UDC

中华人民共和国国家标准

P GB/T 50123－2019

土工试验方法标准

Standard for geotechnical testing method

2019－05－24 发布 2019－10－01 实施

中华人民共和国住房和城乡建设部
国家市场监督管理总局 联合发布

中华人民共和国国家标准

土工试验方法标准

Standard for geotechnical testing method

GB/T 50123 - 2019

主编部门：中华人民共和国水利部
批准部门：中华人民共和国住房和城乡建设部
施行日期：2019年10月1日

中国计划出版社

2019 北 京

中华人民共和国住房和城乡建设部公告

2019 年　第 131 号

住房和城乡建设部关于发布国家标准《土工试验方法标准》的公告

现批准《土工试验方法标准》为国家标准，编号为 GB/T 50123—2019，自 2019 年 10 月 1 日起实施。原《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)同时废止。

本标准在住房和城乡建设部门户网站(www. mohurd. gov. cn)公开，并由住房和城乡建设部标准定额研究所组织中国计划出版社出版发行。

中华人民共和国住房和城乡建设部

2019 年 5 月 24 日

前　言

根据住房和城乡建设部《关于印发〈2010年工程建设标准规范制订、修订计划〉的通知》(建标〔2010〕43号)的要求，标准编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验、参考有关国际标准和国外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，修订本标准。

本标准共分69章和4个附录，主要技术内容是：总则、术语和符号、基本规定、试样制备和饱和、含水率试验、密度试验、比重试验、颗粒分析试验、界限含水率试验、崩解试验、毛管水上升高度试验、相对密度试验、击实试验、承载比试验、回弹模量试验、渗透试验、固结试验、黄土湿陷试验、三轴压缩试验、无侧限抗压强度试验、直接剪切试验、排水反复直接剪切试验、无黏性土休止角试验、自由膨胀率试验、膨胀率试验、收缩试验、膨胀力试验、土的静止侧压力系数试验、振动三轴试验、共振柱试验、土的基床系数试验、冻土含水率试验、冻土密度试验、冻结温度试验、冻土导热系数试验、冻土的未冻含水率试验、冻胀率试验、冻土融化压缩试验、原位冻土融化压缩试验、原位冻胀率试验、原位密度试验、试坑渗透试验、原位直剪试验、十字板剪切试验、标准贯入试验、静力触探试验、动力触探试验、旁压试验、载荷试验、波速试验、化学分析试样风干含水率试验、酸碱度试验、易溶盐试验、中溶盐石膏试验、难溶盐碳酸钙试验、有机质试验、游离氧化铁试验、阳离子交换量试验、土的X射线衍射矿物成分试验、粗颗粒土的试样制备、粗颗粒土相对密度试验、粗颗粒土击实试验、粗颗粒土的渗透及渗透变形试验、反滤试验、粗颗粒土固结试验、粗颗粒土直接剪切试验、粗颗粒土三轴压缩试验、粗颗粒土三轴蠕变试验、粗颗粒土三轴湿化变形试验等。

本标准修订的主要内容是：

(1)增加了基本规定；

(2)增加了崩解试验、毛管水上升高度试验、无黏性土休止角试验、土的静止侧压力系数试验、振动三轴试验、共振柱试验、土的基床系数试验、冻土含水率试验、原位冻胀率试验、原位密度试验、试坑渗透试验、原位直剪试验、十字板剪切试验、标准贯入试验、静力触探试验、动力触探试验、旁压试验、载荷试验、波速试验、化学分析试样风干含水率试验、游离氧化铁试验、阳离子交换量试验、土的X射线衍射矿物成分试验、粗颗粒土的试样制备、粗颗粒土相对密度试验、粗颗粒土击实试验、粗颗粒土的渗透及渗透变形试验、反滤试验、粗颗粒土固结试验、粗颗粒土直接剪切试验、粗颗粒土三轴压缩试验、粗颗粒土三轴蠕变试验、粗颗粒土三轴湿化变形试验；

(3)补充完善了条文说明；

(4)删除了土的离心含水当量试验。

本标准由住房和城乡建设部负责管理，由水利部水利水电规划设计总院负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议，请寄送水利部水利水电规划设计总院(地址：北京市西城区六铺炕北小街2-1号，邮政编码：100120)。

本标准主编单位、参编单位、主要起草人和主要审查人：

主 编 单 位：水利部水利水电规划设计总院

南京水利科学研究院

参 编 单 位：中国水利水电科学研究院

长江科学院

中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室

西北农林科技大学(水利部西北水利科学研究所)

西安理工大学

中铁第一勘察设计院集团有限公司工程试验检测中心

河海大学

长江岩土工程总公司(武汉)

中水东北勘测设计研究有限责任公司

主要起草人: 蔡正银　王　芳　高长胜　何　宁　刘小生

龚壁卫　吴青柏　李　鹏　胡再强　凌　华

邓友生　王韫楠　朱俊高　李少雄　韩会生

曹　培　傅　华　高明霞　张延亿　李　杰

刘启旺　关云飞　郭　伟　曹永琅　蔡　红

左永振　李顺利　李小梅　黄英豪

主要审查人: 饶锡保　陈德基　殷宗泽　路新景　盛树馨

辛鸿博　薛　强　汪明元　雷兴顺　冯　星

卞素珍　潘海利　江菊英

目　　次

1　总　　则 …… (1)
2　术语和符号 …… (2)
2.1　术语 …… (2)
2.2　符号 …… (3)
3　基本规定 …… (7)
4　试样制备和饱和 …… (8)
4.1　一般规定 …… (8)
4.2　仪器设备 …… (8)
4.3　扰动土试样预备程序 …… (9)
4.4　扰动土试样制备 …… (10)
4.5　原状土试样制备 …… (11)
4.6　试样饱和 …… (11)
4.7　计算和记录 …… (14)
5　含水率试验 …… (16)
5.1　一般规定 …… (16)
5.2　烘干法 …… (16)
5.3　酒精燃烧法 …… (17)
6　密度试验 …… (19)
6.1　一般规定 …… (19)
6.2　环刀法 …… (19)
6.3　蜡封法 …… (20)
7　比重试验 …… (22)
7.1　一般规定 …… (22)
7.2　比重瓶法 …… (22)

7.3 浮称法 …… (24)
7.4 虹吸筒法 …… (26)
8 颗粒分析试验 …… (29)
8.1 一般规定 …… (29)
8.2 筛析法 …… (29)
8.3 密度计法 …… (32)
8.4 移液管法 …… (41)
9 界限含水率试验 …… (44)
9.1 一般规定 …… (44)
9.2 液塑限联合测定法 …… (44)
9.3 碟式仪液限法 …… (47)
9.4 搓滚塑限法 …… (49)
9.5 缩限试验 …… (50)
10 崩解试验 …… (52)
11 毛管水上升高度试验 …… (54)
11.1 一般规定 …… (54)
11.2 直接观测法 …… (54)
11.3 土样管法 …… (55)
12 相对密度试验 …… (57)
12.1 一般规定 …… (57)
12.2 最小干密度试验 …… (57)
12.3 最大干密度试验 …… (59)
13 击实试验 …… (62)
13.1 一般规定 …… (62)
13.2 仪器设备 …… (62)
13.3 操作步骤 …… (64)
13.4 计算、制图和记录 …… (65)
14 承载比试验 …… (67)
14.1 一般规定 …… (67)

14.2 仪器设备 …… (67)
14.3 操作步骤 …… (70)
14.4 计算、制图和记录 …… (72)
15 回弹模量试验 …… (74)
15.1 一般规定 …… (74)
15.2 杠杆压力仪法 …… (74)
15.3 强度仪法 …… (77)
16 渗透试验 …… (79)
16.1 一般规定 …… (79)
16.2 常水头渗透试验 …… (79)
16.3 变水头渗透试验 …… (82)
17 固结试验 …… (85)
17.1 一般规定 …… (85)
17.2 标准固结试验 …… (85)
17.3 快速固结试验 …… (91)
17.4 应变控制加荷固结试验 …… (92)
18 黄土湿陷试验 …… (96)
18.1 一般规定 …… (96)
18.2 湿陷系数试验 …… (96)
18.3 自重湿陷系数试验 …… (97)
18.4 溶滤变形系数试验 …… (98)
18.5 湿陷起始压力试验 …… (98)
19 三轴压缩试验 …… (100)
19.1 一般规定 …… (100)
19.2 仪器设备 …… (100)
19.3 试样的制备和饱和 …… (106)
19.4 不固结不排水剪试验 …… (110)
19.5 固结不排水剪试验 …… (111)
19.6 固结排水剪试验 …… (113)

19.7 一个试样多级加荷试验 …… (113)
19.8 计算、制图和记录 …… (114)
20 无侧限抗压强度试验 …… (118)
20.1 一般规定 …… (118)
20.2 仪器设备 …… (118)
20.3 操作步骤 …… (119)
20.4 计算、制图和记录 …… (120)
21 直接剪切试验 …… (122)
21.1 一般规定 …… (122)
21.2 仪器设备 …… (122)
21.3 操作步骤 …… (123)
21.4 计算、制图和记录 …… (125)
22 排水反复直接剪切试验 …… (127)
22.1 一般规定 …… (127)
22.2 仪器设备 …… (127)
22.3 操作步骤 …… (127)
22.4 计算、制图和记录 …… (129)
23 无黏性土休止角试验 …… (131)
23.1 一般规定 …… (131)
23.2 仪器设备 …… (131)
23.3 操作步骤 …… (132)
23.4 计算和记录 …… (132)
24 自由膨胀率试验 …… (133)
24.1 一般规定 …… (133)
24.2 仪器设备 …… (133)
24.3 操作步骤 …… (133)
24.4 计算和记录 …… (134)
25 膨胀率试验 …… (136)
25.1 一般规定 …… (136)

25.2 无荷载膨胀率试验 …… (136)
25.3 有荷载膨胀率试验 …… (138)
26 收缩试验 …… (140)
26.1 一般规定 …… (140)
26.2 仪器设备 …… (140)
26.3 试验步骤 …… (141)
26.4 计算、制图和记录 …… (141)
27 膨胀力试验 …… (143)
27.1 一般规定 …… (143)
27.2 仪器设备 …… (143)
27.3 操作步骤 …… (143)
27.4 计算和记录 …… (144)
28 土的静止侧压力系数试验 …… (145)
28.1 一般规定 …… (145)
28.2 仪器设备 …… (145)
28.3 操作步骤 …… (146)
28.4 计算、制图和记录 …… (147)
29 振动三轴试验 …… (148)
29.1 一般规定 …… (148)
29.2 仪器设备 …… (148)
29.3 操作步骤 …… (149)
29.4 计算、制图和记录 …… (153)
30 共振柱试验 …… (158)
30.1 一般规定 …… (158)
30.2 仪器设备 …… (158)
30.3 操作步骤 …… (159)
30.4 计算、制图和记录 …… (162)
31 土的基床系数试验 …… (166)
31.1 一般规定 …… (166)

31.2 仪器设备 …… (166)
31.3 操作步骤 …… (166)
31.4 计算、制图和记录 …… (167)
32 冻土含水率试验 …… (168)
32.1 一般规定 …… (168)
32.2 烘干法 …… (168)
32.3 联合测定法 …… (169)
33 冻土密度试验 …… (172)
33.1 一般规定 …… (172)
33.2 浮称法 …… (172)
33.3 联合测定法 …… (174)
33.4 环刀法 …… (174)
33.5 充砂法 …… (175)
34 冻结温度试验 …… (177)
34.1 一般规定 …… (177)
34.2 仪器设备 …… (177)
34.3 操作步骤 …… (178)
34.4 计算、制图和记录 …… (179)
35 冻土导热系数试验 …… (180)
35.1 一般规定 …… (180)
35.2 仪器设备 …… (180)
35.3 操作步骤 …… (181)
35.4 计算和记录 …… (181)
36 冻土的未冻含水率试验 …… (183)
36.1 一般规定 …… (183)
36.2 仪器设备 …… (183)
36.3 操作步骤 …… (183)
36.4 计算、制图和记录 …… (183)
37 冻胀率试验 …… (185)

37.1 一般规定 …… (185)
37.2 仪器设备 …… (185)
37.3 操作步骤 …… (186)
37.4 计算和记录 …… (187)
38 冻土融化压缩试验 …… (188)
38.1 一般规定 …… (188)
38.2 仪器设备 …… (188)
38.3 操作步骤 …… (189)
38.4 计算、制图和记录 …… (190)
39 原位冻土融化压缩试验 …… (192)
39.1 一般规定 …… (192)
39.2 仪器设备 …… (192)
39.3 操作步骤 …… (193)
39.4 计算、制图和记录 …… (195)
40 原位冻胀率试验 …… (196)
40.1 一般规定 …… (196)
40.2 仪器设备 …… (196)
40.3 操作步骤 …… (197)
40.4 计算、制图和记录 …… (197)
41 原位密度试验 …… (199)
41.1 一般规定 …… (199)
41.2 灌砂法 …… (199)
41.3 灌水法 …… (202)
42 试坑渗透试验 …… (204)
42.1 一般规定 …… (204)
42.2 仪器设备 …… (204)
42.3 操作步骤 …… (205)
42.4 计算和记录 …… (205)
43 原位直剪试验 …… (207)

43.1 一般规定 …… (207)
43.2 仪器设备 …… (207)
43.3 操作步骤 …… (207)
43.4 计算、制图和记录 …… (209)
44 十字板剪切试验 …… (211)
44.1 一般规定 …… (211)
44.2 电测式十字板剪切试验 …… (211)
44.3 机械式十字板剪切试验 …… (214)
45 标准贯入试验 …… (218)
45.1 一般规定 …… (218)
45.2 仪器设备 …… (218)
45.3 操作步骤 …… (219)
45.4 计算、制图和记录 …… (220)
46 静力触探试验 …… (221)
46.1 一般规定 …… (221)
46.2 仪器设备 …… (221)
46.3 操作步骤 …… (225)
46.4 计算、制图和记录 …… (227)
47 动力触探试验 …… (229)
47.1 一般规定 …… (229)
47.2 仪器设备 …… (229)
47.3 操作步骤 …… (231)
47.4 计算、制图和记录 …… (232)
48 旁压试验 …… (234)
48.1 一般规定 …… (234)
48.2 仪器设备 …… (234)
48.3 操作步骤 …… (235)
48.4 计算、制图和记录 …… (238)
49 载荷试验 …… (241)

49.1 一般规定 …… (241)
49.2 平板载荷试验 …… (241)
49.3 黄土浸水载荷试验 …… (247)
49.4 螺旋板载荷试验 …… (249)
50 波速试验 …… (255)
50.1 一般规定 …… (255)
50.2 仪器设备 …… (255)
50.3 操作步骤 …… (256)
50.4 计算、制图和记录 …… (259)
51 化学分析试样风干含水率试验 …… (262)
51.1 一般规定 …… (262)
51.2 仪器设备 …… (262)
51.3 操作步骤 …… (262)
51.4 计算和记录 …… (263)
52 酸碱度试验 …… (264)
52.1 一般规定 …… (264)
52.2 仪器设备和试剂 …… (264)
52.3 操作步骤和记录 …… (265)
53 易溶盐试验 …… (266)
53.1 一般规定 …… (266)
53.2 浸出液制取 …… (266)
53.3 易溶盐总量测定(质量法) …… (266)
53.4 碳酸根(CO_3^{2-})及重碳酸根(HCO_3^-)的测定(双指示剂中和滴定法) …… (268)
53.5 氯离子(Cl^-)的测定(硝酸银滴定法) …… (270)
53.6 硫酸根(SO_4^{2-})的测定(EDTA 络合滴定法或比浊法) …… (272)
53.7 钙离子(Ca^{2+})的测定(EDTA 法) …… (277)
53.8 镁离子(Mg^{2+})的测定(钙镁合量滴定法) …… (278)
53.9 钠离子(Na^+)和钾离子(K^+)的测定(火焰光度法) …… (279)

54 中溶盐石膏试验 …… (282)
54.1 一般规定 …… (282)
54.2 仪器设备和试剂 …… (282)
54.3 操作步骤 …… (282)
54.4 计算和记录 …… (283)
55 难溶盐碳酸钙试验 …… (285)
55.1 一般规定 …… (285)
55.2 简易碱吸收容量法 …… (285)
55.3 气量法 …… (287)
56 有机质试验 …… (292)
56.1 一般规定 …… (292)
56.2 仪器设备和试剂 …… (292)
56.3 操作步骤 …… (293)
56.4 计算和记录 …… (294)
57 游离氧化铁试验 …… (295)
57.1 一般规定 …… (295)
57.2 仪器设备和试剂 …… (295)
57.3 操作步骤 …… (296)
57.4 计算 …… (297)
58 阳离子交换量试验 …… (299)
58.1 一般规定 …… (299)
58.2 氯化钡缓冲液法 …… (299)
58.3 1mol·L^{-1}乙酸铵交换法 …… (301)
58.4 乙酸钠-火焰光度法 …… (305)
59 土的X射线衍射矿物成分试验 …… (307)
59.1 一般规定 …… (307)
59.2 仪器设备和试剂 …… (307)
59.3 操作步骤 …… (308)
59.4 数据整理、鉴定和记录 …… (311)

60 粗颗粒土的试样制备 …… (317)
60.1 一般规定 …… (317)
60.2 仪器设备 …… (317)
60.3 操作步骤 …… (317)
60.4 计算和记录 …… (319)
61 粗颗粒土相对密度试验 …… (321)
61.1 一般规定 …… (321)
61.2 仪器设备 …… (321)
61.3 操作步骤 …… (322)
61.4 计算和记录 …… (324)
62 粗颗粒土击实试验 …… (326)
62.1 一般规定 …… (326)
62.2 仪器设备 …… (326)
62.3 操作步骤 …… (327)
62.4 计算、制图和记录 …… (329)
63 粗颗粒土的渗透及渗透变形试验 …… (330)
63.1 一般规定 …… (330)
63.2 仪器设备 …… (330)
63.3 操作步骤 …… (332)
63.4 计算、制图和记录 …… (334)
64 反滤试验 …… (337)
64.1 一般规定 …… (337)
64.2 无黏性土的反滤试验 …… (337)
64.3 黏性土的反滤试验 …… (339)
65 粗颗粒土固结试验 …… (341)
65.1 一般规定 …… (341)
65.2 仪器设备 …… (341)
65.3 操作步骤 …… (342)
65.4 计算、制图和记录 …… (343)

66 粗颗粒土直接剪切试验 …… (344)
66.1 一般规定 …… (344)
66.2 仪器设备 …… (344)
66.3 操作步骤 …… (345)
66.4 计算、制图和记录 …… (347)
67 粗颗粒土三轴压缩试验 …… (349)
67.1 一般规定 …… (349)
67.2 仪器设备 …… (349)
67.3 无黏性粗颗粒土三轴压缩试验 …… (350)
67.4 黏质粗颗粒土三轴压缩试验 …… (354)
67.5 计算、制图和记录 …… (356)
68 粗颗粒土三轴蠕变试验 …… (357)
68.1 一般规定 …… (357)
68.2 仪器设备 …… (357)
68.3 操作步骤 …… (357)
68.4 计算、制图和记录 …… (358)
69 粗颗粒土三轴湿化变形试验 …… (360)
69.1 一般规定 …… (360)
69.2 仪器设备 …… (360)
69.3 操作步骤 …… (361)
69.4 计算、制图和记录 …… (362)
附录 A 试验资料的整理与试验报告 …… (364)
附录 B 土样的要求与管理 …… (367)
附录 C 土的工程分类 …… (371)
附录 D 各项试验记录表 …… (374)
本标准用词说明 …… (479)
引用标准名录 …… (480)
附:条文说明 …… (481)

Contents

1 General provisions ····· (1)

2 Terms and symbols ····· (2)

2.1 Terms ····· (2)

2.2 Symbols ····· (3)

3 Basic requirements ····· (7)

4 Preparation and saturation of test specimens ····· (8)

4.1 General requirements ····· (8)

4.2 Instruments and equipments ····· (8)

4.3 Disturbed soil sample preparation procedures ····· (9)

4.4 Disturbed soil specimen preparation ····· (10)

4.5 Undisturbed sample preparation ····· (11)

4.6 Sample saturated ····· (11)

4.7 Calculate and record ····· (14)

5 Water content test ····· (16)

5.1 General requirements ····· (16)

5.2 Drying method ····· (16)

5.3 Alcohol burning method ····· (17)

6 Density test ····· (19)

6.1 General requirements ····· (19)

6.2 Ring knife method ····· (19)

6.3 Wax sealing method ····· (20)

7 Specific gravity test ····· (22)

7.1 General requirements ····· (22)

7.2 Pycnometer method ····· (22)

7.3 Floating method ····· (24)
7.4 Siphon cylinder method ····· (26)
8 Grain distribution analysis test ····· (29)
8.1 General requirements ····· (29)
8.2 Sieve analysis method ····· (29)
8.3 Densimeter method ····· (32)
8.4 Pipette method ····· (41)
9 Limit water content test ····· (44)
9.1 General requirements ····· (44)
9.2 Liquid and plastic limit water content joint measurement ····· (44)
9.3 Disc type liquid limit method ····· (47)
9.4 Rolling method of plastic limit ····· (49)
9.5 Shrinkage limit test ····· (50)
10 Disintegration test ····· (52)
11 Capillary lift test ····· (54)
11.1 General requirements ····· (54)
11.2 Observation method ····· (54)
11.3 Sample tube method ····· (55)
12 Relative density test ····· (57)
12.1 General requirements ····· (57)
12.2 The minimum dry density test ····· (57)
12.3 The maxmum dry density test ····· (59)
13 Compaction test ····· (62)
13.1 General requirements ····· (62)
13.2 Instruments and equipments ····· (62)
13.3 Operation steps ····· (64)
13.4 Calculate,drawing and record ····· (65)
14 California bearing ratio test ····· (67)
14.1 General requirements ····· (67)

14.2 Instruments and equipments ····· (67)
14.3 Operation steps ····· (70)
14.4 Calculate, drawing and record ····· (72)
15 Modulus of resilience test ····· (74)
15.1 General requirements ····· (74)
15.2 Lever pressure gauge method ····· (74)
15.3 Intensity method ····· (77)
16 Permeability test ····· (79)
16.1 General requirements ····· (79)
16.2 Constant water head method ····· (79)
16.3 Variable water head method ····· (82)
17 Consolidation test ····· (85)
17.1 General requirements ····· (85)
17.2 Standard consolidation test ····· (85)
17.3 Rapid consolidation test ····· (91)
17.4 Strain control loading consolidation test ····· (92)
18 Loess collapse test ····· (96)
18.1 General requirements ····· (96)
18.2 The collapsibility coefficient test ····· (96)
18.3 The gravity collapsibility coefficient test ····· (97)
18.4 Leached deformation coefficient test ····· (98)
18.5 The initial collapse pressure test ····· (98)
19 Triaxial compression test ····· (100)
19.1 General requirements ····· (100)
19.2 Instruments and equipments ····· (100)
19.3 Sample preparatin and saturation ····· (106)
19.4 Undrained and unconsolidation shear test ····· (110)
19.5 Undrained and consolidation shear test ····· (111)
19.6 Drained and consolidation shear test ····· (113)

19.7 Multistage loading test ····· (113)
19.8 Calculate, drawing and record ····· (114)
20 Unconfined compression test ····· (118)
20.1 General requirements ····· (118)
20.2 Instruments and equipments ····· (118)
20.3 Operation steps ····· (119)
20.4 Calculate, drawing and record ····· (120)
21 Direct shear test ····· (122)
21.1 General requirements ····· (122)
21.2 Instruments and equipments ····· (122)
21.3 Operation steps ····· (123)
21.4 Calculate, drawing and record ····· (125)
22 Drained repeated direct shear test ····· (127)
22.1 General requirements ····· (127)
22.2 Instruments and equipments ····· (127)
22.3 Operation steps ····· (127)
22.4 Calculate, drawing and record ····· (129)
23 Angle of repose test of cohesionless soil ····· (131)
23.1 General requirements ····· (131)
23.2 Instruments and equipments ····· (131)
23.3 Operation steps ····· (132)
23.4 Calculate, drawing and record ····· (132)
24 Free swell test ····· (133)
24.1 General requirements ····· (133)
24.2 Instruments and equipments ····· (133)
24.3 Operation steps ····· (133)
24.4 Calculate and record ····· (134)
25 Swelling ratio test ····· (136)
25.1 General requirements ····· (136)

25.2 No loading swelling ratio test ····· (136)
25.3 Loading swelling ratio test ····· (138)
26 Shrinkage test ····· (140)
26.1 General requirements ····· (140)
26.2 Instruments and equipments ····· (140)
26.3 Operation steps ····· (141)
26.4 Calculate, drawing and record ····· (141)
27 Swelling force test ····· (143)
27.1 General requirements ····· (143)
27.2 Instruments and equipments ····· (143)
27.3 Operation steps ····· (143)
27.4 Calculate and record ····· (144)
28 Coefficient of earth pressure at rest test ····· (145)
28.1 General requirements ····· (145)
28.2 Instruments and equipments ····· (145)
28.3 Operation steps ····· (146)
28.4 Calculate, drawing and record ····· (147)
29 Dynamic triaxial test ····· (148)
29.1 General requirements ····· (148)
29.2 Instruments and equipments ····· (148)
29.3 Operation steps ····· (149)
29.4 Calculate, drawing and record ····· (153)
30 Resonant column triaxial test ····· (158)
30.1 General requirements ····· (158)
30.2 Instruments and equipments ····· (158)
30.3 Operation steps ····· (159)
30.4 Calculate, drawing and record ····· (162)
31 Foundation modulus test of soil ····· (166)
31.1 General requirements ····· (166)

31.2 Instruments and equipments ····· (166)
31.3 Operation steps ····· (166)
31.4 Calculate, drawing and record ····· (167)
32 Frozen soil water content test ····· (168)
32.1 General requirements ····· (168)
32.2 Drying method ····· (168)
32.3 Joint measurement ····· (169)
33 Frozen soil density test ····· (172)
33.1 General requirements ····· (172)
33.2 Floating method ····· (172)
33.3 Joint measurement ····· (174)
33.4 Ring knife method ····· (174)
33.5 Sand filling method ····· (175)
34 Freezing temperature test ····· (177)
34.1 General requirements ····· (177)
34.2 Instruments and equipments ····· (177)
34.3 Operation steps ····· (178)
34.4 Calculate, drawing and record ····· (179)
35 Frozen soil coefficient of thermal conductivity test ····· (180)
35.1 General requirements ····· (180)
35.2 Instruments and equipments ····· (180)
35.3 Operation steps ····· (181)
35.4 Calculate and record ····· (181)
36 Unfrozen water content test ····· (183)
36.1 General requirements ····· (183)
36.2 Instruments and equipments ····· (183)
36.3 Operation steps ····· (183)
36.4 Calculate, drawing and record ····· (183)
37 Frost-heave ratio test ····· (185)

37.1 General requirements ····· (185)
37.2 Instruments and equipments ····· (185)
37.3 Operation steps ····· (186)
37.4 Calculate and record ····· (187)
38 Frozen soil thaw compression test ····· (188)
38.1 General requirements ····· (188)
38.2 Instruments and equipments ····· (188)
38.3 Operation steps ····· (189)
38.4 Calculate, drawing and record ····· (190)
39 In-situ frozen soil thaw compression test ····· (192)
39.1 General requirements ····· (192)
39.2 Instruments and equipments ····· (192)
39.3 Operation steps ····· (193)
39.4 Calculate, drawing and record ····· (195)
40 In-situ frost-heave test ····· (196)
40.1 General requirements ····· (196)
40.2 Instruments and equipments ····· (196)
40.3 Operation steps ····· (197)
40.4 Calculate, drawing and record ····· (197)
41 In-situ density test ····· (199)
41.1 General requirements ····· (199)
41.2 Sand filling method ····· (199)
41.3 Water filling method ····· (202)
42 Pit permeability test ····· (204)
42.1 General requirements ····· (204)
42.2 Instruments and equipments ····· (204)
42.3 Operation steps ····· (205)
42.4 Calculate and record ····· (205)
43 In-situ direct shear test ····· (207)

43.1 General requirements ····· (207)
43.2 Instruments and equipments ····· (207)
43.3 Operation steps ····· (207)
43.4 Calculate, drawing and record ····· (209)
44 Vane shear test ····· (211)
44.1 General requirements ····· (211)
44.2 Electrical vane shear test ····· (211)
44.3 Mechanical vane shear test ····· (214)
45 Standard penetration test ····· (218)
45.1 General requirements ····· (218)
45.2 Instruments and equipments ····· (218)
45.3 Operation steps ····· (219)
45.4 Calculate, drawing and record ····· (220)
46 Cone penetration test ····· (221)
46.1 General requirements ····· (221)
46.2 Instruments and equipments ····· (221)
46.3 Operation steps ····· (225)
46.4 Calculate, drawing and record ····· (227)
47 Dynamic penetration test ····· (229)
47.1 General requirements ····· (229)
47.2 Instruments and equipments ····· (229)
47.3 Operation steps ····· (231)
47.4 Calculate, drawing and record ····· (232)
48 Pressure meter test ····· (234)
48.1 General requirements ····· (234)
48.2 Instruments and equipments ····· (234)
48.3 Operation steps ····· (235)
48.4 Calculate, drawing and record ····· (238)
49 Plate loading test ····· (241)

49.1 General requirements ····· (241)
49.2 Plate loading test ····· (241)
49.3 The loess immersion loading test ····· (247)
49.4 Spiral plate loading test ····· (249)
50 Wave veloity test ····· (255)
50.1 General requirements ····· (255)
50.2 Instruments and equipments ····· (255)
50.3 Operation steps ····· (256)
50.4 Calculate, drawing and record ····· (259)
51 Chemical analysis specimens air-dried water content test ····· (262)
51.1 General requirements ····· (262)
51.2 Instruments and equipments ····· (262)
51.3 Operation steps ····· (262)
51.4 Calculate and record ····· (263)
52 Acidity and alkalinity test ····· (264)
52.1 General requirements ····· (264)
52.2 Equipments and reagents ····· (264)
52.3 Operation steps and record ····· (265)
53 Strongly soluble salt test ····· (266)
53.1 General requirements ····· (266)
53.2 Make leach liquor ····· (266)
53.3 Total soluble salt determination ····· (266)
53.4 CO_3^{2-} and HCO_3^- determination ····· (268)
53.5 Cl^- determination ····· (270)
53.6 SO_4^{2-} determination ····· (272)
53.7 Ca^{2+} determination ····· (277)
53.8 Mg^{2+} determination ····· (278)
53.9 Na^+ and K^+ determination ····· (279)

54 Moderately soluble salt test ····· (282)
54.1 General requirements ····· (282)
54.2 Equipments and reagents ····· (282)
54.3 Operation steps ····· (282)
54.4 Calculate and record ····· (283)
55 Slightly soluble salt test ····· (285)
55.1 General requirements ····· (285)
55.2 Simple alkali absorption capacity method ····· (285)
55.3 Gas volume method ····· (287)
56 Organicmatter test ····· (292)
56.1 General requirements ····· (292)
56.2 Equipments and reagents ····· (292)
56.3 Operation steps ····· (293)
56.4 Calculate and record ····· (294)
57 Free ferric oxide test ····· (295)
57.1 General requirements ····· (295)
57.2 Equipments and reagents ····· (295)
57.3 Operation steps ····· (296)
57.4 Calculate ····· (297)
58 Cation exchange test ····· (299)
58.1 General requirements ····· (299)
58.2 Barium chloride buffer method ····· (299)
58.3 1mol • L^{-1} ammonium acetate exchange method ····· (301)
58.4 Sodium acetate-flame photometry ····· (305)
59 Mineralogical composition of soil byX -ray diffraction test ····· (307)
59.1 General requirements ····· (307)
59.2 Equipments and reagents ····· (307)
59.3 Operation steps ····· (308)

59.4 Data sorting, identification and record ····· (311)
60 Preparation of coarse-grained soil specimens ····· (317)
60.1 General requirements ····· (317)
60.2 Instruments and equipments ····· (317)
60.3 Operation steps ····· (317)
60.4 Calculate and record ····· (319)
61 Relative density test of coarse-grained soil ····· (321)
61.1 General requirements ····· (321)
61.2 Instruments and equipments ····· (321)
61.3 Operation steps ····· (322)
61.4 Calculate and record ····· (324)
62 Compaction test of coarse-grained soil ····· (326)
62.1 General requirements ····· (326)
62.2 Instruments and equipments ····· (326)
62.3 Operation steps ····· (327)
62.4 Calculate, drawing and record ····· (329)
63 Permeability and filtration erosion test of coarse-grained soil ····· (330)
63.1 General requirements ····· (330)
63.2 Instruments and equipments ····· (330)
63.3 Operation steps ····· (332)
63.4 Calculate, drawing and record ····· (334)
64 Filter test ····· (337)
64.1 General requirements ····· (337)
64.2 Filter test of cohesionless soil ····· (337)
64.3 Filter test of cohesion soil ····· (339)
65 Consolidation test of coarse-grained soil ····· (341)
65.1 General requirements ····· (341)
65.2 Instruments and equipments ····· (341)

65.3 Operation steps ····· (342)
65.4 Calculate, drawing and record ····· (343)
66 Direct shear test of coarse-grained soil ····· (344)
66.1 General requirements ····· (344)
66.2 Instruments and equipments ····· (344)
66.3 Operation steps ····· (345)
66.4 Calculate, drawing and record ····· (347)
67 Triaxial compression test of coarse-grained soil ····· (349)
67.1 General requirements ····· (349)
67.2 Instruments and equipments ····· (349)
67.3 Triaxial compression test of cohesionless coarse-grained soil ····· (350)
67.4 Triaxial compression test of cohesion coarse-grained soil ····· (354)
67.5 Calculate, drawing and record ····· (356)
68 Triaxial rheological test of coarse-grained soil ····· (357)
68.1 General requirements ····· (357)
68.2 Instruments and equipments ····· (357)
68.3 Operation steps ····· (357)
68.4 Calculate, drawing and record ····· (358)
69 Triaxial slaking test of coarse-grained soil ····· (360)
69.1 General requirements ····· (360)
69.2 Instruments and equipments ····· (360)
69.3 Operation steps ····· (361)
69.4 Calculate, drawing and record ····· (362)
Appendix A Test data collation and report ····· (364)
Appendix B Requirements and management of soil sample ····· (367)
Appendix C Engineering classification of soil ····· (371)

Appendix D Test records ····· (374)
Explanation of wording in this standard ····· (479)
List of quoted standards ····· (480)
Addition: Explanation of provisions ····· (481)

1 总　　则

1.0.1　为测定土的基本工程性质，统一试验方法，制定本标准。

1.0.2　本标准适用于工业和民用建筑、水利水电、交通、电力等建设工程的地基土及填筑土料的基本工程性质试验。

1.0.3　土工试验资料的整理，应通过对样本（试验测得的数据）的研究来估计土体单元特征及其变化的规律，使土工试验的成果为工程设计和施工提供准确可靠的土性指标。试验成果的分析整理应按本标准附录 A 进行。

1.0.4　土样的要求与管理应符合本标准附录 B 的规定，土的分类应符合本标准附录 C 的规定。

1.0.5　土工试验方法除应符合本标准外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术　　语

2.1.1 干比重　　dry specific gravity

土在105℃～110℃下烘至恒值时的质量与相当于土粒总体积的纯水4℃时纯水质量的比值，土粒总体积包括土的固体颗粒、封闭型孔隙及开敞型孔隙组成的全部体积。

2.1.2 吸着含水率　　absorbed water content

土粒在饱和面干状态时所含的水的质量与干土质量比，以百分数表示。

2.1.3 土的泊松比　　poisson's ratio of soil

土在无侧限条件下加载时径向应变与竖向应变的比值。

2.1.4 主固结　　primary consolidation

饱和土受压力后，随孔隙水的排出孔隙水压力逐渐消散至零，有效应力相应增加，体积逐渐减小的过程。

2.1.5 次固结　　secondary consolidation

饱和黏性土在完成主固结后，土体积仍随时间减小的过程。

2.1.6 次固结系数　　coefficient of secondary consolidation

土体主固结完成进入次固结后固结曲线的斜率，反映土体次固结速率的指标。

2.1.7 粗颗粒土　　coarse-grained soil

粒径5mm以上土的质量大于总质量50%的粗粒土。

2.1.8 动三轴试验　　dynamic triaxial test

在试验仪器压力室内，以一定围压或偏压使土样固结后施加动荷载以确定土的动强度、动弹性模量与阻尼以及液化势的试验。

2.1.9 原位测试　　in-situ testing

在岩土体原来所处的位置，基本保持岩土体的结构、含水率和原位应力状态，直接或间接地测定岩土的工程特性。

2.1.10 载荷试验　　plate loading test

用一定尺寸的承压板，对岩、土体施加竖向荷载，同时量测承压板沉降，以研究岩、土体在荷载作用下的变形特征，测定岩、土体承载力和变形模量等的原位试验。分为平板载荷试验和螺旋板载荷试验。

2.1.11 旁压试验　　pressuremeter test(PMT)

利用可侧向膨胀的旁压仪，在钻孔中对孔壁施加径向压力，根据压力与变形关系测定岩土临塑压力、极限压力、旁压模量等参数的原位测试，又称横压试验。

2.1.12 波速测试　　wave velocity testing

根据压缩波、剪切波或瑞利波在岩土体内的传播速度，间接测定岩土体在小应变条件下动弹性模量的原位测试。

2.1.13 纯水　　pure water

脱气水或离子交换水。

2.2 符　　号

2.2.1 物理性指标：

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；

G_s'——干比重；

I_D——密度指数；

I_L——液性指数；

I_P——塑性指数；

S_r——饱和度；

w——含水率；

w_f——冻土含水率；

w_{fn}——冻土的未冻含水率；

w_L——液限；

w_P——塑限；

w_{op}——最优含水率；

w_s——缩限；

W_u——有机质含量；

ρ——土的湿密度；

ρ_f——冻土密度；

ρ_d——土的干密度；

ρ_{fd}——冻土干密度；

α_c——风干状态下休止角；

α_m——水下休止角。

2.2.2 力学性指标：

A_f——试样破坏时孔隙水压力系数；

A_t——试样在时间 t 时的崩解量；

a_{f0}——冻土融沉系数；

a_{fv}——冻土融化压缩系数；

a_v——压缩系数；

B——试样初始孔隙水压力系数；

B_i——初始切线体积模量；

c——黏聚力；

C_c——压缩指数；

C_h——径向固结系数；

C_s——回弹指数；

C_v——固结系数；

C_a——次固结系数；

CBR——承载力；

E_e——回弹模量；

E_d——动弹性模量；

E_i——初始切线模量；

E_s——压缩模量；

E_m——旁压模量；

E_{sc}——螺旋板试验土的变形模量；

G_d——动剪切模量；

K——基床系数；

K_t——切线体积变形模量；

K_0——静止侧压力系数；

k_{20}——标准温度 20℃时的渗透系数；

m_v——体积压缩系数；

p_c——先期固结压力；

p_e——膨胀力；

p_{sh}——湿陷起始压力；

q_u——无侧限抗压强度；

R_t——破坏比；

S——抗剪强度；

S_t——灵敏度；

u——孔隙水压力；

δ_e——无荷载膨胀率；

δ_{ef}——自由膨胀率；

δ_{ep}——有荷载膨胀率；

δ_s——湿陷系数；

δ_t——时间 t 时的无荷载膨胀率；

δ_{wt}——溶滤湿陷系数；

δ_{zs}——自重湿陷系数；

η_f——冻胀率；

λ——阻尼比；

λ_s——收缩系数；

μ_i——初始切线泊松比；

σ——正应力；

τ——剪应力；

φ——摩擦角。

2.2.3 热学指标：

T——温度；

T_f——冻结温度；

λ_f——导热系数。

2.2.4 化学性指标：

$b(x)$——物质 x 的质量摩尔浓度；

$C(x)$——溶液 x 的浓度；

$\omega(x)$——物质 x 的含量；

CEC——阳离子交换量；

$O.M.$——土壤有机质含量。

3 基本规定

3.0.1 本标准所用的仪器设备应符合现行国家标准《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》GB/T 15406 的有关规定，并应进行检定或校准。

3.0.2 本标准试验用水，除特殊要求外均应为纯水。

3.0.3 本标准试验用试剂，除特殊要求外应为国家标准二级品或以上等级的试剂。

4 试样制备和饱和

4.1 一般规定

4.1.1 试样制备的扰动土和原状土的颗粒粒径应小于60mm。

4.1.2 制备特殊试样的程序应符合有关试验的规定。

4.1.3 试样制备的数量视试验需要而定，应多制备1个～2个备用。原状土样同一组试样的密度最大允许差值应为±0.03g/cm³，含水率最大允许差值应为±2%；扰动土样制备试样密度、含水率与制备标准之间最大允许差值应分别为±0.02g/cm³与±1%；扰动土平行试验或一组内各试样之间最大允许差值应分别为±0.02g/cm³ 与±1%。

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

4.2 仪器设备

4.2.1 制备试样需用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 筛：孔径20mm、5mm、2mm、0.5mm；

2 洗筛：孔径0.075mm；

3 台秤：称量10kg～40kg，分度值5g；

4 天平：称量1000g，分度值0.1g；称量200g，分度值0.01g；

5 碎土器：磨土机；

6 击实器：包括活塞、导筒和环刀；

7 抽气机(附真空表)；

8 饱和器(附金属或玻璃的真空缸)。

4.2.2 制备试样需用的其他设备：烘箱、干燥器、保湿器、研钵、木锤、木碾、橡皮板、玻璃瓶、玻璃缸、修土刀、钢丝锯、凡士林、土样标

签及盛土器。

4.3 扰动土试样预备程序

4.3.1 细粒土试样预备程序应符合下列规定：

1 对扰动土试样进行描述，描述内容可包括颜色、土类、气味及夹杂物；当有需要时，将扰动土充分拌匀，取代表性土样进行含水率测定。

2 将块状扰动土放在橡皮板上用木碾或利用碎土器碾散，碾散时勿压碎颗粒；当含水率较大时，可先风干至易碾散为止。

3 根据试验所需试样数量，将碾散后的土样过筛。过筛后用四分对角取样法或分砂器，取出足够数量的代表性试样装入玻璃缸内，试样应有标签，标签内容应包括任务单号、土样编号、过筛孔径、用途、制备日期和试验人员，以备各项试验之用。对风干土，应测定风干含水率。

4 配制一定含水率的试样，取过筛的风干土 1kg～5kg，平铺在不吸水的盘内，按本标准式(4.7.2)计算所需的加水量，用喷雾器喷洒预计的加水量，静置一段时间，装入玻璃缸内密封，润湿一昼夜备用，砂性土润湿时间可酌情减短。

5 测定湿润土样不同位置的含水率，取样点不应少于 2 个，最大允许差值应为±1%。

6 对不同土层的土样制备混合土试样时，应根据各土层厚度，按权数计算相应的质量配合，然后应按本标准第 4.3.1 条第 1 款～第 4 款的规定进行扰动土的预备工作。

4.3.2 粗粒土试样预备程序应符合下列规定：

1 对砂及砂砾土，可按四分法或分砂器细分土样。取足够试验用的代表性土试样供颗粒分析试验用，其余过 5mm 筛。筛上和筛下土样分别贮存，供做比重及相对密度等试验用。取一部分过 2mm 筛的试样供做直剪、固结力学性试验用。

2 当有部分黏土依附在砂砾石表面时，先用水浸泡，将浸泡

过的土样在2mm筛上冲洗，取筛上及筛下代表性的试样供做颗粒分析试验用。

3 将冲洗下来的土浆风干至易碾散为止，应按本标准第4.3.1条第2款～第4款的规定进行预备工作。

4.4 扰动土试样制备

4.4.1 扰动土试样的制备，根据工程实际情况可分别采用击样法、击实法和压样法。

4.4.2 击样法应按下列步骤进行：

1 根据模具的容积及所要求的干密度、含水率，应按本标准式(4.7.1)、式(4.7.2)计算的用量制备湿土试样；

2 将湿土倒入模具内，并固定在底板上的击实器内，用击实方法将土击入模具内；

3 称取试样质量，应符合本标准第4.1.3条的规定。

4.4.3 击实法应按下列步骤进行：

1 根据试样所要求的干密度、含水率，应按本标准式(4.7.1)、式(4.7.2)计算的用量制备湿土试样。

2 应按本标准第13.3.1条、第13.3.2条的规定，将土样击实到所需的密度，用推土器推出。

3 将试验用的切土环刀内壁涂一薄层凡士林，刃口向下，放在土样上。用切土刀将土样切削成稍大于环刀直径的土柱。然后将环刀垂直向下压，边压边削，至土样伸出环刀为止。削去两端余土并修平。擦净环刀外壁，称环刀、土总量，准确至0.1g，并应测定环刀两端削下土样的含水率，应符合本标准第4.1.3条的规定。

4.4.4 压样法应按下列步骤进行：

1 应按本标准第4.4.2条第1款的规定制备湿土试样，称出所需的湿土量。将湿土倒入压样器内，拂平土样表面，以静压力将土压入。

2 称取试样质量，并应符合本标准第4.1.3条的规定。

4.4.5 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.1 的规定。

4.5 原状土试样制备

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

4.5.2 应按本标准第 4.4.3 条第 3 款的操作步骤执行，切取试样，试样与环刀应密合。

4.5.3 切削过程中，应细心观察土样的情况，并应描述土样的层次、气味、颜色，同时记录土样有无杂质、土质是否均匀、有无裂缝等情况。

4.5.4 切取试样后剩余的原状土样，应用蜡纸包好置于保湿器内，以备补做试验之用；切削的余土做物理性试验。

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

4.5.6 原状土开土记录格式应符合本标准附录 D 表 D.2 的规定。

4.6 试 样 饱 和

4.6.1 试样饱和方法视土样的透水性能，可选用浸水饱和法、毛管饱和法及真空抽气饱和法。

1 砂土可直接在仪器内浸水饱和；

2 较易透水的细粒土，渗透系数大于 1×10^{-4} cm/s 时，宜采用毛管饱和法；

3 不易透水的细粒土，渗透系数小于 1×10^{-4} cm/s 时，宜采用真空饱和法；当土的结构性较弱时，抽气可能发生扰动者，不宜采用真空饱和法。

4.6.2 毛管饱和法应按下列步骤进行：

1 选用框式饱和器（图 4.6.2），在装有试样的环刀两面贴放滤纸，再放两块大于环刀的透水板于滤纸上，通过框架两端的螺丝将透水板、环刀夹紧；

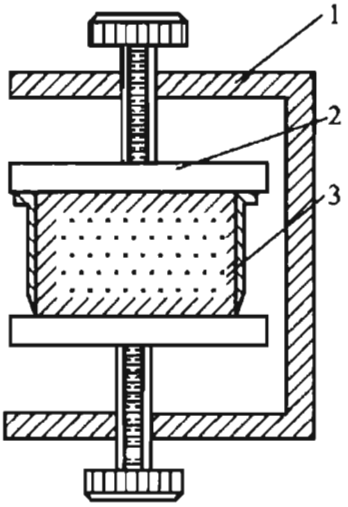


图 4.6.2　框式饱和器

1—框架；2—透水板；3—环刀

2　将装好试样的饱和器放入水箱中，注入清水，水面不宜将试样淹没；

3　关上箱盖，防止水分蒸发，借土的毛细管作用使试样饱和，约需 3d；

4　试样饱和后，取出饱和器，松开螺丝，取出环刀，擦干外壁，吸去表面积水，取下试样上下滤纸，称环刀、土总量，准确至 0.1g，应按本标准式(4.7.5)计算饱和度；

5　如饱和度小于 95%时，将环刀再装入饱和器，浸入水中延长饱和时间直至满足要求。

4.6.3　真空饱和法应按下列步骤进行：

1　选用重叠式饱和器(图 4.6.3-1)或框式饱和器，在重叠式饱和器下板正中放置稍大于环刀直径的透水板和滤纸，将装有试样的环刀放在滤纸上，试样上再放一张滤纸和一块透水板，以此顺序由下向上重叠至拉杆的高度，将饱和器上夹板放在最上部透水板上，旋紧拉杆上端的螺丝，将各个环刀在上下夹板间夹紧；

2　装好试样的饱和器放入真空缸内(图 4.6.3-2)，盖上缸盖，盖缝内应涂一薄层凡士林，以防漏气；

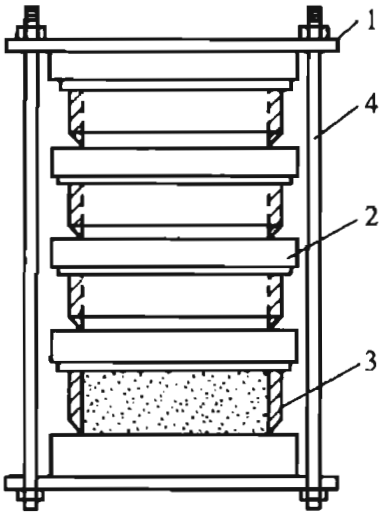


图 4.6.3-1　重叠式饱和器

1—夹板；2—透水板；3—环刀；4—拉杆

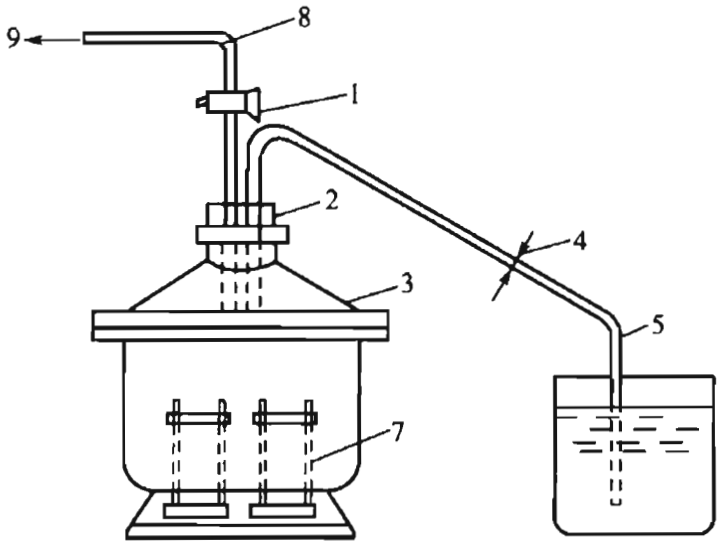


图 4.6.3-2　真空缸

1—二通阀；2—橡皮塞；3—真空缸；4—管夹；
5—引水管；7—饱和器；8—排气管；9—接抽气机

3　关管夹、开二通阀，将抽气机与真空缸接通，开动抽气机，抽除缸内及土中气体，当真空表接近－100kPa 后，继续抽气，黏质土约 1h，粉质土约 0.5h 后，稍微开启管夹，使清水由引水管徐徐注入真空缸内；在注水过程中，应调节管夹，使真空表上的数值基本上保持不变；

4　待饱和器完全淹没水中后即停止抽气，将引水管自水缸中

提出，开管夹令空气进入真空缸内，静置一定时间，细粒土宜为10h，使试样充分饱和；

5 应按本标准第4.6.2条第4款的规定取出试样，称量，计算饱和度。

4.7 计算和记录

4.7.1 干土质量应按下式计算：

$$m_d = \frac{m_0}{1 + 0.01w_0} \tag{4.7.1}$$

式中：m_d——干土质量(g)；

m_0——风干土质量(或天然湿土质量)(g)；

w_0——风干含水率(或天然含水率)(%)。

4.7.2 土样制备含水率所加水量应按下式计算：

$$m_w = \frac{m_0}{1 + 0.01w_0} \times 0.01(w' - w_0) \tag{4.7.2}$$

式中：m_w——土样所需加水质量(g)；

w'——土样所要求的含水率(%)。

4.7.3 制备扰动土试样所需总土质量应按下式计算：

$$m_0 = (1 + 0.01w_0)\rho_d V \tag{4.7.3}$$

式中：ρ_d——制备试样所要求的干密度(g/cm³)；

V——计算出击实土样体积或压样器所用环刀容积(cm³)。

4.7.4 制备扰动土样应增加的水量应按下式计算：

$$\Delta m_w = 0.01(w' - w_0)\rho_d V \tag{4.7.4}$$

式中：Δm_w——制备扰动土样应增加的水量(g)。

4.7.5 饱和度应按下式计算：

$$S_r = \frac{(\rho - \rho_d)G_s}{e\rho_d} \times 100 \text{ 或 } S_r = \frac{wG_s}{e} \tag{4.7.5}$$

式中：S_r——饱和度(%)；

ρ——饱和后的密度(g/cm³)；

G_s——土粒比重；

e——土的孔隙比；

w——饱和后的含水率(%)。

4.7.6 扰动土开土记录格式应符合本标准附录D表D.1的规定。原状土开土记录应符合本标准附录D表D.2的规定。

5 含水率试验

5.1 一般规定

5.1.1 本试验以烘干法为室内试验的标准方法。在野外当无烘箱设备或要求快速测定含水率时，可用酒精燃烧法测定细粒土含水率。

5.1.2 土的有机质含量不宜大于干土质量的5%，当土中有机质含量为5%～10%时，仍允许采用本标准进行试验，但应注明有机质含量。

5.2 烘 干 法

5.2.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 烘箱：可采用电热烘箱或温度能保持105℃～110℃的其他能源烘箱；

2 电子天平：称量200g，分度值0.01g；

3 电子台秤：称量5000g，分度值1g；

4 其他：干燥器、称量盒。

5.2.2 烘干法试验应按下列步骤进行：

1 取有代表性试样：细粒土15g～30g，砂类土50g～100g，砂砾石2kg～5kg。将试样放入称量盒内，立即盖好盒盖，称量，细粒土、砂类土称量应准确至0.01g，砂砾石称量应准确至1g。当使用恒质量盒时，可先将其放置在电子天平或电子台秤上清零，再称量装有试样的恒质量盒，称量结果即为湿土质量；

2 揭开盒盖，将试样和盒放入烘箱，在105℃～110℃下烘到恒量。烘干时间，对黏质土，不得少于8h；对砂类土，不得少于6h；对有机质含量为5%～10%的土，应将烘干温度控制在65℃～

70℃的恒温下烘至恒量；

3 将烘干后的试样和盒取出，盖好盒盖放入干燥器内冷却至室温，称干土质量。

5.2.3 含水率应按下式计算，计算至0.1%。

$$w = \left(\frac{m_0}{m_d} - 1\right) \times 100 \tag{5.2.3}$$

式中：w——含水率(%)。

5.2.4 本试验应进行两次平行测定，取其算术平均值，最大允许平行差值应符合表5.2.4的规定。

表5.2.4 含水率测定的最大允许平行差值(%)

含水率 w	最大允许平行差值
<10	±0.5
10～40	±1.0
>40	±2.0

5.2.5 本试验的记录格式应符合本标准附录D表D.3的规定。

5.3 酒精燃烧法

5.3.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 电子天平：称量200g，分度值0.01g；

2 酒精：纯度不得小于95%；

3 其他：称量盒、滴管、火柴、调土刀。

5.3.2 酒精燃烧法应按下列步骤进行：

1 取有代表性试样：黏土5g～10g，砂土20g～30g。放入称量盒内，应按本标准第5.2.2条第1款的规定称取湿土；

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

3 点燃盒中酒精，烧至火焰熄灭；

4 将试样冷却数分钟，应按本标准第5.3.2条第2款、第3

款的规定再重复燃烧两次。当第3次火焰熄灭后，立即盖好盒盖，称干土质量；

5 本试验称量应准确至0.01g。

5.3.3 本试验应进行两次平行测定，计算方法及最大允许平行差值应符合本标准式(5.2.3)和表5.2.4的规定。

5.3.4 本试验的记录格式应符合本标准附录D表D.3的规定。

6 密度试验

6.1 一般规定

6.1.1 细粒土宜采用环刀法。

6.1.2 试样易碎裂、难以切削时，可用蜡封法。

6.2 环刀法

6.2.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 环刀：尺寸参数应符合国家现行标准《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》GB/T 15406 及《土工实验仪器 环刀》SL 370 的规定；

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

6.2.2 环刀法试验应按下列步骤进行：

1 按工程需要取原状土试样或制备所需状态的扰动土试样，整平其两端，将环刀内壁涂一薄层凡士林，刃口向下放在试样上；

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

3 擦净环刀外壁称量，准确至 0.1g。

6.2.3 密度及干密度应按下列公式计算，计算至 0.01g/cm³。

$$\rho = \frac{m_0}{V} \tag{6.2.3-1}$$

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0.01w} \tag{6.2.3-2}$$

式中：ρ——试样的湿密度（g/cm³）；

ρ_d——试样的干密度（g/cm³）；

V——环刀容积（cm³）。

6.2.4 本试验应进行两次平行测定，其最大允许平行差值应为±0.03g/cm³。取其算术平均值。

6.2.5 本试验记录格式应符合本标准附录D表D.4的规定。

6.3 蜡 封 法

6.3.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 蜡封设备：应附熔蜡加热器；

2 天平：称量500g，分度值0.1g；称量200g，分度值0.01g。

6.3.2 蜡封法试验应按下列步骤进行：

1 切取约30cm³的试样。削去松浮表土及尖锐棱角后，系于细线上称量，准确至0.01g，取代表性试样测定含水率；

2 持线将试样徐徐浸入刚过熔点的蜡中，待全部沉浸后，立即将试样提出。检查涂在试样四周的蜡中有无气泡存在。当有气泡时，应用热针刺破，并涂平孔口。冷却后称蜡封试样质量，准确至0.1g；

3 用线将试样吊在天平(图6.3.2)一端，并使试样浸没于纯水中称量，准确至0.1g。测记纯水的温度；

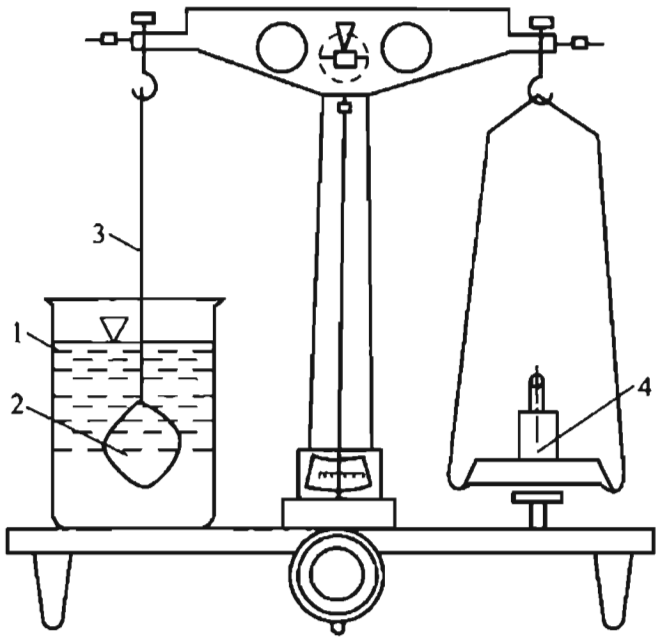


图6.3.2 天平

1—盛水杯；2—蜡封试样；3—细线；4—砝码

4　取出试样，擦干蜡表面的水分，用天平称量蜡封试样，准确至0.1g。当试样质量增加时，应另取试样重做试验。

6.3.3　湿密度及干密度应按下列公式计算：

$$\rho = \frac{m_0}{\dfrac{m_n - m_{nw}}{\rho_{wT}} - \dfrac{m_n - m_0}{\rho_n}} \tag{6.3.3-1}$$

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0.01w} \tag{6.3.3-2}$$

式中：m_n——试样加蜡质量(g)；

m_{nw}——试样加蜡在水中质量(g)；

ρ_{wT}——纯水在 T℃时的密度(g/cm³)，准确至0.01g/cm³；

ρ_n——蜡的密度(g/cm³)，准确至0.01g/cm³。

6.3.4　本试验应进行两次平行测定，其最大允许平行差值应为±0.03g/cm³。试验结果取其算术平均值。

6.3.5　本试验记录格式应符合本标准附录D表D.5的规定。

7 比重试验

7.1 一般规定

7.1.1 按照土粒粒径可分别用下列方法进行比重测定：

1 粒径小于5mm的土，用比重瓶法进行；

2 粒径不小于5mm的土，且其中粒径大于20mm的颗粒含量小于10%时，应用浮称法；粒径大于20mm的颗粒含量不小于10%时，应用虹吸筒法。

7.1.2 一般土粒的比重应用纯水测定；对含有易溶盐、亲水性胶体或有机质的土，应用煤油等中性液体替代纯水测定。

7.2 比重瓶法

7.2.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 比重瓶：容量100mL或50mL，分长颈和短颈两种；

2 天平：称量200g，分度值0.001g；

3 恒温水槽：最大允许误差应为±1℃；

4 砂浴：应能调节温度；

5 真空抽气设备：真空度－98kPa；

6 温度计：测量范围0℃～50℃，分度值0.5℃；

7 筛：孔径5mm；

8 其他：烘箱、纯水、中性液体、漏斗、滴管。

7.2.2 比重瓶的校准应按下列步骤进行：

1 将比重瓶洗净，烘干，称量两次，准确至0.001g。取其算术平均值，其最大允许平均差值应为±0.002g。

2 将煮沸并冷却的纯水注入比重瓶，对长颈比重瓶，达到刻度为止。对短颈比重瓶，注满水，塞紧瓶塞，多余水自瓶塞毛细管

中溢出。移比重瓶入恒温水槽。待瓶内水温稳定后，将瓶取出，擦干外壁的水，称瓶、水总质量，准确至0.001g。测定两次，取其算术平均值，其最大允许平行差值应为±0.002g。

3 将恒温水槽水温以5℃级差调节，逐级测定不同温度下的瓶、水总质量。

4 以瓶、水总质量为横坐标，温度为纵坐标，绘制瓶、水总质量与温度的关系曲线。

7.2.3 比重瓶法试验应按下列步骤进行：

1 将比重瓶烘干。当使用100mL比重瓶时，应称粒径小于5mm的烘干土15g装入；当使用50mL比重瓶时，应称粒径小于5mm的烘干土12g装入。

2 可采用煮沸法或真空抽气法排除土中的空气。向已装有干土的比重瓶注入纯水至瓶的一半处，摇动比重瓶，将瓶放在砂浴上煮沸，煮沸时间自悬液沸腾起砂土不得少于30min，细粒土不得少于1h。煮沸时应注意不使土液溢出瓶外。

3 将纯水注入比重瓶，当采用长颈比重瓶时，注水至略低于瓶的刻度处；当采用短颈比重瓶时，应注水至近满，有恒温水槽时，可将比重瓶放于恒温水槽内。待瓶内悬液温度稳定及瓶上部悬液澄清。

4 当采用长颈比重瓶时，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；当采用短颈比重瓶时，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。称量后应测定瓶内水的温度。

5 根据测得的温度，从已绘制的温度与瓶、水总质量关系中查得瓶、水总质量。

6 当土粒中含有易溶盐、亲水性胶体或有机质时，测定其土粒比重应用中性液体代替纯水，用真空抽气法代替煮沸法，排除土中空气。抽气时真空度应接近一个大气负压值（－98kPa），抽气

时间可为1h～2h，直至悬液内无气泡逸出时为止。其余步骤应按本标准第7.2.3条第3款～第5款的规定进行。

7 本试验称量应准确至0.001g，温度应准确至0.5℃。

7.2.4 土粒比重应按下列公式计算：

1 用纯水测定时：

$$G_s = \frac{m_d}{m_{bw} + m_d - m_{bws}} G_{wT} \qquad (7.2.4\text{-}1)$$

式中：m_{bw}——比重瓶、水总质量(g)；

m_{bws}——比重瓶、水、干土总质量(g)；

G_{wT}——T℃时纯水的比重(可查物理手册)，准确至0.001。

2 用中性液体测定时：

$$G_s = \frac{m_d}{m_{bk} + m_d - m_{bks}} G_{kT} \qquad (7.2.4\text{-}2)$$

式中：m_{bk}——瓶、中性液体总质量(g)；

m_{bks}——瓶、中性液体、干土总质量(g)；

G_{kT}——T℃时中性液体的比重(实测得)，准确至0.001。

7.2.5 本试验应进行2次平行测定，试验结果取其算术平均值，其最大允许平行差值应为±0.02。

7.2.6 本试验记录格式应符合本标准附录D表D.6的规定。

7.3 浮 称 法

7.3.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 铁丝筐：孔径小于5mm，直径为10cm～15cm，高为10cm～20cm；

2 盛水容器：适合铁丝筐沉入；

3 浮称天平或秤：称量2kg，分度值0.2g；称量10kg，分度值1g；

4 筛：孔径为5mm、20mm；

5　其他：烘箱、温度计。

7.3.2　浮称法试验应按下列步骤进行：

1　取粒径不小于5mm，且其中粒径大于20mm的颗粒含量小于10%的代表性试样500g～1000g，当采用秤称时，称取1kg～2kg；

2　冲洗试样，直至颗粒表面无尘土和其他污物；

3　将试样浸在水中24h后取出，将试样放在湿毛巾上擦干表面，即为饱和面干试样，称取饱和面干试样质量后，立即放入铁丝筐，缓缓浸没于水中，并在水中摇晃，至无气泡逸出时为止；

4　称铁丝筐和试样在水中的总质量（图7.3.2）；

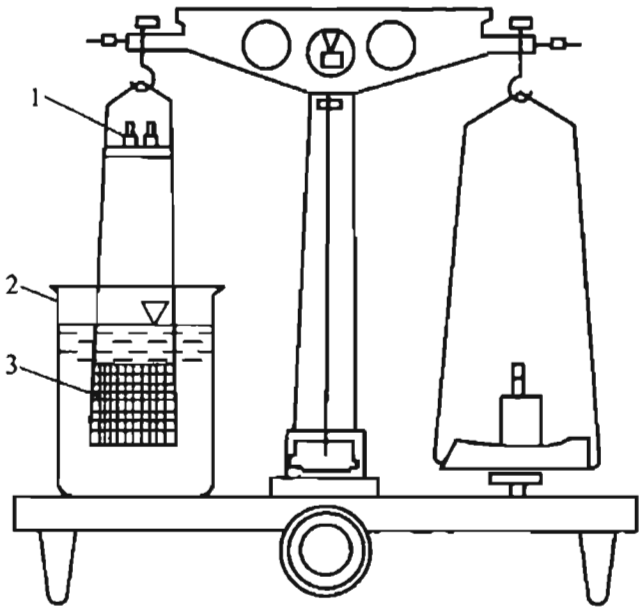


图7.3.2　浮称天平

1—调天平平衡砝码盘；2—盛水容器；3—盛粗粒土的铁丝框

5　取出试样烘干、称量；

6　称铁丝筐在水中质量，并应测量容器内水的温度，准确至0.5℃；

7　本试验称量应准确至0.2g。

7.3.3　土粒比重应按下式计算：

$$G_s = \frac{m_d}{m_d - (m_{ks} - m_k)} G_{wT} \tag{7.3.3}$$

式中：m_{ks}——试样加铁丝筐在水中总质量(g)；

m_k——铁丝筐在水中质量(g)。

7.3.4 干比重应按下式计算：

$$G'_s = \frac{m_d}{m_b - (m_{ks} - m_k)} G_{wT} \tag{7.3.4}$$

式中：m_b——饱和面干试样质量(g)。

7.3.5 吸着含水率应按下式计算：

$$w_{ab} = \left(\frac{m_b}{m_d} - 1\right) \times 100 \tag{7.3.5}$$

式中：w_{ab}——吸着含水率(%)，计算至0.1%。

7.3.6 本试验应进行两次平行测定，两次测定最大允许差值应为±0.02，试验结果取其算术平均值。

7.3.7 土粒平均比重应按下式计算：

$$G_s = \frac{1}{\frac{P_5}{G_{s1}} + \frac{1 - P_5}{G_{s2}}} \tag{7.3.7}$$

式中：P_5——粒径大于5mm的土粒占总质量的含量，以小数计；

G_{s1}——粒径大于5mm的土粒的比重；

G_{s2}——粒径小于5mm的土粒的比重。

7.3.8 本试验记录格式应符合本标准附录D表D.7的规定。

7.4 虹吸筒法

7.4.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 虹吸筒(图7.4.1)；

2 台秤：称量10kg，分度值1g；

3 量筒：容量大于2000mL；

4 筛：孔径5mm、20mm；

5 其他：烘箱、温度计、搅拌棒。

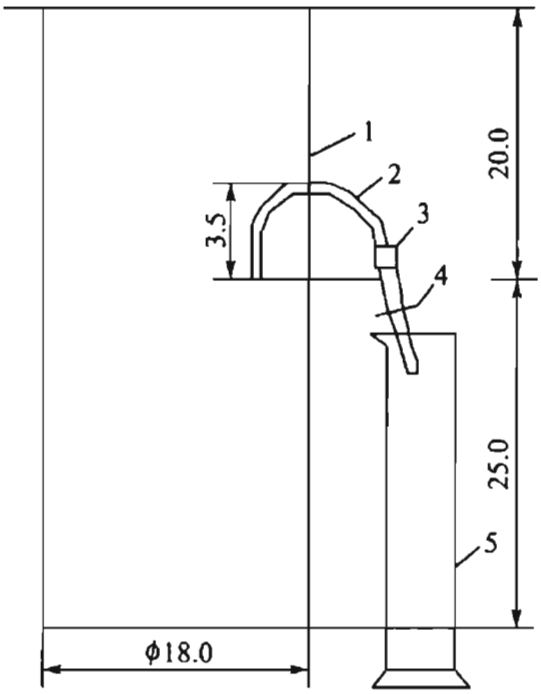


图 7.4.1　虹吸筒(单位:cm)

1—虹吸筒;2—虹吸管;3—橡皮管;4—管夹;5—量筒

7.4.2　虹吸筒法试验应按下列步骤进行:

1　取粒径不小于 5mm,且其中粒径不小于 20mm 的颗粒含量大于 10%的代表性试样 1000g～7000g;

2　将试样冲洗,直至颗粒表面无尘土和其他污物;

3　再将试样浸在水中 24h 后取出,晾干(或用布擦干)其表面水分,称量;

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

5　待虹吸筒中水面平静后,开管夹,让试样排开的水通过虹吸管流入量筒中;

6　称量筒与水总质量。测量筒内水的温度,准确至 0.5℃;

7　取出虹吸筒内试样,烘干、称量;

8　本试验称量应准确至 1g。

7.4.3 比重应按下式计算：

$$G_s = \frac{m_d}{(m_{cw} - m_c) - (m_{ad} - m_d)} G_{wT} \qquad (7.4.3)$$

式中：m_{cw}——量筒加排开水总质量(g)；

m_c——量筒质量(g)；

m_{ad}——晾干试样质量(g)。

7.4.4 本试验应进行两次平行测定，两次测定的最大允许平均差值应为±0.02。取其算术平均值。

7.4.5 平均比重应按本标准式(7.3.7)计算。

7.4.6 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.8 的规定。

8 颗粒分析试验

8.1 一般规定

8.1.1 本试验方法分为筛析法、密度计法、移液管法。

8.1.2 本试验根据土的颗粒大小及级配情况，可分别采用下列4种方法：

1 筛析法：适用于粒径为0.075mm～60mm的土；

2 密度计法：适用于粒径小于0.075mm的土；

3 移液管法：适用于粒径小于0.075mm的土；

4 当土中粗细兼有时，应联合使用筛析法和密度计法或筛析法和移液管法。

8.2 筛 析 法

8.2.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 试验筛：应符合现行国家标准《试验筛 技术要求和检验 第1部分：金属丝编织网试验筛》GB/T 6003.1的规定；

2 粗筛：孔径为60mm、40mm、20mm、10mm、5mm、2mm；

3 细筛：孔径为2.0mm、1.0mm、0.5mm、0.25mm、0.1mm、0.075mm；

4 天平：称量1000g，分度值0.1g；称量200g，分度值0.01g；

5 台秤：称量5kg，分度值1g；

6 振筛机：应符合现行行业标准《实验室用标准筛振荡机技术条件》DZ/T 0118的规定；

7 其他：烘箱、量筒、漏斗、瓷杯、附带橡皮头研杵的研钵、瓷盘、毛刷、匙、木碾。

8.2.2 筛析法试验应按下列步骤进行：

1 从风干、松散的土样中，用四分法按下列规定取出代表性试样：

1）粒径小于 2mm 的土取 100g～300g；

2）最大粒径小于 10mm 的土取 300g～1000g；

3）最大粒径小于 20mm 的土取 1000g～2000g；

4）最大粒径小于 40mm 的土取 2000g～4000g；

5）最大粒径小于 60mm 的土取 4000g 以上。

2 砂砾土筛析法应按下列步骤进行：

1）应按本标准第 8.2.2 条第 1 款规定的数量取出试样，称量应准确至 0.1g；当试样质量大于 500g 时，应准确至 1g；

2）将试样过 2mm 细筛，分别称出筛上和筛下土质量；

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

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

5）由最大孔径筛开始，顺序将各筛取下，在白纸上用手轻叩摇晃筛，当仍有土粒漏下时，应继续轻叩摇晃筛，至无土粒漏下为止。漏下的土粒应全部放入下级筛内。并将留在各筛上的试样分别称量，当试样质量小于 500g 时，准确至 0.1g；

6）筛前试样总质量与筛后各级筛上和筛底试样质量的总和的差值不得大于试样总质量的 1%。

3 含有黏土粒的砂砾土应按下列步骤进行：

1）将土样放在橡皮板上用土碾将黏结的土团充分碾散，用四分法取样，取样时应按本标准第 8.2.2 条第 1 款的规

定称取代表性试样，置于盛有清水的瓷盆中，用搅棒搅拌，使试样充分浸润和粗细颗粒分离；

2）将浸润后的混合液过 2mm 细筛，边搅拌边冲洗边过筛，直至筛上仅留大于 2mm 的土粒为止。然后将筛上的土烘干称量，准确至 0.1g。应按本标准第 8.2.2 条第 2 款第 3 项、第 4 项的规定进行粗筛筛析；

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

4）将粒径大于 0.075mm 的净砂烘干称量，准确至 0.01g。并应按本标准第 8.2.2 条第 2 款第 3 项、第 4 项的规定进行细筛筛析；

5）将粒径大于 2mm 的土和粒径为 2mm～0.075mm 的土的质量从原取土总质量中减去，即得粒径小于 0.075mm 的土的质量；

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

8.2.3 小于某粒径的试样质量占试样总质量百分数应按下式计算：

$$X = \frac{m_A}{m_B} d_x \tag{8.2.3}$$

式中：X——小于某粒径的试样质量占试样总质量的百分数(%)；

m_A——小于某粒径的试样质量(g)；

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

d_x——粒径小于 2mm 或粒径小于 0.075mm 的试样质量占

总质量的百分数(%)。

8.2.4 以小于某粒径的试样质量占试样总质量的百分数为纵坐标,颗粒粒径为横坐标,在单对数坐标上绘制颗粒大小分布曲线。

8.2.5 级配指标不均匀系数和曲率系数 C_u、C_c 应按下列公式计算:

1 不均匀系数:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \tag{8.2.5-1}$$

式中:C_u——不均匀系数;

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

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

2 曲率系数:

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60}d_{10}} \tag{8.2.5-2}$$

式中:C_c——曲率系数;

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

8.2.6 本试验的记录格式应符合本标准附录D表D.9的规定。

8.3 密度计法

8.3.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定:

1 密度计应符合下列规定:

1) 甲种:刻度单位以20℃时每1000mL悬液内所含土质量的克数表示,刻度为−5～50,分度值为0.5;

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

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

3 试验筛应符合下列规定：

1）细筛：孔径 2mm、1mm、0.5mm、0.25mm、0.15mm；

2）洗筛：孔径 0.075mm。

4 天平：称量 200g，分度值 0.01g。

5 温度计：刻度 0℃～50℃，分度值 0.5℃。

6 洗筛漏斗：直径略大于洗筛直径，使洗筛恰可套入漏斗中。

7 搅拌器：轮径 50mm，孔径约 3mm；杆长约 400mm，带旋转叶。

8 煮沸设备：附冷凝管。

9 其他：秒表、锥形瓶、研钵、木杵、电导率仪。

8.3.2 试剂应符合下列规定：

1 分散剂：浓度 4%六偏磷酸钠，6%双氧水，1%硅酸钠；

2 水溶盐检验试剂：10%盐酸，5%氯化钡，10%硝酸，5%硝酸银。

8.3.3 密度计法试验应按下列步骤进行：

1 宜采用风干土试样，并应按下式计算试样干质量为 30g 时所需的风干土质量：

$$m_0 = m_d(1 + 0.01w_0) \tag{8.3.3-1}$$

式中：w_0——风干土含水率(%)。

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

1）电导法应按电导率仪使用说明书操作，测定温度 T℃时试样溶液(土水比 1∶5)的电导率，20℃时的电导率应按下式计算：

$$K_{20} = \frac{K_T}{1 + 0.02(T - 20)} \tag{8.3.3-2}$$

式中：K_{20}——20℃时悬液的电导率(μS/cm)；

K_T——T℃时悬液的电导率(μS/cm)；

T——测定时悬液的温度(℃)。

当 K_{20}＞1000μS/cm 时，应洗盐。

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

3 洗盐应按下列步骤进行：

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

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

3)检查易溶盐清洗程度，可用 2 个试管各取刚滤下的滤液 3mL～5mL，一管加入 3 滴～5 滴 10%盐酸和 5%氯化钡；另一管加入 3 滴～5 滴 10%硝酸和 5%硝酸银。当发现管中有白色沉淀时，试样中的易溶盐未洗净，应继续清洗，直至检查时试管中均不再发现白色沉淀为止。

4)洗盐后将漏斗中的土样仔细洗下，风干试样。

4 称干质量为 30g 的风干试样倒入锥形瓶中，勿使土粒丢失。注入水 200mL，浸泡约 12h。

5 将锥形瓶放在煮沸设备上，连接冷凝管进行煮沸。煮沸时间约为 1h。

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

仅留大于0.075mm的颗粒为止。

7 将留在洗筛上的颗粒洗入蒸发皿内，倾去上部清水，烘干称量，应按本标准第8.2.2条第2款的规定进行细筛筛析。

8 将过筛悬液倒入量筒，加4%浓度的六偏磷酸钠约10mL于量筒溶液中，再注入纯水，使筒内悬液达1000mL。当加入六偏磷酸钠后土样产生凝聚时，应选用其他分散剂。

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

10 取出搅拌器，将密度计放入悬液中同时开动秒表。可测经0.5min、1min、2min、5min、15min、30min、60min、120min、180min和1440min时的密度计读数。

11 每次读数均应在预定时间前10s～20s将密度计小心地放入悬液接近读数的深度，并应将密度计浮泡保持在量筒中部位置，不得贴近筒壁。

12 密度计读数均以弯液面上缘为准。甲种密度计应准确至0.5，乙种密度应准确至0.0002。每次读数完毕立即取出密度计放入盛有纯水的量筒中。并测定各相应的悬液温度，准确至0.5℃。放入或取出密度计时，应尽量减少悬液的扰动。

13 当试样在分析前未过0.075mm洗筛，在密度计第1个读数时，发现下沉的土粒已超过试样总质量的15%时，则应于试验结束后，将量筒中土粒过0.075mm筛，应按本标准第8.3.3条第7款的规定进行筛析，并应计算各级颗粒占试样总质量的百分比。

8.3.4 小于某粒径的试样质量占试样总质量百分数应按下列公式计算：

1 甲种密度计：

$$X = \frac{100}{m_d} C_s (R_1 + m_T + n_w - C_D) \qquad (8.3.4\text{-}1)$$

$$C_s = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_{w20}} \cdot \frac{2.65 - \rho_{w20}}{2.65} \qquad (8.3.4\text{-}2)$$

式中：C_s——土粒比重校正值，也可按表 8.3.4-1 执行；

R_1——甲种密度计读数；

m_T——温度校正值，可按表 8.3.4-2 执行；

n_w——弯液面校正值；

C_D——分散剂校正值；

ρ_s——土粒密度(g/cm³)；

ρ_{w20}——20℃时水的密度(g/cm³)。

表 8.3.4-1　土粒比重校正值

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

表 8.3.4-2　温度校正值

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

2　乙种密度计：

$$X = \frac{100V}{m_d} C'_s [(R_2 - 1) + m'_T + n'_w - C'_D] \rho_{w20} \quad (8.3.4\text{-}3)$$

$$C'_s = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_{w20}} \quad (8.3.4\text{-}4)$$

式中：V——悬液体积(mL)；

C'_s——土粒比重校正值，也可按表 8.3.4-1 执行；

R_2——乙种密度计读数；

m'_T——温度校正值，可按表 8.3.4-2 执行；

n'_w——弯液面校正值；

C'_D——分散剂校正值。

8.3.5 粒径应按下式计算：

$$d = \sqrt{\frac{1800 \times 10^4 \eta}{(G_s - G_{wT})\rho_{w0} g}} \cdot \frac{L_t}{t} \qquad (8.3.5\text{-}1)$$

式中：d——粒径(mm)；

η——水的动力黏滞系数(1×10^{-6} kPa·s)，可按表 8.3.5-1 执行；

G_{wT}——温度为 T℃时的水的比重；

ρ_{w0}——4℃时水的密度(g/cm³)；

g——重力加速度(981cm/s²)；

L_t——某一时间 t 内的土粒沉降距离(cm)；

t——沉降时间(s)。

为了简化计算，式(8.3.5-1)也可写成：

$$d = K\sqrt{\frac{L_t}{t}} \qquad (8.3.5\text{-}2)$$

式中：K——粒径计算系数 $\left[K = \sqrt{\frac{1800 \times 10^4 \eta}{(G_s - G_{wT})\rho_{w0} g}}\right]$，与悬液温度和土粒比重有关。其值可按表 8.3.5-2 执行。

表 8.3.5-1 水的动力黏滞系数、黏滞系数比、温度校正值

温度 T(℃)	动力黏滞系数 η (1×10^{-6} kPa·s)	η_T/η_{20}	温度校正系数 T_D	温度 T(℃)	动力黏滞系数 η (1×10^{-6} kPa·s)	η_T/η_{20}	温度校正系数 T_D
5.0	1.516	1.501	1.17	6.0	1.470	1.455	1.21
5.5	1.493	1.478	1.19	6.5	1.449	1.435	1.23

续表 8.3.5-1

温度 T(℃)	动力黏滞系数 η (1×10^{-6} kPa·s)	η_T/η_{20}	温度校正系数 T_D	温度 T(℃)	动力黏滞系数 η (1×10^{-6} kPa·s)	η_T/η_{20}	温度校正系数 T_D
7.0	1.428	1.414	1.25	18.5	1.048	1.038	1.70
7.5	1.407	1.393	1.27	19.0	1.035	1.025	1.72
8.0	1.387	1.373	1.28	19.5	1.022	1.012	1.74
8.5	1.367	1.353	1.30	20.0	1.010	1.000	1.76
9.0	1.347	1.334	1.32	20.5	0.998	0.988	1.78
9.5	1.328	1.315	1.34	21.0	0.986	0.976	1.80
10.0	1.310	1.297	1.36	21.5	0.974	0.964	1.83
10.5	1.292	1.279	1.38	22.0	0.963	0.953	1.85
11.0	1.274	1.261	1.40	22.5	0.952	0.943	1.87
11.5	1.256	1.243	1.42	23.0	0.941	0.932	1.89
12.0	1.239	1.227	1.44	24.0	0.919	0.910	1.94
12.5	1.223	1.211	1.46	25.0	0.899	0.890	1.98
13.0	1.206	1.194	1.48	26.0	0.879	0.870	2.03
13.5	1.188	1.176	1.50	27.0	0.859	0.850	2.07
14.0	1.175	1.163	1.52	28.0	0.841	0.833	2.12
14.5	1.160	1.148	1.54	29.0	0.823	0.815	2.16
15.0	1.144	1.133	1.56	30.0	0.806	0.798	2.21
15.5	1.130	1.119	1.58	31.0	0.789	0.781	2.25
16.0	1.115	1.104	1.60	32.0	0.773	0.765	2.30
16.5	1.101	1.090	1.62	33.0	0.757	0.750	2.34
17.0	1.088	1.077	1.64	34.0	0.742	0.735	2.39
17.5	1.074	1.066	1.66	35.0	0.727	0.720	2.43
18.0	1.061	1.050	1.68	—	—	—	—

表 8.3.5-2　粒径计算系数 K 值表

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

8.3.6 用小于某粒径的土质量百分数为纵坐标，粒径为横坐标，在单对数横坐标上绘制颗粒大小分布曲线。当与筛析法联合分析时，应将两段曲线绘成一平滑曲线。

8.3.7 本试验记录格式应符合本标准附录 D 表 D.10 的规定。

8.4 移液管法

8.4.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 移液管(图 8.4.1)：容积 25mL；

2 小烧杯：容积 50mL；

3 天平：称量 200g，分度值 0.001g；

4 其他：应符合本标准第 8.3.1 条第 5 款～第 9 款的规定。

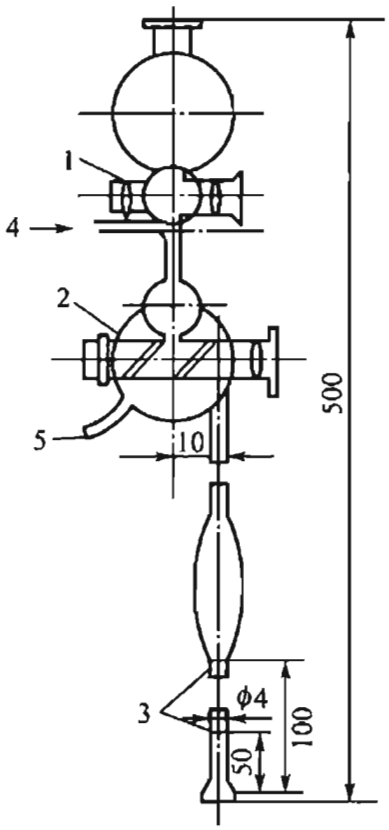


图 8.4.1 移液管示意图(单位：mm)

1—二通阀；2—三通阀；3—移液管；4—接吸球；5—放流口

8.4.2 移液管法试验应按下列步骤进行：

1 取代表性试样，黏土为10g～15g，砂土为20g，并应按本标准第8.3.3条第1款～第8款的规定制取悬液；

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

3 可按本标准式(8.3.5-2)推算出粒径小于0.05mm、0.01mm、0.005mm、0.002mm和其他所需粒径下沉一定深度所需的静置时间；

4 准备好移液管，将二通阀置于关闭位置，三通阀置于移液管和吸球相通的位置；

5 用搅拌器沿悬液上、下搅拌各30次，时间1min，取出搅拌器；

6 开动秒表，根据各粒径的静置时间，提前约10s，将移液管放入悬液中，浸入深度为10cm，用吸球吸取悬液，吸取悬液量不应少于25mL；

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

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

9 每吸取一组粒径的悬液后必须重新搅拌，再吸取另一组粒径的悬液；

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

8.4.3 小于某粒径的试样质量占试样总质量的百分数应按下式计算：

$$X = \frac{m_{dx} V_x}{V_x' m_d} \times 100 \qquad (8.4.3)$$

式中：m_{dx}——吸取悬液中(25mL)土粒的干土质量(g)；

V_x——悬液总体积，$V_x = 1000\text{mL}$；

V_x'——移液管每次吸取的悬液体积，$V_x'=25mL$。

8.4.4 以小于某粒径的试样质量百分数为纵坐标，粒径为横坐标，在单对数横坐标纸上绘制颗粒大小分布曲线。

8.4.5 本试验记录格式应符合本标准附录 D 表 D.11 的规定。

9 界限含水率试验

9.1 一般规定

9.1.1 土的粒径应小于 0.5mm 以及有机质含量不大于干土质量的 5%。

9.1.2 本试验中含水率的测定应按本标准第 5.2 节的烘干法执行。

9.2 液塑限联合测定法

9.2.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 液塑限联合测定仪(图 9.2.1)应包括带标尺的圆锥仪、电磁铁、显示屏、控制开关和试样杯。圆锥仪质量为 76g，锥角为 30°；读数显示宜采用光电式、游标式和百分表式；

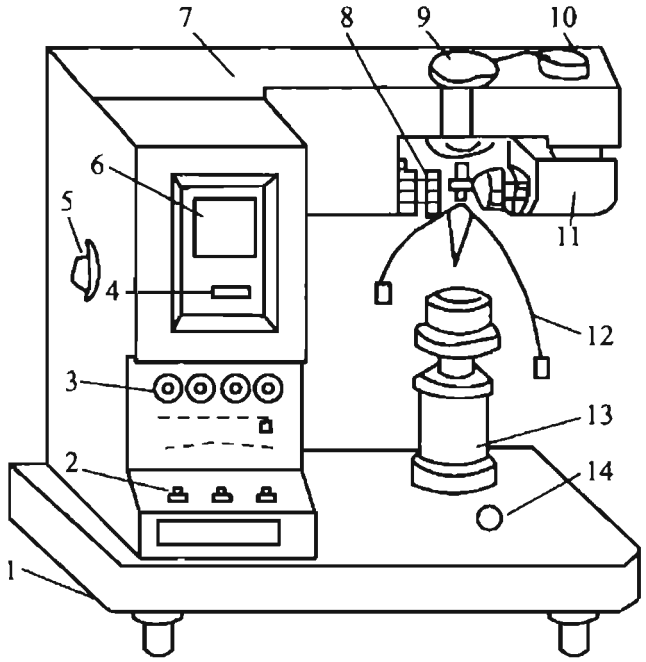


图 9.2.1 光电式液塑限联合测定仪示意图

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

2　试样杯：直径 40mm～50mm；高 30mm～40mm；

3　天平：称量 200g，分度值 0.01g；

4　筛：孔径 0.5mm；

5　其他：烘箱、干燥缸、铝盒、调土刀、凡士林。

9.2.2　液塑限联合测定法试验应按下列步骤进行：

1　液塑限联合试验宜采用天然含水率的土样制备试样，也可用风干土制备试样。

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

3　当采用风干土样时，取过 0.5mm 筛的代表性土样约 200g，分成 3 份，分别放入 3 个盛土皿中，加入不同数量的纯水，使其分别达到本标准第 9.2.2 条第 2 款中所述的含水率，调成均匀土膏，放入密封的保湿缸中，静置 24h。

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

5　取圆锥仪，在锥体上涂以薄层润滑油脂，接通电源，使电磁铁吸稳圆锥仪。当使用游标式或百分表式时，提起锥杆，用旋钮固定。

6　调节屏幕准线，使初读数为零。调节升降座，使圆锥仪锥角接触试样面，指标灯亮时圆锥在自重下沉入试样内，当使用游标式或百分表式时用手扭动旋扭，松开锥杆，经 5s 后测读圆锥下沉深度。然后取出试样杯，挖去锥尖入土处的润滑油脂，取锥体附近的试样不得少于 10g，放入称量盒内，称量，准确至 0.01g，测定含水率。

7　应按本标准第 9.2.2 条第 4 款～第 6 款的规定，测试其余 2 个试样的圆锥下沉深度和含水率。

9.2.3　以含水率为横坐标，圆锥下沉深度为纵坐标，在双对数坐

标纸上绘制关系曲线。三点连一直线(图 9.2.3 中的 A 线)。当三点不在一直线上,通过高含水率的一点与其余两点连成两条直线,在圆锥下沉深度为 2mm 处查得相应的含水率,当两个含水率的差值小于 2%时,应以该两点含水率的平均值与高含水率的点连成一线(图 9.2.3 中的 B 线)。当两个含水率的差值不小于 2%时,应补做试验。

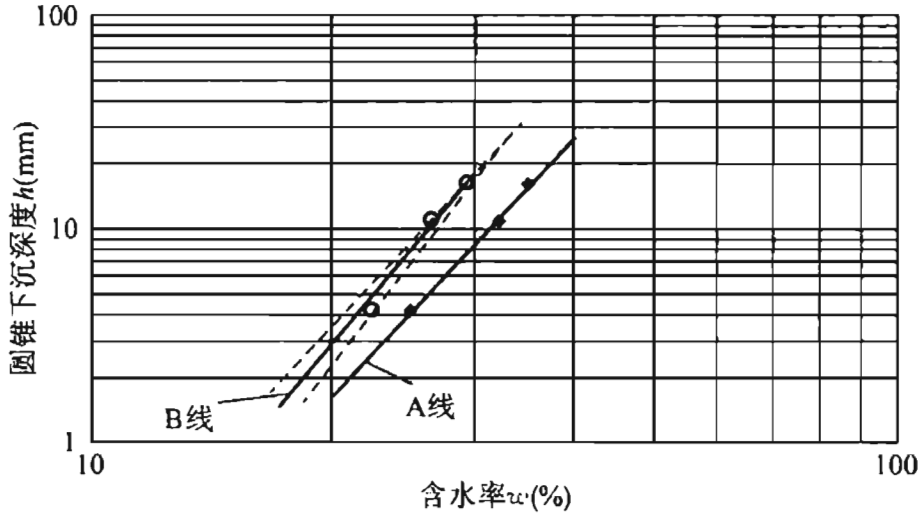


图 9.2.3 圆锥下沉深度与含水率关系图曲线

9.2.4 通过圆锥下沉深度与含水率关系图,查得下沉深度为 17mm 所对应的含水率为液限,下沉深度为 10mm 所对应的含水率为 10mm 液限;查得下沉深度为 2mm 所对应的含水率为塑限,以百分数表示,准确至 0.1%。

9.2.5 塑性指数和液性指数应按下列公式计算:

$$I_P = w_L - w_P \tag{9.2.5-1}$$

$$I_L = \frac{w_0 - w_P}{I_P} \tag{9.2.5-2}$$

式中:I_P——塑性指数;

I_L——液性指数,计算至 0.01;

w_L——液限(%);

w_P——塑限(%)。

9.2.6 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.12 的规定。

9.3 碟式仪液限法

9.3.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 碟式液限仪(图 9.3.1)：由土碟和支架组成专用仪器，并有专用划刀。其技术条件应符合现行国家标准《土工试验仪器 液限仪 第 1 部分：碟式液限仪》GB/T 21997.1 的规定；

2 天平：称量 200g，分度值 0.01g；

3 筛：孔径为 0.5mm；

4 其他：烘箱、干燥缸、铝盒、调土刀。

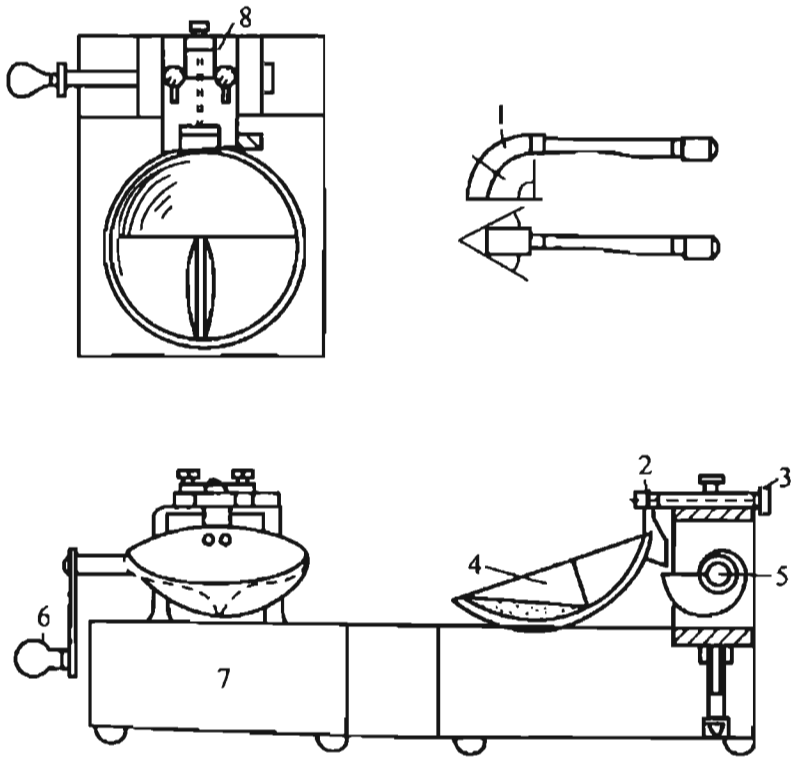


图 9.3.1 碟式液限仪

1—开槽器；2—销子；3—支架；4—土碟；5—蜗轮；6—摇柄；7—底座；8—调整板

9.3.2 碟式仪液限法试验应按下列步骤进行：

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

2　取一部分试样,平铺于土碟的前半部。铺土时应防止试样中混入气泡。用调土刀将试样面修平,使最厚处为 10mm,多余试样放回调土皿中。以蜗形轮为中心,用划刀自后至前沿土碟中央将试样划成槽缝清晰的两半(图 9.3.2-1)。为避免槽缝边扯裂或试样在土碟中滑动,允许从前至后,再从后至前多划几次,将槽逐步加深,以代替一次划槽,最后一次从后至前的划槽能明显的接触碟底,但应尽量减少划槽的次数。

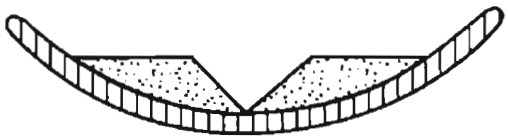


图 9.3.2-1　划槽状况

3　以每秒 2 转的速率转动摇柄,使土碟反复起落,坠击于底座上,数记击数,直至试样两边在槽底的合拢长度为 13mm 为止(图 9.3.2-2),记录击数,并在槽的两边采取试样 10g 左右,测定其含水率。



图 9.3.2-2　合拢状况

4　将土碟中的剩余试样移至调土皿中,再加水彻底拌和均匀,应按本标准第 9.3.2 条第 2 款、第 3 款的规定至少再做两次试验。这两次土的稠度应使合拢长度为 13mm 时所需击数为 15 次～35 次,其中 25 次以上及以下各 1 次。然后测定各击次下试样的相应含水率。

9.3.3 各击次下合拢时试样的相应含水率应按下式计算：

$$w_N = \left(\frac{m_N}{m_d} - 1\right) \times 100 \qquad (9.3.3)$$

式中：w_N—— N 击下试样的含水率(%)；

m_N—— N 击下试样的质量(g)。

9.3.4 根据试验结果，以含水率为纵坐标，击次为横坐标，在单对数坐标上绘制击次与含水率关系曲线，查得曲线上击数 25 次所对应的含水率，即为该试样的液限。

9.3.5 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.13 的规定。

9.4 搓滚塑限法

9.4.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 毛玻璃板：尺寸宜为 200mm×300mm；

2 卡尺：分度值 0.02mm；

3 天平：称量 200g，分度值 0.01g；

4 筛：孔径 0.5mm；

5 其他：烘箱、干燥缸、铝盒。

9.4.2 搓滚塑限法试验应按下列步骤进行：

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

2 将试样在手中捏揉至不黏手，捏扁，当出现裂缝时，表示含水率已接近塑限。

3 取接近塑限的试样一小块，先手用捏成橄榄形，然后再用手掌在毛玻璃板上轻轻搓滚。搓滚时手掌均匀施加压力于土条上，不得使土条在毛玻璃板上无力滚动，土条不得有空心现象，土条长度不宜大于手掌宽度。

4 当土条搓成 3mm 时，产生裂缝，并开始断裂，表示试样达到塑限。当不产生裂缝及断裂时，表示这时试样的含水率高于塑限；当土条直径大于 3mm 时即断裂，表示试样含水率小于塑限，

应弃去，重新取土试验。当土条在任何含水率下始终搓不到3mm即开始断裂，则该土无塑性。

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

9.4.3 塑限应按下式计算，计算至0.1%：

$$w_P = \left(\frac{m_0}{m_d} - 1\right) \times 100 \qquad (9.4.3)$$

9.4.4 本试验应进行两次平行测定，两次测定的最大允许差值应符合本标准第5.2.4条的规定。

9.4.5 本试验的记录格式应符合本标准附录D表D.14的规定。

9.5 缩限试验

9.5.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 收缩皿(或环刀)：金属制成，直径4.5cm～5.0cm，高2.0cm～3.0cm；

2 天平：称量500g，分度值0.01g；

3 筛：孔径0.5mm；

4 蜡，烧杯，细线，针；

5 其他：烘箱、干燥缸、铝盒、调土刀。

9.5.2 缩限试验应按下列步骤进行：

1 取代表性的土样，用纯水制备成约为液限的试样；

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

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

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

5 称皿和干土总质量，应准确至0.01g；

6 应按本标准第6.3节的规定测定干土体积。

9.5.3 缩限应按下式计算，计算至0.1%：

$$w_s = \left(0.01w' - \frac{V_0 - V_d}{m_d} \cdot \rho_w\right) \times 100 \qquad (9.5.3)$$

式中：w_s——缩限(%)；

w'——土样所要求的含水率(制备含水率)(%)；

V_0——湿土体积(即收缩皿或环刀的容积)(cm^3)；

V_d——烘干后土的体积(cm^3)；

ρ_w——水的密度(g/cm^3)。

9.5.4 本试验应进行两次平行测定，两次测定的最大允许差值应符合本标准第5.2.4条的规定。

9.5.5 本试验的记录格式应符合本标准附录D表D.15的规定。

10 崩解试验

10.0.1 土样为有结构性的黏质土体。

10.0.2 本试验所用的仪器设备(图 10.0.2)应符合下列规定：

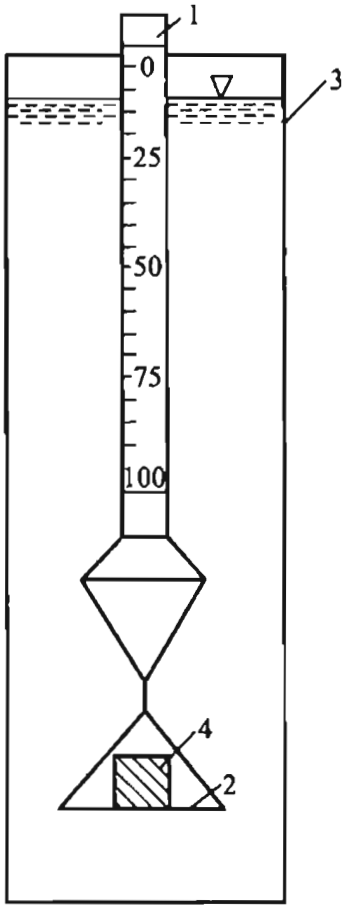


图 10.0.2 崩解仪示意图

1—浮筒；2—网板；3—玻璃水筒；4—试样

1 浮筒：长颈锥体，下有挂钩，颈上有刻度，分度值为 5；

2 网板：10cm×10cm。金属方格网，孔眼 $1cm^2$，可挂在浮筒下端；

3 玻璃水筒：宽约 15cm，高约 70cm，长度视需要而定，内盛清水；

4 天平：称量 500g，分度值 0.01g；

5 其他：烘箱、干燥器、时钟、切土刀、调土皿、称量皿。

10.0.3 崩解试验应按下列步骤进行：

1 取原状土或用扰动土制备成所需状态的土样，用切土刀切成边长为 5cm 的立方体试样；

2 应按本标准第 5.2 节、第 6.2 节的规定测定试样的含水率及密度；

3 将试样放在网板中央，网板挂在浮筒下，然后手持浮筒颈端，迅速地将试样浸入水筒中，开动秒表，测记开始时浮筒齐水面处刻度的瞬间稳定读数及开始时间；

4 在试验开始时可按 1min、3min、10min、30min、60min、2h、3h、4h……测记浮筒齐水面处的刻度读数，并描述各该时试样的崩解情况，根据试样崩解的快慢，可适当缩短或增长测读的时间间隔；

5 当试样完全通过网格落下后，试验即告结束；当试样长期不崩解时，应记录试样在水中的情况。

10.0.4 崩解量应按下式计算：

$$A_t = \frac{R_t - R_0}{100 - R_0} \times 100 \qquad (10.0.4)$$

式中：A_t——试样在时间 t 时的崩解量(%)；

R_t——时间 t 时浮筒齐水面处的刻度读数；

R_0——试验开始时浮筒齐水面处刻度的瞬间稳定读数。

10.0.5 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.16 的规定。

11　毛管水上升高度试验

11.1　一 般 规 定

11.1.1　本试验根据不同的土质，可分别采用直接观测法和土样管法。

11.1.2　直接观测法用于粗砂、中砂，土样管法用于细砂、粉土或毛管水上升高度较小的黏土。

11.2　直接观测法

11.2.1　本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1　毛管仪(图 11.2.1)：包括支架、玻璃杯及厚壁玻璃管。厚壁玻璃管内径为 2cm～3cm，长约 100cm，分度值为 0.5cm，零点在下端，底端用金属网包住；

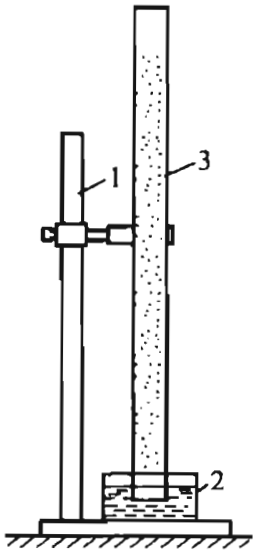


图 11.2.1　毛管仪

1—支架；2—玻璃杯；3—厚壁玻璃管

2　天平：称量 2000g，分度值 0.1g；

3　其他：烘箱、漏斗、称量盒、捣棒。

11.2.2　直接观测法试验应按下列步骤进行：

1　取代表性的风干砂土约 1500g，使其分散，借漏斗分数次装

入玻璃管中，并应用捣棒捣实，使密度均匀，并达到所需的干密度；

2 将玻璃管垂直插入玻璃杯中，管身用支架固定；

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

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

11.2.3 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.17 的规定。

11.3 土样管法

11.3.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 土样管毛管仪（图 11.3.1）应符合下列规定：

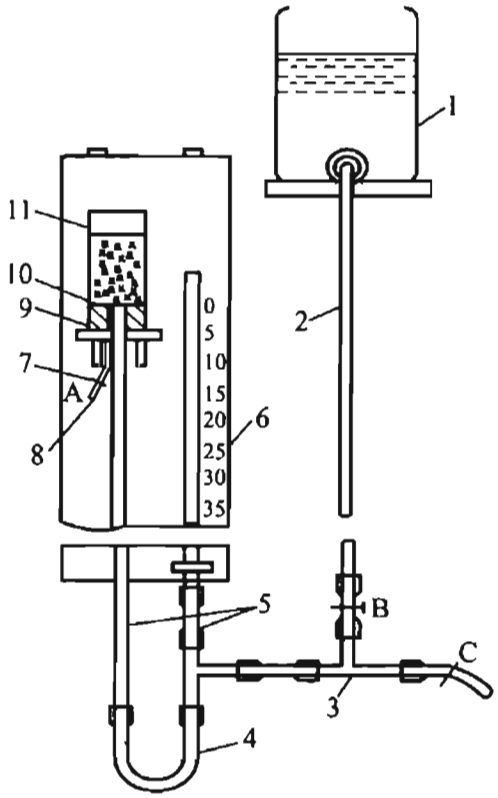


图 11.3.1 土样管毛管仪

1—供水瓶；2—玻璃管；3—三通接头；4—橡皮管；5—测压管；6—直尺；7—管夹；8—排气管；9—橡皮塞；10—筛布；11—玻璃筒

1)玻璃筒(或金属筒):直径 4cm～6cm,高约 12cm;

2)测压管:直径 0.5cm～1.0cm,长约 200cm;

3)直尺:分度值 0.5cm,其零点与试样面齐平。

2 天平:称量 2000g,分度值 0.1g;

3 其他:烘箱、干燥缸、捣棒、直径比玻璃筒略小的切土筒、修土刀、称量盒。

11.3.2 土样管法试验应按下列步骤进行:

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

2 对原状土样,用切土筒削取试样高约为 8.0cm,测定含水率和密度。并将试样推入玻璃筒中,使其距玻璃筒端约 2cm。四周间隙用蜡密封,不使其漏气。玻璃筒下口用铺有筛布的橡皮塞塞紧,并采取封密措施。土中含有较多黏土颗粒时,则在筛布上铺一层约 1cm 厚粗砂缓冲层。此时,直尺零点应与缓冲层顶齐平。

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

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

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

6 应按本标准第 11.3.2 条第 1 款～第 5 款的规定重复 1 次,取两次测定结果的算术平均值,以整数(cm)表示。

11.3.3 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.18 的规定。

12 相对密度试验

12.1 一般规定

12.1.1 土样为能自由排水的砂砾土，粒径不应大于5mm，其中粒径为2mm～5mm的土样质量不应大于土样总质量的15%。

12.1.2 最小干密度试验宜采用漏斗法和量筒法，最大干密度试验宜采用振动锤击法。

12.1.3 本试验应进行两次平行测定，两次测定值其最大允许平行差值应为±0.03g/cm³，取两次测值的算术平均值为试验结果。

12.2 最小干密度试验

12.2.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 量筒：容积为500mL及1000mL两种，后者内径应大于6cm；

2 长颈漏斗：颈管内径约1.2cm，颈口磨平；

3 锥形塞：直径约1.5cm的圆锥体，焊接在铜杆下端(图12.2.1)；

4 天平：称量1000g，分度值1g；

5 砂面拂平器。

12.2.2 最小干密度试验应按下列步骤进行：

1 取代表性的烘干或充分风干试样约1.5kg，用手搓揉或用圆木棍在橡皮板上碾散，并应拌和均匀；

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

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

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

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

6　从本标准第12.2.2条第4款和第5款两种方法测得的体积值中取体积值较大的一个，为松散状态时试样的最大体积。

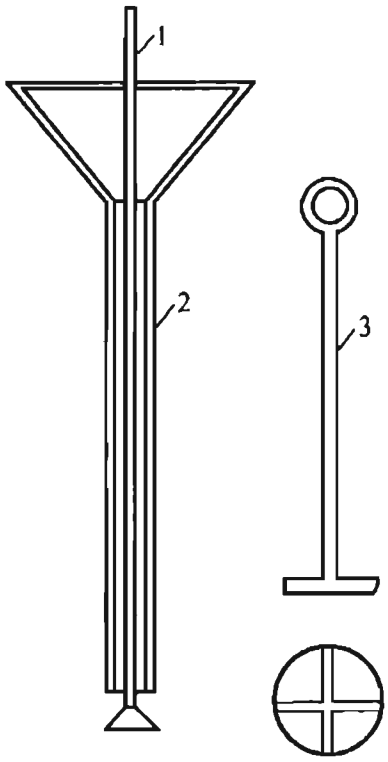


图12.2.1　漏斗及拂平器

1—锥形塞；2—长颈漏斗；3—砂面拂平器

12.2.3　最小干密度应按下式计算，计算至0.01g/cm³：

$$\rho_{dmin} = \frac{m_d}{V_{max}} \tag{12.2.3}$$

式中：ρ_{dmin}——最小干密度(g/cm³)；

V_{max}——松散状态时试样的最大体积(cm³)。

12.2.4　最大孔隙比应按下式计算：

$$e_{max} = \frac{\rho_w G_s}{\rho_{dmin}} - 1 \qquad (12.2.4)$$

式中：e_{max}——最大孔隙比。

12.2.5 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.19 的规定。

12.3 最大干密度试验

12.3.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 金属容器，有两种：

1）容积 250mL，内径 5cm，高 12.7cm；

2）容积 1000mL，内径 10cm，高 12.75cm。

2 振动叉（图 12.3.1-1）；

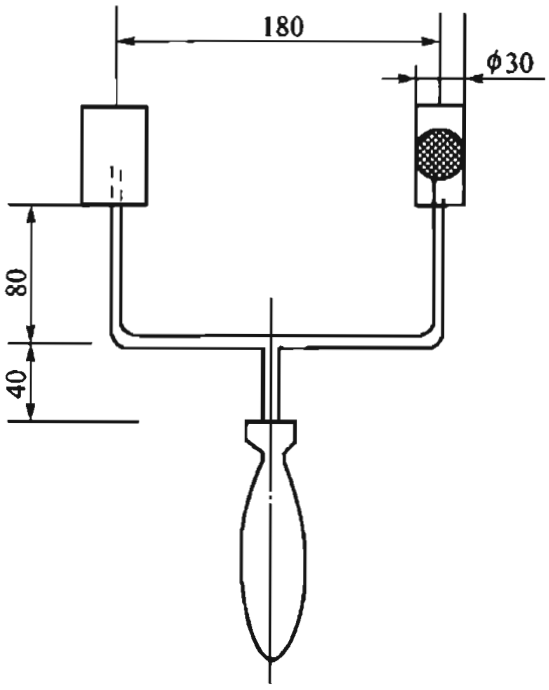


图 12.3.1-1 振动叉（单位：mm）

3 击锤：锤质量 1.25kg，落高 15cm，锤底直径 5cm（图 12.3.1-2）；

4 台秤：称量 5000g，分度值 1g。

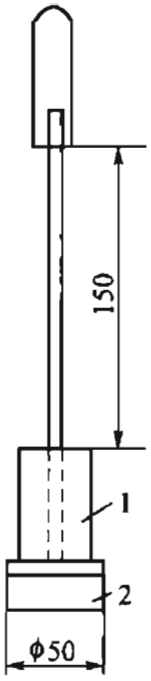


图 12.3.1-2　击锤(单位:mm)

1—击锤;2—锤座

12.3.2　最大干密度试验应按下列步骤进行:

1　取代表性的试样约 4kg,应按本标准第 12.2.2 条第 1 款的规定处理。

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

3　应符合本标准第 12.3.2 条第 2 款的规定,进行后两次的装样、振动和锤击,第 3 次装样时应先在容器口上安装套环。

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

12.3.3 最大干密度应按下式计算，计算至 0.01g/cm³：

$$\rho_{dmax} = \frac{m_d}{V_{min}} \tag{12.3.3}$$

式中：ρ_{dmax}——最大干密度(g/cm³)；

V_{min}——紧密状态时试样的最小体积(cm³)。

12.3.4 最小孔隙比应按下式计算：

$$e_{min} = \frac{\rho_w G_s}{\rho_{dmax}} - 1 \tag{12.3.4}$$

式中：e_{min}——最小孔隙比。

12.3.5 相对密度应按下列公式计算：

$$D_r = \frac{e_{max} - e_0}{e_{max} - e_{min}} \tag{12.3.5-1}$$

$$D_r = \frac{(\rho_d - \rho_{dmin})\rho_{dmax}}{(\rho_{dmax} - \rho_{dmin})\rho_d} \tag{12.3.5-2}$$

式中：D_r——相对密度，计算至 0.01；

e_0——天然孔隙比或填土的相应孔隙比。

12.3.6 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.19 的规定。

13 击实试验

13.1 一般规定

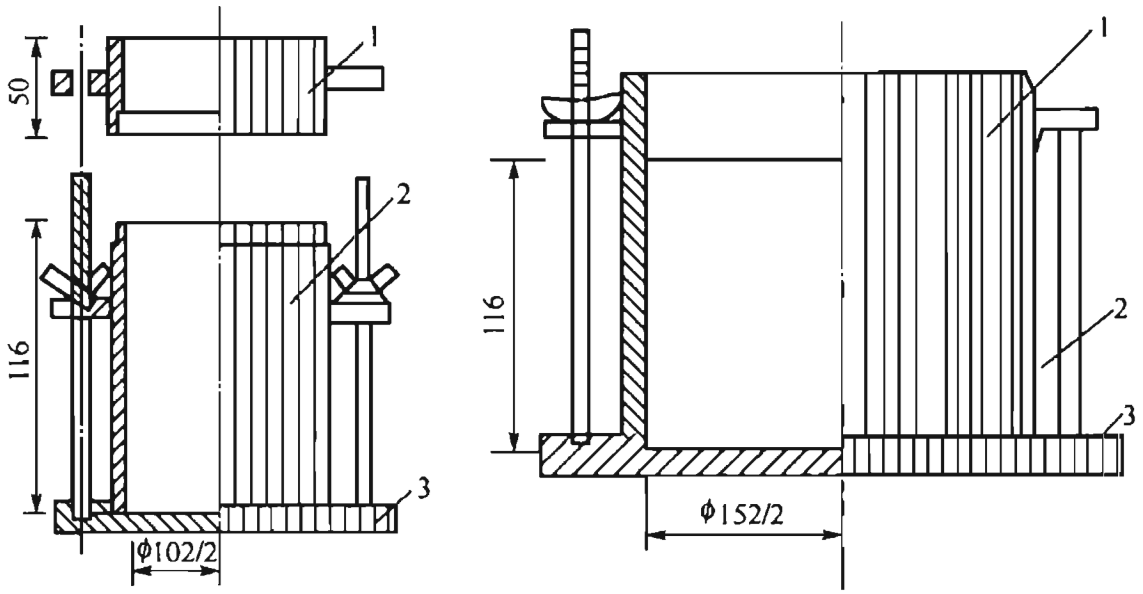
13.1.1 土样粒径应小于20mm。

13.1.2 本试验分轻型击实和重型击实。轻型击实试验的单位体积击实功约为592.2kJ/m³，重型击实试验的单位体积功约为2684.9kJ/m³。

13.2 仪器设备

13.2.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

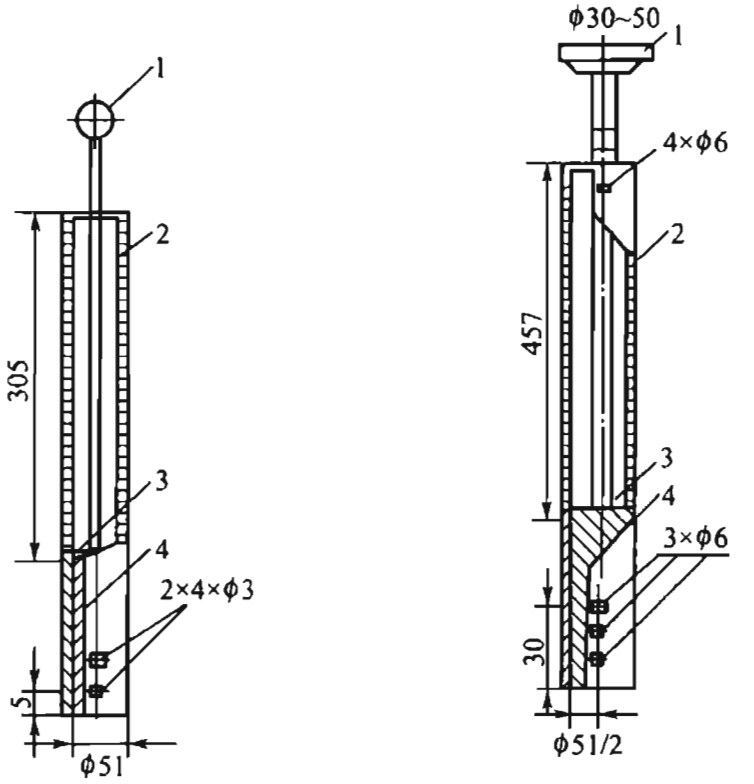
1 击实仪：应符合现行国家标准《土工试验仪器 击实仪》GB/T 22541的规定。由击实筒(图13.2.1-1)、击锤(图13.2.1-2)和护筒组成，其尺寸应符合表13.2.1的规定。



(a) 小击实筒　　(b)大击实筒

图13.2.1-1 击实筒(单位：mm)

1—护筒；2—击实筒；3—底板



(a) 2.5 kg击锤(落高305mm)　　(b) 4.5kg击锤(落高457mm)

图 13.2.1-2　击锤与导筒(单位:mm)

1—提手;2—导筒;3—硬橡皮垫;4—击锤

表 13.2.1　击实仪主要技术指标

试验方法	锤底直径(mm)	锤质量(kg)	落高(mm)	层数	每层击数	击实筒			护筒高度(mm)	备注
						内径(mm)	筒高(mm)	容积(cm^3)		
轻型	51	2.5	305	3	25	102	116	947.4	≥50	
				3	56	152	116	2103.9	≥50	
重型		4.5	457	3	42	102	116	947.4	≥50	
				3	94	152	116	2103.9	≥50	
				5	56					

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

3　天平：称量 200g，分度值 0.01g。

4　台秤：称量 10kg，分度值 1g。

5　标准筛：孔径为 20mm、5mm。

13.2.2　本试验所用的其他仪器设备应符合下列规定：

1　试样推出器：宜用螺旋式千斤顶或液压式千斤顶，如无此类装置，也可用刮刀和修土刀从击实筒中取出试样；

2　其他：烘箱、喷水设备、碾土设备、盛土器、修土刀和保湿设备。

13.3　操作步骤

13.3.1　试样制备可分为干法制备和湿法制备两种方法。

1　干法制备应按下列步骤进行：

1）用四点分法取一定量的代表性风干试样，其中小筒所需土样约为 20kg，大筒所需土样约为 50kg，放在橡皮板上用木碾碾散，也可用碾土器碾散；

2）轻型按要求过 5mm 或 20mm 筛，重型过 20mm 筛，将筛下土样拌匀，并测定土样的风干含水率；根据土的塑限预估的最优含水率，并按本标准第 4.3 节规定的步骤制备不少于 5 个不同含水率的一组试样，相邻 2 个试样含水率的差值宜为 2%；

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

2　湿法制备应取天然含水率的代表性土样，其中小型击实筒所需土样约为 20kg，大型击实筒所需土样约为 50kg。碾散，按要求过筛，将筛下土样拌匀，并测定试样的含水率。分别风干或加水

到所要求的含水率，应使制备好的试样水分均匀分布。

13.3.2 试样击实应按下列步骤进行：

1 将击实仪平稳置于刚性基础上，击实筒内壁和底板涂一薄层润滑油，连接好击实筒与底板，安装好护筒。检查仪器各部件及配套设备的性能是否正常，并做好记录。

2 从制备好的一份试样中称取一定量土料，分3层或5层倒入击实筒内并将土面整平，分层击实。手工击实时，应保证使击锤自由铅直下落，锤击点必须均匀分布于土面上；机械击实时，可将定数器拨到所需的击数处，击数可按表13.2.1确定，按动电钮进行击实。击实后的每层试样高度应大致相等，两层交接面的土面应刨毛。击实完成后，超出击实筒顶的试样高度应小于6mm。

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

4 用推土器从击实筒内推出试样，从试样中心处取2个一定量的土料，细粒土为15g～30g，含粗粒土为50g～100g。平行测定土的含水率，称量准确至0.01g，两个含水率的最大允许差值应为±1%。

5 应按本条第1款～第4款的规定对其他含水率的试样进行击实。一般不重复使用土样。

13.4 计算、制图和记录

13.4.1 击实后各试样的含水率应按下式计算：

$$w = \left(\frac{m_0}{m_d} - 1\right) \times 100 \tag{13.4.1}$$

13.4.2 击实后各试样的干密度应按下式计算，计算至0.01g/cm³：

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0.01w} \tag{13.4.2}$$

13.4.3 土的饱和含水率应按下式计算：

$$w_{sat} = \left(\frac{\rho_w}{\rho_d} - \frac{1}{G_s}\right) \times 100 \qquad (13.4.3)$$

式中：w_{sat}——饱和含水率(%)；

ρ_w——水的密度(g/cm³)。

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

13.4.5 数个干密度下土的饱和含水率应按本标准式(13.4.3)计算。以干密度为纵坐标，含水率为横坐标，在图上绘制饱和曲线。

13.4.6 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.20 的规定。

14 承载比试验

14.1 一般规定

14.1.1 土样粒径应小于20mm。

14.1.2 本试验应采用重型击实法将扰动土在规定试样筒内制样后进行试验。

14.2 仪器设备

14.2.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 击实仪应符合本标准第13.2.1条的规定，其主要部件的尺寸应符合下列规定：

1)试样筒(图14.2.1-1)：内径152mm，高166mm的金属圆筒；试样筒内底板上放置垫块，垫块直径为151mm，高50mm，护筒高度50mm；

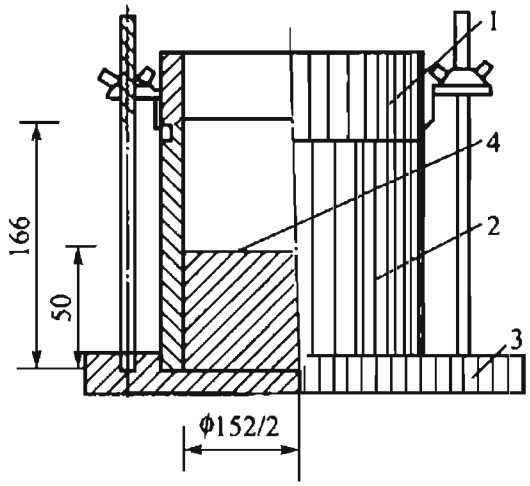


图14.2.1-1 试样筒(单位：mm)

