

UDC

中华人民共和国行业标准

SL

P

SL237—1999

土工试验规程

Specification of soil test

1999-03-25 发布

1999-04-15 实施

中华人民共和国水利部 发布

中华人民共和国行业标准

土工试验规程

Specification of soil test

SL237—1999

主编单位：南京水利科学研究所

批准单位：中华人民共和国水利部

施行日期：1999年4月15日

中华人民共和国水利部

关于批准发布
《土工试验规程》SL237—1999 的通知

水国科 [1999] 139 号

根据部水利水电技术标准制定、修订计划，由水利部国际合作与科技司主持，以南京水利科学研究院为主编单位修订的《土工试验规程》，经审查批准为水利行业标准，并予以发布。标准的名称和编号为：

《土工试验规程》SL237—1999。

本标准实施后取代 SD128—84，SD128—86，SD128—87 及 SDS01—79 《土工试验规程》。

本标准自 1999 年 4 月 15 日起实施。在实施过程中，请各单位注意总结经验，如有问题请函告主持部门，并由其负责解释。

标准文本由中国水利水电出版社出版发行。

一九九九年三月二十五日

前 言

根据水利部技监办 [1995] 22 号文精神,按《水利水电技术标准编写规定》的要求,对《土工试验规程》第一分册 (SD128—84)、第二分册 (SD128—86)、第三分册 (SD128—87) 的内容及 SDS01—79 下册中除第二、第三分册外的内容共 76 项,进行了全面的修订。经修订后的《土工试验规程》,列有 69 项试验和 3 个附录。在修订中,将原规程中不常用或不成熟的项目减去了 12 项试验,新增了 5 项试验 (承载比试验、回弹模量试验、共振柱试验、冻结温度试验及游离氧化铁试验)。在固结试验中增加了“应变控制连续加荷试验方法”,在原位密度试验中增列了“核子射线法”,在载荷试验中增加了“螺旋板试验方法”等。修改后的《土工试验规程》,包括“室内常规土工试验”、“土的膨胀性试验”、“土的变形参数试验”、“土的动力试验”、“冻土物理性试验”、“土的原位试验”、“粗颗粒土试验”和“土的化学性试验”等内容,涵盖了一般工程土及黄土、膨胀土、盐渍土、红土和冻土等特殊土所需的试验项目,比较全面地反映了土工试验的内容。

本次修订,与原规程相比,增加了“引用标准”一章;在仪器设备中,增加了“仪器设备的检定和校准”一节;在附录中,增加了“试验数据的整理与成果报告”和“室内土工仪器通用要求”;并按标准编写规定的要求,将“试验说明书”改为“条文说明”。

本标准主编单位: 南京水利科学研究院

本标准参编单位: 中国水利水电科学研究院

长江科学院

水利部东北勘测设计院

本标准主要起草人: 盛树馨 奚 宜 陶秀珍 朱思哲
徐伯孟 李青云 郭熙灵 何晓民

目 次

土的工程分类	SL237—001—1999	1
土样和试样制备	SL237—002—1999	12
含水率试验	SL237—003—1999	22
密度试验	SL237—004—1999	27
比重试验	SL237—005—1999	32
颗粒分析试验	SL237—006—1999	43
界限含水率试验	SL237—007—1999	66
湿化试验	SL237—008—1999	78
毛管水上升高度试验	SL237—009—1999	81
相对密度试验	SL237—010—1999	86
击实试验	SL237—011—1999	91
承载比试验	SL237—012—1999	99
回弹模量试验	SL237—013—1999	108
渗透试验	SL237—014—1999	114
固结试验	SL237—015—1999	124
黄土湿陷试验	SL237—016—1999	141
三轴压缩试验	SL237—017—1999	148
一个试样多级加荷三轴压缩试验	SL237—018—1999	181
孔隙水压力消散试验	SL237—019—1999	187
无侧限抗压强度试验	SL237—020—1999	197
直接剪切试验	SL237—021—1999	202
排水反复直接剪切试验	SL237—022—1999	210
无粘性土休止角试验	SL237—023—1999	215
自由膨胀率试验	SL237—024—1999	218
膨胀率试验	SL237—025—1999	221
收缩试验	SL237—026—1999	226

膨胀力试验	SL237—027—1999	230
静止侧压力系数试验	SL237—028—1999	233
弹性模量试验	SL237—029—1999	239
土的变形参数试验	SL237—030—1999	244
单轴抗拉强度试验	SL237—031—1999	254
振动三轴试验	SL237—032—1999	262
共振柱试验	SL237—033—1999	277
冻土含水率试验	SL237—034—1999	293
冻土密度试验	SL237—035—1999	298
冻结温度试验	SL237—036—1999	305
冻土导热系数试验	SL237—037—1999	309
未冻含水率试验	SL237—038—1999	312
冻胀量试验	SL237—039—1999	314
冻土融化压缩试验	SL237—040—1999	318
原位密度试验	SL237—041—1999	323
原位渗透试验	SL237—042—1999	337
原位直剪试验	SL237—043—1999	341
十字板剪切试验	SL237—044—1999	347
标准贯入试验	SL237—045—1999	354
静力触探试验	SL237—046—1999	358
动力触探试验	SL237—047—1999	367
旁压试验	SL237—048—1999	373
载荷试验	SL237—049—1999	384
波速试验	SL237—050—1999	395
原位冻胀量试验	SL237—051—1999	404
原位冻土融化压缩试验	SL237—052—1999	408
粗颗粒土的试样制备	SL237—053—1999	413
粗颗粒土相对密度试验	SL237—054—1999	418
粗颗粒土击实试验	SL237—055—1999	424
粗颗粒土的渗透及渗透变形试验	SL237—056—1999	430

反滤料试验	SL237—057—1999	438
粗颗粒土固结试验	SL237—058—1999	441
粗颗粒土直接剪切试验	SL237—059—1999	447
粗颗粒土三轴压缩试验	SL237—060—1999	456
化学分析试样风干含水率试验	SL237—061—1999	466
酸碱度试验	SL237—062—1999	469
易溶盐试验	SL237—063—1999	472
中溶盐石膏试验	SL237—064—1999	492
难溶盐碳酸钙试验	SL237—065—1999	496
有机质试验	SL237—066—1999	502
游离氧化铁试验	SL237—067—1999	506
阳离子交换量试验	SL237—068—1999	511
土的矿物组成试验	SL237—069—1999	515
附录 A 试验数据的整理与成果报告		525
附录 B 室内土工仪器的通用要求		534
附录 C 土样要求与管理		537
本标准用词说明		542
条文说明		543

土的工程分类

SL237—001—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 本规程用于工程用土的鉴别、定名和描述，以便对土的状况作定性评价。

1.0.2 本规程适用于各类工程用土；不适用于有机土、混凝土所用砂和石料。

注：工程用土指工程勘察、建筑地基、堤坝填料等涉及的土类；有机土指土中部分成分为有机物质的土。

2 引用标准

GBJ145—90《土的分类标准》。

SL237—1999《土工试验规程》。

3 一般规定

3.0.1 土的工程分类（简称“分类”），应以下列土的特性指标作为依据。

1 土颗粒组成及其特性。

2 土的塑性指标：液限（ w_L ）、塑限（ w_P ）和塑性指数（ I_P ）。

3 土中有机质含量。

3.0.2 土的分类试验应按下列标准进行。

1 土颗粒粒组含量应按 SL237—006—1999《颗粒分析试验》中的筛析法规定进行试验。

2 土的塑性指标应按 SL237—007—1999《界限含水率试验》规定进行试验。

3 有机质含量应按 SL237—066—1999《有机质试验》规定进行测定。

3.0.3 本规程将工程用土分为一般土和特殊土两大类。

1 一般土按不同粒组的相对含量可分为：巨粒土、粗粒土和细粒土。

2 特殊土包括黄土、膨胀土、红粘土。

3.0.4 土的粒组应按表 3.0.4 中规定的土颗粒粒径范围划分。

表 3.0.4 粒 组 划 分

粒组统称	粒组划分		粒径 (d) 的范围 (mm)
巨粒组	漂石 (块石) 组		$d > 200$
	卵石 (碎石) 组		$200 \geq d > 60$
粗粒组	砾粒 (角砾)	粗砾	$60 \geq d > 20$
		中砾	$20 \geq d > 5$
		细砾	$5 \geq d > 2$
	砂 粒	粗砂	$2 \geq d > 0.5$
		中砂	$0.5 \geq d > 0.25$
		细砂	$0.25 \geq d > 0.075$
细粒组	粉 粒		$0.075 \geq d > 0.005$
	粘 粒		$d \leq 0.005$

3.0.5 土颗粒组成特性应以土的级配指标 (不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c) 表示。

1 不均匀系数 C_u ：反映土中颗粒级配均匀程度的一个系数，应按式 (3.0.5-1) 计算：

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (3.0.5-1)$$

式中 d_{10} 、 d_{60} ——在粒径分布曲线上粒径累积质量分别占总质量

10%和60%的粒径。

2 曲率系数 C_c : 反映粒径分布曲线的形状, 是颗粒级配优劣程度的一个系数, 应按式 (3.0.5-2) 计算:

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10}d_{60}} \quad (3.0.5-2)$$

式中 d_{30} ——在粒径分布曲线上, 粒径累积质量占总质量 30% 的粒径;

其余符号见式 (3.0.5-1)。

3.0.6 土类基本代号应符合下列规定。

漂石 (块石)	B
卵石 (碎石)	C _b
砾 (角砾)	G
砂	S
粉土	M
粘土	C
细粒土 (C 和 M 合称)	F
混合土 (粗、细粒土合称)	SI
有机质土	O
黄土	Y
膨胀土	E
红粘土	R
盐渍土	St
级配良好	W
级配不良	P
高液限	H
低液限	L

3.0.7 表示土类的代号按下列规定构成。

1 1 个代号即表示土的名称。

示例: C_b——卵石、碎石;

M——粉土。

2 由 2 个基本代号构成时，第 1 个基本代号表示土的主成分，第 2 个基本代号表示土的特性指标（土的液限或土的级配）。

示例：GP——不良级配砾；

CL——低液限粘土。

3 由 3 个基本代号构成时，第 1 个基本代号表示土的主成分，第 2 个基本代号表示液限的高低（或级配的好坏），第 3 个基本代号表示土中所含次要成分。

示例：CHG——含砾高液限粘土；

MLS——含砂低液限粉土。

4 土 的 分 类

4.1 一般程序

4.1.1 根据土中未完全分解的动植物残骸和无定形物质判定是有机土还是无机土。有机质呈黑色、青黑色或暗色，有臭味，手触有弹性和海绵感。

注：当不能判定时，可将试样在 105~110℃ 的烘箱中烘焙一昼夜，焙烘后试样的液限降低到未烘焙试样液限的 3/4 时，则试样为有机质土。

4.1.2 对于无机土，则按巨粒土、粗粒土和细粒土进行细分类。

4.2 巨粒土和含巨粒土的分类和定名

4.2.1 试样中巨粒组质量大于总质量 50% 的土称巨粒类土。

4.2.2 试样中巨粒组质量为总质量的 15%~50% 的土为巨粒混合土。

4.2.3 试样中巨粒组质量小于总质量 15% 的土，可扣除巨粒，按粗粒土或细粒土的相应规定分类、定名。

4.2.4 巨粒土和含巨粒土的分类、定名，应符合表 4.2.4 的规定。

4.3 粗粒土的分类和定名

4.3.1 试样中粗粒组质量大于总质量 50% 的土称粗粒类土。

4.3.2 粗粒类土中砾粒组质量大于总质量 50% 的土称砾类土；砾粒组质量小于或等于总质量 50% 的土称砂类土。

表 4.2.4 巨粒土和含巨粒土的分类

土类	粒组含量		土代号	土名称
巨粒土	巨粒含量 100%~75%	漂石粒含量>50%	B	漂石
		漂石粒含量≤50%	C _b	卵石
混合巨粒土	巨粒含量 小于75%，大于50%	漂石粒含量>50%	BSI	混合土漂石
		漂石粒含量≤50%	C _b SI	混合土卵石
巨粒混合土	巨粒含量 50%~15%	漂石含量>卵石含量	SIB	漂石混合土
		漂石含量≤卵石含量	SIC _b	卵石混合土

4.3.3 砾类土应根据其中细粒含量及类别、粗粒组的级配，按表 4.3.3 分类和定名。

表 4.3.3 砾类土分类

土类	粒组含量		土代号	土名称
砾	细粒含量 小于5%	级配： $C_u \geq 5$ $C_c = 1 \sim 3$	GW	级配良好砾
		级配：不同时满足 上述要求	GP	级配不良砾
含细粒土砾	细粒含量5%~15%		GF	含细粒土砾
细粒土质砾	15%<细粒含量≤50%	细粒为粘土	GC	粘土质砾
		细粒为粉土	GM	粉土质砾

注 表中细粒土质砾土类，应按细粒土在塑性图中的位置定名。

4.3.4 砂类土应根据其中细粒含量及类别、粗粒组的级配，按表 4.3.4 分类和定名。

4.4 细粒土分类和定名

4.4.1 试样中细粒组质量大于或等于总质量 50% 的土称细粒类土。

4.4.2 细粒类土应按下列规定划分。

- 1 试样中粗粒组小于总质量 25% 的土称细粒土。
- 2 试样中粗粒组质量为总质量的 25%~50% 的土称含粗粒

表 4.3.4 砂类土的分类

土类	粒组含量		土代号	土名称
砂	细粒含量 小于5%	级配: $C_u \geq 5$ $C_c = 1 \sim 3$	SW	级配良好砂
		级配: 不同时满足 上述要求	SP	级配不良砂
含细粒土砂	细粒含量 5%~15%		SF	含细粒土砂
细粒土质砂	15% < 细粒含量 ≤ 50%	细粒为粘土	SC	粘土质砂
		细粒为粉土	SM	粉土质砂

注 表中细粒土质砂土类, 应按细粒土在塑性图中的位置定名。

的细粒土。

3 试样中含有部分有机质 (有机质含量 $5\% \leq O_L \leq 10\%$) 的土称有机质土。

4.4.3 细粒土应根据塑性图分类。塑性图的横坐标为土的液限 (w_L), 纵坐标为塑性指数 (I_P)。塑性图中有 A、B 两条界限线。

1 A 线方程式: $I_P = 0.73 (w_L - 20)$ 。A 线上侧为粘土, 下侧为粉土。

2 B 线方程式为: $w_L = 50$ 。 $w_L \geq 50$ 为高液限, $w_L < 50$ 为低液限。

3 本标准的塑性图为图 4.4.3。

4.4.4 细粒土应按塑性图中的位置确定土的类别, 并按表 4.4.4 分类和定名。

表 4.4.4 细粒土的分类

土的塑性指标在塑性图中的位置		土代号	土名称
塑性指数 (I_P)	液限 (w_L)		
$I_P \geq 0.73 (w_L - 20)$ 和 $I_P \geq 10$	$w_L \geq 50\%$	CH	高液限粘土
	$w_L < 50\%$	CL	低液限粘土
$I_P < 0.73 (w_L - 20)$ 和 $I_P < 10$	$w_L \geq 50\%$	MH	高液限粉土
	$w_L < 50\%$	ML	低液限粉土

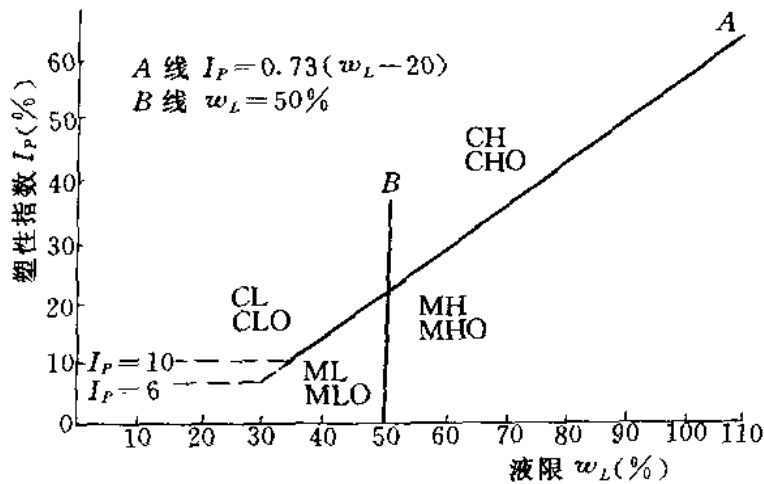


图 4.4.3 塑性图

4.4.5 含粗粒土的细粒土先按表 4.4.4 规定确定细粒土名称,再按下列规定最终定名。

1 粗粒中砾粒占优势,称含砾细粒土,应在细粒土名代号后缀以代号 G。

示例: CHG——含砾高液限粘土;

MLG——含砾低液限粉土。

2 粗粒中砂粒占优势,称含砂细粒土,应在细粒土代号后缀以代号 S。

示例: CHS——含砂高液限粘土;

MLS——含砂低液限粉土。

4.4.6 有机质土可按表 4.4.4 规定划分定名,在各相应土类代号之后缀以代号 O。

示例: CHO——有机质高液限粘土;

MLO——有机质低液限粉土。

4.5 特殊土分类

4.5.1 黄土、膨胀土和红粘土等特殊土类在塑性图中的基本位置见图 4.5.1。其相应的初步判别见表 4.5.1。

4.5.2 黄土、膨胀土、红粘土等特殊土的最终分类和定名尚应遵照相应的专门规范。本规程仅规定在塑性图中的基本位置和相应

的学名。

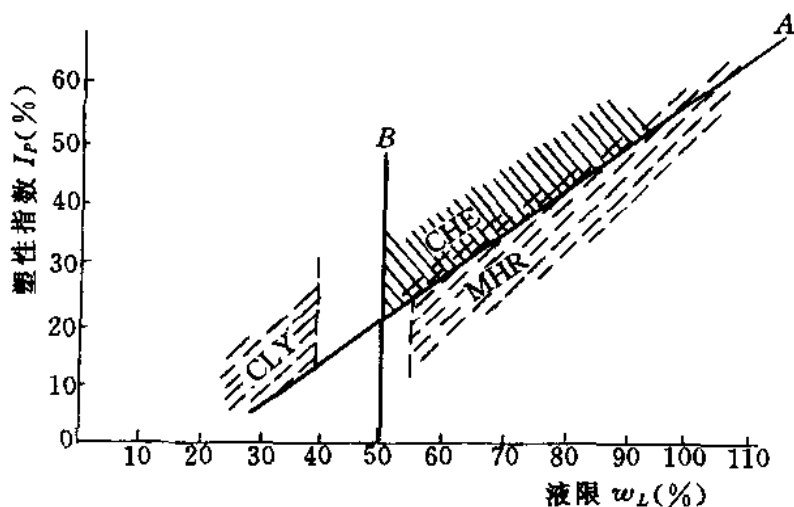


图 4.5.1 特殊土塑性图

表 4.5.1 黄土、膨胀土和红粘土的判别

土的塑性指标在塑性图中的位置		土代号	土名称
塑性指数 (I_P)	液限 (w_L)		
$I_P \geq 0.73 (w_L - 20)$	$w_L < 40\%$	CLY	低液限粘土 (黄土)
	$w_L > 50\%$	CHE	高液限粘土 (膨胀土)
$I_P < 0.73 (w_L - 20)$	$w_L > 55\%$	MHR	高液限粉土 (红粘土)

5 土的简易鉴别、分类和描述

5.1 简易鉴别方法

5.1.1 简易鉴别方法是用目测法代替筛析法确定土颗粒组成及其特征；用干强度、手捻、搓条、韧性和摇振反应等定性方法代替用仪器测定土的塑性。

5.1.2 土的有机质可按本规程 4.1.1 的规定鉴定。

5.1.3 土粒粒组含量的确定：可将研碎的风干试样摊成一薄层，凭目测估计土中巨、粗、细粒组所占的比例。再按本规程 4.2 至 4.4 的有关规定确定其为巨粒土、粗粒土（砾类土或砂类土）和细

粒土。

5.1.4 干强度试验。将一小块土捏成土团风干后用手指掰断、捻碎。根据用力大小可区分为：

- 1 干强度高——很难或用力才能捏碎或掰断；
- 2 干强度中等——稍用力即可捏碎或掰断；
- 3 干强度低——易于捏碎或捻成粉末。

5.1.5 手捻试验。将稍湿或硬塑的小土块在手中揉捏，然后用拇指和食指将土捻成片状，根据手感和土片光滑度可区分为：

- 1 塑性高——手感滑腻，无砂，捻面光滑；
- 2 塑性中等——稍有滑腻感，有砂粒，捻面稍有光泽；
- 3 塑性低——稍有粘性，砂感强，捻面粗糙。

5.1.6 搓条试验。将含水率略大于塑限的湿土块在手中揉捏均匀，再在手掌上搓成土条。根据土条断裂而能达到的最小直径可区分为：

- 1 塑性高——能搓成直径小于 1 mm 土条；
- 2 塑性中等——能搓成直径为 1~3 mm 土条；
- 3 塑性低——搓成直径大于 3 mm 的土条即断裂。

5.1.7 韧性试验。将含水率略大于塑限的土块在手中揉捏均匀，然后在手掌中搓成直径为 3 mm 的土条，再揉成土团。根据再次搓条的可能性可区分为：

- 1 韧性大——能揉成土团，再搓成条，捏而不碎；
- 2 韧性中等——可再揉成团，捏而不易碎；
- 3 韧性小——勉强或不能揉成团，稍捏或不捏即碎。

5.1.8 摇振反应试验。将软塑至流动的小土块捏成土球，放在手掌上反复摇晃，并用另一手振击该手掌，土中自由水渗出，球面呈现光泽；用两手指捏土球，放松手水又被吸入，光泽消失。根据上述渗水和吸水反应快慢。可区分为：

- 1 反应快——立即渗水和吸水；
- 2 反应中等——渗水和吸水中等；
- 3 反应慢（或无反应）——渗水和吸水慢或不渗不吸。

5.2 鉴别分类

5.2.1 巨粒土和粗粒土根据 5.1.3 的目估结果，按本规程表 4.2.4、表 4.3.3 和表 4.3.4 的规定进行分类和定名。

5.2.2 细粒土可根据本规程 5.1.2 和 5.1.4 至 5.1.8 的试验结果，按表 5.2.2 进行分类和定名。

表 5.2.2 细粒土简易分类

半固态时的干强度	硬塑—可塑状态时的手捻感和光滑度	土在可塑状态时		软塑—流动状态时的摇振反应	土类代号
		可搓成最小直径 (mm)	韧性		
低—中	灰黑色，粉粒为主，稍粘，捻面粗糙	3	低	快—中	MLO
中	砂粒稍多，有粘性，捻面较粗糙，无光泽	2—3	低	快—中	ML
中—高	有砂粒，稍有滑腻感，捻面稍有光泽，灰黑色者为 CLO	1—2	中	无—很慢	CL CLO
中	粉粒较多，有滑腻感，捻面较光滑	1—2	中	无—慢	MH
中—高	灰黑色，无砂，滑腻感强，捻面光滑	<1	中—高	无—慢	MHO
高—很高	无砂感，滑腻感强，捻面有光泽，灰黑色者为 CHO	<1	高	无	CH CHO

5.3 土状态描述

5.3.1 在现场采样和试验开启土样时，应按下述内容描述土的状态。

1 巨粒土和粗粒土：通俗名称及当地名称；土颗粒的最大粒径；漂石粒、卵石粒、砾粒、砂粒组的含量百分数；土颗粒形状（圆、次圆、棱角或次棱角）；土颗粒矿物成分；土的颜色和有机物含量；细粒土成分（粘土或粉土）；土的代号和名称。

示例：粉质砂土，含砾约 20%，最大粒径约 10 mm，砾坚，带棱角；砂粒由粗到细，粒圆；含约 15% 的无塑性粉质土，干强度低，密实，天然状态潮湿，系冲积砂（SM）。

2 细粒土：通俗名称及当地名称；土粒的最大粒径；巨粒、砾粒、砂粒组的含量百分数；潮湿时颜色及有机质含量；土的湿度（干、湿、很湿或饱和）；土的状态（流动、软塑、可塑或硬塑）；土的塑性（高、中或低）；土的代号和名称。

示例：粘质粉土，棕色，微有塑性，含少量细砂，有无数垂直根孔，天然状态坚实，系黄土（CLY）。

5.3.2 土的状态应根据不同用途按下列各项分别描述。

1 当用作填土时：不同土类的分布层次和范围。

2 当用作地基时：土类的分布层次及范围；土层结构、层理特征；密实度和稠度。

土样和试样制备

SL237—002—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 土样在试验前必须经过制备程序，包括土的风干、碾散、过筛、匀土、分样和贮存等预备程序，以及制备试样程序。

1.0.2 土样制备程序视需要的试验而异，故土样制备前应拟定土工试验计划。

1.0.3 对密封的原状土样除小心搬运和妥善存放外，在试验前不应开启。试验前如需要进行土样鉴别和分类必须开启时，则在检验后，应迅速妥善封好贮藏，应使土样少受扰动。

1.0.4 本规程适用于扰动土样的预备程序，扰动土样和原状土样的制备程序。

1.0.5 制备特殊试样的程序，分别在有关试验项目中阐述。

2 仪器设备

2.1 制备土样需用的仪器设备

2.1.1 细筛：孔径 5、2、0.5 mm。

2.1.2 洗筛：孔径 0.075 mm。

2.1.3 台秤：称量 10~40 kg，分度值 5 g。

2.1.4 天平：称量 1000 g，分度值 0.1 g；称量 200 g，分度值 0.01 g。

2.1.5 碎土器：磨土机。

2.1.6 击实器：包括活塞、导筒和环刀。

2.1.7 抽气机（附真空表）。

2.1.8 饱和器（附金属或玻璃的真空缸）。

2.1.9 其他：烘箱、干燥器、保湿器、研钵、木锤、木碾、橡皮板、玻璃瓶、玻璃缸、修土刀、钢丝锯、凡士林、土样标签以及其他盛土器等。

2.2 仪器设备的检定和校准

2.2.1 计量仪器（台秤、天平、真空表）应按相应的检定规程进行检定。

3 扰动土样预备程序

3.1 细粒土样预备程序

3.1.1 将扰动土样进行土样描述。如颜色、土类、气味及夹杂物等；如有需要，将扰动土充分拌匀，取代表性土样进行含水率测定。

3.1.2 将块状扰动土放在橡皮板上用木碾或利用碎土器碾散（勿压碎颗粒）；如水量较大时，可先风干至易碾散为止。

3.1.3 根据试验所需土样数量，将碾散后的土样过筛。物理性试验土样如液限、塑限、缩限等试验，过 0.5 mm 筛；物理性及力学性试验土样，过 2 mm 筛；击实试验土样，过 5 mm 筛。过筛后用四分对角取样法或分砂器，取出足够数量的代表性土样，分别装入玻璃缸内，标以标签^①，以备各项试验之用。对风干土，需测定风干含水率。

3.1.4 为配制一定含水率的土样，取过 2 mm 筛的足够试验用的风干土 1~5 kg，平铺在不吸水的盘内，按本规程式（7.0.2）计算所需的加水量，用喷雾器喷洒预计的加水量，静置一段时间，然后装入玻璃缸内盖紧，润湿一昼夜备用（砂性土润湿时间可酌情减短）。

3.1.5 测定湿润土样不同位置的含水率（至少 2 个以上），要求差值不大于±1%。

3.1.6 对不同土层的土样制备混合土样时，应根据各土层厚度，

① 标签应注明工程名称、土样编号、过筛孔径、用途、制备日期和试验人员等。

按权数计算相应的质量配合，然后按本规程 3.1.2 至 3.1.4 的规定进行扰动土的预备工作。

3.2 粗粒土样预备程序

3.2.1 对砂及砂砾土，按本规程 3.1.3 的四分法或分砂器细分土样，然后取足够试验用的代表性土样供作颗粒分析试验用，其余过 5 mm 筛。筛上和筛下土样分别贮存，供作比重及最大和最小孔隙比等试验用。取一部分过 2 mm 筛的土样供作力学性试验用。

3.2.2 如有部分粘土依附在砂砾石上面，则先用水浸泡，将浸泡过的土样在 2 mm 筛上冲洗，取筛上及筛下代表性的土样供作颗粒分析试验用。

3.2.3 将冲洗下来的土浆风干至易碾散为止，再按本规程 3.1.2 至 3.1.4 的规定进行预备工作。

4 扰动土试样制备

4.1 一般要求

4.1.1 根据工程和设计的要求，将扰动土制备成所需的试样供进行湿化、膨胀、渗透、压缩及剪切等试验用。

4.1.2 试样制备的数量视试验需要而定，一般应多制备 1~2 个备用。制备试样密度、含水率与制备标准之差值应分别在 $\pm 0.02 \text{ g/cm}^3$ 与 $\pm 1\%$ 范围以内，平行试验或一组内各试样间之差值分别要求在 0.02 g/cm^3 和 1% 以内。

4.1.3 扰动土试样的制备，视工程实际情况，分别采用击样法、击实法和压样法。

4.2 击样法

4.2.1 根据环刀的容积及所要求的干密度，含水率，按本规程式 (7.0.1)、式 (7.0.2) 计算的用量，制备湿土样。

4.2.2 将湿土倒入预先装好的环刀内，并固定在底板上的击实器内，用击实方法将土击入环刀内。

4.2.3 取出环刀，称环刀、土总量，并符合本规程 4.1.2 的要求。

4.3 击实法

4.3.1 根据试样所要求的干密度、含水率,按本规程式(7.0.1)、式(7.0.2)计算的用量,制备湿土样。

4.3.2 用SL237—011—1999《击实试验》击实程序,将土样击实到所需的密度,用推土器推出。

4.3.3 将试验用的切土环刀内壁涂一薄层凡士林,刃口向下,放在土样上。用切土刀将土样切削成稍大于环刀直径的土柱。然后将环刀垂直向下压,边压边削,至土样伸出环刀为止。削去两端余土并修平。擦净环刀外壁,称环刀、土总量,准确至0.1g,并测定环刀两端削下土样的含水率。

4.3.4 试样制备应尽量迅速操作,或在保湿间内进行。

4.4 压样法

4.4.1 按本规程4.3.1的规定制备湿土样称出所需的湿土量。将湿土倒入预先装好环刀的压样器内,拂平土样表面,以静压力将土压入环刀内。

4.4.2 取出环刀,称环刀、土总量,并符合本规程4.1.2的要求。

5 原状土试样制备

5.0.1 小心开启原状土样包装皮,辨别土样上下和层次,整平土样两端。无特殊要求时,切土方向与天然层次垂直。

5.0.2 按本规程4.3.3的操作步骤,切取试样;试样与环刀要密合,同一组试样的密度差值不宜大于 0.03 g/cm^3 ,含水率差值不宜大于2%。

5.0.3 切削过程中,应细心观察土样的情况,并描述它的层次、气味、颜色,有无杂质,土质是否均匀,有无裂缝等。

5.0.4 切取试样后剩余的原状土样,应用蜡纸包好置于保湿器内,以备补作试验之用;切削的余土作物理性试验。

5.0.5 视试样本身及工程要求,决定试样是否进行饱和,如不立即进行试验或饱和时,则将试样暂存于保湿器内。

6 试样饱和

6.1 基本规定

6.1.1 土的孔隙逐渐被水填充的过程称为饱和,当孔隙被水充满时的土,称为饱和土。

6.1.2 试样饱和方法视土的性质选用浸水饱和法、毛管饱和法及真空抽气饱和法三种。

1 砂土。可直接在仪器内浸水饱和。

2 较易透水的粘性土。渗透系数大于 10^{-4} cm/s 时,采用毛管饱和法较为方便。

3 不易透水的粘性土。渗透系数小于 10^{-4} cm/s 时,采用真空饱和法;如土的结构性较弱,抽气可能发生扰动者,不宜采用。

6.2 毛管饱和法

6.2.1 选用框式饱和器(图 6.2.1),在装有试样的环刀两面贴放滤纸,再放两块大于环刀的透水板于滤纸上,通过框架两端的螺丝将透水板、环刀夹紧。

6.2.2 将装好试样的饱和器放入水箱中,注清水入箱,水面不宜将试样淹没,使土中气体得以排出。

6.2.3 关上箱盖,防止水分蒸发,借土的毛细管作用使试样饱和,一般约需 3 天。

6.2.4 试样饱和后,取出饱和器,松开螺丝,取出环刀,擦干外壁,吸去表面积水,取下试样上下滤纸,称环刀、土总量,准确至 0.1 g。按本规程式(7.0.5)计算饱和度。

6.2.5 如饱和度小于 95% 时,将环刀再装入饱和器,浸入水中延长饱和时间。

6.3 真空饱和法

6.3.1 选用重叠式饱和器(图 6.3.1)或框式饱和器,在重叠式饱和器下板正中放置稍大于环刀直径的透水板和滤纸,将装有试

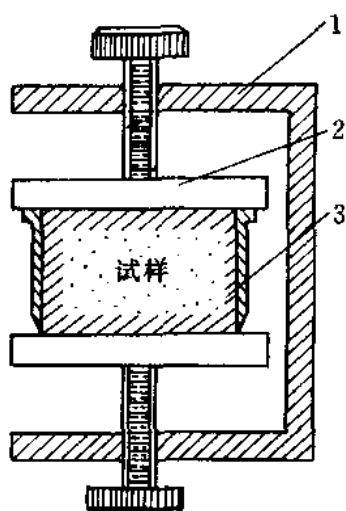


图 6.2.1 框式饱和器

1—框架；2—透
水板；3—环刀

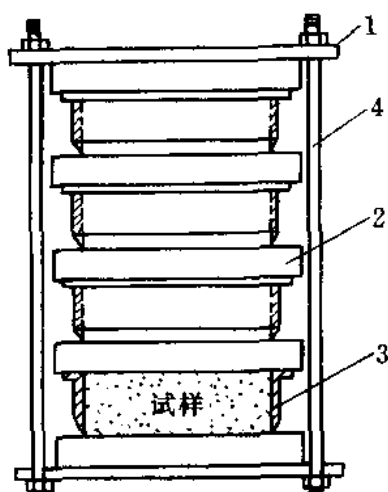


图 6.3.1 重叠式饱和器

1—夹板；2—透水板；
3—环刀；4—拉杆

样的环刀放在滤纸上，试样上再放一张滤纸和一块透水板，以这样顺序重复，由下向上重叠，至拉杆的长度，将饱和器上夹板放在最上部透水板上，旋紧拉杆上端的螺丝，将各个环刀在上下夹板间夹紧。

6.3.2 装好试样的饱和器放入真空缸内（图 6.3.2），盖上缸盖。盖缝内应涂一薄层凡士林，以防漏气。

6.3.3 关管夹、开二通阀，将抽气机与真空缸接通，开动抽气机，抽除缸内及土中气体，当真空表达达到约 1 个大气负压力值后，继续抽气，粘质土约 1 h，粉质土约 0.5 h 后，稍微开启管夹，使清水由引水管徐徐注入真空缸内。在注水过程中，应调节管夹，使真空表上的数值，基本上保持不变。

6.3.4 待饱和器完全淹没水中后，即停止抽气。将引水管自水缸中提出，开管夹令空气进入真空缸内，静置一定时间，借大气压力，使试样饱和。

6.3.5 按本规程 6.2.4 的规定取出试样，称量准确到 0.1 g。按本程式（7.0.5）计算饱和度。

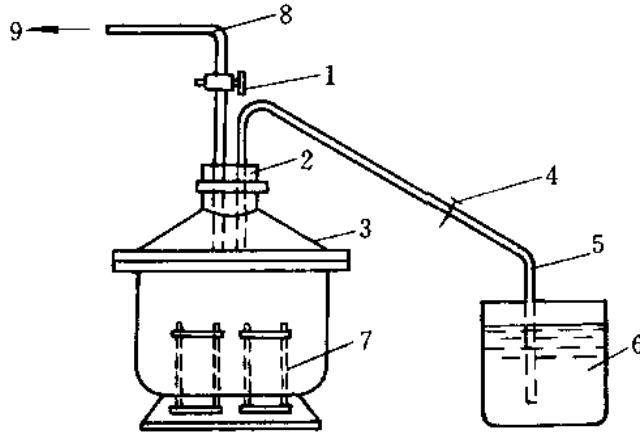


图 6.3.2 真空饱和装置

1—三通阀；2—橡皮塞；3—真空缸；4—管夹；5—
引水管；6—水缸；7—饱和器；8—排气管；
9—接抽气机

7 计 算

7.0.1 按式 (7.0.1) 计算干土质量：

$$m_d = \frac{m}{1 + 0.01w_o} \quad (7.0.1)$$

式中 m_d ——干土质量，g；

m ——风干土质量（或天然湿土质量），g；

w_o ——风干含水率（或天然含水率），%。

7.0.2 按式 (7.0.2) 计算土样制备含水率所加水量：

$$m_w = \frac{m}{1 + 0.01w_o} \times 0.01(w' - w_o) \quad (7.0.2)$$

式中 m_w ——土样所需加水质量，g；

m ——风干含水率时的土样质量，g；

w_o ——风干含水率，%；

w' ——土样所要求的含水率，%。

7.0.3 按式 (7.0.3) 计算制备扰动土试样所需总土质量：

$$m = (1 + 0.01w_o)\rho_d V \quad (7.0.3)$$

式中 m ——制备试样所需总土质量，g；

ρ_d ——制备试样所要求的干密度， g/cm^3 ；

V ——计算出击实土样体积或压样器所用环刀容积， cm^3 ；

w_o ——风干含水率，%。

7.0.4 按式 (7.0.4) 计算制备扰动土样应增加的水量：

$$\Delta m_w = 0.01(w' - w_o)\rho_d V \quad (7.0.4)$$

式中 Δm_w ——制备扰动土样应增加的水量， g ；

其余符号见本规程式 (7.0.2) 和式 (7.0.3)。

7.0.5 按式 (7.0.5) 计算饱和度：

$$S_r = \frac{(\rho - \rho_d)G_s}{e\rho_d} \text{ 或 } S_r = \frac{wG_s}{e} \quad (7.0.5)$$

式中 S_r ——饱和度，%；

ρ ——饱和后的密度， g/cm^3 ；

ρ_d ——土的干密度， g/cm^3 ；

e ——土的孔隙比；

G_s ——土粒比重；

w ——饱和后的含水率，%。

8 记 录

8.0.1 原状土开土记录格式如表 8.0.1。

8.0.2 扰动土试样制备记录格式如表 8.0.2。

表 8.0.1 原状土开土记录

委托单位 _____ 进室日期： 年 月 日
工程名称 _____ 开土日期： 年 月 日

土样编号		取土 高程	取土深度 (m)	颜色	气味	结构	夹杂物	包装与 扰动情况	其他
室内	野外								

记录者：

校核者：

表 8.0.2 扰动土试

工程名称 _____ 土样编号 _____ 制备日期 _____

土样编号	制备标准		所需土质量及增加水量的计算					
	干密度 ρ_d (g/cm ³)	含水率 w' (%)	环刀或计算的击实筒容积 V (cm ³)	干土质量 m_d (g)	含水率 w_o (%)	湿土质量 m (g)	增加的水量 Δm_w (ml)	所需土质量 (g)

含水率试验

SL237—003—1999

1 定义和适用范围

1.0.1 土的含水率是试样在 105~110℃ 下烘到恒量时所失去的水质量和达恒量后干土质量的比值，以百分数表示。

1.0.2 本试验以烘干法为室内试验的标准方法。在野外如无烘箱设备或要求快速测定含水率时，可依土的性质和工程情况分别采用下列方法。

1 酒精燃烧法。适用于简易测定细粒土含水率。

2 比重法。适用于砂类土。

1.0.3 本规程适用于有机质（泥炭、腐植质及其他）含量不超过干质量 5% 的土，当土中有机质含量在 5%~10% 之间，仍允许采用本规程进行试验，但需注明有机质含量。

2 烘 干 法

2.1 仪器设备

2.1.1 烘箱：可采用电热烘箱或温度能保持 105~110℃ 的其他能源烘箱。

2.1.2 天平：称量 200 g，分度值 0.01 g。

2.1.3 其他：干燥器、称量盒（为简化计算手续可用恒质量盒）。

2.2 仪器设备的检定和校准

2.2.1 天平应按相应的检定规程进行检定。

2.3 操作步骤

2.3.1 取代表性试样 15~30 g，放入称量盒内，立即盖好盒盖，称量。称量时，可在天平一端放上等质量的称量盒或与盒等质量

的砝码。称量结果即为湿土质量。

2.3.2 揭开盒盖，将试样和盒放入烘箱，在温度 105~110℃ 下烘到恒量。烘干时间对粘质土不少于 8 h；砂类土不少于 6 h；对含有有机质超过 10% 的土，应将温度控制在 65~70℃ 的恒温下烘至恒量。

2.3.3 将烘干后的试样和盒取出，盖好盒盖放入干燥器内冷却至室温，称干土质量。

2.3.4 本试验称量应准确至 0.01 g。

2.3.5 按式 (2.3.5) 计算含水率：

$$w = \left(\frac{m}{m_d} - 1 \right) \times 100 \quad (2.3.5)$$

式中 w ——含水率，%；

m ——湿土质量，g；

m_d ——干土质量，g。

计算至 0.1%。

2.3.6 本试验需进行 2 次平行测定，取其算术平均值，允许平行差值应符合表 2.3.6 规定。

表 2.3.6 含水率测定的允许平行差值

含水率 (%)	允许平行差值 (%)
<10	0.5
10~40	1.0
>40	2.0

2.4 记录

2.4.1 本试验记录格式如表 2.4.1。

表 2.4.1 含水率试验记录

工程名称 _____

试验者 _____

试验方法 _____

计算者 _____

试验日期 _____

校核者 _____

试样 编号	土样 说明	盒 号	盒质量 (g)	盒加湿 土质量 (g)	盒加干 土质量 (g)	水分 质量 (g)	干土 质量 (g)	含水率 (%)	平均 含水率 (%)
			(1)	(2)	(3)	(4) = (2) - (3)	(5) = (3) - (1)	(6) = $\frac{(4)}{(5)}$	(7)

3 酒精燃烧法

3.1 仪器设备

3.1.1 称量盒（定期校正为恒值）。

3.1.2 天平：称量 200 g，分度值 0.01 g。

3.1.3 酒精：纯度 95%。

3.1.4 其他：滴管、火柴、调土刀等。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 天平应按相应的检定规程进行检定。

3.3 操作步骤

3.3.1 取代表性试样（粘质土 5~10 g，砂质土 20~30 g），放入称量盒内，按本规程 2.3.1 规定称湿土质量。

3.3.2 用滴管将酒精注入放有试样的称量盒中，直至盒中出现自由液面为止。为使酒精在试样中充分混合均匀，可将盒底在桌面上轻轻敲击。

3.3.3 点燃盒中酒精，烧至火焰熄灭。

3.3.4 将试样冷却数分钟，按本规程 3.3.2，3.3.3 规定再重复燃烧 2 次。当第 3 次火焰熄灭后，立即盖好盒盖，称干土质量。

3.3.5 本试验称量应准确至 0.01 g。

3.3.6 本试验需进行 2 次平行测定，计算方法及允许平行差值见本程式（2.3.5）和表 2.3.6。

3.4 记录

3.4.1 本试验记录格式见本规程表 2.4.1。

4 比重法

4.1 仪器设备

4.1.1 玻璃瓶：容积 500 ml 以上。

4.1.2 天平：称量 1000 g，分度值 0.5 g。

4.1.3 其他：漏斗、小勺、吸水球、玻璃片、土样盘及玻璃棒等。

4.2 仪器设备的检定和校准

4.2.1 天平应按相应的检定规程进行检定。

4.3 操作步骤

4.3.1 取代表性砂质土试样 200~300 g，放入土样盘内。

4.3.2 向玻璃瓶中注入清水至 1/3 左右。然后用漏斗将土样盘中的试样倒入瓶中，并用玻璃棒搅拌 1~2 min，直到含气完全排出为止。

4.3.3 向瓶中加清水至全部充满，静置 1 min 后用吸水球吸去泡沫，再加清水使其充满，盖上玻璃片，擦干瓶外壁称量。

4.3.4 倒去瓶中混合液，洗净，再向瓶中加清水至全部充满，盖上玻璃片，擦干瓶外壁称量。

4.3.5 本试验称量应准确至 0.5 g。

4.3.6 按式 (4.3.6) 计算含水率：

$$w = \left[\frac{m(G_s - 1)}{G_s(m_1 - m_2)} - 1 \right] \times 100^{①②} \quad (4.3.6)$$

式中 w ——砂性土的含水率，%；

m ——湿土质量，g；

m_1 ——瓶、水、土、玻璃片质量，g；

m_2 ——瓶、水、玻璃片质量，g；

G_s ——土粒比重。

计算至 0.1%。

4.3.7 本试验需进行 2 次平行测定，取其算术平均值。

4.4 记录

4.4.1 本试验记录格式如表 4.4.1。

① 为简化计算及试验手续，可将 m_2 定期校正成恒值。

② 砂类土的比重可实测或根据一般资料估计。

表 4.4.1 含水率试验记录(比重法)

工程编号 _____

试验者 _____

土样说明 _____

计算者 _____

试验日期 _____

校核者 _____

土样 编号	瓶 号	湿土 质量 (g)	瓶、水、 土、玻璃 片总质量 (g)	瓶、水、 玻璃片总 质量 (g)	土粒 比重	含 水 率 (%)	平均 含水率 (%)	备注
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5) = $\frac{(1)[(4)-1]}{(4)[(2) \cdot (3)]} - 1$	(6)	

密度试验

SL237—004—1999

1 定义和适用范围

1.0.1 土的密度是土的单位体积质量。

1.0.2 本试验对一般粘质土，宜采用环刀法。土样易碎裂，难以切削，可用蜡封法。

2 引用标准

GB/T15406—94《土工仪器的基本参数及通用技术条件》第一篇：室内土工仪器。

SD191—86《切土环刀》。

SL110—95《切土环刀校验方法》。

3 环刀法

3.1 仪器设备

3.1.1 环刀：尺寸参数应符合 GB/T15406—94 的 4.1.1.1 规定。

3.1.2 天平：称量 500 g，分度值 0.1 g；称量 200 g，分度值 0.01 g。

3.1.3 其他：切土刀、钢丝锯、凡士林等。

3.2 仪器设备的检定和校验

3.2.1 天平应按相应的检定规程进行检定。

3.2.2 环刀应按 SL110—95 规定进行校验。

3.3 操作步骤

3.3.1 按工程需要取原状土或制备所需状态的扰动土样，整平其两端，将环刀内壁涂一薄层凡士林，刃口向下放在土样上。

3.3.2 用切土刀(或钢丝锯)将土样削成略大于环刀直径的土柱。然后将环刀垂直下压,边压边削,至土样伸出环刀为止。将两端余土削去修平,取剩余的代表性土样测定含水率。

3.3.3 擦净环刀外壁称量。在天平放砝码一端放一等量环刀,可直接称出湿土质量。准确至 0.1 g。

3.3.4 按式(3.3.4-1)、式(3.3.4-2)计算密度及干密度:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.3.4-1)$$

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0.01w} \quad (3.3.4-2)$$

式中 ρ ——密度, g/cm³;

ρ_d ——干密度, g/cm³;

m ——湿土质量, g;

V ——环刀容积, cm³;

w ——含水率, %。

计算至 0.01 g/cm³。

3.3.5 本试验需进行 2 次平行测定,其平行差值不得大于 0.03 g/cm³。取其算术平均值。

3.4 记录

3.4.1 本试验记录格式如表 3.4.1。

表 3.4.1 密度试验记录表(环刀法)

工程名称 _____ 试验者 _____
 钻孔编号 _____ 计算者 _____
 土样说明 _____ 校核者 _____
 试验日期 _____

试样 编号	土样 类别	环刀 号	湿土 质量 (g)	体积 (cm ³)	湿密度 (g/cm ³)	含水率 (%)	干密度 (g/cm ³)	平均 干密度 (g/cm ³)
			(1)	(2)	(3) = $\frac{(1)}{(2)}$	(4)	(5) = $\frac{(3)}{1+0.01(4)}$	(6)

4 蜡 封 法

4.1 仪器设备

4.1.1 天平：称量 500 g，分度值 0.1 g。

4.1.2 其他：切土刀、蜡、烧杯、细线、针等。

4.2 仪器设备的检定和校核。

4.2.1 天平应按相应的检定规程进行检定。

4.3 操作步骤

4.3.1 切取约 30 cm³ 的试样，削去松浮表土及尖锐棱角后，系于细线上称量，准确至 0.1 g，取代表性试样测定含水率。

4.3.2 持线将试样徐徐浸入刚过熔点的蜡中，待全部沉浸后，立即将试样提出。检查涂在试样四周的蜡中是否有气泡存在。若有，则应用热针刺破，并涂平孔口。冷却后，称土加蜡质量，准确至 0.1 g。

4.3.3 用线将试样吊在天平一端，并使试样浸没于纯水中称量，准确至 0.1 g，见图 4.3.3。测记纯水的温度。

4.3.4 取出试样，擦干蜡表面的水分后再称量 1 次，检查试样中是否有水浸入，如有水浸入，应重做。

4.3.5 按式 (4.3.5-1) 和式 (4.3.5-2) 计算湿密度及干密度：

$$\rho = \frac{m}{\frac{m_1 - m_2}{\rho_w} - \frac{m_1 - m}{\rho_n}} \quad (4.3.5-1)$$

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0.01w} \quad (4.3.5-2)$$

式中 ρ ——湿密度，g/cm³；
 ρ_d ——干密度，g/cm³；

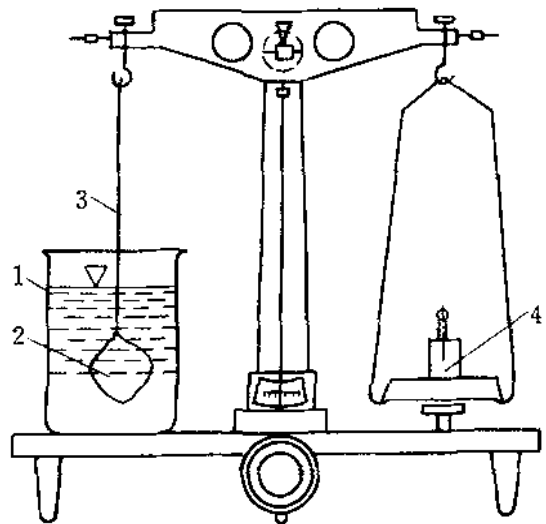


图 4.3.3 天平

1—盛水杯；2—蜡封试样；
3—细线；4—砝码

m ——湿土质量，g；

m_1 ——土加蜡质量，g；

m_2 ——土加蜡在水中质量，g；

w ——含水率，%；

ρ_{wt} ——纯水在 $t^{\circ}\text{C}$ 时的密度， g/cm^3 ，准确至 $0.01 \text{ g}/\text{cm}^3$ ；

ρ_n ——蜡的密度， g/cm^3 ，准确至 $0.01 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

4.3.6 本试验需进行 2 次平行测定，其平行差值不得大于 $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ 。取其算术平均值。

4.4 记录

4.4.1 本试验记录格式如表 4.4.1。

比重试验

SL237—005—1999

1 定义和适用范围

1.0.1 土的颗粒比重是土在 105~110℃下烘至恒值时的质量与土粒同体积 4℃纯水质量的比值。

1.0.2 按照土粒粒径不同，分别用下列方法进行比重测定。

1 粒径小于 5 mm 的土，用比重瓶法进行。

2 粒径大于 5 mm 的土，其中含粒径大于 20 mm 颗粒小于 10%时，用浮称法进行，含粒径大于 20 mm 颗粒大于 10%时，用虹吸筒法进行；粒径小于 5 mm 部分用比重瓶法进行，取其加权平均值作为土粒比重。

1.0.3 一般土粒的比重用纯水测定对含有可溶盐、亲水性胶体或有机质的土，须用中性液体（如煤油）测定。

2 比重瓶法

2.1 仪器设备

2.1.1 比重瓶：容量 100（或 50）ml，分长颈和短颈两种。

2.1.2 天平：称量 200 g，分度值 0.001 g。

2.1.3 恒温水槽：准确度±1℃。

2.1.4 砂浴：能调节温度。

2.1.5 真空抽气设备。

2.1.6 温度计：测量范围 0~50℃，分度值 0.5℃。

2.1.7 其他：如烘箱、纯水、中性液体（如煤油等）、孔径 2 mm 及 5 mm 筛、漏斗、滴管等。

2.2 仪器设备的检定和校准

- 2.2.1 天平、温度计等计量仪器应按相应的检定规程进行检定。
- 2.2.2 比重瓶应按本规程“附 a”——《比重瓶校正》方法进行校准。
- 2.3 操作步骤
- 2.3.1 将比重瓶烘干，装烘干土 15 g 入 100 ml 比重瓶内（若用 50 ml 比重瓶，装烘干土 12 g）称量。
- 2.3.2 为排除土中的空气，将已装有干土的比重瓶，注纯水至瓶的一半处，摇动比重瓶，并将瓶放在砂浴上煮沸，煮沸时间自悬液沸腾时算起，砂及砂质粉土不应少于 30 min；粘土及粉质粘土不应少于 1 h。煮沸时应注意不使土液溢出瓶外。
- 2.3.3 将纯水注入比重瓶，如系长颈比重瓶，注水至略低于瓶的刻度处；如系短颈比重瓶，应注水至近满（有恒温水槽时，可将比重瓶放于恒温水槽内）。待瓶内悬液温度稳定及瓶上部悬液澄清。
- 2.3.4 如系长颈比重瓶，用滴管调整液面恰至刻度处（以弯液面下缘为准），擦干瓶外及瓶内壁刻度以上部分的水，称瓶、水、土总质量；如系短颈比重瓶，塞好瓶塞，使多余水分自瓶塞毛细管中溢出，将瓶外水分擦干后，称瓶、水、土总质量。称量后立即测出瓶内水的温度。
- 2.3.5 根据测得的温度，从已绘制的温度与瓶、水总量关系中查得瓶、水总质量。
- 2.3.6 测定含有可溶盐、亲水性胶体或有机质的土比重时，用中性液体（如煤油等）代替纯水，用真空抽气法代替煮沸法，排除土中空气。抽气时真空度须接近 1 个大气压（—98 kPa），从达到 1 个大气压时算起，抽气时间一般为 1~2 h，直至悬液内无气泡逸出时为止。其余步骤按本规程 2.3.3~2.3.5 规定进行。
- 2.3.7 本试验称量应准确至 0.001 g。
- 2.3.8 按式（2.3.8-1）、式（2.3.8-2）计算土粒比重。

1 用纯水测定时：

$$G_s = \frac{m_d}{m_1 + m_d - m_2} G_{wt} \quad (2.3.8-1)$$

式中 G_s ——土粒比重；

m_d ——干土质量，g；

m_1 ——瓶、水总质量，g；

m_2 ——瓶、水、土总质量，g；

G_{wt} —— $t^\circ\text{C}$ 时纯水的比重（可查物理手册），准确至 0.001。

2 用中性液体测定时：

$$G_s = \frac{m_d}{m'_1 + m_d - m'_2} G_{kt} \quad (2.3.8-2)$$

式中 m'_1 ——瓶、中性液体总质量，g；

m'_2 ——瓶、中性液体、土总质量，g；

G_{kt} —— $t^\circ\text{C}$ 时中性液体的比重（实测得），准确至 0.001；

其余符号见本规程式（2.3.8-1）。

计算至 0.001。

2.3.9 本试验须进行 2 次平行测定，其平行差值不得大于 0.02。取其算术平均值。

2.4 记录

2.4.1 本试验记录格式如表 2.4.1。

3 浮称法

3.1 仪器设备

3.1.1 孔径小于 5 mm 的铁丝筐，直径约 10~15 cm，高约 10~20 cm。

3.1.2 适合铁丝筐沉入用的盛水容器。

3.1.3 天平或秤：称量 2 kg，分度值 0.2 g；称量 10 kg，分度值 1 g。

3.1.4 其他：如烘箱、温度计、孔径 5 mm、20 mm 筛等。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 天平或秤应按相应的检定规程进行检定。

3.3 操作步骤

3.3.1 取粒径大于 5 mm 的代表性试样 500~1000 g (若用秤称则称 1~2 kg)。

3.3.2 冲洗试样, 直至颗粒表面无尘土和其他污物。

3.3.3 将试样浸在水中 24 小时后取出, 立即放入铁丝筐, 缓缓浸没于水中, 并在水中摇晃, 至无气泡逸出时为止。

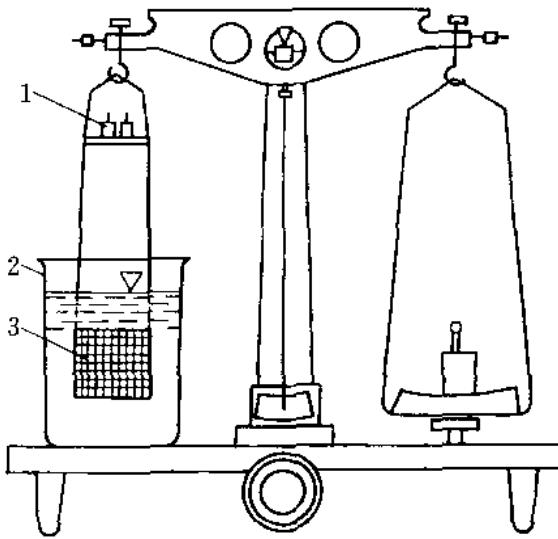


图 3.3.4 浮称天平

1—调平平衡砝码盘; 2—盛水容器;

3—盛粗粒土的铁丝筐

3.3.4 称铁丝筐和试样在水中的总质量, 见图 3.3.4。

3.3.5 取出试样烘干、称量。

3.3.6 称铁丝筐在水中质量, 并立即测量容器内水的温度, 准确至 0.5℃。

3.3.7 本试验称量应准确至 0.2 g。

3.3.8 按式 (3.3.8) 计算土粒比重:

$$G_s = \frac{m_d}{m_d - (m'_2 - m'_1)} G_{wt} \quad (3.3.8)$$

式中 m'_1 ——铁丝筐在水中质量, g;

m'_2 ——试样加铁丝筐在水中总质量, g;

其余符号见本规程式 (2.3.8-1)。

计算至 0.001。

3.3.9 本试验应进行 2 次平行测定, 2 次测定差值不得大于 0.02, 取其算术平均值。

3.3.10 按式 (3.3.10) 计算土粒平均比重:

$$G_s = \frac{1}{\frac{p_1}{G_{s1}} + \frac{p_2}{G_{s2}}} \quad (3.3.10)$$

表 3.4.1 比重试验记录表(浮称法)

工程名称 _____

试验者 _____

计算者 _____

试验日期 _____

校核者 _____

野外 编号	室内 编号	温度	水的比重	烘干土质量	铁丝筐加试样 在水中质量	铁丝筐在 水中质量	试样在 水中质量	比重	平均 值	备 注
		(°C)		(g)	(g)	(g)	(g)			
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)		
			查表				(4)-(5)	$\frac{(3) \times (2)}{(3) - (6)}$		

式中 G_{s1} ——粒径大于 5 mm 土粒的比重；

G_{s2} ——粒径小于 5 mm 土粒的比重；

P_1 ——粒径大于 5 mm 土粒占总质量的百分数，%；

P_2 ——粒径小于 5 mm 土粒占总质量的百分数，%。

计算至 0.001。

3.4 记录

3.4.1 本试验记录格式如表 3.4.1。

4 虹吸筒法

4.1 仪器设备

4.1.1 虹吸筒：见图 4.1.1。

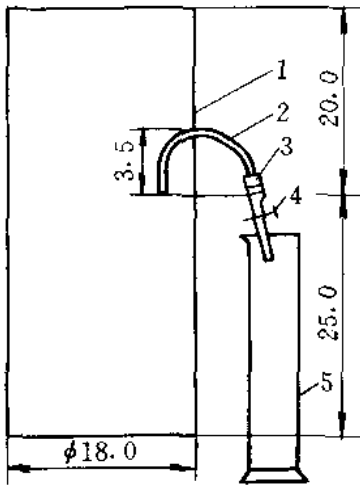


图 4.1.1 虹吸筒
(单位：cm)

1—虹吸筒；2—虹吸管；3—
橡皮管；4—管夹；5—量筒

4.1.2 台秤：称量 10 kg，分度值 1 g。

4.1.3 量筒：容量大于 2000 ml。

4.1.4 其他：如烘箱，温度计，孔径 5 mm、20 mm 的筛等。

4.2 仪器设备的检定和校准

4.2.1 台秤应按相应的检定规程进行检定。

4.3 操作步骤

4.3.1 取粒径大于 5 mm 的代表性试样 1000~7000 g。

4.3.2 将试样冲洗，直至颗粒表面无尘土和其他污物。

4.3.3 再将试样浸在水中 24 小时后取出，晾干（或用布擦干）其表面水分，称量。

4.3.4 注清水入虹吸筒，至管口有水溢出时停止注水。待管口不再有水流出后，关闭管夹，将试样缓缓放入筒中，边放边搅，至无气泡逸出时为止，搅动时勿使水溅出筒外。

4.3.5 待虹吸筒中水面平静后，开管夹，让试样排开的水通过虹

表 4.4.1 比重试验记录表(虹吸筒法)

工程名称 _____

试验者 _____

试验日期 _____

计算者 _____

校核者 _____

野外 编号	室内 编号	温度 (°C)	水的 比 重	烘干 土质量 (g)	风干 土质量 (g)	量筒 质量 (g)	量筒加排 开水质量 (g)	排开 水质量 (g)	吸着 水质量 (g)	比重	平均比重
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	
			查表					(6) - (5)	(4) - (3)	$\frac{(3) \times (2)}{(7) - (8)}$	

吸管流入量筒中。

4.3.6 称量筒与水总质量。测量筒内水的温度，准确至 0.5℃。

4.3.7 取出虹吸筒内试样，烘干、称量。

4.3.8 本试验称量应准确至 1 g。

4.3.9 按式 (4.3.9) 计算比重：

$$G_s = \frac{m_d}{(m_1 - m_0) - (m - m_d)} G_{wt} \quad (4.3.9)$$

式中 m ——晾干试样质量，g；

m_1 ——量筒加水总质量，g；

m_0 ——量筒质量，g；

其余符号见本规程式 (2.3.8-1)。

计算至 0.001。

4.3.10 本试验进行 2 次平行测定，2 次测定的差值不得大于 0.02。取其算术平均值。

4.3.11 按本规程式 (3.3.10) 计算平均比重。

4.4 记录

4.4.1 本试验记录格式如表 4.4.1。

附 a 比重瓶校正

a.1 目的

a.1.0.1 比重瓶的玻璃在不同温度下会产生胀缩。水在不同温度下的密度（比重）也各不相同。因此，比重瓶盛装纯水至一定标记处的总质量随温度而异，故比重瓶必须进行校正。

a.1.0.2 比重瓶每年至少校正 1 次，并经常抽查。如发现有误差时，应重新校正。

a.2 仪器设备和检定

a.2.1 仪器设备

a.2.1.1 比重瓶：容量 50ml 及 100 ml。

a.2.1.2 天平：称量 200 g，分度值 0.001 g。

a. 2. 1. 3 恒温水槽：准确度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

a. 2. 1. 4 温度计：刻度范围 $0\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，分度值 0.5°C 。

a. 2. 1. 5 其他：如纯水、滴管等。

a. 2. 2 仪器设备的检定

a. 2. 2. 1 天平、温度计应按相应的检定规程进行检定。

a. 3 操作步骤

a. 3. 0. 1 将比重瓶洗净，烘干，称量 2 次，准确至 0.001 g 。取其算术平均值，2 次差值不得大于 0.002 g 。

a. 3. 0. 2 将事先煮沸并冷却的纯水注入比重瓶，对长颈比重瓶达到刻度处为止。对短颈比重瓶，注满水，塞紧瓶塞，多余水自瓶塞毛细管中溢出。移比重瓶入恒温水槽。待瓶内水温稳定后，将瓶取出，擦干外壁的水，称瓶、水总质量，准确至 0.001 g 。重复上述步骤，测定 2 次，取其算术平均值，其平行差值不得大于 0.002 g 。

a. 3. 0. 3 将恒温水槽水温以 5°C 级差调节，逐级测定不同温度下的瓶、水总质量。

a. 3. 0. 4 将测定结果列表（表 a. 4. 0. 1），以瓶、水总质量为横坐标，温度为纵坐标，绘制瓶、水总质量与温度的关系曲线（图 a. 3. 0. 4）备用。

a. 4 记录

a. 4. 0. 1 本校正记录格式如表 a. 4. 0. 1。

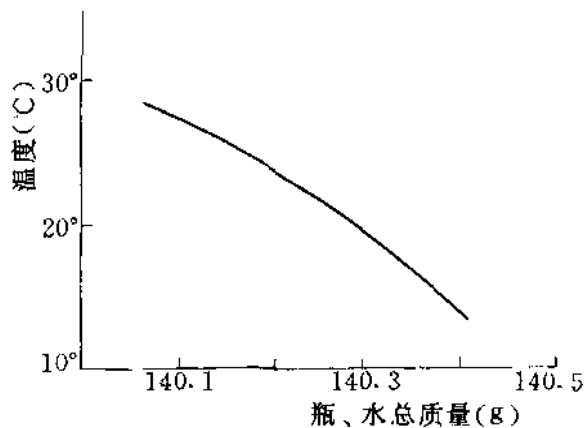


图 a. 3. 0. 4 比重瓶校正曲线

表 a. 4. 0. 1 比重瓶校正记录表

瓶 号 _____

校正者 _____

瓶 重 _____

校正日期 _____

校核者 _____

温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	瓶、水总质量 (g)		平均瓶、水总质量 (g)

颗粒分析试验

SL237—006—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 颗粒分析试验是测定干土中各种粒组所占该土总质量的百分数的方法，借以明了颗粒大小分布情况，供土的分类及概略判断土的工程性质及选料之用。

1.0.2 本规程根据土的颗粒大小及级配情况，分别采用以下4种方法。

- 1 筛析法：适用于粒径大于0.075 mm的土。
- 2 密度计法：适用于粒径小于0.075 mm的土。
- 3 移液管法：适用于粒径小于0.075 mm的土。
- 4 若土中粗细兼有，则联合使用筛析法及密度计法或移液管法。

2 引用标准

GB/T15406—94《土工仪器的基本参数及通用技术条件》第一篇：室内土工仪器。

GB6003—85《试验筛》。

GB9909—88《实验室用标准振筛机技术条件》。

3 筛析法

3.1 仪器设备

3.1.1 试验筛：应符合GB6003—85的要求。

- 1 粗筛：圆孔。孔径为60 mm、40 mm、20 mm、10 mm、

5 mm、2 mm。

2 细筛：孔径为 2.0、1.0、0.5、0.25、0.1、0.075。

3.1.2 天平：称量 1000 g，分度值 0.1 g；称量 200 g，分度值 0.01 g。

3.1.3 台秤：称量 5 kg，分度值 1 g。

3.1.4 振筛机：应符合 GB9909—88 的技术条件。

3.1.5 其他：烘箱、量筒、漏斗、瓷杯、研钵（附带橡皮头研杵）、瓷盘、毛刷、匙、木碾等。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 试验筛应按 GB6003—85 的规定进行检定。

3.2.2 天平、台秤应按相应的检定规程进行检定。

3.2.3 振筛机应按 GB9909—88 的规定进行检定。

3.3 操作步骤

3.3.1 从风干、松散的土样中，用四分法按下列规定取出代表性试样：

1 粒径小于 2 mm 颗粒的土取 100~300 g。

2 最大粒径小于 10 mm 的土取 300~1000 g。

3 最大粒径小于 20 mm 的土取 1000~2000 g。

4 最大粒径小于 40 mm 的土取 2000~4000 g。

5 最大粒径小于 60 mm 的土取 4000 g 以上。

3.3.2 无粘性土。

1 按本规程 3.3.1 规定数量取出试样，称量准确至 0.1 g；当试样质量多于 500 g 时，应准确至 1 g。

2 将试样过孔径为 2 mm 细筛，分别称出筛上和筛下土质量。

3 取 2 mm 筛上试样倒入依次叠好的粗筛的最上层筛中；取 2 mm 筛下试样倒入依次选好的细筛的最上层筛中，进行筛析。细筛宜放在振筛机上震摇，震摇时间一般为 10~15 min。

4 由最大孔径筛开始，顺序将各筛取下，在白纸上用手轻叩摇晃，如仍有土粒漏下，应继续轻叩摇晃，至无土粒漏下为止。漏

下的土粒应全部放入下级筛内。并将留在各筛上的试样分别称量，准确至 0.1 g。

5 各细筛上及底盘内土质量总和与筛前所取 2 mm 筛下试样质量之差不得大于 1%。

6 各粗筛上及 2 mm 筛下的土质量总和与试样质量之差不得大于 1%。

7 2 mm 筛下的土，小于试样总质量的 10%，则可省略细筛筛析。2 mm 筛上的土，小于试样总质量的 10%，则可省略粗筛筛析。

3.3.3 含有粘土粒的砂砾土。

1 将土样放在橡皮板上用木碾将粘结的土团充分碾散，用四分法按本规程 3.3.1 规定称取代表性试样，置于盛有清水的瓷盆中，用搅棒搅拌，使试样充分浸润和粗细颗粒分离。

2 将浸润后的混合液过 2 mm 细筛，边搅拌边冲洗边过筛，直至筛上仅留大于 2 mm 的土粒为止。然后将筛上的土风干称量，准确至 0.1 g。按本规程 3.3.2 规定进行粗筛筛析。

3 用带橡皮头的研杵研磨粒径小于 2 mm 的混合液，俟稍沉淀，将上部悬液过 0.075 mm 筛。再向瓷盆加清水研磨，静置过筛。如此反复，直至盆内悬液澄清。最后将全部土料倒在 0.075 mm 筛上，用水冲洗，直至筛上仅留大于 0.075 mm 的净砂为止。

4 将粒径大于 0.075 mm 的净砂烘干称量，准确至 0.01 g。并按本规程 3.3.2 规定进行细筛筛析。

5 将粒径大于 2 mm 颗粒和 2~0.075 mm 颗粒的质量从原取土总质量中减去，即得粒径小于 0.075 mm 颗粒土的质量。

6 当粒径小于 0.075 mm 的试样质量大于总质量的 10% 时，应按密度计法或移液管法测定粒径小于 0.075 mm 的颗粒组成。

3.4 计算及制图

3.4.1 按式 (3.4.1) 计算小于某粒径的试样质量占试样总质量百分数：

$$x = \frac{m_A}{m_B} d_x \quad (3.4.1)$$

式中 x ——小于某粒径的试样质量占试样总质量的百分数，%；

m_A ——小于某粒径的试样质量，g；

m_B ——当细筛分析时或用密度计法分析时所取试样质量（粗筛分析时则为试样总质量），g；

d_x ——粒径小于 2 mm 或粒径小于 0.075 mm 的试样质量占总质量的百分数，如试样中无大于 2 mm 粒径或无小于 0.075 mm 的粒径，在计算粗筛分析时则 $d_x = 100\%$ 。

3.4.2 绘制颗粒大小分布曲线。以小于某粒径的试样质量占试样总质量的百分数为纵坐标，以粒径（mm）在对数横坐标上进行绘制。求出各粒组的颗粒质量百分数，如图 3.4.2。

3.4.3 必要时计算级配指标。

1 按式（3.4.3-1）计算不均匀系数：

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (3.4.3-1)$$

式中 C_u ——不均匀系数；

d_{60} ——限制粒径，在粒径分布曲线上小于该粒径的土含量占总土质量的 60% 的粒径；

d_{10} ——有效粒径，在粒径分布曲线上小于该粒径的土含量占总土质量的 10% 的粒径。

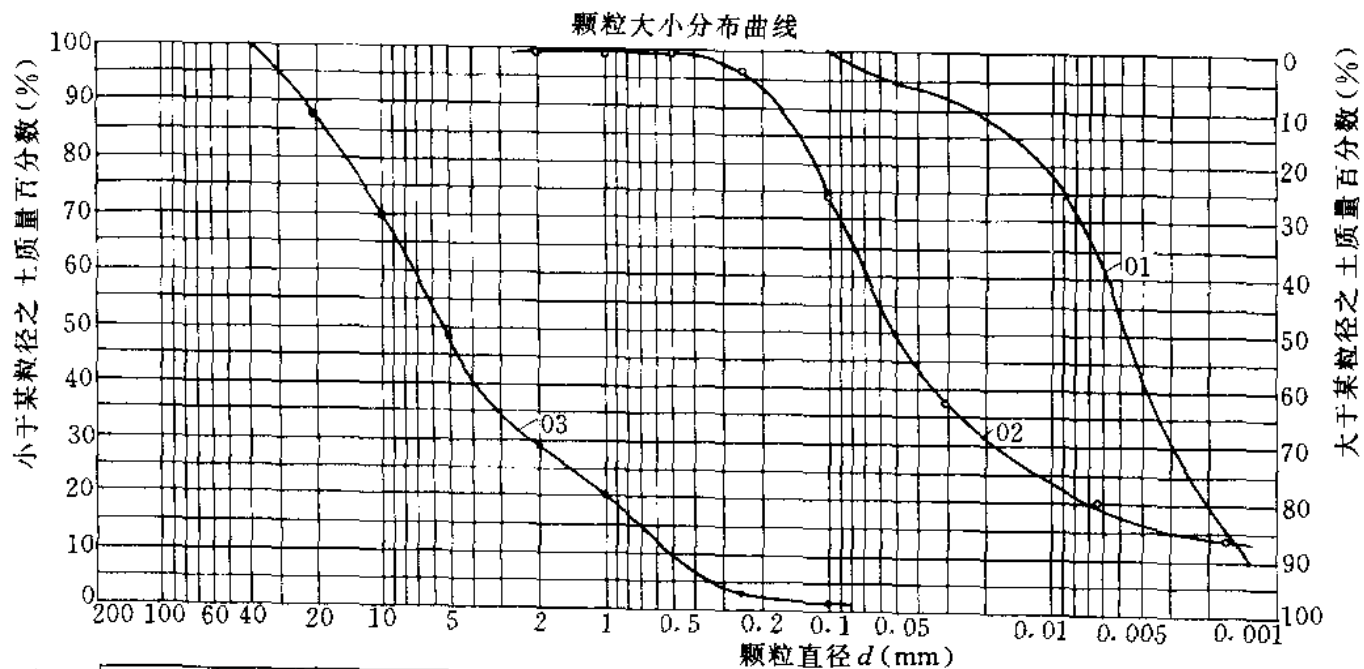
2 按式（3.4.3-2）计算曲率系数：

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60}d_{10}} \quad (3.4.3-2)$$

式中 C_c ——曲率系数；

d_{30} ——在粒径分布曲线上小于该粒径的土含量占总土质量的 30% 的粒径；

其余符号见本规程式（3.4.3-1）。



卵石 或碎石	粗	中	细	粗	中	细	粉粒	粘粒
	砾			砂粒				
试样 编号	粗粒土(> 0.075mm)				土 的 分 类	细粒土(< 0.075mm)		工程编号 _____
	>60(%)	砾(%)	砂(%)	$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$		$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10}d_{60}}$	0.075~ 0.005	<0.005
								土样说明 _____
								试验日期 _____
								试验者 _____
								计算者 _____
								制图者 _____
								校核者 _____

图 3.4.2 颗粒大小分布曲线

4 密度计法

4.1 仪器设备

4.1.1 密度计。

1 甲种：刻度单位以摄氏 20℃ 时每 1000 ml 悬液内所含土质量的克数表示，刻度为 -5~50，分度值为 0.5。

2 乙种：刻度单位以摄氏 20℃ 时悬液的比重表示，刻度为 0.995~1.020，分度值为 0.0002。

4.1.2 量筒：高约 45 cm，直径约 6 cm，容积 1000 ml。刻度为 0~1000 ml，分度值为 10 ml。

4.1.3 试验筛。

1 细筛：孔径 2mm、1mm、0.5mm、0.25mm、0.1 mm。

2 洗筛：孔径 0.075 mm。

4.1.4 天平：称量 1000 g，分度值 0.1 g；称量 500 g，分度值 0.01 g；称量 200 g，分度值 0.001g 三种。

4.1.5 温度计：刻度 0~50℃，分度值 0.5℃。

4.1.6 洗筛漏斗：直径略大于洗筛直径，使洗筛恰可套入漏斗中。

4.1.7 搅拌器：轮径 50 mm，孔径约 3 mm；杆长约 400 mm，带旋转叶。

4.1.8 煮沸设备：附冷凝管。

4.1.9 其他：秒表、锥形瓶、研钵、木杵、电导率仪等。

4.2 仪器设备的检定和校准

4.2.1 密度计的校正应按“附 a”——《密度计校正》的规定进行。

4.2.2 试验筛应按 GB6003—85 的规定进行检定。

4.2.3 天平应按相应的检定规程进行检定。

4.3 试剂

4.3.1 分散剂：浓度 6% 双氧水，1% 硅酸钠，4% 六偏磷酸钠。

4.3.2 水溶盐检验试剂：10% 盐酸，5% 氯化钡，10% 硝酸，5%

硝酸银。

4.4 操作步骤

4.4.1 宜采用风干土试样，并按式（4.4.1）计算试样干质量为 30 g 时所需的风干土质量。

$$m = m_d(1 + 0.01w) \quad (4.4.1)$$

式中 m ——风干土质量，g；

m_d ——试样干土质量，g；

w ——风干土含水率，%。

4.4.2 试样中易溶盐含量大于总质量的 0.5% 时，应洗盐。易溶盐含量检验可用电导法或目测法。

1 电导法。按电导率仪使用说明书操作，测定温度 $T^{\circ}\text{C}$ 时试样溶液（土水比为 1:5）的电导率，并按式（4.4.2）计算 20°C 时的电导率：

$$K_{20} = \frac{K_T}{1 + 0.02(T - 20)} \quad (4.4.2)$$

式中 K_{20} —— 20°C 时悬液的电导率， $\mu\text{S}/\text{cm}$ ；

K_T —— $T^{\circ}\text{C}$ 时悬液的电导率， $\mu\text{S}/\text{cm}$ ；

T ——测定时悬液的温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

当 K_{20} 大于 $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ 时应洗盐。

2 目测法。取风干试样 3 g 于烧杯中，加适当纯水调成糊状研散，再加纯水 25 ml 煮沸 10 min 冷却后移入试管中，放置过夜，观察试管，当出现凝聚现象时应洗盐。

4.4.3 洗盐步骤如下。

1 将分析用的试样放入调土杯内，注入少量蒸馏水，拌和均匀。迅速倒入贴有滤纸的漏斗中，并注入蒸馏水冲洗过滤。附在调土杯上的土粒全部洗入漏斗。若发现滤液混浊，须重新过滤。

2 应经常使漏斗内的液面保持高出土面约 5 cm。每次加水后，须用表面皿盖住漏斗。

3 检查易溶盐清洗程度，可用 2 个试管各取刚滤下的滤液 3~5 ml，一管加入数滴 10% 盐酸和 5% 氯化钡；另一管加入数滴

10%硝酸和5%硝酸银。若发现一管中有白色沉淀，则证明土中的易溶盐仍未洗净，应继续清洗，直至检查时试管中不再发现白色沉淀为止。

4 洗盐后将漏斗中的土样仔细洗下，风干试样。

4.4.4 称干质量为30 g的风干试样倒入锥形瓶中，勿使土粒丢失。注入水200 ml，浸泡过夜。

4.4.5 将锥形瓶放在煮沸设备上，连接冷凝管进行煮沸。一般煮沸时间约1 h。

4.4.6 将冷却后的悬液倒入瓷杯中，静置约1 min，将上部悬液倒入量筒。杯底沉淀物用带橡皮头研杵细心研散，加水，经搅拌后，静置约1 min，再将上部悬液倒入量筒。如此反复操作，直至杯内悬液澄清为止。当土中大于0.075 mm的颗粒估计超过试样总质量的15%时，应将其全部倒至0.075 mm筛上冲洗，直至筛上仅留大于0.075 mm的颗粒为止。

4.4.7 将留在洗筛上的颗粒洗入蒸发皿内，倾去上部清水，烘干称量，然后按本规程3.3.2规定进行细筛筛析。

4.4.8 将过筛悬液倒入量筒，加4%浓度的六偏磷酸钠约10 ml于量筒溶液中，再注入纯水，使筒内悬液达1000 ml（对加入六偏磷酸钠后产生凝聚的土，应选用其他分散剂）。

4.4.9 用搅拌器在量筒内沿整个悬液深度上下搅拌约1 min，往复各约30次，搅拌时勿使悬液溅出筒外。使悬液内土粒均匀分布。

4.4.10 取出搅拌器，将密度计放入悬液中同时开动秒表。测经1、5、30、120 min和1440 min时的密度计读数。根据试样情况或实际需要，可增加密度计读数或缩短最后一次读数的时间。

4.4.11 每次读数均应在预定时间前10~20 s将密度计小心放入悬液接近读数的深度，并须注意密度计浮泡应保持在量筒中部位置，不得贴近筒壁。

4.4.12 密度计读数均以弯液面上缘为准。甲种密度计应准确至0.5，乙种密度计应准确至0.0002。每次读数完毕立即取出密度计放入盛有纯水的量筒中。并测定各相应的悬液温度，准确至

0.5℃。放入或取出密度计时，应尽量减少悬液的扰动。

4.4.13 如试样在分析前未过 0.075 mm 洗筛，而在密度计第 1 个读数时，发现下沉的土粒已超过试样总质量的 15% 时，则应于试验结束后，将量筒中土粒过 0.075 mm 筛，然后按本规程 4.4.7 规定求得粒径大于 0.075 mm 的颗粒组成。

4.5 计算和制图

4.5.1 按下列公式计算小于某粒径的试样质量占试样总质量百分数。

1 甲种密度计：

$$X = \frac{100}{m_d} C_s (R + m_t + n - C_D) \quad (4.5.1-1)$$

$$C_s = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_{w_{20}}} \times \frac{2.65 - \rho_{w_{20}}}{2.65}$$

式中 X ——小于某粒径的土质量百分数，%；

m_d ——试样干土质量，g；

C_s ——土粒比重校正值，查附表 a.5.0.1；或按公式计算；

n ——弯液面校正值；

ρ_s ——土粒密度，g/cm³；

$\rho_{w_{20}}$ ——20℃时水的密度，g/cm³；

m_t ——温度校正值，查附表 a.4.0.1；

C_D ——分散剂校正值；

R ——甲种密度计读数。

2 乙种密度计：

$$X = \frac{100V}{m_d} C'_s [(R' - 1) + m'_t + n' - C'_D] \rho_{w_{20}} \quad (4.5.1-2)$$

$$C'_s = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_{w_{20}}}$$

式中 V ——悬液体积 (=1000 ml)；

C'_s ——土粒比重校正值，查表 a. 5. 0. 1；或按公式计算；

n' ——弯液面校正值；

m'_t ——温度校正值，查附表 a. 4. 0. 1；

C'_D ——分散剂校正值；

R' ——乙种密度计读数；

其余符号见本规程式 (4. 5. 1-1)。

4. 5. 2 按式 (4. 5. 2-1) 计算颗粒直径，也可按图 4. 5. 2 确定。

$$d = \sqrt{\frac{1800 \times 10^4 \eta}{(G_s - G_{w_T}) \rho_{w_0} g}} \times \frac{L}{t} \quad (4. 5. 2-1)$$

式中 d ——颗粒直径，mm；

ρ_{w_0} ——4℃时水的密度，g/cm³；

η ——水的动力粘滞系数，(10⁻⁶) kPa·s；

G_s ——土粒比重；

G_{w_T} ——温度为 T ℃时的水的比重；

L ——某一时间 t 内的土粒沉降距离，cm；

g ——重力加速度，981cm/s²；

t ——沉降时间，s。

为了简化计算，式 (4. 5. 2-1) 可写成：

$$d = K \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (4. 5. 2-2)$$

式中 K ——粒径计算系数 $\left[= \sqrt{\frac{1800 \times 10^4 \eta}{(G_s - G_{w_T}) \rho_{w_0} g}} \right]$ ，与悬液温度

和土粒比重有关。其值见表 4. 5. 2。

4. 5. 3 用小于某粒径的土质量百分数为纵坐标，颗粒直径 (mm) 在对数横坐标上，绘制颗粒大小分布曲线。如系与筛析法联合分析，应将两段曲线绘成一平滑曲线，如图 3. 4. 2。

4. 6 记录

4. 6. 1 本试验记录格式如表 4. 6. 1。

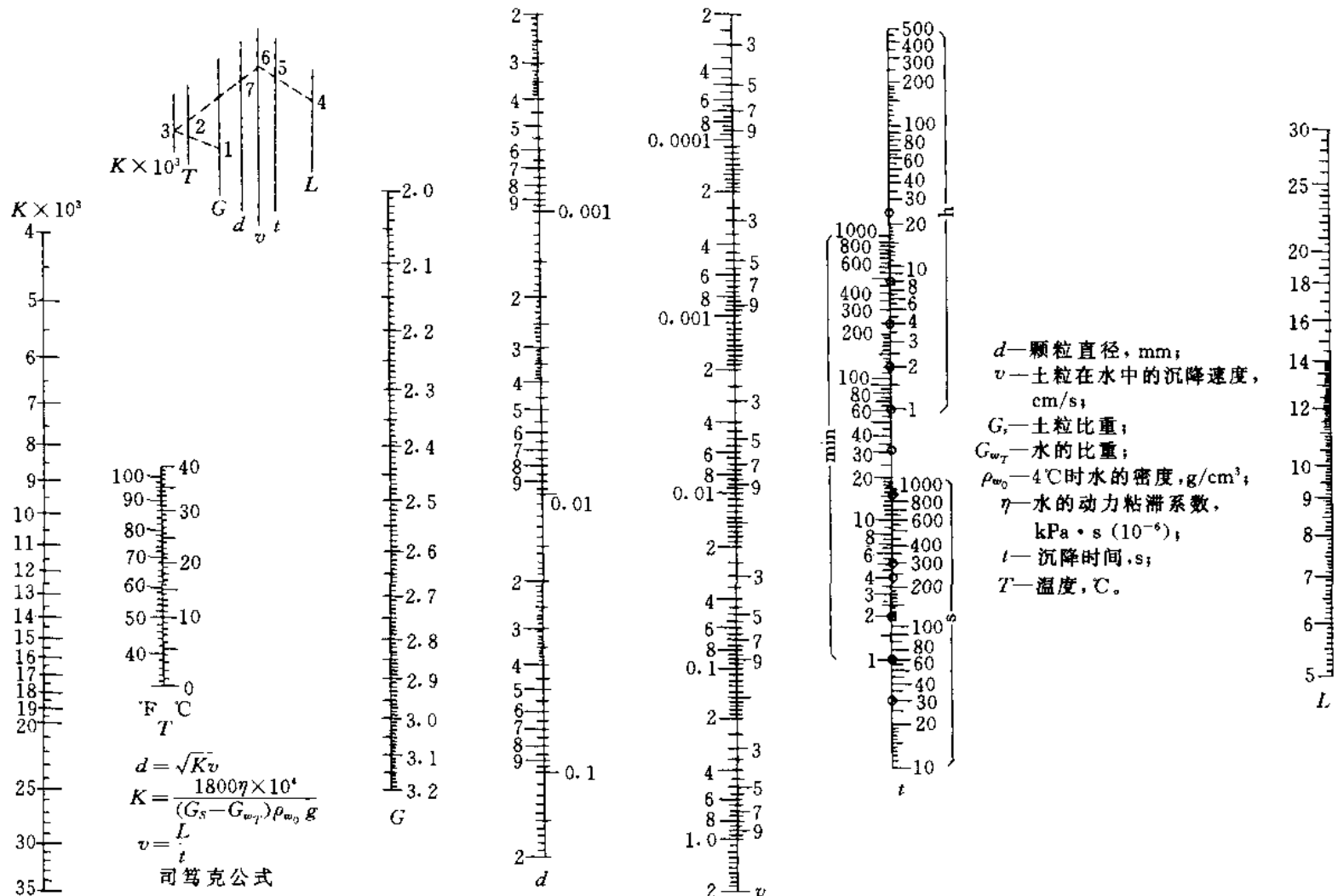


图 4.5.2 司笃克公式列线图

表 4.5.2 粒径计算系数 $K = \sqrt{\frac{1800 \times 10^4 \eta}{(G_s - G_{sT}) \rho_w g}}$ 值表

温度 (°C)	土 粒 比 重								
	2.45	2.50	2.55	2.60	2.65	2.70	2.75	2.80	2.85
5	0.1385	0.1360	0.1339	0.1318	0.1298	0.1279	0.1261	0.1243	0.1226
6	0.1365	0.1342	0.1320	0.1299	0.1280	0.1261	0.1243	0.1225	0.1208
7	0.1344	0.1321	0.1300	0.1280	0.1260	0.1241	0.1224	0.1206	0.1189
8	0.1324	0.1302	0.1281	0.1260	0.1241	0.1223	0.1205	0.1188	0.1182
9	0.1305	0.1283	0.1262	0.1242	0.1224	0.1205	0.1187	0.1171	0.1164
10	0.1288	0.1267	0.1247	0.1227	0.1208	0.1189	0.1173	0.1156	0.1141
11	0.1270	0.1249	0.1229	0.1209	0.1190	0.1173	0.1156	0.1140	0.1124
12	0.1253	0.1232	0.1212	0.1193	0.1175	0.1157	0.1140	0.1124	0.1109
13	0.1235	0.1214	0.1195	0.1175	0.1158	0.1141	0.1124	0.1109	0.1004
14	0.1221	0.1200	0.1180	0.1162	0.1149	0.1127	0.1111	0.1095	0.1000
15	0.1205	0.1184	0.1165	0.1148	0.1130	0.1113	0.1096	0.1081	0.1067
16	0.1189	0.1169	0.1150	0.1132	0.1115	0.1098	0.1083	0.1067	0.1053
17	0.1173	0.1154	0.1135	0.1118	0.1100	0.1085	0.1069	0.1047	0.1039
18	0.1159	0.1140	0.1121	0.1103	0.1086	0.1071	0.1055	0.1040	0.1026
19	0.1145	0.1125	0.1108	0.1090	0.1073	0.1058	0.1031	0.1088	0.1014
20	0.1130	0.1111	0.1093	0.1075	0.1059	0.1043	0.1029	0.1014	0.1000
21	0.1118	0.1099	0.1081	0.1064	0.1043	0.1033	0.1018	0.1003	0.0990
22	0.1103	0.1085	0.1067	0.1050	0.1035	0.1019	0.1004	0.0990	0.09767
23	0.1091	0.1072	0.1055	0.1038	0.1023	0.1007	0.09930	0.09793	0.09659
24	0.1078	0.1061	0.1044	0.1028	0.1012	0.09970	0.09823	0.09600	0.09555
25	0.1065	0.1047	0.1031	0.1014	0.09990	0.09839	0.09701	0.09566	0.09434
26	0.1054	0.1035	0.1019	0.1003	0.09897	0.09731	0.09592	0.09455	0.09327
27	0.1041	0.1024	0.1007	0.09915	0.09767	0.09623	0.09482	0.09349	0.09225
28	0.1032	0.1014	0.09975	0.09818	0.09670	0.09529	0.09391	0.09257	0.09132
29	0.1019	0.1002	0.09859	0.09706	0.09555	0.09413	0.09279	0.09144	0.09028
30	0.1008	0.09910	0.09752	0.09597	0.09450	0.09311	0.09176	0.09050	0.08927

5 移液管法

5.1 仪器设备

5.1.1 移液管：容积 25 ml，如图 5.1.1。

5.1.2 小烧杯：容积 50 ml。

5.1.3 天平：称量 200 g，分度值 0.001g。

5.1.4 其他：符合本规程 4.1.5~4.1.9 的规定。

5.2 仪器设备的检定与校准

5.2.1 天平应按相应的检定规程进行检定。

5.3 操作步骤

5.3.1 取代表性试样。粘质土为 10~15 g，砂质土为 20 g，并按本规程 4.4.1~4.4.8 的规定制取悬液。

5.3.2 将盛试样悬液的量筒放入恒温水槽中，测记悬液温度，准确至 0.5℃。试验中悬液温度允许变化范围应为 ±0.5℃。

5.3.3 按本规程式 (4.5.2-1) 计算粒径小于 0.05、0.01、0.005、0.002 mm 和其他所需粒径下沉一定深度所需的静置时间。

5.3.4 准备好移液管。将二通阀置于关闭位置，三通阀置于移液管和吸球相通的位置。

5.3.5 用搅拌器沿悬液上、下搅拌各约 30 次，时间 1 min，取出搅拌器。

5.3.6 开动秒表，根据各粒径的静置时间，提前约 10 s，将移液管放入悬液中，浸入深度为 10 cm。用吸球吸取悬液。吸取悬液量

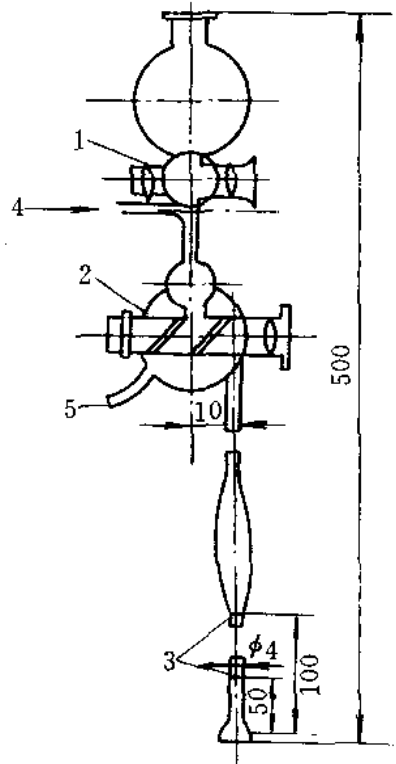


图 5.1.1 移液管示意图

- 1—二通阀；2—三通阀；
3—移液管；4—接吸球；
5—放流口

应不少于 25 ml。

5.3.7 旋转三通阀，使与放流口相通，将多余的悬液从放流口放出，收集后倒入原量筒内的悬液中。

5.3.8 将移液管下口放入已称量过的小烧杯中，由上口倒入少量纯水，开三通阀使水流入移液管，连同移液管内的试样悬液流入小烧杯内。

5.3.9 每吸取一组粒径的悬液后必须重新搅拌，再吸取另一组粒径的悬液。

5.3.10 将烧杯内的悬液蒸发浓缩半干，在 105~110℃ 温度下烘至恒量，称小烧杯连同干土的质量，准确至 0.001 g。

表 5.5.1 颗粒分析试验记录表（移液管法）

工程名称 _____ 试验者 _____
 土样编号 _____ 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

<2 mm 颗粒土质量百分数 _____ <0.075 mm 颗粒土质量百分数 _____ 试样干质量 m_d (g) _____ 土粒比重 G_s _____					三角烧瓶号 _____ 烧杯号 _____ 量筒号 _____ 移液管体积 _____		
粒径 (mm)	杯号	杯加土 质量 (g)	杯质 量 (g)	吸管内 悬液 质量 (g)	1000 ml 量筒内 土质量 (g)	小于某粒 径土质量 百分数 (%)	小于某粒 径土占总 土质量 百分数 (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5) = (3) - (4)	(6)	(7)	(8)
<0.05							
<0.01							
<0.005							
<0.001							

5.4 计算和制图

5.4.1 按式 (5.4.1) 计算小于某粒径的试样质量占试样总质量的百分数:

$$X = \frac{m'_s V}{V_1 m_d} \times 100 \quad (5.4.1)$$

式中 X ——小于某粒径的试样质量占试样总质量的百分数, %;

m'_s ——吸取悬液中 (25 ml) 土粒的质量, g;

m_d ——试样干土质量, g;

V ——悬液总体积, $V=1000$ ml;

V_1 ——移液管每次吸取的悬液体积, $V_1=25$ ml。

5.4.2 用小于某粒径的试样质量百分数为纵坐标, 颗粒粒径 (mm) 在对数横坐标上, 绘制颗粒大小分布曲线, 如图 3.4.2。

5.5 记录

5.5.1 本试验记录格式如表 5.5.1。

附 a 密度计校正

a.1 校正项目

a.1.0.1 土粒沉降距离校正。密度计读数, 除表示悬液密度外, 同时也由悬液面至密度计浮泡体积中心的距离来表示土粒的沉降深度。但在试验时, 当密度计放入悬液后, 液面因之升高, 致使土粒沉降距离较实际的为大, 故须加以校正。

a.1.0.2 温度校正。密度计刻度是在 20°C 时刻制的, 如试验时悬液温度不等于 20°C , 则水的密度及密度计浮泡体积的胀缩, 影响密度计的准确读数, 故须加以校正。

a.1.0.3 土粒比重校正。密度计刻度系假定悬液内土粒比重为 2.65, 如试验时土粒比重不是 2.65, 应加以校正。

a.1.0.4 分散剂校正。密度计刻度是以纯水为标准的, 当悬液中加入分散剂时, 则密度增大, 故亦须加以校正。

a. 1. 0. 5 弯液面校正。密度计读数刻度时是以弯液面底为标准，试验时读数以弯液面顶为准，故须校正。

a. 2 仪器设备和检定

a. 2. 1 仪器设备

a. 2. 1. 1 密度计：甲种，分度值为 0. 5；乙种（20℃/20℃），分度值为 0. 0002。

a. 2. 1. 2 量筒：直径 6 cm（±1 mm），容积 1000 ml，分度值为 10 ml 和容积 250 ml，分度值为 1 ml 两种。

a. 2. 1. 3 电动搅拌机：附玻璃搅拌棒。

a. 2. 1. 4 恒温水槽：准确度±1℃。

a. 2. 1. 5 比重瓶：容积 100 ml。

a. 2. 1. 6 温度计：刻度 0~50℃，分度值 0. 5℃。

a. 2. 1. 7 天平：称量 100 g，分度值 0. 0001 g，称量 200 g，分度值 0. 001 g 两种。

a. 2. 1. 8 其他：玻璃棒、烧杯、纯水、坐标纸等。

a. 2. 2 仪器设备的检定

a. 2. 2. 1 量筒：参照 JJG20—89《标准玻璃容器检定规程》进行检定。

a. 2. 2. 2 温度计：应按相应检定规程进行检定。

a. 2. 2. 3 天平：应按相应的检定规程进行检定。

a. 3 土粒沉降距离校正

a. 3. 0. 1 测定密度计浮泡体积。在 250 ml 量筒内倒入约 130 ml 纯水，并保持水温为 20℃，测定量筒内水面读数（以弯液面上缘为准）后划一标记。将密度计放入量筒中，使水面达密度计最低分度处（以弯液面上缘为准），同时测记水面在量筒上的读数（以弯液面上缘为准）后再划一标记，两者之差，即为密度计浮泡的体积。读数准确至 1 ml。

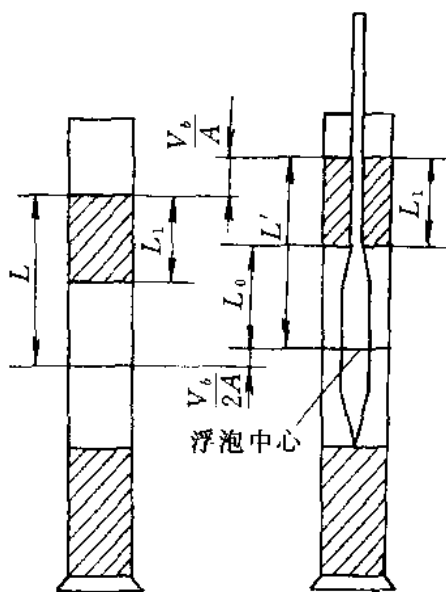
a. 3. 0. 2 测定密度计浮泡体积中心。在测定密度计浮泡体积后，将密度计向上缓缓垂直提起，使水面恰落至两标记的正中间，此时水面与浮泡相切（以弯液面上缘为准）处，即为浮泡体积中心。

将密度计固定于三足架上，用直尺准确量出水面至密度计最低分度的垂直距离。

a. 3. 0. 3 测定 1000 ml 量筒内径（准确至 1 mm），并算出量筒面积。

a. 3. 0. 4 量出自密度计最低分度至玻璃杆上各分度处的距离，每隔 5 格或 10 格量距 1 次。

a. 3. 0. 5 按式 (a. 3. 0. 5) 计算土粒有效沉降距离（见附图 a. 3. 0. 5）：



附图 a. 3. 0. 5 土粒有效沉降距离校正图

$$L = L' - \frac{V_b}{2A}$$

$$= L_1 + \left(L_0 - \frac{V_b}{2A} \right) \quad (\text{a. 3. 0. 5})$$

式中 L ——土粒有效沉降距离，cm；

L_1 ——自最低刻度至玻璃杆上各分度的距离，cm；

L_0 ——密度计浮泡中心至最低分度的距离，cm；

V_b ——密度计浮泡体积， cm^3 ；

A ——1000 ml 量筒面积， cm^2 。

a. 3. 0. 6 用所量出的不同 L_1 代入本规程式 (a. 3. 0. 5)，计算出如附图 a. 3. 0. 5 相应的 L 值，如附表 a. 3. 0. 6-1、附表 a. 3. 0. 6-2。绘制密度计读数与土粒有效沉降距离的关系曲线，如附图 a. 3. 0. 6-1、附表 a. 3. 0. 6-2。或将密度计读数直接列于本规程图 4. 5. 2 土颗粒列线图土粒有效沉降距离尺度右侧。

a. 4 温度校正

a. 4. 0. 1 试验时如悬液温度不等于 20°C ，可以从附表 a. 4. 0. 1 查得温度校正值。

附表 a. 3. 0. 6-1 土粒沉降距离校正计算表

校正者 _____ 计算者 _____ 校核者 _____ 校正日期 _____

密度计编号 甲 ₃		量筒编号 1号	
密度计浮泡体积 $V_b = 86 \text{ cm}^3$		量筒内径 $D = 6.79 \text{ cm}$	
密度计浮泡中心至最低分度距离 $L_0 = 8.6 \text{ cm}$		量筒面积 $A = 36.19 \text{ cm}^2$	
$L = L_1 + \left(L_0 - \frac{V_b}{2A} \right)$ $= L_1 + (8.6 - 1.19) = L_1 + 7.41$		弯液面校正值 ($n = -1.2$)	
密度计刻度	由最低分度至各分度距离 L_1 (cm)	土粒有效沉降距离 L (cm)	密度计读数 R_H
0	10.58	17.99	-1.2
10	8.41	15.82	8.8
20	6.35	13.76	18.8
30	4.22	11.63	28.8
40	2.02	9.43	38.8
50	0	7.41	48.8

附图 a. 3. 0. 6-1 密度计读数 R_H 与土粒有效沉降距离 L 关系曲线

a. 5 土粒比重校正

a. 5. 0. 1 试验时如土粒比重不是 2.65, 可由附表 a. 5. 0. 1 查得比重校正值。

a. 6 分散剂校正

a. 6. 0. 1 注纯水入量筒, 然后加分散剂 (分散剂品种和用量与试验时采用的相同), 使量筒溶液达 1000 ml。用搅拌器在量筒内沿整个深度上下搅拌均匀, 恒温至 20℃。然后将密度计放入溶液中,

测记密度计读数。此时密度计的读数与在 20℃ 时纯水中读数之差，即为分散剂校正值。

a. 6. 0. 2 按式 (a. 6. 0. 2) 计算分散剂校正值：

$$C_D = R'_{D20} - R'_{w20} \quad (\text{a. 6. 0. 2})$$

式中 C_D ——分散剂校正值；

R'_{D20} ——加入分散剂溶液密度计的读数；

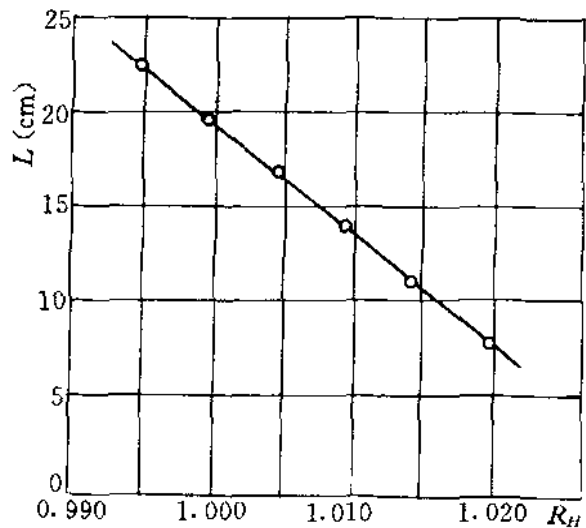
R'_{w20} ——20℃ 纯水中密度计的读数。

附表 a. 3. 0. 6-2 土粒沉降距离校正计算表

校正者 _____ 计算者 _____ 校核者 _____ 校正日期 _____ 年 _____ 月

密度计编号	乙 ₃	量筒编号	9号
密度计浮泡体积 $V_b = 60.0 \text{ cm}^3$		量筒内径 $D = 6.63 \text{ cm}$	
密度计浮泡中心至最低分度距离 $L_0 = 8.8 \text{ cm}$		量筒面积 $A = 34.52 \text{ cm}^2$	
$L = L_1 + \left(L_0 - \frac{V_b}{2A} \right)$ $= L_1 + (8.8 - 0.869) = L_1 + 7.931$		弯液面校正值 $n' = -0.0004$	

密度计刻度	由最低分度至各分度距离 L_1 (cm)	土粒有效沉降距离 L' (cm)	密度计读数 R_H
0.995	14.480	24.411	0.9946
1.000	11.651	19.582	0.9996
1.005	8.759	16.690	1.0046
1.010	5.863	13.794	1.0096
1.015	2.910	10.841	1.0146
1.020	0	7.937	1.0196



附图 a. 3. 0. 6-2 密度计读数 R_H ~ 土粒有效沉降距离 L' 关系图

a. 7 弯液面校正

a. 7. 0. 1 将密度计放于 20℃ 纯水的量筒中, 求出弯液面上、下缘读数之差即为弯液面校正值。

附表 a. 4. 0. 1 温度校正值

悬液温度 ℃	甲种密度计 温度校正值 m_t	乙种密度计 温度校正值 m_t	悬液温度 ℃	甲种密度计 温度校正值 m_t	乙种密度计 温度校正值 m_t
10.0	-2.0	-0.0012	20.0	0.0	+0.0000
10.5	-1.9	-0.0012	20.5	+0.1	+0.0001
11.0	-1.9	-0.0012	21.0	+0.3	+0.0002
11.5	-1.8	-0.0011	21.5	+0.5	+0.0003
12.0	-1.8	-0.0011	22.0	+0.6	+0.0004
12.5	-1.7	-0.0010	22.5	+0.8	+0.0005
13.0	-1.6	-0.0010	23.0	+0.9	+0.0006
13.5	-1.5	-0.0009	23.5	+1.1	+0.0007
14.0	-1.4	-0.0009	24.0	+1.3	+0.0008
14.5	-1.3	-0.0008	24.5	+1.5	+0.0009
15.0	-1.2	-0.0008	25.0	+1.7	+0.0010
15.5	-1.1	-0.0007	25.5	+1.9	+0.0011
16.0	-1.0	-0.0006	26.0	+2.1	+0.0013
16.5	-0.9	-0.0006	26.5	+2.2	+0.0014
17.0	-0.8	-0.0005	27.0	+2.5	+0.0015
17.5	-0.7	-0.0004	27.5	+2.6	+0.0016
18.0	-0.5	-0.0003	28.0	+2.9	+0.0018
18.5	-0.4	-0.0003	28.5	+3.1	+0.0019
19.0	-0.3	-0.0002	29.0	+3.3	+0.0021
19.5	-0.1	-0.0001	29.5	+3.5	+0.0022
20.0	-0.0	-0.0000	30.0	+3.7	+0.0023

附表 a. 5. 0. 1 土粒比重校正值

土粒 比重	甲种土壤密度计 比重校正值 C_s	乙种土壤密度计 比重校正值 C'_s	土粒 比重	甲种土壤密度计 比重校正值 C_s	乙种土壤密度计 比重校正值 C'_s
2.50	1.038	1.666	2.70	0.989	1.588
2.52	1.032	1.658	2.72	0.985	1.581
2.54	1.027	1.649	2.74	0.981	1.575
2.56	1.022	1.641	2.76	0.977	1.568
2.58	1.017	1.632	2.78	0.973	1.562
2.60	1.012	1.625	2.80	0.969	1.556
2.62	1.007	1.617	2.82	0.965	1.549
2.64	1.002	1.609	2.84	0.961	1.543
2.66	0.998	1.603	2.86	0.958	1.538
2.68	0.993	1.595	2.88	0.954	1.532

界限含水率试验

SL237—007—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 细粒土由于含水率不同,分别处于流动状态、可塑状态、半固体状态和固体状态。液限是细粒土呈可塑状态的上限含水率;塑限是细粒土呈可塑状态的下限含水率;缩限是细粒土从半固体状态继续蒸发水分过渡到固体状态时体积不再收缩的界限含水率。

1.0.2 本试验的目的是测定细粒土的液限、塑限和缩限,划分土类、计算塑性指数,供设计、施工使用。各项含水率的测定按SL237—003—1999《含水率试验》的烘干法进行。

1.0.3 本规程适用于粒径小于0.5 mm颗粒组成及有机质含量不大于干土质量5%的土。

2 引用标准

GB/T15406—94《土工仪器的基本参数及通用技术条件》第一篇:室内土工仪器。

GB7961—87《碟式液限仪》。

SL113—95《光电式液塑限联合测定仪校验方法》。

SL237—003—1999《含水率试验》。

SL237—004—1999《密度试验》。

3 液限塑限联合测定法

3.1 仪器设备

3.1.1 液塑限联合测定仪。

1 圆锥仪：锥质量为 76 g，锥角 30°。

2 读数显示：宜采用光电式、游标式，百分表式。光电式液塑限联合测定仪如图 3.1.1。

3 测定仪的基本参数应符合 GB/T15406—94 4.1.1.2 的规定。

3.1.2 试样杯：直径 40~50 mm；高 30~40 mm。

3.1.3 天平：称量 200 g，分度值 0.01 g。

3.1.4 其他：烘箱、干燥缸、铝盒、调土刀、筛（孔径 0.5 mm），凡士林等。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 液、塑限联合测定仪的校准应按 SL113—95 规定的校验方法进行。

3.2.2 天平应按相应的检定规程进行检定。

3.3 操作步骤

3.3.1 液限、塑限联合试验，原则上采用天然含水率的土样制备试样，但也允许用风干土制备试样。

3.3.2 当采用天然含水率的土样时，应剔除大于 0.5 mm 的颗粒，然后分别按接近液限、塑限和二者的中间状态制备不同稠度的土膏，静置湿润。静置时间可视原含水率的大小而定。

3.3.3 当采用风干土样时，取过 0.5 mm 筛的代表性土样约 200 g，分成 3 份，分别放入 3 个盛土皿中，加入不同数量的纯水，使分别达到本规程 3.3.2 中所述的含水率，调成均匀土膏，然后放入密封的保湿缸中，静置 24h。

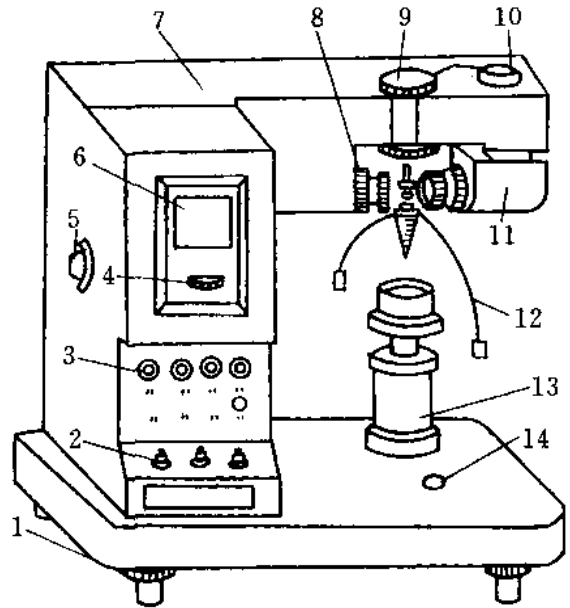


图 3.1.1 光电式液塑限联合测定仪示意图

1—水平调节螺丝；2—控制开关；3—指示灯；4—零线调节螺丝；5—反光镜调节螺丝；6—屏幕；7—机壳；8—物镜调节螺丝；9—电磁装置；10—光源调节螺丝；11—光源；12—圆锥仪；13—升降台；14—水平泡

3.3.4 将制备好的土膏用调土刀充分调拌均匀，密实地填入试样杯中，应使空气逸出。高出试样杯的余土用刮土刀刮平，随即将试样杯放在仪器底座上。

3.3.5 取圆锥仪，在锥体上涂以薄层润滑油脂，接通电源，使电磁铁吸稳圆锥仪（对于游标式或百分表式，提起锥杆，用旋钮固定）。

3.3.6 调节屏幕准线，使初读数为零（游标尺或百分表读数调零）。调节升降座，使圆锥仪锥角接触试样面，指示灯亮时圆锥在自重下沉入试样内（游标式或百分表式用手扭动旋钮，松开锥杆），经 5 s 后立即测读圆锥下沉深度。然后取出试样杯，取 10 g 以上的试样 2 个，测定含水率。

3.3.7 按本规程 3.3.4~3.3.6 的规定，测试其余 2 个试样的圆锥下沉深度和含水率。

3.4 计算和制图

3.4.1 按式 (3.4.1) 计算含水率：

$$w = \left(\frac{m}{m_d} - 1 \right) \times 100 \quad (3.4.1)$$

式中 w ——含水率，%；

m ——湿土质量，g；

m_d ——干土质量，g。

计算至 0.1%。

3.4.2 以含水率为横坐标，圆锥下沉深度为纵坐标，在双对数坐标纸上绘制关系曲线。三点连一直线，如图 3.4.2 中的 A 线。当三点不在一直线上，通过高含水率的一点与其余两点连成两条直线，在圆锥下沉深度为 2mm 处查得相应的含水率，当两个含水率的差值小于 2% 时，应以该两点含水率的平均值与高含水率的点连成一线，如图 3.4.2 中的 B 线。当两个含水率的差值大于、等于 2% 时，应补做试验。

3.4.3 在圆锥下沉深度与含水率关系图上，查得下沉深度为 17mm 所对应的含水率为液限；查得下沉深度为 2mm 所对应的含

水率为塑限,以百分数表示,取整数。

3.4.4 按式(3.4.4-1)计算塑性指数和液性指数:

$$I_P = w_L - w_P \quad (3.4.4-1)$$

$$I_L = \frac{w - w_P}{I_P} \quad (3.4.4-2)$$

式中 I_P ——塑性指数;
 w_L ——液限,%;
 w_P ——塑限,%;
 w ——天然含水率,%;
 I_L ——液性指数,计算至0.01。

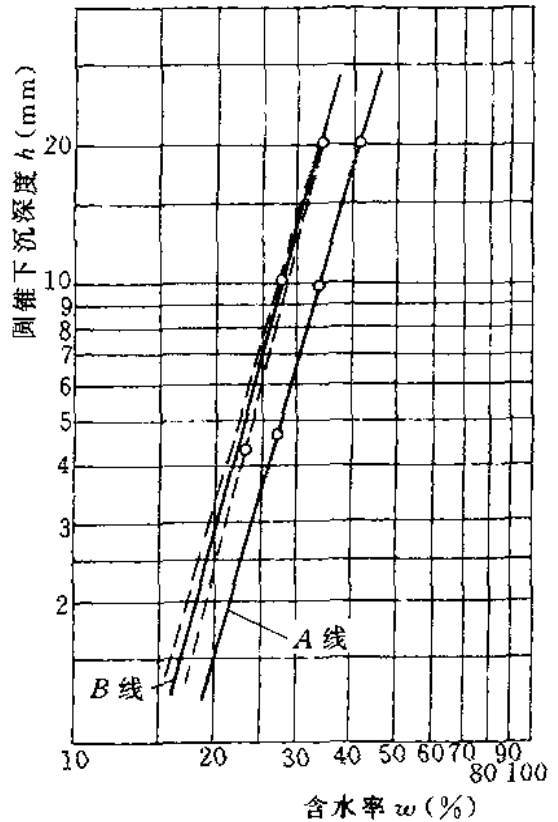


图 3.4.2 圆锥下沉深度与含水率关系图

3.5 记录

3.5.1 本试验记录格式如表

3.5.1。

表 3.5.1 液塑限联合试验记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
 土样说明 _____ 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

试样编号	圆锥下沉深度 h (mm)	盒号	湿土质量 m (g)	干土质量 m_s (g)	含水率 w (%)	液限 w_L (%)	塑限 w_P (%)	塑性指数 I_P	液性指数 I_L
			(1)	(2)	(3) = $\left[\frac{(1)}{(2)} - 1 \right] \times 100$	(4)	(5)	(6) = (4) - (5)	(7) = $\frac{(3) - (5)}{(6)}$

4 碟式仪液限试验

4.1 定义

4.1.1 碟式仪液限试验是将土碟中的土膏，用划刀分成两半，以每秒 2 次的速率将土碟由 10 mm 高度下落。当击数 25 次时，两半土膏在碟底的合拢长度刚好达到 13 mm，此时的含水率为液限。

4.2 仪器设备

4.2.1 碟式液限仪：由土碟和支架组成专用仪器，并有专用划刀，如图 4.2.1。其技术条件应符合 GB7961—87 的规定。

4.2.2 天平：称量 200 g，分度值 0.01 g。

4.2.3 其他：烘箱、干燥缸，铝盒，调土刀，筛（孔 0.5 mm）。

4.3 仪器设备的检定和校准

4.3.1 碟式仪的校正按本规程“附 a”方法进行。

4.3.2 天平应按相应的检定规程进行检定。

4.4 操作步骤

4.4.1 取过 0.5 mm 筛的土样（天然含水率的土样或风干土样均可）约 100 g，放在调土皿中，按需要加纯水，用调土刀反复拌匀。

4.4.2 取一部分试样，平铺于土碟的前半部，如图 4.2.1 (d) 所示。铺土时应防止试样中混入气泡。用调土刀将试样面修平，使最厚处为 10 mm，多余试样放回调土皿中。以蜗形轮为中心，用划刀自后至前沿土碟中央将试样划成槽缝清晰的两半 [图 4.4.2 (a)]。为避免槽缝边扯裂或试样在土碟中滑动，允许从前至后，再从后至前多划几次，将槽逐步加深，以代替一次划槽，最后一次从后至前的划槽能明显的接触碟底。但应尽量减少划槽的次数。

4.4.3 以每秒 2 转的速率转动摇柄 F，使土碟反复起落，坠击于底座 G 上，数记击数，直至试样两边在槽底的合拢长度为 13 mm 为止，记录击数，并在槽的两边采取试样 10 g 左右，测定其含水率。

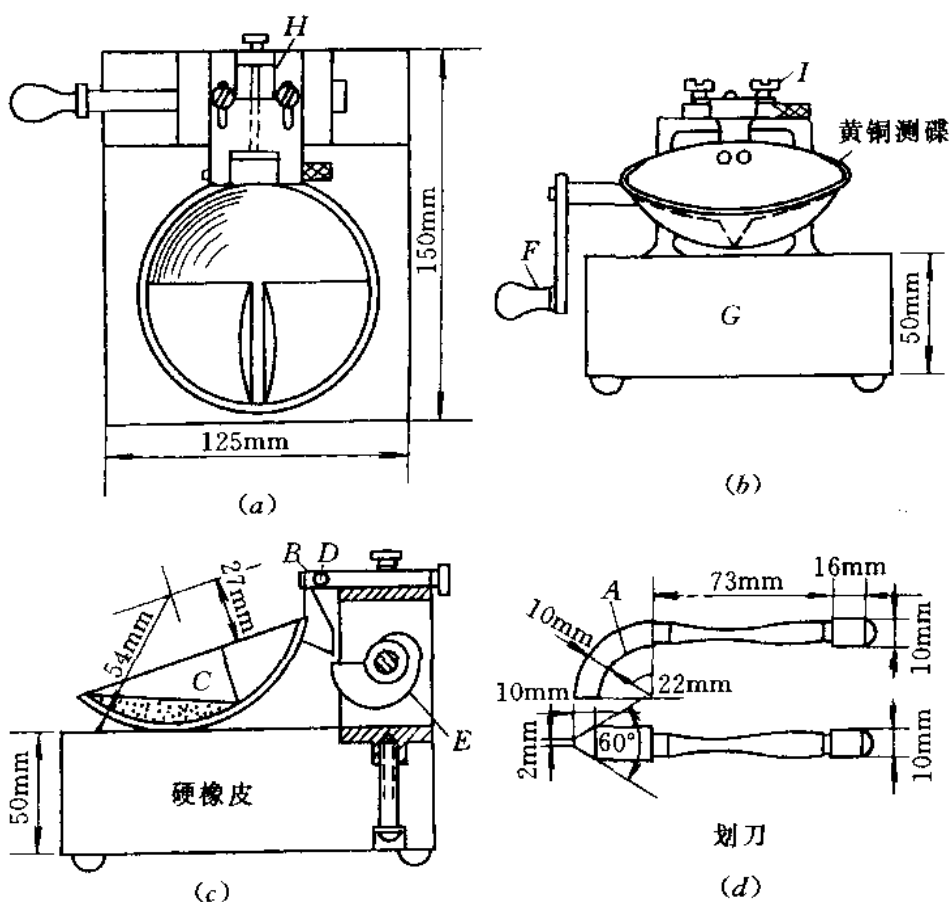


图 4.2.1 碟式液限仪

A—划刀；B—销子；C—土碟；D—支架；E—蜗轮；F—摇柄；
G—底座；H—调整板；I—螺丝

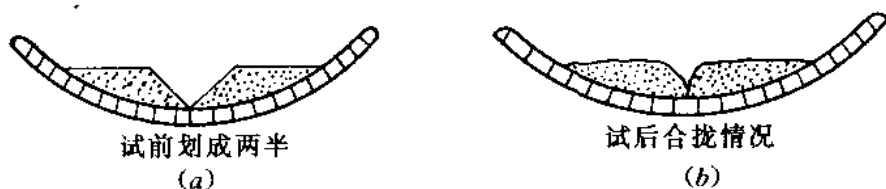


图 4.4.2 划槽及合拢状况

4.4.4 将土碟中的剩余试样移至调土皿中，再加水彻底拌和均匀，按本规程 4.4.1~4.4.3 的规定至少再做 2 次试验。这 2 次土的稠度应使合拢长度为 13 mm 时所需击数在 15~35 次之间（25 次以上及以下各 1 次）。然后测定各击次下试样的相应含水率。

4.5 计算和制图

4.5.1 按式 (4.5.1) 计算各击次下合拢时试样的相应含水率:

$$w_n = \left(\frac{m_n}{m_d} - 1 \right) \times 100 \quad (4.5.1)$$

式中 w_n —— n 击下试样的含水率, %;

m_n —— n 击下试样的质量, g;

m_d ——试样的干土质量, g。

4.5.2 根据试验结果, 以含水率为纵坐标, 以击次在对数横坐标上, 绘制曲线, 如图 4.5.2。查得曲线上击数 25 次所对应的含水率, 即为该试样的液限。

4.6 记录

4.6.1 本试验的记录格式如表 4.6.1。

表 4.6.1 碟式仪液限试验

工程名称 _____

试验者 _____

土样说明 _____

计算者 _____

试验日期 _____

校核者 _____

试样 编号	击数 N	盒 号	湿土 质量 m (g)	干土 质量 m_d (g)	含水率 w (%)	液限 w_L (%)	塑限 w_P (%)	塑性 指数 I_P	液性 指数 I_L
			(1)	(2)	(3) = $\left[\frac{(1)}{(2)} - 1 \right] \times 100$	(4)	(5)	(6)	(7) = $\frac{(3) - (5)}{(6)}$

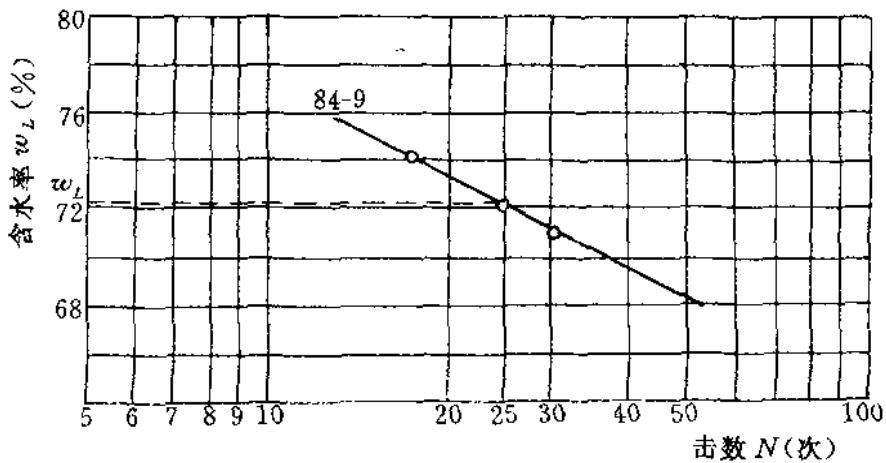


图 4.5.2 含水率与击数关系曲线

5 搓滚法塑限试验

5.1 定义

5.1.1 搓滚法试验是用手掌在毛玻璃板上搓滚土条,当土条直径达 3 mm 时产生裂缝并断裂,该时的含水率为塑限。

5.2 仪器设备

5.2.1 毛玻璃板: 约 200 mm × 300 mm。

5.2.2 缝隙 3 mm 的模板或直径 3 mm 的金属丝,或卡尺。

5.2.3 天平: 称量 200 g, 分度值 0.01 g。

5.2.4 其他: 烘箱, 干燥缸, 铝盒, 筛(孔径 0.5 mm)等。

5.3 仪器设备的检定和校准

5.3.1 天平应按相应的检定规程进行检定。

5.4 操作步骤

5.4.1 取过 0.5 mm 筛的代表性试样约 100 g, 加纯水拌和, 浸润静置过夜。

5.4.2 为使试验前试样的含水率接近塑限, 可将试样在手中捏揉至不粘手, 或用吹风机稍微吹干, 然后将试样捏扁, 如出现裂缝, 表示含水率已接近塑限。

5.4.3 取接近塑限的试样一小块, 先用手捏成橄榄形, 然后再用

手掌在毛玻璃板上轻轻搓滚。搓滚时手掌均匀施加压力于土条上，不得使土条在毛玻璃板上无力滚动。土条长度不宜超过手掌宽度。在任何情况下，土条不得产生中空现象。

5.4.4 当土条搓成 3 mm 时，产生裂缝，并开始断裂，表示试样达到塑限。若不产生裂缝及断裂，表示这时试样的含水率高于塑限；当土条直径大于 3 mm 时即断裂，表示试样含水率小于塑限，应弃去，重新取土试验。若土条在任何含水率下始终搓不到 3 mm 即开始断裂，则该土无塑性。

5.4.5 取直径符合 3 mm 断裂土条约 3~5 g，放入称量盒内，随即盖紧盒盖，测定含水率。此含水率即为塑限。

5.5 计算

5.5.1 按式 (5.5.1) 计算塑限：

$$w_p = \left(\frac{m}{m_d} - 1 \right) \times 100 \quad (5.5.1)$$

式中 w_p ——塑限，%；
 m ——湿土质量，g；
 m_d ——干土质量，g。

表 5.6.1 搓滚法塑限试验记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
 土样说明 _____ 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

土样 编号	盒号	湿土质量 m (g)	干土质量 m_d (g)	含水率 w (%)	塑限 w_p (%)
		(1)	(2)	(3) = $\left[\frac{(1)}{(2)} - 1 \right] \times 100$	

计算至 0.1%。

5.5.2 本试验需进行 2 次平行测定，两次测定的差值，高液限土不得大于 2%；低液限土不得大于 1%。

5.6 记录

5.6.1 本试验记录格式如表 5.6.1。

6 缩限试验

6.1 仪器设备

6.1.1 收缩皿（或环刀）：金属制成，直径 4.5~5.0 cm，高 2~3 cm。

6.1.2 天平：称量 500 g，分度值 0.01 g。

6.1.3 蜡，烧杯，细线，针。

6.1.4 其他：烘箱，干燥缸，铝盒，调土刀，筛（孔径 0.5 mm）。

6.2 仪器设备的检定和校准

6.2.1 天平应按相应的检定规程进行检定。

6.2.2 用分度值为 0.02 mm 的卡尺测定收缩皿的直径和高度。

6.3 操作步骤

6.3.1 取代表性的土样，用纯水制备成约为液限的试样。

6.3.2 在收缩皿内抹一薄层凡士林。将试样分层装入收缩皿中，每次装入后将皿在试验台上拍击，直至驱尽气泡为止。

6.3.3 收缩皿装满试样后，用直尺刮去多余试样，擦净收缩皿外部，立即称收缩皿加湿土总质量。

6.3.4 将盛装试样的收缩皿放在室内逐渐晾干，至试样的颜色变淡时，放入烘箱中烘至恒量。

6.3.5 称皿和干土总质量，准确至 0.01 g。

6.3.6 用 SL237—004—1999 规程的蜡封法测定干土体积。

6.4 计算

6.4.1 按式（6.4.1）计算缩限：

$$w_s = 0.01w - \frac{V_1 - V_2}{m_d} \rho_w \times 100 \quad (6.4.1)$$

式中 w_s ——缩限，%；

V_1 ——湿土体积（即收缩皿或环刀的容积）， cm^3 ；

V_2 ——烘干后土的体积， cm^3 ；

w ——制备含水率，%；

m_d ——干土质量，g；

ρ_w ——水的密度， g/cm^3 。

计算至 0.1%。

表 6.5.1 缩限试验记录表

工程名称 _____

试验者 _____

土样编号 _____

计算者 _____

土样说明 _____

校核者 _____

试验日期		年	月			
			日			
室内编号						
收缩皿编号						
湿土质量 (g)	(1)					
干土质量 (g)	(2)					
含水率 (%)	(3)		$\left[\frac{(1)}{(2)} - 1 \right] \times 100$			
湿土体积 (cm^3)	(4)					
干土体积 (cm^3)	(5)					
收缩体积 (cm^3)	(6)		(4) - (5)			
收缩含水率 (%)	(7)		$\frac{(6)}{(2)} \rho_w \times 100$			
缩限 (%)	(8)		(3) - (7)			
平均值 (%)	(9)					

6.4.2 本试验需进行 2 次平行测定，平行差值，高液限土不得大于 2%，低液限土不得大于 1%。

6.5 记录

6.5.1 本试验记录格式如表 6.5.1。

附 a 碟式仪校正

a.1 目的

a.1.0.1 碟式仪在试验前应检查校正。

a.2 操作步骤

a.2.0.1 检查连接土碟的销子 B 是否磨损。

a.2.0.2 上紧固定螺丝 I。

a.2.0.3 以划刀柄（直径 10 mm）为量度，前后移动调整板 H，以调整土碟底至底座 G 之间的落高为 10 mm，然后拧紧螺丝 I，固定调整板。

a.2.0.4 检查划刀 A 的划口尺寸应符合 GB7961—87 的规定。

湿化试验

SL237—008—1999

1 定义和目的

1.0.1 土的湿化是土体在水中发生崩解的现象。

1.0.2 本试验的目的是测定具有结构性的粘质土体在水中的崩解速度，作为湿法筑坝选择土料的标准之一。

2 引用标准

SL237—003—1999 《含水率试验》。

SL237—004—1999 《密度试验》。

3 仪器设备

3.1.1 浮筒：长颈锥体，下有挂钩，颈上有刻度，分度值为5，如图3.1.1所示。

3.1.2 网板：10 cm×10 cm。金属方格网，孔眼1 cm²，可挂在浮筒下端。

3.1.3 玻璃水筒：宽约15 cm，高约70 cm，长度视需要而定，内盛清水。

3.1.4 天平：称量500 g，分度值0.01 g。

3.1.5 其他：烘箱、干燥器、时钟、切土刀、调土皿、称量皿等。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 天平应按相应的检定规程进行检定。

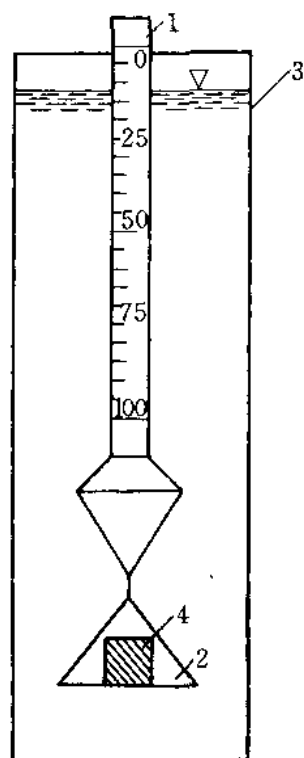


图 3.1.1 湿化仪示意图

1—浮筒；2—网板；3—玻璃水筒；4—试样

4 操作 步 骤

- 4.0.1 按需要取原状土或用扰动土制备成所需状态的土样,用切土刀切成边长为 5 cm 的立方体试样。
- 4.0.2 按规程 SL237—003—1999,SL237—004—1999 规定测定试样的含水率及密度。
- 4.0.3 将试样放在网板中央,网板挂在浮筒下,然后手持浮筒颈端,迅速地将试样浸入水筒中,开动秒表。
- 4.0.4 立即测记开始时浮筒齐水面处刻度的瞬间稳定读数及开始时间。
- 4.0.5 在试验开始后按 1、3、10、30、60 min,2、3、4…h 测记浮筒齐水面处的刻度读数,并描述各该时试样的崩解情况,根据试样崩解的快慢,可适当缩短或增长测读的时间间隔。

表 5.0.1 湿化试验记录表

工程编号 _____	试 验 者 _____
土样编号 _____	计 算 者 _____
仪器编号 _____	校 核 者 _____
土样说明 _____	试验用水 _____

密度 (g/cm ³)		含水率 (%)			
观察时间 年 月	经过 时间	浮筒 读数	浮筒 读数差	崩解量 (%)	崩解情况
d : h : min	h : min	R_t	$R_t - R_0$	$A_t = \frac{R_t - R_0}{100 - R_0} \times 100$	

4.0.6 当试样完全通过网格落下后，试验即告结束。如果试样长期不崩解时，则记试样在水中的情况。

4.0.7 按式（4.0.7）计算崩解量：

$$A_t = \frac{R_t - R_0}{100 - R_0} \times 100 \quad (4.0.7)$$

式中 A_t ——试样在时间 t 时的崩解量，%；

R_t ——时间 t 时浮筒齐水面处的刻度读数；

R_0 ——试验开始时浮筒齐水面处刻度的瞬间稳定读数。

5 记 录

5.0.1 本试验的记录格式如表 5.0.1。

毛管水上升高度试验

SL237—009—1999

1 定义和适用范围

1.0.1 土的毛管水上升高度是水在土孔隙中因毛管作用而上升的最大高度。

1.0.2 本试验的目的是测定土的毛管水上升高度。

1.0.3 本规程根据不同的土质，分别采用直接观测法和土样管法。直接观测法适用于粗砂，中砂；土样管法适用于细砂、粉土或毛管水上升高度较小的粘质土。

2 直接观测法

2.1 仪器设备

2.1.1 毛管仪：包括支架、玻璃杯及厚壁玻璃管。厚壁玻璃管内径为 2~3 cm，长约 100 cm，分度值为 0.5 cm，零点在下端，底端用金属网包住，见图 2.1.1。

2.1.2 天平：称量 2000 g，分度值 0.1 g。

2.1.3 其他：烘箱，漏斗，称量盒，捣棒等。

2.2 仪器设备的检定和校验

2.2.1 天平：应按相应的检定规程进行检定。

2.3 操作步骤

2.3.1 取代表性的风干砂土约 1500 g，使其分散，借漏斗分数次装入玻璃管中，并用捣棒轻轻捣实，使密度均匀，并达到所需的干密度。

2.3.2 将玻璃管垂直插入玻璃杯中，管身用

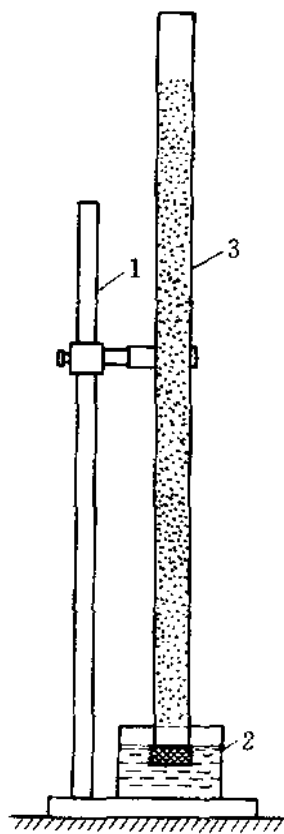


图 2.1.1 毛管仪
1—支架；2 玻璃杯；
3—厚壁玻璃管

支架固定。

2.3.3 在玻璃杯中注入水，水面应高出管底 0.5~1.0 cm。在试验过程中水面须保持不变。

2.3.4 注水入杯后，经过 5、10、20、30、60 min，以后每隔数小时，根据玻璃管中砂土颜色的深浅，测记各时间毛管水上升最高点的高度（从杯中水面为基点），直至上升稳定为止。

2.4 记录

2.4.1 本试验记录格式如表 2.4.1。

表 2.4.1 毛管水上升高度试验记录表（直接观测法）

工程名称 _____ 试验者 _____
 钻孔编号 _____ 计算者 _____
 土样说明 _____ 校核者 _____

试验日期	年		月				试样状态
			日				
试样编号							
仪器编号							
毛管水上升高度 (cm)	日	时	分				试样干密度 (ρ_d) = g/cm ³ 试样孔隙比 (e_0) =

3 土样管法

3.1 仪器设备

3.1.1 土样管毛管仪（图 3.1.1）。

1 玻璃筒（或金属筒）：直径 4~6 cm，高约 12 cm。

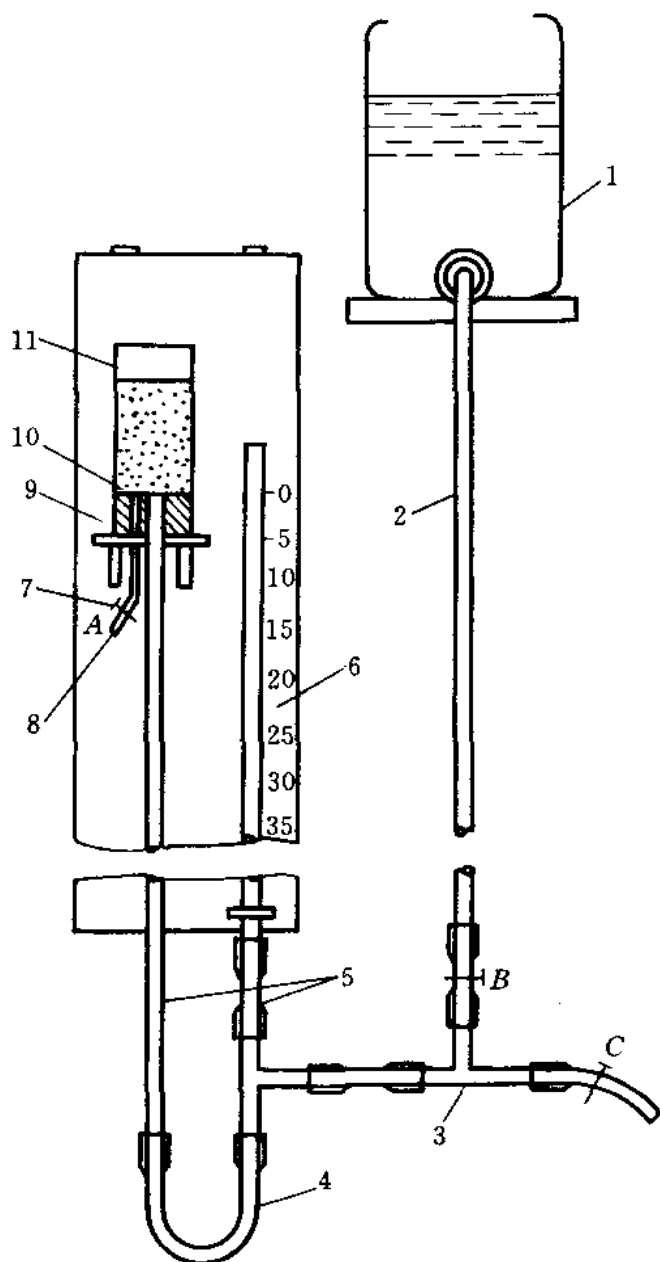


图 3.1.1 土样管毛管仪

1—供水瓶；2—玻璃管；3—三接头；4—橡皮管；
 5—测压管；6—直尺；7—管夹；8—排气管；9—橡皮塞；10—筛布；11—玻璃筒

- 2 测压管：直径 0.5~1.0 cm，长约 200 cm。
- 3 直尺：分度值 0.5 cm，其零点与试样面齐平。

3.1.2 天平：称量 2000 g，分度值 0.1 g。

3.1.3 其他：烘箱，干燥缸，捣棒，切土筒（直径比玻璃筒略小），修土刀，称量盒等。

3.2 仪器设备的检定和校验

3.2.1 天平按相应的检定规程进行检定。

3.2.2 直尺：参考 JJG1—89《钢直尺检定规程》进行检定。

3.3 操作步骤

3.3.1 关好管夹 A、B、C。供水瓶注满水，取代表性风干土样约 500~600 g，经分散后倒入铺有筛布的玻璃筒中，并逐次用捣棒捣实，使其均匀，达到所需的孔隙比，直至试样高度达 8.0 cm 为止，测定试样密度。

3.3.2 对原状土样，用切土筒削取试样高约 8.0 cm，测定含水率和密度。并将试样推入玻璃筒中，使距玻璃筒端约 2 cm。四周间隙用蜡密封，不使其漏气。玻璃筒下口用铺有筛布的橡皮塞塞紧，并采取封密措施。

土中含有较多粘土颗粒时，则在筛布上铺一层约 1 cm 厚粗砂缓冲层。此时，直尺零点应与缓冲层顶齐平。

3.3.3 开管夹 A、B，使水缓缓地经测压管上升至试样下部。排除管内空气至排气管流出的水中无气泡时，关管夹 A、B。

3.3.4 徐徐间断开或关管夹 B，使水缓缓地由下而上地饱和试样，至试样表面见水时，关管夹 B。

3.3.5 徐徐开管夹 C，使右边测压管之水面逐渐下降，至管内水面停止下降或开始升高时，记下此时测压管中水面读数，即为毛管水上升高度。

3.3.6 按本规程 3.3.3~3.3.5 的规定重复 1 次，取 2 次测定结果的算术平均值，以整数 (cm) 表示。如 2 次试验结果相差太大，应重做试验。

3.4 记录

3.4.1 本试验的记录格式如表 3.4.1。

表 3.4.1 毛管水上升高度试验记录表 (土样管法)

工程名称 _____

试验者 _____

钻孔编号 _____

计算者 _____

土样说明 _____

校核者 _____

试验日期			月						
			日						
土 样 编 号									
仪 器 编 号									
试样质量	g	(1)							
试样体积	cm ³	(2)							
密 度	g/cm ³	(3)	$\frac{(1)}{(2)}$						
含水率	%	(4)							
干密度	g/cm ³	(5)	$\frac{(3)}{1+0.01(4)}$						
土粒比重		(6)							
孔隙比		(7)	$\frac{(6)}{(5)} - 1$						
毛管水上升高度	cm								
平均值	cm								

相对密度试验

SL237—010—1999

1 定义和适用范围

1.0.1 相对密度是无粘性土处于最松状态的孔隙比与天然状态孔隙比之差和最松状态孔隙比与最紧密状态的孔隙比之差的比值。

1.0.2 本试验的目的是测定无粘性土的最大与最小孔隙比,用于计算相对密度。最大孔隙比试验宜采用漏斗法和量筒法;最小孔隙比试验采用振动锤击法。

1.0.3 本规程适用于颗粒粒径小于 5 mm 而能自由排水的砂砾土。

2 最大孔隙比试验

2.1 仪器设备

2.1.1 量筒:容积为 500ml 及 1000ml 两种,后者内径应大于 6cm。

2.1.2 长颈漏斗:颈管内径约 1.2 cm,颈口磨平(图 2.1.2)。

2.1.3 锥形塞:直径约 1.5 cm 的圆锥体镶于铁杆上。

2.1.4 砂面拂平器(图 2.1.2)。

2.1.5 天平:称量 1000 g,分度值 1 g。

2.2 仪器设备的检定和校准

2.2.1 量筒:应按 JJG169—90《常用玻璃量器检定规程》进行检定。

2.2.2 天平:应按相应的检定规程进行检定。

2.3 操作步骤

2.3.1 取代表性的烘干或充分风干试样约 1.5 kg,用手搓揉或

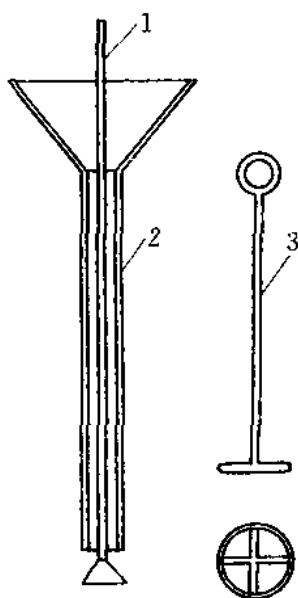


图 2.1.2 漏斗
及拂平器

1—锥形塞；2—长颈漏斗；3—砂面拂平器

用圆木棍在橡皮板上碾散，并拌和均匀。

2.3.2 将锥形塞杆自漏斗下口穿入，并向上提起，使锥体堵住漏斗管口，一并放入体积 1000 ml 量筒中，使其下端与筒底接触。

2.3.3 称取试样 700 g，准确至 1 g，均匀倒入漏斗中，将漏斗与塞杆同时提高，然后下放塞杆使锥体略离开管口，管口应经常保持高出砂面约 1~2 cm，使试样缓缓且均匀分布地落入量筒中。

2.3.4 试样全部落入量筒后，取出漏斗与锥形塞，用砂面拂平器将砂面拂平，勿使量筒振动，然后测读砂样体积，估读至 5 ml。

2.3.5 用手掌或橡皮板堵住量筒口，将量筒倒转，然后缓慢地转回原来位置，如此重复几次，记下体积的最大值，估读至 5 ml。

2.3.6 取上述两种方法测得的较大体积值，计算最大孔隙比。

3 最小孔隙比试验

3.1 仪器设备

3.1.1 金属容器，有两种：

1 容积 250 ml，内径 5 cm，高 12.7 cm。

2 容积 1000 ml，内径 10 cm，高 12.75 cm。

3.1.2 振动叉：见图 3.1.2。

3.1.3 击锤：锤质量 1.25 kg，落高 15 cm，锤底直径 5 cm，见图 3.1.3。

3.1.4 台秤：称量 5000 g，分度值 1 g。

3.2 仪器设备的检定和校准

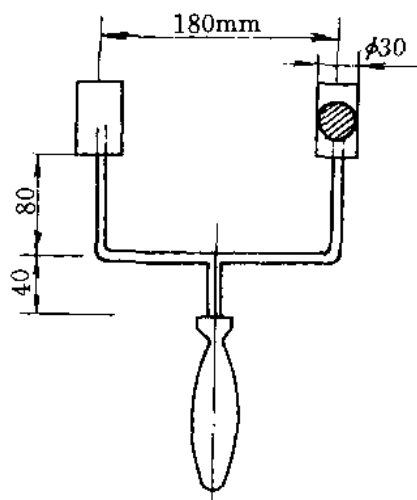


图 3.1.2 振动叉

3.2.1 金属容器：应参照 JJG209—94《体积管检定规程》进行检定。

3.2.2 台秤：应按相应的检定规程进行检定。

3.3 操作步骤

3.3.1 取代表性的试样约 4 kg，按本规程 2.3.1 的规定处理。

3.3.2 分 3 次倒入容器进行振击。先取上述试样 600~800 g（其数量应使振击后的体积略大于容器容积的 1/3）倒入 1000 ml 容器内，用振动叉以每分钟各 150~200 次的速度敲打容器两侧，并在同一时间内，用击锤于试样表面每分钟锤击 30~60 次，直至砂样体积不变为止（一般击 5~10 min）。敲打时要用足够的力量使试样处于振动状态；锤击时，粗砂可用较少击数，细砂应用较多击数。

3.3.3 按本规程 3.3.2 的规定，进行后 2 次的装样、振动和锤击，第 3 次装样时应先在容器口上安装套环。

3.3.4 最后 1 次振毕，取下套环，用修土刀齐容器顶面削去多余试样，称容器内试样质量，准确至 1 g，并记录试样体积，计算其最小孔隙比。

3.3.5 最小与最大密度，均需进行 2 次平行测定，取其算术平均值，其平行差值不得超过 0.03 g/cm³。

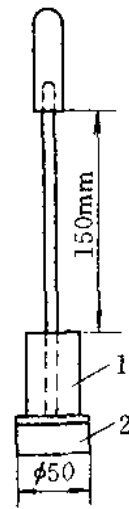


图 3.1.3 击锤

1—击锤；
2—锤座

4 计 算

4.0.1 按式 (4.0.1-1)、式 (4.0.1-2) 计算最小与最大干密度：

$$\rho_{dmin} = \frac{m_d}{V_{max}} \quad (4.0.1-1)$$

$$\rho_{dmax} = \frac{m_d}{V_{min}} \quad (4.0.1-2)$$

式中 $\rho_{d\min}$ ——最小干密度， g/cm^3 ；
 $\rho_{d\max}$ ——最大干密度， g/cm^3 ；
 m_d ——试样干质量， g ；
 V_{\max} ——试样之最大体积， cm^3 ；
 V_{\min} ——试样之最小体积， cm^3 。

计算至 $0.01 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

4.0.2 按式 (4.0.2-1)、式 (4.0.2-2) 计算最大与最小孔隙比：

$$e_{\max} = \frac{\rho_w G_s}{\rho_{d\min}} - 1 \quad (4.0.2-1)$$

$$e_{\min} = \frac{\rho_w G_s}{\rho_{d\max}} - 1 \quad (4.0.2-2)$$

式中 e_{\max} ——最大孔隙比；
 e_{\min} ——最小孔隙比；
 ρ_w ——水的密度， g/cm^3 ；
 G_s ——土粒比重；

其余符号见本规程式 (4.0.1-1) 和式 (4.0.1-2)。

计算至 0.01 。

4.0.3 按式 (4.0.3-1) 和式 (4.0.3-2) 计算相对密度：

$$D_r = \frac{e_{\max} - e_0}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (4.0.3-1)$$

$$D_r = \frac{(\rho_d - \rho_{d\min})\rho_{d\max}}{(\rho_{d\max} - \rho_{d\min})\rho_d} \quad (4.0.3-2)$$

式中 D_r ——相对密度；
 e_0 ——天然孔隙比或填土的相应孔隙比；
 ρ_d ——天然干密度或填土的相应干密度， g/cm^3 ；
 其余符号见本规程式 (4.0.1-1)、式 (4.0.1-2)。

计算至 0.01 。

5 记 录

5.0.1 本试验记录格式如表 5.0.1。

表 5.0.1 相对密度试验记录表

工程名称 _____
 土样编号 _____
 土样说明 _____
 试验日期 _____

试验者 _____
 计算者 _____
 校核者 _____

试 验 项 目			最大孔隙比	最小孔隙比	备注
试 验 方 法			漏 斗 法	振 打 法	
试样加容器质量 (g)	(1)				
容器质量 (g)	(2)				
试样质量 (g)	(3)	(1) - (2)			
试样体积 (cm ³)	(4)				
干密度 (g/cm ³)	(5)	(3) ÷ (4)			
平均干密度 (g/cm ³)	(6)				
比重 G _s	(7)				
孔隙比 e	(8)				
天然干密度 (g/cm ³)	(9)				
天然孔隙比 e ₀	(10)				
相对密度 D _r	(11)				

击实试验

SL237—011—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 本试验的目的是用标准的击实方法,测定土的密度与含水率的关系,从而确定土的最大干密度与最优含水率。

1.0.2 本规程分为轻型击实试验和重型击实试验2种方法。轻型击实试验适用于粒径小于5mm的粘性土,其单位体积击实功能为 592.2 kJ/m^3 ;重型击实试验适用于粒径小于20mm的土,其单位体积击实功能为 2684.9 kJ/m^3 。

2 引用标准

GB/T15406—94《土工仪器的基本参数及通用技术条件》第一篇:室内土工仪器。

GB7960--87《击实仪》。

SL112-95《击实仪校验方法》。

3 仪器设备

3.1 仪器设备

3.1.1 击实仪:由击实筒(图3.1.1-1)、击锤(图3.1.1-2)和护筒组成,其尺寸应符合表3.1.1的规定。

3.1.2 击实仪的击锤应配导筒,击锤与导筒间应有足够的间隙使锤能自由下落。电动操作的击锤必须有控制落距的跟踪装置和锤击点按一定角度(轻型 53.5° 重型 45°)均匀分布的装置。

3.1.3 天平:称量200g,分度值0.1g。

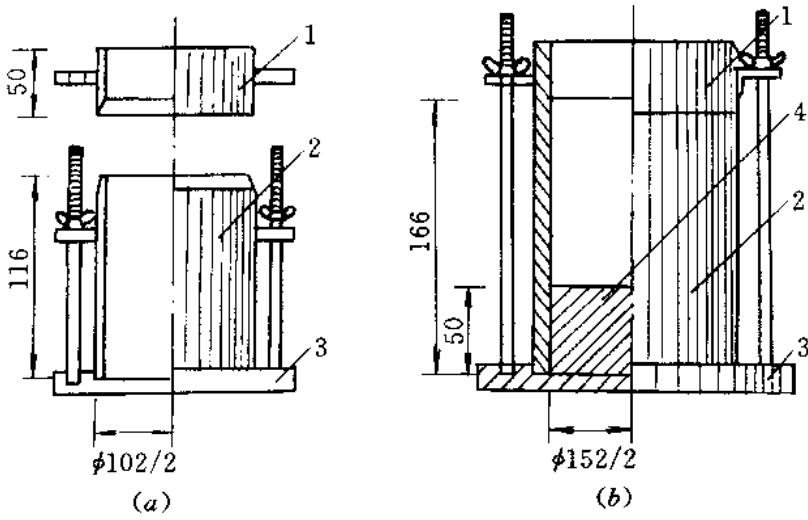
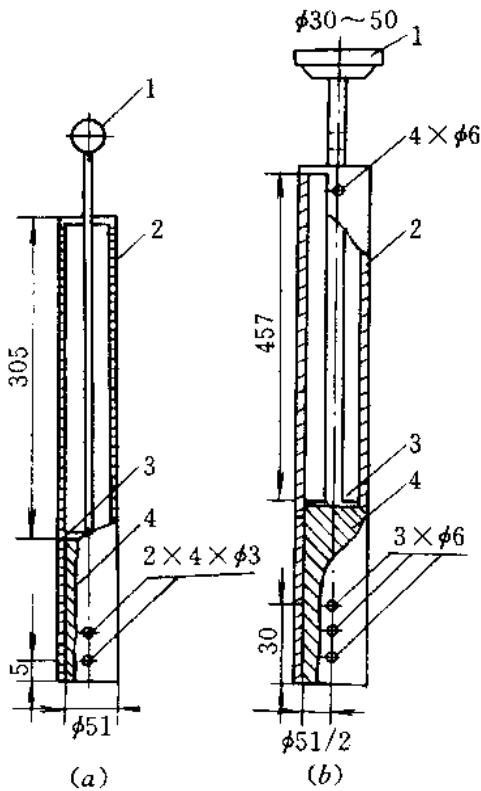


图 3.1.1-1 击实筒 (单位: mm)
 (a) 轻型击实筒; (b) 重型击实筒
 1—护筒; 2—击实筒; 3—底板; 4—垫块



3.1.1-2 击锤和导筒 (单位 mm)
 (a) 2.5 kg 击锤 (落高 305cm);
 (b) 4.5 kg 击锤 (落高 457cm)
 1—提手; 2—导筒; 3—硬橡胶垫; 4—击锤

- 3.1.4 台秤：称量 10 kg，分度值 5 g。
- 3.1.5 标准筛：孔径为 20 mm 圆孔筛和 5 mm 标准筛。
- 3.1.6 试样推出器：宜用螺旋式千斤顶或液压式千斤顶，如无此类装置，也可用刮刀和修土刀从击实筒中取出试样。
- 3.1.7 其他：烘箱、喷水设备、碾土设备、盛土器、修土刀和保湿设备等。

3.2 仪器设备的检定和校准

- 3.2.1 击实仪应按 SL112—95 校验方法进行校验。
- 3.2.2 天平和其他计量器具应按有关检定规程进行检定。
- 3.2.3 试验前、后应对仪器的性能（特别是对落距跟踪装置）进行检查并作记录。

表 3.1.1 击实仪主要部件尺寸规格表

试验方法	锤底直径 (mm)	锤质量 (kg)	落高 (mm)	击实筒			护筒高度 (mm)	备注
				内径 (mm)	筒高 (mm)	容积 (cm ³)		
轻型	51	2.5	305	102	116	947.4	≥50	
重型	51	4.5	457	152	116	2103.9	≥50	

4 操作步骤

4.1 试样制备

4.1.1 试样制备分为干法制备和湿法制备

1 干法制备。取一定量的代表性风干土样（轻型约为 20 kg，重型约为 50 kg），放在橡皮板上用木碾碾散（也可用碾土器碾散），并分别按下列方法备样。

(1) 轻型击实试验过 5 mm 筛，将筛下土样拌匀，并测定土样

的风干含水率。根据土的塑限预估最优含水率，按依次相差约 2% 的含水率制备一组（不少于 5 个）试样，其中应有 2 个含水率大于塑限，2 个含水率小于塑限，1 个含水率接近塑限。并按式 (4.1.1) 计算应加水量：

$$m_w = \frac{m}{1 + 0.01w_0} \times 0.01(w - w_0) \quad (4.1.1)$$

式中 m_w ——土样所需加水质量，g；

m ——风干含水率时的土样质量，g；

w_0 ——风干含水率，%；

w ——土样所要求的含水率，%。

(2) 重型击实试验过 20 mm 筛，将筛下土样拌匀，并测定土样的风干含水率。按依次相差约 2% 的含水率制备一组（不少于 5 个）试样，其中至少有 3 个含水率小于塑限的试样。然后按本规程式 (4.1.1) 计算加水量。

(3) 将一定量土样平铺于不吸水的盛土盘内（轻型击实取土样约 2.5 kg，重型击实取土样约 5.0 kg），按预定含水率用喷水设备往土样上均匀喷洒所需加水量，拌匀并装入塑料袋内或密封于盛土器内静置备用。静置时间分别为：高液限粘土 (CH) 不得少于 24h，低液限粘土 (CL) 可酌情缩短，但不应少于 12 h。

2 湿法制备。取天然含水率的代表性土样（轻型为 20 kg，重型为 50 kg）碾散，按重型和轻型击实要求过筛，将筛下土样拌匀，分别风干或加水到所要求的不同含水率。制备试样时必须使土样中含水率分布均匀。

4.2 试样击实

4.2.1 将击实仪放在坚实的地面上，击实筒内壁和底板涂一薄层润滑油，联接好击实筒与底板，安装好护筒。检查仪器各部件及配套设备的性能是否正常，并做好记录。

4.2.2 从制备好的一份试样中称取一定量土料，分 3 层或 5 层倒入击实筒内并将土面整平，分层击实。对于分 3 层击实的轻型击实法，每层土料的质量为 600~800 g（其量应使击实后试样的高

度略高于击实筒的 1/3), 每层 25 击; 对于分 5 层击实的重型击实法, 每层土料的质量宜为 900~1100 g (其量应使击实后的试样高度略高于击实筒的 1/5), 每层 56 击。如为手工击实, 应保证使击锤自由铅直下落, 锤击点必须均匀分布于土面上; 如为机械击实, 可将定数器拨到所需的击数处, 按动电钮进行击实。重型击实试验应保证作用到击实筒中央土层上的功能与周围土层相等 (击实仪中心点每圈加一击)。击实后的每层试样高度应大致相等, 两层交接面的土面应刨毛。击实完成后, 超出击实筒顶的试样高度应小于 6 mm。

4.2.3 用修土刀沿护筒内壁削挖后, 扭动并取下护筒, 测出超高 (应取多个测值平均, 准确至 0.1 mm)。沿击实筒顶细心修平试样, 拆除底板。如试样底面超出筒外, 亦应修平。擦净筒外壁, 称量, 准确至 1 g。

4.2.4 用推土器从击实筒内推出试样, 从试样中心处取 2 个一定量土料 (轻型为 15~30 g, 重型为 50~100 g) 平行测定土的含水率, 称量准确至 0.01 g, 含水率的平行误差不得超过 1%。

4.2.5 按本规程 4.2.1~4.2.4 的规定对其他含水率的土样进行击实。一般不重复使用土样。

5 计算及制图

5.1 计算

5.1.1 按式 (5.1.1) 计算击实后各试样的含水率:

$$w = (m/m_d - 1) \times 100 \quad (5.1.1)$$

式中 w ——含水率, %;

m ——湿土质量, g;

m_d ——干土质量, g。

5.1.2 按式 (5.1.2) 计算击实后各试样的干密度:

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0.01w} \quad (5.1.2)$$

式中 ρ_d ——干密度, g/cm^3 ;
 ρ ——湿密度, g/cm^3 ;
 w ——含水率, %。

计算至 $0.01 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

5.1.3 按式 (5.1.3) 计算土的饱和含水率:

$$w_{\text{sat}} = \left(\frac{\rho_w}{\rho_d} - \frac{1}{G_s} \right) \times 100 \quad (5.1.3)$$

式中 w_{sat} ——饱和含水率, %;

G_s ——土粒比重;

ρ_w ——水的密度, g/cm^3 ;

其余符号见本规程式 (5.1.2)。

5.2 制图

5.2.1 以干密度为纵坐标, 含水率为横坐标, 绘制干密度与含水率的关系曲线。曲线上峰值点的纵、横坐标分别代表土的最大干密度和最优含水率, 如图 5.2.1。如果曲线不能给出峰值点, 应进行补点试验。

5.2.2 按本规程式 (5.1.3) 计算数个干密度下土的饱和含水率。

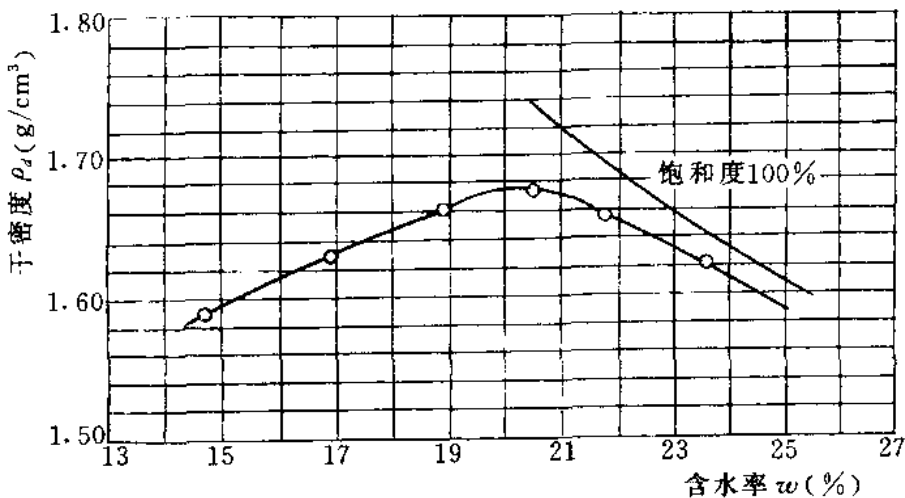


图 5.2.1 $\rho_d \sim w$ 关系曲线

以干密度为纵坐标，含水率为横坐标，在图 5.2.1 上绘制饱和曲线。

5.3 校正

5.3.1 轻型击实试验中，当粒径大于 5 mm 的颗粒含量小于 30% 时，应按式 (5.3.1) 计算校正后的最大干密度：

$$\rho'_{dmax} = \frac{1}{\frac{1-P}{\rho_{dmax}} + \frac{P}{G_{S2}\rho_w}} \quad (5.3.1)$$

式中 ρ'_{dmax} ——校正后的最大干密度，g/cm³；

ρ_{dmax} ——粒径小于 5 mm 试样的最大干密度，g/cm³；

ρ_w ——水的密度，g/cm³；

P ——粒径大于 5 mm 颗粒的含量（用小数表示）；

G_{S2} ——粒径大于 5 mm 颗粒的干比重。

计算至 0.01 g/cm³。

5.3.2 轻型击实试验中，当粒径大于 5 mm 的颗粒含量小于 30% 时，应按式 (5.3.2) 计算校正后的最优含水率：

$$w'_{op} = w_{op}(1-P) + Pw_2 \quad (5.3.2)$$

式中 w'_{op} ——校正后的最优含水率，%；

w_{op} ——粒径小于 5 mm 试样的最优含水率，%；

w_2 ——粒径大于 5 mm 颗粒的吸着含水率，%；

其余符号见本程式 (5.3.1)。

计算至 0.01%。

6 记 录

6.0.1 本试验记录格式如表 6.0.1。

表 6.0.1 击实试验记录表

工程编号 _____

土粒比重 _____

试验者 _____

土样编号 _____

每层击数 _____

计算者 _____

仪器编号 _____

风干含水率 _____

校核者 _____

土样类别 _____

试验日期 _____

试验 序号	干 密 度					含 水 率								
	筒加土 质量 (g)	筒质量 (g)	湿土 质量 (g)	密度 (g/cm ³)	干密度 (g/cm ³)	盒 号	盒加湿 土质量 (g)	盒加干 土质量 (g)	盒质量 (g)	湿土 质量 (g)	干土 质量 (g)	含水率 (%)	平 均 含水率 (%)	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)		(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	
			(1) - (2)	$\frac{(3)}{V}$	$\frac{(4)}{1+0.01(12)}$					(6) - (8)	(7) - (8)	$\left(\frac{(9)}{(10)} - 1 \right)$ ×100		
最大干密度:				g/cm ³	最优含水率:				%	饱和度:				%
大于 5 mm 颗粒含量:				%	校正后最大干密度:				g/cm ³	校正后最优含水率:				%

承载比试验

SL237—012—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 本试验的目的是采用贯入法,通过测定土在承受标准贯入探头贯入土中时相应的承载力,求取扰动土的承载比。

1.0.2 本规程宜用于粒径在 20 mm 以内,最大粒径不得超过 38 mm 的试样。

2 引用标准

SL237—011—1999 《击实试验》。

GB7960—87 《击实仪》。

SL112—95 《击实仪校验方法》。

3 仪器设备

3.1 仪器设备

3.1.1 击实仪:应符合 GB7960—87 规定的技术要求。其主要部件的尺寸应符合以下规定。

1 击实筒:内径 152 mm,高 166 mm 的金属圆筒;击实筒内底板上放置垫块,垫块直径为 151 mm,高 50 mm,护筒高度 50 mm。

2 击锤和导筒:锤底直径 51 mm,锤质量 4.5 kg,落距 457 mm;击锤与导筒之间的空隙应符合 GB7960—87 的规定。

3.1.2 标准筛:孔径为 20 mm 和 5 mm。

3.1.3 台秤:称量 20 kg,分度值 5 g。

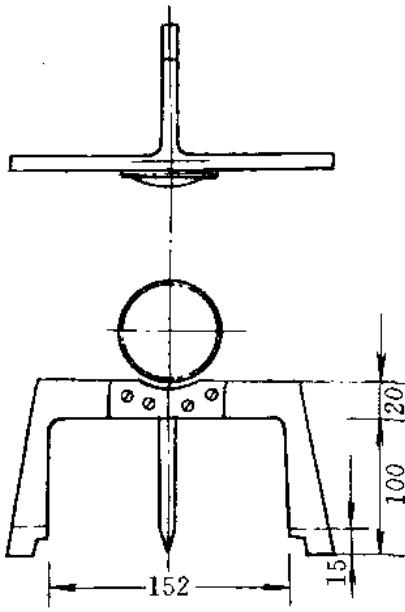


图 3.1.4 膨胀量测定装置
(单位: mm)

