



T/CECS XXX-20XX

中国工程建设标准化协会标准

非饱和土试验方法标准

Standard for Unsaturated Soil Test Method

(征求意见稿)

中国计划出版社

中国工程建设标准化协会标准

非饱和土试验方法标准

Standard for Unsaturated Soil Test Method

T/CECS XXX-20XX

主编单位：中冀建勘集团有限公司

陆军勤务学院

批准部门：中国工程建设标准化协会

执行日期：20XX 年 XX 月 XX 日

中国计划出版社

20XX 年

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发（2018年第二批协会标准制定、修订计划）的通知》（建标协〔2018〕030号）的要求，由中冀建勘集团有限公司和陆军勤务学院会同有关单位成立标准编制组，经过深入调查研究，认真总结工程实践经验，参考有关标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本标准。

本标准主要技术内容包括：总则、术语和符号、试样制备、土-水特征试验的测定试验、侧限压缩试验、直剪试验、黄土侧限增/减湿变形试验、抗拉强度试验、三轴试验、水平土柱渗水试验、渗气试验、真三轴试验、膨胀力试验、温控侧限压缩试验、温控三轴试验、蠕变试验、结构特征试验、化学-力学特性试验、振动三轴试验和共振柱试验、空心圆柱动扭剪试验、渗水模型试验、原位含水率与基质吸力试验、孔内剪切试验、原位多场综合监测、三轴试样全表面变形数字图像测量、三轴试样含水率分布测试试验、土的分散性鉴别试验等。

本标准由中国工程建设标准化协会湿陷性黄土专业委员会归口管理，由陆军勤务学院（地址：重庆市渝州路79号附75号，邮编：400041，email：fangxiangwei1975@163.com）负责具体技术内容的解释。本标准在使用中，如有需要修改或补充之处，请将有关资料和建议寄送解释单位（地址：重庆市渝州路79号附75号，邮编：400041，email：fangxiangwei1975@163.com），以供修订时参考。

本标准主编单位：中冀建勘集团有限公司

陆军勤务学院

本标准参编单位：

主要起草人：

主要审查人：

目 录

1 总 则.....	1
2 术语和符号.....	2
2.1 术 语	2
2.2 符 号	3
3 试样制备.....	7
3.1 一般规定	7
3.2 压实法制备扰动土试样	7
4 土-水特征曲线的测定试验.....	11
4.1 一般规定	11
4.2 张力计法	12
4.3 轴平移技术法	17
4.4 滤纸法	22
4.5 饱和盐溶液蒸汽平衡法	29
5 侧限压缩试验.....	33
5.1 一般规定	33
5.2 仪器设备与高进气值陶土板的饱和及检验	33
5.3 控制基质吸力为常数的排水侧限压缩试验	39
5.4 控制气压力为常数的不排水侧限压缩试验（测孔隙水压力）	49
5.5 排气不排水侧限压缩试验（不测孔隙水压力）	55
5.6 考虑上覆压力影响的广义持水特性试验	60
6 直剪试验.....	67
6.1 一般规定	67
6.2 仪器设备	67
6.3 控制基质吸力为常数的固结排水直剪试验	70
6.4 不固结排气不排水直剪试验	76
6.5 控制气压力为常数的固结不排水直剪试验	79
7 黄土侧限增/减湿变形试验.....	83
7.1 一般规定	83

7.2 土样的增湿/减湿方法	83
7.3 “先增/减湿后加压路径”非饱和黄土增/减湿变形试验.....	85
7.4 “先加压后增湿路径”非饱和黄土增湿变形试验	89
8 抗拉强度试验	92
8.1 一般规定	92
8.2 仪器设备	92
8.3 操作步骤	94
8.4 计算、制图和记录	96
9 三轴试验	102
9.1 一般规定和仪器设备	102
9.2 高进气值陶土板的饱和与检验及体变标定	108
9.3 控制基质吸力为常数的排水各向等压试验	119
9.4 控制吸力和净围压都为常数的固结排水剪切试验	132
9.5 控制气压力和净围压都为常数的固结不排水剪切试验（测孔隙水压力）	151
9.6 控制净围压为常数的不固结排气不排水剪切试验	161
9.7 控制净平均应力为常数而基质吸力逐级增大广义持水特性试验	167
9.8 控制基质吸力与净平均应力为常数而偏应力逐级增大的排水剪切试验	179
9.9 在一定应力状态下基质吸力卸载到零的湿陷/湿化试验	187
9.10 在一定应力状态和初始含水率下不同浸湿程度的湿陷/湿化试验	198
9.11 同时控制基质吸力和轴向净正应力不变而净围压减小的固结排水剪切试验	207
9.12 控制净平均应力和偏应力为常数而基质吸力增大的广义持水特性试验	215
10 水平土柱渗水试验	225
10.1 一般规定	225
10.2 仪器设备	225
10.3 扰动土样的制备与安装	227
10.4 原状土样的制备	227
10.5 试验方法	231
11 渗气试验	238
11.1 一般规定	238
11.2 试验设备	240

11.3 试样制备	243
11.4 一维渗气试验	243
11.5 三轴渗气试验	247
12 真三轴试验	251
12.1 一般规定	251
12.2 非饱和土真三轴仪	251
12.3 固结常含水率剪切试验	261
12.4 常基质吸力固结排水剪切试验	267
13 膨胀力试验	277
13.1 一般规定	277
13.2 恒体积法测膨胀力试验	277
13.3 三向膨胀力试验	280
14 温控侧限压缩试验	290
14.1 一般规定	290
14.2 仪器设备	290
14.3 控制温度和基质吸力为常数的侧限压缩试验	292
14.4 控制温度和含水率为常数的侧限压缩试验（不测孔隙水压力）	300
14.5 控制温度和净竖向压力为常数的广义持水特性试验	306
15 温控三轴试验	312
15.1 一般规定	312
15.2 仪器设备与准备工作	312
15.3 控制温度和基质吸力为常数的各向等压固结试验	318
15.4 控制温度、吸力和净围压都为常数的固结排水剪切试验	328
15.5 控制温度和净围压都为常数的不固结排气不排水剪切试验	348
15.6 控制温度和净围压等于常数、吸力逐步增大的广义持水特性试验	351
16 蠕变试验	359
16.1 一般规定	359
16.2 仪器设备	359
16.3 操作步骤	361
16.4 计算、制图和记录	366

17 结构特征试验	379
17.1 一般规定	379
17.2 细观结构演化特征的 CT-三轴试验	379
17.3 土的微观结构 SEM 试验	386
17.4 压汞试验	390
18 化学-力学特性试验	397
18.1 一般规定	397
18.2 化学物质类型与试验力学参数	400
18.3 试样制备	401
18.4 侧限压缩试验	402
18.5 直剪试验	406
18.6 三轴试验	410
19 振动三轴试验和共振柱试验	424
19.1 一般规定	424
19.2 振动三轴试验	424
19.3 共振柱试验	436
20 空心圆柱动扭剪试验	439
20.1 一般规定	439
20.2 仪器设备	439
20.3 操作步骤	441
20.4 试验数据处理	445
21 渗水模型试验	455
21.1 一般规定	455
21.2 仪器设备	455
21.3 扰动土样的制备与仪器的安装	462
21.4 试验方法	463
22 原位含水率与基质吸力试验	470
22.1 一般规定	470
22.2 时域反射法	470
22.3 张力计法	478

22.4 热传导法	481
23 孔内剪切试验	484
23.1 一般规定	484
23.2 仪器设备	484
23.3 操作步骤	485
23.4 计算、制图和记录	487
24 原位多场综合监测	490
24.1 一般规定	490
24.2 仪器设备	490
24.3 实施方法	492
24.4 计算和记录	497
25 三轴试样全表面变形数字图像测量	501
25.1 一般规定	501
25.2 仪器设备	501
25.3 操作步骤	509
25.4 试验数据后处理	514
26 三轴土样含水率分布测试试验	520
26.1 一般规定	520
26.2 仪器设备	520
26.3 标定试验	522
26.4 三轴试样含水率分布试验	524
27 土的分散性鉴别试验	528
27.1 一般规定	528
27.2 泥球试验	528
27.3 孔隙水阳离子试验	530
27.4 分散值 (F) 方法	534
27.5 野外调查方法	536
附录 A 土-水特征关系曲线快速测定试验要点	543
附录 B 膨胀土的膨胀性快速判别的电导率测试法要点	545
附录 C “8”字形试样单轴拉伸试验方法要点	547

附录 D 非饱和黄土的构度试验要点..... 550

Contents

1	General provisions.....	1
2	Terms and symbols.....	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbols	3
3	Preparation of test specimens	7
3.1	General requirements.....	7
3.2	Compaction method for disturbed soil specimen preparation	7
4	Soil-water characteristic curve test.....	11
4.1	General requirements.....	11
4.2	Tensiometer method	12
4.3	Axis translation method	17
4.4	Filter paper method.....	22
4.5	Vapor equilibrium method.....	29
5	Oedometer test.....	33
5.1	General requirements.....	33
5.2	Instruments, equipments and saturation of high air entry ceramic disks.....	33
5.3	One-dimensional drained compression test with control of matric suction.....	39
5.4	One-dimensional undrained compression test with control of pore gas pressure and measurement of pore water pressure	49
5.5	One-dimensional compression test at constant water content, without measurement of pore water pressure.....	55
5.6	Generalized soil-water characteristic curve test with control of vertical stress.....	60
6	Direct shear test	67
6.1	General requirements.....	67
6.2	Instruments and equipments	67
6.3	Consolidated drained direct shear test with control of matric suction.....	70
6.4	Unconsolidated undrained direct shear test with pore gas exhaust	76
6.5	Consolidated undrained direct shear test with control of pore gas pressure.....	79
7	One-dimensional wetting/drying test of loess	83
7.1	General requirements.....	83
7.2	Wetting/drying methods of soil	83

7.3	Deformation test of unsaturated loess along the drying/wetting and subsequent loading path	85
7.4	Deformation test of unsaturated loess along the loading and subsequent wetting path	89
8	Tensile strength test.....	92
8.1	General requirements.....	92
8.2	Instruments and equipments	92
8.3	Operation steps	94
8.4	Calculate, drawing and record	96
9	Triaxial test.....	102
9.1	General requirements, instruments and equipments	102
9.2	Saturation of high air entry ceramic disks and calibration of volume change measurement.....	108
9.3	Drained isotropic compression test with control of matric suction	119
9.4	Consolidated drained shear test with control of matric suction and net confining pressure.....	132
9.5	Consolidated undrained shear test with control of pore gas pressure and net confining pressure and measurement of pore water pressure	152
9.6	Unconsolidated undrained shear test with pore gas exhaust and control of net confining pressure, without measurement of pore water pressure	164
9.7	Generalized soil-water characteristic curve test at constant net mean stress, along a drying path.....	170
9.8	Consolidated drained shear test at constant matric suction and net mean stress	182
9.9	Collapse/wetting test at a given stress state	190
9.10	Collapse/wetting test at a given stress state and initial water content	201
9.11	Consolidated drained shear test at constant matric suction and net axial stress	210
9.12	Generalized soil-water characteristic curve test at constant net mean stress and deviator stress, along a drying path	218
10	Infiltration test of horizontal soil columns	228
10.1	General requirements.....	228
10.2	Instruments and equipments	228
10.3	Preparation and installation of disturbed soil columns.....	230
10.4	Preparation of undisturbed soil columns	230
10.5	Test method	234

11	Gas permeability test	241
11.1	General requirements	241
11.2	Instruments and equipments	243
11.3	Soil specimen preparation.....	246
11.4	One-dimensional gas permeability test.....	246
11.5	Triaxial gas permeability test.....	250
12	True triaxial test for unsaturated soils	254
12.1	General requirements	254
12.2	True triaxial apparatus for testing unsaturated soils	254
12.3	Consolidated shear test at constant water content	264
12.4	Consolidated drained shear test at constant matric suction	270
13	Swelling pressure test.....	280
13.1	General requirements.....	280
13.2	Constant-volume swelling pressure test	280
13.3	Three-dimensional swelling pressure test.....	283
14	Temperature-controlled oedometer test.....	293
14.1	General requirements.....	293
14.2	Instruments and equipments	293
14.3	One-dimensional compression test with control of matric suction and temperature	295
14.4	Temperature-controlled one-dimensional compression test at constant water content, without measurement of pore water pressure.....	303
14.5	Generalized soil-water characteristic curve test with control of vertical stress and temperature	309
15	Temperature-controlled triaxial test	315
15.1	General requirements.....	315
15.2	Instruments, equipments and test preparation.....	315
15.3	Isotropic compression test with control of matric suction and temperature	321
15.4	Consolidated drained shear test with control of matric suction, net confining pressure and temperature	332
15.5	Unconsolidated undrained shear test with pore gas exhaust and control of net confining pressure and temperature.....	351
15.6	Generalized soil-water characteristic curve test with control of net mean stress and temperature, along a drying path.....	354

16	Creep test.....	362
16.1	General requirements.....	362
16.2	Instruments and equipments	362
16.3	Operation steps	364
16.4	Calculate, drawing and record	369
17	Structural Characterisation test	382
17.1	General requirements.....	382
17.2	CT-triaxial test for soil mesostructural investigation	382
17.3	Scanning electron microscopy test for soil microstructure investigation	389
17.4	Mercury intrusion porosimetry test.....	393
18	Chemical-mechanical characteristics test.....	400
18.1	General requirements.....	400
18.2	Chemical substance types and mechanical parameters.....	403
18.3	Soil specimen preparation.....	404
18.4	One-dimensional compression test	405
18.5	Direct shear test	409
18.6	Triaxial test	413
19	Dynamic triaxial test and resonant column test for unsaturated soils	427
19.1	General requirements.....	427
19.2	Dynamic triaxial test.....	427
19.3	Resonant column triaxial test.....	439
20	Hollow cylinder torsional shear test.....	442
20.1	General requirements.....	442
20.2	Instruments and equipments	442
20.3	Operation steps	444
20.4	Test data processing.....	448
21	Water infiltration model test.....	458
21.1	General requirements.....	458
21.2	Instruments and equipments	458
21.3	Disturbed soil specimen preparation and instrument installation	465
21.4	Test method.....	466
22	Field measurement test of water content and matric suction	473
22.1	General requirements.....	473
22.2	Time domain reflectometry method	473

22.3	Tensiometer method	481
22.4	Thermal conductivity sensor method.....	484
23	Borehole shear test	487
23.1	General requirements.....	487
23.2	Instruments and equipments	487
23.3	Operation steps	488
23.4	Calculate, drawing and record	490
24	In-situ integrated multi-field monitoring of unsaturated soils.....	493
24.1	General requirements.....	493
24.2	Instruments and equipments	493
24.3	Implementation method	495
24.4	Calculate and record	500
25	Whole surface deformation measurement of triaxial soil specimen based on digital image processing.....	504
25.1	General requirements.....	504
25.2	Instruments and equipments	504
25.3	Operation steps	512
25.4	Test data processing.....	517
26	Water content distribution measurement of triaxial soil specimen	523
26.1	General requirements.....	523
26.2	Instruments and equipments	523
26.3	Calibration test.....	525
26.4	Water content distribution measurement of triaxial soil specimen	527
27	Identification test of soil dispersivity	531
27.1	General requirements.....	531
27.2	Muddy ball test	531
27.3	Pore water cations test	533
27.4	Dispersivity value method	537
27.5	Field survey method.....	539
Appendix A	Main points of quick determination method of soil-water characteristic curve	546
Appendix B	Main points of rapid expansibility identification by measuring electrical conductivity for expansive soils	548
Appendix C	Main points of uniaxial tensile test method for 8-shaped soil specimen	550

Appendix D Main points of test method for structural index of unsaturated loess.....	553

1 总 则

1.0.1 为适应工程建设的新需求和土力学的新发展，测定非饱和土的基本工程性质，规范非饱和土的试验技术，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于工业与民用建筑、水利水电、交通、电力、空港等建设工程的处于非饱和状态的地基土及填筑土料的基本工程性质试验。

1.0.3 非饱和土试验资料的整理，应通过对样本（试验测得的数据）的研究估计土体单元特征及其变化的规律，使非饱和土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《土工试验方法标准GB/T 50123-2019》附录A进行。

1.0.4 土样的要求与管理应符合《土工试验方法标准GB/T 50123-2019》附录B的规定，土的分类应符合《土工试验方法标准GB/T 50123-2019》附录C的规定。

1.0.5 非饱和土试验方法除应符合本标准外，尚应符合《土工试验方法标准GB/T 50123-2019》和国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 非饱和土——饱和度小于1的土，是固、液、气三相介质，其孔隙水压力小于零（即，低于大气压）、孔隙气压力不小于零。

2.1.2 基质吸力——是吸力的毛细部分，反映土骨架（基质）对土中水分的吸持作用，包括毛细作用和表面张力两方面的影响，其值等于孔隙气压力与孔隙水压力之差。

2.1.3 渗透吸力——是吸力的溶质部分，即由于土孔隙水中含有溶质而产生的吸力。

2.1.4 总吸力——等于基质吸力与溶质吸力之和。

2.1.5 高进气值陶土板——有压气体能够穿过饱和陶土板的最小压力称为该陶土板的进气值。如果陶土板的进气值不小于50kPa，就称其为高进气值陶土板。

2.1.6 轴平移技术——通过提高孔隙气压力使孔隙水压力由负值（小于大气压）升高为正值（大于大气压），从而避免发生汽化和气穴现象、便于量测孔隙水压力的技术。因孔隙水压力和孔隙气压力都升高了同一的量值，二者之间的差值（即基质吸力）不变，相当于计量压力的基准（坐标轴）平行移动了一段距离，故称之为轴平移技术。应用轴平移技术，可以量测不高于1500kPa 的基质吸力，为控制吸力等于常数的非饱和土力学试验提供了科学依据。

2.1.7 土-水特征试验——指测定土所受到的吸力（基质吸力或总吸力）与土中水分（饱和度/体积含水率/质量含水率）的对应关系的试验。

2.1.8 侧限压缩试验——试样的侧向（水平方向）变形被完全限制、只有在竖直方向能够变形的压缩试验。

2.1.9 非饱和土水平土柱渗水试验——非饱和土的渗水系数不是常数，而依赖于土的密度、含水率或液相饱和度，测定渗水系数与含水率或液相饱和度之间关系的试验称之为非饱和土渗水试验。水在水平土柱中渗透时，可不考虑位置水头的影响，从而简化计算。

2.1.10 渗气试验——非饱和土的渗气系数不是常数，而依赖于土的密度、含水率或液相饱和度（或气相饱和度），测定渗气系数与含水率或液相饱和度（或气相饱和度）之间关系的试验称之为非饱和土渗气试验。

2.1.11 膨胀力试验——有的土（如膨胀土和膨润土）具有湿胀干缩特性，其大小与土所受外力有关。测定土的湿胀干缩变形与土所受外力之间关系的试验称之为胀缩试验；

该试验亦可限定胀缩变形而测定约束力的大小。土具有各向异性，水平方向膨胀力与竖向膨胀力是不同的，可用三向胀缩仪测定。

2.1.12 温控力学试验——在控制温度为一定值时进行的力学试验。

2.1.13 结构特征试验——用 CT、电子显微镜、环境电镜扫描、压汞试验等揭示土的细观结构、微观结构和孔隙结构特征的试验。

2.1.14 化学-力学特性试验——考虑土中孔隙水的盐溶液浓度影响的力学试验。

2.1.15 蠕变试验——测定非饱和土在一定吸力（或含水率）和应力（包括净平均应力和偏应力）作用下的变形（包括体应变和偏应变）随时间的变化规律及长期强度的试验。

2.1.16 非饱和土动力特性试验——包括常含水率动三轴试验和常含水率共振柱试验，用以测定非饱和土的动强度参数和动变形参数及阻尼比的试验。

2.1.17 非饱和土空心圆柱动扭剪试验——测定非饱和土在动扭剪荷载作用下的剪切强度、残余变形、动剪切模量和阻尼比等动力特性指标的试验。

2.1.18 非饱和土渗水模型试验——基于 γ 射线法测量水分在模型土体中的运移过程，得出模型土体中水分场的动态分布；既可模拟常水头入渗，也可模拟控制降雨强度的降雨入渗或蒸发。

2.1.19 非饱和土原位孔内剪切试验——是一种原位试验，可得到土的强度参数。

2.1.20 三轴试样全表面变形数字图像测量——利用数字图像测量技术动态量测三轴试验过程中试样表面任一点的变形。

2.1.21 三轴试样含水率分布测试试验——以范德堡电阻率测法为基础，测定三轴试验中试样表面不同部位的含水率的试验。

2.1.22 分散性土——是一种在水力坡降很低条件下由于土颗粒间的排斥力超过吸引力而导致土体产生分散流失的细粒土。

2.2 符号

2.2.1 物理性指标（10个）

e —— 孔隙比；

G_s —— 土粒相对密度；

n —— 孔隙率(%)；

S_r —— 液相饱和度，简称为饱和度(%)；

S_{res} —— 残余饱和度(%);
 w —— 质量含水率(%);
 ρ —— 三相土的密度(g/cm^3);
 ρ_d —— 土的干密度(g/cm^3);
 ρ_w —— 纯水密度(g/cm^3);
 θ —— 体积含水率(%)。

2.2.2 力学性指标（35个）：

a_v^s —— 具有一定基质吸力的土在某一压力范围内土骨架的压缩系数(MPa^{-1})。
 c —— 总黏聚力(kPa);
 c' —— 有效黏聚力(kPa);
 C_c^s —— 具有一定基质吸力的土在某一压力范围内土骨架的压缩指数;
 C_s^s —— 具有一定基质吸力的土在某一压力范围内土骨架的回弹指数;
 E_s^s —— 具有一定基质吸力的土在某一净竖向压力范围内土骨架的压缩模量
 (MPa);
 E_i —— 初始切线杨氏模量(MPa);
 E_t —— 切线杨氏模量(MPa);
 L —— 应力水平;
 m_v^s —— 具有一定基质吸力的土在某一压力范围内土骨架的体积压缩系数(MPa^{-1});
 k_a —— 渗气系数(m/s);
 k_w —— 渗水系数(m/s);
 p —— 净平均应力(kPa);
 p_{atm} —— 大气压(kPa);
 p_t —— 总平均应力(kPa);
 p_{vy}^s —— 具有一定基质吸力的土的初始屈服净竖向应力(kPa);
 q —— 偏应力(kPa);
 R_f —— 破坏比;
 s —— 基质吸力(kPa);

s_b —— 进气值(kPa);
 u_a —— 孔隙气压力(kPa);
 u_w —— 孔隙水压力(kPa);
 ε_v —— 体应变(%);
 $\bar{\varepsilon}$ —— 偏应变或广义剪应变(%);
 ε_w —— 液相体应变, 亦即体积含水率的改变量(%);
 ε_v^{sh} —— 湿陷/湿化体应变(%);
 $\bar{\varepsilon}^{sh}$ —— 湿陷/湿化偏应变(%);
 θ_ε^{sh} —— 湿陷/湿化应变的罗德角($^\circ$);
 σ_3 —— 净围压, 净小主应力(kPa);
 σ_{3t} —— 总围压, 总小主应力(kPa);
 τ —— 剪应力(kPa);
 ϕ^b —— 吸力摩擦角($^\circ$);
 ϕ' —— 有效摩擦角($^\circ$);
 π —— 溶质吸力(kPa);
 ν —— 比体积;
 ψ —— 总吸力(kPa)。

2.2.3 热学性指标 (2个):

T —— 温度($^\circ\text{C}$);
 H —— 相对湿度(%).

2.2.4 化学性指标 (3个):

$C(x)$ —— 溶液 x 的摩尔浓度(mol/L);
 CEC —— 阳离子交换量(mmol/100g);

2.2.5 电学性指标 (2个)

ε —— 介电常数, 单位是 F/m, 即法/米。
 κ —— 电导率 (conductivity), 描述电荷在介质中流动的难易程度, 是电阻率的倒数, 单位是 s/m (即 Siemens /meter, 西门子/米)。

2.2.6 放射性指标 (2个)

I —— 射线强度（脉冲数/s），表示单位时间通过某一方向的粒子数目；

μ_m —— 质量吸收系数(cm^2/g)，射线穿过密度为 ρ 的物质时与该物质发生相互作用，按以 e 为底、以 $(-\mu_m \rho t)$ （ t 为历时）为指数的规律衰减。

3 试样制备

3.1 一般规定

3.1.1 试样制备与饱和应符合《土工试验方法标准》（GB/T 50123 — 2019）第 4 章的规定。

3.1.2 试样制备的仪器设备应符合《土工试验方法标准》（GB/T 50123 — 2019）4.2 节的规定。

3.1.3 扰动土试样预备程序应符合《土工试验方法标准》（GB/T 50123 — 2019）4.3 节的规定。

3.1.4 原状土试样制备应符合《土工试验方法标准》（GB/T 50123 — 2019）4.5 节的规定。

3.1.5 试样饱和应符合《土工试验方法标准》（GB/T 50123 — 2019）4.6 节的规定。

3.1.6 有关计算和记录应符合《土工试验方法标准》（GB/T 50123 — 2019）4.7 节的规定。

3.1.7 下列试验用的原状土试样和扰动土试样在本标准各有关试验章节中介绍：

- 1 持水特性试验（试样尺寸因量测仪器不同而异）
- 2 土柱入渗试验（试样尺寸大，安装水分和吸力传感器）；
- 3 真三轴试验的试样（试样为立方体或长方体）；
- 4 三向胀缩变形和膨胀力试验（试样为立方体）；
- 5 空心圆柱扭剪试验（试样为薄壁圆筒，尺寸大）；
- 6 模型试验（试样尺寸大、制备过程中埋设传感器）。

【条文说明】：3.1.7 本标准面向科研和工程应用两个方面，有 6 类试验的土样尺寸比较特殊，故在本标准各有关试验章节中介绍。

3.1.8 高进气值陶土板的饱和方法在本标准各有关试验章节中介绍。

【条文说明】：3.1.8 高进气值陶土板与试验仪器连结在一起，根据试验仪器的具体情况采取相应的饱和方法比较方便，故在本标准各有关试验章节中介绍。

3.2 压实法制备扰动土试样

3.2.1 扰动土试样制备应以压实法为主。

【条文说明】：3.2.1 《土工试验方法标准》（GB/T 50123 — 2019）对制备扰动土样

推荐了 3 种方法：击样法、击实法和压实法。根据西安理工大学和后勤工程学院等单位 30 多年的经验，用制样模具采用压实法制备的试样，不管是环刀试样，还是三轴试样，都能准确控制试样的干密度和含水率，质量高，效率高，操作简便，快捷，几乎不浪费土料，故本条规定：扰动土试样制备应以压实法为主。

3.2.2 本章所说的扰动土试样主要包括环刀试样和三轴试验试样，应符合以下规定：

1 环刀试样（用于侧限力学试验和直接剪切试验）：内径 6.18cm，横截面积 30cm²，高 2cm；

2 三轴试样（用于三轴力学试验和三轴渗气试验）：直径 3.91cm，横截面积 12cm²，高 8cm。

3.2.3 制样设备主要包括压实装置及制备三轴样模具（图 3.2.3-1）和制备环刀试样模具（图 3.2.3-2），应符合以下规定：

1 制样模具应用不锈钢制成。三轴试验的制样模具包括试样模筒和底座、制样活塞及 4 只活塞套环（每只高 16mm）、脱模活塞；侧限力学试样的制样模具的内径应与环刀外径相匹配；

2 压实装置包括加压台架、千斤顶、脱模支架、加压活塞等。

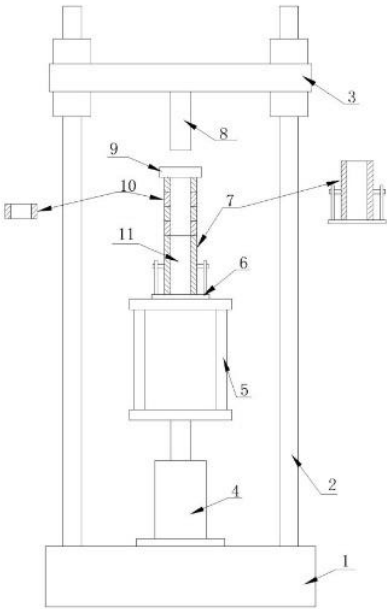


图 3.2.3-1 压实装置及制备三轴样模具示意图

1.台架底座 2.立柱 3.横梁 4.液压千斤顶
5.脱模支架 6.模筒底座 7.试样模筒
8.制样压头 9.制样活塞 10.制样套环 11.试样

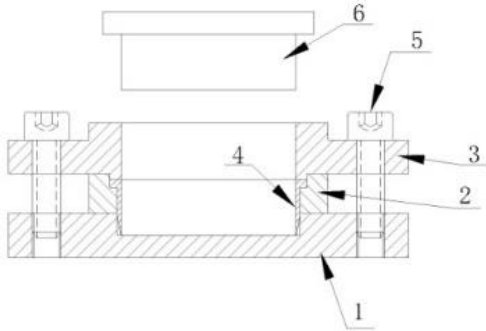


图 3.2.3-2 制备环刀试样模具示意图

1.模具底座 2.定位圈 3.导向上盖
4.环刀 5.固定螺栓 6.制样活塞

3.2.4 制备侧限试验试样（环刀试样）应按《土工试验方法标准》（GB/T 50123 —

2019)第 4.4.2 条第 1 款的规定制备湿土料,根据试样预定的干密度称出所需的湿土量。将湿土倒入模具内,槌平土样表面,一次压实成型。

3.2.5 制备三轴试验试样应按下列步骤进行:

1 应按《土工试验方法标准》(GB/T 50123 — 2019)第 4.4.2 条第 1 款的规定制备湿土料,根据试样预定的干密度计算所需的湿土量,分 5 次称出,每次称出五分之一,土样分 5 层压实,每层的厚度相同;

2 给模筒内壁四周涂上一薄层凡士林,将第一份湿土称出倒入模筒内,槌平土样表面;将制样活塞插入模筒,用千斤顶加压,直到制样活塞外沿与模筒挤紧为止;取下活塞,把模筒内土样的顶面打毛;

3 将第二份湿土称出倒入模筒内,槌平土样表面;在制样活塞上套一个钢环,将制样活塞插入模筒,用千斤顶加压,直到制样活塞外沿与模筒挤紧为止;取下活塞,把模筒内土样的顶面打毛。如此继续,直到第 5 层压实为止;

4 将制样模筒从底座上拆下,放在脱模支架上,下面用玻璃板托住土样底面,将脱模活塞插入模筒,推出土样,连同玻璃板一起放在工作台上;

5 给土样套上三瓣模,用刀把试样两端修平;

6 拆下三瓣模,称取试样质量,计算试样的初始干密度和初始孔隙比,并应符合《土工试验方法标准》(GB/T 50123 — 2019)第 4.1.3 条的规定。拆下三瓣模,称取试样质量,计算试样的初始干密度和初始孔隙比,并应符合《土工试验方法标准》(GB/T 50123 — 2019)第 4.1.3 条的规定。

3.2.6 本试验制备侧限力学试验的扰动土环刀试样的记录格式应符合《土工试验方法标准》(GB/T 50123 — 2019)附录 D 表 D.1 的规定;用压实法制备扰动土三轴试样的记录格式应符合本标准附录 E 表 3.1 的规定。

【条文说明】:3.2.6 《土工试验方法标准》(GB/T 50123 — 2019)附录 D 表 D.1 满足侧限力学试验扰动土环刀试样制备的要求,可以直接采用。故本本标准只给出用压实法制备扰动土三轴试样的记录格式(本标准附录 E 表 3.1)。

附录 E 表 3.1 压实法制备扰动土三轴试样记录表

任务单号		试验者	
试样编号		计算者	
制样日期		校核者	
制样设备名称		土样种类	
制备试样的 设计干密度 (g/cm ³)		制备试样的 设计质量含水率 (%)	
制备试样时测定的 预配土料质量含水 率 (%)		制备土样尺寸	直径×高 = 39.1mm × 80mm
每个试样所需 湿土质量 (g)		压实层数	5
每层所需湿土 质量 (g)		制样历时 (min)	
试样制成后的 实际质量含水率 (%)		试样制成后的 实际干密度 (g/cm ³)	
制备试样与设计试 样的质量含水率之 差 (%)		制备试样与设计 试样的干密度之差 (g/cm ³)	

4 土-水特征曲线的测定试验

4.1 一般规定

4.1.1 本试验方法适用于测量砂土、粉土和黏性土的基质吸力和总吸力。

4.1.2 本试验方法分为张力计法、轴平移技术法、滤纸法、饱和盐溶液蒸汽平衡法。

【条文说明】：4.1.2 张力计法中，普通张力计一般由经硬质管连接的多孔陶瓷头与压力测量装置（真空表或传感器）构成。张力计工作时，多孔陶瓷头和硬质连接管用脱气水饱和。陶瓷头与土体须充分接触，使土体孔隙中的水与陶瓷头以及张力计中的脱气水达到压力平衡，经压力测量装置读数得到土体中的基质吸力。

轴平移技术法中，饱和试样置于饱和陶土板上，通过施加一定基质吸力，使水从试样中经饱和的陶土板排出。当试样中的水停止排出时，即视为试样含水率在该基质吸力下达到平衡。测量和计算试样的含水率，建立基质吸力和含水率的关系。

滤纸法中，滤纸在密闭容器内与土体直接接触达到平衡以测得土体的基质吸力（接触法），或与容器内局部蒸汽压达到平衡以测得土体的总吸力（非接触法）。

饱和盐溶液湿度平衡法通过饱和盐溶液，在放有试样的密闭干燥器中创建稳定的相对湿度环境。试样通过与该湿度环境平衡而达到特定的总吸力。通过测定试样在不同饱和盐溶液所创建的湿度环境下平衡后的含水率，建立土样含水率与不同饱和盐溶液所对应的总吸力之间的关系。

4.1.3 本试验不同方法量测土体吸力的类型及范围为：

- 1 张力计法：量测土体的基质吸力，范围一般为 0~70 kPa；
- 2 轴平移技术法：量测土体的基质吸力，范围一般为 0~1500 kPa；
- 3 滤纸法：量测土体的基质吸力和总吸力，范围一般为 10~100000 kPa；
- 4 饱和盐溶液蒸汽平衡法：量测土体的总吸力，范围一般为 3000~400000 kPa。

【条文说明】：4.1.3 普通张力计理论上可测量基质吸力的范围为 0~90 kPa，但实践表明，当基质吸力超过 70 kPa 时，张力计中的脱气水会局部发生气穴现象产生气泡，进而使张力计反应速度和测量精度降低。另外，内陆海拔高于海平面，大气压低于 1 个标准大气压。因此，普通张力计的宜测定的基质吸力范围为 0~70 kPa。

吸力小于 1500 kPa 时宜采用轴平移技术测定。吸力大于 3 MPa 时，土体以重力含水率-吸力关系表达的土-水特征曲线与试样的干密度无关。

4.1.4 本试验确定的土的土-水特征曲线一般表示为重力含水率、体积含水率或饱和度与对应吸力（基质吸力或总吸力）的关系（图 4.1.4）。基质吸力或总吸力一般用对数坐标（log10）表示。

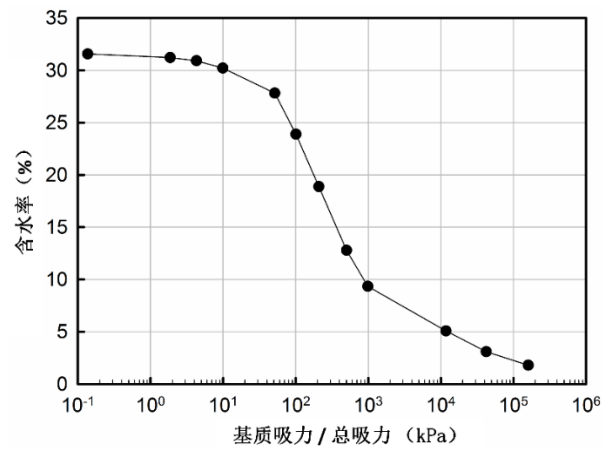


图 4.1.4 土-水特征曲线示例图

4.2 张力计法

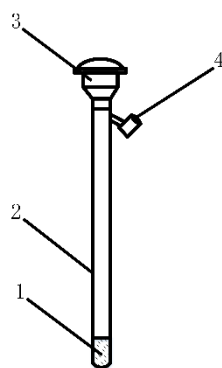
4.2.1 本方法量测的土体的基质吸力应小于张力计多孔陶瓷头的进气值。

【条文说明】：4.2.1 当所测土体的基质吸力大于多孔陶瓷头的进气值时，会发生气穴现象，使张力计失效。张力计不能用于测量土体的渗透吸力，因为可溶盐能够自由通过多孔陶瓷头。

4.2.2 本方法所用的仪器设备应符合下列规定：

1 张力计（图 4.2.2）：包括真空表（或传感器）、储水槽(或阀门)、连接管(一般为硬质的有机玻璃管)、多孔陶瓷头。真空表（或传感器）用来读取张力计内脱气水的压力，分度值 1kPa；储水槽(或阀门)用于收集和去除张力计中的气泡；多孔陶瓷头用于连接土体孔隙水与张力计内脱气水，其进气值一般为 30~90 kPa；

2 成孔器（或螺旋钻头）：在土中成孔，所成孔的直径应略小于多孔陶瓷头的直径。



1-多孔陶瓷头；2-连接管；3-储水槽(或阀门)；
4-真空表(或传感器)

图 4.2.2 张力计构造示意图

【条文说明】：4.2.2 近年来，张力计的结构也趋于多样化，出现了便携式小型张力计以及具有高量程、可与非饱和土三轴仪等试验设备集成的张力计。

4.2.3 张力计法测试前应对张力计进行如下检验：

1 检验张力计多孔陶瓷头是否饱和：使用张力计前，其陶瓷头应在脱气水中浸泡 1 d，使其充分饱和。浸泡后，在张力计的连接管中充满水，施加 80 kPa 左右的负压，并维持 30~60 s，使多孔陶瓷头中残存的气泡析出。负压解除后，冲洗气泡并向连接管重新注满脱气水，然后将张力计组装好。让水从多孔陶瓷头蒸发，在管内水中产生 80 kPa 左右的负压。在此负压作用下，观察管中是否出现气泡。如出现，则应重复进行上述步骤直到管中气泡基本消失为止。

2 检验张力计反应时间：让水从多孔陶瓷头蒸发，当张力计读数为 80 kPa 负压时将陶瓷头浸入水中，张力计中的负压一般在多孔陶瓷头浸入水中 5 min 左右即恢复到大气压。若读数变化明显迟缓，则表明多孔陶瓷头可能堵塞、量测系统中可能有气泡或压力表可能有故障，需对张力计重新饱和或校调。

【条文说明】：4.2.3 张力计陶瓷头测量吸力的反应速度较快，一般能够在 5~10 min 左右达到平衡（见图1所示Sweeney（1982）^[1]所测不同吸力下测张力计读数与时间的关系）。

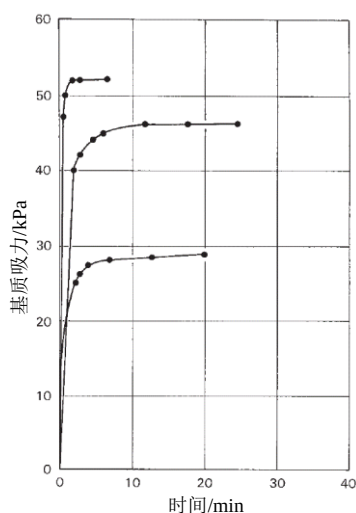


图1 张力计基质吸力和时间之间的关系

4.2.4 张力计法应按下列步骤进行：

1 若对原状土样或重塑土样进行测量，应参照《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）第 4.5 节的规定制备原状土样；应参照本标准第 3.2.4 条的规定制备环刀重塑土样；原状土样或重塑土样应具有足够大的尺寸，直径宜大于 10cm,厚度宜大于 20cm，以尽量减少陶瓷头插入过程中对试样的扰动。

2 若进行现场测量，应开挖至待测土层，形成面积足够的工作面以便安装张力计；开挖过程中应尽量减少对土体的扰动。

3 用与张力计多孔陶瓷头尺寸配套的成孔器成孔。若无配套成孔器，则应自制或使用尺寸合适的螺旋钻头成孔。孔的内径应略小于张力计多孔陶瓷头的直径，以保证多孔陶瓷头与土体之间有良好的接触。

4 将多孔陶瓷头安装至孔中，保证多孔陶瓷头与土体之间紧密接触，并尽量减少安装过程对土体的扰动。现场测量时，应用成孔时挖出的土体对工作面进行回填，回填土的密度应稍大于原状土的密度。

5 多孔陶瓷头安装好后，应静置 1 h，使之与土体之间建立吸力平衡。其后每隔 2 h 记录张力计读数，直至连续三个读数相互之差小于 5 kPa 为止。该测量过程宜持续 24 h 以上。测量结束后，取最后三个读数的平均值作为最终读数。

6 吸力平衡后，按照《土工试验方法标准》（GB/T50123-2019）第 5.2 节所列方法测定试样的含水率。若在现场测量，应在工作面成孔处取原状土样并测定其含水率。

【条文说明】：4.2.4 若不能使陶瓷探头和土充分接触，则张力计的反应时间会变长，读数可能出现错误。本规范张力计吸力平衡准则及读数方法与 ASTM D3404(2015)^[2]

及 Fredlund 等(2012)^[3]一致。

4.2.5 张力计的读数需依据多孔陶瓷头和真空表（或传感器）之间的垂直距离（即位置水头差），按下式对读数进行修正，进而得到量测的基质吸力值。

$$s = s_0 + \gamma_w h \quad (4.2.5)$$

式中： s — 张力计所测基质吸力，为正值（kPa）；

s_0 — 真空表（或传感器）读数的绝对值（kPa）；

γ_w — 水的重度（kN/m³）；

h — 多孔陶瓷头和真空表（或传感器）之间的垂直距离（m），准确至 0.001m。

4.2.6 绘制含水率与对应基质吸力的关系曲线，即为试验土的土-水特征曲线。

4.2.7 本试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 4.1 的规定。

附录 E 表 4.1 张力计法试验记录表

任务单号					试验者					
试验地点					计算者					
试验日期					校核者					
试验环境					张力计量程					
仪器名称及 编号					试样干密度					
试样/测量位置 编号	张力计读数, S_0 (kPa)								位置水头 差, h (m)	基质吸力, S (kPa)
	初始 读数	1h	3h	5h	7h	9h	11h	最终 读数		
备注										

4.3 轴平移技术法

4.3.1 本方法所用的仪器设备应符合下列规定：

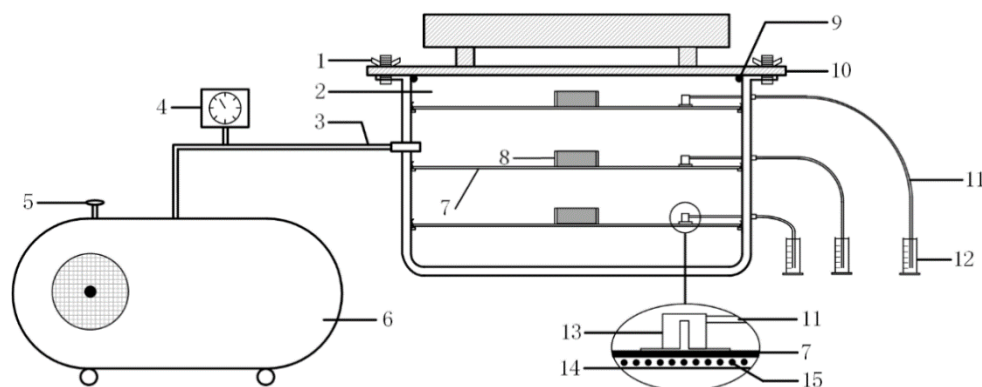
1 压力室（图 4.3.1）：对试样施加气压（通常是空气压力）的密闭金属容器，应标明额定压力。额定压力应不小于试验拟施加最大气压值的 5 倍。压力室内外设排水水管，以将陶土板（或多孔膜）底部的排水引流至压力室外部。

2 可调节压力源：通过压力源（一般为空气压缩机或氮气瓶）及调节器向压力室施加稳定的气压。调节器的精度应为 $\pm 0.25\%$ 或更高。

3 压力表：用于监测压力室中的气压。其精度必须在所施加气压值的 0.25% 以内。

4 陶土板：进气值应大于试验拟施加的最大基质吸力。陶土板的顶面与试样接触，底面下设一层金属丝网，用橡胶膜包裹形成一个充满脱气水的腔体。腔体经陶土板上的连接器与排水管相连。压力室内可设置多层陶土板，以便对同一种土样进行平行试验。

5 制样环刀：通常由不锈钢、丙烯酸或聚氯乙烯制成，高度至少 5 mm，内径至少 25 mm。应有足够壁厚以保证试验时不发生径向变形。



1-蝶形螺母；2-压力室；3-进气管；4-压力表；5-压力源调节器；6-压力源；7-陶土板；8-试样；9-O型垫圈；10-密封盖；11-排水管；12-量筒；13-连接器；14-橡胶膜；15-金属丝网

图 4.3.1 压力室构造示意图

6 天平：称量 200 g，分度值 0.01 g。

7 烘箱：可采用电热烘箱或温度能保持在 105~110℃的其他能源烘箱。

8 量筒：容量 10 ml，分度值 0.1 ml。

9 饱和器：根据土样的透水性能，依据《土工试验方法标准》（GB/T50123-2019）第 4.6 节的规定选取相应的饱和器。

10 其他：干燥器、称量盒、钢丝锯、修土刀和其他用于切削试样的工具。

【条文说明】：4.3.1 亦可采用多孔膜代替陶土板开展轴平移试验。多孔膜为具有较高进气值的膜材料，由于其厚度小于陶土板，因此所需吸力平衡时间一般比陶土板短。每次试验都需使用新的多孔膜。在使用时首先应进行饱和。饱和多孔膜时须小心操作多孔膜，避免损坏。多孔膜应先在温水（须为试验用水）中浸泡至少 30 min 以对其进行软化。软化后，将多孔膜在 75 kPa 负压下抽气饱和至少 24 h，直到膜面不再有气泡析出。

4.3.2 若无指定试验用水，可采用脱气的 0.0025 mol/L 的 CaCl_2 溶液或脱气自来水。除有特殊要求，一般不宜采用蒸馏水或去离子水。若试验过程较长，可在水中添加杀菌剂（试验报告中应记录杀菌剂种类及含量）。

【条文说明】：4.3.2 轴平移法只适用于含有两种孔隙流体，即气体和液体的土体。液体通常是水，气体通常是空气。孔隙中的液体可以是水之外的其他液体，但如果该液体导致土体过度收缩或膨胀，则不宜使用轴平移法。

试验用水需进行脱气处理，以尽量避免水中溶解的空气在试验过程中析出，对试验结果产生影响。可用真空脱气或煮沸的方法进行脱气处理。应避免使用蒸馏水或去离子水，以避免造成土体中水的溶质浓度降低，降低溶质吸力或总吸力值。

4.3.3 在试验过程中，实验室温度波动应保持在 $\pm 3^\circ\text{C}$ 以内。设备应避开阳光直射或其他可能引起温度变化的热源。若需精确控制温度，应将压力室置于隔热箱中。

4.3.4 轴平移技术法试验前应进行如下准备：

1 饱和陶土板：陶土板应先在试验用水中浸泡 1 h，然后在 75 kPa 负压下抽气饱和至少 24 h，直到板面不再有气泡析出。

2 陶土板检验：首次使用或者每使用 10 次时，应对陶土板进行检验，以确定其进气值是否足够，并检查孔隙是否堵塞。应根据本节第 1 款所述方法饱和陶土板。将陶土板安装于压力室中，以压力室额定压力值的 1/10 为增量进行逐级加气压，每次加压至少保持 30 min，在每次加压结束时记录排水量。绘制排水量与压力的关系图（图 4.3.4）。除初始加压时排出的自由水外，在达到进气值之前加压排出的总水量不得超过 0.4 mL。若排出的水量大于 0.4 mL，或图中存在陡变或跳跃，则陶土板失效。测定饱和陶土板的渗透系数，如果其渗透系数较新的饱和陶土板下降了 5 倍以上，则陶土板出现堵塞，应清洗或更换陶土板。

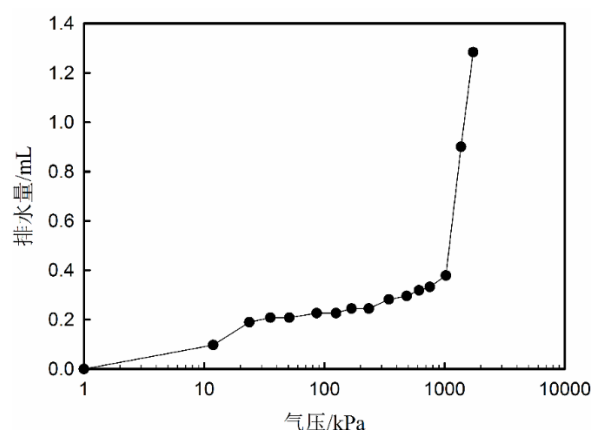


图 4.3.4 进气值为 1000 kPa 的陶土板的排水量-气压关系示意图

4.3.5 轴平移技术法应按下列步骤进行：

- 1 在三个不同位置测量环刀的内径和高度，要求测量误差应小于 0.1 mm，取平均值作为环刀的内径和高度。称量并记录环刀的质量，精确到 0.01 g。
- 2 应参照《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）第 4.5 节的规定制备原状土样；应参照本标准第 3.2.4 条的规定制备环刀重塑土样。
- 3 按照《土工试验方法标准》（GB/T50123-2019）第 4.6 节的规定对试样进行饱和。
- 4 将饱和陶土板置于压力室中，与排水管相连。用脱气水饱和排水管和排水管与陶土板之间的所有连接以去除气泡。用量筒收集排水管导出的水，并测量其体积，精度应为 0.1 mL 或更高。
- 5 将装有试样的环刀置于陶土板上，稍加压力并旋转约 45°，以确保试样与陶土板之间有良好的接触。试样应间隔放置以避免接触。密封压力室，让试样平衡至少 48 h。在 48 h 结束时，记录量筒内水的体积。
- 6 平衡后，调节压力源施加吸力。第一级吸力不应超过土样预计进气值的一半。维持吸力直至吸力达到平衡。
- 7 若压力室中仅放置一个土样，则在吸力平衡后可直接根据量筒所测试样排水量计算平衡时土样的含水率。若压力室中放置多个土样，则在吸力平衡后应用夹子夹紧排水管防止回流，卸载压力室内的压力，打开压力室，快速从陶土板上取下环刀样，立即称量环刀连同试样的总质量。称量结束后，将环刀样迅速放回陶土板上，并稍加压力将每个环刀样旋转约 45°，以确保良好的接触。关闭并密封压力室，迅速加载至下一级吸力，然后取下排水管上的夹子，直至吸力平衡。重复此过程，直至施加完成所有预定吸力为止。

8 本试验判断吸力达到平衡的标准为：当吸力介于 0~500 kPa 时，测量排出水体积，直到 24 h 内排出水的体积小于 0.1 ml 为止，视为吸力达到平衡；当吸力介于 500~1000 kPa 时，测量排出水体积，直到 48 h 内排出水的体积小于 0.1 ml 为止，视为吸力达到平衡；当吸力大于 1000 kPa 时，测量排出水体积，直到 96 h 内排出水的体积小于 0.1 ml 为止，视为吸力达到平衡。

9 吸力达到平衡后，将试样取出，按照《土工试验方法标准》（GB/T50123-2019）第 5 章所列方法测定其含水率。

【条文说明】：4.3.5 只有同一类土才可以在一个压力室内同时进行多个平行试样的试验。由于不同类土的孔隙分布及持水能力的差异，达到吸力平衡所需的时间可能相差很大。因此，不同类土不宜在同一压力室内同时进行试验。

若用压力室同时对多个土样进行试验，每级吸力平衡后，拿取和称量试样时应迅速且轻拿轻放，尽量减小对试样的扰动。

本方法判断土体达到吸力平衡的标准为指定时间段内土体的排水量达到可以忽略的程度（小于 0.1 ml）。本方法判断吸力平衡的标准与 ASTM D6836(2016)^[4]一致。土体达到吸力平衡的时间与土样本身的土性、密度、体积、吸力水平以及陶土板的渗透系数有关。土体密度越小，体积越小，塑性越低，吸力水平越低，其渗透性越强，越容易达到吸力平衡。同时，进气值较低的陶土板一般渗透系数较高，排水速度较快，更容易达到平衡，反之，进气值较高的陶土板一般渗透系数较低，排水速度较慢，达到平衡时间更长。

4.3.6 绘制含水率和基质吸力的关系曲线，即为试验土的土-水特征曲线：

4.3.7 本试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 4.2 的规定。

附录 E 表 4.2 轴平移技术法试验记录表

任务单号										试验者	
试验地点										计算者	
试验日期										校核者	
试验环境										陶土板进气值	
仪器名称及编号											
试样 编号 及干 密度	施加吸力 S (kPa)	10	25	50	100	200	500	800	1000	烘干后试样质量 m_d (g)	
	平衡后试样 质量 m_e (g)										
	试样含水率 (%)										
	平衡后试样 质量 m_e (g)										
	试样含水率 (%)										
	平衡后试样 质量 m_e (g)										
	试样含水率 (%)										
	平衡后试样 质量 m_e (g)										
	试样含水率 (%)										
备注											

4.4 滤纸法

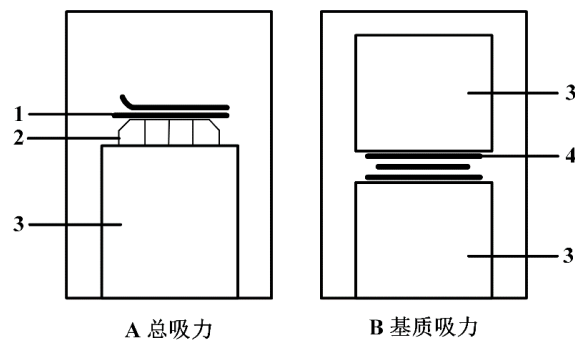
4.4.1 本方法所用的仪器设备应符合下列规定：

- 1 滤纸：应为无灰滤纸，如“**Whatman**”42 号滤纸和“双圈”牌滤纸（No.203）等。滤纸的直径一般为 5.5 cm。
- 2 密闭容器：容积为 120～240 mL 且密闭性良好的防锈金属罐或玻璃罐。
- 3 隔热箱：当外部温度变化 3℃时，其内部温度的变化应在±1℃内的泡沫聚氯乙烯箱。
- 4 天平：称量 20 g、分度值 0.1 mg。
- 5 烘箱：可采用电热烘箱或温度能保持在 105～110℃的其他能源烘箱。
- 6 干燥器：内有硅胶或无水硫酸钙的密封容器，用以盛放干燥滤纸。
- 7 其他：镊子、胶带、O 型环、金属网、称量盒等。

【条文说明】：4.4.1 每次试验应采用新滤纸，不得重复使用滤纸。

4.4.2 滤纸法应按下列步骤进行：

- 1 应参照《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）第 4.5 节的规定制备原状土样；应参照本标准第 3.2.4 条的规定制备环刀重塑土样。
- 2 将滤纸在烘箱中在 110±1℃ 下烘烤至少 12h。烘干后置于干燥器内存储待用。
- 3 将制备好的土样置于密闭容器中，土样应尽量填满整个密闭容器，以缩短平衡时间，并减小密闭容器中空气里的水蒸气对土样吸力的影响。
- 4 非接触法测量总吸力：在土样上方放置由金属网、O 型环等憎水材料做成的悬空支架。用镊子从干燥器内取出两片滤纸，快速放置在支架上，避免滤纸和土样直接接触（图 4.4.2A）。
- 5 接触法测量基质吸力：将 3 张一叠的滤纸夹在两个平行土样之间（图 4.4.2B）。中间滤纸的直径应比外层滤纸的直径至少小 3～4mm，以确保测量基质吸力的中间滤纸不受污染。



1-2片滤纸；2-悬空支撑；3-试样；4-3片滤纸

图 4.4.2 滤纸法测定土样吸力示意图

6 密封密闭容器，用胶带封口，置于隔热箱内进行吸力平衡。隔热箱内的温度变化应在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内，环境温度一般设置为 20°C 。吸力平衡时间至少为 7 d。

7 吸力平衡之后，将盛有土样的密闭容器移出隔热箱并打开，迅速用镊子将试验滤纸（非接触法测量总吸力时为上层滤纸，接触法测量基质吸力时为中间滤纸）夹到称量盒中。整个过程应在 3~5 秒内完成。

8 用天平快速称量装有湿滤纸的称量盒的质量，准确至 0.1 mg。

9 将装有滤纸的称量盒敞口放置在烘箱内烘干至少 2h。

10 烘干后，立即用天平称量装有干滤纸的称量盒的质量，准确至 0.1 mg。取出滤纸，称量称量盒的质量，准确至 0.1 mg。

11 从密闭容器中取出土样，按照《土工试验方法标准》（GB/T50123-2019）第 5.2 节所列方法测量土样的含水率。

【条文说明】：4.4.2 滤纸含水率测量成功的关键在于尽量减少夹取滤纸的时间。因为如果暴露在相对湿度为 30~50%的室内条件下，湿滤纸由于蒸发引起的质量损失将大于 5%。

当吸力大于 100 kPa 时，滤纸法试验结果的误差在 2%以内。土样的扰动对大于 20kPa 的吸力影响很小，而当吸力小于 20 kPa 时，土样扰动会对试验结果产生较大的误差。

4.4.3 滤纸的含水率应按下式计算：

$$w_f = 100 \left(\frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0} \right) \quad (4.4.3)$$

式中： w_f — 滤纸含水率（%）；

m_0 — 称量盒的质量（g）；

m_1 — 称量盒与平衡后的湿滤纸的总质量 (g) ;

m_2 — 称量盒与烘干后滤纸的总质量 (g) 。

4.4.4 根据所用滤纸的率定曲线，确定滤纸含水率所对应的吸力值。滤纸法常用“**Whatman**”42 号滤纸和“**双圈**”牌 203 号滤纸及其率定曲线见图 4.4.4。

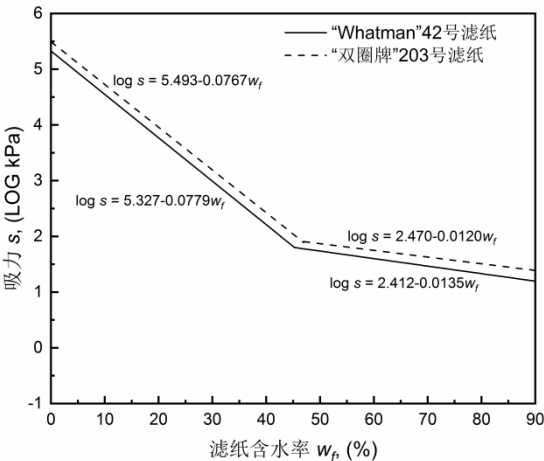


图 4.4.4 “**Whatman**”42 号滤纸和“**双圈**”牌 203 号滤纸的率定曲线

【条文说明】：4.4.4 标定滤纸率定曲线的方法如下：

基质吸力率定曲线：采用本规范 4.3 节“轴平移技术法”所列仪器和方法，将饱和滤纸作为试样置于饱和陶土板上，施加 10 级基质吸力（20，35，50，80，100，200，350，500，800，1000kPa）。吸力平衡后测量和计算滤纸的含水率，建立滤纸含水率与所施加基质吸力之间的关系，即滤纸的率定曲线。滤纸基质吸力率定曲线的试验结果记录格式应符合本标准附录 E 表 4.4 的规定。

总吸力率定曲线：采用本规范 4.5 节“饱和盐溶液湿度平衡法”所列仪器和方法，在密闭干燥器中，分别加入不同浓度的 NaCl 和 KCl 溶液。在 20℃恒温下，使滤纸与盐溶液在密闭干燥器中所创建的相对湿度环境相平衡。通过测量平衡后滤纸的含水率，进而建立滤纸含水率与相对湿度所对应的吸力之间的关系，即可得到滤纸的率定曲线。表 1 列出了不同浓度的 NaCl 和 KCl 溶液所对应的相对湿度和吸力值。滤纸总吸力率定曲线的试验结果记录格式应符合本标准附录 E 表 4.5 的规定。

表 1 20℃下不同浓度的 NaCl 和 KCl 溶液所对应的相对湿度和吸力值

吸力 kPa	盐溶液上方空气的相对 湿度 RH，以小数表示	20℃	
		NaCl g/1000mL	KCl g/1000mL
98	0.99927	1.3	1.7
310	0.99774	3.8	5.3
980	0.99278	13.1	17.0

3099	0.97764	39.0	52.7
9800	0.93008	122.5	165.0

试验中亦可采用两张滤纸进行测量，即在非接触法中在下层保护滤纸上放两张滤纸，量测两张滤纸的含水率并确定相应总吸力；或在接触法中在上下两个保护滤纸间放入两张滤纸，量测两张滤纸的含水率并确定相应基质吸力。可两张滤纸所确定的吸力的平均值作为测量结果。若两张滤纸所确定的吸力值之差大于 0.5 个对数单位，则结果无效，应重新进行试验（即：若两张滤纸所测吸力分别为 s_1 和 s_2 ，则 s_1 和 s_2 应满足

$$\left| \log(s_1) - \log(s_2) \right| = \left| \log\left(\frac{s_1}{s_2}\right) \right| \leq 0.5$$

4.4.5 绘制含水率所对应的总吸力或基质吸力的关系曲线，即为试验土的土-水特征曲线。

4.4.6 本试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 4.3~表 4.5 的规定。

附录 E 表 4.3 滤纸法试验记录表

任务单号					试验者				
试验地点					计算者				
试验日期					校核者				
试验环境					滤纸型号				
仪器名称及 编号									
试样 编号	试样 干密度	滤 纸 编 号	平 衡 历 时 (d)	称量盒 质量 (g)	称量盒+ 平衡后湿 滤纸质量 (g)	称量盒+ 干滤纸质 量 (g)	滤纸含 水率 (%)	吸力 (kPa)	土样 含水率 (%)
备注									

附录 E 表 4.4 滤纸率定曲线（基质吸力部分）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				
试验环境						陶土板 进气值				
仪器名称及编号						滤纸型号				
滤纸 编号	施加吸力 s (kPa)	10	25	50	100	200	500	800	1000	烘干后滤纸 质量 (g)
	平衡后滤纸质量 (g)									
	滤纸含水率 (%)									
	平衡后滤纸质量 (g)									
	滤纸含水率 (%)									
	平衡后滤纸质量 (g)									
	滤纸含水率 (%)									
	平衡后滤纸质量 (g)									
	滤纸含水率 (%)									
	平衡后滤纸质量 (g)									
	滤纸含水率 (%)									
备注										

附录 E 表 4.5 滤纸率定曲线（总吸力部分）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							
试验环境			仪器名称及编号							
盐溶液类型	总吸力 (kPa)	滤纸 编号	试样质量 (g)						烘干滤 纸质量 (g)	滤纸 含水率 (%)
			10d	12d	14d	16d	18d	平衡		
备注										

4.5 饱和盐溶液蒸汽平衡法

4.5.1 本方法采用的饱和盐溶液及其在 20℃ 时对应的相对湿度值和总吸力值如表 4.5.1 所示。

表 4.5.1 饱和盐溶液及其在 20℃ 时所对应的相对湿度和总吸力

饱和盐溶液类型	相对湿度 (%)	总吸力 (kPa)
LiBr	6.6	367540
NaOH	7.0	359100
LiCl	12.0	286300
CH ₃ COOK	23.1	197900
MgCl ₂	33.1	149300
K ₂ CO ₃	43.2	113300
NaBr	59.1	71000
KI	69.9	48420
NaCl	75.5	37900
KCl	85.1	21800
Na ₂ CO ₃	91.0	12700
Na ₂ SO ₄	93.0	9800
KNO ₃	94.6	7480
K ₂ SO ₄	97.6	3300

【条文说明】：4.5.1 吸力与相对湿度的关系用开尔文方程表达。在 20℃ 时开尔文方程为：

$$s = -135022 \ln(RH) \quad (4.5.1)$$

式中： s —吸力 (kPa)；

RH —相对湿度，以小数表示。

不同盐溶液在特定温度下的相对湿度以及对应的吸力值详见 Greenspan (1977)^[5]。

4.5.2 本方法所用的仪器设备应符合下列规定：

- 1 密闭干燥器：宜由玻璃或有机玻璃制造，密封性良好。
- 2 多孔板：开有小孔的塑料板或有机玻璃板，可支撑于密封干燥器底部饱和盐溶液的液面之上，其上放置试样。
- 3 试样支架：在多孔板上放置试样支架，再将试样悬空放置于支架上，以增加试样与周围空气的接触面积。
- 4 天平：称量 20 g，分度值 0.1 mg。

5 可溶盐：种类如表 4.5.1 所列。

4.5.3 饱和盐溶液蒸汽平衡法应在 $20\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 的恒温环境下开展。。

4.5.4 饱和盐溶液蒸汽平衡法应按下列步骤进行：

1 用蒸馏水配制饱和盐溶液。配置后的盐溶液应处于过饱和状态，即有结晶盐析出。配置后的饱和盐溶液应静置至少 1 h。

2 将饱和盐溶液置于密闭干燥器的底部。放置多孔板（多孔板底部应高于饱和盐溶液液面）和试样支架。将土样切割成 1~5 g 的小块，置于试样支架上（图 4.5.4）。

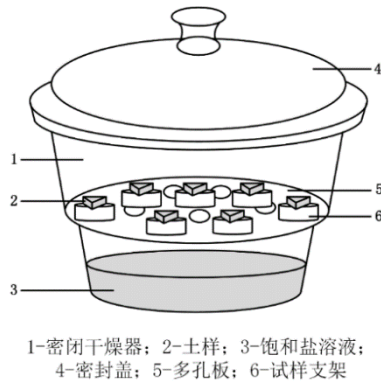


图 4.5.4 密闭干燥器示意图

3 密封干燥器，静置 10 d。其后每 2 d 用天平称量土样质量。称量过程应迅速完成以减少对土样含水率以及密闭干燥器中湿度环境的影响。

4 土体与密闭干燥器中湿度环境达到平衡的标准为试样的质量变化率，即单位时间内试样质量的变化量与试样初始质量的比值，小于 $0.1\%/d$ 。

5 按照《土工试验方法标准》（GB/T50123-2019）第 5.2 节所列方法测量土样在平衡后的含水率。

【条文说明】：4.5.4 试样块的质量越大，达到平衡所需的时间越长。一般可将土样切割成若干平行试样块，放入盛有不同饱和盐溶液的密闭干燥器中同时进行平衡，以更快得到不同湿度环境（吸力）下的吸力-含水率关系。

在相对湿度较低时，水汽平衡所需的时间要比相对湿度较高时少。在低相对湿度条件下，水汽平衡所需的时间为 1~2 周，而在高相对湿度条件下，达到水汽平衡可能需要数月。此外，水汽平衡时间还与温度有关。因此，在高相对湿度及较长平衡时间条件下，恒温控制非常重要，可将密闭干燥器放入恒温恒湿箱中进行平衡。

试样的初始含水率大于最终含水率时，试样经脱湿过程达到平衡；反之，试样的初始含水率小于最终含水率时，试样经吸湿过程达到平衡。

由于外界环境（如实验室内）的相对湿度一般为 50~70%，与密闭干燥器不同。为了避免环境湿度影响试样重量，因此称量试样质量的过程要求迅速完成。

参考文献:

- [1] Sweeney, D. J. 1982. Some in situ soil suction measurements in Hong Kong's residual soil slopes, Proceedings of the Seventh Southeast Asia Geotechnical Conference, Hong Kong, Vol. 1, pp. 91–106.
- [2] ASTM D3404 2015. Standard guide for measuring matric potential in vadose zone using tensiometers, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [3] Fredlund, D. G., Rahardjo, H., Fredlund, M. D. 2012. Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley & Sons.
- [4] ASTM D6836 2016. Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, or Centrifuge¹, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [5] Greenspan, L. 1977. Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions. Journal of Research of the National Bureau of Standards-A Physics and Chemistry, Vol. 81A, pp. 89-96.