1 护筒；2—试样筒；3--底板；4—垫块

2)击锤和导筒：锤底直径51mm，锤质量4.5kg，落距457mm；

击锤与导筒之间的空隙应符合现行国家标准《土工试验仪器　击实仪》GB/T 22541 的规定。

2　贯入仪(图 14.2.1-2)应符合下列规定：

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

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

3)百分表：2 只，量程分别为 10mm 和 30mm，分度值 0.01mm。

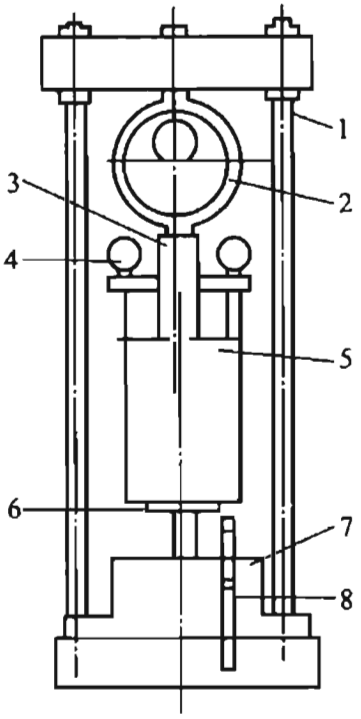


图 14.2.1-2　贯入仪示意图

1—框架；2—测力计；3—贯入杆；4—位移计；5—试样；6—升降台；7—蜗轮蜗杆箱；8—摇把

3　标准筛：孔径为 20mm、5mm；

4　台秤：称量 20kg，分度值 1g；

5　天平：称量 200g，分度值 0.01g。

14.2.2　本试验所用的其他仪器设备应符合下列规定：

1　膨胀量测定装置(图 14.2.2-1):由百分表和三脚架组成;

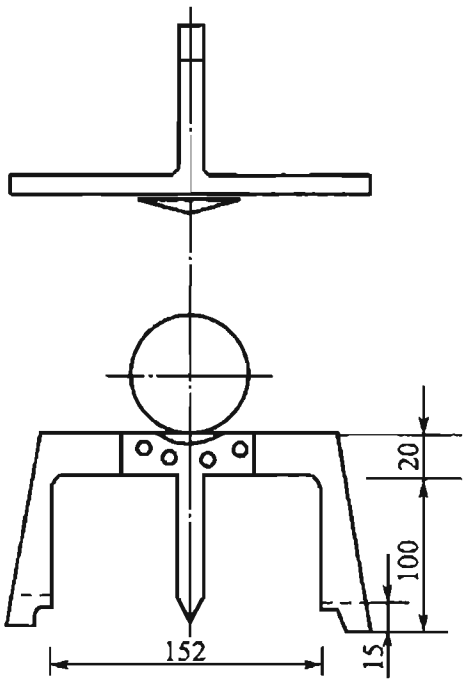


图 14.2.2-1　膨胀量测定装置(单位:mm)

2　有孔底板:孔径宜小于 2mm,底板上应配有可紧密连接试样筒的装置;带调节杆的多孔顶板(图 14.2.2-2);

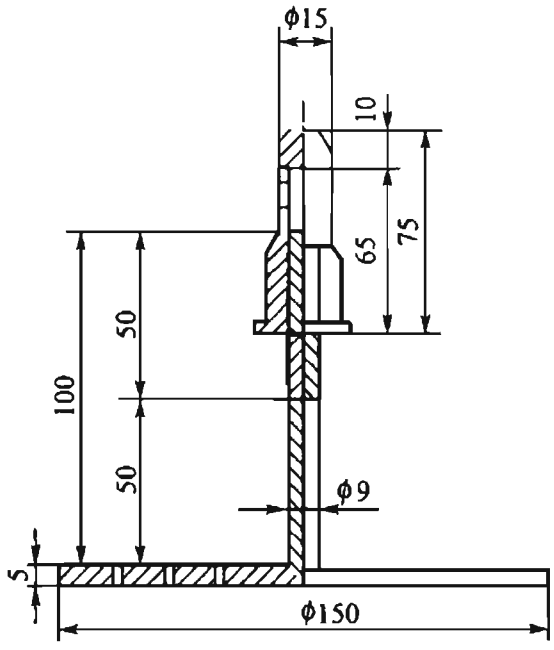


图 14.2.2-2　带调节杆的多孔顶板(单位:mm)

3　荷载块(图 14.2.2-3):直径 150mm,中心孔直径 52mm;每对质量 1.25kg,共 4 对,并沿直径分为两个半圆块;

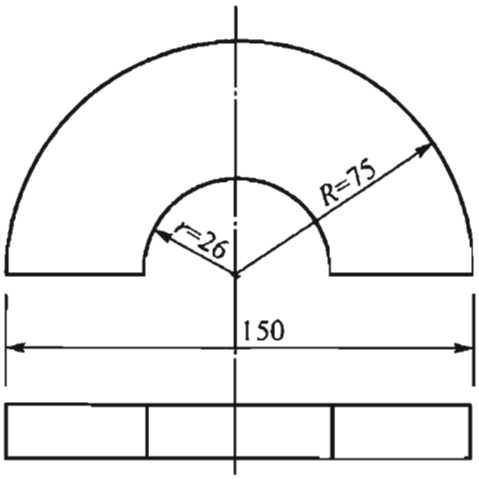


图 14.2.2-3　荷载块(单位:mm)

4　水槽:槽内水面应高出试件顶面 25mm;

5　其他:刮刀、修土刀、直尺、量筒、土样推出器、烘箱、盛土盘。

14.3　操 作 步 骤

14.3.1　试样制备应按下列步骤进行:

1　试样制备应符合本标准第 13.3.1 条的规定。其中土样需过 20mm 筛,以筛除粒径大于 20mm 的颗粒,并记录超径颗粒的百分数;按需要制备数份试样,每份试样质量约为 6.0kg;

2　应按本标准第 13.3.2 条的规定进行重型击实试验,求取最大干密度和最优含水率;

3　应按最优含水率备料,进行重型击实试验制备 3 个试样,击实完成后试样超高应小于 6mm;

4　卸下护筒,沿试样筒顶修平试样,表面不平整处宜细心用细料修补,取出垫块,称试样筒和试样的总质量。

14.3.2　浸水膨胀应按下列步骤进行:

1　将一层滤纸铺于试样表面,放上多孔底板,并应用拉杆将试样筒与多孔底板固定好;

2　倒转试样筒，取一层滤纸铺于试样的另一表面，并在该面上放置带有调节杆的多孔顶板，再放上 8 块荷载块；

3　将整个装置放入水槽，先不放水，安装好膨胀量测定装置，并读取初读数；

4　向水槽内缓缓注水，使水自由进入试样的顶部和底部，注水后水槽内水面应保持在荷载块顶面以上大约 25mm(图 14.3.2)；通常试样要浸水 4d；

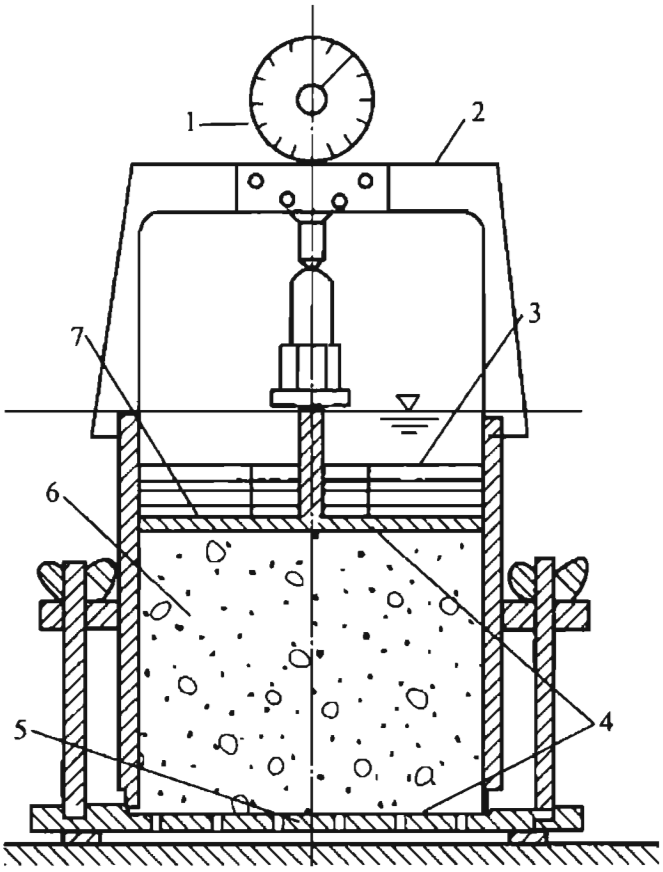


图 14.3.2　浸水膨胀试验装置

1—百分表；2—三脚架；3—荷载板；4—滤纸；5—多孔底板；6—试样；7—多孔顶板

5　根据需要以一定时间间隔读取百分表的读数。浸水终了时，读取终读数。膨胀率应按下式计算：

$$\delta_w = \frac{\Delta h_w}{h_0} \times 100 \qquad (14.3.2)$$

式中：δ_w——浸水后试样的膨胀率(%)；

Δh_w——浸水后试样的膨胀量(mm)；

h_0——试样的初始高度(mm)。

6 卸下膨胀量测定装置，从水槽中取出试样，吸去试样顶面的水，静置15min让其排水，卸去荷载块、多孔顶板和有孔底板，取下滤纸，并称试样筒和试样总质量，计算试样的含水率与密度的变化。

14.3.3 贯入试验应按下列步骤进行：

1 将浸水终了的试样放到贯入仪的升降台上，调整升降台的高度，使贯入杆与试样顶面刚好接触，并在试样顶面放上8块荷载块；

2 在贯入杆上施加45N荷载，将测力计量表和测变形的量表读数调整至零点；

3 加荷使贯入杆以1mm/min～1.25mm/min的速度压入试样，按测力计内量表的某些整读数(如20、40、60)记录相应的贯入量，并使贯入量达2.5mm时的读数不得少于5个，当贯入量读数为10mm～12.5mm时可终止试验；

4 应进行3个试样的平行试验，每个试样间的干密度最大允许差值应为±0.03g/cm^3。当3个试样试验结果所得承载比的变异系数大于12%时，去掉一个偏离大的值，试验结果取其余2个结果的平均值；当变异系数小于12%时，试验结果取3个结果的平均值。

14.4 计算、制图和记录

14.4.1 由p-l曲线上获取贯入量为2.5mm和5.0mm时的单位压力值，各自的承载比应按下列公式计算。承载比一般是指贯入量为2.5mm时的承载比，当贯入量为5.0mm时的承载比大于2.5mm时，试验应重新进行。当试验结果仍然相同时，应采用贯入量为5.0mm时的承载比。

1　贯入量为 2.5mm 时的承载比应按下式计算：

$$CBR_{2.5} = \frac{p}{7000} \times 100 \qquad (14.4.1\text{-}1)$$

式中：$CBR_{2.5}$——贯入量为 2.5mm 时的承载比(%)；

p——单位压力(kPa)；

7000——贯入量为 2.5mm 时的标准压力(kPa)。

2　贯入量为 5.0mm 时的承载比应按下式计算：

$$CBR_{5.0} = \frac{p}{10500} \times 100 \qquad (14.4.1\text{-}2)$$

式中：$CBR_{5.0}$——贯入量为 5.0mm 时的承载比(%)；

10500——贯入量为 5.0mm 时的标准压力(kPa)。

14.4.2　以单位压力(p)为横坐标，贯入量(l)为纵坐标，绘制 p-l 曲线(图 14.4.2)。图 14.4.2 中，曲线 1 是合适的，曲线 2 的开始段是凹曲线，应进行修正。修正的方法为：在变曲率点引一切线，与纵坐标交于 O' 点，这 O' 点即为修正后的原点。

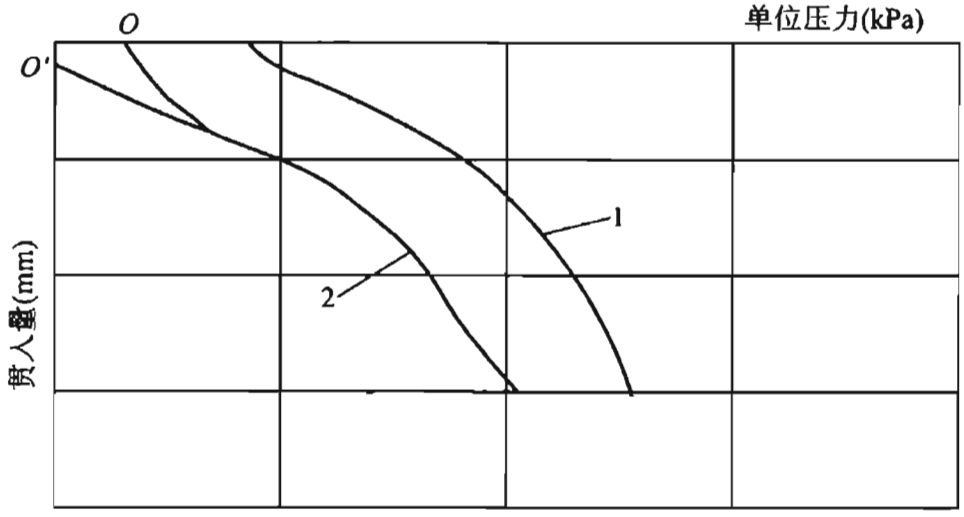


图 14.4.2　单位压力与贯入量的关系曲线(p-l 曲线)

14.4.3　承载比试验的记录格式应符合本标准附录 D 表D.21、表D.22 的规定。

15　回弹模量试验

15.1　一 般 规 定

15.1.1　土样粒径应小于 20mm。

15.1.2　本试验采用杠杆压力仪法和强度仪法。杠杆压力仪法用于含水率较大、硬度较小的试样。

15.2　杠杆压力仪法

15.2.1　本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1　杠杆压力仪(图 15.2.1-1)：最大压力 1500N；

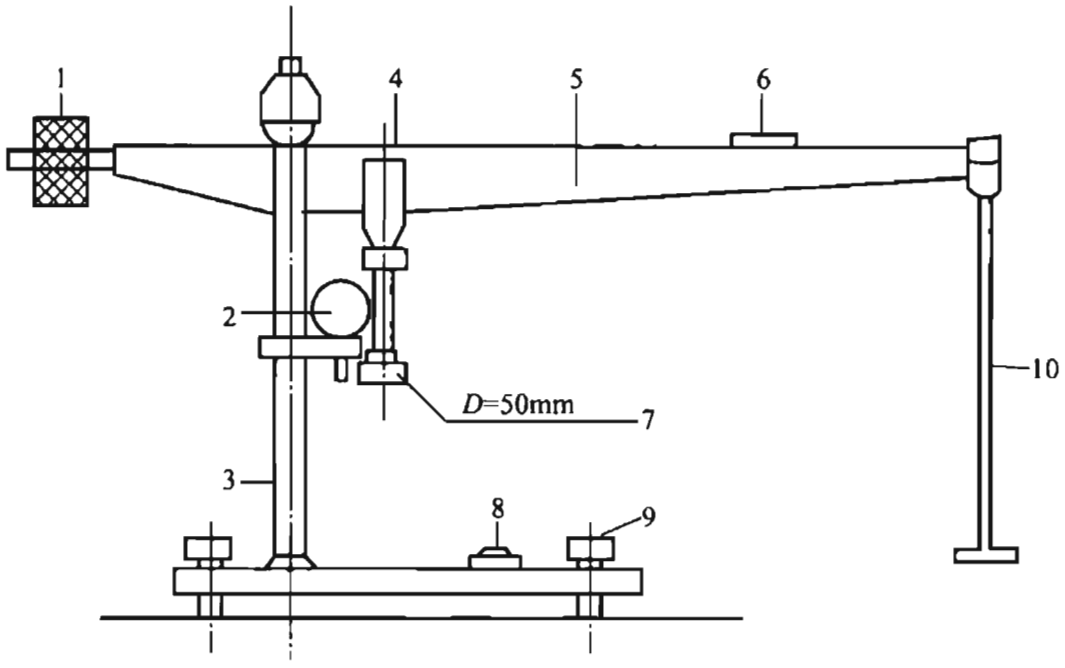


图 15.2.1-1　杠杆压力仪

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

2　试样筒(图 15.2.1-2):内径 152mm,高 166mm 的金属圆筒,其形式和尺寸应符合本标准图 14.2.1-1 的规定,但在与夯击底板的立柱连接的缺口板上多一个内径 5mm、深 5mm 的螺丝孔,用来安装千分表支架;

3　护筒:高 50mm;

4　筒内垫块:直径 151mm,高 50mm,夯击底板与击实仪同;

5　承载板(图 15.2.1-3):直径 50mm,高 80mm;

6　千分表:2 只,量程 2.0mm,分度值 0.001mm;

7　秒表:分度值 0.1s。

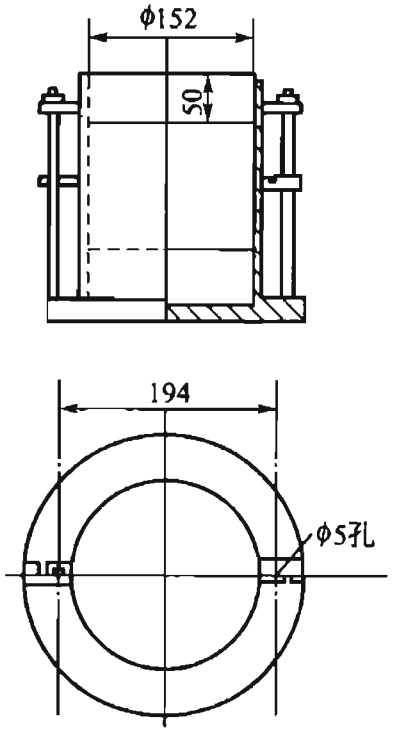


图 15.2.1-2　试样筒(单位:mm)

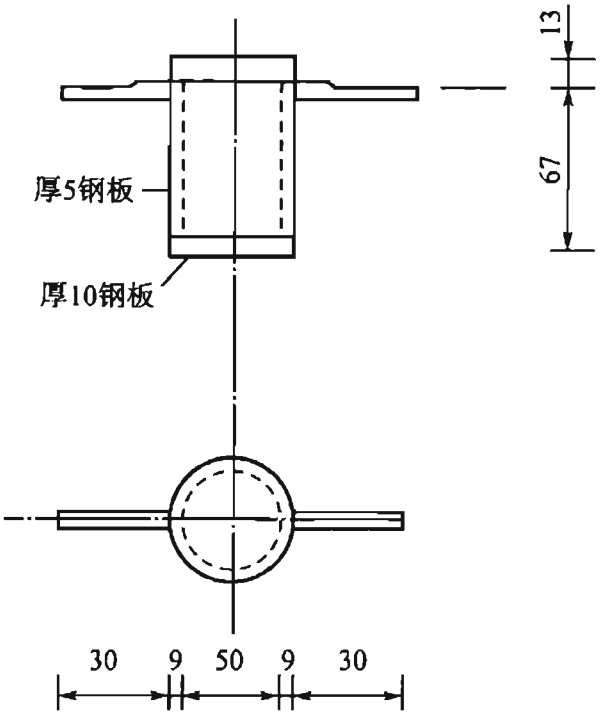


图 15.2.1-3　承载板(单位:mm)

15.2.2　杠杆压力仪法试验应按下列步骤进行:

1　应按本标准第 13.3.2 条的规定用重型击实法制备试样,得出最大干密度和最优含水率。

2　应按最优含水率制备试样,以规定的击数在试样筒内制备试样。

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

4 在杠杆压力仪的加载架上施加砝码，用预定的最大压力进行预压，对含水率大于塑限的土，p＝50kPa～100kPa；对含水率小于塑限的土，p＝100kPa～200kPa。预压应进行 1 次～2 次，每次预压 1min 卸载。预压后调整承载板位置，并将千分表调到零位。

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

6 土的回弹模量测定应进行 3 次平行试验，每次试验结果与回弹模量的均值间最大允许差值应为±5%。

15.2.3 每级荷载下试样的回弹模量应按下式计算：

$$E_e = \frac{\pi p D}{4l}(1-\mu^2) \tag{15.2.3}$$

式中：E_e——回弹模量(kPa)；

p——承载板上的单位压力(kPa)；

D——承载板直径(cm)；

l——相应于压力的回弹变形量(加载读数减卸载读数)(cm)；

μ——土的泊松比，一般取 0.35。

15.2.4 以单位压力 p 为横坐标，回弹变形量 l 为纵坐标，绘制 p-l曲线。试样的回弹模量取 p-l 曲线的直线段计算，对于较软的土，p-l 曲线不通过原点时，允许用初始直线段与纵坐标轴的交点当作原点，修正各级荷载下的回弹变形和回弹模量。

15.2.5 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.23 的规定。

15.3 强度仪法

15.3.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 路面材料强度仪：应符合本标准第 14.2.1 条第 2 款的规定；

2 试样筒：应符合本标准第 15.2.1 条第 2 款的规定；

3 承载板：应符合本标准第 15.2.1 条第 5 款的规定；

4 千分表(量表)支杆与表夹：支杆长 200mm，直径 10mm，一端带有长 5mm 与试样筒上螺丝孔连接的螺丝杆，表夹可用钢制，也可用硬塑料制成；

5 其他仪器应符合本标准第 15.2.1 条第 6 款、第 7 款的规定。

15.3.2 强度仪试验应按下列步骤进行：

1 试样制备应符合本标准第 15.2.2 条第 1 款、第 2 款的规定；

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

3 摇动摇把，用预定的最大压力进行预压，预压方法应按本标准第 15.2.2 条第 4 款执行；

4 将预定的最大压力分为 4 级～6 级进行加载，加载卸载应按本标准第 15.2.2 条第 5 款执行；当试样较硬时，可以不受预定最大压力值的限制，增加加载级数，至需要的压力为止；

5 进行平行试验的次数和准确度应符合本标准第 15.2.2 条第 6 款的规定。

15.3.3 每级压力下试样的回弹模量应按本标准式(15.2.3)计算。其中计算中所用 μ 值一般为 0.35，对于具有一定龄期的加固土取值范围为 0.25～0.30。

15.3.4 本试验的 p-l 曲线绘制应符合本标准第 15.2.4 条的

规定。

15.3.5 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.23 的规定。

16 渗透试验

16.1 一般规定

16.1.1 常水头渗透试验适用于粗粒土，变水头渗透试验适用于细粒土。

16.1.2 试验用水宜采用实际作用于土中的天然水。有困难时，可用纯水或经过滤的清水。在试验前必须用抽气法或煮沸法进行脱气。试验时的水温宜高于室温3℃～4℃。

16.1.3 渗透系数的最大允许差值应为$\pm 2.0\times 10^{-n}$cm/s，在测得的结果中取3个～4个在允许差值范围内的数据，求得其平均值，作为试样在该孔隙比e时的渗透系数。

16.1.4 本试验应以水温20℃为标准温度，计算标准温度下的渗透系数。

16.2 常水头渗透试验

16.2.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 常水头渗透仪装置：封底圆筒的尺寸参数应符合现行国家标准《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》GB/T 15406的规定；当使用其他尺寸的圆筒时，圆筒内径应大于试样最大粒径的10倍；玻璃测压管内径为0.6cm，分度值为0.1cm（图16.2.1）；

2 天平：称量5000g，分度值1.0g；

3 温度计：分度值0.5℃；

4 其他：木锤、秒表。

16.2.2 常水头渗透试验应按下列步骤进行：

1 应先装好仪器（图16.2.1），并检查各管路接头处是否漏

水。将调节管与供水管连通，由仪器底部充水至水位略高于金属孔板，关止水夹。

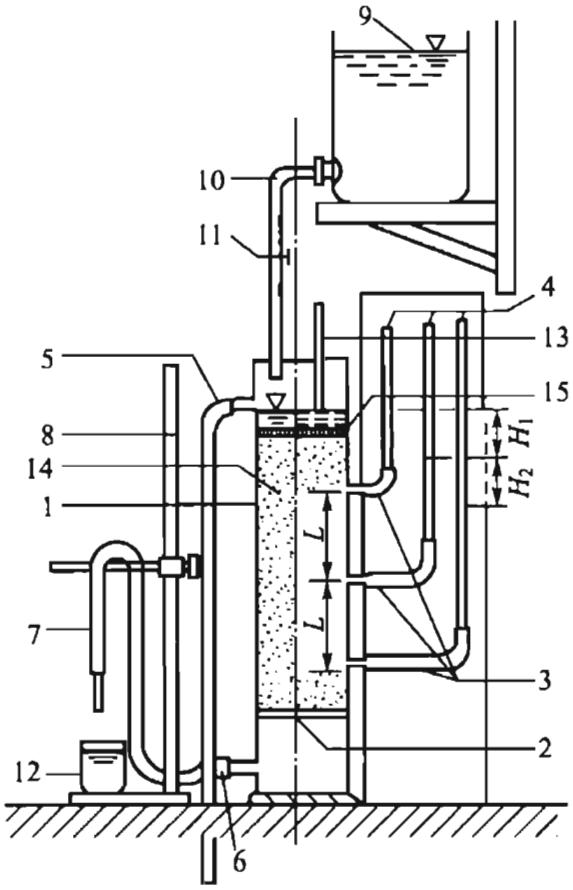


图 16.2.1　常水头渗透装置

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

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

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

4　每层试样装好后，连接供水管和调节管，并由调节管中进水，微开止水夹，使试样逐渐饱和。当水面与试样顶面齐平，关止水夹。饱和时水流不应过急，以免冲动试样。

5 按照本标准第16.2.2条第1款～第4款的规定逐层装试样，至试样高出上测压孔3cm～4cm为止。在试样上端铺厚约2cm砾石作缓冲层。待最后一层试样饱和后，继续使水位缓缓上升至溢水孔。当有水溢出时，关止水夹。

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

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

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

9 降低调节管口，使其位于试样上部1/3高度处，造成水位差使水渗入试样，经调节管流出。在渗透过程中应调节供水管夹，使供水管流量略多于溢出水量。溢水孔应始终有余水溢出，以保持常水位。

10 测压管水位稳定后，记录测压管水位，计算各测压管间的水位差。

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

12 测记进水与出水处的水温，取平均值。

13 降低调节管管口至试样中部及下部1/3处，以改变水力坡降，按本标准第16.2.2条第9款～第12款规定重复进行测定。

14 根据需要，可装数个不同孔隙比的试样，进行渗透系数的测定。

16.2.3 常水头渗透试验渗透系数应按下列公式计算：

$$k_T = \frac{2QL}{At(H_1 + H_2)} \qquad (16.2.3\text{-}1)$$

$$k_{20} = k_T \frac{\eta_T}{\eta_{20}} \qquad (16.2.3\text{-}2)$$

式中：k_T——水温T℃时试样的渗透系数(cm/s)；

Q——时间 t 秒内的渗透水量(cm^3)；

L——渗径(cm)，等于两测压孔中心间的试样高度；

A——试样的断面积(cm^2)；

t——时间(s)；

H_1、H_2——水位差(cm)；

k_{20}——标准温度(20℃)时试样的渗透系数(cm/s)；

η_T——T℃时水的动力黏滞系数(1×10^{-6}kPa·s)；

η_{20}——20℃时水的动力黏滞系数(1×10^{-6}kPa·s)。

比值 η_T/η_{20} 与温度的关系应按本标准表 8.3.5-1 执行。

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

16.2.5 常水头渗透试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.24 的规定。

16.3 变水头渗透试验

16.3.1 本试验所用的仪器设备(图 16.3.1)应符合下列规定：

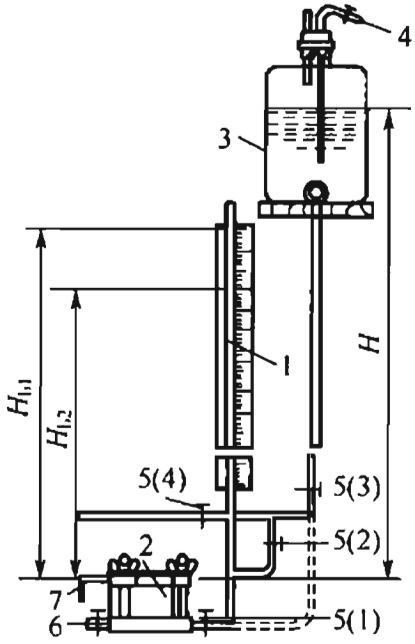


图 16.3.1 变水头渗透装置

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

1　渗透容器：由环刀、透水板、套筒及上、下盖组成；

2　水头装置：变水头管的内径，根据试样渗透系数选择不同尺寸，且不宜大于1cm，长度为1.0m以上，分度值为1.0mm；

3　其他：切土器、秒表、温度计、削土刀、凡士林。

16.3.2　变水头渗透试验应按下列步骤进行：

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

2　将容器套筒内壁涂一薄层凡士林，将盛有试样的环刀推入套筒，压入止水垫圈。把挤出的多余凡士林小心刮净。装好带有透水板的上、下盖，并用螺丝拧紧，不得漏气漏水。

3　把装好试样的渗透容器与水头装置连通。利用供水瓶中的水充满进水管，水头高度根据试样结构的疏松程度确定，不应大于2m，待水头稳定后注入渗透容器。开排气阀，将容器侧立，排除渗透容器底部的空气，直至溢出水中无气泡。关排气阀，放平渗透容器。

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

5　将水头管充水至需要高度后，关止水夹5(2)，开时测记变水头管中起始水头高度和起始时间，按预定时间间隔测记水头和时间的变化，并测记出水口的水温。如此连续测记2次～3次后，再使水头管水位回升至需要高度，再连续测记数次，重复试验5次～6次以上。

16.3.3　变水头渗透试验渗透系数应按下列公式计算：

$$k_T = 2.3\frac{aL}{At}\lg\frac{H_{b1}}{H_{b2}} \qquad (16.3.3\text{-}1)$$

$$k_{20} = k_T\frac{\eta_T}{\eta_{20}} \qquad (16.3.3\text{-}2)$$

式中：a——变水头管截面积(cm^2)；

L——渗径(cm),等于试样高度;

H_{b1}——开始时水头(cm);

H_{b2}——终止时水头(cm)。

16.3.4 变水头渗透试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.25 的规定。

17 固结试验

17.1 一般规定

17.1.1 土样应为饱和的细粒土。当只进行压缩试验时，可用于非饱和土。

17.1.2 渗透性较大的细粒土，可进行快速固结试验。

17.2 标准固结试验

17.2.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 固结容器：由环刀、护环、透水板、加压上盖和量表架等组成。环刀、透水板的技术性能和尺寸参数应符合现行国家标准《土工实验仪器 环刀》SL 370 切土环刀及相关标准的规定(图 17.2.1)。

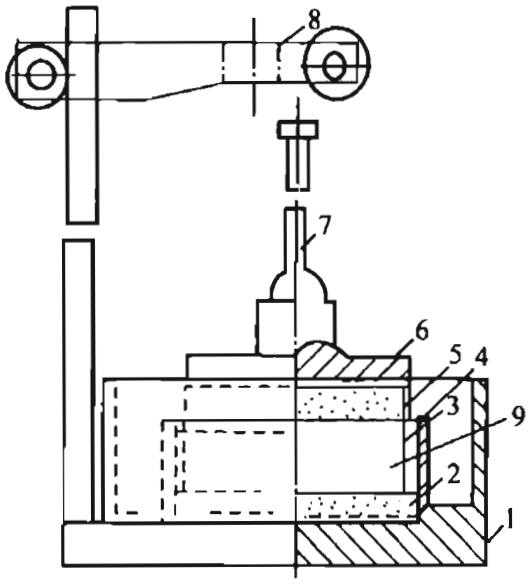


图 17.2.1 固结容器示意图

1—水槽；2—护环；3—环刀；4—导环；5—透水板；6—加压上盖；7—位移计导杆；8—位移计架；9—试样

2 加压设备：可采用量程为5kN～10kN的杠杆式、磅秤式或其他加压设备，其最大允许误差应符合现行国家标准《土工试验仪器 固结仪 第1部分：单杠杆固结仪》GB/T 4935.1、《土工试验仪器 固结仪 第2部分：气压式固结仪》GB/T 4935.2的有关规定。

3 变形测量设备：百分表量程10mm，分度值为0.01mm，或最大允许误差应为±0.2%F.S的位移传感器。

4 其他：刮土刀、钢丝锯、天平、秒表。

17.2.2 标准固结试验应按下列步骤进行：

1 根据工程需要，切取原状土试样或制备给定密度与含水率的扰动土试样。制备方法应按本标准第4.3节、第4.4节执行。

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

3 试样的含水率及密度的测定应符合本标准第5.2.2条、第6.2.2条的规定。对于扰动试样需要饱和时，应按本标准第4.6节规定的方法将试样进行饱和。

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

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

6 确定需要施加的各级压力。加压等级宜为12.5kPa、25kPa、50kPa、100kPa、200kPa、400kPa、800kPa、1600kPa、3200kPa。最后一级的压力应大于上覆土层的计算压力100kPa～200kPa。

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

8 第1级压力的大小视土的软硬程度宜采用12.5kPa、25.0kPa或50.0kPa（第1级实加压力应减去预压压力）。只需测定压缩系

数时，最大压力不小于400kPa。

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

10 需测定沉降速率时，加压后宜按下列时间顺序测记量表读数：6s、15s、1min、2min15s、4min、6min15s、9min、12min15s、16min、20min15s、25min、30min15s、36min、42min15s、49min、64min、100min、200min、400min、23h和24h至稳定为止。

11 当不需要测定沉降速率时，稳定标准规定为每级压力下固结24h或试样变形每小时变化不大于0.01mm。测记稳定读数后，再施加第2级压力。依次逐级加压至试验结束。

12 需要做回弹试验时，可在某级压力（大于上覆有效压力）下固结稳定后卸压，直至卸至第1级压力。每次卸压后的回弹稳定标准与加压相同，并测记每级压力及最后一级压力时的回弹量。

13 需要做次固结沉降试验时，可在主固结试验结束继续试验至固结稳定为止。

14 试验结束后，迅速拆除仪器各部件，取出带环刀的试样。需测定试验后含水率时，则用干滤纸吸去试样两端表面上的水，测定其含水率。

17.2.3 固结试验各项指标计算应符合下列规定：

1 试样的初始孔隙比 e_0 应按下式计算：

$$e_0 = \frac{\rho_w G_s (1 + 0.01 w_0)}{\rho_0} - 1 \qquad (17.2.3\text{-}1)$$

式中：e_0——初始孔隙比。

2 各级压力下固结稳定后的孔隙比 e_i 应按下式计算：

$$e_i = e_0 - (1 + e_0) \frac{\sum \Delta h_i}{h_0} \qquad (17.2.3\text{-}2)$$

式中：e_i——某级压力下的孔隙比；

$\sum \Delta h_i$——某级压力下试样的高度总变形量（cm）；

h_0——试样初始高度(cm)。

3 某一压力范围内的压缩系数 a_v 应按下式计算：

$$a_v = \frac{e_i - e_{i+1}}{p_{i+1} - p_i} \times 10^3 \qquad (17.2.3\text{-}3)$$

式中：a_v——压缩系数(MPa^{-1})；

p_i——某一单位压力值(kPa)。

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

$$E_s = \frac{1 + e_0}{a_v} \qquad (17.2.3\text{-}4)$$

$$m_v = \frac{1}{E_s} = \frac{a_v}{1 + e_0} \qquad (17.2.3\text{-}5)$$

式中：E_s——压缩模量(MPa)；

m_v——体积压缩系数(MPa^{-1})。

5 压缩指数 C_c 及回弹指数 C_s(C_c 即 e-lg$p$ 曲线直线段的斜率。用同法在回弹支上求其平均斜率，即 C_s)应按下式计算：

$$C_c \text{或} C_s = \frac{e_i - e_{i+1}}{\lg p_{i+1} - \lg p_i} \qquad (17.2.3\text{-}6)$$

式中：C_c——压缩指数；

C_s——回弹指数。

17.2.4 以孔隙比 e 为纵坐标，单位压力 p 为横坐标，绘制孔隙比与单位压力的关系曲线。

17.2.5 原状土的先期固结压力 p_c 的确定方法可按图 17.2.5 执行，用适当比例的纵横坐标作 e-lg$p$ 曲线，在曲线上找出最小曲率半径 R_{min} 点 O。过 O 点作水平线 OA、切线 OB 及 $\angle AOB$ 的平分线 OD，OD 与曲线的直线段 C 的延长线交于点 E，则对应于 E 点的压力值即为该原状土的先期固结压力。

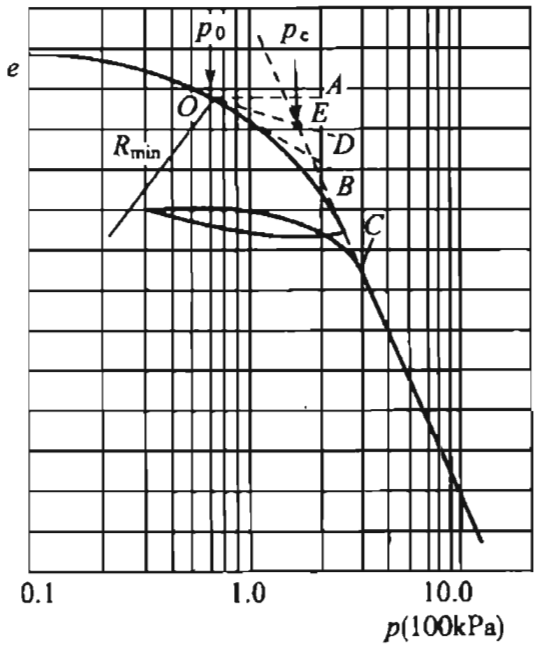


图 17.2.5　e-lg$p$ 曲线和求 p_c 示意图

17.2.6　固结系数 C_v 应按下列方法求算：

1　时间平方根法：对于某一压力，以量表读数 d(mm)为纵坐标，时间平方根$\sqrt{t}$(min)为横坐标，绘制 d-$\sqrt{t}$ 曲线(图 17.2.6-1)。延长 d-$\sqrt{t}$ 曲线开始段的直线，交纵坐标轴于 d_s(d_s称理论零点)。过 d_s绘制另一直线，令其横坐标为前一直线横坐标的 1.15 倍，则后一直线与 d-$\sqrt{t}$ 曲线交点所对应的时间的平方根即为试样固结度达 90%所需的时间 t_{90}。该压力下的固结系数应按下式计算：

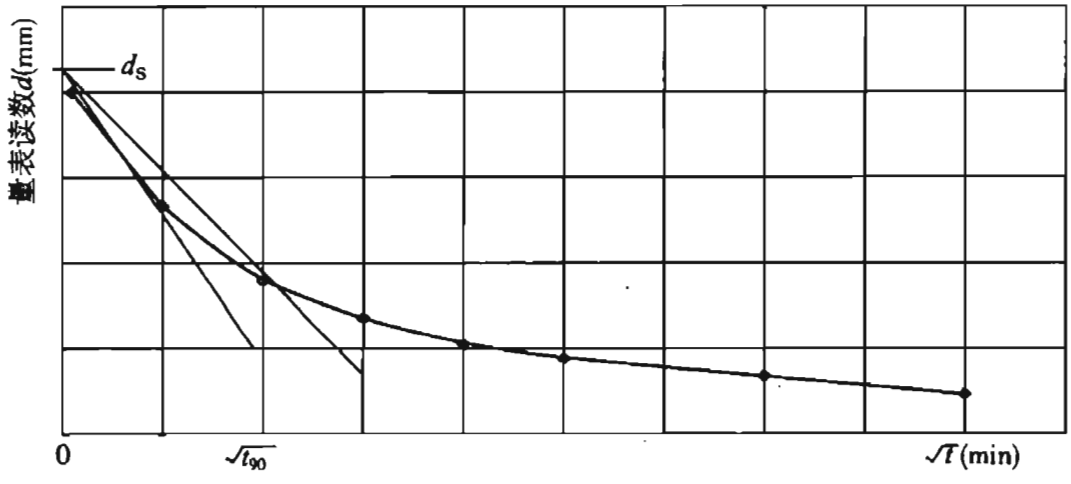


图 17.2.6-1　时间平方根法求 t_{90}

$$C_v = \frac{0.848\,\bar{h}^2}{t_{90}} \qquad (17.2.6\text{-}1)$$

式中：C_v——固结系数(cm^2/s)；

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

t_{90}——固结度达90%所需的时间(s)。

2 时间对数法：对于某一压力，以量表读数 d(mm)为纵坐标，时间在对数(min)横坐标上，绘制 d-lg$t$ 曲线(图 17.2.6-2)。延长 d-lg$t$ 曲线的开始线段，选任一时间 t_1，相对应的量表读数为 d_1，再取时间 $t_2 = \frac{t_1}{4}$，相对应的量表读数为 d_2，则 $2d_2 - d_1$ 之值为 d_{01}。如此再选取另一时间，依同法求得 d_{02}、d_{03}、d_{04}等，取其平均值即为理论零点 d_0。延长曲线中部的直线段和通过曲线尾部数点切线的交点即为理论终点 d_{100}，则 $d_{50} = \frac{d_0 + d_{100}}{2}$，对应于 d_{50} 的时间即为试样固结度达到50%所需的时间 t_{50}。该压力下的固结系数 C_v应按下式计算：

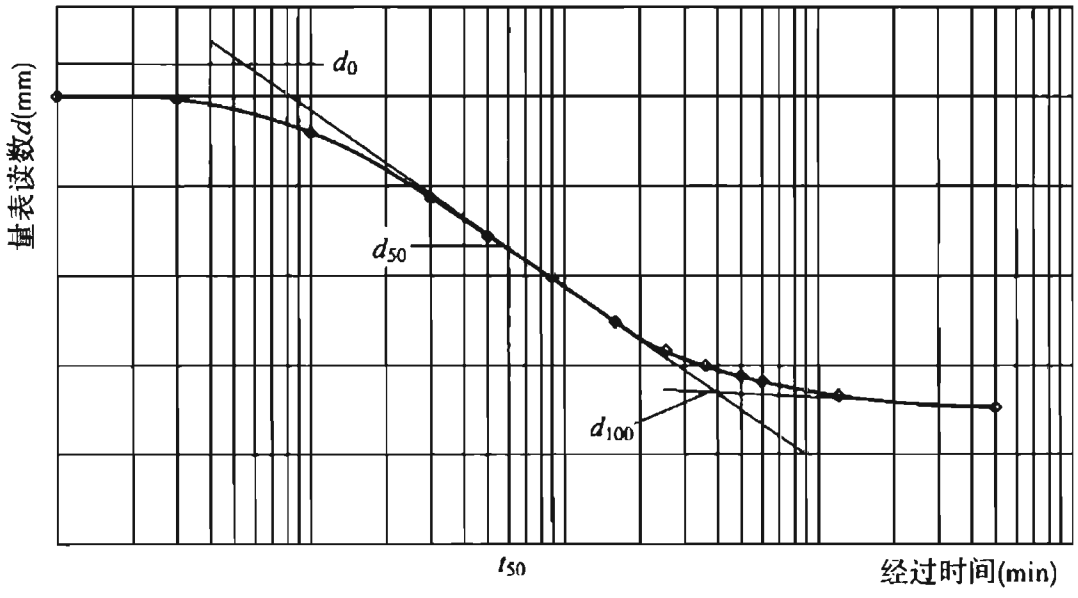


图 17.2.6-2 时间对数法求 t_{50}

$$C_v = \frac{0.197\,\bar{h}^2}{t_{50}} \qquad (17.2.6\text{-}2)$$

式中：t_{50}——固结度达50%所需的时间(s)。

17.2.7 对于某一压力，以孔隙比 e 为纵坐标，时间在对数(min)横坐标上，绘制 e-lg$t$ 曲线。主固结结束后试验曲线下部的直线段的斜率即为次固结系数。次固结系数应按下式计算：

$$C_\alpha = \frac{-\Delta e}{\lg(t_2/t_1)} \qquad (17.2.7)$$

式中：C_α——次固结系数；

Δe——对应时间 t_1 到 t_2 的孔隙比的差值；

t_1、t_2——次固结某一时间(min)。

17.2.8 标准固结试验的记录格式应符合本标准附录D表D.26～表D.28的规定。

17.3 快速固结试验

17.3.1 仪器设备应符合本标准第17.2.1条的规定。

17.3.2 试验应按本标准第17.2.2条第1款～第6款、第8款、第9款和第14款执行。

17.3.3 计算应符合本标准第17.2.3条第1款～第4款的规定。对快速法所得的试验结果，当需要校正时，各级压力下试样校正后的总变形量应按下式计算：

$$\sum \Delta h_i = (h_i)_t \frac{(h_n)_{t_w}}{(h_n)_t} \qquad (17.3.3)$$

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

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

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

$(h_n)_t$——最后一级压力下固结1h的总变形量减去该压力

下的仪器变形量(mm)。

17.3.4 制图应符合本标准第17.2.4条的规定。

17.3.5 快速固结试验的记录格式应符合本标准附录D表D.29的规定。

17.4 应变控制加荷固结试验

17.4.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 固结仪(图17.4.1)：由具有连续测孔隙水压力装置的刚性底座、护环、环刀、透水板、加压上盖等组成：

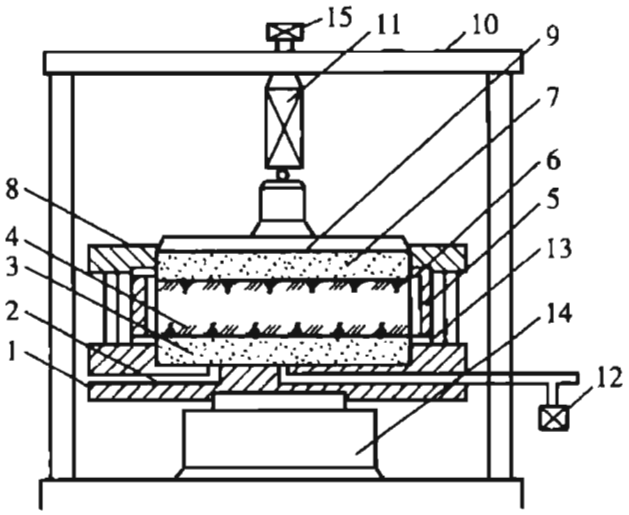


图17.4.1 固结仪组装示意图

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

1)环刀、透水板的技术性能和尺寸参数应符合现行行业标准《土工实验仪器　环刀》SL 370及有关标准的规定；

2)环刀和护环底部与刚性底座要密封，应能经受1.0MPa

的内压不泄漏。

2 轴向加荷设备：可采用螺旋杆式、液压式和气压式加荷装置。应能反馈、伺服跟踪连续加荷。轴向测力计采用负荷传感器等。测量装置应具有相应的刚度。量程应为0kN～10kN；最大允许误差应为±0.5%F.S。

3 孔隙水压力量测设备：可采用压力传感器，量程：0MPa～1MPa；最大允许误差应为±0.5%F.S。其体积因数应小于$1.5\times10^{-5}cm^3/kPa$。

4 变形测量设备：可采用位移传感器，量程应为0mm～10mm；最大允许误差应为±0.2%F.S。

5 其他：切土器、刮土刀、天平、秒表、烘箱、土样盒。

17.4.2 应变控制式加荷固结试验应按下列步骤进行：

1 制备试样应按本标准第17.2.2条第1款执行。

2 测定试样的密度和含水率应符合本标准第17.2.2条第3款的规定，并对试样饱和。

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

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

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

6 选择适宜的应变速率。其标准应使在试验时的任何时间试样底部产生的孔隙水压力为施加垂直应力的3%～20%。应变速率可按表17.4.2选择。试验时，当超孔隙水压力值超出建议的范围时，可调整应变速率。

表 17.4.2 应变速率

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

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

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

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

10 在试验时，需获得次固结数据时，在所需轴向荷载时中断控制应变加荷，并保持该荷载不变条件下，应按本标准第 17.2.2 条第 10 款规定的时间顺序记录变形值，一直延续至变形和对数时间关系曲线上呈现一次固结部分线性特性阶段为止。若需进一步加荷，则在先前常应变速率条件下，恢复控制应变的轴向加荷。

11 当要求回弹或卸荷特性时，试样在等于加荷时的应变速率条件下卸荷。卸荷时关闭孔隙水压力测量系统。应按本标准第 17.4.2 条第 8 款规定的时间间隔记录轴向荷载和变形。回弹完成后，打开孔隙水压力测量系统，监测孔隙水压力，并允许其消散。

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

17.4.3 应变控制加荷固结试验指标应按下列规定计算：

1 试样的初始孔隙比 e_0 应按本标准式(17.2.3-1)计算；

2 任意时刻试样的孔隙比 e_i 应按本标准式(17.2.3-2)计算；

3 任意时刻试样的有效压力 σ'_i 应按下式计算：

$$\sigma_i' = \sigma_i - \frac{2}{3}u_b \qquad (17.4.3\text{-}1)$$

式中：σ_i'——任意时刻 t 试样上的有效压力(kPa)；

σ_i——任意时刻 t 试样上施加的总压力(kPa)；

u_b——任意时刻 t 试样底部的孔隙水压力(kPa)。

4 某一压力范围内的压缩系数 a_v 应按本标准式(17.2.3-3)计算；

5 某一压力范围内压缩模量 E_s 和体积压缩系数 m_v 应按本标准式(17.2.3-4)、式(17.2.3-5)计算；

6 压缩指数 C_c 和回弹指数 C_s 应按本标准式(17.2.3-6)计算；

7 任意时刻 t 的固结系数 C_v 应按下式计算：

$$C_v = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta t} \cdot \frac{h^2}{2m_v u_b'} \qquad (17.4.3\text{-}2)$$

式中：$\Delta\varepsilon$——两读数间的应变变化(%)；

h——两读数间的试样平均高度(cm)；

Δt——两读数间的历时(s)；

u_b'——两读数间试样底部测得的孔隙水压力平均值(kPa)。

17.4.4 以孔隙比 e 为纵坐标，有效压力 σ' 在对数横坐标上，绘制 e-lgσ' 的关系图。

17.4.5 以固结系数 C_v 为纵坐标，有效压力 σ' 为横坐标，绘制 C_v-σ' 的关系图。

17.4.6 为获得次压缩数据，在半对数坐标上绘制变形与时间图。

17.4.7 应变控制式加荷固结试验的记录格式应符合本标准附录D表D.26～表D.28、表D.30的规定。

18 黄土湿陷试验

18.1 一般规定

18.1.1 本试验应根据工程要求，分别测定黄土的湿陷系数、自重湿陷系数、溶滤变形系数和湿陷起始压力。

18.1.2 进行本试验时，从同一土样中制备的试样，其密度的最大允许差值应为$\pm 0.03 g/cm^3$。

18.1.3 本试验所用的仪器设备应符合本标准第17.2.1条的规定，环刀内径为79.8mm。试验所用的滤纸及透水石的湿度应接近试样的天然湿度。

18.1.4 黄土湿陷试验的变形稳定标准为每小时变形不应大于0.01mm，溶滤变形稳定标准为每3d变形不应大于0.01mm。

18.2 湿陷系数试验

18.2.1 湿陷系数试验应按下列步骤进行：

1 试样制备应符合本标准第4.5节的规定，试样安装应符合本标准第17.2.2条第4款、第5款的规定。

2 确定需要施加的各级压力，压力等级宜为50kPa、100kPa、150kPa、200kPa，大于200kPa后每级压力为100kPa。最后一级压力应按取土深度而定：从基础底面算起至10m深度以内，压力为200kPa；10m以下至非湿陷土层顶面，应用其上覆土的饱和自重压力，当大于300kPa时，仍应用300kPa。当基底压力大于300kPa时或有特殊要求的建筑物时，宜按实际压力确定。

3 施加第一级压力后，每隔1h测定一次变形读数，直至试样变形稳定为止。

4 试样在第一级压力下变形稳定后，施加第二级压力，以此

类推。试样在规定浸水压力下变形稳定后，向容器内自上而下或自下而上注入纯水，水面宜高出试样顶面，每隔 1h 测记一次变形读数，直至试样变形稳定为止。

5 测记试样浸水变形稳定读数后，应按本标准第 17.2.2 条第 14 款规定的步骤拆卸仪器及试样。

18.2.2 湿陷系数应按下式计算：

$$\delta_s = \frac{h_p - h'_p}{h_0} \tag{18.2.2}$$

式中：δ_s——湿陷系数；

h_p——在某级压力下，试样变形稳定后的高度(mm)；

h'_p——在某级压力下，试样浸水湿陷变形稳定后的高度(mm)。

18.2.3 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.31 的规定。

18.3 自重湿陷系数试验

18.3.1 自重湿陷系数试验应按下列步骤进行：

1 试样制备应符合本标准第 4.5 节的规定，试样安装应符合本标准第 17.2.2 条第 4 款、第 5 款的规定；

2 施加土的饱和自重压力，当饱和自重压力小于或等于 50kPa 时，可一次施加；当压力大于 50kPa 时，应分级施加，每级压力不应大于 50kPa，每级压力时间不应少于 15min，如此连续加至饱和自重压力；加压后每隔 1h 测记一次变形读数，直至试样变形稳定为止；

3 向容器内注入纯水，水面应高出试样顶面，每隔 1h 测记一次变形读数，直至试样浸水变形稳定为止；

4 测记试样变形稳定读数后，可按本标准第 17.2.2 条第 14 款规定的步骤拆卸仪器及试样。

18.3.2 自重湿陷系数应按下式计算：

$$\delta_{zs} = \frac{h_z - h'_z}{h_0} \tag{18.3.2}$$

式中：δ_{zs}——自重湿陷系数；

h_z——在饱和自重压力下，试样变形稳定后的高度(mm)；

h'_z——在饱和自重压力下，试样浸水湿陷变形稳定后的高度(mm)。

18.3.3 本试验的记录格式应符合本标准附录D表D.32的规定。

18.4 溶滤变形系数试验

18.4.1 溶滤变形系数试验应按下列步骤进行：

1 试样制备应符合本标准第4.5节的规定，试样安装应符合本标准第17.2.2条第4款、第5款的规定；

2 试验应按本标准第18.2.1条第2款～第4款规定的步骤进行后继续用水渗透，每隔2h测记1次变形读数，24h后每天测记1次～3次，直至变形稳定为止；

3 测记试样溶滤变形稳定读数后，拆卸仪器及试样应按本标准第17.2.2条第14款执行。

18.4.2 溶滤变形系数应按下式计算：

$$\delta_{wt} = \frac{h'_p - h_s}{h_0} \tag{18.4.2}$$

式中：δ_{wt}——溶滤变形系数；

h_s——在某级压力下，长期渗透而引起的溶滤变形稳定后的试样高度(mm)。

18.4.3 本试验的记录格式应符合本标准附录D表D.31的规定。

18.5 湿陷起始压力试验

18.5.1 本试验可用单线法或双线法。

18.5.2 湿陷起始压力试验应按下列步骤进行：

1 试样制备应符合本标准第4.5节的规定，单线法切取5个环刀试样，双线法切取2个环刀试样；试样安装应符合本标准第17.2.2条第4款、第5款的规定；

2 单线法试验：对5个试样均在天然湿度下分级加压，分别

加至不同的规定压力，应符合本标准第 18.2.1 条第 2 款～第 4 款的规定，直至试样湿陷变形稳定为止；

3 双线法试验：一个试样在天然湿度下分级加压，应符合本标准第 18.2.1 条第 2 款～第 4 款规定，直至湿陷变形稳定为止；另一个试样在天然湿度下施加第一级压力后浸水，直至第一级压力下湿陷稳定后，再分级加压，直至试样在各级压力下浸水变形稳定为止；压力等级，在 150kPa 以内，每级增量为 25kPa～50kPa；150kPa 以上，每级增量为 50kPa～100kPa；

4 测记试样湿陷变形稳定读数后，应按本标准第 17.2.2 条第 14 款的规定卸仪器及试样。

18.5.3 某一级压力下的湿陷系数应按下式计算：

$$\delta_{sp} = \frac{h_{pn} - h_{pw}}{h_0} \tag{18.5.3}$$

式中：δ_{sp}——某一级压力下的湿陷系数；

h_{pn}——在某一级压力下试样变形稳定后的高度(mm)；

h_{pw}——在某一级压力下试样浸水变形稳定后的高度(mm)。

18.5.4 以压力为横坐标，湿陷系数为纵坐标，绘制压力与湿陷系数关系曲线(图 18.5.4)，湿陷系数为 0.015 所对应的压力即为湿陷起始压力。

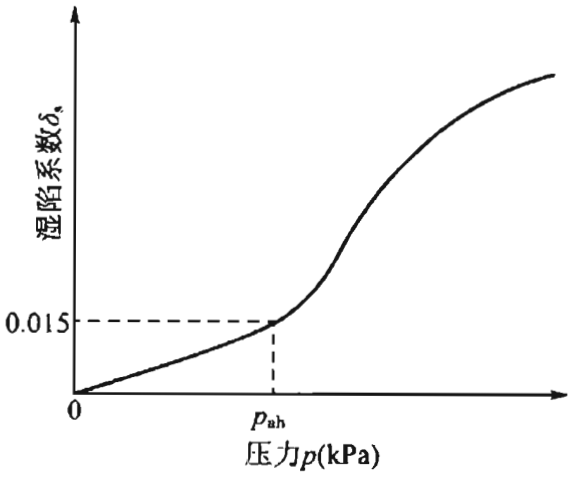


图 18.5.4 湿陷系数与压力关系曲线

18.5.5 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.33 的规定。

19 三轴压缩试验

19.1 一般规定

19.1.1 土样粒径应小于20mm。

19.1.2 根据排水条件的不同，本试验可分为不固结不排水剪(UU)、固结不排水剪(CU或$\overline{CU}$)和固结排水剪(CD)3种试验类型。

19.1.3 对于无法取得多个试样、灵敏度较低的原状土，可采用一个试样多级加荷试验。

19.2 仪器设备

19.2.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 应变控制式三轴仪(图19.2.1-1)：由反压力控制系统、周围压力控制系统、压力室、孔隙水压力量测系统组成。其技术条件应符合现行国家标准《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》GB/T 15406及《土工试验仪器 三轴仪 第1部分：应变控制式三轴仪》GB/T 24107.1的规定；

2 附属设备应符合下列规定：

1)击实器(图19.2.1-2)；

2)饱和器(图19.2.1-3)；

3)切土盘(图19.2.1-4)；

4)切土器和切土架(图19.2.1-5)；

5)原状土分样器(图19.2.1-6)；

6)承膜筒(图19.2.1-7)；

7)制备砂样圆模(图19.2.1-8)，用于冲填土或砂性土。

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

4 负荷传感器：轴向力的最大允许误差为±1%；

5 位移传感器（或量表）：量程 30mm，分度值 0.01mm；

6 橡皮膜：对直径为 39.1mm 和 61.8mm 的试样，橡皮膜厚度宜为 0.1mm～0.2mm；对直径为 101mm 的试样，橡皮膜厚度宜为 0.2mm～0.3mm；

7 透水板：直径与试样直径相等，其渗透系数宜大于试样的渗透系数，使用前在水中煮沸并泡于水中。

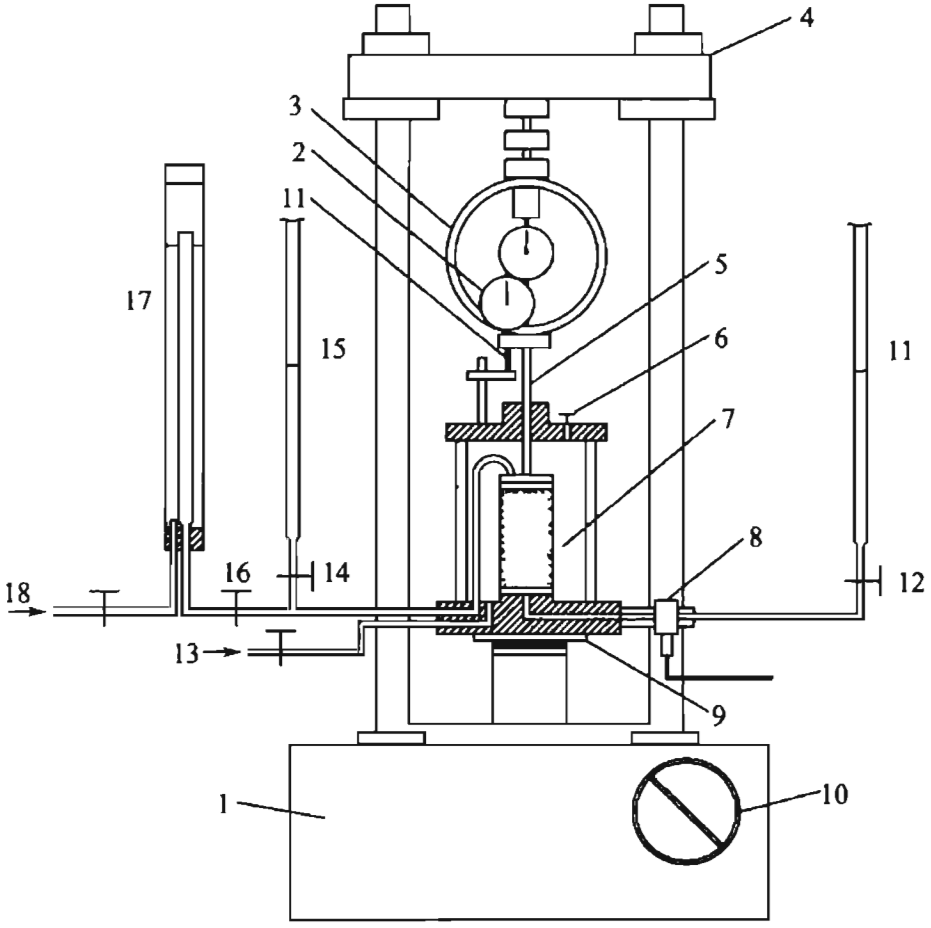


图 19.2.1-1 三轴仪示意图

1—试验机；2—轴向位移计；3—轴向测力计；4—试验机横梁；5—活塞；6—排气孔；7—压力室；8—孔隙压力传感器；9—升降台；10—手轮；11—排水管；12—排水管阀；13—周围压力；14—排水管阀；15—量水管；16—体变管阀；17—体变管；18—反压力

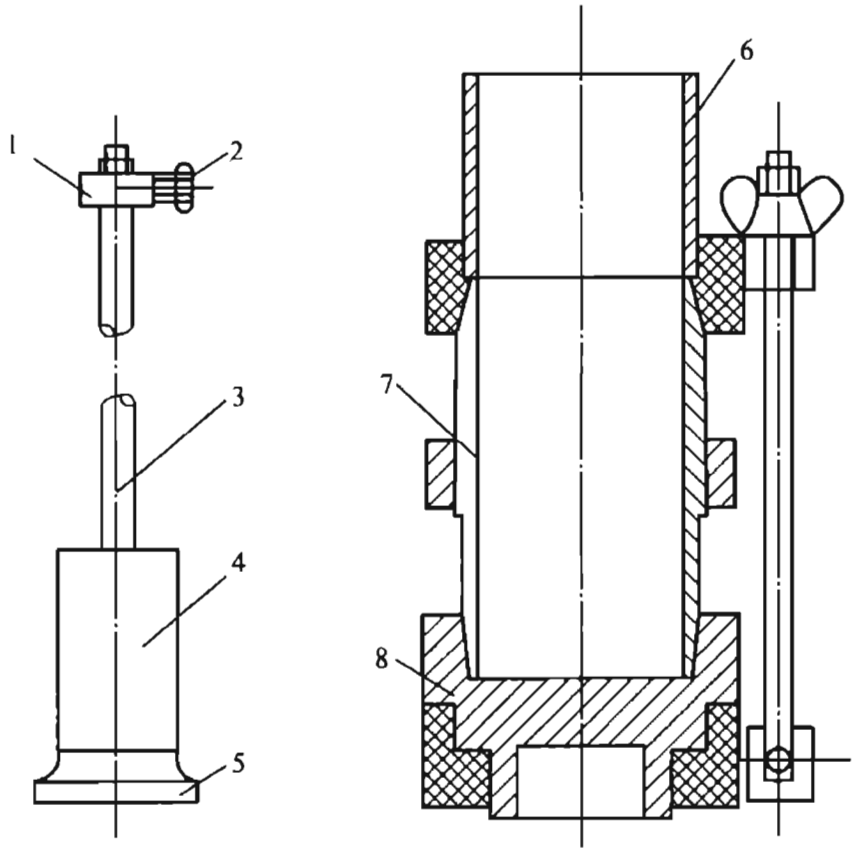


图 19.2.1-2　击实器

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

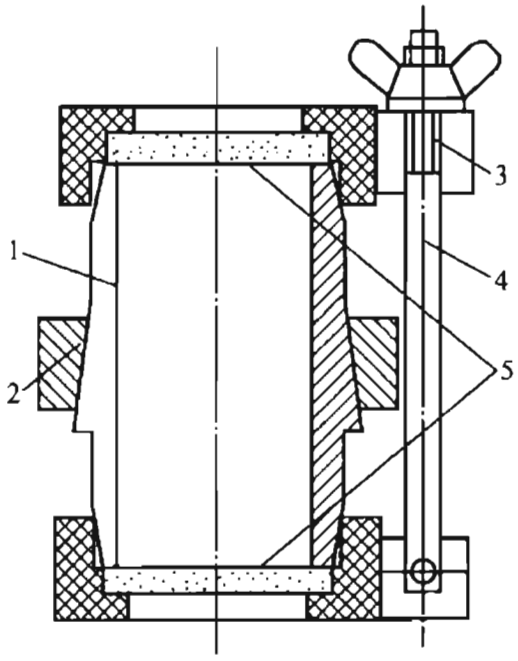


图 19.2.1-3　饱和器

1—土样筒;2—紧箍;3—夹板;4—拉杆;5—透水板

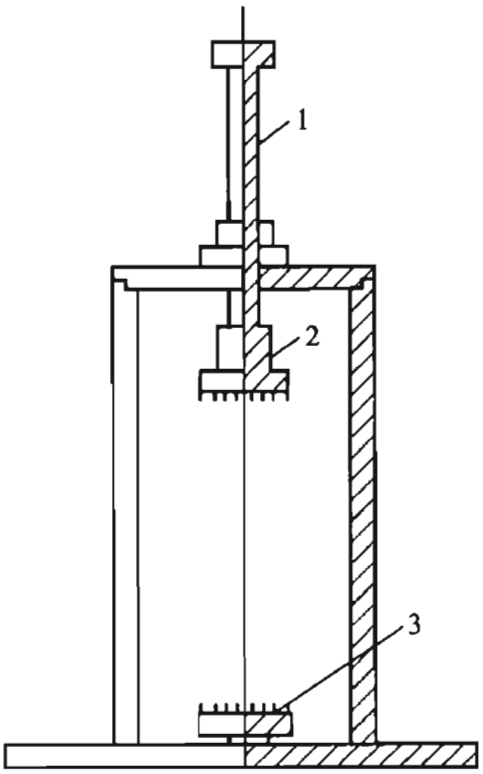


图 19.2.1-4　切土盘

1—轴；2—上盘；3—下盘

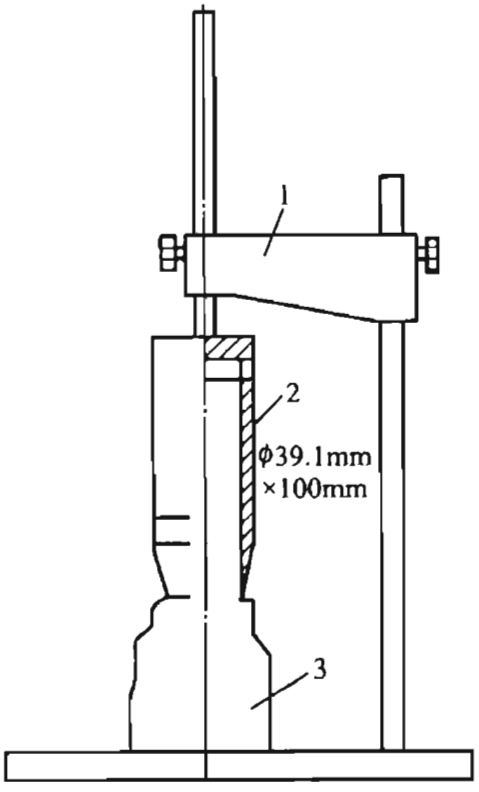


图 19.2.1-5　切土器和切土架

1—切土架；2—切土器；3—土样

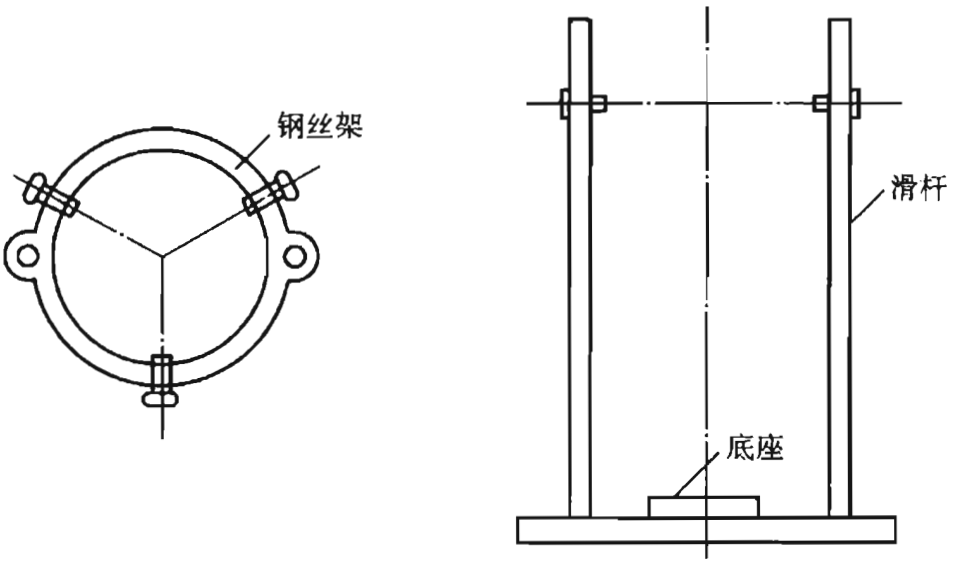


图 19.2.1-6　原状土分样器

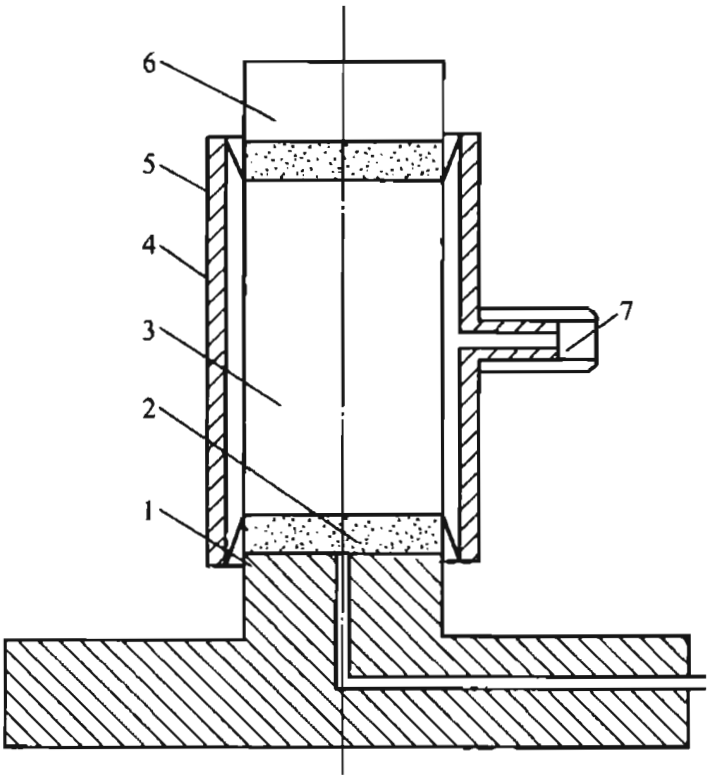


图 19.2.1-7　承膜筒安装示意图

1—压力室底座；2—透水板；3—试样；4—承膜筒；5—橡皮膜；6—上帽；7—吸气孔

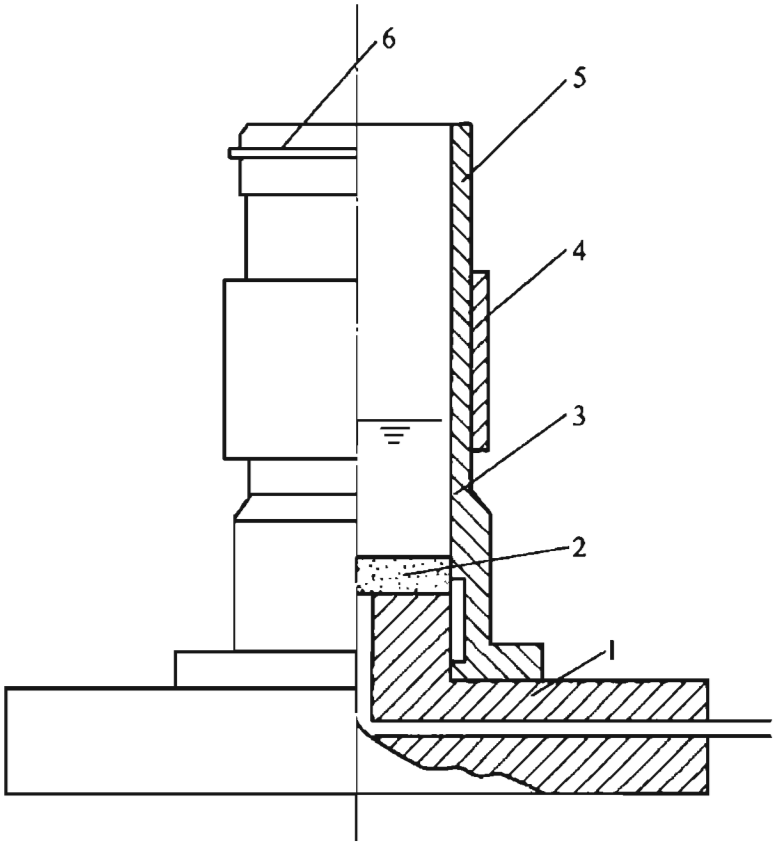


图 19.2.1-8　制备砂样圆模

1—压力室底座；2—透水板；3—制样圆模（两片合成）；
4—紧箍；5—橡皮膜；6—橡皮圈

19.2.2　试验时的仪器应符合下列规定：

1　根据试样的强度大小，选择不同量程的测力计。

2　孔隙压力量测系统的气泡应排除。其方法是：孔隙压力量测系统中充以无气水并施加压力，小心地打开孔隙压力阀，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。孔隙压力量测系统的体积因数应小于 $1.5\times10^{-5}cm^3/kPa$。

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

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

19.3 试样的制备和饱和

19.3.1 试样制备应按下列步骤进行：

1 试样高度 h 与直径 D 之比(h/D)应为 2.0～2.5，直径 D 分别为 39.1mm、61.8mm 及 101.0mm。对于有裂隙、软弱面或构造面的试样，直径 D 宜采用 101.0mm。

2 原状土试样制备应按下列规定进行：

1)对于较软的土样，先用钢丝锯或削土刀切取一稍大于规定尺寸的土柱，放在切土盘(图 19.2.1-4)的上、下圆盘之间。再用钢丝据或削土刀紧靠侧板，由上往下细心切削，边切削边转动圆盘，直至土样的直径被削成规定的直径为止。然后按试样高度的要求，削平上下两端。对于直径为 10cm 的软黏土土样，可先用原状土分样器(图 19.2.1-6)分成 3 个土柱，再按上述的方法切削成直径为 39.1mm 的试样；

2)对于较硬的土样，先用削土刀或钢丝锯切取一稍大于规定尺寸的土柱，上、下两端削平，按试样要求的层次方向放在切土架上，用切土器(图 19.2.1-5)切削。先在切土器刀口内壁涂上一薄层油，将切土器的刀口对准土样顶面，边削土边压切土器，直至切削到比要求的试样高度高约 2cm 为止，然后拆开切土器，将试样取出，按要求的高度将两端削平。试样的两端面应平整，互相平行，侧面垂直，上下均匀。在切样过程中，当试样表面因遇砾石而成孔洞时，允许用切削下的余土填补；

3)将切削好的试样称量，直径为 101.0mm 的试样应准确至 1g；直径为 61.8mm 和 39.1mm 的试样应准确至 0.1g。取切下的余土，平行测定含水率，取其平均值作为试样的含水率。试样高度和直径用卡尺量测，试样的平均直径应按下式计算：

$$D_0 = \frac{D_1 + 2D_2 + D_3}{4} \qquad (19.3.1)$$

式中：　D_0——试样平均直径(mm)；

D_1、D_2、D_3——试样上、中、下部位的直径(mm)。

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

3　扰动土试样制备的击实法应按下列步骤进行：

1)选取一定数量的代表性土样。直径为39.1mm的试样约取2kg，直径为61.8mm和101.0mm试样分别取10kg和20kg。经风干、碾碎、过筛，筛的孔径应符合本标准表19.3.1的规定，测定风干含水率，按要求的含水率算出所需加水量；

表19.3.1　土样粒径与试样直径的关系(mm)

试样直径 D	最大允许粒径 d_{max}
39.1	$\frac{1}{10}D$
61.8	$\frac{1}{10}D$
101.0	$\frac{1}{5}D$

2)将需加的水量喷洒到土料上拌匀，稍静置后装入塑料袋，然后置于密闭容器内至少20h，使含水率均匀。取出土料复测其含水率。含水率的最大允许差值应为±1%。当不符合要求时，应调整含水率至符合要求为止；

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

4）根据要求的干密度，称取所需土质量。按试样高度分层击实，粉土分 3 层～5 层，黏土分 5 层～8 层击实。各层土料质量相等。每层击实至要求高度后，将表面刨毛，再加第 2 层土料。如此继续进行，直至击实最后一层。将击样筒中的试样两端整平，取出称其质量。

4　砂土试样制备应按下列步骤进行：

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

2）开孔隙压力阀及量管阀，使压力室底座充水。将煮沸过的透水板滑入压力室底座上，并用橡皮带把透水板包扎在底座上，以防砂土漏入底座中。关孔隙压力阀及量管阀，将橡皮膜的一端套在压力室底座上并扎紧，将对开模套在底座上，将橡皮膜的上端翻出，然后抽气，使橡皮膜贴紧对开模内壁（图 19.2.1-8）；

3）在橡皮膜内注脱气水约达试样高的 1/3 。用长柄小勺将煮沸冷却的一份砂样装入膜中，填至该层要求高度。对含有细粒土和要求高密度的试样，可采用干砂制备，用水头饱和或反压力饱和；

4）第 1 层砂样填完后，继续注水至试样高度的 2/3 ，再装第 2 层砂样。如此继续装样，直至模内装满为止。如果要求干密度较大，则可在填砂过程中轻轻敲打对开模，使所称出的砂样填满规定的体积。然后放上透水板、试样帽，翻起橡皮膜，并扎紧在试样帽上；

5）开量管阀降低量管，使管内水面低于试样中心高程以下约 0.2m，当试样直径为 101mm 时，应低于试样中心高程以下约 0.5m。在试样内产生一定负压，使试样能站立。拆除对开模，测量试样高度与直径应符合本标准第 19.3.1 条第 2 款第 3 项的规定，复核试样干密度。各试样之间的干密度最大允许差值应为±0.03g/cm^3。

19.3.2 试样饱和宜选用下列方法：

1 抽气饱和法：应将装有试样的饱和器置于无水的抽气缸内，进行抽气，当真空度接近当地 1 个大气压后，应继续抽气，继续抽气时间宜符合表 19.3.2 的规定。

表 19.3.2 不同土性的抽气时间(h)

土 类	抽气时间
粉土	>0.5
黏土	>1
密实的黏土	>2

当抽气时间达到表 19.3.2 的规定后，徐徐注入清水，并保持真空度稳定。待饱和器完全被水淹没即停止抽气，并释放抽气缸的真空。试样在水下静置时间应大于 10h，然后取出试样并称其质量。

2 水头饱和法：适用于粉土或粉土质砂。应按本标准第 19.3.1 条第 4 款第 1 项～第 5 项规定的步骤安装试样，试样顶用透水帽，然后施加 20kPa 的周围压力，并同时提高试样底部量管的水面和降低连接试样顶部固结排水管的水面，使两管水面差在 1m 左右。打开量管阀、孔隙压力阀和排水阀，让水自下而上通过试样，直至同一时间间隔内量管流出的水量与固结排水管内的水量相等为止。当需要提高试样的饱和度时，宜在水头饱和前，从底部将二氧化碳气体通入试样，置换孔隙中的空气。二氧化碳的压力宜为 5kPa～10kPa，再进行水头饱和。

3 反压力饱和法：试样要求完全饱和时，可对试样施加反压力。

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

2）反压力应分级施加，并同时分级施加周围压力，以减少对

试样的扰动，在施加反压力过程中，始终保持周围压力比反压力大 20kPa，反压力和周围压力的每级增量对软黏土取 30kPa；对坚实的土或初始饱和度较低的土，取 50kPa～70kPa；

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

4）计算每级周围压力下的孔隙压力增量 Δu，并与周围压力增量 $\Delta\sigma_3$ 比较，当孔隙水压力增量与周围压力增量之比 $\Delta u/\Delta\sigma_3 > 0.98$ 时，认为试样饱和；否则应按本标准第 19.3.2 条第 3 款的规定重复，直至试样饱和为止。

19.4 不固结不排水剪试验

19.4.1 试样的安装应按下列步骤进行：

1 对压力室底座充水，在底座上放置不透水板，并依次放置试样、不透水板及试样帽。对于砂性土的试样安装，应按本标准第 19.3.1 条第 4 款的规定进行。

2 将橡皮膜套在承膜筒内，两端翻出筒外（图 19.2.1-7），从吸气孔吸气，使膜贴紧承膜筒内壁，套在试样外，放气，翻起橡皮膜的两端，取出承膜筒。用橡皮圈将橡皮膜分别扎紧在压力室底座和试样帽上。

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

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

5 关体变传感器或体变管阀及孔隙压力阀，开周围压力阀，施加所需的周围压力。周围压力大小应与工程的实际小主应力 σ_3 相适应，并尽可能使最大周围压力与土体的最大实际小主应力

σ_3 大致相等。也可按 100kPa、200kPa、300kPa、400kPa 施加。

6 上升升降台，当轴向测力计有微读数时表示活塞已与试样帽接触。然后将轴向负荷传感器或测力计、轴向位移传感器或位移计的读数调整到零位。

19.4.2 剪切试样应按下列步骤进行：

1 剪切应变速率宜为 0.5%/min～1.0%/min。

2 开动试验机，进行剪切。开始阶段，试样每产生轴向应变 0.3%～0.4%时，测记轴向力和轴向位移读数各 1 次。当轴向应变达 3%以后，读数间隔可延长为每产生轴向应变 0.7%～0.8%时各测记 1 次。当接近峰值时应加密读数。当试样为特别硬脆或软弱土时，可加密或减少测读的次数。

3 当出现峰值后，再继续剪 3%～5%轴向应变；轴向力读数无明显减少时，则剪切至轴向应变达 15%～20%。

4 试验结束后，关闭电动机，下降升降台，开排气孔，排去压力室内的水，拆除压力室罩，揩干试样周围的余水，脱去试样外的橡皮膜，描述破坏后形状，称试样质量，测定试验后含水率。对于直径为 39.1mm 的试样，宜取整个试样烘干；直径为 61.8mm 和 101mm 的试样，可切取剪切面附近有代表性的部分土样烘干。

19.5 固结不排水剪试验

19.5.1 试样的安装应按下列步骤进行：

1 开孔隙压力阀及量管阀，使压力室底座充水排气，并关阀。然后放上试样，试样上端放一湿滤纸及透水板。在其周围贴上 7 条～9 条浸湿的滤纸条，滤纸条宽度为试样直径的 1/5～1/6。滤纸条两端与透水石连接，当要施加反压力饱和试样时，所贴的滤纸条必须中间断开约试样高度的 1/4，或自底部向上贴至试样高度 3/4 处。

2 应按本标准第 19.4.1 条第 2 款的规定将橡皮膜套在试样外。橡皮膜下端扎紧在压力室底座上。

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

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

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

6 应按本标准第 19.4.1 条第 3 款、第 4 款的规定，装上压力室罩并注满水。然后放低排水管使其水面与试样中心高度齐平，测记其水面读数，并关排水管阀。

19.5.2 试样排水固结应按下列步骤进行：

1 使量管水面位于试样中心高度处，开量管阀，测读传感器，记下孔隙压力起始读数，然后关量管阀。

2 施加周围压力应符合本标准第 19.4.1 条第 5 款的规定，并调整负荷传感器或测力计、轴向位移传感器或位移计的读数。

3 打开孔隙压力阀，测记稳定后的孔隙压力读数，减去孔隙压力计起始读数，即为周围压力与试样的初始孔隙压力。

4 开排水管阀，按 0min、0.25min、1min、4min、9min…时间测记排水读数及孔隙压力计读数。固结度至少应达到 95%，固结过程中可随时绘制排水量 ΔV 与时间平方根或时间对数曲线及孔隙压力消散度与时间对数曲线。若试样的主固结时间已经掌握，也可不读排水管和孔隙压力的过程读数。

5 当要求对试样施加反压力时，则应符合本标准第 19.3.2 条第 3 款的规定。关体变管阀，增大周围压力，使周围压力与反压力之差等于原来选定的周围压力，记录稳定的孔隙压力读数和体变管水面读数作为固结前的起始读数。

6 开体变管阀，让试样通过体变管排水，并应按本标准第 19.5.2 条第 2 款～第 4 款的规定进行排水固结。

7　固结完成后，关排水管阀或体变管阀，记下体变管或排水管和孔隙压力的读数。开动试验机，到轴向力读数开始微动时，表示活塞已与试样接触，记下轴向位移读数，即为固结下沉量 Δh。依此算出固结后试样高度 h_c。然后将轴向力和轴向位移读数都调至零。

8　其余几个试样按同样方法安装试样，并在不同周围压力下排水固结。

19.5.3　剪切试样应按下列步骤进行：

1　剪切应变速率宜为 0.05%/min～0.10%/min，粉土剪切应变速率宜为 0.1%/min～0.5%/min；

2　开始剪切试样。测力计、轴向变形、孔隙水压力的测记应符合本标准第 19.5.2 条第 3 款、第 4 款规定；

3　试验结束后，关闭电动机，下降升降台，开排气孔，排去压力室内的水，拆除压力室罩，揩干试样周围的余水，脱去试样外的橡皮膜，描述破坏后形状，称试样质量，测定试验后含水率。

19.6　固结排水剪试验

19.6.1　试样的安装、固结应按本标准第 19.5.1 条、第 19.5.2 条的规定进行。

19.6.2　试样的剪切应按本标准第 19.5.3 条的规定进行，但在剪切过程中应打开排水阀。剪切速率宜为 0.003%/min～0.012%/min。

19.7　一个试样多级加荷试验

19.7.1　不固结不排水剪试验应按下列步骤进行：

1　试样的安装应符合本标准第 19.4.1 条的规定。

2　施加第一级周围压力，试样剪切应符合本标准第 19.4.2 条第 1 款的规定。当测力计读数达到稳定或出现倒退时，测记轴向位移和测力计读数，关闭电机停止剪切，将轴向压力退至零。

3　施加第二级周围压力。此时测力计因施加周围压力而增

加，应重新调至原来读数值，然后升高升降台。当测力计读数微动时，表示试样帽与测力系统重新接触，再按原剪切速率剪切，直至测力计读数稳定或接近稳定为止。按此进行其余各级周围压力的试验。最后一级周围压力下的剪切累积应变不应超过20%。

4 试验结束后，关周围压力阀，拆除压力室罩，取下试样称量，并测定剪切后的含水率。

19.7.2 固结不排水剪试验应按下列步骤进行：

1 试样的安装应符合本标准第19.5.1条的规定。

2 试样的固结应符合本标准第19.5.2条的规定。

3 试样的剪切应符合本标准第19.5.3条的规定。施加第一级周围压力，试样剪切应变速率应符合本标准第19.5.3条第1款的规定。第一级剪切完成后，退除轴向压力，待孔隙水压力稳定后施加第二级周围压力，进行排水固结。

4 固结完成后进行第二级周围压力下的剪切，并按本标准第19.7.2条第1款～第3款的步骤进行第三级周围压力下的剪切，累计剪切累积应变不应超过20%。

5 试验结束后，关周围压力阀，尽快拆除压力室罩，取下试样称量，并测定剪切后的含水率。

19.8 计算、制图和记录

19.8.1 计算应符合下列规定：

1 试样的高度、面积、体积及剪切时的面积应按表19.8.1中的公式计算。

表19.8.1 高度、面积、体积计算表

项目	起始	固结后		剪切时校正值
		按实测固结下沉	等应变简化式样	
试样高度(cm)	h_0	$h_c = h_0 - \Delta h_c$	$h_c = h_0 \times \left(1 - \frac{\Delta V}{V_0}\right)^{1/3}$	—

续表 19.8.1

项目	起始	固结后		剪切时校正值
		按实测固结下沉	等应变简化式样	
试样面积（cm^2）	A_0	$A_c=\dfrac{V_0-\Delta V}{h_c}$	$A_c=A_0\times\left(1-\dfrac{\Delta V}{V_0}\right)^{2/3}$	$A_a=\dfrac{A_0}{1-0.01\varepsilon_1}$（不固结不排水剪）
				$A_a=\dfrac{A_c}{1-0.01\varepsilon_1}$（固结不排水剪）
				$A_a=\dfrac{V_c-\Delta V_i}{h_c-\Delta h_i}$（固结排水剪）
试样体积（cm^3）	V_0	$V_c=h_cA_c$		—

注：表中，Δh_c为固结下沉量，由轴向位移计测得（cm）；ΔV为固结排水量（实测或试验前后试样质量差换算）（cm^3）；ΔV_i为排水剪中剪切时的试样体积变化（cm^3），按体变管或排水管读数求得；ε_1为轴向应变（%）；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 ΔV-h_c及 ΔV-A_c的关系线备用。

2 主应力差（$\sigma_1-\sigma_3$）应按下式计算：

$$(\sigma_1-\sigma_3)=\frac{CR}{A_a}\times 10 \qquad (19.8.1\text{-}1)$$

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 有效主应力比 σ_1/σ_3应按下列公式计算：

$$\frac{\sigma_1'}{\sigma_3'}=\frac{(\sigma_1-\sigma_3)}{\sigma_3'}+1 \qquad (19.8.1\text{-}2)$$

$$\sigma_1' = \sigma_1 - u \tag{19.8.1-3}$$

$$\sigma_3' = \sigma_3 - u \tag{19.8.1-4}$$

式中：σ_1'、σ_3'——有效大主应力和有效小主应力(kPa)；

σ_1、σ_3——大主应力与小主应力(kPa)；

u——孔隙水压力(kPa)。

4 孔隙压力系数 B 和 A 应按下列公式计算：

$$B = \frac{u_0}{\sigma_3} \tag{19.8.1-5}$$

$$A = \frac{u_d}{B(\sigma_1 - \sigma_3)} \tag{19.8.1-6}$$

式中：u_0——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)。

19.8.2 制图应符合下列规定：

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，有效主应力比(σ_1'/σ_3')与轴向应变 ε_1 的关系曲线，孔隙压力 μ 与轴向应变 ε_1 的关系曲线，用 $\frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2}\left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2}\right]$ 与 $\frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2}\left[\frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2}\right]$ 作坐标的应力路径关系曲线。

2 破坏点的取值可以$(\sigma_1 - \sigma_3)$或(σ_1'/σ_3')的峰点值作为破坏点。如$(\sigma_1 - \sigma_3)$和(σ_1'/σ_3')均无峰值，应以应力路径的密集点或按一定轴向应变(一般可取 $\varepsilon_1 = 15\%$，经过论证也可根据工程情况选取破坏应变)相应的$(\sigma_1 - \sigma_3)$或(σ_1'/σ_3')作为破坏强度值。

3 应按下列规定绘制强度包线：

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

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

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

4）如各应力圆无规律，难以绘制各圆的强度包线，可按应力路径取值，即以 $\frac{\sigma'_1-\sigma'_3}{2}\left[\frac{(\sigma_1-\sigma_3)}{2}\right]$ 为纵坐标，$\frac{\sigma'_1+\sigma'_3}{2}\left[\frac{(\sigma_1+\sigma_3)}{2}\right]$ 为横坐标，绘制应力圆，作通过各圆之圆顶点的平均直线。根据直线的倾角及在纵坐标上的截距，应按下列公式计算 φ' 和 c'：

$$\varphi' = \sin^{-1}\tan\alpha \tag{19.8.2-1}$$

$$c' = \frac{d}{\cos\varphi'} \tag{19.8.2-2}$$

式中：α——平均直线的倾角(°)；

d——平均直线在纵轴上的截距(kPa)。

19.8.3 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.34～表 D.36 的规定。

20 无侧限抗压强度试验

20.1 一 般 规 定

20.1.1 土样应为饱和软黏土。

20.1.2 本试验方法加荷方式应为应变控制式。

20.2 仪 器 设 备

20.2.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 应变控制式无侧限压缩仪(图 20.2.1)：应包括负荷传感器或测力计、加压框架及升降螺杆等。应根据土的软硬程度选用不同量程的负荷传感器或测力计；

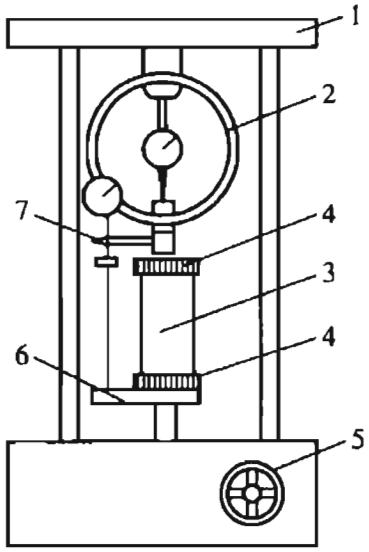


图 20.2.1 应变控制式无侧限压缩仪示意图

1—轴向加压架；2—轴向测力计；3—试样；4—传压板；5—手轮或电动转轮；6—升降板；7—轴向位移计

2 位移传感器或位移计(百分表)：量程 30mm，分度值 0.01mm；

3　天平：称量 1000g，分度值 0.1g。

20.2.2　本试验所用的其他仪器设备应符合下列规定：

1　重塑筒筒身应可以拆成两半，内径应为 3.5mm～4.0mm，高应为 80mm；

2　其他设备包括秒表、厚约 0.8cm 的铜垫板、卡尺、切土盘、直尺、削土刀、钢丝锯、薄塑料布、凡士林。

20.3　操 作 步 骤

20.3.1　试样制备应符合本标准第 19.3.1 条的规定。

20.3.2　试样直径可为 3.5cm～4.0cm。试样高度宜为 8.0cm。

20.3.3　将试样两端抹一薄层凡士林，当气候干燥时，试样侧面亦需抹一薄层凡士林防止水分蒸发。

20.3.4　将试样放在下加压板上，升高下加压板，使试样与上加压板刚好接触。将轴向位移计、轴向测力读数均调至零位。

20.3.5　下加压板宜以每分钟轴向应变为 1%～3%的速度上升，使试验在 8min～10min 内完成。

20.3.6　轴向应变小于 3%时，每 0.5%应变测记轴向力和位移读数 1 次；轴向应变达 3%以后，每 1%应变测记轴向位移和轴向力读数 1 次。

20.3.7　当轴向力的读数达到峰值或读数达到稳定时，应再进行 3%～5%的轴向应变值即可停止试验；当读数无稳定值时，试验应进行到轴向应变达 20%为止。

20.3.8　试验结束后，迅速下降下加压板，取下试样，描述破坏后形状，测量破坏面倾角。

20.3.9　当需要测定灵敏度时，应立即将破坏后的试样除去涂有凡士林的表面，加入少量切削余土，包于塑料薄膜内用手搓捏，破坏其结构，重塑成圆柱形，放入重塑筒内，用金属垫板，将试样挤成与原状样密度、体积相等的试样。然后应按本标准第 20.3.4 条～第 20.3.8 条的规定进行试验。

20.4 计算、制图和记录

20.4.1 试样的轴向应变应按下式计算：

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h}{h_0} \times 100 \tag{20.4.1}$$

20.4.2 试样的平均断面积应按下式计算：

$$A_a = \frac{A_0}{1 - 0.01\varepsilon_1} \tag{20.4.2}$$

20.4.3 试样所受的轴向应力应按下式计算：

$$\sigma = \frac{CR}{A_a} \times 10 \tag{20.4.3}$$

式中：σ——轴向应力(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)。

20.4.4 以轴向应力为纵坐标，轴向应变为横坐标，绘制应力应变曲线(图 20.4.4)。取曲线上的最大轴向应力作为无侧限抗压强度 q_u。最大轴向应力不明显时，取轴向应变为 15%对应的应力作为无侧限抗压强度 q_u。

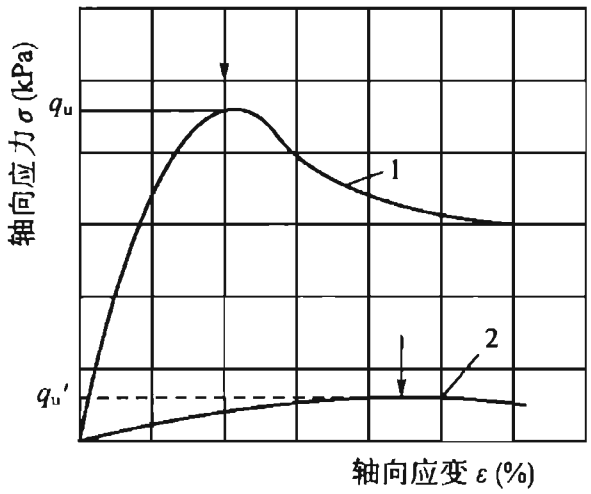


图 20.4.4 轴向应力与轴向应变关系曲线

1—原状试样；2—重塑试样

20.4.5 灵敏度应按下式计算：

$$S_t = \frac{q_u}{q'_u} \tag{20.4.5}$$

式中：S_t——灵敏度；

q_u——原状试样的无侧限抗压强度(kPa)；

q'_u——重塑试样的无侧限抗压强度(kPa)。

20.4.6 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.37 的规定。

21 直接剪切试验

21.1 一般规定

21.1.1 本试验方法分为快剪、固结快剪和慢剪三种。

21.1.2 快剪试验和固结快剪试验的土样宜为渗透系数小于 1×10^{-6}cm/s 的细粒土。

21.2 仪器设备

21.2.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 应变控制式直剪仪(图 21.2.1)：包括剪切盒(水槽、上剪切盒、下剪切盒)，垂直加压框架，负荷传感器或测力计及推动机构等，其技术条件应符合现行国家标准《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》GB/T 15406 的规定；

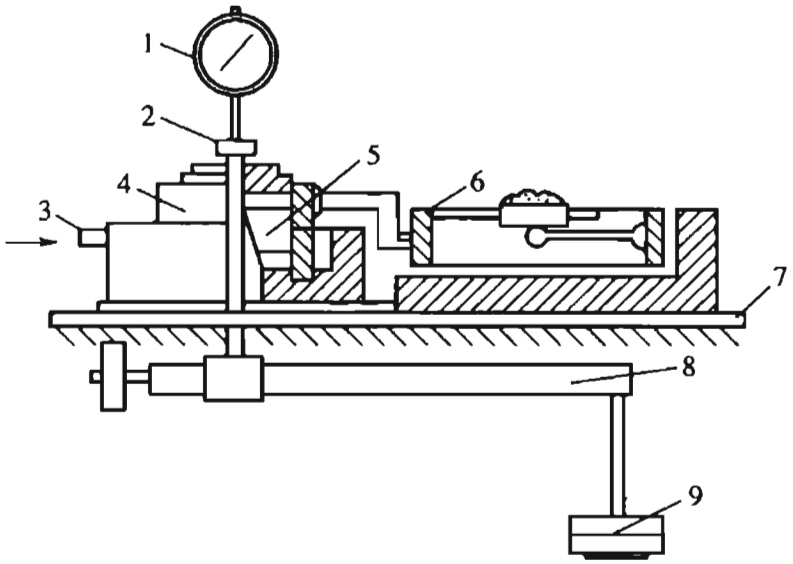


图 21.2.1 应变控制式直剪仪结构示意图

1—垂直变形百分表；2—垂直加压框架；3—推动座；4—剪切盒；5—试样；6—测力计；7—台板；8—杠杆；9—砝码

2　位移传感器或位移计(百分表):量程 5mm～10mm,分度值 0.01mm;

3　天平:称量 500g,分度值 0.1g。

21.2.2　本试验所用的其他仪器设备应符合下列规定:

1　环刀:内径 6.18cm,高 2cm;

2　其他:饱和器、削土刀或钢丝锯、秒表、滤纸、直尺。

21.3　操 作 步 骤

21.3.1　试样制备应按下列步骤进行:

1　黏性土试样制备:

1)从原状土样中切取原状土试样或制备给定干密度及含水率的扰动土试样。制备方法应符合本标准第 4.5 节的规定;

2)测定试样的含水率及密度,应符合本标准第 5.2 节及本标准第 6.2 节的规定。对于试样需要饱和时,应按本标准第 4.6 节规定的方法进行抽气饱和。

2　砂类土试样制备:

1)取过 2mm 筛孔的代表性风干砂样 1200g 备用。按要求的干密度称每个试样所需风干砂量,准确至 0.1g;

2)对准上下盒,插入固定销,将洁净的透水板放入剪切盒内;

3)将准备好的砂样倒入剪力盒内,拂平表面,放上一块硬木块,用手轻轻敲打,使试样达到要求的干密度。然后取出硬木块。

3　垂直压力应符合下列规定:每组试验应取 4 个试样,在 4 种不同垂直压力下进行剪切试验。可根据工程实际和土的软硬程度施加各级垂直压力,垂直压力的各级差值要大致相等。也可取垂直压力分别为 100kPa、200kPa、300kPa、400kPa,各个垂直压力可一次轻轻施加,若土质松软,也可分级施加以防试样挤出。

21.3.2 试样安装与剪切应按下列步骤进行：

1 快剪试验：

1) 对准上下盒，插入固定销。在下盒内放不透水板。将装有试样的环刀平口向下，对准剪切盒口，在试样顶面放不透水板，然后将试样徐徐推入剪切盒内，移去环刀。对砂类土，应按本标准第 21.3.1 条第 2 款的规定制备和安装试样；

2) 转动手轮，使上盒前端钢珠刚好与负荷传感器或测力计接触。调整负荷传感器或测力计读数为零。顺次加上加压盖板、钢珠、加压框架，安装垂直位移传感器或位移计，测记起始读数；

3) 应按本标准第 21.3.1 条第 3 款的规定施加垂直压力；

4) 施加垂直压力后，立即拔去固定销。开动秒表，宜采用 0.8mm/min～1.2mm/min 的速率剪切，每分钟 4 转～6 转的均匀速度旋转手轮，使试样在 3min～5min 内剪损。当剪应力的读数达到稳定或有显著后退时，表示试样已剪损，宜剪至剪切变形达到 4mm。当剪应力读数继续增加时，剪切变形应达到 6mm 为止，手轮每转一转，同时测记负荷传感器或测力计读数并根据需要测记垂直位移读数，直至剪损为止；

5) 剪切结束后，吸去剪切盒中积水，倒转手轮，移去垂直压力、框架、钢珠、加压盖板等，取出试样。需要时，测定剪切面附近土的含水率。

2 固结快剪试验：

1) 试样安装和定位应符合本条第 1 款第 1 项、第 2 项的规定。试样上下两面的不透水板改放湿滤纸和透水板；

2) 当试样为饱和样时，在施加垂直压力 5min 后，往剪切盒水槽内注满水；当试样为非饱和土时，仅在活塞周围包以湿棉花，防止水分蒸发；

3)在试样上施加规定的垂直压力后，测记垂直变形读数。当每小时垂直变形读数变化不大于0.005mm时，认为已达到固结稳定。试样也可在其他仪器上固结，然后移至剪切盒内，继续固结至稳定后，再进行剪切；

4)试样达到固结稳定后，剪切应按本条第1款第4项执行，剪切后取试样测定剪切面附近试样的含水率。

3 慢剪试验：

1)安装试样应符合本条第1款第1项、第2项的规定；试样固结应符合本条第2款第1项～第3项的规定。待试样固结稳定后进行剪切。剪切速率应小于0.02mm/min。也可按下式估算剪切破坏时间：

$$t_f = 50t_{50} \tag{21.3.2}$$

式中：t_f——达到破坏所经历的时间(min)；

t_{50}——固结度达到50%的时间(min)。

2)剪损标准应按本条第1款第4项的规定选取；

3)应按本条第1款第5项的规定进行拆卸试样及测定含水率。

21.4 计算、制图和记录

21.4.1 试样的剪应力应按下式计算：

$$\tau = \frac{CR}{A_0} \times 10 \tag{21.4.1}$$

式中：τ——剪应力(kPa)；

C——测力计率定系数(N/0.01mm)；

R——测力计读数(0.01mm)；

A_0——试样初始的面积(cm^2)。

21.4.2 以剪应力为纵坐标，剪切位移为横坐标，绘制剪应力τ与剪切位移ΔL关系曲线。

21.4.3 选取剪应力τ与剪切位移ΔL关系曲线上的峰值点或稳

定值作为抗剪强度 S。当无明显峰点时，取剪切位移 $\Delta L=4\text{mm}$ 对应的剪应力作为抗剪强度 S。

21.4.4 以抗剪强度 S 为纵坐标，垂直单位压力 p 为横坐标，绘制抗剪强度 S 与垂直压力 p 的关系曲线。根据图上各点，绘一视测的直线。直线的倾角为土的内摩擦角 φ，直线在纵坐标轴上的截距为土的黏聚力 c。各种试验方法所测得的 c、φ 值，快剪试验应表示为 c_q 及 φ_q；固结快剪试验应表示为 c_{cq} 及 φ_{cq}；慢剪试验应表示为 c_s 及 φ_s。

21.4.5 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.38、表 D.39 的规定。

22 排水反复直接剪切试验

22.1 一般规定

22.1.1 土样宜为超固结黏土及软弱岩石夹层的黏土。

22.1.2 本试验方法加荷方式为应变控制式。

22.2 仪器设备

22.2.1 应变控制式反复直剪仪(图 22.2.1)应包括变速设备、可逆电动机和反推夹具。

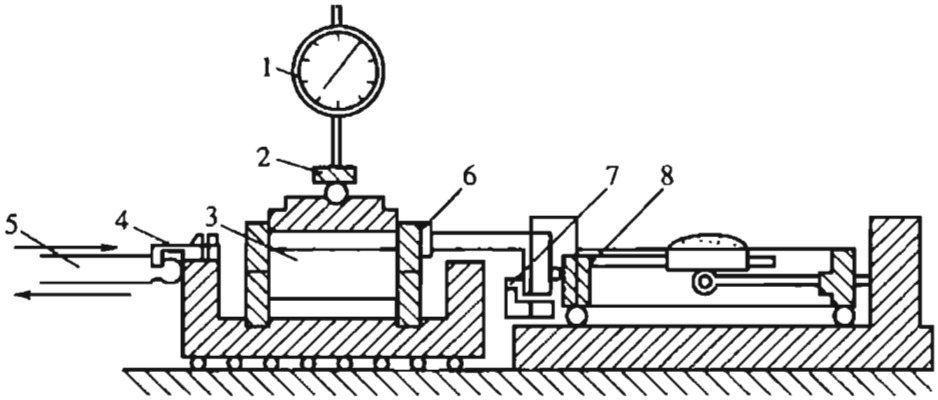


图 22.2.1 反复直剪仪结构示意图

1—垂直变形百分表;2—加压框架;3—试样;4—连接件;5—推动轴;6- 剪切盒;7—限制连接杆;8—测力计

22.2.2 其他仪器设备应符合本标准第 21.2.2 条的规定。

22.3 操作步骤

22.3.1 试样制备应按下列步骤进行:

1 对有软弱面的原状土样,先要分清软弱面的天然滑动方向,整平土样两端,使土样顶面平行于软弱面。在环刀内涂一薄层

凡士林。切土时，使软弱面位于环刀高度一半处，在试样面上标出软弱面的天然滑动方向。

2 对无软弱面的完整原状黏土或原状的超固结黏土，可用环刀按本标准第4.5节的规定制备试样，将试样放入剪切盒内。先在小于50kPa的垂直压力下，以较快的剪速进行预剪，使形成破裂面。当试样坚硬时，也可用刀、锯等工具先切割成一个剪切面，再加垂直荷载，待固结稳定后进行剪切。

3 对泥化带较厚的软弱夹层、滑坡层面，取靠近滑裂面1mm～2mm的土；对泥化带较薄的滑动面，取泥化的土；对无泥化带的裂隙面，取靠裂隙面两边的土。将所刮取的土样用纯水浸泡24h后调制均匀，制备成液限状态的土膏，将其填入环刀内。装填时，先沿环刀四周填入，然后填中部。应排除试样内的气体。

4 原状试样应取破裂面上的土测求含水率；对于扰动土试样，可取切下的余土测求含水率。

5 试样应达到饱和。饱和方法一般用抽气饱和法。

6 每组试验应制备4个试样，同组试样的密度最大允许差值应为$\pm 0.03 g/cm^3$。

22.3.2 试样剪切应按下列步骤进行：

1 先对仪器进行检查。然后将上、下剪切盒对准，插入固定销，顺次放入饱和的透水板、滤纸，将试样推入剪切盒内。再放上滤纸、透水板及加压盖板、钢珠、加压框架等，并安装垂直位移传感器或百分表。在加压板周围包以湿棉花，防止水分蒸发。然后记录负荷传感器或测记测力计和垂直位移的初始读数。

2 施加垂直压力应符合本标准第21.3.1条第3款的规定。对于液限状态的试样，应分级施加至规定压力，并应按本标准第21.3.2条第2款第3项的规定进行固结。

3 除含水率相当于液限试样的剪切外，一般原状土、硬黏土的试验，在剪切时，剪切盒应开缝，缝宽应保持在0.3mm～1.0mm。

4 转动手轮，使剪切盒前端的钢珠与测力计刚好接触，再调

整负荷传感器或测力计读数至零位。

5 拔出固定销，调节变速箱。对一般粉质土、粉质黏土及低塑性黏土，剪切速度不宜大于0.06mm/min；对高塑性黏土，剪切速度不宜大于0.02mm/min。开动电机，测读垂直位移和水平位移读数。在第1次剪切过程中，达到峰值剪应力之前，一般水平位移每隔0.2mm～0.4mm测记1次；过峰力后，每隔0.5mm测记1次。剪切时其每次正向剪切位移为8mm～10mm，试验不能中断，直至最大剪切位移，停止剪切。

6 倒转手轮，用反推设备应以不大于0.6mm/min的剪切速度将下剪切盒反向推至与上剪切盒重合位置，插入固定销。按上述步骤进行第2次剪切。一次剪切完成后，也允许相隔一定时间后再按上述步骤进行下一次剪切。如此，继续反复进行剪切至剪应力达到稳定值为止。粉质黏土、砂质黏土需5次～6次正向剪切，正向总剪切位移量为40mm～48mm；黏土需要3次～4次正向剪切，正向总剪切位移量为24mm～32mm。

7 剪切结束，测记垂直位移读数，吸去剪切盒中积水，尽快卸除位移传感器或位移计、垂直压力、加压框架，加压盖板及剪切盒等，并描述剪切面的破坏情况。取剪切面附近的土样测定剪后含水率。

22.4 计算、制图和记录

22.4.1 残余剪应力应按下式计算：

$$\tau_r = \frac{CR}{A_0} \times 10 \tag{22.4.1}$$

式中：τ_r——残余剪应力(kPa)。

22.4.2 绘制剪应力与剪切位移关系曲线。取每个试验曲线上第1次剪切时峰值作为破坏强度值；取曲线上最后稳定值作为残余强度，并绘制抗剪强度与垂直压力关系曲线，抗剪强度包括峰值强度和残余强度。直线的倾角为土的内摩擦角φ_r，直线在纵坐标轴

上的截距为土的黏聚力 c_r。

22.4.3 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.40 的规定。

23 无黏性土休止角试验

23.1 一 般 规 定

23.1.1 土样应为粒径小于 5mm 的无黏性土。

23.1.2 本试验方法测定的休止角分为风干状态和水下状态两种。

23.2 仪 器 设 备

23.2.1 休止角测定仪(图 23.2.1)圆盘直径分为 10cm 和 20cm 两种,分别适用于粒径小于 2mm 的无黏性和粒径小于 5mm 的无黏性土。

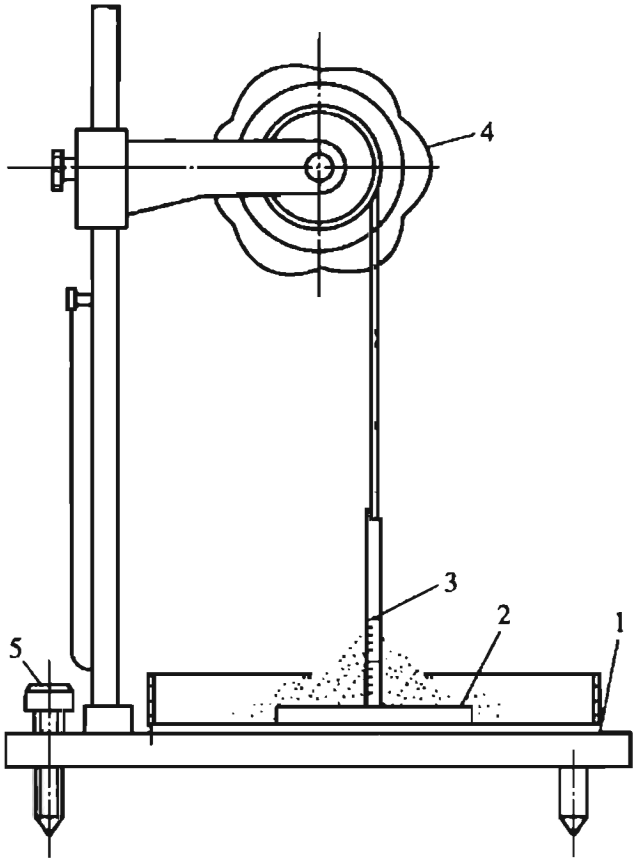


图 23.2.1 休止角测定仪

1—底盘;2—圆盘;3—铁杆;4—制动器;5—水平螺丝

23.2.2　附属设备包括勺子、水槽、烘箱。

23.3　操作步骤

23.3.1　取代表性的充分风干试样若干，并选择相应的圆盘。

23.3.2　转动制动器，使圆盘落在底盘中。

23.3.3　用小勺细心地沿铁杆四周倾倒试样。小勺离试样表面的高度应始终保持在1cm左右，直至圆盘外缘完全盖满为止。

23.3.4　慢慢转动制动器，使圆盘平稳升起，直至离开底盘内的试样为止。测记锥顶与铁杆接触处的刻度(h_{zc})。

23.3.5　当测定水下状态的休止角时，先将盛土圆盘慢慢地沉入水槽内。水槽内水面应达铁杆的0刻度处，应按本标准第23.3.3条的规定注入试样。应按本标准第23.3.4条的规定转动制动器，使圆盘下降。当锥体顶端达水面时，测记锥顶与铁杆接触处的刻度(h_{zm})。

23.3.6　根据测得的h_{zc}和h_{zm}值，计算其休止角。

23.3.7　本试验需进行2次平行测定，取其算术平均值，以整数(°)表示。

23.4　计算和记录

23.4.1　风干状态及水下休止角应按下列公式计算：

$$\alpha_c = \arctan\left(\frac{2h_{zc}}{d_z}\right) \qquad (23.4.1\text{-}1)$$

$$\alpha_m = \arctan\left(\frac{2h_{zm}}{d_z}\right) \qquad (23.4.1\text{-}2)$$

式中：α_c——风干状态下休止角(°)；

α_m——水下休止角(°)；

h_{zc}——风干状态下试样堆积圆锥高度(cm)；

h_{zm}——水下试样堆积圆锥高度(cm)；

d_z——圆锥底面直径(cm)。

23.4.2　本试验的记录格式应符合本标准附录D表D.41的规定。

24 自由膨胀率试验

24.1 一般规定

24.1.1 土样应为无结构情况下的黏土试样。

24.1.2 本试验应进行两次测定，当 $\delta_{ef}<60\%$ 时，最大允许差值应为±5%；当 $\delta_{ef}\geqslant 60\%$ 时，最大允许差值应为±8%。取其算术平均值，以整数(%)表示。

24.2 仪器设备

24.2.1 玻璃量筒容积应为 50mL，分度值应为 1mL。

24.2.2 量土杯内径应为 20mm，容积应为 10mL。

24.2.3 无颈漏斗上口直径应为 50mm～60mm，下口直径约为 5mm。

24.2.4 搅拌器由直杆和带孔圆板组成，圆板应略小于量筒直径。

24.2.5 天平称量应为 200g，分度值应为 0.01g。

24.2.6 标准筛的孔径应为 0.5mm。

24.2.7 其他设备包括漏斗支架、刮土刀。

24.3 操作步骤

24.3.1 选取有代表性的风干土样 100g，碾碎后全部过 0.5mm 筛，在 105℃～110℃下烘至恒量。取出放入干燥缸内冷却至室温。

24.3.2 将无颈漏斗放在支架上，漏斗下口对准量土杯中心并保持距离 10mm(图 24.3.2)。

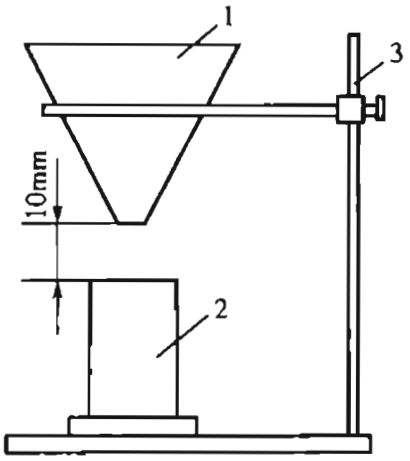


图 24.3.2　漏斗与量杯位置图

1—漏斗；2—量土杯；3—支架

24.3.3　应按图 24.3.2 装置用取土匙取适量试样倒入漏斗中，边倒边用细铁丝搅动。待量土杯装满土样并开始溢出时，移开漏斗，刮去杯口多余土，称量土杯中试样质量。将量杯中试样倒入匙内，再次倒入漏斗中，并落入量土杯，刮去多余土，称量土杯中试样的质量。两次测定的差值不得大于 0.1g。

24.3.4　向 50mL 的量筒内注入 30mL 纯水，并加入 5mL 浓度为 5%的纯氯化钠溶液。

24.3.5　将备好的试样倒入量筒内，用搅拌器上下搅拌溶液各 10 次，用纯水淋洗搅拌器和量筒壁至悬液达 50mL，静置 24h。

24.3.6　待悬液澄清后每隔 2h 测读 1 次土面高度，估读至 0.1mL，直至 6h 内两次读数差值不大于 0.2mL 为止，当土面倾斜时，读数应取中值。

24.4　计算和记录

24.4.1　自由膨胀率应按下式计算：

$$\delta_{ef} = \frac{V_{we} - V_0}{V_0} \times 100 \qquad (24.4.1)$$

式中：δ_{ef}——自由膨胀率(%)；

V_{we}——土样在水中膨胀稳定后的体积(mL)；

V_0——土样初始体积，即量土杯体积(mL)。

24.4.2 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.42 的规定。

25 膨胀率试验

25.1 一 般 规 定

25.1.1 土样应为原状试样或击实试样。

25.1.2 本试验方法分为无荷载膨胀率和有荷载膨胀率两种。

25.2 无荷载膨胀率试验

25.2.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 膨胀仪(图 25.2.1)：环刀直径 61.8mm，高 20mm；另备等直径环刀接环，高 10mm；

2 百分表：量程 10mm，分度值 0.01mm；

3 其他：天平、秒表、吸水球、刮土刀。

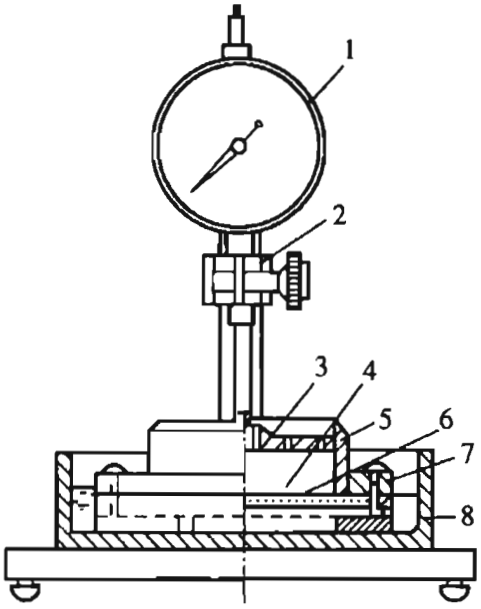


图 25.2.1 膨胀仪示意图

1—量表；2—表架；3—多孔板；4—试样；5—环刀；6—透水板；7—压板；8—水盒

25.2.2 无荷载膨胀率试验应按下列步骤进行：

1 在环刀内壁均匀涂抹薄层凡士林，切取代表性原状土试样或所需状态的击实试样，修平两面，制成高度为 20mm 的试样；

2 擦净环刀外壁，称环刀和土总质量，准确至 0.1g；

3 将烘干的透水板埋在切削下的碎土内 1h 后，取出刷净，放入仪器中；

4 将环刀钝口端用压环固定在底座上，使试样底面与透水板顶面密切接触，然后一起放到水盒中，将有孔盖板放在试样顶面，对准中心，安好百分表，记录初读数；

5 向水盒内注入纯水，使水自下而上进入试样，并保持水面高出试样 5mm，记录注水开始时间，按 5min、10min、20min、30min、1h、2h、3h、6h、12h 测读百分表读数；

6 当 6h 内变形不大于 0.01mm 时，可终止试验。移去百分表，吸去容器中的水，从环刀内推出试样，称量并烘至恒量；待冷却后再称量，计算胀后含水率和孔隙比。

25.2.3 膨胀含水率应按下式计算：

$$w_h = \frac{m_w}{m_d} \times 100 \tag{25.2.3}$$

式中：w_h——膨胀含水率(%)；

m_w——膨胀稳定后试样中水的质量(g)。

25.2.4 体膨胀率应按下式计算：

$$\delta_e = \frac{V_w - V_0}{V_0} \times 100 \tag{25.2.4}$$

式中：δ_e——体膨胀率(%)；

V_w——膨胀稳定后试样的体积(cm^3)；

V_0——试样初始体积(cm^3)。

25.2.5 任一时间的无荷载膨胀率应按下式计算：

$$\delta_t = \frac{Z_0 - Z_t}{h_0} \times 100 \tag{25.2.5}$$

式中：δ_t——时间 t 时的无荷载膨胀率(%)；

Z_0——试验开始时量表的读数(mm)；

Z_t——时间 t 时量表的读数(mm)；

h_0——试样初始高度(mm)。

25.2.6 当有需要时，可绘制膨胀率与时间关系曲线。

25.2.7 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.43、表 D.44的规定。

25.3 有荷载膨胀率试验

25.3.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 试样容器：应符合现行国家标准《土工试验仪器 固结仪 第1部分：单杠杆固结仪》GB/T 4935.1 的规定。另备等直径的环刀接环，高 10mm；

2 加压设备、变形测定设备：应符合本标准第 17.2.1 条第 2 款的规定；

3 其他：刮土刀、钢丝锯、天平、秒表。

25.3.2 有荷载膨胀率试验应按下列步骤进行：

1 在环刀内壁均匀涂抹薄层凡士林，切取代表性原状试样或所需状态的击实试样，修平两面制成高度 20mm 的试样；

2 擦净环刀外壁，称环刀和土总质量，应准确至 0.1g；

3 检查仪器的平衡状况及注水通路；

4 将烘干的透水板埋在切削下的碎土内 1h 后，取出刷净，放入仪器中；

5 将试样放到容器中，放上透水板和盖板，安好量表，施加 1kPa 的压力，使仪器各部分接触，调整量表，记下初读数；

6 根据试验所要求的荷载，可 1 次或分级施加，当每级荷载下每小时变形不大于 0.01mm 时，认为变形稳定；

7 至预定荷载变形稳定后，记下此时读数，开始向水盒内注入纯水，使水自下而上进入试样，并保持水面高出试样 5mm，记下注水开始时间；

8 浸水后每隔 2h 测记量表读数 1 次，当两次读数差值不大于 0.01mm 时，认为膨胀稳定，记下稳定读数；

9 试验结束，取出试样，称量并烘至恒量，计算胀后含水率和孔隙比。

25.3.3 特定荷载下的膨胀率应按下式计算：

$$\delta_{ep} = \frac{Z_{w1} - Z_{w2}}{h_0} \times 100 \qquad (25.3.3)$$

式中：δ_{ep}——压力 p 作用下的膨胀率(%)；

Z_{w1}——压力 p 作用下变形稳定后的量表读数(mm)；

Z_{w2}——压力 p 作用下膨胀稳定后的量表读数(mm)。

25.3.4 当有需要时，可绘制膨胀率与压力的关系曲线。

25.3.5 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.43、表 D.44 的规定。

26 收缩试验

26.1 一般规定

26.1.1 土样应为原状试样或击实试样。

26.1.2 本试验应在室温不高 30℃的条件下进行。

26.2 仪器设备

26.2.1 收缩仪(图 26.2.1)多孔板上孔的面积应大于总面积的 50%。

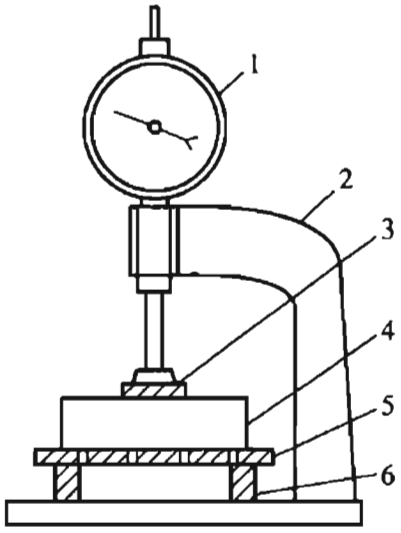


图 26.2.1 收缩仪

1—量表;2—支架;3—测板;4—试样;5—多孔板;6—垫块

26.2.2 环刀尺寸参数应符合现行行业标准《土工实验仪器 环刀》SL 370 的规定。

26.2.3 百分表量程应为 10mm,分度值应为 0.01mm。

26.2.4 天平量程应为 500g,分度值应为 0.1g。

26.2.5 其他设备包括烘箱、干燥缸、蜡封工具。

26.3 试验步骤

26.3.1 试样制备应按本标准第 4.3 节～第 4.5 节的步骤进行。

26.3.2 将制备好的试样推出环刀(当试样不紧密时,应采用风干脱环法),置于多孔板上,称试样和多孔板的质量,应准确至 0.1g。

26.3.3 装好百分表,记下初读数。

26.3.4 根据室内温度及收缩速度,宜每隔 1h～4h 测记百分表读数,并称整套装置和试样质量,准确至 0.1g;2d 后,每隔 6h～24h 测记百分表读数并称质量,直至两次百分表读数不变。称量时应保持百分表不变。在收缩曲线的第Ⅰ阶段内应取得不少于 4 个数据。