天平: 称量 200 g, 分度值 0.01 g。

3.1.4 膨胀量测定装置 (图 3.1.4): 由百分表和三脚架组成。

3.1.5 有孔底板: 孔径宜小于 2 mm, 底板上应配有可紧密联接击实筒的装置; 带调节杆的多孔顶板 (图 3.1.5)。

3.1.6 荷载块 (图 3.1.6): 直径 150 mm, 中心孔直径 52 mm; 每块质量 1.25 kg, 共 4 块; 并沿直径分为两个半圆块。

3.1.7 水槽: 槽内水面应高出试样顶面 25 mm。

3.1.8 贯入仪 (图 3.1.8) 应由下列部件组成。

1 加荷和测力设备: 量程应不低于 50 kN, 最小贯入速度应能调节至 1 mm/min。

2 贯入杆: 杆的端面直径 50 mm, 杆长 100 mm, 杆上应配有安装百分表的夹孔。

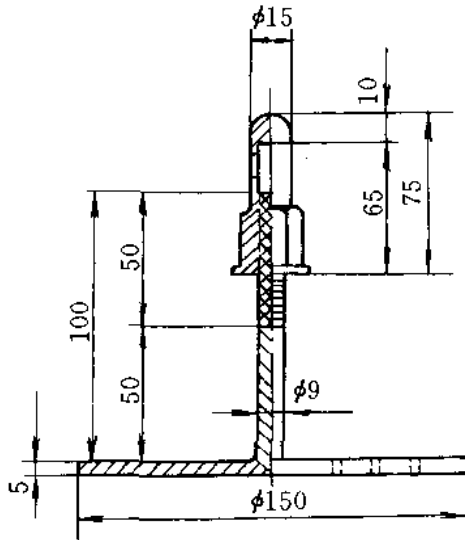


图 3.1.5 带调节杆的多孔顶板
(单位: mm)

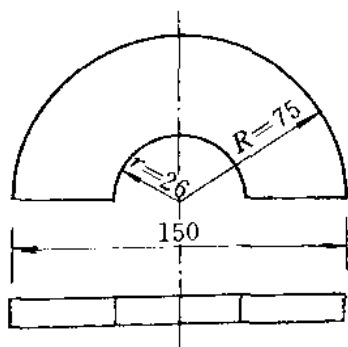


图 3.1.6 荷载块 (单位: mm)

3 百分表: 2 只, 量程 10 mm。分度值 0.01 mm。

4 秒表: 分度值 0.1 s。

3.1.9 其他设备: 刮刀, 修土刀, 直尺, 量筒, 土样推出器, 烘箱, 盛土盘等。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 试验前应对试验设备的技术性能进行检验, 并作记录。

3.2.2 测力计: 参照 JJG144—92《标准测力计检定规程》进行检定。

3.2.3 百分表: 应按 JJG34—84《百分表检定规程》进行检定。

3.2.4 秒表等通用计量器具应按有关检定规程进行检定。

3.2.5 击实仪等专用仪器应按 SL112—95 校验方法进行校验。

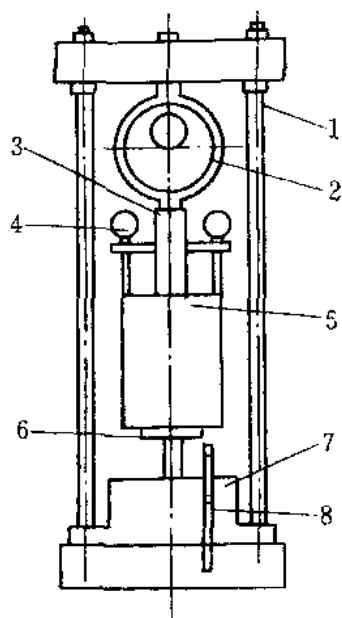


图 3.1.8 贯入仪示意图

1—框架; 2—测力计; 3—贯入杆;
4—百分表; 5—试件; 6—升降台;
7—蜗轮蜗杆箱; 8—摇柄

4 操作步骤

4.1 试样制备

4.1.1 按 SL237—011—1999 规程 4.1.1 规定的重型击实试验进行试样制备。其中土样需过 20 mm 或 38 mm 筛, 以筛除大于 20 mm 或 38 mm 的颗粒, 并记录超径颗粒的百分数; 按需要制备数份试样, 每份试样质量约为 6.0 kg。

4.1.2 按 SL237—011—1999 规程 4.2.1~4.2.5 规定进行重型

击实试验,求取最大干密度和最优含水率。对含有最大粒径38 mm 颗粒的土,可分3层击实,每层90击。

4.1.3 以本规程4.1.2规定求取的最优含水率,按SL237—011—1999规程4.1.1重型击实试验方法制备试样,应制备3个试样,并按SL237—011—1999规程4.2.1至4.2.5规定进行重型击实试验。对粒径小于20 mm的土样分5层击实,对含粒径38 mm的土样分3层击实,击实完成后试样超高应小于6 mm。

4.1.4 卸下护筒,沿击实筒顶修平试样,表面不平整处宜细心用细料修补,取出垫块,称击实筒和试样的质量。

4.2 浸水膨胀

4.2.1 将一层滤纸铺于试样表面,放上有孔底板,并用拉杆将击实筒与有孔底板固定好。

4.2.2 倒转击实筒,取一层滤纸铺于试样的另一表面,并在该面上放置带有调节杆的多孔顶板,再放上4块荷载块。

4.2.3 将整个装置放入水槽(先不放水),安装好膨胀量测定装置,并读取初读数。

4.2.4 向水槽内缓缓注水,使水自由进入试样的顶部和底部,注水后水槽内水面应保持在试样顶面以上大约25 mm左右(图4.2.4);通常试样要浸水4天。

4.2.5 根据需要以一定时间间隔读取百分表的读数。浸水终了时,读取终读数。并用式(4.2.5)计算膨胀率。

$$\delta_w = \frac{\Delta h_w}{h_0} \times 100 \quad (4.2.5)$$

式中 δ_w ——浸水后试样的膨胀率, %;

Δh_w ——浸水后试样的膨胀量, mm;

h_0 ——试样的初始高度(116 mm)。

4.2.6 卸下膨胀量测定装置(即带百分表的三角架),从水槽中取出试样,吸去试样顶面的水,静置15 min让其排水,然后卸去荷载块、多孔顶板和有孔底板,取下滤纸,并称量,以计算试样的含水率与密度的变化。

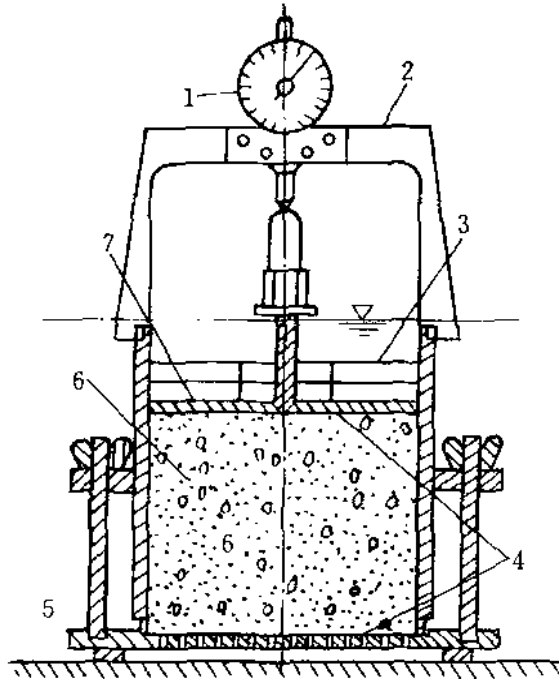


图 4.2.4 浸水膨胀试验装置

1—百分表；2 三角架；3—荷载板；4—滤纸；5—多孔底板；6—试样；7 多孔顶板

4.3 贯入试验

4.3.1 将浸水终了的试样（带击实筒）放到贯入仪的升降台上，应注意不要使击实筒壁压到升降台，调整升降台的高度，使贯入杆与试样顶面刚好接触，并在试样顶面放上本规程 4.2.2 规定的 4 块荷载块。

4.3.2 先在贯入杆上施加 45 N 荷载，然后将测力计量表和测变形的量表读数都调整至零点。

4.3.3 加荷使贯入杆以 1~1.25 mm/min 的速度压入试样，按测力计内量表的某些整读数（如 20、40、60）记录相应的贯入量，并使贯入量达 2.5 mm 时，能有 5 个以上的读数。当贯入量读数为 10~12.5 mm 时可终止试验。

4.3.4 应进行 3 个试样的平行试验，每个试样间的干密度之差应不大于 0.03 g/cm^3 。当 3 个试样试验结果所得承载比的变异系数 C_v 大于 12% 时，则去掉一个偏离大的值，取其余 2 个结果的平均

值，当 C_v 小于 12%，则取 3 个结果的平均值。

5 计算及制图

5.1 计算

5.1.1 由 $p \sim l$ 曲线上获取贯入量为 2.5 mm 和 5.0 mm 时的单位压力值，按下列公式分别计算各自的承载比，即 CBR 。

1 按式 (5.1.1-1) 计算贯入量为 2.5 mm 时的承载比：

$$CBR_{2.5} = \frac{p}{7000} \times 100 \quad (5.1.1-1)$$

式中 $CBR_{2.5}$ ——贯入量为 2.5 mm 时的承载比，%；

p ——单位压力，kPa；

7000——贯入量为 2.5 mm 时的标准压力，kPa。

2 按式 (5.1.1-2) 计算贯入量为 5.0 mm 时的承载比：

$$CBR_{5.0} = \frac{p}{10500} \times 100 \quad (5.1.1-2)$$

式中 $CBR_{5.0}$ ——贯入量为 5.0 mm 时的承载比，%；

10500——贯入量为 5.0 mm 的标准压力，kPa。

承载比一般是指贯入量为 2.5 mm 时的承载比，如果贯入量为 5.0 mm 时的承载比大于 2.5 mm 时的承载比时，则试验应重新进行，如果试验结果仍然相同，则采用贯入量为 5.0 mm 时的承载比。

5.1.2 按式 (5.1.2) 计算试样的湿密度：

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (5.1.2)$$

式中 ρ ——试样的湿密度，g/cm³；

m_2 ——击实筒和试样的总质量，g；

m_1 ——击实筒的质量，g；

V ——击实筒的容积，cm³。

5.1.3 按式 (5.1.3) 计算试样的干密度：

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0.01w} \quad (5.1.3)$$

式中 ρ_d ——试样的干密度， g/cm^3 ；

w ——试样的含水率， $\%$ 。

5.1.4 按式 (5.1.4) 计算浸水后试样的吸水量：

$$m_w = m_3 - m_2 \quad (5.1.4)$$

式中 m_w ——浸水后试样的吸水量， g ；

m_3 ——浸水后试样和击实筒的总质量， g ；

其余符号见本规程式 (5.1.2)。

5.2 制图

5.2.1 以单位压力 (p) 为横坐标，贯入量 (l) 为纵坐标，绘制 $p \sim l$ 曲线，如图 5.2.1 所示。图上曲线 1 是合适的，曲线 2 的开始段是凹曲线，需要进行修正。修正的方法为：在变曲率点引一切线，与纵坐标交于 O' 点，这 O' 点即为修正后的原点。

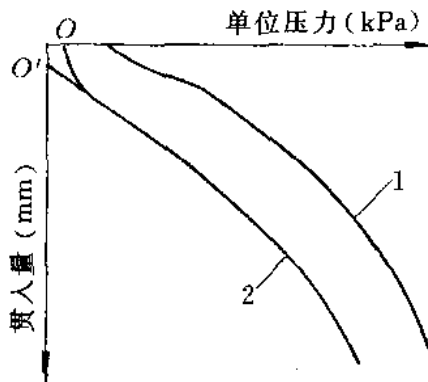


图 5.2.1 单位压力与贯入量的关系曲线

6 记 录

6.0.1 本试验试样制备和浸水膨胀的记录格式如表 6.0.1。

6.0.2 本试验贯入试验的记录格式如表 6.0.2。

表 6.0.1 CBR 试验记录表 (膨胀量)

工程名称 _____

试验者 _____

试验日期 _____

计算者 _____

击实筒体积 _____

校核者 _____

试样编号		(1)		1	2	3
击实筒编号		(2)				
含水量	盒加湿土质量 (g)	(3)				
	盒加干土质量 (g)	(4)				
	盒质量 (g)	(5)				
	含水率 (%)	(6)	$\left(\frac{(3)-(5)}{(4)-(5)} - 1 \right) \times 100$			
	平均含水率 (%)	(7)				
密度	筒加试样质量 (g)	(8)				
	筒质量 (g)	(9)				
	湿密度 (g/cm ³)	(10)	$\frac{(8)-(9)}{V}$			
	干密度 (g/cm ³)	(11)	$\frac{(10)}{1+0.01(7)}$			
	干密度平均值 (g/cm ³)	(12)				
膨胀率	浸水前试样高度 (mm)	(13)				
	浸水后试样高度 (mm)	(14)				
	膨胀率 (%)	(15)	$\frac{(14)-(13)}{(13)} \times 100$			
	膨胀率平均值 (%)	(16)				
吸水	浸水后筒加试样质量 (g)	(17)				
	吸水量 (g)	(18)	(17)-(8)			
	吸水量平均值 (g)	(19)				

表 6.0.2 CBR 试验记录表 (贯入)

工程名称 _____ 试验者 _____
 试样说明 _____ 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

击实方法 _____ (次/层)				荷载板质量 m _____ (kg)					
最大干密度 ρ_{dmax} _____ (g/cm ³)				贯入速度 v _____ (mm/min)					
最优含水率 w_{op} _____ (%)				贯入面积 A _____ (cm ²)					
浸水条件 _____				测力计率定系数 C _____ (N/0.01 mm)					
试样编号 No					试样编号 No				
贯入量 (0.01 mm)			荷载 (kPa)		贯入量 (0.01 mm)			荷载 (kPa)	
量表 I	量表 II	平均值	测力计 读数	单位 压力	量表 I	量表 II	平均值	测力计 读数	单位 压力
$CBR_{2.5} =$ _____ (%)				$CBR_{2.5} =$ _____ (%)					
$CBR_{5.0} =$ _____ (%)				$CBR_{5.0} =$ _____ (%)					
$CBR =$ _____ (%)				$CBR =$ _____ (%)					
平均 $CBR =$ _____ (%)									

回弹模量试验

SL237—013—1999

1 目的和适用范围

- 1.0.1 本试验的目的是通过对试样进行规定压力下的加载和卸载，测定土的回弹变形量，以确定土的回弹模量值。
- 1.0.2 本试验采用杠杆压力仪法和强度仪法。杠杆压力仪法用于含水率较大、硬度较小的试样。
- 1.0.3 本规程适用于不同含水率和不同干密度的细粒土。

2 引用标准

SL237—011—1999 《击实试验》。

SL112—95 《击实仪校验方法》。

SL114—95 《杠杆式固结仪校验方法》。

3 杠杆仪法

3.1 仪器设备

3.1.1 杠杆压力仪：最大压力 1500 N，如图 3.1.1 所示。

3.1.2 击实筒：内径 152 mm，高 166 mm 的金属圆筒，其形式和尺寸应符合 SL237—011—1999 规程 3.1.1 的规定。但在与夯击底板的立柱联接的缺口板上多一个内径 5 mm、深 5 mm 的螺丝孔，用来安装千分表支架。

护筒：高 50 mm；筒内垫块：直径 151 mm，高 50 mm，如图 3.1.2。夯击底板与击实仪同。

3.1.3 承载板：直径 50 mm，高 80 mm，如图 3.1.3。

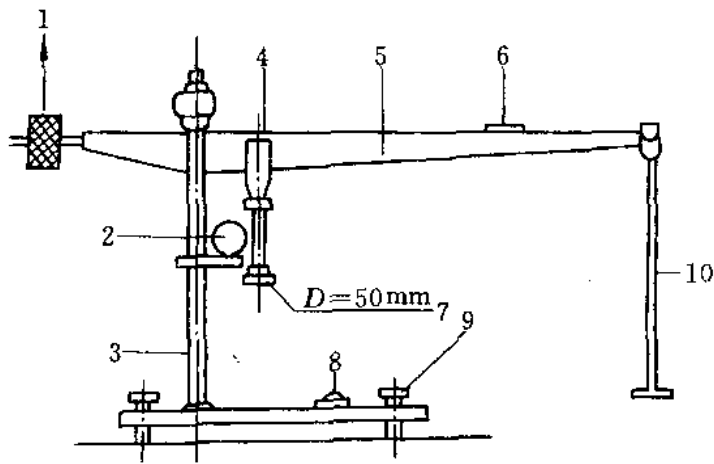


图 3.1.1 杠杆压力仪

1—调平砝码；2—千分表；3—立柱；4—加压杆；5—水平杠杆；6—水平气泡；7—加压球座；8—底座水平气泡；9—调平脚螺丝；10—加载架

3.1.4 千分表：2 只，量程 2.0 mm。分度值 0.001 mm。

3.1.5 秒表：分度值 0.1 s。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 杠杆压力仪：参照 SL114—95 校验方法进行校准。

3.2.2 击实筒：参照 SL112—95 校验方法进行校准。

3.2.3 千分表：参照 JJG34—84《百分表检定规程》进行检定。

3.2.4 试验前，应首先检查仪器各部件性能是否正常，并作记录。

3.3 操作步骤

3.3.1 按 SL237—011—1999 规程的重型击实法制备试样，得出最大干密度和最优含水率。

3.3.2 按最优含水率制备试样，以规定击数在击实筒内制备试样。

3.3.3 将装有试样的击实筒底面放在杠

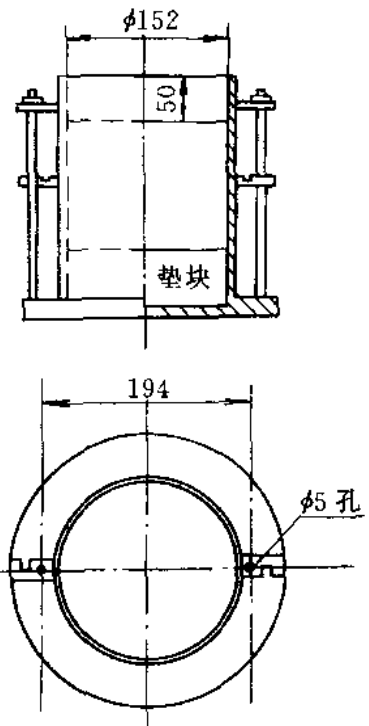


图 3.1.2 击实筒
(单位：mm)

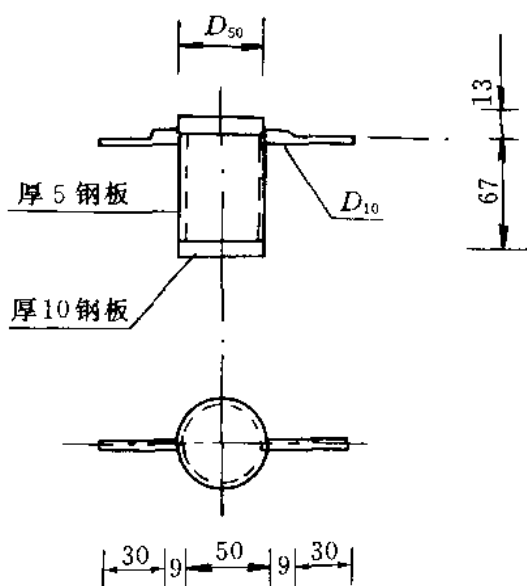


图 3.1.3 承载板 (单位: mm)

杆压力仪的底盘上, 将承载板放在试样的中心位置, 并与杠杆压力仪的加压球座对正。将千分表固定在立柱上, 并将千分表的测头安放在承载板的表架上。

3.3.4 在杠杆压力仪的加载架上施加砝码, 用预定的最大压力 p 进行预压。对含水率大于塑限的土, $p=50\sim 100$ kPa; 对含水率小于塑限的土, $p=100\sim 200$ kPa。预压应进行 1~2 次, 每次预压 1 min 卸载。预

压后调整承载板位置, 并将千分表调到零位。

3.3.5 将预定的最大压力分为 4~6 级进行加载, 每级加载时间为 1 min, 记录千分表读数, 同时卸载, 当卸载 1 min 时, 记录千分表读数, 再施加下一级荷载。如此逐级进行加载和卸载, 并记录千分表读数, 直至最后一级荷载。为使试验曲线的开始部分比较准确, 可将第 1、第 2 级荷载再分别分成 2 小级进行加载和卸载。试验中的最大压力也可略大于预定的最大压力。

3.3.6 土的回弹模量测定应进行 3 次平行试验, 每次试验结果与回弹模量的均值之差应不超过 5%。

3.4 计算及制图

3.4.1 按式 (3.4.1) 计算每级荷载下试样的回弹模量:

$$E = \frac{\pi p D}{4l} (1 - \mu^2) \quad (3.4.1)$$

式中 E ——回弹模量, kPa;

p ——承载板上的压力, kPa;

D ——承载板直径, cm (5.0 cm);

l ——相应于压力的回弹变形 (加载读数减卸载读数), cm;

μ ——土的泊松比，一般取 0.35。

3.4.2 以压力 p 为横坐标，回弹变形 l 为纵坐标，绘制 $p \sim l$ 曲线，如图 3.4.2。

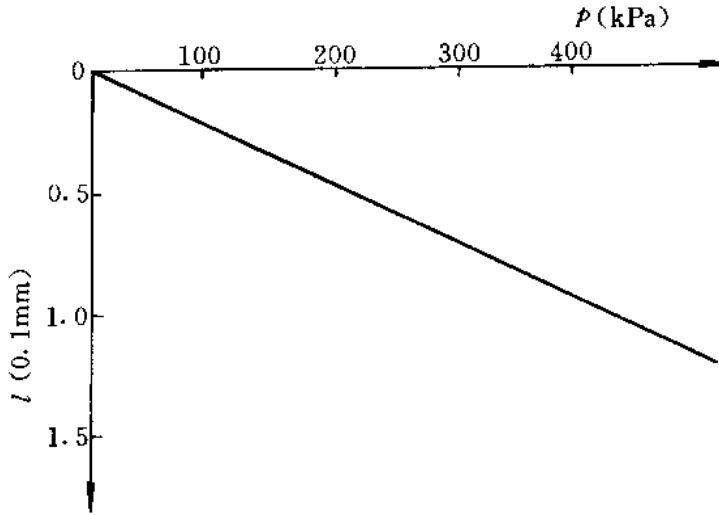


图 3.4.2 压力与回弹变形 ($p \sim l$) 的关系曲线

3.4.3 每个试样的回弹模量取 $p \sim l$ 曲线上任一压力与其对应的 l 按本规程式 (3.4.1) 计算。

3.4.4 对于较软的土，如果 $p \sim l$ 曲线不通过原点，允许用初始直线段与纵坐标轴的交点当作原点，修正各级荷载下的回弹变形和回弹模量。

3.5 记录

3.5.1 本试验的记录格式见表 3.5.1。

4 强度仪法

4.1 仪器设备

4.1.1 路面材料强度仪(同 CBR 试验贯入仪)，见 SL237—012—1999 规程图 3.1.8。

4.1.2 击实筒：应符合本规程 3.1.2 的规定。

4.1.3 承载板：应符合本规程 3.1.3 的规定。

4.1.4 千分表(量表)支杆与表夹：支杆长 200 mm，直径 10 mm，

表 3.5.1 回弹模量试验记录表

工程名称 _____ 试验日期 _____
 试样编号 _____ 仪器编号 _____
 土样分类 _____ 试验者 _____
 试验方法 _____ 校核者 _____

加载级数	单位压力 (kPa)	砝码重力 (N)或测力计读数 (0.01 mm)	量表读数 (0.001 mm)						回弹变形 (0.001mm)		回弹模量 (kPa)
			加 载			卸 载			读数值	修正值	
			左	右	平均	左	右	平均			

一端带有长 5 mm 与击实筒上螺丝孔联接的螺丝杆，表夹可用钢制，也可用硬塑料制成。

4.1.5 其他仪器应符合本规程 3.1.4 和 3.1.5 规定。

4.2 仪器设备的检定和校准

4.2.1 强度仪的测力计：应参照 JJG114—92《标准测力仪检定规程》进行检定。

4.2.2 击实筒、千分表：应按本规程 3.2.2 和 3.2.3 进行校验和检定。

4.3 操作步骤

4.3.1 试样制备按本规程 3.3.1 和 3.3.2 规定进行。

4.3.2 将制备好的试样和击实筒的底面放在强度仪的升降台上，千分表支杆拧在击实筒两侧的螺丝孔上，承载板放在试样表面中央位置，并与强度仪的贯入杆对正；千分表和表夹安装在支杆上，并将千分表测头安放在承载板两侧的支架上。

4.3.3 摇动摇把，用预定的最大压力进行预压。预压方法按本规程 3.3.4 规定进行。

4.3.4 将预定的最大压力分为4~6级进行加载。应预先将每级压力折算成测力计百分表的读数，可按百分表读数逐级加载。加载卸载按本规程3.3.5规定进行。当试样较硬时，可以不受预定最大压力值的限制，增加加载级数，至需要的压力为止。

4.3.5 进行平行试验的次数和准确度应符合本规程3.3.6的规定。

4.4 计算及制图

4.4.1 每级压力下试样的回弹模量按本规程式(3.4.1)计算。其中计算中所用 μ 值一般取0.35，对于具有一定龄期的加固土取0.25~0.30。

4.4.2 本试验的 $p \sim l$ 曲线绘制按本规程3.4.2规定进行。

4.5 记录

4.5.1 本试验的记录格式如本规程表3.5.1。

渗透试验

SL237—014—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 本试验的目的是测定土的渗透系数。

1.0.2 土的渗透系数变化范围很大($10^{-1} \sim 10^{-8}$ cm/s), 渗透系数的测定应采用不同的方法。

1 常水头渗透试验: 适用于粗粒土(砂质土)。

2 变水头渗透试验: 适用于细粒土(粘质土和粉质土)。

1.0.3 试验用水应采用实际作用于土中的天然水。如有困难, 允许用纯水或经过滤的清水。在试验前必须用抽气法或煮沸法进行脱气(包括天然水)。试验时的水温宜高于室温 $3 \sim 4^{\circ}\text{C}$ 。

2 引用标准

GB9357-88 《渗透仪》。

GB/T15406-94 《土工仪器的基本参数及通用技术条件》第一篇: 室内土工仪器。

SD191-86 《切土环刀》。

SL110-95 《切土环刀校验方法》。

SL111-95 《透水板校验方法》。

SL115-95 《变水头(常水头)渗透仪校验方法》。

3 常水头渗透试验

3.1 仪器设备

3.1.1 常水头渗透仪(70型渗透仪)。其中: 封底圆筒的尺寸参

数应符合 GB/T15406—94 《室内土工仪器》 4.2.3 的规定；当使用其他尺寸的圆筒时，圆筒内径应大于试样最大粒径的 10 倍。

玻璃测压管内径为 0.6 cm；分度值为 0.1 cm。仪器装置如图

3.1.1。

3.1.2 天平：称量 5000 g，分度值 1.0 g。

3.1.3 温度计：分度值 0.5℃。

3.1.4 其他附属设备：木锤、秒表等。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 天平应按相应的检定规程进行检定。

3.2.2 温度计应按相应检定规程进行检定。

3.2.3 用分度值 0.5 mm 的卡尺校验测压孔间距。

3.3 操作步骤

3.3.1 按图 3.1.1 装好仪器，并检查各管路接头处是否漏水。将调节管与供水管连通，由仪器底部充水至水位略高于金属孔板，关止水夹。

3.3.2 取具有代表性的风干试样 3~4 kg，称量准确至 1.0 g，并测定试样的风干含水率。

3.3.3 将试样分层装入圆筒，每层厚 2~3 cm，用木锤轻轻击实到一定厚度，以控制其孔隙比。如试样含粘粒较多，应在金属孔板上加铺厚约 2 cm 的粗砂过渡层，防止试验时细料流失，并量出过渡层厚度。

3.3.4 每层试样装好后，连接供水管和调节管，并由调节管中进

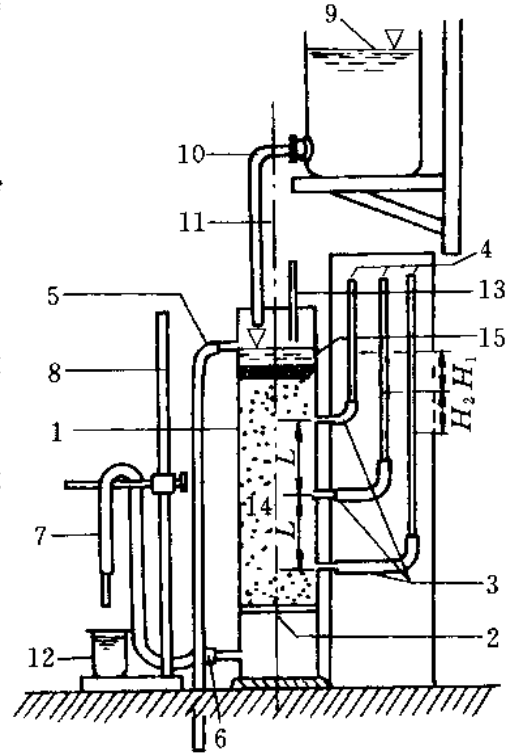


图 3.1.1 常水头渗透仪装置

1—封底金属圆筒；2—金属孔板；3—测压孔；4—玻璃测压管；5—溢水孔；6—渗水孔；7—调节管；8—滑动支架；9—容量为 5000 ml 的供水瓶；10—供水管；11—止水夹；12—容量为 500 ml 的量筒；13—温度计；14—试样；15—砾石层

水，微开止水夹，使试样逐渐饱和。当水面与试样顶面齐平，关止水夹。饱和时水流不应过急，以免冲动试样。

3.3.5 依上述步骤逐层装试样，至试样高出上测压孔 3~4 cm 止。在试样上端铺厚约 2 cm 砾石作缓冲层。待最后一层试样饱和后，继续使水位缓缓上升至溢水孔。当有水溢出时，关止水夹。

3.3.6 试样装好后量测试样顶部至仪器上口的剩余高度，计算试样净高。称剩余试样质量（准确至 1.0 g），计算装入试样总质量。

3.3.7 静置数分钟后，检查各测压管水位是否与溢水孔齐平。如不齐平，说明试样中或测压管接头处有集气阻隔，用吸水球进行吸水排气处理。

3.3.8 提高调节管使其高于溢水孔，然后将调节管与供水管分开，并将供水管置于金属圆筒内。开止水夹，使水由上部注入金属圆筒内。

3.3.9 降低调节管口，使位于试样上部 1/3 处，造成水位差，水即渗过试样，经调节管流出。在渗透过程中应调节供水管夹，使供水管流量略多于溢出水量。溢水孔应始终有余水溢出，以保持常水位。

3.3.10 测压管水位稳定后，记录测压管水位，计算各测压管间的水位差。

3.3.11 开动秒表，同时用量筒接取经一定时间的渗透水量，并重复 1 次。接取渗透水量时，调节管口不可没入水中。

3.3.12 测记进水与出水处的水温，取平均值。

3.3.13 降低调节管管口至试样中部及下部 1/3 处，以改变水力坡降，按本规程 3.3.9 至 3.3.12 规定重复进行测定。

3.3.14 根据需要，可装数个不同孔隙比的试样，进行渗透系数的测定。

3.4 计算及制图

3.4.1 按下列公式计算试样的干密度 ρ_d 及孔隙比 e ：

$$m_d = \frac{m}{1 + 0.01w} \quad (3.4.1-1)$$

$$\rho_d = \frac{m_d}{Ah} \quad (3.4.1-2)$$

$$e = \frac{\rho_w G_s}{\rho_d} - 1 \quad (3.4.1-3)$$

式中 m_d ——试样干质量, g;
 m ——风干试样总质量, g;
 w ——风干含水率, %;
 ρ_d ——试样干密度, g/cm³;
 A ——试样断面积, cm²;
 h ——试样高度, cm;
 e ——试样孔隙比;
 G_s ——土粒比重。

3.4.2 按下列公式计算渗透系数 k_T 及 k_{20} :

$$k_T = \frac{QL}{AHt} \quad (3.4.2-1)$$

$$k_{20} = k_T \frac{\eta_T}{\eta_{20}} \quad (3.4.2-2)$$

式中 k_T ——水温 $T^\circ\text{C}$ 时试样的渗透系数, cm/s;
 Q ——时间 t 秒内的渗透水量, cm³;
 L ——两测压孔中心间的试样高度, 10 cm;
 H ——平均水位差 $\left(\frac{H_1 + H_2}{2}\right)$, cm; (H_1, H_2 ——图 3.1.1 所示);
 t ——时间, s;
 k_{20} ——标准温度 (20 $^\circ\text{C}$) 时试样的渗透系数, cm/s;
 η_T —— $T^\circ\text{C}$ 时水的动力粘滞系数, kPa·s (10^{-6});
 η_{20} ——20 $^\circ\text{C}$ 时水的动力粘滞系数, kPa·s (10^{-6})。

比值 η_T/η_{20} 与温度的关系, 见表 3.4.2。

表 3.4.2 水的动力粘滞系数、粘滞系数比、温度校正值

温度 (°C)	动力粘 滞系数 η ($10^{-6}\text{kPa}\cdot\text{s}$)	η_T/η_{20}	温度校 正系数 T_D	温度 (°C)	动力粘 滞系数 η ($10^{-6}\text{kPa}\cdot\text{s}$)	η_T/η_{20}	温度校 正系数 T_D
5.0	1.516	1.501	1.17	17.5	1.074	1.066	1.66
5.5	1.493	1.478	1.19	18.0	1.061	0.050	1.68
6.0	1.470	1.455	1.21	18.5	1.048	1.038	1.70
6.5	1.449	1.435	1.23	19.0	1.035	1.025	1.72
7.0	1.428	1.414	1.25	19.5	1.022	1.012	1.74
7.5	1.407	1.393	1.27	20.0	1.010	1.000	1.76
8.0	1.387	1.373	1.28	20.5	0.998	0.988	1.78
8.5	1.367	1.353	1.30	21.0	0.986	0.976	1.80
9.0	1.347	1.334	1.32	21.5	0.974	0.964	1.83
9.5	1.328	1.315	1.34	22.0	0.963	0.953	1.85
10.0	1.310	1.297	1.36	22.5	0.952	0.943	1.87
10.5	1.292	1.279	1.38	23.0	0.941	0.932	1.89
11.0	1.274	1.261	1.40	24.0	0.919	0.910	1.94
11.5	1.256	1.243	1.42	25.0	0.899	0.890	1.98
12.0	1.239	1.227	1.44	26.0	0.879	0.870	2.03
12.5	1.223	1.211	1.46	27.0	0.859	0.850	2.07
13.0	1.206	1.194	1.48	28.0	0.841	0.833	2.12
13.5	1.188	1.176	1.50	29.0	0.823	0.815	2.16
14.0	1.175	1.163	1.52	30.0	0.806	0.798	2.21
14.5	1.160	1.148	1.54	31.0	0.789	0.781	2.25
15.0	1.144	1.133	1.56	32.0	0.773	0.765	2.30
15.5	1.130	1.119	1.58	33.0	0.757	0.750	2.34
16.0	1.115	1.104	1.60	34.0	0.742	0.735	2.39
16.5	1.101	1.090	1.62	35.0	0.727	0.720	2.43
17.0	1.088	1.077	1.64				

表 3.5.1 常水头渗透试验记录

工程名称 _____ 试样高度 _____ 干土质量 _____ 试验者 _____
 土样编号 _____ 试样面积 _____ 土粒比重 _____ 计算者 _____
 仪器编号 _____ 试样说明 _____ 孔隙比 _____ 校核者 _____
 测压孔间距 10cm 试验日期 _____

试验 次数	经过 时间 t (s)	测压管水位 (cm)			水 位 差 (cm)			水力 坡降 J	渗透 水量 Q (cm ³)	渗透系数 k_T (cm/s)	平均 水温 (°C)	校正 系数 $\frac{\eta_T}{\eta_{20}}$	水温 20°C 渗透系数 k_{20} (cm/s)	平均渗 透系数 k_{20} (cm/s)	备注
		I 管	I 管	II 管	H_1	H_2	平均 H								
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	
					(2) - (3)	(3) - (4)	$\frac{(5)+(6)}{2}$	0.1 × (7)		$\frac{(9)}{A \times (8) \times (1)}$			(10) × (12)	$\frac{\sum(13)}{n}$	

3.4.3 在测得的结果中取 3~4 个在允许差值范围以内的数值, 求其平均值, 作为试样在该孔隙比 e 时的渗透系数(允许差值不大于 $2 \times 10^{-7} \text{cm/s}$)。

3.4.4 当进行不同孔隙比下的渗透试验时, 可在半对数坐标上绘制以孔隙比为纵坐标, 渗透系数为横坐标的 $e \sim k$ 关系曲线图, 如图 3.4.4。

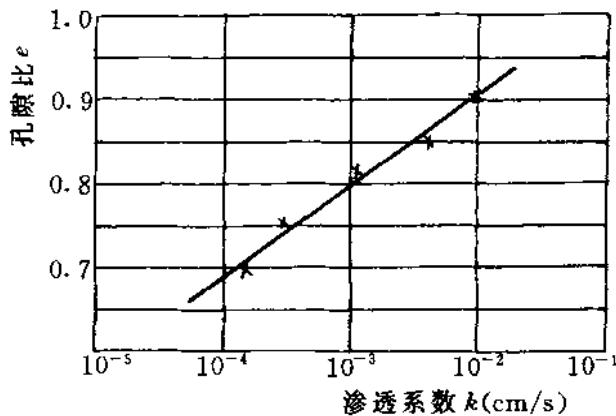


图 3.4.4 孔隙比 e 与渗透系数 k 关系曲线

3.5 记录

3.5.1 本试验记录格式如表 3.5.1。

4 变水头渗透试验

4.1 仪器设备 (南 55 型, 见图 4.1.1)

4.1.1 渗透容器: 由环刀、透水板、套筒及上、下盖组成。

4.1.2 水头装置: 变水头管的内径, 根据试样渗透系数选择不同尺寸, 长度为 1.0 m 以上, 分度值为 1.0 mm。

4.1.3 其他: 切土器、100 ml 量筒、秒表、温度计、削土刀、凡士林等。

4.2 仪器设备的检定和校准

4.2.1 环刀: 应符合 GB/T15406—94 之 4.1.1.1 规定的尺寸参数, 并按 SL110—95 校验方法进行校验。

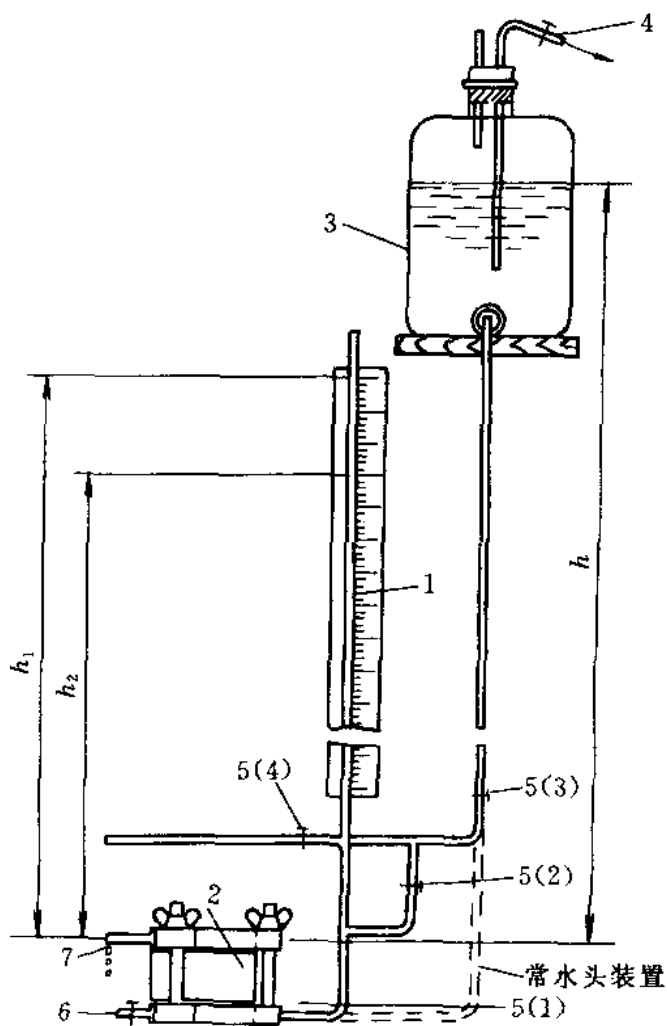


图 4.1.1 变水头渗透装置

- 1—变水头管；2—渗透容器；3—供水瓶；
 4—接水源管；5—进水管夹；6—排气管；
 7—出水管

4.2.2 透水板：应按 SL111—95 规定的校验方法进行校验。

4.2.3 渗透容器：应按 SL115—95 规定的校验方法进行校验。

4.3 操作步骤

4.3.1 根据需要用环刀在垂直或平行土样层面切取原状试样或扰动土制备成给定密度的试样，并进行充分饱和。切土时，应尽量避免结构扰动，并禁止用削土刀反复涂抹试样表面。

4.3.2 将容器套筒内壁涂一薄层凡士林，然后将盛有试样的环刀

推入套筒，并压入止水垫圈。把挤出的多余凡士林小心刮净。装好带有透水板的上、下盖，并用螺丝拧紧，不得漏气漏水。

4.3.3 把装好试样的渗透容器与水头装置连通。利用供水瓶中的水充满进水管，并注入渗透容器。开排气阀，将容器侧立，排除渗透容器底部的空气，直至溢出水中无气泡。关排气阀，放平渗透容器。

4.3.4 在一定水头作用下静置一段时间，待出水管口有水溢出时，再开始进行试验测定。

4.3.5 将水头管充水至需要高度后，关止水夹 5 (2)，开动秒表，同时测记起始水头 h_1 。经过时间 t 后，再测记终止水头 h_2 。如此连续测记 2~3 次后，再使水头管水位回升至需要高度，再连续测记数次，需 6 次以上，试验终止，同时测记试验开始时与终止时的水温。

4.4 计算

4.4.1 按式 (4.4.1) 计算渗透系数：

$$k_T = 2.3 \frac{aL}{At} \lg \frac{h_1}{h_2} \quad (4.4.1)$$

式中 a ——变水头管截面积， cm^2 ；

L ——渗径，等于试样高度， cm ；

h_1 ——开始时水头， cm ；

h_2 ——终止时水头， cm ；

A ——试样的断面积， cm^2 ；

t ——时间， s ；

2.3—— \ln 和 \lg 的换算系数。

4.4.2 按式 (4.4.2) 计算标准温度下的渗透系数：

$$k_{20} = k_T \frac{\eta_T}{\eta_{20}} \quad (4.4.2)$$

式中符号见本规程式 (3.4.2-2)。

4.4.3 按本规程 3.4.3 规定计算该孔隙比的平均渗透系数。

4.5 记录

4.5.1 本试验记录表格如表 4.5.1。

表 4.5.1 变水头渗透试验记录表

工程名称 _____ 土样说明 _____ 试样面积 _____ 试验者 _____
 土样编号 _____ 测压管断面积 _____ 孔隙比 _____ 计算者 _____
 仪器编号 _____ 试样高度 _____ 试验日期 _____ 校核者 _____

开始时间 t_1 (d h min)	終了时间 t_2 (d h min)	经过时间 t (s)	开始 水头 h_1 (cm)	終了 水头 h_2 (cm)	$2.3 \frac{a}{A} \frac{L}{t}$	$\lg \frac{h_1}{h_2}$	水温 $T^\circ\text{C}$ 时的渗透 系数 k_T (cm/s)	水温 ($^\circ\text{C}$)	校正 系数 $\frac{\eta_T}{\eta_{20}}$	渗透 系数 k_{20} (cm/s)	平均渗 透系数 k_{20} (cm/s)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
		(2)-(1)			$2.3 \frac{a}{A} \frac{L}{(3)}$	$\lg \frac{(4)}{(5)}$	(6)×(7)			(8)× (10)	$\frac{\sum(11)}{n}$

固 结 试 验

SL237—015—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 本试验的目的是测定试样在侧限与轴向排水条件下的变形和压力,或孔隙比和压力的关系,变形和时间的关系,以便计算土的压缩系数 a_v 、压缩指数 C_c 、回弹指数 C_s 、压缩模量 E_s 、固结系数 C_v 及原状土的先期固结压力 p_c 等。测定项目视工程需要而定。

1.0.2 本规程适用于饱和的粘质土。当只进行压缩试验时,允许用于非饱和土。

2 引 用 标 准

SD191—86 《切土环刀》。

SL110—95 《切土环刀校验方法》。

GB4935—85 《单杠杆固结》。

SL114—95 《杠杆式固结仪校验方法》。

SL237—002—1999 《土样和试样制备》。

SL237—003—1999 《含水率试验》。

SL237—004—1999 《密度试验》。

GB/T15406—94 《土工仪器的基本参数及通用技术条件》第一篇：室内土工仪器。

3 标准固结试验

3.1 仪器设备

3.1.1 固结容器：由环刀、护环、透水板、加压上盖和量表架等

组成。环刀、透水板的技术性能和尺寸参数应符合 SD191—86 切土环刀及相关标准的规定。见图 3.1.1。

3.1.2 加压设备：可采用量程为 5~10 kN 的杠杆式、磅秤式或其他加压设备，其准确度应符合 GB4935—85 及 GB/T15406—94 的规定。

3.1.3 变形测量设备：百分表量程 10 mm，分度值为 0.01 mm，或准确度为全量程的 0.2% 的位移传感器。

3.1.4 其他：刮土刀、钢丝锯、天平、秒表等。

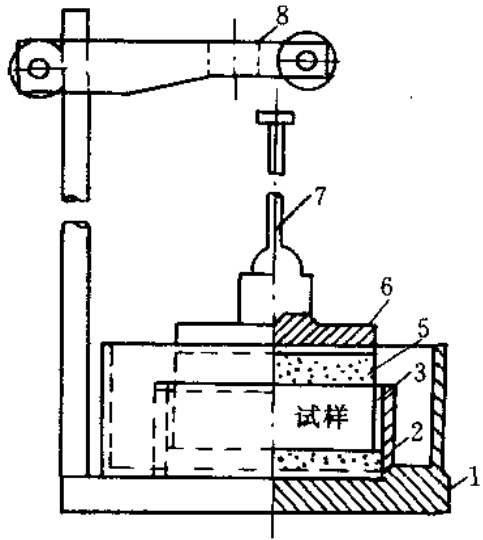


图 3.1.1 固结容器示意图

1—水槽；2—护环；3—环刀；4—加压上盖；5—透水板；6—量表导杆；7—量表架

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 环刀：应按 SL110—95 规定的方法进行校验。

3.2.2 透水板：应按 SL111—95 规定的方法进行校验。

3.2.3 加荷设备：参照 SL114—95 的方法进行校验。

3.2.4 百分表：应按 JJG34—84 《百分表检定规程》进行检定。

3.2.5 固结仪变形校正应按 SL114—95 的附《固结仪变形校正》方法进行。

3.3 试验步骤

3.3.1 根据工程需要，切取原状土试样或制备给定密度与含水率的扰动土试样。制备方法参照 SL237—002—1999 规定进行。

3.3.2 如系冲填土，先将土样调成液限或 1.2~1.3 倍液限的土膏，拌合均匀，在保湿器内静置 24h。然后把环刀倒置于小玻璃板上，用调土刀把土膏填入环刀，排除气泡刮平，称量。

3.3.3 按 SL237—003—1999 及 SL237—004—1999 的规定，测定试样的含水率及密度。对于扰动试样需要饱和时，按 SL237—002—1999 规定的方法将试样进行抽气饱和。

3.3.4 在固结容器内放置护环、透水板和薄滤纸，将带有环刀的试样，小心装入护环，然后在试样上放薄滤纸、透水板和加压盖板，置于加压框架下，对准加压框架的正中，安装量表。

注：如试样为饱和土，上、下透水板应事先浸水饱和；对非饱和状态的试样，透水板的湿度应尽量与试样湿度接近。

3.3.5 为保证试样与仪器上下各部件之间接触良好，应施加 1 kPa 的预压压力，然后调整量表，使指针读数为零。

3.3.6 确定需要施加的各级压力。加压等级一般为 12.5、25.0、50.0、100、200、400、800、1600、3200 kPa。最后一级的压力应大于上覆土层的计算压力 100~200 kPa。

3.3.7 需要确定原状土的先期固结压力时，加压率宜小于 1，可采用 0.5 或 0.25 倍。最后一级压力应使 $e \sim \lg p$ 曲线下段出现较长的直线段。

3.3.8 第 1 级压力的大小视土的软硬程度分别采用 12.5、25.0 kPa 或 50.0 kPa（第 1 级实加压力应减去预压压力）。

3.3.9 如系饱和试样，则在施加第 1 级压力后，立即向水槽中注水至满。如系非饱和试样，须用湿棉围住加压盖板四周，避免水分蒸发。

3.3.10 需测定沉降速率时，加压后按下列时间顺序测记量表读数：0.10、0.25、1.00、2.25、4.00、6.25、9.00、12.25、16.00、20.25、25.00、30.25、36.00、42.25、49.00、64.00、100.00、200.00 min 和 400.00min 及 23 h 和 24 h 至稳定为止。

3.3.11 当不需要测定沉降速率时，稳定标准规定为每级压力下固结 24 h。测记稳定读数后，再施加第 2 级压力。依次逐级加压至试验结束。

注：当试样的渗透系数大于 10^{-5} cm/s 时，允许以主固结完成作为相对稳定标准；对某些高液限土，24 h 以后尚有较大的压缩变形时，以试样变形每小时变化不大于 0.005 mm 认为稳定。

3.3.12 需要作回弹试验时，可在某级压力（大于上覆压力）下固结稳定后卸压，直至卸至第 1 级压力。每次卸压后的回弹稳定

标准与加压相同，并测记每级压力及最后一级压力时的回弹量。

3.3.13 试验结束后，迅速拆除仪器各部件，取出带环刀的试样。如系饱和试样，则用干滤纸吸去试样两端表面上的水，取出试样，测定试验后的含水率。

3.4 计算及制图

3.4.1 按式 (3.4.1) 计算试样的初始孔隙比 e_0 ：

$$e_0 = \frac{\rho_w G_s (1 + 0.01 w_0)}{\rho_0} - 1 \quad (3.4.1)$$

式中 G_s ——土粒比重；

ρ_w ——水的密度， g/cm^3 ；

ρ_0 ——试样初始密度， g/cm^3 ；

w_0 ——试样的初始含水率，%。

3.4.2 按式 (3.4.2) 计算各级压力下固结稳定后的孔隙比 e_i ：

$$e_i = e_0 - (1 + e_0) \frac{\Delta h_i}{h_0} \quad (3.4.2)$$

式中 e_i ——某级压力下的孔隙比；

Δh_i ——某级压力下试样高度变化， cm ；

h_0 ——试样初始高度， cm 。

3.4.3 按式 (3.4.3) 计算某一压力范围内的压缩系数 a_v ：

$$a_v = \frac{e_i - e_{i+1}}{p_{i+1} - p_i} \quad (3.4.3)$$

式中 p_i ——某一压力值， kPa ；

其余符号见本规程式 (3.4.2)。

3.4.4 按下列公式计算某一压力范围内的压缩模量 E_s 和体积压缩系数 m_v ：

$$E_s = \frac{1 + e_0}{a_v} \quad (3.4.4-1)$$

$$m_v = \frac{1}{E_s} = \frac{a_v}{1 + e_0} \quad (3.4.4-2)$$

式中符号见本规程式 (3.4.1)、式 (3.4.3)。

3.4.5 以孔隙比 e 为纵坐标，压力 p 为横坐标，绘制孔隙比与压

力的关系曲线，如图 3.4.5 所示。

3.4.6 原状土的先期固结压力 p_c 的确定方法见图 3.4.6，用适当比例的纵横坐标作 $e \sim \lg p$ 曲线，在曲线上找出最小曲率半径 R_{\min} 点 O 。过 O 点作水平线 OA 、切线 OB 及角 AOB 的平分线 OD ， OD 与曲线的直线段 C 的延长线交于点 E ，则对应于 E 点的压力值即为该原状土的先期固结压力 p_c 。

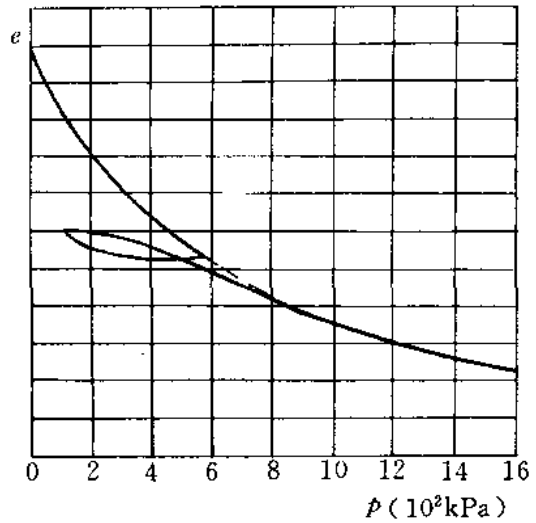


图 3.4.5 $e \sim p$ 关系曲线

3.4.7 按式 (3.4.7) 计算压缩指数 C_c 及回弹指数 C_s ：

$$C_c \text{ 或 } C_s = \frac{e_i - e_{i+1}}{\lg p_{i+1} - \lg p_i} \quad (3.4.7)$$

式中符号见本规程式 (3.4.3)。

C_c 即 $e \sim \lg p$ 曲线直线段的斜率。用同法在回弹支上求其平均

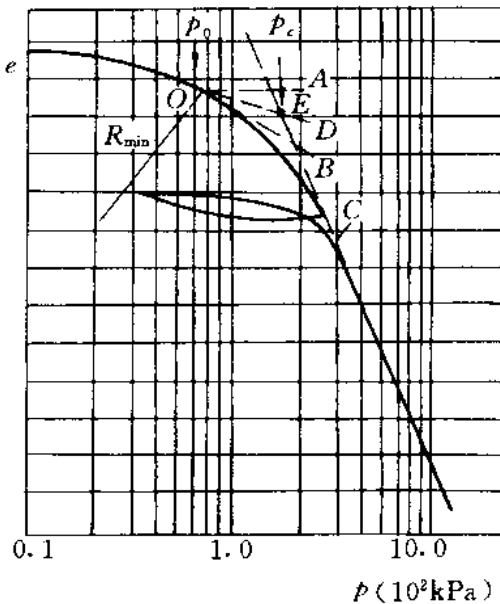


图 3.4.6 $e \sim \lg p$ 曲线
和求 p_c 示意图

斜率，即 C_s 。

3.4.8 按下列方法求算固结系数 C_v 。

1 时间平方根法。

对于某一压力，以量表读数 d (mm) 为纵坐标，时间平方根 \sqrt{t} (min) 为横坐标，绘制 $d \sim \sqrt{t}$ 曲线如图 3.4.8-1。延长 $d \sim \sqrt{t}$ 曲线开始段的直线，交纵坐标轴于 d_s (d_s 称理论零点)。过 d_s 绘制另一直线，令其横坐标为前一直线横坐标的 1.15 倍，则后一

直线与 $d \sim \sqrt{t}$ 曲线交点所对应的的时间的平方即为试样固结度达 90% 所需的时间 t_{90} 。按式 (3.4.8-1) 计算该压力下的固结系数 C_v ：

$$C_v = \frac{0.848(\bar{h})^2}{t_{90}} \quad (3.4.8-1)$$

式中 \bar{h} ——最大排水距离，等于某一压力下试样初始与终了高度的平均值之半，cm；

t_{90} ——固结度达 90% 所需的时间，s。

2 时间对数法。

对于某一压力，以量表读数 d (mm) 为纵坐标，时间在对数 (min) 横坐标上，绘制 $d \sim \lg t$ 曲线如图 3.4.8-2，在 $d \sim \lg t$ 曲线的开始线段，选任一时间 t_1 ，相对应的量表读数为 d_1 ，再取时间 $t_2 = \frac{t_1}{4}$ ，相对应的量表读数为 d_2 ，为则 $2d_2 - d_1$ 之值为 d_{01} 。如此

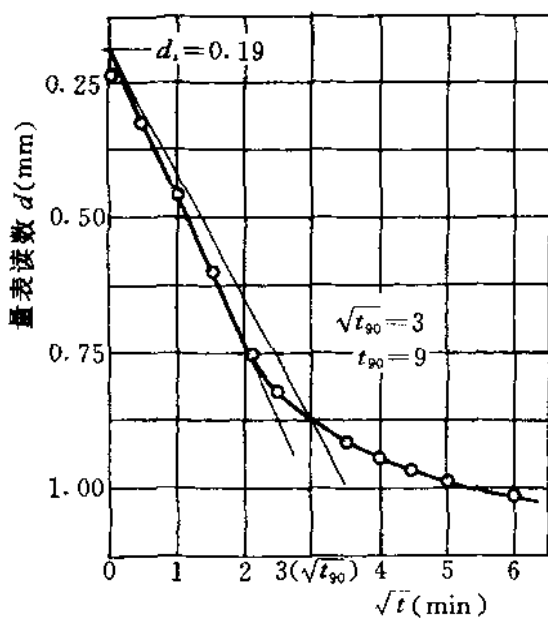


图 3.4.8-1 时间平方根法求 t_{90}

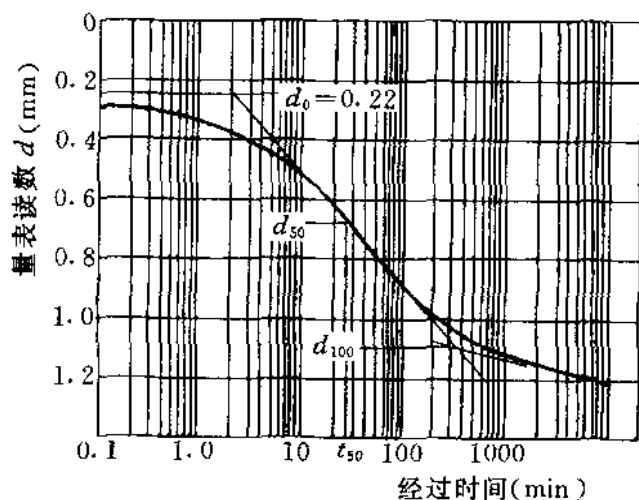


图 3.4.8-2 时间对数法求 t_{50}

表 3.5.1-1 固结试验记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
 土样编号 _____ 计算者 _____
 取土深度 _____ 校核者 _____
 土样说明 _____ 试验日期 _____

1. 含水率试验

试样情况		盒号	盒加湿土质量 (g)	盒加干土质量 (g)	盒质量 (g)	水质量 (g)	干土质量 (g)	含水率 (%)
			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
			(1)	(2)	(3)	(1)-(2)	(2)-(3)	(4)÷(5)×100
试验前	饱和前							平均
	饱和后 (或饱和土)							
试验后								

2. 密度试验

试样情况		环加土质量 (g)	环质量 (g)	土质量 (g)	试样体积 (cm ³)	密度 (g/cm ³)
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
		(1)	(2)	(1)-(2)	(4)	(3)÷(4)
试验前	饱和前					
	饱和后 (或饱和土)					
试验后						

3. 孔隙比及饱和度计算 $G_s =$ _____

试样情况	试验前	试验后
含水率 (%)		
密度 (g/cm ³)		
孔隙比		
饱和度 (%)		

表 3.5.1-2 固结试验记录表

工程名称 _____
 土样编号 _____
 仪器编号 _____

试验者 _____
 计算者 _____
 校核者 _____

经过时间 (min)	压 力 (kPa)							
	50		100		200		400	
	日期	量表读数 (0.01mm)	日期	量表读数 (0.01mm)	日期	量表读数 (0.01mm)	日期	量表读数 (0.01mm)
0								
0.25								
1								
2.25								
4								
6.25								
9								
12.25								
16								
20.25								
25								
30.25								
36								
42.25								
60								
23 h								
24 h								
总变形量 (mm)								
仪器变形量 (mm)								
试样总变形量 (mm)								

再选取另一时间，依同法求得 d_{02} 、 d_{03} 、 d_{04} 等，取其平均值即为理论零点 d_0 。延长曲线中部的直线段和通过曲线尾部数点切线的交点即为理论终点 d_{100} ，则 $d_{50} = \frac{d_0 + d_{100}}{2}$ ，对应于 d_{50} 的时间即为试样固结度达到 50% 所需的时间 t_{50} 。按式 (3.4.8-2) 计算该压力下的固结系数 C_v ：

$$C_v = \frac{0.197(\bar{h})^2}{t_{50}} \quad (3.4.8-2)$$

式中 t_{50} ——固结度达 50% 所需的时间，s；
其余符号见本规程式 (3.4.8-1)。

3.5 记录

3.5.1 本试验记录格式如表 3.5.1-1，表 3.5.1-2，表 3.5.1-3。

4 快速固结试验*

4.1 定义

快速法规定试样在各级压力下的固结时间为 1 h，仅在最后一级压力下，除测记 1 h 的量表读数外，还应测读达压缩稳定时的量表读数。稳定标准为量表读数每小时变化不大于 0.005 mm。

4.2 仪器设备

4.2.1 本试验所用仪器设备应符合本规程 3.1 的规定。

4.3 仪器设备的检定和校准

4.3.1 本试验所用仪器设备的检定和校准按本规程 3.2 的规定进行。

4.4 操作步骤

4.4.1 本试验操作步骤按本规程 3.3.1~3.3.6、3.3.8、3.3.9 和 3.3.13 的规定进行。

* 应用说明：对渗透性较大的细粒土，若计算沉降要求精度不高，且不需要求固结系数时，可采用本快速固结试验法。

4.4.2 对快速法所得试验结果,如需要校正时则按式(4.3.3)计算各级压力下试样校正后的总变形量:

$$\sum \Delta h_i = (h_i)_i \frac{(h_n)_T}{(h_n)_i} = K(h_i)_i \quad (4.3.3)$$

式中 $\sum \Delta h_i$ ——某一压力下校正后的总变形量, mm;

$(h_i)_i$ ——某一压力下固结 1 h 的总变形量减去该压力下的仪器变形量, mm;

$(h_n)_i$ ——最后一级压力下固结 1 h 的总变形量减去该压力下的仪器变形量, mm;

$(h_n)_T$ ——最后一级压力下达到稳定标准的总变形量减去该压力下的仪器变形量, mm;

K ——校正系数。

4.5 计算及制图

4.5.1 按本规程 3.4.1~3.4.5 规定进行计算和制图。

4.6 记录

4.6.1 本试验记录格式如表 4.6.1。

表 4.6.1 快速固结试验记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
 土样编号 _____ 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

试样初始高度: $h_0 =$ mm $K = (h_n)_T / (h_n)_i =$					
加压历时 (h)	压力 (kPa)	校正前试样总变形量 (mm)	校正后试样总变形量 (mm)	压缩后试样高度 (mm)	孔隙比
	(p)	$(h_i)_i$	$\sum \Delta h_i = K(h_i)_i$	$h = h_0 - \sum \Delta h_i$	$e_i = e_0 - \frac{\sum \Delta h_i (1 + e_0)}{h_0}$
1					
1					
1					
1					
1					
稳定					

5 应变控制加荷固结试验

5.1 定义

本方法是试样在侧限和轴向排水条件下，采用应变速率控制连续加荷确定试样的固结量和固结速率。

5.2 仪器设备

5.2.1 固结仪：由刚性底座（具有连接测孔隙水压力装置的通孔）、护环、环刀、透水板、加压上盖等组成，见图 5.1.1。

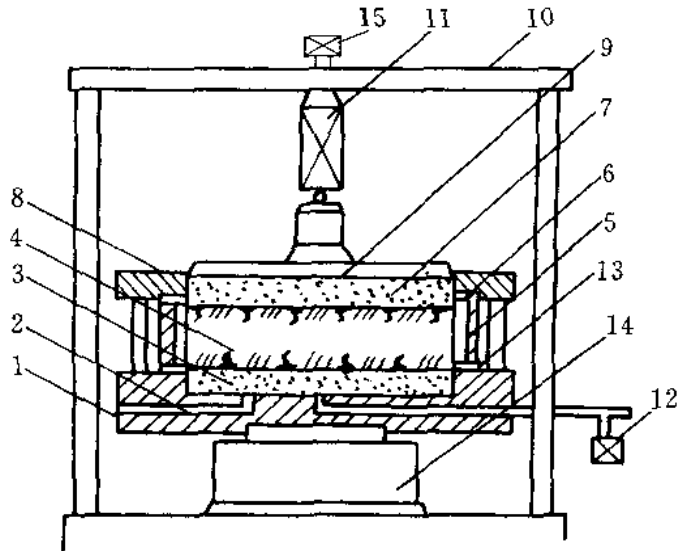


图 5.1.1 固结仪组装示意图

1—底座；2—排气孔；3—下透水板；4—试样；5—护环；6—环刀；7—上透水板；8—上盖；9—加压盖板；
10 加荷架；11—负荷传感器；12—孔压传感器；13—
密封圈；14—加压机座；15—位移传感器

1 环刀、透水板的技术性能和尺寸参数应符合 SD191—86 及相关标准的规定。

2 环刀和护环底部与刚性底座要密封，应能经受 1.0 MPa 的内压不泄漏。

5.2.2 轴向加荷设备：可采用螺旋杆式、液压式和气压式加荷装置。应能反馈、伺服跟踪连续加荷。

轴向测力计采用负荷传感器等。测量装置要求具有相应的刚度。量程为 0~10 kN；准确度为全量程的 0.5%。

5.2.3 孔隙水压力测量设备：采用压力传感器，量程：0~1 MPa；准确度为全量程的 0.5%。其体积因数应小于 $1.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{kPa}$ 。

5.2.4 变形测量设备：采用位移传感器，量程 0~10 mm；准确度为 0.2%F.S。

5.2.5 其他：切土器、刮土刀、天平、秒表、烘箱、土样盒等。

5.3 仪器设备的检定和校准

5.3.1 环刀：应按 SL110—95 规定的方法进行校验。

5.3.2 负荷传感器：应参照 JJG391—85《负荷传感器试行检定规程》进行检定。

5.3.3 孔隙水压力传感器：应参照有关规程进行检定。

5.3.4 位移传感器：应参照有关检定规程进行检定。

5.4 操作步骤

5.4.1 按本规程 3.3.1 的规定制备试样。

5.4.2 按本规程 3.3.3 的规定测定试样的密度和含水率，并对试样饱和。

5.4.3 将固结容器底部连接孔隙水压力传感器的阀门打开，用无气水排除底部滞留的气泡。并将透水板用无气水饱和，使水淹没底部透水板。透水板上放薄滤纸。

5.4.4 将装有试样的环刀放入护环内，装入固结容器，压入密封圈。试样上放薄滤纸、透水板、上盖和加压盖板，用螺丝拧紧，使环刀和护环与底座密封。然后将固结仪放置到轴向加荷设备正中。在组装固结仪时，孔隙水压力测量系统不应带入气体。

5.4.5 装上位移传感器，并对试样施加 1 kPa 的设置压力，然后调整孔隙水压力和位移传感器的初始读数或零读数。

5.4.6 选择适宜的应变速率。其标准应使在试验时的任何时间试样底部产生的孔隙水压力为施加垂直应力的 3%~20%。应变速率可按表 5.4.6 选择初步估计值。试验时，若呈现的超孔隙水压

力值超出建议的范围，可调整应变速率。

表 5.4.6 应 变 速 率

液限 w_L (%)	应变速率 ϵ (%/min)	液限 w_L (%)	应变速率 ϵ (%/min)
0~40	0.04	80~100	0.001
40~60	0.01	100~120	0.0004
60~80	0.004	120~140	0.0001

5.4.7 接通控制系统、采集系统和加压设备的电源，预热30 min，采集初始读数。在所选的常应变速率下，施加轴向荷载，使产生轴应变。

5.4.8 数据采集时间间隔。在历时前 10 min 时每隔 1 min；随后的 1 h 以内每隔 5 min；1 h 以后每隔 15 min 采集 1 次轴荷载、超孔隙水压力和变形值。

5.4.9 连续加荷一直到预期应力或应变为止。当轴向荷载施加完成后，在轴向荷载不变或变形不变条件下使孔隙水压力消散。

5.4.10 在试验时，若需获得次压缩数据，在所需轴向荷载时中断控制应变加荷，并保持该荷载不变条件下，按本规程 3.3.10 规定的时间顺序记录变形值，一直延续至变形和对数时间关系曲线上呈现一次压缩部分线性特性阶段为止。若需进一步加荷，则在先前常应变速率条件下，恢复控制应变的轴向加荷。

5.4.11 当要求回弹或卸荷特性时，试样在等于加荷时的应变速率条件下卸荷。卸荷时关闭孔隙水压力测量系统。并按本规程 5.4.8 规定的时间间隔记录轴向荷载和变形。回弹完成后，打开孔隙水压力测量系统，监测孔隙水压力，并允许其消散。

5.4.12 所有试验完成后，从固结仪中取出整个试样，称量、烘干，求得干密度及含水率。

5.5 计算和制图

5.5.1 按本程式 (3.4.1) 计算试样的初始孔隙比 e_0 。

5.5.2 按本程式 (3.4.2) 计算任意时刻试样的孔隙比 e_i 。

5.5.3 按式 (5.5.3) 计算任意时刻试样的有效压力 σ'_i ：

$$\sigma'_i = \sigma_i - \frac{2}{3}u_b \quad (5.5.3)$$

式中 σ'_i ——任意时刻 t 试样上的有效压力，kPa；

σ_i ——任意时刻 t 试样上施加的总压力，kPa；

u_b ——任意时刻 t 试样底部的孔隙水压力，kPa。

5.5.4 按本规程式 (3.4.3) 计算某一压力范围内的压缩系数 a_v 。

5.5.5 按本规程式 (3.4.4-1)、式 (3.4.4-2) 计算某一压力范围内压缩模量 E_s 和体积压缩系数 m_v 。

5.5.6 按本规程式 (3.4.7) 计算压缩指数 C_c 和回弹指数 C_s 。

5.5.7 按式 (5.5.7) 计算任意时刻 t 的固结系数 C_v ：

$$C_v = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta t} \times \frac{h^2}{2m_v u_b} \quad (5.5.7)$$

式中 $\Delta\varepsilon$ ——两读数间的应变变化，%；

h ——两读数间的试样平均高度，cm；

Δt ——两读数间的历时，s；

u_b ——两读数间试样底部测得的孔隙水压力平均值，kPa；

m_v ——两读数间试样的体积压缩系数， kPa^{-1} 。

5.5.8 以孔隙比 e 为纵坐标，有效压力 σ' 在对数横坐标上，绘制 $e \sim \lg \sigma'$ 的关系图，图 5.5.8。

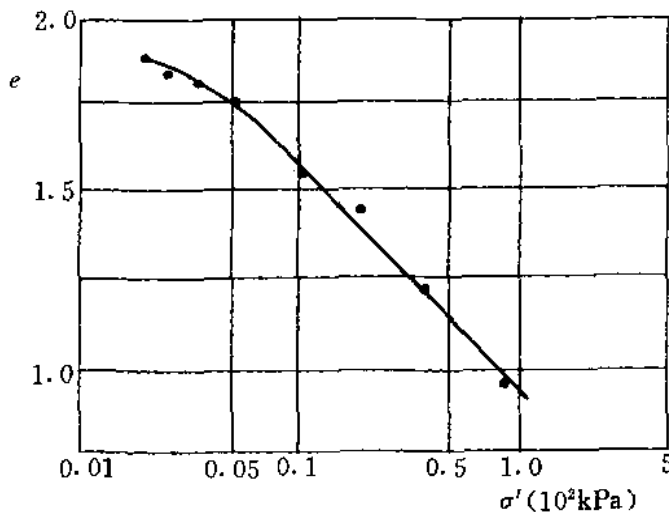


图 5.5.8 $e \sim \lg \sigma'$ 关系图

表 5.6.1 应变控制加荷固结试验记录表

工程名称 _____
 土样编号 _____
 试验日期 _____

试验者 _____
 计算者 _____
 校核者 _____

试样初始高度 $h_0 =$ _____ cm		试样面积 $A =$ _____ cm ²		应变速率 = _____ %/s		负荷传感器系数: α _____		孔压传感器系数: β _____	
经过时间 t (min)	轴向变形 Δh (0.01mm)	应变 (%)	t 时 孔隙比 e_t	负荷 传感器 读数	轴向荷载 p (kN)	轴向压力 σ (MPa)	孔压 传感器 读数	底部 孔隙压力 u_b (MPa)	轴 向 有效压力 σ' (MPa)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
		$(2)/h_0$	$e_0 - (1 - e_0) \times (3)$		$(5) \times \alpha$	$(6)/A$		$(8) \times \beta$	$(7) - \frac{2}{3}(9)$
0									
1									
2									
⋮									
10									
15									
20									
25									
⋮									
60									
75									
90									
105									
120									
135									
150									

5.5.9 以固结系数 C_v 为纵坐标，以有效压力 σ' 为横坐标，绘制 $C_v \sim \sigma'$ 的关系图，图 5.5.9。

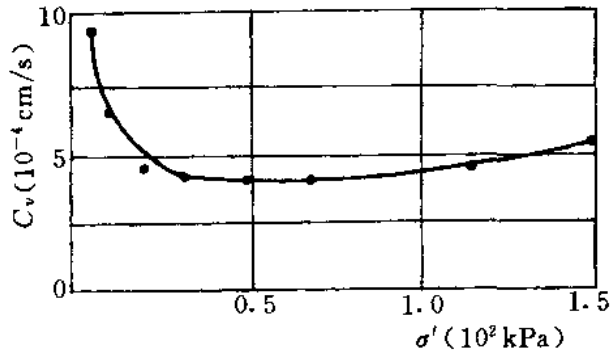


图 5.5.9 $C_v \sim \sigma'$ 关系图

5.5.10 为获得次压缩数据，在半对数坐标上绘制变形与时间图。

5.6 记录

5.6.1 本试验记录格式如下。

- 1 含水率、密度的记录格式如本规程表 3.5.1-1。
- 2 轴向压力、孔隙水压力和变形的记录格式如表 5.6.1。

黄土湿陷试验

SL237—016—1999

1 定义和目的

1.0.1 黄土湿陷是黄土在一定的压力、浸水及渗流长期作用下，产生压缩、湿陷及渗透溶滤变形的全过程。本规程中的黄土泛指典型黄土、黄土状土等各种黄土类土。

1.0.2 本试验的目的是测定黄土变形和压力的关系，以计算压缩变形系数、湿陷变形系数，渗透溶滤变形系数、自重湿陷系数等黄土压缩性指标。测定项目根据未处理的和预先浸水处理过的场地工程实际情况，选定试验程序来确定。

1.0.3 本规程采用单线法（实际荷载法）测定黄土湿陷性指标。在初步勘察阶段或取多个试样有困难时也允许采用双线法进行试验。

2 引用标准

GB4935—85《单杠杆固结仪》。

SL114—95《杠杆式固结仪校验方法》。

SL237—015—1999《固结试验》。

GB/T15406—94《土工仪器的基本参数及通用技术条件》第一篇：室内土工仪器。

3 单线法

3.1 仪器设备

3.1.1 固结容器：环刀面积应采用 50 cm^2 ，其他技术条件应符合

GB4935—85 及 GB/T15406—94 (5) 的要求。

3.1.2 加压设备、变形测量设备应符合 SL237—015—1999 中 3.1.2, 3.1.3 的规定。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 仪器校验参照 SL114—95 规定的方法进行。

3.3 操作步骤

3.3.1 按工程需要切取原状试样至少 5 个。切土时应使试样受压方向与天然土层受压方向一致。各试样之间的密度允许差值为 0.03 g/cm^3 , 并测定含水率。

3.3.2 将带有试样的环刀装入固结容器内, 套上护环, 放上透水板和加压盖板。透水板的湿度应接近试样的天然湿度。

3.3.3 施加 1 kPa 的预压力使试样与仪器上、下各部件接触, 并调整变形测量计的零位或初始值。

3.3.4 加压等级一般规定为: 在 $0\sim 200 \text{ kPa}$ 范围内, 每级压力增量为 $25\sim 50 \text{ kPa}$; 在 200 kPa 以上, 每级压力增量为 100 kPa 。

3.3.5 施加第 1 级压力后, 同时开动秒表按下列时间测记变形读数: $10、20、30 \text{ min}$, 以后每隔 30 min 测读 1 次至压缩变形稳定为止。稳定标准为连续 2 次每小时变形量不大于 0.01 mm 。如此, 依次施加第 2 级及以后各级压力。

3.3.6 测定湿陷变形时, 根据工程需要及土的沉积条件确定浸水压力。在不同的浸水压力下待变形稳定后, 保持压力不变, 根据工程情况, 用自上而下或自下而上的方式, 使试样浸水。浸水宜用纯水。按本规程 3.3.5 的规定测记变形读数, 至变形稳定为止。

3.3.7 测定自重湿陷变形时, 试样应在天然湿度下, 逐步加压至试样所处的上覆土层饱和和自重压力待变形稳定后, 浸水使试样湿陷变形, 按本规程 3.3.5 的规定测记变形读数, 至变形稳定为止。

3.3.8 测定溶滤变形时, 则在浸水压力下待湿陷变形稳定后, 继续使水渗过, 开始每隔 $2、4、8 \text{ h}$ 读数一次, 以后每日读数 $1\sim 3$ 次, 直到变形稳定为止。稳定标准为每 3 天不大于 0.01 mm 。

3.3.9 如设计压力未定, 或在同一地区内有不同设计压力的建筑

物时，可测定不同压力与压缩变形系数、湿陷变形系数和渗透溶滤变形系数的关系。为此，需要 4 个以上的原状试样，按本规程 3.3.6 至 3.3.8，在不同压力下确定相应的压缩变形，湿陷变形及渗透溶滤变形。

3.3.10 如建筑物地基采用预先浸水方式处理，则可在现场预浸水稳定后的试坑中取样，按本规程 3.3.5 至 3.3.6 的规定进行试验，测定黄土湿陷性指标及建筑物运用期黄土层的第 2 次湿陷变形。

3.3.11 试验完毕，放掉容器中的积水，拆除仪器，取出试样。在试样中心处取样测定其含水率，检查浸水后试样的饱和度。

3.4 计算和制图

3.4.1 按式 (3.4.1) 计算湿陷系数 δ_s ：

$$\delta_s = \frac{h_1 - h_2}{h_0} \quad (3.4.1)$$

式中 h_1 ——在某级压力下，试样变形稳定后的高度，mm；

h_2 ——在某级压力下，试样浸水湿陷变形稳定后的高度，mm；

h_0 ——试样初始高度，mm。

3.4.2 按式 (3.4.2) 计算自重湿陷系数 δ_{zs} ：

$$\delta_{zs} = \frac{h_z - h'_z}{h_0} \quad (3.4.2)$$

式中 h_z ——在饱和自重压力下试样变形稳定后的高度，mm；

h'_z ——在饱和自重压力下，试样浸水湿陷变形稳定后的高度，mm；

其余符号见本规程式 (3.4.1)。

3.4.3 按式 (3.4.3) 计算溶滤变形系数 δ_{wt} ：

$$\delta_{wt} = \frac{h_2 - h_3}{h_0} \quad (3.4.3)$$

式中 h_3 ——在某级压力下，试样在溶滤变形稳定后的高度，mm；

其余符号见本规程式 (3.4.1)。

3.4.4 以压力为横坐标，各湿陷系数为纵坐标，绘制压力与湿陷系数关系曲线，图 3.4.4。

3.5 记录

3.5.1 本试验记录格式如表 3.5.1。

表 3.5.1 黄土湿陷试验记录表
(单线法)

工程名称 _____ 试验者 _____
 土样编号 _____ 计算者 _____
 土样说明 _____ 校核者 _____
 仪器编号 _____ 试验日期 _____

压力 (kPa) 读 数	50		100		150		200		浸水湿陷 (在 200 kPa 下)		浸水溶滤 (在 200 kPa 下)	
	时间 (min)	读数 (0.01 mm)	时间 (min)	读数 (0.01 mm)	时间 (min)	读数 (0.01 mm)	时间 (min)	读数 (0.01 mm)	时间 (min)	读数 (0.01 mm)	时间 (min)	读数 (0.01 mm)
变形 (mm)												
总变形量												
仪器变形量												
试样变形量												
试样高度												
	自重湿陷系数 $\delta_{zs} = \frac{h_x - h'_z}{h_0}$								湿陷变形 系数 $\delta_s = \frac{h_1 - h_2}{h_0}$		渗透溶滤 变形系数 $\delta_{ur} = \frac{h_2 - h_3}{h_0}$	

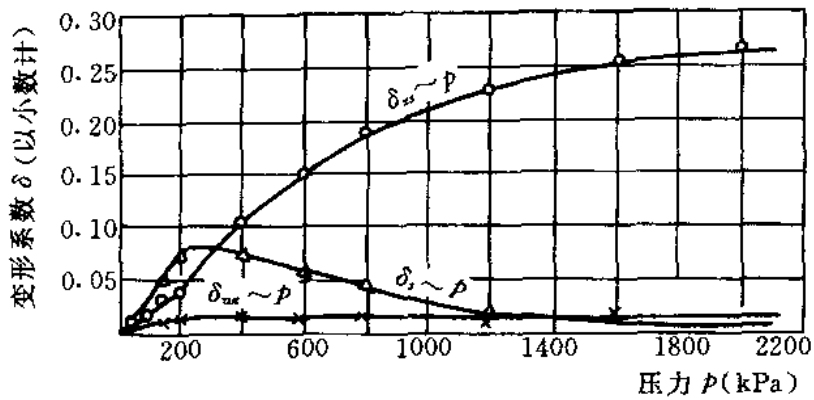


图 3.4.4 黄土湿陷系数与压力关系曲线

4 双 线 法

4.1 仪器设备

4.1.1 本试验所用仪器设备和校验方法应符合本规程 3.1 和 3.2 规定。

4.2 操作步骤

4.2.1 按本规程 3.3.1 至 3.3.5 进行试验。用 2 个试样，其中 1 个试样在试验过程中应保持天然含水率，另 1 个试样则在 50 kPa 压力下，达到变形稳定后，自试样顶面加水，待再度稳定后，继续加压进行试验。

4.3 计算和制图

4.3.1 以试样高度 h 为纵坐标，压力 P 为横坐标，绘制试样高度 h 与压力 P 关系曲线，如图 4.3.1 所示。在同一压力 P 下，两曲线纵坐标之差值 $\Delta h'_p$ 即为该压力下的湿陷变形量。

4.3.2 按式 (4.3.2) 计算某一压力下的湿陷系数：

$$\delta_s = \frac{h_p - h'_p}{h_0} \quad (4.3.2)$$

式中 h_p ——在某一压力下天然含水率试样压缩曲线的纵坐标，
mm；

h'_p ——在同压力下浸水后试样压缩曲线的纵坐标，mm；

其余符号见本程式 (3.4.1)。

4.3.3 以压力 p 为横坐标、湿陷变形系数 δ_s 为纵坐标, 绘制湿陷系数与压力的关系曲线, 如图 4.3.3。

4.4 记录

4.4.1 本试验记录格式如表 4.4.1。

表 4.4.1 黄土湿陷试验记录表 (双线法)

工程名称 _____ 试验者 _____
 土样编号 _____ 计算者 _____
 试样说明 _____ 校核者 _____
 仪器编号 _____ 试验日期 _____

压力 p (kPa)	试样 高度 h (mm)	孔隙比 $e = \frac{h}{h_s} - 1$	$e_i - e_{i+1}$	$p_{i+1} - p_i$ (kPa)	$a_v = \frac{e_i - e_{i+1}}{p_{i+1} - p_i}$ (kPa ⁻¹)	未浸水 试样高 h_p (mm)	浸水后 试样高 h'_p (mm)	湿陷量 $h_p - h'_p$ (mm)	湿陷系数 $\delta_s = \frac{h_p - h'_p}{h_0}$
0									
50									
100									
150									
200									
400									
600									
800									
1200									
1600									
2000									

试验前试样的孔隙比 e_0 试样土粒体积高度 $h_s = \frac{h_0}{1 + e_0}$

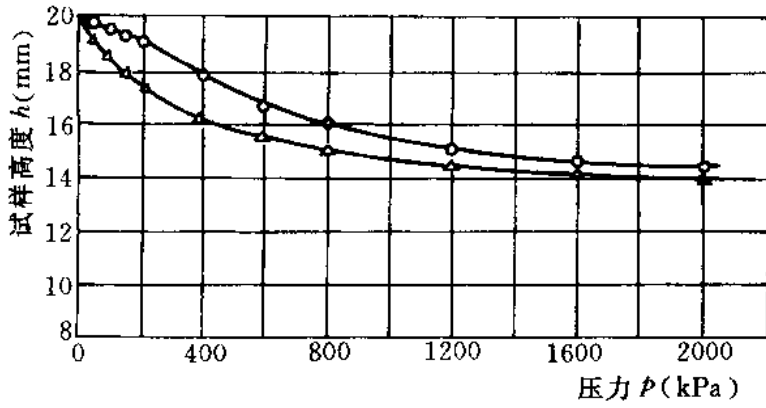


图 4.3.1 试样高度与压力关系曲线

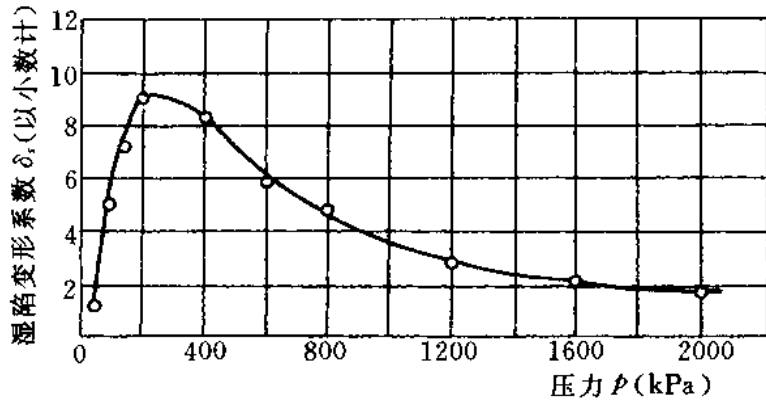


图 4.3.3 湿陷变形系数与压力关系曲线

三轴压缩试验

SL237—017—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 三轴压缩试验是测定土的抗剪强度的一种方法,它通常用3~4个圆柱形试样,分别在不同的恒定周围压力(即小主应力 σ_3)下,施加轴向压力[即产生主应力差($\sigma_1 - \sigma_3$)],进行剪切直至破坏;然后根据摩尔-库仑理论,求得抗剪强度参数。

1.0.2 本规程适用于测定细粒土和砂类土的总抗剪强度参数和有效抗剪强度参数。根据排水条件的不同,本试验分为不固结不排水剪(UU);固结不排水剪(CU或 \overline{CU})和固结排水剪(CD)等3种试验类型。

1 不固结不排水剪(UU)试验是在施加周围压力和增加轴向压力直至破坏过程中均不允许试样排水。本试验可以测得总抗剪强度参数 c_u 、 φ_u 。

2 固结不排水剪(CU或 \overline{CU})试验是试样先在某一周围压力作用下排水固结,然后在保持不排水的情况下,增加轴向压力直至破坏。本试验可以测得总抗剪强度参数 c_{cu} 、 φ_{cu} 或有效抗剪强度参数 c' 、 φ' 和孔隙压力系数。

3 固结排水剪(CD)试验是试样先在某一周围压力作用下排水固结,然后在允许试样充分排水的情况下增加轴向压力直到破坏,本试验可以测得有效抗剪强度参数 c_d 、 φ_d 和变形参数。

2 引用标准

GB4540—84《应变控制式三轴仪》。

SL118—95《应变控制式三轴仪校验方法》。

SL237—011—1999 《击实试验》。

GB/T15406—94 《土工仪器的基本参数及通用技术条件》第一篇：室内土工仪器。

3 仪器设备

3.1 仪器设备

3.1.1 应变控制式三轴仪：如图 3.1.1 所示，有反压力控制系统、周围压力控制系统、压力室，孔隙水压力测量系统，试验机等。其技术条件应符合 GB/T15406—94 规定。

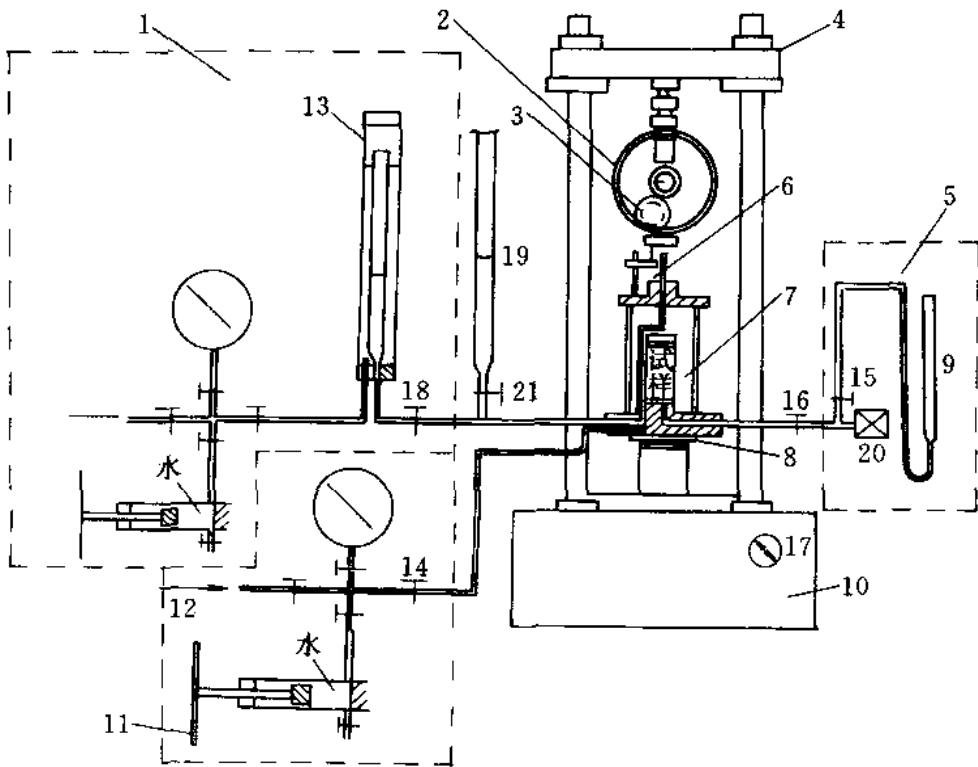


图 3.1.1 三轴仪组成示意图

- 1—反压力控制系统；2—轴向测力计；3—轴向位移计；4—试验机横梁；5—孔隙压力测量系统；6—活塞；7—压力室；8—升降台；9—量水管；10—试验机；
11—周围压力控制系统；12—压力源；13—体变管；14—周围压力阀；
15—量管阀；16—孔隙压力阀；17—手轮；18—体变管阀；19—排水管；
20—孔隙压力传感器；21—排水管阀

3.1.2 附属设备。

1 击实筒：见图 3.1.2-1。

2 饱和器：见图 3.1.2-2。

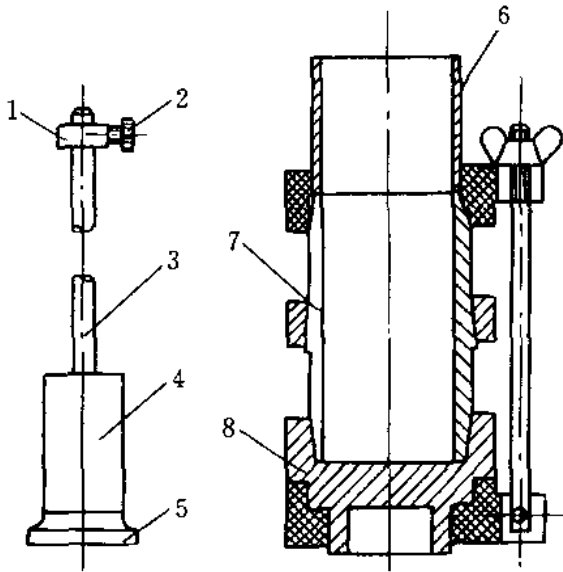


图 3.1.2-1 击实筒

1—套环；2—定位螺丝；3—导杆；4—击锤；
5—底板；6—套筒；7—饱和器；8—底板

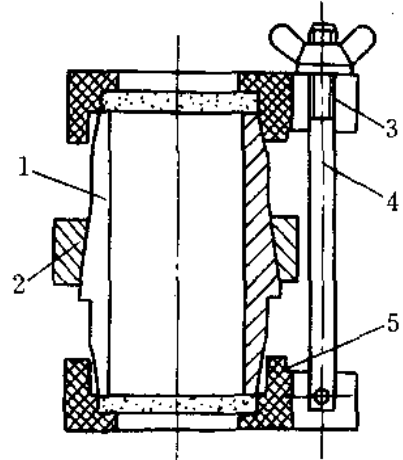


图 3.1.2-2 饱和器

1—土样筒；2—紧箍；3—夹板；
4—拉杆；5—透水板

3 切土盘：见图 3.1.2-3。

4 切土器和切土架：见图 3.1.2-4。

5 分样器：见图 3.1.2-5。

6 承膜筒：见图 3.1.2-6。

7 制备砂样圆模：见图 3.1.2-7，用于冲填土或砂性土。

3.1.3 天平：称量 200 g，分度值 0.01 g；称量 1000 g，分度值 0.1 g；称量 5000 g，分度值 1 g。

3.1.4 量表：量程 30 mm，分度值 0.01 mm。

3.1.5 橡皮膜：对直径 39.1 mm 和 61.8 mm 的试样，橡皮膜厚度以 0.1~0.2 mm 为宜；对直径 101 mm 的试样，橡皮膜厚度以 0.2~0.3 mm 为宜。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 天平：应按相应的检定规程规定进行检定。

3.2.2 应变控制式三轴仪：应按 SL118--95 规定的方法进行校准。

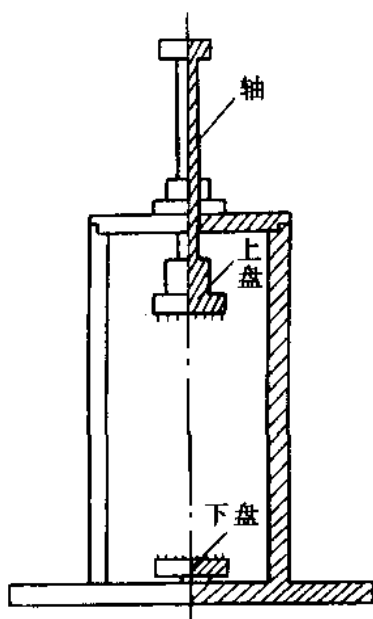


图 3.1.2-3 切土盘

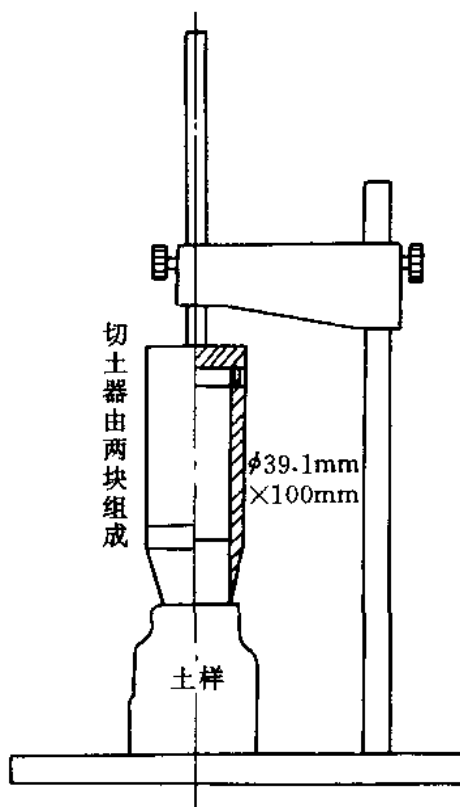


图 3.1.2-4 切土器和切土架

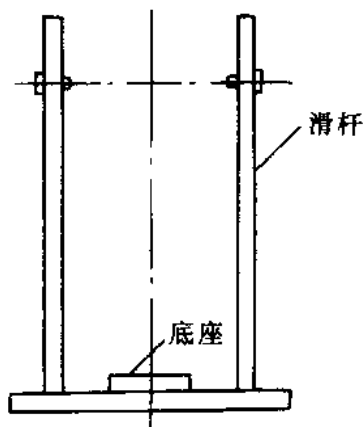
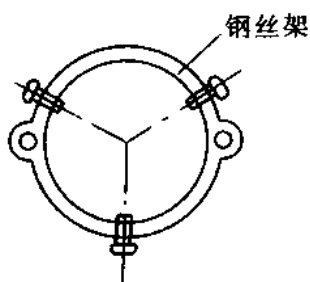


图 3.1.2-5 原状土分样器

3.2.3 量表:应按 JJG379—95《大量程百分表检定规程》进行检定。

3.3 仪器检查

3.3.1 周围压力控制系统和反压力控制系统的仪表的误差应小于全量程的 $\pm 1\%$, 采用传感器时, 其误差应小于全量程的

±0.5%，根据试样的强度大小，选择不同量程的测力计，最大轴向压力的准确度不小于1%。

3.3.2 孔隙压力量测系统的气泡应排除。其方法是：孔隙压力量测系统中充以无气水（煮沸冷却后的蒸馏水）并施加压力，小心打开孔隙压力阀，让管路中的气泡从压力室底座排出。应反复几次，直到气泡完全冲出为止（若用零位指示器时，将零位指示器中的水银移入贮槽内，关闭量管阀，用调压筒对孔隙压力测量系统加压排除气泡，需要注意，不要使贮槽内水

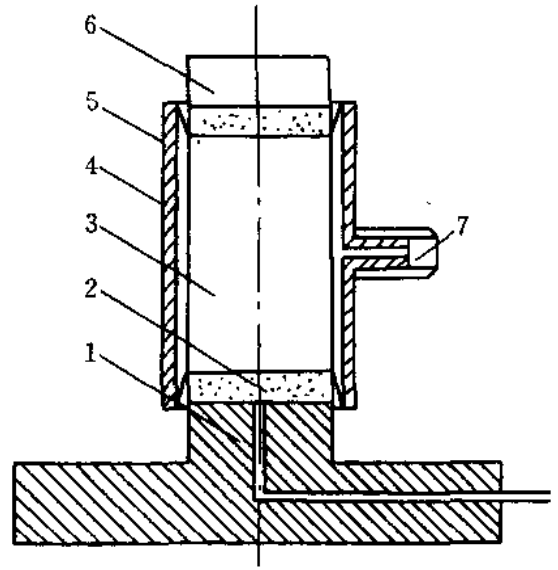


图 3.1.2-6 承膜筒安装示意图
1—压力室底座；2—透水板；3—试样；4—承膜筒；5—橡皮膜；6—上帽；7—吸气孔

银冲出指示器。排气完毕后，从贮槽中移回水银，关闭孔隙压力

阀，用调压筒施加压力)。孔隙压力量测系统的体积因数，应小于 $1.5 \times 10^{-5} \text{cm}^3/\text{kPa}$ 。

3.3.3 排水管路应通畅。活塞在轴套内应能自由滑动，各连接处应无漏水漏气现象。俟仪器检查完毕，关周围压力阀、孔隙压力阀和排水阀，以备使用。

3.3.4 橡皮膜在使用前应仔细检查。其方法是扎紧两端，在膜内充气，然后沉入水下检查应无气泡溢出。

3.3.5 仪器检查的各项结果应符合 SL118—95 的规定。

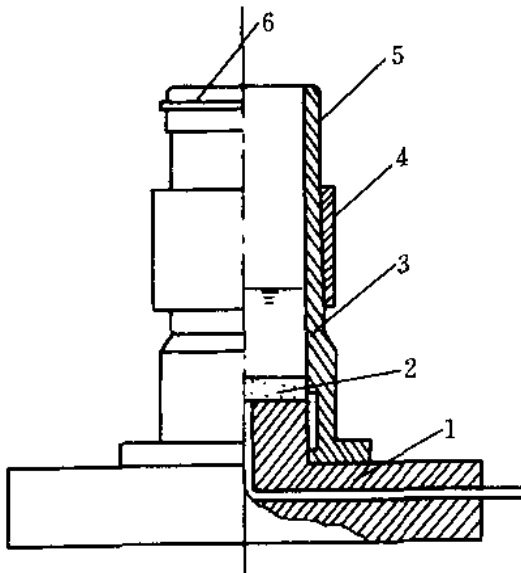


图 3.1.2-7 制备砂样圆模
1—压力室底座；2—透水板；3—制样圆模（两片合成）；4—紧箍；5—橡皮膜；6—橡皮圈

4 操作步骤

4.1 试样制备

4.1.1 试样尺寸应符合下列要求。

试样高度 H 与直径 D 之比 (H/D) 应为 2.0~2.5, 对于有裂隙、软弱面或构造面的试样, 直径 D 宜采用 101 mm。

4.1.2 原状土试样制备。

1 对于较软的土样, 先用钢丝锯或削土刀切取一稍大于规定尺寸的土柱, 放在切土盘的上、下圆盘之间, 见图

3.1.2-3。再用钢丝锯或削土刀

紧靠侧板, 由上往下细心切削, 边切削边转动圆盘, 直至土样的直径被削成规定的直径为止。然后按试样高度的要求, 削平上下两端。对于直径为 10 cm 的软粘土土样, 可先用分样器 (图 3.1.2-5) 分成 3 个土柱, 然后再按上述的方法, 切削成直径为 39.1 mm 的试样。

2 对于较硬的土样, 先用削土刀或钢丝锯切取一稍大于规定尺寸的土柱, 上、下两端削平, 按试样要求的层次方向, 放在切土架上, 用切土器切削, 见图 3.1.2-4。先在切土器刀口内壁涂上一薄层油, 将切土器的刀口对准土样顶面, 边削土边压切土器, 直至切削到比要求的试样高度约高 2 cm 为止, 然后拆开切土器, 将试样取出, 按要求的高度将两端削平。

试样的两端面应平整, 互相平行, 侧面垂直, 上下均匀。在切样过程中, 若试样表面因遇砾石而成孔洞, 允许用切削下的余土填补。

3 将切削好的试样称量, 直径 101 mm 的试样准确至 1 g; 直

表 4.1.1 土样粒径与试样直径的关系表

试样直径 D (mm)	允许粒径 d (mm)
39.1	$d < \frac{1}{10}D$
61.8	$d < \frac{1}{10}D$
101.0	$d < \frac{1}{5}D$

径 61.8 mm 和 39.1 mm 的试样准确至 0.1 g。试样高度和直径用卡尺量测，试样的平均直径按式 (4.1.2) 计算：

$$D_0 = \frac{D_1 + 2D_2 + D_3}{4} \quad (4.1.2)$$

式中 D_0 ——试样平均直径，mm；

D_1 、 D_2 、 D_3 ——分别为试样上、中、下部位的直径，mm。

取切下的余土，平行测定含水率，取其平均值作为试样的含水率。

对于同一组原状试样，密度的差值不宜大于 0.03 g/cm^3 ，含水率差值不宜大于 2%。

4 对于特别坚硬的和很不均匀的土样，如不易切成平整、均匀的圆柱体时，允许切成与规定直径接近的柱体，按所需试样高度将上下两端削平，称取质量，然后包上橡皮膜，用浮称法称试样的质量，并换算出试样的体积和平均直径。

4.1.3 扰动土试样制备（击实法）。

1 选取一定数量的代表性土样（对直径 39.1 mm 试样约取 2 kg；61.8 mm 和 101 mm 试样分别取 10 kg 和 20 kg），经风干、碾碎、过筛（筛的孔径应符合本规程表 4.1.1 规定），测定风干含水率，按要求的含水率算出所需加水量 [计算方法参照 SL237—011—1999 中式 (4.1.1)]。

2 将需加的水量喷洒到土料上拌匀，稍静置后装入塑料袋，然后置于密闭容器内至少 20 h，使含水率均匀。取出土料复测其含水率。测定的含水率与要求的含水率的差值应小于 $\pm 1\%$ 。否则需调整含水率至符合要求为止。

3 击样筒的内径应与试样直径相同。击锤的直径宜小于试样直径，也允许采用与试样直径相等的击锤。击样筒壁在使用前应洗擦干净，涂一薄层凡士林。

4 根据要求的干密度，称取所需土质量。按试样高度分层击实，粉质土分 3~5 层，粘质土分 5~8 层击实。各层土料质量相等。每层击实至要求高度后，将表面刨毛，然后再加第 2 层土料。

如此继续进行，直至击完最后一层。将击样筒中的试样两端整平，取出称其质量，一组试样的密度差值应小于 0.02 g/cm^3 。

4.1.4 冲填土试样制备（土膏法）。

1 取代表性土样风干、过筛，调成略大于液限的土膏，然后置于密闭容器内，储存 20 h 左右，测定土膏含水率，同一组试样含水率的差值不应大于 1%。

2 在压力室底座上装对开圆模和橡皮膜（在底座上的透水板上放一湿滤纸，连接底座的透水板均应饱和），橡皮膜与底座扎紧。称制备好的土膏，用调土刀将土膏装入橡皮膜内，装土膏时避免试样内夹有气泡。试样装好后整平上端，称剩余土膏，计算装入土膏的质量。在试样上部依次放湿滤纸、透水板和试样帽并扎紧橡皮膜。然后打开孔隙压力阀和量管阀，降低量水管，使其水位低于试样中心约 50 cm，测记量水管读数，算出排水后试样的含水率。拆去对开模，测定试样上、中、下部位的直径及高度，按本规程式（4.1.2）计算试样的平均直径及体积。

4.1.5 砂类土试样制备。

1 根据试验要求的试样干密度和试样体积称取所需风干砂样质量，分三等分，在水中煮沸，冷却后待用。

2 开孔隙压力阀及量管阀，使压力室底座充水。将煮沸过的透水板滑入压力室底座上，并用橡皮带把透水板包扎在底座上，以防砂土漏入底座中。关孔隙压力阀及量管阀，将橡皮膜的一端套在压力室底座上并扎紧，将对开模套在底座上，将橡皮膜的上端翻出，然后抽气，使橡皮膜贴紧对开模内壁，见图 3.1.2-7。

3 在橡皮膜内注脱气水约达试样高的 $1/3$ 。用长柄小勺将煮沸冷却的一份砂样装入膜中，填至该层要求高度^①。

4 第 1 层砂样填完后，继续注水至试样高度的 $2/3$ ，再装第 2 层砂样。如此继续装样，直至模内装满为止。如果要求干密度较

① 对含有细粒土和要求高密度的试样，可采用干砂制备，用水头饱和或反压力饱和。

大，则可在填砂过程中轻轻敲打对开模，务使所称出的砂样填满规定的体积。然后放上透水板、试样帽，翻起橡皮膜，并扎紧在试样帽上。

5 开量管阀降低量管，使管内水面低于试样中心高程以下约 0.2 m (对于直径 101 mm 的试样约 0.5 m)，在试样内产生一定负压，使试样能站立。拆除对开模，按本规程 4.1.2 之 3 量试样高度与直径，复核试样干密度。各试样之间的干密度差值应小于 0.03 g/cm^3 。

4.2 试样饱和

4.2.1 抽气饱和。将装有试样的饱和器置于无水的抽气缸内，进行抽气，当真空度接近当地 1 个大气压后，应继续抽气，继续抽气时间宜符合下列要求：

粉质土	大于 0.5 h
粘质土	大于 1 h
密实的粘质土	大于 2 h

当抽气时间达到上述要求后，徐徐注入清水，并保持真空度稳定。待饱和器完全被水淹没即停止抽气，并释放抽气缸的真空。试样在水下静置时间应大于 10 h，然后取出试样并称其质量。

4.2.2 水头饱和。对于粉土或粉质砂土，均可直接在仪器上用水头饱和。其方法是先按本规程 4.3.1 之 1 至 4 步骤安装完毕（试样顶用透水帽），然后施加 20 kPa 的周围压力，并同时提高试样底部量管的水面和降低连接试样顶部固结排水管的水面，使两管水面差在 1 m 左右。打开量管阀、孔隙压力阀和排水阀，让水自下而上通过试样，直至同一时间间隔内量管流出的水量与固结排水管内的水量相等为止。

4.2.3 二氧化碳 (CO_2) 饱和。二氧化碳饱和适用于无粘性的松砂、紧砂及密度低的粉质土。二氧化碳的饱和装置见图 4.2.3，其步骤如下。

1 试样安装完成后，装上压力室罩，将各阀门关闭，开周围压力阀对试样施加 40~50 kPa 的周围压力。

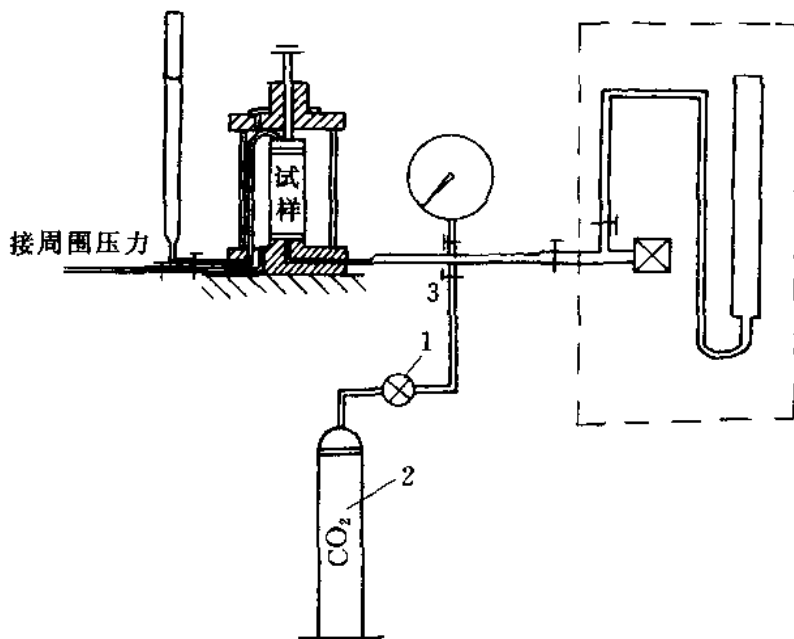


图 4.2.3 二氧化碳饱和装置图

1—减压阀；2—CO₂ 储气瓶；3—供气阀

2 将减压阀调至 20 kPa，开供气阀使 CO₂ 气体由试样底部输入试样内。

3 开体变管阀，当体变管内的水面无气泡时关闭供气阀。

4 开孔隙压力阀及量管阀、升高量管内水面，使保持高于体变管内水面约 0.2 m。

5 当量管内流出的水量约等于体变管内上升的水量为止，再继续水头饱和后，关闭体变管阀及孔隙压力阀。

4.2.4 反压力饱和。按本规程 4.2.1、4.2.2 或 4.2.3 规定进行试样饱和，并用 B 值（孔隙压力系数）检查饱和度，如试样的饱和度达不到 99%，可对试样施加反压力以达到完全饱和。

施加反压力装置见图 3.1.1。其步骤如下。

1 试样装好以后装上压力室罩，关孔隙压力阀和反压力阀，测记体变管读数。先对试样施加 20 kPa 的周围压力预压。并开孔隙压力阀待孔隙压力稳定后记下读数，然后关孔隙压力阀。

2 反压力应分级施加，并同时分级施加周围压力，以尽量减少对试样的扰动。在施加反压力过程中，始终保持周围压力比反

压力大 20 kPa。

反压力和周围压力的每级增量对软粘土取 30 kPa。对坚实的土或初始饱和度较低的土，取 50~70 kPa。

3 操作时，先调周围压力至 50 kPa，并将反压力系统调至 30 kPa，同时打开周围压力阀和反压力阀，再缓缓打开孔隙压力阀，待孔隙压力稳定后，测记孔隙压力计和体变管读数，再施加下一级的周围压力和反压力。

4 算出本级周围压力下的孔隙压力增量 Δu ，并与周围压力增量 $\Delta\sigma_3$ 比较，如 $\Delta u/\Delta\sigma_3 < 1$ ，则表示试样尚未饱和，这时关孔隙压力阀、反压力阀和周围压力阀，继续按上述规定施加下一级周围压力和反压力。

5 当试样在某级压力下达到 $\Delta u/\Delta\sigma_3 = 1$ 时，应保持反压力不变，增大周围压力，假若试样内增加的孔隙压力等于周围压力的增量，表明试样已完全饱和；否则应重复上述步骤，直至试样饱和为止。

4.3 试样安装和固结

4.3.1 不固结不排水剪试验 (UU 试验)。

1 对压力室底座充水，在底座上放置不透水板，并依次放置试样、不透水板及试样帽。对于冲填土或砂性土的试样安装，分别按本规程 4.1.4 或 4.1.5 规定进行。

2 将橡皮膜套在承膜筒内，两端翻出筒外（见图 3.1.2-6），从吸气孔吸气，使膜贴紧承膜筒内壁，然后套在试样外，放气，翻起橡皮膜的两端，取出承膜筒。用橡皮圈将橡皮膜分别扎紧在压力室底座和试样帽上。

3 装上压力室罩。安装时应先将活塞提升，以防碰撞试样，压力室罩安放后，将活塞对准试样帽中心，并均匀地旋紧螺丝，再将轴向测力计对准活塞。

4 开排气孔，向压力室充水，当压力室内快注满水时，降低进水速度，水从排气孔溢出时，关闭排气孔。

5 关体变管阀及孔隙压力阀，开周围压力阀，施加所需的周

围压力。周围压力大小应与工程的实际荷载相适应，并尽可能使最大周围压力与土体的最大实际荷载大致相等。也可按 100、200、300、400 kPa 施加。

6 旋转手轮，同时转动活塞，当轴向测力计有微读数时表示活塞已与试样帽接触。然后将轴向测力计和轴向位移计的读数调整到零位。

4.3.2 固结不排水剪试验（测孔隙压力， \overline{CU} 试验）。

1 开孔隙压力阀及量管阀，使压力室底座充水排气，并关阀。将煮沸过的透水板滑入压力室底座上。然后放上湿滤纸和试样，试样上端亦放一湿滤纸及透水板。在其周围贴上 7~9 条浸湿的滤纸条（宽度为试样直径的 $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{6}$ 左右），滤纸条上端与透水石连接^①。

2 按本规程 4.3.1 之 2 规定将橡皮膜套在试样外。橡皮膜下端扎紧在压力室底座上。

3 用软刷子或双手自下向上轻轻按抚试样，以排除试样与橡皮膜之间的气泡。对于饱和软粘土，可开孔隙压力阀及量管阀，使水徐徐流入试样与橡皮膜之间，以排除夹气，然后关闭。

4 开排水管阀，使水从试样帽徐徐流出以排除管路中气泡，并将试样帽置于试样顶端。排除顶端气泡，将橡皮膜扎紧在试样帽上。

5 降低排水管，使其水面至试样中心高程以下 20~40 cm，吸出试样与橡皮膜之间多余水分，然后关排水管阀。

6 按本规程 4.3.1 之 3 和 4 的规定，装上压力室罩并注满水。然后放低排水管使其水面与试样中心高度齐平，并测记其水面读数。关排水管阀。

7 使量管水面位于试样中心高度处。开量管阀（若用零位指示器时用调压筒调整零位指示器的水银面于毛细管指示线），测读传感器，记下孔隙压力计起始读数，然后关量管阀。

① 如要施加反压力饱和试样，所贴的滤纸条必须中间断开约 1/4 试样高度。或自底部向上贴至 3/4 试样高度处。

8 按本规程 4.3.1 之 5 的规定,施加周围压力,并调整各测力计和位移计读数。

9 打开孔隙压力阀(若用零位指示器,用调压筒先将孔隙压力计读数调至接近该级周围压力大小,然后缓缓打开孔隙压力阀,并同时旋转调压筒,使毛细管内水银面保持不变),测记稳定后的孔隙压力读数,减去孔隙压力计起始读数,即为周围压力下试样的初始孔隙压力 u 。

注:如不测孔隙压力。可以不做本款要求的试验。

10 开排水管阀的同时开动秒表,按 0、0.25、1、4、9 min、…时间测记排水管水面及孔隙压力计读数。在整个试验过程中(零位指示器的水银面始终保持在原来位置),排水管水面应置于试样中心高度处。固结度至少应达到 95%(随时绘制排水量 ΔV 与时间平方根或时间对数曲线见图 4.3.2 (a)、(b)^①或孔隙压力消散度 U 与时间对数曲线)。

11 如要求对试样施加反压力时,则按本规程 4.2.4 规定进行。然后关体变管阀,增大周围压力,使周围压力与反压力之差等于原来选定的周围压力,记录稳定的孔隙压力读数和体变管水面读数作为固结前的起始读数。

12 开体变管阀,让试样通过体变管排水,并按本规程 4.3.2 之 9 及 4.3.2 之 10 规定进行排水固结。

13 固结完成后,关排水管阀或体变管阀,记下体变管或排水管和孔隙压力计的读数。然后转动细调手轮,到测力计读数开始微动时,表示活塞已与试样接触,记下轴向位移计读数,即为固结下沉量 Δh 。依此算出固结后试样高度 h_c 。然后将测力计、垂直位移计读数都调至零。

14 其余几个试样按同样方法安装试样,并在不同周围压力下排水固结。

4.3.3 固结排水试验(CD 试验)。

① 若试样的主固结时间已经掌握,也可不读排水管和孔隙压力的过程读数。

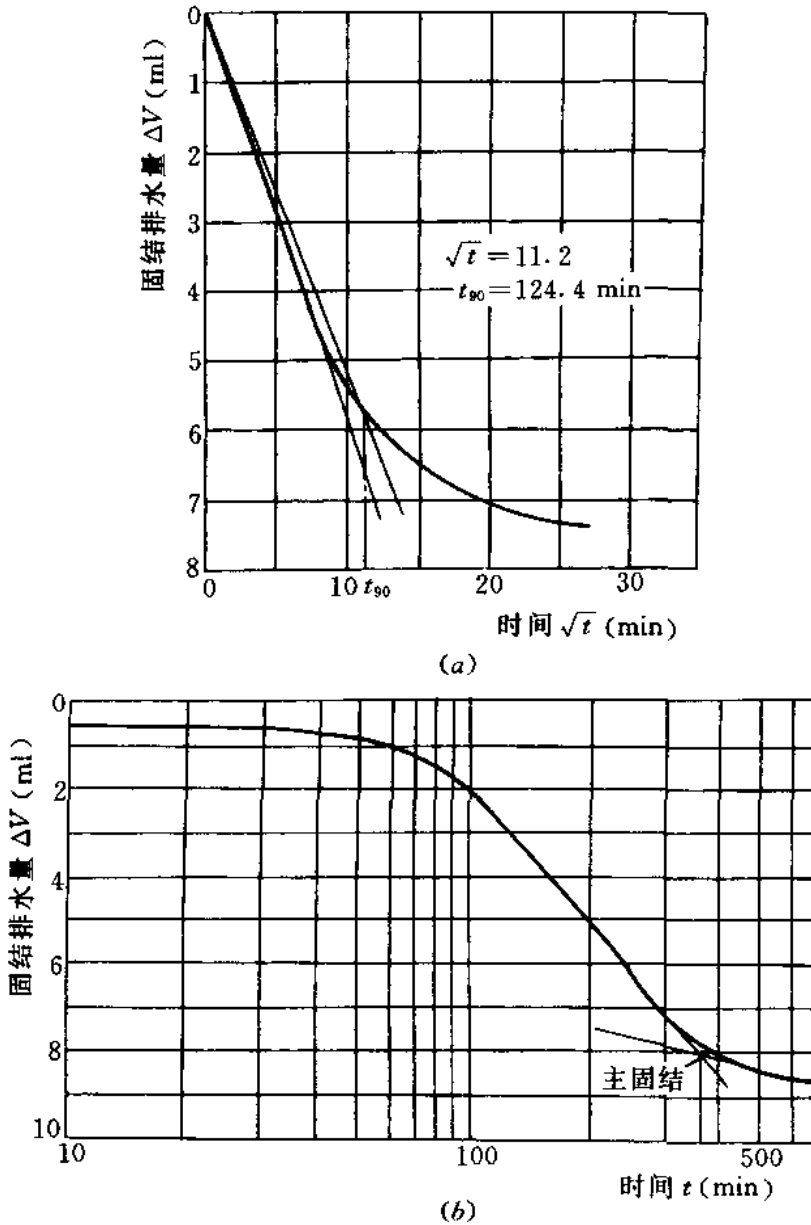


图 4.3.2 排水量与排水时间的关系曲线
 (a) 固结排水量与时间平方根曲线；(b) 固结排水量与时间对数曲线

- 1 试样安装按本规程 4.3.2 之 1~6 规定进行。
- 2 排水固结按本规程 4.3.2 之 9~14 规定进行。

4.4 试样剪切

- 4.4.1 试验机的电动机启动之前,应按表 4.4.1 规定将各阀门关

表 4.4.1 各阀门开关状态

试验方法	体变管阀 (18)	排水管阀 (19)	周围压力阀 (14)	孔隙压力阀 (16)	量管阀 (15)
UU 试验	关	关	开	关	关
$\overline{\text{CU}}$ 试验 (测孔隙压力)	关	关	开	开	关
CU 试验	关	关	开	关	关
CD 试验	开	开	开	开	关

注 试验中用体变管或排水管。

闭或开启。

4.4.2 试样的剪切应变速率按表 4.4.2 规定选择。

表 4.4.2 剪切应变速率表

试验方法	剪切应变速率 (%/min)	备 注
UU 试验	0.5~1.0	
$\overline{\text{CU}}$ 试验 (测孔隙压力)	0.1~0.5 0.1~0.05 <0.05	粉 质 土 粘 质 土 高密度粘性土
CU 试验	0.5~1.0	
CD 试验	0.012~0.003	

4.4.3 开动电动机，合上离合器，进行剪切。开始阶段，试样每产生轴向应变 0.3%~0.4%测记测力计读数和轴向位移计读数各 1 次。当轴向应变达 3%以后，读数间隔可延长为 0.7%~0.8%各测记 1 次。当接近峰值时应加密读数。如果试样为特别硬脆或软弱的土可酌情加密或减少测读的次数。

4.4.4 当出现峰值后，再继续剪 3%~5%轴向应变；若测力计读数无明显减少，则剪切至轴向应变达 15%~20%。

4.4.5 $\overline{\text{CU}}$ 试验(测孔隙压力)，测读轴向位移计时应同时测读孔隙压力计的读数；CD 试验，测读轴向位移计时，应同时测读体变管读数或排水管读数。

4.4.6 试验结束后关闭电动机，关周围压力阀， \overline{CU} 试验（测孔隙压力）应关闭孔隙压力阀；CD 试验，则应关闭孔隙压力阀和体变管阀。然后拔出离合器，倒转手轮，开排气孔，排去压力室内的水，拆除压力室罩，揩干试样周围的余水，脱去试样外的橡皮膜，描述破坏后形状，称试样质量，测定试验后含水率。

对于 39.1 mm 直径的试样，宜取整个试样烘干；61.8 mm 和 101 mm 直径的试样允许切取剪切面附近有代表性的部分土样烘干。

4.4.7 对其余几个试样，在不同周围压力下以同样的剪切应变速率进行试验。

5 计算和制图

5.1 计算

5.1.1 试样的高度、面积、体积及剪切时的面积计算公式列于表 5.1.1。

表 5.1.1 高度、面积、体积计算表

项 目	起 始	固 结 后		剪 切 时 校 正 值
		按实测固结下沉	等应变简化式	
试样高度 (cm)	h_0	$h_c = h_0 - \Delta h_c$	$h_c = h_0$ $\times \left(1 - \frac{\Delta V}{V_0}\right)^{1/3}$	
试样面积 (cm ²)	A_0	$A_c = \frac{V_0 - \Delta V}{h_c}$	$A_c = A_0$ $\times \left(1 - \frac{\Delta V}{V_0}\right)^{2/3}$	$A_a = \frac{A_0}{1 - 0.01\epsilon_1}$ (不固结不排水剪) $A_a = \frac{A_c}{1 - 0.01\epsilon_1}$ (固结不排水剪) $A_a = \frac{V_c - \Delta V_i}{h_c - \Delta h_i}$ (固结排水剪)
试样体积 (cm ³)	V_0	$V_c = h_c A_c$		

表中 Δh_c ——固结下沉量，由轴向位移计测得，cm；

ΔV ——固结排水量（实测或试验前后试样质量差换算）， cm^3 ；

ΔV_i ——排水剪中剪切时的试样体积变化，按体变管或排水
管读数求得， cm^3 ；

ε_1 ——轴向应变，% $\left\{ \begin{array}{l} \text{不固结不排水剪中的 } \varepsilon_1 \text{ 等于 } \frac{\Delta h_i}{h_0}, \\ \text{固结不排水剪及固结排水剪中的 } \varepsilon_1 \text{ 等于 } \frac{\Delta h_i}{h_c} \end{array} \right.$ ；

Δh_i ——试样剪切时高度变化，由轴向位移计测得（cm），为
方便起见，可预先绘制 $\Delta V \sim h_c$ 及 $\Delta V \sim A_c$ 的关系
线备用。

5.1.2 按式（5.1.2）计算主应力差（ $\sigma_1 - \sigma_3$ ）：

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{CR}{A_a} \times 10 \quad (5.1.2)$$

式中 σ_1 ——大主应力，kPa；

σ_3 ——小主应力，kPa；

C ——测力计率定系数，N/0.01 mm；

R ——测力计读数，0.01 mm；

A_a ——试样剪切时的面积， cm^2 ；

10——单位换算系数。

5.1.3 按式（5.1.3）计算有效主应力比 σ'_1/σ'_3 ：

$$\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\sigma_3} + 1 \quad (5.1.3)$$

式中 $\sigma'_1 = \sigma_1 - u$ ，kPa；

$\sigma'_3 = \sigma_3 - u$ ，kPa；

σ'_1 、 σ'_3 ——有效大主应力和有效小主应力，kPa；

σ_1 、 σ_3 ——大主应力与小主应力，kPa；

u ——孔隙水压力，kPa。

5.1.4 按式（5.1.4-1）、式（5.1.4-2）计算孔隙压力系数 B 和 A ：

$$B = \frac{u}{\sigma_3} \quad (5.1.4-1)$$

$$A = \frac{u_d}{B(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (5.1.4-2)$$

式中 u ——试样在周围压力下产生的初始孔隙压力, kPa;

u_d ——试样在主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 下产生的孔隙压力, kPa。

5.2 制图

5.2.1 根据需要分别绘制主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与轴向应变 ϵ_1 的关系曲线 (图 5.2.1-1); 有效主应力比 (σ'_1/σ'_3) 与轴向应变 ϵ_1 的关系曲线 (图 5.2.1-2); 孔隙压力 u 与轴向应变 ϵ_1 的关系曲线 (图 5.2.1-3); 用 $\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right)$ 与 $\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right)$ 作坐标的应力路径关系曲线 (图 5.2.1-4)。

5.2.2 破坏点的取值。以 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 或 σ'_1/σ'_3 的峰点值作为破坏点。如 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 和 σ'_1/σ'_3 均无峰值, 应以应力路径的密集点或按一定轴向应变 (一般可取 $\epsilon_1 = 15\%$, 经过论证也可根据工程情况选取破坏应变) 相应的 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 或 σ_1/σ_3 作为破坏强度值。

5.2.3 绘制强度包线。

1 对于不固结不排水剪切试验及固结不排水剪切试验, 以法向应力 σ 为横坐标, 剪应力 τ 为纵坐标。在横坐标上以 $\frac{\sigma_{1f} + \sigma_{3f}}{2}$ 为圆心, $\frac{\sigma_{1f} - \sigma_{3f}}{2}$ 为半径 (f 注脚表示破坏时的值), 绘制破坏总应力圆后, 作诸圆包线。该包线的倾角为内摩擦角 φ_u 或 φ_{cu} 。包线在纵轴上的截距为粘聚力 c_u 或 c_{cu} 。见图 5.2.3-1 及图 5.2.3-2。

2 在固结不排水剪切中测孔隙压力, 则可确定试样破坏时的有效应力。以有效应力 σ' 为横坐标, 剪应力 τ 为纵坐标。在横坐标轴上以 $\frac{\sigma'_{1f} + \sigma'_{3f}}{2}$ 为圆心, 以 $\frac{\sigma'_{1f} - \sigma'_{3f}}{2}$ 为半径, 绘制不同周围压力下的有效破坏应力圆后, 作诸圆包线, 包线的倾角为有效内摩擦角 φ' , 包线在纵轴上的截距为有效粘聚力 c' 。

3 在排水剪切试验中, 孔隙压力等于零, 抗剪强度包线的倾角和在纵轴上的截距分别以 φ_d 和 c_d 表示, 如图 5.2.3-3。

4 如各应力圆无规律, 难以绘制各圆的强度包线, 可按应力路

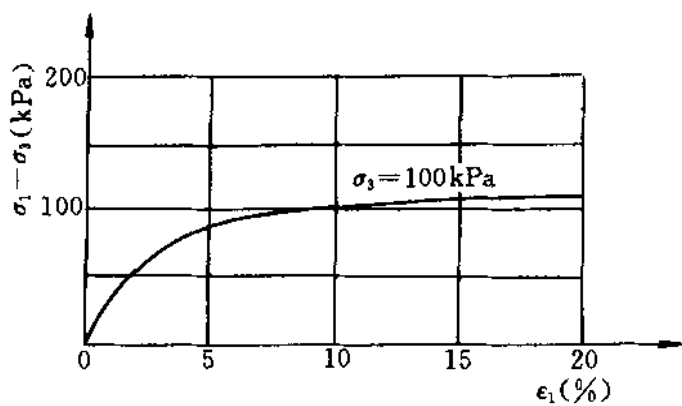


图 5.2.1-1 主应力差与轴向应变关系曲线

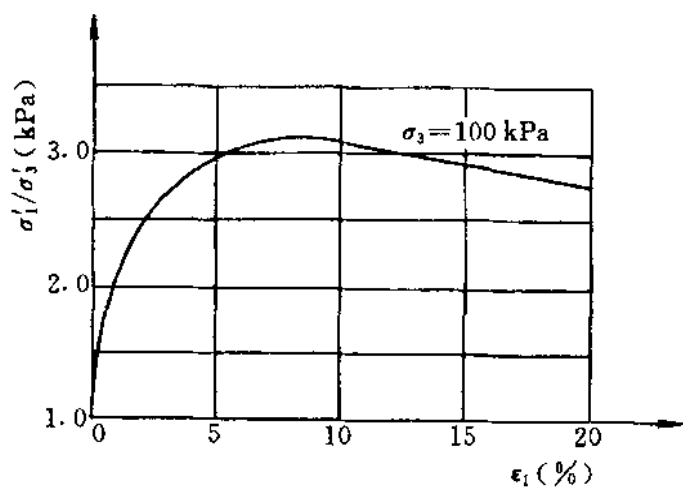


图 5.2.1-2 有效主应力比与轴向应变关系曲线

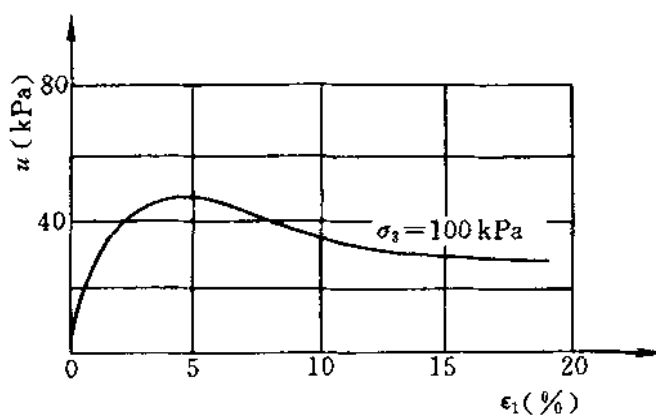


图 5.2.1-3 孔隙压力与轴向应变关系曲线

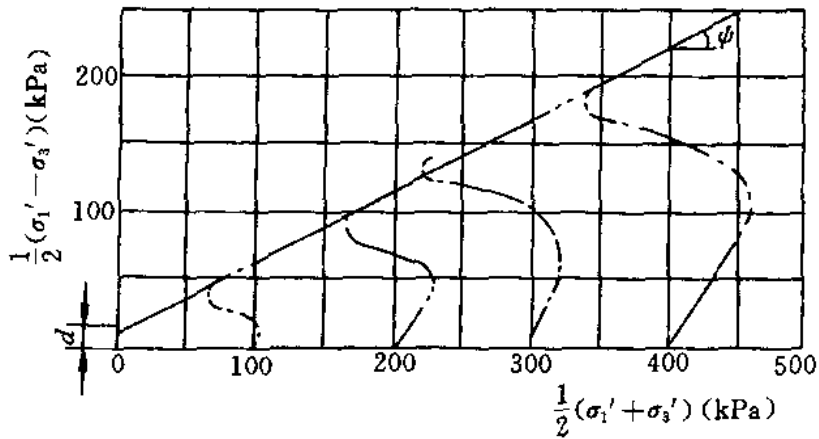


图 5.2.1-4 应力路径曲线 (正常固结粘土)

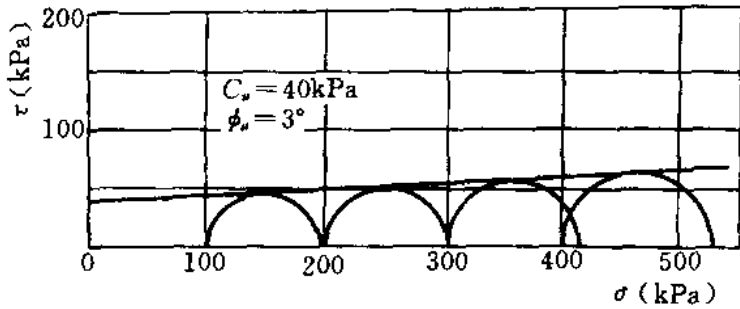


图 5.2.3-1 不固结不排水剪强度包线

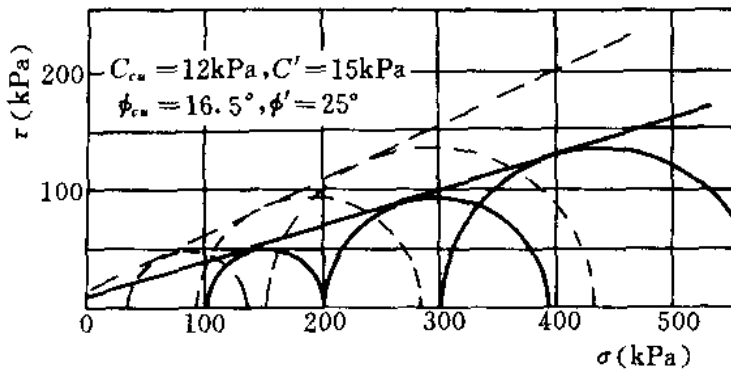


图 5.2.3-2 固结不排水剪强度包线

径取值,即以 $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ ($\frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2}$) 作纵坐标, $\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ ($\frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2}$) 作横坐标, 绘制应力圆,作通过各圆之圆顶点的平均直线。见图 5.2.3-4。根据直线的倾角及在纵坐标上的截距,按下列两式计算 ϕ' 和 c' :

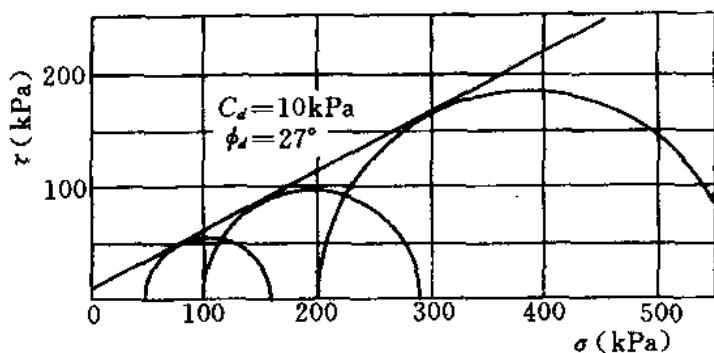


图 5.2.3-3 固结排水剪强度包线

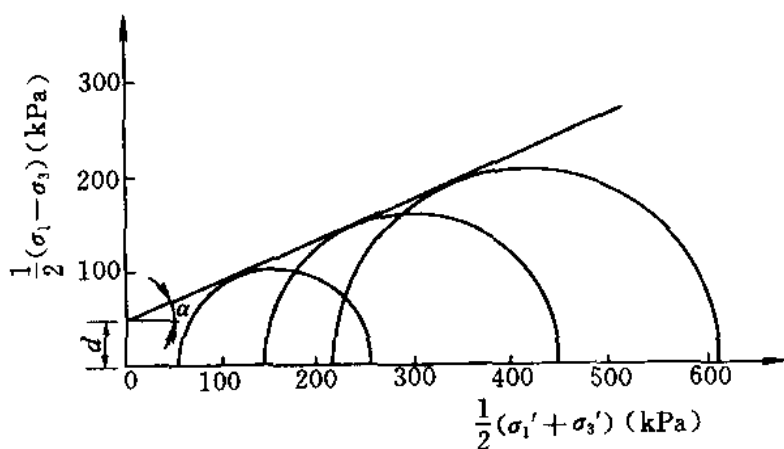


图 5.2.3-4 应力路径包线

$$\phi = \sin^{-1} \tan \alpha \quad (5.2.3-1)$$

$$c' = \frac{d}{\cos \phi} \quad (5.2.3-2)$$

式中 α ——平均直线的倾角 ($^{\circ}$);

d ——平均直线在纵轴上的截距, kPa。

5.3 变形参数的整理

5.3.1 E 、 μ 变形参数的整理按本规程“附 a”的方法进行。

5.3.2 E 、 B 变形参数的整理按本规程“附 b”的方法进行。

6 记 录

6.0.1 本试验的记录格式如表 6.0.1-1、表 6.0.1-2、表 6.0.1-3。

表 6.0.1-1 三轴压缩试验记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
 土样编号 _____ 计算者 _____
 土样说明 _____ 校核者 _____
 试验方法 _____ 试验日期 _____

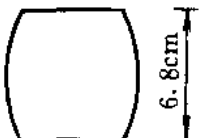
试样状态				周围压力 σ_3 (kPa)	
	起始值	固结后	剪切后		
直径 D (cm)				反压力 u_0 (kPa)	
高度 h (cm)				周围压力下的孔隙压力	
面积 A (cm ²)				u (kPa)	
体积 V (cm ³)				孔隙压力系数 $B = \frac{u}{\sigma_3}$	
质量 m (g)				破坏应变 ϵ_f (%)	
密度 ρ (g/cm ³)				破坏主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$	
干密度 ρ_d (g/cm ³)				(kPa)	
试样含水率				破坏大主应力 σ_{1f} (kPa)	
	起始值		剪切后		
盒号				破坏孔隙压力系数 $\bar{B}_f =$	
盒质量 (g)				$\frac{u_f}{\sigma_{1f}}$	
盒加湿土质量 (g)				相应的有效大主应力 σ'_1	
湿土质量 (g)				(kPa)	
盒加干土质量 (g)				相应的有效小主应力 σ'_3	
干土质量 (g)				(kPa)	
水质量 (g)				最大有效主应力比	
含水率 w (%)				$\left(\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3}\right)_{\max}$	
饱和度 S_r				孔隙压力系数	
				$A_f = \frac{u_{df}}{B(\sigma_1 - \sigma_3)_f}$	
试样破坏情况的描述	呈鼓状破坏 				
备注					

表 6.0.1-2 三轴压缩

土样编号 _____

周围压力 _____

试验者 _____

加反压力过程							说明 (检验 结果)
时间	周围压力	反压力	孔隙压力	孔隙压力 增 量	试样体积变化		
	σ_3 (kPa)	u_0 (kPa)	u (kPa)	Δu (kPa)	读数 (cm ³)	体变量 (cm ³)	

试验记录表

计算者 _____
 校核者 _____
 试验日期 _____

固 结 过 程							说 明
时间 (min)	量 管		孔 隙 压 力		体 变 管		
	读 数	排 水 量	读 数 (kPa)	压 力 值 (kPa)	读 数 (cm ³)	体 变 值 (cm ³)	

表 6.0.1-3 三轴压缩

土样编号 _____

试验方法 _____

试验日期 _____

轴向变形读数 Δh_i (0.01 mm)		轴向应变 $\epsilon_1 = \frac{\Delta h_i}{h_c}$ (%)	试样校正 后面积 $A_a = \frac{A_c}{1 - \epsilon_1}$ (cm ²)	测力计 表读数 R (0.1 mm)	主应力差 ($\sigma_1 - \sigma_3$) $= \frac{RC}{A_a} \times 10$ (kPa)	大主应力 $\sigma_1 = (\sigma_1 - \sigma_3) + \sigma_3$ (kPa)	孔隙压力	
							读数	压力值 (kPa)

试验记录表

试验者 _____

计算者 _____

校核者 _____

固结下沉量: $\Delta h =$ cm									
固结后高度: $h_r =$ cm									
固结后面积: $A_r =$ cm ²									
试样体积变化				有效大 主应力 σ'_1 (kPa)	有效小 主应力 σ'_3 (kPa)	有效主 应力比 $\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3}$	$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ (kPa)	$\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ (kPa)	$\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}$ (kPa)
排水管		体积变化							
读数	排出 水量 (cm ³)	读数	体变量 (cm ³)						

附 a E 、 μ 模型参数的资料整理

a. 1 切线弹性模量和切线泊松比的计算

a. 1. 0. 1 按下列两式计算切线弹性模量:

$$E_t = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \times \left[1 - \frac{R_f(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin\varphi)}{2c\cos\varphi + 2c\sigma_3\sin\varphi} \right]^2 \quad (\text{a. 1. 0. 1-1})$$

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (\text{a. 1. 0. 1-2})$$

式中 E_t ——切线弹性模量, kPa;

σ_3 ——周围压力, kPa;

P_a ——大气压力, kPa;

R_f ——破坏比, 数值小于 1;

φ ——土的内摩擦角, ($^\circ$);

c ——土的粘聚力, kPa;

K 、 n ——试验常数。

a. 1. 0. 2 切线泊松比按下列两式计算:

$$\mu_t = \frac{G - F \lg \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)}{(1 - A)^2} \quad (\text{a. 1. 0. 2-1})$$

$$A = \frac{D(\sigma_1 - \sigma_3)}{K p_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin\varphi)}{2c\cos\varphi + 2c\sigma_3\sin\varphi} \right]} \quad (\text{a. 1. 0. 2-2})$$

式中 G 、 F 、 D ——试验常数;

其余符号见本规程式 (a. 1. 0. 1)。

a. 2 应力应变的计算

a. 2. 0. 1 按下列三式计算体积应变和侧向应变:

$$\epsilon_v = \frac{\Delta V}{V_c} \quad (\text{a. 2. 0. 1-1})$$

$$\epsilon_v = \epsilon_1 + 2\epsilon_3 \quad (\text{a. 2. 0. 1-2})$$

$$\epsilon_3 = \frac{\epsilon_v - \epsilon_1}{2} \quad (\text{a. 2. 0. 1-3})$$

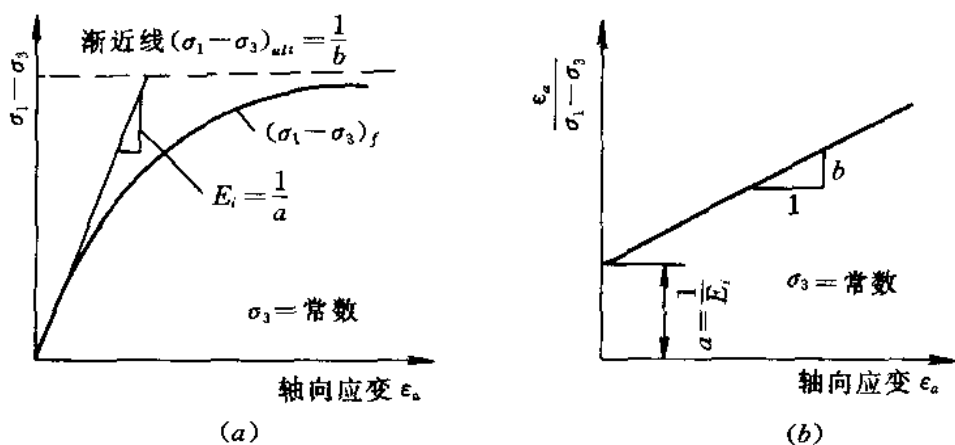
式中 ϵ_v ——试样在剪切过程中的体积应变，%；
 ΔV ——试样在剪切过程中的体积变化， cm^3 ；
 V_c ——试样固结后的体积， cm^3 ；
 ϵ_1 ——轴向应变，%；
 ϵ_3 ——侧向应变，%。

a. 2. 0. 2 主应力差的计算按本规程式 (5. 1. 2) 进行。

a. 3 试验常数的求得

a. 3. 0. 1 绘制应力—应变关系曲线。

根据康德纳的建议，在 σ_3 为常量下，三轴试验的应力应变关系近似双曲线关系。如附图 a. 3. 0. 1 (a)。



附图 a. 3. 0. 1 三轴试验的应力应变关系

(a) 双曲线应力应变关系；(b) 变换纵坐标的双曲线

双曲线关系式：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\epsilon_1}{a + b\epsilon_1} \quad (\text{a. 3. 0. 1-1})$$

变换纵坐标，如图 a. 3. 0. 1 (b)：

$$\frac{\epsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b\epsilon_1 \quad (\text{a. 3. 0. 1-2})$$

式中 a ——初始切线模量 E_i 的倒数；

b ——主应力差渐近值 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 的倒数。

由 a 和 b 即可求得初始切线模量和主应力差的渐近值。

按式 (a. 3. 0. 1-3) 计算破坏比 R_f ：

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (\text{a. 3. 0. 1-3})$$

式中 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ ——主应力差的破坏值，kPa；

$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ ——主应力差的渐近值，kPa。

a. 3. 0. 2 绘制 E_i 和 σ_3 的关系曲线。

根据简布对压缩试验的研究，初始切线模量与固结压力有以下关系：

$$E_i = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (\text{a. 3. 0. 2})$$

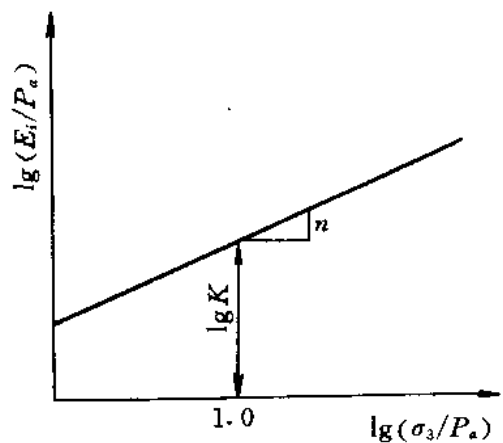
式中 p_a ——大气压力，kPa。

K 、 n 由 $\lg E_i \sim \lg \sigma_3$ 曲线 (附图 a. 3. 0. 2) 确定。

a. 3. 0. 3 绘制轴向应变与侧向应变关系曲线。

假定轴向应变 ϵ_a 与侧向应变 ϵ_r 成双曲线关系 (附图 a. 3. 0. 3)，即：

$$\epsilon_a = \frac{\epsilon_r}{f + D\epsilon_r} \quad (\text{a. 3. 0. 3-1})$$



变换纵坐标，如图 a. 3. 0. 3 (b)：

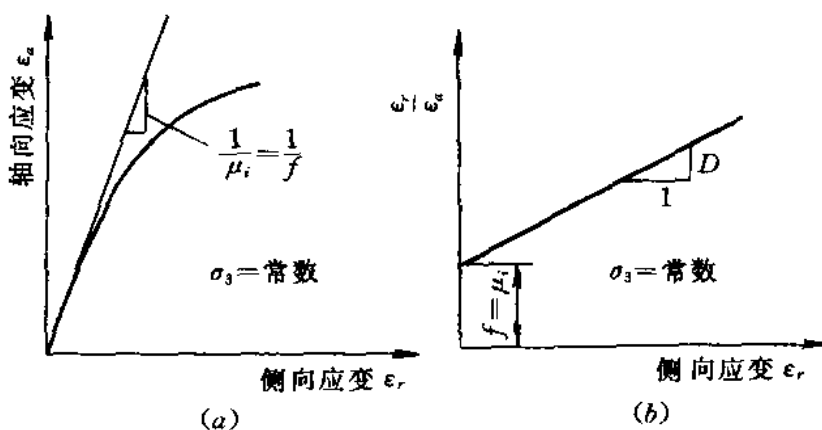
$$\frac{\epsilon_r}{\epsilon_a} = f + D\epsilon_r \quad (\text{a. 3. 0. 3-2})$$

附图 a. 3. 0. 2 $\lg E_i \sim \lg \sigma_3$ 关系曲线

式中 f ——初始切线泊松比；

D ——轴向应变渐近值的倒数。

从图 a. 3. 0. 3 中求得 f 、 D 值。



附图 a. 3. 0. 3 轴向应变与侧向应变关系
(a) 双曲线主应变关系; (b) 变换纵坐标的双曲线

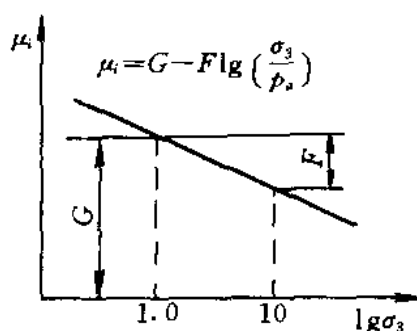
a. 3. 0. 4 绘制 μ_i 与 $\lg\sigma_3$ 关系曲线 (附图 a. 3. 0. 4):

$$\mu = G - F \lg\left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right) \quad (a. 3. 0. 4)$$

式中 μ_i ——不同 σ_3 作用下的初始泊松比;

G 、 F 由 $\mu_i \sim \lg\sigma_3$ 关系曲线求得。

式 (a. 1. 0. 1) 和式 (a. 1. 0. 2) 中共有 8 个参数: K 、 n 、 R_f 、 c 、 φ 、 G 、 D 、 F 。 c 和 φ 根据库伦-摩尔包线确定, 如本规程图 5. 2. 3-3。



附图 a. 3. 0. 4 $\mu_i \sim \lg\sigma_3$ 关系曲线

附 b E 、 B 模型参数的资料整理

b. 1 切线弹性模量和切线体积模量的计算

b. 1. 0. 1 切线弹性模量按下列两式计算:

$$E_t = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)^n \times \left[1 - \frac{R_f(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin\varphi)}{2c\cos\varphi + 2\sigma_3\sin\varphi} \right]^2 \quad (b. 1. 0. 1-1)$$

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (\text{b. 1. 0. 1-2})$$

式中 E_t ——切线弹性模量, kPa;

σ_3 ——周围压力, kPa;

p_a ——大气压力, kPa;

R_f ——破坏比, 数值小于 1;

φ ——土的内摩擦角, ($^\circ$);

c ——土的粘聚力, kPa;

K 、 n ——试验常数。

b. 1. 0. 2 切线体积模量按式 (b. 1. 0. 2) 计算:

$$B_t = K_b p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^m \quad (\text{b. 1. 0. 2})$$

式中 B_t ——切线体积模量, kPa;

K_b 、 m ——试验常数;

其余符号见式 (b. 1. 0. 1)。

b. 2 主应力差、体积应变和侧向应变的计算

b. 2. 0. 1 主应力差、体应变和侧向应变的计算, 见本规程“附 a”式 (5. 1. 2) 和式 (a. 2. 0. 1)。

b. 3 试验常数的推算

b. 3. 0. 1 绘制应力—应变关系曲线。

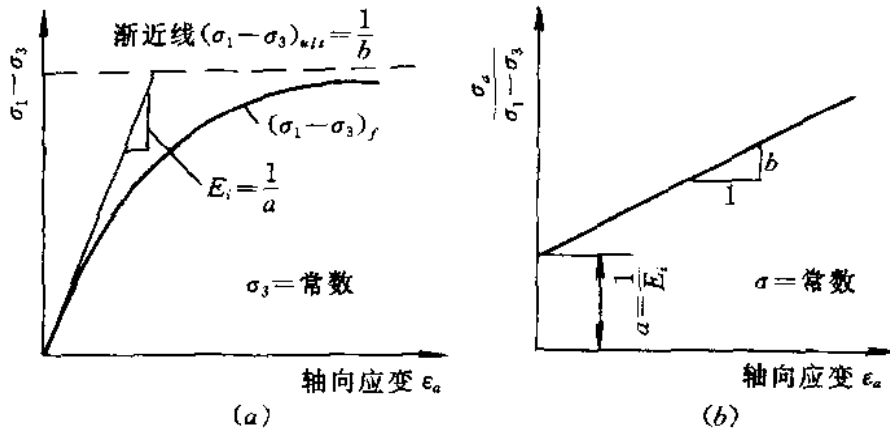
根据康德纳的建议, 在 σ_3 为常量下, 三轴试验的应力应变关系近似双曲线关系。如附图 b. 3. 0. 1 (a)。

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\epsilon_a}{a + b\epsilon_a} \quad (\text{b. 3. 0. 1-1})$$

变换纵坐标, 如附图 b. 3. 0. 1 (b)。

$$\frac{\epsilon_a}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b\epsilon_a \quad (\text{b. 3. 0. 1-2})$$

取应力水平 70% 和 95% 两点的连线, 求得 a 和 b 。 a 为直线在纵坐标上的截距; b 为直线的斜率。由 a 和 b 即可求得初始切线模量和主应力差的渐近线 (附图 b. 3. 0. 1)。



附图 b. 3. 0. 1 三轴试验的应力应变关系

破坏比按式 (b. 3. 0. 1-3) 计算:

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (\text{b. 3. 0. 1-3})$$

式中 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ —— 主应力差的破坏值, kPa;

$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ —— 主应力差的渐近值, kPa。

b. 3. 0. 2 绘制 E_i 和 σ_3 的关系曲线。

根据简布对压缩试验的研究, 初始切线模量与固结压力有以下关系:

$$E_i = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (\text{b. 3. 0. 2})$$

在双对数坐标纸上绘制 $E_i/p_a \sim \sigma_3/p_a$ 关系曲线 (附图 b. 3. 0. 2) 确定 K 、 n 值。

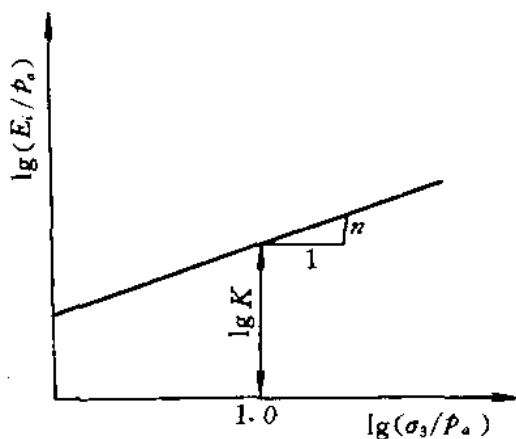
b. 3. 0. 3 初始切线体积模量按式 (b. 3. 0. 3) 计算:

$$B_i = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3\varepsilon_v} \quad (\text{b. 3. 0. 3})$$

式中 B_i —— 初始切线体积模量, kPa;

ε_v —— 与应力水平对应的体积应变, %。

取值原则: 若土样的体应变曲线在强度值的 70% 以前未出现峰值, 则取 $0.7 (\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 应力水平及相应的体应变 ε_v ; 对于体应变曲线在强度值的 70% 之前出现峰值, 则体应变应取峰值及取对应的应力水平。



附图 b. 3. 0. 2 $\lg E_i \sim \lg \sigma_3$
关系曲线

b. 3. 0. 4 在双对数坐标上绘制 $B_i/p_a \sim \sigma_3/p_a$ 关系曲线。见附图 b. 3. 0. 4。

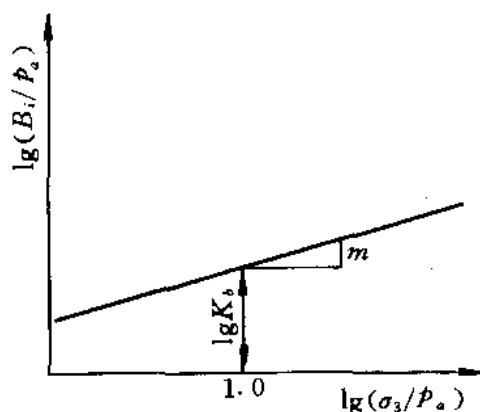
b. 3. 0. 5 式 (b. 1. 0. 1) 和式 (b. 1. 0. 2) 中共有 7 个参数, K 、 n 、 c 、 φ 、 R_f 、 K_b 、 m 。 c 和 φ 根据摩尔—库仑包线确定。

当无粘性土的摩尔包线呈弯曲时, 应将每一周围压力下的 φ 值求出, 绘制 $\varphi \sim \lg \sigma_3$ 曲线, 并按式 (b. 3. 0. 5) 计算 φ 值:

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg(\sigma_3/p_a) \quad (\text{b. 3. 0. 5})$$

式中 φ_0 ——当 σ_3/p_a 为 1 时的 φ 值, ($^\circ$);

$\Delta\varphi$ ——当 σ_3 增加 10 倍时 φ 的减小量, ($^\circ$)。



附图 b. 3. 0. 4 $\lg B_i \sim \lg \sigma_3$ 关系曲线

一个试样多级加荷三轴压缩试验

SL237—018—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 本试验采用一个试样多级施加周围压力和轴向压力进行剪切，以测定土的总强度参数 c 、 φ 和有效强度参数 c' 、 φ' 。

1.0.2 本规程适用于无法取得多个试样(3~4个)进行三轴试验的原状硬土、扰动土或有不规则裂隙的裂土。

2 引用标准

GB4540—84 《应变控制式三轴仪》。

SL118—95 《应变控制式三轴仪校验方法》。

SL237—017—1999 《三轴压缩试验》。

3 仪器设备

3.0.1 本试验所采用的仪器及附属设备应符合 SL237—017—1999 规程 3.1 的规定。

3.0.2 仪器设备的检定和校准及检查按 SL237—017—1999 规程 3.2, 3.3 规定进行。

4 操作步骤

4.1 试样制备

4.1.1 试样制备按 SL237—017—1999 规程 4.1 规定进行。

4.2 试样饱和

4.2.1 试样饱和按 SL237—017—1999 规程 4.2 规定进行。

4.3 试样安装

4.3.1 不固结不排水剪切试验 (UU 试验)。按 SL237—017—1999 规程 4.3.1 规定进行。

4.3.2 固结不排水剪试验 (CU 试验) 按 SL237—017—1999 规程 4.3.2 规定进行, 但孔隙压力阀及量管阀均关闭。

4.4 试样剪切

4.4.1 不固结不排水剪试验 (UU 试验)。

1 按本规程 4.3.1 规定安装试样后, 施加第 1 级周围压力 (周围压力分 2~3 级施加)。

2 剪切应变速度取每分钟为 0.5%~1.0%, 然后开始剪切。开始阶段, 以试样应变每隔 0.3%~0.4% 测记测力计和轴向位移计读数; 当应变达 3% 以后, 每隔 0.7%~0.8% 测记一次。

3 当测力计读数稳定或接近稳定时, 记录轴向位移计读数和测力计读数, 关闭电机停止剪切, 将轴向压力退至零。

4 施加第 2 级周围压力。此时测力计读数因施加周围压力而增加, 应重新调至原来读数, 然后转动手轮。当测力计读数微动时, 表示试样帽与测力计重新接触, 再按原剪切速率剪切, 直至测力计读数稳定或接近稳定为止。

5 按本规程 4.4.1 之 4 进行其余各级周围压力的试验。最后一级周围压力下的剪切累积应变应不超过 20%。

6 试验结束后, 关周围压力阀, 尽快拆除压力室罩, 取下试样称量, 并测定剪切后的含水率。

4.4.2 固结不排水剪试验 (CU 试验)。

1 按本规程 4.3.2 规定安装试样后施加第一级周围压力, 按 SL237—017—1999 规程 4.3.2 之 8~10 规定进行试样固结, 待固结稳定后, 关体变管阀或排水管阀。

2 按本规程 4.4.1 之 2 及 3 规定进行第 1 级试样剪切。

3 第 1 级剪切完成后, 轴向压力退至为零。待孔隙压力稳定后再施加第 2 级周围压力, 并按本规程 4.4.2 之 1 规定进行排水

固结。

4 试样固结稳定后，关闭变管阀或排水管阀，正转手轮，使活塞与试样帽接触为止，记录轴向位移计读数 Δh_2 （此时试样高度 $h_2 = h_0 - \Delta h_2$ ）。

5 按本规程 4.4.1 之 2 及 3 规定进行剪切。

6 按本规程 4.4.2 之 3 规定进行下一级周围压力下的试验，最后一级周围压力下的剪切累积应变变量应不超过 20%。

7 按本规程 4.4.1 之 6 规定拆除试样，称试样质量，并测定试验后试样的含水率。

5 计算和制图

5.1 计算

5.1.1 按下列两式计算不固结不排水试验施加第 1 级周围压力剪切时试样的轴向应变和面积：

$$\epsilon_1 = \frac{\Delta h}{h_0} \times 100 \quad (5.1.1-1)$$

$$A_a = \frac{A_0}{1 - 0.01\epsilon_1} \quad (5.1.1-2)$$

式中 h_0 ——试样起始高度，cm；

Δh ——试样在剪切时的轴向变形，cm；

ϵ_1 ——轴向应变，%；

A_0 ——试样起始面积， cm^2 ；

A_a ——试样剪切时的面积， cm^2 。

5.1.2 按下列公式计算固结不排水剪切施加第 1 级周围压力后的试样高度和面积。

1、固结后试样的高度和面积：

$$h_c = h_0 - \Delta h_c$$

或

$$h_c = h_0 \left(1 - \frac{\Delta V}{V_0} \right)^{1/3} \quad (5.1.2-1)$$

$$A_c = \frac{V_0 - \Delta V}{h_0}$$

或

$$A_c = A_0 \left(1 - \frac{\Delta V}{V_0} \right)^{2/3} \quad (5.1.2-2)$$

2 剪切时试样的轴向应变及面积:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h_c}{h_c} \times 100 \quad (5.1.2-3)$$

$$A_a = \frac{A_c}{1 - 0.01\varepsilon_1} \quad (5.1.2-4)$$

式中 h_c ——固结后试样的高度, cm;

Δh_c ——固结变形量 (轴向), cm;

V_0 ——试样起始体积, cm^3 ;

ΔV ——固结排水量, cm^3 ;

其余符号见本规程式 (5.1.1)。

3 施加第 1 级周围压力后, 剪切终了时的高度和面积作为第 2 级周围压力下的起始高度和起始面积。

4 施加第 2 级周围压力后, 剪切终了时的高度和面积作为第 3 级周围压力下的起始高度和起始面积。

5.1.3 按 SL237—017—1999 规程式 (5.1.2) ~ 式 (5.1.4) 计算主应力差、主应力比和孔隙压力系数。

5.2 制图

5.2.1 绘制不固结不排水剪应力应变关系曲线, 见图 5.2.1。

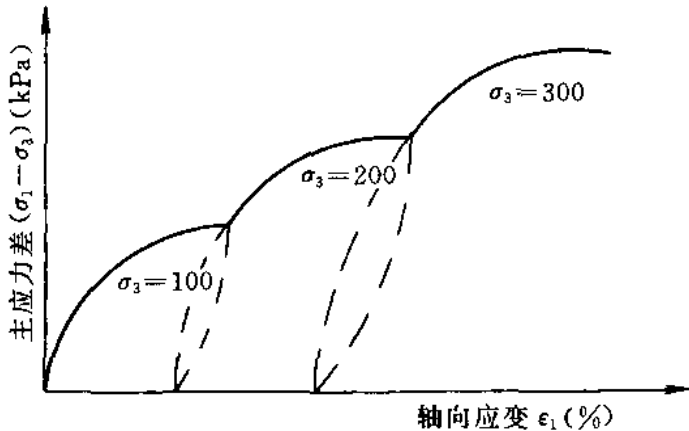


图 5.2.1 不固结不排水剪的应力与应变关系曲线

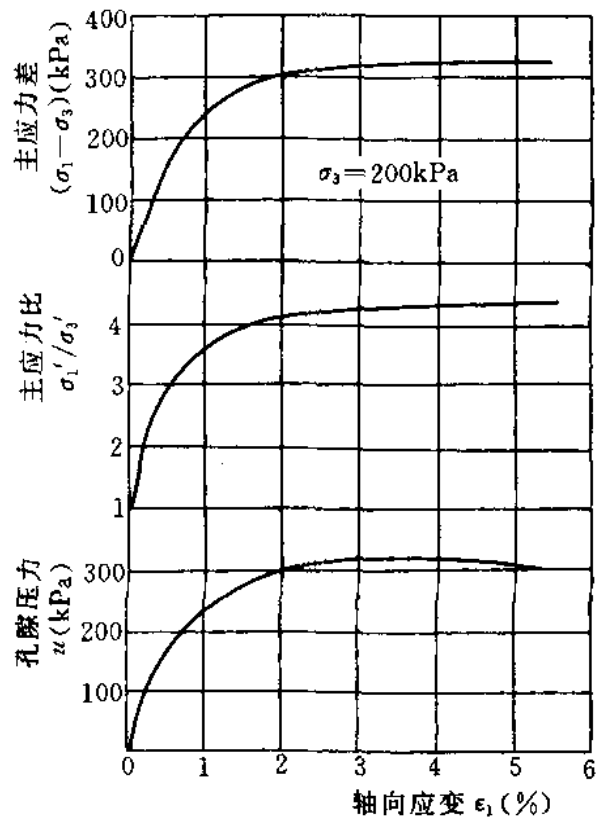


图 5.2.2 固结不排水剪应力与应变曲线

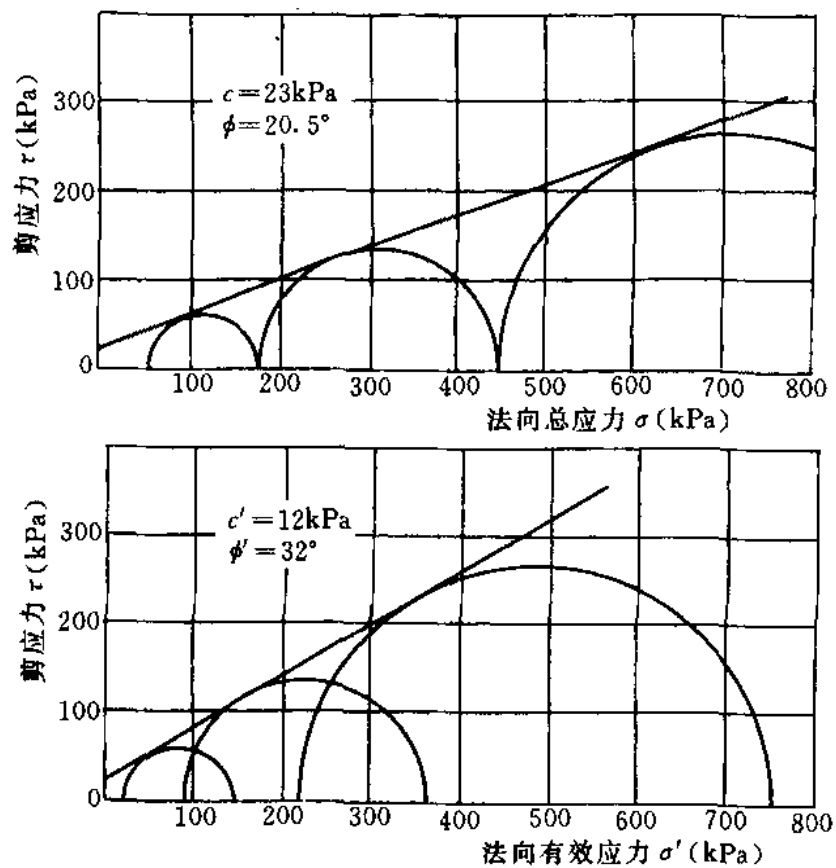


图 5.2.3 一个试样固结不排水剪强度包线

5.2.2 绘制固结不排水剪应力与应变曲线，见图 5.2.2。

5.2.3 绘制固结不排水剪的法向应力与剪应力曲线，见图 5.2.3。

6 记 录

6.0.1 本试验的记录格式应符合 SL237—017—1999 规程表 6.0.1。

孔隙水压力消散试验

SL237—019—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 本试验是测定圆柱体试样在周围压力作用或在 K_0 条件下,受轴向压力作用产生的孔隙水压力消散系数 C'_v 、消散百分数 D_c 及孔隙水压力系数 B 、 \bar{B} 。

