

ICS 19. 020

P 13

团 体 标 准

T/CHES 29—2019

粗粒土试验规程

Specification for coarse-grained soil test

2019-08-20 发布

2019-10-01 实施

中国水利学会 发布

中国水利学会公告

关于批准发布《粗粒土试验规程》 等 3 项团体标准的公告

2019 年第 2 号（总第 4 号）

经理事长专题办公会批准，决定发布《粗粒土试验规程》等 3 项团体标准，现予公告。

标准自 2019 年 10 月 1 日起实施。

序号	标准名称	标准编号	批准日期	实施日期
1	粗粒土试验规程	T/CHES 29—2019	2019. 8. 20	2019. 10. 1
2	除磷剂 选铜尾砂	T/CHES 30—2019	2019. 8. 20	2019. 10. 1
3	电波（雷达）流速仪	T/CHES 31—2019	2019. 8. 20	2019. 10. 1

中国水利学会

2019 年 8 月 21 日

前 言

根据中国水利学会团体标准制修订计划安排，按照《工程建设标准编写规定》（建标〔2008〕182号）的要求，编制本规程。

编写过程中编写组充分收集了十几年来粗粒土试验检测技术方面的科技成果，总结了比较成熟的工程检测技术方法和经验，分析研究了粗粒土试验检测方面行业标准的技术特点和应用效果，提出了粗粒土全级配或近似全级配的试验检测方法，在充分征求行业相关单位意见的基础上，编制本规程。

本规程共 26 章和 3 个附录，主要技术内容有：基本规定、土样和试样制备、颗粒分析试验、含水率试验、比重试验、相对密度试验、渗透及渗透变形试验、反滤试验、压缩试验、直接剪切试验、三轴压缩试验、三轴蠕变试验、三轴湿化变形试验、三轴劣化变形试验、CT 三轴试验、真三轴试验、振动三轴试验、动力触探试验、旁压试验、载荷试验、波速试验、深厚覆盖层密度试验、原位密度试验、碾压试验等室内、现场（含原位）试验方法。

本规程由中国水利学会归口。

本规程主编单位、参编单位、主要起草人和主要审查人：

主编单位：中国水电建设集团十五工程局有限公司

中国水利水电科学研究院

水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院

参编单位：长江水利委员会长江科学院

大连理工大学

水利部新疆水利水电勘测设计研究院

中国电建集团西北勘测设计研究院

四川省水利水电勘测设计研究院

河海大学

长江勘测规划设计研究有限责任公司

陕西秦海检测科技有限公司

主要起草人：王星照 赵剑明 陈生水 汤轩林 刘小生
何小雄 程展林 石北嘯 刘启旺 易永军
杨正权 邹德高 穆汉平 李学强 高希章
朱 晟 赵继成 朱建秋 章天长 杨玉生
陈 宁 王 龙 凌 华 韩华强 潘家军
左永振 刘京茂 彭卫军 苗 喆 孙 陶
李 晨 梁艳萍 陈晓静 朱凯斌 魏匡民
范金勇 杨志宏 王伟亮 李彦玲 李 飞
钟 红 李宏伟 王洪亮 马洪玉 齐洪文
殷 旗 沙元杰
主要审查人：高安泽 马毓淦

目 次

1	总则	1
2	术语与符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	2
3	基本规定	4
4	土样和试样制备	5
4.1	一般规定	5
4.2	设备和设施	5
4.3	土样准备	5
4.4	土样制备	6
4.5	土样级配	7
4.6	试样制备	7
4.7	计算与记录	7
5	颗粒分析试验	10
5.1	一般规定	10
5.2	设备和设施	10
5.3	试验步骤	10
5.4	计算与记录	12
6	含水率试验	15
6.1	一般规定	15
6.2	烘干法	15
6.3	炒干法	17
6.4	晾晒法	17
6.5	快速测定法	18
7	比重试验	20
7.1	一般规定	20

7.2	比重瓶法	20
7.3	浮称法	22
7.4	虹吸筒法	24
8	相对密度试验	27
8.1	一般规定	27
8.2	振动台法	27
8.3	表面振动法	28
8.4	现场密度桶法	29
8.5	计算与记录	32
9	渗透及渗透变形试验	35
9.1	一般规定	35
9.2	室内渗透及渗透变形试验	35
9.3	现场渗透试验	45
10	反滤试验	50
10.1	一般规定	50
10.2	设备和设施	50
10.3	试验步骤	50
10.4	计算与记录	53
11	压缩试验	54
11.1	一般规定	54
11.2	设备和设施	54
11.3	试验步骤	56
11.4	计算与记录	57
12	直接剪切试验	61
12.1	一般规定	61
12.2	室内直剪试验	61
12.3	现场直剪试验	65
13	三轴压缩试验	69
13.1	一般规定	69
13.2	设备和设施	69

13.3	操作步骤	71
13.4	成果整理	74
13.5	超大三轴压缩试验的特殊要求	84
13.6	记录	86
14	三轴蠕变试验	89
14.1	一般规定	89
14.2	设备和设施	89
14.3	操作步骤	89
14.4	计算与记录	90
15	三轴湿化变形试验	93
15.1	一般规定	93
15.2	设备和设施	93
15.3	操作步骤	94
15.4	计算与记录	95
16	三轴劣化变形试验	98
16.1	一般规定	98
16.2	设备和设施	98
16.3	操作步骤	99
16.4	计算与记录	101
17	CT 三轴试验	104
17.1	一般规定	104
17.2	设备和设施	104
17.3	试验步骤	105
17.4	计算与记录	106
18	真三轴试验	108
18.1	一般规定	108
18.2	设备和设施	108
18.3	试样制备	109
18.4	试验步骤	111
18.5	计算与记录	112

19	振动三轴试验	115
19.1	一般规定	115
19.2	设备和设施	115
19.3	操作步骤	117
19.4	成果整理	120
19.5	超大振动三轴试验的特殊要求	128
19.6	记录	128
20	动力触探试验	133
20.1	一般规定	133
20.2	设备和设施	133
20.3	操作步骤	134
20.4	计算与记录	135
21	旁压试验	138
21.1	一般规定	138
21.2	设备和设施	138
21.3	操作步骤	140
21.4	计算和记录	142
22	载荷试验	146
22.1	一般规定	146
22.2	堆载和锚桩反力载荷试验	146
22.3	洞内载荷试验	152
23	波速试验	156
23.1	一般规定	156
23.2	设备和设施	156
23.3	操作步骤	157
23.4	计算与记录	160
24	深厚覆盖层密度试验	164
24.1	一般规定	164
24.2	设备和设施	164
24.3	室内模型试样制备与安装	164

24.4	试验步骤	165
24.5	计算与记录	167
25	原位密度试验	168
25.1	一般规定	168
25.2	灌砂法	168
25.3	灌水法	172
26	碾压试验	175
26.1	一般规定	175
26.2	设备和设施	175
26.3	碾压试验准备	176
26.4	碾压试验要求	177
26.5	碾压试验检测	179
26.6	计算与记录	179
26.7	试验工作量基本组合	181
26.8	试验成果整理及报告编写	184
附录 A	土样级配缩尺处理方法	186
附录 B	大型直剪仪的检查和标定	189
附录 C	旁压仪标定	191
	本规程用词说明	193
	引用标准名录	194
	条文说明	195

Contents

1	General provisions	1
2	Terms and symbols	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbols	2
3	Basic requirements	4
4	Preparation of soil sample and test specimens	5
4.1	General requirements	5
4.2	Instruments and equipments	5
4.3	Soil sample plan	5
4.4	Soil sample preparation	6
4.5	Soil sample gradation	7
4.6	Test specimens preparation	7
4.7	Calculate and record	7
5	Grain distribution analysis test	10
5.1	General requirements	10
5.2	Instruments and equipments	10
5.3	Operation steps	10
5.4	Calculate and record	12
6	Water content test	15
6.1	General requirements	15
6.2	Oven – drying method	15
6.3	Pan – roasting method	17
6.4	Air drying method	17
6.5	Rapid determination method	18
7	Specific gravity test	20
7.1	General requirements	20

7.2	Pycnometer method	20
7.3	Floating method	22
7.4	Siphon cylinder method	24
8	Relative density test	27
8.1	General requirements	27
8.2	Vibration table method	27
8.3	Surface vibration method	28
8.4	Field density barrel method	29
8.5	Calculate and record	32
9	Permeability and seepage deformation test	35
9.1	General requirements	35
9.2	Permeability and seepage deformation test in laboratory	35
9.3	Permeability test in field	45
10	Filter test	50
10.1	General requirements	50
10.2	Instruments and equipments	50
10.3	Operation steps	50
10.4	Calculate and record	53
11	Compression test	54
11.1	General requirements	54
11.2	Instruments and equipments	54
11.3	Operation steps	56
11.4	Calculate and record	57
12	Direct shear test	61
12.1	General requirements	61
12.2	Direct shear test in laboratory	61
12.3	Direct shear test in field	65
13	Triaxial compression test	69
13.1	General requirements	69
13.2	Instruments and equipments	69

13.3	Operation steps	71
13.4	Processing results	74
13.5	Special requirements for Ultra – large triaxial compression test	84
13.6	Record	86
14	Triaxial rheological test	89
14.1	General requirements	89
14.2	Instruments and equipments	89
14.3	Operation steps	89
14.4	Calculate and record	90
15	Triaxial slaking test	93
15.1	General requirements	93
15.2	Instruments and equipments	93
15.3	Operation steps	94
15.4	Calculate and record	95
16	Triaxial deterioration test	98
16.1	General requirements	98
16.2	Instruments and equipments	98
16.3	Operation steps	99
16.4	Calculate and record	101
17	Triaxial CT test	104
17.1	General requirements	104
17.2	Instruments and equipments	104
17.3	Operation steps	105
17.4	Calculate and record	106
18	True triaxial test	108
18.1	General requirements	108
18.2	Instruments and equipments	108
18.3	Soil sample preparation	109
18.4	Operation steps	111

18.5	Calculate and record	112
19	Cyclic triaxial test	115
19.1	General requirements	115
19.2	Instruments and equipments	115
19.3	Operation steps	117
19.4	Processing results	120
19.5	Special requirements of Ultra – large dynamic triaxial compression test	128
19.6	Record	128
20	Dynamic penetration test	133
20.1	General requirements	133
20.2	Instruments and equipments	133
20.3	Operation steps	134
20.4	Calculate and record	135
21	Pressure meter test	138
21.1	General requirements	138
21.2	Instruments and equipments	138
21.3	Operation steps	140
21.4	Calculate and record	142
22	Plate loading test	146
22.1	General requirements	146
22.2	Loading test with surcharges and loading test with anchor pile	146
22.3	Loading test in cave	152
23	Wave velocity test	156
23.1	General requirements	156
23.2	Instruments and equipments	156
23.3	Operation steps	157
23.4	Calculate and record	160
24	Density test of deep overburden	164

24.1	General requirements	164
24.2	Instruments and equipments	164
24.3	modeling sample preparation in laboratory	164
24.4	Operation steps	165
24.5	Calculate and record	167
25	In – situ density test	168
25.1	General requirements	168
25.2	Sand filling method	168
25.3	Water filling method	172
26	Rolling compaction test	175
26.1	General requirements	175
26.2	Instruments and equipments	175
26.3	Preparation of rolling compaction test	176
26.4	Requirments of rolling compaction test	177
26.5	Detection of rolling compaction test	179
26.6	Calculate and record	179
26.7	Basic combination of test workload	181
26.8	Process of test result and preparation of report	184
Appendix A	Scalling – methord of sample gradation	186
Appendix B	Inspection and calibration of large direct shear equipment	189
Appendix C	Calibration of pressure meter equipment	191
	Explanation of wording in this standard	193
	List of quoted standards	194
	Explanation of provisions	195

1 总 则

1.0.1 为了促进新技术、新成果在水利水电工程粗粒土试验和检测中的应用，科学、准确地进行粗粒土的试验检测工作，统一试验检测方法，为工程设计、施工等提供技术指标，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于水利水电工程粗粒土的基本工程性质和技术指标试验，适用于室内、现场（含原位）粗粒土全级配或近似全级配试验检测。

1.0.3 本规程列入了粗粒土的多种试验内容和多种试验方法，科研、设计、施工各阶段应根据试验目的和用途选择适宜的试验方法。

1.0.4 试验检测所用的仪器、仪表、计量器具应进行检定或校准，保证其状态正常，计量准确。

1.0.5 试验检测资料整理分析，应保证试验结果的准确可靠性。除应符合各章节数据处理的相应要求外，还应满足数据统计、误差处理、数据整理的要求。

1.0.6 粗粒土试验除应符合本规程规定外，尚应符合国家及行业现行有关标准的规定。

2 术语与符号

2.1 术语

2.1.1 粗粒土 coarse-grained soil

粒径小于 0.075mm 土的质量不大于总质量 12% 的粗粒组和巨粒组土的总称。

2.1.2 有效最大粒径 effective maximum particle diameter

对应于平均级配曲线上累计质量占总质量 95% 的颗粒粒径，用 d_{95} 表示。

2.1.3 三因素相关图 three-factors correlation diagram

干密度、砾石含量、相对密度的相关关系图。

2.1.4 表面振动法 surface vibration method

在试样表面通过振动压实装置密实粗粒土的方法。

2.1.5 密度桶法 density bucket method

通过振动碾压设备现场测定全级配粗粒土最大、最小干密度的试验方法。

2.1.6 埋管法 buried pipe method

现场将多孔钢管埋入粗粒土中测定粗粒土填筑体的综合渗透系数的一种试验方法。

2.2 符号

2.2.1 尺寸

A ——试样面积

D ——试样的平均直径

d ——土颗粒直径

h ——试样高度

V ——试样体积

2.2.2 物理性能指标

C_c ——曲率系数
 C_u ——不均匀系数
 D_r ——相对密度
 e ——孔隙比
 G_s ——土粒比重
 w ——含水率
 ρ ——试样密度

2.2.3 力学性能指标

a_v ——压缩系数
 C_c ——压缩指数
 E_s ——压缩模量
 k ——渗透系数
 m ——试样质量
 p ——单位压力
 Q ——渗水量
 c ——黏聚力
 φ ——内摩擦角
 τ ——剪应力
 δ ——剪切位移

3 基本规定

3.0.1 试验用料应具有代表性。

3.0.2 试验前应充分了解粗粒土的工程用途，综合考虑工程技术要求、试验场地和条件，编制试验大纲。

3.0.3 试样直径与试验用料的最大粒径的径径比，可根据不同试验内容和试验条件确定，宜为 3~5。

4 土样和试样制备

4.1 一般规定

4.1.1 本章规定适用于粗粒土的各项试验。

4.1.2 土样和试样制备的目的是选取具有代表性的粗粒土，经过必要的制备程序和设备加工，为各项试验提供合格的土样和试样。

4.2 设备和设施

4.2.1 试验筛：粗筛（圆孔），孔径为 100mm、80mm、60mm、40mm、20mm、10mm、5mm；细筛，孔径为 2mm、1mm、0.5mm、0.25mm、0.075mm。

4.2.2 秤：称量 200kg、最小分度值 50g；称量 50kg、最小分度值 5g；称量 10kg、最小分度值 1g。

4.2.3 天平：称量 5000g，最小分度值 1g；称量 1000g，最小分度值 0.1g，称量 200g，最小分度值 0.01g。

4.2.4 振筛机：符合《实验室用标准筛振筛机技术条件》GB 9909 的技术要求。

4.2.5 钢直尺：量程 0~500mm、精度 1mm；量程 0~1000mm、精度 1mm。

4.2.6 其他：烘箱、木槌、橡皮板、铁铲、盛土盘、喷雾器等。

4.3 土样准备

4.3.1 土样数量宜为试验用量的 2~3 倍，并应对土样的特性、形状、风化程度等进行描述。

4.3.2 直接用于试验的天然原型级配土样应单独存储，不得与其他土样混淆，土样分割应采取四分法。

4.3.3 有含水率要求的土样应采取有效密封保湿措施。

4.3.4 土样储存环境应采取有效的防污染、防流失措施。

4.4 土 样 制 备

4.4.1 风干土样制备应符合下列规定：

1 将土样风干，碾散土块及附着在粗颗粒表面上的细颗粒，碾散时应避免破坏土的天然颗粒。

2 按照大于 800mm、800~600mm、600~400mm、400~200mm、200~100mm、100~80mm、80~60mm、60~40mm、40~20mm、20~10mm、10~5mm 和小于 5mm 的粒组分级备用。

3 将全部土样依次筛分，大于 100mm 土样宜采用机械筛、尺量法或套环法分级称量。小于等于 100mm 的土样应采用筛析法筛分称量。

4 测定各粒组土样的风干含水率。

5 计算全级配土样的各粒组含量百分数，绘制颗粒级配曲线图，计算曲率系数 C_c 、不均匀系数 C_u 值。

6 制备好的土样按粒组分别堆存，做好样品标识，不得混淆。

4.4.2 天然含水率土样制备应符合下列规定：

1 将天然含水率土样采用四分法分别取两份样品。

1) 一份样品风干后按 4.4.1 条中 1~6 款测定各粒级分组含量，绘制级配曲线。

2) 另一份样品应在保持天然含水率不变的情况下，将土样充分拌和均匀，测定其天然含水率。

2 根据试验用量，用四分法分别取试验所需土样，密封存储。

4.4.3 根据土样性质和工程需要，从分组土样中分别取代表性土样进行相关物理、化学性能试验。

4.4.4 必要时，对粒径大于 5mm 土样的岩性、形状、风化程度及小于等于 5mm 颗粒特性进行描述。

4.5 土样级配

4.5.1 试验用土样级配应按照试验要求的级配进行。无级配要求时，宜采用有代表性的级配进行。

4.5.2 当土样最大粒径超过本规程试验允许径径比时，应对土样粒径进行缩尺处理，缩尺处理方法见附录 A。

4.6 试样制备

4.6.1 按照确定的试验级配及试验密度，计算单次试验用料质量，配料量宜不小于试样量的 1.3 倍。

4.6.2 采用缩尺级配料进行室内试样制备时，制样密度宜考虑原级配料干密度的缩尺效应。

4.6.3 采用人工配料进行试样制备时，应按照确定的试验级配，各粒组质量分级称取，拌和均匀。

4.6.4 采用原级配进行试样制备时，应按照试验用量采取四分法称取试验用料，并应使分割样的较大颗粒分配均匀。

4.6.5 需要配制含水率时，将称取好的试验用料平铺在不吸水的橡皮板上拌和均匀，按控制含水率均匀施加所需的水量后，拌和均匀，密封保存。

4.6.6 试样制备的密度、含水率与制备标准的差值应满足各试验项目的平行试验要求。

4.6.7 制备好的试样有含水率要求时应密封保存。

4.7 计算与记录

4.7.1 按试验要求级配进行土样制备时，各粒组质量及所需加水量计算应符合下列要求：

1 按试验要求级配曲线计算每一粒组试验用料量：

$$g = Gp \quad (4.7.1-1)$$

式中： g ——每一粒组试验用料量， kg；

G ——试验用料总量， kg；

p ——每一粒组百分含量， %。

2 按下列公式计算所需土样的质量：

$$m = m_1 + m_2 \quad (4.7.1-2)$$

$$m_1 = V\rho_d(1 + 0.01w_1)0.01p_5 \quad (4.7.1-3)$$

$$m_2 = V\rho_d(1 + 0.01w_2)(1 - 0.01p_5) \quad (4.7.1-4)$$

$$m_i = \frac{p_i}{p_5}m_1 \quad (4.7.1-5)$$

式中： m ——风干土或天然土总质量， g；

m_1 ——大于 5mm 粗粒风干土或天然土质量， g；

m_2 ——小于等于 5mm 细粒风干土或天然土质量， g；

m_i ——粗粒某粒组风干土质量， g；

V ——试样体积， cm^3 ；

ρ_d ——试样控制干密度， g/cm^3 ；

p_5 ——制样时大于 5mm 颗粒含量， %；

w_1 ——大于 5mm 颗粒风干或天然含水率， %；

w_2 ——小于等于 5mm 风干或天然含水率， %；

p_i ——粗粒某粒组含量， %。

3 按下列公式计算土样所需加水量：

$$m_w = \frac{m}{1 + 0.01w_0}0.01(w - w_0) \quad (4.7.1-6)$$

$$w_0 = 0.01w_1p_5 + w_2(1 - 0.01p_5) \quad (4.7.1-7)$$

式中： m_w ——土样所需加水量， g；

w_0 ——风干土或天然土总含水率， %；

w ——试样控制含水率， %。

4.7.2 记录格式见表 4.7.2。

表 4.7.2 粗粒土试样制备记录表

工程名称 _____ 试验日期 _____

试验依据			主要设备名称和编号		
土样编号		试样编号		土样最大粒径 /mm	
试样最大 粒径 /mm		试样砾石 含量 /%		试样 小于 0.075mm 含量/%	
风干土样 含水率 /%		试样控制 含水率 /%		试样控制 干密度 /(g/cm ³)	
试样体积 /cm ³		试样加水量 /g		干试样质量 /g	
粒径 /mm	土样级配或设计级 配各粒组质量 /g		试样级配 各粒组含量 /%	各粒组风干 土质量 /g	备注
...					
400					
200					
100					
80					
60					
40					
20					
10					
5					
2					
1					
0.5					
0.25					
0.075					
<0.075					
总计					

试验

计算

校核

5 颗粒分析试验

5.1 一般规定

5.1.1 颗粒分析试验是测定风干粗粒土中各种粒组占该土总质量的百分数，用以确定颗粒大小分布情况，供粗粒土的分类和概略判断土的工程性质及选料之用。

5.1.2 筛析法适用于粒径为 0.075~100mm 的土。

5.1.3 钢尺测量法或套环法适用于粒径大于 100mm 的土。

5.2 设备和设施

5.2.1 试验筛：粗筛（圆孔），孔径为 100mm、80mm、60mm、40mm、20mm、10mm、5mm；细筛，孔径为 2.0mm、1.0mm、0.5mm、0.25mm、0.075mm。

5.2.2 秤：称量 200kg、最小分度值 50g；称量 100kg、最小分度值 50g；称量 10kg、最小分度值 1g。

5.2.3 天平：称量 1kg、最小分度值 0.1g。

5.2.4 振筛机：符合《实验室用标准筛振筛机技术条件》GB 9909 的技术要求。

5.2.5 钢直尺：量程 0~500mm、精度 1mm；量程 0~1000mm、精度 1mm。

5.2.6 套环：用 $\phi 8$ 光圆钢筋制作直径分别为 200mm、400mm 等直径的钢环。

5.2.7 其他：烘箱、瓷盘、铁盆等。

5.3 试验步骤

5.3.1 试验用料应具有代表性，不同粒径试样数量应符合表 5.3.1 的规定。爆破堆石料颗粒级配试验时，用料量宜为表中规定质量的 5~8 倍。

表 5.3.1 代表性试样质量

试样最大粒径/mm	取样质量不小于/kg
<5	2
<60	20
<80	40
<100	100
<200	300
<400	2000
<600	5000
≥600	根据试坑大小及密度计算确定

5.3.2 将全部试样筛分，5mm 以下试样应采用细筛筛析，5～100mm 试样应采用粗筛筛析，100mm 以上试样宜采用尺量法或套环法，综合加权计算质量百分数。

1 粒径大于 100mm 的试样，用尺量法或套环法测量能通过筛孔的断面尺寸作为该块体的粒径，按粒径组分级堆放，分粒径组称试样质量。

2 粒径 5～100mm 的试样，用粗筛进行筛析，按粒径组分级堆放，分粒径组称试样质量。

3 粒径小于 5mm 的试样，四分法取样 500g，筛析时振摇时间宜为 10～15min，准确至 0.1g。筛析完毕，由最大孔径筛开始，顺序将各筛取下，在空瓷盘上用手轻叩摇晃，直至每分钟的通过量不超过试样总量的 0.1% 为止，每号筛上的筛余平均层厚应不大于试样的最大粒径，如超过此值，应将该号筛上的筛余分成两份，再进行筛分，漏下的土粒应全部放入下一级筛内，并将留在各筛上的试样分别称量。

5.3.3 当 5mm 筛下的土样，小于试样总质量的 10% 时可省略细筛筛析。

5.3.4 5mm 以上各粒组试样质量及 5mm 筛下的土质量总和与试样质量之差不得大于 1%。

5.4 计算与记录

5.4.1 按公式 (5.4.1) 计算小于某粒径颗粒质量百分数:

$$x_i = \frac{m_a}{m_b} \times 100 \quad (5.4.1)$$

式中: x_i ——小于某粒径的试样质量占试样总质量的百分数, %, 准算至 0.1 %;

m_a ——小于某粒径的试样质量, g;

m_b ——试样的总质量, g。

5.4.2 当小于等于 5mm 的颗粒用四分法取样时, 按公式 (5.4.2) 计算小于某粒径的试样质量占试样总质量的百分数:

$$x_i = \frac{m'_a}{m'_b} d_x \quad (5.4.2)$$

式中: x_i ——小于某粒径的试样质量占试样总质量的百分数, %, 准算至 0.1 %;

m'_a ——通过 5mm 筛的试样中小于某粒径的试样质量, g;

m'_b ——通过 5mm 筛分析时所取的试样质量, g;

d_x ——粒径 $\leq 5\text{mm}$ 的颗粒质量百分数, %。

5.4.3 绘制颗粒大小分布曲线, 求出各粒组的颗粒百分数。以小于该粒径的总土质量百分数为纵坐标, 以粒径 (mm) 的对数为横坐标绘制颗粒级配分析曲线图, 确定颗粒大小分布情况, 测量颗粒最大粒径, 进而判定土样级配状况, 如图 5.4.3 所示。

5.4.4 计算级配指标应按下列公式计算:

1 按公式 (5.4.4-1) 计算不均匀系数 C_u :

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (5.4.4-1)$$

2 按公式 (5.4.4-2) 计算曲率系数 C_c :

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} d_{10}} \quad (5.4.4-2)$$

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

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

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

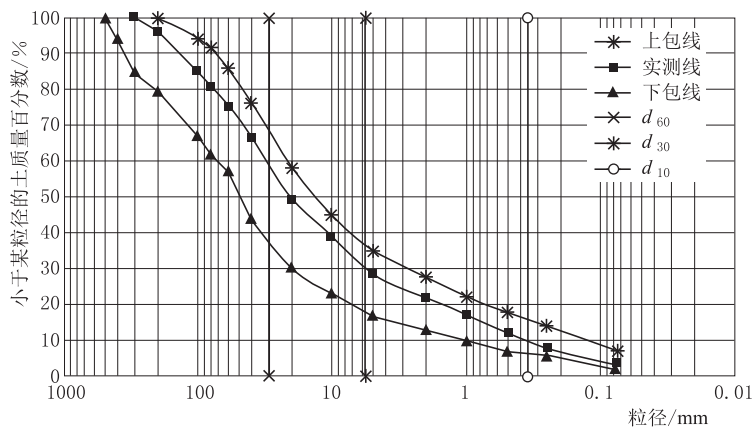


图 5.4.3 颗粒大小分布曲线示意图

5.4.5 记录格式见表 5.4.5。

表 5.4.5 颗粒分析试验记录（筛析法）

工程名称		试验日期			
试验依据			主要设备名称和编号		
土样编号			试样编号		
试样数量	风干土质量= g，最大粒径： mm。 5mm 筛上土质量= g，小于 5mm 的土占总质量的百分数= %。 5mm 筛下土质量= g，小于 0.075mm 的土占总质量的百分数= %				
粒 径 /mm	分计筛余量 /g	分计筛余 百分数 /%	累计筛余 百分数 /%	小于该粒径的 土质量百分数 /%	小于该粒径的 总土质量百分数 /%
600					
500					

表 5.4.5 (续)

粒径 /mm	分计筛余量 /g	分计筛余 百分数 /%	累计筛余 百分数 /%	小于该粒径的 土质量百分数 /%	小于该粒径的 总土质量百分数 /%
400					
300					
200					
100					
80					
60					
40					
20					
10					
5					
<5					
Σ					
粒径 /mm	分计筛余量 /g	分计筛余 百分数 /%	累计筛余 百分数 /%	小于该粒径的 土质量百分数 /%	小于该粒径的 总土质量百分数 /%
2					
1					
0.5					
0.25					
0.075					
<0.075					
Σ					

试验

计算

校核

6 含水率试验

6.1 一般规定

- 6.1.1 含水率试验包括烘干法、炒干法、晾晒法、快速测定法。
- 6.1.2 室内试验时粒径不大于 60mm 的应采用烘干法，粒径大于 60mm 的可采用晾晒法。
- 6.1.3 现场试验可根据土的性质和工程情况，采用烘干法、炒干法、晾晒法、快速测定法。

6.2 烘 干 法

- 6.2.1 应采用下列主要设备与设施：

- 1 烘箱：温度可控制在 105~110℃，有效烘烤体积应与试样量相匹配。
- 2 秤：称量 10kg、最小分度值 1g。
- 3 天平：称量 2kg、最小分度值 0.01g。
- 4 托盘：能满足样品称量质量。

- 6.2.2 试验应采用下列步骤：

- 1 按试样的粒径范围取代表性试样，试样的质量不宜小于表 6.2.2 的规定。

表 6.2.2 与最大粒径相应的试样质量

最大粒径/mm	5	10	20	40	60
试样质量/kg	0.5	1.0	1.5	3.0	5.0

- 2 取洁净干燥的托盘，称其质量 m_1 ；将试样放入托盘中，称盘和试样质量 m_2 。

- 3 将称量好盛有试样的盘放入烘箱，控制烘箱温度为 105~110℃ 进行烘干，烘干时间不应少于 6h。

- 4 烘干后，冷却至室温。称盘和烘干试样质量 m_3 。

6.2.3 含水率应按下列公式计算：

1 按公式（6.2.3）计算粗粒土的含水率：

$$w = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \times 100 \tag{6.2.3}$$

式中： w ——粗粒土的含水率，%；

m_1 ——盘的质量，g；

m_2 ——盘和湿试样的质量，g；

m_3 ——盘和烘干试样的质量，g。

2 计算精确至 0.1%。

6.2.4 烘干法应进行两次平行测定，结果取算术平均值。允许的平行差值应符合表 6.2.4 的规定。

表 6.2.4 含水率允许的平行差值 %

含水率	允许的平行差值
≤ 5	$\leq \pm 0.5$
> 5	$\leq \pm 1.0$

6.2.5 记录格式见表 6.2.5。

表 6.2.5 含水率试验记录表

工程名称 _____ 试验日期 _____

试验依据					主要设备名称和编号			
试样 编号	盘号	盘的质量 /g	盘+试样 质量 /g	盘+烘干 试样质量 /g	水的 质量 /g	烘干试样 质量 /g	含水率 /%	平均 含水率 /%

试验 _____ 计算 _____ 校核 _____

6.3 炒 干 法

6.3.1 应采用下列主要设备与设施：

- 1 热源：采用可调温电炉等。
- 2 炒锅：采用金属盘或铁锅。
- 3 秤：称量 10kg、最小分度值 1g。

6.3.2 试验应采用下列步骤：

1 按试样的粒径范围取代表性试样，试样的质量应不小于表 6.2.2 的规定。

2 将经称量的试样放入炒锅中，并置于热源上炒干。在炒干过程中防止颗粒失落，随时翻拌试样，至试样完全干燥，冷却至室温后，称量炒干试样质量。

6.3.3 记录与计算应符合 6.2.3 条、6.2.4 条的要求，记录格式参照 6.2.5 条。

6.4 晾 晒 法

6.4.1 应采用下列主要设备与设施：

- 1 秤：称量 100kg、最小分度值 50g。
- 2 容器：能盛放试样的铁皮桶或瓷盘。
- 3 晾晒场地：平整场地、彩条布、帆布等。

6.4.2 试验应采用下列步骤：

1 按试样的粒径范围取代表性试样，试样的质量应不小于表 6.4.2 的规定。

表 6.4.2 与最大粒径相应的试样质量

最大粒径/mm	80	100	200	400	600	800
试样质量/kg	20	40	200	500	500	500

2 将称量好的试样均匀分散晾晒场地上，在光照充足或者通风条件较好的环境下晾晒风干至干燥，称量晒（风）干试样质量。

6.4.3 计算与记录应符合 6.2.3 条、6.2.4 条的要求，记录格式参照 6.2.5 条。

6.5 快速测定法

6.5.1 本试验方法适用于现场快速测定全级配粗粒土的含水率。

6.5.2 应采用下列主要设备与设施：

1 烘箱：温度可控制在 105～110℃，有效烘烤体积应与试样量相匹配。

2 秤：称量 100kg、最小分度值 50g；称量 10kg、最小分度值 1g。

3 天平：称量 2kg、最小分度值 0.01g。

4 其他：铁皮桶、瓷盘、彩条布、钢刷等。

6.5.3 试验应采用下列步骤：

1 采用填筑施工的粗粒土，按照 6.2 节、6.3 节、6.4 节中适宜的试验方法，建立不同砾石含量、不同含水率的全料含水率与小于等于 5mm（或 10mm）含水率关系曲线，如图 6.5.3 所示。

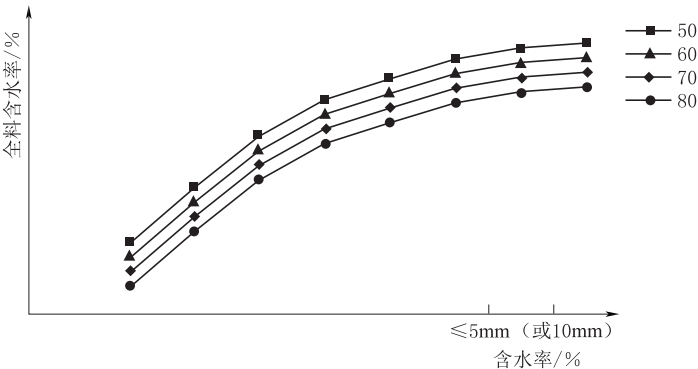


图 6.5.3 ≤5mm (10mm) 料与全料含水率关系曲线示意图

2 现场炒干法检测试样中小于等于 5mm（或 10mm）料的含水率，筛分法检测试样的砾石含量。

3 用小于等于 5mm（或 10mm）料的含水率，筛分法检测试样的砾石含量结果，在全料含水率与小于等于 5mm（或 10mm）含水率关系曲线中快速查出试样的全料含水率。

6.5.4 计算与记录参照 6.2 节、6.3 节、6.4 节相关条款执行。

7 比 重 试 验

7.1 一 般 规 定

7.1.1 土粒比重是指土粒在 105~110℃ 温度下烘至恒重时的质量与同体积 4℃ 时纯水的质量之比。

7.1.2 按照土粒粒径不同，分别采用比重瓶法、浮称法和虹吸筒法。

- 1 比重瓶法适用于粒径不大于 5mm 的土。
- 2 浮称法适用于粒径为 5~100mm 的土。
- 3 粒径大于 20mm 的土也可采用虹吸筒法测定。

7.2 比 重 瓶 法

7.2.1 应采用下列主要设备与设施：

- 1 比重瓶：容量 100mL（或 50mL），分长颈和短颈两种。
- 2 天平：称量 200g、最小分度值 0.001g。
- 3 恒温水槽：准确度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。
- 4 砂浴：能调节温度。
- 5 真空抽气设备。
- 6 温度计：测量范围 0~50℃，分度值 0.5℃。
- 7 其他：如烘箱、蒸馏水、中性液体（如煤油等）、孔径 2mm 及 5mm 筛、漏斗、滴管等。

7.2.2 试验应采用下列步骤：

1 将比重瓶烘干，装烘干土 15g 入 100mL 比重瓶内（若用 50mL 比重瓶，装烘干土 12g），称量。

2 为排除土中空气，将已装有干土的比重瓶，注蒸馏水至瓶的一半，摇动比重瓶，再将瓶在砂浴中煮沸，煮沸时间自悬液沸腾时算起，砂及砂质粉土不应少于 30min。煮沸时应注意不使土液溢出瓶外。

3 将蒸馏水注入，待瓶内悬液温度稳定及瓶上部悬液澄清。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，将蒸馏水注满，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。

4 根据测得的温度，从已绘制的温度与瓶、水总质量的关系曲线中查得瓶、水总质量。

5 测定含有可溶盐、亲水性胶体或有机质的土粒比重时，用中性液体（如煤油等）测定，用真空抽气法代替煮沸法，排除土中空气。抽气时真空度应接近 1 个大气压（101kPa），从达到 1 个大气压时算起，抽气时间宜为 1~2h，直至悬液内无气泡逸出时为止。其余步骤按本条 3~4 款的规定进行。

7.2.3 应按下列公式计算：

1 用蒸馏水测定时，按公式（7.2.3-1）计算土粒比重：

$$G_s = \frac{m_d}{m_1 + m_d - m_2} \times G_{wt} \quad (7.2.3-1)$$

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} —— $t^{\circ}\text{C}$ 时蒸馏水的相对密度（可查物理手册），精确至 0.001。

2 用中性液体测定时，按公式（7.2.3-2）计算土粒比重：

$$G_s = \frac{m_d}{m'_1 + m_d - m'_2} \times G_{kt} \quad (7.2.3-2)$$

式中： m'_1 ——瓶、中型液体总质量，g；

m'_2 ——瓶、中型液体、土总质量，g；

G_{kt} —— $t^{\circ}\text{C}$ 时中性液体的相对密度，精确至 0.001；

其余符号同公式（7.2.3-1）。

3 计算精确至 0.001。

7.2.4 比重瓶法试验应进行 2 次平行测定，其平行差值不得大于 0.02，取其算术平均值。

7.2.5 记录格式见表 7.2.5。

表 7.2.5 土粒比重试验记录表（比重瓶法）

工程名称 _____ 试验日期 _____

试验依据			主要设备名称和编号									
试样 编号	比 重 瓶 号	温 度 /℃	水 的 比 重	比 重 瓶 质 量 /g	瓶、干土 总质量 /g	干土 质量 /g	瓶、水 总质量 /g	瓶、水、 土总质量 /g	与干土同 体积的 水体质量 /g	土 粒 比 重	平 均 值	备 注

试验

计算

校核

7.3 浮 称 法

7.3.1 采用下列主要设备与设施：

- 1 网篮：孔径小于 5mm，直径为 20~25cm，高为 20~30cm。
- 2 盛水容器：适合网篮沉入。
- 3 筛：孔径 5mm、20mm、100mm。
- 4 烘箱、温度计等。
- 5 静水力学天平：称量 5kg、最小分度值 1g（图 7.3.1）。

7.3.2 试验采用下列步骤：

- 1 取粒径大于 5mm 的代表性试样 1000~2000g。
- 2 将试样表面清洗洁净，浸入水中约 24h 后取出，将试样采用湿毛巾擦干表面，即为饱和面干状态，立即放入网篮，并缓

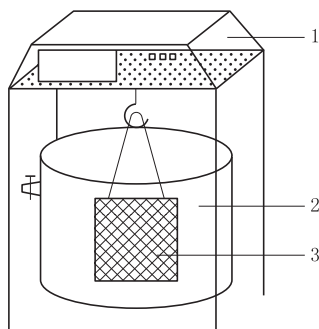


图 7.3.1 静水力学天平示意图

1—天平；2—盛水容器；3—盛试样的网篮

慢将网篮浸没于水中，在水中轻轻摇动至试样中无气泡逸出时为止。

- 3 称网篮和试样在水中的总质量。
- 4 取出试样烘干，烘干时间应不少于 6h。
- 5 称量烘干试样质量。
- 6 称网篮在水中的质量，并测量盛水容器内水温。

7.3.3 应按下列公式计算：

- 1 土粒比重应按公式 (7.3.3) 计算：

$$G_s = \frac{m_d}{m_d - (m_1 - m_2)} \times G_{wt} \quad (7.3.3)$$

式中： m_d ——烘干试样质量，g；

m_1 ——网篮和试样在水中的质量，g；

m_2 ——网篮在水中的质量，g；

其余符号见公式 (7.2.3-1)。

- 2 计算精确至 0.001。

7.3.4 浮称法试验应进行 2 次平行测定，两个试样的试验差值不得大于 0.02，结果取其算术平均值。

7.3.5 浮称法土粒比重试验的记录格式见表 7.3.5。

表 7.3.5 土粒比重试验记录表（浮称法）

工程名称_____试验日期_____

试验依据		主要设备名称和编号							
试样 编号	温度 /℃	水的 相对密度 G_{wt}	烘干试样 质量 /g	网篮+试样 在水中的 质量 /g	网篮在 水中的 质量 /g	试样 在水中的 质量 /g	土粒 比重	平均值	备注

试验

计算

校核

7.4 虹吸筒法

7.4.1 应采用下列主要设备与设施：

1 虹吸筒装置（图 7.4.1）：由虹吸筒和虹吸管组成，虹吸筒直径与试样最大粒径之比不宜小于 3 倍，高度与试样最大粒径之比不宜小于 2 倍。

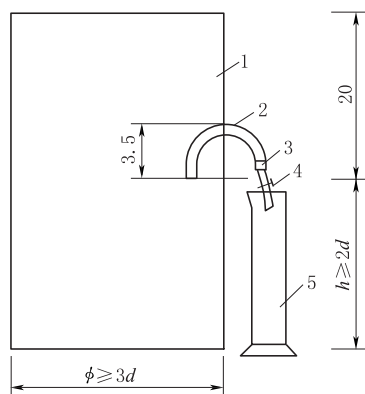


图 7.4.1 虹吸筒示意图（单位：cm）

1—虹吸筒；2—虹吸管；3—橡皮管；4—夹管；5—量筒

2 秤：称量 200kg、最小分度值 50g；称量 50kg、最小分度值 5g；称量 10kg、最小分度值 1g。

3 量筒：容量大于 2000mL。

7.4.2 试验应采用下列步骤：

1 按试样的粒径范围，取代表性试样。试样最小质量应符合表 7.4.2 的规定。

表 7.4.2 试样最小质量

最大粒径/mm	80	100	200	300	400
试样最小质量/kg	5	10	60	200	400

2 将试样表面清洗洁净浸入水中约 24h 后取出，晾干（或用布擦干）试样表面水分。

3 将清水注入虹吸管至虹吸管口有水溢出时停止注水，待管口不再有水溢出时关闭管夹。将晾干的试样缓缓放入虹吸管中，边放边搅拌，至无气泡逸出为止，搅动时水不得溅出筒外。

4 当虹吸筒内水面平稳后，开管夹，让试样排开的水通过虹吸管流入量筒，称量量筒和水总质量，精确至 1g，并测量筒内水温，准确至 0.5℃。

5 取出虹吸筒内试样，室内烘干称量试样质量 m 。

7.4.3 土粒比重应按下列公式计算：

1 土粒比重应按公式（7.4.3-1）计算：

$$G_s = \frac{m}{m_1 - m_0} \times G_{wt} \quad (7.4.3-1)$$

式中： m ——烘干试样质量，g；

m_0 ——量筒质量，g；

m_1 ——量筒和水总质量，g；

其余符号见公式（7.2.3-1）。

2 土粒平均比重应按公式（7.4.3-2）计算：

$$G_s = \frac{1}{\frac{P_1}{G_{s1}} + \frac{P_2}{G_{s2}} + \frac{P_3}{G_{s3}}} \quad (7.4.3-2)$$

式中： G_{s1} ——粒径 $\leq 5\text{mm}$ 土粒的比重；
 G_{s2} —— $5\text{mm} < \text{粒径} \leq 60\text{mm}$ 土粒的土粒比重；
 G_{s3} ——粒径 $> 60\text{mm}$ 土粒的土粒比重；
 P_1 ——粒径 $\leq 5\text{mm}$ 土粒占总质量的百分数，%；
 P_2 —— $5\text{mm} < \text{粒径} \leq 60\text{mm}$ 土粒占总质量的百分数，%；
 P_3 ——粒径 $> 60\text{mm}$ 土粒占总质量的百分数，%。

- 3 计算精确至 0.001。
- 7.4.4 试验应进行 2 次平行测定，两个试样试验差值不得大于 0.02，结果取其算术平均值。
- 7.4.5 记录格式见表 7.4.5。

表 7.4.5 土粒比重试验记录表（虹吸筒法）

工程名称				试验日期				
试验依据				主要设备名称和编号				
试样 编号	温度 /℃	水的 相对密度 / G_{wt}	风干土 质量 /g	量筒和水 总质量 /g	量筒质量 /g	水质量 /g	土粒 比重	平均值
试验		计算				校核		

8 相对密度试验

8.1 一般规定

8.1.1 试验目的是测定粗粒土在最紧密和最疏松状态时的孔隙比（即最小孔隙比和最大孔隙比）或干密度（即最大干密度和最小干密度），用于计算一定干密度下的相对密度。相对密度试验方法包括振动台法、表面振动法、密度桶法。

8.1.2 室内相对密度试验采用振动台法、表面振动法。

8.1.3 现场相对密度试验采用密度桶法。

8.2 振动台法

8.2.1 主要设备与设施：

1 振动台：具有隔振装置的振动台，固定于混凝土基础上。振动台的负荷（20%~80%）应满足加重底板、加重物、试样、容器及附属设备重力的要求。振动台的频率为 40~60Hz，振幅可调，最大 2mm。

2 试样筒：为圆柱形金属筒，直径与试样最大粒径之比宜为 4~5，高度与试样最大粒径之比大于 3。加重底板：底板为厚 12mm 的钢板，直径略小于相应试样筒内径，中心应有 $\phi 15\text{mm}$ 未穿通的提吊螺孔。加重物：尺寸与试样筒配套。加重底板与加重物对试样的总压力为 14kPa。

3 套筒：内径应与试样筒配套，且与试样筒紧固后内壁成直线连接。

4 游标卡尺：应带测针，量程 0~300mm，最小分度值 0.05mm。

5 试验筛：粗筛（圆孔），孔径为 100mm、80mm、60mm、40mm、20mm、10mm、5mm；细筛，孔径为 2mm、1mm、0.5mm、0.25mm、0.075mm。

- 6 秤：称量 50kg、最小分度值 5g；称量 10kg、最小分度值 1g。
 - 7 其他设备：搅拌盘、铁铲、毛刷、秒表、称料桶等。
- 8.2.2 土样制备应符合下列要求：**
- 1 按第 4 章要求制备风干的土样。
 - 2 按试验要求的级配和试样筒的体积计算所需要的试样量，称取各粒组的土样，充分均匀。
- 8.2.3 最小干密度试验应按下列步骤进行：**
- 1 用尺量或灌水法测标定试样筒的体积。
 - 2 用铁铲将土样松填于试样筒内。装填时铁铲应贴近筒内土面（对土面不产生冲击），使铲中土样徐徐滑入筒内，直至装填土样距筒顶 3~5cm，并使试样表面基本平整。宜用灌砂法测定试样至试样筒顶面的体积。称试样筒和试样总质量。
 - 3 最小干密度测定应按本条 1 款、2 款的规定进行平行试验。
- 8.2.4 振动台法最大干密度试验应按下列步骤进行：**
- 1 用已进行最小干密度试验的试样，将试样筒固定在振动台上，把加重底板放于土面上，依次安放好加重物。将振动台调至要求的振幅和频率，振动 8min 后，卸除加重物。用灌砂法测定试样至试样筒顶面的体积，并称试样筒和土的质量。
 - 2 最大干密度测定应按本条 1 款的规定进行平行试验。

8.3 表面振动法

8.3.1 应采用下列主要设备与设施：

- 1 试样筒：圆柱形金属筒，直径与试样最大粒径之比宜为 3~5，高度与试样最大粒径之比不小于 3。
- 2 振动器：由振动电动机及振动夯组成。振动夯由连接杆、连接栓固定于振动电动机下，其底部为圆形夯板。夯板直径小于试样筒内径 2~5mm。夯板与加重块总重对试样总压力为 14kPa。振动夯激振频率范围 40~60Hz，最大振幅 2.5mm。
- 3 套筒：内径应与试样筒配套，且与试样筒紧固后内壁成直线连接。

- 4 测针架及测针：测针的分度值为 0.1mm。
- 5 试验筛：粗筛（圆孔），孔径为 100mm、80mm、60mm、40mm、20mm、10mm、5mm。细筛，孔径为 2mm、1mm、0.5mm、0.25mm、0.075mm。
- 6 秤：称量 20kg、感量 20g；称量 10kg、感量 5g。
- 7 其他：搅拌盘、起吊设备、铁铲、毛刷、秒表、钢尺、卡尺、称料桶、瓷盘等。

8.3.2 试验应采用下列操作步骤：

- 1 选用代表性土样在 105~110℃下烘干或风干，并分级过筛贮存。
- 2 最小干密度测定应按 8.2.3 条的规定进行。
- 3 最大干密度的测定：
 - 1) 把试样筒固定在基础底板上，将拌匀烘干或风干的土样均分为两份，分两层装填于试样筒中（装填方法与最小干密度的测定相同）。每层装好后，放入振动器进行振动，每层振动 8min。振动完成后，取出振动器，卸除套筒，用灌砂法测定试样至试样桶顶面的体积，并称试样筒和土的质量。
 - 2) 最大干密度的测定应按上述步骤进行平行试验。

8.4 现场密度桶法

8.4.1 应采用下列主要仪器设备和设施：

- 1 现场密度桶法试验的碾压设备宜采用自行式振动碾，且振动碾自重不宜小于 22t。
- 2 密度桶：为带底无盖钢桶。钢桶直径与试样最大有效粒径之比不应小于 3；桶高不宜小于最大有效粒径 1.5 倍且不大于 1000mm，桶壁厚不小于 12mm，钢桶材质应不低于 Q235。结构形式如图 8.4.1 所示。
- 3 秤：称量 100kg、感量 50g；电子天平：称量 5kg、感量 0.1g。

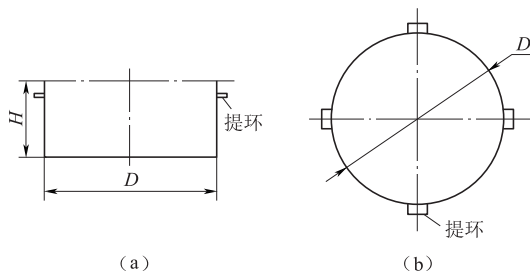


图 8.4.1 密度桶结构示意图

4 分级设备：

- 1) 分级直径环：600mm、400mm、200mm。
- 2) 粗筛（圆孔），孔径为 100mm、80mm、60mm、40mm、20mm、10mm、5mm。
- 3) 细筛：孔径为 2mm、1mm、0.5mm、0.25mm、0.075mm。

5 烘箱：温度 105~110℃。

6 标准砂：粒径为 0.25~0.5mm 洁净风干砂。

7 其他：钢板尺、瓷盘、炒锅、水平尺、盛水容器等。

8.4.2 试验应采用下列步骤：

1 按下列要求准备试验用料：

- 1) 试验用料宜在自然条件下风干，风干后实测不大于 5mm 颗粒含水率应不大于 0.5%。对风干料分级筛分，粒径大于 100mm 料宜用直径环分级，不大于 100mm 的采用筛析法分级。剔除大于 600mm 漂石，分级粒径组为 600~400mm，400~200mm、200~100mm、100~80mm、80~60mm、60~40mm、40~20mm、20~10mm、10~5mm、小于 5mm 共十级，每级制样质量宜为本级试验用料的 1.5~2 倍。
- 2) 试验时按照不同试验用料级配采用分级称重混合制备。不大于 200mm 粗粒料，人工掺配均匀待用，大于 200mm 粗粒料分级堆存待用。