4.5.5 绘制含水率和总吸力的关系曲线(图 4.1.3)，即为试验土的土-水特征曲线。。

4.5.6 本试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 4.6 的规定。

表 4.6 饱和盐溶液湿度平衡法试验记录表

任务单号				试验者							
试验地点				计算者							
试验日期				校核者							
试验环境				仪器名称及编号							
盐溶液类型	总吸力 (kPa)	试样 编号	试样质量 (g)						烘干试 样质量 (g)	试样 含水 率	试样 干密 度
			10d	12d	14d	16d	18d	平衡			
备注											

5 侧限压缩试验

5.1 一般规定

5.1.1 本试验方法适用于非饱和砂土、粉土、粉质粘土和胀缩性不大的粘土。

5.1.2 本试验主要包括以下 5 种类型，应根据工作要求分别采用：

1 控制基质吸力为常数的排水侧限压缩试验，要求试验控制的基质吸力尽可能与试样的初始基质吸力相等；

2 控制气压力为常数的不排水侧限压缩试验（测孔隙水压力）；

3 排气不排水侧限压缩试验（不测孔隙水压力）；

4 考虑上覆压力影响的广义持水特性试验；

5 控制基质吸力和净竖向压力为常数、待变形和排水稳定后基质吸力卸载到零的浸水湿陷（或湿化）试验，要求试验控制的基质吸力尽可能与试样的初始基质吸力相等。

本章只介绍前 4 种试验。

【条文说明】：5.1.2 第 1 款和第 5 款：“要求试验控制的基质吸力尽可能与试样的初始基质吸力相等”，是为了尽量避免因控制吸力高于试样的初始基质吸力时试样发生侧向收缩而引起对试样体变计算的误差。

由于对非饱和土侧限压缩仪很难做到不完全排气，因而本标准不考虑做非饱和土不排气侧限力学试验。

5.1.3 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《土工试验方法标准》（GB/T 50123 — 2019）4.3 节、4.5 节和本标准 3.2 节执行。

5.2 仪器设备与高进气值陶土板的饱和及检验

5.2.1 本试验所用的主要仪器设备为非饱和土侧限压缩仪（图 5.2.1），应符合下列规定：

1 气压室：由上下两部分组成，下半部分是筒形金属底座，用以安装试样容器；上半部分应是可整体装卸的气压罩。气压罩的下端和顶盖宜为不锈钢材料，侧壁应为有机玻璃筒，以便随时观察试验情况。竖向压力活塞杆穿过罩顶盖中央，活塞杆下端与荷载传感器相连。荷载传感器宜置于气压室内以提高荷载量测精度。加载活塞与气

压罩顶盖之间应采用滚动隔膜密封。气压罩下端与气压室下半部分宜采用粗螺纹联结,并用 O 型圈密封,装卸方便。试样容器固定于气压室内,利用气压室可对试样施加气压,控制试样基质吸力。

2 试样容器:由环刀、护环、高进气值陶土板、螺旋水槽、多孔薄金属板(不锈钢板或铜板)、加压上盖组成。

1) 环刀:内径为 61.8mm,高度为 20mm。环刀应具有一定的刚度,内壁应保持较高的光洁度,宜涂一薄层硅脂或聚四氟乙烯。

2) 多孔薄金属板(不锈钢板或铜板):直径 61.8mm,厚度为 3mm,其上均布直径为 1mm 的网眼,孔心距宜为 10mm,置于试样顶部,通过小孔为试样施加气压力和基质吸力,且不会吸取试样的水分。

3) 高进气值陶土板:其渗透系数应大于试样的渗透系数,进气值必须大于给试样施加的最大基质吸力。陶土板的直径宜为 60mm,厚度为 7mm。必须用高强度双管胶将其侧面与试样容器底部侧壁粘结牢固。宜配备进气值为 500kPa 和 1500kPa 两种规格的高进气值陶土板。

4) 螺旋水槽:位于高进气值陶土板之下,宽度和深度宜为 3mm,槽内应光滑无尖角,用以冲洗气泡,水从底座中心进入螺旋槽,从螺旋槽末端流出。在螺旋槽出口应安装三通阀,其一端接排水管,另一端安装孔压传感器。

3 气压设备:气压源由空压机或氮气瓶提供;由精密气压阀和精密压力表给试样施加气压以控制基质吸力,最小分度值应为 5kPa,且能保持长时间稳定。

4 加载设备:应能垂直地在瞬间施加各级规定的压力,且没有冲击力,压力准确度应符合现行国家标准《土工仪器的基本参数及通用技术条件》GB/T15406 的规定,竖向荷载传感器应置于气压室内。

5 补偿砝码:应配备一系列小质量砝码,以补偿因施加不同量值的气压力引起的竖向压力的减小。

6 变形量测设备:量程 10mm,最小分度值为 0.01mm 的百分表或准确度为全程 0.2%的位移传感器。

7 排水量测设备:由竖直安装的内径 4mm 的有机玻璃管(其中的 79.58mm 水柱体积等于 1cm^3)或具有同一内径的硬尼龙管与不锈钢尺(分度值 1mm)组成,宜在排水管的水面之上放一层密度小于 1g/cm^3 、粘性小、厚 5mm 的轻油,以防止水分蒸发。在排水管下端应安装三通阀,用以放水或充水,使管中液面保持合适的高度。条

件许可时，排水量应采用体积分度值不大于 1mm^3 的压力-体积控制器或具有相应量测精度的压差传感器测定。

8 采集系统和控制系统：压力和变形范围应满足试验要求。

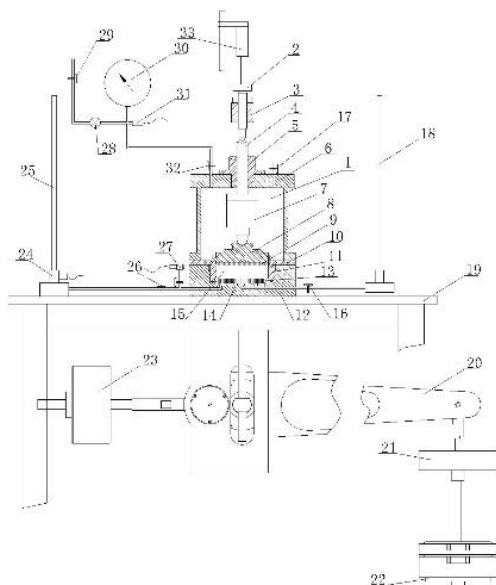


图 5.2.1 非饱和土侧限压缩仪示意图

- 1.气压室 2.调节螺柱 3.上横梁 4.活塞杆 5.活塞套 6.气压室罩 7.荷载传感器
- 8.传压帽 9.多孔薄金属板 10.压环 11.护环 12.气压室底座 13.高进气值陶土板
- 14.陶土板下螺旋槽 15.非饱和土试样 16.冲洗阀门 17.排气阀门 18.冲洗水管
- 19.机架部件 20.杠杆砝码式加载部件 21.补偿小砝码盘 22.砝码盘 23.平衡锤
- 24.排水差压传感器 25.排水管 26.排水三通阀门 27.孔隙水压传感器
- 28.孔隙气压调压阀 29.气源阀门 30.孔隙气压压力表 31.孔隙气压传感器
- 32.孔隙气压阀门 33.竖向位移传感器

【条文说明】：5.2.1 本试验所用的主要仪器设备为非饱和土侧限压缩仪（图 5.2.1），应符合下列规定：

1 气压室：由上下两部分组成，下半部分是筒形金属底座，用以安装试样容器；上半部分应是可整体装卸的气压罩。非饱和土试验需要用轴平移技术施加和控制基质吸力，通常控制孔隙水压力为零（等于大气压），施加的气压力在数值上就等于基质吸力。对侧限压缩试验而言，施加和控制气压力最方便的方法就是把试样容器放进一个密闭的气压室内。

2 试样容器：由环刀、护环、高进气值陶土板、螺旋水槽、多孔薄金属板（不锈钢板或铜板）、加压上盖组成。

2) 多孔薄金属板（不锈钢板或铜板）：常规饱和土的压缩试验在试样上下两端放置透水石，考虑到透水石会从试样吸收水分，故不宜用于非饱和土试验，采用多孔薄金属板可以避免这一缺点。

3) 高进气值陶土板：是非饱和土试验的核心设备，饱和后的陶土板只过水不过气，即，只让试样中的水分通过，而不让试样中的气体通过，从而实现水压力和气压力的独立控制及量测。美国土壤水分仪器公司生产系列高进气值陶土板产品，标称进气值从 50kPa 到 1500kPa，可根据研究土样的吸力范围选用。

4) 螺旋水槽：位于高进气值陶土板之下。设置螺旋槽的目的是为了高进气值陶土板下面积聚的冲洗气泡。尽管高进气值陶土板在饱和后只能让水通过而不让气通过，但试样中的空气在压力作用下会溶解在孔隙水中，并随排水一起通过高进气值陶土板而逸出（因陶土板下面的水压力为大气压），并积聚在陶土板下面，历时越长，逸出的空气越多，影响排水量的量测结果和精度，必须隔一段时间将气泡冲洗走。在试验过程中，宜每隔 8h 左右用纯净水冲洗陶土板下面一次。

3 气压设备：气压源由空压机或氮气瓶提供，用氮气瓶作为气压源无需动力设备，不消耗电能，没有噪音；若再配置气压减压装置，效果更佳，建议优先采用。

5 补偿砝码：用轴平移技术施加基质吸力时，气压力对竖向加压活塞有向上的顶托作用力，为补偿由此引起的竖向压力的减小，应专门配备了一些小砝码，可根据施气压力的大小通过计算在标准砝码基础上，在加载盘上额外添加质量合适的小砝码即可。

7 排水量测设备：由竖直安装的内径 4mm 的有机玻璃管（其中的 79.58mm 水柱体积等于 1cm^3 ）或具有同一内径的硬尼龙管与不锈钢尺（分度值 1mm）组成。此法简便易行，直观可靠，量测精度高（排水量管中水位变化 1mm，相应的排水量是 12mm^3 ）。如有条件，可以采用标准压力-体积控制器作为排水量测装置。

5.2.2 侧限压缩仪、加压设备、量测系统和控制采集系统应定期校准，并应作仪器变形校正曲线，具体操作见有关标准。

【条文说明】：5.2.2 5.2.3 高进气值陶土板的饱和与是否漏气对非饱和土试验非常重要，故本条和本标准 5.2.4 做了详细介绍。

5.2.3 在试验前必须饱和高进气值陶土板。非饱和土侧限压缩仪的高进气值陶土板应采用如下方法：

1 给螺旋槽末端的排水阀连接一段内径 4mm、长度 5~10cm 的硬尼龙管，并使硬

尼龙管末端（与大气相通）上倾，打开该排水阀，用无气水流冲排陶土板下的螺旋槽中的空气，水从连接螺旋槽中心的阀门进入，从上述硬尼龙管末端流出，持续 1min，关闭进水阀门；

2 给试样容器中注入纯净水，水位应淹没高进气值陶土板，以不溢出容器为宜；

3 安装气压罩；

4 给气压室施加 300 ~ 500kPa 的气压力，保持压力不变，直到排水硬尼龙管内无气泡而出现连续水流，再继续维持压力 2h，期间仍为连续水流，即认为陶土板已经饱和；

5 卸除气压力，保留试样容器中的水，使陶土板一直处于饱和状态；

6 若高进气值陶土板是第一次饱和，则应用洗耳球吸走试样容器中的水，注入没有使用过的纯净水，重复上述过程 2-3 次，一般重复两次即可。

5.2.4 宜用下述两种方法检验陶土板是否完全饱和、在其标称吸力下是否漏气或陶土板周边与试样底座连接处是否漏气：

1 用洗耳球吸走试样容器中的水，使高进气值陶土板顶面暴露；安装气压罩；给气压室持续施加量值等于高进气值陶土板额定吸力的气压力，在 1~2h 内未见排水管道中有气泡出现即可；

2 取掉气压罩，用洗耳球给陶土板顶面洒满无气纯净水，并用洗耳球吸走陶土板下面的全部水；连接气压源与排水管，给陶土板下面持续施加量值等于陶土板额定吸力的气压力，在 30min~1h 内未见陶土板顶面或周边有气泡出现即可。

5.2.5 若陶土板顶面有气泡出现，则必须重新饱和并重新检验；若陶土板周边有气泡出现，则宜用 502 粘结剂处理，待粘结剂晾干后必须重新饱和陶土板并重新检验；如仍不能达到要求，则必须更换高进气值陶土板。

5.2.6 非饱和土侧限压缩仪高进气值陶土板的饱和及检验记录格式应符合本标准附录 E 表 5.1 的规定。

附录 E 表 5.1 非饱和土侧限压缩仪高进气值陶土板的饱和及检验记录表

任务单号		土样来源及种类	
试验者		协助者	
试验日期		仪器名称及编号	
高进气值陶土板 标称进气值 (kPa)		试验用水类别	纯净水
试验阶段	饱和和高进气值陶土板	饱和操作遍数	1
开始时间		备注	
试样容器内水面淹没 高进气值陶土板的深度 (mm)		检查水、气阀门的 开关状态是否正确?	
施加气压值 (kPa)		开始施加气压时间	
排水管口 开始出水的时间		排水管开始出现 连续水流的时间	
连续水流持续历时 (h)		卸除气压时间	
试样容器内预留水面距 陶土板顶面高度 (cm)		试验结束时间	
结论 (陶土板是否已完全饱和)			
试验阶段	饱和和高进气值陶土板	饱和操作遍数	2
开始时间		备注	
试样容器内水面淹没 高进气值陶土板的深度 (mm)		检查水、气阀门的 开关状态是否正确?	
施加气压值 (kPa)		开始施加气压时间	
排水管口 开始出水的时间		排水管开始出现 连续水流的时间	
连续水流持续历时 (h)		卸除气压时间	
试样容器内预留水面距 陶土板顶面高度 (cm)		试验结束时间	
结论 (陶土板是否已完全饱和)			
试验阶段	饱和后检验	检验方法 1	从气压室施加气压力
检验开始时间		备注	
陶土板表面是否有水	无	施加气压值 (kPa)	
开始施加气压时间		排水管内是否有气泡?	
气压力持续历时 (h)		试验结束时间	
结论 (陶土板是否已完全饱和)			
试验阶段	饱和后检验	检验方法 2	从螺旋槽施加气压力
检验开始时间		螺旋槽中水是否吸走?	是
陶土板表面是否有水	有	施加气压值 (kPa)	
开始施加气压时间		陶土板表面及周边是否冒 泡?	
气压力持续历时 (h)		试验结束时间	
结论 (陶土板是否已完全饱和)			

5.3 控制基质吸力为常数的排水侧限压缩试验

5.3.1 本试验所用的主要仪器设备及要求与 5.2.1 条的规定相同（图 5.2.1）。

5.3.2 控制基质吸力为常数的排水侧限压缩试验应按下列步骤进行：

1 用无气纯净水饱和高进气值陶土板，应符合本标准第 5.2.3 条的规定；饱和后用湿抹布擦去陶土板上面的余水；将螺旋槽出口的三通阀置于排水状态，调整排水管的高度，使管中液面与试样中心平齐。

2 在试样容器内放置大护环，将带有试样的环刀装入大护环内，放上导环（小护环），试样上依次放上多孔薄铜板和加压上盖，并将试样容器置于加压框架正中，使加压上盖与加压框架中心对准，盖上气压罩，安装百分表和孔隙水压力传感器。

3 施加 1kPa 的预压力使试样与仪器上下各部件之间接触，将百分表或传感器调整到零位或测读初读数，记录排水设备的初始读数。

4 施加基质吸力：宜按每分钟 25kPa 的速率施加气压力到预定值，也可一次性施加到预定值，施加的预定气压力必须不低于试样的初始基质吸力，同时必须迅速补偿因气压对加压活塞头的顶托作用（其值等于活塞横断面积与气压力的乘积）引起的预压力的减小。记录排水量和竖向变形值，记录时间为 1min、5min、10min、15min、30min、60min、2h、4h、6h、.....，直到二者均达到稳定为止。稳定标准是：在 2h 内，变形不超过 0.01mm，排水量不超过 12mm³，且历时应不宜少于 48h。在平衡的过程中，应每隔 8h 左右用纯净水冲洗陶土板下面一次，历时 30~40s。在冲洗开始前，应先关闭排水量测管的阀门，在冲洗完成后再重新将该阀门打开。

5 确定需要施加的各级净竖向压力（其值等于总竖向压力与气压力之差），净竖向压力等级宜为 12.5、25、50、75、100、125、150、175、200、250、300、400、600、800、1600、3200kPa。最后一级净竖向压力应大于土的自重压力与附加压力之和。只需测定压缩系数时，最大净竖向应力不小于 400kPa。。

6 需要测定土样在一定基质吸力下的初始屈服净竖向压力（ p_{vy}^s ）时，初始段的荷重率应小于 1，可采用 0.5 或 0.25。施加的净竖向压力应使测得的 $e-\log p_v$ （ p_v 为净竖向压力）曲线下段出现直线段。

7 需要测定沉降速率时，施加每一级净竖向压力后宜按下列时间顺序测记试样的高度变化。时间为 5min、15min、30min、60min、2h、4h、6h、.....，至稳定为止。不需要测定沉降速率时，则施加每级净竖向压力后 36h 测定试样高度变化作为稳定标

准：只需测定压缩系数的试样，施加每级净竖向压力后，以每 2h 变形不超过 0.01mm 作为稳定标准，记录稳定后试样高度变化。按此步骤逐级加压至试验结束。在加载过程中，应每隔 6~8h 左右冲洗陶土板下面一次，历时 30~40s。在冲洗开始前，应先关闭排水量测管的阀门，在冲洗完成后再重新将该阀门打开。

8 需要进行回弹试验时，可在某级净竖向压力下变形稳定后退压，直至退到要求的净竖向压力，每次退压至 36h 后测定试样的回弹量（饱和土的相应试验的要求是：每次退压至 24h 测定试样的回弹量）。

9 试验结束后，先迅速卸除竖向荷载，再迅速卸除气压力，并迅速拆除仪器各部件，取出整块试样，测定含水率。

10 用无气纯净水饱和陶土板，对不同的预定基质吸力重复上述过程，直到完成全部试验。

【条文说明】：5.3.2 控制基质吸力为常数的排水侧限压缩试验应按下列步骤进行：

4 本款规定，施加基质吸力后的稳定标准是：“在两小时内，变形不超过 0.01mm，排水量不超过 12mm^3 ，且历时不宜少于 48h。”如此规定的理由有二。一是在《土工试验方法标准》（GB/T 50123—2019）的 17.2.1 条第 11 款中规定，“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。”这是针对饱和土而言的。由于非饱和土的渗透性远低于饱和土，其稳定历时自然要比饱和土的长。二是非饱和土试样在施加吸力之后，其反应包括变形和排水两个方面，加之非饱和土的变形量和排水量都比饱和土的小，所以稳定标准相应提高，要求更严。非饱和土试验的排水量管通常采用内径 4mm 的有机玻璃管，其中的 79.58mm 水柱体积等于 1cm^3 ；在排水量管的侧面安装有竖直的不锈钢尺，其分度值为 1mm，用以观察排水量的变化；排水量管中水位变化 1mm，相应的排水量是 12mm^3 。后勤工程学院对陕西省铜川原状 Q_3 黄土（扈胜霞，2001）和兰州原状 Q_3 黄土（朱元青，2007）、广州含粘砂土（苗强强，2011）做的非饱和土侧限固结试验，发现只有在达到上述标准后，试样后续的变形和排水量才可以忽略不计，且达到稳定标准的历时在 50h 左右。Gan 在 1988 年对非饱和重塑冰碛土做了 5 个非饱和土直剪试验，试样先在基质吸力和竖向压力作用下排水固结，其中两个典型试样达到变形和排水稳定的固结历时约为 40h（见 Fredlund 著《非饱和土土力学》（中译本）P343 图 10.46 和图 10.47）。

7 关于“不需要测定沉降速率时，则施加每级净竖向压力后 36h 测定试样高度变化作为稳定标准”的说明。在《土工试验方法标准》（GB/T 50123—2019）的 17.2.1

条第 11 款中规定,“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。”如上所述,非饱和土的变形量比饱和土的小,所以稳定标准相应提高,要求更严。

8 关于“需要进行回弹试验时,可在某级净竖向压力下变形稳定后退压,直至退到要求的净竖向压力,每次退压至 36h 后测定试样的回弹量”的说明。理由同上,不再赘述。

5.3.3 试样的初始孔隙比,应按下式计算:

$$e_0 = \frac{(1+w_0)G_s\rho_w}{\rho_0} - 1 \quad (5.3.3)$$

式中: e_0 — 试样的初始孔隙比;

ρ_0 — 试样的初始密度 (g/cm^3);

w_0 — 试样的初始质量含水率 (%);

G_s — 土粒相对密度;

ρ_w — 水的密度,通常取 1g/cm^3 。

5.3.4 在基质吸力作用下试样变形稳定后的沉降量百分比,应按下式计算:

$$S_s = \frac{\Delta h_s}{h_0} \times 100\% \quad (5.3.4)$$

式中: S_s — 在基质吸力作用下试样变形稳定后的沉降量百分比,下标表示基质吸力为常数;

h_0 — 试样初始高度 (mm);

Δh_s — 施加基质吸力引起的沉降量 (mm)

5.3.5 以试样的初始高度、初始孔隙比、初始质量含水率和初始体积为基准,在基质吸力作用下试样变形和排水量稳定后的高度、孔隙比和质量含水率,应分别按下列各式计算:

$$h_s = h_0 - \Delta h_s \quad (5.3.5-1)$$

$$e_s = e_0 - (1+e_0) \frac{\Delta h_s}{h_0} \quad (5.3.5-2)$$

$$w_s = w_0 - \frac{1+e_0}{G_s} \frac{\Delta V_w^s}{V_0} \quad (5.3.5-3)$$

式中: h_s — 在基质吸力作用下试样变形稳定后的高度;

e_s — 在基质吸力作用下试样变形稳定后的孔隙比；

w_s — 在基质吸力作用下试样排水量稳定后的质量含水率；

ΔV_w^s — 在基质吸力作用下试样的排水量 (cm^3)，上标表示基质吸力为常数；

V_0 — 试样的初始体积 (cm^3)。

5.3.6 试验过程中的净竖向压力，应按下式计算：

$$p_{v,i} = p_{vt,i} - u_a \quad (5.3.6)$$

式中： $p_{v,i}$ — 第 i 级净竖向压力值 (MPa)；

$p_{vt,i}$ — 第 i 级总竖向压力 (MPa)；

u_a — 孔隙气压力 (MPa)。

【条文说明】：5.3.6 在整理试验资料时主要使用净竖向压力，为了明确符号的含义，并使净竖向应力的表示形式简明，本条对净竖向压力加下标 v 但右上角不加撇号，而对总竖向压力加下标 vt 。

5.3.7 以试样在基质吸力作用下变形稳定后的高度为基准，在第 i 级净竖向压力作用下试样变形稳定后的沉降量百分比，应按下式计算：

$$S_i = \frac{\sum_{j=1}^i \Delta h_j}{h_s} \times 100\% \quad (5.3.7)$$

式中： S_i — 在第 i 级净竖向压力作用下试样变形稳定后的沉降量百分比；

$\sum_{j=1}^i \Delta h_j$ — 在第 i 级压力作用下试样变形稳定后的总沉降量（即从第 1 级加载

到第 i 级加载引起的总沉降量，等于第 i 级压力下变形稳定读数减去仪器变形量，不计基质吸力引起的变形量）(mm)；

5.3.8 以在基质吸力作用下试样变形和排水量稳定后的高度、孔隙比、含水率和体积为基准，在第 i 级净竖向压力作用下试样变形和排水量稳定后的孔隙比和含水率，应分别按下列两式计算：

$$e_i = e_s - (1 + e_s) \frac{\sum_{j=1}^i \Delta h_j}{h_s} \quad (5.3.8-1)$$

$$w_i = w_s - \frac{1+e_s}{G_s} \frac{\sum_{j=1}^i \Delta V_w^j}{V^s} \quad (5.3.8-2)$$

式中： e_i — 在第 i 级净竖向压力作用下试样变形稳定后的孔隙比；

w_i — 在第 i 级净竖向压力作用下试样排水量稳定后的质量含水率；

$\sum_{j=1}^i \Delta V_w^j$ — 在第 i 级净竖向压力作用下试样排水量稳定后的总排水量（即从第

1 级加载到第 i 级加载引起的总排水量，不计基质吸力引起的排水量）（ cm^3 ）；

V^s — 在基质吸力作用下试样变形稳定后的体积（等于试样的初始横断面积乘以在基质吸力作用下试样变形稳定后的高度）（ cm^3 ），上标表示基质吸力为常数。

5.3.9 在常基质吸力和某一压力范围内土骨架的压缩系数，应按下式计算：

$$a_v^s = \frac{e_i - e_{i+1}}{p_{v,i+1} - p_{v,i}} \quad (5.3.9)$$

式中： a_v^s — 在常基质吸力和某一压力范围内土骨架的压缩系数（ MPa^{-1} ），上标表示基质吸力为常数。

5.3.10 在常基质吸力和某一净竖向压力范围内土骨架的压缩模量，应按下式计算：

$$E_s^s = \frac{1+e_0}{a_v^s} \quad (5.3.10)$$

式中： E_s^s — 在常基质吸力和某一净竖向压力范围内土骨架的压缩模量（ MPa ），上标表示基质吸力为常数。

5.3.11 在常基质吸力和某一压力范围内土骨架的体积压缩系数，应按下式计算：

$$m_v^s = \frac{1}{E_s^s} = \frac{a_v^s}{1+e_0} \quad (5.3.11)$$

式中： m_v^s — 在常基质吸力和某一压力范围内土骨架的体积压缩系数（ MPa^{-1} ），上标表示基质吸力为常数。

5.3.12 在常基质吸力和某一压力范围内土骨架的压缩指数和回弹指数，应按下式计算：

$$C_c^s \text{ 或 } C_s^s = \frac{e_i - e_{i+1}}{\log p_{v,i+1} - \log p_{v,i}} \quad (5.3.12)$$

式中： C_c^s — 在常基质吸力和某一压力范围内土骨架的压缩指数，上标表示基质吸力为常数；

C_s^s — 在常基质吸力和某一压力范围内土骨架的回弹指数，上标表示基质吸力为常数。

5.3.13 相应于一定基质吸力，以孔隙比为纵坐标，净竖向压力为横坐标，绘制各级净竖向压力下的孔隙比与净竖向压力的关系曲线，见图 5.3.13。

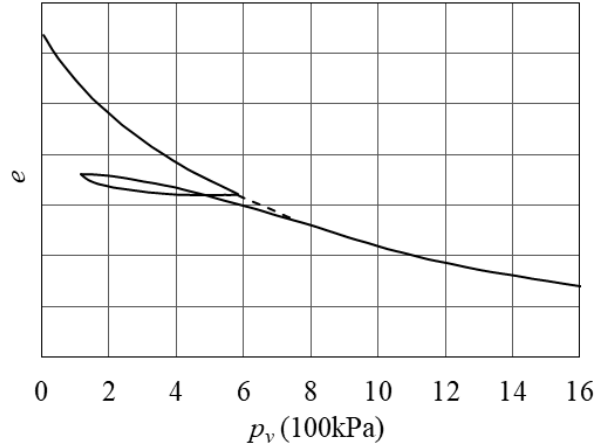


图 5.3.13 $e - p_v$ 关系曲线

5.3.14 相应于一定基质吸力，以孔隙比为纵坐标，净竖向压力的常用对数为横坐标，绘制各级净竖向压力下的孔隙比与净竖向压力的常用对数关系曲线，见图 5.3.14。

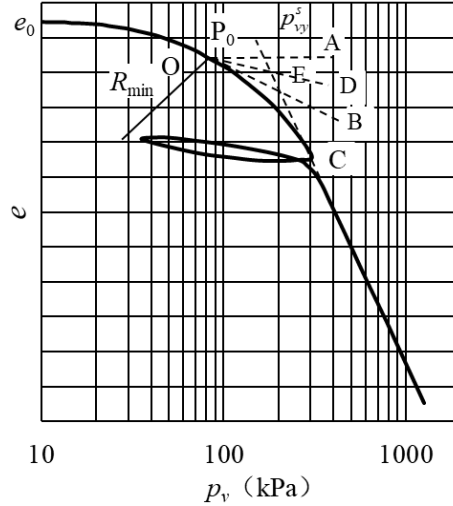


图 5.3.14 $e - \log p_v$ 曲线求 p_{vy}^s 示意图

5.3.15 试样在一定基质吸力下的初始屈服净竖向压力 p_{vy}^s （上标表示基质吸力为常数），应按下列方法确定：在 $e - \log p_v$ 曲线上找出最小曲率半径 R_{min} 的点 O （见本标准图 5.3.14），过 O 点做水平线 OA ，切线 OB 及 $\angle AOB$ 的平分线 OD ， OD 与曲线下段直线的延长线交于 E 点，则对应于 E 点的压力值即为该试样在某一基质吸力下的初始屈服净竖向压力；亦可采用 $e - \log p_v$ 曲线上的转折点作为屈服点（图 5.3.15）。

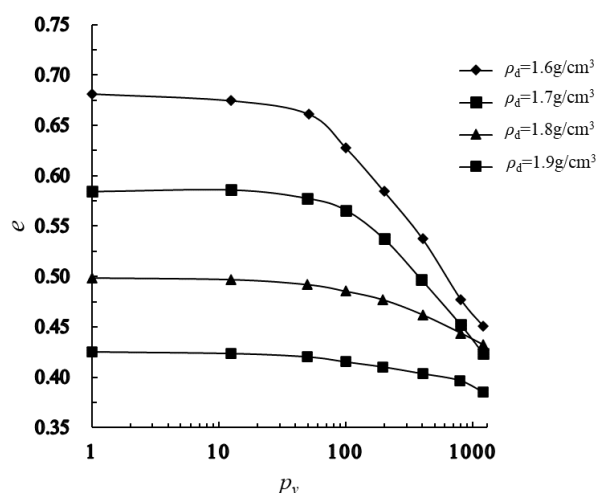


图 5.3.15 某土在 100kPa 吸力下不同起始干密度试样的 $e - \log p_v$ 关系曲线

【条文说明】：5.3.15 饱和土（基质吸力等于零）的屈服净竖向压力就是先期固结压力，而非饱和土的屈服净竖向压力与基质吸力有关，可采用类似于确定饱和土先期固结压力的方法确定；亦可采用曲线上的转折点作为屈服点。

5.3.16 相应于一定基质吸力，以质量含水率为纵坐标，净竖向压力的为横坐标，绘制各级净竖向压力下的质量含水率与净竖向压力的关系曲线，见图 5.3.16。

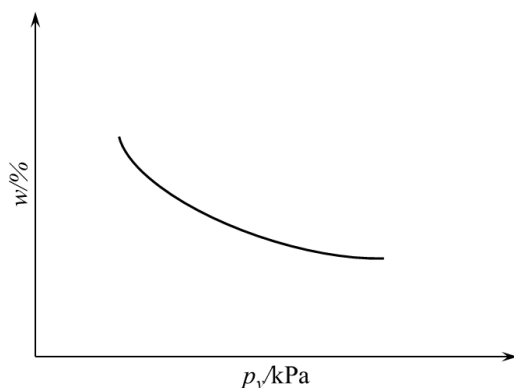


图 5.3.16 $w - p_v$ 关系曲线

5.3.17 在常基质吸力和某一净竖向压力范围内质量含水率的压排系数，应按下式计算：

$$b_v^s = \frac{w_i - w_{i+1}}{p_{v,i+1} - p_{v,i}} \quad (5.3.17)$$

式中： b_v^s — 在常基质吸力和某一净竖向压力范围内质量含水率的压排系数(MPa⁻¹)，上标表示基质吸力为常数；

【条文说明】：5.3.17 控制基质吸力为常数的排水侧限压缩试验的可量测反应表现为两个方面：试样体积压缩和质量含水率的减小。为了完整描述这两个方面，除定义了土骨架的压缩系数、压缩模量、体积压缩系数、压缩指数和回弹指数外，还定义了质

量含水率的压排指数和回渗指数。

5.3.18 在常基质吸力和某一净竖向压力范围内质量含水率的压排指数和回渗指数，应按下列式计算：

$$D_c^s \text{ 或 } D_s^s = \frac{w_i - w_{i+1}}{\log p_{v,i+1} - \log p_{v,i}} \quad (5.3.18)$$

式中： D_c^s — 在常基质吸力和某一净竖向压力范围内质量含水率的压排指数，上标表示基质吸力为常数；

D_s^s — 在常基质吸力和某一净竖向压力范围内质量含水率的回渗指数，上标表示基质吸力为常数。

5.3.19 控制基质吸力为常数的排水侧限压缩试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 5.2（一）和表 5.2（二）的规定。

附录 E 表 5.2 (一) 控制基质吸力为常数的排水侧限压缩试验记录表

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				土样种类		
土样初始尺寸	直径×高 =			初始干密度 (g/cm ³)		
初始质量含水率 (%)				排水量管 比例系数	cm ³ / 排水量管 1mm 水柱	
基质吸力 (kPa)				试验阶段	基质吸力平衡阶段	
历时	时间	变形量表读数 (0.01mm)	排水量管读数 (mm)	时间	变形量表读数 (0.01mm)	排水量管读数 (mm)
0						
5min						
15min						
30min						
1h						
2h						
4h						
6h						
8h						
10h						
12h						
14h						
16h						
18h						
20h						
22h						
24h						
26h						
28h						
30h						
32h						
34h						
36h						
38h						
40h						
42h						
44h						
46h						
48h						
.....						

附录 E 表 5.2 (二) 控制基质吸力为常数的排水侧限压缩试验记录表

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				土样种类		
土样初始尺寸	直径×高 =			初始干密度 (g/cm ³)		
初始质量含水率 (%)				排水量管 比例系数	cm ³ / 排水量管 1mm 水柱	
基质吸力 (kPa)				试验阶段	净竖向压力作用下的压缩阶段	
历时	不同净竖向压力作用下的变形和排水					
	() (kPa)			() (kPa)		
	时间	变形量表读数 0.01mm)	排水量管读数 (mm)	时间	变形量表读数 (0.01mm)	排水量管读数 (mm)
0						
5min						
15min						
30min						
1h						
2h						
4h						
6h						
8h						
10h						
12h						
14h						
16h						
18h						
20h						
22h						
24h						
26h						
28h						
30h						
32h						
34h						
36h						
38h						
40h						
42h						
44h						
46h						
48h						
.....						

5.4 控制气压力为常数的不排水侧限压缩试验（测孔隙水压力）

5.4.1 本试验所用的主要仪器设备及要求与 5.2.1 条相同（图 5.2.1）。需用的其他设备应符合下列规定：

- 1 孔隙水压力量测设备：孔隙水压力传感器，量程应为 $-100 \sim 1000\text{kPa}$ ，线性应小于 $\pm 0.1\%FS$ ，重复性应小于 $0.05\%FS$ 。
- 2 特制三通阀：一端连接螺旋槽的出口，一端连接排水管，第三端必须竖直向上，连接孔隙水压力传感器（图 5.4.1），以保证安装孔压传感器时管道内始终充满水。

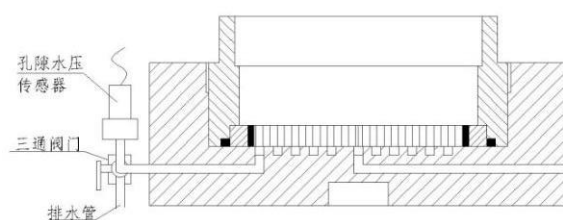


图 5.4.1 孔隙水压力传感器的正确安装方式

【条文说明】：5.4.1 本试验所用的主要仪器设备及要求与 5.2.1 条相同（图 5.2.1）。需用的其他设备应符合下列规定：

1 孔隙水压力量测设备的量程应为 $-100 \sim 1000\text{kPa}$ 。目前有此类传感器供应。从理论上讲，在标准海平面上用张力计可以直接量测的最大基质吸力为 1 个大气压；但陆地高程通常高于海平面，用张力计能够直接量测的基质吸力一般不超过 70kPa 。因此，当试样的基质吸力不超过 70kPa 时，就不必采用轴平移技术而直接量测基质吸力；而当基质吸力超过 70kPa 时，就必须采用轴平移技术，通过给试样施加气压力提高试样水压力，使试样水压力高于 -70kPa 甚至变为正值，避免汽化和气穴现象发生，便于量测。

5.4.2 控制气压力都为常数的不排水侧限压缩试验（测孔隙水压力）应按下列步骤进行：

- 1 用无气纯净水饱和高进气值陶土板，应符合本标准第 5.2.3 条的规定；饱和后关闭排水阀，安装孔隙水压力传感器，用湿抹布擦去陶土板上面的余水。
- 2 在试样容器内放置大护环，将带有试样的环刀装入大护环内，放上导环（小护环），试样上依次放上多孔薄铜板和加压上盖，并将试样容器置于加压框架正中，使

加压上盖与加压框架中心对准，盖上气压罩，安装百分表或位移传感器。

3 施加 1kPa 的预压力使试样与仪器上下各部件之间接触，将百分表或传感器调整到零位或测读初读数，记录孔隙水压力传感器的初始读数。

4 施加气压力：当试样的初始基质吸力不超过 70kPa 时，可不必施加气压力（即气压力保持为大气压）。若试样初始基质吸力超过 70kPa，则必须施加大于初始基质吸力值的气压力且保持为常数，以保证试样的孔隙水压力为正值便于量测。可按每分钟 25kPa 的速率施加气压力到预定值，也可一次性施加到预定值，同时必须补偿因气压对加压活塞头的向上顶托作用引起的预压力的减小。记录竖向变形值和孔隙水压力值，记录时间为 5min、10min、15min、30min、60min、2h、4h、6h、.....，直到二者达到稳定为止。稳定标准是：在 2h 内竖向变形量不超过 0.01 mm，且孔隙水压力变化不超过 1kPa。在稳定过程中，应每隔 8h 左右冲洗陶土板下面一次，历时 30~40s。

5 确定需要施加的各级净竖向压力，净竖向压力等级宜为 12.5、25、50、100、200、400、800、1600、3200kPa。第一级净竖向压力的大小应视土的软硬程度而定，宜用 12.5、25kPa 或 50kPa。最后一级净竖向压力应大于土的自重压力与附加压力之和。只需测定压缩系数时，最大净竖向应力不小于 400kPa。

6 需要测定沉降速率时，施加每一级净竖向压力后宜按下列时间顺序测记试样的高度和孔隙水压力的变化。记录时间为 5min、15min、30min、60min、2h、4h、6h、.....，至变形和孔隙水压力稳定为止，稳定标准同本标准本条第 4 款。不需要测定沉降速率时，则施加每级净竖向压力后 24h 测定试样高度变化和孔隙水压力作为稳定标准。只需测定压缩系数的试样，施加每级净竖向压力后，以每 2h 变形不超过 0.01mm 作为稳定标准。按此步骤逐级加压至试验结束。在变形和孔隙水压力的稳定过程中，应每隔 8h 左右冲洗陶土板下面一次，历时 30~40s。

7 需要进行回弹试验时，可在某级净竖向压力下变形稳定后退压，直至退到要求的压力，每次退压至 24h 后测定试样的回弹量和孔隙水压力。

8 试验结束后，先迅速卸除竖向荷载，再迅速卸除气压力，并迅速拆除仪器各部件，取出整块试样，测定含水率。

9 用无气纯净水饱和陶土板，对不同的含水率试样重复上述过程，直到完成全部试验。

【条文说明】：5.4.2 控制气压力都为常数的不排水侧限压缩试验（测孔隙水压力）应按下列步骤进行：

6 在不排水侧限压缩试验过程中，水分仅在试样的局部区域调整而不会大范围迁移，达到稳定需要的历时比排水试验的历时（36h）少（参见本标准第 5.3.2 条第 7 款），因而本款规定：“不需要测定沉降速率时，则施加每级净竖向压力后 24h 测定试样高度变化和孔隙水压力作为稳定标准。”

7 本款规定：“需要进行回弹试验时，可在某级净竖向压力下变形稳定后退压，直至退到要求的压力，每次退压至 24h 后测定试样的回弹量和孔隙水压力。”理由同本条第 6 款。

5.4.3 试样的初始孔隙比，应按本标准第 5.3 节的式（5.3.3）计算。

5.4.4 在试验过程中任一时刻的净竖向应力和基质吸力，应按下列两式计算：

$$p_v = p_{vt} - u_a \quad (5.4.4-1)$$

$$s = u_a - u_w \quad (5.4.4-2)$$

式中： p_v — 净竖向压力（kPa）；

p_{vt} — 总竖向压力（kPa）；

s — 基质吸力（kPa）；

u_a — 孔隙气压力（kPa）；

u_w — 孔隙水压力（kPa）。

5.4.5 以试样的初始高度、孔隙比和质量含水率为基准，在第 i 级净竖向压力下试样变形稳定后的孔隙比和饱和度，应按下列两式计算：

$$e_i = e_0 - (1 + e_0) \frac{\sum_{j=1}^i \Delta h_j}{h_0} \quad (5.4.5-1)$$

$$S_{r,i} = \frac{G_s w_0}{e_i} \quad (5.4.5-2)$$

式中： e_i — 在第 i 级净竖向压力下试样变形稳定后的孔隙比；

$S_{r,i}$ — 在第 i 级净竖向压力下试样变形稳定后的饱和度（%）；

w_0 — 试样的初始质量含水率（%）；

e_0 — 试样的初始孔隙比，应按本标准第 5.3 节的式（5.3.3）计算；

h_0 — 试样的初始高度（mm）；

G_s — 土颗粒的相对密度；

$\sum_{j=1}^i \Delta h_j$ — 在第 i 级净竖向压力下试样变形稳定后的总变形量 (mm) (等于

该级净竖向压力下变形稳定读数扣除仪器变形量和施加气压力引起的变形量)。

5.4.6 在试验过程中试样的孔隙比和饱和度, 应按下列两个增量表达式描述:

$$de = a_t dp_v + a_m ds \quad (5.4.6-1)$$

$$dS_r = c_t dp_v + c_m ds \quad (5.4.6-2)$$

式中: de 、 dS_r 、 dp_v 和 ds — 分别为孔隙比增量、饱和度增量、净竖向压力增量和基质吸力增量 (kPa);

a_t — 与净竖向压力相关的土骨架的切线压缩系数 (kPa^{-1});

a_m — 与基质吸力相关的土骨架的切线压缩系数 (kPa^{-1});

c_t — 与净竖向压力相关的饱和度的切线增加系数 (kPa^{-1});

c_m — 与基质吸力相关的饱和度的切线增加系数 (kPa^{-1})。

【条文说明】: 5.4.6 控制气压力为常数的不排水侧限压缩试验过程中, 孔隙水压力升高而基质吸力减小, 试样的质量含水率为常数 (等于初始质量含水率), 但孔隙比减小而饱和度增加; 本条用式 (5.4.6-1) 和式 (5.4.6-2) 描述孔隙比与饱和度的变化, 共包含 4 个参数, 即, 与净竖向压力相关的土骨架的压缩系数、与基质吸力相关的土骨架的压缩系数、与净竖向压力相关的饱和度的增加系数、与基质吸力相关的饱和度的增加系数。

5.4.7 控制气压力为常数的不排水侧限压缩试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 5.3

(一) 和表 5.3 (二) 的规定。

附录 E 表 5.3 (一) 控制气压力为常数的不排水侧限压缩试验 (测孔隙水压力) 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			土样种类			
土样初始尺寸	直径×高 =		初始干密度(g/cm ³)			
初始质量含水率 (%)			气压力 (kPa)			
试验阶段	气压力单独作用阶段		备注			
经历时间	在气压力作用下的变形和孔隙水压力					
	时间	变形量表读数 (0.01mm)	水压力读数 (kPa)	时间	变形量表读数 (0.01mm)	水压力读数 (kPa)
0						
5min						
15min						
30min						
1h						
2h						
4h						
6h						
8h						
10h						
12h						
14h						
16h						
18h						
20h						
22h						
24h						
26h						
28h						
30h						
32h						
34h						
36h						
38h						
40h						
42h						
44h						
46h						
48h						
.....						

附录 E 表 5.3 (二) 控制气压力为常数的不排水侧限压缩试验 (测孔隙水压力) 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				土样种类		
土样初始尺寸	直径×高 =			初始干密度 (g/cm ³)		
初始质量含水率 (%)				气压力 (kPa)		
试验阶段	上覆压力作用下的压缩阶段			备注		
历时	不同净上覆压力下的变形和孔隙水压力					
	() (kPa)			() (kPa)		
	时间	变形量表读数 (0.01mm)	水压力读数 (kPa)	时间	变形量表读数 (0.01mm)	水压力读数 (kPa)
0						
5min						
15min						
30min						
1h						
2h						
4h						
6h						
8h						
10h						
12h						
14h						
16h						
18h						
20h						
22h						
24h						
26h						
28h						
30h						
32h						
34h						
36h						
38h						
40h						
42h						
44h						
46h						
48h						
.....						

5.5 排气不排水侧限压缩试验（不测孔隙水压力）

5.5.1 本试验所用的主要仪器设备及要求与 5.2.1 条相同（图 5.2.1）

5.5.2 排气不排水侧限压缩试验（不测孔隙水压力）应按下列步骤进行：

- 1 在陶土板上放置不透水的硬塑料薄膜。
- 2 在试样容器内放置大护环，将带有试样的环刀装入大护环内，放上导环（小护环），试样上依次放上多孔薄铜板和加压上盖，并将试样容器置于加压框架正中，使加压上盖与加压框架中心对准，盖上气压罩，安装百分表或位移传感器。
- 3 施加 1kPa 的预压力使试样与仪器上下各部件之间接触，将百分表或传感器调整到零位或测读初读数。
- 4 确定需要施加的各级竖向压力，竖向压力等级宜为 12.5、25、50、100、200、400、800、1600、3200kPa。第一级竖向压力的大小应视土的软硬程度而定，宜用 12.5、25kPa 或 50kPa。最后一级竖向压力应大于土的自重压力与附加压力之和。只需测定压缩系数时，最大竖向应力不小于 400kPa。
- 5 需要测定沉降速率时，施加每一级竖向压力后宜按下列时间顺序测记试样的高度和孔隙水压力的变化。时间为 5min、15min、30min、60min、2h、4h、6h，……，至变形稳定为止。不需要测定沉降速率时，则施加每级竖向压力后 24h 测定试样高度变化作为稳定标准。只需测定压缩系数的试样，施加每级竖向压力后，将两小时内变形不超过 0.01mm 作为稳定标准。按此步骤逐级加压至试验结束。
- 6 需要进行回弹试验时，可在某级净竖向压力下变形稳定后退压，直至退到要求的压力，每次退压至 24h 后测定试样的回弹量。
- 7 试验结束后，迅速卸除竖向荷载，并迅速拆除仪器各部件，取出整块试样，测定含水率。

5.5.3 以试样的初始高度、孔隙比和含水率为基准，在第 i 级竖向压力下试样变形稳定后的孔隙比和饱和度，应按下列两式计算：

$$e_i = e_0 - (1 + e_0) \frac{\sum_{j=1}^i \Delta h_j}{h_0} \quad (5.5.3-1)$$

$$S_{r,i} = \frac{G_s w_0}{e_i} \quad (5.5.3-2)$$

式中： e_i — 在第 i 级竖向压力下试样变形稳定后的孔隙比；

$S_{r,i}$ — 在第 i 级竖向压力下试样变形稳定后的饱和度 (%)；

w_0 — 试样的初始质量含水率 (%)；

e_0 — 试样的初始孔隙比，应按本标准式 (5.3.3) 计算；

h_0 — 试样的初始高度 (mm)；

G_s — 土颗粒的相对密度；

$\sum_{j=1}^i \Delta h_j$ — 在第 i 级竖向压力下试样变形稳定后的总变形量 (mm) (等于该

级竖向压力下变形稳定读数扣除仪器变形量)。

5.5.4 在常含水率和某一压力范围内土骨架的排气不排水压缩系数 (因不测孔隙水压力，得不出基质吸力，故用总压力计算)，应按下式计算：

$$a_v^{w_0} = \frac{e_i - e_{i+1}}{p_{vt,i+1} - p_{vt,i}} \quad (5.5.4)$$

式中： $a_v^{w_0}$ — 在常含水率和某一压力范围内土骨架的排气不排水压缩系数(MPa⁻¹)，上标表示含水率为常数；

$p_{vt,i}$ — 第 i 级总竖向压力 (MPa)，简称为竖向压力，下标 vt 表示竖向总量。

5.5.5 在常含水率和某一压力范围内土骨架的排气不排水压缩模量，应按下式计算：

$$E_s^{w_0} = \frac{1+e_0}{a_v^{w_0}} \quad (5.5.5)$$

式中： $E_s^{w_0}$ — 在常含水率和某一压力范围内土骨架的排气不排水压缩模量 (MPa)，上标表示含水率为常数。

5.5.6 在常含水率和某一压力范围内土骨架的排气不排水体积压缩系数，应按下式计算：

$$m_v^{w_0} = \frac{1}{E_s^{w_0}} = \frac{a_v^{w_0}}{1+e_0} \quad (5.5.6)$$

式中： $m_v^{w_0}$ — 在常含水率和某一压力范围内土骨架的排气不排水体积压缩系数 (MPa⁻¹)，上标表示含水率为常数。

5.5.7 在常含水率和某一压力范围内土骨架的排气不排水压缩指数和回弹指数，应按下式计算：

$$C_c^{w_0} \text{ 或 } C_s^{w_0} = \frac{e_i - e_{i+1}}{\log p_{vt,i+1} - \log p_{vt,i}} \quad (5.5.7)$$

式中： $C_c^{w_0}$ — 在常含水率和某一压力范围内土骨架的排气不排水压缩指数，上标表示含水率为常数；

$C_s^{w_0}$ — 在常含水率和某一压力范围内土骨架的排气不排水回弹指数，上标表示含水率为常数。

5.5.8 对应某一质量含水率，以孔隙比为纵坐标，总竖向压力为横坐标，绘制各级总竖向压力作用下的孔隙比与总竖向压力的关系曲线，见图 5.5.8。

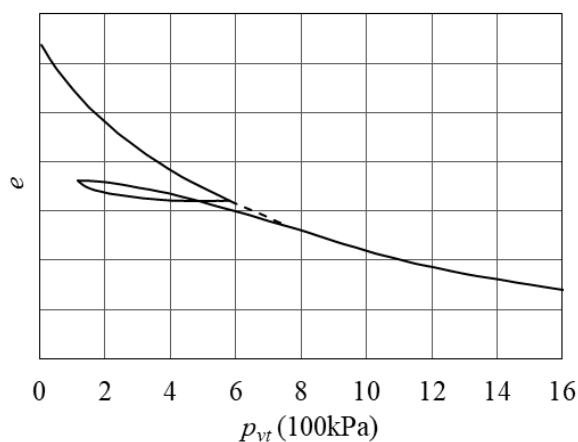


图 5.5.8 $e - p_{vt}$ 关系曲线

5.5.9 对应某一质量含水率，以孔隙比为纵坐标，总竖向压力的对数为横坐标，绘制各级总竖向压力作用下的孔隙比与总竖向压力的对数关系曲线，见图 5.5.9。

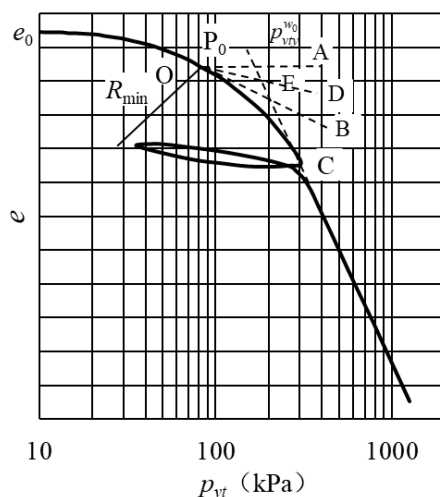


图 5.5.9 $e - \log p_{vt}$ 曲线求 $p_{vty}^{w_0}$ 示意图

5.5.10 试样在某一质量含水率下的初始屈服压力 $p_{vty}^{w_0}$ ，应按下列方法确定。在 $e - \log p_{vt}$ 曲线上找出最小曲率半径 R_{min} 的点 O (见本标准图 5.5.9)，过 O 点做水平线

OA,切线OB及 $\angle AOB$ 的平分线OD,OD与曲线下段直线的延长线交于E点,则对应于E点的压力值即为该试样在某一质量含水率下的初始屈服压力。

【条文说明】：5.5.10 在不排水条件下,非饱和土的屈服竖向压力与质量含水率有关,可采用类似于确定饱和土先期固结压力的方法确定。

5.5.11 对应某一质量含水率,以饱和度为纵坐标,竖向压力为横坐标,绘制各级总竖向压力作用下的饱和度与总竖向压力的关系曲线,见图 5.5.11。

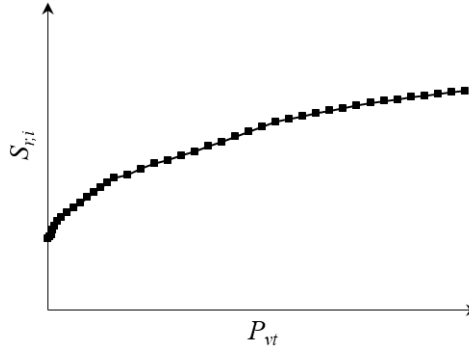


图 5.5.11 $S_{r,i}$ - P_{vt} 关系曲线

5.5.12 在常含水率和某一竖向压力范围内,排气不排水侧限压缩条件下饱和度的增加系数,应按下式计算:

$$c_{S_r}^{w_0} = \frac{S_{r,i+1} - S_{r,i}}{P_{vt,i+1} - P_{vt,i}} \quad (5.5.17)$$

式中: $c_{S_r}^{w_0}$ — 在常含水率和某一净竖向压力范围内,排气不排水侧限压缩条件下饱和度的增加系数(MPa^{-1}),上标表示含水率为常数;

【条文说明】：5.5.12 为了描述控制含水率为常数的侧限压缩试验(不测孔隙水压力)中饱和度的变化,引入一个指标,即,排气不排水侧限压缩条件下饱和度的增加系数,用式(5.5.17)计算。

5.5.13 控制含水率为常数的侧限压缩试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 5.4 的规定。

附录 E 表 5.4 排气不排水侧限压缩试验（不测孔隙水压力）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			土样种类			
土样初始尺寸	直径×高 =		初始干密度(g/cm³)			
初始质量含水率 (%)			气压力 (kPa)	0		
经历时间	不同上覆压力下的变形					
	() (kPa)		() (kPa)		() (kPa)	
	时间	变形量表读数 (0.01mm)	时间	变形量表读数 (0.01mm)	时间	变形量表读数 (0.01mm)
0						
5min						
15min						
30min						
1h						
2h						
4h						
6h						
8h						
10h						
12h						
14h						
16h						
18h						
20h						
22h						
24h						
26h						
28h						
30h						
32h						
34h						
36h						
38h						
40h						
42h						
44h						
46h						
48h						
.....						

5.6 考虑上覆压力影响的广义持水特性试验

5.6.1 本试验所用的主要仪器设备及要求与 5.2.1 条相同（图 5.2.1）。

5.6.2 本试验应采用饱和试样，试样饱和应按《土工试验方法标准》（GB/T 50123 - 2019）第 4.6 节的规定执行。

5.6.3 考虑上覆压力的广义持水特性试验应按下列步骤进行：

1 用无气纯净水饱和高进气值陶土板，应符合本标准第 5.2.3 条的规定；饱和后关闭排水阀，安装孔隙水压力传感器，用湿抹布擦去陶土板上面的余水。

2 在试样容器内放置大护环，将带有试样的环刀装入大护环内，放上导环（小护环），试样上依次放上多孔薄铜板和加压上盖，并将试样容器置于加压框架正中，使加压上盖与加压框架中心对准，盖上气压罩，安装百分表或位移传感器，打开排水阀。

3 施加 1kPa 的预压力使试样与仪器上下各部件之间接触，将百分表或传感器调整到零位或测读初读数，记录排水设备的初始读数。

4 施加上覆压力（等于上覆土重与附加竖向应力之和，即净竖向压力）：应按每分钟 5kPa 的速率施加压力到预定值，记录变形和排水量，直到二者稳定为止。稳定标准是：在 2h 内变形不超过 0.01mm，且排水量不超过 12mm³。在稳定过程中，应每隔 8h 左右冲洗陶土板下面一次，历时 30~40s。

5 逐级施加气压力：气压力（数值上等于基质吸力）的等级宜为 5、10、15、20、25、30、40、50、75、100、200、300、400、500、750、1000、1250、1500 kPa。在施加气压的同时，必须迅速补偿因气压对加压活塞头的向上顶托作用引起的上覆压力的减小。记录每一级气压作用下的竖向变形值和排水量，直到达到稳定为止。稳定标准同本标准本条第 4 款。在稳定过程中，应每隔 8h 左右冲洗陶土板下面一次，历时 30~40s。

7 需要进行基质吸力卸载试验时，可在某级气压力下待变形和孔隙水压力稳定后减少气压力压，应按每分钟 10kPa 的速率卸除气压力，直至退到要求的气压力为止，每次退压至 24h 后测定试样的回弹变形量和排水量变化。

8 试验结束后，先迅速卸除竖向荷载，再迅速卸除气压力，并迅速拆除仪器各部件，取出整块试样，测定含水率。

9 用无气纯净水饱和陶土板，对受不同上覆压力的试样重复上述过程，直到完成全部试验。

【条文说明】：5.6.3 土的持水特性与应力状态有关，本试验的特色就是能考虑上覆压力对持水特性的影响。换言之，就是用侧限压缩仪做持水特性试验。应当指出，在基质吸力增加时试样会发生侧向收缩，由此对试样体变计算造成误差，甚至不再符合侧限试验的条件；但与常规持水特性曲线试验相比，本试验能考虑上覆压力对持水特性的影响。因而国外生产的所谓高级型应力相关土-水特征曲线压力板仪（SDSWCC-H）就具有做本节试验的功能。

5.6.4 试样的初始孔隙比 e_0 ，应按本标准第3节的式（5.3.3）计算。

5.6.5 试样的初始湿密度 ρ_0 和初始干密度 ρ_d ，应按《土工试验方法标准》（GB/T 50123 -2019）第6.2节的方法测定。

5.6.6 试样的初始质量含水率，应按《土工试验方法标准》（GB/T 50123 -2019）第5章的方法测定；试样的初始饱和度，应按下式计算：

$$S_{r0} = \frac{G_s w_0}{e_0} \quad (5.6.6)$$

式中： S_{r0} — 试样初始饱和度（%）；

w_0 — 试样初始质量含水率（%）；

e_0 — 试样初始孔隙比；

G_s — 土颗粒的相对密度。

5.6.7 在上覆压力 p_v （即净竖向压力）作用下试样变形稳定后的孔隙比，应按下式计算：

$$e_{p_v} = e_0 - (1 + e_0) \frac{\Delta h_{p_v}}{h_0} \quad (5.6.7)$$

式中： e_{p_v} — 在上覆压力作用下试样变形稳定后的孔隙比；

h_0 — 试样初始高度（mm）；

Δh_{p_v} — 在上覆压力 p_v 作用下试样变形稳定后的沉降量（mm）（等于该压力下沉降稳定读数减去仪器变形量）。

5.6.8 在上覆压力（即净竖向压力）作用下试样变形和排水稳定后的含水率与饱和度，应分别按以下两式计算：

$$w_{p_v} = w_0 - \frac{1 + e_0}{G_s} \frac{\Delta V_{w_{p_v}}}{V_0} \times 100\% \quad (5.6.8-1)$$

$$S_r^{p_v} = \frac{G_s w_{p_v}}{e_{p_v}} \quad (5.6.8-2)$$

式中： w_{p_v} — 在上覆压力作用下试样变形和排水稳定后的质量含水率（%），下标表示上覆压力为常数；

$S_r^{p_v}$ — 在上覆压力作用下试样变形和排水稳定后的饱和度（%），上标表示上覆压力为常数；

$\Delta V_{w_{p_v}}$ — 在上覆压力作用下试样变形和排水稳定后的排水量（ cm^3 ），第 2 个下标表示上覆压力为常数；

V_0 — 试样的初始体积（ cm^3 ）。

5.6.9 在第 i 级气压力（基质吸力）作用下试样变形稳定后的孔隙比，应按下式计算：

$$e_i = e_{p_v} - (1 + e_{p_v}) \frac{\sum_{j=1}^i \Delta h_j}{h_{p_v}} \quad (5.6.9)$$

式中： e_i — 在第 i 级气压力共同作用下试样变形稳定后的孔隙比；

h_{p_v} — 在上覆压力作用下试样变形稳定后高度（ mm ）（等于试样的初始高度减去在该上覆压力作用下引起的沉降在稳定后的读数），下标表示上覆压力为常数；

$\sum_{j=1}^i \Delta h_j$ — 第 i 级气压力下试样变形稳定后的总沉降量（ mm ）（即从第 1 级气压到第 i 级气压引起的总沉降量，等于第 i 级压力下变形稳定读数，不计上覆压力引起的变形量）。

5.6.10 在第 i 级气压力下试样变形和排水稳定后的质量含水率和饱和度，应分别按以下两式计算：

$$w_i = w_{p_v} - \frac{1 + e_0}{G_s} \frac{\sum_{j=1}^i \Delta V_w^j}{V_0} \quad (5.6.10-1)$$

$$S_{r,i} = \frac{G_s w_i}{e_i} \quad (5.6.10-2)$$

式中： w_i — 在第 i 级气压力作用下试样排水量稳定后的质量含水率；

$S_{r,i}$ — 在第 i 级气压力作用下试样排水量稳定后的饱和度；

$\sum_{j=1}^i \Delta V_w^j$ — 在第 i 级气压力作用下试样排水量稳定后的总排水量（即从第 1 级

气压力到第 i 级气压力引起的总排水量，不计上覆压力引起的排水量）（ cm^3 ）。

5.6.11 对应某一上覆压力，以各级气压力下的质量含水率或饱和度为纵坐标，基质吸力（等于相应的各级气压力）的自然对数（ $\ln\left(\frac{s+p_{\text{atm}}}{p_{\text{atm}}}\right)$ ）或常用对数

（ $\log\left(\frac{s+p_{\text{atm}}}{p_{\text{atm}}}\right)$ ）为横坐标，绘制各级基质吸力作用下质量含水率（或饱和度）与基

质吸力的关系曲线，分别见图 5.6.11-1 和图 5.6.11-2。质量含水率与基质吸力的自然对数关系曲线宜用下式描述：

$$w = w_{p_v} - \bar{b} \ln\left(\frac{s+p_{\text{atm}}}{p_{\text{atm}}}\right) \quad (5.6.11)$$

式中： p_{atm} — 大气压（kPa）；

$s = u_a - u_w$ — 基质吸力（kPa）；

$\bar{b}$ — 无量纲模型参数。

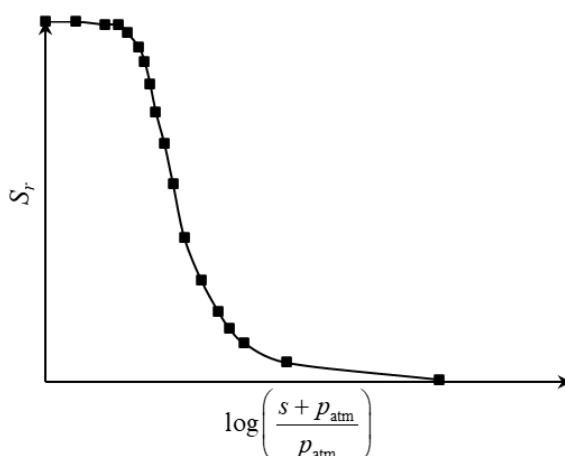
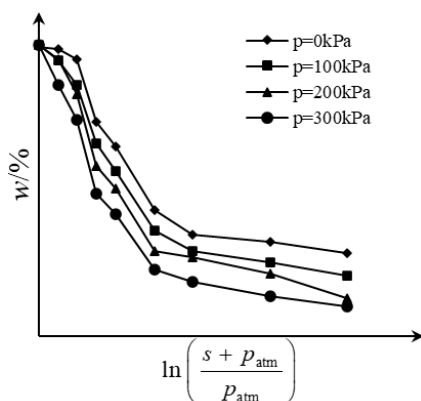


图 5.6.11-1 $w - \ln\left(\frac{s+p_{\text{atm}}}{p_{\text{atm}}}\right)$ 关系曲线 图 5.6.11-2 $S_r - \log\left(\frac{s+p_{\text{atm}}}{p_{\text{atm}}}\right)$ 关系曲线

5.6.12 应用类似于本标准第 5.3.15 条确定初始屈服净竖向压力的方法（见本标准的图 5.3.14），找出图 5.6.11-2 曲线上曲率最小的点，该点对应的吸力就是该试样在某一上覆压力下的进气值。

5.6.13 以质量含水率为纵坐标，以无量纲参数 $\frac{p_v}{p_{\text{atm}}}$ 为横坐标，绘制各级上覆压力下的

含水率 w_p 与无量纲参数 $\frac{p_v}{p_{atm}}$ 的关系曲线。各级上覆压力下的质量含水率 w_p 与无量纲

参数 $\frac{p_v}{p_{atm}}$ 的关系曲线可用下式描述

$$w_p = w_0 - \bar{a} \frac{p_v}{p_{atm}} \quad (5.6.13)$$

式中： $\bar{a}$ —无量纲参数。

5.6.14 考虑上覆压力影响的广义持水特性试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 5.5

（一）表 5.5（二）的规定。

附录 E 表 5.5 (一) 考虑上覆压力影响的广义持水特性试验记录表

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				土样种类		
土样初始尺寸	直径×高 =			初始干密度 (g/cm ³)		
初始质量含水率 (%)				排水量管 比例系数	cm ³ / 排水量管 1mm 水柱	
初始吸力 (kPa)	0			试验阶段	上覆压力作用下的固结阶段	
历时	上覆压力作用下的变形和排水					
	时间	变形量表读数 (0.01mm)	排水量管读数 (mm)	时间	变形量表读数 (0.01mm)	排水量管读数 (mm)
0						
5min						
15min						
30min						
1h						
2h						
4h						
6h						
8h						
10h						
12h						
14h						
16h						
18h						
20h						
22h						
24h						
26h						
28h						
30h						
32h						
34h						
36h						
38h						
40h						
42h						
44h						
46h						
48h						
.....						