1.0.2 本规程适用于饱和度大于 85% 的原状粘质土及含水率大于最优含水率的击实粘质土。

2 引用标准

SL110—95 《切土环刀校验方法》。

SL118—95 《应变式控制式三轴仪校验方法》。

SL237—017—1999 《三轴压缩试验》。

3 仪器设备

3.1 仪器设备

3.1.1 三轴压力室:附有孔隙压力测量系统、周围压力系统,见图 3.1.1。

3.1.2 附属设备

1 圆膜筒。

2 环刀:直径 6.18 cm、10 cm,两端均有刃口。

3.1.3 其他:天平、橡皮膜应符合 SL237—017—1999 规程 3.1.3 和 3.1.5 的规定。

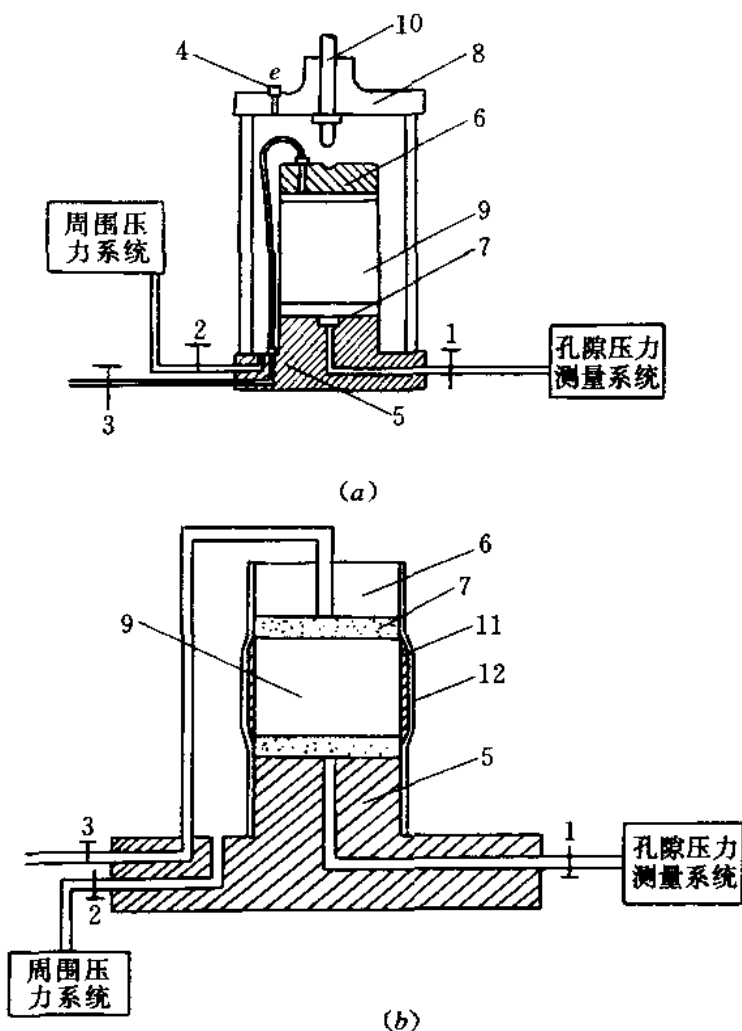


图 3.1.1 孔隙压力消散试验装置图

(a) 各向等压消散试样装置；

(b) K_0 消散试样在压力室内装置

1—孔隙压力阀；2—周围压力阀；3—排水管阀；4—排气阀；

5—压力室底座；6—加压上帽；7—透水板；8—压力室；

9—试样；10—活塞；11—环刀；12—橡皮膜

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 三轴压力室：参照 SL118—95 校验方法进行校验。

3.2.2 天平：应按相应的检定规程进行检定。

3.2.3 环刀：参照 SL110—95 校验方法进行校验。

3.2.4 应参照 SL237—017—1999 规程 3.3 规定进行仪器检查。

4 操作步骤

4.1 各向等压消散试验

4.1.1 试样制备。

1 按 SL237—017—1999 规程 4.1.2 规定切取原状土样或 4.1.3 至 4.1.4 规定制备扰动土样。试样尺寸分别为直径 10 cm，高 10 cm，或直径 6.18 cm，高 6.0 cm^①。

2 原状样或扰动样，如需饱和，按 SL237—017—1999 规程 4.2.1 规定进行。

4.1.2 试样安装。

1 原状试样或击实试样，按 SL237—017—1999 规定 4.3.2 之 1 至 5 规定进行，但试样侧面不贴滤纸条。

2 按 SL237—017—1999 规程 4.3.2 之 6 和 7 规定装上压力室罩，充水，并调整孔隙压力测量系统的零位。关孔隙压力阀及量管阀。

4.1.3 孔隙压力消散。

1 开周围压力阀，并按 SL237—017—1999 规程 4.3.2 之 8 和 9 规定施加第 1 级周围压力，测定试样的起始孔隙压力 u 。

2 开排水管阀，同时开动秒表，进行消散测定。并参照下列时间测记孔隙压力、排水体积（如为零位指示器测定时应旋转调压筒，使零位指示器水银面始终保持不变）：0.25、1、4、9、16、25、36、49、64 min，2、4 h…直至孔隙压力消散到需要的消散度为止（测读时间可根据实际情况加密或减少），关排水阀。

3 按本规程 4.1.3 之 1 和 2 规定，进行下一级周围压力下的起始孔隙压力和孔隙压力消散测定。如此 3 次，每次可按实际需要压力的 1/3 施加周围压力，也可按实际情况增减消散次数和选择各级周围压力。

① 试样直径和高度比值规定为 1，如是渗透性过低的粘质土，亦允许采用 1.5~2.0。

4 试样在最后一级周围压力下孔隙压力消散完毕,关周围压力阀、排水管阀与孔隙压力阀。然后打开排气孔,排去压力室内的水,拆去压力室,揩干橡皮膜外部及压力室底座上的积水。

5 拆除试样帽及透水板,脱去橡皮膜,迅速取出试样。用卡尺测量其试验后的高度、直径,并称质量、烘干,测定其试验后含水率。

4.2 K_0 消散试验

4.2.1 试样制备。

1 用环刀切取原状土样或扰动土样,如图 4.2.2 所示。将带有环刀的试样用活塞板从一端推出 2 mm,将超出环刀的试样削去,再将试样推至环刀中部,使试样恰为所需的高度。

2 试样如需饱和,按 SL237—017—1999 规程 4.2.1 规定进行。

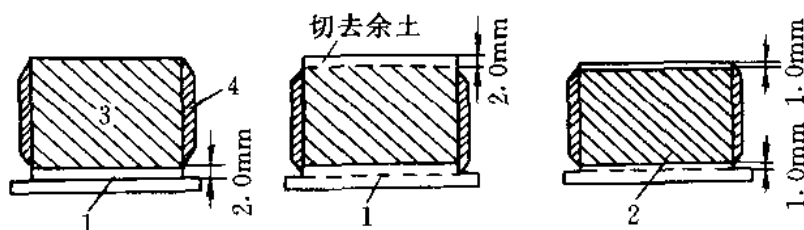


图 4.2.2 试样切制示意图

1—2.0 mm 厚活塞板 (带气孔); 2—1.0 mm 厚活塞板 (带气孔); 3—试样; 4—环刀

4.2.2 试样安装。

1 按 SL237—017—1999 规程 4.3.2 之 1 规定,将带有环刀的试样放到压力室底座上。在试样上端放滤纸和透水板,上下两端的透水板应嵌入环刀内 1 mm。

2 按 SL237—017—1999 规程 4.3.2 之 2 至 5 规定,将带有环刀的试样封于橡皮膜内。排除环刀与橡皮膜之间的气泡,扎好橡皮膜,吸出橡皮膜和环刀之间的多余水分。

3 按本规程 4.1.2 之 2 规定,装上压力室罩,充水,调整孔隙压力测量系统的零位。

4.2.3 孔隙压力消散。

1 按本规程 4.1.3 之 1 规定施加周围压力,并测定其起始孔隙压力 u 。^①

2 按本规程 4.1.3 之 2 规定进行消散。

3 按本规程 4.1.3 之 1 和 2 规定,施加下一级周围压力,测定起始孔隙压力 u , 并进行消散。

4 按本规程 4.1.3 之 4 和 5 规定拆除仪器,取下试样,测定试验后的试样高度及含水率。

5 计算和制图

5.1 计算

5.1.1 按下列三式计算试样的初始干密度 ρ_d 、饱和度 S_r 和冲填土的试验前试样体积 V_0 :

$$\rho_d = \frac{4m}{\pi(1 + 0.01w)D_0^2 h_0} \quad (5.1.1-1)$$

$$S_r = \frac{w}{\frac{\rho_w}{\rho_d} - \frac{1}{G_s}} = \frac{G_s w}{e_0} \quad (5.1.1-2)$$

$$V_0 = \frac{m}{\rho} \quad (5.1.1-3)$$

式中 m ——试样湿质量, g;

D_0 ——试样起始平均直径,对 K_0 消散为常数, cm;

h_0 ——试样起始高度, cm;

G_s ——试样土粒比重;

w ——试样起始含水率, %;

V_0 ——试样起始体积, cm^3 ;

ρ ——试样初始密度,试验前用环刀法测定, g/cm^3 ;

ρ_w ——水的密度, g/cm^3 。

① 周围压力对带有环刀的试样等于轴向压力 σ_0 。

5.1.2 按下列两式计算各向等压力下孔隙压力系数 B 和 K_0 条件下孔隙压力系数 \bar{B} :

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \quad (5.1.2-1)$$

$$\bar{B} = \frac{\Delta u_i}{\Delta \sigma_1} \quad (5.1.2-2)$$

式中 $\Delta \sigma_3$ ——周围压力增量, kPa;

$\Delta \sigma_1$ ——轴向压力增量, kPa;

Δu_i ——相应于该压力增量下的起始孔隙压力增量, kPa。

5.1.3 按式(5.1.3)计算经任一时间 t 后的孔隙压力消散百分数 D_c :

$$D_c = \left(1 - \frac{u_t}{u_i} \right) \times 100 \quad (5.1.3)$$

式中 u_i 、 u_t ——分别为起始及 t min 后不排水端的孔隙压力值, kPa。

5.1.4 按式(5.1.4)计算各向等压力下和 K_0 条件下任一消散度的消散系数 C'_v :

$$C'_v = \frac{T_v}{60t} (\bar{h})^2 \quad (5.1.4)$$

式中 C'_v ——消散系数, cm^2/s ;

t ——消散时间(达任意消散度 D_c 所需时间), min;

T_v ——任意消散度的时间因数;

\bar{h} ——消散前后的试样平均高度, cm;

60——秒与分的换算系数。

时间因数 T_v 与消散百分数 D_c 的对应关系见表 5.1.4 及图 5.1.4。

5.2 制图

5.2.1 以各级周围压力 σ_3 或轴向压力 σ_1 为横坐标, 以相应于各级 σ_3 或 σ_1 的起始孔隙压力 u_i 为纵坐标, 绘制起始孔隙压力与压力的关系曲线, 如图 5.2.1。

表 5.1.4 非排水端孔隙压力消散百分数 D_c 与时间因数表

D_c (%)	T_v	D_c (%)	T_v	D_c (%)	T_v
0	0	40	0.30	80	0.76
5	0.1	45	0.34	85	0.87
10	0.13	50	0.38	90	1.03
15	0.16	55	0.42	95	1.32
20	0.18	60	0.47	97	1.50
25	0.21	65	0.52	98	1.68
30	0.24	70	0.59	99	1.99
35	0.27	75	0.66		

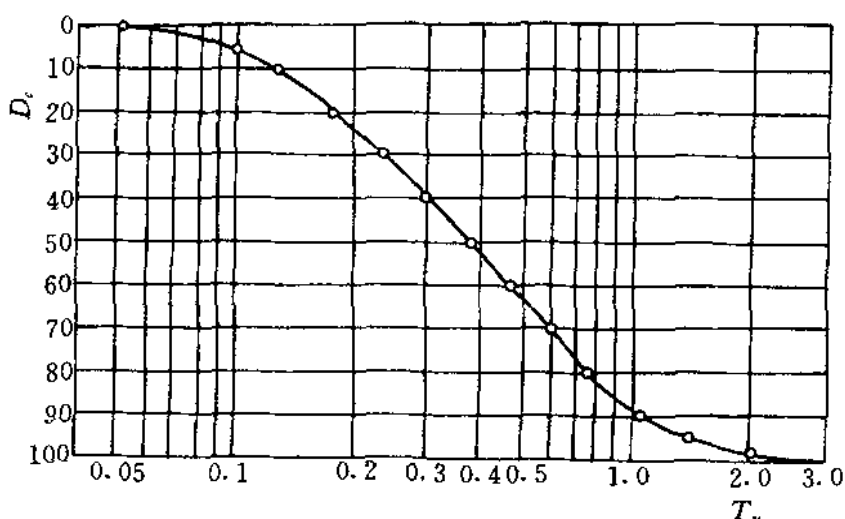


图 5.1.4 孔隙压力消散百分数与时间因素关系曲线

5.2.2 以消散百分数为纵坐标，将时间在对数横坐标上绘制 $D_c \sim \lg t$ 曲线，如图 5.2.2。从该图可按实际消散度的一半或任一消散度的时间，计算消散系数 C'_v 。

5.2.3 以孔隙比或消散系数为纵坐标，周围压力 σ_3 或轴向压力 σ_1 为横坐标，绘制 $C'_v \sim \sigma_3$ 及 $e \sim \sigma_3$ ，或 $C'_v \sim \sigma_1$ 及 $e \sim \sigma_1$ 关系曲线，如图 5.2.3。

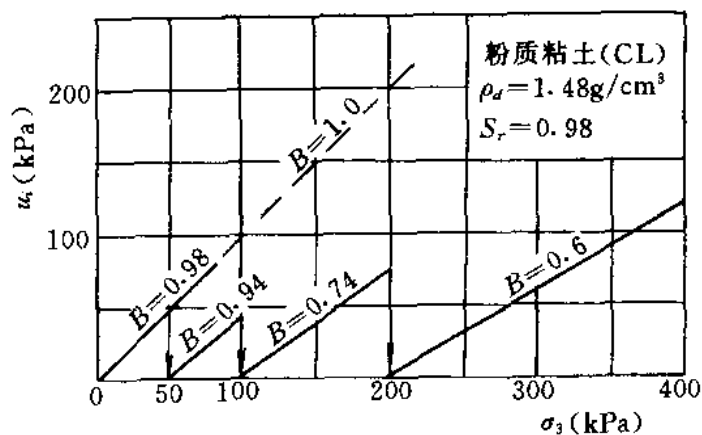


图 5.2.1 4 次消散试验中的起始孔隙水压力

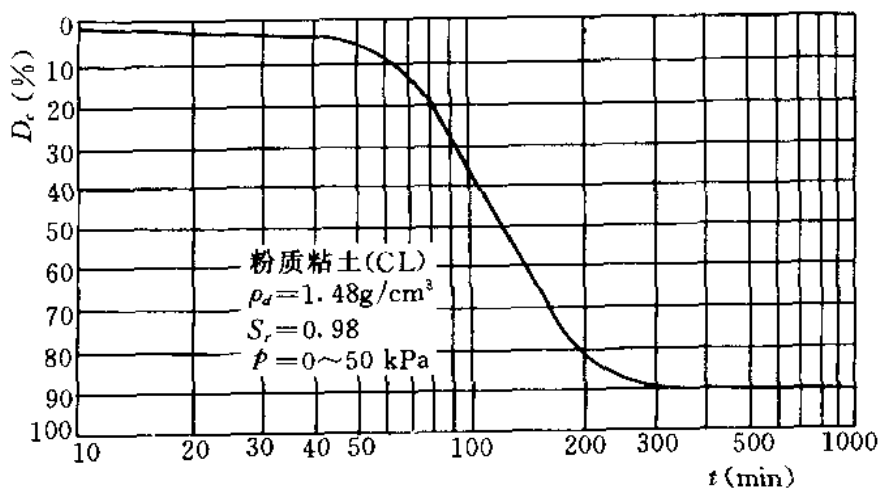


图 5.2.2 孔隙压力消散百分数 D_r 与时间对数值曲线

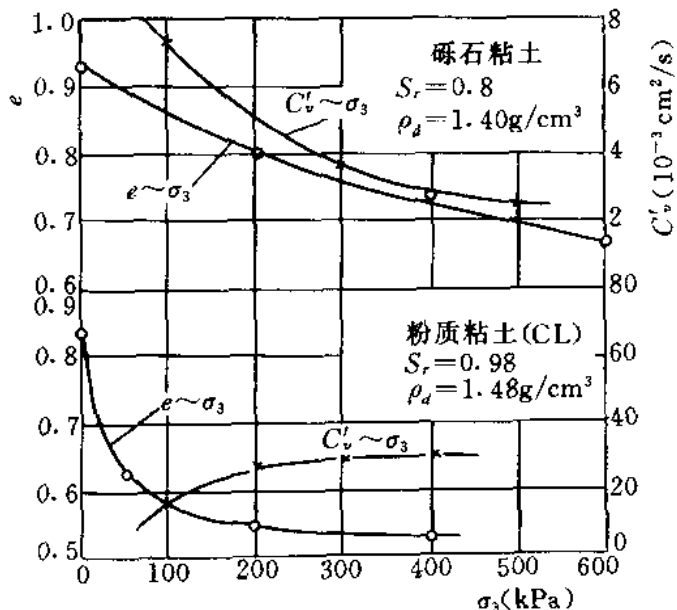


图 5.2.3 孔隙比、消散系数与压力曲线

6 记 录

6.0.1 本试验记录格式如表 6.0.1-1、表 6.0.1-2。

表 6.0.1-1 孔隙水压力消散试验记录表

工程名称 _____	试验者 _____
土样编号 _____	计算者 _____
土样说明 _____	校核者 _____
试验方法 _____	试验日期 _____

试 样 状 态			试 样 含 水 率		
	试验前	试验后		试验前	试验后
试样直径 D (cm)			试样质量 m (g)		
试样高度 h (cm)			干土质量 m_d (g)		
试样体积 V (cm ³)			水质量 m_w (g)		
试样质量 m (g)			含水率 w (%)		
密度 ρ (g/cm ³)			饱和度 S_r (%)		
干密度 ρ_d (g/cm ³)			备注：试验后的试样体积等于试验前 试样体积减去体积变化		
比重 G_s					

周围压力 σ_3 或轴向 压力 σ_1 (kPa)	试样干 土质量 m_d (g)	试样 体积 V (cm ³)	干密度 ρ_d (g/cm ³)	孔隙比 e	消散 50% 所需时间 t_{50} (min)	试样平 均高度 \bar{h} (cm)	消散系数 C'_v (cm ² /s)
(1)	(2)	(3)	(4) = (2) / (3)	(5) = $\frac{G_s}{(4)} - 1$	(6)	(7)	(8) = $\frac{0.380 \times (7)^2}{60 \times (6)}$

表 6.0.1-2 孔隙水压力消散试验记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
 土样编号 _____ 计算者 _____
 日 期 _____ 校核者 _____

1. $B(\bar{B})$ 测试

时 间 (h)	经过时间 (min)	周围压力 σ_3 或轴向压力 σ_1 (kPa)	孔隙水压力 u (kPa)	孔隙压力系数 $B(\bar{B})$

2. 排水消散

时间 (h min)	经过 时间 (min)	孔 隙 水压力 u (kPa)	孔隙水压力 消散百分数 D_c (%)	排水管 读 数 V (cm ³)	体积 变化 ΔV (cm ³)	试样 高度 h_s (cm)	消散 系数 C_v (cm ² /s)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
			1 - (3) + u^*		V_0^{**} - (5)		$\frac{T_v}{60(2)} h_s^2$

* u 为起始孔隙水压力。

** V_0 为排水管开始读数。

无侧限抗压强度试验

SL237—020—1999

1 定义和适用范围

1.0.1 无侧限抗压强度是试样在无侧向压力条件下,抵抗轴向压力的极限强度。

1.0.2 原状土的抗压强度与重塑后土的抗压强度之比定义为灵敏度。

1.0.3 本规程适用于测定饱和软粘土的无侧限抗压强度及灵敏度。

2 引用标准

GB9358—88《应变式无侧限压缩仪》。

SL117—95《应变控制式无侧限压缩仪校验方法》。

SL237—017—1999《三轴压缩试验》。

3 仪器设备

3.1 仪器设备

3.1.1 应变式无侧限压缩仪:包括测力计、加压框架及升降螺杆等。应根据土的软硬程度选用不同量程的测力计,见图3.1.1。

3.1.2 位移计(百分表):量程10 mm,分度值0.01 mm。

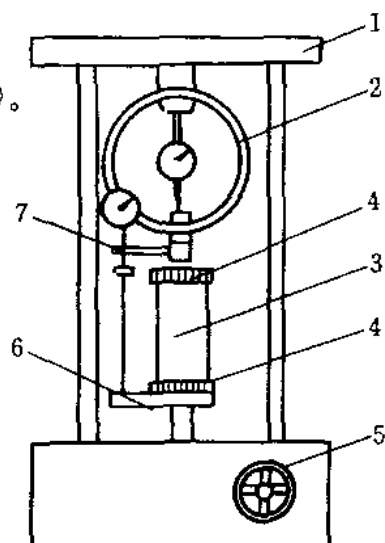


图 3.1.1 应变控制式无侧限压缩仪示意图
1—轴向加压架; 2—轴向测力计; 3—试样; 4—上、下传压板; 5—手轮或电动转轮; 6—升降板; 7—轴向位移计

3.1.3 切土盘：应符合 SL237—017—1999 规程 3.1.2 之 3 的规定。

3.1.4 重塑筒：筒身可以拆成两半，内径 3.5~4.0 cm，高 80 mm。

3.1.5 天平：称量 1000 g，分度值 0.1 g。

3.1.6 其他：秒表、铜垫板（厚约 0.8 cm）、卡尺、直尺、削土刀、钢丝锯、薄塑料布、凡士林等。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 天平：应按相应的检定规程进行检定。

3.2.2 应变式无侧限压缩仪：应按 SL117—95 规定的方法进行校验。

3.2.3 位移计：参照 JJG34—84《百分表检定规程》进行检定。

4 操作步骤

4.0.1 按 SL237—017—1999 规程 4.1.2 规定制备试样。

4.0.2 试样直径可采用 3.5~4.0 cm。试样高度与直径之比应按土的软硬情况采用 2~2.5。

4.0.3 将试样两端抹一薄层凡士林（如气候干燥，试样侧面亦需抹一薄层凡士林，防止水分蒸发）。

4.0.4 将试样放在下加压板上，转动手轮，使试样与上加压板刚好接触。将轴向位移计、轴向测力计读数均调至零位。

4.0.5 以每分钟轴向应变为 1%~3% 的速度转动手轮，使试验在 8~10 min 内完成。

4.0.6 轴向应变小于 3% 时，每 0.5% 测记测力计和位移计读数 1 次；轴向应变达 3% 以后，每 1% 测记轴向位移计和轴向测力计读数 1 次。

4.0.7 当测力计的读数达到峰值或读数达到稳定，应再进行 3%~5% 的轴向应变值即可停止试验；如读数无稳定值，则试验应进行到轴向应变达 20% 为止。

4.0.8 试验结束后,迅速反转手轮,取下试样。描述破坏后形状。测量破坏面倾角。

4.0.9 若需要测定灵敏度,则将破坏后的试样加入少量切削余土包以塑料布,用手搓捏,破坏其结构。再搓成圆柱形,放入重塑筒内。削平两端,挤成与原状样密度、体积相等的试样。然后随即按本规程 4.0.4 至 4.0.8 规定进行试验。^①

5 计算及制图

5.0.1 按式 (5.0.1) 计算试样的轴向应变:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (5.0.1)$$

式中 ε_1 ——轴向应变, %;

h_0 ——试样初始高度, cm;

Δh ——轴向变形, cm。

5.0.2 按式 (5.0.2) 计算试样平均断面积:

$$A_a = \frac{A_0}{1 - 0.01\varepsilon_1} \quad (5.0.2)$$

式中 A_a ——校正后试样面积, cm^2 ;

A_0 ——试样初始面积, cm^2 ;

其余符号见本规程式 (5.0.1)。

5.0.3 按式 (5.0.3) 计算试样所受的轴向应力:

$$\sigma = \frac{CR}{A_a} \times 10 \quad (5.0.3)$$

式中 σ ——轴向应力, kPa;

C ——测力计率定系数, N/0.01 mm (或 N/mV);

R ——测力计读数, (0.01) mm (或 mV);

^① 若试样侧面抹有凡士林, 则应将其刮去, 再添上少许土, 包以塑料布, 用手搓捏。

10——单位换算系数；

其余符号见本程式 (5.0.2)。

5.0.4 按式 (5.0.4) 计算灵敏度：

$$S_i = \frac{q_u}{q'_u} \quad (5.0.4)$$

式中 S_i ——灵敏度；

q_u ——原状试样的无侧限抗压强度，kPa；

q'_u ——重塑试样的无侧限抗压强度，kPa。

5.0.5 以轴向应力为纵坐标，轴向应变为横坐标，绘制应力应变曲线，见图 5.0.5。取曲线上的最大轴向应力作为无侧限抗压强度 q_u 。如最大轴向应力不明显，取轴向应变为 15% 对应的应力作为无侧限抗压强度 q_u 。

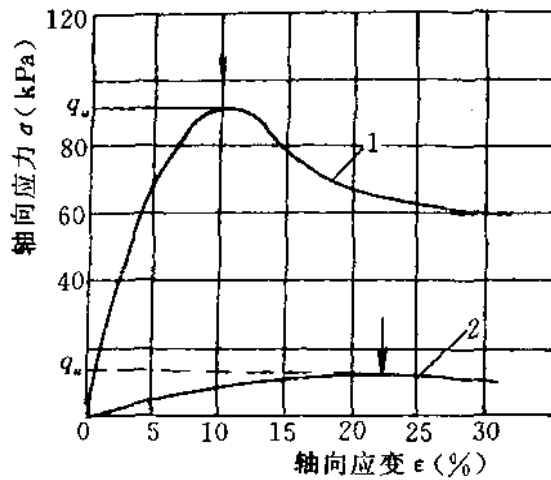


图 5.0.5 轴向应力与轴向
应变关系曲线
1—原状试样；2—重塑试样

6 记 录

6.0.1 本试验记录格式如表 6.0.1。

表 6.0-1 无侧限抗压强度试验记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
 土样编号 _____ 计算者 _____
 试样编号 _____ 校核者 _____
 土样说明 _____ 试验日期 _____

试验前试样高度 $h_0 =$ _____ cm 试验前试样直径 $D_0 =$ _____ cm 试验前试样面积 $A_0 =$ _____ cm ² 试样质量 $m =$ _____ g 试样密度 $\rho =$ _____ g/cm ³ 轴向变形 $\Delta h =$ _____ 0.01 mm 测力计率定系数 $C =$ _____ N/0.01 mm (或 N/mV) 原状试样无侧限抗压强度 $q_u =$ _____ kPa 重塑试样无侧限抗压强度 $q'_u =$ _____ kPa 灵敏度 S_r				试样破坏情况	
测力计量 表读数 R (0.01 mm)	轴向变形 Δh (0.01 mm)	轴向应变 ε_1 (%)	校正后面积 A_z (cm ²)	轴向荷载 W (N)	轴向应力 σ (kPa)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5) = (1) $\times C$	(6) = $\frac{(5)}{(4)}$ $\times 10$

直接剪切试验

SL237—021—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 直接剪切试验是测定土的抗剪强度的一种常用方法。通常采用4个试样，分别在不同的垂直压力 p 下，施加水平剪切力进行剪切，求得破坏时的剪应力 τ 。然后根据库仑定律确定土的抗剪强度参数：内摩擦角 φ 和粘聚力 c 。

1.0.2 直接剪切试验分为快剪(Q)、固结快剪(CQ)和慢剪(S)3种试验方法。

1 快剪试验(Q)，是在试样上施加垂直压力后立即快速施加水平剪切力。

2 固结快剪试验(CQ)，是在试样上施加垂直压力，待排水固结稳定后，快速施加水平剪切力。

3 慢剪试验(S)，是在试样上施加垂直压力及水平剪切力的过程中，均应使试样排水固结。

1.0.3 本规程适用于测定细粒土的抗剪强度参数 c 和 φ 及土颗粒的粒径应小于2mm砂土的抗剪强度参数 φ 。渗透系数 k 大于 10^{-6} cm/s的土不宜作快剪试验。

2 引用标准

GB/T15406—94《土工仪器的基本参数及通用技术条件》第一篇：室内土工仪器。

GB4934—85《应变控制式直剪仪》。

SL110—95《切土环刀的校验方法》。

SL116—95《应变控制式直剪仪检验方法》。

SL237—002—1999 《土样和试样制备》。

SL237—003—1999 《含水率试验》。

SL237—004—1999 《密度试验》。

3 仪器设备

3.1 仪器设备

3.1.1 应变控制式直剪仪 (图 3.1.1)。主要部件包括: 剪切盒 (水槽、上剪切盒、下剪切盒), 垂直加压框架, 测力计及推动机构等。其技术条件应符合 GB/T15406—94 的规定。

3.1.2 位移计 (百分表): 量程 5~10 mm, 分度值 0.01 mm。

3.1.3 天平: 称量 500 g, 分度值 0.1 g。

3.1.4 环刀: 内径 6.18 cm, 高 2 cm。

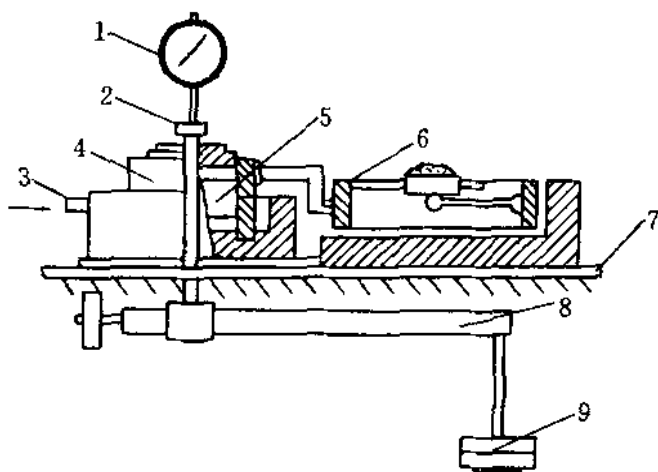


图 3.1.1 应变控制式直剪仪结构示意图

1—垂直变形百分表; 2—垂直加压框架; 3—推动座;
4—剪切盒; 5—试样; 6—测力计; 7—台板; 8—杠杆;
9—砝码

3.1.5 其他: 饱和器、削土刀 (或钢丝锯)、秒表、滤纸、直尺等。

3.2 仪器设备的检定和校准

- 3.2.1 环刀：按 SL110—95 的校检方法进行校验。
- 3.2.2 直接剪切仪：应按 SL116—95 的校验方法进行校验。
- 3.2.3 天平：应按相应的检定规程进行检定。
- 3.2.4 位移计（百分表）：参照 JJG34—84《百分表检定规程》进行检定。

4 操作步骤

4.1 试样制备

4.1.1 粘性土试样制备

1 从原状土样中切取原状土试样或制备给定干密度及含水率的扰动土试样。制备方法应按 SL237—002—1999 规程规定进行。

2 按 SL237—004—1999 规程及 SL237—003—1999 规程的规定，测定试样的密度及含水率。对于扰动试样需要饱和时，按 SL237—002—1999 规程规定的方法进行抽气饱和。

4.1.2 砂类土试样制备

1 取过 2 mm 筛孔的代表性风干砂样 1200 g 备用。按要求的干密度称每个试样所需风干砂量，准确至 0.1 g。

2 对准上下盒，插入固定销，将洁净的透水板放入剪切盒内。

3 将准备好的砂样倒入剪力盒内，拂平表面，放上一块硬木块，用手轻轻敲打，使试样达到要求的干密度。然后取出硬木块。

4.1.3 每组试验应取 4 个试样，在 4 种不同垂直压力 p 下进行剪切试验。一个垂直压力相当于现场预期的最大压力 p ，一个垂直压力要大于 p ，其他垂直压力均小于 p 。但垂直压力的各级差值要大致相等。也可以取垂直压力分别为 100、200、300、400 kPa，各个垂直压力可一次轻轻施加，若土质松软，也可分级施加以防试样挤出。

4.2 试样安装与剪切

4.2.1 快剪试验 (Q)^①

1 对准上下盒，插入固定销。在下盒内放不透水板。将装有试样的环刀平口向下，对准剪切盒口，在试样顶面放不透水板，然后将试样徐徐推入剪切盒内，移去环刀。对砂类土按本规程 4.1.2 之 3 规定制备和安装试样。

2 转动手轮，使上盒前端钢珠刚好与测力计接触。调整测力计读数为零。顺次加上加压盖板、钢珠、加压框架，安装垂直位移计，测记起始读数。

3 按本规程 4.1.3 规定施加垂直压力。

4 施加垂直压力后，立即拔去固定销。开动秒表，以 0.8~1.2 mm/min 的速率剪切（每分钟 4~6 转的均匀速度旋转手轮），使试样在 3~5 min 内剪损。如测力计的读数达到稳定，或有显著后退，表示试样已剪损。但一般宜剪至剪切变形达到 4 mm。若测力计读数继续增加，则剪切变形应达到 6 mm 为止。手轮每转一转，同时测记测力计读数并根据需要测记垂直位移计读数，直至剪损为止。

5 剪切结束后，吸去剪切盒中积水，倒转手轮，尽快移去垂直压力、框架、钢珠、加压盖板等。取出试样，测定剪切面附近土的含水率。

4.2.2 固结快剪试验 (CQ)。

1 按本规程 4.2.1 之 1 和 2 规定进行试样安装和定位。但试样上下两面的不透水板改放湿滤纸和透水板。

2 如系饱和试样，则在施加垂直压力 5 min 后，往剪切盒水槽内注满水；如系非饱和土，仅在活塞周围包以湿棉花，防止水分蒸发。

3 在试样上施加规定的垂直压力后，测记垂直变形读数。如每小时垂直变形读数变化不超过 0.005 mm，认为已达到固结稳

① 对于软粘土或渗透系数 k 大于 10^{-6} cm/s 的土，不宜在直接剪切仪中试验。建议用三轴仪作不排水剪试验。

定^①。

4 试样达到固结稳定后,按本规程 4.2.1 之 4 和 5 规定进行剪切,剪切后取试样测定剪切面附近试样的含水率。

4.2.3 慢剪试验 (S)。

1 按本规程 4.2.1 之 1 和 2 规定进行试样安装;按本规程 4.2.2 之 3 规定进行试样固结。待试样固结稳定后进行剪切。剪切速率应小于 0.02 mm/min。也可按式(4.2.3)估算剪切破坏时间。

$$t_f = 50t_{50} \quad (4.2.3)$$

式中 t_f ——达到破坏所经历的时间;

t_{50} ——固结度达到 50%的时间。

2 剪损标准按本规程 4.2.1 之 4 规定选取。

3 按本规程 4.2.1 之 5 规定进行拆卸试样及测定含水率。

5 计算和制图

5.0.1 按式(5.0.1)计算试样的剪应力:

$$\tau = CR/A_0 \times 10 \quad (5.0.1)$$

式中 τ ——剪应力, kPa;

C ——测力计率定系数, N/0.01 mm;

R ——测力计读数, 0.01 mm;

A_0 ——试样面积, cm^2 ;

10——单位换算系数。

5.0.2 以剪应力为纵坐标,剪切位移为横坐标,绘制剪应力 τ 与剪切位移 Δl 关系曲线,见图 5.0.2。

5.0.3 选取剪应力 τ 与剪切位移 Δl 关系曲线上的峰值点或稳定值作为抗剪强度 S ,如图 5.0.2 中曲线上的箭头所示。如无明显峰点,则取剪切位移 Δl 等于 4 mm 对应的剪应力作为抗剪强度 S ,

^① 试样也可在其他仪器上固结,然后移至剪切盒内,继续固结至稳定后,再进行剪切。

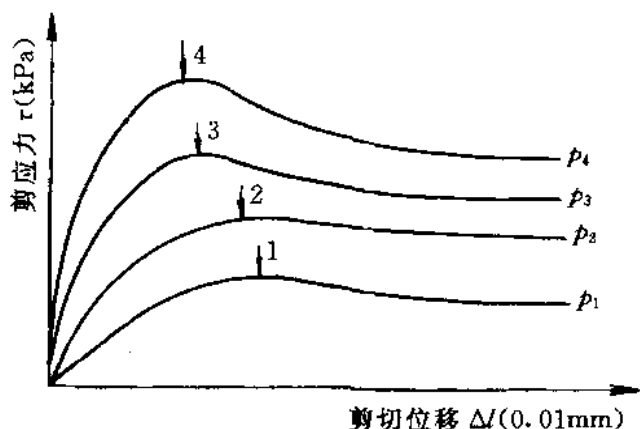


图 5.0.2 剪应力与剪切位移关系曲线

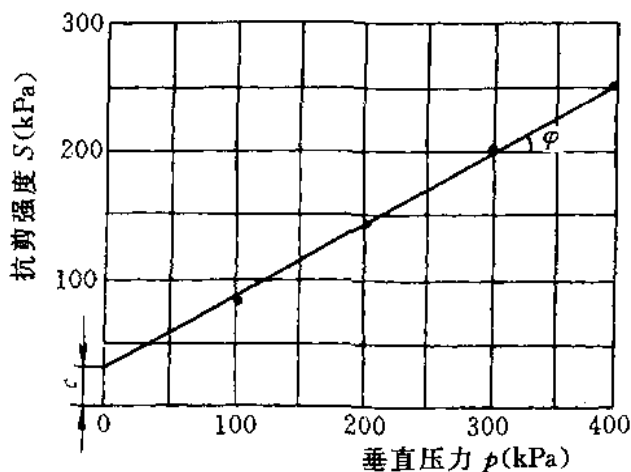


图 5.0.4 抗剪强度与垂直压力的关系曲线

图 5.0.2 中 p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4 为相应的垂直压力。

5.0.4 以抗剪强度 S 为纵坐标，垂直压力 p 为横坐标，绘制抗剪强度 S 与垂直压力 p 的关系曲线，如图 5.0.4 所示。根据图上各点，绘一视测的直线。直线的倾角为土的内摩擦角 φ ，直线在纵坐标轴上的截距为土的粘聚力 c 。^①

6 记 录

6.0.1 本试验记录格式如表 6.0.1-1、表 6.0.1-2。

^① 各种试验方法所测得的 c 、 φ 值用下列符号表示：快剪试验用 c_q 及 φ_q ；固结快剪试验用 c_{cq} 及 φ_{cq} ；慢剪试验用 c_s 及 φ_s 。

表 6.0.1-2 直接剪切试验记录表

工程名称 _____

计算者 _____

土样编号 _____

校核者 _____

试验方法 _____

试验者 _____

试验日期 _____

试样编号:		剪切前固结时间: min		
仪器编号:		剪切前压缩量: mm		
垂直压力: kPa		剪切历时: min		
测力计率定系数: $C=N/0.011\text{ mm}$		抗剪强度: kPa		
手轮转数 (转) (1)	测力计读数 (0.01 mm) (2)	剪切位移 (0.01 mm) (3) = (1) × 20 - (2)	剪应力 (kPa) (4) = $\frac{(2) \times C}{A_0} \times 10$	垂直位移 (0.01 mm)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
⋮				
32				

排水反复直接剪切试验

SL237—022—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 反复直接剪切试验是用应变控制式直剪仪在慢速（排水）条件下，对试样反复剪切至剪应力达到稳定值，以测求土的残余抗剪强度参数 c' 和 ϕ' 。

1.0.2 本规程适用于超固结粘性土及软弱岩石夹层的粘性土。

2 引用标准

GB4934—85 《应变控制式直剪仪》。

SL116—95 《应变控制式直剪仪校验方法》。

SL110—95 《切土环刀校验方法》。

SL237—002—1999 《土样和试样制备》。

SL237—021—1999 《直接剪切试验》。

3 仪器设备

3.1 仪器设备

3.1.1 应变控制式反复直剪仪：包括变速设备、可逆电动机和反推夹具，见图 3.1.1。

3.1.2 位移计（百分表）：量程 5~10 mm，分度值 0.01 mm。

3.1.3 天平：称量 500 g，分度值 0.1 g。

3.1.4 环刀：内径 6.18 cm，高 2 cm。

3.1.5 其他：饱和器、削土刀、秒表、滤纸等。

3.2 仪器设备的检定和校验

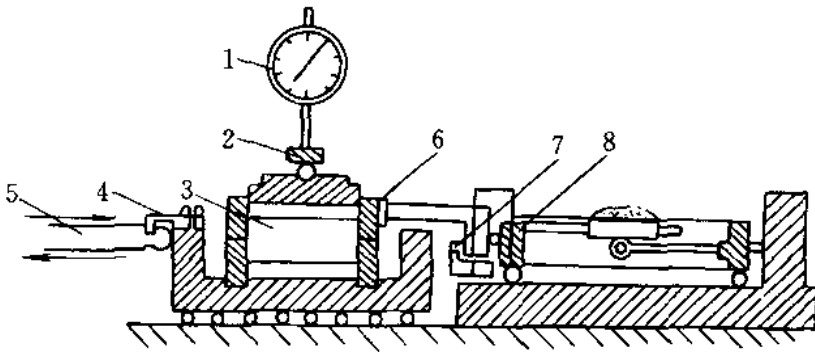


图 3.1.1 反复直剪仪示意图

1—垂直变形百分表；2—加压框架；3—试样；4—连接件；
5—推动轴；6—剪切盒；7—限制连接杆；8—测力计

3.2.1 仪器设备的检定和校验应按 SL237—021—1999 规程的 3.2 规定进行。

4 操作步骤

4.1 试样制备

4.1.1 对有软弱面的原状土样，先要分清软弱面的天然滑动方向，整平土样两端，使土样顶面平行于软弱面。在环刀内涂一薄层凡士林。切土时，使软弱面位于环刀高度一半处，然后在试样面上标出软弱面的天然滑动方向。

4.1.2 对无软弱面的完整原状粘土或原状的超固结粘土，可用环刀按 SL237—002—1999 规程原状试样的制备方法切成试样，然后将试样放入剪切盒内。先在小于 50 kPa 的垂直压力下，以较快的剪速进行预剪，使形成破裂面。如试样坚硬，也可用刀、锯等工具先切割成一个剪切面，然后加垂直荷载，待固结稳定后进行剪切。

4.1.3 对泥化带较厚的软弱夹层、滑坡层面，取靠近滑裂面 1~2 mm 的土；对泥化带较薄的滑动面，取泥化的土；对无泥化带的裂隙面，取靠裂隙面两边的土。将所刮取的土样用纯水浸泡 24 h

后调制均匀，制备成液限状态的土膏，将其填入环刀内。装填时，先沿环刀四周填入，然后填中部。应排除试样内的气体。

4.1.4 原状试样应取破裂面上的土测求含水率；对于扰动土试样可取切下的余土测求含水率。

4.1.5 试样应达到饱和。饱和方法一般用抽气饱和法。

4.1.6 每组试验应制备 4 个试样，同组试样的密度差值不大于 0.03 g/cm^3 。

4.2 试样剪切

4.2.1 先对仪器进行检查。然后将上、下剪切盒对准，插入固定销，顺次放入饱和的透水板、滤纸，将试样推入剪切盒内。再放上滤纸、透水板及加压盖板、钢珠、加压框架等，并安装垂直百分表（位移计）。在活塞周围包以湿棉花，防止水分蒸发。然后测记测力计和垂直位移计的初始读数。

4.2.2 按 SL237—021—1999 规程 4.1.3 规定施加垂直压力。对于液限状态的试样应分级施加至规定压力。并按 SL237—021—1999 规程 4.2.2 之 3 进行固结。

4.2.3 除含水率相当于液限试样的剪切外，一般原状土、硬粘土的试验，在剪切时，剪切盒应开缝，缝宽保持在 $0.3\sim 1.0 \text{ mm}$ 。

4.2.4 转动手轮，使剪切盒前端的钢珠与测力计刚好接触，再调整测力计读数至零位。

4.2.5 拔出固定销，调节变速箱。对一般粉质土、粉质粘土及低塑性粘土的剪切速度不宜超过 0.06 mm/min ；对高塑性粘土的剪切速度，不宜超过 0.02 mm/min 。开动电机，测读垂直位移计和水平位移计读数。在第 1 次剪切过程中，达到峰值剪应力之前，一般水平位移每隔 $0.2\sim 0.4 \text{ mm}$ 测记 1 次；过峰值剪应力后，每隔 0.5 mm 测记 1 次。每次剪切时，试验不能中断，直至最大剪切位移（每次正向剪切位移 $8\sim 10 \text{ mm}$ ）停止剪切。

4.2.6 倒转手轮，用反推设备缓慢地（剪切速度不大于 0.6 mm/min ）将下剪切盒反向推至与上剪切盒重合位置，插入固定销。按

本规程 4.2.5 的规定进行第 2 次剪切。^① 如此, 继续反复进行剪切至剪应力达到稳定值为止^②。

4.2.7 剪切结束, 测记垂直位移计读数, 吸去剪切盒中积水, 尽快卸除位移计、垂直压力、加压框架, 加压盖板及剪切盒等, 并描述剪切面的破坏情况。取剪切面附近的土样测定剪后含水率。

5 计算和制图

5.0.1 按式 (5.0.1) 计算残余抗剪强度 S_r :

$$S_r = CR/A_0 \times 10 \quad (5.0.1)$$

式中 C ——测力计率定系数, $N/0.01 \text{ mm}$;

R ——测力计读数, 0.01 mm ;

A_0 ——试样面积, cm^2 ;

10——单位换算系数。

5.0.2 绘制剪应力与剪切位移关系曲线, 见图 5.0.2-1。取每个试验曲线上第 1 次剪切时峰值作为破坏强度 S ; 取曲线上最后稳定值作为残余强度 S_r , 并绘制抗剪强度 (峰值强度与残余强度) 与垂直压力关系曲线, 见图 5.0.2-2。

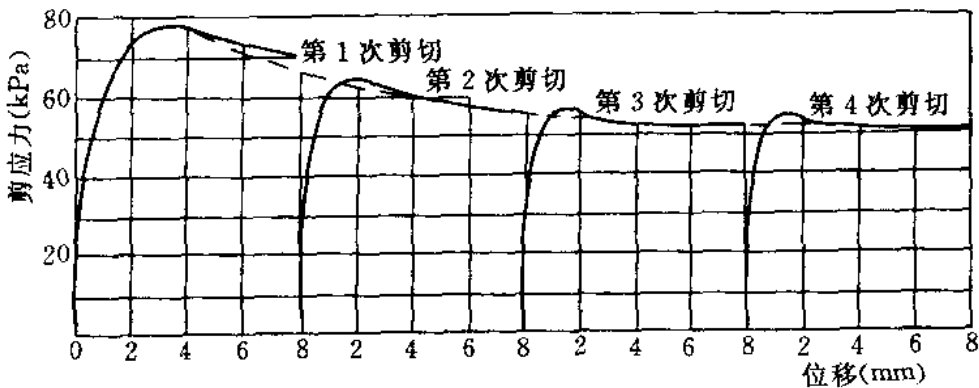


图 5.0.2-1 剪应力与剪切位移曲线

① 若一次剪切完成后, 也允许相隔一定时间后再按本规程 4.2.6 进行下一次剪切。

② 一般粉质粘土、砂质粘土需 5~6 次正向剪切 (正向总剪切位移量为 40~48 mm); 粘土需要 3~4 次正向剪切 (正向总剪切位移量为 24~32 mm)。

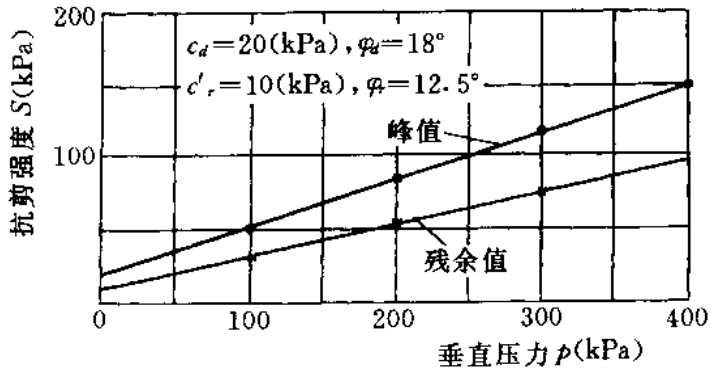


图 5.0.2-2 抗剪强度与垂直压力关系曲线

6 记 录

6.0.1 本试验记录格式如表 6.0.1。

表 6.0.1 排水反复直接剪切试验

工程名称 _____ 试验者 _____
 土样编号 _____ 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

仪器编号:		剪前固结时间: min	
测力计率定系数: N/0.01 mm		剪前固结沉降量: mm	
剪切速率: mm/min		剪切次数:	
垂直压力: kPa		抗剪强度: kPa	
剪切位移 (0.01 mm)	垂直位移计读数 (0.01 mm)	测力计读数 (0.01 mm)	剪应力 (kPa)
30			
60			
100			
130			
160			
200			
230			
260			
300			
350			
400			
⋮			
800			

注 “+” 为剪胀，“-” 为剪缩。

无粘性土休止角试验

SL237—023—1999

1 定义和适用范围

1.0.1 休止角是无粘性土在松散状态堆积时其坡面与水平面所形成的最大倾角。

1.0.2 本规程适用于测定无粘性土在风干状态下或水下状态的休止角。

2 仪器设备

2.0.1 休止角测定仪：图 2.0.1 所示。圆盘直径为 10 cm（适用

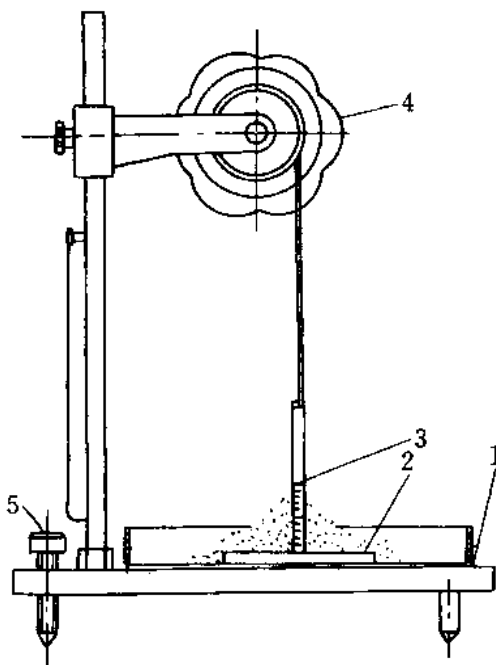


图 2.0.1 休止角测定仪

1—底盘；2—圆盘；3—铁杆；4—制动器；
5—水平螺丝

于粒径小于 2 mm 的无粘性土) 及 20 cm (适用于粒径小于 5 mm 的无粘性土)。

2.0.2 附属设备: 勺子、水槽等。

3 操作 步 骤

3.0.1 取代表性的充分风干试样若干, 并选择相应的圆盘。

3.0.2 转动制动器, 使圆盘落在底盘中。

3.0.3 用小勺细心地沿铁杆四周倾倒试样。小勺离试样表面的高度应始终保持在 1 cm 左右, 直至圆盘外缘完全盖满为止。

3.0.4 慢慢转动制动器, 使圆盘平稳升起, 直至离开底盘内的试样为止。测记锥顶与铁杆接触处的刻度 ($\text{tg}\alpha_c$)。

3.0.5 如果测定水下状态的休止角, 先将盛土圆盘慢慢地沉入水槽内。水槽内水面应达铁杆的 0 刻度处, 然后按本规程 3.0.3 规定注入试样。按本规程 3.0.4 规定转动制动器, 使圆盘升起。当锥体顶端达水面时, 测记锥顶与铁杆接触处的刻度 ($\text{tg}\alpha_m$)。

3.0.6 将测得的 $\text{tg}\alpha_c$ 和 $\text{tg}\alpha_m$ 值, 在三角函数表中查取休止角。

3.0.7 本试验需进行 2 次平行测定, 取其算术平均值, 以整数 ($^\circ$) 表示。

4 计 算

4.0.1 按式 (4.0.1) 计算休止角 α_0 :

$$\text{tg}\alpha_0 = \frac{2h}{d} \quad (4.0.1)$$

式中 h ——试样堆积圆锥高度, cm;

d ——圆锥底面直径, cm。

5 记 录

5.0.1 本试验记录如表 5.0.1。

表 5.0.1 无粘性土休止角试验记录表

工程编号 _____
 仪器编号 _____
 土样说明 _____
 试验方法 _____

试验者 _____
 计算者 _____
 校核者 _____
 试验日期 _____

土样编号	充分风干状态休止角			水下状态休止角			备注
	读数		平均值	读数		平均值	
	$\text{tg}\alpha_c$	(°)	(°)	$\text{tg}\alpha_m$	(°)	(°)	

自由膨胀率试验

SL237—024—1999

1 定义和适用范围

- 1.0.1 自由膨胀率是以人工制备的松散的、干燥的试样，在纯水中膨胀稳定后的体积增量与原体积之比。
- 1.0.2 本规程适用于测定粘性土试样在无结构情况下的自由膨胀率。

2 仪器设备

2.1 仪器设备

- 2.1.1 玻璃量筒：容积为 50 ml，分度值为 1 ml。
- 2.1.2 量土杯：内径 20 mm，容积 10 ml。
- 2.1.3 无颈漏斗：上口直径 50~60 mm，下口直径约 5 mm。
- 2.1.4 搅拌器：由直杆和带孔圆板组成，圆板应略小于量筒直径。
- 2.1.5 天平：称量 200 g，分度值 0.01 g。
- 2.1.6 其他：漏斗支架、0.5 mm 标准筛、刮土刀等。

2.2 仪器设备的检定和校准

- 2.2.1 天平：应按相应的检定规程进行检定。
- 2.2.2 玻璃量筒：按 JJG169—90《常用玻璃量器检定规程》进行检定。

3 操作步骤

- 3.0.1 选取有代表性的风干土样 100 g，碾碎后全部过 0.5 mm 筛，于 105~110℃ 温度下烘至恒量。取出放入干燥缸内冷却至

室温。

3.0.2 将无颈漏斗放在支架上,漏斗下口对准量土杯中心并保持距离 10 mm, 见图 3.0.2。

3.0.3 按图 3.0.2 装置用取土匙取适量试样倒入漏斗中,边倒边用细铁丝搅动。待量土杯装满土样并开始溢出时,移开漏斗,刮去杯口多余土,称量土杯中试样质量。将量杯中试样倒入匙内,再次倒入漏斗中,并落入量土杯,刮去多余土,称量土杯中试样的质量。2 次测定的差值不得大于 0.1 g。

3.0.4 向 50 ml 的量筒内注入 30 ml 纯水,并加入 5 ml 浓度为 5% 的纯氯化钠溶液。

3.0.5 将备好的试样徐徐倒入量筒内,用搅拌器上下搅拌溶液各 10 次,用纯水淋洗搅拌器和量筒壁至悬液达 50 ml,静置 24 h。

3.0.6 待悬液澄清后,每隔 2 h 测读 1 次土面高度(估读至 0.1 ml),直至 6 h 内 2 次读数差值不超过 0.2 ml 为止。若土面倾斜,读数应取中值。

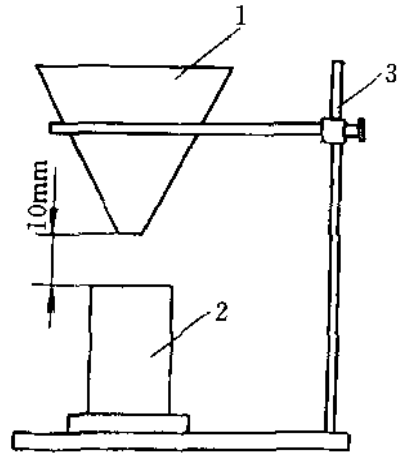


图 3.0.2 漏斗与量杯位置图

1—漏斗; 2—量土杯; 3—支架

4 计 算

4.0.1 按式 (4.0.1) 计算自由膨胀率:

$$\delta_{ef} = \frac{V_{we} - V_0}{V_0} \times 100 \quad (4.0.1)$$

式中 δ_{ef} ——自由膨胀率, %;

V_{we} ——土样在水中膨胀稳定后的体积, ml;

V_0 ——土样初始体积, 即量土杯体积, 10 ml。

4.0.2 本试验应进行 2 次测定, 允许差值:

当 δ_{ef} 小于 60% 时为 5%；当 δ_{ef} 大于 60% 时为 8%。
取其算术平均值，以整数（%）表示。

5 记 录

5.0.1 本试验记录格式如表 5.0.1。

表 5.0.1 自由膨胀率试验记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
量筒体积 _____ 计算者 _____
日 期 _____ 校核者 _____

土样 编号	干土质量 (g)	量筒 编号	不同时间 (h) 体积读数 (ml)						自由膨胀率	
			2	4	6	8	10	12	δ_{ef} (%)	
备注：										

膨胀率试验

SL237—025—1999

1 定义和适用范围

1.0.1 膨胀率是指试样在有侧限条件下膨胀的增量与初始高度之比。根据加载条件可分为：无荷载膨胀率试验和有荷载膨胀率试验。

1.0.2 本规程适用于测定原状试样和击实试样的膨胀率。

2 引用标准

GB4935—85《单杠杆固结仪》。

SL114—95《杠杆式固结仪校验方法》。

SL110—25《切土环刀校验方法》。

SL237—015—1999《固结试验》。

3 无荷载膨胀率试验

3.1 仪器设备

3.1.1 膨胀仪（图 3.1.1）：环刀直径 61.8 mm，高 20 mm；等直径环刀接环，高 10 mm。

3.1.2 百分表：量程 10 mm，分度值 0.01 mm。

3.1.3 其他：天平、秒表、吸水球、刮土刀等。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 环刀：应按 SL110—95 校验方法进行校验。

3.2.2 百分表：按 JJG34—84《百分表检定规程》进行检定。

3.2.3 天平、秒表：应按相应的检定规程进行检定。

3.3 操作步骤

3.3.1 在环刀内壁均匀涂抹薄层凡士林，切取代表性原状土试样或所需状态的击实试样，修平两面，制成高度为 20 mm 的试样。

3.3.2 擦净环刀外壁，称环刀和土总质量，准确至 0.1 g。

3.3.3 将烘干的透水板埋在切削下的碎土内 1 h 后，取出刷净，放入仪器中。

3.3.4 将环刀钝口端用压环固定在底座上，使试样底面与透水板顶面密切接触，然后一起放到水盒中。将有孔盖板放在试样顶面，对准中心，安好百分表，记录初读数。

3.3.5 向水盒内注入纯水，使水自下而上进入试样，并保持水面高出试样 5 mm。记录注水开始时间，按 5、10、20、30 min，1、2、3、6、12 h 测读百分表读数。

3.3.6 当 6 h 内变形不超过 0.01 mm，可终止试验。移去百分表，吸去容器中的水。从环刀内推出试样，称量并烘至恒量；待冷却后再称量。计算胀后含水率和孔隙比。

3.4 计算和制图

3.4.1 按式 (3.4.1) 计算膨胀含水率：

$$w_h = \frac{m_w}{m_d} \times 100 \quad (3.4.1)$$

式中 w_h ——膨胀含水率，%；

m_w ——膨胀稳定后试样中水的质量，g；

m_d ——干土质量，g。

3.4.2 按下列两式计算任一时间的无荷载膨胀率。

1 体膨胀率按式 (3.4.2-1) 计算：

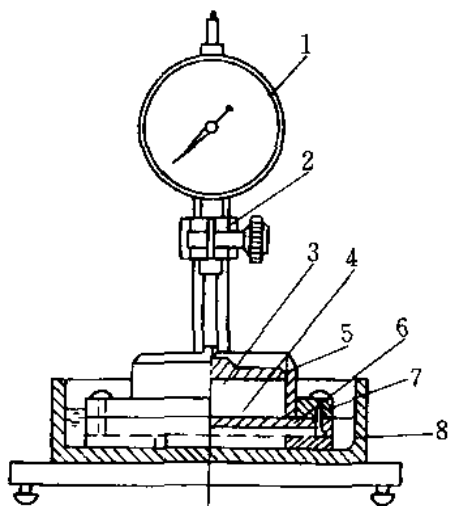


图 3.1.1 膨胀仪示意图

1—量表；2—表架；3—有孔板；4—试样；5—环刀；6—透水板；7—压板；8—水盒

表 3.5.1 无荷载膨胀率试验记录

工程名称 _____ 试验者 _____ 土样编号 _____ 计算者 _____
 土样说明 _____ 校核者 _____ 仪器编号 _____ 日期 _____

试 样 状 态			膨 胀 量 测 定								
项 目		试验前	试验后	测定时间			经过时间			量表读数 R (mm)	膨胀率 (%)
环 刀 编 号				d	h	min	d	h	min		
环刀加湿土质量(g)	(1)										
环刀加干土质量(g)	(2)										
环刀质量(g)	(3)										
湿土质量(g)	(4)	(1) - (3)	(1) - (3)								
干土质量(g)	(5)	由试后得	(2) - (3)								
水质量(g)	(6)	(4) - (5)									
含水率(%)	(7)	$\frac{(6)}{(5)} \times 100$	$\frac{(6)}{(5)} \times 100$								
试样体积(cm ³)	(8)	V_0	$V_0(1+V_h)$								
密度(g/cm ³)	(9)	$\frac{(4)}{(8)}$	$\frac{(4)}{(8)}$								
干密度(g/cm ³)	(10)	$\frac{(5)}{(8)}$	$\frac{(5)}{(8)}$								
土粒比重	(11)										
孔隙比	(12)	$\frac{(11)}{(10)} - 1$									
V _h 为膨胀体积											

$$\delta_e = \frac{V - V_0}{V_0} \times 100 \quad (3.4.2-1)$$

式中 δ_e ——体膨胀率, %;

V ——膨胀稳定后试样的体积, cm^3 ;

V_0 ——试样初始体积, cm^3 。

2 时间 t 时的膨胀率按式 (3.4.2-2) 计算:

$$\delta_t = \frac{R_t - R_0}{h_0} \times 100 \quad (3.4.2-2)$$

式中 δ_t ——时间 t 时的无荷载膨胀率, %;

R_t ——时间 t 时量表的读数, mm;

R_0 ——试验开始时量表的读数, mm;

h_0 ——试样初始高度, mm。

3.4.3 如有需要, 可绘制膨胀率与时间关系曲线。

3.5 记录

3.5.1 本试验记录格式如表 3.5.1。

4 有荷载膨胀率试验

4.1 仪器设备

4.1.1 试样容器: 应符合 GB4935—85 标准的规定。另备等直径的环刀接环, 高 10 mm。

4.1.2 加压设备、变形测定设备: 应符合 SL237—015—1999 规程 3.1.2, 3.1.3 的规定。

4.1.3 其他: 刮土刀、钢丝锯、天平、秒表等。

4.2 仪器设备的检定与校准

4.2.1 应按 SL237—015—1999 规程 3.2 的规定进行检定和校准。

4.3 操作步骤

4.3.1 在环刀内壁均匀涂抹薄层凡士林, 切取代表性原状试样或所需状态的击实试样, 修平两面制成高度 20 mm 的试样。

- 4.3.2 擦净环刀外壁，称环刀和土总质量，准确至 0.1 g。
- 4.3.3 检查仪器的平衡状况及注水通路。
- 4.3.4 将烘干的透水板埋在切削下的碎土内 1 h 后，取出刷净，放入仪器中。
- 4.3.5 将试样放到容器中，放上透水板和盖板，安好量表，施加 1 kPa 的压力，使仪器各部分接触，调整量表，记下初读数。
- 4.3.6 根据所要求的荷载，可 1 次或分级施加。
- 4.3.7 待每小时变形不超过 0.01 mm，即认为变形稳定。可向水盒内注入纯水，使水自下而上进入试样，并保持水面高出试样 5 mm，记下注水开始时间。
- 4.3.8 浸水后每隔 2 h 测记量表读数 1 次，当 2 次读数差值不超过 0.01 mm，认为膨胀稳定。
- 4.3.9 在膨胀稳定后，分 3~4 个等级逐次退荷到零，并测定各级荷载下的膨胀稳定值。
- 4.3.10 试验结束，取出试样，称量并烘至恒量，计算胀后含水率和孔隙比。

4.4 计算和制图

- 4.4.1 按式 (4.4.1) 计算压力 p 下的膨胀率：

$$\delta_{ep} = \frac{R_p + \lambda - R_0}{h_0} \times 100 \quad (4.4.1)$$

式中 δ_{ep} ——在 p 压力作用下的膨胀率，%；

R_p —— p 压力作用下膨胀稳定后量表的读数，mm；

R_0 ——压力为零时的量表读数，mm；

λ ——压力 p 时仪器变形量，mm；

h_0 ——试样初始高度，mm。

- 4.4.2 如有需要，可绘制膨胀率与压力的关系曲线。

4.5 记录

- 4.5.1 本试验记录格式如本规程表 3.5.1。

收缩试验

SL237—026—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 本试验是测定细粒土的收缩特性指标：线缩率、体缩率及收缩系数。

1.0.2 本规程适用于原状土和击实粘质土。

2 引用标准

SD191—86 《切土环刀》。

SL110—95 《切土环刀校验方法》。

SL237—002—1999 《土样和试样制备》。

SL237—004—1999 《密度试验》。

3 仪器设备

3.1 仪器设备

3.1.1 收缩仪(图 3.1.1)：多孔板上孔的面积大于总面积的 50%。

3.1.2 环刀：尺寸参数应符合 SD191—86 标准规定。

3.1.3 百分表：量程 10 mm，分度值 0.01 mm。

3.1.4 天平：量程为 500 g，分度值 0.1 g。

3.1.5 其他：烘箱、干燥缸、蜡封工

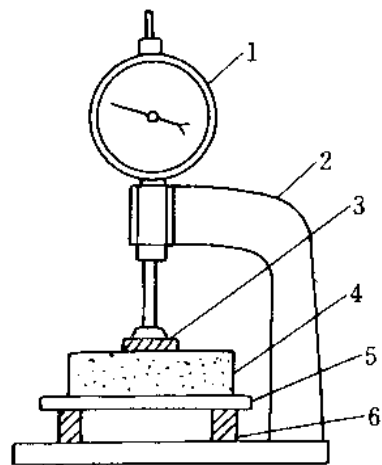


图 3.1.1 收缩仪

1—量表；2 支架；3—测板；
4—试样；5—多孔板；6—垫块

具等。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 环刀：应按 SL110—95 规定的方法进行校验。

3.2.2 百分表：应按 JJG34—84《百分表检定规程》进行检定。

3.2.3 天平：应按相应的检定规程进行检定。

4 试验步骤

4.0.1 试样制备按 SL237—002—1999 规程 3, 4 和 5 的步骤进行。

4.0.2 将制备好的试样推出环刀（当试样不紧密时，应采用风干脱环法），置于多孔板上，称试样和多孔板的质量，准确至 0.1 g。

4.0.3 装好百分表，记下初读数。

4.0.4 置于室温不高于 30℃ 条件下进行试验。根据室内温度及收缩速度，宜每隔 1~4h 测记百分表读数，并称整套装置和试样质量，准确至 0.1 g；2 天后，每隔 16~24 h 测记百分表读数并称质量，直至 2 次百分表读数不变。称量时应保持百分表不变。在收缩曲线的第 I 阶段内应取得不少于 4 个数据。

4.0.5 取出试样在 105~110℃ 温度下烘干，称干土质量。

4.0.6 按 SL237—004—1999 规程的蜡封法测定烘干试样体积。

5 计算及制图

5.1 计算

5.1.1 按式 (5.1.1) 计算不同时间的含水率：

$$w_i = \left(\frac{m_i}{m_d} - 1 \right) \times 100 \quad (5.1.1)$$

式中 w_i ——某时刻试样的含水率，%；

m_i ——某时刻试样的质量，g；

m_d ——试样的干质量，g。

5.1.2 按式 (5.1.2) 计算线缩率:

$$\delta_{si} = \frac{z_i - z_0}{h_0} \times 100 \quad (5.1.2)$$

式中 δ_{si} ——试样在某时刻的线缩率, %;

z_i ——某时刻的百分表读数, mm;

z_0 ——百分表初始读数, mm;

h_0 ——试样初始高度, mm。

5.1.3 按式 (5.1.3) 计算体缩率:

$$\delta_v = \frac{V_0 - V_d}{V_0} \times 100 \quad (5.1.3)$$

式中 δ_v ——体缩率, %;

V_0 ——试样初始体积 (环刀容积), cm^3 ;

V_d ——试样烘干后的体积, cm^3 。

5.1.4 按式 (5.1.4) 计算收缩系数:

$$\lambda_s = \frac{\Delta\delta_{si}}{\Delta w} \quad (5.1.4)$$

式中 λ_s ——竖向收缩系数;

$\Delta\delta_{si}$ ——收缩曲线上第 I 阶段 2 点线缩率之差, %;

Δw ——相应于 $\Delta\delta_{si}$ 两点含水率之差, %。

5.2 制图

5.2.1 以线缩率为纵坐标, 含水率为横坐标, 绘制关系曲线, 如

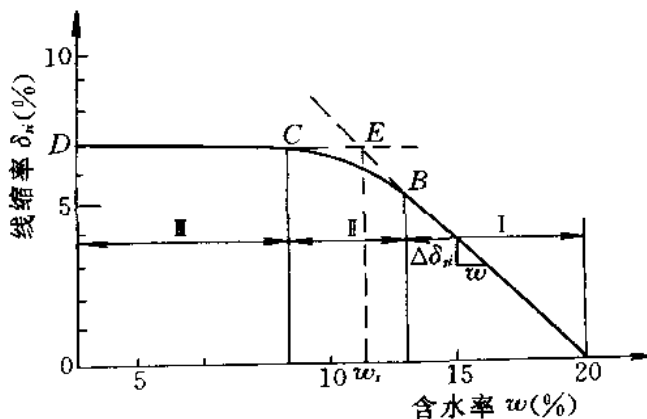


图 5.2.1 线缩率与含水率关系曲线

图 5.2.1。延长第 I、III 阶段的直线段至相交，两线交点对应的横坐标值 w_s 即为原状土的缩限。

6 记 录

6.0.1 本试验记录格式如表 6.0.1。

表 6.0.1 收缩试验记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
 土样编号 _____ 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

测定时间			百分表读数	单向收缩	线缩率	试样质量	水质量	含水率	备 注
d	h	min	z_i (0.01mm)	$z_i - z_0$ (mm)	δ_{si} (%)	m_i (g)	m_w (g)	w_i (%)	

膨胀力试验

SL237—027—1999

1 定义和适用范围

1.0.1 膨胀力是指土体吸水膨胀时所产生的内应力。本试验采用平衡法。

1.0.2 本规程适用于测定原状试样和击实试样在体积保持不变时，由于吸水膨胀而产生的最大内应力。

2 引用标准

GB4935—85《单杠杆固结仪》。

SL114—95《杠杆式固结仪校验方法》。

SL237—015—1999《固结试验》。

SL237—025—1999《膨胀率试验》。

3 仪器设备与校正

3.1 仪器设备

3.1.1 试样容器：应符合 SL237—015—1999 规程 3.1.1 的规定，另备等直径环刀接环，高 10 mm。

3.1.2 加压设备、变形测量设备：应符合 SL237—015—1999 规程 3.1.2，3.1.3 的规定。

3.1.3 其他：刮土刀、钢丝锯、天平、吸水球、量表（分度值 0.01 mm）。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 应按 SL237—015—1999 规程 3.2 的规定进行检定和

校准。

4 操作步骤

4.0.1 试样安装按 SL237—025—1999 规程 4.3.1~4.3.5 规定进行。

4.0.2 向水盒内注入纯水，并保持水面高出试样 5 mm。

4.0.3 当试样开始膨胀（膨胀量不应大于 0.01 mm），应立即施加平衡荷载，使量表指针仍指向初始读数（加荷载时应避免冲击力），直到 2 h 内读数不变为止。

4.0.4 当平衡荷载足以产生仪器变形时，在加下一次平衡荷载时，此时量表指针应指向上一级平衡荷载相应的仪器变形位置。直到最后一级平衡荷载产生的变形量恰好等于仪器变形量时，认为变形稳定。

4.0.5 试验结束，吸去容器内水，取出试样，称试样质量，测定试验后含水率并计算孔隙比。

5 计算

5.0.1 按式 (5.0.1) 计算膨胀力：

$$p_e = k \frac{W}{A} \times 10 \quad (5.0.1)$$

式中 p_e ——膨胀力，kPa；

W ——总平衡荷载，N；

A ——试样面积， cm^2 ；

k ——压缩仪杠杆比；

10——单位换算系数。

6 记录

6.0.1 本试验记录格式如表 6.0.1。

表 6.0.1 膨胀力试验记录

工程名称 _____ 试验者 _____
 土样编号 _____ 计算者 _____
 土样说明 _____ 校核者 _____
 仪器编号 _____ 日期 _____

试样状态			膨胀力测定						
项 目		试验前	试验后	测定时间			平衡重	压力	仪器变形量
环刀编号				d	h	min	(N)	(kPa)	(mm)
环刀加湿土质量(g)	(1)								
环刀加干土质量(g)	(2)								
环刀质量(g)	(3)								
湿土质量(g)	(4)	(1)-(3)	(1)-(3)						
干土质量(g)	(5)	由试后得	(2)-(3)						
水质量(g)	(6)	(4)-(5)							
含水率(%)	(7)	$\frac{(6)}{(5)} \times 100$	$\frac{(6)}{(5)} \times 100$						
土样体积(cm ³)	(8)	V_0	$V_0(1+V_h)$						
密度(g/cm ³)	(9)	$\frac{(4)}{(8)}$	$\frac{(4)}{(8)}$						
干密度(g/cm ³)	(10)	$\frac{(5)}{(8)}$	$\frac{(5)}{(8)}$						
土粒比重	(11)								
孔隙比	(12)	$\frac{(11)}{(10)} - 1$							
V _h 为膨胀体积									

静止侧压力系数试验

SL237—028—1999

1 定义和适用范围

- 1.0.1 土的静止侧压力系数是土体在无侧向变形条件下,侧向有效应力与轴向有效应力之比。
- 1.0.2 本试验用侧压力仪进行排水试验测定侧向有效应力与轴向有效应力,计算土的静止侧压力系数。
- 1.0.3 本规程适用于饱和的粘质土和砂质土。

2 引用标准

- GB4935—85 《杠杆式固结仪》。
- SL114—95 《杠杆式固结仪校验方法》。
- SL110—95 《切土环刀校验方法》。
- SL237—002—1999 《土样和试样制备》。

3 仪器设备

3.1 仪器设备

- 3.1.1 侧压力仪,见图 3.1.1。
- 3.1.2 轴向加压设备:杠杆式或磅秤式,最大负荷 5 kN。
- 3.1.3 侧向压力量测设备:包括压力传感器,准确度为全量程的 0.5%,测量装置或三轴压缩仪的测压板。
- 3.1.4 切土环刀:内径 61.8 mm,高度 40 mm。
- 3.1.5 其他:校正样块(内径 61.8 mm,高度 100 mm)、饱和器、推样器、硅脂等。

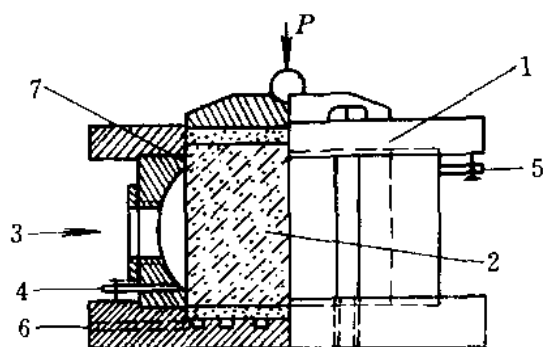


图 3.1.1 侧压力仪 K_0 试验
装置示意图

1—侧压仪容器；2—试样；3—接压力传递系统；4—进水孔；5—排气孔阀；6—固结排水孔；7—O形圈

3.2 仪器设备的检定和校验

3.2.1 轴向加压设备：参照 SL114—95 规定的方法进行校准。

3.2.2 压力传感器：应参照 JJG860—94《压力传感器检定规程》进行检定。

3.2.3 切土环刀：参照 SL110—95 规定的方法进行校验。

3.2.4 侧压力仪在使用前应进行检查。

1 排除密闭受压室内和测压系统的气泡。其方法是打开排气孔阀，从进水孔注入纯水，当排气孔溢出水时，用手挤压受压室内的橡皮膜，使受压室中的水从排气阀冲出。如此反复数次，直至无气泡溢出时为止。排气完毕，关排气孔阀，拧紧进水孔螺丝。

2 用校正样块代替试样，慢慢放入容器内，开排气孔阀使受压室多余的水从排气孔排出，使橡皮膜平整并紧贴校正样块。关排气孔阀，用侧压力量测系统逐级施加压力，直至压力达 500 kPa。如压力表读数不下降，表示受压室和各管路系统不漏水。然后卸除压力，取出校正样块。

4 操作步骤

4.1 粘质土试验

4.1.1 试样分原状土和扰动土两类。原状土试样制备按 SL237—002—1999 规程 5.0.1 至 5.0.5 规定进行；扰动土试样制备按 SL237—002—1999 规程 4.2.1 至 4.2.2 规定进行。试样尺寸：直径为 61.8 mm，高度为 40~60 mm。

4.1.2 将带有环刀的试样装入框式饱和器内，按 SL237—002—1999 规程 6.3 的规定进行饱和，饱和度要求达到 95% 以上。

4.1.3 将试样推出环刀，贴上滤纸条，套上橡皮膜并涂薄层硅脂，放入侧压仪容器内（安装试样前，打开进水阀，用调压筒抽出密闭受压室中的部分水，使橡皮膜凹进，试样推进容器后，再将抽出的水压回受压室，使试样与橡皮膜紧密接触，关进水阀）。放上透水板、护水圈、传压板、钢珠。将容器置于加压框架正中，施加 1 kPa 预压力。安装轴向位移计，并调至零位。

4.1.4 打开接侧压力量测装置的阀，调平电测仪表。测记受压室中水压力为零时的压力传感器读数（若用三轴压缩仪的测压板测定受压室压力时，则调整零位指示器内水银面于指示线处，并测定压力表初始读数）。

4.1.5 施加轴向压力。压力等级一般按 25、50、100、200、400kPa 施加。施加每级轴向压力后，随时调平电测仪表，按 0.5、1、4、9、16、25、36、49 min、…测记仪表读数和轴向变形（若用测压板测定受压室压力，则随时调节调压筒，使零位指示器内水银面保持初始位置，按上述时间间隔测定压力表读数），直至变形稳定为止。试样变形稳定标准为每小时变形不大于 0.01 mm，再加下一级轴向压力。

4.1.6 试验结束后，关闭侧压力装置阀，卸去轴向压力，拆除护水圈、传压板及透水板等。取出试样称量，并测定含水率。

4.2 砂质土试验

4.2.1 根据要求的干密度和试样体积称取所需的风干砂样，准确至 0.1 g。

4.2.2 将砂样装入容器中，拂平表面，放上一块硬木块，用手轻轻敲打，使试样达到要求的干密度，然后取下硬木块。若采用饱

和砂样，则将干砂放入水中煮沸，冷却后填入容器。

4.2.3 试样填好后，放上透水板、传压板，将容器置于加压框架正中，按本规程 4.1.3 至 4.1.6 的规定进行。

5 计算和制图

5.0.1 按式 (5.0.1) 计算侧向压力：

$$\sigma_3' = C(R - R_0) \quad (5.0.1)$$

式中 σ_3' ——密封受压室的水压力即侧向有效应力，kPa；

C ——压力传感器比例常数，kPa/ $\mu\epsilon$ (kPa/mV)；

R_0 ——侧向压力等于零时，电测仪表的初读数 ($\mu\epsilon=10^{-6}$)，mV；

R ——试样竖向变形稳定时电测仪表读数 ($\mu\epsilon=10^{-6}$)，mV。

5.0.2 以有效轴向压力为横坐标，有效侧向压力为纵坐标，绘制 $\sigma_1' \sim \sigma_3'$ 关系曲线，如图 5.0.2，其斜率为静止侧压力系数，即 $K_0 = \sigma_3' / \sigma_1'$ 。

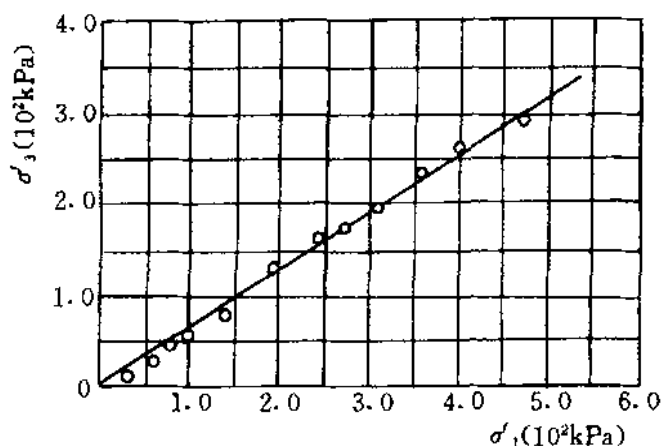


图 5.0.2 $\sigma_1' \sim \sigma_3'$ 关系曲线

6.0.1 本试验记录格式如表 6.0.1。

表 6.0-1 静止侧压力系数试验记录表

工程编号 _____

试验者 _____

试样编号 _____

计算者 _____

日 期 _____

校核者 _____

1. 含水率 w _____ %

项 目	试 验 前		试 验 后	
	(1)	(2)	(1)	(2)
盒 号				
湿土加盒质量 (g)				
干土加盒质量 (g)				
盒质量 (g)				
含水率 (%)				
平均含水率 (%)				

2. 密度 ρ _____ g/cm³

项 目	试 验 前	试 验 后
试样面积 (cm ²)		
试样高度 (cm)		
试样体积 (cm ³)		
试样质量 (g)		
试样密度 (g/cm ³)		
孔隙比		
试样描述		

3. K_0 试验

电测仪表初始读数 $R_0 =$ $\mu\epsilon$ (mV)

压力传感器比例常数 = $\text{kPa}/\mu\epsilon$ (mV)

轴向压力 = kPa				
经过时间 t (min)	轴向变形 Δh (0.01 mm)	电测仪表读数 R ($\mu\epsilon$) (mV)	读数变化值 ($R - R_0$) ($\mu\epsilon$) (mV)	侧向压力 σ_3 (kPa)
0				
1' / 4				
1'				
4'				
9'				
16'				
25'				
36'				
49'				
60'				
100'				

弹性模量试验

SL237—029—1999

1 定义和适用范围

- 1.0.1 土的弹性模量是土体在外力作用下，应力与弹性应变之比。
- 1.0.2 本试验用圆柱形试样，在侧向应力（ $\sigma_2 = \sigma_3$ ）作用下，用轴向反复加荷、卸荷的方法确定土的弹性变形，计算土的弹性模量。
- 1.0.3 本规程适用于饱和的粘质土和砂质土。

2 引用标准

- GB4540—84 《应变控制式三轴仪》。
- SL118—95 《应变控制式三轴仪的校验方法》。
- SL237—017—1999 《三轴压缩试验》。
- SL237—030—1999 《土的变形参数（K、G）试验》。

3 仪器设备

3.1 仪器设备

- 3.1.1 应力控制式三轴仪：如图 3.1.1。
- 3.1.2 附属设备：应符合 SL237—017—1999 规程 3.1.2 的规定。
- 3.1.3 天平：称量 200 g，分度值 0.01 g；称量 1000 g，分度值 0.1 g。
- 3.1.4 位移计（千分表）：量程 2 mm，分度值 0.001 mm。

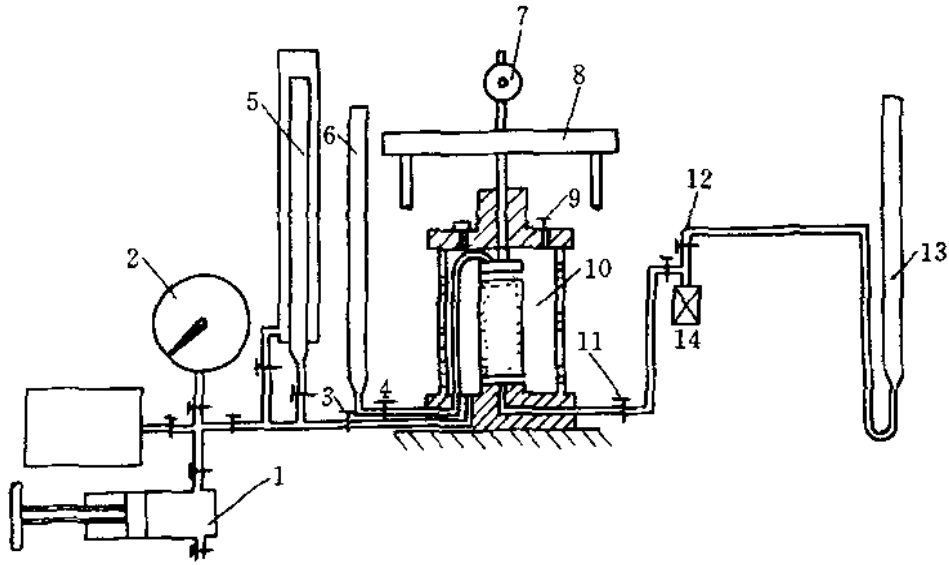


图 3.1.1 应力控制式三轴仪装置

1—调压筒；2—周围压力表；3—周围压力阀；4—排水阀；5—体变管；6—排水管；7—轴向位移计；8—轴向加压设备；9—排气孔；10—压力室；11—孔隙压力阀；12—量管阀；13—量管；14—孔压传感器

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 应力控制式三轴仪：参照 SL118—95 规定的方法进行校验。

3.2.2 天平：应按相应的检定规程进行检定。

3.2.3 千分表：参照 JJG34—84《百分表检定规程》进行检定。

3.3 仪器检查

3.3.1 仪器检查按 SL237—017—1999 规程 3.3.1~3.3.5 的规定进行。

4 操作步骤

4.1 粘质土试验

4.1.1 原状土试样制备按 SL237—017—1999 规程 4.1.2 的规定进行；扰动土试样制备按 SL237—017—1999 规程 4.1.3 的规定进行。

- 4.1.2 试样饱和按 SL237—017—1999 规程 4.2.1 的规定进行。
- 4.1.3 试样安装和固结按 SL237—017—1999 规程 4.3.2 的规定进行。
- 4.1.4 试样 K_0 固结按 SL237—030—1999 规程 4.3.2 之 1 的规定进行。若不需要加反压力，排水量由排水管测读。
- 4.1.5 关排水阀和孔隙压力阀，将轴向位移计调整至零位。分级施加轴向压力，每级压力按预计的试样破坏主应力差的 $1/10 \sim 1/12$ 施加。
- 4.1.6 施加第 1 级压力，同时开动秒表，测记加压后 1 min 时位移计的读数。每隔 1 min 施加一级压力，测记位移计读数 1 次，施加到第 4 级压力为止。
- 4.1.7 在测记第 4 级压力施加后 1 min 位移计读数的同时，逐级卸压。每隔 1 min 卸去一级，并测记卸压后 1 min 的位移计读数，直至施加的轴向压力全部卸去。
- 4.1.8 在测记最后一级压力卸去后 1 min 位移计读数时，按本规程 4.1.6 至 4.1.7 的规定重复加荷、卸荷 4~5 遍后，继续加压。测记每级压力施加后 1 min 位移计读数，直至破坏为止。
- 4.1.9 关周围压力阀，卸去轴向压力，拆除试样，称试样质量并测定试验后含水率。

4.2 砂质土试验

- 4.2.1 试样制备和安装按 SL237—017—1999 规程 4.1.5 的规定进行。
- 4.2.2 试样 K_0 固结按本规程 4.1.4 的规定进行。
- 4.2.3 加荷、卸荷按本规程 4.1.5~4.1.8 的规定进行。
- 4.2.4 按本规程 4.1.9 的规定拆除试样。

5 计算和制图

- 5.0.1 绘制加压、卸压与轴向变形关系曲线，如图 5.0.1 所示。将最后一个滞回圈的两端点连成直线，其斜率为土的弹性模量。

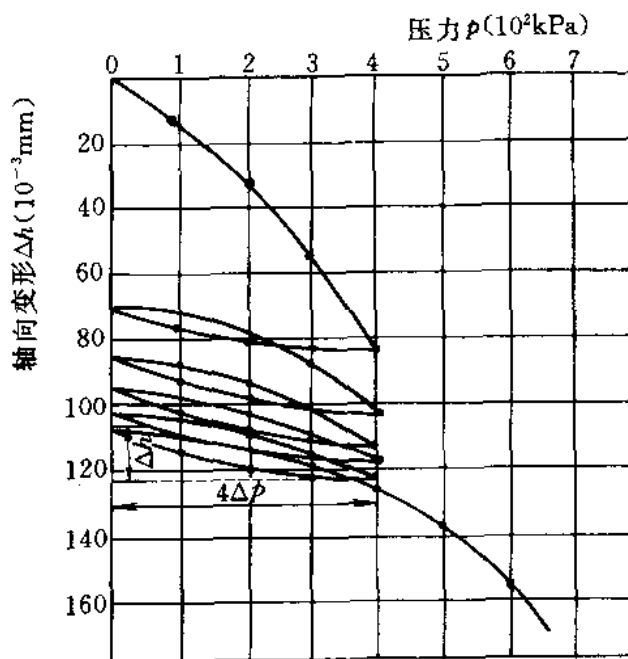


图 5.0.1 加压、卸压与轴向变形关系曲线

5.0.2 按式 (5.0.2) 计算试样弹性模量:

$$E = \frac{\frac{\sum \Delta p}{A_0}}{\frac{\sum \Delta h}{h_c}} \times 10 \quad (5.0.2)$$

式中 E ——试样的弹性模量, kPa;

Δp ——每级轴向荷载, N;

$\sum \Delta h$ ——相应于总压力下的弹性变形, mm;

A_0 ——试样初始面积, cm^2 ;

h_c ——试样固结后高度, mm;

10——单位换算系数。

6 记 录

6.0.1 本试验记录格式如表 6.0.1。

表 6.0.1 弹性模量试验记录

工程名称 _____
 试样编号 _____
 日 期 _____

试验者 _____
 计算者 _____
 校核者 _____

1. 含水率

项 目	试 验 前		试 验 后	
	(1)	(2)	(1)	(2)
盒 号				
湿土加盒质量 (g)				
干土加盒质量 (g)				
盒质量 (g)				
含水率 (%)				
平均含水率 (%)				

2. 密度

项 目	试 验 前	试 验 后
试样面积 (cm ²)		
试样高度 (cm)		
试样体积 (cm ³)		
试样质量 (g)		
试样密度 (g/cm ³)		
孔隙比		
试样描述		

3. 加荷、卸荷 (固结压力: 轴向 _____ kPa, 侧向 _____ kPa)

荷重级编号	荷载增量 (N)	加荷压缩量 (1 min 位移计读数)	卸荷回弹量 (1 min 位移计读数)
1			
2			
3			
4			
5			
6			

土的变形参数试验

SL237—030—1999

1 定义和适用范围

1.0.1 土的体积变形模量(K)定义为土体在三向等压力作用下,应力与体积应变之比;土的剪切模量(G)定义为剪应力与剪应变之比。

1.0.2 本试验是通过试样在三向等压力作用下排水固结,测定应力与体积应变的关系曲线,计算土的体积变形模量。根据有效平均主应力为常量的排水剪试验,测定试样的应力应变关系曲线,计算土的剪切模量。

1.0.3 本规程适用于饱和的粘质土和砂质土。

2 引用标准

GB4540—84 《应变控制式三轴仪》。

SL118—95 《应变控制式三轴仪的校验方法》。

SL237—017—1999 《三轴压缩试验》。

3 仪器设备

3.1 仪器设备

3.1.1 仪器设备:采用GB4540—84应变控制式三轴仪; K 固结时宜采用应力控制式三轴仪。三轴仪应有施加反压力的装置。

3.1.2 附属设备和其他设备:应符合SL237—017—1999规程3.1.2~3.1.5的规定。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 仪器设备的检定和校准按 SL237—017—1999 规程 3.2.1~3.2.3 规定进行。

3.3 仪器检查

3.3.1 仪器检查应按 SL237—017—1999 规程 3.3 的规定进行。

4 操作步骤

4.1 试样制备和安装

4.1.1 粘质土试样分为原状土和扰动土两类。原状土试样按 SL237—017—1999 规程 4.1.2 的规定进行；扰动土试样制备按 SL237—017—1999 规程 4.1.3 的规定进行。试样尺寸建议采用直径 39.1 mm，高 80 mm。

4.1.2 试样饱和按 SL237—017—1999 规程 4.2 的规定进行。

4.1.3 试样安装按 SL237—017—1999 规程 4.3.2 的规定进行。滤纸条下端与透水板不连接。若考虑端部约束，则可在试样上、下两端放置中心可排水并涂有硅脂的双层乳胶膜。

4.1.4 砂质土试样的制备和安装按 SL237—017—1999 规程 4.1.5 的规定进行。要求密度均匀，达到所要求的干密度。试样尺寸建议采用本规程 4.1.1 的规定。

4.2 体积变形模量 (K) 试验

4.2.1 将周围压力调至所需反压力值，开周围压力阀和体变管阀，施加反压力。开孔隙压力阀，待孔压稳定，关体变管阀，测记体变管读数（即排水量读数）和孔隙压力表读数，关孔隙压力阀。

4.2.2 调节周围压力。周围压力的选择应与工程实际荷载相适应，最大周围压力宜大于设计荷载，一般可按 50、100、200、400、600 kPa 施加。

4.2.3 施加第 1 级周围压力。旋转手轮，使活塞与试样帽接触，将轴向位移计调至零读数。打开孔隙压力阀，测定稳定后的孔隙压力读数，减去孔隙压力初始读数，即为该级压力下试样的孔隙

压力。

4.2.4 开体变管阀，开动秒表，按 0.25、1、4、9 min、…测读体变管读数及孔隙压力读数^①。

4.2.5 固结完成后，关体变管阀、周围压力阀和孔隙压力阀，测记排水稳定后体变管读数和孔隙压力读数，然后缓慢转动手轮。当测力计开始微动，表示活塞和试样帽接触，记下轴向位移读数即为固结下沉量。

4.2.6 调节第 2 级周围压力，按本规程 4.2.3~4.2.5 的规定进行试验，并依此进行第 3 级、第 4 级，直至最后一级周围压力下的固结。

4.2.7 若需要进行逐级退荷试验时，测记各级荷载下膨胀后体变管读数及轴向位移读数。

4.2.8 试验结束后，拆除试样、称量，并测定试验后含水率。

4.3 剪切模量 (G) 试验

4.3.1 等向固结。

1 试样等向固结按本规程 4.2.1~4.2.4 的规定进行。

2 固结完成后，测记体变管、孔隙压力和轴向位移读数。

3 开电动机进行剪切。剪切速率对一般细粒土采用每分钟 0.012%~0.003% 的应变为宜。对砂质土，可适当加快。剪切过程中测记排水量、测力计读数，并随时计算轴向压力。随着轴向压力增加，减少周围压力，保持整个剪切过程中有效平均主应力为常量。

4 试验结束后，关体变管阀、孔隙压力阀和周围压力阀，拆除试样、称量，并测定试验后含水率。

4.3.2 K_0 固结

1 K_0 固结宜在应力控制三轴仪上进行。试样安装后，按本规程 4.2.1、4.2.2 的规定施加周围压力和反压力。随着试样排水，缓慢地施加轴向压力，其速率以排水量等于轴向变形量（试样面

① 若不测时间过程，该步骤可省略，只需打开体变管阀，使试样排水固结。

积不变)控制,务使排水量等于轴向变形量与试样初始面积的乘积,直至孔隙压力消散到接近施加的反压力,使有效侧向压力与有效轴向压力之比等于 K_0 。(静止侧压力系数)值。

2 固结完成后,测记体变管、孔隙压力和轴向变形读数。

3 试样剪切。轴向压力按预计试样破坏主应力差的 $1/10\sim 1/20$ 分级逐级施加。每级轴向压力施加后,待孔隙压力消散完后再施加下一级压力,直至试样破坏。

4 施加每级轴向压力前,按式(4.3.2)计算每级轴向荷载:

$$P = \sigma_1 A_i - \sigma_3 (A_i - a) \quad (4.3.2)$$

式中 P ——每级轴向荷载, N;

σ_1 ——每级轴向压力, kPa;

σ_3 ——每级轴向压力下的周围压力, kPa;

A_i ——每级荷载下的试样面积, cm^2 ;

a ——活塞面积, cm^2 。

5 在加压框架底盘上,用砝码逐级施加每级轴向压力时,并根据每级轴向压力的大小,减小周围压力,使整个剪切过程中,保持有效平均主应力为常量。测记轴向变形、孔隙压力和体变管读数。

6 试验结束后,关排水阀、孔隙压力阀和周围压力阀,卸去轴向荷载,拆除试样、称量,并测定试验后含水率。

5 计算和制图

5.1 体积变形模量(K)的计算

5.1.1 按式(5.1.1)计算体积应变:

$$\epsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} \times 100 \quad (5.1.1)$$

式中 ϵ_v ——试样的体积应变, %;

ΔV ——试样在每级周围压力下的体积变化,即排水量, cm^3 ;

V_0 ——试样的初始体积, cm^3 。

5.1.2 绘制 $\epsilon_v \sim \lg p$ 关系曲线，图 5.1.2。

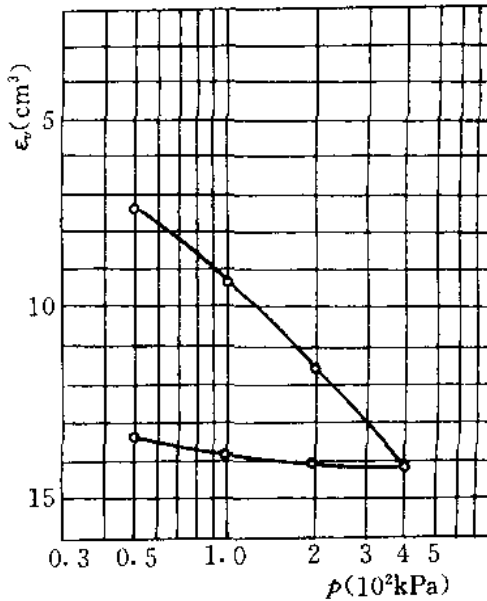


图 5.1.2 $\epsilon_v \sim \lg p$ 关系曲线

5.1.3 按式 (5.1.3) 计算切线体积变形模量：

$$K_t = \frac{p}{0.434 C_{cv}} \quad (5.1.3)$$

式中 K_t ——切线体积变形模量，kPa；

p ——施加的压力，kPa；

C_{cv} ——压缩主枝的斜率即体积压缩指数。

5.2 剪切模量 (G) 的计算

5.2.1 按式 (5.2.1) 计算试样固结后的高度、面积和体积。

1 等向固结：按 SL237—017—1999 规程表 5.1.1 的公式计算。

2 K_0 固结：

$$\begin{cases} h_c = \frac{V_0 - \Delta V}{A_0} & \text{或} & h_c = h_0 - \Delta h \\ A_c = A_0 \\ V_c = V_0 - \Delta V & \text{或} & V_c = h_c A_c \end{cases} \quad (5.2.1)$$

式中符号见 SL237—017—1999 规程 5.1.1。

5.2.2 按式 (5.2.2-1)、式 (5.2.2-2) 计算轴向应变和广义剪应变 ϵ ：

$$\epsilon_1 = \frac{\Delta h}{h_c} \quad (5.2.2-1)$$

$$\epsilon = \frac{2}{3}(\epsilon_1 - \epsilon_3) \quad (5.2.2-2)$$

式中 ϵ ——广义剪应力，%；

ϵ_1 ——轴向应变，%；

ϵ_3 ——侧向应变，%；

其余符号见本规程 5.2.1。

5.2.3 按式 (5.2.3) 计算剪切时的断面积：

$$A_a = \frac{V_c - \Delta V}{h_c - \Delta h} \quad (5.2.3)$$

式中符号见本规程式 (5.2.1)。

5.2.4 按式 (5.2.4-1)、式 (5.2.4-2) 计算广义剪应力：

1 应变式：

$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3 = \frac{(R_i - R_0)C}{A_a} \times 10 \quad (5.2.4-1)$$

2 应力式：

$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3 = \frac{W_i - W_0}{A_a} \times 10 \quad (5.2.4-2)$$

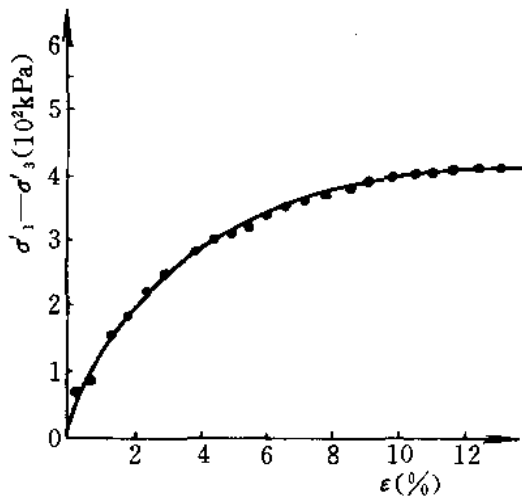


图 5.2.5 应力与应变关系曲线

式中 q ——广义剪应力, kPa;

R_i ——测力计读数, 0.01 mm;

R_0 ——周围压力作用下活塞反力在测力计上的读数,
0.01 mm;

C ——测力计率定系数, N/0.01 mm;

W_i ——各级轴向荷载, N;

W_0 ——周围压力作用下活塞反力, N;

10——单位换算系数。

5.2.5 绘制广义剪应力与广义剪应变关系曲线, 如图 5.2.5。根据采用的数学模型推求切线剪切模量和初始剪切模量。

6 记 录

6.0.1 本试验的记录格式如表 6.0.1-1、表 6.0.1-2。

表 6.0.1-1 体积变形模量 (K) 试验记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
试样编号 _____ 计算者 _____
日 期 _____ 校核者 _____

1. 含水率

项 目	试 验 前		试 验 后	
	(1)	(2)	(1)	(2)
盒 号				
湿土加盒质量 (g)				
干土加盒质量 (g)				
盒质量 (g)				
含水率 (%)				
平均含水率 (%)				

2. 密度

项 目	试 验 前	试 验 后
试样面积 (cm ²)		
试样高度 (cm)		
试样体积 (cm ³)		
试样质量 (g)		
试样密度 (g/cm ³)		
孔隙比		
试样描述		

3. 排水量与孔隙压力

项 目	周围压力 (kPa)	排水量 (cm ³)	孔隙压力 (kPa)
(1)			
(2)			
(3)			
(4)			
(5)			

4. 固结过程

(1) 周围压力 = kPa		
经过时间 <i>t</i> (min)	量水管读数 (cm ³)	孔隙压力 (kPa)
0		
1/4		
1		
4		
9		
16		
25		
36		
49		
60		
100		
240		
⋮		
1440		

表 6.0.1-2 剪切模量 (G) 试验记录表

工程名称 _____ 试样编号 _____ 日期 _____
 试验者 _____ 计算者 _____ 校核者 _____

1. 含水率

项 目	试 验 前		试 验 后	
	(1)	(2)	(1)	(2)
盒 号				
湿土加盒质量 (g)				
干土加盒质量 (g)				
盒质量 (g)				
含水率 (%)				
平均含水率 (%)				

2. 密度

项 目	试 验 前	试 验 后
试样面积 (cm ²)		
试样高度 (cm)		
试样体积 (cm ³)		
试样质量 (g)		
试样密度 (g/cm ³)		
孔隙比		
试样描述		

3. 固结过程 反压力 _____ kPa

周围压力 kPa		
经过时间 (min)	量水管读数 (cm ³)	孔隙压力 (kPa)
0		
0.25		
1		
4		
9		
16		
25		
36		
49		
60		
100		
240		
⋮		
1440		

4. 排水剪切(平均主应力保持常量)

测力计率定系数 $C =$ _____ N/0.01 mm 剪切速率 = _____ mm/min

轴向变形 (0.01 mm)	应变 ϵ_1 (%)	计算面积 $A_a = \frac{V_0 - \Delta V}{h_c - \Delta h}$ (cm ²)	测力计 读数 R_i (0.01 mm)	主应力差 $q = \sigma'_1 - \sigma'_3$ $= \frac{(R_i - R_0)C}{A_a} \times 10$ (kPa)	轴向主 应力 σ_1 (kPa)	孔隙压力 u (kPa)	侧向主 应力 σ_3 (kPa)	平均主应力 $P' = \frac{1}{3} \times$ $(\sigma'_1 + 2\sigma'_3)$ (kPa)	应力比 $\frac{q}{P'}$	排水管 读数 (cm ³)

单轴抗拉强度试验

SL237—031—1999

1 定义和适用范围

1.0.1 土的单轴抗拉强度是试样只在轴向拉力作用下达到断裂破坏时的极限正应力。

1.0.2 本试验是对圆柱形或长方体试样逐级施加轴向拉力,使试样达到断裂破坏,测得单轴抗拉强度。本试验分为立式和卧式单轴抗拉强度两种试验方法。

1.0.3 本规程适用于粘质土。

2 引用标准

GB4540—84《应变控制式三轴仪》。

GB/T15406—94《土工仪器的基本参数及通用技术条件》第一篇:室内土工仪器。

SL118—95《应变控制式三轴仪校验方法》。

SL237—017—1999《三轴压缩试验》。

3 立式单轴抗拉强度试验

3.1 仪器设备

3.1.1 三轴仪:电动机能正反转动的应变控制式或具有加荷框架的应力控制式三轴仪(不需要周围压力控制系统和孔隙压力测量系统),其性能应符合GB/T15406—94标准4.2.2之3要求。

3.1.2 附属设备。

1 卧式方形截面制样模,如图3.1.2-1。

2 钩拉装置，如图 3.1.2-2。

3 其他设备：夹具、粘合剂及切土工具等。

3.1.3 百分表：量程 10 mm，分度值 0.01 mm。

3.2 仪器设备的检定和校验

3.2.1 三轴仪：参照 SL118—95 校验方法进行校验。

3.2.2 百分表（位移计）：按 JJG34—84《百分表检定规程》进行检定。

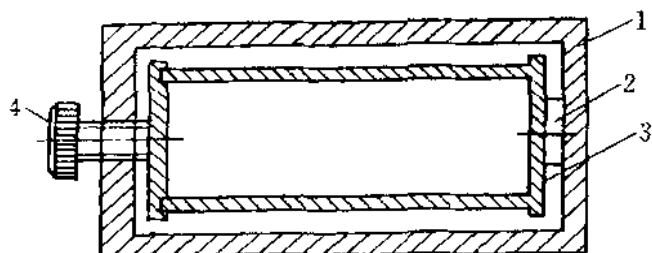


图 3.1.2-1 正方截面制样模具示意图

1—框架；2—垫块；3—四片成型模；4—压紧螺丝

3.3 操作步骤

3.3.1 试样采用原状土和扰动土两类。试样尺寸宜采用直径 61.8 mm，高度 125 mm。

3.3.2 原状土试样的制备按 SL237—017—1999 规程 4.1.2 的规定进行。

3.3.3 扰动土试样的制备。

1 根据要求的干密度、含水率和试样体积称取所需的湿土，分四层压入制样模具中，制成试样的坯。

2 按 SL237—017—1999 规程 4.1.2 规定切取试样。

3.3.4 将试样的上、下两端分

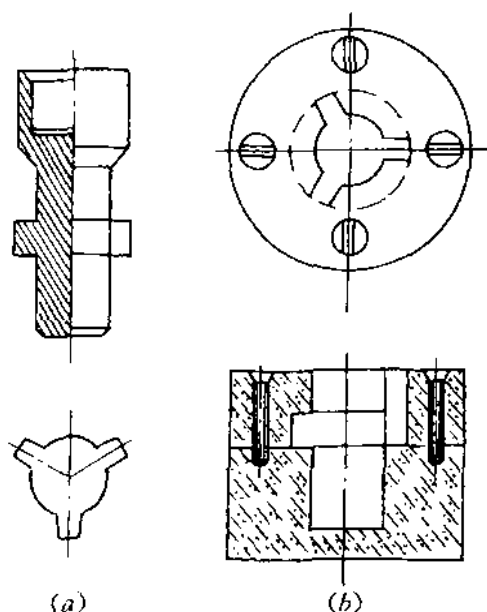


图 3.1.2-2 钩拉装置

(a) 三脚爪；(b) 试样帽

别与试样帽和不透水板用粘合剂依次胶结后，在试样表面均匀地涂薄层凡士林，并放入湿润的密封容器内养护 12 h 以上^①。

3.3.5 将养护后的试样放在压力室底座上，并用夹具将不透水板和底座固定在一起，用钩拉装置将活塞下端与试样帽连接。

3.3.6 应变控制拉伸。

1 将活塞上端与测力计连接，旋转仪器手轮，使台座下降。当测力计微动，表示试样开始受拉。

2 安装轴向位移计并调整零位。

3 拉伸应变速率取每分钟 0.01%~0.03%的应变量。

4 合上离合器，按电动机倒转开关，试样受拉。试样每产生轴向变形 0.1~0.2 mm 测记测力计和位移计读数 1 次（对强度低的试样，可加密读数），接近破坏时，加密读数。注意读取测力计的最大值。

5 试验结束后，关闭电动机开关，拔出离合器，拆除钩拉装置，称断裂部位以上试样及试样帽的质量，测定试样断裂处及其他部位的含水率。

3.3.7 应力控制拉伸。

1 将活塞上端与加荷框架连接，挂上加荷框架的平衡盘。

2 安装轴向位移计并调整零位。

3 在加荷框架的平衡盘上施加荷载，每级荷载的大小，开始按预计破坏荷载的 1/6~1/7 施加，接近破坏时减小为 1/10~1/12。

4 在每级荷载施加后，开始以间隔 1、5、10 min 测定轴向变形读数 1 次，以后每 10 min 测记 1 次，直到 2 次变形读数相差不超过 0.02 mm（对变形小的试样，可缩短时间测记变形读数），即可施加下一级荷载。逐级施加，直到断裂，取最后 2 级荷载的平均值作为断裂荷载。

5 试样断裂后，停止试验，取下荷载和加荷框架，拆除钩拉

^① 若需饱和按 SL237—017 1999 规程 4.2.1 的规定进行，然后胶结。

装置。称断裂部位以上试样及试样帽质量，并测定试样断裂处及其他部位的含水率。

3.4 计算和制图

3.4.1 按下列两式计算轴向应变 ϵ_a 和轴向拉应力 σ_T ：

$$\epsilon_a = \frac{\Delta h}{h_0} \times 100 \quad (3.4.1-1)$$

$$\sigma_T = \frac{T - mg}{A_0} \times 10 \quad (3.4.1-2)$$

式中 Δh —— 轴向拉伸变形，cm；

h_0 —— 试样初始高度，cm；

T —— 轴向拉力，N（应变式 $T=CR$ ，应力式 T =每级荷载）；

m —— 断裂面上部试样及试样帽质量，g；

g —— 重力加速度，9.81 m/s²；

A_0 —— 试样初始面积，cm²；

10 —— 单位换算系数。

当 T 为断裂的轴向拉力时， σ_T 为单轴抗拉强度。

3.4.2 绘制轴向拉应力与轴向应变关系曲线，如图 3.4.2。

3.5 记录

3.5.1 本试验记录格式如表 3.5.1-1、表 3.5.1-2。

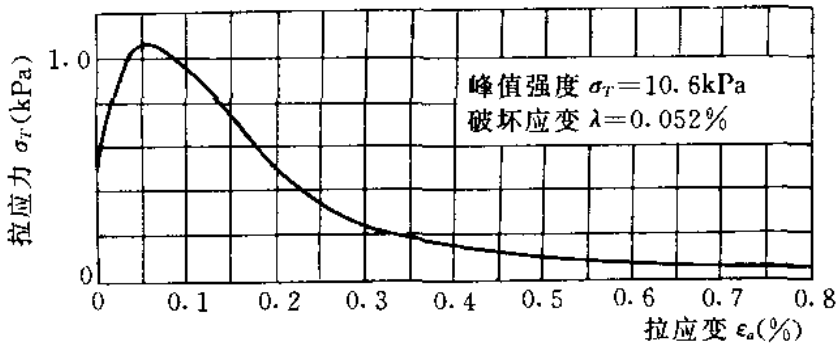


图 3.4.2 轴向拉应力与轴向应变关系曲线

表 3.5.1-1 单轴抗拉强度试验记录 (应变控制)

工程名称 _____

试验者 _____

试样编号 _____

计算者 _____

日期 _____

校核者 _____

1. 含水率

项 目	试 验 前		试 验 后	
	(1)	(2)	(1)	(2)
盒 号				
湿土加盒质量 (g)				
干土加盒质量 (g)				
盒质量 (g)				
含水率 (%)				
平均含水率 (%)				

2. 密度

项 目	试 验 前	试 验 后
试样面积 (cm ²)		
试样高度 (cm)		
试样体积 (cm ³)		
试样质量 (g)		
试样密度 (g/cm ³)		
孔隙比		
试样描述		

3. 拉伸

轴向变形 (0.01mm)	轴向应变 (%)	测力计读数 (0.01mm)	轴向拉力 (N)	轴向拉力加上部土的重力 (N)	轴 向 拉应力 (kPa)
备注	测力计系数 C = N/0.01 mm 拉伸应变速率 = mm/min				

表 3.5.1-2 单轴抗拉强度试验记录表 (应力控制)

工程名称 _____ 试验者 _____
 试样编号 _____ 计算者 _____
 日 期 _____ 校核者 _____

1. 含水率

项 目	试 验 前		试 验 后	
	(1)	(2)	(1)	(2)
盒 号				
湿土加盒质量 (g)				
干土加盒质量 (g)				
盒质量 (g)				
含水率 (%)				
平均含水率 (%)				

2. 密度

项 目	试 验 前	试 验 后
试样面积 (cm ²)		
试样高度 (cm)		
试样体积 (cm ³)		
试样质量 (g)		
试样密度 (g/cm ³)		
孔隙比		
试样描述		

3. 拉伸

轴向拉力 (N)	历时 (min)	轴向变形 读 数 (0.01mm)	轴向变形 (0.01 mm)	轴向应变 (%)	轴向拉力加 上部土重量 (N)	拉应力 (kPa)
	1					
	5					
	10					

4 卧式单轴抗拉强度试验

4.1 仪器设备

本试验仪器装置如图 4.1.1。

4.1.1 加荷装置：包括加荷盘（钩）及荷载（专用砝码、铁砂等），传力滑轮（应装有轴承以减少摩擦）。

4.1.2 百分表（位移计）：量程 10 mm，分度值 0.01 mm。

4.1.3 卧式方形截面制样模具：见本规程图 3.1.2-1。断面为 30mm×30 mm，50mm×50 mm；长度 150~200 mm。

4.1.4 其他：钩拉装置、粘合剂和切土工具等。

4.2 仪器设备的检定和校准

4.2.1 专用砝码、铁砂：用分度为 0.5% 相应的架盘天平（10 级）和 5 等砝码称量检定和校准。

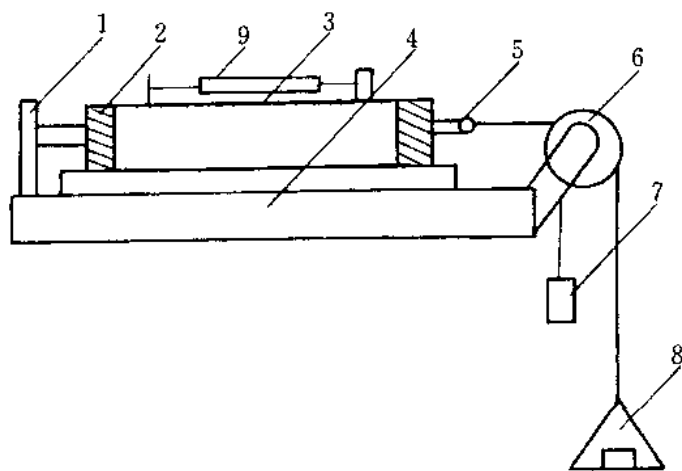


图 4.1.1 卧式单轴抗拉试验装置示意图

1—固定端；2—端板；3—试样；4—平板；5—钩拉装置；6—滑轮；7—平衡重；8—加荷盘；9—位移计

4.2.2 百分表（位移计）：按 JJG34—84《百分表检定规程》进行检定。

4.3 操作步骤

4.3.1 试样采用原状土和扰动土两类。宜采用方形断面，尺寸为

30mm×30 mm 或 50 mm×50 mm；长度为 150~200 mm。

4.3.2 对原状土样,先用削土刀或钢丝锯切取一稍大于规定尺寸的土柱,放在切土架盘上,用切土刀紧靠着调好尺寸的切土架侧面,小心切削。土柱面达到规定的断面尺寸,按长度削平两端。

4.3.3 对扰动土样,按要求的干密度和含水率配制湿土样,静置湿润一段时间,然后分层压入制样模中,压制成试样。

4.3.4 将试样两端分别与端板用粘合剂依次胶结后,按本规程 3.3.4 的规定进行养护。

4.3.5 将养护后的试样放在平板上(为了减小平板与试样间的摩擦,可在平板上涂抹润滑剂或放置滚柱),将一端刚性连接在装置的固定端,另一端用钩拉装置通过滑轮挂上已平衡的加荷盘(或挂钩)。

4.3.6 安装百分表或位移计,并调至零位或初读数。

4.3.7 按本规程 3.3.7 之 3 规定确定加荷等级施加荷载。

4.3.8 按本规程 3.3.7 之 4 规定逐级加荷,测记轴向变形,直至试样断裂为止。

4.3.9 试样断裂后,停止试验。拆除钩拉装置和加荷盘,取下试样,测定试样断裂处的含水率。

4.4 计算和制图

4.4.1 按下列两式计算轴向拉应力 σ_T 和轴向应变 ϵ_a :

$$\sigma_T = \frac{T}{A_0} \quad (4.4.1-1)$$

$$\epsilon_a = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100 \quad (4.4.1-2)$$

式中 T ——轴向拉力, N;

A_0 ——试样初始面积, cm^2 ;

Δl ——轴向拉伸变形, cm;

l_0 ——试样初始长度, cm。

4.4.2 绘制拉应力与拉应变关系曲线,如本规程图 3.4.2。

4.5 记录

4.5.1 本试验记录格式见本规程表 3.5.1-2。

振动三轴试验

SL237—032—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 本试验的目的是测定饱和土在动应力作用下的应力、应变和孔隙水压力的变化过程，从而确定其在动力作用下的破坏强度（包括液化）、应变大于 10^{-4} 时的动弹性模量和阻尼比等动力特性指标。

1.0.2 本规程适用于饱和砂土、粉土和粘土。一般采用固结不排水试验。

2 引用标准

SL118—95 《应变控制式三轴仪校验方法》。

SL237—017—1999 《三轴压缩试验》。

3 仪器设备

3.1 仪器设备

3.1.1 电磁式振动三轴仪：有常规控制式和微机控制式两种。其组成包括主机、静力控制系统、动力控制系统和量测系统。

1 主机：包括压力室和激振器等，见图 3.3.1-1。

2 静力控制系统：用于施加侧向压力、轴向压力、反压力，包括储气罐、调压阀、放气阀、压力表和管路等。

3 动力控制系统：包括交流稳压电源、超低频信号发生器、超低频峰值电压表、电源、功率放大器、超低频双线示波器等，或采用振动控制器和测量放大器。激振波型良好，拉压两半周幅值

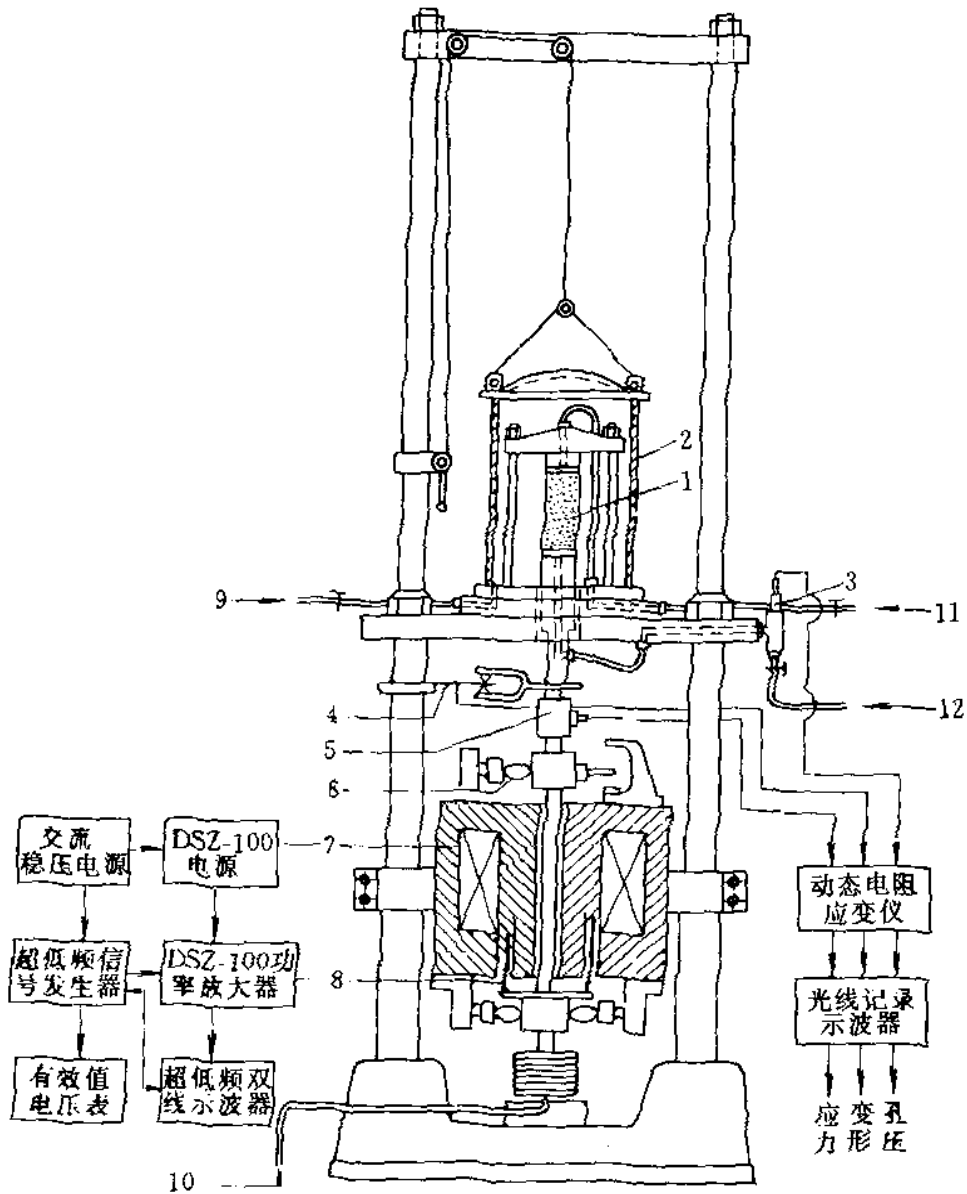


图 3.1.1-7 电磁式振动三轴仪示意图

- 1- 试样; 2- 压力室; 3- 孔隙压力传感器; 4- 变形传感器; 5- 拉压力传感器;
 6- 导轮; 7- 励磁线圈 (定圈); 8- 激振线圈 (动圈); 9- 接侧压力稳压罐系统;
 10- 接垂直压力稳压罐系统; 11- 接反压力饱和及排水系统;
 12- 接静孔隙压力测量系统

和持时基本相等, 相差应小于 $\pm 10\%$ 。

4 量测系统: 用于量测轴向应力、轴向位移及孔隙水压力, 由传感器、动态电阻应变仪、光线记录示波器或 $x-y$ 函数记录器

等组成。若采用微机控制和数据采集系统，应编制控制、数据采集和处理程序、绘图和汇总试验成果程序和打印程序。配打印机或绘图仪。整个系统的各部分均应有良好的频率响应、性能稳定，不应超过允许误差范围。

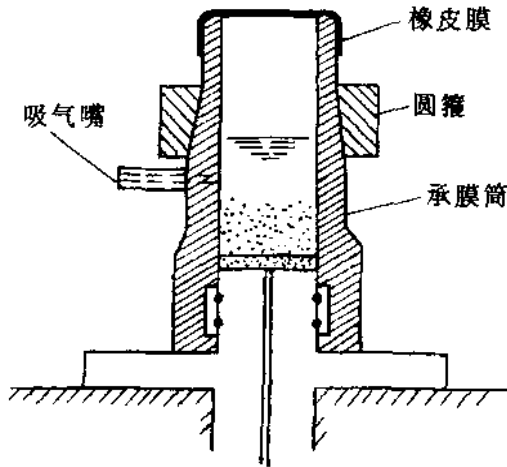


图 3.1.1-2 试样装置示意图

3.1.2 附属设备：应符合 SL237—017—1999 规程 3.1.2 的规定。

3.1.3 天平：称量 200 g，分度值 0.01 g；称量 1000 g，分度值 0.1 g。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 主机的压力室和静力控制系统按 SL118—95 校验方法之 13, 14, 15 规定的方法进行校验。

3.2.2 传感器检定

1 拉压力传感器：参照 JJG391—85《负荷传感器试行检定规程》进行检定。

2 孔压传感器：参照 JJG860—94《压力传感器检定规程》进行检定。

3 位移传感器：参照 JJG55—84《测长仪检定规程》进行检定。

3.2.3 天平：应按相应的检定规程进行检定。

3.3 仪器各部件的检查和标定

3.3.1 压力室、静力控制系统、孔隙水压力量测系统的检查按

SL237—017—1999 规程 3.3.1~3.3.3 的规定进行检查。

3.3.2 量测系统的动态应变仪、光线示波器或 $x-y$ 函数记录器应满足使用说明书的调试要求进行检查（检查电控柜与主机、微机系统的连接是否正确）。

4 操作步骤

4.1 试样制备

4.1.1 本试验采用的试样直径为 39.1mm 和 50 mm，高度以试样直径的 2~2.5 倍为宜。

4.1.2 原状土样的试样制备按 SL237—017—1999 规程 4.1.2 的规定进行。

4.1.3 扰动土样的试样制备按 SL237—017—1999 规程 4.1.3 的规定进行。

4.1.4 砂土试样制备按 SL237—017—1999 规程 4.1.5 的规定进行。对填土宜模拟现场状态用密度控制。对天然地基宜用原状试样。

4.2 试样饱和

4.2.1 抽气饱和按 SL237—017—1999 规程 4.2.1 的规定进行。

4.2.2 水头饱和按 SL237—017—1999 规程 4.2.2 的规定进行。

4.2.3 二氧化碳饱和按 SL237—017—1999 规程 4.2.3 的规定进行。

4.2.4 反压力饱和按 SL237—017—1999 规程 4.2.4 的规定进行。

4.3 试样安装

4.3.1 先将激振器动圈调至水平位置，打开供水阀，使试样底座充水排气，当溢出的水不含气泡时，按 SL237—017—1999 规程

4.3.2 中 1~7 的规定安装试样。

4.3.2 砂样安装在试样制备过程中完成。

4.4 试样固结

4.4.1 等向固结。先对试样施加 20 kPa 的侧压力，然后逐级施加均等的侧向压力和轴向压力，直到侧向压力和轴向压力相等并达到预定压力。

4.4.2 不等向固结。应在等向固结变形稳定后，逐级增加轴向压力，直到预定的轴向压力，加压时勿使试样产生过大的变形。

4.4.3 对施加反压力的试样，按 SL237—017—1999 规程 4.2.4 的规定施加反压力。

4.4.4 施加压力后打开排水阀或体变管阀和反压力阀，使试样排水固结。固结稳定标准：对粘土和粉土试样，1 h 内固结排水量变化不大于 0.1 cm^3 ；砂土试样等向固结时，关闭排水阀后 5min 内孔隙压力不上升；不等向固结时，5 min 内轴向变形不大于 0.005 mm 。

4.4.5 固结完成后关排水阀，并计算振前干密度。

4.5 动强度（液化）试验

4.5.1 常规控制式操作步骤。

1 开动力控制系统和量测系统仪器的电源，预热 30 min。将信号发生器的“波形选择”、“时间周期”（频率）旋钮旋到所需的位置，对振动频率无特殊要求时，宜采用 1 Hz。

2 根据预估的动应力，选择动态应变仪中的应力、变形和孔隙水压力的“衰减”档以及功率放大器上的“输出调节”、信号发生器上的“输出衰减”和“输出调节”，使动态应变仪、光线示波器（或绘图仪）等处于工作状态。

3 选好拍摄速度、开启光线示波器的电动机和拍摄按钮，记录光点初始位置。

4 启动功率放大器，对试样施加预估的动应力，用光点示波器（或绘图仪）记录动应力、动应变和动孔隙水压力的时程曲线。在振动过程中，应随时注意观察试样和光点有无异常变化，如波形过大或过小，应及时改变“衰减”档，并在记录上注明。

5 对等向固结的试样，当孔隙压力等于侧向压力；不等向固结的试样，应变达 10% 时，再振 10~20 周停机。测记振后的排水

量和轴向变形量。

6 将应变仪“衰减”档调至零位，关闭仪器电源，卸除压力，拆除试样，描述试样破坏形状，称试样质量。

7 对同一密度的试样，宜选择 1~3 个固结比。在同一固结比下，应选择 1~3 个不同的侧向压力。每一侧向压力下用 3 至 4 个试样，选择不同的振动破坏周次（10 周，20~30 周和 100 周左右）按本规程 4.5.1 中 1~6 的规定进行试验。

4.5.2 微机控制式操作步骤。

1 系统调零：

1) 按电控柜“ON”键一次灯亮，开计算机（或复位），输入运行程序（按仪器使用说明书操作）。

2) 根据屏幕提示，选择相应的功能键，进行测量系统调零。旋转测量放大器面板上的各个调零电位器，使屏幕上相应的轴向力、轴向位移、孔隙水压力值为零。

2 振动试验：

1) 按电控柜“ON”键二次，依次功率放大器和励磁电源灯亮。励磁电流值为 4 A 左右，待稳定后，再按“ON”键一次，振动线圈灯亮。

2) 返回采集和控制程序主菜单，根据屏幕提示，选择试验类型、波型等，并根据屏幕提示，逐项设置。

3) 当屏幕上提示“Y/N?”时，将功率放大器增益调节开关向右旋到最大，键入“Y”，开始振动试验。当试验按设置的程序运行后，自动返回命令执行菜单，将功率放大器增益调节开关向左旋至关上。试验过程中计算机自动采集数据。

3 试验结束，卸去压力，拆除试样，描述试样破坏形状，称试样质量。

4 按本规程 4.5.1 之 7 规定，用 3~4 个试样，按 4.5.2 中 1、2 的规定进行试验。

5 利用数据处理程序，计算机进行数据处理、绘图、汇总结果并存盘、打印。

4.6 动弹性模量和阻尼比

4.6.1 仪器的预热和调试按本规程 4.5.1 中 1~3 的规定进行，并调好 $x-y$ 函数记录仪初始相位，放下记录笔。

4.6.2 选择动力大小。在不排水条件下对试样施加动应力，测记动应力、动应变和动孔隙水压力，同时用 $x-y$ 函数记录仪绘制动应力和动应变滞回圈，直到预定振次时停机，拆样。

4.6.3 同一干密度的试样，在同一固结应力比下，应在 1 至 3 个不同的侧压力下试验，每一侧压力，宜用 5~6 个试样，改变 5~6 级动力，按本规程 4.6.1、4.6.2 的规定进行试验。

5 计算和制图

5.1 动强度（液化）计算

5.1.1 按下列公式计算试样在静应力状态的指标。

1 固结应力比：

$$K_c = \frac{\sigma'_{1c}}{\sigma'_{3c}} = \frac{\sigma_{1c} - u_0}{\sigma_{3c} - u_0} \quad (5.1.1-1)$$

式中 K_c ——固结应力比；

σ'_{1c} ——有效轴向固结应力，kPa；

σ'_{3c} ——有效侧向固结应力，kPa；

σ_{1c} ——轴向固结应力，kPa；

σ_{3c} ——侧向固结应力，kPa；

u_0 ——初始孔隙水压力，kPa。

2 初始剪应力比：

$$\alpha = \frac{\tau_0}{\sigma'_0} \quad (5.1.1-2)$$

$$\tau_0 = \frac{(K_c - 1)\sigma'_{3c}}{2} = \frac{1}{2}(\sigma_{1c} - \sigma_{3c})$$

$$\sigma'_0 = \frac{(K_c + 1)\sigma'_{3c}}{2} = \frac{1}{2}(\sigma_{1c} + \sigma_{3c}) - u_0$$

式中 α ——初始剪应力比；

τ_0 ——振前试样 45°面上的剪应力, kPa;

σ'_0 ——振前试样 45°面上的有效法向应力, kPa;

其余符号见本规程式 (5.1.1-1)。

5.1.2 按下列公式计算动应力、动应变和动孔隙水压力。

1 动应力:

$$\sigma_d = \frac{K_\sigma L_\sigma}{A_c} \times 10 \quad (5.1.2-1)$$

式中 σ_d ——动应力 (取初始值), kPa;

K_σ ——动应力传感器标定系数, N/cm;

L_σ ——动应力光点位移, cm;

A_c ——试样固结后面积, cm^2 ;

10——单位换算系数。

2 动应变:

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta h_d}{h_c} \times 100 \quad (5.1.2-2)$$

式中 ε_d ——动应变, %;

Δh_d ——动变形, ($=K_\varepsilon L_\varepsilon$), cm;

K_ε ——动变形传感器标定系数, cm/cm;

L_ε ——动变形光点位移, cm;

h_c ——固结后试样高度, cm。

3 动孔隙水压力:

$$u_d = K_u L_u \quad (5.1.2-3)$$

式中 u_d ——动孔隙水压力, kPa;

K_u ——动孔隙水压力传感器标定系数, kPa/cm;

L_u ——动孔隙水压力光点位移, cm。

5.1.3 按下列公式计算动剪应力、总剪应力、液化应力比。

1 动剪应力:

$$\tau_d = \frac{1}{2} \sigma_d \quad (5.1.3-1)$$

式中 τ_d ——动剪应力, kPa;

其余符号见本规程式 (5.1.2-1)。

2 总剪应力:

$$\tau_{td} = \frac{\sigma_{1c} - \sigma_{3c} + \sigma_d}{2} = \tau_0 + \tau_d \quad (5.1.3-2)$$

式中 τ_{td} ——总剪应力, kPa;

其余符号见本规程式 (5.1.1-1)、式 (5.1.3-1)。

3 液化应力比:

$$\frac{\tau_d}{\sigma_0} = \frac{\sigma_d}{2\sigma_0} \quad (5.1.3-3)$$

式中符号见本规程式 (5.1.1-2) 和式 (5.1.3-1)。

5.1.4 以动剪应力为纵坐标, 破坏振次在对数横坐标上, 绘制不同固结比时不同侧压力下的动剪应力和振次关系曲线, 如图 5.1.4。

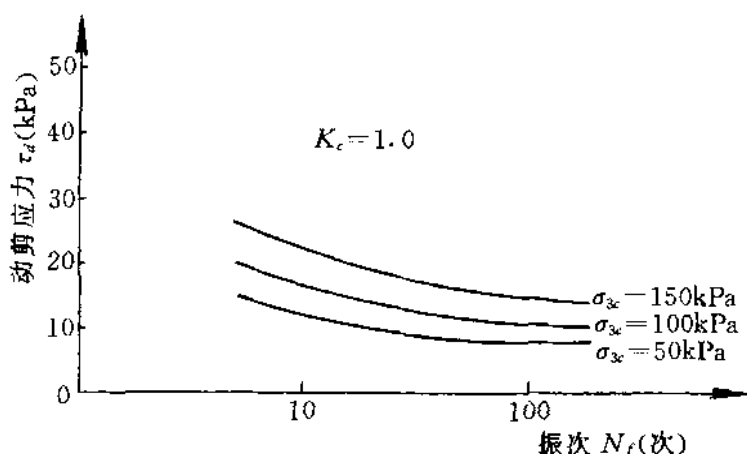


图 5.1.4 动剪应力与振次关系曲线

5.1.5 以振动破坏时试样 45° 面上的总剪应力 ($\tau_0 + \tau_d$) 为纵坐标, 振前试样 45° 面上的有效法向应力为横坐标, 绘制给定振次下, 不同初始剪应力比时的总剪应力与有效法向应力关系曲线, 如图 5.1.5。

5.1.6 以液化应力比为纵坐标, 破坏振次在对数横坐标上, 绘制不同固结应力比时的液化应力比与振次关系曲线, 如图 5.1.6。

5.1.7 以动孔隙水压力比为纵坐标, 破坏振次在对数横坐标上,

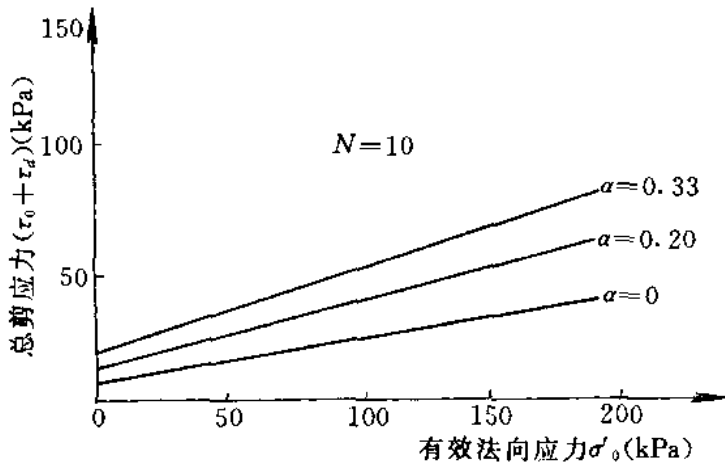


图 5.1.5 总剪应力与有效法向应力关系曲线

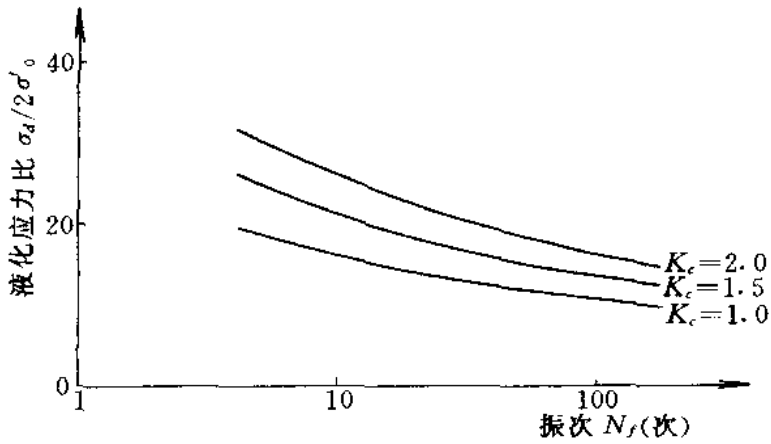


图 5.1.6 液化应力比与振次关系曲线

绘制动孔隙水压力比与振次关系曲线，如图 5.1.7。

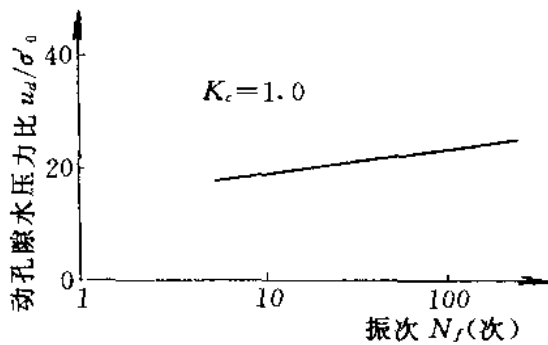


图 5.1.7 动孔隙水压力比
与振次关系曲线

5.2 动弹模量和阻尼比计算

5.2.1 按式 (5.2.1) 计算动弹性模量 E_d :

$$E_d = \frac{\sigma_d}{\epsilon_d} \quad (5.2.1)$$

式中 σ_d ——动应力, kPa;

ϵ_d ——动应变, %。

5.2.2 按式 (5.2.2) 计算阻尼比 λ_d :

$$\lambda_d = \frac{1}{4\pi} \frac{A}{A_s} \quad (5.2.2)$$

式中 A ——滞回圈 $ABCD$ 的面积, cm^2 , 见图 5.2.2;

A_s ——三角形 OAE 的面积, cm^2 。

5.2.3 以阻尼比为纵坐标, 动应变在对数横坐标上, 绘制不同固结应力的阻尼比与动应变关系曲线, 如图 5.2.3。

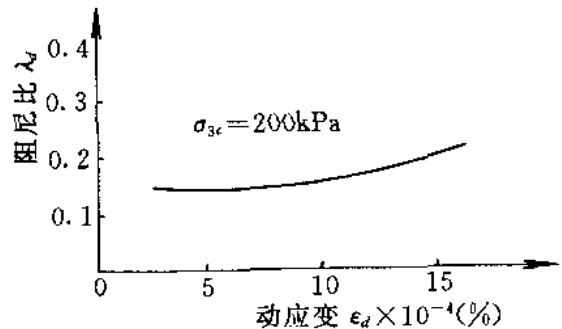
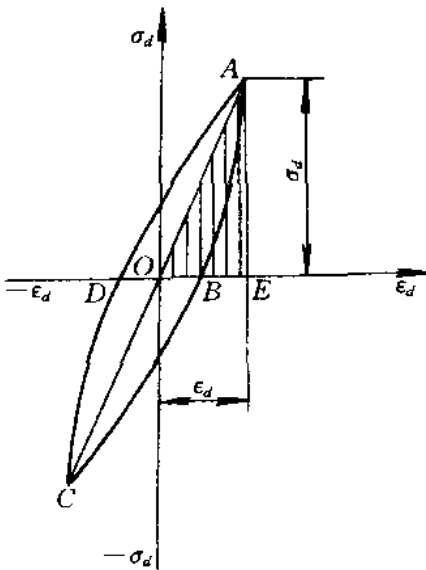


图 5.2.2 应力应变滞回圈

图 5.2.3 阻尼比与动应变关系曲线

6 记 录

6.0.1 动强度 (液化) 试验记录格式见表 6.0.1。

6.0.2 动弹性模量和阻尼比试验记录格式见表 6.0.2。

表 6.0.1 振动三轴试验记录表(动强度与液化试验)

工程编号 _____
 试样编号 _____
 日 期 _____

试验者 _____
 计算者 _____
 校核者 _____

固 结 前	固 结 后	固 结 条 件	试 验 及 破 坏 条 件
试样直径 d (mm)	试样直径 d_c (mm)	固结应力比 K_c	振动频率 (Hz)
试样高度 h (mm)	试样高度 h_c (mm)	轴向固结应力 σ_{1c} (kPa)	给定破坏振次 (次)
试样面积 A (cm ²)	试样面积 A_c (cm ²)	侧向固结应力 σ_{3c} (kPa)	均压时孔压破坏标准 (kPa)
试样体积 V (cm ³)	试样体积 V_c (cm ³)	固结排水量 ΔV (ml)	均压时应变破坏标准 (%)
试样干密度 ρ_d (g/cm ³)	试样干密度 ρ_{dc} (g/cm ³)	固结变形量 Δh (mm)	偏压时应变破坏标准 (%)

续表

振次 (次)	动应变			动应力				动孔隙水压力			
	光点 位移 L_c (cm)	标定 系数 K_c (cm/ cm)	动应变 ϵ_d (%)	光点 位移 L_σ (cm)	标定 系数 K_σ (N/ cm)	动应力 σ_d (kPa)	液 化 应力比 $\frac{\sigma_d}{2\sigma_0}$	光点 位移 L_u (cm)	标定 系数 K_u (kPa/ cm)	动孔压 u_d (kPa)	动孔 压比 $\frac{u_d}{\sigma_3}$
(1)	(2)	(3)	(4) = $\frac{(2) \times (3)}{h_c}$ $\times 100$	(5)	(6)	(7) = $\frac{(5) \times (6)}{A_c}$ $\times 10$	(8) = $\frac{(7)}{2 \times \sigma_0}$	(9)	(10)	(11) = (9) \times (10)	(12) = $\frac{(11)}{\sigma_{3c}}$

表 6.0.2 振动三轴试验记录表(模量与阻尼比试验)

工程编号 _____
 试样编号 _____
 日 期 _____

试验者 _____
 计算者 _____
 校核者 _____

固 结 前	固 结 后	固 结 条 件
试样直径 d (mm)	试样直径 d_c (mm)	固结应力比 K_c
试样高度 h (mm)	试样高度 h_c (mm)	轴向固结应力 σ_{1c} (kPa)
试样面积 A (cm ²)	试样面积 A_c (cm ²)	侧向固结应力 σ_{3c} (kPa)
试样体积 V (cm ³)	试样体积 V_c (cm ³)	固结排水量 ΔV (ml)
试样干密度 ρ_d (g/cm ³)	试样干密度 ρ_{dc} (g/cm ³)	固结变形量 Δh (mm)

续表

输出电压 (mV)	动应力				动应变				动孔隙水压力				动模量		阻尼比		
	衰减档	光标位移 L_d (cm)	标定系数 K_s (N/cm)	动应力 σ_d (kPa)	衰减档	光标位移 L_e (cm)	标定系数 K_e (cm/cm)	动应变 ϵ_d (%)	衰减档	光标位移 L_n (cm)	标定系数 K_n (cm/cm)	动孔压 u_d (kPa)	动模量 E_d (MPa)	$1/E_d$ (MPa ⁻¹)	滞回圈面积 A (cm ²)	三角形面积 A_t (cm ²)	阻尼比 λ
(1)	(2)	(3)	(4) = $\frac{10 \times (2) \times (3)}{A_c}$	(5)	(6)	(7)	(8) = $\frac{(6) \times (7)}{h_c} \times 100$	(9)	(10)	(11)	(12) = (11) \times (10)	(13) = $\frac{(4)}{(8)}$	(14) = $\frac{1}{(13)}$	(15)	(16)	(17) = $\frac{1}{4\pi} \times \frac{(15)}{(16)}$	

共振柱试验

SL237—033—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 本试验的目的是测定试样在周期荷载作用下,小应变($10^{-6} \sim 10^{-4}$)时的动剪切模量和阻尼比或动弹性模量和阻尼比。本试验采用稳态强迫振动法和自由振动法。激振方式为旋转振动和纵向振动。

1.0.2 本试验宜制备3个以上性质相同的试样,在不同周围压力下进行试验。周围压力宜根据工程实际确定。一般采用100、200、300、400 kPa。

1.0.3 本规程适用于饱和砂土、粉土和粘土。

2 引用标准

SL118—95《应变控制式三轴仪校验方法》。

SL237—017—1999《三轴压缩试验》。

SL237—032—1999《振动三轴试验》。

3 仪器设备

3.1 仪器设备

3.1.1 共振柱。按对试样的约束条件可分为:一端固定一端自由和一端固定一端用弹簧和阻尼器支承两类。

1 压力室:内部置放激振器、加速度计及试样。压力室底座和试样上压盖板具有辐射状的凸条。如图3.1.1所示。

2 静力控制系统:应符合SL237—032—1999规程3.1.1之

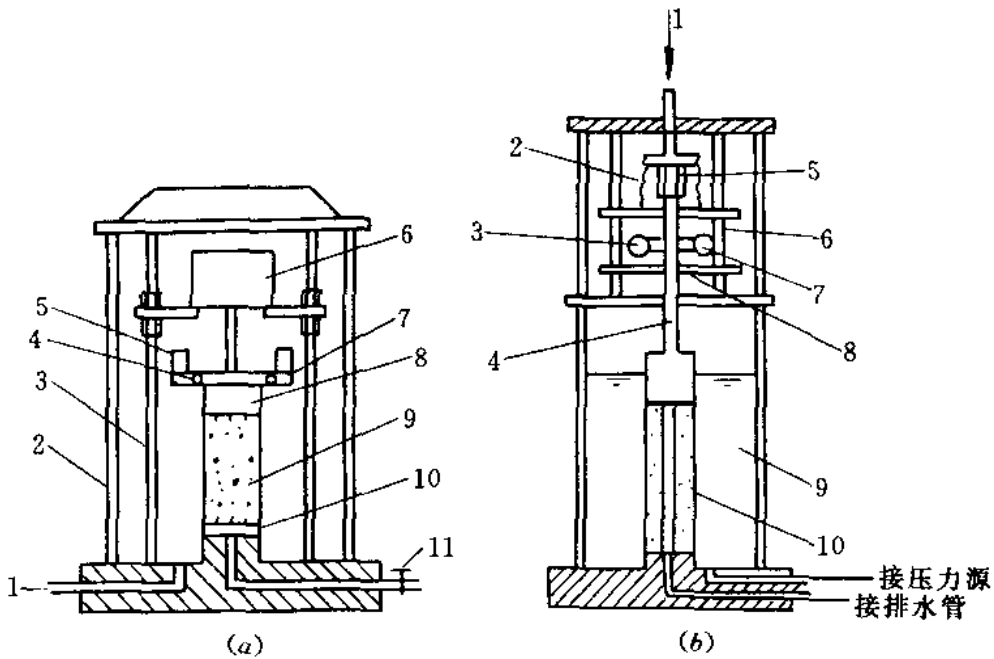


图 3.1.1 共振柱主机示意图

(a) 各向等压共振柱

1—接周围压力系统；2—压力室外罩；3—支架；4—加速度计；5—扭转激振器；6—轴向激振器；7—驱动板；8—上压盖；9—试样；10—透水板；
11—接排水管

(b) 轴向和侧向不等压共振柱示意图

1—轴向压力；2—弹簧；3—激振器；4—旋转轴；5—压力传感器；
6—导向杆；7—加速度计；8—上下活动框架；9—水；10—试样

2 的规定。

3 激振控制系统：包括信号发生器、功率放大器、D/A 转换器和微型计算机。

4 量测系统：包括加速度计、电荷放大器、频率计、示波器或 A/D 转换器和微型计算机。

3.1.2 附属设备：应符合 SL237—017—1999 规程 3.1.2 的规定。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 静力控制系统：参照 SL118—95 校验方法之 14 压力控制系统校验。

- 3.2.2 测量系统的加速度计应按有关规程进行检定。
- 3.2.3 激振控制系统技术要求按仪器说明书的调试要求进行校准。
- 3.2.4 仪器特征常数标定按本规程“附 a”的规定进行。

4 操作 步 骤

4.1 试样制备

- 4.1.1 本试验采用的试样直径为 50 mm，试样高度为直径的 2 倍。
- 4.1.2 原状土样的试样制备按 SL237—017—1999 规程 4.1.2 的规定进行。
- 4.1.3 扰动土样的试样制备按 SL237—017—1999 规程 4.1.3 的规定进行。
- 4.1.4 砂性土的试样制备按 SL237—017—1999 规程 4.1.5 规定进行。

4.2 试样饱和

- 4.2.1 抽气饱和按 SL237—017—1999 规程 4.2.1 的规定进行。
- 4.2.2 水头饱和按 SL237—017—1999 规程 4.2.2 的规定进行。
- 4.2.3 二氧化碳饱和按 SL237—017—1999 规程 4.2.3 的规定进行。
- 4.2.4 反压力饱和按 SL237—017—1999 规程 4.2.4 的规定进行。

4.3 试样安装和固结

- 4.3.1 打开量管阀，使试样底座充水，当溢出的水不含气泡时，关量管阀，在底座透水板上放湿滤纸。
- 4.3.2 将试样放在底座上，并压入凸条中。在其周围贴 7~9 条宽 6 mm 的湿滤纸条。用承膜筒将乳胶膜套在试样外，下端与底座扎紧，取下承膜筒。用对开圆模夹紧试样，将乳胶膜上端翻出模外。

4.3.3 对扭转振动,将加速度计和激振驱动系统水平固定在驱动板上,再将驱动板置于试样上端,将旋转轴与试样帽上端连接,翻起乳胶膜并扎紧在上压盖上(试样帽)。按线圈座编号,将对应的线圈套进磁钢外极。磁极中心至线圈上、下端的距离应相等。两对线圈的高度应一致,线圈两侧的磁隙应相同,并对称于线圈支架,按线圈上的标志接线。

4.3.4 对轴向振动,将加速度计垂直固定在上压盖上,再将上压盖与激振器相连。当上压盖上下活动自如时,垂直地置于试样上端,翻起乳胶膜并扎紧在上压盖上。

4.3.5 用引线将加力线圈与功率放大器相连,并将加速度计与电荷放大器相连。

4.3.6 拆除对开圆模,装上压力室外罩。转动调压阀,施加周围压力(一端固定另一端弹簧支承的可进行不等向固结)。打开排水阀,直至固结稳定(稳定标准按 SL237—032—1999 规程 4.4.4 的规定执行),关排水阀。

4.4 稳态强迫振动法

4.4.1 开启信号发生器、示波器、电荷放大器和频率计电源、预热。

4.4.2 将信号发生器的振幅控制旋钮调至零位,开启功率放大器电源预热 5 min,将功能开关置于共振档。

4.4.3 将信号发生器输出调至给定值,连续改变激振频率,由低频逐渐增大,直至系统发生共振,(由示波器屏幕上显示的李沙育图形找出共振点),读出最大电压值。此时,频率计读数即为共振频率。测记共振频率和相应的电压值,由电压值确定动应变或动剪应变。

4.4.4 进行阻尼比测定时,当激振频率达到系统共振频率后,继续增大频率,这时振幅逐渐减小,测记每一激振频率和相应的振幅电压值。如此继续,测记 7 至 10 组数据,关仪器电源。

4.4.5 绘制振幅与频率关系曲线,如图 4.4.5。

4.4.6 退去压力,取下压力室罩,拆除试样,需要时测定试样的含水率。

4.5 自由振动法

4.5.1 开启电荷放大器电源，预热。开计算机系统电源。

4.5.2 将试验程序输入计算机，开功率放大器电源预热 5 min，在计算机控制下进行试验。计算机指令 D/A 转换器控制驱动系统，对试样施加瞬时扭矩后立即卸除，使试样自由振动。在振动过程中，加速度计的信号经过电荷放大器和 A/D 转换器输入到计算机处理。不用计算机采集数据时，需用光线示波器或 x - y 函数记录仪记录振幅衰减曲线。

4.5.3 在每一级激振力振动下试验后，逐次增大激振力，继续进行试验得到在试样应变幅值增大后测试的模量和阻尼比。一般应变幅值增大到 10^{-4} 为止。用计算机采集数据时，试验结果由打印机打出某一固结压力下，每一激振力时的剪应变，剪切模量和阻尼比。

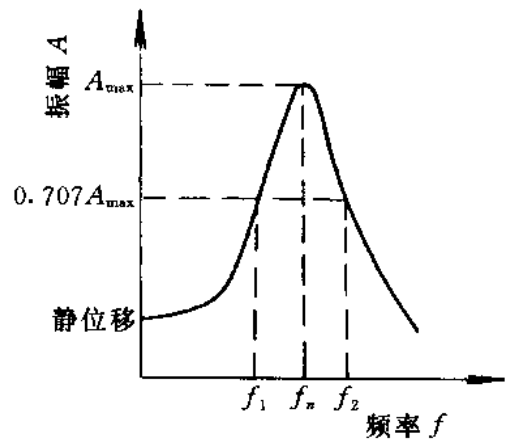


图 4.4.5 稳态振动振幅与频率关系曲线

4.5.4 在一级固结压力下试验后，增大试样的侧向压力和轴向

压力，排水固结后，按本规程 4.4.1~4.4.6 或 4.5.1~4.5.3 的规定进行试验。

4.5.5 关闭仪器电源，退除压力，取下压力室外罩，拆除试样，需要时，测定试样含水率。

5 计算和制图

5.0.1 按式 (5.0.1-1) 或式 (5.0.1-2) 计算扭转共振时的动剪切模量。

1 无弹簧支承：

$$G_d = \left(\frac{2\pi f_n h_c}{\beta_s} \right)^2 \rho_0 \quad (5.0.1-1)$$

式中 G_d ——动剪切模量, kPa;

f_n ——试验时实测的共振频率, Hz;

h_c ——试样固结后的高度, cm;

ρ_0 ——试样密度, g/cm³;

β_s ——无量纲频率因数 ($\beta_s \text{tg} \beta_s = I_0 I_t$), 查 β_s 与 I_0/I_t 曲线图 5.0.1;

I_0 ——试样的质量惯性矩 ($I_0 = \frac{md^2}{8}$), kg·m²;

I_t ——试样顶端附加物的质量惯性矩, 由“附 a”标定确定, kg·m²;

d ——试样直径, cm;

m ——试样质量, g。

2 有弹簧支承:

$$G_d = 4\pi^2 \rho_0 h_c^2 I_t (f_n^2 - f_0^2) / I_0 \quad (5.0.1-2)$$

式中 f_0 ——无试样时转动各部分扭振的共振频率, Hz;

f_n ——试验时实测的共振频率, Hz;

其余符号见式(5.0.1-1)。

5.0.2 按式(5.0.2)计算轴向共振时的动弹性模量:

$$E_d = \left(\frac{2\pi f_n h_c}{\beta_L} \right)^2 \rho_0 \quad (5.0.2)$$

式中 β_L ——无量纲频率因数 ($\beta_L \text{tg} \beta_L = \frac{m_0}{m_t}$), 查 β_L 与 m_0/m_t 曲线图 5.0.1;

m_t ——试样顶端附加物的质量, g;

m_0 ——试样质量, g;

其余符号见本规程式(5.0.1-1)。

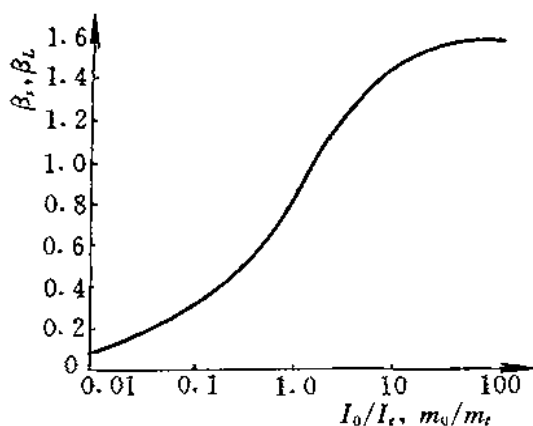


图 5.0.1 β_s 与 I_0/I_t 、 β_L 与 m_0/m_t 关系曲线

5.0.3 按下列公式计算土的阻尼比。

1 无弹簧支承：

1) 自由振动

$$\lambda = \frac{1}{2\pi} \times \frac{1}{N} \ln \frac{A_1}{A_{N+1}} \quad (5.0.3-1)$$

式中 λ ——阻尼比；

N ——计算所取的振动次数；

A_1 ——停止激振后第 1 周振动的振幅，mm；

A_{N+1} ——停止激振后第 $N+1$ 周振动的振幅，mm。

2) 稳态强迫振动法

$$\lambda = \frac{1}{2} \left(\frac{f_2 - f_1}{f_n} \right) \quad (5.0.3-2)$$

式中 f_1 、 f_2 ——分别为振幅与频率关系曲线上 0.707 倍最大振幅值所对应的频率（图 4.4.5），Hz；

f_n ——最大振幅值所对应的频率，Hz。

2) 有弹簧支承：

1) 自由振动

$$\lambda = [\delta(1 + S) - \delta_0 S] / 2\pi \quad (5.0.3-3)$$

$$S = \left(\frac{I_t}{I_0} \right) \left(\frac{f_0 \beta_B}{f_n} \right)$$

式中 δ 、 δ_0 ——有试样和无试样时仪器转动部分扭振时的对数衰减率；

S ——能量比；

其余符号见本规程式（5.0.1-1）。

2) 稳态强迫振动法

$$\lambda = \frac{1}{2} \frac{A}{TR} \quad (5.0.3-4)$$

$$A = \frac{1}{4\pi^2 I_\theta f_n^2} \left[\frac{k_t C_R}{\theta_R} - 2\pi k_d f_n \right] \quad (5.0.3-5)$$

$$T = \frac{I_t}{I_\theta} \left(1 - \frac{f_0^2}{f_n^2} \right)^2 \quad (5.0.3-6)$$

式中 T ——振动体系系数；

f_0 、 f_n ——无试样和有试样时实测的共振频率，Hz；

R ——与 T 有关的数值，查图 5.0.3-4；

k_t ——仪器常数（扭矩与电流标定系数）， $\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^3}{\text{A} \cdot \text{s}}$ （见“附 a”）；

C_R ——振动系统共振时通过激振器线圈的电流，A；

k_d ——仪器的阻尼系数， $\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}}$ （见“附 a”）；

θ_R ——振动系统共振时试样振幅，mm；

I_θ ——试样的转动惯量， $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ；

I_t ——试样顶部附加物质量惯性矩， $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ （见“附 a”）。

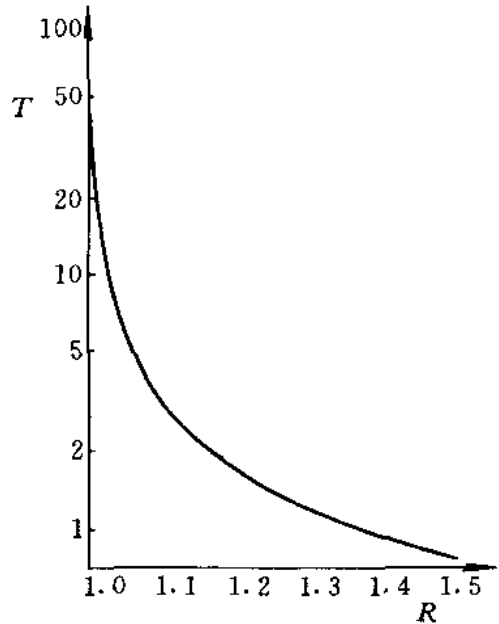


图 5.0.3-4 共振时测阻尼比的 $T-R$ 曲线

5.0.4 试样的应变按下列公式计算。

1 动剪应变：

$$\gamma = \frac{Ad_c}{3d_1h_c} \times 100 \quad (5.0.4-1)$$

式中 γ ——动剪应变，%；

A ——安装加速度计处的动位移，($A=U/\beta\omega^2$)，cm；

U ——加速度计经放大后的电压值，mV；

β ——标定系数，mV/981cm/s²；

ω ——共振圆频率，($=2\pi f_n$) rad/s；

d_1 ——加速度计到试样轴线的距离，cm；

d_c ——试样固结后的直径，cm；

h_c ——试样固结后的高度，cm。

2 动轴向应变：

$$\epsilon_d = \frac{\Delta h_d}{h_c} \times 100 \quad (5.0.4-2)$$

式中 Δh_d ——动轴向变形，($=U/\beta\omega^2$)，cm；

其余符号见本规程式 (5.0.4-1)。

5.0.5 以动剪切模量为纵坐标，动剪应变为横坐标，在半对数纸上绘制不同周围压力下动剪切模量与动剪应变关系曲线，如图 5.0.5。曲线在纵轴上的截距即为该级周围压力下的最大动剪切模量 G_{dmax} 。

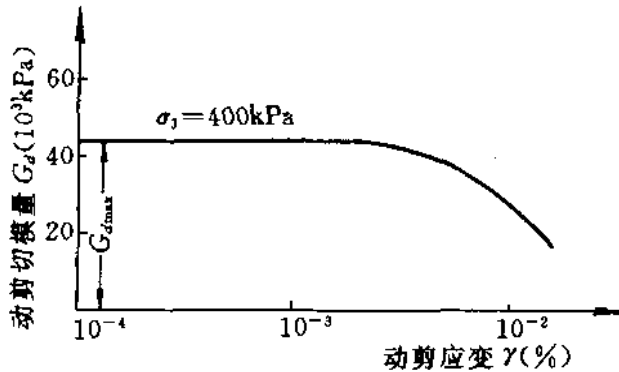


图 5.0.5 动剪切模量与动剪应变关系曲线

5.0.6 以动剪切模量比为纵坐标，动剪应变为横坐标，在半对数纸上绘制周围压力下动剪切模量比与动剪应变关系的归一化曲线，如图 5.0.6。

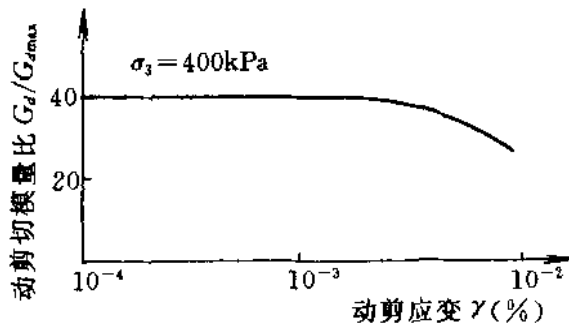


图 5.0.6 动剪切模量比与动剪应变关系曲线

5.0.7 以最大动剪切模量为纵坐标，周围压力为横坐标，在双对数纸上绘制关系曲线，如图 5.0.7。该直线具有以下形式：

$$G_{dmax} = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (5.0.7)$$

式中 K ——当 $\sigma_3/p_a=1$ 时的 G_{dmax} 值；
 n ——直线斜率。

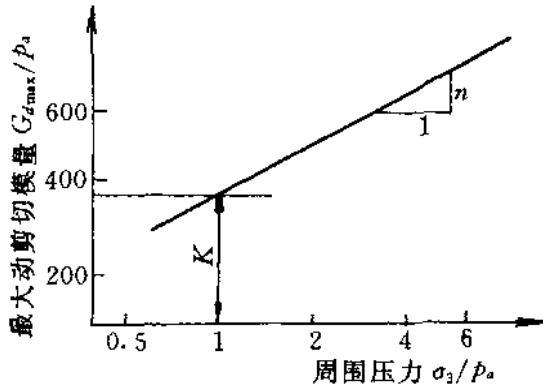


图 5.0.7 最大动剪切模量
与周围压力关系曲线

5.0.8 以阻尼比为纵坐标，动剪应变（或轴向动应变）为横坐标，在半对数纸上绘制关系曲线，如图 5.0.8。

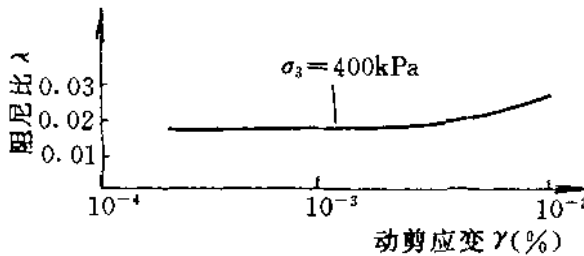


图 5.0.8 阻尼比与动剪应变
（或动应变）关系曲线

5.0.9 以动弹性模量为纵坐标，轴向动应变为横坐标，在半对数纸上绘制关系曲线，如图 5.0.9。

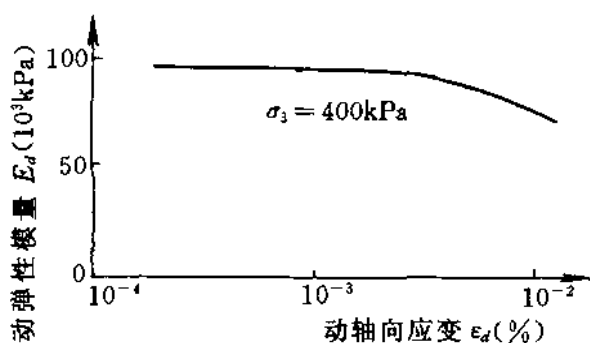


图 5.0.9 动弹性模量和动应变关系曲线

6 记 录

6.0.1 共振柱试验记录格式见表 6.0.1-1、表 6.0.1-2。

表 6.0.1-1 共振柱试验记表 (稳态强迫振动法)