2 试验场地应处理平整、干净，碾压坚实；单组试验场地尺寸 $6\text{m} \times 10\text{m}$ 。多组同时试验时，相应扩大场地面积。

3 在桶底碾压体表面宜铺设厚度为 $50\text{mm} \pm 10\text{mm}$ 的砂料，静压 2 遍。同一级配料应布置 2 个密度桶。将密度桶安放在砂料上，桶的位置应在试验场外明显标识。密度桶中心线宜与试验场地轴线一致，桶间净间距不小于 3m 。布置示意图如图 8.4.2-1 所示。

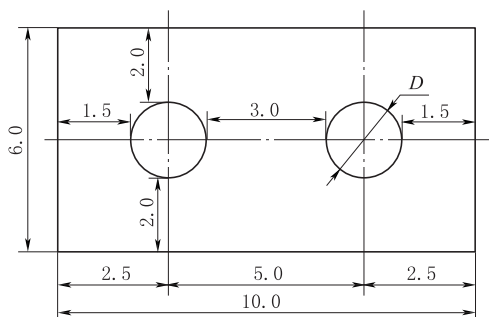


图 8.4.2-1 试验场地布置示意图（单位：m）

4 最小干密度试验应按下列步骤进行：

- 1) 采用尺量或灌水法测标定密度桶体积。
- 2) 按照选定的试验级配配料，配料质量为预估最大干密度计算质量的 1.2 倍。
- 3) 采用人工松填法测定最小干密度：制备完成的粒径不大于 200mm 试验用料，从四周到中心螺旋均匀布料，装填时铁铲应贴近筒内土面（对土面不产生冲击）；大于 200mm 砾石人工分散、均匀摆放，距桶壁距离不宜小于 50mm ，将粗粒料按级配要求均匀松填于密度桶中。装填时将试样轻轻放入桶内，不得冲击和振动。装填的粗粒料低于桶顶 100mm 左右。用灌砂法测定料顶面到桶口的体积，称取剩余的试验料质量，计算装入桶内粗粒料的质量。

5 最大干密度试验按下列步骤进行：

- 1) 最小干密度测试结束后, 继续装填同一制备料至高出桶顶 $250\text{mm} \pm 50\text{mm}$, 用级配大致相同的粗粒料铺填密度桶四周, 高度与试验料平齐, 如图 8.4.2-2 所示。

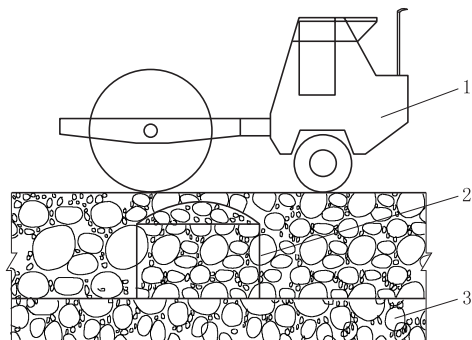


图 8.4.2-2 最大干密度试验方法示意图

1—碾压设备; 2—密度桶; 3—试验地基

- 2) 将选定的振动碾在场外启动, 宜采用高频低振幅方式振动碾压, 行驶速度 $2 \sim 3\text{km/h}$, 振动碾压遍数不少于 16 遍后, 继续在每个密度桶范围内微动振动碾压 15min。在碾压过程中, 应根据试验料及周边料的沉降情况, 及时补充试验用料, 振动碾碾碾不得与密度桶直接接触。
- 3) 碾压完成后, 超出密度桶顶的粗粒料试样高度应不大于 100mm , 大于 100mm 时应重新试验。
- 4) 挖除桶周围的粗粒料, 人工挖除桶上粗粒料至低于桶口 100mm 左右为止, 并不得扰动下部试样。宜用灌砂法测定上部体积。
- 5) 将桶内试料全部挖出, 称量密度桶内试料质量, 必要时进行土料的颗分试验。

8.5 计算与记录

8.5.1 按公式 (8.5.1-1)、公式 (8.5.1-2) 分别计算最小、

最大干密度，精确到 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 。

1 最小干密度：

$$\rho_{\text{dmin}} = \frac{m_{\text{d}}}{V - V_1} \quad (8.5.1-1)$$

2 最大干密度：

$$\rho_{\text{dmax}} = \frac{m_{\text{d}}}{V - V_2} \quad (8.5.1-2)$$

式中： m_{d} ——干土质量， kg ；

V ——试样筒的体积， m^3 ；

V_1 ——松散试样顶面到筒口的体积， m^3 ；

V_2 ——振实试样顶面到筒口的体积， m^3 。

3 两次试验差值不大于 $30\text{kg}/\text{m}^3$ ，取其算术平均值作为该试验级配的最小、最大干密度。两次试验差值大于 $30\text{kg}/\text{m}^3$ 时，应重新进行试验。

8.5.2 按公式 (8.5.2-1) 或公式 (8.5.2-2) 计算相对密度 D_r ：

$$D_r = \frac{\rho_{\text{dmax}}(\rho_{\text{d0}} - \rho_{\text{dmin}})}{\rho_{\text{d0}}(\rho_{\text{dmax}} - \rho_{\text{dmin}})} \quad (8.5.2-1)$$

或

$$D_r = \frac{e_{\text{max}} - e_0}{e_{\text{max}} - e_{\text{min}}} \quad (8.5.2-2)$$

式中： D_r ——相对密度；

ρ_{d0} ——天然或填筑干密度， kg/m^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。

相对密度计算精确至 0.01。

8.5.3 按公式 (8.5.3) 计算压实度 R_c ：

$$R_c = \frac{\rho_{\text{d0}}}{\rho_{\text{dmax}}} \times 100 \quad (8.5.3)$$

8.5.4 按公式 (8.5.4) 计算密度指数 I_D ：

$$I_D = \frac{\rho_{\text{d0}} - \rho_{\text{dmin}}}{\rho_{\text{dmax}} - \rho_{\text{dmin}}} \quad (8.5.4)$$

8.5.5 绘制干密度、砾石含量（ P_5 含量）及相对密度三因素关系曲线图。

8.5.6 本试验记录格式见表 8.5.6。

表 8.5.6 粗粒土相对密度试验检测记录表

工程名称		试验日期			
试验依据		主要设备 名称和编号		试样编号	
试验用料 最大粒径 /mm		级配		试筒编号	
试筒质量 /kg		试筒内径 /mm		试筒容积 /cm ³	
试验组数		1		2	
		最小干密度	最大干密度	最小干密度	最大干密度
试样最大有效粒径/mm					
试样与试筒质量/kg					
样品质量/kg					
灌砂部分 体积测定					
	试样距桶顶 体积/cm ³				
试样体积/cm ³					
试样干密度/(g/cm ³)					
最小干密度平均值/(g/cm ³)					
最大干密度平均值/(g/cm ³)					
土粒比重					
孔隙比					
天然（填筑）干密度/(g/cm ³)					
天然孔隙比					
相对密度					
压实度/%					
密度指数					
备 注					

试验

计算

校核

9 渗透及渗透变形试验

9.1 一般规定

9.1.1 本试验目的是测定渗流水通过粗颗粒土时的渗透系数和细颗粒随渗流逐渐流失的临界坡降（管涌）或土体整体浮动时的破坏坡降（流土）。

9.1.2 渗透及渗透变形试验分为室内和现场两种，室内渗透和渗透变形试验适用于测定渗透系数和渗透变形比降，现场试验可用于测定天然沉积粗粒土、填筑碾压后的粗粒土的原位渗透系数。

9.2 室内渗透及渗透变形试验

9.2.1 室内渗透及渗透变形试验宜在无荷载条件下进行，分为垂直渗透试验和水平渗透试验。对于有荷载条件下的渗透试验，可参照本方法执行，渗透试验期间施加的垂直或水平应力波动允许偏差为 $\pm 0.5\%F_s$ 。

9.2.2 应采用下列主要设备和设施：

1 垂直渗透变形仪（图 9.2.2 - 1）：包括仪器筒、顶盖、底座、透水板及支架等。

1) 渗透变形仪在试验应力条件下应密封良好，仪器筒和透水板的变形量满足试验要求。

2) 仪器筒：筒身内径或边长与试样最大颗粒粒径之比应不小于 5，试样高度应不小于试样直径。

3) 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。在下透水板之下，也可设置斜透水板，坡度为 1 : 1 ~ 1 : 1.5，用以排除水中含气，斜透水板上端设有排气孔。

4) 对于超大型渗透仪，上下透水板宜布设环形水槽，以

1—试样；2—10~20mm 砾；3—进水口；4—接测压管；5—排气孔；
6—量水管；7—千斤顶；8—主柱；9—反力框架

9.2.3 仪器检查，应按下列步骤进行：

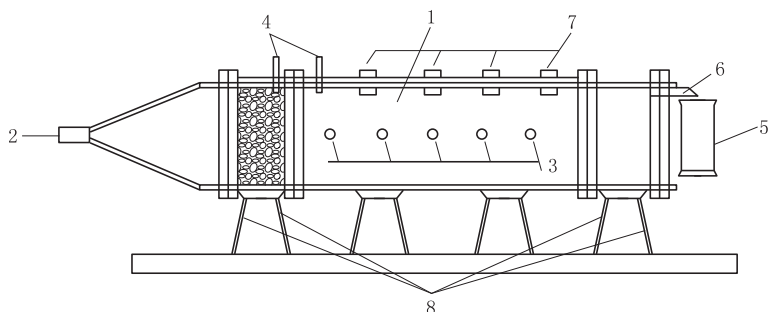


图 9.2.2-2 水平渗透变形仪示意图

1—试样；2—进水口；3—测压管；4—排气孔；5—量水管；

6—排水管；7—法兰螺丝；8—支架

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渗漏等。检查完毕，降低供水箱，对于垂直渗透仪使水箱中水位与下透水板的下沿齐平，对于水平渗透仪使水箱中水位与试样底部齐平。

2 对于垂直渗透仪，取出顶盖，在下透水板上铺设滤网，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。若为方形试样，可采用玻璃胶等材料处理边角，以防止形成集中渗流通道。对于水平渗透仪，取出上盖板，固定上游透水板，在透水板上铺设滤网。只进行渗透系数试验时，在下游固定透水板并铺设滤网。需进行渗透变形时，下游设置格栅，安装集砂器。沿仪器壁和透水板之间的接触缝隙涂一圈油泥或橡皮泥。

3 开启全部测压孔，使之处于排气状态。

9.2.4 试验应按下列步骤进行：

1 试样制备应按下列步骤进行：

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，按仪器内径应不小于试样最大粒

径的 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，对最大允许粒径以上的粗颗粒可按 4.3.1 条 3 款 2 项的规定处理。

- 3) 根据需要控制的干密度及试样高度，试样质量 m_d 应按公式 (9.2.4) 计算：

$$m_d = \rho_d \pi r^2 h' \quad (9.2.4)$$

式中： 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，应分层装填试样，且每层的级配应相同，宜加相当于试样质量 1%~2% 的水分，均匀后再进行装样。
- 5) 将称好的试样均匀分层装入仪器中，采用人工击实法或表面振动法制样。试样应达到要求的密度和总厚度：细砾石不小于 15cm；中粗砾石为 20~25cm；卵石为试样最大粒径的 3~5 倍。装填分层厚度为试样最大粒径的 1.5~2.0 倍。对于边长或直径达到 100cm 等类似的超大型渗透试验，由于试样总质量较大，采用常规表面振动器制样时间长，也难以控制试样表面的平整度，可采用大尺寸的表面振动器进行制样，振动器夯板直径或边长应略小于试样筒内径 2~5mm，表面振动器振动频率为 40~60Hz，夯与振动器对试样的静压力为 14kPa。
- 2 试样饱和应按下列步骤进行：
- 1) 试样装好后，测量试样的实际厚度，然后用无气水采用水头饱和法进行饱和。使水位略高于试样底面位置，再缓慢地提升水箱，每次提升 1cm，待水箱水位与试样中水位相等，并停 10min 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。

- 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，应使试验用水的温度不低于室温，或采用其他排气措施。

3 渗透试验应按下列步骤进行：

- 1) 根据工程要求，试验过程需要在试样顶面施加荷载时，则利用加荷设备，通过活塞及上透水板对试样施加荷载。
- 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。其原则是既应测得试样临发生变形前的坡降，又应能准确地测得临界坡降。
- 3) 提升供水箱或调节水头压力，使供水水头与渗透容器溢水口（上进水口）保持常水头差，形成初始渗透坡降。
- 4) 对管涌土，加第一级水头时，初始渗透坡降可为 0.02～0.03；然后可按 0.05、0.1、0.15、0.2、0.3、0.4、0.5、0.7、1.0、1.5、2.0、…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。
- 5) 每次升高水头 30min 至 1h 后，测记测压管水位，并用量筒测读渗水量 3 次。每次测读间隔时间宜为 10～20min。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。

- 6) 如果连续 3 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。
- 7) 对于每级渗透坡降，均应按本款 5) 项的规定重复进行，直至试验破坏或当水头不能再继续增加时，方可结束试验。

9.2.5 应按下列公式进行计算：

- 1 试样的干密度应按公式 (9.2.5-1) 计算：

$$\rho_d = \frac{m_d}{\pi r^2 h_0} \quad (9.2.5-1)$$

式中： m_d ——干土质量，g；

r ——试样半径，cm；

h_0 ——试样初始高度，cm。

- 2 试样的孔隙率 n 应按公式 (9.2.5-2) 计算：

$$n = \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_w G_s}\right) \times 100 \quad (9.2.5-2)$$

- 3 土粒比重 G_s 应为粗细颗粒混合比重，应按公式 (9.2.5-3) 计算：

$$G_s = \frac{1}{\frac{P_5}{G_{s1}} + \frac{1-P_5}{G_{s2}}} \quad (9.2.5-3)$$

式中： G_{s1} 、 G_{s2} ——粒径大于、不大于 5mm 的土粒比重。

- 4 渗透坡降应按公式 (9.2.5-4) 计算：

$$i = \frac{\Delta H}{L} \quad (9.2.5-4)$$

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 渗流速度应按公式 (9.2.5-5) 计算：

$$v = \frac{Q}{tA} \quad (9.2.5-5)$$

式中： Q ——渗水量， cm^3 ；

t ——时间， s ；

A ——试样面积， cm^2 ；

v ——渗透流速， cm/s 。

6 渗透系数应按公式（9.2.5 - 6）、公式（9.2.5 - 7）计算：

$$k_T = \frac{v}{i} \quad (9.2.5 - 6)$$

$$k_{20} = k_T \frac{\eta_T}{\eta_{20}} \quad (9.2.5 - 7)$$

式中： k_T ——水温 T 时试样的渗透系数， cm/s ；

k_{20} ——标准温度（ 20°C ）时试样的渗透系数， cm/s ；

η_T —— $T^\circ\text{C}$ 时水的动力黏滞系数（ $10^{-6} \text{ kPa} \cdot \text{s}$ ），查表 9.2.5 得到；

η_{20} —— 20°C 时水的动力黏滞系数（ $10^{-6} \text{ kPa} \cdot \text{s}$ ），查表 9.2.5 得到。

表 9.2.5 水的动力黏滞系数、黏滞系数比、温度校正值

温度 T / $^\circ\text{C}$	动力黏滞系数 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
5.5	1.493	1.478	1.19
6.0	1.470	1.455	1.21
6.5	1.449	1.435	1.23
7.0	1.428	1.414	1.25
7.5	1.407	1.393	1.27
8.0	1.387	1.373	1.28
8.5	1.367	1.353	1.30
9.0	1.347	1.334	1.32
9.5	1.328	1.315	1.34

表 9.2.5 (续)

温度 T / $^{\circ}\text{C}$	动力黏滞系数 η / $(10^{-6}\text{kPa}\cdot\text{s})$	η_T/η_{20}	温度校正系数 T_D
10.0	1.310	1.297	1.36
10.5	1.292	1.279	1.38
11.0	1.274	1.261	1.40
11.5	1.256	1.243	1.42
12.0	1.239	1.227	1.44
12.5	1.223	1.211	1.46
13.0	1.206	1.194	1.48
13.5	1.188	1.176	1.50
14.0	1.175	1.163	1.52
14.5	1.160	1.148	1.54
15.0	1.144	1.133	1.56
15.5	1.130	1.119	1.58
16.0	1.115	1.104	1.60
16.5	1.101	1.090	1.62
17.0	1.088	1.077	1.64
17.5	1.074	1.066	1.66
18.0	1.061	1.050	1.68
18.5	1.048	1.038	1.70
19.0	1.035	1.025	1.72
19.5	1.022	1.012	1.74
20.0	1.010	1.000	1.76
20.5	0.998	0.988	1.78
21.0	0.986	0.976	1.80
21.5	0.974	0.964	1.83
22.0	0.963	0.953	1.85
22.5	0.952	0.943	1.87

表 9.2.5 (续)

温度 T / $^{\circ}\text{C}$	动力黏滞系数 η / $(10^{-6} \text{ kPa} \cdot \text{s})$	η_T/η_{20}	温度校正系数 T_D
23.0	0.941	0.932	1.89
24.0	0.919	0.910	1.94
25.0	0.899	0.890	1.98
26.0	0.879	0.870	2.03
27.0	0.859	0.850	2.07
28.0	0.841	0.833	2.12
29.0	0.823	0.815	2.16
30.0	0.806	0.798	2.21
31.0	0.789	0.781	2.25
32.0	0.773	0.765	2.30
33.0	0.757	0.750	2.34
34.0	0.742	0.735	2.39
35.0	0.727	0.720	2.43
—	—	—	—

7 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)。

8 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, 必要时还应绘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 $\lg i \sim \lg v$ 关系曲线进行判断。当 $\lg i \sim \lg v$ 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

$$i_k = \frac{i_2 + i_1}{2} \quad (9.2.5-8)$$

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。

表 9.2.6 粗粒土的渗透变形及反滤试验记录表

工程名称		采样地点		试验编号		试样日期												
试验依据		主要设备名称及编号																
试样类别		试样质量 m_d /g		试样中值粒径 d_{50} /mm		反滤层不均匀系数 C_u												
土粒比重 G_s		试样面积 A /cm ²		骨架粒径/mm		渗透方向												
试样不均匀系数 C_u		试验前试样高度 h /cm		填料含量 P_5		反滤层厚度/cm												
曲率系数 C_c		试验后试样高度 h' /cm		试样孔隙率 n /%		反滤层层数												
荷载 p /kPa		试样干密度 ρ_d /(g/cm ³)		接触面下移距离/mm		反滤层中值粒径 d_{50} /mm												
试验次数	记录时间 (h:mm)	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 Q /cm ³	时间 t /s	渗流 速度 $v = \frac{Q}{tA}$ /(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 /cm	集砂量 /g	反滤 层淤 填量 Z /%	水温 T /℃	室温 T /℃	试验 现象 描述	

试验

计算

校核

随着水头逐步加大，细粒不断被冲走，渗透流量变大，当水头增加到试样破坏，该坡降称为试样的破坏坡降 i_F ，其值为

$$i_F = \frac{i'_2 + i'_1}{2} \quad (9.2.5-9)$$

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，则可按公式 (9.2.5-10) 计算：

$$i_F = i'_1 \quad (9.2.5-10)$$

9.2.6 渗透及渗透变形试验记录格式见表 9.2.6。

9.3 现场渗透试验

9.3.1 现场渗透试验方法包括双环法、单环法、埋管法，根据现场具体情况选用。

9.3.2 应采用下列主要设备和设施：

1 钢环：用于测定渗透系数的钢环直径宜为测定堆石料最大粒径的 3~5 倍。

1) 双环法的内环直径不小于 40cm、外环直径不小于 80cm。

2) 单环法直径根据土样最大粒径选择，不宜小于 100cm，钢环高宜为 40cm，壁厚宜不小于 4mm。

3) 埋管法钢管内径 30cm、高度 80~120cm，壁厚不小于 6mm，底部、顶部不封闭，管身为梅花形布孔花管，孔径 5mm，间距 2~3cm。

2 秒表：精度 0.1s；流量计：精度 0.1L。

3 供水器具等其他辅助工具。

9.3.3 试验应按下列步骤进行：

1 双环法：

1) 在选定的试验位置将两个渗透钢环按同心圆状埋入深约 5~8cm 的土层内，用黏土搓条后压紧内外环周边，

封闭后内、外环内的水不发生交叉流动，外环外部周边不漏水。

- 2) 修整渗透钢环内试验土层，且土层结构不被扰动。
- 3) 在内环及内外环之间土层上铺厚 2~3cm、粒径为 5~10mm 洁净的碎砾石作为注水时的缓冲层。
- 4) 按图 9.3.3-1 所示安装渗透装置。

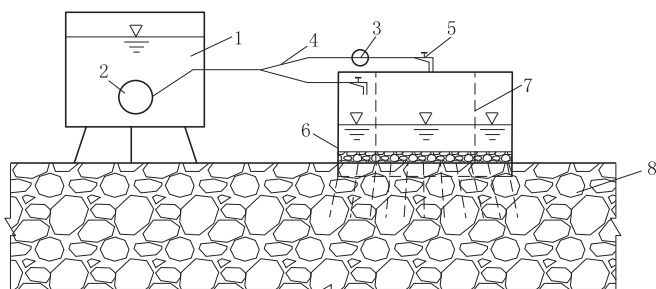


图 9.3.3-1 双环法渗透试验示意图

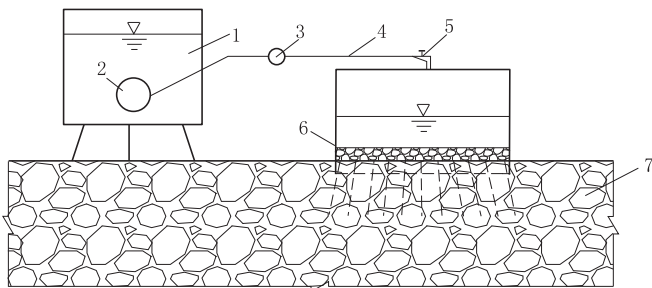
1—储水罐；2—水泵；3—流量计；4—水管；5—水龙头；
6—渗透外环；7—渗透内环；8—试验土层

- 5) 由储水罐向环内注水不低于 10cm 深，观察内外环水位下降情况，至基本稳定后内外环水面高度相同时试验开始，由两个水龙头同时向内外环之间注水，保持水深不变。
- 6) 测定内环注入体积时应精确到 0.1L，以 5min 为间隔连续测量，直至后两次连续测量值之差小于最后一次测量值的 10% 时，试验结束，以最后一次测量值作为渗透系数的计算值。

2 单环法：

- 1) 在选定的试验位置挖圆形试坑至试验土层，坑底应修平，试验土层的结构不被扰动。
- 2) 钢环埋深 5~8cm，周边用黏土搓条后压实密封，试环外部周边不漏水。

- 3) 在环内底部铺上厚 2~3cm, 粒径为 5~10mm 洁净的碎砾石作为注水时的缓冲层。
- 4) 按图 9.3.3-2 所示安装渗透装置。



9.3.3-2 单环法渗透试验示意图

1—储水罐；2—水泵；3—流量表；4—水管；
5—水龙头；6—渗透环；7—试验土层

- 5) 向环内注水不小于 10cm, 保持一段时间并调整水龙头放水的流量大小至水的高度能稳定时开始测量。水泵的供水能力应能满足试验土料有较大渗透系数时, 保持试环内水位高度稳定的要求。
 - 6) 测定环内注入体积时应精确到 0.1L, 以 3min 为间隔连续测量, 直至后两次连续测量值之差小于最后一次测量值的 10% 时, 试验结束, 以最后一次测量值作为渗透系数的计算值。
 - 7) 需排除碾压面致密层对渗透系数的影响时, 按照图 9.3.3-3 挖除碾压层表面 20~30cm 土料后按本款 1~6 项步骤进行试验。
- 3 埋管法:
- 1) 在选定的试验位置跨层埋设试验用花管, 花管周边用透水材料包裹。
 - 2) 试验前, 清除管口上部土料露出管口。
 - 3) 开始注水, 观察注水的速率, 使水面在管口下 10cm

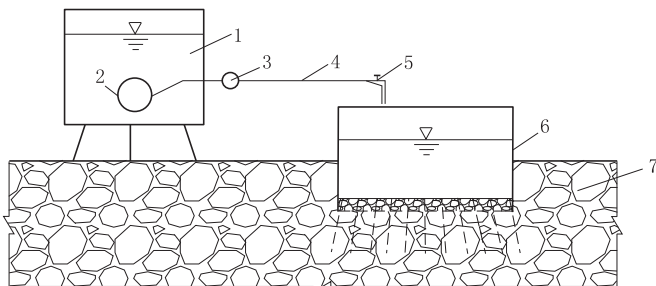


图 9.3.3-3 挖除表面致密层渗透试验示意图

1—储水罐；2—水泵；3—流量表；4—水管；
5—水龙头；6—渗透环；7—试验土层

左右处稳定，开始测定注水量，精确到 0.1L，以 3min 为间隔连续测量，直至后两次连续测量值之差小于最后一次测量值的 10% 时，试验结束，以最后一次测量值作为渗透系数的计算值。

- 4) 连续测读不少于 6 次，取平均值计算渗透系数。
- 5) 按图 9.3.3-4 所示安装渗透装置。

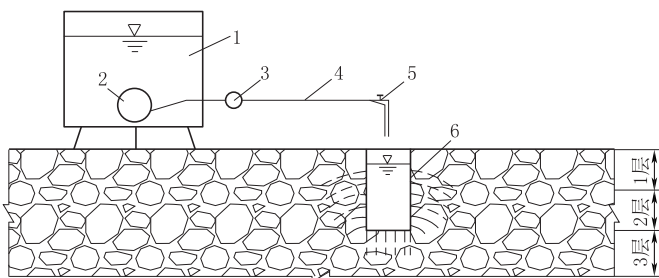


图 9.3.3-4 埋管法渗透试验示意图

1—储水罐；2—水泵；3—流量表；4—水管；
5—水龙头；6—渗透花管

9.3.4 渗透系数计算按公式 (9.3.4) 进行：

$$k_T = \frac{Q}{A} \quad (9.3.4)$$

式中： k_T ——渗透系数，cm/s；
 Q ——渗透流量，双环法为内环渗透流量， cm^3/s ；
 A ——单环法时为铁环渗透水面积，双环法为内环渗透水面积；埋管法时为花管的管壁面积及底面积， cm^2 。

9.3.5 本试验记录格式见表 9.3.5。

表 9.3.5 现场渗透试验记录表

工程名称_____试验日期_____

试验依据		主要设备名称和编号				试坑编号	
测试次数	测试时长 /min	渗水量 /cm ³	渗透面积 /cm ²	渗透系数 k_T /(cm/s)	水温 /℃	平均渗透系数 k_T /(cm/s)	

试验计算校核

10 反 滤 试 验

10.1 一 般 规 定

10.1.1 本试验目的是验证在渗透水流作用下被保护土的反滤层土样的反滤效果和确定合理级配。

10.1.2 被保护土可为黏性粗粒土或无黏性粗粒土。

10.1.3 本试验方法采用垂直渗透法。

10.2 设 备 和 设 施

10.2.1 本试验所用的主要仪器设备应符合 9.2.2 条 1~6 款的规定。当渗透水流由上向下时，下游溢水口处，宜加设一个可升降的溢流水箱。

10.2.2 仪器检查应符合 9.2.3 条 1~3 款的规定。

10.3 试 验 步 骤

10.3.1 无黏性土的反滤试验：

1 试样制备应按下列步骤进行：

- 1) 将称好的土样分层装入仪器内，采用人工击实法或表面振动法击实，使之达到要求的干密度。
- 2) 被保护土和反滤料的厚度应符合 9.2.4 条 1 款 5 项的规定，并不小于 15cm。
- 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) 沿渗透水流方向，依次铺装被保护土和反滤料。

2 试样饱和应符合 9.2.4 条 2 款的规定。

3 反滤试验应按下列步骤进行：

- 1) 进行由上向下的渗透试验时，下游溢水箱水面应高于或位于被保护土和滤层的接触面。

- 2) 试验开始时, 以相应于 $0.1 \sim 0.2$ 的渗透坡降的水头作为第一级水头进行试验, 以后每隔 1h 加一级水头。
 - 3) 每抬高一级水头后, 隔 30min 读数一次。每级水头应测读两次。流量也应进行两次测量, 取其平均值。
 - 4) 若试样未发生任何变化, 流量未随时间增大, 测压管水位无变化, 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。各级水头可按 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, 均应按本款 3 项的规定进行测读。
 - 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应延长到 3~4h。
 - 6) 当渗入滤层中的细粒停止移动, 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。
 - 7) 有下列情况之一者, 可结束试验:
 - a) 当升高水头后, 流量不断变大, 被保护土中的渗透坡降减小。
 - b) 滤层中的渗透坡降等于被保护土中的渗透坡降。
 - c) 渗透坡降大于 10 时, 被保护土仍未破坏。
 - 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。
 - 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。
- 10.3.2 黏性土的反滤试验应符合下列规定:**
- 1 反滤料试样制备应按下列步骤进行:
 - 1) 渗透水流方向采用由上向下, 反滤料应置于黏性土试样之下。

- 2) 先将称好的反滤料分层装入仪器内，用击实锤击实或振捣加密法压实，使之达到要求的干密度。
- 3) 在反滤料与黏性土之间的接触面上应布置测压管。
- 2 反滤料试样饱和应符合 9.2.3 条 2 款的规定。当反滤料里的水面离出口表面差 2cm 时，停止饱和。
- 3 试样制备应按下列步骤进行：
 - 1) 为了在黏性土试样中形成贯穿裂缝，将长度略高于试样高度的 70mm×3mm（宽×厚）的造缝模具置于试样中心部位、反滤料层顶面处。
 - 2) 将称好的黏性土分层装入仪器内，用击实锤击实，使之达到要求的干密度。
 - 3) 小心拔出预先放置的模具，在黏性土试样中形成 70mm×3mm（长×宽）的贯通裂缝。
- 4 反滤试验应按下列步骤进行：
 - 1) 从下游溢水箱处缓慢注水，并调整溢流水面置于略高于黏性土和滤料的接触面的位置。
 - 2) 对黏性土缝隙表面用砾石或碎石进行保护，防止水流直接冲刷缝隙表面。
 - 3) 上游慢慢注水，充满整个容器。待水充满整个容器后，立即施加水头进行试验，施加水头采用一次性加压到位的方法，水头值应保证黏性土试样土体（不考虑裂缝）所承的水力比降不低于 100。
 - 4) 施加水头后测量记录不同时间的渗流量以及出水是否浑浊，试验开始后立即测定流量，并在随后的 30min 每 5min 测记一次流量，然后每小时测记一次流量。
 - 5) 试验结束后，应缓慢降低水箱水位。
 - 6) 仪器中水放完后，拆样察看裂缝自愈的情况，以及裂缝的土体是否进入到反滤料中。
- 5 有下列情况之一者，可结束试验：
 - 1) 渗流量越来越大，而且出水浑浊。

- 2) 出水先是有点浑浊, 然后变清, 而且渗流量逐步减小, 试验进行 24h。
- 3) 渗流量基本上不变, 试验进行 24h。

10.4 计算与记录

10.4.1 无黏性土的反滤试验应符合下列规定:

- 1 干密度、孔隙率、土粒比重、渗透坡降、渗流速度应按 9.2.5 条所列公式计算。
- 2 应绘制被保护土的 $\lg i \sim \lg v$ 曲线和 $v \sim t$ 曲线。
- 3 应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。
- 4 无黏性土的反滤试验记录格式见表 9.2.6。

10.4.2 黏性土的反滤试验应符合下列规定:

- 1 应按 9.2.5 条所列公式计算干密度、孔隙率、土粒比重、渗透坡降, 并绘制 $Q \sim t$ 曲线。
- 2 黏性土的反滤试验记录格式见表 9.2.6。

11 压 缩 试 验

11.1 一 般 规 定

11.1.1 粗粒土压缩试验是测定粗粒土的压力与变形、时间与变形的关系，用于计算土的压缩系数、压缩模量等。

11.1.2 室内压缩试验时，根据粗粒土最大粒径选择不同的压缩设备。

11.1.3 现场压缩试验宜采用预埋模量筒的方法，加载反力系统可利用预设锚桩或利用岩石较坚硬的试验洞进行，试验场地或试验洞断面根据土料最大粒径、试样成型方式及试验量综合确定。

11.2 设 备 和 设 施

11.2.1 试样直径与最大粒径之比宜为 $3\sim 5$ ，试样直径与高度之比宜为 $1.5\sim 2.5$ 。

11.2.2 室内压缩仪示意图如图 11.2.2-1、图 11.2.2-2 所示，现场反力框架加载的压缩示意图如图 11.2.2-3 所示。图 11.2.2-1 适用于最大粒径不大于 60mm 的粗粒土，图 11.2.2-2 适用于最大粒径大于 60mm 的粗粒土。

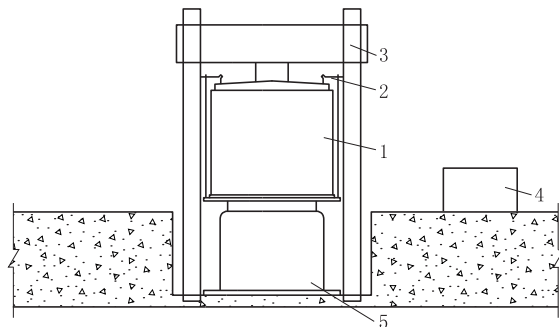


图 11.2.2-1 压缩仪装置示意图 (一)

1—试样桶；2—位移传感器；3—加载框架；4—控制器；5—千斤顶

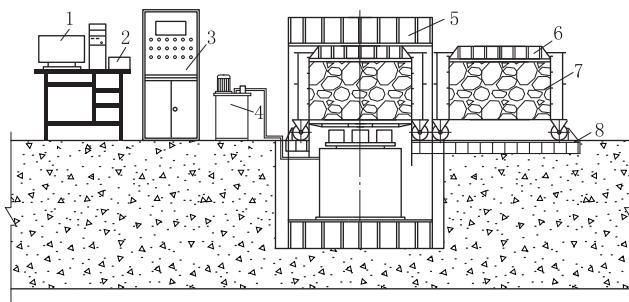


图 11.2.2-2 压缩仪装置示意图 (二)

1—自动控制数据采集系统；2—数据采集控制箱；3—控制柜；
4—液压系统；5—反力框架；6—承压板；7—试样桶；8—小车轨道

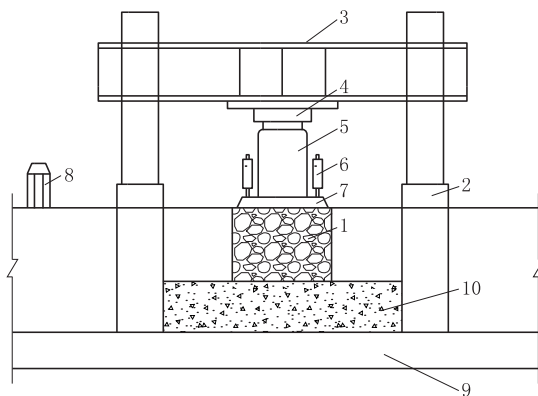


图 11.2.2-3 现场压缩装置示意图

1—试样桶；2—锚桩；3—反力框架；4—测力传感器；5—千斤顶；
6—位移传感器；7—承压板；8—加载装置；
9—反力框架底板；10—刚性基础

1 压缩试验设备主要由加载系统、试验控制部分、变形监测系统、试样筒等组成。

2 加荷设备和稳压装置：荷载传感器（或测力计）准确度

为全量程的 1%。位移传感器：准确度为全量程的 0.2%；或位移计：量程 0~30mm，最小分度值 0.01mm。

3 磅秤：称量 100kg、最小分度值 50g；台秤：称量 5000g、最小分度值 5g。

4 附属设备：饱和设备、吊装设备、振动器、击实器、烘箱、试验筛等。

5 仪器设备应进行检定或校准，试验前应进行检查。

11.3 试验步骤

11.3.1 试样制备与装样应符合下列规定：

1 根据试验要求的试样最大粒径和试样体积、干密度、含水率制备土样，将制备好的试验用料 100mm 及以下拌和均匀，100mm 以上粒径分别堆放，根据试样桶尺寸大小，均分成 2~4 份。

2 装样前应在试样筒底部铺设土工布或其他材料，防止细颗粒流失堵塞饱和和用水透水板等。分层装样，按照每层各粒径试验用料的质量，将试验用料分层均匀装入试样桶内，大于 100mm 的土料人工分散、均匀摆放，距桶壁距离不宜小于 20mm，试验用料装完夯实前应将试样层表面整理平整。

3 人工或振动电夯夯实，夯实应均匀、从外至内螺旋状进行，不得一个部位集中夯实。高度至计算好的层高线，桶内试样密度、孔隙率与试验技术要求一致，每层夯完达到预设高度后进行下层试验料装样。

11.3.2 试样安装与饱和应符合下列规定：

1 将装有试样的容器置于加荷框架中心。

2 试样如需饱和，将蓄水槽安装在压缩仪底盘上，连接供水装置。从试样底部开始用水头饱和，饱和水完全浸湿试样上表面，饱和 24h。

3 在上加压板上安装传力柱，在上加压板上对称位置安装位移传感器或百分表。需要时，可测量试样饱和期间的沉降量。

11.3.3 试验应按下列步骤进行:

1 施加 3~4kPa 的预压力,使试样与仪器各部位之间接触良好,压力表和百分表清零。

2 试验荷载根据试样尺寸大小分为 5~10 级。

3 试验加载宜按 50kPa、100kPa、200kPa、400kPa、800kPa、1600kPa、3200kPa、…分级施加,最大压力宜大于试验要求压力的 100~200kPa。

4 在试验过程中,每级荷载加压后 1h 测读一次沉降量,当相邻两次各传感器或百分表沉降量差值均不大于 0.05mm 时,达到稳定标准,可施加下一级荷载。

5 需要测定沉降速率时,在施加每一级荷载后,按下列时间顺序测读传感器或百分表读数:1min、4min、9min、16min、25min、36min、60min。以后每 1h 读数一次,当每 1h 各传感器或百分表读数差均不大于 0.05mm 时,可施加下一级荷载。

6 试验结束后,排出容器中的水,拆除仪器各部件,将试样从仪器中取出,取代表性试样测试试验后的土料含水率,如需了解颗粒破碎情况,应对全部试样进行颗粒分析试验,计算试验后土料颗粒破碎率。

11.4 计算与记录

11.4.1 计算与制图:

1 计算试样初始孔隙比 e_0 :

$$e_0 = \frac{\rho_w G_s (1 + 0.01 \omega_0)}{\rho_0} - 1 \quad (11.4.1-1)$$

式中: G_s ——土粒比重;

ρ_w ——水的密度, g/cm^3 ;

ρ_0 ——试样的初始密度, g/cm^3 ;

ω_0 ——试样的初始含水率, %。

2 计算各级压力下压缩稳定后的孔隙比 e_i :

$$e_i = e_0 - (1 + e_0) \frac{\sum \Delta h_i}{h_0} \quad (11.4.1-2)$$

式中： e_i ——某级压力下的孔隙比；

$\sum \Delta h_i$ ——某级压力下试样高度变化量，cm；

h_0 ——试样初始高度，cm。

3 计算某一压力范围内的压缩系数 a_v ：

$$a_v = \frac{e_i - e_{i+1}}{p_{i+1} - p_i} \quad (11.4.1-3)$$

式中： p_i ——某一压力值，kPa。

4 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 ：

$$E_s = \frac{1 + e_0}{a_v} \quad (11.4.1-4)$$

$$m_v = \frac{1}{E_s} = \frac{a_v}{1 + e_0} \quad (11.4.1-5)$$

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 11.4.1-1 所示。

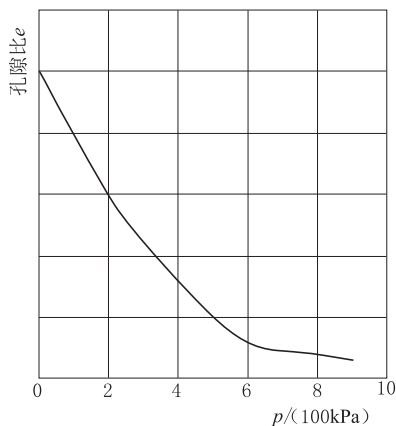


图 11.4.1-1 $e \sim p$ 关系曲线

11.4.2 记录格式见表 11.4.2-1、表 11.4.2-2。

12 直接剪切试验

12.1 一般规定

12.1.1 本试验采用应变控制式大型直接剪切仪测定粗颗粒土的抗剪强度参数。

12.1.2 室内直剪试验适用于最大粒径不大于 80mm 的粗颗粒土。现场直剪试验适用于最大粒径大于 80mm 或全级配的粗颗粒土。

12.2 室内直剪试验

12.2.1 应采用下列主要仪器设备：

1 应变控制式大型直剪仪：由上剪切盒、下剪切盒、传压板、滚珠排、加荷设备、垂直加压框架和水平加压支座等组成，如图 12.2.1 所示。仪器设备应符合以下规定：

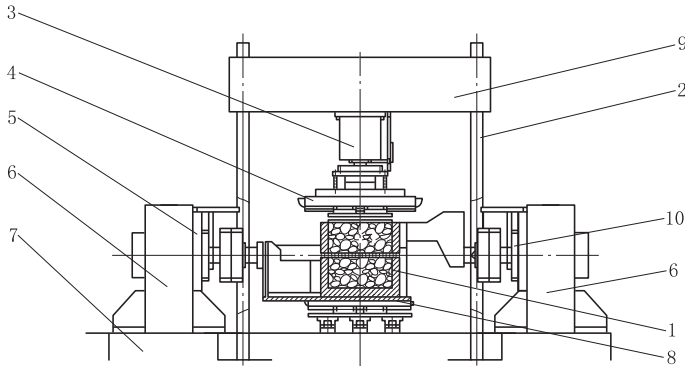


图 12.2.1 大型直剪仪示意图

1—组合式剪切盒装置；2—四立柱；3—垂直向加载油缸；4—上剪切盒；
5—水平剪切伺服加载油缸；6—水平承载支架；7—机座；8—下剪切盒；
9—承载横梁；10—水平剪切伺服加载油缸

- 1) 剪切盒形状采用圆形或方型，尺寸：径径比 $D/d_{\max}$ 不宜小于 5，高径比 $H/d_{\max}$ 不宜小于 4。
 - 2) 百分表：量程 30mm，分度值 0.01mm。
 - 3) 其他设备：真空泵（附真空测压表）、饱和器（附金属真空缸）、粗筛（筛孔孔径分别 80mm、60mm、40mm、20mm、10mm、5mm）、秤 200kg（分度值 200g）、水平尺、工具、恒湿设备与击实锤等。
- 2 试验前仪器设备的检查按附录 B 的规定进行。
- 12.2.2 试验应采用下列步骤：
- 1 试样制备和安装：
 - 1) 试样按 4.4.1 条、4.4.2 条的规定进行备料。根据试验要求的干密度、含水率和试样尺寸，计算并分层称取试验所需的土样数量。
 - 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，使上、下盒同心，并用固定插销定位。
 - 3) 将称好的试样拌匀后分层装入剪切盒内，根据试样高度与层缝错开确定装样层数，宜为 3 层或 5 层，且每一层应击实至要求的高度。
 - 4) 试样如需饱和，宜用水头饱和法。
 - 5) 在试样面上依次放上透水板、传压板等。安装应对中，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，徐徐开动垂直传动轴，使各部接触。记录变形起始读数。
 - 6) 安装水平百分表，水平传动轴的着力线应通过剪切面的中心。徐徐开动水平传动轴，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。
 - 7) 每组试验应制备 4~5 个试样，在不同压力下进行试验，其密度差值不得大于 $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ ，含水率差值不

得大于 1%。

2 剪切试验：

- 1) 按本条 1 款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细铜丝布和透水钢板。在试样上一次施加预定的垂直荷载，使其在整个试验过程中保持恒定。
- 2) 在试样上施加垂直荷载后，如每小时垂直变形小于 0.03mm，则认为固结稳定。测记此时垂直百分表读数。
- 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。检查垂直荷载、水平测力计、百分表等，记录其读数。开动水平传动轴和秒表，以一定剪切速率施加水平荷载，每隔 1mm 测记 1 次水平荷载读数和垂直百分表读数。剪切速率，可按公式 (12.2.2) 计算剪切破坏时间，根据剪损时的剪切变形计算剪切速率。

$$t_f = 50t_{50} \quad (12.2.2)$$

式中： t_f ——达到破坏所经历的时间，s；

t_{50} ——固结度达到 50% 的时间，s。

当水平荷载读数达到稳定，或有显著后退，表示试样已剪损。若剪应力读数继续增加，应控制剪切变形达试样直径的 1/5~1/10，方可停止试验。

- 4) 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。可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。

12.2.3 计算和制图：

- 1 按公式 (12.2.3-1)、公式 (12.2.3-2) 计算剪应力：

$$\tau = \frac{p - F}{A} \quad (12.2.3-1)$$

$$p = CR \quad (12.2.3-2)$$

式中： τ ——剪应力，kPa；

p ——水平荷载，kN；

C ——水平测力计率定系数，kN/0.01mm；

R ——水平测力计读数，0.01mm；

F ——某垂直压力下仪器摩擦力，kN；

A ——试样面积， m^2 。

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 与水平剪切位移 δ 关系曲线，如图 12.2.3-1 所示。

3 取剪应力与剪应变关系曲线上峰值或稳定值作为抗剪强度，如图 12.2.3-1 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 。

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 12.2.3-2 所示。直线的倾角为粗颗粒土的内摩擦角 φ ，直线在纵坐标轴上的截距为粗颗粒土的黏聚力 c 。

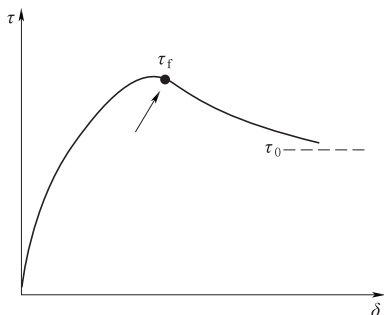


图 12.2.3-1 剪应力与水平剪切位移曲线示例

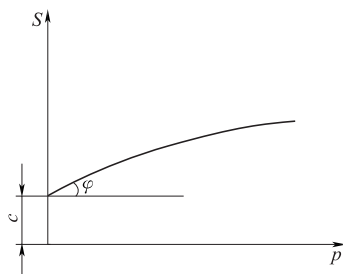


图 12.2.3-2 抗剪强度与垂直压力关系曲线示例

12.2.4 本试验的记录格式见表 12.2.4。

表 12.2.4 粗颗粒土直接剪切试验记录表

工程名称_____ 试验日期_____

试验依据					仪器名称及编号				
土样编号					制样日期				
垂直压力 p/kPa					试样面积 A/m^2				
固结时间 t/h					开缝尺寸 t_1/mm				
剪切速率 $S/(\text{mm}/\text{min})$					摩擦力 F/kN				
起始干密度 $\rho_d/(\text{g}/\text{cm}^3)$					风干含水率 $w/\%$				
破坏剪应力 τ/kPa					$C/(\text{kN}/0.01\text{mm})$				
测力计读数 $/(0.01\text{mm})$	剪应力 τ $/\text{kPa}$	水平位移 $/(0.01\text{mm})$				垂直变形 $/(0.01\text{mm})$			
		百分表读数 ΔL			累计增量 $\Sigma\Delta L$	百分表读数 ΔL			累计增量 $\Sigma\Delta L$
		1	2	平均		1	2	平均	
备注									

试验_____ 计算_____ 校核_____

12.3 现场直剪试验

12.3.1 应采用下列主要仪器与设备：

- 1 试验装置示意如图 12.3.1 所示。
- 1) 剪切盒：由上剪切盒和下剪切盒组成，之间留有剪切缝，剪切缝宽度由剪切缝中的钢珠控制，宜为平均粒径的 1/3~1/4。剪切盒边长宜为最大粒径 3~5 倍，高度宜不小于最大粒径的 3 倍。

2) 垂直传力系统：由下盖板、滚排、上盖板及垫块组成。

3) 加载系统：由垂直向千斤顶、水平向千斤顶、液压油源、油源（压力）控制系统组成。液压千斤顶，其出

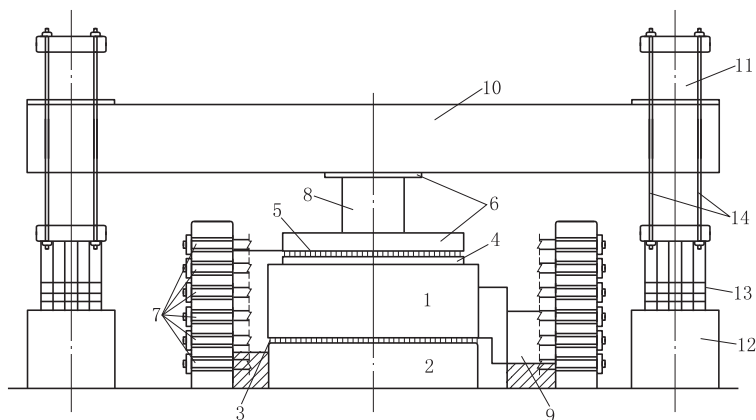


图 12.3.1 现场直剪试验示意图

- 1—上剪切盒；2—下剪切盒；3—剪切缝；4—试样盖板；
5—滚排；6—垫板；7—水平反力机构；8—竖向千斤顶；
9—水平向千斤顶；10—主梁；11—副梁；12—锚桩；
13—锚筒；14—连接机构

力误差不得大于全量程的 1%；安全过负荷率应大于 120%。

- 4) 垂直向反力系统：垂直向反力由主梁、副梁及 4 根反力桩承担。其组合必须牢固稳定、安全可靠，其承受能力不小于试验最大荷载的 1.5~2.0 倍。
- 5) 水平向反力系统：水平荷载由自反力框架承担。
- 6) 垂直向位移测试装置：垂直向位移由安装在上盖板上的 4 只位移传感器测量，百分表由磁性表架固定在基准梁上，其精度不应小于 0.01mm。
- 7) 水平向位移测试装置：水平向位移由安装在剪切盒两侧剪切缝处的 2 只位移传感器测量，其精度不应小于 0.01mm。
- 8) 其他设备：吊车、粗筛（筛孔孔径分别为 100mm、80mm、60mm、40mm、20mm、10mm、5mm）、秤 200kg（最小分度值 200g）、水平尺、击实设备。

2 仪器设备应符合以下规定：

1) 垂直向千斤顶，压力表为 1.5 级。

2) 水平向千斤顶，压力表为 1.5 级。

3) 百分表：4~6 个，量程 10~25mm，最小分度值 0.01mm。

12.3.2 试验应按下列步骤进行：

1 安装剪切盒。先将安放剪切盒位置铺约 1cm 左右的中砂垫层，并用水平尺找平。将下剪切盒平稳安装好，并沿下剪切盒的剪切缝上安放钢珠〔用钢珠控制剪切盒开缝尺寸为 $(1/3 \sim 1/4)d_{50}$ 〕，然后安放上剪切盒，使上、下盒同心，并用固定插销定位。