26.3.5 取出试样在 105℃～110℃下烘干,称干土质量。

26.3.6 应按本标准第 6.3 节蜡封法的规定测定烘干试样体积。

26.4 计算、制图和记录

26.4.1 不同时间的含水率应按下式计算:

$$w_t = \left(\frac{m_t}{m_d} - 1\right) \times 100 \tag{26.4.1}$$

式中:w_t——时间 t 时的试样含水率(%);

m_t——时间 t 时的试样质量(g)。

26.4.2 线缩率应按下式计算:

$$\delta_{st} = \frac{Z_t - Z_0}{h_0} \times 100 \tag{26.4.2}$$

式中:δ_{st}——时间 t 时的试样线缩率(%);

Z_t——时间 t 时的百分表读数(mm);

Z_0——百分表初始读数(mm)。

26.4.3 体缩率应按下式计算:

$$\delta_V = \frac{V_0 - V_d}{V_0} \times 100 \tag{26.4.3}$$

式中:δ_V——体缩率(%);

V_0——试样初始体积(环刀容积)(cm^3)；

V_d——试样烘干后的体积(cm^3)。

26.4.4 收缩系数应按下式计算：

$$\lambda_s = \frac{\Delta\delta_{si}}{\Delta w} \tag{26.4.4}$$

式中：λ_s——收缩系数；

$\Delta\delta_{si}$——收缩曲线上第Ⅰ阶段2点线缩率之差(%)；

Δw——相应于$\Delta\delta_{si}$两点含水率之差(%)。

26.4.5 以线缩率为纵坐标，含水率为横坐标，绘制关系曲线(图26.4.5)。延长第Ⅰ、Ⅲ阶段的直线段至相交，两线交点对应的横坐标值w_s即为原状土的缩限。

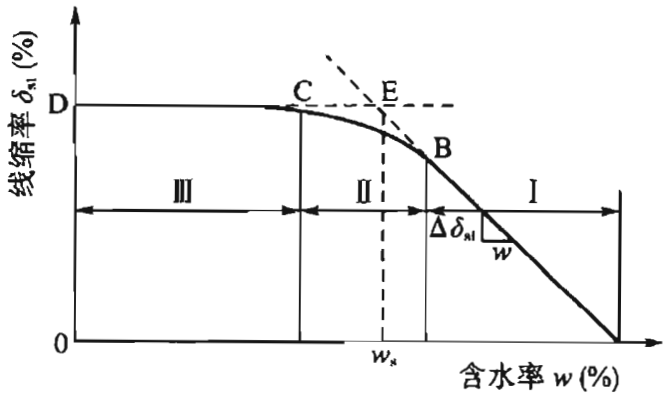


图26.4.5 线缩率与含水率关系曲线

26.4.6 收缩试验的记录格式应符合本标准附录D表D.45的规定。

27 膨胀力试验

27.1 一般规定

27.1.1 土样应为原状试样或击实试样。

27.1.2 本试验方法采用加荷平衡法。

27.2 仪器设备

27.2.1 试样容器应符合本标准第 25.3.1 条第 1 款的规定，另备等高 10mm 的直径环刀接环。

27.2.2 加压设备、变形测量设备应符合本标准第 25.3.1 条第 2 款的规定。

27.2.3 其他设备包括刮土刀、钢丝锯、天平、吸水球、分度值为 0.01mm 的量表。

27.3 操作步骤

27.3.1 试样安装应按本标准第 25.3.2 条第 1 款～第 5 款的规定进行。

27.3.2 向水盒内注入纯水，并保持水面高出试样 5mm。

27.3.3 试样开始膨胀，当膨胀量不大于 0.01mm 时，应施加平衡荷载，使量表指针仍指向初始读数，加荷载时应避免冲击力。

27.3.4 当平衡荷载足以产生仪器变形时，在加下一次平衡荷载时，此时量表指针应指向上一级平衡荷载相应的仪器变形位置。直到试样在某级平衡荷载下间隔 2h 不再膨胀时，则试样在该级荷载下达到稳定，允许膨胀量不应大于 0.01mm，记录施加的平衡荷载。

27.3.5 试验结束，吸去容器内水，取出试样，称试样质量，测定试

验后含水率并计算孔隙比。

27.4 计算和记录

27.4.1 膨胀力应按下式计算：

$$p_e = k\frac{W}{A} \times 10 \tag{27.4.1}$$

式中：p_e——膨胀力(kPa)；

k——固结仪杠杆比；

W——平衡荷载(N)；

A——面积(cm^2)。

27.4.2 膨胀力试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.46、表 D.47 的规定。

28 土的静止侧压力系数试验

28.1 一般规定

28.1.1 土样应为饱和的黏土或砂质土。

28.1.2 试样变形稳定标准为每小时变形不应大于0.01mm。

28.2 仪器设备

28.2.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 侧压力仪(图28.2.1)；

2 轴向加压设备分为杠杆式或磅秤式，最大负荷5kN；

3 周围压力量测设备包括压力传感器，最大允许误差应为±0.5%F.S，测量装置或三轴压缩仪的测压板。

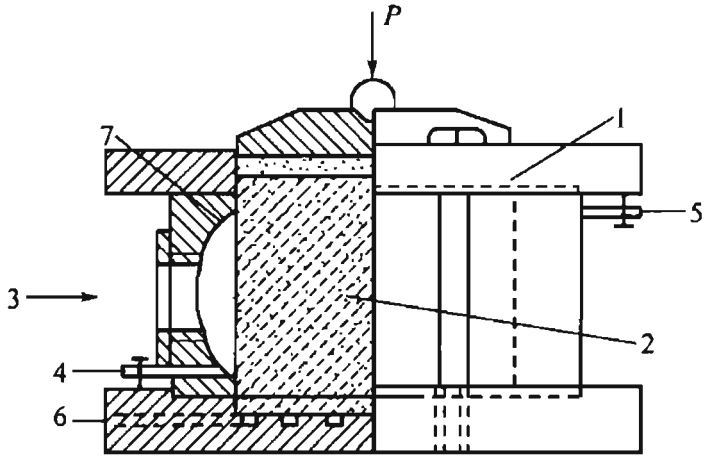


图28.2.1 侧压力仪试验装置示意图

1—侧压仪容器；2—试样；3—接压力传递系统；4—进水孔；5—排气孔阀；6—固结排水孔；7—()形圈

28.2.2 本试验所用的其他仪器设备应符合下列规定：

1　切土环刀：内径 61.8mm，高度 40mm；

2　校正样块：内径 61.8mm，高度 100mm；

3　其他设备：饱和器、推样器、硅脂。

28.3　操 作 步 骤

28.3.1　黏土试样的静止侧压力试验应按下列步骤进行：

1　试样分原状土和扰动土两类，原状土试样制备应按本标准第 4.5.1 条～第 4.5.5 条的规定进行；扰动土试样制备应按第 4.4.2 条～第 4.4.4 条的规定进行。

2　将带有环刀的试样装入框式饱和器内，应按本标准第 4.6 节的规定进行饱和，饱和度要求达到 95％以上。

3　将试样推出环刀，贴上滤纸条，套上橡皮膜并涂薄层硅脂，放入侧压仪容器内。安装试样前，打开进水阀，用调压筒抽出密闭受压室中的部分水，使橡皮膜凹进，试样推进容器后，再将抽出的水压回受压室，使试样与橡皮膜紧密接触，关进水阀。放上透水板、护水圈、传压板、钢珠。将容器置于加压框架正中，施加 1kPa 预压力。安装轴向位移计，并调至零位。

4　打开接侧压力量测装置的阀，调平电测仪表。测记受压室中水压力为零时的压力传感器读数（用三轴压缩仪的测压板测定受压室压力时，则调整零位指示器内水银面于指示线处，并测定压力表初始读数）。

5　施加轴向压力。压力等级应按 25kPa、50kPa、100kPa、200kPa、400kPa 施加。施加每级轴向压力后，随时调平电测仪表，应按 0.5min、1min、4min、9min、16min、25min、36min、49min……测记仪表读数和轴向变形，当用测压板测定受压室压力时，则随时调节调压筒，使零位指示器内水银面保持初始位置，按上述时间间隔测定压力表读数，直至变形稳定后再加下一级轴向压力。

6　试验结束后，关接侧压力装置阀，卸去轴向压力，拆除护水圈、传压板及透水板等。取出试样称量，并测定含水率。

28.3.2 砂质土的静止侧压力试验应按下列步骤进行：

1 根据要求的干密度和试样体积称取所需的风干砂样，准确至0.1g；

2 将砂样装入容器中，拂平表面，放上一块硬木块，用手轻轻敲打，使试样达到要求的干密度，然后取下硬木块。若采用饱和砂样，则将干砂放入水中煮沸，冷却后填入容器；

3 试样填好后，放上透水板、传压板，将容器置于加压架、正中，应按本标准第28.3.1条第3款～第6款的规定进行。

28.4 计算、制图和记录

28.4.1 周围压力应按下式计算：

$$\sigma_3' = C'(R_d - R_{d0}) \tag{28.4.1}$$

式中：σ_3'——密封受压室的水压力即侧向有效应力(kPa)；

C'——压力传感器比例常数(kPa/mV)；

R_d——试样竖向变形稳定时电测仪表读数(mV)；

R_{d0}——周围压力等于零时，电测仪表的初读数(mV)。

28.4.2 以有效轴向压力为横坐标，有效周围压力为纵坐标，绘制σ_1'-σ_3'关系曲线，其斜率为静止侧压力系数，即$K_0 = \sigma_3'/\sigma_1'$。

28.4.3 本试验的记录格式应符合本标准附录D表D.48的规定。

29 振动三轴试验

29.1 一般规定

29.1.1 土样应为饱和的细粒土或砂土，其他粗粒土也可参照执行。

29.1.2 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。动力变形特性试验宜采用固结不排水振动试验条件。动残余变形特性试验宜采用固结排水振动试验条件。

29.2 仪器设备

29.2.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

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。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 29.2.1）：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：用于轴向激振，施加轴向动应力，包括液压油源、伺服控制器、伺服阀、轴向作动器等。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：由用于量测轴向载荷、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。

2 附属设备应符合本标准第 19.2.1 条第 2 款的规定。

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

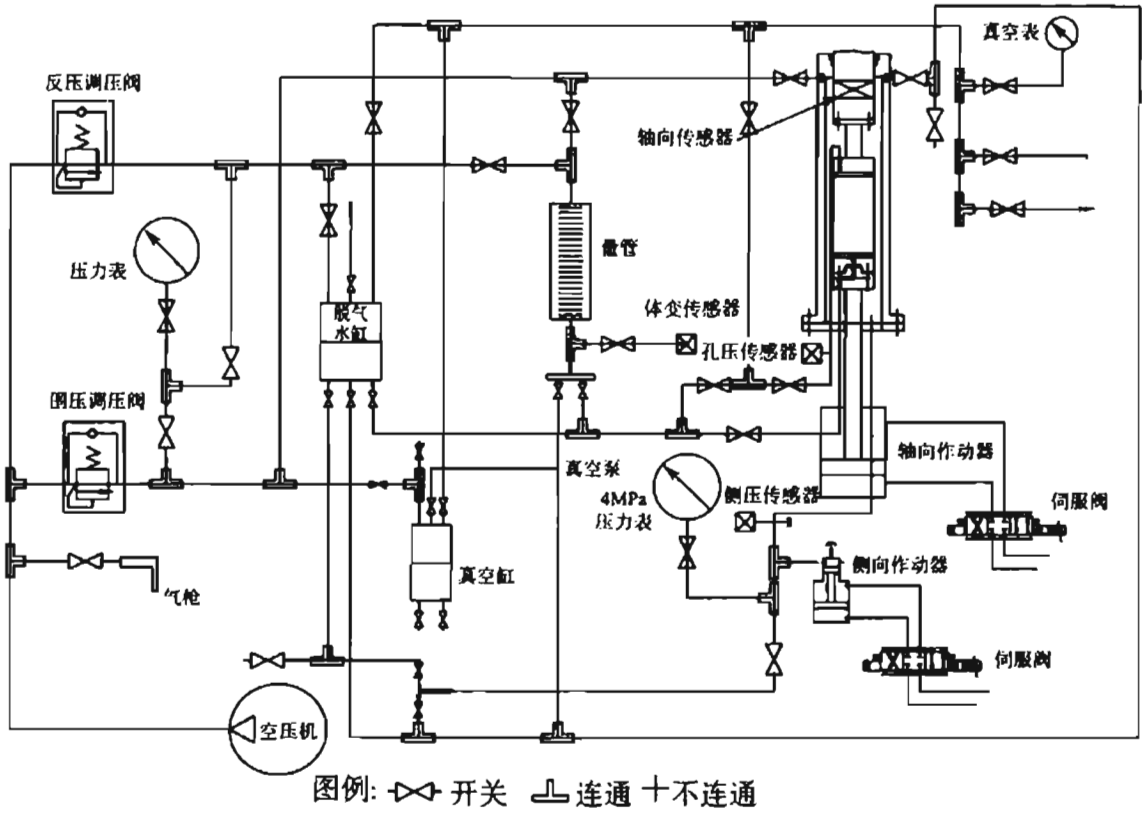


图 29.2.1 液压伺服单向激振式振动三轴仪示意图

29.2.2 压力室、静力控制系统、孔隙水压力量测系统的检查应符合本标准第 19.2.2 条第 1 款～第 3 款的规定。

29.3 操作步骤

29.3.1 试样制备应符合下列规定：

1 本试验采用的试样最小直径为 39.1mm，最大直径为 101mm，高度以试样直径的 2 倍～2.5 倍为宜；

2 原状土样的试样制备应按本标准第 19.3.1 条第 2 款的规定进行；

3 扰动土样的试样制备应按本标准第 19.3.1 条第 3 款的规

定进行；

4 砂土试样制备应按本标准第 19.3.1 条第 4 款的规定进行；

5 对填土，宜模拟现场状态用密度控制。对天然地基，宜用原状试样。

29.3.2 试样饱和应符合下列规定：

1 抽气饱和应按本标准第 19.3.2 条第 1 款的规定进行；

2 水头饱和应按本标准第 19.3.2 条第 2 款的规定进行；

3 反压力饱和应按第 19.3.2 条第 3 款的规定进行。

29.3.3 试样安装应符合下列规定：

1 打开供水阀，使试样底座充水排气，当溢出的水不含气泡时，应按本标准第 19.5.1 条第 1 款～第 6 款的规定安装试样；

2 砂样安装在试样制备过程中完成。

29.3.4 试样固结应符合下列规定：

1 等向固结应先对试样施加 20kPa 的侧压力，然后逐级施加均等的周围压力和轴向压力，直到周围压力和轴向压力相等并达到预定压力；

2 不等向固结应在等向固结变形稳定后，逐级增加轴向压力，直到预定的轴向压力，加压时勿使试样产生过大的变形；

3 对施加反压力的试样应按本标准第 19.3.2 条第 3 款的规定施加反压力；

4 施加压力后打开排水阀或体变管阀和反压力阀，使试样排水固结。固结稳定标准，对黏土和粉土试样，1h 内固结排水量变化不大于 0.1cm^3，砂土试样等向固结时，关闭排水阀后 5min 内孔隙压力不上升；不等向固结时，5min 内轴向变形不大于 0.005mm；

5 固结完成后关排水阀，并计算振前干密度。

29.3.5 动强度（抗液化强度）试验应按下列步骤进行：

1 动强度（抗液化强度）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（抗液化强度）。破坏标准可取应变等于5%或孔隙水压力等于周围压力，也可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周～10周左右停止振动。

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个～3个固结比。在同一固结比下，可选择1个～3个不同的周围压力。每一周围压力下用4个～6个试样。可分别选择10周、20周～30周和100周等不同的振动破坏周次，应按本标准第29.3.5条的规定进行试验。

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。

29.3.6 动力变形特性试验应按下列步骤进行：

1 在动力变形特性试验中，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。动力变形特性试验一般采用正弦波激振，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，一般每个试样只能进行一个动应力试验。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 个～5 个不同的侧压力试验，每一侧压力用 3 个～5 个试样，每个试样采用 4 级～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。

29.3.7　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一般采用正弦波激振，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个～3个固结比。在同一固结比下，可选择1个～3个不同的周围压力。每一周围压力下用3个～5个试样，应按本条的规定进行试验。

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。

29.4 计算、制图和记录

29.4.1 试样的静、动应力指标应按下列规定计算：

1 固结应力比应按下式计算：

$$K_c = \frac{\sigma'_{1c}}{\sigma'_{3c}} = \frac{\sigma_{1c} - u_0}{\sigma_{3c} - u_0} \tag{29.4.1-1}$$

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 轴向动应力应按下式计算：

$$\sigma_d = \frac{W_d}{A_c} \times 10 \tag{29.4.1-2}$$

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 轴向动应变应按下式计算：

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta h_d}{h_c} \times 100 \qquad (29.4.1\text{-}3)$$

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 体积应变应按下式计算：

$$\varepsilon_V = \frac{\Delta V}{V_c} \times 100 \qquad (29.4.1\text{-}4)$$

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)。

29.4.2 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，根据本标准第29.3.5条第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应按下列公式计算：

$$\frac{\tau_d}{\sigma'_0} = \frac{\sigma_d}{2\sigma'_0} \qquad (29.4.2\text{-}1)$$

$$\tau_d = \frac{\sigma_d}{2} \qquad (29.4.2\text{-}2)$$

$$\sigma'_0 = \frac{\sigma'_{1c} + \sigma'_{3c}}{2} \qquad (29.4.2\text{-}3)$$

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)。

29.4.3 动强度试验的试验曲线可按下列规定进行绘图：

1　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 R_f 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；

2　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；

3　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；

4　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；

5　以动孔隙水压力为纵坐标，以振次为横坐标，根据试验结果在单对数坐标上绘制动孔隙水压力比与振次的关系曲线；

6　以动孔压比为纵坐标，以破坏振次 N_f 为横坐标，绘制振次比与动孔压比的关系曲线；

7　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，以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。

29.4.4　动弹性模量和阻尼比应按下列公式计算：

1　动弹性模量：

$$E_d = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_d} \times 100 \qquad (29.4.4\text{-}1)$$

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：

$$\lambda = \frac{1}{4\pi}\frac{A_z}{A_s} \qquad (29.4.4\text{-}2)$$

式中：λ——阻尼比；

A_z——滞回圈 ABCDA(图 29.4.4-1)的面积(cm^2)；

A_s——三角形 OAE 的面积(cm^2)。

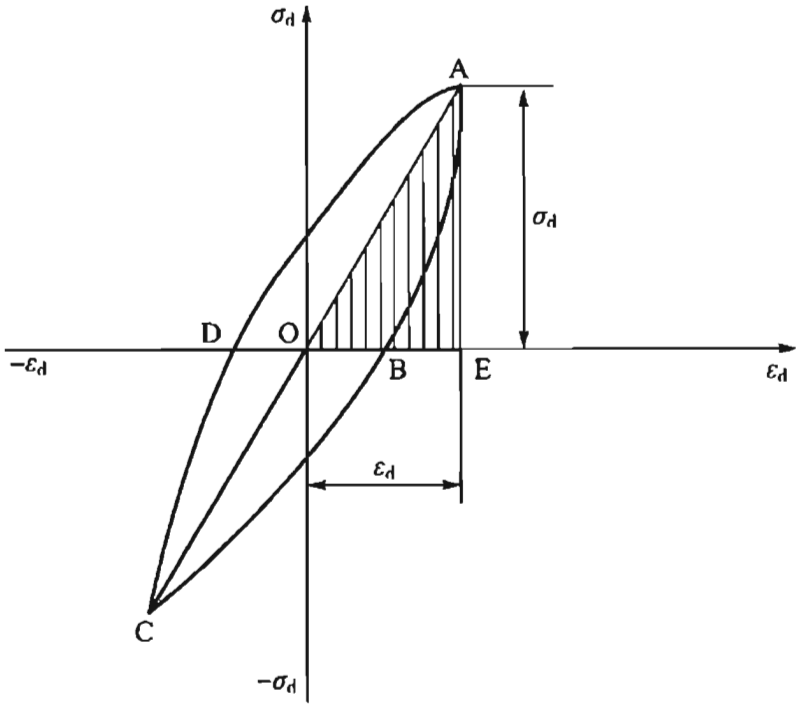


图 29.4.4-1　应力应变滞回圈

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，可按下列公式进行换算：

$$G_d = \frac{E_d}{2(1+\mu)} \tag{29.4.4-3}$$

$$\gamma_d = \varepsilon_d(1+\mu) \tag{29.4.4-4}$$

式中：G_d——动剪切模量(kPa)；

μ——泊松比；

γ_d——动剪应变(%)。

4　最大动弹性模量可按下列规定求得：绘制 ε_d/σ_d(即 $1/E_d$)与动应变 ε_d 的关系曲线(图 29.4.4-2)，将曲线切线在纵轴上的截距的倒数作为最大动弹性模量。有条件时，可将在微小应变($\varepsilon_d \leqslant 1\times10^{-5}$)测得的动弹性模量作为最大动弹性模量。

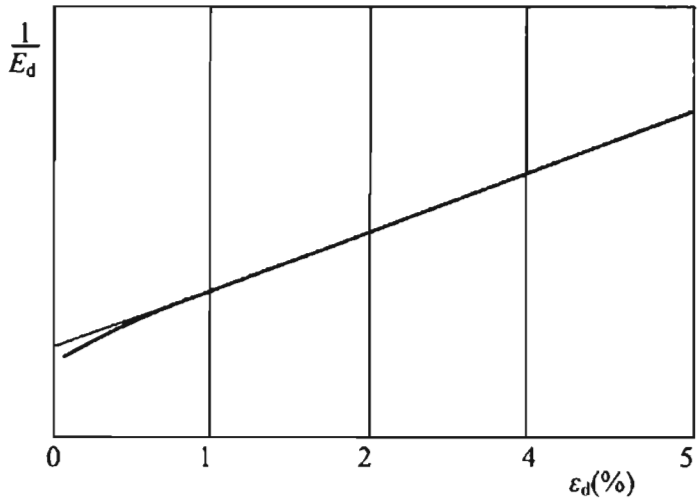


图 29.4.4-2　最大动弹性模量的确定示意图

29.4.5　残余变形计算应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、残余轴应变与振次关系曲线。

29.4.6　动强度(抗液化强度)试验记录和计算格式应符合本标准附录 D 表 D.49、表 D.50 的规定。动弹性模量和阻尼比试验记录和计算格式应符合本标准附录 D 表 D.51、表 D.52 的规定。动残余变形特性试验记录和计算格式应符合本标准附录 D 表 D.53、表 D.54 的规定。

30 共振柱试验

30.1 一般规定

30.1.1 土样应为饱和的细粒土或砂土。

30.1.2 本试验宜制备多个性质相同的试样，在不同周围压力和不同固结比下进行试验。周围压力和固结比宜根据工程实际确定。可采用1个～4个周围压力，1个～3个固结比。

30.2 仪器设备

30.2.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 共振柱试验仪：按试样约束条件，可分为一端固定一端自由及一端固定一端用弹簧和阻尼器支承两类；按激振方式，可分为稳态强迫振动法和自由振动法两类；按振动方式，可分为扭转振动和纵向振动两类；

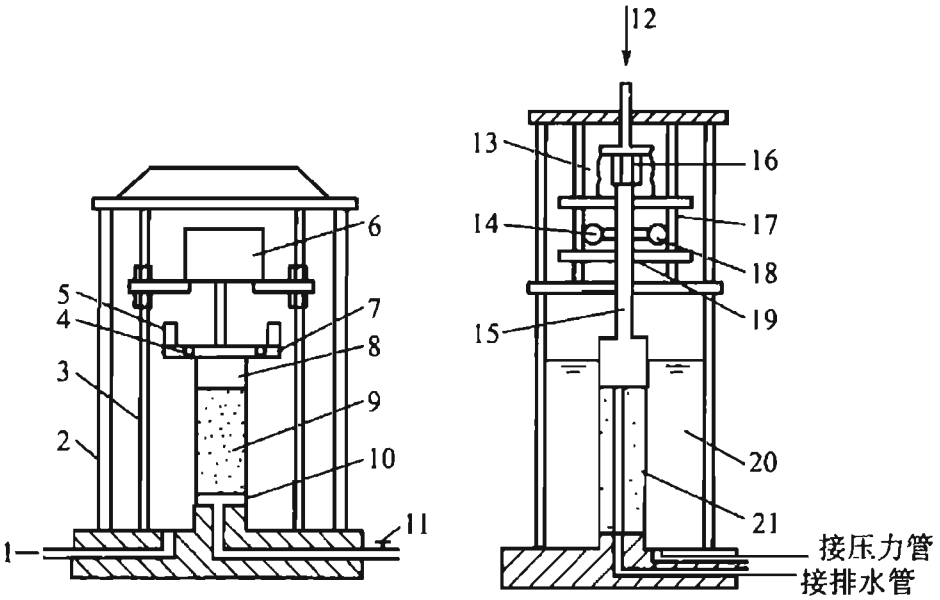
2 压力室(图30.2.1)：内部置放激振器、加速度计及试样，压力室底座和试样上压盖板应具有辐射状的凸条；

3 静力控制系统：应符合本标准第29.2.1条第1款第2项的规定；

4 激振控制系统：包括信号发生器、功率放大器、D/A转换器和计算机；

5 量测系统：包括加速度计、电荷放大器、频率计、示波器或A/D转换器和计算机。

30.2.2 本试验所用的其他仪器设备应符合本标准第19.2.1条第2款的规定。



(a) 等压共振柱示意图　　(b) 轴向和侧向不等压共振柱示意图

图 30.2.1　共振柱主机示意图

1—接周围压力系统；2—压力室外罩；3—支架；4—加速度计；5—扭转激振器；6—轴向激振器；7—驱动板；8—上压盖；9—试样；10—透水板；11—接排水管；12—轴向压力；13—弹簧；14—激振器；15—旋转轴；16—压力传感器；17—导向杆；18—加速度计；19—上下活动框架；20—水；21—试样

30.3　操 作 步 骤

30.3.1　试样制备应符合下列规定：

1　本试验采用的试样直径为 50mm，试样高度为直径的 2 倍～2.5 倍；

2　原状土样的试样制备应按本标准第 19.3.1 条第 2 款的规定进行；

3　扰动土样的试样制备应按本标准 19.3.1 条第 3 款的规定进行；

4　砂性土的试样制备应按本标准第 19.3.1 条第 4 款的规定进行。

30.3.2　试样饱和应符合下列规定：

1　抽气饱和应按本标准第19.3.2条第1款的规定进行；

2　水头饱和应按本标准第19.3.2条第2款的规定进行；

3　饱和度检查和反压力饱和应按本标准第19.3.2条第3款的规定进行。

30.3.3　试样安装和固结应按下列步骤进行：

1　打开量管阀，使试样底座充水，当溢出的水不含气泡时，关量管阀，在底座透水板上放湿滤纸。

2　将试样放在底座上，并压入凸条中，在其周围贴7条～9条宽6mm的湿滤纸条，用撑膜筒将乳胶膜套在试样外，下端与底座扎紧，取下撑膜筒。用对开圆模夹紧试样，将乳胶膜上端翻出模外。

3　对扭转振动，将加速度计和激振驱动系统水平固定在驱动板上，再将驱动板置于试样上端，将旋转轴与试样帽上端连接，翻起乳胶膜并扎紧在上压盖上（试样帽），按线圈座编号，将对应的线圈套进磁钢外极，磁极中心至线圈上、下端的距离应相等。两对线圈的高度应一致，线圈两侧的磁隙应相同，并对称于线圈支架，按线圈上的标志接线。

4　对轴向振动，将加速度计垂直固定在上压盖上，再将上压盖与激振器相连。当上压盖上下活动自如时，垂直地置于试样上端，翻起乳胶膜并扎紧在上压盖上。

5　用引线将加力线圈与功率放大器相连，并将加速度计与电荷放大器相连。

6　拆除对开圆模，装上压力室外罩。

7　转动调压阀，逐级施加至预定的周围压力，一端固定另一端弹簧支承的可进行不等向固结。打开排水阀，直至固结稳定。稳定标准应符合本标准第29.3.4条第4款的规定，关排水阀。

30.3.4　稳态强迫振动法应按下列步骤进行：

1　开启信号发生器、示波器、电荷放大器和频率计电源，预

热，打开计算机数据采集系统。

2 将信号发生器的振幅控制旋钮调至零位，开启功率放大器电源预热 5min，将功能开关置于共振挡。

3 将信号发生器输出调至给定值，连续改变激振频率，由低频逐渐增大，直至系统发生共振，读出最大电压值，此时频率计读数即为共振频率。测记共振频率和相应的电压值，由电压值确定动应变或动剪应变。

4 进行阻尼比测定时，当激振频率达到系统共振频率后，继续增大频率，这时振幅逐渐减小，测记每一激振频率和相应的振幅电压值。如此继续，测记 7 组～10 组数据，关仪器电源。以振幅为纵坐标，以频率为横坐标，绘制振幅与频率关系曲线。

5 宜逐级施加动应变幅或动应力幅进行测试，后一级的振幅可控制为前一级的 1 倍。在同一试样上选用允许施加的动应变幅或动应力幅的级数时，应避免孔隙水压力明显升高。

6 关闭仪器电源，退去压力，取下压力室罩，拆除试样，需要时测定试样的干密度和含水率。

30.3.5 自由振动法应按下列步骤进行：

1 开启电荷放大器电源，预热，开计算机系统电源。

2 将试验程序输入计算机，开功率放大器电源预热 5min，在计算机控制下进行试验。计算机指令 D/A 转换器控制驱动系统，对试样施加瞬时扭矩后立即卸除，使试样自由振动。在振动过程中，加速度计的信号经过电荷放大器和 A/D 转换器输入计算机处理，得到振幅衰减曲线。

3 宜逐级施加动应变幅或动应力幅进行测试，后一级的振幅可控制为前一级的 1 倍。在每一级激振力振动下试验后，逐次增大激振力，继续进行试验得到在试样应变幅值增大后测试的模量和阻尼比。一般应变幅值增大到 1×10^{-4} 为止。

4 关闭仪器电源，退除压力，取下压力室外罩，拆除试样，需要时测定试样的干密度和含水率。

30.4 计算、制图和记录

30.4.1 试样的动应变按下列公式计算：

1 动剪应变：

$$\gamma = \frac{A_d d_c}{3 d_1 h_c} \times 100 = \frac{U d_c}{3 d_1 h_c \beta \omega^2} \times 100 = \frac{U d_c}{12 d_1 h_c \beta \pi^2 f_{nt}^2} \times 100 \tag{30.4.1-1}$$

式中：γ——动剪应变(%)；

A_d——安装加速度计处的动位移(cm)；

d_c——试样固结后的直径(cm)；

d_1——加速度计到试样轴线的距离(cm)；

h_c——试样固结后的高度(cm)；

U——加速度计经放大后的电压值(mV)；

β——标定系数[mV/(981cm·s^2]；

ω——共振圆频率(rad/s)；

f_{nt}——试验实测扭转共振频率(Hz)。

2 动轴向应变：

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta h_d}{h_c} \times 100 = \frac{U}{\beta \omega^2 h_c} \times 100 \tag{30.4.1-2}$$

式中：Δh_d——动轴向变形(cm)。

30.4.2 扭转共振时的动剪切模量应按下式计算：

$$G_d = \left(\frac{2\pi f_{nt} h_c}{\beta_s}\right)^2 \rho_0 \times 10^{-4} \tag{30.4.2}$$

式中：G_d——动剪切模量(kPa)；

f_{nt}——试验时实测的扭转共振频率(Hz)；

β_s——扭转无量纲频率因数；

ρ_0——试样密度(g/cm^3)。

30.4.3 扭转无量纲频率因数应根据试样的约束条件分别按下列公式计算：

1 无弹簧支承：

$$\beta_s \tan\beta_s = \frac{I_0}{I_t} = \frac{m_0 d^2}{8 I_t} \qquad (30.4.3\text{-}1)$$

式中：I_0——试样的转动惯量（g·cm²）；

I_t——试样顶端附加物的转动惯量（g·cm²）；

m_0——试样质量（g）；

d——试样直径（cm）。

2 有弹簧支承：

$$\beta_s \tan\beta_s = \frac{I_0}{I_t} \frac{1}{1 - \left(\frac{f_{0t}}{f_{nt}}\right)^2} \qquad (30.4.3\text{-}2)$$

式中：f_{0t}——无试样时转动振动各部分的扭振共振频率（Hz）；

f_{nt}——试验时实测的扭转共振频率（Hz）。

30.4.4 轴向共振时的动弹性模量应按下式计算：

$$E_d = \left(\frac{2\pi f_{nl} h_c}{\beta_L}\right)^2 \rho_0 \times 10^{-4} \qquad (30.4.4)$$

式中：E_d——动弹性模量（kPa）；

f_{nl}——试验时实测的纵向振动共振频率（Hz）；

β_L——纵向振动无量纲频率因数。

30.4.5 纵向振动无量纲频率因数应根据试样的约束条件分别按下列公式计算：

1 无弹簧支承：

$$\beta_L \tan\beta_L = \frac{m_0}{m_{ft}} \qquad (30.4.5\text{-}1)$$

式中：m_0——试样的质量（g）；

m_{ft}——试样顶端附加物的质量（g）。

2 有弹簧支承：

$$\beta_L \tan\beta_L = \frac{m_0}{m_T} \frac{1}{1 - \left(\frac{f_{0l}}{f_{nl}}\right)^2} \qquad (30.4.5\text{-}2)$$

式中：f_{0l}——无试样时系统各部分的纵向振动共振频率（Hz）；

f_{nl}——试验时实测的纵向振动共振频率（Hz）。

30.4.6 土的阻尼比应按下列公式计算：

1 无弹簧支承：

1）自由振动法：

$$\lambda = \frac{1}{2\pi}\frac{1}{N}\ln\frac{A_1}{A_{N+1}} \tag{30.4.6-1}$$

式中：λ——阻尼比；

N——计算所取的振动次数；

A_1——停止激振后第 1 周振动的振幅(mm)；

A_{N+1}——停止激振后第 $N+1$ 周振动的振幅(mm)。

2）稳态强迫振动法：

$$\lambda = \frac{1}{2}\left(\frac{f_2 - f_1}{f_n}\right) \tag{30.4.6-2}$$

式中：f_1、f_2——振幅与频率关系曲线上最大振幅值的 70.7%处所对应的频率(Hz)；

f_n——最大振幅值所对应的频率(Hz)。

2 有弹簧支承：

1）自由扭转振动法：

$$\lambda = \frac{\delta_t(1+s_t) - \delta_{0t}s_t}{2\pi} \tag{30.4.6-3}$$

$$s_t = \frac{I_t}{I_0}\left(\frac{f_{0t}\beta_s}{f_{nt}}\right)^2 \tag{30.4.6-4}$$

式中：δ_t、δ_{0t}——有试样和无试样时系统扭转振动时的对数衰减率；

s_t——扭转振动时的能量比。

2）自由纵向振动法：

$$\lambda = \frac{\delta_l(1+s_l) - \delta_{0l}s_l}{2\pi} \tag{30.4.6-5}$$

$$s_l = \frac{m_t}{m_0}\left(\frac{f_{0l}\beta_L}{f_{nl}}\right)^2 \tag{30.4.6-6}$$

式中：δ_l、δ_{0l}——有试样和无试样时系统纵向振动时的对数衰减率；

s_1——纵向振动时的能量比。

30.4.7 以动剪应变(或轴向应变)为横坐标,动剪切模量或动弹模量为纵坐标,在半对数纸上绘制不同周围压力下动剪应变或动弹模量与动剪切模量或轴向应变关系曲线。取微小动剪应变($\gamma<1\times10^{-5}$)下的动剪切模量为最大动剪切模量 G_{dmax}。

30.4.8 以动剪应变或轴向应变为横坐标,动剪切模量比或动弹模量比为纵坐标,在半对数纸上绘制周围压力下动剪应变或轴向应变与动剪切模量比或动弹模量比关系的归一化曲线。

30.4.9 以动剪应变或轴向动应变为横坐标,阻尼比为纵坐标,在半对数纸上绘制关系曲线。

30.4.10 共振柱试验记录格式应符合本标准附录 D 表 D.55～表 D.58 的规定。

31 土的基床系数试验

31.1 一般规定

31.1.1 土样应为饱和的黏土或砂质土。

31.1.2 本试验采用应力加荷法。

31.2 仪器设备

31.2.1 本试验主要仪器设备应符合本标准第 19.2.1 条的规定。

31.2.2 试验时的仪器设备应符合本标准第 19.2.2 条的规定。

31.3 操作步骤

31.3.1 试样的制备和饱和应按本标准第 19.3.1 条、第 19.3.2 条的规定进行。

31.3.2 土的静止侧压力系数 K_0 值应按本标准第 28.4 节的规定计算。

31.3.3 试样安装和固结应符合下列规定：

1 试样安装应符合本标准第 19.5.1 条的规定；

2 将试样在 K_0 条件下进行排水固结，侧向围压应按下列公式计算，排水固结应按本标准第 19.5.2 条的规定进行：

$$\sigma_3 = K_0 \sigma_1 \tag{31.3.3-1}$$

$$\sigma_1 = \gamma h_0 \tag{31.3.3-2}$$

式中：σ_1——轴向应力(kPa)；

σ_3——侧向围压(kPa)；

K_0——土的静止侧压力系数；

γ——上覆土层重度(kN/m^3)；

h_0——上覆土层厚度(m)。

31.3.4 固结稳定后，控制主应力增量 $\Delta\sigma_1$ 与围压增量 $\Delta\sigma_3$ 比值 n 为某一固定数值，应分别按 $n=0$、0.1、0.2、0.3 等不同应力路径进行，剪切速率宜采用 0.003%/min～0.012%/min，剪切过程中应打开排水阀。

31.3.5 试验结束后，关闭电动机，下降升降台，开排气孔，排去压力室内的水，拆除压力室罩，揩干试样周围的余水，脱去试样外的橡皮膜，描述试验后试样形状，称试样质量，测定试验后含水率。

31.4 计算、制图和记录

31.4.1 试验结果的整理应按本标准第 19.8 节的规定进行。

31.4.2 以主应力增量为纵坐标，轴向应变为横坐标，绘制 $\Delta\sigma_1$-ε_1 关系曲线；以主应力增量为纵坐标，轴向变形量为横坐标，绘制不同应力比的 $\Delta\sigma_1$-Δh_i 关系曲线。

31.4.3 取 $\Delta\sigma_1$-Δh_i 关系曲线初始段切线模量或取对应应力段的割线模量为基床系数。

31.4.4 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.59 的规定。

32 冻土含水率试验

32.1 一般规定

32.1.1 冻土的有机质含量不应大于干土质量的5%。当冻土的有机质含量在5%～10%之间时，仍可采用烘干法，但应注明有机质含量。

32.1.2 本试验的标准方法为烘干法。在现场或需要快速测定含水率时，对层状和网状结构的冻土可采用联合测定法。

32.2 烘 干 法

32.2.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 烘箱：可采用电热烘箱或温度能保持105℃～110℃的其他加热干燥设备；

2 天平：称量500g，分度值0.1g；称量5000g，最小分度值1g；

3 称量盒：可将盒调整为恒量并定期校正；

4 其他：干燥器、搪瓷盘、切土刀、吸水球、滤纸。

32.2.2 烘干法试验应按下列步骤进行：

1 整体状构造（肉眼不易看到显著冰晶）的黏质土或砂质土：

1）每个试样的质量不宜少于50g，试验应符合本标准第5.2.2条、第5.2.3条的规定；

2）试验应进行两次平行测定，取其算术平均值，其最大允许平行差值应符合表32.2.2的规定。

2 对层状和网状构造的冻土，应采用平均试样法测定含水率：

1）将冻土样用四分法取出1000g～2000g，视冻土结构均匀程度而定，较均匀的可少取，反之多取。称量准确至1g，放入搪瓷盘中使其融化；

表 32.2.2 冻土含水率测定平行差值(%)

含水率 w_f	最大允许平行差值
$w_f \leqslant 10$	±1
$10 < w_f \leqslant 20$	±2
$20 < w_f \leqslant 30$	±3

2)将融化的土样调拌成均匀糊状稠度,当土太湿时,多余水分待澄清后可用吸球和吸纸吸出,或让其自然蒸发;土太干时可适当加水。进行称量,准确至 0.1g;

3)从糊状稠度土样中取样测定含水率,应按本标准第 5.2.2 条第 1 款～第 3 款的规定进行;

4)试验应进行两次平行测定,其平行最大允许差值应为 ±1%。

32.2.3 整体状构造的冻土含水率应按本标准式(5.2.3)计算,层状和网状构造的冻土应按下式计算冻土的含水率,计算至 0.1%:

$$w_f = \left[\frac{m_{f0}}{m_{f1}}(1 + 0.01w_n) - 1\right] \times 100 \qquad (32.2.3)$$

式中:w_f——冻土含水率(%);

m_{f0}——冻土试样质量(g);

m_{f1}——调成糊状的土样质量(g);

w_n——平均试样含水率(%)。

32.2.4 烘干法冻土含水率试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.60 的规定。

32.3 联合测定法

32.3.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定:

1 排液筒(图 32.3.1);

2 台秤:称量 5kg,分度值 1g;

3 量筒:容量 1000mL,分度值 10mL。

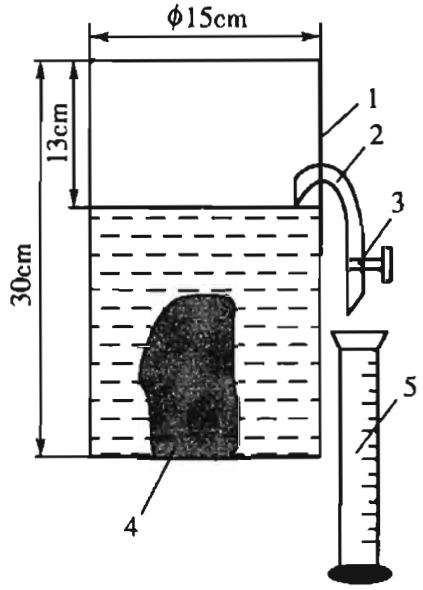


图 32.3.1　排液筒装置示意图

1—排液筒；2—虹吸管；3—止水夹；4—冻土试样；5—量筒

32.3.2　联合测定法试验应按下列步骤进行：

1　将排液筒置于台秤上，拧紧虹吸管止水夹。排液筒在台秤上的位置，在试验过程中不得移动；

2　取 1000g～1500g 的冻土试样，并称质量；

3　将接近 0℃的清水缓慢倒入排液筒，使水面超过虹吸管顶；

4　松开虹吸管的止水夹，使排液筒中的水面徐徐下降，待水面稳定和虹吸管不再出水时，拧紧止水夹，称排液筒和水的质量；

5　将冻土试样轻轻放入排液筒中，松开止水夹，使排液筒中的水流入量筒内；

6　水流停止后，拧紧止水夹，立即称排液筒、水和试样质量，同时测读量筒中水的体积，用以校核冻土试样的体积；

7　使冻土试样在排液筒中充分融化成松散状态，澄清。补加清水使水面超过虹吸管顶；

8　松开止水夹，排水。当水流停止后，拧紧止水夹，并称排液筒、水和土颗粒质量；

9 在试验过程中应保持水面平稳，在排水和放入冻土试样时，排液筒不得发生上下剧烈晃动。

32.3.3 冻土含水率 w_f 应按下式计算，计算至 0.1%：

$$w_f = \left[\frac{m_{f0}(G_s - 1)}{(m_{tws} - m_{tw})G_s} - 1\right] \times 100 \qquad (32.3.3)$$

式中：m_{f0}——冻土试样质量(g)；

m_{tws}——筒、水和冻土颗粒的总质量(g)；

m_{tw}——筒加水的质量(g)。

32.3.4 联合测定法冻土含水率试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.61 的规定。

33 冻土密度试验

33.1 一般规定

33.1.1 土样应为原状冻土或人工冻土。

33.1.2 冻土密度试验应根据冻土的特点和试验条件选用浮称法、联合测定法、环刀法或充砂法：

1 浮称法用于表面无显著孔隙的冻土；

2 联合测定法用于砂质冻土和层状、网状结构的黏质冻土；

3 环刀法用于温度高于－3℃的黏质和砂质冻土；

4 充砂法用于表面有明显孔隙的冻土。

33.1.3 冻土密度试验宜在负温环境下进行。无负温环境时，应采取保温措施和快速测定。在试验过程中，冻土表面不得发生融化。

33.2 浮 称 法

33.2.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 天平（图 33.2.1）：称量 1000g，分度值 0.1g；

2 液体密度计：分度值 0.001g/cm^3；

3 温度计：测量范围为－30℃～＋20℃，分度值为 0.1℃；

4 量筒：容积为 1000mL；

5 盛液筒：容积为 1000mL～2000mL。

33.2.2 浮称法试验应按下列步骤进行：

1 调整天平，将盛液筒置于天平一端；

2 切取质量为 300g～1000g 的冻土试样，用细线捆紧，放入盛液筒中并悬吊在天平挂钩上称量，准确至 0.1g；

3 将事先预冷接近冻土试样温度的煤油缓慢注入盛液筒，液面宜超过试样顶面 2cm，并用温度计量测煤油温度，准确至 0.1℃；

4 称取试样在煤油中的质量，准确至0.1g；

5 从煤油中取出冻土试样，削去表层带煤油的部分，然后按规定取样测定冻土的含水率；

6 采用0℃水时，应快速测定，试样表面不得发生融化。

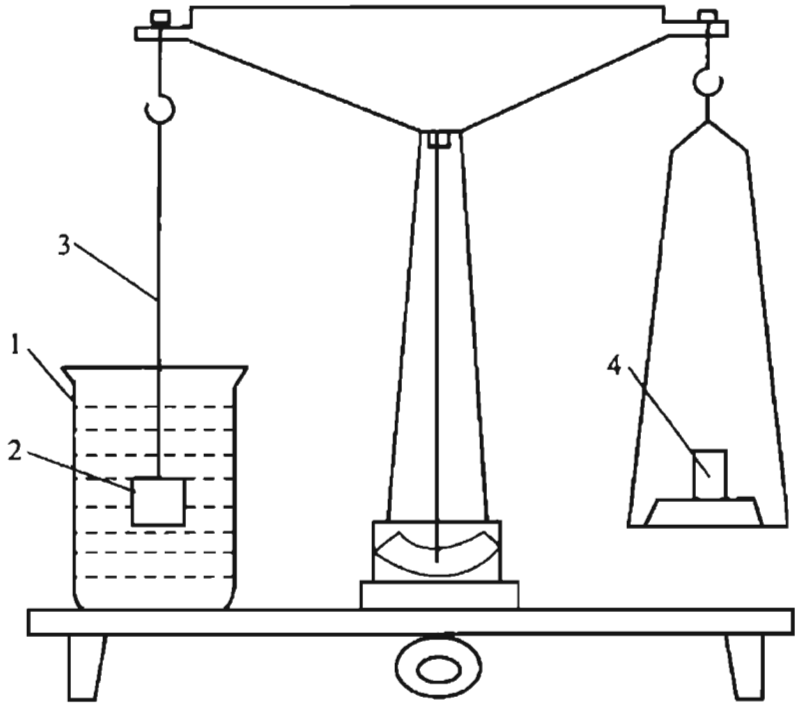


图33.2.1 浮重天平

1—盛液筒；2—试样；3—细线；4—砝码

33.2.3 冻土密度应按下列公式计算：

$$\rho_f = \frac{m_{f0}}{V_f} \tag{33.2.3-1}$$

$$V_f = \frac{m_{f0} - m_{fm}}{\rho_m} \tag{33.2.3-2}$$

式中：ρ_f——冻土密度(g/cm³)；

m_{f0}——冻土试样质量(g)；

V_f——冻土试样体积(cm³)；

m_{fm}——冻土试样在煤油中的质量(g)；

ρ_m——试验温度下煤油的密度(g/cm³)，可由煤油密度与温

度关系曲线查得。

33.2.4 冻土干密度应按下式计算，计算至 0.01g/cm³：

$$\rho_{fd} = \frac{\rho_f}{1 + 0.01 w_f} \tag{33.2.4}$$

式中：ρ_{fd}——冻土干密度(g/cm³)。

33.2.5 冻土密度试验应进行不少于 2 组平行试验。对于整体状构造的冻土，两次测定的最大允许差值应为±0.03g/cm³，并取其算术平均值；对于层状和网状构造和其他富冰冻土，宜提出两次测定值。

33.2.6 浮称法冻土密度试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.62 的规定。

33.3 联合测定法

33.3.1 本试验所用的仪器设备应符合本试验第 32.3.1 条的规定。

33.3.2 本试验方法应按本试验第 32.3.2 条规定的步骤进行。

33.3.3 联合测定法的冻土密度应按下列公式计算：

$$\rho_f = \frac{m_{f0}}{V_f} \tag{33.3.3-1}$$

$$V_f = \frac{m_{f0} + m_{tw} - m'_{tws}}{\rho_w} \tag{33.3.3-2}$$

式中：m'_{tws}——放入冻土试样后筒、水、试样的总质量(g)。

33.3.4 联合测定法的冻土干密度应按本标准式(33.2.4)计算。

33.3.5 本试验应进行两次平行试验。试验结果取其算术平均值。

33.4 环 刀 法

33.4.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 环刀：容积不得小于 500cm³；

2 天平：称量 3000g，分度值 0.2g；

3　其他：切土器、钢丝锯。

33.4.2　环刀法试验应按下列步骤进行：

1　本试验宜在负温环境中进行。无负温环境时，必须快速进行。切样和试验过程中的试样表面不得发生融化。

2　取原状土样，整平其两端，将环刀刃口向下放在土样上。

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

4　擦净环刀外壁称量，算出冻土质量，准确至0.2g。

33.4.3　冻土密度和冻土干密度应按本标准式（33.2.3-1）和式（33.2.4）计算。

33.4.4　本试验应进行两次平行试验。其平行最大允许差值应为±0.03g/cm^3。试验结果取其算术平均值。

33.4.5　环刀法冻土密度试验的记录格式应符合本标准附录D表D.63的确定。

33.5　充　砂　法

33.5.1　本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1　金属测筒：内径宜用15cm，高度宜用13cm；

2　量砂：粒径0.25mm～0.50mm的干净标准砂；

3　漏斗：上口直径可为15cm，下口直径为1.5cm，高度为10cm；

4　天平：称量5000g，分度值1g。

33.5.2　充砂法试验应按下列步骤进行：

1　切取冻土试样，试样宜取直径为8cm～10cm，高为8cm～10cm的圆形或（8～10）cm×（8～10）cm×（8～10）cm的方形体，试样底面必须削平，称试样质量。

2　将试样平面朝下放入测筒内，试样底面与测筒底面必须接触紧密。

3　用标准砂充填冻土试样与筒壁之间的空隙和试样顶面：

1）取一定量的清洗干净校验后的干净标准砂，标准砂的温度应接近冻土试样的温度；

2）用漏斗架将漏斗置于测筒上方，漏斗下口与测筒上口应保持5cm～10cm的距离；

3）用薄板挡住漏斗下口，并将标准砂充满漏斗后移开挡板，使砂充入测筒，与此同时，不断向漏斗中补充标准砂，使砂面始终保持与漏斗上口齐平，在充砂过程中不得敲击或振动漏斗和测筒；

4）当测筒充满标准砂后，移开漏斗，轻轻刮开砂面，使之与测筒上口齐平，在刮砂过程中不应将砂压密。

4　称测筒、试样和充砂的总质量。

33.5.3　冻土密度应按下列公式计算：

$$\rho_f = \frac{m_{f0}}{V_f} \tag{33.5.3-1}$$

$$V_f = V_{f0} - \frac{m_{tfs} - m_{lt} - m_{f0}}{\rho_{ls}} \tag{33.5.3-2}$$

$$\rho_{ls} = \frac{m_{ts} - m_{lt}}{V_t} \tag{33.5.3-3}$$

式中：m_{tfs}——测筒、试样和量砂的总质量(g)；

m_{lt}——测筒质量(g)；

m_{ts}——筒、砂总质量(g)；

ρ_{ls}——量砂的密度(g/cm^3)；

V_t——测筒容积(cm^3)。

33.5.4　本试验应进行两次平行测定，其平行最大允许差值应为±0.03g/cm^3，试验结果取其算术平均值。

33.5.5　充砂法冻土密度试验的记录格式应符合本标准附录D表D.64的规定。

34 冻结温度试验

34.1 一般规定

34.1.1 土样应为黏土或砂质土。

34.1.2 本试验方法采用无外加载荷法。

34.2 仪器设备

34.2.1 仪器设备(图 34.2.1)包括零温瓶、低温瓶、测温设备和试样杯。仪器设备应符合下列规定:

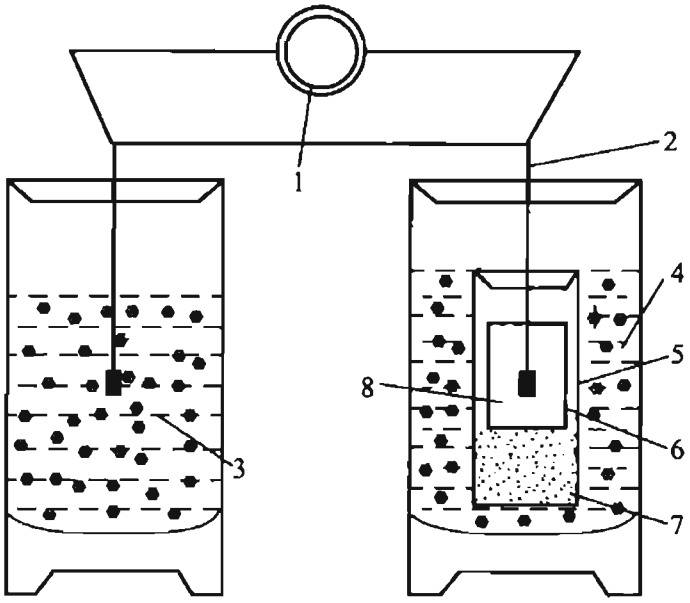


图 34.2.1 冻结温度测定装置示意图

1—数字电压表;2—热电偶;3—零温瓶;4—低温瓶;5—塑料管;6—试样杯;7—干砂;8—试样

1 零温瓶:容积为 3.57L,内盛冰水混合物,其温度应为 0±0.1℃;

2　低温瓶：容积为 3.57L，内盛低融冰晶混合物，其温度宜为 −7.6℃；

3　测温设备：由热电偶和数字电压表组成。热电偶宜用 0.2mm 的铜和康铜线材制成；

4　数字电压表：量程为 2mV，分度值为 1μV；

5　试样杯：用黄铜制成，直径 3.5cm，高 5cm，带有杯盖。

34.2.2　其他：用于配制低融冰晶混合物的氯化钠、氯化钙。直径 5cm、长 25cm 的硬质聚氯乙烯管。切土刀。

34.3　操 作 步 骤

34.3.1　原状冻土试验应按下列步骤进行：

1　土样应按自然沉积方向放置。剥去蜡封和胶带，开启土样筒取出土样；

2　试样杯内壁涂一薄层凡士林，杯口向下放在土样上，将试样杯垂直下压，并用切土刀沿杯外壁切削土样，边压边削至土样达到试样杯高度，用钢丝锯整平杯口，擦净外壁，盖上杯盖，并取余土测定含水率；

3　将热电偶的测温端插入试样中心，杯盖周侧用硝基漆密封；

4　零温瓶内装入用纯水制成的冰块，冰块直径应小于 2cm，再倒入纯水，使水面与冰块面相平，然后插入热电偶零温端；

5　低温瓶内装入用浓度 $2mol \cdot L^{-1}$ 氯化钠等溶液制成的盐冰块，其直径应小于 2cm，再倒入相同浓度的氯化钠溶液，使之与冰块面相平；

6　将封好底且内装 5cm 高干砂的塑料管插入低温瓶内，再把试样杯放入塑料管内，然后塑料管口和低温瓶口分别用橡皮塞和瓶盖密封；

7　将热电偶测定端与数字电压表相连，每分钟测量一次热电势，当电势值突然减小并连续 3 次稳定在某一数值（相应的温度即为冻结温度）时，试验结束。

34.3.2 扰动冻土试验应按下列步骤进行：

1 称取风干土样，平铺于搪瓷盘内，按所需的加水量将纯水均匀喷洒在土样上，充分拌匀后装入盛土器内盖紧，润湿 24h（砂质土的润湿时间可酌减）；

2 将配制好的土装入试样杯中，以装实装满为止，杯口加盖，将热电偶测温端插入试样中心，杯盖周侧用硝基漆密封；

3 应按本标准第 34.3.1 条第 4 款～第 7 款的规定进行试验。

34.4 计算、制图和记录

34.4.1 冻结温度应按下式计算：

$$T_f = U_f / K_f \tag{34.4.1}$$

式中：T_f——冻结温度（℃）；

U_f——热电势跳跃后的电压稳定值（μV）；

K_f——热电偶的标定系数（μV/℃）。

34.4.2 以温度为纵坐标，时间为横坐标，绘制温度和时间过程曲线。

34.4.3 冻结温度试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.65 的规定。

35 冻土导热系数试验

35.1 一般规定

35.1.1 土样应为扰动的黏土或砂土。

35.1.2 本试验采用稳定态比较法。

35.2 仪器设备

35.2.1 试验装置(图 35.2.1)由恒热系统、测温系统和试样盒组成。

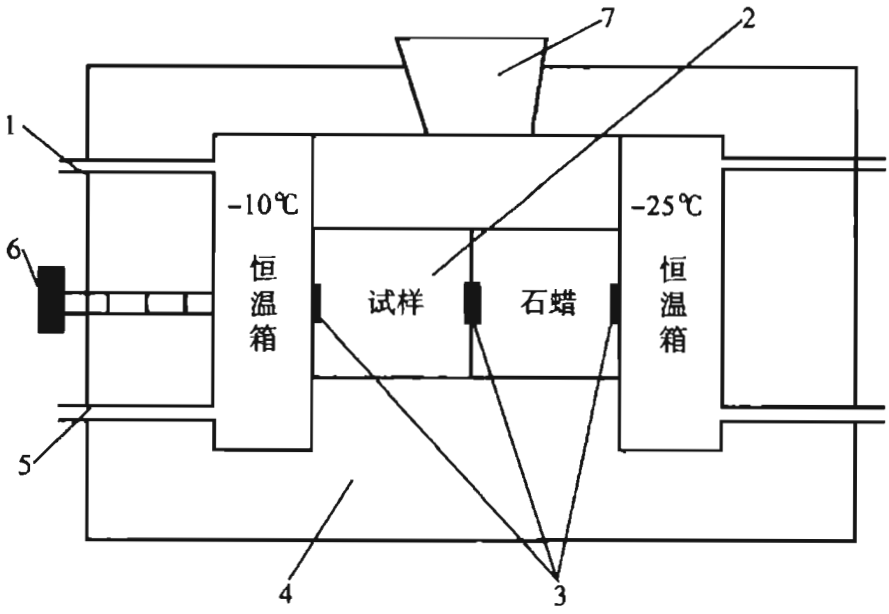


图 35.2.1 导热系数试验装置示意图

1—冷浴循环液出口;2—试样盒;3—热电偶;4—保温材料;5—冷浴循环液进口;6—夹紧螺杆;7—保温盖

35.2.2 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定:

1 恒温系统:由 2 个尺寸 $l \times b \times h$ 为 50cm×20cm×50cm 的

恒温箱和2台低温循环冷浴组成。恒温箱与试样盒接触面应采用5mm厚的平整铜板。2个恒温箱分别提供2个不同的负温环境(－10℃和－25℃)。恒温最大允许差值应为±0.1℃。

2 测温系统:由热电偶、零温瓶和量程为2mV、分度值1μV的数字电压表组成。

3 试样盒:2只,其外形尺寸 $l \times b \times h$ 为25cm×25cm×25cm,盒的两侧为厚5mm的平整铜板。试样盒的另两侧、底面和上端盒盖应采用尺寸为25cm×25cm,厚3mm的胶木板。

35.3 操作步骤

35.3.1 将风干试样平铺在搪瓷盘内,应按所需的含水率和土样制备要求制备试样。

35.3.2 将制备好的试样按要求的密度装入一个试样盒,装实装满后加盒盖。装土时,将2支热电偶的测温端放置在试样两侧铜板内壁的中心位置。

35.3.3 另一个试样盒装入石蜡,作为标准试样。装石蜡时,按要求安放两支热电偶。

35.3.4 应将分别装好石蜡和试样的2个试样盒按图35.2.1的方式安装好,驱动夹紧螺杆使试样恒温箱的各铜板面坚实接触。

35.3.5 接通测温系统。

35.3.6 开动2个低温循环冷浴,分别设定冷浴循环液温度为－10℃和－25℃。

35.3.7 冷浴循环液达到要求温度后再运行8h,开始测温。每隔10min测定1次标准试样和冻土试样两侧壁面的温度,并记录。当各点的温度连续3次测得的差值小于0.1℃时,试验结束。

35.3.8 取出冻土试验,测定其含水率和密度。

35.4 计算和记录

35.4.1 导热系数应按下式计算:

$$\lambda_f = \frac{\lambda_0 \Delta\theta_0}{\Delta\theta} \tag{35.4.1}$$

式中：λ_f——冻土的导热系数[W/(m·K)]；

λ_0——石蜡的导热系数[0.279 W/(m·K)]；

$\Delta\theta_0$——石蜡样品盒内两壁面温差(℃)；

$\Delta\theta$——待测试样盒两壁面温差(℃)。

35.4.2 导热系数试验的记录格式应符合本标准附录D表D.66的规定。

36 冻土的未冻含水率试验

36.1 一般规定

36.1.1 土样应为黏土或砂质土。

36.1.2 冻土的未冻含水率以两次平行试验的差值，在0℃～－3℃范围内最大允许误差应为±2%；低于－3℃时最大允许误差应为±1%。

36.2 仪器设备

36.2.1 本试验的主要仪器设备应符合本标准第34.2.1条的规定。

36.2.2 本试验的其他仪器设备应符合本标准第34.2.2条的规定。

36.3 操作步骤

36.3.1 应按本标准第34.3.2条第1款的规定制备3个试样。其中1个试样按所需的加水量加纯水制备；另2个试样的加水量宜使试样处于10mm液限和塑限状态作为初始含水率。

36.3.2 制备好的试样应按本标准第34.3.2条第2款、第3款的规定进行冻结试验。

36.4 计算、制图和记录

36.4.1 未冻含水率应按下列公式计算：

$$w_{fn} = AT_f^{-B} \tag{36.4.1-1}$$

$$A = w_L T_L^B \tag{36.4.1-2}$$

$$B = \frac{\ln w_L - \ln w_P}{\ln T_P - \ln T_L} \tag{36.4.1-3}$$

式中：w_{fn}——冻土的未冻含水率(%)；

T_f——试样的冻结温度(负温)绝对值(℃)；

T_L——液限试样的冻结温度绝对值(℃)；

T_P——塑限试样的冻结温度绝对值(℃)。

36.4.2 以试样的含水率为纵坐标，对应的冻结温度为横坐标，在双对数纸上绘制含水率与冻结温度的关系曲线。从曲线上查得需测试样的冻结温度 T_f 相对应的含水率，即为冻土的未冻含水率。

36.4.3 未冻含水率试验记录格式应符合本标准附录 D 表 D.65 的规定。

37 冻胀率试验

37.1 一般规定

37.1.1 土样应为黏土或砂质土。

37.1.2 本试验方法的降温速度，黏土应为 0.3℃/h，砂质土应为 0.2℃/h。

37.2 仪器设备

37.2.1 试样盒(图 37.2.1)应由外径为 12cm、壁厚为 1cm、高为 10cm 的有机玻璃筒作为试样盒。在侧壁，沿高度每隔 1cm 设热敏电阻温度计插入孔，底板和顶盖结构能提供恒温液循环和外界水源补充通道。

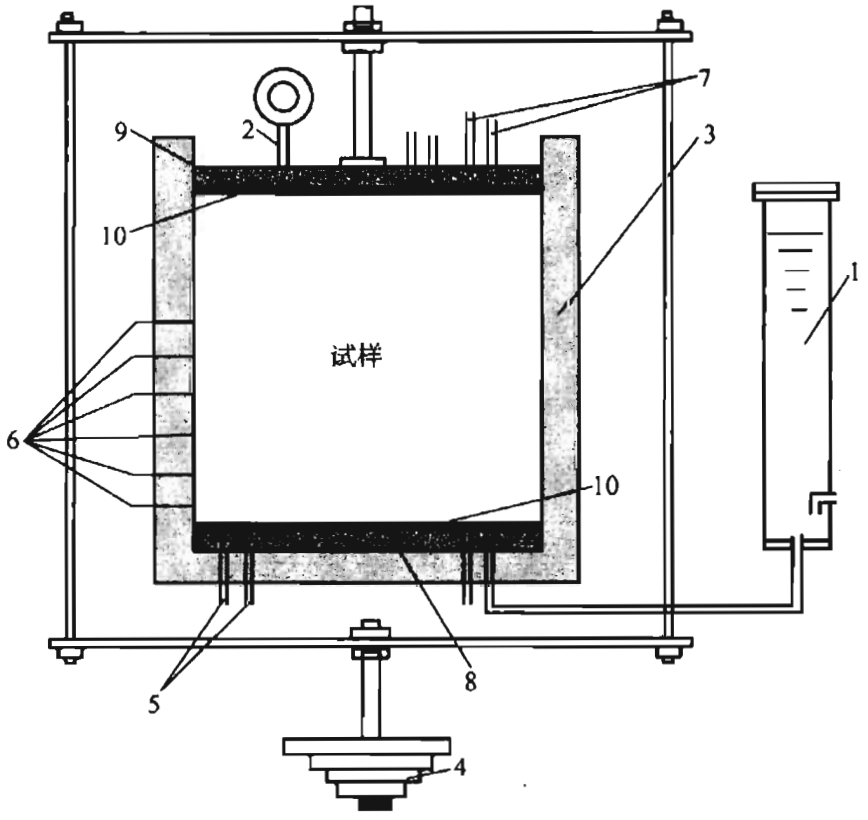


图 37.2.1 试样盒结构示意图

1—供水装置；2—百分表；3—保温材料；4—加压装置；5—正温循环液进出口；6—热敏电阻测温点；7—负温循环液进出口；8—底板；9—顶板；10—滤水板

37.2.2 恒温箱容积不应小于 0.8m³，内设冷液循环管路和加热器，功率为 500W，通过热敏电阻温度计与温度控制仪相连，使试验期间箱温保持在 1℃±0.5℃。

37.2.3 温度控制系统应由低温循环浴和温度控制仪组成，提供试验所需的顶板、底板温度。

37.2.4 温度监测系统应由热敏电阻温度计、数字电压表组成。监测试验过程中土样、顶板、底板温度和箱温变化。

37.2.5 补水系统应由恒定水位装置通过塑料管与底板相连，水位应高于底板和土样接触面 0.5cm。

37.2.6 变形监测系统百分表或位移传感器的量程应为 30mm，分度值应为 0.01mm。

37.2.7 加压系统应由加压框架和砝码组成。

37.3 操作步骤

37.3.1 原状土冻胀率试验应按下列步骤进行：

1 土样应按自然沉积方向放置，剥去蜡封和胶带，开启土样筒取出土样；

2 用切土器将原状土样削成直径为 10cm、高为 5cm 的试样，称量确定密度并取余土测定初始含水率；

3 在有机玻璃试样盒内壁涂上一薄层凡士林，放在底板上并放一张滤纸，然后将试样从顶装入盒内，让其自由滑落在底板上；

4 在试样顶面上放一张滤纸，然后放上顶板，并稍稍加力，以使土柱与顶、底板接触紧密；

5 将装有试样的试样盒放入恒温箱内，试样周侧、顶板、底板内插入热敏电阻温度计，试样周侧包裹 5cm 厚的泡沫塑料进行保温，连接顶板、底板冷液循环管路及底板补水管路，供水并排除底板内气泡，调节供水装置水位，当考虑无水源补充状态时，可切断供水，安装百分表或位移传感器；

6 若需模拟原状土天然受力状态，可施加相应的荷载；

7 开启恒温箱、试样顶板、底板冷浴，设定恒温箱冷浴温度为－15℃，箱内温度为1℃；顶板、底板冷浴温度为1℃；

8 试样恒温6h，并监测温度和变形。待试样初始温度均匀达到1℃以后，开始试验；

9 顶板温度调节到－15℃并持续0.5h，让试样迅速从顶面开始冻结，然后将顶板温度调节到－2℃或所要求的负温，使土体温度匀速下降，保持箱温和底板温度均为1℃，记录初始水位，每隔1h记录水位、温度和变形量各1次，试验持续72h；

10 试验结束后，迅速从试样盒中取出试样，量测试样高度并测定冻结深度。

37.3.2 扰动土冻胀率试验应按下列步骤进行：

1 称取风干土样，加纯水拌和呈稀泥浆，装入内径为10cm的有机玻璃筒内，加压固结，直至达到所需初始含水率和干容重要求后，将土样从有机玻璃筒中推出，并将土样高度切削到5cm；

2 应按本标准第37.3.1条第3款～第10款的规定进行试验。

37.4 计算和记录

37.4.1 冻胀率应按下式计算：

$$\eta_f = \frac{\Delta h_f}{H_f - \Delta h_f} \times 100 \tag{37.4.1}$$

式中：η_f——冻胀率(%)；

Δh_f——试样总冻胀量(mm)；

H_f——冻结深度(mm)。

37.4.2 冻胀率试验的记录格式应符合本标准附录D表D.67的规定。

38 冻土融化压缩试验

38.1 一 般 规 定

38.1.1 土样应为冻结黏土和粒径小于 2mm 的冻结砂质土。

38.1.2 本试验试验宜在负温环境下进行。严禁在切样和装样过程中使试样表面发生融化。试验过程中应满足自上而下单向融化。

38.2 仪 器 设 备

38.2.1 融化压缩仪(图 38.2.1)应由加热传压板应采用导热性能好的金属材料制成。试样环应采用有机玻璃或其他导热性低的非金属材料制成,其尺寸宜为:内径 79.8mm,高 40.0mm。保温外套可用聚苯乙烯或聚氨酯泡沫塑料。

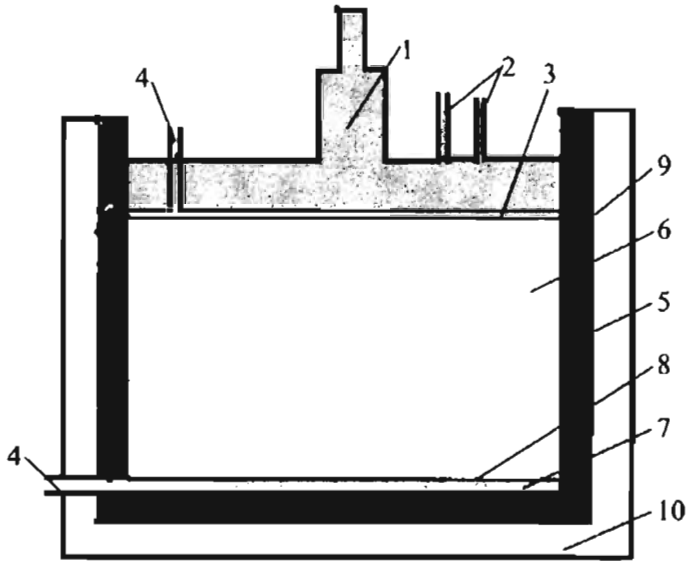


图 38.2.1 融化压缩仪示意图

1—加热传压板;2—热循环水进出口;3—透水板;4—上下排水孔;5—试样环;6—试样;7—透水板;8—滤纸;9—导环;10—保温外套

38.2.2 加荷设备可采用量程为2000kPa的杠杆式、磅秤式和其他相同量程的加荷设备，其最大允许误差应符合现行国家标准《土工试验仪器　固结仪　第1部分：单杠杆固结仪》GB/T 4935.1的规定。

38.2.3 变形测量设备由百分表或位移传感器组成，量程应为10mm，分度值应为0.01mm。

38.2.4 恒温供水设备。

38.2.5 原状冻土取样器钻具开口内径应为79.8mm。

38.3 操作步骤

38.3.1 在切样和装样过程中不得使试样表面发生融化。

38.3.2 用冻土取样器钻取冻土试样，其高度应大于试样环高度。将钻样剩余的冻土取样测定含水率。钻样时必须保持试样的层面与原状土一致，且不得上下倒置。

38.3.3 将冻土样装入试样环，使之与环壁紧密接触。刮平上、下面，但不得造成试样表面发生融化。测定冻土试样的密度。

38.3.4 在融化压缩容器底部先放透水板，其上放一张润湿滤纸。将装有试样的试样环放在滤纸上，套上护环。然后在试样上部放滤纸和透水板，再放上加热传压板。装上保温外套，并将融化压缩容器放置在加压框架正中。安装百分表或位移传感器。

38.3.5 施加1kPa的压力，调整平加压杠杆。调整百分表或位移传感器到零位。

38.3.6 用胶管连接加热传压板的热循环水进出口与事先装有温度为40℃～50℃水的恒温水槽，并打开开关和开动恒温器，以保持水温。

38.3.7 试样开始融沉时即开动秒表，分别记录1min、2min、5min、10min、30min、60min时的变形量。之后每2h观测记录1次，直到变形量在2h内小于0.05mm时为止，并测记最后一次变形量。

38.3.8 融沉稳定后，停止热水循环，并开始加荷进行压缩试验。加荷等级视实际工程需要确定，宜取 50kPa、100kPa、200kPa、400kPa、800kPa，最后一级荷载应比土层的计算压力大 100kPa～200kPa。

38.3.9 施加每级荷载后 24h 为稳定标准，并观测记录相应的压缩量。直到施加最后一级荷载压缩稳定为止。

38.3.10 试验结束后，拆卸仪器各部件，取出试样，测定含水率。

38.4 计算、制图和记录

38.4.1 融沉系数应按下式计算：

$$a_{f0} = \frac{\Delta h_{f0}}{h_{f0}} \times 100 \tag{38.4.1}$$

式中：a_{f0}——冻土融沉系数(%)；

Δh_{f0}——冻土融化下沉量(mm)；

h_{f0}——冻土试样初始高度(mm)。

38.4.2 冻土试样初始孔隙比应按下式计算：

$$e_{f0} = \frac{\rho_w G_s (1 + 0.01 w_f)}{\rho_{f0}} - 1 \tag{38.4.2}$$

式中：e_{f0}——冻土试样初始孔隙比；

ρ_{f0}——冻土试样初始密度(g/cm³)。

38.4.3 融沉稳定后和各级压力下压缩稳定后的孔隙比应按下列公式计算：

$$e = e_{f0} - (h_{f0} - \Delta h_0) \frac{1 + e_{f0}}{h_{f0}} \tag{38.4.3-1}$$

$$e_i = e - (h - \Delta h) \frac{1 + e}{h} \tag{38.4.3-2}$$

式中：e、e_i——融沉稳定后和压力作用下压缩稳定后的孔隙比；

h、h_{f0}——融沉稳定后和初始试样高度(mm)；

Δh、Δh_0——压力作用下稳定后的下沉量和融沉下沉量(mm)。

38.4.4 某一压力范围内的冻土融化压缩系数应按下式计算：

$$a_{fv} = \frac{e_i - e_{i+1}}{p_{i+1} - p_i} \times 10^3 \qquad (38.4.4)$$

式中：a_{fv}——某一压力范围内的冻土融化压缩系数(MPa^{-1})。

38.4.5 以孔隙比为纵坐标，单位压力为横坐标，绘制孔隙比与压力关系曲线。

38.4.6 冻土融化压缩试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.68 的规定。

39 原位冻土融化压缩试验

39.1 一 般 规 定

39.1.1 本试验应在现场试坑进行，位置为除漂石以外的其他各类冻土形成的地层。

39.1.2 试坑深度不得小于季节融化深度，对于非衔接的多年冻土，不得小于多年冻土层的上限深度。试坑底面积不得小于 2m×2m。

39.2 仪 器 设 备

39.2.1 试验装置(图 39.2.1)应由内热式传压板、加荷系统、沉降量测系统、温度量测系统组成。

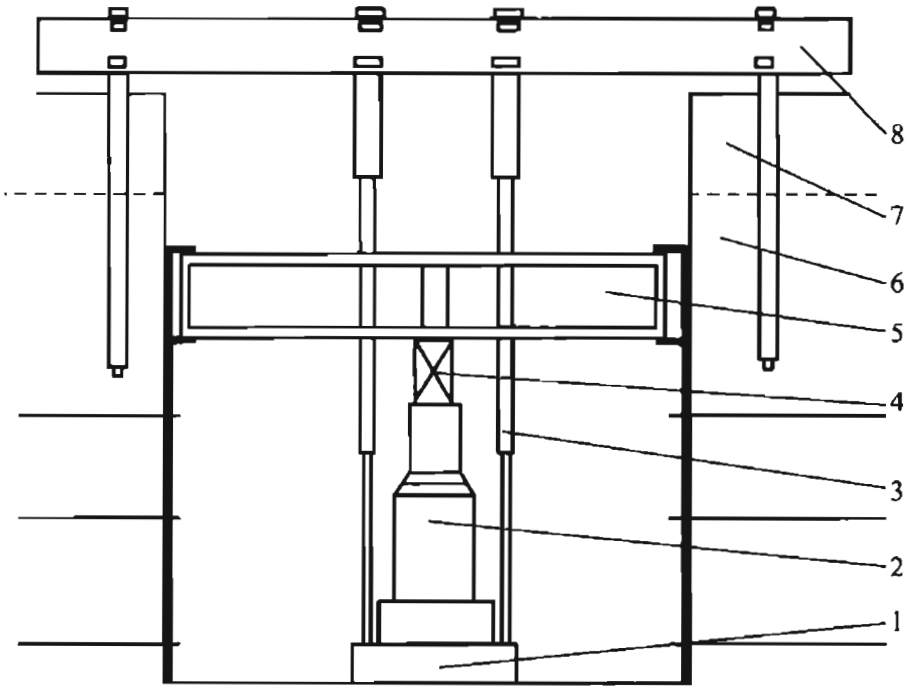


图 39.2.1 原位融化压缩试验示意图

1—热压模板；2—千斤顶；3—变位测针；4—压力传感器；5—反压横梁；6—冻土；7—融土；8—测量支架

39.2.2 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 内热式传压板：传压板可取圆形或方形，中空式平板。应有足够刚度，承受上部荷载时不发生变形。面积不宜小于5000cm²（图 39.2.2）；

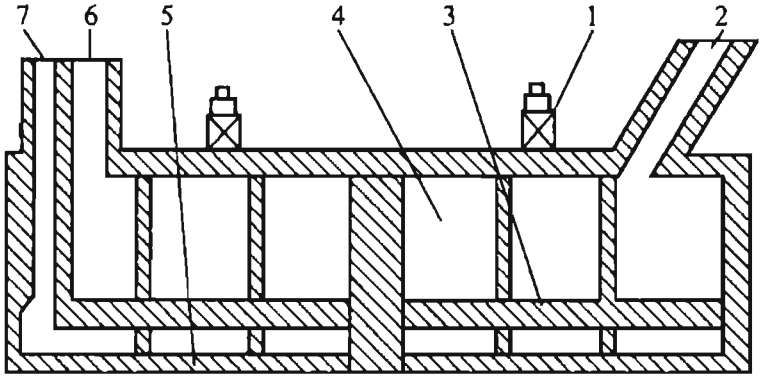


图 39.2.2 热压模板示意图

1—固定千斤顶螺丝；2—加热孔；3—热压模板；4—储水腔；5—透水板；6—排水孔；7—加水孔

2 加热系统：传压板加热可用电热或水（汽）热，加热应均匀，加热温度不应超过 90℃。传压板周围应形成一定的融化圈，其宽度不宜小于传压板直径的 30%；

3 加荷系统：加荷方式可用千斤顶或重物。当冻土的总含水率超过液限时，加荷装置的重量不应大于传压板底面高程处的上覆压力；

4 沉降量测系统：沉降量测可采用大量程百分表或位移传感器，其量测最大允许误差应为 0.01mm；

5 温度量测系统：温度量测系统可由热电偶和数字电压表组成。量测准确度应为 0.1℃。

39.3 操作步骤

39.3.1 应对试验场地进行冻结土层的岩性和冷生构造的描述，并取样进行其物理性试验。

39.3.2 仔细开挖试坑，平整试坑底面。必要时应进行坑壁保护。

39.3.3 在传压板的边侧钻孔，孔径 3cm～5cm，孔深宜为 50cm。将 5 支热电偶温端自下而上每隔 10cm 逐个放入孔内，并用黏质土夯实填孔。

39.3.4 坑底面铺砂找平。铺砂厚度不应大于 2cm。将传压板放置在坑底中央砂面上。

39.3.5 安装加荷装置，应使加荷点处于传压板中心部位。

39.3.6 在传压板周边等距安装 3 个位移计。

39.3.7 进行安全和可靠性检查后，向传压板施加等于该处上履压力，不小于 50kPa，直至传压板沉降稳定后，调整位移计至零读数，做好记录。

39.3.8 接通电(热)源，连接测温系统，使传压板下和周围冻土缓慢均匀融化。每隔 1h 观测记录 1 次土温和位移。

39.3.9 当融化深度达到 25cm～30cm 时，切断电(热)源停止加热。用钢钎探测 1 次融化深度，并继续观测记录土温和位移。当融化深度接近 40cm(50%传压板直径)时，每 15min 观测记录 1 次融化深度。当 0℃温度融化深度达到 40cm 时观测记录位移量，并用钢钎观测记录 1 次融化深度。

39.3.10 当停止加热时，依靠余热不能使传压板下的冻土继续融化达到 50%传压板直径的深度时，应继续补加热，直至满足这一要求。

39.3.11 经上述步骤达到融沉稳定后，开始逐级加荷进行压缩试验。加荷等级视实际工程需要确定，每级荷载，对黏质土宜取 50kPa，对砂质土宜取 75kPa，对含巨粒土宜取 100kPa，最后一级荷载应比计算压力大 100kPa～200kPa。

39.3.12 施加一级荷载后，每 10min、20min、30min、60min 测记 1 次位移计示值，此后每小时测记 1 次，直到传压板沉降稳定后再加下一级荷载。

39.3.13 沉降量可取 3 个位移计读数的平均值。沉降稳定标准，

对黏质土宜取 0.05mm/h，对砂和含巨粒砂土宜取 0.1mm/h。

39.3.14 试验结束后，拆除加荷装置，清除垫砂和 10cm 厚表土，然后取 2 个～3 个融化压实土样，进行含水率、密度及其他必要的试验。最后，应挖除其余融化压实土量测融化圈。

39.4 计算、制图和记录

39.4.1 融沉系数 a_{f0} 应按下式计算：

$$a_{f0} = \frac{S_0}{h_{r0}} \times 100 \tag{39.4.1}$$

式中：S_0——冻土融沉（$p=0$）阶段的沉降量（cm）；

h_{r0}——融化深度（cm）。

39.4.2 原位融化压缩系数 α_{fv} 应按下列公式计算：

$$\alpha_{fv} = \frac{\Delta\delta}{\Delta p} K_{fv} \tag{39.4.2-1}$$

$$\Delta\delta = \frac{S_{i+1} - S_i}{h_{r0}} \tag{39.4.2-2}$$

式中：$\Delta\delta$——相应于某一压力范围（Δp）的相对融沉降系数量；

Δp——单位压力增量值（kPa）；

K_{fv}——系数，黏土为 1.00，粉质黏土为 1.20，砂和砂质土为 1.30，巨粒土为 1.35；

S_i——某一荷载作用下的沉降量（cm）。

39.4.3 以相对沉降量为纵坐标，单位压力为横坐标，绘制相对沉降量与单位压力关系曲线。

39.4.4 原位冻土融化压缩试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.69 的规定。

40 原位冻胀率试验

40.1 一 般 规 定

40.1.1 本试验应选择有代表性的黏土或砂质土的场地。

40.1.2 场地的地表应整平。在地表开始冻结前埋设冻胀仪。

40.2 仪 器 设 备

40.2.1 分层冻胀仪可采用图 40.2.1 所示的形式。

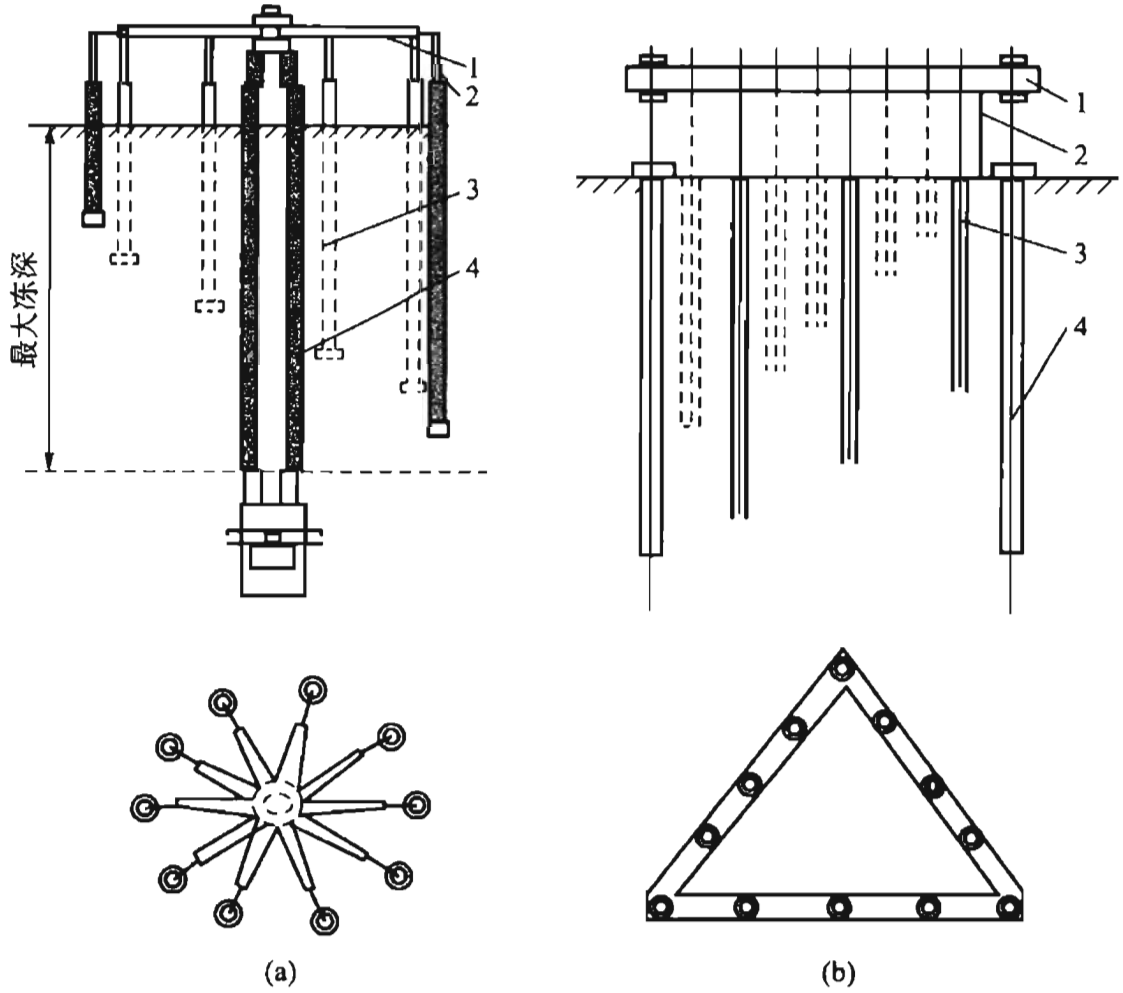


图 40.2.1 分层冻胀仪示意图

1—基准盘(梁);2—测杆;3—套管;4—固定桩(杆)

40.2.2 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 冻深器应具有套管的水位管；

2 测尺分度值应为 1mm；

3 地下水位管及测钟；

4 ϕ50cm 土钻及相应工具。

40.3 操作步骤

40.3.1 冻胀仪测杆分层埋设的间距可取 20cm～30cm，地表必须设 1 个测点，最深一点应达到最大冻深线。各测杆之间的水平埋设距离不得小于 30cm。

40.3.2 测杆应采用钻孔埋设。孔口应加盖保护。当地下水位处于冻结层内时，测杆与套管之间的空隙必须用工业凡士林或其他低温下不冻的材料充填。

40.3.3 架设基准盘(梁)的固定杆在最大冻深范围内必须加设套管。其打入最大冻深线以下土中的深度应小于 1m。

40.3.4 基准盘(梁)距冻前地面的架设高度应大于 40cm。

40.3.5 应在冻胀仪附近埋设冻深器和地下水位观测管。

40.3.6 冻胀量的测量可采用分度值为 1mm 的钢尺。在地表开始冻结前，应观测记录各测杆顶端至基准盘(梁)上相应固定点的长度，作为起始读数。

40.3.7 冻结期间可每隔 1d～2d 观测记录 1 次。融化期间可根据需要确定观测记录的次数。

40.3.8 观测期间宜用水准仪每隔半个月左右校核一次基准盘(梁)固定杆、冻深器、地下水位管顶端的高程变化，进行各项测值必要的修正。

40.4 计算、制图和记录

40.4.1 平均冻胀率应按下式计算：

$$\eta_f = \frac{\Delta h_f}{H_f} \times 100 \tag{40.4.1}$$

式中：η_f——冻胀率(%)；

Δh_f——地表总冻胀量(cm)；

H_f——冻深(cm)，以冻结前地面算起的最大冻深。

40.4.2 绘制平均冻胀量、冻深与时间的关系曲线(图 40.4.2)。

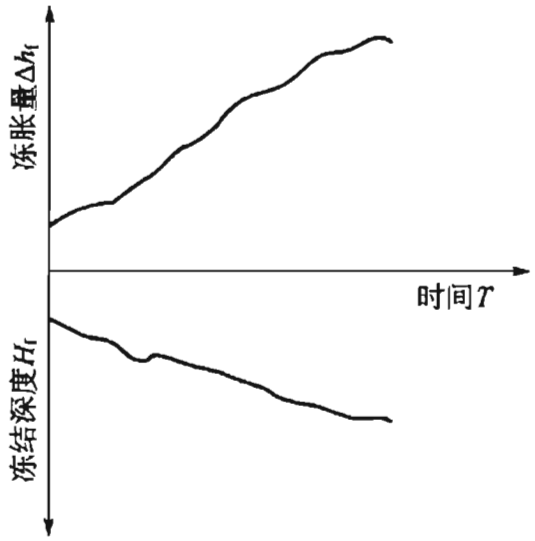


图 40.4.2 冻胀过程线

40.4.3 以冻深为纵坐标，总冻胀量或冻胀率为横坐标，绘制 H_f-$\Delta h_f(\eta_f)$关系曲线(图 40.4.3)。

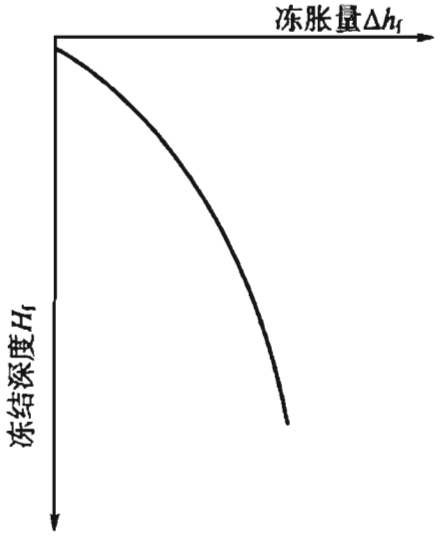


图 40.4.3 H_f-$\Delta h_f(\eta_f)$关系曲线

40.4.4 原位冻胀率试验的记录格式应符合本标准附录 D 表D.70的规定。

41 原位密度试验

41.1 一 般 规 定

41.1.1 原位密度试验方法有环刀法、灌砂法、灌水法。

41.1.2 环刀法适用于细粒土。灌砂法、灌水法适用于细粒土、砂类土和砾类土。

41.2 灌 砂 法

41.2.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 灌砂法密度试验仪(图 41.2.1)：包括漏斗、漏斗架、防风筒、套环、附有 3 个固定器；

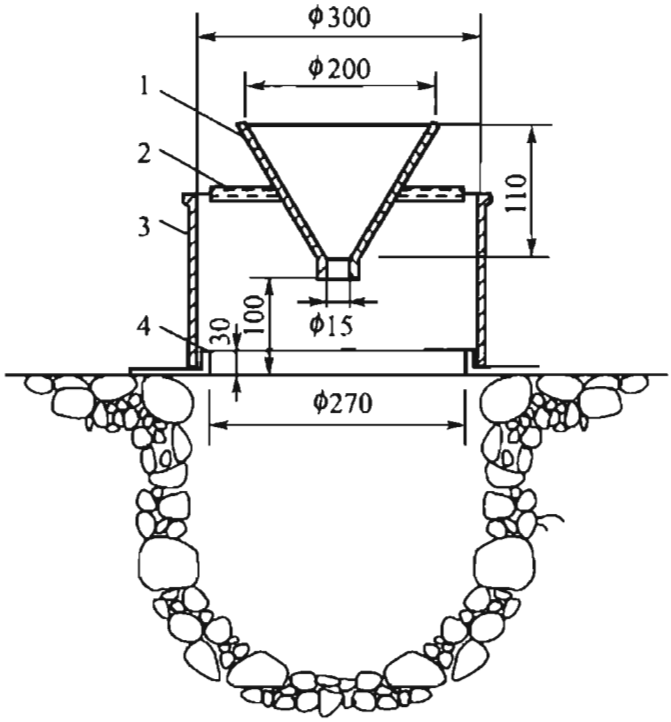


图 41.2.1 灌砂法密度试验仪(单位：mm)

1—漏斗；2—漏斗架；3—防风筒；4—套环

2　台秤：称量 10kg，分度值 5g；称量 50kg，分度值 10g；

3　量砂：粒径 0.25mm～0.50mm 的干燥清洁标准砂 10kg～40kg；

4　其他：有盖的量砂容器、直尺、铲土工具。

41.2.2　用套环的灌砂法试验应按下列步骤进行：

1　选定具有代表性的一块面积约 40cm×40cm 的场地并将地面铲平。检查填土压实密度时，应将表面未压实土层清除掉，并将压实土层铲去一部分，其深度视需要而定，使试坑底能达到规定的深度。

2　称盛量砂的容器加量砂质量。按图 41.2.1 所示，将仪器放在整平的地面上，用固定器将套环固定。开漏斗阀，将量砂经漏斗灌入套环内，待套环灌满后，拿掉漏斗、漏斗架及防风筒，无风可不用防风筒，用直尺刮平套环上砂面，使与套环边缘齐平。将刮下的量砂细心倒回量砂容器，不得丢失。称量砂容器加第 1 次剩余量砂质量。

3　将套环内的量砂取出，称量，倒回量砂容器内。环内量砂允许有少部分仍留在环内。

4　在套环内挖试坑，其尺寸应符合表 41.2.2 的规定。挖坑时要特别小心，将已松动的试样全部取出。放入盛试样的容器内，将盖盖好，称容器加试样质量，并取代表性试样，测定含水率。

表 41.2.2　试坑尺寸与相应的最大粒径(mm)

试样最大粒径	试坑尺寸	
	直　径	深　度
5(20)	150	200
40	200	250
60	250	300
200	880	1000

5　在套环上重新装上防风筒、漏斗架及漏斗。将量砂经漏斗

灌入试坑内，量砂下落速度应大致相等，直至灌满套环。

6 取掉漏斗、漏斗架及防风筒，用直尺刮平套环上的砂面，使与套环边缘齐平。刮下的量砂全部倒回量砂容器内，不得丢失。称量砂容器加第二次剩余量砂质量。

41.2.3 不用套环的灌砂法试验应按下列步骤进行：

1 应按本标准第 41.2.2 条第 1 款的规定选择试验地点，在刮平的地面上应按本标准表 41.2.2 的规定挖坑；

2 称盛量砂容器加量砂质量，在试坑上放置防风筒和漏斗，将量砂经漏斗灌入试坑内，量砂下落速度应大致相等，直至灌满试坑；

3 试坑灌满量砂后，去掉漏斗及防风筒，用直尺刮平量砂表面，使与原地面齐平，将多余的量砂倒回量砂容器，称量砂容器加剩余量砂质量。

41.2.4 计算应符合下列规定。

1 湿密度应按下列公式计算：

1)用套环法：

$$\rho = \frac{(m_{y4} - m_{y6}) - [(m_{y1} - m_{y2}) - m_{y3}]}{\dfrac{m_{y2} + m_{y3} - m_{y5}}{\rho_{ls}} - \dfrac{m_{y1} - m_{y2}}{\rho'_{ls}}} \quad (41.2.4\text{-}1)$$

2)不用套环法：

$$\rho = \frac{m_{y4} - m_{y6}}{\dfrac{m_{y1} - m_{y7}}{\rho_{ls}}} \quad (41.2.4\text{-}2)$$

式中：m_{y1}——量砂容器加原有量砂质量(g)；

m_{y2}——量砂容器加第 1 次剩余量砂质量(g)；

m_{y3}——从套环中取出的量砂质量(g)；

m_{y4}——试样容器加试样质量(包括少量遗留砂质量)(g)；

m_{y5}——量砂容器加第 2 次剩余量砂质量(g)；

m_{y6}——试样容器质量(g)；

m_{y7}——量砂容器加剩余量砂质量(g)；

ρ_{ls}——往试坑内灌砂时量砂的平均密度(g/cm³)；

ρ'_{ls}——挖试坑前，往套环内灌砂时量砂的平均密度(g/cm³)，计算至0.01g/cm³。

2 干密度应按下式计算：

$$\rho_d = \frac{\rho}{1+0.01w} \tag{41.2.4-3}$$

3 本试验需进行两次平行测定，取其算术平均值。

41.2.5 灌砂法试验的记录格式应符合本标准附录D表D.71、表D.72的规定。

41.3 灌 水 法

41.3.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 储水筒：直径应均匀，并附有刻度；

2 台秤：称量20kg，分度值5g；称量50kg，分度值10g；

3 薄膜：聚乙烯塑料薄膜；

4 其他：铲土工具、水准尺、直尺等。

41.3.2 灌水法试验应按下列步骤进行：

1 将测点处的地面整平，并用水准尺检查；

2 应按本标准表41.2.2的规定确定试坑尺寸，按确定的试坑直径划出坑口轮廓线，在轮廓线内下挖至要求的深度。将坑内的试样装入盛土容器内，称试样质量，取有代表性的试样测定含水率；

3 试坑挖好后，放上相应尺寸的套环，并用水准尺找平，将大于试坑容积的塑料薄膜沿坑底、坑壁紧密相贴(图41.3.2)；

4 记录储水筒内初始水位高度，拧开储水筒内的注水开关，将水缓慢注入塑料薄膜中。当水面接近套环上边缘时，将水流调小，直至水面与套环上边缘齐平时关注水开关，不应使套环内的水溢出；持续3min～5min，记录储水筒内水位高度。

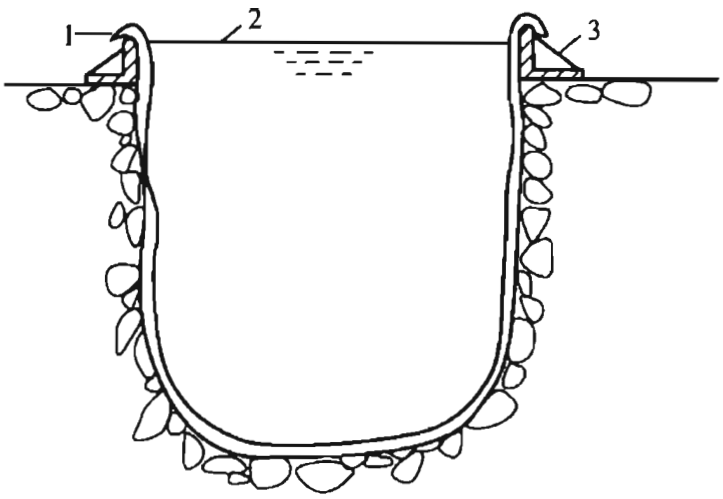


图 41.3.2　灌水法密度试验

1—塑料薄膜；2—参考水平面；3—钢套环

41.3.3　计算应符合下列规定：

1　试坑体积应按下式计算：

$$V_{sk} = (H_{t2} - H_{t1})A_w - V_{th} \qquad (41.3.3\text{-}1)$$

式中：V_{sk}——试坑体积(cm^3)；

H_{t1}——储水筒内初始水位高度(cm)；

H_{t2}——储水筒内注水终了时水位高度(cm)；

A_w——储水筒断面积(cm^2)；

V_{th}——套环体积(cm^3)。

2　湿密度及干密度按下列公式计算，计算至 $0.01g/cm^3$：

$$\rho = \frac{m_0}{V_{sk}} \qquad (41.3.3\text{-}2)$$

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0.01w} \qquad (41.3.3\text{-}3)$$

3　本试验需进行两次平行测定，取算术平均值。

41.3.4　灌水法试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.73 的规定。

42 试坑渗透试验

42.1 一般规定

42.1.1 本试验采用试坑注水法，可测定非饱和土的渗透参数。

42.1.2 试验方法有双环法和单环法，砂土及粉土宜用单环法，黏性土宜用双环法。

42.2 仪器设备

42.2.1 本试验试验装置可采用图 42.2.1 所示的形式。

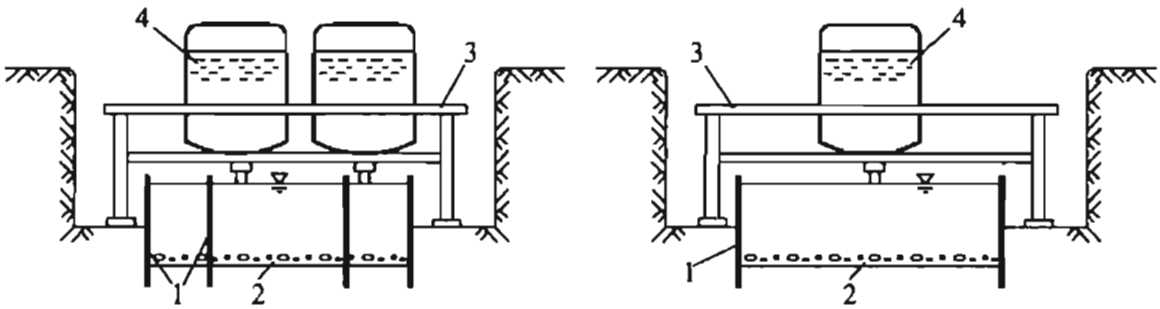


图 42.2.1 试坑渗水法装置

1—铁环；2—砾石层；3—支架；4—供水瓶

42.2.2 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 铁环：双环法为内环直径 25cm、高 15cm，外环直径 50cm、高 15cm。单环法铁环直径 37cm～75cm（铁环横截面积 1000cm^2）、高 15cm。在木支架上倒置着容量为 5000mL～10000mL 装有斜口玻璃管和橡皮塞的供水瓶，根据试验需要可为一个或多个。供水瓶的分度值为 50mL。

2 温度计：量程 0℃～50℃，分度值 1℃。

3 其他设备：土钻、吸水球及原位测含水率设备。

42.3 操作步骤

42.3.1 应在试验地区拟定的测试土体中按预定深度开挖一面积不小于 1.0m×1.5m 的试坑，在坑底再下挖一直径等于外环、深 10cm～15cm 的贮水坑，整平坑底。

42.3.2 把铁环细心放入贮水坑中，钢环入土深度至环上的起点刻度。双环法应使内、外环成同心圆状，两环上缘应在同一水平面上。压环时，须防止土的压实或变形。如扰动过大，须重新挖试坑另做。

42.3.3 在环底部土体上均铺 2cm 厚的砾石层，然后向环内注入清水至满，安放支架至水平位置。将供水瓶注满清水后倒置于支架上，供水瓶的斜口玻璃管插入环内水面以下。双环法注水时，支架上倒置 2 个注满清水的供水瓶，2 个供水瓶的斜口玻璃管分别插入内环和内外环之间的水面以下，玻璃管的斜口应在同一高度上，即环口水平面。

42.3.4 打开橡皮塞，调节供水瓶出水量，以保持环内水位不变。双环法注水时，内环和内外环之间的水面应在同一高度。

42.3.5 记录渗水开始时间及供水瓶的水位和水温。经一定时间后，测记在此时间内由供水瓶渗入土中的水量，直至流量稳定为止。

42.3.6 从供水瓶流出的水量达稳定后，在 1h～2h 内测记流出水量至少 5 次～6 次。每次测记的流量与平均流量之差不应超过 10%。双环法主要侧记内环供水瓶的流量。

42.3.7 试验结束后，拆除仪器，吸出贮水坑中的水。

42.3.8 在离试坑中心 3m～4m 以外，钻几个 3m～4m 深的钻孔，每隔 0.2m 取土样 1 个，平行测定其含水率。根据含水率的变化，确定渗透水的入渗深度。

42.4 计算和记录

42.4.1 渗透系数应按下列公式计算：

1 近似值：

$$k_T = \frac{Q}{tA_h} \tag{42.4.1-1}$$

2 较精确值：

$$k_T = \frac{QH_1}{tA_h(H_{y1} + H_{y2} + H_{y3})} \tag{42.4.1-2}$$

$$k_{20} = k_T \frac{\eta_T}{\eta_{20}} \tag{42.4.1-3}$$

式中：Q——渗透水量(cm^3)，双环法为内环渗透水量；

t——时间(s)；

A_h——铁环面积(cm^2)，双环法为内环面积；

H_{y1}——试验时水的入渗深度(cm)；

H_{y2}——贮水坑中水的深度(cm)；

H_{y3}——相当于作用毛细管力的水柱高度(cm)，根据不同土质可按表 42.4.1 采用；

η_T、η_{20}——分别为 T℃和 20℃时水的动力黏滞系数(1×10^{-6}kPa·s)。比值 η_T/η_{20}与温度的关系可按本标准表 8.3.5-1 执行。

表 42.4.1 相当于作用毛细管力的水柱高度表(cm)

土的名称	H_{y3}	土的名称	H_{y3}
粉质黏土(CL)	100	黏土质细砂(SC)	30
砂质黏土(CLS)	80	细砂(SM)	20
粉土(ML)	60	中砂(SP)	10
砂质粉土(MLS)	40	粗砂(SW)	5

42.4.2 试坑注水法渗透试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.74 的规定。

43 原位直剪试验

43.1 一般规定

43.1.1 本试验方法可分为岩土体法向应力作用下沿剪切面剪切破坏的抗剪断试验，岩土体剪断后沿剪切面继续剪切的抗剪试验（摩擦试验），法向应力为零时岩体剪切的抗剪试验。

43.1.2 原位直剪试验可在试洞、试坑、探槽或大口径钻孔内进行。当剪切面水平或接近于水平时，可采用平推法或斜推法；当剪切面较陡时，可采用契形体法。

43.2 仪器设备

43.2.1 本试验所用的主要仪器设备应由垂直加荷装置、水平推力（拉力）装置、剪切盒、水平及垂直位移计组成。

43.2.2 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 附压力表的千斤顶 4 个～6 个，出力 150kN～200kN；压力表为 1.5 级。经称量的加重物若干块；

2 拉力计：量程为 0kN～100kN，最大允许差值为 1.0%F.S；

3 百分表：2 个～4 个，量程 10mm～25mm，分度值 0.01mm；

4 牵引及导向设备：钢丝绳、滑轮、三脚架、锚座等；

5 其他设备：加荷台、起重葫芦、秒表、土锚、工字梁、槽钢、垫块、滚珠轴承、链条钳。

43.3 操作步骤

43.3.1 同一组试验体的土性应基本相同，受力状态应与土体在工程中的受力状态相近。

43.3.2 开挖试坑时，应避免对试体的扰动，尽量保持土体结构及

含水率不产生显著变化。在地下水位以下进行试验时，应避免水压力及渗流对试体的影响。

43.3.3 每组试验土体不宜少于3个。剪切面积不宜小于0.3m²，高度不宜小于20cm或宜为最大土粒粒径的4倍～8倍，剪切面开缝应为最小粒径的1/3～1/4。

43.3.4 将修整好的试体在顶面放上盖板，周边套上剪切盒，剪切盒与试样间的间隙应用膨胀快凝水泥砂浆填充。剪切盒底边应在剪切面以上留适当的间隙。

43.3.5 施加的法向压力、剪切压力应位于剪切面、剪切缝的中心，或使法向压力与剪切压力的合力通过剪切面的中心，并保持法向压力不变。

43.3.6 最大的法向压力应大于设计荷载，并按等量分成4个～5个压力进行试验。法向压力施加方法如下：

1 当采用重物加荷时，可先在土试体上搁置加荷平台，均匀地逐渐加上重物。应避免加荷时发生偏心现象；

2 当采用千斤顶加荷时，安装好反力装置，按顺序装上千斤顶和滚轮及滑轨，必须保证试验全过程中作用力位于试体的中心。

43.3.7 施加法向压力后，让土体在此压力下进行压缩，并用百分表量测法向变形量。当法向变形量每小时小于0.01mm时，即达到相对稳定后，架设测试剪向位移的百分表即可开始剪切。

43.3.8 剪切时，施加剪应力的速率应适当选择。施加每级剪切压力可按预估最大压力的8%～10%分级等量施加，或按法向压力的5%～10%分级等量施加，一般每隔30s施加一级剪切荷载。

43.3.9 在施加每一级剪应力时，均应测记剪切力和土试块的剪向位移量及法向位移量。位移量应在加下一级剪应力前测试。同时观察周围土的变形现象，当剪切变形急剧增长或剪切变形量达试体尺寸的1/10时，即认为土体已经破坏，可停止试验。

43.3.10 试验停止后，掀开剪切盒及试样土块，记录剪切面的形态、土体的结构特征或软弱面的发育特点，并进行素描或照相。

43.3.11 按本标准上述规定，测定不同垂直压力下试块的抗剪强度。

43.3.12 当需要时可沿剪切面继续进行摩擦试验。

43.4 计算、制图和记录

43.4.1 作用于试块上的法向应力 σ 计算应符合下列规定：

1 采用重物加载法应按下式计算：

$$\sigma = \frac{W}{A_0} \times 10 \tag{43.4.1-1}$$

式中：σ——作用于试块上的法向压力(kPa)；

W——作用于加荷台上的轴向总荷载(N)；

A_0——试体或混凝土试块的面积(cm^2)。

2 采用千斤顶法加载法应按下式计算：

$$\sigma = \frac{pa_h}{A_0} \tag{43.4.1-2}$$

式中：p——单位压力，即垂直千斤顶上压力表的读数(kPa)；

a_h——千斤顶活塞面积(cm^2)。

43.4.2 土体的剪应力 τ 或抗滑强度 S 应按下式计算：

$$\tau(S) = \frac{F_H}{A} \times 10 \tag{43.4.2}$$

式中：F_H——试体或地基土破坏时的剪切力(当采用滑轮组加荷时，根据滑轮组合计算求得，当用千斤顶加载时，则为水平千斤顶上压力表的读数乘千斤顶活塞面积)(kN)；

A——土试体(混凝土试块)的面积(cm^2)。

43.4.3 绘制剪应力与剪切位移曲线(图 43.4.3)，应按现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021 的规定，确定比例强度 τ_e、屈服强度 τ_p 和峰值强度 τ_f。

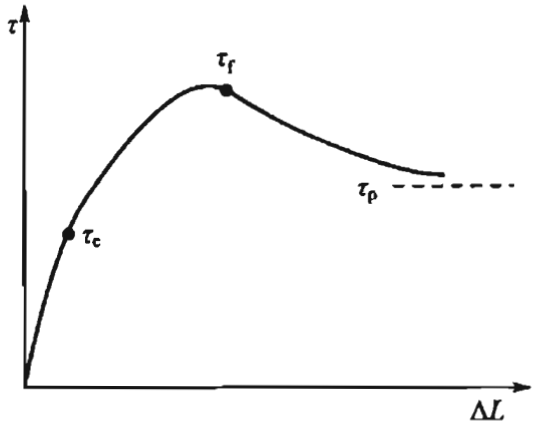


图 43.4.3　剪应力与剪切位移曲线

43.4.4　根据不同垂直压力的试验，以抗剪强度（一般为峰值强度）为纵坐标，垂直压力为横坐标，绘制抗剪强度与垂直压力关系曲线（图 43.4.4），确定相应的强度参数 c、φ。

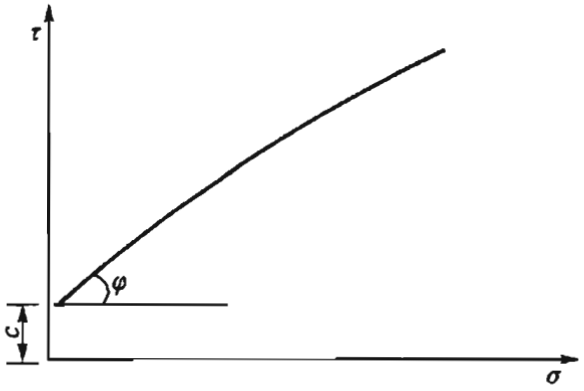


图 43.4.4　抗剪强度与垂直压力关系曲线

43.4.5　原位直剪试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.75 的规定。

44 十字板剪切试验

44.1 一般规定

44.1.1 十字板剪切试验按力的传递方式分为电测式和机械式两类。

44.1.2 对于均质的软黏土，十字板剪切试验点的布置宜按1.0m左右进行一点试验，对于非均质或夹薄层粉细砂的软黏土，宜先进行静力触探试验探清土层分布，选择软黏土进行试验。

44.2 电测式十字板剪切试验

44.2.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 压入主机：应能将十字板头垂直压入土中，可采用触探主机或其他压入设备；

2 十字板头：基本参数、机械和材料应符合现行国家标准《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》GB/T 15406的规定；

3 扭力量测仪表：传感器和量测仪表应符合现行国家标准《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》GB/T 15406的规定；

4 扭力装置：由蜗轮蜗杆、变速齿轮、钻杆夹具和手柄组成；

5 环境要求：仪器应在－10℃～＋45℃条件下能正常工作，应符合现行国家标准《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》GB/T 15406的规定；

6 其他：钻杆、水平尺、管钳等。

44.2.2 电测式十字板剪切试验应按下列步骤进行：

1 在试验点两旁将地锚旋入土中，安装和固定压入主机。用分度值为1mm的水平尺校平，并安装好施加扭力的装置。

2 将十字板头接在扭力传感器上并拧紧。把穿好电缆的钻

杆插入扭力装置的钻杆夹具孔内，将传感器的电缆插头与穿过钻杆的电缆插座连接并进行防水处理。接通量测仪表，然后拧紧钻杆。钻杆应平直，接头要拧紧。宜在十字板以上 1m 的钻杆接头处加扩孔器。

3 将十字板头压入土中预定的试验深度后，调整机架使钻杆位于机架面板导孔中心。当试验深度处为较硬的夹层时，应穿过夹层进行试验。

4 十字板头压入试验深度后，应静止 2min～3min 方可开始试验。

5 拧紧扭力装置上的钻杆夹具，并将量测仪表调零或读取初读数。

6 顺时针方向转动扭力装置上的手摇柄，当量测仪表读数开始增大时，即开动秒表，宜以 1°/10s～2°/10s 的速率旋转钻杆。每转 1°测记读数 1 次，当读数出现峰值或稳定值后，再继续旋转测记 1min。峰值或稳定值作为原状土剪切破坏时的读数。

7 在峰值或稳定值测试完成后，按顺时针方向旋转 6 圈，使十字板头周围的土充分扰动后，应按本条第 6 款的规定测定重塑土的不排水抗剪强度。重塑土的抗剪强度试验视工程需要而定。

8 如需继续进行试验，可松开钻杆夹具，将十字板头压至下一个试验深度，按上述的规定进行。

9 全孔试验完毕后，逐节提取钻杆和十字板头，清洗干净，检查各部件完好程度。

10 对需要钻孔进行十字板剪切试验的，则钻孔并下套管至欲测试深度以上 3 倍～5 倍套管直径或 0.5m 处，然后使用有孔螺旋钻清孔，并将十字板头、轴杆、钻杆逐节接好用管钳拧紧，然后下放孔内至十字板头与孔底接触，将十字板头压入钻孔底的深度不得小于钻孔或套管直径的 3 倍～5 倍或 0.5m。

11 试验时应避免十字板头被暴晒或受冻，对开口钢环十字板剪切仪，应修正轴杆与土间的摩阻力影响。

12　在工程试验前和结束后，应对十字板头的扭力传感器进行标定，每次标定的使用时效一般以1个月～3个月为宜，在使用过程中出现异常应重新标定，标定时所用的传感器、导线和测量仪器应与试验时相同。

13　水上进行十字板试验，当孔底土质软时，为防止套管在试验过程中下沉，应采用套管控制器。

44.2.3　各试验点土体的十字板剪切强度 C_u、C'_u 应按下列公式计算：

$$C_u = 10K'_1 \xi R_y \tag{44.2.3-1}$$

$$C'_u = 10K'_1 \xi R_c \tag{44.2.3-2}$$

$$K'_1 = \frac{2}{\pi D^2 H\left(1 + \frac{D}{3H}\right)} \tag{44.2.3-3}$$

式中：C_u——原状土不排水抗剪强度(kPa)；

C'_u——重塑土不排水抗剪强度(kPa)；

K'_1——与十字板头尺寸有关的常数(cm^{-3})；

ξ——传感器率定系数[N·(cm/με)]；

R_y——原状土剪切破坏时的读数(με)；

R_c——重塑土剪切破坏时的读数(με)；

D——十字板头直径(cm)；

H——十字板头高度(cm)。

44.2.4　土的灵敏度 S_t 应按下式计算：

$$S_t = C_u / C'_u \tag{44.2.4}$$

44.2.5　以深度为纵坐标，抗剪强度为横坐标，绘制抗剪强度 C_u 值随深度变化曲线。必要时以抗剪强度为纵坐标，转动角为横坐标，绘制各试验点的抗剪强度与转动角的关系曲线。

44.2.6　根据土层条件和地区经验，对实测土体的十字板不排水抗剪强度进行修正。

44.2.7　电测式十字板剪试验的记录格式应符合本标准附录D表D.76的规定。

44.3 机械式十字板剪切试验

44.3.1 机械式十字板剪切仪(图 44.3.1)应符合现行国家标准《土工试验仪器 剪切仪 第 2 部分:现场十字板剪切仪》GB/T 4934.2 的规定。

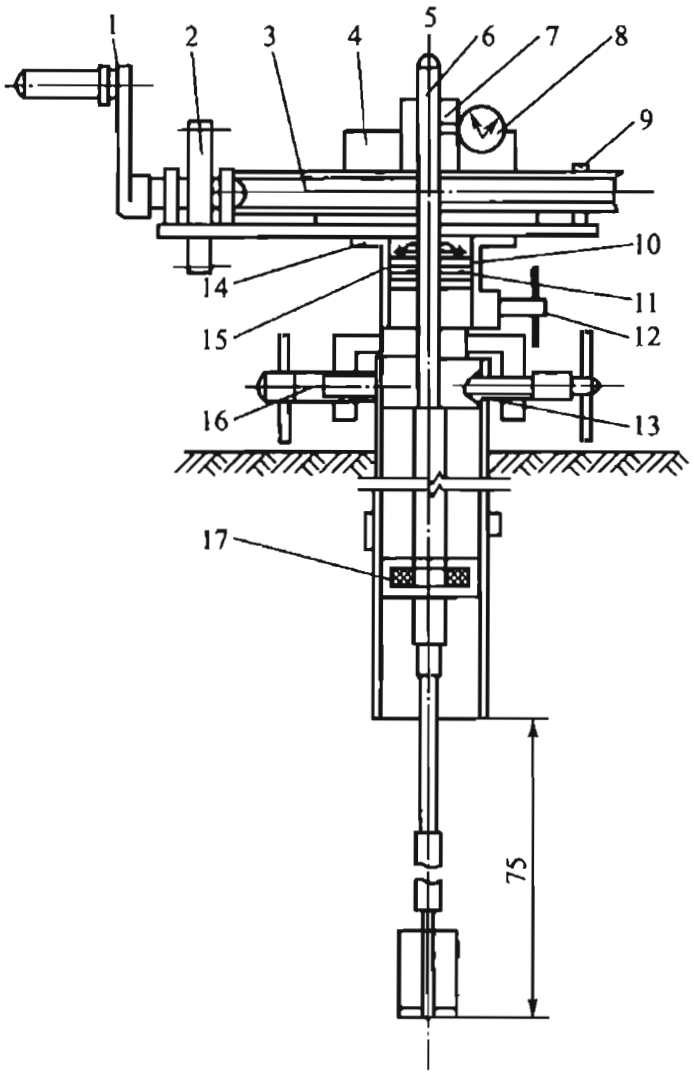


图 44.3.1 机械式十字板剪切仪示意图(单位:cm)

1—手摇柄;2—齿轮;3—涡轮;4—开口钢环;5—导杆;6—特制键;7—固定夹;8—量表;9—支座;10—压圈;11—平面弹子盘;12—锁紧轴;13—底座;14—固定套;15—横销;16—制紧轴;17—导轮

44.3.2 机械式十字板剪切仪由十字板头、钻杆和扭力装置组成。

1　十字板头：基本参数、机械和材料要求应符合本标准第44.2.1条第2款的规定。连接形式有离合式和牙嵌式(图44.3.2)；

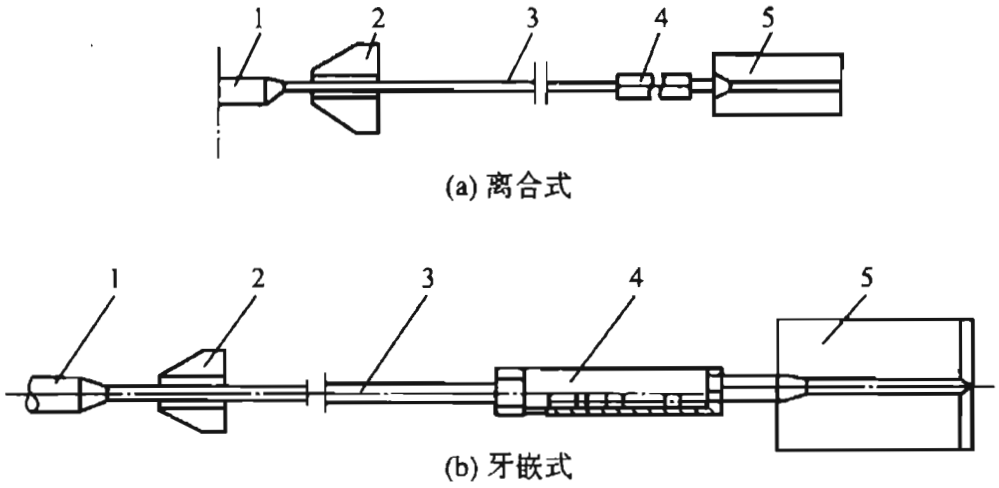


图44.3.2　十字板头离合器示意图

1—钻杆；2—导轮；3—轴杆；4—离合器；5—十字板头

2　钻杆：应符合现行国家标准《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》GB/T 15406标准的规定；