工程编号 _____ 试样编号 _____ 试验日期 _____
 试验者 _____ 计算者 _____ 校核者 _____

	固结前	固结后	计 算 参 数	
试样直径 (cm)			转动惯量	试验 I_{01}
试样高度 (cm)				试样顶端附加物 I_{t1}
试样体积 (cm)			试样顶端附加物质量 m_t	
试样质量 (g)			频率系数	β_s :
试样含水率 (%)				β_L :
试样干密度 (g/cm^3)			加速度计标定系数 β : ($mV/981/cm/s^2$)	
			加速度计到试样轴线距离 d_1 : (cm)	
轴 向 共 振			扭 转 共 振	
测定次数			测定次数	
共振频率 (Hz)			共振频率 (Hz)	
最大电压值 (mV)			最大电压值 (mV)	
共振圆频率 (rad/s)			共振圆频率 (rad/s)	
轴向动变形 (cm)			动位移 (cm)	
动应变 $\times 10^{-4}$ (%)			动剪应变 (%)	
动弹性模量 (kPa)			动剪切模量 (kPa)	
			阻尼比	

附 a 共振柱仪特性常数标定

a. 1 目的

a. 1. 0. 1 共振柱试验的各项数据与仪器系统各部件的特征常数有关。因此，需要对仪器特征常数进行标定。

a. 2 标定项目

a. 2. 0. 1 试样顶部附加物（包括传感器、激振器、旋转杆和上压盖板）的质量惯性矩 I_t 。

a. 2. 0. 2 仪器转动部分自振频率 f_0 。

a. 2. 0. 3 仪器自振频率对数衰减率 δ_0 。

a. 2. 0. 4 弹簧系数 k_s 和阻尼系数 k_d 。

a. 3 标定条件

a. 3. 0. 1 标定杆：已知剪切模量 G 和质量惯性矩 I_0 的金属圆柱体。

a. 3. 0. 2 已检定合格的负荷传感器、加速度计。

a. 4 标定项目和标定方法

a. 4. 1 试样顶部附加物质量惯性矩 I_t 标定。

a. 4. 1. 1 用标定杆代替试样放在仪器底座上，并刚性连接，按本规程 4. 3. 3 规定安装加速度计和激振驱动系统，接好磁钢的引线。

a. 4. 1. 2 按本规程 4. 3. 5 的规定将引线连接功率放大器和电荷放大器。

a. 4. 1. 3 按本规程 4. 4. 1 至 4. 4. 3 的规定进行测试，直至系统发生共振，测定该系统的共振频率及相应的电压值。

a. 4. 1. 4 按式 (a. 4. 1. 4) 计算试样顶部附加物的质量惯性矩：

$$I_t = \frac{GI_0}{(2\pi)^2 \rho H^2 (f_n^2 - f_0^2)} \quad (\text{a. 4. 1. 4})$$

式中 G ——标定杆的剪切模量，kPa；

I_0 ——标定杆的质量惯性矩， $(= \frac{\pi}{32} d^4)$ ， m^4 ；

ρ ——标定杆的密度， kg/m^3 ；

H ——标定杆的高度, m;

d ——标定杆的直径, m;

f_0 ——仪器转动部分的自振频率, s^{-1} 。

a. 4. 2 仪器转动部分自振频率 f_0 的标定

a. 4. 2. 1 将加速度计和激振驱动系统水平固定在驱动板上(但不装试样), 接好磁钢引线。

a. 4. 2. 2 按本规程 4. 3. 5 的规定接线, 并按本规程 4. 4. 1 至 4. 4. 3 的规定进行测试, 直至转动部分发生共振。此时, 频率计读数即为仪器转动部分的自振频率 f_0 。

a. 4. 3 仪器自振频率对数衰减率 δ_0 的标定

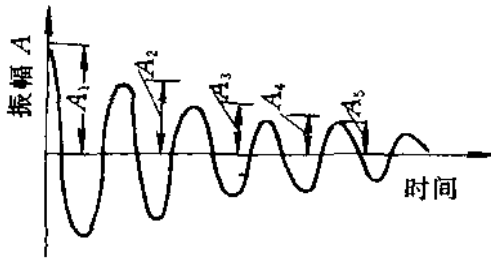


图 a. 4. 3. 1 振幅衰减曲线

a. 4. 3. 1 按本规程 a. 4. 2. 1 和 a. 4. 2. 2 的规定进行测试, 当转动部分发生共振时, 切断激振器电源停止激振, 使转动部分发生自由振动。用记录仪记录振幅随时间的衰减关系曲线, 如图 a. 4. 3. 1。

a. 4. 3. 2 以对数为纵坐标, 以自然数为横坐标绘制振幅 A 与波峰数 N 的关系线, 如图 a. 4. 3. 2。直线斜率为对数衰减率 δ_0 。

a. 4. 3. 3 按式 (a. 4. 3. 3) 计算仪器自振振幅的对数衰减率 δ_0 :

$$\delta_0 = \frac{1}{N} \ln \frac{A_1}{A_{N+1}} \quad (\text{a. 4. 3. 3})$$

式中 N ——波峰数 (计算所取的振次);

A_1 ——停止激振后第 1 周振动的振幅, mm;

A_{N+1} ——停止激振后第 $N+1$ 周振动的振幅, mm。

a. 4. 4 弹簧系数 k_s 和阻尼系数 k_d

a. 4. 4. 1 按式 (a. 4. 4. 1) 计算仪器的弹簧系数:

$$k_s = (2\pi f_0)^2 I_t \quad (\text{a. 4. 4. 1})$$

式中符号见本规程式 (a. 4. 1. 4)。

a. 4. 4. 2 按式 (a. 4. 4. 2) 计算仪器的阻尼系数:

$$k_d = \frac{\delta_0}{\pi} \sqrt{k_t I_t} = 2f_0 I_t \delta_0 \quad (\text{a. 4. 4. 2})$$

式中符号见本规程式 (a. 4. 1. 4)、式 (a. 4. 3. 3)、式 (a. 4. 4. 1)。

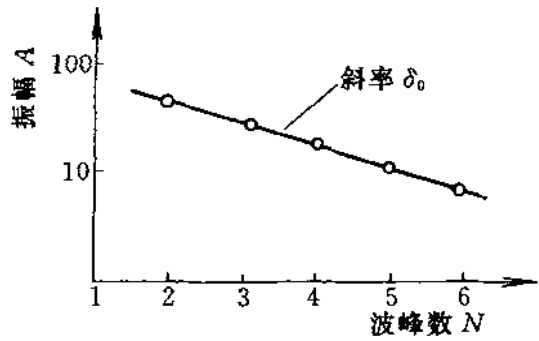


图 a. 4. 3. 2 振幅的对数与波峰的关系

a. 4. 4. 3 当轴向振动时按下式计算弹簧系数和阻尼系数。

1 弹簧系数 k_{sL} :

$$k_{sL} = (2\pi f_{OL})^2 m_t \quad (\text{a. 4. 4. 3-1})$$

2 阻尼系数 k_{dL} :

$$k_{dL} = 2f_{OL} m_t \delta_{OL} \quad (\text{a. 4. 4. 3-2})$$

式中 m_t ——仪器转动部分的质量, kg;

f_{OL} ——轴向振动时仪器转动部分的自振频率, s^{-1} ;

δ_{OL} ——轴向振动时振幅的对数衰减率。

a. 4. 5 力和电流及力矩和电流的标定

a. 4. 5. 1 按本规程 a. 4. 1. 1~a. 4. 1. 2 的规定安装标定杆, 加速度计和派振驱动系统, 并连接好激振控制系统。

a. 4. 5. 2 将激振控制系统和量测系统仪表预热。

a. 4. 5. 3 将信号发生器输出调至在 0.707 倍最大振幅 (电压) 值所对应的频率上, 并输以足够的电流到激振器上, 使传感器 (加速度计或速度计) 具有一个信号 10 倍于周围振动体及电噪声的信号, 测记传感器及电流测量仪表的输出值。

a. 4. 5. 4 将频率固定在 1.414 倍最大振幅 (电压) 值所对应的共振频率上, 按本规程 a. 4. 5. 3 的规定进行测试, 测记传感器及电流测量仪表的输出值。

a. 4. 5. 5 按下列式计算扭矩与电流标定系数:

$$C_1 = \frac{\alpha C_{g1}}{2R_1} \quad (\text{a. 4. 5. 5-1})$$

$$C_2 = \frac{\alpha C_{g2}}{R_2} \quad (\text{a. 4. 5. 5-2})$$

式中 α ——加速度传感器标定系数, $981\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}/\text{mV}(\text{mA})$;

C_{g1}, C_{g2} ——传感器分别在 0.707 倍和在 1.414 倍共振时的输出, $\text{mV}(\text{mA})$;

R_1, R_2 ——分别为 0.707 倍和 1.414 倍共振时的电流值, A 。

考虑到仪器及标定杆的弹簧常数 k_s , 则扭矩与电流标定系数按下式计算:

$$k_t = 0.5(C_1 + C_2)k_s \quad (\text{a. 4. 5. 5-3})$$

注: 式 (a. 4. 5. 5-3) 适用于 C_1 和 C_2 应相差在 10% 以内。其根据轴向振动求得 C_1 和 C_2 , 则该式可用于力与电流标定系数。

冻土含水率试验

SL237—034—1999

1 定义和适用范围

1.0.1 冻土含水率系指冻土中所含冰和未冻水的总质量与干土质量之比。它是冻土地区进行水热平衡计算、分析冻土发育条件的重要指标。

1.0.2 本试验的标准方法为烘干法。在现场或需要快速测定含水率时，对层状和网状结构的土，可采用联合测定法。

1.0.3 本规程适用于有机质（泥炭、腐植质及其他）含量不超过干土质量5%的土。当土的有机质含量在5%~10%之间，仍允许采用烘干法，但需注明有机质含量。

2 引用标准

SL237—003—1999 《含水率试验》。

3 烘 干 法

3.1 仪器设备

3.1.1 烘箱：可采用电热烘箱或温度能保持105~110℃的其他加热干燥设备。

3.1.2 天平：称量500g，分度值0.1g；称量5000g，分度值1g。

3.1.3 称量盒：可将盒调整为恒量并定期校正。

3.1.4 其他：干燥器、搪瓷盘、切土刀、吸水球、滤纸等。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 天平：应按相应的检定规程进行检定。

3.3 操作步骤

3.3.1 整体状结构——肉眼不易看到显著冰晶的粘质土或砂质土。

1 按 SL237—003—1999 规程 2.3.1 至 2.3.5 的规定进行，但每个试样的质量不宜少于 50 g。

2 试验应进行 2 次平行测定，取其算术平均值，其允许平行

表 3.3.1 含水率测定平行差值

含水率 (%)	允许平行差值 (%)
10 以下	1
30 以下	2
30 以上	3

差值应符合表 3.3.1 的规定。

3.3.2 对层状和网状构造的土应采用平均试样法测定含水率。

1 将土样用四分法取出 1000~2000 g (视冻土结构均

匀程度而定，较均匀的可少取，反之多取)，称量准确至 1 g，放入搪瓷盘中使其融化。

2 将融化的土样调拌成均匀糊状稠度 (土太湿时，多余水分待澄清后可用吸球和吸纸吸出，或让其自然蒸发；土太干时可适当加水)，进行称量，准确至 0.1 g。

3 从糊状稠度土样中取样测定含水率，应按 SL237—003—1999 规程 2.3.1 至 2.3.5 的规定进行。

4 试验应进行 2 次平行测定，其平行差值不得大于 1%。

3.4 计算

3.4.1 按式 (3.4.1) 计算冻土的含水率：

$$w = \left[\frac{m_1}{m_2} (1 + w_n) - 1 \right] \times 100 \quad (3.4.1)$$

式中 w ——冻土含水率，%；

m_1 ——冻土试样质量，g；

m_2 ——调成糊状的土样质量，g；

w_n ——平均试样含水率，以小数表示。

计算至 0.1%。

3.5 记录

3.5.1 本试验记录格式如表 3.5.1。

表 3.5.1 冻土含水率试验记录表 (烘干法)

工程名称 _____ 试验者 _____
 钻孔编号 _____ 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

土样 编号	土样 说明	盒号	盒质量	盒加湿	盒加干	湿土质量	干土质量	含水率	平均值
			(g)	土质量	土质量	(g)	(g)	(%)	(%)
			(1)	(2)	(3)	(4)= (2)-(1)	(5)= (3)-(1)	(6)= $\left[\frac{(4)}{(5)} - 1 \right] \times 100$	(7)

4 联合测定法

4.1 仪器设备

4.1.1 排液筒：见图 4.1.1。

4.1.2 台秤：称量：5 kg，分度值 1g。

4.1.3 量筒：容量 1000 ml，分度值 10 ml。

4.2 仪器设备的检定和校准

4.2.1 台秤：应按相应的检定规程进行检定。

4.2.2 量筒：应按 JJG196—90《常用玻璃量器检定规程》进行检定。

4.3 操作步骤

4.3.1 将排液筒置于台秤上，拧紧虹

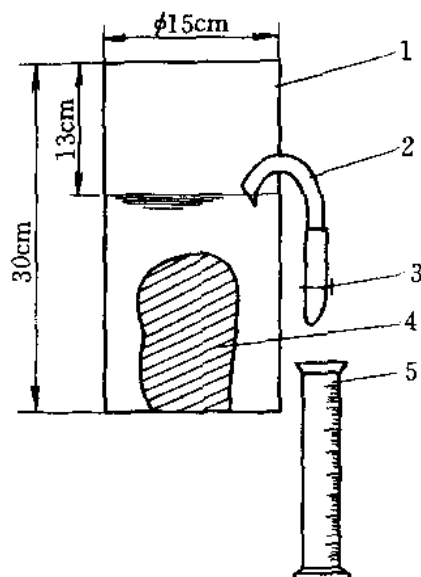


图 4.1.1 排液筒装置示意图

1—排液筒；2—虹吸管；3—止水夹；4—冻土试样；5—量筒

吸管止水夹。排液筒在台秤上的位置，在试验过程中不得移动。

4.3.2 取约为 1000~1500 g 的冻土试样，并称质量。

4.3.3 将接近 0℃ 的清水缓慢倒入排液筒，使水面超过虹吸管顶。

4.3.4 松开虹吸管的止水夹，使排液筒中的水面徐徐下降，待水面稳定和虹吸管不再出水时，拧紧止水夹，称排液筒和水的质量。

4.3.5 将冻土试样轻轻放入排液筒中，随即松开止水夹，使排液筒中的水流入量筒内。

4.3.6 水流停止后，拧紧止水夹，立即称排液筒、水和试样质量。同时测读量筒中水的体积，用以校核冻土试样的体积。

4.3.7 使冻土试样在排液筒内充分融化成松散状态，澄清。补加清水使水面超过虹吸管顶。

4.3.8 松开止水夹，排水。当水流停止后，拧紧止水夹，并称排液筒、水和土颗粒质量。

4.3.9 在试验过程中应保持水面平稳，在排水和放入冻土试样时排液筒不得发生上下剧烈晃动。

4.4 计算

4.4.1 按式 (4.4.1) 计算冻土含水率 w ：

$$w = \left[\frac{m(G_s - 1)}{(m_3 - m_1)G_s} - 1 \right] \times 100 \quad (4.4.1)$$

式中 m ——冻土试样质量，g；

m_1 ——筒加水的质量，g；

m_3 ——筒、水和土颗粒的质量，g；

G_s ——土颗粒的比重，可实测也可采用经验值。

4.4.2 按式 (4.4.2) 计算冻土密度 ρ_f ：

$$\rho_f = \frac{m}{m + m_1 - m_2} \rho_w \quad (4.4.2)$$

式中 m_2 ——筒、水和试样质量，g；

ρ_w ——水的密度，g/cm³；

其余符号见本规程式 (4.4.1)。

含水率计算至 0.1%，密度计算至 0.01 g/cm³。

4.5 记录

4.5.1 本试验记录格式如表 4.5.1。

表 4.5.1 冻土含水率和密度试验记录表 (联合测定法)

工程名称 _____ 试验者 _____
 钻孔编号 _____ 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

试样 编号	筒加 水质 量 m (g)	筒加水 加土样 质量 m_1 (g)	筒加水 加土颗 粒质量 m_2 (g)	土粒 比重 G_s (g)	土样体积 (cm ³)	密 度 (g/cm ³)	含 水 率 (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6) = $\frac{(1)+(2)-(3)}{\rho_w}$	(7) = $\frac{(1)}{(6)}$	(8) = $\frac{(1) \times [(5)-1]}{[(4)-(2)] \times (5)} - 1$

冻土密度试验

SL237—035—1999

1 定义和适用范围

1.0.1 冻土密度是冻土单位体积的质量,它是冻土的基本物理特性指标之一。

1.0.2 密度试验应根据冻土的特点和试验条件选用浮称法、联合测定法、环刀法或充砂法。

1 浮称法用于表面无显著孔隙的冻土。

2 联合测定法用于砂质土和层状、网状结构的粘质冻土。

3 环刀法用于温度高于 -3°C 的粘质和砂质冻土。

4 充砂法用于表面有明显孔隙的冻土。

1.0.3 冻土密度试验宜在负温环境下进行。无负温环境时,应采取保温措施和快速测定。在试验过程中,冻土表面不得发生融化。

1.0.4 本规程适用于原状冻土和人工冻土。

2 引用标准

SL110—95 《切土环刀校验方法》。

SL237—034—1999 《冻土含水率试验》。

SL237—041—1999 《原位密度试验》。

3 浮称法

3.1 仪器设备 (见图 3.1)

3.1.1 天平:称量 1000 g,分度值 0.1 g。

3.1.2 液体密度计:分度值为 0.001 g/cm^3 。

3.1.3 温度计:测量范围为 $-30 \sim +20^{\circ}\text{C}$,分度值为 0.1°C 。

3.1.4 量筒:容积为 1000ml。

3.1.5 盛液筒:容积为 1000~2000 ml。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 天平:应按相应的检定规程进行检定。

3.2.2 液体密度计:应参照 JJG86—86《标准玻璃浮计检定规程》进行检定。

3.2.3 温度计:按 JJG128—89《二等标准水银温度计试行检定规程》进行检定。

3.2.4 用密度计测定煤油在不同温度下的密度,绘出密度与温度关系曲线。

3.3 操作步骤

3.3.1 调整天平,将盛液筒置于天平一端。

3.3.2 切取质量为 300~1000 g 的冻土试样,用细线捆紧,放入盛液筒中并悬吊在天平挂钩上称量,准确至 0.1 g。

3.3.3 将事先预冷接近冻土试样温度的煤油缓慢注入盛液筒,液面宜超过试样顶面 2 cm,并用温度计量测煤油温度,准确至 0.1°C 。

3.3.4 称取试样在煤油中的质量,准确至 0.1 g。

3.3.5 从煤油中取出冻土试样,削去表层带煤油的部分,然后按规定取样测定冻土的含水率。

3.3.6 采用 0°C 水时,应快速测定,试样表面不得发生融化。

3.4 计算

3.4.1 按下列两式计算冻土密度 ρ_f :

$$\rho_f = \frac{m_1}{V} \quad (3.4.1-1)$$

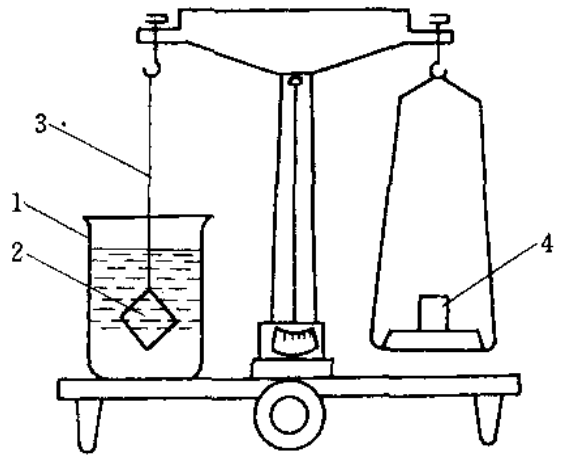


图 3.1 浮重天平

1—盛液筒;2—试样;3—细线;4—砝码

$$V = \frac{m_1 - m_2}{\rho_m} \quad (3.4.1-2)$$

式中 ρ_f ——冻土密度, g/cm^3 ;

V ——冻土试样体积, cm^3 ;

m_1 ——冻土试样质量, g ;

m_2 ——冻土试样在煤油中的质量, g ;

ρ_m ——试验温度下煤油的密度, g/m^3 。可由煤油密度与温度关系曲线查得。

3.4.2 按式 (3.4.2) 计算冻土的干密度 ρ_{fd} :

$$\rho_{fd} = \frac{\rho_f}{1 + 0.01w} \quad (3.4.2)$$

式中 ρ_{fd} ——冻土干密度, g/cm^3 ;

w ——冻土含水率, %。

3.4.3 冻土密度试验应进行不少于 2 组平行试验。对于整体状构造的冻土, 2 次测定的差值不应大于 $0.03 \text{ g}/\text{cm}^3$, 并取其算术平均值; 对于层状和网状构造和其他富冰冻土, 宜提出 2 次测定值。

3.5 记录

3.5.1 本试验记录格式如表 3.5.1

表 3.5.1 冻土密度试验记录表 (浮称法)

工程名称 _____ 试验者 _____
 钻孔编号 _____ 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

试样 编号	土样 描述	煤油 温度 ($^{\circ}\text{C}$) (1)	煤油 密度 (g/cm^3) (2)	试样 质量 (g) (3)	试样在 油中质量 (g) (4)	试样体积 (cm^3) (5) = $\frac{(3)-(4)}{(2)}$	密 度 (g/cm^3) (6) = $\frac{(3)}{(5)}$	平均值 (g/cm^3) (7)

4 联合测定法

4.0.1 本试验方法按 SL237—034—1999 规程的“联合测定法”进行。

5 环刀法

5.1 仪器设备

5.1.1 环刀：容积应大于或等于 500 cm³。

5.1.2 天平：称量 2000 g，分度值 0.2 g。

5.1.3 其他：切土器、钢丝锯等。

5.2 仪器设备的检定和校准

5.2.1 环刀：应参照 SL110—95 校验方法进行校验。

5.2.2 天平：应按相应的检定规程进行检定。

5.3 操作步骤

5.3.1 本试验宜在负温环境中进行。无负温环境时，必须快速进行。切样和试验过程中的试样表面不得发生融化。

5.3.2 取原状土样，整平其两端，将环刀刃口向下放在土样上。

5.3.3 用切土刀(或钢丝锯)将土样削成略大于环刀直径的土柱，然后将环刀垂直下压，边压边削，至土样伸出环刀为止。将两端余土削去修平，取剩余的代表性土样测定含水率。

5.3.4 擦净环刀外壁称量，算出湿土质量，准确至 0.2 g。

5.4 计算

5.4.1 按下列两式计算冻土密度和干密度：

$$\rho_f = \frac{m}{V} \quad (5.4.1-1)$$

$$\rho_{fd} = \frac{\rho}{1 + 0.01w} \quad (5.4.1-2)$$

式中 ρ_f ——密度，g/cm³；

ρ_{fd} ——干密度, g/cm^3 ;

m ——湿土质量, g ;

w ——含水率, %。

计算至 $0.01 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

5.4.2 本试验应进行 2 次平行试验。其平行差值不应大于 $0.03 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。取其算术平均值。

5.5 记录

5.5.1 本试验记录格式如表 5.5.1。

表 5.5.1 冻土密度试验记录表 (环刀法)

工程名称 _____

试验者 _____

钻孔编号 _____

计算者 _____

试验日期 _____

校核者 _____

试样 编号	土样 描述	试样 体积 (cm^3) (1)	湿土 质量 (g) (2)	湿密度 (g/cm^3) (3) = $\frac{(2)}{(1)}$	含水率 (%) (4)	干密度 (g/cm^3) (5) = $\frac{(3)}{1+0.01 \times (4)}$	平均干 密度 (g/cm^3) (6)

6 充砂法

6.1 仪器设备

6.1.1 金属测筒: 内径宜用 15 cm , 高度宜用 13 cm 。

6.1.2 量砂: 粒径 $0.25 \sim 0.5 \text{ mm}$ 的干净标准砂。

6.1.3 漏斗: 上口直径可为 15 cm , 下口直径为 1.5 cm , 高度为 10 cm 。

6.1.4 天平: 称量 5000 g , 分度值 1 g 。

6.2 仪器设备的检定和校准

6.2.1 测筒容积：参照 JJG259—89《标准金属量器检定规程》进行检定。

6.2.2 量砂：应按 SL237—041—1999 规程“附 a”的方法校准。

6.2.3 天平：应按相应的检定规程进行检定。

6.3 操作步骤

6.3.1 切取冻土试样。试样宜取直径为 8~10 cm 的圆形或 $l \times b \times h$, cm; $(8 \sim 10) \times (8 \sim 10) \times (8 \sim 10)$ 的方形。试样底面必须削平。称试样质量。

6.3.2 将试样平面朝下放入测筒内。试样底面与测筒底面必须接触紧密。

6.3.3 用标准砂充填冻土试样与筒壁之间的空隙和试样顶面。

1 取一定量的清洗干净校准后的干燥标准砂。标准砂的温度应接近冻土试样的温度。

2 用漏斗架将漏斗置于测筒上方。漏斗下口与测筒上口应保持 5~10 cm 的距离。

3 用薄板挡住漏斗下口，并将标准砂充满漏斗后移开挡板，使砂充入测筒。与此同时，不断向漏斗中补充标准砂，使砂面始终保持与漏斗上口齐平。在充砂过程中不得敲击或振动漏斗和测筒。

4 当测筒充满标准砂后，移开漏斗，轻轻刮平砂面，使之与测筒上口齐平。在刮砂过程中不应将砂压密。

6.3.4 称测筒、试样和充砂的总质量。

6.4 计算

6.4.1 按下列三式计算冻土密度 ρ_f ：

$$\rho_f = \frac{m}{V} \quad (6.4.1-1)$$

$$V = V_0 - \left(\frac{m_3 - m_1 - m}{\rho_s} \right) \quad (6.4.1-2)$$

$$\rho_s = \frac{m_2 - m_1}{V_0} \quad (6.4.1-3)$$

式中 m ——冻土试样质量, g;
 V ——试样体积, cm^3 ;
 V_0 ——测筒容积, cm^3 ;
 m_1 ——测筒质量, g;
 m_2 ——筒、砂总质量, g;
 m_3 ——测筒、试样和量砂的总质量, g;
 ρ_s ——量砂的密度, g/cm^3 。

计算至 $0.01 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

6.4.2 本试验需进行 2 次平行测定, 其平行差值不大于 $0.03 \text{ g}/\text{cm}^3$, 取算术平均值。

6.5 记录

表 6.5.1 冻土密度试验记录表 (充砂法)

工程名称 _____ 试验者 _____
 钻孔编号 _____ 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

试样 编号	测筒 质量 (g) (1)	试样 质量 (g) (2)	测筒、试样 加量砂质量 (g) (3)	量砂质量 (g) (4) = (3) - (1) - (2)	量砂 密度 (g/cm^3) (5)	测筒 容积 (cm^3) (6)	试样体积 (cm^3) (7) = (6) - (4) / (5)	冻土密度 (g/cm^3) (8) = (2) / (7)	平均密度 (g/cm^3) (9)

冻结温度试验

SL237—036—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 冻结温度是判断土是否处于冻结状态的指标。本试验的目的是用量热法测定土体的冻结温度。

1.0.2 本规程适用于原状和扰动的粘质土和砂质土。

2 仪器设备

2.1 仪器设备

仪器设备包括零温瓶、低温瓶、测温设备及试样杯等，如图 2.1 所示。

2.1.1 零温瓶：容积为 3.57 l，内盛冰水混合物（其温度应为 $0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ ）。

2.1.2 低温瓶：容积为 3.57 l，内盛低融冰晶混合物，其温度宜为 -7.6°C 。

2.1.3 测温设备：由热电偶和数字电压表组成。热电偶宜用 0.2mm 的铜和康铜线材制成。数字电压表：量程 2 mV，分度值为 $1 \mu\text{V}$ 。

2.1.4 试样杯：用黄铜制成，直径 3.5 cm，高 5 cm，带有杯盖。

2.1.5 其他：用于配制低融冰晶混合物的氯化钠、氯化钙。硬质聚

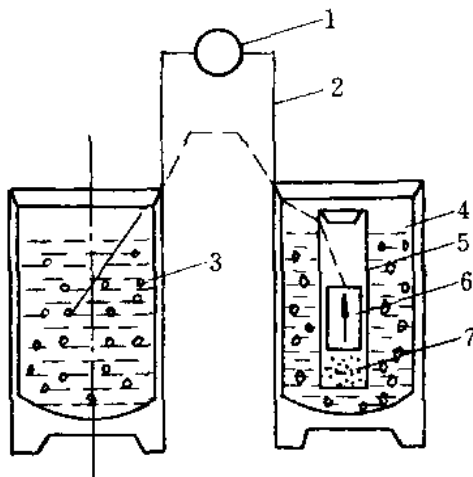


图 2.1 冻结温度试验装置示意图

1—数字电压表；2—热电偶；3—零温瓶；
4—低温瓶；5—塑料管；6—试样杯；7—干砂

表 2.2.1 低融盐浓度与融点

低融盐		氯化钠	氯化钙	氯化镁
15℃时密度(g/cm ³)		1.08	1.10	1.08
含量 (g)	100g 溶液中	11.0	12.1	9.4
	100g 水中	12.3	14.0	10.4
融点 (-℃)		7.6	7.6	7.2

氯乙烯管 (直径 5 cm, 长 25 cm), 切土刀等。

2.2 仪器设备的检定和校准

2.2.1 低融冰晶混合物配制见表 2.2.1。

2.2.2 电热偶: 应按 JJG115—90《标准铜—镍铜(康铜)热电偶检定规程》进行检定。

2.2.3 数字电压表: 参照 JJG250—90《电子电压表检定规程》进行检定。

3 操作步骤

3.1 原状土试验

3.1.1 土样应按自然沉积方向放置。剥去蜡封和胶带, 开启土样筒取出土样。

3.1.2 试样杯内壁涂一薄层凡士林, 杯口向下放在土样上。将试样杯垂直下压, 并用切土刀沿杯外壁切削土样。边压边削至土样达到试样杯高度, 用钢丝锯整平杯口, 擦净外壁, 盖上杯盖, 并取余土测定含水率。

3.1.3 将热电偶的测温端插入试样中心, 杯盖周侧用硝基漆密封。

3.1.4 零温瓶内装入用纯水制成的冰块, 冰块直径应小于 2 cm, 再倒入纯水, 使水面与冰块面相平, 然后插入热电偶零温端。

3.1.5 低温瓶内装入用浓度 2mol/l 氯化钠等溶液制成的盐冰块, 其直径应小于 2 cm, 再倒入相同浓度的氯化物溶液, 使之与冰块面相平。

3.1.6 将封好底且内装 5 cm 高干砂的塑料管插入低温瓶内, 再把试样杯放入塑料管内。然后, 塑料管口和低温瓶口分别用橡皮

塞和瓶盖密封。

3.1.7 将热电偶测定端与数字电压表相连,每分钟测量一次热电势,当电势值突然减小并连续3次稳定在某一数值(相应的温度即为冻结温度),试验结束。

3.2 扰动冻土试验

3.2.1 称取风干土样,平铺于搪瓷盘内,按所需的加水量将纯水均匀喷洒在土样上,充分拌匀后装入盛土器内盖紧,润湿24小时(砂质土的润湿时间可酌减)。

3.2.2 将配制好的土样装入试样杯中,以装实装满为止。杯口加盖。将热电偶测温端插入试样中心。杯盖周侧用硝基漆密封。

3.2.3 按本规程3.1.4至3.1.7的规定进行试验。

4 计算和制图

4.0.1 按式(4.0.1)计算冻结温度:

$$T = V/K \quad (4.0.1)$$

式中 T ——冻结温度, $^{\circ}\text{C}$;

V ——热电势跳跃后的电压稳定值, μV ;

K ——热电偶的标定系数, $^{\circ}\text{C}/\mu\text{V}$ 。

4.0.2 绘制温度和时间过程曲线,如图4.0.2。

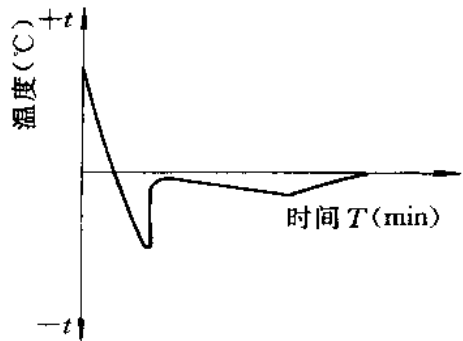


图 4.0.2 土的冻结过程曲线

5 记录

5.0.1 本试验记录格式如表5.0.1。

表 5.0.1 冻结温度试验记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
 试样编号 _____ 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

热电偶编号:		热电偶系数 (K)		C/ μ V
序 号	历 时 (min)	电压表示值 (μ V)	实际温度 ($^{\circ}$ C)	备 注
	(1)	(2)	(3) = (2) / K	

冻土导热系数试验

SL237—037—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 导热系数是表示土体导热能力的指标。本试验的目的是用稳态比较法测定冻土的导热系数。

1.0.2 本规程适用于扰动的粘质土和砂质土。

2 引用标准

SL237—036—1999 《冻结温度试验》。

3 仪器设备

3.1 仪器设备

试验装置由恒热系统、测温系统和试样盒组成。见图 3.1。

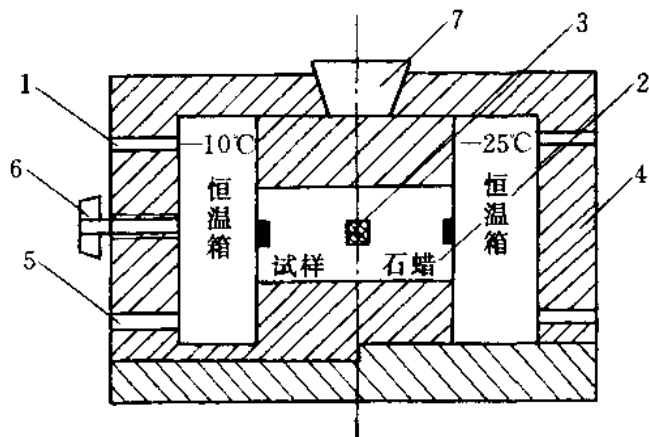


图 3.1 导热系数试验装置示意图

1—冷浴循环液出口；2—试样盒；3—热电偶；4—保温材料；5—冷浴循环液进口；6—夹紧螺杆；7—保温盖

3.1.1 恒温系统：由 2 个尺寸为 $l \times b \times h$, cm: $50 \times 20 \times 50$ 的恒温箱和 2 台低温循环冷浴组成。恒温箱与试样盒接触面应采用 5mm 厚的平整铜板。2 个恒温箱分别提供 2 个不同的负温环境 (-10°C 和 -25°C)。恒温准确度应为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。

3.1.2 测温系统：由热电偶、零温瓶和量程为 2 mV、分度值 $1\mu\text{V}$ 的数字电压表组成。

3.1.3 试样盒：2 只，其外形尺寸均为 $l \times b \times h$, cm: $25 \times 25 \times 25$ ，盒的两侧为厚 5mm 的平整铜板。试样盒的另两侧、底面和上端盒盖应采用尺寸为 $25\text{cm} \times 25\text{cm}$ ，厚 3mm 的胶木板。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 恒温系统：应用一等标准温度计控制，检定合格。

3.2.2 测温系统：热电偶应按 JJG115—90《标准铜—镍铜（康铜）热电偶检定规程》进行检定。

3.2.3 数字电压表：参照 JJG250—90《电子电压表检定规程》进行检定。

4 操作步骤

4.0.1 将风干试样平铺在搪瓷盘内，按所需的含水率和土样制备要求制备土样。

4.0.2 将制备好的土样按要求的密度装入一个试样盒，装实装满后加盒盖。装土时，将 2 支热电偶的测温端放置在试样两侧铜板内壁的中心位置。

4.0.3 另一个试样盒装入石蜡，作为标准试样。装石蜡时，按要求安放两支热电偶。

4.0.4 将分别装好石蜡和试样的 2 个试样盒按图 3.1 的方式安装好，驱动夹紧螺杆使试样盒和恒温箱的各铜板面紧密接触。

4.0.5 接通测温系统。

4.0.6 开动 2 个低温循环冷浴，分别设定冷浴循环液温度为 -10°C 和 -25°C 。

4.0.7 冷浴循环液达到要求温度后再运行 8 h, 开始测温。每隔 10 min 测定一次标准试样和冻土试样两侧壁面的温度, 并记录。当各点的温度连续 3 次测得的差值小于 0.1℃时, 试验结束。

4.0.8 取出冻土试样, 测定其含水率和密度。

5 计 算

5.0.1 按式 (5.0.1) 计算导热系数:

$$\lambda = \frac{\lambda_0 \Delta\theta_0}{\Delta\theta} \quad (5.0.1)$$

式中 λ ——冻土导热系数, W/(m·K);

λ_0 ——石蜡的导热系数, 0.279W/(m·K);

$\Delta\theta_0$ ——石蜡样品盒内两壁面温差, C;

$\Delta\theta$ ——待测试样盒两壁面温差, C。

6 记 录

6.0.1 本试验的记录表格如表 6.0.1。

表 6.0.1 冻土导热数试验记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
 试样编号 _____ 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

试样含水率 w _____ %		石蜡导热系数 λ_0 0.279 W/(m·K)			
试样密度 ρ _____ g/cm ³					
序 号	时 间 (min)	石蜡样温差 (C)	试样温差 (C)	导热系数 [W/(m·K)]	备 注
	(1)	(2)	(3)	(4) = $\lambda_0(2)/(3)$	

未冻含水率试验

SL237—038—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 未冻含水率是冻土物理力学性质变化的主导因子之一。本试验的目的是测定试样在不同初始含水率状态时的冻结温度，推算未冻含水率。

1.0.2 本规程适用于粘质土和砂质土。

2 引用标准

SL237—036—1999 《冻结温度试验》。

3 仪器设备

3.1 仪器设备

3.1.1 仪器设备：应符合 SL237—036—1999 规程 2.1 的规定。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 仪器设备的检定和校准：应按 SL237—036—1999 规程 2.2 的规定进行。

4 操作步骤

4.0.1 按 SL237—036—1999 规程 3.2.1 的规定制备 3 个试样。其中 1 个试样按所需的加水量加纯水制备；另 2 个试样的加水量宜使试样处于液限和塑限状态作为初始含水率。

4.0.2 将制备好的试样，按 SL237—036—1999 规程 3.2.2 至

3.2.3 的规定进行冻结试验。

5 计算和制图

5.0.1 按下列三式计算未冻含水率：

$$w_n = AT_f^{-B} \quad (5.0.1-1)$$

$$A = w_L T_L^B \quad (5.0.1-2)$$

$$B = \frac{\ln w_L - \ln w_P}{\ln T_P - \ln T_L} \quad (5.0.1-3)$$

式中 w_n ——未冻含水率，%；

w_L ——液限，%；

w_P ——塑限，%；

A 、 B ——与土的性质有关的常数；

T_f ——冻结温度（冰点）绝对值，C；

T_L ——液限试样的冻结温度绝对值，C；

T_P ——塑限试样的冻结温度绝对值，C。

5.0.2 未冻含水率 2 次平行试验的差值，在 0~ -3℃ 范围内不超过 2%；低于 -3℃ 不超过 1%。

5.0.3 以含水率 (w_L 、 w_P) 为纵坐标，冻结温度为横坐标，在双对数纸上绘制关系曲线，

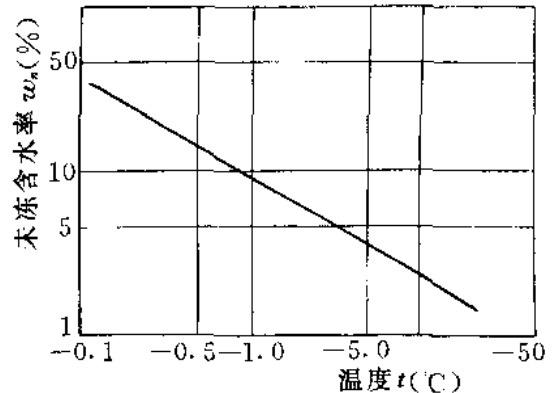


图 5.0.3 未冻含水率与温度的关系

如图 5.0.3。从曲线上查得需测试样的冻结温度 T_f 相对应的含水率，即为未冻含水率。

6 记 录

6.0.1 本试验记录格式见 SL237—036—1999 规程表 5.0.1。

冻胀量试验

SL237—039—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 土体在冻结过程中的冻胀变形量即为冻胀量。本试验的目的是测定土冻结过程的冻胀量,从而计算表征土冻胀性的冻胀率。

1.0.2 本规程适用于原状的及扰动的粘质土和砂质土。

2 仪器设备

2.1 仪器设备

试验装置由试样盒、恒温箱和温控系统、温度监测系统、变形量测系统、补水系统及加压系统组成。

2.1.1 试样盒:由外径 12 cm、壁厚为 1 cm、高为 10 cm 的有机玻璃筒作为侧壁,沿高度每隔 1 cm 设热敏电阻温度计插入孔,底板和顶盖结构能提供恒温液循环和外界水源补充通道。如图 2.1.1。

2.1.2 恒温箱:容积不小于 0.8 m^3 ,内设冷液循环管路和加热器(功率为 500 W),通过热敏电阻温度计与温度控制仪相连,使试验期间箱温保持在 $1 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

2.1.3 温度控制系统:由低温循环浴和温度控制仪组成,提供试验所需的顶、底板温度。

2.1.4 温度监测系统:由热敏电阻温度计、数字电压表组成。监测试验过程中土样、顶、底板温度和箱温变化。

2.1.5 补水系统:由恒定水位装置(图 2.1.1)通过塑料管与顶板相连,水位应低于顶板与土样接触面 1 cm。

2.1.6 变形监测系统:百分表或位移传感器(量程 30 mm、分度值 0.01 mm)。

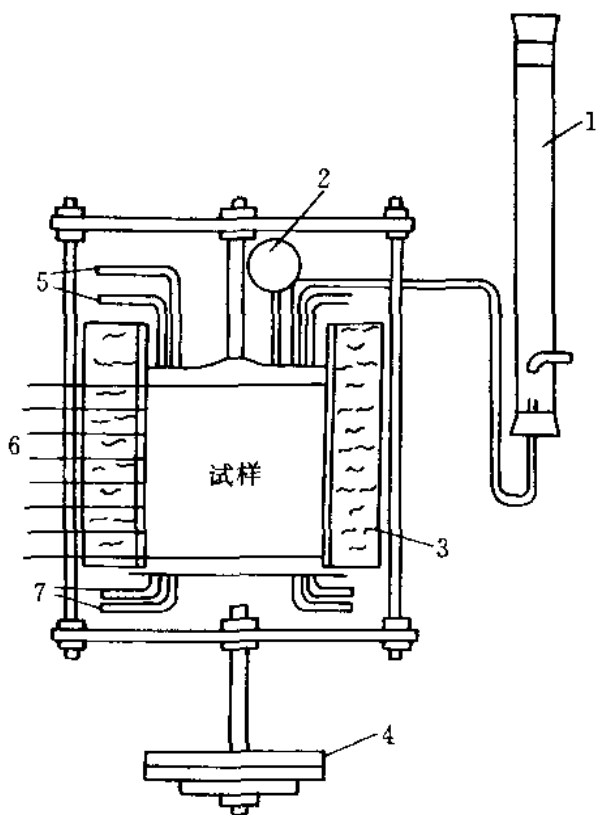


图 2.1.1 试样盒结构示意图

1 供水装置;2 百分表;3—保温材料;4—加压装置;5—正温循环液进出口;6 热敏电阻测温点;7—负温循环液进出口

2.1.7 加压系统：由加压框架和砝码组成。

2.2 仪器设备的检定和校准

2.2.1 热敏电阻温度计：应参照 JJG160—92《标准铂电阻温度计检定规程》进行检定。

2.2.2 百分表或位移传感器：应按 JJG379—95《大量程百分表检定规程》进行检定。

2.2.3 温度控制仪：应参照有关检定规程检定。

2.2.4 加压系统：应以三等测力计进行比对检定。

3 操作步骤

3.1 原状土

3.1.1 土样应按自然沉积方向放置，剥去蜡封和胶带，开启土样

筒取出土样。

3.1.2 用切土器将原状土样削成直径为 10 cm、高为 5 cm 的试样，称量确定密度并取余土测定初始含水率。

3.1.3 在有机玻璃试样盒内壁涂上一薄层凡士林，放在底板上并放一张滤纸，然后将试样从顶装入盒内，让其自由滑落在底板上。

3.1.4 在试样顶面上放一张滤纸，然后放上顶板，并稍稍加力，以使土柱与顶、底板接触紧密。

3.1.5 将盛有试样的试样盒放入恒温箱内，试样周侧、顶、底板内插入热敏电阻温度计。试样周侧包裹 5 cm 厚的泡沫塑料保温。连接顶、底板冷液循环管路及底板补水管路，供水并排除底板内气泡，调节供水装置水位（若考虑无水源补充状态，可切断供水）。安装百分表或位移传感器。

3.1.6 若需模拟原状土天然受力状态，可施加相应的荷载。

3.1.7 开启恒温箱、试样顶、底板冷浴，设定恒温箱冷浴温度为 -15°C ，箱内温度为 1°C ；顶、底板冷浴温度为 1°C 。

3.1.8 试样恒温 6 h，并监测温度和变形。待试样初始温度均匀达到 1°C 以后，开始试验。

3.1.9 底板温度调节到 -15°C 并持续 0.5 h，让试样迅速从底面冻结，然后将底板温度调节到 -2°C 。粘质土以 $0.3^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ，砂质土以 $0.2^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 速度下降。保持箱温和顶板温度均为 1°C ，记录初始水位。每隔 1 h 记录水位、温度和变形量各 1 次。试验持续 72 h。

3.1.10 试验结束后，迅速从试样盒中取出试样，量测试样高度并测定冻结深度。

3.2 扰动土

3.2.1 称取风干土样，加纯水拌和呈稀泥浆，装入内径为 10 cm 的有机玻璃筒内，加压固结，直至达到所需初始含水率要求后，将土样从有机玻璃筒中推出，并将土样高度切削到 5 cm。

3.2.2 按本规程 3.1.3 至 3.1.10 的规定进行试验。

4 计 算

4.0.1 按式 (4.0.1) 计算冻胀率:

$$\eta = \frac{\Delta h}{H_f} \times 100 \quad (4.0.1)$$

式中 η ——冻胀率, %;

Δh ——试样总冻胀量, mm;

H_f ——冻结深度 (不包括冻胀量), mm。

5 记 录

5.0.1 本试验记录格式如表 5.0.1。

表 5.0.1 冻胀量试验记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
 土样编号 _____ 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

试样含水率 (w) _____ %		土样结构 _____						
试样密度 (ρ) _____ g/cm ³								
序 号	时 间 (h)	测温数字电压表读数 (mV)					变形量 (mm)	备 注
		1	2	3	4	5		

冻土融化压缩试验

SL237—040—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 本试验的目的是测定冻土的融沉系数和融化压缩系数,供冻土地基的融化和压缩沉降计算用。

1 融沉系数:冻土融化过程中在自重作用下的相对下沉量。

2 融化压缩系数:冻土融化后,在外荷作用下,所产生的压缩变形称融化压缩。融化压缩系数是单位荷载下的孔隙比变化量。

1.0.2 本规程适用于冻结粘质土和粒径小于 2 mm 的冻结砂质土。

2 引用标准

GB4935—85《单杠杆固结仪》。

SL114—95《杠杆式固结仪校验方法》。

3 仪器设备

3.1 仪器设备

3.1.1 融化压缩仪(图 3.1.1):加热传压板应采用导热性能好的金属材料制成。试样环应采用有机玻璃或其他导热性低的非金属材料制成,其尺寸宜为:内径 79.8 mm,高 40.0 mm。保温外套可用聚苯乙烯或聚胺酯泡沫塑料。

3.1.2 加荷设备:可采用量程为 2000 kPa 的杠杆式、磅秤式和其他相同量程的加荷设备,其准确度应符合 GB 4935—85 的规定。

3.1.3 变形测量设备:量程为 10 mm,分度值为 0.01 mm 的百

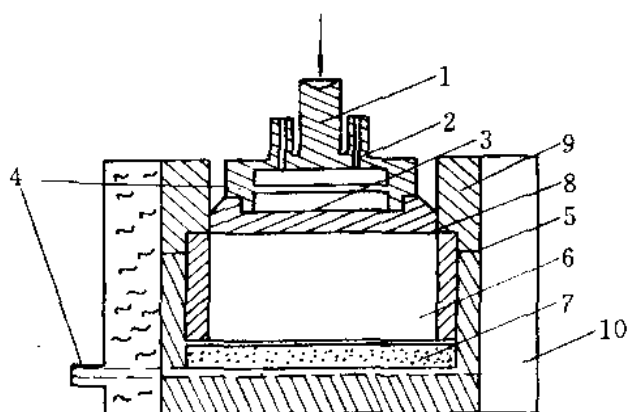


图 3.1.1 融化压缩仪示意图

1—加热传压板；2—热循环水进出口；3—透水板；4—上下排水孔；5—试样环；6—试样；7—透水板；8—滤纸；9—导环；10—保温外套

分表或位移传感器。

3.1.4 恒温供水设备。

3.1.5 原状冻土取样器：钻具开口内径为 79.8 mm。

3.2 仪器设备的检定与校准

3.2.1 加荷设备：参照 SL114—95 校验方法进行校准。

3.2.2 百分表：应按 JJG34—84《百分表检定规程》进行检定。

3.2.3 压缩仪的变形：应按 SL114—95 的附《固结仪变形校正》的方法定期校准。

4 操作步骤

4.0.1 试验宜在负温环境下进行。在切样和装样过程中不得使试样表面发生融化。

4.0.2 用冻土取样器钻取冻土试样，其高度应大于试样环高度。将钻样剩余的冻土取样测定含水率。钻样时必须保持试样的层面与原状土一致，且不得上、下倒置。

4.0.3 将冻土样装入试样环，使之与环壁紧密接触。刮平上、下面，但不得造成试样表面发生融化。测定冻土试样的密度。

4.0.4 在融化压缩容器内先放透水板，其上放一张润湿滤纸。将装有试样的试样环放在滤纸上，套上护环。在试样上放滤纸和透水板，再放上加热传压板。然后装上保温外套。放置融化压缩容器位于加压框架正中。安装百分表或位移传感器。

4.0.5 施加 1 kPa 的压力，调平加压杠杆。调整百分表或位移传感器到零位。

4.0.6 用胶管连接加热传压板的热循环水进出口与事先装有温度为 40~50℃ 水的恒温水槽，并打开开关和开动恒温器，以保持水温。

4.0.7 试样开始融沉时即开动秒表，分别记录 1、2、5、10、30、60 min 时的变形量。以后每 2 h 观测记录 1 次，直至变形量在两小时内小于 0.05 mm 时为止，并测记最后一次变形量。

4.0.8 融沉稳定后，停止热水循环，并开始加荷进行压缩试验。加荷等级视实际工程需要确定，宜取 50、100、200、400、800 kPa 最后一级荷载应比土层的计算压力大 100~200 kPa。

4.0.9 施加每级荷载后 24 h 为稳定标准，并测记相应的压缩量。直至施加最后一级荷载压缩稳定为止。

4.0.10 试验结束后，迅速拆卸仪器各部件，取出试样，测定含水率。

5 计算和制图

5.0.1 按式 (5.0.1) 计算融沉系数：

$$a_0 = \frac{\Delta h_0}{h_0} \times 100 \quad (5.0.1)$$

式中 a_0 ——冻土融沉系数，%；

Δh_0 ——冻土融化下沉量，cm；

h_0 ——冻土试样初始高度，cm。

5.0.2 按式 (5.0.2) 计算冻土试样初始孔隙比：

$$e_0 = \frac{\rho_w G_s (1 + 0.01w)}{\rho_0} - 1 \quad (5.0.2)$$

式中 e_0 ——试样初始孔隙比；
 ρ_w ——水的密度， g/cm^3 ；
 ρ_0 ——试样初始密度， g/cm^3 ；
 G_s ——土粒比重；
 w ——试样含水率，%。

5.0.3 按下列两式计算融沉稳定后和各级压力下压缩稳定后的孔隙比：

$$e = e_0 - (h_0 - \Delta h_0) \frac{1 + e_0}{h_0} \quad (5.0.3-1)$$

$$e_i = e - (h - \Delta h) \frac{1 + e}{h} \quad (5.0.3-2)$$

式中 e 、 e_i ——分别为融沉稳定后和压力作用下压缩稳定后的孔隙比；

h 、 h_0 ——分别为融沉稳定后和初始试样高度， cm ；

Δh 、 Δh_0 ——分别为压力作用下稳定后的下沉量和融沉下沉量， cm ；

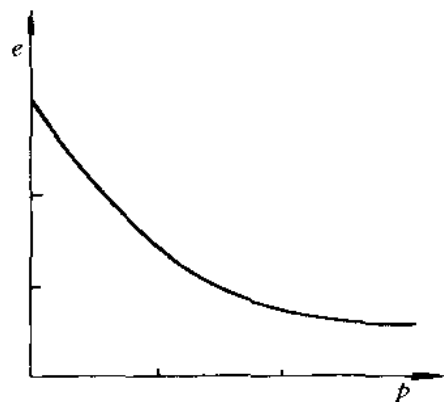


图 5.0.5 孔隙比与压力关系曲线

其余符号见本规程式 (5.0.2)。

5.0.4 按式 (5.0.3) 计算某一压力范围内的冻土融化压缩系数：

$$a = \frac{e_i - e_{i+1}}{p_{i+1} - p_i} \quad (5.0.3)$$

式中 a ——某一压力范围内的融化压缩系数， MPa^{-1} ；

p_{i+1} 、 p_i ——分级压力值， kPa ；

e_{i+1} 、 e_i ——与分级压力相应的孔隙比。

5.0.5 绘制孔隙比与压力关系曲线，如图 5.0.5。

6 记 录

6.0.1 本试验记录格式如表 6.0.1。

表 6.0.1 冻土融化压缩试验记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
 试验编号 _____ 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

融沉后试样高度 h : cm		融沉后试样孔隙比 e :			
加压历时 (h , min)	压 力 (kPa)	试样总 变形量 (mm)	压缩后试 样高度 (mm)	孔 隙 比	融化压缩系数 (MPa ⁻¹)
t	p	$\sum \Delta h_i$	$h = h_0 - \sum \Delta h_i$	$e_i = e_0 - \frac{\sum \Delta h_i (1 + e_0)}{h_0}$	a

原位密度试验

SL237—041—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 原位密度试验的主要目的是测定原位土的密度和对填方工程进行施工质量控制。

1.0.2 原位密度试验方法有环刀法、灌砂法、灌水法、核子射线法等。

1 灌砂法、灌水法适用于砾类填土。

2 环刀法、核子射线法适用于细粒土。

2 灌砂法

2.1 仪器设备

2.1.1 灌砂法密度试验仪，见图 2.1.1。包括漏斗、漏斗架、防风筒、套环、附有 3 个固定器。

2.1.2 台秤：称量 10 kg，分度值 5 g；称量 50 kg；分度值 10g。

2.1.3 量砂：粒径 0.25~0.5 mm 干燥清洁标准砂 10~40 kg。

2.1.4 其他：量砂容器（有盖）、直尺、铲土工具等。

2.2 仪器设备的检定和校准

2.2.1 台秤：应按相应的检定规程进行检定。

2.2.2 量砂：应按本规程“附 a”要求制备，并校准其密度。

2.3 操作步骤（用套环）

2.3.1 在试验地点，将面积约 40 cm×40 cm 的一块地面铲平。检查填土压实密度时，应将表面未压实土层清除掉，并将压实土层铲去一部分（其深度视需要而定），使试坑底能达到规定的深度。

2.3.2 称盛量砂的容器加量砂质量。按图 2.1.1 所示，将仪器放

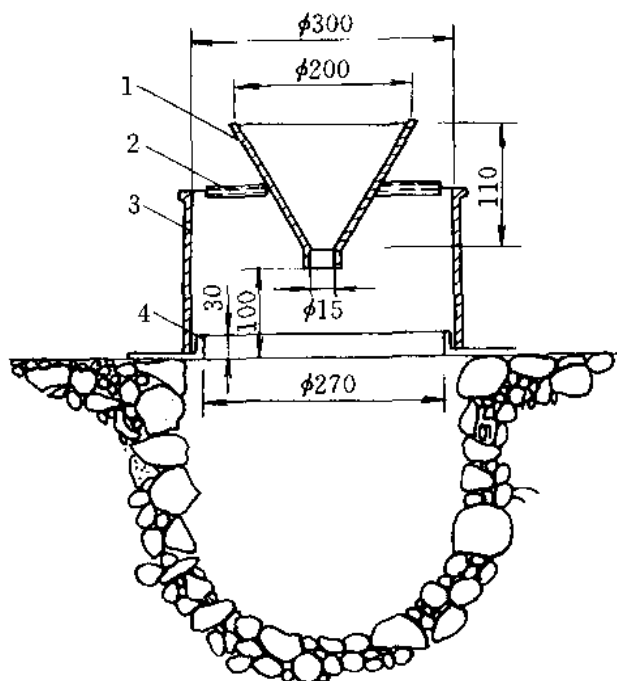


图 2.1.1 灌砂法密度试验仪

1—漏斗；2—漏斗架；3—防风筒；4—套环

在整平的地面上，用固定器将套环固定。开漏斗阀，将量砂经漏斗灌入套环内，待套环灌满后，拿掉漏斗、漏斗架及防风筒（无风可不用防风筒），用直尺刮平套环上砂面，使与套环边缘齐平。将刮下的量砂细心倒回量砂容器，不得丢失。称量砂容器加第 1 次剩余量砂质量。

2.3.3 将套环内的量砂取出，称量，倒回量砂容器内。环内量砂允许有少部分仍留在环内。

表 2.3.4 试坑尺寸与相应的最大粒径

试样最大粒径 (mm)	试坑尺寸	
	直径 (mm)	深度 (mm)
5 (20)	150	200
40	200	250
60	250	300
200	800	1000

2.3.4 在套环内挖试坑，其尺寸大致如表 2.3.4。

挖坑时要特别小心，将已松动的试样全部取出。放入盛试样的容器内，将盖盖好，称容器加试样质量，并取代表性试样，测定含水率。

2.3.5 在套环上重新装上防

风筒、漏斗架及漏斗。将量砂经漏斗灌入试坑内，量砂下落速度应大致相等，直至灌满套环。

2.3.6 取掉漏斗、漏斗架及防风筒，用直尺刮平套环上的砂面，使与套环边缘齐平。刮下的量砂全部倒回量砂容器内，不得丢失。称量砂容器加第2次剩余量砂质量。

注：量砂的湿度发生变化或混有杂质时，应充分风干过筛后再可使用；试坑中有较大孔隙时，量砂可能进入，应按试坑外形，松弛地放入一层柔软的纱布。然后再进行灌砂。

2.4 操作步骤（不用套环）

2.4.1 按本规程2.3.1的规定准备试验地点，在刮平的地面上按本规程表2.3.4规定挖坑。

2.4.2 称盛量砂容器加量砂质量，在试坑上放置防风筒和漏斗，将量砂经漏斗灌入试坑内，量砂下落速度应大致相等，直至灌满试坑。

2.4.3 试坑灌满量砂后，去掉漏斗及防风筒，用直尺刮平量砂表面，使与原地面齐平，将多余的量砂倒回量砂容器，称量砂容器加剩余量砂质量。

2.5 计算

2.5.1 按下列两式计算湿密度及干密度。

1 用套环法：

$$\rho = \frac{(m_4 - m_6) - [(m_1 - m_2) - m_3]}{\frac{m_2 + m_3 - m_5}{\rho_n} - \frac{m_1 - m_2}{\rho'_n}} \quad (2.5.1-1)$$

2 不用套环法：

$$\rho = \frac{m_4 - m_6}{\frac{m_1 - m_7}{\rho_n}} \quad (2.5.1-2)$$

式中 ρ ——湿密度，g/cm³；

m_1 ——量砂容器加原有量砂质量，g；

m_2 ——量砂容器加第1次剩余量砂质量，g；

m_3 ——从套环中取出的量砂质量，g；

表 2.6.1-1 原位密度试验记录表 (灌砂法, 用套环)

工程名称 _____

试验者 _____

计算者 _____

试验日期 _____

校核者 _____

取 样 地 点					
土 样 编 号					
量砂容器质量加原有量砂质量	g	(1)			
量砂容器质量加第 1 次剩余量砂质量	g	(2)			
套环内耗砂质量	g	(3)	(1) - (2)		
量砂密度 ρ'_s	g/cm ³	(4)			
套环体积	cm ³	(5)	$\frac{(3)}{(4)}$		
从套环内取出量砂质量	g	(6)			
套环内残留量砂质量	g	(7)	(3) - (6)		
量砂容器质量加第 2 次剩余量砂质量	g	(8)			
试坑及套环内耗砂质量	g	(9)	(2) + (6) - (8)		
量砂密度 ρ_s	g/cm ³	(10)			
试坑及套环总体积	cm ³	(11)	$\frac{(9)}{(10)}$		
试坑体积	cm ³	(12)	(11) - (5)		
试样容器质量加试样质量 (内包括残留之量砂)	g	(13)			
试样容器质量	g	(14)			
试样质量	g	(15)	(13) - (14) - (7)		
试样密度	g/cm ³	(16)	$\frac{(15)}{(12)}$		
试样含水率	%	(17)			
干密度	g/cm ³	(18)	$\frac{(16)}{1+0.01(17)}$		
平均干密度	g/cm ³	(19)			

表 2.6.1-2 原位密度试验记录表 (灌砂法, 不用套环)

工程名称 _____ 试验者 _____
 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

取 样 地 点						
土 样 编 号						
量砂容器质量加原有量砂质量	g	(1)				
量砂容器质量加剩余量砂质量	g	(2)				
试坑耗砂质量	g	(3)	(1) - (2)			
量砂密度 ρ_n	g/cm ³	(4)				
试坑体积	cm ³	(5)	$\frac{(3)}{(4)}$			
试样质量加试样容器质量	g	(6)				
试样容器质量	g	(7)				
试样质量	g	(8)	(6) - (7)			
试样密度	g/cm ³	(9)	$\frac{(8)}{(5)}$			
试样含水率	%	(10)				
干密度	g/cm ³	(11)	$\frac{(9)}{1 + 0.01 (10)}$			
平均干密度	g/cm ³	(12)				

m_4 —— 试样容器加试样质量 (包括少量遗留砂质量), g;

m_5 —— 量砂容器加第 2 次剩余量砂质量; g;

m_6 —— 试样容器质量, g;

m_7 —— 量砂容器加剩余量砂质量, g;

ρ_n —— 往试坑内灌砂时量砂的平均密度, g/cm³;

ρ'_n —— 挖试坑前, 往套环内灌砂时量砂的平均密度, g/cm³。

计算至 0.01 g/cm³。

注：经量砂密度校证明 ρ_n 与 ρ'_n 相差很小时，式中 ρ'_n 可用 ρ_n 代替。

2.5.2 按式 (2.5.2) 计算干密度：

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0.1w} \quad (2.5.2)$$

式中 ρ_d ——干密度，g/cm³；

w ——含水率，%；

其余符号见本规程 (2.5.1)。

计算至 0.01 g/cm³。

2.5.3 本试验需进行 2 次平行测定，取其算术平均值。

2.6 记录

2.6.1 本试验记录格式如表 2.6.1-1、表 2.6.1-2。

3 灌 水 法

3.1 仪器设备

3.1.1 储水筒：直径应均匀，并附有刻度。

3.1.2 台秤：称量 20 kg，分度值 5g；称量 50 kg，分度值 10g。

3.1.3 薄膜：聚乙烯塑料薄膜。

3.1.4 其他：铲土工具，水准尺，直尺等。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 台秤：应按相应的检定规程进行检定。

3.2.2 储水筒：应按 JJG259—89《标准金属量器检定规程》进行检定。

3.3 操作步骤

3.3.1 将测点处的地面整平，并用水准尺检查。

3.3.2 按本规程表 2.3.4 规定确定试坑尺寸。按确定的试坑直径划出坑口轮廓线，在轮廓线内下挖至要求的深度。将坑内的试样装入盛土容器内，称试样质量。取有代表性的试样测定含水率。

3.3.3 试坑挖好后，放上相应尺寸的套环，并用水准尺找平。将大于试坑容积的塑料薄膜沿坑底、坑壁紧密相贴。如图 3.3.3。

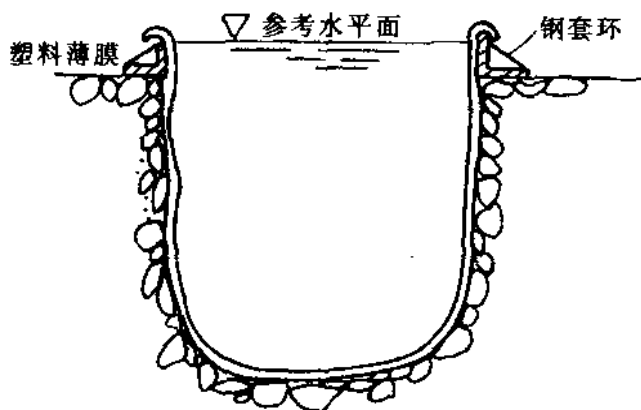


图 3.3.3 灌水法密度试验

3.3.4 记录储水筒内初始水位高度，拧开储水筒内的注水开关，将水缓慢注入塑料薄膜中。当水面接近套环上边缘时，将水流调小，直至水面与套环上边缘齐平时关闭水开关，不应使套环内的水溢出。持续 3~5 min，记录储水筒内水位高度。

3.4 计算

3.4.1 按式 (3.4.1) 计算试坑体积：

$$V = (H_2 - H_1)A_w - V_0 \quad (3.4.1)$$

式中 V ——试坑体积， cm^3 ；

H_1 ——储水筒内初始水位高度， cm ；

H_2 ——储水筒内注水终于时水位高度， cm ；

A_w ——储水筒断面积， cm^2 ；

V_0 ——套环体积， cm^3 。

3.4.2 按式 (3.4.2-1)、式 (3.4.2-2) 计算湿密度及干密度：

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.4.2-1)$$

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0.01w} \quad (3.4.2-2)$$

式中 m ——取自试坑内的试样质量， g ；

w ——试坑中土的含水率， $\%$ ；

其余符号见本规程 (2.5.2)、(3.4.1)。

计算至 0.01 g/cm^3 。

3.4.3 本试验需进行 2 次平行测定，取算术平均值。

3.5 记录

3.5.1 本试验记录格式如表 3.5.1。

表 3.5.1 原位密度试验记录表（灌水法）

工程名称 _____ 试验者 _____
 仪器编号 _____ 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

试样 编号	套环 体积 V_0 (cm^3)	储水筒水位 (cm)		储水筒 面积 A_w (cm^2)	试坑体积 V (cm^3)	试样 质量 m (g)	试样含 水率 w (%)	试样湿密度 ρ (g/cm^3)	试样干密度 ρ_d (g/cm^3)
		初始 H_1	终了 H_2						
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6) = [(4) - (3)] × (5) - (2)	(7)	(8)	(9) = $\frac{(7)}{(6)}$	(10) = $\frac{(9)}{1 + 0.01 (8)}$

4 核子射线法

4.1 仪器设备

核子湿度密度仪，见图 4.1。

4.1.1 γ 放射源：常用的放射源有铯 137 (Cs^{137}) 和钴 60 (Co^{60})。密封于探测杆的顶端。密度测定范围：1.2~2.7 g/cm^3 。探测深度：30~50 cm。

4.1.2 γ 射线检测器：盖革—缪勒 (G-M) 计数器或 γ 闪烁计数器。

4.1.3 其他：钻具、导板等。

4.2 仪器设备的校准和标定

4.2.1 标准计数率校准：校准方法见本规程“附 b”。

4.2.2 计数率标定, 按下列步骤进行。

1 制备密度标样。选择密度变化范围较大(1.2~2.5 g/cm³)、物理化学性稳定的材料, 按预定的高、中、低密度, 在压实箱内分层控制夯实, 制备成不同密度的五块标样。

2 准确测定标样块的体积、校核质量, 计算出标样块的平均密度, 计算至 0.01 g/cm³。

3 用钻具成孔作透射测定用。

4 用核子湿度密度仪对不同密度的标样块, 按仪器操作方式进行标样的密度测定。

5 按式(4.2.2-1)计算实测计数率:

$$n = \frac{N}{t} \quad (4.2.2-1)$$

式中 n ——实测计数率, 次/min;

N ——脉冲总数, 次;

t ——计数时间, min。

6 按式(4.2.2-2)计算计数比:

$$R_c = \frac{n}{S} \quad (4.2.2-2)$$

式中 R_c ——计数率比;

n ——实测计数率, 次/min;

S ——标准计数率, 次/min。

7 绘制计数率比 R_c 与密度 ρ 关系曲线, 如图 4.2.2。

注: 有的核子湿度密度仪出厂前已做好标定试验。带有微机处理的仪器,

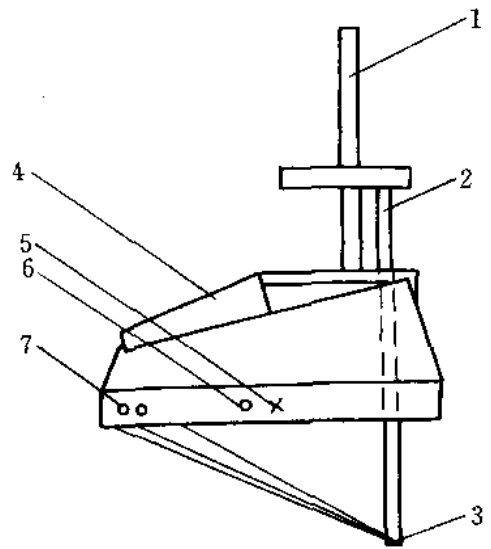


图 4.1 表面型核子湿度密度仪示意图

1—导杆; 2—测杆; 3— γ 放射源;
4—键盘; 5—中子源; 6—中子检测器; 7— γ 检测器

标定曲线存储在中心存储器中，测量时可自动显示密度数据。

4.3 操作步骤

4.3.1 用刮板或铲子将测试地点整平，清除松散土。

4.3.2 导向板导向，用钻具打一与地面垂直的、孔深大于测试深度5cm的测试孔。

4.3.3 仪器的预热和自检。首先打开电源预热约10 min，同时，按仪器说明书进行电子线路、液晶显示的自检及面板键盘、旋钮等检查。仪器工作正常时，即可进行测试。

4.3.4 使用仪器测试前，记录标准计数率 S_1 。

4.3.5 将仪器放在测孔的表面，通过可动放射源杆，将放射源逐次下插，插入时不要扰动孔壁。每次插入量为2.5 cm或5.0 cm，记录实测计数率，一直插至测试深度。放射源不能插入测试孔底部。

4.3.6 测试过程中，应注意测试数据的合理性与准确度的要求。要测试的总计数 $N (=nt)$ 满足要求，进行必要的重复测试，取其平均值。

4.3.7 连续测试后，记录标准计数率 S_2 。

4.4 计算

4.4.1 按式(4.4.1)计算测试地点的计数率比 R_c ：

$$R_c = \frac{n}{S} = \frac{n}{(S_1 + S_2)/2} \quad (4.4.1)$$

式中符号见本规程式(4.2.2-1)、式(4.2.2-2)。

4.2.2 用计数率比 R_c ，从标定曲线求得湿密度 ρ_0 。并按下列两式计算干密度 ρ_d 和含水率 w 。

$$\rho_d = \rho_0 - \rho_w \quad (4.4.2-1)$$

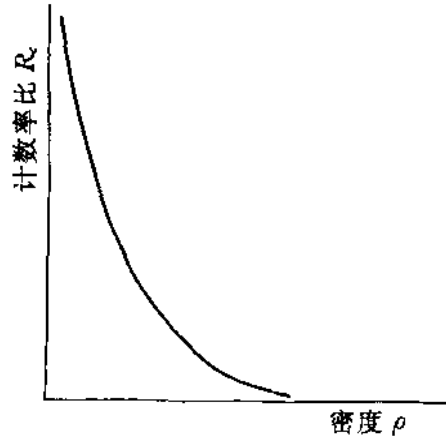


图 4.2.2 计数率比与密度关系曲线

$$w = \frac{\rho_w}{\rho_0 - \rho_w} \times 100 = \frac{\rho_w}{\rho_d} \times 100 \quad (4.4.2-2)$$

- 式中 ρ_d ——干密度, g/cm³;
 ρ_0 ——湿密度, g/cm³;
 ρ_w ——含水量 (含水的密度), g/cm³;
 w ——含水率, %。

注: 带有专用微处理机的仪器, 测试后得到计数率后, 按相应的键盘, 直接读出湿密度、含水率、干密度。

附 a 量砂制备方法及其密度校准

a. 1 仪器设备

a. 1.0.1 标准筛: 孔径 0.25 mm, 0.5 mm 两种。

a. 1.0.2 量砂容器 (带盖)。

a. 1.0.3 量器:

- 1 直径 150 mm, 高 230 mm (当不用套环时, 量器高 200mm)。
- 2 直径 200 mm, 高 280 mm (当不用套环时, 量器高 250mm)。
- 3 直径 250 mm, 高 330 mm (当不用套环时, 量器高 300mm)。
- 4 直径 270 mm, 高 300 mm。

a. 1.0.4 漏斗: 上口直径 200 mm, 下口直径 15 mm, 高 110 mm。

a. 1.0.5 台秤: 称量 10 kg, 分度值 5 g; 称量 50 kg, 分度值 10 g。

a. 1.0.6 其他: 玻璃板, 钢直尺, 小铲等。

a. 2 仪器设备的检定和校准

a. 2.0.1 台秤: 应按相应的检定规程进行检定。

a. 3 操作步骤

a. 3.0.1 取风干的均匀粒径净砂若干千克 (数量按需要而定), 用孔径 0.25 mm 及 0.5 mm 标准筛过筛。将 0.5 mm 筛下, 0.25 mm 筛上的砂样充分风干后, 放入量砂容器内备用。

a. 3. 0. 2 分别称量器质量及量器加玻璃板质量。将量器内充满净水，用玻璃板沿量器边缘轻轻擦净盖好（量器内应无气泡）。擦干量器外壁及玻璃板表面，称量器加玻璃板及水质量。每种量器需进行 3 次平行测定，取其算术平均值。

a. 3. 0. 3 将量器内外擦干，置漏斗于量器上，使漏斗下口距量器上口 100 mm，并对正量器中心，将量砂经漏斗灌入量器内，量砂下落速度大致相等，直到灌满量器。取掉漏斗，用直尺沿量器上缘刮平砂面，使砂面与量器边缘齐平。灌砂过程中应不使量器受振动。

a. 3. 0. 4 称量器加量砂质量，每种量砂需进行 3 次平行测定，取其算术平均值。

a. 4 计算

a. 4. 0. 1 按式 (a. 4. 0. 1) 计算量器容积：

$$V = \frac{m_2 - m_1}{\rho_w} \quad (\text{a. 4. 0. 1})$$

式中 V ——量器容积， cm^3 ；

m_1 ——量器加玻璃板质量， g ；

m_2 ——量器加玻璃板及水质量， g ；

ρ_w ——水的密度，等于 1 g/cm^3 。

计算至 1 cm^3 。

a. 4. 0. 2 按式 (a. 4. 0. 2) 计算量砂密度：

$$\rho_n = \frac{m_4 - m_3}{V} \quad (\text{a. 4. 0. 2})$$

式中 ρ_n ——量砂密度， g/cm^3 ；

m_3 ——量器质量， g ；

m_4 ——量器加量砂质量， g ；

V ——量砂容积， cm^3 。

计算至 0.01 g/cm^3 。

a. 5 记录

a. 5. 0. 1 本试验记录格式如表 a. 5. 0. 1。

表 a. 5. 0. 1 量砂密度校准

砂的来源 _____ 试验者 _____
 砂粒径范围 _____ 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

量器尺寸	试验次数	量器质量 (g)	量器加玻璃板质量 (g)	量器加玻璃板及水质量 (g)	量器容积 (cm ³)	平均量器容积 (cm ³)	量器加量砂质量 (g)	量砂质量 (g)	量砂密度 (g/cm ³)	平均密度 (g/cm ³)
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
					$\frac{(3)-(2)}{\rho_w}$			(6)-(1)	$\frac{(7)}{(5)}$	
	1									
	2									
	3									
	1									
	2									
	3									
	1									
	2									
	3									

附 b 标准计数率校准

b. 1 目的

b. 1. 0. 1 核子湿度密度仪的放射源遵循指数衰减定律。放射强度随时间而变化；同时，仪器的电子元件也会老化，机械元件会磨损；不同地区放射性本底也不同。为了测试的准确性，应进行相对测定。需用标准计数。

b. 2 校准条件

b. 2. 0. 1 参照标样：由镁片和聚乙烯片叠层组成（由厂家提供）。

b. 3 校准步骤

b. 3. 0. 1 按仪器说明书，设置参照标样的位置。

b. 3. 0. 2 将仪器平整的放在参照标样上，中间不应留空隙。仪器周围 2 m 内不应有其他物品，并与周围建筑物距离 5 m 以上。

b. 3. 0. 3 将放射杆置于测取标准计数的位置固定，测量时间使用慢速挡（4 min），按测定标准计数的规定步骤操作，测定标样的计数率。

b. 4 计算

b. 4. 0. 1 按下列公式计算计数率的最大值和最小值：

$$\left. \begin{array}{l} S_{\max} \\ S_{\min} \end{array} \right\} = S \pm 1.96 \sqrt{\frac{S}{t}} \quad (\text{b. 4. 0. 1})$$

式中 S ——实测标样的计数率，次/min；

t ——计数时间，min。

b. 4. 0. 2 实测的结果，应满足下列公式：

$$\left. \begin{array}{l} S_{\max} > S'_{0\min} \\ S_{\min} < S'_{0\max} \end{array} \right\} \quad (\text{b. 4. 0. 2})$$

$$\left. \begin{array}{l} S'_{0\min} \\ S'_{0\max} \end{array} \right\} = S'_0 \pm 1.96 \sqrt{\frac{S'_0}{t_0}} \quad (\text{b. 4. 0. 2-1})$$

$$S'_0 = S_0(1/2)^{D/T} \quad (\text{b. 4. 0. 2-2})$$

式中 S_0 ——选定某一时间为标准的计数率，次/min；

t_0 ——测定 S_0 时所用的时间，一般要求 $S_0 t_0 \geq 15400$ ，min；

T ——使用的放射性同位素的半衰期，d；

D ——自 S_0 测定后经过的时间，d。

若不满足上式时，应对仪器进行检查，并检验标定曲线。

原位渗透试验

SL237—042—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 为了评价工程土体的渗透性，需进行现场的渗透性测定。

1.0.2 本规程采用试坑注水法，适用于测定非饱和土的渗透系数。

2 仪器设备

2.1 仪器设备

2.1.1 试验装置如图 2.1.1。其中：内环直径为 22.6 cm，高为 15 cm；外环直径为 45.2 cm，高为 15 cm。在木支架上倒置着 2~4 个容量为 5000~1000 ml 装有斜口玻璃管和橡皮塞的供水瓶。供水瓶的分度值为 50 ml。

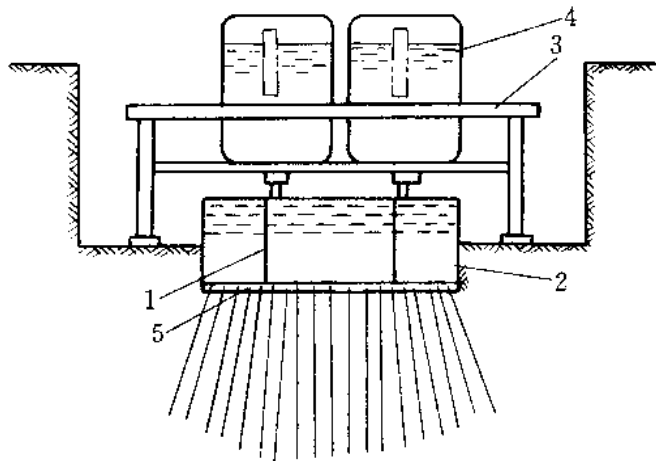


图 2.1.1 试坑渗水法装置

1—内环；2—外环；3—支架；4—供水瓶；5—砾石层

2.1.2 温度计：量程 0~50℃，分度值 1℃。

2.1.3 其他设备：土钻、吸水球及现场测含水率设备。

2.2 仪器设备的检定和校准

2.2.1 供水瓶:按 JJG196—90《常用玻璃量器检定规程》进行检定。

2.2.2 温度计:参照 JJG130—84《工作用玻璃液体温度计检定规程》进行检定。

3 操作步骤

3.0.1 在试验地区按预定深度开挖一面积不小于 $1.0\text{m} \times 1.5\text{m}$ 的试坑,在坑底再下挖一直径等于外环,深 $15 \sim 20\text{cm}$ 的贮水坑,整平坑底。

3.0.2 把大小钢环细心放入贮水坑中,使成同心圆,钢环入土深度至环上的起点刻度,两环上缘应在同一水平面上,压环时,须防止土的压实或变形。如扰动过大,须重新挖试坑另作。

3.0.3 在两环底部均铺以 2cm 厚的砾石层,然后在内环及两环间隙内注入清水至满,安放支架至水平位置。将供水瓶注满清水后倒置于支架上,供水瓶的斜口玻璃管分别插入内环和内外环之间的水面以下。玻璃管的斜口应在同一高度上(即环口水平面),以保持水位不变。

3.0.4 记录渗水开始时间及供水瓶的水位和水温。经一定时间后,测记在此时间内由供水瓶渗入土中的水量,直至流量稳定为止。

3.0.5 从供水瓶流出的水量达稳定后,在 $1 \sim 2\text{h}$ 内测记流出水量至少 $5 \sim 6$ 次。每次测记的流量与平均流量之差,不应超过 10% 。

3.0.6 试验结束后,拆除仪器,吸出贮水坑中的水。

3.0.7 在离试坑中心 $3 \sim 4\text{m}$ 以外,钻几个 $3 \sim 4\text{m}$ 深的钻孔,每隔 0.2m 取土样一个,平行测定其含水率。根据含水率的变化,确定渗透水的入渗深度。

4 计算

4.0.1 按下列公式计算渗透系数。

1 近似值计算:

$$k_T = \frac{Q}{A} \quad (4.0.1-1)$$

2 较精确值计算:

$$k_T = \frac{QH_1}{A(H_1 + H_2 + H_3)} \quad (4.0.1-2)$$

$$k_{20} = k_T \frac{\eta_T}{\eta_{20}} \quad (4.0.1-3)$$

式中 k_T ——渗透系数, cm/s;

Q ——渗透流量, cm^3/s ;

A ——内环面积 (≈ 400), cm^2 ;

H_1 ——试验时水的入渗深度, cm;

H_2 ——贮水坑中水的深度, cm;

H_3 ——相当于作用毛细管力的水柱高度 (cm), 根据不同土质可按表 4.0.1 采用;

k_{20} ——水温为 20°C 时的渗透系数, cm/s;

η_T 、 η_{20} ——分别为 $T^\circ\text{C}$ 和 20°C 时水的动力粘滞系数, $\text{kPa} \cdot \text{s}$ (10^{-6})。

比值 η_T/η_{20} 与温度的关系, 见 SL 237—014—1999 规程表 3.4.2。

表 4.0.1 相当于作用毛细管力的水柱高度表

土的名称	H_3 (cm)	土的名称	H_3 (cm)
粉质粘土 (CL)	100	粘土质细砂 (SC)	20
砂质粘土 (CL)	80	纯细砂 (SM)	20
粉土 (ML)	60	中砂 (SP)	10
砂质粉土 (ML)	40	粗砂 (SW)	5

5 记 录

5.0.1 本试验记录格式如表 5.0.1。

原位直剪试验

SL237—043—1999

1 目的和适用范围

- 1.0.1 原位直剪试验用于测定土体本身、土体软弱面和地基土与混凝土接触面的抗剪强度。
- 1.0.2 本规程包括在法向应力作用下沿固定剪切面的抗剪强度试验和混凝土板与地基土的抗滑试验。
- 1.0.3 试验可采用应力控制和应变控制方式进行。

2 引用标准

GB50021—94《岩土工程勘察规范》现场剪切试验。

3 土体抗剪强度试验

3.1 仪器设备

主要设备由垂直加荷装置、水平推力（拉力）装置、剪切盒、水平及垂直位移计等组成。

- 3.1.1 附压力表的千斤顶 4 至 6 个，出力 150~200 kN；压力表为 1.5 级。经称量的加重物（如铁块、混凝土块等）若干块。
- 3.1.2 拉力计：量程：0~100 kN，准确度为全量程的 1.0%。
- 3.1.3 百分表：2 至 4 个，量程 10~25 mm，分度值 0.01 mm。
- 3.1.4 牵引及导向设备：钢丝绳、滑轮、三角架、锚座等。
- 3.1.5 其他设备：加荷台、起重葫芦、秒表、土锚、工字梁、槽钢、垫块、滚珠轴承、链条钳等。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 压力表：应按 JJG52~87《弹簧管式一般压力表、压力真空表及真空表检定规程》检定后，再与千斤顶组合在试验机上进行校准。

3.2.2 拉力测力计：应参照 JJG144—92《标准测力计检定规程》进行检定。

3.2.3 百分表：应按 JJG379—95《大量程百分表检定规程》进行检定。

3.3 操作步骤

3.3.1 本试验可在试洞、试坑或探槽中进行。同一组试验体的地质条件应基本相同，其受力状态应与土体在工程中的受力状态相近。

3.3.2 根据剪切面状态，选择试验布置方案。当剪切面水平或近于水平时，可采用平推法；当剪切面较陡时，可采用楔形体法。

3.3.3 开挖试坑时，应避免对试体的扰动，尽量保持土体结构及含水率不产生显著变化。在地下水位以下进行试验时，应避免水压力及渗流对试体的影响。

3.3.4 每组试验试体不宜少于 3 块。试体面积不宜小于 0.1 m^2 ，高度不宜小于 10 cm 或为最大土粒粒径的 4~8 倍。

3.3.5 将修整好的试体，在顶面放上盖板，周边套上剪切盒，剪切盒与试样间的间隙应用膨胀快凝水泥砂浆填充。剪切盒底边应在剪切面以上，留一适当的间隙。

3.3.6 根据设计荷载来确定最大的垂直压力，并以此按等量分成 3 至 4 个垂直压力进行试验。垂直压力施加方法如下。

1 若采用重物加荷时，可先在土试体上搁置加荷平台，均匀地逐渐加上重物。应避免加荷时发生偏心现象。

2 若采用千斤顶加荷时，支架好反力装置，按顺序装上千斤顶和滚珠轴承，必须保证作用力位于试体的中心。

3.3.7 施加垂直压力后，让土体在此压力下进行压缩。当垂直变形达到相对稳定 (0.01 mm/h) 后，架设测试水平位移的百分表即可开始剪切。

3.3.8 剪切时施加水平力的速率应适当选择。一般每隔 1 min 施加水平力 1 次,控制试验在 20 min 内剪完。施加水平力的方法如下。

1 若采用应力控制时用滑轮组施加,可于施加水平力的加荷平台逐级加荷,并用拉力计计量。一般第一级荷载约为总垂直荷载的 1/10,以后逐级减小,使其剪切破坏时的最后一级荷载约为垂直荷载的 1/20。如图 3.3.8-1。

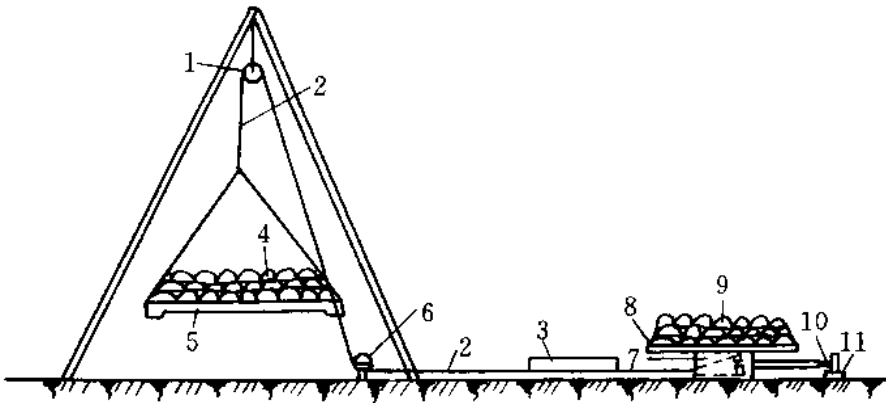


图 3.3.8-1 应力控制方式布置图

1—滑轮; 2—钢丝绳; 3—拉力计; 4—铁块; 5—水平荷载台; 6—导向轮;
7—试块; 8—加垂直荷载平台; 9—铁块; 10—百分表; 11—支架

为了避免加载引起冲击力,最好先用起重葫芦将加荷平台吊起,待加荷时再徐徐放下。

2 若采用应变控制时用千斤顶加荷,根据土试体面积和千斤顶活塞面积的大小,事先算出千斤顶的出力,然后控制千斤顶上压力表的读数,保证每级剪切力的大小在规定的数值上。如图 3.3.8-2。

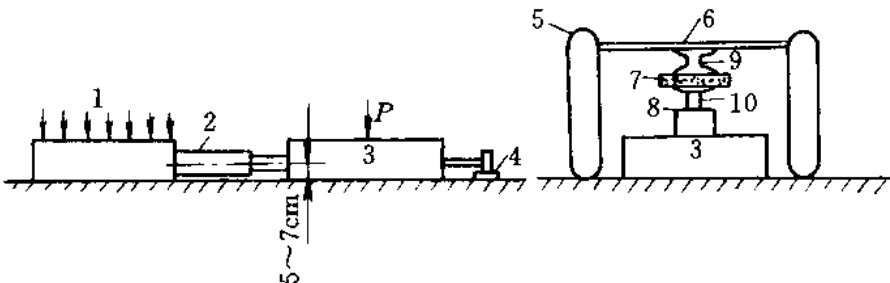


图 3.3.8-2 应变控制方式布置图

1—镇压荷载; 2—千斤顶; 3—试块; 4—支座; 5—车轮; 6—载重汽车底架; 7—轴承; 8—千斤顶; 9—工字钢; 10—垫块

3.3.9 在施加每一级水平力时,均应测记剪切力和土试块的水平位移量及垂直位移量。位移量应在加下一级水平力前测试。同时观察周围土的变形现象,当剪切变形急剧增长或剪切变形量达试块尺寸的 1/10 时,即认为土体已经破坏,可停止试验。

3.3.10 按本规程 3.3.5~3.3.9 的规定,测定不同垂直压力下试块的抗剪强度。

3.3.11 当需要时可沿剪切面继续进行摩擦试验。

4 混凝土板与地基土的抗滑试验

4.1 仪器设备

4.1.1 仪器设备应符合本规程 3.1 的规定。

4.2 仪器设备的检定和校准

4.2.1 仪器设备的检定和校准应按本规程 3.2 的规定进行。

4.3 操作步骤

4.3.1 根据所选择的试验方案(应力控制和应变控制)等情况,选择适当的地点,整平足够的试验场地。

4.3.2 确定试块尺寸。按原型建筑物所设计的混凝土标号,在现场浇注(或预制)试验用的混凝土块。在混凝土试块浇注后,地基若是粘性土时,应使土体浸水饱和。为便于地基充分浸水,在浇注混凝土时最好预留竖向小孔若干个。试块一般养护约 7 d 后方可使用。

4.3.3 试验开始前,应检查设备的灵活性和支撑设备的可靠性,以保证试验的正常进行。

4.3.4 按本规程 3.3.6~3.3.10 的规定进行抗滑试验。

5 计算和制图

5.0.1 按下列公式计算作用于试块上的垂直压力 σ 。

1 采用重物加载:

$$\sigma = \frac{W}{A} \times 10 \quad (5.0.1-1)$$

式中 σ ——作用于试块上的垂直压力, kPa;
 W ——作用于加荷台上的总荷载, kN;
 A ——试体或混凝土试块的面积, cm^2 ;
 10——单位换算系数。

2 采用千斤顶法加载:

$$\sigma = \frac{Fa}{A} \quad (5.0.1-2)$$

式中 F ——垂直千斤顶上压力表的读数, kPa;
 a ——千斤顶活塞面积, cm^2 ;
 其余符号见本规程式 (5.0.1-1)。

5.0.2 按式 (5.0.2) 计算土体的剪应力 τ 或抗滑强度 s :

$$\tau(s) = \frac{F_H}{A} \times 10 \quad (5.0.2)$$

式中 F_H ——试体或地基土破坏时的水平力(当采用滑轮组加荷时,根据滑轮组合计算求得,当用千斤顶加载时,则为水平千斤顶上压力表的读数乘千斤顶活塞面积), kN;
 A ——土试体(混凝土试块)的面积, cm^2 ;
 其他符号见本规程式 (5.0.1-1)。

5.0.3 绘制剪应力与剪切位移曲线,按 GB50021—94 规范要求,确定比例强度 τ_c 、屈服强度 τ_p 和峰值强度 τ_f ,如图 5.0.3。

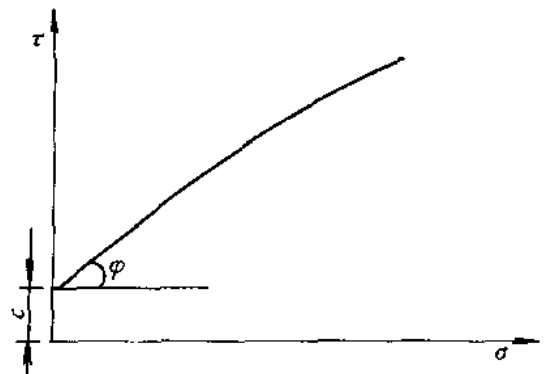
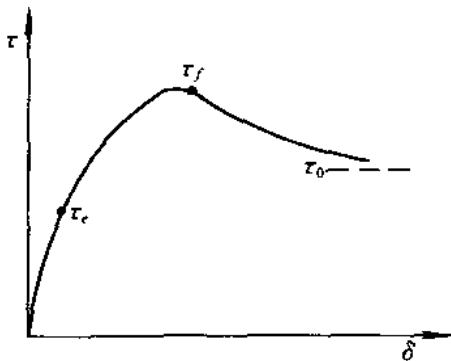


图 5.0.3 剪应力与剪切位移曲线

图 5.0.4 抗剪强度与垂直压力关系曲线

十字板剪切试验

SL237—044—1999

1 定义和适用范围

- 1.0.1 十字板剪切试验是用插入软粘土中的十字板头,以一定的速率旋转,测出土的抵抗力矩,换算其抗剪强度。它相当于摩擦角 $\varphi_u=0$ 时的粘聚力 c_u 值。
- 1.0.2 十字板剪切试验按力的传递方式分为电测式和机械式两类。
- 1.0.3 本规程适用于原位测定饱和软粘土的不排水总强度和灵敏度。

2 引用标准

GB4933—85 《现场十字板剪切仪》。

GB/T15406—94 《土工仪器的基本参数及通用技术条件》第二篇：原位测试仪器。

3 电测式十字板剪切试验

3.1 仪器设备

- 3.1.1 压入主机：应能将十字板头垂直压入土中，可采用触探主机或其它压入设备。
- 3.1.2 十字板头：基本参数应符合 GB/T15406—94 表 14 的规定；其机械和材料要求应符合该标准 8.2 和 8.3 的规定。
- 3.1.3 扭力量测仪表：传感器和量测仪表应符合 GB/T 15406—94 表 14 及 8.5.1 和 8.5.3 的规定。

- 3.1.4 扭力装置：由蜗轮蜗杆、变速齿轮、钻杆夹具和手柄组成。
- 3.1.5 其他：钻杆、水平尺、管钳等。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 测力传感器通过施加扭矩的圆盘和误差不大于 $\pm 0.1\%$ 的专用砝码，参照 JJG391—85《负荷传感器试行检定规程》的方法进行检定。其结果应满足本规程 3.1.3 的要求。

3.3 操作步骤

3.3.1 在试验点两旁将地锚旋入土中，安装和固定压入主机，用分度值为 1 mm 的水平尺校平，并安装好施加扭力的装置。

3.3.2 将十字板头接在扭力传感器上并拧紧。把穿好电缆的钻杆插入扭力装置的钻杆夹具孔内，将传感器的电缆插头与穿过钻杆的电缆插座连接，并进行防水处理。接通量测仪表，然后拧紧钻杆。钻杆应平直，接头要拧紧。宜在十字板以上 1 m 的钻杆接头处加扩孔器。

3.3.3 将十字板头压入土中预定的试验深度后，调整机架使钻杆位于机架面板导孔中心。

3.3.4 拧紧扭力装置上的钻杆夹具，并将量测仪表调零或读取初读数。

3.3.5 顺时针方向转动扭力装置上的手摇柄，当量测仪表读数开始增大时，即开动秒表，以 $0.1^\circ/\text{s}$ 的速率旋转钻杆。每转 1° 测记读数 1 次。应在 2 min 内测得峰值。当读数出现峰值或稳定值后，再继续旋转测记 1 min。峰值或稳定值作为原状土剪切破坏时的读数。

3.3.6 松开钻杆夹具，用扳手或管钳快速将钻杆顺时针方向旋转 6 圈，使十字板头周围的土充分扰动后，立即拧紧钻杆夹具，按本规程 3.3.5 的规定，测记重塑土剪切破坏时的读数。

重塑土的抗剪强度试验视工程需要而定，一般情况下可酌情减少试验次数。

3.3.7 如需继续进行试验，可松开钻杆夹具，将十字板头压至下一个试验深度，按本规程 3.3.4 至 3.3.6 的规定进行。

3.3.8 全孔试验完毕后，逐节提取钻杆和十字板头，清洗干净，检查各部件完好程度。

3.4 计算和制图

3.4.1 按下列公式计算十字板剪切强度 C_u 、 C'_u ：

$$C_u = 10K'\xi R_y \quad (3.4.1-1)$$

$$C'_u = 10K'\xi R_e \quad (3.4.1-2)$$

$$K' = \frac{2}{\pi D^2 H \left(1 + \frac{D}{3H} \right)} \quad (3.4.1-3)$$

式中 C_u ——原状土抗剪强度，kPa；

C'_u ——重塑土抗剪强度，kPa；

D ——十字板头直径，cm；

H ——十字板头高度，cm；

ξ ——传感器率定系数， $N \cdot (cm/\mu\epsilon)$ ；

R_y ——原状土剪切破坏时的读数， $\mu\epsilon$ ；

R_e ——重塑土剪切破坏时的读数， $\mu\epsilon$ ；

K' ——与十字板头尺寸有关的常数， cm^{-3} ；

10——单位换算系数。

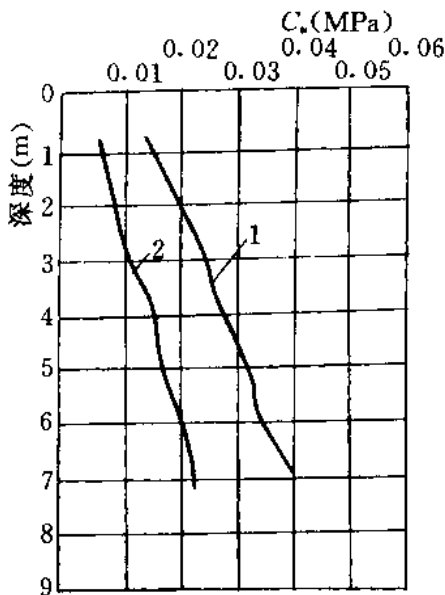


图 3.4.3-1 抗剪强度随深度变化曲线

1—原状土；2—扰动土

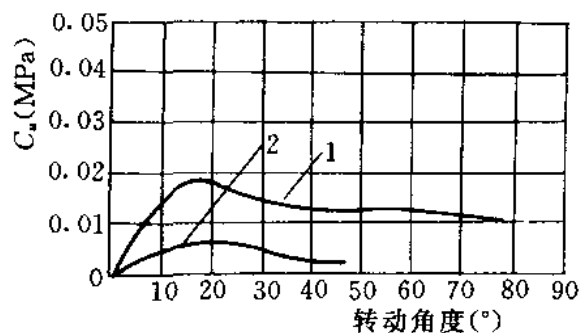


图 3.4.3-2 抗剪强度与转角关系曲线

1—原状土；2—扰动土

3.4.2 按式 (3.4.2) 计算土的灵敏度 S_t ：

$$S_t = C_u / C'_u \quad (3.4.2)$$

3.4.3 绘制抗剪强度 C_u 值随深度变化曲线，如图 3.4.3-1 所示。必要时绘制各试验点的抗剪强度与转动角的关系曲线，如图 3.4.3-2 所示。

3.5 记录

3.5.1 本试验记录格式如表 3.5.1。

4 机械式十字板剪切试验

4.1 仪器设备

4.1.1 机械式十字板剪切仪：采用 GB4933—85 标准，由十字板头、钻杆和扭力装置组成。如图 4.1.1。

4.1.2 十字板头：基本参数、机械和材料要求应符合本规程 3.1.2 的规定。连接形式有离合式和牙嵌式，如图 4.1.2。

4.1.3 钻杆：应符合 GB/T 15406—94 标准 8.2.2 的规定。

4.1.4 扭力装置：由开口钢环、刻度盘、旋转手柄等组成。量程和准确度应符合 GB/T 15406—94 表 14 的规定。

4.2 仪器设备的检定和校准

4.2.1 开口钢环：应参照 JJG144—92 《标准测力仪检

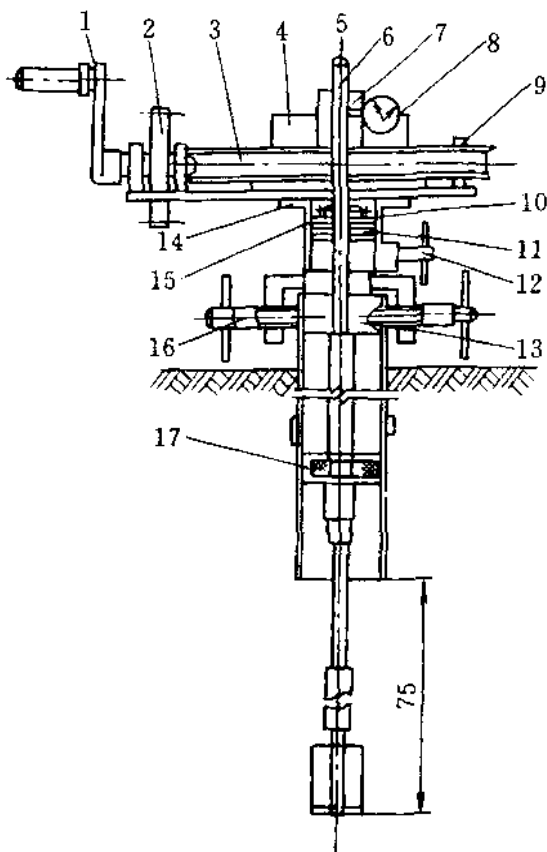


图 4.1.1 机械式十字板剪切仪示意图
 1—手摇柄；2—齿轮；3—蜗轮；4—开口钢环；
 5—导杆；6—特制键；7—固定夹；8—量表；
 9—支座；10—压圈；11—平面弹子盘；
 12—锁紧轴；13—底座；14—固定套；
 15—横销；16—制紧轴；17—导轮

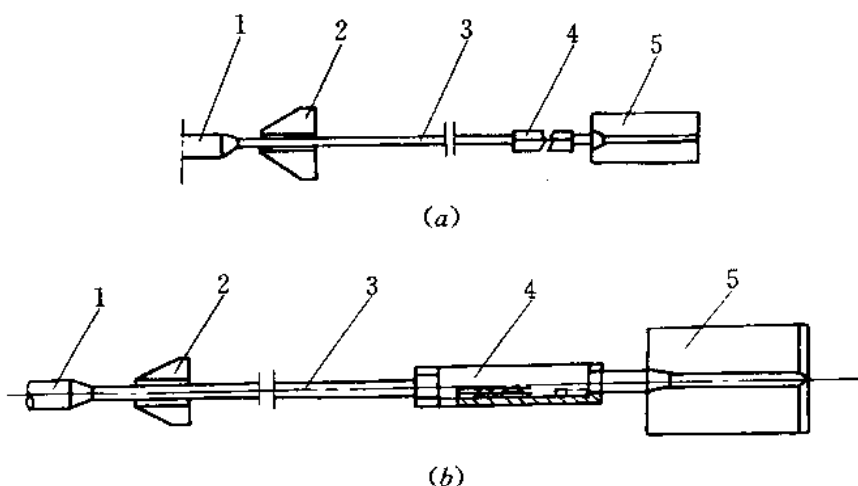


图 4.1.2 十字板头离合器示意图

(a) 离合式；(b) 牙嵌式

1—钻杆；2—导轮；3—轴杆；4—离合器；5—十字板头

定规程》进行检定。

4.3 操作步骤

4.3.1 在试验地点按钻探深度，将套管下至欲测试深度以上 3~5 倍套管直径处。

4.3.2 用木套管夹或链条钳将套管固定，以防套管下沉或扭力过大时套管发生反向旋转。

4.3.3 清除孔内残土。为避免试验土层受扰动，一般使用有孔螺旋钻清孔。

4.3.4 将十字板头、轴杆、钻杆逐节接好用管钳拧紧，然后下放孔内至十字板头与孔底接触。

4.3.5 接上导杆，将底座穿过导杆固定在套管上，用制紧螺丝拧紧，然后将十字板头徐徐压至试验深度。当试验深度处为较硬夹层时，应穿过夹层进行试验。

4.3.6 套上传动部件，转动底板使导杆键槽与钢环固定夹键槽对正，用锁紧螺丝将固定套与底座锁紧，再转动手摇柄使特制键自由落入键槽，将指针对准任何一整数刻度，装上百分表并调至零位。

4.3.7 试验开始，以 $0.1^\circ/\text{s}$ 的转速转动手摇柄，同时开动秒表，

每转 1° 测记百分表读数 1 次。当读数出现峰值或稳定值后，再继续旋转测读 1 min。其峰值读数或稳定值读数即为原状土剪切破坏时量表最大读数 R_y 。

4.3.8 拔出特制键，在导杆上端装上旋转手柄，顺时针方向转动 6 圈，使十字板头周围土充分扰动。取下旋转手柄，然后插上特制键，按本规程 4.3.7 的规定，测记重塑土剪切破坏时量表最大读数 R_r 。

重塑土的抗剪强度试验视工程需要而定，一般情况下可酌情减少试验次数。

4.3.9 对于离合式十字板头，拨下特制键，上提导杆 2~3 cm，使离合齿脱离，再插上特制键，匀速转动手摇柄，测记轴杆与土摩擦的量表稳定读数 R_g 。

4.3.10 对于牙嵌式十字板头，逆时针快速转动手柄 10 余圈，使轴杆与十字板头脱离，再顺时针方向匀速转动手柄，测记轴杆与土摩擦时的量表读数 R_g 。

4.3.11 试验完毕，卸下转动部件和底座，在导杆孔中插入吊钩，逐节提取钻杆和十字板头。清洗十字板头，检查螺丝是否松动，轴杆是否弯曲。

4.3.12 水上进行十字板试验，当孔底土质软时，为防止套管在试验过程中下沉，应采用套管控制器。

4.4 计算和制图

4.4.1 按下列公式计算十字板剪切强度 C_u 、 C'_u ：

$$C_u = 10KC(R_y - R_g) \quad (4.4.1-1)$$

$$C'_u = 10KC(R_r - R_g) \quad (4.4.1-2)$$

$$K = \frac{2L}{\pi D^2 H \left(1 + \frac{D}{3H} \right)} \quad (4.4.1-3)$$

式中 R_x ——轴杆和钻杆与土摩擦时的量表最大读数，mm；

L ——率定时的力臂长，cm；

C ——钢环系数，N/mm；

K ——与十字板头尺寸有关的常数， cm^{-2} ；

其他符号见本规程式 (3.4.1)。

4.4.2 土的灵敏度的计算见本规程式 (3.4.2)。

4.4.3 制图应按本规程 (3.4.3) 的规定进行。

4.5 记录

4.5.1 本试验记录格式如表 3.5.1。

表 3.5.1 十字板剪切试验记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
 试验地点 _____ 记录者 _____
 试验孔号 _____ 校核者 _____
 试验日期 _____

孔口标高：_____ 试验深度：_____ 稳定水位 _____						
十字板规格：D _____ (mm) H _____ (mm) K (K') _____						
钢环 (传感器) 编号：_____ 率定系数 _____ (N/mm, N·cm/ $\mu\epsilon$)						
序号	原 状 土		重 塑 土		轴 杆	备注
	百分表读数 (0.01 mm) 应变仪读数 ($\mu\epsilon$)	抗剪强度 C_u (kPa)	百分表读数 (0.01 mm) 应变仪读数 ($\mu\epsilon$)	抗剪强度 C'_u (kPa)	百分表读数 (0.01 mm)	

标准贯入试验

SL237—045—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 标准贯入试验是用 63.5 ± 0.5 kg 的穿心锤,以 0.76 ± 0.02 m 的自由落距,将一定规格尺寸的标准贯入器在孔底预打入土中 0.15 m,测记再打入 0.30 m 的锤击数,称为标准贯入击数。

1.0.2 标准贯入试验的目的是用测得的标准贯入锤击数 N ,判断砂土的密实程度或粘性土的稠度,以确定地基土的容许承载力;评定砂土的振动液化势和估计单桩的承载力;并可确定土层剖面和取扰动土样进行一般物理性试验。

1.0.3 本规程适用于粘质土和砂质土。

2 引用标准

GB12741—91《标准贯入仪》。

GB/T15406—94《土工仪器的基本参数及通用技术条件》第二篇:原位测试仪器。

3 仪器设备

3.1 仪器设备

3.1.1 标准贯入器:采用 GB1274—91 标准,由刃口形的贯入器靴、对开圆筒式贯入器身和贯入器头 3 部分组成。其机械要求和材料要求应符合 GB/T15406—94 标准和 GB12741—91 产品标准的规定。具体规格如表 3.1.1。其结构如图 3.1.1。

3.1.2 落锤(穿心锤):质量为 63.5 ± 0.5 kg 钢锤,应配有自动

表 3.1.1 贯入器规格

贯入器靴	长度 (mm)	75
	刃口角度 (°)	18~20
	靴壁厚 (mm)	2.5
贯入器身	长度 (mm)	>450
	外径 (mm)	51±1
	内径 (mm)	35±1
贯入器头	长度 (mm)	175

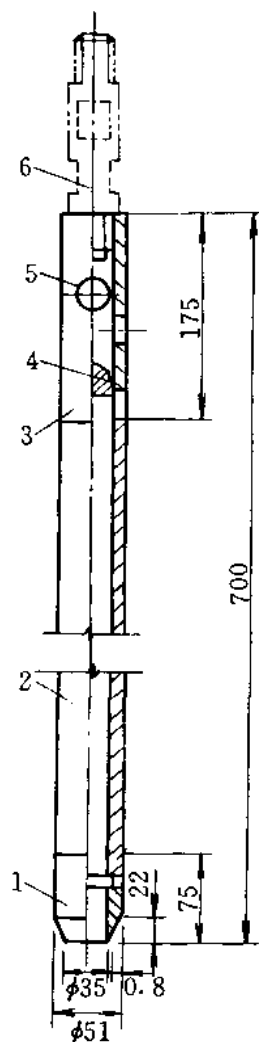


图 3.1.1 标准贯入器
结构图 (单位: mm)

1—贯入器靴; 2—贯入器身; 3 贯入器头; 4—钢球; 5—排水孔; 6 钻杆接头

落锤装置, 落距为 76 ± 2 cm。

3.1.3 钻杆: 直径 42 mm, 抗拉强度应大于 600 MPa; 轴线的直线度误差应小于 0.1%。

3.1.4 锤垫: 承受锤击钢垫, 附导向杆, 两者总质量不超过 30kg 为宜。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 标准贯入器尺寸: 用量程为 0~200 mm, 分度值为

0.1mm 的游标卡尺测量内、外径及靴壁厚; 用钢直尺测量长度。当贯入器靴缺口或卷刃, 单独缺口长度超过 5 mm, 或累计长度超过 12mm 时应更换。

3.2.2 应定期调整控制落距的器具, 以保证落距的准确度。

3.2.3 定期检查钻杆的弯曲度 (以使用总长度为标准), 剔除弯曲杆及不符合同轴度的钻杆接头。

4 操作步骤

4.0.1 先用钻具钻至试验土层标高以上 0.15 m 处，清除残土。清孔时应避免试验土层受到扰动。当在地下水位以下的土层进行试验时，应使孔内水位高于地下水位，以免出现涌砂和坍孔。必要时应下套管或用泥浆护壁。

4.0.2 贯入前应拧紧钻杆接头，将贯入器放入孔内，避免冲击孔底，注意保持贯入器、钻杆、导向杆联接后的垂直度。孔口宜加导向器，以保证穿心锤中心施力。

注：贯入器放入孔内，测定其深度，要求残土厚度不大于 0.1 m。

4.0.3 采用自动落锤法，将贯入器以每分钟 15~30 击打入土中 0.15m 后，开始记录每打入 0.10m 的锤击数，累计 0.30m 的锤击数为标准贯入击数 N ，并记录贯入深度与试验情况。若遇密实土层，贯入 0.3m 锤击数超过 50 击时，不应强行打入，记录 50 击的贯入深度。

4.0.4 旋转钻杆，然后提出贯入器，取贯入器中的土样进行鉴别、描述、记录，并量测其长度。将需要保存的土样仔细包装、编号，以备试验之用。

4.0.5 按本规程 4.0.1 至 4.0.4 的规定，进行下一深度的贯入试验，直到所需深度。

5 计算和制图

5.0.1 用式 (5.0.1) 换算相应于贯入 0.3 m 的锤击数 N ：

$$N = \frac{0.3n}{\Delta S} \quad (5.0.1)$$

式中 n ——所选取贯入的锤击数；

ΔS ——对应锤击数为 n 的贯入深度。

注：根据用途及相应规范确定是否需要修正 N 值。

5.0.2 绘制击数 (N) 和贯入深度标高 (H) 关系曲线，如图 5.0.2。

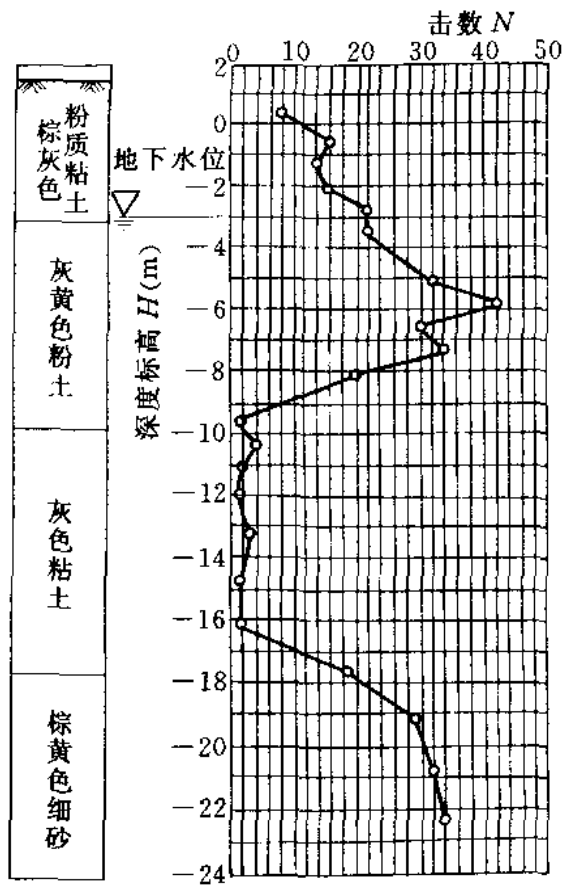


图 5.0.2 $N \sim H$ 关系曲线

6 记 录

6.0.1 本试验记录格式如表 6.0.1。

表 6.0.1 标准贯入试验记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
 钻孔编号 _____ 记录者 _____
 孔口标高 _____ 校核者 _____
 地下水位 _____ 日期 _____

序 号	浮土厚度 (m)	试验深度 (m)	贯入深度 (m)	击 数 (n)	描 述

静力触探试验

SL237—046—1999

1 定义和适用范围

1.0.1 将圆锥形探头按一定速率匀速压入土中,量测其贯入阻力(锥头阻力、侧壁摩阻力)的过程称为静力触探试验。

1.0.2 静力触探是工程地质勘察中的一项原位测试方法,可用于:

1 划分土层,判定土层类别,查明软、硬夹层及土层在水平和垂直方向的均匀性。

2 评价地基土的工程特性(容许承载力、压缩性质、不排水抗剪强度、水平向固结系数、饱和砂土液化势、砂土密实度等)。

3 探寻和确定桩基持力层,预估打入桩沉桩可能性和单桩承载力。

4 检验人工填土的密实度及地基加固效果。

1.0.3 本规程适用于粘质土和砂质土。

2 引用标准

GB12745—91《静力触探仪》。

GB/T15406—94《土工仪器的基本参数及通用技术条件》第二篇:原位测试仪器。

GB50021—94《岩土工程勘察规范》静力触探试验。

3 仪器设备

3.1 仪器设备

3.1.1 触探主机:应能匀速的将探头垂直压入土中,其额定贯入

力和贯入速度应满足 GB/T 15406—94。标准 7.4 的规定。其装置如图 3.1.1。

3.1.2 反力装置：可用地锚、压重、车辆自重提供所需的反力。

3.1.3 探头：探头的结构按功能分为单桥探头、双桥探头和孔压探头。

1 规格和结构：单桥探头用于测定比贯入阻力 p_s ，其结构主要由探头管、顶柱、变形柱（传感器）及锥头组成，如图 3.1.3-1；双桥探头用于测定锥头阻力 q_c 和侧壁摩阻力 f_s ，它与单桥探头的区别主要是有 2 个传感器（2 个电桥）分别测定锥头阻力和侧壁摩阻力，其结构可参照图 3.1.3-2；孔压静探探头，除测定锥头阻力和侧壁摩阻力外，同时还测定孔隙压力及其消散，其结构可参照图 3.1.3-3。

探头的技术规格应符合 GB/T15406—94 标准 7.4 的规定。锥头截面积的误差为 $\pm 3\%$ ；双桥摩擦筒表面积容许误差为 $\pm 2\%$ ；锥头高度容许误差为 -10% 。

2 材料和机械要求应符合 GB12745—91 标准的规定。

3 探头传感器准确度应符合 GB/T15406—94 标准 8.5.1 的规定。

3.1.4 探杆：探杆应符合 GB/T15406—94 标准的 8.2 和 8.3 的规定。

3.1.5 量测仪器：可采用下列仪器：

—静态电阻应变仪：准确度为 $\pm 2\%$ ；分度值为 $5 \mu\epsilon$ 。

—静力触探数字测力仪：准确度自动挡为 0.3% ，手动挡为 0.5% 。

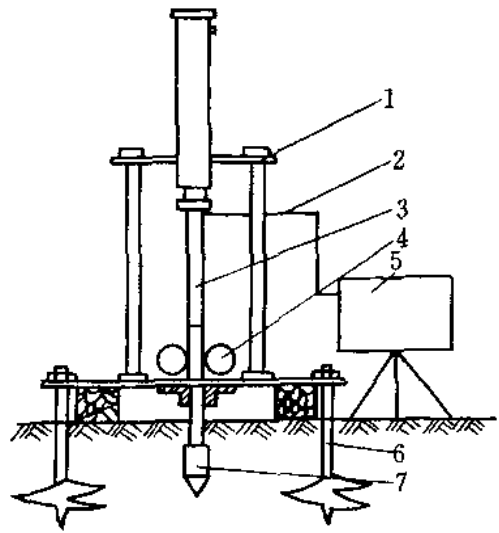


图 3.1.1 贯入装置示意图
1—触探主机；2—导线；3—探杆；
4—深度转换装置；5—测量记录仪；
6—反力装置；7—探头

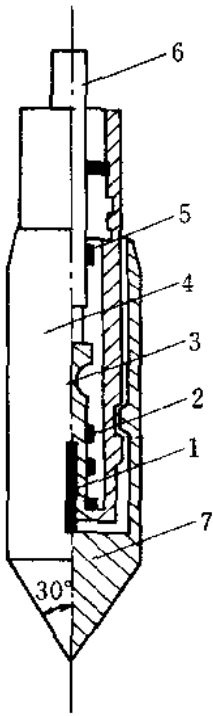


图 3.1.3-1 单桥

探头

1—顶柱；2—电阻片；
3—变形柱；4—探头筒；
5—密封圈；6—电缆；
7—锥头

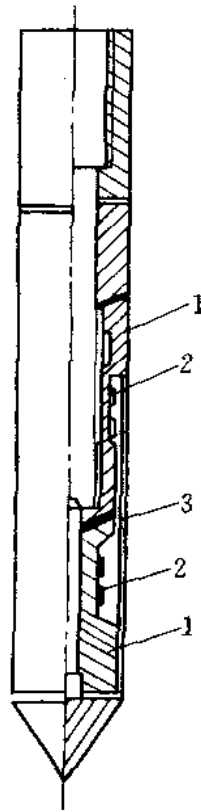


图 3.1.3-2 双桥探头

1—变形柱；2—电阻片；
3—摩擦筒

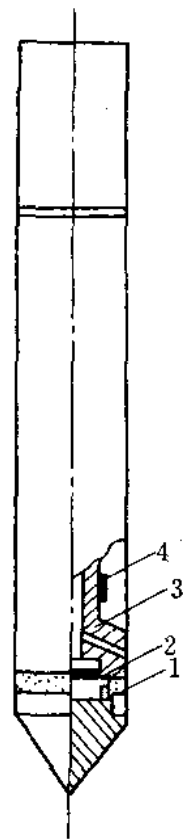


图 3.1.3-3 孔压静

力探头

1—透水石；2—孔压传感
器；3—变形柱；4—电阻片

—电子电位差计：0.5 级。

—深度记录装置：准确度为±1%。

3.1.6 其他：水准尺、管钳等工具。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 主机速率校准。选空载和额定贯入力，在行程范围内分别测定贯入速率，其相对误差应符合本规程 3.1.1 的规定。

3.2.2 探头的校准

1 探头的尺寸规格及材料按 GB12745—91 规定的方法检验。其结果应符合本规程 3.1.3 的规定。探头的更换标准如表 3.2.2。

2 探头的负荷传感器：应参照 JJG391—85《负荷传感器试行检定规程》检定。

表 3.2.2 探头更换标准 (磨损后)

型 号	原锥头面积 (cm^2)	锥头直径 (mm)	摩擦筒直径 (mm)	锥头高度 (mm)
I	10	<35.16	小于锥头直径	<28
II	15	<43.04		<34
III	20	<49.64		<39

3 孔隙压力传感器:应参照 JJG860—94《压力传感器检定规程》进行检定。

探头传感器一般应每隔 3 个月校准 1 次。

3.2.3 量测仪器的校准:不同类型的量测仪器应参照相应的检定规程进行检定和校准。

4 操作 步 骤

4.0.1 平整试验场地,设置反力装置。将触探主机对准孔位,调平机座(用分度值为 1 mm 的水准尺校准),并紧固在反力装置上。

4.0.2 将已穿入探杆内的传感器引线按要求接到量测仪器上,打开电源开关,预热并调试到正常工作状态。

4.0.3 贯入前应试压探头,检查顶柱、锥头、摩擦筒等部件工作是否正常。当测孔隙压力时,应使孔压传感器透水面饱和。正常后将连接探头的探杆插入导向器内,调整垂直并紧固导向装置,必须保证探头垂直贯入土中。启动动力设备并调整到正常工作状态。

4.0.4 采用自动记录仪时,应安装深度转换装置,并检查卷纸机构运转是否正常;采用电阻应变仪或数字测力仪时,应设置深度标尺。

4.0.5 将探头按 $1.2 \pm 0.3 \text{ m/min}$ 均速贯入土中 0.5~1.0 m 左右(冬季应超过冻结线),然后稍许提升,使探头传感器处于不受

力状态。待探头温度与地温平衡后（仪器零位基本稳定），将仪器调零或记录初读数，即可进行正常贯入。在深度 6 m 内，一般每贯入 1~2 m，应提升探头检查温漂并调零；6 m 以下每贯入 5~10 m 应提升探头检查回零情况，当出现异常时，应检查原因及时处理。

4.0.6 贯入过程中，当采用自动记录时，应根据贯入阻力大小合理选用供桥电压，并随时核对，校正深度记录误差，作好记录；使用电阻应变仪或数字测力计时，一般每隔 0.1~0.2 m 记录读数 1 次。

4.0.7 当测定孔隙水压力消散时，应在预定的深度或土层停止贯入，并按适当的时间间隔或自动测读孔隙水压力消散值，直至基本稳定。

4.0.8 当贯入到预定深度或出现下列情况之一时，应停止贯入。

- 触探主机达到额定贯入力；探头阻力达到最大容许压力。
- 反力装置失效。
- 发现探杆弯曲已达到不能容许的程度。

4.0.9 试验结束后应及时起拨探杆，并记录仪器的回零情况。探头拨出后应立即清洗上油，妥善保管，防止探头被曝晒或受冻。

4.0.10 注意事项。

1 试验点与已有钻孔、触探孔、十字板试验孔等的距离，建议不小于 20 倍已有的孔径。

2 试验前应根据试验场地的地质情况，合理选用探头，使其在贯入过程中，仪器的灵敏度较高而又不致损坏。

3 试验点必须避开地下设施（管道、电缆等），以免发生意外。

4 由于人为或设备的故障，而使贯入中断 10 min 以上，应及时排除。故障处理后，重新贯入前应提升探头，测记零读数。对超深触探孔分两次或多次贯入时；或在钻孔底部进行触探时，在

深度衔接点以下的扰动段，其测试数据应舍弃。

5 应注意安全操作和安全用电。

6 当使用液压式、电动丝杆式触探主机时，活塞杆、丝杆的行程不得超过上、下限位，以免损坏设备。

7 采用拧锚机时，应待准备就绪后才可启动。拧锚过程中如遇障碍，应立即停机处理。

5 计算和制图

5.1 原始数据的处理

5.1.1 零点读数：当有零点漂移时，一般按回零段内以线性内插法进行校正，校正值等于读数值减零读数内插值。

5.1.2 记录深度与实际深度有误差时，应按线性内插法进行调整。

5.2 计算和制图

5.2.1 按下列公式分别计算比贯入阻力 p_s 、锥头阻力 q_c 、侧壁摩阻力 f_s 、摩阻比 F 及孔隙水压力 u ：

$$p_s = k_p \epsilon_p \quad (5.2.1-1)$$

$$q_c = k_q \epsilon_q \quad (5.2.1-2)$$

$$f_s = k_f \epsilon_f \quad (5.2.1-3)$$

$$u = k_u \epsilon_u \quad (5.2.1-4)$$

$$F = \frac{f_s}{q_c} \quad (5.2.1-5)$$

式中 k_p 、 k_q 、 k_f 、 k_u ——分别为 p_s 、 q_c 、 f_s 、 u 对应的率定系数，kPa/ $\mu\epsilon$ ，kPa/mV；

ϵ_p 、 ϵ_q 、 ϵ_f 、 ϵ_u ——分别为单桥探头、双桥探头、摩擦筒及孔压探头传感器的应变量或输出电压， $\mu\epsilon$ ，mV。

5.2.2 按式 (5.2.2) 估算静探水平向固结系数 C_{ph} :

$$C_{ph} = \frac{R^2}{t_{50}} T_{50} \quad (5.2.2)$$

式中 T_{50} ——与圆锥几何形状、透水板位置有关的相应于孔隙压力消散度 50% 的时间因数 (对锥角 60° 、截面积为 10 cm^2 、透水板位于锥底处的孔压探头, 相应的 $T_{50} = 5.6$);

R ——探头圆锥底半径, cm ;

t_{50} ——实测孔隙消散度达 50% 的经历时间, s 。

5.2.3 以深度 (H) 为纵坐标, 以锥头阻力 q_c (或比贯入阻力

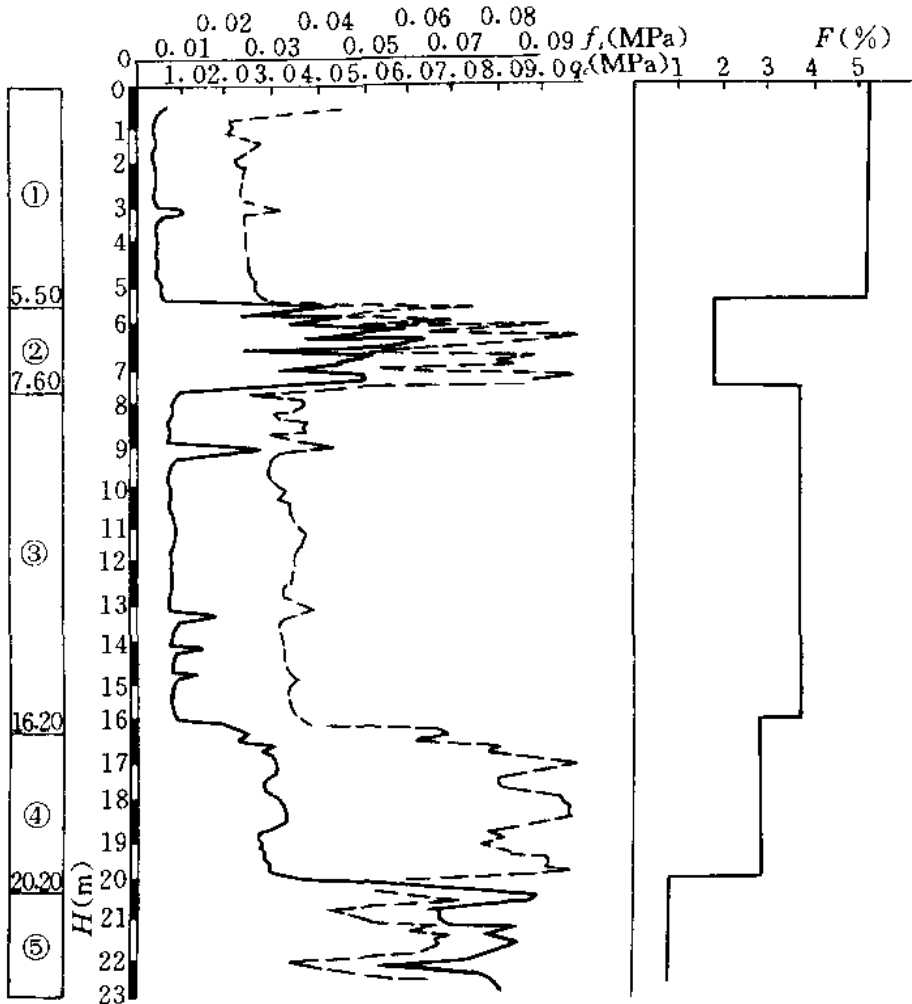


图 5.2.3 静力触探曲线图

p_s)、侧壁摩阻力 f_s 、摩阻比 F 及孔隙压力 u 为横坐标, 绘制 $q_c \sim H$ ($p_s \sim H$)、 $f_s \sim H$ 、 $F \sim H$ 及 $u \sim H$ 关系曲线, 如图 5.2.3。

5.2.4 绘制孔隙水压力消散曲线。

1 数据取舍。由于土的变异、孔压传感器含气以及操作等原因, 使实测的初始孔隙水压力滞后很多或波动太大, 这些数据应舍弃。

2 将消散数据归一化为超孔隙压力, 消散度 \bar{U} 定义为:

$$\bar{U} = \frac{u_i - u_0}{u_i - u_0} \quad (5.2.4)$$

式中 \bar{U} —— t 时孔隙水压力消散度, %;

u_i —— t 时孔隙水压力实测值, kPa;

u_0 ——静水压力, kPa;

u_i ——开始 (或贯入) 时的孔隙水压力 ($t=0$) kPa。

3 绘制 \bar{U} 对 $\lg t$ 的曲线, 如图 5.2.4。

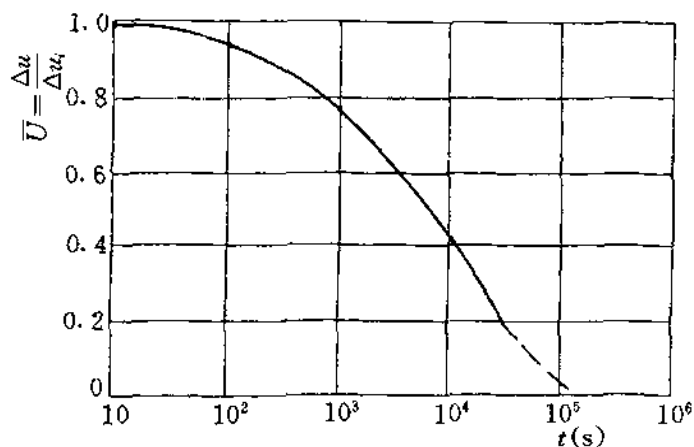


图 5.2.4 $\bar{U} \sim \lg t$ 曲线

6 记 录

6.0.1 本试验记录格式如表 6.0.1。

表 6.0.1 静力触探试验记录表

工程编号 _____ 探头编号 _____ 试验者 _____
 孔 号 _____ k_q _____ 计算者 _____
 孔口标高 _____ (m) 率定系数 k_f _____ 校核者 _____
 水位标高 _____ (m) k_u _____ 日 期 _____

1. 阻力测定

触探深度 (m)	锥头阻力 q_c (p_c)		摩擦阻力 f_s		孔隙水压力 u		摩阻比 $F = \frac{f_s}{q_c}$ (%)
	仪表读数 ($\mu\epsilon$, mV)	贯入阻力 (kPa)	仪表读数 ($\mu\epsilon$, mV)	贯入阻力 (kPa)	仪表读数 ($\mu\epsilon$, mV)	贯入阻力 (kPa)	

2. 孔压消散 (触探深度: m)

时 间 (min)	经过时间 (min)	仪表读数 ($\mu\epsilon$, mV)	孔隙压力 (kPa)	孔隙压力消散百分数 (%)

动力触探试验

SL237—047—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 本试验是利用一定的落锤能量,将与触探杆相连接的探头打入土中。根据打入的难易程度(表示为贯入度或贯入阻力)来判断土的工程性质的一种原位测试方法。一般用于确定各类土的容许承载力;还可用于查明土层在水平和垂直方向上的均匀程度;确定桩基持力层的位置和预估单桩承载力。

1.0.2 本试验根据锤击能量分为轻型、重型和超重型3种。轻型动力触探适用于一般粘质土及素填土;重型动力触探适用于中、粗、砾砂和碎石土;超重型适用于卵石、砾石类土。

1.0.3 触探指标定义为每贯入一定深度所需的锤击数。轻型动力触探以每贯入0.30 m的锤击数,以 N_{10} 表示;重型和超重型动力触探以每贯入0.10 m所需的锤击数,分别以 $N_{62.5}$ 和 N_{120} 表示。也可用动贯入阻力作为触探指标。

2 引用标准

GB/T15406—94《土工仪器的基本参数及通用技术条件》第二篇:原位测试仪器。

3 仪器设备

3.1 仪器设备

3.1.1 动力触探仪:由落锤、探头和触探杆(包括锤座和导向杆)组成,其规格如表3.1.1所列。

表 3.1.1 动力触探设备规格

设备类型		轻型	重型	超重型
落 锤	质量 m (kg)	10 ± 0.2	63.5 ± 0.5	120 ± 1
	落距 H (m)	0.50 ± 0.02	0.76 ± 0.02	100 ± 0.02
探 头	直径 (mm)	40	74	74
	截面积 (cm ²)	12.6	43	43
	圆锥角 (°)	60	60	60
触 探 杆	直径 (mm)	25	42, 50	50~63
	每米质量 (kg)		<8	<12
	锥座质量 (kg)		10~15	

3.1.2 重型和超重型动力触探设备须备有自动落锤装置。

3.1.3 探头的尺寸见图 3.1.3-1 和图 3.1.3-2。重型和超重型动力触探探头直径的最大允许磨损尺寸为 2 mm；探头尖端的最大允许磨损尺寸为 5 mm。

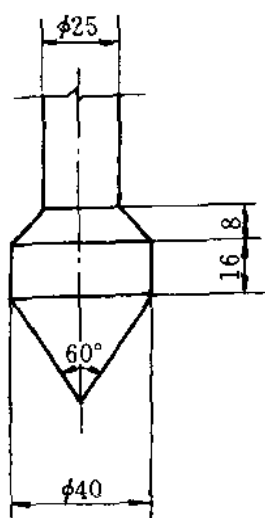


图 3.1.3-1 轻型动力触探探头 (单位: mm)

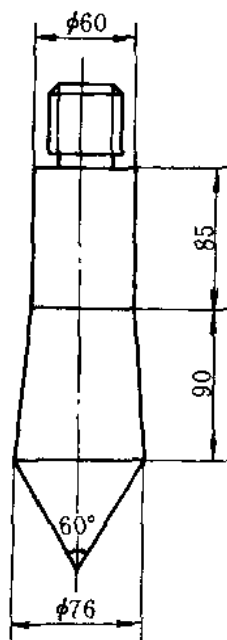


图 3.1.3-2 重型、超重型动力触探探头 (单位: mm)

3.1.4 触探杆应符合 GB/T15406—94 标准的 8.2 和 8.3 的规定。触探杆的接头应与触探杆具有相同的直径。每个接头的容许最大偏心为 0.2 mm。

重型和超重型动力触探的锤座直径应小于 100 mm，并不大于锤底面直径的一半。锤座、导向杆与触探杆的轴中心必须成一直线。锤座和导杆的总质量不应超过 30 kg。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 落锤的质量：应按产品生产厂规定的方法进行校准。其结果应符合本规程 3.1.1 的规定。

3.2.3 探头尺寸：用分度值为 0.01 mm 的卡尺进行检定。

3.2.4 探杆接头偏心度应与探杆连接后在车床上校验。

4 操作步骤

4.1 轻型动力触探

4.1.1 先用轻便钻具钻至试验土层标高以上 0.3 m 处，然后对所需试验土层连续进行触探。

4.1.2 试验时，穿心锤落距为 0.50 ± 0.02 m，使其自由下落。记录每打入土层中 0.30 m 时所需的锤击数（最初 0.30 m 可以不记）。

4.1.3 若需描述土层情况时，可将触探杆拨出，取下探头，换贯入器进行取样。

4.1.4 如遇密实坚硬土层，当贯入 0.30 m 所需锤击数超过 100 击或贯入 0.15 m 超过 50 击时，即可停止试验。如需对下卧土层进行试验时，可用钻具穿透坚实土层后再贯入。

4.1.5 本试验一般用于贯入深度小于 4 m 的土层。必要时也可在贯入 4 m 后用钻具将孔掏清后再继续贯入 2 m。

4.2 重型动力触探

4.2.1 试验前将触探架安装平稳，使触探保持垂直地进行。垂直度的最大偏差不得超过 2%。触探杆应保持平直，连接牢固。

4.2.2 贯入时，应使穿心锤自由下落，落锤落距为 0.76 ± 0.02 m。

地面上的触探杆的高度不宜过高,以免倾斜与摆动太大。

4.2.3 锤击速率宜为每分钟 15~30 击。打入过程应尽可能连续,所有超过 5 min 的间断都应在记录中予以注明。

4.2.4 及时记录每贯入 0.10 m 所需的锤击数。其方法可在触探杆上每隔 0.10 m 划出标记,然后直接(或用仪器)记录锤击数;也可以记录每一阵击的贯入度,然后再换算为每贯入 0.10 m 所需的锤击数。

4.2.5 对于一般砂、圆砾和卵石,触探深度不宜超过 12~15 m,超过该深度时,需考虑触探杆的侧壁摩阻影响。

4.2.6 每贯入 0.10 m 所需锤击数连续 3 次超过 50 击时,即停止试验。如需对土层继续进行试验时,可改用超重型动力触探。

4.2.7 本试验也可在钻孔中分段进行。一般可先进行贯入,然后进行钻探直至动力触探所及深度以上 1 m 处,取出钻具将触探器放入孔内再进行贯入。

4.3 超重型动力触探

4.3.1 贯入时穿心锤自由下落,落距为 100 ± 0.02 m。贯入深度一般不宜超过 20 m,超过该深度时,需考虑触探杆侧壁摩阻的影响。

4.3.2 其他步骤可参照本规程 4.2.1~4.2.6 的规定进行。

5 计算与制图

5.0.1 可按下列公式计算触探指标:

$$N_{63.5} = \frac{100}{e} \quad (5.0.1-1)$$

$$e = \frac{\Delta S}{n} \quad (5.0.1-2)$$

式中 $N_{63.5}$ ——每贯入 0.10m 所需的锤击数;超重型动力触探为 N_{120} ;

e ——每击贯入度, mm;

ΔS ——一阵击的贯入度; mm;

n ——相应的一阵击锤击数；

100——单位换算系数。

5.0.2 按式 (5.0.2) 计算动贯入阻力 q_d ：

$$q_d = \frac{Q^2}{(Q + q)} \frac{H}{Ae} \times 1000 \quad (5.0.2)$$

式中 q_d ——动贯入阻力，kPa；

Q ——落锤重，kN；

q ——触探器，即被打入部分（包括探头、触探杆、锤座和导向杆）的重量，kN；

H ——落距，m；

A ——探头面积， m^2 ；

e ——每击贯入度，mm；

1000——单位换算系数。

5.0.3 动力触探曲线。

1 计算单孔分层贯入指标平均值时，应剔除超前和滞后影响范围内及个别指标的异常值。

2 绘制贯入指标与触探深度曲线，如图 5.0.3。

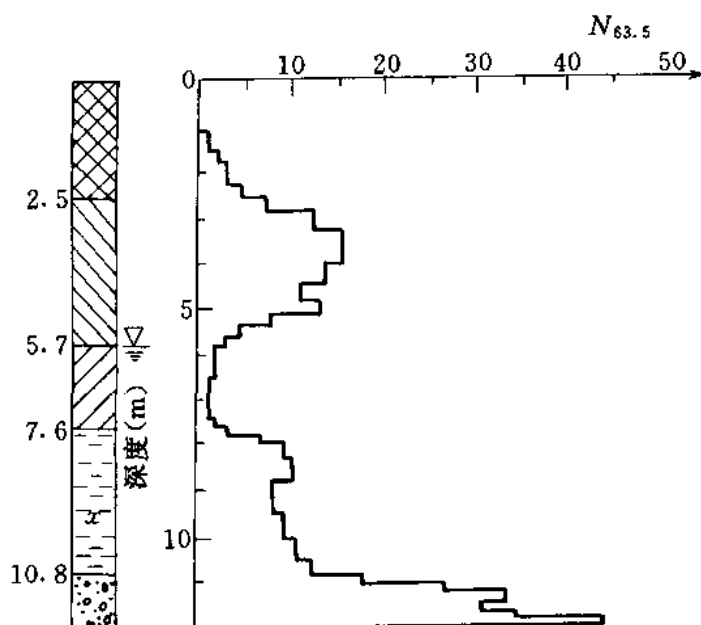


图 5.0.3 触探曲线

6 记 录

6.0.1 本试验记录格式如表 6.0.1。

表 6.0.1 重型、超重型动力触探试验记录表

工程名称_____ 孔 号_____ 试验者_____

工程地点_____ 探杆直径_____ 记录者_____

孔口标高_____ 探杆质量_____ 校核者_____

地下水位_____ 锤座质量_____ 日 期_____

触探杆总长 (m)	触探深度 (m)	一阵锤 击数	贯入度 (mm)	每贯入 0.1m 锤击数	小层累计 贯入度 (mm)	小层平均 锤击数	说明

旁 压 试 验

SL237—048—1999

1 定义和适用范围

1.0.1 本规程的旁压试验包括预钻式和自钻式两类。预钻式是在预先钻好的钻孔内放入旁压器，自钻式是用自钻钻头钻进将旁压器放入预定位置，然后通过压力—体积控制装置使旁压器径向扩张，对孔壁施加压力，使土体产生相应变形的一种原位测试方法。

1.0.2 由预钻旁压试验所得的旁压曲线的特征值（初始压力 p_0 、临塑压力 p_f 和极限压力 p_L ），可用来确定地基承载力标准值 q_k 和旁压模量 E_M 等指标；自钻旁压试验尚可用于测求土的水平向压力 p_0 、静止侧压力系数 K_0 、孔隙压力和消散特征以及估算土的不排水强度等。

1.0.3 本规程适用于粘性土、砂类土和强风化岩石。

2 引 用 标 准

GB/T15406—94《土工仪器的基本参数及通用技术条件》第二篇：原位测试仪器。

3 仪 器 设 备

3.1 仪器设备

旁压仪由旁压器、加压稳压装置和变形测量装置及导管等部分组成。其结构框图如图 3.1.1。

3.1.1 旁压器：为圆柱形骨架，外套有密封的弹性膜。预钻式一般分上、中、下三腔。中腔为测试腔，上、下腔为辅助腔。上、下

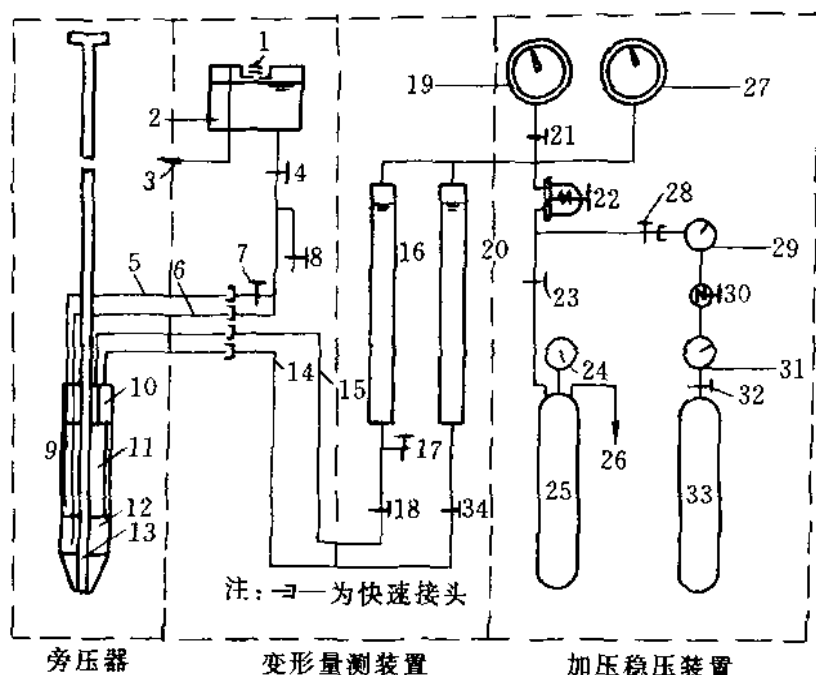


图 3.1.1 旁压仪结构框图

- 1—安全阀；2—水箱；3—水箱加压；4—注水阀；5—注水管 2；6—注水管 1；7—中腔注水；8—排水阀；9—旁压器；10—上腔；11—中腔；12—下腔；13—导水管；14—导压管；15—导压管 4；16—量管；17—调零阀；18—测压阀；19—600kPa 压力表；20—辅管；21—低压表阀；22—调压器；23—手动加压阀；24—2500kPa 压力表；25—贮气罐；26—手动加压；27—1600kPa 压力表；28—氮气加压阀；29—2500kPa 压力表；30—减压阀；31—25000kPa 压力表；32—氮气源阀；33—高压氮气源；34—辅管阀

腔用金属管连通，而与中腔严密隔离。自钻式一般为单腔，旁压器中央为导水管，用以疏导地下水，以利于将旁压器放到测试位置。在弹性膜外按需要可加装一层可扩张的金属保护套（铠装保护）。其规格如表 3.1.1 所列。

3.1.2 加压稳压装置：压力源为高压氮气或人工打气。并附有加压稳压调节阀和压力表。其量程和准确度见本规程表 3.1.1。

3.1.3 变形测量装置：一般由体变管（量管）或液位仪及辅管组成，其量程和准确度见本规程表 3.1.1。也可采用横向变形传感器

表 3.1.1 旁压仪规格

旁 压 器				体变管		压 力		量管截面积 (cm ²)
外径 (mm)	中腔长度 (mm)	总长度 (mm)	总长度 外径	量程 (cm ³)	准确度 (%)	量程 (MPa)	准确度 (%)	
44~90	200~250	450~980	4~10	0~600	1.5	0~4.0	1.5	13.2~34.5

直接测出径向变形。其技术条件应符合GB/T15406—94标准8.5.1的规定。

3.1.4 导管：为尼龙软管，连接旁压器中腔与体变管相通，连接上、下腔与辅管相通。

3.1.5 成孔的钻探设备。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 压力表：应按JJG52—87《弹簧管式一般压力表、压力真空表及真空表检定规程》进行检定。

3.2.2 体变管：应按JJG209—94《体积管检定规程》进行检定。变形传感器的校准与弹性膜约束力同时进行。

3.2.3 试验前要进行旁压器弹性膜约束力和仪器综合变形值的校准。校验方法按本规程[附a]进行。

4 操作 步 骤

4.1 预钻旁压试验

4.1.1 试验前平整试验场地，根据土的分类和状态选择适宜的钻头开孔。要求孔壁垂直、呈完整的圆形，尽可能减少孔壁土体扰动。

4.1.2 钻孔时，若遇松散砂层和软土地层时，须用泥浆护壁钻进。钻孔孔径应略大于旁压器外径2~6mm。

4.1.3 试验点布置原则：必须保证旁压器上、中、下三腔都在同一土层中。试验点垂直间距一般不小于1m，每层土不少于1个测

点。层厚大于 3 m 的土层，一般不少于 2 个测点，亦可视工程需要确定测点位置和数量。

取完土样或做过标贯试验的部位不得进行旁压试验。

4.1.4 试验前在水箱内注满蒸馏水或无杂质的冷开水，打开水箱安全盖。

4.1.5 检查并接通管路，把旁压器的注水管和导压管的快速接头对号插入。

4.1.6 把旁压器竖立于地面，打开水箱至量管、辅管各管阀门，使水从水箱分别注入旁压器各个腔室，并返回到量管和辅管。在此过程中需不停地拍打尼龙管并摇晃旁压器，以便尽量排除旁压器和管路中滞留的气泡。为了加速注水和排除气泡，亦可向水箱稍加压力。

当量管和辅管水位升到刻度零或稍高于零，即可终止注水，关闭注水阀和中腔注水阀。

4.1.7 调零。把旁压器垂直提高，直到使中腔的中点与量管零位相平，打开调零阀，并密切注意水位的变化，当水位下降到零时，立即关闭调零阀、量管阀和辅管阀，然后放下旁压器。

4.1.8 将旁压器放入钻孔中预定的试验深度，其深度以中腔中点为准。打开量管阀和辅管阀施加压力。

4.1.9 用高压氮气源加压时，接上氮气加压装置导管（手动加压装置则应关闭），把减压阀按逆时针方向拧到最松位置，打开气源阀，按顺时针方向调节减压阀，使高压降低到比所需最高试验压力大 100~200 kPa，然后缓慢地按顺时针方向调节调压阀并调到所需的试验压力。

4.1.10 手动加压时，先接上打气筒，关闭氮气加压阀，打开手动加压阀，用打气筒向贮气罐加压，使贮气罐内的压力增加到比所用最高试验压力大 100~200 kPa 以上。然后按顺时针方向缓慢旋转调节阀调到所需的试验压力。

4.1.11 加压等级一般为预计极限压力的 1/8~1/12，也可参照表 4.1.11 选用。

表 4.1.11 试验加压等级

土的工程特性	加压等级 (kPa)	
	临塑压力前	临塑压力后
淤泥、淤泥质土、流塑状态的粘质土、饱和或松散粉细砂	<15	≤30
软塑状态的粘质土、疏松的黄土、稍密很湿的粉细砂，稍密的中、粗砂	15~25	30~50
可塑至硬塑状态的粘质土，一般黄土，中密至密实很湿的粉细砂，稍密至中密的中、粗砂	25~50	50~100
坚硬状态的粘质土，密实的中、粗砂	50~100	100~200
中密至密实的碎石类土	≥100	≥200

4.1.12 各级压力下的相对稳定时间标准为 1 min 或 3 min。按下列时间顺序测记量管的水位下降值。

对 1 min 稳定时间标准：15、30、60 s。

对 3 min 稳定时间标准：1、2、3 min。

4.1.13 在任何情况下，扩张体积相当于量测腔的固有体积时，应立即终止试验。

4.1.14 试验结束后，采取以下方法使弹性膜恢复原状。

1 试验深度小于 2 m 时，把调压阀按逆时针方向拧到最松位置，即与大气相通，利用弹性膜的约束力回水至量管和辅管，当水位接近零时，即可关闭量管阀和辅管阀。

2 试验深度大于 2 m 时，打开水箱安全盖，再打开注水阀和中腔注水阀，利用试验压力使旁压器回水至水箱。

3 当需排净旁压器内的水时，可打开排水阀和中腔注水阀，利用试验压力排净旁压器内的水。

4 也可引用真空泵吸回水。

4.1.15 终止试验消压后，必须等 2~3 min 后才能取出旁压器。并仔细检查、擦洗、装箱。

4.1.16 当需进行下一试验点的测试时，重复上述步骤进行。

4.2 自钻旁压试验

4.2.1 试验点的布置原则参照本规程 4.1.3 的规定。

4.2.2 在所选定的试验点上，安装自钻旁压仪。利用自动切削装置切碎土体，用循环冲洗液将切碎的土屑输送到地面。同时将旁压器置放于所需试验的位置。

4.2.3 利用液压或气压参照本规程 4.1.8 至 4.1.12 的规定进行加压，并测记量管水位或传感器的输出值。

4.2.4 试验结束后，参照本规程 4.1.14 的方法使弹性膜恢复原状，取出旁压器。

5 计算和制图

5.0.1 压力和体积变形校正。

1 按式 (5.0.1-1) 计算校正压力：

$$p = p_m + p_w - p_i \quad (5.0.1-1)$$

式中 p ——校正后的压力，kPa；

p_m ——压力表读数，kPa；

p_w ——静水压力，kPa；

p_i ——弹性膜约束力，kPa，查弹性膜约束力校正曲线。

2 按式 (5.0.1-2) 校正变形量：

$$V = SA$$

$$S = S_m - \alpha(p_m + p_w) \quad (5.0.1-2)$$

式中 V ——校正后的体变量， cm^3 ；

S ——校正后的量管水位下降值，cm；

A ——量水管截面积， cm^2 ；

S_m ——量水管水位下降值，cm；

α ——仪器综合变形校正系数， cm/kPa ；

其余符号见本规程式 (5.0.1-1)。

5.0.2 用校正后的压力 p 和校正后的体变 V 绘制 $p \sim V$ 曲线,如图 5.0.2。也可绘制压力和量管水位变化曲线。

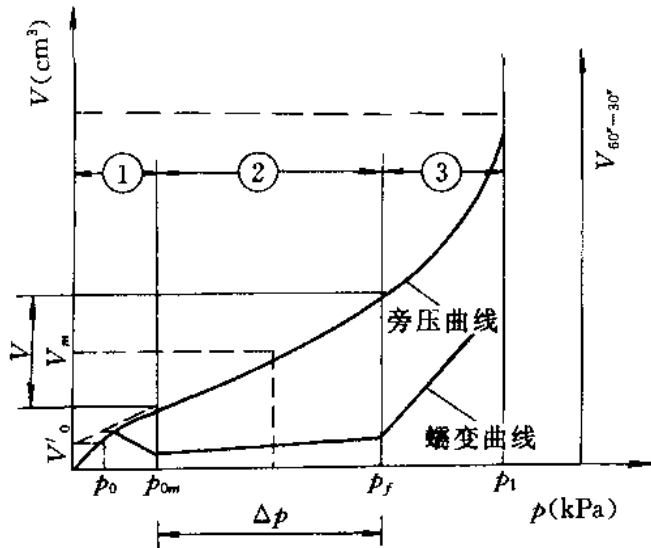


图 5.0.2 旁压曲线

作图比例: 纵坐标以 1 cm 代表体积变量 100 cm^3 ; 横坐标 (压力 p 值) 以 1 cm 代表 100 kPa 。或根据具体情况选择比例标准。图幅尺寸要求一般为 $10\text{cm} \times 10 \text{ cm}$ 。

5.0.3 从绘制的 $p \sim V$ 曲线上, 确定三个压力特征值, p_0 、 p_f 、 p_l 。

1 将旁压曲线直线段延长与纵坐标相交, 交点为 V_0 , 由 V_0 作与 p 轴平行线相交于曲线的一点, 其对应的压力为原位水平土压力 p_0 值。

2 取旁压曲线直线段的终点, 即曲线与直线段的第 2 个切点所对应的压力为临塑压力 p_f 值。

3 曲线过临塑压力后, 趋向于与纵轴平行的渐近线时, 其对应的压力为极限压力 p_l 值。

当从 $p \sim V$ 曲线上不能直接求出极限压力 p_l 值时, 可用曲线外推方法至最大体积增量值 $V_l (=V_c + 2V_0, V_c$ 为旁压器中腔初始体积, V_0 为孔穴体积与中腔初始体积的差值), 取对应 V_l 的压力为极限压力 p_l 。或用倒数曲线法求取。

5.0.4 从三个压力特征值确定承载力的基本值 f_0 。

1 临塑压力法：

$$f_0 = p_f - p_0 \quad (5.0.4-1)$$

2 极限压力法：

$$f_0 = (p_l - p_0)/F \quad (5.0.4-2)$$

式中 p_0 ——原位水平土压力，kPa；

F ——安全系数。

5.0.5 按式 (5.0.5) 计算不排水抗剪强度 c_u ：

$$c_u = p_f - p_0 \quad (5.0.5)$$

5.0.6 按式 (5.0.6) 估算侧压力系数 K_0 ：

$$K_0 = \frac{p_0}{z\gamma} \quad (5.0.6)$$

式中 γ ——土的容重，kN/m³；

z ——旁压器中心点至地面的土柱高度，m。

5.0.7 按式 (5.0.7) 计算旁压模量 E_m 值：

$$E_m = 2(1 + \mu)(V_c + V_m) \frac{\Delta p}{\Delta V} \quad (5.0.7)$$

式中 E_m ——由旁压试验确定的模量，称为旁压模量，kPa；

μ ——泊松比；

Δp ——旁压试验曲线上直线变形段的压力增量，kPa；

ΔV ——相应于 Δp 的体积变化增量，cm³；

V_m ——平均体积增量（取旁压试验曲线直线段两点间压力所对应的体积之和的一半）cm³；

V_c ——旁压器（中腔）初始体积，cm³。

6 记 录

6.0.1 本试验记录格式如表 6.0.1。

表 6.0.1 旁压试验记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
 试验孔编号 _____ 计算者 _____
 试验点编号 _____ 校核者 _____
 旁压器编号 _____ 日期 _____

孔口标高 (m)		试验深度 (m)		地下水位 (m)							
量管水面离孔口距离 (m)			旁压器中所受静水压力								
试验土层描述				备注							
压力 p (kPa)				量管水位下降值 (累计值) (cm)						体积增量 V (cm^3)	
压力表 读数	总压力	校正值	校正后	0min	1min	2min	3min	校正值	校正后		

附 a 旁压仪校准

a.1 目的和校准要求

a.1.0.1 试验前应对仪器进行两项校准：弹性模（包括铠装护套）的约束力校准和仪器综合变形校准。

a.1.0.2 新仪器首次使用，对两项校验均需进行。更新弹性膜（或护套），需进行弹性膜约束力的校准。

a.1.0.3 弹性膜一般进行 20 次试验后，需复校 1 次。对临塑压力 $p_f \leq 100$ kPa 土中试验时，每 10 次试验后，需复校 1 次。当气温较大变化或置放较长时间后，应重新校准。

a.1.0.4 接长或缩短导管，更新变形传感器，需进行仪器综合变形校准。

a.2 校验方式

a.2.1 弹性膜约束力校准

a. 2. 1. 1 将旁压器竖直，使旁压器中腔中点与量水管水位齐平，让弹性膜呈自由状态。

a. 2. 1. 2 先对弹性膜加压，使体变管达到 600 cm^3 （或量管相应的下降值）时的膨胀量，再退压使其收缩，反复胀缩 4 至 5 次，然后再进行校验。

a. 2. 1. 3 以加压等级为 10 kPa 逐级加压，并按本规程 4. 1. 12~4. 1. 14 规定的观测时间和终止条件的要求进行。

a. 2. 1. 4 对用变形传感器测定弹性膜径向变形时，应记录各级压力作用下的传感器的输出值。

a. 2. 2 仪器综合变形校准

a. 2. 2. 1 将旁压器放入校验管（用有机玻璃或钢管制作的专用设备）内，使旁压器受到径向限制。

a. 2. 2. 2 以加压等级为 100 kPa 逐级加压，按本规程 4. 1. 12 规定的观测时间测读量管的水位下降值。一般加压至 800 kPa 终止试验。

a. 3 制图

a. 3. 0. 1 对弹性膜约束力校准；绘制压力 p 值和量管水位下降 S

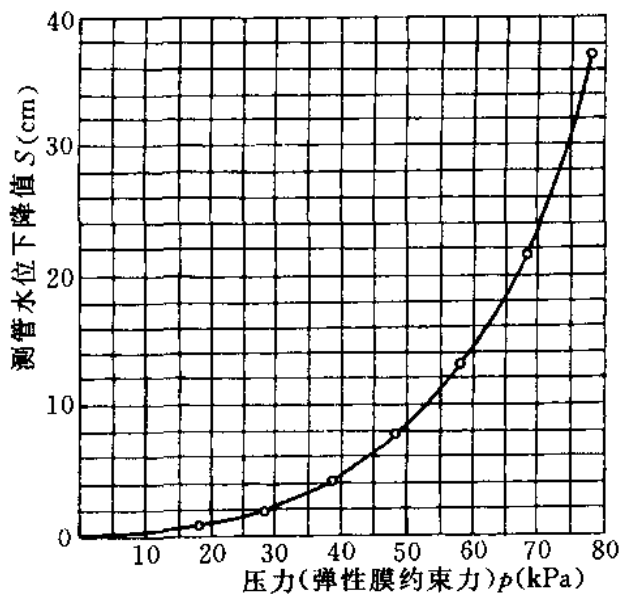


图 a. 3. 0. 1 弹性膜约束力校准曲线

值（或压力 p 和传感器输出值 δ ）的关系曲线，即为弹性膜约束力校准曲线，如图 a. 3. 0. 1。

a. 3. 0. 2 仪器综合变形校准；绘制压力 p 值和量管水位下降 S 值的关系曲线，如图 a. 3. 0. 2。图中直线的斜率 $\Delta S/\Delta p$ 为仪器的综合变形校准系数。

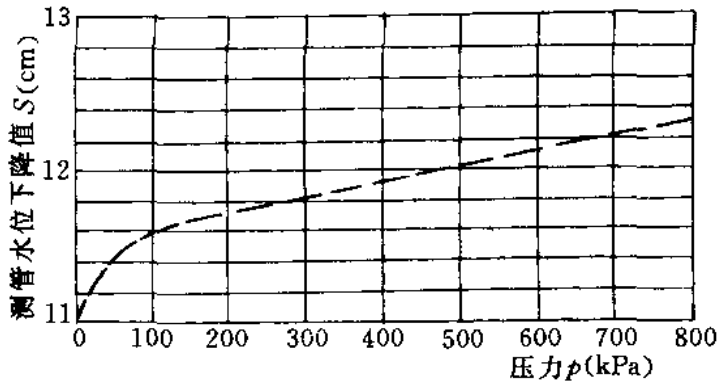


图 a. 3. 0. 2 仪器综合变形校准曲线

载 荷 试 验

SL237—049—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 载荷试验项目包括平板载荷试验和螺旋板载荷试验,它是在一定面积的承压板上向地基土逐级施加荷载,观测地基土的承受压力和变形的原位试验。其成果一般用于评价地基土的承载力;也可用于计算地基土的变形模量;现场测定湿陷性黄土地基的湿陷起始压力。

1.0.2 平板载荷试验适用于各类地基土。它所反映的相当于承压板下 1.5~2.0 倍承压板直径(或宽度)的深度范围内地基土的强度、变形的综合性状。

1.0.3 螺旋板载荷试验适用于粘土和砂土地基,用于深层或地下水位以下的土层。

2 引 用 标 准

GB/T15406—94《土工仪器的基本参数及通用技术条件》第二篇:原位测试仪器。

GBJ7—89《建筑地基基础设计规范》附录四。

3 平 板 载 荷 试 验

3.1 仪器设备

3.1.1 承压板:应具有足够的刚度。一般采用圆形或正方形钢质板;也可采用现浇或预制混凝土板。面积可采用 $0.25\sim 0.50\text{m}^2$,不应小于 0.1m^2 。

3.1.2 加荷装置:包括压力源、载荷台架或反力构架。

1 压力源：可用液压装置或重物，其出力误差不得大于全量程的 1%；安全过负荷率应大于 120%。

2 载荷台架或反力构架：必须牢固稳定、安全可靠，其承受能力不小于试验最大荷载的 1.5~2.0 倍。

3.1.3 沉降观测装置：其组合必须牢固稳定、调节方便。位移仪表可采用大量程百分表或位移传感器等，相应的分度值为 0.01 mm。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 加荷装置。

1 重物加荷装置的堆载物，应对每件堆载物的质量事先称量、编号，合理安排堆载顺序及位置。

2 千斤顶和测力计组成的加荷装置，应配套进行检定。

钢环测力计：应参照 JJG144—92《标准测力仪检定规程》检定。

负荷传感器：应参照 JJG391—85《负荷传感器试行检定规程》检定。

3.2.2 沉降观测仪表。

1 大量程百分表：应按 JJG379—95《大量程百分表检定规程》进行检定。

2 位移传感器应：按相应的有关检定规程进行检定。

3.3 操作步骤

3.3.1 在有代表性的地点，整平场地，开挖试坑。试坑底面宽度不小于承压板直径（或宽度）的 3 倍。试验前应保持试坑土层的天然状态。在开挖试坑及安装设备中，应将坑内地下水位降至坑底以下，并防止因降低地下水位而可能产生破坏土体的现象。试验前应在试坑边取原状土样 2 个，以测定土的含水率和密度。