附录 E 表 5.5 (二) 考虑上覆压力影响的广义持水特性试验记录表

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				土样种类		
土样初始尺寸	直径×高 =			初始干密度 (g/cm ³)		
初始质量含水率 (%)				排水量管 比例系数	cm ³ / 排水量管 1mm 水柱	
初始吸力 (kPa)	0			试验阶段	吸力逐级增加阶段	
历时	在不同吸力作用下的变形和排水					
	() (kPa)			() (kPa)		
	时间	变形量表读数 (0.01mm)	排水量管读数 (mm)	时间	变形量表读数 (0.01mm)	排水量管读数 (mm)
0						
5min						
15min						
30min						
1h						
2h						
4h						
6h						
8h						
10h						
12h						
14h						
16h						
18h						
20h						
22h						
24h						
26h						
28h						
30h						
32h						
34h						
36h						
38h						
40h						
42h						
44h						
46h						
48h						
.....						

6 直剪试验

6.1 一般规定

6.1.1 本试验方法适用于各种非饱和细粒土。

6.1.2 本试验主要包括 3 种类型，应根据工作要求分别采用：

1 控制基质吸力为常数的固结排水直剪试验，要求试验控制的基质吸力尽可能与试样的初始基质吸力相等；

2 不固结排气不排水直剪试验（试验全过程气压为零，不测孔隙水压力）；

3 控制气压力为常数的固结不排水直剪试验（剪切过程中测孔隙水压力）。

【条文说明】：6.1.2 其中第 1 款“要求试验控制的基质吸力尽可能与试样的初始基质吸力相等”的理由见本标准第 6.1.2 条的条文说明。鉴于在直剪试验中很难做到不排气，故不考虑不排气剪切试验；另外，控制气压力为常数的不固结不排水剪切试验与本条所列的第 2 种试验，即，不固结排气不排水直剪试验（试验全过程气压为零，不测孔隙水压力）的差别不大，故亦不考虑。

6.1.3 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《土工试验方法标准》（GB/T 50123 — 2019）4.3 节、4.5 节和本标准 3.2 节执行。

6.2 仪器设备

6.2.1 本试验所用的主要仪器设备，应符合下列规定：

1 应变控制式直剪仪（图 6.2.1）：由气压室、剪切容器、垂直加压设备、变速箱及剪切传动装置、测力计、位移量测设备组成。

2 气压室：由上下两部分组成，其下半部分是筒形金属底座，用以安装滑轨、下剪切盒、水平推力活塞杆（位于底座左侧）和水平荷载传感器（位于底座右侧的外伸圆筒中）；其上半部分是可整体装卸的气压罩，气压罩的侧壁是有机玻璃筒，气压罩的下端和顶盖是不锈钢材料。竖向压力活塞杆穿过罩盖中央，竖向压力活塞杆下端与荷载传感器相连。水平推力活塞杆及竖向压力活塞杆与气压室之间都采用滚动隔膜密封。气压室的上、下两部分之间采用粗螺纹联结，并用 O 型圈密封，装卸方便。为了提高量测精度，水平荷载传感器和竖向荷载传感器皆应置于气压室内。

3 剪切容器：由上半盒、下半盒、环刀、高进气值陶土板、螺旋水槽、多孔薄金

属板、加压上盖组成。

1) 剪切盒必须用不锈钢或铜合金棒材加工制成，材料密实而无微孔隙，不透气，试验中水、气互不干扰。剪切盒固定于气压室内,利用气压室可对试样施加气压，控制试样基质吸力。下半盒底部刻有螺旋槽，螺旋槽上安置高进气值陶板。

2) 环刀：内径 61.8mm，高度 20mm。

3) 多孔薄金属板、高进气值陶土板和螺旋水槽：应符合本标准第 5.2.1 条的第 2 款的规定。

4 垂直加压设备：应能垂直地在瞬间施加各级规定的压力，且没有冲击力，压力准确度应符合现行国家标准《土工仪器的基本参数及通用技术条件》GB/T15406 的规定。

5 气压设备：应符合本标准 5.2.1 条第 3 款的规定。

6 补偿砝码：应配备一系列小质量砝码，以补偿因施加不同量值的气压力引起的竖向压力的减小。

7 位移量测设备：量程为 10mm，分度值为 0.01mm 的百分表；或准确度为全程 0.2%的传感器。

8 变速箱及剪切传动装置：变速箱设 15 档剪切速度（与常规三轴仪的变速装置及传动装置相同），供不同试验方法和不同土类的剪切试验选择。

9 排水量测设备：应符合本标准第 5.2.1 条的第 7 款的规定。

10 采集系统和控制系统：压力和变形范围应满足试验要求。

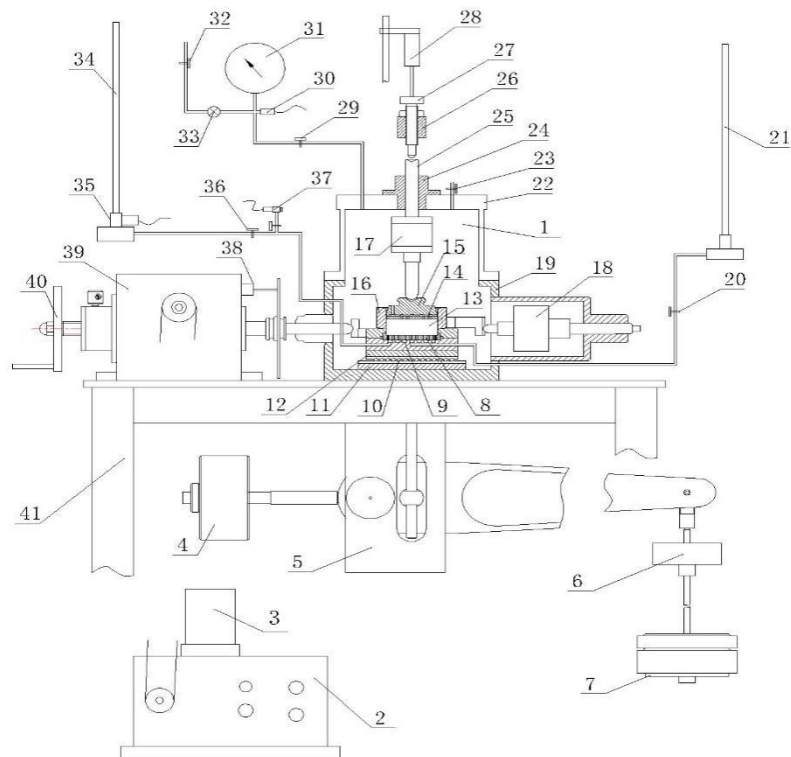


图 6.2.1 应变控制式非饱和土直剪仪示意图

- 1.气压室 2.变速箱 3.电动机 4.平衡锤 5.杠杆砝码式加载部件 6.补偿小砝码盘
7.砝码盘 8.高进气值陶土板 9.陶土板下螺旋槽 10.钢球 11.下滑轨 12.上滑轨
13.非饱和土试样 14.多孔薄金属板 15.传压帽 16.剪切盒部件 17.轴向荷载传感器
18.水平荷载传感器 19.气压室下半部（金属部件） 20.冲洗螺旋槽水管阀门 21.冲洗水管
22.气压室罩（有机玻璃） 23.排气阀门 24.活塞套 25.活塞杆 26.上横梁
27.调节螺柱 28.竖向位移传感器 29.孔隙气压阀门 30.孔隙气压传感器
31.孔隙气压压力表 32.气源阀门 33.孔隙气压调压阀 34.排水管 35.排水差压传感器
36.排水三通阀门 37.孔隙水压传感器 38.水平位移传感器 39.水平推动部件
40.手轮 41.机架部件

【条文说明】：6.2.1 本试验所用的主要仪器设备，应符合下列规定：

3 剪切容器：

1) 剪切盒必须用不锈钢或铜合金棒材加工制成，材料密实而无微孔隙，不透气，试验中水、气互不干扰。必须指出，铸铜构建内存在微孔隙，压力空气可以透过进入螺旋槽，故不能用铸铜制造剪切盒。

8 变速箱及剪切传动装置：变速箱设 15 档剪切速度，供不同试验方法和不同土类的剪切试验选择。非饱和土直剪仪吸了常规应变控制式三轴仪的优点，将其变速装

置及传动装置移植到非饱和土直剪仪。

6.2.2 直剪仪、加压设备、量测系统和控制采集系统应定期校准，并应作仪器变形校正曲线，具体操作见有关标准。

6.2.3 在试验前必须按本标准 5.2.3 条的规定饱和高进气值陶土板，在饱和后还必须按本标准 5.2.4 条的规定检查在试验需要施加的最大气压下是否漏气，并按本标准附录 E 表 5.1 的格式进行记录。

6.3 控制基质吸力为常数的固结排水直剪试验

6.3.1 本试验所用的主要仪器设备，应与本标准第 6.2.1 条相同（本标准图 6.2.1）。

6.3.2 控制基质吸力为常数的固结排水直剪试验，应按下列步骤进行：

1 每组试样不得少于 4 个，其中一个应为饱和试样，饱和方法应符合《土工试验方法标准》（GB/T 50123 — 2019）4.6 节的规定。

2 用无气纯净水饱和高进气值陶土板，应符合本标准第 5.2.3 条的规定；饱和后用湿抹布擦去陶土板上面的余水；将螺旋槽出口的三通阀置于排水状态，调整排水管的高度，使管中液面与试样中心平齐。

3 对准剪切容器上下盒，插入固定销，将带有试样的环刀刃口向上，对准剪切盒口，在试样上放多孔金属板，将试样小心地推入剪切盒内。

4 移动传动装置，使上盒前端钢柱刚好与测力计接触，依次放上传压板、加压框架，安装垂直位移和水平位移量测装置，施加 1kPa 的预压力使试样与仪器上下各部件之间接触，并调至零位或测记初读数。

5 施加基质吸力，应按本标准 5.3.2 条第 4 款的步骤进行，施加的基质吸力必须不低于试样的初始基质吸力。

6 根据工程实际和土的软硬程度施加净垂直压力，对松软试样净垂直压力应分级施加，以防土样挤出；在施加净垂直压力前，应先用小砝码平衡气压力对压力活塞头施加的向上顶托力（其值等于活塞横断面积与气压力的乘积）。

7 在基质吸力施加到预定值后，应紧接着施加净竖直压力，应按以下时间顺序测读竖向变形和排水量：5min、15min、30min、60min、2h、4h，……，直至试样变形和排水稳定为止。稳定标准为：在两小时内变形不超过 0.01mm，排水量不大于 12mm³，且历时不宜少于 48h。

8 选择剪切速率，拔去固定销，以小于 0.01mm/min 的剪切速度进行剪切，试样

每产生剪切位移 0.2 ~ 0.4mm 测记测力计和位移读数，直至测力计读数出现峰值，应继续剪切至剪切位移为 4mm 时停机，记下破坏值；当剪切过程中测力计读数无峰值时，应剪切至剪切位移为 6mm 时停机。

9 剪切结束，依次迅速退去剪切力、净垂直净压力和气压力，移动加压框架，取出试样，测定试样质量含水率。

10 用无气纯净水重新饱和陶土板，对不同的预定净垂直压力，重复上述过程，直到完成全部试验。6.3.4 内部沉降监测读数仪量程应大于所测土层厚度，分辨力不大于 2mm，测尺长度的误差应不大于±0.1%FS（FS 表示满量程）。

【条文说明】：6.3.2 控制基质吸力为常数的固结排水直剪试验，应按下列步骤进行：7 关于在吸力和净竖向压力作用下的固结排水达到稳定的标准和历时可参阅本标准第 5.3.2 条的条文说明。

8 选择剪切速率。《土工试验方法标准》（GB/T 50123 — 2019）规定饱和土慢剪试验的剪切速率应小于 0.02mm/min，非饱和土的固结排水剪切试验的剪切速率应低于该值，故本款规定剪切速度应小于 0.01mm/min，即，约为饱和土慢剪试验的剪切速率的一半。如按 0.01mm/min 的剪切速率考虑，则剪切至剪切位移为 4mm 时约需要 400min = 6.7 h。Gan 在 1988 年对非饱和重塑冰碛土做了 5 个非饱和土直剪试验，剪切位移速率为 1.7×10^{-4} mm/s，即 0.0102mm/min，若以剪切位移达到 4mm 为破坏标准，则剪切历时约为 6.5h。朱元青（2007）对宁夏扶贫扬黄灌溉工程十一号泵站地基的自重湿陷性黄土进行控制吸力为常数直剪试验采用的剪切速率 0.0072 mm/min，剪切至 4mm 历时 9.25h。扈胜霞（2001）对陕西省铜川市武警支队新区工地现场的原状 Q₃ 黄土试样做了控制吸力的固结排水剪切试验，剪切位移速率为 0.0032mm/min，剪切位移达到 6-7mm 时试样破坏，剪切历时约 36 小时；如按剪切位移达到 4mm 为破坏标准，则剪切历时约为 21h。对 Escario（1986）对马德里灰粘土和马德里粘质砂土及一种红粘土的重塑试样做了非饱和土直剪试验，剪切位移速率均为 2.8×10^{-5} mm/s，即 0.0017mm/min，剪切至位移达到 4mm 需要 39.2h。

6.3.3 剪应力应按下列式计算：

$$\tau = \frac{C \cdot R}{A_0} \times 10 \quad (6.3.3)$$

式中： τ — 试样所受的剪应力（kPa）；

C — 测力计率定系数（N/0.01mm）；

R — 测力计量表读数 (0.01mm)。

6.3.4 以剪应力为纵坐标，剪切位移为横坐标，绘制剪应力与剪切位移关系曲线（图 6.3.4），取曲线上剪应力的峰值为抗剪强度，无峰值时，取剪切位移 4mm 所对应的剪应力为抗剪强度。

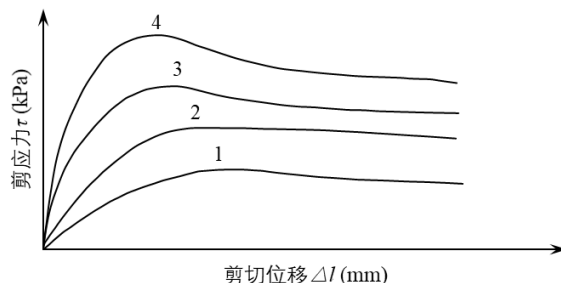


图 6.3.4 剪应力与剪切位移关系曲线

6.3.5 考虑吸力对抗剪强度的贡献，非饱和土的抗剪强度可用下式描述：

$$\tau_{ff} = c' + (p_{vt, f} - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad (6.3.5-1)$$

$$c = c' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad (6.3.5-2)$$

式中： τ_{ff} — 破坏时破坏面上的剪应力 (kPa)；

c — 总凝聚力，或表观凝聚力 (kPa)；

c' — 有效凝聚力 (kPa)；

$(p_{vt, f} - u_a)_f$ — 破坏时破坏面上净法向应力，在本试验中即为净竖向应力 (kPa)；

【条文说明】：6.3.5 本条给出了考虑吸力对抗剪强度的贡献的非饱和土抗剪强度表达式 (6.3.5-1) 和式 (6.3.5-2)，从而为确定非饱和土的抗剪强度参数提供了依据。

6.3.6 以抗剪强度为纵坐标，净垂直压力为横坐标，把试验点绘在抗剪强度-净垂直压力坐标系中（图 6.3.6），用最小二乘法按直线拟合试验点，直线的倾角为与净垂直压力相关的内摩擦角，直线在纵坐标轴上的截距为总凝聚力。

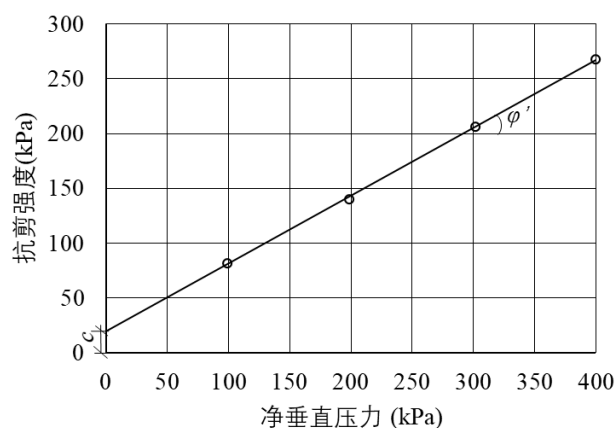


图 6.3.6 抗剪强度与净垂直压力关系曲线

6.3.7 以总凝聚力为纵坐标，基质吸力为横坐标，将试验点绘总凝聚力-基质吸力坐标系中（图 6.3.7），用最小二乘法按直线拟合试验点，直线的倾角为基质吸力摩擦角 ϕ^b ，直线在纵坐标轴上的截距为有效凝聚力 c' 。

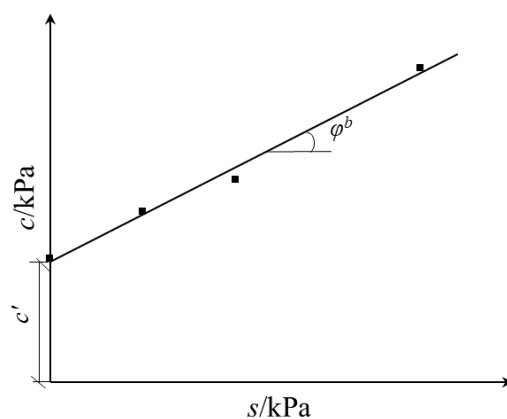


图 6.3.7 总凝聚力与基质吸力关系曲线

6.3.6 控制基质吸力为常数的固结排水直剪试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 6.1（一）和表 6.1（二）的规定。

附录 E 表 6.1 (一) 控制基质吸力为常数的固结排水直剪试验记录表

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				土样种类		
土样初始尺寸	直径×高 =			排水量管 比例系数	cm ³ / 排水量管 1mm 水柱	
初始干密度(g/cm ³)				基质吸力 (kPa)		
初始质量含水率 (%)				净垂直压力 (kPa)		
试验阶段	固结阶段			备注		
历时	时间	变形量表读数 (0.01mm)	排水量管读数 (mm)	时间	变形量表读数 (0.01mm)	排水量管读数 (mm)
0						
5min						
15min						
30min						
1h						
2h						
4h						
6h						
8h						
10h						
12h						
14h						
16h						
18h						
20h						
22h						
24h						
26h						
28h						
30h						
32h						
34h						
36h						
38h						
40h						
42h						
44h						
46h						
48h						
.....						

6.4 不固结排气不排水直剪试验

(试验全过程气压为零, 不测孔隙水压力)

6.4.1 本试验所用的主要仪器设备, 应与本标准第 6.2.1 条相同 (本标准图 6.2.1)。

6.4.2 不固结排气不排水直剪试验, 应按下列步骤进行:

1 试样制备和安装, 应按本标准第 6.3.2 条 1、3 款的步骤进行。安装前无需饱和和陶土板, 也无需安装垂直位移量测装置, 但应在陶土板上放置不透水的硬塑料薄膜。

2 施加净垂直压力, 拔去固定销, 立即以 0.02mm/min 的剪切速度按本标准第 6.3.2 条的第 8、9 款进行剪切至试验结束。

【条文说明】: 6.4.2 不固结排气不排水直剪试验, 应按下列步骤进行:

2 剪切位移速率采用 0.02mm/min, 是控制基质吸力为常数的固结排水剪切试验剪切速率的 2 倍, 剪切位移达到 4mm 需要历时 200min。

6.4.3 改变净竖向压力或含水率, 进行下一个试验, 直到全部试验完成。

6.4.4 不固结排气不排水直剪试验的剪应力计算应按本标准第 6.3.3 条的规定进行。

6.4.5 不考虑基质吸力对抗剪强度的贡献, 非饱和土的不固结排气不排水抗剪强度可用下式描述:

$$\tau_{ff} = c_{qq} + p_{v,f} \tan \phi'_{qq} \quad (6.4.5)$$

式中: $p_{v,f}$ — 净法向应力, 因试验过程中气压恒为零, 净竖向应力就等于总竖向应力;

c_{qq} — 非饱和土的不固结排气不排水剪切试验的总凝聚力;

ϕ'_{qq} — 非饱和土的不固结排气不排水剪切试验与净竖向应力相关的内摩擦角。

6.4.6 以抗剪强度为纵坐标, 破坏时的净竖向应力为横坐标, 把试验点绘在抗剪强度-竖向应力坐标系中 (图 6.4.6), 用最小二乘法按直线拟合试验点, 直线的倾角即为与净竖向应力相关的内摩擦角 ϕ'_{qq} , 直线在纵坐标轴上的截距为非饱和土的不固结排气不排水总凝聚力 c_{qq} 。

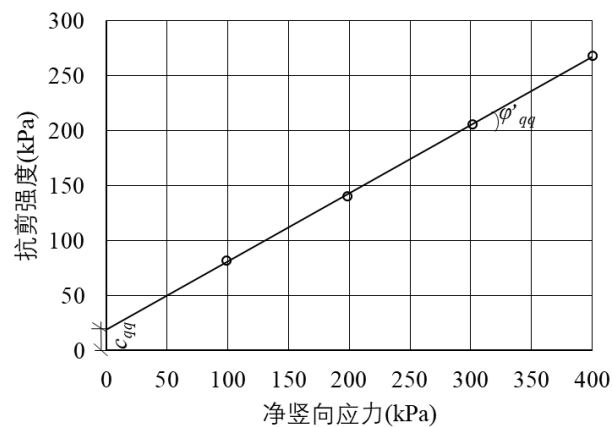


图 6.4.6 抗剪强度和净竖向应力关系曲线

6.4.7 由本标准第 6.4.6 条所得强度指标是质量含水率的函数，应进一步分析其与质量含水率的关系。

【条文说明】：6.4.7 在不固结排气不排水直剪试验过程中，质量含水率保持为常数，故本条规定：“由本标准第 6.4.6 条所得强度指标是质量含水率的函数，应进一步分析其与质量含水率的关系。”已有研究表明，凝聚力与质量含水率的关系比较复杂，摩擦角随质量含水率增加而降低。

6.4.8 不固结排气不排水直剪试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 6.2 的规定。

6.5 控制气压力为常数的固结不排水直剪试验

(剪切过程中测孔隙水压力)

6.5.1 本试验所用的主要仪器设备, 应与本标准第 6.2.1 条相同 (本标准图 6.2.1)。

6.5.2 本试验所用的孔隙水压力传感器和特制三通阀应符合本标准第 5.4.1 条的规定。

6.5.3 控制气压力为常数的固结不排水直剪试验, 应按下列步骤进行: 表 6.5.3 测斜仪精度:

1 用无气纯净水饱和高进气值陶土板, 应符合本标准第 5.2.3 条的规定;

2 安装试样和固结阶段, 应按本标准 6.3.2 条的第 1~7 款进行; 当试样的初始基质吸力不超过 70kPa 时, 可不必施加气压力 (即气压力保持为大气压)。若试样初始基质吸力超过 70kPa, 则必须施加大于初始基质吸力值的气压力且保持为常数; 施加气压力应符合本标准第 5.4.2 条第 4 款的规定。

3 在固结完成后关闭排水阀, 测记孔隙水压力传感器的初始读数;

4 剪切阶段, 固结完成后, 立即以 0.02mm/min 的剪切速度按本标准第 6.3.2 条的第 8、9 款进行剪切至试验结束, 试样每产生剪切位移 0.2~0.4mm 测记测力计、位移和孔隙水压力读数。

【条文说明】: 6.5.3 第 2 款: 若试样初始基质吸力超过 70kPa, 则必须施加大于初始基质吸力值的气压力且保持为常数。理由见 5.4.1 条的条文说明。

6.5.4 本试验的剪应力计算应按本标准第 6.3.3 条的规定进行。

6.5.5 本试验绘制剪应力与剪切位移关系曲线图应按本标准的第 6.3.4 条进行。

6.5.6 本试验的抗剪强度指标, 应按下述两种方法求取:

1 考虑基质吸力对抗剪强度的贡献, 绘图应按本标准的 6.3.6 和 6.3.7 条的规定进行, 本试验所得抗剪强度包线 (图 6.3.6) 的倾角为与净法向压力 $p_{v,f}$ 相关的内摩擦角 ϕ'_{cq} , 抗剪强度直线在纵坐标轴上的截距为总凝聚力 c_{cq} ; 在总凝聚力 - 基质吸力坐标系中直线 (图 6.3.7) 的倾角为吸力摩擦角 ϕ_b , 在纵坐标轴上的截距为有效凝聚力 c' 。

2 不考虑气压力和基质吸力对抗剪强度的影响, 以抗剪强度为纵坐标, 破坏时的总竖向应力 $p_{v,f}$ 为横坐标, 把试验点绘在抗剪强度-总竖向应力坐标系中 (图 6.5.6), 用最小二乘法按直线拟合试验点, 直线的倾角即为按总应力分析得到的内摩擦角 ϕ'_{cq} , 直线在纵坐标轴上的截距为按总应力分析得到的不固结排气不排水凝聚力 c_{cq}^t 。

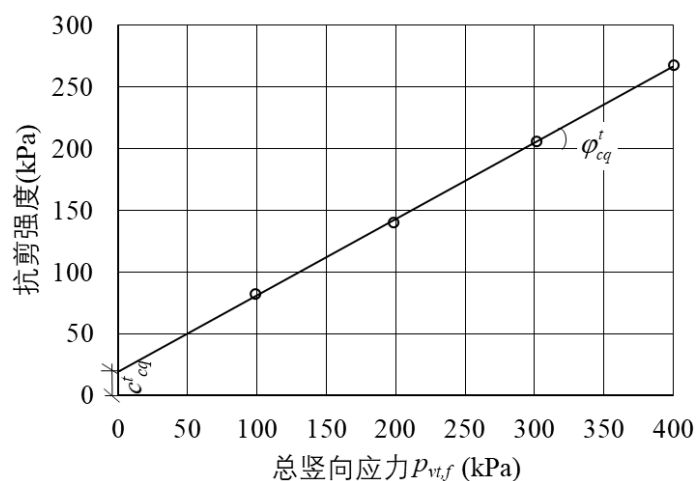


图 6.5.6 抗剪强度-总竖向应力关系曲线

【条文说明】：6.5.6 本试验的抗剪强度指标，应按下述两种方法求取：

- 1 考虑基质吸力对抗剪强度的贡献，按两个应力状态变量分析确定强度指标；
- 2 不考虑气压力和基质吸力对抗剪强度的影响，按总应力分析确定强度指标。

6.5.7 本试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 6.3（一）和表 6.3（二）的规定。

附录 E 表 6.3 (一) 控制气压力为常数的固结不排水直剪试验记录表

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				土样种类		
土样初始尺寸	直径×高 =			排水量管比例系数	cm ³ / 排水量管 1mm 水柱	
初始干密度(g/cm ³)				气压力 (kPa)		
初始质量含水率 (%)				净垂直压力 (kPa)		
试验阶段	固结阶段			备注		
时间 月 - 日 - 时 - 分	时间	变形量表读数 (0.01mm)	排水量管读数 (mm)	时间	变形量表读数 (0.01mm)	排水量管读数 (mm)
0						
5min						
15min						
30min						
1h						
2h						
4h						
6h						
8h						
10h						
12h						
14h						
16h						
18h						
20h						
22h						
24h						
26h						
28h						
30h						
32h						
34h						
36h						
38h						
40h						
42h						
44h						
46h						
48h						
.....						

7 黄土侧限增/减湿变形试验

7.1 一般规定

7.1.1 本试验可用于测定非饱和黄土在侧限情况下的增湿变形系数或者减湿变形系数。应根据试验目的要求,采用“先增/减湿后加压路径”或者“先加压后增湿路径”的试验方法。

【条文说明】: 7.1.1 侧限情况下增湿/减湿试验操作简单,试样较薄,水分容易在短时间内均匀,应用最为广泛。三轴增湿试验存在增湿/减湿水量在试样中分布不均匀等问题,尚不成熟,本标准暂不列。提供的两种浸水路径应该根据不同的试验目的选用。

7.1.2 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 $\pm 0.02\text{g/cm}^3$ 。

7.1.3 试验所用的滤纸及透水石的湿度应接近试样的天然湿度。

7.1.4 变形稳定标准为连续2h内,每小时变形不应大于0.01mm。

7.1.5 原状黄土样的取得和制备,必须保持其密度、湿度和结构,并应符合《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001)中I级土样质量的要求。

【条文说明】: 7.1.5 原状黄土增/减湿变形性质受取样影响较大,因此进行原状黄土试验时,必须符合I级试样标准,最好采用人工挖孔取样的方法进行取样,并防止运输中水分的损失和结构的扰动。若采用钻孔取样,应采用干钻法进行,不得加水钻进或者泥浆固壁。

7.1.6 重塑黄土样的制备,应根据工程实际情况可分别采用击样法、击实法和压样法,并应符合《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)第4.1~4.5条的要求。

7.1.7 试验开始之前应对所用仪器进行标定,并在记录表格中记录仪器变形量值。

7.2 土样的增湿/减湿方法

7.2.1 重塑黄土样应采用制备不同含水率土样的方法实现土样的增湿/减湿,土样密度的差值应符合本标准7.1.2条的要求,土样含水率应以制备完成后测定的含水率做为实际含水率值。

7.2.2 原状黄土样的增湿可采用水膜转移法,减湿可采用自然风干法。

7.2.3 原状黄土样增湿/减湿主要仪器设备应符合下列规定:

1 环刀：内径 79.8mm，2cm，内底面积 50cm²，内体积 100cm³，并符合《土工实验仪器 环刀》（SL370-2006）切土环刀和相关标准的规定。

2 天平：称重 200g，分度值 0.01g。

3 其他设备：烘箱、密封缸、橡胶吸水球、量筒、修土刀、玻璃板和盛土器等。

7.2.4 原状黄土样增湿的水膜转移法应符合下列规定：

1 预先测定原状土样的密度和天然含水率。

2 将环刀四周涂上一薄层凡士林，用切土器（或钢丝锯）将原状土块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。将两端留有一定的余土，先不削平。

3 根据增湿后的含水率，按照环刀体积的 1.02~1.06 倍，计算需要加入土样的水量。每次增湿的含水率不应大于 4%。

4 将环刀连同土样一起放置与干燥的玻璃板上，用橡胶吸水球分 5~8 次向环刀内土样表面均匀滴水。

5 滴水完成后将土样置于密封缸内静置 48h，密封缸周围温度应控制在 10℃~30℃ 之间。

6 取出土样后两头削平，作为试验土样；用削掉的土样测定含水率，以该含水率作为增湿后土样的含水率值。

【条文说明】：7.2.4 当土样已经削平时，原状黄土样的增湿的水膜转移法也可以用以下的方法进行：在土样制作好并放入环刀之内后，将试样置于精度 0.01g 的电子天平上，用橡胶滴管在试样表面均匀的缓浸滴入预定的纯水，滴入的水量根据需要增湿的含水率计算得出，并用天平按重量控制；然后把试样放置在一密封缸内养护 48h，使水分在水膜压力作用下逐渐转移，最后均匀分布于试样内部，即达到所控制的增湿含水率。每次滴水不应使土样含水率增加超过 4%，若大于 4%可以通过分多次滴加和养护的方式完成。

7.2.5 原状黄土样减湿的自然风干法应符合下列规定：

1 预先测定原状土样的密度和天然含水率。

2 将环刀四周涂上一薄层凡士林，用切土器（或钢丝锯）将原状土块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。将两端留有一定的余土，先不削平。

3 将环刀连同土样一起放置与干燥的玻璃板上，置于室内在室温条件下阴干。阴

干时间可根据需要减湿的水量和室内温度和湿度情况选定，一般为 12h~72h，阴干时不应将土样放置在阳光直射的地方。每次减湿的含水率不应大于 4%。

4 阴干完成后，将土样置于密封缸内静置 48h，密封缸周围温度应控制在 10℃~30℃ 之间。

5 取出土样后两头削平，作为试验土样；用削掉的土样测定含水率，以该含水率作为减湿后土样的含水率值。

【条文说明】：7.2.5 当土样已经削平时，减湿的自然风干法也可用以下方法进行：将制备好的由环刀保护的土样放置于室内环境中阴干，环境温度应在 15℃~25℃之间，避免阳光直射，用精度 0.01g 电子天平称量测定散失的水分，若达到减湿后的含水率时，将土样放置于密封缸内养护 48h 即可。每次阴干不应使土样含水率减少超过 4%。

7.3 “先增/减湿后加压路径”非饱和黄土增/减湿变形试验

7.3.1 试验所用仪器设备应符合下列规定：

1 固结容器：由环刀、护环、透水板、加压上盖和量表架组成，即常规的固结仪。

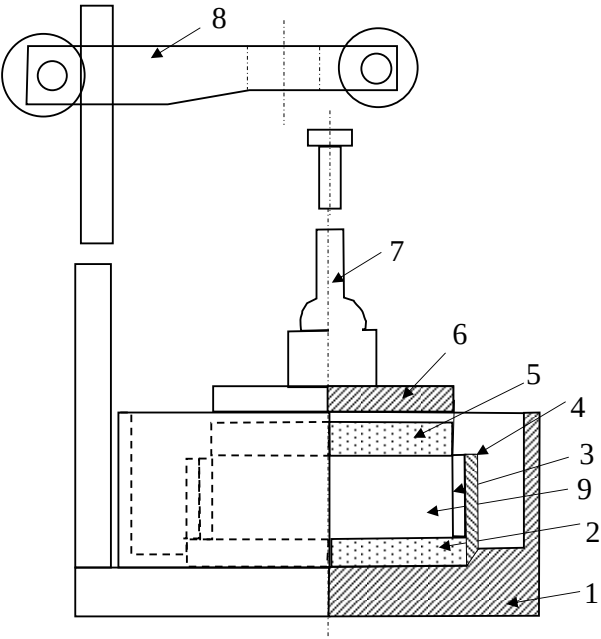


图 7.3.1 固结容器示意图

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。

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

4 其他：天平、秒表。

【条文说明】：7.3.1 这种试验实质上就是不同含水率土样的固结试验，因此采用的仪器就是固结仪。

7.3.2 初始含水率土样的压缩与湿陷试验应按下列步骤进行：

1 在固结容器内放置护环、透水板和薄滤纸，将带有环刀的初始含水率试样小心装入护环中，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。

2 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。

3 确定需要施加的各级压力，并分级施加压力，压力等级宜为 50kPa、100kPa、150kPa、200kPa，大于 200kPa 后每级增量为 100kPa。

4 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。稳定标准应符合本标准第 7.1.4 条的规定。

5 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。试样在规定的压力变形稳定后，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，直到试样变形稳定为止。

6 测记试样浸水变形稳定读数后，迅速拆卸仪器各部件，取出带环刀的试样。当需要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。

7.3.3 土样规定压力下的湿陷系数应按下列式计算：

$$\delta_s = \frac{h_{p0} - h'_{p0}}{h_0} \quad (7.3.3)$$

式中： δ_s — 某一级压力下的湿陷系数；

h_{p0} — 在某级压力下，试样变形稳定后的高度（mm）；

h'_{p0} — 在某级压力下，试样浸水变形稳定后的高度（mm）；

h_0 — 试样的原始高度（mm）。

7.3.4 增湿或减湿到某一含水率的非饱和黄土压缩与湿陷试验应符合下列要求：

1 试验所用仪器设备应符合本标准第 7.3.1 条的规定。

2 试验步骤应符合本标准第 7.3.2 条的规定，但所用试样应为增湿或减湿到某一含水率的试样。

7.3.5 规定的压力下的“先增/减湿后加压路径”非饱和黄土增/减湿变形系数应按下列式计

算：

$$\delta_w = \frac{h_{p0} - h_{pw}}{h_0} \tag{7.3.4}$$

式中： δ_w — 某一级压力下，“先增/减湿后加压路径”的增湿或减湿变形系数；

h_{p0} — 在某级压力下，初始含水率的试样变形稳定后的高度（mm）；

h_{pw} — 在某级压力下，增湿或者减湿到某一含水率的试样变形稳定后的高度（mm）；

h_0 — 试样的原始高度（mm）。

7.3.6 应以压力为横坐标，增/减湿变形系数为纵坐标，绘制增湿或减湿变形系数随压力变化曲线，见图 7.3.6。

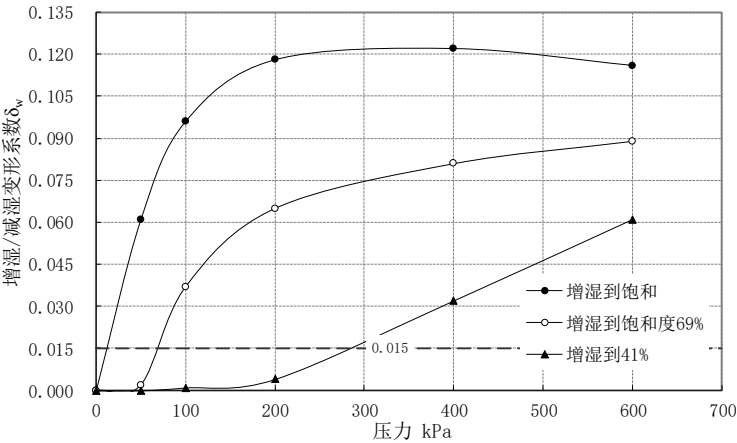


图 7.3.6 增湿或减湿变形系数随压力变化曲线

7.3.7 本试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 7.1 的规定。

附录 E 表 7.1 “先增/减湿后加压路径”非饱和黄土增/减湿变形试验记录

任务单号						试验者					
试样编号						计算者					
仪器名称与编号						校核者					
试验方法						试验日期					
环刀号: 仪器号:						环刀号: 仪器号:					
经过时间 (h)	初始状态试样					增/减湿到 $w=(\quad)\%$ 状态试样					
	含水率 $w(\%)$					含水率 $w(\%)$					
	初始干密度 $\rho_d(\text{g}/\text{cm}^3)$					初始干密度 $\rho_d(\text{g}/\text{cm}^3)$					
	土粒相对密度 G_s					土粒相对密度 G_s					
	试样初始高度 $h_0(\text{cm})$					试样初始高度 $h_0(\text{cm})$					
	() (kPa)	() (kPa)	() (kPa)	() (kPa)	浸 水	() (kPa)	() (kPa)	() (kPa)	() (kPa)	浸 水	
1											
2											
.....											
仪器变形量 (mm)											
试样变形量 (mm)											
饱和湿陷系数											
增/减湿 变形系数											

7.4 “先加压后增湿路径”非饱和黄土增湿变形试验

7.4.1 试验所用仪器设备应符合下列规定：

- 1 固结容器、加压设备和变形量测设备与本标准7.3.1条所用仪器一致。
- 2 透水板应采用钢制或者铜制多孔板来减小其吸水量。
- 3 在加压盖顶部进水孔上设置进水管，进水管上设置进水阀，并于进水罐相连。
- 4 其他：天平、秒表、量筒。量筒的精度应小于0.5ml。

7.4.2 “先加压后增湿路径”的增湿变形试验应按下列步骤进行：

1 在固结容器内放置护环、透水板和薄滤纸，将带有环刀的初始含水率试样小心装入护环中，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。

2 在加压盖顶部进水孔安装进水管与进水罐，关闭进水阀。

3 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。

4 确定需要施加的各级压力，并分级施加压力，压力等级宜为 50kPa、100kPa、150kPa、200kPa，大于 200kPa 后每级压力增量为 100kPa。

5 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。稳定标准应符合本标准第 7.1.4 条的规定。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。

6 按增湿后的土样含水率与初始含水率的差值计算需要加入试样的水量。

7 待试样在规定的压力下变形稳定后，用量筒向进水罐内注水，注水量为以上计算的水量值，并应使进水罐内水位高于试样顶面 1~2cm。

8 打开进水阀，自上而下向试样注水，每隔 1h 测记一次变形读数，直到量水管内水全部注入试样且试样变形稳定为止，期间应保证进水阀处于打开状态。

9 第一级增湿注水完成后，可在压力不变的情况下进行第二级增湿注水，以此类推，直到土样完全饱和为止。测记每级增湿注水变形稳定后的变形读数。

【条文说明】：7.4.2 这个路径的试验的关键在于注水的精确性和注水的均匀性。大量试验表明，在 2cm 高的压缩试样中由上到下注水在一定时间后可以达到水分均匀的目的，若由下到上注水则需要考虑透水板内残余的水量，这时计算得到的增湿后含水率值不精确，最好在试验后实测土样的含水率。

7.4.3 规定的压力下的“先加压后增湿路径”非饱和黄土增湿变形系数应按下列式计算：

$$\delta'_w = \frac{h'_{po} - h'_{pw}}{h_o} \quad (7.4.3)$$

式中： δ'_w — 某一压力下，“先加压后增湿路径”的增湿变形系数；

h'_{po} — 某一压力下，初始含水率的试样变形稳定后的高度（mm）；

h'_{pw} — 某一压力下，试样增湿注水到某一含水率且变形稳定后的高度（mm）

h_o — 试样的原始高度（mm）。

7.4.4 应以压力为横坐标，增/减湿变形系数为纵坐标，绘制增湿或减湿变形系数随压力变化曲线。

7.4.5 本试验的记录格式应符合本标准附录E表7.2的规定。

附录 E 表 7.2 “先加压后增湿路径”非饱和黄土增湿变形试验记录

任务单号		初始含水率 $w(\%)$		试验者			
试样编号		初始干密度 $\rho_d(g/cm^3)$		计算者			
仪器名称与编号		土粒相对密度 G_s		校核者			
试验方法		试样初始高度 $h_0(cm)$		试验日期			
环刀号: 增湿前施加的最大压力(kPa):							
经过时间 (h)	试样在压力作用下注水增湿的变形						
	() (kPa)	() (kPa)	() (kPa)	() (kPa)	加水至() (%)	加水至() (%)	加水至() (%)
1							
2							
.....							
仪器变形量 (mm)							
试样变形量 (mm)							
增湿变形系数							

8 抗拉强度试验

8.1 一般规定

8.1.1 试样制备应符合《土工试验方法标准》（GB/T 50123 — 2019）第 4 章的规定。

8.1.2 本试验的目的是测定非饱和土试样在单轴拉伸条件下达到断裂破坏时的极限强度，或非饱和土试样在三轴拉伸条件下的轴向拉伸应力、轴向拉伸应变，进而确定非饱和土的抗拉强度。

8.1.3 本标准土的抗拉强度试验为圆柱形试样拉伸试验，不涉及通过增加围压导致的三轴挤伸情况。在圆柱形试样拉伸试验中，围压为零时即为单轴拉伸试验；围压大于零时即为三轴拉伸试验。因拉伸速率较快，在试验中不施加吸力。

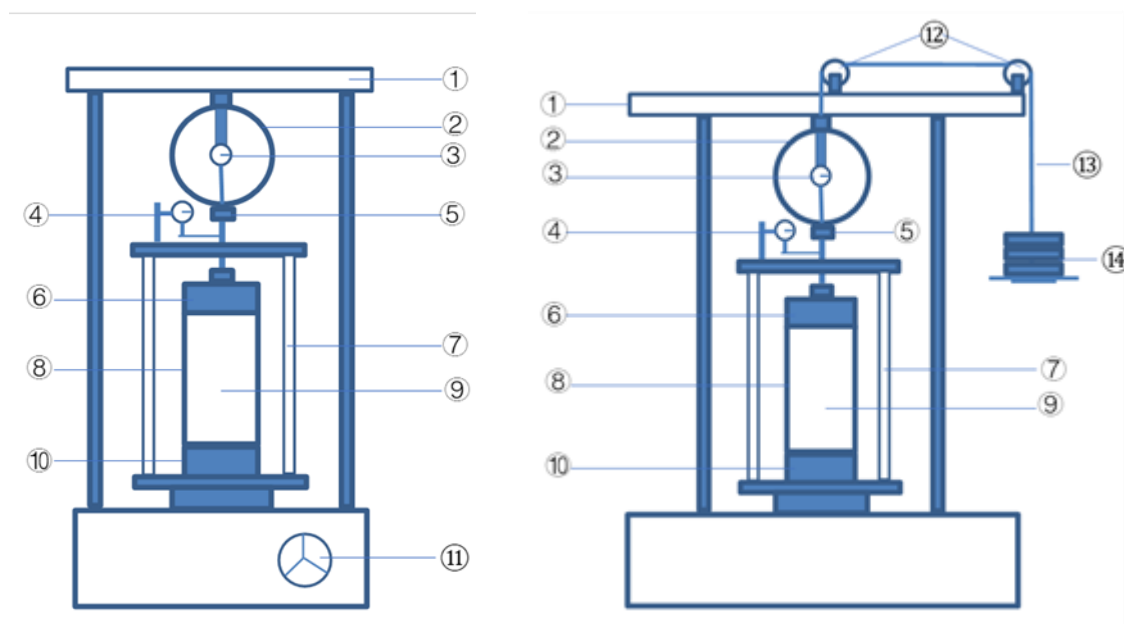
8.1.4 本试验应测定试样的初始吸力和试样拉裂后的吸力。

8.1.5 本试验试样的初始吸力拉裂后的吸力宜采用压力板法或滤纸法量测；试样的持水特性曲线的测定应符合本标准第 4 章之规定。

8.2 仪器设备

8.2.1 本试验所用主要仪器设备为电动机具备正反转动功能的应变控制式非饱和土常规土工三轴仪（图 8.2.1（a）），或具有轴向拉应力加载控制的非饱和土工三轴仪（图 8.2.1（b））

【条文说明】：8.2.1 仪器为三轴拉伸试验仪，其压力控制系统和量测系统应满足给试样施加固结压力、轴向拉伸力，同时又能满足测定应力、应变、体变及孔隙压力的精度要求（见图 8.2.1）。



(a) 应变式

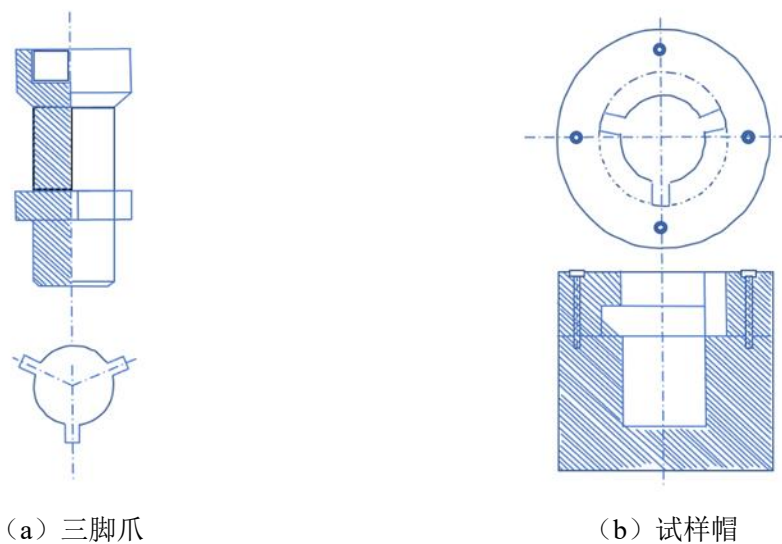
(b) 应力式

①反力框架 ②量力环 ③测力表 ④轴向位移计 ⑤钩拉装置 ⑥试样帽 ⑦双层压力室 ⑧试样膜 ⑨试样 ⑩试样底座 ⑪升降手轮 ⑫导向滑轮 ⑬拉应力牵引绳 ⑭重力砝码

图 8.2.1 非饱和土三轴拉伸仪结构示意图

8.2.2 本试验试样的连接形式应符合下列规定：

1 使用三轴仪进行拉伸试验时，试样帽与量力环连接可采用图 8.2.2-1 的钩拉装置。

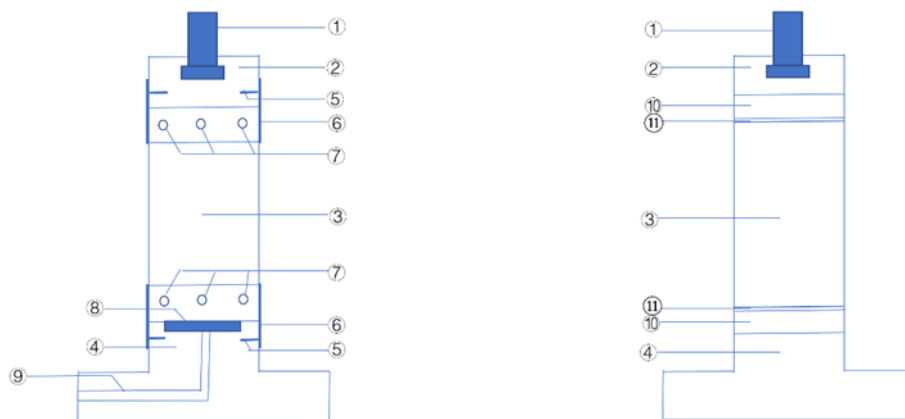


(a) 三脚爪

(b) 试样帽

图 8.2.2-1 钩拉装置

2 试样与试样帽和试验仪器底座连接宜采用夹具固定连接，也可采用粘合剂胶结固定，图 8.2.2-2。



(a) 试样帽套钢环插针固定连接

(b) 用粘结剂胶结固定

①钩拉装置 ②试样帽 ③试样 ④试样底座 ⑤铆钉 ⑥钢套环 ⑦插针孔 ⑧陶土板

⑨孔隙水压力量测通道 ⑩有机玻璃板 ⑪502 粘结胶

图 8.2.2-2 试样与试样帽及底座连接方式

3 试样与底座和试样帽的连接应按图 8.2.2-2 规定进行选用。当采用钢针连接时，钢针宜采用直径 0.8mm、长度 10mm、数量 4—8 根钢针，插入钢环小孔的钢针不应露出钢环，外露的针眼应用橡皮泥覆盖；当采用粘结剂直接粘结，粘结剂可选 502 胶。

【条文说明】：8.2.2 三轴拉伸仪试样帽与量力环（或测力计）之间需由钩拉装置进行连接，由钩拉杆上下分别插入量力环底部连接部和试样帽旋转一定角度完成钩拉连接。（见图 8.2.2-1）

8.2.3 试验前仪器设备的检定及校准应符合下列规定：

1 用量力环测量拉应力时，试验前应分别对量力环受拉力和受压力作用进行率定，求得不同的量力环系数，且量力环上的计量表应采用千分表；用传感器测量拉应力时，应率定拉应力传感器测量系数。

2 试验前应率定连接装置的变形，保证试样的初始拉变形正确。

8.3 操作步骤

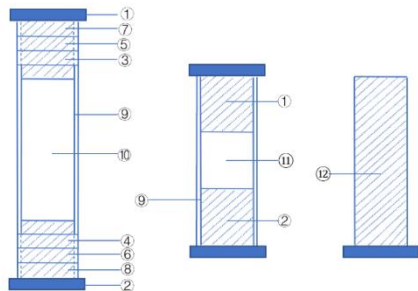
8.3.1 本试验试样制备应符合以下规定：

1 本试验试样为直径 39.1mm，高 80.0mm 的圆柱形试样。

2 原状土试样制样应符合《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）第 4.5 节相关规定直接由原状土样削制成型。

3 重塑土和固化土等扰动土试样应符合《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）第 4.4.4 条相关规定压制成型。试样的干密度依据试验要求进行控制，制样时，

含水率可按某一给定值进行配制，待水份均匀后，用新型三轴试验压样器一次性匀速压制而成。



①上压样头 ②下压样头 ③④⑤⑥⑦⑧开口可拆卸定位环 ⑨制样圆筒 ⑩土料 ⑪试样 ⑫推样头

图 8.3.1 新型三轴试样压样器示意图

4 试样含水率控制：制成的试样先放入养护缸内养护数天，然后再采用风干法或水膜转移法将试样的含水率调节到试验要求值，然后将其用保鲜膜包裹，放入密闭养护缸进行养护，待内部水分分布均匀后备用。

【条文说明】：8.3.1 三轴拉伸试样制备包括：试样尺寸、制样过程、含水率控制、养护要求等：

1 试样尺寸：拉伸试样为圆柱形，直径 39.1mm，高 100mm；或外径为 80mm。

2 制样过程：非饱和原状土试样直接由非饱和原状土样削制而成；非饱和重塑土试样由试验土样经风干、碾碎、过筛后的土料压制而成。非饱和重塑土试样的干密度依据试验要求进行控制，制样时，含水率可按某一给定值进行配制，待水份均匀后，用新型三轴试验压样器一次性匀速压制而成。使用图 8.3.1 新型三轴压样器制样可以上下同时压样，实现试样土料一次性填加，制样密度均匀，无需分层刨毛等优点，适合各种重塑土试样压制，特别是适合对于三轴拉伸试验试样的制样。

3 非饱和土试样含水率控制及养护要求：制成的试样先放入养护缸内养护数天，然后再采用风干法或水膜转移法将试样的含水率调节到试验要求值，然后将其用保鲜膜包裹，放入密闭养护缸进行养护，待内部水分分布均匀后备用。

8.3.2 试样安装应符合《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）第 19.5.1 条的规定。

【条文说明】：8.3.2 试样的固结压力分别按 50、100、150、200kPa 控制，周围压力通过周围压力稳压源进行控制，轴向通过量力环和三轴仪进行施加，并保证周围压力与轴向压力相等。固结稳定标准遵循本标准第 5 章非饱和土固结试验相关标准，固结过程中宜量测试样的轴向变形、体变。

8.3.3 给试样施加围压及进行固结应符合《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）第 19.5.2 条的规定。试样固结过程中宜量测试样的轴向变形、体变。

【条文说明】：8.3.3 拉应力的量测。用常规三轴仪的量力环进行测量，试验前分别对量力环在受拉力和受压力作用时需要进行率定，求得不同的量力环系数，同时为了提高量测精度可用千分表代替原用的百分表。条件允许亦可用拉压应力传感器直接量测。

8.3.4 本试验的试验步骤应符合以下规定：

- 1 打开数据采集与控制系统，将量测试样拉伸变形千分表读数或传感器示数置 0。
- 2 三轴应变式拉伸试验时，三轴拉伸仪的主机变速箱电机宜以尽量慢速的拉伸速率给试样施加拉应力，参照《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）第 19.6.2 条三轴固结排水剪试验，拉伸速率宜为 0.0003%/min-0.012%/min；拉伸过程中应测记试样的轴向变形、体变和轴向拉应力。
- 3 三轴应力式拉伸试验时，轴向拉力砝码应分级施加，在试样轴向形成拉应力前（偏压固结情况）加荷分级宜为 10N（相当于 8kPa 轴向拉应力），试样轴向转换成拉应力后加荷分级宜为 5N（相当于 4kPa 轴向拉应力），每级压力稳定时间不宜少于 1h；通过观察轴向拉伸变形情况，若变形量/砝码重量比值明显变大，估计试样即将达到断裂，加荷分级宜减小至 1N（相当于 0.8kPa 轴向拉应力）。拉伸过程中应测记试样的轴向变形、体变。
- 4 若测力计量表指针出现明显回跳表示试样出现断裂，可终止试验；若试验过程中测力计量表读数持续增大，则达到设定拉应变值后可终止试验。
- 5 试验结束后，应取下试样、对破坏后的试样形状及断面特征在记录表格中进行描述、仪器归位和关闭电源。
- 6 整理试验记录和资料。

8.4 计算、制图和记录

8.4.1 本试验资料整理宜符合以下规定：

- 1 试样的轴向应变 ε_a 应按式(8.4.1-1)计算：

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100 \quad (8.4.1-1)$$

式中： ε_a — 轴向应变（%）；

Δl — 试样轴向拉伸变形量 (mm) ;

l_0 — 试样有效拉伸高度 (mm) 。

2 试样的轴向拉应力 σ_3 应按式(8.4.1-2)计算:

$$\sigma_3 = \sigma_1 - \frac{1 + \varepsilon_a}{F} \left[\sigma_1 a + G - f_0 - W_0 - \frac{W_2}{2} \right] \quad (8.4.1-2)$$

式中: σ_3 — 轴向拉应力 (kPa) ;

σ_1 — 周围压力 (kPa) ;

ε_a — 轴向应变 (%) ;

a — 压力室活塞杆截面积 (mm²) ;

G — 施加的轴向荷载 (kN) , 即量力环荷载, 量力环受拉时为负;

F — 试样原始截面积 (mm²) ;

f_0 — 压力室活塞与轴套之间的摩阻力 (kN) ;

W_0 — 活塞加试样帽及钢环等的合重力 (kN) ;

W_2 — 试样重力 (kN) 。

3 试样的断裂强度 σ_t 应按式(8.4.1-3)计算:

$$\sigma_t = \sigma_1 - \frac{1 + \varepsilon_t}{F} (\sigma_1 a + G_t + f) \quad (8.4.1-3)$$

式中: σ_t — 试样的断裂强度 (kPa) ;

σ_1 — 周围压力 (kPa) ;

ε_t — 试样断裂时的轴向应变 (%) ;

a — 压力室活塞杆截面积 (mm²) ;

G_t — 试样断裂时施加的轴向荷载 (kN) ;

F — 试样原始截面积 (mm²) ;

f — 等于式(8.4.1-2)中 $f_0 + W_0 + \frac{W_2}{2}$ 。

【条文说明】: 8.4.1 试验资料整理:

1 三轴拉伸和三轴压缩的大、小主应力方向不同。三轴压缩时大主应力 σ_1 为轴向应力,而三轴拉伸时的大主应力 σ_1 为周围压力,三轴拉伸应力为小主应力 σ_3 ,即三轴压缩和三轴拉伸的大、小主应力方向发生转向。

2 三轴拉伸时,由于试样两端是通过大头针将试样与底座和试样帽连接和固定,因此真正参与拉伸试验的是上、下大头针之间的试样,故计算拉伸应变时以上、下大头针之间的试样高度作为试样有效拉伸高度 l_0 来计算拉伸应变 ε_a 。

3 拉伸试验时,当试样出现缩颈现象后,试样会很快发生破坏,因此在计算三轴拉伸应力时,不考虑试样缩颈后的面积变化,仍用试样的固结稳定后的断面面积进行计算。

4 三轴拉伸应力计算。在三轴拉伸试验过程中,试样轴向伸长,同时发生径向收缩。这种径向收缩只有在一些情况下才是沿试样高度均匀地收缩的,在多数情况下将发生局部的收缩现象。假定沿试样高度均匀收缩,则作用在试样上的轴向拉应力为:

$$\sigma_3 = \sigma_1 - \frac{1 + \varepsilon_a}{F} \left[\sigma_1 a + G - f_0 - W_0 - \frac{W_2}{2} \right] \quad (8.4.1-2)$$

式中: σ_3 — 轴向拉应力 (kPa);

σ_1 — 周围压力 (kPa);

ε_a — 轴向应变 (%);

a — 压力室活塞杆截面积 (mm^2);

G — 施加的轴向荷载 (kN), 即量力环荷载, 量力环受拉时为负;

F — 试样原始截面积 (mm^2);

f_0 — 压力室活塞摩阻力 (kN);

W_0 — 活塞加上盖合重 (kN);

W_2 — 试样重 (kN)。

可以认为 f_0 、 W_0 和 W_2 是不变则三者可以合并为一项, 使 $f = f_0 + W_0 + \frac{W_2}{2}$, 试样在断裂时的轴向拉应力 σ_3 就是该时刻的试样断裂强度, 以 σ_t 表之, 则:

$$\sigma_t = \sigma_1 - \frac{1 + \varepsilon_t}{F} (\sigma_1 a + G_t + f) \quad (8.4.1-3)$$

式中: σ_t — 试样的断裂强度 (kPa);

σ_1 — 周围压力 (kPa);

ε_t — 试样断裂时的轴向应变 (%);

a — 压力室活塞杆截面积 (mm^2);

G_t — 试样断裂时施加的轴向荷载 (kN);

F — 试样原始截面积 (mm^2);

f — 等于式 (8.4.1-2) 中 $f_0 + W_0 + \frac{W_2}{2}$ 。

8.4.2 本试验的试验曲线可按下列规定进行绘制:

1 本试验拉伸应力-应变关系曲线区分单轴拉伸和三轴拉伸两种情况, 可分别按图 8.4.2-1 和 8.4.2-2 绘制。

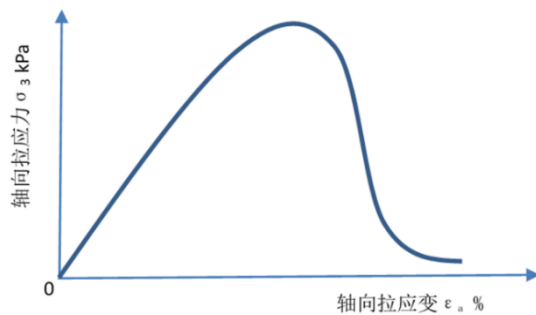


图 8.4.2-1 单轴拉伸拉应力与拉应变关系曲线示意图

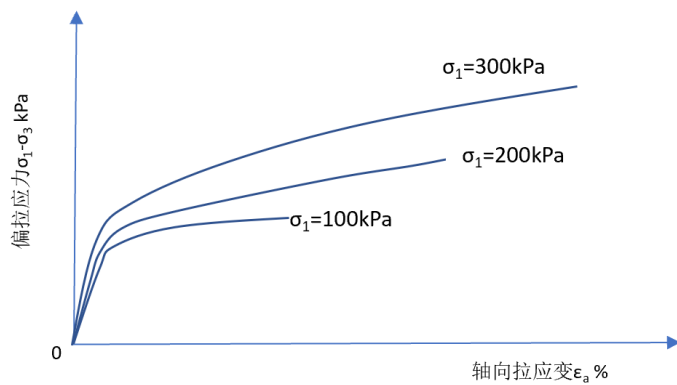


图 8.4.2-2 三轴拉伸应力-应变关系曲线

2 本试验周围压力与极限拉应变关系曲线可按图 8.4.2-3 绘制。

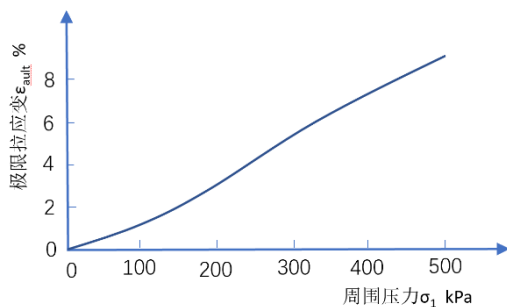


图 8.4.2-3 三轴拉伸周围压力 σ_1 与极限拉应变 ϵ_a 关系曲线

3 本试验给定干密度及周围压力下断裂强度与含水率关系曲线可按图 8.4.2-4 绘制。

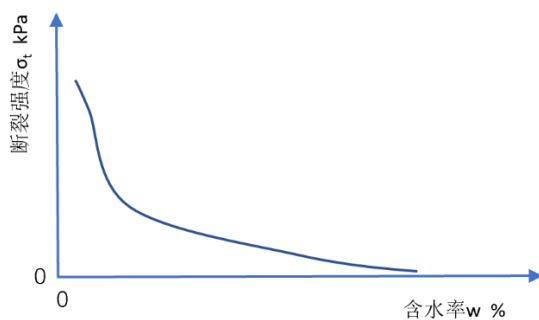


图 8.4.2-4 给定干密度及周围压力下断裂强度 σ_t 与含水率 w 关系曲线

4 非饱和土三轴拉伸摩尔库伦强度包线可按图 8.4.2-5 绘制。

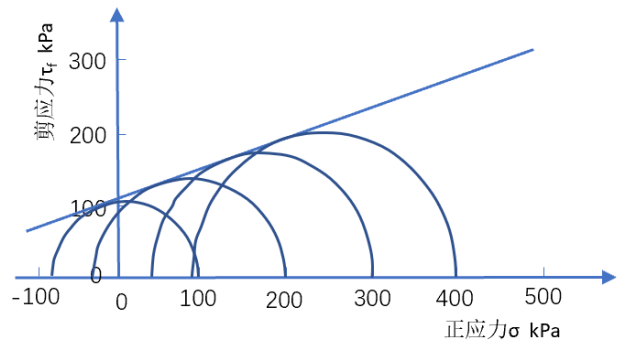


图 8.4.2-5 非饱和土三轴拉伸试验摩尔库伦强度包线

5 破坏周围压力与抗拉强度关系曲线以及几种破坏准则的比较曲线可按图 8.4.2-6 绘制。

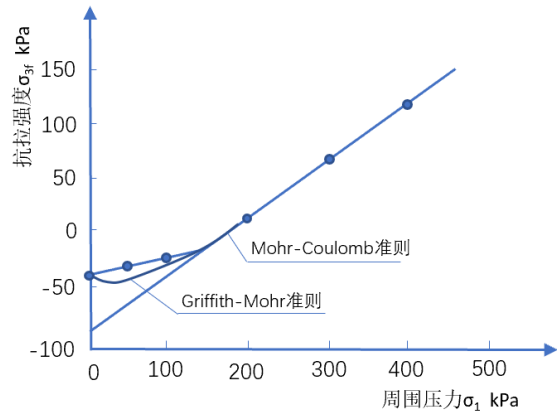


图 8.4.2-6 破坏周围压力 σ_1 与抗拉强度 σ_{3f} 关系曲线

8.4.3 本试验记录表格应符合本标准附录 E 表 8.1 的规定。

附录 E 表 8.1 非饱和土抗拉强度试验记录表

[illegible]

9 三轴试验

9.1 一般规定和仪器设备

9.1.1 本试验方法适用于细粒土和粒径小于 20mm 的粗粒土。

9.1.2 本试验包括 15 种类型，应根据工作要求分别采用。

1 控制基质吸力为常数的各向等压试验。通过本项试验可以获得非饱和土的初始屈服净平均应力、压缩指标、回弹指标、水量变化指标随吸力的变化规律及巴塞罗那加载-湿陷屈服轨迹的表达式等。

2 控制气压力为常数的不排水各向等压试验（测孔隙水压力）。通过本项试验可以获得非饱和土在常含水率条件下试样的屈服净平均应力、变形和孔隙水压力随净平均应力与基质吸力的变化规律等。

3 排气不排水各向等压试验（气压力保持为零、不测孔隙水压力）。通过本项试验可以获得非饱和土在常含水率条件下试样的屈服净平均应力、变形随净平均应力的变化规律等。

4 不排气不排水各向等压试验（不测孔隙水压力）。通过本项试验可以获得非饱和土在常含水率条件下试样的屈服总平均应力、变形随总平均应力的变化规律等。

5 控制基质吸力和净围压为常数的固结排水剪切试验。通过本项试验可以获得非饱和土在试验条件下的变形特性、强度特性、强度参数、水量变化特性和非线性本构模型参数等及其随基质吸力、净围压、偏应力的变化规律。

6 控制气压力和净围压为常数的固结不排水剪切试验（测孔隙水压力）。通过本项试验可以获得经过固结的非饱和土在不排水条件下的变形强度随净围压、偏应力和基质吸力的变化规律等。

7 控制净围压为常数的不固结排气不排水剪切试验（试验全过程气压力为零，不测孔隙水压力）。通过本项试验可以获得非饱和土在不排水条件下的变形强度随净围压和偏应力的变化规律等。

8 控制总围压为常数的不固结不排气不排水剪切试验（不测孔隙水压力）。通过本项试验可以获得非饱和土在常含水率条件下的变形强度随总应力（包括总围压、偏应力）的变化规律等。

9 控制净平均应力为常数而基质吸力逐级增大的广义持水特性试验。本试验即为

考虑净平均应力影响的广义持水特性试验。通过本项试验可以获得非饱和土的考虑净平均应力影响的广义持水特性曲线、初始屈服吸力及与吸力有关的非线性本构模型参数。

10 控制净平均应力增量和基质吸力增量之比为常数的排水各向等压试验。通过本项试验可以获得非饱和土在净平均应力-吸力平面内的屈服轨迹等。

11 控制基质吸力与净平均应力为常数而偏应力增大的排水剪切试验（应力控制）。通过本项试验可以获得非饱和土在试验条件下的变形、强度和水量变化特性及其随基质吸力、净平均应力和偏应力的变化规律。

12 控制净平均应力和偏应力为常数而基质吸力逐级增大的广义持水特性试验。本项试验即为同时考虑净平均应力和偏应力影响的广义持水特性试验。通过本项试验可以获得非饱和土的考虑净平均应力和偏应力影响的广义持水特性曲线、初始屈服吸力及与吸力有关的非线性本构模型参数。

13 在一定应力状态下基质吸力卸载到零的湿陷/湿化试验。通过本项试验可以获得非饱和土在三轴应力条件下的湿陷/湿化变形特性随初始基质吸力、净围压和偏应力的变化规律等。

14 在一定应力状态和初始含水率条件下不同浸湿程度的湿陷/湿化试验。通过本项试验可以获得非饱和土在一定初始含水率和三轴应力条件下的湿陷/湿化变形特性随初始含水率、总围压和偏应力的变化规律等。

15 控制基质吸力和轴向净正应力为常数而净围压减小的剪切试验。通过本项试验可以获得非饱和土在试验条件下的变形、强度和水量变化特性及其随基质吸力、轴向净正应力和偏应力的变化规律。

本章只介绍其中的 10 种试验的试验方法，即序号为 1、5、6、7、9、11、12、13、14、15 的试验。

【条文说明】：9.1.2 本试验包括 16 种类型，应根据工作要求分别采用。非饱和土三轴力学试验是揭示非饱和土力学特性的最基本最重要的试验，可以反映应力状态、应力路径（包括应力历史）和应力水平的影响，故试验种类较多，本标准仅介绍常用的 10 种试验的试验方法。

9.1.3 本试验对每个类型的试验必须制备 4 个以上性质相同的试样，在不同的基质吸力/含水率/净围压/净平均应力/偏应力下进行试验。净围压宜根据工程实际荷载确定。对于填土，最大一级净周围压力应与最大的实际荷载大致相等。

9.1.4 本试验所用的主要仪器设备，应符合《土工仪器的基本参数及通用技术条件》GB/T15406 的规定和下列规定：

1 控制基质吸力的非饱和土三轴仪，分为应变控制式（图 9.1.4-1）和应力控制式（图 9.1.4-2），由双层压力室、轴向加压设备与轴向变形量测设备、周围压力与体变量测设备、水压力施加设备与量测设备、气压力施加设备与量测设备组成。

2 压力室应为双层有机玻璃筒结构（图 9.1.4-3），分别称为内压力室和外压力室；压力室顶盖应有两个排气孔分别与内、外压力室相通；压力室底座上的试样座中必须有螺旋槽，螺旋槽上部应安装高进气值陶土板，高进气值陶土板应用高强度双管胶将其侧面与试样粘结牢固，宜配备进气值为 500kPa 和 1500kPa 两种规格的高进气值陶土板；压力室底座外侧应设 5 个三通阀门，分别与内压力室、外压力室、气压通道、螺旋槽中心和末端相连。

3 周围压力与体变量测设备：必须用两台型号相同的压力-体积控制器分别给内压力室和外压力室施加周围压力，给内压力室施加围压的压力-体积控制器同时量测试样体变。

4 水压力施加和控制设备：应用一台压力-体积控制器施加和控制水压力。

5 气压力施加-控制设备和量测设备：应用高精度气压阀施加-控制气压力，其分度值为 5kPa，气压源可由空气压缩机或配备减压装置的高压氮气瓶提供。

6 应力控制式三轴仪的轴向加载设备：包括压力源、加载活塞和荷载传感器（或量力环）。压力源宜采用下述 3 种方式之一，即空气压缩机及高精度气压阀（施加-控制气压力）、压力-体积控制器（提供液压）、步进电机及其驱动器和调压筒（提供液压）。在试验前必须对荷载传感器（或量力环）进行标定，并应通过标定建立气压阀控制的输出气压值与荷载传感器（或量力环）读数之间的关系曲线、压力-体积控制器输出液压值与荷载传感器（或量力环）读数之间的关系曲线。

7 附属设备：包括重塑土试样制备装置、切土器、原状土分样器、切土盘、承模筒和对开园模，应符合下图要求：

1) 重塑土试样制备装置：包括制样模具（本标准图 3.2.3-1）和加压装置（本标准图 3.2.3-2），应符合本标准 3.2.3 条的规定。

2) 切土器、原状土分样器、切土盘、承模筒和对开园模应符合《土工试验方法标准》（GB/T 50123 — 2019）的 19.2.1 条的第 2 款的规定。

8 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。

9 橡皮膜： 应具有弹性的乳胶膜，对直径 39.1 和 61.8mm 的试样，厚度以 0.1~0.2mm 为宜；对直径 101mm 的试样，厚度以 0.2~0.3mm 为宜。

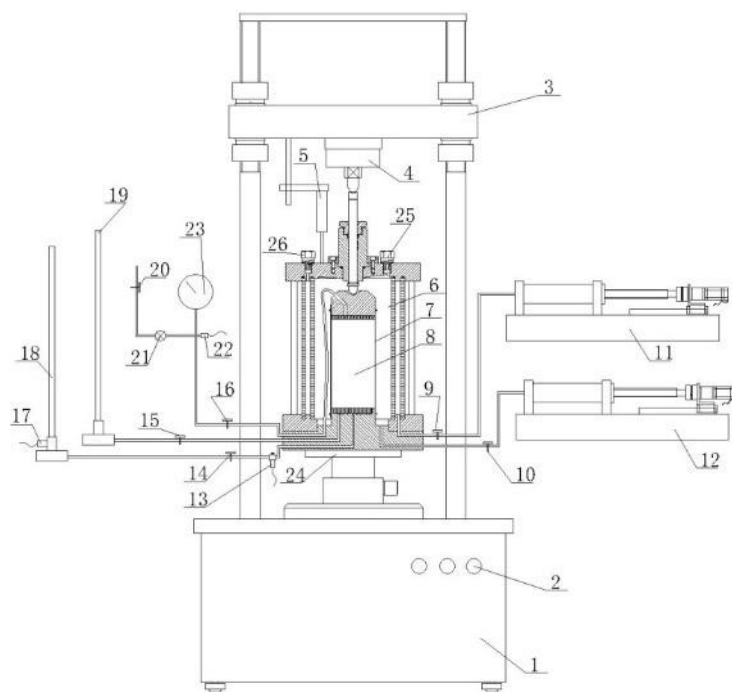


图 9.1.4-1 应变控制式非饱和土三轴仪示意图

- 1.电机 2.电源开关 3.试仪器横梁 4.荷载传感器（或量力环） 5.位移传感器
- 6.双层压力室 7.试样乳胶膜 8.试样 9.外压力室加压三通阀门
- 10.内压力室加压三通阀门 11.和外压力室配套的压力-体积控制器
- 12.和内压力室配套的压力-体积控制器 13.孔隙水压传感器 14.排水三通阀门
- 15.冲洗三通阀门 16.孔隙气压三通阀门 17.排水差压传感器 18.排水管 19.冲洗水管
- 20.气源阀门 21.孔隙气压调压阀 22.孔隙气压传感器
- 23.孔隙气压压力表 24.升降台 25.内压力室排气螺钉 26.外压力室排气螺钉

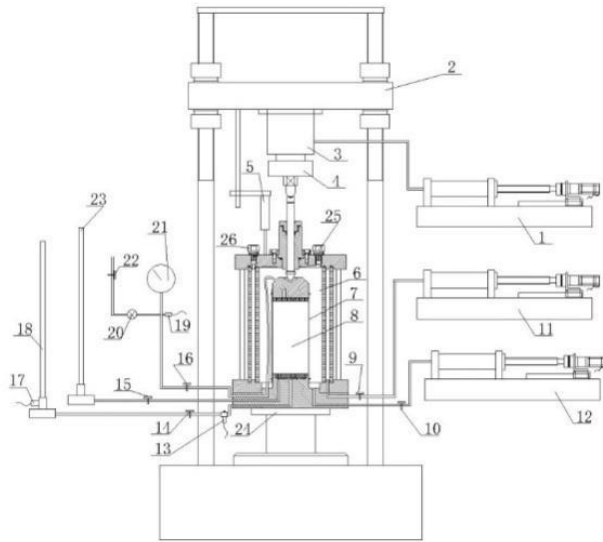


图 9.1.4-2 应力控制式非饱和土三轴仪示意图

1. 竖向加载压力-体积控制器 2. 试验机横梁 3. 竖向加载活塞 4. 荷载传感器
5. 位移传感器 6. 双层压力室 7. 试样乳胶膜 8. 试样 9. 外压力室加压三通阀门
10. 内压力室加压三通阀门 11. 和外压力室配套的压-体积控制器
12. 和内压力室配套的压-体积控制器 13. 孔隙水压传感器 14. 排水三通阀门
15. 冲洗三通阀门 16. 孔隙气压三通阀门 17. 排水差压传感器 18. 排水管 19. 冲洗水管
20. 气源阀门 21. 孔隙气压调压阀 22. 孔隙气压传感器 23. 孔隙气压压力表
24. 压力室座 25. 内压力室内排气螺钉 26. 外压力室排气螺钉

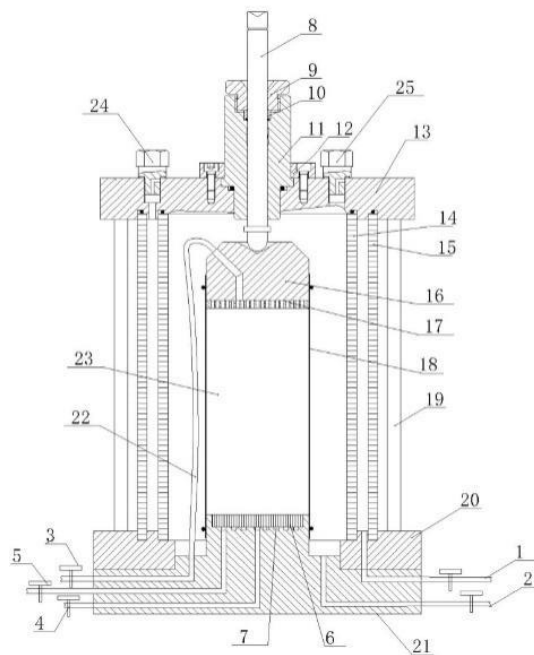


图 9.1.4-3 双层压力室构造示意图

- 1.外压力室三通阀阀门 2.内压力室三通阀门 3.孔隙气压三通阀门 4.排水三通阀门
- 5.冲洗三通阀门 6.高进气值陶土板 7.陶土板底部螺旋槽 8.活塞杆 9.密封螺母
- 10.压圈 11.活塞套 12.压紧法兰 13.顶盖 14.压力室内筒体 15.压力室外筒体
- 16.传压帽 17.多孔薄金属板 18.试样乳胶膜 19.拉杆 20.法兰
- 21.底座 22.细进气管 23.试样 24.外压力室排气阀 25.内压力室排气阀

10 多孔薄不锈钢板（图 9.1.4-4）：直径 39.1mm，厚度 3mm，均匀分布直径 1mm 的孔若干个。

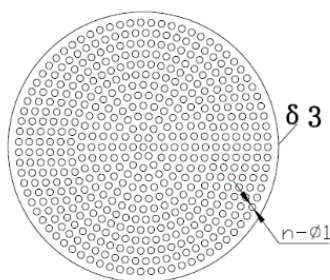


图 9.1.4-4 多孔薄不锈钢板

【条文说明】：9.1.4 本试验所用的主要仪器设备

1 控制基质吸力的非饱和土三轴仪，分为应变控制式（图 9.1.4-1）和应力控制式（图 9.1.4-2），前者能够控制基质吸力、净围压和轴向变形速率，后者能够控制基质吸力、净围压和偏应力，可以根据工作要求选用。

2 压力室应为双层有机玻璃筒结构，分别称为内压力室和外压力室。非饱和土的体变不等于排水量，且数量较小，通常通过测量压力室中水量变化推知试样体变。为了提高量测试样体变的精度，采用双层压力室结构；在试验过程中，给内、外压力室施加等值的液压，内压力室侧壁的两边受到的压力相等，从而内压力室不会产生胀缩变形，减小了量测试样体变的误差。

关于本条款中高进气值陶土板和螺旋槽的说明，可参见本标准条文说明的 5.2.1 条的第 2 款。

3 周围压力与体变量测设备：“必须用两台型号相同、技术参数相同的标准压力-体积控制器分别给内压力室和外压力室施加周围压力，给内压力室施加围压的压力-体积控制器同时量测试样体变。”标准压力-体积控制器的量测压力分度值为 1kPa，体变分度值为 1mm³。压力-体积控制器操作方便，性能稳定，量测精度高，已在国内土工试验中普及；加之，目前国内已能制造性能良好的各种规格的压力-体积控制器，为非饱和土三轴仪的改造升级提供了方便。为提升非饱和土试验的技术水平，推动非饱和土试验设备的国产化和科技进步，采用压力-体积控制器势在必行。

4 水压力施加和控制设备：应用一台压力-体积控制器施加和控制水压力。理由见本条第 3 款的说明。

5 气压源可由空气压缩机或配备减压装置的高压氮气瓶提供。用氮气瓶作为气压源无需动力设备，不消耗电能，没有噪音；若再配置气压减压装置，效果更佳，建议优先采用。

6 应力控制式三轴仪的轴向加载设备，有三种方式供选择使用。

10 多孔薄不锈钢板。有关说明见本标准条文说明的 5.2.1 条的第 2 款。

9.1.5 试验时的仪器，应符合下列规定：

1 压力-体积控制器的压力分度值应不大于 1kPa，体积分度值应不大于 1mm³；

2 根据试样强度的大小，选择不同量程的测力计或荷载传感器，应使最大轴向压力的准确度不低于 1%；

3 应力控制式三轴仪的轴向压力加荷装置（图 9.1.4-2）应能提供足够的压力，并必须使荷载在连续 48h 内保持稳定；

4 管路应畅通，各连接处应无漏水，压力室活塞杆在轴套内应能滑动；

5 橡皮膜在使用前应仔细检查，其方法是扎紧两端，向膜内充水，拧紧膜口，挤压橡皮膜，应无水射出，方可使用。

9.1.6 本试验试样尺寸应符合《土工试验方法标准》（GB/T 50123 — 2019）第 19.3.1 条第 1 款的要求。

9.1.7 应按《土工试验方法标准》（GB/T 50123 — 2019）第 19.3.1 条第 2 款规定制备本试验用原状土样。

9.1.8 宜用本标准的扰动土土样制备设备（图 3.2.3-1 和图 3.2.3-2）和本标准 3.2.5 条的规定制备本试验用的重塑土试样。

9.2 高进气值陶土板的饱和与检验及体变标定

9.2.1 非饱和土三轴仪的高进气值陶土板应采用下述方法饱和：

1 安装压力室罩，使压力室底座上的气压三通阀处于完全关闭状态（三向互不相通）；调节压力室底座上的排水三通阀，使压力室与排水量管（或压力-体积控制器）处于关闭状态，而使压力室与该三通阀的另一端头相通，在此端头连接一段内径 4mm、长度 5~10cm 的硬尼龙管，并使硬尼龙管末端（与大气相通）上倾。

2 用无气水流冲排陶土板下的螺旋槽中的空气，水从连接螺旋槽中心的阀门进

入，从上述第 1 款中的硬尼龙管中排出，持续 1min，关闭进水阀门。

3 宜用具有 1m 水头的无气纯净水源从下部给内、外压力室充水，待水充满后拧紧压力室顶盖上的两颗排气螺钉。

4 用压力-体积控制器同时同步给内、外压力室施加等值压力，最大压力量值宜为 300~500kPa，保持压力不变，直到排水硬尼龙管内无气泡而出现连续水流，再继续维持压力 2h，即认为陶土板已经饱和。

5 关闭排水阀，同时同步等值卸除内、外室压力；若要检验陶土板是否完全饱和，待压力完全卸除后，则应放掉压力室中全部水；若不检验高进气值陶土板是否漏气，则只需放掉内压力室中的大部分水，内压力室中保留水的水面应超过高进气值陶土板的顶面 1cm 左右以使陶土板处于饱和状态。

【条文说明】：9.2.1 非饱和土三轴仪的高进气值陶土板应采用下述方法饱和。根据后勤工程学院多年经验，用压力水饱和陶土板是既安全又有效的方法，操作步骤应按本条的第 1-5 款进行，并按本条第 6 款检验陶土板是否完全饱和、在其标称吸力下是否漏气或陶土板周边与试样底座连接处是否漏气。

9.2.2 宜用下述两种方法检验陶土板是否完全饱和、在其标称吸力下是否漏气或陶土板周边与试样底座连接处是否漏气：

1 在完全放掉压力室中的水后，给内、外压力室持续施加量值等于高进气值陶土板额定吸力的气压力，在 1~2h 内未见排水硬尼龙管中有气泡出现即可。

2 取掉压力室罩，用洗耳球给陶土板顶面洒满无气纯净水，并用洗耳球吸走陶土板下面的全部水；连接气压源与硬尼龙管，给陶土板下面持续施加量值等于陶土板额定吸力的气压力，在 30min~1h 内未见陶土板顶面或周边有气泡出现即可。

9.2.3 若陶土板顶面有气泡出现，则必须重新饱和并重新检验；若陶土板周边有气泡出现，则宜用 502 粘结剂处理，待粘结剂晾干后必须重新饱和陶土板并重新检验；如仍不能达到要求，则必须更换高进气值陶土板。

【条文说明】：9.2.3 在试验前必须标定内压力室及其与压力-体积控制器连结的管路在不同压力下的体积变化。在本标准条文说明 9.1.4 条第 2 款的说明中指出：“在试验过程中，给内、外压力室施加等值的液压，内压力室侧壁的两边受到的压力相等，从而内压力室不会产生胀缩变形，减小了量测试样体变的误差。”不过，压力-体积控制器与内压力室连接的硬尼龙水管在围压作用下会发生膨胀；另一方面，尽管在常规应力（0-1000kPa）作用下，认为水是不可压缩的，压力室侧壁的压缩变形是可以忽略

的，但在围压作用下二者毕竟是要产生微小体积变形的；第三，试样帽、导气细尼龙管、乳胶膜等在围压作用下都会产生微小的体积变形。为了尽可能减少以至消除这些误差，在试验前必须对内压力室及其与压力-体积控制器连结的管路在不同压力下的体积变化进行标定。标定用水必须是纯净无气水；标定时必须设法消除附着在压力室侧壁、试样帽、导气细尼龙管、乳胶膜、绑扎乳胶膜带、压力活塞头及活塞杆等器壁上的所有微小气泡。

以下对双层压力室及其有关管路的标定结果进行说明。陈正汉从做博士学位论文研究（1990 年）以来一直使用具有双层压力室的非饱和土三轴仪，他本人及其学术团队的许多成员都多次做过标定工作，部分标定的具体结果列于表 1~表 3。由表 1~表 3 可见，标定结果具有以下特点：一是体变量较小，数值比较稳定，可以通过标定消除其对试样体变的影响；二是标定结果与季节温度有关，故应每月标定一次；三是标定数值大小依赖于内压力室与体变管（或压力-体积控制器）之间的连接管路长度，故应在改变管路长度时进行体变标定。

表 1 陈正汉和周海清对体变 6 次标定情况统计表

标定人	陈正汉				周海清	
标定次数	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 1 次	第 2 次
标定年月	1994 年 3 月—4 月			1995 年 2 月	1995 年 10 月	
具体时间 及 相关情况	3 月 9 日 加载过程 8:35-20:30 历时： ≈12h	3 月 10 日 加载过程 08:55-15:20 历时： 6.5h 卸载过程 15:20-19:30 历时： ≥4h	4 月 4 日 加载过程 9:00-16:50 历时：≈ 8h	2 月 3 日 加载过程 3:45-23:00 历时： ≥19h 卸载过程 3 日 23:00-4 日 12:40 历时： ≈14h	10 月 13 日 加载过程 9:00-16:00 历时：7h 卸载过程 16:00-19:30 历时：3.5h	10 月 14 日 加载过程 9:15-16:00 历时：≈ 7h 卸载直到 15 日 8:00 历时:16h
液压 (kPa)	体变读数 (1%mm)			体变读数 (1%mm)	体变读数 (1%mm)	
0	93	29.5	70	95	2.9	13.3
25	-	-	-	-	11	21

50	109.5	42	82	104	19.5	30
75	-	-	-	-	24	36.2
100	131.5	64.5	102.5	117	34.1	42.5
150	148	81	122.5	137	45.5	53.5
200	161	91.5	135.5	150	54.3	61.5
250	172	103	146.5	163	63.1	70
300	181	113.5	157	173	71	77
350	191	124	167	183	79	84.5
400	200	132.5	177	193	87	92
450	209.5	144	186	202	94.7	99.2
500	219	155	196.5	210,5	103.1	106.6
最终读数 与 起始读数 之差	126	125.5	126.5	115.5	100.2	93.3
最终 体变量 (cm³)	0.794	0.791	0.797	0.728	0.631	0.588
	标定三次，在 500kPa 压力作用下的平均体变量 0.794 cm³				标定两次，在 500kPa 压力作用下的平均体变量 0.61 cm³	
说明	① 用特制体变管量测体变，体变读数每 1%mm = 体变百分表 1 格 = 0.0063cm³； ② 卸载过程的数据没有列出。					

表 2 孙树国和黄海对体变 5 次标定情况统计表

标定人	孙树国			黄 海	
标定次数	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 1 次	第 2 次
标定年月	1998 年 2-3 月		1998 年 5 月	1998 年 10 月-11 月	
具体时间 及 相关情况	2 月 27 日 加载过程 9:20-13:35 历时: ≥4h 卸载过程 13:35-17:20 历时≈ 4h	2 月 28 日 加载过程 13:40-18:40 历时: 5h 维持 500kPa 共 14h, 百分表只 变动了 1 格 卸载过程	5 月 21 日 加载过程 12:35-19:10 历时 6.5h	10 月 8-9 日 加载过程 8 日 19:05 —9 日 2:52 历时≈8h	11 月 9 日 —10 日 加载过程 9 日 16:40 —10 日 1:00 历时≈8.5h

		3 月 1 日 8:30—12:40 历时≥4h			
液压（kPa）	体变读数（1%mm）			体变读数（1%mm）	
0	88	19	64	95	30
25	104	30	65	105	45
50	121	50	68.8	114	54
75	142	66	76.8	134	65
100	159	83	93	152	76
125	-	-	113	164	-
150	171	97	120	177	96
200	185	108	146	195	112
250	202	125		212	129
300	219	140	186	228	142
350	235	154	-	241	153
400	248	165	215	255	164
450	262	176	-	267	173
500	271	187	240	281	183
最终读数与 起始读数 之差	195	183	176	186	153
最终 体变量 （cm ³ ）	1.229	1.153	1.109	1.172	0.964
	标定两次，在 500kPa 压力作用 下的平均体变量 1.191 cm ³				
说明	① 用特制体变管量测体变，体变读数每 1%mm = 体变百分表 1 格 = 0.0063cm ³ ； ② 卸载过程的数据没有列出。 ③ 标定结果与季节温度有关，故应每月标定一次，并控制实验室温度不超过 22℃。				

表 3 张龙对内压力室及其管道体变和螺旋槽及其管道的 2 次标定情况统计表

标定人	张龙	张龙
标定部件	内压力室及其 与压力-体积控制器连接的管道	螺旋槽及其 与压力-体积控制器连接的管道
标定年月	2016 年	2016 年

标定次数	第 1 次	第 2 次	平均值	第 1 次	第 2 次	平均值
具体时间 及历时	1 月 31 日 0:42-3:12 历时: 2.5h	2 月 1 日 8:02-10:34 历时: 2.5h				
液压 (kPa)	读数 (mm ³)			体变读数 (mm ³)		
0	0	0	0	18	20	19.0
50	197	192	194.5	32	36	34.0
75	267	260	263.5	53	50	51.5
100	324	315	319.5	67	64	65.5
125	371	369	370.0	81	79	80.0
150	413	413	413.0			
175	453	455	454.0			
200	492	493	492.5			
225	528	532	530.0			
250	563	566	564.5			
275	599	603	601.0			
300	632	638	635.0			
325	668	674	671.0			
350	703	709	706.0			
375	738	746	742.0			
400	772	780	776.0			
425	816	817	816.5			
450	851	857	854.0			
475	891	893	892.0			
500	923	934	928.5			
说明	① 用标准压力-体积控制器给内压力室施加围压, 分度值为体积 1mm ³ ; 压力 1kPa; ② 用标准压力-体积控制器给螺旋槽施加孔隙水压力, 分度值同上。					

9.2.4 在试验前必须标定内压力室及其与压力-体积控制器连结的管路在不同压力下的体积变化, 应按下述方法进行:

1 标定前必须先饱和陶土板, 其方法见本标准第 9.2.1 条进行, 陶土板饱和后应关闭螺旋槽进口和出口的阀门, 并应使保留在内压力室中的水面超过高进气值陶土板

的顶面 1cm 左右。

2 将压力室底座上的气压三通阀的气压源方向关闭，使另一方向与压力室相通，接通该三通阀与具有 1m 水头的无气纯净水源，抬高试样帽（其上连有给试样施加气压的细尼龙管，简称为导气细尼龙管），让水流过导气细尼龙管，待出现连续水流后关闭三通阀，切断水源。

3 宜用洗耳球给试样帽外侧、导气尼龙管外侧、压力室底座上面、两个 O 型橡胶圈和压力室罩内壁喷水，以尽可能减少后续压力室充水时产生或滞留气泡。

4 把压力室盖倒置，宜用医用注射器（安装有针头）给压力室活塞下端的机械加工孔中注满水，挤出该孔中的空气。

5 把用以包裹试样的乳胶膜的内、外面和 6 条乳胶膜绑扎带用水洗净，放入压力室底座上。

6 安装压力室罩，使压力活塞的下端紧贴压力室盖的下面。

7 宜用具有 1m 水头的无气纯净水源从下部给内、外压力室注水，注水速率不宜太快，待水注满后拧紧排气孔螺钉。

8 检查内压力室中的所有物品表面和通水管道中是否有气泡存在，如有气泡，务必除净，或者把水放空重新注满。

9 将内、外压力室与各自的压力-体积控制器连通，应给内、外压力室同时同步施加 5kPa 的压力，待压力稳定后记录相应的体变值作为初始值。

10 确定需要施加的各级室压力，室压力等级宜为 10、25、50、75、100、125、150、175、200、250、300、350、400、450、500、600、800、1000kPa。

11 按照第 10 款的室压力等级，依次从低到高进行加载，必须同时同步施加内、外室压力，待压力和变形稳定后记录相应的体变值。

12 按照第 9 款的室压力等级，依次从高到低进行卸荷，待压力和变形稳定后记录相应的体变值。

13 应按上述方法加卸载两次，取各级压力下内压力室及其水压力管道的体变平均值作为标定值。

9.2.5 绘制液压-平均体变曲线，作为标定曲线（图 9.2.5）。

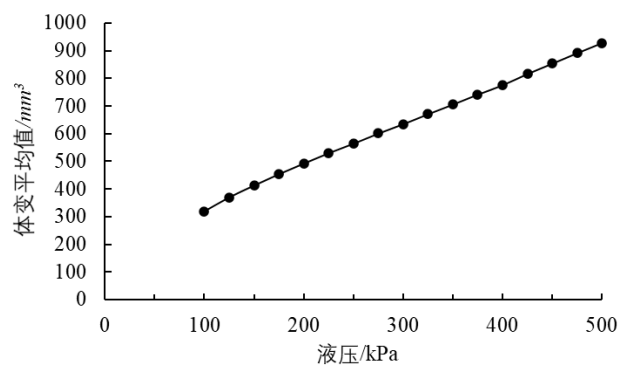


图 9.2.5 液压-平均体变曲线

9.2.6 高进气值陶土板的饱和与检验试验、体变标定试验的记录格式应分别符合本标准附录 E 表 9.1（一）和 9.1（二）的规定。

附录 E 表 9.1（一） 非饱和土三轴仪高进气值陶土板的饱和及检验试验记录表

任务单号		土样来源及种类	
试验者		协助者	
试验日期		仪器名称及编号	
高进气值陶土板 标称进气值（kPa）		试验用水类别	纯净水
试验阶段	饱和和高进气值陶土板	饱和操作遍数	1
开始时间		检查水、气阀门的 开关状态是否正确？	
施加液压力值（kPa）		开始施加液压力时间	
排水管口 开始出水的时间		排水管开始出现 连续水流的时间	
连续水流持续历时 （h）		卸除液压力时间	
压力室放水后预留水 面距陶土板顶面高度 （cm）		试验结束时间	
结论（陶土板是否已完全饱和）			
试验阶段	饱和和高进气值陶土板	饱和操作遍数	2
开始时间		检查水、气阀门的 开关状态是否正确？	
施加液压力值（kPa）		开始施加液压力时间	
排水管口 开始出水的时间		排水管开始出现 连续水流的时间	
连续水流持续历时 （h）		卸除液压力时间	
压力室放水后预留水 面距陶土板顶面高度 （cm）		试验结束时间	
结论（陶土板是否已完全饱和）			
试验阶段	饱和后检验	检验方法 1	从压力室施加气压力
检验开始时间		备注	
陶土板表面是否有水	无	施加气压值（kPa）	
开始施加气压 时间		排水管内是否有 气泡？	
气压力持续历时 （h）		试验结束时间	
结论（陶土板是否已完全饱和）			
试验阶段	饱和后检验	检验方法 2	从螺旋槽施加气压力

检验开始时间		螺旋槽中水是否吸走？	是
陶土板表面是否有水	有	施加气压值（kPa）	
开始施加气压时间		陶土板表面及周边是否冒泡？	
气压力持续历时（h）		试验结束时间	
结论（陶土板是否已完全饱和）			

附录 E 表 9.1 (二) 内压力室及其与压力-体积控制器连接管道体变标试验记录表

任务单号		土样来源及种类			
标定者		协助者			
标定部件	内压力室及其与压力-体积控制器 连接的管道		试验用水类别		纯净水
压力-体积控制器(PVC)分辨率		压力: 1kPa, 体积: 1mm ³			
标定年月		检查与试样帽连接的导气管是否充满水?			
检查水、气阀门的开关状态是否正确?		检查内压力室各处是否有微小气泡?			
液压 (kPa)	加压后历时 (min)	压力-体积控制器体变读 (mm ³)			体变平均值 (mm ³)
		第 1 次	第 2 次	第 3 次	
0					
25	5				
	10				
					
50	5				
	10				
					
75	5				
	10				
					
100	5				
	10				
					
125	5				
	10				
					
150	5				
	10				
					
.....					
450	5				
	10				
					
475	5				
	10				
					
500	5				
	10				
					

9.3 控制基质吸力为常数的排水各向等压试验

9.3.1 本试验所有的主要仪器设备是应变控制式非饱和土三轴仪（图 9.1.4-1），应与本标准第 9.1.4 条相同。

9.3.2 进行本试验前必须先饱和高进气值陶土板，应按本标准 9.2.1 条进行。

9.3.3 进行本试验前必须在饱和陶土板后标定内压力室及其与压力-体积控制器连结的管路在不同压力下的体积变化，应按本标准 9.2.4 条进行。

9.3.4 试样的安装，应按下列步骤进行：

1 应采用无气纯净水饱和高进气值陶土板，饱和后关闭螺旋槽进口和出口的阀门，并暂时保留陶土板顶部的水分。

2 打开压力室底座上的气压阀门，宜用 300kPa 的压力空气冲出气体管路(包括连接试样帽的通气细尼龙管)中的水分。

3 借助承模筒，在试样顶上放置多孔不锈钢薄板，给试样套上乳胶膜。

4 用湿抹布擦去陶土板上面的余水；把套有乳胶膜的试样放在试样底座上；把承模筒套在试样外，用 3 条橡皮筋（每条折成两圈）把乳胶膜的下端绑扎在试样底座上；放置试样帽，用手指稳住试样帽，用湿抹布从下往上理顺橡皮膜，挤出橡皮膜与试样之间的空气，使二者贴紧；用 3 条橡皮筋（每条折成两圈）把乳胶膜的上端紧扎在试样帽上。

5 宜用洗耳球给橡皮膜外侧、橡皮筋之间、试样帽顶上、通气尼龙管外侧、压力室底座上面、两个 O 型橡胶圈和压力室罩内壁喷水，以尽可能减少后续压力室充水时产生或滞留气泡。

6 把压力室罩倒置，宜用医用注射器（安装有针头）给压力室活塞下端的机械加工孔中注满水，挤出该孔中的空气。

7 安装压力室罩，使压力活塞的下端紧贴压力室盖的下面。

8 应从下部给内、外压力室注水，注水速率不宜太快，待水注满后拧紧排气孔螺钉；应仔细检查内压力室中各个部位和通水管道中是否有气泡存在，若有，务必设法除净，或者把水放空重新注满。

9 将螺旋槽出口的三通阀置于排水状态，调整排水管的高度，使管中液面与试样中心平齐。

10 同时给内、外压力室施加 5kPa 的压力，使橡皮膜、多孔薄金属板、试样帽与试样之间紧密接触，测记体积变化和排水量作为各自的初始值。

9.3.5 排水各向等压试验，应按下列步骤进行：

1 给试样施加预定的气压力（在数值上等于施加的基质吸力，其值应不低于土样的初始基质吸力），不宜一步到位，应分多步、按每分钟 25kPa 的速率施加气压力到预定值，必须同时同步等值提高内、外压力室的压力，并使内、外室压力始终比气压力高 5kPa。

2 在施加基质吸力后，宜按下列时间顺序测记体变和排水量。时间为 5min、10min、30min、1h、2h、4h、6h、8h、10h，至稳定为止。稳定标准是：在两小时内，体变不超过 6mm^3 ，排水量不超过 12mm^3 ，且历时不宜少于 72h。在稳定过程中，每隔 6~8h 冲洗高进气值陶土板和螺旋槽一次。

3 确定需要给试样施加的各级净各向等值压力（称为净平均应力，用 p 表示，等于施加的室压力与气压力之差，亦称为净围压），净各向等值压力等级宜为 10、20、30、50、75、100、125、150、175、200、250、300、350、400、450、500、600、800、1000、1250、1500kPa。每级施加的相应的室压力（称为总平均应力，用 p_t 表示）等于每级净平均应力 p 与气压力（用 u_a 表示）之和，即， $p_t = p + u_a$ 。

4 必须同时同步等值地对内、外压力室施加总平均应力，不宜一步到位，应分多步、按每分钟 25kPa 的速率施加，待达到预定值后，宜按下列时间顺序测记体变和排水量。时间为 5min、10min、30min、1h、2h、4h、6h、8h、10h，至稳定为止。稳定标准是：在 2h 内，体变不超过 6mm^3 ，且排水量不超过 12mm^3 ，且历时不宜少于 48h。在稳定过程中，每隔 6~8h 冲洗高进气值陶土板和螺旋槽一次。

5 如需从某一压力下进行卸载，必须同时同步等值减少内、外室压力，不宜一步卸到位，而应按 -25kPa 的增量，逐步卸载，测记每级卸载的体变值和排水量，直到二者达到稳定为止。稳定标准与本条第 2 款相同。在稳定过程中，每隔 6~8h 冲洗高进气值陶土板和螺旋槽一次。

6 试验结束，应先同时同步等值卸除内、外压力室的净围压后，并使剩余的围压高于气压 5kPa，再同时同步等值卸除气压力和剩余围压；取掉两个排气孔螺钉，放掉压力室中的水，卸除压力室，拆卸试样，量测试样含水率。

【条文说明】：9.3.5 排水各向等压试验，应按下列步骤进行：

1 “给试样施加预定的气压力（在数值上等于施加的基质吸力，其值应不低于土样的初始基质吸力），不宜一步到位，应分多步、按每分钟 25kPa 的速率施加气压力到预定值，必须同时同步等值提高内、外压力室的压力，并使内、外室压力始终比气

压力高 5kPa。”这些规定的目的是在给内、外压力室加载时尽量保证“同时同步等值”，避免因不同步引起压力室变形给量测体变造成误差。

2 施加基质吸力后的稳定标准是：在 2h 时内，体变不超过 6mm^3 ，排水量不超过 12mm^3 ，且历时不宜少于 72h。确定此标准的有关依据见本标准条文说明的 5.3.2 条第 4 款，进一步的依据补充说明如下。

后勤工程学院做了大量控制吸力为常数的排水各向等压试验，表 4 是陈正汉在 1995 年对山西汾阳机场重塑 Q_3 黄土所做试验的情况。从表 4 可知，采用上述稳定标准时，3 个试样在施加吸力后变形和排水的达到稳定的历时都在 72h 以上，平均为 73.67h。孙树国和黄海在 1998 年 10 月 12 日 10:50-11 月 4 日 17:00 做了一个净围压等于 5kPa、吸力逐级增大的三轴持水特性试验，土样是南阳重塑膨胀土，为饱和试样，起始干密度 1.5g/cm^3 ，共施加 6 级吸力，各级吸力下的稳定时间列于表 5；以每级吸力施加后排水和变形稳定的历时为准，其平均历时为 81h，前 5 级平均稳定历时为 75h。根据这些试验结果，本标准要求施加基质吸力后的稳定历时“不宜少于 72h”。

4 施加各向等压引起排水固结的稳定标准是：在两小时内，体变不超过 6mm^3 ，排水量不超过 12mm^3 ，且历时不宜少于 48h。从表 4 可知，3 个重塑黄土试样施加各向等压共 23 次，平均每次加载的稳定历时是 39h。作为试验标准，应当从严要求，故本条规定“历时不宜少于 48h”。

表 4 重塑黄土的控制吸力为常数的各向等压固结排水试验在吸力和各级压力下稳定历时统计表

试验名称		控制吸力为常数的各向等压固结排水试验			
试验者	陈正汉	土样来源及种类		山西汾阳机场重塑 Q ₃ 黄土	
试样初始指标		干密度 $\rho_d=1.7\text{g/cm}^3$ ， 含水率 $w_0=17.15\%$			
稳定标准		在两小时内，体变不超过 6mm ³ ，排水量不超过 12mm ³			
试样编号					
1		2		3	
1995 年 3 月 24 日~4 月 10 日 共历时 17 天 408 小时		1995 年 4 月 10 日~4 月 29 日， 共历时 18 天 451 小时 除去卸载-再加载 50h = 401h		1995-4-29~5 月 13 日 共历时 14 天 332 小时	
控制吸力 $u_a-u_w=50\text{kPa}$		控制吸力 $u_a-u_w=100\text{kPa}$		控制吸力 $u_a-u_w=200\text{kPa}$	
总围压（kPa）	历时（h）	总围压	历时（h）	总围压	历时（h）

		(kPa)		(kPa)	
50=吸力	稳定历时 72h	-	-	-	-
100	48	100=吸力	稳定历时 75h	-	-
150	45	150	39	-	-
200	36	200	44	200 = 吸力	稳定历时 74h
250	37	250	24	250	36
300	35	300	32	300	38
350	36	275 卸载	29	350	48
400	29	300 再加载	21	400	44
450	32	350	37	450	52
500	38	400	35	500	40
		450	63		
		500	52		
总体变	3.67cm ³	总体变	2.54cm ³	总体变	3.16cm ³
总排水	3.28cm ³	总排水	4.29cm ³	总排水	5.98cm ³
压力级数	9	压力级数	8	压力级数	6
各向等压 平均历时	37.33h	各向等压 平均历时	37.8	各向等压平均 历时	43h
小结：① 3 个试验仅施加吸力的平均稳定时间 = (72h + 75h + 74h) / 3 = 73.67h; ② 3 个试样共各向等压加载 23 次，平均稳定历时为 (37.33h×9 次 + 37.8h×8 次 + 43h×6 次)÷23 次 = 39h					

表 5 重塑膨胀土的三轴持水特性试验在各级吸力下稳定历时统计表

试验名称		三轴持水特性试验	
试验者	孙树国、黄海	土样来源及种类	南阳陶岔重塑膨胀土
试验时间	1998 年 10 月 12 日 10:50 — 11 月 4 日 17:00		
试样初始指标	饱和试样，干密度 1.5 g/cm ³		
试验方法	净围压等于 5kPa、吸力逐级增大，排水		
试验数量	1		
稳定标准	在两小时内，体变不超过 6mm ³ ，排水量不超过 12mm ³		
吸力	试验持续时间	变形-排水达到稳定历时 (h)	
50	10 月 12 日 10:50 ~ 16 日 9:00 共 94h	78	
100	10 月 16 日 9:00 ~ 19 日 9:00 共 72h	72	
150	19 日 9:00 ~ 22 日 10:40 共 74h	73	
200	22 日 10:40 ~ 25 日 11:00 共 72h	72	
300	25 日 11:00 ~ 28 日 19:00	80	
400	10 月 28 日 19:00 ~ 11 月 02 日 9:00 共 110h	110	
卸载 375	11 月 02 日 9:00 ~ 3 日 20:00		
卸载 350	11 月 3 日 20:00 ~ 4 日 17:00		

小结：① 对干密度为 1.5 g/cm^3 的重塑膨胀土试样，共施加 6 级吸力，以每级吸力施加后排水和变形稳定的历时为准，其平均历时为 81h；前 5 级平均稳定历时为 75h。

② 表 4 所列 3 个重塑黄土试样（初始干密度 1.7 g/cm^3 ）在施加吸力后的稳定历时的平均值是 73.67h，可见膨胀土（粘土）在施加吸力后的稳定历时比黄土（粉土）略长一些。

9.3.6 重新饱和和高进气值陶土板，安装下一个试样，改变基质吸力，按照本标准 9.3.5 条第 1~6 款的方法步骤进行试验，直到完成全部试验。

9.3.7 应根据试验结束后量测的试样含水率，对试验过程中的排水量按历时进行校正；同时应把试验过程中量测的体变按本标准 9.2.4 条的标定曲线进行校正。

9.3.8 以试样的初始体积和初始孔隙比为基准，在基质吸力作用下试样变形稳定后的体应变、孔隙比和比体积，应分别按下列各式计算：

$$\varepsilon_v^s = \frac{\Delta V^s}{V_0} \times 100\% \quad (9.3.8-1)$$

$$e_s = e_0 - (1 + e_0) \varepsilon_v^s \quad (9.3.8-2)$$

$$v_s = 1 + e_s \quad (9.3.8-3)$$

式中： ε_v^s — 在基质吸力作用下试样变形稳定后的体应变（%）；

ΔV^s — 在基质吸力作用下试样变形稳定后的体积变化量（应按图 9.2.4 的标定曲线进行校正）（ cm^3 ）；

V_0 — 试样的初始体积（ cm^3 ）；

e_s — 在基质吸力作用下试样变形稳定后的孔隙比；

e_0 — 试样的初始孔隙比；

v_s — 在基质吸力作用下试样变形稳定后的比体积。

9.3.9 以试样的初始体积和初始质量含水率为基准，在基质吸力作用下试样排水稳定后的液相体应变和质量含水率，应分别按以下两式计算：

$$\varepsilon_w^s = \frac{\Delta V_w^s}{V_0} \times 100\% \quad (9.3.9-1)$$

$$w_s = w_0 - \frac{1 + e_0}{G_s} \varepsilon_w^s \quad (9.3.9-2)$$

式中： ε_w^s — 在基质吸力作用下试样排水稳定后的液相体应变（%），即试样体积含水率的改变量；

ΔV_w^s — 在基质吸力作用下试样排水稳定后的排水体积（ cm^3 ）；

w_s — 在基质吸力作用下试样排水稳定后的质量含水率（%）；

w_0 — 试样的初始质量含水率（%）；

G_s — 土颗粒的相对密度。

9.3.10 以基质吸力作用下试样体变稳定后的体积和孔隙比为基准，试样在第 i 级净平均应力作用下的体应变、孔隙比和比体积，应按下列各式计算：

$$\varepsilon_{v,i} = \frac{\sum_{j=1}^i \Delta V_j}{V^s} \times 100\% \quad (9.3.10-1)$$

$$e_i = e_s - (1 + e_s) \varepsilon_{v,i} \quad (9.3.10-2)$$

$$v_i = 1 + e_i \quad (9.3.10-3)$$

$$V^s = V_0 - \Delta V^s \quad (9.3.10-4)$$

式中： $\varepsilon_{v,i}$ — 在第 i 级净平均应力作用下试样变形稳定后的体应变；

$\sum_{j=1}^i \Delta V_j$ — 在第 i 级净平均应力作用下试样变形稳定后的体积变化量（不计施加基质吸力引起的体积变化量，应按图 9.2.4 的标定曲线进行校正）（ cm^3 ）；

V^s — 在基质吸力作用下试样变形稳定后的体积（ cm^3 ）；

e_i — 在第 i 级净平均应力作用下试样变形稳定后的孔隙比；

v_i — 在第 i 级净平均应力作用下试样变形稳定后的比体积。

9.3.11 以基质吸力作用下试样体变稳定后的体积和质量含水率为基准，试样在第 i 级净平均应力作用下排水稳定后的液相体应变和质量含水率，应按下列各式计算：

$$\varepsilon_{w,i} = \frac{\sum_{j=1}^i \Delta V_{w,j}}{V^s} \times 100\% \quad (9.3.11-1)$$

$$w_i = w_s - \frac{1 + e_s}{G_s} \varepsilon_{w,i} \quad (9.3.11-2)$$

式中： $\varepsilon_{w,i}$ — 试样在第 i 级净平均应力作用下排水稳定后的液相体应变（%），即试样体积含水率的改变量；

$\sum_{j=1}^i \Delta V_{w,j}$ — 试样在第 i 级净平均应力作用下排水稳定后的总排水量（不计施加

基质吸力引起的排水量）（ cm^3 ）；

w_i — 试样在第 i 级净平均应力作用下排水稳定后的质量含水率 (%)。

9.3.12 分别以 ε_v 和 v 为纵坐标，以净平均应力的自然对数 ($\ln p$) 为横坐标，绘制各级净平均应力下 (包括加载过程和卸载过程) 的 $\varepsilon_v - \ln p$ 关系曲线 (图 9.3.12-1) 和 $v - \ln p$ 关系曲线 (图 9.3.12-2)。其中， $v - \ln p$ 关系曲线在加卸载过程中近似为直线 (图 9.3.12-2)，宜按下两式描述：

$$v = N(s) - \lambda(s) \ln p \quad (9.3.12-1)$$

$$v = v_k(s) - k \ln p \quad (9.3.12-2)$$

式中： $N(s)$ — 对应于某一基质吸力，图 9.3.12-2 中描述加载过程直线的截距；

$\lambda(s)$ — 对应于某一基质吸力，图 9.3.12-2 中描述加载过程直线的斜率；

$v_k(s)$ — 对应于某一基质吸力，图 9.3.12-2 中描述卸载过程直线的截距；

k — 对应于某一基质吸力，图 9.3.12-2 中描述卸载过程直线的斜率。

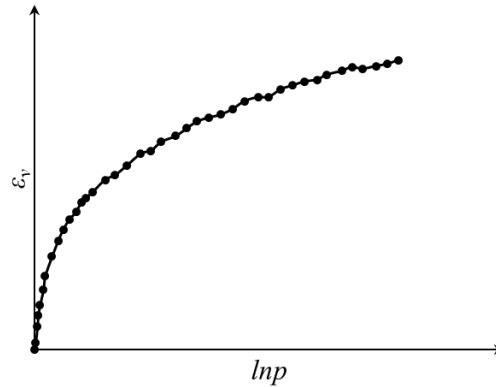


图 9.3.12-1 加卸载过程的 $\varepsilon_v \sim \ln p$ 关系曲线

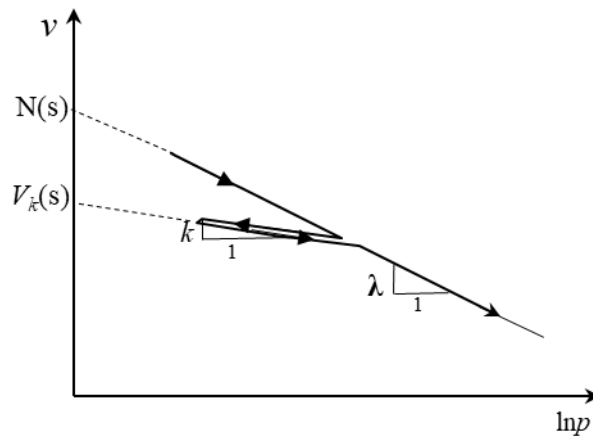


图 9.3.12-2 加卸载过程的 $v \sim \ln p$ 关系曲线

9.3.13 不同基质吸力下的 $v - \ln p$ 关系曲线 (图 9.3.12-2) 的直线段斜率，宜按下式描

述：

$$\lambda(s) = \lambda(0)[(1-\gamma)\exp(-\beta s) + \gamma] \quad (9.3.13)$$

式中： $\lambda(0)$ — 饱和土试样的各向等压试验在 $v \sim \ln p$ 平面上屈服后的直线段斜率；

γ — 与试样最大刚度相关的常数；

β — 控制试样刚度随吸力增长速率的参数，视为常数。

9.3.14 分别以 ε_w 和 w 为纵坐标，以净平均应力为横坐标，绘制各级净平均应力下（包括加载过程和卸载过程）的 $\varepsilon_w - p$ 关系曲线（图 9.3.14-1）和 $w - p$ 关系曲线（图 9.3.14-2）。利用式 (9.3.11-2) 可知，两图中的曲线斜率应存在下式描述的关系：

$$\beta(s) = -\frac{1+e_0}{G_s} K_{wt} \quad (9.3.14)$$

式中： $K_{wt} = \frac{dp}{d\varepsilon_w}$ — 与净平均应力相关的液相切线体积模量（kPa），即图 9.3.14-1 曲线的斜率；

$\beta(s)$ — 图 9.3.14-2 曲线的斜率，随吸力而变化的参数。

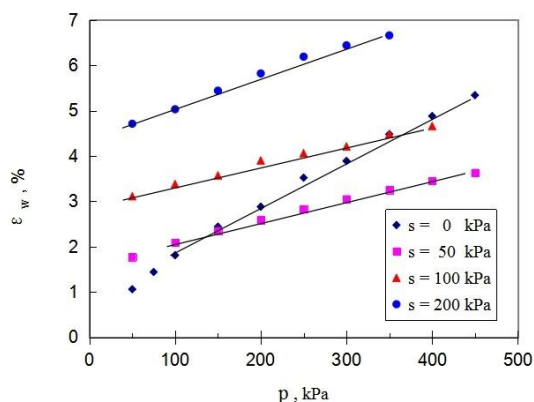


图 9.3.14-1 $\varepsilon_w - p$ 关系曲线

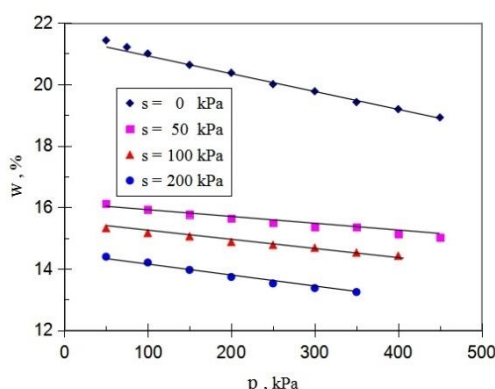


图 9.3.14-2 $w - p$ 关系曲线

9.3.15 试样在某一基质吸力下的初始屈服净平均应力 $p_0(s)$ ，应按下列方法确定：

1 分别以 ε_v 和 v 为纵坐标，以净平均应力的常用对数（ $\log p$ ）为横坐标，绘制包括加载过程和卸载过程的 $\varepsilon_v - \log p$ 关系曲线（图 9.3.15-1）或 $v - \log p$ 关系曲线（图 9.3.15-2）。

2 在 $v - \log p$ 曲线上找出最小曲率半径 $R_{\min}$ 的点，按照 5.3.15 条确定初始屈服净竖向应力的方法确定试样在某一基质吸力下的初始屈服净平均应力。

3 若 $v - \log p$ 曲线的前后两部分分别可用两段直线近似，则两直线的交点 F 对应

的净平均应力值即为该试样在某一基质吸力下的初始屈服净平均应力（图 9.3.15-2）。

4 类似地，可利用 $\varepsilon_v - \ln p$ 关系曲线确定 $p_0(s)$ 。

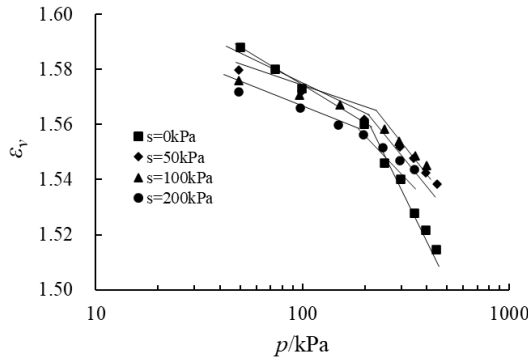


图 9.3.15-1 $\varepsilon_v \sim \log p$ 关系曲线

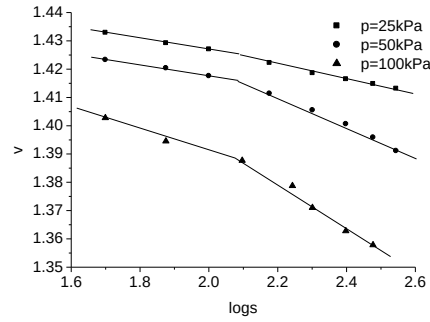


图 9.3.15-2 $v - \log p$ 关系曲线

9.3.16 以基质吸力为纵坐标，以净平均应力为横坐标，绘制屈服时基质吸力与屈服净平均应力的关系曲线（图 9.3.16），该曲线称为初始 LC（加载-湿陷）屈服线，宜用下式描述：

$$\frac{p_0}{p^c} = \left(\frac{p_0^*}{p^c} \right)^{\frac{\lambda(0)-\kappa}{\lambda(s)-\kappa}} \quad (9.3.16)$$

式中： p_0^* — 饱和土的屈服净平均应力（kPa）。

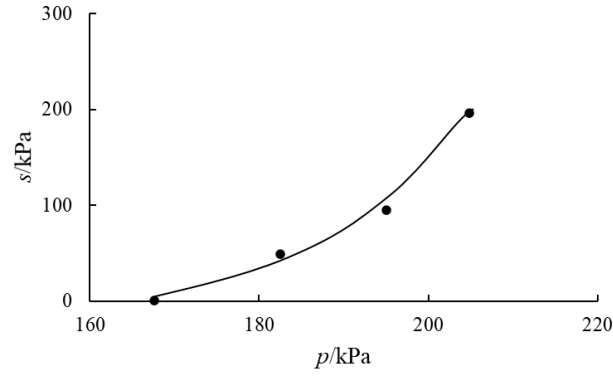


图 9.3.16 某土的基质吸力与屈服净平均应力的关系曲线

【条文说明】：9.3.16 9.3.12、9.3.13 和 9.3.16 这 3 条是结合巴塞罗那模型对试验资料的分析，发挥试验资料更大的潜力，为进行非饱和土的弹塑性变形分析提供方便。

9.3.17 控制基质吸力为常数的各向等压试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 9.2（一）和 9.2（二）的规定。

附录 E 表 9.2 (一) 控制基质吸力为常数的排水各向等压试验记录表

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		土样种类		
土样初始尺寸	直径×高 =	初始干密度(g/cm ³)		
初始质量含水率 (%)		排水量管比例系数	cm ³ / 排水量管 1mm 水柱	
基质吸力 (kPa)		总围压 (kPa)		
试验阶段	基质吸力平衡阶段	内、外压力室 压力-体积控制器 (PVC)分辨率	压力: 1kPa 体积: 1mm ³	
经历时间	在基质吸力作用下的体变和排水			
	时间 年 - 月 - 日 - 时 - 分	内 PVC 体变读数 (mm ³)	外 PVC 体变 读数 (mm ³)	排水量管读数 (mm)
0				
5min				
10min				
30min				
1h				
2h				
4h				
6h				
8h				
10h				
12h				
14h				
16h				
18h				
20h				
22h				
24h				
26h				
28h				
30h				
32h				
34h				
36h				
38h				
40h				
.....				