3　扭力装置：由开口钢环、刻度盘、旋转手柄等组成，量程和最大允许误差应符合现行国家标准《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》GB/T 15406的规定。

44.3.3　机械式十字板剪切试验应按下列步骤进行：

1　在试验地点按钻探深度，将套管下至欲测试深度以上3倍～5倍套管直径或0.5m处；

2　用木套管夹或链条钳将套管固定，以防套管下沉或扭力过大时套管发生反向旋转；

3　清除孔内残土，为避免试验土层受扰动，一般使用有孔螺旋钻清孔；

4　将十字板头、轴杆、钻杆逐节接好用管钳拧紧，然后下放孔内至十字板头与孔底接触；

5　接上导杆，将底座穿过导杆固定在套管上，用制紧螺丝拧

紧，然后将十字板头徐徐压至试验深度。当试验深度处为较硬夹层时，应穿过夹层进行试验；

6 十字板头压入试验深度后，应静止 2min～3min，方可开始试验；

7 套上传动部件，转动底板使导杆键槽与钢环固定夹键槽对正，用锁紧螺丝将固定套与底座锁紧，再转动手摇柄使特制键自由落入键槽，将指针对准任何一整数刻度，装上百分表并调至零位；

8 试验开始，以 1°/10s～2°/10s 的转速转动手摇柄，同时开动秒表，每转 1°测记百分表读数 1 次；当读数出现峰值或稳定值后，再继续旋转测读 1min，其峰值读数或稳定值读数即为原状土剪切破坏时量表最大读数 R_y；

9 拔出特制键，在导杆上端装上旋转手柄，顺时针方向转动 6 圈，使十字板头周围土充分扰动。取下旋转手柄，然后插上特制键，应按本条第 8 款的规定，测记重塑土剪切破坏时量表最大读数 R_y，重塑土的抗剪强度试验视工程需要而定；

10 对于离合式十字板头，拔下特制键，上提导杆 2cm～3cm，使离合齿脱离，再插上特制键，匀速转动手摇柄，测记轴杆与土摩擦的量表稳定读数 R_y；

11 对于牙嵌式十字板头，逆时针快速转动手柄十余圈，使轴杆与十字板头脱离，再顺时针方向匀速转动手柄，测记轴杆与土摩擦时的量表读数 R_y；

12 试验完毕，卸下转动部件和底座，在导杆孔中插入吊钩，逐节提取钻杆和十字板头。清洗十字板头，检查螺丝是否松动，轴杆是否弯曲；

13 水上进行十字板试验，当孔底土质软时，为防止套管在试验过程中下沉，应采用套管控制器；

14 对于开口钢环十字板剪切仪，应修正轴干与土体之间的摩擦力的影响；

15 在工程试验前和结束后，应对十字板头的扭力传感器进

行标定，在使用过程中出现异常应重新标定，标定时所用的传感器、导线和测量仪器应与试验时相同。

44.3.4 十字板剪切强度 C_u、C'_u 应按下列公式计算：

$$C_u = 10K'_2C(R_y - R_g) \tag{44.3.4-1}$$

$$C'_u = 10K'_2C(R_c - R_g) \tag{44.3.4-2}$$

$$K'_2 = \frac{2L_{lb}}{\pi D^2 H\left(1 + \frac{D}{3H}\right)} \tag{44.3.4-3}$$

式中：K'_2——与十字板头尺寸有关的常数(cm^{-2})；

C——钢环系数(N/mm)；

R_g——轴杆和钻杆与土摩擦时的量表最大读数(mm)；

L_{lb}——率定时的力臂长(cm)。

44.3.5 土的灵敏度的计算应按本标准式(44.2.4)计算。

44.3.6 制图应按本标准第44.2.5条的规定进行。

44.3.7 机械式十字板剪切试验的记录格式应符合本标准附录D表D.77的规定。

45 标准贯入试验

45.1 一般规定

45.1.1 土样应为原位的砂土、粉土和黏土。

45.1.2 对于流塑状态的软黏土层，不宜进行标准贯入试验。

45.2 仪器设备

45.2.1 标准贯入器(图 45.2.1)应由刃口形的贯入器靴、对开圆筒式贯入器身和贯入器头 3 部分组成。

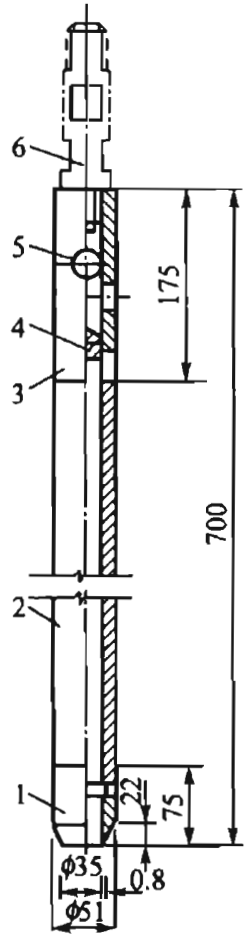


图 45.2.1 标准贯入器结构图(单位：mm)

1—贯入器靴；2—贯入器身；3—贯入器头；4—钢球；5—排水孔；6—钻杆接头

45.2.2 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 标准贯入器：其机械要求和材料要求应符合现行国家标准《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》GB/T 15406 和《土工试验仪器 贯入仪》GB/T 12746 的规定。具体规格应符合表 45.2.2 的要求；

表 45.2.2 贯入器规格

贯入器靴	长度(mm)	50～76
	刃口角度(°)	18～20
	靴壁厚(mm)	1.6
贯入器身	长度(mm)	＞500
	外径(mm)	51±1
	内径(mm)	35±1
贯入器头	长度(mm)	175

2 落锤(穿心锤)：钢锤质量为 63.5kg±0.5kg，应配有自动落锤装置，落距为 76cm±2cm；

3 钻杆：直径 42mm，抗拉强度应大于 600MPa；轴线的直线度最大允许误差应为±0.1%；

4 锤垫：承受锤击钢垫，附导向杆，两者总质量宜不超过 30kg。

45.3 操 作 步 骤

45.3.1 标准贯入试验孔采用回转钻进，当在地下水位以下的土层进行试验时，应使孔内水位略高于地下水位，以免出现涌砂和坍孔，必要时应下套管或用泥浆护壁，下套管时，套管不得进入钻孔底部的土层，以免使试验结果偏大。

45.3.2 先用钻具钻至试验土层标高以上 15cm 处，清除残土，清孔时应避免试验土层受到扰动。

45.3.3 贯入前应拧紧钻杆接头，将贯入器放入孔内，避免冲击孔

底，注意保持贯入器、钻杆、导向杆连接后的垂直度，孔口宜加导向器，以保证穿心锤中心施力。在贯入器放入孔内后，测定其深度，残土厚度不应大于 10cm。

45.3.4 采用自动落锤法，锤击速率宜采用每分钟 15 击～30 击，将贯入器打入土中 15cm 后，开始记录每打入 10cm 的锤击数，累计打入 30cm 的锤击数为标准贯入击数 N，同时记录贯入深度与试验情况。若遇密实土层，当锤击数已达到 50 击，而贯入深度尚未达到 30cm 时，不应强行打入，记录 50 击的贯入深度，并按本标准式(45.4.1)换算成相当于 30cm 的标准贯入试验锤击数 N_{30}。

45.3.5 旋转钻杆，提出贯入器，取贯入器中的土样进行鉴别、描述、记录，并量测其长度。将需要保存的土样仔细包装、编号，以备试验之用。

45.3.6 应按本标准第 45.3.1 条～第 45.3.4 条的规定进行下一深度的贯入试验，直到所需深度。

45.3.7 试验时每隔 1.0m～2.0m 进行一次试验，对于土质不均匀的土层进行标准贯入试验时，应增加试验点的密度。

45.4 计算、制图和记录

45.4.1 相应于贯入 30cm 的锤击数 N_{30} 应按下式换算：

$$N_{30} = \frac{0.3N_0}{\Delta S} \tag{45.4.1}$$

式中：N_{30}——贯入 30cm 相应的一阵击锤击数；

N_0——所选取贯入的锤击数；

ΔS——对应锤击数为 N_0 的贯入深度(m)。

45.4.2 以深度标高为纵坐标，击数为横坐标，绘制击数(N_i)和贯入深度标高(H)关系曲线。

45.4.3 标准贯入试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.78 的规定。

46 静力触探试验

46.1 一般规定

46.1.1 土样为原位的软土、一般黏性土、粉土、砂土或含少量碎石的土层。其中孔压静力触探试验中土样为饱和土。

46.1.2 静力触探可根据工程需要采用单桥探头、双桥探头或带孔隙水压力测量的单、双桥探头。试验时将圆锥形探头按一定速率匀速压入土中，可量测比贯入阻力、锥尖阻力、侧壁摩阻力和贯入时的孔隙水压力。

46.1.3 静力触探试验可用于：

1 划分土层，判定土层类别，查明软、硬夹层及土层在水平和垂直方向的均匀性；

2 评价地基土的工程特性，包括容许承载力、压缩性质、不排水抗剪强度、水平向固结系数、土体液化判别、砂土密实度；

3 探寻和确定桩基持力层，预估打入桩沉桩可能性和单桩承载力；

4 检验人工填土的密实度及地基加固效果。

46.2 仪器设备

46.2.1 本试验贯入装置可采用图 46.2.1 所示的形式。

46.2.2 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 触探主机：应能匀速地将探头垂直压入土中，其额定贯入力和贯入速度应满足现行国家标准《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》GB/T 15406 的规定。

2 反力装置：可用地锚、压重、车辆自重提供所需的反力。

3　探头：探头的结构按功能分为单桥探头、双桥探头和孔压探头：

1）规格和结构：单桥探头用于测定比贯入阻力 p_s，其结构主要由探头管、顶柱、变形柱（传感器）及锥头组成（图 46.2.2-1）；双桥探头用于测定锥尖阻力 q_c 和侧壁摩阻力 f_s，它与单桥探头的区别主要是有 2 个传感器（2 个电桥）分别测定锥头阻力和侧壁摩阻力，其结构可参照图 46.2.2-2；孔压静探探头，除测定锥尖阻力和侧壁摩阻力外，同时还测定孔隙压力及其消散，其结构可参照图 46.2.2-3。探头的锥头截面积最大允许误差为±3%，双桥摩擦筒表面积最大允许误差为±2%，锥头高度允许误差范围为－10%～0；

2）材料和机械要求应符合现行国家标准《土工试验仪器 触探仪》GB/T 12745 的规定；

3）探头传感器最大允许误差应符合现行国家标准《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》GB/T 15406 标准的规定。

4　探杆：探杆应符合现行国家标准《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》GB/T 15406 的规定。

5　量测仪器可采用下列仪器：

1）静态电阻应变仪：最大允许误差为±2%，分度值为 5με；

2）静力触探数字测力仪：最大允许误差，自动挡为 0.3%，手动挡为 0.5%；

3）电子电位差计：0.5 级；

4）深度记录装置：最大允许误差为±1%。

6　其他：水准尺、管钳。

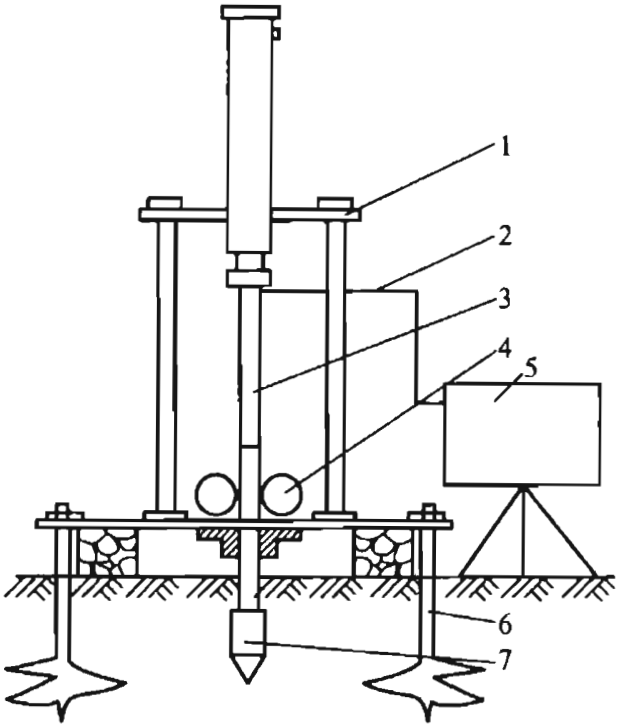


图 46.2.1　贯入装置示意图

1—触探主机；2—导线；3—探杆；4—深度转换装置；5—测量记录仪；6—反力装置；7—探头

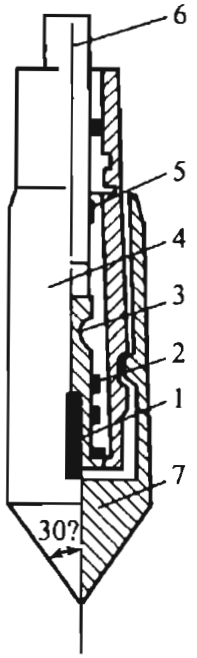


图 46.2.2-1　单桥探头

1—顶柱；2—电阻片；3—变形柱；4—探头筒；5—密封圈；6—电缆；7—锥头

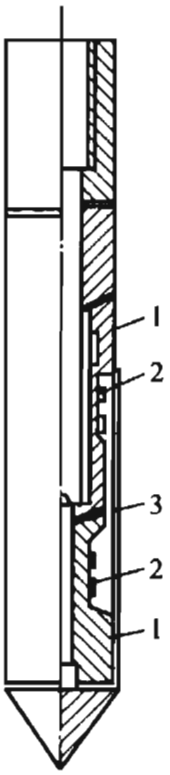


图 46.2.2-2　双桥探头

1—变形柱；2—电阻片；3—摩擦筒



图 46.2.2-3　孔压静力探头

1—透水石；2—孔压传感器；3—变形柱；4—电阻片

46.3 操作步骤

46.3.1 平整试验场地，设置反力装置。将触探主机对准孔位，调平机座，用分度值为1mm的水准尺校准，并紧固在反力装置上。

46.3.2 将已穿入探杆内的传感器引线按要求接到量测仪器上，打开电源开关，预热并调试到正常工作状态。

46.3.3 贯入前应试压探头，检查顶柱、锥头、摩擦筒等部件工作是否正常。当测孔隙压力时，应使孔压传感器透水面饱和。正常后将连接探头的探杆插入导向器内，调整垂直并紧固导向装置，必须保证探头垂直贯入土中。启动动力设备并调整到正常工作状态。

46.3.4 采用自动记录仪时，应安装深度转换装置，并检查卷纸机构运转是否正常；采用电阻应变仪或数字测力仪时，应设置深度标尺。

46.3.5 将探头按(1.2±0.3)m/min均速贯入土中0.5m～1.0m左右，冬季应超过冻结线，然后稍许提升5cm～10cm，使探头传感器处于不受力状态。待探头温度与地温平衡后(仪器零位基本稳定)，将仪器调零或记录初读数，即可进行正常贯入。在深度6m内，一般每贯入1m～2m，应提升探头检查温漂并调零；6m以下每贯入5m～10m应提升探头检查回零情况，当出现异常时，应检查原因及时处理。

46.3.6 贯入过程中，当采用自动记录时，应根据贯入阻力大小合理选用供桥电压，并随时核对，校正深度记录误差，做好记录；使用电阻应变仪或数字测力计时，一般每隔0.1m～0.2m记录读数1次。

46.3.7 孔压探头在贯入前，应采用抽气饱和等方法确保探头应变腔为已排除气泡的液体所饱和，并在现场采取措施保持探头的饱和状态，直至探头进入地下水位以下的土层为止，在进行孔压静探过程中应连续贯入，不得中间提升探头。

46.3.8 当测定孔隙水压力消散时，应在预定的深度或土层停止贯入，立即锁定钻杆并同时启动测量仪器，测定不同时间的孔隙水压力消散值，直至基本稳定，在消散过程中不得碰撞和松动探杆。

46.3.9 为保证探头孔压系统的饱和，在地下水位以上的部分应预先开孔，注水后在进行贯入。

46.3.10 当贯入预定深度或出现下列情况之一时，应停止贯入：

1 触探主机达到额定贯入力，探头阻力达到最大容许压力；

2 反力装置失效；

3 发现探杆弯曲已达到不能容许的程度。

46.3.11 试验结束后应及时起拔探杆，并记录仪器的回零情况。探头拔出后应立即清洗上油，妥善保管，防止探头被曝晒或受冻。

46.3.12 试验应注意下列事项：

1 试验点与已有钻孔、触探孔、十字板试验孔等的距离，不宜小于20倍已有的孔径，且不宜小于2m；

2 试验前应根据试验场地的地质情况，合理选用探头，使其在贯入过程中，仪器的灵敏度较高而又不致损坏；

3 试验点必须避开地下设施，以免发生意外；

4 由于人为或设备的故障而使贯入中断10min以上时，应及时排除故障。故障处理后，重新贯入前应提升探头，测记零读数。对超深触探孔分两次或多次贯入时，或在钻孔底部进行触探时，在深度衔接点以下的扰动段，其测试数据应舍弃；

5 应注意安全操作和安全用电；

6 当使用液压式、电动丝杆式触探主机时，活塞杆、丝杆的行程不得超过上、下限位，以免损坏设备；

7 采用拧锚机时，应待准备就绪后才可启动。拧锚过程中如遇障碍，应立即停机处理；

8 锥尖阻力及侧壁阻力的“采零”应在试验终止时进行，孔压的“采零”应在探头提出地面更换透水元件时进行；

9　探头测力传感器应连同仪器、电缆进线定期标定，室内探头标定测力传感器的非线性误差、重复性误差、滞后误差、温度漂移、归零等最大允许误差应为±1%F.S，现场归零误差应为±3%，绝缘电阻不应小于500MΩ。

46.4　计算、制图和记录

46.4.1　原始数据的处理应按下列规定进行：

1　零点读数：当有零点漂移时，一般按回零段内以线性内插法进行校正，校正值等于读数值减零读数内插值；

2　记录深度与实际深度有误差时，应按线性内插法进行调整。

46.4.2　比贯入阻力 p_s、锥头阻力 q_c、侧壁摩阻力 f_s、摩阻比 F_m 及孔隙水压力 u 应按下列公式分别计算：

$$p_s = k_p \varepsilon_p \tag{46.4.2-1}$$

$$q_c = k_q \varepsilon_q \tag{46.4.2-2}$$

$$f_s = k_f \varepsilon_f \tag{46.4.2-3}$$

$$u = k_u \varepsilon_u \tag{46.4.2-4}$$

$$F_m = \frac{f_s}{q_c} \tag{46.4.2-5}$$

式中：k_p、k_q、k_f、k_u——p_s、q_c、f_s、u 对应的率定系数（kPa/με 或 kPa/mV）；

ε_p、ε_q、ε_f、ε_u——单桥探头、双桥探头、摩擦筒及孔压探头传感器的应变量或输出电压（με 或 mV）。

46.4.3　静探径向固结系数 C_h 应按下式估算：

$$C_h = \frac{R_t^2}{t_{50}} T_{50} \tag{46.4.3}$$

式中：T_{50}——与圆锥几何形状、透水板位置有关的相应于孔隙压力消散度50%的时间因数（对锥角60°、截面积为10cm²、透水板位于锥底处的孔压探头，取 $T_{50}=5.6$）；

R_1——探头圆锥底半径(cm)；

t_{50}——实测孔隙消散度达50%的经历时间(s)。

46.4.4 以深度(H)为纵坐标，以锥头阻力 q_c(或比贯入阻力 p_s)、侧壁摩阻力 f_s、摩阻比 F 及孔隙压力 u 为横坐标，绘制 q_c-H(p_s-H)、f_s-H、F-H 及 u-H 关系曲线。

46.4.5 孔隙水压力消散曲线按下列规定绘制：

1 数据取舍应符合下列规定：由于土的变异、孔压传感器含气以及操作等原因，使实测的初始孔隙水压力滞后很多或波动太大的，这些数据应舍弃；

2 将消散数据归一化为超孔隙压力，消散度 $\overline{U}$ 应按下式计算：

$$\overline{U}=\frac{u_t-u_0}{u_i-u_0} \tag{46.4.5}$$

式中：$\overline{U}$——t 时孔隙水压力消散度(%)；

u_t——t 时孔隙水压力实测值(kPa)；

u_0——初始孔隙水压力，即静水压力(kPa)；

u_i——开始(或贯入)时的孔隙水压力($t=0$)(kPa)。

3 以消散度为纵坐标，以时间为横坐标，绘制 $\overline{U}$-lg$t$ 的关系曲线。

46.4.6 本试验的记录格式应符合本标准附录D表D.79的规定。

47 动力触探试验

47.1 一般规定

47.1.1 动力触探试验根据锤击能量分为轻型、重型和超重型3种。

47.1.2 轻型动力触探适用于浅部的素填土、砂土、粉土和黏性土，重型动力触探适用于中、粗、砾砂和中密以下碎石土，超重型适用于卵石、密实和很密的碎石土以及砾石类土。

47.2 仪器设备

47.2.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

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，其规格应符合表47.2.1的规定；

表47.2.1 动力触探设备规格

设备类型		轻型	重型	超重型
落锤	质量 m(kg)	10±0.2	63.5±0.5	120±1
	落距 H(m)	0.50±0.02	0.76±0.02	100±0.02
探头	直径(mm)	40	74	74
	截面积(cm^2)	12.6	43	43
	圆锥角(°)	60	60	60
触探杆	直径(mm)	25	42,50	50～63
	每米质量(kg)	—	<8	<12
	锥座质量(kg)	…	10～15	—
指标		贯入30cm的读数 N_{10}	贯入10cm的读数 $N_{63.5}$	贯入10cm的读数 N_{120}

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；

3　探头的尺寸如图 47.2.1-1 和图 47.2.1-2 所示。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；

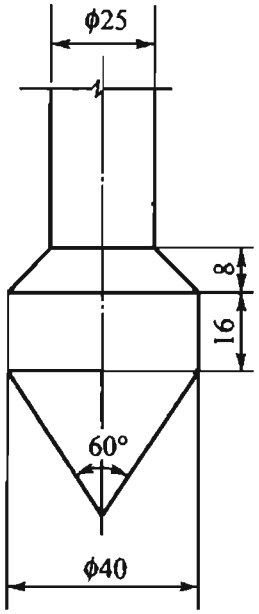


图 47.2.1-1　轻型动力触探探头（单位：mm）

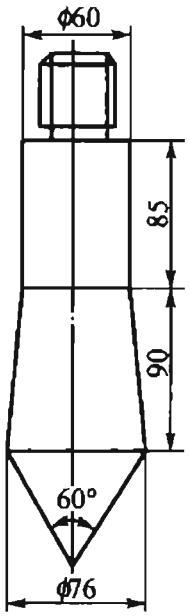


图 47.2.1-2　重型、超重型动力触探探头（单位：mm）

4　触探杆最大偏斜度为±2%，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。

47.2.2　试验时的仪器设备应符合下列规定：

1　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；

2　锤击速率每分钟宜为15击～30击，每贯入1m，宜将探杆转动一圈半，当贯入深度超过10m时，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，只是在接探杆时才允许停顿。

47.3　操作步骤

47.3.1　轻型动力触探法试验应按下列步骤进行：

1　先用轻便钻具钻至试验土层标高以上0.3m处，将探头和探杆放入到孔内，保持探杆垂直，就位后对所需试验土层连续进行触探；

2　试验时，穿心锤落距为0.50m±0.02m，使其自由下落，记录每打入土层中0.30m时所需的锤击数，最初0.30m可以不记，然后连续向下贯入，记录下一深度的锤击数，重复试验到预定的试验深度；

3　若需描述土层情况时，可将触探杆拔出，取下探头，换贯入器进行取样；

4　如遇密实坚硬土层，当贯入0.30m所需锤击数超过100击或贯入0.15m超过50击时，即可停止试验；如需对下卧土层进行试验时，可用钻具穿透坚实土层后再贯入；

5　本试验一般用于贯入深度小于4m的土层。必要时也可在贯入4m后用钻具将孔掏清后再继续贯入2m。

47.3.2　重型动力触探法试验应按下列步骤进行：

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 0.76m±0.02m。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，记录锤击数；也可以记录每一阵击的贯入度，然后再换算为每贯入 0.10m 所需的锤击数。

5　对于一般砂、圆砾和卵石，触探深度不宜超过 12m～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。当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。可先进行贯入，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　本试验用于贯入深度小于 12m～15m，当超过 15m 时，需考虑探杆侧壁摩阻的影响。

47.3.3　超重型动力触探法试验应按下列步骤进行：

1　贯入时穿心锤自由下落，落距为 100m±0.02m。贯入深度不宜超过 20m，超过该深度时，需考虑触探杆侧壁摩阻的影响。

2　其他步骤可参照本标准第 47.3.2 条第 1 款～第 5 款的规定进行。

3　本试验 N_{120} 的正常击数为 3 击～40 击，击数超过这个范围，如遇软黏土，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。

47.4　计算、制图和记录

47.4.1　触探指标应按下式计算：

$$N_{63.5} = \frac{100N_0}{\Delta S} \tag{47.4.1}$$

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}；

N_0——相应的一阵击锤击数；

ΔS——一阵击的贯入度(mm)。

47.4.2 动贯入阻力 q_d 应按下式计算：

$$q_d = \frac{Q_{lc}^{\ 2}}{(Q_{lc} + Q_{ct})} \cdot \frac{H_l N_0}{A_t \Delta S} \times 1000 \tag{47.4.2}$$

式中：q_d——动贯入阻力(kPa)；

Q_{lc}——落锤重(kN)；

Q_{ct}——触探器被打入部分(包括探头、触探杆、锤座和导向杆)的重量(kN)；

H_l——落距(m)；

A_t——探头面积(m^2)。

47.4.3 动力触探曲线应按下列规定绘制：

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 以深度为纵坐标，贯入指标为横坐标，绘制贯入指标与触探深度曲线。

47.4.4 动力触探试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.80 和表 D.81 的规定。

48 旁压试验

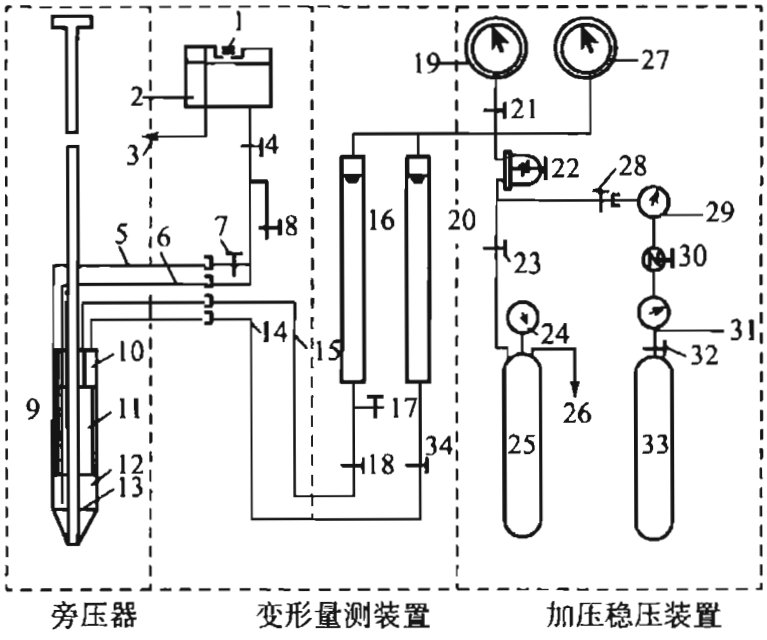
48.1 一般规定

48.1.1 土样为原位的黏性土、粉土、砂土、碎石土、残积土、极软岩或软岩。

48.1.2 本试验方法为预钻式旁压试验。

48.2 仪器设备

48.2.1 旁压仪由旁压器、加压稳定装置和变形测量装置及导管等部分组成，其结构框图见图 48.2.1。



注：⊣⊢—为快速接头

图 48.2.1 旁压仪结构图

1—安全阀；2—水箱；3—水箱加压；4—注水阀；5—注水管 2；6—注水管 1；7—中腔注水；8—排水阀；9—旁压器；10—上腔；11—中腔；12—下腔；13—导水管；14—导压管；15—导压管 4；16—量管；17—调零阀；18—测压阀；19—600kPa 压力表；20—辅管；21—低压表阀；22—调压器；23—手动加压阀；24—2500kPa 压力表；25—贮气罐；26—手动加压；27—1600kPa 压力表；28—氮气加压阀；29—2500kPa 压力表；30—减压阀；31—25000kPa 压力表；32—氮气源阀；33—高压氮气源；34—辅管阀

48.2.2 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 旁压器：为圆柱形骨架，外套有密封的弹性膜。预钻式一般分上、中、下三腔。中腔为测试腔，上、下腔为辅助腔。上、下腔用金属管连通，而与中腔严密隔离。自钻式一般为单腔，旁压器中央为导水管，用以疏导地下水，以利于将旁压器放到测试位置。在弹性膜外按需要可加装一层可扩张的金属保护套(铠装保护)。其规格应符合表 48.2.2 的要求。

表 48.2.2 旁压仪规格

旁压器				体变管		压力		量管截面积 (cm^2)
外径 (mm)	中腔长度 (mm)	总长度 (mm)	总长度外径 (mm)	量程 (cm^3)	最大允许误差 (%)	量程 (MPa)	最大允许误差 (%)	
44～90	200～250	450～980	4～10	0～600	±1.5	0～7.0	±1.5	13.2～34.5

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。其量程和最大允许误差应符合表 48.2.2 的要求。

3 变形量测装置：一般由体变管或液位仪及辅管组成，其量程和最大允许误差应符合表 48.2.2 的要求。也可采用横向变形传感器直接测出径向变形。其技术条件应符合现行国家标准《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。

5 自钻式旁压仪的自钻钻头、钻头转速、钻进速率、刃口距离、泥浆压力和流量等应符合有关规定。

48.3 操作步骤

48.3.1 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。要求孔壁垂直、呈完整的圆形，尽可能减少孔壁土体扰动。

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

48.3.3 试验点布置原则：必须保证旁压器上、中、下三腔都在同一土层中，试验点垂直间距不宜小于 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。

48.3.4 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。

48.3.5 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。

48.3.6 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。在此过程中需不停地拍打尼龙管并摇晃旁压器，以便尽量排除旁压器和管路中滞留的气泡。为了加速注水和排除气泡，亦可向水箱稍加压力。当量管和辅管水位升到刻度零或稍高于零，即可终止注水，关闭注水阀和中腔注水阀。

48.3.7 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。

48.3.8 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。

48.3.9 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 100kPa～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。

48.3.10 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 100kPa～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。

48.3.11 加压等级一般为预计极限压力的1/7～1/5，初始加荷等级可取小值，也可参照表48.3.11选用。必要时可做卸荷再加荷试验，测定再加荷旁压模量。

表48.3.11 试验加压等级(kPa)

土的工程特性	加压等级	
	临塑压力前	临塑压力后
淤泥、淤泥质土、流塑状态的黏质土、饱和或松散的粉细砂	<15	≤30
软塑状的黏质土、疏松的黄土、稍密很湿的粉细砂，稍密的中、粗砂	15～25	30～50
可塑至硬塑状态的黏质土，一般黄土，中密至密实很湿的粉细砂，稍密至中密的中、粗砂	25～50	50～100
坚硬状态的黏质土，密实的中、粗砂	50～100	100～200
中密至密实的碎石类土	≥100	≥200

48.3.12 各级压力下的相对稳定时间标准为1min或3min。相对稳定时间标准为1min时，加荷后15s、30s、60s测读变形量；相对稳定时间标准为3min时，加荷后60s、120s、180s测读变形量。

48.3.13 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。

48.3.14 试验结束后，采取以下方法使弹性膜恢复原状：

1 试验深度小于2m时，把调压阀按逆时针方向拧到最松位置，即与大气相通，利用弹性膜的约束力回水至量管和辅管，当水位接近零时，即可关闭量管阀和辅管阀；

2 试验深度大于2m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。

48.3.15 终止试验消压后，必须等 2min～3min 后才能取出旁压器，并仔细检查、擦洗、装箱。

48.3.16 当需进行下一试验点时，重复本标准第 48.3.1 条～第 48.3.15 条。

48.4 计算、制图和记录

48.4.1 校正压力应按下式计算：

$$p_x = p_m + p_w - p_i \tag{48.4.1}$$

式中：p_x——校正后的单位压力(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确定。

48.4.2 校正变形量应按下列公式计算：

$$V = H_x A \tag{48.4.2-1}$$

$$H_x = H_m - a(p_m + p_w) \tag{48.4.2-2}$$

式中：V——校正后的体变量(cm^3)；

H_x——校正后的量管水位下降值(cm)；

A——量水管截面积(cm^2)；

H_m——量水管水位下降值(cm)；

a——仪器综合变形校正系数(cm/kPa)。

48.4.3 以校正后的体变 V 为纵坐标，校正后的压力 p 为横坐标，绘制 p-V 曲线(图 48.4.3)。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 $100cm^3$；横坐标为单位压力 p 值，以 1cm 代表 100kPa。或根据具体情况选择比例标准。图幅尺寸要求宜为 10cm×10cm。

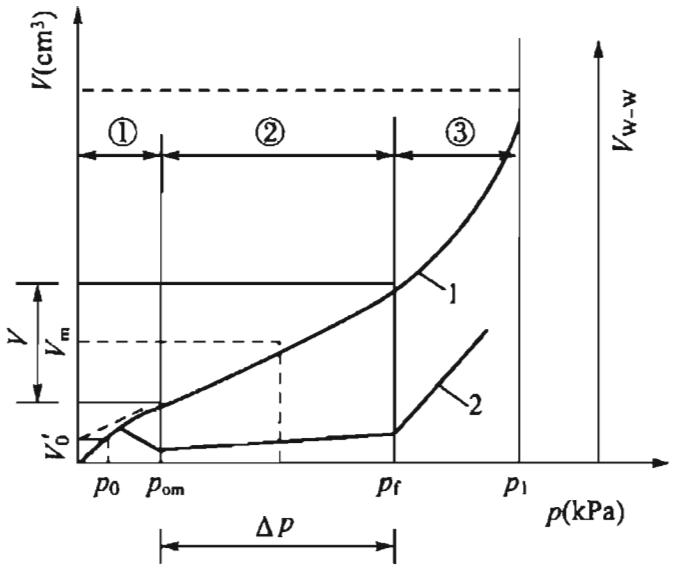


图 48.4.3　旁压曲线

1—旁压曲线；2—蠕变曲线

48.4.4　在绘制的 p-V 曲线上，确定三个压力特征值：p_0、p_f、p_l。

1　将旁压曲线直线段延长与纵坐标相交，交点为 V_0，由 V_0 作与 p 轴平行线相交于曲线的一点，其对应的压力为原位水平土压力 p_0 值；

2　取旁压曲线直线段的终点，即曲线与直线段的第 2 个切点所对应的压力为临塑压力 p_f 值；

3　曲线过临塑压力后，趋向于与纵轴平行的渐近线时，其对应的压力为极限压力 p_l 值，当从 p-V 曲线上不能直接求出极限压力 p_l 值时，可用曲线外推方法至最大体积增量值 V_l（$=V_c+2V_0$，V_c 为旁压器中腔初始体积，V_0 为孔穴体积与初始体积的差值），取对应 V_l 的压力为极限压力 p_l。或用倒数曲线法求取。

48.4.5　可从三个压力特征值确定承载力的基本值 f_{0k}。

1　临塑压力法：

$$f_{0k} = p_f - p_0 \tag{48.4.5-1}$$

2　极限压力法：

$$f = (p_l - p_0)/F_s \tag{48.4.5-2}$$

式中：p_0——原位水平单位土压力(kPa)；

F_a——安全系数。

48.4.6 不排水抗剪强度应按下式计算：

$$C_u = p_f - p_0 \tag{48.4.6}$$

48.4.7 侧压力系数应按下式估算：

$$K_0 = \frac{p_0}{z\gamma} \tag{48.4.7}$$

式中：z——旁压器中心点至地面的土柱高度(m)；

γ——土的容重(kN/m³)。

48.4.8 旁压模量应按下式计算：

$$E_m = 2(1+\mu)(V_c + V_m)\frac{\Delta p}{\Delta V} \tag{48.4.8}$$

式中：E_m——由旁压试验确定的模量，称为旁压模量(kPa)；

μ——泊松比；

V_c——旁压器(中腔)初始体积(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)；

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)。

48.4.9 旁压试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.82 的规定。

49 载荷试验

49.1 一般规定

49.1.1 载荷试验方法可用于测定承压板下应力主要影响范围内岩土的承载力和变形模量，包括平板载荷试验和螺旋板载荷试验，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。

49.1.2 平板载荷试验方法适用于各类地基土。它所反映的相当于承压板下1.5倍～2.0倍承压板直径或宽度的深度范围内地基土的强度、变形的综合性状。浅层平板载荷试验适用于浅层地基土，深层平板载荷试验适用于试验深度不小于5m的深层地基土和大直径桩的桩端土。

49.1.3 螺旋板载荷试验适用于黏土和砂土地基，用于深层地基土或地下水位以下的地基土。

49.2 平板载荷试验

49.2.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 承压板：平板载荷试验一般采用圆形或正方形钢质板，也可采用现浇或预制混凝土板，应具有足够的刚度。土的浅层平板载荷试验承压板的面积不应小于0.25m^2，对于软土和粒径较大的填土，不应小于0.50m^2；对于含碎石的土类，承压板宽度应为最大碎石直径的10倍～20倍，加固后复合地基宜采用大型载荷试验。土的深层平板载荷试验承压板面积宜选用0.5m^2，紧靠承压板周围外侧的土层高度不应少于80cm。

2 加荷装置：包括压力源、载荷台架或反力构架；

1）压力源：可用液压装置或重物，出力最大允许误差为

±1%F.S;安全过负荷率应大于120%;

2)载荷台架或反力构架:必须牢固稳定、安全可靠,其承受能力不小于试验最大荷载的1.5倍~2.0倍;

3 沉降观测装置:其组合必须牢固稳定、调节方便。位移仪表可采用大量程百分表或位移传感器等,其量测最大允许误差应为±1%F.S。

49.2.2 平板载荷试验试验应按下列步骤进行:

1 在有代表性的地点,整平场地,开挖试坑。浅层平板载荷试验的试坑宽度不应小于承压板直径或宽度的3倍,深层平板载荷试验的试井直径应等于承压板直径,当试井直径大于承压板直径时,紧靠承压板周围土的高度不应小于承压板直径。

2 试验前应保持试坑或试井底的土层避免扰动,在开挖试坑及安装设备中,应将坑内地下水位降至坑底以下,并防止因降低地下水位而可能产生破坏土体的现象。试验前应在试坑边取原状土样2个,以测定土的含水率和密度。

3 设备安装应符合图49.2.2-1、图49.2.2-2的要求,步骤应符合下列规定:

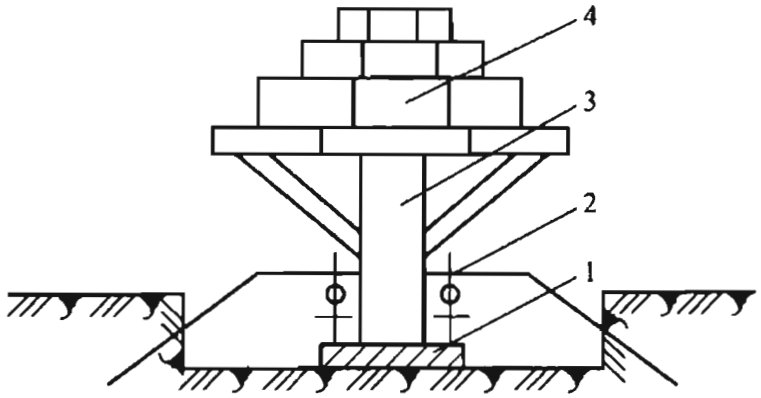


图49.2.2-1 重物式装置示意图

1—承压板;2—沉降观测装置;3—荷载台架;4--重物

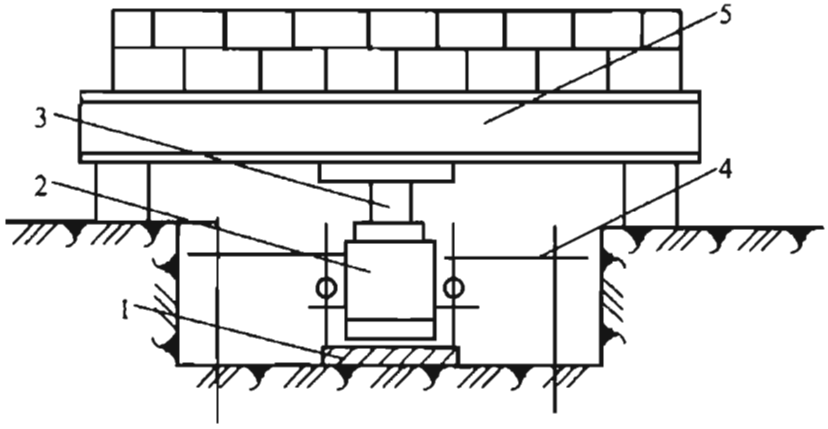


图 49.2.2-2　反力式装置示意图

1—承压板；2—加荷千斤顶；3—荷重传感器；4—沉降观测装置；5—反力装置

1）安装承压板前应整平试坑面，铺设不超过 20cm 厚的中砂垫层找平，使承压板与试验面平整接触，并尽快安装设备；

2）安放载荷台架或加荷千斤顶反力构架，其中心应与承压板中心一致。当调整反力构架时，应避免对承压板施加压力；

3）安装沉降观测装置。其固定点应设在不受变形影响的位置处。沉降观测点应对称设置。

4　试验点应避免冰冻、曝晒、雨淋，必要时设置工作棚。

5　载荷试验加荷方式应采用分级维持荷载沉降相对稳定法（常规慢速法），有地区经验时，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 级～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，载荷量测最大允许误差应为±1%F.S。每级荷载增量一般取预估试验土层极限压力的 1/10～1/12，当不易预估其极限压力时，可参考表 49.2.2 所列增量选用。

表 49.2.2　荷载增量表（kPa）

试验土层特征	荷载增量
淤泥、流塑状黏质土、饱和或松散的粉细砂	≤15

续表 49.2.2

试验土层特征	荷载增量
软塑状黏质土、疏松的黄土、稍密的粉细砂	15～25
可塑～硬塑状黏质土、一般黄土、中密～密实的粉细砂	25～100
坚硬的黏质土、中粗砂、碎石类土、软质岩石	50～200

6 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，使所加的荷载保持稳定。

7 稳定标准可采用相对稳定法，即每施加一级荷载，待沉降速率达到相对稳定后再加下一级荷载。

8 应按时、准确观测沉降量。每级荷载下观测沉降的时间间隔一般采用下列标准：对于慢速法，每级荷载施加后，间隔 5min、5min、10min、10min、15min、15min 测读 1 次沉降，以后每隔 30min 测读 1 次沉降，当连续 2 小时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标准，施加下一级荷载。

9 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，荷载-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 6%；

5）当达不到极限荷载时，最大压力应达预期设计压力的 2.0 倍或超过第一拐点至少三级荷载。

10 当需要卸载观测回弹时，每级卸载量可为加载增量的 2 倍，每卸一级荷载后，间隔 15min 观测一次，1h 后再卸第二级荷载，荷载卸完后继续观测 3h。

11 对于深层平板载荷试验，加荷等级可按预估承载力的1/15～1/10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，荷载-沉降曲线出现明显的陡降段，且沉降量超过承压板直径的4%；

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6%；

4) 当持力层土层坚硬，沉降量很小时，最大加载量不应小于设计要求的2.0倍。

49.2.3 对原始数据检查、校对后，整理出荷载与沉降值、时间与沉降值汇总表。

49.2.4 绘制 p-s 曲线(图49.2.4)，必要时绘制 s-t 曲线或 s-lg$t$ 曲线，如果 p-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。

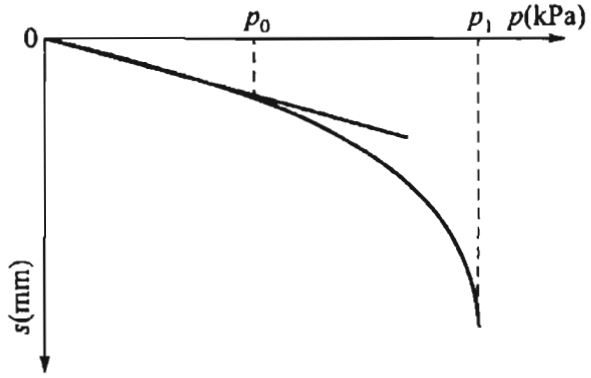


图49.2.4 典型 p-s 曲线

49.2.5 特征值的确定应符合下列规定：

1 当曲线具有明显直线段及转折点时，以转折点所对应的荷载定为比例界限压力和极限压力；

2 当曲线无明显直线段及转折点时，可按本标准第49.2.2条第9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)的压力评定地基土称承压力。

49.2.6 承载力基本值 f_0 可按现行国家标准《建筑地基基础设计

规范》GB 50007 确定。

1　比例界限明确时，取该比例界限所对应的荷载值，即 $f_0=p_l$；

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，若压板面积为 0.25m²～0.50m²，对低压缩性土和砂土，取 $s=(0.01\sim0.015)b$ 对应的荷载值；对中、高压缩性土，取 $s=0.02b$ 对应的荷载值。

49.2.7　变形模量计算应符合下列规定：

1　浅层平板载荷试验法可按下列公式计算：

$$E_0=0.785(1-\mu^2)D_c\frac{p}{s}\quad\text{（承压板为圆形）} \tag{49.2.7-1}$$

$$E_0=0.886(1-\mu^2)a_c\frac{p}{s}\quad\text{（承压板为方形）} \tag{49.2.7-2}$$

2　深层平板载荷试验法可按下式计算：

$$E_0=\omega' D_c\frac{p}{s} \tag{49.2.7-3}$$

式中：E_0——试验土层的变形模量（kPa）；

μ——土的泊松比（碎石取 0.27，砂土取 0.30，粉土取0.35，粉质黏土取 0.38，黏土取 0.42）；

D_c——承压板的直径（cm）；

p——单位压力（kPa）；

s——对应于施加压力的沉降量（cm）；

a_c——承压板的边长（cm）；

ω'——与试验深度和土类有关的系数，可按表 49.2.7 选用。

表 49.2.7　深层载荷试验计算系数 ω'

土类	碎石土	砂土	粉土	粉质黏土	黏土
$d/z=0.30$	0.477	0.489	0.491	0.515	0.524
$d/z=0.25$	0.469	0.480	0.480	0.506	0.514
$d/z=0.20$	0.460	0.471	0.471	0.497	0.505

续表 49.2.7

土类	碎石土	砂土	粉土	粉质黏土	黏土
$d/z=0.15$	0.444	0.454	0.454	0.479	0.487
$d/z=0.10$	0.435	0.446	0.446	0.470	0.478
$d/z=0.05$	0.427	0.437	0.437	0.461	0.468
$d/z=0.01$	0.418	0.429	0.429	0.452	0.459

49.2.8 平板载荷试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.83 的规定。

49.3 黄土浸水载荷试验

49.3.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 承压板：面积不宜小于 0.5m^2，其余应符合本标准第 49.2.1 条第 1 款的规定；

2 加荷装置应符合本标准第 49.2.1 条第 2 款的规定；

3 沉降观测装置应符合本标准第 49.2.1 条第 3 款的规定。

49.3.2 黄土浸水载荷试验应按下列步骤进行：

1 单线法：

1) 整平场地，开挖试坑。应在同一土层内平行挖 3 个试坑，间距不应大于 6m；

2) 设备安装应按本标准第 49.2.2 条第 2 款的规定进行。承压板的安装应按本标准第 49.2.2 条第 3 款第 1 项的规定进行，在承压板以外的试坑面积也应铺设 5cm～10cm 厚的砂砾石滤层。沉降观测的装置固定点不得受浸水影响；

3) 施加荷载增量取预估湿陷起始压力的 1/5，或采用 10kPa～20kPa。试验终止压力不宜小于 200kPa；

4) 按相对稳定法进行天然湿度下的加载试验，直到预估的湿陷起始压力；

5) 向试坑注水。试坑内的水头高度应高于滤层顶面 3cm。

并按相对稳定法的观测要求观测浸水沉降量(湿陷量),直至每小时的沉降量不大于0.1mm为止;

6)应按本标准第49.3.2条第1款第4项、第5项的规定,选用大小或小于预估湿陷压力50kPa压力下,进行其余两个试坑的试验。

2 双线法:

1)应按本标准第49.3.2条第1款第1项的规定,在同一土层内平行开挖2个试坑;

2)应按本标准第49.3.2条第1款第2项的规定安装试验设备;

3)应按本标准第49.3.2条第1款第3项的规定确定加载等级;

4)一个试坑按相对稳定法在天然湿度下进行加载试验,另一个试坑在预先浸水饱和后再按相对稳定法进行加载试验。

3 饱水单线法:

1)应按本标准第49.3.2条第1款第1项的规定平整场地,开挖1个试坑;

2)应按本标准第49.3.2条第1款第2项的规定安装试验设备;

3)应按本标准第49.3.2条第1款第3项的规定确定荷载等级;

4)向试坑内注水,使3.5倍承压板直径(或宽度)深度范围内的土层达到饱和。饱和标准采用饱和含水率;

5)应按相对稳定法进行加荷试验。

49.3.3 绘制p-s曲线,然后在图上取不同压力下的湿陷量(s_{sh}值),并绘出p-s_{sh}曲线(图49.3.3-1、图49.3.3-2)。

49.3.4 一般取p-s_{sh}曲线转折点对应的荷载作为湿陷起始压力(p_{sh})。当曲线上的转折点不明显时,可取浸水下沉量与承压板宽度之比$\left(\frac{s}{b}\right)$等于0.02所对应的荷载作为湿陷起始压力。

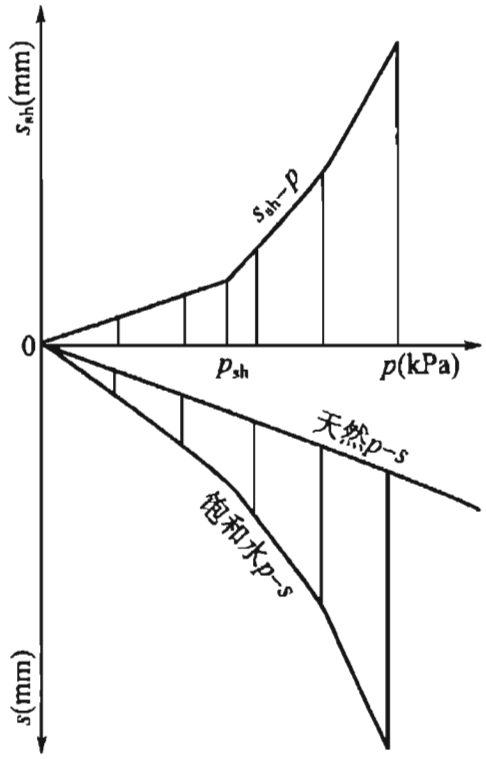


图 49.3.3-1　双线法求湿陷起始压力

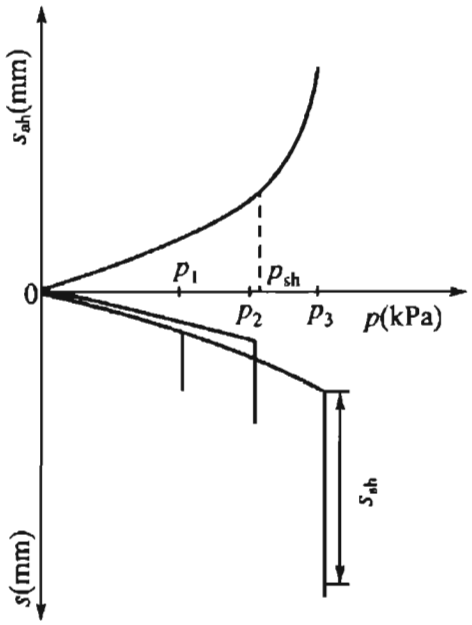


图 49.3.3-2　单线法求湿陷起始压力

49.4　螺旋板载荷试验

49.4.1　仪器设备(图 49.4.1)应由螺旋承压板、加荷装置、位移

观测装置组成，并应符合下列规定：

1 螺旋承压板：螺旋板尺寸参数及测力传感器的最大允许压力宜符合现行国家标准《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》GB/T 15406 的规定；

2 加荷装置：包括压力源和反力构架，其技术条件应符合本标准第 49.2.1 条第 2 款的规定；

3 位移观测装置应符合本标准第 49.2.1 条第 3 款的规定。

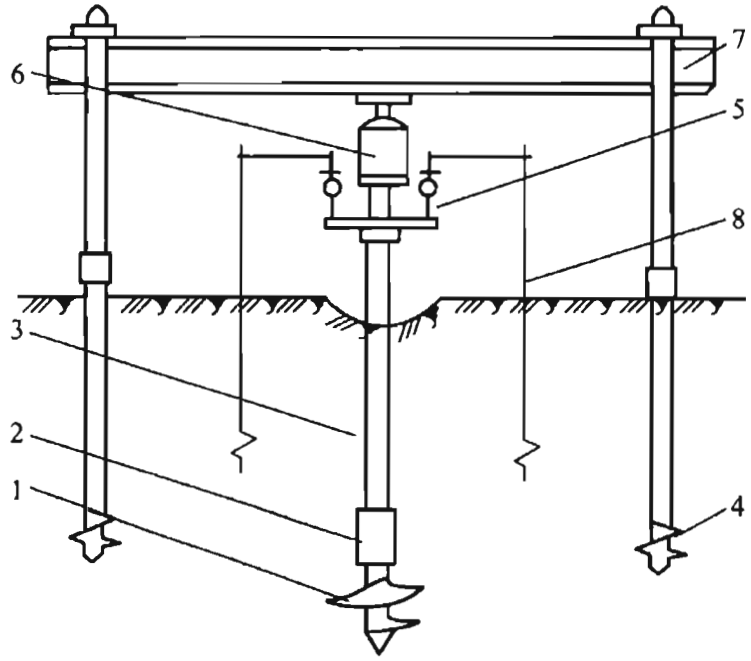


图 49.4.1 螺旋板荷载试验装置示意图

1—螺旋承载板；2—测力传感器；3—传力杆；4—反力地锚；5—位移计；6—油压千斤顶；7—反力钢梁；8—位移固定锚

49.4.2 螺旋板载荷试验应按下列步骤进行：

1 将试验场地平整，设置反力装置及位移计的固定地锚。

2 选择适宜尺寸的螺旋承压板旋钻至预定深度，旋钻时应控制每旋转一周钻进一螺距，尽可能减小对土体的扰动程度。

3 安装加荷千斤顶，其中心应与螺旋承压板中心一致；安装位移计，并调整零点。

4 按下列方式进行加荷：

1）当采用应力控制式时，按等量分级施加，荷载增量应按本标准第 49.2.2 条第 5 款的规定，每级荷载确保稳压；

2）当采用应变控制式时，应连续加荷，控制沉降速度应为 0.25mm/min～2.00mm/min；

3）试验的加荷等级、试验结束条件应符合本标准第 49.2.2 条第 4 款～第 9 款的规定；

4）按本标准第 49.4.2 条第 4 款第 1 项、第 2 项的规定加荷时，应进行沉降观测。应力控制式加荷沉降观测的时间顺序宜采用 0.10min、0.25min、1.00min、2.25min、4.00min 等按 $\sqrt{t}$ 读取，直至沉降基本稳定，再加下一级荷载，该时间顺序用于绘制 $\sqrt{t}$-s 曲线；应变控制式加载沉降观测每隔 30s 等间距读取 1 次，试验至土体破坏。

5 土体破坏后，卸除加荷和位移观测装置，再将螺旋承压板旋钻至下一个预定的试验深度，应按本标准第 49.4.2 条第 3 款、第 4 款的规定进行试验。

49.4.3 应按本标准第 49.2.3 条、第 49.2.4 条的规定，进行计算并绘制 p-s 曲线（图 49.4.3）。

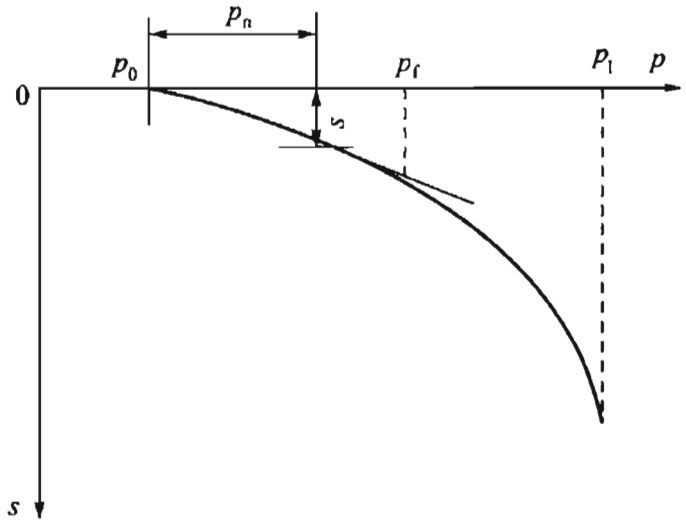


图 49.4.3 p-s 曲线

49.4.4 根据各级荷载下的沉降 s 与时间 t 的数据，绘制 s-$\sqrt{t}$ 曲线(图 49.4.4)。

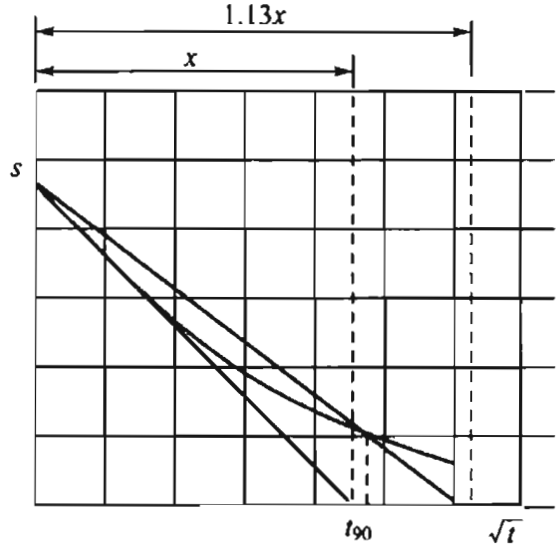


图 49.4.4 s-$\sqrt{t}$曲线

49.4.5 特殊值应按下规定确定：

1 原位有效自重压力 p_0：取 p-s 曲线的直线段与 p 轴的交点作为 p_0 值；

2 临塑压力 p_f：相应于 p-s 曲线的直线段终点的压力；

3 极限压力 p_l：相应于 p-s 曲线末尾直线段起点的压力；

4 固结度达 90%所需时间 t_{90}：以 s-$\sqrt{t}$ 曲线初始直线段与沉降坐标(纵坐标)的交点作为理论零点，其延长段交于沉降稳定值的渐近线(横坐标)上，见图 49.4.4 的 x 段，再作与初始直线斜率 1.13 倍的直线，该直线与 s-$\sqrt{t}$ 曲线的交点所对应的时间为 t_{90}。

49.4.6 变形模量应按下式计算：

$$E_{sc} = m_{sc} p_n \left(\frac{p}{p_n}\right)^{1-a_p} \qquad (49.4.6\text{-}1)$$

可根据 p-s 曲线求得变形模量系数 m_{sc}：

$$m_{sc} = \frac{A_p}{s} \cdot \frac{p - p'_0}{p_a} D_{sc} = \frac{A_p}{s} \cdot \frac{p_n}{p_a} D_{sc} \qquad (49.4.6\text{-}2)$$

式中：E_{sc}——螺旋板试验土的变形模量(kPa)；

m_{sc}——变形模量系数，对正常饱和黏土一般为 5～50；

p_a——标准压力，取 100kPa；

p——单位压力(kPa)，取直线段内任一压力值；

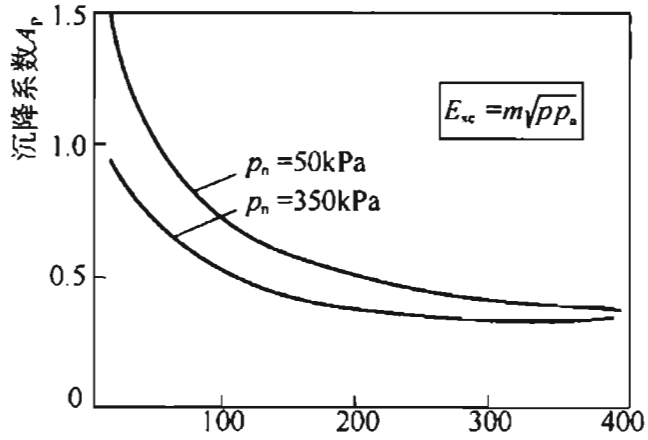
a_p——应力指数，超固结饱和土取 1，砂与粉土取 1/2，正常固结饱和黏土，取 $a=0$；

A_p——无量纲沉降系数，与 p_0、p_n有关，查图 49.4.6 确定；

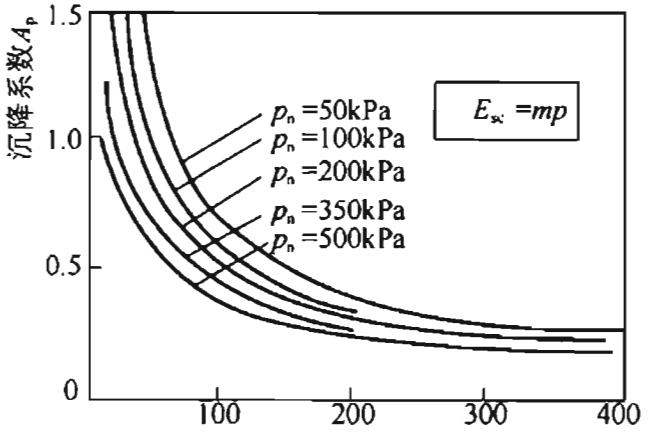
s——对应于施加压力的沉降量(cm)；

p_0'——原位有效自重压力(kPa)；

D_{sc}——螺旋承压板直径(cm)。



(a)有效自重压力p_0(kPa)



(b)有效自重压力p_0(kPa)

图 49.4.6　沉降系数 A_p 值

49.4.7 径向固结系数应按下式估算：

$$C_h = T_{90}\frac{R_{sc}^2}{t_{90}} = 0.335\frac{R_{sc}^2}{t_{90}} \tag{49.4.7}$$

式中：C_h——径向固结系数(cm^2/s)；

T_{90}——相应于90%固结度的时间因数，$T_{90}=0.335$；

R_{sc}——螺旋承压板半径(cm)；

t_{90}——固结度达90%的所需时间(s)。

49.4.8 螺旋板载荷试验的记录格式应符合本标准附录D表D.83的规定。

50 波速试验

50.1 一般规定

50.1.1 波速试验分跨孔法、单孔波速法(检层法)和面波法。

50.1.2 跨孔法以一孔为激振孔,另布置2孔或3孔作检波孔,测定直达的压缩波初至和第一个直达剪切波的到达时间,计算传播速度。常用于多层体系地层中。

50.1.3 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。

50.1.4 面波法,本试验采用稳态振动法。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。

50.2 仪器设备

50.2.1 本试验所用的主要仪器设备由激振器、检波器、放大器、记录器、测斜仪、零时触发器和套管组成。

50.2.2 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定:

1 激振器:可采用机械震源、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;

2 检波器:采用三分量检波器,其谐振频率一般为8Hz～27Hz,检波器必须置于密封防水的无磁性圆筒内;

3 放大器:采用低噪声多通道放大器,噪声水平应低于2μV,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；

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，记录最大允许误差应为 1ms～2ms；

5 测斜仪：应能测量 0°～360°的方位角及 0°～30°的倾角，倾角测量允许差值应为 0.1°；

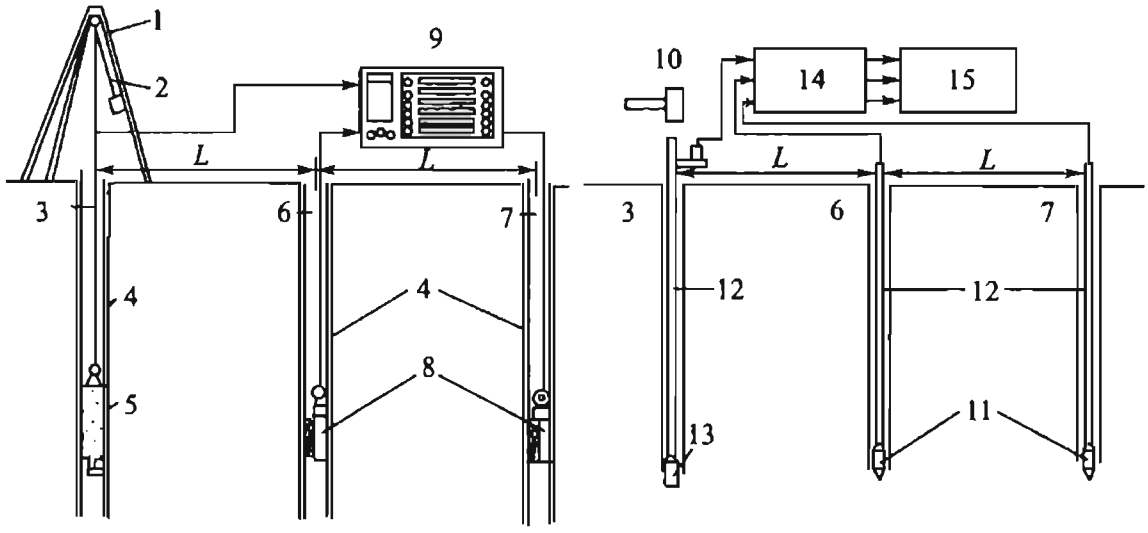
6 零时触发器：采用压电晶体触发器或机械触发装置，其升压时间延迟应不大于 0.1ms；

7 套管：内径为 76mm～85mm，壁厚为 6mm～7mm 的硬聚氯乙烯塑料管。

50.3 操 作 步 骤

50.3.1 跨孔波速法试验应按下列步骤进行：

1 试验孔布置（图 50.3.1）应符合下列规定：



(a)下套管　　(b)不下套管

图 50.3.1 试验布置图

1—三脚架；2—绞车；3—震源孔；4—套管；5—井下剪切波锤；6—接收孔 1；7—接收孔 2；8—井下检波器；9—信号增强地震仪；10—锤子；11—检波器；12—钻杆；13—取土器；14—测震放大器；15—振子示波器

1）振源孔和测试孔应布置在一条直线上，试验孔应尽量布

置在地表高程相差不大的地段，若地表起伏较大，必须准确测量孔口高程；

2）一组试验布置3孔，试验孔的间距，在土层中宜取2m～5m，在岩层中宜取8m～15m，测点垂直间距宜取1m～2m，近地表测点宜布置在2/5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。

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3d～6d，方可进行测试。

5 为准确地算出各测点的直达波传播距离，当测试孔深度大于15m时，应进行激振孔和测试孔倾斜度和倾斜方位的量测，测点间距宜取1m。

6 将井下剪切波锤利用气囊，或用弹簧、机械扩展装置等方法固定。然后拉动上、下质量块，上、下冲击固定锤体，使土层水平向产生S波，用放入孔内贴壁式三分量检波器由上往下逐点测量。从孔口往下2/5孔距处为第1个测点，然后以1m～2m的间距连续测量。每个地层一般要有2个～5个测点，每个测点需测量2次～4次。每次测试时，振源中心和检波器中心须在同一高程上。

7 当用几台钻机分段钻进时，待钻至预定测试深度后，提出钻机，将振源装置和检波器分别放入各钻孔底，进行测试。采用此方法时，为确保振源装置和检波器顺利放到所测深度处，孔底残余扰动土应小于10cm厚，否则应重新清除孔底浮土。

50.3.2 单孔波速法试验应按下列步骤进行：

1 在所选定的试验点沿垂直向进行钻孔，并绘制钻孔柱状图，将三分量检波器固定在孔内预定深度出，并紧贴孔壁；

2 可采用地面激振动或孔内激振，进行孔内激振时，在距孔口 1.0m～3.0m 处放一长度为 2m～3m 的混凝土板或木板，木板上应放置约 500kg 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；

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 1m～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。

50.3.3 稳态振动面波法试验应按下列步骤进行：

1 选择试验场地，并进行整平；

2 可采用瞬态法或稳定法，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(图 50.3.3)；

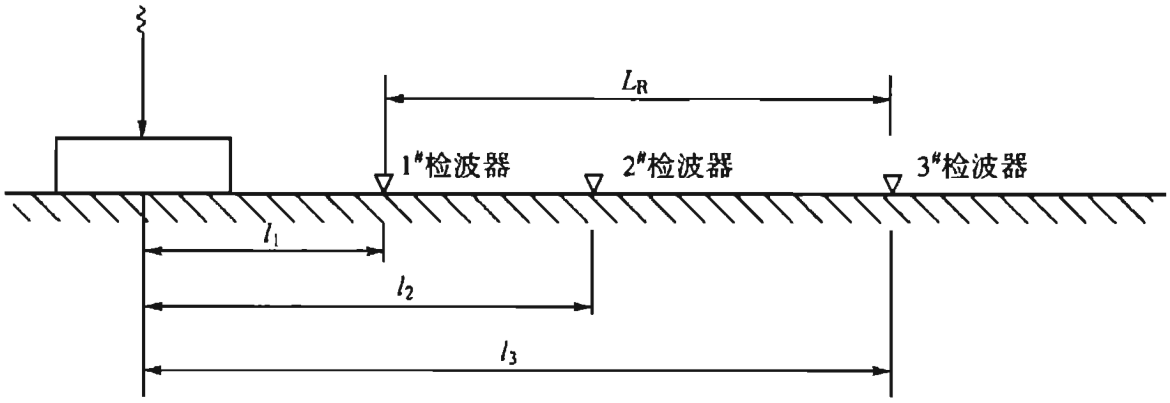


图 50.3.3 面波法(稳定振动)布置图

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，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，$l=L_R, 2L_R, 3L_R$……进行测试。试验应重复多次，一般 5 组即可。

50.4 计算、制图和记录

50.4.1 波形识别按下列规定进行：

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 50.4.1(a)所示；

3 周期比压缩波周期至少增加 2 倍以上，如图 50.4.1(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[图 50.4.1(c)]。

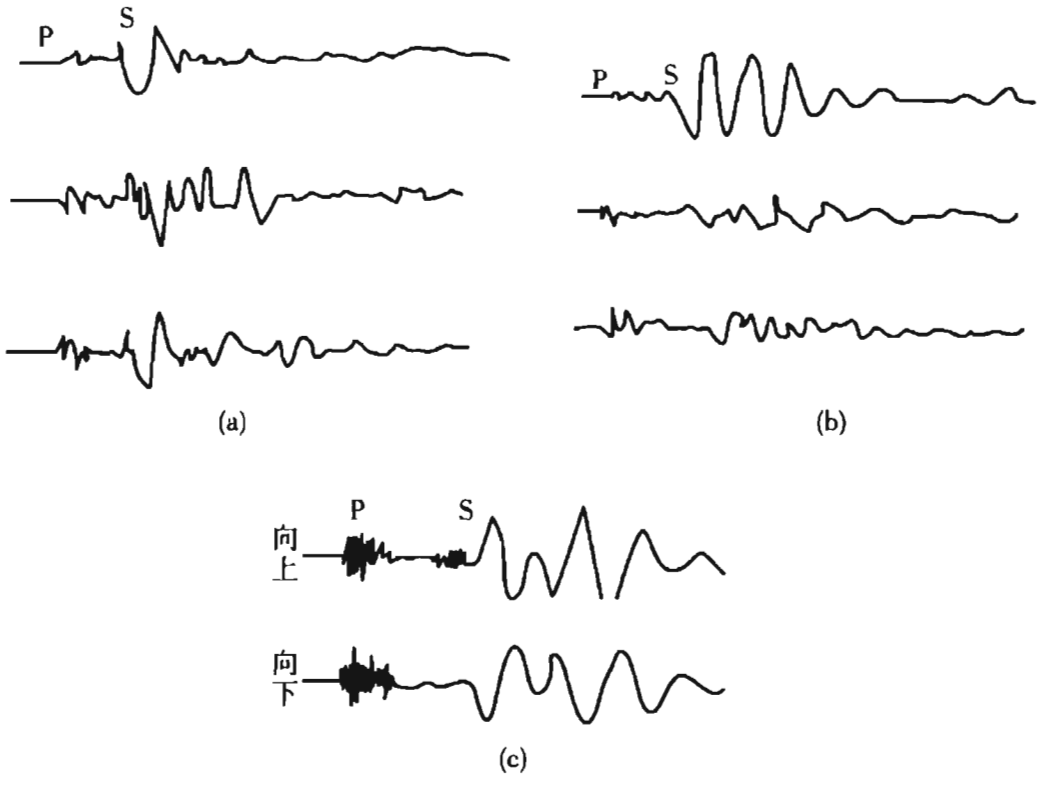


图 50.4.1 P 波、S 波的识别

50.4.2 应正确计算激振点与检波点之间的距离，对跨孔法，如孔有偏斜，应对孔距进行校准。

50.4.3 压缩波、剪切波和瑞利波的传播速度应按下列公式计算，其最大允许误差应为±5%：

$$v_P = \frac{L_P}{t_P} \tag{50.4.3-1}$$

$$v_S = \frac{L_S}{t_S} \tag{50.4.3-2}$$

$$v_R = \frac{L_R}{t_R} = \frac{L_R}{\frac{2\pi}{\omega}} = L_R f \tag{50.4.3-3}$$

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})。

50.4.4 动剪切模量、动弹性模量和泊松比应按下列公式计算：

$$G_d = \rho v_S^2 \tag{50.4.4-1}$$

$$E_d = \frac{\rho v_S^2 (3v_P^2 - 4v_S^2)}{v_P^2 - v_S^2} \tag{50.4.4-2}$$

或

$$E_d = 2\rho v_S^2 (1 + \mu_d) \tag{50.4.4-3}$$

$$E_d = \frac{\rho v_P^2 (1 + \mu_d)(1 - 2\mu_d)}{1 - \mu_d} \tag{50.4.4-4}$$

$$\mu_d = \left[\left(\frac{v_P}{v_S}\right)^2 - 2\right] \Big/ \left[2\left(\frac{v_P}{v_S}\right)^2 - 2\right] \tag{50.4.4-5}$$

式中：G_d——地层的动剪切模量(kPa)；

v_S——地层的剪切波波速(m/s)；

v_P——地层的压缩波波速(m/s)；

E_d——地层的动弹性模量(kPa)；

μ_d——地层的动泊松比。

50.4.5 根据整理和计算的数据，以深度为纵坐标，压缩波波速、剪切波速、动剪切模量、动弹性模量为横坐标，绘出 v_P、v_S、G_d、E_d 值与深度变化的关系曲线。

50.4.6 波速试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.84、表 D.85的规定。

51 化学分析试样风干含水率试验

51.1 一般规定

51.1.1 土样为除有机质含量较高以及含石膏较多的土之外的各种土。

51.1.2 本试验方法所用试样应为风干试样。

51.2 仪器设备

51.2.1 电子天平称量应为200g，分度值应为0.001g。

51.2.2 本试验所用的其他仪器设备应符合下列规定：

1 烘箱：附温度控制装置；

2 铝盒或水分皿；

3 干燥器，盛有氯化钙或其他干燥剂。

51.3 操作步骤

51.3.1 将洁净的铝盒置于105℃～110℃的烘箱中烘焙3h～4h，取出，置于干燥器中冷却至室温，用电子天平称量。如此反复操作，直至恒量为止，恒量稳定标准为前后两次质量相差不大于0.001g。记下铝盒质量。

51.3.2 将风干试样2g～3g放入上述称量过的铝盒中，用电子天平称量，准确至0.001g。

51.3.3 将盛有试样的铝盒置于烘箱中，敞开铝盒，在105℃～110℃下烘焙6h～8h。

51.3.4 取出铝盒，将盒盖盖好，放在干燥器中冷却至室温，立即称量。

51.3.5 再将铝盒放在烘箱中，敞开铝盒，在105℃～110℃下烘

焙 3h～4h，取出铝盒，将盒盖好，放在干燥器中冷却至室温，立即称量。如此反复操作直至恒量为止，记下质量。

51.4 计算和记录

51.4.1 风干土含水率应按下式计算：

$$w_0 = \left(\frac{m_0}{m_d} - 1\right) \times 100 \tag{51.4.1}$$

式中：w_0——风干土含水率(%)；

m_0——风干试样质量(g)。

51.4.2 风干土含水率结果应计算至 0.01%，平行试验最大允许差值应为±0.5%，试验结果取其算术平均值。

51.4.3 化学分析试样风干含水率试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.86 的规定。

52 酸碱度试验

52.1 一般规定

52.1.1 土样为各种土类。

52.1.2 本试验方法采用电位法测定。

52.2 仪器设备和试剂

52.2.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 酸度计(pH 计)：附玻璃电极、甘汞电极或复合电极；

2 天平：称量 200g，分度值 0.01g；

3 电动振荡器；

4 容量瓶；

5 广口瓶；

6 烧杯；

7 定性滤纸；

8 温度计。

52.2.2 本试验所用的试剂应符合下列规定：

1 邻苯二甲酸盐标准缓冲溶液(pH＝4.01)：称取在温度 105℃～110℃下经 2h～3h 烘干恒重的邻苯二甲酸氢钾($KHC_8H_4O_4$) 10.21g，用无二氧化碳纯水溶解后，移至 1000mL 容量瓶中，稀释至刻度，摇匀。

2 磷酸盐标准缓冲溶液(pH＝6.87)：称取在温度 105℃～110℃下经 2h～3h 烘干恒重的磷酸氢二钠(Na_2HPO_4) 3.53g 和磷酸二氢钾(KH_2PO_4) 3.39g，用无二氧化碳纯水溶解后，移至 1000mL 容量瓶中，稀释至刻度，摇匀。

3 硼酸盐标准缓冲溶液(pH＝9.18)：称取硼砂($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$)

3.80g，用无二氧化碳纯水溶解后，移至1000mL容量瓶中，稀释至刻度，摇匀，转入密闭的塑料瓶中保存。此溶液保存使用期不宜超过2个月，若出现发霉、浑浊，不宜使用。

4 饱和氯化钾(KCl)溶液：向适量纯水中加入氯化钾，边加边搅拌，直至不溶解为止。

52.3 操作步骤和记录

52.3.1 土悬液制备应称取通过2mm筛的风干试样10g，置于100mL广口瓶中，加50mL无二氧化碳纯水(土水比为1∶5)。在振荡器上振荡3min，静止30min，待测。

52.3.2 将少许土悬液盛于小烧杯中，将酸度计上的玻璃电极和甘汞电极(或复合电极)插入杯中，轻轻摇动烧杯，使土悬液均匀接触电极2min～3min，弃去。如此反复用土悬液洗涤1次～2次。再取土悬液按仪器说明书测定pH值，准确至0.01。同时测定土悬液温度，进行温度补偿。两次平行最大允许误差应为±0.1。

52.3.3 测量完毕，关闭电源，用纯水洗净电极，并用滤纸吸干电极表面的水分或将玻璃电极浸泡在饱和氯化钾溶液中。

52.3.4 酸碱度试验的记录格式应符合本标准附录D表D.87的规定。

53 易溶盐试验

53.1 一般规定

53.1.1 土样为各种土类。

53.1.2 本试验方法所用试样应为风干试样。

53.2 浸出液制取

53.2.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 过滤设备：包括真空泵、平底瓷漏斗、抽滤瓶；

2 离心机：转速为 10000r/min；

3 天平：称量 200g，分度值 0.01g；

4 其他：广口瓶、细颈瓶等、微孔滤膜。

53.2.2 浸出液制取法试验应按下列步骤进行：

1 称取 2mm 筛下风干试样 50g～150g（视土中含盐量和分析项目而定），准确至 0.01g。置于广口瓶，按土水比例 1∶5 加入纯水，振荡 3min，抽气过滤；另取试样 3g～5g，按本标准第 51.3.1 条～第 51.3.5 条的规定测定风干含水率；

2 将滤纸用纯水浸湿后贴在漏斗底部，漏斗装在抽滤瓶上，连通真空泵抽气，使滤纸与漏斗贴紧，将振荡后的土悬液摇匀，倾入漏斗中抽气过滤；

3 当发现滤液混浊时，需重新过滤。经反复过滤仍然浑浊，应用离心机分离，或用微孔滤膜过滤。所得的透明滤液即为土的浸出液，贮于细口瓶中供分析用。

53.3 易溶盐总量测定（质量法）

53.3.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1　分析天平：称量 200g，分度值 0.0001g；

2　烘箱：附温度控制装置；

3　其他：水浴锅、蒸发皿、表面皿、移液管、干燥器。

53.3.2　本试验所用的试剂应符合下列规定：

1　15%双氧水（化学纯）；

2　2%碳酸钠（Na_2CO_3）溶液。

53.3.3　易溶盐总量测定试验应按下列步骤进行：

1　用移液管吸取浸出液 50mL～100mL 注入已恒量的蒸发皿中，放在水浴锅上蒸干；当蒸干残渣中呈现黄褐色时，表明残渣含有有机质，加入少量 15%双氧水，继续在水浴上加热，反复处理至残渣发白，以完全除去有机质；

2　将蒸发皿放入烘箱，在温度 105℃～110℃下烘干 4h～8h，取出后放入干燥器中冷却，称蒸发皿加试样的总质量，反复进行至两次质量差值不大于 0.0001g；

3　当浸出液蒸干残渣中含有大量结晶水时，将使测得的易溶盐含量偏高，遇此情况，可用两个蒸发皿，一个加浸出液 50mL，另一个加纯水 50mL，然后各加等量 2%碳酸钠溶液，搅拌均匀后按上述的规定操作，烘干温度改为 180℃。

53.3.4　易溶盐含量应按下列公式计算，计算至 0.1g·kg^{-1}，平行最大允许差值应为±0.2g·kg^{-1}，取算术平均值。

1　未经 2%碳酸钠溶液处理的易溶盐含量应按下式计算：

$$\omega(\text{易溶盐}) = \frac{(m_{mz} - m_m)\dfrac{V_w}{V_{xl}}}{m_d \times 10^{-3}} \qquad (53.3.4\text{-}1)$$

式中：ω（易溶盐）——易溶盐含量（g·kg^{-1}）；

m_{mz}——蒸发皿加烘干残渣质量（g）；

m_m——蒸发皿质量（g）；

V_w——制取浸出液所加纯水量（mL）；

V_{xl}——吸取浸出液量（mL）。

2　经2%碳酸钠处理后的易溶盐含量应按下式计算：

$$\omega(\text{易溶盐})=\frac{V_{w}(m_{z1}-m_{z})}{V_{x1}m_{d}\times 10^{-3}} \qquad (53.3.4\text{-}2)$$

式中：m_{z1}——蒸干后试样加碳酸钠质量(g)；

m_{z}——蒸干后碳酸钠质量(g)。

53.3.5　本试验的记录格式应符合本标准附录D表D.88的规定。

53.4　碳酸根(CO_3^{2-})及重碳酸根(HCO_3^{-})的测定(双指示剂中和滴定法)

53.4.1　本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1　酸式滴定管：容量为25mL，分度值为0.1mL；

2　分析天平：称量200g，分度值0.0001g；

3　其他：容量瓶、蒸发皿、烘箱等。

53.4.2　本试验所用的试剂应符合下列规定：

1　0.1%甲基橙指示剂：称0.1g甲基橙溶于100mL纯水中；

2　0.5%酚酞指示剂：称0.5g酚酞溶于50mL95%的酒精中，用纯水稀释至100mL；

3　硫酸(H_2SO_4)标准溶液：将3mL浓硫酸加入1000mL纯水，然后稀释至5000mL。

53.4.3　硫酸(H_2SO_4)标准溶液的标定应取在温度160℃～180℃下烘干2h～4h的无水碳酸钠(Na_2CO_3)3份，每份0.1g(准确至0.0001g)。放入3个锥形瓶中，注入20mL～30mL纯水，加0.1%甲基橙指示剂2滴，用配制好的硫酸标准溶液滴定至溶液由黄色变为橙色为止。记下硫酸标准溶液用量。硫酸标准溶液的浓度应按下式计算，计算准确至0.0001mol·L^{-1}，取3个结果的算术平均值作为硫酸标准溶液的浓度：

$$C\left(\frac{1}{2}H_2SO_4\right)=m_{h1}/(V_{hb1}\times 0.053) \qquad (53.4.3)$$

式中：$C\left(\frac{1}{2}H_2SO_4\right)$——硫酸标准溶液的浓度(mol·$L^{-1}$)；

m_{hl}——碳酸钠的用量(g)；

V_{hbl}——硫酸标准溶液的用量(mL)；

0.053——碳酸钠$\left(\frac{1}{2}Na_2CO_3\right)$摩尔质量(kg·$mol^{-1}$)。

53.4.4 碳酸根(CO_3^{2-})及重碳酸根(HCO_3^-)的测定试验应按下列步骤进行：

1 用移液管吸取土浸出液25mL，注入锥形瓶中，加0.5%酚酞指示剂2滴～3滴，如试液不显红色，表示无碳酸根(CO_3^{2-})存在；当试液显红色时，用硫酸标准溶液滴定至呈淡红色为止，记下硫酸标准溶液的用量，准确至0.01mL；

2 在试液中加入0.1%甲基橙指示剂1滴～2滴，继续用硫酸标准溶液滴定至试液由黄色变为橙色为止，记下硫酸标准溶液用量，准确至0.05mL；

3 滴定后的试液，可作测定氯离子(Cl^-)用。

53.4.5 碳酸根的含量按下列公式计算，计算准确至0.001g·kg^{-1}或0.01mmol·kg^{-1}，平行最大允许误差应为±0.015g·kg^{-1}或±0.25mmol·kg^{-1}，取算术平均值：

$$b\left(\frac{1}{2}CO_3^{2-}\right)=\frac{2V_{hb2}C\left(\frac{1}{2}H_2SO_4\right)\frac{V_w}{V_{x2}}}{m_d\times10^{-3}} \quad (53.4.5\text{-}1)$$

$$\omega(CO_3^{2-})=0.030\times b(CO_3^{2-}) \quad (53.4.5\text{-}2)$$

式中：$b\left(\frac{1}{2}CO_3^{2-}\right)$——碳酸根的质量摩尔浓度(mmol·$kg^{-1}$)；

$\omega(CO_3^{2-})$——碳酸根含量(g·kg^{-1})；

V_{hb2}——酚酞指示剂达到终点时消耗硫酸标准溶液的量(mL)，此时碳酸盐只是半中和；

V_w——制浸出液加纯水量(mL)；

V_{x2}——试验时吸取土浸出液量(mL)；

$C\left(\frac{1}{2}H_2SO_4\right)$——硫酸标准溶液的浓度(mol·$L^{-1}$);

0.030——碳酸根$\left(\frac{1}{2}CO_3^{2-}\right)$的摩尔质量(kg·$mol^{-1}$)。

53.4.6 重碳酸根的含量按下列公式计算,计算准确至0.001g·kg^{-1}或0.01mmol·kg^{-1},平行最大允许误差应为±0.02g·kg^{-1}或±0.3mmol·kg^{-1},取算术平均值:

$$b(HCO_3^-)=\frac{(V_{hb3}-2V_{hb2})C\left(\frac{1}{2}H_2SO_4\right)\frac{V_w}{V_{x2}}}{m_d\times10^{-3}} \tag{53.4.6-1}$$

$$\omega(HCO_3^-)=0.061b(HCO_3^-) \tag{53.4.6-2}$$

式中:$b(HCO_3^-)$——重碳酸根的质量摩尔浓度(mmol·kg^{-1});

$\omega(HCO_3^-)$——重碳酸根含量(g·kg^{-1});

V_{hb3}——甲基橙为指示剂滴定时的硫酸标准溶液用量(mL);

0.061——重碳酸根的摩尔质量(g·$mmol^{-1}$)。

53.4.7 本试验的记录格式应符合本标准附录D表D.89的规定。

53.5 氯离子(Cl^-)的测定(硝酸银滴定法)

53.5.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定:

1 酸式滴定管、试剂瓶、细口瓶均为棕色;

2 分析天平:称量200g,分度值0.0001g;

3 其他:容量瓶、蒸发皿、烘箱等。

53.5.2 本试验所用的试剂应符合下列规定:

1 5%铬酸钾(K_2CrO_4)指示剂:取5g铬酸钾溶于大约75mL纯水中,逐滴加入硝酸银($AgNO_3$)标准溶液至略有砖红色沉淀为止。放置24h后过滤,将滤液稀释至100mL,贮于棕色瓶中,备用。

2 浓度为 0.02mol·L^{-1} 重碳酸钠($NaHCO_3$)溶液：称取1.7g重碳酸钠，溶于纯水中，稀释至 1000mL。

3 浓度为 0.02mol·L^{-1} 硝酸银($AgNO_3$)标准溶液：准确称取经 105℃～110℃烘干的分析纯硝酸银 3.3974g，溶解于纯水中，倒入 1000mL 容量瓶，用纯水稀释定容，贮于棕色细口瓶中。

53.5.3 氯离子(Cl^-)测定试验应按下列步骤进行：

1 用滴定碳酸盐和重碳酸盐以后的溶液继续滴定 Cl^-。如果不用这个溶液，另取 25mL 土浸出液，加入甲基橙指示剂，逐滴加入浓度为 0.02mol·L^{-1} 重碳酸钠溶液至试液变为纯黄色，酸碱度控制为 7。再加入 5%铬酸钾指示剂 5 滴～6 滴。用硝酸银标准溶液滴定，直至生成砖红色沉淀，记下硝酸银标准溶液用量。

2 用移液管吸取 25mL 纯水，应按本标准第 53.4.3 条 1 款的规定进行空白试验，记下硝酸银标准溶液用量。

53.5.4 氯根的含量按下列公式计算，计算准确至 0.001g·kg^{-1} 或 0.01mmol·kg^{-1}，平行最大允许差值应为±0.005g·kg^{-1} 或 0.1mmol·kg^{-1}，取算术平均值：

$$b(Cl^-)=\frac{C(AgNO_3)(V_{hb4}-V_{hb5})\dfrac{V_w}{V_{x2}}}{m_d\times 10^{-3}} \quad (53.5.4\text{-}1)$$

$$\omega(Cl^-)=0.0355b(Cl^-) \quad (53.5.4\text{-}2)$$

式中：$b(Cl^-)$——氯根的质量摩尔浓度(mmol·kg^{-1})；

$C(AgNO_3)$——硝酸银标准溶液浓度(mol·L^{-1})；

V_{hb4}——滴定试样时硝酸银标准溶液用量(mL)；

V_{hb5}——空白试验中硝酸银标准溶液用量(mL)；

$\omega(Cl^-)$——氯根含量(g·kg^{-1})；

0.0355——氯离子的摩尔质量(g·$mmol^{-1}$)；

10^{-3}——将 g 换算成 kg 的因数。

53.5.5 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.90 的规定。

53.6 硫酸根(SO_4^{2-})的测定(EDTA 络合滴定法或比浊法)

53.6.1 硫酸根的测定应根据硫酸根含量的估测结果选用下列方法:

1 EDTA 络合滴定法适用于常量分析;

2 比浊法适用于硫酸根含量小于 50mg·L^{-1}。

53.6.2 硫酸根含量的估测应符合下列规定:

1 5%氯化钡($BaCl_2$)溶液:5g 氯化钡溶于 95mL 纯水。

2 硫酸根含量的估测应按下列步骤进行:

1)取土浸出液 5mL 注入试管,加入 1∶1 盐酸 2 滴,5%氯化钡溶液 5 滴摇匀。按溶液混浊程度查表 53.6.2 估测硫酸根的含量。当含量不小于 50mol·L^{-1}时,用 EDTA 络合滴定法;当含量小于 50mol·L^{-1}时,用比浊法;

2)硫酸根含量测定时,吸取土浸出液体积和钡镁混合剂用量应查表 53.6.2 确定。

表 53.6.2 硫酸根测定方法选择与试剂用量表

加氯化钡后溶液浑浊情况	硫酸根含量(mg·L^{-1})	测定方法	吸取土浸出液体积(mL)	钡镁混合剂(mL)
数分钟后微浑浊	<10	比浊法	—	—
立即呈微浑浊	25～50	比浊法	—	—
立即浑浊	50～100	EDTA 法	25	4～5
立即沉淀	100～200	EDTA 法	25	8
立即大量沉淀	>200	EDTA 法	10	10～12

53.6.3 EDTA 间接络合滴定法应按下规定进行:

1 EDTA 络合滴定法所用的主要仪器设备应符合本标准第 53.2.1 条第 1 款～第 3 款的规定,但需增加电炉。

2 试剂应符合下列规定:

1)1∶4 盐酸溶液:将浓盐酸 10mL 与 40mL 纯水混匀;

2）钡镁混合剂：将 1.22g 氯化钡（$BaCl_2 \cdot 2H_2O$）和 1.02g 氯化镁（$MgCl_2 \cdot 6H_2O$）溶于水中，稀释至 500mL，溶液中钡、镁（Ba^{2+}、Mg^{2+}）离子浓度为 0.01mol·L^{-1}，每毫升约沉淀硫酸根（SO_4^{2-}）1mg；

3）氨缓冲溶液（pH＝10）：将 67.50g 氯化铵（NH_4Cl）溶于 300mL 纯水中，加入氨水 570mL，用纯水稀释至 1000mL，贮于塑料瓶中；

4）铬黑 T 指示剂：将 0.5g 铬黑 T 和 100g 烘干氯化钠（NaCl）混合，磨细拌匀，贮于棕色瓶中，并放入干燥器中；

5）酒精：浓度为 95%；

6）钙（Ca^{2+}）标准溶液：准确称取在 105℃～110℃下烘干 4h～6h的分析纯 $CaCO_3$ 0.5004g，溶于 25mL 0.5mol·L^{-1} 盐酸溶液中，煮沸除去 CO_2，用无 CO_2 的纯水洗入 500mL 容量瓶，并稀释至刻度。此溶液浓度为 0.01mol·L^{-1}；

7）浓度为 0.01mol·L^{-1} EDTA 标准溶液：称取乙二胺四乙酸二钠 3.720g 溶于无 CO_2 的纯水中，微热溶解，冷却后定容至 1000mL。用钙标准溶液标定。

3 标准溶液的标定应符合下列规定：

1）浓度为 0.01mol·L^{-1} EDTA 标准溶液的标定应用移液管吸取 3 份浓度为 0.01mol·L^{-1} 钙标准溶液，每份 20mL，分别注入 3 个锥形瓶中，加纯水至 50mL，加氨缓冲溶液 10mL，铬黑 T 指示剂少许，95%酒精 5mL，用 EDTA 标准溶液滴定，使溶液由红色变为亮蓝色为止，记下用量；

2）EDTA 标准溶液的浓度应按下式计算，计算至 0.0001 mol·L^{-1}，取 3 个标定值的算术平均值：

$$C(\mathrm{EDTA}) = V_{\mathrm{C}} \frac{C(Ca^{2+})}{V_{\mathrm{E}}} \qquad (53.6.3\text{-}1)$$

式中：C(EDTA)——EDTA 标准溶液的浓度(mol·L^{-1})；

V_C——钙标准溶液的用量(mL)；

$C(Ca^{2+})$——钙标准溶液的浓度(mol·L^{-1})；

V_E——EDTA 标准溶液的用量(mL)。

4 EDTA 间接络合滴定法试验应按下列步骤进行：

1) 参考表 53.6.2 的规定，用移液管吸取土浸出液放入 150mL 三角瓶中，稀释成 25mL，加入 1∶4 的盐酸溶液 8 滴，并煮沸除去二氧化碳。按表 53.6.2 的规定用滴定管缓慢加入钡镁合剂，边加边摇动。再煮沸 5min，冷却后静置 2h。加入氨缓冲溶液 10mL 摇匀，再加入铬黑 T 指示剂少许，95%酒精 5mL，摇匀。用 EDTA 标准溶液滴定，当溶液呈紫色时，摇动 0.5min～1min，继续滴定至试液变为亮蓝色为止。记下 EDTA 标准溶液用量，准确至 0.01mL；

2) 另取锥形瓶进行空白试验。用移液管吸取 25mL 纯水放入 150mL 三角瓶中，加入 1∶4 的盐酸溶液 8 滴，加入 10mL 钡镁合剂、10mL 氨缓冲溶液、少许铬黑 T 指示剂，95%酒精 5mL，摇匀。再用 EDTA 标准溶液滴定至空白试液由红色变为亮蓝色为止。记下 EDTA 标准溶液用量。

5 钡镁混合液浓度应按下式计算，计算至 0.0001mol·L^{-1}：

$$C(Ba+Mg)=V_E\frac{C(EDTA)}{10} \qquad (53.6.3\text{-}2)$$

式中：C(Ba+Mg)——钡镁混合液浓度(mol·L^{-1})；

C(EDTA)——EDTA 标准溶液浓度(mol·L^{-1})。

6 硫酸根(SO_4^{2-})的含量按下列公式计算，计算至 0.001g·kg^{-1} 或 0.01mmol·kg^{-1}，平行最大允许误差应为±0.025g·kg^{-1} 或±0.25mmol·kg^{-1}，取算术平均值：

$$b\left(\frac{1}{2}SO_4^{2-}\right)=\frac{[C(Ba+Mg)V_B-(V_E-V_{E0})C(EDTA)]\frac{V_w}{V_{x2}}\times 2}{m_d\times 10^{-3}} \quad (53.6.3\text{-}3)$$

$$\omega(SO_4^{2-})=0.048b\left(\frac{1}{2}SO_4^{2-}\right) \quad (53.6.3\text{-}4)$$

式中：$b\left(\frac{1}{2}SO_4^{2-}\right)$——硫酸根的质量摩尔浓度（$mmol\cdot kg^{-1}$）；

$\omega(SO_4^{2-})$——硫酸根含量（$g\cdot kg^{-1}$）；

$C(Ba+Mg)$——钡镁混合液浓度（$mol\cdot L^{-1}$）；

V_B——加入钡镁混合剂量（mL）；

V_{E0}——消耗于与测硫酸根时体积相同的土浸出液中钙离子和镁离子的 EDTA 标准溶液的滴定量（mL）；

$C(EDTA)$——EDTA 标准溶液的浓度（$mol\cdot L^{-1}$）；

0.048——硫酸根的摩尔质量（$g\cdot mmol^{-1}$）。

7 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.91、表 D.92 的规定。

53.6.4 比浊法应按下列规定进行：

1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1）磁力搅拌器，秒表；

2）光电比色计或分光光度计；

3）量匙：容量为 0.2mL～0.3mL；

4）其他：移液管、容量瓶、烧杯等。

2 试剂应符合下列规定：

1）悬浊液稳定剂：将浓盐酸 30mL，95%的酒精 100mL，纯水 300mL，氯化钠（NaCl）75g 的溶液与 50mL 甘油混合；

2）结晶氯化钡（$BaCl_2$）：将氯化钡结晶过筛，取粒径在 0.25mm～0.5mm 之间的结晶备用；

3）硫酸根（SO_4^{2-}）标准溶液：称取在温度 105℃～110℃下烘干

的无水硫酸钠(Na_2SO_4)0.1479g,溶于纯水中,倒入1000mL容量瓶中定容。此溶液中硫酸根含量为0.1mg·mL^{-1}。

3 比浊法试验应按下列步骤进行:

1)用移液管吸取土浸出液25mL(当硫酸根含量大于4mg·mL^{-1}时应减少土浸出液用量并稀释至25mL),放入50mL烧杯中。准确加入悬浊液稳定剂1mL和一量匙氯化钡结晶(1.0g),用磁力搅拌器搅拌1min,将上述悬浊液在15min内于420nm或480 nm下进行比浊,以同一土浸出液(25mL中加1mL稳定剂,不加氯化钡结晶),调节比色(浊)计吸收值"0"点,或测读吸收值后在土样浊液吸收值中减去,从工作曲线上查得比浊液中硫酸根含量(mg·25mL^{-1})。记录测定时的室温;

2)工作曲线的绘制:用移液管分别准确吸取硫酸根标准溶液0mL、1mL、2mL、4mL、6mL、8mL、10mL倒入25mL容量瓶中,加水定容,即成硫酸根含量为0mL、0.1mL、0.2mL、0.4mL、0.6mL、0.8mL、1.0mg/25mL的标准系列溶液。按上述与待测液相同的步骤,加悬浊稳定剂1mL和一量匙氯化钡结晶显浊和测读吸收值后,以硫酸根含量为纵坐标,吸收值为横坐标,绘制关系曲线。该曲线称为标准曲线,并注明试验温度。

4 硫酸根(SO_4^{2-})含量按下列公式计算:

$$\omega(SO_4^{2-})=\frac{0.001K_{h1}\dfrac{V_w}{V_{x1}}}{m_d\times10^{-3}} \qquad (53.6.4\text{-}1)$$

$$b\left(\frac{1}{2}SO_4^{2-}\right)=\frac{\omega(SO_4^{2-})}{0.0480} \qquad (53.6.4\text{-}2)$$

式中:$\omega(SO_4^{2-})$——硫酸根含量(g·kg^{-1});

$b\left(\frac{1}{2}SO_4^{2-}\right)$——硫酸根的质量摩尔浓度(mmol·kg^{-1});

K_{h1}——由标准曲线查得的25mL浸出液中的SO_4^{2-}含

量(mg)；

0.001——将 mg 换算成 g 的因数；

0.0480——$\frac{1}{2}SO_4^{2-}$ 的摩尔质量(kg·mol^{-1})。

5 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.91、表 D.92 的规定。

53.7 钙离子(Ca^{2+})的测定(EDTA 法)

53.7.1 本试验所用的仪器设备应符合本标准第 53.4.1 条的规定。

53.7.2 本试验所用的试剂应符合下列规定：

1 试剂应符合本标准第 53.6.2 条第 2 款的规定；

2 刚果红试纸；

3 K.B 指示剂应称取 0.5g 酸性铬蓝 K、1g 萘酚绿 B 与 100g 干燥分析纯氯化钠(NaCl)研细混匀，贮于棕色瓶中，用毕即刻盖好，可长期使用。放在干燥器中保存；

4 2mol·L^{-1}氢氧化钠(NaOH)溶液应称取 8g 氢氧化钠溶于 100mL 无二氧化碳的纯水中。

53.7.3 标准溶液标定应符合本标准第 53.6.3 条第 3 款的规定。

53.7.4 钙离子(Ca^{2+})试验应按下列步骤进行：

1 用移液管吸取土浸出液 25mL，加入 150mL 三角瓶中，放入刚果红试纸一小片。滴入 1∶4 的盐酸溶液，使试纸变蓝色，煮沸除去二氧化碳。当土浸出液中碳酸根和重碳酸根含量很少，可省去此步骤；

2 冷却后，加入 2mol·L^{-1}氢氧化钠 2mL(酸碱度控制在 12)，摇匀放置 1min～2min，使镁离子沉淀完全。加入钙指示剂少许，95%酒精 5mL，用 EDTA 标准溶液滴定至试液由红色变为浅蓝色为止。记下 EDTA 标准溶液的用量，准确至 0.01mL。

53.7.5 钙离子的含量按下列公式计算，计算至 0.001g·kg^{-1}或

0.01mmol·kg^{-1}，平行最大允许差值应为±0.004g·kg^{-1}或0.1mmol·kg^{-1}，取算术平均值：

$$b\left(\frac{1}{2}Ca^{2+}\right)=\frac{C(EDTA)V_{E1}\frac{V_w}{V_{x1}}\times 2}{m_d\times 10^{-3}} \qquad (53.7.5\text{-}1)$$

$$\omega(Ca^{2+})=0.020b\left(\frac{1}{2}Ca^{2+}\right) \qquad (53.7.5\text{-}2)$$

式中：$b\left(\frac{1}{2}Ca^{2+}\right)$——钙离子的质量摩尔浓度(mmol·kg^{-1})；

$\omega(Ca^{2+})$——钙离子含量(g·kg^{-1})；

V_{E1}——滴定Ca^{2+}时所用的EDTA体积(mL)；

0.020——钙离子$\left(\frac{1}{2}Ca^{2+}\right)$的摩尔质量(kg·mol^{-1})。

53.7.6 本试验记录格式应符合本标准附录D表D.93的规定。

53.8 镁离子(Mg^{2+})的测定(钙镁合量滴定法)

53.8.1 本试验所用的仪器设备应符合本标准第53.4.1条的规定。

53.8.2 本试验所用的试剂应符合本标准第53.6.3条第2款的规定。

53.8.3 标准溶液的标定应符合本标准第53.6.3条第3款的规定。

53.8.4 镁离子(Mg^{2+})的测定试验应按下列步骤进行：

1 用移液管吸取土浸出液25mL，注入三角瓶中，加入氨缓冲溶液5mL，摇匀，加铬黑T指示剂少许，95%酒精5mL，充分摇匀。再用EDTA标准溶液滴定试液至亮蓝色为止，记下EDTA标准溶液用量，准确至0.01mL；

2 用移液管吸取与本标准第53.8.4条第1款规定的等体积浸出液，应按本标准第53.7.4条的规定，滴定钙离子对EDTA标准溶液的用量。

53.8.5 镁离子的含量应按下列公式计算，计算准确至 0.001g·kg^{-1}或 0.01mmol·kg^{-1}，平行最大允许差值应为±0.004g·kg^{-1}或 0.15mmol·kg^{-1}，取算术平均值：

$$b\left(\frac{1}{2}Mg^{2+}\right)=\frac{C(EDTA)(V_{E2}-V_{E1})\dfrac{V_w}{V_{x1}}}{m_d\times10^{-3}} \quad (53.8.5\text{-}1)$$

$$\omega(Mg^{2+})=0.0122b\left(\frac{1}{2}Mg^{2+}\right) \quad (53.8.5\text{-}2)$$

式中：$b\left(\frac{1}{2}Mg^{2+}\right)$——镁离子的质量摩尔浓度(mmol·$kg^{-1}$)；

$\omega(Mg^{2+})$——镁离子含量(g·kg^{-1})；

V_{E2}——滴定 Ca^{2+}、Mg^{2+}合量时所用的 EDTA 标准溶液体积(mL)；

0.0122——镁离子的摩尔质量(kg·mol^{-1})。

53.8.6 镁离子的测定记录格式应符合本标准附录 D 表 D.93 的规定。

53.9 钠离子(Na^+)和钾离子(K^+)的测定(火焰光度法)

53.9.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 火焰光度计或原子吸收光谱-火焰分光光度计；

2 分析天平：称量 100g，分度值 0.0001g；

3 其他：烧杯、容量瓶、塑料瓶、高温电炉、烘箱。

53.9.2 试剂应符合下列规定：

1 钠(Na^+)标准溶液：准确称取经 550℃灼烧过的氯化钠(NaCl)0.2542g，在少量纯水中溶解，移至 1000mL 容量瓶定容，贮于塑料瓶中，此溶液含钠离子浓度为 0.1mg·mL^{-1}，以此为母液可稀释配制成所需浓度的标准系列溶液；

2 钾(K^+)标准溶液：准确称取经 105℃～110℃烘干 4h～6h 的分析纯氯化钾(KCl)0.1907g，在少许纯水中溶解，移至 1000mL 容量瓶中定容，贮于塑料瓶中，此溶液含钾离子 0.1mg/mL，以此

为母液可稀释配制所需浓度的标准系列溶液。

53.9.3 钠离子(Na^+)和钾离子(K^+)的测定试验应按下列步骤进行：

1 标准曲线的制作。取50mL溶量瓶9个，准确加入钠和钾标准溶液各为0mL、0.5mL、1mL、2.5mL、5mL、10mL、15mL、20mL、25mL，然后用纯水稀释定容，即成钠、钾含量分别为0mg·L^{-1}、1mg·L^{-1}、2mg·L^{-1}、5mg·L^{-1}、10mg·L^{-1}、20mg·L^{-1}、30mg·L^{-1}、40mg·L^{-1}、50mg·L^{-1}的标准系列溶液。按火焰光度计使用说明进行操作，分别用钠滤光片和钾滤光片逐个测定其吸收值，然后以吸收值为横坐标，相应的钠、钾浓度为纵坐标，分别绘制标准曲线，并将曲线进行回归，求出回归方程。

2 吸取10mL～20mL的土浸出液，在火焰光度计上，按仪器说明书进行操作。当钠、钾含量超过仪器容许范围时，需稀释后再操作。分别用钠滤光片、钾滤光片逐个测定吸光值。记下仪器读数，注明试验条件。分别查钠、钾标准曲线，计算其钾、钠含量。用原子吸收-火焰分光光度计时，用发射挡。

53.9.4 钠离子的含量应按下列公式计算，计算至0.001g·kg^{-1}或0.01mmol·kg^{-1}，平行最大允许差值应为±0.005g·kg^{-1}或±0.2mmol·kg^{-1}，取算术平均值：

$$\omega(Na^{+}) = \frac{0.001 N_x K_n V_w}{m_d \times 10^{-3}} \qquad (53.9.4\text{-}1)$$

$$b(Na^{+}) = \frac{\omega(Na^{+})}{0.023} \qquad (53.9.4\text{-}2)$$

式中：$\omega(Na^+)$——钠离子含量(g·kg^{-1})；

$b(Na^+)$——钠离子的质量摩尔浓度(mmol·kg^{-1})；

0.001——mg换算成g的因数；

N_x——土浸出液的稀释倍数，当直接取土浸出液比色时，$N_x=1$；

K_n——由标准曲线查得的钠离子含量(mg·mL^{-1})；

0.023——钠离子的摩尔质量(kg·mol^{-1})。

53.9.5 钾离子的含量应按下列公式计算,计算至0.001g·kg^{-1}或0.01mmol·kg^{-1},平行最大允许差值应为±0.02g·kg^{-1}或±0.5mmol·kg^{-1},取算术平均值:

$$\omega(K^+)=\frac{0.001NK_kV_w}{m_d\times10^{-3}} \tag{53.9.5-1}$$

$$b(K^+)=\frac{\omega(K^+)}{0.039} \tag{53.9.5-2}$$

式中:$\omega(K^+)$——钾离子含量(g·kg^{-1});

$b(K^+)$——钾离子的质量摩尔浓度(mmol·kg^{-1});

K_k——由标准曲线查得的钾离子含量(mg·mL^{-1});

0.039——钾离子的摩尔质量(kg·mol^{-1})。

53.9.6 本试验的记录格式应符合本标准附录D表D.94的规定。

54 中溶盐石膏试验

54.1 一般规定

54.1.1 土样为含石膏较多的土类。

54.1.2 当土中石膏含量很高时，以55℃～60℃烘干土或风干土计算为宜。

54.2 仪器设备和试剂

54.2.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 高温电炉、水浴锅、瓷坩埚；

2 分析天平：称量200g，分度值0.0001g；

3 其他：容量瓶、漏斗、漏斗架、烧杯、无灰滤纸。

54.2.2 试剂应符合下列规定：

1 浓度为0.25mol·L^{-1}的盐酸(HCl)溶液：将浓盐酸20.8mL稀释至1000mL；

2 10%氨水(NH_4OH)：将浓氨水31mL稀释成100mL；

3 10%氯化钡($BaCl_2$)溶液：将10g氯化钡溶于少量纯水中，稀释至100mL；

4 酸化硝酸银($AgNO_3$)溶液：将0.5g硝酸银溶于50mL纯水中，加入少量浓硝酸酸化。贮于棕色瓶中；

5 0.1%甲基橙指示剂；

6 1∶1盐酸溶液。

54.3 操作步骤

54.3.1 试样中石膏的浸提液制备应按下列规定进行：

1 称取过0.25mm筛的风干试样1g～5g，准确至0.0001g。

放入250mL烧杯中，缓慢加入浓度为0.25mol·L^{-1}的盐酸溶液50mL。边加边搅拌。当土中含碳酸钙时，应加盐酸至无气泡产生为止，放置过夜；

2 第二天过滤，并用浓度为0.25mol·L^{-1}的盐酸溶液淋洗土样至滤液中无硫酸根为止。

54.3.2 硫酸根的测定应按下列规定进行：

1 应按本标准上述的规定处理后的滤液中加入2滴0.1%甲基橙指示剂，用10%氨水中和溶液，当溶液呈黄色时，再用1∶1盐酸溶液调至红色后多加10滴，加热煮沸，进行搅拌，并缓慢滴入热的10%氯化钡溶液，直至试液中硫酸根沉淀完全，并稍有过量为止。放在水浴锅(60℃左右)保温2h，或静置过夜。

2 将硫酸根沉淀，用无灰滤纸过滤，用温纯水洗涤至无氯离子为止(用硝酸银溶液检验)。

3 用滤纸包好洗净的沉淀物，放入经600℃灼烧至恒量的瓷坩埚中，置于电炉上灰化滤纸(不得出现明火燃烧)。然后移入高温炉中，控制在600℃下灼烧1h取出，放于洁净的石棉网上，在干燥器中冷却至室温，称质量，再在600℃下灼烧30min，冷却后称质量，反复操作至恒量，记下质量。

4 易溶盐硫酸根的测定，应按本标准第53.6节的规定进行。

54.4 计算和记录

54.4.1 减去易溶盐硫酸根含量时中溶盐(石膏)含量应按下式计算，计算至0.1g·kg^{-1}，平行最大允许差值应为±1g·kg^{-1}，取算术平均值：

$$\omega(CaSO_4\cdot 2H_2O)=\left[\frac{(m_{gz}-m_{g0})\times 0.4114}{m_d\times 10^{-3}}-\omega(SO_4^{2-})\right]\times 1.7922 \tag{54.4.1}$$

式中：$\omega(CaSO_4\cdot 2H_2O)$——中溶盐(石膏)含量(g·$kg^{-1}$)；

m_{gz}——瓷坩埚与沉淀总质量(g)；

m_{g0}——瓷坩埚质量(g)；

0.4114——由硫酸钡换算为硫酸根的系数；

$\omega(SO_4^{2-})$——易溶盐硫酸根的含量($g \cdot kg^{-1}$)；

10^{-3}——将 g 换算成 kg 的因数；

1.7922——由硫酸根换算为石膏的系数。

54.4.2 不减去易溶盐硫酸根含量时中溶盐(石膏)含量应按下式计算，计算至 0.1g·kg^{-1}，平行最大允许差值应为±1g·kg^{-1}，取算术平均值：

$$\omega(CaSO_4 \cdot 2H_2O) = \frac{(m_{gz} - m_{g0}) \times 0.7377}{m_d \times 10^{-3}} \quad (54.4.2)$$

式中：0.7377——由硫酸钡换算为石膏的系数。

54.4.3 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.95 的规定。

55 难溶盐碳酸钙试验

55.1 一 般 规 定

55.1.1 土样为各类土。

55.1.2 本试验方法分为简易碱吸收容量法和气量法两种方法，可根据试验数量和最大允许误差要求选用其中之一。对测定结果要求较准确时宜用简易碱吸收容量法，而气量法适用于大批试样的粗略测定。

55.2 简易碱吸收容量法

55.2.1 本试验使用的仪器设备应符合下列规定：

1 简易的碱吸收容量法测定装置(图 55.2.1)；

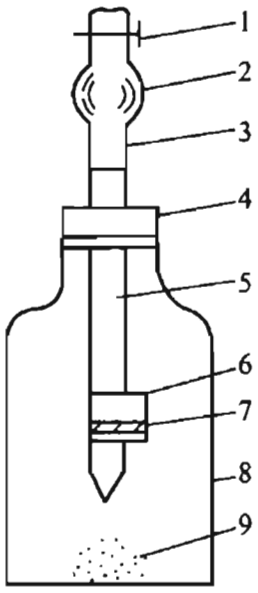


图 55.2.1 简易碱吸收容量法测定装置

1—止水夹；2—玻璃珠；3—乳胶管；4—橡皮塞；5—玻璃管；6—塑料杯；7—橡皮筋；8—广口瓶；9—土样

2　分析天平：称量 100g，分度值 0.0001g；

3　其他：容量瓶、250mL 三角瓶、酸式滴定管、50mL 医用注射器、塑料瓶、点滴瓶。

55.2.2　本试验使用的试剂应符合下列规定：

1　浓度为 2mg·L^{-1}的氢氧化钾(KOH)溶液：应将 112g 氢氧化钾溶解于 700mL 煮沸后冷却的纯水中，移至 1000mL 容量瓶中，用纯水稀释至刻度，摇匀。贮于有隔绝空气中二氧化碳装置(苏打石灰膏)的塑料瓶中。

2　浓度为 2mol·L^{-1}的盐酸(HCl)溶液：应将 167mL 盐酸(HCl，$\rho\approx1.19g/cm^3$，分析纯)稀释至 1000mL。

3　浓度为 1mol·L^{-1}的盐酸溶液：应将 83mL 盐酸(HCl，$\rho\approx1.19g/cm^3$，分析纯)稀释至 1000mL。

4　浓度为 0.1mol·L^{-1}的盐酸标准溶液制备应按下列规定进行：

1)浓度为 0.1mol·L^{-1}的盐酸标准溶液的配制：应将 8.3mL 盐酸(HCl，$\rho\approx1.19g/cm^3$，分析纯)稀释至 1000mL；

2)盐酸标准溶液的标定应按本标准第 53.4.3 条的规定进行，并计算其浓度，计算结果表示到小数点后四位；

3)溴甲酚绿指示剂：应将 0.1g 溴甲酚绿溶解于 250mL 浓度为 0.0006 mol·L^{-1}的氢氧化钾溶液中；

4)百里酚兰-酚酞试剂：应将 1 份 1.0g·kg^{-1}百里酚蓝的 50%的酒精溶液与 3 份 1.0g·kg^{-1}酚酞酒精溶液相混合。

55.2.3　简易碱吸收容量法试验应按下列步骤进行：

1　用分析天平准确称取过 0.15mm 筛孔的风干土样 1g～8g(碳酸钙含量不超过 0.25g)，放置于广口瓶中，在塑料杯中加入 5mL 浓度为 2 mol·L^{-1}的氢氧化钾溶液，塞紧瓶塞勿使漏气。将 50mL 医用注射器连接在乳胶管上端，捏开玻璃珠开关，从广口瓶中抽出 50mL 空气。

2　用注射器通过乳胶管向广口瓶中注入 20mL 浓度为 2mol·L^{-1}的盐酸溶液，乳胶管上端用止水夹夹紧，轻轻旋转广口瓶使试样与

盐酸充分接触均匀，在室温下放置16h～24h。

3 打开瓶塞，细心取出塑料杯，用50mL无二氧化碳的纯水，将塑料杯中的氢氧化钾溶液洗入200mL三角瓶中。加百里酚兰-酚酞混合指示剂20滴，用1mol·L^{-1}盐酸溶液滴定至溶液由紫色变为淡红色时，改用0.1mol·L^{-1}盐酸标准溶液滴定至溶液刚出现黄色而红色又未完全消失(pH=8.3)为止(不记用量)。然后加入16滴钾溴酚绿指示剂，用浓度为0.1mol·L^{-1}的盐酸标准溶液滴定至溶液由蓝色变为亮黄色(pH=3.9)为止，记下这次滴定用量。

4 应按本条第3款的规定进行空白试验。

55.2.4 碳酸钙含量应按下式计算，计算结果表示到小数点后一位，平行最大允许差值应为±2g·kg^{-1}，试验结果取算术平均值：

$$\omega(CaCO_3)=\frac{2C_{b1}(V_{hb6}-V_{hb7})\times 0.050}{m_d\times 10^{-3}} \qquad (55.2.4)$$

式中：$\omega(CaCO_3)$——难溶盐碳酸钙含量(g·kg^{-1})；

2——因V_1只是酸中和重碳酸根时的用量，故中和碳酸根的用量应为2倍V_1；

C_{b1}——盐酸标准滴定溶液浓度(mol·L^{-1})；

V_{hb6}——以钾溴酚绿为指示剂时盐酸滴定标准溶液滴定溶液的体积的数值(mL)；

V_{hb7}——空白试验，以钾溴酚绿为指示剂时盐酸标准滴定溶液的体积的数值(mL)；

0.050——碳酸钙摩尔质量的一半(g·$mmol^{-1}$)，因1mmol盐酸仅能与0.5mmol碳酸钙作用；

10^{-3}——将g换算成kg的因数。

55.2.5 本试验碱吸收容量法的记录格式应符合本标准附录D表D.96的规定。

55.3 气 量 法

55.3.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1　二氧化碳约测计，装置如图 55.3.1 所示；

2　气压计、温度计；

3　天平：称量 200g，分度值 0.01g；

4　其他：瓷坩埚、指形管等。

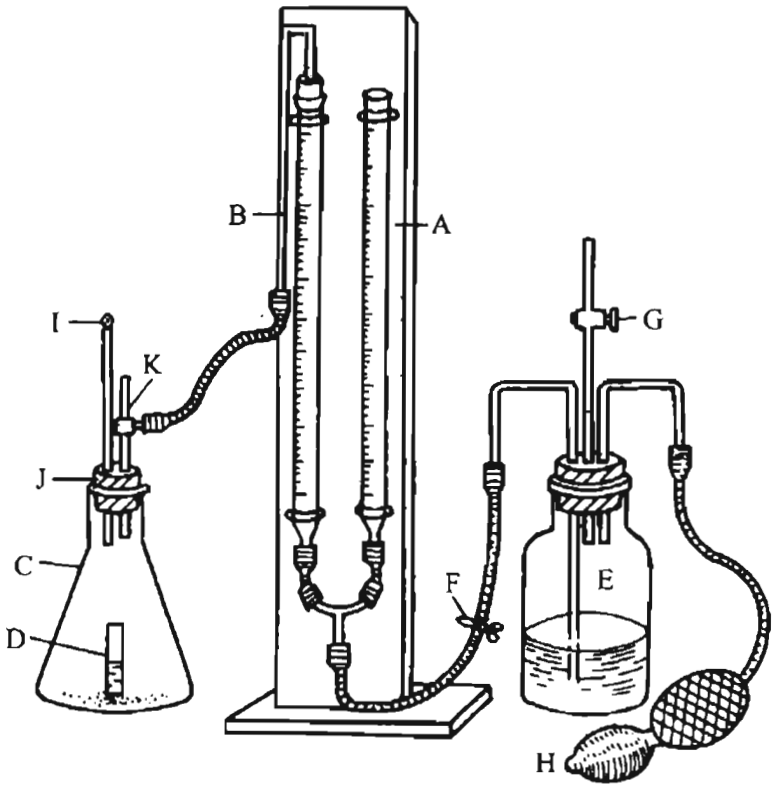


图 55.3.1　二氧化碳约测计示意图

A、B—量管；C—三角瓶；D—试管；E—广口瓶；F—夹子；G—活塞；H—打气球；I—温度计；J—橡皮塞；K—活塞

55.3.2　试剂应符合下列规定：

1　1∶3 盐酸溶液：将 1 份盐酸（HCl，$\rho\approx1.19g/cm^3$，分析纯）与 3 份纯水混合；

2　浓度约为 $0.5mol\cdot L^{-1}$ 的 H_2SO_4 有色溶液，每 100mL 纯水中加硫酸（H_2SO_4，$\rho=1.84g/cm^3$，化学纯）3mL，加甲基红指示剂数滴，装入量气管；

3　含量为 $1.0g\cdot kg^{-1}$ 的甲基红指示剂。

55.3.3　气量法试验应按下列步骤进行：

1　称取过 0.25mm 筛，经 105℃～110℃烘干的试样 1g～5g

($CaCO_3$含量0.1g～0.2g)，准确至0.01g，小心地将土样倒入三角瓶底。在试管D中装入盐酸溶液(1∶3)约至2/3处，将试管用镊子小心地立在已盛有土样的三角瓶C中。

2 给广口瓶中装入浓度为0.5 mol·L^{-1}的H_2SO_4有色溶液，关闭活塞G，打开夹子F，用打气球打气，使有色溶液装满滴定管。检查是否漏气：关闭活塞K，将橡皮塞J塞紧，此时B管液面略低于A管，稍等片刻，检查是否漏气。如果漏气，两管液面会慢慢齐平，应仔细检查各接头并用石蜡溶液密封，使不漏气。

3 打开活塞K，使A、B两管液面在同一平面，记录B管液面读数，再关好活塞K，同时打开活塞G。

4 将三角瓶C中的试管D的盐酸倒于瓶底，此时即有CO_2气体产生，B管液面下降，应及时用夹子F调节A管中液面，使A管液面始终略高于B管。当B管液面停止下降时，用长柄夹子夹住三角瓶C颈部，间歇摇动三角瓶C四至五次，直到B管液面不下降为止。

5 用夹子F或上下变动A管高低来调节A、B两管液面使之在同一水平面上，记录B管液面读数。最终读数与起始读数之差即为产生的二氧化碳体积的数值，并同时记录温度和气压。

55.3.4 碳酸钙的含量应按下式计算，计算结果表示到个位，平行最大允许差值应为±5g·kg^{-1}，取算术平均值：

$$\omega(CaCO_3)=\frac{V_{CO_2}\rho_{CO_2}\times10^{-6}\times2.272}{m_d\times10^{-3}} \qquad (55.3.4)$$