3.3.2 设备安装参照图 3.3.2-1、图 3.3.2-2，其次序与要求如下：

1 安装承压板。安装承压板前应整平试坑面，铺约 1 cm 厚的中砂垫层，并用水平尺找平，承压板与试验面平整接触。

2 安放载荷台架或加荷千斤顶反力构架，其中心应与承压板中心一致。当调整反力构架时，应避免对承压板施加压力。

3 安装沉降观测装置。其固定点应设在不受变形影响的位置

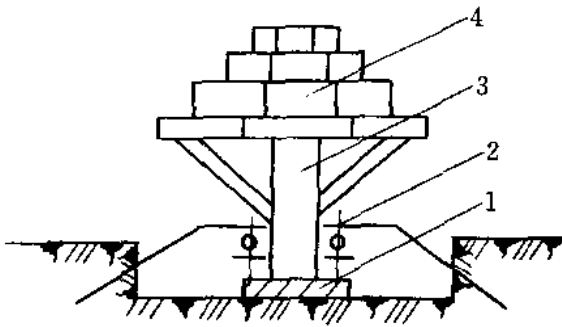


图 3.3.2-1 重物式装置示意图
1—承压板；2—沉降观测装置；
3—荷载台架；4—重物

处。沉降观测点应对称设置。

3.3.3 试验点应避免冰冻、曝晒、雨淋，必要时设置工作棚。

3.3.4 荷载一般按等量分级施加，并保持静力条件和沿承压板中心传递。每级荷载增量一般取预估试验土层极限压力的 $1/8 \sim 1/10$ 。当

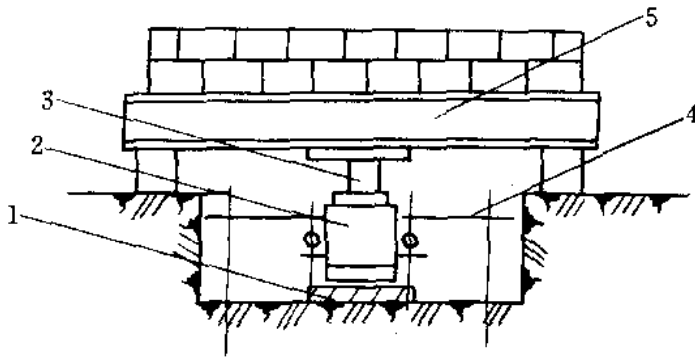


图 3.3.2-2 反力式装置示意图
1—承压板；2—加荷千斤顶；3—荷重传感器；
4—沉降观测装置；5—反力装置

不易预估其极限压力时，可按表 3.3.4 所列增量选用。

表 3.3.4 荷载增量表

试验土层特征	荷载增量 (kPa)
淤泥、流塑状粘质土、饱和或松散的粉细砂	≤ 15
软塑状粘质土、疏松的黄土、稍密的粉细砂	15~25
可塑~硬塑状粘质土、一般黄土、中密~密实的粉细砂	25~100
坚硬的粘质土、中粗砂、碎石类土、软质岩石	50~200

3.3.5 稳定标准：一般采用相对稳定法，即每施加一级荷载，待沉降速率达到相对稳定后再加下一级荷载。

3.3.6 应按时、准确观测沉降量。每级荷载下观测沉降的时间间

隔一般采用下列标准：

自加荷开始，按 10、10、10、15、15 min，以后每隔 30~60min 观测 1 次，直至 1 h 的沉降量不大于 0.1 mm 为止。

3.3.7 试验一般宜进行至试验土层达到破坏阶段终止。当出现下列情况之一时，即可终止试验。

- 在本级荷载下，沉降急剧增加，承压板周围出现裂缝和隆起。
- 在本级荷载下，持续 24 h 沉降速率加速或近似等速发展。
- 总沉降量超过承压板直径（或宽度）的 1/12。
- 当达不到极限荷载时，最大压力应达预期设计压力的 2.0 倍或超过第一拐点至少三级荷载。

3.3.8 当需要卸载观测回弹时，每级卸载量可为加载增量的 2 倍，历时 1 h，每隔 15 min 观测一次。荷载安全卸除后继续观测 3 h。

3.4 计算和制图

3.4.1 对原始数据检查、校对后，整理出荷载与沉降值、时间与沉降值汇总表。

3.4.2 绘制 $p \sim S$ 曲线，其比例尺一般按最终荷载与所对应的最大沉降量在图幅上之比以 0.9 : 1.0 ~ 1.0 : 1.2 为宜。 p 坐标单位为 kPa， S 坐标单位为 mm。如图 3.4.2。

3.4.3 特征值的确定。

1 当曲线具有明显直线段及转折点时，一般以转折点所对应的压力定为临塑荷载值（比例界限值）。

2 当曲线无明显直线段及转折点时，可按本规程 3.3.7 所列情况确定极限荷载值。

3.4.4 承载力基本值 f_0 的确定（按 GBJ7—89 规程）。

1 比例界限明确时，取该比例界限所对应的荷载值，即 $f_0 = p_f$ 。

2 当极限荷载能确定时（且该值小于比例界限荷

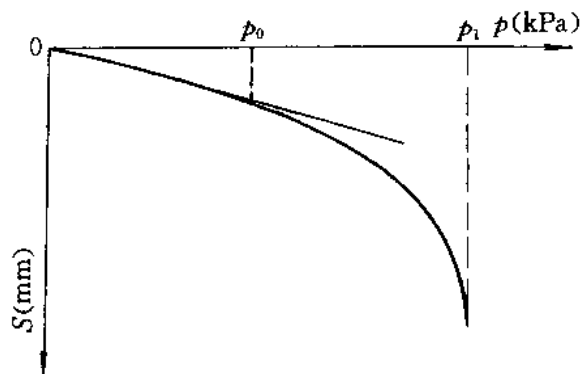


图 3.4.2 典型 $p \sim S$ 曲线

载值 1.5 倍时) 取极限荷载值的一半, 即 $f_0 = p_l/2$ 。

3 以沉降标准取值。对低压缩性土和砂土, 取 $s = (0.01 \sim 0.015)b$ 对应的荷载值; 对高压缩性土, 取 $s = 0.02b$ 对应的荷载值。

3.4.5 按下列两式计算变形模量:

$$E_0 = 0.79(1 - \mu^2)d \frac{p}{S} \text{ (承压板为圆形)} \quad (3.4.5-1)$$

$$E_0 = 0.89(1 - \mu^2)a \frac{p}{S} \text{ (承压板为方形)} \quad (3.4.5-2)$$

式中 E_0 ——试验土层的变形模量, kPa;

p ——施加的压力, kPa;

S ——对应于施加压力的沉降量, cm;

d ——承压板的直径, cm;

a ——承压板的边长, cm;

μ ——泊松比。

3.5 记录

3.5.1 本试验的记录格式如表 3.5.1。

表 3.5.1 载荷试验记录表

工程名称 _____ 承压板面积 _____ 记录者 _____
 试验地点 _____ 试验方法 _____ 计算者 _____
 试验深度 _____ 气候条件 _____ 校核者 _____
 土层性状 _____ 试验日期 _____

加荷时间	读数时间	荷载 (kPa)	沉 降 量 (mm)								平均沉降量 (mm)	累积沉降量 (mm)	备注
			A		B		C		D				
			读数	沉降	读数	沉降	读数	沉降	读数	沉降			

4 黄土浸水载荷试验

4.1 仪器设备

4.1.1 承压板: 面积不宜小于 0.5 m^2 。其余应符合本规程 3.1.1

的规定。

4.1.2 加荷装置：应符合本规程 3.1.2 的规定。

4.1.3 沉降观测装置：应符合本规程 3.1.3 的规定。

4.2 仪器设备的检定和校准

4.2.1 加荷装置：应按本规程 3.2.1 的规定进行检定。

4.2.2 沉降观测仪表：应按本规程 3.2.2 的规定进行检定。

4.3 操作步骤

4.3.1 单线法。

1 整平场地，开挖试坑。应在同一土层内平行挖 3 个试坑，间距不大于 6 m。

2 设备安装应按本规程 3.3.2 的规定进行。

承压板的安装除按本规程 3.3.2 之 1 规定进行外，在承压板以外的试坑面积需铺设 5~10 cm 厚的砂砾石滤层。

沉降观测的装置固定点不得受浸水影响。

3 施加荷载增量取预估湿陷起始压力的 1/5，或采用 10~20kPa。试验终止压力不宜小于 200 kPa。

4 按相对稳定法进行天然湿度下的加载试验，直到预估的湿陷起始压力。

5 向试坑注水。试坑内的水头高度应高于滤层顶面 3 cm。并按相对稳定法的观测要求观测浸水沉降量（湿陷量），直至每小时的沉降量不大于 0.1 mm 为止。

6 本规程按 4.3.1 之 4 和之 5 规定，选用大于或小于预估湿陷压力 50 kPa 压力下，进行其余两个试坑的试验。

4.3.2 双线法。

1 按本规程 4.3.1 之 1 的规定，在同一土层内平行开挖 2 个试坑。

2 按本规程 4.3.1 之 2 的规定安装试验设备。

3 按本规程 4.3.1 之 3 的规定确定加载等级。

4 一个试坑按相对稳定法在天然湿度下进行加载试验；另一个试坑在预先浸水饱和后再按相对稳定法进行加载试验。

4.3.3 饱水单线法。

- 1 按本规程 4.3.1 之 1 规定平整场地，开挖 1 个试坑。
- 2 按本规程 4.3.1 之 2 的规定安装试验设备。
- 3 按本规程 4.3.1 之 3 的规定确定荷载等级。
- 4 向试坑内注水，使 3.5 倍承压板直径（或宽度）的深度范围内的土层达到饱和。饱和标准采用饱和含水率。
- 5 按相对稳定法进行加荷试验。

4.4 计算和制图

4.4.1 绘制 $p \sim S$ 曲线，然后在图上取不同压力下的湿陷量 (S_{sh} 值)，并绘出 $p \sim S_{sh}$ 曲线，如图 4.4.1-1、图 4.4.1-2。

4.4.2 一般取 $p \sim S_{sh}$ 曲线转折点对应的荷载作为湿陷起始压力 (p_{sh})。当曲线上的转折点不明显时，可取浸水下沉量与承压板宽

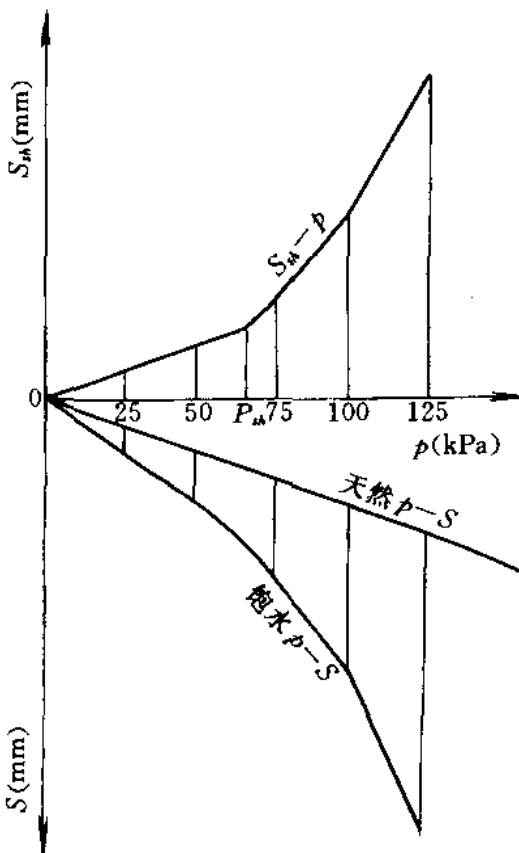


图 4.4.1-1 双线法求湿陷起始压力

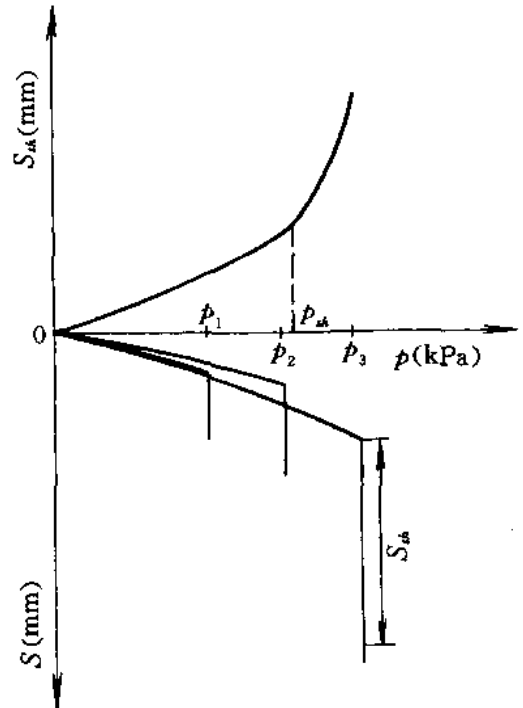


图 4.4.1-2 单线法求湿陷起始压力

度之比 $\left(\frac{s}{b}\right)$ 等于 0.02 所对应的荷载作为湿陷起始压力。

5 螺旋板载荷试验

5.1 仪器设备

由螺旋承压板、加荷装置、位移观测装置组成，如图 5.1。

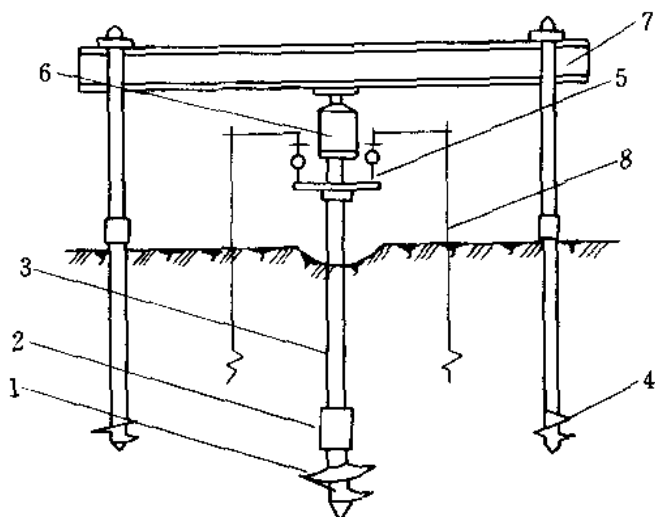


图 5.1 螺旋板载荷试验装置示意图

1—螺旋承载板；2—测力传感器；3—传力杆；4—反力地锚；5—位移计；6—油压千斤顶；7—反力钢梁；8—位移固定锚

5.1.1 螺旋承压板：螺旋板尺寸参数及测力传感器的最大允许压力宜采用 GB/T15604—94 标准的 7.6 规定。

5.1.2 加荷装置：包括压力源和反力构架，其技术条件应符合本规程 3.1.2 的规定。

5.1.3 位移观测装置应符合本规程 3.1.3 的规定。

5.2 仪器设备的检定和校准

5.2.1 测力传感器：应参照 JJG391—85《负荷传感器试行检定规程》进行检定。

5.2.2 位移观测仪表：按本规程 3.2.2 规定进行检定。

5.3 操作步骤

5.3.1 将试验场地平整，设置反力装置及位移计的固定地锚。

5.3.2 选择适宜尺寸的螺旋承压板旋钻至预定深度。旋钻时应控制每旋转一周钻进一螺距，尽可能减小对土体的扰动程度。

5.3.3 安装加荷千斤顶，其中心应与螺旋承压板中心一致；安装位移计，并调整零点。

5.3.4 按下列方式进行加荷。

1 采用应力控制式时，按等量分级施加，荷载增量按本规程 3.3.4 的规定，每级荷载确保稳压。

2 采用应变控制式时，应连续加荷，控制沉降速度为 $0.25 \sim 2.0 \text{ mm/min}$ 。

5.3.5 按本规程 5.3.4 规定加荷时，应进行沉降观测。应力控制式加荷沉降观测的时间顺序宜采用 0.10, 0.25, 1.00, 2.25, 4.00min 等按 \sqrt{t} 读取，直至沉降基本稳定，再加下一级荷载，该时间顺序用于绘制 $\sqrt{t} \sim S$ 曲线；应变控制式加荷沉降观测每隔 30 s 等间距读取 1 次，试验至土体破坏。

5.3.6 土体破坏后，卸除加载和位移观测装置，再将螺旋承压板旋钻至下一个预定的试验深度，按本规程 5.3.3 至 5.3.5 的规定进行试验。

5.4 计算和制图

5.4.1 按本规程 3.4.1 和 3.4.2 的规定，进行计算并绘制 $p \sim S$ 曲线，如图 5.4.1。

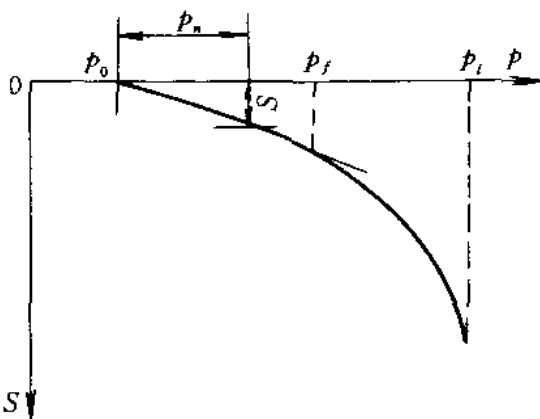


图 5.4.1 $p \sim S$ 曲线

5.4.2 根据各级荷载下的沉降 S 与时间 t 的数据绘制 $S \sim \sqrt{t}$ 曲线，如图 5.4.2。

5.4.3 特征值的确定。

1 原位有效自重压力 p_0 ：取 $p \sim S$ 曲线的直线段与 p 轴的交点作为 p_0 值。

2 临塑压力 p_f ：相应于 $p \sim S$ 曲线的直线段终点的压力。

3 极限压力 p_l : 相应于 $p \sim S$ 曲线末尾直线段起点的压力。

4 固结度达 90% 所需时间 t_{90} : 以 $S \sim \sqrt{t}$ 曲线初始直线段与沉降坐标 (纵坐标) 的交点作为理论零点, 其延长段交于沉降稳定值的渐近线 (横坐标) 上, 如图 5.4.2 的 x 段, 再作与初始直线斜率 1.13 倍的直线, 该直线与 $S \sim \sqrt{t}$ 曲线的交点所对应的时间为 t_{90} 。

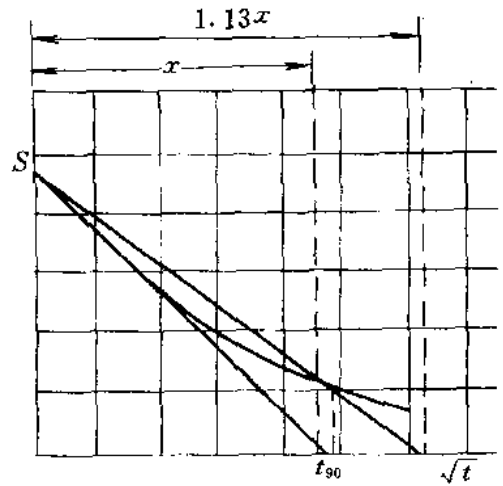


图 5.4.2 $S \sim \sqrt{t}$ 曲线

5.4.4 按式 (5.4.4-1) 计算变形模量:

$$E_{sc} = m p_a \left(\frac{p}{p_a} \right)^{1-a} \quad (5.4.4-1)$$

根据 $p \sim S$ 曲线可以求得变形模量系数 m :

$$m = \frac{A}{S} \frac{(p - p_0)}{p_a} D = \frac{A}{S} \frac{p_n D}{p_a} \quad (5.4.4-2)$$

式中 E_{sc} ——螺旋板试验土的变形模量, kPa;

p ——施加的压力值, 取直线段内任一压力值, kPa;

p_0 ——原位有效自重压力, kPa;

p_a ——标准压力, =100kPa;

S ——对应 p 的沉降量, cm;

D ——螺旋承压板直径, cm;

A ——无量纲沉降系数, 与 p_0 、 p_n 有关, 查图 5.4.4;

a ——应力指数, 超固结饱和土取 1; 砂与粉土取 1/2; 正常固结饱和粘土、取 $a=0$;

m ——变形模量系数, 对正常饱和粘土一般为 5~50。

5.4.5 按式 (5.4.5) 估算径向固结系数:

$$C_h = T_{90} \frac{R^2}{t_{90}} = 0.335 \frac{R^2}{t_{90}} \quad (5.4.5)$$

式中 C_h ——固结系数， cm^2/s ；
 R ——螺旋承压板半径， cm ；
 t_{90} ——固结度达 90% 的所需时间， s ；
 T_{90} ——相应于 90% 固结度的时间因数， $T_{90}=0.335$ 。

5.1 记录

5.5.1 本试验记录格式如本规程表 3.5.1。

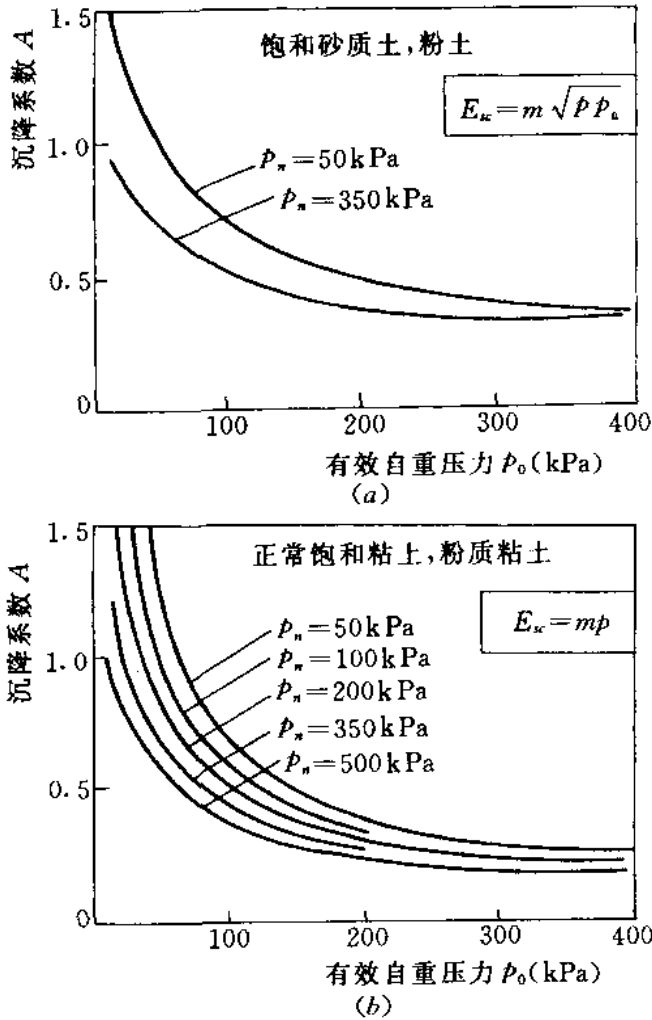


图 5.4.4 沉降系数 A 值

波 速 试 验

SL237—050—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 依据弹性波在岩土体内的传播理论,测定剪切波(S 波)和压缩波(P 波)在地层中的传播时间,根据已知的相应传播距离,计算出地层中波的传播速度,间接推导出岩土体在小应变($10^{-4} \sim 10^{-6}$)条件下的动力参数。

1.0.2 波速试验分跨孔法、单孔波速法(检层法)和面波法。

1 跨孔法以一孔为激振孔,另布置2孔或3孔作检波孔,测定直达的压缩波初至和第一个直达剪切波的到达时间,计算传播速度。常用于多层体系地层中。

2 单孔波速法是在同一孔中,在孔口设置振源,孔内不同深度处固定检波器,测出孔口振源所产生的波传到孔内不同深度处所需的时间,计算传播速度。常用于地层软硬变化大和层次较少或岩基上为覆盖层的地层中。

3 面波法,本规程采用稳态振动法。测定不同激振频率下瑞利波(R 波)速度弥散曲线(即 R 波速与波长关系曲线),可以计算一个波长范围内的平均波速。当激振频率在 $20 \sim 30$ Hz以上,测试深度在 $3 \sim 5$ m。一般用于地质条件简单、波速快的土层下伏波速慢的土层的场地。

1.0.3 本规程适用于各类岩土体。

2 引 用 标 准

GB50021—94《岩土工程勘察规范》波速测试。

3 仪器设备

3.1 仪器设备

3.1.1 激振器：可采用机械震源、爆炸震源和电火花等，但主要采用能正反向重复激振的井下剪切波锤。面波法采用电磁式或机械式激振器。

3.1.2 检波器：采用三分量（相互成正交）检波器，其谐振频率一般为 $8\sim 27\text{Hz}$ 。检波器必须置于密封防水的无磁性圆筒内。

3.1.3 放大器：采用多通道、低噪声放大器（噪声水平应低于 $2\mu\text{V}$ ），各通道必须具有一致的相位特性（相位偏差应小于 0.1ms ），并配有可调的增益装置（电压增益应大于 80dB ，不能采用信号滤波装置）。

3.1.4 记录器：可采用各种型号的示波记录器或多通道工程地震仪。记录准确度应在 $1\sim 2\text{ms}$ 。

3.1.5 测斜仪：应能测量 $0\sim 360^\circ$ 的方位角及 $0\sim 30^\circ$ 的倾角。倾角测量允许误差为 $\pm 0.1^\circ$ 。

3.1.6 套管：内径为 $76\sim 85\text{mm}$ ，壁厚为 $6\sim 7\text{mm}$ 的硬聚氯乙烯塑料管。

3.1.7 零时触发器：采用压电晶体触发器或机械触发装置，其升压时间延迟应不大于 0.1ms 。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 电磁式和机械式激振器：应参照 JJG89—87《机械式振动试验台试行检定规程》进行检定。

3.2.2 各种型式的检波器：应按有关检定规程进行检定。

3.2.3 放大器：应按产品技术条件的试验方法进行检定。

3.2.4 记录器：应参照 JJG262—81《通用示波器试验检定规程》进行检定。

3.2.5 测斜仪：应参照 DZ0022—91《测斜仪通用技术条件》所规定的方法进行校验。

4 操作步骤

4.1 跨孔波速法

4.1.1 试验孔布置。

1 试验孔应尽量布置在地表高程相差不大的地段,若地表起伏较大,必须准确测出孔口的高程。

2 一组试验布置3孔,试验孔的间距,在土层中一般为2~4 m;在岩层中为8~10 m。在保证直达波首先到达检波器的前提下,孔距可根据地层厚度、测试要求适当调整。

试验布置如图4.1.1。

4.1.2 先将一组试验孔一次全部钻好,接着在孔内安置好塑料套管,并在孔壁与套管的间隙内灌浆或用砂充填。

4.1.3 灌浆前按照1:1:6.25的比例将水泥、膨润土和水搅拌成混合物。然后采用移动式循环高压泥浆泵,通过放到孔底的灌浆管,从孔底向上灌浆,直到灌满孔壁与套管的间隙,并测定孔口溢流出的泥浆浓度(或密度)与预先搅拌的泥浆浓度(或密度)相等为止。

4.1.4 待灌浆或填砂后3~6 d,方可进行测试。

4.1.5 为了准确地算出各测点的直达波传播距离,当试验孔深度大于15 m时,必须用测斜仪对每个试验孔进行倾斜度测量。先从上到下以测试点相同的间距连续进行,然后从孔底向上进行复测,并将测斜仪反转180°重测一次。

4.1.6 将井下剪切波锤利用气囊,或用弹簧、机械扩展装置等方法固定。然后拉动上、下质量块,上、下冲击固定锤体,使土层水平向产生S波,用放入孔内贴壁式三分量检波器由上往下逐点测量。从孔口往下0.4倍孔距深度处为第1个测点,然后以1~2m的间距连续测量。每个地层一般要有2~5个测点,每个测点需测量2~4次。每次测试时,振源中心和检波器中心须在同一高程上。

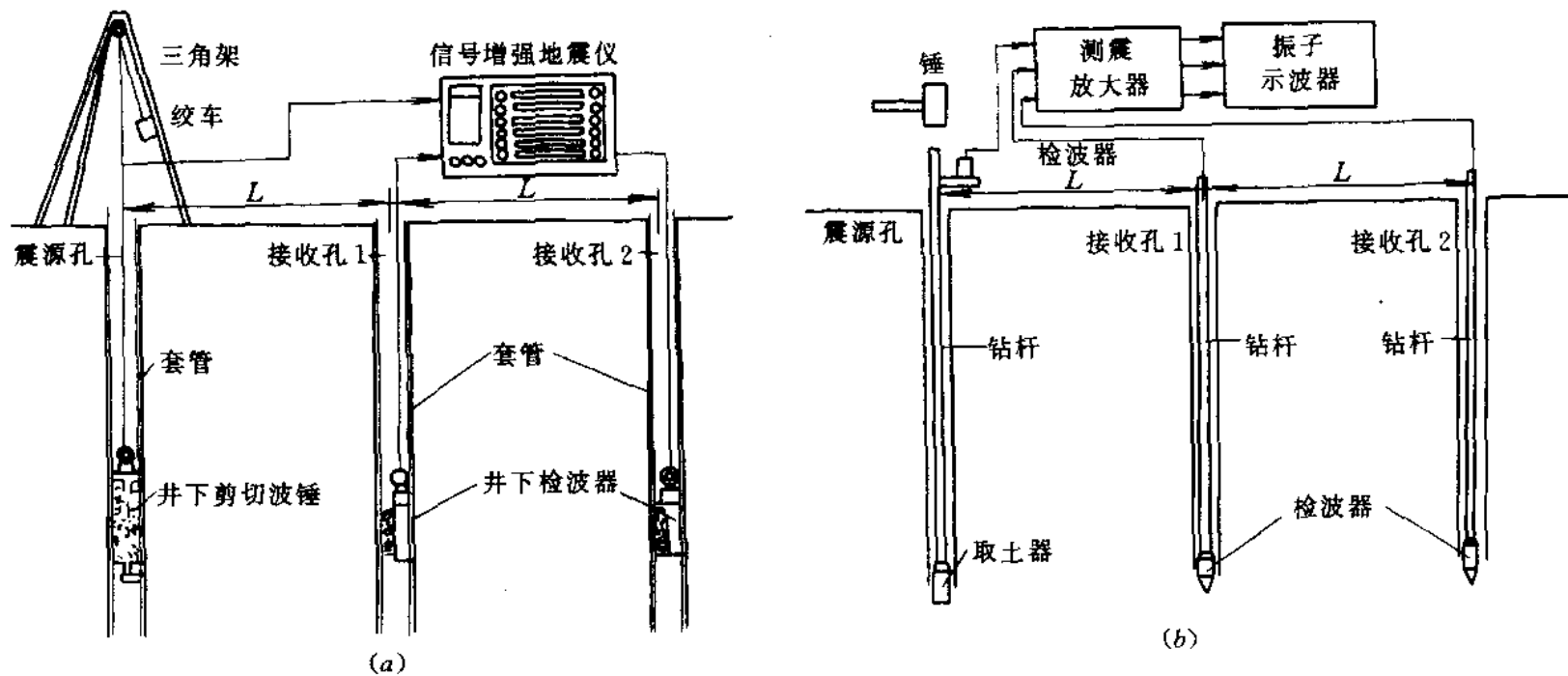


图 4.1.1 试验布置示意图

(a) 下套管; (b) 不下套管

4.1.7 若用几台钻机分段钻进，待钻至预定测试深度后，提出钻具，将振源装置和检波器分别放入各钻孔底，进行测试。采用此方法时，为确保振源装置和检波器顺利放到所测深度处，孔底残余扰动土应小于 10 cm 厚，否则应重新清除孔底浮土。

4.2 单孔波速法

4.2.1 在所选定的试验点钻测试孔，测试孔应垂直，并记录土层状态。

4.2.2 在距孔口 1.0~3.0 m 处置放一长度为 2~3 m 的混凝土板或木板。在木板上应放置约 500 kg 的重物。用锤沿板纵轴从两个相反方向水平敲击板端，使地层产生水平剪切波。

4.2.3 将检波器用气囊，或用弹簧、机械扩展装置等方法固定在孔内不同深度接受剪切波。

4.2.4 测试应自下而上进行，在一个试验深度上，应重复试验多次。

4.3 面波法（稳态振动）

4.3.1 选择试验场地，并进行整平。

4.3.2 以振源作为测线零点，在振源一边布置 2 个或 3 个检波器，如图 4.3.2。

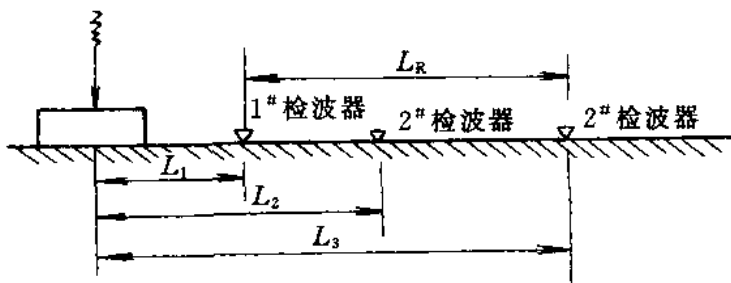


图 4.3.2 面波法（稳定振动）布置图

4.3.3 选择适合的激振频率 f ，开启激振器，由拾振器接受瑞利波。

4.3.4 当两检波器接受到的振动波有相位差时，表明两检波器的间距 Δl 不等于瑞利波波长 L_R ，因此，移动其中任一检波器，使两

检波器记录的波形同相位 (2π), 然后在同一频率下, 移动检波器至 2 个波长, 3 个波长处, $l=L_R, 2L_R, 3L_R\cdots$, 进行测试。试验应重复多次, 一般 5 组即可。

5 资料整理和计算

5.1 波形识别

5.1.1 首先在各测点的原始波形记录上识别出压缩波 (P 波) 序列和剪切波 (S 波) 序列。第 1 个起跳点即为压缩波的初至。然后, 根据下列特征识别出第 1 个剪切波的到达点。

1 波幅突然增至为压缩波幅值 2 倍以上。如图 5.1.1(a)。

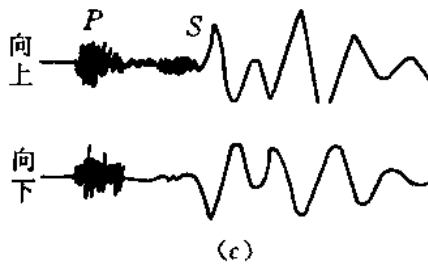
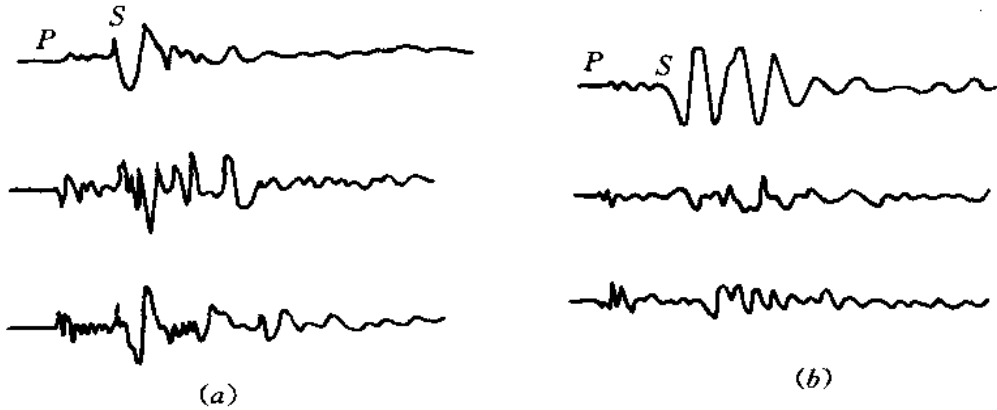


图 5.1.1 P 、 S 波的识别

2 周期比压缩波周期至少增加 2 倍以上, 如图 5.1.1(b)。

3 若采用井下剪切波锤作振源, 一般压缩波的初至极性不发生变化, 而第一个剪切波到达点的极性产生 180° 的改变, 所以, 极

性波的交点即为第一个剪切波的到达点，如图 5.1.1 (c)。

5.2 计算和制图

5.2.1 正确计算激振点与检波点之间的距离。对跨孔法如孔有偏斜，应对孔距进行校准。

5.2.2 按下列公式计算压缩波、剪切波和瑞利波的传播速度，其误差应在 5% 以内：

$$V_p = \frac{L_p}{t_p} \quad (5.2.2-1)$$

$$V_s = \frac{L_s}{t_s} \quad (5.2.2-2)$$

$$V_R = \frac{L_R}{t_R} = \frac{L_R}{\frac{2\pi}{\omega}} = L_R f \quad (5.2.2-3)$$

式中 V_p 、 V_s 、 V_R ——分别为压缩波、剪切波和瑞利波的波速，m/s；

L_p 、 L_s 、 L_R ——分别为压缩波、剪切波和瑞利波的传播距离（激振点与检波点的距离），m；

t_p 、 t_s 、 t_R ——分别为各波从激振点传至检波点所需的时间，s；

ω ——简谱波的圆频率，rad/s；

f ——激振频率， s^{-1} 。

5.2.3 按下列公式计算动剪切模量、动弹性模量和泊松比：

$$G_d = \rho V_s^2 \quad (5.2.3-1)$$

$$E_d = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (5.2.3-2)$$

或
$$E_d = 2\rho V_s^2 (1 + \mu_d) \quad (5.2.3-3)$$

$$E_d = \frac{\rho V_p^2 (1 + \mu_d) (1 - 2\mu_d)}{1 - \mu_d} \quad (5.2.3-4)$$

$$\mu_d = \left[\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 2 \right] / \left[2 \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 2 \right] \quad (5.2.3-5)$$

式中 V_p ——地层的压缩波速度, m/s;

V_s ——地层的剪切波速度, m/s;

G_d ——地层的动剪切模量, kPa;

E_d ——地层的动弹性模量, kPa;

ρ ——地层的密度, kg/m^3 , $\text{kN} \cdot (\text{s}^2/\text{m}^4)$;

μ_d ——地层的动泊松比。

5.2.4 根据整理和计算出的数据, 绘出 V_p 、 V_s 、 G_d 、 E_d 值与深度变化的关系曲线, 如图 5.2.4。

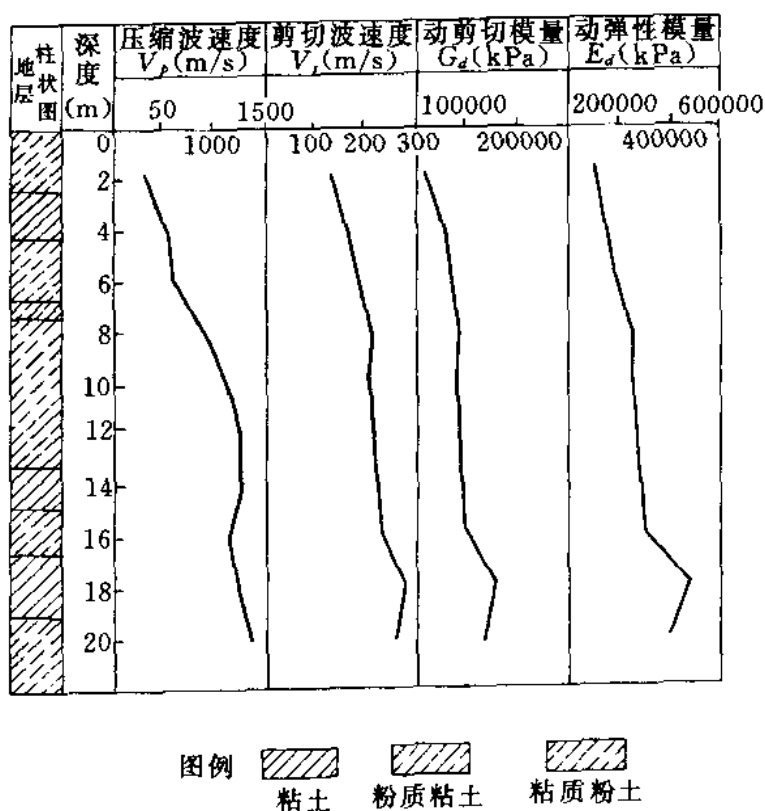


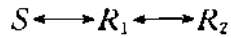
图 5.2.4 V_p 、 V_s 、 G_d 、 E_d 随深度变化曲线

6 记 录

6.0.1 本试验记录格式如表 6.0.1、表 6.0.2。

表 6.0.1 波速试验记录表 (跨孔法)

工程名称 _____ 试验者 _____
 钻孔排列方位 _____ 计算者 _____
 日期 _____ 校核者 _____



深度 (m)	土层名称	测斜后的实际水平距离			波的传播时间 (ms)						波速值 (m/s)							
		$S-R_1$	$S-R_2$	R_1-R_2	$S-R_1$		$S-R_2$		R_1-R_2		$S-R_1$		$S-R_2$		R_1-R_2			
					t_p	t_s	t_p	t_s	t_p	t_s	V_p	V_s	V_p	V_s	V_p	V_s		

表 6.0.2 波速试验记录表 (面波法)

工程名称 _____ 试验者 _____
 试验地点 _____ 计算者 _____
 日期 _____ 校核者 _____

激振频率 $f (s^{-1})$	检波器与振源间距离 (m)			波 长 (m)	波速值 $V = L_R f$ (m/s)
	$s-l_1$	$s-l_2$	$s-l_3$	$L_R = l_3 - l_1$	

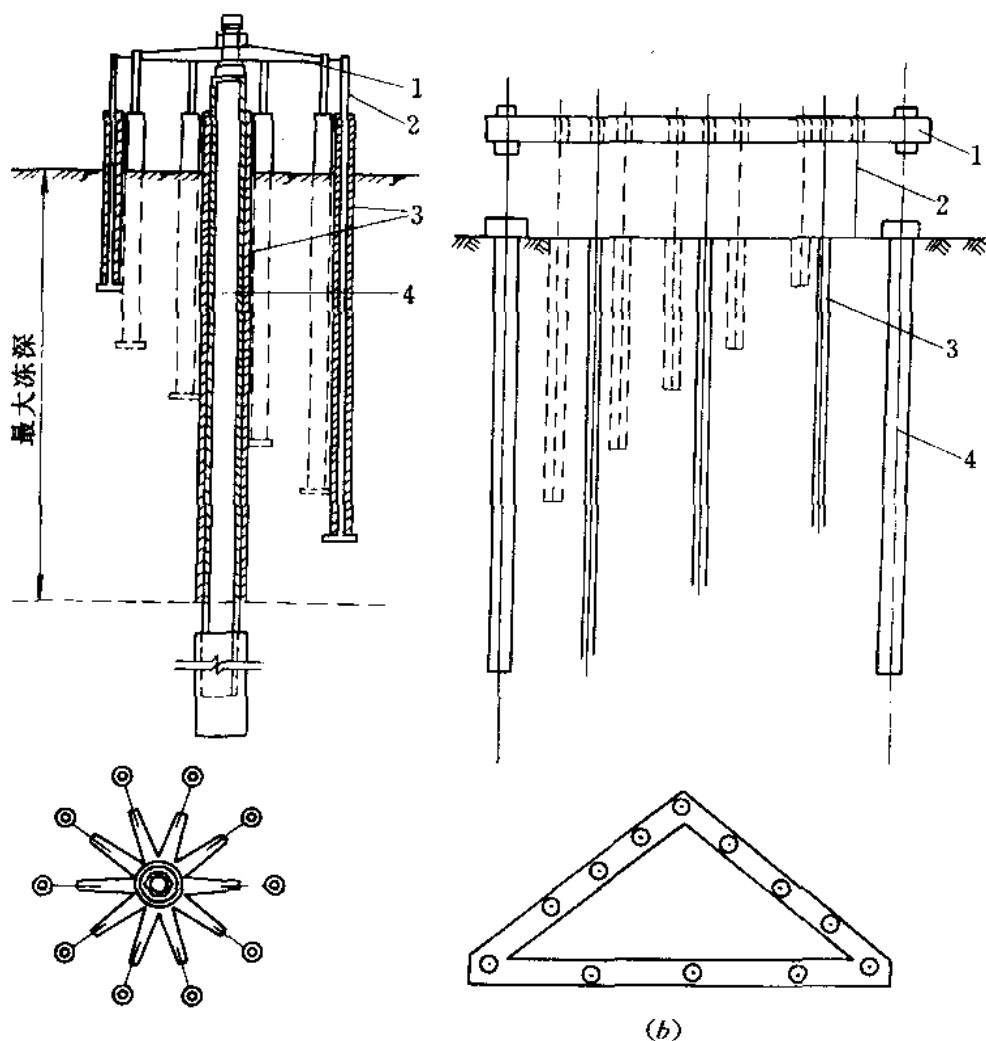
原位冻胀量试验

SL237—051—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 本试验的目的是采用埋设分层冻胀仪,现场测定天然条件下土体在冻结过程中沿深度的冻胀量。

1.0.2 本规程适用于粘质土和砂质土的地基。



(a)

图 2.1.1 分层冻胀仪示意图

1—基准盘(梁); 2—测杆; 3—套管; 4—固定桩(杆)

2 仪器设备

2.1 仪器设备

2.1.1 分层冻胀仪：可采用图 2.1.1(a)或图 2.1.1(b)的形式。

2.1.2 冻深器：具有套管的水位管。

2.1.3 测尺：分度值 1 mm。

2.1.4 地下水位管及测钟。

2.1.5 $\varphi 5$ cm 土钻及相应工具。

2.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 测尺：应按 JJG1—89《钢直尺检定规程》进行检定。

3 操作步骤

3.0.1 选择有代表性的场地。地表应整平。在地表开始冻结前埋设冻胀仪。

3.0.2 冻胀仪测杆分层埋设的间距可取 20~30 cm，地表必须设一个测点，最深一点应达到最大冻深线。各测杆之间的水平埋设距离应不小于 30 cm。

3.0.3 测杆应采用钻孔埋设。孔口应加盖保护。当地下水位处于冻结层内时，测杆与套管之间的空隙必须用工业凡士林或其他低温下不冻的材料充填。

3.0.4 架设基准盘（梁）的固定杆在最大冻深范围内必须加设套管。其打入最大冻深线以下土中的深度应不小于 1 m。

3.0.5 基准盘（梁）距冻前地面的架设高度应大于 40 cm。

3.0.6 在冻胀仪附近埋设冻深器和地下水位观测管。

3.0.7 冻胀量的测量可采用分度值为 1 mm 的钢尺。在地表开始冻结前，应测记各测杆顶端至基准盘（梁）上相应固定点的长度，作为起始读数。

3.0.8 冻结期间可每隔 1~2 日测记 1 次。融化期可根据需要确

定测次。

3.0.9 观测期间宜用水准仪每隔半个月左右校核一次基准盘（梁）固定杆、冻深器、地下水位管顶端的高程变化，进行各项测值必要的修正。

4 计算和制图

4.0.1 按式（4.0.1）计算平均冻胀率：

$$\eta = \frac{\Delta h}{H_f} \times 100 \quad (4.0.1)$$

式中 η ——平均冻胀率，%；

Δh ——地表总冻胀量，cm；

H_f ——冻深，以冻结前地面算起的最大冻深，cm。

4.0.2 绘制平均冻胀量、冻深与时间的关系曲线，如图 4.0.2。

4.0.3 以冻深为纵坐标，平均冻胀量、冻胀率为横坐标，绘制 $H_f \sim \Delta h \sim \eta$ 关系曲线，如图 4.0.3。

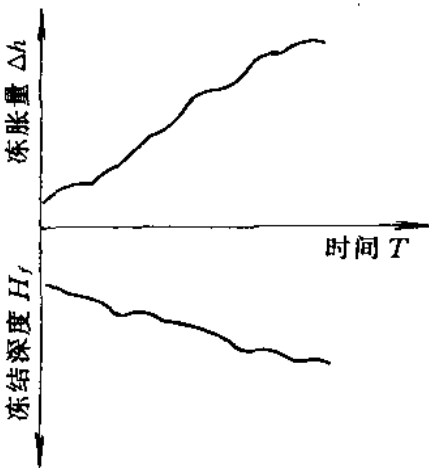


图 4.0.2 冻胀过程线

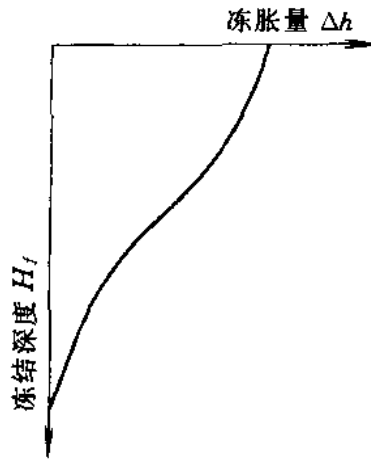


图 4.0.3 $H_f \sim \Delta h$ 关系曲线

5 记录

5.0.1 本试验记录格式如表 5.0.1。

表 5.0.1 冻胀量试验记录表

工程名称 _____

观测者 _____

试验地点 _____

计算者 _____

试验日期 _____

校核者 _____

时间	温度及 冻胀量	深 度 (cm)						地下水位 (m)	冻 深 (m)		冻胀率 (%)
		0	20	40	60	80	100		地温计	冻深器	
	温度 (C)										
	冻胀量(cm)										

原位冻土融化压缩试验

SL237—052—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 本试验的目的是在原状冻土层上进行融化压缩试验,用以计算融沉系数及融化压缩系数。

1.0.2 本规程适用于除漂石以外的其他各类土形成的地层。

2 仪器设备

2.1 仪器设备

试验装置由内热式传压板、加荷系统(包括反力架)、沉降量测系统、温度量测系统组成,如图2.1。

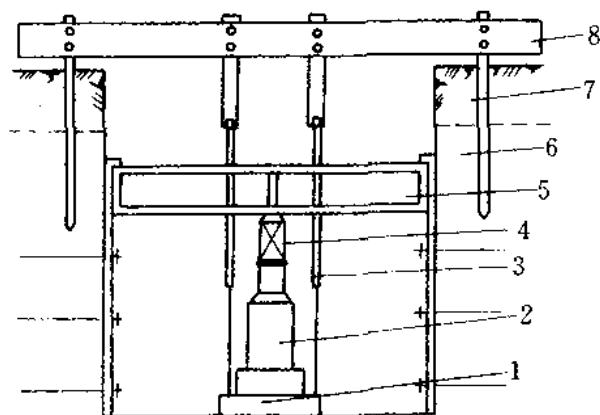


图 2.1 现场原位融化压缩试验示意图

1—热压模板;2—千斤顶;3—变位测针;4—压力传感器;5—反压横梁;6—冻土;7—融土;8—测量支架

2.1.1 内热式传压板:传压板可取圆形或方形,中空式平板。应有足够刚度,承受上部荷载时不发生变形。面积宜不小于 5000cm^2 ,如图2.1.1。

2.1.2 加热系统：传压板加热可用电热或水（汽）热，加热应均匀，加热温度不应超过 90°C 。传压板周围应形成一定的融化圈，其宽度宜等于或大于传压板直径的 0.3 倍。

2.1.3 加荷系统：加荷方式可用千斤顶或重物。当冻土的总含水率超过液限时，加荷装置的重量应等于或小于传压板底面高程处的上覆压力。

2.1.4 沉降量测系统：沉降量测可采用大量程百分表或位移传感器，其量测准确度应为 0.1 mm 。

2.1.5 温度量测系统：温度量测系统可由热电偶和数字电压表组成。量测准确度应为 0.1°C 。

2.2 仪器设备的检定和校准

2.2.1 千斤顶的压力表：应按 JJG52—87《弹簧管式一般压力表、压力真空表及真空表检定规程》进行检定；经检定合格后，与千斤顶配套，参照 JJG144—92《标准测力仪检定规程》进行综合检定。

2.2.2 大量程百分表、位移传感器：应按 JJG379—95《大量程百分表检定规程》进行检定。

2.2.3 热电偶：可按 JJG368—84《工作用铜—康铜热电偶检定规程》进行检定。

数字电压表：参照 JJG250—90《电子电压表检定规程》检定。

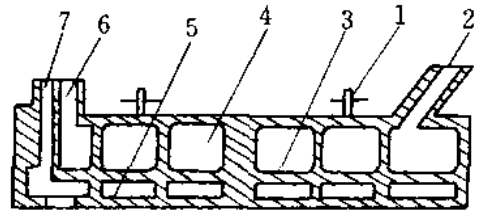


图 2.1.1 热压模板示意图
1—固定千斤顶螺丝；2—加热孔；
3—热压模板；4—储水腔；5—透
水板；6—排水孔；7—加水孔

3 操作步骤

3.0.1 对试验场地应进行冻结土层的岩性和冷生构造的描述，并取样进行其物理性试验。

3.0.2 仔细开挖试坑，平整试坑底面。试坑底面积应不小于

2m×2 m。必要时应进行坑壁保护。

3.0.3 在传压板的边侧钻孔,孔径3~5 cm,孔深宜为50 cm。将5支热电偶测温端自下而上每隔10 cm逐个放入孔内,并用粘质土夯实填孔。

3.0.4 坑底面铺砂找平。铺砂厚度应不大于2 cm。将传压板放置在坑底中央砂面上。

3.0.5 安装加荷装置,应使加荷点处于传压板中心部位。

3.0.6 在传压板周边等距安装3个位移计。

3.0.7 进行安全和可靠性检查后,向传压板施加等于该处上履压力(不小于50 kPa),直至传压板沉降稳定后,调整位移计至零读数,作好记录。

3.0.8 接通电(热)源,连接测温系统,使传压板下和周围冻土缓慢均匀融化。每隔1 h测记1次土温和位移。

3.0.9 当融化深度达到25~30 cm时,切断电(热)源停止加热。用钢钎探测一次融化深度,并继续测记土温和位移。当融化深度接近40 cm(0.5倍传压板直径)时,每15 min测记一次融化深度。当0℃温度达到40 cm时测记位移量,并用钢钎测记一次融化深度。

3.0.10 当停止加热后,依靠余热不能使传压板下的冻土继续融化达到0.5倍传压板直径的深度时,应继续补加热,直至满足这一要求。

3.0.11 经上述步骤达到融沉稳定后,开始逐级加荷进行压缩试验。加荷等级视实际工程需要确定,对粘质土每级荷载宜取50kPa,砂质土宜取75kPa,含巨粒土宜取100 kPa,最后一级荷载应比计算压力大100~200 kPa。

3.0.12 施加一级荷载后,每10、20、30、60 min测记一次位移计示值,此后每小时测记一次,直到传压板沉降稳定后再加下一级荷载。

沉降量可取3个位移计读数的平均值。沉降稳定标准对粘质土宜取0.05 mm/h,砂和含巨粒土0.1 mm/h。

3.0.13 试验结束后,拆除加荷装置,清除垫砂和10 cm厚表土,

然后取 2~3 个融化压实土样,用于含水率、密度及其他必要的试验。最后,应挖除其余融化压实土量测融化圈。

4 计算和制图

4.0.1 按式 (4.4.1) 计算融沉系数 a_0 :

$$a_0 = \frac{S_0}{h_0} \times 100 \quad (4.4.1)$$

式中 S_0 ——冻土融沉 ($p=0$) 阶段的沉降量, cm;
 h_0 ——融化深度, cm。

4.0.2 按式(4.4.2-1)计算融化压缩系数, a :

$$a = \frac{\Delta\delta}{\Delta p} K \quad (4.4.2-1)$$

$$\Delta\delta = \frac{S_{i+1} - S_i}{h_0} \quad (4.4.2-2)$$

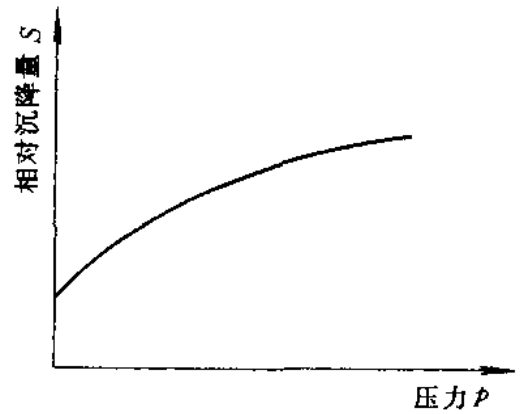


图 4.0.3 相对沉降量与压力关系曲线

式中 Δp ——压力增量值, kPa;
 $\Delta\delta$ ——相应于某一该压力范围 (Δp) 的相对沉降量, cm/cm;

S_i ——某一荷载作用下的沉降量, cm;

K ——系数, 粘土为 1, 粉质粘土为 1.2, 砂和砂质土为 1.3, 巨粒土为 1.35。

4.0.3 绘制相对沉降量与压力关系曲线, 如图 4.0.3。

5 记录

5.0.1 本试验记录格式如表 5.0.1。

表 5.0.1 现场冻土融化压缩试验记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
 试坑编号 _____ 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

土类: _____		试坑深度: _____							
冻结状态含水率: _____ (%)		密度: _____ (g/cm ³)							
荷载 (kPa)	历 时		变形 (mm)		荷载 (kPa)	历 时		变形 (mm)	
	读数时间	累计 (min)	量表读数	变形量		读数时间	累计 (min)	量表读数	变形量

粗颗粒土的试样制备

SL237—053—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 粗颗粒土是指粒径大于 5 mm 土的质量大于总质量 50% 的粗粒土。

1.0.2 土样制备的目的是将具有代表性的粗颗粒土,经过必要的制备程序为各项试验提供试验用料。

1.0.3 本规程适用于粘质粗颗粒土和无粘性粗颗粒土。

2 仪器设备

2.1 仪器设备

2.1.1 粗筛:孔径为 100、80、60、40、20、10、5mm。

2.1.2 细筛:孔径 2、1、0.5、0.25、0.10、0.075mm。

2.1.3 台秤:称量 100 kg 或 50 kg,分度值 50 g;称量 10 kg,分度值 5 g。

2.1.4 天平:称量 5000 g,分度值 1 g;称量 200 g,分度值 0.01g。

2.1.5 其他:碎石机、振筛机、烘箱、木锤、橡皮板、铁铲、盛土盘、喷雾器、保湿缸等。

2.2 仪器设备的检定和校准

2.2.1 计量仪器(如天平、台秤等):应按相应的检定规程进行检定。

2.2.2 试验筛:应按 GB6003—85《试验筛》的规定进行检定。

3 操作步骤

3.1 粘质粗颗粒土的土样制备

3.1.1 风干土样制备。将全部土样置于橡皮板上风干,用木锤将土块及附着在粗颗粒土上的细粒土敲散,应避免破坏土的天然颗

粒。将全部土样依次过筛，按 >100 、 $100\sim 80$ 、 $80\sim 60$ 、 $60\sim 40$ 、 $40\sim 20$ 、 $20\sim 10$ 、 $10\sim 5$ 、 <5 mm 分组并称其质量，计算各粒组含量百分数，测定粒径大于 5 mm 土(或各粒组)及粒径小于 5 mm 土的风干含水率。

3.1.2 根据土样性质及工程要求，从大于和小于 5 mm 粒径的土中分别取代表性土样进行物理性试验。必要时，参照地质鉴定方法，对粒径大于 5 mm 土粒的岩性、形状、风化程度及粒径小于 5 mm 土粒特性进行描述。

3.1.3 根据各项试验要求的级配进行配制。各粒组取土数量按本规程式(4.0.4)计算。若土样中含超粒径颗粒(超过试验仪器允许的粒径)，有以下 4 种处理方法供选择。

1 剔除法：将超粒径颗粒剔除。

2 等量替代法：根据仪器允许的最大粒径以下和粒径大于 5 mm 的土粒，按比例等质量替换超粒径颗粒。

3 相似级配法：根据原级配曲线的粒径，分别按照几何相似条件等比例地将原样粒径缩小至仪器允许的粒径。缩小后的土样级配应保持不均匀系数不变。

4 混合法：同时采用 2、3 两种方法，即先用适当的比尺缩小，使小于 5 mm 粒径土的质量不大于总质量的 30%，若仍有超粒径颗粒再用等量替代法制样。

3.1.4 将取好的土样拌和均匀，平铺在不吸水的垫板上，按要求含水率按本规程式(4.0.5)计算加水量。用喷雾器均匀喷洒所需的水量后，充分拌和，湿润 24h，实测含水率与要求含水率之差不应超过 1%。

3.1.5 制备好的土样如暂时不用时，应装入塑料袋或有内衬塑料膜的编织袋中，扎紧袋口，密封保存，以防含水率变化。

3.1.6 如土料数量不够，可重复使用，但风化土和含有棱角的易破碎的石渣、堆石料，则不允许重复使用。

3.1.7 天然含水率土样制备。应在保持天然含水率不变的情况下，将全部土样拌和均匀。根据含砾量多少，按以下规定取代表

性土样，测定其天然含水率。

粗、细颗粒混合土样 2000~5000 g

大于 5 mm 粗颗粒土 2000~3000 g (各粒组分别测定时取 200~2000 g)

小于 5 mm 细颗粒土 100~200 g

根据各项试验所需总质量，用四分法分别取所需土样质量(务使粗颗粒分配均匀)，装入保湿器内，以防含水率变化。

3.2 无粘性粗颗粒土的土样制备

3.2.1 将全部土样依次过粗筛，分组称量。必要时取粒径小于 5 mm 土过筛，计算各粒组含量百分数。按粒组分别存放备用。

3.2.2 按本规程 3.1.2~3.1.6 的规定进行备样。

4 计 算

4.0.1 按式 (4.0.1) 计算剔除法级配：

$$P_i = P_{oi} / (100 - P_{dmax}) \quad (4.0.1)$$

式中 P_i ——剔除后某粒组含量，%；

P_{dmax} ——超粒径颗粒含量，%；

P_{oi} ——原级配某粒组含量，%。

4.0.2 按式 (4.0.2) 计算等量替代法级配：

$$P_i = \frac{P_{oi}}{P_5 - P_{dmax}} P_5 \quad (4.0.2)$$

式中 P_i ——替代后粗粒某粒组含量，%；

P_5 ——大于 5 mm 粒径土的含量，%；

其余符号见本规程式 (4.0.1)。

4.0.3 按下列两式计算相似级配法粒径和级配。

1 相似级配法粒径：

$$d_{ni} = \frac{d_{oi}}{n} \quad (4.0.3-1)$$

2 相似级配法级配：

$$p_{dn} = p_{do}/n \quad (4.0.3-2)$$

式中 d_{ni} ——原级配某粒径缩小后的粒径，mm；

d_{oi} ——原级配某粒径，mm；

n ——粒径缩小倍数， $=d_{omax}/d_{max}$ ；

d_{omax} ——原级配最大粒径，mm；

d_{max} ——仪器允许最大粒径，mm；

p_{dn} ——粒径缩小 n 倍后相应的小于某粒径含量百分数，%；

p_{do} ——原级配相应的小于某粒径含量百分数，%。

4.0.4 按下列两式计算各单项试验所需风干土质量和某粒组应取风干土质量。

1 各单项试验所需风干土质量：

$$m = m_1 + m_2 \quad (4.0.4-1)$$

$$m_1 = V\rho_d P_5(1 + w_1)$$

$$m_2 = V\rho_d(1 + w_2)(1 - P_5)$$

2 某粒组应取风干土质量：

$$m_i = \frac{P_i}{P_5} m_1 \quad (4.0.4-2)$$

式中 m ——风干土样总质量，kg；

P_i ——某粒径组含量，以小数计；

P_5 ——大于 5 mm 粒径土的含量，以小数计；

m_1 ——大于 5 mm 粒径风干土质量，kg；

m_2 ——小于 5 mm 粒径风干土质量，kg；

m_i ——某粒组风干土质量，kg；

V ——试样体积， cm^3 ；

ρ_d ——要求制样干密度， g/cm^3 ；

w_1 ——大于 5 mm 粒径风干含水率，%；

w_2 ——小于 5 mm 粒径风干含水率，%。

4.0.5 按下列两式计算土样所需加水量：

$$m_w = \frac{m}{1 + 0.01w_0} 0.01(w' - w_0) \quad (4.0.5-1)$$

$$w_0 = w_1 P_5 + w_2 (1 - P_5) \quad (4.0.5-2)$$

式中 m_w ——土样所需加水量, kg;
 w_0 ——风干土样总含水率, %;
 w' ——制样含水率, %;
 其余符号见本规程式 (4.0.4)。

5 记 录

5.0.1 土样制备记录如表 5.0.1。

表 5.0.1 粗颗粒土扰动试样制备记录表

工程名称 _____ 允许最大粒径 _____ 试验者 _____
 试样编号 _____ 制备日期 _____ 计算者 _____
 含砾量 P_5 _____ 校核者 _____

粒径 (mm)	原级配或要求级配		替换料级配 (%)	各粒组取风 干土质量 (kg)	描述
	留筛土质量 (g)	留筛百分数 (%)			
60					
40					
20					
10					
5					
<5					
总计					
控制干密度 ρ_d (g/cm ³)			控制含水率 w' (%)		
试样体积 V (cm ³)			粗料风干含水率 w_1 (%)		
风干粗粒土质量 m_1 (kg)			细料风干含水率 w_2 (%)		
风干细料土质量 m_2 (kg)			试料风干含水率 w_0 (%)		
总风干试料土质量 m (kg)			试料加水量 m_w (kg)		

粗颗粒土相对密度试验

SL237—054—1999

1 定义与适用范围

1.0.1 相对密度是指无粘性土处于最松状态的孔隙比与天然状态（或给定）孔隙比之差和最松状态孔隙比与最紧孔隙比之差的比值。

1.0.2 本规程适用于最大粒径为 60mm 能自由排水的粗颗粒土。规定粗颗粒土中细粒土（ <0.075 mm）含量不得大于 12%。

2 引用标准

GB/T15406—94《土工仪器的基本参数及通用技术条件》第一篇：室内土工仪器。

GB6003—85《试验筛》。

3 仪器设备

3.1 仪器设备

3.1.1 最大干密度试验装置，如图 3.1.1。它由振动台、试样筒、套筒、加重盖板及加重物组成。其技术条件应符合 GB/T15406—94 的规定。

1 振动台：具有隔振装置的振动台。台面尺寸为 762 mm \times 762 mm，振动台的负荷应满足式样筒、套筒、加重底板、加重物及试样等总质量要求。振动台频率应为 40~60 Hz，振幅为 0~ \pm 2mm 可调。

2 试样筒：I 及 II 号试样筒的尺寸见表 3.1.1。

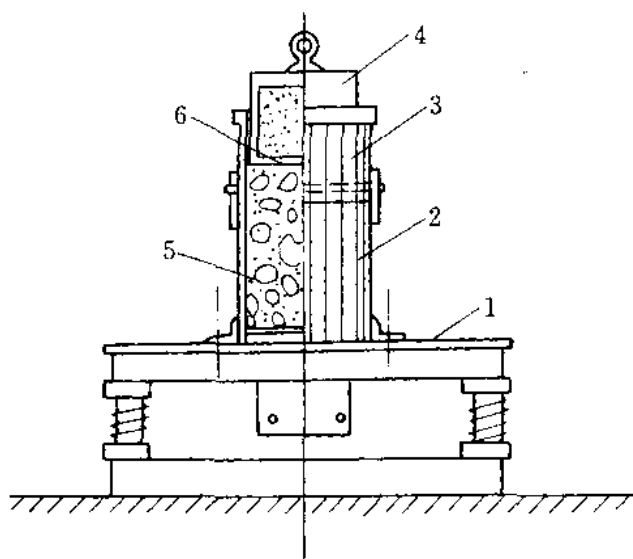


图 3.1.1 最大干密度试验装置图

1—振动台；2—试样筒；3—套筒；4—加重物；
5—试样；6—加重盖板

表 3.1.1 试样筒尺寸

试样筒编号	内径 D (cm)	高度 H (cm)	体积 V (cm^3)	允许最大粒径 d_{max} (mm)	试料质量 m (kg)
I	30	34	24033	60	40~50
II	20	23	7226	20	10~15

3 套筒：应与试样筒紧固连接。

4 加重盖板：盖板为 1.2 cm 厚的钢板，直径略小于试样筒，中心应有 $\phi 15$ mm 未穿通的提吊螺孔。

5 加重物：每一种尺寸的试样筒有一重物。对所用的试样筒，加重盖板与加重物的总压力为 14 kPa。

3.1.2 测针架及测针：测针的分度值为 0.1 mm。

3.1.3 灌注设备：带管嘴的漏斗。管嘴直径 10~20 mm，漏斗喇叭口径 100~150 mm，管嘴长度视套筒高度而定。

3.1.4 试验筛。

1 粗筛：孔径分别为 60、40、20、10、5 mm。

2 细筛：孔径分别为 5、2、1、0.5、0.25、0.125、0.075 mm。

3.1.5 台秤：称量 50 kg，分度值 50 g；称量 10 kg，分度值 5 g。

3.1.6 其他设备：搅拌盘、起吊设备、铁铲、毛刷、秒表、钢尺、卡尺、称料桶、大瓷盘等。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 计量仪器（台秤、卡尺等）：应按有关检定规程进行检定。

3.2.2 试样筒体积的校准：利用量程 0~300 mm，分度值 0.05mm 的游标卡尺直接量测试样筒的尺寸，并绘制出体积与高度的关系曲线以备使用。测量时准确到 0.1 mm。计算体积时，I 号试样筒准确到 25 cm³，II 号试样筒准确到 10 cm³。

3.2.3 试验筛：应按 GB 6003—85《试验筛》的规定进行检定。

4 操作步骤

4.1 试样制备

4.1.1 选用代表性土样在 105~110℃ 下烘干，并分级过筛贮存。筛分过程中应使弱胶结的土样能充分剥落。

4.2 最小干密度的测定

4.2.1 根据土样的最大粒径，选用灌注设备及试样筒。称筒质量。

4.2.2 对粒径小于 10 mm 的烘干土，采用固定体积法。将拌匀的土样，从漏斗管嘴均匀徐徐地注入试样筒。注入时随时调整漏斗管口的高度，使自由下落的距离保持在 2~5 cm 之间。同时要从外侧向中心呈螺旋线移动，使土层厚度均匀增高而不产生大小颗粒分离。当充填到高出筒顶约 25 mm 时，用钢直刀沿筒口刮去余土。注意在操作时不得扰动试样筒。称筒及试样总质量。

4.2.3 对粒径大于 10 mm 的烘干土，采用固定体积法。用大勺或小铲将土样填入试样筒内。装填时小铲应贴近筒内土面，使铲中土样徐徐滑入筒内，直至填土高出筒顶，余土高度不应超过 25 mm 为止。然后将筒面整平。当有大颗粒露顶时，凸出筒顶的体积应能近似地与筒顶水平面以下的大空隙体积相抵消，称筒及试样总质量。

4.2.4 最小干密度测定应按本规程 4.2.1~4.2.3 的规定进行平行试验。

4.2.5 对于超径料含量较多的粗颗粒土,为求得原级配的相对密度值,应进行最大粒径以下不同模型比的最小干密度系列试验。

4.3 最大干密度的测定:有干法和湿法两种方法。

4.3.1 干法:先拌匀烘干土样,将土样装填于试样筒中,称筒与试样总质量。装填方法与最小干密度的测定相同。通常情况是直接用最小时干密度试验时装好的试样筒,放在振动台上,加上套筒,把加重盖板放于土面上,依次安放好加重物。随即将振动台调至最优振幅 0.64 mm,振动 8 min 后,卸除加重物和套筒,测读试样高度,计算试样体积。

4.3.2 湿法:在烘干试料中加适量的水,或用天然的湿土进行装样。装完试样后,应立即振动 6 min。对于高含水率的土样,为了防止某些土在振动过程中产生颗粒跳动,振动 6 min 时,应随时减小振动台的振幅。振动后吸除土面上的积水,依次装上套筒,施加重物,然后固定在振动台上,振动 8 min 后,依次卸除加重物与套筒。测读试样高度,称筒与试样总质量。取代表性土样测含水率。

4.3.3 最大干密度测定应按本规程 4.3.1 和 4.3.2 的规定进行平行试验。

5 计 算

5.0.1 按下列两式计算最小、最大干密度。

1 最小干密度:

$$\rho_{d\min} = \frac{m_d}{V_c} \quad (5.0.1-1)$$

2 最大干密度:

$$\rho_{d\max} = \frac{m_d}{V_s} \quad (5.0.1-2)$$

式中 m_d ——干土质量, kg;

V_c ——试样筒的体积, cm^3 ;

V_s ——试样体积, $=V_c - (R_i - R_l) \times A$, cm^3 ;

R_i ——振后加荷盖板上百分表的读数, mm;

R_l ——起始读数, mm;

A ——试样筒断面积, cm^2 。

5.0.2 按下两式计算相对密度 D_r :

$$D_r = \frac{\rho_{d\max}(\rho_{d0} - \rho_{d\min})}{\rho_{d0}(\rho_{d\max} - \rho_{d\min})} \quad (5.0.2-1)$$

或

$$D_r = \frac{e_{\max} - e_0}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (5.0.2-2)$$

式中 D_r ——相对密度;

ρ_{d0} ——天然状态或人工填筑之干密度, g/cm^3 ;

$\rho_{d\max}$ ——最大干密度, g/cm^3 ;

$\rho_{d\min}$ ——最小干密度, g/cm^3 ;

e_{\max} ——最大孔隙比;

e_{\min} ——最小孔隙比;

e_0 ——天然或填筑孔隙比。

5.0.3 按式 (5.0.3) 计算压实度:

$$R_c = \frac{\rho_{d0}}{\rho_{d\max}} \quad (5.0.3)$$

式中 R_c ——压实度, 以小数计;

其余符号见本规程式 (5.0.2)。

5.0.4 按式 (5.0.4) 计算密度指数:

$$I_D = \frac{\rho_{d0} - \rho_{d\min}}{\rho_{d\max} - \rho_{d\min}} \times 100 \quad (5.0.4)$$

式中 I_D ——密度指数, %;

其余符号见本规程式 (5.0.2)。

6 记 录

6.0.1 本试验记录格式如表 6.0.1。

表 6.0.1 粗颗粒土相对密度试验记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
 试样编号 _____ 计算者 _____
 日 期 _____ 校核者 _____

试验项目	最大孔隙比	最小干密度	最小孔隙比	最大干密度
	e_{max}	ρ_{dmin}	e_{min}	ρ_{dmax}
试验方法	干 法			
	湿 法			
试样加试样筒质量 (kg)				
试样筒质量 (kg)				
试样质量 m_d (kg)				
试样体积 V_s (kg)				
干密度 ρ_d (g/cm ³)				
平均干密度 (g/cm ³)				
土粒比重 G_s				
孔隙比 e				
天然(给定)干密度 ρ_{d0} (g/cm ³)				
天然孔隙比 e_0				
相对密度 D_r				
压实度 R_c				
密度指数 I_D (%)				

粗颗粒土击实试验

SL237—055—1999

1 定义和适用范围

1.0.1 本试验的目的是用标准击实法测定粗颗粒土的含水率与密度的关系，从而确定其最优含水率与相应的最大干密度。

1.0.2 本规程适用于最大粒径为 60 mm，且不能自由排水的含粘质土的粗颗粒土。

2 引用标准

GB/T15406—94《土工仪器的基本参数及通用技术条件》第一篇：室内土工仪器。

SL112—95《击实仪校验方法》。

SL237—053—1999《粗颗粒土的土样制备》。

3 仪器设备

3.1 仪器设备

3.1.1 大型击实仪：由击实筒、套筒、击锤、导筒等组成，见图 3.1.1。其主要指标应符合 GB/T15406—94 的规定，见表 3.1.1。

表 3.1.1 大型击实仪技术性能

击锤质量 (kg)	击锤底直径 (cm)	落高 (cm)	击实筒尺寸		装土层次	每层击数	单位体 积功能 (kJ/m ³)	单位面 积冲量 (kPa·s)
			直径 (cm)	高度 (cm)				
15.5	15	60	30	28.8	3	44	591.9	3
35.2	15	60	30	28.8	3	88	2688.2	7

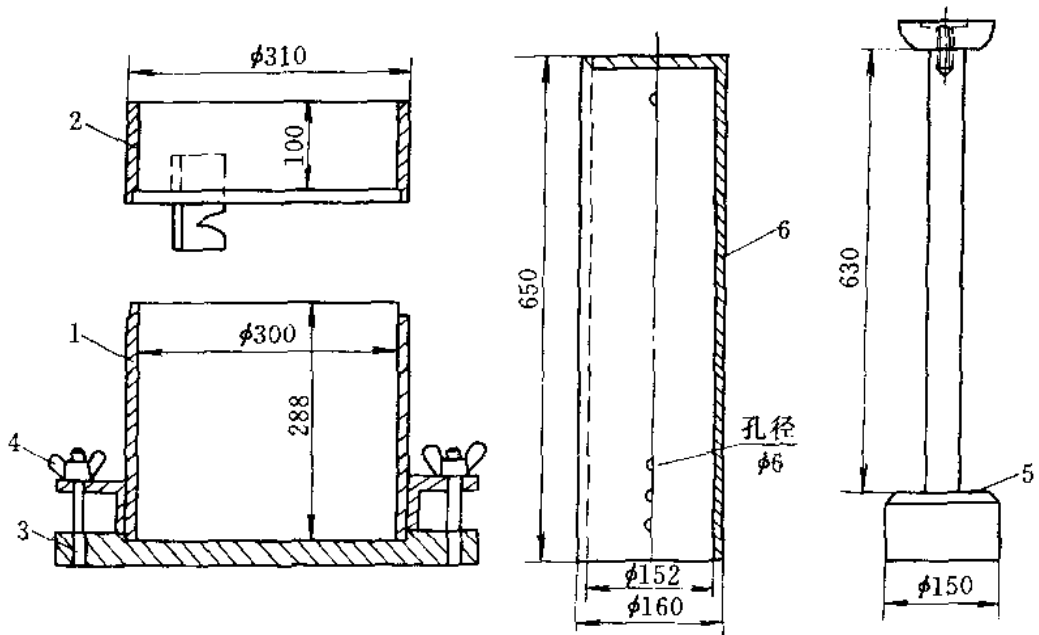


图 3.1.1 大型击实仪示意图 (单位: mm)

- 1—击实筒; 2—套筒; 3—底盘;
4—固定螺丝; 5—击锤; 6—导筒

3.1.2 天平: 称量 200 g, 分度值 0.01 g; 称量 2000 g, 分度值 1 g。

3.1.3 台秤: 称量 10 kg, 分度值 5 g; 称量 100 kg, 分度值 50g。

3.1.4 粗筛: 孔径 100、80、60、40、20、10、5 mm。

3.1.5 其他: 喷水器、恒湿器、搪瓷盘、大铝盒、铁铲、木棒、刮土刀、平口刀等。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 天平、台秤: 应按有关检定规程进行检定。

3.2.2 击实仪: 参照 SL112-96 校验方法进行校验。

4 操作步骤

4.1 土样制备

4.1.1 将有代表性土样一次备足, 充分拌匀后取 20~50 kg, 测定试验前的级配、混合含水率或分别测定粗颗粒土、粒径小于

5 mm土样的含水率、比重及细粒土的液塑限。

4.1.2 干法制备。

1 将有代表性土样风干,将土块及附于粗颗粒上的细颗粒碾散。碾散时,应避免将天然颗粒碾破。然后将全部土样过筛,按 >60 、 $60\sim 40$ 、 $40\sim 20$ 、 $20\sim 10$ 、 $10\sim 5$ 、 <5 mm 粒组分别堆放备用。

2 将备好的土样,按照 SL237—053—1999 规程 3.1.3 的规定进行处理,分别计算并称取每一试样所需的各级粒组的质量(每个试样的质量约 $35\sim 45$ kg),一组试验不少于 5 个试样。

3 调制粒径小于 5 mm 试样含水率,各试样依次相差 2%左右,其中 2 个大于最优含水率,2 个小于最优含水率(按细粒的塑限估计最优含水率)。所需加水量按 SL237—053—1999 规程式 4.0.5 进行计算。若粗颗粒采用饱和面干状态含水率,则只需计算粒径小于 5 mm 试样的加水量。

4 将各个试样分别置于不吸水的平板上,用喷水设备均匀喷洒至预定水量。边喷洒边拌和,待拌和均匀后,装入盛土密闭器具内,使之充分湿润。一般贮存 24h,根据土的性质可延长或缩短贮存时间。

4.1.3 湿法制备

1 宜用于含强风化的粗颗粒土。

2 取天然含水率的粗颗粒土约 $300\sim 400$ kg,分成 7 等份。其中 1 份作测定试样含水率用,1 份备用,其余 5 份分别按本规程 4.1.2 之 3 的规定制备试样含水率。

4.2 试样击实

4.2.1 击实仪应放在刚性基础上,安装调整好,拧紧全部螺帽,在击实筒内壁及底板涂一薄层润滑油。

4.2.2 取制备好的土样,拌和均匀。按本规程表 3.1.1 选定的标准分层击实。装填试样时,应防止粗粒集中并控制每层的高度大致相同。每层击实后,应将其表面刨毛。最后一层的顶面不应超过击实筒顶面 15 mm。

4.2.3 击实完成后，取下套环，取去超高部分余土，并将表面填平。然后卸去底盘，将击实筒外壁擦净、称筒与试样总质量，准确至 50 g。

4.2.4 将试样从击实筒内推出，并从试样中部取 2~5kg 混合土样测定其含水率（或取 50~100 g 粒径小于 5 mm 的土样，测定其含水率）。

4.2.5 按本规程 4.2.2~4.2.4 的规定进行不同含水率土样的击实试验。

5 计算与制图

5.0.1 按式 (5.0.1) 计算干密度：

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0.01w} \quad (5.0.1)$$

式中 ρ_d ——干密度， g/cm^3 ；

ρ ——湿密度， g/cm^3 ；

w ——含水率，%。

计算准确至 $0.01\text{g}/\text{cm}^3$ 。

5.0.2 以干密度为纵坐标，含水率为横坐标，绘制干密度和含水率关系曲线，如图 5.0.2。曲线的峰值为最大干密度 $\rho_{d\max}$ ，与其对应的含水率为最优含水率 w_{op} 。

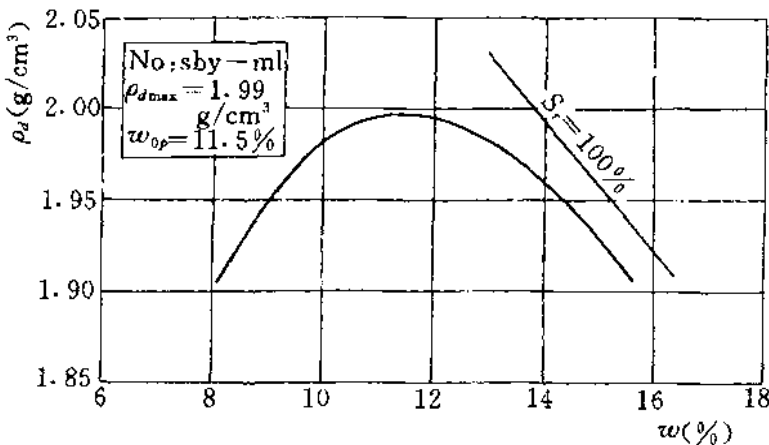


图 5.0.2 干密度 ρ_d ~含水率 w 关系曲线

5.0.3 按式 (5.0.3) 计算饱和状态的含水率:

$$w_{sat} = \left(\frac{\rho_w}{\rho_d} - \frac{1}{G_s} \right) \times 100 \quad (5.0.3)$$

式中 w_{sat} ——饱和状态含水率, %;

G_s ——土粒比重;

ρ_w ——水的密度, g/cm^3 ;

ρ_d ——试样干密度, g/cm^3 。

5.0.4 计算数个干密度下土的饱和含水率, 以干密度为纵坐标, 含水率为横坐标, 绘制饱和曲线, 见图 5.0.2。

6 记 录

6.0.1 本试验记录格式如表 6.0.1。

表 6.0.1 粗颗粒土击实试验记录表

工程编号 _____ 试验者 _____
 土样编号 _____ 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

每层击数 _____		起始含水率 _____ (%)	试验前 $P_5\%$ _____ (洗筛)						
击实筒体积 _____ (cm^3)		土粒比重 _____	试验后 $P_5\%$ _____ (洗筛)						
土样说明 _____		制样方法 _____							
试 验 次 数			1	2	3	4	5	6	7
干密度	制样时加水量								
	筒加土质量(g)	(1)	(1)						
	筒的质量(g)	(2)	(2)						
	湿土质量(g)	(3)							
	湿密度(g/cm^3)	(4)	$\frac{(3)}{20358}$						
	干密度(g/cm^3)	(5)	$\frac{(4)}{1+0.01w}$						

续表

每层击数_____		起始含水率_____ (%)		试验前 $P_5\%$ _____ (洗筛)						
击实筒体积 _____ (cm^3)		土粒比重 _____		试验后 $P_5\%$ _____ (洗筛)						
土样说明 _____		制样方法 _____								
试验次数				1	2	3	4	5	6	7
含水率	盘号			1	2	3	4	5	6	7
	盘加湿土质量(g)	(1)	(1)							
	盘加干土质量(g)	(2)	(2)							
	盘质量(g)	(3)	(3)							
	水的质量(g)	(4)	(1) - (2)							
	干土质量(g)	(5)	(2) - (3)							
	含水率(%)	(6)	$\frac{(4)}{(5)} \times 100$							
	平均含水率(%)									

粗颗粒土的渗透及渗透变形试验

SL237—056—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 本试验的目的是测定粗颗粒土在渗流水通过时,试样的渗透系数和细颗粒随渗流逐渐流失的临界坡降(管涌)及土体整体浮动时的破坏坡降(流土)。

1.0.2 本试验适用于扰动的粗颗粒土试样和原状粗颗粒土试样。

2 引用标准

SL114—95 杠杆式固结仪校验方法。

SL237—053—1999 《粗颗粒土的土样制备》。

3 仪器设备

3.1 仪器设备

3.1.1 垂直渗透变形仪:见图 3.1.1。包括仪器筒、顶盖、底座、透水板及支架。仪器筒身内径为 20 cm 和 30 cm 两种;仪器高度分别为直径的 3 倍和 2 倍。顶盖中心为一活塞套。透水板分上透水板和下透水板,上透水板兼起传递荷载作用。透水板孔径分别为 3、5、7 mm (在下渗水板之下,也可设置斜透水板,坡度为 $(1:1) \sim (1:1.5)$,用以排除水中含气,斜透水板上端设有排气孔)。

3.1.2 供水设备:供水箱,提升架、橡皮管。供水箱设置溢流堰,能保持常水头。

3.1.3 加荷设备:活塞杆、加荷框架、加荷杠杆和百分表支架。

3.1.4 量测设备：测压管、量筒、秒表、温度计、百分表和测压装置。

3.1.5 其他设备：击锤（或振动器）、台秤、天平及标准筛等。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 加荷设备：加荷框架、加荷杠杆应参照 SL 114—95 的杠杆校验和砝码校验进行校验。

3.2.2 量测设备：量筒、秒表、温度计、百分表等应按有关规程进行检定。

3.2.3 台秤、天平应按有关检定规程进行检定。

3.3 仪器检查

3.3.1 将下进水口与供水管相连接，使仪器充水，检查仪器的各部件是否堵塞及漏水等。检查完毕后，降低供水箱，使水箱中水位与下透水板的下沿齐平。

3.3.2 取去顶盖，放入孔径 5 mm 的下透水板，并铺以同样直径的滤网，以免细料漏失。沿仪器壁和滤网之间的接触缝隙涂一圈油泥或橡皮泥。

3.3.3 开启全部测压孔，使之处于排气状态。

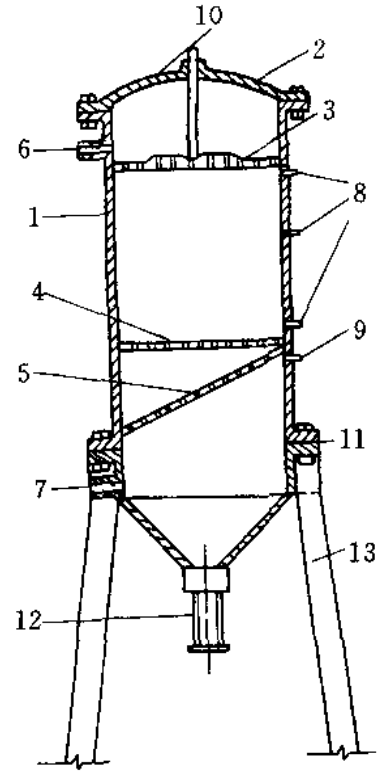


图 3.1.1 垂直渗透变形仪示意图

1—筒身；2—上盖；3—上透水板；4—下透水板；5—斜透水板；6—上进水口（溢水口）；7—下进水口（溢水口）；8—测压孔；9—排气孔；10—上排气孔；11—橡皮止水；12—集砂器；13—支架

4 操作步骤

4.1 试样制备

4.1.1 扰动试样制备。

1 从风干、松散的土样中，取具有代表性土样，进行颗粒分析试验，确定试样的颗粒级配，并绘制颗粒级配曲线。

2 根据试验土样粒径，按仪器内径应大于试样粒径 d_{85} 的 5 倍

选择仪器。当常规试验的仪器内径不能满足要求时,应设计加工大直径的渗透变形仪。或根据试样情况,亦可对最大允许粒径以上的粗颗粒按 SL237—053—1999 规程 3.1.3 的规定加以处理。

3 根据需要控制的干密度及试样高度,按式(4.1.1)计算试样质量:

$$m_d = \rho_d \pi r^2 h' \quad (4.1.1)$$

式中 m_d ——试验需要的干土质量, g;

ρ_d ——需控制的干密度, g/cm³;

r ——仪器筒身半径, cm;

h' ——试样高度, cm。

4 称取试样后,为减少粗细颗粒分离现象,保证试样的均匀性,应当分层装填试样,且每层的级配应相同,还可酌加相当于试样质量 1%~2% 的水分,拌和均匀后再进行装样。

5 将称好的试样均匀分层装入仪器中,用击实锤(对于风化石渣或易击碎之土料可采用振动加密法)击实。达到要求的密度试样总厚度:砂土不小于 10 cm;细砾石不小于 15 cm;中粗砾石为 20~25 cm;卵石不应小于 d_{85} 的 3~5 倍,以包括试样中最大颗粒为度。装填分层厚度:砂土一般为 2~3 cm;砂砾石及砂卵石为 d_{85} 的 1.5~2.0 倍。

4.1.2 原状试样制备。

1 取样位置。应选择有代表性地层和渗流流态条件的不同部位,如防渗墙底部、坝基内部段、水流出逸段、抗渗强度较低处等部位取样。

2 在取样地点。首先挖一尺寸大于试样尺寸的土柱,除去土样表面的扰动土,再用削土工具小心地慢慢地将土样削至所要求尺寸(圆形)。

3 环绕土柱底四周的水平土面上铺垫一层砂,并使垫砂平整。

4 套上筒身,筒身与试样周围间隙大致相等,埋设中间测压管,间距 10 cm 左右,然后在试样周围浇注膨胀快凝水泥砂浆

(配合比:水灰比 0.65、灰砂比 1:1,掺 20%生石膏、20%氯化钙、0.005%铝粉),浇好养护。

5 待砂浆有一定强度后(一般 24 h),小心地切断土柱,然后连同筒身运至室内。将试样削平,在试样下端放置下透水板及斜透水板。接上下进水口,并与供水管连接。

4.2 试样饱和

4.2.1 试样装好后,测量试样的实际厚度,然后采用热水饱和法进行饱和,即在供水箱内贮存热水,使水位略高于试样底面位置,再缓慢地提升水箱,每次提升 1 cm,待水箱水位与试样中水位相等,并停 10 min 后,再提升水箱。随着供水箱上升,让水由仪器底部向上渗入,使试样缓慢饱和,以完全排除试样中的空气。与此同时,随着水位上升,应接通相应的测压管。(若试验用自来水,应至少贮存一天曝气后再用来作试验用水,以减少水中气体的离析)。

4.2.2 为减少试验过程中由于试验用水分离出的气泡堵塞试样孔隙,影响试验准确度,力求使试验用水的温度等于或高于室温,或采用其他排气措施。

4.3 试验步骤

4.3.1 根据工程要求,如需要在试验过程中在试样顶面施加荷载,则利用加荷设备,通过活塞及上透水板对试样施加荷载。

4.3.2 试验时,选择初始渗透坡降及渗透坡降递增值,应先根据细粒含量大致判别试样渗透变形的破坏形式。如为管涌破坏,则渗透坡降初始值及递增值要小一些。如为流土破坏,则渗透坡降初始值及递增值应大一些。其原则是既要测得试样临发生变形前的坡降,又能准确地测得临界坡降。

4.3.3 提升供水箱,使供水箱的水面高出渗透容器的溢水口(上进水口),保持常水头差,形成初始渗透坡降。

4.3.4 对管涌土,加第一级水头时,初始渗透坡降可为 0.02~0.03;然后一般可按 0.05、0.1、0.15、0.2、0.3、0.4、0.5、0.7、1.0、1.5、2.0、...等坡降递增。但在接近临界坡降时,渗透坡降

递增值应酌量减小。对于非管涌土，初始渗透坡降可适当提高，渗透坡降递增值应适当放大。

4.3.5 每次升高水头 30 min 至 1 h 后，测记测压管水位，并用量筒测读渗水量 3 次。每次测读间隔时间一般为 10~20 min。同时测读水温、室温。对非管涌土，测读间隔时间可适当延长。仔细观察试验过程中出现的各种现象，如水的浑浊程度、冒气泡、细颗粒的跳动、移动或被水流带出、土体悬浮、渗流量及测压管水位的变化等，并描述记于记录中。

4.3.6 如果连续 4 次测得的水位及渗水量基本稳定，又无异常现象，即可提升至下一级水头。

4.3.7 对于每级渗透坡降，均按本规程 4.3.5 的规定重复进行，直至试验破坏。当水头不能再继续增加时，即可结束试验。

5 计算和制图

5.0.1 按下列两式计算试样的干密度和孔隙率。

1 干密度：

$$\rho_d = \frac{m_d}{\pi r^2 h} \quad (5.0.1-1)$$

2 孔隙率：

$$n = \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_w G_s} \right) \times 100 \quad (5.0.1-2)$$

式中 m_d ——试样干质量，g；

r ——试样半径，cm；

h ——试样高度，cm；

ρ_d ——干密度，g/cm³；

ρ_w ——水的密度，g/cm³；

n ——孔隙率，%；

G_s ——土粒比重。

土粒比重 G_s 应为粗细颗粒混合比重，即：

$$G_s = \frac{1}{\frac{P_1}{G_{s1}} + \frac{P_2}{G_{s2}}} \quad (5.0.1-3)$$

式中 G_{s1} 、 G_{s2} ——分别为粒径大于和小于 5 mm 的土粒比重；

P_1 、 P_2 ——分别为粒径大于和小于 5 mm 土的含量，%。

5.0.2 按式 (5.0.2) 计算渗透坡降：

$$i = \frac{\Delta H}{L} \quad (5.0.2)$$

式中 i ——渗透坡降；

ΔH ——测压管水头差，cm；

L ——与水头差 ΔH 相应的渗径长度，cm。

5.0.3 按式 (5.0.3) 计算渗透流速：

$$v = \frac{Q}{A} \quad (5.0.3)$$

式中 Q ——渗流量， cm^3/s ；

A ——试样面积， cm^2 ；

v ——渗透流速， cm/s 。

5.0.4 按式 (5.0.4) 计算渗透系数：

$$k_T = \frac{v}{i} \quad (5.0.4)$$

式中符号见本规程式 (5.0.2)、式 (5.0.3)。

注：标准温度 (20℃) 时试样的渗透系数应为 $k_{20} = k_T \frac{\eta_T}{\eta_{20}}$ ，比值 $\frac{\eta_T}{\eta_{20}}$ 与温度的关系查 SL237—014—1999《渗透试验》表 3.4.2。

5.0.5 在双对数纸上，以渗透坡降 i 为纵坐标，渗透速度 v 为横坐标，绘制渗透坡降与渗流速度关系曲线 ($\lg i \sim \lg v$ 曲线)，如图 5.0.5。

5.0.6 对管涌破坏的试样，应分别确定其临界坡降及破坏坡降。首先根据试样的总厚度作出 $\lg i \sim \lg v$ 曲线，必要时还应作出测压管之间试样厚度的 $\lg i \sim \lg v$ 曲线。临界坡降可根据 $\lg i \sim \lg v$ 关系曲线 (图 5.0.5) 进行判断。

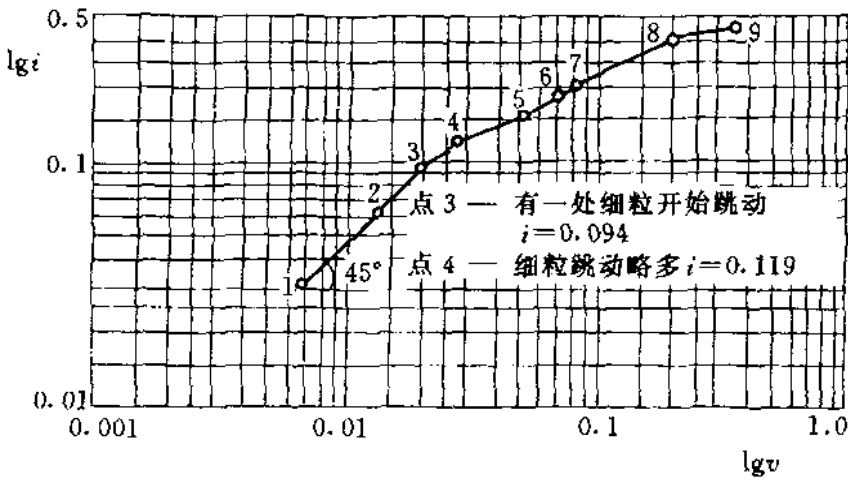


图 5.0.5 $lgi \sim lgv$ 曲线

当 $lgi \sim lgv$ 关系曲线的斜率开始变化，并观察到细颗粒开始跳动或被水流带出时，认为该试样达到了临界坡降 i_k ，其值为：

$$i_k = \frac{i_2 + i_1}{2} \quad (5.0.6-1)$$

式中 i_2 ——开始出现管涌时的坡降；

i_1 ——开始出现管涌前一级的坡降。

随着水头逐步加大，细粒不断被冲走，渗透流量变大，当水头增加到试样失去抗渗强度，该坡降称为试样的破坏坡降 i_F ，其值为：

$$i_F = \frac{i'_2 + i'_1}{2} \quad (5.0.6-2)$$

式中 i'_2 ——试样破坏时的渗流坡降；

i'_1 ——试样破坏前一级的渗流坡降。

发生流土破坏时，有时 i'_2 不易测得，则可按下式计算：

$$i_F = i'_1 \quad (5.0.6-3)$$

6 记 录

6.0.1 本试验记录格式如表 6.0.1。

表 6.0.1 渗透变形及反滤层试验记录表

工程编号 _____ 试样质量 m _____ (g) 试样不均匀系数 C_u _____ 反滤层层数 _____
 土样编号 _____ 试样面积 A _____ (cm²) 曲率系数 C_c _____ 反滤层厚度 _____ (cm)
 土样采取地点 _____ 试验前试样高度 h _____ (cm) 试样中值粒径 d_{50} _____ (mm) 反滤层中值粒径 D_{50} _____ (mm)
 土样类别 _____ 试验后试样高度 h' _____ (cm) 试样干密度 ρ_d _____ (g/cm³) 反滤层不均匀系数 $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ _____
 试验组次 _____ 试样孔隙率 n _____ (%) 骨架粒径 _____ (mm) 荷载 P _____ (Pa)
 渗流方向 _____ 土粒比重 G_s _____ 填料含量 P_s _____ (%) 接触面下移距离 _____ (mm)

试验次数	记录时间 (h : min)	测压管编号	测压管读数 (cm)	测压管水位差 Δh (cm)	测压管间距 L (cm)	渗透坡降 $i = \frac{\Delta h}{L}$	渗水量 m_w (cm ³)	时间 t (s)	渗流量 $Q = \frac{m_w}{t}$ (cm ³ /s)	渗流速度 $v = \frac{Q}{A}$ (cm/s)	渗透系数 $k = \frac{v}{i}$ (cm/s)	温度校正系数 $\frac{\eta_T}{\eta_{20}}$	渗透系数 k_{20} (cm/s)	沉降量 δ (cm)	集砂量 S (g)	反滤层淤填量 Z (%)	水温 t (°C)	室温 t (°C)	试验现象描述
1																			
2																			
3																			
4																			
5																			
9																			

试验者：

计算者：

校核者：

日期：

反滤料试验

SL237—057—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 反滤料试验的目的是用以确定在渗透水流作用下,被保护土的反滤层土样的合理级配。

1.0.2 本规程适用于无粘性土样。

2 引用标准

GB/T15406—94《土工仪器的基本参数及通用技术条件》第一篇:室内土工仪器。

SL237—056—1999《粗颗粒土的渗透及渗透变形试验》。

3 仪器设备

3.1 仪器设备

3.1.1 仪器设备应符合 SL237—056—1999 规程 3.1.1 至 3.1.5 的规定。当渗透水流由上向下时,下游溢水口处,加设一个可升降的溢流水箱。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 仪器设备的检定和校准按 SL237—056—1999 规程 3.2.1 至 3.2.3 的规定进行。

3.3 仪器检查

3.3.1 仪器检查按 SL237—056—1999 规程 3.3.1 至 3.3.3 的规定进行。

4 操作步骤

4.1 试样制备

4.1.1 将称好的土样分层装入仪器内,用击实锤(对风化石渣或易击碎的土料,可采用振动加密法)击实,使之达到要求的干密度。

4.1.2 被保护土和反滤料的厚度应不小于 15 cm。

4.1.3 在滤料与被保护土和滤层与滤层之间的接触面上均应布置测压管。

4.1.4 如渗透水流方向由上向下,反滤料应位于被保护土之下。

4.2 试样饱和

4.2.1 试样饱和应按 SL237—056—1999 规程 4.2.1 的规定进行。

4.3 试验步骤

4.3.1 进行渗透由上向下试验时,下游溢水箱水面应高于或位于被保护土和滤层的接触面。

4.3.2 试验开始时,以相应于 0.1~0.2 的渗透坡降的水头作为第一级水头进行试验,以后每隔 1 h 加一级水头。

4.3.3 每抬高一级水头后,隔 30 min 读数 1 次。每级水头应测读两次。流量也应进行 2 次测量,取其平均值。

4.3.4 若试样未发生任何变化,流量未随时间增大,测压管无变化,无细粒移动和水色变浑等迹象,即可进行下一级水头的试验。以后各级水头,大致按 0.3、0.5、1.0、1.5、2.0、3.0、4.0、… 的坡降逐次升高。每升高一次水头,均应按本规程 4.3.3 的规定进行测读。

4.3.5 在本级水头下,如发现细粒通过接触面跑入滤层,或发现滤层中的测压管水头差不断增大时,则本级水头和以后步骤中的每一级水头试验持续时间需延长到 3~4h。

4.3.6 当渗入滤层中细粒停止移动,位于滤层中的测压管水头差不再继续增大时。应继续升高水位,进行下一级水头的试验,不宜中断。

4.3.7 有下列情况之一者,可以结束试验:

1 当升高水头后，流量不断变大，被保护土中的渗流坡降减小。

2 滤层中的渗透坡降等于被保护土中的渗透坡降。

3 被保护土为粘质土，渗透坡降大于 50~100 时；被保护土为无粘性土，渗透坡降大于 10 时，被保护土仍未破坏。

4.3.8 试验结束后，应缓慢降低水箱水位。以防止上层细粒在停水过程中掉入下层，或通过透水板掉入下漏斗。

4.3.9 仪器中水放完后，分层取样，进行颗粒分析。在分层取样时，记录下列现象：滤层淤填厚度、接触带变化情况、被保护土中细粒流失粒径、流失部位、深度等。

5 计算和制图

5.0.1 按 SL237—056—1999 规程 5.0.1 至 5.0.4 所列公式计算有关指标。

5.0.2 绘制被保护土的 $\lg i \sim \lg v$ 曲线和 $v \sim t$ 曲线。

5.0.3 绘制被保护土和滤层在试验前后的颗粒级配曲线，用以确定从被保护土层中带出的土粒量及滤层内的淤填量。

6 记录

6.0.1 本试验记录格式如 SL237—056—1999 规程表 6.0.1。

粗颗粒土固结试验

SL237—058—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 本试验的目的是测定粗颗粒土变形和压力(或孔隙比与压力)的关系、变形与时间的关系,以便计算土的压缩系数、压缩指数、回弹指数、体积压缩系数、压缩模量、固结系数及先期固结压力。

1.0.2 本规程适用于最大粒径为 60 mm 的粗颗粒土。

2 引用标准

GB/T15406—94《土工仪器的基本参数及通用技术条件》第一篇:室内土工仪器。

SL237—053—1999《粗颗粒土的土样制备》。

SL237—015—1999《固结试验》。

3 仪器设备

3.1 仪器设备

3.1.1 固结仪:如图 3.1.1 所示。

1 固结容器(浮环式):直径(D)与高度(H)之比为 2~2.5,高度与试样最大粒径 d_{\max} 之比 4~6 为宜,其尺寸参照 GB/T 15406—94 标准 4.2.1。

2 加荷设备(附稳压装置):负荷传感器(或测力计)准确度为全量程的 1%。

3 位移计:量程 0~30mm,分度值 0.01mm(或准确度

为全量程 0.2% 的位移传感器)。

3.1.2 磅秤:称量 100 kg,分度值 50 g;台秤:称量 5000g,分度值 5 g。

3.1.3 附属设备:饱和装置、吊装设备、振动器、击实器、推土器、秒表、烘箱、瓷盘、铁铲等。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 加荷设备:负荷传感器应按 JJG391—85《负荷传感器试行检定规程》进行检定;测力计参照 JJG144—92《标准测力仪检定规程》进行检定。

3.2.2 位移计:参照 JJG379—95《大量程百分表检定规程》进行检定。

3.2.3 磅秤、台秤应按有关检定规程进行检定。

3.3 仪器设备检查

3.3.1 仪器设备在使用前应检查。加荷平台要求水平稳固与加荷框架平行,中心一致;稳压器灵敏,试验压力稳定。各管路接头、阀门不泄漏。

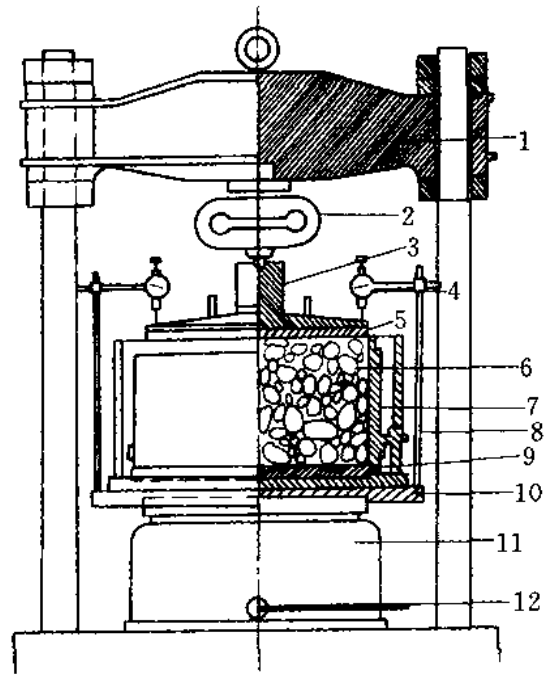


图 3.1.1 大型压缩仪装置示意图

1—加荷框架; 2—测力计; 3—传压块;
4—百分表; 5—有孔金属透水板;
6—试样; 7—浮环; 8—饱和
水槽; 9—浮环垫块; 10—底
盘; 11—油压机; 12—接
压力油库

4 操作步骤

4.1 试样制备

4.1.1 扰动土。

1 按 SL 237—053—1999 规程有关规定制备土样。取制备好的土样拌匀，均分为 2~3 份，注意勿使粗粒集中。

2 将带套环的固结容器内壁涂一层润滑脂，安放在放有透水板的底盘上。容器下垫以垫块。透水板上放一层滤纸，分层均匀装料。粘质粗颗粒土用击实法，无粘性粗颗粒土用振动法，将试样分层压实至要求的干密度。除去套环，整平表面，其上放一层滤纸，顺次放透水板和传压板。

4.1.2 原状土。

1 将采取的粘质粗颗粒土原状样置于平整地方，拆除包装后，细心检查土样是否扰动，有无裂缝等，并将四周可能松动的土削去。整平端面。

2 将固结容器涂一层润滑脂，下端加一内径与容器相同的有刃口的切土环。然后放在土样上。小心地用切土刀或钢锯将土样修成略大于容器外径的土柱，边修边压，直至土样顶面高出容器为止。边缘若有砾石可以剔除，用较小的砾质土填补。取去切土环，将容器两端余土削平。擦净容器外壁，称质量；测定端面削下余土的含水率。

3 在切削过程中，应仔细观察试样情况，并描述层次、颜色、层间结合、砾石风化程度及分布情况等。

4.2 试样安装与饱和

4.2.1 将装有试样的固结容器吊装到水槽内，顺次放滤纸，透水板、传压板。置于加荷框架中心。

4.2.2 试样如需饱和，将饱和装置连结供水装置。对无粘性粗颗粒土试样，宜用水头饱和；对粘质粗颗粒土试样，宜用真空饱和。

4.2.3 拆去容器的浮环垫块，安装测力计或负荷传感器、百分表（位移传感器）。

4.3 试样固结

4.3.1 用稳压装置施加 3~5 kPa 的预压力，使试样与仪器各部之间接触良好。将各百分表或位移传感器调整到零点或初始

读数。

4.3.2 施加各级压力。压力等级一般为 50、100、200、400、800、1600、3200kPa、…，最后一级压力应大于土层实际压力 100~200kPa。

4.3.3 如需要确定先期固结压力时，施加的压力应达到使试样的 $e \sim \lg p$ 曲线下段呈较长的直线段。

4.3.4 对粘质粗颗粒土需要测定固结系数时，则施加每一级压力后，按下列时间顺序测记试样高度的变化：0.1、0.25、1、2.25、4、6.25、9、12.25、16、20.25、25、30.25、36、42.25、60 min，此后每隔 1 h 测记 1 次，直至主固结完成，或延长至 24 h。

4.3.5 如需作回弹试验，可在施加某级压力（大于上覆压力）下，固结稳定后逐级退压，直至退到第一级压力。每次退压后测记试样的回弹量，至稳定为止。

4.3.6 试验结束后，排除容器中的水，拆除仪器各部件，将试样从容器内推出，取代表性试样测定试验后含水率。如要了解颗粒破碎情况，应对全部试样进行颗粒分析试验。

5 计算和制图

5.0.1 按 SL237—015—1999 规程 3.4.1~3.4.8 计算和制图。

6 记 录

6.0.1 本试验记录格式如表 6.0.1-1、表 6.0.1-2。

表 6.0.1-1 固结试验记录表

工程名称 _____ 试验编号 _____ 试验日期 _____ 计算者 _____ 校核者 _____ 试验者 _____

记录时间			压 力 (MPa)									百 分 表 读 数 (mm)											
			0.05			0.1			0.2			0.4			0.8			1.6			3.2		
h	min	s	1表	2表	平均	1表	2表	平均	1表	2表	平均	1表	2表	平均	1表	2表	平均	1表	2表	平均	1表	2表	平均
		15																					
	1																						
	2	15																					
	4																						
	6	15																					
	9																						
	12	15																					
	16																						
	20	15																					
	25																						
	30	15																					
	36																						
	42	15																					
	60																						
2																							
3																							
4																							
5																							
6																							
7																							
8																							
24																							
总变形量																							
仪器变形量																							
试样总变形量																							

表 6.0.1-2 固结试验成果计算表

工程名称 _____

试验者 _____

试验编号 _____

计算者 _____

试验日期 _____

校核者 _____

制样密度 ρ_s		>5mm 粗粒含量 P_s (%)	总含水率 w		比重 G_s			饱和度 S_r		起始 孔隙比 e_0	试样原始 高度 h_0 (mm)	$C_v = \frac{0.848 (\bar{h})^2}{t_{90}}$ $C_v = \frac{0.197 (\bar{h})^2}{t_{50}}$
湿 ρ (g/cm ³)	干 ρ_d (g/cm ³)		起始 w_0 (%)	饱和后 (%)	>5mm 颗粒	<5mm 颗粒	混合	起始 (%)	饱和后 (%)			

压力	试样总变形量	压缩后试样高度	孔隙比	压缩系数	压缩模量	排水距离	固结系数
p (kPa)	$\sum \Delta h_i$ (mm)	$h = h_0 - \sum \Delta h_i$ (mm)	$e_i = e_0 - \frac{(1+e_0) \sum \Delta h_i}{h_0}$	$a_v = \frac{e_i - e_{i+1}}{p_{i+1} - p_i}$ (kPa)	$E_s = \frac{a_v}{1+e_0}$ (kPa)	$\bar{h} = \frac{h_1 + h_2}{4}$ (cm)	C_v (cm ² /s)
0							
0.05							
0.1							
0.2							
0.4							
0.8							
1.6							
3.2							

粗颗粒土直接剪切试验

SL237—059—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 本试验采用应力控制式大型直接剪切仪测定粗颗粒土的抗剪强度参数。

1.0.2 本规程适用于最大粒径为 60 mm 的粗颗粒土。

2 引用标准

SL237—053—1999 《粗颗粒土的土样制备》。

3 仪器设备

3.1 仪器设备

应力控制式大型直剪仪：由上剪切盒、下剪切盒、传压板、滚珠排、垂直加压框架和水平加压支座等组成，如图 3.1。

3.1.1 剪切盒：形状宜采用圆形，尺寸： D/d_{\max} 为 8~12， H/d_{\max} 为 4~8。

3.1.2 加荷设备：双向油压千斤顶 2 台和稳压装置。

3.1.3 百分表：量程 30 mm，分度值 0.01 mm。

3.1.4 其他设备：真空泵（附真空测压表）、饱和器（附金属真空缸）、粗筛一套（筛孔孔径分别 60、40、20、10、5、2 mm）、磅秤（分度值 250 g）、台秤、托盘天平、水平尺、拌和工具、恒湿设备与击实锤。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 加荷设备：千斤顶的压力表应按 JJG52—87 《弹簧管式一

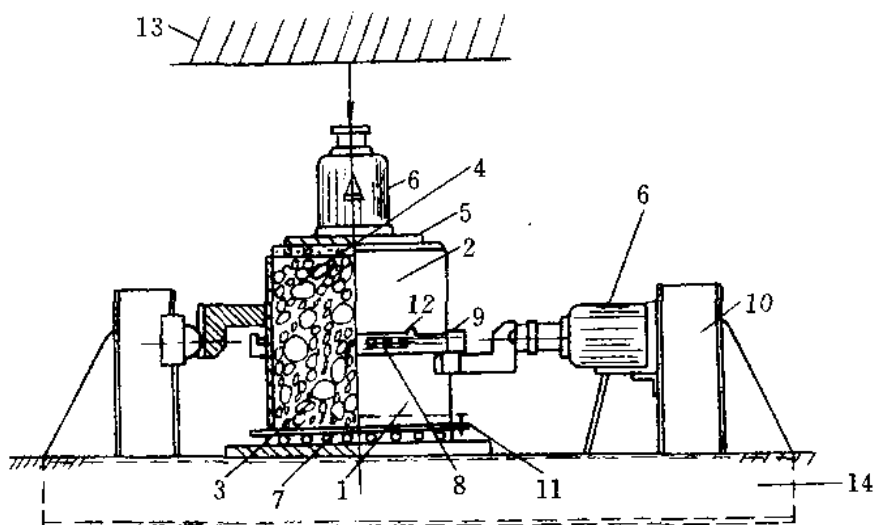


图 3.1 大型直剪仪示意图

- 1 下剪切盒;2—上剪切盒;3—透水板;4—试样;5—传压板;6—千斤顶;
7 滚轴排;8—开缝装置;9—水槽;10—水平加荷支座;11—进水孔;
12—固定销;13—上反力横梁;14—下反力横梁

般压力表、压力真空表检定规程》进行检定。经检定合格后，与千斤顶配套，按本规程“附 a. 3”的规定进行校准。

3.2.2 百分表：按 JJG 379—95《大量程百分表检定规程》进行检定。

3.2.3 磅秤、台秤、托盘天平应按有关检定规程进行检定。

3.2.4 剪切盒的摩擦校准按本规程“附 a. 2”的规定进行。

3.3 仪器设备检查

3.3.1 试验前仪器设备的检查按本规程“附 a. 1”的规定进行。

4 操作步骤

4.1 试样制备和安装

4.1.1 试样按 SL237—053—1999 规程的规定进行备料。根据试验要求的干密度、含水率和试样尺寸，计算并称取试验所需的土样数量。对无粘性粗颗粒土为防止颗粒分离，也可根据装填层数，分层称取试验所需的土样。

4.1.2 将下剪切盒吊放在滚轴排上,并在下剪切盒上安放开缝环及钢珠(控制剪切开缝尺寸为 $(1/3\sim 1/4)d_{\max}$),然后将上剪切盒放上,务使上、下盒同心,并用固定插销定位。

4.1.3 将称好的试样拌匀后分层装入剪切盒内(层次可根据高度与层缝错开的原则而定,一般为3或5层)。每一层应击实至要求的高度。对粘质粗颗粒土,每层表面刨毛后,再填第2层。重复上述步骤至最后一层,整平表面。

4.1.4 试样如需饱和,对无粘性粗颗粒土,宜用水头饱和法;对粘质粗颗粒土宜用真空饱和法。

4.1.5 在试样面上依次放上透水板、传压板、垂直千斤顶和传压板等,并与液压稳定器管路连接。要求安装对中,传压板应用水平尺校平。上、下反力钢梁应水平。然后安装2~4个垂直百分表,徐徐开动垂直千斤顶,使各部接触。记录变形起始读数。

4.1.6 安装水平千斤顶和水平百分表,务使水平千斤顶的着力线通过剪切面的中心。徐徐开动水平千斤顶,使其与下剪切盒的着力点接触(即水平百分表开始微动)即停止。

4.1.7 每组试验应制备4至5个试样,其密度差值不得大于 0.03 g/cm^3 ,含水率差值不得大于1%。在不同压力下进行试验,各级垂直压力级差大致相同。

4.2 快剪试验(Q)^①

4.2.1 按本规程4.1.5的规定安装试样和定位,但在试样上、下面接触处,安放与透水板厚度相等的不透水钢板。在试样上一次施加额定的垂直荷载,使其在整个试验过程中保持恒定。

4.2.2 拔除上、下剪切盒的固定销并取掉开缝环。记录垂直、水平千斤顶、百分表等的读数。随即开动水平千斤顶,施加水平荷载,每30s加一级,并测读1次水平百分表和垂直百分表的读数。起始水平荷载按垂直荷载的7%~10%施加。当某级水平荷载下的剪切位移超过前一级剪切位移的1.5~2.0倍时,改为按5%施

① 渗透系数大于 10^{-6} cm/s 的土不宜用此法。

加。每施加一级水平荷载，测读垂直和水平百分表各一次。

当水平荷载读数不再增加或剪切变形急骤增长，即认为已剪损。若无上述两种情况出现，应控制剪切变形达试样直径的 $1/15 \sim 1/10$ ，方可停止试验。应控制试样在 $5 \sim 10$ min 内达到剪切破坏。

4.2.3 试验结束后，尽快卸去百分表、水平荷载、垂直荷载和加荷设备。视需要对剪切面作简要描述。取剪切面附近的试样，测定其剪切后含水率与颗粒级配。

4.3 固结快剪试验 (R)

4.3.1 按本规程 4.2.1 的规定进行试样安装和定位。但试样上、下两面的不透水板换放细铜丝布和透水钢板。

4.3.2 在试样上施加垂直荷载后，如每小时垂直变形小于 0.03mm ，则认为变形稳定。测记此时垂直百分表读数。

4.3.3 试样达到固结稳定后，按本规程 4.2.2 和 4.2.3 的规定进行剪切。

4.4 慢剪试验 (S)

4.4.1 按本规程 4.2.1 的规定进行试样安装和定位。但试样上、下两面的不透水板改放细铜丝布和透水钢板。

4.4.2 按本规程 4.3.2 的规定进行试样固结。

4.4.3 试样达到固结稳定后，拔除上、下剪切盒固定销并取掉开缝环。检查垂直千斤顶、水平千斤顶、百分表等，记录其读数。开动水平千斤顶，施加水平荷载，每隔 1 min 测记 1 次水平百分表读数和垂直百分表读数。若 1 min 内剪切变形不超过 0.01mm ，则施加下一级水平荷载。起始水平荷载每级按垂直荷载的 $7\% \sim 10\%$ 施加，当某级水平荷载下的剪切位移超过前一级剪切位移的 $1.5 \sim 2.0$ 倍时，改为按 5% 施加。

当水平荷载读数不再增加或剪切变形急骤增长，即认为已剪损。若无上述两种情况出现，应控制剪切变形达试样直径的 $1/5 \sim 1/10$ ，方可停止试验。

4.4.4 试验结束后，按本规程 4.2.3 的规定拆除试样，并测定其

剪切后含水率与颗粒级配。

5 计算和制图

5.0.1 按下列公式计算垂直压力和剪应力：

$$p = \frac{p_v + \Delta p}{A} \quad (5.0.1-1)$$

$$\tau = \frac{p_h - F}{A} \quad (5.0.1-2)$$

$$p_v = C_v R_v \quad (5.0.1-3)$$

$$p_h = C_h R_h \quad (5.0.1-4)$$

式中 p 、 τ ——分别为垂直压力和剪应力，kPa；

p_v 、 p_h ——分别为垂直荷载和水平荷载，kN；

C_v 、 C_h ——分别为垂直千斤顶和水平千斤顶上压力表的率定系数，kN/kPa；

R_v 、 R_h ——分别为垂直和水平千斤顶压力表读数，kPa；

F ——某垂直压力下仪器摩擦力，kN；

Δp ——附加垂直荷载，包括透水板、传压板和千斤顶的重力，千斤顶以上的设备重力不计算在内，kN；

A ——试样面积， m^2 。

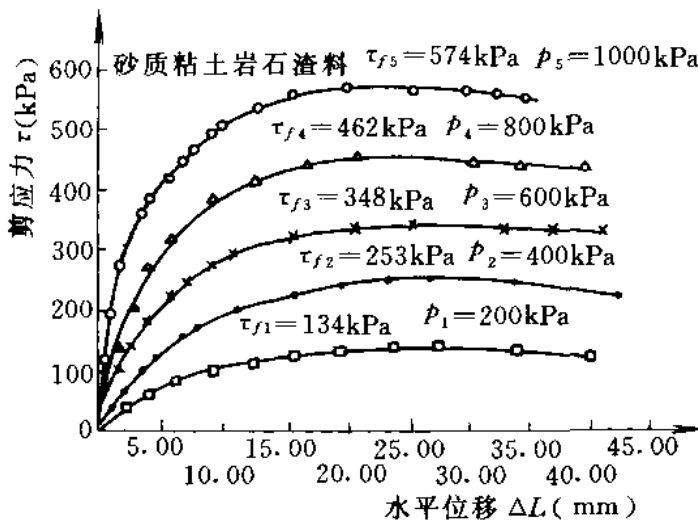


图 5.0.2-1 剪应力与水平位移关系曲线

5.0.2 以剪应力和垂直变形为纵坐标，水平位移为横坐标，分别绘制某级垂直压力下剪应力 τ 与水平位移 ΔL 关系曲线和垂直变形 Δs 与水平位移 ΔL 关系曲线，见图 5.0.2-1 和图 5.0.2-2。

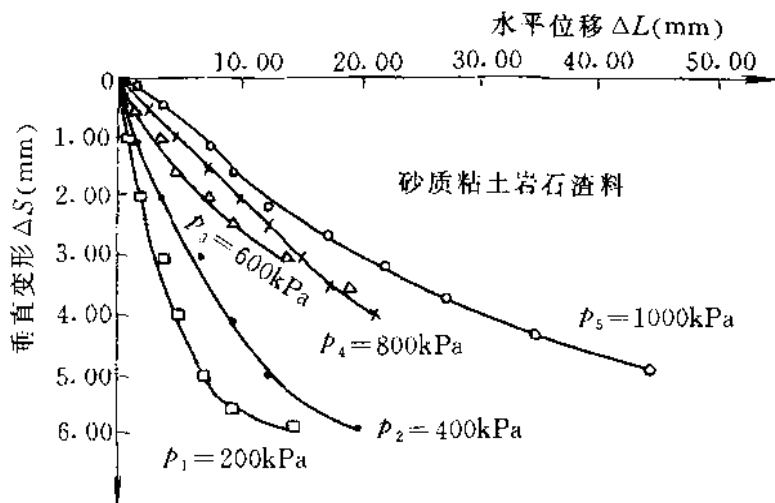


图 5.0.2-2 水平位移与垂直变形关系曲线

5.0.3 取剪应力 τ 与水平位移 ΔL 关系曲线上峰值或稳定值作为抗剪强度，如图 5.0.2-1 中曲线上的箭头所示。如无明显峰值，则取水平位移达到试样直径 $1/15 \sim 1/10$ 处的剪应力作为抗剪强度 S 。

5.0.4 以抗剪强度 S 为纵坐标，垂直压力 p 为横坐标，绘制抗剪

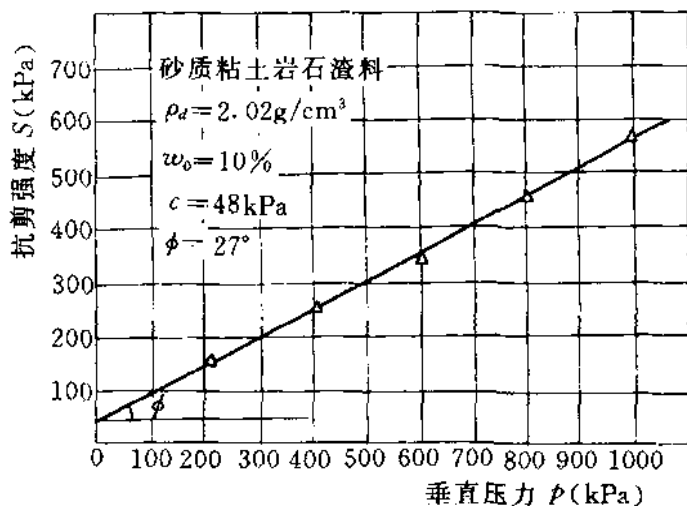


图 5.0.4 抗剪强度与垂直压力关系曲线

附 a 大型直剪仪的检查和校准

a. 1 仪器检查

a. 1. 1 剪切仪底座必须水平、稳固。

a. 1. 2 上、下剪切盒要求直径相等并同心，试验前测量其平均高度和平均直径。

a. 1. 3 滚轴排和开缝用的滚珠必须直径相等，均匀分布。

a. 1. 4 所有滑动部位必须擦油，并检查是否灵活。

a. 1. 5 剪切盒应能均匀地滑动，如有扭动现象，应进行校准。

a. 2 摩擦校准

a. 2. 1 移去上剪切盒，使下剪盒处于正常工作状态，在下剪切盒中心放置有足够刚度的传力钢柱，上放承力钢板。

a. 2. 2 在钢板上放上滚轴排后，再放厚钢板及千斤顶，接液压稳压器，施加垂直荷载至额定值。并保持不变。

a. 2. 3 与剪切试验相同，安装水平千斤顶，接液压源，并安装水平向测位移的百分表，由压力源均匀地施加水平力，直至下剪切盒连续滑动为止。此时水平力总值的 $1/2$ ，即为该垂直荷载下的摩擦力 F 。

a. 2. 4 卸去荷载，将仪器重新安装好，按本规程 a. 2. 2 和 a. 2. 3 的规定在该垂直荷载下重复试验几次，直至最后 2 次的摩擦力差不超过 1% 为止，取其平均值。

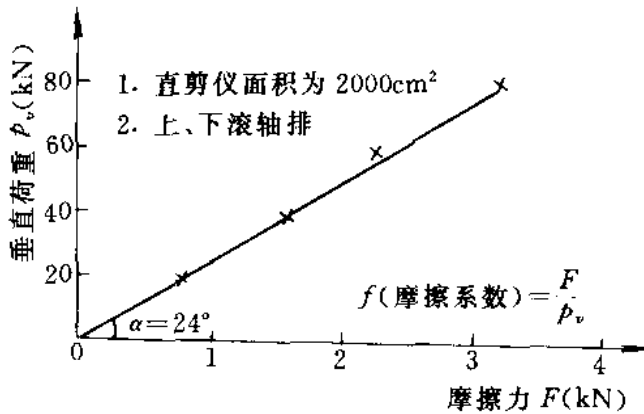
a. 2. 5 变更垂直荷载，按本规程 a. 2. 2~a. 2. 4 的规定进行试验，实测值列于附表 a. 2. 5。然后根据附表 a. 2. 5 中的实测值，以摩擦力 F 为横坐标，垂直荷载 p_v 为纵坐标，绘制 $p_v \sim F$ 关系曲线，如附图 a. 2. 5。

a. 3 千斤顶校准

a. 3. 1 将装有经检定合格的压力表的（或与液压源连接）千斤顶放在油压机上，用在千斤顶与机之间放一标准测力计进行校准。先使千斤顶活塞伸出 $1/2$ 高度，用油压机向千斤顶加压。

附表 a. 2. 5 不同垂直荷载下的摩擦力实测值

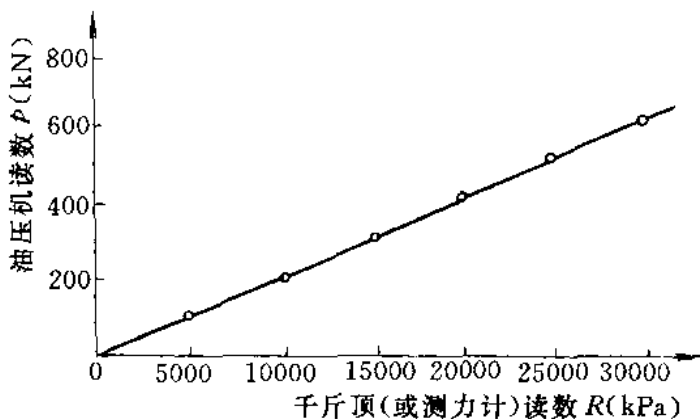
垂直荷载 p_v (kN)	10.00	15.00	20.00	40.00	60.00	80.0
摩擦力 F (kN)	0.42	0.65	0.85	1.60	2.28	3.20
摩擦系数 (两排滚轴) $f = F/p_v$	0.042	0.043	0.043	0.040	0.038	0.040
摩擦系数 (一排滚轴) $f = F/p_v$	0.021	0.022	0.022	0.020	0.019	0.020



附图 a. 2. 5 $p_v \sim F$ 关系曲线

a. 3. 2 使千斤顶活塞上升，通过标准测力计与油压机承压板接触，测记压力表和测力计起始读数。然后使油压机向千斤顶加压，同时测记千斤顶的压力表读数 p 和标准测力计测值 R ，直加到千斤顶最大出力为止。重复进行 3 次，取其平均值。

a. 3. 3 以千斤顶（或液压源）压力表读数 p 为纵坐标，测力计实测值 R 为横坐标，绘制 $p \sim R$ 关系曲线，见附图 a. 3. 3。



附图 a. 3. 3 $p \sim R$ 关系曲线

粗颗粒土三轴压缩试验

SL237—060—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 本试验是测定粗颗粒土抗剪强度的一种方法。它通常用 3 至 4 个试样, 分别在不同恒定周围压力 (即最小主应力 σ_3) 下, 施加轴向压力 (即主应力差 $\sigma_1 \sim \sigma_3$), 进行剪切至破坏, 然后按摩尔—库仑强度理论求得抗剪强度参数。

1.0.2 本规程适用于测定最大粒径为 60 mm 的粗颗粒土的总应力抗剪强度参数、有效应力抗剪强度参数和孔隙压力系数。

1.0.3 根据粗颗粒土的性质、工程情况和不同的排水条件, 本试验分为不固结不排水剪 (UU)、固结不排水剪 (CU)、固结排水剪 (CD) 等三种试验类型。

2 引用标准

SL118—95 《应变控制式三轴仪的校验方法》。

SL237—017—1999 《三轴压缩试验》。

SL237—053—1999 《粗颗粒土的土样制备》。

3 仪器设备

3.1 仪器设备

3.1.1 大型三轴仪, 如图 3.1.1。主要有压力室、轴向加压系统、周围压力系统、反压力系统、体变量测系统和孔隙水压力量测系统等部分组成。

1 压力室: 为镶有有机玻璃窗口的钢筒, 尺寸按试样大小

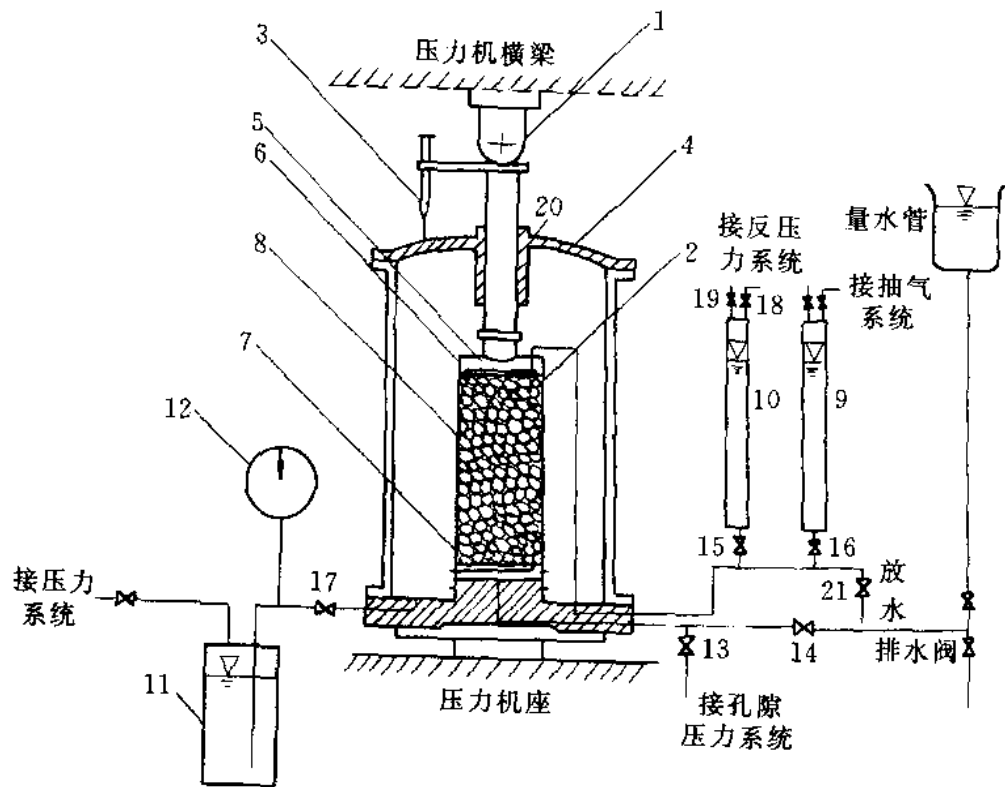


图 3.1.1 大型三轴仪示意图

1—测力计；2—试样；3—轴向位移计；4—压力室罩；5—顶帽；6—上透水板；7—下透水板；8—橡皮膜；9—量水管；10—体变管；11—压力库；12—压力表；13—孔隙压力阀；14—进水管阀；15—排水阀；16—量水管阀；17—周围压力阀；18—反压力阀；19—通气阀；20—排气阀；21—排气（水）阀

选用。

2 轴向加压系统：包括加压框架、加压设备和轴向压力量测设备（测力计、压力机等）。

3 周围压力系统：包括空气压缩机、压力库和恒压装置。

4 变形量测系统：包括大量程百分表和体变管。

3.1.2 附属设备：包括对开成型筒、承膜筒、击实锤或振捣器、橡皮膜、磅秤、天平、钢尺、秒表、瓷盘、烘箱等。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 三轴压缩仪：参照 SL118—95 规定的校验方法进行校准。

3.2.2 位移计（百分表）：参照 JJG379—95《大量程百分表检定规程》进行检定。

3.2.3 磅秤、天平、秒表等应按有关检定规程进行检定。

3.3 三轴仪使用前的检查

3.3.1 轴向压力系统、周围压力系统运行正常。根据工程要求确定周围压力 σ_3 的最大值，按 σ_1 大于 $5\sigma_3$ 估算轴向额定压力。轴向测力计的准确度不宜低于最大轴向压力的 1%。

3.3.2 压力室应密封不泄漏。传压活塞应在轴套内滑动正常；孔隙压力量测设备的管道内应无气泡；各管道、阀门、接头等应通畅不泄漏。检查完毕后，关闭周围压力阀、排水阀、孔隙压力阀等，以备使用。

3.3.3 橡皮膜应不漏水。

3.3.4 孔隙压力量测系统参照 SL237—017—1999 规程 3.3.2 的规定进行检查。

4 无粘性粗颗粒土试验

4.1 试样制备

4.1.1 试样尺寸：试样直径应等于或大于最大土粒直径的 5 倍 ($D \geq 5d_{\max}$)，试样高度为试样直径的 2~2.5 倍 ($H/D = 2.0 \sim 2.5$)。一般试样直径采用 200~500 mm。

4.1.2 按 SL237—053—1999 规程的规定备好土料。根据试验要求的干密度、含水率及试样尺寸计算并称取试验所需的土样。

4.1.3 将备好的土样，按装填层数分成几等份。应防止粗细颗粒分离，保证试样的均匀性。

4.1.4 将透水板放在试样底座上，开进水阀，使试样底座透水板充水至无气泡逸出，关闭阀门。

4.1.5 在底座上扎好橡皮膜，安装成型筒，将橡皮膜外翻在成型筒上，并使其顺直和紧贴成型筒内壁。

4.1.6 装入第 1 层土样，均匀拂平表面，用振捣法使土样达到预计高度后，再以同样方法填入第 2 层土样。如此继续，直至装完最后一层，整平表面，加上透水板和试样帽，扎紧橡皮膜。开真空泵从试样顶部抽气，使试样在 30 kPa 负压下直立，再去掉成型筒。

4.1.7 检查橡皮膜，若有破裂处，立即进行粘补，必要时再加一层。

4.1.8 用钢直尺量测试样高度 H_0 ，用钢卷尺量测试样上、中、下部的直径，并按式 (4.1.8) 计算试样平均直径 D_0 ：

$$D_0 = \frac{1}{4}(D_1 + 2D_2 + D_3) - 2t \quad (4.1.8)$$

式中 D_1 、 D_2 、 D_3 ——试样上部、中部、下部的直径；

t ——橡皮膜厚度。

4.1.9 安装压力室，旋紧连接螺栓。开压力室排气孔，向压力室注满水后，关排气孔。开压力机，使试样与传力活塞和测力计等接触，当测力计指针微动时立即停机。并调整轴向位移计（百分表）和测力计指针为零。

4.2 试样饱和

4.2.1 抽气饱和。由试样顶部抽气，试样内形成负压，测记进水量管水位读数后，徐徐开进水阀。试样在负压作用下，水由下而上逐渐饱和试样。待试样上部出水后，持续 20 min 左右，停止抽气。徐徐打开周围压力阀施加周围压力 σ_3 ($\leq 30\text{kPa}$)，并开试样上部排气（水）阀释放负压。提高进水管水位，用水头饱和法进

行饱和。

4.2.2 水头饱和。按本规程 4.1.9 规定安装压力室后,徐徐打开周围压力阀施加周围压力 σ_3 ($\leq 30\text{kPa}$) 和开试样上部排气(水)阀,释放负压,测记进水量管水位读数。开进水阀,逐渐提高进水量管水头 2~3 m,水由下而上逐渐饱和试样,待上部出水后,测记进、出水量管水位读数。用进水量、出水量和孔隙体积估算饱和度。若未达到要求,仍按上述方法延长饱和时间,至符合要求为止。

4.2.3 二氧化碳(CO₂)饱和。二氧化碳饱和系统见图 4.2.3。按本规程中 4.1.9 的规定安装压力室后,徐徐开排气阀(5),施加周围压力 σ_3 ($= 30\text{kPa}$)。开阀门(1)和(3),使二氧化碳(CO₂)由试样底部注入,由下而上置换试样孔隙中的空气。二氧化碳(CO₂)的压力一般以 2~10 kPa 为宜。待水气瓶(6)内的水面冒气泡 3~5 min,再关阀门(1),开阀门(2)。利用水头使试样饱和。

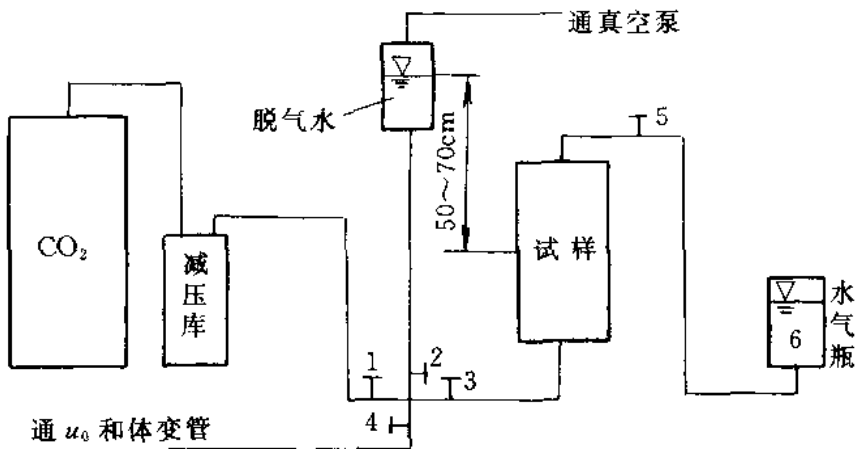


图 4.2.3 二氧化碳饱和系统示意图

4.2.4 饱和度的鉴别。如孔隙压力系数 B 大于或等于 0.95 时,可以认为试样已达到饱和。如 B 小于 0.95 时,则应继续饱和。 B 值的计算按 SL237—017—1999 规程的式 (5.1.4-1) 计算。

4.3 不固结不排水剪 (UU)

4.3.1 试样饱和后,关进水阀、排水阀,开周围压力阀施加周围

压力至预定值，并保持恒定。周围压力的大小应根据工程的实际荷载选用。一般采用 100、200、300、400 kPa

4.3.2 以每分钟轴向应变 0.5%~1.0% 的速率施加轴向压力。试样的轴向应变每 0.1%~0.4% 测记测力计和轴向位移计读数各 1 次，若有特殊要求，可酌情加密或减少读数次数。有峰值时，试验应进行至轴向应变达到峰值出现后的 3%~5%。如无峰值时，则轴向应变达到 15%~20%。

4.3.3 试验结束后，卸去轴向压力，再卸去周围压力，开压力室排气孔和排水阀，排去压力室内的水，卸除压力室罩，揩干试样周围余水，去掉橡皮膜，拆掉试样，并对剪后试样进行描述。必要时，测定剪切面试样含水率和分析颗粒破碎情况。

4.3.4 其余几个试样，分别在不同周围压力下，按本规程 4.3.1 至 4.3.3 的规定进行试验。

4.4 固结不排水剪 (CU) (测孔隙压力)

4.4.1 试样饱和后，使量水管水面位于试样中部，测记读数。关排水阀，测记孔隙压力的起始读数。施加周围压力至预定值，并保持恒定，测定孔隙压力稳定后的读数。

4.4.2 开排水阀，每隔 20~30 s 测记排水量管水位和孔隙压力计读数各 1 次。在固结过程中随时绘制排水量 ΔV 与时间 t 或孔隙水压力 u 与时间 t 关系曲线 (见图 4.4.2)。正常情况下，排水

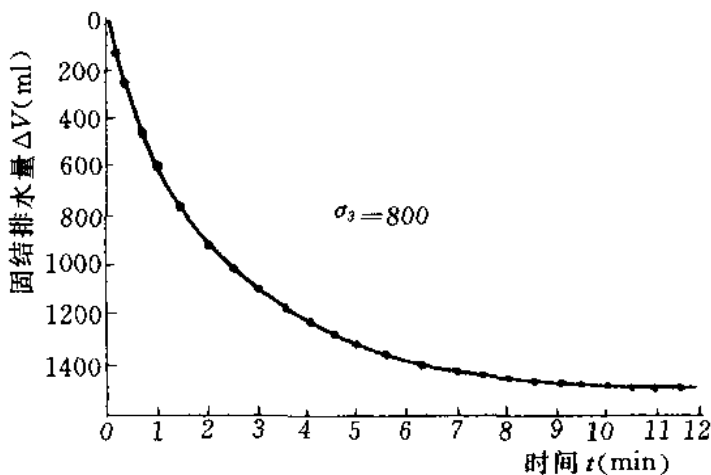


图 4.4.2 $\Delta V \sim t$ 关系曲线

量应趋于稳定，即曲线的下段趋于水平，即认为固结完成。

4.4.3 固结完成后，关排水阀，测记量水管水位和孔隙压力计读数。开压力机，当轴向压力计微动时，表示活塞与试样接触，关压力机，测轴向位移计读数，计算固结下沉量 Δh 。

4.4.4 以每分钟应变为 $0.1\% \sim 1.0\%$ 的剪切速率按本规程 4.3.2 至 4.3.3 的规定进行剪切。剪切过程中除测记轴向测力计、轴向位移计读数外，还需测记孔隙压力计读数。剪切结束后关孔隙压力阀。

4.4.5 其余几个试样，分别在不同周围压力下，按上述步骤进行试验。

4.5 固结排水剪 (CD)

4.5.1 按本规程 4.4.1 和 4.4.2 的规定固结完成后，不关排水阀，使试样保持排水条件。以每分钟应变为 $0.1\% \sim 0.5\%$ 的剪切速率按本规程 4.3.2 和 4.3.3 的规定进行剪切。在剪切过程中测记轴向压力计、轴向位移计和量水管读数。

4.5.2 其余几个试样，分别在不同周围压力下，按上述步骤进行试验。

5 粘质粗颗粒土试验

5.1 试样制备

5.1.1 按 SL237—053—1999 规程的规定制备土样。根据干密度、含水率、试样体积及个数一次备好一组试验所需的土样，称取每个试样所需要的土样质量备用。

5.1.2 将每个试样的土样分成 3~5 等分，分 3 层或 5 层填入成型筒。用锤击实或压力机压实，第 1 层土样压实后，其表面应刨毛，再加第 2 层土样压实。其他各层用同法进行压实，每层土样应压实至预定高度。

5.1.3 拆去成型筒（或将试样从成型筒内推出）。将试样置于压力室底座上测定其直径 D_0 及高度 H_0 ，依次放上顶帽，套上橡皮

膜，并将其与顶帽和底座孔紧。

5.2 试样饱和

5.2.1 抽气饱和：将试样连同成型筒一起吊入饱和缸内，盖好密封顶盖后进行抽气。待接近 1 个大气压后，持续约 1 h，徐徐注入清水，并保持真空度稳定，直至试样全部浸没，停止抽气。静置 10 h 以上，将成型筒连同试样从水中取出，将试样从成型筒内取出，然后称量并计算其饱和度。

抽气饱和也可在三轴仪上进行，其方法按本规程 4.2.1 的规定。因粘质粗颗粒土透水性小，负压值宜在 60~90 kPa 范围内。

5.2.2 反压力饱和。若需反压力饱和时，将试样安装于压力室后，先向接反压力系统的体变管内注水，并关闭孔隙压力阀、反压力阀、测记体变管读数。再向试样施加 30 kPa 的周围压力，开孔隙压力阀，测记孔隙压力稳定读数。同时分级施加周围压力和反压力，施加过程中，始终保持周围压力比反压力大 30 kPa。反压力和周围压力的每级增量为 20 kPa，待孔隙压力稳定后，测记孔隙压力和体变管读数，然后再施加下一级周围压力和反压力，直至 $B = \Delta u / \Delta \sigma_3$ 等于或大于 0.95 为止。

5.3 不固结水排水剪 (UU)

5.3.1 按本规程 4.3.1 至 4.3.4 的规定进行试验，以轴向应变每分钟 0.1%~0.5% 的速率进行剪切。

5.4 固结不排水剪 (CU) (测孔隙压力)

5.4.1 试样饱和后按本规程 4.4.1 和 4.4.2 的规定进行排水固结，同时开排水阀和秒表，在 0、0.15、1、4、9、16、25、36、49min... 等时刻测记量水管水位和孔隙压力计读数。在固结过程中随时绘制固结排水量 ΔV 与时间 t 对数 (或平方根) 曲线，见图 5.4.1-1 和图 5.4.1-2；或绘制孔隙压力消散度 U 与时间 t 对数曲线。

5.4.2 如对试样施加反压力时，则按本规程 5.2.2 的规定进行。然后保持反压力恒定，关排水阀，增大周围压力，使其与反压力之差等于选定的周围压力并保持恒定，测记稳定后的孔隙压力计和体变管水位读数作为固结前的起始读数。然后开排水阀，让试

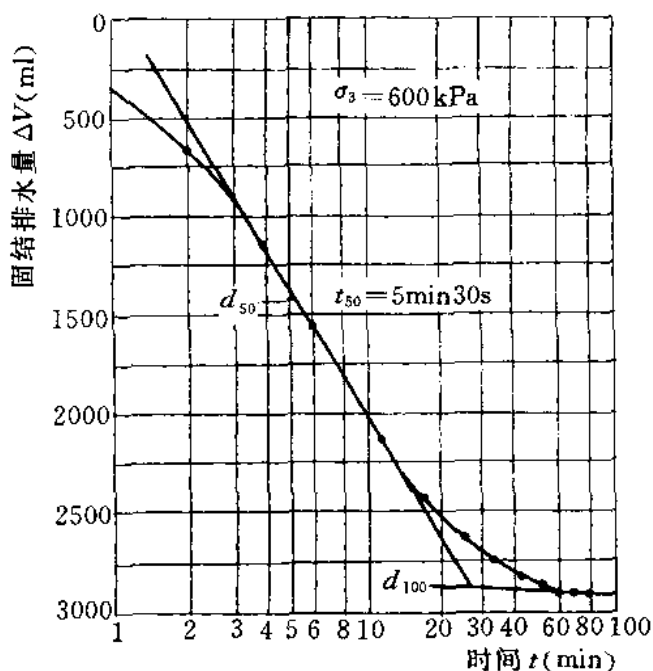


图 5.4.1-1 固结排水量与时间对数关系曲线

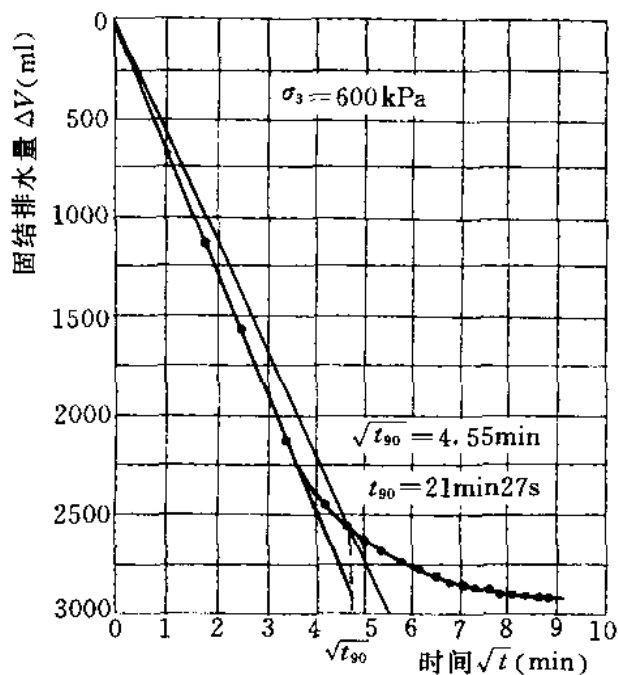


图 5.4.1-2 固结排水量与时间平方根关系曲线

样排水到体变管，并按本规程 5.4.1 的规定进行排水固结。固结完成后按本规程 4.4.3 的规定测记体变管水位、孔隙压力计和轴向位移计读数等，测定固结下沉量 Δh 。

5.4.3 剪切速率控制在每分钟轴向应变 $0.05\% \sim 0.1\%$ 以内,按本规程 4.4.4 的规定进行剪切。

5.4.4 对固结不排水,不测孔隙水压力的剪切试验,在固结完成后,关排水阀、孔隙压力阀,按本规程 5.4.3 的规定进行剪切,但剪切过程中不测孔隙水压力。

5.5 固结排水剪 (CD)

5.5.1 固结完成后,不关孔隙压力阀和排水阀,保持排水条件,以每分钟轴向应变为 $0.012\% \sim 0.003\%$ 的剪切速率按本规程 4.5.1 和 4.5.2 的规定进行剪切。并在剪切过程中测记轴向测力计、轴向位移计、量水管水位和孔隙压力计读数。

6 计算和制图

6.0.1 按 SL237—017—1999 规程 5.1.1~5.2.3 计算和制图。

7 记 录

7.0.1 本试验的记录格式如 SL237—017—1999 规程表 6.0.1-1、表 6.0.1-2、表 6.0.1-3。

化学分析试样风 干含水率试验

SL237—061—1999

1 定义和适用范围

1.0.1 风干含水率是风干试样在温度 $105\sim 110^{\circ}\text{C}$ 下烘至恒量时，失去水分的质量与恒量时试样的质量之比，以百分比 (%) 表示。

1.0.2 本试验的目的是测定风干试样的含水率，将其作为其他试验中风干试样质量换算成烘干样质量的依据。本试验采用烘干法。

1.0.3 本规程适用于除有机质含量较高以及含石膏较多的土之外的各种土。

2 仪器设备

2.1 仪器设备

2.1.1 烘箱：附温度控制装置。

2.1.2 分析天平：分度值 0.001 g 。

2.1.3 铝盒或水分皿。

2.1.4 干燥器：盛有氯化钙或其他干燥剂。

2.2 仪器设备的检定和校准

2.2.1 分析天平应按相应的检定规程进行检定。

3 操作步骤

3.0.1 将洁净的铝盒置于 $105\sim 110^{\circ}\text{C}$ 温度的烘箱中烘焙 $3\sim 4\text{ h}$ ，取出在干燥器中冷却至室温，立即用分析天平称量。如此反复操

作，直至恒量为止（前后两次质量相差不大于 0.001 g），记下铝盒质量。

3.0.2 将风干试样 2~3 g 放入上述称量过的铝盒中，用分析天平称量，准确至 0.001 g。

3.0.3 将盛试样的铝盒放在烘箱中，铝盒敞开，在温度 105~110℃ 下烘焙 6~8 h。

3.0.4 取出铝盒，将盒盖盖好，放在干燥器中冷却至室温，立即称量。

3.0.5 再将铝盒放在烘箱中，在温度 105~110℃ 下烘焙 3~4 h，取出铝盒，将盒盖盖好，放在干燥器中冷却至室温，立即称量。如此反复操作直至恒量为止，记下质量。

4 计 算

4.0.1 按式 (4.0.1) 计算风干土含水率：

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m} \times 100 \quad (4.0.1)$$

式中 w ——风干土含水率，%；

m_1 ——风干试样加铝盒质量，g；

m_2 ——烘干试样加铝盒质量，g；

m ——铝盒质量，g；

100——百分比系数。

计算至 0.01%，平行试验允许误差 0.2%~0.5%，取算术平均值。

5 记 录

5.0.1 本试验记录格式如表 5.0.1。

表 5.0.1 风干含水率试验记录表

工程名称 _____ 试验者 _____

试验方法 _____ 计算者 _____

试验日期 _____ 校核者 _____

土样 编号	铝盒 编号	铝盒质量		铝盒加风 干土质量	铝盒加烘干 土质量		烘干土 质量	失水 质量	风干含水率	
		m (g)			m_1 (g)	m_2 (g)			$m_2 - m$ (g)	$m_1 - m_2$ (g)
		第 1 次	第 2 次	第 1 次		第 2 次	计算值	平均值		

酸碱度试验

SL237—062—1999

1 定义和适用范围

1.0.1 酸碱度 (pH 值) 系溶液中氢离子浓度 (氢离子活度) 的负对数, 即 $\text{pH} = -\lg [\text{H}^+]$ 。pH 是标志溶液酸碱度的通用指标。pH 值的范围为 0~14。溶液 pH 等于 7 时为中性, 小于 7 时为酸性, 大于 7 时为碱性。

1.0.2 本试验的目的是测定土的水浸出液或悬液的酸碱度, 并以 pH 表示。

1.0.3 本试验采用电测法, 适用于各种土类。

2 仪器设备和试剂

2.1 仪器设备

2.1.1 酸度计 (pH 计): 应附玻璃电极、甘汞电极或复合电极。

2.1.2 电动振荡器。

2.1.3 天平: 称量 200 g, 分度值 0.01 g。

2.1.4 其他: 容量瓶、广口瓶、烧杯、定性滤纸、温度计等。

2.2 仪器设备的检定和校准

2.2.1 酸度计: 按酸度计的使用说明书, 用不同酸碱度的标准缓冲溶液进行校正。

2.2.2 容量瓶: 按 JJG20—98《标准玻璃量器检定规程》进行检定。

2.3 试剂

2.3.1 pH=4.01 标准缓冲溶液：称取在温度 105~110℃ 经 2~3 h 烘干的邻苯二甲酸氢钾 ($\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_6$) 10.21g 溶于纯水中，移至 1000 ml 容量瓶中定容。

2.3.2 pH=6.87 标准缓冲溶液：称取在温度 105~110℃ 经 2~3 h 烘干的磷酸氢二钠 (Na_2HPO_4) 2.53 g 和磷酸二氢钾 (KH_2PO_4) 3.39g 溶于纯水中，移至 1000 ml 容量瓶中定容。

2.3.3 pH=9.18 标准缓冲溶液：将硼砂 ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) 3.80g 溶于已除去二氧化碳 (CO_2) 的纯水中，移至 1000 ml 容量瓶中定容。贮于密闭的塑料瓶中。此溶液保存使用期不宜超过 2 个月，若出现发霉、浑浊，不宜使用。

2.3.4 饱和氯化钾 (KCl) 溶液：向少量纯水中加入氯化钾，边加边搅拌，直至不溶解为止。

3 操作 步 骤

3.0.1 土悬液制备：取通过 2 mm 筛的风干土样 10 g，放入 100ml 广口瓶，加纯水 50 ml (土水比为 1:5)。在振荡器上振荡 3 min，静止 30 min。

3.0.2 将少许土悬液盛于小烧杯中，将酸度计上的玻璃电极和甘汞电极 (或复合电极) 插入杯中，轻轻摇动烧杯，使土悬液均匀接触电极 2~3 min，弃去。如此反复用土悬液洗涤 1~2 次。再取土悬液按仪器说明书测定 pH 值，准确至 0.01pH。同时测定土悬液温度，进行温度补偿。2 次平行允许误差 0.1 pH。

3.0.3 测量完毕，关闭电源，用纯水洗净电极，并用滤纸吸干电极表面的水分或将玻璃电极浸泡在纯水中。

4 记 录

4.0.1 本试验记录格式如表 4.0.1。

表 4.0.1 酸碱度 (pH) 测定记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
 试验方法 _____ 计算者 _____
 试验时间 _____ 校核者 _____

土样编号	土水比例	温度 (°C)	pH 值		备 注
			第 1 次	第 2 次	

易溶盐试验

SL237—063—1999

1 定义和适用范围

1.0.1 土的易溶盐系指土中易溶于水的盐类，包括全部氯化物、易溶的硫酸盐（如钾、钠的硫酸盐）和易溶的碳酸盐（如钾、钠的碳酸盐）以及重碳酸盐等。

1.0.2 本试验的目的是测定土中易溶盐的总量（或称残渣，即用双氧水除去水溶性有机质后的烘干残渣）及其组成的阴离子（ CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} ）和阳离子（ Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 及 Na^+ ）的含量。测定结果以1kg烘干土所含的克（g）数（g/kg）表示，或以质量摩尔浓度（mol/kg）表示。

1.0.3 本规程适用于各种土类。

2 引用标准

SL237—061—1999《化学分析试样风干含水率试验》。

3 浸出液制取

3.1 仪器设备

3.1.1 过滤设备：包括真空泵、平底瓷漏斗、抽滤瓶。

3.1.2 离心机：转速为10000 r/min。

3.1.3 天平：称量200g，分度值0.01 g。

3.1.4 其他：广口瓶、细颈瓶等。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 天平：应按相应的检定规程进行检定。

3.3 操作步骤

3.3.1 称取 2 mm 筛下风干试样 50~150 g (视土中含盐量和分析项目而定), 准确至 0.01g。置于广口瓶, 按土水比例 1:5 加入纯水, 振荡 3 min, 抽气过滤; 另取试样 3~5g, 按 SL 237—061—1999 规程的规定测定风干含水率。

3.3.2 将滤纸用纯水浸湿后贴在漏斗底部, 漏斗装在抽滤瓶上, 联通真空泵抽气, 使滤纸与漏斗贴紧, 将振荡后的土悬液摇匀, 倾入漏斗中抽气过滤, 过滤时漏斗用表面皿盖好。

3.3.3 当发现滤液混浊时, 需重新过滤。经反复过滤仍然混浊, 应用离心机分离。所得的透明滤液即为土的浸出液, 贮于细口瓶中供分析用。

4 易溶盐总量测定

(烘干法)

4.1 仪器设备

4.1.1 分析天平: 称量 200 g, 分度值 0.0001 g。

4.1.2 烘箱: 附温度控制装置。

4.1.3 其他: 水浴锅, 蒸发皿, 玻三角, 表面皿, 移液管, 干燥器等。

4.2 仪器设备的检定和校准

4.2.1 分析天平: 应按相应的检定规程进行检定。

4.3 试剂

4.3.1 15% 双氧水 (化学纯)。

4.3.2 2% 碳酸钠 (Na_2CO_3) 溶液。

4.4 操作步骤

4.4.1 用移液管吸取浸出液 50~100 ml 注入已知恒量的蒸发皿中, 盖上表面皿, 放在水浴锅上蒸干。当蒸干残渣中呈现黄褐色时, 应加入 15% 双氧水 1~2 ml, 继续在水浴锅上蒸干, 反复处理至黄褐色消失。

4.4.2 将蒸发皿放入烘箱,在温度 105~110℃下烘 4~8 h。取出后放入干燥器中冷却,称蒸发皿加试样的总质量。反复进行至 2 次质量差值不大于 0.001 g。

4.4.3 当浸出液蒸干残渣中含有大量结晶水时,将使测得的易容盐含量偏高,遇此情况,可用两个蒸发皿,一个加浸出液 50 ml,另一个加纯水 50 ml (空白),然后各加等量 2% 碳酸钠溶液,搅拌均匀后按本规程 4.4.1 和 4.4.2 的规定操作,烘干温度改为 180℃。

4.5 计算

4.5.1 按式 (4.5.1) 计算未经 2% 碳酸钠溶液处理的易溶盐总量:

$$\text{易溶盐总量} = \frac{(m_2 - m_1) \times \frac{V_w}{V_1}}{m_d \times 10^{-3}} \quad (4.5.1)$$

$$m_d = m / (1 + w/100)$$

式中 m_2 ——蒸发皿加烘干残渣质量, g;

m_1 ——蒸发皿质量, g;

V_w ——制取浸出液所加纯水量, ml;

V_1 ——吸取浸出液量, ml;

m_d ——烘干土质量, g;

m ——风干土质量, g;

w ——风干含水率, %;

10^{-3} ——将 g 换算成 kg 的因数。

计算至 0.1g/kg, 平行允许误差 0.1~0.2 g/kg, 取算术平均值。

4.5.2 按式 (4.5.2) 计算经 2% 碳酸钠处理后的易容盐总量:

$$\text{易溶盐总量} = \frac{V_w (m_3 - m_0)}{V_1 \times m_d \times 10^{-3}} \quad (4.5.2)$$

式中 m_3 ——蒸干后试样加碳酸钠质量, g;

m_0 ——蒸干后碳酸钠质量, g;

其余符号见本规程式 (4.5.1)。

计算至 0.1 g/kg, 平行试验允许误差 0.1~0.2 g/kg, 取算术平均值。

注: 本规程中土的化学分析试验所用土样均为风干土样, 在结果计算时需将土样的风干质量 (m , g) 换算成烘干质量 (m_d , g), 因此在进行化学分析试验时均需同期测试土的风干含水率 (w , %), 其换算关系为 $m_d = m / (1 + w/100)$ 。

4.6 记录

4.6.1 本试验记录格式如表 4.6.1。

表 4.6.1 易溶盐总量测定试验的记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
 试验方法 _____ 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

土样 编号	风干土 质量 m (g)	风干含 水率 w (%)	烘干土 质量 m_d (g)	加水 容积 V_w (ml)	吸取浸 出液 V_1 (ml)	蒸发皿 编号 No	蒸发皿 质量 m_1 (g)	蒸发皿 加残渣 质量 m_2 (g)	残渣 质量 $m_2 - m_1$ (g)	易溶盐 总量 (g/kg)	
										计算值	平均值

5 碳酸根 (CO_3^{2-}) 及重碳酸根 (HCO_3^{2-}) 的测定

(双指示剂中和滴定法)

5.1 仪器设备

5.1.1 酸式滴定管: 容量为 25 ml, 分度值为 0.1 ml。

5.1.2 分析天平: 称量 200 g, 分度值 0.0001 g。

5.1.3 其他: 容量瓶、蒸发皿、烘箱等。

5.2 仪器设备的检定和校准

5.2.1 分析天平应按相应的检定规程进行检定。

5.2.2 容量瓶：应参照 JJG20—89《标准玻璃仪器检定规程》进行检定。

5.3 试剂

5.3.1 0.1%甲基橙指示剂：称 0.1g 甲基橙溶于 100 ml 纯水中。

5.3.2 0.5%酚酞指示剂：称 0.5 g 酚酞溶于 50 ml 95%的酒精中，用纯水稀释至 100 ml。

5.3.3 硫酸 (H_2SO_4) 标准溶液：将 3 ml 浓硫酸加入 1000 ml 纯水，然后稀释至 5000 ml。

5.4 标准溶液的标定

5.4.1 硫酸 (H_2SO_4) 标准溶液的标定：取在温度 160~180℃ 下烘 2~4 h 的无水碳酸钠 (Na_2CO_3) 3 份，每份 0.1 g (准确至 0.0001g)。放入 3 个锥形瓶中，注入 20~30 ml 纯水，加 0.1%甲基橙指示剂 2 滴，用配制好的硫酸标准溶液滴定至溶液由黄色变为橙色为止。记下硫酸标准溶液用量。按式 (5.4.1) 计算硫酸标准溶液的浓度：

$$C_s = m / (V \times 0.106) \quad (5.4.1)$$

式中 C_s ——硫酸标准溶液的浓度，mol/l；

V ——硫酸标准溶液的用量，ml；

m ——碳酸钠的用量，g；

0.106——碳酸钠摩尔质量，kg/mol。

计算准确至 0.0001 mol/l，取 3 个结果的算术平均值作为硫酸标准溶液的浓度。

注：硫酸标准溶液也可用标定过的氢氧化钠标准溶液标定。

5.5 操作步骤

5.5.1 用移液管吸取土浸出液 25 ml，注入锥形瓶中，加 0.5%酚酞指示剂 2~3 滴，如试液不显红色，表示无碳酸根 (CO_3^{2-}) 存在；当试液显红色时，用硫酸标准溶液滴定至呈淡红色为止，记下硫酸标准溶液的用量，准确至 0.01 ml。