2 安装自反力框架，水平向荷载的反力由该自反力框架提供。

3 安装水平千斤顶，使水平千斤顶的着力线通过剪切面的中心。

4 根据试验要求的干密度、级配、含水率和试样尺寸，计算并称取试验所需各粒组的土样的质量。

5 试样土料拌匀后分 3 层装入剪切盒内，每一层击实至要求的高度，再填第 2 层。重复上述步骤至最后一层，整平表面。

6 对于饱和试样采用塑料薄膜隔水，在试样装填完成后充分浸水饱和。

7 在装填完成的试样面上依次放上下压板、滚排、上压板、垂直向千斤顶及垫块等。要求安装对中，传压板应用水平尺校平。在上压板上对称安装 4 个垂直位移传感器。

8 安装主梁、副梁，使主梁、副梁和反力桩组成垂直加载反力构架。

9 固结：在试样上施加垂直荷载并变形稳定后，为固结完成，测记此时垂直百分表读数。最大的法向压力应大于设计荷载，并分成 4~5 个压力进行试验。对于饱和试样，在固结时应通过剪切缝将防水塑料薄膜刺破。

10 剪切：试样达到固结稳定后，施加水平荷载，每隔

1min 测记 1 次水平位移读数和垂直位移读数，达到变形稳定后再施加下一级水平荷载。起始水平荷载每级按垂直荷载的 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% 施加（剪切时施加剪应力的速率应适当选择。施加每级剪切压力按预估最大压力的 8%~10% 分级等量施加，或按法向压力的 5%~10% 分级等量施加，宜每隔 30s 施加一级剪切荷载）。

11 当水平荷载读数不再增加或剪切变形急骤增长，即认为已剪坏。若无上述两种情况出现，应控制剪切变形达试样边长的 $1/5 \sim 1/10$ ，方可停止试验。

12 按本条 1~11 款的规定，测定不同垂直压力下试样的抗剪强度。

13 每组试验不宜少于 4 个试样。

12.3.3 计算和制图按 12.2.3 条进行。

12.3.4 记录格式见表 12.2.4。

13 三轴压缩试验

13.1 一般规定

13.1.1 本试验目的是测定粗颗粒土的三轴抗剪强度特性和变形特性。

13.1.2 本章规定适用于最大粒径 $\leq 200\text{mm}$ 的三轴压缩试验。

13.1.3 根据粗颗粒土的性质和排水条件，宜进行固结排水剪（CD）试验。

13.2 设备和设施

13.2.1 应采用的主要设备与设施：

1 大型三轴仪，如图 13.2.1 所示。主要由压力室、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：为钢筒，尺寸按试样大小选用，钢筒上宜镶有有机玻璃窗口。
- 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) 体变量测系统：包括大量程百分表（或位移传感器）和体变管（或体变测量装置）。

2 附属设备：包括对开成型筒、承膜筒、击实锤或表面振动击实器、橡皮膜、真空泵、磅秤、天平、钢尺、秒表、瓷盘、烘箱等。

13.2.2 三轴仪使用前的检查：

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 $\sigma_1 > 5\sigma_3$ 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%。

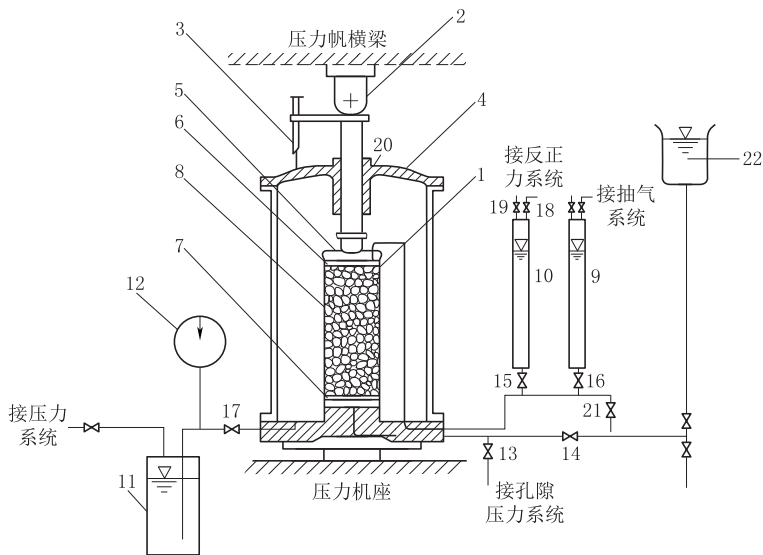


图 13.2.1 大型三轴仪示意图

- 1—试样；2—测力计；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
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 1）阀；22—量水管

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 橡皮膜应不漏水。

4 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。

13.3 操作步骤

13.3.1 试样制备应符合下列规定：

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 ($H/D=2.0 \sim 2.5$)。试样直径采用 200~1000mm。

2 按 4.3.2 条的规定备好土料。根据试验要求的干密度、含水率及试样尺寸计算并分层称取试验所需的土样。

3 将备好的土样，分层装填。应防止粗细颗粒分离，保证试样的均匀性。

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。

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。

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，使试样在负压下直立，再去掉成型筒。

7 检查橡皮膜，若有破裂处，立即进行黏补，必要时再加一层。

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，并按公式 (13.3.1) 计算试样平均直径 D_0 ：

$$D_0 = \frac{1}{4}(D_1 + 2D_2 + D_3) - 2t \quad (13.3.1)$$

式中： D_1 、 D_2 、 D_3 ——试样上部、中部、下部的直径，cm；

t ——橡皮膜厚度，cm。

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。

13.3.2 试样饱和应符合下列规定：

1 抽气饱和。为保证稍后饱和过程中试样不会坍塌，先给试样施加 10~20kPa 的侧压力。试样抽真空时间约 30min 后，徐徐开进水阀，使用脱气水在负压作用下，水由下而上逐渐饱和试样。待试样上部出水后，持续 20min 左右，关闭真空泵和出水阀门，试样底部继续进水直至进水管的水位稳定，试样内负压去除。

2 水头饱和。按 13.3.1 条 9 款的规定安装压力室后，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，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，适当增加进出水管水头差，最大水头差不应大于 2m，仍按上述方法延长饱和时间，至符合要求为止。

3 二氧化碳 (CO_2) 饱和。二氧化碳饱和系统如图 13.3.2 所示。按 13.3.1 条 9 款的规定安装压力室后，徐徐施加周围压力 σ_3 ($=30\text{kPa}$)。开阀门 1 和 3，使二氧化碳 (CO_2) 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 (CO_2) 的压力宜为 2~10kPa。待水气瓶 6 内的水面冒气泡 3~5min，再关阀门 1，开阀门 2，利用水头使试样饱和。

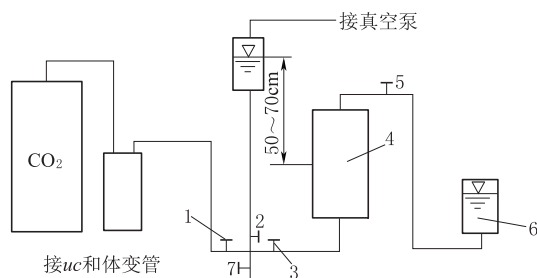


图 13.3.2 二氧化碳饱和系统示意图

4 饱和度的鉴别。如孔隙压力系数 $B \geq 0.95$ 时可认为试样已达到饱和。如 $B < 0.95$ 时，则应继续饱和， B 值的计算按公式 (13.4.1-3) 计算。

13.3.3 剪切试验：

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。

2 开排水阀，每隔 20~30s 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固结排水量 ΔV 与时间 t 或孔隙水压力 u 与时间 t 关系曲线（图 13.3.3）。正常情况下，排水量应趋于稳定，即曲线的下段趋于水平，即认为固结完成。

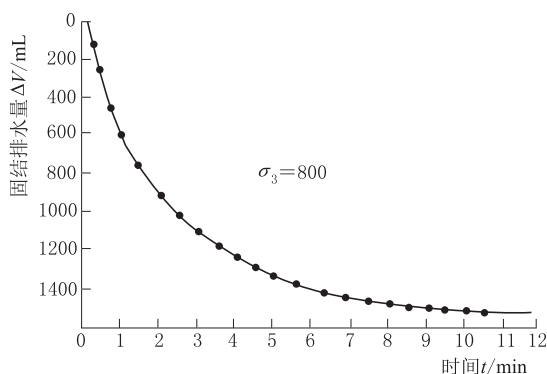


图 13.3.3 $\Delta V \sim t$ 关系曲线

3 若需加反压力饱和时，压力室安装好后，先向接反压力系统的体变管内注水，然后关闭孔隙压力阀，测记体变管读数。调反压力阀，向试样施加 30kPa 的周围压力，开孔隙压力阀，测记孔隙压力稳定读数。分级施加周围压力和反压力，反压力和周围压力的每级增量为 20kPa，施加过程中，始终保持周围压力比反压力大 30kPa。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。

4 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。有峰值时，试验应进行至轴向应变达到峰值出现后的 $3\% \sim 5\%$ 。如无峰值时，则轴向应变达到 $15\% \sim 20\%$ 。

5 试验结束后，关排水阀，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。

6 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。

13.4 成果整理

13.4.1 应按下列公式进行计算：

1 试样的高度、面积、体积及剪切时的面积计算公式列于表 13.4.1。

表 13.4.1 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	等应变简化试样	
试样高度 /cm	h_0	$h_c = h_0 - \Delta h_c$	$h_c = h_0 \left(1 - \frac{\Delta V}{V_0}\right)^{1/3}$	
试样面积 /cm ²	A_0	$A_c = \frac{V_0 - \Delta V}{h_c}$	$A_c = A_0 \left(1 - \frac{\Delta V}{V_0}\right)^{2/3}$	$A_s = \frac{V_c - \Delta V_i}{h_c - h_i}$ (固结排水剪)
试样体积 /cm ³	V_0	$V_c = h_c A_c$		

注： 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），cm³； 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，cm³； ϵ_1 —轴向应变， $\% \left(\text{不固结不排水剪中的 } \epsilon_1 = \frac{\Delta h_i}{h_0} \times 100 \right)$ ； Δh_i —试样剪切时高度变化，cm，由轴向位移计测得，为方便起见，可预先绘制 $\Delta V \sim h_c$ 及 $\Delta V \sim A_c$ 的关系曲线备用。

2 按公式 (13.4.1-1) 计算主应力差 $\sigma_1 - \sigma_3$:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{CR}{A_a} \times 10 \quad (13.4.1-1)$$

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/0.01mm;

R ——测力计读数, 0.01mm;

A_a ——试样剪切时的面积, cm^2 。

3 按公式 (13.4.1-2) 计算有效主应力比 $\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3}$:

$$\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma'_3} + 1 \quad (13.4.1-2)$$

式中: $\sigma'_1 = \sigma_1 - u$, kPa;

$\sigma'_3 = \sigma_3 - u$, kPa;

σ'_1 、 σ'_3 ——有效大主应力、有效小主应力, kPa;

σ_1 、 σ_3 ——大主应力、小主应力, kPa;

u ——孔隙水压力, kPa。

4 按公式 (13.4.1-3)、公式 (13.4.1-4) 计算孔隙压力系数 B 和 A :

$$B = \frac{u}{\sigma_3} \quad (13.4.1-3)$$

$$A = \frac{u_d}{B(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (13.4.1-4)$$

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。

13.4.2 制图:

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 13.4.2-1) 和体应变 ϵ_v 与轴向应变 ϵ_1 的关系曲线 (图 13.4.2-2)。

2 破坏点的取值。以 $\sigma_1 - \sigma_3$ 的峰点值作为破坏点。如 $\sigma_1 - \sigma_3$

无峰值，应按一定轴向应变（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 $\sigma_1-\sigma_3$ 作为破坏强度值。

3 绘制摩尔圆和强度包线：假定为零，对每个围压力作摩尔圆，作过零点的切线，切线倾角即为该围压力下的摩擦角。由于粗粒土强度包线不是直线（图 13.4.2-3），宜采用非线性强度指标 φ_0 表示。

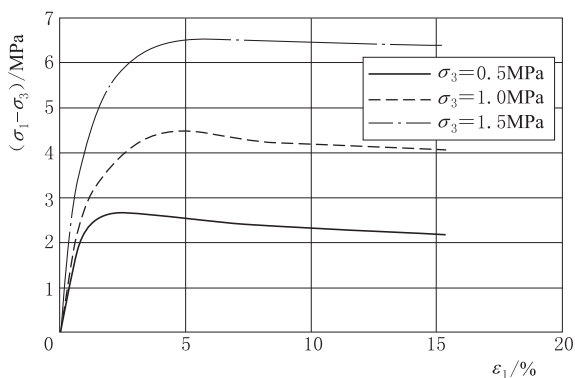


图 13.4.2-1 主应力差与轴向应变关系曲线示例

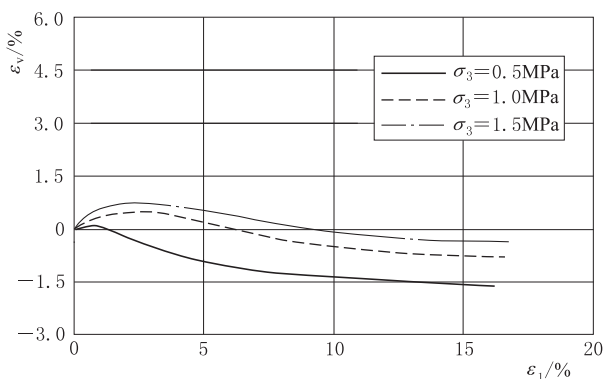


图 13.4.2-2 体应变与轴向应变关系曲线示例

13.4.3 邓肯-张 $E-\mu$ 模型参数整理：

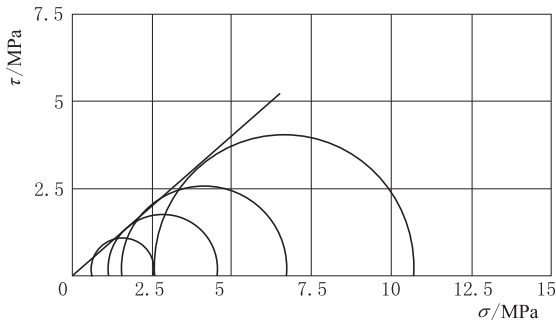


图 13.4.2-3 固结排水剪强度包线示例

1 切线弹性模量和切线泊松比的计算：

- 1) 按公式 (13.4.3-1)、公式 (13.4.3-2) 计算切线弹性模量：

$$E_t = K P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \times \left[1 - \frac{R_f (\sigma_1 - \sigma_3) (1 - \sin \varphi)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]^2 \quad (13.4.3-1)$$

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (13.4.3-2)$$

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，(°)；

c ——土的黏聚力，kPa；

K 、 n ——试验常数；

$(\sigma_1 - \sigma_3)$ ——主应力差，见公式 (13.4.1-1)。

- 2) 切线泊松比按公式 (12.4.3-3)、公式 (13.4.3-4) 计算：

$$\mu = \frac{G - F \lg \frac{\sigma_3}{P_a}}{(1 - A)^2} \quad (13.4.3-3)$$

$$A = \frac{D(\sigma_1 - \sigma_3)}{KP_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)^n \left[1 - \frac{R_f(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin\varphi)}{2c\cos\varphi + 2\sigma_3\sin\varphi}\right]} \quad (13.4.3-4)$$

式中： G 、 F 、 D ——试验常数；

其余符号见公式（13.4.3-1）、公式（13.4.3-2）。

2 应力应变的计算：

按公式（13.4.3-5）～公式（13.4.3-7）计算体积应变和侧向应变：

$$\epsilon_v = \frac{\Delta V}{V_c} \quad (13.4.3-5)$$

$$\epsilon_v = \epsilon_1 + 2\epsilon_3 \quad (13.4.3-6)$$

$$\epsilon_3 = \frac{\epsilon_v - \epsilon_1}{2} \quad (13.4.3-7)$$

式中： ϵ_v ——试样在剪切过程中的体积应变，‰；

ΔV ——试样的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，‰。

3 试验常数的求得：

- 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 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与应变 ϵ_1 关系近似双曲线关系，如图 13.4.3-1 (a) 所示。

双曲线关系式：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\epsilon_1}{a + b\epsilon_1} \quad (13.4.3-8)$$

变换纵坐标，如图 13.4.3-1 (b) 所示：

$$a + b\epsilon_1 = \frac{\epsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (13.4.3-9)$$

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。

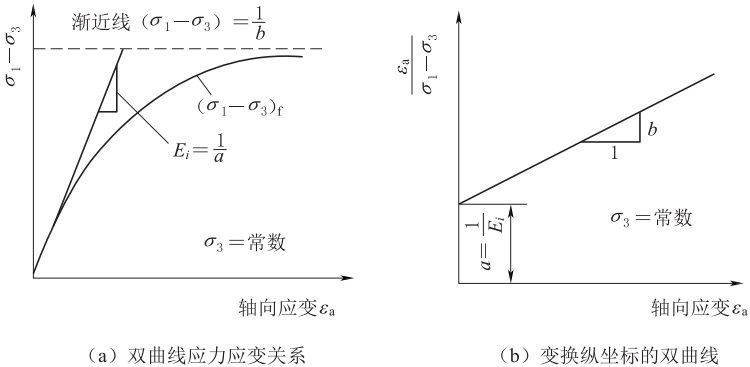


图 13.4.3-1 三轴试验的应力应变关系示例

由 a 和 b 即可求得初始切线模量和主应力差的渐近值。

按公式 (13.4.3-10) 计算破坏比 R_f ：

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (13.4.3-10)$$

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。

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 E_i 与有效固结压力 σ_3 有以下关系：

$$E_i = K P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (13.4.3-11)$$

式中： P_a ——大气压力，kPa。

K 、 n 由 $\lg(E_i/P_a) \sim \lg(\sigma_3/P_a)$ 关系曲线 (图 13.4.3-2) 确定。

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 [图 13.4.3-3 (a)]，即：

$$\epsilon_a = \frac{\epsilon_r}{f + D\epsilon_r} \quad (13.4.3-12)$$

变换纵坐标，如图 13.4.3-3 (b) 所示：

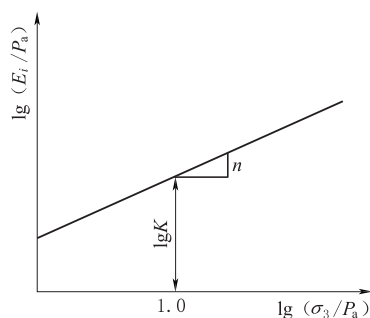


图 13.4.3-2 $\lg(E_i/P_a) \sim \lg(\sigma_3/P_a)$

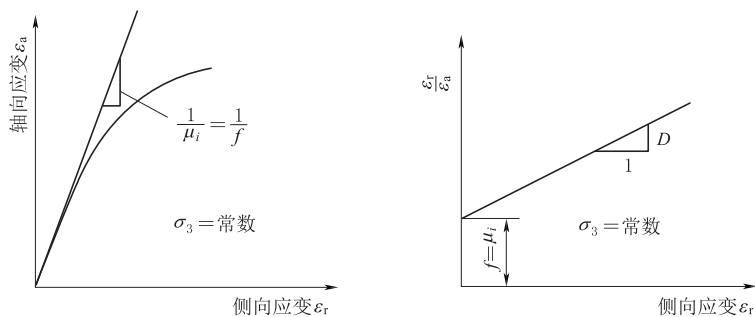
关系曲线示例

$$\frac{\epsilon_r}{\epsilon_a} = f + D\epsilon_r \quad (13.4.3-13)$$

式中： f ——初始切线泊松比；

D ——轴向应变渐近值的倒数。

从图 13.4.3-3 中求得 f 、 D 值。



(a) 双曲线主应变关系

(b) 变换纵坐标的双曲线

图 13.4.3-3 轴向应变与侧向应变关系

4) 绘制 $\mu_i \sim \lg \sigma_3$ 关系曲线 (图 13.4.3-4)：

$$\mu_i = G - F \lg \frac{\sigma_3}{P_a} \quad (13.4.3-14)$$

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。

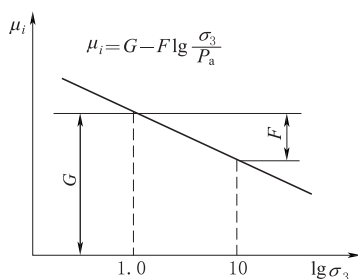


图 13.4.3-4 $\mu_i \sim \lg \sigma_3$ 关系曲线

公式 (13.4.3-1) 和公式 (13.4.3-3) 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。

13.4.4 邓肯-张 $E-B$ 模型参数整理：

1 切线弹性模量和切线体积模量的计算：

1) 切线弹性模量按公式 (13.4.4-1)、公式 (13.4.4-2) 计算：

$$E_t = K P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \times \left[1 - \frac{R_f (\sigma_1 - \sigma_3) (1 - \sin \varphi)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]^2 \quad (13.4.4-1)$$

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (13.4.4-2)$$

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，(°)；

c ——土的黏聚力，kPa；

K 、 n ——试验常数。

2) 切线体积模量按公式 (13.4.4-3) 计算：

$$B_t = K_b P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^m \quad (13.4.4-3)$$

式中： B_t ——切线体积模量，kPa；

K_b 、 m ——试验常数；

其余符号同公式 (13.4.4-1)。

2 主应力差、体积应变和侧向应变的计算，见公式 (13.4.1-1)、公式 (13.4.3-6) 和公式 (13.4.3-7)。

3 试验常数的推算：

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，如图 13.4.4-1 (a) 所示：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\epsilon_a}{a + b\epsilon_a} \quad (13.4.4-4)$$

变换纵坐标，如图 13.4.4-1 (b) 所示：

$$\frac{\epsilon_a}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b\epsilon_a \quad (13.4.4-5)$$

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（图 13.4.4-1）。

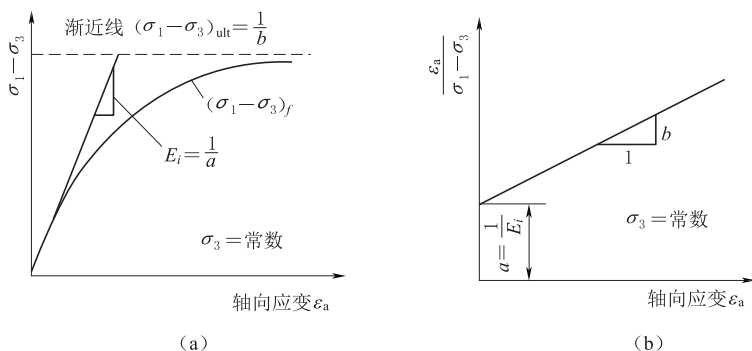


图 13.4.4-1 三轴试验的应力应变关系示例

破坏比按公式 (13.4.4-6) 计算：

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (13.4.4-6)$$

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。

- 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:

$$E_i = K P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (13.4.4-7)$$

在双对数坐标纸上绘制 $E_i/P_a \sim \sigma_3/P_a$ 关系曲线 (图 13.4.4-2) 确定 K 、 n 值。

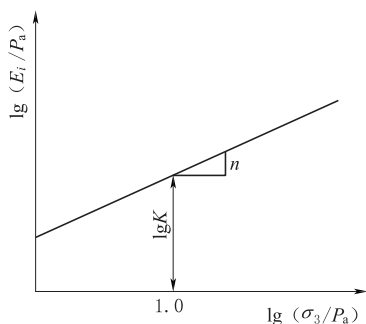


图 13.4.4-2 $\lg(E_i/P_a) \sim \lg(\sigma_3/P_a)$

关系曲线示例

- 3) 初始切线体积模量按公式 (13.4.4-8) 计算:

$$B_i = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3\epsilon_v} \quad (13.4.4-8)$$

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, 则体应变取峰值及取对应的应力水平。

- 4) 在双对数坐标上绘制 $B_i/P_a \sim \sigma_3/P_a$ 关系曲线, 如图

13.4.4-3 所示。

- 5) 公式 (13.4.4-1) 和公式 (13.4.4-3) 中共有 7 个参数, K 、 n 、 c 、 φ 、 R_f 、 K_b 、 m_0 。 c 和 φ 根据摩尔-库仑包线确定。当摩尔-库仑包线呈弯曲时, 应将每一周围压力下的 φ 值求出, 绘制 $\varphi \sim \lg \sigma_3$ 曲线, 并按公式 (13.4.4-9) 计算 φ 值:

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg(\sigma_3/P_a) \quad (13.4.4-9)$$

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, ($^\circ$)。

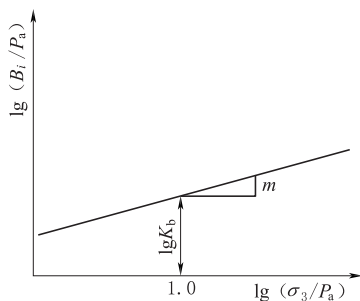


图 13.4.4-3 $\lg(B_i/P_a) \sim \lg(\sigma_3/P_a)$ 关系曲线示例

13.5 超大三轴压缩试验的特殊要求

13.5.1 超大三轴压缩试验适用于最大粒径 100~200mm 的粗粒土。

13.5.2 试样制备:

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 ($H/D=2.0 \sim 2.5$)。

2 将全部土样依次过粗筛, 按 200~160mm、160~130mm、130~100mm、100~80mm、80~60mm、60~40mm、40~20mm、20~10mm、10~5mm、<5mm 分组并称其质量。必要时取粒径小于 5mm 土过筛, 计算各粒组含量百分数, 并按粒组分别存放备用。

3 按第 4 章的规定进行备样, 其中推荐相似级配法作为超

大型三轴试验超粒径颗粒处理方法。

4 将备好的土样，分层装填。应防止粗细颗粒分离，保证试样的均匀性。

5 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，透水板上铺一层土工布。

6 在底座上扎好橡皮膜，安装承膜桶，将橡皮膜外翻在承膜桶上，采用真空泵抽出承膜桶与橡皮膜之间的气体，使橡皮膜顺直和紧贴承膜桶内壁。

7 装入第 1 层土样，为防止橡皮膜被刺破，应避免粗颗粒棱角与橡皮膜直接接触。均匀拂平表面，采用表面振动击实器进行击实，为了保证制样的均匀性，应考虑上部击实对下部的附加影响，每次击实应预留超高，第 1 层土样击实至预定高度后，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 50kPa 负压下直立，再去掉承膜桶。

8 检查橡皮膜，若有破裂处，立即进行黏补，为防止粗颗粒棱角刺破橡皮膜，宜再加一层橡皮膜。

9 按 13.3.1 条 8 款的规定测量试样高度 H_0 及平均直径 D_0 。

10 按 13.3.1 条 9 款的规定安装压力室。

13.5.3 试样饱和：

1 抽气饱和：按 13.3.2 条 1 款的规定进行，对试样施加的侧压力可提高至 50~60kPa。

2 水头饱和：按 13.3.2 条 2 款的规定进行，周围压力可适当增加至最高不超过 100kPa。

3 二氧化碳 (CO_2) 饱和：按 13.3.2 条 3 款的规定进行，周围压力可适当增加至最高不超过 100kPa，水气瓶水面冒气泡时间可适当延长至 30min。

4 饱和度的鉴别：按 13.3.2 条 4 款的规定进行饱和度的鉴别。

13.6 记 录

本试验的记录格式可按表 13.6-1~表 13.6-3。

表 13.6-1 三轴压缩试验记录计算表一

工程名称			试验日期	
试验依据			主要设备名称和编号	
试样编号			试样状态	
固结	起始值	固结后	周围压力 σ_3/kPa	
			反压力 u_0/kPa	
直径 D/cm			周围压力下的孔隙压力 u/kPa	
高度 h/cm				
面积 A/cm^2			孔隙压力系数 $B = \frac{u}{\sigma_3}$	
体积 V/cm^3				
质量 m/g				
含水率 $w/\%$				
密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$				
干密度 $\rho_d/(\text{g}/\text{cm}^3)$				
剪切	起始值	剪切后	破坏应变 $\epsilon_f/\%$	
直径 D/cm				
高度 h/cm			破坏主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f/\text{kPa}$	
面积 A/cm^2				
体积 V/cm^3			破坏主应力 σ_{1f}/kPa	
质量 m/g			最大有效主应力比 $\left(\frac{\sigma'_1}{\sigma_3}\right)_{\max}$	
密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$				
干密度 $\rho_d/(\text{g}/\text{cm}^3)$			试样破坏情况的描述	
备注				

试验

计算

校核

表 13.6-3 三轴压缩试验记录计算表三

工程名称			试验日期									
试验依据			仪器名称及编号									
土样编号			试样编号									
周围压力/kPa			固结下沉量 Δh /cm									
剪切应变速率/(mm/min)			固结后高度 h_0 /cm									
测力计率定系数/(N/0.01mm)			固结后面积 A_0 /cm ²									
轴向变形 读数 Δh_1 (/0.01mm)	轴向应变 $\epsilon_1 = \frac{\Delta h_1}{h_c}$ /%	试样校正后 面积 $A_a = \frac{A_c}{1 - \epsilon_1}$ /cm ²	测力计 表读数 R (/0.1mm)	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		试样体积变化			有效大 主应力 σ'_3 /kPa	
						读数 /kPa	压力值 /kPa	排水管	体积变化	体变量 /cm ³		
				读数 /kPa	压力值 /kPa	读数 /cm ³	排出 水量 /cm ³	读数 /cm ³	体变量 /cm ³	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
				</								

14 三轴蠕变试验

14.1 一般规定

14.1.1 本试验目的是测定最大粒径 $\leq 60\text{mm}$ 粗粒土的蠕变特性，测定有关参数。

14.1.2 蠕变试验宜采用应力控制式加载。

14.2 设备和设施

14.2.1 主要设备和设施：

1 粗粒土的蠕变试验宜在高精度能长期恒压的应力控制式大型三轴压缩仪上进行。大型三轴仪的设备组成见 13.2.1 条 1 款的规定。

2 附属设备应符合 13.2.1 条 2 款的规定。

14.2.2 三轴仪使用前的检查：轴向压力系统、周围压力系统、压力室、橡皮膜和孔隙压力量测系统等应符合第 13.2.2 条的规定。

14.2.3 试验期间应保持试验室温度相对稳定，环境温度变化量允许偏差宜为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

14.3 操作步骤

14.3.1 试样制备应符合下列规定：

1 试样尺寸：试样的直径和高度应符合第 13.3.1 条 1 款的规定。

2 试样制备应按 13.3.1 条 2~9 款的规定，并量测试样的直径和高度。

14.3.2 试样饱和，应符合 13.3.2 条的规定，并进行饱和度的鉴别。

14.3.3 试样固结应符合 13.3.3 条 1 款、2 款的规定。

14.3.4 蠕变试验应按下列步骤进行：

1 将轴向位移计、体变管水位读数等清零。

2 对试样加载至预定轴向压力，并保持轴向应力不变。加载过程中可测读轴向测力计、轴向位移计、量水管水位读数等。

3 加载到设定的轴向荷载后，立即记录时间、轴向位移计、量水管水位读数。在整个蠕变试验过程中，应保持围压和轴向应力不变。

4 每隔一定时间记录时间、轴向位移计、量水管水位。时间可选为 0.2min、0.5min、1min、2min、3min、5min、10min、30min、60min、…，在蠕变试验中期和后期可数小时或十数小时读数一次。

5 蠕变稳定标准。当每 24h 内轴向应变的变化量小于 0.05‰，或 24h 的轴向应变小于累计蠕变轴向应变的 1‰～5‰ 时，可认为蠕变试验结束，停机、拆样。

6 蠕变试验一般 3～5 个围压，每个围压下取 3～4 级应力水平。

14.4 计算与记录

14.4.1 按公式 (14.4.1-1) 计算蠕变轴向应变，按公式 (14.4.1-2) 计算蠕变体积应变：

$$\epsilon_{1t} = \frac{\Delta h_t}{h_c} \times 100 \quad (14.4.1-1)$$

$$\epsilon_{vt} = \frac{\Delta V_t}{V_c} \times 100 \quad (14.4.1-2)$$

式中： ϵ_{1t} ——蠕变轴向应变，‰；

ϵ_{vt} ——蠕变体积应变，‰；

Δh_t ——剪切蠕变开始后到某时刻止试样的高度变化，cm；

ΔV_t ——剪切蠕变开始后到某时刻止试样的体积变化，通过体变管或排水量测， cm^3 ；

h_c ——试样固结后的高度， cm ；

V_c ——试样固结后的体积， cm^3 。

14.4.2 以时间为横坐标，以轴向应变 ϵ_{1t} 和体积应变 ϵ_{vt} 为纵坐标，绘制蠕变变形与时间的关系曲线，如图 14.4.2-1 和图 14.4.2-2 所示。

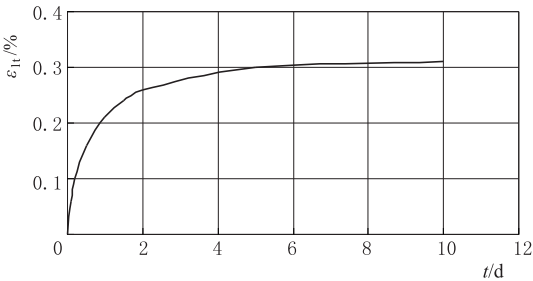


图 14.4.2-1 轴向应变与时间的
关系曲线示例

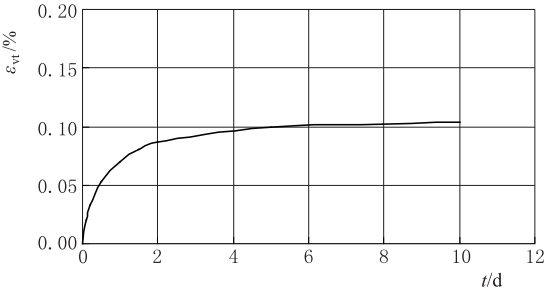


图 14.4.2-2 体积应变与时间的
关系曲线示例

14.4.3 计算记录可采用表 14.4.3 的格式。

15 三轴湿化变形试验

15.1 一般规定

15.1.1 本试验目的是测定最大粒径不大于 60mm 粗粒土的湿化变形特性，测定有关参数。

15.1.2 三轴湿化变形试验宜采用应力控制式加载，宜采用单线法进行试验。

15.2 设备和设施

15.2.1 仪器设备和设施应符合下列规定：

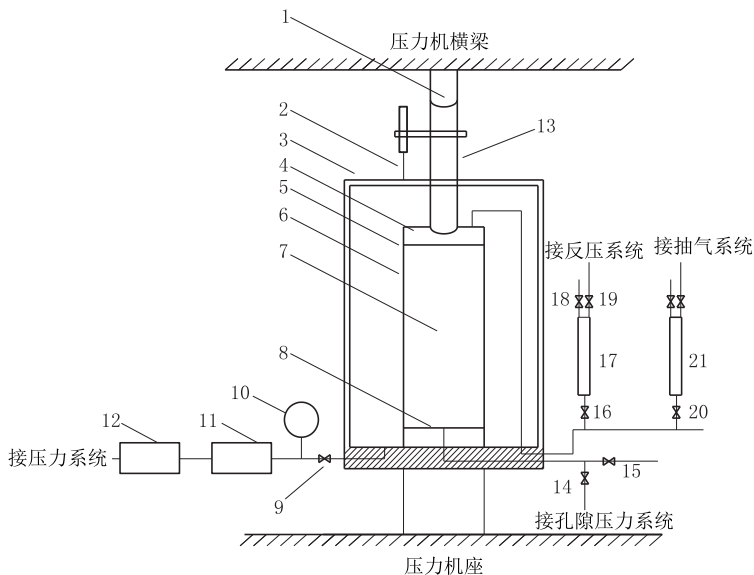


图 15.2.1 大型三轴压缩仪示意图

- 1—压力传感器；2—位移传感器；3—压力室；4—试样帽；5—上透水板；
6—橡皮膜；7—试样；8—下透水板；9—周围压力阀；10—压力表；
11—流量计（或外体变测量系统）；12—液压推缸；13—传力杆；
14—孔隙压力阀；15—进水管阀；16—排水阀；17—体变管；
18—通气阀；19—反压力阀；20—量水管阀；21—量水管

1 粗颗粒土湿化试验采用的大型三轴压缩仪的设备组成见 13.2.1 条 1 款的规定，还应增加应力控制式的高精度长期恒压装置和高精度的双向流量计（或外体变测量系统），如图 15.2.1 所示。

2 附属设备：应符合 13.2.1 条 2 款的规定。

15.2.2 三轴仪使用前的检查：轴向压力系统、周围压力系统、压力室和橡皮膜等应符合 13.2.2 条 1~4 款的规定。

15.2.3 试验期间应保持试验室温度相对稳定，环境温度变化量允许偏差宜为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

15.3 操作步骤

15.3.1 试样制备：

1 试样尺寸：试样的直径和高度应符合 13.3.1 条 1 款的规定。

2 试样制备应符合 13.3.1 条 2~9 款的规定，并测定试样的直径和高度。

15.3.2 试样固结应符合 13.3.3 条 1~2 款的规定。固结过程中排水阀应开启。

15.3.3 湿化试验：

1 将轴向位移计、流量计或外体变测量系统读数等清零。

2 对试样加载至预定轴向压力，并保持轴向应力不变。加载过程中可测读轴向测力计、轴向位移计、量水管水位读数等。

3 加载到设定的轴向荷载后，立即记录时间、轴向位移计、流量计或外体变测量系统读数。宜经过 3~5h，在围压和轴向应力作用下干样的变形就可稳定，宜采用 30min 内轴向应变的变化量小于 0.01% 作为稳定标准。稳定过程中也应测记时间、轴向位移计、流量计或外体变测量系统读数。

4 干样变形稳定后，保持周围压力和轴向应力不变，按照 13.3.2 条 2 款的规定进行水头饱和。在水头饱和过程中宜保持

水头压力恒定在 10kPa。

5 水头饱和过程中应记录时间、轴向位移计、流量计或外体变测量系统读数。

6 湿化后的稳定标准，宜采用 30min 内轴向应变的变化量小于 0.01% 作为稳定标准。

7 湿化变形稳定后，停机拆样。

8 宜进行 3~5 个围压，每个围压下 3~5 级应力水平下的湿化变形试验。

15.4 计算与记录

15.4.1 按公式 (15.4.1-1) 计算湿化轴向应变 ϵ_{1s} ，按公式 (15.4.1-2) 式计算湿化体积应变 ϵ_{vs} ：

$$\epsilon_{1s} = \frac{\Delta h_s}{h_c} \times 100 \quad (15.4.1-1)$$

$$\epsilon_{vs} = \frac{\Delta V_s}{V_c} \times 100 \quad (15.4.1-2)$$

式中： ϵ_{1s} ——湿化轴向应变，%；

ϵ_{vs} ——湿化体积应变，%；

Δh_s ——某时刻止湿化产生的试样高度变化，cm；

h_c ——试样固结后的高度， $h_c = h_0 - \Delta h_c$ ，cm；

ΔV_s ——某时刻止湿化产生的体积变化， cm^3 ；

V_c ——试样固结后的体积， cm^3 。

15.4.2 按公式 (15.4.2-1) 计算试样体积变形：

$$\Delta V_s = \Delta V' + 0.01\epsilon_{1s}h_cA_g \quad (15.4.2-1)$$

$$\text{其中} \quad A_g = \frac{1}{4}\pi D_g^2 \quad (15.4.2-2)$$

式中： $\Delta V'$ ——流量计或外体变测量系统读数变化， cm^3 ；

A_g ——传力杆的面积， cm^2 。选择传力杆 3 个位置，分

4 个角度用游标卡尺量测传力杆的直径，得到平均直径 D_g 。

15.4.3 以时间为横坐标，以轴向应变和体积应变为纵坐标，绘制湿化变形与时间的关系曲线，如图 15.4.3-1 和图 15.4.3-2 所示。

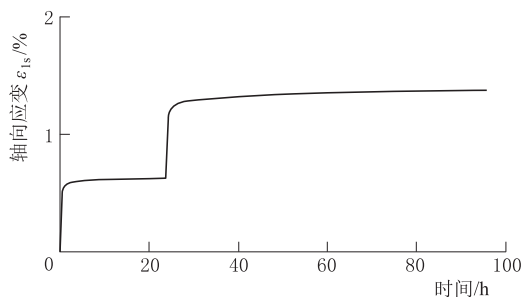


图 15.4.3-1 湿化轴向应变与时间的
关系曲线示例

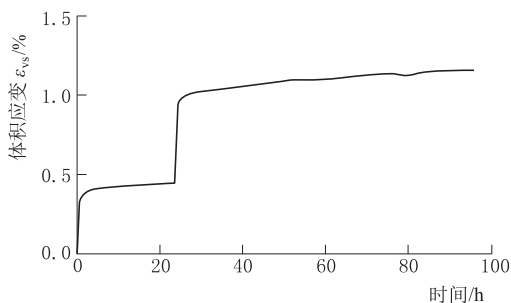


图 15.4.3-2 湿化体积应变与时间的
关系曲线示例

15.4.4 记录：

- 1 湿化试验前的记录格式见表 13.6-1～表 13.6-3。
- 2 湿化变形记录格式见表 15.4.4。

表 15.4.4 湿化试验记录表

工程名称 _____ 试验日期 _____

试验依据				仪器名称及编号			
土样编号				试样编号			
周围压力 σ_3 /kPa				轴向应力 σ_1 /kPa			
固结后高度 h_c /cm				剪切后高度 h_j /cm			
固结后面积 A_c /cm ²				剪切后面积 A_j /cm ²			
固结后体积 V_c /cm ³				剪切后体积 V_j /cm ³			
传力杆面积 A_g /cm ²				温度 /℃			
时间 /min	试样 高度变化 /cm	湿化轴向 应变 /%	流量计 读数 /cm ³	试样湿化 体积变化 /cm ³	湿化体积 应变/%	备注	
t	Δh_s	$\epsilon_{1s} = \frac{\Delta h_s}{h_c} \times 100$	$\Delta V'$	$\Delta V_s = \Delta V' - \Delta h_s A_g$	$\epsilon_{vs} = \frac{\Delta V_s}{V_c} \times 100$		

试验

计算

校核

16 三轴劣化变形试验

16.1 一般规定

16.1.1 粗粒土的劣化变形试验包含干-湿循环劣化变形试验和温度高-低循环劣化变形试验。

16.1.2 本试验适用于最大粒径不大于60mm 粗粒土的劣化变形特性测定，确定有关模型参数。

16.2 设备和设施

16.2.1 主要仪器设备与设施：

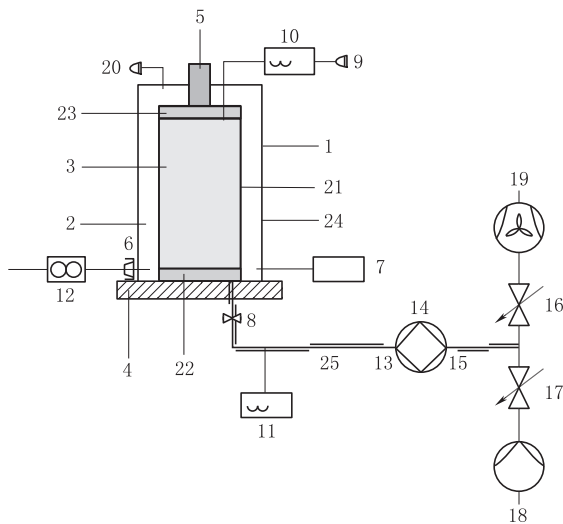


图 16.2.1 大型三轴劣化仪示意图

- 1—三轴压力室；2—围压腔；3—试样；4—压力室底座；5—轴压杆；
6—围压液进口；7—围压压力表；8—下排水阀；9—上排水阀；
10—上排水口温度传感器；11—下排水口温度传感器；12—高精度
体变位移计；13—压力调节泵出口；14—压力调节泵；15—压力调
节泵进口；16—气路阀门；17—水路阀门；18—冷热水产生装置；
19—冷热气产生装置；20—围压液出口；21—橡皮膜；22—下透水板；
23—上透水板；24—保温棉；25—通水管路

1 劣化变形试验宜在能长期恒压的应力控制式大型三轴劣化仪上进行,大型三轴劣化仪除包括第 13.2.1 条 1 款各系统外,增设劣化变形系统。劣化变形系统包含冷热水(气)循环装置、高精度外体变测量装置,上排水阀和下排水阀处的高精度温度传感器。大型三轴劣化仪示意图如图 16.2.1 所示。

2 附属设备:应符合 13.2.1 条 2 款的规定。

16.2.2 三轴劣化仪使用前,轴向压力系统、周围压力系统、压力室、体变量测系统和孔隙压力量测系统等应按 13.2.2 条 1~4 款的规定进行检查。

16.2.3 三轴劣化仪的传感器、压力室、透水板、橡皮膜等均耐高温和低温,温度劣化试验过程应做好保温措施。

16.3 操作步骤

16.3.1 试样制备应按下列步骤进行:

1 试样尺寸:试样的直径和高度应符合 13.3.1 条 1 款的规定。

2 按 13.3.1 条 2~9 款的规定,进行试样制备并测定试样的直径和高度。

16.3.2 试样如需饱和,应按 13.3.2 条 1~4 款的规定进行。

16.3.3 试样固结应按下列步骤进行:

1 施加周围压力至预定压力。

2 待外体变测量系统读数稳定后,清零读数。

3 开排水阀(对干样起排气作用),每隔 20~30s 测记外体变测量系统读数 ΔV 一次。经计算得到试样的体积变化 ΔV 。固结过程中绘制 $\Delta V \sim t$ 关系曲线,当曲线下段趋于水平时,即认为固结完成。

16.3.4 施加轴向应力应按下列步骤进行:

1 施加轴向应力应符合 13.3.4 条 1 款的规定,剪切至预定轴向压力后,保持轴向压力不变。剪切过程中应测记轴向荷载传

感器、位移计、外体变测量系统等的读数。

2 在围压和轴向应力作用下，当 30min 内试样的轴向应变变化量小于 0.01% 时，认为试样的变形稳定。

16.3.5 干湿循环劣化变形试验应按下列步骤进行：

1 干样变形稳定后，将轴向位移计、外体变测量系统等清零或记录劣化前的初始读数。

2 干样满足 16.3.4 条 2 款的变形稳定要求后，按 13.3.2 条 2 款的规定进行水头饱和，在试样饱和过程中，应保持试样中心部位水压恒定在 10kPa；当上排水口溢流稳定且无气泡溢出，30min 内试样的轴向应变变化量小于 0.01% 时，认为饱和样变形稳定。

3 打开上排水阀和下排水阀，排水 1h 后，从下排水阀通 $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 空气以继续排水并干燥试样，通气压力不超过 20kPa，当 30min 内试样的轴向应变变化量小于 0.01% 时，认为试样变形稳定。

4 本条 1~3 款为干湿劣化变形试验的 1 次循环，当本次循环的劣化轴向应变总量不大于 1‰，或本次循环的劣化轴向应变总量小于前次循环的 1/3，试验结束，停机、拆样。

5 干湿循环劣化变形试验围压根据工程需求确定，应力水平宜按 0、0.2、0.4、0.8 进行。

16.3.6 饱和样温度循环劣化变形试验应按下列步骤进行：

1 饱和样变形稳定后，将轴向位移计、外体变测量系统等清零或记录劣化前的初始读数。保持周围压力和轴向应力不变，开启冷热水循环装置，从下排水阀处通 $10^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 无气水，通水压力不超过 20kPa。

2 当上、下排水阀处水温差不超过 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 时，降低通入的水温 3°C ，如此继续直至上排水阀水温达到试验要求温度。当 30min 内轴向应变的变化量小于 0.01% 时，认为试样变形稳定。

3 升高下排水阀处通水温度 3°C ，当上、下排水阀处水温

差不超过 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 时,升高下排水阀通入水温 3°C ,如此继续直至上排水阀水温达到试验要求温度。当 30min 内轴向应变的变化量小于 0.01% 时,认为试样变形稳定。

4 本条1~3款为饱和样温度循环劣化变形试验的1次循环,当本次循环的劣化轴向应变总量不大于 1% ,或本次循环的劣化轴向应变总量小于前次循环的 $1/3$,试验结束,停机、拆样。

5 饱和样温度循环劣化变形试验围压根据工程需求确定,应力水平宜按 0 、 0.2 、 0.4 、 0.8 进行,试验循环温度宜根据当地气候条件确定。

16.3.7 温度循环三轴劣化变形试验,如采用环境温度箱改变三轴压力室及试样温度,或改变围压腔液温度,实现试样的冻融循环,应量测试样的即时温度,试样温度循环起始和变形稳定标准按16.3.6条1~5款执行。

16.4 计算与记录

16.4.1 试样固结后的体积 V_c 应按公式(16.4.1)计算:

$$\begin{aligned} V_c &= V_0 - (\Delta V' - \Delta h_c A_g) \\ &= V_0 - \left(\Delta V' - \frac{\Delta h_c \pi D_g^2}{4} \right) \end{aligned} \quad (16.4.1)$$

式中: V_c ——试样固结后的体积, cm^3 ;

V_0 ——试样初始体积, cm^3 ;

$\Delta V'$ ——外体变测量系统读数变化, cm^3 ;

Δh_c ——试样固结后下沉量,由轴向位移计测得, cm ;

A_g ——传力杆的面积, cm^2 ;

D_g ——平均直径, cm ,选择传力杆3个位置,分4个角度用游标卡尺量测传力杆的直径。

16.4.2 劣化轴向应变 ϵ_{1d} 、劣化体积应变 ϵ_{vd} 应按公式(16.4.2-1)、公式(16.4.2-2)计算:

$$\epsilon_{1d} = \frac{\Delta h_s - \Delta h_{sd}}{h_0 - \Delta h_c} \times 100 \quad (16.4.2-1)$$

$$\epsilon_{vd} = \frac{\Delta V_s}{V_c} \times 100 = \frac{\Delta V' - \Delta h_s A_g - \Delta V_{ss} - \Delta V_{sd}}{V_c} \times 100 \quad (16.4.2-2)$$

式中： ϵ_{1d} ——劣化轴向应变，‰；

ϵ_{vd} ——劣化体积应变，‰；

h_c ——试样固结后的高度，cm；

Δh_{sd} ——因温度引起传力杆的收缩高度，cm；

Δh_s ——某时刻止劣化产生的轴向变形，cm；

ΔV_s ——某时刻止劣化产生的体积变化， cm^3 ；

ΔV_{ss} ——某时刻止因温度引起围压液产生的体积变化， cm^3 ；

ΔV_{sd} ——某时刻止因温度引起压力室产生的体积变化， cm^3 。

ΔV_{ss} 和 ΔV_{sd} 可分别按公式（16.4.2-3）、公式（16.4.2-4）

计算：

$$\Delta V_{ss} = V_s \frac{K_{sT} - K_{st}}{K_{sT}} \quad (16.4.2-3)$$

$$\Delta V_{sd} = V_d \frac{K_{dT} - K_{dt}}{K_{dT}} \quad (16.4.2-4)$$

式中： V_s ——常温下围压液的体积， cm^3 ；

K_{sT} ——常温下围压液的体积膨胀系数；

K_{st} ——某时刻围压液的体积膨胀系数；

K_{dT} ——常温下压力室的体积膨胀系数；

K_{dt} ——某时刻压力室的体积膨胀系数。

16.4.3 以时间为横坐标，以劣化轴向应变或劣化体积应变为纵坐标，绘制劣化变形与时间的关系曲线。

16.4.4 计算记录格式见表 16.4.4。

表 16.4.4 三轴劣化变形试验记录表

工程名称 _____ 试验日期 _____

试验依据				仪器名称及编号			
试样编号				环境温度/℃			
周围压力 σ_3 /kPa				轴向应力 σ_1 /kPa			
固结后高度 h_c /cm				剪切后高度 h_j /cm			
固结后面积 A_c /cm ²				剪切后面积 A_j /cm ²			
固结后体积 V_c /cm ³				剪切后体积 V_j /cm ³			
传力杆面积 A_g /cm ²							
循环次数 /次	时间 /min	试样轴向变形 /cm	劣化轴向应变 /%	外体变 测量系 统读数 变化 /cm ³	试样劣化 体积变化 /cm ³	劣化体积 应变 /%	温度 /℃
N	T	Δh_s	$\epsilon_{ls} = \frac{\Delta h_s}{\Delta V'} \times 100$	$\Delta V'$	$\Delta V_s = \Delta V' - \Delta h_s A_g$	$\epsilon_{vs} = \frac{\Delta V_s}{V_c} \times 100$	