式中：$\omega(CaCO_3)$——碳酸钙含量(g·kg^{-1})；

V_{CO_2}——二氧化碳的体积(mL)；

ρ_{CO_2}——在试验的温度和气压下二氧化碳的密度(μg·mL^{-1})，可查表55.3.4确定；

2.272——由二氧化碳换算成碳酸钙的系数(100/44)；

10^{-6}——μg与kg的换算系数；

10^{-3}——g与kg的换算系数。

表 55.3.4　不同温度及大气压力下二氧化碳密度 ρ_{CO_2} (μg · mL^{-1})

温度 (℃)	大气压力[kPa(mmHg)]													
	98.925 (742)	99.258 (744.5)	99.591 (747)	99.858 (749)	100.125 (753.5)	100.458 (751)	100.791 (756)	101.059 (758)	101.325 (760)	101.658 (762.5)	101.991 (756)	102.258 (767)	102/525 (769)	102.791 (771)
28	1778	1784	1791	1797	1804	1810	1817	1823	1828	1833	1837	1842	1847	1852
27	1784	1790	1797	1803	1810	1816	1823	1829	1834	1839	1843	1848	1853	1858
26	1791	1797	1803	1809	1816	1822	1829	1835	1840	1845	1849	1854	1859	1864
25	1797	1803	1810	1816	1823	1829	1836	1842	1847	1852	1856	1861	1866	1871
24	1803	1809	1816	1822	1829	1835	1842	1848	1853	1858	1862	1867	1872	1877
23	1809	1815	1822	1828	1835	1841	1848	1854	1859	1864	1868	1873	1878	1883
22	1815	1821	1828	1834	1841	1847	1854	1860	1865	1870	1875	1880	1885	1890
21	1822	1828	1835	1841	1848	1854	1861	1867	1872	1877	1882	1887	1892	1897
20	1828	1834	1841	1847	1854	1860	1867	1873	1878	1883	1888	1893	1898	1903
19	1834	1840	1847	1853	1860	1866	1873	1879	1884	1889	1894	1899	1904	1909
18	1840	1846	1853	1859	1866	1872	1879	1885	1890	1895	1900	1905	1910	1915
17	1846	1853	1860	1866	1873	1879	1886	1892	1897	1902	1907	1912	1917	1922
16	1853	1860	1866	1873	1879	1886	1892	1893	1903	1909	1913	1918	1923	1928
15	1859	1866	1872	1879	1886	1892	1899	1905	1910	1915	1920	1925	1930	1935
14	1865	1872	1878	1885	1892	1899	1906	1912	1917	1922	1927	1932	1937	1942
13	1872	1878	1885	1892	1899	1906	1913	1919	1924	1929	1934	1939	1944	1949
12	1878	1885	1892	1899	1906	1912	1919	1925	1930	1935	1940	1945	1950	1955
11	1885	1892	1899	1906	1913	1919	1926	1932	1937	1942	1947	1952	1957	1962
10	1892	1899	1960	1913	1919	1926	1933	1939	1944	1949	1954	1959	1964	1969

55.3.5 在无气压计情况下采用标准曲线法计算 $CaCO_3$ 的含量。在分度值为 0.01g 的天平上称取干燥的分析纯 $CaCO_3$ 分别为 0.05g、0.1g、0.2g、0.3g、0.4g(如果用 50mL 滴定管收集气体称取的 $CaCO_3$ 量不要大于 0.2g),按上述试验应按下列步骤进行:测定 CO_2 毫升数,以 CO_2 的体积为纵坐标,$CaCO_3$ 含量为横坐标,画出标准曲线,或求出其回归方程。然后用同一时间测得的土样 CO_2 的体积数求出 $CaCO_3$ 含量。计算结果表示到个位,平行最大允许差值应为 $\pm 5g \cdot kg^{-1}$,取算术平均值。

$$\omega(CaCO_3) = \frac{m_{c1}}{m_d \times 10^{-3}} \tag{55.3.5}$$

式中:m_{c1}——查得 $CaCO_3$ 的质量(g)。

55.3.6 本试验气量法的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.97 的规定。

56 有机质试验

56.1 一般规定

56.1.1 本试验采用重铬酸钾容量法测定其中的有机碳，再乘以经验系数1.724换算成有机质，并以1kg烘干土中所含有机质的克(g)数表示，单位为克每千克($g \cdot kg^{-1}$)。

56.1.2 土样的有机质含量不应大于$150g \cdot kg^{-1}$。

56.2 仪器设备和试剂

56.2.1 本试验使用的仪器设备应符合下列规定：

1 分析天平：称量200g，分度值0.0001g；

2 油浴锅：内盛甘油或植物油并应带铁丝笼；

3 温度计：量程0℃～200℃，分度值为0.5℃；

4 其他：酸式滴定管、三角瓶、硬质试管、小漏斗、试管夹。

56.2.2 本试验所用的试剂应符合下列规定：

1 浓度为$0.8000mol \cdot L^{-1}$的重铬酸钾$\left(\frac{1}{6}K_2Cr_2O_7\right)$标准溶液：用分析天平称取经105℃～110℃烘干并研磨细的重铬酸钾39.2245g，溶于400mL纯水，加热溶解，冷却后倒入1000mL容量瓶中，用纯水稀释至刻度，摇匀。

2 浓度为$0.2mol \cdot L^{-1}$的硫酸亚铁($FeSO_4 \cdot 7H_2O$)(或硫酸亚铁铵)标准溶液应符合下列规定：

1)浓度为$0.2mol \cdot L^{-1}$的硫酸亚铁$\left(\frac{1}{2}FeSO_4 \cdot 7H_2O\right)$(或硫酸亚铁铵)标准溶液的配制：称取硫酸亚铁56.0g(或硫酸亚铁铵80.0g)，溶于纯水中，加入浓度为$6\ mol \cdot L^{-1}$

的硫酸$\left(\frac{1}{2}H_2SO_4\right)$溶液 30mL，稀释至 1000mL，贮于棕色瓶中；

2）浓度为 0.2mol·L^{-1}的硫酸亚铁$\left(\frac{1}{2}FeSO_4\cdot 7H_2O\right)$（或硫酸亚铁铵）标准溶液的标定：准确吸取重铬酸钾标准溶液 5mL、硫酸 5mL 各三份，分别放入 250mL 锥形瓶中，稀释至 60mL 左右，加入邻啡罗啉指示剂 3 滴～5 滴，用硫酸亚铁标准溶液进行滴定，使溶液由黄色经绿色突变至棕红色为止。按下式计算硫酸亚铁的浓度，计算结果表示到小数点后四位，取三份结果的算术平均值：

$$C\left(\frac{1}{2}FeSO_4\right)=\frac{C\left(\frac{1}{6}K_2Cr_2O_7\right)V_K}{V_F} \qquad (56.2.2)$$

式中：$C\left(\frac{1}{2}FeSO_4\right)$——硫酸亚铁标准滴定溶液的浓度（mol·$L^{-1}$）；

$C\left(\frac{1}{6}K_2Cr_2O_7\right)$——重铬酸钾标准溶液的浓度（mol·$L^{-1}$）；

V_K——重铬酸钾标准溶液的体积的数值（mL）；

V_F——硫酸亚铁标准滴定溶液的体积的数值（mL）。

3 硫酸（H_2SO_4，$\rho=1.84g/cm^3$，分析纯）。

4 邻啡罗啉指示剂：将邻啡罗啉 1.485g 和硫酸亚铁 0.695g 溶于 100mL 纯水中，贮于棕色瓶中。

56.3 操作步骤

56.3.1 当试样中含有机质小于 8mg 时，用分析天平称取剔除植物根并通过 0.15mm 筛的风干试样 0.1g～0.5g，放入干燥的试管底部，准确吸取重铬酸钾标准溶液 5mL、硫酸 5mL，加入试管并摇匀，在试管口放上小漏斗。

56.3.2 将试管插入铁丝笼中，放入 190℃左右的油浴锅内。试

管内的液面低于油面。温度应控制在170℃～180℃，从试管内试液沸腾时开始计时，煮沸5min，取出。

56.3.3 将试管内溶液倒入三角瓶中，用纯水洗净试管内部，并使溶液控制在60mL左右，加入邻啡罗啉指示剂3滴～5滴，用硫酸亚铁标准滴定溶液滴定，当溶液由黄色经绿色突变至橙红色时为止。记下硫酸亚铁标准溶液用量，准确至0.01mL。

56.3.4 试样试验的同时，应按本标准第56.3.1条～第56.3.3条的规定采用纯砂进行空白试验。

56.4 计算和记录

56.4.1 有机质含量应按下式计算，计算至0.1g·kg^{-1}，平行最大允许误差为±0.5g·kg^{-1}，试验结果取算术平均值：

$$O.M. = \frac{0.003 \times 1.724 \times C\left(\frac{1}{2}FeSO_4\right)(V_{hb8} - V_{hb9})}{m_d \times 10^{-3}} \tag{56.4.1}$$

式中：$O.M.$——土壤有机质含量(g·kg^{-1})；

V_{hb8}——空白试验时硫酸亚铁标准滴定溶液的体积的数值(mL)；

V_{hb9}——硫酸亚铁标准滴定溶液的体积的数值(mL)；

0.003——1mol硫酸亚铁所相当的有机质碳量(kg)；

1.724——有机碳换算成有机质的系数；

10^{-3}——将g换算成kg的系数。

56.4.2 本试验的记录格式应符合本标准附录D表D.98的规定。

57 游离氧化铁试验

57.1 一般规定

57.1.1 土样为各类土。

57.1.2 本试验用于测定土中游离氧化铁的总量(米拉·杰克逊法)和无定形游离氧化铁的含量(达姆试剂法),二者相减可得结晶质游离氧化铁。

57.2 仪器设备和试剂

57.2.1 本试验使用的仪器设备应符合下列规定:

1 离心机(转速为 3000r/min～4000r/min),50mL 离心管;

2 分析天平:称量 200g,分度值 0.0001g;

3 可见光分光光度计;

4 水浴锅(附温度控制器);

5 振荡器;

6 其他设备:容量瓶、移液管、量筒、100mL 棕色广口瓶、100mL 试剂瓶、0.25mm 细筛。

57.2.2 本试验使用的试剂应符合下列规定:

1 连二亚硫酸钠($Na_2S_2O_4$),化学纯;

2 氯化钠溶液:称取氯化钠 58.45g 溶于纯水,稀释至 1L,氯化钠溶液浓度为 $1mol \cdot L^{-1}$;

3 $100g \cdot L^{-1}$盐酸羟胺溶液:称取 10g 化学纯盐酸羟胺溶于水中,移入 100mL 容量瓶中,用纯水稀释至刻度,摇匀,贮于棕色试剂瓶中;

4 $1mol \cdot L^{-1}$碳酸氢钠溶液:称取 84.01g 碳酸氢钠($NaHCO_3$,化学纯)溶于水,移入 1000mL 容量瓶中,用纯水稀释至刻度,

摇匀；

5 0.3mol·L^{-1}柠檬酸钠溶液：称取104.4g柠檬酸钠($Na_3C_6H_5O_7 \cdot H_2O$，化学纯)溶于纯水，移入1000mL容量瓶中，用纯水稀释至刻度，摇匀；

6 醋酸-醋酸钠缓冲溶液：称取68g醋酸钠($CH_3COONa \cdot H_2O$)溶于500mL纯水中，加入28.8mL冰醋酸，用纯水稀释至1000mL；

7 铁标准储备溶液：称取0.7017g硫酸亚铁铵[$(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$]溶于纯水中，加浓硫酸5mL，然后移入1000mL容量瓶中，用纯水稀释刻度，摇匀，此时溶液含铁100μg·mL^{-1}；

8 铁标准溶液：将100μg·mL^{-1}铁标准溶液稀释10倍成为10μg/mL的溶液液，供比色制标准曲线；

9 1.0g·L^{-1}邻菲罗啉：称取1.0g邻菲罗啉($CnHSN_2 \cdot H_2O$)溶于1000mL纯水中(内含0.1mol·L^{-1}盐酸5mL)；

10 达姆试剂(0.2mol·L^{-1}草酸铵缓冲液)：称取62.1g草酸铵、31.5g草酸溶于2500mL纯水中，溶液pH值为3.2左右，必要时可用氨水或草酸调节。

57.3 操作步骤

57.3.1 试样处理应按下列规定进行：

1 用分析天平称过0.25mm筛的风干土样0.1g～0.5g(游离氧化铁含量很低时要称0.5g～1.0g)，放入50mL离心管中，加入0.3mol·L^{-1}柠檬酸钠溶液20mL，1mol·L^{-1}碳酸氢钠溶液2.5mL；

2 将离心管在水浴锅上加热至80℃(不能超过此温度)后，加固体连二亚硫酸钠0.5g，不断搅拌15min，然后再加氯化钠溶液5mL，取出冷却，用离心机分离，清液倒入250mL容量瓶中，如此反复处理至土样呈灰白色；

3 用1mol·L^{-1}氯化钠溶液洗涤离心管内残渣2次～3次，清液一并倒入250mL容量瓶中，定容待测游离氧化铁总量；

4　用分析天平称取 1g～2g 土样，放入 100mL 经过烘干的棕色广口瓶中，用移液管或酸式滴定管加入 0.2mol·L^{-1} 达姆试剂草酸氨缓冲溶液 50mL，加塞振荡 2h 后，立即倒入离心管中离心机分离，将澄清液倒入烘干的 100mL 试剂瓶中待测无定形铁之用。

57.3.2　铁的测定应按下列步骤进行：

1　分别吸取一定量的上述两种待测液至 50mL 容量瓶中，加入 100g·L^{-1} 盐酸羟胺 1mL 摇匀放置 10min，加醋酸-醋酸钠缓冲溶液 5mL，加入 1.0g·L^{-1} 邻菲罗啉 5mL，摇匀，室温 20℃时放置 1.5h，使其充分显色。用纯水稀释至刻度后，摇匀，然后于 520nm 波长处用 1cm 比色皿比色，测定其吸光度。

2　分别吸取 10μg·mL^{-1} 铁标准溶液使用液 0mL、1mL、3mL、5mL、7mL、9mL，相应的含铁量为 0μg、10μg、30μg、50μg、70μg、90μg，应按本标准第 57.4.2 条第 1 款的规定与待测液做同样处理显色，测定其对应的吸光度，然后以含铁量为横坐标，吸光度为纵坐标，绘制标准曲线。显色时间在室温下需 24h，亦可在水浴锅上加热 15min，以加快显色过程。

57.4　计　　算

57.4.1　游离氧化铁总量应按下式计算，计算结果表示到小数点后一位，平行最大允许差值应为±1g·kg^{-1}，取算术平均值：

$$\omega(Fe_2O_3)=\frac{F\dfrac{V_w}{V_{x1}}\times 1.4297\times 10^{-3}}{m_d} \qquad (57.4.1)$$

式中：$\omega(Fe_2O_3)$——游离氧化铁总量(g·kg^{-1})；

F——按待测液的消光值在标准曲线上查得的铁含量(μg)；

V_w——浸提液的总体积的数值(mL)；

V_{x1}——吸取待测液的体积的数值(mL)；

1.4297——Fe 与 Fe_2O_3 的换算系数；

10^{-3}——将 g 换算成 kg 的系数。

57.4.2 无定形游离氧化铁应按下式计算，计算结果表示到小数点后一位，平行最大允许差值应为 $\pm 1 g \cdot kg^{-1}$，取算术平均值。

$$\omega(\text{无定形游离氧化铁}) = \frac{F_1 \dfrac{V_w}{V_{x1}} \times 1.4297 \times 10^{-3}}{m_d} \tag{57.4.2}$$

式中：F_1——标准曲线上查的得铁含量(μg)；

V_w——达姆试剂浸提液的总体积(mL)。

57.4.3 结晶态游离氧化铁应按下式计算：

$$\omega(\text{结晶态游离氧化铁}) = \omega(Fe_2O_3) - \omega(\text{无定形游离氧化铁}) \tag{57.4.3}$$

57.4.4 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.99、表 D.100的规定。

58 阳离子交换量试验

58.1 一般规定

58.1.1 本试验采用氯化钡缓冲液法、1mol·L^{-1}乙酸铵交换法、乙酸钠-火焰光度法测定土中阳离子交换总量。

58.1.2 氯化钡缓冲液法适用于非盐渍化的各种土类，1mol·L^{-1}乙酸铵交换法适用于酸性土，乙酸钠-火焰光度法适用于石灰性土和盐碱土。

58.2 氯化钡缓冲液法

58.2.1 本试验使用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 离心机(转速为 3000r/min～4000r/min)及离心管(容量为 100mL)；

2 分析天平：称量 100g，分度值 0.0001g；天平，分度值 0.1g；

3 其他：移液管、滴定管、容量瓶、三角瓶等。

58.2.2 本试验使用的试剂应符合下列规定：

1 1mol·L^{-1}氯化钡($BaCl_2$)溶液：称取 244g 氯化钡($BaCl_2 \cdot 2H_2O$)，溶于纯水中，移入 1000mL 容量瓶中，用纯水稀释至刻度，摇匀；

2 氯化钡缓冲试剂：将等体积的三乙醇胺溶液与浓度为 1mol·L^{-1}的氯化钡溶液混合，调节 pH 值至 8.1；

3 pH=10 的氨缓冲溶液：称取 67.5g 氯化氨于纯水中，加入 570mL 浓氨水(ρ=0.9g/cm^3，含氨 25%)，加纯水稀释至 1000mL；

4 0.025mol·L^{-1}硫酸镁($MgSO_4$)溶液：称取 6.2g 硫酸镁($MgSO_4 \cdot 7H_2O$)，用纯水稀释至 1000mL；

5 0.01mol·L^{-1} EDTA 标准溶液：称取 3.720g EDTA，用

纯水稀释至1000mL，其标定见本标准第53.6.3条第2款第7条的规定；

6 三乙醇胺溶液：量取90mL三乙醇胺，用纯水稀释至1000mL，加入140mL浓度为2mol·L^{-1}的盐酸，移入2000mL容量瓶中，用纯水稀释至刻度，摇匀，贮存期间防止吸收二氧化碳；

7 1.0g·L^{-1}铬黑T：称取0.1g铬黑T，与5g盐酸羟胺共溶于100mL酒精中。

58.2.3 氯化钡缓冲液法试验应按下列步骤进行：

1 称取2g左右通过0.15mm筛孔的风干土样，放入离心管中准确称量；

2 若土样系石灰性土，加入40mL氯化钡缓冲液试剂，间歇摇晃1h，用离心机转3min～5min，弃去清液；若土样系非石灰性土，则此步骤可以省略；

3 加入80mL氯化钡缓冲液，摇晃后放置过夜，离心弃去上部清液；

4 加入80mL纯水，摇晃至土块碎裂，再离心，弃去上部清液，将离心管及内容物一起称量；

5 用移液管向离心管中注入40mL的0.025 mol·L^{-1}硫酸镁溶液，间歇摇晃2h，离心后，将上部清液仔细移入有盖三角瓶中；

6 从三角瓶中吸出5mL溶液，加8滴pH＝10的氨缓冲溶液和4滴铬黑T指示剂，使呈紫色，用EDTA标准溶液滴定至颜色从红变蓝为止（滴定量为V_{E4}）；

7 另吸5mL的0.025 mol·L^{-1}硫酸镁溶液用EDTA标准溶液滴定至终点（滴定量为V_{E5}），根据2份滴定结果之差计算交换量。

58.2.4 计算应符合下列规定：

1 考虑到离心过的土样用纯水洗后残留体积的影响，对土样的滴定量（V_{E4}）应按下式的规定进行校正：

$$V_{E3} = V_{E4}(40 + m_{g2} - m_{g1})/40 \qquad (58.2.4\text{-}1)$$

式中：V_{E3}——EDTA 标准滴定溶液的体积的数值(mL)；

m_{g1}——试样加离心管质量(g)；

m_{g2}——离心后土液混合物加离心管质量(g)。

2 阳离子交换量应按下式计算：

$$CEC = \frac{(V_{E5} - V_{E3}) \times \frac{40}{5} \times C(\text{EDTA}) \times 100}{m_d} \qquad (58.2.4\text{-}2)$$

式中：CEC——阳离子交换量($cmol \cdot kg^{-1}$)；

V_{E5}——滴定硫酸镁溶液所消耗 Na_2-EDTA 的体积(mL)；

V_{E3}——滴定经硫酸镁处理的土样溶液所消耗的EDTA标准滴定溶液的体积(mL)；

$\frac{40}{5}$——分取倍数；

C(EDTA)——EDTA 标准滴定溶液的浓度($mol \cdot L^{-1}$)；

100——mol 与 cmol 的换算系数。

58.2.5 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.101 的规定。

58.3 1mol·L⁻¹乙酸铵交换法

58.3.1 本试验使用的仪器设备应符合下列规定：

1 离心机(转速为 3000r/min～4000r/min)及离心管(容量为 100mL)；

2 分析天平：称量 100g，分度值 0.0001g；天平，称量 200g，分度值 0.01g；

3 其他：移液管、滴定管、容量瓶、三角瓶、开氏瓶(150mL)、蒸馏装置。

58.3.2 本试验使用的试剂应符合下列规定：

1 固体氧化镁：将氧化镁(化学纯)放在镍蒸发皿或坩埚内，

在500℃～600℃高温电炉中灼烧半小时，冷后贮藏在密闭的玻璃器皿内。

2 1mol·L^{-1}乙酸铵溶液(pH=7.0)：称取乙酸铵(CH_3COONH_4，化学纯)77.09g用水溶解，用纯水稀释至近1000mL。如pH≠7.0，使用1∶1氨水溶液或稀乙酸溶液调节pH=7.0，然后用纯水稀释至1000mL。

3 95%乙醇溶液。

4 液体石蜡(化学纯)。

5 20g·L^{-1}硼酸指示剂溶液：称取硼酸(H_3BO_3，化学纯)20g，溶于1000mL水中；每升硼酸溶液中加入甲基红-溴甲酚绿混合指示剂20mL，并用稀酸或稀碱调节至紫红色(葡萄酒色)，此时该溶液的pH=4.5。

6 pH=10的氨缓冲溶液：称取氯化铵(化学纯)67.5g溶于无二氧化碳的水中，加入新开瓶的浓氨水(分析纯，ρ=0.9g·mL^{-1}，含氨25%)570mL，用水稀释至1000mL，贮于塑料瓶中，并注意防止吸收空气中的二氧化碳。

7 0.05mol·L^{-1}盐酸标准溶液应符合下列规定：

1)0.05mol·L^{-1}盐酸标准溶液的配制：吸取盐酸(HCl，$\rho\approx1.19g/cm^3$，分析纯)4.5mL，放入1000mL容量瓶中，用纯水稀释至刻度，摇匀；

2)0.05 mol·L^{-1}盐酸标准溶液的标定：标定剂硼砂($Na_2B_4O_7\cdot10H_2O$，分析纯)必须保存于相对湿度为60%～70%的空气中，以确保硼砂含10个结合水，通常可在干燥器的底部放置氯化钠和蔗糖的饱和溶液(并有二者的固体存在)，密闭容器中空气的相对湿度即为60%～70%。称取硼砂2.3825g溶于水中，用纯水稀释至250mL，得0.05mol·$L^{-1}$$\left(\frac{1}{2}Na_2B_4O_7\right)$标准溶液。吸取上述溶液25mL置于250mL锥形瓶中，加2滴溴

甲酚绿-甲基红指示剂(或 2.0g·kg^{-1}甲基红指示剂),用配好的 0.05mol·L^{-1}盐酸溶液滴定至溶液变酒红色为终点(甲基红的终点为由黄突变为微红色)。同时做空白试验。盐酸标准溶液的浓度应按下式计算,取 3 次标定结果的平均值:

$$C_{b1}=\frac{C_{b2}\times V_{hb12}}{V_{hb10}-V_{hb11}} \tag{58.3.2}$$

式中:C_{b1}——盐酸标准滴定溶液的浓度(mol·L^{-1});

C_{b2}——硼砂($1/2Na_2B_4O_7$)标准溶液的浓度(mol·L^{-1});

V_{hb10}——盐酸标准滴定溶液的体积的数值(mL);

V_{hb11}——空白试验用去盐酸标准溶液的体积的数值(mL);

V_{hb12}——吸取硼砂标准溶液的体积的数值(mL)。

8 纳氏试剂:称取氢氧化钾(KOH,分析纯)134g 溶于 460mL 水中。另称取碘化钾(KI,分析纯)20g 溶于 50mL 水中,加入碘化汞(HgI_2,分析纯)大约 3g,使溶解至饱和状态。然后将两溶液混合即成。

9 甲基红-溴甲酚绿混合指示剂:称取溴甲酚绿 0.099g 和甲基红 0.066g 置于玛瑙研钵中,加少量 95%乙醇,研磨至指示剂完全溶解为止,最后加 95%乙醇至 100mL。

58.3.3 1mol·L^{-1}乙酸铵交换法试验应按下列步骤进行:

1 称取通过 2mm 筛孔的风干土样 2.0g,质地较轻的土壤称取 5.0g,放入 100mL 离心管中,沿离心管壁加入少量 1mol·L^{-1}酸铵溶液,用橡皮头玻璃棒搅拌土样,使其成为搅拌均匀的泥浆状态。再加 1mol·L^{-1}乙酸铵溶液至总体积约 60mL,并充分搅拌均匀,然后用 1 mol·L^{-1}乙酸铵溶液洗净橡皮头玻璃棒,溶液收入离心管内。

2 将离心管成对放在粗天平的两盘上,用乙酸铵溶液使之质量平衡。平衡好的离心管对称地放入离心机中,离心 3min～5min,转速为 3000r/min～4000r/min,如不测定交换性盐基,离心

后的清液即弃去，如需测定交换性盐基时，每次离心后的清液收集在250mL容量瓶中，如此用1mol·L^{-1}乙酸铵溶液处理3次～5次，直到最后浸出液中无钙离子反应为止。最后用1mol·L^{-1}乙酸铵溶液定容，留着测定交换性盐基。

3 往载土的离心管中加少量95%乙醇，用橡皮头玻璃棒搅拌土样，使之其成为泥浆状态，再加95%乙醇约60mL，用橡皮头玻璃棒充分搅匀，以便洗去土粒表面多余的乙酸铵，切不可有小土团存在。然后将离心管成对放在粗天平的两盘上，用95%乙醇溶液使之质量平衡，并对称放入离心机中，离心3min～5min，转速为3000r/min～4000r/min，弃去酒精溶液。如此反复用酒精洗3次～4次，直到最后1次乙醇溶液中无铵离子为止，用纳氏试剂检查铵离子。

4 用水冲洗离心管的外壁，往离心管内加少量水，并搅拌成糊状，用水把泥浆洗入150mL开氏瓶中，并用橡皮头玻璃棒擦洗离心管的内壁，使全部土样转入开氏瓶内，洗入水的体积应控制在50mL～80mL。蒸馏前往开氏瓶内加入液状石蜡2mL和氧化镁1g，立即把开氏瓶装在蒸馏装置上。

5 将盛有20g·L^{-1}硼酸指示剂吸收液25mL的锥形瓶(250mL)，放置在用缓冲管连接的冷凝管的下端。打开螺丝夹(蒸汽发生器内的水要先加热至沸)，通入蒸汽，随后摇动开氏瓶内的溶液使其混合均匀。打开开氏瓶下的电炉电源，接通冷凝系统的流水。用螺丝夹调节蒸汽流速度，使其一致，蒸馏约20min，馏出液约达80mL以后，应检查蒸馏是否完全。检查方法：取下缓冲管，在冷凝管下端取几滴馏出液于白瓷比色板的凹孔中，立即往馏出液内加1滴甲基红-溴甲酚绿混合指示剂，呈紫红色，则表示氨已蒸完，呈蓝色则需继续蒸馏(如加滴纳氏试剂，无黄色反应，即表示蒸馏完全)。

6 将缓冲管连同锥形瓶内一起取下，用水冲洗缓冲管的内外壁(洗入锥形瓶内)，然后用盐酸标准溶液滴定。同时做空白试验。

58.3.4 阳离子交换量应按下式计算：

$$CEC = \frac{C_{b1}(V_{hb10} - V_{hb11})}{m_d} \times 100 \qquad (58.3.4)$$

式中：CEC——阳离子交换量（$cmol \cdot kg^{-1}$）；

C_{b1}——盐酸标准溶液的浓度（$mol \cdot L^{-1}$）。

58.3.5 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.102 的规定。

58.4 乙酸钠-火焰光度法

58.4.1 本试验，适用于石灰性土和盐碱土，所用的仪器设备应符合下列规定：

1 离心机（转速为 3000r/min～4000r/min）及离心管（容量为 100mL）；

2 分析天平：称量 100g，分度值 0.0001g；天平，分度值 0.1g；

3 火焰光度计；

4 其他：移液管、容量瓶。

58.4.2 试剂应符合下列规定：

1 $1mol \cdot L^{-1}$ 乙酸钠溶液（pH＝8.2）：称取乙酸钠（$CH_3COONa \cdot 3H_2O$，分析纯）136g 用蒸馏水溶解并稀释至 1000mL。此溶液 pH＝8.2；

2 异丙醇（99%）或乙醇（95%）；

3 $1mol \cdot L^{-1}$ NH_4OAc 溶液（pH＝7.0）：取冰乙酸（99.5%）57mL，加蒸馏水至 500mL，加 69mL 浓氨水（$NH_3 \cdot H_2O$），再加蒸馏水至约 980mL，用氨水溶液或乙酸溶液调节溶液 pH＝7.0，然后用纯水稀释到 1000mL；

4 钠（Na）标准溶液：称取氯化钠（分析纯，105℃烘 4h）2.5423g，以 pH＝7.0 的 $0.1mol \cdot L^{-1}$ NH_4OAc 溶液为溶剂，定容于 1000mL，即为 $1000\mu g \cdot mL^{-1}$ 钠标准溶液，然后逐级用醋酸铵溶液稀释成 $3\mu g \cdot mL^{-1}$、$5\mu g \cdot mL^{-1}$、$10\mu g \cdot mL^{-1}$、$20\mu g \cdot mL^{-1}$、

30μg·mL^{-1}、50μg·mL^{-1}钠标准溶液，贮于塑料瓶中保存。

58.4.3 乙酸钠-火焰光度法试验应按下列步骤进行：

1 称取过1mm筛孔的风干土样4.00g～6.00g(黏土4g，砂土6g)，置于50mL离心管中。

2 当含盐量较大时，于离心管中加入50℃左右的50%乙醇溶液30mL，搅拌，离心，弃去清液，反复数次至用$BaCl_2$溶液检查清液仅有微量$BaSO_4$反应为止。

3 加pH=8.2的1mol·L^{-1} NaOAc溶液33mL，使各管质量一致，塞住管口，振荡5min后离心，弃去清液。重复用NaOAc提取4次。然后以同样方法，用异丙醇或乙醇溶液洗涤试样3次，最后1次尽量除尽洗涤液。

4 将上述土样加1mol·L^{-1} NH_4OAc溶液33mL，振荡5min(必要时用玻棒搅动)，离心，将清液小心地倾入100mL容量瓶中；按同样方法用1mol·L^{-1} NH_4OAc溶液交换洗涤两次，收集的清液最后用1mol·L^{-1} NH_4OAc溶液稀释至刻度。

5 用火焰光度计测定溶液中Na^+浓度，计算土壤交换量。

58.4.4 阳离子交换量应按下式计算：

$$CEC = \frac{\rho_{Na^+} V_{hd} N}{m_d \times 23} \times 10^{-1} \tag{58.4.4}$$

式中：ρ_{Na^+}——标准曲线上查得的待测液中钠离子的质量浓度(μg·mL^{-1})；

V_{hd}——测定时定容的体积的数值(mL)；

N——吸取滤液的稀释倍数；

23——钠的摩尔质量(g·mol^{-1})。

58.4.5 本试验的记录格式应符合本标准附录D表D.103的规定。

59 土的X射线衍射矿物成分试验

59.1 一般规定

59.1.1 本方法是以X射线射入矿物晶格产生的衍射为基础，定性或半定量地判断土的矿物组成。

59.1.2 土样为各种土类。

59.2 仪器设备和试剂

59.2.1 本试验使用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 X射线衍射仪：X射线发生器、测角仪、计数器及自动记录装置。X射线衍射仪应按仪器说明书进行校准；

2 载样玻璃片：平面的及开有试样孔槽的硬质玻璃片；

3 离心机：5000r/min；

4 高温电炉及电炉；

5 干燥器：内盛饱和硝酸钙溶液，相对湿度约为50%；

6 其他：烧杯、量杯、移液管、玻璃片、软毛刷等。

59.2.2 试剂应符合下列规定：

1 0.5mol·L^{-1}氯化镁($MgCl_2$)溶液：将102g氯化镁溶于少量纯水中，移入1000mL容量瓶中，用纯水稀释至刻度，摇匀；

2 0.5mol·L^{-1}氯化钾(KCl)溶液：将74.5g氯化钾溶于少量纯水中，移入1000mL容量瓶中，用纯水稀释至刻度，摇匀；

3 1mol·L^{-1}硝酸铵溶液：将80g硝酸铵溶于少量纯水中，稀释至1000mL；

4 盐酸溶液(1+1)；

5 95%乙醇；

6 丙酮；

7　甘油(1＋1)。

59.3　操 作 步 骤

59.3.1　常规鉴定用的试样制备应按下列规定进行：

1　镁饱和试样制备应按下列步骤进行：

1)称取1g左右过0.15mm筛孔的风干土试样，放入离心管中，加入0.5mol·L^{-1}氯化镁溶液50mL，用球状玻璃棒充分搅拌，然后用3000r/min以上的速度离心，弃去上部清液；再用0.5mol·L^{-1}氯化镁溶液处理两次；

2)分别用纯水和95%乙醇或丙酮洗涤，离心2次～3次；

3)将处理过的试样晾干，或在低于50℃下烘干，磨细备用。

2　干粉末试样制备：应将开有试样孔的载样玻璃片，放在一块平整玻璃片上，向试样孔中填入经过风干磨细的土样，使其厚度略高出试样孔。盖上一块平整玻璃片，用手按压，将试样压实、压平，然后移去上下的玻璃片。用软毛刷小心地扫除试样孔周围多余的土样。

3　水分散定向薄膜试样的制备：应称取0.05g镁饱和试样，加2mL～3mL纯水，充分搅拌使其分散。吸出1.5mL悬液，在3.5cm×5cm洁净的平面载样玻璃板上均匀铺开，静置晾干。

59.3.2　试样的专门处理与制备应按下列规定进行：

1　镁饱和试样甘油化扩展处理应按下列步骤进行：

1)供蒙脱石类矿物与蛭石、绿泥石区分，以及水化埃洛石与伊利石区分用；

2)将镁饱和试样50mg放入离心管中，加入5%甘油溶液10mL，用球状玻璃棒充分搅拌。用3000r/min以上的速度离心，弃去上部清液。按此操作用甘油溶液再处理一次，最后将离心管倒立于滤纸上，吸尽剩余的甘油溶液，按本标准第59.3.1条第3款的规定制成定向薄膜试样；

3)也可按本标准第59.3.1条第2款的规定压制的干粉末样，加入1滴～2滴的甘油溶液(1＋1)湿润，稍干后即可供鉴定用。若试样加甘油后膨胀隆起，用玻璃片压实刮平。

2 钾饱和试样的制备和热处理应按下列步骤进行：

1)供扩展性与非扩展性晶格的矿物区分，以及蛭石与蒙脱石类矿物区分用；

2)钾饱和试样制备：可按本标准第59.3.1条的规定制备，仅需将试剂相应地换成1mol·L^{-1}氯化钾溶液即可；

3)薄膜制备：可将钾饱和试样按本标准第59.3.1条第3款的规定制成定向薄膜试样，或风干磨成粉末后可按本标准第59.3.1条第2款的规定进行压制；

4)钾饱和试样的热处理：将钾饱和粉末试样或其定向薄膜放入300℃～350℃高温炉内加热2h(定向薄膜的玻璃片加热时应逐渐上升至所需温度，加热后应逐渐冷却)。然后冷却至60℃左右，取出贮于盛有无水氯化钙或五氧化二磷的干燥器中，直至进行X射线分析时取出使用。若是粉末试样，使用时应按本标准第59.3.1条第2款的规定进行压制。

3 试样550℃热处理应按下列步骤进行：

1)供绿泥石与高岭石以及其他14×10^{-1}nm矿物区分用；

2)将钾或镁饱和粉末试样或其定向薄膜放入550℃高温炉中加热2h，然后冷却至60℃左右，取出贮于盛有无水氯化钙或五氧化二磷的干燥器中，直至进行X射线分析时取出使用。若是粉末试样，使用时应按本标准第59.3.1条第2款的规定进行压制。

4 试样的盐酸溶蚀处理应按下列步骤进行：

1)供绿泥石与高岭石以及其他14×10^{-1}nm矿物区分用；

2)盐酸溶蚀处理：将试样用盐酸溶液(1＋1)在100℃下加

热处理 15min～20min，然后移至离心管中，离心，弃去上部清液，分别用纯水和 95%乙醇或丙酮各处理两次，离心洗去多余的盐酸；

3）溶蚀过的试样应按本标准第 59.3.1 条第 3 款的规定制成定向薄膜，或风干磨细成粉末后应按本标准第 59.3.1 条第 2 款的规定进行压制。

5 试样的硝酸铵处理应按下列步骤进行：

1）供镁质蛭石与其他 14×10^{-1}nm 矿物区分用；

2）硝酸铵处理：将试样或其镁饱和试样用 1mol·L^{-1} 硝酸铵溶液煮沸 10min，然后移至离心管中，离心，弃去上部清液，分别用纯水、95%乙醇或丙酮各处理两次，离心洗去多余的盐类；

3）处理过的试样应按本标准第 59.3.1 条第 3 款的规定制成定向薄膜，或风干磨细成粉末后应按本标准第 59.3.1 条第 2 款的规定进行压制。

59.3.3 X 射线衍射分析应按下列规定进行：

1 在分析前，各种试样（加热处理的试样除外）应在盛有饱和硝酸钙溶液的干燥器中放置 3d。

2 加热处理的试样从无水氯化钙干燥器中取出后，应加热至 60℃左右或立即进行分析。若衍射仪试样台有加热装置，则加热处理的试样应在 120℃温度下进行衍射分析。

3 试验条件的控制和主要参数选择（因仪器型号、性能不同而有所差异，下列为参考值）：

1）X 射线管阳极一般为铜靶（CuKa 辐射），含铁多的试样最好能用铁靶（FeKa 辐射）。X 射线管的工作电压为 30kV～40kV，工作电流为 10mA～15mA；

2）发射狭缝：1°或 0.5°；散射狭缝：1°（加镍滤片或不加）；接收狭缝：0.2mm 或 0.4mm。

3）扫描速度：可在 0.5°～2°（2θ/min）内选择，一般用 1°（2θ/min）；

4)扫描范围：一般为 2°～32°(2θ)。如果要研究矿物高角度的衍射谱线如(060)等，则应将扫描范围延续到 65°(2θ)左右(都是对铜靶而言)，同时要减小扫描速度，放宽狭缝；

5)灵敏度：满刻度 400N/s～2000N/s；

6)时间常数：4s～8s；

7)记录纸移动速度：300mm/h～600mm/h。

4 将载有试样的玻片插在 X 射线衍射仪的试验台上，选定技术参数和试验条件后，按仪器使用说明书启动仪器进行操作。当测角器转至所需角度(2θ)上限后，即可结束试验，关闭仪器。

59.4 数据整理、鉴定和记录

59.4.1 数据整理应符合下列规定：

1 试验结束后所得到的试验结果为仪器记录的衍射图谱，它是以衍射角(2θ)为横坐标，以衍射谱线的衍射强度(衍射峰的高度)为纵坐标的曲线。为了鉴定矿物，必须进行整理求得晶面间距和衍射强度两种衍射数据。

2 数据的整理方法：

1)由各衍射峰的峰尖向横坐标作垂线，确定衍射峰的衍射角(2θ)；

2)根据衍射峰的衍射角查衍射角与晶面间距换算表(即θ-d对照表，可参照有关专著)求得相应的晶面间距(一般称作 d 值)。也可按布拉格公式求出 d 值，简化后的布拉格公式为：

$$d = \lambda_{hx}/2\sin\theta \qquad (59.4.1)$$

式中：d——晶面间距(10^{-1}nm)；

λ_{hx}——X 射线波长(X 射线管为铜靶时，$\lambda_{hx}=1.5418\times10^{-1}$nm；若是铁靶，$\lambda_{hx}=1.9373\times10^{-1}$nm)($10^{-1}$nm)；

θ——衍射角(°)。

3)根据衍射峰的高度或面积，确定其衍射强度(一般用 I 表示)。衍射强度广为应用的是相对强度(I/I_0)。表示方法常用的有：100 分制：以最强者为 100，最弱者为0.5，然后对比其他衍射峰的强度；10 分制：以最强者为 10，最弱者为 1，然后对比其他衍射峰的强度；五级制：将强度分为最强、强、中等、弱、最弱五个等级；

4)对于某些形状特殊的衍射峰，需注明宽散程度、对称程度等；

5)在衍射图谱上注明试验条件、主要参数及试样制备和处理方法。

59.4.2 黏土矿物鉴定应符合下列规定：

1 衍射数据整理后，便可与标准矿物的衍射数据对比，进行鉴定矿物。鉴定的要点如下：

1)应有 3 条强衍射谱线(即衍射峰)的 d 值和 I/I_0[有的矿物在 2°～32°(2θ)范围内可能只出现一条衍射谱线]，与标准矿物的数据基本吻合，其中 d 值吻合程度要求高一些，I/I_0吻合程度可以差一些；

2)对比时，应以低角度谱线(值大的谱线)特别是(001)基面谱线为主，高角度衍射谱线为辅；

3)应注意特征谱线的对比(表 59.4.2)；

表 59.4.2 常见的黏土矿物粉晶衍射数据表

高岭石(苏州)		埃洛石(阳泉)		蒙脱石(抚顺)		伊利石(南京)		蛭石		绿泥石	
$d(10^{-1}$ nm)	I/I_0	$d(10^{-1}$ nm)	I/I_0	$d(10^{-1}$ nm)	I/I_0	$d(10^{-1}$ nm)	I/I_0	$d(10^{-1}$ nm)	I/I_0	$d(10^{-1}$ nm)	I/I_0
7.19	10	10.04	10	15.0	10	9.83	8	14.5	10	14.02	0.5
4.459	3.5	4.391	7.5	5.007	0.5	4.983	6	4.952	2	7.08	10
4.439	4.5	3.361	3	4.548	1	4.484	4	4.571	3	4.717	6.5
4.167	4	2.996	1	3.006	0.5	4.230	1	3.504	2	3.546	6

续表 59.4.2

高岭石(苏州)		埃洛石(阳泉)		蒙脱石(抚顺)		伊利石(南京)		蛭石		绿泥石	
$d(10^{-1}$ nm)	I/I_0	$d(10^{-1}$ nm)	I/I_0	$d(10^{-1}$ nm)	I/I_0	$d(10^{-1}$ nm)	I/I_0	$d(10^{-1}$ nm)	I/I_0	$d(10^{-1}$ nm)	I/I_0
3.830	2	2.554	2.5	2.569	1	3.480	1	2.605	5	3.323	0.5
3.736	1	1.682	1	1.524	1	3.339	10	2.421	3	2.838	0.5
3.576	10	1.481	1.5			3.184	7	1.674	2	2.547	0.5
3.372	1					2.979	3	1.529	4	2.378	0.5
2.564	3					2.550	3			2.031	0.5
2.534	1					2.456	1			1.663	0.5
2.495	3					2.380	1			1.538	0.5
2.384	1					2.276	1				
2.336	4					2.128	1				
2.290	8					1.994	3				
1.994	3.5					1.817	0.5				
1.786	0.5					1.624	1				
1.650	1.5					1.497	2				
1.617	1										
1.545	0.5										
1.489	2.5										

4)注意衍射峰的形状特征:黏土矿物衍射峰形状大多宽散,非黏土矿大多较尖锐。扩展性晶格矿物如蒙脱石等衍射峰具有明显的宽散特征;

5)先鉴别出主要的黏土矿物类型,然后再作细分,最后鉴定伴存矿物。

2 高岭石与埃洛石的衍射图谱相似,可用下列方法区分:

1)高岭石为片状结晶,易于形成定向集合体,故 $d(001)=$

7.0×10^{-1}nm～7.2×10^{-1}nm，衍射强度大，4.4×10^{-1}nm附近谱线强度弱，谱线均无宽散现象。埃洛石的(001)基面间距略大些，$d=7.4\times10^{-1}$nm～7.6×10^{-1}nm，谱线宽散且强度较弱，但4.4×10^{-1}nm附近谱线强度大，并有向小的晶面间距扩散的趋势；

2)埃洛石在甘油饱和后，d(001)可扩展至10×10^{-1}nm左右，高岭石不扩展；

3)高岭石(001)与绿泥石(002)基面间距相似，均在7×10^{-1}nm左右，可用下列方法区分：将试样按酸的溶蚀处理后，绿泥石因分解，衍射谱线全部消失(绿泥石的特征反应)，而高岭石无变化。故处理后7×10^{-1}nm谱线仍然存在，示有高岭石；反之，说明原有7×10^{-1}nm附近谱线是绿泥石的。将试样进行550℃热处理后，高岭石因晶格破坏，衍射谱线全部消失。绿泥石衍射谱线仅稍有变化，往往是(001)基面谱线增强，而(002)、(003)和(004)基面的衍射谱线减弱。高岭石与绿泥石还可按下列谱线对比来区分：

绿泥石	高岭石
4.72×10^{-1}nm(003)	无
3.54×10^{-1}nm(004)	3.57×10^{-1}nm～3.58×10^{-1}nm(002)
极弱或无(006)	2.37×10^{-1}nm～2.39×10^{-1}nm(003)弱
1.53×10^{-1}nm(060)	1.48×10^{-1}nm～1.49×10^{-1}nm(060)

3 蒙脱石、蛭石、绿泥石这三种矿物都有14×10^{-1}nm附近的谱线，可按下列方法区分：

1)在镁饱和甘油化定向薄膜试样的衍射图谱中，仅蒙脱石的(001)基面间距由14×10^{-1}nm附近扩展至17.7×10^{-1}nm(蒙脱石的特征反应)。据此易于将蒙脱石与其他14×10^{-1}nm矿物区分开来；

2)将试样进行热处理后，三者之中仅绿泥石(001)基面间距

无显著变化，且衍射强度往往有所增大，而蒙脱石和蛭石均由 14×10^{-1}nm 附近收缩至 10×10^{-1}nm 附近。此可作为绿泥石与其他 14×10^{-1}nm 附近矿物相区别的特征反应；

3)将试样进行酸的溶蚀处理后，三者之中仅绿泥石衍射线全部消失，其余两者的谱线基本上不变；

4)将试样制成钾饱和定向薄膜，其中绿泥石的 14×10^{-1}nm 谱线无变化，蛭石 14×10^{-1}nm 谱线收缩至 10×10^{-1}nm，而蒙脱石则收缩至 12×10^{-1}nm 附近(有的亦可收缩至 10×10^{-1}nm)。若再进行 300℃～350℃加热处理，三者中仅有绿泥石谱线无变化，其余二者均可收缩至 10×10^{-1}nm 左右；

5)将试样进行硝酸铵处理后，三者之中仅绿泥石衍射线无变化。镁质蛭石 14×10^{-1}nm 谱线将收缩至 10×10^{-1}nm，蒙脱石则收缩至 12×10^{-1}nm 附近；

6)伊利石与水化埃洛石这两种矿物都有 10×10^{-1}nm 附近谱线，可按下列方法区分：试样处理成镁饱和甘油化定向薄膜后，伊利石谱线无变化，水化埃洛石的 10×10^{-1}nm 谱线将扩展至 11×10^{-1}nm 附近。试样进行 300℃～350℃加热处理后，伊利石谱线无变化，水化埃洛石的 10×10^{-1}nm谱线将收缩至 7.2×10^{-1}nm 附近。

7)伊利石类矿物 $d(003)=3.32\times10^{-1}$nm～3.36×10^{-1}nm，石英 $d(101)=3.34\times10^{-1}$nm 左右。这两种矿物都是土中常见的，在判读 $d=3.34\times10^{-1}$nm 左右谱线时容易混淆，应当注意。石英以 $d(100)=4.26\times10^{-1}$nm 附近谱线为依据较为适宜；

8)二八面体和三八面体的黏土矿物，可用(060)晶面间距大小以及(002)谱线的强弱来鉴别。通常二八面体的黏土矿物 $d(060)=1.48\times10^{-1}$nm～1.51×10^{-1}nm，并且

(002)谱线较强；三八面体的黏土矿物 $d(060)=1.52\times10^{-1}$nm～1.53×10^{-1}nm，(002)谱线较弱或没有。应当注意不要将石英的 1.53×10^{-1}nm 附近的谱线加以误判。

59.4.3 本试验系定性的鉴定而不是定量分析，所以鉴定结果依据主要衍射峰的高度和面积粗略地加以估计后，按各种黏土矿物大致含量由多到少依次排列。至于伴存的非黏土矿物，宜按其含量由少到多依次排列在黏土后面。

59.4.4 试验记录中除了将鉴定出的矿物依次排列外，还应将整理后的衍射数据列入记录表中，同时应将试样的 X 射线衍射图谱附在成果鉴定表后。

59.4.5 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.104 的规定。

60 粗颗粒土的试样制备

60.1 一般规定

60.1.1 土样应为黏质粗颗粒土或无黏性粗颗粒土。

60.1.2 本试验对于含超粒径土样的处理方式有剔除法、等量替代法、相似级配法和混合法。

60.2 仪器设备

60.2.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 粗筛孔径：100mm、80mm、60mm、40mm、20mm、10mm、5mm；

2 细筛孔径：2mm、1mm、0.5mm、0.25mm、0.10mm、0.075mm。

60.2.2 本试验所用的其他仪器设备应符合下列规定：

1 台秤：称量 100kg 或 50kg，分度值 50g；称量 10kg，分度值 5g；

2 天平：称量 5000g，分度值 1g；称量 200g，分度值 0.01g；

3 其他：碎石机、振筛机、烘箱、木锤、橡皮板、铁铲、盛土盘、喷雾器、保湿缸。

60.3 操作步骤

60.3.1 黏质粗颗粒土的试样制备应按下列步骤进行：

1 风干土样制备应将全部土样置于橡皮板上风干，用木锤将土块及附着在粗颗粒土上的细粒土敲散，应注意避免破坏土的天然颗粒。将全部土样依次过筛，按＞100mm、100mm～80mm、80mm～60mm、60mm～40mm、40mm～20mm、20mm～10mm、10mm～5mm、＜5mm 分组并称其质量，计算各粒组含量百分数，测定粒径大于 5mm 土及粒径小于 5mm 的各粒组土的风干含水率。

2 根据土样性质及工程要求，从粒径大于5mm和小于5mm的土中分别取代表性土样进行物理性试验。必要时，参照地质鉴定方法对粒径大于5mm土粒的岩性、形状、风化程度及粒径小于5mm土粒特性进行描述。

3 根据试验要求的级配进行配制土样。各粒组取土质量应按本标准第60.4.5条的规定计算。当土样中含超粒径颗粒时，可按下列4种方法处理：

1）剔除法：将超粒径颗粒剔除；

2）等量替代法：用粒径小于仪器允许最大粒径并大于5mm的土粒按比例等质量替换超粒径颗粒；

3）相似级配法：根据原级配曲线的粒径，分别按照几何相似条件等比例地将原样粒径缩小至仪器允许的粒径；

4）混合法：同时采用本款第2项、第3项两种方法，即先用适当的比尺缩小，使粒径小于5mm的土的质量不大于总质量的30%，若仍有超粒径颗粒再用等量替代法制样。

4 将取好的土样拌和均匀，平铺在不吸水的垫板上，含水率应按本标准第60.4.6条的规定计算加水量。用喷雾器均匀喷洒所需的水量后，充分拌和，在保湿器内湿润24h，并实测含水率，含水率的最大允许差值应为±1%。

5 制备好的土样如暂时不用，应装入塑料袋或有内衬塑料膜的编织袋中，扎紧袋口，密封保存，以防含水率变化。

6 如土料数量不够，可重复使用，但风化土和含有棱角的易破碎的石渣、堆石料则不允许重复使用。

7 天然含水率土样制备：应在保持天然含水率不变的情况下，将全部土样拌和均匀。根据含砾量多少，取不少于以下规定的代表性土样，测定其天然含水率：

粗、细颗粒混合土样	2000g～5000g
粒径大于5mm粗颗粒土	2000g～3000g（各粒组分别测定时取200g～2000g）

粒径不大于 5mm 细颗粒土　　100g～200g

根据各项试验所需总质量，用四分法分别取所需土样质量（务必使粗颗粒分配均匀），装入保湿器内，以防含水率变化。

60.3.2　无黏性粗颗粒土的试样制备应符合下列规定：

1　将全部土样依次过粗筛，分组称量。必要时取粒径小于 5mm 土过筛，计算各粒组含量百分数。按粒组分别存放备用；

2　应按本标准第 60.3.1 条第 2 款～第 6 款的规定进行备样。

60.4　计算和记录

60.4.1　剔除法级配应按下式计算：

$$X_i = \frac{X_{0i}}{1 - P_{d\max}} \tag{60.4.1}$$

式中：X_i——剔除后某粒组含量（%）；

X_{0i}——原级配某粒组含量（%）；

$P_{d\max}$——超粒径颗粒含量，以小数计。

60.4.2　等量替代法级配应按下式计算：

$$X_i = \frac{X_{0i}}{P_5 - P_{d\max}} P_5 \tag{60.4.2}$$

式中：P_5——粒径大于 5mm 的土粒占总质量的含量，以小数计。

60.4.3　相似级配法粒径应按下列公式计算：

$$d_{ni} = \frac{d_{0i}}{n_d} \tag{60.4.3-1}$$

$$n_d = d_{0\max} / d_{\max} \tag{60.4.3-2}$$

式中：d_{ni}——原级配某粒径缩小后的粒径（mm）；

d_{0i}——原级配某粒径（mm）；

n_d——粒径缩小倍数；

$d_{0\max}$——原级配最大粒径（mm）；

$d_{\max}$——仪器允许最大粒径（mm）。

60.4.4　相似级配法级配应按下式计算：

$$X_{dn} = X_{d0} / n_d \tag{60.4.4}$$

式中：X_{dn}——粒径缩小 n_d 倍后相应的小于某粒径含量(%)；

X_{d0}——原级配相应的小于某粒径含量(%)。

60.4.5 各单项试验所需风干土质量和某粒组应取风干土质量应按下列公式计算：

1 各单项试验所需风干土质量：

$$m_0 = m_{01} + m_{02} \tag{60.4.5-1}$$

$$m_{01} = V\rho_d P_5(1 + 0.01w_{01}) \tag{60.4.5-2}$$

$$m_{02} = V\rho_d(1 + 0.01w_{02})(1 - P_5) \tag{60.4.5-3}$$

2 某粒组应取风干土质量：

$$m_{0i} = \frac{0.01X_i}{P_5}m_{01} \tag{60.4.5-4}$$

式中：m_0——风干土样总质量(kg)；

m_{01}——粒径大于 5mm 风干土质量(kg)；

m_{02}——粒径不大于 5mm 风干土质量(kg)；

m_{0i}——某粒组风干土质量(kg)；

w_{01}——粒径大于 5mm 风干土含水率(%)；

w_{02}——粒径不大于 5mm 风干土含水率(%)；

V——试样体积(cm^3)；

X_i——某粒径组含量(%)。

60.4.6 土样所需加水量应按下列公式计算：

$$m_w = \frac{m_0}{1 + 0.01w_0} - 0.01(w' - w_0) \tag{60.4.6-1}$$

$$w_0 = w_{01}P_5 + w_{02}(1 - P_5) \tag{60.4.6-2}$$

60.4.7 土样制备记录格式应符合本标准附录 D 表 D.105 的规定。

61 粗颗粒土相对密度试验

61.1 一般规定

61.1.1 土样应为最大粒径不大于 60mm 的能自由排水的粗颗粒土。

61.1.2 粗颗粒土中细粒土的含量不应大于 12%。

61.2 仪器设备

61.2.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 振动台：具有隔振装置的振动台。台面尺寸为 762mm×762mm，振动台的负荷应满足试样筒、套筒、加重底板、加重物及试样等总质量要求。振动台频率应为 40Hz～60Hz，振幅为 0mm～2mm 可调，加重盖板为 1.2cm 厚的钢板，直径略小于试样筒，中心应有 15mm 未穿通的提吊螺孔。对所用的试样筒，加重盖板与加重物的总压力为 14kPa。

2 表面振动器：由振动电动机及钢制夯组成。钢制夯由连接杆、连接栓固定于振动电动机下，其底部为厚 15mm 的圆形夯板。夯板直径略小于试样筒内径 2mm～5mm。表面振动器振动频率为 40Hz～60Hz，激振力约为 4.2kN，夯与振动器对试样的静压力为 14kPa。

3 试样筒：试样筒的尺寸应符合表 61.2.1 的规定。

表 61.2.1 试样筒尺寸

内径 D (cm)	高度 H (cm)	体积 V (cm^3)	允许最大粒径 d_{max} (mm)	试料质量 m (kg)
30	34	24033	60	40～50

61.2.2 本试验所用的其他仪器设备应符合下列规定：

1　套筒：应与试样筒紧固连接；

2　测针架及测针：测针的分度值为 0.1mm；

3　灌注设备：带管嘴的漏斗。管嘴直径 10mm～20mm，漏斗喇叭口径 100mm～150mm，管嘴长度视套筒高度而定；

4　试验筛：

1）粗筛：孔径分别为 60mm、40mm、20mm、10mm、5mm；

2）细筛：孔径分别为 5mm、2mm、1mm、0.5mm、0.25mm、0.075mm。

5　台秤：称量 50kg，分度值 50g；称量 10kg，分度值 5g；

6　其他：搅拌盘、起吊设备、铁铲、毛刷、秒表、钢尺、卡尺、称料桶、大瓷盘。

61.3　操作步骤

61.3.1　选用代表性土样在 105℃～110℃下烘干，并分级过筛贮存。筛分过程中应使弱胶结的土样能充分剥落。

61.3.2　最小干密度试验应按下列步骤进行：

1　称筒质量。

2　对粒径不大于 10mm 的烘干土，采用固定体积法。将拌匀的土样从漏斗管嘴均匀徐徐地注入试样筒。注入时随时调整漏斗管口的高度，使自由下落的距离保持在 2mm～5mm 之间。同时要从外侧向中心呈螺旋线移动，使土层厚度均匀增高而不产生大小颗粒分离。当充填到高出筒顶约 25mm 时，用钢直刀沿筒口刮去余土。注意在操作时不得扰动试样筒。称筒及试样总质量。

3　对粒径大于 10mm 的烘干土，采用固定体积法。用大勺或小铲将土样填入试样筒内。装填时小铲应贴近筒内土面，使铲中土样徐徐滑入筒内，直至填土高出筒顶，余土高度不应超过 25mm。然后将筒面整平。当有大颗粒露顶时，凸出筒顶的体积应能近似地与筒顶水平面以下的大凹隙体积相抵消，称筒及试样

总质量。

4 最小干密度测定应按上述的规定进行平行试验，取其算术平均值，其最大允许平行差值应为±0.03g/cm³。

61.3.3 最大干密度振动台法试验应按下列步骤进行：

1 振动台法(干法)：先拌匀烘干土样，将土样装填于试样筒中，称筒与试样总质量。装填方法与最小干密度的测定相同。通常情况是直接用最小干密度试验时装好的试样筒，放在振动台上，加上套筒，把加重盖板放于土面上，依次安放好加重物。随即将振动台调至最优振幅0.64mm，振动8min后，卸除加重物和套筒，测读试样高度，计算试样体积。

2 振动台法(湿法)：在烘干试料中加适量的水，或用天然的湿土进行装样。装完试样后，应立即振动6min。对于高含水率的土样，为了防止某些土在振动过程中产生颗粒跳动，振动6min时，应随时减小振动台的振幅。振动后吸除土面上的积水，依次装上套筒。施加重物，然后固定在振动台上，振动8min后，依次卸除加重物与套筒。测读试样高度，称筒与试样总质量。取代表性土样测含水率。

3 最大干密度测定应按上述的规定进行平行试验，取其算术平均值，其最大允许平行差值应为±0.03g/cm³。

61.3.4 最大干密度表面振动法试验的测定应按下列步骤进行：

1 干法表面振动法应先将试样筒及底板固定在基础上，制样及装填方法应按本标准第61.3.3条第1款的规定进行，将试样均分为两份，分两层装填，每层振动8min，取出振动器，卸除套筒，量测试样高度。称试样筒和土的质量。

2 湿法表面振动法应先将试样筒及底板固定在基础上，制样及装填方法应按本标准第61.3.3条第2款的规定进行，将试样均分为两份，分两层装填，第一层装好后，放入振动器进行振动，振动8min后，提起振动器，吸除土表面的积水，重复第一层试样装填振动

步骤。测读试样高度，称筒与试样总质量并应按本标准第60.3.1条第3款第7项的规定测试样含水率。

61.4 计算和记录

61.4.1 最小、最大干密度应按下列公式计算：

1 最小干密度：

$$\rho_{dmin}=\frac{m_d}{V_c} \tag{61.4.1-1}$$

2 最大干密度：

$$\rho_{dmax}=\frac{m_d}{V_s}=\frac{m_d}{V_c-(R_i-R_t)\times 0.1\times A} \tag{61.4.1-2}$$

式中：V_c——试样筒的体积(cm^3)；

V_s——试样体积(cm^3)；

R_i——起始读数(mm)；

R_t——振后加荷盖板上百分表的读数(mm)；

A——试样筒断面积(cm^2)。

61.4.2 相对密度 D_r 应按下列公式计算：

$$D_r=\frac{(\rho_{d0}-\rho_{dmin})\rho_{dmax}}{(\rho_{dmax}-\rho_{dmin})\rho_{d0}} \tag{61.4.2-1}$$

$$D_r=\frac{e_{max}-e_0}{e_{max}-e_{min}} \tag{61.4.2-2}$$

式中：ρ_{d0}——天然状态或人工填筑之干密度(g/cm^3)；

e_0——天然或填筑孔隙比。

61.4.3 压实度应按下式计算：

$$R_c=\frac{\rho_{d0}}{\rho_{dmax}} \tag{61.4.3}$$

式中：R_c——压实度，以小数计。

61.4.4 密度指数应按下式计算：

$$I_D=\frac{\rho_{d0}-\rho_{dmin}}{\rho_{dmax}-\rho_{dmin}}\times 100 \tag{61.4.4}$$

式中：I_D——密度指数(%)。

61.4.5 粗颗粒土相对密度试验记录格式应符合本标准附录 D 表 D.106 的规定。

62 粗颗粒土击实试验

62.1 一般规定

62.1.1 土样应为最大粒径不大于60mm且不能自由排水的含黏质土的粗颗粒土。

62.1.2 本试验分为轻型击实试验和重型击实试验。轻型击实试验的单位体积击实功约为592.2kJ/m³，重型击实试验的单位体积功约为2684.9kJ/m³。

62.2 仪器设备

62.2.1 大型击实仪应符合下列规定(图62.2.1)：由击实筒、套筒、击锤、导筒等组成。其主要指标应符合现行国家标准《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》GB/T 15406的规定，见表62.2.1。

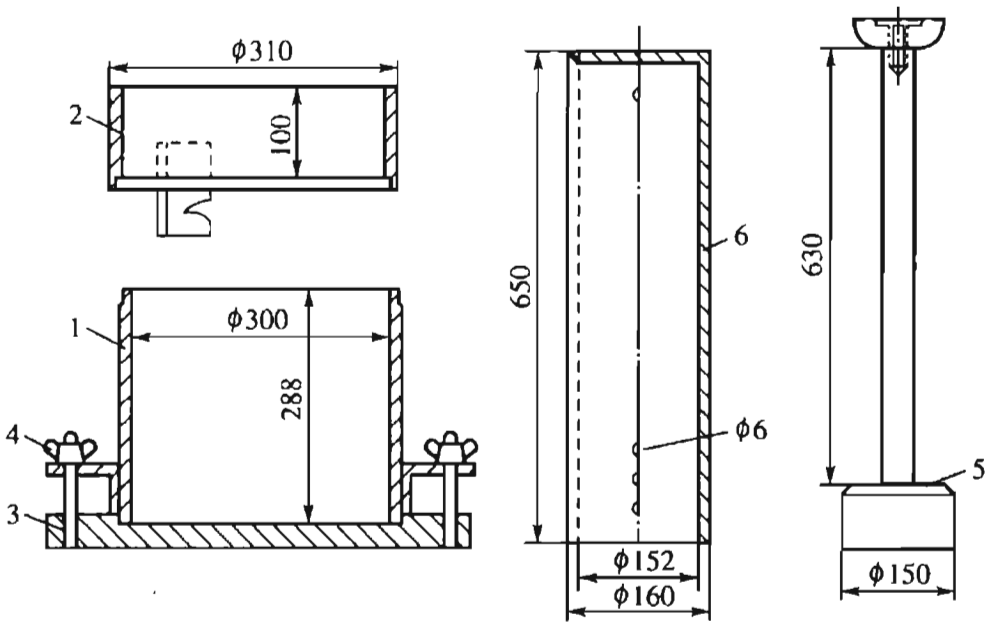


图62.2.1 大型击实仪示意图(单位：mm)

1—击实筒；2—套筒；3—底盘；4—固定螺丝；5—击锤；6—导筒

表 62.2.1 大型击实仪技术性能

击锤质量(kg)	击锤底直径(cm)	落高(cm)	击实筒尺寸		装土层次	每层击数	单位面积冲量(kPa·s)
			直径(cm)	高度(cm)			
15.5	15	60	30	28.8	3	44	3
35.2	15	60	30	28.8	3	88	7

62.2.2 本试验所用的其他仪器设备应符合下列规定：

1 天平：称量 200g，分度值 0.01g；称量 2000g，分度值 1g；

2 台秤：称量 10kg，分度值 5g；称量 100kg，分度值 50g；

3 粗筛：孔径 100mm、80mm、60mm、40mm、20mm、10mm、5mm；

4 其他：喷水器、恒湿器、搪瓷盘、大铝盒、铁铲、木棒、刮土刀、平口刀。

62.3 操作步骤

62.3.1 试样制备分为湿样法和干样法两种。

1 干法制备应按下列步骤进行：

1) 将有代表性土样一次备足，充分拌匀后取 20kg～50kg，测定试验前的级配、混合含水率或分别测定粗颗粒土、粒径不大于 5mm 土样的含水率、比重及细粒土的液塑限；

2) 将代表性土样风干，将土块及附于粗颗粒上的细颗粒碾散。碾散时，应避免将天然颗粒碾破。然后将全部土样过筛，按＞60mm、60mm～40mm、40mm～20mm、20mm～10mm、10mm～5mm、＜5mm 粒组分别堆放备用；

3) 备好的土样应按照本标准第 60.3.1 条第 3 款的规定进行处理，分别计算并称取每一试样所需的各级粒组的质量（每个试样的质量约为 35kg～45kg），一组试验不少于 5 个试样；

4) 调制粒径不大于 5mm 试样含水率，各试样依次相差 2%

左右，其中 2 个大于最优含水率，2 个小于最优含水率（按细粒的塑限估计最优含水率）。所需加水量按本标准第 60.4.6 条的规定进行计算。若粗颗粒采用饱和面干状态含水率，则只需计算粒径不大于 5mm 试样的加水量；

5）将各个试样分别置于不吸水的平板上，用喷水设备均匀喷洒至预定水量。分层边喷洒边拌和，待拌和均匀后，装入盛土密闭器具内，在保湿器内湿润 24h，根据土的性质可延长或缩短贮存时间。

2 湿法制备应按下列步骤进行：

1）宜用于含强风化的粗颗粒土；

2）取天然含水率的粗颗粒土约为 300kg～400kg，分成 7 等份，其中 1 份作测定试样含水率用，1 份备用，其余 5 份应分别按本标准第 62.3.1 条第 1 款第 4 项的规定制备试样。

62.3.2 击实试验应按下列步骤进行：

1 击实仪应放在刚性基础上，安装调整好，拧紧全部螺帽，在击实筒内壁及底板涂一薄层润滑油。

2 取制备好的土样，拌和均匀。应按本标准表 62.2.1 的规定分层击实。装填试样时，应防止粗粒集中并控制每层的高度大致相同，每层击实后，应将其表面刨毛。最后一层的顶面不应大于击实筒顶面 15mm。

3 击实完成后，取下套环，取去超高部分余土，并将表面填平。然后卸去底盘，将击实筒外壁擦净，称筒与试样总质量，准确至 50g。

4 将试样从击实筒内推出，并从试样中部取 2kg～5kg 混合土样测定其含水率，或取 50g～100g 粒径不大于 5mm 的土样，测定其含水率。

5 应按本标准第 62.3.2 条第 2 款～第 4 款的规定进行不同

含水率土样的击实试验。

62.4 计算、制图和记录

62.4.1 干密度应按下式计算：

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0.01w} \tag{62.4.1}$$

62.4.2 以干密度为纵坐标，含水率为横坐标，绘制干密度和含水率关系曲线。曲线的峰值为最大干密度 $\rho_{d\max}$，与其对应的含水率为最优含水率 w_{op}。

62.4.3 饱和状态的含水率应按下式计算：

$$w_{sat} = \left(\frac{\rho_w}{\rho_d} - \frac{1}{G_s}\right) \times 100 \tag{62.4.3}$$

式中：w_{sat}——饱和状态含水率(%)。

62.4.4 计算数个干密度下土的饱和含水率，以干密度为纵坐标，含水率为横坐标，绘制饱和曲线。

62.4.5 粗颗粒土击实试验记录格式应符合本标准附录 D 表 D.107的规定。

63 粗颗粒土的渗透及渗透变形试验

63.1 一般规定

63.1.1 土样应为扰动的粗颗粒土试样。

63.1.2 本试验方法分为垂直渗透试验和水平渗透试验。

63.2 仪器设备

63.2.1 本试验所使用的主要仪器设备应符合以下规定：

1 垂直渗透变形仪(图 63.2.1-1)：包括仪器筒、顶盖、底座、透水板及支架。筒身内径与试样最大颗粒粒径之比不应小于 5，试样高度不应小于试样直径。顶盖中心为一活塞套。透水板分上透水板和下透水板，上透水板兼起传递荷载作用。在下渗水板之下，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。

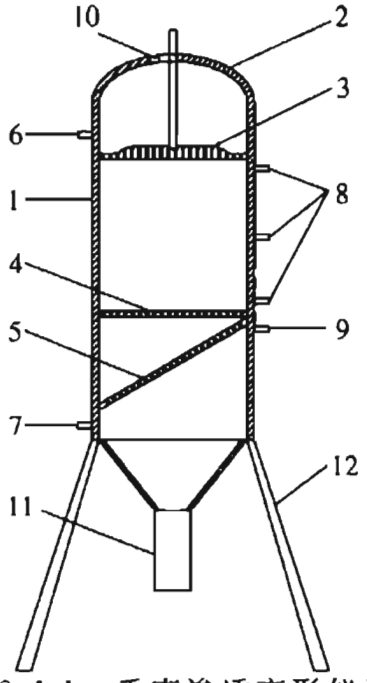


图 63.2.1-1 垂直渗透变形仪示意图

1—筒身；2—上盖；.3—上透水板；4—下透水板；5—斜透水板；6—上进水口(溢水口)；7—下进水口(溢水口)；8—测压孔；9—排气孔；10—上排气孔；11—集砂器；12—支架

2 水平渗透变形仪(图 63.2.1-2):由进水段、试样段、出水段、集砂器、水箱、支架组成。仪器的宽度和厚度与试样最大颗粒粒径比不得小于 5,长度不得小于宽度。

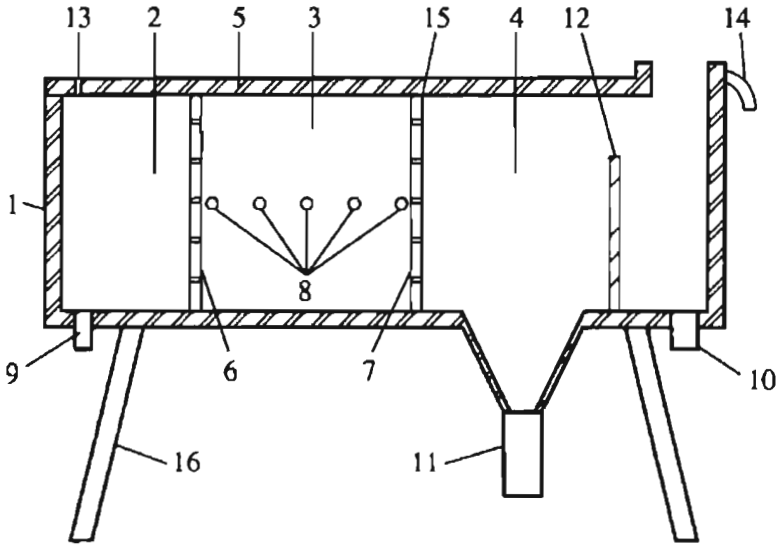


图 63.2.1-2 水平渗透变形仪示意图

1—筒;2—进水段;3—试样段;4—出水段;5—上盖板;6—上游透水板;7—下游透水板;8—测压孔;9—上游进水口(放水口);10—下游放水口;11—集砂器;12—格栅;13—上游排气孔;14—下游溢水口;15—橡皮止水;16—支架

3 供水设备:供水箱,提升架、橡皮管。供水箱设置溢流堰能保持常水头。

4 加荷设备:活塞杆、加荷框架、加荷杠杆和百分表支架。

5 量测设备:测压管、量筒、秒表、温度计、百分表和测压装置。

6 其他设备:击锤(或振动器)、台秤、天平及标准筛等。

63.2.2 仪器检查应下列步骤进行:

1 将下进水口与供水管相连接,使仪器充水,检查仪器的各部件是否堵塞及漏水等。检查完毕,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，取去顶盖，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。对于水平渗透仪，取去上盖板，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，安好集砂器。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。

63.3　操作步骤

63.3.1　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，按仪器内径不应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本标准第60.3.1条第3款第2项的规定处理。

3　根据需要控制的干密度及试样高度，试样质量应按下式计算：

$$m_d = \rho_d \pi r^2 h' \tag{63.3.1}$$

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，应当分层装填试样，且每层的级配应相同，还可酌加相当于试样质量1%～2%的水分，拌和均匀后再进行装样。

5　将称好的试样均匀分层装入仪器中，用击实锤(对于风化石渣或易击碎之土料可采用振动加密法)击实。达到要求的密度试样总厚度：砂土不小于10cm；细砾石不小于15cm；中粗砾石为20cm～25cm；卵石为试样最大粒径的3倍～5倍。装填分层厚度：砂土一般为2cm～3cm；砂砾石及砂卵石为试样最大粒径的

1.5倍～2.0倍。

63.3.2 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（若试验用自来水，应至少贮存一天曝气后再用来作试验用水，以减少水中气体的离析）。

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。

63.3.3 渗透试验应按下列步骤进行：

1 根据工程要求，当需要在试验过程中在试样顶面施加荷载时，则利用加荷设备。对于垂直渗透仪，通过活塞及上透水板对试样施加荷载；对于水平渗透仪，通过上盖板对试样施加荷载。

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。其原则是既要测得试样临发生变形前的坡降，又要准确地测得临界坡降。

3 提升供水箱，使供水箱的水面高出渗透容器的溢水口（上进水口）保持常水头差，形成初始渗透坡降。

4 对管涌土，加第一级水头时，初始渗透坡降可为0.02～0.03；然后一般可按0.05、0.1、0.15、0.2、0.3、0.4、0.5、0.7、1.0、1.5、2.0……等坡降递增。但在接近临界坡降时，渗透坡降递增值应酌量减小。对于非管涌土，初始渗透坡降可适当提高，渗透坡降递增值应适当放大。

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。每次测读间隔时间一般为10min～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，均应按本标准63.3.3条第5款的规定重复进行，直至试验破坏或当水头不能再继续增加时，即可结束试验。

63.4 计算、制图和记录

63.4.1 试样的干密度应按下式计算：

$$\rho_d = \frac{m_d}{\pi r^2 h_0} \tag{63.4.1}$$

式中：r——试样半径(cm)；

h_0——试样初始高度(cm)。

63.4.2 试样的孔隙率应按下式计算：

$$n = \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_w G_s}\right) \times 100 \tag{63.4.2}$$

式中：n——孔隙率(%)。

63.4.3 土粒比重G_s应为粗细颗粒混合比重，应按下式计算：

$$G_s = \frac{1}{\frac{P_5}{G_{s1}} + \frac{1 - P_5}{G_{s2}}} \tag{63.4.3}$$

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

63.4.4 渗透坡降应按下式计算：

$$i = \frac{\Delta H}{L} \tag{63.4.4}$$

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)。

63.4.5 渗流速度应按下式计算：

$$v = \frac{Q}{tA} \tag{63.4.5}$$

式中：v——渗透流速(cm/s)；

Q——渗水量(cm^3)；

t——时间(s)；

A——试样面积(cm^2)。

63.4.6 渗透系数应按下式计算：

$$k_T = \frac{v}{i} \tag{63.4.6}$$

63.4.7 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($\lg i$-$\lg v$ 曲线)。

63.4.8 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 $\lg i$-$\lg v$ 曲线，必要时还应作出测压管之间试样厚度的 $\lg i$-$g v$ 曲线。临界坡降可根据 $\lg i$-$\lg v$ 关系曲线进行判断。当 $\lg i$-$\lg v$ 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：

$$i_k = \frac{i_2 + i_1}{2} \tag{63.4.8-1}$$

式中：i_2——开始出现管涌时的坡降；

i_1——开始出现管涌前一级的坡降。

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

$$i_F = \frac{i'_2 + i'_1}{2} \tag{63.4.8-2}$$

式中：i'_2——试样破坏时的渗流坡降；

i'_1——试样破坏前一级的渗流坡降。

发生流土破坏时，有时 i_2' 不易测得，则可按下式计算：

$$i_F = i_1' \tag{63.4.8-3}$$

63.4.9 粗颗粒土的渗透及渗透变形试验记录格式应符合本标准附录 D 表 D.108 的规定。

64 反滤试验

64.1 一般规定

64.1.1 土样应为无黏性土样和黏性土样。

64.1.2 本试验方法采用垂直渗透法。

64.2 无黏性土的反滤试验

64.2.1 本试验所用的主要仪器设备应符合本标准第63.2.1条第1款～第6款的规定。当渗透水流由上向下时，下游溢水口处，加设一个可升降的溢流水箱。

64.2.2 仪器检查应符合本标准第63.2.2条第1款～第3款的规定。

64.2.3 试样的制备与饱和应按下列步骤进行：

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，用击实锤(对风化石渣或易击碎的土料，可采用振动加密法)击实，使之达到要求的干密度；

2)被保护土和反滤料的厚度应符合第63.3.1条第5款的规定，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)如渗透水流方向由上向下，反滤料应位于被保护土之下。

2 试样饱和应符合本标准第63.3.2条的规定。

64.2.4 无黏性土的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 0.1～0.2 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。以后各级水头，大致按 0.3、0.5、1.0、1.5、2.0、3.0、4.0…的坡降逐次升高。每升高一次水头，均应按标准第 64.2.4 条第 3 款的规定进行测读。

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需延长到 3h～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：

1）当升高水头后，流量不断变大，被保护土中的渗透坡降减小；

2）滤层中的渗透坡降等于被保护土中的渗透坡降；

3）被保护土为黏质土，渗透坡降大于 50～100 时；被保护土为无黏性土，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、流失部分、深度等。

64.2.5　干密度、孔隙率、土粒比重、渗透坡降、渗流速度应按本标准第 63.4.1 条～第 63.4.4 条所列公式计算。

64.2.6　应绘制被保护土的 $\lg i$-$\lg v$ 曲线和 v-t 曲线。

64.2.7 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。

64.2.8 无黏性土的反滤试验记录格式应符合本标准附录 D 表 D.108 的规定。

64.3 黏性土的反滤试验

64.3.1 仪器设备应符合本标准第 63.2.1 条第 1 款～第 6 款的规定。

64.3.2 仪器检查应符合本标准第 63.2.2 条第 1 款～第 3 款的规定。

64.3.3 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，用击实锤击实或振动加密法压实，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。

64.3.4 反滤料试样饱和应符合本标准第 63.3.2 条的规定。当反滤料里的水面离出口表面差 2cm 时，停止饱和。

64.3.5 黏性土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。

64.3.6 黏性土的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内每5min测记1次流量，然后每小时测记1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。

64.3.7 有下列情况之一者，可以结束试验：

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。

64.3.8 应按本标准第63.4.1条～第63.4.3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-t曲线。

64.3.9 黏性土的反滤试验记录格式应符合本标准附录D表D.108的规定。

65 粗颗粒土固结试验

65.1 一 般 规 定

65.1.1 土样应为扰动的粗颗粒土试样。

65.1.2 本试验方法采用标准固结法。

65.2 仪 器 设 备

65.2.1 本试验所用的仪器设备应符合以下规定：

1 固结仪(图 65.2.1)：

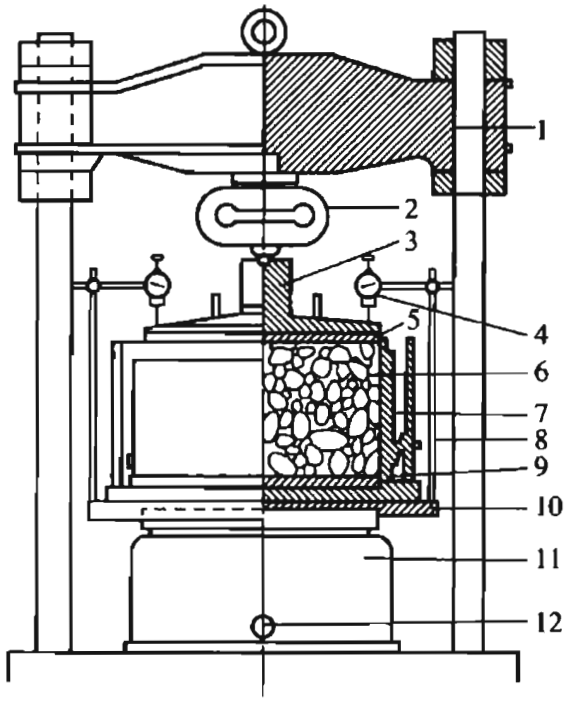


图 65.2.1 大型压缩仪装置示意图

1—加荷框架；2—测力计；3—传压块；4—百分表；5—有孔金属透水板；6—试样；7—浮环；8—饱和水槽；9—浮环垫块；10—底盘；11—油压机；12—接压力油库

1)固结容器(浮环式)：直径(D)与高度(H)之比为 1.5～

2.5，高度与试样最大粒径 d_{max} 之比 4～6 为宜，其尺寸应符合现行国家标准《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》GB/T 15406 的规定；

2）加荷设备（附稳压装置）：负荷传感器（或测力计）最大允许误差应为±1%F.S；

3）位移传感器：最大允许误差应为±0.2%F.S；或位移计：分度值 0.01mm。

2 磅秤：称量 100kg，分度值 50g；台秤：称量 5000g，分度值 5g。

3 其他：饱和装置、吊装设备、振动器、击实器、推土器、秒表、烘箱、瓷盘、铁铲。

65.2.2 加荷平台要求水平稳固与加荷框架平行，中心一致；稳压器灵敏，试验压力稳定。各管路接头、阀门不泄漏。

65.3 操作步骤

65.3.1 试样制备应按下列步骤进行：

1 应按本标准第 60.3.1 条、第 60.3.2 条的规定制备土样。取制备好的土样拌匀，均分为 2 份～3 份，注意勿使粗粒集中。

2 将带套环的固结容器内壁涂一层润滑脂，安放在放有透水板的底盘上。容器下垫以垫块。透水板上放一层滤纸或薄层无纺土工布，分层均匀装料。黏质粗颗粒土用击实法，无黏性粗颗粒土用振动法，将试样分层压实至要求的干密度。除去套环，整平表面，其上放一层滤纸或薄层无纺土工布，顺次放透水板和传压板。

65.3.2 试样安装与饱和应按下列步骤进行：

1 将装有试样的固结容器吊装到水槽内，置于加荷框架中心；

2 试样需饱和时，将饱和装置连接供水装置，对无黏性粗颗粒土试样，宜用水头饱和；对黏质粗颗粒土试样，宜用真空饱和；

3 拆去容器的浮环垫块，安装负荷传感器或测力计、位移传

感器或百分表。

65.3.3 固结试验应按下列步骤进行：

1 用稳压装置施加 3kPa～5kPa 的预压力，使试样与仪器各部之间接触良好。将各百分表或位移传感器调整到零点或初始读数；

2 施加各级压力，压力等级一般为 50kPa、100kPa、200kPa、400kPa、800kPa、1600kPa、3200kPa…最后一级压力应大于土层实际压力 100kPa～200kPa；

3 对黏质粗颗粒土需要测定固结系数时，则施加每一级压力后，按下列时间顺序测记试样高度的变化：0.1min、0.25min、1min、2.25min、4min、6.25min、9min、12.25min、16min、20.25min、30.25min、36min、42.25min、60min，此后每隔 1h 测记 1 次，直至主固结完成或延长至 24h；

4 当需做回弹试验时，可在施加大于上覆压力的某级压力固结稳定后逐级退压，直至退到第一级压力，每次退压后的回弹稳定标准与加压相同，测记试样的回弹量；

5 试验结束后，排除容器中的水，拆除仪器各部件，将试样从容器内推出，取代表性试样测定试验后含水率，当需了解颗粒破碎情况时，应对全部试样进行颗粒分析试验。

65.4 计算、制图和记录

65.4.1 计算应符合本标准第 17.2.3 条的规定。

65.4.2 制图应符合本标准第 17.2.4 条的规定。

65.4.3 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.109、表 110 规定。

66 粗颗粒土直接剪切试验

66.1 一般规定

66.1.1 土样应为最大粒径不大于 60mm 的粗颗粒土。

66.1.2 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。

66.2 仪器设备

66.2.1 应变控制式大型直剪仪(图 66.2.1)应由上剪切盒、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。

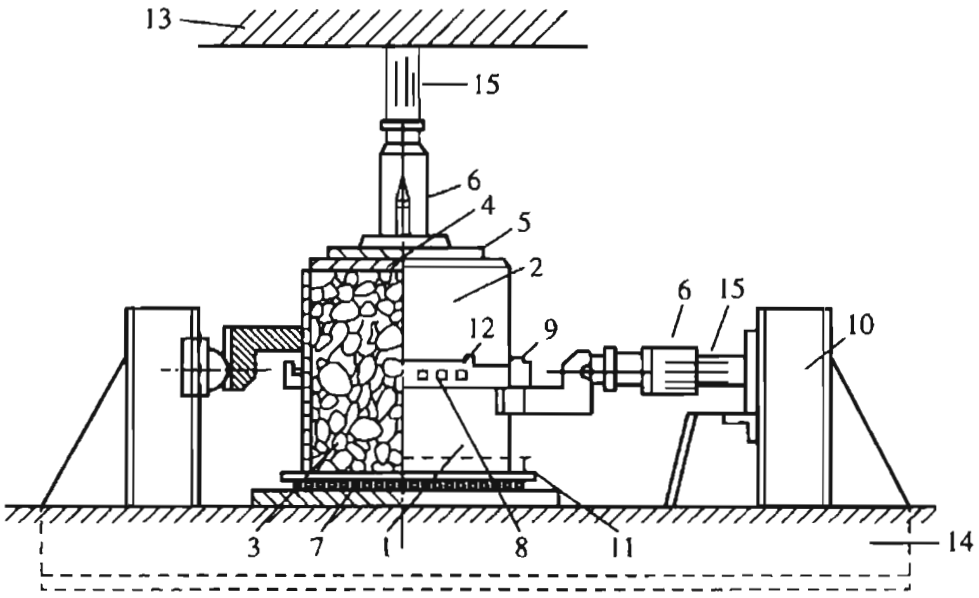


图 66.2.1 大型直剪仪示意图

1—下剪切盒;2—上剪切盒;3—试样;4—透水板;5—传压板;6—测力计;7—滚轴排;8—开缝装置;9—水槽;10—水平加荷支座;11—进水孔;12—固定销;13—上反力横梁;14—下反力横梁;15—传动轴

66.2.2 剪切盒形状宜采用圆形，尺寸：D/d_{max}为8～12，H/d_{max}为4～8。

66.2.3 百分表或位移计：分度值0.01mm。

66.2.4 粗筛：孔径60mm、40mm、20mm、10mm、5mm、2mm。

66.2.5 磅秤：分度值250g。

66.2.6 其他设备：附真空测压表的真空泵、饱和器、台秤、水平尺、拌和工具、恒湿设备与击实锤。

66.3 操作步骤

66.3.1 试样制备和安装应下列步骤进行：

1 试样应按本标准第60.3.1条、第60.3.2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，计算并称取试验所需的土样数量。对无黏性粗颗粒土，为防止颗粒分离，也可根据装填层数，分层称取试验所需的土样。

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(1/3～1/4) 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(层次可根据高度与层缝错开的原则而定，一般为3层或5层)。每一层可采用击实、振捣或静压等制样方法控制每一层试样至预定要求的高度。对黏质粗颗粒土，每层表面刨毛后，再填下一层。重复上述步骤至最后一层，整平表面。

4 试样当需饱和时，对无黏性粗颗粒土，宜用水头饱和法；对黏质粗颗粒土，宜用真空饱和法。

5 在试样面上依次放上透水板、传压板等。要求安装对中，传压板应用水平尺校平。上、下反力钢梁应水平。安装2个～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 安装水平百分表或位移计，使水平传动轴的着力线通过剪

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停止。

7 每组试验应制备4个～5个试样，在不同压力下进行试验，其密度最大允许差值应为±0.03g/cm³，含水率最大允许差值应为±1%。

66.3.2 快剪试验应按下列步骤进行：

1 应按本标准第66.3.1条第5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不透水钢板。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 拔除上、下剪切盒的固定销并取掉开缝环。记录垂直、水平测力计、百分表等的读数。开动水平传动轴和秒表，以每分钟剪切试样直径的1.2%～1.8%的剪切速率，使试样在5min～10min内剪损。如剪应力的读数达到稳定，或有显著后退，表示试样已剪损。若剪应力读数继续增加，则剪切变形应达到60mm或达到试样直径的1/15～1/10为止。每1mm测记负荷传感器或测力计读数并根据需要测记垂直位移读数，直至剪损为止。

3 试验结束后，尽快卸去百分表或位移计、水平荷载、垂直荷载和加荷设备。视需要对剪切面作简要描述。取剪切面附近的试样，测定其剪切后含水率与颗粒级配。

66.3.3 固结快剪试验应按下列步骤进行：

1 应按本标准第66.3.1条第5款的规定进行试样安装和定位，试样上、下两面的不透水板换放细铜丝布和透水钢板；

2 在试样上施加垂直荷载后，当每小时垂直变形小于0.03mm时，认为变形稳定。测记此时垂直百分表读数；

3 试样达到固结稳定后应按本标准第66.3.2条第2款、第3款的规定进行剪切。

66.3.4 慢剪试验应按下列步骤进行：

1 应按本标准第66.3.1条第5款的规定进行试样安装和定

位，但试样上、下两面的不透水板改放细铜丝布和透水钢板。

2 应按本标准第 66.3.3 条第 2 款的规定进行试样固结。

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。剪切速率可按式(66.3.4)计算剪切破坏时间，根据剪损时的剪切变形计算剪切速率。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；

$$t_f = 50t_{50} \tag{66.3.4}$$

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)。

4 试验结束后应按本标准 66.3.2 条第 3 款的规定拆除试样，并测定其剪切后含水率与颗粒级配。

66.4 计算、制图和记录

66.4.1 剪应力应按下式计算：

$$\tau = \frac{CR - F}{A} \tag{66.4.1}$$

式中：τ——剪应力(kPa)；

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)。

66.4.2 以剪应力和垂直变形为纵坐标，水平位移为横坐标，分别绘制某级垂直压力下剪应力 τ 与水平位移 ΔL 关系曲线、垂直变形 Δs 与水平位移 ΔL 关系曲线。

66.4.3 取剪应力 τ 与水平位移 ΔL 关系曲线上峰值或稳定值作

为抗剪强度。当无明显峰值时，取水平位移达到试样直径 1/15～1/10 处的剪应力作为抗剪强度 S。

66.4.4 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。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。

66.4.5 粗颗粒土直接剪切试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.111 的规定。

67 粗颗粒土三轴压缩试验

67.1 一般规定

67.1.1 土样应为最大粒径不大于60mm的粗颗粒土。

67.1.2 根据粗颗粒土的性质、工程情况和不同的排水条件，本试验分为不固结不排水剪(UU)、固结不排水剪(CU)、固结排水剪(CD)等三种试验类型。

67.2 仪器设备

67.2.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 大型三轴仪(图67.2.1)：包括压力室、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：

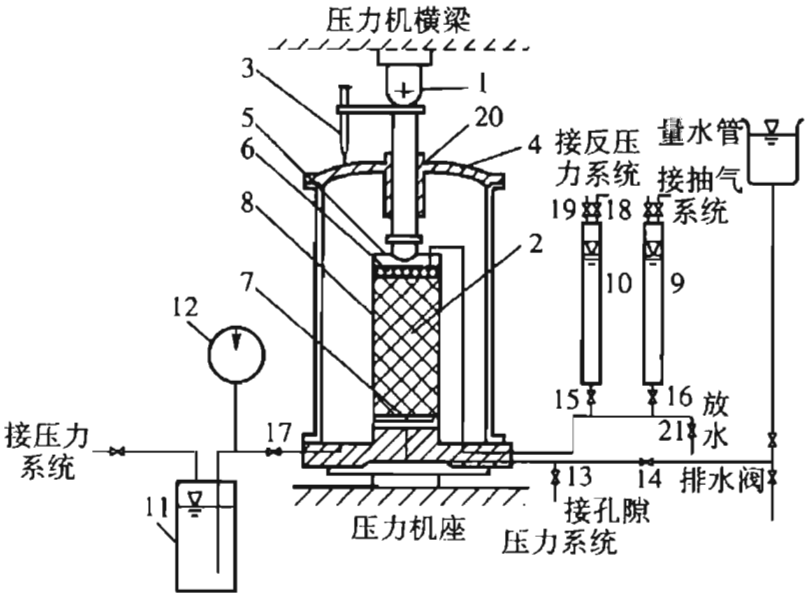


图67.2.1 大型三轴仪示意图

1—轴向荷载传感器；2—试样；3—轴向位移计；4—压力室罩；5—顶帽；6—上透水板；7—下透水板；8—橡皮膜；9—量水管；10—体变管；11—压力库；12—压力表；13—孔隙压力阀；14—进水管阀；15—排水阀；16—量水管阀；17—周围压力阀；18—反压力阀；19—通气阀；20—排气阀；21—排气(水)阀

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(轴向荷载传感器、压力机)等;

3)周围压力系统:包括空气压缩机、压力库和恒压装置;

4)变形量测系统:包括大量程百分表(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、击实锤或振捣器、橡皮膜、真空泵、磅秤、天平、钢尺、秒表、瓷盘、烘箱等。

67.2.2 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。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。轴向荷载传感器的最大允许误差宜为±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 孔隙压力量测系统可按本标准第19.2.2条第2款的规定进行检查。

67.3 无黏性粗颗粒土三轴压缩试验

67.3.1 试样制备应按以下步骤进行:

1 试样尺寸:试样直径不应小于最大土粒直径的5倍($D \geqslant 5d_{max}$),试样高度宜为试样直径的2倍~2.5倍($H/D=2.0\sim2.5$)。一般试样直径宜采用200mm~500mm。

2 应按本标准第60.3.2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,分层不少于5层。

3　将透水板放在试样底座上，开进水阀，使试样底座透水板充水至无气泡逸出，关闭阀门。

4　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。

5　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，应防止粗细颗粒分离，保证试样的均匀性。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30kPa负压下直立，再去掉成型筒。

6　检查橡皮膜，若有破裂处，进行粘补，必要时再加一层。

7　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，试样平均直径 D_0 应按下式计算：

$$D_0 = \frac{1}{4}(D_1 + 2D_2 + D_3) - 2d_m \qquad (67.3.1)$$

式中：D_1、D_2、D_3——试样上部、中部、下部的直径(cm)；

d_m——橡皮膜厚度(cm)。

8　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轴向荷载传感器等接触，当轴向荷载传感器的读数微动时立即停机。并调整轴向位移计(百分表)和轴向荷载传感器为零。

67.3.2　试样饱和应按下步骤进行：

1　抽气饱和法：由试样顶部抽气，试样内形成负压，测记进水量管水位读数后，徐徐开进水阀，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，停止抽气。徐徐打开周围压力阀施加周围压力 σ_3 (≤30kPa)，并开试样上部排气(水)阀释放负压。提高进水管水位，用水头饱和法继续进行饱和。

2　水头饱和法：按本标准第67.3.1条第8款的规定安装压力室，然后徐徐打开周围压力阀施加周围压力 σ_3 (≤30kPa)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,适当提高水进出水管水头差,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)饱和法:二氧化碳饱和系统见图67.3.2。应先按本标准第67.3.1条第8款的规定安装压力室后,然后徐徐开排气阀(5),施加周围压力σ_3(=30kPa)。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2kPa～10kPa。待水气瓶(6)内的水面冒气泡30min～60min,再关阀门(1),开阀门(2)。利用水头使试样饱和。

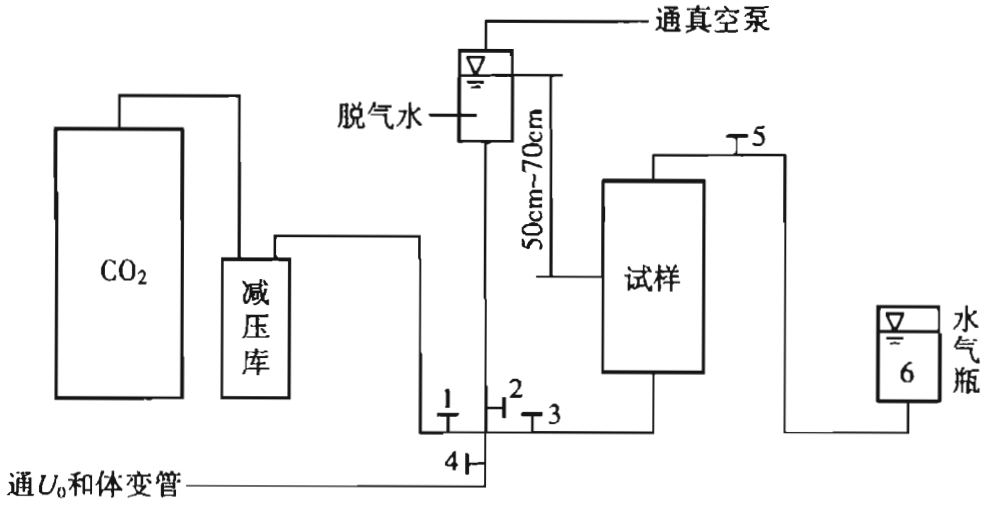


图67.3.2 二氧化碳饱和系统示意图

4 饱和度的鉴别。当孔隙压力系数$B\geqslant 0.95$时,可认为试样已达到饱和。当$B<0.95$时,应继续饱和,B值的计算应按本标准式(19.8.1-3)计算。

67.3.3 固结不排水剪试验(CU)(测孔隙压力)应按下列步骤进行:

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20s～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　固结完成后，关排水阀，测记量水管水位和孔隙压力计读数。开压力机，当轴向荷载传感器微动时，表示活塞与试样接触，关压力机，测轴向位移计读数，计算固结下沉量 Δh。

4　以每分钟轴向应变为0.1%～1.0%的速率施加轴向压力。试样的轴向应变每0.1%～0.4%测记轴向荷载传感器、孔隙压力计和轴向位移计读数各1次，若有特殊要求，可酌情加密或减少读数次数。有峰值时，试验应进行至轴向应变达到峰值出现后的3%～5%。如无峰值时，则轴向应变达到15%～20%。

5　试验结束后，关孔隙压力阀，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　其余几个试样应分别在不同周围压力下，按上述步骤进行试验。

67.3.4　固结排水剪试验(CD)应按下列步骤进行：

1　应按本标准第67.3.3条第1款、第2款的规定进行固结，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%～0.5%的剪切速率进行剪切。在剪切过程中测记轴向荷载传感器、轴向位移计和量水管读数。

2　其余试样应分别在不同周围压力下，按本标准第67.3.3条第1款的规定进行试验。

67.4 黏质粗颗粒土三轴压缩试验

67.4.1 试样制备应按下列步骤进行：

1 应按本标准第 60.3.1 条的规定制备土样。根据干密度、含水率、试样体积及个数一次备好一组试验所需的土样，称取每个试样所需要的土样质量备用。

2 将每个试样的土样分成 3 等份或 5 等份，分 3 层或 5 层填入成型筒。用锤击实或压力机压实，第 1 层土样压实后，其表面应刨毛，再加第 2 层土样压实。其他各层用同样的方法进行压实，每层土样应压实至预定高度。

3 拆去成型筒（或将试样从成型筒内推出）。将试样置于压力室底座上测定其直径 D_0 及高度 H_0，依次放上顶帽，套上橡皮膜，并将其与顶帽和底座扎紧。

67.4.2 试样饱和应按下列步骤进行：

1 抽气饱和法：将试样连同成型筒一起吊入饱和缸内，盖好密封顶盖后进行抽气。待接近 1 个大气压后，持续约 1h，徐徐注入清水，并保持真空度稳定，直至试样全部浸没，停止抽气。静置 10h 以上，将成型筒连同试样从水中取出，将试样从成型筒内取出，然后称量并计算其饱和度。抽气饱和也可在三轴仪上进行，其方法应符合本标准第 67.3.2 条第 1 款的规定。因黏质粗颗粒土透水性小，负压值宜在 60kPa～90kPa 范围内。

2 反压力饱和法：若需反压力饱和时，将试样安装于压力室后，先向接反压力系统的体变管内注水，并关闭孔隙压力阀、反压力阀、测记体变管读数。再向试样施加 30kPa 的周围压力，开孔隙压力阀，测记孔隙压力稳定读数。同时分级施加周围压力和反压力，施加过程中，始终保持周围压力比反压力大 30kPa，反压力和周围压力的每级增量为 20kPa，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 $B=\Delta u/\Delta\sigma_3\geqslant 0.95$ 为止。

67.4.3 不固结不排水剪试验(UU)应按下列步骤进行：

1 试样饱和后，关进水阀、排水阀，开周围压力阀施加周围压力至预定值，并保持恒定，周围压力的大小应根据工程的实际荷载选用；

2 应以每分钟轴向应变0.1%～0.5%的速率按本标准第67.3.3条第4款至第67.3.3条第6款的规定进行剪切，试验过程中可不测孔隙压力。

67.4.4 固结不排水剪(CU)应按下列步骤进行：

1 试样饱和后应按本标准第67.3.3条第1款、第2款的规定进行排水固结，同时开排水阀和秒表，在0min、0.15min、1min、4min、9min、16min、25min、36min、49min……时刻测记量水管水位和孔隙压力计读数，在固结过程中随时绘制固结排水量 ΔV 与时间 t 对数(或平方根)曲线；或绘制孔隙压力消散度 U 与时间 t 对数曲线。

2 如对试样施加反压力时，则应按本标准第67.4.2条第2款的规定进行。然后保持反压力恒定，关排水阀，增大周围压力，使其与反压力之差等于选定的周围压力并保持恒定，测记稳定后的孔隙压力计和体变管水位读数作为固结前的起始读数。然后开排水阀，让试样排水到体变管，并按本标准第67.4.4条第1款的规定进行排水固结。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。

3 剪切速率控制在每分钟轴向应变0.05%～0.1%以内，应按本标准67.3.3条第4款的规定进行剪切。

4 对固结不排水，不测孔隙水压力的剪切试验，在固结完成后，关排水阀、孔隙压力阀，按上述的规定进行剪切，但剪切过程中不测孔隙水压力。

67.4.5 固结排水剪试验(CD)应按下列步骤进行：固结完成后，不关孔隙压力阀和排水阀，保持排水条件，应以每分钟轴向应变为0.012%～0.003%的剪切速率按本标准第67.3.4条第1款和第

67.3.4 条第 2 款的规定进行剪切。并在剪切过程中测记轴向荷载传感器示值、轴向位移计、量水管水位和孔隙压力计读数。

67.5 计算、制图和记录

67.5.1 计算应符合本标准第 19.8.1 条的规定。

67.5.2 制图应符合本标准第 19.8.2 条的规定。

67.5.3 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.34～表 D.36 的规定。

68 粗颗粒土三轴蠕变试验

68.1 一般规定

68.1.1 土样应为最大粒径不大于60mm的粗颗粒土。

68.1.2 本试验方法加荷方式采用应力控制式。

68.2 仪器设备

68.2.1 本试验所用的仪器设备应符合以下规定：

1 粗颗粒土的蠕变试验宜在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可参照本标准第67.2.1条第1款的规定，参见图67.2.1。试验期间应保持试验室温度相对稳定。

2 附属设备：应符合本标准第67.2.1条第2款的规定。

68.2.2 三轴仪使用前的轴向压力系统、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本标准第67.2.2条第1款～第4款的规定进行检查。

68.3 操作步骤

68.3.1 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本标准第67.3.1条第1款的规定；

2 无黏性粗颗粒土应按本标准第67.3.1条第2款～第8款的规定，黏质粗颗粒土应按本标准第67.4.1条第1款～第3款的规定，进行试样制备并量测试样的直径和高度。

68.3.2 试样饱和应按下列步骤进行：无黏性粗颗粒土应按本标准第67.3.2条的规定，黏质粗颗粒土应按本标准第67.4.2条的

规定，进行试样饱和并进行饱和度的鉴别。

68.3.3 试样固结应按下列步骤进行：无黏性粗颗粒土的固结应符合本标准第 67.3.3 条第 1 款、第 2 款的规定，黏质粗颗粒土的固结应符合应按本标准第 67.4.4 条第 1 款、第 2 款的规定。

68.3.4 无黏性粗颗粒土的剪切速率应符合本标准第 67.3.4 条第 1 款的规定，黏质粗颗粒土的剪切速率应符合本标准第 67.4.5 条的规定，剪切至预定轴向压力，保持轴向应力不变。剪切过程中测读轴向荷载传感器、轴向位移计、体变管水位读数等。

68.3.5 蠕变试验应按下列步骤进行：

1 加载到设定的轴向荷载后，立即记录时间、轴向位移计、体变管水位读数，作为初值。在整个蠕变试验过程，应保持围压和轴向应力不变；

2 每隔一定时间记录时间、温度、轴向位移计、体变管水位。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；

3 蠕变稳定标准可取每 24h 内轴向应变的变化量小于 0.05‰，或取 24h 的轴向应变小于累计蠕变轴向应变的 1‰～5‰，达到稳定标准后，可结束试验，停机、拆样；

4 蠕变试验可取 3 级～5 级围压，每个围压下取 3 级～4 级应力水平。

68.4 计算、制图和记录

68.4.1 应按本标准第 19.8.1 条、第 19.8.2 条进行蠕变试验前的计算和制图。

68.4.2 蠕变轴向应变、蠕变体积应变应按下列公式计算：

$$\varepsilon_{1t} = \frac{\Delta h_t}{h_c} \times 100 \tag{68.4.2-1}$$

$$\varepsilon_{vt} = \frac{\Delta V_t}{V_c} \times 100 \tag{68.4.2-2}$$

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轴向变形(cm)；

h_c——试样固结后的高度(cm)；

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

V_c——试样固结后的体积(cm^3)。

68.4.3 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。

68.4.4 本试验的记录格式应符合本标准附录 D 表 D.34～表 D.36、表 D.112 的规定。

69 粗颗粒土三轴湿化变形试验

69.1 一般规定

69.1.1 土样为最大粒径不应大于60mm的粗颗粒土。

69.1.2 本试验方法加荷方式采用应力控制式。

69.2 仪器设备

69.2.1 本试验所用的仪器设备应符合以下规定：

1 粗颗粒土的湿化试验宜在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可参考本标准图67.2.1。为准确测量体积变化，应在大型三轴压缩仪围压系统上增加高精度的外体变测量系统(图69.2.1)。

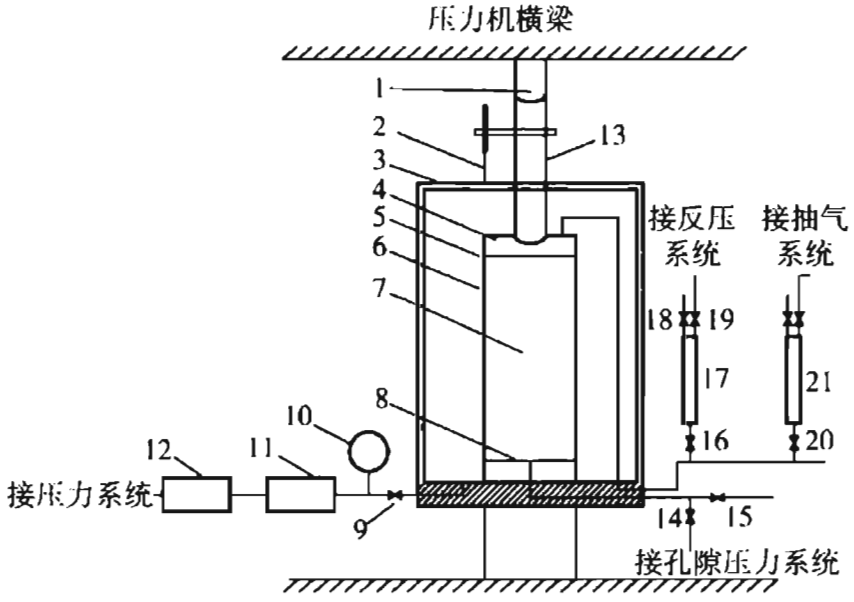


图69.2.1 大型三轴压缩仪

1—轴向荷载传感器；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—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

2　附属设备：应符合本标准第 67.2.1 条第 2 款的规定。

69.2.2　三轴仪使用前的轴向压力系统、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本标准第 67.2.2 条第 1 款～第 4 款的规定进行检查。

69.3　操 作 步 骤

69.3.1　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本标准第 67.3.1 条第 1 款的规定；

2　无黏性粗颗粒土应按本标准第 67.3.1 条第 2 款～第 8 款的规定，黏质粗颗粒土应按本标准第 67.4.1 条的规定，进行试样制备并测定试样的直径和高度。

69.3.2　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（实际起排气作用），每隔 20s～30s 测记外体变测量系统读数 ΔV 一次，计算得到试样的体积变化 ΔV。固结过程中随时绘制 ΔV-t 关系曲线，当曲线下段趋于水平时即认为固结完成。

69.3.3　施加轴向应力应按下列步骤进行：

1　无黏性粗颗粒土应符合本标准第 67.3.4 条第 1 款的规定，黏质粗颗粒土应符合本标准第 67.4.5 条的规定，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　经过 3h～5h，在围压和轴向应力作用下，当 30min 内干样的轴向应变变化量小于 0.01%时，认为干样的变形稳定。

69.3.4　湿化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湿化前的初始读数。保持周围压力和轴向应力不变，应按

本标准第67.3.2条第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。

2 水头饱和过程中应记录时间、测计轴向荷载传感器、轴向位移计、孔隙压力计和外体变测量系统读数。

3 对于细粒含量较少的无黏性粗颗粒土，湿化变形能较快稳定，对于黏质粗颗粒土，稳定的时间应适当放长。当30min内轴向应变的变化量小于0.01%时，可认为湿化变形稳定。

4 湿化变形稳定后停机拆样。

5 湿化变形试验可取3级～5级围压，每个围压下3级～4级应力水平。

69.4 计算、制图和记录

69.4.1 干样固结后的体积V_c应按下列公式计算：

$$V_c = V_0 - \Delta V \tag{69.4.1-1}$$

$$\Delta V = \Delta V' - \Delta h_c A_g = \Delta V' - \frac{\Delta h_c \pi D_g^2}{4} \tag{69.4.1-2}$$

式中 V_c——干样固结后的体积(cm^3)；

V_0——干样初始体积(cm^3)；

$\Delta V'$——外体变测量系统读数变化(cm^3)；

Δh_c——干样固结后下沉量(cm)，由轴向位移计测得；

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。

69.4.2 湿化轴向应变ε_{1s}、湿化体积应变ε_{vs}应按下列公式计算：

$$\varepsilon_{1s} = \frac{\Delta h_s}{h_c} \times 100 = \frac{\Delta h_s}{h_0 - \Delta h_c} \times 100 \tag{69.4.2-1}$$

$$\varepsilon_{vs} = \frac{\Delta V_s}{V_c} \times 100 = \frac{\Delta V' - \Delta h_s A_g}{V_c} \times 100 \tag{69.4.2-2}$$

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轴向变形(cm)；

h_c——干样固结后的高度(cm)；

ΔV_s——某时刻止湿化产生的体积变化(cm^3)。

69.4.3 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。

69.4.4 本试验的记录格式应符合本标准附录D表D.34～表D.36、表D.113的规定。

附录 A　试验资料的整理与试验报告

A.0.1　为使试验资料可靠和适用，应进行正确的数据分析和整理。整理时对试验资料中明显不合理的数据，应通过研究，分析原因（试样的代表性、试验过程中出现异常情况等），或在有条件时，进行一定的补充试验后，可决定对可疑数据的取舍或改正。

A.0.2　舍弃试验数据时，应根据误差分析或概率的概念，按三倍标准差（即$\pm 3s$）作为舍弃标准，即在资料分析中应该舍弃那些在$\overline{x} \pm 3s$范围以外的测定值，然后重新计算整理。

A.0.3　土工试验测得的土性指标，可按其在工程设计中的实际作用分为一般特性指标和主要计算指标。前者如土的天然密度、天然含水率、土粒比重、颗粒组成、液限、塑限、有机质、水溶盐等，系指作为对土分类定名和阐明其物理化学特性的土性指标；后者如土的黏聚力、内摩擦角、压缩系数、变形模量、渗透系数等，系指在设计计算中直接用以确定主体的强度、变形和稳定性等力学性的土性指标。

A.0.4　对一般特性指标的成果整理，通常可采用多次测定值x_i的算术平均值$\overline{x}$，并计算出相应的标准差s和变异系数c_v，以反映实际测定值对算术平均值的变化程度，从而判别其采用算术平均值时的可靠性。

1　算术平均值$\overline{x}$应按下式计算：

$$\overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \qquad \text{(A.0.4-1)}$$

式中：n——指标测定的总次数；

$\sum_{i=1}^{n} x_i$——指标测定值的总和。

2　标准差 s 应按下式计算：

$$s=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2} \qquad (A.0.4\text{-}2)$$

3　变异系数 c_v 应按下式计算，并按表 A.0.4 评价变异性：

$$c_v=\frac{s}{\bar{x}} \qquad (A.0.4\text{-}3)$$

表 A.0.4　变异性评价

变异系数	$c_v<0.1$	$0.1\leqslant c_v<0.2$	$0.2\leqslant c_v<0.3$	$0.3\leqslant c_v<0.4$	$c_v\geqslant 0.4$
变异性	很小	小	中等	大	很大

A.0.5　对于主要计算指标的成果整理，测定的组数较多时，此时指标的最佳值接近于诸测值的算术平均值，仍可按一般特性指标的方法确定其设计计算值，即采用算术平均值。但通常由于试验的数据较少，考虑到测定误差、土体本身不均匀性和施工质量的影响等，为安全考虑，对初步设计和次要建筑物宜采用标准差平均值，即对算术平均值加或减一个标准差的绝对值（$\bar{x}\pm|s|$）。

A.0.6　对不同应力条件下测得的某种指标，如抗剪强度等，应经过综合整理求取。在有些情况下，尚需求出不同土体单元综合使用时的计算指标。这种综合性的土性指标，一般采用图解法或最小二乘方分析法确定。

1　图解法：将不同应力条件下测得的指标值（如抗剪强度）求得算术平均值，然后以不同应力为横坐标，以指标平均值为纵坐标作图，并求得关系曲线，确定其参数（如土的黏聚力 c 和角摩擦系数 $\mathrm{tg}\varphi$）。

2　最小二乘方分析法：根据各测定值同关系曲线的偏差的平方和为最小的原理求取参数值。

3　当设计计算几个土体单元土性参数的综合值时，可按土体单元在设计计算中的实际影响，采用加权平均值，即：

$$\bar{x}=\frac{\sum\omega_i x_i}{\sum\omega_i} \qquad (A.0.6)$$

式中：ω_i——不同土体单元的对应权；

x_i——不同土体单元的计算指标。

A.0.7 试验报告的编写和审核应符合下列规定：

1 试验报告所依据的试验数据应进行整理、检查、分析，经确定无误后方可采用。

2 试验报告所需提供的依据应包括根据不同建筑物的设计和施工的具体要求所拟试验的全部土性指标。

3 试验报告的内容可包括：试验方案的简要说明，试验数据和基本结论。其中试验方案的内容可包括工程概况，所需解决的问题以及由此对试样的采制，试验项目和试验条件提出的要求。

4 试验报告中应采用国家颁布的法定计量单位。

5 试验报告应按下列方面审查：

1）对照委托任务书，检查试验项目应齐全；

2）检查试验项目应按照试验方法标准进行；

3）综合分析检查各指标间的关系应合理；

4）对需要进行数据统计分析的试验报告检查选用的方法应合理，结果应正确；

5）检查土的定义应与相关标准相符。

6 试验报告审批应符合下列程序：

1）由试验人员填写成果汇总表；

2）经校核人员校核汇总表中的数据；

3）由试验负责人编写试验报告；

4）由技术负责人签字并盖章发送。

附录B　土样的要求与管理

B.0.1　采样数量应满足要求进行的试验项目和试验方法的需要，常规试验项目采样的数量可按表B.0.1的规定进行，并应附取土记录及土样现场描述。

表B.0.1　试验取样数量和过土筛标准

试验项目	土样数量					
	细粒土		砂土		砂砾土	过筛标准（mm）
	原状土（筒）ϕ10cm×20cm	扰动土（kg）	原状土（筒）ϕ10cm×20cm	扰动土（kg）	扰动土（kg）	
含水率	1	0.8	1	0.8	10	—
密度	1	—	1	—	—	—
比重	1	0.8	1	0.8	10	—
颗粒分析	1	0.8	1	0.8	200	—
界限含水率	1	0.5	—	—	—	0.5
崩解	1	2	—	—	—	—
毛管水上升高度	—	—	1	2	—	—
相对密度	—	—	1	6	80	5、60

续表 B.0.1

试验项目	土样数量					
	细粒土		砂土		砂砾土	过筛标准（mm）
	原状土（筒）ϕ10cm×20cm	扰动土（kg）	原状土（筒）ϕ10cm×20cm	扰动土（kg）	扰动土（kg）	
击实	—	30～50	—	—	300	20、60
承载比	—	50	—	—	—	20
渗透	1	2	1	5	80	2.0、60
反滤料	—	—	—	—	150	60
固结	1	2	1	2	200	2.0、60
黄土湿陷	1	—	—	—	—	—
三轴压缩	2	5	3	5～20	600	2.0、20、60
三轴流变	—	—	—	—	2400	60
三轴湿化变形	—	—	—	—	2400	60
无侧限抗压强度	1	2	—	—	—	2.0
直接剪切	1	3	1	3	1000	2.0、60
排水反复剪切	1	3	1	3	1000	2.0、60
无黏性土休止角	—	—	—	3	—	5
膨胀、收缩	2	2	—	—	—	2.0
振动三轴、共振柱试验	—	20	—	20～300	5000	2、20、60

续表 B.0.1

试验项目 \ 土类 \ 土样数量	黏土		砂土		过筛标准（mm）
	原状土（筒）ϕ10cm×20cm	扰动土（g）	原状土（筒）ϕ10cm×20cm	扰动土（g）	
土的静止侧压力系数	1	2000	1	2000	--
土的基床系数	2	5000	3	5000～20000	2、20
冻土含水率	1	2000	1	2000	—
冻土密度	1	3000	1	3000	—
冻结温度	--	500	—	500	—
冻土导热系数	—	20000	—	20000	—
未冻含水率	1	500	1	500	—
冻胀率	1	1500	1	1500	—
冻土融化压缩试验	1	1000	1	1000	—
化学分析试样风干含水率	—	500	—	500	2
酸碱度	—	500	—	500	2
易溶盐	—	500	—	500	2
中溶盐石膏	—	100	—	100	0.25
难溶盐碳酸钙	—	100	—	100	0.15
有机质	—	100	—	100	0.15
游离氧化铁	—	500	—	500	2
阳离子交换量	—	500	—	500	2
土的矿物组成	—	100	—	100	0.15

B.0.2 土样的验收和管理应符合下列规定：

1 土样送达试验单位，必须附送样单及试验委托书或其他有关资料。送样单应有原始记录和编号。内容应包括工程名称，试坑或钻孔编号、高程、取土深度、取样日期。原状土应有地下水位高程、土样现场鉴别和描述及定义、取土方法等。试验委托书应包括工程名称、工程项目、试验目的、试验项目、试验方法及要求。例如原状土进行力学性试验时，试样是在天然含水率状态下还是饱和状态下进行；剪切试验的仪器；剪切试验方法；剪切和固结的最大荷重；渗透试验是垂直还是水平方向；求哪一级荷重或某一个干密度孔隙比下的固结系数或湿陷渗透系数；黄土压缩试验须提出设计荷重。扰动土样的力学性试验要提出初步设计干密度和施工现场可能达到的平均含水率等。

2 试验单位接到土样后，应按试验委托书验收。验收中需查明土样数量、编号，所送土样应满足试验项目和试验方法的要求。必要时可抽验土样质量，验收后登记，编号。登记内容应包括：工程名称、委托单位、送样日期、土样室内编号和野外编号、取土地点和取土深度、试验项目的要求以及要求提出成果的日期等。

3 土样送交试验单位验收、登记后，即将土样按顺序妥善存放，应将原状土样和保持天然含水率的扰动土样置于阴凉的地方，尽量防止扰动和水分蒸发。土样从取样之日起至开始试验的时间不应超过 3 周。

4 土样经过试验之后，余土应贮存于适当容器内，并标记工程名称及室内土样编号，妥善保管，以备审核试验成果之用。一般保存到试验报告提出 3 个月以后，委托单位对试验报告未提出任何疑义时，方可处理。

5 处理试验余土时应考虑余土对环境的污染、卫生等要求。

附录C　土的工程分类

C.0.1　土的工程分类应符合现行国家标准《土的工程分类标准》GB/T 50145的规定。

C.0.2　土按其不同粒组的相对含量可分为：巨粒类土、粗粒类土和细粒类土。土的粒组应按表C.0.2中规定的土颗粒粒径范围划分。

1　巨粒类土应按粒组划分；

2　粗粒类土应按粒组、级配、细粒土含量划分；

3　细粒类土应按塑性图、所含粗粒类别以及有机质含量划分。

表C.0.2　粒组划分

粒组	颗粒名称		粒径(d)的范围(mm)
巨粒	漂石(块石)		$d>200$
	卵石(碎石)		$60<d\leqslant200$
粗粒	砾粒	粗砾	$20<d\leqslant60$
		中砾	$5<d\leqslant20$
		细砾	$2<d\leqslant5$
	砂粒	粗砂	$0.5<d\leqslant2$
		中砂	$0.25<d\leqslant0.5$
		细砂	$0.075<d\leqslant0.25$
细粒	粉粒		$0.005<d\leqslant0.075$
	黏粒		$d\leqslant0.005$

C.0.3　巨粒类土的分类应符合表C.0.3的规定。

表 C.0.3　巨粒类土的分类

土类	粒组含量		土类代号	土类名称
巨粒土	巨粒含量>75%	漂石含量大于卵石含量	B	漂石(块石)
		漂石含量不大于卵石含量	Cb	卵石(碎石)
混合巨粒土	50%<巨粒含量≤75%	漂石含量大于卵石含量	BSI	混合土漂石(块石)
		漂石含量不大于卵石含量	CbSI	混合土卵石(块石)
巨粒混合土	15%<巨粒含量≤50%	漂石含量大于卵石含量	SIB	漂石(碎石)混合土
		漂石含量不大于卵石含量	SICb	卵石(碎石)混合土

C.0.4　砾类土的分类应符合表 C.0.4 的规定。

表 C.0.4　砾类土的分类

土类	粒组含量		土类代号	土类名称
砾	细粒含量<5%	级配：$C_u \geqslant 5$，$1 \leqslant C_c \leqslant 3$	GW	级配良好砾
		级配：不同时满足上述要求	GP	级配不良砾
含细粒土砾	5%≤细粒含量<15%		GF	含细粒土砾
细粒土质砾	15%≤细粒含量<50%	细粒组中粉粒含量不大于 50%	GC	黏土质砾
		细粒组中粉粒含量大于 50%	GM	粉土质砾