5.5.2 在试液中加入 0.1% 甲基橙指示剂 1~2 滴，继续用硫酸标准溶液滴定至试液由黄色变为橙色为止，记下硫酸标准溶液用量，准确至 0.05 ml。

5.5.3 滴定后的试液，可作测定氯离子 (Cl⁻) 用。

5.6 计算

5.6.1 按下列两式计算碳酸根的含量：

$$b(\text{CO}_3^{2-}) = \frac{V_1 \times C_s \times \frac{V_w}{V}}{m_d \times 10^{-3}} \quad (5.6.1-1)$$

$$\text{CO}_3^{2-} = 0.060 \times b(\text{CO}_3^{2-}) \quad (5.6.1-2)$$

式中 $b(\text{CO}_3^{2-})$ —— 碳酸根的质量摩尔浓度，mmol/kg；

CO_3^{2-} —— 碳酸根含量，g/kg；

V_1 —— 酚酞为指示剂滴定时硫酸标准溶液用量，ml；

V_w —— 制浸出液加纯水量，ml；

V —— 试验时吸取土浸出液量，ml；

C_s —— 硫酸标准溶液的浓度，mol/l；

m_d —— 烘干土质量，g；

0.060 —— 碳酸根的摩尔质量，g/mmol；

10^{-3} —— 将 g 换算成 kg 的因数。

计算准确至 0.001g/kg 或 0.01 mmol/kg，平行误差不大于 0.015g/kg 或 0.25 mmol/kg，取算术平均值。

5.6.2 按下列两式计算重碳酸根的含量：

$$b(\text{HCO}_3^-) = \frac{2(V_2 - V_1) \times C_s \times \frac{V_w}{V}}{m_d \times 10^{-3}} \quad (5.6.2-1)$$

$$\text{HCO}_3^- = 0.061 \times b(\text{HCO}_3^-) \quad (5.6.2-2)$$

式中 $b(\text{HCO}_3^-)$ —— 重碳酸根的质量摩尔浓度，mmol/kg；

HCO_3^- —— 重碳酸根含量，g/kg；

V_2 —— 甲基橙为指示剂滴定时的硫酸标准溶液用

量, ml;

0.061——重碳酸根的摩尔质量, g/mmol;

2——1mol/l 硫酸可与 2 mol 重碳酸根反应;

其余符号见本规程式 (5.6.1-1)。

计算准确至 0.001g/kg 或 0.01 mmol/kg, 平行误差不大于 0.02g/kg 或 0.3 mmol/kg, 取算术平均值。

5.7 记录

5.7.1 本试验记录格式如表 5.7.1。

表 5.7.1 易溶盐碳酸根 (CO_3^{2-}) 重碳酸根 (HCO_3^-) 的试验记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
试验方法 _____ 计算者 _____
试验日期 _____ 校核者 _____

土样 编号	烘干 土质 量 m_d (g)	加水 体积 V_w (ml)	吸取 滤液 体积 V (ml)	硫酸 (H_2SO_4) 标准溶液			碳酸根含量 (g/kg)		重碳酸钙含量 (g/kg)	
				浓度 C (mol/l)	第 1 次用量 V_1 (ml)	第 2 次用量 V_2 (ml)	计算值	平均值	计算值	平均值

6 氯根 (Cl^-) 测定 (硝酸银滴定法)

6.1 仪器设备

6.1.1 酸式滴定管、试剂瓶、细口瓶均为棕色。

6.1.2 分析天平: 称量 200 g, 分度值 0.0001 g。

6.1.3 其他：容量瓶、蒸发皿、烘箱等。

6.2 仪器设备的检定和校准

6.2.1 仪器设备的检定和校准见按本规程 5.2.1, 5.2.2 规定进行。

6.3 试剂

6.3.1 5% 铬酸钾 (K_2CrO_4) 指示剂：取 5g 铬酸钾溶于纯水中，逐滴加入硝酸银 ($AgNO_3$) 标准溶液至略有砖红色沉淀为止。放置一夜后过滤，将滤液稀释至 100 ml。

6.3.2 0.02 mol/l 重碳酸钠 ($NaHCO_3$) 溶液：称取 1.7g 重碳酸钠，溶于纯水中，稀释至 1000 ml。

6.3.3 0.02 mol/l 硝酸银 ($AgNO_3$) 标准溶液：准确称取经 105~110℃ 烘干的分析纯硝酸银 3.3974 g，用纯水溶解，倒入 1000 ml 容量瓶，用纯水稀释定容；贮于棕色细口瓶中。

6.4 操作步骤

6.4.1 取 25 ml 土浸出液，加入甲基橙指示剂，逐滴加入 0.02 mol/l 重碳酸钠溶液至试液变为纯黄色，酸碱度控制为 7。再加入 5% 铬酸钾指示剂 5~6 滴。用硝酸银标准溶液滴定，直至生成砖红色沉淀，记下硝酸银标准溶液用量。

6.4.2 用移液管吸取 25 ml 纯水，按本规程 5.5.1 规定进行空白试验，记下硝酸银标准溶液用量。

6.5 计算

6.5.1 按下列两式计算氯根的含量：

$$b(Cl^-) = \frac{C(V_1 - V_2) \times \frac{V_w}{V}}{m_d \times 10^{-3}} \quad (6.5.1-1)$$

$$Cl^- = 0.0355 \times b(Cl^-) \quad (6.5.1-2)$$

式中 $b(Cl^-)$ ——氯根的质量摩尔浓度，mmol/kg；

Cl^- ——氯根含量，g/kg；

V_1 ——滴定试样时硝酸银标准溶液用量，ml；

V_2 ——空白试验中硝酸银标准溶液用量，ml；

C ——硝酸银标准溶液浓度，mol/l；

V_w ——浸出液加纯水量, ml;

V ——试验时吸取土浸出液量, ml;

m_d ——烘干土质量, g;

0.0355——氯根的摩尔质量, g/mmol;

10^{-3} ——将 g 换算成 kg 的因数。

计算准确至 0.001g/kg 或 0.01mmol/kg, 平行误差不大于 0.005g/kg 或 0.1 mmol/kg, 取算术平均值。

6.6 记录

6.6.1 本试验记录格式如表 6.6.1。

表 6.6.1 易溶盐氯根 (Cl^-) 的试验记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
试验方法 _____ 计算者 _____
试验日期 _____ 校核者 _____

土样 编号	烘干土 质量 m_d (g)	加水 体积 V_w (ml)	吸取滤 液体积 V (ml)	硝酸银标准溶液			氯根含量 (g/kg)	
				浓 度 C (mol/l)	滴定用量 V_1 (ml)	空白用量 V_2 (ml)	计算值	平均值

7 硫酸根 (SO_4^{2-}) 的测定 (EDTA 络合滴定法或比浊法)

7.1 适用范围

7.1.1 硫酸根的测定应根据硫酸根含量的估测结果选用下列方法:

- 1 EDTA 络合滴定法适用于常量分析。
- 2 比浊法适用于硫酸根含量小于 50 mg/l。

7.2 硫酸根含量的估测

7.2.1 试剂。

- 1 5%氯化钡 (BaCl_2) 溶液：将 5g 氯化钡溶于 95ml 纯水。
- 2 1:1 盐酸：将浓盐酸与同体积纯水混匀。

7.2.2 硫酸根含量的估测，应按下列步骤进行：

1 取土浸出液 5 ml 注入试管，加入 1:1 盐酸 2 滴，5%氯化钡溶液 5 滴摇匀。按溶液混浊程度查表 7.2.2 估测硫酸根的含量。当含量大于、等于 50 mg/l 时，用 EDTA 络合滴定法；当含量小于 50 mg/l 时，用比浊法。

2 硫酸根含量测定时，吸取土浸出液体积和钡镁混合剂用量查表 7.2.2。

表 7.2.2 硫酸根测定方法选择与试剂用量表

加氯化钡后溶液 浑浊情况	硫酸根含量 (mg/l)	测定方法	吸取土浸出液体积 (ml)	钡镁混合剂 (ml)
数分钟后微浑浊	<10	比浊法	—	—
立即呈微浑浊	25~50	比浊法	—	—
立即浑浊	50~100	EDTA 法	25	4~5
立即沉淀	100~200	EDTA 法	25	8
立即大量沉淀	>200	EDTA 法	10	10~12

7.3 EDTA 络合滴定法

7.3.1 仪器设备：EDTA 络合滴定法所用的主要仪器设备应符合本规程 5.1.1 至 5.1.3 的规定，但需增加电炉等。

7.3.2 仪器设备的检定和校准：仪器设备的检定和校准按本规程 5.2.1，5.2.2 的规定进行。

7.3.3 试剂。

- 1 1:4 盐酸溶液：将浓盐酸 10 ml 于 40 ml 纯水混匀。
- 2 钡镁混合剂：将 1.22 g 氯化钡 ($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 和 1.02g 氯化镁 ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 溶于水中，稀释至 500 ml，溶液中钡、镁 (Ba^{2+} 、 Mg^{2+}) 离子浓度为 0.01 mol/l，每毫升约沉淀 1 mg 硫酸根 (SO_4^{2-})。

3 氨缓冲溶液 (pH=10): 将 70g 氯化铵 (NH₄Cl) 溶于纯水中, 加入新开瓶的浓氨水 570 ml, 稀释至 1000 ml。本试剂应新鲜配制。

4 铬黑 T 指示剂: 将 0.5 g 铬黑 T 和 100 g 烘干氯化钠 (NaCl) 混合, 磨细拌匀, 贮于棕色瓶中, 并放入干燥器中。

5 酒精: 浓度为 95%。

6 锌 (Zn⁺) 标准溶液: 准确称取经烘干处理的分析纯锌粒 (粉) 0.6538g, 放入烧杯内, 分次加入少量 (20~30 ml) 的 1:1 盐酸溶液, 待完全溶解 (可稍加热, 但勿使溅失) 后, 倒入 1000 ml 容量瓶中定容。此溶液浓度为 0.01 mol/l。

7 0.01mol/l EDTA 标准溶液: 称取乙二胺四乙酸二钠 3.72 g 溶于热纯水中, 冷却后稀释至 1000 ml。

7.3.4 标准溶液的标定。

1 0.01 mol/l EDTA 标准溶液的标定: 用移液管吸取 3 份浓度 0.01 mol/l 锌标准溶液, 每份 20ml, 分别注入 3 个锥形瓶中, 加纯水至 50 ml, 加氨缓冲溶液 10 ml, 铬黑 T 指示剂少许, 95% 酒精 5 ml, 用 EDTA 标准溶液滴定, 使溶液由红色变为亮蓝色为止, 记下用量。

2 按式 (7.3.4) 计算 EDTA 标准溶液的浓度:

$$C_e = V_z \times \frac{C_z}{V_e} \quad (7.3.4)$$

式中 C_e ——EDTA 标准溶液的浓度, mol/l;

V_e ——EDTA 标准溶液的用量, ml;

C_z ——锌标准溶液的浓度, mol/l;

V_z ——锌标准溶液的用量, ml。

计算至 0.0001 mol/l, 取 3 个标定值的算术平均值。

7.3.5 操作步骤:

1 参考表 7.2.2 的规定, 用移液管吸取土浸出液注入锥形瓶, 稀释成 25 ml, 加入 1:4 的盐酸溶液 8 滴, 并煮沸除去二氧化碳。按表 7.2.2 的规定用滴定管缓慢注入钡镁合剂, 边加边摇

动。再煮沸 5 min，冷却后静置 2 h。加入氨缓冲溶液 10 ml 摇匀，再加入铬黑 T 指示剂少许和 95% 酒精 5 ml，摇匀。用 EDTA 标准溶液滴定试液，当试液呈紫色时，摇动 0.5~1min，继续滴定至试液变为亮蓝色为止。记下 EDTA 标准溶液用量，准确至 0.01 ml。

2 另取锥形瓶进行空白试验。用移液管吸取 25 ml 纯水注入锥形瓶，加入 1:4 盐酸溶液 8 滴，注入 10 ml 钡镁合剂、10 ml 氨缓冲溶液、少许铬黑 T 指示剂和 95% 酒精，摇匀。再用 EDTA 标准溶液滴定至空白试液由红色变为亮蓝色为止。记下 EDTA 标准溶液用量。

7.3.6 计算。

1 按式 (7.3.6-1) 计算钡镁合剂浓度：

$$C_b = V_e \times \frac{C_e}{10} \quad (7.3.6-1)$$

式中 C_b ——钡镁混合液浓度，mol/l；

V_e ——滴定时 EDTA 标准溶液用量，ml；

C_e ——EDTA 标准溶液浓度，mol/l。

计算至 0.0001 mol/l。

2 按下列两式计算硫酸根 (SO_4^{2-}) 的含量：

$$b(\text{SO}_4^{2-}) = \frac{[C_b \times V_b - (V_e - V_{e1}) \times C_e] \times \frac{V_w}{V}}{m_d \times 10^{-3}} \quad (7.3.6-2)$$

$$\text{SO}_4^{2-} = 0.096 \times b(\text{SO}_4^{2-}) \quad (7.3.6-3)$$

式中 $b(\text{SO}_4^{2-})$ ——硫酸根的质量摩尔浓度，mmol/kg；

SO_4^{2-} ——硫酸根含量 g/kg；

C_b ——钡镁混合液浓度，mol/l；

V_b ——加入钡镁混合剂量，ml；

V_e ——EDTA 标准溶液滴定土浸出液的用量，ml；

V_{e1} ——消耗于与测硫酸根时体积相同的土浸出液

中钙离子和镁离子的 EDTA 标准溶液的滴定量, ml;

C_e ——EDTA 标准溶液的浓度, mol/l;

V ——试验时吸取土浸出液量, ml;

0.096——硫酸根的摩尔质量, g/mmol;

其余符号见本规程式 (5.6.1)。

计算至 0.001 g/kg 或 0.01 mmol/kg, 平行误差不大于 0.025 g/kg 或 0.25mmol/kg, 取算术平均值。

7.3.7 本试验的记录格式如表 7.3.7。

表 7.3.7 硫酸根 (SO_4^{2-}) 测定记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
 试验方法 EDTA 法 _____ 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

土样 编号	烘干土 质量 m_d (g)	加水 体积 V_w (ml)	吸取滤 液体积 V (ml)	钡镁混合液		EDTA 标准溶液			硫酸根含量 (g/kg)	
				浓度 C_b (mol/l)	用量 V_b (ml)	浓度 C_e (mol/l)	用量 V_e (ml)	滴定钙 镁用量 V_{e1} (ml)	计算值	平均值

7.4 比浊法

7.4.1 仪器设备。

- 1 磁力搅拌器, 秒表。
- 2 光电比色计或分光光度计。
- 3 量匙: 容量为 0.2~0.3 ml。
- 4 其他: 移液管, 容量瓶, 烧杯等。

7.4.2 试剂。

1 悬浊液稳定剂：将浓盐酸 30 ml，95% 的酒精 100 ml，纯水 300 ml，氯化钠 (NaCl) 25 g 混匀的溶液与 50 ml 甘油混匀。

2 结晶氯化钡 (BaCl₂)：将氯化钡结晶过筛，取粒径在 0.60~0.85mm 之间的结晶备用。

3 硫酸根 (SO₄²⁻) 标准溶液：称取在温度 105~110℃ 烘干的无水硫酸钠 (Na₂SO₄) 0.1479 g，溶于水中，倒入 1000 ml 容量瓶中定容。此溶液中硫酸根含量为 0.1 mg/ml。

7.4.3 操作步骤。

1 标准曲线的测绘：用移液管分别吸取硫酸根标准溶液 5、10、20、30、40ml 倒入 100 ml 容量瓶中定容，制成硫酸根含量为 0.5、1.0、2.0、3.0、4.0 mg/100ml 的标准系列，分别注入烧杯中，加入悬浊液稳定剂 5.00 ml 和一量匙氯化钡结晶，用磁力搅拌器搅拌 1 min。将悬浊液在光电比色计中用紫色光片进行比浊，在 3 min 内每隔 30 s 测读一次悬浊液的吸收值，读取稳定的读数。再以硫酸根含量为纵坐标，吸收值为横坐标，绘制关系曲线。该曲线称为标准曲线，并注明试验温度。

2 用移液管吸取土浸出液 100 ml 注入烧杯中，当硫酸根含量大于 4 mg/ml 时应减少土浸出液用量并稀释至 100 ml，加入悬浊液稳定剂 5.00 ml 和一量匙氯化钡结晶。用磁力搅拌器搅拌 1min，将悬浊液在光电比色计中用紫色滤光片进行比浊，在 3 min 内每隔 30 s 测读一次悬浊液的吸收值（以同一土浸出液为空白溶液），取稳定的读数查标准曲线，计算硫酸根含量。试验数据应注明温度。

7.4.4 计算。

1 按下列两式计算硫酸根 (SO₄²⁻) 含量：

$$SO_4^{2-} = \frac{0.001K \times \frac{V_w}{V}}{m_d \times 10^{-3}} \quad (7.4.4-1)$$

$$b(SO_4^{2-}) = SO_4^{2-} / 0.096 \quad (7.4.4-2)$$

式中 $b(SO_4^{2-})$ ——硫酸根的质量摩尔浓度 mmol/kg；

SO_4^{2-} ——硫酸根含量, g/kg;

K ——由标准曲线查得的硫酸根含量, mg;

0.001——将 mg 换算成 g 的因数;

其余符号见本规程式 (7.3.6)。

7.4.5 本试验记录格式如表 7.4.5。

表 7.4.5 硫酸根 (SO_4^{2-}) 测定记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
试验方法 比浊法 _____ 计算者 _____
试验日期 _____ 校核者 _____

土样 编号	烘干土 质量 m_d (g)	加水 体积 V_w (ml)	吸取滤 液体积 V (ml)	试验时 温度 ($^{\circ}\text{C}$)	吸收值	由标准曲线查出的 硫酸根质量 K (mg)	硫酸根含量 (g/kg)	
							计算值	平均值

8 钙离子 (Ca^{2+}) 的测定 (EDTA 法)

8.1 仪器设备

8.1.1 仪器设备应符合本规程 5.1.1 至 5.1.3 的规定。

8.2 仪器设备的检定和校准

8.2.1 仪器设备的检定校准按本规程 5.2.1, 5.2.2 的规定进行。

8.3 试剂

8.3.1 主要试剂应符合本规程 7.3.3 的规定。

8.3.2 刚果红试纸。

8.3.3 钙指示剂：将 0.5 g 钙指示剂与 50 g 氯化钠 (NaCl) (需经烘焙) 研细混匀，贮于棕色瓶中，放在干燥器中保存。

8.3.4 2 mol/l 氢氧化钠 (NaOH) 溶液：称取 8g 氢氧化钠溶于 100 ml 除去二氧化碳的纯水中。

8.4 标准溶液的标定

8.4.1 标准溶液的标定按本规程 7.3.4 的规定进行。

8.5 操作步骤

8.5.1 用移液管吸取土浸出液 25 ml，注入锥形瓶中，放入刚果红试纸一小片。滴入 1:4 盐酸溶液，使试纸变蓝色，煮沸除去二氧化碳。当土浸出液中碳酸根和重碳酸根含量很少，可省去此步骤。

8.5.2 冷却后，加入 2 mol/l 氢氧化钠 2 ml (酸碱度控制在 12)，摇匀放置 1~2 min，使镁离子沉淀完全。加入钙指示剂少许，95% 酒精 5ml，用 EDTA 标准溶液滴定至试液由红色变为浅蓝色为止。记下 EDTA 标准溶液的用量，准确至 0.01ml。

8.6 计算

8.6.1 按下列两式计算钙离子的含量：

$$b(\text{Ca}^{2+}) = \frac{C_e \times V_{e1} \times \frac{V_w}{V}}{m_d \times 10^{-3}} \quad (8.6.1-1)$$

$$\text{Ca}^{2+} = 0.04 \times b(\text{Ca}^{2+}) \quad (8.6.1-2)$$

式中 $b(\text{Ca}^{2+})$ ——钙离子的质量摩尔浓度，mmol/kg；

Ca^{2+} ——钙离子含量，g/kg；

0.04——钙离子的摩尔质量，g/mmol；

其余符号见本规程式 (7.3.6)。

计算至 0.001 g/kg 或 0.01 mmol/kg，平行误差不大于 0.004g/kg 或 0.1mmol/kg，取算术平均值。

8.7 记录

8.7.1 本试验记录格式如表 8.7.1。

表 8.7.1 钙离子 (Ca²⁺)、镁离子 (Mg²⁺) 测定记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
 试验方法 EDTA 法 _____ 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

土样 编号	烘干 土质 量 <i>m_d</i> (g)	加水 体积 <i>V_w</i> (ml)	吸取 滤液 体积 <i>V</i> (ml)	EDTA 标准溶液				Ca ²⁺ 含量 (g/kg)		Mg ²⁺ 含量 (g/kg)	
				浓度 <i>C_e</i> (mol/l)	滴定 Ca ²⁺ 用量 <i>V_{e1}</i> (ml)	滴定 Ca ²⁺ +Mg ²⁺ 用量 <i>V_e</i> (ml)	滴定 Mg ²⁺ 用量 <i>V_e - V_{e1}</i> (ml)	计算值	平均值	计算值	平均值

9 镁离子 (Mg²⁺) 的测定

(钙镁合量滴定法)

9.1 仪器设备

9.1.1 主要仪器设备应符合本规程 5.1.1 至 5.1.3 的规定。

9.2 仪器设备的检定和校准

9.2.1 仪器设备的检定和校准按本规程 5.2.1, 5.2.2 的规定进行。

9.3 试剂

9.3.1 主要试剂应符合本规程 7.3.3 的规定。

9.4 标准溶液的标定

9.4.1 标准溶液的标定按本规程 7.3.4 的规定进行。

9.5 操作步骤

9.5.1 用移液管吸取土浸出液 25 ml, 注入锥形瓶中, 加入氨缓冲溶液 5 ml, 摇匀, 加铬黑 T 指示剂少许, 95% 酒精 5 ml, 充分摇匀。再用 EDTA 标准溶液滴定试液至亮蓝色为止, 记下 EDTA 标准溶液用量, 准确至 0.01 ml。

9.5.2 用移液管吸取与本规程 9.5.1 规定的等体积的浸出液,按本规程 8.5.1 和 8.5.2 的规定,滴定钙离子对 EDTA 标准溶液的用量。

9.6 计算

9.6.1 按下列两式计算镁离子的含量:

$$b(\text{Mg}^{2+}) = \frac{C_e(V_e - V_{e1}) \times \frac{V_w}{V}}{m_d \times 10^{-3}} \quad (9.6.1-1)$$

$$\text{Mg}^{2+} = 0.0243 \times b(\text{Mg}^{2+}) \quad (9.6.1-2)$$

式中 $b(\text{Mg}^{2+})$ ——镁离子的质量摩尔浓度, mmol/kg;

Mg^{2+} ——镁离子含量, g/kg;

0.0243——镁离子的摩尔质量, g/mmol;

V_e ——EDTA 标准溶液滴定土浸出液的用量, ml;

其余符号见本规程式 (7.3.6)。

计算准确至 0.001g/kg 或 0.01 mmol/kg, 平行误差不大于 0.004g/kg 或 0.15 mmol/kg, 取算术平均值。

9.7 记录

9.7.1 镁离子的测定记录格式见本规程表 8.7.1。

10 钠离子 (Na^+) 和钾离子 (K^+) 的测定

(火焰光度法)

10.1 仪器设备

10.1.1 火焰光度计或原子吸收光谱—火焰分光光度计。

10.1.2 分析天平: 称量 100 g, 分度值 0.0001 g。

10.1.3 其他: 烧杯、容量瓶、塑料瓶、高温炉、烘箱等。

10.2 仪器设备的检定和校准

10.2.1 仪器设备的检定和核准应按本规程 5.2.1, 5.2.2 的规定进行。

10.3 试剂

10.3.1 钠 (Na^+) 标准溶液: 准确称取经 550 °C 灼烧过的氯化钠

(NaCl) 0.2542g, 在少量纯水中溶解, 移至 1000 ml 容量瓶定容。贮于塑料瓶中。此溶液含钠离子 0.1 mg/ml, 以此为母液可稀释配制成所需浓度的标准系列。

10.3.2 钾 (K⁺) 标准溶液: 准确称取经 105~110℃ 烘干的分析纯氯化钾 (KCl) 0.1907 g, 在少许纯水中溶解, 移至 1000 ml 容量瓶中定容。贮于塑料瓶中。此溶液含钾离子 0.1 mg/ml, 以此为母液可稀释配制所需浓度的标准系列。

10.4 操作步骤

10.4.1 标准曲线的测绘。

1 配制标准系列: 取 50 ml 容量瓶 6 个, 准确加入钠和钾标准溶液各为 0、1、5、10、15、25ml, 然后用纯水稀释定容, 此系列溶液的质量浓度范围为 0~50 mg/l。

2 按火焰光度计使用说明进行操作, 分别用钠滤光片和钾滤光片逐个测定其吸收值, 然后以吸收值为纵坐标, 相应的钠、钾浓度为横坐标, 分别绘制标准曲线。

10.4.2 用移液管吸取一定量的土浸出液, 在火焰光度计上, 按仪器说明书进行操作。当钠、钾含量超过仪器容许范围时, 宜稀释后再操作。测钠离子时用钠滤光片, 测钾离子时用钾滤光片。记下仪器读数, 注明试验条件。分别查钠、钾标准曲线, 计算含量。用原子吸收—火焰分光光度计时, 用发射档。

10.5 计算

10.5.1 按下列两式计算钠离子的含量:

$$\text{Na}^+ = \frac{0.001 \times N \times K_n \times V_w}{m_d \times 10^{-3}} \quad (10.5.1-1)$$

$$b(\text{Na}^+) = \text{Na}^+ / 0.023 \quad (10.5.1-2)$$

式中 $b(\text{Na}^+)$ ——钠离子的质量摩尔浓度, mmol/kg;

Na^+ ——钠离子含量, g/kg;

K_n ——由标准曲线查得的钠离子含量, mg/ml;

0.001——mg 换算成 g 的因数;

N ——土浸出液的稀释倍数, 当直接取土浸出液比

色时, $N=1$;

0.023——钠离子的摩尔质量, g/mmol;

其余符号见本规程式 (5.6.1)。

计算至 0.001g/kg 或 0.01mmol/kg, 平行误差不大于 0.005g/kg 或 0.2 mmol/kg, 取算术平均值。

10.5.2 按下列两式计算钾离子的含量:

$$K^+ = \frac{0.001 \times N \times K_k \times V_w}{m_d \times 10^{-3}} \quad (10.5.2-1)$$

$$b(K^+) = K^+ / 0.039 \quad (10.5.2-2)$$

式中 $b(K^+)$ ——钾离子的质量摩尔浓度, mmol/kg;

K^+ ——钾离子含量, g/kg;

K_k ——由标准曲线查得的钾离子含量, mg/ml;

0.039——钾离子的摩尔质量, g/mmol;

其他符号见本规程式 (10.5.1)。

计算至 0.001 g/kg 或 0.01 mmol/kg, 平行误差不大于 0.02g/kg 或 0.5 mmol/kg, 取算术平均值。

10.6 记录

10.6.1 本试验记录格式如表 10.6.1。

表 10.6.1 钠离子 (Na^+)、钾离子 (K^+) 测定记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
 试验方法 火焰光度法 计算者 _____
 试验日期 _____ 8+校核者 _____

土样 编号	烘干 土质 量 m_d (g)	加水 体积 V_w (ml)	吸取 滤液 稀释 倍数 N	试验 条件	测钠 离子 读数 E_n	由标准 曲线查 钠离子 含量 K_n (mg/ml)	钠离子含量 (g/kg)		测钾 离子 读数 E_k	由标准 曲线查 钾离子 含量 K_k (mg/ml)	钾离子含量 (g/kg)	
							计算值	平均值			计算值	平均值

中溶盐石膏试验

SL237—064—1999

1 定义和适用范围

1.0.1 土的中溶盐系指石膏。本试验采用酸浸提—质量法测定土中石膏的含量，测定结果以 1kg 烘干土（温度 105~110℃）中所含的石膏（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）的克（g）表示，单位为 g/kg。

1.0.2 本试验方法适用于含石膏较多的土类。若土中石膏含量很高时，以 55~60℃ 烘干土或风干土计算为宜。

2 引用标准

SL237—063—1999 《易溶盐试验》：7 硫酸根测定。

3 仪器设备和试剂

3.1 仪器设备

3.1.1 高温炉、水浴锅、瓷坩锅。

3.1.2 分析天平：称量 200 g，分度值 0.0001 g。

3.1.3 其他：容量瓶、漏斗、漏斗架，烧杯，无灰滤纸等。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 仪器设备的检定和校准应按 SL237—063—1999 规程 5.2.1，5.2.2 的规定进行。

3.3 试剂

3.3.1 0.25mol/l 盐酸（HCl）溶液：将浓盐酸 20.8 ml 稀释至 1000 ml。

3.3.2 10%氨水（ NH_4OH ）：将浓氨水 31 ml 稀释成 100 ml。

3.3.3 10%氯化钡 (BaCl_2) 溶液: 将 10 g 氯化钡溶于少量纯水中, 稀释至 100 ml。

3.3.4 酸化硝酸银 (AgNO_3) 溶液: 将 0.5 g 硝酸银溶于 50 ml 纯水中, 加入少量浓硝酸酸化。贮于棕色瓶中。

3.3.5 0.1%甲基橙指示剂和 1:1 盐酸溶液。

4 操作步骤

4.1 试样中石膏的浸提液制备

4.1.1 称取过 0.5 mm 筛的风干试样 1~5g, 准确至 0.0001 g。放入 200 ml 烧杯中, 缓慢加入 0.25 mol/l 盐酸溶液 50 ml。边加边搅拌。当土中含碳酸钙时, 应加盐酸至无气泡产生为止, 放置过夜。

4.1.2 第二天过滤, 并用 0.25mol/l 盐酸溶液淋洗土样至滤液中无硫酸根为止。

注: 硫酸根的检验方法是, 取滤液数滴加 1:1 盐酸溶液 1 滴, 用 10% 氯化钡检验, 当有硫酸根存在时则有白色硫酸钡沉淀, 滤液产生混浊。

4.2 硫酸根的测定

4.2.1 按本规程 4.1.2 的规定处理后的滤液中加入 2 滴 0.1% 甲基橙指示剂, 用 10% 氨水中和溶液, 当溶液呈黄色时, 再用 1:1 盐酸溶液调至红色后多加 10 滴, 加热煮沸, 进行搅拌, 并缓慢滴入热的 10% 氯化钡溶液, 直至试液中硫酸根沉淀完全, 并稍有过量为止。放在水浴锅 (60℃左右) 保温 2 h。

注: 当试样静置澄清后, 向上部滴加氯化钡溶液时应无混浊。

4.2.2 将硫酸根沉淀, 用无灰滤纸过滤, 用温纯水洗涤至无氯离子为止 (用硝酸银溶液检验)。

4.2.3 用滤纸包好洗净的沉淀物, 放入经 600℃灼烧至恒量的瓷坩埚中, 在电炉上充分灰化, 不得出现明火燃烧。然后移至高温炉内, 在 600℃下灼烧 1 h 取出, 放于洁净的石棉网上, 在干燥器中冷却至室温, 称质量。再在 600℃下灼烧 30 min, 冷却后称质量, 反复操作至恒量, 记下质量。

4.2.4 易溶盐硫酸根的测定，应按 SL237—063—1999 规程之 7 的规定进行。

5 计 算

5.0.1 按式 (5.0.1) 计算减去易溶盐硫酸根含量时中溶盐石膏含量：

$$\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O} = \left[\frac{(m_2 - m_1) \times 0.4114}{m_d \times 10^{-3}} - G_2 \right] \times 1.7922 \quad (5.0.1)$$

式中 $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ——中溶盐（石膏）含量，g/kg；

m_2 ——瓷坩埚与沉淀总质量，g；

m_1 ——瓷坩埚质量，g；

0.4114——由硫酸钡换算为硫酸根的系数；

G_2 ——易溶盐硫酸根的含量，g/kg；

m_d ——烘干土质量，g；

10^{-3} ——将 g 换算成 kg 的因数；

1.7922——由硫酸根换算为石膏的系数。

计算至 0.1 g/kg，平行误差不大于 1 g/kg，取算术平均值。

5.0.2 按式 (5.0.2) 计算不减去易溶盐硫酸根含量时中溶盐（石膏）含量：

$$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \frac{(m_2 - m_1) \times 0.7377}{m_d \times 10^{-3}} \quad (5.0.2)$$

式中 0.7377——由硫酸钡换算为石膏的系数；

其余符号见本规程式 (5.0.1)。

计算至 0.1 g/kg，平行误差不大于 1 g/kg，取算术平均值。

6 记 录

6.0.1 本试验记录格式如表 6.0.1。

表 6.0.1 中溶盐石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 测定记录表

工程名称 _____ 试验者 _____

试验方法 _____ 计算者 _____

试验日期 _____ 校核者 _____

样编号	烘干质量 m_d (g)	坩埚编号 No	坩埚质量 m_1 (g)	沉淀加坩 埚质量 m_2 (g)	沉淀 质量 $m_2 - m_1$ (g)	酸浸出硫 酸根含量 G_1 (g/kg)	易溶盐硫 酸根含量 G_2 (g/kg)	中溶盐石膏含量 (g/kg)	
								计算值	平均值

难溶盐碳酸钙试验

SL237—065—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 土中难溶盐系指钙、镁的碳酸盐类。本试验的目的是测定难溶的碳酸盐类在土中的含量，测定结果以 1kg 烘干土中所含碳酸钙的克 (g) 数表示，单位为 g/kg。

1.0.2 本规程所列的两种方法适用于各类土，可根据试验数量和准确度要求选用其中之一。对测定结果要求较准确时宜用简易碱吸收容量法；而气量法适于大批试样的粗略测定。

2 引用标准

SL237—063—1999《易溶盐试验》：5 碳酸根及重碳酸根的测定。

3 简易碱吸收容量法

3.1 仪器设备

3.1.1 简易的碱吸收容量法测定装置，如图 3.1.1 所示。

3.1.2 分析天平：称量 100 g，分度值 0.0001 g。

3.1.3 其他：容量瓶、200 ml 三角瓶、酸式滴定管、50 ml 医用注射器、塑料瓶、点滴瓶等。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 仪器设备的检定和校准应按 SL 237—063—1999 规程 5.2.1 和 5.2.2 的规定进行。

3.3 试剂

3.3.1 2 mol/l 氢氧化钾 (KOH) 溶液: 将 112 g 氢氧化钾溶解于 700 ml 煮沸后冷却的纯水中, 稀释至 1000 ml。贮于有隔绝空气中二氧化碳装置 (苏打石灰管) 的塑料瓶中。

3.3.2 2 mol/l 盐酸 (HCl) 溶液: 将 167 ml 浓盐酸稀释至 1000 ml。

3.3.3 1 mol/l 盐酸溶液: 将 83 ml 浓盐酸稀释至 1000 ml。

3.3.4 溴甲酚绿指示剂: 溶解 0.1 g 溴甲酚绿于 250 ml 浓度为 0.0006 mol/l 氢氧化钠溶液中。

3.3.5 百里酚兰—酚酞试剂: 将 1 份 0.1% 百里酚兰的 50% 的酒精溶液与 3 份 0.1% 酚酞酒精溶液相混合。

3.3.6 0.1 mol/l 盐酸标准溶液: 将浓盐酸 8.3 ml 稀释至 1000 ml。

3.4 标准溶液的标定

3.4.1 盐酸标准溶液的标定按 SL237—063—1999 规程 5.4.1 的规定进行, 并计算其浓度, 计算至 0.0001 mol/l。

3.5 操作步骤

3.5.1 用分析天平准确称取过 0.15 mm 筛孔的风干土样 1~8 g (碳酸钙含量不超过 0.25g), 放置于广口瓶中, 在塑料杯中加入 5 ml 浓度为 2 mol/l 氢氧化钾溶液, 塞紧瓶塞勿使漏气。将 50 ml 医用注射器连接在乳胶管上端, 捏开玻璃珠开关, 从广口瓶中抽出 50 ml 空气。

3.5.2 用注射器通过乳胶管向广口瓶中注入 20 ml 浓度为 2 mol/l 盐酸溶液, 乳胶管上端用止水夹夹紧, 轻轻旋转广口瓶使试样与盐酸充分接触均匀。在室温下放置 16~24 h。

3.5.3 打开瓶塞, 细心取出塑料杯, 用 50 ml 无二氧化碳的纯水, 将塑料杯中的氢氧化钾溶液洗入 200 ml 三角瓶中。加百里酚兰—酚酞混合指示剂 20 滴, 用 1 mol/l 盐酸溶液滴定至溶液由紫色变

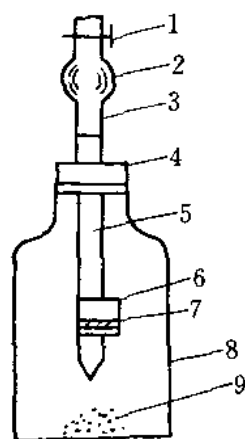


图 3.1.1 简易碱吸收容量测定装置

1—止水夹; 2—玻璃珠; 3—乳胶管; 4—橡皮塞; 5—玻璃管; 6—塑料杯; 7—橡皮筋; 8—广口瓶; 9—试样

为淡红色时，改用 0.1 mol/l 盐酸标准溶液滴定至溶液刚出现黄色而红色又未完全消失 (pH=8.3) 为止 (不记用量)。然后加入 16 滴溴钾酚绿指示剂，用 0.1 mol/l 盐酸标准溶液滴定至溶液由蓝色变为亮黄色 (pH=3.9) 为止，记下这次滴定用量。

3.5.4 按本规程 3.5.3 的规定进行空白试验。

3.6 计算

3.6.1 按式 (3.6.1) 计算碳酸钙含量：

$$\text{CaCO}_3 = \frac{2C(V_1 - V_2) \times 0.050}{m_d \times 10^{-3}} \quad (3.6.1)$$

式中 CaCO_3 ——难溶盐碳酸钙含量，g/kg；

C ——盐酸标准溶液浓度，mol/l；

V_1 ——以钾溴酚绿为指示剂滴定时盐酸标准溶液用量，ml；

V_2 ——空白试验，以钾溴酚绿为指示剂滴定时盐酸标准溶液用量，ml；

2——因 V_1 只是酸中和重碳酸根时的用量，故中和碳酸根的用量应为 $2V_1$ ；

0.050——碳酸钙摩尔质量的一半 (kg/mol)，因 1mol 盐酸仅能与 0.5mol 碳酸钙作用；

m_d ——烘干土质量，g；

10^{-3} ——将 g 换算成 kg 的因数。

计算至 0.1g/kg，平行误差不大于 2 g/kg，取算术平均值。

4 气 量 法

4.1 仪器设备

4.1.1 二氧化碳约测计，装置如图 4.1.1 所示。

4.1.2 气压计、温度计。

4.1.3 天平：称量 200 g，分度值 0.01 g。

4.1.4 其他：瓷坩锅、指形管、温度计等。

4.2 仪器设备的检定和校准

4.2.1 分析天平：按相应的检定规程进行检定。

4.2.2 气压计：按相应的检定规程进行检定。

4.3 试剂

4.3.1 1:3 盐酸溶液：将 1 份浓盐酸与 3 份纯水混合。

4.3.2 0.1% 甲基红指示剂。

4.4 操作步骤

4.4.1 安装好二氧化碳约测计，将加有微量盐酸和数滴 0.1% 甲基红指示剂的红色水溶液注入两量管中。

4.4.2 称取过 0.5 mm 筛，经 105~110℃ 烘干的试样 1~5 g，准确至 0.01 g，放入广口瓶中。再将盛有

1:3 盐酸溶液的瓷坩埚也放入广口瓶中，塞紧瓶口。打开阀门上下移动移动管，使三管水面齐平。

4.4.3 将移动管继续下移，当量管的右肢水面下降很快时，表示接头处漏气，应仔细检查各接头并用石蜡溶液密封至不漏气。三管水面齐平后，关闭阀门，记下量管右肢的起始水位读数。

4.4.4 用长柄夹子夹住广口瓶颈部轻轻摇动，使瓷坩埚中盐酸倾出与瓶中试样充分反应。当量管右肢水面受到二氧化碳气体压力而下降时，打开阀门。使量管左右肢水面保持同一水平。静置 10 min，当量管右肢水面稳定时反应完全，再移动移动管，使三管水面齐平。记下量管右肢最终水位读数。最终读数与起始读数之差即为产生的二氧化碳体积，并记下试验时温度和气压。

4.4.5 按本规程 4.4.1 至 4.4.4 的规定进行空白试验。并从试样产生的二氧化碳体积中减去空白试验值。

4.5 计算

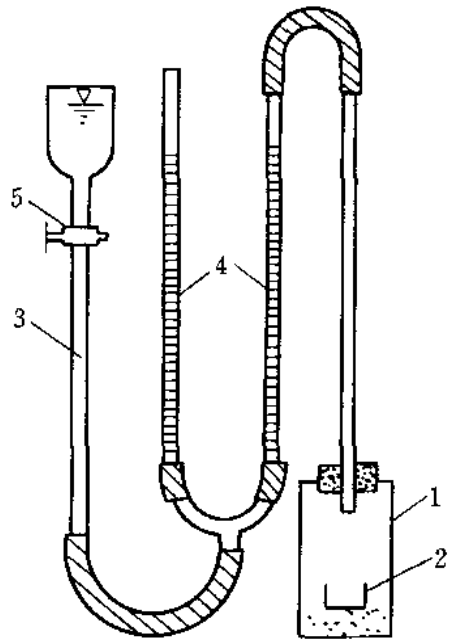


图 4.1.1 二氧化碳约测计示意图

1—广口瓶；2—坩埚；3—移动管；
4—量管；5—阀门

4.5.1 按式 (4.5.1) 计算碳酸钙的含量:

$$\text{CaCO}_3 = \frac{V \times \rho \times 10^{-6} \times 2.272}{m_d \times 10^{-3}} \quad (4.5.1)$$

式中 V ——二氧化碳体积, ml;

ρ ——在试验的温度和气压下二氧化碳的密度, $\mu\text{g/ml}$, 可查“附表”;

2.272——由二氧化碳换算成碳酸钙的因数;

10^{-6} ——微克与克的换算因数;

10^{-3} ——克与千克的换算因数;

其余符号见本规程式 (3.0.1)。

计算至 1 g/kg , 平行误差不大于 5 g/kg , 取算术平均值。

4.6 记录

4.6.1 本试验记录格式如表 4.6.1-1 和表 4.6.1-2。

表 4.6.1-1 难溶盐碳酸钙 (CaCO_3) 测定记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
 试验方法 碱吸收容量法 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

土样 编号	风干土 质量 m (g)	风干 含水率 w (%)	烘干 土质量 m_d (g)	盐酸标准溶液			碳酸钙含量 (g/kg)	
				浓 度 C (mol/l)	用 量 V (ml)	空白用量 V_2 (ml)	计算值	平均值

表 4.6.1-2 难溶盐碳酸钙 (CaCO₃) 测定记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
 试验方法 气量法 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

土样 编号	风干 土质量 <i>m</i> (g)	风干 含水率 <i>w</i> (%)	烘干 土质量 <i>m_d</i> (g)	试验 温度 (C)	大气 压力 (mm)	二氧化 碳体积 <i>V</i> (ml)	二氧化 碳密度 <i>ρ</i> (10 ⁻⁶ g/ml)	碳酸钙含量 (g/kg)	
								计算值	平均值

附表 二氧化碳比重表 (μg/ml)

温 度 (C)	气 压 (mmHg)													
	742	744.5	747	749	753.5	751	756	758	760	762.5	765	767	769	771
28	1778	1784	1791	1797	1804	1810	1817	1823	1828	1833	1837	1842	1847	1852
27	1784	1790	1797	1803	1810	1816	1823	1829	1834	1839	1843	1848	1853	1858
26	1791	1797	1803	1809	1816	1822	1829	1835	1840	1845	1849	1854	1859	1864
25	1797	1803	1810	1816	1823	1829	1836	1842	1847	1852	1856	1861	1866	1871
24	1803	1809	1816	1822	1829	1835	1842	1848	1853	1858	1862	1867	1872	1877
23	1809	1815	1822	1828	1835	1841	1848	1854	1859	1864	1868	1873	1878	1883
22	1815	1821	1828	1834	1841	1847	1854	1860	1865	1870	1875	1880	1885	1890
21	1822	1828	1835	1841	1848	1854	1861	1867	1872	1877	1882	1887	1892	1897
20	1828	1834	1841	1847	1854	1860	1867	1873	1878	1883	1888	1893	1898	1903
19	1834	1840	1847	1853	1860	1866	1873	1879	1884	1889	1894	1899	1904	1909
18	1840	1846	1853	1859	1866	1872	1879	1885	1890	1895	1900	1905	1910	1915
17	1846	1853	1860	1866	1873	1879	1886	1892	1897	1902	1907	1912	1917	1922
16	1853	1860	1866	1873	1879	1886	1892	1893	1903	1909	1913	1918	1923	1928
15	1859	1866	1872	1879	1886	1892	1899	1905	1910	1915	1920	1925	1930	1935
14	1865	1872	1878	1885	1892	1899	1906	1912	1917	1922	1927	1932	1937	1942
13	1872	1878	1885	1892	1899	1906	1913	1919	1924	1929	1934	1939	1944	1949
12	1878	1885	1892	1899	1906	1912	1919	1925	1930	1935	1940	1945	1950	1955
11	1885	1892	1899	1906	1913	1919	1926	1932	1937	1942	1947	1952	1957	1962
10	1892	1899	1906	1913	1919	1926	1933	1939	1944	1949	1954	1959	1964	1969

有机质试验

SL237—066—1999

1 定义和适用范围

1.0.1 土的有机质系以碳、氮、氢、氧为主体，还有少量的硫、磷以及金属元素组成的有机化合物的通称。

1.0.2 本试验采用重铬酸钾容量法测定其中的有机碳，再乘以经验系数 1.724 换算成有机质，并以 1 kg 烘干土中所含有机质的 g 数表示，单位为 g/kg。

1.0.3 本试验方法适用于有机含量不超过 150g/kg (15%) 的土。

2 仪器设备和试剂

2.1 仪器设备

2.1.1 分析天平：称量 200 g，分度值 0.0001 g。

2.1.2 油浴锅：内盛甘油或植物油并应带铁丝笼。

2.1.3 温度计：量程 0~200℃，分度值为 0.5℃。

2.1.4 其他：酸式滴定管、三角瓶、硬质试管、小漏斗、试管夹。

2.2 仪器设备的检定和校准

2.2.1 分析天平：按相应的检定规程进行检定。

2.2.2 温度计：参照 JJG128—89《二等标准水银温度计试行检定规程》进行检定。

2.3 试剂

2.3.1 0.15mol/l 重铬酸钾 ($K_2Cr_2O_7$) 标准溶液：用分析天平称取经 105~110℃ 烘干并研磨细的重铬酸钾 44.1231g，溶于 800 ml 纯水中（必要时可加热），缓慢加入浓硫酸 1000 ml，并不断搅拌，

冷却后倒入 2000 ml 容量瓶中定容。

2.3.2 0.2 mol/l 硫酸亚铁 ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) (或硫酸亚铁铵) 标准溶液: 称取硫酸亚铁 56 g (或硫酸亚铁铵 80g), 溶于纯水中, 加入 3 mol/l 硫酸溶液 30 ml, 稀释至 1000 ml, 密封贮于棕色瓶中。

2.3.3 邻啡罗啉指示剂: 将邻啡罗啉 1.485 g 和硫酸亚铁 0.695g 溶于 100 ml 纯水中, 密封保存在棕色瓶中。

2.4 标准溶液的标定

2.4.1 硫酸亚铁 (或硫酸亚铁铵) 标准溶液的标定: 准确取重铬酸钾标准溶液 10.00ml 3 份, 分别注入锥形瓶中, 稀释至 60 ml 左右, 加入邻啡罗啉指示剂 3~5 滴, 用硫酸亚铁标准溶液进行滴定, 使溶液由黄色经绿色突变至棕红色为止。按式 (2.4.1) 计算硫酸亚铁的浓度:

$$C_F = \frac{C_K \times V_K}{V_C} \quad (2.4.1)$$

式中 C_F ——硫酸亚铁的浓度, mol/l;

V_K ——硫酸亚铁的用量, ml;

C_K ——重铬酸钾的浓度, mol/l;

V_C ——重铬酸钾的用量, ml。

计算至 0.0001mol/l, 取 3 份结果的算术平均值。

3 操作步骤

3.0.1 当试样中含有有机碳小于 8 mg 时, 用分析天平称取剔除植物根并通过 0.15 mm 筛的风干试样 0.1~0.5 g, 放入干燥的试管底部, 用滴定管缓慢滴入重铬酸钾标准溶液 10.00 ml, 摇匀, 并在试管口插入小漏斗。

3.0.2 将试管插入铁丝笼中, 放入 190℃ 左右的油浴锅内。试管内的液面低于油面。温度应控制在 170~180℃, 试管内试液沸腾时开始计时, 煮沸 5 min, 取出稍冷。

3.0.3 将试管内试液倒入锥形瓶中, 用纯水洗净试管内部, 并使

试液控制在 60 ml，加入邻啡罗啉指示剂 3~5 滴，用硫酸亚铁标准溶液滴定，当溶液由黄色经绿色突变至橙红色时为止。记下硫酸亚铁标准溶液用量，准确至 0.01 ml。

3.0.4 试样试验的同时，应按本规程 3.0.1 至 3.0.3 规定采用纯砂进行空白试验。

4 计 算

4.0.1 按式 (4.0.1) 计算有机质含量：

$$W_u = \frac{0.003 \times 1.724 \times C_F \times (V_2 - V_1)}{m_d \times 10^{-3}} \quad (4.0.1)$$

- 式中 W_u ——有机质含量，g/kg；
 C_F ——硫酸亚铁标准溶液浓度，mol/l；
 V_2 ——测定试样时硫酸亚铁标准溶液用量，ml；
 V_1 ——空白试验时硫酸亚铁标准溶液用量，ml；

表 5.0.1 有机质试验记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
 试验方法 重铬酸钾容量法 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

土样 编号	烘干 土质量 m_d (g)	重铬酸钾标准溶液			硫酸亚铁标准溶液			有机质含量 (g/kg)	
		浓度 C_K (mol/l)	用量 V_K (ml)	空白用量 V (ml)	浓度 C_F (mol/l)	用量 V_2 (ml)	空白用量 V_1 (ml)	计算值	平均值

0.003· — I 摩尔硫酸亚铁所相当的有机质碳量, kg;

1.724· — 有机碳换算成有机质的因数;

m_d ——烘干土质量, g;

10^{-3} ——将 g 换算成 kg 的系数。

计算至 0.1g/kg, 平行误差不大于 0.5 g/kg, 取算术平均值。

5 记 录

5.0.1 本试验记录格式如表 5.0.1。

游离氧化铁试验

SL237—067—1999

游离氧化铁总量（米拉-杰克逊法）

无定形游离氧化铁（达姆试剂法）

1 定义和适用范围

1.0.1 土中呈游离状态（即非硅酸盐形式）铁的氧化物及其水化物称游离氧化铁。游离氧化铁根据其结晶程度分为结晶态游离氧化铁和无定形（即非晶质）游离氧化铁，无定形游离氧化铁是指不能产生 X—射线衍射图谱的铁的氧化物。

1.0.2 本试验用于测定土中游离氧化铁的总量和无定形游离氧化铁的含量，二者差减可得结晶质游离氧化铁。

1.0.3 本规程适用各种土类。

2 仪器设备和试剂

2.1 仪器设备

2.1.1 离心机，大于 3000 r/min，50 ml 离心管。

2.1.2 分析天平，称量 200 g，分度值 0.0001 g。

2.1.3 分光光度计，72 型或 721 型。

2.1.4 水浴锅（附温度控制器）。

2.1.5 振荡器。

2.1.6 其他设备：天平（分度值 0.1 克）、容量瓶、移液管、量杯、量筒、100 ml 棕色广口瓶、100 ml 试剂瓶。

2.2 仪器设备的检定和校准

2.2.1 分析天平：按相应的检定规程进行检定；

2.2.2 容量瓶：参照 JJG196—90《常用玻璃量器检定规程》进行

检定。

2.3 试剂

2.3.1 连二亚硫酸钠 ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$), 化学纯。

2.3.2 氯化钠饱和溶液。

2.3.3 10%盐酸羟氨。

2.3.4 1 mol/l 碳酸氢钠溶液: 84.01g 碳酸氢钠 (NaHCO_3 , 化学纯) 溶于 1000 ml 纯水中。

2.3.5 0.3 mol/l 柠檬酸钠溶液: 104.45 g 柠檬酸钠 ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 化学纯) 溶于 1000 ml 纯水中。

2.3.6 醋酸-醋酸钠缓冲溶液: 68 g 醋酸钠 ($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot \text{H}_2\text{O}$) 溶于 500 ml 纯水中, 加入 28.8 ml 冰醋酸, 用纯水稀释至 1000 ml。

2.3.7 0.1%邻菲罗啉: 称取 1.0 g 邻菲罗啉 ($\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) 溶于 1000 ml 纯水中 (内含 0.1 mol/l 盐酸 5ml)。

2.3.8 达姆试剂: 称 62.1 g 草酸铵、31.5 g 草酸溶于 2.5 l 纯水中, pH 约 8.2。

2.3.9 铁标准溶液: 称 0.7017g 硫酸亚铁铵 [$(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$] 溶于纯水中, 加浓硫酸 5 ml, 最后定容至 1000 ml, 此时溶液含铁 $100\mu\text{g}/\text{ml}$ 。

2.3.10 铁标准溶液使用液: 将 $100\mu\text{g}/\text{ml}$ 铁标准溶液稀释 10 倍成为 $10\mu\text{g}/\text{ml}$ 的使用液, 供比色制标准曲线。

3 操作步骤

3.1 试样处理

3.1.1 用分析天平称取 0.1~0.5 g 风干土样 (游离氧化铁含量很低时要称 0.5~1.0 g), 放入 50 ml 离心管中, 加入 0.3mol/l 柠檬酸钠溶液 20 ml, 1 mol/l 碳酸氢钠溶液 2.5 ml。

3.1.2 将离心管在水浴锅上加热至 80°C (不能超过此温度) 后, 加固体连二亚硫酸钠 0.5 g, 不断搅拌 15 min, 然后再加饱和氯化

钠溶液 5 ml，取出冷却，用离心机分离，清液倒入 250 ml 容量瓶中，如此反复处理至土样呈灰白色。

3.1.3 用 1 mol/l 氯化钠溶液洗涤离心管内残渣 2~3 次，清液一并倒入容量瓶中，定容待测游离氧化铁总量。

3.1.4 用分析天平称取 1~2g 土样，放入 100ml 经过烘干的棕色广口瓶中，用移液管或酸式滴定管加入 0.2mol/l 草酸氨缓冲溶液 50ml，加塞振荡 2h 后，立即倒入离心管中用离心机分离，将澄清液倒入烘干的 100ml 试剂瓶中待测无定形铁之用。

3.2 测试

3.2.1 分别吸取一定量的上述两种待测液至 50 ml 容量瓶中，加入 10% 盐酸羟氨 1 ml 摇匀放置 10 min，加醋酸—醋酸钠缓冲溶液 5 ml，加入 0.1% 邻菲罗啉 3 ml，加水至刻度，摇匀使其充分显色，1 h 后于 508 nm 波长处用 1 cm 比色皿比色，测定其消光值；

3.2.2 分别吸取 10 μ g/ml 铁标准溶液使用液 0、1、3、5、7、9 ml，相应的含铁量为 0、10、30、50、70、90 μ g，按本规程 3.2.1 的规定与待测液做同样处理显色，比色测定其对应的消光值，然后以含铁量为横坐标，以消光值为纵坐标绘制标准曲线。

4 计 算

4.0.1 按式 (4.0.1) 计算游离氧化铁总量：

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{F \times \frac{V_w}{V} \times n \times 10^{-6}}{m_d \times 10^{-3}} \quad (4.0.1)$$

式中 Fe_2O_3 ——游离氧化铁总量，g/kg；

F ——按待测液的消光值在标准曲线上查的得铁含量， μ g；

m_d ——烘干土质量，g；

V ——吸取待测液的体积, ml;

V_w ——浸提液的总体积, ml;

n ——Fe 与 Fe_2O_3 的换算系数, 1.4297;

10^{-6} —— μg 换算成 g 的因数;

10^{-3} ——将 g 换算成 kg 的因数。

计算至 0.1 g/kg, 平行误差不大于 1 g/kg, 取算术平均值。

4.0.2 按式 (4.0.2) 计算无定形游离氧化铁:

$$\text{无定形游离氧化铁 } \text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{F_1 \times \frac{V_w}{V_1} \times n \times 10^{-6}}{m_d \times 10^{-3}} \quad (4.0.2)$$

式中 F_1 ——标准曲线上查的得铁含量, μg ;

m_d ——烘干土质量, g;

V_w ——达姆试剂浸提液的总体积, ml;

V_1 ——吸取待测液的体积, ml;

其余符号见本规程式 (4.0.1)。

计算至 0.1 g/kg, 平行误差不大于 1 g/kg, 取算术平均值。

4.0.3 按式 (4.0.3) 计算结晶态游离氧化铁:

结晶态游离氧化铁 = 游离氧化铁总量 - 无定形游离氧化铁

(4.0.3)

5 记 录

5.0.1 本试验记录格式如表 5.0.1-1、表 5.0.1-2。

表 5.0.1-1 游离氧化铁总量试验记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
 试验方法 米拉-杰克逊法 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

土样 编号	烘干 土质量 m_d (g)	浸提液		消光值	从标准曲线 上查得的含 铁量 F ($10^{-5}g$)	换算系数 n	游离氧化铁含量 (g/kg)	
		总体积 V_w (ml)	用量 V (ml)				计算值	平均值

表 5.0.1-2 无定形（非晶质）游离氧化铁试验记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
 试验方法 达姆试剂法 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

土样 编号	烘干 土质量 m_d (g)	浸提液		消光值	从标准曲线 上查得的含 铁量 F ($10^{-6}g$)	换算系数 n	无定形游离 氧化铁含量 (g/kg)	
		总体积 V_w (ml)	用量 V_1 (ml)				计算值	平均值

阳离子交换量试验

SL237—068—1999

1 定义和适用范围

1.0.1 阳离子交换量系指在一定条件下,一定量的土中所能交换吸附的阳离子总数,以1 kg干土中含有交换性阳离子的厘摩尔数来表示,单位为 $\text{cmol}(+)/\text{kg}$ 。

1.0.2 阳离子交换量是度量土样对溶液中的阳离子交换吸附性能强弱的指标,可大致地反映土中粘粒含量和粘土矿物成分,在一定程度上反映土的物理化学特性,亦可用来定性判断和比较土的膨胀势。

1.0.3 本试验采用氯化钡缓冲液法测定土中阳离子交换总量。

1.0.4 本规程适用于非盐渍化的各种土类。

2 仪器设备和试剂

2.1 仪器设备

2.1.1 离心机(转速为3000 r/min)及玻璃离心管(容量为100ml)。

2.1.2 分析天平:称量100 g,分度值0.0001 g;天平,分度值0.1 g。

2.1.3 其他:移液管、滴定管、容量瓶、三角瓶等。

2.2 仪器设备的检定和校准

2.2.1 天平:按相应的检定规程进行检定。

2.2.2 容量瓶:参照JJG196—90《常用玻璃量器检定规程》进行检定。

2.3 试剂

2.3.1 三乙醇胺溶液:量取90 ml三乙醇胺,用纯水稀释至

1000 ml, 加入 140 ml 浓度为 2 mol/l 盐酸, 稀释至 2000 ml, 混匀, 贮存期间防止吸收二氧化碳。

2.3.2 1 mol/l 氯化钡 (BaCl_2) 溶液: 称取 244 g 氯化钡 ($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), 用纯水稀释至 1000 ml。

2.3.3 氯化钡缓冲试剂: 将等体积的三乙醇胺溶液与 1 mol/l 的氯化钡溶液混合, 调节 pH 至 8.1。

2.3.4 0.025 mol/l 硫酸镁 (MgSO_4) 溶液: 称取 6.2 g 硫酸镁 ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), 用纯水稀释至 1000 ml。

2.3.5 pH10 缓冲溶液: 称取 67.5 g 氯化氨于纯水中, 加入 570 ml 浓氢氧化氨(比重 0.9, 含氨 25%), 加纯水稀释至 1000 ml。

2.3.6 0.01 mol/l $\text{Na}_2\text{—EDTA}$: 称取 3.72 g $\text{Na}_2\text{—EDTA}$, 用纯水稀释至 1000 ml, 用标准硫酸镁溶液标定其准确浓度。

2.3.7 0.1% 铬黑 T: 称取 0.1 g 铬黑 T, 与 5g 盐酸羟胺共溶于 100 ml 酒精中。

3 操作步骤

3.0.1 称取 2 g 左右通过 0.15 mm 筛孔的风干土样, 放入离心管中准确称量。

3.0.2 若土样系石灰性土, 加入 40 ml 氯化钡缓冲液试剂, 间歇摇晃 1 h, 用离心机转 3~5 min, 弃去清液; 若土样系非石灰性土, 则此步骤可以省略。

3.0.3 加入 80 ml 氯化钡缓冲液, 摇晃后放置过夜, 离心弃去上部清液。

3.0.4 加入 80 ml 纯水, 摇晃至土块碎裂, 再离心, 弃去上部清液, 将离心管及内容物一起称量。

3.0.5 用移液管向离心管中注入 40 ml 的 0.025 mol/l 硫酸镁溶液, 间歇摇晃 2 h, 离心后, 将上部清液仔细移入有盖三角瓶中。

3.0.6 从三角瓶中吸出 5 ml 溶液, 加 8 滴 pH=10 的缓冲溶液和 4 滴铬黑 T 指示剂, 使成紫色, 用标准 $\text{Na}_2\text{—EDTA}$ 滴定至颜色从

红变蓝为止 (滴定量为 V_1)。

3.0.7 另吸 5 ml 浓度为 0.025mol/l 硫酸镁溶液用 $\text{Na}_2\text{-EDTA}$ 溶液滴定至终点 (滴定量为 V_2) 根据 2 份滴定结果之差计算交换量。

4 计 算

4.0.1 考虑到离心过的土样用纯水洗后残留体积的影响,对土样的滴定量 (V_1) 应作如下校正:

$$V_3 = V_1(40 + m_2 - m_1)/40 \quad (4.0.1)$$

式中 V_3 —— $\text{Na}_2\text{-EDTA}$ 滴定用量, ml;

m_1 ——试样加离心管质量, g;

m_2 ——离心后土液混合物加离心管质量, g;

V_1 、 V_2 见本规程 3.0.6 和 3.0.7 的含义。

4.0.2 按式 (4.0.2) 计算阳离子交换量:

$$\text{CEC} = \frac{(V_2 - V_3) \times 10^{-3} \times \frac{40}{5} \times C \times 100}{m_d \times 10^{-3}} \quad (4.0.2)$$

式中 CEC——阳离子交换量, cmol/kg;

V_2 ——滴定硫酸镁溶液所消耗 $\text{Na}_2\text{-EDTA}$ 的体积, ml;

V_3 ——滴定经硫酸镁处理的土样溶液所消耗的 $\text{Na}_2\text{-EDTA}$ 体积, ml, (V_1 的校正值);

10^{-3} ——ml 与 l 的换算因数;

$40/5$ ——分取倍数;

C —— $\text{Na}_2\text{-EDTA}$ 标准溶液的摩尔浓度, mol/l;

m_d ——烘干土样的质量, g;

100——mol 与 cmol 的换算因数;

10^{-3} ——g 与 kg 的换算因数。

5 记 录

5.0.1 本试验的记录格式见表 5.0.1。

表 5.0.1 阳离子交换量试验记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
 试验方法 _____ 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

土样 编号	烘干 土质 量 m_d (g)	离心管加 土样质量		Na ₂ -EDTA 标准溶液			校正后 滴定 用量 V_3 (ml)	阳离子交换量 (cmol/kg)	
		处理前 m_1 (g)	处理后 m_2 (g)	滴定用量 V_1 (ml)	空白滴定用量 V_2 (ml)	浓度 C (mol/l)		计算值	平均值

土的矿物组成试验

SL237—069—1999

1 定义和适用范围

1.0.1 对岩土工程,土的矿物组成主要指土中的粘土矿物及伴存矿物的类型和数量。

1.0.2 X射线衍射分析是研究矿物结晶构造、鉴定矿物的主要手段。本方法是以X射线射入矿物晶格产生的衍射为基础,定性或半定量地判断土的矿物组成。

1.0.3 本规程适用于各种土类。

2 仪器设备和试剂

2.1 仪器设备

2.1.1 X射线衍射仪: X射线发生器、测角仪、计数器及自动记录装置。

2.1.2 载样玻璃片: 平面的及开有试样孔槽的硬质玻璃片。

2.1.3 离心机: 5000 r/min。

2.1.4 高温炉及电炉。

2.1.5 干燥器: 内盛饱和硝酸钙溶液(相对湿度约为50%)。

2.1.6 其他: 烧杯、量杯、移液管、玻璃片、软毛刷等。

2.2 仪器设备的检定和校准

2.2.1 X射线衍射仪应按仪器说明书进行校准。

2.3 试剂

2.3.1 0.5 mol/l 氯化镁($MgCl_2$)溶液: 将102 g 氯化镁溶于少量纯水中, 稀释至1000 ml。

2.3.2 0.5 mol/l 氯化钾(KCl)溶液: 将74.5 g 氯化钾溶于少

量纯水中，稀释至 1000 ml。

2.3.3 5%甘油溶液。

2.3.4 50%盐酸 (HCl) 溶液。

2.3.5 95%酒精。

2.3.6 丙酮。

2.3.7 1 mol/l 硝酸铵溶液：将 80 g 硝酸铵溶于少量纯水中，稀释至 1000 ml。

2.3.8 1:1 甘油。

3 操作步骤

3.1 常规鉴定用的试样制备

3.1.1 镁饱和试样制备。

1 称取 1 g 左右过 0.15 mm 筛孔的风干土试样，放入离心管中，加入 0.5 mol/l 氯化镁溶液 50 ml，用球状玻璃棒充分搅拌，然后在 3000 r/min 以上的速度离心，弃去上部清液；再用 0.5 mol/l 氯化镁溶液处理 2 次。

2 分别用纯水和 95%酒精或丙酮洗涤，离心 2~3 次。

3 将处理过的试样凉干，或在低于 50 ℃下烘干，磨细备用。

3.1.2 干粉末试样制备。将开有试样孔的载样玻璃片，放在一块平整玻璃片上，向试样孔中填入经过风干磨细的土样，使其厚度略高出试样孔。盖上一块平整玻璃片，用手按压，将试样压实、压平，然后移去上下的玻璃片。用软毛刷小心地扫除试样孔周围多余的土样。

3.1.3 水分散定向薄膜试样的制备。称取 0.05 g 镁饱和试样，加 2~3 ml 纯水，充分搅拌使其分散。吸出 1.5 ml 悬液，在 3.5 cm×5 cm 洁净的平面载样玻璃板上均匀铺开，静置凉干。

3.2 试样的专门处理与制备

3.2.1 镁饱和试样甘油化扩展处理（供蒙脱石类矿物与蛭石、绿泥石区分，以及水化埃洛石与伊利石区分用）。

1 将镁饱和试样 50 mg 放入离心管中，加入 5% 甘油溶液 10 ml，用球状玻璃棒充分搅拌。用 3000 r/min 以上的速度离心，弃去上部清液。按此操作用甘油溶液再处理一次，最后将离心管倒立于滤纸上，吸尽剩余的甘油溶液，按本规程 3.1.3 的规定制成定向薄膜试样。

2 也可用本规程 3.1.2 的规定压制的干粉末样，加入 1~2 滴 1:1 的甘油溶液湿润，稍干后即可供鉴定用。若试样加甘油后膨胀隆起，用玻璃片压实刮平。

3.2.2 钾饱和试样的制备和热处理(供扩展性与非扩展性晶格的矿物区分，以及蛭石与蒙脱石类矿物区分用)。

1 钾饱和试样制备。按本规程 3.1.1 的规定制备，仅需将试剂相应地换成 1 mol/l 的氯化钾溶液即可。

2 薄膜制备。将钾饱和试样按本规程 3.1.3 的规定制成定向薄膜试样，或风干磨成粉末后按本规程 3.1.2 的规定进行压制。

3 钾饱和试样的热处理。将钾饱和粉末试样或其定向薄膜，放入 300~350 °C 高温炉内加热 2 h (定向薄膜的玻璃片加热时应逐渐上升至所需温度，加热后应逐渐冷却)。然后冷却至 60 °C 左右，取出贮于盛有无水氯化钙或五氧化二磷的干燥器中，直至进行 X 射线分析时取出使用。若是粉末试样，使用时按本规程 3.1.2 的规定进行压制。

3.2.3 试样 550 °C 热处理(供绿泥石与高岭石以及其他 14Å 矿物区分用，1Å = 10⁻¹⁰m)。

将钾或镁饱和粉末试样或其定向薄膜，放入 550 °C 高温炉中加热 2h，然后冷却至 60 °C 左右，取出贮于盛有无水氯化钙或五氧化二磷的干燥器中，直至进行 X 射线分析时取出使用。若是粉末试样，使用时还需按本规程 3.1.2 的规定进行压制。

3.2.4 试样的盐酸溶蚀处理(供绿泥石与高岭石以及其他 14Å 矿物区分用)：

1 盐酸溶蚀处理 将试样用 1:1 盐酸溶液在 100 °C 下加热处理 15~20 min，然后移至离心管中，离心，弃去上部清液，分

别用纯水和 95%乙醇或丙酮各处理 2 次，离心洗去多余的盐酸。

2 将溶蚀过的试样按本规程 3.1.3 的规定制成定向薄膜，或风干磨细成粉末后按本规程 3.1.2 的规定进行压制。

3.2.5 试样的硝酸铵处理（供镁质蛭石与其他 14Å 矿物区分用）。

1 硝酸铵处理。将试样或其镁饱和试样，用 1 mol/l 硝酸铵溶液煮沸 10 min，然后移至离心管中，离心，弃去上部清液，分别用纯水、95%酒精或丙酮各处理 2 次，离心洗去多余的盐类。

2 将处理过的试样按本规程 3.1.3 的规定制成定向薄膜，或风干磨细成粉末后按本规程 3.1.2 的规定进行压制。

3.3 X 射线衍射分析

3.3.1 在分析前，各种试样（加热处理的试样除外），应在盛有饱和硝酸钙溶液的干燥器中放置 3 天。

3.3.2 加热处理的试样，从无水氯化钙干燥器中取出后，应加热至 60℃ 左右或立即进行分析。若衍射仪试样台有加热装置，则加热处理的试样应在 120℃ 温度下进行衍射分析。

3.3.3 试验条件的控制和主要参数选择（因仪器型号、性能不同而有所差异，下列为参考值）。

1 X 射线管阳极一般为铜靶（CuKα 辐射），含铁多的试样最好能用铁靶（FeKα 辐射）。X 射线管的工作电压 30~40kV，工作电流 10~15mA。

2 发射狭缝：1° 或 0.5°；散射狭缝：1°（加镍滤片或不加）；接收狭缝：0.2 mm 或 0.4 mm。

3 扫描速度：可在 0.5°~2°（2θ/min）内选择，一般用 1°（2θ/min）。

4 扫描范围：一般在 2°~32°（2θ）。如果要研究矿物高角度的衍射谱线如（060）等，则应将扫描范围延续到 65°（2θ）左右（都是对铜靶而言），同时要减小扫描速度，放宽狭缝。

5 灵敏度：满刻度 400—2000 N/s。

6 时间常数：4~8s。

7 记录纸移动速度：300~600 mm/h。

3.3.4 将载有试样的玻片,插在 X 射线衍射仪的试验台上,选定技术参数和试验条件后,按仪器使用说明书启动仪器进行操作。当测角器转至所需角度 (2θ) 上限后,即可结束试验,关闭仪器。

4 数据整理及鉴定

4.1 数据整理

4.1.1 试验结束后所得到的试验结果为仪器记录的衍射图谱,它是以衍射角 (2θ) 为横坐标,以衍射谱线的衍射强度(衍射峰的高度)为纵坐标的曲线。为了鉴定矿物,必须进行整理求得晶面间距和衍射强度两种衍射数据。

4.1.2 数据的整理方法如下(如果仪器可自动整理并记录出该两种数据,则以下步骤可省去)。

1 由各衍射峰的峰尖向横坐标作垂线,确定衍射峰的衍射角 (2θ)。

2 根据衍射峰的衍射角查“衍射角与晶面间距换算表(即 $\theta \sim d$ 对照表,可参照有关专著)”求得相应的晶面间距(一般称作 d 值)。也可按布拉格公式求出 d 值。

简化后的布拉格公式为:

$$d = \lambda / 2 \sin \theta \quad (4.1.2)$$

式中 d ——晶面间距, \AA ;

θ ——衍射角, ($^\circ$);

λ ——X 射线波长(X 射线管为铜靶时 $\lambda=1.5418\text{\AA}$;若是铁靶, $\lambda=1.9373\text{\AA}$)。

3 根据衍射峰的高度或面积,确定其衍射强度(一般用 I 表示)。衍射强度广为应用的是相对强度(I/I_0)。表示方法常用的有以下三种:

—100 分制:以最强者为 100,最弱者为 0.5,然后对比其他衍射峰的强度。

—10 分制:以最强者为 10,最弱者为 1,然后对比其他衍射

峰**的强度**。

—**五级制**：将强度分为最强、强、中等、弱、最弱五个等级。

4 对于某些形状特殊的衍射峰，需注明宽散程度、对称程度等。

5 在衍射图谱上注明试验条件、主要参数及试样制备和处理方法。

4.2 粘土矿物鉴定

4.2.1 衍射数据整理后，便可与标准矿物的衍射数据对比，进行鉴定矿物。鉴定的要点如下。

1 应有 3 条强衍射谱线（即衍射峰）的 d 值和 I/I_0 。（有的矿物在 $2^\circ\sim 32^\circ$ (2θ) 范围内可能只出现一条衍射谱线），与标准矿物的数据基本吻合，其中 d 值吻合程度要求高一些， I/I_0 吻合程度可以差一些。

2 对比时，应以低角度谱线（值大的谱线）特别是 (001) 基面谱线为主，高角度衍射谱线为辅。

3 应注意特征谱线的对比（各种主要粘土矿物的特征谱线见“附 a”）。

4 注意衍射峰的形状特征：粘土矿物衍射峰形状大多宽散，非粘土矿物大多较尖锐。扩展性晶格矿物如蒙脱石等衍射峰具有明显的宽散特征。

5 先鉴别出主要的粘土矿物类型，然后再作细分，最后鉴定伴存矿物。

4.2.2 高岭石与埃洛石二者衍射图谱相似，可用下列方法区分：

1 高岭石为片状结晶，易于形成定向集合体，故 $d(001) = 7.0\sim 7.2\text{\AA}$ ，衍射强度大， 4.4\AA 附近谱线强度弱，谱线均无宽散现象。埃洛石的 (001) 基面间距略大些， $d = 7.4\sim 7.6\text{\AA}$ ，谱线宽散且强度较弱，但 4.4\AA 附近谱线强度大，并有向小的晶面间距扩散的趋势。

2 埃洛石在甘油饱和后, $d(001)$ 可扩展至 10\AA 左右, 高岭石不扩展。

4.2.3 高岭石 (001) 与绿泥石 (002) 基面间距相似, 均在 7\AA 左右, 可用下列方法区分:

1 将试样按酸的溶蚀处理后, 绿泥石因分解, 衍射谱线全部消失 (绿泥石的特征反应), 而高岭石无变化。故处理后 7\AA 谱线仍然存在, 示有高岭石; 反之, 说明原有 7\AA 附近谱线是绿泥石的。

2 将试样进行 550°C 热处理后, 高岭石因晶格破坏, 衍射谱线全部消失。绿泥石衍射谱线仅稍有变化, 往往是 (001) 基面谱线增强, 而 (002)、(003) 和 (004) 的衍射谱线减弱。

3 高岭石与绿泥石还可按下列谱线对比来区分:

绿泥石	高岭石
4.72\AA (003)	无
3.54\AA (004)	$3.57\sim 3.58\text{\AA}$ (002)
极弱或无 (006)	$2.37\sim 2.39\text{\AA}$ (003) 弱
1.53\AA (060)	$1.48\sim 1.49\text{\AA}$ (060)

4.2.4 蒙脱石、蛭石、绿泥石三种矿物都有 14\AA 附近的谱线, 可按下列方法区分:

1 在镁饱和甘油化定向薄膜试样的衍射图谱中, 仅蒙脱石的 (001) 基面间距由 14\AA 附近扩展至 17.7\AA (蒙脱石的特征反应)。据此易于将蒙脱石与其他 14\AA 矿物区分开来。

2 将试样进行热处理后, 三者之中仅绿泥石 (001) 基面间距无显著变化, 且衍射强度往往有所增大, 而蒙脱石和蛭石均由 14\AA 附近收缩至 10\AA 附近。此可作为绿泥石与其他 14\AA 附近矿物相区别的特征反应。

3 将试样进行酸的溶蚀处理后, 三者之中仅绿泥石衍射线全部消失, 其余两者的谱线基本上不变。

4 将试样制成钾饱和定向薄膜, 其中绿泥石的 14\AA 谱线无变化, 蛭石 14\AA 谱线收缩至 10\AA , 而蒙脱石则收缩至 12\AA 附近 (有的亦可收缩至 10\AA)。若再进行 $300\sim 350^\circ\text{C}$ 加热处理, 三者中仅有

绿泥石谱线无变化，其余二者均可收缩至 10\AA 左右。

5 将试样进行硝酸铵处理后，三者之中仅绿泥石衍射线无变化。镁质蛭石 14\AA 谱线将收缩至 10\AA ，蒙脱石则收缩至 12\AA 附近。

4.2.5 伊利石与水化埃洛石两种矿物都有 10\AA 附近谱线，可按下列方法区分：

1 试样处理成镁饱和甘油化定向薄膜后，伊利石谱线无变化；水化埃洛石的 10\AA 谱线将扩展至 11\AA 附近。

2 试样进行 $300\sim 350^{\circ}\text{C}$ 加热处理后，伊利石谱线无变化；水化埃洛石的 10\AA 谱线将收缩至 7.2\AA 附近。

4.2.6 伊利石类矿物 $d(003) = 3.32\sim 3.36\text{\AA}$ ，石英 $d(101) = 3.34\text{\AA}$ 左右。这两种矿物都是土中常见的，在判读 $d = 3.34\text{\AA}$ 左右谱线时容易混淆，应当注意。石英以 $d(100) = 4.26\text{\AA}$ 附近谱线为依据较为适宜。

4.2.7 二八面体和三八面体的粘土矿物，可用 (060) 晶面间距大小以及 (002) 谱线的强弱来鉴别。

通常二八面体的 $d(060) = 1.48\sim 1.51\text{\AA}$ ，并且 (002) 谱线较强；三八面体的 $d(060) = 1.52\sim 1.53\text{\AA}$ ， (002) 谱线较弱或没有。应当注意不要将石英的 1.53\AA 附近的谱线加以误判。

5 记 录

5.0.1 本试验系定性的鉴定而不是定量分析，所以鉴定结果依据主要衍射峰的高度和面积粗略地加以估计后，按各种粘土矿物大致含量由多到少依次排列。至于伴存的非粘土矿物，亦按其大致含量，由多到少地依次排列在粘土矿物后面。

5.0.2 试验记录中除了将鉴定出的矿物依次排列外，还应将整理后的衍射数据列入记录表中，同时应将试样的 X 射线衍射图谱附在成果鉴定表后。

5.0.3 本试验的记录格式如表 5.0.3。

表 5.0.1 X 射线粉晶衍射分析记录表

试样编号 _____ 试验者 _____
 试验方法 _____ 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

d (Å)	I/I_0	d (Å)	I/I_0	d (Å)	I/I_0	鉴定结果
						实验条件
X 射线衍射图谱:						

附 a 某些常见的粘土矿物粉晶衍射数据表

高岭石(苏州)		埃洛石(阳泉)		蒙脱石(抚顺)		伊利石(南京)		蛭石		绿泥石	
d (Å)	I/I_0	d (Å)	I/I_0	d (Å)	I/I_0	d (Å)	I/I_0	d (Å)	I/I_0	d (Å)	I/I_0
7.19	10	10.04	10	15.0	10	9.83	8	14.5	10	14.02	0.5
4.459	3.5	4.391	7.5	5.007	0.5	4.983	6	4.952	2	7.08	10
4.439	4.5	3.361	3	4.548	1	4.484	4	4.571	3	4.717	6.5
4.167	4	2.996	1	3.006	0.5	4.230	1	3.504	2	3.546	6
3.830	2	2.554	2.5	2.569	1	3.480	1	2.605	5	3.323	0.5
3.736	1	1.682	1	1.524	1	3.339	10	2.421	3	2.838	0.5
3.576	10	1.481	1.5			3.184	7	1.674	2	2.547	0.5
3.372	1					2.979	3	1.529	4	2.378	0.5
2.564	3					2.550	3			2.031	0.5
2.534	1					2.456	1			1.663	0.5
2.495	3					2.380	1			1.538	0.5
2.384	1					2.276	1				
2.336	4					2.128	1				
2.290	8					1.994	3				
1.994	3.5					1.817	0.5				
1.786	0.5					1.624	1				
1.650	1.5					1.497	2				
1.617	1										
1.545	0.5										
1.489	2.5										

附录 A 试验数据的整理 与成果报告

A.1 目的和内容

A.1.0.1 为使试验数据可靠和适用，应进行正确的数据分析和整理。

A.1.0.2 试验数据的分析和整理的主要内容包括：对评价指标探求变化规律；对设计所需的定量分析数据，求取最佳值、确定计算指标。必要时尚需建立土性指标之间的相互关系，作出相应的关系曲线或经验公式。提出试验报告。

A.2 统计分析的原则要求

A.2.0.1 试验数据的分析整理，是通过对试验数据的统计分析来估计总体（土体单元）的特性值及其变化的规律性，应用数理统计的方法。

A.2.0.2 试验数据分析整理时，应首先根据所研究的土体在地貌特征、地质年代、成因类型以及成分和结构构造上差别，结合试验测得的颗粒级配、密度和含水率等指标的变化规律，将其划分为若干个性相近的土层（在立面上）或土区（在平面上），称为工程地质单元或土体单元；然后对不同的土体单元再分原状土样或扰动土样以及不同试验条件，汇集所有试验成果。

A.2.0.3 对于不同土体单元，区别不同情况所汇集的各项试验数据分别编制数据统计表。然后统计其散落在各变化区间内的试验点数，即频数，按各变化区间数据的平均值和相应的频数（或频率）作出频数或频率分布图表示数据的变异情况。根据分布图特征，分为正常型和异常型。

1 正常型一般均应在中段出现明显的峰值，两端的频数对

很小。

2 异常型系峰值不明显,出现多峰、陡壁等,表示数据离散过大、试验数据不够合理或土体单元划分不合理等。应查明原因。

A.3 数据舍弃标准

A.3.0.1 对试验数据中明显不合理的数据,应查明原因(试样是否有代表性,试验过程是否出现异常等),或在有条件时,进行一定的补充试验,以便决定对可疑数据的取舍或改正。

A.3.0.2 核查试验数据的合理性时,除考虑试验数据离散范围的大小外,尚可参考同类地区相同条件下土性指标的历史成果,或考虑具体试验条件下土性指标之间的相互关系。

A.3.0.3 最后舍弃试验数据时,应根据误差分析的概念或概率的概念进行。

1 当试验数据多时(一般 $n > 30$),某个测得值 x_i 的残余误差(残差) $v_i (=x_i - x_m)$ 的绝对值满足下式:

$$|v_i| > 3\sigma \quad (\text{A.3.0.3-1})$$

则认为 x_i 是含有粗大误差的异常值,须剔除。

2 当试验数据不太多时,某个测得值 x_i 的残差 v_i 的绝对值满足下式:

$$|v_i| > Z_c \sigma \quad (\text{A.3.0.3-2})$$

则认为 x_i 是含有粗大误差,须剔除。 Z_c 值随 n 的变化查表 A.3.0.3。

表 A.3.0.3 Z_c 值与 n 关系表

n	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	50
Z_c	1.38	1.54	1.65	1.73	1.80	1.86	1.92	1.96	2.13	2.24	2.33	2.39	2.49	2.58

A. 4 土性指标的统计分析和取值

A. 4. 0. 1 土工试验测得的土性指标，可按其在工程设计中实际作用分为一般特性指标和主要计算指标。前者如土的天然密度、天然含水率、土粒比重、颗粒组成、液限、塑限、有机质、水溶盐等，系指作为对土分类、定名和阐明其物理化学特性的土性指标；后者如土的粘聚力、内摩擦角、压缩系数、变形模量、渗透系数等，系指在设计计算中直接用以确定土体对强度、变形和稳定性等力学性的土性指标。

A. 4. 0. 2 土性指标的统计分析应按下列两式计算平均值 x_m 和标准差 S_f ：

$$x_m = \frac{1}{n} \sum x_i \quad (\text{A. 4. 0. 2-1})$$

$$S_f = \sqrt{\frac{1}{n-1} [\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2]} \quad (\text{A. 4. 0. 2-2})$$

式中 x_i ——土性指标数据；

n ——土体单元（区段、层位）数据的个数。

A. 4. 0. 3 土性参数应按下列方法评价其变异特征：

1 土性参数的变异特征以变异系数 C_v 表示，并按表 A. 4. 0. 3 评价。

$$C_v = \frac{S_i}{x_m} \quad (\text{A. 4. 0. 3-1})$$

表 A. 4. 0. 3 参数变异性

变异系数 C_v	$C_v < 0.1$	$0.1 \leq C_v < 0.2$	$0.2 \leq C_v < 0.3$	$0.3 \leq C_v < 0.4$	$C_v \geq 0.4$
变异性	很小	小	中等	大	很大

2 应分析土性参数沿深度（钻孔深度）和/或在水平方向上的变异规律。并按相关系数来评价。

土性参数沿钻孔深度方向上的自相关函数定义：

$$r(\Delta z) = \frac{1}{(n-1)S(z)S(z+\Delta z)} \sum_{j=i}^n [x_j(z) - x_m(z)] \times [x_j(z+\Delta z) - x_m(z+\Delta z)] \quad (\text{A. 4. 0. 3-2})$$

式中 n ——为几个钻孔所得相应于 Δz 的数据组；

Δz ——钻孔深度的变化值。

式 (A. 4. 0. 3-2) 可用下式近似：

$$r(\Delta z) = \exp(-A|\Delta z|) \quad (\text{A. 4. 0. 3-3})$$

3 变异系数的均化可按下列两式计算：

$$C_v = \frac{S_r}{x_m} \quad (\text{A. 4. 0. 3-4})$$

$$S_r = S_f \sqrt{1-r^2} \quad (\text{A. 4. 0. 3-5})$$

式中 S_r ——剩余标准差；

r ——相关系数。

4 土性参数随深度的变异特性，按均化后的变异系数划分均一型 ($C_v < 0.3$) 和剧变型 ($C_v \geq 0.30$)。

A. 4. 0. 4 土性参数的标准值和设计值可按下列方法选取。

1 标准值 x_k 可按下列式计算：

$$x_k = r_s x_m \quad (\text{A. 4. 0. 4-1})$$

式中 r_s ——统计修正系数。

统计修正系数，在采用风险率 $\alpha=0.05$ 条件下可用下列式估算：

$$r_s = 1 \pm \left(\frac{1.704}{\sqrt{n}} + \frac{4.678}{n^2} \right) C_v \quad (\text{A. 4. 0. 4-2})$$

注：式中正负号按不利组合考虑，如计算 c 、 φ 值的修正系数取负号。

2 对初步设计和次要建筑物宜用标准差平均值，即对算术平均值加（或减）一个标准差的绝对值 ($x_m \pm |S|$)。

A. 4. 0. 5 对不同应力条件下测得的某种指标（如抗剪强度等）应经过综合整理求取，可按下列方法进行：

1 图解法。将不同应力条件下测得的指标值（如抗剪强度），

求得算术平均值，然后以不同应力为横坐标，指标平均值为纵坐标作图，并求得关系曲线，确定其参数（如土的摩擦角系数 $\text{tg}\varphi$ 和粘聚力 c ）。

2 最小二乘方分析法。根据各测定值同关系曲线的偏差的平方和为最小的原理求取参数值。

示例：求取抗剪强度参数。

对几次测得的垂直压力 P 下的抗剪强度 τ ，求取偏差值，再平方相加得：

$$Q = \sum[\tau - (p_i \text{tg}\varphi + c)]^2 = \sum(\tau_i - p_i f - c)^2 \quad (\text{A. 4. 0. 5-1})$$

当偏差的平方和 Q 最小时，则得：

$$\frac{\partial Q}{\partial f} = 0 \quad \sum \tau_i p_i - f \sum p_i^2 - c \sum p_i = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial c} = 0 \quad \sum \tau_i - f \sum p_i - nc = 0$$

联立求解得：

$$f = \text{tg}\varphi = \frac{n \sum p_i \tau_i - \sum p_i \sum \tau_i}{n \sum p_i^2 - (\sum p_i)^2} \quad (\text{A. 4. 0. 5-2})$$

$$c = \frac{\sum p_i \sum \tau_i - \sum p_i \sum p_i \tau_i}{n \sum p_i^2 - (\sum p_i)^2} \quad (\text{A. 4. 0. 5-3})$$

A. 4. 0. 6 当设计计算几个土体单元土性参数的综合值时，可按各土体单元在设计计算中的实际影响，采用加权平均值，即：

$$x_m = \frac{\sum \omega_i x_i}{\sum \omega_i} \quad (\text{A. 4. 0. 6})$$

式中 x_i ——不同土体单元的计算指标；

ω_i ——不同土体单元的对应数。

A. 5 试验报告的编写和审核

A. 5. 1 基本要求

A.5.1.1 试验报告所依据的试验数据,应进行整理、检查、分析,经确定无误后方可应用。

A.5.1.2 试验报告所需提供的数据,一般应包括根据不同建筑物的设计施工的具体要求所拟试验的全部土性指标。参见表A.5.1.2。

A.5.1.3 试验报告的内容应包括试验方案的简要说明(工程概况,所需解决的问题以及由此对试样采制,试验项目和试验条件提出的要求),试验数据和基本结论。

A.5.1.4 试验数据的有效位数可参照表A.5.1.4采取。数值修约应符合现行国家标准《数值修约规则》规定。

表 A.5.1.2 土性指标选择参考表

类别	项别	指 标						说 明
		1	2	3	4	5	6	
必需的 A类	I	天然 密度	天然 含水率	颗粒 比重	颗粒 分析	△ 液性 指数	○ 相对 密度	一般基础项目
	II	内摩 擦角	△ 粘聚力	○ 天然 休止角	渗透 系数	破坏 比降	△ 压缩 系数	根据解决问题的内容选定 (强度、变形或渗透稳定性等)
	III	△ 湿陷	○ 振动 液化	△ 击实	△ 冻胀	△ 消散		根据土质的具体条件选定(如 黄土、饱和砂土、冻土等)
附加的 B类	I	△ 有机质 含量	△ 水溶盐 含量	△ 膨胀	△ 收缩	△ 湿化	△ 灵敏度	根据其对工程的影响选定
	II	△ 残余 强度	△ 抗拉 强度	侧压力 系数				根据计算方法选定
	III	标准 贯入	表面 摩擦	静力 触探	十字板 剪切			根据有无现场试验要求及条 件选定

注 表中△和○分别表示对细粒土和粗粒土的单独立要求。

表 A. 5. 1. 4 试验数据的有效位数

项目	天然密度 (g/cm ³)	天然含水率 (%)	颗粒比重	天然孔隙比	相对密度	液限 (%)	液性指数	颗粒分析 (%)	不均匀系数	渗透系数 (cm/s)	压缩系数 (MPa ⁻¹)	粘聚力 (kPa)	内摩擦角 (°)	无侧限抗压强度 (kPa)
有效位数	0.01	0.1	0.01	0.001	0.01	0.1	0.01	0.1	0.1	0.1× 10 ⁻ⁿ	0.001	0.01	0.5	0.1

注 其他项目参考同类指标确定。

A. 5. 1. 5 试验报告主要审查以下方面：

- 1 对照委托任务书，检查试验项目是否齐全。
- 2 检查各试验项目是否按照试验方法标准进行。
- 3 检查土的定名是否与相关规范相符。
- 4 综合分析检查各指标间的关系是否合理。
- 5 对需要进行数理统计分析的试验报告应检查选用的统计方法是否合适，结果是否正确。

A. 5. 2 试验报告审批程序。

- 1 由试验人员填写成果汇总表，参照表 A. 5. 2-1，表 A. 5. 2. 2。
- 2 经校核人员校核汇总表中的数据有无差错。
- 3 由试验负责人编写试验报告。
- 4 由技术负责人签字并盖章发送。

表 A.5.2-1 土的基本性质

工程名称 _____

委托单位 _____

钻孔 编号	土样 编号	取土 深度	天然状态土的物理性指标					极限孔隙比		相对 密度	液限	塑限	塑性 指数	收 缩限	
			含水 率	密 度		孔隙 比	饱和 度	土粒 比重	最大						最小
				湿	干										
			w	ρ	ρ_d	e	S_r	G_s	e_{max}						e_{min}
m	%	g/cm ³	g/cm ³	—	%	—	—	—	—	%	%	%			

表 A.5.2-2 土的基本性质

工程名称 _____

委托单位 _____

钻孔 编号	土样 编号	取土 深度	渗透系数			土的压缩性							
			孔隙 比	垂直	水平	孔隙比 e_i 垂直压力 p_i	压缩 系数	压缩 指数	回弹 指数	压缩 模量	固结 系数	先期 固结 压力	湿陷 系数
			e	k_v	k_H	a_v	C_c	C_s	E	C_v	p_c	δ_{ie}	
m	cm/s	cm/s	kPa ⁻¹	MPa ⁻¹			MPa	cm ² /s	kPa	%			

附录 B 室内土工仪器的通用要求

B.1 目的和适用范围

B.1.0.1 本标准的目的是规定试验仪器的通用要求，以保证试验数据的准确可靠。

B.1.0.2 本标准适用于室内土工仪器。

B.2 引用标准

GB/T15406—94《土工仪器的基本参数及通用技术条件》第一篇：室内土工仪器；第四篇：检验规则和标志、包装、运输。

SL110—118—95 土工试验专用仪器校验方法。

B.3 仪器设备通用要求

B.3.1 基本参数

B.3.1.1 仪器的基本参数应能满足各类土性指标试验的要求。

B.3.1.2 各类试验所需仪器的基本参数应符合GB/T15406—94之4的规定。

B.3.2 通用技术条件

B.3.2.1 仪器设备应具备预计使用所要求的计量特性（如准确度、稳定度、量程和分辨力），基本特性要求可按GB/T15406—94之5.5的规定选用。

B.3.2.2 仪器设备的结构、材料、工作环境应满足GB/T15406—94之5.2，5.3，5.4规定的要求。

B.4 准确度和校准

B.4.1 仪器的准确度

B. 4. 1. 1 各类室内土工仪器的准确度应符合 GB/T 15406—94 之 5. 5. 1, 5. 6. 2 及该标准附录“土工室内主要仪器准确度表”规定的要求。

B. 4. 2 校准

B. 4. 2. 1 仪器中配备有计量标准器具时, 应按规定的检定周期送交具有计量检定能力的单位检定。

B. 4. 2. 2 室内土工仪器的校验可按 SL110—118—95 的规定进行校验。

B. 4. 2. 3 对专用性强、结构和原理较复杂的仪器设备, 尚未制订计量检定规程或校验方法, 可按 JJG 1002—84《国家计量检定规程编写规则》的要求编写校验或检验方法, 按程序审批后进行仪器校验。

B. 5 不合格的仪器

B. 5. 0. 1 不合格仪器设备是指已经损坏; 过载或误动作; 工作不正常; 功能出现了可疑; 超过了规定的确认间隔时间; 铅封完整性已被损坏。

B. 5. 0. 2 凡不合格的仪器设备应停止使用, 隔离存放, 作出明显的标记。

B. 5. 0. 3 不合格仪器的处理有以下几种。

1 仪器设备不准确或有其他故障时, 应先进行调整, 仔细检查或修理, 再经检定或校验合格后重新投入使用。

2 对不能调整或修复的计量器具, 应考虑降级 (有等级的) 使用或报废。

3 对具有多功能和多量程的仪器设备, 经证实能在一种或多种功能或量程内正常使用时, 应标明限制使用范围, 可在规定的正常功能和量程内使用。

B. 6 仪器设备管理

B. 6. 0. 1 应编制仪器设备一览表, 其内容为: 仪器名称、技术指

标、制造厂名、购置日期、保管人。

B. 6. 0. 2 应编制仪器设备检定（校验）周期表，其内容包括：仪器设备名称、编号、检定周期、检定单位、最近检定日期、送检负责人。

B. 6. 0. 3 所有仪器设备应有统一格式的标志。

1 标志分“合格”、“准用”、“停用”三种，分别以绿、黄、红三种颜色表示。

2 标志内容：仪器编号、检定结论、检定日期、检定单位。

3 可拆卸的检测仪表组合成的仪器设备，每个仪表应有独立的标志；不可拆卸仪表组合成的仪器设备，可以只有一个标志。

B. 6. 0. 4 仪器设备说明书（包括原文的）应妥善保存，并能方便使用。

B. 6. 0. 5 应建立仪器设备档案，其内容为：使用记录、故障及维修情况记录。

附录 C 土样要求与管理

C.1 土样要求

C.1.0.1 采取原状土样或扰动土样应视岩土工程性质而定。

1 凡属建筑物的天然地基、天然边坡和天然地层等，应采取原状土样。

2 凡属填土工程：如土坝、路堤、土围堰、地基基础回填等，应采取扰动土样。对土料场不同土层，除采取扰动土样外，尚应有采取一定的原状土（供测定天然含水率和天然密度）。按料场土层厚度，扰动土样可分层采取或取混合样。

3 不论何种工程，如只要求进行土的分类，只需采取扰动土样。

C.1.0.2 土样可用钻孔、探井、探槽、探洞及天然地面采取。在采取土样时，除应按现行勘测、勘察规范规定的取样工具和方法进行外，应使所取的土样具有代表性。

C.1.0.3 土样质量可根据试验项目按表 C.1.0.3 分为四个等级。

表 C.1.0.3 土样质量等级划分

级 别	扰动程度	试 验 项 目
I	不扰动	土类定名、密度、渗透、强度、固结
II	轻微扰动	土类定名、密度
III	显著扰动	土类定名、含水率
IV	完全扰动	土类定名、渗透（粗粒土）、颗粒分析

注 不扰动（原状）是指原位应力虽已改变，但土的结构、密度、含水率变化很小，能满足室内各项试验的要求；确无条件采取 I 级土样，在工程技术条件允许的情况下，可用 II 级土样代用，但应在试验报告中注明。

C.1.0.4 取土样数量应满足要求进行的试验项目和试验方法的需要。一般试验项目（除粗颗粒土试验）采取土样的数量可参考表 C.1.0.4。

表 C.1.0.4 不同试验项目所需土样数量表

试验项目	土样类别	样品状态	最大颗粒直径 (mm)	样品质量	备 注
含水率	砂 土	扰动		80~100g	
	细粒土	扰动		80~100g	
密 度	细粒土	原状		φ10×20 cm	
	砂 土	原状		φ10×20 cm	
比 重	细粒土	扰动		50 g	
	砂 土	扰动		50 g	
	砂 砾	扰动	>5	2~10kg	取土量视最大颗粒直径大小而异,可参照规定
颗粒分析	砂 砾	扰动	>2	0.5~7 kg	取土量视最大颗粒直径大小而异,可参照规定
	砂 土	扰动	>2	200~500 g	
	细粒土	扰动		100g	
相对密度	粗颗粒土	扰动	<60	80kg	取不到原状样品时,测定最大孔隙比及最小孔隙比
	砂 土	原状		10cm×10cm×10 cm 或 φ10×20 cm	
	砂 土	扰动	<5	2000g	
液限及塑限	细粒土	扰动	<0.5	500 g	
收 缩	细粒土	原状		10cm×10cm×10 cm 或 φ10×20 cm	
	细粒土	扰动		1000 g	
膨 胀	细粒土	原状		φ10×20cm	
	细粒土	扰动		1000g	
湿 化	细粒土	原状		10cm×10cm×10cm	
	细粒土	扰动		1000 g	
毛管水上升高度	砂 土	扰动		2000 g	
	细粒土	原状		10cm×10cm×10cm	
击 实	粗颗粒土	扰动	<60	250 kg	
	细粒土	扰动	<5、<20	30 kg、50 kg	

续表

试验项目	土样类别	样品状态	最大颗粒直径 (mm)	样品质量	备注	
渗透	砂土	扰动	<2	4~5 kg		
	细粒土	扰动	<2	2000 g		
	粗颗粒土	扰动	<60	250 kg		
	细粒土	原状		$\phi 10 \times 20$ cm		
固结	细粒土	原状		10cm \times 10cm \times 10cm 或 $\phi 10 \times 20$ cm		
	细粒土	扰动	<0.5	1000g		击实制样
	粗颗粒土	扰动	<60	200kg		
黄土压缩	细粒土	原状	<0.5	20cm \times 20cm \times 20cm 或 $\phi 10 \times 20$ cm		
三轴压缩试验	细粒土	原状	<2	20cm \times 20cm \times 20cm 或 $\phi 10 \times 20$ cm	击实或压实制样	
	细粒土	扰动	<2	5000 g		
	砂土	扰动	<2	5000 g		
	粗颗粒土	扰动	<60	500 kg		
直接剪切	细粒土	原状		10cm \times 10cm \times 10cm 或 $\phi 10 \times 20$ cm		
	细粒土	扰动		1500~3000 g		
	砂土	扰动	<2	3000 g		
	粗颗粒土	扰动	<60	300 kg		
无侧限抗压	细粒土	原状		10cm \times 10cm \times 15cm 或 $\phi 10 \times 20$ cm		
天然坡角	砂土	扰动	<5	1000~3000 g		
反滤料	粗颗粒土	扰动	<60	100 kg		

C.2 采样记录的要求

C.2.0.1 土样采取时应有原始记录和编号。

1 采取的土样应有取样记录和标签, 内容有: 工程名称, 试

坑或钻孔编号，高程，取样深度或位置，取样日期。

2 如系原状土应在标签上用箭头表示土样上层方向和取样说明，内容为：土层的变化和地下水位高程，土样现场鉴别和描述及定名、取土方法，取土过程中的现象（如有无承压水）、气候、取土人员和取土日期。

C. 2. 0. 2 对 I、Ⅱ级水工建筑物的取土单上，应附地质说明书，内容有：地层，地质构造，地下水，不良地质现象的描述和评价。

C. 2. 0. 3 标签宜用韧质纸，用不脱色笔书写清楚。贴于土样筒外。如袋装扰动土，可用木板作标签放置袋内，并在袋外面标记土样编号。

C. 3 土样的包装和运送

C. 3. 0. 1 不论原状土或保持天然含水率的扰动土，在采取之后，应立即封闭取土筒或盛土容器，取土筒不满的钻孔原状土样，应以接近原状土湿度的扰动土填充后再行封装。土筒上所有缝隙，均应以胶布封严，贴上标签，浇注融蜡。如无取土筒，亦可将取出的原状土块用纱布包裹后，贴上标签，浇注融蜡。以防水分散失。

C. 3. 0. 2 封闭后之原状土样在装箱之前，应存放于阴凉潮湿地点，或挖浅坑埋起，盖以湿土。不需要保持天然含水率的扰动土，最好经过风干稍加粉碎后装入袋或木箱，以免湿土将袋腐蚀及土样中有机物的生长，并应防止袋和木箱漏土。

C. 3. 0. 3 土样运输时，原状土筒或封好的土块，均应装入木箱，装箱时土样与木箱之间的空隙，应以稻草或木屑填紧，避免在运输过程中受震、受冻以及雨水淋湿损坏。木箱应编号，并注明“小心轻放”、“请勿倒置”及“上”、“下”等字样。

C. 4 土样验收

C. 4. 0. 1 土样送达试验单位，必须附送样单及试验委托书或其他有关资料。

1 送样单内容按 C. 2. 0. 1 要求填写。

2 试验委托书包括工程名称、工程项目、试验目的、试验项目、试验方法及要求。原状土方面：进行力学性试验时，试样是天然含水率状态下或饱和状态下进行，剪切试验的仪器（三轴或直剪），剪切试验方法（快剪、固结快剪、固结不排水剪，不固结不排水剪等），剪切和压缩的最大压力等。渗透试验是采用垂直或水平方向；求哪一级干密度（或孔隙比）下的渗透系数等，黄土压缩试验须提出设计荷重。扰动土样的力学性试验要提出初步设计干密度和施工现场可能达到的平均含水率等。

3 其他有关资料包括钻孔或试坑的平面布置图，简单的剖面图，建筑物的总平面布置图，工程初步设计书及其他必要的地质和水文地质资料等。

C. 4. 0. 2 试验单位接到土样后，根据上述资料验收。验收中须查明土样数量是否有误，编号是否相符，所送土量是否满足试验项目和试验方法的要求。

验收后即进行土样入室登记、编号。登记内容包括：工程名称、委托单位、送样日期，土样室内编号和野外编号，取土地点和取土深度，试验项目的要求以及提出成果的时间等。

C. 5 土 样 管 理

C. 5. 0. 1 土样送交验收、登记后，试验单位即将土样按顺序妥善存放。扰动土与原状土应分别保藏。如无地下室或雾室设备，应将原状土和保持天然含水率的扰动土置于阴凉的地方（冬应采取防冻措施），尽量防止扰动和水分蒸发。

C. 5. 0. 2 土样经过试验之后，如有余土，应贮存于适当容器内，并标记工程名称及室内土样编号妥为保管，以备审核试验成果之用。一般保管至试验报告提出一月以后，委托单位对试验报告未提出任何疑义时，即可处理。如委托单位事先提出特殊要求，可根据具体情况协商保存时间。

C. 5. 0. 3 处理试验余土时，应考虑余土对环境的污染及卫生等要求。

本标准用词说明

一、为了便于执行本标准条文时能区别对待，对于要求严格程度不同的用词，说明如下：

1 表示很严格，非这样做不可的用词：

正面词采用“必须”；

反面词采用“严禁”。

2 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词：

正面词采用“应”；

反面词采用“不应”或“不得”。

3 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：

正面词采用“宜”或“可”；

反面词采用“不宜”。

二、条文中指明必须按其他有关标准、规范进行时：

写法为“应按……进行”或“应符合……的要求或规定”。

非必须按所指定的标准、规范进行时，写法为“可参照……”。

中华人民共和国行业标准

土工试验规程

SL237—1999

条文说明

1999 北京

目 次

土的工程分类	SL237—001—1999	547
土样和试样制备	SL237—002—1999	552
含水率试验	SL237—003—1999	555
密度试验	SL237—004—1999	558
比重试验	SL237—005—1999	559
颗粒分析试验	SL237—006—1999	563
界限含水率试验	SL237—007—1999	569
湿化试验	SL237—008—1999	580
毛管水上升高度试验	SL237—009—1999	581
相对密度试验	SL237—010—1999	582
击实试验	SL237—011—1999	585
承载比试验	SL237—012—1999	588
回弹模量试验	SL237—013—1999	590
渗透试验	SL237—014—1999	591
固结试验	SL237—015—1999	595
黄土湿陷试验	SL237—016—1999	604
三轴压缩试验	SL237—017—1999	609
一个试样多级加荷三轴压缩试验	SL237—018—1999	617
孔隙水压力消散试验	SL237—019—1999	619
无侧限抗压强度试验	SL237—020—1999	623
直接剪切试验	SL237—021—1999	625
排水反复直接剪切试验	SL237—022—1999	628
自由膨胀率试验	SL237—024—1999	632
膨胀率试验	SL237—025—1999	633
收缩试验	SL237—026—1999	634
膨胀力试验	SL237—027—1999	635

静止侧压力系数试验	SL237—028—1999	636
弹性模量试验	SL237—029—1999	638
土的变形参数试验	SL237—030—1999	642
单轴抗拉强度试验	SL237—031—1999	645
振动三轴试验	SL237—032—1999	649
共振柱试验	SL237—033—1999	653
冻土含水率试验	SL237—034—1999	656
冻土密度试验	SL237—035—1999	659
冻结温度试验	SL237—036—1999	660
冻土导热系数试验	SL237—037—1999	661
未冻含水率试验	SL237—038—1999	662
冻胀量试验	SL237—039—1999	663
冻土融化压缩试验	SL237—040—1999	665
原位密度试验	SL237—041—1999	667
原位渗透试验	SL237—042—1999	671
原位直剪试验	SL237—043—1999	672
十字板剪切试验	SL237—044—1999	678
标准贯入试验	SL237—045—1999	680
静力触探试验	SL237—046—1999	684
动力触探试验	SL237—047—1999	691
旁压试验	SL237—048—1999	696
载荷试验	SL237—049—1999	702
波速试验	SL237—050—1999	710
原位冻胀量试验	SL237—051—1999	717
原位冻土融化压缩试验	SL237—052—1999	718
粗颗粒土的试样制备	SL237—053—1999	719
粗颗粒土相对密度试验	SL237—054—1999	723
粗颗粒土击实试验	SL237—055—1999	725
粗颗粒土的渗透及渗透变形试验	SL237—056—1999	726
反滤料试验	SL237—057—1999	729

粗颗粒土固结试验	SL237—058—1999	730
粗颗粒土直接剪切试验	SL237—059—1999	731
粗颗粒土三轴压缩试验	SL237—060—1999	735
化学分析试样风干含水率试验	SL237—061—1999	739
酸碱度试验	SL237—062—1999	740
易溶盐试验	SL237—063—1999	741
中溶盐石膏试验	SL237—064—1999	745
难溶盐碳酸钙试验	SL237—065—1999	746
有机质试验	SL237—066—1999	747
游离氧化铁试验	SL237—067—1999	748
阳离子交换量试验	SL237—068—1999	749
土的矿物组成试验	SL237—069—1999	750

土的工程分类

SL237—001—1999

1.0.1 本分类以 GBJ145—90《土的分类标准》为基础，结合水利、水电工程中利用土作为建筑材料或地基的特点而编制的。其内容包括：鉴别（室内试验、现场简易鉴别法）、分类，确定名称和代号，并给以必要的描述。由此可使工程用土的名称统一，并对土的性状作定性的评价。在工程设计阶段，需要结合其他评价指标和计算指标综合分析土的特性时使用。

3.0.1, 3.0.2 土的鉴别、分类需进行的土工试验，应遵照国家标准进行。对液限 (w_L)、塑限 (w_P) 及塑性指数 (I_P)，本规程采用圆锥质量 76g，锥角 30° ，入土深度 17mm 为液限、2mm 为塑限的标准；也可以采用碟式仪测液限，搓滚法测塑限的标准。

3.0.3 将工程用土分为一般土和特殊土。一般土按组成含量的不同分为巨粒土、粗粒土和细粒土；特殊土包括黄土、膨胀土、红粘土。这样，可以满足一般的工程需要。由于本规程的土分类系根据扰动土试样的鉴别结果，关于土的天然状态，如砂土的密实程度，土的含水状态的软、硬程度，结构状态的成层或各向异性，应力历史造成的正常固结或超固结等，在本分类中没有考虑。若需用时，可参照有关标准。对于特殊土类，本规程列入了可在塑性图上有基本位置的黄土、膨胀土和红粘土，其他如软土、冻土、盐渍土没有列入，需用时可参照有关标准。对于特殊成因和年代的土类，本规程虽然没有具体列入，但建议在定名和描述中说明，如新近堆积的砂质粉土，残、坡积碎石土，洪积卵石等。

3.0.4 关于粒组划分，本规程主要是根据我国现有标准并结合英、德、日、法、美等国标准而规定的。其中细粒组的上限值，即本规程的砂土类的下限值从 SD128—001—84《规程》的 0.1mm 改为 0.075mm。关于砂粒和砾粒的界限，国内外除美国 ASTM 标准

为 4.76mm 外，其余绝大部分国家标准均规定为 2mm。但在击实试验中，以 5mm 作为粗料和细料的界限值，需要注意的是 5mm 既不是砾粒和砂粒的界限值，也不是粗粒土和细粒土的界限值。

4.2.1、4.3.1、4.4.1 土类界限的确定。按颗粒指标区分土类时，根据粒组含量（以质量计）在土中何者占优势来确定土类归属。如土中巨粒组的含量超过 50%，将土定为巨粒土；在粗粒土中，如砾粒含量超过砂粒含量（砾粒在粗粒中含量超过 50%），就将定为砾类土。当粒组含量正好位于界限值时，应从工程安全出发，确定土名称。如粗细粒土的确定以“试样中细粒组质量大于或等于总质量 50% 的土称细粒土”。这样确定主要是出于一般逻辑推理，因为超过 50%，意味着占优势。国外大多数也如此规定。

4.2.4 巨粒类土实际上是石土混合料。本规程分为三档：即巨粒土、混合巨粒土（土质石）、巨粒混合土（石质土）。在确定土名时，理应按何种粒组（漂石或卵石）占优势给予定名。本规程为与 GBJ145—90《土的分类标准》一致，规定只有漂石粒组超过总质量的 50%，而不是单纯多于卵石粒组时定为漂石，这与专门标准中累积含量的概念一致。漂石粒组质量少于、等于总质量 50% 时称卵石。从力学观点看，此种土可能被“降级”使用，因为这时漂石粒组质量有可能比卵石粒组还要高。

混合巨粒土（土质石）的划分也基于以上理由划分。而巨粒混合土（石质土）的划分是根据习惯概念划分，即在巨粒含量 50%~15% 的巨粒混合土（石质土）中，漂石粒组含量大于卵石粒组时，定为漂石混合土（砾石质土）（SIB）；而卵石粒组含量大于或等于漂石粒组时，定为卵石混合土（卵石质土）（SICb），如图 4.2.4。

4.3.2 粗粒组包括砾粒和砂粒，按累积含量的概念，划分为砾类土和砂类土。

4.3.3、4.3.4 扣除少于总质量 15% 巨粒的砾类土，砂类土按所含细粒组的多少分为三档。具体划分考虑了如下的理由。

1 粗粒土中细粒组含量不大于总质量的 5% 时，细粒土对粗

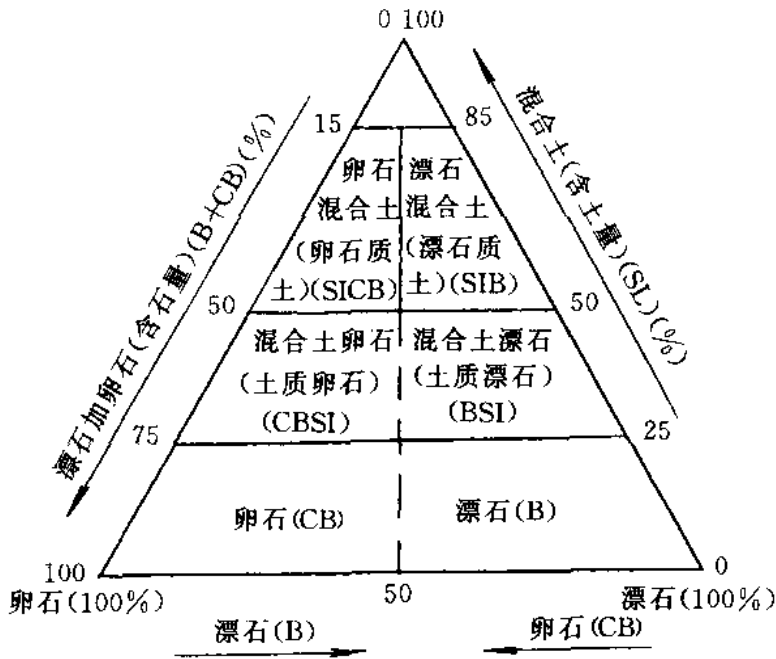


图 4.2.4 巨粒类土分类图

粒土（砾类土、砂类土）的性质几乎没有影响。应定为（纯）砾、（纯）砂。此时级配指标对土的性质有明显影响，应予以考虑。本分类采用的两个级配指标（ C_u 、 C_c ）和界限系根据我国长期的工程经验，并参考国外主要标准确定的。

2 当粗粒土中细粒组含量为 5%~15%时，粗粒土将起骨架作用，细粒土不易填满粒间的孔隙，土的各项指标主要取决于粗粒土，这时土类为含细粒土砾或含细粒土砂。

3 当细粒组含量为 15%~50%时，粗、细粒共同起作用，显示混合料的特征。这时区分细粒组类可以更好地反映土的性质，土类定为粘土质砾，粘土质砂和粉土质砾，粉土质砂。

上述分类也可用三角坐标图表示，如图 4.3.3。

4.4.2 细粒土中含粗粒组时，应考虑如下的理由划分界限：

1 土体中粗粒组含量少于总质量的 25%时，粗粒在土体中分散填充在细粒土内，对土的性质影响不大，故称细粒土。其中包括高、低液限粉土（MH、ML）及高低液限粘土（CH、CL）。

2 土体中粗粒组含量为总质量的 25%~50%时，粗粒在土

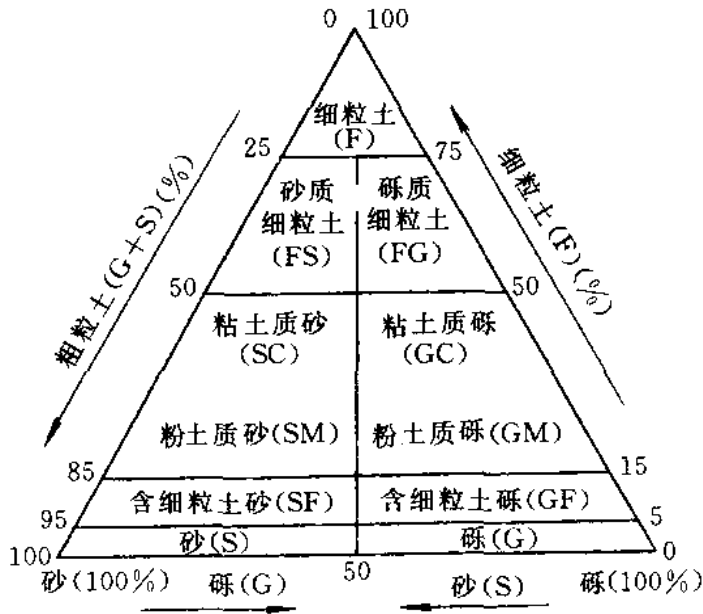


图 4.3.3 粗粒土三角分类

体中已起骨架作用，对土的性质已有相当的影响。理应在定名时反映，统称含粗粒的细粒土。详细可以再分为砾质细粒土，包括含砾高、（低）液限粘土和粉土（CHG，CLG，MHG，MLG）；砂质细粒土，包括含砂高（低）液限粘土和粉土（CHS，CLS，MHS，MLS）。

以上界限和定名也可在图 4.3.3 上反映。

4.4.3 本规程塑性图中的液限 (w_L) 和塑限 (w_P) 的标准已在本规程 3.0.1、3.0.2 中说明。图中的土类划分界限是按美国统一分类采用的 A 线和 B 线（将 SD128—001—84《规程》的 B 线和 C 线修改成 B 线）。图中的 $I_P=10$ 线是在低液限区内粉土和粘土的上界限值，即塑性指数等于或小于 10 的土，定为粉土。而 $I_P=10 \sim 6$ 之间为过渡区，可能由低液限粉土 (ML) 过渡为低液限粘土 (CL)。

4.5.2 特殊土最终分类定名遵照的相应规定如下：

有机土的分类：GB50021—94《岩土工程勘察规范》附录一之四“土按有机质含量分类”。

黄土的分类：GBJ25—90《湿陷性黄土地区建筑规范》。

膨胀土分类：GBJ112—87《膨胀性地区建筑技术规范》。

红粘土分类：GB50021—94《岩土工程勘察规范》附录八。

盐渍土分类：GB50021—94《岩土工程勘察规范》附录十一“盐渍土分类”。

5.1.4~5.1.8 世界各国的土分类法都列有野外鉴别的简易方法。本规程制定了5种简易的鉴别方法，每种方法鉴别结果分3个档次表示。这是根据国外有关标准，并结合我国工程勘察多年实践经验规定的，可以对土类进行较可靠的评价。

5.2.2 细粒土简易分类定名是根据国内8种规程和手册及国外6种规程与标准而制定的。与GBJ145—90《土的分类标准》稍有不同。

5.3.1 无论在现场钻孔、试坑中取样，还是试验时开启土样，均应对土的特征和状态进行描述。对扰动土主要是天然含水状态；对原状土除天然含水状态外，尚应对密实度与结构特征描述。本条所列内容是基本项目，以便对土的利用作出更准确的依据。

土样和试样制备

SL237—002—1999

1.0.1 土样和试样的制备程序是试验工作的第一个质量要素。为保证试验成果的可靠性和试验数据的可比性，必须统一土样和试样的制备方法和程序。

扰动土的土样制备包括：风干、碾散、过筛、均匀后贮存等土样预备程序和击实、饱和等试样制备程序。原状土的土样制备包括：开启、切取等。这些步骤的正确与否，都会直接影响试验成果。

1.0.5 本规程包括扰动土、原状土的试样制备及试样饱和的一般方法。至于原状砾质土、风化土、冲填土、岩石夹泥等特殊土的试样制备要求，分别在有关试验项目中叙述。对于粗颗粒土，在本规程中另列了一项“粗颗粒土的试样制备”。

3.1.3 对碾散后的粘质土样和砂质土样，应进行过筛程序。筛孔径的大小取决于试验所用的仪器容器的大小。根据已有的试验研究表明：用于直接剪切试验中的试样颗粒最大粒径，不应大于剪切盒内径的 $1/20$ （以剪切盒内径为 6.18cm 计），土样需过 2mm 筛。对于无侧限压缩、三轴压缩等试验中的试样颗粒最大粒径与试样直径的比值为 $1/8\sim 1/12$ 。本规程中规定的一般三轴试样直径为 39.1 、 61.8 、 101mm 三种，其试样的允许最大粒径分别为 2 、 5 、 10mm 。对压缩试验的试样最大颗粒粒径为容器高度的 $1/6\sim 1/8$ 。根据目前一般所用的固结仪，其容器高度为 2cm ，用过 2mm 筛的土样是可以的，又鉴于粒径 2mm 又恰为砂粒的上限。因此，土样制备中统一规定扰动土过 2mm 筛进行试样制备。

除上述制备力学性试验的土样过 2mm 筛以外，物理性试验的土样过 0.5mm 筛；击实试验的土样轻型应过 5mm 筛，重型过 20mm 筛。

3.2.2 砾质土的过筛。砾质土有的是无粘性松散土，有的是粘粒附于砾粒上具有粘性的土。前者可以稍加研磨而后过筛。后者如用碾磨粉碎的方法，不但使大颗粒受到破坏，而且粘附于砾石上的粘土粒也不易脱粒，影响颗粒分析成果。根据试验资料，同样的砾质土，干过筛与湿过筛（即浸泡以后水中过筛）的结果，在粘粒含量方面有很大的区别。如对一种砾质粗砂，干过筛粘粒含量仅20%，湿过筛则粘粒含量增到39%，说明这种砾质土是不能用于过筛的，否则影响筛分结果。属于砾质土的风化土（如风化破碎等），使用水浸透后过筛的方法，避免在研磨时使岩石破碎，但由于岩石风化程度和性质不同，是否均可用水浸泡，应视具体情况确定。

湿过筛对于具有粘性的砾质土固然是比较好的方法，但手续既繁，又费时间。所以为了省掉一次过筛程序，在制备土样时仅过2mm筛，免去5mm筛的程序。

4.1.3 为了控制制备试样的均匀性，减少试验数据的离散性，一般是用含水率和密度作为控制指标。对扰动土制备一组试样的密度和含水率的允许误差，不能像原状土试样中所规定的一样，所以在规程中不能单规定各试样之间的允许误差，还应规定试样与所要求的密度、含水率的允许误差。本规程规定对一组试样的密度、含水率与制备标准之差，密度不得大于 $\pm 0.02\text{g/cm}^3$ ，含水率不得大于 $\pm 1\%$ ，而在各试样间彼此相差分别不大于 0.02g/cm^3 和 1% 。

4.2, 4.3, 4.4 关于扰动土试样的制备，以往通常用击实法将土样击实后再切成试样，这样做往往因分层击实，试样上、下密度及土体结构情况不好，为此要求以单层击实最佳。

目前常用的击样法是将土样用击实方法直接在环刀中击成需要密度和含水率的试样，也有单位用压样器来制备试样。试样制备方法对抗剪强度的影响随土质情况、饱和方法及开始含水率等条件而变化。试样制备龄期会对抗剪强度有影响，但试样一经压密，此影响即消失，故在实际中可忽略不计。规程中对扰动土样

制备将击样法、压样法和击实法均列入，以备使用单位根据具体情况选用。但单层击实法（用小面积锤）中，以控制击实高度来代表以锤击的功能控制土样的密度，这样是比较易于控制试样的密度。压样器在各使用单位形式不一。有的活塞有排气孔，有的带有透水板，有的采用有上下活塞两面压样的。

5.0.2 该条规定的理由与 4.1.3 相同。但由于原状土的均匀性是反映天然土体的状态，非人工所能控制，因此，同一组试样的密度和含水率的差值比扰动土试样的稍大一些。

5.0.3 原状土的开土、切削、土样描述强调了对土样质量的鉴别。为了保证试验成果的可靠性，质量不符合要求的原状土样不能做力学性试验。

6.2.5 饱和度的大小，对渗透试验，固结和剪切试验的成果均有影响。对于不测孔隙水压力的试验，一般认为：饱和度大于 95% 即认为饱和。对于需要测试孔隙水压力参数的试验，如三轴压缩试验，应变控制加荷固结试验，对饱和度的要求较高 ($S_r = 99\%$ 以上)。宜采用二氧化碳或反压力饱和方法。

8.0.1, 8.0.2 关于试样制备记录问题。为了便于计算和与制备标准比较，在规程中增列了扰动土试样制备记录。鉴于原状土开土时的土样描述对于试验成果的分析有很大的用处，所以增列了“原状土开土记录”，内容包括：土样编号、取土高程、取土深度、包装情况、扰动情况、颜色、气味、结构、夹杂物等，其他的描述可记载在其他一栏中。

含水率试验

SL237—003—1999

1.0.1 土的“含水量”和“含水率”两个名词在其定义上应该是不同的。长期以来，在岩土工程领域中相互混淆，统称含水量。从标准化的角度来说，一个名词不能有两个不同的含义。

含水量：土体中所含的水量，也可称为水含量，单位为克（g）。

含水率：土试样在 105~110℃ 温度下烘到恒量时所失去的水量与达到恒量后干土质量的比值，以百分率（%）表示。

从上述两个名词的定义来看，含水量是反映土中水分含量状况的抽象概念，而含水率却是定量表达含水量相对大小的具体数值。

另外日本 JIS 定名为“含水比”；在岩石试验中，定名为“自然含水率”；建筑材料学科中定名为“含水率”。

本规程为了明确定义“含水量”、“含水率”两名词，将“含水量”改名为“含水率”。国家标准《岩土工程基本术语》和《水利科学技术名词》，以及在岩石力学、土力学、岩土工程中也将“含水量”改名为“含水率”。为了与国际一致，对应的英文名称仍为“water content”，同时为了逐步过渡，可在“含水率”后注“又称含水量”。

1.0.2 本规程将烘干法作为室内试验的标准方法。标准方法一般是要较长时间才能测定含水率，效率低。在填方和土坝等施工质量管理中，常常要求很快得出填土的含水率，此时，可采用快速测定含水率。

目前较广泛采用的快速测定含水率的方法有：核子测定含水量（g/cm³）法、酒精燃烧法、比重法等。核子测定含水率方法，一般运用于原位试验，已拟另定标准，故本规程中快速测定法仅

列酒精燃烧法、比重法。

另外，SD128—84 规程列有“实容积法”（试行）。据了解，自 SD128—84《规程》颁发以来，在现场用该法测定含水率的使用单位极少，并且该法的原理是依据波义尔—马略特定律，首先要求气温应基本保持不变，这在填筑工地上是很难达到的。若以标准温度为 20°C ，那么气温变化 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，实容积的变化就达到 $\pm 5\%$ ；相应含水率的变化也就约 5% 。因此，本次修订时取消了该方法。炒干法也不常用故不列。

1.0.3, 2.3.2 对含有机质的土，由于在 $105\sim 110^{\circ}\text{C}$ 温度下经长时间烘干后，有机质特别是腐植酸会在烘干过程中逐渐分解而不断损失，使测得的失去“水量”比实际的要大，计算的含水率比较大。土中有机质含量越高误差就越大。故本规程对有机质含量超过 10% 的试样，规定在 $65\sim 70^{\circ}\text{C}$ 的恒温下烘干。

2.3.1, 3.3.1, 4.3.1 关于代表性试样选取及试样数量问题。进行含水率试验时，常因各种因素，影响试验成果：如土层的不均匀，试样数量过少，扰动土样（如风干土）拌和不匀，钻探取土时，取土器和筒壁的挤压，土样在运输和存放期间保护不当等等。为此，选取含水率试验的试样可根据试验目的和要求而定。若为了了解全土层综合而概略的天然含水率，可沿土层剖面竖向切取土样，拌和均匀测定其含水率；如是配合压缩、抗剪强度、渗透试验，应在切取试样环刀的上下两面选取土样，这样测得含水率的结果可能由于土样层次不均有所差异，但有助于了解土层的真实情况和对试验成果的分析。

关于试样的数量问题。对烘干法为使试验结果准确可靠，同时考虑到烘焙时间的长短，粘质土规定 $15\sim 30\text{g}$ ；砂质土或砾质土因持水性较差，颗粒大小相差悬殊，水含量易于变化，所以试样应多取一些。酒精燃烧法多为施工质量控制所采用，为使酒精用量不宜过大，根据实践经验，粘质土样的数量为 $5\sim 10\text{g}$ 。在填土来源固定时，为了减少每次试验所用试样的数量，加快试验速度，可事先测定粗颗粒土吸着含水率平均值，检查试验时只测粒径小

于 5mm 土的含水率及粗颗粒含量百分数，按加权法计算总含水率。

2.3.2 本规程规定烘干温度为 105~110℃，改变了原规程 (SD128—84) 规定烘干温度为 100~105℃ 的标准。这是因为：取决于土的水理性质的认识；目前国外一些主要土工试验标准规定，JIS 规定用 110℃，ASTM 和 BS 规定用 105~110℃，故本规程规定 105~110℃。

2.3.6, 3.3.6, 4.3.7 平行试验和平行差值问题。规程采用平行试验目的是为了 避免操作中间发生的错误。对原状土通过平行试验还可进一步了解含水率的均匀程度。为了保证试验准确度，规定平行试验的允许误差是合理的。对于烘干法，允许误差规定如规程表 2.3.6。

对于一些快速测定方法，规程中规定了平行测定而未规定允许误差的范围，这是因为这些方法准确度较差，可以参考烘干法的规定，斟酌采用。

密度试验

SL237—004—1999

1.0.2 土的密度是单位体积的土质量。按定义，测定密度的方法主要是以测定土体积的方法而命名，如环刀法、蜡封法、灌砂法和灌水法等。

3.3.5, 4.3.6 为了保证试验的可靠性，对环刀法和蜡封法两种试验方法规定了平行试验，同时平行差值不得大于 $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ ，这与 SL237—002—1999《土样和试样制备》的规定基本一致。

4.3.2 将土样浸入熔解的蜡中密封时，如果蜡的温度过高，对土样的含水率和结构都会造成一定的影响，而温度太低会使蜡熔解不均匀，不易封好蜡皮。故规程规定蜡的温度控制到刚过熔点。

封蜡时为避免易碎裂土样的扰动和有气泡封闭在土与蜡中间，规程采用将土样一次徐徐沉浸在蜡中。

比重试验

SL237—005—1999

1.0.1 土粒比重是土的基本物理性指标之一，它是计算孔隙比和评价土类的主要指标。

关于比重的定义，以往国内《土工试验规程》和教科书上一般均定义为：土粒在温度 $100\sim 105^{\circ}\text{C}$ 下，烘至恒重时的重量与同体积 4°C 时蒸馏水重量的比值。近年来，国外某些书刊中给出这样的定义：给定体积材料的质量（或密度）与等体积水的质量（或密度）的比值。

自1984年2月国家法定计量单位颁布实施以来，鉴于GB3102.3—86中3—1.1量的名称备注：“人民生活 and 贸易中，质量习惯称为重量。表示力的概念时应称为重力”。并建议物理学界不要把“重量”一词代替“重力”，这就意味着不得采用“重量”一词。为了回避“重量”一词，有的标准将岩土工程中的“容重”、“土粒比重”、“相对密度”等专业名词相应地改为“重度”、“相对密度”和“相对密实度”。这一改变给工程应用、教学和对外交流带来一定的困难和混乱。

《现代科学技术词典》将材料的比重定义为：材料的密度和某一标准材料的密度之比。这样可以消除重力加速度是一变数而造成定义的不严谨，使定义更具有科学性和一般性。鉴于以上情况，我们仍沿袭使用“比重”这个无量纲的名词，作为土工试验中的专用名词来对待。因为它涉及到试验原理和试验方法。它的明确的定义为：土粒比重是土在 $105\sim 110^{\circ}\text{C}$ 温度下烘至恒值时的质量与同体积 4°C 时纯水质量之比值。

这样定义土粒比重既照顾了岩土工程中的习惯用法，又有明确的科学定义，符合法定计量单位的有关规定。

1.0.2 在水利水电工程建设中，作为建筑材料和地基的土，有细

料和粗料（以粒径 5mm 为界限）之区分，因此本规程中根据土粒小于和大于 5mm 分别采用比重瓶法、浮称法和虹吸筒法。

自《62 规程》中选用虹吸筒法后，经过多年来的实践，不少试验室都认为这种方法测得的结果不稳定。其原因主要是粗颗粒实体积测试不准，若是在操作中排气不充分，往往测得的比重值一般偏小。

虹吸筒法和浮称法，也均适合野外选用。对大于 20mm 的粗颗粒较多时，采用浮称法将增大试验设备，故规程中将浮称法与虹吸筒法一并列入。规定粒径大于 5mm 的试样中 20mm 的颗粒小于 10% 时，用浮称法；20 mm 的颗粒大于 10% 时，用虹吸筒法。

2.1.1 比重瓶大小的选择。目前各单位多采用 100ml 的比重瓶，也有采用 50ml 的。通过实验比较，认为瓶的大小对比重成果影响不大。用 100ml 的比重瓶可多取些试样，使试样的代表性和试验的准确度可以提高。本规程建议采用 100ml 的比重瓶，但也允许采用 50 ml 的比重瓶。

2.2.2 比重瓶校准方法的选定。比重瓶校准方法一般有下列两种：

1 称量校准法。根据本地区一年内温度变化的情况选择若干个控制温度，实测各温度下的瓶、水总质量；绘制温度与瓶、水总质量的关系曲线供试验时查用。这种方法精度较高。

2 计算校准法。假定玻璃瓶体积的胀缩系数在任何温度下为一常数，可利用玻璃体积的膨缩系数换算出各种温度下的瓶、水总质量，具体方法如下。

计算公式：

$$\begin{aligned} m_2 &= (m_1 - m_0) \frac{\rho_{w2}}{\rho_{w1}} [1 + \epsilon_v(T_2 - T_1)] + m_0 \\ &= (m_1)A + m_0 \end{aligned} \quad (2.2.2)$$

式中 m_2 ——任意温度 T_2 时的瓶、水总质量，g；

m_1 ——温度 T_1 时的瓶、水总质量，g；

m_0 ——比重瓶质量，g；

ρ_{w2} ——任意温度 T_2 时水的密度, g/cm^3 ;

ρ_{w1} ——温度 T_1 时水的密度, g/cm^3 ;

ϵ_v ——玻璃的胀缩系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

设 m_2 时对应的温度 T_1 为 20°C , ϵ_v 值采用 $24 \times 10^{-6} ^{\circ}\text{C}^{-1}$, 每隔 5°C 计算一个 m_2 值。表 2.2.2 为计算 m_2 时不同温度下的 A 值。

表 2.2.2 计算 m_2 时不同温度下的 A 值表

温度	5	10	10	20	25	30	35	40
A	1.00150	1.00132	1.00081	1.0000	0.99892	0.99760	0.99607	0.99434

2.3.1 用比重法测定土粒比重,目前绝大多数试验室都采用烘干土,认为可减少计算中的累计误差,也适合于含有机质、可溶盐、亲水性胶体等的土用中性液体测定。同时认为烘焙对土中胶体的影响并无害处。因此本规程中采用烘干土。但也有人认为试样在高温下烘焙会引起土中胶体的变化,也会引起有机质土中腐植物烧失,如美国陆军水道实验站工程手册中提到特别是对那些有机质含量高的土一经烘干后往往难以重新湿润。对这些土首先可不预先烘干即作试验,待试验结束后,再测定试样的烘干质量。因此,在实际工作中如遇有某些土用烘干土测定会影响试验成果时,也可采用风干土或天然土用纯水测定,试验结束后,再测定试样的烘干质量。但对含可溶盐的土不能用纯水测定。

2.3.2 排气方法。规程中仍选用煮沸法为主,此法简单易行,效果好。如需用中性液体时,则采用真空抽气法。砂土煮沸时砂粒容易跳出,亦允许用真空抽气法代替煮沸法。

2.3.6 含有机质、水溶盐、亲水性胶体的土粒比重测定问题。含有机质、水溶盐、亲水性胶体的土与水相互作用时,往往会额外增大比重值,这主要是由于这类细粒土表面活动性对水的影响,使土中水呈三种状态:最近土粒面的呈固态,其密度可达 $2\text{g}/\text{cm}^3$,称吸附水或强粘结水;中层为高粘滞性水如沥青状,呈半固态,密度可达 $1.5\text{g}/\text{cm}^3$,称弱粘结水;最外层为自由水或正常水。

粘结水的多少随土中的胶粒含量、矿物成分和吸附的各种离子而不同。例如蒙脱土和有机质土的亲水性特别大。因此用纯水测定时，靠近土粒表面的水密度大，使一定容积内的瓶、水、土总质量增大，比重值亦相应增大。对含水溶盐的土，则由于盐类部分或全部溶于水中，同样会使瓶、水、土总质量增大，因而也会使比重值增大。

根据以上情况，规程中规定如发现土中含有可溶盐、亲水性胶体或有机质，须用中性液体代替纯水测定，并用真空抽气法代替煮沸法，排除土中空气。关于中性液体目前多采用煤油，也有采用苯或酒精的。

3.3.10, 4.3.11 粗、细土粒混合测定问题。天然土常为粗细颗粒混合而成，对这类土的比重应区别情况进行测定，以不影响准确度为原则。

1 当其中大于 5mm 的粗粒含量较少时，可直接用比重瓶法一次测定。也允许将少量大于 5mm 颗粒打碎拌和均匀后取样，颗粒打碎有助于排除孔隙里的空气。

2 当大于 5mm 粗粒含量较多时，根据实际情况分别用浮称法（或虹吸筒法）和比重瓶法测定，然后再求其加权平均值。

颗粒分析试验

SL237—006—1999

1.0.2 颗粒大小分析的试验方法主要有两大类：一是机械分析法，如筛析法；二是物理分析法，如密度计法、移液管法、沉淀法等等。本规程根据水利水电部门大规模生产的需要，除选人筛析法和密度计法外，并增加移液管法，以便在细粒土的分析中，更好地根据实际情况进行选择。

3.3.1 关于试样的用量。以往有的标准规定按粒径大于 2mm 的含量百分数来确定取样量。根据以往经验，按上述方法确定试样用量，在实际工作中是不便于掌握的。鉴于土样中粗颗粒的含量（以质量计），一般与颗粒的大小有关。因而以最大颗粒粒径为标准来确定试样的用量，比较直观易于掌握。

3.3.3 含有粘土粒的砾质土（包括风化土）的颗粒分析，有研散后干过筛和湿过筛两种方法。两种方法的使用情况见 SL237—002—1999 规程 3.2.2 的条文说明。

3.4.3 因土的分类定名的需要，本规程增加了级配指标（不均匀系数、曲率系数）的计算公式。

4.1.1 密度计型号的选择。目前通常采用的密度计有甲、乙两种，其制造原理及使用方法并无不同之处。甲种密度计读数系表示 1000ml 悬液中的干土量；乙种密度计读数系表示悬液比重。有些单位为了计算时方便而采用甲种密度计。如果校验准确，两种密度计的效果相同，故规程不予硬性规定。

必须指出，由于这两种密度计刻度时所采用的悬液温度标准不同（20℃/20℃，20℃/4℃），因此在密度计校准以及土量百分数计算公式中，都有严格区别，如不加以注意，将会造成错误。本标准采用 20℃/20℃ 标准。

4.2.1 密度计的校准问题。以往由于密度计的制造不一定规范，

造成浮泡体积、刻度不准确，加之，密度计的刻度是以纯水为标准的，当悬液加入分散剂后，则比重增大。故需要在使用前应对刻度、弯液面、土粒沉降距离、温度、分散剂等的影响进行校验。上述校验工作特别是刻度校准是极其繁重而细致的工作。

国内已有单位生产准确度符合国际标准的密度计，甲种密度计最小分度值为 0.5，乙种密度计为 0.0002，无需进行刻度、沉降距离和弯液面的校准。若使用其他型号的密度计，仍然需要进行有关项目的校准。

4.4.1, 5.3.1 试样的状态和用量。粘质土颗粒分析的结果，主要取决于分析时试样状态、制备方法和分析方法等因素。试样通常可分为：天然湿度、风干和烘干三种状态。

实践证明，用天然状态下的试样比风干和烘干状态的试样所得的粘粒含量均偏高。因为粘土中往往有非可逆性的胶体物质，经过干燥后细粒能胶结成团难以再度分散。所以，一般来说，用天然湿度状态下的试样分析更符合于实际。但是在实际工作中，往往在土样取出后特别是坝料，在查勘时所取得的扰动土样，经过长途运送，历时较长，无法保持其天然含水率。因此，原则规定密度计法和移液管法应采用天然含水率的土样进行。若土样无法保持其天然含水率时，允许用风干或烘干土样进行分析。但应该注意，同一地区同一工程用途应该采用相同状态的土样进行分析，以便比较。

关于试样的用量。根据对移液管法进行研究的结果：当悬液浓度在 0.5%~3% 范围时，各粒组的含量没有显著出入；而当悬液浓度增至 4% 尤其是 5% 时，则 0.25~0.05mm 粒组含量增加，并相应地减少了粘粒含量。因此，当用密度计法分析时，试样用量规定为 30g，移液管法可酌情减少，规定用量为 10~20g。

4.4.2 本规程规定了当试样中易溶盐含量大于总质量的 0.5% 时已属于盐渍土，须经过洗盐手续，才能进行颗粒分析试验。

当含有易溶盐的试样进行颗粒分析时，对试验成果有较大影响，如表 4.4.2。从表中可见，未经洗盐的试样与洗盐后的试样相

比，未洗盐的粉粒含量高，粘粒含量低；洗盐后粉粒含量低，粘粒含量高。

关于洗盐的方法，一般采用过滤法。对粘粒含量较多的试样，可用抽气过滤法，以加快过滤的速度。

洗盐的检验方法，规程上列了加化学试剂的观测法。也可采用电导法，该法效率高，操作方便，具体操作参考有关手册。

表 4.4.2 盐渍土洗盐与不洗盐的比较

省 (区)	土样号	含盐量 (%)	粉粒含量 (%) 0.05~0.005mm		粘粒含量 (%) <0.005mm	
			洗盐前	洗盐后	洗盐前	洗盐后
新疆	146	5.26	22.33	6.00	9.08	18.61
	147	14.66	17.23	13.10	40.04	41.17
甘肃	133	2.10	62.20	47.50	1.50	14.00
	142	2.19	54.50	43.50	0.50	14.00
	143	1.11	24.99	22.47	17.99	21.34
	149	5.13	20.79	7.21	5.25	16.52
	156	0.88	41.50	34.70	9.50	13.00

4.4.6, 4.4.13 关于过筛次序问题。密度计法分析中，试样过 0.075mm 洗筛的步骤，有的主张在分析前进行，有的主张在分析后进行。前者一方面是根据一般文献规定，另一方面考虑到土中粒径大于 0.075mm 土粒过多时，如不先过筛，则在沉降过程中粗粒互相碰撞，将会引起悬液扰动，且当粗粒下沉时易将细粒曳带一起下沉，影响分析结果的准确性。主张分析后过筛的理由是：一方面在操作上可以省去一些繁杂的冲洗手续，另一方面由于在筛上经过反复冲洗，易使土粒损失，这些均能影响结果。

以上两种主张都有根据，但也有缺点。因此，为了提高效率而又确保质量，本规程规定：如土中粒径大于 0.075mm 的颗粒含量约超过试样总量的 15% 时，应将其全部倒至 0.075mm 筛上冲洗，至筛上仅留粒径大于 0.075mm 颗粒为止。反之，可不经过筛

冲洗，直接全部倒入量筒。但在试验程序中应妥为安排，以免混乱，发生错误。

4.4.8 关于土的分散标准和分散剂品种问题。细粒土的土粒可以分为原级颗粒和团粒两种。团粒是由颗粒集结而成，它是在沉积过程中以及其后的生存期间内形成的。组成粘土的原级颗粒和团粒，总称之为结构单元。制备试样时，随着处理过程的加剧（例如延长煮沸时间等），粘粒含量越来越大，直至某一极限。粘粒含量的增大，说明一部分团粒已被分散。

对于颗粒大小分析中试样分散标准问题，有的主张用全分散法，理由是颗粒分析本身应该反映土的各种真实原级颗粒的组成；有的主张用半分散法和微集成法，以符合实际土未被完全分散的情况。

本规程采用半分散法（用煮沸法）为主，主要是考虑到此法在一般建筑工程和地质工程作颗粒分析时惯用。这种分散方法所得的结果是土的结构单元不受任何破坏时，其粒组所占土质量的百分数。

关于分散剂品种，国内有不同意见，主要反映在：（1）从不同土类的角度出发，选用合适的分散剂；（2）从不同的分散理论角度出发，如有的从土悬液 pH 值的大小，采用不同的分散剂；有的从粘土的离子交换容量能力来考虑，选用合适的分散剂。

从目前国际上的趋势看，采用强分散剂（如六偏磷酸钠，焦磷酸钠）不再考虑不同土类用不同分散剂的趋势，以便统一标准和方法。

国内大多数规程也均以钠盐作为分散剂，以六偏磷酸钠使用最广；使用偏磷酸钠和焦磷酸钠亦不少，还有些单位使用 25% 氨水作分散剂。

分散剂的选择，应考虑各种不同土类的粘土矿物组成，结晶的性质及浓度，同时又要考虑到试验数据的可比性及国内外交流的需要。根据我国以往对分散剂使用的现状及我国土类分布的多样性，本规程规定了对一般土用 4% 六偏磷酸钠作为分散剂。至于

特殊土类，选择不同的合适的分散剂。

4.4.10 密度计读数的选择目前有两种方法：一种是全曲线分析读数法，即经 0.5、1.0、2.0、5、15、30、60、120、180、1440min…测读密度计读致，其中，0.5、1.0、2.0min 读数后均需重新搅拌；另一种是选用相应于各粒组界限值（0.075、0.05、0.002mm）沉降时间作为读数时间。这种方法既节省了大量的计算工作量，又免去了多次在静止的悬液中放取密度计对悬液的扰动，减少了产生误差的因素。

修订规程时根据水利工程的需要和参考上述方法的优点，选择密度计读数的原则：既要测出各粒组的界限值（如 0.075、0.005、0.002mm），又要控制测点在曲线图上均匀分布，使颗粒级配曲线的形状趋于真实，同时也要照顾读数的上限和下限值，使能求出总土量的 85% 和 10%（或小于 0.002mm 粒径），以满足级配曲线的完整性。

根据上述情况及参考有关文献，规定测定 1、5、30、120min 和 1440min 的五个读数。另外也可根据试样情况或实际需要，可适当增加密度计读数或缩短最后一次读数的时间。

4.5.2 土粒径的计算公式在表达式上有两种表示：

$$d = \sqrt{\frac{1800\mu}{(G_s - G_{wr})\rho_{wo}}} \times \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (4.5.2-1)$$

$$d = \sqrt{\frac{1800\eta}{(G_s - G_{wr})\rho_{wo}g}} \times \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (4.5.2-2)$$

式中，表示动力粘滞系数的两个符号 μ 和 η ，其计量单位分别为 $10^{-5} \text{g} \cdot (\text{s}/\text{cm}^2)$ 和 $10^{-2} \text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s})$ ，两者的关系为 $\eta = \mu \times g$ （重力加速度 $981 \text{cm}/\text{s}^2$ ）。在工程单位制（ $\text{cm} \cdot \text{g} \cdot \text{s}$ ）时，克（g）表示克力（gf），动力粘滞系数的单位为泊（P）。用于水的动力粘滞系数单位为泊（ 1×10^{-2} ）。这样，式（4.5.2-1）和式（4.5.2-2）的量纲虽不同，但量值仍为 10^{-2} 。

自 1984 年实行法定计量单位后，动力粘滞系数为专门名词，其单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ，即 $\text{N}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ；用于水的动力粘滞系数的量值

改为 $10^{-6} \text{ kPa} \cdot \text{s}$ 。因 1 泊 (P) $= 10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{s}$; (10^{-2}) 泊 $= 10^{-6} \text{ kPa} \cdot \text{s}$ 。使用法定计量单位, 应将式 (4.5.2-2) 的相应系数给以修正, 本规程土粒径的计算公式为:

$$d = \sqrt{\frac{1800 \times 10^4 \eta}{(G_s - G_{wr}) \rho_{wo} g}} \times \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (4.5.2-3)$$

5.3.3, 5.3.6 移液管法是根据各种粒径在一定时间后下沉距离的关系来计算吸取悬液的时间和距离。因此, 本规程是固定粒径和吸取深度 (10cm) 来计算时间。但需要说明的是, 在计算前还要确定土粒比重及悬液温度。为了方便, 可事先制备土粒在不同温度静水中某一深度 (10cm) 沉降时间表, 以便查阅。

5.4.1 移液管法主要是从量筒中吸取一定体积的悬液注入烧杯, 然后烘干、称量。因此, 在悬液中小于某一约定粒径的土粒质量 m_0 等于被吸的土粒干质量 m'_d 乘以悬液总体积 V 与被吸悬液体积 V_1 之比, 即:

$$m_0 = m'_d \frac{V}{V_1} \quad (5.4.1-1)$$

小于某一粒径的土粒质量的百分数为:

$$X(\%) = \frac{m_0}{m_d} = \frac{m'_d V}{m_d V_1} \times 100 \quad (5.4.1-2)$$

界限含水率试验

SL237—007—1999

1.0.1 细粒土的状态随土中水量的变化而变化。界限含水率（液限、塑限、缩限）就是区分不同状态的量度值。液限是土体从粘滞流状态到可塑状态的上限含水率。在该含水率时，土体对变形和剪切力就产生一定阻力，它反映出土体具有可量度的最小强度值。塑限是土体从可塑状态转变为半固体状态的界限值，是塑性状态的下限含水率。在该含水率时，土体开始变得具有脆性。在脆性范围内，含水率比塑限低，细粒土搓揉时易破碎。因此，塑限试验制定的搓条法是依据将土条搓到一定尺寸，土条就开始破裂或断裂。缩限是土体从半固体状态转变成固体状态的界限值，其特征是水分蒸发使土体积不再收缩时的含水率。事实上，土从粘滞流状态到可塑状态再到半固体状态的性质变化都是渐变的。因此，在两者之间建立确定的界限都带有一定的任意性。先后发展起来的测定液限的碟式仪法、圆锥仪法、测定塑限的搓滚法，以及液限、塑限联合试验法都是分别依据了一定的经验数据（如碟式仪的 25 击，合拢长度 13 mm；圆锥仪的下沉深度；搓滚法的 3mm 等）。

3.1.1 液、塑限联合测定仪的读数显示部分，分别列有光电式、游标式和百分表式几种，并在操作步骤中均有注明，可根据具体情况选用。

3.3.1 为了尽量减少人为影响，使试样更能反映实际情况，本规程规定，原则上用天然含水率的土样制备试样。但由于有时土样在采取及运送过程中湿度可能已经变化，或者由于土质不均匀，选取代表性的土样有困难。因此，本规程允许用风干土样制备试样。当用天然含水率的土样进行联合测定时，视天然含水率的大小，从高含水率做到低含水率。

3.3.2 液、塑限联合试验法三个测点的分布应使其间距尽量大些，在图上比较均匀地分布。一般锥体下沉深度在 2~17mm 之间。最高一点的下沉深度应在 16~18mm；最低一点，按“79 规程”规定在 2~3mm 之间。考虑到下沉深度为 2~3mm 的试样调制困难，在“84 规程”中把最低一点定为 4~5mm，中间一点定为 9~11mm。

本次修订，考虑到规定具体的下沉深度数值难以执行，且意义不大。因此，改为“分别按接近液限、塑限和二者中间状态制备不同稠度的土膏静置，静置时间视含水率大小而定”。

3.3.6 圆锥沉入土中读数时间标准。对中、高液限的粘质土和粉质土锥体沉入后，能在较短时间内稳定。对比试验的资料表明：对上述土类，5s、15s、30s 的下沉读数保持基本不变；而对低液限粉质土中，由于试样在锥体作用下发生排水，使锥体继续下沉，有时长达数分钟后才能稳定。若待锥体下沉持续很长时间再读数，因含水率及强度均有变化，求得的结果就难以代表试样的真实情况。因此，原则上当锥体由很快下沉转变为缓慢蠕动下沉时就读数，但这很难做到。对此资料表明：对于低液限土，下沉深度随时间增加。在高含水率时，5s 与 15s 下沉深度最大差值可达 2mm；但低含水率时差值较小，一般在 0.5mm 上下，由此引起的含水率差值并不太大（因 $\lg w - \lg h$ 直线的斜率大），一般情况下不超过 1%。个别情况略大于 1%。为了尽可能避免蠕动影响，规程规定以 5s 为锥体下沉的测读时间标准。

3.4.2 关于含水率与圆锥下沉深度的关系，自 60 年代以来，水电、冶金、交通等部门土工试验室进行了大量的比较试验研究。特别是在“79 规程”及“84 规程”两次修订中，组织了 10 个单位，对包括粘质土、冻土、黑土、黄土和淤泥等（液限从 23.7% 到 62.6%，塑性指数从 3.0 到 27.6）进行过比较试验。

1983 年又组织了 13 个单位统一采用 FG-I 型仪器，用统一的操作方法，同时对 16 组土样进行了第二次液、塑限对比试验。对比试验的土样取自国内不同地区的代表性土，其塑性指数从

8.5 到 36.1 (76g, 10mm 标准)。

通过两次对比试验结果认为：不论圆锥质量为 76g、80g 还是 100g，其下沉深度与相应的含水率的关系在双对数坐标纸上，从下沉 2mm 到 20mm 左右，均有良好的直线性，如图 3.4.2。这一组直线的集中程度，反映了联合测定的准确度，也奠定了联合试验法的基础。

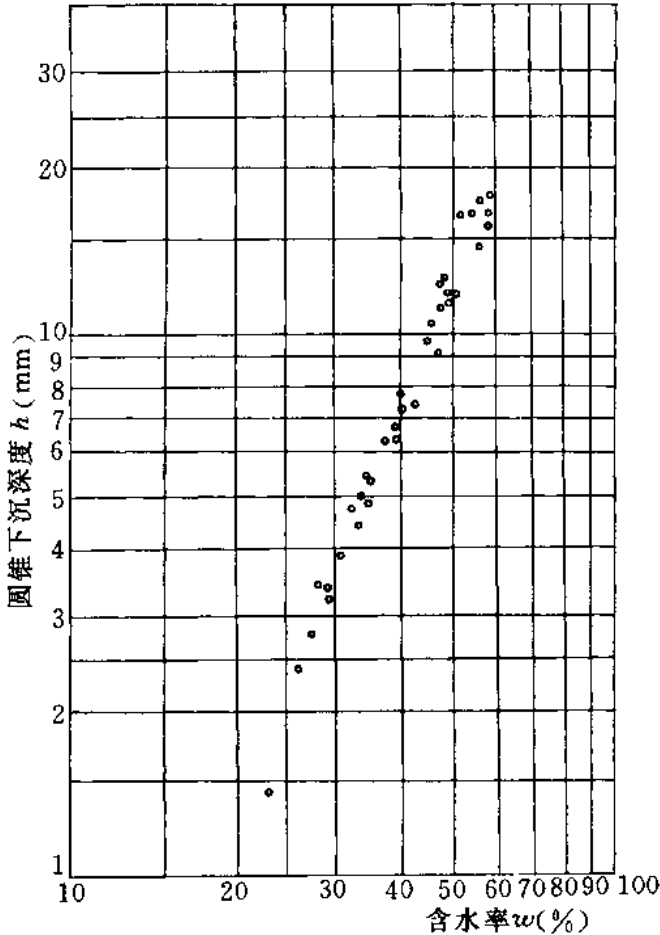


图 3.4.2 $\lg w$ 与 $\lg h$ 测点图

在对比试验中，每一个土样由 13 个单位分别得到的 $\lg w - \lg h$ 直线上量得 $h=17\text{mm}$ 时的含水率的平均值 \bar{x} 。并算出标准差 σ 及离差系数 C_v 。同时比较了同一土样用 ASTM 碟式仪得出的 7~8 组测值的平均值、标准差和离差系数。比较说明了圆锥仪联合测定法测得的液限较碟式仪的准确度为高。

3.4.3 液限和塑限标准的选定。

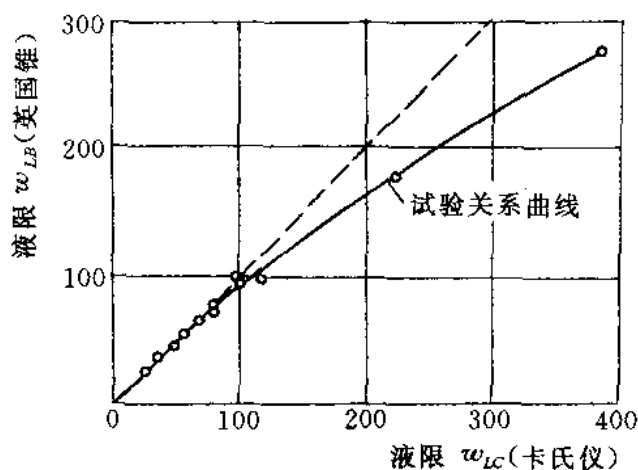
1 液限标准的选定。从界限含水率的物理意义可以看出：液限是土体处于粘滞塑性状态时的含水率，在该界限时，土体出现一定的流动阻力—最小可量度的剪切强度。这就是各种测试方法等效的标准。

根据以往的研究，碟式仪测得液限时对应的抗剪强度如表 3.4.3-1 所列。从表中看出：不同的碟式仪（基底材料不同）液限时土样的抗剪强度也不同。国外较多的研究者认为：对各类土，碟式液限时抗剪强度约为 1.7kPa。该值可作为等效标准。

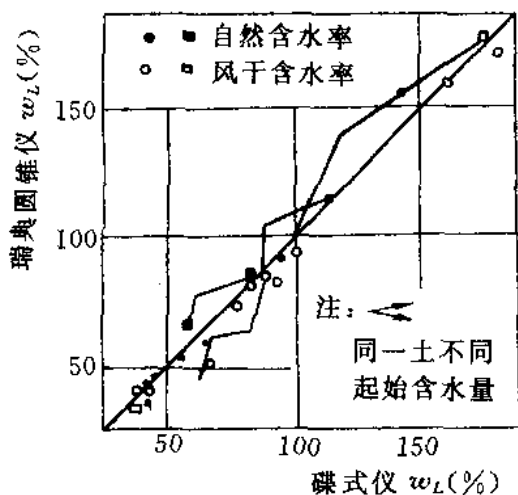
表 3.4.3-1 碟式液限时抗剪强度

基座材料	抗剪强度 C_u (kPa)	资料来源
硬橡胶	2.6	Seed 等人 (1964)
胶 木	2.0~3.1	Casagrande (1958)
	1.1~2.3	Norman (1958)
	1.3~2.4	Youssef 等人 (1965)
	0.5~4.8	Karlsson (1977)
橡 胶 (英国标准)	0.8~1.6	Norman (1958)
	0.7~1.5	Skempton, Northey (1952)
	1.0~3.1	Skopek, Ter-Stepanian (1975)

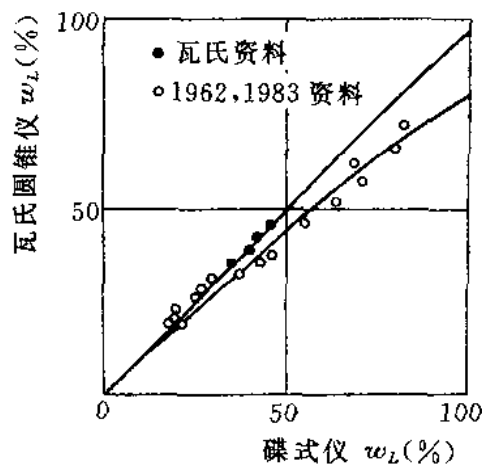
国内外等效碟式仪的方法均采用圆锥仪。图 3.4.3-1 (a) 为英国标准圆锥仪（锥体质量 80g，锥角 60°，入土深度 20mm，计算强度值为 2.2kPa）与卡萨格兰特碟式仪所测液限的比较。可以看出：液限在 100% 以内，两者相一致；图 3.4.3-1 (b) 为瑞典圆锥仪（锥体质量 60g，锥角 60°，入土深度 10mm，计算强度值 2.5kPa）与卡氏碟式仪所测液限的比较，两者也相互一致；图 3.4.3-1 (c) 为瓦西列夫圆锥仪（锥体质量 76g，锥角 30°，入土深度 10mm，计算强度值为 8.4kPa）与卡氏碟式仪所测液限的比较。图中黑点为瓦西列夫的资料，圈点为原水电部修订土工试验规程时进行的比较试验成果。可以看出：在低液限范围内 ($w_L < 20\%$) 相关性较好，在高液限范围内，两者相差较大，碟式仪测



(a)



(b)



(c)

图 3.4.3-1 碟式仪与锥式仪比较

得的液限值比圆锥仪的液限约大 30%。如表 3.4.3-2。

第二次液、塑限比较试验中，对 ASTM 碟式仪与 76g 圆锥仪的测值水平作了对比。圆锥仪作了 13 次平行测定，碟式仪作了 7 次平行测定，所得结果是：当取显著性水平 $\alpha=0.05$ 时，进行“t”检验。76g 锥下沉 10mm 时的含水率与 ASTM 碟式仪液限除 4 个低液限土（液限低于 30）以外，均有显著差异。当取 76g 锥下沉 17mm 时，其含水率与 ASTM 碟式仪液限值除 4 个低液限土及 3 个特殊土以外，均无显著性差异。如果 76g 锥取下沉深度为

表 3.4.3-2 两种仪器测定液限的比值 K

土号 比值	84-13	84-6	84-12	84-15	84-8	84-16	84-9	84-10	
	$\frac{w_{C76-10}}{w_L}$	$\frac{71.8}{79.3}$	$\frac{75.7}{108.3}$	$\frac{62.9}{72.3}$	$\frac{60.3}{75.5}$	$\frac{56.2}{72.5}$	$\frac{53.2}{72.2}$	$\frac{49.2}{70.1}$	$\frac{45.6}{59.5}$
K	0.905	0.699	0.870	0.799	0.775	0.742	0.702	0.766	
$\frac{W_{C76-17}}{W_L}$	$\frac{86.1}{79.3}$	$\frac{96.4}{108.3}$	$\frac{74.8}{72.3}$	$\frac{76.2}{75.5}$	$\frac{69.2}{72.5}$	$\frac{69.4}{72.2}$	$\frac{65.3}{70.1}$	$\frac{56.7}{59.5}$	
K	1.086	0.890	1.035	1.009	0.954	0.961	0.932	0.953	
土号 比值	84-5	84-1	84-14	84-3	84-2	84-11	84-7	84-4	平均值
	$\frac{w_{C76-10}}{w_L}$	$\frac{37.9}{47.1}$	$\frac{33.7}{44.9}$	$\frac{32.9}{38.8}$	$\frac{27.3}{31.7}$	$\frac{28.1}{27.9}$	$\frac{27.5}{28.0}$	$\frac{24.7}{25.6}$	$\frac{22.4}{21.8}$
K	0.805	0.750	0.849	0.860	1.007	0.982	0.965	1.027	0.844
$\frac{w_{C76-17}}{w_L}$	$\frac{45.5}{47.1}$	$\frac{42.4}{44.9}$	$\frac{38.8}{38.3}$	$\frac{32.3}{31.7}$	$\frac{32.4}{27.9}$	$\frac{31.6}{28.0}$	$\frac{28.8}{25.6}$	$\frac{26.1}{21.8}$	
K	0.966	0.944	1.013	1.020	1.161	1.129	1.125	1.197	1.023

18mm 时与碟式仪相比，还是除 4 个低液限土及 2 个特殊土外均无显著性差异。

低液限土在进行碟式仪试验时，因发生震动液化现象而使测得的液限偏低，不宜作为比较标准。

以上分析及国内外一些成果表明：对测值的准确度和重现性来说，圆锥仪较碟式仪为高。但从测值的水平来看，对于中等及高塑性土，76g 锥下沉深度 10mm 的液限比碟式仪液限显著偏低，而其强度则相应的偏高。为使液限标准与国际上多数国家相一致，就需要对原液限标准作适当的修改。

由于圆锥仪标准有两个参数：锥质量与下沉深度。因此，不论用 76g、80g 或 100g 锥，只要采用合适的下沉深度都能达到目的。考虑到我国的实际情况，多年来一直采用 76g 圆锥仪，为了便于与过去积累的液限资料及与现行的有关规范相联系，故决定

仍采用 76g 圆锥仪,但把下沉深度从原来的 10mm 改为 17mm。试验的强度值为 1.6kPa (计算值为 2.9kPa) 下沉深度 17mm 时的含水率作为液限标准。此外,为了使用有关规范查承载力基本值,可从联合试验的 $\lg w - \lg h$ 直线上读出 $h = 10\text{mm}$ 时的含水率,用 w_{10} 表示,相应的塑性指数为 I_{10} 作为配套的专门规定,不适用于其他情况。这也是一种过渡办法。希望以 76g 锥 17mm 下沉深度的液限标准为基础,对塑性指数、液性指数以及相应的分类标准,土的承载力等问题进行研究,积累资料,待条件成熟后,可以不再测求 $h = 10\text{mm}$ 时的含水率,以免混淆。液限标准改为 76g 锥下沉深度 17mm 后,可以直接利用卡萨格兰特塑性图进行分类。

2 塑限标准的选择。联合测定法确定塑限是以与搓滚法塑限标准相对应。主要问题是确定相应于 76g 圆锥下沉深度 h_p 。

同液限一样,塑限也可从圆锥入土深度与土的抗剪强度关系中反映出来。根据斯开普顿等人的试验,塑限时的平均抗剪强度为 112.2~132.7kPa,如表 3.4.3-3。英国以 112.2kPa 作为塑限时的抗剪强度。

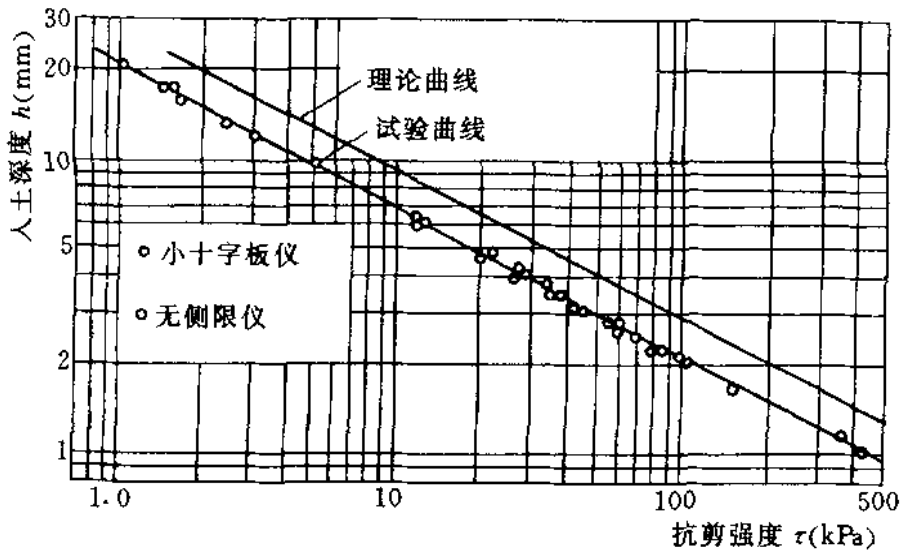
表 3.4.3-3 塑限时的抗剪强度

抗剪强度 C_z (kPa)	平均值 (kPa)	资料来源
86.73~127.55	112.2	Skperton, Northey (1952)
30.61~326.50	117.4	Dennehy (1978)
20.41~224.50	112.2	Arrowsmith (1978)
25.51~224.49	132.7	Arrowsmith (1979)
173.47		Wroth (1979)