试验

计算

校核

17 CT 三轴试验

17.1 一般规定

17.1.1 本试验目的是观测粗粒土在不同加荷过程中试样颗粒破损、剪切带发展等内部细观结构演化过程。

17.1.2 试样直径选择宜根据 CT 设备参数进行，试样直径应不小于 5 倍最大土粒直径。当所采用的 CT 设备功率能确保图像清晰时，可采用更大直径的试样。

17.1.3 在三轴试验加载过程中，同步对试样进行 CT 扫描，记录不同加载时刻的应力、变形和试样内部每一点的 CT 数等。

17.2 设备和设施

17.2.1 主要设备和设施应符合下列规定：

1 CT 设备包括扫描系统、计算处理系统和图像显示系统。扫描系统由 X 射线球管、探测器和扫描架组成，示意图如图 17.2.1 所示。

2 三轴仪的结构、尺寸应与 CT 机相适应，包括三轴压力室、轴向加压设备、周围压力控制系统、量测系统等。CT 三轴仪宜采用分离结构，三轴压力室应采用无伪影材料。

3 应根据所使用 CT 设备的出厂要求控制试验场地的温度和湿度。

17.2.2 试验设备校准应符合下列规定：

1 CT 机每次开机应进行球管预热空气校准，校准时确保 CT 机处于空载状态。连续使用期间，每天应重启并进行球管预热空气校准一次。

2 每 3 个月采用空气与纯水对 CT 机扫描结果进行校准。空气的 CT 数为 -1024 ，纯水的 CT 数为 0 。

3 CT 三轴仪的检定、校准，使用前的检查应符合 13.2.2

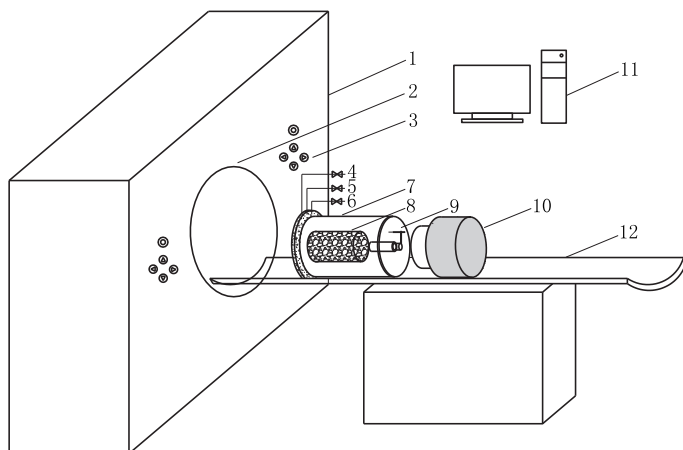


图 17.2.1 CT 三轴系统示意图

- 1—CT 机；2—射线球管；3—定位按钮；4—接围压系统；
5—进水口；6—排水口；7—CT 三轴压力室；8—试样；
9—测力计和位移计；10—轴向加压设备；
11—图像显示系统；12—CT 机扫描床

条的规定。

17.3 试验步骤

17.3.1 试样制备、安装、饱和、固结等步骤应符合 13.3.1～13.3.3 条的规定。

17.3.2 对试样先施加 5kPa 的轴向初始压力后，将 CT 三轴仪卧放于扫描床上。参照 CT 设备定位灯，调整扫描床高度与三轴仪位置，使试样中心处于 X 射线球管中心。

17.3.3 对试样进行定位扫描，设置扫描位置。宜对试样进行整体扫描。

17.3.4 设置适当的管电压、管电流、扫描间距等扫描参数，对试样进行断面扫描。管电压、管电流应确保 CT 断面切图清晰。

17.3.5 设置重建视野宽度、中心位置和层厚，重建横、纵剖面

图像。根据具体需要分析横、纵剖面特定区域的 CT 值、CT 方差，以及进行三维重组分析和后处理。

17.3.6 CT 三轴试验过程中，为反映试样内部结构的变化过程，CT 扫描次数应不少于 6 次，宜包括制样后、固结完成后、应力水平为 0.2、0.4、0.6、0.8 等状态。对于试验过程中应变速率较大的阶段，宜加密扫描。每次扫描过程的管电压、管电流应保持一致。对短周期三轴试验，应提前使试样就位，达到预定的时间、位移或荷载时立即进行扫描。对长周期三轴试验，在单次扫描完后三轴仪如需脱离 CT 机，应对 CT 机、三轴仪与试样的相对位置做好精确标记，重新放置时位置误差应小于 0.5mm。

17.4 计算与记录

17.4.1 根据不同时刻的 CT 图像，进行关键位置的前后对比分析内部结构变化过程。

17.4.2 成果整理与分析计算：

1 某图像点物体的 CT 数 H_{rm} 按公式 (17.4.2-1) 进行换算：

$$H_{rm} = 1000 \times \frac{\mu_{rm} - \mu_w}{\mu_w} \quad (17.4.2-1)$$

式中： H_{rm} ——某图像点物体的 CT 值， H_u ，纯水的 H_{rm} 为 0，空气的 H_{rm} 为 -1024；

μ_{rm} ——某图像点物体的 X 射线吸收系数；

μ_w ——纯水的 X 射线的吸收系数，取值为 1。

2 某物体单位密度质量 X 射线吸收系数 μ_m 按公式 (17.4.2-2) 计算：

$$\mu_m = \mu_{rm} / \rho_d \quad (17.4.2-2)$$

式中： ρ_d ——试样的干密度。

3 试样的局部密度 ρ 按公式 (17.4.2-3) 计算：

$$\rho = (H_{rm} \mu_w / 1000 + \mu_w) / \mu_m \quad (17.4.2-3)$$

17.4.3 CT 扫描记录可按表 17.4.3 采用，三轴试验记录可按

13.6 节的格式采用。

表 17.4.3 CT 三轴试验记录表

工程名称	试验日期
------	------

试验依据					仪器设备和编号				
土样编号						试样编号			
围压 /kPa				固结压力 /kPa				试样密度 /(g/cm ³)	
文件编号	轴向变形 /mm	轴压 /kN	体积变形 /cm ³	孔压 /kPa	管电流	管电压	扫描层厚	CT 均值	

校核

18 真 三 轴 试 验

18.1 一 般 规 定

18.1.1 真三轴试验适用于最大粒径不大于 60mm 的粗粒土，可测得复杂应力状态和复杂应力路径下粗粒土的变形特性和强度特性。

18.1.2 根据不同应力路径确定最小主应力、中主应力、最大主应力的加载过程线。

18.1.3 依据加载过程线同步施加最小主应力、中主应力、最大主应力进行加载，至试样破坏。

18.1.4 最小主应力的最大值宜根据工程实际荷载确定。

18.2 设 备 和 设 施

18.2.1 应采用下列主要设备和设施：

1 真三轴仪：包括压力室、最大主应力加压系统、中主应力加压系统、最小主应力加压系统、反压力系统等部分（图 18.2.1）。

2 量测设备：包括最大主应力、中主应力、最小主应力方向的轴向力、轴向变形量测系统，体变量测系统和孔隙水压力量测系统。

3 附属设备：包括对开成型筒、击实锤或振捣器、橡皮膜、台秤或天平、钢尺、秒表、瓷盘、烘箱等。

4 真三轴仪侧向加载板与试样接触面应有减小摩阻力措施。

18.2.2 真三轴仪使用前的检查：

1 最大主应力加压系统、中主应力加压系统、最小主应力加压系统运行正常。根据工程要求确定最小主应力 σ_3 的最大值，按 $\sigma_1 > 8\sigma_3$ 估算大主应力额定压力。轴向测力计的准确度不宜低于最大轴向压力的 1%。

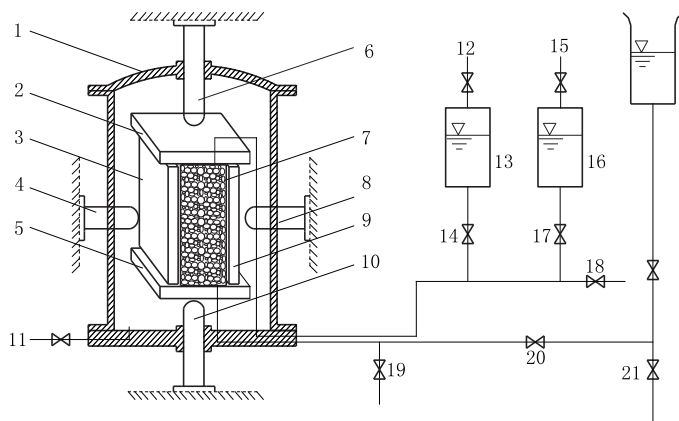


图 18.2.1 真三轴仪示意图

- 1—压力室；2—上刚性顶板（含透水板）；3—左水平刚性板；
 4—左水平加载系统；5—下刚性顶板（含透水板）；6—上轴
 向加载系统；7—试样；8—右水平加载系统；9—右水平刚性板；
 10—下轴向加载系统；11—接最小压力系统；12—接反压系统；
 13—体变管；14—反压阀；15—接抽气系统；16—量水管；
 17—量水管阀；18—放水阀；19—孔压阀；
 20—进水阀；21—排水阀

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，关闭压力阀、排水阀、孔隙压力阀等，以备使用。

3 橡皮膜应采用具有弹性的乳胶膜，厚度均匀，无气泡、无砂眼、不漏气，橡皮膜的厚度应根据试样尺寸选用，宜为 2~3mm。

18.3 试样制备

18.3.1 真三轴试样宜采用长方体样，试样长宽比宜为 1.0，高宽比宜大于 2.0，上下、前后、左右的六个面应平整，对立面应互相平行、侧面垂直。

18.3.2 真三轴试样制备应符合下列规定：

1 选择一定数量的代表性土样，经风干、碾碎、过筛，测定风干含水率。

2 根据试验要求的干密度、试样尺寸及填装层数称取试验所需土样，填装层数宜取 4~5 层。

3 按备样含水率计算所需加的水量，均匀喷洒在试样上，拌匀备用。

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水泡逸出，关闭进水阀门。

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，并使其顺直和紧贴在成型筒内壁。

6 装入第 1 层土样，均匀找平表面，用表面振动密实法使土样达到预计高度后，刮毛表面，再以同样方法填入第 2 层土样，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。

7 开真空泵从试样顶部抽气，使试样在 30~50kPa 负压下直立，去掉成型筒。

8 检查橡皮膜，对破裂处应立即修补，或拆样采用新橡皮膜重新制样。

18.3.3 真三轴试样饱和应符合下列规定：

1 真三轴试样饱和方法有抽气饱和、水头饱和、二氧化碳 (CO₂) 饱和、反压力饱和等方法，试样饱和时可根据试样渗透性选择，宜采用先二氧化碳 (CO₂) 饱和后水头饱和的方法，当饱和度达不到要求时，应采用反压力饱和。

2 饱和度的鉴别。如孔隙压力系数 $B \geq 0.95$ 时可以认为试样已达到饱和。如 $B < 0.95$ 时，则应继续饱和， B 值的计算按公式 (13.4.1-3) 计算。

3 抽气饱和、水头饱和、二氧化碳 (CO₂) 饱和方法按 13.3.2 条执行。

4 反压力饱和。在完成试样制备后，徐徐打开最小主应力

压力阀施加最小主应力 σ_3 ($\leq 50\text{kPa}$)，测记体变管读数、孔隙压力读数。开反压力阀，同时施加最小主应力和反压力，施加过程中，始终保持最小主应力比反压力大 50kPa ，每级增量宜为 50kPa ，每增加一级最小主应力和反压力后，测记稳定后的孔隙压力、反压力、最小主应力、体变管读数一次，直至孔隙压力增量与小主应力压力增加之比不小于 0.95 为止。

18.4 试验步骤

18.4.1 试验样品制备完成后，安装中主应力和最大主应力加载系统，向压力室内注满水后，关闭排水孔。按中主应力方向、最大主应力方向使荷载传感器、活塞与试样接触，并调零。

18.4.2 施加最小主应力至预定值，并保持恒定。打开排水阀，测记排水量。在固结过程中随时绘制排水量与时间的关系曲线。正常情况下，排水量趋于稳定，可认为固结完成。

18.4.3 固结完成后，按照中主应力方向、最大主应力方向的顺序控制活塞与试样接触。测记最大主应力方向和中主应力方向位移计读数，计算各方向固结变形量，测记排水量读数，计算固结排水量。

18.4.4 在控制程序中设定加载速率、应力路径、数据采集间隔，施加中主应力和最大主应力，开始真三轴剪切试验。加载速率宜采用应变控制，最大主应变增量速率宜为 $(0.1\% \sim 0.5\%) / \text{min}$ 。

18.4.5 加载过程中应保持试样中心点不动，对立面应变差应小于 5% 。

18.4.6 当最大主应力方向荷载值出现峰值时，应剪切至最大主应变再增加 $3\% \sim 5\%$ 为止，当最大主应力方向荷载值无峰值出现时，应剪切至最大主应变达到 15% 为止。

18.4.7 记录试验过程中的荷载、应变、排水量等。试验结束后，按顺序卸除最大主应力、中主应力、最小主应力。

18.4.8 打开压力室排气孔和排水阀，排去压力室内的水，卸除压力室罩和中主应力侧面板，揩干试样周围余水，去掉橡皮膜，

拆掉试样。

18.5 计 算 与 记 录

18.5.1 试样的高度、面积、体积可按表 18.5.1 计算：

表 18.5.1 试样高度、面积、体积计算表

项目	起始	固结后	剪切时校正值
试样高度/cm	H_0	$h_c = H_0 - (\Delta h_{1c} + \Delta h_{2c})$	
最大主应变 $\epsilon_1 / \%$		$\epsilon_{1c} = \frac{\Delta h_{1c} + \Delta h_{2c}}{H_0}$	$\epsilon_1 = \frac{\Delta h_{1i} + \Delta h_{2i}}{h_c}$
试样长度/cm	S_0	$s_c = S_0 - (\Delta s_{1c} + \Delta s_{2c})$	
中主应变 $\epsilon_2 / \%$		$\epsilon_{2c} = \frac{\Delta s_{1c} + \Delta s_{2c}}{S_0}$	$\epsilon_2 = \frac{\Delta s_{1i} + \Delta s_{2i}}{s_c}$
试样体积/cm ³	V_0	$V_c = V_0 - \Delta V_c$	
最小主应变 $\epsilon_3 / \%$		$\epsilon_{3c} = \frac{\Delta V_c}{V_0} - \epsilon_{1c} - \epsilon_{2c}$	$\epsilon_3 = \frac{\Delta V_i}{V_0} - \epsilon_1 - \epsilon_2$
试样宽度/cm	B_0	$b_c = \epsilon_{3c} B_0$	
最大主应力方向 试样面积/cm ²	A_{v0}	$A_{vc} = s_c b_c$	$A_v = s_c (1 - \epsilon_2) b_c (1 - \epsilon_3)$
中主应力方向 试样面积/cm ²	A_{s0}	$A_{sc} = h_c b_c$	$A_s = h_c (1 - \epsilon_1) b_c (1 - \epsilon_3)$

注： Δh_{1c} —最大主应力方向上端固结位移量，mm； Δh_{2c} —最大主应力方向下端固结位移量，cm； Δh_{1i} —最大主应力方向上端位移量，cm； Δh_{2i} —最大主应力方向下端位移量，cm； Δs_{1c} —中主应力方向左侧固结位移量，cm； Δs_{2c} —中主应力方向右侧固结位移量，cm； Δs_{1i} —中主应力方向左侧位移量，cm； Δs_{2i} —中主应力方向右侧位移量，cm； ΔV_c —固结排水量，cm³； ΔV_i —实测试样剪切时排水量，cm³。

18.5.2 最大主应力与最小主应力之差应按公式（18.5.2）计算：

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{P_{v1} + P_{v2}}{2A_v} \times 10^4 \quad (18.5.2)$$

式中： σ_1 ——最大主应力，kPa；

σ_3 ——最小主应力，kPa；

P_{v1} ——最大主应力方向上端荷载传感器读数，kN；

P_{v2} ——最大主应力方向下端荷载传感器读数，kN；

A_v ——试样剪切时最大主应力方向的面积， cm^2 。

18.5.3 中主应力与最小主应力之差应按公式 (18.5.3) 计算：

$$(\sigma_2 - \sigma_3) = \frac{P_{s1} + P_{s2}}{2A_s} \times 10^4 \quad (18.5.3)$$

式中： σ_2 ——中主应力，kPa；

P_{s1} ——中主应力方向左侧荷载传感器读数，kN；

P_{s2} ——中主应力方向右侧荷载传感器读数，kN；

A_s ——试样剪切时中主应力方向的面积， cm^2 。

18.5.4 应力不变量应按公式 (18.5.4-1) ~ 公式 (18.5.4-3) 计算：

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (18.5.4-1)$$

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (18.5.4-2)$$

$$q = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (18.5.4-3)$$

式中： b ——中主应力参数；

p ——球应力，kPa；

q ——偏应力，kPa。

18.5.5 洛德角 θ 按公式 (18.5.5) 计算：

$$\tan\theta = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sqrt{3}(\sigma_1 - \sigma_3)} = \frac{2b - 1}{\sqrt{3}} \quad (18.5.5)$$

18.5.6 依据需要，绘制应力应变关系曲线、强度与应力指标的关系曲线等。

18.5.7 真三轴试验数据记录可采用表 18.5.7 格式。

19 振动三轴试验

19.1 一般规定

19.1.1 振动三轴试验的目的是测试循环动应力条件下粗粒土的动变形、动强度、动力残余变形特性。

19.1.2 适用于最大粒径不大于 200mm 的粗粒土振动三轴试验。

19.1.3 动强度（或抗液化强度）特性试验，宜采用固结不排水振动试验条件。动变形特性试验，宜采用固结不排水振动试验条件。动力残余变形特性试验，宜采用固结排水振动试验条件。

19.2 设备和设施

19.2.1 应采用下列主要仪器设备和设施：

1 振动三轴仪：按激振方式可分为惯性力式、电磁式、电液伺服式及气动式等振动三轴仪；按加载方式的不同，可分为单向激振和双向激振振动三轴仪。其组成包括主机、静力控制系统、动力控制系统、量测系统、数据采集和处理系统。

- 1) 主机（图 19.2.1）：包括压力室和激振器等。
- 2) 静力控制系统：用于施加周围压力、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：用于施加振动荷载，包括液压油源、伺服控制器、伺服阀、动载作动器等。要求激振波形良好，拉压两半周幅值和持时基本相等，相差应小于 10%。
- 4) 量测系统：用于量测轴向载荷、轴向位移及孔隙水压力的传感器等组成。
- 5) 计算机控制、数据采集和处理系统：包括计算机、绘图和打印设备、计算机控制、数据采集和处理程序等。
- 6) 整个设备系统各部分均应有良好的频率响应，性能稳

定，误差不应超过允许范围。

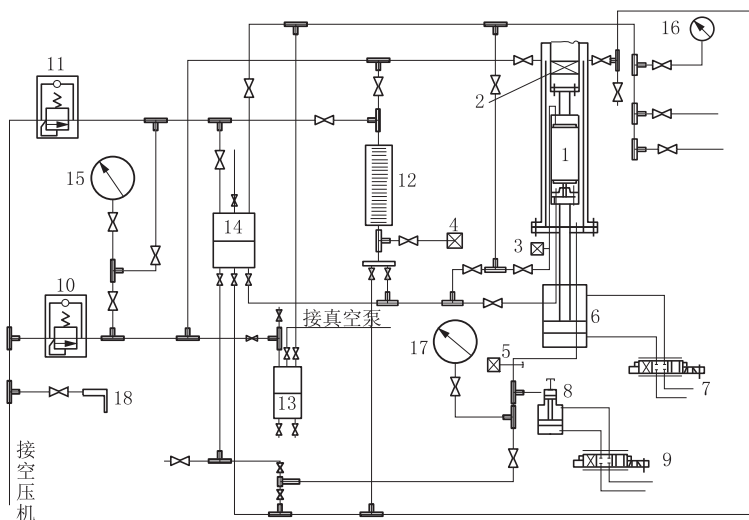


图 19.2.1 液压伺服振动三轴仪示意图

- 1—试样；2—轴向负荷传感器；3—孔压传感器；4—体变传感器；
5—侧压传感器；6—轴向作动器；7—轴向伺服阀；8—侧向作动器；
9—侧向伺服阀；10—侧压调压阀；11—反压调压阀；12—体变量管；
13—抽真空过渡缸；14—脱气水缸；15—压力表；
16—真空表；17—压力表；18—气枪

注：— 阀门

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、真空泵、磅秤、天平、钢尺、秒表、瓷盘、烘箱等。

19.2.2 振动三轴仪使用前应按下列规定进行检查：

1 轴向压力系统、周围压力系统运行正常。轴向荷载传感器的最大允许误差宜为 $\pm 1\%F.S.$ 。

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 橡皮膜应不漏水。

4 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完全排出为止。孔隙压力量测系统的体积因数，应小于 $1.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{kPa}$ 。

19.3 操作步骤

19.3.1 试样制备按 13.3.1 条进行。

19.3.2 试样饱和按 13.3.2 条进行。

19.3.3 试样固结应符合下列规定：

1 试样饱和后，使量水管水面位于试样中部，测记读数。关闭排水阀，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。

2 打开排水阀，每隔 20~30s 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。正常情况下，排水量应趋于稳定，即曲线的下段趋于水平，即认为固结完成。

3 如对试样施加反压力时，则应按 13.3.3 条 3 款的规定进行。然后保持反压力恒定，关闭排水阀，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起始读数。然后打开排水阀，让试样排水到体变管，进行排水固结。固结度至少达到 95%，固结完成后测记体变管水位、孔隙压力计和轴向位移计读数等，测定固结下沉量 Δh 。

4 固结完成后关闭排水阀，并计算振前干密度。

19.3.4 动强度（抗液化强度）试验应按下列步骤进行：

1 动强度（包括抗液化强度）特性试验为固结不排水振动三轴试验，试验中测定应力、应变和孔隙水压力的变化过程，根据一定的试样破坏标准，确定动强度（或抗液化强度）。对于等向固结试验，宜取双幅弹性应变等于 5%；对于不等向固结试

验，宜取试样的弹性应变与塑性应变之和等于 5%；对于可以达到初始液化的可液化土，也可采用初始液化作为破坏标准，应根据具体工程情况选取。

2 试样固结好后，在计算机控制界面中设定试验方案，包括相位差、侧向及轴向动荷载大小、振动频率、振动波形、振动次数等。动强度试验宜采用正弦波激振，振动频率宜根据实际工程动荷载条件确定振动频率，也可采用 1.0Hz。

3 在计算机控制界面中新建试验数据存储的文件。

4 关闭排水阀，并检查管路各个开关的状态，确认活塞轴上、下锁定处于解除状态。

5 当所有工作检查完毕，并确定无误后，点击计算机控制界面的开始按钮，试验开始。

6 当试样达到破坏标准后，再振 5~10 周停止振动。

7 试验结束后卸掉压力，关闭压力源。

8 描述试样破坏形状，必要时测定试样振后干密度，拆除试样。

9 对同一密度的试样，可选择 1~3 个固结比。在同一固结比下，可选择 1~3 个不同的周围压力。每一周围压力下用 4~6 个试样。可分别选择大约 10 周、20 周、30 周和 100 周等不同的振动破坏周次，按本条规定进行试验。

10 整个试验过程中的动荷载、动变形、动孔隙水压力及侧压力由计算机自动采集和处理。

19.3.5 动变形特性试验应按下列步骤进行：

1 在动变形特性试验中，根据振动试验过程中的轴向应力和轴向动应变的变化过程和应力应变滞回圈，计算动弹性模量和阻尼比。动变形特性试验宜采用正弦波激振，振动频率可根据工程需要选择确定。

2 试样固结好后，在计算机控制界面中设定试验方案，包括振动次数、振动的动荷载大小、振动频率和振动波形等。

3 在计算机控制界面中新建试验数据存储的文件。

4 关闭排水阀，检查管路各个开关的状态，确认活塞轴上、下锁定处于解除状态。

5 当所有工作检查完毕，并确定无误后，点击计算机控制界面的开始按钮，分级进行试验。试验过程中由计算机自动采集轴向动应力、轴向变形及试样孔隙水压力等的变化过程。

6 试验结束后卸掉压力，关闭压力源。

7 在需要时测定试样振后干密度，拆除试样。

8 在进行动弹性模量和阻尼比随应变幅的变化的试验时，每个试样宜进行 1 个动应力试验。当采用多级加荷试验时，同一干密度的试样，在同一固结应力比下，可选 1~5 个不同的侧压力试验，每一侧压力用 3~5 个试样，每个试样采用 4~5 级动应力，宜采用逐级施加动应力幅的方法，后一级的动应力幅值可控制为前一级的 2 倍左右，每级的振动次数不宜大于 10 次。应按本条 1~7 款的规定进行试验。

9 试验过程的试验数据由计算机自动采集、处理，并根据所采集的应力应变关系，画出应力应变滞回圈，整理出动弹性模量和阻尼比随应变幅的关系曲线。

19.3.6 动力残余变形特性试验应按下列步骤进行：

1 动力残余变形特性试验为饱和固结排水振动试验。根据振动试验过程中的排水量计算其残余体积应变的变化过程，根据振动试验过程中的轴向变形量计算其残余轴应变及残余剪应变的变化过程。

2 动力残余变形特性试验宜采用正弦波激振，振动频率可根据工程需要选择确定。

3 试样固结好后，在计算机控制界面中设定试验方案，包括动荷载、振动频率、振动次数、振动波形等。

4 在计算机控制界面中新建试验数据存储的文件。

5 保持排水阀开启，并检查管路各个开关的状态，确认活塞轴上、下锁定处于解除状态。

6 当所有工作检查完毕，并确定无误后，点击计算机控制

界面的开始按钮，试验开始。

7 试验结束后卸掉压力，关闭压力源。

8 在需要时测定试样振后干密度，拆除试样。

9 对同一密度的试样，可选择 1~3 个固结比。在同一固结比下，可选择 1~3 个不同的周围压力。每一周围压力下用 3~5 个试样，应按本条 1~8 款的规定进行试验。

10 整个试验过程中的动荷载、侧压力、残余体积变形和残余轴向变形由计算机自动采集和处理。根据所采集的应力应变（包括体应变）时程记录，整理需要的残余剪应变和残余体应变模型参数。

19.4 成果整理

19.4.1 试样的静、动应力指标应按下列规定计算：

1 固结应力比应按公式（19.4.1-1）计算：

$$K_c = \frac{\sigma'_{1c}}{\sigma'_{3c}} = \frac{\sigma_{1c} - u_0}{\sigma_{3c} - u_0} \quad (19.4.1-1)$$

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 轴向动应力应按公式（19.4.1-2）计算：

$$\sigma_d = \frac{W_d}{A_c} \times 10 \quad (19.4.1-2)$$

式中： σ_d ——轴向动应力，kPa；

W_d ——轴向动荷载，N；

A_c ——试样固结后截面积， cm^2 。

3 轴向动应变应按公式（19.4.1-3）计算：

$$\epsilon_d = \frac{\Delta h_d}{h_c} \times 100 \quad (19.4.1-3)$$

式中： ϵ_d ——轴向动应变，%；

Δh_d ——轴向动变形，mm；

h_c ——固结后试样高度，mm。

4 体积应变应按公式 (19.4.1-4) 计算：

$$\epsilon_v = \frac{\Delta V}{V_c} \times 100 \quad (19.4.1-4)$$

式中： ϵ_v ——体积应变，%；

ΔV ——试样体积变化，即固结排水量， cm^3 ；

V_c ——试样固结后体积， cm^3 。

19.4.2 动强度试验可按下列规定进行绘图和整理：

1 动强度（抗液化强度）计算应在试验记录的动应力、动变形和动孔隙水压力的时程曲线上，根据 19.3.4 条 1 款规定的破坏标准，确定达到该标准的破坏振次。相应于该破坏振次试样 45° 面上的破坏动剪应力比 τ_d/σ'_0 应按公式 (19.4.2-1) ~ 公式 (19.4.2-3) 计算：

$$\frac{\tau_d}{\sigma'_0} = \frac{\sigma_d}{2\sigma'_0} \quad (19.4.2-1)$$

$$\tau_d = \frac{\sigma_d}{2} \quad (19.4.2-2)$$

$$\sigma'_0 = \frac{\sigma'_{1c} + \sigma'_{3c}}{2} \quad (19.4.2-3)$$

式中： τ_d/σ'_0 ——试样 45° 面上的破坏动剪应力比；

σ_d ——试样轴向动应力，kPa；

τ_d ——试样 45° 面上的动剪应力，kPa；

σ'_0 ——试样 45° 面上的有效法向固结应力，kPa；

σ'_{1c} ——有效轴向固结应力，kPa；

σ'_{3c} ——有效侧向固结应力，kPa。

2 对同一固结应力条件进行多个试样的测试，以破坏动剪应力比 τ_d/σ'_0 为纵坐标，破坏振次 N_f 为横坐标，在单对数坐标上绘制破坏动剪应力比 τ_d/σ'_0 与破坏振次 N_f 的关系曲线，如图 19.4.2-1 所示。

3 对于工程要求的等效破坏振次 N ，可根据破坏动剪应力比 τ_d/σ'_0 与破坏振次 N_f 的曲线确定相应的破坏动剪应力比 $(\tau_d/\sigma'_0)_N$ 。并可根据工程需要，按不同表示方法，整理出动强度（抗液化强度）特性指标。

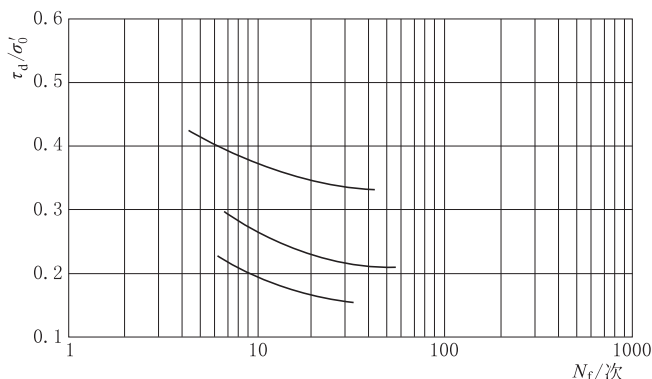


图 19.4.2-1 破坏动剪应力比 τ_d/σ'_0
与破坏振次 N_f 的关系曲线示例

4 在对动孔隙水压力数据进行整理时，可取动孔隙水压力的峰值；也可根据工程需要，取残余动孔隙水压力值。

5 当由于土的性能影响或仪器性能影响导致测试记录的孔隙水压力有滞后现象时，可对记录值进行修正后再作处理。

6 以动孔隙水压力为纵坐标，振次为横坐标，根据试验结果在单对数坐标上动孔隙水压力比与振次的关系曲线。

7 以动孔压比为纵坐标，以破坏振次 N_f 为横坐标，绘制振次 N 与动孔压比 $\Delta u/\sigma'_0$ 的关系曲线，如图 19.4.2-2 所示。

8 对于初始剪应力比相同的各个试验，可以动孔压比为纵坐标，动剪应力比为横坐标，绘制在固定振次作用下的动孔压比与动剪应力比的关系曲线；也可根据工程需要，绘制不同初始剪应力比与不同振次作用下的同类关系曲线。

9 根据工程需要或计算方法，整理等效破坏振次 N 下潜在破坏面上地震总应力抗剪强度或其他强动强度参数。

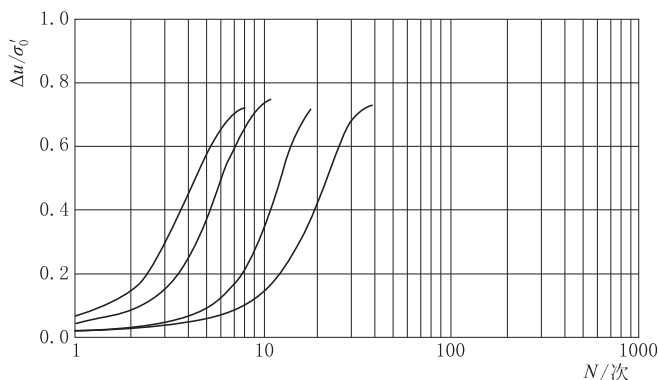


图 19.4.2-2 振次 N 与动孔压比 $\Delta u/\sigma'_0$ 的关系曲线示例

19.4.3 动弹性模量和阻尼比应按公式 (19.4.3-1)、公式 (19.4.3-2) 计算：

1 动弹性模量：

$$E_d = \frac{\sigma_d}{\epsilon_d} \times 100 \quad (19.4.3-1)$$

式中： E_d ——动弹性模量，kPa；

σ_d ——轴向动应力，kPa；

ϵ_d ——轴向动应变，‰。

2 阻尼比 λ ：

$$\lambda = \frac{1}{4\pi} \frac{A_z}{A_s} \quad (19.4.3-2)$$

式中： λ ——阻尼比；

A_z ——滞回圈 ABCDA (图 19.4.3-1) 的面积， cm^2 ；

A_s ——三角形 OAE 的面积， cm^2 。

3 动弹性模量和动剪切模量及动轴向应变幅和动剪应变幅之间，可按公式 (19.4.3-3)、公式 (19.4.3-4) 进行换算：

$$G_d = \frac{E_d}{2(1+\mu)} \quad (19.4.3-3)$$

$$\gamma_d = \epsilon_d (1+\mu) \quad (19.4.3-4)$$

式中： G_d ——动剪切模量，kPa；

μ ——泊松比；

γ_d ——动剪应变，‰。

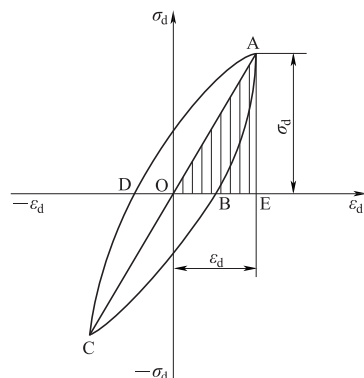


图 19.4.3-1 应力应变滞回圈示例

4 动弹性模量的倒数 $1/E_d$ 与动应变 ϵ_d 之间的关系可按公式 (19.4.3-5) 进行换算：

$$1/E_d = a + b\epsilon_d \quad (19.4.3-5)$$

式中： a 、 b ——拟合直线的截距和斜率。

绘制 ϵ_d/σ_d (即 $1/E_d$) 与动应变 ϵ_d 的关系曲线 (图 19.4.3-2)，将曲线切线在纵轴上的截距作为最大动弹性模量 E_{dmax} 。有

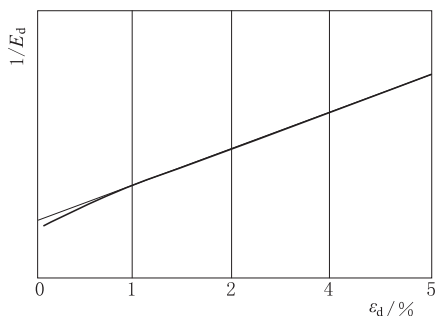


图 19.4.3-2 最大动弹性模量的确定示意图

条件时，可将在微小应变（ $\epsilon_d \leq 10^{-5}$ ）测得的动弹性模量作为最大动弹性模量 E_{dmax} 。

5 在双对数坐标图上绘制最大动弹性模量 E_{dmax} 与 45° 面上的有效法向应力（或平均有效主应力） σ'_0 的关系曲线，如图 19.4.3-3 所示。该曲线可用公式（19.4.3-6）表达：

$$\frac{E_{dmax}}{P_a} = k' \left(\frac{\sigma'_0}{P_a} \right)^n \quad (19.4.3-6)$$

式中： E_{dmax} ——最大动弹性模量，kPa；

P_a ——大气压，kPa；

k' ——系数；

n ——指数。

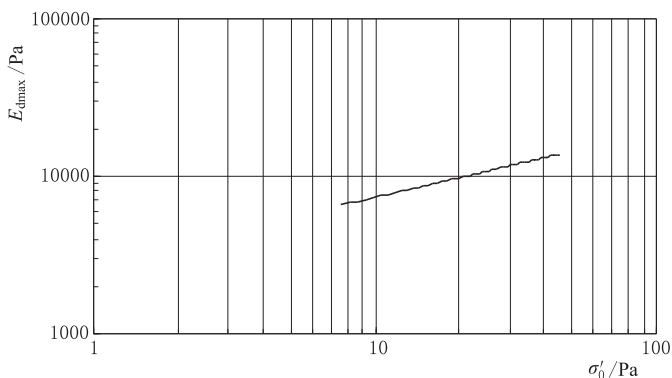


图 19.4.3-3 最大动弹性模量 E_{dmax}/P_a 与 45° 面上有效法向应力 σ'_0/P_a （或平均有效主应力）的关系曲线

45° 面上的有效法向应力按公式（19.4.3-7）计算：

$$\sigma'_0 = \frac{\sigma'_{1c} + \sigma'_{3c}}{2} \quad (19.4.3-7)$$

平均有效主应力按公式（19.4.3-8）计算：

$$\sigma'_0 = \frac{\sigma'_{1c} + 2\sigma'_{3c}}{3} \quad (19.4.3-8)$$

6 根据试验结果, 在半对数坐标图上, 绘制不同固结应力条件下的动弹性模量比和阻尼比与动应变的关系曲线, 如图 19.4.3-4 所示。

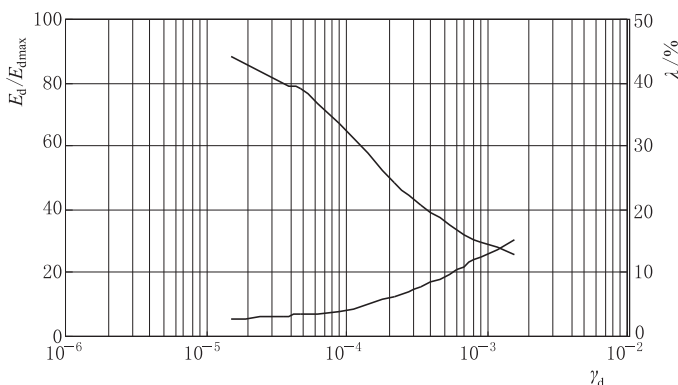


图 19.4.3-4 动弹性模量比和阻尼比与
动应变的关系曲线

19.4.4 动力残余变形计算和整理可按下列步骤进行:

1 根据所采用计算模型和计算方法要求, 对每个试样试验可分别整理残余体积应变 ϵ_v 、残余轴应变 ϵ_p 与振次 N 关系曲线的试验结果, 如图 19.4.4-1、图 19.4.4-2 所示。

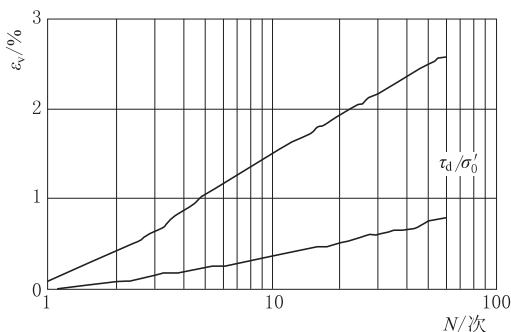


图 19.4.4-1 残余体积应变与振次关系曲线示例

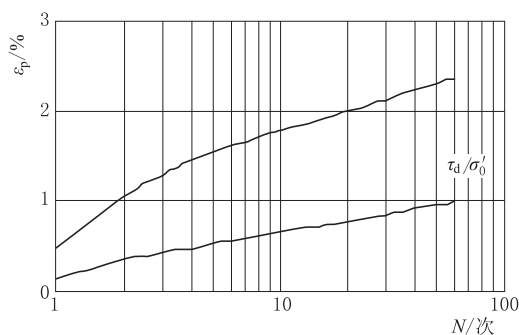


图 19.4.4-2 残余轴向应变与振次
关系曲线示例

2 根据上述残余体积应变、残余轴向应变与振次关系的试验曲线，绘制工程要求的等效破坏振次下，不同固结应力条件的残余体积应变、残余轴向应变与动剪应力比的关系曲线，如图 19.4.4-3、图 19.4.4-4 所示。也可根据具体采用的计算模型和计算方法整理其他类似关系。

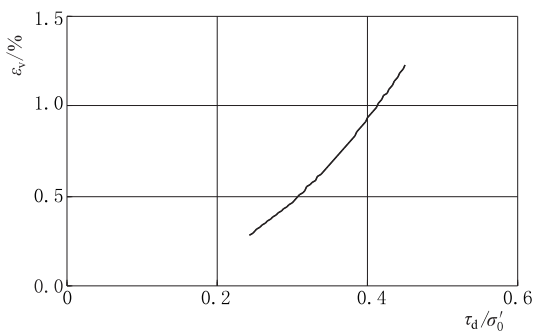


图 19.4.4-3 残余体积应变与动剪应力比的
关系曲线示例

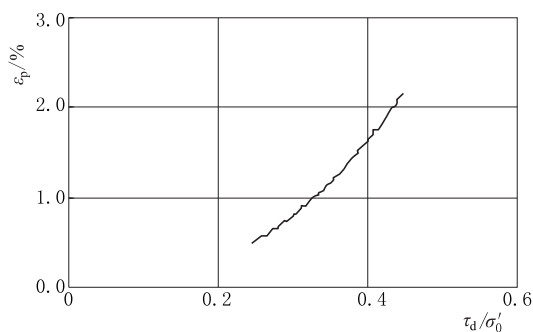


图 19.4.4-4 残余轴向应变与动剪应力比的关系曲线示例

19.5 超大振动三轴试验的特殊要求

19.5.1 超大三轴振动试验适用于最大粒径为 100~200mm 的粗粒土。

19.5.2 试样制备按 13.5.2 条 1 款的规定进行。

19.5.3 试样饱和按 13.5.3 条 2 款的规定进行。

19.6 记 录

19.6.1 振动三轴动强度（或抗液化强度）试验记录见表 19.6.1-1、表 19.6.1-2。

19.6.2 振动三轴动变形特性试验记录见表 19.6.2-1、表 19.6.2-2。

19.6.3 振动三轴动力残余变形特性试验记录见表 19.6.3-1、表 19.6.3-2。

表 19.6.1-1 振动三轴动强度（或抗液化强度）试验记录表一

工程名称 _____ 试验日期 _____

试验依据		仪器名称及编号	
土样编号		试样编号	
固结前	固结后	固结条件	试验条件和破坏标准
试样直径 d/mm	试样直径 d_c/mm	固结应力比 K_c	轴向动荷载 W_d/kN
试样高度 h/mm	试样高度 h_c/mm	轴向固结应力 σ_{1c}/kPa	侧向动荷载 σ_{3d}/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	相位差 / $^\circ$
体积量管读数 V_1/cm^3	体积量管读数 V_2/cm^3	固结排水量 Δ/cm^3	振动频率 f/Hz
试样体积 V/cm^3	试样体积 V_c/cm^3	固结变形量 $\Delta h/\text{mm}$	等压时孔压 破坏标准 / kPa
试样干密度 $\rho_d/(\text{g}/\text{cm}^3)$	试样干密度 $\rho_d/(\text{g}/\text{cm}^3)$		等压时应变 破坏标准 / $\%$
			偏压时应变 破坏标准 / $\%$
			振后高度 / mm
试样破坏情况描述			
备注			

试验

计算

校核

表 19.6.1-2 振动三轴动强度（或抗液化强度）试验记录表二

工程名称_____试验日期_____

试验依据		仪器名称及编号		
土样编号		试样编号		
振次 /次	动变形 $\Delta h_d/\text{mm}$	动应变 $\varepsilon_d/\%$	动孔隙压力 u_d/kPa	动孔压比 u_d/σ'_0

试验 计算 校核

表 19.6.2-1 振动三轴动变形特性试验记录表一

工程名称_____试验日期_____

试验依据		仪器名称及编号								
土样编号		试样编号								
固结前		固结后		固结条件及振动试验条件						
试样直径 d/mm		试样直径 d_c/mm		固结应力比						
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						
体积量管读数 V_1/cm^3		体积量管读数 V_2/cm^3		固结排水量 $\Delta V/\text{cm}^3$						
试样体积 V/cm^3		试样体积 V_c/cm^3		固结变形量 $\Delta h/\text{mm}$						
试样干密度 $\rho_d/(\text{g}/\text{cm}^3)$		试样干密度 $\rho_d/(\text{g}/\text{cm}^3)$		振动频率 f/Hz						
级数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
每级动荷载/kN										
备注										

试验 计算 校核

表 19.6.2-2 振动三轴动变形特性试验记录表二

工程名称_____ 试验日期_____

试验依据		仪器名称及编号			
土样编号		试样编号			
振次 /次	动应力 σ_d/kPa	动变形 $\Delta h_d/\text{mm}$	动应变 $\epsilon_d/\%$	动弹性模量 E_d/kPa	阻尼比 $\lambda/\%$

试验

计算

校核

表 19.6.3-1 振动三轴动力残余变形特性试验记录表一

工程名称_____ 试验日期_____

试验依据				仪器名称及编号			
土样编号				试样编号			
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		动荷载 /kN	
试样高度 h/mm		试样高度 h_c/mm		轴向固结应力 σ_{1c}/kPa		振动频率 f/Hz	
试样面积 A/cm^2		试样面积 A_c/cm^2		侧向固结应力 σ_{3c}/kPa		振动次数 /次	
体质量管读数 V_1/cm^3		体质量管读数 V_2/cm^3		固结排水量 $\Delta V/\text{cm}^3$		振后排水量 /cm ³	
试样体积 V/cm^3		试样体积 V_c/cm^3		固结变形量 $\Delta h/\text{mm}$		振后高度 /mm	
试样干密度 $\rho_d/(\text{g}/\text{cm}^3)$		试样干密度 $\rho_d/(\text{g}/\text{cm}^3)$					
试样破坏情况描述							
备注							

试验

计算

校核

表 19.6.3-2 振动三轴动力残余变形特性试验记录表二

工程名称 _____ 试验日期 _____

试验依据		仪器名称及编号		
土样编号		试样编号		
振次 /次	动残余体积变形 /cm ³	动残余轴向变形 /mm	残余体应变 $\epsilon_{vr}/\%$	动残余轴向应变 $\epsilon_d/\%$

试验

计算

校核

20 动力触探试验

20.1 一般规定

20.1.1 动力触探试验目的是通过测定在标准锤重、落距和贯入度下的锤击数和动贯入阻力，进而确定粗粒土的密度、模量和强度等特性。

20.1.2 动力触探试验根据锤击能量分为重型和超重型 2 种。重型动力触探适用于粒径在 2~60mm 的粗粒土；超重型动力触探适用于粒径大于 60mm 的粗粒土。

20.2 设备和设施

20.2.1 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 20.2.1 所列。

表 20.2.1 动力触探设备规格

设备类型		重型	超重型
落锤	质量 m/kg	63.5 ± 0.5	120 ± 1
	落距 H/cm	76 ± 2	100 ± 2
探头	直径/ mm	74	74
	截面积/ cm^2	43	43
	圆锥角/ $^\circ$	60	60
触探杆	直径/ mm	42, 50	50~63
	每米质量/ kg	<8	<12
	锤座质量/ kg	10~15	
指标		贯入 10cm 的读数 $N_{63.5}$	贯入 10cm 的读数 N_{120}

20.2.2 为保证锤击能量的恒定，动力触探设备应采用固定落距的自动落锤装置。

20.2.3 探头的尺寸见表 20.2.1 和图 20.2.3。重型和超重型动

力触探探头直径的最大允许磨损尺寸为2mm；探头尖端的最大允许磨损尺寸为5mm。

20.2.4 触探杆最大偏斜度不应超过2%，锤击贯入应连续进行；防止锤击偏心、探杆倾斜和侧向晃动，保持锤座、导向杆与触探杆的轴中心成一直线。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0.2mm。重型和超重型动力触探的锤座直径应小于100mm，并不大于锤底面直径的一半。锤座和导杆的总质量不应超过30kg。

20.2.5 锤击速率每分钟宜为15～30击，每贯入1m，宜将探杆转动一圈半，当贯入深度超过10m，每贯入20cm宜转动探杆一次，使探杆能保持垂直贯入，并减少探杆的侧阻力，每一孔触探孔应连续贯入，只是在接探杆时方可停顿。

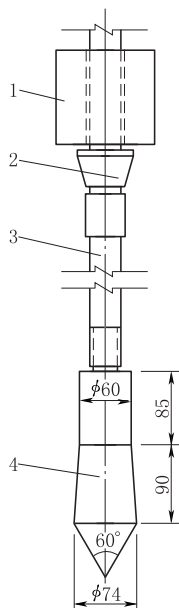


图 20.2.3 动力触探
试验装置示意图
(单位：mm)

1—穿心锤；2—锤垫；
3—触探杆；4—探头

20.3 操作步骤

20.3.1 重型动力触探试验应采用下列步骤：

1 试验前将触探架安装平稳，使触探保持垂直地进行，触探杆应保持平直，连接牢固。

2 贯入时，应使穿心锤自由下落，落锤落距为 $0.76\text{m} \pm 0.02\text{m}$ 。地面上的触探杆的高度不宜过高，以免倾斜与摆动太大。

3 贯入过程应连续进行，所有超过5min的间断都应在记录中予以注明。

4 及时记录每贯入0.10m所需的锤击数。其方法可在触探

杆上每隔 0.10m 划出标记，然后直接（或用仪器）记录锤击数；也可记录每一振击的贯入度，然后再换算为每贯入 0.10m 所需的锤击数。

5 对于圆砾和卵石，触探深度不宜超过 15m，超过该深度时，应考虑触探杆的侧壁摩阻影响。

6 每贯入 0.10m 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，应改用超重型动力触探。

7 本试验也可在钻孔中分段进行。宜先进行贯入，然后进行钻探直至动力触探所及深度以上 1m 处，取出钻具将触探器放入孔内再进行贯入。

8 本试验宜用于贯入深度小于 15m 的情况，当超过 15m 时，应考虑探杆侧壁摩阻的影响。

20.3.2 超重型动力触探试验应采用下列步骤：

1 贯入时穿心锤自由下落，落距为 $100\text{mm} \pm 2\text{mm}$ 。贯入深度不宜超过 20m，超过该深度时，应考虑触探杆侧壁摩阻的影响。