内 PVC 总体变量 (cm ³)				
仪器体变量 (cm ³)				
试样总体变量 (cm ³)				
试样总排水量 (cm ³)				

附录 E 表 9.2 (二) 控制基质吸力为常数的排水各向等压试验记录表

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		土样种类		
土样初始尺寸	直径×高 =	初始干密度(g/cm ³)		
初始质量含水率 (%)		排水量管比例系数	cm ³ / 排水量管 1mm 水柱	
基质吸力 (kPa)		内、外压力室 压力-体积控制器 (PVC) 分辨率	压力: 1kPa 体积: 1mm ³	
试验阶段	各向等压排水固结阶段			
经历时间	在不同净各向等压作用下的体变和排水			
	时间 年 - 月 - 日 - 时 - 分	净各向等压 (kPa)	内 PVC 体变 读数 (mm ³)	排水量管读数 (mm)
0				
5min				
10min				
30min				
1h				
2h				
4h				
6h				
8h				
10h				
12h				
14h				
16h				
18h				
20h				
22h				
24h				
26h				
28h				
30h				
32h				
34h				
36h				
38h				
40h				

.....				
试样总体变量 (mm ³)				
试样总排水量 (cm ³)				

9.4 控制吸力和净围压都为常数的固结排水剪切试验

9.4.1 本试验所有的主要仪器设备是应变控制式非饱和土三轴仪（图 9.1.4-1），应与本标准第 9.1.4 条相同。

9.4.2 进行本试验前必须先饱和高进气值陶土板，应按本标准 9.2.1 条进行。

9.4.3 进行本试验前必须在饱和陶土板后标定内压力室及其与压力-体积控制器连结的管路在不同压力下的体积变化，应按本标准 9.2.4 条进行。

9.4.4 试样的安装，应按本标准的第 9.3.4 条第 1~10 款进行。

9.4.5 本试验的固结阶段，应按下列步骤进行：

1 按本标准的第 9.3.4 条第 1 款给试样施加预定的基质吸力，可不必待试样变形和排水稳定，紧接着给试样施加预定的净围压，以减少试验历时。

2 给试样施加预定的净围压（用 σ_3 表示），不宜一步到位，应分多步、按每分钟 25kPa 的速率施加，必须同时同步等值提高内、外压力室的压力（用 σ_{3t} 表示， $\sigma_{3t} = \sigma_3 + u_a$ ）。

3 在施加基质吸力和净围压后，宜按下列时间顺序测记体变和排水量。时间为 5min、10min、30min、1h、2h、4h、6h、8h、10h，至稳定为止。稳定标准是：在 2h 内，体变不超过 6mm^3 ，排水量不超过 12mm^3 ，且固结历时不宜少于 72h。在稳定过程中，每隔 6~8h 冲洗高进气值陶土板和螺旋槽一次。

【条文说明】：9.4.5 本试验的固结阶段，应按下列步骤进行：

3 “在施加基质吸力和净围压后，宜按下列时间顺序测记体变和排水量。时间为 5min、10min、30min、1h、2h、4h、6h、8h、10h，至稳定为止。稳定标准是：在 2h 内，体变不超过 6mm^3 ，排水量不超过 12mm^3 ，且固结历时不宜少于 72h。”

确定此标准的依据源于试验的经验。表 6 是山西汾阳机场重塑 Q_3 黄土的试验情况，12 个试验在固结阶段达到变形和排水稳定的历时平均值是 69.5h。孙树国在 1998 年 4-6 月做了 17 个南阳重塑膨胀土（包括饱和试样与非饱和试样）的控制吸力和净围压为常数的固结排水剪切试验，按上述稳定标准，除个别试验外，固结历时均在 72h 以上。

表 6 控制吸力和净围压都为常数的固结排水剪切试验在固结阶段的稳定历时统计表
(山西汾阳机场重塑 Q₃ 黄土)

试验名称		控制吸力和净围压为常数的固结排水试验	
试验者	陈正汉	土样来源及种类	山西汾阳机场 重塑 Q ₃ 黄土
试样初始干密度 (g/cm ³)	1.70	试样初始含水率 (%)	17.15
稳定标准		在两小时内, 体变不超过 6mm ³ , 排水量不超过 12mm ³	
试验编号	控制净围压 (kPa)	试验时间	变形、排水稳定历时 (h)
控制吸力 = 50 kPa			
1	100	1994-6-03 15:30—06 日 11:30	67
2	200	1994-6-13 09:30—16 日 10:45	73
3	300	1994-6-20 11:50—23 日 09:50	70
控制吸力 = 100 kPa			
4	100	1994-3-27 16:35—29 日 10:30	42
5	200	1994-4-09 07:30—12 日 10:30	74
6	300	1994-4-16 16:25—19 日 10:30	66
控制吸力 = 200 kPa			
7	100	1994-4-23 10:37—26 日 11:00	60
8	200	94-4-29 17:40—05 月 3 日 16:20	96
9	300	94-5-07 17:25—05 月 09 日 21:00	55
控制吸力 = 300 kPa			
10	100	94-5-16 09:00—05 月 19 日 09:40	73
11	200	94-5-22 21:30—05 月 25 日 17:00	67
12	300	补做试验 95 年 5-15 11:40~19 日 07:10	91
小结: ① 共 12 个试验, 固结历时最长 96h, 最短 42h, 平均 69.5h。若剔除两个极值, 则平均值为 69.6h, 与总体平均值相同。 ② 共 12 个试验, 10 个试验的排水量大于体变量, 体变先到达稳定, 排水延后稳定。说明稳定历时受排水控制; 故稳定标准对体变的要求应高于排水。			

9.4.6 试验的剪切阶段, 应按下列步骤进行:

1 将离合器调至粗位, 转到粗调手轮, 当试样帽与活塞及测力计接近时, 将离合器调至细位, 改用细调手轮, 使试样帽与活塞及测力计接触; 装上变形指示计, 将测力计和变形指示计调至零位, 同时测记此时的体变读数和排水读数, 将其作为剪切试验的初始值。

2 剪切应变速率宜为 0.0015% /min~ 0.006%/min。

3 启动电机，合上离合器，开始剪切，试样每产生 0.3%~0.4%的轴向应变（或 0.2mm 变形值），测记一次测力计读数、轴向变形值、体变量读数和排水量读数。当轴向应变大于 3%时，试样每产生 0.7%~0.8%的轴向应变（或 0.5mm 变形值），测记一次。

4 在剪切过程中，每隔 6~8h 冲洗高进气值陶土板和螺旋槽一次。

5 当测力计读数出现峰值时，剪切应继续到轴向应变到 15%~20%。

6 如需从某一压力下进行卸载，可让电动机反转，卸载过程采用的应变速率应与加载过程采用的应变速率相同。在卸载过程中，每隔 6~8h 冲洗高进气值陶土板和螺旋槽一次。

7 试验结束，关电动机，脱开离合器，将离合器调至粗位，转到粗调手轮，将压力室降下；先同时同步等值卸除内、外室的净围压，并使剩余的围压高于气压 5kPa，再同时同步等值卸除气压力和剩余围压；取掉两个排气孔螺钉，放掉压力室中的水，卸除压力室，拆卸试样，量测试样含水率。

【条文说明】：9.4.6 试验的剪切阶段，应按下列步骤进行：

2 “剪切应变速率宜为 0.0015%/min~0.006%/min”。对此说明如下。

首先，《土工试验方法标准》（GB/T 50123 — 2019）第 19.6.2 条规定，对于饱和土的固结排水剪切试验，剪切速率宜为 0.003%/min~0.012%/min，是本标准规定的非饱和土剪切速率的 2 倍；按此速率，饱和土剪切至轴向应变到 15%需要 20.83h~83.33h。按本标准，非饱和土剪切至轴向应变到 15%则需要 41.67h~166.67h。

其次，从 Bishop（1960）和 Satija（1978）等人的研究可知，偏应力-应变曲线对剪切速率的大小不敏感，剪切速率主要影响试样含水率（排水剪）和孔隙水压力（不排水剪）的变化。由于非饱和土的渗水系数较低，在剪切过程中试样的水分不易达到均等分布，故对非饱和土宜采取较低的剪切速率。一般而言，对固结排水剪切试验，应选用较低的剪切速率；而对于不排水剪切试验，剪切速率可适当提高。对某一种土的合适的剪切速率应通过比较不同剪切速率的试验结果确定。由于偏应力-轴向应变曲线对剪切速率不敏感，对强度问题可通过比较不同剪切速率下的偏应力-轴向应变曲线选择合适的剪切速率。对不排水剪切试验，孔隙水压力对剪切速率的反应很敏感，应通过比较不同剪切速率下的孔隙水压力的时程曲线选择合适的剪切速率。对排水剪切试验，则应通过比较不同剪切速率下的排水量时程曲线选择合适的剪切速率。Satija（1978）通过试验比较，对 Dhanauri 粘土的固结排水剪切试验，剪切速率选用

1.3×10⁻⁴%/s；对该土的不排水剪切试验，选取剪切速率为 6.7×10⁻⁴%/s，约为排水剪切速率的 5 倍。按此剪切速率，剪切至轴向应变到 15%，固结排水剪历时为 32.05h，不排水剪只需要 6.22h。陈正汉等在 1994 年—2000 年对多地黄土（原状与重塑）和南阳膨胀土（原状与重塑）进行控制吸力和净围压为常数的固结排水剪切试验，采用的剪切速率为 0.0022mm/min，剪切至轴向应变到 15%，需要 91h。

9.4.7 重新饱和和高进气值陶土板，安装下一个试样，改变基质吸力或净围压，按照本标准 9.4.5 条和 9.4.6 条的方法步骤进行试验，直到完成全部试验。

9.4.8 应根据试验结束后量测的试样含水率，对试验过程中的排水量按历时进行校正；同时应把试验过程中量测的体变按本标准 9.2.4 条的标定曲线进行校正。

9.4.9 以试样的初始体积和初始孔隙比为基准，试样在基质吸力和净围压的共同作用下固结完成后的体应变、孔隙比、高度、横截面积和体积，应分别按下列各式计算：

$$\varepsilon_{vc} = \frac{\Delta V_c}{V_0} \times 100\% \quad (9.4.9-1)$$

$$e_c = e_0 - (1 + e_0)\varepsilon_{vc} \quad (9.4.9-2)$$

$$h_c = h_0(1 - \varepsilon_{vc})^{1/3} \quad (9.4.9-3)$$

$$A_c = A_0(1 - \varepsilon_{vc})^{2/3} \quad (9.4.9-4)$$

$$V_c = A_c h_c = V_0(1 - \varepsilon_{vc}) = V_0 - \Delta V_c \quad (9.4.9-5)$$

式中： ε_{vc} — 试样在基质吸力和净围压的共同作用下固结完成后的体应变（%）；

ΔV_c — 试样在基质吸力和净围压的共同作用下固结完成后的体积变化量

（cm³），应按图 9.2.4 的标定曲线进行校正；

V_0 — 试样的初始体积（cm³）；

e_c — 试样在基质吸力和净围压的共同作用下固结完成后的孔隙比；

e_0 — 试样的初始孔隙比；

h_0 — 试样的初始高度（cm）；

h_c — 试样在基质吸力和净围压的共同作用下固结完成后的高度（cm）；

A_0 — 试样的初始横截面积（cm²）；

A_c — 试样在基质吸力和净围压的共同作用下固结完成后的横截面积（cm²）；

V_c — 试样在基质吸力和净围压的共同作用下固结完成后的体积（cm³）

9.4.10 以试样的初始体积和初始质量含水率为基准，试样在基质吸力和净围压的共同作用下固结完成后的液相体应变和质量含水率，应分别按以下两式计算：

$$\varepsilon_{wc} = \frac{\Delta V_{wc}}{V_0} \times 100\% \quad (9.4.10-1)$$

$$w_c = w_0 - \frac{1+e_0}{G_s} \varepsilon_{wc} \quad (9.4.10-2)$$

式中： ε_{wc} — 试样在基质吸力和净围压的共同作用下固结完成后的液相体应变（%），亦即试样体积含水率的改变量；

ΔV_{wc} — 试样在基质吸力和净围压的共同作用下固结完成后的排水体积（ cm^3 ）；

w_c — 试样在基质吸力和净围压的共同作用下固结完成后的质量含水率（%）；

w_0 — 试样的初始质量含水率（%）；

G_s — 土颗粒的相对密度。

9.4.11 在排水剪切过程中试样所受到的净围压、净大主应力、净平均应力、偏应力和基质吸力，应用下列各式表示和计算：

$$\sigma_3 = \sigma_{3t} - u_a \quad (9.4.11-1)$$

$$\sigma_1 = \sigma_{1t} - u_a \quad (9.4.11-2)$$

$$p = \sigma_3 + \frac{1}{3}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (9.4.11-3)$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (9.4.11-4)$$

$$s = u_a - u_w \quad (9.4.11-5)$$

式中： σ_3 — 净围压（kPa）；

σ_1 — 净大主应力（kPa）；

σ_{1t} — 总大主应力（kPa）

p — 排水剪切过程中的净平均应力（kPa）；

q — 排水剪切过程中的偏应力应力（kPa）；

s — 基质吸力（kPa）；

u_a — 孔隙气压力（kPa）；

u_w — 孔隙水压力 (kPa)。

9.4.12 以固结完成后的试样的尺寸为基准, 排水剪切过程中任一瞬时的试样的轴向应变、横截面积、偏应力数值、体应变、径向应变 (小主应变)、偏应变和孔隙比, 应按下列各式计算:

$$\varepsilon_{li} = \frac{\Delta h_i}{h_c} \times 100\% \quad (9.4.12-1)$$

$$A_i = \frac{V_i}{h_i} = \frac{V_c - \Delta V_i}{h_c - \Delta h_i} \quad (9.4.12-2)$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{CR}{A_i} \times 10 \quad (9.4.12-3)$$

$$\varepsilon_{vi} = \frac{\Delta V_i}{V_c} \times 100\% \quad (9.4.12-4)$$

$$\varepsilon_{ri} = \varepsilon_{3i} = \frac{1}{2}(\varepsilon_{vi} - \varepsilon_{li}) \quad (9.4.12-5)$$

$$\varepsilon_{si} = \bar{\varepsilon}_i = \frac{2}{3}(\varepsilon_{li} - \varepsilon_{3i}) \quad (9.4.12-6)$$

$$e_i = e_c - (1 + e_c)\varepsilon_{vi} \quad (9.4.12-7)$$

式中: ε_{li} — 在排水剪切过程中试样的轴向应变 (%);

Δh_i — 排水剪切过程中试样的高度变化 (cm), 等于变形百分表读数与测力计百分表读数之差 (以 cm 为单位计量);

V_i — 试样剪切过程中任一时刻的体积 (cm³);

h_i — 试样剪切过程中任一时刻的高度 (cm);

A_i — 试样剪切过程中任一时刻的面积 (cm²);

ΔV_i — 排水剪切过程中试样任一时刻的体积变化量, 等于内压力室中水的体积变化量与活塞杆进入压力室中的体积之和 (cm³), 因围压不变而不必对体变进行校正; 其中活塞进入压力室的体积等于变形百分表读数与测力计百分表读数之差乘以活塞的横截面积 (cm²);

$\sigma_1 - \sigma_3$ — 偏应力, 亦称主应力差 (kPa);

C — 测力计率定系数 (N/0.01mm 或 N/mV);

R — 测力计读数 (0.01mm);

ε_{vi} —排水剪切过程中试样的体应变（%）；

$\varepsilon_{ri} = \varepsilon_{3i}$ —排水剪切过程中试样的径向应变或小主应变（%）；

$\varepsilon_{si} = \bar{\varepsilon}_i$ —排水剪切过程中试样的偏应变（%）；

e_i —排水剪切过程中试样的孔隙比。

9.4.13 以固结完成后的试样尺寸和物性指标为基准，排水剪切过程中的液相体应变、质量含水率与饱和度，应按下列各式计算：

$$\varepsilon_{wi} = \frac{\Delta V_{wj}}{V_c} \times 100\% \quad (9.4.13-1)$$

$$w_i = w_c - \frac{1+e_c}{G_s} \varepsilon_{wi} \quad (9.4.13-2)$$

$$S_{ri} = \frac{G_s w_i}{e_i} \quad (9.4.13-3)$$

式中： ε_{wi} —排水剪切过程中试样液相的体应变（%），即试样体积含水率的改变量；

ΔV_{wj} —排水剪切过程中试样排出的水体积（ cm^3 ）；

w_i —排水剪切过程中试样的质量含水率（%）；

S_{ri} —排水剪切过程中试样的饱和度（%）。

9.4.14 分别以偏应力和体应变为纵坐标，轴向应变为横坐标，在同一图上绘制偏应力-轴向应变关系曲线和体应变-轴向应变关系（图 9.4.14）。对有峰值的偏应力-轴向应变曲线，取其峰值点作为破坏点；对无峰值的曲线，取 15%轴向应变对应的点作为破坏点。

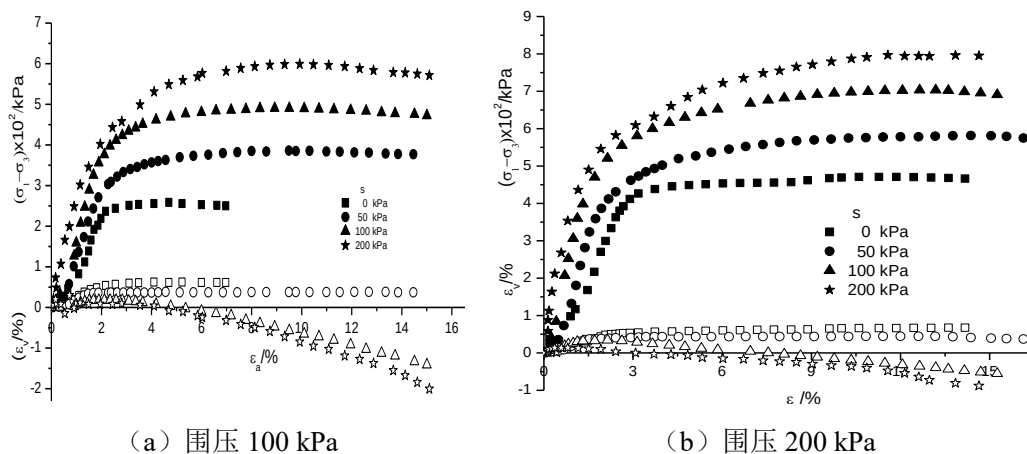


图 9.4.14 某非饱和土的偏应力-轴向应变关系曲线和体应变-轴向应变曲线
(控制吸力和净围压，图中 s 是控制吸力)

9.4.15 以径向应变为纵坐标，轴向应变为横坐标，绘制径向应变与轴向应变关系曲线（图 9.4.15）。

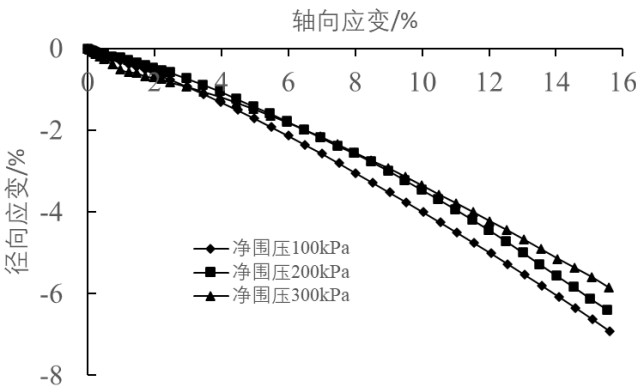


图 9.4.15 某非饱和土的径向应变与轴向应变关系曲线（吸力=100kPa）

9.4.16 以偏应变为纵坐标，轴向应变为横坐标，绘制偏应变与轴向应变关系曲线（图 9.4.16）。

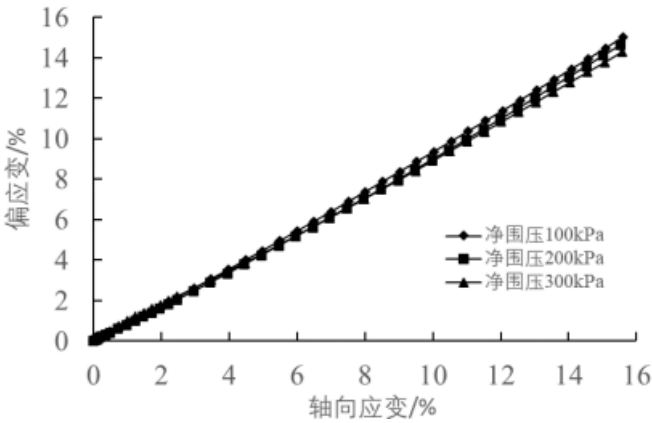


图 9.4.16 某非饱和土的偏应变-轴向应变关系曲线（吸力=100kPa）

9.4.17 以为液相体应变（或质量含水率，或饱和度）纵坐标，轴向应变为横坐标，绘制液相体应变与轴向应变关系曲线（图 9.4.17-1）、质量含水率与轴向应变关系曲线（图 9.4.17-2）。

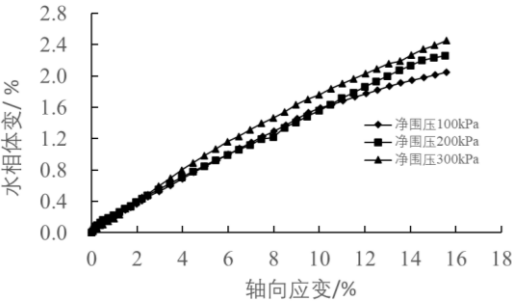


图 9.4.17-1 某非饱和土的液相体应变与轴向应变关系曲线（吸力=100kPa）

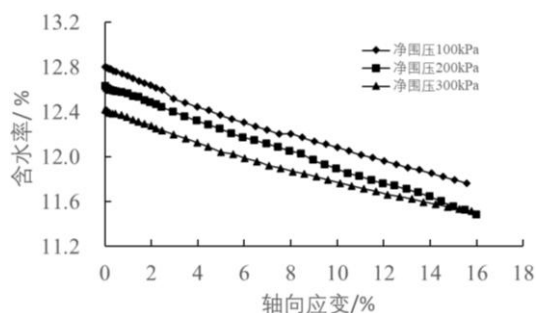


图 9.4.17-2 某非饱和土的质量含水率与轴向应变关系曲线（吸力=100kPa）

9.4.18 以各级偏应力下的体应变 ε_v 为纵坐标，以各级偏应力作用下的 $\log \frac{q}{p}$ 为横坐标，绘制 $\varepsilon_v - \log \frac{q}{p}$ 关系曲线（图 9.4.18），曲线是曲率最小的点就是试样的屈服点，屈服点所对应的应力比就是在该吸力作用下的初始屈服应力比 $(\frac{q}{p})_y^s$ 。

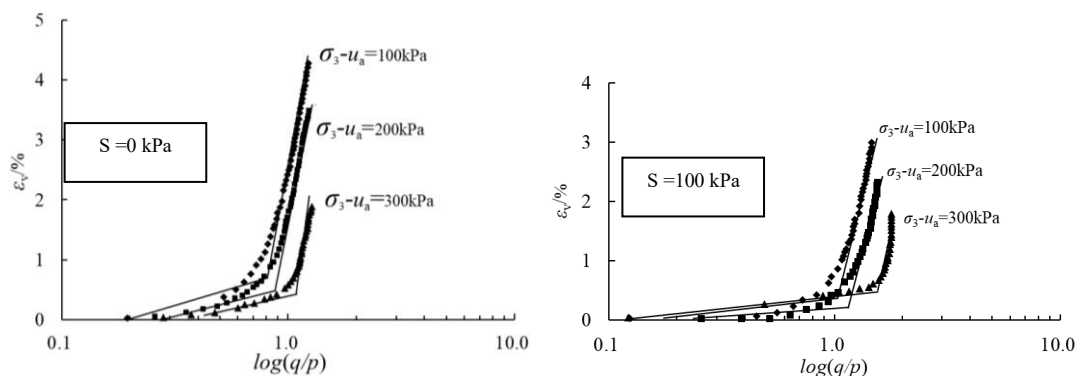


图 9.4.18 某非饱和土的 $\varepsilon_v - \log \frac{q}{p}$ 关系曲线

【条文说明】：9.4.18 如何确定三轴应力状态的屈服应力，是一个需要研究的问题。考虑到在三轴应力条件下，球应力和偏应力对屈服都有贡献，陈正汉（1999）在下述文献[1]提出用 $\varepsilon_v - \log \frac{q}{p}$ 关系曲线上曲率最小的点确定屈服应力的方法，为确定 $p-q$ 平面上的屈服轨迹提供了方便。

[1] 陈正汉. 重塑非饱和黄土的变形、强度、屈服和水量变化特性[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 82–90.

9.4.19 剪切破坏时的偏应力、净平均应力、基质吸力、净应力摩尔圆的半径和圆心坐标，应按下列各式计算：

$$q_f = (\sigma_1 - \sigma_3)_f \quad (9.4.19-1)$$

$$p_f = (\sigma_{3t} - u_a)_f + \frac{1}{3}(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \sigma_{3f} + \frac{1}{3}(\sigma_1 - \sigma_3)_f \quad (9.4.19-2)$$

$$s_f = (u_a - u_w)_f = (u_a - u_w)_{initial} \quad (9.4.19-3)$$

$$\bar{q} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)_f \quad (9.4.19-4)$$

$$\bar{p} = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)_f \quad (9.4.19-5)$$

式中： p_f — 剪切破坏时的净平均应力（kPa）；

q_f — 剪切破坏时的偏应力应力（kPa）；

s_f — 剪切破坏时的基质吸力（kPa）；

$\bar{p}$ — 剪切破坏时的净应力摩尔园中心坐标（kPa）；

$\bar{q}$ — 剪切破坏时的净应力摩尔园的半径（kPa）。

9.4.20 以 $\bar{q}$ 为纵坐标，以 $\bar{p}$ 为横坐标，绘制破坏时净应力摩尔园的半径和园心坐标的关系曲线（图 9.4.20，就是破坏摩尔园顶点的连线），可用直线拟合，直线的截距和倾角分别用 $\bar{c}$ 和 $\bar{\phi}$ 表示，则破坏时与破坏面上的净法向应力相关的内摩擦角和总凝聚力，应分别按以下两式计算：

$$\sin \phi' = \tan \bar{\phi} \quad (9.4.20-1)$$

$$c = \frac{\bar{c}}{\cos \bar{\phi}} \quad (9.4.20-2)$$

式中： ϕ' — 与破坏面上的净法向应力相关的内摩擦角（°）；

c — 总凝聚力（kPa）。

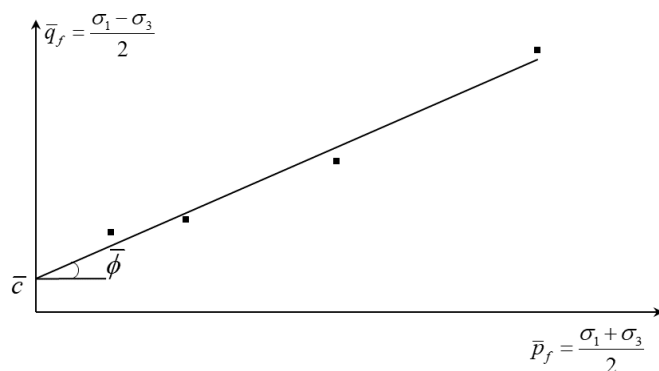


图 9.4.20 某非饱和土破坏时净应力摩尔圆的半径和圆心坐标的关系曲线

【条文说明】：9.4.20 此条推荐用净应力摩尔圆的半径和圆心坐标的关系曲线（直线）

及最小二乘法确定抗剪强度指标，而不必借助摩尔圆，简便易行，准确度高。

9.4.21 以破坏时的偏应力为纵坐标，以破坏时的净平均应力为横坐标，绘制破坏时的偏应力和净平均应力的关系曲线（图 9.4.21），可用直线拟合，直线的截距和倾角分别用 ξ 和 ω 表示，则与破坏时破坏面上的净法向应力相关的内摩擦角和总凝聚力，应分别按以下两式计算：

$$\sin \phi' = \frac{3 \tan \omega}{6 + \tan \omega} \quad (9.4.21-1)$$

$$c = \frac{3 - \sin \phi'}{6 \cos \phi'} \xi \quad (9.4.21-2)$$

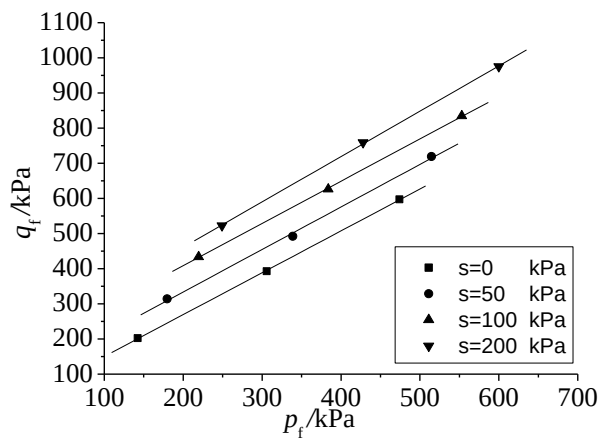


图 9.4.21 某非饱和土的破坏时的偏应力和净平均应力的关系曲线

【条文说明】：9.4.21 此条推荐用破坏时的净平均应力和偏应力确定抗剪强度指标，而不必借助摩尔圆，简便易行，准确度高。

9.4.22 以总凝聚力为纵坐标，基质吸力为横坐标，绘制总凝聚力与基质吸力关系曲线（图 9.4.22），可用直线拟合，直线的截距和倾角分别为有效凝聚力 c' 和与基质吸力相关的摩擦角 ϕ^b 。

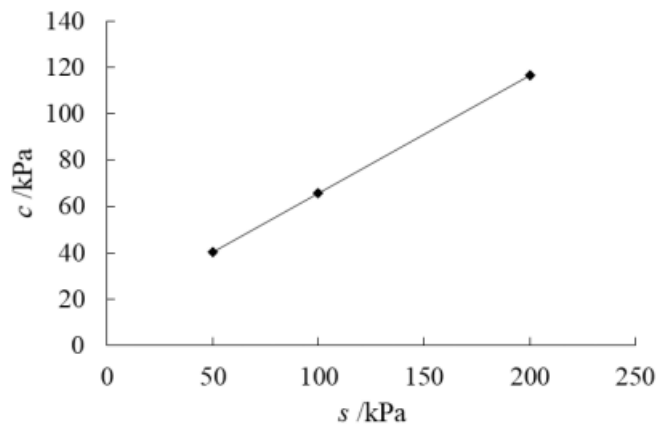


图 9.4.22 某非饱和黄土的总凝聚力和基质吸力关系曲线

9.4.23 图 9.4.14 的偏应力与轴向应变关系曲线，宜用下列的双曲线描述：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{a + b\varepsilon_1} \quad (9.4.23-1)$$

$$\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b\varepsilon_1 \quad (9.4.23-2)$$

$$E_i = \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{d\varepsilon_1} = \frac{1}{a} \quad (9.4.23-3)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} = \frac{\varepsilon_1}{a + b\varepsilon_1} = \frac{1}{b} \quad (9.4.23-4)$$

式中： ε_1 — 大主应变，对三轴试验而言就是轴向应变，即 $\varepsilon_1 = \varepsilon_a$ ；

a — 其几何意义是式 (9.4.23-2) 所示直线（图 9.4.23）的截距，其物理意义是式 (9.4.23-1) 所示双曲线起始斜率（初始切线模量 E_i ）的倒数（ kPa^{-1} ）；

b — 其几何意义是式 (9.4.23-2) 所示直线（图 9.4.23）的斜率，其物理意义是式 (9.4.23-1) 所示双曲线渐近线所对应的极限偏应力的倒数（ kPa^{-1} ）。

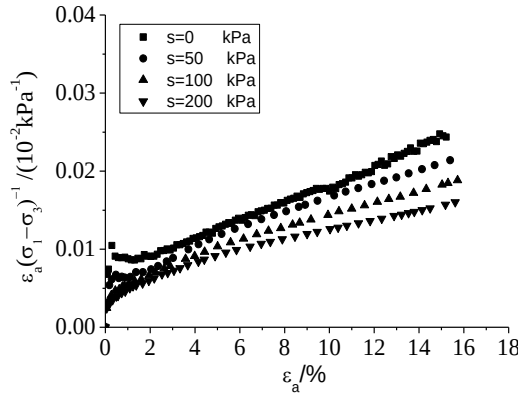


图 9.4.23 某非饱和土的 $\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3}$ 与 ε_1 关系曲线（净围压为 275 kPa）

9.4.24 以 $\log \frac{E_i}{p_{atm}}$ 为纵坐标， $\log \frac{\sigma_{3t} - u_a}{p_{atm}} = \log \frac{\sigma_3}{p_{atm}}$ 为横坐标，绘制 $\log \frac{E_i}{p_{atm}}$ 和 $\log \frac{\sigma_3}{p_{atm}}$

关系曲线（图 9.4.24），可用直线拟合，应按下式描述：

$$E_i = \Lambda p_{atm} \left(\frac{\sigma_{3t} - u_a}{p_{atm}} \right)^n = \Lambda p_{atm} \left(\frac{\sigma_3}{p_{atm}} \right)^n \quad (9.4.24)$$

式中： $\log \Lambda$ — 图 9.4.24 中直线的截距，无量纲；

n — 图 9.4.24 中直线的斜率，无量纲。

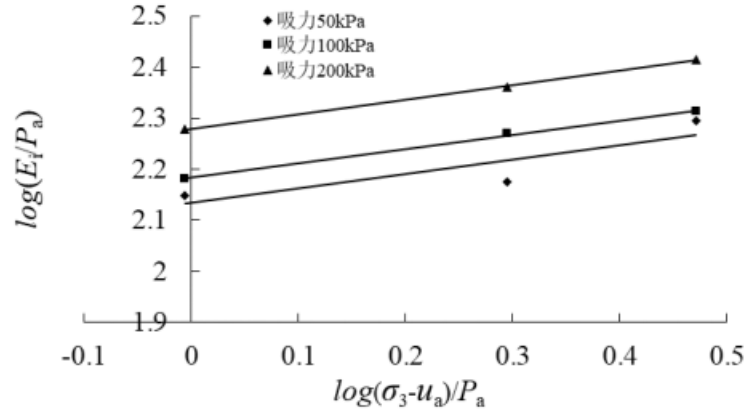


图 9.4.24 某非饱和土的 $\log \frac{E_i}{P_a}$ 和 $\log \frac{\sigma_3}{P_a}$ 关系曲线

9.4.25 以 Λ 为纵坐标，基质吸力为横坐标，绘制 Λ 和基质吸力的关系曲线（图 9.4.25），可用直线拟合，应按下式描述：

$$\Lambda = k^0 + m_1 \frac{s}{p_{atm}} \quad (9.4.25)$$

式中： k^0 — 图 9.4.25 所示直线的截距，是基质吸力等于零（饱和土）的 Λ 值；

m_1 — 图 9.4.25 所示直线的斜率，无量纲。

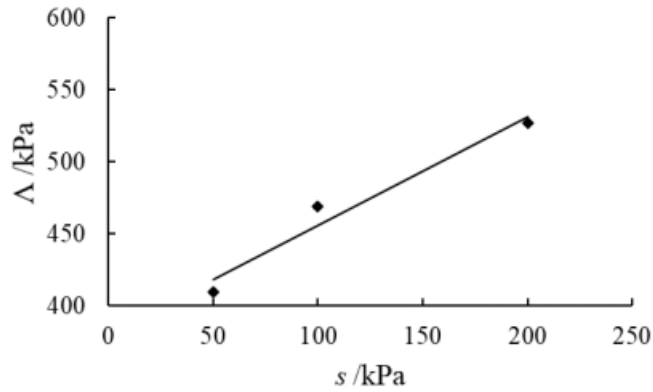


图 9.4.25 某非饱和土的参数 Λ 和基质吸力的关系曲线

9.4.26 试样的切线杨氏模量，应按下式计算：

$$\begin{aligned} E_t &= \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{d\varepsilon_1} \\ &= p_{atm} \left[1 - \frac{R_f (1 - \sin \phi') (\sigma_{1t} - \sigma_{3t})}{2c \cos \phi' + 2(\sigma_{3t} - u_a) \sin \phi'} \right]^2 \left(k^0 + m_1 \frac{s}{p_{atm}} \right) \left(\frac{\sigma_{3t} - u_a}{p_{atm}} \right)^n \\ &= p_{atm} \left[1 - \frac{R_f (1 - \sin \phi') (\sigma_1 - \sigma_3)}{2(c' + s_f \tan \phi^b) \cos \phi' + 2\sigma_3 \sin \phi'} \right]^2 \left(k^0 + m_1 \frac{s}{p_{atm}} \right) \left(\frac{\sigma_3}{p_{atm}} \right)^n \end{aligned} \quad (9.4.26)$$

式中： $R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}$ —破坏比，或许与基质吸力有关。

【条文说明】：9.4.26 按照 9.4.23 ~ 9.4.26 这 4 条的方法可以确定考虑吸力影响的切线杨氏模量，为进行非饱和土的变形分析提供方便。

9.4.27 对于一定的基质吸力和净围压，试样与净平均应力相关的切线体积模量，应在应力水平等于 70%时按下式计算：

$$K_t = \frac{1}{3} \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\varepsilon_v} \right]_{L=70\%} \quad (9.4.27)$$

式中： $K_t = \frac{dp}{d\varepsilon_v}$ —与净平均应力相关的试样切线体积模量（kPa）；

$$L = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \text{ — 应力水平。}$$

9.4.28 以 K_t 为纵坐标， s 为横坐标，绘制 K_t 和 s 关系曲线（图 9.4.28），可用直线拟合，应按下式描述：

$$K_t = K_t^0 + m_2 s \quad (9.4.28)$$

式中： K_t^0 —图 9.4.28 中直线的截距，是基质吸力等于零（饱和土）的切线体积模量（kPa），或许与净围压有关；

m_2 —图 9.4.28 中直线的斜率，无量纲。

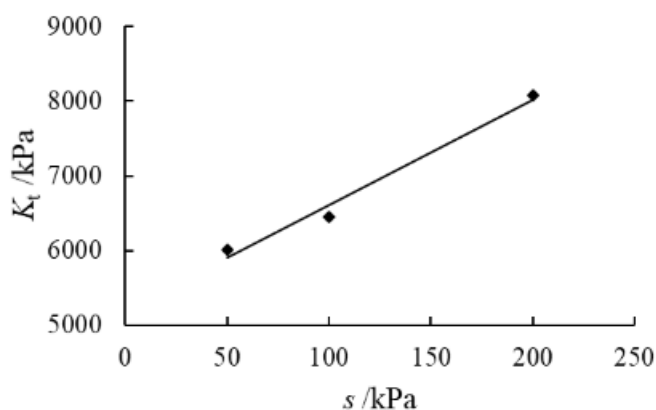


图 9.4.28 某非饱和黄土的绘制 K_t 和 s 关系曲线

【条文说明】：9.4.28 按照 9.4.27 ~ 9.4.28 这 2 条的方法可以确定考虑吸力影响的、与净平均应力相关的、土骨架的切线体积模量，为进行非饱和土的变形分析提供方便。

9.4.29 对于固定的基质吸力和净围压，液相与净平均应力相关的切线体积模量，应按以下两种方法计算并互相校核：

1 在应力水平等于 70%时按下式计算：

$$K_{wt} = \frac{1}{3} \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\varepsilon_w} \right]_{L=70\%} \quad (9.4.29-1)$$

式中： $K_{wt} = \frac{dp}{d\varepsilon_w}$ — 与净平均应力相关的液相切线体积模量（kPa）。

2 以剪切过程中的含水率为纵坐标，净平均应力为横坐标，绘制含水率与净平均应力关系曲线（图 9.4.29），具有相同基质吸力和不同净围压的一族含水率与净平均应力关系曲线可用一条直线拟合，且不同基质吸力的直线彼此平行，其平均斜率用 $\beta(s)$ 表示。把式 (9.4.13-2) 两边对净平均应力求导，解得：

$$\beta(s) = -\frac{1+e_c}{G_s} K_{wt} \quad (9.4.29-2)$$

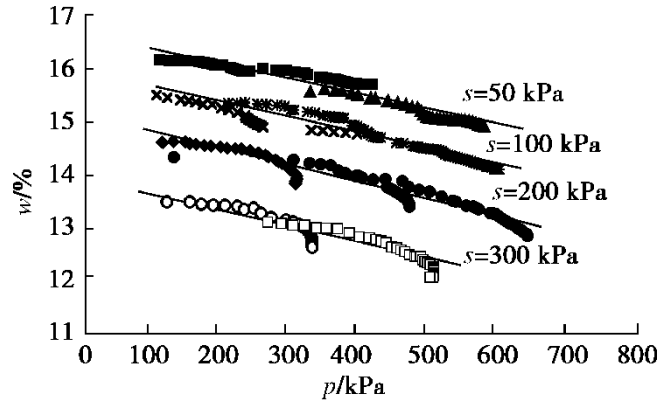


图 9.4.29 某非饱和土的在三轴剪切过程中的质量含水率与净平均应力关系曲线

9.4.30 以 K_{wt} 为纵坐标， s 为横坐标，绘制 K_{wt} 和 s 关系曲线（图 9.4.30），可用直线拟合，应按下式描述：

$$K_{wt} = K_{wt}^0 + m_3 s \quad (9.4.30)$$

式中： K_{wt}^0 — 图 9.4.30 中直线的截距，是基质吸力等于零（饱和土）的液相与净平均应力相关的切线体积模量（kPa），或许与净围压有关；

m_3 — 图 9.4.30 中直线的斜率，无量纲。

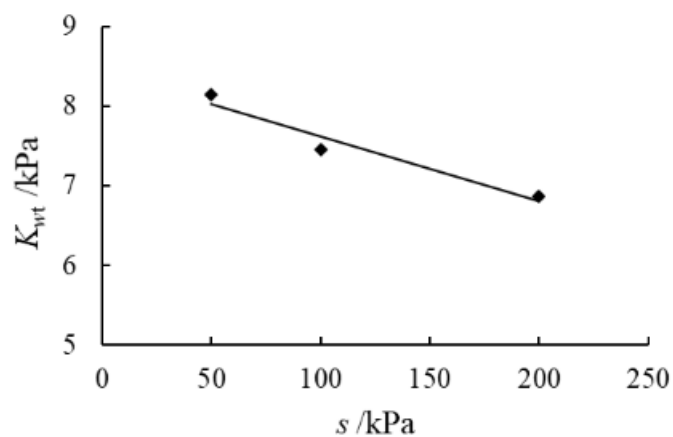


图 9.4.30 某非饱和黄土的绘制 K_{wt} 和 s 关系曲线

【条文说明】：9.4.30 按照 9.4.29 ~ 9.4.30 这 2 条的方法可以确定考虑吸力影响的、与净平均应力相关的、液相切线体积模量，为进行非饱和土的多场耦合分析提供方便。

9.4.31 控制基质吸力和净围压为常数的固结排水剪切试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 9.3（一）和表 9.3（二）的规定。

附录 E 表 9.3 (一) 控制基质吸力和净围为常数的固结排水剪切试验记录表

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		土样种类		
土样初始尺寸	直径×高 =	初始干密度(g/cm ³)		
初始质量含水率 (%)		排水量管 比例系数	cm ³ / 排水量管 1mm 水柱	
基质吸力 (kPa)		净围压 (kPa)		
试验阶段	在基质吸力和净围压 作用下的固结阶段	内、外压力室 压力-体积控制器 (PVC)分辨率	压力: 1kPa 体积: 1mm ³	
经历时间	固结阶段的体变和排水			
	时间 年 - 月 - 日 - 时 - 分	内 PVC 体变读数 (mm ³)	外 PVC 体变 读数 (mm ³)	排水量管读数 (mm)
0				
5min				
10min				
30min				
1h				
2h				
4h				
6h				
8h				
10h				
12h				
14h				
16h				
18h				
20h				
22h				
24h				
26h				
28h				
30h				
32h				
34h				
36h				
38h				
40h				
.....				

试样总体变量 (cm ³)				
试样总排水量 (cm ³)				

附录 E 表 9.3 (二) 控制基质吸力和净围为常数的固结排水剪切试验记录表

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			土样种类		
土样初始尺寸	直径×高 =		初始干密度(g/cm ³)		
初始质量含水率 (%)			排水量管 比例系数	cm ³ / 排水量管 1mm 水柱	
基质吸力 (kPa)			内、外压力室 压力-体积控制器 (PVC) 分辨率	压力: 1kPa 体积: 1mm ³	
净围压 (kPa)					
试验阶段	剪切阶段				
测力计率定系数 C(N/0.01mm)			压力室活塞横截面积 (mm ²)		
剪切速率 (mm/min)			备注		
剪切过程的轴向变形、体变和排水					
时间 月 - 日 - 时 - 分	轴向变形 (0.01mm)	轴向荷载读数 (N)	内 PVC 体变读数 (mm ³)	外 PVC 体变 读数 (mm ³)	排水量管读数 (mm)
	5				
	10				
	20				
	30				
	40				
	60				
	80				
	100				
	120				
	140				
	160				
					
试样总体变量 (mm ³)					
试样总排水量 (cm ³)					

9.5 控制气压力和净围压都为常数的固结不排水剪切试验（测孔隙水压力）

9.5.1 本试验所有的主要仪器设备是应变控制式非饱和土三轴仪（图 9.1.4-1），应与本标准第 9.1.4 条相同。本试验所用的孔隙水压力传感器和特制三通阀应符合本标准第 5.4.1 条的规定。

9.5.2 进行本试验前必须先饱和高进气值陶土板，应按本标准 9.2.1 条进行。

9.5.3 进行本试验前必须在饱和陶土板后标定内压力室及其与压力-体积控制器连结的管路在不同压力下的体积变化，应按本标准 9.2.4 条进行。

9.5.4 试样的安装，应按本标准的第 9.3.4 条第 1～9 款进行。

9.5.5 试验的固结阶段，应按本标准 9.4.5 条的步骤进行；当试样的初始基质吸力不超过 70kPa 时，可不施加气压力（即气压力保持为大气压）；若试样初始基质吸力超过 70kPa，则必须施加大于初始基质吸力值的气压力且保持为常数，并同时同步等值增加内外压力室的压力。

9.5.6 试验的剪切阶段，应按下列步骤进行：

1 将离合器调至粗位，转到粗调手轮，当试样帽与活塞及测力计接近时，将离合器调至细位，改用细调手轮，使试样帽与活塞及测力计接触；装上变形指示计，将测力计和变形指示计调至零位；关闭排水阀，将孔隙水压力传感器指示计调至零位；测记此时的体变读数，将其作为剪切试验的初始值。

2 剪切应变速率粘土宜为 0.025%/min ~ 0.035%/min，粉土为每分钟 0.035%/min ~ 0.2%/min。

3 启动电机，合上离合器，开始剪切，试样每产生 0.3% ~ 0.4% 的轴向应变（或 0.2mm 变形值），测记一次测力计读数、轴向变形值、体变量读数和孔隙水压力读数。当轴向应变大于 3% 时，试样每产生 0.7% ~ 0.8% 的轴向应变（或 0.5mm 变形值），测记一次。

4 其余步骤同本标准第 9.4.6 条第 4—7 款、第 9.4.7 条和第 9.4.7 条。

【条文说明】：9.5.6 试验的剪切阶段，应按下列步骤进行：

2 剪切应变速率粘土宜为每分钟应变 0.025% ~ 0.035%，粉土为每分钟 0.035%~0.2%。对此说明如下。首先，《土工试验方法标准》（GB/T 50123—2019）第 19.5.3 条第 1 款规定，饱和土的三轴固结不排水剪切试验的“粘土剪切应变速率宜为 0.05%/min ~ 0.1%/min，粉土剪切应变速率宜为 0.1%/min ~ 0.5%/min”。约为本标准规定的非饱和土的剪切应变速率的 2-3 倍。其次，在本标准第 9.4.6 条的说明中指出，

非饱和土的不排水剪切应变速率可取固结排水剪切应变速率的 5 倍左右，本标准第 9.4.6 条规定的非饱和土固结排水剪切应变速率宜为 0.0015%/min ~ 0.006%/min，其 5 倍等于 0.0075%/min ~ 0.03%/min，处于本款规定的数值之内。

9.5.7 以试样的初始体积和初始孔隙比为基准，试样在基质吸力和净围压的共同作用下固结完成后的体应变、孔隙比、高度、横截面积和体积，应按本标准第 9.4.9 条的式(9.4.9-1)—(9.4.9-5)计算。

9.5.8 以试样的初始体积和初始含水率为基准，试样在基质吸力和净围压的共同作用下固结完成后的液相体应变和含水率，应按本标准第 9.4.9 条的式(9.4.10-1)— (9.4.10-2)计算。

9.5.9 在不排水剪切过程中试样所受到的净围压、净大主应力、净平均应力、偏应力和基质吸力，应按本标准第 9.4.11 条的式 (9.4.11-1)— (9.4.11-5)计算。

9.5.10 以固结完成后的试样的尺寸为基准，排水剪切过程中任一瞬时的试样的轴向应变、横截面积、偏应力数值、体应变、径向应变（小主应变）、偏应变和孔隙比，应按本标准第 9.4.12 条的式 (9.4.12-1)— (9.4.11-7)计算。

9.5.11 以固结完成后的试样尺寸和物性指标为基准，不排水剪切过程中的饱和度，应按下列各式计算：

$$S_{ri} = \frac{G_s w_c}{e_i} \quad (9.5.11)$$

式中： S_{ri} — 排水剪切过程中试样的饱和度（%）。

9.5.12 以偏应力为纵坐标，轴向应变为横坐标，绘制偏应力与轴向应变关系曲线（图 9.5.12）。取曲线上偏应力的峰值作为破坏点，无峰值时，取 15%轴向应变时的偏应力作为破坏点。

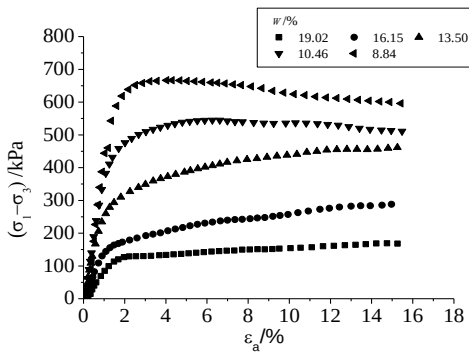


图 9.5.12 某非饱和土在不同含水率剪切时的偏应力与轴向应变关系曲线（围压 125kPa）

9.5.13 以体应变为纵坐标，轴向应变为横坐标，绘制体应变与轴向应变关系曲线（图 9.5.13）。

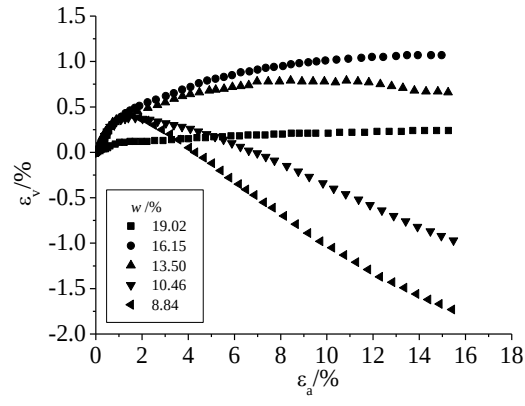


图 9.5.13 某非饱和土在不同含水率剪切时的体应变与轴向应变关系曲线（围压 125kPa）

9.5.14 以径向应变为纵坐标，轴向应变为横坐标，绘制径向应变与轴向应变关系曲线（图 9.5.14）。

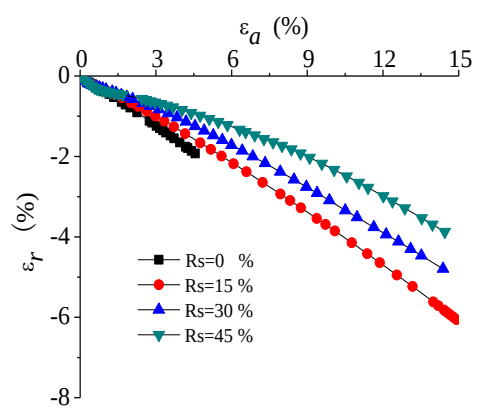


图 9.5.14 某掺砂土的径向应变与轴向应变关系曲线
（三轴不排水剪切，围压 1MPa，含水率 25.55%，Rs 是掺砂比例）

9.5.15 以偏应变为纵坐标，轴向应变为横坐标，绘制偏应变与轴向应变关系曲线（图 9.5.15）。

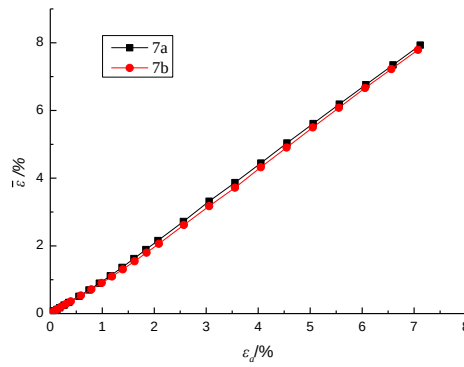


图 9.5.15 某非饱和土的偏应变与轴向应变关系曲线（两个平行试验）

9.5.16 以饱和度纵坐标，轴向应变为横坐标，绘制饱和度与轴向应变关系曲线（图 9.5.16）。

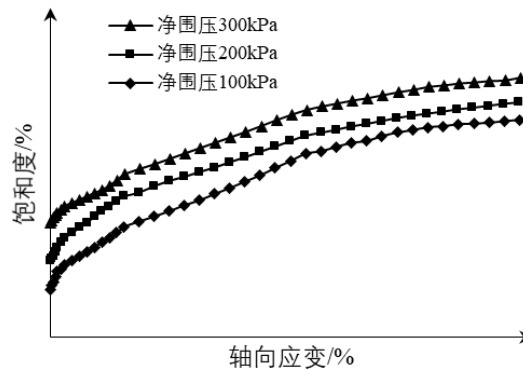


图 9.5.16 某非饱和土的饱和度与轴向应变关系曲线（不排水剪切）

9.5.17 剪切破坏时的基质吸力，应按下列各式计算：

$$s_f = (u_a - u_w)_f = u_{af} - u_{wf} \quad (9.5.17)$$

式中： s_f — 剪切破坏时的基质吸力（kPa）；

u_{af} — 剪切破坏时的孔隙气压力（kPa），等于控制气压力；

u_{wf} — 剪切破坏时的孔隙水压力（kPa）。

9.5.18 剪切破坏时的偏应力、净平均应力、净应力摩尔圆的半径和圆心坐标，应按本标准第 9.4.19 条的式 (9.4.19-1)、(9.4.19-2)、(9.4.19-4)和 (9.4.19-5)计算。

9.5.19 以 $\bar{q}$ 为纵坐标，以 $\bar{p}$ 为横坐标，绘制破坏时净应力摩尔圆的半径和园心坐标的关系曲线（图 9.5.19），可用直线拟合，直线的截距和倾角分别用 $\bar{c}_{cu}$ 和 $\bar{\phi}_{cu}$ 表示，则破坏时与破坏面上的净法向应力相关的内摩擦角和总凝聚力，应分别按下式计算：

$$\sin \phi'_{cu} = \tan \bar{\phi}_{cu} \quad (9.5.19-1)$$

$$c_{cu} = \frac{\bar{c}_{cu}}{\cos \bar{\phi}_{cu}} \quad (9.5.19-2)$$

式中： ϕ'_{cu} — 与破坏面上的净法向应力相关的内摩擦角（°）；

c_{cu} — 总凝聚力（kPa）。

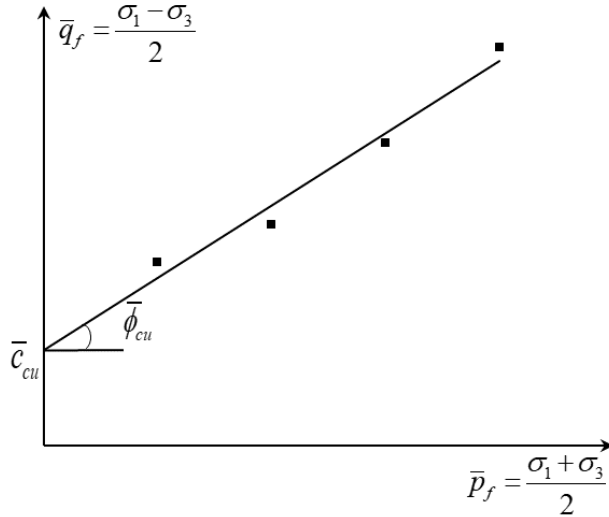


图 9.5.19 破坏时净应力摩尔圆的半径和圆心坐标的关系曲线

9.5.20 以破坏时的偏应力为纵坐标，以破坏时的净平均应力为横坐标，绘制破坏时的偏应力和净平均应力的关系曲线（图 9.5.20），可用直线拟合，直线的截距和倾角分别用 ξ_{cu} 和 ω_{cu} 表示，则与破坏时破坏面上的净法向应力相关的内摩擦角和总凝聚力，应分别按下式计算：

$$\sin \phi'_{cu} = \frac{3 \tan \omega_{cu}}{6 + \tan \omega_{cu}} \quad (9.5.20-1)$$

$$c_{cu} = \frac{3 - \sin \phi'_{cu}}{6 \cos \phi'_{cu}} \xi_{cu} \quad (9.5.20-2)$$

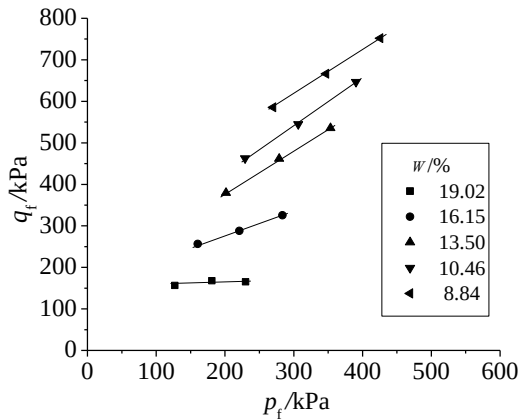


图 9.5.20 某非饱和土不排水剪切破坏时的偏应力和净平均应力的关系曲线

9.5.21 以固结不排水剪切的总凝聚力为纵坐标，破坏时的基质吸力为横坐标，绘制总凝聚力与破坏时的基质吸力关系曲线（图 9.5.21），可用直线拟合，直线的截距和倾角分别为有效凝聚力 c'_{cu} 和与基质吸力相关的摩擦角 ϕ_{cu}^b 。

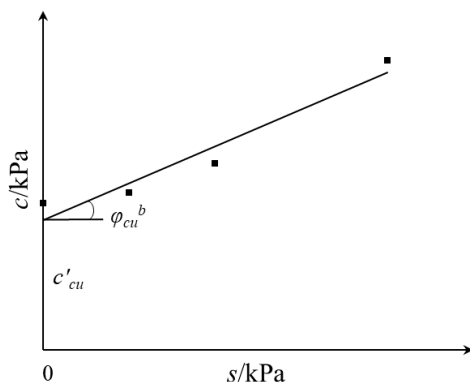


图 9.5.21 总凝聚力和基质吸力关系曲线

【条文说明】：9.5.21 9.5.19、9.5.20 和 9.5.21 这 3 条是按净总应力进行分析确定非饱和土的抗剪强度指标。

9.5.22 如按总应力进行分析，不考虑气压力和破坏时基质吸力对抗剪强度的影响，破坏时的偏应力、总平均应力、总应力摩尔圆的半径和圆心坐标，应按下列各式计算：

$$q_{tf} = (\sigma_{1t} - \sigma_{3t})_f \quad (9.5.22-1)$$

$$p_{tf} = \sigma_{3tf} + \frac{1}{3}(\sigma_{1t} - \sigma_{3t})_f \quad (9.5.22-2)$$

$$\bar{q}_{tf} = \frac{1}{2}(\sigma_{1t} - \sigma_{3t})_f \quad (9.5.22-3)$$

$$\bar{p}_{tf} = \frac{1}{2}(\sigma_{1t} + \sigma_{3t})_f \quad (9.5.22-4)$$

式中： q_{tf} — 剪切破坏时的偏应力应力（kPa）；

p_{tf} — 剪切破坏时的总平均应力（kPa）；

$\bar{q}_{tf}$ — 剪切破坏时的总应力摩尔圆的半径（kPa）。

$\bar{p}_{tf}$ — 剪切破坏时的总应力摩尔园中心坐标（kPa）；

9.5.23 以 $\bar{q}_{tf}$ 为纵坐标，以 $\bar{p}_{tf}$ 为横坐标，绘制破坏时总应力摩尔园的半径和园心坐标的关系曲线（图 9.5.23），可用直线拟合，直线的截距和倾角分别用 $\bar{c}_{cu}^t$ 和 $\bar{\phi}_{cu}^t$ 表示，则按总应力分析得到的内摩擦角和总凝聚力，应分别按下式计算：

$$\sin \phi_{cu}^t = \tan \bar{\phi}_{cu}^t \quad (9.5.23-1)$$

$$c_{cu}^t = \frac{\bar{c}_{cu}^t}{\cos \phi_{cu}^t} \quad (9.5.23-2)$$

式中： ϕ_{cu}^t — 按总应力分析得到的内摩擦角（°）；

c_{cu}^t — 按总应力分析得到的总凝聚力（kPa）。

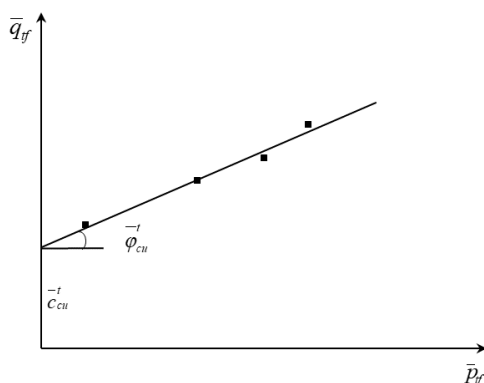


图 9.5.23 破坏时总摩尔圆的半径和圆心坐标的关系曲线

9.5.24 以破坏时的偏应力为纵坐标，以破坏时的总平均应力为横坐标，绘制破坏时的偏应力和总平均应力的关系曲线（图 9.5.24），可用直线拟合，直线的截距和倾角分别用 ξ_{cu}^t 和 ω_{cu}^t 表示，则与破坏时破坏面上的净法向应力相关的内摩擦角和总凝聚力，应分别按下式计算：

$$\sin \phi_{cu}^t = \frac{3 \tan \omega_{cu}^t}{6 + \tan \omega_{cu}^t} \quad (9.5.24-1)$$

$$c_{cu}^t = \frac{3 - \sin \phi_{cu}^t}{6 \cos \phi_{cu}^t} \xi_{cu}^t \quad (9.5.24-2)$$

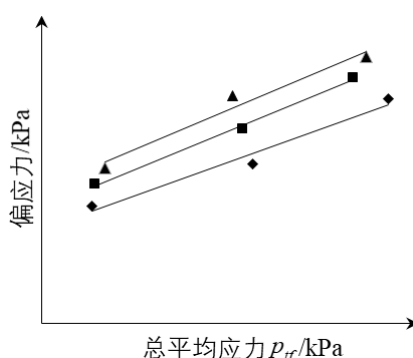


图 9.5.24 某非饱和土在破坏时的偏应力和总平均应力的关系曲线

【条文说明】：9.5.24 9.5.22 和 9.5.24 这 2 条是按总应力进行分析确定非饱和土的抗剪强度指标。

9.5.25 控制气压力和净围压为常数的固结不排水剪切试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 9.4（一）和表 9.4（二）的规定。

附录 E 表 9.4 (一) 控制气压力和净围为常数的固结不排水剪切试验记录表 (测孔隙水压力)

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		土样种类		
土样初始尺寸	直径×高 =	初始干密度(g/cm³)		
初始质量含水率 (%)		排水量管 比例系数	cm³ / 排水量管 1mm 水柱	
气压力 (kPa)		净围压 (kPa)		
试验阶段	固结阶段	内、外压力室 压力-体积控制器 (PVC)分辨率	压力: 1kPa 体积: 1mm³	
经历时间	固结阶段的变形和排水			
	时间 年 - 月 - 日 - 时 - 分	内 PVC 体变数 (mm³)	外 PVC 体变 数 (mm³)	排水量管读数 (mm)
0				
5min				
10min				
30min				
1h				
2h				
4h				
6h				
8h				
10h				
12h				
14h				
16h				
18h				
20h				
22h				
24h				
26h				
28h				
30h				
32h				
34h				
36h				
38h				
40h				
.....				