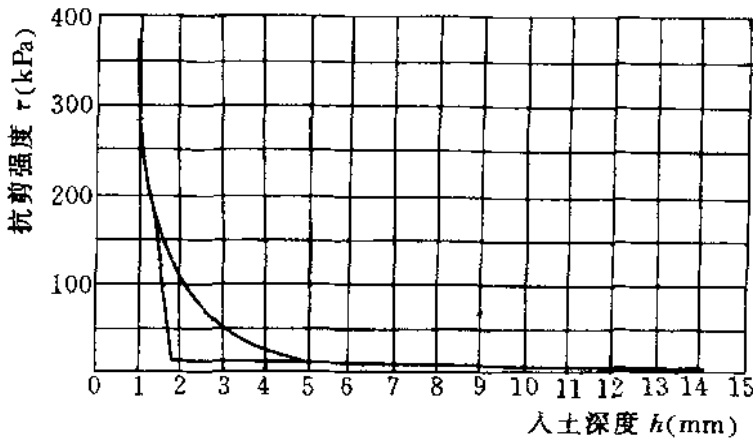
对 19 种土 (液限 23.7%~67.0%, 塑限 14.8%~40.0%, 塑性指数 8.9~27.0), 用小十字板剪切仪 (强度小于 8.0kPa 的土) 和无侧限压缩试验 (对强度大于 10kPa 的土) 进行了不同含水率的抗剪强度与对应圆锥入土深度的试验, 试验结果如图 3.4.3-2 (a)。从图上看: 理论曲线与试验曲线在特性上相当一致。将图

3.4.3-2 (a) 的实测资料绘制在普通坐标纸上,如图 3.4.3-2 (b)。可以看出,圆锥入土深度与强度关系有一剧烈变化段。引两直线交于一点,该点的入土深度约为 1.8mm。

在“84 规程”修订时所进行的液、塑限比较试验结果表明:由国内 12 个试验室分别测得的搓滚法塑限其成果的分散性较“79 规程”进行比较试验成果略小,其极差最大为 9.3,各试样的平均值及方差均见表 3.4.3-4。



(a)



(b)

图 3.4.3-2 入土深度与抗剪强度关系

通过显著性检验得出 76g 锥 2.0mm 塑限的平均值与本次搓滚法塑限的平均值在显著性水平 $\alpha=0.05$ 下没有显著性差异。搓

表 3.4.3-4 各试样塑限平均值及方差

土号	搓滚法塑限			相应于搓滚法塑限 下沉深度的平均值	联合试验法塑限 76g 锥 2mm 标准		
	平均值	方差	极差	\bar{h}_P (mm)	平均值	方差	极差
	\bar{w}_P	S_{wP}^2	Δw_P		w_{76-2}	S_{wL}^2	Δw_2
84-1	18.7	0.56	2.6	1.98	18.7	0.51	2.1
84-2	19.2	5.93	7.0	2.04	18.6	2.58	6.0
84-3	17.5	1.12	3.7	2.06	17.2	1.34	3.1
84-4	15.5	3.37	5.5	2.50	14.9	2.07	5.6
84-5	22.6	1.006	3.2	1.84	22.8	0.71	3.1
84-6	40.8	8.91	9.3	2.09	39.2	11.20	11.3
84-7	16.8	1.38	3.2	2.16	16.1	0.88	2.9
84-8	32.4	2.57	5.4	2.20	31.6	4.38	7.7
84-9	23.5	1.36	3.6	2.05	23.3	1.72	3.9
84-10	23.2	1.55	4.9	2.04	23.5	1.15	3.7
84-11	19.5	2.25	4.8	1.87	19.5	1.93	5.7
84-12	40.4	6.40	8.6	2.16	38.6	3.13	5.7
84-13	50.4	4.52	7.6	2.95 ^①	45.1	8.69	8.7
84-14	20.1	1.14	3.7	1.84	20.3	0.69	2.4
84-15	32.6	1.45	3.4	1.96	32.8	3.14	5.0
84-16	25.9	3.76	7.0	2.04	26.5	1.62	4.2
均值			5.1	2.05			5.05

① 统计时舍去此数据。

滚法塑限的平均值与 76g 锥 2.0mm 塑限的平均值的比值 K 在 0.98~1.038 之间。两种方法的塑限平均值的差值不超过 1% 的占 81%。

根据原水利电力部三次修订土工试验规程所进行的对比试验绘制的图 3.4.3-3 表明：锥体质量 76g，锥角 30° 入土深度 2mm 所得的塑限比搓滚法所得的塑限稍高一些，若将塑限时入土深度

定为 1.7mm 比较合适,其相应的抗剪强度值约为 130kPa。为了方便,同时从准确度要求来看,可以采用入土深度为 2mm 的含水率作为塑限。

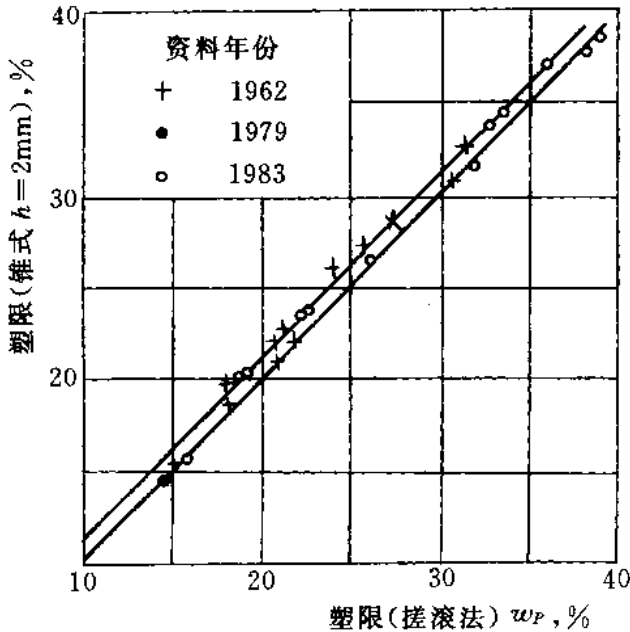


图 3.4.3-3 圆锥仪与搓滚法塑限比较

4.1.1 碟式仪液限试验是根据土体内含水率与击数之间的关系曲线(流动曲线)为一半对数直线而制订的。该直线可用下式表示:

$$w = w_1 - I_f \lg N \quad (4.1.1)$$

式中 w ——击数 N 次时的含水率, %;

w_1 ——流动曲线上击数为 1 次时的含水率, %;

I_f ——流动指数, 即流动曲线的斜率。

当用碟式仪及标准操作方法对 3~4 个不同含水率的试样进行试验,求得流动曲线,在流动曲线上,相应于 25 击次的含水率即为液限。卡萨格兰特得到液限时不排水抗剪强度为 2~3kPa。

4.2.1 碟式仪是卡萨格兰特为使液限试验标准化加以改进的仪器。各国使用的碟式仪在制造材料上(尤其是基座材料)和划刀规格不尽相同。本规程采用国际上应用较广的 ASTM 标准的碟式

仪及 A 型划刀。

5.1.1 用搓滚法测定塑限在国内一直使用,该法的缺点主要是标准不易掌握,人为因素比较大。圆锥仪液限、塑限联合试验方法已经列入正式试验规程可以取代搓滚法。但考虑到目前国内外还采用搓滚法,因此,本规程将搓滚法列入,作为与碟式仪液限试验配套。

5.4.3, 5.4.4 国内外在测定塑限的规定中,搓条方法不尽相同,土条断裂时的直径多数采用 3mm (俄、日、英等国),美国 ASTM 规定为 3.2mm,我国历次规程均采用 3mm,故仍沿用 3mm。关于搓滚速度,俄、日、德和我国均无具体要求,美国 ASTM D424 规定搓滚速度每分钟 80~90 次,英国 BS1377 规定,手指的压力必须使搓滚 5~10 个往返后,土条直径由 6mm 减至 3mm,高塑性粘土则允许往返 10~15 次。这种规定太细、太死,不易掌握,也无必要,故按 5.4.3 原则性的规定进行。

6.3.2 分层填装试样时,要切实注意不断挤压拍击,使其充分排气,增加试样的饱和度,否则不符合土体积的收缩量等于水分的减少量的基本假定,导致计算结果失真,缩限指标不准确。

湿化试验

SL237—008—1999

1.0.1, 1.0.2 用土作为建筑材料的水电工程,直接处于大气中,遭受着气候、水位变化的作用,土体易产生湿化的现象,以至于破裂、剥落或降低其强度和稳定性。另外在湿法筑坝的设计与施工中,需要了解土料湿化崩解的速度,作为取舍料场的依据。因此测定土的湿化性能,是有重要意义的。

4.0.1 试样的选用取决于实际工作条件,如为地基土应采用原状土样;如为填筑的堤坝,应取扰动土样,并控制一定的密度和含水率,制备成试样进行试验。在行业标准《水中填土筑坝暂行施工技术规范》中,规定以 $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 的立方土体进行湿化试验,作为选择土料标准之一。

4.0.5 试验中需要测定的指标,主要是测定土的崩解速度。因此,需要确定读数的时间间隔。

毛管水上升高度试验

SL237—009—1999

1.0.1 土中毛管现象是由于土粒与水分子之间的相互吸引力以及水的表面张力而产生的。毛管水上升高度试验可以求出土内毛管水的上升高度及其上升速度，用于估测地下水位升高时，某些地区是否会变成沼泽或盐碱化，建筑物有无被浸湿的可能性等问题，并用来推算降低地下水位的必要深度。

1.0.3 目前测定毛管水上升高度方法可以综合为两类：正水头作用的和负水头作用的。试验原理都是根据毛管水的弯液面所能支持的水柱重力而计算出毛管水的上升高度。

正水头作用的试验法系使土中毛管水弯液面支持上升的水柱。这类方法中有直接观测法（适用于砂土）；另一为郝赛法（适用于粘质土）

负水头作用的试验法是使土中毛管水弯液面支持下降的水柱。这类方法中有土样管法，适用于原状土或扰动的细砂、粉土及粘质土，不适应于粘性大的粘土。

本规程只列入较通用易行的直接观测法和土样管法。对其他方法可参阅有关文献。

2.3.4 用直接观测法进行毛管水上升高度试验可以求出毛管水上升高度和速度的关系。试验过程中可以随时绘制高度与时间的关系曲线。当曲线已成平缓或趋于平缓时，可依延长线的趋势估计毛管水的上升高度。

3.3.5 关于水柱下降速度问题。水面下降速度的快慢和打开夹子C（见规程图3.1.1）的松紧程度有关。在开始试验时夹子C可以稍微松些，使试样右测测压管内水面的下降速度稍微大些，约每分钟2~5cm，至估计水面的降落已达到毛管水上升高度的1/2或1/4时，应将速度降低，调正夹子C的松紧程度，使每分钟下降至1cm，以便准确地测定毛管水上升高度。

相对密度试验

SL237—010—1999

1.0.1 相对密度是无粘性粗粒土紧密程度的指标,对于土作为材料建造的构筑物和地基的稳定性,特别是在抗震稳定性方面具有重要的意义。砂土的紧密程度不能仅从它的孔隙比的大小来衡量。对于颗粒大小、形状及不均匀系数不同的两种砂土,即使孔隙比完全相同,但其紧密程度可能有很大差别。因此,需根据砂土孔隙比与极限孔隙比的相对关系来表示;亦即当孔隙比接近于最小孔隙比时,则砂土处于紧密状态。反之,当孔隙比接近于最大孔隙比时,则砂土处于疏松状态。故通常用相对密度的指标来表示砂土的紧密程度。

1.0.3 相对密度试验适用于透水性良好的无粘性土,如纯砂、纯砾等。对于排水不良的土料,如无粘性粉土,极细砂或含有大量粉土的砂质、砾质土,在高的击实功能下得到的最大干密度往往大于振动法得到的最大干密度时,不能用相对密度来衡量。“62 规程”说明书中建议用相对密度和击实试验两种方法同时试验,取其孔隙比最小值。美国材料试验学会 (ASTM—1976) 规定:细粒土 ($<0.075\text{mm}$) 含量不超过 12%,且能自由排水的试料,宜用相对密度试验。美国水道试验站 (WES) 建议:细粒土 ($<0.075\text{mm}$) 含量超过 5% 时,分别做标准击实试验和相对密度试验,当击实试验所得的最大干密度的 85% 比相对密度 85% 时的相应干密度值大时,则用击实试验。美国垦务局规定:宜做相对密度试验的土类如表 1.0.3。如遇细粒土 ($<0.075\text{mm}$) 超过 12% 时,分别作相对密度和标准击实试验,当 70% 的相对密度时的相应干密度小于击实最大干密度的 95%,则应用击实试验。由于国内这方面工作做得比较少,因此,各试验室仍可参考“62 规程”说明书的建议及国外标准来判别。关于颗粒粒径大于 5mm 的试验,

参考粗颗粒土规程。

表 1.0.3 宜做相对密度试验的土类

土 类	细粒含量% ($<0.075\text{mm}$)	土 名	相对密度试验
GW, GP SW, SP	<5	各种级配的 纯砂、纯砾	宜
GW-GM, GW-GC GP-GM, GP-GC	<8	砾石含粉土 砾石含粘土	宜
SW-SM, SP-SM SP-QC	<12	砂中含粉土 砂中含粘土	宜
SM, SC		砂与粉土混合料 砂与粘土混合料	是否适宜, 须视级配及 塑性而定, 有些 SM 中细 粒含量达 16% 也宜

2.3.1 考虑到砂、砾质土的风干含水率很小, 可以认为充分风干与烘干两种状态非常接近, 对于试验的结果影响较小。但试验证明: 含水率有少量的增加, 对最大孔隙比的测定影响较大, 如图 2.3.1。故在规程中规定用烘干或充分风干的试样 (即风干到稳定状态或近于烘干状态), 避免产生误差。

2.3.2~2.3.6 关于最大孔隙比测定方法。测定最大孔隙比常用的方法有量筒法, 漏斗法, 松砂器法等。通过比较试验几种方法

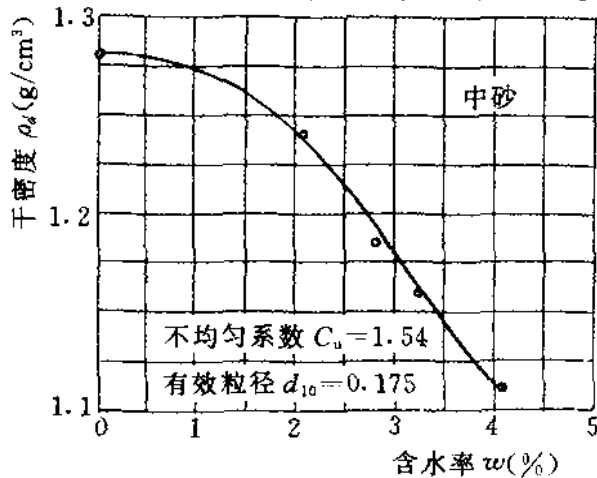


图 2.3.1 最小干密度与含水率关系曲线

所得结果相差不大，而各种方法本身也存在不同的问题。因此，规程选用漏斗法与慢速倒转法，并在本规程 2.3.6 中规定取上述两种方法测得的较大体积值。试验中，试样能否达到最松状态，除试验方法外，还与土的性质、颗粒大小形状及操作熟练程度有关。

3.3.1 根据砂的振动试验得出结论：当砂的含水率相当于饱和度为 0.8 时，砂能得到最好的振动压实；同时，当砂的含水率为零时与最优含水率时所得到的干密度极相近。美国材料试验学会 (ASTM D 2049—69) 是同时采用干法和湿法两种，但在用湿法时还需与干法比较，选择最大的干密度。基于以上原因，本规程规定采用烘干或充分风干试样。

3.3.2, 3.3.3 关于最小孔隙比试验方法问题。测定砂的最小孔隙比即最大干密度，国外采用振动台法，国内以往采用振动锤击法。在“62 规程”修订时将这两种方法进行了比较，比较结果表明：锤击振动联合法（振打轻锤法）比振动台法好，这里需要说明：上述振动法在试样上没有施加 14kPa 的呆荷载。

在制订国标 GBJ123—88 过程中，又进行了比较。振动台法按美国 ASTM D2049—69 规定，采用一定的频率、振幅、时间和加重物块。同时分别进行了干法和湿法试验，试样为均匀的标准砂（中砂），及级配良好的黄砂。试验结果仍然表明：振动锤击法测定的最大干密度比振动台法测得的大。因此，本规程仍以振动锤击法作为最大干密度测定的标准方法。

击实试验

SL237—011—1999

1.0.1 室内击实试验是为了确定扰动土在一定量击实功作用下干密度随含水率变化的关系曲线，以求得土的最大干密度和最优含水率，了解土的压实特性，为工程设计和现场施工碾压提供土的压实性资料。

土的压实程度与含水率、压实功能和压实方法都有密切的关系。当压实功能和压实方法不变时，则土的干密度随含水率增加而增加，当干密度达到某一最大值后，含水率的继续增加反而使干密度减小。此一最大值就称为最大干密度，相应的含水率称为最优含水率。

1.0.2 原《84》规程中只列了轻型击实试验方法，此次修订中增加了重型击实试验方法。室内扰动土的击实试验一般根据工程实际情况选用轻型击实方法或重型击实方法。水利部以往采用轻型击实试验比较多，如水库、堤防填土等多采用轻型击实试验；高等级公路填土和机场跑道等多采用重型击实试验。重型击实仪的击实筒内径大，最大粒径可允许达 20mm（五层击实）。

4.1.1 土样制备方法不同，所得击实试验成果也不同。试验证明：最大干密度以烘干土最大，风干土次之，天然土最小；最优含水率也因制备方法不同而不同，以烘干土为最低。这种现象粘土最明显，粘粒含量愈大，烘干对最大干密度影响也越大，这显然是烘干影响了胶粒性质，故粘土一般不宜用烘干土备样。本规程规定采用干法制备和湿法制备二种方法，一般干法以风干居多，也有用低于 60℃ 温度烘干。

某些特殊土（如红土），含水率的配制方法对压实影响尤为显著。将天然含水率的土风干为不同含水率的一组试样（称为“由湿到干”）进行击实，与事先将天然含水率的土风干，再加水制备

成不同含水率的试样进行击实（称为“由干到湿”），两种制样方法所得试验成果差异较大。图 4.1.1 为天生桥红粘土的击实曲线。

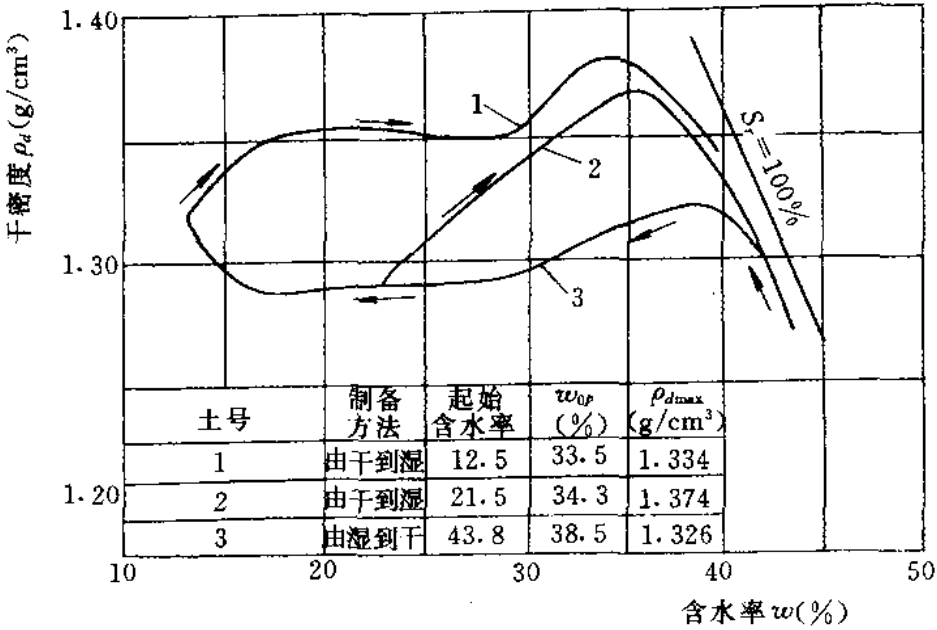


图 4.1.1 天生桥红粘土的击实曲线

重型击实试验的试样制备与轻型击实试验相同。只是过筛的筛径和土样数量有所区别。

4.2.2 重型击实试验中,为了保证击实筒内中央土层和周围土层所受击实功能相同,在采用机械操作时,击实仪必须具备在每一圈周围击实完后中间加一锤的功能。

击实完成后超过筒高的土柱高度称为余土高度。所谓击实关系曲线是指在某一个标准的单位击实功能下,土的干密度与含水率的关系曲线。如果余土高度(超高)等于零(理想状况),击实后土样体积刚好等于击实筒容积,那么,击实曲线就是一条标准功能的等功曲线。如果击实后余土高度不等,干密度和含水率的关系曲线就不是一条等功曲线。根据大量试验结果表明,当余土高度不超过 6mm 时,干密度(以余土高度为零时的干密度为基准)才能控制在允许误差范围内。为了保证试验准确度,本规程规定:余土高度不得超过 6mm。

4.2.3 击实完成后,如果不先用修土刀沿护筒内壁削挖后扭动护筒,则有可能发生击实土柱被剪断的现象。

4.2.5 重复使用土样,对最大干密度和最优含水率以及其他物理性质指标都有一定影响。其原因是:土中的部分颗粒,由于反复击实而破碎,改变了土的级配;其次是试样被击实后要恢复到原来松散状态比较困难,特别是高塑性粘土,再加水时更难以浸透,因而影响试验成果。国内外对此均进行过比较试验,结果表明:重复用土对最大干密度影响较大,差值达 $0.05\sim 0.08\text{g}/\text{cm}^3$;对最优含水率影响较小;对强度指标也有影响。国外的资料也表明,由于重复用土,在击实功能小时,最大干密度的差值为 $0.02\sim 0.06\text{g}/\text{cm}^3$,击实功能大时,差别更大。

5.3.1 土料中常掺杂有较大的颗粒如砾石等,这些颗粒的存在,对填土的最大干密度和最优含水率都有一定的影响。由于仪器尺寸的限制,必须将土样过 5mm 筛。因此,当粒径大于 5mm 颗粒土含量小于 30% 时,就产生了轻型击实试验中对含粒径大于 5mm 颗粒土的试验结果校正的问题。在一般情况下,粘质土坝料中,粒径大于 5mm 的颗粒质量占总土量的百分数是不大的,这些大颗粒间的孔隙,能全部被细粒土所填充,因此,可以根据土料中粒径大于 5mm 颗粒的含量和该颗粒的密度,从过筛土料的击实试验结果来推算原土料的最大干密度和最优含水率。

承载比试验

SL237—012—1999

1.0.1 本试验方法主要依据美国 ASTM D1883—78、ASHTO—74 标准编制而成。承载比试验是由美国加利福尼亚公路局首先提出的,简称 CBR (California Bearing Ratio) 试验。所谓 CBR 值,是指采用标准尺寸的贯入杆贯入试件中 2.5mm 时,所需的荷载(或荷载强度)与相同贯入量时的标准荷载(或荷载强度)的比值。标准荷载与贯入量之间的关系如表 1.0.1 所示。

标准荷载强度与贯入量之间的关系也可用公式表示:

$$p = 162l^{0.61}$$

式中 p ——标准荷载强度, kPa;

l ——贯入量, mm。

表 1.0.1 标准荷载与贯入量关系表

贯入量 (mm)	标准荷载强度 (kPa)	标准荷载 (kN)
2.5	7000	13.7
5.0	10500	20.3
7.5	13400	26.3
10.0	16200	31.8
12.5	18300	36.0

CBR 是路基土和路面材料的强度指标,是柔性路面设计的主要参数之一。在我国的柔性路面设计中,虽以路基土和路面材料的回弹模量值作为设计参数,但不少单位,特别是科研单位,为便于参考国外有关 CBR 方面的资料,在寻求回弹模量与 CBR 的关系方面

作了大量工作,为进一步积累这方面的资料,促进国际学术交流,特将 CBR 试验列入本规程。

1.0.2 本试验方法只适用于室内扰动土的 CBR 试验。由于本试验采用的试样筒高为 166mm,除去垫块的高度 50mm,实际试样高度为 116mm,按五层击实,所以粒径宜控制为 20mm 的土,对含粒径 38mm 颗粒的土,可分三层击实,按功能相等原则,每层

为 90 击。

4.2.2 为了模拟地基土的上覆压力,在浸水膨胀和贯入试验时试样表面要加荷载块,尽管希望能施加与实际荷载或设计荷载相同的力,但对于粘质土来说,特别是上覆荷载较大时,荷载块的影响是无法达到上述要求的。因此,规定施加 4 块荷载块 (5kg) 作为标准方法。

4.2.4 为预估土料在现场可能出现的最不利情况,贯入试验前一般要将试样浸水使之吸水,国内外的标准均以浸水四昼夜作为浸水时间,本规程也参照使用。当然,也可根据不同地区、地形、排水条件和工程结构等情况,适当改变浸水时间或不浸水,使试验结果更符合实际情况。

5.1.1 公式中的分母 7000 和 10500 是原来以 kg/cm^2 表示时的 70 和 105 乘以换算系数 ($1\text{kgf}/\text{cm}^2 \approx 100\text{kPa}$) 而得。

5.2.1 绘制单位压力 (p) 与贯入量 (l) 的关系曲线时,如发现曲线起始部分呈反弯,则表示试验开始时贯入杆端面与土表面接触不好,故应对曲线进行修正,见本规程图 5.2.1,以 O' 点作为修正的原点。

回弹模量试验

SL237—013—1999

1.0.1 本试验方法主要用于公路和机场跑道等填土工程，因此，在编写本规程时主要参考了JTJ051—93《公路土工试验规程》。

3.1.3~3.1.4 仪器设备。

本规程将承载板的直径定为50mm是根据公路土工试验规程的规定，因此，杠杆压力仪的加压球座直径也相应定为50mm。

由于室内试验回弹变形很小，尤其在加载初始阶段，估读误差大，故测定变形的量表采用千分表。

3.4.4 由于加载开始时的土样塑性变形，得出的 $p \sim l$ 曲线有可能与纵坐标轴相交不通过原点的位置。如果仍按读数值计算回弹变形，其中将包含一部分塑性变形，故应对读数进行修正。

4.3.5 加载后由于土样的微小变形可能会使测力计发生轻微卸载。对于较硬的土卸载很小可以忽略不计；当土样较软时，可用手稍稍摇动强度仪摇把，补上卸掉的微小压力。

渗透试验

SL237—014—1999

1.0.2 渗透试验方法的选择。以往的规程均以仪器设备为主线编制的，而不是以试验原理为主线编制。这次规程修订，采用以试验原理为主线编制，使规程的格式和层次更清晰，也与国际同类标准的编写格式一致。

两种方法的适用范围，在条文中规定：常水头渗透试验适用于粗粒土；变水头渗透试验适用于细粒土。这种规定比较原则，但直观。国外有的规程（如 JIS）规定：常水头渗透试验适用于渗透系数较大的试样：即 $k=10^{-2}\sim 10^{-3}\text{cm/s}$ ；变水头渗透试验适用于渗透系数较小的试样，通常指 $k=10^{-3}\sim 10^{-6}\text{cm/s}$ 。也就是说，上述两种方法仅适用于 $k=10^{-2}\sim 10^{-6}\text{cm/s}$ 。至于极高和极低透水性的土，需要采用特殊的试验方法或通过简接的推算求取渗透系数。

1.0.3 水中含气对渗透系数的影响，主要由于水中气体分离，形成气泡，堵塞土的孔隙，致使渗透系数逐渐降低。这已为国内外一些研究者所证实。在规程修订中强调了必须采用脱气水进行渗透试验的规定，同时也建议了几种脱气水的制备方法。

另外，根据国外进行渗透试验的经验，为了避免试验用水进入仪器时产生气泡，试验时要求水的温度大于仪器和土样温度 $3\sim 4^\circ\text{C}$ 。这一点是十分重要的。因为，当低温的水进入较高温的试样时，水将因温度升高而分解出气体来。尽管事先用各种方法进行了脱气，仍不免有气体分解出来，而堵塞孔隙，故规程中除规定用脱气水进行试验外，对于试验水温和测试时间也做了相应的规定。

3.1.1 常水头渗透仪主要由装样容器及水头装置组成。水头装置可以采用正压和负压。从结构简单、操作方便、试验结果合理可

靠出发，规程所列适合粗粒土的常水头仪器（70型渗透仪）是与国外大同小异。规程规定：圆筒内径应大于试样最大粒径的10倍。这是因为若试样粒径相对圆筒内径较大时，圆筒内壁与部分试样的间隙大，可能出现试样边缘部分渗透水增大；另一方面，试样有效截面积会减小，有效水流长度缩短，造成试验有较大的误差。

3.4.2 水在多孔介质中流动时，其渗透特性不仅与多孔介质的几何特性有关，而且也与流体的性质有关。因此，土的渗透系数一般表示为 $k = C \frac{\rho_w}{\eta}$ ，式中： C 值仅受多孔介质几何特性的影响与温度无关，而 ρ_w/η 表征流体性质的影响，它定义为运动粘滞系数 ν (η/ρ_w) 的倒数，与温度有关，与渗透系数 k 成反比。在实用中常以动力粘滞系数 η 之比值代替运动粘滞系数 ν 比值。任一温度 $T^\circ\text{C}$ 时的渗透系数 k_T 应进行校正。

关于温度标准，目前国外也极不统一。例如，美国水道试验站及垦务局均采用 20°C 作标准；德国采用 20°C 或 10°C 作标准（德国土力学手册）；日本渗透试验规程采用 15°C 作标准；前苏联采用 10°C 作标准。究竟应以什么温度作标准，现就收集到的资料来看，以 20°C 作标准的理由，可由标准温度的定义去解释。所谓标准温度，就是“能使度量准确又能使测量仪器和校准仪器都具有正确指示的温度”。根据标准化的要求，凡确定物质、材料及制品的性质所用的量，有的是随着温度而变化的，对于这种量，应标出它们在标准温度的值，我国标准温度是 20°C 。以 10°C 或 15°C 为标准的理由是因为地下水的温度在 $10\sim 15^\circ\text{C}$ 左右。在“84规程”中，采用了以 10°C 为标准。这次修订时，考虑到标准温度的定义，所以修改为 20°C 作为标准温度。

3.4.3 对一个试样多次测定的取值标准。根据6个单位467组渗透试验成果，当 $k = A \times 10^{-n}$ 时， n 值不变， A 的差值小于1.0的占66.3%，小于2.0的占82.6%，大于2.0的占17.4%。根据上述结果，修订规程中规定了一个试样多次测定的取值标准是：在连续测定6次以后，取同次方的 A 值最大与最小的差值不大于

2.0 的四个以上的结果, 并取其平均值, 作为该试样某一孔隙比下的平均渗透系数。

3.4.4 土的渗透性是水通过土孔隙的能力, 显然, 土的孔隙大小, 决定着渗透系数的大小。因此测定渗透系数时, 必须说明与渗透系数相适应的土的密度状态。

试验时应将试样控制在设计要求的孔隙比下, 测定其渗透系数, 否则试验结果实用意义不大。要使试样孔隙比控制在需要值有困难时, 可进行不同孔隙比下渗透系数的测定, 作出孔隙比与渗透系数的关系曲线, 即可查出任意需要孔隙比下的渗透系数。

4.1.1, 4.1.2 用于变水头渗透试验的仪器设备有多种, 如“84 规程”所列的土样管渗透装置及南 55 型渗透仪。土样管渗透装置适用于粗粒土, 且准确度较差。因此, 本规程选用了适用于细粒土的南 55 型变水头渗透试验装置。这种仪器的特点是结构简单,

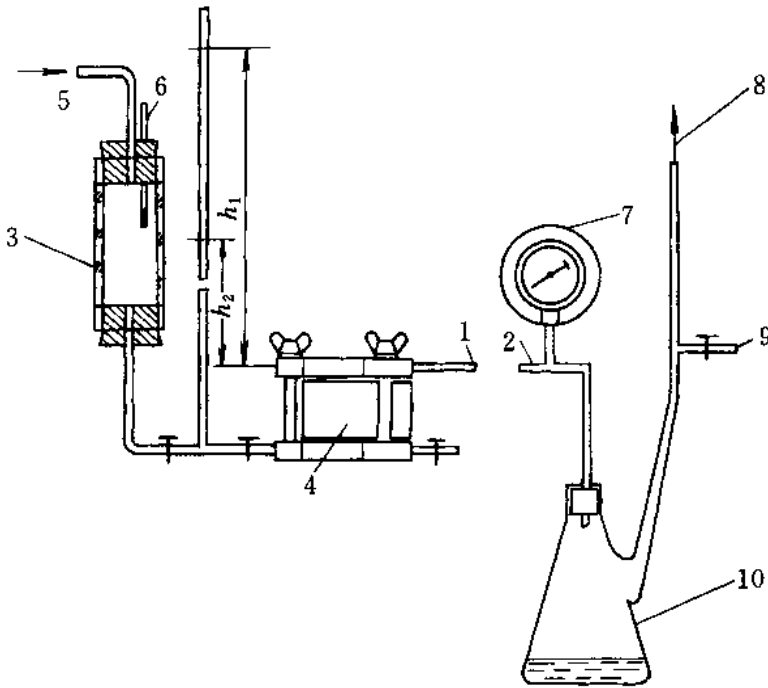


图 4.1.2 南 55 型渗透仪变水头法与负压法水头装置示意图

- 1、2—水管 (负压水头法时 1、2 相接);
- 3—顶滤器;
- 4—试样;
- 5—接水源;
- 6—温度计;
- 7—真空压力表;
- 8—接抽气机;
- 9—负压控制阀门;
- 10—贮水瓶

密水性好，既适用于变水头，也可用于常水头，属于定型的渗透仪，为目前国内各试验室普遍采用。

对于渗透系数小的试样，可以附加负压装置（包括水头负压和抽真空）如图 4.1.2，以加大水力坡降，加快试验速度。

4.3.1 土样的饱和度愈小，土的孔隙内残留气体愈多，使土的有效渗透面积减小。同时由于气体因孔隙水压力的变化而胀缩，因而饱和度的影响即成为一个不定的因素。为了保持试验准确，要求试样必须充分饱和，排尽土孔隙中的气体。饱和方法见 SL237—002—1999 规程有关条文。

但需特别强调指出：有些单位对这问题认识不足，饱和度是否达到要求也不进行测定，这是造成试验成果不稳定的重要原因。因此在进行渗透试验之前，必须测定试样的饱和度。实践证明：真空抽气饱和法是有效的方法，应按规程中规定的饱和方法进行。

固结试验

SL237—015—1999

1.0.1, 1.0.2 本试验以往在国内有的土工试验规程中定名为压缩试验。国际上通用的名称是固结试验 (Consolidation Test)。为了与国际通用的名称一致,本规程将该项试验定名为固结试验。同时表明该项试验是以太沙基 (Terzaghi) 的单向固结理论为基础的。对于非饱和土,该项试验只用于测定压缩性指标,不能用于测定固结系数。

3.1.2 目前国内常用的加压设备有两种:磅称式和杠杆式。随着工程建设的发展,以及为测定土的先期固结压力 p_c , 需要压力高、准确度高的压力设备。国内目前也有用气压和液压加压设备。本规程没有规定具体形式,但准确度应符合现行有关国家标准 GB4935—85, 及 GB/T15406—94 的技术条件。

3.3.1 对原状试样的固结试验,在切削试样时若对土的扰动程度较大,则影响试验成果。图 3.3.1 所示的是以不同扰动程度计算厚 6.7m 土层的沉降量及沉降速率。因此,在切削试样时,应尽可能

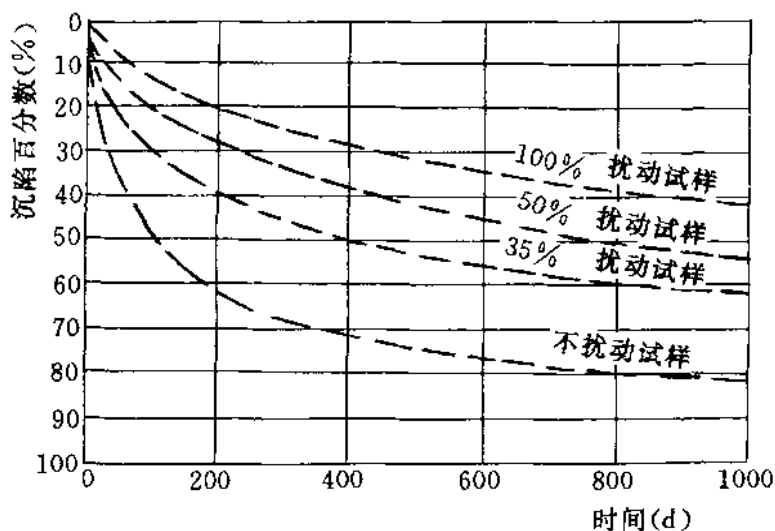


图 3.3.1 不同扰动程度的试样估算的沉降率

能避免破坏土样的结构。操作中，不允许直接将环刀压入土样，应用钢丝锯（或薄口锐刀）按略大于环刀的尺寸沿土样外缘切削，待土样的直径接近环刀的内径时，再轻轻地压下环刀，边削边压；也不允许在削去环刀两端余土时，用刀来回涂抹土面，而致孔隙堵塞，最好用钢丝锯慢慢地一次割去多余的土样。

3.3.6 按固结试验结果估算的沉降量，一般与实测的沉降量相差较大。这是由于固结理论和应力计算与实际情况有所差异，以及土样结构受到不同程度扰动等原因所致。通常，现场上建筑物传给地基内各部位压力，一般是比较缓慢的，而试验室里的固结压力则是很快地传递到试样上。荷载率小，则压缩作用进行得缓慢，对土的触变破坏较小，且其结构强度得以部分恢复，因而沉降量小；反之快速加荷，或荷载率很大，必然会得到较大的沉降量。这种现象，对塑性指数较大的粘土或结构强度小密度低的软土，表现尤为明显。

很久以前，就注意到荷载率对固结试验成果的影响。如荷载率增大，压缩系数和固结系数也随之增大。为了研究这些关系，比较了不同荷载率时土的压缩性变化，从比较试验中得知：土的塑性指数越小，荷载率对试验成果影响相对地就小，反之则大。

从试验研究的结果说明，只有加载率较大时 $\frac{\Delta p}{p} > 1$ 才会出现与太沙基理论相一致的固结曲线。因此，作为标准固结试验方法，其加载率规定为 1。同时，也允许按设计要求，模拟实际施工中的加荷情况作适当的调整。

3.3.7 试验研究结果表明：荷载率小时，由于对试样的扰动程度小，因而求得的先期固结压力较大，也比较准确。因此，在确定原状土的先期固结压力时，规程规定了加载率小于 1，即 0.5 或 0.25。

3.3.10, 3.3.11 稳定标准。加载历时对试样的压缩量、压缩过程以及先期固结压力均有影响。曾有学者用一种海洋粘土进行了四种不同加载历时的试验研究。试样特性和试验条件如表

3.3.10-1。除常应变率加荷外，其余三种的加载率均等于1。不同稳定标准对压缩过程的影响如图 3.3.10；对压缩量（用压缩百分比表示）的影响如图 3.3.11。

表 3.3.10-1 试样特性和试验条件

组次	试样编号	试样厚度 (cm)	排水距离 (cm)	天然含水率 (%)	天然孔隙比	先期固结压力 (kPa)	加荷历时
1	1-18	2	2	57.0	1.63	185	24h
2	1-20	2	1	57.3	1.63	133	7d
3	1-23	1	1	57.5	1.64	262	主固结完成
4	1-25	1	1	59.0	1.67	247	常应变率加荷

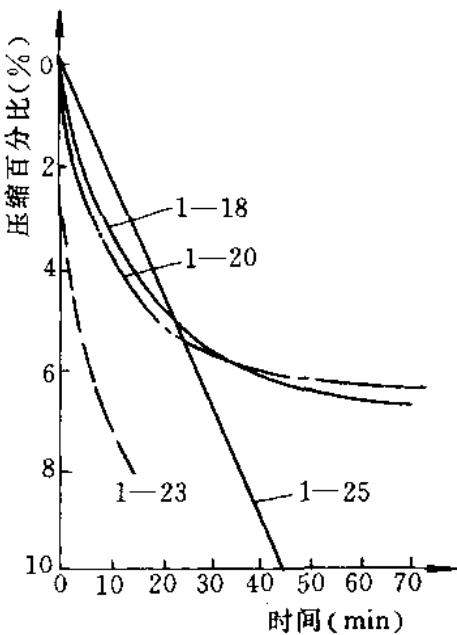


图 3.3.10 不同加载历时的压缩过程线

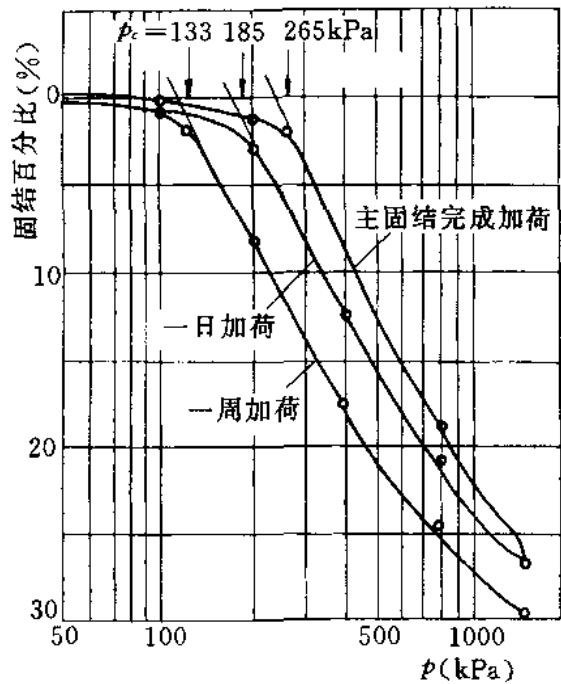


图 3.3.11 不同加载历时的压缩曲线

以往国内对稳定标准有不同的规定：有规定 24h 的（“84 规程”）；也有规定每小时的变形不超过 0.01mm（砂类土）和 0.005mm（粘性土）（铁道部规程）。为了进一步比较，曾统计了

54 组原状土 (包括粘土 (CH), 粉质粘土 (CL)) 试验结果, 最大压力为 300kPa, 以 24h 沉降量为 100, 各种稳定标准的沉降百分比如表 3.3.10-2。

表 3.3.10-2 稳定标准比较表

稳定标准	沉降百分比 (%)		稳定标准	沉降百分比 (%)	
	粘土 (CH)	粉质粘土 (CL)		粘土 (CH)	粉质粘土 (CL)
1h	87.7	96.3	<0.01mm/h	88.0	98.1
2h	92.3	97.3	<0.005mm/h	92.0	98.0

从表 3.3.10-2 数据看出: 原状粘土 1h 的固结度与 <0.01mm/h 标准的接近; 2 小时的固结度与 <0.005/h 的接近。而对粉质粘土, 四种标准基本一致。但对原状粘土 1h 的或 <0.01mm/h 的标准来说, 固结度不到 90%, 似有些偏低。

在 (“62 规程”) 和 (“79 规程”) 修订时都对粘土、粉质粘土 (CL) 进行了高密度、大荷载、饱和与非饱和状态下土样, 以压缩 24h、<0.005mm/h 和 <0.01mm/h 三种稳定标准的比较试验, 对粘土, 要达到 95% 以上的固结度, 需 6h, 粘性较小的粉质土, 时间略短。为了便于工作安排, 和某些粘性土需要较长的稳定时间, 因此规程规定以每级荷载下固结 24h 为稳定标准。这主要考虑到每级荷载下, 固结时间应能明确定出变形与时间对数曲线后段直线的坡度为原则。同时与国外大多数国家的稳定标准一致。特殊土需要更长时间, 因而以量表读数每小时不大于 0.005mm 为稳定标准。

3.4.7 先期固结压力 p_c , 一般可根据工程地质和水文地质情况来估算。但是, 有的因素是地质上无法估计的, 因而推算的 p_c 不很可靠。在这种情况下, 只能根据室内试验所得的 $e \sim \lg p$ 曲线来估计。本规程建议采用目前应用较普遍的卡萨格兰特图解法。

用卡氏图解法求先期固结压力, 有许多影响因素。首先是 $e \sim$

$\lg p$ 曲线尚不能完全反映天然土层的压缩特性,因为在自然界,先期固结压力 p_c 是通过若干世纪,而不是几小时或几天形成的。再就是在钻取土样和试验操作中,取样的扰动和试验方法等影响,都是不可忽视的。试验时沉降稳定标准不同(次固结的影响),可使 p_c 值在较大的范围内变化,如图 3.3.11。绘制 $e \sim \lg p$ 曲线所用比例不同, p_c 也可能有明显的改变。为了便于比较,作图时应选用合适的纵横坐标比例。建议纵坐标取 $\Delta e = 0.1$ 时的长度与横坐标取一对数周期长度之比值为 $0.4 \sim 1.0$ 。尽管这样,用图解法求得的结果并不总是可靠的。要较可靠地求得该压力,需要进一步研究确定天然地层中粘土压缩曲线的方法。

3.4.8 固结系数的确定方法有多种,常用的有时间平方根法、时间对数法和时间对数坡度法。

按理,在同一试验结果中,用三种方法确定的固结系数应该比较一致,实际上却相差甚远。原因是这些方法是利用理论与试验的时间和变形关系曲线的形状相似性,以经验配合法,找出在某一固结度 U 下,理论曲线上 T_v 相当于试验曲线上某一时间 t 值。但实际试验的变形与时间关系曲线的形状因土的性质、状态及受荷历史而不同的,不可能得出一致的结果。

一般认为,用时间对数法确定理论零点误差较大。这样按时间对数坡度法确定 t_{68} ,所求得的 C_v 值误差就更大。因此,本规程仅将时间平方根法和时间对数法列入。在应用时,宜先用时间平方根法求 C_v 。如不能准确定出开始的直线段,再用时间对数法。另外,还有三点法等,采用时可参考有关文献。

4.0.1 标准固结试验需数天到 10 多天才能完成。对 2cm 厚的一般粘质土试样,在荷重作用下 1h 的固结度一般可达 90% (以 24h 的固结度为 100% 计) 参见本规程条文说明表 3.3.10-2。按 1h 稳定的速率进行试验,对试验结果的 $e \sim p$ 曲线进行校正,可得到与标准固结试验近似的结果,又节省时间;因此,规程中列有 1h 快速法,并说明当沉降计算准确度要求不高,对渗透性较大的细粒土,可采用快速法。

5.1.1 在标准固结试验中,荷载是分级施加,加载率为1,稳定标准为24h。应变控制加荷是连续加荷试验方法之一,它是在试样上连续加荷,随时测定试样的变形量与试样底部孔隙水压力。按控制条件,除等应变加荷固结试验(CRS)外,尚有控制等加荷率(CRL)和等孔隙水压力梯度试验(CGC)。

连续加荷固结试验的理论依据仍然是太沙基固结理论,其固结微分方程式为:

$$C_v \frac{\partial \dot{u}}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial t} \sigma(t) \quad (5.1.1-1)$$

根据初始条件、边界条件和加荷条件(如图5.1.1),固结微分方程(5.1.1-1)的解为:

$$u(z,t) = \frac{R_\sigma H^2}{2C_v} \left\{ \left[1 - \frac{z^2}{H^2} \right] - \frac{32}{\pi^3} \sum_{n=1,2,3}^{\infty} \frac{1}{n^3} \sin \frac{n\pi z}{H} \exp \left(-\frac{n^2 \pi^2}{4} T_v \right) \right\} \quad (5.1.1-2)$$

式中 C_v ——固结系数, cm^2/s ;

T_v ——时间因数 $\left(T_v = \frac{C_v}{H^2} t \right)$;

R_σ ——加载速率 $\left(R_\sigma = \frac{\Delta \sigma}{\Delta t} \right)$, kPa/s 。

从上式中看出:连续加荷的固结过程中,孔隙水压力的变化规律分为两部分:一部分为与时间无关的稳定状态,沿试样高度呈二次抛物线分布;另一部分是随时间消散,其消散速度取决于固结系数 C_v 。当经过某一时间后,消散完成,只剩下稳定部分,则式(5.1.1-2)就缩减为:

$$u(z) = \frac{R_\sigma H^2}{2C_v} \left(1 - \frac{z^2}{H^2} \right) = \frac{\Delta \sigma}{\Delta t} \frac{H^2}{2C_v} \left(1 - \frac{z^2}{H^2} \right) \quad (5.1.1-3)$$

在试样底部 ($z=0$), 孔隙水压力为:

$$u_b = \frac{\Delta \sigma}{\Delta t} \times \frac{H^2}{2C_v} \quad (5.1.1-4)$$

从式(5.1.1-3)和式(5.1.1-4)看出:等加载速率试验和等梯度试验在一定条件下是相同的。至于等应变速率试验,假定土

的应力应变关系为 $\Delta\varepsilon = m_v \Delta\sigma'$ ，则：

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\Delta t} = m_v \left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta t} - \frac{\Delta u}{\Delta t} \right) \quad (5.1.1-5)$$

若试样任何一点应变变化率是常数，则试样任何一点的有效应力变化率和孔隙水压力的分布也是不变的。所以，式 (5.1.1-5) 可写成：

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\Delta t} = m_v \frac{\Delta\sigma'}{\Delta t} \quad (5.1.1-6)$$

这样，对于等应变速率试验，试样底部孔隙水压力为：

$$u_b = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta t} \frac{H^2}{2m_v C_v} \quad (5.1.1-7)$$

综合上述，等应变速率加荷、等加荷速率和等梯度加荷三种试验方法，在稳定状态时的孔隙水压力分布基本一致，也就是说，三种方法的实质是一致的。

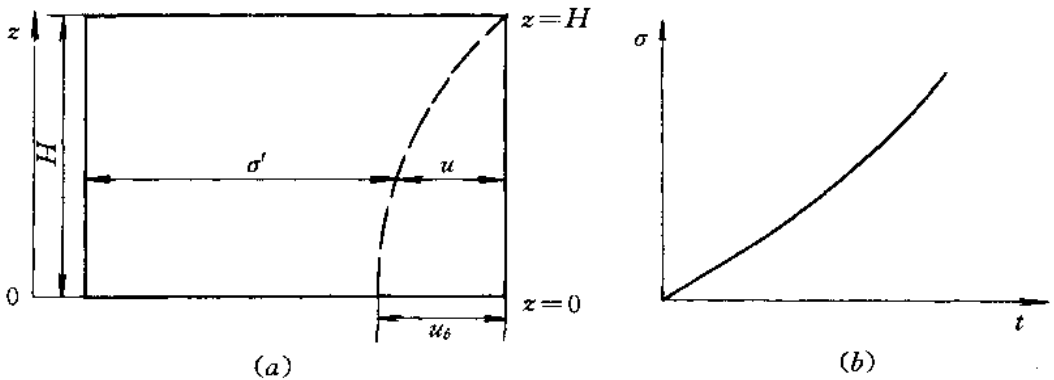


图 5.1.1 连续加荷试样的边界条件及加荷条件

(a) 边界条件；(b) 加荷条件

5.2.1 由于试验过程中，在试样底部测定孔隙水压力，因而，要求仪器结构应能使试样与环刀、环刀及护环底部与刚性底座之间密封良好，且易于排除滞留于底部的气泡。

5.2.2 给定的等应变和等荷载速率是通过加荷装置的测力系统（量力环、负荷传感器）传递的。因此，要求测力系统应有相应的刚度及准确度。

5.2.3 测量孔隙水压力的传感器，要求体积因数（单位孔隙水压

力作用下的体积变化)小,使从试样底部孔隙水的排出可以忽略,使能及时测定试样中的孔隙水压力变化。体积因数采用了三轴试验所规定的标准。同时,一般孔隙水压力将不超过轴向压力的30%,传感器要求准确度为全量程的0.5%。

5.4.2 连续加荷固结试验,因涉及准确测定试样底部孔隙水压力,故要求试样完全饱和或实际上接近完全饱和。

5.4.6 从已有的试验研究资料表明:应变速率对一般土(液限低,活动性小)的压缩性指标和固结系数影响不大。但对高液限土(w_L 大于100以上),大应变速率的试验结果表明:土的压缩量偏小(与标准固结试验相比)。因此,为了使不同方法所得结果具有可比性,要求试验过程中,试样底部孔隙水压力 u_b 不超过垂直应力 σ 某一数值。对不同应变速率条件下试样底部孔隙水压力值 u_b 变化的试验如图5.4.6。从图中可以看出:对于正常固结土,在加荷过程中试样底部孔隙水压力 u_b 达到稳定值时,其比值 $\left(\frac{u_b}{\sigma}\right)$ 一般为20%~30%。本规程采用ASTM D4186—82标准: $\left(\frac{u_b}{\sigma}\right)$ 取值范围为3%~20%。根据该范围估计的应变速率如规程表5.4.6。对于特殊土,根据经验可以修正该估计值。

5.4.8 数据采集时间间隔的规定基于以下两点理由:①试验开始时,试样底部孔隙水压力 u_b 迅速增大;②取足够的读数确定应力应变曲线,当试验数据发生重大变化时,需要更频繁的读数。

5.5.3 计算有效应力时,假定试样中的孔隙水压力处于稳定状态,沿试样高度的分布为一抛物线。因此,试样的平均有效应力可用下式计算:

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}'_i &= \sigma_i - \frac{1}{H} \int_0^H u dz = \sigma_i - \frac{1}{H} \int_0^H u_b \left(1 - \frac{z^2}{H^2}\right) dz \\ &= \sigma_i - \frac{2}{3} u_b\end{aligned}\quad (5.5.3)$$

5.5.7 如在本规程5.1.1条文说明中所述,在加载后短时间间隔内应力应变关系可以认为是线性的,即 $\Delta\varepsilon = m_v \Delta\sigma$,因此,从 $e \sim$

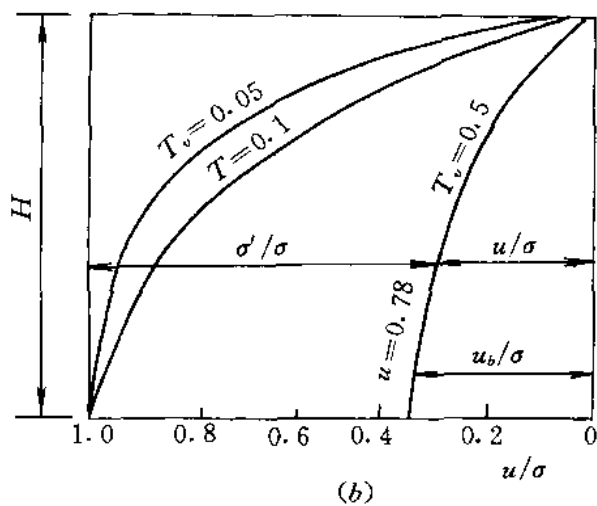
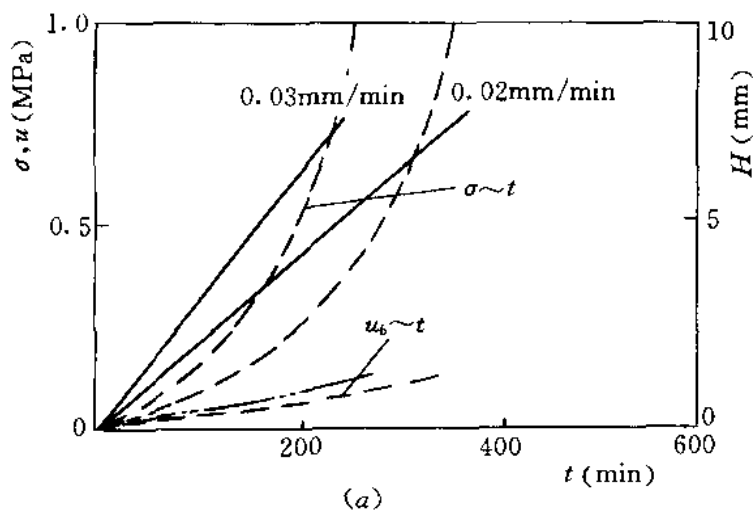


图 5.4.6 不同应变速率时孔隙水压力变化值
(a) 实测曲线；(b) 理论计算曲线

p 曲线上求得 a_{vi} 再求 m_v ，计算固结系数 C_v 。

黄土湿陷试验

SL237—016—1999

1.0.1 在本规程中，“黄土”一词是泛指“典型黄土”（包括 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 ）等各种黄土类土。因为它们具有某些共同的变形特性，需要通过压缩试验来测定。对水工建筑物来说，黄土地基的变形，按外来作用因素的不同，大致可分为下列三种。

1 压缩变形。指黄土在一定压力作用下含水率不变时的垂直变形。这种变形相当于一般未经处理的黄土地基。当建筑物进行施工时，含水率很少变化，主要是压力增加所产生的垂直变形，称压缩变形。

2 湿陷变形。指黄土在一定压力和浸水共同作用下，由于结构破坏而产生的垂直变形。这种变形相当于预先浸水时期，或者工程竣工后，开始放水时期，或在运用时期，由于重复浸水所引起的变形，称为湿陷变形。

3 渗透溶滤变形。指黄土在一定压力及渗透水长期作用下，由于盐类溶滤及土体中孔隙继续被压密而产生的垂直变形，实际也是湿陷变形的继续。其变形的大小与含盐量及水质有关。

1.0.2 关于变形发生阶段，往往由于实际施工、投入生产或运用期工作程序的不同，每一时期的变形量也不相同。如黄土地基预先浸水处理，则首先产生土体自重下的湿陷变形。湿陷稳定后，停止给水并开始施工。在施工期间又由于预先浸湿程度的不同而产生不同的压缩变形。在建筑物投入生产以后，如再次浸水时，因预先浸水及压缩，可能不再产生湿陷变形，也可能再次产生湿陷变形。在运用期间，由于在长期浸水不断渗透的情况下，将随含盐情况的改变及剩余孔隙的继续压密而可能产生渗透溶滤变形。这一现象已引起设计工作者的注意。对于水工建筑物来说，这一过程的变形值是不容忽视的。同时，迄今已有不少成果证明：渗

透溶滤变形试验具有现实意义。因此，本规程反映了这一情况。

1.0.3 黄土湿陷试验，国内外都沿用双线法和单线法两种试验方法。从理论上或试验结果来说，单线法较双线法更符合于黄土变形的实际情况。可是单线法的实际压力往往还未确定。因此，也就不能用一个试样求得土体的压缩变形、湿陷变形与压力的关系曲线。为了获得 $\delta_s \sim p$ 曲线。就必须在同一块土样上切取四个以上的试样，分别在不同压力下进行试验。当在不同压力下压缩变形稳定后，分别进行浸水测出各压力下的湿陷变形，然后绘制湿陷变形系数与压力的关系曲线。

双线法只用两个试样，一个浸水，一个不浸水，两个试验配合就可以得出一条 $\delta_s \sim p$ 的曲线，比单线法的工作量少几倍。根据试验资料，两者得出的平均湿陷起始压力相差不大。因此，是一种较简便的方法。但双线法存在与实际土体变形不相符问题。主要是预先浸水使土体强度有所降低，当实际压力大于或小于土的结构强度时，浸水的湿陷变形值可能偏大或偏小。

根据以上情况，本规程 1.0.3 规定“采用单线法（实际荷重法）测定黄土湿陷性指标。在初步勘察阶段，也允许采用双线法进行试验”。用以大致判别场地的湿陷性质。

3.3.4 关于加荷增量。本规程规定在 $0 \sim 200\text{kPa}$ 范围内采用 50kPa 分级施加；大于 200kPa 以上，每级压力为 100kPa 。以 200kPa 压力为分界主要考虑到 GBJ25—90《湿陷性黄土地区建筑规范》中湿陷系数的压力“以基础底面 10m 以内土层应用 200kPa ”规定相一致。

3.3.5 在固结试验中，每级荷载下的稳定标准的确定主要以沉降量或固结度来衡量。若以 24h 作为稳定标准，那么，对于粘质土（CH），采用每小时的变形量不超过 0.01mm 和 0.005mm 两个标准，相应于 24h 的标准其固结度分别为 88% 和 92% ；对于粉质粘土（CL），其固结度分别为 98.1% 和 98% 。因此可以理解：黄土的组织成分类似于粉质粘土。故对黄土的压缩变形与湿陷变形来说，一般均采用每小时沉降量不大于 0.01mm 为标准。从不同稳

定标准下黄土的湿陷变形系数的比较试验可以看出：所取稳定标准越高，所得的湿陷变形系数越大。表 3.3.5 表明同一试样的试验结果。这些试验结果表明，取 0.01mm/h 作为稳定标准对湿陷系数还是有影响的。不过由于黄土的湿陷变形具有突变性质，这种性质最明显地出现于浸水开始 1~2h 内，即在达到 0.01mm/h 稳定标准之后，湿陷变形也相当缓慢。在考虑渗透溶滤变形的条件下，渗透溶滤变形除了由于盐分溶滤的作用外，就包括湿陷后剩余孔隙的继续压密可以将上述影响计入，故可以认为对湿陷变形采用 0.01mm/h 为标准也是可行的。渗透溶滤变形试验，由于变形性质除粒间应力引起的缓慢塑性变形以外，也取决于长期渗透时盐类的溶滤作用。故规程中规定以每三天变形量不超过 0.01mm 为标准。

表 3.3.5 不同稳定标准下黄土湿陷变形系数

稳定标准		压力 P (kPa)							备 注
		50	100	200	400	800	1600	2000	
0.01 (mm/h)	1	0.44	3.68	9.07	7.01	0.16	0.44	0.05	试样为武功黄土，平均干密度： $\rho_d=1.28\text{g/cm}^3$ ；平均含水率： $w=16.4\%$ 试样总计 14 个 各种压力下压缩稳定后，浸水测读湿陷变形。先用 0.01mm/h 标准稳定后，继续测读 0.005mm/h 的变形，再读至 24h 后结束试验
	2	0.36	5.08	6.87	7.09	0.48	0.41	0.21	
	平均	0.40	4.38	7.97	7.05	0.32	0.43	0.13	
0.005 (mm/h)	1	0.45	3.76	9.11	7.04	0.30	0.55	0.17	
	2	0.40	5.17	6.92	7.17	0.55	0.51	0.35	
	平均	0.43	4.47	8.02	7.11	0.43	0.53	0.26	
24 (h)	1	0.56	3.96	9.26	7.71	0.45	0.79	0.49	
	2	0.50	5.31	7.03	7.28	0.76	0.71	0.55	
	平均	0.53	4.64	8.15	7.50	0.61	0.75	0.52	

3.3.7 关于测定湿陷起始压力，在工业和民用建筑中，由于压力变幅较小，同时，湿陷起始压力（浸水压力）是影响湿陷系数的主要因素，因此，应规定某一浸水压力下的湿陷系数。现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑规范》规定标准压力为 200kPa。根据

在标准压力下湿陷量的大小可分为湿陷性黄土和非湿陷性黄土。湿陷性黄土又分为自重压力下发生湿陷的自重湿陷性黄土和自重压力下不发生湿陷的非自重湿陷性黄土。而湿陷性黄土受水浸后，相应于起始湿陷的压力，称为湿陷起始压力。

在黄土地区的水工建筑物地基，浸水几乎不可避免外，而且场地面积广阔，压力变幅极大，如挖方渠道不仅不会增加土层压力强度，往往反而减少；又如高的堤坝地基，土层压力强度很大，且不同部位大小极不相同等，因此，在测定湿陷系数时，使用的压力对结果影响很大。众所周知，黄土湿陷性与它的密度、湿度和压力有关。从许多研究成果中，清楚地证明了在同一地区不同建筑物的荷载作用下，或同一建筑地基负荷不同时，浸水湿陷的特性均有极大的差别。很明显，必须考虑土体所受压力强度对结构强度的破坏作用。所以本规程采用实际荷载法，并在规程 3.3.7 中规定，分级加压至浸水前，使土样的压力恰好代表土层中部水平断面上所承受的实际荷载（包括土层自重及建筑物的附加荷载）。在实际荷载下变形稳定后，保持荷载不变，对试样进行浸水以确定土的湿陷变形。

对水利水电工程中的工业与民用建筑，当实际荷载在 GBJ25—90《湿陷性黄土地区建筑规范》所规定范围内，可以用该规范规定的标准压力来测定湿陷系数。

黄土压缩试验进行程序应尽量模拟实际情况、因为实际施工，投入生产或运用期间工作程序的每一个时间的变形量就可能有极大的差别。对水工建筑物来说，大致可分为两大类：第一类，水工建筑物建筑在未经处理的天然地基上；第二类，水工建筑物建筑在预先浸水处理已经湿陷过的地基上。

对第一类可采用实际荷载法，在初步勘察阶段也可用双线法进行试验。对第二类，本规程规定在现场预先浸水稳定后的试坑中取样，按本规程 3.3.5 至 3.3.6 的规定进行试验，以确定建筑物运用时期黄土层第二次湿陷变形，这样规定的目的是：①说明现场有预浸水的地质和土壤条件；②预浸水后试样的含水率符合

实际情况，可以减少室内外测定的误差。

3.4.4, 4.3.3 湿陷起始压力利用湿陷系数和压力关系曲线的转折点可求得。

三轴压缩试验

SL237—017—1999

1.0.1 三轴压缩试验是根据摩尔—库仑破坏准则测定土的强度参数：凝聚力 c 和内摩擦角 φ 。

常规的三轴压缩试验是取一圆柱体试样，先在其四周施加一周围压力（即小主应力） σ_3 ，随后逐渐增加大主应力 σ_1 直至破坏为止。根据破坏时的大主应力 σ_1 和小主应力 σ_3 绘摩尔圆，摩尔圆的包线就是抗剪强度与法向应力的关系曲线。通常以近似的直线表示，其倾角为内摩擦角 φ ，在纵轴上的截距为凝聚力 c （见图 1.0.1）。故抗

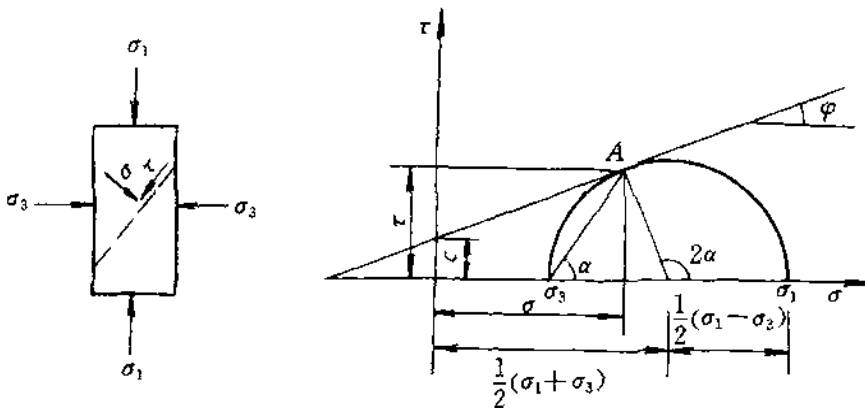


图 1.0.1 三轴压缩试验抗剪强度与法向应力关系曲线

剪强度与法向应力的关系曲线可以用库伦方程表示：

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad (1.0.1-1)$$

式中， τ 及 σ 分别为作用在破坏面上的剪应力及法向应力。它与大主应力 σ_1 ，小主应力 σ_3 及破坏面与大主应力面的倾角 α 具有如下关系：

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\alpha \\ \tau &= \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\alpha \end{aligned} \right\} (1.0.1-2)$$

式中： $\alpha = 45^\circ + \frac{\varphi}{2}$ 。

土体受荷载后，任何面上的法向应力为固体颗粒骨架和孔隙水或气体所承受。即 $\sigma' = \sigma - u$ 。 σ' 称为有效应力， u 称为孔隙压力。土的抗剪强度如用有效应力表示。则 (1.0.1-1) 又可写成：

$$\tau = c' + (\sigma - u)\text{tg}\phi = c' + \sigma'\text{tg}\phi \quad (1.0.1-3)$$

式中 c' —— 有效凝聚力；

ϕ —— 有效内摩擦角。

1.0.2 三轴压缩试验能控制试验过程中的排水条件，可根据工程施工和运用的实际情况选择不同排水条件的试验。无论粘质土或砂质土均可适用。通常分为不固结不排水剪试验 (UU 试验)，固结不排水剪试验 (CU 试验)。固结排水剪试验 (CD 试验)。

1 不固结不排水剪试验 (UU 试验)。这种方法适用的条件是土体受力而孔隙压力不消散的情况。当建筑物施工速度快，土体渗透系数较低 (如小于 $A \times 10^{-4} \text{cm/s}$)，而排水条件又差时，为考虑施工期的稳定，可采用 UU 试验。

对于非饱和土，如压实填土，或未饱和的天然地层，这种土的强度是随 σ_3 的增加而增加。但当随 σ_3 增加到一定值，空气逐渐溶解于水而达到饱和时，强度不再增加。强度包线并非直线。因此，用总应力方法分析时，应按规定的压力范围内选取 c_u 、 ϕ_u 。如非饱和地层预计施工期可能有雨水入渗或地下水位上升会使土体饱和，则试样应在剪切前予以饱和。

2 固结不排水剪试验 (CU 试验)。试验主要目的有二：一是借测量孔隙压力求得土的有效强度参数 c' 、 ϕ' ，以便进行土体稳定的有效应力分析。其次是求得总应力强度指标 c_{cu} 、 ϕ_{cu} 。

3 固结排水剪试验 (CD 试验)。主要是为了求得土的排水强度指标 c_d 、 ϕ_d 。采用应变控制式三轴仪的固结排水剪比较费时，故仅应用于较透水的土料。在测试土的应力应变关系时，为了模拟实际工程的排水条件，也需用应变控制三轴压缩仪的固结排水剪试验成果来确定变形模量、泊松比和剪切模量等变形指标。

3.1.1 三轴压缩仪分为应变控制式和应力控制式两种。前者操作方便，应用广泛，故本规程中各种试验方法均采用此种仪器；后者操作较麻烦，难以测定峰值以后的应力应变曲线，故本规程修改时予以取消。将其列入弹性模量试验规程中。

关于孔隙压力量测系统，除了不能残留气泡外，应有一定的灵敏度，量测时应不允许孔隙水流动。试样内孔隙水的流动，会导致：一是不能准确地测定孔隙压力值，特别在低压缩性的土中显得特别重要；其次是在透水性小的土中会导致时间滞后现象，使得读数难以稳定。本规程规定孔压测量系统的体积因数不能大于 $1.5 \times 10^{-5} \text{cm}^3/\text{kPa}$ 。（即当零位指示器的毛管直径为 0.1cm 时，孔隙压力测量系统在 500kPa 压力下，毛管水银面上升不超过 9mm）。这一数值与英国帝国学院、挪威土工研究所、美国垦务局等使用仪器的体积因素基本一致。

对于孔隙压力系统采用的传感器，要求体积因数小，线性误差和重复性误差小，时漂要满足试验要求。传感器体积因数的测定，可采用精密的双套体变管的方法，将传感器接在体变管的量测系统中（体变管内管更换成毛细管），排除气泡，用调压筒加压，记下压力值与体积变化值，作出压力与体变的关系曲线，即可求出传感器的体积因数。

3.3.1~3.3.4 三轴压缩试验操作复杂，技术要求高，需要的土样也多，如不小心从事，就得不到正确的试验成果；本规程规定了对仪器应预先进行检查，以避免因仪器上的毛病给试验带来误差。

4.1.1 本规程规定三轴试验试样直径分别为 $D=39.1\text{mm}$ ， $D=61.8\text{mm}$ 及 $D=101\text{mm}$ 是根据 GB4540—84《应变控制式三轴仪》所允许的尺寸而制定的。由于试样直径 D 与试样土粒粒径 d 之比与强度有一定影响，如 D/d 比超过某一范围，则所测得的强度偏大。故本规程参照国外一些标准对试样直径 D 与允许的最大土粒粒径作本规程 4.1.1 所列的规定。

近年从国外引进了一些三轴压缩仪，试样的直径大多数为

38、50、70mm 及 100mm。它与本规程的试样直径相似，因此本规程也适用上述直径的试样进行试验。

4.1.2, 4.1.3 细粒土试样分为原状的和扰动的两种。原状样一般均用原状土块或钻孔原状土柱在切土器上切取。扰动试样的制备方法有压样法、击实法、搓碾法、土膏法等。不同的制备方法所得试样的强度有所差别。一般来说，制备方法应与现场情况类似为好，故以击实法和搓碾法为宜。

4.2.1 试样饱和方法有抽气饱和、浸水饱和、水头饱和等，其中以抽气饱和法效果较好。据对粉质粘土的对比试验表明：用抽气法饱和度可达 95%，浸水饱和和水头饱和在持续数昼夜后仅达到 85% 左右。有些资料亦表明：用抽气法饱和度可达 90%~95%。故规程建议以抽气饱和法为主，若研究软化的影响，则要用水头饱和法。

4.2.3 利用二氧化碳饱和试样是近年来发展的一种新方法。由于二氧化碳比空气重且易溶于水，当从按所需密度制备的试样底部注入二氧化碳后，试样孔隙中的空气逐渐从试样顶端排出。二氧化碳是气体，因而用一种气体驱赶另一种气体，不会出现气泡阻滞现象；又由于二氧化碳在水中的溶解度远比空气大（1 个大气压力下，0℃时，1cm³ 水可溶解空气 0.029cm³，可溶解二氧化碳 1.71cm³）。因而，当试样孔隙充满二氧化碳后，用水头饱和法饱和时，试样孔隙中的二氧化碳气泡很快溶于水成碳酸，继续水头饱和时，又可以成为一种液体（水）驱赶另一种液体（稀碳酸），最后使试样孔隙中充满纯净的水，达到饱和试样的目的。

4.2.4 对于渗透性小的粘性土，抽气法难以达到完全饱和，即使试样达到了完全饱和，而仪器底座、孔隙压力系统及安装过程中，试样与橡皮膜等之间的残余气泡也难以驱净，不能满足试验过程中完全饱和。反压力的作用是使试样及仪器的测量系统都达到完全饱和，反压力的另一个作用是使试样的孔隙水压力升高后，在剪切过程中有剪胀的试样不致出现负的孔隙压力。

目前国内外已把对试样施加反压力作为一种常用的饱和方

法，例如美国水道试验站规定：对 CU 试验，剪切前试样饱和度必须达到 98%，而测孔隙压力 \overline{CU} 试验，则必须完全饱和。因此，施加反压力是试验中必要步骤。

4.3.2 固结不排水剪试验。

1 为了加速试样的固结过程，同时在剪切时使试样内孔隙压力均匀传递，国内外都普遍在试样外贴滤纸条。

关于滤纸条的贴法，大约有如下几种：覆盖面积达侧面的 50% 以上和上下连续的滤条（如图 4.3.2 I 型）；上下均与透水板相连的连续滤条（如图 4.2.3 II 型）；滤纸条下部与透水板相连，而上部与透水板断开 1/4 试样高度的距离（图 4.3.2 III 型）；上下均与透水板相连，但中部间断 1/4 试样高度的型式（图 4.2.3 IV 型）。为了加速试样固结，建议采用 II 型。但如对试样施加反压力或测孔隙压力，滤纸条的上、下端与透水板不连接以防反压力与孔隙压力测量直接连通。

2 对试样施加的周围压力应尽可能与土体现场实际作用的压力一致。然而在大周围压力下所测得的强度指标比在小周围压力下所测得的强度指标要低。因此在提供强度指标时应注明所施加的周围压力的范围。

3 固结标准采用两种方法。一种是以固结排水量达到稳定作为固结的标准。另一种是以孔隙水压力完全消散为标准。根据所

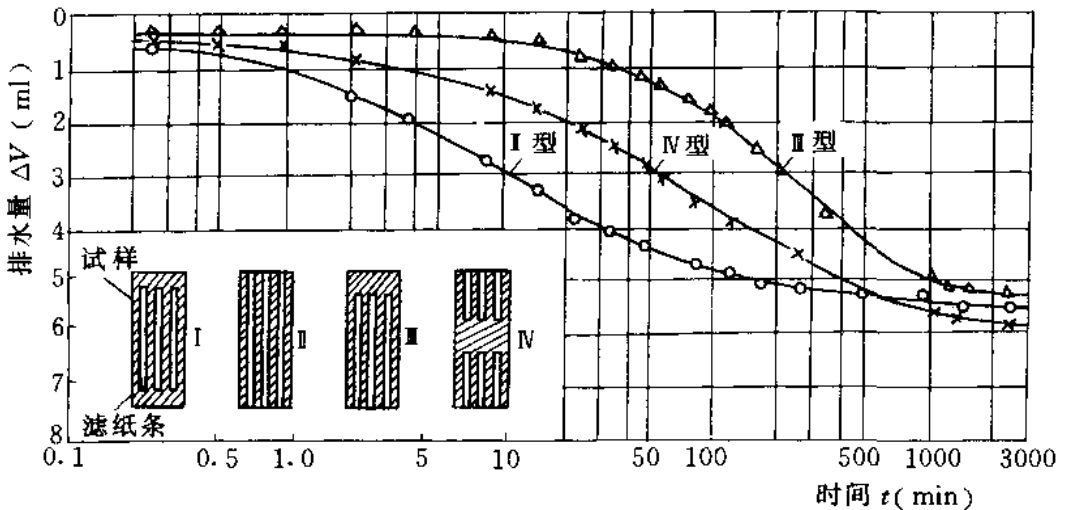


图 4.3.2 滤纸条不同贴法的固结过程线

进行的试验与国内外的经验，本规程规定以固结度达到 95%~100% 作为固结标准。

4.4.2 剪切应变速率的确定。

1 不固结不排水及固结不排水试验的剪切（不测孔隙压力）应变速率。在通常的速率范围内对强度影响不大，故可根据试验方便来选择剪切应变速率。规程建议每分钟应变 0.5%~1% 左右，以使试样在 15~30min 内完成剪切试验。

2 固结不排水试验的剪切（测孔隙压力）应变速率。在常规三轴试样剪切过程中孔隙压力分布是不均匀的，一般中部较大，两端较小。对于测孔隙压力的 $\overline{\text{CU}}$ 试验，为了使底部测得的值能代表剪切区的孔隙压力，故要求剪切应变速率相当慢，以便孔隙压力有足够时间均匀分布。

测孔隙压力的 $\overline{\text{CU}}$ 试验国内不少单位对于剪切应变速率积累了许多经验。经研究认为粘质土采用每分钟应变 0.1% 是合适的，也有的认为粘土以每分钟应变 0.05% 为好。国外对粘质土则多用每分钟应变 0.04%~0.1% 的速率。鉴于上述，因此，规程建议对粘质土测孔隙压力的 $\overline{\text{CU}}$ 试验的剪切应变速率每分钟为 0.05%~0.1%。

粉质土的剪切应变速率可以加快些，经比较，对于渗透系数 $k=1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 的粉质土，当剪切应变速率每分钟应变在 0.1%~0.6% 时，孔隙压力变化很小。对强度的影响也不大（如图 4.4.2），故粉质土的剪切应变速率采用每分钟应变 0.1%~0.5%。

3 固结排水试验的剪切应变速率。关于固结排水试验的剪切应变速率，吉甫逊曾建议过破坏历时的理论公式：

$$U_f = 1 - \frac{h^2}{\eta C_{vt} t_f} \quad (4.4.2-1)$$

式中 h ——排水距离；

η ——取决于排水条件的系数，当试样为一端排水 $\eta=0.75$ ，两端排水 $\eta=3.0$ ；

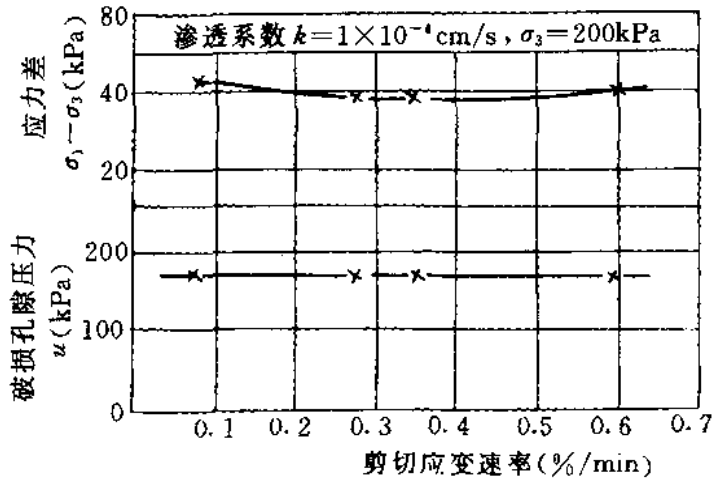


图 4.4.2 剪切速率对应力差与孔隙压力的影响

C_v ——消散系数， cm^2/s ；

U_f ——试样的平均消散度；

t_f ——破坏历时， s 。

在上式中若取 $U_f = 0.95$ ，则得破坏历时 t_f 的式子：

$$t_f = \frac{20h^2}{\eta C_v} \quad (4.4.2-2)$$

将所得的 t_f 来除试样的总变形量，即可得剪切应变速率。按式 (4.4.2-2) 算得的剪切应变速率，对粘质土一般为每分钟应变 $0.012\% \sim 0.003\%$ 。采用这样的剪切应变速率的固结排水剪，对于粘质土可能仍有微小的孔隙压力产生。但对强度影响不大，故本规程规定剪切应变速率为 $0.012\% \sim 0.003\%$ 。

5.1.1 三轴压缩试验的试样在固结后和剪切过程中试样面积会减小或增大，因此必须进行修正。

固结后的修正方法有：①根据固结下沉量和固结排水量（对 CU 和 $\overline{\text{CU}}$ 试验也可采用试验前后的试样质量差）计算固结后的面积；②假定试样固结应变各向均等来计算。固结后的面积由于试样的固结应变并非各向均等，故一般以前法为好。据研究，按前法算得的面积比按后法算得的面积更接近实测值。但有时测固结下沉量较困难，故规程中规定采用第二种方法计算。

5.2.1, 5.2.2 绘制应力圆时,需根据破坏标准选取代表试样破坏时的应力,以主应力差(或主应力比)的峰值和应变值作为破坏标准是国际上普遍采用的标准,我国多年来的实践也证明其行之有效,故本规程仍作为主要选择的标准。而应力路径的密集点(或拐点)适用于各应力圆难以作共同切线时,绘出各破坏应力点(密集点或拐点),通过这些作平均直线,根据直线的倾角 α 和在纵轴的截距 d ,间接地求出 c' 和 ϕ' ,本规程保留此法供试验人员选用。

一个试样多级加荷三轴压缩试验

SL237—018—1999

1.0.1 在三轴压缩试验中,用一个试样多级加荷测定土的强度参数 c 和 φ 值,是根据库伦定律,假定 c 、 φ 值不因应力状态的变化而改变,破裂角 α ($45^\circ + \frac{\varphi}{2}$) 在第一级荷载下出现后,在以后各级荷载下,均保持不变。第一级荷载以后所施加的荷载只是增加摩擦强度,因而可以测定强度包线。

1.0.2 一个试样多级加荷三轴压缩试验原则上适用于粘质土,砂质土。由于是只采用一个试样确定强度包线,它避免了多个试样的不均匀而造成的应力圆分散,各应力圆均能很好切于强度包线。但一个试样的代表性低于多个试样的代表性,故本规程只限于无法取得多个试样,或多个试样彼此性质不均匀的情况下采用此法,并不建议替代作为常规方法采用。

4.4.1 对于第一级围压作用下试样剪切完成后,须退除轴向压力(即测力计为零),使试样回复到等向受力状态,再施加下一级周围压力,这样可以消除固结时偏应力的影响,不致产生轴向蠕变变形,以保持试样在等向压力下固结,故规程作了退除轴向压力的规定。

一个试样多级加荷三轴试验的各级剪切变形随土的种类不同相差很大,故不能作统一规定。基本原则是第一级剪切变形应与多个试样试验的控制变形一致,最后一级达到的累积变形以不超过 20% 为准,中间剪切的轴向变形无法作出统一规定。各级剪切中,可以同时计算有效主应力比或绘制有效应力路径来控制。

破坏点的确定应与多个试样破坏标准的确定相一致。不另作规定。

对于软粘土及塑性大的土,因破坏点不显明,难以根据峰值

或稳定值的近似点确定施加下一级周围压力的标准，因此可以按预先设定的轴向应变，施加各级周围压力。一般可以按以下标准进行，见图 4.4.1。

- 第一级 轴向应变至 16%；
- 第二级 轴向应变至 18%；
- 第三级 轴向应变至 20%。

5.1.2 采用该法进行试验，对于不固结不排水试验的试样面积修正问题与多个试样的试验相同。对于固结不排水试验，因为每一级周围压力下试样体积产生变化，所以试样面积修正还应考虑体积变化问题。目前仍按分级计算方法进行，即第一级周围压力下试样剪切終了时的状态作为下一级周围压力下试样的起始状态。面积修正计算仍按式 $A_c = \frac{A_c}{1 - \epsilon_i}$ 进行。式中 A_c 为试样在本级周围压力下固结后试样的实际面积。 ϵ_i 为试样在本级周围压力下的剪切应变（不累计）。上述计算方法存在一定误差，有待今后继续完善。

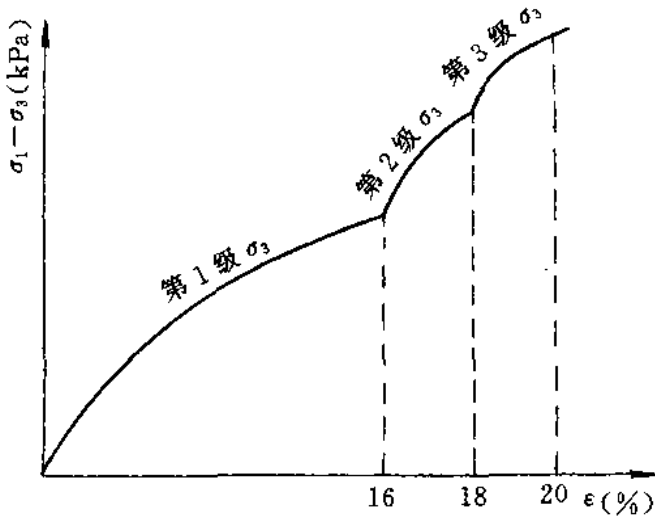


图 4.4.1 按轴向应变加荷

孔隙水压力消散试验

SL237—019—1999

1.0.1 按有效应力法校核施工期土坝坝坡的稳定性和地基在上部荷载作用下的稳定性时，必须估算土体中的孔隙压力。观测结果证明：当土的渗透系数约为 $10^{-5} \sim 10^{-7} \text{cm/s}$ 时，土体在施工期的孔隙水压力有一定程度的消散。因此，对渗透系数满足上述范围的填土、土坝及地基的土体而言，需精确估算施工期的孔隙压力，应根据填土的固结系数（又称消散系数 C_v' ）、施工速率和边界的排水条件，采用差分法或有限单元法求得。

孔隙水压力消散试验是将试样置于三轴压力室使之承受各向均等的周围压力或在 K_0 条件下承受轴向压力作用，测定孔隙压力的消散过程，故称孔隙压力消散试验。

如果能测得固结试验中的孔隙压力消散过程，并根据消散度来确定固结系数则更为合理。

3.1.1 试验可在三轴仪中进行。仪器的装置情况和三轴固结不排水测孔隙压力试验的仪器装置基本相同。测定饱和土的孔隙压力消散有时历时较长，采用水银零位指示器的孔隙压力测量系统，需人工随时进行调节，工作不便。因此，宜采用符合长期稳定、体积因数小、灵敏度高的压力传感器。

4.1.2 孔隙压力消散试验的试样尺寸，不一定按三轴压缩试验径高比的要求。为了使试样的孔隙压力消散时间尽量减小，试样的径高比 D/H 应大于、等于 1。试样直径 D 的选择可根据土类而定。对于含粘粒较多的土，试样直径 (D) 可采用 6.18cm；对渗透性系数大于 10^{-6}cm/s 的土及裂隙土等直径可采用 10.0cm。径高比 (D/H) 可采取 1.5~2.0。

4.1.4 关于周围压力的大小与消散次数。在实际施工中，土层上的荷载并非一次全部施加，为了符合实际情况，周围压力应分级

施加，分级消散。分级的次数，规程规定为 3 次，每次为实际需要荷载的 1/3。各试验室可根据实际情况（包括仪器的能力）加以规定，究竟多大周围压力和多少消散次数最能代表实际情况，在试验设计时酌情考虑。

5.1.3, 5.1.4 关于孔隙压力消散度和消散系数确定的基本原理，可用图 5.1.3 所示予以说明。设有如图中所示一饱和的粘土试样，被包在橡皮膜中，上下两端各放一透水板。开始时不允许试样排水，施加一荷载增量 Δp ，试样内的孔隙压力 u_i 等于 Δp ，如图中 t 等于 0 时的水压线所示。

待孔隙压力稳定后，让上端排水，水压线随时间而改变，它反映试样的孔隙压力消散过程或试样的固结过程。如果在试样底面不排水端测得孔隙压力的消散过程，则得到试样底部的固结特性曲线，即消散度 D_c 与时间 t 关系曲线。

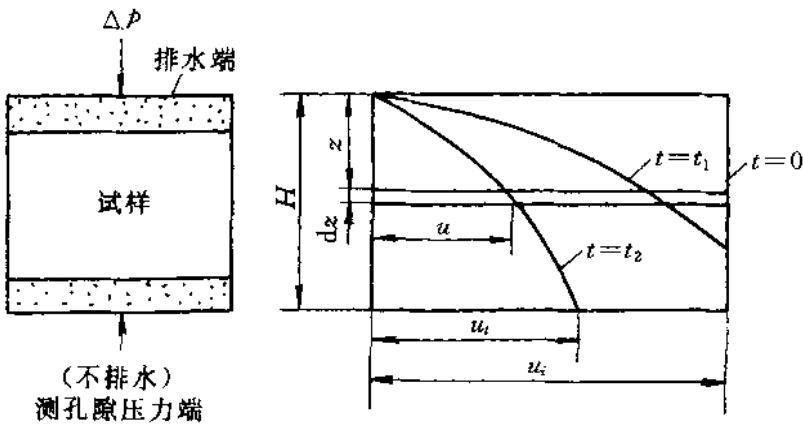


图 5.1.3 试样布置及孔隙水压力分布线图

试样底部不排水端的消散 D_c 定义为：

$$D_c = \left(1 - \frac{u_t}{u_i} \right) \times 100 \quad (5.1.3-1)$$

根据单向固结理论，可算得不排水端的消散度 D_c 与 T_v 的理论关系为：

$$D_c = 1 - \frac{u_t}{u_i}$$

$$= 1 - \frac{4}{\pi} \left(e^{-\frac{\pi^2}{4} T_v} - \frac{1}{3} e^{-\frac{9}{4} \pi^2 T_v} + \frac{1}{5} e^{-\frac{25}{4} \pi^2 T_v} \right) \quad (5.1.3-2)$$

消散度 D_c 与一般平均固结度 U 两者定义不同。根据单向固结理论，则得平均固结度为：

$$U = 1 - \frac{8}{\pi^2} \left(e^{-\frac{\pi^2}{4} T_v} + \frac{1}{9} e^{-\frac{9}{4} \pi^2 T_v} + \frac{1}{25} e^{-\frac{25}{4} \pi^2 T_v} \right) \quad (5.1.3-3)$$

比较式 (5.1.3-2)、式 (5.1.3-3)，都取 1 项（实际上当 $T_v > 0.16$ 时已足够）则：

$$\frac{1 - D_c}{1 - U} \approx \frac{\pi}{2} \quad (5.1.3-4)$$

式 (5.1.3-4) 表明平均固结度与底部消散度的关系。

按式 (5.1.3-2) 算出 $D_c \sim T_v$ 的关系值，见本规程的表 5.1.4，查得某一消散度相应的 T_v 后，按 (5.1.4-1) 式可算得某一消散度下的消散系数 C_v' ：

$$C_v' = \frac{H^2}{t} T_v \quad (5.1.4-1)$$

消散度不同，消散系数也不同，本规程建议按试样实际消散度 $D_c = 50\%$ （即 $T_{50} = 0.38$ ）来推算消散系数，它相当于平均值。至于应采用多大的消散度或固结度，应视工程具体情况预估确定。

关于各向等压力和 K_0 条件排水固结的差别，根据理论推导，得出：

$$C_{v1} = \frac{3(1 - \nu)}{(1 + \nu)} C_{v3} \quad (5.1.4-2)$$

式中 ν ——有效应力下的泊松比。

根据一些正常固结粘土的比较试验资料表明：在试样底部测量孔隙水压力，固结初期， K_0 条件比各向等压力固结的孔隙水压力消散的较快；而在某一时间后， K_0 条件的消散比各向等压力的消散又迟缓。这就说明平均主应力的减小和有效主应力差增大对孔隙水压力消散的影响。因此，在选择试验方法时，应考虑土体在实际工程中所处的部位和所受的应力条件。但应指出，在极大多数的实际问题中，土体是在各向不均等压力下固结的。如天然

土层在自重下的固结，相当于 K_0 条件。而碾压土坝中或地基中，土体固结时有一些侧向移动的，不符合 K_0 条件，也并非各向等压力。

5.2.3 将室内消散试验所得的试样在周围压力 σ_3 或垂直压力 σ_1 下产生的起始孔隙压力 u_i 绘制成 $u_i \sim \sigma_3$ 与 $u_i \sim \sigma_1$ 曲线，则曲线的坡度分别为孔隙压力系数 B 和 \bar{B} 。孔隙压力系数的大小除了取决于试样的受力状态外，还决定于试样在前一级压力下的消散度。因此，上述的 B 和 \bar{B} 值仅代表室内试验条件下所测出的孔隙压力系数。在设计初步估算中，可以采用试验的第一级压力下测出的孔隙压力系数 B 和 \bar{B} 作为孔隙压力消散计算中的起始孔隙压力系数。

无侧限抗压强度试验

SL237—020—1999

1.0.1 无侧限抗压强度试验是用圆柱试样，在无侧向应力下，测定其最大的轴向力即抗压强度 q_u 。并间接求得抗剪强度，它相当于不固结不排水强度 S 之半：

$$S = \frac{1}{2}q_u \quad (1.0.1)$$

4.0.2 试样高度与直径的比值，对无侧限抗压强度试验值有很大影响。比值较大的试样，在加荷后往往发生歪斜，得出较小的结果；反之，比值较小时，由于试样两端受加压板的约束，在两端附近各形成一锥状的不变形区域，致使试样内产生不均匀变形，影响试样中心部位的应力分布，从而歪曲了试验结果。因此，试样的高度与直径应有适当的比值。试验结果表明：当试样高度与直径的比值大于 2 时，两端加压板的约束对试样中心部位应力分布的影响就较小。采用试样高度与直径的比值不小于 2 是合适的。故本规程建议该比值为 2~2.5。

至于试样直径大小，根据国内试验单位的取土情况，建议采用 3.5~4.0cm。重塑土试样尺寸应与原状土尺寸相同，以避免由于试样尺寸不同而产生的误差。

4.0.3 当轴向荷载作用于试样时，试样与加压板之间即发生与侧向膨胀力方向相反的摩擦力。该力使两端土的侧向膨胀受到限制，故试样变成鼓状。垂直变形愈大，鼓状愈大。这样，试样内的应力分布就不均匀。为了减少该影响，可在试样两端抹一薄层凡士林。如果气候干燥，试样侧面也可涂一薄层凡士林，以防水分蒸发。但是在作重塑土试验时，应把抹凡士林的一层土刮去。

4.0.5 如试验的土样渗透性较小，试验历时较短，可认为试验前后的含水率不变。但历时过短，试验不便，故限制加荷时间约为

8~10min。本规程规定应变速率每分钟为1%~3%。

4.0.9 天然结构的土经重塑后，它的结构凝聚力已全部消失。但若放置时间较长，又可以恢复一部分。放置时间愈长，恢复程度愈大。所以，试样重塑后应立即进行试验。

5.0.2 关于试验过程中，试样面积的修正是假定试样体积在轴向变形过程中不发生改变的情况下求得其平均断面。三轴不固结不排水试验，也是采用此方法进行试样面积修正的，也可以用某一轴向变形下试样最大的断面积来计算，但在试验过程中测定断面积较困难，所以目前很少采用该法。

5.0.5 试样受压破坏时，一般分脆性破坏及塑性破坏两种。脆性破坏具有明晰的破裂面，而塑性破坏时没有破裂面。应力应变关系曲线也大致有两种：一种是具有峰值或稳定值的；另一种是不具有峰值或稳定值而是应力随应变渐增的（如图5.0.5）。选择破坏值时，

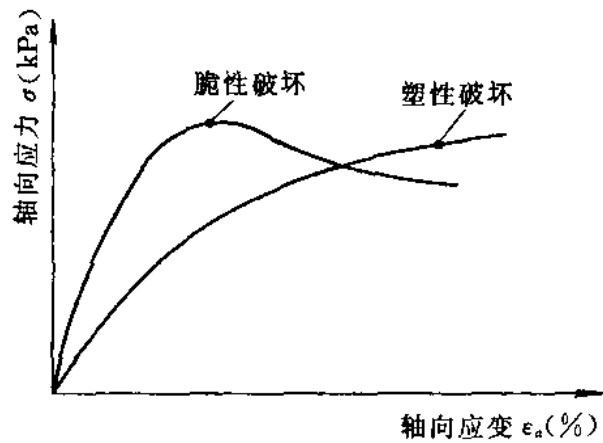


图 5.0.5 剪应轴向应力与轴向应变关系图

对于有明显峰值或稳定值的，以峰值或稳定值为抗压强度；对于没有峰值或稳定值的，为与GB/T501230—1999《土工试验方法标准》的取值一致。将原规程规定的以应变为20%的抗压强度为破坏值，改为以应变15%的抗压强度值作为破坏值。根据许多试验资料，一些塑流现象大的试样，当应变大于或接近20%时，应力已不再增加，或者增加很少。故本规程规定以应变15%作为取值标准。这种方法十分简便，目前已应用很广。

直接剪切试验

SL237—021—1999

1.0.2 用直接剪切试验确定土的强度参数 c 和 φ 的方法主要有三种，即快剪、固结快剪和慢剪。每种试验方法适用于一定排水条件下的土体，相应于工程所处的工作状态。因此，在选择试验方法时，应注意所采用的方法尽量反映土的特性和工程所处的工作阶段，并与分析计算方法相匹配。

1.0.3 直接剪切仪的最大缺点是不能有效地控制排水条件。对渗透性较大的土，进行快剪试验时，所得的结果，用库仑公式表示时，具有较大的内摩擦角，且总应力强度指标往往偏大。因而，规程规定，对渗透系数大于 $A \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 的土不宜作快剪试验。

3.1.1 常用的直接剪切仪分为应变控制式和应力控制式两种。应变控制是控制试样产生一定位移，测定其相应的水平剪应力；应力控制则是对试样施加一定水平剪切力，测定其相应的位移。应变控制直接剪切仪的优点是能较准确地测定剪应力和剪切位移曲线上的峰值和最后值，且操作方便。故本规程以此种仪器作为主要仪器。应力控制直接剪切仪施加水平剪切力较为麻烦，不能准确地测得应力和剪切位移曲线上的峰值及稳定值，目前国内国外均很少采用，故在本次规程修订时，取消了应力控制直接剪切仪。

4.1.3 粘质土的抗剪强度与垂直压力的关系并不完全符合库仑方程的直线关系。对于正常固结土，在一般荷载（100~400kPa）作用下，可以认为是直线关系。规程中规定：垂直荷载大小应根据预计土体所受的力来决定，也可按 100、200、300、400kPa 四级荷载施加。对于先期固结土，在选择垂直荷载时，应考虑先期固结压力 p_c 值，设计压力小于先期固结压力 p_c ，施加的最大垂直压力不大于 p_c ；设计压力大于先期固结压力 p_c ，垂直压力应大于 p_c 。

4.2.1 剪切速率是影响土的强度的一个重要因素，它从二方面影响土的强度；一方面是剪切的快慢影响试样的排水固结强度；另一方面是对粘滞阻力的影响，剪切速率愈快粘滞阻力愈大，强度也愈大；反之亦然。不过在常规试验中，对于粘滞阻力的影响，通常不考虑。

规程中规定：快剪应在 3~5min 内剪损，其目的就是为了在剪切过程中尽量避免试样的排水固结。然而，对于高含水率、低密度的土或透水性大（渗透系数大于 10^{-6} cm/s）的土，即使再加快剪切速率，也难以避免排水固结，因而对于这类土，建议用三轴仪测定其不排水强度。

4.2.2 试样在每级垂直荷载作用下，应固结至主固结完成。关于固结稳定标准，规定为：每小时内垂直位移计读数变化不超过 0.005mm，认为已达固结稳定。

4.2.3 慢剪试验要求在剪切过程中试样的孔隙压力完全消散。因此试验要有充分的时间。参照国内外经验，规程中规定剪切速率应小于 0.02mm/min。但也可根据固结 50% 的时间 t_{50} 的 50 倍 ($50t_{50}$) 估算破坏历时；也可用 $35t_{60}$ 及 $12t_{90}$ 估算。两者的实质一样，计算结果相差不大。

5.0.3 破坏值的选定，常有两种情况：若剪应力~剪切位移关系曲线中具有明显峰值或稳定值，则取峰值或稳定值作为抗剪强度值。如图 5.0.3 中的曲线 1 及 2 的 a 点及 b 点；若剪应力随剪切位移不断增长，无峰值或无稳定值时（如图 5.0.3 中曲线 3），则以相应于选定的某一剪切位移相应的剪应力值作为强度值。国内一般采用最大位移为试样直径 D 的 $1/15 \sim 1/10$ ，即对于直径 61.8mm 的试样，其最大剪切位移量约为 4~6mm。法国中央土木试验室规程取剪切位移为 $D/10$ ，美国水道实验站试验规程取剪切位移为 $D/6$ 。本规程中规定取剪切位移为 4mm 时的剪应力值来确定抗剪强度，同时要求试验的剪切位移达 6mm。

以剪切位移作为选值标准，虽然方法简单，但从理论上讲不太严格，因各种不同类型破坏时的剪切位移并不完全相同，即使

对同一种土，在不同的垂直荷载作用下，破坏剪切位移亦不相同，因而只有在破坏值难以选取时，才允许采用此法。

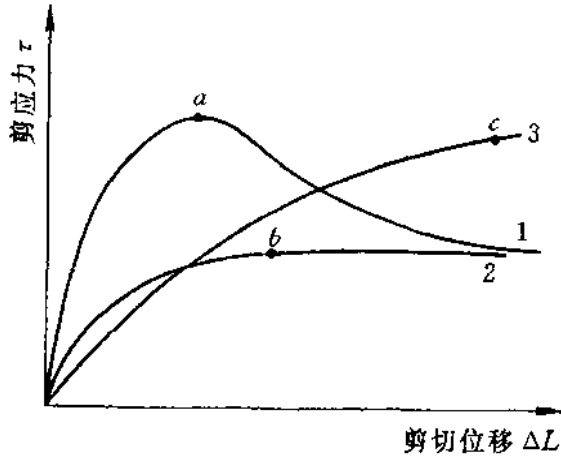


图 5.0.3 剪应力与剪切位移关系曲线

排水反复直接剪切试验

SL237—022—1999

1.0.1 超固结粘土试样在某一有效压力作用下进行剪切试验时，当剪应力达到峰值以后，若继续剪切，则剪应力随剪切位移增加而显著降低，最后达到一个稳定值，该稳定值称土的残余抗剪强度或残余强度，以下式表达：

$$S_r = c_r' + p \operatorname{tg} \varphi_r' \quad (1.0.1)$$

式中 S_r ——土的残余强度，kPa；

c_r' ——残余粘聚力（一般 $c_r' \approx 0$ ），kPa；

φ_r' ——残余内摩擦角，(°)；

p ——垂直压力，kPa。

正常固结粘土亦有此现象，但不很明显，如图 1.0.1。

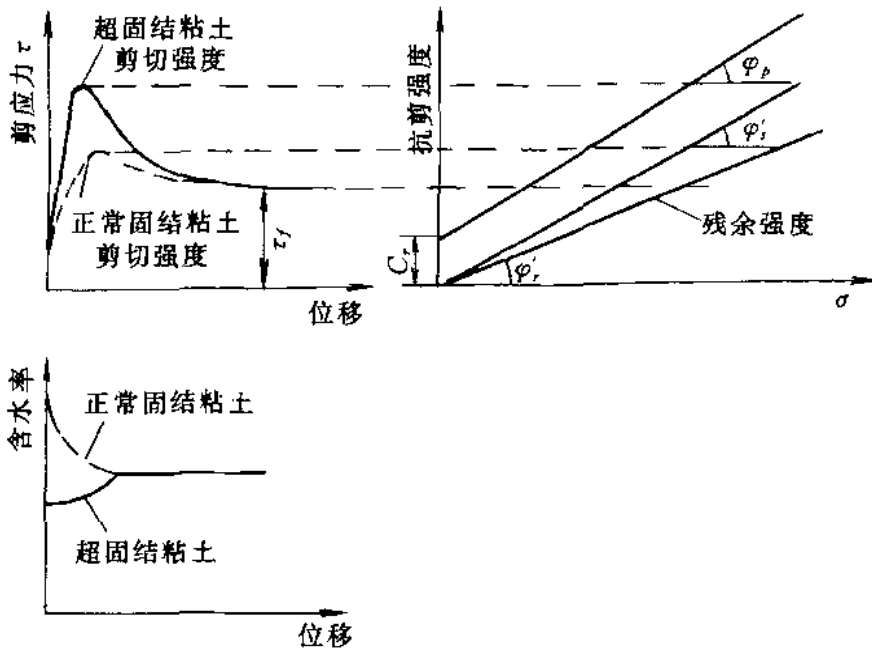


图 1.0.1 剪应力与剪切位移关系曲线

3.1.1 室内测定残余强度的仪器和方法。目前主要有三轴压缩试验、环剪仪作环形剪切试验和用直剪仪作排水反复直接剪切试验

(以下简称反复剪)三种方法。反复剪试验,存在一定的缺点,例如,每次反复后,有一小峰值出现,剪切面可能呈泥浆状。但它简单易行,对多数土均能测得较好的成果,因此,国内外应用较广,本规程也推荐采用直剪仪作反复排水剪试验。

本规程规定在进行第二次,第三次……剪切时,不卸除垂直荷载,将剪切盒下盒拉回原位置。因此,必须将原仪器的推力设备进行改装,使其能推进又能拉回;或另制造一反推设备,待一次剪切完成后,用反推设备将剪切盒下盒推回至原位置。

4.1.3 研究表明:扰动试样的残余强度通常与原状试样的残余强度相接近。对同一种土,不管是正常固结的或超固结的,只要是在同一有效压力作用下,其残余强度相同, φ' 为一常数。它只与土的性质有关,而与应力历史无关。因此,当选取原状土样有困难时,可取扰动土进行试验。

但软弱夹层的滑裂面或滑坡层面是构成剪切破坏的产物,它曾经受过较大的剪切位移,加之在漫长的地质历史时期中地下水的长期作用,使滑裂面或滑坡面上土的颗粒组成以及矿物、化学成份都有别于滑面上下土层,故选取扰动土样时,应取滑裂面或滑坡层面上1~2mm的土进行残余强度试验。否则扰动土的残余强度指标可能大于滑裂面或滑坡层面实际强度值。

经过对土(岩)地基软弱夹层或滑坡带土体的调查了解,夹层和滑动层面上土的含水率往往比夹层上下层的含水率高10%左右。当确定制备含水率时,应注意这个实际情况。本规程建议扰动土的制备含水率采用该土(泥化夹层和滑动层面)的液限为宜。

4.2.5 剪切速率对测定土的残余强度具有明显的影响。土达到残余强度时,其剪切面上的孔隙压力已充分消散,土颗粒已完全定向排列,故测定残余强度的方法只能是最大剪切位移下的慢剪试验。

关于剪切速率对土的残余强度的影响问题。根据对粘土、高塑性粘土、粉质粘土及粉质土的液限试样和粉质粘土的原状样进

行不同剪切速度的对比试验，其成果见图 4.2.5。从图中可以看出：粉质土、粉质粘土、粘土及高塑性粘土的剪切速度的临界值分别为 1.0、0.06mm/min 和 0.02mm/min。

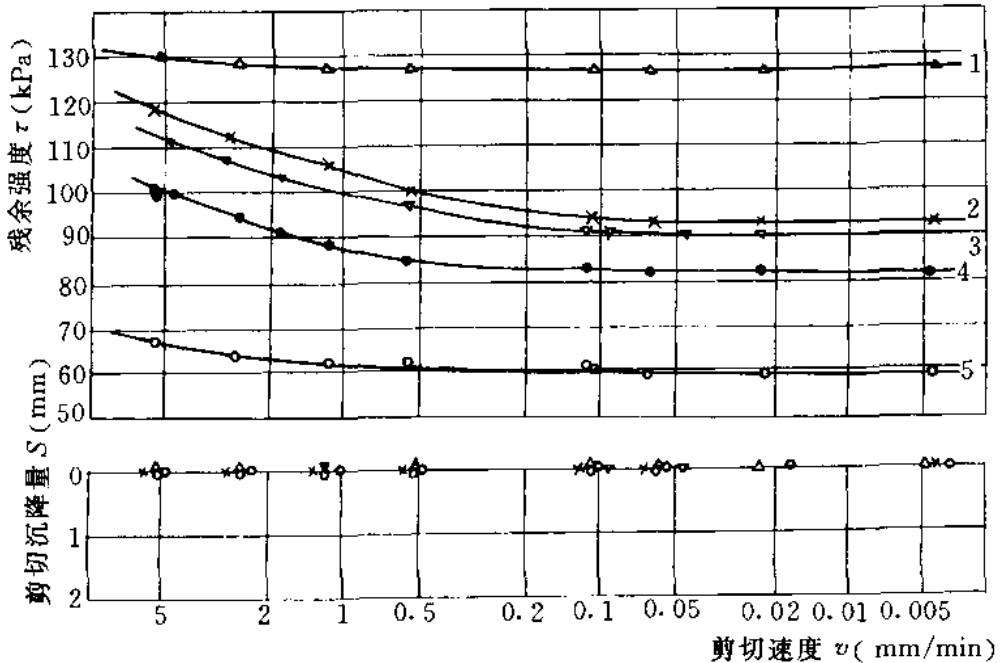


图 4.2.5 剪切速度与残余强度和剪切沉降量关系曲线

1—江苏粉质土；2—广西 8301-7 粉质粘土；3—葛洲坝
夹层土（原状样）；4—华东粘土；5—东北粘土

（注：试样的垂直压力均为 200kPa）

当剪切速度采用 0.02mm/min 时，对于每一剪切行程的位移量为 8~10mm 的试验，约需 8~10h 左右。为了试验室工作进行的方便，可间隔一定时间进行下一次剪切（即可使试验在白天进行）。

4.2.6 试验的总剪切位移多大才能测到稳定的强度值的问题进行过研究。斯肯普顿 (Skempton) 认为在室内试验时，过峰值强度后继续剪切到位移达 25~50mm，强度可降低到稳定残余值。诺布尔 (H.L. Noble) 用内径 4.8cm 的试样在直接剪切仪上以 0.004mm/min 的速率进行试验，每次剪切位移 2.5mm，再推回，如此反复剪 10~15 次，总位移约为 50~75mm，也可达到残余值。

近年来，长江科学院在对软弱夹层的试验中，使用直径为

6.4cm 的试样，在直接剪切仪上以 $0.0224\text{mm}/\text{min}$ 的剪切速率作反复直接剪切试验，试验成果表明：不同颗粒组成的试样，所需要的总剪切位移量是不一样的，一般来讲粘粒含量大的试样，需要的总剪切位移量小，反之亦然，如粉质土、粉质粘土一般需要 $40\sim 48\text{mm}$ ，粘土一般需要 $24\sim 32\text{mm}$ 。一般反向剪切的剪应力大于正向剪切的剪应力，见图 4.2.6。其原因在于反向剪切破坏了已定向排列的土颗粒，使得土的强度增高。因此，不能将反向剪切的位移量计入达到残余强度时所需要的总剪切位移量中。

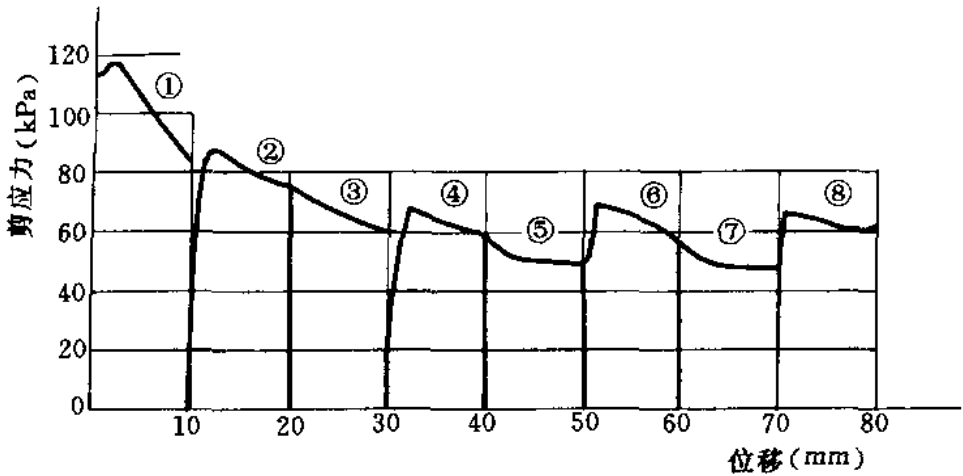


图 4.2.6 反复剪切试验的应力和位移曲线

①、③、⑤、⑦—正向剪切；②、④、⑥、⑧—反向剪切

自由膨胀率试验

SL237—024—1999

1.0.2 本试验的目的是测定粘质土在无结构情况下的膨胀潜势，初步评定粘质土的膨胀性。

3.0.1 自由膨胀率试验中的试样制备是非常重要的，首先是土样过筛的孔径大小。用不同孔径过筛的试样进行比较试验，其结果是过筛孔径越小， 10cm^3 体积的土越轻，自由膨胀率越小。为了取得相对稳定的试验条件，本规程规定采用 0.5mm 过筛。

3.0.3 试样用体积法量取，紧密或疏松会影响自由膨胀率的大小，为消除这个影响因素，规定采用漏斗和支架，固定落距一次倒入的方法，并将量杯的内径统一规定为 20mm，高度略大于内径，便于在装土刮平时避免或减轻自重的影响。

3.0.4 粘土颗粒在悬液中有时有长期混浊的现象，为了加速试验，采用加凝聚剂的方法，但凝聚剂的用量和浓度实际上对不同土类有不同反映，为了增强可比性，本规程统一规定采用浓度 5% 的氯化钠溶液 5ml。

3.0.5 搅拌的目的是使悬液中土粒分散，充分吸水膨胀。搅拌的方法有量筒反复倒转和用搅拌器上下来回搅拌两种，前者操作困难，工作强度大；后者有随搅拌次数增加，读数增大的趋势，故本规程规定上下各搅拌 10 次。

膨 胀 率 试 验

SL237—025—1999

3.1.1 无荷载膨胀试验规定在有侧限条件下测定土的膨胀变形，且只允许向上单向膨胀。其试样尺寸对膨胀量是有影响的。在统一的膨胀稳定标准下，膨胀量随试样高度增加而减小，随直径的增大而增大，为了与通用的环刀尺寸一致，故规定环刀高 20mm、内径 61.8mm，并在钝口和座底下加工丝扣，用于固定环刀。

3.3.3 膨胀率与土的自然状态关系非常密切，起始含水率、干密度都直接影响试验成果。为了防止透水板的水份影响初始读数，规程中要求透水板先烘干，再埋置在切削下的碎土内 1h，使与试样的湿度大致相同。

4.3.5 有荷载膨胀率试验会发生沉降或胀升两种情况，因此，安装量表时要予以考虑。

4.3.6 有荷载膨胀试验是模拟建筑物地基的上覆压力或某一特定荷载条件下，测定按实际荷载大小和有侧限的膨胀量。因此，根据所要求的荷载，可一次施加或分级施加。一次连续施加荷载是指将总荷载分成几级，一次连续加完，目的是为了为了使土样在受压时有个时间间歇，同时避免荷载太大，产生冲击力；对在较小荷载下膨胀性较强的土，应注意浸水后下端土膨胀挤冒，使压缩仪杠杆失去平衡。因此要随时将压缩仪杠杆调水平。

4.3.7 为了保持试样始终浸在水中，要求注水至土样顶面以上 5mm。为便于排气，可采用逐步加水。

4.3.8 同一种试样，荷载越大，稳定越快；无荷载时，膨胀稳定很慢。因此，有荷载与无荷载的稳定标准有所不同，本规程规定 2h 的读数差值不大于 0.01mm，作为稳定标准。

收 缩 试 验

SL237—026—1999

1.0.1, 1.0.2 收缩试验与缩限试验两者区别主要是目的不相同。收缩试验是测定土的收缩特性，适用的土样状态不同，适用于原状土和击实粘性土的试样；而缩限试验适用于含水率等于、大于液限的扰动土试样。因而，试验方法也不同。

3.1.1 收缩仪多为自制，采用轻金属制成百分表架和托板连在一起的形式，以便整体称量，避免反复装卸试样。

4.0.4 由于收缩试验是测定不同收缩时刻的线缩率及收缩系数，因而根据试样的温度及收缩速率，采用相应的时间进行称量（包括整个装置和试样）。

5.2.1 由于原状土和击实土试样不一定饱和，为符合缩限定义，该指标借绘图法求得，如条文中图 5.2.1。同时，按定义：在收缩过程中，缩限是体积不再变化时所对应的含水率，如图中的 C 点所对应的含水率。但在实际试验中很难确定这一点，因此，通常用 I、Ⅲ 阶段直线延长线的交点 E 所对应的含水率 w'_s 代替。根据试验和计算，含水率小于 w'_s 后，土体减小的收缩率仅为总收缩率的 5%~10%；太沙基也曾测得这种附加的收缩率小于总收缩率的 5%。可见以 E 点代替 C 点的误差是不大的。

膨 胀 力 试 验

SL237—027—1999

1.0.1 膨胀力是粘质土遇水膨胀而产生的内应力。伴随此力的解除，土体即发生膨胀。根据实测，当不允许土体发生膨胀时，有的粘质土的膨胀力可达1600kPa，所以膨胀力的测定很有意义。在室内测定膨胀力的方法有多种，国内外采用最多的是以外力平衡内力的方法，即平衡法。本规程规定采用平衡法。

4.0.3 在平衡法试验中，平衡不及时或施加过量的压力都会影响到土的潜能势的发挥，膨胀力随允许膨胀量的增大而增大。试验资料表明，当允许膨胀量由0.01mm增加至0.1mm，再加载平衡时，膨胀力将提高50%。为了提高试验准确度，允许膨胀量应限制到0.005mm。由于仪器本身变形和测量准确度不够，所以，本规程规定允许膨胀量为0.01mm。

4.0.1 对变形较大的仪器，在施加平衡荷载时应注意使量表指针不要退回到零位或初读数，而是指向与压力相对应的仪器变形位置。

静止侧压力系数试验

SL237—028—1999

1.0.1 静止测压力系数是土体在无侧向变形条件下,有效侧向应力与有效轴向应力之比。静止侧压力系数是用于确定天然土层的水平向应力以及挡土结构物在静止状态时水平向压力的计算。

根据静止侧压力系数的定义,在轴对称试样中 $\epsilon_2 = \epsilon_3 = 0$ 时:

$$K_0 = \frac{\sigma_3'}{\sigma_1'} = \frac{\sigma_3 - u}{\sigma_1 - u} \quad (1.0.1)$$

如果施加在试样上的轴向总应力 σ_1 保持不变,对于饱和土来说,开始时试样上的侧向总应力 σ_3 与 σ_1 之比接近 1,随着排水固结的过程,总应力逐渐转换为有效应力。因此,用总应力表示的比值是逐渐变小的。但在整个试验过程,有效应力的比值基本保持常数,所以用有效应力定义静止侧压力系数。

1.0.2 在进行静止测压力系数测定时,要求主应力方向是水平向和垂直向的,即试样的上、下面和侧面都是主应力面,不存在剪应力。能够用于这种试验的仪器和方法很多,目前应用较多的,按试验方法及仪器设备来分大致有两类:一类是三轴仪及相应的保持试样在加压过程中不发生侧向变形的条件。另一类是侧压力仪,在施加轴向压力后试样不允许发生侧向变形,即轴向应变和体积应变相等,在此条件下试样侧面所承受的压力即为静止侧压力。

根据我国目前的设备,采用侧压力仪进行试验的较多,且有定型的仪器,为此,本次规程修订仅列侧压力仪法。

3.1.1 侧压力仪的原理与密闭受压室 (Cell) 相似。它与三轴仪的差别主要有二:其一是在试验过程中受压室的阀门关闭,液体密闭在受压室中,当增大轴向压力时,由于保持试样侧向不允许变形,受压室中的液体压力也增大;其二是加轴向压力的传压板直径与试样直径相等,试样受力发生压缩后,由于密闭受压室的

容积仍保持不变，试样不可能发生侧向变形，轴向应变等于体积应变。用这种仪器测定静止侧压力，密闭受压室必须密封不漏水。密闭受压室外罩，量测密闭受压室液体压力的管路等装置，在承受压力后不应发生变形，否则将引起试样侧向变形。

3.1.4 侧压力仪用压力传感器量测密闭受压室的液体压力，传感器应有足够的灵敏度，又要有相当的刚度，以免量测时变形较大而引起试样侧向变形。传感器应定期标定，测得电压或电阻与压力之间的关系，求得标定系数。

3.2.4 密闭受压室中的液体，需要用纯水，以免水中溶解的空气使水的压缩性增大，受压后引起试样侧向变形。

4.1.1 试样尺寸。侧压力仪的试样直径一般采用 61.8mm，同环刀尺寸一致。试样的高度与直径之比不宜过大，尤其是粘质土，由于固结时间与试样高度有关，高度太大，所需的时间太长，而且在固结过程中，沿试样高度孔隙水压力大小不等，虽然沿试样高度的平均侧向变形等于零，但是局部会发生侧向应变。试样高度减小，可以减少这种局部发生侧向应变的影响。但高度太小，试样上、下两端透水板摩擦作用对侧压力也会产生影响。根据经验，用侧压力仪测定静止侧压力系数，试样的径高比宜用 1。

4.1.5 本试验方法为排水试验，加荷等级和加荷历时应按 SL237—015—1999 规程 3.3.6 和 3.3.10 的规定施加。

弹性模量试验

SL237—029—1999

1.0.1 对各向同性的纯弹性材料，在外力作用下，变形是纯弹性的，外力卸去后，材料恢复到原有尺寸。通常用简单的拉伸或压缩试验测定其弹性常数 E 。称为弹性模量或杨氏模量。

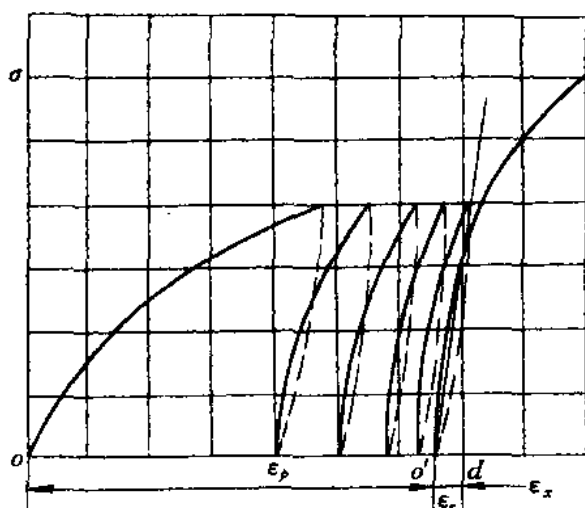
土体不是弹性体，在外力作用下，变形是弹塑性的，当外力卸去后，仍保留一部份残余变形。土体的应力应变关系曲线特征是：加荷和卸荷变形不是同一规律，因此，应力应变之间没有单值关系。卸荷后再加荷，应力应变曲线形成滞回圈，滞回圈随加荷卸荷的次数增加逐渐变窄，交点逐渐提高，如图 1.0.1 所示。

图 1.0.1 中 od 表示总应变， oo' 表示不可恢复的应变即塑性应变 ϵ_p ， $o'd$ 表示可恢复的应变，即弹性应变 ϵ_e ，数学表达式为：

$$\epsilon = \epsilon_p + \epsilon_e \quad (1.0.1)$$

因此，土的弹性模量定义为应力与弹性应变之比。用反复加荷卸荷分离应变的方法作为制定本试验方法的基本出发点。

3.3.1 在弹性模量试验中，由于轴向压力等级较小，仪器系统中活塞与压力室之间摩阻力的影响所占的比重就很大，但目前要准确测定摩阻力有困难，只能



靠对仪器设备的精心维护，尽量将摩阻力减小到最低程度，所以试验前，必须认真检查受压室活塞是否能自由滑动，加荷框架的平衡系统是否灵敏等。建议今后采用压力传感器放在受压室内直接测定对试样所施加的压力，消除仪器系统中摩阻力的

图 1.0.1 加荷卸荷应力应变关系曲线

影响。

4.1.4 K_0 固结的目的和试验方法见SL237—030—1999《土的变形参数试验》的4.3.2条文说明。

4.1.5 压力等级的大小,直接影响试样变形的大小。关于土在不同压力下的变形特性,许多学者指出:土体存在一屈服极限 σ_y ,当作用于土体上的应力小于屈服极限时,土体发生稳定变形,这种变形不会引起土体破坏;反之,则发生不稳定变形,即变形随时间增加,最后土体发生破坏。村山溯郎和柴田彻发现:对数屈服极限和土的含水率 w 关系

是一直线(图4.1.5线1),同时与对数无侧限抗压强度 q_u (= σ_f)和含水率 w 关系的直线(图4.1.5线2)平行,两直线的比值 σ_y/σ_f 约等于0.70,见图4.1.5。从理论上讲,只要 $\sum\Delta p$ 不超过 σ_f 的 $2/3$,土体是不会发生不稳定变形的。但是在小于 σ_y 的范围内,每级压力越大,不可恢复变形所占的比例越大,因此,要分离弹性应变和塑性应变,需要增加加压和卸压的次数。每级压力不宜选择的过大。反之,选择的太小,读数误差又必然增大。根据经验,四级压力累积,一般不超过破坏强度的 $1/3$,所以在本方法中,建议每级压力取试样破坏强度的 $1/10\sim 1/12$ 。对于强度较低的软粘土,可适当减小;对强度较高的土,可适当增大。最好保证试样在每级压力下的应变在 10^{-4} 左右。

4.1.6 当加压等级确定之后,加压卸压的时间间隔实际上是加荷速率问题。在理论上,当土的含水率、应力历史一定时,加荷历时与变形特性通常用流变时间来衡量。如果土的流变时间比试验加荷的历时很长的话,土如同固体一样;反之,土的流变时间与试验加荷的历时相比非常短,土如同液体一样,就是说,加荷卸

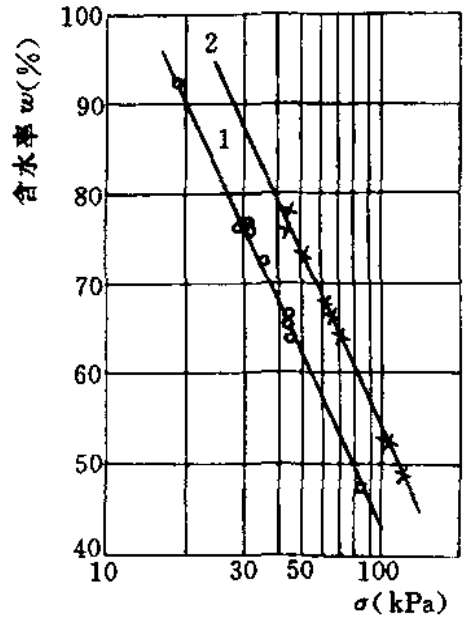


图 4.1.5 强度与含水率关系曲线

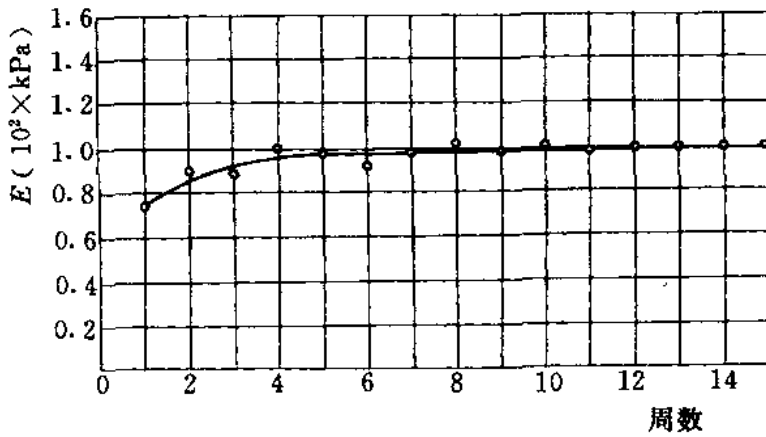
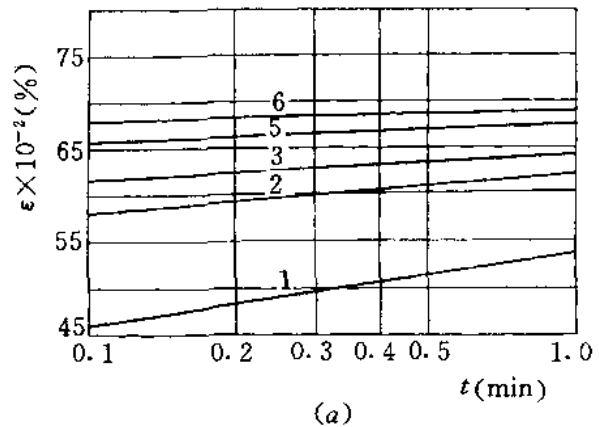


图 4.1.8-1 弹性模量与加荷卸荷次数的关系

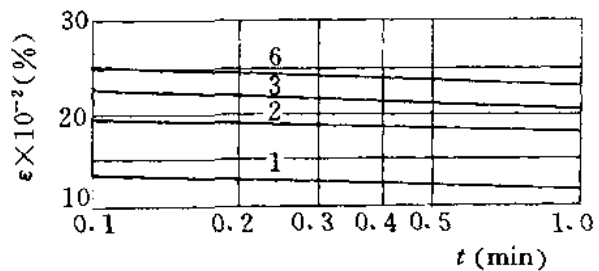
荷的历时越短，试样越能呈现弹性性质。高频振动荷载作用下，测得的土的弹性模量变大，就是这个道理。用三轴仪进行反复加荷、卸荷试验，从满足操作方便所需的最短时间来考虑，本规程建议采用 1min。

4.1.8 随着加荷、卸荷的次数增加，试样的应力应变关系形成一个封闭的、狭窄的滞回圈，用直线连接滞回圈两个端点，其斜率即是弹性模量，它和加荷卸荷次数的关系见图 4.1.8-1。

由图 4.1.8-1 可见：模量随加荷卸荷循环次数的增加而增大，最后趋于一条渐近线。这说明试样的塑性变形与弹性变形相比总是减小的，最后将呈纯弹性变形。根据试验证明：应变与加荷历时和卸荷历时在半



(a)



(b)

图 4.1.8-2 应变与时间关系曲线

(a) 加荷曲线；(b) 卸荷曲线

图 (a) 中的 1, 2, 3, 5, 6—加荷次数；

图 (b) 中的 1, 2, 3, 6 为卸荷次数

对数坐标上成直线关系，见图 4.1.8-2。

从图 4.1.8-2 看出，加荷直线的斜率在第二次再加荷时急剧的减小，而第二次以后的加荷，斜率减小缓慢。而卸荷直线的斜率与次数基本无关。当加荷直线的斜率和卸荷直线的斜率在绝对值上相等，说明滞回圈变为一直线。对砂土来说，一般反复 4~5 次就可以得到；对粘质土，需要更多的反复次数才能达到这个目的。根据饱和软粘土试验，反复 5 次以上，滞回圈两端连线的斜率变化就不大，所以，从实用的观点出发，本规程建议加荷卸荷的反复次数不宜少于 5 次。

土的变形参数试验

SL237—030—1999

1.0.2 由于土体不是弹性体,除了时间效应以外,还具有非线性、弹塑性特性。当前对非线性的土的应力应变关系一般用弹性增量形式表示:

$$\{\delta\sigma\} = [D^e]\{\delta\epsilon^e\} \quad (1.0.2-1)$$

式中, $[D^e]$ 为弹性参数矩阵。该矩阵包括一对参数:弹性模量 E 和泊松比 μ 或剪切模量 G 和体积变形模量 K 。根据弹性理论它们之间的关系如下:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (1.0.2-2)$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\mu)} \quad (1.0.2-3)$$

目前,土的应力应变关系在数学计算模型中,较常采用的是邓肯等人提出的双曲线模型亦即 E 、 μ 模型。但 μ 值在试验中测定比较困难,还缺乏准确测定侧向应变的设备,一般用测定体积变化来进行计算。在研究某些土力学问题时,用 K 和 G 两个弹性参数,即 K 、 G 模型更为方便些,而且 K 、 G 两个值可通过试验直接测定,所以本规程推荐了 K 、 G 参数的测定方法。

采用 K 、 G 模型而进行参数的测定时必须注意:如果土体所处的应力状态,大主应力是水平方向的,则测定剪切模量 G 时,应该进行有效平均主应力保持常量的三轴伸长试验。

3.0.1 为了模拟天然土层的应力状态,需要进行 K_0 固结时,采用应力控制式三轴仪较为方便。

对于活塞面积比试样面积小的压力室,在进行伸长试验时,需要在加荷帽和活塞、活塞和测力计(应变式)或活塞和框架(应力式)之间增设钩拉装置,见图 3.0.1。同时必须将压力室与升降

机台座用夹具夹住，这样才能有效地施加轴向压力。

4.2.1 施加反压力的目的是为了使原状试样恢复原来的饱和状态。除了这个目的外，试样在剪切过程中产生剪胀时，往往产生负的孔隙水压力，施加反压力，使试样中预先存在一定的正孔隙水压力，在孔隙水压力的测定中就比较准确和方便。

反压力的施加方法，可参考 SL237—017—1999 规程中规定的方法施加。

4.3.2 K_0 固结。如果地壳没有遇受地质上的变动，沉积层的形成仅在垂直方向发生变

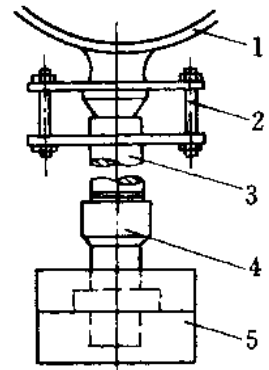


图 3.0.1 钩拉装置与试样帽和量力环连接图
1—量力环；2—连接架；
3—活塞；4—三脚爪；
5—试样帽

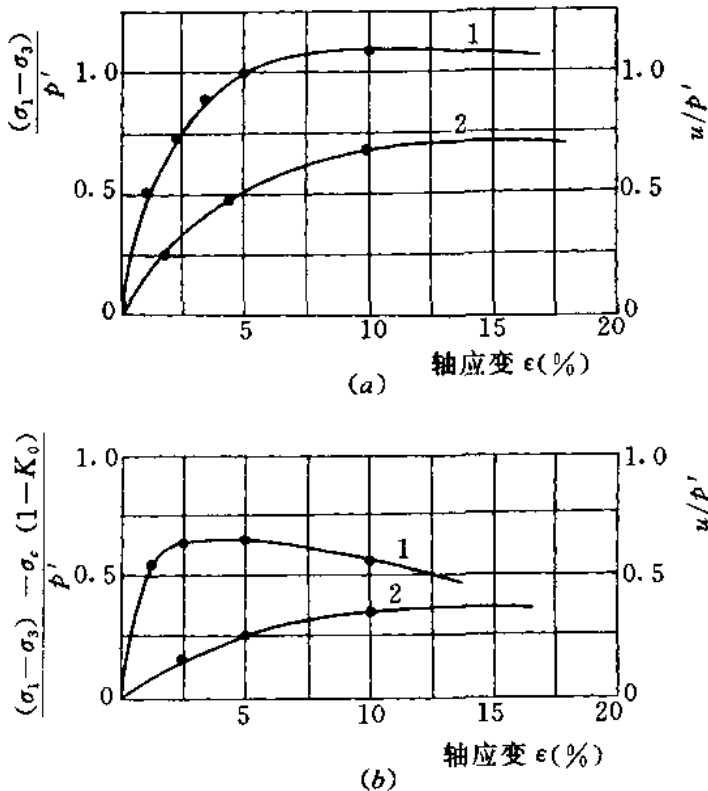


图 4.3.2 不同应力状态的应力应变关系

(a) 等压固结应力应变关系曲线；

(b) K_0 固结应力应变关系曲线

1—主应力差线；2—孔隙压力线

σ_c —固结压力； p' —平均有效应力； u —孔隙水压力

位，因而天然地层中土体处于 K_0 条件，即仅在垂直方向压缩，无侧向变形的应力状态。各向等压固结和 K_0 固结比较试验表明：初始应力状态不同，应力应变关系也不相同。 K_0 固结的试样，主应力差在应变增加的初始阶段急剧增加，随后就很快降低；而各向等压固结的试样，主应力差随应变缓慢地增加。从孔隙水压力的变化来看， K_0 固结的试样比各向等压固结的试样小得多。这可能是在 K_0 条件下，主应力差产生的孔隙水压力在固结过程中已有一定程度的消散，所以，不等向应力历史的影响，使剪切时孔隙水压力系数降低，见图 4.3.2。

单轴抗拉强度试验

SL237—031—1999

1.0.1 粘土的单轴抗拉强度是指试样只在轴向拉力作用下的断裂强度，可供分析土体表层开裂时参考使用。例如，土坝顶部产生纵向裂缝或横向裂缝的问题，可以根据计算的坝体拉应力值对照单轴抗拉强度来判断是否会产生开裂的可能性。在抗拉强度前冠以“单轴”两字是因为抗拉强度和土的抗剪强度一样，随着土体所受的应力状态不同而变化，应力状态不同，土的抗拉强度也不同，因而，在研究土体内部是否有开裂的可能性时，需要进行三向受力状态下的抗裂强度试验。由于三向应力条件下的抗裂强度试验中橡皮膜影响，塑性断裂时应力应变计算问题尚未解决，所以本试验未列三向应力条件下的抗裂强度试验，而仅列单轴抗拉强度试验。

1.0.2 属于单轴抗拉强度试验的方法很多，有长方形等截面条形试样水平放置承受轴向拉力的卧式试验；有圆柱形试样直立放置承受轴向拉力的立式试验；有土梁法及多种劈裂法。前两种方法的应力和应变是直接计算的，后几种方法的应力计算是间接的，要基于各向同性均质、抗压一致的线性弹性理论来计算。这样，由于土体的性质和上述假定的偏离，就不可避免地给应力计算带来一定的误差。

卧式试验有底部摩擦的影响问题，立式试验有试样自重影响问题。试验研究证明：卧式试验和立式试验的成果差别不大，因而本规程将两种方法并列供试验者选用。

3.1.1 立式单轴抗拉强度试验的仪器设备与三轴仪基本相同，但需要增加钩拉装置和夹具。活塞下端与试样帽的连接方式主要有两种：一种是插销钩连，如图 3.1.1 (a)。这种装置在试样帽中间有一定的空间，表面上开有插槽。活塞下端插销的平面形状和插

槽形状相同而略小，插销通过插槽插入试样帽后，适当的旋转一个角度就可以把活塞和试样帽钩连起来。为了适应试样帽有时略有不平的情况，插销可以绕着活塞轴作相应的转动。这种钩连方法比较灵活，但插销与试样帽之间要很好配合。另一种是旋紧固定方式，如图 3.1.1 (b)。活塞下端车有螺纹，试样帽中间车有螺纹孔，两者对准旋紧，形成刚性连接。这种连接可对保证轴向受力，避免偏心拉伸，但要求试样平直，否则试样可能承受弯曲初应力，使抗拉强度降低。

3.3.2, 4.3.2 抗拉强度试验中，扰动土试样的制备要考虑试样的受力情况。在规程中介绍的卧式方形截面制样模考虑了试样受拉的条件。这种制样模简单，加工方便。但是，对立式圆柱试样压样后仅是试样的初胚，需要根据所用的试样尺寸进行切取，对卧式试样，在制样模中，一次压制成试样。目前国内不少单位开展抗拉强度试验，因此，对制样模的设计也进行了研究。图 3.3.2 是一种圆形截面制样模的示意图。这种制样模的特点是压样后即成试样，省略切样步骤。截面尺寸根据试样尺寸设计。

3.3.4, 4.3.4 试验时必须将试样帽和不透水底板与试样牢固粘结。胶结的粘合剂很多，目前国内常用的有 502 粘合剂和环氧树脂等。以 502 粘合剂在使用上较为方便。根据一些资料表明：502 粘合剂虽硬结很快，但强度的增长仍需一段时间。对单轴抗拉强度比较大的试样养护一段时间是必要的。同时，扰动土制备的试样，其力学性质和养护时间的长短有关。因此，单轴抗拉强度试验的试样的养护时间也要和其他试验的试样养护时间相一致。

3.4.1 在试验成果整理中有两个问题需要加以说明：一是破坏荷载的选择；二是轴向应力和应变值的计算。

在应变控制式单轴抗拉强度试验中，量力环量表读数的最大值作为破坏点，其意义是明确的，但不容易读取，要在接近破坏时密切观察量表的变化。在应力控制式单轴抗拉试验中所加荷载是明确的，但破坏荷载不明确，因为试样完全有可能在比最后一级荷载较小的荷载作用下断裂破坏。所以本试验规定一般可取最

后两级荷载的平均值作为破坏荷载。为了提高确定破坏荷载的准确度，要求在接近破坏时每级荷载要小。若遇到最后第二级荷载施加后，试样的变形已不易稳定，在施加最后一级荷载时，试样很快断裂，连第一分钟的变形也来不及读取，此时可取最后第二级荷载作为破坏荷载。

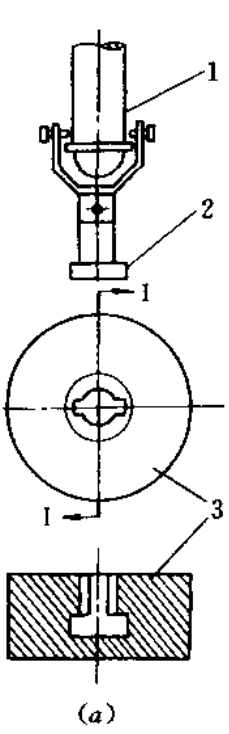


图 3.1.1 钩拉装置

(a) 插销式；(b) 旋转式

1—活塞；2—十字铰；3—试样帽；4—螺杆

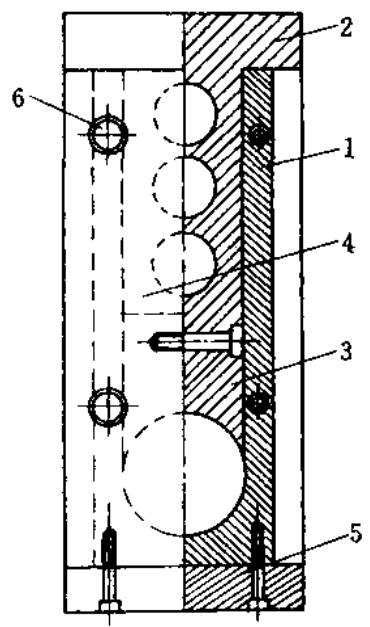
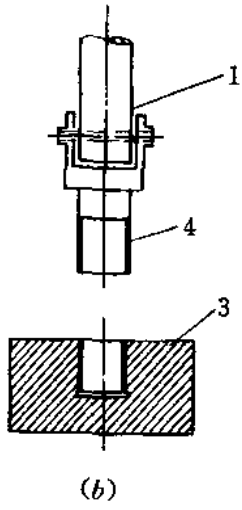


图 3.3.2 抗拉
试验制样模

1—模槽；2—压块；
3—压块头；4—盖板；
5—螺钉；6—夹紧螺丝

在计算轴向应力时，考虑了断裂面以上的试样和试样帽的质量，因为有些土的抗拉强度很小，这个质量对抗拉强度值的计算影响较大。对抗拉强度较大的试样可以忽略这种影响。

在计算轴向应力时没有进行试样的断面校正，因为一般单轴抗拉强度试验，试样都是脆性断裂破坏，试样的轴向应变小于1%，试样的变化微小，故不进行修正。

虽然接近破坏时试样各部位的变形是不均匀的，计算应变值时考虑到总变形不大，所以，仍采用试样初始高度计算应变值。极

限断裂应变值是工程上常用的一个指标，但由于断裂时的变形值不容易测定，因此，可以根据试样的应力应变关系曲线的趋势延伸到断裂强度处，其相应的应变值即为断裂应变值。

振动三轴试验

SL237—032—1999

1.0.1 振动三轴试验是室内进行土的动力特性测定时较普遍采用的一种方法。在室内进行土的动力特性试验，主要包括两方面的内容：一是确定土的动强度，用以分析动态作用条件下地基和结构物的稳定性，特别是砂土的振动液化问题；另一是确定剪切模量和阻尼比，用以计算土体在一定范围内引起的位移、速度、加速度或应力随时间的变化。

振动三轴试验是应用圆柱形试样，在轴向与侧向均等或不均等压力下，通过轴向等幅周期循环荷载作用，测定应力、应变及孔隙水压力的变化，从而求得土的动力参数。试验过程中，不仅要将现场土体的静应力状态进行模拟，而且还要将实际地震波按震级大小进行简化模拟，按动荷载施加。

1.0.2 采用单向激振式三轴仪试验时，为了模拟土体实际应力状态，必须用饱和试样进行试验，试验过程中需要测定动孔隙水压力。因受仪器性能限制，本试验适用于饱和的砂土、粉土和粘土等细粒土。对于抗震分析来说，由于震前的试样在静力作用下已经固结，而在震动作用下，又因作用时间很短，相应于在基本不排水条件下施加了动剪应力，故本试验建议在固结不排水条件下进行。

3.1.1 振动三轴仪按产生激振力的激振方式不同，分为电磁激振式、惯性力激振式、气动力激振式和液压激振式，每种类型又有单向激振和双向激振。目前较多采用的是电磁单向激振式。通过多年来的发展，研制成功了微机控制和数据采集的电磁式振动三轴仪。本试验是以电磁单向激振三轴仪为对象进行编写。

3.3.1, 3.3.2 振动三轴仪在使用前应调整、仔细标定。孔隙压力量测系统不漏水不漏气，无气泡残存；加压系统的压力应保持稳定；各活动部件应灵活并进行摩擦修正。对激振部分要求波型

良好，拉压两半周的幅值应基本相等，相差应小于 $\pm 10\%$ ；振动频率在 $0.1\sim 10\text{ Hz}$ 范围内可调；振动荷载在大应变时应基本稳定，增减变化小于 $\pm 10\%$ 单幅值；传感器、应变仪和示波仪均应满足说明书调试要求。函数记录仪的起始相位差必须预先消除。仪器设备的各组成部分均应定期标定；微机控制的各种部件应连接准确。

4.1.1 试样直径。本规程规定采用 39.1 和 50 mm 两种，主要符合国内仪器情况。试样的允许粒径分别为 2 mm 和 5 mm ，个别超径颗粒的最大尺寸不能大于试样直径的 $1/5$ 。试样的高度以试样直径的 $2\sim 2.5$ 倍为宜。

4.1.3 扰动土试样制备要求成型良好，密度均匀，完全饱和，结构状态尽可能接近现场情况，试样制备是整个试验中带关键性的环节。

4.1.4 当前砂样成型均采用样模（对开或三瓣）、抽气（使橡皮内膜紧贴模壁，保证形状均匀，尺寸合格），并施加负压（使试样挺立，便于拆模和量取试样尺寸）等三个措施，效果良好。量取试样直径时，一般取上、中、下三个数据，必要时考虑橡皮膜厚度的校正。

为了达到密度均匀，常用在一定试模体积内装相应干砂量（取决于控制的密度）的方法控制。当干装或湿装时，常将按预定密度和体积计算称取的干砂或湿砂分成 $5\sim 6$ 等份，每份填装于同密度相应的体积内，最后进行饱和。当直接填装饱和砂时，常用两种方法：一是将称取的砂样浸水饱和，再按一定方法（取决于要求的密度）正好装满预定的体积；另一是直接从盛有已备妥的饱和砂土的量杯中取砂装样，称装样前后量杯的质量，计算实际装入的干砂量。

对于一组试验中的各个试样，固结后的密度应基本接近于要求的控制密度。

4.2.1~4.2.4 为了使试样获得较高的饱和度，常用的方法有以下几种：①用脱气水制样；②将砂煮沸；③抽气饱和；④用脱气

水循环渗流；⑤采用二氧化碳和反压力饱和。这些提高饱和度的方法应该配合使用。采用二氧化碳饱和是近年来发展的一种新方法，它主要利用二氧化碳比空气重，易溶于水的特性。这样，可以在安装好试样后，自下而上连接通入二氧化碳，使其尽量排除试样中可能残留的空气，接着再自下而上通入脱气水。此时，二氧化碳溶于水，原先由二氧化碳所占据的孔隙即可由水代替，达到饱和的目的。反压力饱和是预先向试样内施加一定的压力，使残留在试样中的气泡压缩变小以致溶解于孔隙水中，达到增大饱和度的目的。

4.5.1 对于动强度，因为有时间因素的影响，通常定义为在一定动应力重复次数 N_f 下，产生某一指定破坏应变 ϵ_f 所需的动应力。如果 N_f 值可以按 H. B. Seed 对不同震级提出的等效循环次数来确定的话，即对 7、7.5 级和 8 级地震分别取 10 次、20 次和 30 次，那么破坏应变的标准不同，相应的动强度也就不同。可见，合理地确定这个破坏应变是讨论动强度的基础。但是破坏应变这个概念具有两方面的含义：一是试样达到真正破坏时相应的应变；一是从工程对象所能允许经受的破坏应变。前者从研究土性的变化出发，后者从研究工程对象稳定性出发。当然土体达到破坏时，由它做成的构筑物或地基自然发生破坏，所以上述两种含义基本一致。但是，土在各向不等压固结情况下受动荷作用时，变形常连续增长，而土体并无明显破坏的情况。此时，为了在设计上合理采用动强度指标，最好将二者联系起来确定不同建筑物设计时应该取用的破坏应变标准。为此，试验应提出不同破坏应变标准时的动强度曲线以供不同的建筑物设计时分析应用。对饱和试样，一定的破坏标准自然同一定的孔隙压力相联系。

通过数年来的试验实践，在选择破坏标准时很少用极限平衡条件来评定土体抗震稳定性，故本试验中没有列极限平衡标准。

4.6.2 本试验规定动弹性模量和阻尼比的测定是在不排水条件下施加动荷载，但其前提条件是在施加动荷过程中，试样上的有效应力不改变。因此，振动次数不宜过多，否则产生孔隙水压力

使测得的动弹性模量偏低。本规程没有具体规定振动次数，一般是低于 10 次。采用一个试样进行试验时，由于试样在前一级动荷振动预定次数 N 时，将引起孔隙水压力的一定发展，此时进行第二级动荷下的振动，该孔隙水压力将影响第二级动荷下的变形，也就是每一级动荷下的变形将受到前面各级动荷的累积影响，故本规程没有列入一个试样多级加荷的试验方法。但对粘性土，这种影响较小，可允许采用一个试样逐级试验。

5.1.4~5.1.5 在整理动强度的试验成果时，首先应对一定的密度、一定的固结比、不同侧向压力，绘制达到破坏标准时的循环次数与动剪应力关系曲线（如正文图 5.1.4），然后，在此关系曲线的基础上，根据不同要求对土的动强度成果进行整理。由于土的动抗剪强度与静抗剪强度不同，不仅与法向应力大小有关，而且与振次、初始剪应力有关，所以在整理试验成果时，采用绘制某一振次下不同初始剪应力比时的总剪应力与法向应力关系曲线（如正文图 5.1.5），由此，确定给定振次时土体中任一面的动强度。

5.1.6 目前，砂土液化试验的结果，常用液化应力比同达到液化标准时的循环振次 N 的关系表示。对于不含粘粒的砂土，此种关系曲线表明：在同一固结应力比下，不管 σ'_0 的大小，试验点基本落在同一条 $\sigma_d/2\sigma'_0 \sim N_f$ 曲线上。这说明在通常的固结压力范围内，液化应力比与循环振动次数有关。与固结压力无关，利用这一特点，在某一固结应力比下，可只选用一个侧向固结压力进行液化试验。

5.2.2 地震荷载作用时，土体上反复作用着剪应力，使土体产生动应变，而土具有非线性和滞后性，在一个循环振动周期内的应力应变关系曲线，将是一个狭长的封闭滞回圈，如正文图 5.2.2。对于这种特性，广泛采用等效割线动弹性模量和阻尼比来表达土的应力应变关系。在振动三轴试验中，施加轴向动应力，测定轴向动应变时，同样可以绘出每一周的滞回曲线，以此求得动模量和阻尼比。振动三轴试验不适用于小应变范围。需要求小应变范围内的动弹性模量和阻尼比时，应采用共振柱试验。

共振柱试验

SL237—033—1999

1.0.1 共振柱试验是用圆柱状或圆筒状试样以不同频率的激振力顺次使试样振动，测定其共振频率，以确定弹性波在试样中传播的速度，从而计算动剪切模量和动弹性模量。最常用的共振柱是施加扭转激振力，确定剪切波速。即可计算试样的剪切模量。

3.1.1 共振柱仪按其约束条件分为一端固定另一端自由和一端固定另一端用弹簧和阻尼器支承两种型式，如图 3.1.1。不论哪一种型式的共振柱仪都是由三部分组成：①压力室和施加固结压力的加压系统；②激振器及调节振动频率和振动力大小的激振系统；③位移、速度或加速度传感器及记录振幅变化的量测系统。

4.3.1~4.3.6 激振器、位移传感器、加速度传感器都放在压力室中，安装在水面以上可以上下移动使之与试样接触但不能扭转的圆盘上。试样用橡皮膜包扎安装在水面以下，侧向压力和轴向压力都用压缩空气施加。轴向压力与侧向压力可以不相等。如果激振器和传感器都安装在试样顶端，但试样的顶端自由，轴向压力和侧向压力相等，即只能在各向等力作用力下试验。

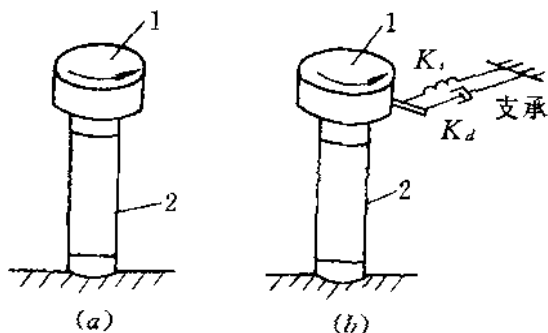


图 3.1.1 共振柱型式示意图

(a) 一端固定一端自由；

(b) 一端固定一端弹簧阻尼器支承

1—附加质量；2—试样

4.4.4, 4.5.2 共振柱试验测定阻尼比，也有两种方法即自由振动和稳态强迫振动，常用的是自由振动法，即在试样自由的一端先施加扭转激振力，然后迅速切断电源，释放扭力，使试样自由振动。由于阻尼作用，扭转振幅越来越小，最后停止振动，振动

的衰减曲线见图 4.5.2。若用稳态强迫振动，则可按本规程 4.4.4 和 4.4.5 规定测定。

5.0.1, 5.0.2 计算式中的无量纲频率因数 β_s 、 β_L 分别表示扭转振动和轴向（纵向）振动时的试样和其顶部附加质量的惯性矩的比值 I_θ/I_t 和质量比值 m_e/m_t 。其推导如下：

1 对一端固定一端自由的共振柱，根据动力平衡条件及边界条件解圆柱发生扭转振动的波动方程，得出在振动时试样顶端的扭转角 θ_t 对静力矩扭转角 θ_s 的放大倍数为：

$$\frac{\theta_t}{\theta_s} = \frac{\frac{V_s \sin \frac{\omega H}{V_s}}{\omega H}}{\cos \frac{\omega H}{V_s} - \frac{I_t}{I_\theta} \frac{\omega H}{V_s} \sin \frac{\omega H}{V_s}} \quad (5.0.1-1)$$

式中 V_s ——剪切波速，cm/s；

θ_s ——静力扭矩 M 施加于圆柱试样顶端时的扭转角

$$\left(= \frac{MH}{GI_\theta} \right)。$$

由于圆柱体发生共振时，在无阻尼条件下放大倍数无限增大，因此，共振时的圆频率 ω_n 应满足下式：

$$\frac{\omega_n H}{V_s} \operatorname{tg} \frac{\omega_n H}{V_s} = \frac{I_\theta}{I_t} \quad (5.0.1-2)$$

若用 β_s 表示 $\frac{\omega_n H}{V_s}$ ，且 β_s 的数值较小可近似取：

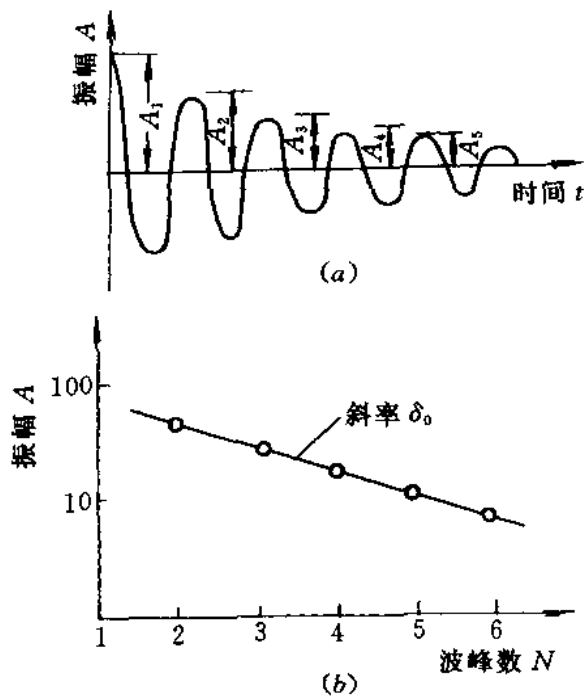


图 4.5.2 自由振动振幅衰减曲线

(a) 振幅随时间的衰减；

(b) 振幅对数随波峰数的衰减

$$\beta_s \operatorname{tg} \beta_s \approx \beta_s^2 = \frac{I_\theta}{I_t} \quad (5.0.1-3)$$

2 对一端固定一端有约束的共振柱, 根据试验资料得知, 仪器阻尼系数对确定剪切模量没有很大影响。在此情况下试样发生共振时的圆频率应满足下式:

$$\frac{\omega_n H}{V_s} \operatorname{tg} \frac{\omega_n H}{V_s} = \frac{I_\theta}{I_t - \frac{k_s}{(2\pi f)^2}} \quad (5.0.1-4)$$

式中 k_s 为弹簧系数 [$= (2\pi f_0)^2 I_t$], 见本规程“附 a”。

根据式 (5.0.1-3), 则得:

$$\beta_s \operatorname{tg} \beta_s = \frac{I_\theta}{I_t} \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{f_0}{f_n}\right)^2\right]} \quad (5.0.1-5)$$

3 对于轴向振动, 因试样顶部不附弹簧, 则 $k_s=0$, 故:

$$\beta_L^2 = \frac{m_0}{m_t} \quad (5.0.2)$$

式中 m_0 、 m_t ——试样的质量和试样顶部附加物的质量, g。

5.0.3 规程(5.0.3-1)式是由试样端部用一个弹簧和一个阻尼器表示的单自由度质点振动系统得出的。对试样顶部有激振器和传感器的振动系统, 振动系统的质量应为试样质量 m 和试样顶部附加物质量 m_t 的总和。这样需对试样的对数衰减率给予修正。根据阻尼比的定义, 设未修正阻尼比 λ , 修正的阻尼比为 λ' , 则:

$$\frac{\lambda}{\lambda'} = \sqrt{\frac{m + m_t}{m}} = \sqrt{1 + \frac{m_t}{m}} \quad (5.0.3-1)$$

将试样质量换算成等效的集中质量 $0.405 m$, 则式 (5.0.3-1) 改为:

$$\lambda = \lambda' \sqrt{1 + \frac{m_t}{0.405m}} \quad (5.0.3-2)$$

对扭转振动的试样, 也可用相同的修正值:

$$\lambda = \lambda' \sqrt{1 + \frac{I_t}{0.405I_\theta}} \quad (5.0.3-3)$$

冻土含水率试验

SL237—034—1999

1.0.1 冻土含水率的大小与冻土的物理、力学、热学等一系列性质有密切关系。含水率大的土层，在冻结（或融化）过程中，将产生大的冻胀或融沉，对工程的危害就大。因此，在冻土地区的工程实践中，往往用含水率这一指标，对冻土进行冻胀性和融沉性的评价和分类。

1.0.2 联合测定法是采用一个试样，同时测定密度和含水率两个指标。这种方法对冻土更为适用。由于冻土的结构极不均匀，用一般方法分别取试样测定冻土的含水率和密度，往往使这些指标间彼此不协调。用联合测定法同时测定含水率和密度，这样就能克服分别测定时存在的缺点，使试验资料彼此协调。

联合测定法是通过量测已知质量的试样所排开水的体积来求得容重（或密度），并利用颗粒比重来计算含水率。在计算中取水的密度为 $1\text{g}/\text{cm}^3$ ，温度对水的密度的影响可以忽略不计。

联合测定法只适用于易分散的层状和网状结构的粘质土和砂质土。

3.3.1 由于冻土结构很不均匀，在不同部位和不同时间，含水率变化很大。为了使试验结果准确可靠，应选择具有代表性的试样，且试样质量应较多，故规程规定试样不宜小于 50g。

关于平行试验差值。由于冻土中冰、水成分分布极不均匀，其平行试验差值往往比融土的大。对于整体状结构的冻土，平行试验差值绝大多数在 3% 以内，只有个别试样超过 3%。因此，参照一般土含水率平行差值的要求，确定了冻土含水率试验平行差值的要求，如正文表 3.3.1。

3.3.2 平均试样法是将土样用四分法取出 1000~2000g 试样，并使其融化，搅拌成糊状稠度。如果试样过干可加水，过湿可将多

余水吸出，这对计算冻土总含水率没有影响。

关于层状和网状结构的冻土，若采用一般取样方法进行试验，当含水率小于液限时，其平行试验的差值一般在5%，个别的达到10%以上；对于含冰层土，其平行试验差值一般均超过10%，有的竟达到20%。因此，对于层状和网状结构的冻土必须采用平均试样法，其平行差值可控制在1%。

3.4.1 平均试样法测定含水率的计算公式如下。

试样干土质量：

$$m_d = \frac{m_2}{1 + 0.01w_n} \quad (3.4.1-1)$$

试样的含水率：

$$w = \left(\frac{m_1}{m_d} - 1 \right) \times 100 \quad (3.4.1-2)$$

将式(3.4.1-1)代入式(3.4.1-2)中得：

$$w = \left[\frac{m_1}{m_2} (1 + 0.01w_n) - 1 \right] \times 100 \quad (3.4.1-3)$$

式中 m_s ——试样干质量，g；

m_1 ——冻土试样质量，g；

m_2 ——调成糊状稠度后试样总质量，g；

w_n ——糊状稠度时试样平均含水率，以小数计。

4.3.7 当试样完全融化并呈松散状态后，筒中水面下降，这时应补充加水至虹吸管以上，以便测定土颗粒的排水体积。

4.4.1 联合测定法含水率计算公式的推导。

土颗粒体积：

$$V_s = \frac{m - m_w}{\rho_w G_s} \quad (4.4.1-1)$$

土颗粒在水（排液筒）中的质量：

$$V_s(G_s - \rho_w) = m_3 - m_1 \quad (4.4.1-2)$$

联立式(4.4.1-1)、式(4.4.1-2)可解得 m_w 为：

$$m_w = \frac{G_s m_1 + m(G_s - \rho_w) - G_s m_3}{G_s - \rho_w} \quad (4.4.1-3)$$

根据含水率定义：

$$w = \frac{m_w}{m - m_w} \times 100 \quad (4.4.1-4)$$

将式 (4.4.1-3) 代入式 (4.4.1-4)，即可得：

$$w = \left[\frac{m(G_s - 1)}{(m_3 - m_1)G_s} - 1 \right] \times 100 \quad (4.4.1-5)$$

式中 V_s ——土颗粒体积， cm^3 ；

m_w ——试样中水的质量， g ；

m ——试样质量， g ；

G_s ——土颗粒比重，可实测或采用经验值，砂为 2.66，粘质砂土为 2.70，砂质粘土为 2.72，粘土为 2.74；

m_1 ——筒加水质量， g ；

m_3 ——筒、水和土颗粒质量， g ；

ρ_w ——水的密度， g/cm^3 。

冻土密度试验

SL237—035—1999

1.0.1 冻土密度是冻土的基本物理指标之一。它是冻土地区工程建设中计算土的冻结或融化深度、冻胀或融沉、冻土热学和力学指标、验算冻土地基强度等所需的重要指标。测定冻土的密度，关键是准确测定试样的体积。

1.0.3 考虑到国内不少单位没有低温试验室，故规定无负温环境时应保持试验过程中试样表面不得发生融化，以免改变冻土的体积。

3.4.3 冻土的基本构造有整体状、层状和网状，不同构造的冻土的均匀性差别较大。因此，冻土密度平行试验的差值较之融土密度平行试验的差值要大。整体状的冻土的结构一般比较均匀，故要求平行试验差值为 $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ ，与融土试验的规定一致；而层状和网状构造冻土的结构均匀性差，平行试验的差值往往大于 $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ ，此时，可以提供试验值的范围。

5.1.1 为了适应冻土结构的不均匀性，所用环刀容积要大一些，但太大会增加取样的困难。环刀尺寸国外有的采用直径为 $100\sim 120\text{mm}$ ，高度为 $80\sim 100\text{mm}$ 。本规程规定不宜小于 500cm^3 。

冻结温度试验

SL237—036—1999

1.0.1 土的冻结是以土中孔隙水结晶为表征。冻结温度是判别土是否处于冻结状态的指标。纯水的结冰温度为 0°C ，土中水分由于受到土颗粒表面能的束缚且含有化学物质，其冻结温度均低于 0°C 。土的冻结温度主要取决于土颗粒的分散度、土中水的化学成分和外加载荷。

2.1.1 本试验采用热电偶测温法，因此需要零温瓶和低温瓶。若采用贝克曼温度计（分辨度为 0.05°C 、量程为 $-10\sim+20^{\circ}\text{C}$ ）测温，则可省略零温瓶、数字表和热电偶。