2 其他步骤可参照 20.3.1 条 1~4 款的规定进行。

3 对于超重型 N_{120} 的正常击数在 3~40 击，击数超过这个范围，如遇软，可记录每击的贯入度，如遇硬土层可记录一定击数下的贯入度。

20.4 计算与记录

20.4.1 可按公式 (20.4.1-1)、公式 (20.4.1-2) 计算触探指标：

$$N_{63.5} = \frac{100}{e} \quad (20.4.1-1)$$

$$e = \frac{\Delta S}{n} \quad (20.4.1-2)$$

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。

20.4.2 按公式 (20.4.2) 计算动贯入阻力:

$$q_d = \frac{Q^2}{(Q+q)} \frac{H}{Ae} \times 1000 \quad (20.4.2)$$

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。

20.4.3 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 20.4.3 所示。

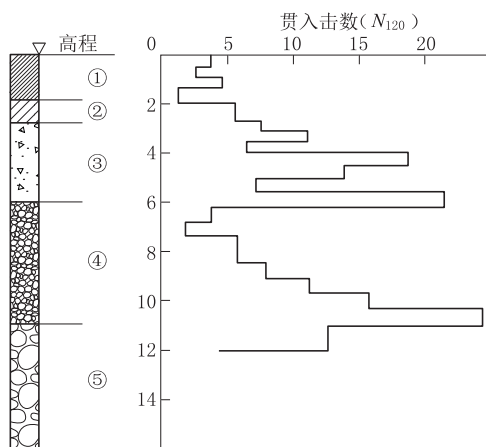


图 20.4.3 触探曲线

20.4.4 本试验记录格式见表 20.4.4。

表 20.4.4 动力触探试验记录计算表

工程名称_____试验日期_____

试验依据				仪器名称及编号			
孔号				试样编号			
试验地点			地下水位/m			探杆质量/kg	
孔口标高/m			探杆直径/mm			锤座质量/kg	
触探杆 总长 /m	触探 深度 /m	一阵锤 击数 /击	贯入度 /mm	每贯入 0.1m 锤击数 /击	小层累积 贯入度 /mm	小层平均 锤击数 /击	说明
试验		计算			校核		

21 旁 压 试 验

21.1 一 般 规 定

21.1.1 本试验目的是通过测定钻孔一定位置的粗粒土旁压与位移曲线，反映一定密度和围压下，一定范围的粗粒土变形特性和强度特性，确定模量和极限承载力，反演分析本构模型参数，也可用于深厚覆盖层的密度确定。

21.1.2 本试验可应用于天然覆盖层砂砾料和人工粗粒土碾压层。

21.2 设 备 和 设 施

21.2.1 旁压仪由旁压器、加压稳压装置和变形量测装置及导管等部分组成，如图 21.2.1 所示。

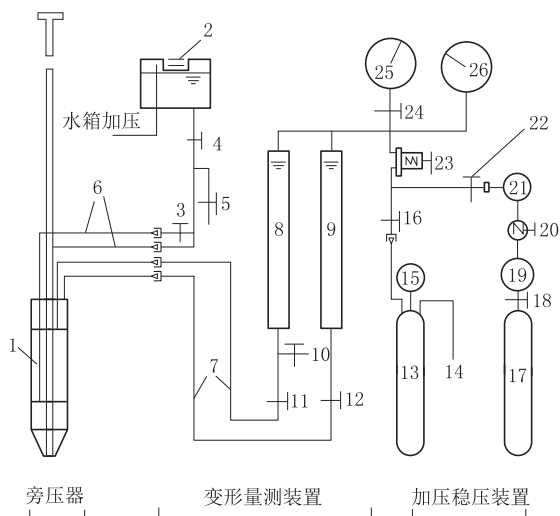
21.2.2 仪器设备应符合以下规定：

1 旁压器：为圆柱形骨架，外套有密封的弹性膜。预钻式宜分上、中、下三腔。中腔为测试腔，上、下腔为辅助腔。上、下腔用金属管连通，而与中腔严密隔离。在弹性膜外按需要可加装一层可扩张的金属保护套（铠装或开缝管保护），其规格如表 21.2.2 所列。旁压器及开缝管如图 21.2.2 所示。

2 加压稳压装置：压力源为高压氮气或人工打气，并附有加压稳定调节阀和压力表。其量程和准确度见表 21.2.2。

3 变形量测装置：宜由体变管（量管）或液位仪及辅管组成，其量程和准确度见表 21.2.2。也可采用横向变形传感器直接测出径向变形。其技术条件应符合《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》GB/T 15406 的规定。

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。



21.2.1 旁压仪结构示意图

- 1—旁压器；2—水箱；3—中空注水阀；4—注水阀；5—排水阀；
6—注水管；7—导压管；8—测管；9—辅管；10—调零阀；
11—测管阀；12—辅管阀；13—储气罐；14—手动加压；
15—中压表；16—手动加压阀；17—高压氮气源；
18—氮气加压阀；19—高压表；20—减压阀；
21—中压表；22—氮气加压阀；23—调压阀；
24—低压表阀；25—低压表；26—中压表
注：—快速接头

表 21.2.2 旁压仪规格

旁 压 器				体变管		压 力		量管 截面积 /cm ²
外径 /mm	中空 长度 /mm	总长度 /mm	总长度 (外径) /cm	量程 /cm ³	准确度 /%	量程 /MPa	准确度 /%	
44~90	200~ 250	120~ 980	4~10	0~ 1000	1.5	0~ 10.0	1.5	13.2~ 34.5

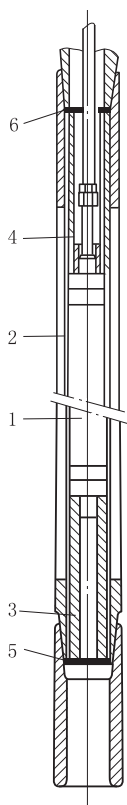


图 21.2.2 旁压器示意图

1—探头；2—开缝护管；3—下减震器；4—上减震器；
5—下垫圈；6—上垫圈

21.3 操作步骤

21.3.1 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。壁应垂直、呈完整的圆形，宜减少孔壁土体扰动。

21.3.2 钻孔时，若遇松散砂层和软土地层时，应用泥浆护壁钻进。钻孔孔径应大于旁压器外径 2~10mm。

21.3.3 试验点布置原则：应保证旁压器上、中、下三腔都在同一土层中，试验点垂直间距不宜小于 1m。试验孔与已有钻孔的

水平距离不宜小于 1m，取完土样或做过标贯试验的部位不得进行旁压试验。

21.3.4 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。

21.3.5 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。

21.3.6 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。在此过程中应不停地拍打尼龙管并摇晃旁压器，以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，也可向水箱稍加压力。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。

21.3.7 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。

21.3.8 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。

21.3.9 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 100~200kPa，然后缓慢地按顺时针方向调节高压阀并调到所需的试验压力。

21.3.10 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 100~200kPa 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。

21.3.11 加压等级宜为预计极限压力的 $1/8 \sim 1/12$ ，初始加荷等级可取小值。必要时可做卸荷再加荷试验，测定再加荷旁压模量。

21.3.12 各级压力下的相对稳定时间标准为 1min 或 2min。维持 1min 时，加荷后 15s、30s、60s 测读变形量，维持 2min 时，

加荷后 15s、30s、60s、120s 测读变形量。

21.3.13 当测量腔的扩张体积相当于量测腔的固有体积时，或试验压力达到仪器的容许最大压力时，应立即终止试验。

21.3.14 试验结束后，采取以下方法使弹性膜恢复原状：

1 试验深度 $< 2\text{m}$ 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 $\geq 2\text{m}$ 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。

21.3.15 终止试验消压后，应等 $2\sim 3\text{min}$ 后才能取出旁压器，并仔细检查、擦洗、装箱。

21.3.16 当需进行下一试验点时，重复 21.3.3~21.3.15 条进行。

21.4 计算和记录

21.4.1 压力和体积变形校正：

1 按公式 (21.4.1-1) 计算校正压力：

$$p = p_m + p_w - p_i \quad (21.4.1-1)$$

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，附录 C。

2 按公式 (21.4.1-2) 校正变形量：

$$V = SA \quad (21.4.1-2)$$

$$S = S_m - a(p_m + p_w) \quad (21.4.1-3)$$

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 。

21.4.2 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 21.4.2 所示。也可绘制压力和量管水位变化曲线。作图比例: 纵坐标以 1cm 代表体积变量 100cm^3 , 横坐标 (压力 p 值) 以 1cm 代表 100kPa 。或根据具体情况选择比例标准。图幅尺寸宜为 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 。

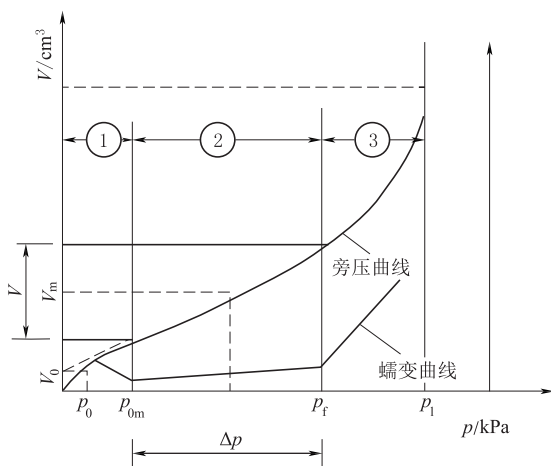


图 21.4.2 旁压曲线示例

21.4.3 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

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 ($V_l = V_c + 2V_0$ ， 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。

21.4.4 从三个压力特征值确定承载力的基本值 f_{ak} 。

1 临塑压力法：

$$f_{ak} = p_f - p_0 \quad (21.4.4-1)$$

2 极限压力法：

$$f = (p_l - p_0) / F \quad (21.4.4-2)$$

式中： p_0 ——原位水平土压力，kPa；

F ——安全系数。

21.4.5 按公式 (21.4.5) 计算不排水抗剪强度：

$$c_u = p_f - p_0 \quad (21.4.5)$$

21.4.6 按公式 (21.4.6) 估算侧压力系数：

$$K_0 = \frac{p_0}{z\gamma} \quad (21.4.6)$$

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。

21.4.7 按公式 (21.4.7) 计算旁压模量 E_m 值：

$$E_m = 2(1 + \mu)(V_c + V_m) \frac{\Delta p}{\Delta V} \quad (21.4.7)$$

式中： E_m ——旁压模量，即由旁压试验确定的模量，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。

21.4.8 反演模型参数：

1 将旁压试验的荷载～体积曲线转换为荷载～位移曲线，

22 载 荷 试 验

22.1 一 般 规 定

22.1.1 载荷试验反映了承压板下 2.0~3.0 倍承压板直径（或宽度）的深度范围内土体强度、变形的综合性状，用于测定承压板下应力主要影响范围内岩土承载力和变形模量，也可用于反演分析本构模型参数。

22.1.2 载荷试验每个场地试验点不宜少于 3 个，土体不均匀时，应适当增加试验点，不同试验点之间的距离应大于承压板直径或边长的 6 倍以上。

22.1.3 载荷试验根据载荷反力机构的差异和适用范围的不同，分为堆载、锚桩反力、洞内载荷试验等，其中堆载和锚桩反力载荷试验适用于天然地基土（层）和人工填筑土（层），洞内载荷试验适用于人工填筑土（层）。

22.2 堆载和锚桩反力载荷试验

22.2.1 应采用下列主要设备和设施：

1 承压板：承压板应具有足够的刚度，可采用圆形或正方形钢质板，承载板直径或边长与土体最大粒径之比应不小于 5。

2 压力源：由液压千斤顶、液压油源、油源（压力）控制和测量系统组成，其出力误差不得大于全量程的 1%；压力源的最大负荷应为试验荷载的 120%。

3 加荷装置：可采用堆载法或锚桩法加载。反力由主梁传递到副梁，副梁再与反力锚桩或堆载重物连接，整个系统必须牢固稳定、安全可靠，其承受能力不小于试验最大荷载的 1.5~2.0 倍。堆载或反力锚桩布置还应符合下列要求：

1) 采用堆载法时，堆载支撑体应在试验点影响范围（不小于承载板直径或边长的 1.5 倍）以外。

- 2) 采用锚桩法时，锚桩钻孔应布置在试验点影响范围（小于承载板直径或边长的 1.5 倍）以外的对称部位。
- 4 传力设备：包括垫板等传力构件。
- 5 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，其允许精度应为 $\pm 0.01\text{mm}$ 。
- 6 其他设备：水平尺、铁锹等辅助设备和工具。
- 7 堆载反力载荷试验机构如图 22.2.1-1 所示，锚桩反力载荷试验机构如图 22.2.1-2 所示。

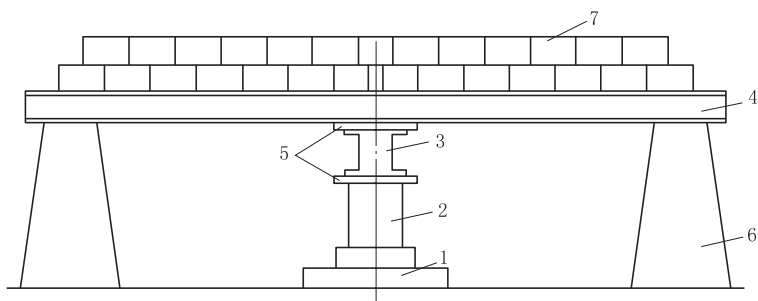


图 22.2.1-1 堆载反力载荷试验机构示意图

1—承压板；2—千斤顶；3—主梁；4—副梁；5—垫板；
6—支撑体；7—堆载重物

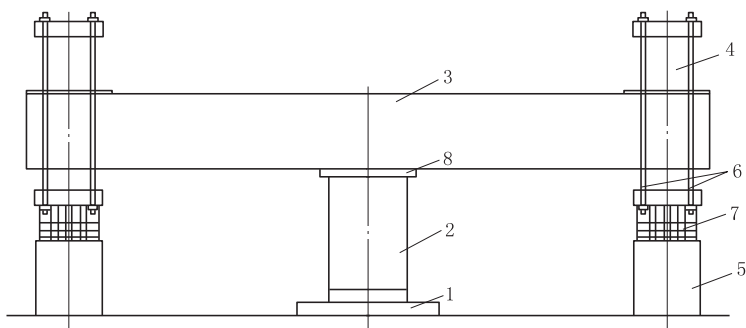


图 22.2.1-2 锚桩反力载荷试验机构示意图

1—承压板；2—千斤顶；3—主梁；4—副梁；5—锚桩；
6—连接机构；7—锚筒；8—垫板

22.2.2 试验应采用下列步骤：

1 试验前应在试验点附近做 2~4 个原位密度试验，以测定试验土层的密度和含水率等。

2 设备安装次序与要求如下：

- 1) 安装荷载板和千斤顶：安装前应整平试验点，铺厚约 1cm 的中砂垫层，并用水平尺找平，使荷载板与试验面平整接触。
- 2) 安装主梁、副梁。安放过程中，应避免对荷载板施加压力。
- 3) 安放堆载反力台架或锚桩反力构架：其中心应与千斤顶、承压板中心一致。安放过程中，应避免对荷载板施加压力。
- 4) 安装沉降测量的基准梁：其固定点应设在试验点影响范围（不小于承载板直径或边长的 1.5 倍）以外。
- 5) 安装百分表或位移传感器：以荷载板中心为中心，对称安装 4 只百分表或位移传感器。

3 试验点应避免冰冻、曝晒、雨淋，必要时设置工作棚。

4 载荷试验加荷方式宜采用分级维持荷载沉降相对稳定法（慢速法），有地区经验时，也可采用分级加荷沉降非稳定法（快速法）或等沉降速率法。加荷等级宜取 10~12 级，并不应少于 8 级，最大加载量不应小于设计要求的 2 倍，荷载量测允许精度应为最大荷载的 $\pm 1\%$ 。每级荷载增量宜取预估试验土层极限压力的 $1/10 \sim 1/12$ 。

5 每级荷载作用下都必须保持稳压，由于地基土的沉降和设备变形等都会引起荷载的减小，试验中应随时观察压力变化予以补压，使所加的荷载保持稳定。

6 稳定标准：宜采用相对稳定法，即每施加一级荷载，待沉降速率达到相对稳定后再施加下一级荷载。

7 应按时、准确观测沉降量。每级荷载下观测沉降的时间间隔宜采用下列标准：对于慢速法，每级荷载施加后，间隔

5min、5min、10min、10min、15min、15min 测读一次沉降值，以后每隔 30min 测读一次沉降值，当连续 2h 每小时沉降量不大于 0.1mm 时，可以认为沉降已达到相对稳定，继续施加下一级荷载。

8 试验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，前三种情况其所对应的前一级荷载即为极限荷载。

- 1) 承压板周围土出现明显侧向挤出，周边土体出现明显隆起和裂缝。
- 2) 本级荷载沉降量大于前级荷载沉降量的 5 倍，载荷～沉降曲线出现明显陡降段。
- 3) 在本级荷载下，持续 24h 沉降速率不能达到相对稳定值。
- 4) 总沉降量超过承压板直径（或宽度）的 0.06 倍。
- 5) 当达不到极限荷载时，最大加载量不小于设计要求的 2.0 倍或超过第一拐点至少三级荷载。

9 当需要卸载观测回弹时，每级卸载量可为加载增量的 2 倍，如为奇数，第一级为 3 倍。每隔 15min 观测一次，历时 1h，荷载卸完后继续观测 3h。

10 对于深层平板载荷试验，加荷等级可按预估承载力的 1/10～1/15 分级施加，当出现下列情况之一时，可终止加荷：

- 1) 在本级荷载下，沉降急剧增加，载荷～沉降曲线出现明显的陡降段，且沉降量超过承压板直径（或宽度）的 0.04 倍。
- 2) 在本级荷载下，持续 24h 沉降速率不能达到相对稳定值。
- 3) 总沉降量超过承压板直径（或宽度）的 0.06 倍。
- 4) 当持力层土层沉降量很小时，最大加载量不小于设计要求的 2.0 倍。

22.2.3 计算和制图：

1 对原始数据检查、校对后,整理出荷载与沉降值、时间与沉降值关系汇总表。

2 绘制荷载~沉降($p \sim S$)曲线,必要时绘制沉降~时间($S \sim t$ 或 $S \sim \lg t$)曲线,如果 $p \sim S$ 曲线的直线段延长不经过 $(0, 0)$ 点,应采用图解法或最小二乘法进行修正。 p 坐标单位为 kPa, S 坐标单位为 mm,如图 22.2.3 所示。

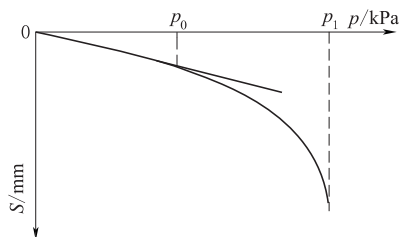


图 22.2.3 典型 $p \sim S$ 曲线示例

3 特征值的确定:

- 1) 当曲线具有明显直线段及转折点时,宜以转折点所对应的荷载定为极限荷载值。
- 2) 当曲线无明显直线段及转折点时,可按 22.2.2 条 8 款所列情况确定极限荷载值,或取对应于某一相对沉降值(即 S/d , d 为承压板直径)对应压力评定地基土承载力。

4 承载力基本值 f_0 的确定:

- 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载值 1.5 倍时)取极限荷载值的一半,即 $f_0 = p_l/2$ 。
- 3) 不能按照上述两点确定时,以沉降标准进行取值,取 $S = (0.01 \sim 0.015)b$ 对应的荷载值。

5 变形模量计算:

- 1) 对于浅层平板载荷试验,可按公式 (22.2.3-1)、公

式 (22.2.3-2) 计算：

$$E_0 = 0.785(1 - \mu^2)d \frac{P}{S} \text{ (承压板为圆形)} \tag{22.2.3-1}$$

$$E_0 = 0.886(1 - \mu^2)a \frac{p}{S} \text{ (承压板为方形)} \tag{22.2.3-2}$$

2) 对于深层平板载荷试验，可按公式 (22.2.3-3) 进行计算：

$$E_0 = \omega d \frac{p}{S} \tag{22.2.3-3}$$

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 ——土的泊松比，取 0.27；
 ω ——与试验深度有关的系数，可按表 22.2.3 选用。

表 22.2.3 深层载荷试验计算系数 ω

相对深度	$d/z=0.30$	$d/z=0.25$	$d/z=0.20$	$d/z=0.15$	$d/z=0.10$	$d/z=0.05$	$d/z=0.01$
ω	0.477	0.469	0.460	0.444	0.435	0.427	0.418

22.2.4 依据大型载荷试验成果（荷载～位移曲线）反演土体本构模型参数参考以下基本流程和方法进行：

- 1 将载荷试验的荷载～位移曲线，作为反分析输入的真实位移信息。
- 2 建立载荷试验的数值模型，对实际载荷试验过程进行数值模拟，计算各级荷载下的计算位移值。
- 3 根据具体的工程问题，进行本构模型参数对位移影响的敏感性分析，确定待反演参数。

4 进行适量的室内试验，测定土体的本构模型参数，并结合工程类比，确定待反演参数的初值范围。

5 采用载荷试验各级荷载下的计算位移值与相应的实测位移值，构建反演目标函数。

6 结合最优化方法，基于载荷试验的位移反分析，寻找与实测位移值相比误差最小的计算位移值所对应的本构模型参数。

22.2.5 本试验的记录格式见表 22.2.5。

表 22.2.5 载荷试验记录表

工程名称				试验日期											
试验依据				仪器名称和编号								试样地点			
承压板面积/cm ²				试验深度/m											
土层性状				试验环境								气候条件			
加荷 级数	加荷 时间 /min	读数 时间 /min	荷载值 /kPa	沉降量/mm								平均 沉降量 /mm	累积 沉降量 /mm	备注	
				测点 1		测点 2		测点 3		测点 4					
				读 数	沉 降	读 数	沉 降	读 数	沉 降	读 数	沉 降				
试验				计算								校核			

22.3 洞内载荷试验

22.3.1 应采用下列主要设备和设施：

- 1 承压板：相关要求同 22.2.1 条 1 款。
- 2 压力源：相关要求同 22.2.1 条 2 款。
- 3 加荷装置：以试验洞顶岩石提供反力，试验洞的高度、宽度、长度应满足铺料、机械碾压及洞内试验的需要，形成稳定的反力系统。
- 4 传力设备：包括传力柱、上垫板、下垫板及洞顶预埋垫板等传力构件，如图 22.3.1 所示。

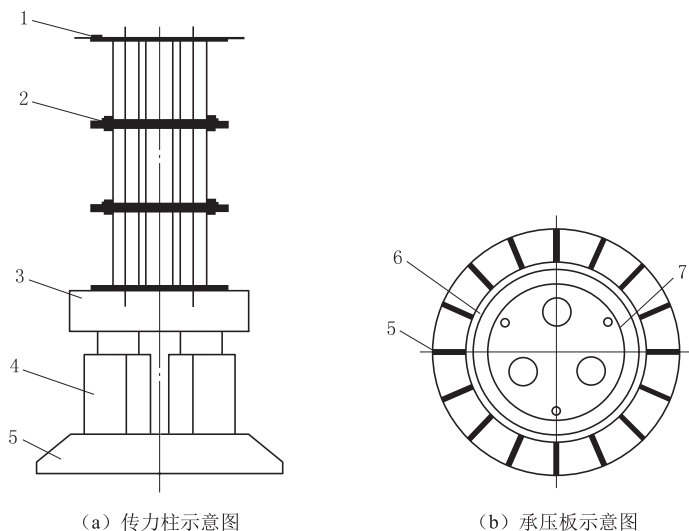


图 22.3.1 洞内载荷试验传力柱示意图

1—顶板；2—连接螺栓；3、6—承压板；
4—千斤顶；5—底板；7—结构钢柱

5 沉降观测装置：相关要求同 22.2.1 条 5 款。

6 其他设备：水平尺、铁锹等辅助设备和工具。

22.3.2 试验应采用下列步骤：

1 在洞内试验区基础找平层碾压完成后，埋设多道花管（钢管），间距不大于 1.5m，平行布设饱和供水管路，与进水管相连接。钢管上梅花形布置出水孔，用土工布缠裹钢管，用于饱和和试验料用。

2 铺筑料使用试验料，按照预先确定的填筑碾压参数（铺料厚度、洒水量、碾压遍数、碾压机械等），分层铺筑碾压，填筑碾压的粗粒土体高度达到试验要求的填筑厚度。在填筑至顶部上下两层时，在载荷试验区外分别进行碾压前后破碎率、级配、含水率、干密度试验检测。

3 试验点要求：

- 1) 试验点的位置应设置在填筑碾压后试验料厚度不小于承压板直径或边长的 1.5~2.0 倍厚度范围内。
 - 2) 试验洞岩石应完整坚固, 洞顶上承压板直径 3 倍范围应进行锚杆加固, 洞顶周边承受的载荷应大于试验载荷的 2 倍。
 - 3) 应在试验点的洞内顶部岩石上埋设 6~9 根 $\phi 28$ 的锚杆, 锚固深大于 100cm, 水平焊接 100mm $\times$ 100mm $\times$ 40mm 钢板, 钢板与试验洞顶岩石之间填充 C50 细石混凝土, 作为试验点的洞顶承压板, 与试验点的中心对应垂直。
 - 4) 试验在天然含水率状态下进行。
 - 5) 进行粗粒土饱和状态载荷试验时, 打开预埋饱和管进水阀, 对填筑碾压的粗粒土进行饱和, 饱和水应完全浸湿填筑体粗粒土上表面, 饱和 24h。
 - 6) 在安装承压板前, 对碾压体表面应进行描述。
- 4 设备安装应符合下列要求:
- 1) 承压板安装前, 对测定点表面进行平整, 当表面起伏较大时, 可采用细颗粒料或水泥砂浆找平, 再在承压板上用水平尺找平, 使承压板与测定点表面平整接触, 使承压板上表面水平承受压力。
 - 2) 在承压板中心安装千斤顶, 通过垫板、传力柱, 将反力施加于洞顶承压板中心位置, 其上下中心应在一条垂直线上。整个系统应安装稳固、牢靠。
 - 3) 当调整立柱等反力构件时, 应避免对承压板施加压力和冲击。
- 5 沉降观测装置安装:
- 1) 安装钢梁固定点应设在试验点影响范围以外, 宜架设在洞壁两侧预埋件上。
 - 2) 百分表或位移传感器数量应不少于 4 个, 对称布置在承压板上, 百分表或位移传感器与钢梁之间用磁力表

座连接，安装完成后，轻轻敲动钢梁，观察位移仪表的回弹情况，检查是否安装正常。

- 3) 仪器安装就位后，压力传感器读数清零，以消除设备自身重力，位移传感器清零，开始试验。

6 试验应按下列步骤进行：

- 1) 载荷试验加载按照设定的载荷量乘以 1.2 倍系数，采用依次逐级等量加荷法逐级加压，每级载荷增量极限载荷的 $1/8 \sim 1/10$ 施压，加载分级不宜少于 8 级，其中第 1 级取分级载荷的 2 倍。卸载分五级进行，每级卸载量取加载时分级载荷的 2 倍。当未有设定试验载荷或者不易预估其极限载荷时，可按照 $55 \sim 200\text{kPa}$ 的增量加压。
- 2) 每施加一级载荷，立即观测沉降量，后续观测沉降的时间间隔按 10min、10min、10min、15min、15min，以后每隔 30~60min 观测一次，待沉降速率达到间隔 1h 的沉降量不大于 0.1mm 为止，再施加下一级载荷。当出现较大沉降时，可适当减少载荷增量。

- 7 试验终止：试验的终止条件同 22.2.2 条 8 款。

- 8 当需要卸载观测回弹时，步骤同 22.2.2 条 9 款。

- 9 试验结束后，应及时拆除设备，对试验点进行观察描述。

22.3.3 计算和制图参照 22.2.3 条。

22.3.4 记录计算参照 22.2.5 条。

23 波 速 试 验

23.1 一 般 规 定

23.1.1 本试验用于测定各类粗粒土的压缩波、剪切波或瑞利波的波速，反映各类覆盖层或人工碾压层的综合力学特性。

23.1.2 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 1 孔为激振孔，另布置 2 孔作为检波孔，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，孔内不同深度处放置检波器，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，本标准采用稳态振动法。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。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。

23.2 设 备 和 设 施

23.2.1 激振器：可采用机械振源、电火花等，但主要是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。

23.2.2 检波器：采用三分量检波器，其谐振频率宜为 8～27Hz。检波器必须置于密封防水的无磁性圆筒内。

23.2.3 放大器：采用低噪声多通道放大器，噪声水平应低于 $2\mu\text{V}$ ，相位一致性偏差应小于 0.1ms，并配有可调的增益装置，电压增益应大于 80dB，不应采用信号滤波装置。

23.2.4 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 $1\sim 2\text{ms}$ 。

23.2.5 测斜仪：应能测量 $0^\circ\sim 360^\circ$ 的方位角及 $0^\circ\sim 30^\circ$ 的倾角。倾角测量允许误差为 $\pm 0.1^\circ$ 。

23.2.6 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 。

23.2.7 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。

23.3 操作步骤

23.3.1 跨孔波速法：

1 试验孔布置：

- 1) 振源孔和测试孔应布置在一条直线上，试验孔宜布置在地表高程相差不大的地段，若地表起伏较大，应准确测量孔口高程。
- 2) 一组试验布置 3 孔，试验孔的间距，在土层中宜取 $2\sim 5\text{m}$ ；在岩层中宜取 $8\sim 15\text{m}$ ，测点垂直间距宜取 $1\sim 2\text{m}$ ，近地表测点宜布置在 0.4 倍孔距的深处，振源和检波器应置于同一地层的相同标高处，并绘制钻孔柱状图。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。跨孔法试验布置如图 23.3.1 所示。

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。

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 待灌浆或填砂后 $3\sim 6\text{d}$ ，方可进行测试。

5 为准确地算出各测点的直达波传播距离，当测试孔深度

板上应放置约 200kg 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。单孔法试验布置如图 23.3.2 所示。

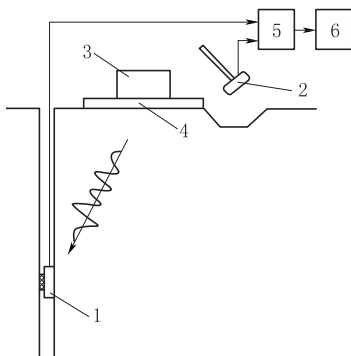


图 23.3.2 单孔法试验布置示意图

1—三分量检波器；2—击锤；3—重物；4—木板；
5—放大器；6—计算机处理示波

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 应结合土层布置测点，测点垂直间距宜取 1~3m，层位变化处加密。测试应自下而上进行，每个试验点，试验次数不应小于 3 次。

23.3.3 面波法（稳态振动）：

1 选择试验场地，并进行整平。

2 可采用瞬态法或稳态法，宜采用低频检波器，间距可根据场地条件通过试验确定。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 23.3.3 所示。

3 选择适合的激振频率，开启激振器，由拾振器接受瑞利波。

4 当两检波器接收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，

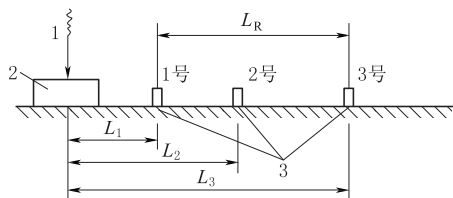


图 23.3.3 面波法（稳态振动）布置示意图

1—振源；2—激振垫板；3—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 个波长或 3 个波长处， $l=L_R, 2L_R, 3L_R, \dots$ ，进行测试。试验应重复多次，可进行 5 组。

23.4 计算与记录

23.4.1 波形识别：

1 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。

2 波幅突然增至压缩波幅 2 倍以上，如图 23.4.1 (a) 所示。

3 周期比压缩波周期至少增加 2 倍以上，如图 23.4.1 (b) 所示。

4 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 23.4.1 (c)。

23.4.2 计算和制图：

1 正确计算激振点与检波点之间的距离。对于跨孔法，如果孔有偏斜，应对孔距进行校准。

2 按公式 (23.4.2-1) ~ 公式 (23.4.2-3) 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。

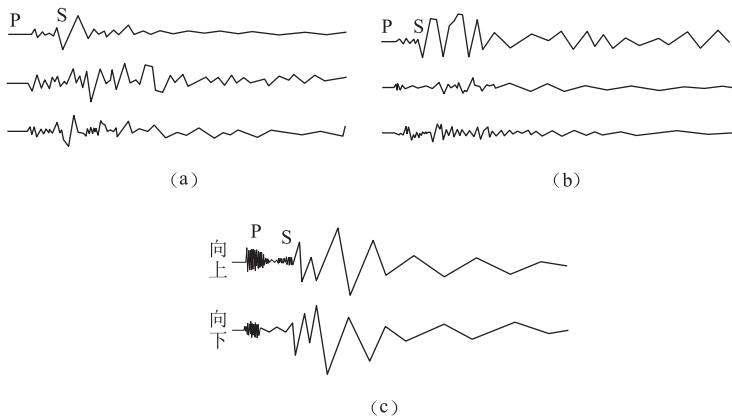


图 23.4.1 P 波、S 波的识别示例图

$$V_P = \frac{L_P}{t_P} \quad (23.4.2-1)$$

$$V_S = \frac{L_S}{t_S} \quad (23.4.2-2)$$

$$V_R = \frac{L_R}{t_R} = \frac{L_R}{\frac{2\pi}{\omega}} = L_R f \quad (23.4.2-3)$$

式中： V_P 、 V_S 、 V_R ——压缩波、剪切波和瑞利波的波速，m/s；

L_P 、 L_S 、 L_R ——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 ——各波从激振点传至检波点所需的时间，s；

ω ——简谐波的圆频率，rad/s；

f ——激振频率， s^{-1} 。

3 按公式 (23.4.2-4) ~ 公式 (23.4.2-8) 计算动剪切模量、动弹性模量和动泊松比：

$$G_d = \rho V_s^2 \quad (23.4.2-4)$$

$$E_d = \frac{\rho V_s^2 (3V_P^2 - 4V_S^2)}{V_P^2 - V_S^2} \quad (23.4.2-5)$$

或
$$E_d=2\rho V_s^2(1+\mu_d)\tag{23.4.2-6}$$

$$E_d=\frac{\rho V_p(1+\mu_d)(1-2\mu_d)}{1-\mu_d}\tag{23.4.2-7}$$

$$\mu_d=\left[\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2-2\right]/\left[2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2-2\right]\tag{23.4.2-8}$$

式中： V_p ——地层的压缩波波速，m/s；

V_s ——地层的剪切波波速，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 ——密度，g/cm³；

μ_d ——地层的动泊松比。

4 根据整理和计算的数据，绘出波速与深度变化的关系曲线，如图 23.4.2 所示。

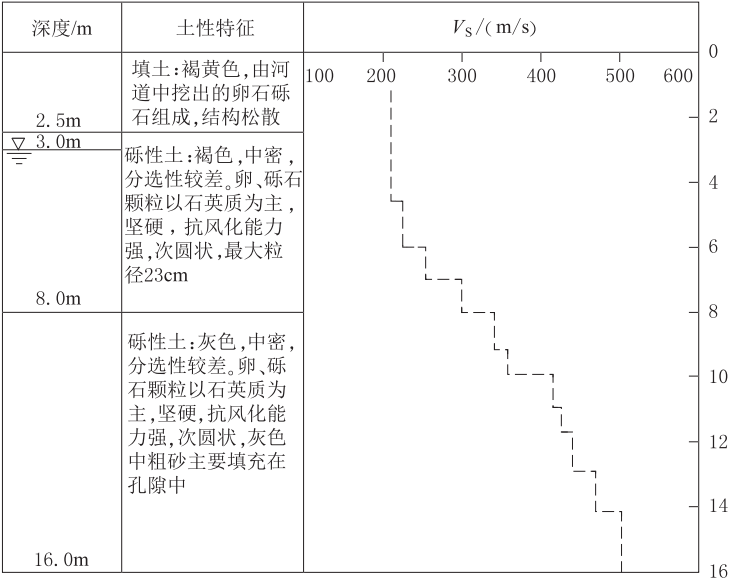


图 23.4.2 波速与深度变化的关系曲线示例图

23.4.3 本试验记录格式见表 23.4.3-1、表 23.4.3-2。

24 深厚覆盖层密度试验

24.1 一般规定

24.1.1 本试验方法适用于砂砾石、卵石混合土等无胶结或弱胶结深厚覆盖层。

24.1.2 本试验综合采用原位旁压试验和室内旁压模型试验间接测定深厚覆盖层不同深度的原位密度。

24.2 设备和设施

24.2.1 深厚覆盖层密度试验采用的试验设备包括旁压仪和室内旁压模型试验系统。

24.2.2 旁压仪的设备要求按 21.2.2 条执行。同时旁压器体变管量程宜达到 1000cm^3 ，试验获得完整的旁压特征曲线。

24.2.3 室内旁压模型试验系统应符合下列规定：

1 模型箱宜为方形或者圆形，应具有足够刚度，旁压模型试验过程中不应产生变形。模型箱边长或直径应大于 10 倍颗粒最大粒径，旁压试验孔应布置在模型箱中间位置。

2 加载系统应能对样品施加均布恒定上覆压力，模拟原位测点的应力状态。荷载传感器（或测力计）的准确度不宜低于最大轴向压力的 1%。

3 附属设备包括击实锤或振捣器、台秤或天平、钢尺、百分表或位移传感器、瓷盘、烘箱等。百分表或位移传感器的量程宜为 $0\sim 50\text{mm}$ ，分度值 0.01mm 。

24.3 室内模型试样制备与安装

24.3.1 室内旁压模型试验样品制备应按以下步骤进行：

1 选择一定数量的代表性土样，经风干、分散、过筛，测定风干含水率。

2 根据试验要求的干密度、试样尺寸及填装层数称取试验所需土样，填装层数宜取 4~5 层，层厚宜不小于 1.5 倍最大颗粒粒径。

3 按备样含水率计算所需加的水量，均匀喷洒在试样上，拌匀备用。

4 将开缝管固定安装在模型箱中间位置，开缝管应垂直于模型箱底面。

5 装入第 1 层土样，均匀拂平表面，用表面振动密实法使土样达到预定高度后，刮毛表面，再以同样方法填入第 2 层土样，直至装完最后一层，整平表面。

24.3.2 室内旁压模型试验样品安装应按以下步骤进行：

1 在试样上安装上覆压力加载装置，拧紧连接螺栓。

2 在试样对称位置安装百分表或位移传感器，数量应不少于 3 个。

3 试样如需饱和，从模型箱底孔进行充水饱和，饱和方式宜采用水头饱和方式。

24.4 试 验 步 骤

24.4.1 现场旁压试验按第 21 章进行，对同一土层旁压试验点数不宜少于 3 个。

24.4.2 现场旁压试验完成后，采用模拟同源土料在试验室进行室内旁压模型试验。

24.4.3 室内旁压模型试验应按以下步骤进行：

1 室内旁压模型试样制备按 24.3.1 条进行。测读百分表或位移传感器的读数，记为 h_1 。

2 按同一土层现场旁压试验的统计深度平均值计算上覆压力，对模型施加均布恒定上覆压力。

3 待变形稳定后，再次测读百分表或位移传感器的读数，记为 h_2 ，两次读数的差值为固结下沉量。

4 按第 21 章旁压试验的操作方法进行室内旁压模型试验。

24.4.4 相同上覆压力条件下的室内旁压模型试验,宜进行 4 个不同密度的试验。

24.4.5 绘制室内旁压模量与试验干密度关系曲线如图 24.4.5 所示。

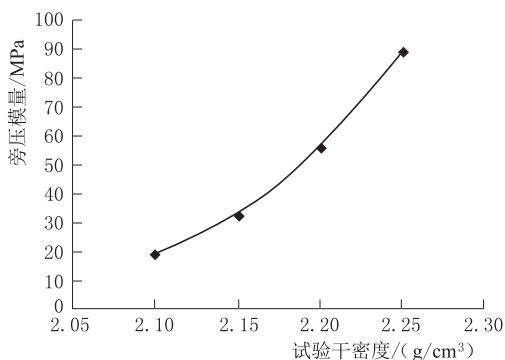


图 24.4.5 室内旁压模量与试验干密度关系曲线示例

24.4.6 以现场旁压试验的旁压模量统计平均值,在室内旁压模量与试验干密度关系曲线图的纵坐标上找到对应的旁压模量值,该旁压模量值与曲线的交点对应的横坐标上的干密度值,为深厚覆盖层某土层原位干密度值,如图 24.4.6 所示。

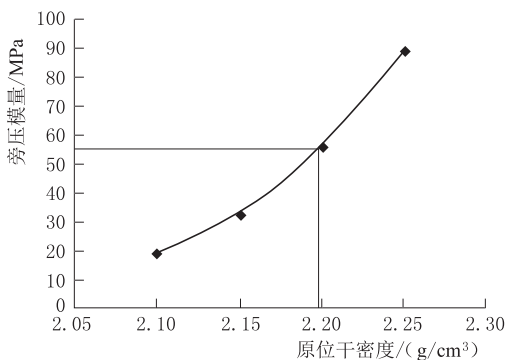


图 24.4.6 原位干密度的确定示例图

24.5 计 算 与 记 录

24.5.1 旁压模量的整理方法按 21.4.7 条执行。

24.5.2 以室内旁压模量为纵坐标，以试验干密度为横坐标，绘制旁压模量与试验干密度曲线如图 24.4.5 所示。

24.5.3 本试验记录格式同表 21.4.8。

25 原位密度试验

25.1 一般规定

25.1.1 原位密度试验的主要目的是测定原位粗粒土的密度和对粗粒土填方工程进行压实质量检测。

25.1.2 粗粒土原位密度试验方法主要有灌砂法和灌水法，当试坑直径大于 300mm 时宜采用灌水法。

25.2 灌砂法

25.2.1 应采用下列主要仪器设备和设施：

- 1 灌砂装置：主要包括漏斗及漏斗架、套环、防风筒等。
- 2 台秤：量程不小于 100kg，最小分度值 50g。
- 3 秤：量程 15kg，最小分度值 1g。
- 4 标准量砂：干燥、洁净，粒径范围 0.25~0.5mm。
- 5 其他工具：0.25mm、0.5mm 标准筛、标准砂量器、水平直尺、钢卷尺、铁锹、玻璃板、称量用容器等。

25.2.2 量砂松方密度标定：

- 1 分别称取量器质量 m_1 和量器加玻璃板质量 m_2 。
- 2 将量器内注满洁净水，用玻璃板紧贴水面沿着量器筒口轻轻滑移，贴面之间不得出现气泡，擦干量器外壁水分，称量量器加玻璃板及水质量 m_3 ，并测量水的温度。
- 3 量器干燥后，将漏斗置于其上，使漏斗下口距离量器筒口 100mm，并对准量器中部位置，将量砂装入漏斗中，打开漏斗下口开关，使量砂缓缓地等速流入下方量器中，直至灌满量器。取掉漏斗，用直尺沿着量器筒口由中间向两边刮平，使量砂与量器顶部齐平，称量量器加满量砂质量 m_4 。注意灌砂过程中不得触碰仪器。

- 4 按公式 (25.2.2) 计算量砂松方密度，准确至 0.01g/

cm^3 。每种量砂应平行试验 3 次，取其算术平均值。

$$\rho_s = \frac{(m_4 - m_1)\rho_w}{(m_3 - m_2)} \quad (25.2.2)$$

式中： ρ_s ——量砂松方密度， g/cm^3 ；

ρ_w ——水在试验温度下的密度， g/cm^3 ；

其余符号见试验步骤。

25.2.3 试验应采用下列步骤：

1 在试验检测地点，随机选取平坦地面，清除表面杂物，其面积不小于套环面积。

2 称取盛量砂容器的质量 m_5 、盛样容器的质量 m_6 ，量砂及容器的质量 m_7 。

3 将套环放置于试验地面上，用固定器将套环固定并使之保持水平，在上方安装好灌砂装置，使漏斗下口对准套环中间位置，并距离地面约 10cm。先向漏斗内添加量砂，然后打开漏斗下口开关，使量砂缓缓匀速地灌入套环内，待套环灌满后，移去灌砂装置，使用水平直尺将套环顶面量砂刮平，使量砂与套环顶部齐平，然后将套环内的量砂小心取出，全部倒回容器内进行称量 m_8 。

4 在套环内挖取试坑，试坑的直径宜不小于试样最大粒径的 3 倍，其深度应达到下层顶面。挖坑时应将松散的试样全部取出，放入带盖容器内及时地进行称量 m_9 ，此过程应避免试样颗粒丢失和水分散失，试坑直径上下宜保持一致，当坑壁遇有孤石悬空时应重新选择地点取样，坑壁上有较大孔洞、空隙时应用未经称量的试样细颗粒填充。按照第 6 章规定的取样方法选取代表性试样，用烘干法测定全料含水率 ω 。

5 在套环上方重新装上灌砂装置，使量砂经漏斗下口缓慢匀速地流入试坑和套环内，直至试坑和套环灌满为止，使用水平直尺辅助刮平表面，收集并称量剩余量砂的质量 m_{10} 。灌砂操作过程仔细程度均应与本条 3 款保持一致。

6 当试验地面较平整时，可不安放套环，直接在选取地点

挖取试坑，按照上述步骤进行灌砂。

25.2.4 试验结果应按下列公式计算：

1 按下列公式计算试样湿密度、干密度。

1) 用套环时，按公式（25.2.4-1）计算湿密度：

$$\rho = \frac{(m_9 - m_6) \rho_s}{(m_7 - m_5) - (m_8 - m_5) - (m_{10} - m_5)} \quad (25.2.4-1)$$

2) 不用套环时，按公式（25.2.4-2）计算湿密度：

$$\rho = \frac{(m_9 - m_6) \rho_s}{(m_7 - m_5) - (m_{10} - m_5)} \quad (25.2.4-2)$$

3) 按公式（25.2.4-3）计算干密度：

$$\rho_d = \frac{\rho}{(1 + 0.01w)} \quad (25.2.4-3)$$

式中： ρ ——湿密度， g/cm^3 ；

ρ_d ——干密度， g/cm^3 ；

其余符号见试验步骤。

2 灌砂法密度试验记录表格式见表 25.2.4-1 和表 25.2.4-2。

25.2.4-1 量砂松方密度标定记录

工程名称			试验日期				
试验依据				仪器名称和编号			
试验次数	量器质量 m_1/g	量器+玻璃板质量 m_2/g	量器+玻璃板+满水质量 m_3/g	量器+量砂质量 m_4/g	水密度 $/(\text{g}/\text{cm}^3)$	量砂松方密度测定值 $/(\text{g}/\text{cm}^3)$	量砂松方密度平均值 $/(\text{g}/\text{cm}^3)$
试验		计算				校核	

表 25.2.4-2 现场密度试验记录表

工程名称_____试验日期_____

试验依据		仪器名称和编号		
试坑位置				
试样最大粒径/mm				
试坑尺寸/mm				
量砂容器质量 m_5/g				
试样容器质量 m_6/g				
量砂及容器质量 m_7/g				
套环内取出量砂质量 m_8/g				
湿试样及容器质量 m_9/g				
灌砂后剩余量砂质量 m_{10}/g				
湿试样质量/g				
试坑体积/ cm^3				
湿密度/ (g/cm^3)				
盘编号				
盘质量/g				
盘+湿试样质量/g				
盘+干试样质量/g				
水质量/g				
干试样质量/g				
含水率/%				
平均含水率/%				
干密度/ (g/cm^3)				

试验

计算

校核

25.3 灌 水 法

25.3.1 应采用下列主要仪器设备和设施：

- 1 量水器：盛装使用的洁净水，并附有刻度。
- 2 台秤：称量 30kg 或 100kg，最小分度值 1g 或 5g。
- 3 塑料薄膜：聚乙烯塑料薄膜，厚度不宜大于 0.04mm，应具有良好的拉伸性能。
- 4 其他工具：铲土工具、水准尺、直尺等。

25.3.2 操作应采用下列步骤：

1 随机选择取样地点，将测点处地面整平，并用水准尺检查。

2 将套环固定于整平后的地表，将聚乙烯塑料膜沿着套环内壁及地表紧贴铺好。记录量水器内初始水位高度 h_1 ，打开阀门，将水缓缓注入套环内，直至与套环顶面齐平不外溢为止，记录量水器内水位高度 h_2 ，计算套环体积 $V_{\text{环}}$ 。在保持套环位置不变的情况下，将塑料膜内水排至不影响试验的场所，取掉塑料薄膜。

3 挖取试坑，试坑直径应为试样最大粒径的 3 倍及以上，开挖至要求的深度，将试坑中取出的料全部装入容器内及时进行称量 m_1 ，容器质量 m_2 。选取具有代表性的试样测定含水率 ω 和颗粒级配。

4 试坑挖好后，将塑料薄膜小心翼翼地铺展到试坑中，紧贴坑壁、坑底，并有富裕部分延伸到坑外。注意防止塑料薄膜被石块棱角刺破，或相互掺合在一起。

5 将量水器注满水，记录量水器内水位高度 H_1 ，打开阀门，然后将水缓缓地注入试坑中，直至水面与套环上边缘齐平不外溢为止，记录量水器内剩余水高度 H_2 ，计算试坑体积 V_P 。

25.3.3 试验结果下列公式计算：

- 1 按公式 (25.3.3-1)、公式 (25.3.3-2) 计算试样湿密

度、干密度：

$$\rho = \frac{m_1 - m_2}{(H_1 - H_2)A_w - V_{\text{环}}} \quad (25.3.3-1)$$

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0.01w} \quad (25.3.3-2)$$

式中： $V_{\text{环}}$ ——套环体积， cm^3 ；
 H_1 、 H_2 ——灌水前、后量水器内水位高度， cm ；
 A_w ——量水器断面积， cm^2 ；
 m_1 、 m_2 符号意义见试验操作过程。

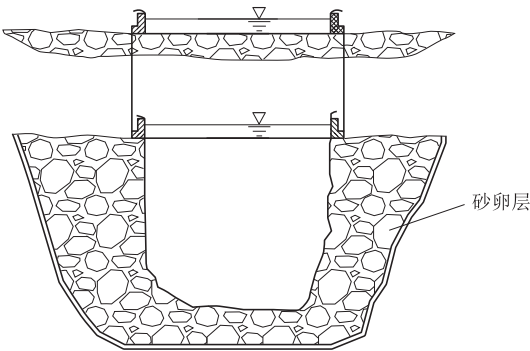


图 25.3.3 灌水法密度试验示意图

2 灌水法密度试验记录表格式见表 25.3.3。

25.3.3 灌水法密度试验记录

工程名称			试验日期		
试验依据			仪器名称和编号		
试样编号		试坑深度 /cm		试样最大粒径 /mm	
测 点				1	2
套环注水前量水器水位高度/cm			h_1		
套环注水后量水器水位高度/cm			h_2		
试坑注水前量水器水位高度/cm			H_1		

25.3.3 (续)

测 点		1	2
试坑注水后量水器水位高度/cm	H_2		
量水器断面面积/cm ²	A_w		
套环体积/cm ³	$V_{\text{环}} = (h_1 - h_2) A_w$		
试坑体积/cm ³	$V_P = (H_1 - H_2) A_w - V_{\text{环}}$		
(盛料容器+湿料) 质量/g	m_1		
盛料容器质量/g	m_2		
试坑内湿试样质量/g	$m_1 - m_2$		
试样湿密度/(g/cm ³)	$\rho = \frac{m}{V_P}$		
细粒部分含水率/%	w_f		
粗粒部分含水率/%	w_c		
细粒料干质量与全部干土质量之比/%	P_f		
试样含水率/%	$w = w_f P_f + w_c (1 - P_f)$		
试样干密度/(g/cm ³)	$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0.01w}$		