C.0.5　砂类土的分类应符合表 C.0.5 的规定。

表 C.0.5　砂类土的分类

土类	粒组含量		土类代号	土类名称
砂	细粒含量<5%	级配：$C_u \geqslant 5$，$1 \leqslant C_c \leqslant 3$	SW	级配良好砂
		级配：不同时满足上述要求	SP	级配不良砂
含细粒土砂	5%≤细粒含量<15%			SF
细粒土质砂	15%≤细粒含量<50%	细粒组中粉粒含量不大于 50%	SC	黏土质砂
		细粒组中粉粒含量大于 50%	SM	粉土质砂

C.0.6　细粒土的分类应符合表 C.0.6 的规定。

表 C.0.6　细粒土的分类

土的塑性指标在塑性图中的位置		土类代号	土类名称
$I_P \geqslant 0.73(w_L-20)$ 和 $I_P \geqslant 7$	$w_L \geqslant 50\%$	CH	高液限黏土
	$w_L < 50\%$	CL	低液限黏土
$I_P < 0.73(w_L-20)$ 或 $I_P < 4$	$w_L \geqslant 50\%$	MH	高液限粉土
	$w_L < 50\%$	ML	低液限粉土

附录 D　各项试验记录表

表 D.1　扰动土试样制备记录

任务单号		制备日期		计算者	
仪器名称及编号		试验者		校核者	

试样编号	制备标准		所需土质量及增加水量的计算						试样制备							与制备标准之差		备注
	干密度 ρ_d (g/cm³)	含水率 w' (%)	环刀或计算的击实筒容积 V (cm³)	干土质量 m_d (g)	含水率 w_0 (%)	湿土质量 m (g)	增加的水量 Δm_w (mL)	所需土质量 m (g)	制备方法	环刀质量 (g)	环刀加湿土质量 (g)	湿土质量 m (g)	密度 ρ (g/cm³)	含水率 w (%)	干密度 ρ_d (g/cm³)	干密度 ρ_d (g/cm³)	含水率 w (%)	

表 D.2　原状土开土记录

任务单号					进室日期：　年　月　日				
记录者					开土日期：　年　月　日				
试样编号		取土高程	取土深度（m）	颜色	气味	结构	夹杂物	包装与扰动情况	其他
室内	野外								

表 D.3　含水率试验记录

任务单号				试验者				
试验日期				计算者				
天平编号				校核者				
烘箱编号								

试样编号	试样说明	盒号	盒质量 (g)	盒加湿土质量 (g)	盒加干土质量 (g)	水分质量 (g)	干土质量 m_d (g)	含水率 w (%)	平均含水率 $\bar{w}$ (%)
			(1)	(2)	(3)	(4)=(2)−(3)	(5)=(3)−(1)	$(6)=\frac{(4)}{(5)}\times 100$	(7)

表 D.4　密度试验记录表(环刀法)

任务单号		试验者	
试验日期		计算者	
天平编号		校核人员	
烘箱编号			

试样编号	环刀号	环刀体积 V (cm^3)	湿土质量 m_0 (g)	湿密度 ρ (g/cm^3)	含水率 w (%)	干密度 ρ_d (g/cm^3)	平均干密度 $\bar{\rho}_d$ (g/cm^3)

表 D.5　密度试验记录表(蜡封法)

任务单号		试验者	
试验日期		计算者	
试验标准		校核者	
烘箱编号		天平编号	

蜡的密度 $\rho_n=0.92(g/cm^3)$

试样编号	试样质量 m (g)	试样加蜡质量 m_n(g)	试样加蜡在水中质量 m_{nw}(g)	温度 (℃)	水的密度 ρ_{wT} (g/cm³)	试样加蜡体积 (cm³)	蜡体积 (cm³)	试样体积 (cm³)	湿密度 ρ (g/cm³)	含水率 w (%)	干密度 ρ_d (g/cm³)	平均干密度 $\bar{\rho}_d$ (g/cm³)	备注
	(1)	(2)	(3)	—	(4)	$(5)=\frac{(2)-(3)}{(4)}$	$(6)=\frac{(2)-(1)}{\rho_n}$	(7)=(5)−(6)	$(8)=\frac{(1)}{(7)}$	(9)	$(10)=\frac{(8)}{1+0.01(9)}$	(11)	

表 D.6　比重试验记录表(比重瓶法)

任务单号						试验环境				
试验日期						试验者				
试验标准						校核者				
烘箱编号						天平编号				
试样编号	比重瓶号	温度(℃)	液体比重 G_{kT}	干土质量 m_d(g)	比重瓶、液总质量 m_{bk}(g)	比重瓶、液、土总质量 m_{bks}(g)	与干土同体积的液体质量(g)	比重 G_s	平均比重 $\overline{G}_s$	备注
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)=(3)+(4)−(5)	(7)=$\frac{(3)}{(6)}\times(2)$		

表 D.7　比重试验记录表(浮称法)

任务单号					试验者				
试验日期					计算者				
天平编号					校核者				
烘箱编号									
试样编号	温度(℃)	水的比重 G_{wT}	烘干土质量 m_d(g)	铁丝筐加试样在水中质量 m_{ks}(g)	铁丝筐在水中质量 m_k(g)	试样在水中质量(g)	比重 G_s	平均比重 $\overline{G}_s$	备注
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)=(4)—(5)	(7)=$\frac{(3)\times(2)}{(3)-(6)}$		

表 D.8　比重试验记录表(虹吸筒法)

任务单号						试验者					
试验日期						计算者					
试验标准						校核者					
烘箱编号						天平编号					
试样编号	温度(℃)	水的比重 G_{wT}	烘干土质量 m_d (g)	晾干土质量 m_{ad} (g)	量筒质量 m_c (g)	量筒加排开水质量 m_{cw} (g)	排开水质量 (g)	吸着水质量 (g)	比重 G_s	平均比重 $\overline{G}_s$	备注
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)=(6)−(5)	(8)=(4)−(3)	(9)=$\frac{(3)\times(2)}{(7)\times(8)}$		

表 D.9　颗粒分析试验记录表(筛析法)

任务单号		试验者	
试验日期		计算者	
烘箱编号		校核者	
试样编号		天平编号	

风干土质量＝_____g　　小于 0.075mm 的土占总土质量百分数 X＝_____%

2mm 筛上土质量＝_____g　　小于 2mm 的土占总土质量百分数 X＝_____%

2mm 筛下土质量＝_____g　　细筛分析时所取试样质量 m_B＝_____g

试验筛编号	孔径 (mm)	累积留筛土质量 (g)	小于某粒径的试样质量 m_A (g)	小于某粒径的试样质量百分数 (%)	小于某孔径的试样质量占试样总质量的百分数 X(%)
底盘总计					

表 D.10　颗粒分析试验记录表(密度计法)

任务单号		试验日期	
试样编号		试验者	
烧瓶编号		计算者	
量筒编号		校核者	
烘箱编号		天平编号	
密度计编号			

小于 0.075mm 颗粒土质量百分数_____　干土总质量 30g　风干土质量_____g　土粒比重 G_s_____

试样处理说明_____　比重校正值 C_s_____　弯液面校正值 n_w_____

下沉时间 t (min)	悬液温度 T (℃)	密度计读数					土料落距 L_1 (cm)	粒径 d (mm)	小于某粒径的土质量百分数 (%)	小于某孔径的试样质量占试样总质量的百分数 X(%)
		密度计读数 R_1	温度校正值 m_T	分散剂校正值 C_D	$R_M=R_1+m_T+n_w-C_D$	$R_H=R_MC_s$				

表 D.11　颗粒分析试验记录表(移液管法)

任务单号		试验日期	
试样编号		试验者	
烘箱编号		计算者	
量筒编号		校核者	
移液管编号		天平编号	
三角烧瓶编号			

小于 2mm 颗粒土质量百分数_____　　小于 0.075mm 颗粒土质量百分数_____

干土总质量 m_d 30g　　土粒比重 G_s_____　　移液管体积 V_x'_____

粒径 d (mm)	杯号	杯加干土质量 (g)	杯质量 (g)	吸管内悬液土粒的干土质量 m_{dx} (g)	1000mL 量筒内土质量 m_d (g)	小于某粒径的土质量百分数 (%)	小于某粒径土占总土质量百分数 X(%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)=(3)−(4)	(6)	(7)	(8)

表 D.12　液塑限联合试验记录表

任务单号						试验者		
试验日期						计算者		
天平编号						校核者		
烘箱编号						液塑限联合测定仪编号		
试样编号	圆锥下沉深度 h (mm)	盒号	湿土质量 m_0 (g)	干土质量 m_d (g)	含水率 w (%)	液限 w_L (%)	塑限 w_P (%)	塑性指数 I_P
	—	—	(1)	(2)	$(3)=\left[\frac{(1)}{(2)}-1\right]\times 100$	(4)	(5)	(6)=(4)−(5)

表 D.13　碟式仪液限法试验记录表

任务单号				试验者		
试验日期				计算者		
碟式仪编号				校核者		
烘箱编号				天平编号		
试样编号	击数 N	盒号	湿土质量 m_N (g)	干土质量 m_d (g)	含水率 w_N (%)	液限 w_L (%)
	—	—	(1)	(2)	$(3)=\left[\frac{(1)}{(2)}-1\right]$	(4)

表 D.14　搓滚塑限法试验记录表

任务单号			试验者		
试验日期			计算者		
烘箱编号			校核者		
天平编号					
试样编号	盒号	湿土质量 m(g)	干土质量 m_d (g)	含水率 w_P (%)	塑限 w_P (%)
	—	(1)	(2)	$(3)=\left[\frac{(1)}{(2)}-1\right]\times 100$	—

表 D.15　缩限试验记录表

任务单号			试验者	
试验日期			计算者	
烘箱编号			校核者	
收缩皿编号			天平编号	
试样编号				
湿土质量(g)	(1)	· ·		
干土质量 m_d(g)	(2)	—		
含水率 w'(%)	(3)	$\left[\frac{(1)}{(2)}-1\right]\times 100$		
湿土体积 V_0(cm^3)	(4)	—		
干土体积 V_d(cm^3)	(5)	—		
收缩体积(g/cm^3)	(6)	(4)—(5)		
收缩含水率(%)	(7)	$\frac{(6)}{(2)}\rho_w\times 100$		
缩限 w_s(%)	(8)	(3)—(7)		
平均值(%)	(9)	—		

表 D.16　崩解试验记录表

任务单号			试验者		
试验日期			计算者		
试样名称			校核者		
天平编号			烘箱编号		
密度_____(g/cm^3)　　含水率_____(%)					
观察时间 年　月 d:h:min	经过时间 h:min	浮筒读数 R_t	浮筒读数差 R_t-R_0	崩解量 A_t (%)	崩解情况

表 D.17　毛管水上升高度试验记录表(直接观测法)

任务单号		试验者	
试样编号		计算者	
烘箱编号		校核者	
毛管仪编号		天平编号	
试验日期	_____年_____月_____日		

日	时	分	毛管水上升高度(cm)	试样状态
				试样干密度(ρ_d)=____ g/cm³ 试样孔隙比(e)=_____

表 D.18　毛管水上升高度试验记录表(土样管法)

任务单号		试验者		
试样编号		计算者		
烘箱编号		校核者		
毛管仪编号		天平编号		
试验日期	_____年_____月_____日			

试样质量 m(g)	(1)	—		
试样体积 V(cm³)	(2)	—		
密度 ρ(g/cm³)	(3)	(1)/(2)		
含水率 w(%)	(4)			
干密度 ρ_d(g/cm³)	(5)	$\frac{(3)}{1+0.01(4)}$		
土粒比重 G_s	(6)			
孔隙比 e	(7)	(6)/(5)—1		
毛管水上升高度(cm)		—		
毛管水上升高度平均值(cm)		—		

表 D.19　相对密度试验记录表

任务单号			试验者				
试验日期			计算者				
试样编号			校核者				
相对密度仪编号			天平编号				
烘箱编号							
试验项目			最大孔隙比 e_{max}		最小孔隙比 e_{min}		备注
试验方法			漏斗法	量筒法	振打法		
试样加容器质量(g)	(1)	—	—				
容器质量(g)	(2)	—	—				
试样质量 m_d(g)	(3)	(1)－(2)					
试样体积 V(cm^3)	(4)	—					
干密度 ρ_d(g/cm^3)	(5)	(3)/(4)					
平均干密度(g/cm^3)	(6)	—					
比重 G_s	(7)	—					
孔隙比 e	(8)	—					
天然干密度(g/cm^3)	(9)	—					
天然孔隙比 e_0	(10)	—					
相对密度 D_r	(11)	—					

表 D.20　击实试验记录表

任务单号		试验者	
试验日期		计算者	
击实仪编号		校核者	
台秤编号		天平编号	
击实筒体积（cm^3）		烘箱编号	
落距（mm）		击锤质量（kg）	
每层击数		击实方法	

试样编号	试验序号	干密度					含水率						超高（mm）
		筒加土质量（g）	筒质量（g）	湿土质量 m_0（g）	湿密度 ρ（g/cm^3）	干密度 ρ_d（g/cm^3）	盒号	湿土质量 m_0（g）	干土质量 m_d（g）	含水率 w（%）	平均含水率 $\overline{w}$（%）		
	最大干密度 ρ_{dmax}　（g/cm^3）						最优含水率 w_{op}　（%）						

表 D.21　承载比试验记录表(膨胀量)

任务单号		试验者	
试验日期		计算者	
仪器名称及编号		校核者	
试样筒体积 $V(cm^3)$			

试样编号		(1)	—	1		2		3			
击实筒编号		(2)	—								
含水率	盒加湿土质量(g)	(3)	—								
	盒加干土质量(g)	(4)	—								
	盒质量(g)	(5)	—								
	含水率 w(%)	(6)	$\left[\frac{(3)-(5)}{(4)-(5)}-1\right]\times 100$								
	平均含水率 $\bar{w}$(%)	(7)	—								
密度	筒加试样质量 m_2(g)	(8)									
	筒质量 m_1(g)	(9)	—								
	湿密度 ρ(g/cm³)	(10)	$\frac{(8)-(9)}{V}$								
	干密度 ρ_d(g/cm³)	(11)	$\frac{(10)}{1+0.01(7)}$								
	干密度平均值 $\bar{\rho}_d$(g/cm³)	(12)	—								
膨胀率	浸水前试样高度 h_0(mm)	(13)	—								
	浸水后试样高度 h_w(mm)	(14)	—								
	膨胀率 δ_w(%)	(15)	$\frac{(14)-(13)}{(13)}\times 100$								
	膨胀率平均值 $\bar{\delta}_w$(%)	(16)									
吸水	浸水后筒加试样质量 m_3(g)	(17)	—								
	吸水量 m_w(g)	(18)	(17)−(8)								
	吸水量平均值 $\bar{m}_w$(g)	(19)	—								

表 D.22　承载比试验记录表(贯入)

任务单号		试验者	
试验日期		计算者	
试样筒体积		校核者	
仪器名称编号			

击实方法_____(次/层)　　荷载板质量 m _____(kg)　　测力计率定系数 C _____(N/0.01mm)

最大干密度 ρ_{dmax} _____(g/cm³)　　贯入速度 v _____(mm/min)　　浸水条件_____

最优含水率 w_{op} _____(%)　　贯入面积 A _____(cm²)

试样编号 No					试样编号 No					试样编号 No				
贯入量(0.01mm)			测力计读数(0.01mm)	单位压力(kPa)	贯入量(0.01mm)			测力计读数(0.01mm)	单位压力(kPa)	贯入量(0.01mm)			测力计读数(0.01mm)	单位压力(kPa)
量表Ⅰ	量表Ⅱ	平均值			量表Ⅰ	量表Ⅱ	平均值			量表Ⅰ	量表Ⅱ	平均值		
$CBR_{2.5}$= (%)					$CBR_{2.5}$= (%)					$CBR_{2.5}$= (%)				
$CBR_{5.0}$= (%)					$CBR_{5.0}$= (%)					$CBR_{5.0}$= (%)				
CBR= (%)					CBR= (%)					CBR= (%)				
平均 CBR= (%)														

表 D.23　回弹模量试验记录表

任务单号		试验者	
试样编号		计算者	
试验标准		校核者	
仪器名称及编号		试验日期	
承载板直径 D(cm)			

加载级数	单位压力 p (kPa)	单位压力(kPa)或测力计读数(0.01mm)	量表读数(0.001mm)						回弹变形量 l (cm)		回弹模量 E_c (kPa)
			加载			卸载			读数值	修正值	
			左	右	平均	左	右	平均			

表 D.24　常水头渗透试验记录

任务单号		试样高度（cm）		干土质量（g）		试验者	
试样编号		试样面积 A（cm^2）		土料比重 G_s		计算者	
仪器名称及编号		试样说明		孔隙比 e		校核者	
测压孔间距（cm）						试验日期	

试验次数	经过时间 t（s）	测压管水位（cm）			水位差（cm）			水力坡降 J	渗透水量 Q（cm^3）	渗透系数 k_T（cm/s）	平均水温 T（℃）	校正系数 $\frac{\eta_T}{\eta_{20}}$	水温20℃渗透系数 k_{20}（cm/s）	平均渗透系数 $\bar{k}_{20}$（cm/s）	备注
		Ⅰ管	Ⅱ管	Ⅲ管	H_1	H_2	平均 H								
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	
	—	—	—	—	(2)−(3)	(3)−(4)	$\frac{(5)+(6)}{2}$	$\frac{(7)}{L}$	—	$\frac{(9)}{A\times(8)\times(1)}$	—	—	(10)×(12)	$\frac{\sum(13)}{n}$	

表 D.25　变水头渗透试验记录

任务单号		试样说明		试样面积(cm^2)		试验者	
试样编号		测压管断面积 a(cm^2)		孔隙比 e		计算者	
仪器名称及编号		试样高度(cm)		试验日期		校核者	

开始时间 t_1 (d h min)	终了时间 t_2 (d h min)	经过时间 t (s)	开始水头 H_{b1} (cm)	终止水头 H_{b2} (cm)	$2.3\frac{a}{A}\frac{L}{t}$	$\lg\frac{H_{b1}}{H_{b2}}$	水温 T℃时的渗透系数 k_T (cm/s)	水温 T (℃)	校正系数 $\frac{\eta_T}{\eta_{20}}$	渗透系数 k_{20} (cm/s)	平均渗透系数 $\bar{k}_{20}$ (cm/s)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
—	—	(2)—(1)	—	—	$2.3\frac{a}{A}\frac{L}{(3)}$	$\lg\frac{(4)}{(5)}$	(6)×(7)	—	—	(8)×(10)	$\frac{\Sigma(11)}{n}$

表 D.26　标准固结试验记录表(一)

任务单号		试验者	
试样编号		计算者	
取土深度		校核者	
试样说明		试验日期	
仪器名称及编号			

1. 含水率试验

试样情况	盒号	盒加湿土质量(g)	盒加干土质量(g)	盒质量(g)	水质量(g)	干土质量 m_d(g)	含水率 w(%)	平均含水率 $\overline{w}$(%)
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
		—	—	—	(1)−(2)	(2)−(3)	(4)/(5)×100	$\frac{\sum(6)}{2}$
试验前								
试验后								

2. 密度试验

试样情况	环加土质量(g)	环刀质量(g)	湿土质量 m_0(g)	试样体积 V(cm^3)	湿密度 ρ(g/cm^3)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	—	—	(1)−(2)	—	(3)/(4)
试验前					
试验后					

3. 孔隙比及饱和度计算 G_s=_____

试样情况	试验前	试验后
含水率 w(%)		
湿密度 ρ(g/cm^3)		
孔隙比 e		
饱和度 S_r(%)		

表 D.27　标准固结试验记录表(二)

任务单号			试验者			
试样编号			计算者			
试验日期			校核者			
仪器名称及编号						
经过时间	试样在不同上覆压力下变形					
	(　　)(kPa)		(　　)(kPa)		(　　)(kPa)		(　　)(kPa)	
	时间	量表读数(0.01mm)	时间	量表读数(0.01mm)	时间	量表读数(0.01mm)	时间	量表读数(0.01mm)
0								
6″								
15″								
1′								
2′15″								
4′								
6′15″								
9′								
12′15″								
16′								
20′15″								
25′								
30′15″								
36′								
42′15″								
49′								
64′								
100′								
200′								
400′								
23h								
24h								
总变形量(mm)								
仪器变形量(mm)								
试样总变形量(mm)								

表 D.28　标准固结试验记录表(三)

任务单号		试验者	
试样编号		计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			
试样原始高度 $h_0=20.0$mm 试验前孔隙比 e_0 —		$C_v=\frac{0.848(\bar{h})^2}{t_{90}}$ 或 $C_v=\frac{0.1978(\bar{h})^2}{t_{90}}$	

加压历时 (h)	压力 p (kPa)	试样总变形量 $\sum\Delta h_i$ (mm)	压缩后试样高度 h (mm)	孔隙比 e_i	压缩模量 E_s (MPa)	压缩系数 a_v (MPa^{-1})	排水距离 $\bar{h}$ (cm)	固结系数 C_v (cm^2/s)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
—	—	—	$(4)=h_0-(3)$	$(5)=e_0-\frac{(3)(1+e_0)}{h_0}$	—	—	$(8)=\frac{h_i+h_{i+1}}{4}$	—
0								
24								
24								
24								
24								
24								
24								
24								
24								
24								

表 D.29　快速固结试验记录表

任务单号		试验者	
试样编号		计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			
试验初始高度：h_0＝_____ mm　　$K=(h_n)_T/(h_n)_t=$			

加压历时 (h)	压力 p (kPa)	校正前试样总变形量 $(h_i)_t$ (mm)	校正后试样总变形量 $\sum\Delta h_i$ (mm)	压缩后试样高度 h (mm)	孔隙比 e_i	压缩模量 E_s (MPa)	压缩系数 a_v (MPa^{-1})
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
—	—	—	(4)＝K(3)	(5)＝K_0－(4)	(6)＝$e_0-\frac{(4)(1+e_0)}{h_0}$	—	—
1							
1							
1							
1							
1							
稳定							

表 D.30　应变控制加荷固结试验记录表

任务单号		试验者	
试样编号		计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

试样初始高度 h_0 = _____ cm　　试样面积 A = _____ cm^2　　负荷传感器系数 α = _____

试样初始孔隙比 e_0 = _____　　应变速率 = _____ %/s　　孔压传感器系数 β = _____

经过时间 t (min)	轴向变形 Δh (0.01mm)	应变 (%)	t 时孔隙比 e_i	负荷传感器读数	轴向荷载 P (kN)	轴向压力 σ (MPa)	孔压传感器读数	底部孔隙压力 u_b (MPa)	轴向有效压力 σ' (MPa)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
—	—	$(3)=(2)/(10\times h_0)$	$(4)=e_0-\frac{(1-e_0)\times(3)}{100}$	—	$(6)=(5)\times\alpha$	$(7)=(6)/A$	—	$(9)=(8)\times\beta$	$(10)=(7)-\frac{2}{3}(9)$
0									
1									
2									
⋮									
10									
15									
20									
25									
⋮									
60									
75									
90									
105									
120									
135									
150									

表 D.31　黄土湿陷试验记录

任务单号		试样含水率 w(%)		试验者	
试样编号		试样湿密度 ρ(g/cm³)		计算者	
仪器名称及编号		土粒比重 G_s		校核者	
试验方法		试样初始高度 h_0(mm)		试验日期	

经过时间(h)	试样在不同上覆压力下变形											
	(　　)(kPa)		(　　)(kPa)		(　　)(kPa)		(　　)(kPa)		浸水湿陷		浸水溶滤	
	时间	读数(0.01mm)	时间	读数(0.01mm)	时间	读数(0.01mm)	时间	读数(0.01mm)	时间	读数(0.01mm)	时间	读数(0.01mm)
1												
2												
3												
4												
5												
⋮												
总变形量(mm)												
仪器变形量(mm)												
试样变形量(mm)												

表 D.32　黄土湿陷性试验记录(自重湿陷系数)

任务单号		仪器名称及编号		试验者	
试样编号		环刀号		计算者	
试验日期		试样初始高度(mm)		校核者	

饱和自重压力计算								试验测试		
层数	密度 ρ (g/cm³)	含水率 w (%)	比重 G_s	孔隙率 n (%)	饱和密度 ρ_{sat} (g/cm³)	层厚 (m)	土层自重 (kPa)	经过时间 t(h)	百分表读数 (0.01mm)	
									自重压力	浸水
	(1)	(2)	(3)	(4) = $\left\{1-\frac{(1)}{(3)\times[1+(2)\times 0.01]}\right\}\times 100$	(5) = $\frac{(1)}{1+(2)\times 0.01}+0.85\times(4)$	(6)	(7)=9.81×(6)×(5)	(8)	(9)	(10)
								稳定读数		
自重压力(kPa) Σ(7)								自重湿陷系数 δ_{zs}		

表 D.33　黄土湿陷性试验记录(湿陷起始压力)

任务单编号			试验者														
试样编号			计算者														
试验日期			校核者														
仪器名称及编号																	
环刀号：　　试样初始高度 h_0：　　(mm)								环刀号：　　试样初始高度 h_0：　　(mm)									
经过时间(min)	天然状态　仪器号：							浸水状态　仪器号：									
	(　)(kPa)	(　)(kPa)	(　)(kPa)	(　)(kPa)	(　)(kPa)	(　)(kPa)	浸水	(　)(kPa)	(　)(kPa)	(　)(kPa)	(　)(kPa)	(　)(kPa)	(　)(kPa)	浸水			
	变形读数(0.01mm)							变形读数(0.01mm)									
仪器变形量(mm)																	
试样变形量(mm)																	
湿陷系数 δ_{xp}																	

表 D.34　三轴压缩试验记录表(一)

任务单号		试验者	
试样编号		计算者	
试样说明		校核者	
试验方法		试验日期	

试样状态			
项　　目	起始值	固结后	剪切后
直径 D(cm)			
高度 h_0(cm)			
面积 A(cm^2)			
体积 V(cm^3)			
质量 m(g)			
湿密度 ρ(g/cm^3)			
干密度 ρ_d(g/cm^3)			

试样含水率		
起始值		剪切后
盒号		
盒质量(g)		
盒加湿土质量(g)		
湿土质量 m(g)		
盒加干土质量(g)		
干土质量 m_d(g)		
水质量(g)		
含水率 w(%)		
饱和度 S_r		

周围压力 σ_3(kPa)	
反压力 u_0(kPa)	
周围压力下的孔隙压力 u(kPa)	
孔隙压力系数 $B=\frac{u_0}{\sigma_3}$	
破坏应变 ε_f(%)	
破坏主应力差$(\sigma_1-\sigma_3)_f$(kPa)	
破坏主应力 σ_{1f}(kPa)	
破坏孔隙压力系数 $\overline{B_f}=\frac{U_f}{\sigma_{3f}}$	
相应的有效大主应力 σ_1'(kPa)	
相应的有效小主应力 σ_3'(kPa)	
最大有效主应力比 $\left(\frac{\sigma_1'}{\sigma_3'}\right)_{max}$	
孔隙压应力系数 $A_f=\frac{u_{df}}{B(\sigma_1-\sigma_3)_f}$	

试样破坏情况的描述	呈鼓状破坏
备　　注	

表 D.35　三轴压缩试验记录表(二)

任务单号		试验者	
试样编号		计算者	
周围压力		校核者	
仪器名称及编号		试验日期	

加反压力过程								固结过程								
时间	周围压力 σ_3 (kPa)	反压力 u_o (kPa)	孔隙压力 u (kPa)	孔隙压力增量 Δu	试样体积变化		说明(检验结果)	时间(min)	量管		孔隙压力 u		体变管		说明
					读数 (cm^3)	体变量 (cm^3)			读数	排水量 (cm^3)	读数 (kPa)	压力值 (kPa)	读数 (cm^3)	体变值 (cm^3)	

表 D.36　三轴压缩试验记录表(三)

试样编号		试验者	
试验方法		计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

周围压力 σ_3 = _____ kPa　　固结下沉量 Δh = _____ cm

剪切应变速率 = _____ mm/min　　固结后高度 h_c = _____ cm

测力计率定系数 C = _____ N/0.01mm　　固结后面积 A_c = _____ cm^2

轴向变形读数 Δh_i (0.01mm)	轴向应变 $\varepsilon_1 = \frac{\Delta h_i}{h_c \times 10}$ (%)	试样校正后面积 $A_a = \frac{A_c}{1-\varepsilon_1 \times 0.01}$ (cm^2)	测力计表读数 R (0.01mm)	主应力差 $(\sigma_1-\sigma_3) = \frac{RC}{A_a} \times 10$ (kPa)	大主应力 $\sigma_1 = \sigma_3 + (\sigma_1-\sigma_3)$ (kPa)	孔隙压力 u		试样体积变化				有效大主应力 σ_1' (kPa)	有效小主应力 σ_3' (kPa)	有效主应力比 $\frac{\sigma_1}{\sigma_3}$	$\frac{\sigma_1-\sigma_3}{2}$ (kPa)	$\frac{\sigma_1+\sigma_3}{2}$ (kPa)	$\frac{\sigma_1+\sigma_3}{3}$ (kPa)
								排水管		体积变化							
						读数	压力值 (kPa)	读数	排出水量 (cm^3)	读数	体变量 (cm^3)						

表 D.37　无侧限抗压强度试验记录表

任务单号		试验者	
试样编号		计算者	
试样编号		校核者	
试样说明		试验日期	
仪器名称及编号			

试验前试样高度 h_0 = _____ cm	试样破坏情况
试验前试样直径 D_0 = _____ cm	
试验前试验面积 A_0 = _____ cm^2	
试样质量 m_0 = _____ g	
试样湿密度 ρ = _____ g/cm^3	
轴向变形 Δh = _____ 0.01mm	
测力计率定系数 C = _____ N/0.01mm	
原状试样无侧限抗压强度 q_u = _____ kPa	
重塑试样无侧限抗压强度 q'_u = _____ kPa	
灵敏度 S_t = _____	

测力计量表读数 R (0.01mm)	轴向变形 Δh (0.01mm)	轴向应变 ε_1 (%)	校正后面积 A_a (cm^2)	轴向应力 σ (kPa)
(1)	(2)	(3)	(4)	$(5)=\frac{(1)\times C}{(4)}\times 10$

表 D.38　直接剪切试样记录表(一)

任务单号		试验者	
试样编号		计算者	
试样说明		校核者	
试验日期		仪器名称及编号	

试样编号			1			2			3			4		
			起始	饱和后	剪后	起始	饱和后	剪后	起始	饱和后	剪后	起始	饱和后	剪后
湿密度 ρ (g/cm³)	(1)	(1)												
含水率 w(%)	(2)	(2)												
干密度 ρ_d(g/cm³)	(3)	$\frac{(1)}{1+0.01\times(2)}$												
孔隙比 e	(4)	$\frac{G_s}{(3)}-1$												
饱和度 S_r(%)	(5)	$\frac{G_s\times(2)}{(4)}$												

表 D.39　直接剪切试样记录表(二)

任务单号		计算者	
试样编号		校核者	
试验方法		试验者	
		试验日期	
试样编号		剪切前固结时间(min)	
仪器名称及编号		剪切前压缩量(mm)	
垂直压力 p(kPa)		剪切历时(min)	
测力计率定系数 C(N/0.01mm)		抗剪强度 S(kPa)	

手轮转数 (转)	测力计读数 R (0.01mm)	剪切位移 Δl (0.01mm)	剪应力 τ (kPa)	垂直位移 (0.01mm)
(1)	(2)	(3)=(1)×20−(2)	$(4)=\dfrac{(2)\times C}{A_0}\times 10$	
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
⋮				
32				

表 D.40　排水反复直接剪切试验

任务单号		试验者	
试样编号		计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号		剪前固结时间(min)	
测力计率定系数 C(N/0.01mm)		剪前固结沉降量(mm)	
剪切速率(mm/min)		剪切次数	
垂直压力 p(kPa)		抗剪强度 S(kPa)	
剪切位移 Δl (0.01mm)	垂直位移计读数 (0.01mm)	测力计读数 R (0.01mm)	剪应力 τ (kPa)
30			
60			
100			
130			
160			
200			
230			
260			
300			
350			
400			
⋮			
800			

表 D.41　无黏性土休止角试验记录表

任务单号		试验者	
试样说明		计算者	
试验方法		校核者	
仪器名称及编号		试验日期	
圆锥底面直径 d_1(cm)			

试样编号	充分风干状态休止角 α_c			水下状态休止角 α_m			备注
	读数		平均值	读数		平均值	
	h_{zc} (cm)	(°)	(°)	h_{zm} (cm)	(°)	(°)	

表 D.42　自由膨胀率试验记录表

任务单号		试验者	
量筒体积		计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

试样编号	干土质量 m_d (g)	量筒编号	不同时间的体积读数(mL)						自由膨胀率 δ_{ef} (%)
			2h	4h	6h	8h	10h	12h	
备注									

表 D.43　膨胀率试验记录(一)

任务单号		试验者	
试验类型		校核者	
试样编号		计算者	
仪器名称及编号		试验日期	

试样状态												
项目	环刀加湿土质量 (g)	环刀加干土质量 (g)	环刀质量 (g)	湿土质量 m_0 (g)	干土质量 m_d (g)	水质量 m_w (g)	含水率 w (%)	试样体积 V (cm^3)	密度 ρ (g/cm^3)	干密度 ρ_d (g/cm^3)	土粒比重 G_s	孔隙比 e
	(1)	(2)	(3)	(4)=(1)−(3)	(5)=(2)−(3)	(6)=(4)−(5)	$(7)=\frac{(6)}{(5)}\times 100$	(8)	$(9)=\frac{(4)}{(8)}$	$(10)=\frac{(5)}{(8)}$	(11)	$(12)=\frac{(11)}{(10)}-1$
试验前												
试验后												

表 D.44　膨胀率试验记录(二)

任务单号				试验者				
试验类型				校核者				
试样编号				计算者				
仪器名称及编号				试验日期				
测定时间			经过时间			量表读数 (mm)	膨胀率 (%)	
d	h	min	d	h	min			

表 D.45　收缩试验记录表

任务单号				试验者					
试样编号				计算者					
试验日期				校核者					
仪器名称及编号									
测定时间			百分表读数 z_t (0.01mm)	单向收缩 $z_t - z_0$ (mm)	线缩率 δ_{st} (%)	试样质量 m_t (g)	水质量 m_w (g)	含水率 w_t (%)	备注
d	h	min							

表 D.46　膨胀力试验记录(一)

任务单号		试验者	
试验类型		校核者	
试样编号		计算者	
仪器名称及编号		试验日期	
试样状态			

项目	环刀加湿土质量 (g)	环刀加干土质量 (g)	环刀质量 (g)	湿土质量 m_0 (g)	干土质量 m_d (g)	水质量 m_w (g)	含水率 w (%)	试样体积 V (cm^3)	密度 ρ (g/cm^3)	干密度 ρ_d (g/cm^3)	土粒比重 G_s	孔隙比 e
	(1)	(2)	(3)	(4)=(1)−(3)	(5)=(2)−(3)	(6)=(4)−(5)	$(7)=\frac{(6)}{(5)}\times 100$	(8)	$(9)=\frac{(4)}{(8)}$	$(10)=\frac{(5)}{(8)}$	(11)	$(12)=\frac{(11)}{(10)}-1$
试验前												
试验后												

表 D.47　膨胀力试验记录

任务单号		试验者	
试验类型		校核者	
试样编号		计算者	
仪器名称及编号		试验日期	

测定时间 (h:min:s)	平衡荷载 W (N)	膨胀力 p_e (kPa)	仪器变形量 (0.01mm)

表 D.48　静止侧压力系数试验记录表

1. 含水率 w _____%

任务单号		试验者	
试样编号		计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

项　　目	试验前		试验后	
	(1)	(2)	(1)	(2)
盒号				
湿土加盒质量(g)				
干土加盒质量(g)				
盒质量(g)				
含水率 w(%)				
平均含水率 $\overline{w}$(%)				

2. 密度 ρ _____ g/cm³

项　　目	试验前	试验后
试样面积 A(cm²)		
试样高度 h (cm)		
试样体积 V(cm³)		
试样质量 m_0(g)		
试样密度 ρ(g/cm³)		
孔隙比 e		
试样描述		

3. K_0试验

电测仪表初始读数 R_0 = _____ $\mu\varepsilon$(mV)

压力传感器比例常数 C' = _____ kPa/$\mu\varepsilon$ (mV)

轴向压力 = _____ kPa

经过时间 t (min)	轴向变形 Δh (0.01mm)	电测仪表读数 R_d ($\mu\varepsilon$,mV)	读数变化值 ($R_d - R_{d0}$) ($\mu\varepsilon$,mV)	周围压力 σ_3' (kPa)

表 D.49　振动三轴动强度(抗液化强度)试验记录表(一)

任务单号		试验者	
试样编号		计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

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		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)		振动频率(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)		等压时孔压破坏标准(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 ΔV(mL)		等压时应变破坏标准(%)	
试样体积 V (cm^3)		试样体积 V_c(cm^3)		固结变形量 Δh(mm)		偏压时应变破坏标准(%)	
试样干密度 ρ_d(g/cm^3)		试样干密度 ρ_d(g/cm^3)		振后排水量(mL)		振后高度 (mm)	
试样破坏情况描述							
备　　注							

表 D.50　振动三轴动强度(抗液化强度)试验记录表(二)

任务单号		试验者	
试样编号		计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

振次 (次)	动变形 Δh_d (mm)	动应变 ε_d (%)	动孔隙压力 u_d (kPa)	动孔压比 u_d/σ_0'

表 D.51　振动三轴动力变形特性试验记录表(一)

任务单号		试验者	
试样编号		计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

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 K_c	
试样高度 h(mm)		试样高度 h_c(mm)		轴向固结应力 σ_{1c}(kPa)	
试样面积 A(cm^2)		试样面积 A_c(cm^2)		侧向固结应力 σ_{3c}(kPa)	
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 ΔV(mL)	
试样体积 V (cm^3)		试样体积 V_c(cm^3)		固结变形量 Δh(mm)	
试样干密度 ρ_d(g/cm^3)		试样干密度 ρ_d(g/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										

表 D.52　振动三轴动力变形特性试验记录表(二)

任务单号		试验者	
试样编号		计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

振次 (次)	动应力 σ_d (kPa)	动变形 Δh_d (mm)	动应变 ε_d (%)	动弹性模量 E_d (kPa)	阻尼比 λ (%)

表 D.53　振动三轴残余变形特性试验记录表(一)

任务单号		试验者	
试样编号		计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

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 K_c		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)	
体积量管读数 V_1(cm^3)		体积量管读数 V_2(cm^3)		固结排水量 ΔV(mL)		振后排水量(mL)	
试样体积 V (cm^3)		试样体积 V_c(cm^3)		固结变形量 Δh(mm)		振后高度(mm)	
试样干密度 ρ_d(g/cm^3)		试样干密度 ρ_d(g/cm^3)					
试样破坏情况描述							
备　　注							

表 D.54　振动三轴残余变形特性试验记录表(二)

任务单号		试验者	
试样编号		计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

振次 (次)	动残余体积变化 (cm^3)	动残余轴向变形 (mm)	残余体应变 ε_{vr} (%)	动残余轴向应变 ε_d (%)

表 D.55　共振柱试验记录表(带弹簧和阻尼器支承端扭转共振柱)

任务单号		试验者	
试样编号		计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

试样情况		计算参数	
试样干质量(g)		试样干密度(g/cm³)	
固结前高度(cm)		试样质量 m_1(g)	
固结前直径(cm)		试样转动惯量 I_1(g/cm²)	
固结后高度(cm)		顶端附加物质量 m_0(g)	
固结后直径(cm)		顶端附加物转动惯量 I_0(g/cm²)	
固结后体积(cm³)		加速度计到试样轴线距离 d_1(cm)	
试样含水率(%)		加速度标定系数 β(981cm·s²/mV)	

扭转共振测试结果

测定次数	最大电压值 U (mV)	扭转共振频率 f_{n1} (Hz)	扭转共振圆频率 ω (rad/s)	动剪应变 $\times 10^4$ (%)	无试样时系统扭转共振频率 f_{01}(Hz)	扭转无量纲频率因数 β_s	动剪切模量 G_d (kPa)	有试样时系统扭转振动时的对数衰减率 δ_1	无试样时系统扭转振动时的对数衰减率 δ_{01}	扭转振动时的能量比 S_t	阻尼比 λ

表 D.56　共振柱试验记录表(带弹簧和阻尼器支承端纵向振动共振柱)

任务单号		试验者	
试样编号		计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

试样情况		计算参数	
试样干质量(g)		试样干密度(g/cm³)	
固结前高度(cm)		试样质量 m_1(g)	
固结前直径(cm)		试样转动惯量 I_1(g/cm²)	
固结后高度(cm)		顶端附加物质量 m_0(g)	
固结后直径(cm)		顶端附加物转动惯量 I_0(g/cm²)	
固结后体积(cm³)		加速度计到试样轴线距离 d_1(cm)	
试样含水率(%)		加速度标定系数 β(981cm·s²/mV)	

纵向振动测试结果

测定次数	最大电压值 U (mV)	轴向动应变 $\times 10^{-4}$ (%)	纵向共振频率 f_{n1} (Hz)	无试样时系统纵向共振频率 f_{01}(Hz)	纵向振动无量纲频率因数 $\beta_{1.}$	动弹性模量 E_d (kPa)	有试样时系统纵向振动时的对数衰减率 δ_1	无试样时系统纵向振动时的对数衰减率 δ_{01}	纵向振动时的能量比 S_1	阻尼比 λ

表 D.57　共振柱试验记录表(自由端扭转共振柱)

任务单号		试验者	
试样编号		计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

试样情况		试验参数	
试样干质量(g)		试样干密度(g/cm³)	
固结前高度(cm)		试样质量 m_t(g)	
固结前直径(cm)		试样转动惯量 I_t(g/cm²)	
固结后高度(cm)		顶端附加物质量 m_0(g)	
固结后直径(cm)		顶端附加物转动惯量 I_0(g/cm²)	
固结后体积(cm³)		加速度计到试样轴线距离 d_1(cm)	
试样含水率(%)		加速度标定系数 β(981cm·s²/mV)	

扭转自由振动测试结果

测定次数	电荷输出电压 U (mV)	自振周期(s)					自振振幅(mm)					扭转自由振动频率 f_{n1} (Hz)	动剪应变 γ (%)	无试样时系统扭转自由振动频率 f_{01}(Hz)	扭转无量纲频率因数 β_s	动剪切模量 G_d (kPa)	阻尼比 λ
		T_1	T_2	T_3	T_4	平均	A_1	A_2	A_3	A_4	平均						

表 D.58　共振柱试验记录表(自由端纵向振动共振柱)

任务单号		试验者	
试样编号		计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

试样情况		计算参数	
试样干质量(g)		试样干密度(g/cm³)	
固结前高度(cm)		试样质量 m_t(g)	
固结前直径(cm)		试样转动惯量 I_t(g/cm²)	
固结后高度(cm)		顶端附加物质量 m_{t0}(g)	
固结后直径(cm)		顶端附加物转动惯量 I_0(g/cm²)	
固结后体积(cm³)		加速度计到试样轴线距离 d_1(cm)	
试样含水率(%)		加速度标定系数 β(981cm·s²/mV)	

自由纵向振动测试结果

测定次数	电荷输出电压 U (mV)	自振周期(s)					自振振幅(mm)					纵向自由振动频率 f_{nl} (Hz)	轴向动应变 ε_d (%)	无试样时系统纵向自由振动频率 f_{0l}(Hz)	纵向无量纲频率因数 β_l	动弹性模量 E_s (kPa)	阻尼比 λ
		T_1	T_2	T_3	T_4	平均	A_1	A_2	A_3	A_4	平均						

表 D.59　基床系数试验记录表

任务单号			试验者		
试样编号			计算者		
试验日期			校核者		
仪器名称及编号					
含水率(%)			试样高度(mm)		
控制比值 n			试样直径(mm)		
试样高度 h_i (mm)	土的变形 Δh_i (mm)	轴向压力 (N)	轴向应变 ε_1 (%)	校正后的面积 (mm^2)	应力 σ_1 (kPa)

表 D.60　冻土含水率试验记录表(烘干法)

任务单号		试验者	
试验日期		计算者	
仪器名称及编号		校核者	

试样编号	试样说明	盒号	盒质量 (g)	盒加湿土质量 (g)	盒加干土质量 (g)	冻土质量 m_{f0} (g)	干土质量 m_d (g)	冻土含水率 w_f (%)	冻土含水率平均值 $\overline{w_f}$ (%)
			(1)	(2)	(3)	(4)=(2)−(1)	(5)=(3)−(1)	$(6)=\left[\frac{(4)}{(5)}-1\right]\times 100$	(7)

表 D.61　冻土含水率和冻土密度试验记录表(联合测定法)

任务单号		试验者	
试验日期		计算者	
仪器名称及编号		校核者	

试样编号	冻土质量 m_{fc} (g)	筒加水质量 m_{cw} (g)	筒加水加试样质量 (g)	筒加水加冻土颗粒质量 m_{cws} (g)	土粒比重 G_s	冻土试样体积 V_f (cm^3)	冻土密度 ρ_f (g/cm^3)	冻土含水率 w_f (%)

表 D.62　冻土密度试验记录表(浮称法)

任务单号		试验者	
试验日期		计算者	
仪器名称及编号		校核者	

试样编号	试样描述	煤油温度(℃)	煤油密度 ρ_m (g/cm³)	冻土质量 m_{f0} (g)	试样在油中的质量 m_{fm} (g)	冻土体积 V_f (cm³)	冻土密度 ρ_f (g/cm³)	平均冻土密度 $\bar{\rho}_f$ (g/cm³)
		(1)	(2)	(3)	(4)	$(5)=\frac{(3)-(4)}{(2)}$	$(6)=\frac{(3)}{(5)}$	(7)

表 D.63　冻土密度试验记录表(环刀法)

任务单号		试验者	
试验日期		计算者	
仪器名称及编号		校核者	

试样编号	试样描述	冻土体积 V_f (cm³)	冻土质量 m_{f0} (g)	冻土密度 ρ_f (g/cm³)	冻土含水率 w_f (%)	冻土干密度 ρ_{fd} (g/cm³)	冻土平均干密度 $\bar{\rho}_{fd}$ (g/cm³)
		(1)	(2)	$(3)=\frac{(2)}{(1)}$	(4)	$(5)=\frac{(3)}{1+0.01\times(4)}$	(6)

表 D.64　冻土密度试验记录表(充砂法)

任务单号		试验者	
试验日期		计算者	
仪器名称及编号		校核者	

试样编号	测筒质量 m_1 (g)	试样质量 m_{10} (g)	测筒、试样加量砂质量 m_{1ls} (g)	量砂质量 (g)	量砂密度 ρ_{ls} (g/cm³)	测筒容积 V_1 (cm³)	试样体积 V_l (cm³)	冻土密度 ρ_l (g/cm³)	冻土平均密度 $\bar{\rho}_l$ (g/cm³)
	(1)	(2)	(3)	(4)=(3)−(1)−(2)	(5)	(6)	$(7)=(6)-\frac{(4)}{(5)}$	$(8)=\frac{(2)}{(7)}$	(9)

表 D.65　冻结温度试验记录表

任务单号		试验者	
试验日期		计算者	
仪器名称及编号		校核者	
热电偶编号：　　热电偶系数 K_t＝_____ μV/℃			

试样编号	历时 (min)	电压表示值 U_t (μV)	冻结温度 T_t (℃)	备注
	(1)	(2)	(3)＝(2)/K_t	

表 D.66　冻土导热数试验记录表

任务单号		试验者	
试验日期		计算者	
仪器名称及编号		校核者	
冻土试样含水率 w_t＝_____%　　石蜡导热系数 λ_0＝0.279W/(m·K) 冻土试样密度 ρ_t＝_____ g/cm³			

试样编号	时间 (min)	石蜡样品盒内两壁面温差 $\Delta\theta_0$ (℃)	待测试样盒两壁面温差 $\Delta\theta$ (℃)	导热系数 λ_t [W/(m·K)]	备注
	(1)	(2)	(3)	(4)＝λ_0×(2)/(3)	

表 D.67　冻胀率试验记录表

任务单号		试验者	
试验日期		计算者	
仪器名称及编号		校核者	
试样结构			

冻土试样含水率 w_f＝_____%　　冻土试样密度 ρ_f＝_____ g/cm³

初始水位＝_____　　冻结深度 H_f＝_____ mm

试样编号	时间（h）	水位（mm）	温度（℃）	冻胀量 Δh_f（mm）	备注

表 D.68　冻土融化压缩试验记录表

任务单号		试验者	
试验日期		计算者	
试样编号		校核者	
仪器名称及编号			
融沉下沉量 $\Delta h_{f0}=$ _____ cm　　融沉后试样孔隙比 $e=$ _____			

加压时间 t (h,min)	压力 p (kPa)	试样 总变形量 (mm)	孔隙比 e_i	融化压缩系数 a_{fv} (MPa^{-1})
(1)	(2)	(3)	$(4)=e-\frac{(3)}{h}(1+e)$	(5)

表 D.69　原位冻土融化压缩试验记录表

任务单号		试验者	
试验日期		计算者	
仪器名称及编号		校核者	
试坑编号及深度		土类	
冻结状态含水率 $w_f=$ _____%	密度 $\rho_f=$ _____ g/cm^3		

荷载 (kPa)	历时		变形(mm)		荷载 (kPa)	历时		变形(mm)	
	读数时间	累计 (min)	量表读数	变形量		读数时间	累计 (min)	量表读数	变形量

表 D.70　原位冻胀率试验记录表

任务单号		试验者	
试验地点		计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			
试样编号			

时间	温度及冻胀量	深度(cm)						地下水位(m)	冻深 H_f(m)		冻胀率 η_f(%)
		0	20	40	60	80	100		地温计	冻深器	
	温度(℃)										
	冻胀量 Δh_f(cm)										
	温度(℃)										
	冻胀量 Δh_f(cm)										
	温度(℃)										
	冻胀量 Δh_f(cm)										

表 D.71　原位密度试验记录表(灌砂法,用套环)

任务单号		试验者					
试验日期		计算者					
试验环境		校核者					
试样编号		仪器名称及编号					
试样描述		取样地点					
量砂容器质量加原有量砂质量 m_{y1}(g)	(1)						
量砂容器质量加第 1 次剩余量砂质量 m_{y2}(g)	(2)						
套环内耗砂质量(g)	(3)	(1)－(2)					
量砂密度 ρ'_{ls}(g/cm³)	(4)						
套环体积(cm³)	(5)	(3)/(4)					
从套环内取出量砂质量 m_{y3}(g)	(6)						
套环内残留量砂质量(g)	(7)	(3)－(6)					
量砂容器质量加第 2 次剩余量砂质量 m_{y5}(g)	(8)						
试坑及套环内耗砂质量(g)	(9)	(2)＋(6)－(8)					
量砂密度 ρ_{ls}(g/cm³)	(10)	(9)/(10)					
试坑及套环总体积(cm³)	(11)						
试坑体积(cm³)	(12)	(11)－(5)					
试样容器质量加试样质量(内包括残留之量砂)m_{y4}(g)	(13)						
试样容器质量 m_{y6}(g)	(14)						
试样质量 m_0(g)	(15)	(13)－(14)－(7)					
试样密度 ρ(g/cm³)	(16)	(15)/(12)					
试样含水率 w(%)	(17)						
干密度 ρ_d(g/cm³)	(18)	$\dfrac{(16)}{1+0.01\times(17)}$					
平均干密度 $\bar{\rho}_d$(g/cm³)	(19)						

表 D.72　原位密度试验记录表(灌砂法,不用套环)

任务单号		试验者					
试验日期		计算者					
试验环境		校核者					
试样编号		仪器名称及编号					
试样描述		取样地点					
量砂容器质量加原有量砂质量 m_{y1}(g)		(1)					
量砂容器质量加剩余量砂质量 m_{y7}(g)		(2)					
试坑内耗砂质量(g)		(3)	(1)－(2)				
量砂密度 ρ_n(g/cm³)		(4)					
试坑体积(cm³)		(5)	(3)/(4)				
试样质量加试样容器质量 m_{y4}(g)		(6)					
试样容器质量 m_{y6}(g)		(7)					
试样质量 m_0(g)		(8)	(6)－(7)				
试样密度 ρ(g/cm³)		(9)	(8)/(5)				
试样含水率 w(%)		(10)					
干密度 ρ_d(g/cm³)		(11)	$\frac{(9)}{1+0.01\times(10)}$				
平均干密度 $\bar{\rho}_d$(g/cm³)		(12)					

表 D.73　原位密度试验记录表(灌水法)

任务单号		试验者	
试验日期		计算者	
试验环境		校核者	
试样描述		仪器名称及编号	
取样地点		试样编号	

试样编号	套环体积 V_{th} (cm^3)	储水筒水位(cm)		储水筒面积 A_w (cm^2)	试坑体积 V_{sk} (cm^3)	试样质量 m_0 (g)	试样含水率 w (%)	试样湿密度 ρ (g/cm^3)	试样干密度 ρ_d (g/cm^3)
		初始 H_{t1}	终了 H_{t2}						
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)=[(4)−(3)]×(5)−(2)	(7)	(8)	(9)=(7)/(6)	$(10)=\frac{(9)}{1+0.01\times(8)}$

表 D.74　试坑渗透试验记录表

任务单号		试坑编号		试验方法		试验者	
土质说明		铁(内)环直径		试坑深度		计算者	
仪器名称及编号				试验日期		校核者	

测量时间			时间间隔 t (min)	渗入水量 Q (cm^3)	水的渗透流量		近似渗透系数 k_T (cm/s)	试验时水的入渗深度 H_{y1} (cm)	贮水坑中水的深度 H_{y2} (cm)	相当于作用毛细管力的水柱高度 H_{y3} (cm)	渗透系数 k_T (cm/s)	水温 20℃ 渗透系数 k_{20} (cm/s)	平均渗透系数 $\bar{k}_{20}$ (cm/s)
d	h	min			cm^3/min	cm^3/s							
—	—	—	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
—	—	—	—	—	$\frac{(2)}{(1)}$	$\frac{(3)}{60}$	$(4)/A$	—	—	—	$\frac{(4)\times(6)}{A[(6)+(7)+(8)]}$	$(9)\times\frac{\eta_T}{\eta_{20}}$	$\frac{\sum(10)}{n}$

表 D.75　原位直剪试验记录表

任务单号		试验者	
试验地点		计算者	
试样编号		校核者	
试验方法		试验日期	
仪器名称及编号			
试样(混凝土板)面积 A_0(cm²)		垂直压力 p(kPa)	
固结时间(h)		剪切历时(min)	
试样压缩量(mm)		抗剪强度 S(kPa)	

剪切历时 (min)	剪应力 τ (kPa)	剪切位移 ΔL (mm)	备　注

表 D.76　电测试十字板剪切试验记录表

任务单号		试验者	
试验地点		计算者	
试验孔号		校核者	
仪器名称及编号		试验日期	
孔口标高		应变仪编号	
试验环境		稳定水位	

十字板规格 D=_____ mm　　H=_____ mm　　K'_1=_____ cm^{-3}

传感器编号:_____　　率定系数 ξ=_____ N·(cm/με)

序号	原状土		重塑土		试验深度 (m)	备注
	应变仪读数 R_y (με)	抗剪强度 C_u (kPa)	应变仪读数 R_e (με)	抗剪强度 C'_u (kPa)		

表 D.77　机械式十字板剪切试验记录表

任务单号		试验者	
试验地点		计算者	
试验孔号		校核者	
仪器名称及编号		试验日期	
孔口标高		稳定水位	
试验环境			

十字板规格 $D=$_____ mm　$H=$_____ mm　$K_2'=$_____ cm^{-2}

钢环编号：_____　钢环系数 $C=$_____ N/0.01mm

序号	原状土		重塑土		轴杆	试验深度（m）	备注
	百分表读数（0.01mm）	抗剪强度 C_u（kPa）	百分表读数（0.01mm）	抗剪强度 C_u'（kPa）	百分表读数（0.01mm）		

表 D.78　标准贯入试验记录表

任务单号		试验者	
钻孔编号		计算者	
孔口标高		校核者	
地下水位		试验日期	
仪器名称及编号		试验环境	
钻孔孔径		钻进方式	
护孔方式		落锤方式	
孔内水位(或泥浆高程)			

序号	浮土厚度（cm）	试验深度（m）	贯入深度（cm）	击数 N	描述

表 D.79　静力触探试验记录表

任务单号		探头编号		试验者	
孔号		率定系数 k_p		计算者	
孔口标高(m)		率定系数 k_q		校核者	
水位标高(m)		率定系数 k_f		试验日期	
试验环境		率定系数 k_u			

1. 阻力测定

触探深度(m)	锥头阻力 q_c(p_s)		摩擦阻力 f_s		孔隙水压力 u		摩阻比 $F_m=\frac{f_s}{q_c}$(%)
	仪表读数(με,mV)	贯入阻力(kPa)	仪表读数(με,mV)	贯入阻力(kPa)	仪表读数(με,mV)	贯入阻力(kPa)	

2. 孔压消散(触探深度：　　m)

时间(min)	经过时间(min)	仪表读数(με,mV)	孔隙压力 u_1(kPa)	孔隙压力消散百分数 $\bar{U}$(%)

表 D.80　轻型动力触探试验记录表

任务单号		孔号		试验者	
试验地点		探杆直径		计算者	
孔口标高		探杆质量		校核者	
地下水位		锤座质量		试验日期	
仪器名称及编号					

触探杆总长（m）	触探深度（m）	一阵锤击数 N_0	贯入度 ΔS（mm）	每贯入 0.1m 锤击数 $N_{63.5}$	小层累计贯入度（mm）	小层平均锤击数	说明

表 D.81　重型、超重型动力触探试验记录表

任务单号		孔号		试验者	
试验地点		探杆直径		计算者	
孔口标高		探杆质量		校核者	
地下水位		锤座质量		试验日期	
仪器名称及编号					

触探杆总长（m）	触探深度（m）	一阵锤击数 N_0	贯入度 ΔS（mm）	每贯入 0.1m 锤击数 N_{120}	小层累计贯入度（mm）	小层平均锤击数	说明

表 D.82　旁压试验记录表

任务单号		试验者	
试验孔编号		计算者	
试验点编号		校核者	
旁压器编号		试验日期	
孔口标高(m)		地下水位(m)	
试验深度(m)		旁压器中所受静水压力 p_w(kPa)	
量管水面离孔口距离(m)		试验土层描述	

压力 p(kPa)					量管水位下降值(累计值) H_m(cm)						体积增量 V (cm^3)
压力表读数 p_m	总压力	校正值	校正后	0s	15s	30s	60s	120s	校正值	校正后	

表 D.83　载荷试验记录表

任务单号		试验者	
试验地点		计算者	
试验深度		校核者	
试验方法		试验日期	
承压板面积		气候条件	
试验环境		土层性状	
仪器名称及编号			

加荷时间	读数时间	单位压力 p (kPa)	沉降量 s(cm)								平均沉降量 (cm)	累计沉降量 (cm)	备注
			A		B		C		D				
			读数	沉降	读数	沉降	读数	沉降	读数	沉降			

表 D.84　波速试验记录表(跨孔法)

任务单号		试验者	
试验日期		计算者	
钻孔排列方位		校核者	
仪器名称及编号			

深度(m)	土层名称	测斜后的实际水平距离(m)			波的传播时间(ms)						波速值(m/s)					
					$S—R_1$		$S—R_2$		$R_1—R_2$		$S—R_1$		$S—R_2$		$R_1—R_2$	
		$S—R_1$	$S—R_2$	$R_1—R_2$	t_P	t_S	t_P	t_S	t_P	t_S	v_P	v_S	v_P	v_S	v_P	v_S

表 D.85　波速试验记录表(面波法)

任务单号		试验者	
试验地点		计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

激振频率 f (s^{-1})	检波器与振源间距离(m)			波长(m)	波速值 $V_R=L_Rf$ (m/s)
	S—l_1	S—l_2	S—l_3	$L_R=l_3-l_1$	

表 D.86　风干含水率试验记录表

任务单号		试验者	
试验地点		计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

试样编号	铝盒编号	铝盒质量(g)		铝盒加风干土质量(g)	铝盒加烘干土质量(g)		烘干土质量 m_d (g)	失水质量(g)	风干含水率 w_0 (%)	
		第1次	第2次		第1次	第2次			计算值	平均值

表 D.87　酸碱度(pH)测定记录表

任务单号		试验者	
试验地点		计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

试样编号	土水比例	温度(℃)	pH 值		备　注
			第 1 次	第 2 次	

表 D.88　易溶盐总量测定试验记录表

任务单号		试验者	
试验地点		计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

试样编号	风干土质量 m_0 (g)	风干含水率 w_0 (%)	烘干土质量 m_d (g)	加水容积 V_w (mL)	吸取浸出液 V_{x1} (mL)	蒸发皿编号 No.	蒸发皿质量 m_m (g)	蒸发皿加烘干残渣质量 m_{mz} (g)	烘干残渣质量 $m_{mz}-m_m$ (g)	易溶盐总量 ω(易溶盐) (g·kg^{-1})	
										计算值	平均值

表 D.89　易溶盐碳酸根$\left(\frac{1}{2}CO_3^{2-}\right)$及重碳酸根($HCO_3^-$)试验记录表

任务单号		试验者	
试验地点		计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

试样编号	烘干土质量 m_d (g)	加水体积 V_w (mL)	吸取滤液体积 V_{x2} (mL)	硫酸$\left(\frac{1}{2}H_2SO_4\right)$标准溶液			碳酸根含量 $\omega(CO_3^{2-})$ (g·kg^{-1})		重碳酸钙含量 $\omega(HCO_3^-)$ (g·kg^{-1})	
				浓度 $C\left(\frac{1}{2}H_2SO_4\right)$ (mol·L^{-1})	第1次用量 V_{hb2} (mL)	第2次用量 V_{hb3} (mL)	计算值	平均值	计算值	平均值

表 D.90　易溶盐氯根(Cl^-)的试验记录表

任务单号		试验者	
试验地点		计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

试样编号	烘干土质量 m_d (g)	加水体积 V_w (mL)	吸取滤液体积 V_{x2} (mL)	硝酸银标准溶液			氯离子含量 $\omega(Cl^-)$ ($g \cdot kg^{-1}$)	
				浓度 $C(AgNO_3)$ ($mol \cdot L^{-1}$)	滴定用量 V_{hs4} (mL)	空白用量 V_{hb5} (mL)	计算值	平均值

表 D.91　硫酸根(SO_4^{2-})测定记录表(EDTA 法)

任务单号		试验者	
试验方法	EDTA 法	计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

试样编号	烘干土质量 m_d (g)	加水体积 V_w (mL)	吸取滤液体积 V_{x2} (mL)	钡镁混合液		EDTA 标准溶液			硫酸根含量 $\omega(SO_4^{2-})$ ($g \cdot kg^{-1}$)	
				浓度 $C(Ba+Mg)$ ($mol \cdot L^{-1}$)	用量 V_B (mL)	浓度 $C(EDTA)$ (mL)	用量 V_E (mL)	滴定钙镁用量 V_{E0} (mL)	计算值	平均值

表 D.92　硫酸根(SO_4^{2-})测定记录表(比浊法)

任务单号					试验者			
试验方法	比浊法				计算者			
试验日期					校核者			
仪器名称及编号								
试样编号	烘干土质量 m_d (g)	加水体积 V_w (mL)	吸取滤液体积 V_{x2} (mL)	试验时温度 (℃)	吸收值	由标准曲线查出的硫酸根质量 K_{hl} (mg)	硫酸根含量 $\omega(SO_4^{2-})$ (g·kg^{-1})	
							计算值	平均值

表 D.93　钙离子(Ca^{2+})、镁离子(Mg^{2+})测定记录表

任务单号		试验者	
试验方法	EDTA 法	计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

试样编号	烘干土质量 m_d (g)	加水体积 V_w (mL)	吸取滤液体积 V_{x2} (mL)	EDTA 标准溶液				Ca^{2+} 含量 $\omega(Ca^{2-})$ ($g \cdot kg^{-1}$)		Mg^{2+} 含量 $\omega(Mg^{2+})$ ($g \cdot kg^{-1}$)	
				浓度 C(EDTA) (mL)	滴定 Ca^{2+} 用量 V_{E1} (mL)	滴定 $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ 用量 V_{E2} (mL)	滴定 Mg^{2-} 用量 $V_{E1}-V_{E2}$ (mL)	计算值	平均值	计算值	平均值

表 D.94　钠离子(Na^+)、钾离子(K^+)测定记录表

任务单号		试验者	
试验方法	火焰光度法	计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

试样编号	烘干土质量 m_d (g)	加水体积 V_w (mL)	吸取滤液稀释倍数 n	试验条件	测钠离子读数 E_n	由标准曲线查钠离子含量 K_n (mg·mL^{-1})	钠离子含量 $\omega(Na^+)$ (g·kg^{-1})		测钾离子读数 E_k	由标准曲线查钾离子含量 K_k (mg·mL^{-1})	钾离子含量 $\omega(K^+)$ (g·kg^{-1})	
							计算值	平均值			计算值	平均值

表 D.95　中溶盐石膏($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)测定记录表

任务单号		试验者	
试验方法		计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

试样编号	烘干质量 m_d (g)	坩埚编号 No.	坩埚质量 m_{g0} (g)	沉淀加坩埚质量 m_{gz} (g)	沉淀质量 $m_{gz}-m_{g0}$ (g)	酸浸出硫酸根含量 $\omega(SO_4^{2-})$ (g·kg^{-1})	易溶盐硫酸根含量 $\omega(SO_4^{2-})$ (g·kg^{-1})	中溶盐石膏含量 $\omega(CaSO_4 \cdot 2H_2O)$ (g·kg^{-1})	
								计算值	平均值

表 D.96　难溶盐碳酸钙($CaCO_3$)测定记录表(碱吸收容量法)

任务单号		试验者	
试验方法	碱吸收容量法	计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

试样编号	风干土质量 m_0 (g)	风干含水率 w_0 (%)	烘干质量 m_d (g)	盐酸标准溶液			难溶盐碳酸钙含量 $\omega(CaCO_3)$ ($g \cdot kg^{-1}$)	
				浓度 C_{b1} ($mol \cdot L^{-1}$)	用量 V_{hb6} (mL)	空白用量 V_{hb7} (mL)	计算值	平均值

表 D.97　难溶盐碳酸钙($CaCO_3$)测定记录表(气量法)

任务单号		试验者	
试验方法	气量法	计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

试样编号	风干土质量 m_0 (g)	风干含水率 w_0 (%)	烘干质量 m_d (g)	试验温度 (℃)	大气压力 (kPa)	二氧化碳体积 V_{CO_2} (mL)	二氧化碳密度 ρ_{CO_2} (μg·mL)	难溶盐碳酸钙含量 $\omega(CaCO_3)$ (g·kg^{-1})	
								计算值	平均值

表 D.98　有机质试验记录表

任务单号		试验者	
试验方法		计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

试样编号	烘干质量 m_d (g)	重铬酸钾标准溶液			硫酸亚铁标准溶液			有机质含量 O.M. (g·kg^{-1})	
		浓度 $C\left(\frac{1}{6}K_2Cr_2O_7\right)$ (mol·L^{-1})	用量 V_K (mL)	空白用量 V (mL)	浓度 $C\left(\frac{1}{2}FeSO_4\right)$ (mol·L^{-1})	空白用量 V_{hb8} (mL)	用量 V_{hb9} (mL)	计算值	平均值

表 D.99　游离氧化铁总量试验记录表

任务单号		试验者	
试验方法	米拉·杰克法	计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

试样编号	烘干质量 m_d (g)	浸提液		消光值	从标准曲线上查得的含铁量 F (μg)	游离氧化铁含量 $\omega(Fe_2O_3)$ (g·kg^{-1})	
		总体积 V_w (mL)	用量 V_{xl} (mL)			计算值	平均值

表 D.100　无定形(非晶质)游离氧化铁试验记录表

任务单号		试验者	
试验方法	达姆试剂法	计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

试样编号	烘干质量 m_d (g)	浸提液		消光值	从标准曲线上查得的含铁量 F (μg)	无定形游离氧化铁含量 ω(无定形游离氧化铁) (g·kg^{-1})	
		总体积 V_w (mL)	用量 V_{x1} (mL)			计算值	平均值

表 D.101　阳离子交换量试验记录表(氯化钡缓冲液法)

任务单号		试验者	
试验方法	氯化钡缓冲液法	计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

试样编号	烘干质量 m_d (g)	离心管加试样质量		EDTA 标准溶液			校正后滴定用量 V_{E3} (mL)	阳离子交换量 CEC (cmol·kg^{-1})	
		处理前 m_{g1} (g)	处理后 m_{g2} (g)	滴定用量 V_{E4} (mL)	空白滴定用量 V_{E5} (mL)	浓度 C_E (mol·L^{-1})		计算值	平均值

表 D.102　阳离子交换量试验记录表(1mol·L^{-1}乙酸铵交换法)

任务单号			试验者		
试验方法		1mol·L^{-1}乙酸铵交换法	计算者		
试验日期			校核者		
仪器名称及编号					

试样编号	风干土质量 m_0 (g)	烘干土质量 m_d (g)	HCl 标准溶液			阳离子交换量 CEC (cmol·kg^{-1})	
			滴定用量 V_{hb10} (mL)	空白滴定用量 V_{hb11} (mL)	浓度 C_{b1} (mol·L^{-1})	计算值	平均值

表 D.103　阳离子交换量试验记录表(乙酸钠-火焰光度法)

任务单号		试验者	
试验方法	乙酸钠-火焰光度法	计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

试样编号	烘干土质量 m_d (g)	吸取溶液体积 V_{hd} (mL)	吸取滤液稀释倍数 N	Na 的测定		阳离子交换量 CEC ($cmol \cdot kg^{-1}$)	
				测钠离子读数 E_n	由标准曲线查钠离子含量 ρ_{Nn^+} ($\mu g \cdot mL^{-1}$)	计算值	平均值

表 D.104　X 射线粉晶衍射分析记录表

任务单号		试验者	
试验方法		计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

d (10^{-1}nm)	I/I_0	d (10^{-1}nm)	I/I_0	d (10^{-1}nm)	I/I_0	鉴定结果
						试验条件

X 射线衍射图谱：

表 D.105　粗颗粒土扰动试样制备记录表

任务单号		试验者	
试样名称及编号		计算者	
允许最大粒径(mm)		校核者	
含砾量 P_5		试验日期	
超粒径颗粒处理方法			

粒径(mm)	原级配或要求级配		替换料级配(%)	各粒组取风干土质量 m_{0i}(kg)	描述
	留筛土质量(kg)	留筛百分数(%)			
100					
80					
60					
40					
20					
10					
5					
<5					
总计					

控制干密度 ρ_d(g/cm³)		控制含水率 w'(%)	
试样体积 V(cm³)		大于 5mm 粒径风干土含水率 w_{01}(%)	
大于 5mm 粒径风干土质量 m_{01}(kg)		不大于 5mm 粒径风干土含水率 w_{02}(%)	
不大于 5mm 粒径风干土质量 m_{02}(kg)		试料风干含水率 w_0(%)	
总风干试料土质量 m_0(kg)		试料加水量 m_w(kg)	

表 D.106　粗颗粒土相对密度试验记录表

任务单号		试验者	
试样编号		计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号		试验方法	
试样筒质量(kg)		土粒比重 G_s	
天然状态(人工填筑)干密度 ρ_{d0}(g/m³)		天然孔隙比 e_0	

试 验 项 目	最小干密度的测定		最大干密度的测定	
试样体积 V_s(cm³)				
试样加试样筒质量(kg)				
试样质量 m_d(kg)				
干密度 ρ_d(g/cm³)				
平均干密度 (g/cm³)				
孔隙比 e				
平均孔隙比 e				
相对密度 D_r				
压实度 R_c				
密度指数 I_D(%)				

表 D.107　粗颗粒土击实试验记录表

任务单号		试验者	
试样编号		计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

每层击数_____　起始含水率_____(%)　试验前 P_5_____　试验后 P_5_____

击实筒体积_____(cm^3)　击实筒质量_____(g)　试样比重 G_s_____

试样说明_____　制样方法_____

试验次数		1		2		3		4		5		6		7	
干密度	制样加水量(g)														
	筒加湿土质量(g)														
	湿土质量 m_0(g)														
	湿密度 ρ(g/cm^3)														
	干密度 ρ_d(g/cm^3)														
含水率	盘号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	盘加湿土质量(g)														
	盘加干土质量(g)														
	盘质量(g)														
	含水率 w(%)														
	平均含水率(%)														
	饱和含水率 w_{sat}(%)														
最大干密度 ρ_{dmax}(g/cm^3)															
最优含水率 w_{op}(%)															

表 D.108　粗颗粒土的渗透变形及反滤试验记录表

任务单号		试样质量 m_d(g)		试样不均匀系数 C_u		试验者	
试样编号		试样面积 A (cm^2)		曲率系数 C_c		计算者	
试样采取地点		试验前试样高度 h(cm)		试样中值粒径 d_{50}(mm)		校核者	
试样类别		试验后试样高度 h' (cm)		骨架粒径 (mm)		试验日期	
试验组次		试样干密度 ρ_d(g/cm^3)		填料含量 P_5		渗流方向	
荷载 p (kPa)		试样孔隙率 n (%)		接触面下移距离(mm)		土粒比重 G_s	
反滤层层数		反滤层中值粒径 d_{50}(mm)		反滤层不均匀系数 C_u		反滤层厚度 (cm)	
仪器名称及编号							

试验次数	记录时间 (h:min)	测压管编号	测压管读数 (cm)	测压管水位差 ΔH (cm)	测压管间距 L (cm)	渗透坡降 $i=\frac{\Delta h}{L}$	渗水量 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

表 D.109　粗颗粒土固结试验记录表(一)

任务单号																								
试样编号																								
试验日期																								
仪器名称及编号																								
记录时间			变形读数(0.01mm)																					
			50kPa			100kPa			200kPa			400kPa			800kPa			1600kPa			3200kPa			
h	min	s	1表	2表	平均	1表	2表	平均	1表	2表	平均	1表	2表	平均	1表	2表	平均	1表	2表	平均	1表	2表	平均	
		15																						
	1																							
	2	15																						
	4																							
	6	15																						
	9																							
	12	15																						
	16																							
	20	15																						
	25																							
	30	15																						
	36																							
	42	15																						
	60																							
2																								
3																								
4																								
5																								
6																								
7																								
8																								
24																								
总变形量(mm)																								
仪器变形量(mm)																								
试样总变形量(mm)																								

表 D.110　粗颗粒土固结试验记录表(二)

任务单号		试验者	
试验编号		计算者	
试验日期		校核者	
仪器名称及编号			

制样密度		>5mm 粗粒含量 P_5	总含水率 w		比重 G_s			饱和度 S_r		起始孔隙比 e_0	试样原始高度 h_0 (mm)	$C_v=\frac{0.848(\bar{h})^2}{t_{90}}$ 或 $C_v=\frac{0.1978(\bar{h})^2}{t_{50}}$
湿密度 ρ (g/cm³)	干密度 ρ_d (g/cm³)		起始 w_0 (%)	饱和后 w_{sat} (%)	>5mm 颗粒	<5mm 颗粒	混合	起始 (%)	饱和后 (%)			

压力 p (MPa)	试样总变形量 $\sum\Delta h_i$ (mm)	压缩后试样高度 $h=h_0-\sum\Delta h_i$ (mm)	孔隙比 $e_i=e_0-\frac{(1+e_0)\sum\Delta h_i}{h_0}$	压缩系数 $a_v=\frac{e_i-e_{i+1}}{p_{i+1}-p}$ (MPa⁻¹)	压缩模量 $E_s=\frac{1+e_0}{a_v}$ (MPa)	排水距离 $\bar{h}=\frac{h_1+h_2}{4}$ (cm)	固结系数 C_v (cm²/s)
0							
0.05							
0.1							
0.2							
0.4							
0.8							
1.6							
3.2							

表 D.111　粗颗粒土直接剪切试验记录表

任务单号		试验者	
试样编号		计算者	
制样日期		校核者	
仪器名称及编号			
试验方法	快剪(q)	固结快剪(R)	慢剪(S)

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= _____ mm/min　　摩擦力 F= _____ kN

起始干密度 ρ_d= _____ g/cm^3

风干含水率 w= _____ %

破坏剪应力 τ= _____ kPa　　C= _____ kN/0.01mm

测力计计数 (0.01mm)	剪应力 τ (kPa)	水平位移(0.01mm)				垂直变形(0.01mm)			
		百分表读数 ΔL			累计增量 $\Sigma\Delta L$	百分表读数 Δs			累计增量 $\Sigma\Delta s$
		1	2	平均		1	2	平均	
备　注									

表 D.112　粗颗粒土三轴蠕变试验记录表

任务单号						试验者			
试样编号						计算者			
试验日期						校核者			
仪器名称及编号									
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)			
时间 t_1			室内温度 T (℃)	经过时间 t_2 (min)	试样轴向变形 Δh_t (cm)	轴向应变 $\varepsilon_{1t}=\frac{\Delta h_t}{h_c}\times 100$ (%)	试样体积变化 ΔV_t (cm^3)	体积应变 $\varepsilon_{vt}=\frac{\Delta V_t}{V_c}\times 100$ (%)	备注
d	h	min							

表 D.113　粗颗粒土三轴湿化试验记录表

任务单号		试验者	
试验日期		计算者	
温度		校核者	
仪器名称及编号			
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(cm²)		剪切后面积 A_j(cm²)	
固结后体积 V_c(cm³)		剪切后体积 V_j(cm³)	
传力杆面积 A_g(cm²)			

时间 T (min)	试样轴向变形 Δh_s (cm)	湿化轴向应变 $\varepsilon_{ls}=\frac{\Delta h_s}{h_c}\times 100$ (%)	外体变测量系统读数 $\Delta V'$ (cm³)	试样湿化体积变化 $\Delta V_s=\Delta V'\Delta h_s A_g$ (cm³)	湿化体积应变 $\varepsilon_{vs}=\frac{\Delta V_s}{V_c}\times 100$ (%)	备注

本标准用词说明

1　为便于在执行本标准条文时区别对待，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

《建筑地基基础设计规范》GB 50007

《岩土工程勘察规范》GB 50021

《土的工程分类标准》GB/T 50145

《土工试验仪器　剪切仪　第2部分：现场十字板剪切仪》GB/T 4934.2

《土工试验仪器　固结仪　第1部分：单杠杆固结仪》GB/T 4935.1

《土工试验仪器　固结仪　第2部分：气压式固结仪》GB/T 4935.2

《试验筛　技术要求和检验　第1部分：金属丝编织网试验筛》GB/T 6003.1

《土工试验仪器　触探仪》GB/T 12745

《土工试验仪器　贯入仪》GB/T 12746

《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》GB/T 15406

《土工试验仪器　液限仪　第1部分：碟式液限仪》GB/T 21997.1

《土工试验仪器　击实仪》GB/T 22541

《土工试验仪器　三轴仪　第1部分：应变控制式三轴仪》GB/T 24107.1

《实验室用标准筛振荡机技术条件》DZ/T 0118

《土工实验仪器　环刀》SL 370

中华人民共和国国家标准

土工试验方法标准

GB/T 50123 - 2019

条 文 说 明

编 制 说 明

《土工试验方法标准》GB/T 50123—2019，经住房和城乡建设部2019年5月24日以第131号公告批准发布。

本标准是在《土工试验方法标准》GB/T 50123—1999（以下简称“原标准”）的基础上修订而成的，上一版标准的主编单位是南京水利科学研究院；参编单位有：铁道部第一勘测设计院、中国科学院兰州冰川冻土研究所、水利部东北勘测设计院、中国建筑科学研究院、交通部公路科学研究所；主要起草人为：盛树馨、吴连荣、徐敦祖、徐伯孟、阎明礼、饶鸿雁、陶秀珍。

本标准修订过程中，主编单位南京水利科学研究院会同有关勘察、设计、科研、教学单位组成编制组，认真总结了以往，特别是原标准制订以来，有关土工试验的实践经验及发展情况，在全国范围内广泛征求意见，并与正在实施和正在修订的有关国家标准进行了协调，参考了相关国外标准，听取国内众多专家意见，经多次讨论，反复修改后完成本标准修订工作。

为便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本标准时能正确理解和执行条文规定，《土工试验方法标准》编制组按章、节、条顺序编制了本标准的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。但是，本条文说明不具备与标准正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目　　次

1　总　　则 …… (495)
3　基本规定 …… (496)
4　试样制备和饱和 …… (497)
4.1　一般规定 …… (497)
4.3　扰动土试样预备程序 …… (497)
4.4　扰动土试样制备 …… (498)
4.5　原状土试样制备 …… (499)
4.6　试样饱和 …… (499)
5　含水率试验 …… (500)
5.1　一般规定 …… (500)
5.2　烘干法 …… (500)
5.3　酒精燃烧法 …… (501)
6　密度试验 …… (502)
6.1　一般规定 …… (502)
6.2　环刀法 …… (502)
6.3　蜡封法 …… (502)
7　比重试验 …… (503)
7.1　一般规定 …… (503)
7.2　比重瓶法 …… (503)
7.3　浮称法 …… (504)
8　颗粒分析试验 …… (505)
8.1　一般规定 …… (505)
8.2　筛析法 …… (505)
8.3　密度计法 …… (505)

8.4 移液管法 …… (509)
9 界限含水率试验 …… (510)
9.2 液塑限联合测定法 …… (510)
9.3 碟式仪液限法 …… (513)
9.4 搓滚塑限法 …… (514)
9.5 缩限试验 …… (514)
10 崩解试验 …… (515)
11 毛管水上升高度试验 …… (516)
11.1 一般规定 …… (516)
11.2 直接观测法 …… (516)
11.3 土样管法 …… (516)
12 相对密度试验 …… (518)
12.1 一般规定 …… (518)
12.2 最小干密度试验 …… (519)
12.3 最大干密度试验 …… (519)
13 击实试验 …… (521)
13.1 一般规定 …… (521)
13.3 操作步骤 …… (521)
13.4 计算、制图和记录 …… (523)
14 承载比试验 …… (524)
14.1 一般规定 …… (524)
14.3 操作步骤 …… (524)
14.4 计算、制图和记录 …… (524)
15 回弹模量试验 …… (526)
15.2 杠杆压力仪法 …… (526)
15.3 强度仪法 …… (526)
16 渗透试验 …… (527)
16.1 一般规定 …… (527)
16.2 常水头渗透试验 …… (527)

16.3 变水头渗透试验 …… (528)
17 固结试验 …… (530)
17.1 一般规定 …… (530)
17.2 标准固结试验 …… (530)
17.3 快速固结试验 …… (533)
17.4 应变控制加荷固结试验 …… (533)
18 黄土湿陷试验 …… (535)
18.1 一般规定 …… (535)
18.2 湿陷系数试验 …… (535)
18.3 自重湿陷系数试验 …… (536)
18.4 溶滤变形系数试验 …… (536)
18.5 湿陷起始压力试验 …… (536)
19 三轴压缩试验 …… (538)
19.1 一般规定 …… (538)
19.2 仪器设备 …… (540)
19.3 试样的制备和饱和 …… (541)
19.4 不固结不排水剪试验 …… (542)
19.5 固结不排水剪试验 …… (542)
19.6 固结排水剪试验 …… (544)
19.7 一个试样多级加荷试验 …… (545)
19.8 计算、制图和记录 …… (546)
20 无侧限抗压强度试验 …… (548)
20.3 操作步骤 …… (548)
20.4 计算、制图和记录 …… (549)
21 直接剪切试验 …… (550)
21.1 一般规定 …… (550)
21.2 仪器设备 …… (550)
21.3 操作步骤 …… (551)
21.4 计算、制图和记录 …… (552)

22 排水反复直接剪切试验 …… (553)
22.1 一般规定 …… (553)
22.2 仪器设备 …… (554)
22.3 操作步骤 …… (554)
24 自由膨胀率试验 …… (557)
24.1 一般规定 …… (557)
24.3 操作步骤 …… (557)
25 膨胀率试验 …… (558)
25.2 无荷载膨胀率试验 …… (558)
25.3 有荷载膨胀率试验 …… (558)
26 收缩试验 …… (560)
26.1 一般规定 …… (560)
26.2 仪器设备 …… (560)
26.3 试验步骤 …… (560)
26.4 计算、制图和记录 …… (560)
27 膨胀力试验 …… (561)
27.1 一般规定 …… (561)
27.3 操作步骤 …… (561)
28 土的静止侧压力系数试验 …… (562)
28.2 仪器设备 …… (562)
28.3 操作步骤 …… (563)
29 振动三轴试验 …… (564)
29.1 一般规定 …… (564)
29.2 仪器设备 …… (565)
29.3 操作步骤 …… (565)
29.4 计算、制图和记录 …… (569)
30 共振柱试验 …… (571)
30.1 一般规定 …… (571)
30.2 仪器设备 …… (571)

30.3 操作步骤 …… (572)
30.4 计算、制图和记录 …… (573)
31 土的基床系数试验 …… (575)
31.3 操作步骤 …… (575)
32 冻土含水率试验 …… (576)
32.1 一般规定 …… (576)
32.2 烘干法 …… (576)
32.3 联合测定法 …… (577)
33 冻土密度试验 …… (579)
33.1 一般规定 …… (579)
33.2 浮称法 …… (579)
33.4 环刀法 …… (579)
34 冻结温度试验 …… (580)
34.2 仪器设备 …… (580)
34.3 操作步骤 …… (580)
35 冻土导热系数试验 …… (582)
35.1 一般规定 …… (582)
35.3 操作步骤 …… (582)
35.4 计算和记录 …… (582)
36 冻土的未冻含水率试验 …… (583)
36.3 操作步骤 …… (583)
37 冻胀率试验 …… (584)
37.1 一般规定 …… (584)
37.3 操作步骤 …… (585)
38 冻土融化压缩试验 …… (586)
38.1 一般规定 …… (586)
38.2 仪器设备 …… (586)
38.3 操作步骤 …… (586)
39 原位冻土融化压缩试验 …… (588)

39.1 一般规定 …… (588)
39.2 仪器设备 …… (588)
39.3 操作步骤 …… (588)
40 原位冻胀率试验 …… (589)
40.2 仪器设备 …… (589)
40.3 操作步骤 …… (589)
41 原位密度试验 …… (591)
41.2 灌砂法 …… (591)
41.3 灌水法 …… (592)
42 试坑渗透试验 …… (594)
42.1 一般规定 …… (594)
43 原位直剪试验 …… (595)
43.1 一般规定 …… (595)
43.3 操作步骤 …… (596)
43.4 计算、制图和记录 …… (597)
44 十字板剪切试验 …… (599)
44.2 电测式十字板剪切试验 …… (599)
44.3 机械式十字板剪切试验 …… (599)
45 标准贯入试验 …… (601)
45.2 仪器设备 …… (601)
45.3 操作步骤 …… (602)
45.4 计算、制图和记录 …… (603)
46 静力触探试验 …… (606)
46.1 一般规定 …… (606)
46.2 仪器设备 …… (606)
46.3 操作步骤 …… (609)
46.4 计算、制图和记录 …… (611)
47 动力触探试验 …… (614)
47.1 一般规定 …… (614)

47.2 仪器设备 …… (615)
47.3 操作步骤 …… (617)
47.4 计算、制图和记录 …… (617)
48 旁压试验 …… (621)
48.1 一般规定 …… (621)
48.2 仪器设备 …… (621)
48.3 操作步骤 …… (621)
48.4 计算、制图和记录 …… (623)
49 载荷试验 …… (627)
49.1 一般规定 …… (627)
49.2 平板载荷试验 …… (627)
49.3 黄土浸水载荷试验 …… (630)
49.4 螺旋板载荷试验 …… (631)
50 波速试验 …… (636)
50.1 一般规定 …… (636)
50.2 仪器设备 …… (636)
50.3 操作步骤 …… (638)
50.4 计算、制图和记录 …… (641)
51 化学分析试样风干含水率试验 …… (644)
51.1 一般规定 …… (644)
51.2 仪器设备 …… (644)
51.3 操作步骤 …… (644)
52 酸碱度试验 …… (645)
52.3 操作步骤和记录 …… (645)
53 易溶盐试验 …… (646)
53.2 浸出液制取 …… (646)
53.3 易溶盐总量测定(质量法) …… (647)
53.4 碳酸根(CO_3^{2-})及重碳酸根(HCO_3^-)的测定(双指示剂中和滴定法) …… (647)

53.5 氯离子(Cl^-)的测定(硝酸银滴定法) …… (648)
53.6 硫酸根(SO_4^{2-})的测定(EDTA 络合滴定法或比浊法) …… (648)
53.7 钙离子(Ca^{2+})的测定(EDTA 法) …… (649)
53.8 镁离子(Mg^{2+})的测定(钙镁合量滴定法) …… (649)
53.9 钠离子(Na^+)和钾离子(K^+)的测定(火焰光度法) …… (649)
54 中溶盐石膏试验 …… (651)
54.1 一般规定 …… (651)
54.3 操作步骤 …… (651)
55 难溶盐碳酸钙试验 …… (652)
55.1 一般规定 …… (652)
55.3 气量法 …… (652)
56 有机质试验 …… (653)
56.1 一般规定 …… (653)
57 游离氧化铁试验 …… (654)
57.1 一般规定 …… (654)
57.3 操作步骤 …… (654)
58 阳离子交换量试验 …… (655)
58.2 氯化钡缓冲液法 …… (655)
59 土的 X 射线衍射矿物成分试验 …… (656)
59.1 一般规定 …… (656)
59.3 操作步骤 …… (656)
60 粗颗粒土的试样制备 …… (657)
60.1 一般规定 …… (657)
60.3 操作步骤 …… (657)
61 粗颗粒土相对密度试验 …… (662)
61.1 一般规定 …… (662)
61.2 仪器设备 …… (662)
61.3 操作步骤 …… (663)
61.4 计算和记录 …… (663)

62 粗颗粒土击实试验 …… (664)
62.1 一般规定 …… (664)
62.3 操作步骤 …… (664)
63 粗颗粒土的渗透及渗透变形试验 …… (665)
63.1 一般规定 …… (665)
63.2 仪器设备 …… (665)
63.3 操作步骤 …… (666)
63.4 计算、制图和记录 …… (667)
64 反滤试验 …… (668)
64.2 无黏性土的反滤试验 …… (668)
64.3 黏性土的反滤试验 …… (668)
65 粗颗粒土固结试验 …… (670)
65.2 仪器设备 …… (670)
65.3 操作步骤 …… (670)
66 粗颗粒土直接剪切试验 …… (671)
66.2 仪器设备 …… (671)
66.3 操作步骤 …… (672)
66.4 计算、制图和记录 …… (674)
67 粗颗粒土三轴压缩试验 …… (675)
67.1 一般规定 …… (675)
67.2 仪器设备 …… (675)
67.3 无黏性粗颗粒土三轴压缩试验 …… (675)
67.4 黏质粗颗粒土三轴压缩试验 …… (678)
68 粗颗粒土三轴蠕变试验 …… (679)
68.1 一般规定 …… (679)
68.2 仪器设备 …… (680)
68.3 操作步骤 …… (680)
68.4 计算、制图和记录 …… (681)
69 粗颗粒土三轴湿化变形试验 …… (682)

69.1 一般规定 …… (682)
69.3 操作步骤 …… (682)
69.4 计算、制图和记录 …… (683)

1 总　　则

1.0.1 《土工试验方法标准》GB/T 50123—1999(以下简称"原标准")自1999年实施以来,已有十多年时间,在这期间,岩土工程有一定的发展,要求提供更多、更可靠的计算参数和判定指标,同时,测试技术也有进步,因此,有必要对原标准进行修改,使各系统的土工试验有一个能满足岩土工程发展需要的试验准则,使所有的试验及试验结果具有一致性和可比性。

1.0.2 水利、公路、铁路、冶金等系统均有相应的土工试验规程,基本内容与本标准相同,但有些试验方法使用条件不同,为此在一些具体的参数或规定上有特殊要求时,允许以相应的专业标准为依据。

1.0.3 土工试验资料的分析整理,对提供准确可靠的土性指标是十分重要的。内容涉及成果整理、土性指标的选择,并计算相应的标准差、变异系数或绝对误差与相对误差指标等。根据误差分析,对不合理的数据进行研究、分析原因,或有条件时,进行一定的补充试验,以便决定对可疑数据的取舍或改正。为此,列入附录A。

3 基本规定

3.0.1 土工试验所用的仪器应符合现行国家标准《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》GB/T 15406 的规定。根据国家计量法的要求，土工试验所用的仪器设备应定期检定或校验。对通用仪器设备，应按有关的检定或校验规程进行，对专用仪器设备可参照国家现行相关标准进行校验。

4 试样制备和饱和

4.1 一般规定

4.1.2 本标准包括扰动土、原状土的试样制备及试样饱和的一般方法。对于粗颗粒土，在本标准中另列了一项“粗颗粒土的试样制备”。

4.1.3 为了控制制备试样的均匀性，减少试验数据的离散性，一般是用含水率和密度作为控制指标。对扰动土制备一组试样的密度和含水率的允许误差，不能像原状土试样中所规定的一样，所以在标准中不能单规定各试样之间的允许误差，还应规定试样与所要求的密度、含水率的允许误差。本标准规定原状土样同一组试样的密度最大允许差值应为$\pm 0.03 g/cm^3$，含水率最大允许差值应为$\pm 2\%$；扰动土样制备试样密度、含水率与制备标准之间最大允许差值应分别为$\pm 0.02 g/cm^3$与$\pm 1\%$。由于原状土的均匀性是反映天然土体的状态，非人工所能控制，因此，同一组试样的密度和含水率的差值比扰动土试样的稍大一些。

4.3 扰动土试样预备程序

4.3.1 细粒土样预备程序应符合下列规定：

3 对碾散后的黏质土样和砂质土样，应进行过筛程序。筛孔径的大小取决于试验所用的仪器容器的大小。根据已有的试验研究表明：用于直接剪切试验中的试样颗粒最大粒径，不应大于剪切盒内径的1/20(以剪切盒内径为6.18m计)，土样需过2mm筛。对于无侧限压缩、三轴压缩(直径小于10cm)等试验，试样颗粒最大粒径与试样直径的比值为1/8～1/12。对压缩试验，试样最大颗粒粒径为容器高度的1/6～1/8。根据目前一般所用的固结仪，其容器高

度为2cm，用过2mm筛的土样是可以的，又鉴于粒径2mm又恰为砂粒的上限，因此，土样制备中统一规定直剪及固结试验扰动土过2mm筛进行试样制备。物理性试验的土样过0.5mm筛，击实试验的土样过5mm筛或20mm筛。

4.3.2 粗粒土样预备程序应符合下列规定：

2 砾质土的过筛。砾质土有的是无黏性松散土，有的是黏粒附于砾粒上具有黏性的土。前者可以稍加研磨而后过筛。后者如用碾磨粉碎的方法，不但使大颗粒受到破坏，而且黏附于砾石上的黏土粒也不易脱粒，影响颗粒分析成果。根据试验资料，同样的砾质土，干过筛与湿过筛（即浸泡以后水中过筛）的结果，在黏粒含量方面有很大的区别。如对一种砾质粗砂，干过筛黏粒含量仅20%，湿过筛则黏粒含量增到39%，说明这种砾质土是不能用干过筛的，否则影响筛分结果。属于砾质土的风化土（如风化破碎等），使用水浸透后过筛的方法，避免在研磨时使岩石破碎，但由于岩石风化程度和性质不同，是否均可用水浸泡，应视具体情况确定。

湿过筛对于具有黏性的砾质土固然是比较好的方法，但手续既烦琐，又费时间。所以为了省掉一次过筛程序，在制备土样时仅过2mm筛，免去过5mm筛的程序。

4.4 扰动土试样制备

4.4.2～4.4.4 关于扰动土试样的制备，以往通常用击实法将土样击实后再切成试样，这样做往往因分层击实，试样上、下密度及土体结构情况不好，为此要求以单层击实最佳。

目前常用的击样法是将土样用击实方法直接在环刀中击成需要密度和含水率的试样，也有单位用压样器来制备试样。试样制备方法对抗剪强度的影响随土质情况、饱和方法及开始含水率等条件而变化。试样制备龄期会对抗剪强度有影响，但试样一经压密此影响即消失，故在实际中可忽略不计。标准中对扰动土样制

备，将击样法、压样法和击实法均列入，以备使用单位根据具体情况选用。但单层击实法（用小面积锤）中，以控制击实高度来代表以锤击的功能控制土样的密度，这样是比较易于控制试样的密度。压样器在各使用单位形式不一，有的活塞有排气孔，有的带有透水板，有的采用有上下活塞两面压样的。

4.5 原状土试样制备

4.5.1～4.5.3 原状土的开土、切削、土样描述强调了对土样质量的鉴别。为了保证试验成果的可靠性，质量不符合要求的原状土样不能做力学性试验。

4.5.6 关于试样制备记录问题。为了便于计算和与制备标准比较，在标准中增列了原状土开土记录及扰动土试样制备记录。鉴于原状土开土时的土样描述对于试验成果的分析有很大的用处，所以增列了“原状土开土记录”，内容包括：试样编号、取土高程、取土深度、包装与扰动情况、颜色、气味、结构、夹杂物，其他的描述可记载在“其他”一栏中。

4.6 试 样 饱 和

4.6.2 毛管饱和法应按下列步骤进行：

5 饱和度的大小对渗透试验、固结和剪切试验的成果均有影响。对于不测孔隙水压力的试验，一般认为饱和度大于95%即为饱和。对于需要测试孔隙水压力参数的试验，如三轴压缩试验、应变控制加荷固结试验，对饱和度的要求较高（S_r为98%以上），宜采用二氧化碳或反压力饱和方法。

5 含水率试验

5.1 一般规定

5.1.1 本标准将烘干法作为室内试验的标准方法。标准方法一般是要较长时间才能测定含水率，效率低。在填方和土坝等施工质量管理中，常常要求很快得出填土的含水率，此时，可采用酒精燃烧法快速测定含水率。

5.1.2 对含有机质的土，由于在105℃～110℃下经长时间烘干后，有机质特别是腐殖酸会在烘干过程中逐渐分解而不断损失，使测得的含水率比实际的含水率大，土中有机质含量越高误差就越大。故本标准适用于有机质含量不大于干质量5%的土，当土中有机质含量在5%～10%之间，仍允许采用本标准进行试验，但需注明有机质含量，以作参考。

5.2 烘 干 法

5.2.2 烘干法试验应按下列步骤进行：

1 关于代表性试样选取及试样数量问题。进行含水率试验时，常因各种因素影响试验成果：如土层的不均匀，试样数量过少，扰动土样（如风干土）拌和不匀，钻探取土时取土器和筒壁的挤压，土样在运输和存放期间保护不当等。为此，选取含水率试验的试样可根据试验目的和要求而定。若为了了解全土层综合而概略的天然含水率，可沿土层剖面竖向切取土样，拌和均匀测定其含水率；如是配合压缩、抗剪强度、渗透试验，应在切取试样环刀的上下两面选取土样，这样测得含水率的结果可能由于土样层次不均有所差异，但有助于了解土层的真实情况和对试验成果的分析。

关于试样的数量问题。对烘干法，为使试验结果准确可靠，同

时考虑到烘焙时间的长短，细粒土规定为 15g～30g；砂质土或砾质土因持水性较差，颗粒大小相差悬殊，含水量易于变化，所以试样应多取一些。

5.2.4 关于平行试验和平行差值问题。标准采用平行试验的目的是为了避免操作中间发生的错误。对原状土通过平行试验还可进一步了解含水率的均匀程度。为了保证试验准确度，规定平行试验的允许误差是合理的。对于烘干法，允许误差规定见表 5.2.4。

5.3 酒精燃烧法

5.3.2 酒精燃烧法试验应按下列步骤进行：

1 酒精燃烧法多为施工质量控制所采用，为使酒精用量不过大，根据实践经验，黏土试样的数量为 5g～10g。

5.3.3 对酒精燃烧法，标准中规定了平行测定而未规定允许误差的范围，这是因为该方法准确度较差，可以参考烘干法的规定，斟酌采用。

6 密度试验

6.1 一般规定

6.1.2 土的密度是单位体积的土质量。按定义，测定密度的方法主要是以测定土体积的方法而命名，如环刀法、蜡封法。

6.2 环刀法

6.2.4 为了保证试验的可靠性，对本试验方法规定了平行试验，同时最大允许平行差值应为$\pm 0.03 g/cm^3$，这与本标准第4章的规定基本一致。当平行差值超过允许范围时，需核实所取试样的代表性，如有异常，则重新进行测定；如无异常，则应分别列出两次测定结果，以备选用。

6.3 蜡封法

6.3.2 蜡封法试验应按下列步骤进行：

2 土样浸入熔解的蜡中密封时，如果蜡的温度过高，对土样的含水率和结构都会造成一定的影响，而温度太低会使蜡熔解不均匀，不易封好蜡皮。故标准规定蜡的温度控制到刚过熔点。

封蜡时为避免易碎裂土样的扰动和有气泡封闭在土与蜡中间，采用将土样一次徐徐沉浸在蜡中。

3 蜡封试样在水中的质量与水的密度有关，水的密度随温度而变化，条文中规定测定水温的目的是为了消除因水密度变化而产生的影响。

6.3.4 本条规定的理由与第6.2.4条相同。

7 比重试验

7.1 一般规定

7.1.1 在工程建设中，作为建筑材料和地基的土，有细料和粗料（以粒径5mm为界限）之分，因此标准中根据土颗粒粒径大小分别采用比重瓶法、浮称法和虹吸筒法。浮称法所测结果较为稳定，但当粒径大于20mm的粗粒较多时，用该方法将增加试验设备，室内使用不便，故规定粒径大于5mm的试样中粒径大于20mm的颗粒含量小于10%时，用浮称法；粒径大于20mm的颗粒含量大于10%时，用虹吸筒法。

7.1.2 标准中规定一般土粒的比重试验用水为纯水，对于含有易溶盐、亲水性胶体或有机质的土，须用中性液体代替纯水测定。这是因为含有机质、水溶盐、亲水性胶体的土与水相互作用时，使靠近土粒表面的水密度大，使一定容积内的瓶、水、土总质量增大，比重值亦相应增大。对含水溶盐的土，则由于盐类部分或全部溶于水中，同样会使瓶、水、土总质量增大，也会使比重值增大。关于中性液体目前多采用煤油，也有采用苯或酒精的。

7.2 比重瓶法

7.2.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 比重瓶大小的选择。目前各单位多采用100mL的比重瓶，也有采用50mL的。通过试验比较，认为瓶的大小对比重成果影响不大。用100mL的比重瓶可多取些试样，使试样的代表性和试验的准确度可以提高。本标准建议采用100mL的比重瓶，但也允许采用50mL的比重瓶。

7.2.3 比重瓶法试验试验应按下列步骤进行：

1　用比重瓶法测定土粒比重，目前绝大多数试验室都采用烘干土，认为可减少计算中的累计误差，也适合于含有机质、易溶盐、亲水性胶体等的土用中性液体测定。同时认为烘焙对土中胶体的影响并无害处。因此本标准中采用烘干土。但也有人认为试样在高温下烘焙会引起土中胶体的变化，也会引起有机质土中腐殖物烧失，如美国陆军水道实验站工程手册中提到特别是对那些有机质含量高的土一经烘干后往往难以重新湿润。对这些土，首先可不预先烘干即做试验，待试验结束后，再测定试样的烘干质量。因此，在实际工作中如遇有某些土用烘干土测定会影响试验成果时，也可采用风干土或天然土用纯水测定，试验结束后，再测定试样的烘干质量。

2　排气方法。标准中仍选用煮沸法为主，此法简单易行，效果好。如需用中性液体时，则采用真空抽气法。砂土煮沸时砂粒容易跳出，亦允许用真空抽气法代替煮沸法。

7.3　浮　称　法

7.3.7　粗、细土粒混合测定问题。天然土常为粗细颗粒混合而成，对这类土的比重应区别情况进行测定，以不影响准确度为原则。当其中粒径大于 5mm 的粗粒含量较少时，可直接用比重瓶法一次测定。也允许将少量粒径大于 5mm 的颗粒打碎拌和均匀后取样，颗粒打碎有助于排除孔隙里的空气。当粒径大于 5mm 的粗粒含量较多时，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。

8 颗粒分析试验

8.1 一般规定

8.1.2 颗粒大小分析的试验方法主要有两大类：一是机械分析法，如筛析法；二是物理分析法，如密度计法、移液管法、沉淀法等。本标准根据大规模生产的需要，除选入筛析法和密度计法外，并增加移液管法，以便在细粒土的分析中更好地根据实际情况进行选择。

8.2 筛析法

8.2.2 筛析法试验应按下列步骤进行：

1 关于试样的用量。以往有的标准规定按粒径大于2mm的含量百分数来确定取样量。根据以往经验，按上述方法确定试样用量，在实际工作中是不便于掌握的。鉴于土样中粗颗粒的含量(以质量计)一般与颗粒的大小有关，因而以最大颗粒粒径为标准来确定试样的用量，比较直观易于掌握。

8.3 密度计法

8.3.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 密度计型号的选择。目前通常采用的密度计有甲、乙两种，其制造原理及使用方法并无不同之处。甲种密度计读数系表示1000mL悬液中的干土质量；乙种密度计读数系表示悬液比重，有些单位为了计算时方便而采用甲种密度计。如果校验准确，两种密度计的效果相同，故标准不作硬性规定。

必须指出，由于这两种密度计刻度所采用的悬液温度标准不同(20℃/20℃，20℃/4℃)，因此在密度计校验以及土量百分数计

算公式中，都有严格区别，如不加以注意，将会造成错误。本标准采用20℃/20℃标准。

8.3.3 密度计法试验应按下列步骤进行：

1 试样的状态。黏质土颗粒分析的结果主要取决于分析时试样状态、制备方法和分析方法等因素。试样通常可分为天然湿度、风干和烘干三种状态。

实践证明，用天然状态下的试样比风干和烘干状态的试样所得的黏粒含量均偏高。因为黏土中往往有非可逆性的胶体物质，经过干燥后细粒能胶结成团，难以再度分散。所以，一般来说，用天然湿度状态下的试样分析更符合实际。但是在实际工作中，往往在土样取出后，特别是坝料，在查勘时所取得的扰动土样，经过长途运送，历时较长，无法保持其天然含水率。因此，原则规定密度计法和移液管法应采用天然含水率的土样进行。若土样无法保持其天然含水率时，允许用风干或烘干土样进行分析。但应该注意，同一地区同一工程用途应该采用相同状态的土样进行分析，以便比较。

2 本标准规定了当试样中易溶盐含量大于总质量的0.5%时已属于盐渍土，须经过洗盐手续，才能进行颗粒分析试验。

当用含有易溶盐的试样进行颗粒分析时，对试验成果有较大影响，见表1。从表1中可见，未经洗盐的试样与洗盐后的试样相比，未洗盐的粉粒含量高，黏粒含量低；洗盐后粉粒含量低，黏粒含量高。

表1 盐渍土洗盐与不洗盐的比较

省（区）	土样号	含盐量（%）	粉粒含量（%）0.05mm～0.005mm		黏粒含量（%）＜0.005mm	
			洗盐前	洗盐后	洗盐前	洗盐后
新疆	146	5.26	22.33	6.00	9.08	18.61
	147	14.66	17.23	13.10	40.04	41.14

续表 1

省（区）	土样号	含盐量（%）	粉粒含量（%）0.05mm～0.005mm		黏粒含量（%）<0.005mm	
			洗盐前	洗盐后	洗盐前	洗盐后
甘肃	133	2.10	62.20	47.50	1.50	14.00
	142	2.19	54.50	43.50	0.50	14.00
	143	1.11	24.99	22.47	17.99	21.34
	149	5.13	20.79	7.21	5.25	16.52
	156	0.88	41.50	34.70	9.50	13.00

关于洗盐的方法，一般采用过滤法。对黏粒含量较多的试样，可用抽气过滤法，以加快过滤的速度。

洗盐的检验方法，标准上列了加化学试剂的观测法。也可采用电导法，该法效率高，操作方便，具体操作参考有关手册。

6、13 关于过筛次序问题。密度计法分析中，试样过 0.075mm 洗筛的步骤，有的主张在分析前进行，有的主张在分析后进行。前者一方面是根据一般文献规定，另一方面考虑到土中粒径大于 0.075mm的土粒过多时，如不先过筛，则在沉降过程中粗粒互相碰撞，将会引起悬液扰动，且当粗粒下沉时易将细粒曳带一起下沉，影响分析结果的准确性。主张分析后过筛的理由是：一方面在操作上可以省去一些繁杂的冲洗手续，另一方面由于在筛上经过反复冲洗，易使土粒损失，这些均能影响结果。

以上两种主张都有根据，但也都有缺点。因此，为了提高效率而又确保质量，本标准规定：如土中粒径大于 0.075mm 的颗粒含量约超过试样总量的 15%时，应将其全部倒至 0.075mm 筛上冲洗，至筛上仅留粒径大于 0.075mm 的颗粒为止。反之，可不经过筛冲洗，直接全部倒入量筒。但在试验程序中应妥为安排，以免混乱，发生错误。

8 关于土的分散标准和分散剂品种问题。细粒土的土粒可

以分为原级颗粒和团粒两种。团粒是由颗粒集结而成，它是在沉积过程中以及其后的生存期间内形成的。组成黏土的原级颗粒和团粒，总称之为结构单元。制备试样时，随着处理过程的加剧（例如延长煮沸时间等），黏粒含量越来越大，直至某一极限。黏粒含量的增大，说明一部分团粒已被分散。

对于颗粒大小分析中试样分散标准问题，有的主张用全分散法，理由是颗粒分析本身应该反映土的各种真实原级颗粒的组成；有的主张用半分散法和微集成法，以符合实际土未被完全分散的情况。

本标准采用半分散法（用煮沸法）为主，主要是考虑到此法在一般建筑工程和地质工程做颗粒分析时惯用。这种分散方法所得的结果是土的结构单元不受任何破坏时，其粒组所占土质量的百分数。

关于分散剂品种，国内有不同意见，主要反映在：①从不同土类的角度出发，选用合适的分散剂；②从不同的分散理论角度出发，如有的从土悬液 pH 值的大小来考虑，采用不同的分散剂；有的从黏土的离子交换容量能力来考虑，选用合适的分散剂。

从目前国际上的趋势看，采用强分散剂（如六偏磷酸钠，焦磷酸钠）不再考虑不同土类用不同分散剂的趋势，以便统一标准和方法。

国内大多数标准也均以钠盐作为分散剂，以六偏磷酸钠使用最广；使用六偏磷酸钠和焦磷酸钠亦不少，还有些单位使用 25% 氨水作分散剂。

分散剂的选择应考虑各种不同土类的黏土矿物组成、结晶的性质及浓度，同时又要考虑到试验数据的可比性及国内外交流的需要。根据我国以往对分散剂使用的现状及我国土类分布的多样性，本标准规定了对一般土用 4%六偏磷酸钠作为分散剂。至于特殊土类，要选择不同的合适的分散剂。

10 密度计读数的选择目前有两种方法：一种是全曲线分析

读数法，即经 0.5min、1min、2min、5min、15min、30min、60min、120min、180min、1440min……测读密度计读数。其中，0.5min、1.0min、2.0min 读数后均需重新搅拌。另一种是五点法，即测定 1min、5min、30min、120min 和 1440min 的 5 个读数。这种方法节省了大量的计算工作量，又免去了多次在静止的悬液中放取密度计对悬液的扰动，减少了产生误差的因素。另外也可根据试样情况或实际需要，可适当增加密度计读数或缩短最后一次读数的时间。

8.4 移液管法

8.4.2 移液管法试验应按下列步骤进行：

1 关于试样的用量。根据对移液管法进行研究的结果：当悬液浓度在 0.5%～3%范围时，各粒组的含量没有显著出入；而当悬液浓度增至 4%尤其是 5%时，则 0.25mm～0.05mm 粒组含量增加，并相应地减少了黏粒含量。因此，当用移液管法分析时，试样用量可酌情减少，规定用量黏土为 10g～15g，砂土为 20g。

3 移液管法是根据各种粒径在一定时间后下沉距离的关系来计算吸取悬液的时间和距离。因此，本标准是固定粒径和吸取深度(10cm)来计算时间。但需要说明的是，在计算前还要确定土粒比重及悬液温度。为了方便，可事先制备土粒在不同温度静水中某一深度(10cm)沉降时间表，以便查阅。

8.4.3 移液管法主要是从量筒中吸取一定体积的悬液注入烧杯，然后烘干、称量。因此，在悬液中小于某一约定粒径的土粒质量 m_0 等于被吸的土粒干质量 m_{dx} 乘以悬液总体积 V_x 与被吸悬液体积 V_x' 之比，即：

$$m_0 = m_{dx}\frac{V_x}{V_x'} \tag{1}$$

小于某一粒径的土粒质量的百分数为：

$$X(\%) = \frac{m_0}{m_d} = \frac{m_{dx}V_x}{m_d V_x'} \times 100 \tag{2}$$

9 界限含水率试验

9.2 液塑限联合测定法

9.2.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 液塑限联合测定仪的读数显示部分分别列有光电式、游标式和百分表式几种，并在试验进行中均有注明，可根据具体情况选用。

9.2.2 液塑限联合测定法试验应按下列步骤进行：

1 为了尽量减少人为影响，使试样更能反映实际情况，本标准规定，原则上用天然含水率的土样制备试样。但由于有时土样在采取及运送过程中湿度可能已经变化，或者由于土质不均匀，选取代表性的土样有困难。因此，本标准允许用风干土样制备试样。当用天然含水率的土样进行联合测定时，视天然含水率的大小，从高含水率做到低含水率。

2 液塑限联合试验法三个测点的分布应使其间距尽量大些，在图上比较均匀地分布。一般锥体下沉深度在 2mm～17mm 之间。因此，标准规定“分别按接近液限、塑限和二者的中间状态制备不同稠度的土膏，静置湿润，静置时间可视原含水率的大小而定”。

6 圆锥沉入土中读数时间标准。对中、高液限的黏质土和粉质土，锥体沉入后，能在较短时间内稳定，对比试验的资料表明：对上述土类，5s、15s、30s 的下沉读数保持基本不变；而对低液限粉质土，由于试样在锥体作用下发生排水，使锥体继续下沉，有时长达数分钟后才能稳定。若待锥体下沉持续很长时间再读数，因含水率及强度均有变化，求得的结果就难以代表试样的真实情况，因此，原则上当锥体由很快下沉转变为缓慢蠕动下沉时就读数，但这

很难做到。对此资料表明：对于低液限土，下沉深度随时间增加。在高含水率时，5s 与 15s 下沉深度最大差值可达 2mm；但低含水率时差值较小，一般在 0.5mm 上下，由此引起的含水率差值并不太大（因 $\lg w$-$\lg h$ 直线的斜率大），一般情况下不超过 1%。个别情况略大于 1%。为了尽可能避免蠕动影响，标准规定以 5s 为锥体下沉的测读时间标准。

9.2.4 液限是土体处于黏滞塑性状态时的含水率，在该界限时，土体出现一定的流动阻力即最小可量度的剪切强度，理论上是强度“从无到有”的分界点。这是各种测试方法等效的标准。根据以往的研究，卡萨格兰特（Casagrande）得到土在液限状态时的不排水强度约为 2kPa～3kPa。而使用 76g 圆锥，下沉深度 10mm 时测得土的强度为 5.4kPa，比其他液限标准下的强度高几倍（见表 9.2.4）。实际上，76g 锥下沉深度 10mm 对应的试样含水率不是土的真正液限，不能反映土的真正物理状态，因此，必须改进，使液限标准向国标上通用标准靠拢。本标准采用与碟式仪测得液限时土的抗剪强度相一致的方法来确定圆锥仪的入土深度，作为液限标准。

碟式仪测得液限时对应的抗剪强度如表 2 所示。从表 2 中可以看出：不同的碟式仪（基底材料不同）液限时土样的抗剪强度也不同。国外较多的研究者认为：对各类土，碟式液限时的抗剪强度约为 1.7kPa。该值可作为等效标准。

表 2 碟式仪液限土的不排水强度

基座材料	抗剪强度 C_u（kPa）	资料来源
硬橡胶	2.55	Seed 等人（1964）
胶木	2.04～3.00	Casagrande（1958）
	1.12～2.35	Norman（1958）
	1.33～2.45	Youssef 等人（1965）
	0.51～4.08	Karlsson（1977）

续表 2

基座材料	抗剪强度 C_u(kPa)	资料来源
橡胶 (英国标准)	0.82～1.68	Norman(1958)
	0.71～1.48	Skempton, Northey(1952)
	1.02～3.06	Skopek, Ter-Stepanian(1975)

原水利电力部于 1983 年组织单位对 16 种不同土类，用 76g、80g、100g 的圆锥仪进行液限、塑限对比试验，结果表明，以 76g 锥下沉深度 17mm 和 100g 锥下沉深度 20mm 时的含水率作为液限与美国 ASTM D423 碟式液限仪测得液限时土的强度(平均值)一致，说明这两种标准与 ASTM 标准等效。鉴于目前使用 76g 锥较多，本标准将 76g 锥下沉深度 17mm 时的含水率作为液限标准。另外从实用角度出发，本标准既采用 76g 锥下沉深度 17mm 时的含水率定为液限的标准，又采用下沉深度 10mm 时的含水率定为 10mm 液限标准。使用于不同目的，当确定土的液限值用于了解土的物理性质及塑性图分类时，应采用碟式仪法或 17mm 时的含水率确定液限；现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 确定黏性土承载力标准值时，按 10mm 液限计算塑性指数和液性指数，是配套的专门规定。

使用圆锥仪测定塑限，是以滚搓法作为比较的，交通部公路系统曾进行了大量对比试验，得出了不同土类塑限时的下沉深度和液限含水率的关系曲线，提出对黏性土用双曲线确定塑限时锥的下沉深度 h_p，对砂类土用正交三次多项式曲线确定 h_p(图 1)，然后根据 h_p 值从本标准图 9.2.3 查得含水率即为塑限。原水利电力部经过对比试验，绘制圆锥下沉深度与塑限时抗剪强度的关系曲线有一剧烈的变化段(图 2)，引两直线的交点，该点的下沉深度约为 1.8mm，相对应抗剪强度约 130kPa，与国外塑限时的强度接近，认为该点的含水率即为塑限。为此，建议 76g 锥下沉深度 2mm 时的含水率定为塑限。

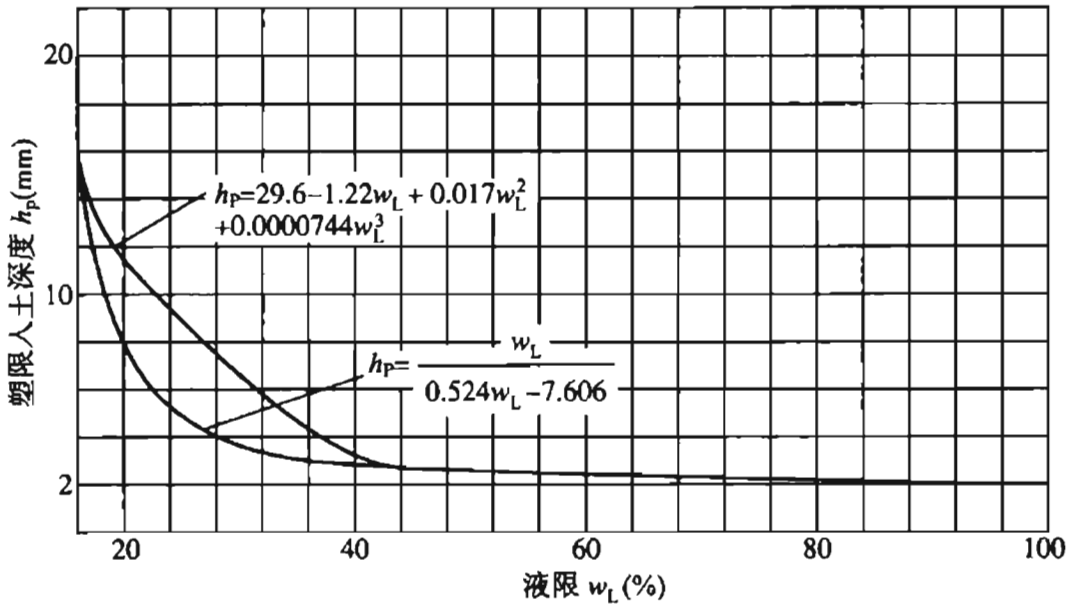


图 1　圆锥下沉深度与液限关系曲线

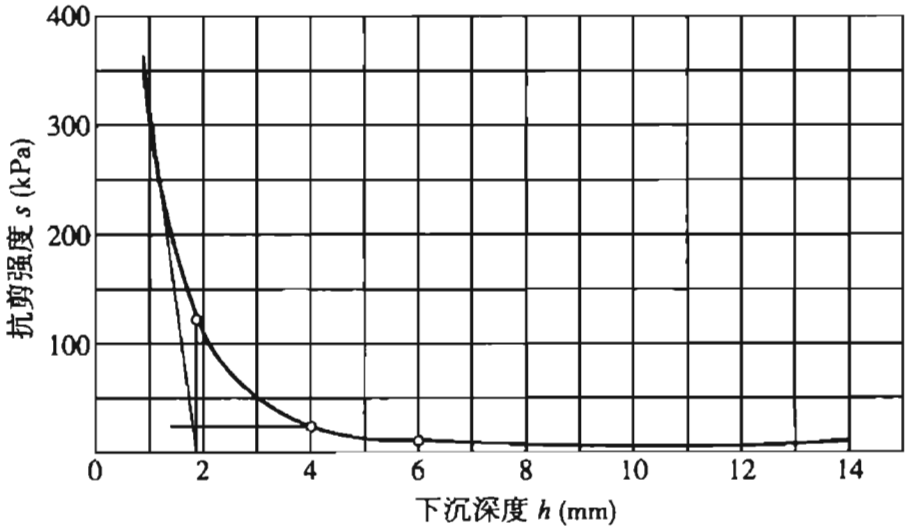


图 2　圆锥下沉深度与塑限时抗剪强度关系曲线

9.3　碟式仪液限法

9.3.1　本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1　碟式液限仪是卡萨格兰特为使液限试验标准化加以改进的仪器。各国使用的碟式仪的制造材料(尤其是基座材料)和划刀规格不尽相同，本标准采用国际上应用较广的 ASTM 标准的蝶式

仪及 A 型划刀。

9.4 搓滚塑限法

9.4.2 搓滚塑限法应按下列步骤进行：

4 滚搓法测定塑限时，各国的搓条方法不尽相同，土条断裂时的直径多数采用 3mm，美国 ASTM D424 规定为 1/8in(约 3.2mm)，我国一直使用 3mm，故本标准仍规定为 3mm。对于某些低液限粉质土，始终搓不到 3mm，可认为塑性极低或无塑性，可按细砂处理。

9.5 缩 限 试 验

9.5.2 缩限试验应按下列步骤进行：

2 分层填装试样时，要切实注意不断挤压拍击，使其充分排气，增加试样的饱和度，否则不符合土体积的收缩量等于水分的减少量的基本假定，导致计算结果失真，缩限指标不准确。

10 崩解试验

10.0.1 本试验的目的是测定具有结构性的黏质土体在水中的崩解速度。用土作为建筑材料的工程，直接处于大气中，遭受着气候、水位变化的作用，土体易产生崩解的现象，以至于破裂、剥落或降低其强度和稳定性。另外在湿法筑坝的设计与施工中，需要了解土料崩解的速度，作为取舍料场的依据。因此测定土的崩解性能，是有重要意义的。

10.0.3 崩解试验应按下列步骤进行：

1 试样的选用取决于实际工作条件，如为地基上应采用原状土样；如为填筑的堤坝，应取扰动土样，并控制一定的密度和含水率，制备成试样进行试验。在行业标准《水中填土筑坝施工技术暂行规范》中，规定以 5cm×5cm×5cm 的立方土体进行崩解试验，作为选择土料标准之一。

4 试验中主要测定的指标是土的崩解速度，因此，需要确定读数的时间间隔。

11 毛管水上升高度试验

11.1 一般规定

11.1.1 毛管水上升高度试验可以求出土内毛管水的上升高度及其上升速度，用于估测地下水位升高时，某些地区是否会变成沼泽或盐碱化，建筑物有无被浸湿的可能性等问题，并用来推算降低地下水位的必要深度。

目前测定毛管水上升高度方法可以综合为两类：正水头作用的和负水头作用的。试验原理都是根据毛管水的弯液面所能支持的水柱重力而计算出毛管水的上升高度。

正水头作用的试验法系使土中毛管水弯液面支持上升的水柱。这类方法中有直接观测法（适用于砂土）和郝赛法（适用于黏质土）。负水头作用的试验法是使土中毛管水弯液面支持下降的水柱。这类方法中有土样管法，适用于原状土或扰动的细砂、粉土及黏质土，不适应于黏性大的黏土。本标准只列入较通用易行的直接观测法和土样管法。其他方法可参阅有关文献。