3.1.7 土中的液态水变成固态的冰这一结晶过程大致要经历三个阶段：先形成很小的分子集团，称为结晶中心或称生长点 (germs)；再由这种分子集团生长变成稍大一些团粒，称为晶核 (nuclei)；最后由这些小团粒结合或生长，产生冰晶 (icecrystal)。从冻结过程的温度曲线上，可以看出：第一阶段，土体开始冷却和过冷，此时土中水尚未冻结成冰，其持续时间取决于土中的水量和冷却速度；第二阶段，土中冰晶已形成，由于水结晶而放出大量的潜热，使土体温度剧烈上升；第三阶段，孔隙水结冰阶段，这阶段中土体的稳定温度就是土中水的冻结温度。所以，土中水冰结的时间过程一般须经历过冷、跳跃、恒定及降低阶段。见本规程图 4.0.2。当出现跳跃时，热电势会突然减小，接着稳定在某一数值，此即为开始冻结。因而规程中规定：“当电势值突然减小并连续三次稳定在某一数值（该稳定温度即为冻结温度），试验结束”。

冻土导热系数试验

SL237—037—1999

1.0.1 冻土导热系数是在单位厚土层，其层面温度相差1℃时，单位时间内在单位面积上通过的热量，它表示土体导热能力的指标。其表达式为：

$$\lambda = q \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (1.0.1)$$

式中 λ ——冻土导热系数，W/ (m·K)；

q ——单位时间通过单位面积的热量，J/ (m²·s)；

Δh ——土层厚度，m；

Δt ——层面温差，℃。

导热系数用于土体冻融深度、热量周转、温度场计算以及冻土地区建筑工程有关的热工计算中。因此，在土的热物理指标中占有相当重要的位置。

导热系数的测定方法分两大类：稳定态法和非稳定态法。稳定态法测定时间较长，但试验结果的重复性较好；非稳定态法具有快速特点，但结果重复性较差。因此，本试验采用稳定态法。稳定态法中，通常使用热流计法，但国产热流计的性能欠佳，故采用比较法，采用导热系数稳定的物质作为标准试样。

4.0.3 采用比较法测定冻土导热系数应采用导热系数稳定的物质作为标准试样。一般常用标准砂、石蜡等。标准砂的密度控制不易准确，因而，本规程采用石蜡作为标准试样。

4.0.7 稳态比较法应遵循测点温度不随时间而变化的原则，但实际上很难做到测点温度绝对不变。因此规定连续3次同一测点温差值<0.1℃则认为已满足方法原理。

未冻含水率试验

SL237—038—1999

1.0.1 在 SDS01—79《土工试验规程》中，将相对含冰量和未冻含水率两个指标进行联合测定，从总的含水率中减去测定的含冰量，即可得到未冻含水率。

测定的方法有许多种，诸如量热法、微波法、核磁共振法等。它们分别以热量平衡、微波吸收和核磁共振等原理为依据。量热法是一种经典的方法，其试验原理明确，具有一定的准确度，但操作及计算较繁；其它方法大都需要复杂而昂贵的仪器，一般单位难以采用。

本规程采用的方法是依据未冻含水率与负温为指数函数的规律，通过测定不同初始含水率的冻结温度（冰点），利用双对数关系计算出未冻含水率的两点法。该法能满足试验准确度的要求，同时，与冻结温度试验方法相同。

4.0.1 未冻含水率随初始含水率的变化略有变化。初始含水率过小，会因冰点测定不准而带来较大的误差。因此，不同初始含水率宜在液限和塑限之间。

4.0.2 可以将制备好的三个不同初始含水率的试样，同时放入装试样杯的聚氯乙烯管内，一起进行试验。

冻胀量试验

SL237—039—1999

1.0.1 土体不均匀冻胀变形是寒区工程大量破坏的重要因素之一。因此，各项工程开展之前，必须对工程所在地区的土体作出冻胀性评价，以便采取相应措施，确保工程构筑物的安全可靠。土体冻胀变形的基本特征值是冻胀量。但由于各地冻结深度等条件不同，其冻胀量值相差很大。为了便于比较冻胀变形的强弱，因此，采用冻胀量与该冻结土层厚度之比，即冻胀率（用百分数计）作为土体冻胀性的特征值。

在特定条件下，土的冻胀性是确定的。但在土的冻胀性的评价方法和等级划分标准上，目前国内外不尽一致。我国 JTJ118—98《冻土地区建筑地基基础设计规范》采用冻胀率来分级，如表 1.0.1-1。

表 1.0.1-1 冻胀性分级表

冻胀率 (%)	$\eta \leq 1$	$1 < \eta \leq 3.5$	$3.5 < \eta \leq 6$	$6 < \eta \leq 12$	$\eta > 12$
冻胀等级	不冻胀	弱冻胀	冻胀	强冻胀	特强冻胀

我国 SL211—98《水工建筑物抗冰冻设计规范》则按冻胀量进行划分，如表 1.0.1-2。

表 1.0.1-2 冻胀性分级表

冻胀量 Δh (mm)	$\Delta h \leq 20$	$20 < \Delta h \leq 50$	$50 < \Delta h \leq 120$	$120 < \Delta h \leq 220$	$\Delta h > 220$
冻胀性级别	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ

在 GBJ7—89《建筑地基基础设计规范》中，按地基土含水状

态、地下水补给条件和冻胀性关系，分为不冻胀、弱冻胀、冻胀及强冻胀性四类。

美国用冻胀速度分级，俄罗斯（ГОСТ28622—90）按冻胀率划分，其标准与我国接近。

土的冻胀性，可通过现场直接观测和室内试验来测定。室内试验不受季节和时间限制，能控制冻结过程中有关条件，便于标准化。但影响土冻胀的因素如土的结构状态、现场冻融情况、地下水变化等条件的模拟和控制比较复杂。

1.0.2 原状冻土和扰动冻土的结构差异较大，为对冻胀性作出正确评价，试验一般应采用原状土进行。若条件不允许，非采用扰动土不可时，应在试验报告中予以说明。本试验方法与目前美国、俄罗斯等国所用方法基本一致。所得数据用于评价该种土的冻胀性略偏大，在工程设计上偏安全。

3.1.2 试样尺寸以往多采用直径和高度均为 15~24 cm。国外各国的试样尺寸也不尽相同。本规程考虑到原状土取土设备的尺寸及土体的均匀程度，试样尺寸建议采用直径 10 cm，高 5 cm。

3.1.5 在水源的补给上，根据不同条件分封闭和敞开系统的两种方法。衔接的多年冻土地区及地下水位较深的季节冻土地区，无外界水源（大气降雨、人工给排水）补给条件的地区，可视为封闭系统；而有水源补给条件的地区，可视为敞开系统，本规程所列方法为敞开系统。若进行封闭系统的试验，可将供水装置关闭。

3.1.9 土体冻胀量是土质、温度和外载条件的函数。当土质已定且不考虑外载时，温度条件就至关重要。其中起主导作用的因素是降温速度。冻胀量与降温速度大致呈抛物线型关系。考虑到自然界地表温度是逐渐下降的，在本规程规定底板温度的调节使粘质土以 0.3℃/h，砂质土以 0.2℃/h 的速度下降，是使试验所得冻胀量较大的情况。

另外，也可采用一定冻结速度的冻结方法，即零度等温线下移速度的控制方法。这种方法在室内试验较难控制。

冻土融化压缩试验

SL237—040—1999

1.0.1 冻土融化时在荷载作用下将同时发生融化下沉和压密。在单向融化条件下，这种沉降符合一维沉降。融化下沉是在土体自重作用下发生的，而压缩沉降则与外部压力有关。目前国内外在进行冻土融化压缩试验时首先是在微小压力下测出冻土融化后的沉降量，计算冻土的融沉系数，然后分级施加荷载测定各级荷载下的压缩沉降，并取某压力范围计算融化压缩系数。由此可以计算冻土融化压缩的总沉降量。

冻土的融沉和压缩的试验方法，有室内试验和原位试验两种。室内试验方法国内外进行的时间久，也比较成熟。

3.1.1 冻土融化压缩试验的试样尺寸，国外取高度 (h) 与直径 (d) 之比为 $h/d \geq 1/2$ ，最小直径取 5 cm，对于不均匀的层状和网状构造的粘质土，则根据其构造情况加大直径并使 $h/d = 1/3 \sim 1/5$ 。国内曾采用的试样环面积为 45 cm²、78 cm² 两种，试样高度有 2.5 cm、4 cm。考虑到便于利用固结仪改装融化压缩仪，故规定可取试样环直径与固结仪大环刀直径 (7.98 cm) 一致，高度则考虑冻土构造的不均匀性，取 4cm，这样高度与直径之比基本为 1:2。

为了模拟天然地层的融化过程，在试验中必须保持试样自上而下的单向融化，因此，除单向加热使试样自上而下融化外，还必须避免侧向热传导而造成试样的侧向融化，这样，试样容器需用坚固的非金属（胶木、有机玻璃等）材料加工制作，以防止侧向传热。

4.0.1 试验时在负温环境下或较低室温下进行。土温太低，切样时往往造成脆性破碎；太高时，切样时表面要发生局部融化。温度一般控制在 $-0.5 \sim 1.0^{\circ}\text{C}$ 为宜。

4.0.2 室内试验采用的冻土试样有原状冻土和用扰动融土制备的冻土试样。一般应采用原状土。

根据原状冻土相同的土质、含水率的扰动土制成的冻土试样进行的对比试验表明：扰动冻土试样的融沉系数小于原状冻土的融沉系数，其差值一般均小于5%。因此，在没有条件采取原状冻土时，可用扰动融土根据冻土天然构造及物理指标（含水率、密度）进行制样。必要时，对融沉系数作适当的修正。

4.0.5 测定融沉系数 a_0 值时，本规程规定施加 1 kPa 的压力。这主要是考虑克服试样与环壁之间的摩擦力。而且，冻土在融化过程中单靠自重下沉的过程往往很长，所以，施加这一小量压力可以加快下沉速度，又不致对融化土骨架产生过大的压缩，对 a_0 的影响甚微。

4.0.6 试验中当融化速度超过天然条件下的排水速度时，融化土层不能及时排水，使融化下沉发生滞后现象。当遇到试样含冰（水）量较大时，若融化速度过快，土体常发生崩解现象，使土颗粒与水分一起挤出，导致试验失败或 a_0 值偏大。因此，循环热水的温度应加以控制。根据已有试验，本规程规定水温控制在 40~50℃。加热循环水应畅通，水温要逐渐升高。当试样含冰（水）量大或试验环境温度较高时，可适当降低水温，以控制 4 cm 高度的试样在 2 小时内融化完为宜。

原位密度试验

SL237—041—1999

1.0.2 近年来，利用核子(γ)射线测定土的密度的方法已成熟，并广泛用于填土工程，控制施工质量，故列入本规程。

2.1.3 灌砂法所用的量砂，应选择适当粒径使其密度变化较小。通过比较试验，认为粒径在0.3~0.4 mm时密度变化较小。据国外资料，其粒径在0.30~0.50 mm范围内的量砂密度较稳定。故本规程建议量砂直径为0.25~0.50 mm。

2.3.2, 2.4.2 关于使用套环问题。一般灌砂法不用套环，直接在刮平的地面上挖试坑，然后灌砂求其体积。这样往往由于地面没有刮平，使所测试坑体积不够准确。采用套环，以套环上缘为一固定基准平面，先灌砂测定基准平面至地面之间的体积，见图2.3.2-1(a)。挖试坑后，再测此基准平面至坑底之间的体积，见图2.3.2-1(b)。二者之差即为试坑体积。这样即使地面不平，亦无影响。但此法增加了一个工序，称量达6次之多，不但试验时间较长，而且增加称量累计误差，是其缺点。

用套环法时，挖试坑前很难将套环内的量砂取净，所以规程中允许有一些量砂留在环内。但当挖试坑时，必须将此量砂和试样一同取出。如试坑直径较小时，可将套环内地面剥掉一薄层，以

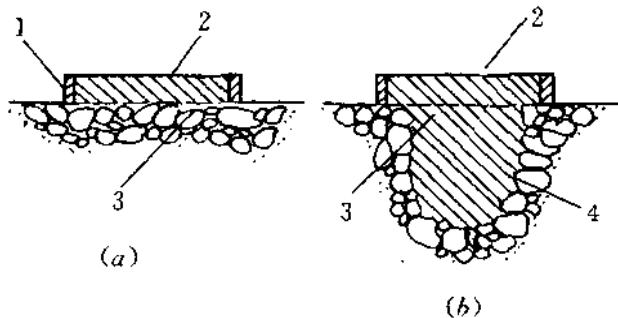


图 2.3.2-1 试坑和套环

1—套环；2—套环上缘面；3—地面；4—坑底

便将套环内量砂全部取出,见图 2.3.2-2。

2.3.5 本试验系根据标准物质(量砂)作为计量体积,而标准物质的密度应稳定。因此,应在相同条件下(如落距、速度等)灌量砂,使与校准量砂密度时一致,否则会引起过大的误差。

2.5.3, 3.4.3 对于灌砂法和灌水法,规程中只规定了进行2次平行试验,其目的是为了相互验证。但由于填土密度变异性较大,而且这两种方法准确度较差,难于用平行试验差值来控制。故未规定允许平行差值。

3.3.1~3.3.3 工地用灌水法测量密度,测试方法是采用较大的试坑(与灌砂法相近),在坑内铺普通塑料薄膜后,灌水测定试坑体积。由于薄膜不能紧贴凹凸不平的坑壁,并有折、皱纹等现象,使测得的体积偏小,计算的干密度偏大,与灌砂法相比,有时差值达 0.03 g/cm^3 ,为了解决试坑地面和试坑内壁平整度,本规程建议在试坑地面置放相应尺寸的套环,并用水准尺找平,试坑内壁采用较柔软的薄塑料膜铺设,使与坑底、坑壁紧密相贴,以提高测定试坑体积的准确度。

4.1.1 γ 放射源目前较多的采用铯 137 (Cs^{137}),如原水电部杭机所、美国太平洋核子仪器公司(CPN)、乔克司勒公司(Troxler)以及德国伯德霍尔特公司(Berthold)。半衰期为33.2年,源强为5~10 mCi。这种中等能量的 γ 射线,透过物质时射线的衰减,主要是光电效应和康普顿—吴有训散射。而 γ 射线经过土体被吸收而减弱其能量,同时又将减弱后的射线又散射出去,如此,多次的吸收、散射,使能量显著降低。土的密度愈大,吸收愈多。检测器的计数率愈小。

4.1.2 核辐射检测器是将核辐射信号转换成电信号,从而探测出射线的强弱和变化。 γ 射线检测器有用盖革(G—M)计数器,它是根据射线对气体的电离作用设计的。另外还有 γ 闪烁计数器,它

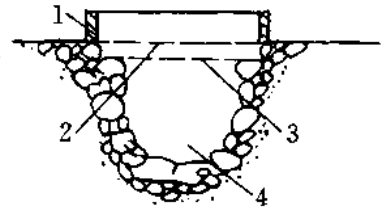


图 2.3.2-2 试坑

1—套环; 2—原地
面; 3—剥掉一薄
层; 4—试坑

比盖革计数器的检测效率大一个数量级。因而可以测到 50 cm 的深度。

4.2.1 由于 γ 放射源的能量遵循指数衰减规律，因而，放射强度随时间而衰减。同时，不同地区放射性本底也不同。加之，仪器的电子元件也会老化等原因，使得测得的计数率不确定性大。为了使测试准确，应进行相对测定，这就需用标准计数率。标准计数率的校准见规程“附 b”。

4.2.2 计数率的标定，可以按规程中建议的方法将结果绘制成“计数率比与密度关系曲线”，也可以按数学表达式计算。检测器的计数率与土体密度之间的关系如下式表示：

$$n_i = Ae^{-B\rho_i} - C \quad (4.2.2-1)$$

式中 n_i ——某一标样的计数率，N/min；

ρ_i ——某一标样的密度，g/cm³；

A、B、C——三个系数。

为了求得 A、B、C 值，选用高、中、低三种密度的标样，测定其计数率 n_1 、 n_2 、 n_3 。并与标准计数率换算成计数率比 R_c 。联立求解方程 (4.2.2-1) 得到式中的 A、B、C。然后将 A、B、C 固化在仪器的微处理机内。实际测定后，得到计数率比，仪器计算机的功能就在于求解下式：

$$\rho = \frac{1}{B} \ln \left(\frac{A}{R_c + C} \right) \quad (4.2.2-2)$$

需要指出的是，当测杆插入不同深度时，由于放射源和检测器之间的距离和角度的改变，不同标样的计数率是不同的。经过计算，A、B、C 系数也是不同的。因此，在分析密度在垂直方向分布时，不同深度应采用不同的 A、B、C 系数。特别是 B 值表征放射源与检测器之间的距离及土的吸收系数，其值随深度逐渐增大。

4.3.5 在不同深度测定时，由于不同深度产生的放射源与检测器之间的距离和角度的变化，使所得的计数率比 R_c 也就不同，算得的密度随深度而增大，对于压密层为 30 cm 的填土，底部密度比

层面要大约 1.5%。这点说明：在整理资料时，应先分层计算，分层评价，然后再综合整层评价。

4.4.2 用核子湿度仪所测定的水量是体积含水量，即单位体积中水的质量。其法定单位为 kg/m^3 或 g/cm^3 。因此，规程中式 (4.4.2-2) 的含水率是水的密度与土体干密度之比。

原位渗透试验

SL237—042—1999

1.0.2 现场渗透系数的测定,以抽水、注水法测定结果较为可靠。但由于设备复杂,耗费大,仅在特殊需要时才采用。本规程中仅列了现场试坑渗水法,此法已为一些施工部门所采用,效果良好。但对细粒土应考虑毛细管引力对渗透系数的影响,否则将导致结果偏大,因此,在式(4.0.1)中考虑了毛细管升高的影响。同时此法适用于地下水面较深的地区,采用时应予以注意。

原位直剪试验

SL237—043—1999

1.0.1 直接剪切试验是测定土体抗剪强度的方法之一。通常土体的原位剪切试验可分为沿剪切面剪切破坏的抗剪断试验、沿剪切破坏面继续剪切的抗剪试验（或称摩擦试验、或抗滑试验）以及抗切试验（法向应力为零）。如图 1.0.1。原位直剪试验由于试验的岩土试体比室内试样大，能包含宏观结构的变化，所以，试验条件接近工程实际情况。

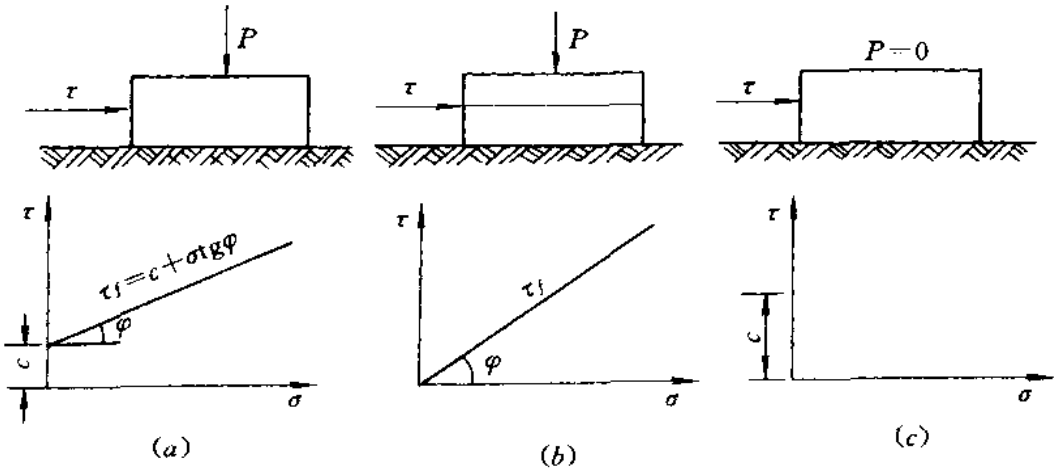


图 1.0.1 剪切试验示意图

(a) 抗剪断试验；(b) 摩擦试验；(c) 抗切试验

1.0.2 本规程包括两类试验：一类是抗剪断试验和抗切试验，它们都是用完整的试体，如图 1.0.1 (a)、(c)；一类是抗剪试验，以两块试体的接触面作为剪切面如图 1.0.1 (b)，这类试验用于确定软弱结构面上的抗剪强度。混凝土板与地基土的抗滑试验也属于此类。

在计算软基上混凝土闸、坝的稳定性时，除分析地基浅层或深层滑动外，还应核算建筑物沿地基表面的水平滑动，这时必须

要有混凝土板和地基土之间的抗滑强度指标。抗剪试验适用于承受水平作用力较大的闸、坝工程；对于其他类似工程，如挡土建筑物等，应根据实际情况决定试验方法，如浸水时间和剪切方式等。当地基土为不均匀土层时，还应注意沿软弱层的抗滑稳定性。

1.0.3 直接剪切试验分为应力控制方式和应变控制方式两种。应力控制一般采用重物通过滑轮转向施加水平力，该法不能准确地测得应力位移曲线上的峰值及稳定值，但对于作大位移的试验（混凝土板与地基土的抗滑试验），还是有优点的。故在规程中列入该种方式。

3.3.2 原位直剪试验，应根据工程地质条件、工程荷载特点、可能发生的剪切破坏模式、剪切面的位置及方向、剪切面的应力条件，选择相应的试验方法。

剪切力平行于剪切面（包括剪断的潜在剪切面和软弱面），为平推法，如图 3.3.2 (a)、(b)；当剪切力与剪切面成 α 角时，为楔形体法。如图 3.3.2 (c)。

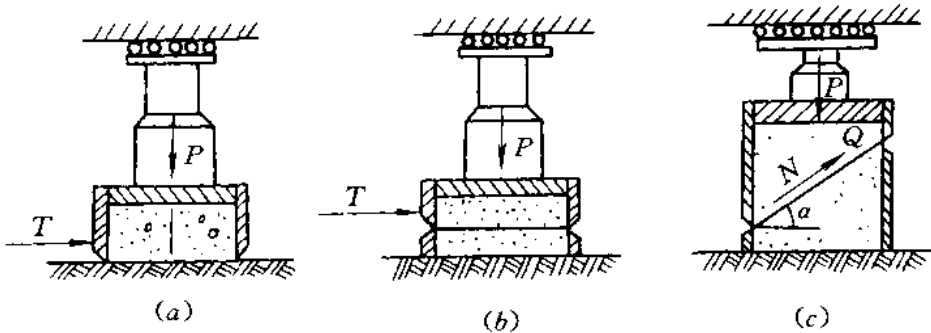


图 3.3.2 原位直剪布置方案

3.3.3 保持岩土试体的原状结构不被扰动是非常重要的，这是原位直接剪切试验的最主要的优点。

3.3.4 土体试样一般以圆形为宜，也可采用方柱体，其尺寸可根据土的不均匀程度及最大粒径确定。一般采用的有：面积 $A=1000\text{cm}^2$ ，高度 $H=10\sim 15\text{cm}$ ； $A=2500\text{cm}^2$ ， $H=10\sim 20\text{cm}$ ； $A=5000\text{cm}^2$ ， $H=20\sim 25\text{cm}$ 。

3.3.5 在削好的试体套上剪切盒，试体与剪切盒之间的间隙应用

砂或砂浆填充密实，这样更好地传递垂直压力和剪切力。

3.3.8 水平力的施加方法，也有直接加载法（应力控制）和千斤顶法（应变控制）两种。

1 直接加载法通过滑轮组和导向滑轮，从吊在三角架的平台上直接累迭重物。所需设备简单，但锚固设备和操作均较麻烦，所需试验场地较大。当荷载很大时，操作甚感困难。此法只能分级施加，不能连续施加。因此，在整理试验资料时，难于得出抗剪强度和位移关系曲线的峰值。同时由于滑轮组摩阻力和钢丝绳的张力难于准确计算，所以，要用可靠的水平拉力测力计，以测定试块实际承受的水平拉力。另外水平拉力施加的增量不为常数，须以逐级递减为原则。特别是试块开始滑动（或位移）时，增量必须减至最小。

2 千斤顶法。此法设备轻便，操作简易，在水平力和位移曲线上能反映出峰值。加力的增量也应由大到小缓慢地递减，切不可忽大忽小，亦不应采取某种均匀不变的速率。最好采用附有比较准确的压力表和有稳压装置的液压千斤顶。

关于剪切力的施加速度，GB50021—94《岩土工程勘察规范》规定每级 30 s，一般可用 5~6 min 即可进行一个试验，这样似乎太快了些。虽然剪切速率对试验成果影响不大，但考虑操作等因素，同时，考虑到混凝土板与地基土的抗滑试验，破坏可能发生在浅层和深层的情况，剪切速率有较大的影响，应加以控制。因此，规程中规定应控制在 20 min 内剪完。

3.3.9 为便于求出水平力和位移曲线的峰值，当采用千斤顶施加水平力的过程中，在试块尚无出现位移迹象（位移量极微）之前，水平力每增加 $0.1p$ （ p 为垂直荷载的总量）观测水平位移一次；当试块处于开始位移状态时，水平力每增加 $0.03\sim 0.05p$ ，观测一次位移；当试块处于位移状态中，水平力每增加或下降 $0.01p$ ，观测一次位移。如水平力保持不变，而位移继续增大是否观测位移，根据时间要求酌情考虑。

采用滑轮组法施加水平拉力时，水平拉力每增加一级观测一

次位移。

4.3.2 一般情况下,两种不同的坚硬材料的摩擦系数和试板大小无关的,与形状也无关。但地基土并非坚硬材料,试板太小,成果不准确;过大时,则所需施加的垂直荷载与水平力都相应增大,从而增加试验工作的困难和费用。试验结果表明:对砂卵石地基当试板面积小于 0.6 m^2 时,重复试验所得的摩擦系数值忽大忽小,缺乏规律性;当试板面积等于 1.0 m^2 时,重复试验所得的数值基本接近。同时,对比较均匀的土,试板尺寸由 1.7 m^2 增到 3.5 m^2 时,试验结果一致。过去现场试验采用的尺寸为 $0.5 \sim 1.0 \text{ m}^2$,对粘质土应大些,对均匀砂土可小些,对不均匀的砂卵石层应大于 0.6 m^2 。

关于试板的形状,许多资料表明:无论是长方形还是正方形,所得结果均一致。为防止试验过程中试板的倾斜或倒塌,宜选用宽与长度之比为 $1:2$ 的长方形。施加水平力的方向宜与试板的长边平行。

试板的浇注方法对试验成果有影响。若在粘质土地基上采用预制试板,则所测得的凝聚力将有所减小,其抗剪强度亦偏低。因此,对于粘质土地基,原则上应该采用就地浇注试板。但对于装配式预制混凝土板的建筑物,试验时为反映建筑物实际工作情况,可用预制试板。

对于砂土,由于其抗剪力主要是摩阻力,为加速工作进度,简化操作过程,可选用预制试板。

4.3.4 混凝土板的抗滑试验中,对于硬的粘质土地基,可用单点法代替多点法,即用一个试块,不改换地点,连续作一组试验,垂直荷载由小到大分 $4 \sim 5$ 级,每级试验一次。

5.0.3 绘制剪应力与剪切位移、剪应力与垂直位移曲线。根据曲线特征,确定有关强度参数。

比例强度定义为剪应力与剪切位移曲线直线段的末端相应的剪应力。在比例强度前,剪切位移很小,比例强度后,剪切位移增加很大,用该特性来确定比例强度。

对于剪应力与剪切位移曲线没有直线段，一般具有硬化型曲线，这时应确定屈服强度。可以用剪切位移和垂直位移曲线特征来辅助确定，如图 5.0.3，其中有两种情况。

1 垂直位移逐渐变小，当增量接近于零时的相应的剪应力值，即为屈服强度。如图 5.0.3 (a)。

2 垂直位移从正值（试体压缩）变为负值（试样剪胀）时相应的剪应力值，即为屈服强度。如图 5.0.3 (b)。

峰值强度和残余强度是容易确定的。

关于抗滑混凝土试块开始滑动的水平力的选择问题，原则上应按应力~位移曲线上的峰点确定。但是曲线上有时没有明显的峰值或转折点。一般以出现下列情况作为试块开始滑动的特征。

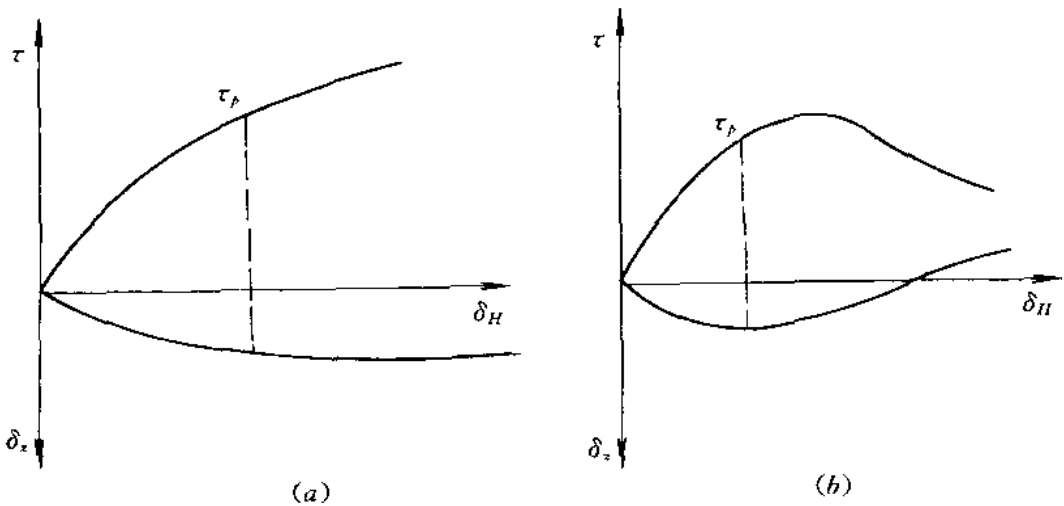


图 5.0.3 确定屈服强度辅助方法

1 水平力不增大，而水平位移呈直线增加，此点以前无明显位移。

2 水平力不断增大的同时，水平位移突然猛增；或水平力减小，而位移继续增大，在曲线上呈现明显的弯曲部段。

3 当曲线上有两个以上明显的弯曲部段，则参照重复试验曲线作综合分析。

5.0.4 原位直接剪切试验表明：土体在剪切力作用下发生破坏的过程一般分为三个阶段。第一阶段是剪应力从零到比例强度 τ_c ，这

一阶段为弹性（或准弹性），剪应力和位移曲线为直线（或接近直线），试体开始产生裂隙。剪应力从 τ_e 一直增加到 τ_f （峰值强度）属于第二阶段。这一阶段是裂隙发展和增长，当剪应力达到 τ_f 时，剪切面上就达到完全破坏。第三阶段，从 τ_f 开始强度不断降低，最终达残余强度 τ_r ，如图 5.0.4。将不同垂直压力（即正应力 σ ）条件下所得的不同强度值绘制成相应的曲线，即可得出相应的强度参数 c 、 φ 。从图 5.0.4 上看出：残余强度是失去粘聚力而仅有摩擦力的强度。

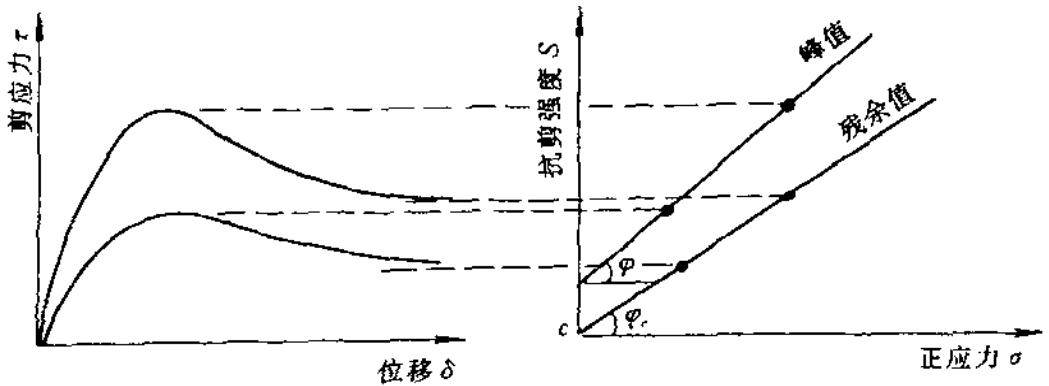


图 5.0.4 抗剪强度与正应力的关系

十字板剪切试验

SL237—044—1999

1.0.2 十字板剪切仪目前国内有三种：开口钢环式、轻便式和电测式。

轻便十字板剪切仪由于在试验中难以准确控制剪切速率和维持仪器在一个水平上，且测试准确度不高，故不再列入规程。

但该仪器具有携带方便，不需要动力等优点，对一般简易小型工程并具有熟练的操作技术者，还是可以采用的。

1.0.3 十字板剪切试验大部分国家规定只适用于饱和软粘土，测得的抗剪强度相当于内摩擦角 φ_u 等于零时的粘聚力值，即不排水抗剪强度。美国 ASTM—STP1010 (88) 提出了具体的适用范围，即适用于灵敏度 (S_u) 小于、等于 10 的均质饱和软粘土。对于其他的土，试验成果误差相当大。

3.1.2, 4.1.2 十字板的规格。目前国际上十字板形状有矩形和菱形，矩形又分为高矩形和矮矩形。我国大多数使用的为高矩形，尺寸为 50 mm×100 mm 和 75 mm×150 mm 两种。为了国际间的技术交流，本规程规定十字板高 (H) : 直径 (D) 为 2 : 1。

十字板厚度也应引起重视，它直接影响试验成果。根据试验表明：十字板厚度愈大，土的扰动也愈大，测得的抗剪强度 C_u 值就愈小。

本规程规定 75 mm×150 mm 的十字板板厚 3 mm；50 mm×100 mm 的十字板板厚 2 mm。

3.3.5, 4.3.7 关于剪切速率。曾用电测十字板剪切仪进行了剪切速率的对比试验，试验的速率为 0.1°/s 和 0.2°/s 两种，试验结果表明：两组强度曲线变化很有规律。剪切速率大，抗剪强度也大；剪切速率小，抗剪强度也小。因此，剪切速率应控制在适当范围内。

目前, 各国规程规定的剪切速率在 $0.1^{\circ}/\text{s} \sim 0.5^{\circ}/\text{s}$ 。如美国 $0.1^{\circ}/\text{s}$, 英国 $0.1^{\circ}/\text{s} \sim 0.2^{\circ}/\text{s}$, 原苏联 $0.2^{\circ}/\text{s} \sim 0.3^{\circ}/\text{s}$, 原联邦德国 $0.5^{\circ}/\text{s}$ 。理论上, 对不同渗透性的土, 规定相应的不排水条件的剪切速率是合理的。但实际操作时, 不可能事先了解地基土层的渗透性, 针对不同渗透性的土选用不同的剪切速率就难以实现。因此, 为了统一, 并与《岩土工程勘察规范》一致, 本规程规定剪切速率为 $0.1^{\circ}/\text{s}$, 并使在 2 min 内测得峰值。

4.3.1 十字板头插入孔底的深度影响试验成果。美国规定为 $5d$ (d 为钻孔直径); 原苏联规定为 0.3~0.5 m; 原联邦德国规定为 0.3 m。本规程规定为 3~5 d 。

4.3.3 规程中规定当进行下一试验点时, 必须清除钻孔中的残土。目前多采用有孔螺旋钻和管钻清孔, 很少采用冲洗法。在饱和软粘土中使用有孔螺旋钻清孔, 其优点是能消除孔底的负压作用, 保持孔壁不坍, 且对孔底土层的扰动深度也较浅, 这样十字板插入土层深 0.5 m 即可。另外, 采用全断面取蕊法钻进, 也能清除孔内残土。

4.3.9, 4.3.10 轴杆校正。当十字板插入土层中旋转时, 土层与轴杆之间产生摩擦阻力, 这对试验成果是有影响的。因此, 试验时必须进行轴杆校正。

标准贯入试验

SL237—045—1999

1.0.1~1.0.3 标准贯入试验（简称标贯）起源于美国。1927年L. 哈特（Hart）和A.F 弗莱彻（Fletcher）设计了一种直径为2英寸的对开式取土器，通过一系列试验之后，弗莱彻和H. A. 莫尔（Mohr）采用了对开式取土器，质量为63.5 kg（140磅）的锤，落高76.2 cm（30英寸），使贯入试验达到标准化。标贯原来是为深基础设计提供数据的，后来在美国普遍采用。1948年太沙基（Terzaghi）和皮克（Peck）把试验数据制成图表，也用于浅基设计。

标贯已在国际上广泛应用，如美国、英国、日本、意大利、西班牙、葡萄牙、希腊、捷克等国。我国自1953年原南京水利实验处引进研制后，首先在淮河水利工程的勘测设计中使用，由于是一种简易迅速的原位测试手段，已广泛采用。近年来在国际上的技术合作和交流中，一般都要求标贯试验成果，如日本建筑学会制定的“建筑物基础结构设计标准同解说”及“建筑物钢桩基础设计施工标准同解说”中都明文规定 N 值为主要地基勘察成果之一。目前，在GBJ7—89《建筑地基基础设计规范》和GB50021—94《岩土工程勘察规范》中，列有试验要点和根据标贯击数 N 确定砂质土和粘质土地基承载力的标准值。

3.1.1 本规程采用的贯入器规格尺寸考虑到国内各单位实际使用情况，也参考多数国家常用的规格而选定的。

贯入器规格国外标准多为外径51 mm，内径35 mm，全长660~810 mm。《建筑地基基础设计规范》、《岩土工程勘察规程》规定全长为700 mm。本规程为了与国家规范一致也将贯入器长度定为700 mm。此外，欧洲标准规定贯入器内外径的误差为 ± 1 mm，这也是合理的，可以采用。至于刃口的磨损、变形等均参考了欧

洲标准及《标准贯入》统一试验方法的规定进行了修订。

3.1.2 落锤的质量，参照欧洲标准（1977）给以误差值，即 63.5 ± 0.5 kg；锤击速率不应超过每分钟 30 击。

关于落距控制，本规程规定为 76 ± 2 cm。根据以往国内外的试验对比表明：用人力牵引控制落锤和用卷扬机牵引控制落锤所得的锤击数均比自动落锤装置控制落距的锤击数要大。人力牵引的落锤击数比自动落锤击数要多 1.3~1.6 倍。

当前自动落锤的装置，国内外均有很大的发展。由于自动落锤具有很大优越性，故本规程规定应用自动落锤装置。但在应用以往人力牵引落锤的资料时应注意修正问题。

根据动能分析资料，落距误差在 2.0~5.0 cm 以内，对 N 值影响较小，若误差为 ± 7.5 cm 时，动能变化达 $\pm 10\%$ 。为此，这次修订采用了欧洲标准的规定：落距为 76 ± 2 cm。

3.1.3 规程规定用直径为 42 mm 的钻杆，主要是根据国内实际情况，也与各国标准大致相同。钻杆壁厚和直径不同，其单位长度的质量不一样。根据单桩计算的能量传递说明粗杆将减小 N 值，但也有人认为影响不大，如 1982 年进行的钻杆直径 42 mm 和 50 mm 的对比试验，以及结合欧洲标准，控制钻杆质量每米不大于 8 kg，使用直径为 50 mm 的钻杆对成果影响不大。

4.0.1 关于钻孔，关键因素是成孔方法。规程中提出了原则要求，未规定具体方法，这是因为钻孔方法因机具及习惯而不同，难以具体罗列。采用泥浆护壁，防止了涌砂和塌孔。对比试验表明：泥浆护壁相应地增大了 N 值。如对某一细砂层至中砂层，由于涌砂， N 的平均值分别为 22、24、29 击；而泥浆护壁防止涌砂后分别为 64、88、94 击。

钻孔孔径在规程中未作具体规定。国内通用的有 108、127、146 mm，国外也不统一。关于孔径对 N 值的影响，英国比较了 8、10 英寸及 12 英寸（200、250mm 及 300mm）套管钻孔的标贯试验；印度进行了较浅孔的 100、200、300 mm 孔径及挖坑的比较试验。结果表明：大孔径孔底由于应力分布的影响， N 值减小。

4.0.3 预打 0.15 m。如 50 击未达 0.15 m，记录实际贯入深度。以后每打入 0.10 m，就记录锤击数，累积打入 0.30 m 的锤击数即为标准贯入数 N 。如锤击已达 50 击，而贯入深度尚未达 0.30 m，则记录实际贯入深度，可通过换算求得贯入深度达 0.30 m 的 N 值。

5.0.1 标准贯入击数 N 的修正问题。对贯入击数 N 的影响因素很多，目前国内外常有对钻杆长度、土层深度、地下水位及落锤的装置等因素的影响进行校正，但迄今尚没有一致公认的意见，故本规程对击数的修正未作统一规定，建议按不同用途，采用不同的修正方法。

1 钻杆长度的修正。我国 GBJ7—89《建筑地基基础设计规范》规定钻杆长度在 3~21 m 内，击数 N 应乘以校正系数 a ($1 \sim 0.70$)；而 GBJ11—89《建筑抗震设计规范》及 SDJ10—78《水工建筑物抗震设计规范》，在使用标贯击数时，都未明确规定钻杆长度的校正。究其原因：GBJ11—89 规范在判断砂土液化时，由于原始数据 N 值未经杆长修正，故使用规范中液化判别式时， N 值也不进行杆长校正。

利用能量分析的方法对不同的钻杆进行了一系列试验研究表明，来自钻杆颤动或其他因素，对波动能量传递方面的影响远大于杆长变化时能量的衰减。从目前的研究情况来看，认为在一定深度（杆长）范围内，可以不进行杆长的修正是一个总的趋势。

至于 GBJ7—89《建筑地基基础设计规范》考虑到过去建立 N 值与土性指标、承载力的经验关系时所用 N 值均经杆长修正，因此该规范规定了杆长修正。

2 土层深度影响（土的有效上覆压力的影响）的修正。自从 50 年代吉布斯和霍尔兹 (Cibbs—Holtz) 的研究试验结果指出：同样的击数 N 对不同深度的砂土表示不同的相对密度之后，一般认为对标准贯入试验的结果应进行深度影响修正。因国内未进行过仔细研究，本规程未作规定，需要时可参考有关标准或文献。

3 地下水位影响的修正。许多试验研究证实，细砂到粗砂以

及砾石的浸水，对贯入击数 N 没有多大影响。但对有效粒径 (d_{10}) 在 0.1~0.05 mm 范围内的极细砂或粉砂，浸水对标贯击数有较显著的影响。

太沙基和皮克 (1948) 认为：松的极细砂或粉砂，在浸水饱和区以下的贯入击数比干砂的击数要低；当紧密状态时，贯入击数将增大。因此，对于标贯击数 N' 大于 15 的，浸水的饱和极细砂或粉砂，其相对密度大致等于按下式提出的标贯击数 N 的干砂的相对密度，即：

$$N = 15 + \frac{1}{2}(N' - 15) \quad (5.0.1)$$

式中， N' 为未校正的饱和极细砂或粉砂的标贯击数； N 为校正后的标贯击数。

综合上述，在提供勘察报告时， N 值不作修正。但在实际应用 N 值时，可按岩土工程具体问题，参照有关规范和设计的要求考虑是否作有关因素的校正。

静力触探试验

SL237—046—1999

1.0.1 静力触探试验是工程地质勘察工作中常用的一个原位测试项目。从力学意义上说，该试验应称准静力触探试验，习惯上称静力触探试验。

1.0.3 静力触探试验适用于粘质土和砂类土。但不适用于裂隙粘土。土层中含有大量砾石、卵石、砖瓦、姜石、贝壳时，难以贯入，并将使贯入阻力严重失真。对某些工程地质问题（如水文地质条件，流砂现场等）也无法解决。

3.1.1 目前，国内常用的触探主机按力的传动方式不同可分为液压传动和机械传动两大类：

(1) 液压传动式触探主机有单缸、双缸两种类型。最大贯入行程一般为 0.5~1.0 m，贯入力大于 80kN。特点是贯入速度均匀、稳定、加压能力大，但加工制作要求精度高，设备较重。适用于一般粘质土、硬粘土、较密实砂类土的深层静力触探试验。

(2) 机械传动式触探主机有电动丝杆和手摇链式两种。而电动丝杆又有梯形丝杆和滚珠丝杆两种。滚珠丝杆触探主机，由于采用了新技术—滚珠丝杆，使机械摩阻力减小，传递效率可高达 92%~96%，从而可使贯入压力提高到 100~150 kN。这类触探主机每次贯入行程为 1 m。贯入速度一般为 1.2 m/min 左右，提升速率可通过变速箱或变速电机来加快。特点是结构简单、保养维修方便，适用于一般粘质土和砂类土。

手摇链式触探主机是一种轻型装置，它是以人力转动手柄，将探头压入土中，贯入速率可人为控制，提升速度是靠改变手柄位置来加快，贯入力一般小于 20~30 kN。特点是结构简单轻巧，不需电源，便于搬运，对交通不便及无电源地区尤感方便。适用于软土、一般粘质土及松至中密砂类土。该机还附有电测十字板探

头，可分别进行静力触探试验和十字板剪切试验。

3.1.3, 3.2.2 探头的规格尺寸。 探头（装有测定土层贯入阻力的传感器）是直接影响试验成果准确性的关键部件。有关探头的一般要求和质量标准在规程中已作了规定，这里着重说明探头的外形、截面积的大小及靠近探头部分的探杆尺寸对试验成果的影响。

探头底面积的大小对贯入阻力的影响称为“尺寸效应”。

日本曾用 $0.2 \sim 20 \text{ cm}^2$ 的 8 种底面积的探头在重塑土中进行了对比试验，所得的成果如图 3.1.3-1。从图中看出： q_c 是随探头底面积的增大而减小，但与我国常用的三种（10、15、20 cm^2 ）规格相比，最大差值为 8%。

国内用三种不同投影面积的探头（10、15、20 cm^2 ）在软土、一般粘质土和硬粘土中进行了 18 组对比试验，结果表明：总的趋势也是 P_s 随底面积的增加而减小，但经显著性检验表明影响不显著。由以上对比资料可以认为：三种底面积的探头均可选用。

在国际上，圆锥底面积的通用标准为 10 cm^2 ，为了向国际标准靠拢，最好使用锥底面积为 10 cm^2 的探头。

双桥探头的外部几何形状也是影响试验成果的一个重要因素，目前国内常用的有两种形式，如图 3.1.3-2 所示。从使用效果来看，一般认为 a 型探头较简单，其工作性状与桩接近，并且便于向多功能探头发展（如测孔隙水压力，测定波速等）。国内外均推荐 a 型，也就是国际上常用的富格罗型。故本规程也推荐了 a 型探

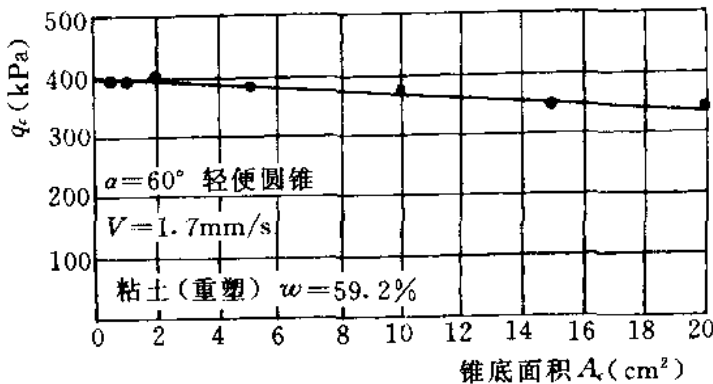


图 3.1.3-1 锥底面积对贯入阻力的影响

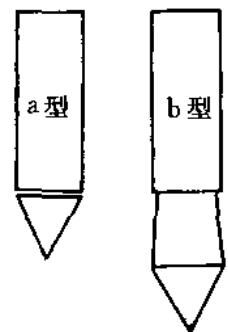


图 3.1.3-2 常用双桥探头外形

头，便于国际资料的交流。

探头加工尺寸公差是按贯入阻力的容许误差为 $\pm 1\%$ 的原则而确定的。更换标准则按投影面积的误差为 -3% 来考虑，这种误差引起贯入阻力的改变对工程来讲是偏于安全的。这一规定比欧洲标准（加工公差为 $35.7 + 0.3 \text{ mm}$ ，使用过程中允许磨损为 -1 mm ）和美国 ASTM（锥底直径 $35.7 \pm 0.4 \text{ mm}$ ）均小。而更换标准界于两者之间。摩擦筒面积误差也按 1% 考虑，但只允许有正误差，当摩擦筒直径小于锥头直径时，应予报废。

3.1.4 触探探杆在贯入和起拔过程中主要是承受竖向压力和拉力，同时，由于触探深度较大，在触探过程中细长的探杆不可避免地会产生一定幅度的弹性弯曲，故探杆除了要满足抗压强度条件外，还需要满足压杆的稳定条件。这就要求合理的选用探杆，一般要采用抗拉、抗压、抗弯强度高的合金管，并按热处理工艺进行调质后加工。

探杆要求平直，特别是进行深层静力触探试验时（一般大于 30 m ），试验前应严格检查探杆的平直度。

3.1.5 贯入阻力的量测仪器有间断测记和连续自动记录两种，前者一般用电阻应变仪或数字测力仪等；后者用电子电位差计（自动记录仪）。近年来，国外已大量采用计算机装置测记、贮存数据，然后按需要进行数据处理、计算和绘图。国内也有些单位已开始将微机应用于静力触探，并已取得了成效。

4.0.3 探头偏离垂直方向贯入（即探孔倾斜）或探杆弯曲，将使量测的成果不能如实反映实际地层贯入阻力的变化情况，影响试验成果的准确度，有时甚至会得出错误的结论。工程实践表明：当触探试验深度一般大于 30 m ，且土中有硬土层或密实砂层存在时，有时按触探资料定出的土层埋深比按钻探所定的土层埋深偏大（指深部土层），有时相差很大。所以，往往出现地层“缺失”或“变厚”及埋深增大等现象，如图 4.0.3 所示。因此，要求垂直贯入。当贯入深度超过 30 m 或穿过软土层贯入硬土层后，应有测斜数据。当偏斜度明显，应修正土层分界限。

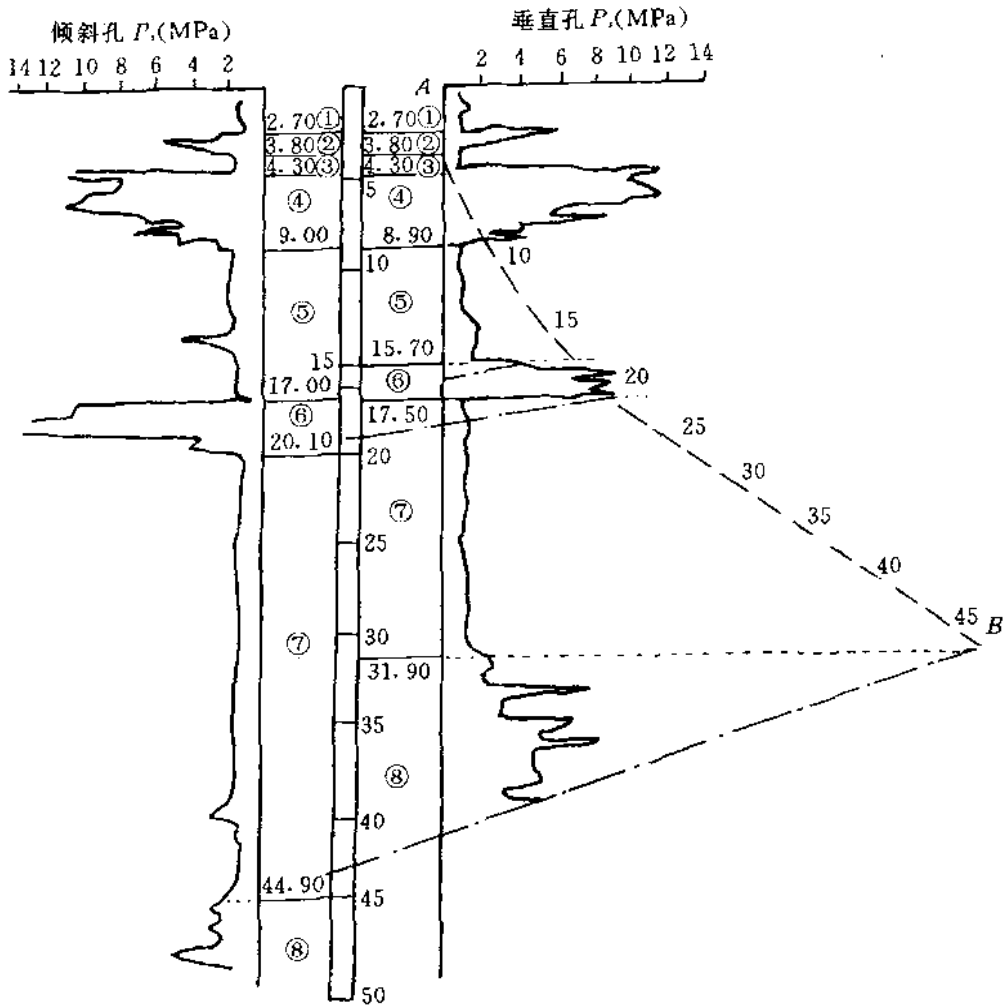


图 4.0.3 垂直孔与倾斜孔对比资料

4.0.5 贯入速率是静力触探试验中的一个重要问题,它不仅关系到试验历时,而且将直接影响试验成果的准确性,国内外对此问题作了不少对比研究。结果表明:贯入速率对贯入阻力是有影响的,但在速率变化范围较小时这种影响是很小的。欧洲标准、美国 ASTM 标准及其他一些国家都规定以 1.2 m/min 作为标准速率,允许变化范围为 0.9~1.5 m/min。考虑到国内设备情况,并尽可能与国际通用标准一致,本规程规定贯入速率为 1.2 ± 0.3 m/min。在此速率范围内,可不考虑贯入速率对贯入阻力的影响。

贯入速率对探头周围孔隙水压力的影响较为明显,但目前对比研究资料不多。因此,当用能同时量测孔隙水压力的多用探头

进行静力触探试验时，也应尽可能采用标准贯入速率。

5.2.1 当使用孔压静探探头时，由于作用于锥底的孔隙水压力，其方向与贯入时产生的锥头阻力相反，因此，应对测量的锥头阻力 q_c 进行修正得出土层的真正阻力 q_t 。修正公式如下：

$$q_t = q_c + u(1 - a) \quad (5.2.1)$$

式中 q_t ——修正后的总锥头阻力，kPa；

u ——孔隙水压力，kPa；

a ——净面积比，即孔隙压力作用面积与圆锥底面积之比。

5.2.2 利用静力触探贯入所产生的超孔隙水压力消散估算水平向固结系数 C_{ph} （静探固结系数）的理论假设为：

1 土层状态为正常固结或轻超固结 ($OCR < 3$)；

2 不考虑土的非均匀性 ($k_v \neq k_h$)，孔隙水压力消散主要由水平向固结系数控制；

3 当固结时，不考虑总应力与孔隙水压力的耦合作用；

4 土层的土性指标为常数（固结系数不随消散过程而变）。

依据上述假设，以扩孔原理（球形或圆柱形）进行线性分析，求得超孔隙水压力消散度 ($u = \Delta u / \Delta u_i$) 对时间因数 T 的关系式，其中时间因数与固结系数的表达式为：

$$C_{ph} = \frac{R^2}{t} T \quad (5.2.2)$$

式中 C_{ph} ——静探水平向固结系数， cm^2/s ；

R ——探头圆锥底半径，cm；

t ——达到给定消散度的测定时间，s；

T ——时间因数。

在推导固结理论关系式时，假定在消散过程中，固结系数为常数。因此，从式 (5.2.2) 中看出：在给定的锥体半径 R 条件下，时间因数 T 与相应的测定时间 t 的比值为常数。从理论上讲，固结系数可以从任意消散度的相应时间因数和测定时间 t 的表达式中求得。但在实际测定过程中，由于土层的异变性或者由于测试误差，在静水压力 u_0 和初始孔隙水压力 u_i 的数值中存在一定的不

确定性。静水压力 u_0 的误差 δu_0 将对消散度大时有较大的影响；初始孔隙水压力 u_i 的误差 δu_i 将对消散度小时有较大的影响。因此，考虑到两类误差，采用中间时间，即当消散度 $\bar{u} = 0.5$ 时的时间因数 T_{50} 和相应的测试时间 t_{50} 估算固结系数是适合的。

从固结理论及试验研究中发现：探头附近超孔隙压力的起始分布对消散过程有明显的影响。而分布状态除与土的固结状态有关外，还与探头的几何形状和透水板的位置有关。

图 5.2.2 所示的是具有锥角为 60° 的探头，透水板处于四个不同位置的孔隙水压力消散度 \bar{u} 对时间因数关系曲线。具体数据列于表 5.2.2 中。在规程中建议采用的探头结构为正文图 3.1.3-3，即透水板位于靠近锥底处，因而， $T_{50} = 5.6$ 。若采用其他结构，可用相应的其他数据。

5.2.3 绘制触探曲线，应选用适当的比例尺。一般宜选用的比尺为：

- H （深度）：1 个单位长相当于 1 m；
- q_c （或 p_s ）：1 个单位长相当于 2 MPa；
- f_s ：1 个单位长相当于 0.2 MPa；
- u （或 Δu ）：1 个单位长相当于 0.05 MPa；
- F ：1 个单位长相当于 1。

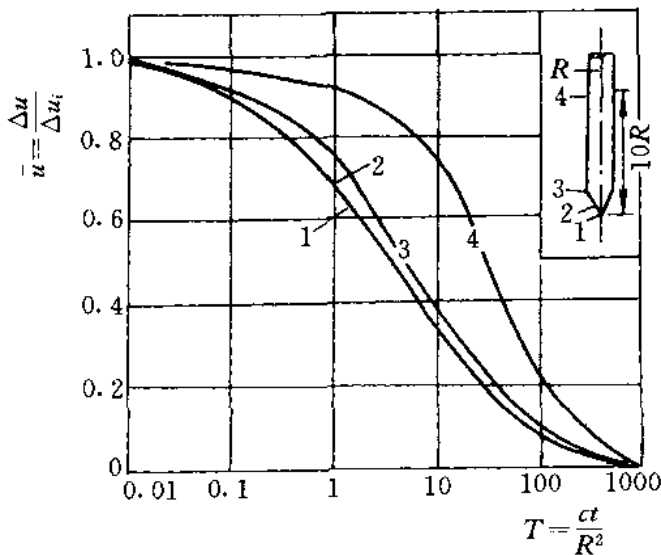


图 5.2.2 60° 锥的消散曲线

表 5.2.2 锥角 60°探头时间因数值

透水板位置 T	消 散 度 \bar{u} (%)				
	80	60	50	40	20
锥尖和锥面	0.44	1.9	3.7	6.5	27
锥 底	0.69	3.0	5.6	10	39
探杆 (10 R)	7.3	22	33	47	114

5.2.4 记录的超孔隙水压力消散曲线是在停止均速贯入后,从初始值 u_i 一直消散到静水压力值 u_0 为止。当研究消散规律时,主要是绘制超孔隙水压力 $\Delta u_i (=u_i - u_0)$ 消散,为了消除初始超孔隙水压力的影响因素,用初始值 $\Delta u_i (=u_i - u_0)$ 对比进行归一化 $\bar{u} (= \Delta u_i / \Delta u_i)$ 。当固结时, \bar{u} 值从 1 减到零。相应的固结度 $U (=1 - \bar{u})$ 就从零到百分之百。根据归一化的消散曲线,选择相应于不同固结度时的经历时间 t (本规程建议选用 t_{50}) 进行固结系数估算。

动力触探试验

SL237—047—1999

1.0.2 本规程列入了轻型、重型和超重型三种动力触探，超重型为国内开发的。

轻型动力触探的优点在于轻便，在施工验槽、填土勘察、查明暗浜软土等方面尚有实用价值。重型动力触探是应用最广泛的动力触探试验，已经积累了较多的经验，而且它的落锤能量与标准贯入试验及国际上通用的动力触探试验相一致。

动力触探试验的应用从一般的砂土向碎(卵)石发展。对于比较密实坚硬的土层，动力触探宜加大触探能量而增大贯入能力。法国、原苏联的有些动力触探落锤质量超过 100 kg(例如法国 E. T. F, 落锤质量 150 kg), 落距达 1.0 m 或更多。欧洲动力触探试验标准规定对坚硬的土层可以调整触探能量, 必要时落锤质量可增加到 127 kg, 落距增大到 1.0 m。我国在成都地区应用落锤质量 120 kg, 落距为 1.0 m 的超重型动力触探试验, 在评价成都地区卵石地基的实际应用中取得了经验。为了适应对碎(卵)石类土勘察的需要, 将这种超重型动力触探试验列入本规程, 以利普遍推广和进一步积累经验。

触探试验适用土层如图 1.0.2 所示。

1.0.3 以每贯入一定深度所需的锤击数为触探指标。这种指标虽然比较直观，但却存在着很重要的缺陷。主要是：不同触探仪参数得出的触探击数不便于互相对比；它的量纲也不利于与其他物理力学性质指标进行对比。因而，有趋向于用动贯入阻力作为动力触探的应用指标。例如原苏联国家标准 ГОСТ19912—74 规定以土的假定动阻力作为计算指标。这个假定动阻力与动力触探能量指数和锤击时的能量损失、侧壁摩擦以及每击贯入度有关。欧洲触探试验标准虽然仍规定以每贯入 0.20 m 所需的锤击数作为触

试验类型		粘质土				砂类土					碎石土		
		淤泥	粘土	粉质粘土	砂质粘土	粉砂	细砂	中砂	粗砂	砾砂	圆砾	卵石	漂石
静力触探													
标准贯入试验													
动力触探	轻型 N ₁₀												
	重型 N _{63.5}												
	超重型 N ₁₂₀												

图 1.0.2 触探试验的适用土层

探指标，但同时列出了动贯入阻力的计算公式。本规程采取了与欧洲触探试验标准相似的办法。

3.1.1 国外的动力触探类型较多，例如法国常用的动力触探有 20 种以上。但是应用广泛且较有代表的是欧洲触探试验标准规定的两种类型和原苏联常用的几种类型。表 3.1.1 列出了本规程的动力触探仪和国外类型的对比。

表 3.1.1 国内外常用的动力触探仪

触探类型		落锤质量 M (kg)	落距 H (m)	探头直径 (mm)	探头截面积 A (cm ²)	能量指数 P_0 (J/cm ²)
中国	轻型	10	0.5	40	12.6	3.9
	重型	63.5	0.76	74	43	11.0
	超重型	120	1.00	74	43	27.4
原苏联	轻型	30	0.40	74	43	2.7
	中型	60	0.80	74	43	11.0
	重型	120	1.00	74	43	27.4
欧洲	DPA	63.5	0.75	62	30	15.6
	DPB	63.5	0.75	51	20	23.4

国内外常见的动力触探探头截面积为 $10\sim 43\text{ cm}^2$ 。截面积较大的探头应配合较大的触探能量。一般用触探能量与探头截面积之比值作为衡量的指标，用能量指数 P_0 (Potential Energy Index) 表示：

$$P_0 = \frac{mgH}{A} \quad (3.1.1)$$

式中 P_0 ——动力触探能量指数， J/cm^2 ；

m ——落锤质量， kg ；

g ——重力加速度， $=9.8\text{ m}/\text{s}^2$ ；

H ——落距， m ；

A ——探头截面积， cm^2 。

3.1.3 除了落锤部分（包括落锤质量和落距，它们与重力加速度之积称为触探能量）以外，最主要的触探仪参数就是探头的外形和尺寸。

探头一般为圆锥形。个别国家如瑞典、西班牙也有采用尖锥截面为 $40\text{ mm}\times 40\text{ mm}$ 的正方形探头。锥角一般都为 60° 或 90° 。1977 年欧洲标准采用了联邦德国和瑞典等国常用的 90° 锥角，又说明 60° 也可能用。西班牙的 A. O. uriel 等人对从 15° 到 180° 八种不同锥角的探头进行了对比试验，结果表明：锥角对探头阻力影响不大。按国内常用尺寸，本规程规定探头圆锥角为 60° 。

在本规程中对试验设备的许多技术条件作了规定，如锥的质量和落距的允许误差；探头直径和尖端的最大允许磨损量；触杆的直径和每米质量；锤座的直径、锤座、导向杆的总质量等。有些规定是实践的经验总结，有些是为了逐步和国际上的标准接近。

4.2.3 本规程规定了贯入锤击速率为每分钟 $15\sim 30$ 击。这个速率略低于欧洲触探试验标准所规定的每分钟 $20\sim 60$ 击。另外还规定尽可能连续进行。这个规定与欧洲触探试验标准也是一致的。

4.2.5 我国现行的规范没有提及侧壁摩擦影响问题。但原苏联国

家标准和欧洲触探试验标准都提到了。欧洲标准中建议的两种动力触探方法,主要区别是对侧壁摩擦的考虑和处理方法有所不同。A型动力触探(DPA)是用泥浆或套管来消除侧壁摩擦,因而在评价时可以不考虑侧壁摩擦的影响,B型动力触探(DPB)不用泥浆或套管,孔壁不能保持稳定,这种试验的侧壁摩擦是不能忽视的。该标准要求用转动触探杆并测定相应的扭矩来估计侧壁摩擦影响。

国外有些资料介绍,对于一般的土层条件,在深度15 m以内用泥浆护孔和无泥浆护孔的试验结果基本一致,因而可以不考虑探杆的侧壁摩擦的影响,深度大于15 m则差别较大。重型动力触探在深度不大(一般可为12 m左右)的范围内,侧壁摩擦对击数的影响是不显著的,可以不予考虑。但有随土的密度和触探深度的增大而增大的趋势。

侧壁摩擦的影响是客观存在的。但想用一个固定的修正系数来适应所有条件,显然是不符合实际情况的。因此,本规程建议在深度较大时,应采取措施(用泥浆或套管)消除侧壁摩擦。

5.0.2 动贯入阻力采用荷兰动力公式。该式是建立在古典的牛顿非弹性碰撞理论,即不考虑弹性变形量的消散。故限于:

- 1 贯入土中的深度小于12 m,贯入度2~50 mm。
- 2 触探器系统的质量与落锤质量之比 $\left(\frac{m_1}{m}\right)$ 宜小于2。

若实际情况与上述条件差别大时,采用规程式5.0.2时应慎重。

5.0.3 触探实践表明:当触探头尚未到达下卧土层时,在一定深度以上,对下卧土的影响已经“超前”反映出来。当探头已经穿透上覆土层进入下卧土层中时,在一定深度内,对上覆土层的影响仍然会有一定的反映。这两种情况分别称之为触探的“超前反映”和“滞后反映”现象。特别是松软土比较显著。

根据试验研究,当上覆为硬层,下卧为软层时,对触探击数的影响范围大,超前反映量(最大可达0.5~0.7 m)大于滞后反

映量（约为 0.2 m）。当上覆为软层，下卧为硬层时，影响范围小，超前反映量（约为 0.1~0.2 m）小于滞后反映量（约 0.3~0.6m），两者差值也较小。规程规定：在考虑工程地质分层界限时，要考虑触探曲线的“超前反映”和“滞后反映”。

旁 压 试 验

SL237—048—1999

1.0.1 旁压仪包括预钻式和自钻式两种。目前较广泛使用的是预钻式，因此，本规程是以预钻式旁压试验为主进行编写。自钻式由于自钻系统、变形测量系统各不相同，试验方法编写的比较原则，在具体操作上可参照产品说明书进行。

1.0.3 目前国内生产的旁压仪额定压力为 2.5 MPa，故测试深度限于 25 m，只适用于粘质土。国外引进的旁压仪额定压力可达 10MPa，甚至更高，测试深度也大于 50 m，适用土类已扩展到砂土、碎石土、残积土、软岩和风化岩。

3.1.1 旁压器分单腔式和三腔式。当旁压器的有效长径比大于 4 以上，孔壁土体变形属于无限长圆柱扩张轴对称平面应变问题。这样单腔式与三腔式所得的结果无明显差别。

4.1.1, 4.1.2 成孔质量要求。成孔质量好坏是预钻旁压试验成败的关键。根据勘察实践总结的经验，成孔质量影响旁压曲线的形态。图 4.1.1 中的 *a*、*c*、*d* 型曲线都是反常的旁压曲线。*a* 线反映钻孔直径太小或有缩孔现象，旁压器被强行压入钻孔中，试验前，孔壁已受到挤压，故旁

压曲线前段消失，找不到 p_0 值和 V_0 值。*c* 线的特点是在曲线上有一段很长的 V_0 值，说明孔径太大，旁压器的膨胀量相当一部分是由于弹性膜与孔壁之间间隙产生的。*d* 线反映成孔过程中孔壁土体被严重扰动，当加压时，扰动土层被压缩，

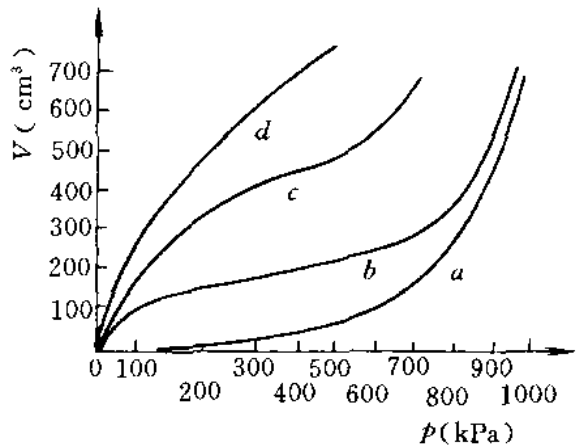


图 4.1.1 成孔质量对旁压曲线的影响

占据较多的体变量，因而，达不到试验要求就被迫停止试验。

孔壁扰动是试验中孔壁出现压缩层（千层饼扰动带）的根本原因，压缩层的存在影响了成果的判释和应用，尤其对旁压模量 E_m 值影响更大。

鉴于上述情况，在规程中规定了钻孔成孔要求及成孔直径的规定。

4.1.3 旁压试验的布点，应在了解地层剖面的基础上进行，以便能合理地在有代表性的位置上布置试验。布置时要保证旁压器的量测腔在同一土层中。关于旁压试验应力的影响范围，根据实践经验，其影响范围：水平约为 60 cm，上、下约为 40 cm。为避免相邻试验点的相互影响，规定试验点的垂直距离不宜小于 1 m。

4.1.11 加压等级的选择和设计是个技术问题。这是因为若加压等级选择不当，不但延长了试验时间，而且在旁压曲线上不易获得 p_0 和 p_f 的特征点。国内几种规格旁压仪的加压方法不太统一，大体是按照仪器说明书进行的。原则上都是按土的预估临塑压力 p_f 值或极限压力 p_l 值而定。如 PY2—A 型旁压仪说明书中规定：每级压力为预估的临塑压力 p_f 的 1/5，每个试验一般加 10 级左右，每级约加压 50 kPa；GA 型旁压仪的加压等级按极限压力 p_l 的 1/10 考虑，每个试验加 10~15 级，每级加压 50~100 kPa。

分析研究了上述各种规定后，采用了通用的加压等级，即规定一般按预估极限压力的 1/8~1/12 的等级加压，同时考虑到按土的性状划分等级更符合实际情况。为了易于获得 p_0 值和 p_l 值，在规程中又推荐了在临塑压力前后不同的加压等级。

4.1.12 加压速率或相对稳定标准是旁压试验中一个很重要的问题。不同的加压速率反映了不同的机制。目前国内常用的加压速率有 1、3、5、10 min 四种标准。人们将 1、3 min 的标准称为“快速法”，将 5、10 min 的标准称为“慢速法”。

通过对“快速法”和“慢速法”的对比试验表明：两种不同加压速率对临塑压力和极限压力影响不大。为提高试验效率，规程规定了 1 min 和 3 min 的快速法的稳定标准。

4.1.13 旁压试验终止试验条件为：

1 加压等级接近或达到极限压力。

2 量测腔的扩张体积相当于量测腔的固有体积，即约 600 cm³。对国产 PY2-A 型旁压仪，因量水管的断面积为 15.28 cm²，所以，规定量水管水位下降值 S 为 40 cm 时，即终止试验。

法国 GA 型旁压仪规定，当蠕变变形 ($V_{60''}-V_{30''}$) 等于大于 50 cm³ 或量水管读数大于 600 cm³ 时应终止试验。

4.2.2 在钻进时，把旁压器插入土中，借自重将切削器插入土中一段距离，开动液压电动机或钻机带动切削器旋转，并根据土的软硬程度施加一定的压力进行钻进。

钻进速度必须控制，对一般地基土，可以采用恒速 0.25m/min。由于不同的土类，施加的压力也不同，因此，建议采用表 4.2.2 所列的速度值。

表 4.2.2 钻进速度建议值

土类及状态	流塑粘土	软塑粘质土	软塑粘土	可塑、硬塑 粘质土	可塑、硬塑 粘土	密实砂
速度 (m/min)	1.2	1	0.65~0.5	0.65~0.5	0.2~0.1	0.2~0.1

4.2.3 根据法国道桥试验研究所的方法，建议每分钟的体应变 $\left(\frac{\Delta V}{V_c}\right)$ 为 2%；试验进行到体应变达 20%~25%，可达极限压力。因此，大约需要 10~13 min。这种速率对粘土属不排水，对砂土属排水。

5.0.1 静水压力的计算应考虑以下两种条件，参见图 5.0.1。

1 无地下水时：

$$p_w = (h_0 + z)\gamma_w \quad (5.0.1-1)$$

2 有地下水时：

$$p_w = (h_0 + h_w)\gamma_w \quad (5.0.1-2)$$

式中 h_0 ——量管水面离地面孔口高度，cm；

z ——地面至旁压器中腔（量测腔）中心点的距离，cm；
 h_w ——地下水位离孔口的距离，cm；
 γ_w ——水的容重， kN/m^3 。

5.0.2 旁压试验曲线的绘制应有统一的规格、标准、尺度和准确度等。图面大小应不小于 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 。旁压试验的压力一律要经过约束力和水头压力的校正，特别要注意地下水位记录数据。其变形要经过仪器综合变形的校正。避免用现场直接读数绘制旁压曲线，如用现场直接读数绘制曲线时，所求得特征值也要经过校正后使用。

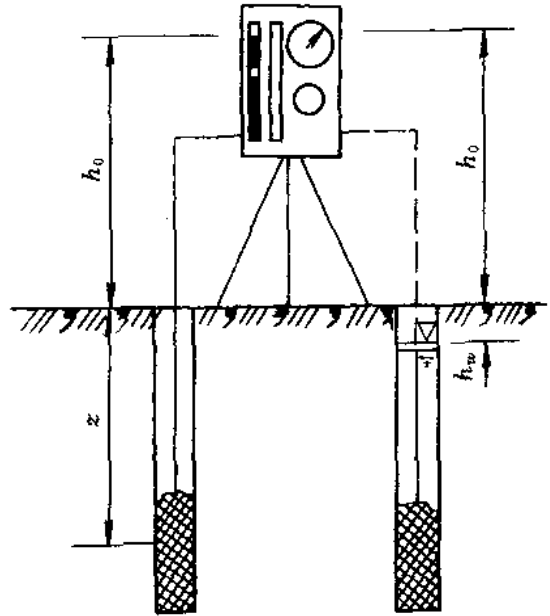


图 5.0.1 静水压力计算示意图

5.0.3 根据梅纳尔的理论，

p_0 、 p_f 值是蠕变压力曲线（以 60s 与 30s 间隔内体积变化值为该级压力下蠕变值划出的 $P \sim V_{60''-30''}$ 曲线）上的第一和第二个拐点。但是画该曲线较麻烦。同时，由于钻孔扰动，缩孔等影响，按该法求得的 p_{om} 值比实际的原位初始侧向（水平）应力大，因此，在规程中推荐了简捷求 p_0 的方法。

至于 p_f 值，相对应 $p \sim V$ 旁压曲线上直线终点 c 对应的应力值。当该点难以直观确定时，可用蠕变曲线第二拐点对应的压力值作为 p_f 值。

关于求取 p_l 值，根据梅纳尔理论， p_l 值是当 $p \sim V$ 旁压曲线通过临塑压力后，趋于铅直，即与纵坐标平行的渐近线相对应的压力值。相当于最大体积增量 $V_l (=V_c + 2V_0)$ 时对应的压力值。国外求取 p_l 值的方法较多，如双对数法、倒数曲线法和相对体积法等。近年来，还发展了一些数解法。规程中推荐了梅纳尔的倒数曲线法。该法是把临塑压力 p_f 以后曲线部分各点的体积 V （或

S) 取倒数 $1/V$ ($1/S$), 作 $p \sim 1/V$ 关系曲线 (近似直线), 在直线上取 $\frac{1}{2V_c + V_0}$ 所对应的压力值即为极限压力 p_l 。

极限压力 p_l 与原位土的不排水抗剪强度 C_u 的关系, 在假定孔穴周围土体为理想弹塑性材料, 则:

$$p_l = p_0 + C_u \left[1 + \ln \frac{E_u}{2(1 + \mu)C_u} \right] \quad (5.0.3)$$

式中 E_u ——土的不排水变形模量, kPa;

μ ——土的泊松比, 对饱和土为 0.5。

5.0.4 目前, 国内采用两种确定地基容许承载力的方法, 即临塑压力法和极限压力法。以往临塑压力法有三种: $q_k = p_f$, $q_k = p_f - p_0$, $q_k = p_f - \xi \gamma h$ 。在 $q_k = p_f$ 式中, 没有减去侧压力, 不宜采用。 $q_k = p_f - \xi \gamma h$ 又因其深度效应问题尚未解决, 目前只适用于浅基。因此, 在规程中推荐了 $q_k = p_f - p_0$ 这个基本公式。

对于红粘土、软淤泥等, 旁压试验曲线通过临塑压力后呈现急剧拐弯, 采用极限压力法为宜。其计算公式过去曾用梅纳尔公式, 即 $q_A = q_0 + \frac{k(p_l - p_0)}{F}$ 。简化为 $q_A = q_0 + \frac{p_l - p_0}{F}$ 。该式已包含了深宽修正因素 ($k=1.0$, $q_0 = \gamma h$), 与 $q_k = p_f - p_0$ 公式不协调。因此, 推荐 $q_k = \frac{p_l - p_0}{F}$ (F 为安全系数取 2~3) 公式。各类土的安全系数根据统计列入表 5.0.4 以供参考。

表 5.0.4 各类土的安全系数

土 类	安全系数	统计数	土 类	安全系数	统计数
高液限粘质土(粘土)	2.6	$n=112$	黄 土	2.7	74
中液限粘质土(粉质粘土)	2.6	114	黄土状亚粘土	2.1	49
低液限粘质土(粉质粉土)	3.0	89	填 土	2.5	12
粉 细 砂	3.8	15			

5.0.7 旁压试验采用“快速法”, 相当于不排水条件, 根据弹性理论, 推导出了旁压模量 E_m 。

由于影响旁压模量的因素较多，各类土的载荷试验变形模量 E_0 与旁压模量 E_m ，室内压缩模量 E_c 与旁压模量 E_m 之间除个别地区外，目前还建立不起来完整的相关关系。因此，在规程中没有提出相关关系式。建议各地区可根据具体情况采用 $E_m = 2(1 + \mu)(V_c + V_m) \frac{\Delta p}{\Delta V}$ 公式，或建立本地区的旁压模量计算公式。

对于自钻式旁压试验，仍可用规程的公式计算旁压模量。由于预钻式和自钻式的初始条件不同，土体被扰动的程度也不同，因此，提供旁压模量时应注明旁压仪类型。

载 荷 试 验

SL237—049—1999

1.0.2 平板荷载试验由于它只反映承压板以下大约 1.5~2.0 倍承压板直径或宽度的深度内土层的应力、应变和时间之间的综合性状，因而只用于浅层地基和地下水位以上的地层。同时，承压板影响范围内的土层应均一。

1.0.3 对于深层荷载试验，以往曾采用在钻孔底部进行。由于孔底土体的扰动，板与土体之间的接触难于控制，同时应力复杂难于分析，限制了试验成果的应用，该方法早已不用。因此，螺旋板荷载试验代替深层平板荷载试验。

3.1.1 承压板面积的选择。荷载试验所得的荷载与沉降曲线的形状取决于承压板的大小、土层的组成以及加载的特性、速率和频率等。承压板的尺寸效应，包括形状和大小是主要影响因素之一。在试验土层和加载条件一定时，承压板的大小，影响地基土体的破坏形式。在以往许多对不同面积的承压板荷载试验的成果中，得出当承压板面积在一定范围内，沉降量 S 随承压板直径 D （或宽度 B ）的增大而增大；当承压板面积大到一定尺寸后，沉降量不随承压板直径的增大而增大。当面积太小时，沉降量随承压板直径的减小反而增大；上述两个转折点所对应的承压板直径值分别为 30 cm 和 500 cm。

国外采用的标准承压板直径为 0.305 m（1 英尺）。国内采用的承压板面积为 0.25~0.50 m²。从生产实践出发，将 0.1m² 作为承压板面积的下限是合理的。在大多数情况下，用面积 0.1~0.25m² 的承压板进行试验所获得的成果是可靠的。

关于承压板的形状，从浅基承载力的理论计算来说，对其极限承载力是有影响的。但方形和圆形的影响承载力的形状系数是相同的，因而，承压板的形状可以采用相同面积的方形或圆形。

3.1.2 关于加载准确度的问题。除原苏联标准 ГОСТ12374—77 规定相对误差不大于 10% 以外，其他国家没有明确规定。在国内 GBJ7—89《建筑地基基础设计规范》有关载荷试验的条款中，也没有荷载准确度的规定。原 SD128—026—86《土工试验规程》第二分册中“载荷试验”中规定：出力相对误差不大于 5%。考虑到 GB50021—94《岩土工程勘察规范》的载荷试验条款中，规定加荷的“测量精度应达最大荷载的 1%”；同时，在计算相对误差时，由于被测量值的不同，相对误差值也不同，这对选择仪表的准确度等级不便。因此，以引用误差表述。本规程修改为“出力误差不得大于全量程的 1%”。这种规定要求液压荷载源所用的压力表应采用 1.0 级的，或采用相应准确度负荷传感器和测力计比，这比原规程（SD128—86）规定的等级要高些。

对液压荷载源来说，要求具有良好的稳压效果。因此，压力稳定性必须考虑液压系统的密封性，液压脉动及迟滞爬行等因素的影响。

3.3.1 试坑底面宽度。我国多数标准规定试坑底面宽度不小于承压板宽的 3 倍。在影响范围的试验土层，应属于同一土层，即从工程地质观点出发，土层的地质年代、成因类型、地基土类别、主要物理力学性质方面属于同一层次。对于非均匀土层，例如，在冲积相的多层地层或人工改良的复合地基上进行载荷试验，在分析和应用试验成果时，需借助于理论知识和实践经验慎重对待。

3.3.4, 3.3.5 关于加载方式和等级。载荷试验的加载方式有等级加荷相对稳定法，沉降非稳定法（快速法）和等沉降速率法。加载方式取决于载荷试验的目的。若仅确定地基承载力，可以采用沉降非稳定法（快速法）或等沉降速率法。它所反映的是不排水或不完全排水条件的变形特性。但必须有比对的资料。在这次规程修改时，只列了沉降相对稳定法，即一般所谓的慢速法。加载等级从整理分析 $p \sim S$ 曲线的需要来看，一般情况下，一个试验有 8~10 级，便能较好地反映 $p \sim S$ 特征，同时，也可有 4~5 点在似弹性变形段内。因此，本规程建议按预估极限荷载的 $1/8 \sim 1/10$ 作

为荷载增量的原则是合适的。

关于第一级荷载量,本规程不考虑挖除试坑土的自重压力,其理由同室内压缩试验的荷载不考虑土自重压力一样。土自重的影响会反映在 $p \sim S$ 曲线上。但设备的重量应计入荷载中。

3.3.6 沉降观测:定时进行沉降观测的目的在于获得沉降随时间发展过程,以便确定加荷时间。

3.3.7 破坏标准:浅层平板载荷试验是在模拟浅基的荷载作用下进行的。实践和研究表明:土的性状、荷载特性、基础宽度和埋深等因素对地基的破坏形态有影响。不同的土类,具有不同的剪切破坏特征。虽然可以将地基的破坏类型归纳为整体剪切破坏、贯入剪切破坏、局部剪切破坏三种,但在试验中准确判断,有时比较困难。本规程所列终止试验的四种情况,只能认为适用于一般情况。对于特殊土层,应根据经验分析判断。

3.4.2 $p \sim S$ 曲线的校正问题。在载荷试验中,由于各种因素的影响,使 $p \sim S$ 曲线偏离坐标原点。我国各系统有的规程,以及原苏联 79 年的标准提出,不论 $p \sim S$ 曲线的形态如何,一律按 $p \sim S$ 曲线前段呈线性关系用平均直线法进行校正。欧、美各国的标准并没有明确规定要进行校正。

$p \sim S$ 曲线是否校正,主要看是否对变形模量、临塑压力和极限压力影响的程度。从临塑压力和极限压力来看,校正与否影响不大;对于变形模量,规程所列的公式中, p 值规定的比较灵活,即按实际所需的压力取值,而 S 则为所需压力 p 相对应的沉降量,同时,零点的校正实质上应该是对第一级荷载下相应的沉降量校正问题。鉴于上述理由,校正与否对变形模量的计算影响也是不大的。因此,规程中没有明确规定对 $p \sim S$ 曲线必须进行校正。

如果 $p \sim S$ 曲线用于进行其他分析研究,需对其进行校正时,可以参考有关文献所建议的方法,如平均直线法、三点法以及高次多项式拟合法等进行校正。

3.4.3 确定临塑压力及极限压力的方法。在本规程中,除对曲线

具有明显直线段及转折点的 $p \sim S$ 曲线，规定可直接用转折点确定临塑压力外，对其他形状的曲线未作规定。为了便于确定转折点，可绘制 $\lg p \sim \lg S$ ， $p \sim \frac{\Delta S}{\Delta p}$ 等其他辅助曲线。

对于极限压力确定方法：

1 当沉降急剧增加，承压板周围出现裂缝和隆起，说明受荷地基发生整体剪切破坏，这属于强度破坏的极限状态。

2 沉降速率加速或等速沉降，表明地基土产生塑限破坏或刺入剪切破坏，这是变形破坏极限状态。

3 关于极限沉降标准，GBJ7—89《建筑地基基础设计规范》规定：如承压板面积为 $0.25 \sim 0.50 \text{ m}^2$ ，对低压缩性土和砂土，可取沉降量对承压板尺寸之比 (S/b) 等于 $0.01 \sim 0.015$ 所对应的荷载值；对高压缩性土可取 S/b 等于 0.02 所对应的荷载值。该值为承载力基本值的确定方法。而极限沉降标准目前有取 S 等于 $0.1 b$ 和 S 等于 $0.06 b$ 两个标准。

3.4.4 变形模量的计算方法。变形模量的计算是在地基土可侧向变形条件下，由弹性理论求得，仅适用于试验土层属于同一层次的均匀地基。实际上土体的应力应变关系是非线性的，因此，不少研究者探索用割线模量、弦线（或切线）模量用于计算地基变形。

4.3.1~4.3.3 本规程列入了三种浸水试验方法，即单线法、双线法、饱水单线法。对测定湿陷起始压力，三种方法均可，但饱水单线法只需作一点，不受土层均匀程度差别的影响；单线法可在某一预定荷载时浸水，对测定某级荷载浸水湿陷量比较明确；双线法在理论上可以测定最大荷载以内任一荷载的湿陷量，对全面观察土层在不同压力下的湿陷性是较经济的方法。由于双线法和多点单线法要进行平行试验，受土层的不均匀的影响较大。

关于浸水饱和程度的鉴定。本规程以饱和含水率为标准，即试验土层在浸水前后取原状土样测定密度等指标，推算饱和含水率。浸水后含水率达饱和含水率的 $85\% \sim 90\%$ ，即认为饱和。

对于单线法,因为先加荷后浸水,一般只用湿陷速率控制。当湿陷速率达到相对稳定标准,即认为饱和程度也达到了要求。

4.4.2 确定湿陷起始压力的方法。

1 在 $p \sim S_{sh}$ 曲线上有转折点时,在曲线上作两切线,其交点对应的压力即为湿陷起始压力。若曲线上出现两个转折点,如图 4.4.2 所示,则在 A、B 两点之间取值。

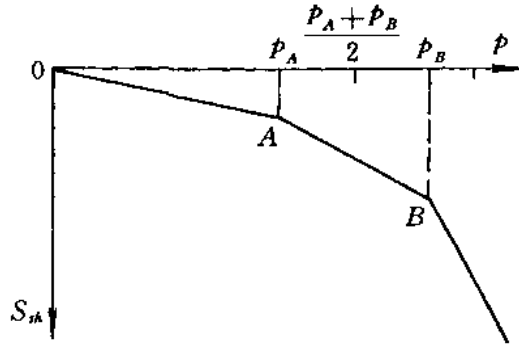


图 4.4.2 确定起始湿陷压力示意图

2 当曲线上无明显转折点时,可根据曲线的形态取 S_{sh}

小于、等于 $0.02b$ 所对应的压力作湿陷起始压力。对湿陷性小的土,取值大些;对湿陷性较大的土,取值小些。

5.1.1 螺旋板的尺寸系列比较多,本规程建议采用 GB/T15406—94 第二篇 7.6 中所列尺寸。也可根据不同土层及现有仪器的尺寸规格选用。

为了消除压杆与土的摩擦力对成果的影响,在紧接螺旋板上端与压杆之间连接一测力传感器直接测量施加于螺旋板上的荷载。

5.3.2 螺旋板载荷试验的可靠性,主要取决于螺旋板旋钻时对土体的扰动,为尽量保证土体的原有状态,应控制螺旋板每旋转一周钻进一个螺距。

5.3.6 试验点沿深度的间距一般为 1 m,对均匀土层也可以 2~3 m 间距一个试验点。根据已有的试验,最大试验深度达 30 m。

5.4.3 从理论上讲,在原位有效自重压力 p_0 之前,螺旋板没有或只有很小的沉降,但实际上往往有少量沉降产生,这可能与土体的扰动有关。因此,取 $p \sim S$ 曲线的直线段与 p 轴的交点作为 p_0 值。

5.4.4 在地层内部用螺旋板载荷试验的结果计算变形模量的理

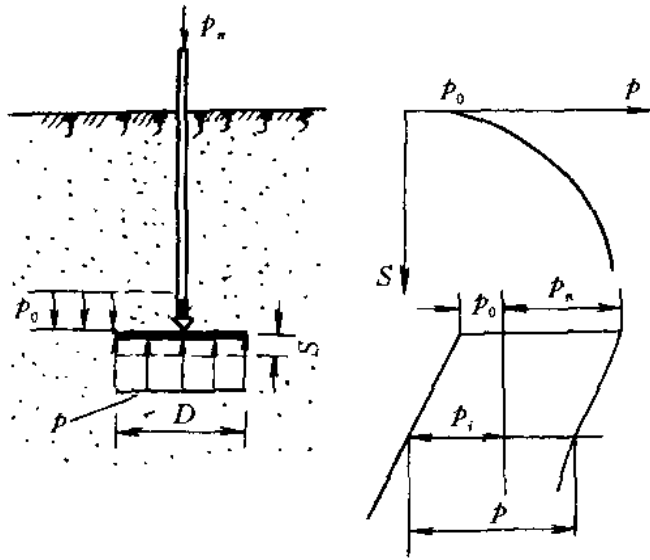


图 5.4.4-1 地层内圆盘沉降计算模式

论模式如图 5.4.4-1。该图表示：在螺旋板处于某一深度，该处的上覆有效自重压力为 p_0 ，作用在螺旋板上的附加压力 p_n 。在该种应力条件下，螺旋板下一直径为 D 、厚度为 dz 土体的变形量（即螺旋板的沉降量） S 应是有效上覆力 p_0 、附加压力 $p_n = (p - p_0)$ 、螺旋板直径 D 和土的模量 E_{sc} 的函数。

即：

$$S = \frac{A}{m} \frac{(p' - p_0')}{p_a} D = \frac{A}{m} \frac{p_n}{p_a} D \quad (5.4.4-1)$$

或

$$m = \frac{A}{S} \frac{(p' - p_0')}{p_a} D = \frac{A}{S} \frac{p_n}{p_a} D \quad (5.4.4-2)$$

式中的 m 为无因次的模量系数； A 为无因次的沉降系数，与 p_0 、 p_n 有关，可查规程图 5.4.4。

由于土的变形模量与土的类别、应力状态和应力水平有关，因而用一系数 A 来统一沉降表达式；同时，用理想化的应力条件来定义模量而用无因次的模量系数 m 来表示。这样，变形模量的普遍表达式即为：

$$E_{sc} = m P_a \left(\frac{p}{p_a} \right)^{1-\alpha} \quad (5.4.4-3)$$

一定的应力指数 α 对应于一定的土类和土的状态。若将应力指数 α 取值为 1, 1/2, 0 三值, 则相应的土类和土的状态为:

1 α 等于 1, 则 E_{sc} 等于 mp_a 。这意味着沉降系数 A 近似常数, 约等于 0.72。常模量的概念显示土体具有弹性性质。这类土包括岩石、硬冰渍土、超固结土以及饱和粘性土的初始不排水条件。

2 α 等于 1/2, 相应于模量 E_{sc} 等于 $m\sqrt{p_a p}$ 。从规程图 5.4.4 (a) 中可看出: 沉降系数 A 随着 p_n 和 p_o' 的增加而减小, 这种模量很大程度上相应于砂质土和粉质土。模量系数 m 从较小的数 50 开始达到几百。

3 α 等于 0, 则 E_{sc} 等于 mp 。从规程图 5.4.4 (b) 中看出: 沉降系数 A 随着 p_o 的增加而急速减小。该种线性模量相应于正常固结的饱和粘土和很细的粉质土。模量系数 m 可从 5 变化到 50。

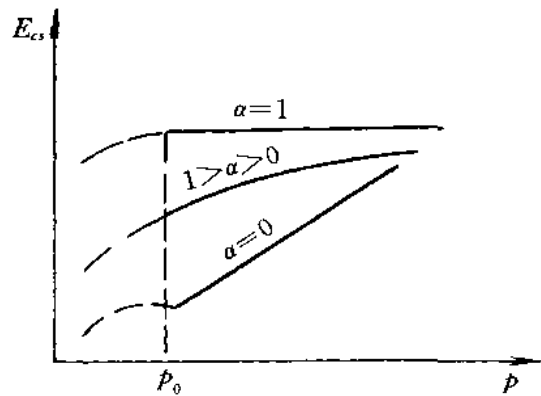


图 5.4.4-2 典型土类状态与模量关系

上述三种典型土类的模量与应力状态的关系如图 5.4.4-2。

根据地层内螺旋板载荷试验, 测得载荷 p_n 与螺旋板的沉降值 S , 再依据土类从规程图 5.4.4 查得沉降系数 A , 即可求得地层的变形模量系数 m 。最后利用 m 求得变形模量 E_{sc} 。

5.4.5 关于固结系数的计算。利用螺旋板载荷试验所观测的沉降随时间变化的曲线计算固结系数, 是根据径向固结理论中所定义的时间因数 T_r , 即:

$$T_r = \frac{C_h}{R^2} t \quad \text{或} \quad C_h = \frac{T_r}{t} R^2 \quad (5.4.5-1)$$

式中 T_r ——径向排水时间因数, 无因次数;

C_h ——水平向固结系数, cm^2/s ;

R ——螺旋承压板半径, cm;

t ——荷载增加后的历时, s。

径向固结微分方程式:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_h \left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) \quad (5.4.5-2)$$

假定承压板下土层的边界条件如图 5.4.5 所示, 则对固结微分方程进行求解得到固结度 U_r 与 T_r 的关系。因 T_r 与 U_r 诸参数都是无因次的, 如将 U_r 与 T_r 的理论关系曲线同试验所得的沉降与时间曲线相比较, 就可以得出 T_r 与 t 的相应值, 从而求得 C_h 。

U_r 与 T_r 的理论关系, 在固结度达 60% 之前近似于抛物线, 其表达式为:

$$U_r^2 = CT_r \quad \text{或} \quad U_r = C \sqrt{T_r} \quad (5.4.5-3)$$

固结度大于 60%, 时间因数 T_r 与固结度 U_r 的关系为:

$$U_r = 1 - 0.692(\exp^{-5.78T_r}) \quad (5.4.5-4)$$

当固结度 $U_r = 90\%$ 时, $T_r = 0.335$, 所以:

$$C_r = T_{90} \frac{R^2}{t_{90}} = 0.335 \frac{R^2}{t_{90}} \quad (5.4.5-5)$$

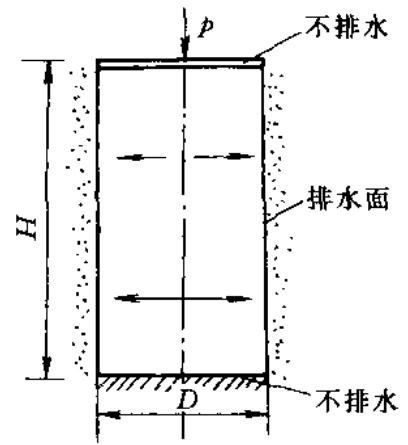


图 5.4.5 试验土层边界条件

波 速 试 验

SL237—050—1999

1.0.1 地层在地震荷载作用下的反应分析,动力基础的设计和结构物受动力作用的反应计算,都需要地层的动弹性模量 E_d 、动剪切模量 G_d 。用原位测定场地地层的压缩波速度 V_p , 剪切波速 V_s 值,计算得到的地层动弹性模量 E_d 、动剪切模量 G_d 被认为是最可靠的方法之一。

测定土体动力参数的方法有试验室内测定和原位测定。试验室测定包括共振柱法、动三轴和动单剪测定法等。原位测定包括跨孔波速法,波速检层法,稳态振动法等。每种方法各有优缺点。原位测试可以保持地层的天然结构和原有应力状态。

1.0.2 由于跨孔波速测试主要是测定直达的压缩波初至和第一个直达剪切波的到达时间。而且振动波直接在所测地层中传播,故测出的 V_p 、 V_s 值反应了地层在天然结构和原有应力条件下的特征。另外,采用跨孔波速测试方法,能测出一些较薄软弱层的动力参数。从理论上讲,能测出钻探所及深度内地层的动力参数值。

单孔波速法,又称波速检层法。振源可以是压缩波,也可以是剪切波。常用的是剪切波。为了提供剪切波,在孔口放置混凝土板或木板,上压重物,用锤水平敲击板端,由于板与地面水平接触,故产生水平剪切波。

面波法由于测试深度不大,在工程勘察中较少用,但可用于碾压填土的质量控制。

3.1.1 钻孔波速试验,主要是测出场地地层的剪切波速度 V_s ,要求振源能产生足够的剪切波能量,抑制压缩波能量,必须使振源产生的 S 波与 P 波能量比尽可能提高,故常采用能反复激振、并能反向冲击的机械振源装置。爆炸振源很少采用,这主要是难以在波的序列上辨别出第一个剪切波的到达点。机械振源装置目前

主要有两大类型：

1 一般通用的标准贯入试验装置。特点是结构简单，加工方便，易于操作，振动能量大，传播距离远。几乎把所有的能量集中在竖直轴上，能把大量能量转换成剪切能，产生很大的剪切波能量。这种振源装置主要用于土层中的跨孔波速试验。

2 井下剪切波锤，如图 3.1.1 所示。主要由一个固定的圆筒体和一个活动质量块组成，适用于各种地层中的钻孔波速试验。特别是能在钻孔中的任一深度处通过液压装置将筒体与孔壁紧贴。然后上、下拉动和松开连接质量块的绳子，使活动质量块上、下冲击固定的筒体，使地层产生很大的剪切波能量，并能重复激振，双向冲击，适用于测定较深地层中的动力参数。

面波法的激振源可以用机械激振、电磁激振和电液激振三种：

(1) 机械式稳态振动是用固定的机构、按固定的周期、循环往复地施加常扰力。这种常扰力通常用成对的质量块以固定的离心加速度循环的旋转，从而产生周期性离心力，作用于试体上。

(2) 电磁激振是利用一定频率和波形的信号发生器，将要求模拟的电信号输入到功率放大器予以加强输出功率。然后将具有一定功率和频率的谐波电流，输送到有电磁铁的固定线圈上，从而产生交变磁场，并驱动线圈产生模拟振动。

(3) 电液激振实际上是一电液伺服系统，比较复杂。

面波法采用机械激振最轻和最为简便。

3.1.2 钻孔波速试验采用三分量检波器作为检测振动信号的接收装置，它由三个检波

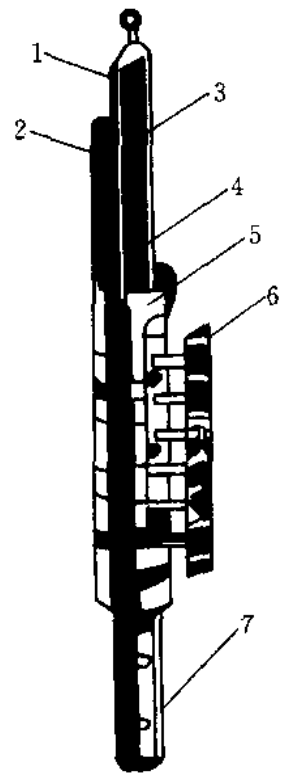


图 3.1.1 剪切波锤结构示意图

- 1—“张扩”液压管；
- 2—“收缩”液压管；3—上部活动质量块；4—活动滑杆；
- 5—井下锤的固定部分；
- 6—井下锤扩张板；
- 7—下部活动质量块

器，按相互正交的方向固定在一个圆柱形的非磁性的塑料管或铝合金管内。我国目前大量生产的三分量检波器的自振频率一般为 27 Hz 和 8 Hz。由机械振源装置激振所产生的剪切波序列的主要频率为 70~130 Hz，这种三分量检波器的自振频率为现场波序列主要频率的 $1/4 \sim 1/3$ 。从国外引进的三分量检波器的自振频率一般都是 8 Hz。检波器自振频率高，对埋置时的垂直度要求不严；自振频率低，埋置时要求尽可能垂直。

采用三分量检波器的目的，主要用竖直检波器接收剪切波，用相对于振源径向排列的水平检波器接受压缩波，同时可相互校验波到达的时间。

4.1.1 跨孔波速试验原是采用 2 个钻孔，后来发现由于振源触发器开关的延迟，波的传播路径改变等因素所产生的计时误差无法估算，势必影响波速值的准确度，因而建议每组跨孔波速试验采取 3 个钻孔，取间隔速度值，排除了振源装置一系列因素的影响，这种间隔速度值的准确度完全满足工程的要求。为了提高波速值的可靠性，每组跨孔波速试验最好采用 4~5 个钻孔，而且最好每组采用两个振源孔。此方法对验证资料的准确度是可行的，但费用太高，故本规程推荐每组跨孔波速试验用 3 个钻孔。

钻孔的孔距很重要，因为该方法的基础是接收直达的压缩波初至和第一个直达剪切波的到达时间。根据折射波的形成传播特点，最佳孔距的确定，既要防止接收到折射波，又要考虑到仪器的计时准确度，同时还要考虑振源能量所传播到的距离。理论分析表明：测试结果误差随孔距的增大而增加。根据国内多年来的实践经验，并参考国外有关文献，在规程中提出：土层中的孔距为 2~4 m，岩石中的孔距为 8~10 m。若为砂石土层，孔距可采用 4~5 m。

4.1.2 一般不用钢管作套管。因钢管本身波的传播速度大（大于 6000 m/s），容易传播钢管本身的剪切振动，会沿钢管长度产生波，导致波的传播和接收的复杂化。

不同的套管材料，充填材料，填料的密实度，以及采用套管

与否等对所测定的波速值的影响程度，尚需进一步积累资料，以便提出更合理的要求。

4.1.3 如果在钻孔内埋设内径 76~85 mm 的硬塑料套管，孔壁与套管之间的间隙必须灌浆或用砂充填，以保证波的传播。灌浆时，一般须采用灌浆管。

浆液是膨润土、水泥和水按照 1:1:6.25 的比例搅拌成混合物，其凝固后的密度一般为 $1.70\sim 2.10\text{ g/cm}^3$ 。灌浆一定要使整个孔壁与套管壁之间密实，不能出现空隙。

用砂充填时，应采用振捣或水冲等措施。此方法一般受深度限制。

4.1.5 为了准确地测定波速值，必须准确地计算出孔内各测点之间的水平距离 (L)。规程提出，当试验深度大于 15 m 时，必须用测斜仪对每个试验孔进行倾斜度测量。这一规定不意味小于 15 m 的钻孔倾斜与否，关系不大；相反，如果倾斜甚剧，又不进行测斜校正，计算所得的波速值仍有较大的误差。例如，两钻孔孔口间距 4 m，钻孔各向外侧倾斜 1° ，则在 15 m 深度处，钻孔间距将增至 4.52 m，相应的波速值将减少 13%。确定以 15 m 为界限，主要考虑钻孔倾斜度测量是一项比较复杂的技术；同时，15 m 深的钻孔尚属比较浅，钻孔的垂直度容易控制，只要钻探开始时比较注意，可以防止钻进时产生较大的倾斜。若没有把握时，仍需要测斜。

4.1.6 目前，检波器的固定主要用气囊装置将检波器外壳与孔壁紧密接触。注意不要仅使检波器的一端与孔壁贴紧，这样会使检波器与孔壁之间出现振荡力偶，形成振动假信号。其他装置如楔子、钢性扩展装置没有气囊装置优越。

众所周知，激振能量除一部分直达检波器外，同时还向各个方向散射，其中部分散射到地面。而地表面是一个良阻波面，又将部分能量反射入地层，其中部分到达检波器，这就干扰了直达波的接收；接收点距地面越近，干扰越严重。所以，本规程规定第一个测点深度应设在孔口以下 0.4 倍孔距处。

4.2.2 单孔波速法主要检测水平的剪切波速。识别第一个剪切波的初至是关键。采用从两个相反方向激振，一般压缩波的初至极性不发生变化，而第一个剪切波达到点的极性产生 180° 改变，极性波的交点即为第一个剪切波的到达点。

4.3.4 稳态振动产生的波为正弦波。地表面上任一点距振源 l 处的波动方程为：

$$Z(t) = A\sin(\omega t - \Phi) = A\sin\omega(t - \Delta t) \quad (4.3.4-1)$$

式中 A ——振幅；

Δt ——波由振源传至距离 l 处的时间差；

Φ ——相位差， $\Phi = \frac{2\pi fl}{V_R}$ 。

当 l 等于瑞利波波长 L_R ，则 $\Phi = 2\pi = \frac{2\pi fL_R}{V_R}$

故 $V_R = fL_R \quad (4.3.4-2)$

当激振器输出一频率 f ，两拾振器的间距为 Δl ，如 Δl 不等于 L_R 。两拾振器收到的振动波就有相位差。 $\Delta l (=l_2 - l_1)$ 越大，2号检波器测到的波形滞后于1号检波器的波形的时间 $\Delta t = \frac{\Phi}{\omega}$ 就越大，则波速值：

$$V_R = \frac{\Delta l}{\Delta t} \quad (4.3.4-3)$$

当2号检波器移到 l_3 处，且 l_3 和 l_1 处两拾振器记录的波形是同相位的，即相位差刚好为 2π ，则间距 $l_3 - l_1$ 等于1个波长 L_R ，此时式(4.3.4-3)变为普遍关系式(4.3.4-2)。改变激振频率，可得 R 波速的弥散曲线(即 $V_R \sim L_R$ 关系曲线)。波速与间距 Δl 等于1波长 L_R 不一致则可能因：①土层不均匀，有块石、夹层、孔洞等；②记录信号受其他振动干扰。

5.1.1 波形识别是试验中一项很重要的工作。为了使每个测点所得的波形记录，能分辨出压缩波序列和剪切波序列，除了采用反向振源外，可以不断调节放大器的增益装置，达到增大压缩波和剪切波之间的区别。当采用微振源时，一定要清晰地显示出较远接收孔所检测得的信号。如不清晰，需重新激振。同时，根据波

形的疏密形状，调整记录器的扫描速度，使波形略微拉开。

准确地判断出压缩波的初至和第一个剪切波的起跳点，从而读出波的传播时间。首先，根据不同方向激振所记录下的波形图，在垂直轴（ z ）记录线上找出极性相反的波形相位，然后用重叠法找出第一个剪切波到达的起跳点，作为剪切波的到达时间，这是有效的方法。

5.2.2 波形识别和判断准确以后，分别计算出每个测点的振源孔到接收器波长 L_{R1} 、接收器波长 L_{R2} 以及 L_{R1} 到 L_{R2} 之间的速度。从理论上讲，这三个速度值应该相等，但实际上是很难达到的。碰到这种情况，需要加以分析，找出原因，如触发器延迟，震源附近地层不均匀等。特别要分析是否受到折射的影响。分析方法可根据式（5.2.2）：

$$\frac{l_c}{H} = \frac{2\cos i \cos \varphi}{1 - \sin(i + \varphi)} \quad (5.2.2)$$

式中： l_c 为临界距离，当振源点到接收点的距离大于此距离时，会接收到折射波； i 为临界角，表示为 $i = \sin^{-1} \frac{V_1}{V_2}$ ； φ 为地层倾角，顺时针为正，逆时针为负； H 为振源点到地层界面的厚度。符号的意义如图 5.2.2 所示。

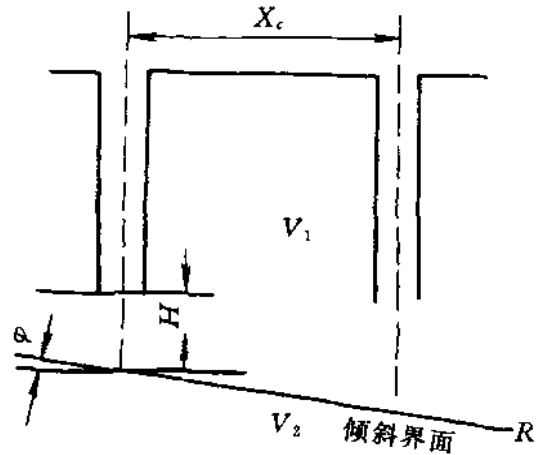


图 5.2.2 倾斜地层折射波影响参数示意图

计算的 l_c/H 值如表 5.2.2。

假若在水平地层中进行跨孔波速试验，根据钻探资料和测

试结果分析，已知上、下两层的速度值，并满足 $V_2 > V_1$ 。若 $V_1/V_2 = 0.1$ ， $\varphi = 0^\circ$ 同时已知从振源到接收点的距离为 6 m，则要求振源点到地层界面的厚度最小为 2.71 m，即大于 2.71 m 时，接收不到折射波，小于 2.71 m 时，可能接收到折射波。在整理资料过程中，通过这样的计算分析，可对速度值是否受折射影响作出判断。

表 5.2.2 l_c/H 值

$\frac{l_c}{H}$	$\frac{V_1}{V_2}$															
	0.10	0.20	0.30	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	
φ																
0°	2.21	2.45	2.73	3.06	3.25	3.46	3.71	4.00	4.37	4.76	5.29	6.00	7.02	8.72	12.49	
10°	2.69	3.04	3.49	4.04	4.38	4.78	5.24	5.83	6.57	7.53	8.89	10.94	14.52	22.60		
20°	3.31	3.86	4.58	5.54	6.17	6.95	7.95	9.25	11.05	13.69	18.01	26.21	46.95			
30°	4.14	5.04	6.28	8.13	9.45	11.20	13.63	17.23	23.04	33.71	43.74					

原位冻胀量试验

SL237—051—1999

1.0.1 土的冻胀性，可通过原位直接观测和室内试验来了解。原位试验工作量大，周期较长，但方法简易，结果比较实际和可靠，为广泛采用。

2.1.1 分层冻胀仪目前国内采用的有单独式和叠合式两种：单独式分层冻胀仪制作容易，用钻孔法埋设，对土的原有结构破坏较小，对地下水位高于冻深的地区尤为适用；叠合式分层冻胀仪能集中在一点观测分层冻胀，有利于成果的整理分析，其缺点是制作和埋设较麻烦，同时，由于埋设孔较大，仪器埋入后对周围土的温度场有影响。从观测数据的可靠性来考虑，本规程采用了单独式分层冻胀仪。

3.0.2 关于沿深度分层间距可视需要而定。分层多可以较详细地测得土层沿深度的冻胀性，但增加了测点及观测工作量；过少则不可能反映土层的分层冻胀性。本规程提出一般间距为 20~30cm。冻深大的间距可取大些，反之间距可小些。

3.0.5 基准盘（梁）离地面的距离，本规程建议一般不小于40cm，这是考虑到测量方便和根据季节性冻土地区可产生的最大冻胀量，如渠系工程冻胀量往往达到 30cm。

3.0.6 冻深和地下水位观测是冻胀观测中必须同时进行的基本项目。冻深观测一般用冻深器（胶管内装水）。这种方法由于外套管的影响，胶管内水的冻结不完全与土的冻结深度一致。但该方法方便易行，当没有条件作分层地温观测时，还是可以采用的。

地温观测可用电阻温度计，温度测点应与冻胀仪埋设的间距一致。

地下水位管埋设深度至少应超过当地可能最低地下水位以下 50 cm。

原位冻土融化压缩试验

SL237—052—1999

1.0.1 原位冻土融化压缩试验方法与融土的载荷试验方法相似。先在无载荷作用下，加热地基冻土，使其融化下沉稳定后，再逐级加载进行压缩试验。与载荷试验不同之处是载荷试验没有界定的压缩土层，而融化压缩试验有一界定的融化深度。该方法由于比较复杂，劳动强度也较大，一般仅用于室内试验难以进行的冻结的粗颗粒土、含砾粘土和富冰土层。

2.1.2 由于融化速度是由传压板的温度来控制。在加热温度 90°C 时，原位试验约在8 h内融化深度可达40 cm。

3.0.11 停止加热后，依靠余热使试样继续融化，因此，仍应继续观测融沉变形，当两小时内变形量对细颗粒小于0.5 mm，对粗粒土小于0.2 mm时，即可认为达到稳定。然后逐级加载进行压缩试验。

粗颗粒土的试样制备

SL237—053—1999

1.0.1 按《土的分类标准》规定，土颗粒粒径小于 60 mm，大于 0.075 mm 之间的土称为粗粒土，等于或小于 0.075 mm 的土称为细粒土。而以往将土颗粒粒径大于 5 mm 的俗称粗粒土，将小于 5mm 的土称细粒土，为了避免混淆，将原规程粗粒土改为粗颗粒土或粗料土。

1.0.2 粗颗粒土的土样制备是为了使各项试验所用的土样制备有统一的程序，并提供具有同一级配的试样进行各项试验。

3.1.3 试样级配和超粒径颗粒的处理。

1 试样级配。级配是影响粗颗粒土工程特性的重要因素。就同一地区的同一类土料而言，尽管成因相同，级配组成也会有所变化。因此，在进行试验时，应按料场或天然地基的自然级配，或模拟工程实际情况合理地选择试样级配，以使试验成果具有代表性。

目前，各单位所采用的级配类型有两种：即天然级配和人工级配。天然级配是根据天然料场或天然地基的天然级配制备试样，进行各项物理力学性试验。并按此来确定各项指标的范围及其采用值。人工级配是根据料场或实际填料试验所得级配成果，按统计方法整理得出的级配，随统计方法不同有多种型式。有采用土料方量百分率级配曲线的方法进行统计，得出典型级配，包括上包线级配、下包线级配和平均级配；也有根据多组级配曲线的外包线轮廓线作出级配范围线，以最细者为上包线，最粗者为下包线，各组算术平均为平均级配。外包线级配是控制料场的极端情况，多用作验证性或探索性试验的依据，平均级配曲线系代表料场的平均级配情况，大多以此作为进行物理力学性质试验的依据。对于级配变化较大的土料，如风化料，则不能固定在某一级配情

况下试验，必须在一定范围内进行研究。此外，尚有采用小值平均级配与考虑强度或渗透变形特征进行配制级配的其他方法。

总之，试样级配选择是一个复杂的问题，实际选用时必须以反映客观实际情况为原则，防止由于试样级配选择不当而影响试验成果的可靠性。

2 关于超径颗粒的处理。用原级配土料进行试验是最理想的，但由于仪器尺寸的限制，有时不得不对土料中某些超过仪器允许粒径的颗粒（即超径颗粒）进行处理。

目前，国内外处理超径颗粒的方法大体有四种，处理后的级配变化如图 3.1.3 所示。

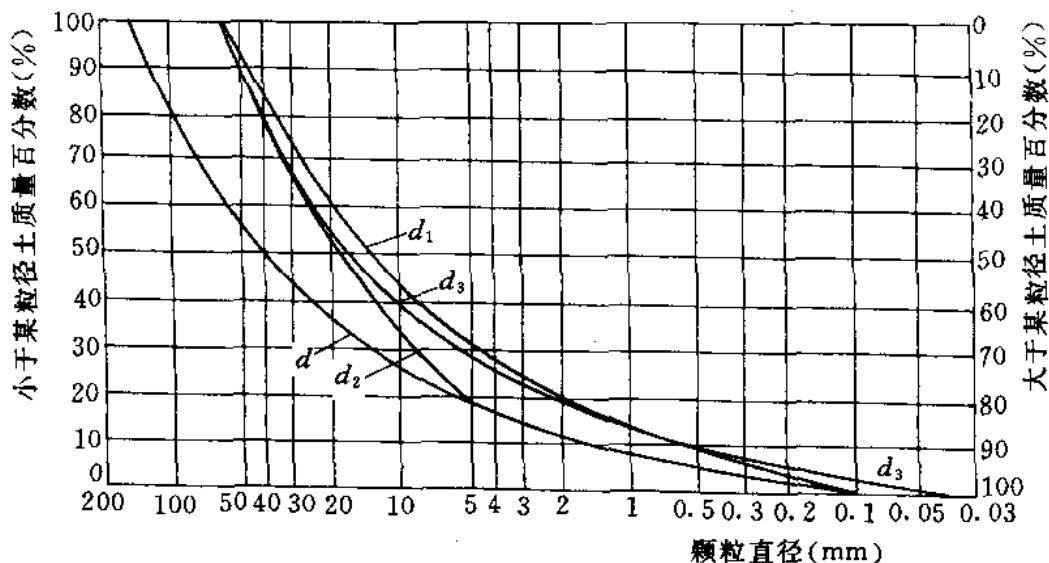


图 3.1.3 颗粒分析级配曲线

(1) 剔除法。此法是将超粒径颗粒剔除，剩余部分作为整体，再分别计算各粒组含量。这样将使小于 5 mm 颗粒含量相对增加，改变了大于 5 mm 颗粒土的性质。因此，除超粒径颗粒含量极小外，一般不采用此法。

(2) 等量替代法。以仪器允许的最大粒径以下和大于 5mm 之间颗粒，按比例等量替换超粒径颗粒，替代的级配虽保持大于和小于 5mm 颗粒含量不变，但改变了粗料土级配、不均匀系数 C_u 及曲率系数 C_c ，此法适用于超粒径颗粒含量小于 40% 的土石混合

料。根据比较试验证实：经替代后所得的强度比剔除法要接近实际。故此法在我国广泛应用于土石混合料等的力学性试验备料。

(3) 相似级配法。此法系将原级配的土料根据确定的允许最大粒径按几何相似等比例将原土样粒径缩小。于是颗分曲线平移后，仍保持与原级配曲线相似，故 C_u 、 C_c 可保持不变，但小于5mm 颗粒含量有所增加。因此，本法只是几何尺寸相似，不能全面地模拟原样的性质。理想的模拟材料是其级配、颗粒形状、颗粒本身的强度、颗粒表面的粗糙度等均应与原材料相似。但这种条件是难以满足的。采用相似级配法应注意的是颗粒级配曲线的平移后，不应使其中的细粒含量增加到影响原级配试样力学性质的程度。一般来讲，小于5 mm 颗粒的含量不大于15%~30%，对力学性质的影响是不明显的。

相似级配法在国外应用较广，多用于砂砾料及堆石料等无粘性粗颗粒土的力学性质试验，近年来，我国也有一些单位采用。

(4) 混合法。先用较适宜的比尺缩小，使超径颗粒含量小于40%，再用等量替代法制样。资料表明：该法所得的最大干密度与现场碾压试验相接近。

表 3.1.3 颗粒级配变化表

土样 编号	颗 粒 组 成 (%)									d_{30}	限制 粒径 d_{60}	有效 粒径 d_{10}	均匀 系数 d_{60}/d_{10}	曲率 系数 $d_{30}^2/(d_{10}d_{60})$
	>60	60~ 40	40~ 20	20~ 10	10~ 5	5~2	2~ 0.1	<0.1	>5					
原级 配 d	40.0	11.0	13.0	10.0	8.0	7.0	11.0	0.0	82.0	13.5	59.0	1.55	38.1	1.99
剔除法 级配 d_1		18.3	21.7	16.7	13.3	11.7	18.3	0.0	70.0	4.8	20.0	0.65	30.8	1.77
等量替 代级配 d_2		21.5	25.4	19.5	15.6	7.0	11.0	0.0	82.0	9.0	25.0	1.55	16.1	2.09
相似法 级配 d_3		20.0	25.0	16.0	11.0	11.0	15.0	3.0	71.0	5.3	23.3	0.61	38.2	1.98

曾用大型 ($\Phi 70$ cm), 中型 ($\Phi 30$ cm), 小型 ($\Phi 10$ cm) 三种不同尺寸的三轴仪对几种堆石料和砂卵石料进行一系列比较试验, 以大试件为原级配, 中、小试件分别用相似级配和等量替代级配。成果表明: 中试件两种模拟级配所得的内摩擦角 (φ) 比大试件大 $2^{\circ} \sim 2.5^{\circ}$, 应力应变关系基本一致; 而小试件所得的内摩擦角 (φ) 和应力应变关系均偏大。这说明粗颗粒土级配粒径缩小过多其成果受到一定的影响。

此外, 对于渗透变形等试验, 超粒径颗粒处理是否可参照进行, 尚有待于试验验证。

总之, 上述几种处理超粒径颗粒的方法, 有一定局限性, 故本规程未作具体规定。在使用时, 要根据土料性质和试验项目来决定。

3 风化粗颗粒土超径的限制。视粗颗粒风化程度不同对试样允许最大粒径的限制可适当放宽。

3.1.7 粗颗粒土含水率的测定。粗颗粒土含有大量砾石, 颗粒大小悬殊, 往往难以取代表性试样正确地测定含水率。目前测定含水率的方法有两种: 一是测全料含水率, 该法取代表性试样时应尽量照顾粗、细料含量的比例, 试样数量为 $2000 \sim 5000$ g; 另一是粗、细料含水率分别测定, 然后按加权值计算全料含水率。

粗颗粒土相对密度试验

SL237—054—1999

1.0.1 粗颗粒土的力学性质与其孔隙比有密切关系,但不同的粗颗粒土,即使孔隙比相同,性质也不相同,孔隙比不能表示紧密程度。相对密度则用以表示粗颗粒土的紧密状态,表示天然密度或填筑密度介于最密实与最松散之间的某种状态,相对密度相当于粘性土的稠度指数。常用以作为对地基和坝体设计和施工控制的标准。

1.0.2 粗颗粒土包括砂、砾及少量的细粒土,本规程规定细粒土(小于 0.075 mm)的含量不超过 12%,其目的是要求土样能自由排水,颗粒之间不致细粒土含量过多而产生粘聚力。目前,世界各国除了美国外,均无制定试验标准。为了对粗颗粒土的相对密度试验有一可以遵循的标准,根据我国的实践经验,并参照美国 ANST/ASTM.D2049—69,制订了本规程。

3.1.1 本规程建议采用的主要仪器为振动台,试样筒尺寸与 ANST/ASTM.D2049—69 的规定略有差异,见表 3.1.1。其余振动频率、振幅及压重均与 ANST/ASTM.D2049—69 一致。

表 3.1.1 试样筒尺寸比较

试样筒 编 号	内 径 D (cm)		高 度 H (cm)		体 积 V (cm^3)		允许最大粒径 d_{\max} (mm)	
	本规程	ASTM	本规程	ASTM	本规程	ASTM	本规程	ASTM
I (大)	30	21.94	34	23.09	24033	14160	60	76.2
II (小)	20	15.12	23	15.52	7226	2830	20	38.1

4.2.1~4.2.5 最小干密度的试验方法在一般文献中缺少详细说明,只提及用人工松填灌注法进行,并指出为了降低系统误差,必

须进行平行试验。另外，为了保证试样结构相似和消除相对密度指标的系统误差，容器尺寸应该与最大干密度试验一致。并且应当满足公认的 $1/5$ 径径比与径高比的要求（颗粒最大粒径与容器直径和高度之比）。

4.3.1~4.3.3 最大干密度试验，国外目前大多采用振动台法，并已完善到标准化的程度。国内近 10 年来，也逐渐采用振动台法，由于测试设备和方法尚未完善，有待进一步研究提高。目前国内外无论采用干法或是采用湿法进行最大干密度试验，均采用变体积法。对有些试样，用振动法所得的资料表明：当含水率相当于饱和度为 0.8 时，砂能得到最好的振动密实；同时，当砂的含水率为零时与最优含水率时所得的干密度极相近。因此，参照 ANST/ASTM 标准，本规程同时推荐采用湿法与干法测定粗颗粒土的最大干密度。

5.0.3, 5.0.4 在实际工程的设计和施工中也常用相对压实度 R_c 和密度指数 I_D 作为控制质量的指标，这两个指标具有实用性，故本次修改的规程增加这两个指标。

粗颗粒土击实试验

SL237—055—1999

3.1.1 击实试验的两项控制标准为单位体积功能和单位面积冲量,世界各国所采用的标准基本上参考美国 ASTM 所制定的标准(D698—78)。为了有利于国际交流及与国际通用标准接轨,本规程参照了 ASTM.D698—78 标准,对击实仪的尺寸及击实方法作了修改使之满足粗颗粒土的击实试验要求,但单位体积击实功能及单位面积冲量保持与 ASTM.D698—78 的击实标准等效。即单位体积功能及单位面积冲量按两种标准制定,分别为 591.9kJ/m^3 和 $3\text{kPa}\cdot\text{s}$ 及 2682.2kJ/m^3 和 $7\text{kPa}\cdot\text{s}$ 。采用何种标准,试验者应根据工程设计的規定选用。

4.1.2, 4.1.3 本规程规定了干法和湿法两种制样方法,其原因见 SL237—011—1999《击实试验》4.1.1 的条文说明。

4.2.2 余土超高 15 mm 时,约占总体积的 5.2%,相应的单位体积功能将减少约 5%,虽对于干密度一般超过 0.03g/cm^3 ,但因含较多的大于 5 mm 粒径的颗粒,超高限制过小,操作难以控制,故规定余土超高不应大于 15 mm。

粗颗粒土的渗透及渗透变形试验

SL237—056—1999

1.0.2 粗颗粒土的渗透变形试验，在SD128—87《土工试验规程》第三分册中，分为三个试验项目：“无粘性扰动试样从下向上渗透变形试验”、“无粘性土扰动试样水平管涌试验”及“原状土渗透变形试验”，这三个试验项目的内容和方法都基本一致。为了简化起见，在本次规程修改中，将这三个试验项目合并为一个试验。其中原状土样，扰动土样均用同一仪器——垂直渗透变形仪。

3.1.1 关于垂直渗透变形仪器，在这次修改中，仍采用试样直径为20 cm及30 cm的两种。其相对应的断面积为 314 cm^2 及 706 cm^2 。也可采用直径为22.6 cm，这样做是为了便于计算渗透速度。仪器内径与试验土样最大粒径（或 d_{85} ）之比值可选为4~6。个别地区可视当地材料而具体确定合适的比值。仪器高度一般来说为内径的2~3倍。仪器分进水段、试样段和出水段。仪器筒身可用无缝有机玻璃管制成，也可用嵌有玻璃的铁质圆筒，以便观察。

3.1.3 加荷设备。加荷的目的在于使试验更好地符合天然受力状态。图3.1.3所示设备可供参考。

目前，加荷设备大都采用杠杆式。一般均用于小直径仪器中。若用于大直径仪器，则所需荷载总量较大，设备也要加大，应用不便，且占地较多。也可采用其他方式加荷，例如气压。

3.1.4 测压管的布置原则。

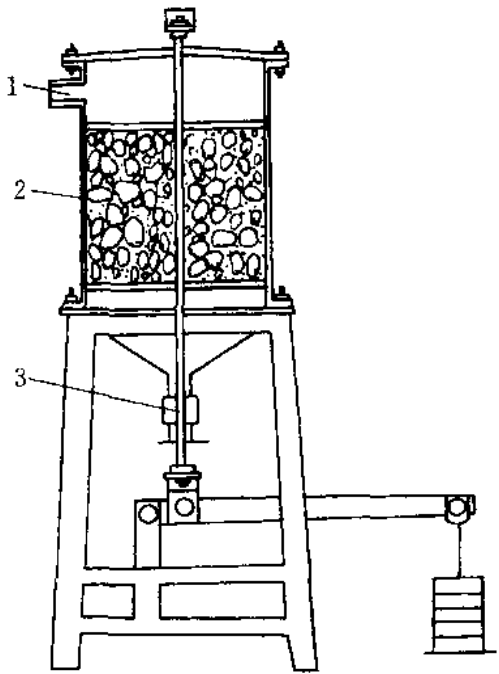


图 3.1.3 加荷设备示意图

1—进水口；2—试样；3—出水口

1 在仪器进水段及出水段应各布置一个测压管,以测定试样总坡降。

2 试样段测压管应布置较密些。一般每隔 5.0 cm 布置一个。布置方式不限,可以分排布置,也可以螺旋形布置或其他布置形式。

3 在作反滤层试验时,必须在反滤层与被保护土之间及反滤层每层之间的接触面上布置测压管。

4 在作水平渗透变形及接触冲刷试验时,在不同介质接触面上,应每隔 5 cm 布置测压管。

5 测压板上的玻璃管一定要垂直,各个玻璃管内径相互误差不大于 2 mm。

6 测压板上零点读数,应低于仪器的第一个测压管,测压板上的最高读数应比最高水箱的水位略高些。

4.1.1 关于超粒径处理办法见 SL237—053—1999《粗颗粒土的土样制备》3.1.3 条文说明。

试样装入仪器内,不可能与仪器边壁很好结合,容易形成边壁通道,渗流集中。因此,管涌往往首先从边壁孔隙内发生。这样,测得的管涌临界坡降就会偏小,使得试验成果失真,必须进行边壁外理。其处理办法,目前均处在摸索阶段,例如用凡士林或橡皮泥涂在侧壁周围等。这些处理办法均是在试样分层装入仪器时,同时逐层进行的。

4.1.2 过滤排气可以起到一定作用,当水流自下向上流动时,先通过倾斜透水板滤气并通过排气孔排出,然后通过下透水板进入试样,可以收到一定效果。

4.3.3, 4.3.4 为了缩短试验时间,“87 规程”将渗流坡降的递增值,采用逐级加大的方法,即是随着试验的不断进行,将其相邻两级的坡降差额,逐步加大,类似于等比级数那样。这样做的目的是既节省了试验时间,又不会增大相对误差。但应按既要取得试样临发生变形前的坡降值,又要能准确找到变形的临界坡降的原则,视具体情况掌握。对于非管涌土,递增值可大些,对于管

涌土递增值宜小些。在临界状态以后至破坏坡降这一段，由于历时较长，递增值可大些。

5.0.4, 5.0.5 试验中对管涌的鉴别，国内外缺乏一个明确标准，概括起来，不外乎下列几种：

1 试验人员从仪器周壁及试样表面，直接用肉眼观察。

2 在双对数纸上，以渗流坡降 (i) 为纵坐标，渗透速度 (v) 为横坐标，绘制 $i \sim v$ 关系曲线。若试验期间，温度变化不大，坡降较小，则根据达西定律：即管涌发生以前， $i \sim v$ 线段应为直线，其斜率等于 1；管涌开始后，一般说来，该直线段将发生明显转折。

3 供水水箱位置升高，而上游测压管水位并不相应升高，甚至下降，流量加大，说明试样内部结构已起变化。

4 试样表面有 $2/3$ 的面积出现细粒跳动，或泉眼翻滚，形成破坏。

从上面所列举的几条标准来看，立足点并不一致，有的是说明管涌的临界坡降，有的则是说明管涌的破坏坡降。对管涌而言，其变形有一个发展过程。在 $i \sim v$ 关系曲线上表现为：当第一个阶段接近终了时，斜率为 1 的直线段发生转折，到达管涌临界坡降。管涌过程进入第二阶段，这时 $i \sim v$ 直线与横轴成某一角度继续上升。在经历一个过程后，到达第三阶段，此时 $i \sim v$ 曲线的纵坐标 i 值随 v 的增大而减小，此转折点所对应的坡降值为破坏坡降。综上所述，对管涌的鉴定，应以 $i \sim v$ 曲线为主，并结合目测。

反滤料试验

SL237—057—1999

1.0.1 保护渗流出口处不发生破坏,可以有效地防止渗透变形的发生和发展,反滤层是防止流土及管涌的重要措施。试验的目的是在土与砂、砾或排水设施之间,选择适宜级配的砂砾料组合层,使之既能防止细土流失,又能畅通排水,保证建筑物有效使用和安全。

3.1.1 反滤料试验使用的仪器,因为考虑到反滤料试验的装样、饱和以及测试方式和渗透变形试验近似,利用垂直渗透变形仪能达到试验要求。故直接采用垂直渗透变形仪进行反滤料试验。

5.0.2 对于试验前后各层的土料均应进行颗粒分析,在同一颗粒分析坐标纸上绘制被保护层和滤层试验前后颗粒分析曲线,根据试验曲线,确定被保护土层中带出土量,从而判断所选定的滤层土料是否能满足反滤要求。

粗颗粒土固结试验

SL237—058—1999

3.1.1 试样尺寸的大小,应当和粗颗粒土的粒径相适应,即试样的最大粒径 d_{\max} 随试样高度与最大粒径之比 (H/d_{\max})、试样直径与高度之比 (D/H) 等而定。

根据国内外使用的一些大型固结仪试样尺寸的统计, H/d_{\max} 大致为 3~10 (较多的在 3.3~5 之间); D/H 大致在 0.5~3 的范围内 (较多的在 2~2.5 之间)。

考虑到粗颗粒土的粒径变化范围极大,故本规程对固结仪的试样尺寸未做具体规定,但对尺寸的比例关系予以规定,即 D/H 为 2~2.5, $H/d_{\max}=4\sim6$ 为宜。试验时可根据试样的粒径、级配等性质选定。

4.1.1, 4.1.2 为了减少试样与环壁之间的摩擦,要求容器内壁加工光滑;涂衬润滑材料如硅脂、聚四氟乙烯。

4.3.4 在荷载作用下,土粒的重新排列及孔隙体积的减少,孔隙压力的消散都需要一定的时间。施加荷载的历时对试验结果都有影响,直接关系到试样的压缩量、固结速率、次固结量等,因此,需要有稳定标准。本规程规定每级压力下,主固结完成或以 24 h 作为稳定标准,这一标准与国外大多数国家的稳定标准一致。对于某些粗颗粒土,在高压下,颗粒破碎可能会引起次固结量。

粗颗粒土直接剪切试验

SL237—059—1999

3.1.1 对粗颗粒土进行直剪试验时，试样尺寸取决于最大粒径。根据国内外现有资料，统计了各试验研究单位所用试样尺寸与最大粒径的比值。

由统计分析可知：试样直径与最大粒径的比值 (D/d_{max}) 变化范围较大，为 4~12.5。其中径径比为 7.5~10 的统计数为 64%，径径比小于 7.5 的占 25%，径径比大于 10 的占 11%；高径比的变化为 1.5~10，其中高径比为 4~8 的占 53%，高径比大于 8 的占 17%，高径比小于 4 的占 30%。以上各单位采用的比值较集中为：径径比为 7.5~10，高径比为 4~8。

不同的径径比和不同的高径比，对粗颗粒土的摩擦角的影响如图 3.1.1-1、图 3.1.1-2。为此，确定试样尺寸与最大粒径关系时，应同时考虑高径比，推荐径径比为 8~12，高径比为 4~8。

根据统计资料分析，粗颗粒土直剪仪的剪切盒多数为圆形，其次是方形，少数为长方形。因圆形受力条件与应力分布比方形的好的，而方形的又比长方形的好。故本试验推荐圆形直剪仪。

4.1.2 粗颗粒土在剪切过程中，颗粒的位置不断调整。

在剪切区产生错动、翻滚和

剪损现象。在直剪仪中，试样受剪力盒约束及剪切面固定，因此，剪切时粗粒要发生翻滚和错动较困难，导致颗粒剪破，剪切过程中伴随着明显的剪胀，使测得的强度偏高。为此，应在上、下剪

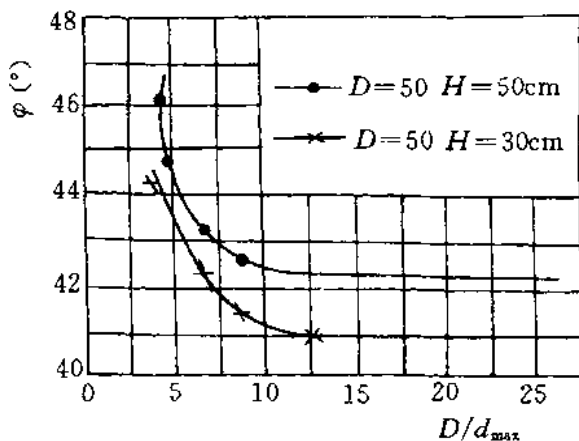


图 3.1.1-1 $\varphi \sim D/d_{max}$ 关系曲线

切盒之间开一定的缝隙。开缝的目的在于避免颗粒剪破，使试样沿弱面剪切。但开缝过大，也不恰当，因剪切区侧限作用过小，试样易从剪切缝挤出；开缝过小，不能消除约束的影响。根据国内资料综合分析，粗颗粒土直剪试验的开缝尺寸推荐 $(1/3 \sim 1/4) d_{\max}$ 作为其使用标准。

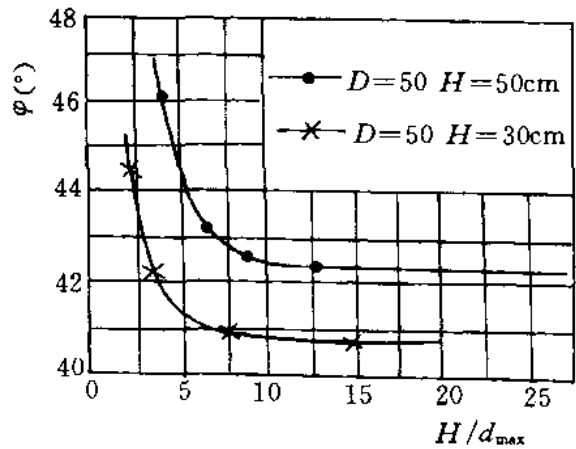


图 3.1.1-2 $\varphi \sim H/d_{\max}$ 关系曲线

4.1.3 试样制备选用以下方法：

1 击实法。采用与室内击实试验相同的功能分 3~5 层及层缝交错法将试料击实至控制密度。

2 振捣法。对砂砾石等无粘性粗颗粒土采用机械振捣到控制密度。

3 静压法。用千斤顶施加静压力，分层将试料压实到控制密度。

试样制备方法应尽可能与现场施工情况一致。对于土坝及土石坝工程或回填基础的含粘质土粗颗粒土，一般可采用击实法制备试样。击锤底面积应比试样面积小，便于击实时排气，塑流揉搓，以与实际压实结构相似。对于无粘性粗颗粒土，采用振捣法制备，接近振动碾施工情况。静压法不便排气，静压时粗粒受压不均匀，在重要工程中也无使用经验，故不拟推荐。

4.1.4 试样饱和常用的方法有真空抽气饱和法、毛细管饱和法和浸水饱和法。根据实践，真空抽气饱和法的饱和度最高，效果最好，适用于含粘质土的粗颗粒土；水头饱和法次之，可用于无粘性粗颗粒土。浸水饱和法易使气体封闭在土内，并造成细粒在水的作用下，向下移动，淤填孔隙，使试样密度不均匀，饱和效果最差，一般不宜使用。

4.2.1 粗颗粒土在高压情况下，抗剪强度与垂直压力呈非线性关

系，不符合库仑方程的直线关系。因此，在设备出力允许条件下，采用的最大垂直压力应符合建筑物或地基中的受力情况；如限于仪器设备能力达不到要求的出力时，应在提交试验资料时予以说明。

4.2.2, 4.3.3, 4.4.3 水平剪切力施加方法。根据国内的情况，水平剪切力的施加方法有以下三种：

1 应变控制法。按水平位移计读数的等速递增作为标准。

2 时间控制法。采用液压稳压器均匀推动水平千斤顶施加水平剪切力，控制试样在 3~5 min（有的单位控制在 5~10 min）内剪损。

3 应力控制法。按水平压力计读数递增水平剪切力。本规程推荐应力控制法。

剪切速率的大小直接关系到试样排水，是影响抗剪强度的主要因素之一。对应力控制法来说，剪切速率指水平荷载分级大小和加荷快慢这两个问题。

(1) 水平荷载分级大小。分级施加水平荷载主要在于求得较规律的 $\tau \sim \Delta L$ 关系曲线。目前国内外采用的分级方法有以下两种：其一是按估计的最大剪切力的百分数分级。大多数单位采用 $0.1 p_{hmax}$ 和 $0.05 p_{hmax}$ 两级（ p_{hmax} 为最大剪应力）。美国 ASTM. D3080—72 在固结排水条件下土的直剪试验标准方法中，规定应力控制法的水平剪应力的增量约等于 0.1 估计最大剪应力，当达到估算破坏力的 50%~70% 时，减少增量至 $0.05 p_{hmax}$ 。其二是按施加的垂直压力的百分数分级，国内大多数单位采用 $0.1 p_v$ 或 $0.05 p_v$ 两级（ p_v 为垂直压力）。不论采用哪种分级方法，水平剪切力施加不得少于 10 级，开始可按 $0.1 p_v$ 施加，加至破坏力的 50%~70% 后可减至 $0.05 p_v$ 。

(2) 水平荷载施加速度。快剪试验（包括固结快剪试验）主要是求剪切过程中含水率保持不变时的抗剪强度，要求在较短时间内剪损。大部分单位采用快剪剪损历时控制在 5~10 min 内，每 30 s 施加一级，但剪损总历时不应超过 10 min，使试样含水率变

化最小，以符合快剪要求。

慢剪试验要求在剪切过程中试样的孔隙压力完全消散，因此，试验要有充分的排水时间。关于施加水平剪切力的时间间隔，目前无统一规定。美国水道试验站规定，每加一级水平剪切力，固结度至少要达到 95%。法国中央土木试验室试验法则只有原则规定，即用最慢的剪切速率进行剪切，施加水平荷载，原则上要求在每级荷载下变形达稳定为止。但为了操作方便，本规程规定，每 1 min 内位移小于 0.01 mm 时再施加下一级荷载。

4.3.2 目前对试样在垂直荷载作用下达到稳定的控制标准，大多数单位用每小时变形不大于 0.01~0.05 mm。本规程规定在垂直荷载作用下，每小时垂直变形不大于 0.03 mm 为变形稳定标准，这与原大型固结试验的变形稳定标准一致。

5.0.3 粗颗粒土直剪试验中现行破坏标准有以下两种，即：极限强度标准和剪切位移标准。

据调查统计，国内许多单位采用极限强度标准作为破坏标准，即以 $\tau \sim \Delta L$ 关系曲线上的峰值或稳定值作为破坏值。该值的概念与极限平衡理论相符，本规程推荐采用极限强度标准。

但粗颗粒土剪切试验中，有时没有明显的峰值，国内外资料建议采用相应于下列变形时的剪应力作为破坏值。

(1) 塑性材料 $\Delta L_{\max} > (1/15)D$

(2) 半脆性材料 $\Delta L_{\max} = (1/15)D$

(3) 脆性材料 $\Delta L_{\max} = (1/15) \sim (1/20)D$

本规程建议在剪切试验过程中无峰值或稳定值时，可用 ΔL_{\max} 值为 $\left(\frac{1}{15} \sim \frac{1}{10}\right)D$ 作为确定破坏值的标准。

粗颗粒土三轴压缩试验

SL237—060—1999

1.0.3 在三轴压缩试验中，根据排水条件的不同，分为不固结不排水剪（UU）、固结不排水剪（CU）、固结排水剪（CD）三种试验类型。其特点和应用见 SL237—017—1999《三轴压缩试验》1.0.2 条文说明。

3.1.1 随着高土石坝建设的发展及对粗颗粒土研究的深入，国内外相继研制了许多大型三轴仪，试样直径 200~500 mm、周围压力 σ_3 为 0~14 MPa，其中：以试样直径 D 为 300 mm、试样高度 H 为 600~750 mm、侧压力 σ_3 为 1.5~2.5 MPa 的为多数。应用也十分广泛。本规程对试样尺寸未做具体规定，可根据具体情况而定。

4.1.1 本规程中规定试样直径应为试料最大粒径的 5 倍以上。而试样高度与试样直径的比值，对试验结果影响也很大，根据对比试验研究结果，高径比大于 2 时，两端承压板的约束对试样中部应力分布影响小。而当高径比大于 2.5 时，试验中试样容易歪斜，成果偏低；高径比小于 2.0 时，试验成果偏高。故本试验建议以高径比为 2~2.5 为宜。

4.1.6, 5.1.2 由于粗颗粒土性质不同，有的含有一定的细颗粒，在土体颗粒间有一定的结合力，土体可自立成土柱；而较多的粗颗粒土不含粘土颗粒，也就无粘结力作用，土体只有借助外力才能成直立状，故在本规程中分为粘质粗颗粒土和无粘性粗颗粒土两类。前者因可自立成土柱，故在试样制备中可在三轴仪底座上或在制样器底座上安装成型筒用击实法制样；后者只宜在三轴仪底座上安装成型筒用击实法或振捣法制样，然后从试样顶部抽气，施加 30 kPa 左右的负压才能拆去成型筒，即借助负压才能自成土柱。粗颗粒土颗粒粒径大，颗粒本身强度较高，试验过程中容易

刺破橡皮膜。为了防止橡皮膜被刺破，有以下几种方法：①用二层或三层橡皮膜；②在橡皮膜和试样间衬几块橡皮板；③将橡皮膜分为内中外三层；在中层橡皮膜上镶嵌六角形橡皮块，块厚 8 mm (见图 4.1.6)，外再套一层橡皮膜；④在内外橡皮膜之间填厚 50 mm 砂；⑤在内膜和试样间夹一层波纹纸，同时在内膜上贴擦了油的聚氯乙烯片 (100 mm×100 mm×1 mm)，再加一外层橡皮膜。显然，这些方法比一般圆筒型橡皮膜要复杂一些。

为消除橡皮膜对试样的影响，应对橡皮膜的影响加以校正。目前校正方法有如下两种：一种是用橡皮膜的弹性模量计算的校正方法；另一种是采用整体校正方法，即分别用一层或几层特制橡皮膜进行试验，两者的差值即为校正值。

4.2, 5.2 对于粘质粗颗粒土，因透水性小，本试验建议用抽气饱和法或反压力饱和法；无粘性粗颗粒土，透水性较大，本试验建议用抽气饱和法、水头饱和法及二氧化碳饱和法等。使用中也可联合使用，如用抽气饱和之后，再继续水头饱和则效果更好。

在这些试验方法中，水头饱和、抽气饱和及反压力饱和法皆为大家所熟悉，已积累了一定的经验。二氧化碳饱和法目前国内已有应用，可获得良好的饱和效果。

关于饱和度的鉴别方法，因试样尺寸较大，对那些只宜在仪器上制样的粗颗粒土，是难以用称量法鉴别饱和度的。除了用饱和水量和孔隙体积估算饱和度外还要用孔隙压力系数 $B(u/\sigma_3)$ 大于、等于 95% 作为鉴别标准。

4.4.2 试样固结稳定标准。一般常用的鉴别标准有：①固结排水量趋于稳定；②固结过程中孔隙水压力消散至小于 5% 或消散度达 95% 以上；③主固结完成。

这里需指出的是，因粗颗粒土性能差别较大，如无粘性粗颗粒土，透水性强，固结历时短，不存在次固结问题，试样在几分钟之内就完成固结。故对此类粗颗粒土，在固结过程可不按 \sqrt{t} 时间进行测记。本试验建议每隔 20~30 s 测记读数一次，并

随时绘制 $\Delta V \sim t$ 或 $u \sim t$ 关系曲线。当曲线的下端趋于水平或孔隙压力 u 消散到 5% 以下，则表示固结完成。对粘质粗颗粒土，因渗透性小，固结历时较长，可按 0、1/4、1、4、9、25min... 的时间间隔测记读数，并随时绘制 $\Delta V \sim \sqrt{t}$ 或 $\Delta V \sim \lg t$ 关系曲线，当主固结完成或固结度 U 等于或大于 0.95，则认为固结完成。

4.3.2, 4.4.4, 4.5.1, 5.3.1, 5.4.3, 5.5.1 剪切速率是粗颗粒土三轴压缩试验中的一个重要问题，它不仅关系到剪切试验历时的长短，而且关系到试验成果的可靠性。

许多研究资料表明，当粒径大于 5 mm 的颗粒含量 (P_5) 大于 70% 时，可用较快的剪切速率；粗颗粒含量 P_5 等于或小于 30%~40% 时，则其物性主要取决于细颗粒的性质，则粗颗粒土就具有粘质土的特征。由此可见，粗颗粒土的性能差异很大，它的剪切速率不能一概而论。然而截至目前，对粗颗粒土剪切速率系统研究的资料甚少，故那些由细粒性质起决定作用的粗颗粒土，如粘质粗颗粒土，其性能与细粒土相似，剪切速率可参考常规三轴试验。对无粘性粗颗粒土，就不固结不排水剪而言，若不测孔隙水压力，通常范围内对强度影响不大，可根据试验方便来选择剪切速率，采用每分钟轴向应变 0.5%~1.0% 左右；在固结排水剪中，对于砂土当剪切历时由 1000 s 减少到 0.01 s，强度仅增强 10%，影响不大。采用每分钟轴向应变为 0.1%~0.5% 为宜。

综合上述并考虑到粗颗粒土三轴试验试样尺寸大的特点，本规程建议剪切速率如表 4.3.2。

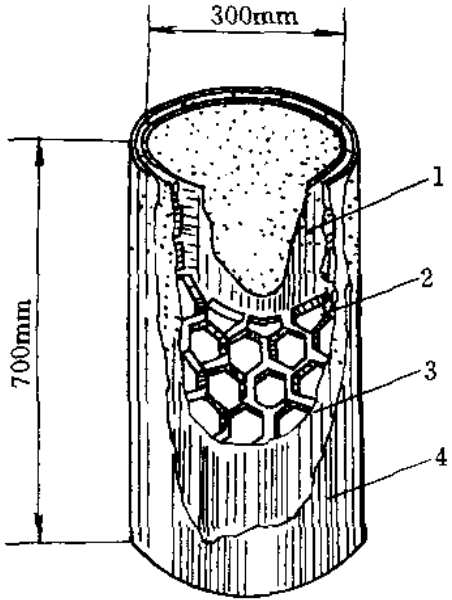


图 4.1.6 贴有六边形橡皮块的橡皮膜
 1—内套厚 4 mm；2—六边形块厚 8 mm；3—六边形粘结套厚 0.8 mm；4—外橡皮膜厚 2 mm

表 4.3.2 建议的剪切速率 (ϵ_1/min)

试验方法	土类	粘质粗颗粒土 (ϵ_1/min)	无粘性粗颗粒土 (ϵ_1/min)
	不固结不排水剪 UU		0.1~0.5
固结不排水剪 CU		0.05~0.1	0.1~1.0
固结排水剪 CD		0.012~0.003	0.1~0.5

化学分析试样风干含水率试验

SL237—061—1999

1.0.2 本规程中化学分析部分所用试样均为室温下的风干试样，而化学分析中各项试验结果均以试样的烘干质量为基准，故在结果计算中应将试样的风干质量 (m) 换算成烘干质量 (m_d)，风干含水率 (w) 的测定便是以此为目的，其换算关系为： $m_d = m / (1 + w/100)$ 。

2.1.2 分析天平内的干燥剂，常用的有无水氯化钙、硅胶以及硫酸。要注意及时更换。

2.1.4 试验中所用的干燥器应当固定，其中干燥剂用一段时间后应予以更换或烘干再用。

3.0.1 在本试验条件下，烘焙时失去的水分主要是吸湿水。其质量随空气的相对湿度、试样的成分以及颗粒的大小而异。本方法适用于各种土，但当试样中有机质含量较高时，本方法误差较大，可改用真空干燥法测定含水率。含石膏较多的试样，烘焙温度应为 $55 \sim 60^\circ\text{C}$ 。

3.0.3 土样烘焙时间应按规定执行，不得任意增减，以免造成误差。烘焙时应注意烘箱中的温度分布情况。铝盒放在烘箱底层，因此处温度较高。

3.0.4 铝盒需盖严后放在干燥器内冷却，冷却时间每次应控制一致。铝盒称量的先后次序也应固定，以利恒量。

3.0.5 每次称量时，铝盒的数量不宜过多，一般 $4 \sim 6$ 只为宜。称量时动作要迅速，否则会因吸湿而难以恒量。

酸碱度试验

SL237—062—1999

1.0.1 酸碱度是了解土的物理化学性质和工程性质的一项重要
的基本指标。酸碱度用 pH 值表示。土呈碱性时，土粒表面容易形
成较扩展的扩散双电层，使土粒处于松散状态。这种土塑性较大，
抗剪强度不大。而酸性土，土粒之间可以通过带正电的边、角和
带负电的基面的静电力相互吸引而较牢固的连接，有较高的力学
强度。

1.0.3 pH 值的测定可用比色法、电测法。但比色法不如电测法
方便、准确，而电测法测定酸碱度是目前常用的方法。酸度计是
一种以 pH 值表示读数的电位计，用它可以直接读出溶液的
pH 值。

3.0.1 土悬液的土水比例的大小，对测定结果有一定的影响。土
水比例究竟用多大比较适宜，目前尚无结论，国内外也不统一，但
用 1:5 的比例较多。本规程也采用 1:5 的比例，振荡 3 min，静
置 30 min。

易 溶 盐 试 验

SL237—063—1999

1.0.1 土中易溶盐包括所有的氯化物盐类、易溶的硫酸盐类和碳酸盐类。这些盐类既可以呈固态，也可以呈液态存在于土中，而且经常互相转化。它们溶解于孔隙溶液中的阳离子与土粒表面吸附的阳离子之间，可以相互置换，并处于动平衡状态。因此，易溶盐的含量、成分和状态及其变化，对土粒表面扩散双电层的性状和结构联结的特性等有较大的影响，从而引起土的物理力学性质发生差异。

1.0.2 在 GB50021—94《岩土工程勘察规范》中有关盐渍土分类规定：盐渍土按含盐的性质分类是采用含盐类质量摩尔浓度 (mmol/kg) 的比值进行分类；盐渍土按含盐量分类是采用含盐质量分数 (g/kg) 进行分类。因此，试验结果计算需提供两个不同量的名称和单位。

3.3.1 用水浸提易溶盐时，需要选择适当的土水比例和浸提时间。力求将易溶盐完全溶解出来，而尽可能不使中溶盐和难溶盐溶解。同时要防止浸出液中的离子与土粒上吸附的离子发生交换反应。由于各种盐类在水中的溶解度差异悬殊，因而利用控制土水比例的方法是有可能将易溶盐、中溶盐和难溶盐分离开来的。从土中易溶盐的含量和组成比例而言，加水量少较好。但由于加水量少，给操作带来一定困难，尤其不适用于粘土。国内普遍用 1:5 的土水比例。

关于浸提时间，在同一土水比例下，浸提的时间不同，所得结果亦有差异。浸提时间愈长，中溶盐、难溶盐被溶提的可能性愈大，土粒和水溶液间离子交换反应亦显著。所以浸提时间宜短不宜长。研究表明：对土中易溶盐的浸提时间 2~3 min 即可。为了统一，本规程采用的浸提时间均为 3 min。

3.3.2, 3.3.3 浸出液过滤问题是该项试验成败的关键。试验中经常遇到过滤困难,需要很长时间才能获得需要的滤液数量,而且不易获得清澈的滤液,目前采用抽滤方法效果较好,且操作简便。

4.4.2 易溶盐试验主要测定土中易溶盐的总量以及各阴离子和阳离子的含量。总量的测定采用烘干法,由于不需用特殊的仪器设备,且比较准确,故在室内分析中应用广泛。电导法虽简单迅速,但受各种因素如颗粒成分、盐分组成、温度等影响,准确度较差,故本规程未列。各种离子的测定采用化学分析法和仪器分析法。

4.4.3 当烘干残渣中有较多的钙、镁硫酸盐存在时,在 $105\sim 110^{\circ}\text{C}$ 下结晶水难以蒸发,会使结果偏高,应改为 180°C 烘干至恒量,并注明烘焙温度。

当烘干残渣中有较多的吸湿性强的钙、镁氯化物存在时,将难以恒量。可在浸出液内预先准确加入2%碳酸钠(Na_2CO_3)溶液 $10\sim 20\text{ ml}$,使其转变为钙、镁碳酸盐,在 180°C 下烘至恒量,并做一个加2%碳酸钠溶液的空白试验,所加入的碳酸钠量应从烘干残渣总量中减去。

5.5.1, 5.5.2 碳酸根(CO_3^{2-})和重碳酸根(HCO_3^-)用双指示剂中和滴定法测定。该法是利用碱金属碳酸盐和重碳酸盐水解时碱性强弱不同,用酸分步滴定,并以不同指示剂指示终点,由标准酸液用量算出碳酸根和重碳酸根的含量。

碳酸根和重碳酸根的测定应在土浸出液过滤后立即进行,否则将由于二氧化碳的吸收或释出而产生误差。

6.4.1 氯根(Cl^-)采用硝酸银滴定法测定,以铬酸钾为指示剂。该法是根据铬酸银与氯化银的溶解度不同,以铬酸钾为指示剂用硝酸进行氯根滴定时,氯化银首先沉淀,待其完全后,多余的银离子才能生成砖红色铬酸银沉淀,此时即表明氯根滴定已达终点。

6.4.2 由于有微量的硝酸银与铬酸钾反应指示终点,因此需进行空白试验以减去消耗于铬酸钾的硝酸银用量。

7.1.1 硫酸根 (SO_4^{2-}) 采用 EDTA 络合滴定法是用过量的氯化钡使溶液中的硫酸根沉淀完全, 再用 EDTA 标准溶液在 $\text{pH} \approx 10$ 时以铬黑 T 为指示剂滴定过量的钡离子, 最后由净消耗的钡离子计算硫酸根含量。比浊法是使氯化钡与溶液中硫酸根形成硫酸钡沉淀, 然后在一定条件下使硫酸钡分散成较稳定的悬浊液, 在比色计中测定其浊度, 按照浊度查标准曲线便可计算硫酸根的含量。

7.3.3 用 EDTA 标准溶液滴定过量的钡离子, 以铬黑 T 为指示剂时, 由于钡离子指示剂阴离子铬合不稳定, 终点不明显, 需加入镁使终点清晰, 故沉淀硫酸根时采用钡镁混合剂。

7.4.3 比浊法适用于硫酸根含量小于 40 mg/l 的试样, 因大于 40 mg/l 时, 标准曲线即向下弯曲, 且悬浊液亦不稳定。当试样中硫酸根含量较高时, 可稀释后测定。在比浊法操作中, 沉淀搅拌时间、搅拌速度、试剂的用量等需严格控制, 否则将会引起较大的误差。

8.3.3 在 pH 大于 12 的溶液中, 镁离子被沉淀为氢氧化镁, 在此条件下以钙指示剂为指示剂, 用 EDTA 标准溶液滴定溶液中的钙离子。

8.5.2 在钙镁测定中, 测定钙离子时溶液的 pH 值必须控制在 12 以上, 使镁离子沉淀为氢氧化镁, 以免影响钙离子的滴定。加氢氧化钠使镁沉淀完全后, 应及时滴定, 以免溶液吸收二氧化碳而生成碳酸钙沉淀, 延长滴定终点。

9.5.1 在 $\text{pH} = 10$ 的条件下, 以铬黑 T 等为指示剂, 用 EDTA 标准溶液滴定钙离子、镁离子含量, 从含量中减去钙离子含量而求出镁离子含量。

10.1.1 火焰光度法是发散光谱分析中比较简单的一种方法。它是利用火焰激发使原子的电子跃迁而释放能量产生特征谱线。由于激发的能量较低, 仅有碱金属和碱土金属等能用此方法激发, 所产生的发射光谱经滤光片后用光电池和检流计来测其发射强度。这种方法简便、迅速, 灵敏度较高, 常用来测定钠、钾的含量, 尤其是当他们含量较低时, 用火焰光度计优于其他方法。故本规程

列入该法。差减法因误差大，本规程未列入。

10.4.1 用火焰光度计测定钠离子和钾离子，激发状况的变化是导致误差的重要原因，因此，试验过程中必须使激发状况稳定。试液中其他成分的干扰也是产生误差的原因，为此，绘制标准曲线时，配制标准溶液所用的盐类，应与土样的主要盐类一致。

中溶盐石膏试验

SL237—064—1999

1.0.1, 1.0.2 中溶盐是指土中所含的石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)。本试验是测定土中石膏含量。以一千克(1kg)烘干土(在 $105\sim 110^\circ\text{C}$ 下恒重)中所含的石膏的克(g)数表示。当土中石膏含量很高时,以 $55\sim 60^\circ\text{C}$ 烘干或风干土计算为宜。

4.1.1, 4.2.1 浸提土中石膏的方法有水浸法和酸浸法。由于水浸法较为费时,且难以溶解完全。本规程规定采用酸浸-质量法,适用于含石膏较多的土样。该法利用稀盐酸为浸提剂,使土中石膏全部溶解,然后利用氯化钡为沉淀剂,使浸提出的碳酸根沉淀为硫酸钡,沉淀经过滤、洗涤后灼烧至恒量,按硫酸钡的质量换算成石膏的含量。

用盐酸浸提石膏时,若土中含有碳酸钙,应在加酸待溶液澄清后立即用倾析法过滤,再加酸处理土样,反复进行至无二氧化碳气泡产生为止,静置过夜。

4.2.3 滤纸灰化时,不应出现明火燃烧,以免沉淀飞出损失。同时灰化要充分,以免残留的碳素使硫酸钡还原为硫化钡。为了避免发生这种反应,高温炉灼烧时的温度以不超过 600°C 为宜。

4.2.4 土中易溶性硫酸盐含量较高时,应对测定结果加以校正,即减去易溶盐中硫酸根的含量。

难溶盐碳酸钙试验

SL237—065—1999

1.0.1 土中难溶盐是指钙、镁的碳酸盐类。本试验是测定难溶的碳酸盐类在土中的含量。以 1 kg 烘干土所含碳酸钙的克数 (g/kg) 表示。

1.0.2 土中的碳酸钙测定有多种方法,本规程中所列的气量法是比较粗的方法,适合大批试样的粗略测定。该法对土中的碳酸钙用盐酸分解,测量释出的二氧化碳的体积,乘以二氧化碳的密度,求出二氧化碳的质量,再乘以换算系数 2.272,便可算出碳酸钙的含量。

4.4.3 试验前应检查试验装置是否漏气。读数时保持三管水面齐平是为了使两个量管所受压力均为 1 个大气压。

4.4.4 气量法受温度影响,特别是广口瓶与量管连接右肢尤甚。因此,需用长柄夹子夹住广口瓶,即使摇动也不要用手接触量管连接肢,以免人的体温影响气体体积。

有机质试验

SL237—066—1999

1.0.1 重铬酸钾容量法是测定土中有机质比较通用的方法。它是通过强氧化剂重铬酸钾加热来氧化有机质，以氧化剂的消耗量求出有机质的量。用过量的重铬酸钾-硫酸溶液，在加热条件下氧化土中有机质，剩余的重铬酸钾则用硫酸亚铁或硫酸亚铁铵的标准溶液滴定，从而得到氧化有机质的重铬酸钾的消耗量，根据重铬酸钾的消耗量乘上换算系数，便可计算出土中有机质的含量。

1.0.2 由于重铬酸钾容量法氧化能力有一定限度，故有机质含量高于 150 g/kg (15%) 的土样是不适用的。

游离氧化铁试验

SL237—067—1999

1.0.1, 1.0.2 游离氧化铁是红土、红粘土及红色沉积岩的主要胶结物，同时易受环境条件的影响改变其形态和特征，由于这些特征，它们对于这类岩土的工程性质有较大的影响。研究表明，游离氧化铁在岩土中的胶结作用不仅与它们的含量、分布形式有关，还受它们的结晶程度、水化程度等影响。本规程所列方法可测定岩土中游离氧化铁的总量和无定形游离氧化铁，二者相减即得结晶质游离氧化铁的含量，可用于定性分析和比较岩土的与胶结有关的工程性质。

3.1.4 从加入草酸氨缓冲溶液直至离心分离的整个过程应连续进行不得间歇，以免因土壤与溶液作用时间不同而影响提取质量。

3.2.1 达姆试剂提取液用量应控制在 6 ml 以内，超过此用量对测定结果有影响。

3.2.2 显色时间在室温下需 24 h，亦可在水浴锅上加热 15 min，以加快显色过程。

阳离子交换量试验

SL237—068—1999

1.0.1 阳离子交换量 (CEC) 现行单位为“厘摩尔每 1000 克土 (cmol/kg)”, 以前的单位为“毫克当量每 100 克土 (m·e/100g)”, 注意对照。

3.0.2 间歇摇晃可根据情况而定, 大约每隔 10 min 摇晃一次, 每次摇晃约 1 min (手摇)。

3.0.6 用 $\text{Na}_2\text{-EDTA}$ 溶液滴定硫酸镁溶液时, 需仔细观测终点。当颜色由酒红色变为紫色时, 应中止滴定, 并不停地摇晃三角瓶, 溶液若由紫色变为蓝色, 表示已到终点; 如溶液不变蓝色, 再继续滴加 $\text{Na}_2\text{-EDTA}$ 溶液, 即变为蓝色。

土的矿物组成试验

SL237—069—1999

1.0.1 X射线衍射分析是研究粘土矿物最重要的一种方法。此法是以X射线射入粘土矿物晶格中产生的衍射为基础。不同的粘土矿物，晶格构造各异，X射线射入时便会产生不同的衍射图谱，据此可对其中的粘土矿物组成进行鉴定。土中伴存的非粘土矿物的鉴定原理与粘土矿物的鉴定相同。有关这些矿物的粉晶衍射数据可参考有关文献。

3.1.1 试样以制成镁离子饱和的较好，因镁是常见的两价阳离子中原子序数最小的，对X射线吸收较少。同时利用甘油扩展法来区分蛭石和蒙脱石时，仅仅镁饱和的蛭石晶层间是比较可靠地只吸附一层甘油而保持 14 \AA ($1\text{ \AA} = 10^{-10}\text{m}$)附近的晶面间距，不因荷电量多少而异。而钙、钡等饱和的蛭石，则可依荷电量多少不同，有时吸附两层甘油也可扩展至 17.7 \AA 左右，无法与蒙脱石区别。

3.2.1 在鉴别具有扩展性晶格矿物如蒙脱石等时，本规程建议用甘油扩展法。近来乙二醇扩展法在国内外比较流行，此法效果虽与甘油法相似，例如也可使蒙脱石吸附两层乙二醇扩展至 17 \AA 左右，但是，某些蛭石特别是层间电荷较少的蛭石，即使用镁饱和也可以吸附两层乙二醇，同样扩展至 17 \AA 附近易与蒙脱石混淆，所以采用甘油扩展法较宜。

3.2.2 实践证明，试样制成定向薄膜比干粉末压制样的效果好，试样用量也较少。故以定向薄膜作衍射分析为宜 [研究(060)谱线除外]。