试验

计算

校核

26 碾 压 试 验

26.1 一 般 规 定

26.1.1 勘探设计阶段的碾压试验主要研究材料的填筑碾压性能，评价粗粒土作为填筑材料的质量，研究当地材料利用的技术可行性，为设计提供技术参数。

26.1.2 施工阶段的碾压试验主要是验证粗粒土设计填筑标准的合理性，确定粗粒土达到设计填筑标准的施工方法和技术参数。

26.2 设 备 和 设 施

26.2.1 主要机械设备包括振动平碾、挖掘机、装载机、推土机、自卸汽车、洒水车等。

26.2.2 主要仪器设备设施：

1 粗筛（圆孔）：孔径为 100mm、80mm、60mm、40mm、20mm、10mm、5mm。

2 细筛：孔径为 2mm、1mm、0.5mm、0.25mm、0.075mm。

3 秤：称量 500kg、最小分度值 200g；称量 200kg、最小分度值 50g；称量 50kg、最小分度值 5g；称量 10kg、最小分度值 5g；称量 5kg、最小分度值 1g。

4 天平：称量 1kg，最小分度值 0.1g。

5 密度套环（带法兰盘）直径为石料最大粒径的 3~5 倍且不超过 200cm，高度 20cm，应保证足够的刚度。

6 塑料薄膜厚度不宜大于 0.04mm 且有良好的韧性。同一工程密度试验所使用的塑料薄膜规格应一致。

7 水准仪、全站仪。

8 堆石料和过渡料等最大粒径大于 80mm 的粗粒土料，渗透环直径不宜小于 100cm；最大粒径小于 80mm 的垫层料和反

滤料等粗粒土料，宜采用内环直径 40cm，外环直径 80cm；渗透环高度不小于 20cm，应保证足够的刚度。

9 其他密封保湿容器、烘箱、秒表、温度计、钢卷尺、直尺、炒锅、瓷盘、毛刷、盛水容器等。

26.2.3 设备状态。

1 碾压设备和检测仪器设备在使用时应处于正常状态。

2 仪器设备应符合《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》GB/T 15406 的要求，并定期进行检定、校准和期间核查。

26.3 碾压试验准备

26.3.1 碾压试验前应充分了解料源地的分布情况，理解设计意图，对相关单位提供的粗粒土材料的物理力学性能进行复核。

26.3.2 工程前期设计阶段碾压试验宜在料场勘探以后进行；施工阶段碾压试验宜在料场复查后进行。

26.3.3 碾压试验用料应具有代表性，试验前应确定出试验用料的料源、级配等技术条件。

26.3.4 应根据现场实际情况，依据相关技术要求编制试验研究大纲，确定试验内容和场次、试验方法等。试验内容和场次应与工程规模、工程等级、设计或施工阶段的条件和要求相匹配。

26.3.5 试验场地选择时宜根据试验内容和试验要求以及场地基础、交通、水电等因素，综合考虑试验场地大小、位置等。

26.3.6 碾压试验场地应符合下列要求：

1 场地应坚实平整，用拟用碾压设备中大工作质量的振动碾按 2~3km/h 的速度碾压，直到每碾压 2 遍后全场平均沉降量不大于 2mm，整场高差小于 20cm 且局部起伏差小于 5cm。

2 对于填方场地，应分层碾压，直至达到坚实平整要求。场地达到要求后，铺填一层厚度大于等于 30cm 的试验料，直至每碾压 2 遍后全场平均沉降量不大于 2mm。

3 场地大小至少应能容纳 1 个试验单元以及两头的回车区和两边的侧限区,粗粒土 1 个试验单元的有效面积不小于 $6\text{m} \times 15\text{m}$ 。有场地条件时,可将若干试验单元并联成单项、多项的试验组合作为 1 个试验场次,确定试验场地的大小。

4 单层碾压试验两侧边试验单元的侧限区宽度不小于 1.5m 。试验场地周边应有足够宽度,供施工机械与重车行走、回车错道。

26.4 碾压试验要求

26.4.1 在振动碾振动影响范围之外的碾压试验场地周边适当位置设置数个测量基准点,并打桩划线标识,测量基底相对高程。测量按照《工程测量规范》GB 50026 有关条款的规定进行。

26.4.2 装车运输及卸料应符合下列要求:

- 1 装车时应保证试验料的级配和质量。
- 2 装车、卸料应防止试验用料的级配分离。
- 3 运输车辆应保持车厢、轮胎等的清洁。

26.4.3 铺填应符合下列要求:

1 最大粒径大于 300mm 的粗粒土铺料宜采用进占法;过渡料、垫层料、反滤料等粒径不大于 300mm 的粗粒土料可采用进占法、后退法或混合法。

2 用推土机平料,铺填推平宜一次到位。

3 控制铺填厚度,铺填厚度控制误差 $\pm 10\%$ 。

26.4.4 用选定吨位的振动碾在划定的试验单元内静碾 2 遍。振动碾平行试验单元长度方向行驶。

26.4.5 撒灰线标识出振动碾行走线和沉降测量点。密度检测点间距宜为 $1.5 \sim 2.0\text{m}$ 。每个试验单元密度检测点数砂砾料 6~8 个、堆石料 3 个。沉降测量点数应不少于 20 个,并引出试验场地外标识。

26.4.6 需要时,振动碾压前测量碾压前高程,碾后高程每碾压

2 遍测量 1 次。

26.4.7 振动碾应在场外起动，达到正常工况后进入试验场地，沿平行试验单元长度方向匀速、平直行驶，行驶速度宜控制在 2~3km/h，按规定的遍数进行振动碾压。前进、后退全振动重迹碾压，前进、后退均计碾压遍数，相邻碾迹重叠宽度 10~20cm。

26.4.8 碾压前颗粒分析、颗粒形状测定及密度测定应符合下列要求：

1 在试验单元内挖坑取样，进行全料颗粒分析试验。坑径为土料最大粒径的 3~5 倍，且不大于 200cm。坑深为铺填层厚度。

2 颗粒分析试验按照第 5 章的规定进行。

3 取试坑内代表性土料进行土粒比重试验。土粒比重试验应按照第 7 章的规定进行。

4 当粒径 100mm 以上各粒径组中针、片状颗粒较多时，宜进行颗粒形状测定和描述。

5 需要进行碾压前后颗粒分析及破碎分析时，碾压后宜在同一位置挖坑取样进行分析。

6 需要进行碾压前密度试验时，应按照第 25 章的规定进行。

26.4.9 一个试验组合预定的所有检测项目完成且经现场校核无误后，将挖出的石料均匀回填，振动碾压回填部位，恢复至挖坑前的状态。

26.4.10 碾压后的堆石体作为下一场次碾压试验单元的基层时，应满足 26.3.4 条的要求。

26.4.11 所有试验组合检测完成后，应选出最优试验组合进行复核试验，复核试验检测项目和点数根据工程具体情况确定。

26.4.12 需要时，在复核场次碾压试验所有检测项目完成后，垂直碾迹对填筑碾压体进行切槽开挖，检查碾压体层面结合情

况、颗粒分布与密实情况等，并对开挖断面进行摄影录像等记录。

26.5 碾压试验检测

26.5.1 密度试验应按照第 25 章的相关规定进行。

26.5.2 碾压后颗粒分析试验每个试验单元颗粒分析数据应不少于 3 个，按第 5 章的规定进行。

26.5.3 含水率试验按照第 6 章的相关规定进行。

26.5.4 原位渗透试验应按照第 9 章的规定进行。

26.5.5 砂砾料相对密度测定应按照第 8 章的相关规定进行。

26.5.6 碾前碾后级配变化和破碎率试验的方法：

1 碾压试验中，在粗粒土铺填完毕碾压以前，在不影响其他试验点的位置，选定 3 个试验点挖坑，坑径不宜小于坑中粗粒土最大粒径的 3 倍，坑深为铺筑层厚度。将挖出的试验料放在彩条布上进行级配分析试验，级配分析试验后，在原试验坑中铺一层塑料薄膜，将试验料混合均匀，重新填入原试验坑中。

2 与碾压试验的其他试验项目同时碾压。

3 碾压完成后，将原试验坑中塑料薄膜以上的试验料再挖出来进行级配分析，评价级配变化和计算破碎率。

4 破碎率计算和评价有两种方法：一种是以小于 5mm 的含量计算；另一种是按碾压前、后各粒径组石料的含量差值之和进行计算。试验时可根据工程需要选择计算方法。

5 试验结果以 3 个试验点的试验结果的算数平均值作为破碎率试验结果。

26.6 计算与记录

26.6.1 按公式 (26.6.1-1)、公式 (26.6.1-2) 计算各试验单元平均沉降量 Δh 与平均累计沉降率 μ ：

$$\Delta h = \frac{\sum_1^n (h_{1q} - h_{1h})}{n} \quad (26.6.1-1)$$

$$\mu = \frac{\Delta h}{H} \times 100 \quad (26.6.1-2)$$

式中： Δh ——某试验单元平均沉降量，mm，计算精确至0.1mm；

h_{iq} ——碾压前各网格交叉点的相对高程，mm；

h_{ih} ——碾压后各网格交叉点的相对高程，mm；

n ——本试验单元沉降网格测点数；

μ ——平均累计沉降率，%，计算值精确至0.1%；

H ——本试验单元碾压前平均厚度，mm。

绘制碾压遍数～累计沉降量、碾压遍数～干密度等关系曲线图。

26.6.2 按公式(26.6.2)计算小于某粒径的土料质量占试坑取石料总质量的百分数：

$$x_i = \frac{m_a}{m_b} \times 100 \quad (26.6.2)$$

式中： x_i ——小于某粒径的土料质量占坑取土料总质量的百分数，%；

m_a ——小于某粒径的土料质量，g；

m_b ——试坑取土料总质量，g，计算值精确至0.1%。

以小于某粒径的土料质量占坑取土料总质量的百分数为纵坐标，土粒径为横坐标，绘制土料颗粒大小分布曲线。

26.6.3 按公式(26.6.3-1)、公式(26.6.3-2)计算颗粒破碎率：

$$B_g = \text{所有 } \Delta W \text{ 的正值之和} \quad (26.6.3-1)$$

$$\Delta W = D_q - D_h \quad (26.6.3-2)$$

式中： B_g ——颗粒破碎率；

ΔW ——碾压前、后各粒径组土料的含量差值；

D_q 、 D_h ——碾压前、后各粒径组土料的含量。

26.6.4 按公式 (26.6.4-1)、公式 (26.6.4-2) 计算碾压堆石体孔隙率 n ：

$$\rho_d = \frac{m}{V_k} \quad (26.6.4-1)$$

$$n = 1 - \frac{\rho_d}{G_s \rho_w} \quad (26.6.4-2)$$

式中： ρ_d ——堆石体干密度， g/cm^3 ，计算精确至 $0.01\text{g}/\text{cm}^3$ ；

m ——坑内土料烘干或炒干后质量， g ；

V_k ——试坑体积， cm^3 ；

G_s ——土料各粒径组加权比重；

ρ_w ——水的密度，取值 1， g/cm^3 。

26.7 试验工作量基本组合

26.7.1 进行碾压试验工程量组合计划时，应收集本工程的勘测设计、岩土试验资料和类似工程的填筑碾压试验资料、施工资料及安全监测资料。

26.7.2 碾压试验工程量组合参数包括料源参数与施工参数。

1 料源参数包括料场、岩性、级配、强度及掺混比例的堆石料（包括砂砾料）、过渡料、人工轧制或筛分天然砂砾料生产的垫层料、反滤料。

2 施工参数包括振动碾、铺填厚度、碾压遍数、行车速度、洒水量等。

26.7.3 设计阶段的填筑碾压试验工程量组合以料源参数为主。

26.7.4 施工阶段的填筑碾压试验工程量组合以施工参数为主。

26.7.5 不同设计阶段、施工阶段，不同功能坝料的碾压试验工作量基本组合分别见表 26.7.5-1、表 26.7.5-2，配套的室内试验工作量组合见表 26.7.5-3。

表 26.7.5-1 同一风化程度、岩性的堆石料（砂砾料）、过渡料填筑碾压试验工作量组合表

场次	试验单元数	振动平碾		碾压遍数					洒水率			铺填厚度			试验检测项目					备注	
		碾Ⅰ	碾Ⅱ	4	6	8	10	12	w ₁	w ₂	w ₃	H ₁	H ₂	H ₃	4遍	6遍	8遍	10遍	12遍		
1	6	✓	✓	✓	✓	✓	✓		—	—	—	—	✓	—	μ	$\mu \begin{matrix} C_u \\ w \\ \rho \end{matrix}$	$\mu \begin{matrix} C_u \\ w \\ \rho \end{matrix}$	$\mu \begin{matrix} C_u \\ w \\ \rho \end{matrix}$	$C_u \begin{matrix} \mu \\ w \\ \rho \end{matrix}$	选碾	
2	6	选定碾		✓	✓	✓	✓		—	—	—	✓	—	✓	μ	$\mu \begin{matrix} C_u \\ W \\ \rho \end{matrix}$	$\mu \begin{matrix} C_u \\ w \\ \rho \end{matrix}$	$\mu \begin{matrix} C_u \\ w \\ \rho \end{matrix}$	$C_u \begin{matrix} \mu \\ w \\ \rho \end{matrix}$	厚度	
3	4	选定碾		✓	✓	✓	✓	✓	—	—	—	选定铺厚			μ	$\mu \begin{matrix} C_u \\ w \\ \rho \end{matrix}$	$\mu \begin{matrix} C_u \\ k \\ w \\ \rho \end{matrix}$	$\mu \begin{matrix} C_u \\ k \\ w \\ \rho \end{matrix}$	$C_u \begin{matrix} \mu \\ k \\ w \\ \rho \end{matrix}$	遍数	
4	3	选定碾		选定遍数					✓	✓	✓	选定铺厚			μ C _u k w ρ				加水量		
5		选定参数																	μ C _u k w ρ		复核

- 注：1. 本表工作量组合是针对设计阶段碾压试验安排的，施工阶段碾压试验工作量组合可参照执行。
2. 本表中碾压遍数均选定 3 个遍数进行试验单元安排，堆石料（砂砾料）一般选择 6 遍、8 遍、10 遍；过渡料一般选择 4 遍、6 遍、8 遍进行试验，不同项目根据料的特性及铺料厚度并结合上表来确定碾压遍数。
3. 不同岩性及风化程度的堆石料、过渡料碾压试验工作量组合参照本表执行，一个组合参照本表安排一组工作量。
4. μ—沉降率；C_u—颗粒分析（含破碎率、颗粒形状测定）；ρ—密度；k—渗透系数；w—含水率。
5. 后续表中符号含义相同。

表 26.7.5-2 垫层料、反滤料填筑碾压试验工作量组合表

场次	试验单元数	振动平碾		碾压遍数				洒水率			铺厚		试验检测项目				备注	
		碾Ⅰ	碾Ⅱ	4	6	8	10	w ₁	w ₂	w ₃	H ₁	H ₂	4遍	6遍	8遍	10遍		
1	6	√	√	√	√	√	√	—	—	—	—	√	μ	μ _w	μ _w	μ _w	μ _w	选碾
2	3	选定碾		√	√	√	√	—	—	—	√	—	μ	μ _w	μ _w	μ _w	μ _w	厚度
3	4	选定碾		√	√	√	√	—	—	—	选定铺厚		μ _w	μ _w	μ _w	μ _w	μ _w	遍数
4	3	选定碾		选定遍数				√	√	√	选定铺厚		μ _w				洒水量	
5						选定参数								μ _w				复核

注：1. 本表工作量组合是针对设计阶段碾压试验安排的，施工阶段碾压试验工作量组合可参照执行。
2. 不同岩性及风化程度的垫层料、反滤料碾压试验工作量组合参照本表执行，一个组合参照本表安排一组工作量。

表 26.7.5-3 填筑碾压试验室内配套试验工作量表

材料	原岩基本物理力学性质 /组	颗粒分析 /组	基本物理性质 /组	相对密度 /组	破碎率测定 /组	压缩试验 /组	三轴试验 /组	渗透试验 /组	渗透变形 /组
堆石料、过渡料	2 组/同一岩性、同等风化程度	—	—	2 组/同一岩性、同等风化程度、同一级配		2 组/同一岩性、同等风化程度、同一级配、同一密度（可研阶段或必要时作）			
垫层料、反滤料	◇2 组/同一岩性、同等风化程度	2 组/同一料场	2 组/同一土性	2 组/同一岩性、同等风化程度、同一级配		2 组/同一岩性、同等风化程度、同一级配、同一密度（可研阶段或必要时作）			

注：◇表示垫层料为人工轧制时应进行的试验项目。

26.7.6 试验时，根据可研、勘探、设计、施工等不同阶段的要求及现场实际情况，根据工程规模、建筑物等级等的需要，选择适合的试验单元数量、实测项目。

26.8 试验成果整理及报告编写

26.8.1 试验成果综合整理前，对全部试验数据进行逐类逐项的检查与核对，分析试验数据的合理性、规律性和代表性。

26.8.2 根据填筑碾压试验成果，结合土石材料功能分类，分别进行归类整理，编制单项及综合试验成果图表。

1 分别绘制不同填筑碾压参数、碾压设备与碾压体的密实程度（孔隙率、干密度、相对密度、压实度）、沉降量或沉降率之间的关系曲线。

2 根据需要绘制试验料碾压前后的级配曲线。

3 绘制最优碾压参数（包括复核场成果）情况下的干密度

(孔隙率、相对密度、压实度)频率分配曲线与累计频率曲线。

26.8.3 绘制配套试验相关成果综合整理图表。

26.8.4 试验报告编制内容宜包括以下内容：

- 1 工程概况及设计阶段或者施工情况。
- 2 试验目的。
- 3 主要研究内容、工作量及技术标准。
- 4 试验用料基本性质。
- 5 试验方案及技术要求，包括碾压试验场地、填筑碾压基本工序、碾压机具的技术参数及比选、填筑碾压参数比选、碾压场次设计、备料方案、掺和工艺、含水率控制措施、配套试验、试验期间气象条件等。
- 6 试验成果整理与分析。
- 7 基本结论与建议。
- 8 附件。

附录 A 土样级配缩尺处理方法

A. 0. 1 土样粒径缩尺处理应根据不同试验项目采取适宜的处理方法，应采用下列常用方法：

1 剔除法：将超粒径颗粒剔除。

2 等量替代法：根据试样允许的最大粒径以下的大于 5mm 各粒组含量，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粒径。

4 混合法：先用相似级配法以较适宜的比例缩小粒径，控制不大于 5mm 粒径符合试验要求的含量，超粒径颗粒再用等量替代法处理。

5 土样级配缩尺处理计算与记录。

1) 剔除法级配应按公式 (A. 0. 1 - 1) 计算：

$$p_i = \frac{p_{0i}}{100 - p_{\text{dmax}}} \times 100 \quad (\text{A. 0. 1 - 1})$$

式中： p_i ——剔除后某粒组含量，%；

p_{0i} ——原级配某粒组含量，%；

p_{dmax} ——超粒径颗粒含量，%。

2) 等量替代法级配应按公式 (A. 0. 1 - 2) 计算：

$$p_i = \frac{p_5}{p_5 - p_{\text{dmax}}} p_{0i} \quad (\text{A. 0. 1 - 2})$$

式中： p_i ——替代后粗粒某粒组含量，%；

p_5 ——原级配大于 5mm 粒组含量，%。

3) 相似级配法粒径和级配应按公式 (A. 0. 1 - 3) ~ 公式 (A. 0. 1 - 5) 计算：

$$d_{ni} = \frac{d_{0i}}{n} \quad (\text{A. 0. 1 - 3})$$

$$n = \frac{d_{0\max}}{d_{\max}} \quad (\text{A. 0. 1 - 4})$$

$$p_{\text{dn}} = \frac{p_{\text{d0}}}{n} \quad (\text{A. 0. 1 - 5})$$

式中： d_{ni} ——原级配某粒径缩小后的粒径，mm；

n ——粒径缩小系数；

p_{dn} ——粒径缩小 n 倍后相应的不大于某粒径含量百分数，%；

d_{0i} ——原级配某粒径，mm；

$d_{0\max}$ ——原级配最大粒径，mm；

$d_{\max}$ ——试样允许最大粒径，mm；

p_{d0} ——原级配相应的不大于某粒径含量百分数，%。

A. 0. 2 根据工程需要也可采用基于最新研究成果提出的其他缩尺方法，如基于分形分布理论的土样级配缩尺处理方法等。

1 基于分形分布土体级配的缩尺处理方法是当原级配满足公式 (A. 0. 2 - 1) 所示的分形分布时，可采用基于分形理论的缩尺方法，将原级配最大粒径缩小至仪器允许的粒径。

$$p_i^0 = 100 \times \left(\frac{d_{0i}}{d_{0\max}} \right)^{3-D_0} \quad (\text{A. 0. 2 - 1})$$

2 基于分形缩尺方法的缩尺后土体级配，应按公式 (A. 0. 2 - 2)、公式 (A. 0. 2 - 3) 计算：

$$p_i = A + (100 - A) \left(\frac{d_i}{d_{\max}} \right)^{3-D_0} \quad (\text{A. 0. 2 - 2})$$

$$p_{5c} = 100 \left(\frac{5}{d_{\max}} \right)^{3-D_c} \quad (\text{A. 0. 2 - 3})$$

1) 当 $D_0 \leq D_c$ 时，令缩尺公式 (A. 0. 2 - 2) 的级配参数 $A=0$ ，直接计算缩尺级配。

2) 当 $D_0 > D_c$ 时，按以下两种情况分别计算缩尺级配：

a) 当 $p_5^0 \geq p_{5c}$ 时，按公式 (A. 0. 2 - 4) 计算缩尺级配参数 A ；然后，利用公式 (A. 0. 2 - 2) 计算缩尺后粒径不小于 5mm 的颗粒百分含量；缩尺后粒径小于 5mm 的颗粒百分含量，保持原级配的取值不变。

$$A = \frac{p_{\text{dmax}}^0 - 100}{p_{\text{dmax}}^0 - p_5^0} p_5^0 \quad (\text{A. 0. 2 - 4})$$

- b) 当 $p_5^0 < p_{5c}$ 时, 首先选定适当的 p_{5k} , 满足 $p_{5k} \leq p_{5c}$, 按公式 (A. 0. 2 - 5) 计算缩尺级配参数 A ; 然后, 利用公式 (A. 0. 2 - 2) 计算缩尺后粒径不小于 5mm 的颗粒百分含量。

$$A = \frac{p_{5k} - 100 \left(\frac{5}{d_{\text{max}}} \right)^{3-D_0}}{1 - \left(\frac{5}{d_{\text{max}}} \right)^{3-D_0}} \quad (\text{A. 0. 2 - 5})$$

对于缩尺级配粒径小于 5mm 的颗粒组成, 则按公式 (A. 0. 2 - 6) 计算确定:

$$p_i = 100 \left(\frac{d_i}{d_{\text{Gmax}}} \right)^{3-D_0} \quad (\text{A. 0. 2 - 6})$$

其中 d_{Gmax} 按公式 (A. 0. 2 - 7) 计算确定:

$$d_{\text{Gmax}} = 5 \times \left(\frac{100}{p_{5k}} \right)^{\frac{1}{3-D_0}} \quad (\text{A. 0. 2 - 7})$$

式中: d_{0i} ——原级配某粒径, mm;

$d_{0\text{max}}$ ——原级配最大粒径, mm;

d_{Gmax} ——过渡级配最大粒径, mm;

d_i ——缩尺级配某粒径, mm;

d_{max} ——试样允许最大粒径, mm;

p_i^0 ——原级配粒径不大于 d_{0i} 的质量百分数, %;

p_i ——缩尺级配粒径不大于 d_i 的质量百分数, %;

D_0 ——原级配的粒度分形维数;

D_c ——临界分形维数, 即土料最优充填关系级配对应的粒度分形维数;

p_{5c} ——缩尺级配最优充填级配对应的粒径小于 5mm 颗粒质量百分数, %;

p_{5k} ——缩尺级配料粒径小于 5mm 颗粒的质量百分数控制值, 可根据实际情况选取, 最大值不超过 p_{5c} , 即: $p_{5k} \leq p_{5c}$ 。

附录 B 大型直剪仪的检查和标定

B.1 仪 器 检 查

- B.1.1** 剪切仪底座必须水平、稳固。
- B.1.2** 上、下剪切盒的直径或边长应相等并同心，试验前应测量其平均高度和平均直径或边长。
- B.1.3** 滚轴排和开缝用的滚珠必须直径相等，均匀分布。
- B.1.4** 所有滑动部位必须擦油，并检查是否灵活。
- B.1.5** 剪切盒应能均匀地滑动，如有扭动现象，应进行标定。

B.2 摩 擦 系 数 标 定

- B.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。
- B.2.2** 在钢板上放上滚轴排后，再放厚钢板，施加垂直荷载至额定值，并保持不变。
- B.2.3** 与剪切试验相同，安装水平向测位移的百分表，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 。
- B.2.4** 卸去荷载，将仪器重新安装好，按 B.2.2 条、B.2.3 条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。
- B.2.5** 变更垂直荷载，按 B.2.2~B.2.4 条的规定进行试验，实测值列于表 B.2.5。然后根据表 B.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，如图 B.2.5 所示。

表 B. 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 $f=F/p_v$ (两排滚轴)	0. 042	0. 043	0. 043	0. 040	0. 038	0. 040
摩擦系数 $f=F/p_v$ (一排滚轴)	0. 021	0. 022	0. 022	0. 020	0. 019	0. 020

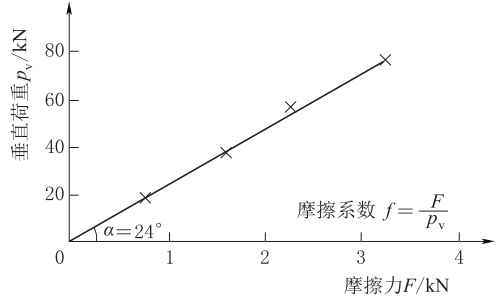


图 B. 2. 5 $p_v \sim F$ 关系曲线示例

注：1. 直剪仪面积为 2000cm^2 。
2. 上、下滚轴排。

附录 C 旁压仪标定

C.1 目的和标定要求

C.1.1 试验前应对仪器进行两项标定：弹性膜（包括铠装护套）的约束力标定和仪器综合变形标定。

C.1.2 新仪器首次使用，应进行两项标定。更新弹性膜（或护套），应进行弹性膜约束力的标定。

C.1.3 弹性膜一般进行 20 次试验后，应复校一次。对极限压力 $p_t \leq 100 \text{ kPa}$ 土中实验时，每 10 次试验后，应复校一次。当气温较大变化或放置较长时间后，应重新标定。

C.1.4 接长或缩短导管，更新变形传感器，应进行仪器综合变形标定。

C.2 标定方式

C.2.1 弹性膜约束力标定应符合下列规定：

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。

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，反复涨缩 4~5 次，然后再进行校验。

3 以加压等级为 10 kPa 逐级加压，并按 21.3.12~21.3.14 条规定的观测时间和终止条件的要求进行。

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。

C.2.2 仪器综合变形标定应符合下列规定：

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，使旁压管受到径向限制。

2 以加压等级为 100 kPa 逐级加压，按 21.3.12 条规定的观测时间测读量管的水位下降值。宜加压至仪器额定压力的 80%

终止试验。

C.3 制 图

C.3.1 对弹性膜约束力标定：绘制压力 p 值和测管水位下降值 S （或压力 p 的传感器输出值 δ ）的关系曲线，即为弹性膜约束力标定曲线，如图 C.3.1 所示。

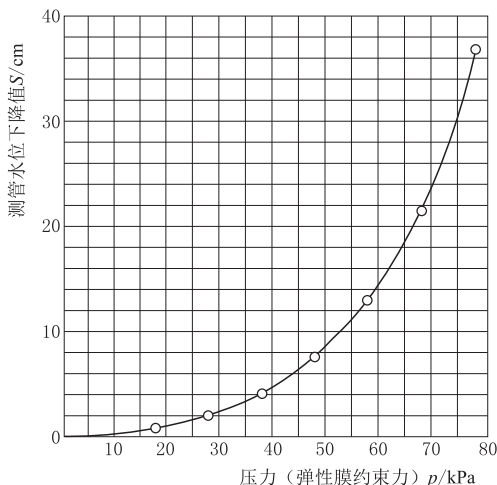


图 C.3.1 弹性膜约束力标定曲线示例

C.3.2 仪器综合变形标定：绘制压力 p 值和测管水位下降 S 值的关系曲线，如图 C.3.2 所示。图中直线的斜率 $\Delta S / \Delta p$ 为仪器的综合变形标定系数。

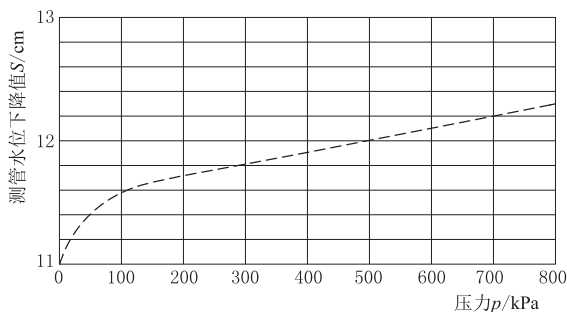


图 C.3.2 仪器综合变形标定曲线

本规程用词说明

1 为了便于在执行本规程条文时区别对待，对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：
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：
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该这样做的：
正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”。
- 4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 《实验室用标准筛振筛机技术条件》GB 9909
- 《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》GB/T 15406
- 《工程测量规范》GB 50026
- 《土工试验方法标准》GB/T 50123
- 《土工试验规程》SL 237
- 《水利水电工程注水试验规程》SL 345
- 《水电水利工程土工试验规程》DL/T 5355
- 《水电水利工程粗粒土试验规程》DL/T 5356
- 《土石筑坝材料碾压试验规程》NB/T 35016
- 《水电水利工程钻孔注水试验规程》NB/T 35104

团 体 标 准

粗粒土试验规程

T/CHES 29—2019

条 文 说 明

目 次

1	总则	197
2	术语与符号	198
3	基本规定	200
4	土样和试样制备	201
5	颗粒分析试验	203
6	含水率试验	204
7	比重试验	205
8	相对密度试验	207
9	渗透及渗透变形试验	217
10	反滤试验.....	221
11	压缩试验.....	223
12	直接剪切试验.....	225
13	三轴压缩试验.....	228
14	三轴蠕变试验.....	233
15	三轴湿化变形试验.....	234
16	三轴劣化变形试验.....	238
17	CT 三轴试验	242
18	真三轴试验.....	243
19	振动三轴试验.....	247
20	动力触探试验.....	253
21	旁压试验.....	260
22	载荷试验.....	266
23	波速试验.....	273
24	深厚覆盖层密度试验.....	280
25	原位密度试验.....	281
26	碾压试验.....	282
	附录 A 土样级配缩尺处理方法	287

1 总 则

1.0.1、1.0.2 粗粒土由于尺寸大、质量大，现行版本的室内试验几十年来多数是对最大粒径 60mm 以下的试样进行试验。而工程使用的粗粒土最大粒径大多数在 300mm 以上。尽管也采用了一些技术方法进行模拟和推导，但存在的不足和问题也是明显的，现场和原位的试验方法也比较单一。随着我国水利水电工程的高速发展，高坝、超高坝的不断出现，筑坝材料的使用越来越宽泛，粗粒土试验的新技术和新方法也在不断发展和成熟。原级配和近似原级配的试验方法已在许多大型工程中使用，且取得了良好的效果，因此，将这些新技术新方法及时的纳入规程进行推广使用，对促进我国筑坝技术的提高，具有重要的意义。

2 术语与符号

2.1 术 语

2.1.1 本规程为无黏性粗粒土试验规程。《土的工程分类标准》GB/T 50145、《土工试验规程》SL 237 规定,粗粒土是试样中粗粒组 ($0.075\text{mm} < d \leq 60\text{mm}$) 质量大于总质量 50% 的土,本规程涉及的粗粒土是一个宽泛的概念,包含了《土的工程分类标准》GB/T 50145、《土工试验规程》SL 237 中的粗粒组、巨粒组两部分内容,按照习惯统称为粗粒土。

现行规程《土工试验规程》SL 237-054、《水电水利工程粗粒土试验规程》DL/T 5356 “粗粒土相对密度试验” 等中规定,能自由排水的粗粒土中细粒含量 ($d < 0.075\text{mm}$) 不超过 12%。本规程归纳分析现行规程粗粒土的定义和概念,以及现场粗粒土试验检测经验,提出了粗粒土是指“粒径小于 0.075mm 土的质量不大于总质量 12% 的粗粒组和巨粒组土的总称”。

2.1.2 根据多个工程料源勘察和实际检测取样中发现,技术文件中给定的最大粒径的颗粒含量几乎很少,可视为散布在土内的零星颗粒,对于坝料性能指标影响较小。所以本规程中提出了有效最大粒径的概念,即平均级配曲线上累计质量大于 95% 的颗粒粒径。表 1 列举了一些工程中现场检测中各粒径组所占比例与工程中技术文件给定的最大粒径的对比结果。

表 1 坝料设计最大粒径与实际检测最大粒径结果统计表

坝料种类 粒径 /mm	>800	800~ 700	700~ 600	600~ 500	500~ 400	400~ 300	<300	备注
贵州省黔中水利枢纽一期工程水源枢纽一期工程平寨水库、设计最大粒径 800mm								
次堆石 145 组	0	1	1	21	87	33	2	
主堆石 327 组	0	1	7	38	183	88	9	

表 1 (续)

坝料种类 粒径 /mm	>800	800~ 700	700~ 600	600~ 500	500~ 400	400~ 300	<300	备注
青海公伯峡水电站工程、设计最大粒径：砂砾石 500mm、堆石料 800mm								
砂砾石 127 组			0	6	27	76	18	
爆破料 268 组	0	7	12	47	84	95	23	
青海积石峡水电站工程、设计最大粒径 800mm								
爆破料 787 组	0	2	4	39	323	325	94	
新疆奴尔水利枢纽工程、设计最大粒径 600mm								
砂砾石 1803 组			0	8	95	810	890	
新疆大石门水利枢纽工程、设计最大粒径 500mm								
砂砾石 239 组				0	9	77	153	
新疆大河沿大坝工程、设计最大粒径 600mm								
砂砾石 1135 组			0	0	28	172	935	

3 基本规定

3.0.3 根据试验检测项目，室内试验及样品的力学试验时试样直径与试验料最大粒径的径径比宜取 5，现场试验时试样直径与试验料最大粒径的径径比宜取 3。

4 土样和试样制备

4.1 一般规定

4.1.1、4.1.2 本规程要求土样选取和制备应采用统一的制备程序和方法，以提高试验过程的规范化和试验结果的可靠性、可比性。

4.4 土样制备

4.4.1 风干土样制备中，大于 100mm 土样可采用机械筛、尺量法或套环法分级称量。机械筛：根据检测需要定制 200mm、400mm 试验筛。套环法：可用 $\phi 8$ 光圆钢筋制作直径分别为 200mm、400mm、600mm、800mm 钢环。200 ~ 100mm、400 ~ 200mm 选用其中任意一种方法即可；大于 800mm、800 ~ 600mm、600 ~ 400mm 用尺量法或套环法，进行土样分级。

4.5 土样级配

4.5.1 试验土样级配选择是影响粗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，一般应按料场或土料的天然级配、人工合成级配、设计确定级配、模拟工程实际情况选择级配等情况确定，以使试验成果具有代表性。在试验设备或试验环境具备的情况下宜采取与实际材料一致的原型级配进行，减少缩尺效应引起的试验结果偏离。

目前，试验采用的级配类型有天然级配和人工级配两种。天然级配是根据料场或土的天然级配制备试样，进行各项物理力学性能试验，并按此来确定各项指标的范围及采用值。人工级配是根据料场或实际填筑料试验所得级配成果，按统计方法整理得出的级配，随统计方法的不同有多种型式：有采用土料方量百分率

级配曲线的方法统计，得出典型级配，包括上包线级配、下包线级配和加权平均级配；也有根据多组级配曲线的外包轮廓作出级配范围线，以最细者为上包线，最粗者为下包线，各组加权平均为平均级配。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；加权平均级配曲线系代表料场的平均级配情况，大多以此作为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，一般在一定范围内进行研究。此外，人工级配也包括了设计工程类比或视料场的实际情况确定的级配，属工程要求的级配。

总之，试样级配选择是一个复杂的问题，实际选用时需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。

4.5.2 用原级配土料进行试验是最适当的，但常常由于仪器尺寸对试样最大粒径的限制要求，有时不得不对土料中某些超过试样允许粒径的颗粒进行处理，本规程根据业内对超径颗粒处理的习惯称谓统称为缩尺处理。

在实际处理超粒径颗粒的缩尺时，可根据土料的性质和试验项目的要求选择使用。

4.6 试样制备

4.6.1、4.6.2 研究表明，由于颗粒级配、颗粒大小、颗粒破碎等因素影响，粗粒土具有明显的缩尺效应。采用缩尺级配料进行试样制备时，应保持室内试样与现场相对密度相匹配，尽可能使得室内试验结果客观反映现场的真实情况。

5 颗粒分析试验

5.3 试验步骤

5.3.1 粗粒料取样数量与颗粒的大小有关，以最大颗粒粒径为标准确定试样用量的方法，比较直观易于掌握，故本规程按最大颗粒粒径确定取样数量。砂砾料取样数量考虑了料场复查、施工过程中检测中，试样最大粒径、试坑尺寸等因素，并充分考虑试样的代表性综合确定，具体实施过程中，应根据工程具体情况适当进行调整。

堆石料爆破一般有梯段爆破法和洞室爆破法两种方法，根据以往工程实际经验，爆破料具有方量大、级配不均匀等特点，考虑爆破料试样的代表性及工程特性，确保试样具有代表性，堆石料爆破试验的颗粒级配试验，一般按砂砾料 5~8 倍标准取样。

5.4 计算与记录

5.4.1~5.4.5 在颗粒分析计算中，应分别计算出不同粒组的“小于该粒径的土质量百分数”和“小于该粒径的总土质量百分数”。对“小于该粒径的总土质量百分数”应采用综合加权计算方法进行计算。综合加权计算法是指各个的数值乘以该数值在总数值所占的比例之和与各个数值比例之和的比值。

6 含水率试验

6.2 烘 干 法

6.2.2 烘干法是含水率室内试验的标准方法，一般需要较长时间才能测定含水率，效率低。随着新设备的使用，还可采用红外线、微波炉等设备进行检测，使用新设备应与标准方法进行烘干条件对比，建立等效关系。

6.3 炒 干 法

6.3.2 在潮湿的环境下，试样炒干后，尽量减少冷却时间，以避免试样吸收空气中的水分。

6.4 晾 晒 法

6.4.2 晾晒法应选择光照充足，空气湿度小于 50% 的晾晒环境，人工翻倒 3~5 次。湿样称量时，因水分蒸发较快，需防止水分散失。堆石料和砂砾石料晾晒时间应不少于 6h，对于风化严重的粗粒料，可增加晾晒时间。

6.5 快速测定法

6.5.3 当现场筑坝料粒径偏大且无明水，检测取样频次较高时，为提高工作效率，本方法可用于快速准确检测筑坝料含水率。宜用数理统计的回归分析方法建立不同砾石含量、不同含水率的全料含水率与小于 5mm（或 10mm）含水率关系标准曲线，相关系数 R 不得小于 0.95。实际应用中根据小于 5mm（或 10mm）粒组的含水率实测值、砾石含量确定全级配料含水率。这一方法在陕西黑河金盆水利枢纽工程坝料填筑过程使用，在满足试验精度要求的前提下，缩短了检测时间。

7 比重试验

7.1 一般规定

7.1.1 土粒比重是土的基本物理指标之一，它是计算孔隙比和评价土类的主要指标。根据现行国家标准《岩土工程基本术语标准》GB/T 50279 仍使用“土粒比重”这个无量纲的名词，作为土工试验中的专用名词。土粒比重定义为土粒在 105~110℃ 温度下烘至恒量时的质量与同体积 4℃ 时纯水质量的比值。

7.1.2 本规程根据颗粒粒径大小分别采用比重瓶法、浮称法和虹吸筒法。在进行混合测定时，可采用下列处理方法：

(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。

(2) 当大于 5mm 的粗粒含量较多时，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。

7.4 虹吸筒法

7.4.2 虹吸筒法适用于测定粒径大于 20mm 的粗粒土全级配试样比重，干燥试样时，室内有烘箱且粒径满足烘箱要求时，采用烘干法；现场无烘箱或试样粒径较大无法采用烘箱干燥时，可采用风干法，试样质量偏差连续 1h 不超过总质量 0.5% 时，即认为已达到干燥状态。

7.4.3 颗粒大于 5mm 的砾石、碎石和卵石等粗粒，颗粒本身有孔隙存在，孔隙又分为闭口的与开口的两部分，当浸水时，开口孔隙被水填充，闭口孔隙则水不能浸入。根据以上情况，粗粒土土粒比重的种类，通常以下列四种方法来表示。

(1) 视密度：土粒干质量与相当于土粒自身实体体积加闭口孔隙体积的纯水 4℃ 时质量的比值，即

$$G_s = \frac{m_d}{(V_s + V_0)\rho_{w0}} \quad (1)$$

式中： ρ_{w0} ——4℃时水的密度，g/cm³；

V_s ——土粒自身实体体积，cm³；

V_0 ——土粒闭口孔隙体积，cm³。

(2) 干密度：土粒干质量与相当于土粒总体积（包括土粒自身实体体积、闭口孔隙体积和开口孔隙体积）的纯水 4℃时质量的比值，即

$$G_{s2} = \frac{m_d}{(V_s + V_0 + V_1)\rho_{w0}} \quad (2)$$

式中： V_1 ——土粒开口孔隙体积，cm³。

(3) 饱和面干密度：当土粒呈饱和面干状态时的土粒总质量与相当于土粒总体积的纯水 4℃时质量的比值，即

$$G_{s2} = \frac{m'_d}{(V_s + V_0 + V_1)\rho_{w0}} \quad (3)$$

式中： m'_d ——土粒饱和面干总质量，g。

(4) 土粒比重：土粒干质量与相当于土粒自身实体体积的纯水 4℃时质量的比值，即：

$$G_s = \frac{m_d}{V_s \rho_{w0}} \quad (4)$$

规程中采用视密度未考虑闭口孔隙影响，这样做比较方便，它与细粒土的土粒比重定义在使用上是一致的，也是切合实际的，因为一般指的空隙，实际上是指能被水填充的空隙。

8 相对密度试验

8.1 一般规定

8.1.1 粗粒土包括天然砂砾石和人工爆破堆石料，本规程规定细粒土（小于 0.075mm）的含量不超过 12%，其目的是要求土样能自由排水，颗粒之间不因细粒土含量过多而产生黏聚力。

本试验适用于测定无黏性粗粒土的最大与最小干密度。粗粒土的力学性质与其孔隙比有密切关系，但不同的粗粒土，即使孔隙比相同，性质也不尽相同，孔隙比不能表示紧密程度。相对密度则可以表示粗粒土的紧密程度，表示天然状态或填筑密度介于最密实与最松散之间的某种状态。相对密度相当于黏性土的压密度，常用来作为坝体设计和施工控制的标准。

振动台法与表面振动法均是采用振动方法测定土的最大干密度，是利用振动压力作用使土颗粒相互挤密，可以统称为振动法，是现行行业标准中规定的试验方法。振动台法是在土样表面施加一定的静压力，通过土样下面振动台的振动和表面静压力的压实作用使土样颗粒互相填充密实。其压实效果取决于土样的级配特征、表面静压力、振动频率、振幅和振动持续时间。

表面振动法是在土样表面施加一定的静压力，并对土样表面给予一定的激振力作用使土样颗粒互相填充密实，其压实效果取决于土样的级配特征、表面静压力、激振力、振动频率、振幅和振动持续时间。

研究结果表明：这两种方法前者是整个土样同时受到垂直方向的振动作用，而后者是振动作用自土体表面垂直向下传递。对无黏性自由排水粗粒土最大干密度试验的测定结果基本一致，但表面振动法更接近于现场振动碾压的实际状况。因此，试验室可

根据试验实际情况进行选择。

密度桶法是现场确定原级配无黏性粗粒土相对密度的试验方法，解决了以往缩尺、推导确定相对密度的弊端，更符合现场施工的实际状况。现行水利水电工程对粗粒土料的压实标准基本都采用相对密度判定压实质量，而相对密度计算的基准，最大、最小密度是通过缩尺进行室内试验，然后通过理论推算确定原型级配粗粒土的压实标准，与实际施工存在一定的差异。《土石筑坝材料碾压试验规程》NB/T 35016 附录 A “砂砾料原级配现场相对密度”中对砂砾石料的相对密度试验方法有过一定的规定和要求，《水电水利工程砂砾石料压实质量密度桶法检测技术规程》T/CEC 5001—2016 中对砂砾石料的压实质量检测从标准建立、检验方法、标准应用等方面制定系统的技术标准，规范了砂砾石料压实质量检验标准。

密度桶法自 1998 年开始进行了系列研究，并应用于许多工程实际，且已列入现行标准。说明本方法已趋于成熟，有条件列入本规程正式使用。

8.2 振动台法

8.2.1 现行水利水电标准规定振动台法适用于最大粒径 $\leq 60\text{mm}$ 的无黏性粗粒土。经过试验验证，当试样筒尺寸满足要求时，对于最大粒径 $\leq 100\text{mm}$ 的无黏性粗粒土，也可采用振动台法测定最大干密度。因此，当试验仪器满足规定时，工程实际中涉及的最大粒径 $\leq 100\text{mm}$ 的过渡料、反滤料、垫层料经过现场论证也可采用振动台法测定最大干密度。

目前振动台法测定相对密度只有我国和美国有试验方法，试样筒尺寸与美国 ANST/ASTM. D2049 的对比见表 2，试样筒尺寸随土粒最大粒径而异，且应满足公认的 $1/5$ 径径比与径高比的要求（颗粒最大粒径与容器直径或高度之比）。

国内外现行标准中对振动台法测定粗粒土的技术参数对比见表 3。

表 2 试样筒尺寸比较

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
30	21.94	34	23.09	24033	14160	60	76.2
20	15.12	23	15.52	7226	2830	20	38.1

通过对比试验发现，随着附加荷重的增加，压实干密度也增大。当附加压力从 7kPa 增至 13.8kPa 时，干密度显著增加，此后再增加附加荷重至 21kPa 时，干密度则无显著增加。因此，本规程规定表面静压力取 14.0kPa。

8.2.2 经过风干和不同含水量状态下，最大、最小干密度试验研究对比，风干状态时最大、最小干密度平行试验差值最小，结果可靠；不同含水量时，最大、最小干密度受环境等因素影响较大，平行试验结果误差较大，因此本规程建议采用风干试样进行试验。

8.2.3 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，需进行平行试验。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，容器尺寸与最大干密度试验保持一致。

现行标准中最小密度体积采用试样筒体积。因粗粒料的顶面整平的难度较大，且人为误差较大，建议距筒顶 3~5cm 的体积用灌砂法测定。

试验证明：当细粒含量较多时，含水率的少量增加对最小密度的测定结果影响较大。因此，在最小密度的测定中，只能用烘干料或充分风干料进行试验。

8.2.4 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，用振动法测得的研究成果表明：当含水率相当于饱和度为 0.8 时，含少量细粒（小于 0.075mm）的粗粒土能得到最好的振动密实；同时，当含水率为

表 3 国内外现行振动台法技术参数对比

采用标准	振动频率 /Hz	振幅 /mm	试样装 填层数 /层	每层振动 持续时间 /min	表面静 压力 /kPa	试筒尺寸		最大 粒径 /mm
						内径 /mm	容积 /cm ³	
《公路土工试验规程》 JTG E40—2007	20~60 可调	0~2 可调	三	10 (50Hz) 8 (60Hz)	大于 18	280	14200	60
《水电水利工程粗粒土试验规程》 DL/T 5356—2006	40~60	0~2 可调	一	8	14	300	24033	60
《土工试验规程》 SL 237—1999	40~60	0~±2 可调	一	8	14	300	24033	60
《铁路工程土工试验规程》 TB 10102—2004	40~60	0~2 可调	一	8	14	300	24033	60
美国 ASTM D4253—00 (2006)	0~60 可调	0.2~0.64 (60Hz) 0.3~0.91 (50Hz)	一	10 (50Hz) 8 (60Hz)	14	280	14200	76
石头水库应用实例	50	0.3~0.7	三	8	14	600	—	100

零时，与最优含水率时所得的干密度极相近。因此，本规程采用风干料。

关于振动加速度和振动时间的选择。试验表明：当振动频率为 25~30Hz 时，有一个最优振幅为 0.5mm，相应的振动加速度为 $1.81g$ ($g=9.81\text{m/s}^2$)；当频率为 47.5~50Hz 时，有一个最优振幅为 0.30mm，相应的加速度为 $2.73g$ 。可见，为得到较大的干密度，采用振动频率 47.5~50Hz 时，最优振幅 0.25mm，相应的最优加速度为 $2.5g$ 。当振动加速度超过一定值（如 $3.63g$ ）时，试样颗粒会产生分离现象，这表明加速度不可太大。试验研究还表明：振动干密度随振动时间的延长而增大，但增至 8min 左右，干密度基本趋于稳定值。故振动历时规定为 8min。

8.3 表面振动法

8.3.1 对于表面振动器的振动频率为 40~60Hz，对试样的静压力为 14kPa。考虑到高土石坝的建设，对粗颗粒土的碾压标准不断提高，试验单位可根据工程的实际情况调整静压力和振动时间，需在试验报告中指出。

振动台法系现行标准规定的唯一最大干密度的室内测试方法，本规程增加了表面振动法与之并列，该法已为英国、瑞典等国家标准采用。振动台法和表面振动法均是采用振动方法测定土的最大干密度，振动台法是整个土样同时受到垂直方向的振动作用，而表面振动法是振动作用自由土土体表面垂直向下传递。国内于 20 世纪 80 年代开始进行了表面振动法测试最大干密度，并应用于许多工程实际，说明该法已趋于成熟，有条件列入本规程正式使用，因此，试验室可根据设备拥有情况并结合工程实际选取最大干密度试验方法。

8.4 现场密度桶法

8.4.1

1 随着振动碾压设备的发展，工程现场施工用振动碾一般为

22~26t 自行式振动碾。振动碾自重太小，不易达到最大干密度；振动碾自重太大，破碎率太高，改变了试验用料的级配。所以根据坝料岩石性质等选用与工程施工一致的设备进行试验，并在试验报告中注明使用设备的名称、型号等，以便试验结果的溯源。

2 密度桶为带底无盖钢桶。通过现场试验研究数据显示，最大有效粒径与桶高之比不小于 2 倍且不大于 3 倍时，最大干密度试验结果更接近真值。通过不同密度桶尺寸效应影响试验得出，采用最大有效粒径 3~5 倍密度桶直径，最大干密度试验结果更接近真值。