试样总体变量 (cm ³)				
试样总排水量 (cm ³)				

附录 E 表 9.4 (二) 控制气压力力和净围为常数的固结不排水剪切试验记录表 (测孔隙水压力)

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			土样种类		
土样初始尺寸	直径×高 =		初始干密度(g/cm ³)		
初始质量含水率 (%)			排水量管 比例系数	cm ³ / 排水量管 1mm 水柱	
气压力 (kPa)			内、外压力室 压力-体积控制器 (PVC) 分辨率	压力: 1kPa 体积: 1mm ³	
净围压 (kPa)					
试验阶段	剪切阶段				
测力计率定系数 C(N/0.01mm)			压力室活塞横截面积 (mm ²)		
剪切速率 (mm/min)			备注		
剪切过程的轴向变形、体变和排水					
时间 月 - 日 - 时 - 分	轴向变形 (0.01mm)	轴向荷载读数 (N)	内 PVC 体变数 (mm ³)	外 PVC 体变数 (mm ³)	孔隙水压力 (kPa)
	5				
	10				
	20				
	30				
	40				
	60				
	80				
	100				
	120				
	140				
	160				
					
试样最终水压力 (kPa)					
试样总体变量 (cm ³)					

9.6 控制净围压为常数的不固结排气不排水剪切试验

(试验全过程气压为零, 不测孔隙水压力)

9.6.1 本试验所有的主要仪器设备是应变控制式非饱和土三轴仪(图 9.1.4-1), 应与本标准第 9.1.4 条相同。

9.6.2 进行本试验无需在试样底座上放置高进气值陶土板, 应在试样底座上依次放置透水石和滤纸, 在试样顶端应依次放置滤纸和透水石, 透水石和滤纸的含水率应与试样的初始含水率相同。

9.6.3 进行本试验前必须标定内压力室及其与压力-体积控制器连结的管路在不同压力下的体积变化, 应参照本标准 9.2.4 条进行。

9.6.4 试样的安装, 应按本标准的第 9.3.4 条第 1~9 款进行。

9.6.5 关闭排水阀, 打开排气阀(与大气相通), 同时同步等值给内外压力室施加围压到预定值, 不宜一步加到位, 应按每分钟 25kPa 的增量分多步施加。

9.6.6 试验的剪切阶段, 应按下列步骤进行:

- 1 按本标准第 9.5.6 条的第 1 款做好剪切前的准备工作。
- 2 剪切应变速粘土宜为 $0.05\%/min \sim 0.1\%/min$; 粉土为每分钟 $0.1\%/min \sim 0.5\%/min$ 。
- 3 其余步骤应按本标准 9.5.6 条的第 3、4 款进行。
- 4、完成一个试验后, 改变净围压或含水率, 安装下一个试样, 重复上述过程, 直到完成全部试验。

【条文说明】: 9.6.6 试验的剪切阶段, 应按下列步骤进行:

2 剪切应变速粘土宜为每分钟应变 $0.05\%/min \sim 0.1\%/min$, 粉土宜为 $0.1\%/min \sim 0.5\%/min$ 。对此规定说明如下。首先, 《土工试验方法标准》(GB/T 50123 — 2019) 第 19.4.2 条第 1 款规定, 饱和土的三轴不固结不排水剪切试验的剪切应变速率宜为 $0.5\% \sim 1.0\%$, 是本标准规定的非饱和土剪切速率的 2~10 倍。其次, 后勤工程学院孙发鑫和广西大学陈皓在对高庙子膨润土(粘土)和膨润土加砂混合料(粘土)做不固结不排水剪切试验前, 先通过对 3 种剪切应变速率($0.011mm/min$ 、 $0.015mm/min$ 、 $0.033mm/min$)进行比较试验, 结果发现, 3 种剪切应变速率对偏应力-轴向应变曲线的形态和峰值影响很小, 故选取 $0.033mm/min = 0.04125\%/min$ 作为不固结不排水试验的剪切应变速, 剪切到轴向应变 15%需要 6.06h。加拿大 J.Graham 等对膨润土的不固结不排水三轴剪切试验采用的剪切速率为 $0.1\%/min$, 剪切到轴向应变 15%仅需要 2.5h。

9.6.7 在剪切过程中试样的孔隙气压力恒为零，试样所受到的净围压、净大主应力、净平均应力和偏应力，应按下列各式计算。

$$\sigma_3 = \sigma_{3t} \quad (9.6.7-1)$$

$$\sigma_1 = \sigma_{1t} \quad (9.6.7-2)$$

$$p = \sigma_3 + \frac{1}{3}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (9.6.7-3)$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (9.6.7-4)$$

9.6.8 以试样的初始尺寸为基准，剪切过程中任一瞬时的试样的轴向应变、横截面积、偏应力数值、体应变、径向应变（小主应变）、偏应变和孔隙比，应按以下各式计算。

$$\varepsilon_{1i} = \frac{\Delta h_i}{h_0} \times 100\% \quad (9.6.8-1)$$

$$A_i = \frac{V_i}{h_i} = \frac{V_0 - \Delta V_i}{h_0 - \Delta h_i} \quad (9.6.8-2)$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{CR}{A_i} \times 10 \quad (9.6.8-3)$$

$$\varepsilon_{vi} = \frac{\Delta V_i}{V_0} \times 100\% \quad (9.6.8-4)$$

$$\varepsilon_{ri} = \varepsilon_{3i} = \frac{1}{2}(\varepsilon_{vi} - \varepsilon_{1i}) \quad (9.6.8-5)$$

$$\varepsilon_{si} = \bar{\varepsilon}_i = \frac{2}{3}(\varepsilon_{1i} - \varepsilon_{3i}) \quad (9.6.8-6)$$

$$e_i = e_0 - (1 + e_0)\varepsilon_{vi} \quad (9.6.8-7)$$

式中： ε_{1i} — 剪切过程中试样的轴向应变（%）；

Δh_i — 剪切过程中试样的高度变化（cm），等于变形百分表读数与测力计百分表读数之差（以 cm 为单位计量）；

V_i — 试样在剪切过程中任一时刻的体积（cm³）；

h_i — 试样在剪切过程中任一时刻的高度（cm）；

A_i — 试样在剪切过程中任一时刻的面积（cm²）；

ΔV_i — 剪切过程中试样任一时刻的体积变化量，等于内压力室中水的体积变化量与活塞杆进入压力室中的体积之和（cm³），应考虑围压对体变进行校正；其中活塞进入压力室的体积等于变形百分表读数与测力计百分表读数之差乘以活塞的横截

面积 (cm^3) ;

$\sigma_1 - \sigma_3$ — 偏应力, 亦称主应力差 (kPa) ;

C — 测力计率定系数 ($\text{N}/0.01\text{mm}$ 或 N/mV) ;

R — 测力计读数 (0.01mm) ;

ε_{vi} — 剪切过程中试样的体应变 (%) ;

$\varepsilon_{ri} = \varepsilon_{3i}$ — 剪切过程中试样的径向应变或小主应变 (%) ;

$\varepsilon_{si} = \bar{\varepsilon}_i$ — 剪切过程中试样的偏应变 (%) ;

e_i — 剪切过程中试样的孔隙比。

9.6.9 以试样初始含水率为基准, 剪切过程中试样的饱和度, 应按下列各式计算:

$$S_{ri} = \frac{G_s w_0}{e_i} \quad (9.6.9)$$

式中: S_{ri} — 剪切过程中试样的饱和度 (%) 。

9.6.10 以偏应力为纵坐标, 轴向应变为横坐标, 绘制偏应力与轴向应变关系曲线 (图 9.6.10)。取曲线上偏应力的峰值作为破坏点, 无峰值时, 取 15%轴向应变时的偏应力作为破坏点。

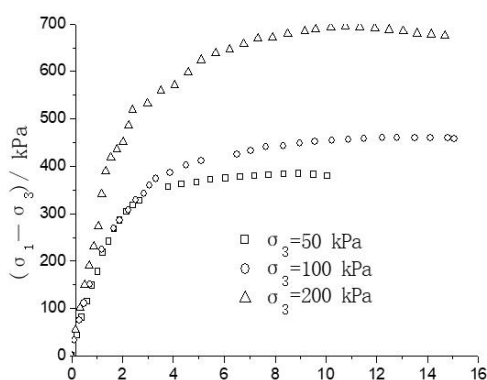


图 9.6.10 某非饱和土不排水剪的偏应力与轴向应变关系曲线
(干密度 $1.85\text{g}/\text{cm}^3$, 含水率 15.5%)

9.6.11 以体应变为纵坐标, 轴向应变为横坐标, 绘制体应变与轴向应变关系曲线 (图 9.6.11) 。

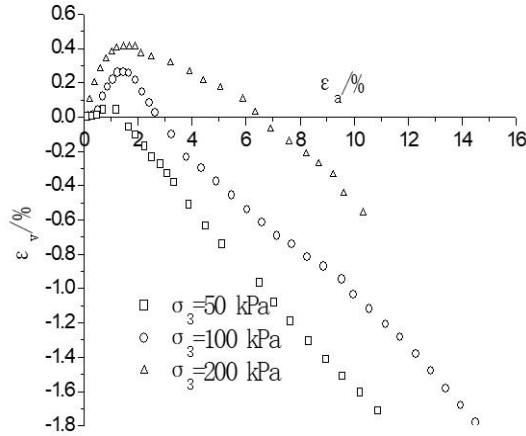


图 9.6.11 某非饱和土不排水剪的体应变与轴向应变关系曲线（干密度 1.85g/cm^3 ，含水率 15.5% ）

9.6.12 剪切破坏时的偏应力、净平均应力、净应力摩尔圆的半径和圆心坐标，应按本标准第 9.4.19 条的式 (9.4.19-1)、(9.4.19-2)、(9.4.19-4)和 (9.4.19-5)计算。

9.6.13 以破坏时净应力摩尔圆的半径 $\bar{q}$ 为纵坐标，以破坏时净应力摩尔圆的圆心坐标 $\bar{p}$ 为横坐标，绘制破坏时净应力摩尔圆的半径和圆心坐标的关系曲线（图 9.6.13），可用直线拟合，直线的截距和倾角分别用 $\bar{c}_{uu}$ 和 $\bar{\phi}_{uu}$ 表示，则破坏时与破坏面上的净法向应力相关的内摩擦角和总凝聚力，应分别按下式计算：

$$\sin \phi'_{uu} = \tan \bar{\phi}_{uu} \quad (9.6.13-1)$$

$$c_{uu} = \frac{\bar{c}_{uu}}{\cos \bar{\phi}_{uu}} \quad (9.6.13-2)$$

式中： ϕ'_{uu} —— 控制净围压为常数的不固结排气不排水试验得到的内摩擦角（°）；

c_{uu} —— 控制净围压为常数的不固结排气不排水试验得到的总凝聚力（kPa）。

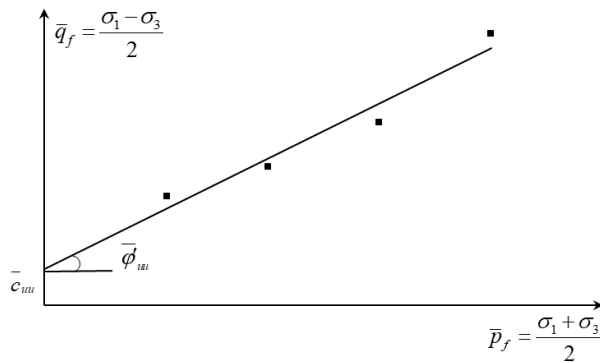


图 9.6.13 破坏时净应力摩尔圆的半径和圆心坐标的关系曲线

9.6.14 以破坏时的偏应力为纵坐标，以破坏时的净平均应力为横坐标，绘制破坏时的偏应力和净平均应力的关系曲线（图 9.6.14），可用直线拟合，直线的截距和倾角分别用 ξ_{uu} 和 ω_{uu} 表示，则破坏时与破坏面上的净法向应力相关的内摩擦角和总凝聚力，

应分别按下式计算：

$$\sin \phi'_{uu} = \frac{3 \tan \omega_{uu}}{6 + \tan \omega_{uu}} \tag{9.6.14-1}$$

$$c_{uu} = \frac{3 - \sin \phi'_{uu}}{6 \cos \phi'_{uu}} \xi_{uu} \tag{9.6.14-2}$$

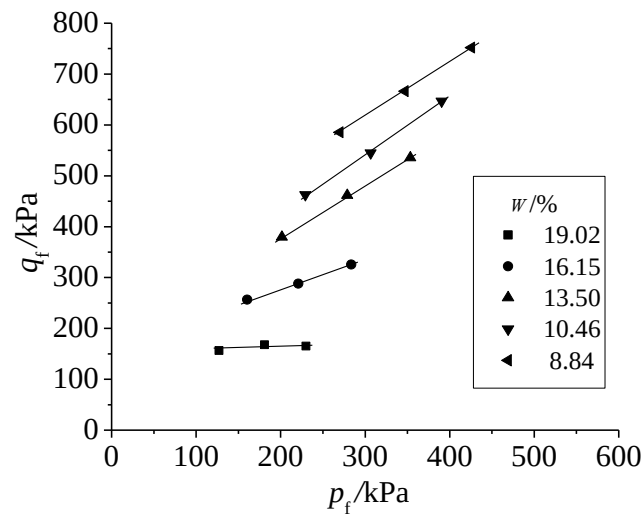


图 9.6.14 某填土在不同含水率下剪切破坏时的偏应力和净平均应力的关系曲线
9.6.15 由本标准第 9.6.13 条和第 9.6.14 条所得强度指标是含水率的函数，总应力摩擦角和总凝聚力与含水率的关系曲线分别见图 9.6.15-1 和图 9.6.16-2。

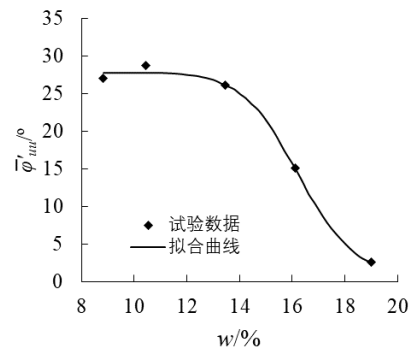


图 9.6.15-1 某填土的总内摩擦角与质量含水率的关系曲线

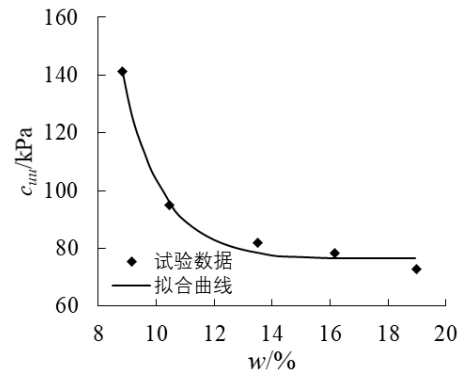


图 9.6.15-2 某填土的总黏聚力与质量含水率的关系曲线

9.6.16 分别以径向应变、偏应变和饱和度为纵坐标，以轴向应变为横坐标，可分别绘制径向应变与轴向应变关系曲、偏应变与轴向应变关系曲线及饱和度与轴向应变关系曲线。

9.6.17 控制净围压为常数的不固结排气不排水剪切试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 9.5 的规定。

附录 E 表 9.5 制控制净围压为常数的不固结排气不排水剪切试验记录表
(不测孔隙水压力)

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			土样种类		
土样初始尺寸	直径×高 =		初始干密度(g/cm ³)		
初始质量含水率 (%)			排水量管 比例系数	cm ³ / 排水量管 1mm 水柱	
气压力 (kPa)	0		内、外压力室 压力-体积控制器 (PVC) 分辨率	压力: 1kPa 体积: 1mm ³	
净围压 (kPa)					
测力计率定系数 C(N/0.01mm)			压力室活塞横截面积 (mm ²)		
剪切速率 (mm/min)			备注		
剪切过程的轴向变形、体变和排水					
时间 月 - 日 - 时 - 分	轴向变形 (0.01mm)	轴向荷载读数 (N)	内 PVC 体变读数 (mm ³)	外 PVC 体变 读数 (mm ³)	备注
	5				
	10				
	20				
	30				
	40				
	60				
	80				
	100				
	120				
	140				
	160				
					
试样总体变量 (cm ³)					
试样轴向变形 (mm)					

9.7 控制净平均应力为常数而基质吸力逐级增大广义持水特性试验

（即考虑净平均应力影响的广义持水特性试验）

9.7.1 本试验所有的主要仪器设备是应变控制式非饱和土三轴仪（图 9.1.4-1）或应力控制式（图 9.1.4-2），应与本标准第 9.1.4 条相同。

9.7.2 进行本试验前必须先饱和和高进气值陶土板，应按本标准 9.2.1 条进行。

9.7.3 进行本试验前必须在饱和陶土板后标定内压力室及其与压力-体积控制器连结的管路在不同压力下的体积变化，应按本标准 9.2.4 条进行。

9.7.4 本试验的土样应采用饱和土样，土样的饱和方法应按《土工试验方法标准》（GB/T 50123—2019）第 4.6 节的方法进行。

9.7.5 试样的安装，应按本标准的第 9.3.4 条第 1～9 款进行。

9.7.6 控制净平均应力为常数而基质吸力逐级增大的持水特性试验，应按下列步骤进行：

1 给试样施加预定的净平均应力（即净各向等值压力，用 p 表示），不宜一步到位，应按每分钟 25kPa 的速率分多步施加，必须同时同步等值提高内、外压力室的压力。在施加预定的净平均应力后，宜按下列时间顺序测记体变和排水量。时间为 5min、10min、30min、1h、2h、4h、6h、8h、10h，至稳定为止。稳定标准是：在 2h 内，体变不超过 6mm^3 ，排水量不超过 12mm^3 ，且历时不宜少于 48h。

2 确定施加的基质吸力等级，基质吸力的等级宜为 5、10、20、30、50、75、100、125、150、175、200、250、300、350、400、450、500、600、800、1000kPa。

3 在施加基质吸力的同时，必须对内、外压力室同时同步等值地施加大平均应力，以维持净平均应力为不变。待基质吸力达到预定值后，宜按下列时间顺序测记体变和排水量。时间为 5min、10min、30min、1h、2h、4h、6h、8h、10h，至稳定为止。稳定标准是：在两小时内，体变不超过 6mm^3 ，排水量不超过 12mm^3 ，且历时不宜少于 72h。在稳定过程中，每隔 6~8h 冲洗高进气值陶土板和螺旋槽一次。

4 如需从某一基质吸力下进行吸力卸载，必须同时同步等值减少内、外室压力以保持净平均应力不变，不宜一步卸到位，而应按 -25kPa 的增量，逐步卸载，测记每级卸载的体变值和排水量，直到二者达到稳定为止。稳定标准同本条第 3 款。在稳定过程中，每隔 6~8h 冲洗高进气值陶土板和螺旋槽一次。

6 试验结束，应先同时同步等值卸除内、外压力室的净平均应力后，并使剩余的围压高于气压 5kPa，再同时同步等值卸除气压力和剩余围压；取掉两个排气孔螺钉，

放掉压力室中的水，卸除压力室，拆卸试样，量测试样含水率。

【条文说明】：9.7.6 控制净平均应力为常数而基质吸力逐级增大的持水特性试验，应按下列步骤进行：

1 给试样施加预定的净平均应力，稳定标准是：在 2h 内，体变不超过 6mm^3 ，排水量不超过 12mm^3 ，且历时不宜少于 48h。确定此标准的有关依据见本标准条文说明的第 9.3.5 条第 4 款的说明。

3 施加基质吸力的稳定标准是：在 2h 内，体变不超过 6mm^3 ，排水量不超过 12mm^3 ，且历时不宜少于 72h。确定此标准的有关依据见本标准条文说明的第 9.3.5 条第 2 款的说明。

9.7.7 重新饱和和高进气值陶土板，安装下一个试样，改变净平均应力，按照本标准 9.5.6 条的方法步骤进行试验，直到完成全部试验。

9.7.8 应根据试验结束后量测的试样含水率，对试验过程中的排水量按历时进行校正；同时应把试验过程中量测的体变按本标准 9.2.4 条的标定曲线（图 9.2.4）进行校正。

9.7.9 以试样的初始体积和初始孔隙比为基准，在净平均应力作用下试样变形稳定后的体应变、孔隙比和比体积，应分别按下列各式计算：

$$\varepsilon_v^p = \frac{\Delta V^p}{V_0} \times 100\% \quad (9.7.9-1)$$

$$e_p = e_0 - (1 + e_0) \varepsilon_v^p \quad (9.7.9-2)$$

$$v_p = 1 + e_p \quad (9.7.9-3)$$

式中： ε_v^p — 在净平均应力作用下试样变形稳定后的体应变（%）；

ΔV^p — 在净平均应力作用下试样变形稳定后的体积变化量（应按图 9.2.4 的标定曲线进行校正）（ cm^3 ）；

V_0 — 试样的初始体积（ cm^3 ）；

e_p — 在净平均应力作用下试样变形稳定后的孔隙比；

e_0 — 试样的初始孔隙比；

v_p — 在净平均应力作用下试样变形稳定后的比体积。

9.7.10 以试样的初始体积和初始质量含水率为基准，在净平均应力作用下试样排水稳定后的液相体应变和质量含水率，应分别按以下两式计算：

$$\varepsilon_w^p = \frac{\Delta V_w^p}{V_0} \times 100\% \quad (9.7.10-1)$$

$$w_p = w_0 - \frac{1+e_0}{G_s} \varepsilon_w^p \quad (9.7.10-2)$$

式中： ε_w^p — 在净平均应力作用下试样排水稳定后的液相体应变（%），即试样体积含水率的改变量；

ΔV_w^p — 在净平均应力作用下试样排水稳定后的排水体积（ cm^3 ）；

w_p — 在净平均应力作用下试样排水稳定后的质量含水率（%）；

w_0 — 试样的初始质量含水率（%）；

G_s — 土颗粒的相对密度。

9.7.11 以净平均应力作用下试样体变稳定后的体积和孔隙比为基准，试样在第 i 级基质吸力作用下的体应变、孔隙比和比体积，应按下列各式计算：

$$\varepsilon_{v,i} = \frac{\sum_{j=1}^i \Delta V_j}{V^p} \times 100\% \quad (9.7.11-1)$$

$$e_i = e_p - (1+e_p) \varepsilon_{v,i} \quad (9.7.11-2)$$

$$\nu_i = 1 + e_i \quad (9.7.11-3)$$

$$V^p = V_0 - \Delta V^p \quad (9.7.11-4)$$

式中： $\varepsilon_{v,i}$ — 在第 i 级基质吸力作用下试样变形稳定后的体应变；

$\sum_{j=1}^i \Delta V_j$ — 在第 i 级基质吸力作用下试样变形稳定后的体积变化量（不计施加

净平均应力引起的体积变化量，应按图 9.2.4 的标定曲线进行校正）（ cm^3 ）；

V^p — 在净平均应力作用下试样变形稳定后的体积（ cm^3 ）；

e_i — 在第 i 级基质吸力作用下试样变形稳定后的孔隙比；

ν_i — 在第 i 级基质吸力作用下试样变形稳定后的比体积。

9.7.12 以净平均应力作用下试样体变稳定后的体积和质量含水率为基准，试样在第 i 级基质吸力作用下排水稳定后的液相体应变和质量含水率，应按下列各式计算：

$$\varepsilon_{w,i} = \frac{\sum_{j=1}^i \Delta V_{w,j}}{V^p} \times 100\% \quad (9.7.12-1)$$

$$w_i = w_p - \frac{1+e_p}{G_s} \varepsilon_{w,i} \quad (9.7.12-2)$$

式中： $\varepsilon_{w,i}$ — 试样在第 i 级基质吸力作用下排水稳定后的液相体应变（%），即试样体积含水率的改变量：

$\sum_{j=1}^i \Delta V_{w,j}$ — 试样在第 i 级基质吸力作用下排水稳定后的总排水量（不计施加基质吸力引起的排水量）（ cm^3 ）：

w_i — 试样在第 i 级基质吸力作用下排水稳定后的质量含水率（%）。

9.7.13 分别以 ε_v 和孔隙比 e （或 v ）为纵坐标，以基质吸力的常用对数（ $\log s$ ）为横坐标，绘制各级基质吸力作用下的 ε_v - $\log s$ 关系曲线（图 9.7.13-1）和 e - $\log s$ 关系曲线（图 9.7.13-2），两图中的曲线的转折点对应的基质吸力就是试样的初始屈服基质吸力。初始屈服基质吸力与净平均应力关系不明显，宜视为常数，用 s_{y0} 表示。

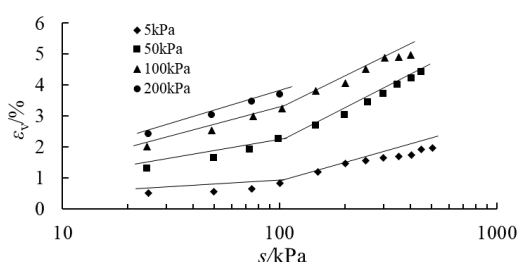


图 9.7.13-1 某土的 ε_v - $\log s$ 关系曲线

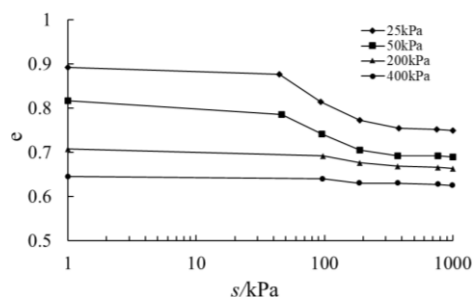


图 9.7.13-2 某土的 e - $\log s$ 关系曲线

【条文说明】：9.7.13 本条用广义持水特性曲线确定初始屈服吸力，与巴塞罗那模型的吸力增加屈服概念相应，为进行非饱和土的弹塑性变形分析提供方便。

9.7.14 以 v 为纵坐标，以 $\ln(s + p_{atm})$ 为横坐标，绘制各级基质吸力作用下（可包括吸力加载过程和吸力卸载过程）的 v - $\ln(s + p_{atm})$ 关系曲线（图 9.7.14）。吸力加、卸载过程的曲线均可用直线拟合，宜按下两式描述：

$$v = N(p) - \lambda_s(p) \ln(s + p_{atm}) \quad (9.7.14-1)$$

$$v = v_k(p) - k_s \ln(s + p_{atm}) \quad (9.7.14-2)$$

式中： $N(p)$ — 对应于某一净平均应力，图 9.7.14 中描述加载过程直线的截距；

$\lambda_s(p)$ — 对应于某一净平均应力，图 9.7.14 中描述加载过程直线的斜率；

$v_k(p)$ — 对应于某一净平均应力，描述卸载过程拟合直线的截距；

k_s — 对应于某一净平均应力，描述卸载过程拟合直线的斜率。

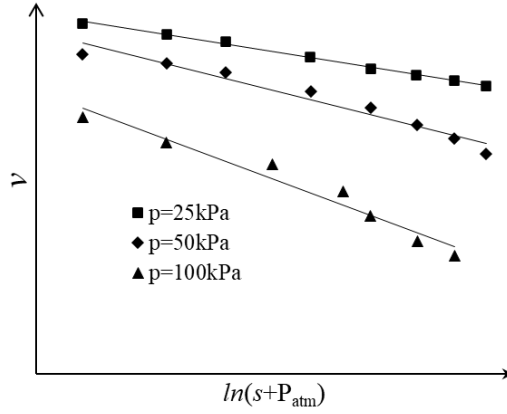


图 9.7.14 某土在不同净围压下基质吸力增大过程的 $v - \ln(s + p_{atm})$ 关系曲线

【条文说明】：9.7.14 本条和本标准 9.3.12 条相应，式 (9.7.14-1) 和式 (9.7.14-2) 分别与式 (9.3.12-1) 和式 (9.3.12-2) 相应，为进行非饱和土的弹塑性变形分析提供方便。

9.7.15 分别以 ε_v 、 w （或 ε_w ）为纵坐标，以 $\log \frac{s + p_{atm}}{p_{atm}}$ （或 $\ln \frac{s + p_{atm}}{p_{atm}}$ ）为横坐标，绘制各级基质吸力作用下（可包括加载过程和卸载过程） $\varepsilon_v - \log \frac{s + p_{atm}}{p_{atm}}$ 的关系曲线

（图 9.7.15-1）、 $\varepsilon_w - \log \frac{s + p_{atm}}{p_{atm}}$ 关系曲线（图 9.7.15-2）和 $w - \log \frac{s + p_{atm}}{p_{atm}}$ 关系曲线

（图 9.7.15-3）（或）。3 张图中的曲线可用直线拟合，宜按下列各式描述：

$$\varepsilon_v = \varepsilon_v^p + \lambda_\varepsilon(p) \log \frac{s + p_{atm}}{p_{atm}} \quad (9.7.15-1)$$

$$\varepsilon_w = \varepsilon_w^p + \lambda_w(p) \log \frac{s + p_{atm}}{p_{atm}} \quad (9.7.15-2)$$

$$w = w_p - \beta(p) \log \frac{s + p_{atm}}{p_{atm}} \quad (9.7.15-3)$$

从式(9.7.12-2)可得：

$$\beta(p) = -\frac{1 + e_p}{G_s} \lambda_w(p) \quad (9.7.15-4)$$

式中： $\lambda_\varepsilon(p)$ —图 9.7.15-1 中直线的斜率；

$\lambda_w(p)$ —图 9.7.15-2 中直线的斜率；

$\beta(p)$ —图 9.7.15-3 中直线的斜率。

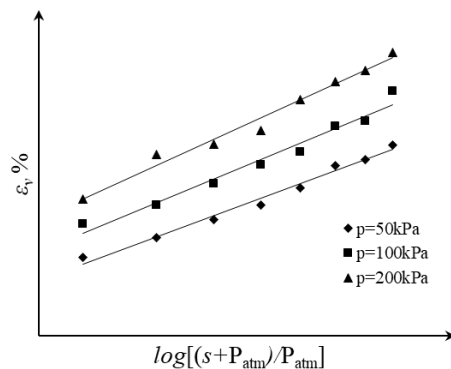


图 9.7.15-1 某土样在不同净围压下吸力增大的 $\varepsilon_v - \log \frac{s + p_{atm}}{p_{atm}}$ 关系曲线

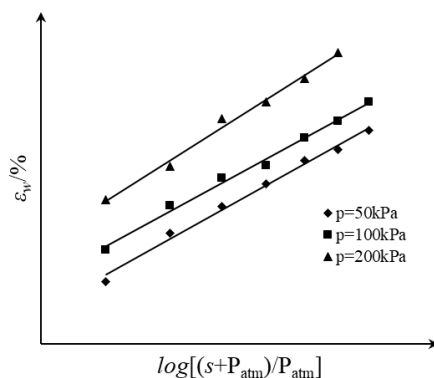


图 9.7.15-2 某土样的 $\varepsilon_w - \log \frac{s + p_{atm}}{p_{atm}}$ 关系曲线

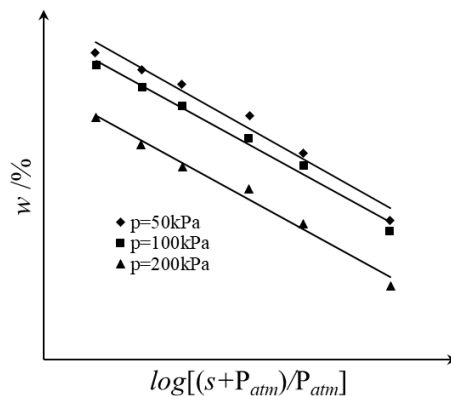


图 9.7.15-3 某土样的 $w - \log \frac{s + p_{atm}}{p_{atm}}$ 关系曲线

【条文说明】：9.7.15 本条用无量纲参数整理试验资料，以便用非线性模型描述吸力增加引起的变形和水量变化。

9.7.16 以质量含水率为纵坐标，以无量纲参数 $\frac{p}{p_{atm}}$ 为横坐标，绘制各净平均应力下的

质量含水率 w_p 与无量纲参数 $\frac{p}{p_{atm}}$ 的关系曲线，见图 9.7.16。各净平均应力作用下的质

量含水率 w_p 与无量纲参数 $\frac{p}{p_{atm}}$ 的关系曲线可用下式描述

$$w_p = w_0 - \tilde{a} \frac{p}{p_{atm}} \quad (9.7.15)$$

式中： $\tilde{a}$ — 图 9.7.16 中直线的斜率，无量纲参数。

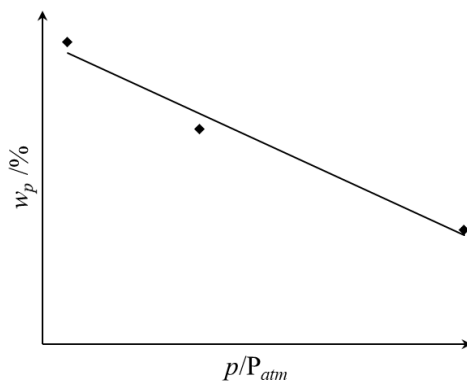


图 9.7.16 $w_p - \frac{p}{p_{atm}}$ 关系曲线

【条文说明】：9.7.16 本条确定式 (9.7.15-3) 中的 w_p 与净平均应力之间的关系，该关系反映净平均应力对持水特性的影响。

9.7.17 以 $\lambda_\varepsilon(p)$ 为纵坐标，以 $\log \frac{p + p_{atm}}{p_{atm}}$ 为横坐标，绘制 $\lambda_\varepsilon(p)$ 和 $\log \frac{p + p_{atm}}{p_{atm}}$ 的关系曲线，可用直线拟合 (图 9.7.17)，应按下式描述：

$$\lambda_\varepsilon(p) = \lambda_\varepsilon^0(p) + m_3 \log \frac{p + p_{atm}}{p_{atm}} \quad (9.7.17)$$

式中： $\lambda_\varepsilon^0(p)$ — 图 9.7.17 中直线的截距，相应于净平均应力等于零的纵坐标；

m_3 — 图 9.7.17 中直线的斜率。

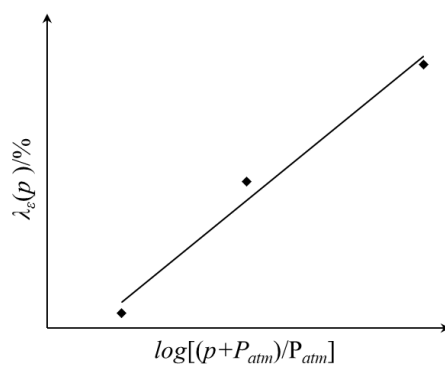


图 9.7.17 $\lambda_\varepsilon(p)$ 和 $\log \frac{p + p_{atm}}{p_{atm}}$ 的关系曲线

【条文说明】：9.7.17 本条确定式 (9.7.15-1)中的 $\lambda_e(p)$ 与无量纲参数 $\log \frac{p+p_{atm}}{p_{atm}}$ 之间的关系。

9.7.18 非饱和土的增量非线性本构模型及相关参数，应按下列各式确定：

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{1+\mu_t}{E_t} d(\sigma_{ij} - u_a \delta_{ij}) - 3 \frac{\mu_t}{E_t} \delta_{ij} dp + \frac{1}{H_t} \delta_{ij} ds \quad (9.7.18-1)$$

$$d\varepsilon_w = \frac{dp}{K_{wt}} + \frac{ds}{H_{wt}} \quad (9.7.18-2)$$

$$H_t = 3 \ln 10 \frac{s+p_{atm}}{\lambda_e(p)} \quad (9.7.18-3)$$

$$H_{wt} = \ln 10 \frac{s+p_{atm}}{\lambda_w(p)} \quad (9.7.18-4)$$

式中： $d\varepsilon_{ij}$ — 应变张量增量；

$d(\sigma_{ij} - u_a \delta_{ij})$ — 净总应力张量增量（kPa）；

dp — 净平均应力增量（kPa）；

ds — 基质吸力增量（kPa）；

δ_{ij} — Kronecker 记号；

E_t — 非饱和土的切线杨氏模量（kPa），应按本标准第 9.4.26 条的式(9.4.26)

确定；

H_t — 与基质吸力相关的土的变形模量（kPa）；

K_{wt} — 与净平均应力相关的水的体变模量（kPa），应按本标准第 9.4.30 条的

式（9.4.30）确定；

H_{wt} — 与基质吸力相关的水的体变模量（kPa）；

μ_t — 非饱和土的切线泊松比，按弹性理论由切线杨氏模量 E_t 和切线体积模量 K_t （按第 9.4.28 条的式（9.4.28）确定）换算求得。

【条文说明】：9.7.18 本条与本标准 9.4.23 ~ 9.4.30 一起，完整确定非饱和土的增量非线性本构模型的参数。

9.7.19 控制净平均应力为常数而基质吸力逐级增大的广义持水特性试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 9.6（一）和表 9.6（二）的规定。

附录 E 表 9.6 (一) 控制净平均应力为常数而基质吸力逐级增大的广义持水特性试验记录表

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		土样种类		
土样初始尺寸	直径×高 =	初始干密度(g/cm ³)		
初始质量含水率 (%)		排水量管比例系数	cm ³ / 排水量管 1mm 水柱	
初始基质吸力 (kPa)	0	净平均应压 (kPa)		
试验阶段	在净平均应力作用下的 固结阶段	内、外压力室 压力-体积控制器 (PVC)分辨率	压力: 1kPa 体积: 1mm ³	
经历时间	固结阶段的体变和排水			
	时间 年 - 月 - 日 - 时 - 分	内 PVC 体变数 (mm ³)	外 PVC 体变 数 (mm ³)	排水量管读数 (mm)
0				
5min				
10min				
30min				
1h				
2h				
4				
6h				
8h				
10h				
12h				
14h				
16h				
18h				
20h				
22h				
24h				
26h				
28h				
30h				
32h				
34h				
36h				
38h				
40h				

.....				
试样总体变量 (cm ³)				
试样总排水量 (cm ³)				

附录 E 表 9.6 (二) 控制净平均应力为常数而基质吸力逐级增大的广义持水特性试验记录表

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		土样种类		
土样初始尺寸	直径×高 =	初始干密度(g/cm ³)		
初始质量含水率 (%)		排水量管 比例系数	cm ³ / 排水量管 1mm 水柱	
初始基质吸力 (kPa)	0	净平均应压 (kPa)		
试验阶段	基质吸力增大阶段	内、外压力室 压力-体积控制器 (PVC)分辨率	压力: 1kPa 体积: 1mm ³	
经历时间	在各级基质吸力作用下的体变和排水			
	时间 年 - 月 - 日 - 时 - 分	基质吸力 (kPa)	内 PVC 体变 数 (mm ³)	排水量管读数 (mm)
0				
5min				
10min				
30min				
1h				
2h				
4h				
6h				
8h				
10h				
12h				
14h				
16h				
18h				
20h				
22h				
24h				
26h				
28h				
30h				
32h				
34h				
36h				
38h				
40h				

.....				
试样总体变量 (cm ³)				
试样总排水量 (cm ³)				

9.8 控制基质吸力与净平均应力为常数而偏应力逐级增大的排水剪切试验

9.8.1 本试验所有的主要仪器设备是应力控制式非饱和土三轴仪（图 9.1.4-2），应与本标准第 9.1.4 条相同。

9.8.2 进行本试验前必须先饱和高进气值陶土板，应按本标准 9.2.1 条进行。

9.8.3 进行本试验前必须在饱和陶土板后标定内压力室及其与压力-体积控制器连结的管路在不同压力下的体积变化，应按本标准 9.2.4 条进行。

9.8.4 进行本试验前必须对轴向压力加载装置进行标定，并对其提供持续稳定轴向力能力进行测试。

9.8.5 试样的安装，应按本标准的第 9.3.4 条第 1~9 款进行。

9.8.6 同时控制基质吸力和净平均应力都为常数而偏应力增大的排水剪切试验，应按下列步骤进行：

1 给试样施加预定的基质吸力和净平均应力，先施加基质吸力，紧接着施加净平均应力；在施加基质吸力时，不宜一步到位，应按每分钟 25kPa 的速率分多步施加，必须同时同步等值提高内、外压力室的压力，且内外压力室的压力始终高于气压力 5kPa。在基质吸力达到预定值后，应按每分钟 25kPa 的速率施加净平均应力达到预定值。宜按下列时间顺序测记体变和排水量，时间为 5min、10min、30min、1h、2h、4h、6h、8h、10h，至稳定为止。稳定标准是：在 2h 内，体变不超过 6mm³，排水量不超过 12mm³，且历时不宜少于 72h。在稳定过程中，每隔 6~8h 冲洗高进气值陶土板和螺旋槽一次。

2 确定施加的偏应力等级，偏应力的等级宜为 15、30、45、60、75、90、120、150、180、210、240、270、300、360、420、480、540kPa。

3 在增大偏应力的同时，必须同时同步等值地减少内、外压力室的压力及气压力以保持净平均应力不变，应按下列式计算：

由

$$\Delta p = \frac{1}{3} \Delta[(\sigma_1 - u_a) + 2(\sigma_3 - u_a)] = \frac{1}{3} \Delta[(\sigma_1 - \sigma_3) + 3(\sigma_3 - u_a)] = 0 \quad (9.8.6-1)$$

得

$$\Delta(\sigma_3 - u_a) = -\frac{1}{3} \Delta(\sigma_1 - \sigma_3) = -\frac{1}{3} \Delta q \quad (9.8.6-2)$$

4 在施加各级偏应力后，宜按下列时间顺序测记体变和排水量。时间为 5min、

10min、30min、1h、2h、4h、6h、8h、10h，至稳定为止。稳定标准是：在2h内，轴向变形不超过0.01mm，体变不超过6mm³，排水量不超过12mm³，且历时不宜少于48h。在稳定过程中，每隔6~8h冲洗高进气值陶土板和螺旋槽一次。

5 试验结束，应先卸除偏应力，再卸除净平均应力后，并使剩余的内、外室围压高于气压5kPa，最后同时同步等值卸除气压力和剩余围压；取掉两个排气孔螺钉，放掉压力室中的水，卸除压力室，拆卸试样，量测试样含水率。

【条文说明】：9.8.6 同时控制基质吸力和净平均应力都为常数而偏应力增大的排水剪切试验，应按下列步骤进行：

1 给试样施加预定的基质吸力和净平均应力，先施加基质吸力，紧接着施加净平均应力；稳定标准是：在2h内，体变不超过6mm³，排水量不超过12mm³，且历时不宜少于72h。确定此标准的有关依据见本标准条文说明的第9.4.5条第3款的说明。

4 施加各级偏应力的稳定标准是：在2h内，轴向变形不超过0.01mm，体变不超过6mm³，排水量不超过12mm³，且历时不宜少于48h。确定此标准的有关依据见本标准条文说明的第5.3.2条第4款和第9.3.5条第4款的说明。

9.8.7 重新饱和和高进气值陶土板，安装下一个试样，改变基质吸力（或净平均应力），按照本标准9.5.6条的方法步骤进行试验，直到完成全部试验。

9.8.8 应根据试验结束后量测的试样含水率，对试验过程中的排水量按历时进行校正；同时应把试验过程中量测的体变按本标准9.2.4条的标定曲线（图9.2.4）进行校正。

9.8.9 以试样的初始体积和初始孔隙比为基准，在基质吸力和净平均应力作用下试样变形稳定后的体应变、孔隙比和比体积，应分别按下列各式计算：

$$\varepsilon_v^{sp} = \frac{\Delta V^{sp}}{V_0} \times 100\% \quad (9.8.9-1)$$

$$e_{sp} = e_0 - (1 + e_0) \varepsilon_v^{sp} \quad (9.8.9-2)$$

$$v_{sp} = 1 + e_{sp} \quad (9.8.9-3)$$

式中： ε_v^{sp} — 在基质吸力和净平均应力作用下试样变形稳定后的体应变（%）；

ΔV^{sp} — 在基质吸力和净平均应力作用下试样变形稳定后的体积变化量（应按图9.2.4的标定曲线进行校正）（cm³）；

V_0 — 试样的初始体积（cm³）；

e_{sp} — 在基质吸力和净平均应力作用下试样变形稳定后的孔隙比；

e_0 — 试样的初始孔隙比；

ν_{sp} — 在基质吸力和净平均应力作用下试样变形稳定后的比体积。

9.8.10 以试样的初始体积和初始质量含水率为基准，在基质吸力和净平均应力作用下试样排水稳定后的液相体应变和质量含水率，应分别按以下两式计算：

$$\varepsilon_w^{sp} = \frac{\Delta V_w^{sp}}{V_0} \times 100\% \quad (9.8.10-1)$$

$$w_{sp} = w_0 - \frac{1+e_0}{G_s} \varepsilon_w^{sp} \quad (9.8.10-2)$$

式中： ε_w^{sp} — 在基质吸力和净平均应力作用下试样排水稳定后的液相体应变

(%)，即试样体积含水率的改变量；

ΔV_w^{sp} — 在基质吸力和净平均应力作用下试样排水稳定后的排水体积 (cm^3)；

w_{sp} — 在基质吸力和净平均应力作用下试样排水稳定后的质量含水率

(%)；

w_0 — 试样的初始质量含水率 (%)；

G_s — 土颗粒的相对密度。

9.8.11 以基质吸力和净平均应力作用下试样体变稳定后的体积和孔隙比为基准，试样在第 i 级偏应力作用下的体应变、孔隙比和比体积，应按下列各式计算：

$$\varepsilon_{v,i} = \frac{\sum_{j=1}^i \Delta V_j}{V^{sp}} \times 100\% \quad (9.8.11-1)$$

$$e_i = e_{sp} - (1+e_{sp}) \varepsilon_{v,i} \quad (9.8.11-2)$$

$$\nu_i = 1+e_i \quad (9.8.11-3)$$

$$V^{sp} = V_0 - \Delta V^{sp} \quad (9.8.11-4)$$

式中： $\varepsilon_{v,i}$ — 在第 i 级偏应力作用下试样变形稳定后的体应变；

$\sum_{j=1}^i \Delta V_j$ — 在第 i 级偏应力作用下试样变形稳定后的体积变化量（不计施加净

平均应力引起的体积变化量，应考虑轴向活塞杆进入压力室的体积）(cm^3)；

V^{sp} — 在基质吸力和净平均应力作用下试样变形稳定后的体积 (cm^3)；

e_i — 在第 i 级偏应力作用下试样变形稳定后的孔隙比；

v_i — 在第 i 级偏应力作用下试样变形稳定后的比体积。

9.8.12 以基质吸力和净平均应力作用下试样体变稳定后的体积和质量含水率为基准，试样在第 i 级偏应力作用下排水稳定后的液相体应变和质量含水率，应按下列各式计算：

$$\varepsilon_{w,i} = \frac{\sum_{j=1}^i \Delta V_{w,j}}{V^{sp}} \times 100\% \quad (9.8.12-1)$$

$$w_i = w_{sp} - \frac{1+e_{sp}}{G_s} \varepsilon_{w,i} \quad (9.8.12-2)$$

式中： $\varepsilon_{w,i}$ — 试样在第 i 级偏应力作用下排水稳定后的液相体应变（%），即试样体积含水率的改变量；

$\sum_{j=1}^i \Delta V_{w,j}$ — 试样在第 i 级偏应力作用下排水稳定后的总排水量（不计施加基质吸力引起的排水量）（ cm^3 ）；

w_i — 试样在第 i 级偏应力作用下排水稳定后的质量含水率（%）。

9.8.13 以质量含水率 w 为纵坐标，以偏应力 q 为横坐标，绘制各级偏应力作用下 $w-q$ 的关系曲线（图 9.8.13），可用直线拟合，宜按下式描述：

$$w = w_{sp} - \tilde{c}(s, p) \frac{q}{p_{atm}} \quad (9.8.13)$$

式中： $\tilde{c}(s, p)$ — 图 9.8.13 中直线的斜率，宜对其做二元回归分析。

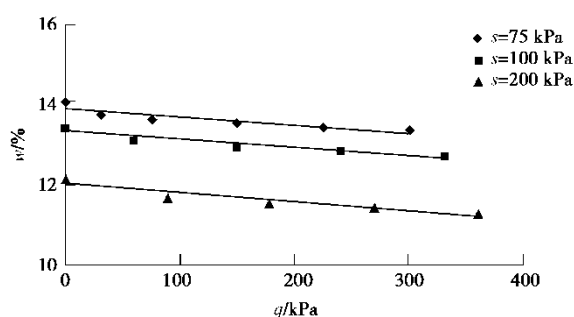


图 9.8.13 某土在吸力和净平均应力为常数而偏应力增大的剪切过程中的 $w-q$ 关系

【条文说明】：9.8.13 本条确定在基质吸力和净平均应力保持常数的剪切过程中含水率与偏应力的关系，该关系反映偏应力对持水特性的影响。

9.8.14 分别以偏应力和体应变为纵坐标，以轴向应变为横坐标，绘制偏应力与轴向应变的关系曲线（图 9.8.14）；亦可绘制体应变与轴向应变的关系曲线。

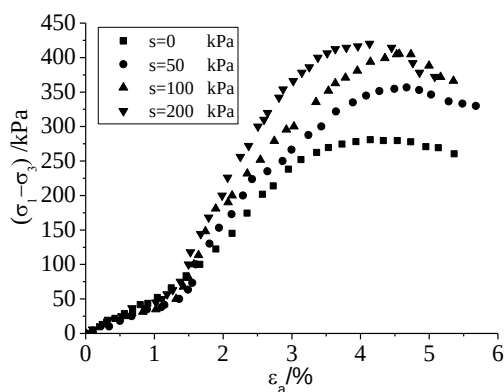


图 9.8.14 某土在净平均应力为 300 kPa 和不同吸力下的偏应力与轴向应变关系曲线

9.8.15 对图 9.8.14-1 中有峰值的曲线，取其峰值点作为破坏点；对无峰值的曲线，取 15%轴向应变对应的点作为破坏点。破坏时的偏应力、净平均应力、基质吸力、净应力摩尔圆的半径和圆心坐标，应按本标准的 9.4.19 条的式 (9.4.19-1)~(9.4.19-5) 计算。

9.8.16 与破坏时破坏面上的净法向应力相关的内摩擦角和总凝聚力，应按本标准 9.4.20 条的式 (9.4.20-1) 和式 (9.4.20-2) 计算；或者应按本标准 9.4.21 条的式 (9.4.21-1) 和式 (9.4.21-2) 计算。

9.8.17 试样的有效凝聚力 c' 和与基质吸力相关的摩擦角 ϕ^b 应按本标准 9.4.22 的方法条确定。

9.8.18 控制基质吸力和净平均应力为常数而偏应力逐级增大的三轴剪切试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 9.7（一）和表 9.7（二）的规定。

附录 E 表 9.7 (一) 控制基质吸力和净平均应力为常数而偏应力逐级增大的三轴剪切试验记录表

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		土样种类		
土样初始尺寸	直径×高 =	初始干密度(g/cm³)		
初始质量含水率 (%)		排水量管比例系数	cm³ / 排水量管 1mm 水柱	
基质吸力 (kPa)		净平均应力 (kPa)		
试验阶段	在基质吸力和净平均应力作用下的固结阶段	内、外压力室 压力-体积控制器 (PVC)分辨率	压力: 1kPa 体积: 1mm³	
经历时间	固结阶段的变形和排水			
	时间 年 - 月 - 日 - 时 - 分	内 PVC 体变数 (mm³)	外 PVC 体变数 (mm³)	排水量管读数 (mm)
0				
5min				
10min				
30min				
1h				
2h				
4h				
6h				
8h				
10h				
12h				
14h				
16h				
18h				
20h				
22h				
24h				
26h				
28h				
30h				
32h				
34h				
36h				
38h				
40h				

.....				
试样总体变量 (cm ³)				
试样总排水量 (cm ³)				

附录 E 表 9.7 (二) 控制基质吸力和净平均应力为常数而偏应力逐级增大的三轴剪切试验记录表

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			土样种类		
土样初始尺寸	直径×高 =		初始干密度(g/cm ³)		
初始质量含水率 (%)			排水量管 比例系数	cm ³ / 排水量管 1mm 水柱	
基质吸力 (kPa)			内、外压力室 压力-体积控制器 (PVC) 分辨率	压力: 1kPa 体积: 1mm ³	
净平均应力 (kPa)					
试验阶段	剪切阶段				
测力计率定系数 C(N/0.01mm)			压力室活塞横截面积 (mm ²)		
剪切速率 (mm/min)			备注		
在各级偏应力作用下的轴向变形、体变和排水					
时间 月 - 日 - 时 - 分	偏应力 (kPa)	轴向变形 (0.01mm)	内 PVC 体变数 (mm ³)	外 PVC 体变数 (mm ³)	排水量管读数 (mm)
		5			
		10			
		20			
		30			
		40			
		50			
		60			
		70			
		80			
		90			
		100			
					
试样总轴向变形 (cm)					
试样总体变量 (cm ³)					
试样总排水量 (cm ³)					

9.9 在一定应力状态下基质吸力卸载到零的湿陷/湿化试验

9.9.1 本试验所说的应力状态包括试样所受的基质吸力、净平均应力和偏应力，本试验所用的主要仪器设备是应力控制式非饱和土三轴仪（图 9.1.4-2），应与本标准第 9.1.4 条相同。

9.9.2 本试验所用三轴仪压力室的试样底座应为二元结构（图 9.9.2），中部为高进气陶土板，陶土板外侧是多孔薄金属环，多孔薄金属环下是环形水槽。用一台压力-体积控制器（或马氏瓶）通过环形水槽给试样浸水，既可以控制浸水压力（水头），也可以量测浸水量。

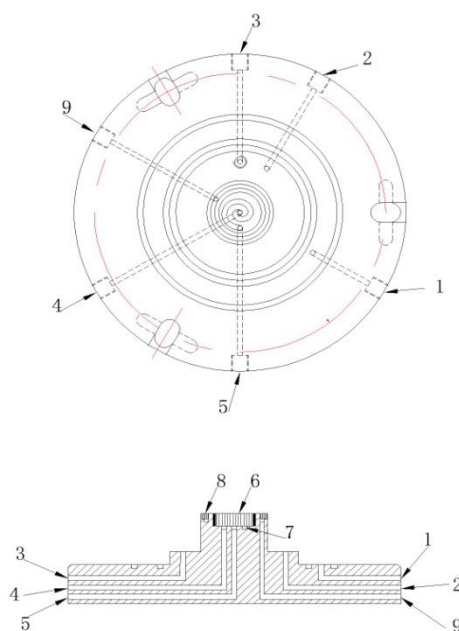


图 9.9.2 具有二元结构的非饱和土三轴压力室试样底座

- 1.接外压力室三通阀门 2.接内压力室三通阀门 3.接孔隙气压三通阀
4.接排水三通阀门 5.接冲洗螺旋槽三通阀门 6.高进气值陶土板
7.陶土板下螺旋槽 8.环形多孔薄金属板 9.接环形水槽阀门

【条文说明】：9.9.2 本试验所用三轴仪压力室的试样底座应为二元结构（图 9.9.2），中部为高进气陶土板，陶土板外侧是多孔薄金属环，多孔薄金属环下是环形水槽。如此构造的压力室的试样底座可以先做控制吸力的非饱和土试验，而后做浸水试验。

9.9.3 进行本试验前必须先饱和高进气值陶土板，应按本标准 9.2.1 条进行。

9.9.4 进行本试验前必须在饱和陶土板后标定内压力室及其与压力-体积控制器连结的管路在不同压力下的体积变化，应按本标准 9.2.4 条进行。

9.9.5 进行本试验前必须对轴向压力加载装置进行标定，并对其提供持续稳定轴向力

的能力进行测试。

9.9.6 试验前应排净多孔薄金属环下的水槽中的水分，并擦干多孔薄金属环表面的水分。

9.9.7 试样的安装，应按本标准的第 9.3.4 条第 1~9 款进行。应在试样顶部放置滤纸和透水石，滤纸和透水石的含水率应与试样的初始含水率相同。为了加速渗水速度和使水分在试样中均匀扩散，应在试样周边均匀放置 6 条宽约 5mm、长度与试样高度相同的滤纸条，滤纸条的初始含水率应与试样的初始含水率相同。

【条文说明】：9.9.7 试样的安装，应按本标准的第 9.3.4 条第 1~9 款进行。应在试样顶部放置滤纸和透水石，滤纸和透水石的含水率应与试样的初始含水率相同。为了加速渗水速度和使水分在试样中均匀扩散，应在试样周边均匀放置 6 条宽约 5mm、长度与试样高度相同的滤纸条，滤纸条的初始含水率应与试样的初始含水率相同。这些规定都是针对做湿陷/湿化试验提出的。

9.9.8 本试验应按下列步骤进行：

1 依次给试样施加预定的基质吸力、净平均应力和偏应力，施加基质吸力和净平均应力应按本标准第 9.4.5 条的第 1 款和第 2 款的方法进行。施加偏应力应按本标准 9.8.6 条第 3 款进行。待试样的应力状态达到预定值时，宜按下列时间顺序测记体变和排水量。时间为 5min、10min、30min、1h、2h、4h、6h、8h、10h，至稳定为止。稳定标准是：在 2h 内，轴向变形不超过 0.01mm，体变不超过 6mm^3 ，排水量不超过 12mm^3 ，且历时不宜少于 72h。在稳定过程中，每隔 6~8h 冲洗高进气值陶土板和螺旋槽一次。

2 同时同步等值卸除气压力和内、外压力室的压力，应保持净平均应力和偏应力不变，直到气压力卸为零，测记轴向变形值和体变值。

3 调节压力室底座外侧的气压三通阀，使连接气压源方向关闭，另一方向与大气相通，从而把安装在试样帽上的细尼龙管的功能由进气管转换为排水管。

4 以 1m 左右的水头自下向上给试样浸水，试样中的空气和水从试样帽上的细尼龙管流出进入排水管；在排水管出现连续水流后，测记某一时段的进水量和出水量，若二者相等，则认为试样已达饱和状态。在浸水过程中，测记进水量、轴向变形和体变，直到试样饱和后变形稳定为止。稳定标准是：试样饱和后，在 2h 内，轴向变形不超过 0.01mm，体变不超过 6mm^3 。

5 试验结束，应先卸除偏应力，再同时同步等值卸内、外压力室的压力；取掉两

个排气孔螺钉，放掉压力室中的水，卸除压力室，拆卸试样，量测试样含水率。

【条文说明】：9.9.8 本试验应按下列步骤进行：

1 依次给试样施加预定的基质吸力、净平均应力和偏应力，施加基质吸力和净平均应力应按本标准第 9.4.5 条的第 1 款和第 2 款的方法进行。施加偏应力应按本标准 9.8.6 条第 3 款进行。稳定标准是：在两小时内，轴向变形不超过 0.01mm，体变不超过 6mm³，排水量不超过 12mm³，且历时不宜少于 72h。确定此标准的有关依据见本标准条文说明的第 5.3.2 条第 4 款和第 9.4.5 条第 3 款的说明。

3 调节压力室底座外侧的气压三通阀，使连接气压源方向关闭，另一方向与大气相通，从而把安装在试样帽上的细尼龙管的功能由进气管转换为排水管。使用三通阀，可以容易实现功能转换，方便试验。

4 以 1m 左右的水头自下向上给试样浸水，试样中的空气和水从试样帽上的细尼龙管流出进入排水管；在排水管出现连续水流后，测记某一时段的进水量和出水量，若二者相等，则认为试样已达饱和状态。在浸水过程中，测记进水量、轴向变形和体变，直到试样饱和后变形稳定为止。稳定标准是：试样饱和后，在 2h 内，轴向变形不超过 0.01mm，体变不超过 6mm³。本款规定的稳定标准和本条第 1 款规定的稳定标准差别之处仅在于对排水量的要求不同。《土工试验方法标准》（GB/T 50123 — 2019）第 18 章《黄土湿陷试验》的 18.1.4 节规定：“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 变形不大于 0.01mm。”在三轴应力条件下的浸水湿陷过程中，不仅有竖向变形，还有侧向变形，二者相互影响，因此，把变形稳定标准从每小时变形不应大于 0.01mm 修改为“试样饱和后，在两小时内，轴向变形不超过 0.01mm，体变不超过 6mm³”。显然，本标准的要求高于《土工试验方法标准》（GB/T 50123 — 2019）的相应规定。

9.9.9 重新饱和和高进气值陶土板，安装下一个试样，改变任何一个应力状态变量（包括基质吸力、净平均应力和偏应力），按照本标准 9.9.8 条的方法步骤进行试验，直到完成全部试验。

9.9.10 以试样的初始体积和初始孔隙比为基准，在基质吸力、净平均应力和偏应力作用下试样变形稳定后的体应变、孔隙比和比体积，应分别按下列各式计算：

$$\varepsilon_v^{spq} = \frac{\Delta V^{spq}}{V_0} \times 100\% \quad (9.9.10-1)$$

$$e_{spq} = e_0 - (1 + e_0) \varepsilon_v^{spq} \quad (9.9.10-2)$$

$$v_{spq} = 1 + e_{spq} \quad (9.9.10-3)$$

式中： ε_v^{spq} — 在基质吸力、净平均应力和偏应力作用下试样变形稳定后的体应变（%）；

ΔV^{spq} — 在基质吸力、净平均应力和偏应力作用下试样变形稳定后的体积变化量（应考虑压力活塞杆进入压力室的体积，并按图 9.2.4 的标定曲线进行校正）（ cm^3 ）；

V_0 — 试样的初始体积（ cm^3 ）；

e_{spq} — 在基质吸力和净平均应力作用下试样变形稳定后的孔隙比；

e_0 — 试样的初始孔隙比；

v_{spq} — 在基质吸力和净平均应力作用下试样变形稳定后的比体积。

9.9.11 以试样的初始体积和初始质量含水率为基准，在基质吸力、净平均应力和偏应力作用下试样排水稳定后的液相体应变和质量含水率，应分别按以下两式计算：

$$\varepsilon_w^{spq} = \frac{\Delta V_w^{spq}}{V_0} \times 100\% \quad (9.9.11-1)$$

$$w_{spq} = w_0 - \frac{1 + e_0}{G_s} \varepsilon_w^{spq} \quad (9.9.11-2)$$

式中： ε_w^{spq} — 在基质吸力、净平均应力和偏应力作用下试样排水稳定后的液相体应变（%），亦即试样体积含水率的改变量；

ΔV_w^{spq} — 在基质吸力、净平均应力和偏应力作用下试样排水稳定后的排水体积（ cm^3 ）；

w_{spq} — 在基质吸力、净平均应力和偏应力作用下试样排水稳定后的质量含水率（%）；

w_0 — 试样的初始质量含水率（%）；

G_s — 土颗粒的相对密度。

9.9.12 以基质吸力、净平均应力和偏应力作用下试样体变稳定后的体积和孔隙比为基准，试样在浸水饱和后的湿陷/湿化体应变、湿陷/湿化径向应变、湿陷/湿化偏应变、湿陷/湿化应变罗德角、湿陷/湿化孔隙比和湿陷/湿化比体积，应按下列各式计算：

$$\varepsilon_v^{sh} = \frac{\Delta V^{sh}}{V^{spq}} \times 100\% \quad (9.9.12-1)$$

$$\varepsilon_r^{sh} = \varepsilon_3^{sh} = \frac{1}{2}(\varepsilon_v^{sh} - \varepsilon_1^{sh}) \quad (9.9.12-2)$$

$$\bar{\varepsilon}^{sh} = \frac{2}{3}(\varepsilon_1^{sh} - \varepsilon_3^{sh}) \quad (9.9.12-3)$$

$$\theta_\varepsilon^{sh} = \frac{1}{3} \arcsin\left(-\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3'}{(J_2')^{3/2}}\right) \quad (9.9.12-4)$$

$$e^{sh} = e_{spq} - (1 + e_{spq})\varepsilon_v^{sh} \quad (9.9.12-5)$$

$$v^{sh} = 1 + e^{sh} \quad (9.9.12-6)$$

$$V^{spq} = V_0 - \Delta V^{spq} \quad (9.9.12-7)$$

式中： ε_v^{sh} — 试样浸水饱和后的湿陷/湿化体应变；

ε_1^{sh} — 试样浸水饱和后的湿陷/湿化轴向应变；

$\varepsilon_r^{sh} = \varepsilon_3^{sh}$ — 试样浸水饱和后的湿陷/湿化径向应变；

$\bar{\varepsilon}^{sh}$ — 试样浸水饱和后的湿陷/湿化偏应变；

θ_ε^{sh} — 试样浸水饱和后的湿陷/湿化应变的罗德角；

J_2' 和 J_3' — 湿陷偏应变的第二和第三不变量；

ΔV^{sh} — 试样浸水饱和后的湿陷/湿化体积变化量（ cm^3 ）；

V^{spq} — 在基质吸力、净平均应力和偏应力作用下试样变形稳定后的体积（ cm^3 ）；

e^{sh} — 试样浸水饱和变形稳定后的孔隙比；

v^{sh} — 试样浸水饱和变形稳定后的比体积。

【条文说明】：9.9.12 既往对黄土湿陷性的试验研究手段以侧限压缩仪为主，描述指标采用相应试验定义湿陷系数，如《土工试验方法标准》（GB/T 50123—2019）第18章《黄土湿陷试验》的18.2.2条定义的湿陷系数和18.3.2条定义的自重湿陷系数。事实上，在复杂应力状态下，黄土湿陷不仅有竖向变形，还有侧向变形，用单一湿陷系数就不能完整描述。陈正汉等^[2]率先在国内开展三轴湿陷试验，用现代土力学观点研究黄土的湿陷问题，提出了3个广义塑性系数，即，湿陷体应变、湿陷偏应变和湿陷应变罗德角，可完整描述湿陷现象，为黄土力学的发展提供了方便。

[2] 陈正汉, 刘祖典. 黄土的湿陷变形机理[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(2): 1-12.