11.2 直接观测法

11.2.2 直接观测法试验应按下列步骤进行：

4 用直接观测法进行毛管水上升高度试验可以求出毛管水上升高度和速度的关系。试验过程中可以随时绘制高度与时间的关系曲线。当曲线已成平缓或趋于平缓时，可依延长线的趋势估计毛管水的上升高度。

11.3 土样管法

11.3.2 土样管法试验应按下列步骤进行：

5 关于水柱下降速度问题。水面下降速度的快慢和打开夹子C(见图11.3.1)的松紧程度有关。在开始试验时夹子C可以稍微松些,使试样右侧测压管内水面的下降速度稍微大些,约每分钟2cm～5cm,至估计水面的降落已达到毛管水上升高度的1/2或1/4时,应将速度降低,调正夹子C的松紧程度,使每分钟下降至1cm,以便准确地测定毛管水上升高度。

12 相对密度试验

12.1 一般规定

12.1.1 相对密度是砂类土紧密程度的指标，对于土作为材料的建筑物和地基的稳定性，特别是在抗震稳定性方面具有重要的意义。相对密度试验适用于透水性良好的无黏性土，对含细粒较多的试样不宜进行相对密度试验，美国 ASTM 规定粒径小于 0.075mm 土粒的含量不大于试样总质量的 12%。美国垦务局规定的宜做相对密度试验的土类如表 3 所示。如遇细粒土(粒径小于 0.075mm)超过总质量的 12%时，分别做相对密度和标准击实试验，当相对密度为 70%对应的干密度小于击实最大干密度的 95%时，则应用击实试验。关于颗粒粒径大于 5mm 的试验，参考粗颗粒土标准。

表 3 宜做相对密度试验的土类

土类	细粒含量(%) <0.075mm	土名	相对密度试验
GW,GP SW,SP	<5	各种级配的纯砂、纯砾	宜
GW-GM, GW-GC GP-GM, GP-GC	<8	砾石含粉土，砾石含黏土	宜
SW-SM, SP-SM SP-QC	<12	砂中含粉土，砂中含黏土	宜
SM,SC	—	砂与粉土混合料，砂与黏土混合料	是否适宜，须视级配及塑性而定，有些 SM 中细粒含量达 16%也宜

12.2 最小干密度试验

12.2.2 最小干密度试验应按下列步骤进行：

1 考虑到砂、砾质土的风干含水率很小，可以认为充分风干与烘干两种状态非常接近，对试验结果影响较小。但试验证明，含水率有少量的增加，对最大孔隙比的测定影响较大，见图 3。故在标准中规定用烘干或充分风干的试样（即风干到稳定状态或近于烘干状态），避免产生误差。

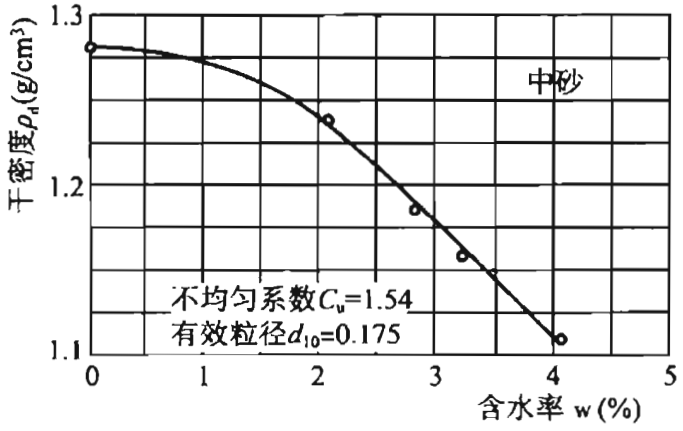


图 3 最小干密度与含水率关系曲线

6 关于最小干密度测定方法。测定最大孔隙比常用的方法有量筒法、漏斗法、松砂器法等。通过比较试验几种方法所得结果相差不大，而各种方法本身也存在不同的问题。因此，本标准选用漏斗法与量筒法，并规定取上述两种方法测得的较大体积值。试验中，试样能否达到最松状态，除试验方法外，还与土的性质、颗粒大小形状及操作熟练程度有关。

12.3 最大干密度试验

12.3.2 根据砂的振动试验得出结论：当砂的含水率相当于饱和度为 0.8 时，砂能得到最好的振动压实；同时，当砂的含水率为零时，与最优含水率时所得到的干密度极相近。美国材料试验学会

(ASTM D2049)是同时采用干法和湿法两种,但在用湿法时还需与干法比较,选择最大的干密度。基于以上原因,本标准规定采用烘干或充分风干试样。

关于最大干密度试验方法问题。测定砂的最大干密度即最小孔隙比,国外采用振动台法,国内以往采用振动锤击法。在制订原标准时,对这两种方法进行了比较,振动台法按美国 ASTM D2049 规定,采用一定的频率、振幅、时间和加重物块,分别进行了干法和湿法试验,试样为均匀的标准砂(中砂)和级配良好的黄砂。试验结果表明:振动锤击法测定的最大干密度比振动台法测得的大。因此,本标准仍以振动锤击法作为最大干密度测定的标准方法。

13 击实试验

13.1 一般规定

13.1.1 原标准规定轻型击实试验适用于粒径小于5mm的黏性土，重型击实试验采用三层击实时，最大粒径不大于40mm。此次修订中增加了大型击实筒在轻型击实试验方法中的使用，标准规定试样最大粒径与试样直径的比值小于1/5。另外对于重型击实筒，最大粒径40mm，即使分三层击实也存在较大超高，因此本标准规定粒径应小于20mm。

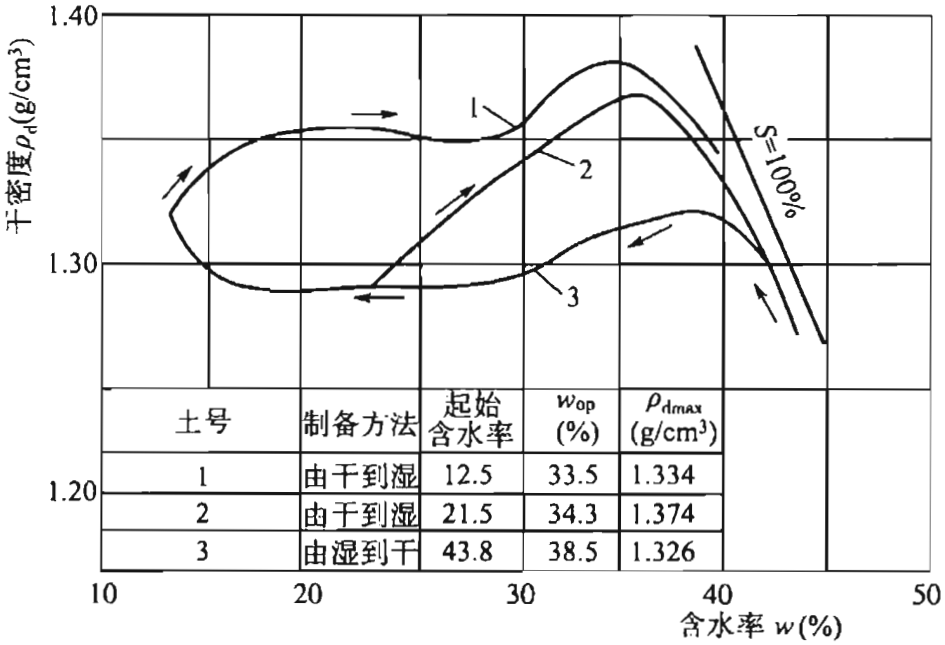
13.1.2 室内扰动土的击实试验一般根据工程实际情况选用轻型击实试验和重型击实试验。我国以往采用轻型击实试验比较多，水库、堤防、铁路路基填土均采用轻型击实试验，高等级公路填土和机场跑道等采用重型击实较多。

13.3 操作步骤

13.3.1 土样制备方法不同，所得击实试验成果也不同。试验证明：最大干密度以烘干土最大，风干土次之，天然土最小；最优含水率也因制备方法不同而不同，以烘干土为最低。这种现象在黏土中表现最明显，黏粒含量越大，烘干对最大干密度影响也越大，这显然是烘干影响了胶粒性质，故黏土一般不宜用烘干土备样。本标准规定采用干法制备和湿法制备两种方法，一般干法以风干居多，也有用低于60℃烘干的。

某些特殊土（如红土），含水率的配制方法对压实影响尤为显著。将天然含水率的土风干为不同含水率的一组试样（称为“由湿到干”）进行击实，与事先将天然含水率的土风干，再加水制备成不同含水率的试样进行击实（称为“由干到湿”），两种制样方法所得

试验成果差异较大。图 4 为天生桥红黏土的击实曲线。



土号	制备方法	起始含水率	w_{op} (%)	ρ_{dmax} (g/cm³)
1	由干到湿	12.5	33.5	1.334
2	由干到湿	21.5	34.3	1.374
3	由湿到干	43.8	38.5	1.326

图 4　天生桥红黏土的击实试验

重型击实试验的试样制备与轻型击实试验相同。只是过筛的筛径和土样数量有所区别。

13.3.2　试样击实应按下列步骤进行：

2　重型击实试验中，为了保证击实筒内中央土层和周围土层所受击实功能相同，在采用机械操作时，击实仪必须具备在每一圈周围击实完后中间加一锤的功能。击实完成后超过筒高的土柱高度称为余土高度。所谓击实关系曲线是指在某一个标准的单位击实功能下，土的干密度与含水率的关系曲线。如果余土高度（超高）等于零（理想状况），击实后土样体积刚好等于击实筒容积，那么，击实曲线就是一条标准功能的等功能曲线。如果击实后余土高度不等，干密度和含水率的关系曲线就不是一条等功能曲线。根据大量试验结果表明，当余土高度不超过 6mm 时，干密度（以余土高度为零时的干密度为基准）才能控制在允许误差范围内。为了保证试验准确度，本标准规定：余土高度不得超过 6mm。

3　击实完成后，如果不先用修土刀沿护筒内壁削挖后扭动护筒，则有可能发生击实土柱被剪断的现象。

5　重复使用土样，对最大干密度和最优含水率以及其他物理性质指标都有一定影响。其原因是：土中的部分颗粒，由于反复击实而破碎，改变了土的级配；其次是试样被击实后要恢复到原来松散状态比较困难，特别是高塑性黏土，再加水时更难以浸透，因而影响试验成果。国内外对此均进行过比较试验，结果表明：重复用土对最大干密度影响较大，差值达 0.05g/cm^3～0.08g/cm^3；对最优含水率影响较小；对强度指标也有影响。国外的资料也表明，由于重复用土，在击实功能小时，最大干密度的差值为 0.02g/cm^3～0.06g/cm^3，击实功能大时，差别更大。

13.4　计算、制图和记录

13.4.6　土料中常掺杂有较大的颗粒如砾石等，这些颗粒的存在，对填土的最大干密度和最优含水率都有一定的影响。由于仪器尺寸的限制，必须将土样过 20mm 筛。因此，当粒径大于 20mm 颗粒土含量小于 30%时，就产生了击实试验中对含粒径大于 20mm 颗粒土的试验结果校正的问题。在一般情况下，黏质土坝料中，粒径大于 20mm 的颗粒质量占总土量的百分数是不大的，这些大颗粒间的孔隙能全部被细粒土所填充，因此，可以根据土料中粒径大于 20mm 颗粒的含量和该颗粒的密度，从过筛土料的击实试验结果来推算原土料的最大干密度和最优含水率。

14 承载比试验

14.1 一般规定

14.1.1 本试验的目的是采用贯入法，通过测定土在承受标准贯入探头贯入土中时相应的贯入阻力，求取扰动土的承载比。本试验方法只适用于室内扰动土的 CBR 试验。由于本试验采用的试样筒高为 166mm，除去垫块的高度 50mm，实际试样高度为 116mm，按三层击实，所以粒径宜控制为粒径不大于 20mm 的土。

14.3 操作步骤

14.3.2 浸水膨胀按下列步骤进行：

2 为了模拟地基土的上覆压力，在浸水膨胀和贯入试验时，试样表面要加荷载块，尽管希望能施加与实际荷载或设计荷载相同的力，但对于黏质土来说，特别是上覆荷载较大时，荷载块的影响是无法达到上述要求的。因此，规定施加 8 块荷载块(5kg)作为标准方法。

4 为预估土料在现场可能出现的最不利情况，贯入试验前一般要将试样浸水使之吸水，国内外的标准均以浸水四昼夜作为浸水时间，本标准也参照使用。当然，也可根据不同地区、地形、排水条件和工程结构等情况，适当改变浸水时间或不浸水，使试验结果更符合实际情况。

14.4 计算、制图和记录

14.4.1 关于计算：

1、2 公式中的分母 7000 和 10500 是原来以 kg/cm^2 表示时的 70 和 105 乘以换算系数($1kgf/cm^2 \approx 100kPa$)而得的。

14.4.2 绘制单位压力(p)与贯入量(l)的关系曲线时，如发现曲线起始部分呈反弯，则表示试验开始时贯入杆端面与土表面接触不好，故应对曲线进行修正，见图 14.4.2，以 O' 点作为修正的原点。

15　回弹模量试验

15.2　杠杆压力仪法

15.2.1　本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

5　本标准将承载板的直径定为50mm是根据公路土工试验标准的规定，因此，杠杆压力仪的加压球座直径也相应定为50mm。

6　由于室内试验回弹变形很小，尤其在加载初始阶段，估读误差大，故测定变形的量表采用千分表。

15.2.4　由于加载开始时的土样塑性变形，得出的 p-l 曲线有可能与纵坐标轴相交不通过原点的位置。如果仍按读数值计算回弹变形，其中将包含一部分塑性变形，故应对读数进行修正。

15.3　强 度 仪 法

15.3.2　强度仪试验应按下列步骤进行：

3　加载后由于土样的微小变形可能会使测力计发生轻微卸载。对于较硬的土，卸载很小可以忽略不计；当土样较软时，可用手稍稍摇动强度仪摇把，补上卸掉的微小压力。

16 渗透试验

16.1 一般规定

16.1.1 规定的两种方法的适用范围：常水头渗透试验适用于粗粒土；变水头渗透试验适用于细粒土。这种规定比较原则，但直观。国外有的标准（如 JIS）规定：常水头渗透试验适用于渗透系数较大的试样：即 $k=1\times10^{-2}$cm/s～1×10^{-3}cm/s；变水头渗透试验适用于渗透系数较小的试样，通常指 $k=1\times10^{-3}$cm/s～1×10^{-6}cm/s。也就是说，上述两种方法仅适用于 $k=1\times10^{-2}$cm/s～1×10^{-6}cm/s 的试样。至于极高和极低透水性的土，需要采用特殊的试验方法或通过间接的推算求取渗透系数。

16.1.2 关于试验用水问题。水中含气对渗透系数的影响，主要是由于水中气体分离，形成气泡堵塞土的孔隙，致使渗透系数逐渐降低，因此，试验中要求用无气水，最好用实际作用于土中的天然水。本标准规定采用的纯水要脱气，并规定水温高于室温 3℃～4℃，目的是避免水进入试样因温度升高而分解出气泡。

16.1.3 对一个试样多次测定的取值标准。根据 6 个单位 467 组渗透试验成果，当 $k=A\times10^{-n}$时，n 值不变，A 的差值小于 1.0 的占 66.3%，小于 2.0 的占 82.6%，大于 2.0 的占 17.4%。根据上述结果，标准中规定了一个试样多次测定的取值标准是：在连续测定 6 次以后，取同次方的 A 值最大与最小的差值不大于 2.0 的 3 个～4 个结果，并取其平均值，作为该试样某一孔隙比下的平均渗透系数。

16.2 常水头渗透试验

16.2.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1　常水头渗透仪主要由装样容器及水头装置组成。水头装置可以采用正压和负压。从结构简单、操作方便、试验结果合理可靠出发，标准所列适合粗粒土的常水头仪器（70型渗透仪）与国外大同小异。标准规定：圆筒内径应大于试样最大粒径的10倍，这是因为若试样粒径相对圆筒内径较大时，圆筒内壁与部分试样的间隙大，可能出现试样边缘部分渗透水增大；另一方面，试样有效截面积会减小，有效水流长度缩短，造成试验有较大的误差。

16.2.3　常水头渗透系数的计算公式是根据达西定律推导的，求得的渗透系数为测试温度下的渗透系数。计算时需要校正到标准温度下的渗透系数。

16.2.4　土的渗透性是水流通过土孔隙的能力，显然，土的孔隙大小决定着渗透系数的大小。因此测定渗透系数时，必须说明与渗透系数相适应的土的密度状态。

试验时应将试样控制在设计要求的孔隙比下，测定其渗透系数，否则试验结果实用意义不大。使试样孔隙比控制在需要值有困难时，可进行不同孔隙比下渗透系数的测定，作出孔隙比与渗透系数的关系曲线，即可查出任意需要孔隙比下的渗透系数。

16.3　变水头渗透试验

16.3.1　变水头渗透试验使用的仪器设备除应符合试验结果可靠合理、结构简单要求外，还要求止水严密，易于排气。常用的仪器设备是变水头渗透仪和负压式渗透仪，为适应各试验室的设备，仪器形式不作具体规定。

16.3.2　变水头渗透试验应按下列步骤进行：

1　试样饱和是变水头渗透试验中的重要问题，土样的饱和度愈小，土的孔隙内残留气体愈多，使土的有效渗透面积减小。同时，由于气体因孔隙水压的变化而胀缩，因而饱和度的影响成为一个不定的因素。为了保证试验准确度，要求试样必须饱和。饱和方法见本标准第4章有关条文。

16.3.3 变水头渗透系数的计算公式是根据达西定律，利用同一时间内经过土样的渗流量与水头量管流量相等推导而得的，求得的渗透系数也是测试温度下的渗透系数，同样需要校正到标准温度下的渗透系数。

17 固结试验

17.1 一般规定

17.1.1 本试验是以太沙基(Terzaghi)的单向固结理论为基础的。对于非饱和土,本试验只用于测定压缩性指标,不能用于测定固结系数。

17.2 标准固结试验

17.2.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定:

2 随着工程建设的发展,以及为测定土的先期固结压力p_c,需要压力高、准确度高的压力设备,目前国内常用的加压设备有三种:磅秤式、杠杆式和气压式,也有用液压加压设备。本标准没有规定具体形式,但最大允许误差应符合现行国家标准《土工试验仪器 固结仪 第1部分:单杠杆固结仪》GB/T 4935.1、《土工试验仪器 固结仪 第2部分:气压式固结仪》GB/T 4935.2的规定。

17.2.2 标准固结试验试验应按下列步骤进行:

1 对原状试样的固结试验,在切削试样时若对土的扰动程度较大,则影响试验成果。图5所示的是以不同扰动程度计算厚6m～7m土层的沉降量及沉降速率。因此,在切削试样时,应尽可能避免破坏土样的结构。操作中,不允许直接将环刀压入土样,应用钢丝锯(或薄口锐刀)按略大于环刀的尺寸沿土样外缘切削,待土样的直径接近环刀的内径时,再轻轻地压下环刀,边削边压;也不允许在削去环刀两端余土时,用刀来回涂抹土面,而致孔隙堵塞,最好用钢丝锯慢慢地一次性割去多余的土样。

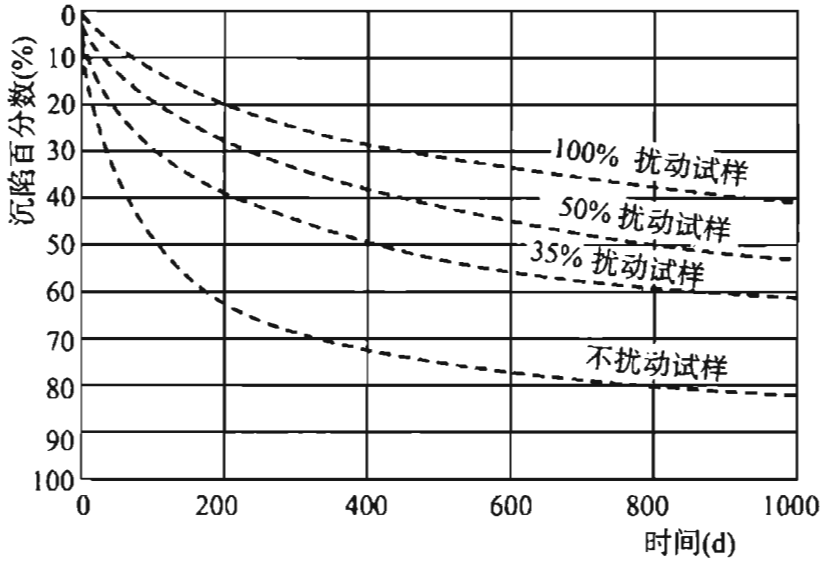


图 5　不同扰动程度的试样估算的沉降率

7　关于加压率。固结试验中一般规定加压率等于 1。由于加压率对确定土的先期固结压力有影响，特别是软土，这种影响更为明显，因此，标准中规定：如需测定土的先期固结压力，加压率宜小于 1，可采用 0.5 或 0.25，在实际试验中，可根据土的状态分段采用不同的荷重率，例如在孔隙比与压力的对数关系曲线最小曲率半径出现前，加压率应小些，而曲线尾部直线段加压率等于 1 是合适的。

10、11　关于稳定标准。目前国内外的土工试验标准（或规程）大多采用每级压力下固结 24h 的稳定标准，一方面考虑土的变形能达到稳定，另一方面也考虑到每天在同一时间施加压力和测记变形读数。本标准规定每级荷重下固结 24h 作为稳定标准。特殊土需要更长固结时间。而当试验中仅测定压缩系数时，施加每级压力后，以量表读数每小时不大于 0.01mm 为稳定标准。

17.2.5　先期固结压力 p_c 一般可根据工程地质和水文地质情况来估算。但是，有的因素是地质上无法估计的，因而推算的 p_c 不很可靠。在这种情况下，只能根据室内试验所得的 e-lg$p$ 曲线来估计。本标准建议采用目前应用较普遍的卡萨格兰特图解法。

用卡氏图解法求先期固结压力有许多影响因素。首先是

e-lg$p$曲线尚不能完全反映天然土层的压缩特性，因为在自然界，先期固结压力 p_c 是通过若干世纪，而不是几小时或几天形成的。再就是在钻取土样和试验操作中，取样的扰动和试验方法等影响，都是不可忽视的。试验时沉降稳定标准不同（次固结的影响），可使 p_c 值在较大的范围内变化，如图 6 所示。绘制 e-lg$p$ 曲线所用比例不同，p_c 也可能有明显的改变。为了便于比较，作图时应选用合适的纵横坐标比例。建议纵坐标取 $\Delta e = 0.1$ 时的长度与横坐标取一个对数周期长度之比值为 0.4～1.0。尽管这样，用图解法求得的结果也并不总是可靠的。要较可靠地求得该压力，需要进一步研究确定天然地层中黏土压缩曲线的方法。

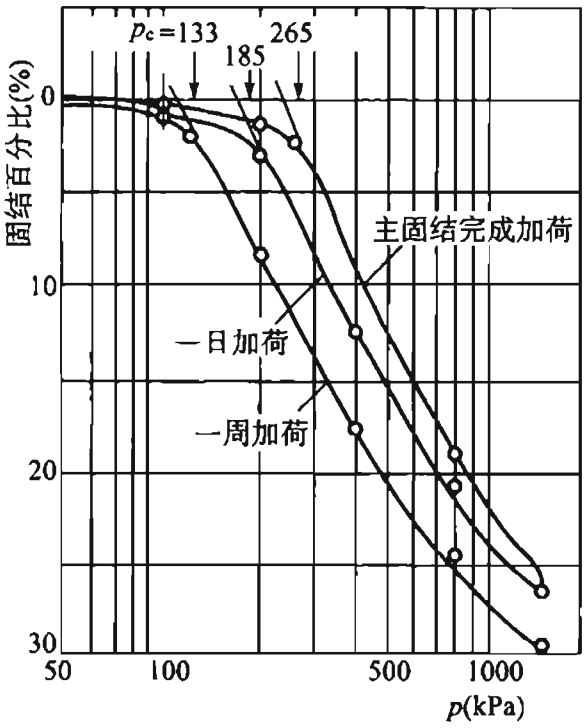


图 6　不同加载历时的压缩曲线

17.2.6　固结系数的确定方法有多种，常用的有时间平方根法、时间对数法和时间对数坡度法。按理，在同一试验结果中，用三种方法确定的固结系数应该比较一致。实际上却相差甚远。原因是这些方法是利用理论与试验的时间和变形关系曲线的形状相似性，以

经验配合法，找出在某一固结度 U 下，理论曲线上 T_v 相当于试验曲线上某一时间 t 值。但实际试验的变形与时间关系曲线的形状因土的性质、状态及受荷历史而不同，不可能得出一致的结果。

一般认为，用时间对数法确定理论零点误差较大。这样按时间对数坡度法确定 t_{50}，所求得的 C_v 值误差就更大。因此，本标准仅将时间平方根法和时间对数法列入。在应用时，宜先用时间平方根法求 C_v。如不能准确定出开始的直线段，再用时间对数法。

17.2.7 次固结是指超孔隙水压力消散主固结结束后，有效应力基本稳定的条件下，因土粒表面的结合水膜蠕变及土颗粒结构重新排列等引起的较为缓慢的变形。次固结系数可以通过固结试验求得，在孔隙比与时间的半对数关系曲线上，次固结系数即为次固结曲线段的斜率。

17.3 快速固结试验

标准固结试验需数天到十多天才能完成。研究表明，对 2cm 厚的一般黏质土试样，在荷重作用下，1h 的固结度一般可达 90%（以 24h 的固结度为 100%计）。按 1h 稳定的速率进行试验，对试验结果的 e-p 曲线进行校正，可得到与标准固结试验近似的结果，又节省时间；因此，标准中列有 1h 快速法，即试样在各级压力下的固结时间为 1h，仅在最后一级压力下，测记 1h 的量表读数和试样达压缩稳定时的量表读数，并用其对各级压力下试样的变形量进行修正，以求得压缩指标。

17.4 应变控制加荷固结试验

17.4.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 试验过程中，在试样底部测定孔隙水压力，要求仪器结构应能使试样与环刀、环刀及护环、底部与刚性底座之间密封良好，且易于排除滞留于底部的气泡。

2 控制的等应变速率是通过加荷设备的测力系统传递的，因

此，要求测力系统有相应的准确度。

3 测量孔隙水压力的传感器，要求体积因数（单位孔隙水压力作用下的体积变化）小，使从试样底部孔隙水的排出可以忽略，能及时测定试样中的孔隙水压力变化。体积因数采用了三轴试验所规定的标准。同时，一般孔隙水压力将不超过轴向压力的30%，传感器要求最大允许误差为±0.5%F.S。

17.4.2 应变控制式加荷固结试验应按下列步骤进行：

2 连续加荷固结试验，因涉及准确测定试样底部孔隙水压力，故要求试样完全饱和或实际上接近完全饱和。

6 已有的试验研究资料表明：应变速率对一般土（液限低，活动性小）的压缩性指标和固结系数影响不大。但对高液限土（w_L大于100以上），大应变速率的试验结果表明：土的压缩量偏小（与标准固结试验相比）。因此，为了使不同方法所得结果具有可比性，要求试验过程中，试样底部孔隙水压力u_b不超过垂直应力σ的某一数值。通过对不同应变速率条件下试样底部孔隙水压力值u_b变化的试验结果表明，对于正常固结土，在加荷过程中试样底部孔隙水压力u_b达到稳定值时，其比值u_b/σ一般为20%～30%。本标准采用ASTM D4186的规定，u_b/σ取值范围为3%～20%。根据该范围估计的应变速率如表17.4.2所示。对于特殊土，根据经验可以修正该估计值。

8 数据采集时间间隔的规定基于以下两点理由：①试验开始时，试样底部孔隙水压力u_b迅速增大；②取足够的读数确定应力应变曲线，当试验数据发生重大变化时，需要更多的读数。

17.4.3 关于计算：

3 计算有效应力时，假定试样中的孔隙水压力处于稳定状态，沿试样高度的分布为一抛物线。

7 在加载后，短时间间隔内应力应变关系可以认为是线性的，即$\Delta\varepsilon=m_v\Delta\sigma$，因此，从$e$-$p$曲线上求得$a_{vi}$，再求$m_v$，计算固结系数$C_v$。

18 黄土湿陷试验

18.1 一般规定

18.1.1 湿陷变形是指黄土在荷重和浸水共同作用下，由于结构遭破坏产生显著的湿陷变形，这是黄土的重要特性。湿陷系数不小于 0.015 时，称为湿陷性黄土，当湿陷系数小于 0.015 时，称非湿陷性黄土。

黄土受水浸湿后，在土的自重压力下发生湿陷的，称为自重湿陷性黄土，在土的自重压力下不发生湿陷的，称为非自重湿陷性黄土。

渗透溶滤变形是指黄土在荷重及渗透水长期作用下，由于盐类溶滤及土中孔隙继续被压密而产生的垂直变形，实际上是湿陷变形的继续，一般很缓慢，在水工建筑物地基是常见的。

黄土在荷重作用下，受水浸湿后开始出现湿陷的压力，称为湿陷起始压力。黄土湿陷试验对房屋地基来说，主要是测定自重湿陷系数、起始压力和规定压力下的湿陷系数，而对水工建筑物来说，主要是测定施工和运用阶段相应的湿陷性指标，包括本试验的所有内容。

18.1.4 关于稳定标准。黄土黏性机理与黏土不同，例如水源来自河流、渠道、塘库则自上而下，若是地下水位上升则自下而上。黄土的变形稳定标准规定为每小时变形量不大于 0.01mm。对于渗透溶滤变形，由于变形特性除粒间应力引起的缓慢塑性变形以外，也取决于长期渗透时盐类溶滤作用，故规定 3d 的变形量不大于 0.01mm。

18.2 湿陷系数试验

18.2.1 浸水压力和湿陷系数是划分湿陷等级的主要指标，为了

对比地基优劣情况，需要在同一条件即规定某一浸水压力下求得湿陷系数。本次修订时，浸水压力是根据现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑规范》GB 50025 的规定确定的。而水工建筑物的地基，必须考虑土体的压力强度与结构强度被破坏的作用，分级加荷至浸水时的压力应是恰好代表土层中部断面上所受的实际荷重。在实际荷重下沉降稳定后，根据工程实际情况用自上而下或自下而上的方式使试样浸水，确定土的湿陷变形。

18.3 自重湿陷系数试验

18.3.1 自重湿陷系数试验应按下列步骤进行：

2 土的饱和自重压力应分层计算，以工程地质勘察分层为依据，当工程未提供分层资料时，才允许按取样深度和试样密度粗略地划分层次。

饱和自重压力大于 50kPa 时，应分级施加，每级压力不大于 50kPa。每级压力时间视变形情况而定，为使试验时有个参考，本条中规定不小于 15min。

18.4 溶滤变形系数试验

18.4.1 溶滤变形系数是水工建筑物施工和运用阶段所要求的湿陷性指标。一般在实际荷重下进行试验，浸水后长期渗透求得溶滤变形。

18.5 湿陷起始压力试验

18.5.1 湿陷起始压力利用湿陷系数和压力关系曲线求得。测定湿陷起始压力（或不同压力下的湿陷系数），国内外都沿用单线、双线两种方法。从理论上和试验结果来说，单线法比双线法更适用于黄土变形的实际情况，如果土质均匀可以得出良好的结果。双线法简便，工作量少，但与变形的实际情况不完全符合，为与现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑规范》GB 50025 一致，本标准改成

单线法、双线法并列，供试验人员根据实际情况选用。进行双线法时，保持天然湿度施加压力的试样，在完成最后一级压力后仍要求浸水测定湿陷系数，其目的在于与浸水条件下最后一级压力的湿陷系数比较，以便二者进行校核。

19　三轴压缩试验

19.1　一 般 规 定

19.1.2　三轴压缩试验是根据摩尔一库仑破坏准则测定土的强度参数:黏聚力 c 和内摩擦角 φ。常规的三轴压缩试验是取一圆柱体试样,先在其四周施加一周围压力(即小主应力)σ_3,随后逐渐增加大主应力 σ_1 直至破坏为止。根据破坏时的大主应力 σ_1 和小主应力 σ_3 绘摩尔圆,摩尔圆的包线就是抗剪强度与法向应力的关系曲线。通常以近似的直线表示,其倾角为内摩擦角 φ,在纵轴上的截距为黏聚力 c(见图 7)。故抗剪强度与法向应力的关系曲线可以用库仑方程表示:

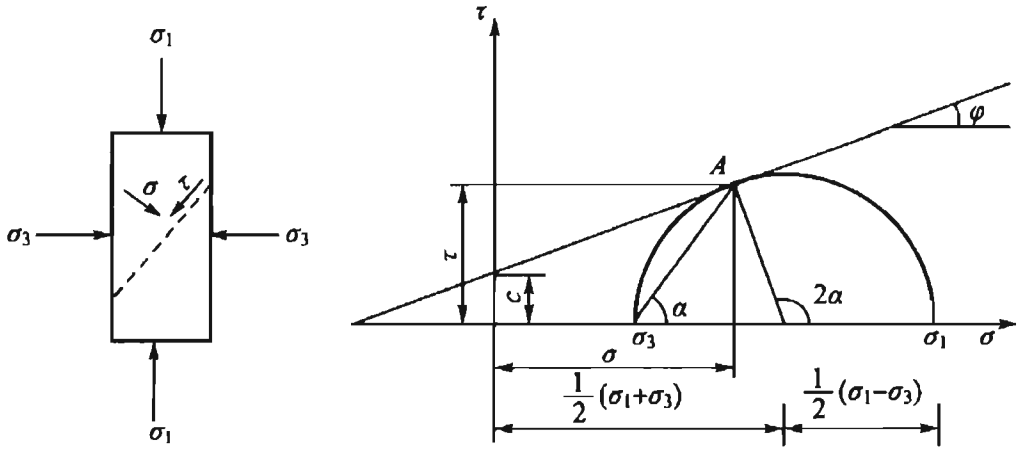


图 7　三轴压缩试验抗剪强度与法向应力关系曲线

$$\tau = c + \sigma \tan\varphi \tag{3}$$

式中:τ、σ——作用在破坏面上的剪应力及法向应力。

τ、σ 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:

$$\left.\begin{aligned}\sigma &= \frac{1}{2}(\sigma_1+\sigma_3)+\frac{1}{2}(\sigma_1-\sigma_3)\cos 2\alpha \\ \tau &= \frac{1}{2}(\sigma_1-\sigma_3)\sin 2\alpha\end{aligned}\right\} \tag{4}$$

式中：$\alpha = 45^\circ + \frac{\varphi}{2}$。

土体受荷载后，任何面上的法向应力为固体颗粒骨架和孔隙水或气体所承受，即 $\sigma' = \sigma - u$。σ'称为有效应力，u 称为孔隙压力。土的抗剪强度如用有效应力表示，则式(3)又可写成：

$$\tau = c' + (\sigma - u)\tan\varphi' = c' + \sigma'\tan\varphi' \tag{5}$$

式中：c'——有效黏聚力(kPa)；

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。无论黏质土或砂质土均可适用。通常分为不固结不排水剪试验(UU 试验)、固结不排水剪试验(CU 试验)和固结排水剪试验(CD 试验)。

不固结不排水剪试验(UU 试验)：这种方法适用的条件是土体受力而孔隙压力不消散的情况。当建筑物施工速度快，土体渗透系数较低(如小于 $A\times10^{-4}$ cm/s)，而排水条件又差时，为考虑施工期的稳定，可采用 UU 试验。

对于非饱和土，如压实填土，或未饱和的天然地层，这种土的强度随 σ_3 的增加而增加。但当随 σ_3 增加到一定值，空气逐渐溶解于水而达到饱和时，强度不再增加。强度包线并非直线。因此，用总应力方法分析时，应按规定的压力范围内选取 c_u、φ_u。如非饱和地层预计施工期可能有雨水入渗或地下水位上升会使土体饱和，则试样应在剪切前予以饱和。

固结不排水剪试验(CU 试验)：试验主要目的有两个：一是借测量孔隙压力求得土的有效强度参数 c'、φ'，以便进行土体稳定的有效应力分析；二是求得总应力强度指标 c_{cu}、φ_{cu}。

固结排水剪试验(CD 试验)：主要是为了求得土的排水强度

指标 c_d、φ_d。采用应变控制式三轴仪的固结排水剪比较费时，故仅应用于较透水的土料。在测试土的应力应变关系时，为了模拟实际工程的排水条件，也需用应变控制三轴压缩仪的固结排水剪试验成果来确定变形模量、泊松比和剪切模量等变形指标。

19.1.3 在三轴压缩试验中，用一个试样多级加荷测定土的强度参数 c 和 φ 值，是根据库仑定律，假定 c、φ 值不因应力状态的变化而改变，破裂角 $\alpha\left(45^\circ+\frac{\varphi}{2}\right)$ 在第一级荷载下出现后，在以后各级荷载下均保持不变。第一级荷载以后所施加的荷载只是增加摩擦强度，因而可以测定强度包线。

一个试样多级加荷三轴压缩试验原则上适用于黏质土、砂质土。由于只是采用一个试样确定强度包线，它避免了多个试样的不均匀而造成的应力圆分散，各应力圆均能很好地切于强度包线。但一个试样的代表性低于多个试样的代表性，故本标准只限于无法取得多个试样，或多个试样彼此性质不均匀的情况下采用此法，并不建议替代作为常规方法采用。

19.2 仪 器 设 备

19.2.1 三轴压缩仪分为应变控制式和应力控制式两种。前者操作方便，应用广泛，故本标准中各种试验方法均采用此种仪器；后者操作较麻烦，难以测定峰值以后的应力应变曲线，故本标准修订时予以取消，仅将其列入弹性模量试验标准中。

关于孔隙压力量测系统，除了不能残留气泡外，应有一定的灵敏度，量测时不应允许孔隙水流动。试样内孔隙水的流动会导致：一是不能准确地测定孔隙压力值，特别是在低压缩性的土中显得特别重要；其次是在透水性小的土中会导致时间滞后现象，使得读数难以稳定。本标准规定孔压测量系统的体积因数不能大于 $1.5\times10^{-5}\,cm^3/kPa$。这一数值与英国帝国学院、挪威土工研究所、美国垦务局等使用仪器的体积因素基本一致。

对于孔隙压力系统采用的传感器，要求体积因数小，线性误差和重复性误差小，时漂要满足试验要求。传感器体积因数的测定，可采用精密的双套体变管的方法，将传感器接在体变管的量测系统中（体变管内管更换成毛细管），排除气泡，然后加压，记下压力值与体积变化值，作出压力与体积变化的关系曲线，即可求出传感器的体积因数。

19.2.2 三轴压缩试验操作复杂，技术要求高，需要的土样也多，如不小心操作，就得不到正确的试验成果，本标准规定了对仪器应预先进行检查，以避免因仪器上的差错给试验带来误差。近年来，随着三轴试验测试设备水平的不断发展，孔隙压力测试普遍采用了传感器，因此本标准删除了有关调试零位指示器的内容。

19.3 试样的制备和饱和

19.3.1 关于试验制备：

1 本标准规定三轴试验试样直径分别为 $D=39.1$mm、$D=61.8$mm 及 $D=101.0$mm，是根据现行国家标准《土工试验仪器 三轴仪 第1部分：应变控制式三轴仪》GB/T 24107.1 中应变控制式三轴仪所允许的尺寸而制订的。由于试样直径 D 与试样土粒粒径 d 之比与强度有一定影响，如 D/d 比超过某一范围，则所测得的强度偏大。故本标准参照国外的一些标准对试样直径 D 与允许的最大土粒粒径作表 19.3.1 所列的规定。

近年从国外引进了一些三轴压缩仪，试样的直径大多数为38mm、50mm、70mm 及 100mm，与本标准的试样直径相似，因此本标准也适用于上述直径的试样进行试验。

2、3 细粒土试样分为原状土试样和扰动土试样两种。原状土试样一般均用原状土块或钻孔原状土柱在切土器上切取。扰动土试样的制备方法有压样法、击实法、搓碾法等。不同的制备方法所得试样的强度有所差别。一般来说，制备方法应与现场情况类似为好，故以击实法和搓碾法为宜。

19.3.2 试样饱和应按下列规定进行：

1 试样饱和方法有抽气饱和法、浸水饱和法、水头饱和法等，其中以抽气饱和法效果较好。据对粉质黏土的对比试验表明：用抽气饱和法饱和度可达95%，浸水饱和法和水头饱和法在持续数昼夜后仅达到85%左右。有些资料亦表明：用抽气饱和法饱和度可达90%～95%。若研究软化的影响，则要用水头饱和法。

3 对于渗透性小的黏性土，抽气饱和法难以达到完全饱和，即使试样达到了完全饱和，而仪器底座、孔隙压力系统及安装过程中，试样与橡皮膜等之间的残余气泡也难以驱净，不能满足试验过程中完全饱和。反压力的另一个作用是使试样的孔隙水压力升高后，在剪切过程中有剪胀的试样不致出现负的孔隙压力。

目前国内外已把对试样施加反压力作为一种常用的饱和方法，例如美国水道试验站规定：对CU试验，剪切前试样饱和度必须达到98%，而测孔隙压力$\overline{\text{CU}}$试验，则必须完全饱和。因此，施加反压力是试验中的必要步骤。

19.4 不固结不排水剪试验

19.4.2 不固结不排水剪试验及固结不排水剪试验的剪切（不测孔隙压力）应变速率，在通常的速率范围内对强度影响不大，故可根据试验方便来选择剪切应变速率。标准建议每分钟应变为0.5%～1.0%，以使试样在15min～30min内完成剪切试验。

19.5 固结不排水剪试验

19.5.1 试样的安装应按下列步骤进行：

1 为了加速试样的固结过程，同时在剪切时使试样内孔隙压力均匀传递，国内外都普遍在试样外贴滤纸条。

关于滤纸条的贴法，大约有如下几种：覆盖面积达侧面的50%以上和上下连续的滤条（如图19.5.1中Ⅰ型）；上下均与透水板相连的连续滤条（如图8中Ⅱ型）；滤纸条下部与透水板相连，而

上部与透水板断开 1/4 试样高度的距离(如图 8 中Ⅲ型);上下均与透水板相连,但中部间断 1/4 试样高度的形式(如图 8 中Ⅳ型);为了加速试样固结,建议采用Ⅱ型。但如对试样施加反压力或测孔隙压力,滤纸条的上下端与透水板不连接以防反压力与孔隙压力测量直接连通。

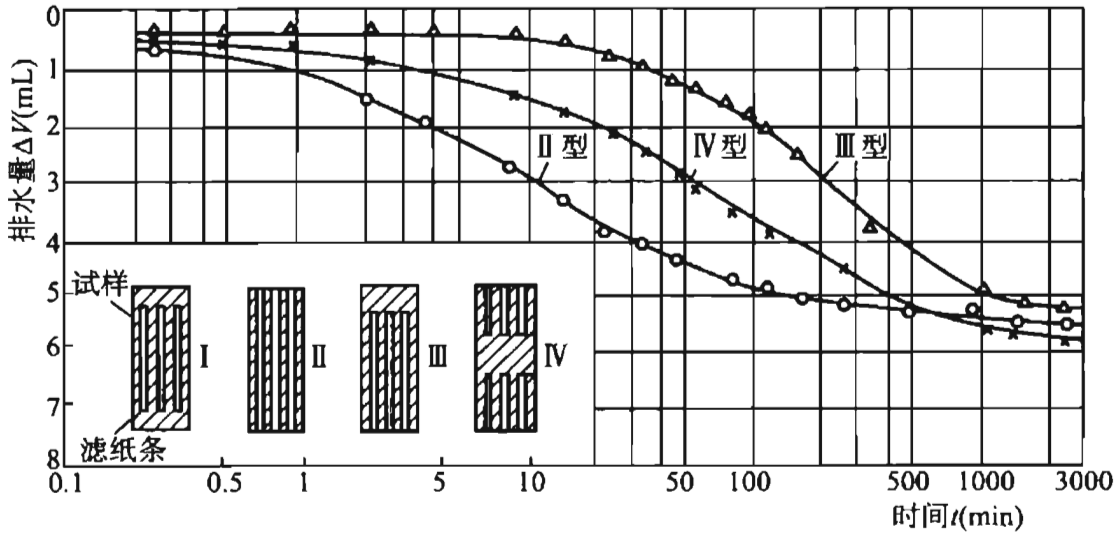


图 8　滤纸条不同贴法的固结过程

19.5.2　对试样施加的周围压力应尽可能与土体现场实际作用的压力一致。然而在大周围压力下所测得的强度指标比在小周围压力下所测得的强度指标要低。因此在提供强度指标时应注明所施加的周围压力的范围。

固结标准采用两种方法:一种是以固结排水量达到稳定作为固结的标准,另一种是以孔隙水压力完全消散为标准。根据所进行的试验与国内外的经验,本标准规定以固结度达到 95%～100%作为固结标准。

19.5.3　关于固结不排水试验的剪切(测孔隙压力)应变速率。在常规三轴试样剪切过程中,孔隙压力分布是不均匀的,一般中部较大,两端较小。对于测孔隙压力的 $\overline{CU}$ 试验,为了使底部测得的值能代表剪切区的孔隙压力,故要求剪切应变速率相当慢,以便孔隙

压力有足够时间均匀分布。

测孔隙压力的 $\overline{CU}$ 试验国内不少单位对于剪切应变速率积累了许多经验。经研究认为，黏质土采用每分钟应变为 0.1%是合适的，也有的认为黏土以每分钟应变为 0.05%为好。国外对黏质土则多用每分钟应变为 0.04%～0.1%的速率。鉴于上述，因此，标准建议对黏质土测孔隙压力的 $\overline{CU}$ 试验的剪切应变速率为每分钟应变为 0.05%～0.1%。

粉质土的剪切应变速率可以加快些，经比较，对于渗透系数 $k=1\times10^{-5}$cm/s的粉质土，当剪切应变速率每分钟应变为 0.1%～0.6%时，孔隙压力变化很小。对强度的影响也不大(见图 9)，故粉质土的剪切应变速率采用每分钟应变为 0.1%～0.5%。

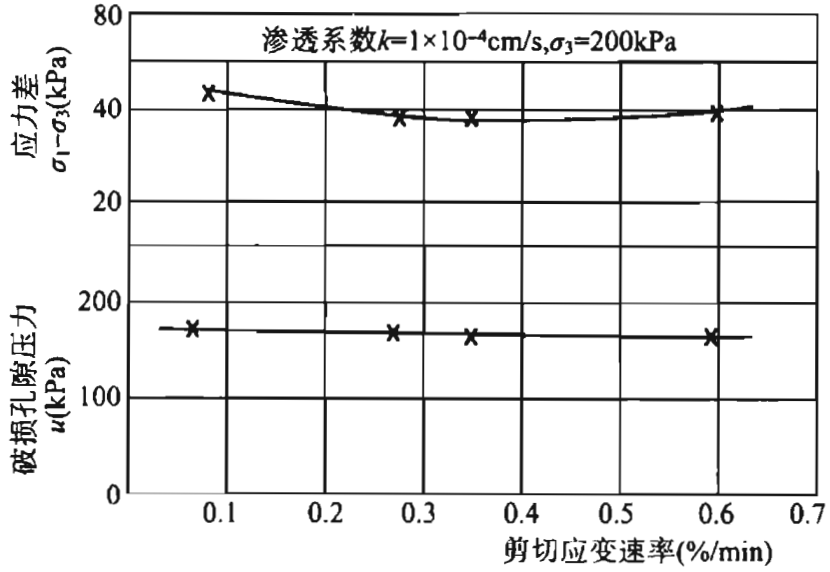


图 9　剪切速率对应力差与孔隙压力的影响

19.6　固结排水剪试验

19.6.2　关于固结排水试验的剪切应变速率，吉甫逊曾建议过破坏历时的理论公式：

$$U_f = 1 - \frac{h^2}{\eta C_v t_f} \tag{6}$$

式中：U_t——试样的平均消散度；

h——排水距离；

η——取决于排水条件的系数，当试样为一端排水时，$\eta=0.75$；两端排水时，$\eta=3.0$；

C_v——消散系数(cm^2/s)；

t_f——破坏历时(s)。

在式(6)中若取 $U_t=0.95$，则得破坏历时 t_f 的式子：

$$t_f=\frac{20h^2}{\eta C_v} \tag{7}$$

将所得的 t_f 来除试样的总变形量，即可得剪切应变速率。按式(6)算得的剪切应变速率，对黏质土一般为每分钟应变为 0.003%～0.012%。采用这样的剪切应变速率的固结排水剪，对于黏质土可能仍有微小的孔隙压力产生。但对强度影响不大，故本标准规定剪切应变速率为每分钟应变为 0.003%～0.012%。

19.7 一个试样多级加荷试验

一个试样多级加荷三轴试验的各级剪切变形随土的种类不同相差很大，故不能做统一规定。基本原则是第一级剪切变形应与多个试样试验的控制变形一致，最后一级达到的累积变形以不超过 20%为准，中间剪切的轴向变形无法作出统一规定。各级剪切中，可以同时计算有效主应力比或绘制有效应力路径来控制。

破坏点的确定应与多个试样破坏标准的确定相一致，不另作规定。

对于软黏土及塑性大的土，因破坏点不显明，难以根据峰值或稳定值的近似点确定施加下一级周围压力的标准，因此可以按预先设定的轴向应变，施加各级周围压力。一般可以按以下标准进行，见图 10。

第一级：轴向应变至 16%；

第二级：轴向应变至 18%；

第三级：轴向应变至20%。

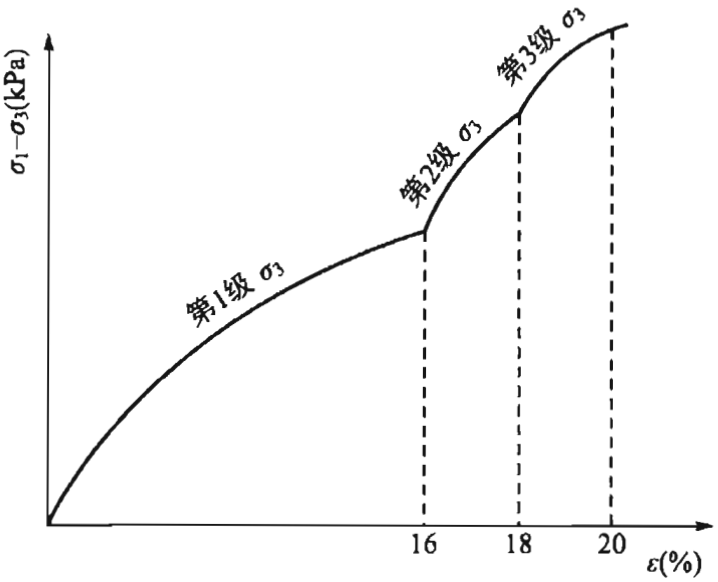


图10　按轴向应变加荷

19.7.1　不固结不排水剪试验应按下列步骤进行：

2　对于第一级围压作用下试样剪切完成后，须退除轴向压力（即测力计为零），使试样恢复到等向受力状态，再施加下一级周围压力，这样可以消除固结时偏应力的影响，不致产生轴向蠕变变形，以保持试样在等向压力下固结，故标准作了退除轴向压力的规定。

19.8　计算、制图和记录

19.8.1　本条说明如下：

1　三轴压缩试验的试样在固结后和剪切过程中试样面积会减小或增大，因此必须进行修正。

固结后的修正方法有：①根据固结下沉量和固结排水量（对CU试验和$\overline{\text{CU}}$试验也可采用试验前后的试样质量差）计算固结后的面积；②假定试样固结应变各向均等来计算。固结后的面积由于试样的固结应变并非各向均等，故一般以前法为好。据研究，按

前法算得的面积比按后法算得的面积更接近实测值。但有时测固结下沉量较困难，故标准中规定采用第二种方法计算。

19.8.2 绘制应力圆时，需根据破坏标准选取代表试样破坏时的应力，以主应力差（或主应力比）的峰值和应变值作为破坏标准是国际上普遍采用的标准，我国多年来的实践也证明其行之有效，故本标准仍将其作为主要选择的标准。而应力路径的密集点（或拐点）适用于各应力圆难以作共同切线时，绘出各破坏应力点（密集点或拐点），通过这些作平均直线，根据直线的倾角 α 和在纵轴的截距 d，间接地求出 c' 和 φ'，本标准保留此法供试验人员选用。

20 无侧限抗压强度试验

20.3 操作步骤

20.3.2 无侧限抗压强度试验是用圆柱试样，在无侧向应力下，测定其最大的轴向力即抗压强度 q_u，并间接求得抗剪强度，它相当于不固结不排水强度 S 的一半：

$$S = \frac{1}{2}q_u \tag{8}$$

试样高度与直径的比值对无侧限抗压强度试验值有很大影响。比值较大的试样，在加荷后往往发生歪斜，得出较小的结果；反之，比值较小时，由于试样两端受加压板的约束，在两端附近各形成一锥状的不变形区域，致使试样内产生不均匀变形，影响试样中心部位的应力分布，从而歪曲了试验结果。因此，试样的高度与直径应有适当的比值。试验结果表明：当试样高度与直径的比值大于 2 时，两端加压板的约束对试样中心部位应力分布的影响就较小。采用试样高度与直径的比值不小于 2 是合适的，故本标准建议比值为 2～2.5。

至于试样直径大小，根据国内试验单位的取土情况，建议采用 3.5cm～4.0cm。重塑土试样尺寸应与原状土尺寸相同，以避免由于试样尺寸不同而产生的误差。

20.3.3 当轴向荷载作用于试样时，试样与加压板之间即发生与侧向膨胀力方向相反的摩擦力。该力使两端土的侧向膨胀受到限制，故试样变成鼓状。垂直变形愈大，鼓状愈大。这样，试样内的应力分布就不均匀。为了减少该影响，可在试样两端抹一薄层凡士林。如果气候干燥，试样侧面也可涂一薄层凡士林，以防水分蒸发。但是在做重塑土试验时，应把抹凡士林的一层土刮去。

20.3.5 如试验的土样渗透性较小，试验历时较短，可认为试验前后

的含水率不变。但历时过短，试验不便，故限制加荷时间约为 8min～10min。本标准规定应变速率为每分钟轴向应变为 1%～3%。

20.3.9 天然结构的土经重塑后，它的结构凝聚力已全部消失。但若放置时间较久，又可以恢复一部分。放置时间愈长，恢复程度愈大。所以，试样重塑后应立即进行试验。

20.4 计算、制图和记录

20.4.2 试验过程中，试样面积的修正是假定试样体积在轴向变形过程中不发生改变的情况下求得其平均断面。三轴不固结不排水试验也是采用此方法进行试样面积修正的，也可以用某一轴向变形下试样最大的断面积来计算，但在试验过程中测定断面积较困难，所以目前很少采用该法。

20.4.4 试样受压破坏时，一般分脆性破坏及塑性破坏两种。脆性破坏具有明晰的破裂面，而塑性破坏时没有破裂面。应力应变关系曲线也大致有两种：一种是具有峰值或稳定值的，另一种是不具有峰值或稳定值而是应力随应变渐增的（见图 11）。选择破坏值时，对于有明显峰值或稳定值的，以峰值或稳定值为抗压强度，对于没有峰值或稳定值的，以应变 15%作为取值标准。

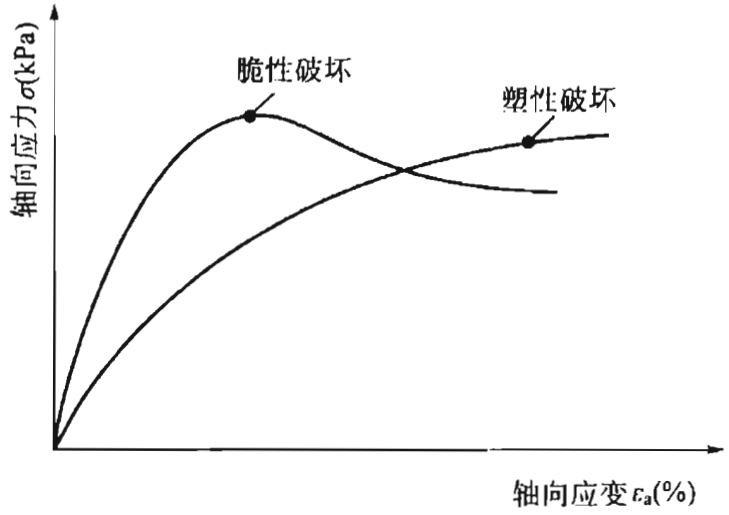


图 11 轴向应力与轴向应变关系图

21 直接剪切试验

21.1 一般规定

21.1.1 用直接剪切试验确定土的强度参数 c 和 φ 的方法主要有三种，即快剪、固结快剪和慢剪。每种试验方法适用于一定排水条件下的土体，相应于工程所处的工作状态。因此，在选择试验方法时，应注意所采用的方法尽量反映土的特性和工程所处的工作阶段，并与分析计算方法相匹配。

21.1.2 对于高含水率、低密度的土或透水性大(渗透系数大于 1×10^{-6}cm/s)的土，即使再加快剪切速率，也难以避免排水固结，因而对于这类土，建议用三轴仪测定其不排水强度。直接剪切仪的最大缺点是不能有效地控制排水条件。对渗透性较大的土，进行快剪试验时，所得的结果，用库仑公式表示时，具有较大的内摩擦角，且总应力强度指标往往偏大。因而，标准规定，对渗透系数大于 $A\times10^{-6}$ cm/s 的土不宜做快剪及固结快剪试验。

21.2 仪器设备

21.2.1 常用的直接剪切仪分为应变控制式和应力控制式两种。应变控制是控制试样产生一定位移，测定其相应的水平剪应力。应力控制则是对试样施加一定水平剪切力，测定其相应的位移。应变控制直接剪切仪的优点是能较准确地测定剪应力和剪切位移曲线上的峰值和最后值，且操作方便。故本标准以此种仪器作为主要仪器。应力控制直接剪切仪施加水平剪切力较为麻烦，不能准确地测得应力和剪切位移曲线上的峰值及稳定值，目前国内国外均很少采用。

21.3 操作步骤

21.3.1 试样制备应按下列规定进行：

3 黏质土的抗剪强度与垂直压力的关系并不完全符合库仑方程的直线关系。对于正常固结土，在一般荷载（100kPa～400kPa）作用下，可以认为是直线关系。标准中规定：垂直荷载大小应根据预计土体所受的力来决定，也可按 100kPa、200kPa、300kPa、400kPa 四级荷载施加。对于先期固结土，在选择垂直荷载时，应考虑先期固结压力 p_c 值，设计压力小于先期固结压力 p_c 时，施加的最大垂直压力不大于 p_c；设计压力大于先期固结压力 p_c 时，垂直压力应大于 p_c。

21.3.2 试样安装与剪切应按下列规定进行：

1 快剪试验：

4）剪切速率是影响土的强度的一个重要因素，它从两方面影响土的强度：一方面是剪切的快慢影响试样的排水固结强度；另一方面是对黏滞阻力的影响，剪切速率愈快，黏滞阻力愈大，强度也愈大，反之亦然。不过在常规试验中，对于黏滞阻力的影响，通常不考虑。标准中规定：快剪应在 3min～5min 内剪损，其目的就是为了在剪切过程中尽量避免试样的排水固结。

2 固结快剪试验：

3）试样在每级垂直荷载作用下，应固结至主固结完成。关于固结稳定标准，规定为：每小时垂直位移读数变化不超过0.005mm，认为已达固结稳定。

3 慢剪试验：

1）慢剪试验要求在剪切过程中试样的孔隙压力完全消散。因此试验要有充分的时间。参照国内外经验，标准中规定剪切速率应小于 0.02mm/min。但也可根据固结 50% 的时间 t_{50} 的 50 倍（$50t_{50}$）估算破坏历时，也可用 $35t_{60}$ 及 $12t_{90}$ 估算。两者的实质一样，计算结果相差不大。

21.4 计算、制图和记录

21.4.3 破坏值选定，常有两种情况：若剪应力-剪切位移关系曲线中具有明显峰值或稳定值，则取峰值或稳定值作为抗剪强度值，如图 12 中的曲线 1 及曲线 2 的 a 点及 b 点；若剪应力随剪切位移不断增长，无峰值或无稳定值时（如图 12 中曲线 3），则以相应于选定的某一剪切位移相应的剪应力值作为强度值。国内一般采用最大位移为试样直径 D 的 1/15～1/10，即对于直径 61.8mm 的试样，其最大剪切位移量约为 4mm～6mm。法国中央土木试验室标准取剪切位移为 $D/10$，美国水道实验站试验标准取剪切位移为 $D/6$。本标准中规定取剪切位移为 4mm 时的剪应力值来确定抗剪强度。

以剪切位移作为选值标准，虽然方法简单，但从理论上讲不太严格，因各种不同类型破坏时的剪切位移并不完全相同，即使对同一种土，在不同的垂直荷载作用下，破坏剪切位移亦不相同，因而只有在破坏值难以选取时，才允许采用此法。

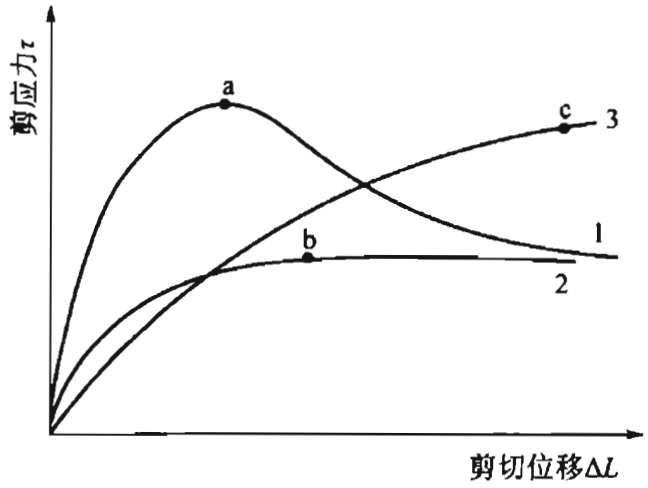


图 12 剪应力与剪切位移关系曲线

22　排水反复直接剪切试验

22.1　一 般 规 定

22.1.1　超固结黏土试样在某一有效压力作用下进行剪切试验时，当剪应力达到峰值以后，若继续剪切，剪应力随剪切位移增加而显著降低，最后达到一个稳定值，该稳定值称土的残余抗剪强度或残余强度，以下式表达：

$$S'_r = c'_r + p\tan\varphi'_r \tag{9}$$

式中：S'_r——土的残余强度(kPa)；

c'_r——残余黏聚力(一般 $c'_r \approx 0$)(kPa)；

φ'_r——残余内摩擦角(°)；

p——垂直压力(kPa)。

正常固结黏土亦有此现象，但不很明显，如图 13 所示。

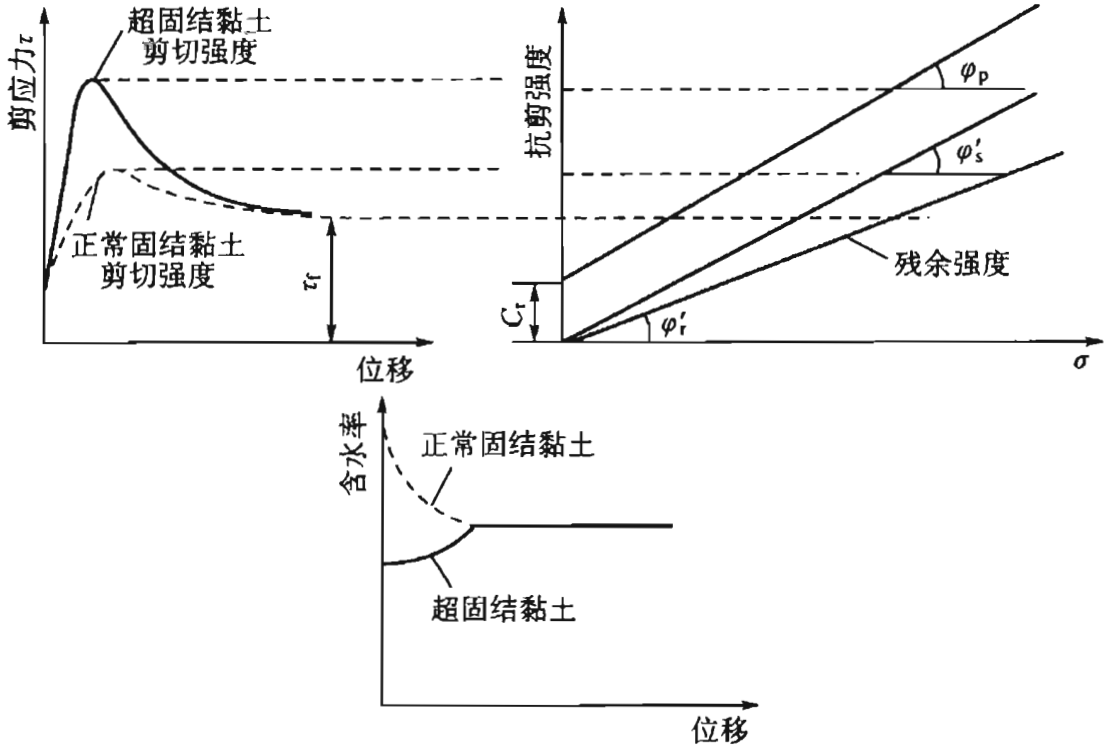


图 13　剪应力与剪切位移关系曲线

22.2 仪器设备

22.2.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

室内测定残余强度的仪器和方法。目前主要有三轴压缩试验、用环剪仪做环形剪切试验和用直剪仪做排水反复直接剪切试验（以下简称反复剪）三种方法。反复剪试验存在一定的缺点，例如，每次反复后，有一小峰值出现，剪切面可能呈泥浆状。但它简单易行，对多数土均能测得较好的成果，因此，国内外应用较广，本标准也推荐采用直剪仪做反复排水剪试验。

本标准规定在进行第二次、第三次……剪切时，不卸除垂直荷载，将剪切盒下盒拉回原位置。因此，仪器的推力设备要求既能使其能推进又能拉回，或另制造一反推设备，待一次剪切完成后，用反推设备将剪切盒下盒推回至原位置。

22.3 操作步骤

22.3.1 研究表明：扰动试样的残余强度通常与原状试样的残余强度相接近。对同一种土，不管是正常固结的或超固结的，只要是在同一有效压力作用下，其残余强度相同，φ'_r 为一常数。它只与土的性质有关，而与应力历史无关。因此，当选取原状土样有困难时，可取扰动土进行试验。

但软弱夹层的滑裂面或滑坡层面是构成剪切破坏的产物，它曾经受过较大的剪切位移，加之在漫长的地质历史时期中地下水的长期作用，使滑裂面或滑坡面上土的颗粒组成以及矿物、化学成分都有别于滑面上下土层，故选取扰动土样时，应取滑裂面或滑坡层面上 1mm～2mm 的土进行残余强度试验。否则扰动土的残余强度指标可能大于滑裂面或滑坡层面实际强度值。

经过对土（岩）地基软弱夹层或滑坡带土体的调查了解，夹层和滑动层面上土的含水率往往比夹层上下层的含水率高 10%左右。当确定制备含水率时，应注意这个实际情况。本标准建议扰

动土制备含水率采用该土(泥化夹层和滑动层面)的液限为宜。

22.3.2 试样剪切应按下列规定进行:

5 剪切速率对测定土的残余强度具有明显的影响。土达到残余强度时,其剪切面上的孔隙压力已充分消散,土颗粒已完全定向排列,故测定残余强度的方法只能是最大剪切位移下的慢剪试验。

关于剪切速率对土的残余强度的影响问题。根据对黏土、高塑性黏土、粉土的液限试样和黏土的原状样进行不同剪切速度的对比试验,其成果见图 14。从图 14 中可以看出:粉土、黏土及高液限黏土的剪切速度的临界值分别为 1.0mm/min、0.06mm/min 和 0.02mm/min。

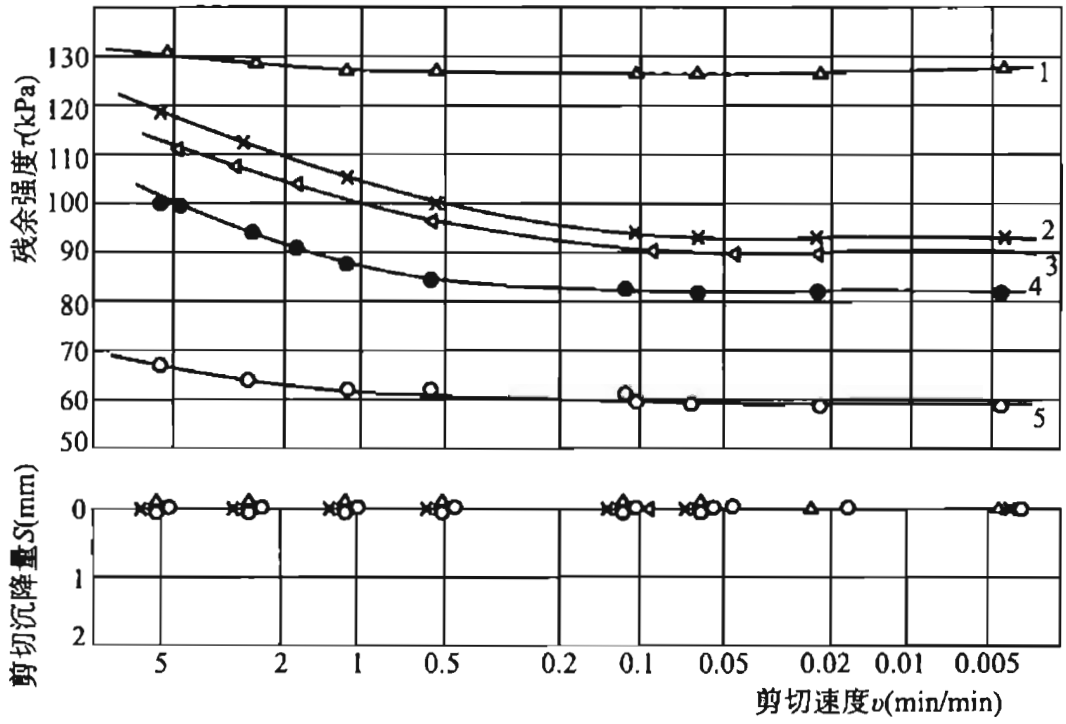


图 14 剪切速度与残余强度和剪切沉降量的关系曲线

(注:试样的垂直压力均为 200kPa)

1—江苏粉土;2—广西 8301-7 粉土;3—葛洲坝夹层土(原状样);

4—华东黏土;5—东北黏土

当剪切速度采用 0.02mm/min 时,对于每一剪切行程的位移量

为 8mm～10mm 的试验，约需 8h～10h 左右。为了试验室工作进行的方便，可间隔一定时间进行下一次剪切(即可使试验在白天进行)。

6 对试验的总剪切位移多大才能测到稳定的强度值的问题，斯肯普顿认为在室内试验时，过峰值强度后继续剪切到位移达 25mm～50mm，强度可降低到稳定残余值；诺布尔用内径 4.8cm 的试样在直接剪切仪上以 0.004mm/min 的速率进行试验，每次剪切位移 2.5mm，再推回，如此反复剪 10 次～15 次，总位移约为 50mm～75mm，也可达到残余值。

长江科学院在对软弱夹层的试验中，使用直径为 6.4cm 的试样，在直接剪切仪上以 0.0224mm/min 的剪切速率做反复直接剪切试验，试验成果表明：不同颗粒组成的试样，所需要的总剪切位移量是不一样的，一般来讲黏粒含量大的试样，需要的总剪切位移量小，反之亦然，如粉质土、粉质黏土一般需要 40mm～48mm，黏土一般需要 24mm～32mm。一般反向剪切的剪应力大于正向剪切的剪应力，见图 15。其原因在于反向剪切破坏了已定向排列的土颗粒，使得土的强度增高。因此，不能将反向剪切的位移量计入达到残余强度时所需要的总剪切位移量中。

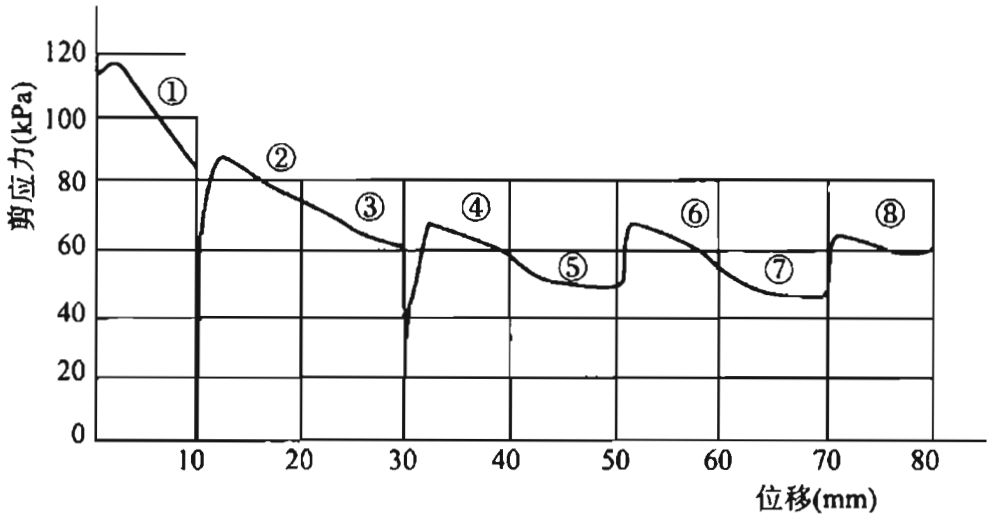


图 15 反复剪切试验的应力和位移曲线

①、③、⑤、⑦—正向剪切；②、④、⑥、⑧—反向剪切

24 自由膨胀率试验

24.1 一般规定

24.1.1 本试验目的是测定黏质土在无结构情况下的膨胀潜势，初步评定黏质土的膨胀性。

24.3 操作步骤

24.3.1 自由膨胀率试验中的试样制备是非常重要的，首先是土样过筛的孔径大小。用不同孔径过筛的试样进行比较试验，其结果是过筛孔径越小，10cm^{3}体积的土越轻，自由膨胀率越小。为了取得相对稳定的试验条件，本标准规定采用0.5mm过筛。

24.3.3 试样用体积法量取，紧密或疏松会影响自由膨胀率的大小，为消除这个影响因素，规定采用漏斗和支架，固定落距一次导入的方法，并将量杯的内径统一规定为20mm，高度略大于内径，便于在装土刮平时避免或减轻自重的影响。

24.3.4 黏土颗粒在悬液中有时有长期浑浊的现象，为了加速试验采用加凝聚剂的方法，但凝聚剂的用量和浓度实际上对不同土类有不同反映，为了增强可比性，本标准统一规定采用浓度为5%的纯氯化钠溶液5mL。

24.3.5 搅拌的目的是使悬液中土粒分散，充分吸水膨胀。搅拌的方法有量筒反复倒转和用搅拌器上下来回搅拌两种，前者操作困难，工作强度大；后者有随搅拌次数增加，读数增大的趋势，故本标准规定上下搅拌各10次。

25 膨胀率试验

25.2 无荷载膨胀率试验

25.2.1 无荷载膨胀试验规定在有侧限条件下测定土的膨胀变形，且只允许向上单向膨胀。其试样尺寸对膨胀量是有影响的。在统一的膨胀稳定标准下，膨胀量随试样高度增加而减小，随直径的增大而增大，为了与通用的环刀尺寸一致，故规定环刀高 20mm、直径 61.8mm，并在钝口和座底下加工丝扣，用于固定环刀。

25.2.2 无荷载膨胀率试验试验应按下列步骤进行：

3 膨胀率与土的自然状态关系非常密切，起始含水率、干密度都直接影响试验结果。为了防止透水板的水分影响初始读数，标准中要求透水板先烘干，再埋置在切削下的碎土内 1h，使其与试样的湿度大致相同。

25.3 有荷载膨胀率试验

25.3.2 有荷载膨胀率试验应按下列步骤进行：

5 有荷载膨胀率试验会发生沉降或涨升两种情况，因此，安装量表时要予以考虑。

6 有荷膨胀率试验是为了模拟建筑物地基的上覆压力或某一特定荷载条件下，地基土在有侧限约束、浸水以后的膨胀变形量。因此，根据所要求的荷载，可一次施加或分级施加。一次连续施加荷载是指将总荷载分成几级，一次连续加完，目的是为了使土样在受压时有个时间间歇，同时避免荷载太大，产生冲击力；对在较小荷载下膨胀性较强的土，应注意浸水后下端土膨胀挤冒，使压缩仪杠杆失去平衡，因此要随时将压缩仪杠杆调水平。有荷膨胀率试验的起始条件应当是在一定荷载条件下已经达到固结（压缩）

稳定状态，因此，在荷载施加过程以及稳定后，应测读因取样卸荷—再压缩所产生的变形量，并将该变形量从试样的起始厚度中扣除。此外，施加荷载所引起的仪器变形量已经通过调整量表指针调零的方式扣除，而膨胀引起的仪器变形量难以准确测量，因此，在运用式(25.3.3)计算荷载 p 作用下的膨胀率时，可不计试样卸荷—再压缩所产生的变形量以及荷载引起的仪器变形量。

个别试验中出现注水后土样压缩的情况，可终止试验或根据需要换用更低一级荷载进行试验。

7 为了保持试样始终浸在水中，要求注水至土样顶面以上5mm。为便于排气，可采用逐步加水。

8 同一试样，荷载越大，稳定越快；无荷载时，膨胀稳定很慢。因此，有荷载与无荷载的稳定标准有所不同，本标准规定 2h 的读数差值不大于 0.01mm 作为稳定标准。

26 收缩试验

26.1 一般规定

26.1.1 收缩试验与缩限试验的区别主要是目的不相同。收缩试验是测定土的收缩特性，适用的土样状态不同，适用于原状土和击实黏性土的试样；而缩限试验适用于含水量不小于液限的扰动土样。因而，试验方法也不同。

26.2 仪器设备

26.2.1 收缩仪多为自制，采用轻金属制成百分表架和托盘连在一起的形式，以便整体称量，避免反复装卸试样。

26.3 试验步骤

26.3.4 由于收缩试验是测定不同收缩时刻的收缩率及收缩系数，因而根据试样的温度及收缩速率，采用相应的时间进行称量（包括整个装置和试样）。

26.4 计算、制图和记录

26.4.5 由于原状土和击实土试样不一定饱和，为符合缩限定义，该指标借绘图法求得，如图 26.4.5 所示。同时，按定义：在收缩过程中，缩限是体积不再变化时所对应的含水率，如图 26.4.5 中的 C 点所对应的含水率。但在实际试验中很难确定这一点，因此，通常用Ⅰ、Ⅲ阶段直线延长线的交点 E 所对应的含水率 w_s 代替。根据试验和计算，含水率小于 w_s 后，土体减小的收缩率仅为总收缩率的 5%～10%；太沙基也曾测得这种附加的收缩率小于总收缩率的 5%。可见以 E 点代替 C 点的误差是不大的。

27 膨胀力试验

27.1 一般规定

27.1.2 膨胀力是黏质土遇水膨胀而产生的内应力。伴随此力的解除，土体即发生膨胀。根据实测，当不允许土体发生膨胀时，有的黏质土的膨胀力可达 1600kPa，所以膨胀力的测定很有意义。在室内测定膨胀力的方法有多种，国内外采用最多的是外力平衡内力的方法，即平衡法。本标准规定采用平衡法。

27.3 操作步骤

27.3.3 在平衡法试验中，平衡不及时或施加过量的压力都会影响到土的潜能势的发挥，膨胀力随允许膨胀量的增大而增大。试验资料表明，当允许膨胀量由 0.01mm 增加至 0.1mm，再加载平衡时，膨胀力将提高 50%。为了提高试验准确度，允许膨胀量应限制到 0.005mm。由于仪器本身变形和测量准确度不够，所以，本标准规定允许膨胀量为 0.01mm。

27.3.4 对变形较大的仪器，在施加平衡荷载时应注意使量表指针不要退回到零位或初读数，而是指向与压力相对应的仪器变形位置。

28 土的静止侧压力系数试验

静止侧压力系数是土体在无侧向变形条件下，有效侧向应力与有效轴向应力之比。静止侧应力系数是用于确定天然土层的水平向应力以及挡土墙结构物在静止状态水平向应力的计算。根据静止侧压力系数的定义，在轴对称试样中 $\varepsilon_2=\varepsilon_3=0$ 时：

$$K_0=\frac{\sigma_3'}{\sigma_1'}=\frac{\sigma_3-u}{\sigma_1-u} \tag{10}$$

如果施加在试样上的轴向总应力 σ_1 保持不变，对于饱和土来说，开始时试样上的侧向总应力 σ_3 与 σ_1 之比接近 1，随着排水固结的过程，总应力逐渐转换为有效应力。因此，用总应力表示的比值是逐渐减小的。但在整个试验过程，有效应力的比值基本保持常数，所以用有效应力定义静止侧应力系数。

在进行静止侧压力系数测定时，要求主应力方向是水平向和垂直向的，即试样的上面、下面和侧面都是主应力面，不存在剪应力。能够用于这种试验的仪器和方法很多，目前应用较多的，按试验方法及仪器设备来分大致有两类：一类是三轴仪及相应的保持试样在加压过程中不发生侧向变形的条件。另一类是侧压力仪，在施加轴向压力后试样不允许发生侧向变形，即轴向应变和体积应变相等，在此条件下试样侧面所承受的压力即为静止侧压力。

根据我国目前的设备，采用侧压力仪进行试验的较多，且有定型的仪器，为此，本次标准修订仅列侧压力仪法。

28.2 仪 器 设 备

28.2.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 侧压力仪的原理与密闭受压室(Cell)相似。它与三轴仪

的差别主要有两方面：一是在试验过程中受压室的阀门关闭，液体密闭在受压室中，当增大轴向压力时，由于保持试样侧向不允许变形，受压室中的液体压力也增大；二是加轴向压力的传压板直径与试样直径相等，试样受力发生压缩后，由于密闭受压室的容积仍保持不变，试样不可能发生侧向变形，轴向变形等于体积应变。用这种仪器测定静止侧压力，密闭受压室必须密封不漏水。密闭受压室外罩、量测密闭受压室液体压力的管路等装置，在承受压力后不应发生变形，否则将引起试样侧向变形。

3 侧压力仪用压力传感器量测密闭受压室的液体压力，传感器应有足够的灵敏度，又要有相当的刚度，以免量测时变形较大而引起试样侧向变形。传感器应定期标定，测得电压或电阻与压力之间的关系，求得标定系数。

28.3 操作步骤

28.3.1 黏土试样的静止侧压力试验应按下列步骤进行：

1 侧压力仪的试样直径一般采用61.8mm，同环刀尺寸一致。试样的高度与直径之比不宜过大，尤其是黏质土，由于固结时间与试样高度有关，高度太大，所需的时间太长，而且在固结过程中，沿试样高度空隙水压力大小不等，虽然沿试样高度的平均侧向变形等于零，但是局部会发生侧向变形。试样高度减小，可以减少这种局部发生侧向应变的影响。但高度太小，试样上、下两端透水板摩擦作用对侧压力也会产生影响。根据经验，用侧压力仪测定静止侧压力系数，试样的径高比宜用1。

5 本试验方法为排水试验，加荷等级和加荷历时要按第17.2.2条第6款和第10款的规定施加。

29 振动三轴试验

29.1 一 般 规 定

29.1.2 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。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）、动孔隙水压力特性、动弹性模量、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；二是动力变形特性试验，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地反映实际现场条件，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方法，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。

29.2 仪器设备

29.2.1 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、气动力激振式和液压伺服激振式。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。目前较多采用的是计算机控制的液压伺服单向激振式，因此本试验以液压伺服单向激振式振动三轴仪为例进行编写。

29.2.2 振动三轴仪在使用前应认真检查。孔隙水压力量测系统应不漏水、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±10%；振动频率在0.1Hz～10Hz范围内可调；振动荷载在大应变时应基本稳定，增减变化小于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。

29.3 操作步骤

29.3.1 试样制备应符合下列规定：

1 本标准规定采用的尺寸，主要是为了符合目前国内使用仪器的情况。试样的高度以试样直径的2倍～2.5倍为宜。

3 扰动土试样制备。要求成型良好，密度均匀，完全饱和，结构状态尽可能接近现场情况，试样制备是整个试验中最关键性的

环节。

4　砂土试样制备。当前砂样成型均采用样模(对开或三瓣)、抽气(使橡皮内膜紧贴模壁,保证形状均匀,尺寸合格),并施加负压(使试样挺立,便于拆模和量取试样尺寸)等3个措施,效果良好。量取试样直径时,一般取上、中、下三个数据,必要时考虑橡皮膜厚度的校正。

为了达到密度均匀,常用在一定试模体积内装相应干砂量(取决于控制的密度)的方法控制。当干装或湿装时,常将按预定密度和体积计算称取的干砂或湿砂分成5等份～6等份,每份填装于同密度相应的体积内,最后进行饱和。当直接填装饱和砂时,常用两种方法:一是将称取的砂样浸水饱和,再按一定方法(取决于要求的密度)正好装满预定的体积;另一是直接从盛有已备妥的饱和砂土的量杯中取砂装样,称装样前后量杯的质量,计算实际装入的干砂量。

对于一组试验中的各个试样,固结后的密度应基本接近于要求的控制密度。对填土宜模拟现场状态用密度控制。对天然地基宜用原状试样。

29.3.2　为了使试样获得较高的饱和度,常用的方法有以下几种:①用脱气水制样;②将砂煮沸;③抽气饱和;④用脱气水循环渗流;⑤采用二氧化碳加反压力饱和。这些提高饱和度的方法应该配合使用。二氧化碳饱和法主要利用二氧化碳比空气重,易溶于水的特性。这样,可以在安装好试样后,自下而上连接通入二氧化碳,使其尽量排除试样中可能残留的空气,接着再自下而上通入脱气水。此时,二氧化碳溶于水,原先由二氧化碳所占据的孔隙即可由水代替,达到饱和的目的。二氧化碳饱和法一般应用于要求制样密度较低砂土试验。反压力饱和是预先向试样内施加一定的压力,使残留在试样中的气泡压缩变小以致溶解于孔隙水中,达到增大饱和度的目的。反压力饱和可与上述各种饱和方法结合使用。

29.3.5　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;一是从工程对象所能允许经受的破坏应变。前者从研究土性的变化出发,后者从研究工程对象稳定性出发。当然土体达到破坏时,由它做成的构筑物或地基自然发生破坏,所以上述两种含义基本一致。但是,土在各向不等压固结情况下受动荷载作用时,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。

本标准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 2Hz～10Hz,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。

29.3.6 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。本标准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载振动预定次数 N 时，将引起孔隙水压力的一定发展，此时进行第二级动荷载下的振动，该孔隙水压力将影响第二级动荷载下的变形，也就是每一级动荷载下的变形将受到前面各级动荷载的累积影响。因此，对砂土一般不建议采用多级加荷试验方法。对黏性土或其他孔隙水压力增长影响较小的情况，可采用一个试样逐级加荷试验。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。

29.3.7 动力残余变形特性试验的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。

29.4 计算、制图和记录

29.4.2 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。这是因为,对于某些砂土,σ_0' 可以对动剪应力与破坏循环周次关系曲线进行归一。即在同一固结应力比下,不管 σ_0' 的大小,试验点基本落在同一条 τ_d/σ_0'-N_f 曲线上。这说明在通常的固结压力范围内,液化应力比与循环振动次数有关,与固结压力无关,利用这一特点,在某一固结应力比下,可只选用一个或较少的侧向固结压力进行液化试验。

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,因此标准列入这一整理方法。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。

29.4.3 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。

29.4.5 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，标准仅建议了最基本的整理方法。

30 共振柱试验

30.1 一 般 规 定

30.1.1 由于共振柱试验设备和试样尺寸的限制，规定本标准适用于砂土和细粒土。

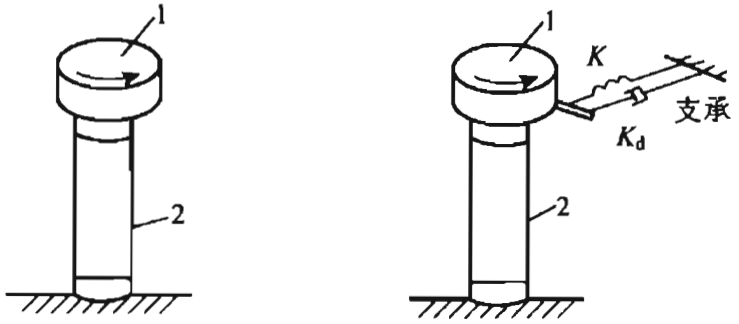
30.1.2 共振柱试验是用圆柱状或圆筒状试样以不同频率的谐波激振力顺次使试样振动，测定其共振频率，以确定弹性波在试样中传播的速度，从而计算动剪切模量、动弹性模量和阻尼比。共振柱试验适用的试样应变范围为 $1\times10^{-6}\sim1\times10^{-4}$，测试结果宜包括下列内容：

(1)最大动剪模量或最大动弹性模量与平均有效固结应力的关系曲线；

(2)动剪切模量和阻尼比对动剪应变幅的关系曲线，或动弹性模量和阻尼比对动轴向应变幅的关系曲线。

30.2 仪 器 设 备

30.2.1 共振柱仪按其约束条件分为一端固定另一端自由和一端固定另一端用弹簧和阻尼器支承两种形式，如图 16 所示。不论哪一种形式的共振柱仪都是由三部分组成：①压力室和施加固结压



(a)一端固定另一端自由　　(b)一端固定另一端用弹簧和阻尼器支承

图 16　共振柱形式示意图

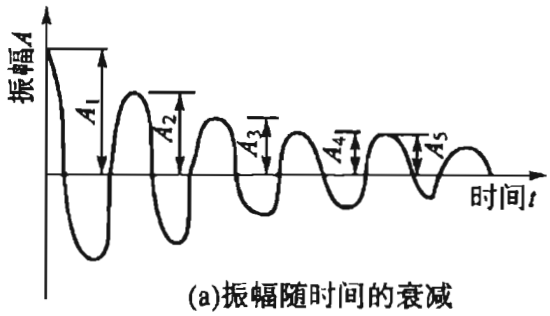
1—附加质量；2—试样

力的加压系统；②激振器及调节振动频率和振动力大小的激振系统；③位移、速度或加速度传感器及计算机数据采集系统。

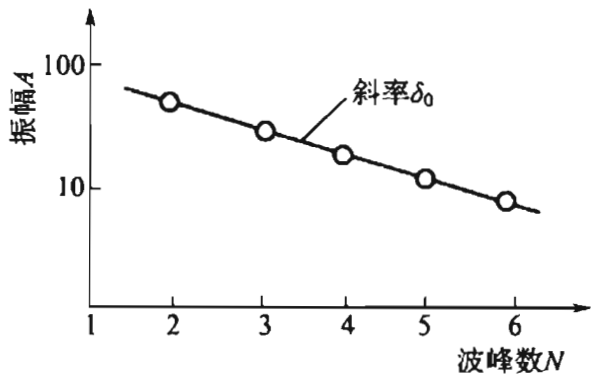
30.3 操 作 步 骤

30.3.3 激振器、位移传感器、加速度传感器都放在压力室中，安装在水面以上可以上下移动使之与试样接触但不能扭转的圆盘上。试样用橡皮膜包扎安装在水面以下，周围压力和轴向压力都用压缩空气施加。轴向压力与周围压力可以不相等。如果激振器和传感器都安装在试样顶端，试样的顶端自由，轴向压力和周围压力相等，则只能在各向等压作用力下试验。

30.3.4、30.3.5 共振柱试验测定阻尼比也有两种方法，即自由振动法和稳态强迫振动法。常用的是自由振动法，即在试样自由的一端先施加扭转激振力，然后迅速切断电源，释放扭力，使试样自由振动。由于阻尼作用，扭转振幅越来越小，最后停止振动。振动的衰减曲线见图 17。若用稳态强迫振动法，则可按本标准第 30.3.4 条第 4 款的规定测定。



(a)振幅随时间的衰减



(b)振幅对数随波峰数的衰减

图 17 自由振动振幅衰减曲线

30.4 计算、制图和记录

30.4.3、30.4.5 计算式中的无量纲频率因数 β_s、β_L 分别表示扭转振动和轴向(纵向)振动时的试样和其顶部附加质量的转动惯量的比值 I_0/I_t 和质量比值 m_0/m_t。以扭转振动的 β_s 为例，推导如下：

(1)对一端固定一端自由的共振柱，根据动力平衡条件及边界条件解圆柱发生扭转振动的波动方程，得出在振动时试样顶端的扭转角 θ_t 对静力矩扭转角 θ_s 的放大倍数为：

$$\frac{\theta_t}{\theta_s}=\frac{\frac{v_s}{\omega H}\sin\frac{\omega H}{v_s}}{\cos\frac{\omega H}{v_s}-\frac{I_t}{I_0}\frac{\omega H}{v_s}\sin\frac{\omega H}{v_s}} \tag{11}$$

式中：θ_t——静力扭矩 M 施加于圆柱试样顶端时的扭转角 $\left(\frac{MH}{GI_0}\right)$；

v_s——剪切波速(cm/s)。

由于圆柱体发生共振时在无阻尼条件下放大倍数无限增大，因此共振时的圆频率 ω_n 应满足下式：

$$\frac{\omega_n H}{v_s}\tan\frac{\omega_n H}{v_s}=\frac{I_0}{I_t} \tag{12}$$

若用 β_s 表示 $\frac{\omega H}{v_s}$，且 β_s 的数值较小可近似取：

$$\beta_s\tan\beta_s\approx\beta_s^2=\frac{I_0}{I_t} \tag{13}$$

(2)对一端固定一端有约束的共振柱，根据试验资料得知，仪器阻尼系数对确定剪切模量没有很大影响。在此情况下试样发生共振时的圆频率应满足下式：

$$\frac{\omega_n H}{v_s}\tan\frac{\omega_n H}{v_s}=\frac{I_0}{I_t-\frac{k_s}{(2\pi f)^2}} \tag{14}$$

式中：k_s——弹簧系数，$k_s=(2\pi f_0)^2 I_t$。

根据式(13)，则得：

$$\beta_s \tan\beta_s = \frac{I_0}{I_t} \frac{1}{1-\left(\frac{f_0}{f_n}\right)^2} \tag{15}$$

(3)对于轴向振动，可以进行类似的推导。

30.4.6 本标准式(30.4.6-1)是由试样端部用一个弹簧和一个阻尼器表示的单自由度质点振动系统得出的。对试样顶部有激振器和传感器的振动系统，振动系统的质量应为试样质量 m 和试样顶部附加物质量 m_t 的总和。这样需对试样的对数衰减率给予修正。根据阻尼比的定义，设未修正阻尼比 λ，修正的阻尼比为 λ'，则：

$$\frac{\lambda}{\lambda'} = \sqrt{\frac{m+m_t}{m}} = \sqrt{1+\frac{m_t}{m}} \tag{16}$$

将试样质量换算成等效的集中质量 $0.405m$，则式(16)改为：

$$\lambda = \lambda' \sqrt{1+\frac{m_t}{0.405m}} \tag{17}$$

对扭转振动的试样，也可用相同的修正值：

$$\lambda = \lambda' \sqrt{1+\frac{I_t}{0.405I_0}} \tag{18}$$

31　土的基床系数试验

基床系数与地基土的类别(砾状土、黏性土)、土的状况(含水率、密度)、风化程度及物理力学特性、岩土体性状与结构、基础的形状及作用面积受力状况有关。这些因素共同决定了基床系数是一个不易确定的指标,各种确定基床系数的测试方法都有一定的局限性和应用范围。

当前用于测定基床系数的标准方法是原位载荷试验(或 K_{30} 试验),随着我国地铁工程、隧道工程的纷纷开建,用原位载荷试验(或 K_{30} 试验)测定基床系数的方法局限性愈发突出。目前,就室内测定基床系数的方法仅在现行国家标准《城市轨道交通岩土工程勘察规范》GB 50307 中提出了可用三轴试验和固结试验方法确定基床系数的描述。

虽然国内学者对基床系数的试验方法进行了大量研究工作,但现阶段直接用某种试验确定地基土的基床系数尚不十分成熟,需要采用多种试验方法并与已有的地区经验值对比后综合确定。

本章主要参考现行国家标准《城市轨道交通岩土工程勘察规范》GB 50307—2012 第 7.3.10 条条文说明、论文"关于用室内三轴(CD)试验方法确定基床系数的探讨"[吴英,印文东. 上海地质,2007(102):38～40]等进行编写。

31.3　操 作 步 骤

31.3.2　为了使土样受力状态与天然状态下相似,通常采用 K_0 状态下固结,即根据土性及埋深确定自重应力,测算出侧向围压。

31.3.4　在试验过程中,σ_1 是一个变量,要满足 $n=0$,需控制围压不变,即 $\Delta\sigma_3=0$。

32 冻土含水率试验

32.1 一般规定

32.1.2 联合测定法是采用一个试样，同时测定密度和含水率两个指标。这种方法对冻土更为适用。由于冻土的结构极不均匀，用一般方法分别取试样测定冻土的含水率和密度，往往使这些指标间彼此不协调。用联合测定法同时测定含水率和密度，这样就能克服分别测定时存在的缺点，使试验资料彼此协调。

联合测定法是通过量测已知质量的试样所排开水的体积来求得密度，并利用颗粒比重来计算含水率。在计算中取水的密度为$1g/cm^3$，温度对水的密度的影响可以忽略不计。

联合测定法只适用于易分散的层状和网状结构的黏质冻土和砂质冻土。

32.2 烘 干 法

32.2.2 烘干法试验应按下列步骤进行：

1 由于冻土结构很不均匀，在不同部位和不同时间，含水率变化很大。为了使试验结果准确可靠，应选择具有代表性的试样，且试样质量应较多，故标准规定试样不宜小于50g。

关于平行试验差值。由于冻土中冰、水成分分布极不均匀，其平行试验差值往往比融土的大。对于整体状结构的冻土，平行试验差值绝大多数在3%以内，只有个别试样大于3%。因此，参照一般土含水率平行差值的要求，确定了冻土含水率试验平行差值的要求，见表32.2.2。

2 平均试样法是将土样用四分法取出1000g～2000g试样，并使其融化，搅拌成糊状稠度。如果试样过干可加水，过湿可将多

余水分吸出，这对计算冻土总含水率没有影响。

关于层状和网状结构的冻土，若采用一般取样方法进行试验，当含水率小于液限时，其平行试验的差值一般为5%，个别的达到10%以上；对于含冰层土，其平行差值一般为10%，有的竟达到20%。因此，对于层状和网状结构的冻土必须采用平均试样法，其平行差值可控制在1%以内。

32.2.3 平均试样法计算公式如下：

试样干土质量：

$$m_d = \frac{m_{f1}}{1 + 0.01w_n} \tag{19}$$

试样的含水率：

$$w_f = \left(\frac{m_{f0}}{m_d} - 1\right) \times 100 \tag{20}$$

将式(19)代入式(20)中得：

$$w_f = \left[\frac{m_{f0}}{m_{f1}}(1 + 0.01w_n) - 1\right] \times 100 \tag{21}$$

式中：m_{f0}——冻土试样质量(g)；

m_{f1}——调成糊状的土样质量(g)；

w_n——平均试样含水率(%)。

32.3 联合测定法

32.3.2 联合测定法试验应按下列步骤进行：

7 当试样完全融化并呈松散状态后，筒中水面下降，这时应补充加水至虹吸管以上，以便测定土颗粒的排水体积。

32.3.3 联合测定法含水率计算公式的推导：

土颗粒体积：

$$V_s = \frac{m_{f0} - m_w}{\rho_w G_s} \tag{22}$$

土颗粒在水(排液筒)中的质量：

$$V_s(G_s - \rho_w) = m_{tws} - m_{tw} \tag{23}$$

联立式(22)、式(23)可解得 m_w 为：

$$m_w = \frac{G_s m_{tw} + m_{f0}(G_s - \rho_w) - G_s m_{tws}}{G_s - \rho_w} \tag{24}$$

根据含水率定义：

$$w_f = \frac{m_w}{m_{f0} - m_w} \times 100 \tag{25}$$

将式(24)代入式(25)，即可得：

$$w_f = \left[\frac{m_{f0}(G_s - 1)}{(m_{tws} - m_{tw})G_s} - 1\right] \times 100 \tag{26}$$

式中：V_s——土颗粒体积(cm^3)；

m_{f0}——冻土试样质量(g)；

m_w——冻土试样中水的质量(g)；

m_{tws}——筒、水和土颗粒的质量(g)；

ρ_w——水的密度(g/cm^3)；

m_{tw}——筒加水的质量(g)。

33 冻土密度试验

33.1 一般规定

33.1.2 冻土密度是冻土的基本物理指标之一。它是冻土地区工程建设中计算土的冻结或融化深度、冻胀或融沉、冻土热学和力学指标、验算冻土地基强度等所需的重要指标。测定冻土的密度，关键是准确测定冻土试样的体积。

33.1.3 考虑到国内不少单位没有低温试验室，故规定无负温环境时应保持试验过程中试样表面不得发生融化，以免改变冻土的体积。

33.2 浮称法

33.2.5 冻土的基本构造有整体状、层状和网状，不同构造的冻土，其不均匀性差别较大。因此，冻土密度平行试验的差值较之融土密度平行试验差值要大。整体状的冻土的结构一般比较均匀，故要求平行试验最大允许差值应为$\pm 0.03 g/cm^3$，与融土试验的规定一致；而层状和网状构造冻土的结构均匀性差，平行试验的差值超过误差范围，此时，可以提供试验值的范围。

33.4 环刀法

33.4.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 为了适应冻土结构的不均匀性，所以环刀容积要大一些，但太大会增加取样的困难。环刀尺寸国外有的采用直径为100mm～120mm，高度为80mm～100mm。本标准规定冻土试样的体积不得小于$500cm^3$。

34 冻结温度试验

土的冻结是以土中孔隙水结晶为表征。冻结温度是判别土是否处于冻结状态的指标。纯水的结冰温度为0℃，土中水分由于受到土颗粒表面能的束缚且含有化学物质，其冻结温度均低于0℃。土的冻结温度主要取决于土颗粒的分散度、土中水的化学成分和含量以及外加载荷等。

34.2 仪器设备

34.2.1 本试验采用热电偶测温法，因此需要零温瓶和低温瓶。若采用贝克曼温度计（分辨度为0.05℃，量程为－10℃～＋20℃），则可省略零温瓶、数字表和热电偶。

34.3 操作步骤

34.3.1 原状土试验应按下列规定进行：

7 土中的液态水变成固态的冰这一结晶过程大致要经历三个阶段：先形成很小的分子集团，称为结晶中心或称生长点（germs）；再由这种分子集团生长变成稍大一些团粒，称为晶核（nuclei）；最后由这些小团粒结合或生长，产生冰晶（icecrystal）。从冻结过程的温度曲线上可以看出：第一阶段，土体开始冷却和过冷，此时土中水尚未冻结成冰，其持续时间取决于土中的水量和冷却速度；第二阶段，土中冰晶已形成，由于水结晶而放出大量的潜热，使土体温度剧烈上升；第三阶段，孔隙水结冰阶段，这阶段中土体的稳定温度就是土中水的冻结温度。所以，土中水冰结的时间过程一般须经历过冷、跳跃、恒定及降低阶段。当出现跳跃时，热点势会突然减少，接着稳定在某一

数值，此即为开始冻结。因此标准中规定："当电势值突然减小并连续3次稳定在某一数值(相应的温度即为冻结温度)时，试验结束"。

35 冻土导热系数试验

35.1 一般规定

35.1.2 导热系数的测定方法分两大类:稳定态法和非稳定态法。稳定态法测定时间较长,但试验结果的重复性较好;非稳定态法具有快速特点,但结果重复性较差。因此,本试验采用稳定态法。稳定态法中,通常使用热流计法。但国产热流计的性能欠佳,故采用比较法,采用导热系数稳定的物质作为标准试样。导热系数用于土体冻融深度、热量周转、温度场计算以及冻土地区建筑工程有关的热工计算中,因此,其在土的热物理指标中占有相当重要的位置。

35.3 操作步骤

35.3.3 采用比较法测定冻土导热系数应采用导热系数稳定的物质作为标准试样。一般常用标准砂、石蜡等。标准砂的密度控制不易准确,因而,本标准采用石蜡作为标准试样。

35.3.7 稳态比较法应遵循测点温度不随时间而变化的原则,但实际上很难做到测点温度绝对不变。因此规定连续 3 次同一测点温差值小于 0.1℃则认为以满足方法原理。

35.4 计算和记录

35.4.1 冻土导热系数是在单位厚的冻土层,其层面温度相差 1℃时,单位时间在单位面积上通过的热量,它表示土体导热能力的指标。

36 冻土的未冻含水率试验

本标准采用的方法是依据冻土的未冻含水率与负温为指数函数的规律，通过测定不同初始含水率的冻结温度（冰点），利用双对数关系计算出未冻含水率的两点法。该法能满足试验准确度的要求，同时与冻结温度试验方法相同。

36.3 操 作 步 骤

36.3.1 冻土的未冻含水率随初始含水率的变化略有变化。初始含水率过小，会因冰点测定不准而带来较大的误差。因此，不同初始含水率宜在液限和塑限之间。

36.3.2 可以将制备好的三个不同初始含水率的试样，同时放入装试样杯的聚氯乙烯管内，一起进行试验。

37 冻胀率试验

37.1 一般规定

37.1.1 土体不均匀冻胀变形是寒区工程大量破坏的重要因素之一。因此，各项工程开展之前，必须对工程所在地区的土体作出冻胀性评价，以便采取相应措施，确保工程构筑物的安全可靠。土体冻胀变形的基本特征值是冻胀量。但由于各地冻结深度等条件不同，其冻胀量值相差很大。为了便于比较冻胀变形的强弱，因此，采用冻胀量与该冻结土层厚度之比，即冻胀率（用百分数计）作为土体冻胀性的特征值。

在特定条件下，土的冻胀性是确定的。但在土的冻胀性的评价方法和等级划分标准上，目前国内外不尽一致。我国现行行业标准《冻土地区建筑地基基础设计规范》JGJ 118 采用冻胀率来分级，见表 4。

表 4 冻胀性分级表

冻胀率 η(%)	$\eta \leqslant 1$	$1 < \eta \leqslant 3.5$	$3.5 < \eta \leqslant 6$	$6 < \eta \leqslant 12$	$\eta > 12$
冻胀等级	不冻胀	弱冻胀	冻胀	强冻胀	特强冻胀

我国现行行业标准《水工建筑物抗冰冻设计规范》SL211—2006 则按冻胀量进行划分，见表 5。

表 5 冻胀性分级表

冻胀量 Δh (mm)	$\Delta h \leqslant 20$	$20 < \Delta h \leqslant 50$	$50 < \Delta h \leqslant 120$	$120 < \Delta h \leqslant 220$	$\Delta h > 220$
冻胀性级别	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ

在现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 中，按地基土含水状态、地下水补给条件和冻胀性关系，分为不冻胀、弱冻

胀、冻胀及强冻胀性四类。

美国用冻胀速度分级，俄罗斯（ГОСТ28622）按冻胀率划分，其标准与我国接近。土的冻胀性，可通过现场直接观测和室内试验来测定。室内试验不受季节和时间限制，能控制冻结过程中有关条件，便于标准化。但影响土冻胀的因素，如土的结构状态、原位冻融情况、地下水变化等条件的模拟和控制比较复杂。

原状冻土和扰动冻土的结构差异较大，为对冻胀性作出正确评价，试验一般应采用原状土进行。若条件不允许，非采用扰动土不可时，应在试验报告中予以说明。本试验方法与目前美国、俄罗斯等国所用方法基本一致。所得数据用于评价该种土的冻胀性略偏大，在工程设计上偏安全。

37.3 操作步骤

37.3.1 原状土应按下列规定进行：

2 试样尺寸以往多采用直径和高度均为 15cm～24cm。各国的试样尺寸也不尽相同。本标准考虑到原状土取土设备的尺寸及土体的均匀程度，试样尺寸建议采用直径 10cm、高 5cm。

5 在水源的补给上，根据不同条件分封闭和敞开系统的两种方法。衔接的多年冻土地区及地下水位较深的季节冻土地区，无外界水源（大气降雨、人工排水）补给条件的地区，可视为封闭系统；而有水源补给条件的地区，可视为敞开系统，本标准所列方法适用于敞开系统。若进行封闭系统的试验，可将供水装置关闭。

9 土体冻胀量是土质、温度和外载条件的函数。当土质已定且不考虑外载时，温度条件就至关重要。其中起主导作用的因素是降温速度。冻胀量与降温速度大致呈抛物线型关系。

38 冻土融化压缩试验

38.1 一般规定

38.1.2 冻土融化时在荷载作用下将同时发生融化下沉和压密。在单向融化条件下，这种沉降符合一维沉降。融化下沉是在土体自重作用下发生的，而压缩沉降则与外部压力有关。目前国内外在进行冻土融化压缩试验时首先是在微小压力下测出冻土融化后的沉降量，计算冻土的融沉系数，然后分级施加荷载测定各级荷载下的压缩沉降，并取某压力范围计算融化压缩系数。由此可以计算冻土融化压缩的总沉降量。

38.2 仪器设备

38.2.1 冻土融化压缩试验的尺寸，国外取高度(h)与直径(d)之比为 $h/d \geqslant 1/2$，最小直径取 5cm，对于不均匀的层状和网状构造的黏质土，则根据其构造情况加大直径并使 $h/d=1/5 \sim 1/3$。国内曾采用的试样环面积为 45cm²、78cm²两种，试样高度有 2.5cm、4cm。考虑到便于利用固结仪改装融化压缩仪，故规定可取试样环直径与固结仪大环刀直径(79.8mm)一致，高度则考虑冻土构造的不均匀性，取 40.0mm，这样高度与直径之比基本为 1∶2。

为了模拟天然地层的融化过程，在试验中必须保持试样自上而下的单向融化，因此，除单向加热使试样自上而下融化外，还必须避免侧向热传导而造成试样的侧向融化，这样，试样容器需用坚固的非金属(胶木、有机玻璃等)材料加工制作，以防止侧向传热。

38.3 操作步骤

38.3.1 试验时在负温环境下或较低室温下进行。土温太低，切

样时往往造成脆性破碎；太高时，切样时表面要发生局部融化。温度一般控制在0.5℃～1.0℃。

38.3.2 室内试验采用的冻土试样有原状冻土和用扰动融土制备的冻土试样。一般采用原状土。

根据原状冻土相同的土质、含水率的扰动土制成的冻土试样进行的对比试验表明：扰动冻土试样的融沉系数小于原状冻土的融沉系数，其差值一般均小于5%。因此，在没有条件采取原状冻土时，可用扰动融土根据冻土天然构造及物理指标（含水率、密度）进行制样。必要时，对融沉系数作适当的修正。

38.3.5 测定融沉系数 α_{f0} 值时，本标准规定施加1kPa的压力。这主要是考虑克服试样与环壁之间的摩擦力。而且，冻土在融化过程中单靠自重下沉的过程往往很长，所以，施加这一小量压力可以加快下沉速度，又不致对融化土骨架产生过大的压缩，对 α_{f0} 的影响甚微。

38.3.6 试验中当融化速度超过天然条件下的排水速度时，融化土层不能及时排水，使融化下沉发生滞后现象。当遇到试样含冰（水）量较大时，若融化速度过快，土体常发生崩解现象，使土颗粒与水分一起挤出，导致试验失败或 α_{f0} 值偏大。因此，循环热水的温度应加以控制。根据已有试验，本标准规定水温控制在40℃～50℃。加热循环水应畅通，水温要逐渐升高。当试样含冰（水）量大或试验环境温度较高时，可适当降低水温，以控制4cm高度的试样在2h内融化完为宜。

39 原位冻土融化压缩试验

39.1 一般规定

39.1.1 原位冻土融化压缩试验方法与融土的载荷试验方法相似。先在无荷载作用下，加热地基冻土，使其融化下沉稳定后，再逐级加载进行压缩试验。与载荷试验不同的是载荷试验没有界定的压缩土层，而融化压缩试验有一界定的融化深度。该办法由于比较复杂，劳动强度也较大，一般仅用于室内试验难以进行的冻结的粗颗粒土、含砾黏土和富冰土层。

39.2 仪器设备

39.2.2 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

2 由于融化速度是由传压板的温度来控制，在加热温度90℃时，原位试验约在8h内融化深度可达40cm。

39.3 操作步骤

39.3.11 停止加热后，依靠余热使试样继续融化，因此，仍应继续观测融沉变形，当两小时内变形量，对细颗粒小于0.5mm，对粗粒土小于0.2mm时，即可认为达到稳定。然后逐级进行压缩试验。

40 原位冻胀率试验

土的冻胀性，可通过原位直接观测和室内试验来了解，原位试验工作量大，周期较长，但方法简易，结果比较实际和可靠，被广泛采用。

40.2 仪器设备

40.2.1 分层冻胀仪目前国内采用的有单独式和叠合式两种：单独式分层冻胀仪制作容易，用钻孔法埋设，对土的原有结构破坏较小，对地下水位高于冻深的地区尤为适用；叠合式分层冻胀仪能集中在一点观测分层冻胀，有利于成果的整理分析，其缺点是制作和埋设较麻烦，同时，由于埋设孔较大，仪器埋入后对周围土的温度场有影响。从观测数据的可靠性来考虑，本标准采用了单独式分层冻胀仪。

40.3 操作步骤

40.3.1 关于沿深度分层间距可视需要而定。分层多可以较详细地测得土层沿深度的冻胀性，但增加了测点及观测工作量；分层过少则不可能反映土层的分层冻胀性。本标准提出一般间距为20cm～30cm。冻深大的间距可取大些，反之间距可小些。

40.3.4 基准盘（梁）离地面的距离，本标准规定应大于40cm，这是考虑到测量方便和根据季节性冻土地区可产生的最大冻胀量，如渠系工程冻胀量往往达到30cm。

40.3.5 冻深和地下水位观测是冻胀观测中必须同时进行的基本项目。冻深观测一般用冻深器（胶管内装水）。这种方法由于外套管的影响，胶管内水的冻结不完全与土的冻结深度一致。但该法

方便易行，当没有条件做分层地温观测时，还是可以采用的。

地温观测可用电阻温度计，温度测点应与冻胀仪埋设的间距一致。地下水位管埋设深度至少应超过当地可能最低地下水位以下 50cm。

41 原位密度试验

41.2 灌 砂 法

41.2.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

3 灌砂法所用的量砂，应选择适当粒径使其密度变化较小。通过比较试验，认为粒径在 0.3mm～0.4mm 时密度变化较小。据国外资料，其粒径在 0.30mm～0.50mm 范围内的量砂密度较稳定。故本标准建议量砂直径为 0.25mm～0.50mm。

41.2.2 用套环灌砂法的试验应按下列步骤进行：

2 关于使用套环问题。一般灌砂法不用套环，直接在刮平的地面上挖试坑，然后灌砂求其体积。这样往往由于地面没有刮平，使所测试坑体积不够准确；采用套环，以套环上缘为一固定基准平面，先灌砂测定基准平面至地面之间的体积，见图 18(a)。挖试坑后，再测此基准平面至坑底之间的体积，见图 18(b)。两者之差即为试坑体积。这样即使地面不平，亦无影响。但此法增加了一个工序，称量达 6 次之多，不但试验时间较长，而且增加称量累计误差，是其缺点。

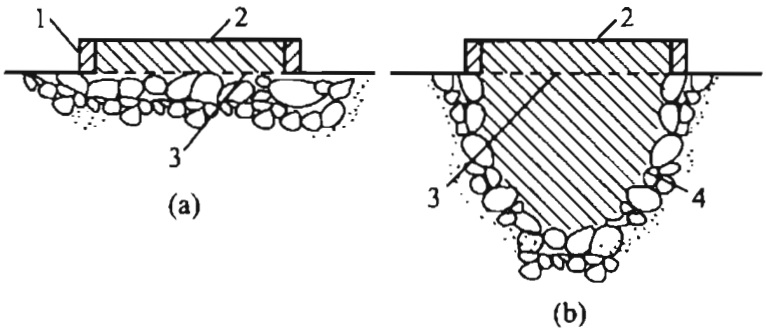


图 18 试坑和套环

1—套环；2—套环上缘部；3—地面；4—坑底

用套环法时，挖试坑前很难将套环内的量砂取净，所以标准中允许有一些量砂留在环内。但当挖试坑时，必须将此量砂和试样一同取出。如试坑直径较小时，可将套环内地面剥掉一薄层，以便将套环内量砂全部取出，见图 19。

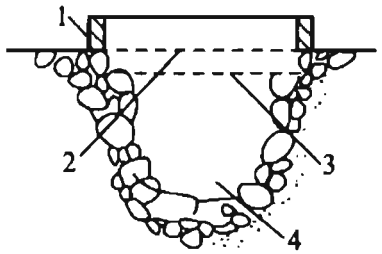


图 19　试坑

1—套环；2—原地面；3—剥掉一薄层；4—试坑

5　本试验是以标准物质（量砂）作为计量体积，所以标准物质的密度应稳定。因此，应在相同条件下（如落距、速度等）灌量砂，使其与校验量砂密度时一致，否则会引起过大的误差。

41.2.3　不用套环的灌砂法试验应按下列步骤进行：

2　本款规定的理由与第 41.2.2 条第 2 款的相同。

41.2.4　对于灌砂法和灌水法，标准中只规定了进行两次平行试验，其目的是为了相互验证。但由于填土密度变异性较大，而且这两种方法准确度较差，难以用平行试验差值来控制。故未规定最大允许平行差值。

41.3　灌　水　法

41.3.2　灌水法试验应按下列步骤进行：

1～3　工地用灌水法测量密度，测试方法是采用较大的试坑（与灌砂法相近），在坑内铺普通塑料薄膜后，灌水测定试坑体积。由于薄膜不能紧贴凹凸不平的坑壁，并有折、皱纹等现象，使测得的体积偏小，计算的干密度偏大，与灌砂法相比，有时差值达 0.03g/cm^3，为了解决试坑地面和试坑内壁平整度，本标准建议在试坑地面置

放相应尺寸的套环，并用水准尺找平，试坑内壁采用较柔软的薄塑料膜铺设，使之与坑底、坑壁紧密相贴，以提高测定试坑体积的准确度。

42 试坑渗透试验

42.1 一 般 规 定

42.1.2 原位渗透系数的测定，以抽水、注水法测定结果较为可靠。但由于设备复杂，耗费大，仅在特殊需要时才采用。本标准中仅列了试坑注水法，适用于埋藏较浅的土体，效果良好。但对细粒土应考虑毛细管引力对渗透系数的影响，否则将导致结果偏大，因此，在式(42.4.1-2)中考虑了毛细管升高的影响。同时此法适用于地下水面较深的地区，采用时应予以注意。

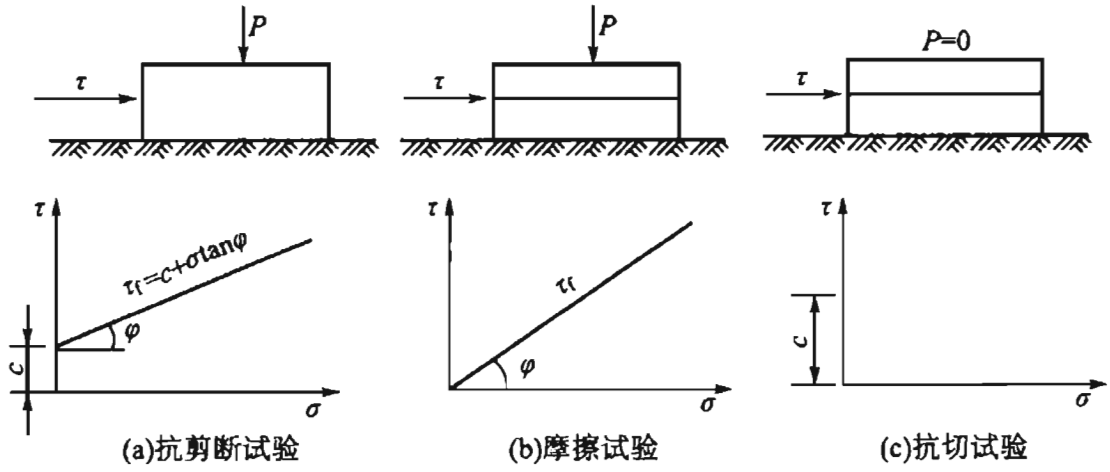
单环法由于没有考虑侧向渗透的影响，试验成果精度稍差；双环法基本排除了侧向渗透的影响，试验成果较为准确。

43 原位直剪试验

43.1 一 般 规 定

43.1.1 直接剪切试验是测定土体抗剪强度的方法之一，可用于岩土体本身、岩土体沿软弱结构面和岩体与其他材料接触面的剪切试验，可分为岩土体试体在法向应力作用下沿剪切面剪切破坏的抗剪断试验，岩土体剪断后沿剪切面继续剪切的抗剪试验（摩擦试验），法向应力为零时岩体剪切的抗切试验。

通常土体的原位剪切试验可分为沿剪切面剪切破坏的抗剪断试验，沿剪切破坏面继续剪切的抗剪试验（或称摩擦试验，或抗滑试验）以及抗切试验（法向应力为零），如图 20 所示。原位直剪试验由于试验的岩土试体比室内试样大，能包含宏观结构的变化，所以，试验条件接近工程实际情况。



(a)抗剪断试验　(b)摩擦试验　(c)抗切试验

图 20 剪切试验示意图

本标准包括两类试验：一类是抗剪断试验和抗切试验，它们都是用完整的试体，如图 20(a)、(c)所示；一类是抗剪试验，以两块

试体的接触面作为剪切面，如图 20(b)所示，这类试验用于确定软弱结构面上的抗剪强度。混凝土板与地基土的抗滑试验也属于此类。

在计算软基上混凝土闸、坝的稳定性时，除分析地基浅层或深层滑动外，还应核算建筑物沿地基表面的水平滑动，这时必须要有混凝土板和地基土之间的抗滑强度指标。抗剪试验适用于承受水平作用力较大的闸、坝工程；对于其他类似工程，如挡土建筑物等，应根据实际情况决定试验方法，如浸水时间和剪切方式等。当地基土为不均匀土层时，还应注意沿软弱层的抗滑稳定性。

43.1.2 原位直剪试验可在试洞、试坑、探槽或大口径钻孔内进行。当剪切面水平或近于水平时，可采用平推法或斜推法；当剪切面较陡时，可采用模形体法。同一组试验体的岩性应基本相同，受力状态应与岩土体在工程中的实际受力状态相近。

43.3 操作步骤

43.3.2 保持岩土试体的原状结构不被扰动是非常重要的，这是原位直接剪切试验的最主要的优点。

43.3.3 土体试样一般以圆形为宜，也可采用方柱体，其尺寸可根据土的不均匀程度及最大粒径确定。

43.3.4 在削好的试体套上剪切盒，试体与剪切盒之间的间隙应用砂或砂浆填充密实，这样能更好地传递垂直压力和剪切力。

43.3.5 原位直剪试验应根据工程地质条件、工程荷载特点、可能发生的剪切破坏模式、剪切面的位置及方向、剪切面的应力条件，选择相应的试验方法。

剪切力平行于剪切面(包括剪断的潜在剪切面和软弱面)时，为平推法，如图 21(a)、(b)所示；当剪切力与剪切面成 α 角时，为楔形体法，如图 21(c)所示。

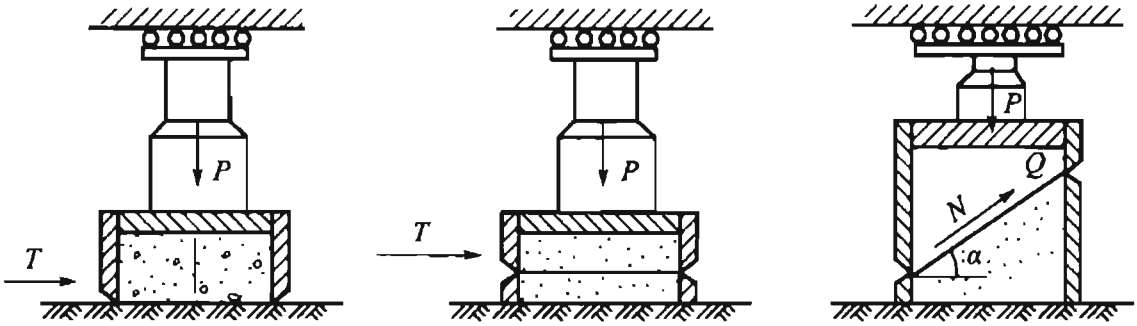


图 21　原位直剪布置方案

43.4　计算、制图和记录

43.4.3　绘制剪应力与剪切位移曲线，根据曲线特征，确定有关强度参数。

比例强度定义为剪应力与剪切位移曲线直线段的末端相应的剪应力。在比例强度前，剪切位移很小，比例强度后，剪切位移增加很大，用该特性来确定比例强度。

对于剪应力与剪切位移曲线没有直线段，一般具有硬化型曲线，这时应确定屈服强度。可以用剪切位移和垂直位移曲线特征来辅助确定，如图 22 所示，其中有两种情况：①垂直位移逐渐变小，当增量接近于零时的相应的剪应力值，即为屈服强度，如图 22(a)所示；②垂直位移从正值(试体压缩)变为负值(试样剪胀)时相应的剪应力值，即为屈服强度，如图 22(b)所示。峰值强度和残余强度是容易确定的。