4 分级直径环直径与粒径分级相匹配。直径环如图 1 所示。

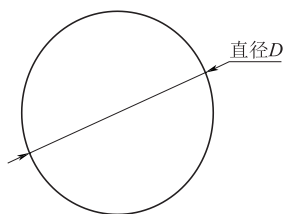


图 1 直径环示意图

粗筛：圆孔，孔径为 100mm、80mm、60mm、40mm、20mm、10mm、5mm。

6 标准砂指 0.25~0.5mm 的标准砂。

8.4.2

1 经对同一试验用料不同含水率最大干密度试验结果对比分析，当试验用料含水率在 1%~3% 时，测定的最大干密度最小。当含水率在 3%~5% 时测定的最大干密度值与风干料接近，大于 5% 后最大干密度开始呈降低趋势，因此本规程规定采用风干料作为试验用料。

试验用料级配是关系试验成果准确可靠的关键因素之一，目前设计单位一般按照经验或料场初步勘探资料提供设计包络线，该包络线可以作为前期试验的依据。但由于设计单位的料场勘探到施工，往往间隔时间较长，料场实际情况可能发生变化。施工

单位进行相对密度试验前，宜对料场进行复查，以确保相对密度试验结果的可靠性。

平均级配线通过上包络线、下包络线算术平均计算取得。

理论上试验级配线选择上包络线、上平均级配线、平均级配线、下平均级配线、下包络线 5 条级配线可以满足试验的需要，但由于砂砾石料源一般储量大，成因复杂，层状分布特点明显，且因施工中各种因素的影响，有可能出现粗料或细料集中的现象，有时料场复查取得的级配包络线还不一定能完全覆盖料源全部级配范围。为了尽可能的覆盖全部料源级配，需要时，可对上、下包络线的砾石含量减小、增大 10% 平行上移、下移延伸，作为试验级配的上包络延伸级配线和下包络级配延伸线。某工程的 7 条试验级配线的确定见表 4。

表 4 某工程的 7 条试验级配线的确定

粒径/mm		800	600	400	200	100	80	60	40	20	10	5
小于某 粒径的 料占总 料重的 百分比 /%	上包线 延伸线			100	94.55	74.28	68.00	62.19	55.72	47.00	40.65	36.12
	上包线			100	84.55	64.28	58.00	52.19	45.72	37.00	30.65	26.12
	上平均线	100	96.95	92.63	75.91	56.75	51.00	45.14	39.04	30.79	24.99	21.27
	平均线	100	93.90	85.25	67.28	49.21	44.00	38.10	32.36	24.57	19.33	16.42
	下平均线	100	90.85	77.88	58.64	41.68	37.00	31.05	25.68	18.36	13.66	11.56
	下包线	100	87.80	70.50	50.00	34.14	30.00	24.00	19.00	12.14	8.00	6.71
	下包线 延伸线	100	77.80	60.50	40.00	24.14	20.00	14.00	9.00	2.14	0.00	0.00

试验用料的分级标准依据料源级配组成确定，目前标准对大于 60mm 的粗粒土还没有统一分级标准，根据工程应用实际经验，本条对大于 60mm 土样按照 80mm、100mm、200mm、400mm、600mm 进行分级。

试验用料由于其粒径组成范围较大，大于 100mm 的砂砾料采用直径环分级，等同于通过同直径的圆孔筛，结果较为准确。

2 试验场地应坚实平整，基础用施工拟用设备中最大工作质量的振动碾按 $2\sim 3\text{km/h}$ 的速度碾压，直到每碾压 2 遍后全场平均沉降量不大于 2mm 。场地高差小于 20cm 且局部起伏差小于 5cm ，为基础处理合格。

3 试验工期要求较紧时可增加密度桶数量，同时增大试验场地范围，可设置多桶布置同时进行试验。有多个工程采用一次布置 5 个密度桶进行试验。

密度桶的布置还可采用挖槽置放式。根据密度桶的尺寸，在试验场地上挖槽，在槽底进行基础处理，合格后在槽底均匀铺一层厚 5cm 细砂，再将密度桶安放在细砂上，将其中心点位置对应标识在试验场外，用灰线标识。密度桶中心线应在同一轴线上，桶与桶之间的净间距应不少于 3m ，周围填充砂砾石。但这种方法应注意防止密度桶周围密实的砂砾石托住振动碾的滚轮，密度桶内试验料压不密实现象发生。

4 最小干密度试验时按照选定的级配计算出各级料的百分含量和拟制备试验料的质量，分级称取试验料。再将制备好的各级试验料搅拌均匀后，四分法分开，装入密度桶内。

装填时将试样轻轻放入桶内，沿桶底部，从四周到中间均匀地放入，确保试样保持自然松散状态，装填过程中严禁将试料洒落在桶外。

5 最大干密度试验时密度桶碾压采用与现场施工相一致的碾压机具，碾压完成后需对桶内试验料进行级配测定，桶内料的砾石含量变化率。微风化料一般不大于 $2\%\sim 3\%$ ，软岩不宜大于 $5\%\sim 6\%$ ，强风化岩应进一步研究，特别软岩应论证后采用。几个工程实际检测结果见表 5。

2) 经类似工程试验，当振动碾压 12 遍时，粗粒料密度增加已趋于稳定，故最大干密度试验时，振动碾压遍数确定为 16 遍后在每个密度桶范围内微动振动碾压 15min ；为防止振动碾原地不动造成沉陷，因此振动碾在密度桶范围内碾压时应微动。

表 5 碾压前后砾石含量变化工程实例

工程名称	填筑部位	最大粒径 /mm	碾压遍数 /遍	砾石含量变化率 /%
公伯峡混凝土 面板堆石坝	主堆石 3BⅡ 砂砾石料	340	10	2.5
		360	8	1.7
潘口混凝土 面板堆石坝	主堆石 3B 砂砾石料	430	10	2.1
		330	8	2.2
龙背湾混凝土 面板堆石坝	主堆石 3C 砂砾石料	280	8	1.2

4) 碾压完成后，超出密度桶顶的粗粒料试样高度应不大于 10cm，是指桶顶到碾压面高度的平均值。

上述试验步骤和控制参数是总结砂砾料相对密度试验成果确定的，对于堆石料的相对密度试验的控制参数等还需要进一步研究总结。

8.5 计算与记录

8.5.3、8.5.4 在实际工程的设计和施工中 also 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，故本标准保留这两个指标。

8.5.5 干密度、砾石含量（ P_s 含量）及相对密度三因素相关曲线，目前已广泛用于砂砾料坝体填筑质量控制中。主要是根据坝料的不同砾石含量采用现场压实设备进行最大、最小干密度试验，计算不同相对密度时的坝体填筑控制干密度，根据以上数据绘制的曲线图。坝料填筑时根据实测干密度、砾石含量查图确定实测相对密度是否满足设计控制要求。表 6 及图 2 为某工程相对密度试验结果汇总表和三因数曲线图。

表 6 现场原级配料相对密度试验试验结果汇总表

相对密度	砾石含量/%					
	65	70.3	74.8	79.3	83.8	88.3
1	2.351	2.403	2.429	2.425	2.407	2.375
0.95	2.329	2.380	2.406	2.402	2.384	2.352
0.90	2.308	2.358	2.384	2.379	2.361	2.330
0.85	2.288	2.336	2.361	2.357	2.339	2.308
0.80	2.267	2.315	2.340	2.335	2.318	2.286
0.70	2.227	2.273	2.298	2.292	2.275	2.244
0	1.984	2.019	2.040	2.033	2.018	1.988

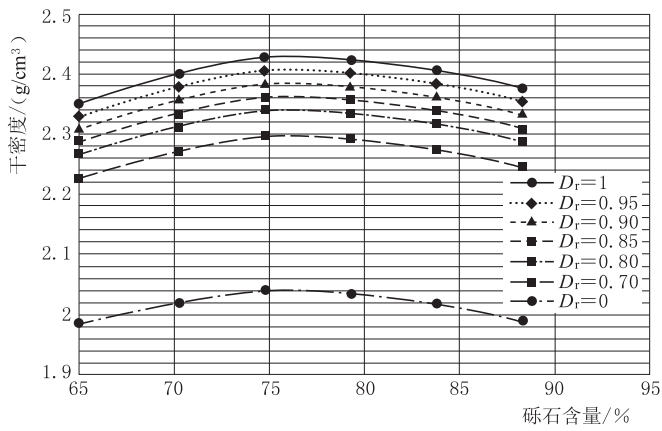


图 2 现场原型级配相对密度试验三因素相关图

9 渗透及渗透变形试验

9.1 一般规定

9.1.1、9.1.2 粗粒土的渗透变形试验，主要适用于扰动的粗颗粒土试样。对于原状粗颗粒土试样，考虑到粗颗粒原状土的制样和运输难度非常大，不适宜在室内进行，建议进行原位渗透试验。

9.2 室内渗透及渗透变形试验

9.2.1 目前室内试验时，加荷的目的在于使试验更好地符合天然受力状态。小尺寸渗透仪目前一般采用杠杆式加荷设备。对于大尺寸仪器，由于所需荷载总量较大，设备也要加大，应用不便，且占地较多，宜采用液压等其他加荷方式。

9.2.2 对超大粒径粗粒土，径高比、径径比可根据最大粒径情况和现场条件适当调整。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，也可用嵌有机玻璃的铁质圆筒，以便观察。

测压管的布置原则：

(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) 试样段测压管布置较密些，沿水流方向至少 3~5 个测试点。

(3) 在做反滤层试验时，在反滤层与被保护土之间及后滤层每层之间的接触面上必须布置测压管。

(4) 在做水平渗透变形及接触冲刷试验时，在不同介质接触面上，至少布置 3~5 个测压管。

(5) 当采用测压板测量水头时，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 2mm；测压板上零点读数，

要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。当采用压力传感器测量水头，根据试验情况合理选择传感器量程，且其误差应小于 $\pm 0.5\%F.S.$ 。

9.2.4

1 试样制备时关于超粒径处理办法主要为剔除法、等量替代法、相似级配法和混合法，宜优先考虑等量替代法。试样装入仪器中，不可能与仪器边壁很好结合，容易形成边壁通道，渗流集中。因为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，目前均处于摸索阶段，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。

2 试样饱和时过滤排气可以起到一定作用，对于垂直渗透试验，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。对于水平渗透试验，当排气孔流出连续水流后，关闭排气孔。若试验用自来水，至少贮存一天曝晒排气后再作为试验用水，以减少水中气体的离析。

3 为了缩短试验时间，将渗流坡降的递增值，采用逐级加大的方法，即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。但需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。

试验中对管涌的鉴别，国内外缺乏一个明确标准，概括起来，主要有以下几种：

(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, 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) 垂直渗透试验试验时试样表面有 $2/3$ 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, 此时曲线的纵坐标值随着横坐标增大而减小, 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, 应以曲线为主, 并结合目测。

9.3 现场渗透试验

9.3.1 双环法边界条件较为清晰, 在渗透系数较小的情况应用效果较好, 但渗透系数较大时难以实施。实际操作中双环法一般用于渗透系数 $\leq 10^{-3}$ cm/s, 单环法用于渗透系数 $> 10^{-3}$ cm/s。对于多层填筑体采用埋管法测定渗透系数。

9.3.2 根据目前工程应用经验, 渗透环有效直径大小按照测定土样最大粒径的 3~5 倍, 且不小于 40cm、不大于 200cm 时, 能较好地反映被测对象的渗透能力, 且易于操作。

(1) 对于单环法现场原位渗透试验, 根据被测土料最大粒径不同分别选择渗透环直径。当被测土料最大粒径为 $80\text{mm} < d_{\max} \leq 300\text{mm}$ 时, 渗透环直径可选择为 100cm。当被测土料最大粒径为 $300\text{mm} < d_{\max} \leq 800\text{mm}$ 时, 渗透环直径选择不大于 200cm。渗透钢环高度 40cm, 壁厚不小于 4mm, 具有足够的

刚度。

(2) 埋管法参照日本电力土木技术协会《最新土石坝工程学》中的原位渗透试验方法进行。埋管法中的钢管内径 30cm、高度 80~120cm，壁厚不小于 6mm，底部、顶部不封闭，管身为梅花形布孔花管，孔径 5mm，间距 2~3cm。该方法已在陕西黑河金盆水利枢纽工程、青海公伯峡水电站大坝等工程填筑料渗透系数原位测定中得到较好的应用。对碾压土体在碾压前应对管口采取合适的保护措施，可采用钢板覆盖管口的方式。

9.3.3 单环渗透试验法中提出了两种不同试坑深度的渗透系数测定方法：一是直接在碾压层面测定渗透系数；二是主要考虑在工程中利用软岩、非硬岩筑坝及目前使用的振动碾吨位较大情况。非硬岩填筑料石料抗压强度低，碾压时会造成表层料破碎形成致密层，当利用软岩时破碎更加严重，最大可影响约 10~20cm 深度，表层渗透系数很小，渗透系数一般降低 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ ，应充分考虑该因素的客观存在。根据设计要求，提供了文中的两种试验深度的试验方法，其结果供设计参考。

单、双环法测定的为水流向下渗透的渗透系数；埋管法主要测定的为水流沿水平方向的渗透系数。埋管法可以根据需要测定单一碾压层、跨两层、多层的渗透系数，增加花管的长度即可。花管预埋时应力求保证竖直。本质上三种方法均有渗透多向性的特征，但考量的主要渗透方向不同。埋管法测定碾压土体的渗透系数时，碾压结束后，清除预埋管管口上部的填筑料，漏出管口后进行试验。

9.3.4、9.3.5 本方法为现场原位渗透系数的近似测定，计算时不考虑水头等情况。计算表格为建议表格，使用时可根据现场需要自行设计制定。

10 反 滤 试 验

10.1 一 般 规 定

10.1.1 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。试验的目的是在细、粗料之间，选择级配适宜的砂砾料组合层，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。

10.2 设 备 和 设 施

10.2.1 反滤试验使用的仪器，因为考虑到反滤试验的装样、饱和以及测试方式和渗透变形试验基本相同，利用垂直渗透变形仪能达到以上试验要求，故直接采用垂直渗透变形仪进行反滤料试验。

10.3 试 验 步 骤

10.3.1 对于试验前后各层的土料均要进行颗粒分析，在同一颗粒分析坐标纸上绘制被保护层和反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，从而判断所选定的反滤层土料是否能满足反滤要求。

10.3.2 高土石坝防渗体的反滤层应按可能产生裂缝的原则设计已逐渐被认可。黏性土考虑裂缝的反滤试验方法有裂缝自愈性能试验、松填黏性土反滤试验等，试验基本上是在大型垂直渗透变形仪上进行。常用的裂缝模拟方式有矩形缝和圆孔两种，由于采用矩形缝隙模拟更接近实际裂缝的形态，本规程建议采用矩形缝，造缝方法采用预埋式造缝法，这样可避免后制缝（试验样制备后再钻孔造缝）对缝周围土体干扰，裂缝尺寸控制及与反滤料的接合比较容易解决。试样直径或边长建议不小于 20cm，且应与试样最大颗粒粒径之比不小于 5。

试样制好后，黏性土试样不进行饱和，立即施加水头进行试验，采用一次性加压到位的方法施加水头，以模拟水库在高水位运行时心墙突然出现贯穿性裂缝的最不利条件。

11 压 缩 试 验

11.2 设 备 和 设 施

11.2.1 试样尺寸的大小，应与粗粒土的粒径相适应，即试样直径随试样高度与有效最大粒径之比 ($H/d_{\max}$)、试样直径与高度之比 (D/H) 而定，根据国内外使用的压缩仪试样尺寸统计结果，考虑到粗粒土粒径范围变化极大等因素，本规程规定 D/H 为 1.5~2.5， $H/d_{\max}$ 为 3~5 为宜。对超大粒径粗粒土，径高比、径径比可根据最大粒径情况和现场条件适当调整。

11.2.2 室内压缩试验目前国内多数试验机构采用的压缩试样桶尺寸为直径 500mm，高度 300mm，适用试样最大粒径不大于 60mm，对于大于 60mm 的粗粒土须经过缩尺处理方可进行试验，本规程考虑到超高土石坝在粗粒土试验研究方面的技术需要，基于相关单位研发的超大型试验设备的应用经验和成果，列入了室内原级配压缩试验系统和锚桩法现场压缩试验装置，可根据项目需要进行选择。

11.3 试 验 步 骤

11.3.1 原级配试验料制备，应按照设计或碾压试验选定级配要求进行制备，采用人工筛分，人工将料筛分成不同的粒径级：<5mm、5~10mm、10~20mm、20~40mm、40~80mm、80~100mm，100mm 以上粒径料采用钢卷尺量测进行分级成 100~200mm 料、200~300mm 料等，再按照要求进行掺配组合。对于最大粒径小于 60mm 的土料，一般分 2 层装样。对原级配料压缩试验，应根据试样最大粒径和试样桶高度分 2~4 层装样，每层厚度宜大于土料最大粒径。

11.3.3 全级配粗粒土压缩试验在加载分级时，由于试样尺寸和粒径较大，试验加载量往往比较高，在分级加载超过 3200kPa

后或加载过程中测定数据变幅较大时，加载等级分级应细化，分级加载量一般不超过 2000kN，以保证测定结果的稳定和试验结果的准确。试验稳定标准采用变形稳定控制，即采用相隔 1h 每个百分表变形均小于 0.05mm 的稳定标准。

12 直接剪切试验

12.1 一般规定

12.1.1 直接剪切试验是测定土体抗剪强度的方法之一，本规程列出了采用应变控制式大型直接剪切仪的室内直剪和现场直剪试验方法。

12.2 室内直剪试验

12.2.1 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（ $H/d_{\max}$ ）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 5~10，高径比为 2~8。

不同的径径比和不同的高径比，对粗颗粒土的摩擦角有一定影响。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 5~8，高径比为 3~5。

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，而方形的又比方形的好的。故本试验推荐圆形直剪仪。

12.2.2

1

(1) 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 $(1/3 \sim 1/4)d_{\text{平均}}$ 作为其使用标准。

(2) 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。对砂砾石等无黏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黏质土粗颗粒土，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。对于无黏性粗颗粒土，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。

(3) 试样饱和常用的方法有真空抽气饱和法、水头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，水头饱和法次之。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。对于无黏性粗粒土真空抽气饱和难易实现，推荐采用水头饱和法进行饱和。

2

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。

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 $0.01 \sim 0.05 \text{mm}$ 。本标准规定在垂直荷载作用下，每小时垂直变形不大于 0.03mm 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。

12.2.3 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 $\Delta L_{\max}$ 值为 $\left(\frac{1}{15} \sim \frac{1}{10}\right)D$ 作为确定破坏值的标准。

12.3 现场直剪试验

12.3.1 对超大粒径粗粒土，径高比、径径比可根据最大粒径情况和现场条件适当调整。

12.3.2 在现场，还可以采用预埋法将剪切盒预埋试验层进行试验，或对试验层套盒开挖进行试验，可以因地制宜采用。

13 三轴压缩试验

13.1 一般规定

13.1.1 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： 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 φ ，在纵轴上的截距为 c （图 3）。故抗剪强度与法向应力的关系曲线可以用库仑方程表示：

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (5)$$

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：

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\alpha \\ \tau &= \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\alpha \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中 $\alpha = 45^\circ + \frac{\varphi}{2}$

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，则式（6）又可写成：

$$\tau = c' + (\sigma - u)\tan \varphi' = c' + \sigma' \tan \varphi' \quad (7)$$

式中： c' ——有效黏聚力；

φ' ——有效内摩擦角。

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。通常分为不固结

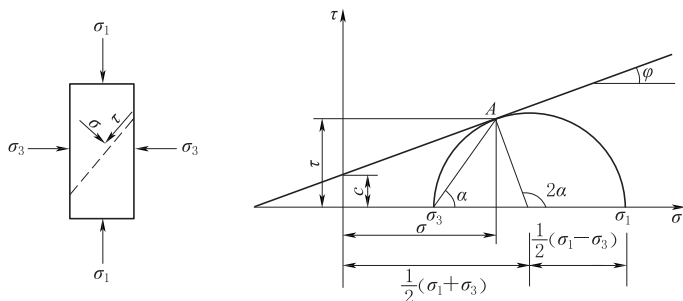


图 3 三轴压缩试验抗剪强度与法向应力关系曲线示例

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）。

由于粗粒土透水性大，加载后孔隙水压力很快消散，一般只进行固结排水剪试验（CD 试验），主要是为了求得土的排水强度指标 c_d 、 φ_d 和邓肯-张模型参数等。

13.2 设备和设施

13.2.1 国内外相继研制了许多大型三轴仪，试样直径 200～1000mm，周围压力 σ_3 最大达 5MPa。大型三轴仪应用十分广泛，本标准对试样尺寸未做具体规定，可根据具体情况而定。

13.3 操作步骤

13.3.1

1 本标准中规定试样直径应为试料最大粒径的 5 倍及以上。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 2.5 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。故本试验建议高径比为 2～2.5。

2 粗颗粒土不含黏土颗粒，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 30kPa 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，块厚不超过橡皮膜厚度（图 4），外再套一层橡皮膜；③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（100mm×100mm×1mm）再加一外层橡皮膜。显然这些方法比一般圆筒形橡皮膜要复杂一些。

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。

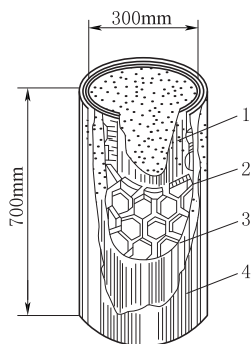


图 4 贴有六边形橡皮块的橡皮膜

1—内套；2—六边形块；3—六边形

粘结套；4—外橡皮膜

13.3.2 粗粒土透水性较大，本试验建议用抽气饱和法、水头饱和法和二氧化碳饱和法等。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在国内已有应用，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 $B(u/\sigma_3)$ 大于或等于 95% 作为鉴别标准。

13.3.3

2 试样固结稳定标准。对于粗颗粒土，由于透水性能强，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。一般固结排水量趋于稳定即视为固结稳定。

4 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 5mm 的颗粒含量 (P_5) 大于 70% 时，可用较快的剪切速率；有试验表明，对于砂土当剪切历时由 1000s 减少到 0.01s，强度仅增强 10%，影响不大。因此，采用每分钟轴向应变为 0.1%~0.5% 为宜。

13.5 超大三轴压缩试验的特殊要求

13.5.1~13.5.3 目前粗粒土材料的应力应变特性和强度特性研究，主要采用试样直径为 300mm 的大型三轴剪切仪，试验的最大粒径为 60mm。对于粒径超过 60mm 的超粒径颗粒处理，采用四种方法，即剔除法、等量替代法、相似机配法及混合法。对缩小尺寸后的模拟级配坝料，按原级配的相对密度进行试样制备控制。这些模拟试验方法是在“六五”“七五”国家科技攻关期间提出的，适合于当时的土石坝筑坝施工水平和筑坝材料情况。但是，由于现代碾压能量越来越高，使坝体填筑密度越来越高，筑坝材料粒径越来越大，现行的粗粒料试验模拟方法经常引起争议。

实际上，上述超粒径颗粒处理方法都有一定的局限性，特别

是不同处理方法对土的应力变形特性及强度特性的影响，尚无明确统一的认识，有待进一步研究解决。尤其是随着大型、重型振动碾压机械的使用和击实能量的提高，坝体填筑材料的最大允许颗粒已由原来的 300~400mm 提高到目前的 600~800mm，碾压密实度也有很大的提高，这种缩尺效应引起的问题更为突出。大量的试验研究表明，粗粒料的应力变形特性和强度特性的改变，主要受岩性、级配缩尺（包括粗粒含量、细粒含量、粒径大小等的改变）、密度及围压力等因素的影响。特别是对一定岩性的粗粒料，级配缩尺方法和大小的影响还随密度控制方法（孔隙率或相对密度）和围压力范围的不同而变。大量地采用室内试验结果的数值分析与坝体实际原型观测资料等的对比分析表明，目前采用的以相对密度控制为代表的当前常规尺度的室内模拟试验方法，不能很好地反映实际的坝体变形特性情况。因此，需要研制更大试样尺寸的超大型土工三轴试验仪，采用原级配或较小比例缩尺的近全级配试样进行试验，并尽可能反映坝料岩性、级配及施工方法和机械所能达到的碾压密实情况，以获取尽可能真实的坝料应力应变和强度特性与参数。

近年来，国内有关科研单位和高等院校研制出了试样直径为 500mm、700mm、800mm 和 1000mm 的超大型三轴试验机，可进行全级配或近全级配的三轴压缩试验。根据这些单位使用的初步经验和成果，总结试样制备和试验操作等方面的特殊要求，提出本条款。相关内容还应在后续使用中总结经验，不断完善。

14 三轴蠕变试验

14.2 设备和设施

14.2.3 温度是影响蠕变试验测试精度的重要因素之一，温度变化会引起土体本身黏性的变化与体积的改变，温度高，蠕变性增加。温度还影响试验仪器尤其是电子量测系统的精度。因此在试验中尽量控制环境温度不变，并予以记录。

14.3 操作步骤

14.3.4 后期变形发展缓慢，可以适当延长时间间隔，可以参考如下规律记录数据：如 24h 内轴向应变的变化量小于 5‰，按 3h 读数 1 次；24h 内轴向应变的变化量小于 1‰，按 6h 读数 1 次；24h 内轴向应变的变化量小于 0.2‰，按 12h 读数 1 次。

蠕变试验有两种不同的加载方式，即分别加载和分级加载。分别加载理论上最符合蠕变试验要求，能直接得到土蠕变的全过程曲线。但实际上是难以做到严格的分别加载：一方面，保证许多完全相同的试样和试验条件比较困难；另一方面，实际中很难有这么多仪器供同时使用。目前国内外的室内蠕变试验一般采用分级加载方法。可以根据 Boltzmann 叠加原理，将分级加载的蠕变试验数据换算为分别加载成果。

15 三轴湿化变形试验

15.1 一般规定

15.1.1、15.1.2 粗粒土的湿化变形是指粗粒土在一定的应力状态下浸水，由于颗粒之间被水润滑以及颗粒矿物浸水软化等原因而使颗粒发生相互滑移、破碎和重新排列，从而产生变形的现象。室内试验中可采用单向固结仪和三轴仪，进行应力状态不变时的湿化变形试验进行。单向固结仪只能测量湿化体积变形，一般其侧向应力无法控制。三轴仪上进行湿化试验，具有应力条件明确、能够量测体积变形和剪切变形的优点，因此本规程仅列出了在三轴仪上进行湿化试验的方法。

湿化变形试验中，有单线法（直接法）或双线法（间接法）两种方法可供选择。双线法是指分别进行干态和湿态下土样的三轴剪切试验，再用相同应力状态下的湿态与干态变形的差值作为该应力状态下的湿化变形量。单线法是指在干态试样在围压作用下固结完成后剪切到某一应力水平，然后保持应力状态不变，浸水湿化，此过程中发生的变形即为该应力状态下的湿化变形量。单线法和双线法测出的湿化变形差别较大，而且双线法试验的应力路径和现场工程湿化路径并不相符，因此为准确得到粗粒土的湿化变形特性，规程规定宜采用单线法进行浸水变形试验研究。

15.2 设备和设施

15.2.1 三轴试样的体变测量，有内体变和外体变 2 种测量方法，内体变是量测橡皮膜内试样变形导致的排水量，外体变是量测实验过程中三轴压力室内水体积的变化来表示土体的体变。湿化变形过程中，土样存在从干样到饱和样的湿化过程，体变只能采用外体变法进行测量。外体变测量中，当试样产生轴向变形，传力杆会进入或退出压力室，导致压力室内水的体积发生改变，

流量计或外体变测量系统读数，应去除这部分的变化。

外体变测量，目前有三种方法：第一种是电子天平称量法（图 5），在三轴压力室外接气水转换室，气水转换室的重量较大，直接采用电子天平称量，精度不能满足要求，其重量通过重物平衡后，剩余重量再采用电子天平称量，可以满足大量程高精度准确测量的要求，精度根据电子天平精度确定，一般可达到 0.1 的要求。第二种是采用高精度位移法（图 6），在三轴压力室外接等截面体变筒，在体变筒上设置能自由滑动的活塞，活塞位移改变通过高精度拉绳式位移计精确测量，乘以固定截面积后换算得到外体变。第三种是高精度双向流量计法，通过流量计进出水量测量外体变。

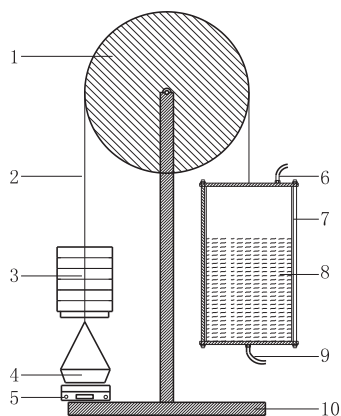


图 5 电子天平称量法测外体变

- 1—铝制圆形转盘；2—钢丝绳；3—平衡重物；4—托盘；
5—电子天平；6—气压连接端；7—气水转换室；8—水体；
9—与三轴压力室围压连接端；10—支撑架

15.3 操作步骤

15.3.2 对于干燥样，试样孔隙内仅有气体，而气体压缩性很大，因此在排气阀打开状态下，按要求施加压力后，即可视为固

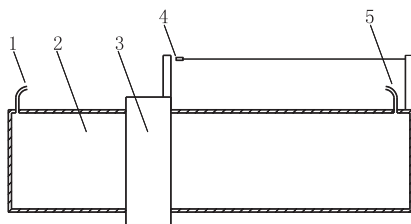


图 6 高精度位移计法测外体变

1—气压连接端；2—等截面体变筒；3—活塞；4—高精度拉绳式位移计；5—与三轴压力室围压连接端

结完成。

15.3.3

3 当干样剪切完毕后维持预定应力状态时，试验样将产生蠕变变形，称之为“停机变形”。如果达到预定应力状态时立即进行湿化试验，则试验所得湿化变形将包含停机变形，从而夸大了材料的湿化变形。目前对湿化试验中停机变形标准的研究较少。对于无黏性粗颗粒土，一般在 3~5h 后，平均应变率为 0.00001/min，已较稳定。结合多家试验单位的试验经验和具体操作方法，建议以 30min 内轴向应变 $<0.02\%$ 作为稳定标准。

4 粗粒土的饱和方法有抽气饱和、水头饱和和二氧化碳饱和方法。为避免对湿化试验成果的影响，建议采取自下而上的水头饱和法，而且饱和过程中进水口水头应保持不变，水头压力 10kPa。

6 试样湿化稳定标准不宜太高也不宜太低。标准太高，变形量测就不可避免地含有流变变形；太低，不能得到完整的湿化变形量。根据国内多家单位的实际经验，对于堆石料，饱和完成后 3~5h 就可认为湿化变形已经完成，建议以 30min 内轴向应变小于 0.02% 作为稳定标准。

15.4 计算与记录

15.4.3 已有研究表明，湿化变形与母岩岩性、颗粒形状、试验

级配、试验密度、初始应力状态、试样尺寸等相关。受上述各种因素的影响，从已有的文献成果来看，湿化轴向变形和湿化体积变形随围压和应力水平的关系也没有形成普遍认同的规律。国内各家试验和计算单位也未采用统一的模型，因此，仅要求记录湿化变形，再由相应的计算单位根据湿化曲线，由计算模型再确定相应参数。

16 三轴劣化变形试验

16.1 一般规定

16.1.1 外界温度的变化、水位的涨落等因素都会引起粗粒土的变形量增大，已被大多数工程师和大量工程实例所证实。为测量上述因素引起的粗粒土变形，在此，将三轴干湿变形试验和三轴温度变形试验统称为三轴劣化变形试验。

16.1.2 试验的最大粒径限制为 60mm，主要是因为目前国内外的干湿或温度循环试验，所使用到的设备最大直径（或边长）为 300mm，还未使用超过该尺寸的设备在该方面开展过试验，无相关经验可循。因此，按照粒径比不小于 5 的要求，限制最大粒径为 60mm。

16.2 设备和设施

16.2.1 在常规三轴仪上加以改造，可以进行粗粒土三轴劣化变形试验，一般有三种改造方法：①在三轴压力室外部增加升降温及保温设备；②在三轴压力室内腔与试样间增加升降温设备；③利用黏滞系数与水类同的液体通过试样并实现升降温。三种方法均可实现三轴温度及干湿劣化变形试验，本规程仅介绍了其中一种方法，另外两种改造方法虽不同，但同样可以达到相同效果。

16.3 操作步骤

16.3.1 该试验的试样制备、饱和与常规三轴试验制样时并没有差别，均采用相同方法。

16.3.4 施加应力水平时，变形稳定标准与三轴湿化试验稳定标准一致。

16.3.5 第 2、第 3 款干湿劣化变形试验中，在水头饱和时规定

水压恒定，主要是考虑水压波动可能造成水样内部细颗粒料流动或被水流带出，影响试验结果。排水 1h 后通 $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 空气，主要是希望试样内部自由水尽量排干后再进行试样干燥。另外，因空气温度很难控制在某一个定值，且对试验结果的影响很小，因此，对通入的空气温度精度要求较低。试验研究表明，通气压力越大，试样干燥时间越短，但等压力超过一定值时，干燥时间缩短不明显，且为了保证试样不受通气的影响，限制通气压力不超过 20kPa。如果采用压力室外或压力室内围压液温度循环的方法，需注意温度。

第 4 款规定当本次循环的劣化轴向应变总量不大于 1‰，或本次循环的劣化轴向应变总量小于前次循环的 1/2 时试验停止。主要基于以下几点考虑：

(1) 三轴湿化试验中，当 30min 内试样的轴向应变变化量小于 0.01‰ 时认为变形稳定；三轴蠕变试验中，24h 的轴向应变小于累计蠕变轴向应变的 1‰ 时认为变形稳定。

本试验可看作是多次湿化试验的累计，但又是长时间的蠕变试验，因此，在稳定标准选择上，与上述两种试验相协调，比湿化变形更明显但又不能含太多的蠕变变形，因此，取本次循环的劣化轴向应变总量不大于 1‰ 为试验停止的一个标准。

(2) 国内学者近期研究结果显示（图 7～图 9），温度循环造

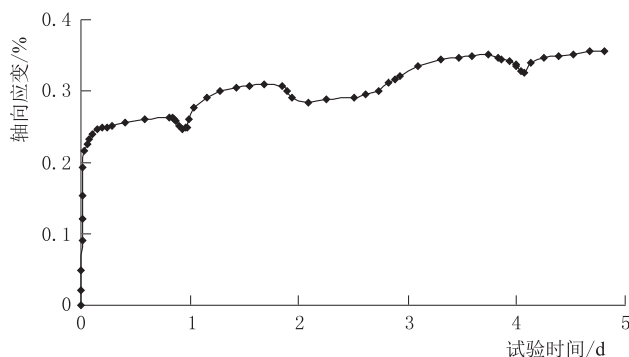


图 7 温度循环劣化变形试验

成粗粒土轴向应变增加，另外，湿化轴向及体积变形量、偏应力峰值随着干湿循环次数增加而逐渐减小。一般母岩性质较优的粗粒土干湿循环 3 次后，再次湿化时的变形量已经很小了，但有些软化系数较大的软岩，湿化变形 5 次后，湿化变形量仍较大，但湿化变形次数过多，一来试验耗时长，且变形总量中包含过多的蠕变变形量，二来湿化过程中大颗粒软化破碎较多，细粒土含量增加，表现出来的已经不再是粗粒土的性质。从目前研究成果上来看，随循环次数的增加，每次轴向应变的总量在减小，见表 7。因此，规定“本次循环的劣化轴向应变总量小于前次循环的 1/2 时试验停止”，作为试验停止的另一个标准。

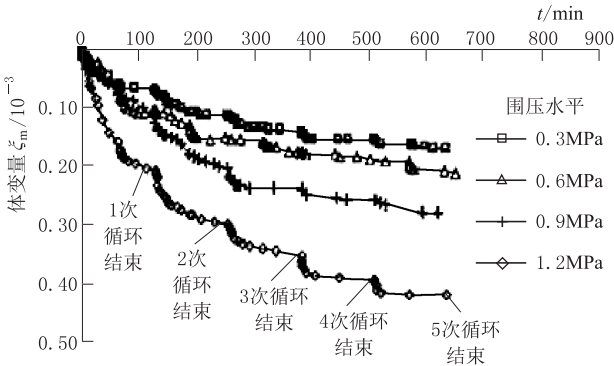


图 8 干湿循环劣化变形试验

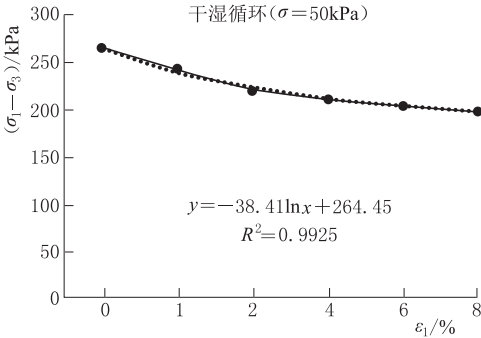


图 9 干湿循环次数与试样偏应力的关系

表 7 某粗粒土干湿循环次数与轴向应变量

干湿循环次数/ n	1	2	3	4	5	6
轴向应变/ $\%$	1.057	0.064	0.42	0.03	0.02	0.013

16.3.6 饱和样温度劣化变形试验，通水温度与试样内部水温差异太大，容易引起堆石料在温差下的崩解，影响试验结果，因此，限制通水温差在 3°C ；目前试样内部温度全部测量准确尚有困难，试样研究发现，当进出水温差在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 时，拆样测量试样各部位温度差不超过 1°C ，因而，温度相差不超过 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 时视为试样温度达到要求。

本条第 5 款，在试验围压的选择上，土石坝中的高坝宜选择高围压，中低坝宜选择的围压稍低些，且编制的该试验规程应具有更广泛的适用性，如高填方中使用的粗粒土，有砟轨道中的粗粒土等，因此，考虑到工程实际，写为“试验围压根据工程需求确定”。另外，因我国南北方温度差异非常大，如东北地区冬季最低温度可达 -40°C 甚至更低，夏天又可回升至 30°C ；而海南一年的温差不会超过 30°C ，且不会出现冰冻现象，直接确定温度循环的起始温度，不能反映工程实际，因此，循环的温度也应根据当地的气候条件确定。

16.3.7 因温度循环试验方法不一，在此对其他两种试验方法的温度循环起始和变形稳定标准做了规定。

16.4 计算与记录

16.4.2 温度变化会引起设备膨胀或收缩，该变形不可忽略，在进行应变计算时需计入。

17 CT 三轴试验

17.1 一般规定

17.1.2 CT 三轴仪的仪器尺寸与试样尺寸需与 CT 机相适应，根据一般医用 CT 设备功率和常规三轴设备尺寸，采用试样直径 101mm 时能得到非常清晰的 CT 切片，因此确定最小试样直径不宜小于 101mm。当 CT 机功率大，扫描得到的 CT 断面切片清晰时，可以采用较大尺寸的试样样品，径径比和高径比与常规三轴相同。

17.1.3 X-CT 理论是建立在射线穿过物体按照指数衰减规律上的，CT 图像重建理论就是对已知 X 射线在各个方向的投影函数，求线衰减系数的分布，线衰减系数由物体成分、密度和 X 射线的波长决定。金属材料因物体成分和高密度，X 射线难以穿透，在 CT 图像中金属材料附近存在明显的伪影现象，为得到清晰可靠的断面图像，扫描区域内应没有金属材料。为适宜 CT 断面扫描，CT 三轴仪的压力室应采用特制无伪影材料，并卧放在扫描床上，使扫描区域内无金属材料，降低压力室罩的 X 射线吸收率，使 X 射线尽可能多地穿透试样，获得清晰的 CT 图像。

17.4 计算与记录

17.4.1 从公式 (17.4.1-3) 中可以看出，在已知某种物质的 X 射线质量系数 μ_m 的条件下，CT 数就直接表示了该物质的密度 ρ ，因此，CT 图像就是被测体某层面的密度图。

18 真三轴试验

18.1 一般规定

18.1.1~18.1.4 真三轴试验对试样各个互相垂直的主应力面分别施加最大主应力 σ_1 、中主应力 σ_2 及最小主应力 σ_3 ，测定相应的主应变 ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 和体积变化等。真三轴试验可模拟不同应力路径下土的应力~应变关系。应力路径一般包括等 p、等 q、等 b 试验。

18.2 设备和设施

18.2.1 真三轴加载方式有刚性加载、柔性加载、刚柔复合加载 3 种。刚性加载真三轴（图 10）为试样安装在 6 个刚性板之内，每一块板可在与之相垂直的另两块板上滑移，当在三个主应力方向施加压力时，试样产生相应的主应变，特点是应变大，应力和应变均匀，主应力轴不发生旋转，但刚性板与试样间的摩擦阻力不可以忽略。柔性加载真三轴（图 11）为柔性袋加载，在试样的 6 个面上均为柔性橡皮膜袋，其内填充液体，通过对液体施加压力，借以对试样施加主应力，特点是加载方便，在应变较小时应力均匀，但应变较大时应力分布不均，柔性膜袋易相互干扰，而且应力加载能力较低，加载应力较大时橡皮膜袋易吹破。刚柔复合加载包括二刚一柔组合和一刚二柔组合加载方式。二刚一柔组合真三轴（图 12）的最大主应力和中主应力方向采用刚性加载，最小主应力方向采用柔性加载；一刚二柔组合真三轴（图 13）的最大主应力采用刚性加载，中主应力方向和最小主应力方向采用柔性加载。

真三轴仪侧向加载板与试样接触面应有减小摩阻力措施。有研究表明，砾石土与刚性板间的接触面摩擦系数可达到 0.3~0.4，因此中主应力加压板与试样接触面需采取减摩措施，以有

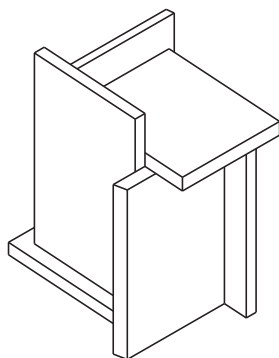


图 10 刚性加载真三轴

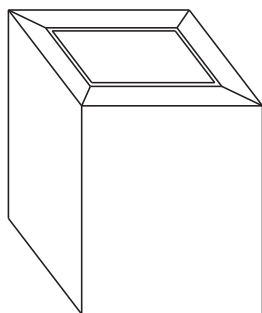


图 11 柔性加载真三轴

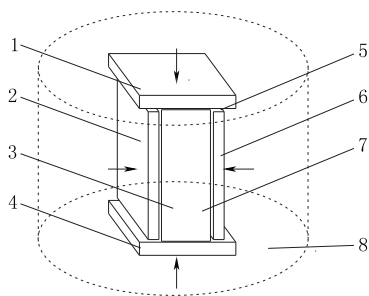


图 12 二刚一柔组合真三轴

1—上加压板；2—左侧水平加压板；3—橡皮膜；4—下加压板；
5—预留间隙；6—右侧水平加压板；7—柔性加载面；8—流体压力室

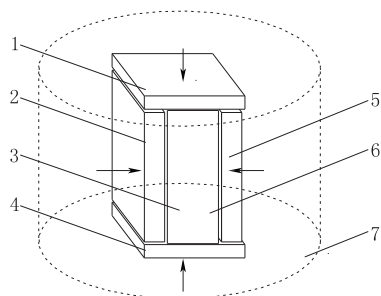


图 13 一刚二柔组合真三轴

1—上加压板；2—左侧水平加载橡皮膜袋；3—橡皮膜；4—下加压板；
5—右侧水平加载橡皮膜袋；6—柔性加载面；7—流体压力室

效减小加压板与试样接触面的摩阻力。一般可采用双层薄膜+夹层黄油的方式减小摩阻力，长江科学院采用双向滚珠轴承方式，变滑动摩擦为滚动摩擦，摩阻力可降低至 0.03 以下。

18.3 试样制备

18.3.1 真三轴的试样一般为长方体或立方体，表 8 中列出了目

前国内外真三轴仪的试样尺寸和加载方式。根据三轴仪的实践经验，对粗粒土试样最小面长度一般不小于最大颗粒粒径的 5 倍，对细粒土试样最小面长度一般不小于最大颗粒粒径的 10 倍。本规程没有对试样尺寸作规定，试验中依据土样最大粒径选用仪器，或依据仪器尺寸限制试样的最大粒径。

表 8 国内外真三轴仪的试样尺寸和加载方式

研发机构	设 备 属 性	
	试样尺寸（长×宽×高） /(mm×mm×mm)	加载方式
伦敦大学	84×81×53	复合
剑桥大学	70×70×70	刚性板
英国萨里大学	100×100×100	柔性
美国 GCTS	75×75×150	复合
美国 Ko 和 Scott	90×90×90	柔性
日本 SEIKEN	100×100×100	复合
日本古藤株式会社	25.6×88.9×88.9	复合
英国 GDS	75×75×150	复合
河海大学	70×70×35 120×120×60	复合
西安理工大学	70×70×70	复合
同济大学	70×70×70	复合
上海交通大学	80×80×50	—
香港理工大学	70×70×140	复合
长江科学院	300×300×600	复合

已有研究表明，砾石土与刚性板间的接触面摩擦系数可达到 0.4，因此中主应力加压板与试样接触面需采取减摩措施，以有效减小加压板与试样接触面的摩阻力。

根据目前统计资料，二刚一柔复合加载方式是目前国内外应用最广的真三轴加载方式，因此本规程对二刚一柔复合加载方式

的真三轴试验设备和操作步骤作出相关规定。其他加载方式的试验操作与成果整理可以参考二刚一柔加载方式进行。

18.4 试验步骤

18.4.1 真三轴试验的加载与控制以最大主应力方向的加载速率为主，中主应力和最小主应力方向的加载速率按相应应力路径自动施加。

18.5 计算与记录

18.5.1 试验成果整理中，给出了最小主应变的计算方法，如果仪器为刚性板加载，其最小主应变的计算参照中主应变的计算公式。

真三轴试验的破坏点选取可参考常规三轴试验取 $\epsilon_1 = 15\%$ ，经过论证也可根据工程情况选取破坏应变值。

19 振动三轴试验

19.1 一般规定

19.1.1 振动三轴试验是室内进行土的动力特性参数测定时较普遍采用的一种方法。需要确定的土的动力特性参数，取决于所选用的力学模型。在循环应力作用下，土的力学模型很多，但比较成熟、国内外应用较广的是等效黏弹性模型，需要确定动强度（或抗液化强度）及动孔隙水压力特性、动弹性模量和阻尼比特性以及动力残余变形特性等参数。主要包括三种试验：一是动强度（或抗液化强度）特性试验，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；二是动变形特性试验，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变化等动力反应；三是动力残余变形特性试验，确定动力残余体应变和残余剪应变特性，用于计算动荷载作用下引起的永久变形。

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、应变或孔隙水压力的变化，从而求得土的动力特性参数。试验过程中，不仅要模拟现场土体的静应力状态，而且还要模拟实际现场的排水条件，将实际不规则变化的地震波按震级大小进行等幅周期循环简化模拟，施加动荷载。

在采用单向激振式三轴仪进行试验时，为了模拟土体实际应力状态，必须考虑动孔隙水压力的影响。试验模拟条件应该尽量真实反映实际现场条件，并与采用的计算模型和分析方法相匹配。对于地震动力反应分析和抗震稳定分析来说，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，故动强度（或抗液化强度）试验和动力变形特性试验建议在固结不排水条件下

进行。

采用动力残余变形评价土工建筑物和地基的抗震安全性是近年来土工抗震设计和研究的发展趋势,根据目前一般采用的计算地震残余变形的办法,标准建议动力残余变形特性试验在固结排水振动试验条件下进行,对应于采用有效应力地震动力反应分析方法或实际工程排水条件较好的情况。

19.2 设备和设施

19.2.1 振动三轴仪按产生激振力的激振方式不同,分为惯性力激振式、电磁激振式、气动激振式和电液伺服激振式。按控制方式不同,又分为常规手动控制式及计算机控制式。每种类型又有单向激振和双向激振之分。

19.2.2 振动三轴仪在使用前应认真检查。孔隙水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 $0.1\sim 10\text{Hz}$ 可调;振动荷载在大应变时应基本稳定,增减变化小于 10% 单幅值;各传感器应满足有关要求。仪器设备的各组成部分均应定期标定;计算机控制的各种部件应连接准确。

19.3 操作步骤

19.3.4 对于循环荷载作用下土的动强度,通常定义为达到某一指定破坏标准(一般取轴向应变达到某个值 ϵ_f)所需的动应力。因为有时间因素的影响,一般试验成果表示为破坏动应力比与破坏振次 N_f 的关系曲线。如果 N_f 值以按 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 级、7.5 级和 8 级地震分别取 10 次、20 次和 30 次。如果取的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 ϵ_f 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;二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。此外，对饱和试样，一定的破坏标准还同一定的孔隙压力相联系，因此也可采用初始液化标准。

本规程提出的是目前比较通用的标准，在实践中也可根据土的性质、动荷载性质、工程运行条件及工程的重要性，选用其他应变标准，或在同时按几种标准进行整理，以供工程设计选用。试验比较表明，由于达到极限平衡标准时，一般应变都还未能较大发展，作为工程破坏标准过于保守，因此没有列入。

土的动强度（或抗液化强度）的试验结果大小还与动荷载的作用速度有关，因此试验振动频率应该根据动荷载的实际作用频率选取。由于实际动荷载，特别是地震荷载，是许多频率成分的组合，其频率为 $2\sim 10\text{Hz}$ ，属低频荷载。低频荷载的振动频率对动强度（或抗液化强度）的影响不显著。为了方便，对地震作用模拟，可以采用 1.0Hz 。

当试验结束后，测定干密度时，采用如下方法：在拆样前排水并记录排水量，拆样过程中不要损失含水率，测定试样含水率，假定试样完全饱和，试验体积等于土颗粒体积与水体积之和，计算试样最终干密度。

19.3.5 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 5 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。规定在一个试样多级加荷时，应对前一级荷载孔隙水压力排水固结后，再施加后一级荷载，并保证后一级荷载应该为前一级荷载的 2 倍以上。

同样，作为低频荷载的地震荷载，振动频率对动模量和阻尼比的影响不显著。

19.3.6 动力残余变形特性试验，主要目的是确定目前普遍采用的基于应变势概念基础之上的地震永久变形分析方法所需参数。固结条件和循环荷载幅值一定时，动力残余变形的大小还与循环次数有关。按 H. B. Seed 提出的震级～等效循环次数对应关系，实际地震荷载的等效循环次数罕有超过 50 次。为了一个试验，能整理出对应不同震级（或等效循环次数）下的动力残余变形，建议每次振动不超过 50 次。

由于先期振动对动力残余变形特性影响显著，一般不允许采用一个试样逐级加荷进行试验的方法。

振动频率对动力残余变形试验结果的影响，主要体现在试验过程中试样是否能充分排水，不累积残余孔隙水压力，应根据土的渗透性及试样尺寸选定。

19.4 成果整理

19.4.2 动强度（或抗液化强度）的试验成果一般表示为一定的密度、一定的固结比及一定侧向固结压力下的动剪应力比 τ_d/σ'_0 与破坏循环次数 N_f 的关系曲线。

然后，在此关系曲线的基础上，根据不同要求，对土的动强度成果整理出不同的参数。

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潜在破坏面上法向应力关系曲线，进而确定总应力抗剪强度指标。这