9.9.13 以基质吸力为参量，绘制某一净围压下不同吸力卸载到零后湿陷/湿化轴向应

变和偏应力的关系曲线（图 9.9.13-1）、湿陷/湿化体应变和净平均应力的关系曲线（图 9.9.13-2）、湿陷/湿化偏应变和偏应力关系曲线（图 9.9.13-3）。

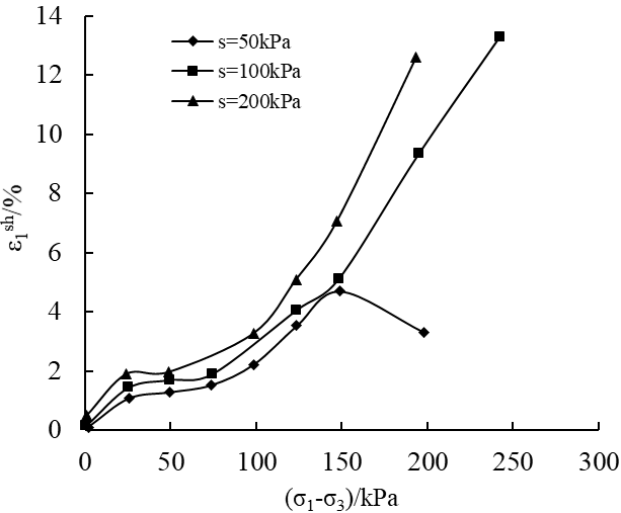


图 9.9.13-1 某黄土在净围压作用下不同吸力卸载到零后湿陷轴向应变和偏应力的关系曲线

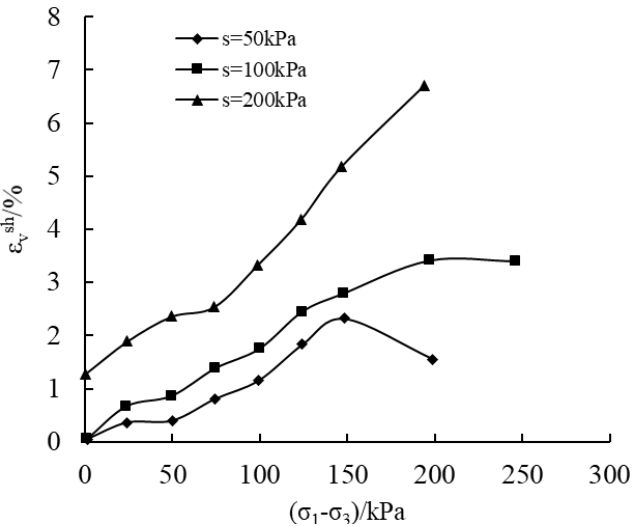


图 9.9.13-2 某黄土在净围压作用下不同吸力卸载到零后湿陷体应变和偏应力的关系曲线

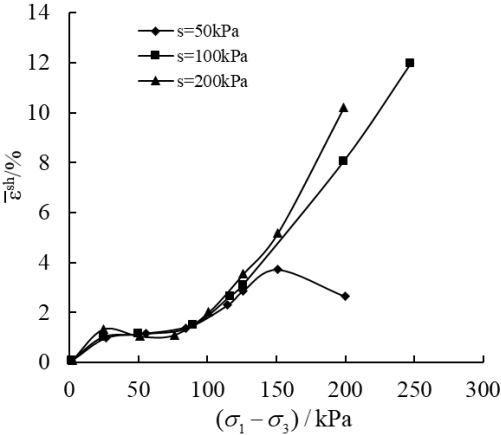


图 9.9.13-3 某黄土在净围压作用下不同吸力卸载到零后湿陷偏应变和偏应力的关系曲线

9.9.14 在 $p-q$ 平面内绘制饱和土的抗剪强度线（图 9.9.14），再以 $\varepsilon_1^{sh}=0.015$ 为起始湿陷的标准，绘制起始湿陷曲线（图 9.9.14）。

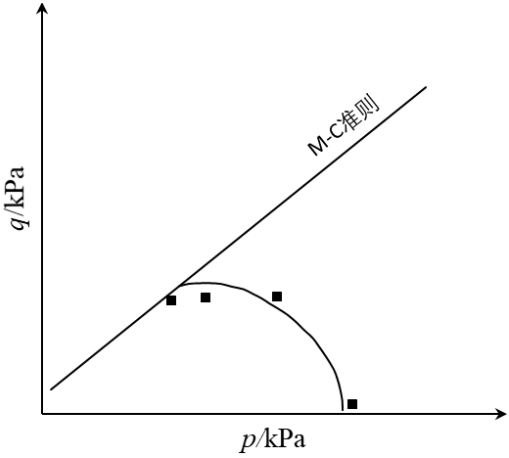


图 9.9.14 $p-q$ 平面内饱和土的抗剪强度线和起始湿陷曲线

【条文说明】：本条借用传统湿陷起始压力的概念及相应的确定方法（见《土工试验方法标准》（GB/T 50123 — 2019）第 18 章《黄土湿陷试验》的 18.5 节及 18.5.4 条），把湿陷起始压力从一个点拓广到 $p-q$ 平面上的一条曲线^[3]。

[3] 陈正汉, 许镇鸿, 刘祖典. 关于黄土湿陷的若干问题[J]. 土木工程学报, 1986, 19(3): 62–69.

9.9.15 在一定应力状态下基质吸力卸载到零的湿陷-湿化试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 9.8（一）和表 9.8（二）的规定。

附录 E 表 9.8 (一) 在一定应力状态下基质吸力卸载到零的湿陷-湿化试验记录表

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		土样种类		
土样初始尺寸	直径×高 =	初始干密度(g/cm ³)		
初始质量含水率 (%)		排水量管比例系数	cm ³ / 排水量管 1mm 水柱	
基质吸力 (kPa)		净平均应压力 (kPa)		
偏应力 (kPa)		备注		
试验阶段	在一定应力状态下的 固结阶段	内、外压力室 压力-体积控制器 (PVC)分辨率	压力: 1kPa 体积: 1mm ³	
经历时间	固结阶段的变形和排水			
	时间 年 - 月 - 日 - 时 - 分	轴向变形读数 (mm)	内 PVC 体变 读数 (mm ³)	排水量管读数 (mm)
0				
5min				
10min				
30min				
1h				
2h				
4				
6h				
8h				
10h				
12h				
14h				
16h				
18h				
20h				
22h				
24h				
26h				
28h				
30h				
32h				
34h				
36h				
38h				

40h				
.....				
试样总体变量 (cm ³)				
试样总排水量 (cm ³)				

附录 E 表 9.8 (二) 在一定应力状态下基质吸力卸载到零的湿陷-湿化试验记录表

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		土样种类		
土样初始尺寸	直径×高 =	初始干密度 (g/cm ³)		
初始质量含水率 (%)		排水量管比例系数	cm ³ / 排水量管 1mm 水柱	
初始基质吸力 (kPa)		净平均应压力 (kPa)		
偏应力 (kPa)		浸水压力 (kPa)		
试验阶段	基质吸力卸到零后的 浸水阶段	内、外压力室 压力-体积控制器 (PVC)分辨率	压力: 1kPa 体积: 1mm ³	
经历时间	各级浸水量下的轴向变形和体变			
	时间 年 - 月 - 日 - 时 - 分	浸水量 (mm ³)	轴向变形读数 (mm)	内 PVC 体变 读数 (mm ³)
0				
5min				
10min				
30min				
1h				
2h				
4h				
6h				
8h				
10h				
12h				
14h				
16h				
18h				
20h				
22h				
24h				
26h				
28h				
30h				
32h				
34h				

36h				
.....				
总浸水量 (cm ³)				
试样总轴向变形 (mm)				
试样总体变量 (cm ³)				
试样最终含水率 (%)				

9.10 在一定应力状态和初始含水率下不同浸湿程度的湿陷/湿化试验

9.10.1 本试验所说的应力状态包括试样所受的平均应力和偏应力，试样的孔隙气压力始终为大气压，本试验所用的主要仪器设备是应力控制式非饱和土三轴仪（图 9.1.4-2），应与本标准第 9.1.4 条相同。

9.10.2 本试验所用三轴仪压力室的试样底座应为二元结构，与本标准 9.9.2 条的图 9.9.2 所示底座相同。

9.10.3 本试验宜用一台压力-体积控制器（或马氏瓶）作为浸水水源，既可以控制浸水压力（水头），也可以量测浸水量。

9.10.4 进行本试验前必须标定内压力室及其与压力-体积控制器连结的管路在不同压力下的体积变化，应按本标准 9.2.4 条进行。

9.10.5 进行本试验前必须对轴向压力加载装置进行标定，并对其提供持续稳定轴向力的能力进行测试。

9.10.6 调节压力室底座外侧的气压三通阀，使连接气压源方向关闭，另一方向与大气相通，从而把安装在试样帽上的细尼龙管的功能由进气管转换为排水管。

9.10.7 试样的安装，应参照本标准的第 9.3.4 条第 1~9 款进行，但无需饱和陶土板。应在试样底座上依次放置多孔不锈钢板（见图 9.1.4-5，防止陶土板吸水）、透水石和滤纸，在试样顶部依次放置滤纸和透水石，滤纸和透水石的含水率应与试样的初始含水率相同。为了加速渗水速度和使水分在试样中均匀扩散，应在试样周边均匀放置 6 条宽约 5 mm、长度与试样高度相同的滤纸条，滤纸条的初始含水率应与试样的初始含水率相同。

【条文说明】：9.10.7 有关规定可参阅本标准第 9.9.7 条的说明。

9.10.8 本试验应按下列步骤进行：

1 依次给试样施加预定的平均应力（围压）和偏应力。施加平均应力时，不宜一步到位，应按每分钟 25kPa 的速率分多步施加。在围压达到预定值后，再逐渐施加偏应力。施加偏应力应按本标准 9.8.6 条的第 2 款和第 3 款进行。待试样的应力状态达到预定值时，宜按下列时间顺序测记体变和排水量。时间为 5min、10min、30min、1h、2h、4h、6h、8h、10h，至稳定为止。稳定标准是：在 2h 内，轴向变形不超过 0.01mm，体变不超过 6mm³，排水量不超过 12mm³，且历时不宜少于 48h。在稳定过程中，每隔 6~8h 冲洗高进气值陶土板和螺旋槽一次。

2 应按下式计算试样饱和时的含水率：

$$w_{sat} = G_s e_0 \quad (9.10.8-1)$$

式中： w_{sat} — 试样的饱和含水率（%）；

G_s — 土颗粒的相对密度；

e_0 — 试样的初始孔隙比；

3 确定浸水等级，可把试样的初始含水率到饱和含水率的差值分成 5~8 等份，每等分以 2.5%~5%为宜，每级浸水量宜按下式计算：

$$\Delta M_w = (0.025 \sim 0.05) V_0 \rho_d \quad (9.10.8-2)$$

式中： ΔM_w — 每级浸水量（g）；

V_0 — 试样的初始体积（cm³）；

ρ_d — 试样的干密度（g/cm³），应按《土工试验方法标准》（GB/T 50123—2019）第 6.2 节或第 6.3 节的试验方法测定，用该标准的式（6.2.3-2）计算。

4 以 1m 左右的水头给试样逐级浸水，用压力-体积控制器控制进水量，该级进水量应使试样湿化后的含水率达到预定值。在浸水和水分均等化的过程中，测记进水量、轴向变形和体变，直到变形稳定为止。

5 进行下一级浸水，重复上述第 4 条的过程，直到完成最后一级浸水。

6 试验结束，应先卸除偏应力，再同时同步等值卸内、外压力室的压力；取掉两个排气孔螺钉，放掉压力室中的水，卸除压力室，拆卸试样，量测试样含水率。

【条文说明】：9.10.8 本试验应按下列步骤进行：

1 依次给试样施加预定的平均应力（围压）和偏应力。稳定标准是：在 2h 内，轴向变形不超过 0.01mm，体变不超过 6mm³，排水量不超过 12mm³，且历时不宜少于 48h。确定此标准的有关依据见本标准条文说明的第 5.3.2 条第 4 款和第 9.3.5 条第 4 款的说明。

9.10.9 安装下一个试样，改变任何一个应力状态变量（包括平均应力和偏应力）或初始含水率，按照本标准 9.10.8 条的方法步骤进行试验，直到完成全部试验。

9.10.10 以试样的初始体积和初始孔隙比为基准，在平均应力和偏应力作用下试样变形稳定后的体应变、孔隙比和比体积，应分别按下列各式计算：

$$\varepsilon_v^{pq} = \frac{\Delta V^{pq}}{V_0} \times 100\% \quad (9.10.10-1)$$

$$e_{pq} = e_0 - (1 + e_0) \varepsilon_v^{pq} \quad (9.10.10-2)$$

$$v_{pq} = 1 + e_{pq} \quad (9.10.10-3)$$

式中： ε_v^{pq} — 在平均应力和偏应力作用下试样变形稳定后的体应变（%）；

ΔV^{pq} — 在平均应力和偏应力作用下试样变形稳定后的体积变化量（应考虑压力活塞杆进入压力室的体积，并按图 9.2.4 的标定曲线进行校正）（ cm^3 ）；

V_0 — 试样的初始体积（ cm^3 ）；

e_{pq} — 在平均应力作用下试样变形稳定后的孔隙比；

v_{pq} — 在平均应力作用下试样变形稳定后的比体积。

9.10.11 以试样的初始体积和初始质量含水率为基准，在平均应力和偏应力作用下试样排水稳定后的液相体应变和质量含水率，应分别按以下两式计算：

$$\varepsilon_w^{pq} = \frac{\Delta V_w^{pq}}{V_0} \times 100\% \quad (9.10.11-1)$$

$$w_{pq} = w_0 - \frac{1 + e_0}{G_s} \varepsilon_w^{pq} \quad (9.10.11-2)$$

式中： ε_w^{pq} — 在平均应力和偏应力作用下试样排水稳定后的液相体应变（%），亦即试样体积含水率的改变量；

ΔV_w^{pq} — 在平均应力和偏应力作用下试样排水稳定后的排水体积（ cm^3 ）；

w_{pq} — 在平均应力和偏应力作用下试样排水稳定后的质量含水率（%）；

w_0 — 试样的初始质量含水率（%）；

G_s — 土颗粒的相对密度。

9.10.12 以平均应力和偏应力作用下试样体变稳定后的体积和孔隙比为基准，试样在第 i 级浸水后的湿陷/湿化体应变、湿陷/湿化径向应变、湿陷/湿化偏应变、湿陷/湿化应变罗德角、湿陷/湿化孔隙比和湿陷/湿化比体积，应按下列各式计算：

$$\varepsilon_{v,i}^{sh} = \frac{\sum_{j=1}^i \Delta V_j^{sh}}{V^{pq}} \times 100\% \quad (9.10.12-1)$$

$$\varepsilon_{r,i}^{sh} = \varepsilon_{3,i}^{sh} = \frac{1}{2} (\varepsilon_{v,i}^{sh} - \varepsilon_{1,i}^{sh}) \quad (9.10.12-2)$$

$$\bar{\varepsilon}_i^{sh} = \frac{2}{3} (\varepsilon_{1,i}^{sh} - \varepsilon_{3,i}^{sh}) \quad (9.10.12-3)$$

$$\theta_{\varepsilon,i}^{sh} = \frac{1}{3} \arcsin\left(-\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3'}{(J_2')^{3/2}}\right) \quad (9.10.12-4)$$

$$e_i^{sh} = e_{pq} - (1 + e_{pq}) \varepsilon_{v,i}^{sh} \quad (9.10.12-5)$$

$$\nu_i^{sh} = 1 + e_i^{sh} \quad (9.10.12-6)$$

$$V^{pq} = V_0 - \Delta V^{pq} \quad (9.10.12-7)$$

式中： $\varepsilon_{v,i}^{sh}$ — 试样在第 i 级浸水后的湿陷/湿化体应变；

$\varepsilon_{1,i}^{sh}$ — 试样在第 i 级浸水后的湿陷/湿化轴向应变；

$\varepsilon_{r,i}^{sh} = \varepsilon_{3,i}^{sh}$ — 试样在第 i 级浸水后的湿陷/湿化径向应变；

$\bar{\varepsilon}_i^{sh}$ — 试样在第 i 级浸水后的湿陷/湿化偏应变；

$\theta_{\varepsilon,i}^{sh}$ — 试样在第 i 级浸水后的湿陷/湿化应变的罗德角；

J_2' 和 J_3' — 湿陷偏应变的第二和第三不变量；

ΔV_j^{sh} — 试样由第 j 级浸水单独引起的湿陷/湿化体积变化量（ cm^3 ）；

$\sum_{j=1}^i \Delta V_j^{sh}$ — 试样在第 i 级浸水后的总湿陷/湿化体积变化量（ cm^3 ），等于从第

1 级到第 i 级浸水引起的湿陷/湿化体积变化量之和；

V^{pq} — 在平均应力和偏应力作用下试样变形稳定后的体积（ cm^3 ）；

e_i^{sh} — 试样在第 i 级浸水变形稳定后的孔隙比；

ν_i^{sh} — 试样在第 i 级浸水变形稳定后的比体积。

【条文说明】：9.10.12 参见本标准条文说明中第 9.9.12 条的说明。

9.10.13 以初始质量含水率为参量，绘制湿陷/湿化体应变和净平均应力的关系曲线（图 9.10.13-1）、湿陷/湿化偏应变和偏应力关系曲线（图 9.10.13-2）。

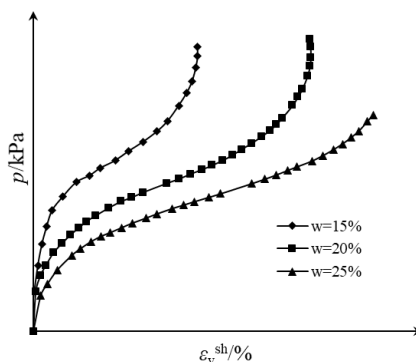


图 9.10.13-1 湿陷/湿化体应变和净平均应力的关系曲线

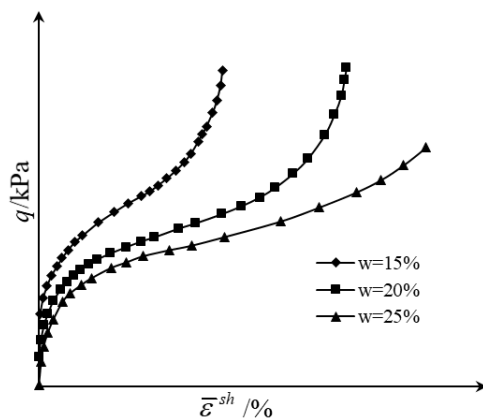


图 9.10.13-2 湿陷/湿化偏应变和偏应力关系曲线

9.10.14 在 $p-q$ 平面内绘制饱和土的抗剪强度线（图 9.10.14），再以 $\varepsilon_1^{sh}=0.015$ 为起始湿陷的标准，绘制起始湿陷/湿化曲线（图 9.10.14）。

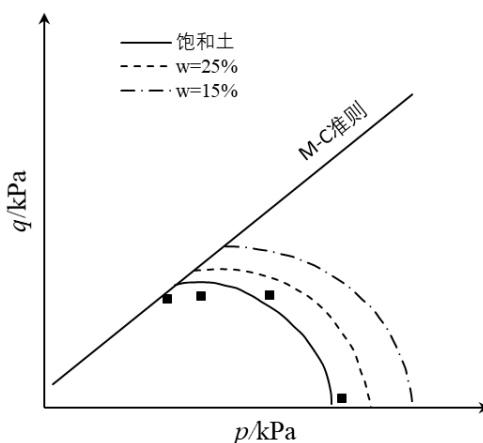


图 9.10.14 $p-q$ 平面内饱和土的抗剪强度线和起始湿陷/湿化曲线

【条文说明】：9.10.14 参见本标准条文说明中第 9.9.14 条的说明。

9.10.15 在一定应力状态和初始含水率下不同浸湿程度的湿陷/湿化试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 9.9（一）和表 9.9（二）的规定。

附录 E 表 9.9 (一) 在一定应力状态和初始含水率下不同浸湿程度的湿陷/湿化试验记录表

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		土样种类		
土样初始尺寸	直径×高 =	初始干密度(g/cm³)		
初始质量含水率 (%)		排水量管比例系数	cm³ / 排水量管 1mm 水柱	
净平均应压（kPa）		偏应力（kPa）		
试验阶段	在一定应力状态下的 固结阶段	内、外压力室 压力-体积控制器 (PVC)分辨率	压力：1kPa 体积：1mm³	
经历时间	固结阶段的变形和排水			
	时间 年 - 月 - 日 - 时 - 分	轴向变形读数 (mm)	内 PVC 体变 读数（mm³）	排水量管读数 (mm)
0				
5min				
10min				
30min				
1h				
2h				
4				
6h				
8h				
10h				
12h				
14h				
16h				
18h				
20h				
22h				
24h				
26h				
28h				
30h				
32h				
34h				
36h				
38h				
40h				
.....				

试样总体变量 (cm ³)				
试样总排水量 (cm ³)				

附录 E 表 9.9 (二) 在一定应力状态和初始含水率下不同浸湿程度的湿陷/湿化试验记录表

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		土样种类		
土样初始尺寸	直径×高 =	初始干密度(g/cm³)		
初始质量含水率 (%)		排水量管比例系数	cm³ / 排水量管 1mm 水柱	
净平均应压（kPa）		偏应力（kPa）		
浸水压力（kPa）		备注		
试验阶段	浸水阶段	内、外压力室 压力-体积控制器 (PVC)分辨率	压力：1kPa 体积：1mm³	
经历时间	各级浸水量下的轴向变形和体变			
	时间 年 - 月 - 日 - 时 - 分	浸水量 (mm³)	轴向变形读数 (mm)	内 PVC 体变读 数 (mm³)
0				
5min				
10min				
30min				
1h				
2h				
4h				
6h				
8h				
10h				
12h				
14h				
16h				
18h				
20h				
22h				
24h				
26h				
28h				
30h				
32h				
34h				
36h				
.....				
总浸水量（cm³）				

试样总轴向变形 (mm)				
试样总体变量 (cm ³)				
试样最终含水率 (%)				

9.11 同时控制基质吸力和轴向净正应力不变而净围压减小的固结排水剪切试验

9.11.1 本试验所有的主要仪器设备是应力控制式非饱和土三轴仪（图 9.1.4-2），应与本标准第 9.1.4 条相同。

9.11.2 进行本试验前必须先饱和高进气值陶土板，应按本标准 9.2.1 条进行。

9.11.3 进行本试验前必须在饱和陶土板后标定内压力室及其与压力-体积控制器连接的管路在不同压力下的体积变化，应按本标准 9.2.4 条进行。

9.11.4 进行本试验前必须对轴向压力加载装置进行标定，并对其提供持续稳定轴向力能力进行测试。

9.11.5 试样的安装，应按本标准的第 9.3.4 条第 1~9 款进行。

9.11.6 依次给试样施加预定的基质吸力、净围压和偏应力。在施加基质吸力时，不宜一步到位，应按每分钟 25kPa 的速率分多步施加，必须同时同步等值提高内、外压力室的压力，且内外压力室的压力始终高于气压力 5kPa。在基质吸力达到预定值后，应按每分钟 25kPa 的速率施加净平均应力达到预定值；再按每分钟 25kPa 的速率施加偏应力到预定值。

9.11.7 试验的固结阶段，宜按下列时间顺序测记体变和排水量。时间为 5min、10min、30min、1h、2h、4h、6h、8h、10h，至稳定为止。稳定标准是：在 2h 时内，轴向变形不超过 0.01mm，体变不超过 6mm³，排水量不超过 12mm³，且历时不宜少于 72h。在稳定过程中，每隔 6~8h 冲洗高进气值陶土板和螺旋槽一次。

【条文说明】：9.11.7 试验的固结阶段的稳定标准是：在 2h 内，轴向变形不超过 0.01mm，体变不超过 6mm³，排水量不超过 12mm³，且历时不宜少于 72h。确定此标准的有关依据见本标准条文说明的第 5.3.2 条第 4 款和第 9.3.5 条第 4 款的说明。

9.11.8 试验的剪切阶段，应按下列步骤进行：

1 确定净围压减小的等级，净围压减小的等级宜为 15、30、45、60、75、90、105、120、135、150、160、.....、200、210、.....、290、300kPa。

2 在同时同步等值减小内、外压力室压力和气压力的同时，必须同时同步等值增大偏应力，以保持净轴向正应力不变，应按下式计算：

由

$$\Delta(\sigma_1 - u_a) = \Delta[(\sigma_1 - \sigma_3) + (\sigma_3 - u_a)] = 0 \quad (9.11.8-1)$$

得

$$\Delta(\sigma_1 - \sigma_3) = \Delta q = -\Delta(\sigma_3 - u_a) \quad (9.11.8-2)$$

3 在每级净围压改变后，宜按下列时间顺序测记轴向变形、体变和排水量。时间为 5min、10min、30min、1h、2h、4h、6h、8h、10h，至稳定为止。稳定标准同本标准第 9.11.7 条。在稳定过程中，每隔 6~8h 冲洗高进气值陶土板和螺旋槽一次。

4 试验结束，应先卸除偏应力，再同时同步等值卸除内、外压力室的压力和气压力，并使剩余的内、外室围压高于气压 5kPa，而后卸除气压力，最后卸除剩余围压；取掉两个排气孔螺钉，放掉压力室中的水，卸除压力室，拆卸试样，量测试样含水率。

9.11.9 重新饱和和高进气值陶土板，安装下一个试样，改变基质吸力、净围压和偏应力中的任何一个，按照本标准 9.11.8 条的方法步骤进行试验，直到完成全部试验。

9.11.10 应根据试验结束后量测的试样含水率，对试验过程中的排水量按历时进行校正；同时应把试验过程中量测的体变按本标准 9.2.4 条的标定曲线（图 9.2.4）进行校正。

9.11.11 以试样的初始体积和初始孔隙比为基准，在基质吸力、初始净围压和初始偏应力共同作用下试样变形稳定后的体应变、孔隙比和比体积，应分别按下列各式计算：

$$\varepsilon_v^\Omega = \frac{\Delta V^\Omega}{V_0} \times 100\% \quad (9.11.11-1)$$

$$e_\Omega = e_0 - (1 + e_0)\varepsilon_v^\Omega \quad (9.11.11-2)$$

$$v_\Omega = 1 + e_\Omega \quad (9.11.11-3)$$

式中： ε_v^Ω — 在基质吸力、初始净围压和初始偏应力共同作用下试样变形稳定后的体应变（%），应考虑轴向压力活塞杆进入压力室的体积对体变量的影响；

ΔV^Ω — 在基质吸力、初始净围压和初始偏应力共同作用下试样变形稳定后的体积变化量（应按图 9.2.4 的标定曲线进行校正）（ cm^3 ）；

V_0 — 试样的初始体积（ cm^3 ）；

e_Ω — 在基质吸力、初始净围压和初始偏应力共同作用下试样变形稳定后的孔隙比；

e_0 — 试样的初始孔隙比；

v_Ω — 在基质吸力、初始净围压和初始偏应力共同作用下试样变形稳定后的比体积。

9.11.12 以试样的初始体积和初始质量含水率为基准，在基质吸力、初始净围压和初

始偏应力共同作用下试样变形稳定后的液相体应变和质量含水率，应分别按以下两式计算：

$$\varepsilon_w^\Omega = \frac{\Delta V_w^\Omega}{V_0} \times 100\% \quad (9.11.12-1)$$

$$w_\Omega = w_0 - \frac{1+e_0}{G_s} \varepsilon_w^\Omega \quad (9.11.12-2)$$

式中： ε_w^Ω — 在基质吸力、初始净围压和初始偏应力共同作用下试样变形稳定后的液相体应变（%），即试样体积含水率的改变量；

ΔV_w^Ω — 在基质吸力、初始净围压和初始偏应力共同作用下试样变形稳定后的排水体积（ cm^3 ）；

w_Ω — 在基质吸力、初始净围压和初始偏应力共同作用下试样变形稳定后的质量含水率（%）；

w_0 — 试样的初始质量含水率（%）；

G_s — 土颗粒的相对密度。

9.11.13 以在基质吸力、初始净围压和初始偏应力共同作用下试样变形稳定后的体积和孔隙比为基准，试样在第 i 级减小的净围压作用下变形稳定后的体应变、孔隙比和比体积，应按下列各式计算：

$$\varepsilon_{v,i} = \frac{\sum_{j=1}^i \Delta V_j}{V^\Omega} \times 100\% \quad (9.11.13-1)$$

$$e_i = e_\Omega - (1+e_\Omega) \varepsilon_{v,i} \quad (9.11.13-2)$$

$$v_i = 1 + e_i \quad (9.11.13-3)$$

$$V^\Omega = V_0 - \Delta V^\Omega \quad (9.11.13-4)$$

式中： $\varepsilon_{v,i}$ — 在第 i 级减小净围压作用下试样变形稳定后的体应变（%）；

$\sum_{j=1}^i \Delta V_j$ — 在第 i 级减小净围压作用下试样变形稳定后的体积变化量（应考虑

净围压减小引起的内压力室及其与压力-体积控制器连结的管路的体积变化（按图 9.2.4 所示的压力-平均体变曲线进行校正，并应考虑轴向压力活塞杆进入压力室的体积对体变量的影响）（ cm^3 ）；

V^Ω — 在基质吸力、初始净围压和初始偏应力共同作用下试样变形稳定后的

体积 (cm^3) ;

e_i — 在第 i 级减小净围压作用下试样变形稳定后的孔隙比;

v_i — 在第 i 级减小净围压作用下试样变形稳定后的比体积。

9.11.14 以在基质吸力、初始净围压和初始偏应力共同作用下试样变形稳定后的体积和质量含水率为基准, 试样在第 i 级减小净围压作用下排水稳定后的液相体应变和质量含水率, 应按下列各式计算:

$$\varepsilon_{w,i} = \frac{\sum_{j=1}^i \Delta V_{w,j}}{V_{\Omega}} \times 100\% \quad (9.11.14-1)$$

$$w_i = w_{\Omega} - \frac{1+e_{\Omega}}{G_s} \varepsilon_{w,i} \quad (9.11.14-2)$$

式中: $\varepsilon_{w,i}$ — 试样在第 i 级减小净围压作用下排水稳定后的液相体应变 (%), 即试样体积含水率的改变量;

$\sum_{j=1}^i \Delta V_{w,j}$ — 试样在第 i 级减小净围压作用下排水稳定后的总排水量 (cm^3);

w_i — 试样在第 i 级减小净围压作用下排水稳定后的质量含水率 (%)。

9.11.15 分别以偏应力为纵坐标, 以轴向应变为横坐标, 绘制偏应力与轴向应变的关系曲线 (图 9.11.15)。

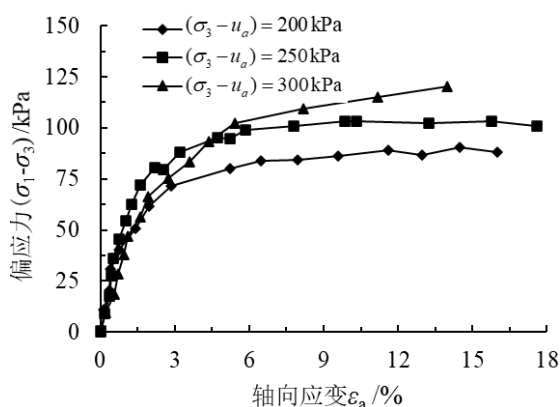


图 9.11.15 某黄土在控制吸力和竖向净应力下侧向卸荷剪切的偏应力与轴向应变关系曲线

9.11.16 对图 9.11.15-1 中有峰值的曲线, 取其峰值点作为破坏点; 对无峰值的曲线, 取 15% 轴向应变对应的点作为破坏点。破坏时的偏应力、净平均应力、基质吸力、净应力摩尔圆的半径和圆心坐标, 应按本标准的 9.4.19 条的式 (9.4.19-1) ~ (9.4.19-5) 计算。

9.11.17 与破坏时破坏面上的净法向应力相关的内摩擦角和总凝聚力, 应按本标准

9.4.20 条的式 (9.4.20-1) 和式 (9.4.20-2) 计算；或者应按本标准 9.4.21 条的式 (9.4.21-1) 和式 (9.4.21-2) 计算。

9.11.18 试样的有效凝聚力 c' 和与基质吸力相关的摩擦角 ϕ^b 应按本标准 9.4.22 的方法条确定。

9.11.19 同时控制基质吸力和轴向净正应力不变而净围压减小的固结排水剪切试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 9.10 (一) 和表 9.10 (二) 的规定。

附录 E 表 9.10 (一) 同时控制基质吸力和轴向净正应力不变而净围压减小的固结排水剪切试验
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		土样种类		
土样初始尺寸	直径×高 =	初始干密度(g/cm ³)		
初始质量含水率 (%)		排水量管比例系数	cm ³ / 排水量管 1mm 水柱	
基质吸力 (kPa)		净平均应力 (kPa)		
净轴向应力 (kPa)		备注		
试验阶段	在基质吸力-净围压-偏应力 作用下的固结阶段	内、外压力室 压力-体积控制器 (PVC)分辨率	压力: 1kPa 体积: 1mm ³	
经历时间	固结阶段的体变和排水			
	时间 年 - 月 - 日 - 时 - 分	轴向变形读数 (0.01mm)	内 PVC 体变 数 (mm ³)	排水量管读数 (mm)
0				
5min				
10min				
30min				
1h				
2h				
4h				
6h				
8h				
10h				
12h				
14h				
16h				
18h				
20h				
22h				
24h				
26h				
28h				
30h				
32h				
34h				
36h				

38h				
40h				
.....				
轴向变形量 (mm)				
试样总体变量 (cm ³)				
试样总排水量 (cm ³)				

附录 E 表 9.10 (二) 同时控制基质吸力和轴向净正应力不变而净围压减小的固结排水剪切试验记录表

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			土样种类		
土样初始尺寸	直径×高 =		初始干密度(g/cm ³)		
初始质量含水率 (%)			排水量管比例系数	cm ³ / 排水量管 1mm 水柱	
基质吸力 (kPa)			内、外压力室 压力-体积控制器 (PVC) 分辨率	压力: 1kPa 体积: 1mm ³	
净平均应压 (kPa)					
净轴向应力 (kPa)					
测力计率定系数 C(N/0.01mm)			压力室活塞横截面积 (mm ²)		
试验阶段	净围压减小的剪切阶段		剪切速率 (mm/min)		
在各级净围压下的轴向变形、体变和排水					
时间 月 - 日 - 时 - 分	净围压 (kPa)	偏应力 (kPa)	轴向变形 (0.01mm)	内 PVC 体变 数 (mm ³)	排水量管读数 (mm)
			5		
			10		
			20		
			30		
			40		
			50		
			60		
			70		
			80		
			90		
			100		
					
轴向变形量 (mm)					
试样总体变量 (cm ³)					
试样总排水量 (cm ³)					

9.12 控制净平均应力和偏应力为常数而基质吸力增大的广义持水特性试验

（同时考虑净平均应力和偏应力影响的广义持水特性试验）

9.12.1 本试验所有的主要仪器设备是应力控制式非饱和土三轴仪（图 9.1.4-2），应与本标准第 9.1.4 条相同。

9.12.2 进行本试验前必须先饱和高进气值陶土板，应按本标准 9.2.1 条进行。

9.12.3 进行本试验前必须在饱和陶土板后标定内压力室及其与压力-体积控制器连结的管路在不同压力下的体积变化，应按本标准 9.2.4 条进行。

9.12.4 本试验的土样应采用饱和土样，土样的饱和方法应按《土工试验方法标准》（GB/T 50123—2019）第 4.6 节的方法进行。

9.12.5 试样的安装，应按本标准的第 9.3.4 条第 1~9 款进行。

9.12.6 控制净平均应力和偏应力为常数而基质吸力逐级增大的三轴收缩试验，应按下列步骤进行：

1 给试样施加预定的净平均应力（即净各向等值压力，用 p 表示），不宜一步到位，应按每分钟 25kPa 的速率分多步施加，必须同时同步等值提高内、外压力室的压力。在施加预定的净平均应力后，宜按下列时间顺序测记体变和排水量。时间为 5min、10min、30min、1h、2h、4h、6h、8h、10h，至稳定为止。稳定标准是：在 2h 内，体变不超过 6mm^3 ，排水量不超过 12mm^3 ，且历时不宜少于 48h。在稳定过程中，每隔 6~8h 冲洗高进气值陶土板和螺旋槽一次。

2 施加预定的偏应力，按本标准本条第 1 款的时间顺序记录轴向变形、体变和排水量，直到稳定为止。稳定标准本标准本条第 1 款。将稳定后的轴向变形、体变和排水量作为初始值。在稳定过程中，每隔 6~8h 冲洗高进气值陶土板和螺旋槽一次。为缩短试验历时，可在施加净平均应力后，紧接着施加偏应力到预定值。

3 确定施加的基质吸力等级，基质吸力的等级宜为 5、10、20、30、50、75、100、125、150、175、200、250、300、350、400、450、500、600、800、1000、1250、1500kPa。

4 在施加基质吸力的同时，必须对内、外压力室同时同步等值地施加大平均应力，以维持净平均应力为不变；同时补偿因总围压增大而引起的偏应力的减小。待基质吸力达到预定值后，宜按下列时间顺序测记体变和排水量。时间为 5min、10min、30min、1h、2h、4h、6h、8h、10h，至稳定为止。稳定标准是：在 2h 内，体变不超过 6mm^3 ，排水量不超过 12mm^3 ，且历时不宜少于 72h。在稳定过程中，每隔 6~8h 冲

洗高进气值陶土板和螺旋槽一次。

5 如需从某一基质吸力下进行吸力卸载，必须同时同步等值减少内、外室压力以保持净平均应力不变，不宜一步卸到位，而应按 -25kPa 的增量，逐步卸载，测记每级卸载的体变值和排水量，直到二者达到稳定为止。稳定标准与本标准本条第 4 款相同。在稳定过程中，每隔 6~8h 冲洗高进气值陶土板和螺旋槽一次。

6 试验结束，应先同时同步等值卸除内、外压力室的净平均应力后，并使剩余的围压高于气压 5kPa ，再同时同步等值卸除气压力和剩余围压；取掉两个排气孔螺钉，放掉压力室中的水，卸除压力室，拆卸试样，量测试样含水率。

【条文说明】：9.12.6 控制净平均应力和偏应力为常数而基质吸力逐级增大的三轴收缩试验，应按下列步骤进行：

1 给试样施加预定的净平均应力，稳定标准是：在 2h 内，体变不超过 6mm^3 ，排水量不超过 12mm^3 ，且历时不宜少于 48h。确定此标准的有关依据见本标准条文说明的第 9.3.5 条第 4 款的说明。

4 施加基质吸力的稳定标准是：在 2h 内，体变不超过 6mm^3 ，排水量不超过 12mm^3 ，且历时不宜少于 72h。确定此标准的有关依据见本标准条文说明的第 9.3.5 条第 2 款的说明。

9.12.7 重新饱和和高进气值陶土板，安装下一个试样，改变净平均应力或偏应力，按照本标准 9.5.6 条的方法步骤进行试验，直到完成全部试验。

9.12.8 应根据试验结束后量测的试样含水率，对试验过程中的排水量按历时进行校正；同时应把试验过程中量测的体变按本标准 9.2.4 条的标定曲线（图 9.2.4）进行校正。

9.12.9 以试样的初始体积和初始孔隙比为基准，在净平均应力和偏应力作用下试样变形稳定后的体应变、孔隙比和比体积，应分别按下列各式计算：

$$\varepsilon_v^{pq} = \frac{\Delta V^{pq}}{V_0} \times 100\% \quad (9.12.9-1)$$

$$e_{pq} = e_0 - (1 + e_0) \varepsilon_v^{pq} \quad (9.12.9-2)$$

$$v_{pq} = 1 + e_{pq} \quad (9.12.9-3)$$

式中： ε_v^{pq} — 在净平均应力和偏应力作用下试样变形稳定后的体应变（%）；

ΔV^{pq} — 在净平均应力和偏应力作用下试样变形稳定后的体积变化量（应按图 9.2.4 的标定曲线进行校正）（ cm^3 ）；

V_0 — 试样的初始体积 (cm^3) ;

e_{pq} — 在净平均应力和偏应力作用下试样变形稳定后的孔隙比;

e_0 — 试样的初始孔隙比;

v_{pq} — 在净平均应力和偏应力作用下试样变形稳定后的比体积。

9.12.10 以试样的初始体积和初始质量含水率为基准, 在净平均应力和偏应力作用下试样排水稳定后的液相体应变和质量含水率, 应分别按以下两式计算:

$$\varepsilon_w^{pq} = \frac{\Delta V_w^{pq}}{V_0} \times 100\% \quad (9.12.10-1)$$

$$w_{pq} = w_0 - \frac{1+e_0}{G_s} \varepsilon_w^{pq} \quad (9.12.10-2)$$

式中: ε_w^{pq} — 在净平均应力和偏应力作用下试样排水稳定后的液相体应变 (%),

即试样体积含水率的改变量;

ΔV_w^{pq} — 在净平均应力和偏应力作用下试样排水稳定后的排水体积 (cm^3) ;

w_{pq} — 在净平均应力和偏应力作用下试样排水稳定后的质量含水率 (%);

w_0 — 试样的初始质量含水率 (%);

G_s — 土颗粒的相对密度。

9.12.11 以净平均应力和偏应力作用下试样体变稳定后的体积和孔隙比为基准, 试样在第 i 级基质吸力作用下的体应变、孔隙比和比体积, 应按下列各式计算:

$$\varepsilon_{v,i} = \frac{\sum_{j=1}^i \Delta V_j}{V^{pq}} \times 100\% \quad (9.12.11-1)$$

$$e_i = e_{pq} - (1 + e_{pq}) \varepsilon_{v,i} \quad (9.12.11-2)$$

$$v_i = 1 + e_i \quad (9.12.11-3)$$

$$V^{pq} = V_0 - \Delta V^{pq} \quad (9.12.11-4)$$

式中: $\varepsilon_{v,i}$ — 在第 i 级基质吸力作用下试样变形稳定后的体应变;

$\sum_{j=1}^i \Delta V_j$ — 在第 i 级基质吸力作用下试样变形稳定后的体积变化量 (不计施加

净平均应力引起的体积变化量, 应按图 9.2.4 的标定曲线进行校正) (cm^3);

V^{pq} — 在净平均应力和偏应力作用下试样变形稳定后的体积 (cm^3) ;

e_i — 在第 i 级基质吸力作用下试样变形稳定后的孔隙比;

v_i — 在第 i 级基质吸力作用下试样变形稳定后的比体积。

9.12.12 以净平均应力和偏应力作用下试样体变稳定后的体积和质量含水率为基准, 试样在第 i 级基质吸力作用下排水稳定后的液相体应变和质量含水率, 应按下列各式计算:

$$\varepsilon_{w,i} = \frac{\sum_{j=1}^i \Delta V_{w,j}}{V^{pq}} \times 100\% \quad (9.12.12-1)$$

$$w_i = w_{pq} - \frac{1 + e_{pq}}{G_s} \varepsilon_{w,i} \quad (9.12.12-2)$$

式中: $\varepsilon_{w,i}$ — 试样在第 i 级基质吸力作用下排水稳定后的液相体应变 (%), 即试样体积含水率的改变量:

$\sum_{j=1}^i \Delta V_{w,j}$ — 试样在第 i 级基质吸力作用下排水稳定后的总排水量 (不计施加基

质吸力引起的排水量) (cm^3):

w_i — 试样在第 i 级基质吸力作用下排水稳定后的质量含水率 (%)。

9.12.13 分别以 ε_v 和 v (或孔隙比 e) 为纵坐标, 以基质吸力的常用对数 ($\log s$) 为横坐标, 绘制各级基质吸力作用下的 $\varepsilon_v - \log s$ 关系曲线和 $v - \log s$ 关系曲线, 曲线的转折点对应的基质吸力就是试样的初始屈服基质吸力。

9.12.14 以 v 为纵坐标, 以 $\ln(s + p_{atm})$ 为横坐标, 绘制各级基质吸力作用下 (包括吸力加载过程和吸力卸载过程) 的 $v - \ln(s + p_{atm})$ 关系曲线。吸力加、卸载过程的曲线均可用直线拟合, 宜按下两式描述:

$$v = N(p, q) - \lambda_s(p, q) \ln(s + p_{atm}) \quad (9.12.14-1)$$

$$v = v_k(p, q) - k_s \ln(s + p_{atm}) \quad (9.12.14-2)$$

式中: $N(p, q)$ — 对应于某一净平均应力和偏应力, 描述加载过程的直线之截距;

$\lambda_s(p, q)$ — 对应于某一净平均应力和偏应力, 描述加载过程的直线之斜率;

$v_k(p, q)$ — 对应于某一净平均应力和偏应力, 描述卸载过程的直线之截距;

k_s — 对应于某一净平均应力, 描述卸载过程的直线之斜率。

9.12.15 分别以 ε_v 、 ε_w 和 w 为纵坐标，以 $\log \frac{s+p_{atm}}{p_{atm}}$ （或 $\ln \frac{s+p_{atm}}{p_{atm}}$ ）为横坐标，绘制

各级基质吸力作用下（包括加载过程和卸载过程）的 $\varepsilon_v - \log \frac{s+p_{atm}}{p_{atm}}$ 的关系曲线、

$\varepsilon_w - \log \frac{s+p_{atm}}{p_{atm}}$ 关系曲线和 $w - \log \frac{s+p_{atm}}{p_{atm}}$ 关系曲线（图 9.12.15-1），可用直线拟合，

宜按下列各式描述：

$$\varepsilon_v = \varepsilon_v^{pq} + \lambda_\varepsilon(p, q) \log \frac{s+p_{atm}}{p_{atm}} \quad (9.12.15-1)$$

$$\varepsilon_w = \varepsilon_w^{pq} + \lambda_w(p, q) \log \frac{s+p_{atm}}{p_{atm}} \quad (9.12.15-2)$$

$$w = w_{pq} - \beta(p, q) \log \frac{s+p_{atm}}{p_{atm}} \quad (9.12.15-3)$$

从式(9.12.12-2)可得：

$$\beta(p, q) = -\frac{1+e_{pq}}{G_s} \lambda_w(p, q) \quad (9.12.15-4)$$

式中： $\lambda_\varepsilon(p, q)$ — 对应于某一净平均应力和偏应力，拟合 $\varepsilon_v - \log \frac{s+p_{atm}}{p_{atm}}$ 关系的直线

斜率；

$\lambda_w(p, q)$ — 对应于某一净平均应力和偏应力，拟合 $\varepsilon_w - \log \frac{s+p_{atm}}{p_{atm}}$ 关系的直线

斜率；

$\beta(p, q)$ — 图 9.12.15 中直线的斜率；

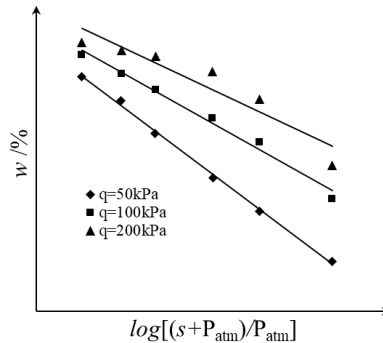


图 9.12.15 某填土在控制净平均应力和偏应力为常数而吸力增大的 $w - \log \frac{s+p_{atm}}{p_{atm}}$ 关系曲线

9.12.16 应对 $\lambda_\varepsilon(p, q)$ 、 $\lambda_w(p, q)$ 和 $\beta(p, q)$ 分别进行二元分析，得出其具体表达式。

9.12.17 控制净平均应力和偏应力为常数而基质吸力增大的广义持水特性试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 9.11（一）和表 9.11（二）的规定。

附录 E 表 9.11 (一) 控制净平均应力和偏应力为常数而基质吸力增大的广义持水特性试验
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		土样种类		
土样初始尺寸	直径×高 =	初始干密度(g/cm ³)		
初始质量含水率 (%)		排水量管比例系数	cm ³ / 排水量管 1mm 水柱	
初始基质吸力 (kPa)	0	净平均应压 (kPa)		
偏应力 (kPa)		备注		
试验阶段	在净平均应力和偏应力 作用下的固结阶段	内、外压力室 压力-体积控制器 (PVC)分辨率	压力: 1kPa 体积: 1mm ³	
经历时间	固结阶段的变形和排水			
	时间 年 - 月 - 日 - 时 - 分	轴向变形读数 (mm)	内 PVC 体变 读数 (mm ³)	排水量管读数 (mm)
0				
5min				
10min				
30min				
1h				
2h				
4h				
6h				
8h				
10h				
12h				
14h				
16h				
18h				
20h				
22h				
24h				
26h				
28h				
30h				
32h				
34h				
36h				

38h				
40h				
.....				
试样总体变量 (cm ³)				
试样总排水量 (cm ³)				

附录 E 表 9.11 (二) 控制净平均应力和偏应力为常数而基质吸力增大的广义持水特性试验
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		土样种类		
土样初始尺寸	直径×高 =	初始干密度(g/cm ³)		
初始质量含水率 (%)		排水量管比例系数	cm ³ / 排水量管 1mm 水柱	
初始基质吸力 (kPa)	0	净平均应压 (kPa)		
偏应力 (kPa)		备注		
试验阶段	基质吸力逐级增大阶段	内、外压力室 压力-体积控制器 (PVC)分辨率	压力: 1kPa 体积: 1mm ³	
经历时间	在各级基质吸力作用下的变形和排水			
	时间 年 - 月 - 日 - 时 - 分	基质吸力 (kPa)	内 PVC 体变 读数 (mm ³)	排水量管读数 (mm)
0				
5min				
10min				
30min				
1h				
2h				
4h				
6h				
8h				
10h				
12h				
14h				
16h				
18h				
20h				
22h				
24h				
26h				
28h				
30h				
32h				
34h				
36h				
38h				

40h				
.....				
试样总体变量 (cm ³)				
试样总排水量 (cm ³)				

10 水平土柱渗水试验

10.1 一般规定

10.1.1 本试验适合于砂土、粉土和黏性土，包括原状土和扰动土。

10.1.2 用本试验可以同时测量土的水分扩散率、比水容量和导水率。

【条文说明】：10.1.2 土的水分扩散率是指不计重力影响时，水流通量与含水率梯度的比值。比水容量是指土的水分特征曲线斜率的倒数，即单位基质吸力的变化所引起的含水率的变化。导水率是指土在单位时间内所通过的水量。

10.2 仪器设备

10.2.1 本试验所用的主要仪器设备为水平土柱渗水试验装置（图 10.2.1）应符合以下规定：

1 试验装置由试验台、水平土柱筒、背板、供水马氏瓶和固定土柱筒的辅助装置等 5 部分组成。

2 水平土柱筒宜用有机玻璃筒制作，其厚度不小于 0.5cm，内径不小于 10cm，长度宜为 80~100cm，用支架固定在试验台上；水平土柱筒外壁上应刻有制备扰动土样的分层线，间隔宜不超过 5cm；在土柱的两侧面应均匀预设安装水分传感器和基质吸力传感器的孔口，孔口的直径应略大于传感器的直径。水平土柱筒的两端应设厚度为 0.3cm~0.5cm 低密度海绵和 120 目纱网构成滤网。

3 试验台的右端设有背板，用以固定马氏瓶。

4 供水马氏瓶的内径宜为 5~6cm，高度不小于 80cm；马氏瓶上设有灌水孔、橡皮塞、进气口、放气阀、测尺；马氏瓶的下端设马氏瓶进气口、针阀、进水阀，进水阀用软管与水室相接。

5 土柱的前端为水室，水室宜用有机玻璃筒制作，其内径应与水平土柱筒相同，长为 10cm，水室与马氏瓶下端的进水阀相连接，水室顶部设有排气放水阀，下部用软管与灌水漏斗连接。

6 试验测量仪器为 TDR 水分传感器、基质吸力传感器和计算机数据采样系统（图 10.2.1）。水分传感器量测体积含水率的量程宜为 1%~50%（质量含水率的量程宜为 1%~36%），分辨率不应低于 0.2%；基质吸力传感器的量程宜为 10~1500KPa。

7 固定土柱筒的辅助装置，用其固定土柱筒以便制备扰动土样，由底座、固定圆筒组成，底座直接放在地面上。

【条文说明】：10.2.1 本试验所用的主要仪器设备为水平土柱渗水试验装置（图10.2.1）应符合以下规定：

2 本标准规定水平土柱渗水试验装置的土柱内径为 10cm，是考虑到土粒与土柱壁面之间的边壁效应及尽量消除因为重力作用而造成的土柱中水分的不均匀分布而确定的合理内径。

4 供水马氏瓶的内径宜为 5~6cm，如果马氏瓶内径过大，可能会造成较大的试验误差。

10.2.2 本试验常用的辅助设备为秒表、烧杯、洗耳球、灌水漏斗、橡皮塞、止水夹、量筒、直尺、凡士林、取土器、夯土器等，夯土器如图 10.2.1（d）所示。

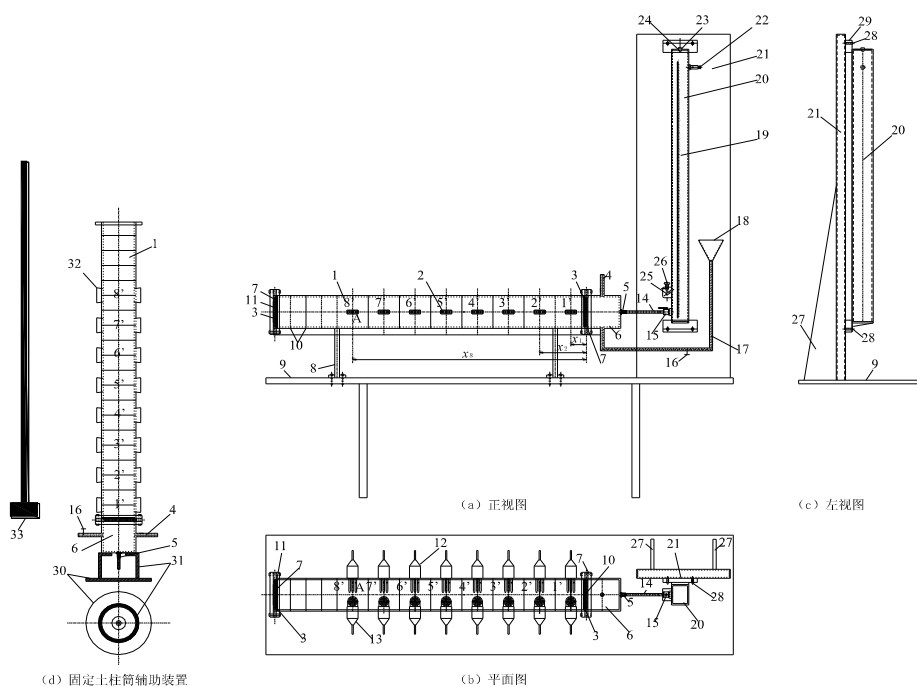


图 10.2.1 水平土柱渗水试验装置图

- 1—水平土柱；2—水分和基质吸力传感器；3—120 纱网；4—排气管；5—管嘴；6—水室；
7—多孔板法兰；8—支柱；9—试验台；10—装土分层线；
11—低密度海绵；12—水分传感器；13—基质吸力传感器；14—软管；
15—进水阀；16—止水夹；17—灌水软管；18—灌水漏斗；19—测尺；
20—马氏瓶；21—背板；22—放气阀；23—橡皮塞；24—灌水孔；
25—马氏瓶进气口；26—针阀；27—支撑；28—固定螺丝；29—固定块；
30 底座；31—固定圆筒；32—橡皮专用塞；33—夯土器

10.3 扰动土样的制备与安装

10.3.1 水平土柱渗水试验的扰动土样制备应按下列步骤进行：

- 1 将取自工程的土料风干碾碎过 0.2cm 筛，按《土工试验方法标准》（GB/T 50123—2019）第 5 章的方法测定含水率。
- 2 根据水分传感器和基质吸力传感器的量程，按《土工试验方法标准》（GB/T 50123—2019）4.3 节和 4.7 节的方法加水制备具有一定初始含水率的湿土料。
- 3 给马氏瓶装水。打开马氏瓶上的放气阀，关闭马氏瓶的进水阀；通过灌水孔给马氏瓶灌水，直到马氏瓶中水面到达放气阀出口高度附近时为止，将放气阀门关闭。
- 4 将水平土柱筒垂直放置，宜将水室端向下，另一端向上，用固定土柱筒的辅助装置将土柱固定，如图 10.2.1（d）所示，打开土柱上端一侧的法兰和滤网。土柱上的传感器安装孔在装填土料时用橡皮塞堵住。
- 5 根据设计的土样干密度，计算每层需要的土料质量，各层厚度应相同，且不应超过 5cm。将第一层的土料装入土柱筒后整平，用夯土器击实至与分层线平齐，将顶面打毛。
- 6 将第二层土料称出装入土柱筒内，整平表面，重复上述第 5 款的方法；如此继续，直到最后一层土料压实为止。
- 7 土样装填完成后，安装多孔法兰板和滤网。
- 8 去掉水平土柱筒侧壁上的橡皮塞，安装水分传感器和基质吸力传感器，其中水分传感器的探针可从预留孔处直接插入土样中，基质吸力传感器在安装前应先在土样上钻孔后再装入，基质吸力传感器侧面的缝隙必须用制备土样的同一土料填实；所有传感器和预留孔之间的间隙应用石蜡密封。

10.3.2 用软管将进水阀与水室侧面的管嘴相连接，同时将传感器的引线 with 计算机采样系统连接。

10.3.3 将马氏瓶进气口高度设置在比水平土柱水室顶部排气放水阀管嘴底部高出 0.2~0.5cm 的位置。

10.4 原状土样的制备

10.4.1 现场水平方向采取原状土样的设备（图 10.4.1）应满足以下规定：

- 1 土柱内径不小于 10cm；

- 2 土柱长度不小于 60cm~80cm;
- 3 土柱筒壁透明光滑;
- 4 入土端头套有环刀状不锈钢环;
- 5 土筒壁设有水分传感器及基质吸力传感器安装孔。

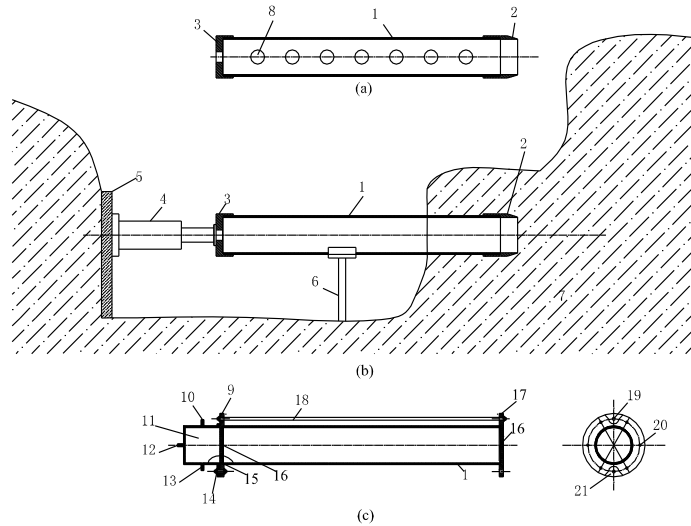


图 10.4.1 现场水平方向取原状土样的设备和取土方法示意图

- 1—土柱筒; 2—入土端头; 3—金属顶板; 4—千斤顶; 5—木垫板; 6—支撑;
 7—自然土体; 8—传感器安装孔; 9—多孔法兰 1; 10—排气孔; 11—水室;
 12—进水孔; 13—放水孔; 14—法兰螺栓; 15—O 型圈;
 16—120 目纱网和低密度海绵; 17—多孔法兰 2;
 18—拉杆螺栓; 19—拉杆螺栓孔; 20—法兰连接孔; 21—水室法兰缺口

10.4.2 在现场水平方向采取原状土样应按下列步骤进行:

1 取原状土样的水平土柱核心装置如图 10.4.1 (a) 所示, 在有机玻璃土柱筒两端分别安装金属顶板和入土端头, 该装置准备好后, 选择需要采取原状水平土柱的地段, 确定好原状水平土柱需要采取的层位。

2 开挖一个能够容纳一个到两个人可以操作的台阶形土坑, 如图 10.4.1 (b) 所示。

3 将支撑插入土坑底部, 其上部弧形支托的弧形底部高度为所采取水平原状土柱的下部层位附近, 将图 10.4.1 (a) 装置放在支撑上, 并用水平尺调整至水平状态。

4 在金属顶板上用榔头沿水平方向适当用力, 使入土端头适当进入原状自然土体中, 在后端土坑的立面上放置木垫板, 将千斤顶放置在木垫板与土柱筒金属顶板之间, 操作千斤顶使其两端受力, 然后用千斤顶将土柱筒缓慢顶入原状土体中, 每顶进大约 5cm 左右, 将入土端头附近周围的土挖掉, 但是要注意始终保持入土端头周围有大约

5cm 厚的包围层以防止土柱断裂破坏，当千斤顶长度不足时，增加木垫板的厚度，不断重复顶入、挖掘等过程，直至原状自然土将土柱筒完全填满为止。

5 将土柱以及入土端头全部挖出，轻轻卸掉入土端头，用平口刀切掉多余的土。

6 切掉土柱筒另一端多余的土，将图 10.4.1 (c) 的多孔法兰 2 的左面放入 120 目纱网和 0.2cm 厚低密度海绵后套入，然后卸掉金属顶板，并用削土刀削掉顶部露出的多余土，使土样顶端与筒口齐平，在管口放置直径与土柱内经相同的 120 目纱网和 0.2cm 厚的低密度海绵，然后将 O 型圈涂抹凡士林后嵌入图 10.4.1 (c) 中多孔法兰 1 的 O 型圈槽中，再将多孔法兰 1 套入到土柱顶端，用两根拉杆螺栓通过多孔板法兰 1 和多孔板法兰 2 的法兰孔用螺栓拉紧。

7 将图 10.4.1 (c) 中水室与多孔法兰 1 用螺栓连接，连接前在两个法兰接触面处涂抹凡士林以保证水室与土柱连接处不漏水。

8 将水分传感器和基质吸力传感器安装到土柱上。

【条文说明】：10.4.2 在现场水平方向采取原状土样应按下列步骤进行。

2 开挖一个能够容纳一个到两个人可以操作的台阶形土坑时，需注意安全，必要时可以对周围土层采取加固措施。

4 在用千斤顶将土柱筒缓慢顶入原状土体的过程中，要始终保持土柱的入土方向，柱身水平、推进平稳。要注意始终保持入土端头周围有大约 5cm 厚的包围层，以防止取土样过程中土柱突然断裂，如果需要，包围层的厚度可以适当放大。

10.4.3 现场（竖直方向）采取原状土样设备（图 10.4.2）应满足以下规定：

- 1 土柱内径不小于 10cm；
- 2 土柱长度不小于 60cm~80cm；
- 3 土柱筒壁透明光滑；
- 4 入土端头套有环刀状不锈钢环；
- 5 土筒壁设有水分传感器及基质吸力传感器安装孔。

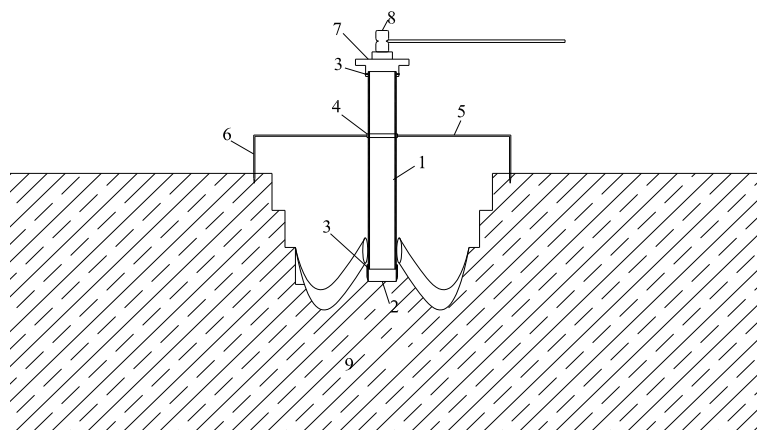


图 10.4.2 现场取原状土样（竖直方向）的设备和取土方法示意图

1—土柱筒；2—入土端头；3—顶丝；4—套环；5—固定支架；
6—固定支架支撑；7—金属顶板；8—榔头；9—原状土

10.4.4 在现场竖直方向取原状土样应按下列步骤进行：

- 1 取原状土样时，将金属顶板和入土端头安装在土柱的顶部和底部。
- 2 确定好取原状土样的位置，将取土层位以上的土去掉，并铲平土层表面。
- 3 将固定支架的套环套在土柱上，并将固定支架支撑插入土样中，用水平尺调整土柱使其处于垂直状态。
- 4 在金属顶板上用榔头沿垂直方向适当用力，使入土端头进入原状土体中，土柱每进大约 5cm 左右，将入土端头附近周围的土挖掉，但要注意始终保持入土端头周围有大约 5cm 厚的包围层以防止土柱断裂破坏，用榔头敲击金属顶板，使原状土逐渐进入有机玻璃土筒中。
- 5 当土筒顶金属顶板接近固定支架时，将固定支架范围内一定厚度的表土去除，并将固定支架下压到新的高度。
- 6 重复上述第 4 款和第 5 款的步骤，直至原状土将土柱筒完全填满为止。
- 7 将金属顶板和固定支架去掉，用一块平板覆盖在土柱顶部并适当固定，以保持顶部土样不会发生破裂，掉落等现象，再将土柱以及入土端头全部挖出，轻轻卸掉入土端头，用平口刀切掉多余的土。
- 8 切掉土柱筒另一端多余的土，将图 10.4.1 (c) 的多孔法兰 2 的左面放入 120 目纱网和 0.2cm 厚低密度海绵后套入，然后立起土柱，使顶板端向上，卸掉盖板，并用削土刀削掉露出的多余土，使土样顶端与筒口齐平，在管口放置直径与土柱内经相同的 120 目纱网和 0.2cm 厚的低密度海绵，然后将 O 型圈涂抹凡士林后嵌入图 10.4.1 (c) 中多孔法兰 1 的 O 型圈槽中，再将多孔法兰 1 套到土柱顶端，用两根拉杆螺栓通过多

孔板法兰 1 和多孔板法兰 2 的法兰孔用螺栓拉紧。

9 将图 10.4.1 (c) 中水室与多孔法兰 1 用螺栓连接, 连接前在两个法兰接触面处涂抹凡士林以保证水室与土柱连接处不漏水。

10 将水分传感器和基质吸力传感器安装到土柱的预留孔中。

【条文说明】: 10.4.4 4 在金属顶板上用榔头沿垂直方向适当用力, 使入土端头进入原状土体时, 要不断地用水平尺进行测量, 使土柱始终保持垂直方向。要注意始终保持入土端头周围有大约 5cm 厚的包围层, 以防止取土样过程中土柱突然断裂, 如果需要, 包围层的厚度可以适当放大。

10.5 试验方法

10.5.1 水平土柱渗水试验应按以下步骤进行:

1 准备好与水室同体积的水量, 用灌水漏斗快速灌入水室, 同时打开进水阀, 用止水夹夹住灌水软管。

2 测记马氏瓶的初始水位, 同时记录入渗时间和马氏瓶的水位变化, 观测土样中湿润锋的变化。

3 按一定的时间间隔, 记录土柱中湿润锋的推进位置。

4 在整个试验过程中, 每当土柱中湿润锋推进 10cm 左右时, 测记一次水分传感器和基质吸力传感器的读数; 同时记录入渗时间及马氏瓶的供水量。

5 当湿润锋超过最后一个基质吸力传感器所设的位置时, 将马氏瓶进水阀关闭, 停止供水, 放空水室中的水并关闭进水阀。

10.5.2 以不同时刻各测点的体积含水率为纵坐标, 以测点到土柱入渗端的距离为横坐标, 绘制体积含水率和测点坐标的关系曲线 (图 10.5.2)。

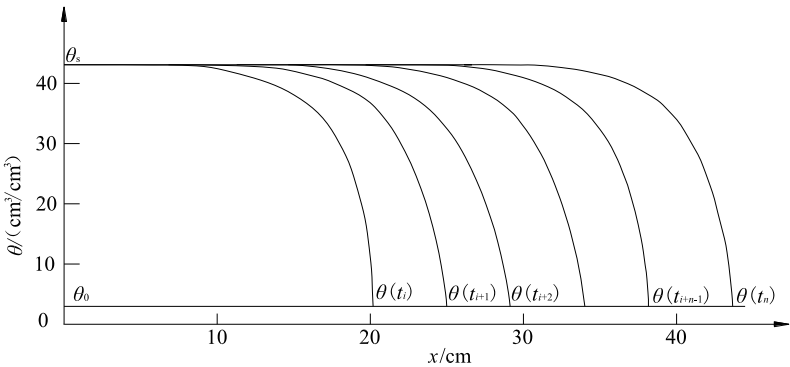


图 10.5.2 体积含水率与测点坐标的关系曲线

10.5.3 土的水分扩散率计算过程如下：

1 对图 10.5.2 中的曲线进行检验和修正。根据水量平衡原理，在 $\Delta t=t_{i+1}-t_i$ 时段内，土体剖面水分增量 $W(t_{i+1}-t_i)$ 应等于同时段内的实际入渗供水量 $(V_{i+1}-V_i)$ ，即

$$V_{i+1}-V_i = \sum_{x=0}^{x_{i+1}} \frac{[\theta(t_{i+1})-\theta(t_i)]A\Delta x}{2} = W(t_{i+1}-t_i) \quad (10.5.3-1)$$

式中： V_i 和 V_{i+1} — 相邻两次入渗时间 t_i 和 t_{i+1} 的马氏瓶供水量 (cm^3)；

A — 土柱横截面积 (cm^2)；

Δx — 水平距离计算步长 (cm)；

θ_i 和 θ_{i+1} — 各计算步长土的体积含水率 (%)。

当计算所得之土体剖面水分增量 $W(t_{i+1}-t_i)$ 与实际供水量 $(V_{i+1}-V_i)$ 不符或相差较大时，需对试验曲线进行修正。对修正后的曲线再计算 $W(t_{i+1}-t_i)$ ，如果计算的土体剖面水分增量与实际供水量相符或不超过一定的要求 ($\leq 1\%$) 时，则可认为所测曲线符合要求。这样依次对曲线进行检验和修正，以确定符合精度要求的试验曲线。

2 土的水分扩散率的计算公式为

$$\begin{aligned} D(\theta_i) &= -\frac{1}{2} \frac{\Delta(x_i t^{-1/2})}{\Delta\theta_i} \sum_{\theta_0}^{\theta} (x_i t^{-1/2}) \Delta\theta_i \\ &= -\frac{1}{2t} \frac{\Delta x_i}{\Delta\theta_i} \sum_{\theta_0}^{\theta} \bar{x}_i \Delta\theta_i \end{aligned} \quad (10.5.3-2)$$

式中： θ_i — 第 i 点处的体积含水率 (%)；

$D(\theta_i)$ — 与 θ_i 对应的土壤水分扩散率 (cm^2/min)；

x_i — 入渗距离 (cm)；

t — 入渗时间 (min)；

$\bar{x}_i$ — 所取 $\Delta\theta_i$ 对应的上、下边界湿润锋距离的平均值 (cm)；

3 取任一时刻符合精度的试验曲线，在曲线上求出坐标 x 和体积含水率 θ ，按照式 (10.5.3.-2) 计算土壤水分运动的扩散率 $D(\theta)$ 。

【条文说明】：10.5.3 土的水分扩散率计算过程如下：

1 根据水量平衡原理，在 $\Delta t=t_{i+1}-t_i$ 时段内，土体剖面水分增量 $W(t_{i+1}-t_i)$ 应等于同时段内的实际入渗供水量 $(V_{i+1}-V_i)$ ，即

$$V_{i+1}-V_i = \sum_{x=0}^{x_{i+1}} \frac{[\theta(t_{i+1})-\theta(t_i)]A\Delta x}{2} = W(t_{i+1}-t_i) \quad (10.5.3-1)$$

式 (10.5.3-1) 是根据非饱和土的达西定律和质量守恒定律推导出来的, 其文献为:

沈晋, 王文焰, 沈冰, 等. 动力水文实验研究[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1991, 121-131.