关于抗滑混凝土试块开始滑动的水平力的选择问题，原则上应按应力-位移曲线上的峰点确定。但是曲线上有时没有明显的峰值或转折点。一般以出现下列情况作为试块开始滑动的特征：①水平力不增大，而水平位移呈直线增加，此点以前无明显位移；②水平力不断增大的同时，水平位移突然猛增；或水平力减小，而位移继续增大，在曲线上呈现明显的弯曲部段；③当曲线上有两个以上明显的弯曲部段，则参照重复试验曲线作综合分析。

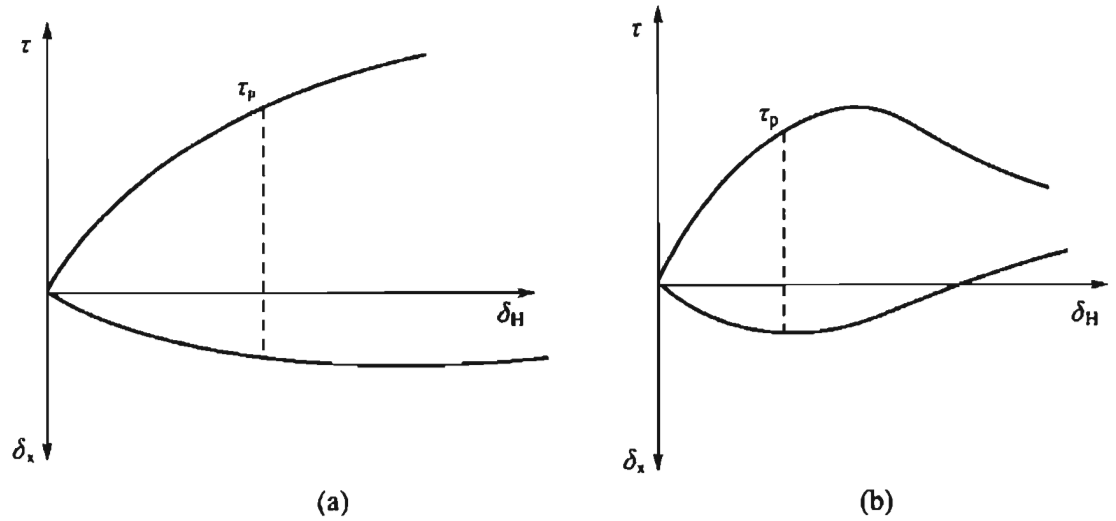


图 22　确定屈服强度辅助方法

43.4.4　原位直接剪切试验表明：土体在剪切力作用下发生破坏的过程一般分为三个阶段：第一阶段是剪应力从零到比例强度 τ_e，这一阶段为弹性（或准弹性），剪应力和位移曲线为直线（或接近直线），试体开始产生裂隙；剪应力从 τ_e 一直增加到 τ_f（峰值强度）属于第二阶段，这一阶段是裂隙发展和增长，当剪应力达到 τ_f 时，剪切面上就达到完全破坏；第三阶段，从 τ_f 开始强度不断降低，最终达残余强度，如图 23 所示。将不同垂直压力（即正应力 σ）条件下所得的不同强度值绘制成相应的曲线，即可得出相应的强度参数 c、φ。从图 23 上可以看出：残余强度是失去黏聚力而仅有摩擦力的强度。

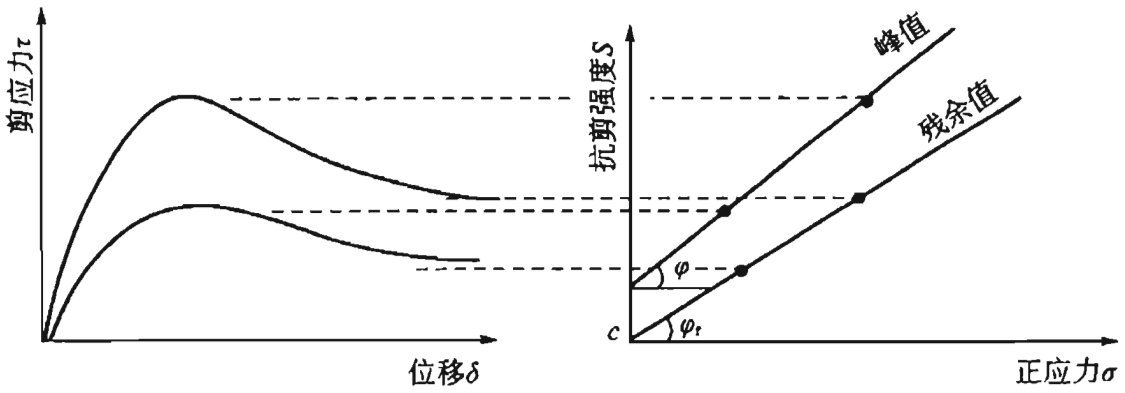


图 23　抗剪强度与正应力的关系

44 十字板剪切试验

44.2 电测式十字板剪切试验

44.2.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

2 关于十字板的规格。目前国际上十字板形状有矩形和菱形，矩形又分为高矩形和矮矩形。我国大多数使用的为高矩形，尺寸为 50mm×100mm 和 75mm×150mm 两种。

十字板厚度也应引起重视，它直接影响试验成果。根据试验表明：十字板厚度愈大，土的扰动也愈大，测得的抗剪强度 C_u 值就愈小。

44.2.2 电测式十字板剪切试验应按下列步骤进行：

6 关于剪切速率。曾用电测十字板剪切仪进行了剪切速率的对比试验，试验的速率为 0.1°/s 和 0.2°/s 两种，试验结果表明：两组强度曲线变化很有规律。剪切速率大，抗剪强度也大；剪切速率小，抗剪强度也小。因此，剪切速率应控制在适当范围内。

各国标准规定的剪切速率为 0.1°/s～0.5°/s，如美国为 0.1°/s，英国为 0.1°/s～0.2°/s，原苏联为 0.2°/s～0.3°/s，原联邦德国为 0.5°/s。理论上，对不同渗透性的土，规定相应的不排水条件的剪切速率是合理的。但实际操作时，不可能事先了解地基上层的渗透性，针对不同渗透性的土选用不同的剪切速率就难以实现。因此，为了统一，并与现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021 一致，本标准规定剪切速率为 1°/10s～2°/10s。

44.3 机械式十字板剪切试验

44.3.3 机械式十字板剪切试验应按下列步骤进行：

1 十字板头插入孔底的深度影响试验成果。美国规定为 $5d$

(d 为钻孔直径)，原苏联规定为 0.3m～0.5m，原联邦德国规定为 0.3m，本标准规定为 3 倍～5 倍套管直径。

3 标准中规定当进行下一试验点时，必须清除钻孔中的残土。目前多采用有孔螺旋钻和管钻清孔，很少采用冲洗法。在饱和软黏土中使用有孔螺旋钻清孔，其优点是能消除孔底的负压作用，保持孔壁不坍，且对孔底土层的扰动深度也较浅，这样十字板插入土层深 0.5m 即可。另外，采用全断面取蕊法钻进，也能清除孔内残土。

8 本款规定的理由与第 44.2.2 条第 6 款的相同。

9、10 关于轴杆校正。当十字板插入土层中旋转时，土层与轴杆之间产生摩擦阻力，这对试验成果是有影响的。因此，试验时必须进行轴杆校正。

45 标准贯入试验

标准贯入试验(简称标贯)起源于美国,1927 年 L. 哈特(Hart)和 C. F 弗莱彻(Fletcher)设计了一种直径为 2 英寸的对开式取土器,通过一系列试验之后,弗莱彻和 H. C. 莫尔(Mohr)采用了对开式取土器,质量为 63.5kg(140 磅)的锤,落高为 76.2cm(30 英寸),使贯入试验达到标准化。标准贯入试验原来是为深基础设计提供数据的,后来在美国普遍采用。1948 年太沙基(Terzaghi)和皮克(Peck)把试验数据制成图表,也用于浅基设计。

标准贯入试验已在国际上广泛应用,如美国、英国、日本、意大利、西班牙、葡萄牙、希腊、捷克等。我国自 1953 年原南京水利实验处引进研制后,首先在淮河水利工程的勘测设计中使用,由于标准贯入试验是一种简易迅速的原位测试手段,已广泛采用。近年来在国际上的技术合作和交流中,一般都要求标准贯入试验成果,如日本建筑学会制定的《建筑物基础结构设计标准同解说》及《建筑物钢桩基础设计施工标准同解说》中都明文规定 N 值为主要地基勘察成果之一。目前,在《岩土工程勘察规范》GB 50021 等很多标准与规范中,均列有试验要点和对地基土体的工程性质的评价方法。标准贯入试验已成为最常用和最广泛的原位试验方法之一。

45.2 仪器设备

45.2.2 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定:

1 本标准采用的贯入器规格尺寸是考虑到国内各单位实际使用情况,也参考多数国家常用的规格而选定的。贯入器规格国外标准多为外径 51mm,内径 35mm,全长 660mm～810mm。现行

国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021 规定贯入器对开管长大于 500mm。此外，欧洲标准规定贯入器内外径的误差为±1mm，这也是合理的，可以采用。

2 落锤的质量，按现行国家标准《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》GB/T 15406 的规定，误差值为±0.5kg，锤击速率不应超过每分钟 30 击。

关于落距控制，本标准规定为 76cm±2cm。根据以往国内外的试验对比表明：用人力牵引控制落锤和用卷扬机牵引控制落锤所得的锤击数均比自动落锤装置控制落距的锤击数要大。人力牵引的落锤击数比自动落锤击数要多 1.3 倍～1.6 倍。

当前自动落锤的装置，国内外均有很大的发展。由于自动落锤具有很大优越性，故本标准规定应用自动落锤装置。但在应用以往人力牵引落锤的资料时，应注意修正问题。

根据动能分析资料，落距误差在 2.0cm～5.0cm 以内，对 N 值影响较小，若误差为±7.5cm 时，动能变化达±10%。为此，采用欧洲标准的规定：落距为 76cm±2cm。

3 标准规定用直径为 42mm 的钻杆，主要是根据国内实际情况，也与各国标准大致相同。钻杆壁厚和直径不同，其单位长度的质量不一样。根据单桩计算的能量传递说明粗杆将减小 N 值，但也有人认为影响不大，如 1982 年进行的钻杆直径 42mm 和 50mm 的对比试验，以及结合欧洲标准，控制钻杆质量每米不大于 8kg，使用直径为 50mm 的钻杆对成果影响不大。

45.3 操 作 步 骤

45.3.1 关于钻孔，关键因素是成孔方法。标准中提出了原则要求，未规定具体方法，这是因为钻孔方法因机具及习惯而不同，难以具体罗列。采用泥浆护壁，防止了涌砂和塌孔。对比试验表明：泥浆护壁相应地增大了 N 值。如对某一细砂层至中砂层，由于涌砂，N 的平均值分别为 22 击、24 击、29 击；而泥浆护壁防止涌砂

后分别为64击、88击、94击。

钻孔孔径在标准中未做具体规定。国内通用的有108mm、127mm、146mm，国外也不统一。关于孔径对N值的影响，英国比较了8英寸、10英寸及12英寸(200mm、250mm及300mm)套管钻孔的标贯试验；印度进行了较浅孔的100mm、200mm、300mm孔径及挖坑的比较试验。结果表明：大孔径孔底由于应力分布的影响，N值减小。

45.3.4 预打15cm，如50击未达15cm，记录实际贯入深度。以后每打入10cm，就记录锤击数，累计打入30cm的锤击数即为标准贯入数N。如锤击已达50击，而贯入深度尚未达30cm，则记录实际贯入深度，可通过换算求得贯入深度达30cm的N值。

45.4 计算、制图和记录

45.4.1 关于标准贯入击数N的修正问题。影响贯入击数N的因素很多，目前国内外常有对钻杆长度、土层深度、地下水位及落锤的装置等因素的影响进行校正，但迄今尚没有一致公认的意见。故本标准对击数的修正未做统一规定，建议按不同用途，采用不同的修正方法。

(1)钻杆长度的修正。杆长修正是根据牛顿碰撞理论，杆件系统质量不得超过锤重的2倍，限制了标准贯入试验使用深度小于21m，而实际使用深度远超21m，最大深度已达100m以上。

利用能量分析的方法对不同的钻杆进行了一系列试验研究表明，来自钻杆颤动或其他因素对波动能量传递方面的影响远大于杆长变化时能量的衰减减，故建议不做杆长修正的N值是基本的数值；但考虑到过去建立的N值与土性参数、承载力的经验关系，所用N值均经杆长修正，而抗震规范评定砂土液化时，N值又不做修正；故在实际应用N值时，应按具体岩土工程问题，参照有关规范考虑是否作杆长修正或其他修正。从目前的研究情况来看，认为在一定深度(杆长)范围内，可以不进行杆长的修正是一个总

的趋势。

抗震设计规范在使用标贯击数时，都未明确规定钻杆长度的校正，原因是在判断砂土液化时，由于原始数据 N 值未经杆长修正，故使用规范中液化判别式时，N 值也不进行杆长校正。考虑到过去一些规范标准建立的 N 值与土性参数、承载力的经验关系，所用 N 值均经杆长校正。依据 N 值提供定量的设计参数时，应有当地的经验，否则只能提供定性的参数，供初步评定用。

(2)土层深度影响(土的有效上覆压力的影响)的修正。自从20世纪50年代吉布斯和霍尔兹(Cibbs，Holtz)的研究试验结果指出：同样的击数 N 对不同深度的砂土表示不同的相对密度之后，一般认为对标准贯入试验的结果应进行深度影响修正。国内对该问题的研究较少，在《北京地区建筑地基基础勘察设计规范》DBJ 11－501 中规定了当有效覆盖压力大于 25kPa 时标准贯入试验锤击数的校正方法。故本标准未作规定，需要时可参考有关标准或文献。

(3)地下水位影响的修正。许多试验研究证实，细砂到粗砂以及砾石的浸水，对贯入击数 N 没有多大影响。但对有效粒径(d_{10})在 0.1mm～0.05mm 范围内的极细砂或粉砂，浸水对标贯击数有较显著的影响。

太沙基和皮克(1948)认为：松的极细砂或粉砂，在浸水饱和区以下的贯入击数比干砂的击数要低；当紧密状态时，贯入击数将增大。因此，对于标贯击数 N' 大于 15 的浸水的饱和极细砂或粉砂，其相对密度大致等于按下式提出的标贯击数 N 的干砂的相对密度，即：

$$N = 15 + \frac{1}{2}(N' - 15) \tag{27}$$

式中：N'——未校正的饱和极细砂或粉砂的标贯击数；

N——校正后的标贯击数。

在我国水利行业标准中，标准贯入试验锤击数 N 值作为砂土

地震液化判别依据时，规定 N 值应对地下水位的影响进行校正。

综合上述，勘察报告应提供不做杆长修正的 N 值，可按岩土工程具体问题，参照有关规范和设计要求考虑是否作有关因素的校正。

46 静力触探试验

46.1 一般规定

46.1.1 静力触探试验适用于黏质土和砂类土，但不适用于裂隙黏土。土层中含有大量砾石、卵石、砖瓦、姜石、贝壳时，难以贯入，并将使贯入阻力严重失真。对某些工程地质问题（如水文地质条件、流砂现场等）也无法解决。

46.1.2 静力触探试验是工程地质勘察工作中常用的一个原位测试项目。从力学意义上说，该试验应称准静力触探试验，习惯上称静力触探试验。

46.2 仪器设备

46.2.1 目前，国内常用的触探主机按力的传动方式不同可分为液压传动和机械传动两大类：液压传动式触探主机有单缸、双缸两种类型。最大贯入行程一般为0.5m～1.0m，贯入力大于80kN。特点是贯入速度均匀，稳定，加压能力大，但加工制作要求精度高，设备较重。适用于一般黏质土、硬黏土、较密实砂类土的深层静力触探试验。机械传动式触探主机有电动丝杆和手摇链式两种。而电动丝杆又有梯形丝杆和滚珠丝杆两种。滚珠丝杆触探主机，由于采用了新技术——滚珠丝杆，使机械摩阻力减小，传递效率可高达92%～96%，从而可使贯入压力提高到100kN～150kN。这类触探主机每次贯入行程为1m，贯入速度一般为1.2m/min左右，提升速率可通过变速箱或变速电机来加快。特点是结构简单，保养维修方便，适用于一般黏质土和砂类土。

手摇链式触探主机是一种轻型装置，它是以人力转动手

柄，将探头压入土中，贯入速率可人为控制，提升速度是靠改变手柄位置来加快，贯入力一般小于20kN～30kN。特点是结构简单轻巧，不需电源，便于搬运，对交通不便及无电源地区来说尤为方便。适用于软土、一般黏质土及松至中密砂类土。该机还附有电测十字板探头，可分别进行静力触探试验和十字板剪切试验。

46.2.2 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

3 探头的规格尺寸。探头（装有测定土层贯入阻力的传感器）是直接影响试验成果准确性的关键部件。有关探头的一般要求和质量标准在标准中已做了规定，这里着重说明探头的外形、截面积的大小及靠近探头部分的探杆尺寸对试验成果的影响。探头底面积的大小对贯入阻力的影响称为“尺寸效应”。

（1）圆锥截面积，国际通用标准为10cm^2，但国内勘察单位广泛使用15cm^{2}的探头。10cm^{2}的探头与15cm^{2}的探头的贯入阻力相差不大，在同样的土质条件和机具贯入能力的情况下，10cm^{2}的探头比15cm^{2}的探头的贯入深度更大；为了向国际标准靠拢，最好使用锥头底面积为10cm^{2}的探头。探头的几何形状及尺寸会影响测试数据的精度，故应定期进行检查。

以10cm^{2}的探头为例，锥头直径d_c、侧壁筒直径d_s的容许误差分别为：34.8mm$\leqslant d_c \leqslant$36.0mm；$d_c \leqslant d_s \leqslant d_c+0.35$mm；锥截面积应为10.00cm$^2\pm$（3%～5%）；侧壁筒直径必须大于锥头直径，否则会显著减小侧壁摩阻力；侧壁摩擦筒侧面积应为150cm$^2\pm$2%。

双桥探头的外部几何形状也是影响试验成果的一个重要因素，目前国内常用的有两种形式，如图24所示。从使用效果来看，一般认为a型探头较简单，其工作性状与桩接近，并且便于向多功能探头发展（如测孔隙水压力，测定波速等）。国内外均推荐a型，也就是国际上常用的富格罗型。故本标准也推荐了a型探头，便于国际资料的交流。

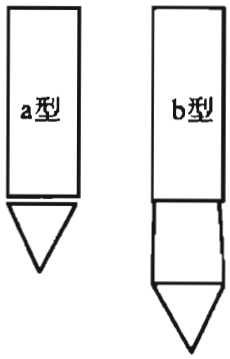


图 24　常用双桥探头外形

探头加工尺寸公差是按贯入阻力的容许误差为±1%的原则而确定的。更换标准则按投影面积的误差为－3%来考虑，这种误差引起贯入阻力的改变对工程来讲是偏于安全的。这一规定比欧洲标准(加工公差为 35.7mm±0.3mm，使用过程中允许磨损为 1mm)和美国 ASTM(锥底直径 35.7mm±0.4mm)均小。而更换标准介于两者之间。摩擦筒面积误差也按 1%考虑，但只允许有正误差，当摩擦简直径小于锥头直径时，应予报废。

(2)探头传感器除室内率定最大允许误差(重复性误差、非线性误差、归零误差、温度漂移等)应为±1.0%F.S 外，特别是在现场当探头返回地面时应记录归零误差，现场的归零误差不应超过 3%，这是试验数据质量好坏的重要标志；探头的绝缘度不应小于 500MΩ 的条件，是在 3 个工程大气压下保持 2h。

(3)贯入读数间隔一般采用 0.1m，不超过 0.2m，深度记录最大允许误差为＋1%；当贯入深度超过 30m 或穿过软土层贯入硬土层后，应有测斜数据；当偏斜度明显，应校正土层分层界线。

4　触探探杆在贯入和起拔过程中主要是承受竖向压力和拉力，同时，由于触探深度较大，在触探过程中细长的探杆不可避免地会产生一定幅度的弹性弯曲，故探杆除了要满足抗压强度条件外，还需要满足压杆的稳定条件。这就要求合理地选用探杆，一般

要采用抗拉、抗压、抗弯强度高的合金管，并按热处理工艺进行调质后加工。

探杆要求平直，特别是进行深层静力触探试验时（一般大于30m），试验前应严格检查探杆的平直度。

5 贯入阻力的量测仪器有间断测记和连续自动记录两种，前者一般用电阻应变仪或数字测力仪等；后者用电子电位差计（自动记录仪）。近年来，国外已大量采用计算机装置测记、贮存数据，然后按需要进行数据处理，计算和绘图。国内也有些单位已开始将计算机应用于静力触探，并已取得了成效。

46.3 操 作 步 骤

46.3.2 常用数据传输方式为探头传感器测试数据通过探杆内的缆线将数据传输到地面量测仪器上，需要预先安装缆线，而且缆线和连接头易意外损坏，试验过程需要人工加接探杆，耗费时间。目前，国外已经研制出无缆静力触探系统，主要利用声学、光学及无线电等无线数据传输技术来传输数据，使得试验过程更方便、安全、高效，并使试验过程自动加接探杆成为可能。该技术对数据传输和接收设备要求较高，使用范围不广。本标准暂未列入，有条件的单位可以先行试用。

46.3.3 探头偏离垂直方向贯入（即探孔倾斜）或探杆弯曲，将使量测的成果不能如实反映实际地层贯入阻力的变化情况，影响试验成果的准确度，有时甚至会得出错误的结论。工程实践表明：当触探试验深度大于30m，且土中有硬土层或密实砂层存在时，有时按触探资料定出的土层埋深比按钻探所定的土层埋深偏大（指深部土层），有时相差很大。所以，往往出现地层“缺失”或“变厚”及埋深增大等现象，如图25所示。因此，要求垂直贯入。当贯入深度超过30m或穿过软土层贯入硬土层后，应有测斜数据。当偏斜度明显时，应修正土层分界限。

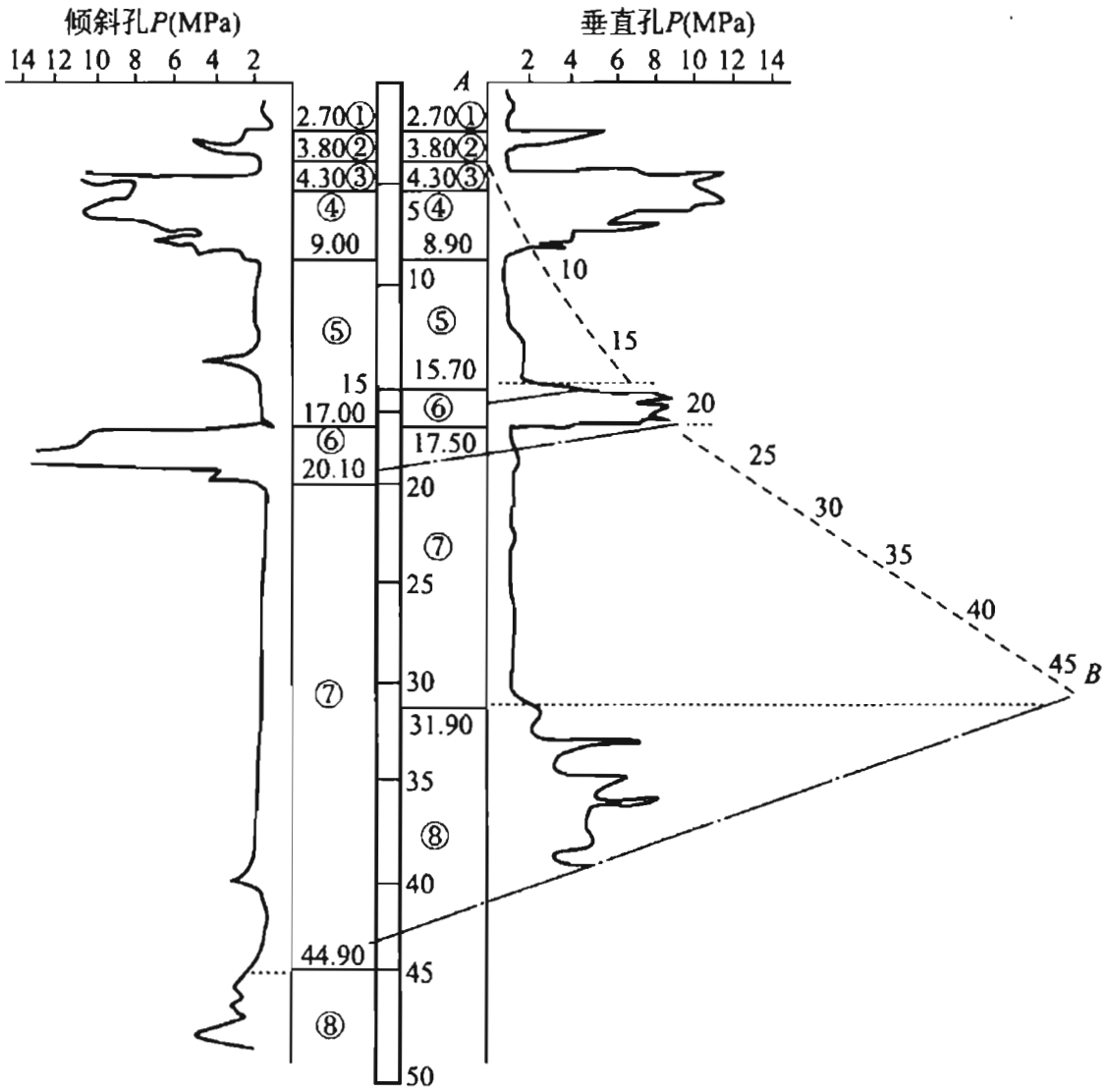


图 25　垂直孔与倾斜孔对比资料

46.3.5　贯入速率要求匀速，贯入速率 1.2m/min±0.3m/min 是国际通用的标准；贯入速率是静力触探试验中的一个重要问题，它不仅关系到试验历时，而且将直接影响试验成果的准确性，国内外对此问题做了不少对比研究。结果表明：贯入速率对贯入阻力是有影响的，但在速率变化范围较小时这种影响是很小的。欧洲标准、美国 ASTM 标准及其他一些国家都规定以 1.2m/min 作为标准速率，允许变化范围为 0.9m/min～1.5m/min。考虑到国内设备情况，并尽可能与国际通用标准一致，本标准规定贯入速率为 1.2m/min±0.3m/min。在此速率范围内，可不考虑贯入速率对

贯入阻力的影响。

贯入速率对探头周围孔隙水压力的影响较为明显，但目前对比研究资料不多。因此，当用能同时量测孔隙水压力的多用探头进行静力触探试验时，也应尽可能采用标准贯入速率。

46.4 计算、制图和记录

46.4.2 当使用孔压静探探头时，由于作用于锥底的孔隙水压力，其方向与贯入时产生的锥头阻力相反，因此，应对测量的锥头阻力 q_c 进行修正，得出土层的真正阻力 q_t。修正公式如下：

$$q_t = q_c + u(1-a) \tag{28}$$

式中：q_t——修正后的总锥头阻力(kPa)；

u——孔隙水压力(kPa)；

a——净面积比，即孔隙压力作用面积与圆锥底面积之比。

46.4.3 利用静力触探贯入所产生的超孔隙水压力消散估算水平向固结系数 C_h(静探固结系数)的理论假设为：

(1)土层状态为正常固结或轻超固结(OCR<3)；

(2)不考虑土的非均匀性($k_v \neq k_h$)，孔隙水压力消散主要由水平向固结系数控制；

(3)当固结时，不考虑总应力与孔隙水压力的耦合作用；

(4)土层的土性指标为常数(固结系数不随消散过程而变)。

依据上述假设，以扩孔原理(球形或圆柱形)进行线性分析，求得超孔隙水压力消散度($u = \Delta u/\Delta u_i$)对时间因数 T 的关系式，其中时间因数与固结系数的表达式为：

$$C_h = \frac{R^2}{t}T \tag{29}$$

式中：C_h——静探水平向固结系数(cm^2/s)；

R——探头圆锥底半径(cm)；

t——达到给定消散度的测定时间(s)；

T——时间因数。

在推导固结理论关系式时，假定在消散过程中，固结系数为常数。因此，从式(28)中看出：在给定的锥体半径 R 条件下，时间因数 T 与相应的测定时间 t 的比值为常数。从理论上讲，固结系数可以从任意消散度的相应时间因数和测定时间 t 的表达式中求得。但在实际测定过程中，由于土层的异变性或者由于测试误差，在静水压力 u_0 和初始孔隙水压力 u_i 的数值中存在一定的不确定性。静水压力 u_0 的误差 δu_0 将对消散度大时有较大的影响；初始孔隙水压力 u_i 的误差 δu_i 将对消散度小时有较大的影响。因此，考虑到两类误差，采用中间时间，即当消散度 $\overline{U}=0.5$ 时的时间因数 T_{50} 和相应的测试时间 t_{50} 估算固结系数是适合的。

从固结理论及试验研究中发现：探头附近超孔隙压力的起始分布对消散过程有明显的影响。而分布状态除与土的固结状态有关外，还与探头的几何形状和透水板的位置有关。图 26 所示的是具有锥角为 60°的探头，透水板处于四个不同位置的孔隙水压力消散度 $\overline{U}$ 对时间因数关系曲线。具体数据列于表 6 中。在标准中建议采用的探头结构为图 46.2.2-3 所示，即透水板位于靠近锥底处，因而，$T_{50}=5.6$。若采用其他结构，可用相应的其他数据。

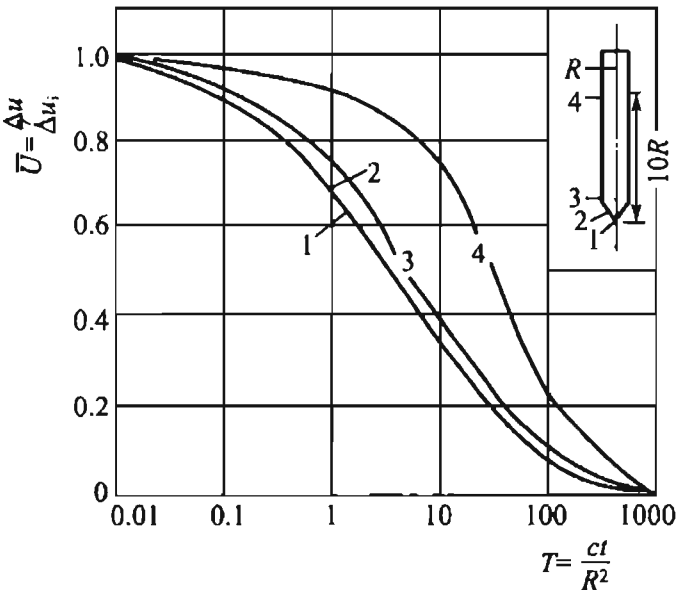


图 26　锥角 60°探头的消散曲线

表 6　锥角 60°探头时间因数值

T / 透水板位置	消散度 $\overline{U}$(%)				
	80	60	50	40	20
锥尖和锥面	0.44	1.9	3.7	6.5	27
锥底	0.69	3.0	5.6	10	39
探杆(10R)	7.3	22	33	47	114

46.4.4　绘制触探曲线应选用适当的比例尺。一般宜选用的比尺为：

H(深度)：1 个单位长相当于 1m；

q_c(或 p_s)：1 个单位长相当于 2MPa；

f_s：1 个单位长相当于 0.2MPa；

u(或 Δu)：1 个单位长相当于 0.05MPa；

F：1 个单位长相当于 1。

46.4.5　记录的超孔隙水压力消散曲线是在停止均速贯入后，从初始值 u_i 一直消散到静水压力值 u_0 为止。当研究消散规律时，主要是绘制超孔隙水压力 Δu_t($=u_t-u_0$)消散，为了消除初始超孔隙水压力的影响因素，用初始值 Δu_i($=u_i-u_0$)对比进行归一化 $\overline{U}$($=\Delta u_t/\Delta u_i$)。当固结时，$\overline{U}$ 值从 1 减到零。相应的固结度 U($=1-\overline{U}$)就从零到百分之百。根据归一化的消散曲线，选择相应于不同固结度时的经历时间 t(本标准建议选用 t_{50})进行固结系数估算。

47 动力触探试验

47.1 一 般 规 定

47.1.1 本标准列入了轻型、重型和超重型三种动力触探。

轻型动力触探的优点在于轻便，在施工验槽，填土勘察，查明局部软土、洞穴等分布具有实用价值。重型动力触探是应用最广泛的动力触探试验，已经积累了较多的经验，其规格标准与国际通用标准一致。超重型动力触探的能量指数（落锤能量与探头截面积之比）与国外的并不一致，但相近，适用于碎石土。

动力触探试验的应用从一般的砂土向碎（卵）石发展。对于比较密实坚硬的土层，动力触探宜加大触探能量而增大贯入能力。法国、原苏联的有些动力触探落锤质量超过 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列入以利普遍推广和进一步积累经验。

触探试验适用土层如图 27 所示。

以每贯入一定深度所需的锤击数为触探指标。这种指标虽然比较直观，但却存在着很重要的缺陷。主要是：不同触探仪参数得出的触探击数不便于互相对比；它的量纲也不利于与其他物理力学性质指标进行对比。因而，有趋向于用动贯入阻力作为动力触探的应用指标。例如原苏联国家标准 ГОСТ19912 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 0.20m 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。本标准采取了与欧洲触探试验标准相似的办法。

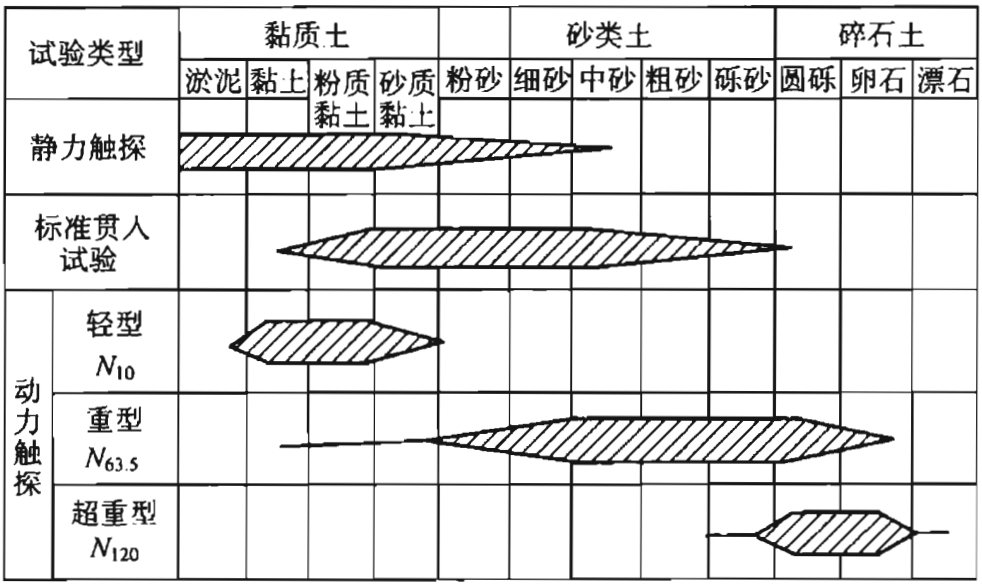


图 27　触探试验的适用土层

47.2　仪 器 设 备

47.2.1　本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1　国外的动力触探类型较多，例如法国常用的动力触探有 20 种以上。但是应用广泛且较有代表的是欧洲触探试验标准规定的两种类型和原苏联常用的几种类型。表 7 列出了本标准的动力触探仪和国外类型的对比。

表 7　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(cm²)	能量指数 P_0(J/cm²)
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

续表 7

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(cm²)	能量指数 P_0(J/cm²)
原苏联	轻型	30	0.40	74	43	2.7
	中型	60	0.80	74	43	11.0
	重型	120	1.00	74	43	27.4
欧洲	DPA 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 10cm²～43cm²。截面积较大的探头应配合较大的触探能量。一般用触探能量与探头截面积之比值作为衡量的指标，用能量指数 P_0(potential energy index)表示：

$$P_0 = \frac{mgH}{A} \tag{30}$$

式中：P_0——动力触探能量指数(J/cm²)；

m——落锤质量(kg)；

g——重力加速度(9.8m/s²)；

H——落距(m)；

A——探头截面积(cm²)。

3 除了落锤部分(包括落锤质量和落距，它们与重力加速度之积称为触探能量)以外，最主要的触探仪参数就是探头的外形和尺寸。

探头一般为圆锥形。个别国家如瑞典、西班牙也有采用尖锥截面为 40mm×40mm 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°也可用。西班牙的 C. O. uriel 等人对从 15°～180°八种不同锥角的探头进行了对比试验，结果表明：锥角对探头阻力影响不大。按国内常用尺寸，本标准规定探头圆锥角为 60°。

在本标准中对试验设备的许多技术条件做了规定，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。

47.2.2 试验时的仪器设备应符合下列规定：

2 本标准规定了贯入锤击速率为每分钟 15 击～30 击。这个速率略低于欧洲触探试验标准所规定的每分钟 20 击～60 击。另外还规定尽可能连续进行。这个规定与欧洲触探试验标准也是一致的。

47.3 操作步骤

47.3.2 重型动力触探应按下列步骤进行：

5 我国现行的规范没有提及侧壁摩擦影响问题。但原苏联国家标准和欧洲触探试验标准都提到了。欧洲标准中建议的两种动力触探方法，主要区别是对侧壁摩擦的考虑和处理方法有所不同。A 型动力触探(DPA)是用泥浆或套管来消除侧壁摩擦，因而在评价时可以不考虑侧壁摩擦的影响，B 型动力触探(DPB)不用泥浆或套管，孔壁不能保持稳定，这种试验的侧壁摩擦是不能忽视的。该标准要求用转动触探杆并测定相应的扭矩来估计侧壁摩擦影响。

国外有些资料介绍，对于一般的土层条件，在深度 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 时则差别较大。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。但想用一个固定的修正系数来适应所有条件，显然是不符合实际情况的。因此，本标准建议在深度较大时，应采取措施(用泥浆或套管)消除侧壁摩擦。

47.4 计算、制图和记录

47.4.1 关于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，相关规范也无明确规定。现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021 中规定，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。

关于探杆长度的修正。现行国家标准《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，锤击数应按下列公式修正：

$$N_{63.5}=\alpha_1 N'_{63.5} \tag{31}$$

$$N_{120}=\alpha_2 N'_{120} \tag{32}$$

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 8 和表 9 取值；

$N'_{63.5}$、N'_{120}——实测重型、超重型动力触探锤击数。

表 8　重型动力触探锤击数修正系数 α_1

探杆长度 L(m) \ $N'_{63.5}$	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

表 9　超重型动力触探锤击数修正系数 α_2

探杆长度 L(m) \ N'_{120}	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
11	0.87	0.73	0.69	0.67	0.66	0.66	0.64	0.62	0.61	0.60	0.59	0.53
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	0.84	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

47.4.2　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上的，即不考虑弹性变形量的消散，故限用于：

(1)触探深度小于 12m，每击贯入度 2mm～50mm；

(2)触探器重量 q 与落锤重量 Q 之比宜小于 2。

当实际情况与上述条件差别大时，采用式(47.4.2)时应慎重。

47.4.3　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，特别是对松软土，情况比较显著。

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 0.5m～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(约为 0.1m～0.2m)小于滞后反映量(约为 0.3m～0.6m),两者差值也较小。标准规定: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”。

48 旁压试验

48.1 一般规定

48.1.2 旁压仪包括预钻式和自钻式两种。目前较广泛使用的是预钻式，因此，本标准是以预钻式旁压试验为主进行编写。自钻式由于自钻系统、变形测量系统各不相同，试验方法在具体操作上可参照产品说明书进行。

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。

48.2 仪器设备

48.2.2 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

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时，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。

48.3 操作步骤

48.3.1、48.3.2 关于成孔质量要求。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28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。

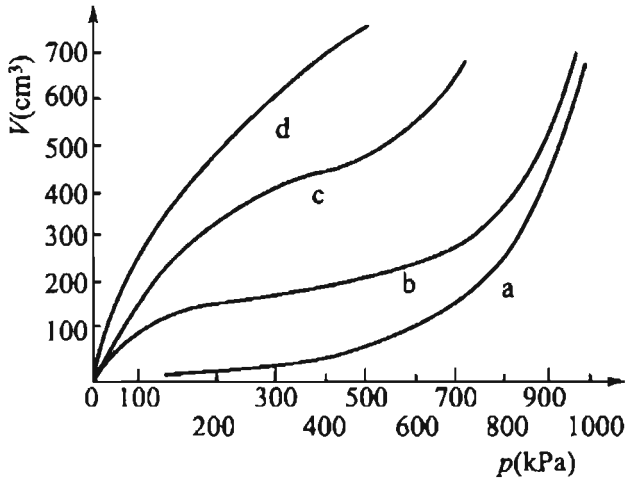


图 28　成孔质量对旁压曲线的影响

孔壁扰动是试验中孔壁出现压缩层（千层饼扰动带）的根本原因，压缩层的存在影响了成果的判释和应用，尤其对旁压模量 E_m 值影响更大。

鉴于上述情况，在标准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。

48.3.3　旁压试验的布点应在了解地层剖面的基础上进行，以便能合理地在有代表性的位置上布置试验。布置时要保证旁压器的量测腔在同一土层中。关于旁压试验应力的影响范围，根据实践相邻试验点的相互影响，规定试验点的垂直距离不宜小于 1m。

48.3.11　加压等级的选择和设计是个技术问题。这是因为若加压等级选择不当，不但延长了试验时间，而且在旁压曲线上不易获得 p_0 和 p_f 的特征点。国内几种规格旁压仪的加压方法不太统一，大体是按照仪器说明书进行的。原则上都是按土的预估临塑压力 p_f 值或极限压力 p_l 值而定。

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 1/7～1/5 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_1 值，在标准中又推荐了在临塑压力前后不同的加压等级。

48.3.12 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。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 3min 的快速法的稳定标准。

48.3.13 旁压试验终止试验条件为：

(1)加压等级接近或达到极限压力(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，量水管水位下降值为 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。

48.4 计算、制图和记录

48.4.1 静水压力的计算应考虑以下两种条件，参见图 29。

(1)无地下水时：

$$p_w = (h_0 + z)\gamma_w \tag{33}$$

(2)有地下水时：

$$p_w = (h_0 + h_w)\gamma_w \tag{34}$$

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)。

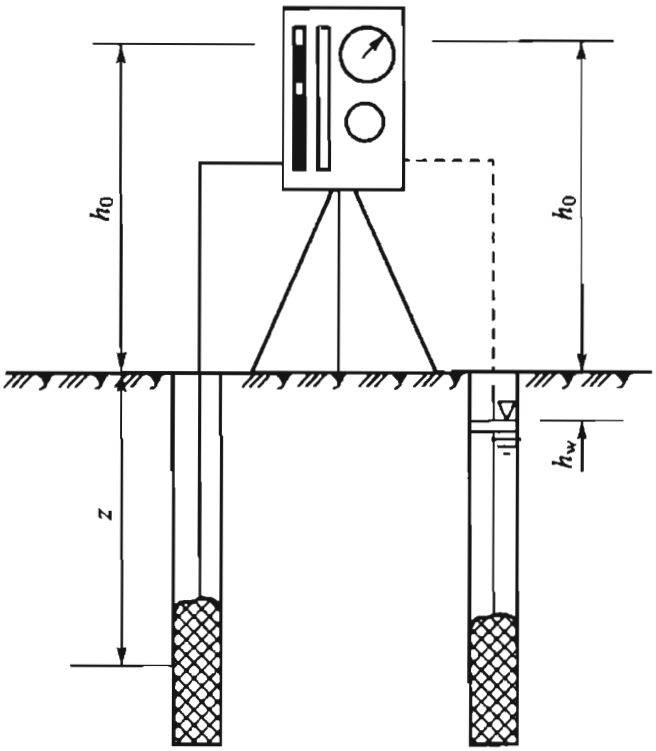


图 29　静水压力计算示意图

48.4.3　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。图面大小不应小于 10cm×10cm。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，所求得的特征值也要经过校正后使用。

48.4.4　根据梅纳尔的理论，p_0、p_f值是蠕变压力曲线（以 60s 与 30s 间隔内体积变化值为该级压力下蠕变值划出的 P-$V_{60''-30''}$ 曲线）上的第一个和第二个拐点。但是绘制该曲线较麻烦。同时，由于钻孔扰动、缩孔等影响，按该法求得的 p_{0m} 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_f值，相对应 p-V 旁压曲线上直线终点 c 对应的应力值。当该点难以直观确定时，可用蠕变曲线第二拐点对应的压力值作为 p_f值。

关于求取 p_l 值，根据梅纳尔理论 p_l 值是当 p-V 旁压曲线通过临塑压力后，趋于铅直，即与纵坐标平行的渐近线相对应的压力值，相当于最大体积增量 $V_l(=V_c+2V_0)$ 时对应的压力值。国外求取 p_l 值的方法较多，如双对数法、倒数曲线法和相对体积法等。近年来，还发展了一些数解法。标准中推荐了梅纳尔的倒数曲线法。该法是把临塑压力 p_f 以后曲线部分各点的体积 V（或 S）取倒数 $1/V$（$1/S$），作 p-$1/V$ 关系曲线（近似直线），在直线上取 $\frac{1}{2V_c+V_0}$ 所对应的压力值即为极限压力 p_l。

极限压力 p_l 与原位土的不排水抗剪强度 C_u 的关系，在假定孔穴周围土体为理想弹塑性材料的条件下，可用下式表示：

$$p_l = p_0 + C_u\left[1 + \ln\frac{E_u}{2(1+\mu)C_u}\right] \tag{35}$$

式中：E_u——土的不排水变形模量（kPa）；

μ——土的泊松比，对饱和土，取 0.5。

48.4.5 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：$q_k=p_f$，$q_k=p_f-p_0$，$q_k=p_f-\xi\gamma h$。在公式 $q_k=p_f$ 中，没有减去侧压力，不宜采用。公式 $q_k=p_f-\xi\gamma h$ 又因其深度效应问题尚未解决，目前只适用于浅基。因此，在标准中推荐了 $f_{0k}=p_f-p_0$ 这个基本公式。

对于红黏土、软淤泥等，旁压试验曲线通过临塑压力后呈现急剧拐弯，采用极限压力法为宜。其计算公式过去曾用梅纳尔公式，即 $q_A=q_0+\frac{k(p_l-p_0)}{F}$。简化为 $q_A=q_0+\frac{p_l-p_0}{F}$。该式已包含了深宽修正因素（$k=1.0$，$q_0=\gamma h$），与公式 $f_{0k}=p_f-p_0$ 不协调。因此，推荐公式 $q_k=\frac{p_l-p_0}{F_a}$（F_a 为安全系数，取 2～3）。各类土的安全系数根据统计列入表 10 以供参考。

表 10　各类土的安全系数

土　　类	安全系数	统计数
高液限黏质土(黏土)	2.6	112
中液限黏质土(粉质黏土)	2.6	114
低液限黏质土(粉质粉土)	3.0	89
粉细砂	3.8	15
黄土	2.7	74
黄土状亚黏土	2.1	49
填土	2.5	12

48.4.8　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,在标准中没有提出相关关系式。各地区应根据具体情况采用式(48.4.8)计算旁压模量。

对于自钻式旁压试验,仍可用标准的公式计算旁压模量。由于预钻式和自钻式的初始条件不同,土体被扰动的程度也不同,因此,提供旁压模量时要注明旁压仪类型。

49 载荷试验

49.1 一般规定

49.1.1 平板载荷试验(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;螺旋板载荷试验(screw plate loading test)是将螺旋板旋入地下预定深度,通过传力杆向螺旋板施加竖向荷载,同时量测螺旋板沉降,测定土的承载力和变形特性。

49.1.2 平板载荷试验由于它只反映承压板以下大约 1.5 倍～2.0 倍承压板直径或宽度的深度内土层的应力,应变和时间之间的综合性状,因而只用于浅层地基和地下水位以上的地层。同时,承压板影响范围内的土层应均一。深层平板载荷试验方法适用于地下水位以上的一般土和硬土,这种方法已经积累了一定经验。

49.1.3 对于深层载荷试验,以往曾采用在钻孔底部进行。由于孔底土体的扰动,板与土体之间的接触难以控制,同时应力复杂难以分析,限制了试验成果的应用。因此,常用螺旋板载荷试验代替深层平板载荷试验。

49.2 平板载荷试验

49.2.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定:

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、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。以往许多对不同面积的承压板载荷试验的成果表明,当承压板面积在一定范围内,沉降量 s 随承压板直径 D(或宽

度 B)的增大而增大;当承压板面积大到一定尺寸后,沉降量不随承压板直径的增大而增大。当面积太小时,沉降量随承压板直径的减小反而增大;上述两个转折点所对应的承压板直径值分别为30cm 和 500cm。

国外采用的标准承压板直径为 0.305m(1 英尺)。国内采用的承压板面积为 0.25m^2～0.50m^2。根据目前试验条件,将 0.25m^{2}作为承压板面积的下限是合理的。在多数情况下,用面积 0.25m^{2}以上的承压板进行试验所获得的成果是可靠的。

关于承压板的形状,从浅基承载力的理论计算来说,对其极限承载力是有影响的。但方形和圆形的影响承载力的形状系数是相同的,因而,承压板的形状可以采用相同面积的方形或圆形。

2 关于加载准确度的问题。现行国家标准《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。现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021 的载荷试验条款中规定:"荷载量测最大允许误差应为±1%F.S"。

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。

49.2.2 平板载荷试验试验应按下列步骤进行:

1 关于试坑底面宽度。我国多数标准规定试坑底面宽度不小于承压板宽的 3 倍。在影响范围的试验土层,应属于同一土层,即从工程地质观点出发,土层的地质年代、成因类型、地基土类别、主要物理力学性质方面属于同一层次。对于非均匀土层,例如,在冲积相的多层地层或人工改良的复合地基上进行载荷试验,在分析和应用试验成果时,需借助于理论知识和实践经验慎重对待。

5、6 关于加荷方式和等级。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-s 曲线的需要来看，一般情况下，一个试验有 8 级～10 级，便能较好地反映 p-s 特征，同时，也可有 4 点～5 点在似弹性变形段内。现行国家标准《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，本标准与其保持一致。

关于第一级荷载量，本标准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-s 曲线上。但设备的重量应计入荷载中。

8 沉降观测：定时进行沉降观测的目的在于获得沉降随时间发展过程，以便确定加荷时间。

9 破坏标准：参考现行国家标准《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。

49.2.4 关于 p-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-s 曲线偏离坐标原点。我国各系统有的标准，以及原苏联 1979 年的标准提出，不论 p-s 曲线的形态如何，一律按 p-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-s 曲线是否校正，主要看对变形模量、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，标准所列的公式中，p 值规定得比较灵活，即按实际所需的压力取值，而 s 值则为所需压力 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，标准中没有明确规定对 p-s 曲线必须进行校正。

如果 p-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。

49.2.5 确定临塑压力及极限压力的方法。在本标准中，除对曲线具有明显直线段及转折点的 p-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 $\lg p$-$\lg s$ 曲线、p-$\frac{\Delta s}{\Delta P}$ 曲线等其他辅助曲线。

49.2.6 关于变形模量的计算方法。变形模量的计算是在地基土可侧向变形条件下，由弹性理论求得，仅适用于试验土层属于同一层次的均匀地基。实际上土体的应力应变关系是非线性的，因此，不少研究者探索用割线模量，弦线（或切线）模量用于计算地基变形。

49.3 黄土浸水载荷试验

49.3.2 本标准列入了三种浸水试验方法，即单线法、双线法和饱水单线法。对测定湿陷起始压力，三种方法均可，但饱水单线法只需作一点，不受土层均匀程度差别的影响；单线法可在某一预定荷载时浸水，对测定某级荷载浸水湿陷量比较明确；双线法在理论上可以测定最大荷载以内任一荷载的湿陷量，对全面观察土层在不同压力下的湿陷性是较经济的方法。由于双线法和多点单线法要进行平行试验，受土层的不均匀性的影响较大。

关于浸水饱和程度的鉴定。本标准以饱和含水率为标准，即试验土层在浸水前后取原状土样测定密度等指标，推算饱和含水率。浸水后含水率达饱和含水率的 85%～90%，即认为饱和。

对于单线法，因为先加荷后浸水，一般只用湿陷速率控制。当湿陷速率达到相对稳定标准，即认为饱和程度也达到了要求。

49.3.4 关于确定湿陷起始压力的方法。

（1）在 p-s_{sh} 曲线上有转折点时，在曲线上做两切线，其交点对应的压力即为湿陷起始压力。若曲线上出现两个转折点，如图 30 所示，则在 A、B 两点之间取值。

（2）当曲线上无明显转折点时，可根据曲线的形态取 $s_{sh} \leqslant 0.02b$

所对应的压力作湿陷起始压力。对湿陷性小的土，取值大些；对湿陷性较大的土，取值小些。

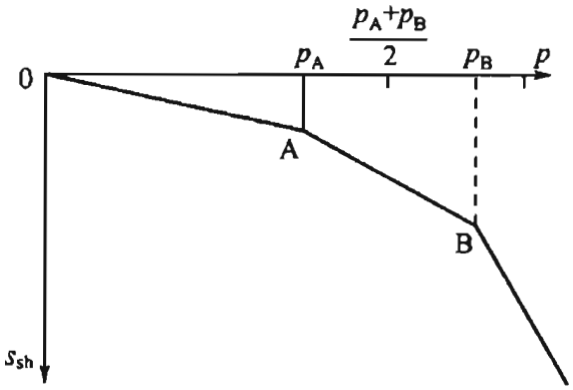


图 30　确定起始湿陷压力示意图

49.4　螺旋板载荷试验

49.4.1　仪器设备由螺旋承压板、加荷装置、位移观测装置组成，应符合下列规定：

螺旋板的尺寸系列比较多，本标准建议采用现行国家标准《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》GB/T 15406 的规定，也可根据不同土层及现有仪器的尺寸规格选用。

为了消除压杆与土的摩擦力对成果的影响，在紧接螺旋板上端与压杆之间连接一测力传感器直接测量施加于螺旋板上的荷载。

49.4.2　螺旋板载荷试验应按下列步骤进行：

2　螺旋板载荷试验的可靠性主要取决于螺旋板旋钻时对土体的扰动，为尽量保证土体的原有状态，应控制螺旋板每旋转一周钻进一个螺距。

5　试验点沿深度的间距一般为 1m，对均匀土层也可以 2m～3m 间距设 1 个试验点。根据已有的试验，最大试验深度达 30m。

49.4.5　从理论上讲，在原位有效自重压力 p_0 之前，螺旋板没有

或只有很小的沉降，但实际上往往有少量沉降产生，这可能与土体的扰动有关。因此，取 p-s 曲线的直线段与 p 轴的交点作为 p_0 值。

49.4.6 在地层内部用螺旋板载荷试验的结果计算变形模量的理论模式如图 31 所示。由图 31 可知：在螺旋板处于某一深度，该处的上覆有效自重压力为 p_0，作用在螺旋板上的附加压力 p_n。在该种应力条件下，螺旋板下一直径为 D、厚度为 d_z 土体的变形量（即螺旋板的沉降量）s 应是有效上覆力 p_0、附加压力 $p_n=(p-p_0)$、螺旋板直径 D 和土的模量 E_{sc} 的函数，即：

$$s=\frac{A}{m_{sc}}\frac{(p'-p'_0)}{p_a}D=\frac{A}{m_{sc}}\frac{p_n}{p_a}D \tag{36}$$

或

$$m_{sc}=\frac{A}{s}\frac{(p'-p'_0)}{p_a}D=\frac{A}{s}\frac{p_n}{p_a}D \tag{37}$$

式中：m_{sc}——无因次的模量系数；

A——无因次的沉降系数，与 p_0、p_n 有关，可查标准图 49.4.6。

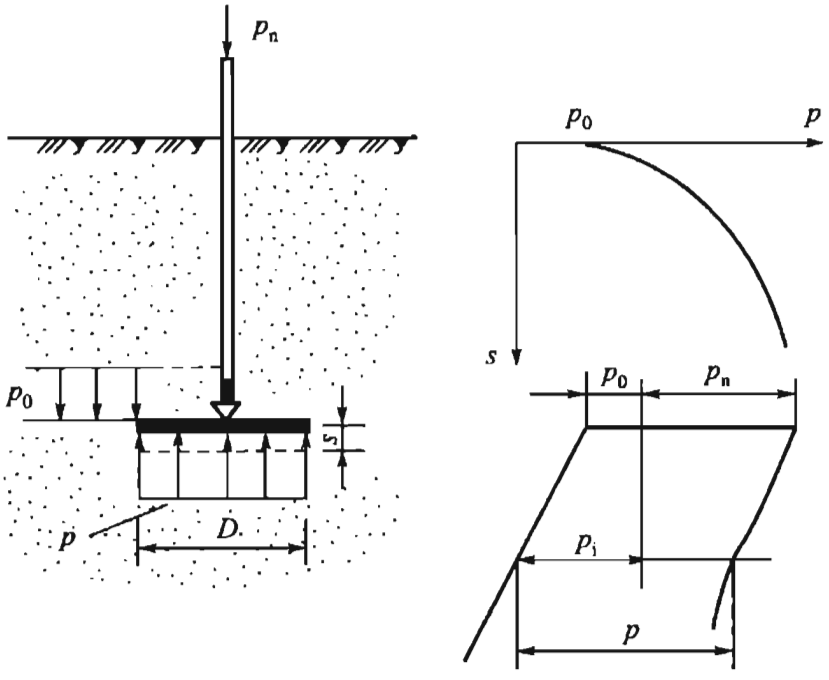


图 31　地层内圆盘沉降计算模式

由于土的变形模量与土的类别、应力状态和应力水平有关，因而用一系数 A 来统一沉降表达式；同时，用理想化的应力条件来定义模量而用无因次的模量系数 m_{sc} 来表示。这样，变形模量的普遍表达式即为：

$$E_{sc} = m_{sc} p_a \left(\frac{p}{p_a}\right)^{1-a} \tag{38}$$

一定的应力指数 a 对应于一定的土类和土的状态。若将应力指数 a 取值为 1、1/2、0 三个值，则相应的土类和土的状态为：

(1)$a=1$，则 $E_{sc}=m_{sc}p_a$。这意味着沉降系数 A 近似常数，约等于 0.72。常模量的概念显示土体具有弹性性质。这类土包括岩石、硬冰渍土、超固结土以及饱和黏性土的初始不排水条件。

(2)$a=1/2$，相应于模量 $E_{sc}=m_{sc}\sqrt{p_a p}$。从图 49.4.6(a)中可看出：沉降系数 A 随着 p_n 和 p_0' 的增加而减小，这种模量很大程度上相应于砂质土和粉质土。模量系数 m_{sc} 从 50 开始达到几百。

(3)$a=0$，则 $E_{sc}=mp$。从图 49.4.6(b)中看出：沉降系数 A 随着 p_0 的增加而急速减小。该种线性模量相应于正常固结的饱和黏土和很细的粉质土。模量系数 m_{sc} 可从 5 变化到 50。

上述三种典型土类的模量与应力状态的关系如图 32 所示。

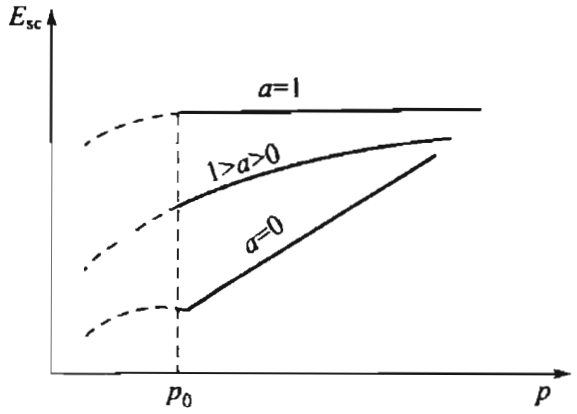


图 32　典型土类状态与模量关系

根据地层内螺旋板载荷试验，测得载荷 p_n 与螺旋板的沉降值 s，再依据土类从图 49.4.6 中查得沉降系数 A，即可求得地层的变形模量系数 m_{sc}，最后利用 m_{sc} 求得变形模量 E_{sc}。

49.4.7 关于固结系数的计算。利用螺旋板载荷试验所观测的沉降随时间变化的曲线计算固结系数，是根据径向固结理论中所定义的时间因数 T_r，即：

$$T_r = \frac{C_h}{R^2}t \text{ 或 } C_h = \frac{T_r}{t}R^2 \tag{39}$$

式中：T_r——径向排水时间因数，无因次数；

C_h——水平向固结系数(cm^2/s)；

R——螺旋承压板半径(cm)；

t——荷载增加后的历时(s)。

径向固结微分方程式为：

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_h\left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial u_r}{\partial r}\right) \tag{40}$$

假定承压板下土层的边界条件如图 33 所示，则对固结微分方程进行求解得到固结度 U_r 与 T_r 的关系。因 T_r 与 U_r 都是无因次的，如将 U_r 与 T_r 的理论关系曲线同试验所得的沉降与时间曲线相比较，就可以得出 T_r 与 t 的相应值，从而求得 C_h。

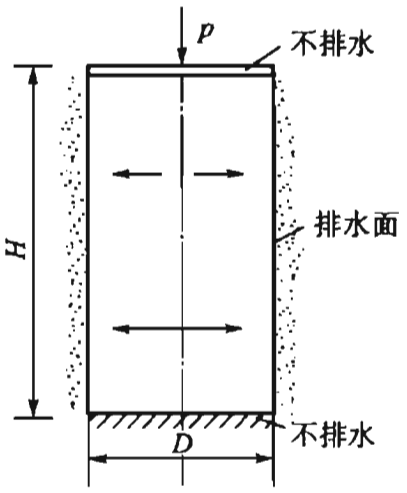


图 33 试验土层边界条件

U_r与 T_r的理论关系，在固结度达 60%之前近似于抛物线，其表达式为：

$$U_r^2 = CT_r \text{ 或 } U_r = C\sqrt{T_r} \tag{41}$$

固结度大于 60%时，时间因数 T_r与固结度 U_r的关系为：

$$U_r = 1 - 0.692(\exp^{-5.78T_r}) \tag{42}$$

当固结度 U_r=90%时，T_r=0.335，所以：

$$C_r = T_{90}\frac{R_{sc}^2}{t_{90}} = 0.335\frac{R_{sc}^2}{t_{90}} \tag{43}$$

50 波速试验

50.1 一般规定

50.1.1 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。

单孔波速法又称波速检层法，振源可以是压缩波，也可以是剪切波，常用的是剪切波。为了提供剪切波，在孔口放置混凝土板或木板，上压重物，用锤水平敲击板端，由于板与地面水平接触，故产生水平剪切波。

面波法由于测试深度不大，在工程勘察中较少用，但可用于碾压填土的质量控制。

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，计算得到地层动弹性模量 E_d、动剪切模量 G_d 被认为是最可靠的方法之一。

测定土体动力参数的方法有试验室内测定和原位测定。试验室测定包括共振柱法、动三轴和动单剪测定法等。原位测定包括跨孔波速法、波速检层法、稳态振动法等。每种方法各有优缺点。原位测试可以保持地层的天然结构和原有应力状态。

50.2 仪器设备

50.2.2 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

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。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34所示。主要由一个固定的圆筒体和一个活动质量块组成，适用于各种地层中的钻孔波速试验。特别是能在钻孔中的任一深度

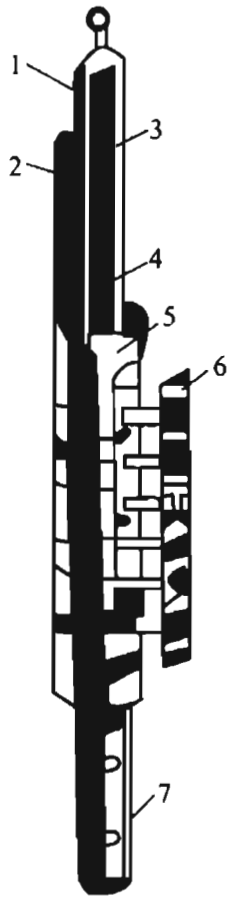


图34　剪切波锤结构示意图

1—“张扩”液压管；2--“收缩”液压管；3—上部活动质量块；4—活动滑杆；5—井下锤的固定部分；6—井下锤扩张板；7—下部活动质量块

处通过液压装置将筒体与孔壁紧贴，然后上、下拉动和松开连接质量块的绳子，使活动质量块上、下冲击固定的筒体，使地层产生很大的剪切波能量，并能重复激振，双向冲击，适用于测定较深地层中的动力参数。

面波法的激振源可以用机械激振、电磁激振和电液激振三种：①机械式稳态振动是用固定的机构，按固定的周期，循环往复地施加常扰力。这种常扰力通常用成对的质量块以固定的离心加速度循环的旋转，从而产生周期性离心力，作用于试体上。②电磁激振是利用一定频率和波形的信号发生器，将要求模拟的电信号输入到功率放大器予以加强输出功率。然后将具有一定功率和频率的谐波电流，输送到有电磁铁的固定线圈上，从而产生交变磁场，并驱动线圈产生模拟振动。③电液激振实际上是一种电液伺服系统，比较复杂。

面波法采用机械激振最轻和最为简便。

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 70Hz～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 1/4～1/3。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，主要是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。

50.3　操 作 步 骤

50.3.1　跨孔波速法应按下列规定进行：

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个～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，故本标准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。根据折射波的形成的传播特点，最佳孔距的确定，既要防止接收到折射波，又要考虑到仪器的计时准确度，同时还要考虑振源能量所传播到的距离。理论分析表明：测试结果误差随孔距的增大而增加。根据国内多年来的实践经验，并参考国外有关文献，在标准中提出：土层中的孔距为2m～5m，岩石中的孔距为8m～15m。若为砂石土层，孔距可采用4m～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76mm～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，一般须采用灌浆管。

浆液是膨润土、水泥和水按照1∶1∶6.25的比例搅拌成混合物，其凝固后的密度一般为1.70g/cm^3～2.10g/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。

5 为了准确地测定波速值，必须准确地计算出孔内各测点之间的水平距离(L)。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。

6 目前，检波器的固定主要用气囊装置将检波器外壳与孔壁紧密接触。注意不要仅使检波器的一端与孔壁贴紧，这样会使检波器与孔壁之间出现振荡力偶，形成振动假信号。其他装置如楔子，钢性扩展装置没有气囊装置优越。

众所周知，激振能量除一部分直达检波器外，同时还向各个方向散射，其中部分散射到地面，而地表面是一个良阻波面，又将部分能量反射入地层，其中部分到达检波器，这就干扰了直达波的接收；接收点距地面越近，干扰越严重。所以，本标准规定第一个测点深度应设在孔口以下 2/5 孔距处。

50.3.2 单孔波速法应按下列规定进行：

1 对原标准的表达方式进行了调整，记录土层状态明确为：绘制钻孔柱状图。

2 单孔波速法主要检测水平的剪切波速。识别第一个剪切波的初至是关键。采用从两个相反方向激振，一般压缩波的初至极性不发生变化，而第一个剪切波达到点的极性产生 180°改变，极性波的交点即为第一个剪切波的到达点。

4 对每个试验点的试验次数进行了明确，不应少于 3 次。

50.3.3 稳态振动面波法试验应按下列步骤进行：

4 稳态振动产生的波为正弦波。地表面上任一点距振源 l 处的波动方程为：

$$Z(t)=A\sin(\omega t,\phi)=A\sin\omega(t,\Delta t) \tag{44}$$

式中：A——振幅；

Δt——波由振源传至距离 l 处的时间差；

ϕ——相位差，$\phi = \dfrac{2\pi fl}{v_R}$。

当 l 等于瑞利波波长 L_R 时，则 $\phi = 2\pi = \dfrac{2\pi fL_R}{v_R}$，故

$$v_R = fL_R \tag{45}$$

当激振器输出一频率 f，两拾振器的间距为 Δl，如 Δl 不等于 L_R，两拾振器收到的振动波就有相位差，$\Delta l(=l_2-l_1)$ 越大，2 号检波器测到的波形滞后于 1 号检波器的波形的时间 $\Delta t = \dfrac{\phi}{\omega}$ 就越大，则波速值：

$$v_R = \frac{\Delta l}{\Delta t} \tag{46}$$

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(46)变为普遍关系式(45)。改变激振频率，可得 R 波速的弥散曲线(即 v_R-L_R 关系曲线)。波速与间距 Δl 等于 1 个波长 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。

50.4 计算、制图和记录

50.4.1 波形识别按下列规定进行：

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。

50.4.3 波形识别和判断准确以后，分别计算出每个测点的振源孔到接收器波长比 L_{R1}、接收器波长 L_{R2} 以及 L_{R1} 到 L_{R2} 之间的速度。

从理论上讲，这三个速度值应该相等，但实际上是很难达到的。碰到这种情况，需要加以分析，找出原因，如触发器延迟、震源附近地层不均匀等。特别要分析是否受到折射的影响。分析方法可根据下式判断：

$$\frac{l_c}{H} = \frac{2\cos i\cos\varphi}{1-\sin(i+\varphi)} \tag{47}$$

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；

H——振源点到地层界面的厚度；

i——临界角，表示为 $i = \sin^{-1}\dfrac{v_1}{v_2}$；

h——地层倾角，顺时针为正，逆时针为负。

式(47)中符号的意义如图 35 所示。计算的 l_c/H 值如表 11 所示。

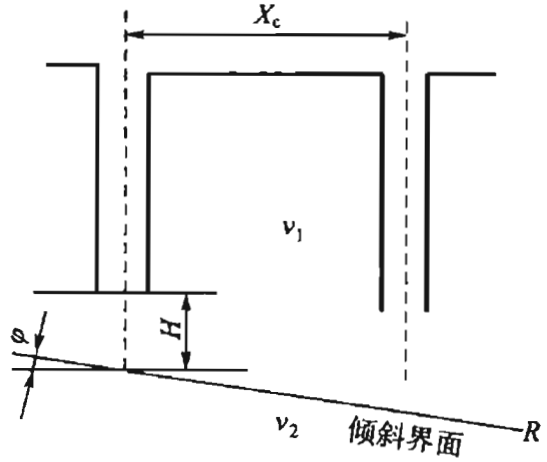


图 35 倾斜地层折射波影响参数示意图

表 11　l_c/H 值

$\frac{l_c}{H}$ \ $\frac{v_1}{v_2}$ / $\varphi(°)$	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	—	—	—	—

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 $v_1/v_2 = 0.1$，$\varphi = 0°$，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。

51 化学分析试样风干含水率试验

51.1 一 般 规 定

51.1.2 本标准中化学分析部分所用试样均为室温下的风干试样，而化学分析中各项试验结果均以试样的烘干质量为基准，故在结果计算中应将试样的风干质量(m_0)换算成烘干质量(m_d)，风干含水率(w)的测定便是以此为目的，其换算关系为：$m_d = m_0/(1+0.01w)$。

51.2 仪 器 设 备

51.2.2 本试验所用的其他仪器设备应符合下列规定：

3 试验中所用的干燥器应当固定，其中干燥剂用一段时间后应予以更换或烘干再用。

51.3 操 作 步 骤

51.3.1 在本试验条件下，烘焙时失去的水分主要是吸湿水。其质量随空气相对湿度、试样的成分以及颗粒的大小而异。本方法适用于各种土，但当试样中有机质含量较高时，本方法误差较大，可改用真空干燥法测定含水率。含石膏较多的试样，烘焙温度应为55℃～60℃。

51.3.3 土样烘焙时间应按规定执行，不得任意增减，以免造成误差。烘焙时要注意烘箱中的温度分布情况。铝盒放在烘箱底层，因此处温度较高。

51.3.4 铝盒盖严后放在干燥器内冷却，冷却时间每次应控制一致。铝盒称量的先后次序也应固定，以利称量。

51.3.5 每次称量时，铝盒的数量不宜过多，一般4只～6只为宜。称量时动作要迅速，否则会因吸湿而难以称量。

52 酸碱度试验

酸碱度是了解土的物理化学性质和工程性质的一项重要的基本指标。酸碱度用 pH 值表示。土呈碱性时，土粒表面容易形成较扩展的扩散双电层，使土粒处于松散状态。这种土塑性较大，抗剪强度不大。而酸性土，土粒之间可以通过带正电的边、角和带负电的基面的静电力相互吸引而较牢固的连接，有较高的力学强度。

pH 值的测定可用比色法、电测法。但比色法不如电测法方便、准确，而电测法测定酸碱度是目前常用的方法。酸度计是一种以 pH 值表示读数的电位计，用它可以直接读出溶液的 pH 值。

52.3 操作步骤和记录

52.3.1 土悬液的土水比例的大小，对测定结果有一定的影响。土水比例究竟用多大比较适宜，目前尚无结论，国内外也不统一，但用 1∶5 的比例较多。本标准也采用 1∶5 的比例，振荡 3min，静置 30min。

53 易溶盐试验

土中易溶盐包括所有的氯化物盐类、易溶的硫酸盐类和碳酸盐类。这些盐类既可以呈固态，也可以呈液态存在于土中，而且经常互相转化。它们溶解于孔隙溶液中的阳离子与土粒表面吸附的阳离子之间，可以相互置换，并处于动平衡状态。因此，易溶盐的含量、成分和状态及其变化，对土粒表面扩散双电层的性状和结构联结的特性等有较大的影响，从而引起土的物理力学性质发生差异。

在现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021 中有关盐渍土分类规定：盐渍土按含盐的性质分类是采用含盐类质量摩尔浓度（$mmol \cdot kg^{-1}$）的比值进行分类，盐渍土按含盐量分类是采用含盐质量分数（$g \cdot kg^{-1}$）进行分类。因此，试验结果计算需提供两个不同量的名称和单位。

53.2 浸出液制取

53.2.2 浸出液制取试验应按下列步骤进行：

1 用水浸提易溶盐时，需要选择适当的土水比例和浸提时间，力求将易溶盐完全溶解出来，而尽可能不使中溶盐和难溶盐溶解。同时要防止浸出液中的离子与土粒上吸附的离子发生交换反应。由于各种盐类在水中的溶解差异悬殊，因而利用控制土水比例的方法是有可能将易溶盐、中溶盐和难溶盐分离开来的。从土中易溶盐的含量和组成比例而言，加水量少较好。但由于加水量少，给操作带来一定困难，尤其不适用于黏土。国内普遍用 1∶5 的土水比例。

关于浸提时间，在同一土水比例下，浸提的时间不同，所得结

果亦有差异。浸提时间愈长，中溶盐、难溶盐被溶提的可能性愈大，土粒和水溶液间离子交换反应亦显著。所以浸提时间宜短不宜长。研究表明：对土中易溶盐的浸提时间 2min～3min 即可。为了统一，本标准采用的浸提时间均为 3min。

2、3 浸出液过滤问题是该项试验成败的关键。试验中经常遇到过滤困难的问题，需要很长时间才能获得需要的滤液数量，而且不易获得清澈的滤液，目前采用抽滤方法效果较好，且操作简便。

53.3 易溶盐总量测定（质量法）

53.3.3 易溶盐总量测定试验应按下列步骤进行：

1 易溶盐试验主要测定土中易溶盐的总量以及各阴离子和阳离子的含量。总量的测定采用烘干法，由于不需用特殊的仪器设备，且比较准确，故在室内分析中应用广泛。电导法虽简单迅速，但受各种因素如颗粒成分、盐分组成、温度等影响，准确度较差，故本标准未列。各种离子的测定采用化学分析法和仪器分析法。

3 当烘干残渣中有较多的钙、镁硫酸盐存在时，在 105℃～110℃下结晶水难以蒸发，会使结果偏高，应改为 180℃烘干至恒量，并注明烘焙温度。

当烘干残渣中有较多的吸湿性强的钙、镁氯化物存在时，将难以恒量。可在浸出液内预先准确加入 2%碳酸钠（Na_2CO_3）溶液 10mL～20mL，使其转变为钙、镁碳酸盐，在 180℃下烘至恒量，并做一个加 2%碳酸钠溶液的空白试验，所加入的碳酸钠量应从烘干残渣总量中减去。

53.4 碳酸根（CO_3^{2-}）及重碳酸根（HCO_3^-）的测定（双指示剂中和滴定法）

53.4.4 碳酸根（CO_3^{2-}）及重碳酸根（HCO_3^-）的测定试验应按下

列步骤进行：

1、2 碳酸根(CO_3^{2-})和重碳酸根(HCO_3^-)用双指示剂中和滴定法测定。该法是利用碱金属碳酸盐和重碳酸盐水解时碱性强弱不同，用酸分步滴定，并以不同指示剂指示终点，由标准酸液用量算出碳酸根和重碳酸根的含量。

碳酸根和重碳酸根的测定应在土浸出液过滤后立即进行，否则将由于二氧化碳的吸收或释出而产生误差。

53.5 氯离子(Cl^-)的测定(硝酸银滴定法)

53.5.3 氯离子(Cl^-)测定试验应按下列步骤进行：

1 氯根(Cl^-)采用硝酸银滴定法测定，以铬酸钾为指示剂。该法是根据铬酸银与氯化银的溶解度不同，以铬酸钾为指示剂用硝酸进行氯根滴定时，氯化银首先沉淀，待其完全后，多余的银离子才能生成砖红色铬酸银沉淀，此时即表明氯根滴定已达终点。

2 由于有微量的硝酸银与铬酸钾反应指示终点，因此需进行空白试验以减去消耗于铬酸钾的硝酸银用量。

53.6 硫酸根(SO_4^{2-})的测定(EDTA 络合滴定法或比浊法)

53.6.1 硫酸根的测定应根据硫酸根含量的估测结果选用下列方法：

1 硫酸根(SO_4^{2-})采用 EDTA 络合滴定法是用过量的氯化钡使溶液中的硫酸根沉淀完全，再用 EDTA 标准溶液在 pH≈10 时以铬黑 T 为指示剂滴定过量的钡离子，最后由将消耗的钡离子计算硫酸根含量。比浊法是使氯化钡与溶液中硫酸根形成硫酸钡沉淀，然后在一定条件下使硫酸钡分散成较稳定的悬浊液，在比色计中测定其浊度，按照浊度查标准曲线便可计算硫酸根的含量。

53.6.3 EDTA 间接络合滴定法应按下规定进行：

3 用 EDTA 标准溶液滴定过量的钡离子，以铬黑 T 为指示剂时，由于钡离子指示剂阴离子铬合不稳定，终点不明显，需加入

镁使终点清晰，故沉淀硫酸根时采用钡镁混合剂。

53.6.4 比浊法适用于硫酸根含量小于 40mg·L^{-1}的试样，因硫酸根含量大于 40mg·L^{-1}时，标准曲线即向下弯曲，且悬浊液亦不稳定。当试样中硫酸根含量较高时，可稀释后测定。在比浊法操作中，沉淀搅拌时间、搅拌速度、试剂的用量等需严格控制，否则将会引起较大的误差。

53.7 钙离子(Ca^{2+})的测定(EDTA 法)

53.7.2 在 pH＞12 的溶液中，镁离子被沉淀为氢氧化镁，在此条件下以钙指示剂为指示剂，用 EDTA 标准溶液滴定溶液中的钙离子。

53.7.4 钙离子(Ca^{2+})试验应按下列步骤进行：

2 在钙镁测定中，测定钙离子时，溶液的 pH 值必须控制在 12 以上，使镁离子沉淀为氢氧化镁，以免影响钙离子的滴定。加氢氧化钠使镁沉淀完全后，应及时滴定，以免溶液吸收二氧化碳而生成碳酸钙沉淀，延长滴定终点。

53.8 镁离子(Mg^{2+})的测定(钙镁合量滴定法)

53.8.4 镁离子(Mg^{2+})的测定试验应按下列步骤进行：

1 在 pH＝10 条件下，以铬黑 T 等为指示剂，用 EDTA 标准溶液滴定钙离子、镁离子合量，从合量中减去钙离子含量而求出镁离子含量。

53.9 钠离子(Na^{+})和钾离子(K^{+})的测定(火焰光度法)

53.9.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 火焰光度法是发散光谱分析中比较简单的一种方法。它是利用火焰激发使原子的电子跃迁而释放能量产生特征谱线。由于激发的能量较低，仅有碱金属和碱土金属等能用此方法激发，所产生的发射光谱经滤光片后用光电池和检流计来测其发射强度。

这种方法简便、迅速，灵敏度较高，常用来测定钠、钾的含量，尤其是当其含量较低时，用火焰光度计优于其他方法。故本标准列入该法。差减法因误差大，本标准未列入。

53.9.3 钠离子(Na^+)和钾离子(K^+)的测定试验应按下列步骤进行：

1 用火焰光度计测定钠离子和钾离子，激发状况的变化是导致误差的重要原因，因此，试验过程中必须使激发状况稳定。试液中其他成分的干扰也是产生误差的原因，为此，绘制标准曲线时，配制标准溶液所用的盐类应与土样的主要盐类一致。

54 中溶盐石膏试验

54.1 一般规定

54.1.2 中溶盐是指土中所含的石膏($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)。本试验是测定土中石膏含量。以1kg烘干土(在105℃～110℃下恒重)中所含的石膏的克(g)数表示。当土中石膏含量很高时,以55℃～60℃烘干或风干土计算为宜。

54.3 操作步骤

54.3.1 浸提土中石膏的方法有水浸法和酸浸法。由于水浸法较为费时,且难以溶解完全,本标准规定采用酸浸-质量法,适用于含石膏较多的土样。该法利用稀盐酸为浸提剂,使土中石膏全部溶解,然后利用氯化钡为沉淀剂,使浸提出的碳酸根沉淀为硫酸钡,沉淀经过滤、洗涤后灼烧至恒量,按硫酸钡的质量换算成石膏的含量。

用盐酸浸提石膏时,若土中含有碳酸钙,应在加酸待溶液澄清后立即用倾析法过滤,再加酸处理土样,反复进行至无二氧化碳气泡产生为止,静置过夜。

54.3.2 硫酸根的测定应按下列规定进行:

3 滤纸灰化时,不应出现明火燃烧,以免沉淀飞出损失。同时灰化要充分,以免残留的碳素使硫酸钡还原为硫化钡。为了避免发生这种反应,高温炉灼烧时的温度以不超过600℃为宜。

4 土中易溶性硫酸盐含量较高时,应对测定结果加以校正,即减去易溶盐中硫酸根的含量。

55 难溶盐碳酸钙试验

55.1 一般规定

55.1.2 土中难溶盐是指钙、镁的碳酸盐类。本试验是测定难溶的碳酸盐类在土中的含量，以 1kg 烘干土所含碳酸的克数($g \cdot kg^{-1}$)表示。

土中的碳酸钙测定有多种方法，本标准中所列的气量法是较粗略的方法，适合大批试样的粗略测定。该法对土中的碳酸钙用盐酸分解，测量释放出的二氧化碳的体积，乘以二氧化碳的密度，求出二氧化碳的质量，再乘以换算系数 2.272，便可算出碳酸钙的含量。

55.3 气量法

55.3.3 气量法试验应按下列步骤进行：

3 试验前应检查试验装置是否漏气。读数时保持两管水面齐平是为了使两个量管所受压力均为 1 个大气压。

4 气量法受温度影响，特别是三角瓶与量管连接的 B 管。因此，需用长柄夹子夹住广口瓶，即使摇动也不要用手接触量管连接肢，以免人的体温影响气体体积。

56 有机质试验

56.1 一般规定

56.1.1 重铬酸钾容量法是测定土中有机质比较通用的方法。它是通过强氧化剂重铬酸钾加热来氧化有机质，以氧化剂的消耗量求出有机质的量。用过量的重铬酸钾-硫酸溶液，在加热条件下氧化土中有机质，剩余的重铬酸钾则用硫酸亚铁或硫酸亚铁铵的标准溶液滴定，从而得到氧化有机质的重铬酸钾的消耗量，根据重铬酸钾的消耗量乘上换算系数，便可计算出土中有机质的含量。

56.1.2 由于重铬酸钾容量法氧化能力有一定限度，故有机质含量高于 $150g \cdot kg^{-1}$(15%)的土样是不适用的。

57 游离氧化铁试验

57.1 一般规定

57.1.1、57.1.2 游离氧化铁是红土、红黏土及红色沉积岩的主要胶结物，同时易受环境条件的影响而改变其形态和特征，由于这些特征，它们对于这类岩土的工程性质有较大的影响。研究表明，游离氧化铁在岩土中的胶结作用不仅与它们的含量、分布形式有关，还受它们的结晶程度、水化程度等影响。本标准所列方法可测定岩土中游离氧化铁的总量和无定形游离氧化铁，二者相减即得结晶质游离氧化铁的含量，可用于定性分析和比较岩土的与胶结有关的工程性质。

57.3 操作步骤

57.3.1 试样处理应按下列规定进行：

4 从加入草酸氨缓冲溶液直至离心分离的整个过程应连续进行不得间歇，以免因土壤与溶液作用时间不同而影响提取质量。

57.3.2 铁的测定应下列步骤进行：

1 达姆试剂提取液用量应控制在 6mL 以内，超过此用量对测定结果有影响。

58 阳离子交换量试验

58.2 氯化钡缓冲液法

58.2.3 氯化钡缓冲液法试验应按下列步骤进行：

2 间歇摇晃可根据情况而定，大约每隔 10min 摇晃一次，每次摇晃约 1min(手摇)。

6 用 EDTA 溶液滴定硫酸镁溶液时，需仔细观测终点。当颜色由酒红色变为紫色时，应中止滴定，并不停地摇晃三角瓶，溶液若由紫色变为蓝色，表示已到终点；如溶液不变蓝色，再继续滴加 Na_2-EDTA 溶液，即变为蓝色。

59 土的X射线衍射矿物成分试验

59.1 一般规定

59.1.1 X射线衍射分析是研究黏土矿物最重要的一种方法。本法是以X射线射入黏土矿物晶格中产生的衍射为基础。不同的黏土矿物，晶格构造各异，X射线射入时便会产生不同的衍射图谱，据此可对其中的黏土矿物组成进行鉴定。土中伴存的非黏土矿物的鉴定原理与黏土矿物的鉴定相同。有关这些矿物的粉晶衍射数据可参考有关文献。

59.3 操作步骤

59.3.1 常规鉴定用的试样制备应按下列规定进行：

1 试样以制成镁离子饱和的为好，因镁是常见的两价阳离子中原子序数最小的，对X射线吸收较少。同时利用甘油扩展法来区分蛭石和蒙脱石时，仅仅镁饱和的蛭石晶层是比较可靠地只吸附一层甘油而保持14Å(1Å＝1×10^{-10} m)附近的晶面间距，不因荷电量多少而异。而钙、钡等饱和的蛭石，则可依荷电量多少不同，有时吸附两层甘油也可扩展至17.7Å左右，无法与蒙脱石区别。

59.3.2 试样的专门处理与制备应按下列规定进行：

1 在鉴别具有扩展性晶格矿物如蒙脱石等时，本标准建议用甘油扩展法。近来乙二醇扩展法在国内外比较流动，此法效果虽与甘油法相似，但是，某些蛭石特别是层间电荷较少的蛭石，即使用镁饱和也可以吸附两层乙二醇，同样扩展至17Å附近易与蒙脱石混淆，所以采用甘油扩展法较好。

2 实践证明，试样制成定向薄膜比干粉末压制样的效果好，试样用量也较少。故以定向薄膜做衍射分析为宜(研究060谱线除外)。

60 粗颗粒土的试样制备

60.1 一 般 规 定

60.1.1 本标准中将土颗粒粒径大于5mm的土称为粗颗粒土或粗料土。粗颗粒土的土样制备是为了使各项试验所用的土样制备有统一的程序，并提供具有同一级配的试样进行各项试验。

60.3 操 作 步 骤

60.3.1 黏质粗粒土的试样制备应按下列步骤进行：

3 关于试样级配和超粒径颗粒的处理。

(1)关于试样级配。级配是影响粗颗粒土工程特性的重要因素。就同一地区的同一类土料而言，尽管成因相同，级配组成也会有所变化。因此，在进行试验时，应按料场或天然地基的自然级配，或模拟工程实际情况合理地选择试样级配，以便试验成果具有代表性。

目前，各单位所采用的级配类型有两种，即天然级配和人工级配。天然级配是根据天然料场或天然地基的天然级配制备试样，进行各项物理力学性试验并按此来确定各项指标的范围及其采用值。人工级配是根据料场或实际填料试验所得级配成果，按统计方法整理得出的级配随统计方法的不同有多种形式。有采用土料方量百分率级配曲线的方法进行统计，得出典型级配，包括上包线级配、下包线级配和平均级配；也有根据多组级配曲线的外包线轮廓线作出级配范围线，以最细者为上包线，最粗者为下包线，各组算术平均为平均级配。外包线级配是控制料场的极端情况，多用作验证性或探索性试验的依据，平均级配曲线系代表料场的平均级配情况，大多以此作为进行物理力学性质试验的依据。对于级配变化较大的土料，如风化料，则不能固定在某一级配情况下试

验，必须在一定范围内进行研究。此外，尚有采用小值平均级配与考虑强度或渗透变形特征进行配制级配的其他方法。

总之，试样级配选择是一个复杂的问题，实际选用时必须以反映客观实际情况为原则，防止由于试样级配选择不当而影响试验成果的可靠性。

(2)关于超径颗粒的处理。用原级配土料进行试验是最理想的，但由于仪器尺寸的限制，有时不得不对土料中某些超过仪器允许粒径的颗粒(即超径颗粒)进行处理。

目前，国内外处理超径颗粒的方法大体有四种，处理后的级配变化如图 36 和表 12 所示。

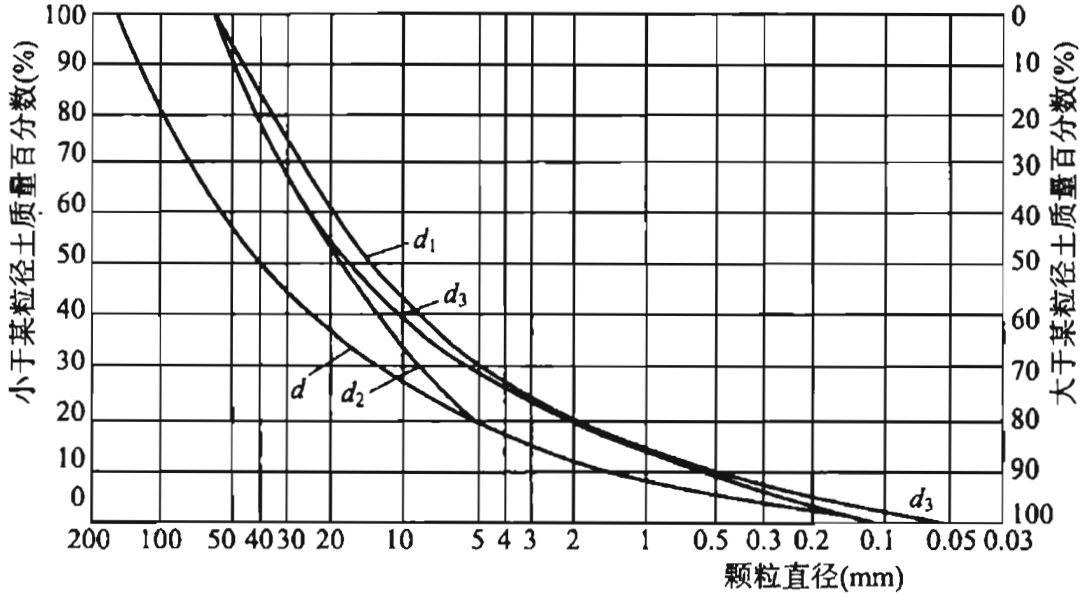


图 36　颗粒分析级配曲线

表 12　颗粒级配变化表

土样编号	颗粒组成(%)									d_{30}	限制粒径 d_{60}	有效粒径 d_{10}	不均匀系数 d_{60}/d_{10}	曲率系数 $d_{30}^2/(d_{10}d_{60})$
	>60	60～40	40～20	20～10	10～5	5～2	2～0.1	>0.1	>5					
原级配	40.0	11.0	13.0	10.0	8.0	7.0	11.0	0.0	82.0	13.5	59.0	1.55	38.1	1.99

续表 12

土样编号	颗粒组成(%)									d_{30}	限制粒径 d_{60}	有效粒径 d_{10}	不均匀系数 d_{60}/d_{10}	曲率系数 $d_{30}^2/(d_{10}d_{60})$
	>60	60～40	40～20	20～10	10～5	5～2	2～0.1	>0.1	>5					
剔除法级配 d_1	—	18.3	21.7	16.7	13.3	11.7	18.3	0.0	70.0	4.8	20.0	0.65	30.8	1.77
等量替代级配 d_2	—	21.5	25.4	19.5	15.6	7.0	11.0	0.0	82.0	9.0	25.0	1.55	16.1	2.09
相似法级配 d_3	—	20.0	25.0	16.0	11.0	11.0	15.0	3.0	71.0	5.3	23.3	0.61	38.2	1.98

1)剔除法。此法是将超粒径颗粒剔除,剩余部分作为整体,再分别计算各粒组含量。这样将使粒径小于 5mm 的颗粒含量相对增加,改变了粒径大于 5mm 的颗粒土的性质。因此,除超粒径颗粒含量极小外,一般不采用此法。

2)等量替代法。以仪器允许的最大粒径以下和粒径大于 5mm 之间颗粒,按比例等量替换超粒径颗粒,替代的级配虽保持粒径大于和小于 5mm 颗粒含量不变,但改变了粗料土级配、不均匀系数 C_u 及曲率系数 C_c,此法适用于超粒径颗粒含量小于 40% 的土石混合料。根据比较试验证实:经替代后所得的强度比剔除法要接近实际。故此法在我国广泛应用于土石混合料等的力学性试验备料。

3)相似级配法。该法系将原级配的土料根据确定的允许最大粒径按几何相似等比例将原土样粒径缩小。于是颗分曲线平移后,仍保持与原级配曲线相似,故 C_u、C_c 可保持不变,但粒径小于

5mm 的颗粒含量有所增加。因此，该法只是几何尺寸相似，不能全面地模拟原样的性质。理想的模拟材料是其级配、颗粒形状、颗粒本身的强度、颗粒表面的粗糙度等均应与原材料相似。但这种条件是难以满足的。采用相似级配法应注意的是颗粒级配曲线的平移后，不应使其中的细粒含量增加到影响原级配试样力学性质的程度。一般来讲，粒径小于 5mm 颗粒的含量不大于 15%～30%，对力学性质的影响是不明显的。

相似级配法在国外应用较广，多用于砂砾料及堆石料等无黏性粗颗粒土的力学性质试验，近年来，我国也有一些单位采用。

4)混合法。先用较适宜的比尺缩小，使超径颗粒含量小于 40%，再用等量替代法制样。资料表明：该法所得的最大干密度与现场碾压试验相接近。

曾用大型(ϕ70cm)、中型(ϕ30cm)、小型(ϕ10cm)三种不同尺寸的三轴仪对几种堆石料和砂卵石料进行一系列比较试验，以大试件为原级配，中、小试件分别用相似级配和等量替代级配。成果表明：中试件两种模拟级配所得的内摩擦角(φ)比大试件大 2°～2.5°，应力应变关系基本一致；而小试件所得的内摩擦角(φ)和应力应变关系均偏大。这说明粗颗粒土级配粒径缩小过多其成果受到一定的影响。

此外，对于渗透变形等试验，超粒径颗粒处理是否可参照进行，尚有待于试验验证。

总之，上述几种处理超粒径颗粒的方法，有一定局限性，故本标准未做具体规定。在使用时，要根据土料性质和试验项目来决定。

(3)关于风化粗颗粒土超径的限制。视粗颗粒风化程度不同对试样允许最大粒径的限制可适当放宽。

7 关于粗颗粒土含水率的测定。粗颗粒土含有大量砾石，颗粒大小悬殊，往往难以取代表性试样正确地测定含水率。目前测定含水率的方法有两种：一是测全料含水率，该法取代表性试样时

应尽量照顾粗、细料含量的比例，试样数量不小于2000g～5000g；另一种是粗、细料含水率分别测定，然后按加权值计算全料含水率。

61 粗颗粒土相对密度试验

61.1 一 般 规 定

61.1.2 粗颗粒土包括砂、砾及少量的细粒土，本标准规定细粒土(粒径小于0.075mm)的含量不大于12%，其目的是要求土样能自由排水，颗粒之间不致细粒土含量过多而产生黏聚力。目前，世界各国除了美国外，均未制订试验标准。为了对粗颗粒土的相对密度试验有一可以遵循的标准，根据我国的实践经验，并参照美国ANST/ASTM. D2049，制订了本试验标准。

61.2 仪 器 设 备

61.2.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 本标准建议采用的主要仪器为振动台，试样筒尺寸与ANST/ASTM. D2049的规定略有差异，也可选择内径为20cm的试样桶，但允许最大粒径为20mm，见表13。其余振动频率、振幅及压重均与ANST/ASTM. D2049.69的规定一致。

表13 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)	
本标准	ASTM	本标准	ASTM	本标准	ASTM	本标准	ASTM
30	21.94	34	23.09	24033	14160	60	76.2
20	15.12	23	15.52	7226	2830	20	38.1

2 对于表面振动器，振动频率为40Hz～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。

61.3 操作步骤

61.3.2 最小干密度的试验方法一般文献中缺少详细说明，只提及用人工松填灌注进行，并指出为了降低系统误差，必须进行平行试验。另外，为了保证试样结构相似和消除相对密度指标的系统误差，容器尺寸应该与最大干密度试验一致。并且应当满足公认的 1/5 径高比的要求（颗粒最大粒径与容器直径和高度之比值）。

61.3.3、61.3.4 振动台法系原标准规定的唯一最大干密度的测试方法，本次修订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，并应用于许多实际工程，说明该法已趋于成熟，有条件列入本标准正式使用，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。目前国内外无论采用干法或是采用湿法进行最大干密度试验，均采用变体积法。对有些试样，用振动法所得的资料表明：当含水率相当于饱和度为 0.8 时，砂能得到最好的振动密实；同时，当砂的含水率为零时与最优含水率时所得的干密度极相近。因此，参照 ANST/ASTM 标准，本标准同时推荐采用湿法与干法测定粗颗粒土的最大干密度。

61.4 计算和记录

61.4.3、61.4.4 在实际工程的设计和施工中也常用压实度 R_c 和密度指数 I_D 作为控制质量的指标，这两个指标具有实用性，故本次修订的标准保留这两个指标。

62 粗颗粒土击实试验

62.1 一 般 规 定

62.1.2 击实试验的两项控制标准为单位体积功能和单位面积冲量，世界各国所采用的标准基本上参考美国 ASTM 所制订的标准(D698)。为了有利于国际交流及与国际通用标准接轨，本标准参照了美国标准 ASTM. D698，对击实仪的尺寸及击实方法做了修改，使之满足粗颗粒土的击实试验要求，但单位体积击实功能及单位面积冲量保持与 ASTM. D698 的击实标准等效，即单位体积功能及单位面积冲量按两种标准制定，分别为 592.2kJ/m³ 和 3kPa·s 及 2684.9kJ/m³ 和 7kPa·s。采用何种标准，试验者应根据工程设计的规定选用，在保证击实功率的情况下，可根据实际情况选择击实筒，需在试验报告中指出。

62.3 操 作 步 骤

62.3.1 本标准规定了干法和湿法两种制样方法，其原因见本标准第 13 章相应的条文说明。

62.3.2 击实试验应按下列步骤进行：

2 余土超高 15mm 时，约占总体积的 5.2%，相应的单位体积功能将减少约 5%，虽对干密度一般超过 0.03g/cm³，但因含较多的粒径大于 5mm 的颗粒，超高限制过小，操作难以控制，故规定余土超高不应大于 15mm。

63 粗颗粒土的渗透及渗透变形试验

63.1 一般规定

63.1.1 粗颗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，建议进行原位试验，具体方法可参考本标准“试坑渗透试验”。

63.2 仪器设备

63.2.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 本标准所规定的仪器的尺寸主要是根据仪器的内径与试验土样最大粒径（或 d_{85}）之比值来确定。个别地区可视当地材料而具体确定合适的比值。仪器分进水段、试样段和出水段。仪器筒身可用无缝有机玻璃管制成，也可用嵌有玻璃的铁质圆筒，以便观察。

4 加荷设备。加荷的目的在于使试验更好地符合天然受力状态。目前，加荷设备大都采用杠杆式。一般均用于小直径仪器中。若用于大直径仪器，则所需荷载总量较大，设备也要加大，应用不便，且占地较多。也可采用其他方式加荷，例如气压和液压。

5 测压管的布置原则：

（1）在仪器进水段及出水段要各布置 1 个测压管，以测定试样总坡降。

（2）试样段测压管要布置较密些。一般每隔 5.0cm 布置 1 个。布置方式不限，可以分排布置，也可以螺旋形布置或其他布置形式。

（3）在做反滤层试验时，要在反滤层与被保护土之间及后滤层

每层之间的接触面上布置测压管。

(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,要每隔 5cm 布置测压管。

(5)测压板上的玻璃管一定要垂直,各个玻璃管内径相互误差不大于 2mm。

(6)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要比最高水箱的水位略高些。

63.3 操作步骤

63.3.1 试样制备应按下列步骤进行:

2 关于超粒径的处理办法,主要有剔除法、等量替代法、相似级配法和混合法,优先考虑等量替代法。

4 试样装入仪器中,不可能与仪器边壁很好地结合,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,必须进行边壁处理。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。

63.3.2 试样饱和应按下列步骤进行:

1 过滤排气可以起到一定作用,当水流自下向上流动时,先通过倾斜透水板滤气并通过排气孔排出,然后通过下透水板进入试样,可以收到一定效果。

63.3.3 渗透试验应按下列步骤进行:

3、4 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。这样做的目的是为了既节省试验时间,又不会增大相对误差。但应按既要取得试样临发生变形前的坡降值,又要能准确找到变形的临界坡降的原则,视具体情况掌握。对于非管涌土,递增值可大些,对于管涌土,递增值可小些。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。

63.4 计算、制图和记录

63.4.8 试验中对管涌的鉴别，国内外缺乏一个明确标准，概括起来，不外乎下列几种：

(1)试验人员从仪器周壁及试样表面直接用肉眼观察。

(2)在双对数纸上，以渗流坡降(i)为纵坐标，渗透速度(v)为横坐标，绘制 i-v 关系曲线。若试验期间，温度变化不大，坡降较小，则根据达西定律，即管涌发生以前，i-v 线段应为直线，其斜率等于 1；管涌开始后，一般说来，该直线段将发生明显转折。

(3)供水水箱位置升高，而上游测压管水位并不相应升高，甚至下降，流量加大，说明试样内部结构已起变化。

(4)试样表面有 2/3 的面积出现细粒跳动，或泉眼翻滚，形成破坏。

从上面所列举的几条标准来看，立足点并不一致，有的是说明管涌的临界坡降，有的则是说明管涌的破坏坡降。对管涌而言，其变形有一个发展过程。在 i-v 关系曲线上表现为：当第一个阶段接近终了时，斜率为 1 的直线段发生转折，到达管涌临界坡降。管涌过程进入第二阶段，这时 i-v 直线与横轴成某一角度继续上升。在经历一个过程后，到达第三阶段，此时 i-v 曲线的纵坐标 i 值随 v 的增大而减小，此转折点所对应的坡降值为破坏坡降。综上所述，对管涌的鉴定，应以 i-v 曲线为主，并结合目测。

64 反滤试验

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。本试验的目的是在土与砂、砾或排水设施之间，选择适宜级配的砂砾料组合层，使之既能防止细土流失，又能畅通排水，保证建筑物有效使用和安全。

64.2 无黏性土的反滤试验

64.2.1 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近似，利用垂直渗透变形仪能达到试验要求。故直接采用垂直渗透变形仪进行反滤料试验。

64.2.7 对于试验前后各层的土料均应进行颗粒分析，在同一颗粒分析坐标纸上绘制被保护层和滤层试验前后颗粒分析曲线，根据试验曲线，确定被保护土层中带出土量，从而判断所选定的滤层土料是否能满足反滤要求。

64.3 黏性土的反滤试验

64.3.5 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，由于采用矩形缝模拟更接近实际裂缝的形态，本标准建议采用矩形缝，造缝方法采用预埋式造缝法，这样可避免后制缝（试验样制备好后再钻孔造缝）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。试样直径建议不小于 20cm。

64.3.6 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。

65 粗颗粒土固结试验

65.2 仪 器 设 备

65.2.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 试样尺寸的大小应当和粗颗粒土的粒径相适应，即试样的最大粒径 d_{max} 随试样高度与最大粒径之比（H/d_{max}）、试样直径与高度之比（D/H）等而定。

根据国内外使用的一些大型固结仪试样尺寸的统计，H/d_{max} 大致为 3～10（较多的在 3.3～5 之间），D/H 大致在 0.5～3 的范围内（较多的在 1.5～2.5 之间）。

考虑到粗颗粒土的粒径变化范围极大，故本标准对固结仪的试样尺寸未做具体规定，但对尺寸的比例关系予以规定，即 D/H 为 1.5～2.5，$H/d_{max}=4$～6 为宜。试验时可根据试样的粒径、级配等性质选定。

65.3 操 作 步 骤

65.3.1 试样制备应按下列步骤进行：

2 为了减少试样与环壁之间的摩擦，要求容器内壁加工光滑，涂衬润滑材料如硅脂、聚四氟乙烯。也可采用多环式固结容器（一节钢环、一节橡皮相间组合），从而可减小侧壁摩擦的影响。

65.3.3 试样固结应按下列步骤进行：

3 在荷载作用下，土粒的重新排列及孔隙体积的减少，孔隙压力的消散都需要一定的时间。施加荷载的历时对试验结果都有影响，直接关系到试样的压缩量、固结速率、次固结量等，因此，需要有稳定标准。本标准规定每级压力下，主固结完成或以 24h 作为稳定标准，这一标准与国外大多数国家的稳定标准一致。对于某些粗颗粒土，在高压力下，颗粒破碎可能会引起次固结量。

66 粗颗粒土直接剪切试验

66.2 仪器设备

66.2.2 对粗颗粒土进行直剪试验时，试样尺寸取决于最大粒径。根据国内外现有资料，统计了各试验研究单位所用试样尺寸与最大粒径的比值。

由统计分析可知：试样直径与最大粒径的比值（D/d_{max}）变化范围较大，为4～12.5。其中径径比为7.5～10的统计数为64%，径径比小于7.5的占25%，径径比大于10的占11%；高径比的变化为1.5～10，其中高径比为4～8的占53%，高径比大于8的占17%，高径比小于4的占30%。以上各单位采用的比值较集中为：径径比为7.5～10，高径比为4～8。

不同的径径比和不同的高径比对粗颗粒土的摩擦角的影响如图37、图38所示。为此，确定试样尺寸与最大粒径关系时，应同时考虑高径比，推荐径径比为8～12，高径比为4～8。根据统计资料分析，粗颗粒土直剪仪的剪切盒多数为圆形，其次是方形，少数为长方形。因圆形受力条件与应力分布比方形的好，而方形的又比长方形的好。故本试验推荐圆形直剪仪。

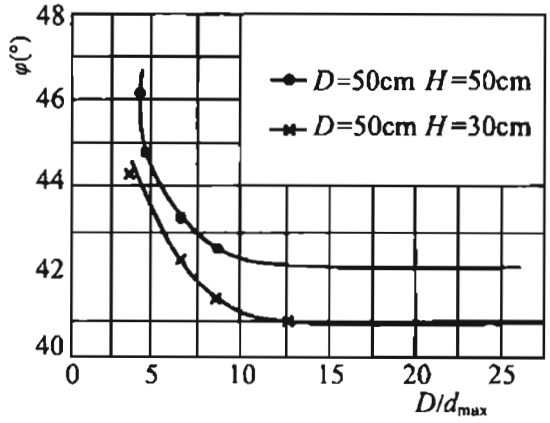


图37 φ-D/d_{max}关系曲线

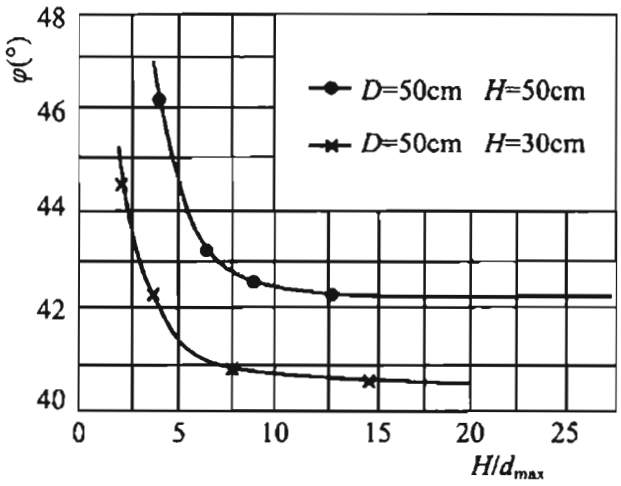


图 38 φ-H/d_{max}关系曲线

66.3 操 作 步 骤

66.3.1 试样制备和安装应下列步骤进行：

2 粗颗粒土在剪切过程中，颗粒的位置不断调整，在剪切区产生错动、翻滚和剪损现象。在直剪仪中，试样受剪力盒约束及剪切面固定，因此，剪切时粗粒要发生翻滚和错动较困难，导致颗粒剪破，剪切过程中伴随着明显的剪胀，使测得的强度偏高。为此，应在上、下剪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(1/3～1/4)/d_{max}作为其使用标准。

3 试样制备选用以下方法：

(1)击实法。采用与室内击实试验相同的功能分 3 层～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。

4 试样饱和常用的方法有真空抽气饱和法、毛细管饱和法和浸水饱和法。实践证明，真空抽气饱和法的饱和度最高，效果最好，适用于含黏质土的粗颗粒土；水头饱和法次之，可用于无黏性粗颗粒土。浸水饱和法易使气体封闭在土内，并造成细粒在水的作用下向下移动，淤填孔隙，使试样密度不均匀，饱和效果最差，一般不宜使用。

66.3.2 快剪试验应按下列步骤进行：

1 渗透系数大于 1×10^{-6}cm/s 的土不宜用此法。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。

2 关于水平剪切力施加方法。根据国内的情况，水平剪切力的施加方法有以下三种：

(1)应变控制法。按水平位移计读数的等速递增作为标准。

(2)时间控制法。采用液压稳压器均匀推动水平千斤顶施加水平剪切力，控制试样在 3min～5min(有的单位控制在 5min～10min)内剪损。

(3)应力控制法。按水平压力计读数递增水平剪切力。

剪切速率的大小直接关系到试样排水，是影响抗剪强度的主要因素之一。

对于无黏性粗颗粒土，其渗透系数较大，在荷载作用下孔隙水压力能迅速消散，在快剪和固结快剪条件下，也难避免排水固结，

因而建议用三轴仪测定其不排水强度。

对于渗透系数较小的黏质粗颗粒土，快剪和固结快剪的剪切速率参考了直径61.8mm细粒土的剪切速率。对于固结慢剪，由于土料性质和渗透系数的差异，较难准确确定剪切速率，参考细粒土固结慢剪经验，建议估算破坏历时，根据破坏时的剪切变形计算剪切速率。可根据设备尺寸、土料性质等因素自行确定剪切速率，但要保证孔隙水压力消散充分。

66.3.3 固结快剪试验应按下列步骤进行：

2、3 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0.01mm～0.05mm。本标准规定在垂直荷载作用下，每小时垂直变形小于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。

第66.3.4条第3款规定的理由与第66.3.2条第2款的相同。

66.4 计算、制图和记录

66.4.3 粗颗粒土直剪试验中现行破坏标准有两种，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τ-ΔL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，本标准推荐采用极限强度标准。

但在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：$(1/20)D \leqslant \Delta L_{max} \leqslant (1/15)D$。

本标准建议在剪切试验过程中无峰值或稳定值时，可用ΔL_{max}值为$\left(\frac{1}{15} \sim \frac{1}{10}\right)D$作为确定破坏值的标准。

67 粗颗粒土三轴压缩试验

67.1 一般规定

67.1.2 在三轴压缩试验中，根据排水条件的不同，分为不固结不排水剪(UU)、固结不排水剪(CU)、固结排水剪(CD)三种试验类型。其特点和应用见本标准第19.1.2条的说明。

67.2 仪器设备

67.2.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 国内外相继研制了许多大型三轴仪，试样直径为200mm～500mm，周围压力 σ_3 为0MPa～14MPa，其中：以试样直径 D 为300mm、试样高度 H 为600mm～750mm、侧压力 σ_3 为1.5MPa～2.5MPa的为多数，应用也十分广泛。本标准对试样尺寸未做具体规定，可根据具体情况而定。

67.3 无黏性粗颗粒土三轴压缩试验

67.3.1 试样制备应按下步骤进行：

1 本标准中规定试样直径不应小于试料最大粒径的5倍。而试样高度与试样直径的比值对试验结果的影响也很大，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。故本试验建议以高径比为2～2.5为宜。

5 由于粗颗粒土性质不同，有的含有一定的细颗粒，在土体颗粒间有一定的结合力，土体可自立成土柱；而较多的粗颗粒土不含黏土颗粒，也就无黏结力作用，土体只有借助外力才能成直立

状，故在本标准中分为黏质粗颗粒土和无黏性粗颗粒土两类。前者因可自立成土柱，故在试样制备中可在三轴仪底座上或在制样器底座上安装成型筒用击实法制样；后者只宜在三轴仪底座上安装成型筒用击实法或振捣法制样，然后从试样顶部抽气，施加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用两层或三层橡皮膜；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（见图39），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型橡皮膜要复杂一些。

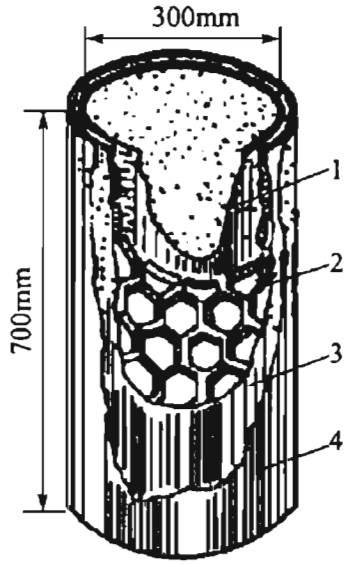


图39　贴有六边形橡皮块的橡皮膜

1—内套；2—六边形块；3—六边形黏结套；4—外橡皮膜

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。

67.3.2、67.4.2 对于黏质粗颗粒土，因透水性小，本试验建议用抽气饱和法或反压力饱和法；对于无黏性粗颗粒土，透水性较大，本试验建议用抽气饱和法、水头饱和法及二氧化碳饱和法等。使用中也可联合使用，如用抽气饱和之后，再继续水头饱和则效果更好。

在这些试验方法中，水头饱和、抽气饱和及反压力饱和法皆为大家所熟悉，已积累了一定的经验。二氧化碳饱和法目前在国内已有应用，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 $B(u/\sigma_3)\geqslant 95\%$ 作为鉴别标准。

67.3.3 固结不排水剪切试验(CU)应按下列步骤进行：

2 关于试样固结稳定标准。一般常用的鉴别标准有：①固结排水量趋于稳定；②固结过程中孔隙水压力消散至小于5%或消散度达95%以上；③主固结完成。这里需指出的是，因粗颗粒土性能差别较大，如对于无黏性粗颗粒土，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。故对此类粗颗粒土，在固结过程可不按 $\sqrt{t}$ 时间进行测记。本试验规定每隔20s～30s测记读数一次，并随时绘制 ΔV-t 或 u-t 关系曲线。当曲线的下端趋于水平或孔隙压力 u 消散到5%以下，则表示固结完成。对黏质粗颗粒土，因渗透性小，固结历时较长，可按0min、1/4min、1min、4min、9min、25min等的时间间隔测记读数，并随时绘制 ΔV-t 或 ΔV-lg$t$ 关系曲线，当主固结完成或固结度 $U\geqslant 0.95$ 则认为固结完成。

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的颗粒含量大于70%时，可用较快的剪切速率；粗颗粒含量不大于30%～40%时，则其

物性主要取决于细颗粒的性质，则粗颗粒土就具有黏质土的特征。由此可见，粗颗粒土的性能差异很大，它的剪切速率不能一概而论。然而截至目前，对粗颗粒土剪切速率系统研究的资料甚少，故那些由细粒性质起决定作用的粗颗粒土，如黏质粗颗粒土，其性能与细粒土相似，剪切速率可参考常规三轴试验。对无黏性颗粗粒土，不固结不排水剪对应的实际工况几乎没有，试验本身没有意义，因此本标准未纳入无黏性颗粗粒土不固结不排水剪试验。无黏性颗粗粒土固结排水剪中，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。采用每分钟轴向应变为0.1%～0.5%为宜。

67.4 黏质粗颗粒土三轴压缩试验

67.4.1 试样制备应按下列步骤进行：

2 本款规定的理由与第67.3.1条第1款的相同。

68 粗颗粒土三轴蠕变试验

68.1 一般规定

68.1.1 土体变形和应力与时间的关系统称为土的流变。它包括:蠕变、应力松弛、长期强度、应变率(或荷载率)效应等。蠕变是指有效应力不变条件下,变形随时间而发展的现象。

粗颗粒土具有蠕变特性,从已建大坝的沉降资料来看,竣工以后的沉降相当一部分是由于作为坝体填料的粗粒料蠕变造成的。例如澳大利亚坝高 110m 的塞沙那(Cethana)面板堆石坝,从 1971 年 4 月蓄水结束到 1980 年 11 月,坝顶最大沉降约达 64mm,坝顶最大向下游方向的水平位移约 44mm,其中 1973 年～1980 年,坝体沉降和水平位移分别以每年 4mm 和 3mm 的速率发展。我国高 95m 的西北口面板坝,观测沉降最大的点在施工完成时的沉降为 36cm,8 年后的沉降发展到 66cm。我国的成屏面板堆石坝运行 3 年后,变形才逐渐趋于稳定。这些后期变形主要是由堆石的蠕变引起的。我国正在兴建的 200m 乃至 300m 的高土石坝,坝体内应力分布复杂,应力大,堆石体的蠕变问题更严重,是值得高度重视的问题。

通常情况下,室内粗颗粒材料蠕变试验只是研究恒定应力作用下颗粒本身的蠕变及接触点错动或破坏所引起的宏观上的变形与时间的关系,测得的蠕变量在总变形量中所占的比例较小,完成得也快。野外现场受到日晒雨淋因素的影响,测得的蠕变量则相当大,且长时间发展。对于土石坝工程而言,主要原因有两条:①天气变化、日晒雨淋、温度循环、大气的氧化作用等现场因素引起颗粒接触点的软化、侵蚀,从而加剧堆石内部颗粒错动或者接触点破碎,引起重新排列,相应产生变形;②荷载的变化。库水位的

周期性升降引起荷载反复增减，引起堆石料的塑性变形。这部分变形是荷载变化引起的，不属于蠕变。

68.2 仪器设备

68.2.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 室内蠕变试验仪器主要有：单向压缩蠕变仪、三轴蠕变仪和剪切蠕变仪。单向蠕变仪可以是普通的单向固结仪，恒定竖向压力，量测随时间变化的竖向变形。该仪器操作简单，但是仅能得到 K_0 固结状态下的体积变形，不能得到剪切变形，而且侧壁摩擦影响大。在具有应力控制功能且能长期恒压的三轴仪上进行蠕变试验，能够确定体积变形和轴向变形，因此本标准只列入了在三轴仪上进行蠕变试验的方法。

研究表明，温度是影响蠕变试验测试精度的重要影响因素之一，由此在进行试验时宜在恒温条件或温差不大情况下进行。

68.3 操作步骤

68.3.4 蠕变试验在变形量测时，应保证有效应力不变。在外荷不变和排水条件下，就要求超孔隙水压力保持为零，或在蠕变初始测量时就不允许产生超孔隙水压力。因此本标准在施加轴向应力时采用的加载速率是三轴压缩 CD 试验的剪切速率，以使试样能充分排水，保证孔隙水压力基本为零。

68.3.5 蠕变试验应按下列步骤进行：

1、2 目前普遍的观点是：蠕变在荷载施加时刻起就已经发生。因此施加轴向应力到预定应力时，就应立刻开始记录产生的变形。

但要说明的是，按照滞后变形理论，量测得到的应变可分为瞬时产生的弹塑性应变（或初始应变）和蠕变应变。目前还没有统一的方法进行这两者之间的区分，有的单位以时间（如 1h）为界，有的单位按照理论公式或经验公式对试验曲线进行拟合后确定。试

验中应全过程记录，前期变形发展较大，记录应密集；后期变形发展缓慢，可适当延长时间间隔。

3　关于蠕变的稳定标准，目前还没有形成公论。国内进行蠕变试验时往往采用下述3种稳定标准：①以一定时间内变形的绝对变化值为标准，如轴向应变每24h不大于5×10^{-5}；②以一定时间内变形的相对变化为标准，如选择24h内的变形为累计蠕变变形的1‰～5‰；③以时间作为稳定标准。如蠕变试验每级至少7d。这个标准显然忽视了堆石的本身特性，如硬岩稳定时间较短，而强风化或软岩相应的蠕变稳定时间较长，黏质粗颗粒材料的稳定时间更长。按第①、②种稳定标准，往往数天或数十天蠕变变形已较稳定。因此推荐第①、②种稳定标准，第③种不推荐。

68.4　计算、制图和记录

68.4.2、68.4.3　研究表明，试样级配、母岩岩性、颗粒形状、试样的饱和状态、试样密度、初始应力状态（包括围压和应力水平）、加载应力路径、试样尺寸等是影响粗粒料蠕变特性的主要因素。试验环境温度对试验结果也有影响。温度变化会引起土体本身黏性的变化，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。

蠕变的本构模型很多，有将蠕变曲线用幂函数或指数衰减函数等拟合的经验蠕变模型、元件蠕变模型、弹黏塑性模型、速率过程理论等。国内各家试验和计算单位也未采用统一的模型。因此本标准仅要求记录变形随时间的发展关系，实际应用时根据蠕变曲线，由计算模型再确定模型参数。已有研究表明，最终剪切蠕变量与偏应力水平和试验围压均有关；最终体积蠕变量也与围压和偏应力水平有关，存在“剪胀性”。这表明了蠕变特性也存在“交叉影响”。

69 粗颗粒土三轴湿化变形试验

69.1 一般规定

69.1.2 粗粒土料的湿化是指粗粒土料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。室内试验中这种变形应在应力状态不变时进行量测。

粗粒土料湿化变形试验研究可在单向固结仪和三轴仪上进行。单向固结仪只能测量湿化体积变形，而且一般其侧向应力无法控制。湿化试验在三轴仪上进行时，具有应力条件明确、能够量测体积变形和剪切变形的优点，因此本标准仅列出了在三轴仪上进行湿化试验的方法。

湿化变形试验和计算分析中，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。

69.3 操作步骤

69.3.2 试样固结应按下列步骤进行：

2 当试样孔隙内仅有气相时，其渗透系数往往比饱和试样渗透系数大一个或几个数量级，干样的固结过程非常迅速。为方便起见，将干样固结方式、剪切方法按饱和粗颗粒土的进行，这完全可以保证超孔隙气压力的消散。施加周围压力，压力室、侧向缸体

和管路等系统会产生变形。因此在加围压后，在未开排气阀门状态下，待外体变测量系统读数稳定后，将外体变测量系统读数清零，以消除系统膨胀导致的误差。

69.3.3 施加轴向应力应按下列步骤进行：

1 本款规定的理由与第 69.3.2 条第 2 款的相同。

2 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 3h～5h 后，平均应变率为 0.00001/min，已较稳定。对于黏质粗颗粒土，稳定时间应适当延长。结合多家试验单位的试验经验和具体操作方法，建议以 30min 内轴向应变小于 0.01%作为稳定标准。

69.3.4 湿化试验应按下列步骤进行：

1 无黏性粗颗粒土的饱和方法有抽气饱和法、水头饱和法和二氧化碳饱和法。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。

3 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蠕变变形；太低，则不能得到完整的湿化变形量。根据多家单位的实际经验，对于堆石料，饱和完成后 3h～5h 就可认为湿化变形已经完成。对于黏质粗颗粒土，稳定时间应适当延长。结合多家试验单位的试验经验和具体操作方法，建议以 30min 内轴向应变的变化量小于 0.01%作为稳定标准。

69.4 计算、制图和记录

69.4.1、69.4.2 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，外体变量程示值读数发生变化，应去除这部分的变化。

69.4.3 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。

S/N:155182·0306

9 155182 030602

统一书号：155182·0306

定　　价：124.00 元