种整理方法概念上比较合理，实际应用也较广，因此本规程列入这一整理方法。当然，也可根据具体的工程问题及所采用的分析方法采用其他的整理方法，确定相应的动强度（或抗液化强度）参数。

此外，有效应力分析土体动力反应和抗震稳定性，既是发展趋势，有些情况还必须考虑地震引起的动孔隙水压力的影响，因此需要测试并整理土的动孔隙水压力特性曲线和参数，这里建议的是目前国内外应用较广的表示和整理方法。

19.4.3 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。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。

研究表明，在以平面波方式传播时，土的最大动剪模量只与在质点振动和振动传播两个方向上作用的主应力有关，而几乎不受作用在垂直振动平面上的主应力影响。对三维问题，最大动剪模量与三个方向上的主应力有关。因此，在整理最大动剪模量或最大动弹性模量与有效应力的关系时，对二维和三维问题，应采用不同的整理方法。

19.4.4 振动三轴试验条件下的动力残余变形特性试验结果，一般表示为一定的密度、一定的固结比及一定侧向固结压力下的残余剪应变及残余体应变与循环次数 N 的关系曲线。

在此基础上，可根据所采用的残余剪应变模型、残余体应变模型及地震永久变形分析方法，整理出相应的关系曲线和模型参数，规程仅建议了最基本的整理方法。

19.5 超大振动三轴试验的特殊要求

19.5.1~19.5.3 目前粗粒土材料的动力特性研究，主要采用试

样直径为 300mm 的大型动三轴试验，试验的最大颗粒粒径为 60mm。对于实际坝料存在的粒径超过 60mm 的超粒径颗粒，常采用四种方法处理，即剔除法、等量替代法、相似级配法及混合法。然后，对缩小尺寸后的模拟级配坝料，按原级配的相对密度进行试样制备控制。与静力情况相似，由于现代碾压能量越来越高，使坝体填筑密度越来越高，筑坝材料粒径越来越大，尤其是随着大型、重型振动碾压机械的使用和击实能量的提高，坝体填筑材料的最大允许颗粒已由原来的 300~400mm，提高到目前的 600~800mm，碾压密实度也有很大的提高，缩尺效应引起的问题更为突出。因此，需要研制更大试样尺寸的超大型土工三轴试验仪，采用原级配或较小比例缩尺的近全级配试样进行试验，并尽可能反映坝料岩性、级配及施工方法和机械所能达到的碾压密实情况，以获取尽可能真实的坝料尽可能真实的动变形、动强度和动力残余变形特性与参数。

近年来，国内有关科研单位和高等院校研制出了试样直径为 500mm、700mm、800mm 和 1000mm 的超大型动力三轴试验机，可进行全级配或近全级配的振动三轴试验。根据这些单位使用的初步经验和成果，总结试样制备和试验操作等方面的特殊要求，提出本条款。相关内容还应在后续使用中总结经验，不断完善。

20 动力触探试验

20.1 一般规定

20.1.1 本规程列入了重型、超重型动力触探试验。重型动力触探试验应用最为广泛，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。

以每贯入一定深度所需的锤击数为触探指标，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 0.2m 所需的锤击数作为触探指标，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。

20.1.2 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、苏联的有些动力触探落锤质量超过 100kg（例如法国 E. T. F，落锤质量 150kg），落距达 1.0m 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 127kg，落距增大到 1.0m。我国最早在成都地区应用落锤质量 120kg，落距为 1.0m 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，以利于普遍推广和进一步积累经验。触探试验适用土层如图 14 所示。

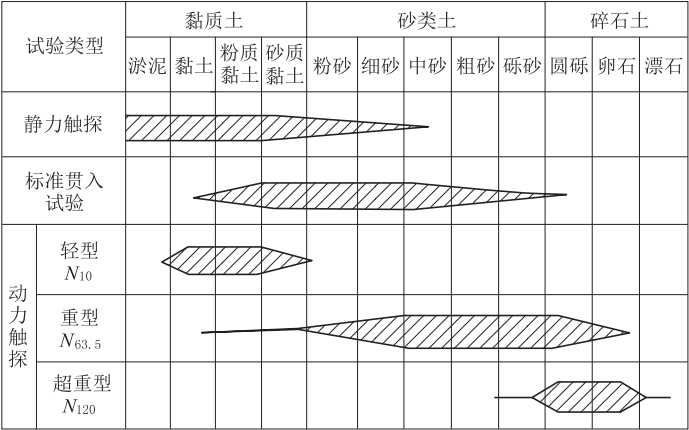


图 14 触探试验的适用土层

20.2 设备和设施

20.2.1 国外的动力触探类型较多，常用的动力触探有 20 种以上，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苏联常用的几种类型。表 9 列出了本规程的动力触探仪和国外类型的对比。

表 9 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
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 DPB	63.5	0.75	62	30	15.6
		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的比值作为衡量的指标，用能量指数 p_0 （Potential Energy Index）表示：

$$p_0 = \frac{mgH}{A} \quad (8)$$

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，取 $9.8\text{m}/\text{s}^2$ ；

H ——落距， m ；

A ——探头截面积， cm^2 。

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 A. O. uriel 等对从 $15^\circ\sim 180^\circ$ 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。

本规程规定了贯入锤击速率为 $15\sim 30$ 击/ min 。这个速率略低于欧洲触探试验标准所规定的 $20\sim 60$ 击/ min 。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。

20.3 操作步骤

20.3.1 我国现行的规范没有提及侧壁摩擦影响问题。但苏联国

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 15m 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 15m 则差别较大。重型动力触探在深度不大（一般可为 12m 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。但想用一個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。

20.4 计算与记录

20.4.1 动力触探锤击数的修正问题。锤击数是否修正及如何修正历来有不同的观点，缺乏统一认识，相关规范规程也无明确规定。在《岩土工程勘察规范》GB 50021—2001 中规定，应用试验成果是否修正及如何修正，应根据建立统计关系时的具体情况确定。目前在评价地基土的密实度问题上有比较统一的认识，均认为采用重型动力触探锤击数确定砂土、碎石土的孔隙比和密实时，锤击数须经探杆长度修正，如《岩土工程勘察规范》GB 50021—2001、《建筑地基基础设计规范》GB 50007—2011 等。

关于探杆长度的修正。《岩土工程勘察规范》GB 50021—2001 附录 B 中规定，当采用重型或超重型动力触探试验确定碎石土的密度时锤击数应按公式（9）、公式（10）修正：

$$N_{63.5} = \alpha_1 N'_{63.5} \tag{9}$$

$$N_{120} = \alpha_2 N'_{120} \tag{10}$$

式中： $N_{63.5}$ 、 N_{120} ——修正后的重型、超重型动力触探锤击数；
 α_1 、 α_2 ——修正系数，分别按表 10 和表 11 取值；
 $N'_{63.5}$ 、 N'_{120} ——实测重型、超重型动力触探锤击数。

表 10 $N'_{63.5}$ 重型动力触探锤击数修正系数 α_1

L/m	5	10	15	20	25	30	35	40	≥ 50
2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	—
4	0.96	0.95	0.93	0.92	0.90	0.89	0.87	0.86	0.84
6	0.93	0.90	0.88	0.85	0.83	0.81	0.79	0.78	0.75
8	0.90	0.86	0.83	0.80	0.77	0.75	0.73	0.71	0.67
10	0.88	0.83	0.79	0.75	0.72	0.69	0.67	0.64	0.61
12	0.85	0.79	0.75	0.70	0.67	0.64	0.61	0.59	0.55
14	0.82	0.76	0.71	0.66	0.62	0.58	0.56	0.53	0.50
16	0.79	0.73	0.67	0.62	0.57	0.54	0.51	0.48	0.45
18	0.77	0.70	0.63	0.57	0.53	0.49	0.46	0.43	0.40
20	0.75	0.67	0.59	0.53	0.48	0.44	0.41	0.39	0.36
注：表中 L 为探杆长度。									

表 11 N'_{120} 超重型动力触探锤击数修正系数 α_2

L/m	1	3	5	7	9	10	15	20	25	30	35	40
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	0.96	0.92	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.89	0.89	0.88	0.88	0.88
3	0.94	0.88	0.86	0.85	0.84	0.84	0.84	0.83	0.82	0.82	0.81	0.81
5	0.92	0.82	0.79	0.78	0.77	0.77	0.76	0.75	0.74	0.73	0.72	0.72
7	0.90	0.78	0.75	0.74	0.73	0.72	0.71	0.70	0.68	0.68	0.67	0.66
9	0.88	0.75	0.72	0.70	0.69	0.68	0.67	0.66	0.64	0.63	0.62	0.62

表 11 (续)

L/m	1	3	5	7	9	10	15	20	25	30	35	40
11	0.87	0.73	0.69	0.67	0.66	0.66	0.64	0.62	0.61	0.60	0.59	0.58
13	0.86	0.71	0.67	0.65	0.64	0.63	0.61	0.60	0.58	0.57	0.56	0.55
15	0.86	0.69	0.65	0.63	0.62	0.61	0.59	0.58	0.56	0.55	0.54	0.53
17	0.85	0.68	0.63	0.61	0.60	0.60	0.57	0.56	0.54	0.53	0.52	0.50
19	0.84	0.66	0.62	0.60	0.58	0.58	0.56	0.54	0.52	0.51	0.50	0.48

注：表中 L 为探杆长度。

《岩土工程勘察规范》GB 50021—2001 的杆长修正，限制在深度 20m 范围内。近年来国内科研机构针对重型动力触探杆长修正问题，在室内进行了不同杆长的重型动力触探模型试验，地基土材料为砂砾石和中粗砂两种，最大杆长达到 83m。通过试验认为杆长修正系数符合牛顿弹性碰撞理论，且与地基土材料特性和上覆压力无关。各种杆长修正系数与杆长关系如图 15 所示。推荐重型动力触探杆长修正系数见表 12。

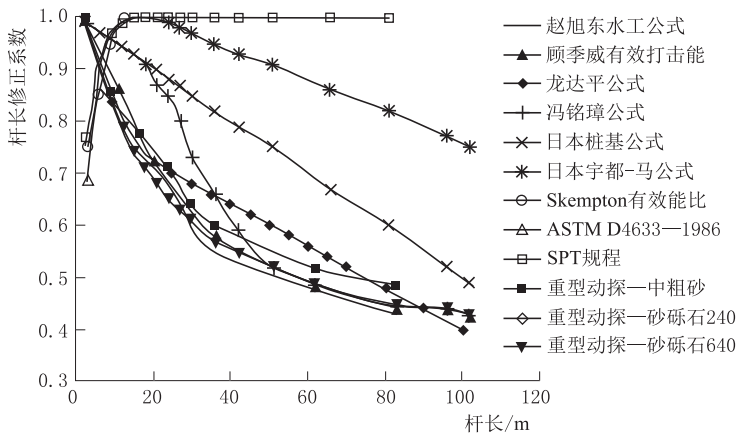


图 15 各种杆长修正系数与杆长关系

表 12 重型动力触探锤击数修正系数

L/m	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
修正系数	1.00	0.92	0.84	0.79	0.74	0.71	0.68	0.65	0.63	0.61
L/m	35	40	45	50	55	60	65	70	80	90
修正系数	0.58	0.56	0.54	0.52	0.51	0.49	0.48	0.47	0.45	0.44

20.4.2 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) 触探深度小于 12m，每击贯入度 2~50mm。

(2) 触探器重量 q 与落锤重量 Q 之比宜小于 2。

若实际情况与上述条件差别大时，采用公式 (20.4.2-1) 时应慎重。

20.4.3 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 0.5~0.7m）大于滞后反映量（约为 0.2m）。当上覆为软层、下卧为硬层时，影响范围小，超前反映量（为 0.1~0.2m）小于滞后反映量（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”。

21 旁 压 试 验

21.1 一 般 规 定

21.1.1 旁压仪包括预钻式和自钻式两种。对于粗粒土，自钻式不可行，因此本规程是以预钻式旁压试验为主进行编写。

21.1.2 目前旁压仪的适用土类已扩展到碎石土、残积土、软岩和风化岩，测试深度可大于 90m。

21.2 设 备 和 设 施

21.2.1 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变形模量结果无明显差别，但单腔式的临塑压力和极限压力偏小。

21.3 操 作 步 骤

21.3.1 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 16 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，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。

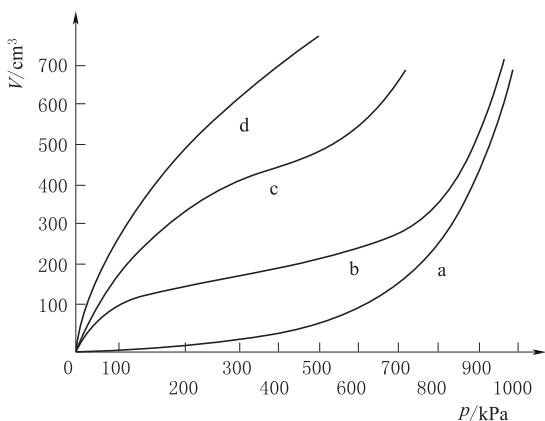


图 16 成孔质量对旁压曲线的影响

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，从工程实际出发对试验孔径大于旁压器外径值放宽到 10mm。

21.3.11 加压等级的选择和设计是关键环节，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极限压力 p_l 值而定。

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 $1/5 \sim 1/7$ 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，在标准中又推荐了在临塑压力前后不同的加压等级。

21.3.12 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 1min、3min、5min、10min 四种标准。人们将 1min、3min 的标准称为“快速法”，将 5min、10min 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，标准规定了 1min 和 2min 的快速法的稳定标准。

21.3.14 旁压试验终止试验条件：

(1) 加压等级接近或达到极限压力（预计最大压力）。

(2) 量测腔的扩张体积相当于量测腔的固有体积，避免弹性膜破裂。对国产 PY2 - A 型旁压仪，因量水管的断面积为 15.28cm^2 ，所以，规定量水管水位下降值 36cm 时（绝对不能超过 40cm），即终止试验。

法国 GA 型旁压仪规定，当蠕变变形等于或大于 50cm^3 或量筒读数大于 600cm^3 时应终止试验。

21.4 计算和记录

21.4.1 静水压力的计算应考虑以下两种条件，参见图 17。

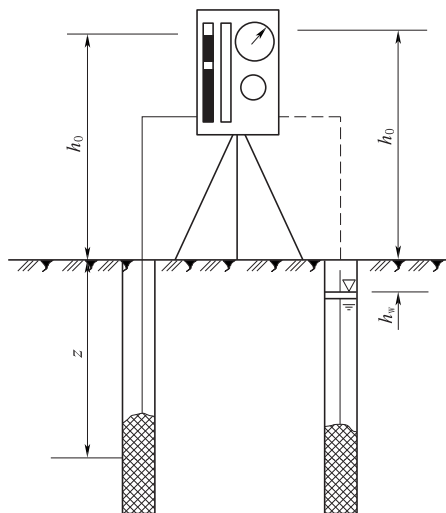


图 17 静水压力计算示意图

(1) 无地下水时：

$$p_w = (h_0 + z)\gamma_w \quad (11)$$

(2) 有地下水时:

$$p_w = (h_0 + h_w)\gamma_w \quad (12)$$

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 。

21.4.2 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。

21.4.3 根据梅纳尔理论, p_0 、 p_t 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 $p \sim V_{60'' \sim 30''}$ 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, 在标准中推荐了简捷求 p_0 的方法。

至于 p_t 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_t 值。

关于求取 p_t 值, 根据梅纳尔理论 p_t 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 $V_l (=V_e + 2V_0)$ 时对应的压力值。国外求取 p_t 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。标准中推荐了梅纳尔的倒数曲线法。该法是把临塑压力 p_t 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 $\frac{1}{2V_e + V_0}$ 所对应的压力值即为极限压力 p_l 。

极限压力 p_1 与原位土的不排水抗剪强度 C_u 的关系, 在假定孔隙周围土体为理想弹塑性材料, 则:

$$p_1 = p_0 + C_u \left[1 + \ln \frac{E_u}{2(1+\mu)C_u} \right] \quad (13)$$

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。

21.4.4 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 $q_k = p_f$ 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。

21.4.7 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_s 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公式 $E_m = 2(1+\mu)(V_c + V_m) \frac{\Delta P}{\Delta V}$, 或建立本地区的旁压模量计算公式。

21.4.8 深厚覆盖层的工程力学特性和模型参数的确定, 一直是困扰人们的疑难问题。特别是对于覆盖层砂砾石土体, 由于粒径大, 更是几乎不可能取得原状样。目前普遍采用的方法是, 在现场采取散装样, 运至试验室按密度控制重新制备试样进行模拟试验, 研究土体的工程力学特性, 确定土体本构模型参数。但已有研究表明, 这种试验结果与原状样或现场原位试验结果有很大差别, 其原因是土体的原位结构性影响很大。特别是对于深厚覆盖层土体, 由于成层年代长, 应力应变历史复杂, 其原位结构性的影响将更为显著。而且, 即使采用散装样进行模拟试验, 试样制备控制所需的土体原位密度确定也是一个未能很好解决的问题。

近年国内一些单位和高校开展了通过旁压试验确定覆盖层土体本构模型参数的研究和应用工作，内容包括：①采用邓肯-张 E-B 非线性模型有限元数值分析的方法，来模拟旁压试验过程和变形机理；②研制了采用阻尼最小二乘法等非线性优化理论，依据实测旁压曲线，进行本构模型参数反演的方法和程序；③在对模型各参数敏感性分析的基础上，以室内试验结果为初值，依据实际工程覆盖层地基的旁压试验曲线，进行邓肯-张 E-B 模型参数的有限元反演分析；④对实测旁压曲线、室内试验参数计算的旁压曲线及反演参数计算的旁压曲线三者进行比较分析。研究表明，覆盖层地基土体原位结构性的影响显著，室内试验参数计算的曲线与实测曲线相差较大，反演结果较单纯室内试验更能反映实际情况，能够考虑结构性的影响，这方面成果具有重要的工程意义，也值得在后续应用中积累更多经验和进行完善。

22 载 荷 试 验

22.1 一 般 规 定

22.1.1 载荷试验 (plate loading test) 是在岩土体原位, 用一定尺寸的承压板, 施加竖向荷载, 同时观测承压板沉降, 测定岩土体承载力和变形特性。平板荷载试验由于它只反映承压板以下大约 2~3 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。同时, 承压板影响范围内的土层应均一。

大量的工程实践及国内外经验表明, 载荷试验是评价地基容许承载力和预估建筑物沉降的一个重要试验方法, 尤其模拟与施工现场相似的工况下, 把实际碾压的土体载荷试验放在洞内进行, 即节省了锚拉桩、堆载、钢构框架等一系列结构应力计算和烦琐的工序等问题, 又解决了在大吨位荷载状态下庞大的反应力问题, 更保证了试验成果的准确性。

平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。

水对碾压体的湿化和软化作用很明显, 对于南方地区或高土石坝, 可开展碾压体的载荷试验, 浸水饱和程度的鉴定本规程以饱和含水率为标准。即对碾压体的浸水前、后测定密度等指标, 推算饱和含水率, 浸水后含水率达到饱和含水率的 80%~90%, 认为饱和。

22.2 堆载和锚桩反力载荷试验

22.2.1 仪器设备应符合以下规定:

(1) 承压板面积的选择。载荷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, 如加载速率和频率等。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。

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。

(2) 关于加载准确度的问题。《建筑地基基础设计规范》GB 50007 有关载荷试验的条款中,没有荷载准确度的规定。《岩土工程勘察规范》GB 50021 的荷载试验条款中规定“荷载量测精度不应低于最大荷载的 $\pm 1\%$ ”。

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。

22.2.2

(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。

(2) 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。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。《岩土工程勘察规范》GB 50021 规定:“加荷等级宜取 10 级~12 级,并不应少于 8 级”,因此,本规程与其保持一致。

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) 沉降观测:定时进行沉降观测的目的在于获得沉降随时间的发展过程,以便确定加荷时间。

(4) 破坏标准:参考《建筑地基基础设计规范》GB 50007 和《岩土工程勘察规范》GB 50021 进行了改写,明确了极限荷载的取法。

22.2.3

(1) $p \sim S$ 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。我国各系统有的标准以及苏联 1979 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。

(2) 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。

(3) 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土。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。从本条开始承载力基本值(f_0)全部改为承载力特征值(f_{ak})。

22.2.4 由于现代土石坝工程(包括混凝土面板堆石坝)的主体填筑材料,大多采用天然的砂砾石料或爆破开采的堆石料,最大粒径达 600~800mm,甚至更大。由于室内试验设备尺寸的限制,必须对实际坝料级配进行缩尺,采用模拟级配试样进行试验。已有研究表明,这种模拟试验级配与实际级配粗粒土的工程力学特性存在较明显差别,即存在所说的缩尺效应问题。此外,实际施工碾压与室内制样捣实形成的土体结构性差别也可能对工程力学特性产生影响。近年来现场(原位)试验越来越受到重视,特别是依据现场试验,采用优化理论和技术,反演本构模型参数的方法很有发展前景。根据近年来国内有关科研单位开展的依据现场大型载荷试验的载荷~位移试验曲线,采用非线性优化技术,反演坝体堆石材料(包括砂砾石料)的本构模型参数的经验和成果,提出本条款,可在后续使用中不断总结经验,不断完善。

22.3 洞内载荷试验

22.3.1 洞内载荷试验设备可根据洞内高度自行加工。载荷设备方面,国内成熟的同类品种很多,尤其与传力系统匹配的数据自动采集系统与静荷载实验仪相连接,从设定应力、施加压力、自动补偿稳压、数据自动采集整理等一系列完备的试验过程。国内已采用的一种钢结构传力系统如图 18 所示。

试验采用的负荷传感器应参照《力传感器检定规程》JJG 391—95 检定;大量程百分表或位移传感器,应按《大量程百分表检定规程》JJG 379—2009 及相应的有关检定规程进行检定。

试验洞开挖:在开挖试验洞时,试验洞应呈斜坡状向内延

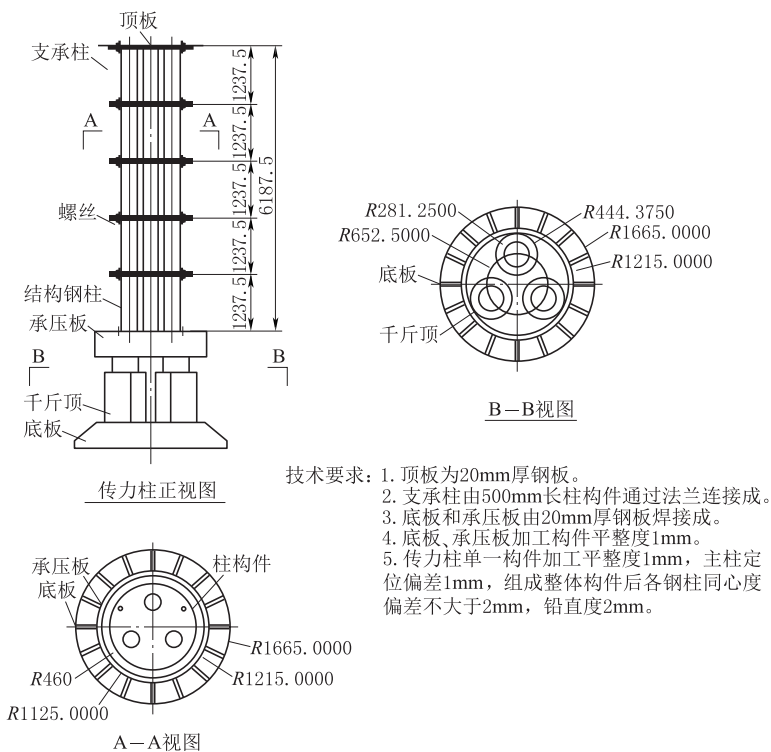


图 18 传力系统示意图

伸，底部试验区域应平坦，有利于试验料坑内饱和。对开挖好的试验洞进行修整，包括基础、顶板和侧壁，使其表面尽量平整，试验洞总长度不宜小于 28m，试验洞载荷试验区域尺寸，推荐长 13m、宽 7m、高 7.5m，振动碾高度、宽度、承压板影响范围等因素确定试验料层厚度。

试验洞修整：在洞顶试验点区域内，利用洞内支护预留的锚杆，顶部焊接 1.2m×1.2m，厚度不小于 12mm 水平钢板，在钢板和洞顶之间密实塞填 C50 干硬性高强混凝土。

22.3.2 对修整好的试验洞基础岩石面试验点区域内预埋标点，用于检测基础在载荷试验后的沉降变形情况，再进行基础找平处

理，对于坑洼处薄层铺筑与试验用料相同的找平料，并进行分层铺料，每层虚铺厚度、洒水量、碾压遍数等按照碾压试验选定参数进行，最终填筑层厚应大于 3m。碾压后的试验洞高度应满足铺筑碾压到试验高度后碾压设备进出安全有效的高度距离。参见试验洞布置示意图图 19。

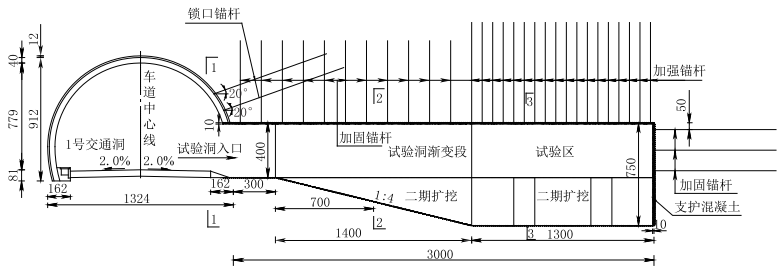


图 19 试验洞布置示意图

洞内饱和供水管路的布设：在洞内试验基础碾压完成后，埋设多道直径约 10cm 的花管（钢管），间距不大于 1.5m，平行布设，与进水管相连接。钢管上梅花形布置直径 5mm 的出水孔，用土工布缠裹钢管，用于饱和试验料用。

最后一层试验料铺筑完成后，碾压前在碾压体载荷区域以外，挖坑法检测两个点的碾压前级配。碾压后同样在相邻的区域再检测两个点的密度，用于校准洞内碾压体密度是否满足规定的密度要求，同时荷载试验完成后对承压板下部试验料进行密度和级配检测，以更好地了解分析载荷试验后对试验料级配产生的破碎等情况。

沉降观测装置其组合必须牢固稳定，调节方便，试验用的位移百分表或位移传感器等相应的分度值为 0.01mm。

如果采用（位移传感器）自动采集系统观测位移。建议在观测点同位置同时安装 4 只数显式百分表，进行同步人工采集位移变形量。

关于试验前预压及预压力大小，在施加第一级荷载之前是否

预压，主要取决于两点：一是压板下与碾压土体表面之间细粒体找平层厚度；二是是否预压取决于传力系统自身重量是否等于或小于第一级荷载量的 $1/2$ 。

试验前应采取措施对试验洞及测试装置及立柱架采取钢绳等进行安全防护，试验工作中需配备安全员进行安全检查和监控。试验结束后应及时拆除设备，并对碾压体试验点进行观察描述，观察表面破碎情况，土体下沉后有无裂缝等。需要时，对试验前后的碾压体取样进行密度、含水、颗粒分析试验。

从整理分析荷载～沉降关系曲线所需的精度考虑，一般情况下，一个试验有 $8\sim 10$ 级便能较好地反应曲线特征，同时也可有 $4\sim 5$ 点在线性变形段内。因此，本规程建议按照预估极限荷载的 $1/8\sim 1/10$ 作为荷载增量的原则是否合适。

关于稳定标准，现在有一些规程，在规定相对稳定标准的同时，还提出了在不同土层中的观测时间的附加规定。就是说，即使在本级荷载下，沉降已达相对稳定的标准，但未到规定的时间也不能施加下一级荷载，这与相对稳定标准是矛盾的。基于上述情况，对每一级荷载观测时间不做规定。

本规程所列终止试验前的三种情况，只能认为适应于一般情况，对于特殊碾压土体，应根据经验分析判断。

关于荷载～沉降关系曲线的校正问题，在荷载试验中，由于各种因素的影响，使线性段延长线偏离原坐标点，曲线是否校正，主要看对变形模量、比例界限压力和极限压力的影响程度。从比例界限压力和极限压力来看，校正与否影响大小；对于变形模量，本规程所列的公式中，取线性的斜率为计算依据，校正与否对变形模量的计算影响也是不大的，因此，本规程中没有明确规定对曲线必须进行校正。

确定比例界限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曲线可直接用转折点确定比例界限值压力外，对其他形状的曲线未作规定。在确定极限压力时一般距承压板边缘 0.7 倍板宽以外所出现的破坏迹象作为判断的依据较为可靠。

23 波 速 试 验

23.1 一 般 规 定

23.1.1 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、单孔法（又称波速检层法）、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。

23.1.2 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 值反映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，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，但可用于碾压堆石层的质量控制。

23.2 设 备 和 设 施

23.2.1 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，本规程不推荐使用。

(1) 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 20 所示。主要由一个固定的圆筒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。

(2) 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机械激振是用固定的机构，按固定的周期，循环往复地施

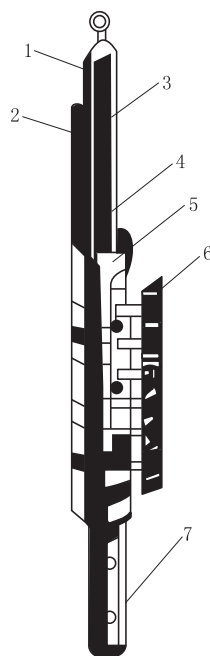


图 20 剪切波锤结构示意图

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—井下锤的
固定部分；7—下部
活动质量块

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。

23.2.2 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 27Hz 和 8Hz。由机械振源装置激振所产生的剪切波序列的主要频率为 70~130Hz，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 8Hz。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。

23.3 操作步骤

23.3.1

(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减小。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 2~4m，岩石中的孔距为 8~10m。若为砂砾石土层，孔距可采用 4~5m。

(2) 一般不用钢管作套管。因钢管本身波的传播速度大（大于 6000m/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。

(3) 如果在钻孔内埋设内径 76~85mm 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。实际工作中塑料套管多选择与钻孔孔径相一致的，真正进行灌浆处理的不多。

(4) 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)。当试验深度大于 15m 时，必须用测斜仪对每个试验孔进行倾斜度测量。

(5) 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。

23.3.2 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。

23.3.3

1 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：

$$Z(t) = A \sin(\omega t - \Phi) = A \sin \omega(t - \Delta t) \quad (14)$$

其中
$$\Phi = \frac{2\pi fl}{V_R}$$

式中：A——振幅；

Δt ——波由振源传至距离 l 处的时间差；

Φ ——相位差。

当 l 等于瑞利波波长 L_R ；则 $\Phi = 2\pi = \frac{2\pi f L_R}{V_R}$ ，故

$$V_R = f L_R \quad (15)$$

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差 $\Delta t = \frac{\Phi}{\omega}$ 就越大，则波速值：

$$V_R = \frac{\Delta l}{\Delta t} \quad (16)$$

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 $V_R = \frac{\Delta l}{\Delta t}$ 变为普遍关系式 $V_R = fL_R$ 。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 l 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。

23.4 计算与记录

23.4.1

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。

23.4.2

1 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 R_1 ，接收器 R_2 以及 R_1 到 R_2 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。分析方法可根据下式：

$$\frac{l_c}{H} = \frac{2\cos i \cos \varphi}{1 - \sin(i + \varphi)} \quad (17)$$

式中： l_c ——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 ——临界角, $i = \sin^{-1} \frac{V_1}{V_2}$;

φ ——地层倾角, 顺时针为正, 逆时针为负;

H ——振源点到地层界面的厚度。

倾斜地层折射波影响参数示意图如图 21 所示。计算的 l_c/H 值见表 13。

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 6m，则要求振源点到地层界面的厚度最小为 2.71m，即大于 2.71m 时，接收不到折射波，小于 2.71m 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。

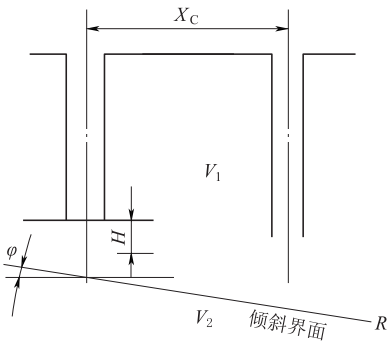


图 21 倾斜地层折射波影响参数示意图

表 13 l_c/H 值

φ	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
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				

24 深厚覆盖层密度试验

24.1 一般规定

24.1.1 直接测定深厚覆盖层的天然状态指标非常困难，冰冻法、胶结法、开挖竖井不仅成本高，而且受各种条件的限制。对深厚覆盖层进行钻探，由于砂砾石颗粒较大并且无胶结，很难取得覆盖层的原状样，因此其密度很难确定。基于当前原位勘探手段的发展水平，采用旁压试验等方法间接反映土层的物理状态是一个相对可行的方法，但无法直接测试深厚覆盖层砂砾石料的密度参数。深厚覆盖层原位密度确定是联合室内试验和现场原位试验综合确定覆盖层原位密度的新方法。

24.4 试验步骤

24.4.1 现场原位旁压试验过程中，可以在旁压试验点上下部位分段取样，或者在旁压试验孔附近增加取样孔，用旁压试验点附近的钻孔取样级配代替旁压试验点的级配，并取统计平均线为深厚覆盖层某一层位的平均级配。深厚覆盖层钻孔取样数量有限，室内模型试验需要样品较多，可取覆盖层表层同源砂卵砾石按级配配置后作为模型试验样品。

24.4.2 深厚覆盖层钻孔取样数量有限，室内模型试验需要样品较多，可取相同岩性、磨圆度类似的覆盖层表层砂卵砾石按条文说明 24.4.1 确定的级配配置后作为模拟同源土料。

25 原位密度试验

25.2 灌砂法

25.2.1 量砂制备方法应参照《土工试验规程》SL 237—1999 中 SL 237 - 041—1999 附 a 方法进行，为方便取用，量砂应储存在专用带盖塑料容器内，防止混入杂物、受潮。预先应分成质量相同的若干份进行存储、使用。使用后的量砂，其湿度发生变化或混有杂质时，应充分风干过筛后方可使用。

25.2.2 量砂松方密度标定时，对于经常使用的量砂，当量砂粒径组成发生变化时，应重新进行标定。

25.2.3 粗粒土表面很难达到理想的平整状态，加之取样位置随机抽取并非选择指定，因此灌砂时要在试坑顶部安置套环，套环须保持水平状态，此时灌入量砂的体积包括试坑的体积、套环固有的体积和套环底部与地面之间间隙的体积，因此，挖坑取样前应进行原位标定套环和间隙消耗量砂的体积，以此来提高试验准确度。当从套环内取出量砂时，地面上难免会留有少许量砂，不便清理干净，可随后和取出的试样一起称重。

灌砂装置包括漏斗、防风筒、套环和固定装置等，套环尺寸应略大于试坑直径，防风筒由金属薄板制成，具有防风作用，防止灌砂过程中量砂下落时受到风速的影响。灌砂漏斗呈锥形，上开口净尺寸为 200mm，下料口内径为 15mm，高度 110mm，应装有节流开关，灌砂时应注意每次使漏斗下口距离地面约 100mm，并控制好量砂下落速度，保持缓慢匀速。而不使用灌砂装置进行试验，会大大地降低试验准确度，用小铲装填会使量砂堆积疏密程度因人而异，且与量砂松方密度标定方法不相一致，欲想每次操作都保持一致却非常困难，试验工作量也很大。因此，规定采用灌砂装置漏斗进行灌砂。

现场表面条件较好情况下可采用不安设套环方式进行试验，但应确保试验准确度。

26 碾 压 试 验

26.1 一 般 规 定

26.1.1、26.1.2 碾压试验主要适用于可研、勘探、设计、施工阶段，用爆破石料、天然砂砾料、轧制的碎石等制备的堆石料、过渡料、垫层料、反滤料等筑坝用料，围堰填筑及其他建筑物施工用粗粒料可参照执行。

26.2 设 备 和 设 施

26.2.1 碾压试验的主要填筑碾压设备依据坝料类别、性质、碾压压实度、工程规模与填筑强度等选用。根据石料特性与工程特点，首先要关注振动碾的型号，是自行式的或是拖式的。标称相同工作质量的振动碾，自行式振动碾的振动轮工作质量约为拖式振动碾的振动轮工作质量的 65%。其次要关注振动碾的频率、振幅、工作速度、激振力等。有条件的工程可考虑采用冲击碾。振动碾的动压力随深度的增加逐渐减弱，因此，铺填厚度对压实效果影响较大，铺填厚度越大，压实效果越差。铺填厚度越薄，越容易压实，但从生产效率考虑，厚度越薄，要求坝料大粒径小，开采费用高，同时需要碾压的层数增多，填筑强度降低。因此，铺填厚度的选择既要考虑压实效果也要考虑施工进度与费用，还要考虑坝体不同分区的填筑标准，从而选择优的铺填厚度。

26.2.2 塑料薄膜厚度越大，所测试坑体积误差越大；塑料薄膜厚度越小，所测试坑体积误差越小，但薄膜易破损。多个工程实践表明：塑料薄膜厚度为 0.04mm，拉伸强度不小于 20MPa，断裂伸长率不小于 660%时，问题可得到较好解决。

26.3 碾 压 试 验 准 备

26.3.6 场地面积要求，只规定了试验单元的尺寸，试验单元的

数量与试验工作量组合有关。

国产 18~32t 自行式振动碾长度为 6.3~6.6m，回车错道的宽度需 9m。国产 18~22t 拖式振动碾长度为 5.7m，加上拖头，总长约为 12m，回车错道的宽度需 15m。

若需多场碾压试验，还应考虑安全削坡后能布置所需的试验单元及供施工机械与重车行走、回车错道的通道及上坡道路所占场地。

26.4 碾压试验要求

26.4.5 沉降量是判断碾压体压实状态及碾压机具功效的参数之一。可通过对填筑料每碾压 2 遍后的平均高程变化差值求得。为了真实反映试验单元的整体状况，要求试验单元内布置一定数量的沉降测量点，既可方格布置测点，也可梅花形布置测点。

沉降测量点是否固定应根据测量工作的需要确定。可在碾压场场外通过测量基点固定桩号，测量时通过碾压场外桩号放线引入测量点的方法，在场外桩号处用刻度测绳放出测量点即可。该方向上所有测点测量完成后，移动测绳，进行下一桩号测量点的测量。此法较好避免了测量效率不高、测量成果离散的缺点。

26.4.7 碾压试验未考虑错距碾压方式，主要是为了取得精确碾压遍数下的沉降、密度、渗透系数等参数。

26.4.8 碾压前颗粒分析、颗粒形状测定及碾前密度测定：

当长度大于宽度 3 倍者则为针状颗粒；厚度小于宽度 1/3 者为片状颗粒。对于爆破石料，可结合碾压前进行密度和颗粒分析时，对于粒径大于 100mm 的石料用卷尺量测长度、宽度、厚度三个方向的尺寸，根据三者的数量比值关系，作为判断针片状颗粒的依据。对于粒径 100mm 以内的石料，在堆石体中起骨架支撑作用较小，对堆石体的压实效果影响可以忽略。

若石料级配不良，如再含有较大百分比的针片状颗粒，往往压实效果达不到设计要求。以常用的 YZT25Y 为例，总作用力约为 795kN，振动轮宽 213cm，接地面积按 5cm 计算，不考虑

作用力的发散方向，压应力为 7.4MPa，仍难以使坚硬的针片状堆石破碎，因而产生架空现象，压实效果达不到设计要求。碾前密度测定是为了检验碾压效果与确定铺填厚度。

26.4.11、26.4.12 复核试验是对碾压试验得到的优碾压参数和佳施工机具组合起来，重新进行校核验证铺料方式、铺填厚度、碾压遍数、洒水量、碾压机吨位、行驶速度及牵引设备等参数的试验。在复核试验完成后应该在碾压堆石体上进行密度、级配、颗粒破碎分析、渗透试验，并视需要进行载荷、原位直剪等试验检测。当复核试验成果与优选的碾压试验参数差异较大时，应对试验资料进行逐项逐类的检查和核对，分析成果的代表性、规律性和合理性。

26.6 计算与记录

26.6.1 现场碾压试验完成后，应绘制“铺料厚度~沉降率~不同碾压遍数关系图”和“铺料厚度~沉降量~不同碾压遍数关系图”，进一步分析坝料碾压试验结果的规律性。如新疆某工程碾压试验完成后的铺料厚度~沉降率~不同碾压遍数等关系图如图 22~图 24 所示。从图中结果看，砂砾料铺料厚度 60cm、80cm、100cm，碾压 8 遍、10 遍、12 遍，随着碾压遍数增加，干密度值增大，铺料厚度增加干密度降低，符合基本规律。

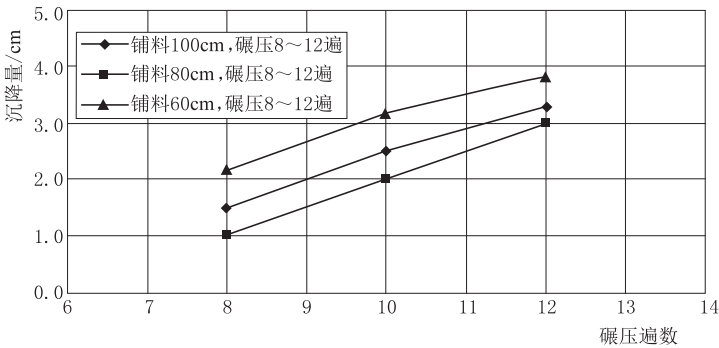


图 22 砂砾料碾压遍数与沉降量关系示例图

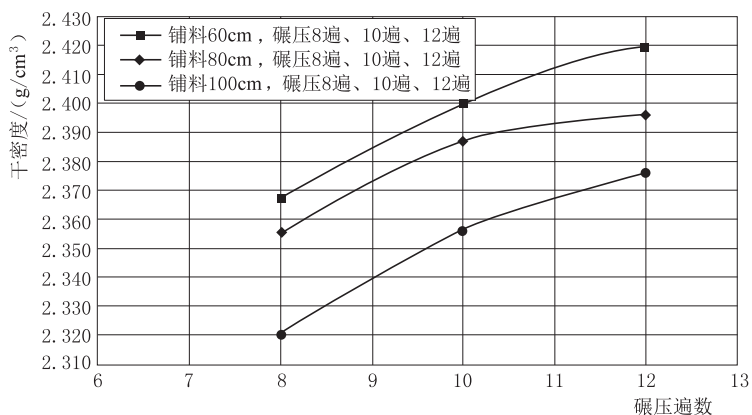


图 23 砂砾料碾压遍数与干密度关系示例图

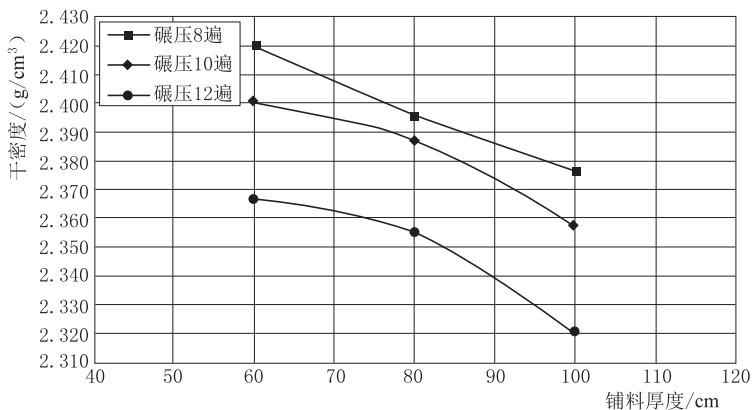


图 24 砂砾料碾压遍数、干密度和铺料厚度关系示例图

26.7 试验工作量基本组合

26.7.5 试验组合中的加水量试验安排在第 4 场次进行，实际试验中也可根据工程需要安排在其他场次进行。

复核场次的碾压试验应结合工程实际情况，选择不加水和加水两种情况下的复核试验。

26.7.6 根据不同阶段的试验目的，碾压试验时可以对试验组合进行适当调整，可研、勘探、设计阶段碾压试验偏重于料的工程特性了解及料的技术可行性、适用性确定，通过碾压试验对实测项目进行检测，分析料的特性；施工阶段碾压试验偏重于对碾压机械、碾压遍数、铺料厚度、碾压速度等工艺参数的确定，根据侧重点不同可以参照本规程的组合要求，进行合理的组合，安排试验单元数量和实测项目。

附录 A 土样级配缩尺处理方法

A.0.1 国内外对土样缩尺处理的基本方法有四种，分别为剔除法、等量替代法、相似级配法、混合法。

1 剔除法。剔除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 5mm 颗粒含量相对增加，改变了原级配土的性质。因此，除超粒径含量极小外，一般不采用此法。

2 等量替代法。等量替代法是以试样允许的最大粒径以下和大于 5mm 之间的颗粒，按比例等量替代超粒径颗粒，等量替代后的级配虽保持了粗、细料含量不变，但改变了粗料的级配、不均匀系数及曲率系数，此法适用于超粒径颗粒含量小于 40% 的土石混合料。超粒径含量较小时也可用最大一级粒径粒组等量替代超径粒。

3 相似级配法。相似级配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的原则等比例将原土样粒径缩小，使颗粒分曲线向平移后，仍保持与原级配曲线相似，故 C_u 和 C_c 可以保持不变，但小于 5mm 颗粒含量有所增加。采用相似级配法应注意颗粒级配曲线平移后，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 5mm 颗粒的含量不大于 15%~30%，对力学性质的影响是不明显的。

4 混合法。混合法是先用相似级配法以比较适宜的比例缩小粒径，控制不大于 5mm 颗粒含量增加到不超过试验要求的含量，超径颗粒含量再用等量替代法处理。混合法一定程度上保持了与原级配的结构相似，但由于缩尺同时使用了等量替代技术，仍然部分改变了粗料的级配、不均匀系数及曲率系数，劣化了颗粒级配的充填关系。资料表明：该法所得的最大干密度与现场碾压试验相接近，强度指标也介于相似级配和等量替代级配所得指

标之间。

A.0.2 近年来，科研人员对缩尺方法进行了研究，提出了基于分形分布土体级配的缩尺处理方法和基于 Weibull 分布土体级配的缩尺处理方法等。本规程附录 A 列出了基于分形分布级配的缩尺方法。

分形缩尺法时将分形理论应用于颗粒破碎、级配设计以及缩尺效应等粗粒土性质的研究，得到了工程粗粒土的粒度分形维可以客观反映颗粒充填关系，其良好级配的粒度分形维为 2.22～2.62；不同母岩岩性粗粒土最优级配的临界分形维 D_c ，对于级配最大粒径具有尺度无关性等重要结论。将原级配的粒度分形维 D_0 不大于其最优充填关系对应的临界分形维 D_c ，作为相似级配法的使用条件，相比《水电水利工程粗粒土试验规程》DL/T 5356—2006 而言，做了如下两点改进：一是拓宽了相似级配法的使用范围，如目前室内试验使用最广的最大粒径 60mm 缩尺级配，利用公式 (A.0.2-2) 以及临界分形维 D_c 基本在 2.58 附近，对应的 $p_{5c}=35.2\%$ ，可以最大限度地保持缩尺前后级配结构的几何相似，缩尺级配的渗透性也基本能满足室内三轴试验等力学试验的透水性要求；二是采用临界分形维 D_c 作为区分相似级配法和混合法或等量替代法的条件，使得缩尺级配的控制参数 p_{5c} 可以随着最大粒径的改变而动态变化，保证原级配达到最优充填关系之前，原则上都可以使用相似级配法缩尺。

现就分形分布土体级配的缩尺处理方法案例列举如下。

表 14～表 16 所示分别为典型工程（一）～典型工程（三）的原级配，计算确定 $d_{\max}=60\text{mm}$ 的缩尺试验级配。

表 14 典型工程（一）堆石料的级配

粒径 /mm	700	600	400	200	100	60	40	20	10	5	2	0.5	0.075
平均线	100	93.8	78.0	55.0	41.0	32.0	27.5	20.1	15.0	9.5	7.2	3.5	1.5
缩尺级配						100	83.0	60.5	44.0	32.0	21.1	11.2	4.7

表 15 典型工程（二）砂砾料的级配

粒径/mm	300	200	150	100	60	40	20	10	5	2	0.5	0.075
平均线	100	88.0	82.0	73.0	59.8	52.0	41.0	33.0	24.4	19.0	13.0	6.0
缩尺级配					100	84.6	62.6	45.0	31.0	23.0	14.7	7.9

表 16 典型工程（三）堆石料的级配

粒径/mm	600	400	200	100	60	40	20	10	5	2	0.5	0.075
平均线	100	91.1	68.7	50.5	36.0	29.8	18.4	11.5	7.1	3.8	1.4	0.3

1 超径土体原级配的分形分布特性验算：根据级配分形分布公式（A.0.2-1），对表 14～表 16 土料的原级配数据进行统计分析，计算原级配的粒度分形维数 D_0 、相关系数 R 和标准差 S ，见表 17。拟合相关系数均大于 0.97，典型工程（一）和典型工程（二）坝料的拟合标准差也较小，说明原级配较好地符合分形分布。对于表 16 的典型工程（三）堆石料而言，其中小于 5mm 颗粒百分含量仅 7.1%，远低于对应分形分布的 11.9%；由于表 17 的拟合标准差过大，达 4.5421，说明典型工程（三）堆石料原级配偏离分形分布较为明显，不适合采用本方法缩尺。

表 17 不同工程超径土体级配参数

典型工程 编号	类型	粒度分形维数 D_0	$d_{0\max}$ /mm	p_{5c} /%	相关系数 R	标准差 S
（一）	堆石料	2.542	700	35.2	0.9998	0.6285
（二）	砂砾料	2.676	300	35.2	0.9991	1.3405
（三）	堆石料	2.556	600	35.2	0.9917	4.5421

2 缩尺试验级配计算：

（1）取缩尺级配最大粒径 $d_{\max} = 60\text{mm}$ ，取临界分形维数 $D_c = 2.58$ ，利用公式（A.0.2-3），计算得 $p_{5c} = 35.2\%$ 。

（2）对典型工程（一）堆石料，原级配粒度分形维 $D_0 = 2.542$ ，小于临界分形维 D_c ，得到 $A = 0$ ，代入公式（A.0.2-2），计算缩尺级配，列于表 14。

(3) 对典型工程(二)砂砾料,原级配粒度分形维 $D_0 = 2.671$, 大于临界分形维 D_c 。按以下步骤确定缩尺级配:

由 $p_5^0 < p_{5c}$, 取 $p_{5k} = 31.0\%$, 满足公式(A.0.2-8)要求, 代入公式(A.0.2-5), 得到 $A = -24.74$ 。

将 $A = -24.74$ 代入公式(A.0.2-2), 计算得到缩尺级配中粒径不小于5mm的颗粒百分含量, 见表15。

根据公式(A.0.2-7)以及 p_{5k} , 计算确定缩尺级配中 p_{5k} 对应的 $d_{G_{\max}}$ 等于185.7mm。

根据公式(A.0.2-6), 计算确定缩尺级配中粒径小于5mm的颗粒组成, 见表15。

检验缩尺级配粒径不大于0.075mm颗粒的百分含量不大于8%, 保证缩尺试样的自由排水性能。计算得到最终缩尺级配见表15。