2 土的水分扩散率的计算公式为

$$\begin{aligned} D(\theta_i) &= -\frac{1}{2} \frac{\Delta(x_i t^{-1/2})}{\Delta\theta_i} \sum_{\theta_0}^{\theta} (x_i t^{-1/2}) \Delta\theta_i \\ &= -\frac{1}{2t} \frac{\Delta x_i}{\Delta\theta_i} \sum_{\theta_0}^{\theta} x_i \Delta\theta_i \end{aligned} \quad (10.5.3-2)$$

式 (10.5.3-2) 的文献为:

Bruce R R, Klute A. The measurement of soil water diffusivity [J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1956, 20:458-462 和张建丰, 张志昌, 李涛. 土壤水动力过程物理模拟[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020, 51-60.

10.5.4 根据实测某断面的吸力与体积含水率值, 绘制吸力与体积含水率的关系曲线 (图 10.5.4), 该曲线即为土样的水分特征曲线。

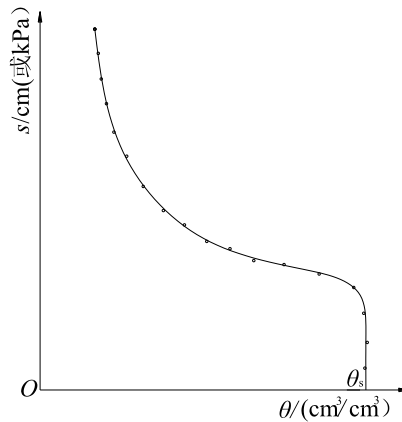


图 10.5.4 水分特征关系曲线示意图

10.5.5 对图 10.5.4 的基质吸力和体积含水率的关系进行拟合, 如果用幂函数拟合, 其公式的形式为

$$s = m\theta^n \quad (\theta_0 \leq \theta \leq \theta_s) \quad (10.5.5-1)$$

式中: s — 基质吸力 (kPa 或 cm, 1kPa=10.2cm 水柱高);

m — 经验常数;

n — 经验常数;

θ_0 — 初始体积含水率 (%);

θ_s — 饱和体积含水率 (%) ;

10.5.6 土的比水容量

土的水分特征曲线斜率的倒数的负值即为比水容量, 即

$$C(\theta) = -\frac{1}{ds/d\theta} = -d\theta/ds \quad (10.5.6)$$

式中: $C(\theta)$ — 土的比水容量(1/cm)。

10.5.7 土的非饱和导水率 $K(\theta)$ 按下式计算:

$$K(\theta) = C(\theta)D(\theta) \quad (10.5.7)$$

式中: $K(\theta)$ — 土的非饱和导水率 (cm/min)。

10.5.8 水平土柱渗水试验的扰动土样制备记录应按《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019) 附录 D 的表 D.1 的格式记录。

10.5.9 水平土柱渗水试验的原状土样制备记录应按《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019) 附录 D 的表 D.2 的格式记录。

10.5.10 水平土柱渗水试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 10.1 和附录 E 表 10.2 的规定。

10.5.11 土壤扩散率计算过程应符合本标准附录 E 表 10.3 的规定。

附录 E 表 10.1 水平土柱渗水量和渗水通量试验记录表

[illegible]

附录 E 表 10.2 各测点断面土样体积含水率 θ 和土样基质吸力 s 测量记录表

任务单号						试验者						
试验日期						计算者						
仪器名称及编号						校核者						
t_i (min)	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5		测点 6		测点 7		测点 8	
	测点距起始点水平距离 (cm)											
	$x_1=$	$x_2=$	$x_3=$	$x_4=$	$x_5=$		$x_6=$		$x_7=$		$x_8=$	
	θ_i (%)	θ_i (%)	θ_i (%)	θ_i (%)	θ_i (%)	s (kPa)	θ_i (%)	s (kPa)	θ_i (%)	s (kPa)	θ_i (%)	s (kPa)

附录 E 表 10.3 水分运动扩散率计算表

任务单号						试验者			
试验日期						计算者			
仪器名称及编号						校核者			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x_i (cm)	θ_i (%)	Δx_i (cm)	$\Delta \theta_i$ (%)	$-\Delta x_i / \Delta \theta_i$ (cm)	$\bar{x}_i$ (cm)	$\bar{x}_i \Delta \theta_i$ (cm)	$\sum \bar{x}_i \Delta \theta_i$ (cm)	$(\Delta x_i / \Delta \theta_i) / (2t)$ (cm/min)	$D(\theta_i)$ (cm ² /min)

11 渗气试验

11.1 一般规定

11.1.1 非饱和土渗气试验主要采用稳态法，适用于各种非饱和土。

11.1.2 本试验包括两类试验：一维渗气试验和三轴渗气试验；前者不施加外力，后者可考虑围压引起的体变对渗气性的影响。

【条文说明】：11.1.2 有资料表明在饱和度达到某一临界值时，渗气系数陡降为零，渗水系数急剧增加，故而渗气试验适宜于非饱和土。渗气试验分为稳态法和非稳态法，稳态法对于各类土均适用，而非稳态法在试验操作以及计算方面较复杂，本标准只限于稳态法。一维渗气试验不考虑竖向压力的影响，不施加竖向压力。三轴渗气试验主要考虑围压对渗气系数的影响，不考虑偏应力等因素的影响。

11.1.3 试验用水宜采用蒸馏水。试验用气宜为空气或氮气，气体注入端的气体缓冲罐内宜盛放少量蒸馏水，以增加气体湿度。

【条文说明】：11.1.3 试验用水主要用于三轴渗气试验中压力室中充水，采用蒸馏水可以有效防止水中溶解的气体对围压以及试样变形的影响。考虑到土中气体主要是空气，采用空气为供气源，但也可采用氮气。气体注入端的气体缓冲罐内宜盛放少量水，以增加气体湿度，防止渗气过程中引起试样干化收缩。

11.1.4 渗气系数的最大允许差值应在 $\pm 2.0 \times 10^{-n}$ m/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，作为试样在特定物理力学条件下的渗气系数。

【条文说明】：11.1.4 根据《ZC-5 型渗气仪的研制与渗气测试方法的研究》《非饱和 Q₃ 黄土渗气特性试验研究》《非饱和含黏砂土的水气运移规律和力学特性研究》《膨润土-砂混合型缓冲/回填材料基本工程特性研究》等关于黄土（表 11.1.4-1、表 11.1.4-2 和图 11.1.4-1）、含黏砂土（图 11.1.4-2）、膨润土-砂混合料（图 11.1.4-3）等试验结果可知，不同压力差和初始物理力学参数条件下的渗气系数相差并不是很大，一般取平均值作为最终的渗气系数。从现有资料来看，最大误差可以控制在 $\pm 2.0 \times 10^{-n}$ m/s 范围内，故而取最大允许差值为 $\pm 2.0 \times 10^{-n}$ m/s。

表 11.1.4-1 常压渗气测试统计结果^[1]

压力范围 h (cm)	统计值	试件号			
		I	II	III	IV
17-6	n	18	19	27	
	k (cm/s)	8.62×10^{-2}	1.97×10^{-2}	1.49×10^{-2}	
3.5-0.5	n	24	20	21	26

	k (cm/s)	1.2×10^{-1}	2.02×10^{-2}	1.58×10^{-2}	1.37×10^{-2}
17-0.5	n	43	39	48	
	k (cm/s)	1.05×10^{-1}	1.99×10^{-2}	1.53×10^{-2}	

表 11.1.4-2 变压渗气测试统计结果^[1]

水箱位置 s (cm)	$S_{\text{大}}=0 \ S_{\text{小}}=0$		$S_{\text{大}}=0 \ S_{\text{小}}=0$		$S_{\text{大}}=0 \ S_{\text{小}}=0$	
压力范围 h (cm)	17-6	3.5-0.5	17-6	3.5-0.5	17-6	3.5-0.5
I k (cm/s)	8.36×10^{-2}	9.11×10^{-2}	8.68×10^{-2}	9.42×10^{-2}	9.63×10^{-2}	9.34×10^{-2}
II k (cm/s)	1.93×10^{-2}	1.86×10^{-2}			1.95×10^{-2}	1.82×10^{-2}
III k (cm/s)	1.53×10^{-2}	1.53×10^{-2}	1.57×10^{-2}	1.47×10^{-2}	1.53×10^{-2}	1.48×10^{-2}
IV k (cm/s)	1.33×10^{-1}	1.34×10^{-2}	1.35×10^{-2}	1.27×10^{-2}	1.36×10^{-2}	1.34×10^{-2}

[1]丁朴荣. ZC-5 型渗气仪的研制与渗气测试方法的研究[J]. 西安理工大学学报, 1986, (4): 40-55.

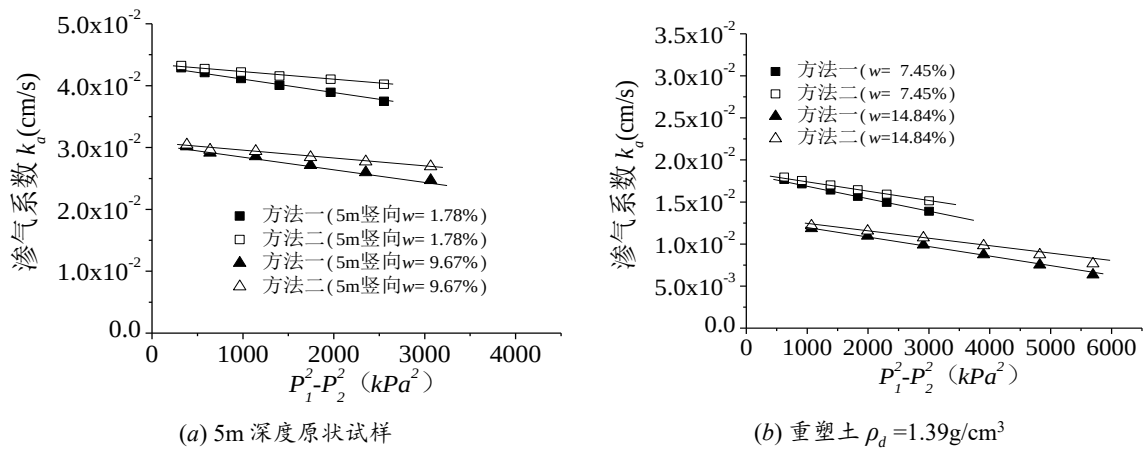
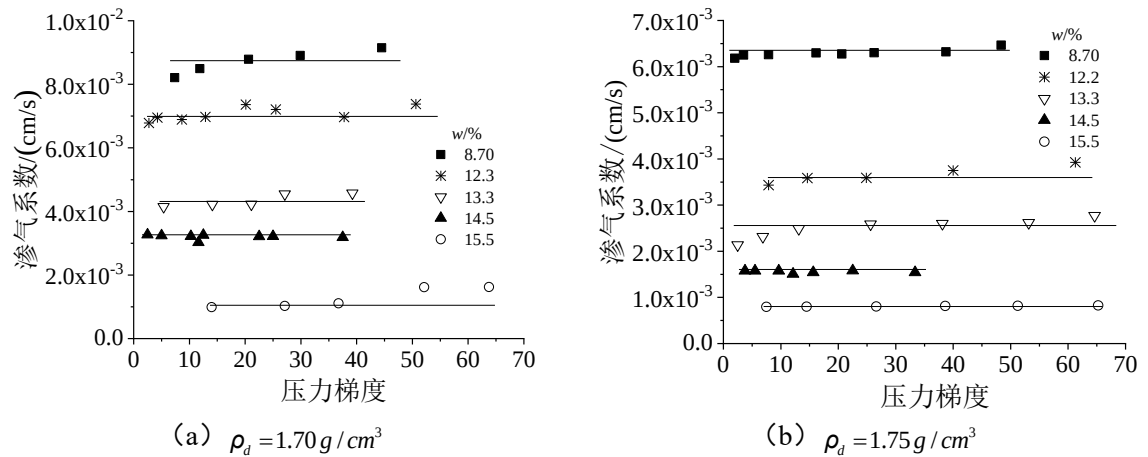


图 11.1.4-1 原状黄土试样和重塑黄土试样渗气系数^[2]

[2]姚志华, 陈正汉, 黄雪峰, 等. 非饱和 Q_3 黄土渗气特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1264-1273.



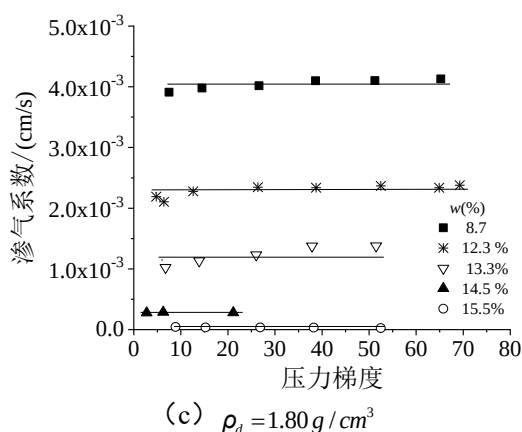


图 11.1.4-2 含黏砂土相同干密度、含水率与渗气系数的关系^[3]

[3]苗强强. 非饱和含黏砂土的水气运移规律和力学特性研究[D]. 重庆: 解放军后勤工程学院, 2011.

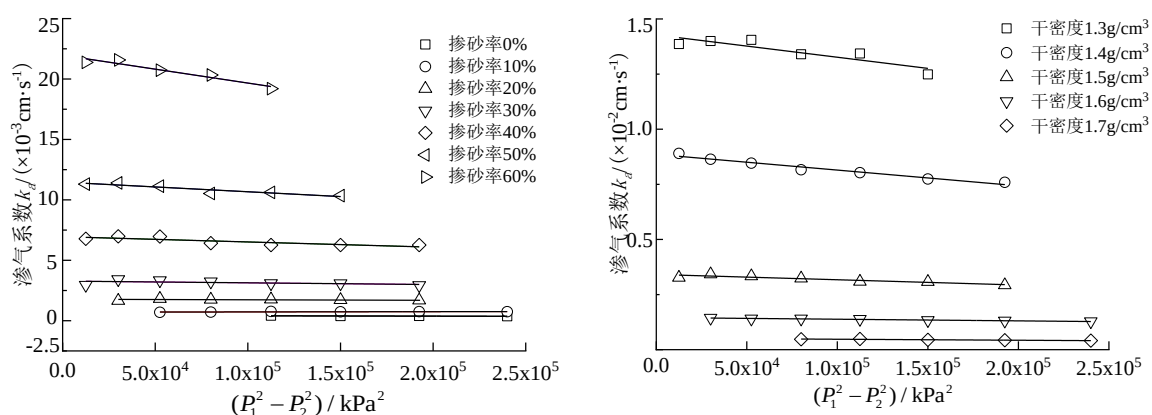


图 11.1.4-3 不同掺砂率和干密度条件下的混合物渗气系数与压力平方差的关系曲线^[4]

[4]汪龙. 膨润土-砂混合型缓冲/回填材料基本工程特性研究[D]. 重庆: 解放军后勤工程学院, 2014.

11.1.5 本试验应以温度 20℃为标准温度, 计算标准温度下的渗气系数。

【条文说明】：11.1.5 温度会对渗气系数产生影响, 应根据实验室实测温度对标准温度下的渗气系数测试结果进行调整换算。另外, 气压及海拔也对渗气系数产生影响, 本规范不再考虑其影响。

11.2 试验设备

11.2.1 本试验设备包括一维渗气试验设备和三轴渗气试验设备。

11.2.2 一维渗气试验设备（图 11.2.2.1）包括试样容器、辅助装置等, 应符合以下规定：

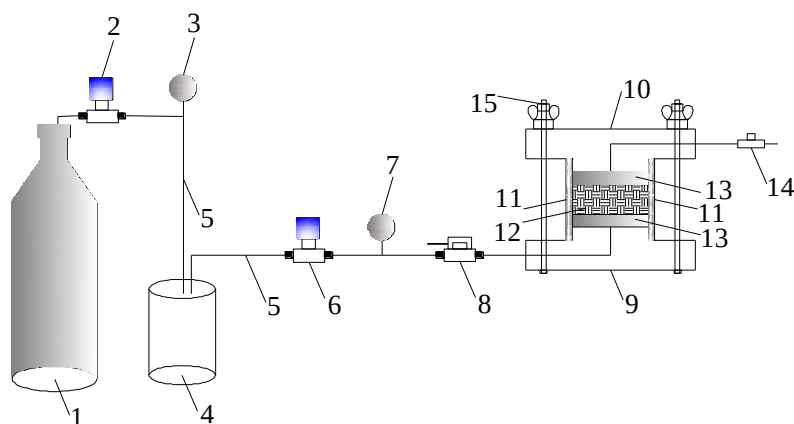


图 11.2.1 一维渗气试验装置示意图

1-储气罐；2-调压阀；3-气压表；4-气体缓冲罐；5-导气管；6-调压阀；7-气压表；
8-三通阀门；9-底座；10-顶盖；11-试样；12-套筒；13-透水板；14-气体流量计；
15-螺丝套杆

1 试样容器：套筒，透水板、底座和顶盖等组成；套筒为一空心圆柱体，可放入环刀。环刀和透水板技术性能和尺寸参数应符合现行行业标准《土工试验仪器 环刀》SL370 及有关标准的规定；

2 辅助装置：储气罐、导气管、气体缓冲罐、调压阀、气压表和气体流量计等；

3 天平：称量 500g，分度值 0.01g；

4 温度计：分度值 0.1℃；

5 其他：切土器、秒表、削土刀、凡士林。

【条文说明】：11.2.2 渗气室可选用变水头渗透仪的渗透室，仪器可参见《土工试验方法标准》（GB/T 50123 - 2019）。渗气室内径需与标准环刀外径相同，确保标准环刀放入试样容器中严丝合缝，不产生空气流通通道。试验前宜在试样容器内径和标准环刀外径上涂抹凡士林。透水板直径与试样直径相等，其渗气系数应大于试样的渗气系数。

储气罐体积宜在 0.3 m³ 以上，工作压力不小于 800 kPa。储气罐板材采用 Q235B 钢材，厚度不小于 3.5 mm；通气管道应采用尼龙管等，受压能力超过 1MPa 以上，管径公差控制在±0.08 mm 内，管道直径与渗透室和供气装置等阀门匹配。调压阀或压力传感器精度宜达到 1 kPa；气体流量计精度达到 0.01 L/min。

11.2.3 三轴渗气试验设备（图 11.2.2.2）包括三轴压力室和辅助性设备，应符合以下规定：

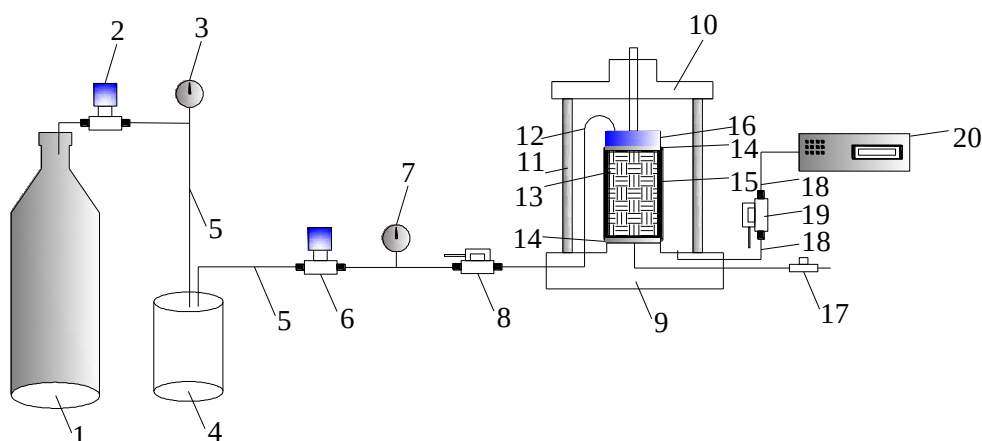


图 11.2.2 一维渗气试验装置示意图

1-储气罐；2-调压阀；3、7-气压表；4-缓冲罐；5、12-导气管；6-调压阀；8-两通阀门；

9-三轴压力室底座；10-三轴压力室顶盖；11-压力室腔体；12-套筒；13-三轴试样；

14-透水石；15-橡皮膜；16-试样顶帽；17-气体流量计；18-围压管线；19-两通阀门；

20-围压施加装置

1 三轴压力室：三轴压力室底座、三轴压力室顶盖、压力室腔体和试样顶帽等。

围压由三轴仪围压系统提供或用压力-体积控制器控制。

2 辅助性设备：储气罐、通气管道、气体缓冲罐、调压阀、压力传感器、气体流量计等。

3 天平：称量 500g，分度值 0.01g；

4 温度计：分度值 0.1 °C；

5 橡皮膜：对于 39.1mm 直径试样，橡皮膜厚度宜为 0.1mm~0.2mm；

6 透水板：其直径与试样直径相等，其渗气系数要大于试样的渗气系数。

7 制样设备：击实器、切土盘、切土器、切土架、原状土分样器、承筒膜、制备砂样圆模，用于粗颗粒土制备。

8 其他：游标卡尺、秒表等。

【条文说明】：11.2.3 本试验装置可由标准三轴仪改进，渗气室采用传统三轴压力室，气体从试样底部进入试样，从试样顶帽流出。围压由三轴设备空气压缩机或者压力体积控制器提供。其技术条件应符合国家标准《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》GB/T15406 及《土工试验仪器 三轴仪》GB/T24107.1 的规定，本标准仅涉及其压力室，不涉及其他三轴剪切设备和部件。

辅助性设备与 11.2.2 节第 2 条规定相同，主要为试样提供气源、渗气通道、调压功能以及采集数据等。三轴渗气试样制样设备应符合本标准第 3.2 节的规定。

11.3 试样制备

11.3.1 渗气试验的试样制备包括扰动土试样和原状土试样，采用环刀试样和三轴试样。

11.3.2 制备扰动土环刀试样和三轴试样应符合本标准第 3.2 节和《土工试验方法标准》（GB/T 50123 - 2019）4.4 节与 19.3 节的规定。对于原状土试样，应符合《土工试验方法标准》（GB/T 50123 - 2019）第 4.5 节和 19.3 节的规定。

11.3.3 试样含水率测定应符合《土工试验方法标准》（GB/T 50123 - 2019）第 5 章的规定进行测试。目标含水率的调整方法应符合《土工试验方法标准》（GB/T 50123 - 2019）第 4.3 节、4.4 节和 4.7 节的规定。

11.4 一维渗气试验

11.4.1 一维渗气试验应按下列步骤进行：

- 1 安装好仪器（图 11.2.2），检查各管路接头处是否漏气。
- 2 渗气室套筒内壁涂抹一薄层凡士林，将盛有试样的环刀推入套筒中。把挤出的多余凡士林小心刮净。将透水板和滤纸以及密封圈分别装入渗气室上、下盖中，安装好渗透室，并用螺丝拧紧，保证渗气室与环刀安装后形成封闭空间。
- 3 安装好试样的渗气室与供气装置相连，设定目标气压力，打开储气罐阀门，使气体进入气体缓冲罐中，直到气压表读数稳定为止；
- 4 打开调压阀 6（图 11.2.2.1），气体从试样底部流入，从试样顶部流出，待气压传感器 5 的读数稳定后实时记录气体流量和试验时间；
- 5 记录同一次试验过程中气体流量计处的温度以及室温，取平均值。
- 6 调节目标气压力，改变压力梯度，按本标准 11.4.1 中第 4-第 6 款规定重复进行测定。
- 7 根据需要，宜制备数个不同初始物理指标（如含水率、饱和度、干密度、孔隙比等）的试样，进行渗气系数测定。

【条文说明】：11.4.1 透水板和滤纸宜与试样含水率相当。放置透水板与滤纸为了防止气压对土样冲击的破坏。密封圈确保环刀与套筒内壁不漏气。

供气装置可采用通过气压加载装置施加气压以在试样两端形成气压差的主动渗气压施加方式，也可采用通过水箱放水以在试样两端形成气压差的被动渗气压施加方式。

11.4.2 本试验渗气系数应按下列公式计算：

$$k_a = \frac{v_a}{i_a} = \frac{Q_a/A}{\Delta p/(\rho_w gh)} = \frac{Q_a \rho_w gh}{\Delta p A} \quad (11.4.2)$$

式中： k_a — 渗气系数（m/s）；

v_a — 渗气速率（m/s）；

i_a — 渗气压力梯度；

Q_a — 渗气体积流速（m³/s）；

Δp — 试样上下两端的气压差（kPa）；即，输入试样的气压与输出试样气压的差值，输出试样气压可为大气压（kPa）。

A — 试样的面积（m²）；

h — 试样的高度（m）；

ρ_w — 水的密度（kg/m³）；

g — 重力加速度（N/kg）。

【条文说明】：11.4.2 该公式基于 Darcy 定律推导^[5]。为了测定渗气系数，需确定气压差 Δp 和渗气体积流速 Q_a ， Δp 可分别通过主动渗气压施加方式实现，也可采用通过水箱放水以在试样两端形成气压差的被动渗气压施加方式。

对于主动渗气压施加方式， Q_a 可通过气体流量计测定。对于被动渗气压施加方式，试样的一端与空压机提供的稳定气源相通，于是试样两端形成气压差。该压差可由传感器获取。经过一段时间后，由试样进入水箱上部空气的体积流量与从水箱下部放出水的流量达到了动态平衡，压差传感器的读数保持恒定，这时开始用量筒接水，同时开始计时，经过一段时间量筒收集到一定量的水，用精度 0.01g 天平测量量筒中的水质量。将压差传感器与初始稳定读数差值换算成气压力，这样就完成了某个试样在一个压力梯度下的试验，调节放水量，重复以上量测过程，可得出一组试验资料。在整理试验资料时，把量测水体积按下式校正：

$$Q_a = \frac{P_{atm} - \Delta P}{P_{atm}} Q \quad (11.4.2-1)$$

式中， Q 为量测水体积流速， ΔP 为压力差， Q_a 为渗过试样的空气在某个标准气压 P_{atm} 下的体积流速，20℃，其值等于 101.325 kPa。

分别用 Q_a 和 ΔP 计算空气的体积流速 v 及气压梯度 i ：

$$v = \frac{Q_a}{A} \quad (11.4.2-2)$$

$$i = \frac{\Delta P}{\rho_w g h} \quad (11.4.2-3)$$

式中， A 、 h 分别为试样的横截面积与高度。

考虑到压力与温度对渗气体积流速的影响，通过理想气体状态平衡方程校正至标准状态。在标准温度得到的渗气系数可得到其他温度条件下的渗气系数。

研究资料表明，在常温（变化不大）条件下，Darcy 定律和 Fick 定律试验结果是吻合的，两者均可以用于描述非饱和土中气体流动。Fick 定律侧重于质量流，形式较为复杂，Darcy 定律则应用较为方便。

[5] 陈正汉, 谢定义, 王永胜. 非饱和土的水气运动规律及其工程性质研究[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(3): 9-20.

11.4.3 计算某一压力差 ΔP 和孔隙比及含水率等条件下的试样平均渗气系数 $\bar{k}_g$ ，绘制 $\bar{k}_g$ -孔隙比 e ， $\bar{k}_g$ -含水率 w ， $\bar{k}_g$ - ΔP 关系曲线，并确定渗气系数的变化规律。

【条文说明】：11.4.3 土的渗气系数表征了气体通过土孔隙的能力，密切与土的孔隙比、密度、含水率、饱和度等物理指标相关。因此，在测定渗气系数时，必须说明与渗气系数相适应的物理参数。根据设定初始物理条件的试样，测定渗气系数。初始物理需要值条件下的试样制备存在困难时，可进行不同物理参数条件下渗气系数测定，做出渗气系数与不同物理参数的关系曲线，即可查出任意需要初始物理条件下的渗气系数。如试样施加了竖向压力，则应考虑竖向压力影响下渗气系数变化规律。

11.4.4 一维渗气试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 11.1 的规定。

附录 E 表 11.1 一维渗气试验记录表

任务单号			试样说明				试样面积			试验者		
试样编号			初始含水率				初始孔隙比			计算者		
仪器名称和编号			试样高度和面积				试验日期			校核者		
试验 次数	稳定开始时间 t_1 (D/h/min)	稳定终了时间 t_2 (D/h/min)	经过时间 t (s)	注入压 力 P_1 (kPa)	大气压 P_{atm} (kPa)	压力差 Δp (kPa)	气体流速 Q_a (m ³ /s)	$\frac{\rho_w gh}{A}$	渗气系数 k_a (m/s)	平均温 度 T (°C)	渗气系数 $k_{a(20)}$ (m ² /s)	平均渗气系 数 $\bar{k}_{a(20)}$ (m ² /s)
1	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
—	—	—	(2) - (1)	—	—	(5) ² - (4) 2	—	—	(7) × (8) / (6)	—	$\frac{T_{20}}{(10)} \times (9)$	$\frac{\Sigma(11)}{n}$
2												
3												
.....												
n												

11.5 三轴渗气试验

11.5.1 三轴渗气试验试样安装应按下列步骤进行：

- 1 对压力室底座充水，压力室底座放置透水板，再依次安装试样、透水板和试样帽。
- 2 安装压力室罩，开排气孔，向压力室注水。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。

11.5.2 三轴渗气试验应按下列步骤进行：

- 1 仪器按图 11.2.3 进行安装，装试样前应检查各管路接头处是否漏气。。
- 2 试样装好后，施加目标围压，测记试样体积变形和时间，待试样体积变形稳定为止。变形稳定标准为：试样体变 $\leq 0.006 \text{ cm}^3/\text{h}$ 。施加围压应符合《土工试验方法标准》（GB/T 50123 - 2019）19.4.1 条第 5 款规定。
- 3 调整调压阀（10）（图 11.2.3）至目标压力，打开储气罐阀门，使气体进入气体缓冲罐中；调节调压阀（7）于设定气压值，始终保持气压低于围压。
- 4 待压力稳定后，打开阀门（5），空气从试样下端的透水石穿过试样，再通过试样顶部的透水石进入试样帽，继而通过连接在试样帽上的细尼龙管从三轴底座流出。
- 5 待气压表读数稳定后，记录注入压力和气体流量。
- 6 记录气体流量计（12）处的温度以及室温，取平均值。
- 7 调节气体注入压力和围压，改变压力梯度，按本标准 11.5.2 中第 3-第 6 款规定重复进行测定。
- 8 根据需要，可制备或削取数个不同初始物理指标的扰动土或原状土试样，进行不同围压条件下的渗气系数测定。

【条文说明】：11.5.2 渗透室中注入蒸馏水的目的为了防止气泡产生对围压的影响，这与三轴压缩试验规定相同。本试验主要针对非饱和土，设备未安装陶土板等装置，故而在试样排水方面不再要求，仅对土样体积变形进行精确控制。体变稳定标准参考《土工试验方法标准》（GB/T 50123 - 2019）。渗气时施加了气压值不超过围压，以免出现试样受损和橡皮膜鼓胀等现象。

11.5.3 施加围压的三轴渗气试验渗气系数应按下列公式计算：

$$k_a = \frac{2\rho_a g P_{atm} h Q_h}{A(P_1^2 - P_{atm}^2)} \quad (11.5.3)$$

式中: ρ_a — 气压 P_1 以及标准温度 T 条件下的气体密度; (kg/m^3);

g — 重力加速度(N/kg);

P_{atm} — 大气压 (Pa); 标准温度 20°C 条件下, 其值等于 101.325 kPa ;

P_1 — 施加于试样底端气压 (kPa);

H — 试样高度 (m);

A — 试样横截面积 (m^2);

k_a — 渗气系数 (m/s);

Q_h — 流出试样顶端气体流量 (m^3/s)。

【条文说明】: 11.5.3 气体在多孔介质中流动时, 由气体的一维稳定渗流达西定律可得到多孔介质的气体固有渗透率的计算公式^[6, 7]:

$$K = \frac{2\mu P_{atm} h Q_h}{A(P_1^2 - P_2^2)} \quad (11.5.3-1)$$

式中: K — 气体固有渗透率 (m^2);

μ — 气体的动力粘滞系数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$); 1.983×10^{-5} ;

P_{atm} — 大气压 (Pa), 20°C , 101.325 kPa ;

P_1 — 施加于试样底端气压 (kPa);

P_2 — 流出试样顶端气体气压 (kPa); 该值为了计算方便可等同于大气压 P_{atm} ;

h — 试样高度 (m);

A — 试样横截面积 (m^2);

Q_h — 流出试样顶端大气压下气体流量 (m^3/s)。

上式中的气体固有渗透率 K , 是土的自身性质, 取决于土的孔隙结构。在满足 1) 流体流动是层流; 2) 流体与土样无反应; 3) 孔隙空间被单相流体完全饱和等条件下, 土的体固有渗透率与通过的流体性质无关。在实验室测定时, 通常用空气作为通过土样的介质, 因此, 土的绝对渗透率又称作空气渗透率。其测定原理是气体的一维稳态流达西定律。

气体固有渗透率与渗气系数存在如下关系:

$$K = \frac{k_a \mu}{\rho_a g} \quad (11.5.3-2)$$

式中： ρ_a — 压力 P_1 以及标准温度 T 下的气体密度；（ kg/m^3 ）；

g — 重力加速度(N/kg)；

则渗气系数可表达为：

$$k_a = \frac{2\rho_a g P_{atm} h Q_h}{A(P_1^2 - P_2^2)} \quad (11.5.3-3)$$

如假定气体流出试样的气压等同于大气压，则上式变为：

$$k_a = \frac{2\rho_a g P_{atm} h Q_h}{A(P_1^2 - P_{atm}^2)} \quad (11.5.3-4)$$

[6]Thaveesak V., Abdelmalek B. Gas permeability of partially hydrated geosynthetic clay liners[J].

Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2004, 130(1): 93-102.

[7] 姚志华，陈正汉，黄雪峰. 自重湿陷性黄土的水气运移和力学变形特征[M]. 北京：人民交通出版社. 2018.

11.5.4 试验资料整理、绘制曲线、确定渗气系数的变化规律及渗气系数与围压的关系。

计算某一压力平方差 $P_1^2 - P_{atm}^2$ 和孔隙比及含水率等条件下的试样平均渗气系数 k_a ，绘制 k_a -孔隙比 e ， k_a -含水率 w ， k_a - $P_1^2 - P_{atm}^2$ 关系曲线，并确定渗气系数的变化规律。

【条文说明】：11.5.4 本试验渗气系数计算公式中高度 h 和面积 A 应采用压缩变形稳定后并校核后的试样实际尺寸指标。

非饱和土试样在施加围压后会产生体积压缩变形，会对渗气系数计算产生影响，故而，待非饱和土试样压缩变形稳定后，对施加围压后的非饱和土试样原始截面积和高度进行校正。假定非饱和土试样压缩应变各向均等，对直径和高度以及孔隙比等物理参数进行校核。本试验不采用陶土板进行非饱和土固结排水测试，故而含水率 w 认为仍是试样初始值。

11.5.5 三轴渗气试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 11.2 的规定。

附录 E 表 11.2 三轴渗气试验记录表

任务单号		试样说明				试样初始/变形稳定后面积				试验者				
试样编号		含水率				初始/变形稳定后孔隙比				计算者				
仪器名称和编号		试样初始/变形稳定后高度				试验日期				校核者				
试验 次数	稳定开始时间 t_1 (D/h/min)	稳定终了时间 t_2 (D/h/min)	经过 时间 t (s)	围压 (kPa)	试样 体变 (%)	注入压 力 P_1 (kPa)	大气压 P_{atm} (kPa)	压力 平方差 $P_1^2 - P_{atm}^2$ (kPa ²)	气体流量 Q_h (m ³ /s)	$\frac{2\rho_a g h}{A}$	渗气系数 k_a (m/s)	平均温 度 T (°C)	渗气系数 $k_{a(20)}$ (m/s)	平均渗气 系数 $\bar{k}_{a(20)}$ (m/s)
1	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
—	—	—	(2) - (1)	—	—	—	—	(7) ² - (6) ²	—	—	(9) × (10) / (8)	—	$\frac{T_{20}}{(12)} \times$ (11)	$\frac{\Sigma(13)}{n}$
2														
3														
.....														
n														

12 真三轴试验

12.1 一般规定

12.1.1 本试验适用于粘土、粉质粘土、粉土及砂类土的大、中、小三向主应力作用下土的固结和剪切过程的应力、应变，以及不同中主应力条件下土的剪切变形和抗剪强度的测试。

【条文说明】：12.1.1 本试验适用于粘土、粉质粘土、粉土及砂类土，可以模拟实际土单元正交三向分别在大、中、小不同的主应力作用下的应力状态，它不同于常规三轴试验模拟轴对称应力条件的中主应力等于小主应力的状态。中主应力相对于大主应力和小主应力的变化可以由中主应力比值 ($b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$) 确定。一般，在均压固结条件下，控制中主应力比值不变，可以测试不同中主应力比值条件下土的剪切应力应变关系及峰值强度或破坏应变条件下土的强度。

在三维主应力空间中土的应力路径变化可由控制不同的中主应力比值平面内应力状态的变化反映。常规三轴试验中试样的应力状态限定在中主应力比值恒等于零的平面内，不能够反映不同中主应力比值平面内应力状态的变化。真三轴试验中控制试样一侧面的中主应力相对于另一个正交侧面的小主应力和竖向的大主应力的变化，即可保持土样的主应力状态在恒定的中主应力比值平面内运动。当土承受三向主应力，且应用总应力方法分析土工问题时，需考虑土沉积过程三向主应力作用下固结完成与否及附加应力作用剪切过程中伴随土孔隙水压力产生是否排水的条件变化，将试验区分为不固结不排水剪、固结不排水剪和固结排水剪三种。

12.2 非饱和土真三轴仪

12.2.1 非饱和土真三轴仪（XGT型）主要包括压力室（一室四腔），轴向加载与侧向加载装置（三向伺服液压/体变控制器），荷载、变形与孔压量测系统，孔隙气压力控制系统，数据采集和自动控制系统等。非饱和土真三轴仪整体构成如图 12.2.1-1。试样加载过程的量测和控制如下：

1 压力室中试样的竖向荷载一般通过刚性板液压缸施加，水平面内正交两向侧向荷载通过四腔内两向液压囊连通伺服液压/体变控制器的液压缸施加。

2 利用轴平移技术量测非饱和土基质吸力或控制非饱和土常含水率。通过气压源连通调压阀，控制连通试样的气压恒定，固结剪切过程中试样排水，量测排水量，控

制恒定基质吸力；通过气压源连通调压阀，控制连通试样的气压恒定，固结剪切过程中试样不排水，量测孔隙水压力，确定试样变化的基质吸力。

3 轴向加压装置和侧向加压装置均通过伺服控制液压/体变控制器施加荷载，控制试样的固结和剪切过程中通过轴向刚性板施加的轴向压力，连通液压囊施加水平面内正交两向侧向压力；伺服控制液压/体变控制器量测液压缸体积变形，等于液压囊体积变形量，轴向刚性板加载的竖向位移为试样竖向变形。

4 压力室包括一室四腔，压力室的底座，压力室的竖向导向顶盖，试样底镶嵌陶土板的透水板，试样顶透气板和排气试样帽，四腔内液压囊组成。压力室剖面如图 12.2.1-2 所示，压力室横断面如图 12.2.1-3 所示，压力室立面如图 12.2.1-4 所示。压力室四腔液压囊之间的空间尺寸为 7cm x7cm x14cm，安装非饱和土试样。试样由乳胶膜密封，制备试样按照附录 E 表 12.1 记录。伺服液压/体变控制器与液压囊和竖向液压缸连通，施加水平面内正交中、小主应力和竖向大主应力。压力室底座设置镶嵌高进气值陶土板的透水板，压力室顶试样帽设置透气板，控制气压力。透水板密封固定压力室底座设置进水、排水孔，试样帽设置排气孔。通过试样帽排气孔、密封连接的透气板连接气压力源和连通试样，控制恒定的气压力；不排水条件下，通过陶土板排水，量测孔隙水压力，确定变化的基质吸力；排水条件下，通过陶土板排水，量测排水体积，控制恒定的基质吸力。

5 量测系统与数据采集和自动控制系统包括荷载、压力、位移传感器，电信号传输至集成电路板 A/D 转换，数字传输至计算机。轴向荷载、位移传感器分别量测轴向荷载和变形；液压/体变控制器液压传感器量测连通液压囊压力，活塞运动的位移传感器量测活塞位移与液压缸内面积确定液压囊体积变形；不排水条件下进水孔联结孔压传感器量测孔隙水压力，与调压阀连通的标准压力表量测气压。按照附录 E 表 12.2、表 12.3，或表 12.4、表 12.5 记录固结剪切过程应力、应变、孔压和基质吸力的变化。

6 伺服竖向液压加载活色连接加载杆，加载杆连接试样帽，施加竖向主应力（0-3000kPa）。竖向最大变形量 50mm；水平面内正交两向中主应力、小主应力最大加载达 2MPa，侧向最大变形量 20mm；反压饱和土样的孔隙水压力最大加载达 1MPa。

7 试样帽安装透气板，控制孔隙气压力（0-800kPa）；试样底座陶土板控制水压力（0-500kPa），由孔隙气压力和孔隙水压力控制基质吸力（0-1300kPa）。

8 检查轴向应力量程不小于 3MPa，侧向中、小主应力量程不小于 2MPa，孔隙压力量程不小于 1MPa，精度要求达到 $\pm 0.5\%$ ；竖向变形量程不小于 50mm，侧向变形量

程不小于 25mm，精度要求达到 $\pm 0.5\%$ 。

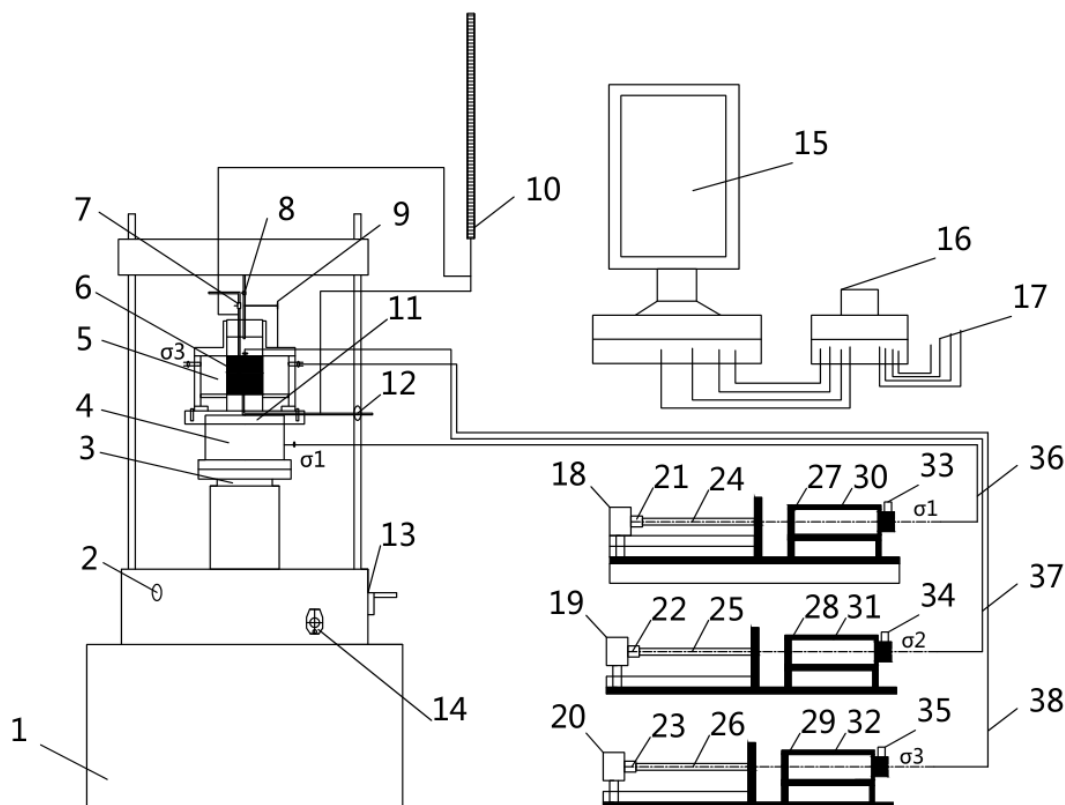


图 12.2.1-1 非饱和土真三轴仪（XGT 型）整体构成示意图

- 1-机座；2-上下调节开关；3-轴向伸缩活塞；4-轴向加载液压缸；5-压力室侧压腔；6-试样；
 7-顶部孔压传感器；8-拉压传感器；9-位移传感器；10-量水管；11-轴向液压活塞；
 12-底部孔压传感器；13-粗调；14-细调；15-电脑；16-数据采集器；17-采集数据输入端；
 18-轴向大主应力液压加载驱动电机；19-侧向中主应力液压加载驱动电机；
 20-侧向小主应力液压加载驱动电机；21-大主应力液压活塞驱动联轴器；
 22-中主应力液压活塞驱动联轴器；23-小主应力液压活塞驱动联轴器；24-大主应力滚珠丝杠；
 25-中主应力滚珠丝杠；26-小主应力滚珠丝杠；27-大主应力活塞；28-中主应力活塞；
 29-小主应力活塞；30-大主应力压力缸；31-中主应力压力缸；32-小主应力压力缸；
 33-大主应力液压传感器；34-中主应力液压传感器；35-小主应力液压传感器；
 36-大主应力连通液压管；37-中主应力连通液压管；38-小主应力连通液压管。

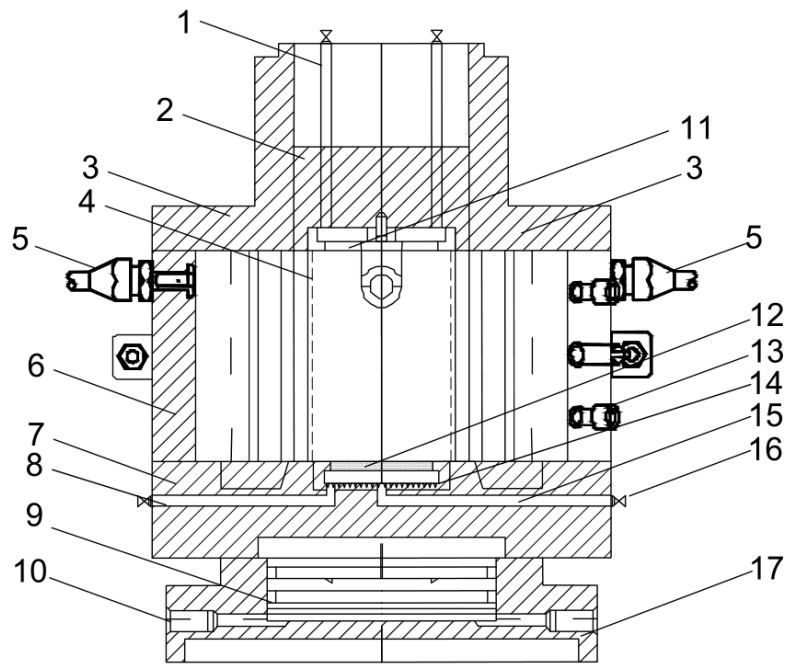


图 12.2.1-2 压力室结构示意图

1-进气孔；2-试样顶帽；3-压力室顶盖；4-乳胶膜；5-侧压腔液压囊连接头；6-压力室侧壁；
7-压力室底座；8-排水孔；9-轴向活塞；10-轴向活塞液压孔；11-透气板；12-陶土板；
13-隔板径向弹簧轴；14-螺旋槽；15-进水孔；16-阀门；17-轴向加载液压缸

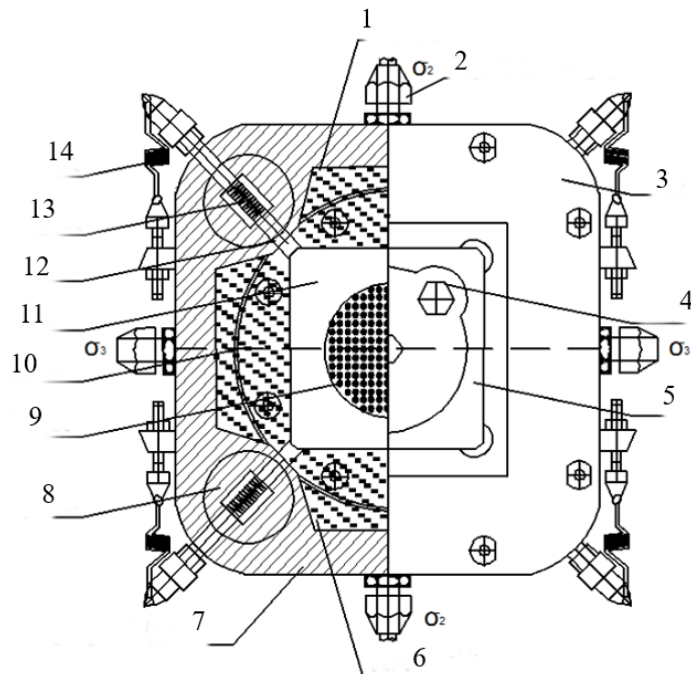


图 12.2.1-3 压力室一室四腔结构横剖面示意图

1-侧向压力腔；2-侧向压力腔液压囊连接头；3-压力室顶盖；4-试样顶帽排气孔；5-试样顶帽；
6-侧向压力腔；7-压力室侧壁；8-隔板水平面转动轴；9-试样底座陶土板；10-侧向压力腔；
11-试样底座；12-挡板；13-径向伸缩弹簧；14-水平扭转弹簧

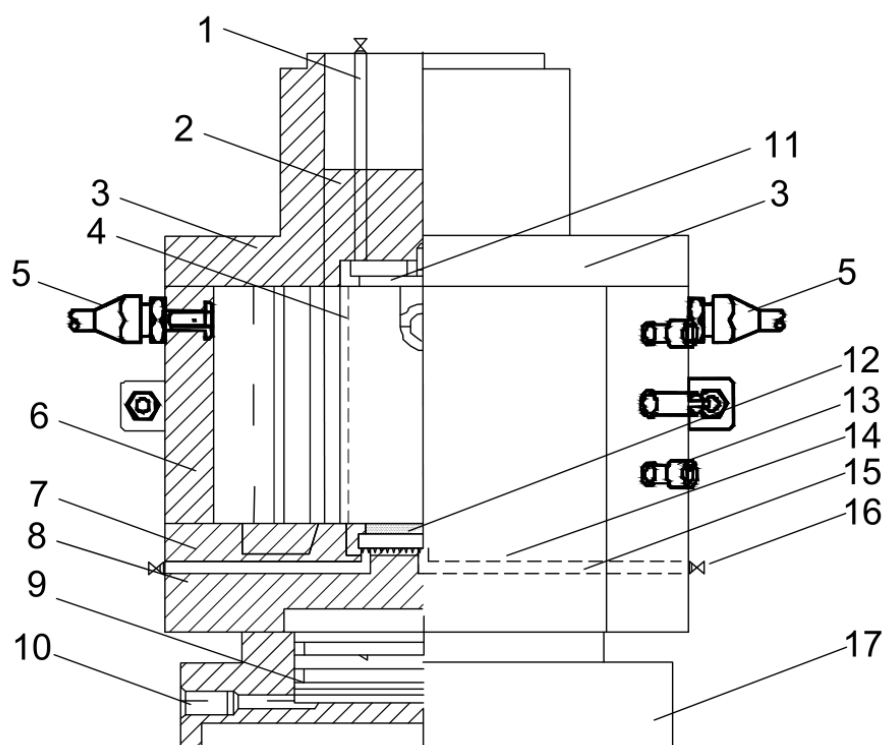


图 12.2.1-4 压力室一室四腔结构纵剖面示意图

1-进气孔；2-试样顶帽；3-压力室顶盖；4-乳胶膜；5-侧压腔液压囊连接头；6-压力室侧壁；
7-试样底座；8-排水孔；9-轴压活塞；10-轴向活塞液压孔；11-透气板；12-陶土板；
13-隔板径向弹簧轴；14-螺旋槽；15-进水孔；16-阀门；17-轴向加载液压缸

【条文说明】：12.2.1 非饱和土真三轴仪主要包括一室四腔压力室、轴向加压装置、侧向加压装置、变形量测系统、孔隙气压力控制系统和孔隙水压力量测系统以及数据采集和自动控制系统等。

1) 一室四腔压力室及其四周分别安装液压囊及其镶嵌陶土板压力室底座和镶嵌透气板试样帽，通过伺服控制液压/体变控制器和水平面内正交两向与液压囊连通的伺服控制液压/体变控制器，对试样施加三向不同的主应力。长方体土试样压力室具有特殊的三向主应力加载机构。

2) 为了便于独立地施加长方体土试样的三向主应力，克服刚性加载板对试样端部的约束，上下端通过刚性板加载，正交两个侧面采用互相隔离的柔性液压囊加载。

3) 伺服自动控制三向主应力加载，可以实现不同应力路径控制。竖向荷载/位移传感器、侧向液压囊压力/体变量测、控制试样顶部透气板气压力、量测不同排水条件陶土板孔隙水压力和体变，配置集成电路闭环控制板和 A/D 转换计算机控制采集系统，可自动量测试样的应力、应变、孔隙气压力、孔隙水压力和基质吸力孔压。

4) 竖向长方体试样上下端采用刚性板加载，正交两向侧面采用液压囊加载。上

下端刚性板对试样具有约束作用，侧面液压囊对试样的约束作用可以忽略不计，需要沿竖向增大试样的高度，要求试样高度与侧向宽度的比值为 2.0 以上。

5) 长方体试样的三向主应力可采用刚性板加载和液压囊流体压力加载。竖向刚性板加载水平面内正交两向液压囊加载，正交三向加载机构需可有效地避免互相干扰。

6) 竖向长方体试样在三向施加均等压缩应力或非均等压缩应力作用下固结。固结完成后的三向应力压缩剪切过程中控制小主应力和中主应力比值不变，施加大主应力和中主应力；或者，控制平均主应力和中主应力比值不变，施加大、中、小主应力。根据固结应力状态和应力路径变化，可区分为等向压缩固结和非等向压缩固结，以及等小主应力、等中主应力比值剪切和等平均主应力、等中主应力比值剪切；根据排水条件变化，区分为固结不排水与排水，剪切不排水与排水。

7) 真三轴试验分为常含水率和常基质吸力状态，试样底座需安装内嵌有陶土板的底板。安装之前需对陶土板进行饱和，然后密封固定于具有螺旋排水槽的压力室底座上。螺旋槽中心为进水口，末端为出水口，通过进水口注入蒸馏水，冲刷陶土板与压力室底座密封螺旋槽内气泡。当排水无气泡时，关闭进水口阀门，排水管连接高精度伺服液压/体变控制体变器，或者排水量测管。常含水率试样试验时，关闭压力室底座进、出水阀门，试样顶部排气管连接气压源调压阀。常基质吸力试样试验时，控制试样顶部进气压力和试样底部孔隙水压力。

12.2.2 非饱和土真三轴试验试样制备应符合下列规定：

1 原状土试样制备应按下列要求进行：

1) 试样尺寸：制备试样尺寸为 70mm×70 mm×140mm 长方体。

2) 用削土刀或钢丝锯切取稍大于试样规定尺寸的原状土土柱，削平土柱的上、下端。将土柱沿竖向放置、固定削试样中心，安装削样器外罩进行切削。用削土刀紧贴外罩限位侧板，先由上往下，再由下往上细心切削，最后切削中部，待切削表面平整后，开始切削相对平行的另一面。相对两面切削完成后，重新安装削样器外罩，按照上述方法切削横断面上正交的另外两个平行面，直到土样的四个侧面被削成互相正交的平面，然后按高度要求，削平上、下端面。

3) 将切削制备的试样称重。用卡尺量测试样横断面边长和高度尺寸；测定土的含水率和干密度。

4) 将切削原状土制备试样放入保湿缸，避免试样脱水。用卡尺量测试样；用天平量测试样质量。

5) 记录按照附表 12.2.1 制备试样记录表。

2 重塑土试样制备应按下列要求进行:

1) 关于制备湿土料, 应符合《土工试验方法标准》(2019) 第 4.3.1 条第 4 款的规定。

2) 土样方形筒壁在使用前应洗擦干净, 涂一薄层凡士林。

3) 根据要求的干密度, 称取所需土质量, 按照试样高度不同, 分 7 层方样击实, 通过定位销固定垫块限定每层高度为 20mm。计算并称量每层土料的质量, 各试样之间的干密度最大允许差值应为 $\pm 0.03\text{g/cm}^3$ 。

4) 试样尺寸: 制备试样尺寸为 70mm×70 mm×140mm 长方体。

3 砂土试样制备应按下列步骤进行:

1) 在仪器底座下安装内嵌透水板的底板, 密封试样乳胶膜下端。在压力室底座上安装成方样模, 方样乳胶膜上端外翻出方形成样膜外, 使试样乳胶膜紧贴成样模内壁。打开进水阀门, 在成样膜内充三分之一的蒸馏水。

2) 根据砂土的干密度和试样体积, 称出所需风干砂样质量, 分三等分, 在水中煮沸, 待砂样冷却以后, 用长柄小勺将每份砂样装入试样乳胶膜膜中, 直至该层高度。

3) 第一层砂样填完后, 继续注水至试样高度的三分之二, 再装入第二层砂样。如此继续装样, 直至试样乳胶膜内装满为止。然后放上内嵌透水板的顶板, 翻起试样乳胶膜上端包裹顶板, 放置止水垫, 密封圈对接顶板排水孔和试样帽排水孔, 螺栓连接顶板与试样帽。通过压力室底座排水孔进水, 由试样底向上渗透, 试样帽排水孔排水, 排除上排水管气体。关闭上排水阀。

4) 打开压力室底座下排水阀, 降低排水管, 使管内水面低于试样中心以下 20~40cm, 在试样内产生一定负压, 使试样能够成形。拆除方形断面成样模, 量测试样尺寸, 复核试样干密度。各试样之间的干密度差值, 不应大于 0.03g/cm^3 。

5) 试样尺寸: 制备试样尺寸为 70mm×70 mm×140mm 长方体。

4 试样制备其他附属设备:

1) 原状土削样器: 见图 12.2.2-1。

2) 对开成样模: 见图 12.2.2-2。

3) 重塑土压样器: 图 12.2.2-3。

4) 承样模: 图 12.2.2-4。

5) 天平: 称重 3000g, 分度值 0.01g。

6) 试样乳胶膜：试样尺寸以 70mm×70mm×140mm 为例，试样密封宜采用 70mm×70mm×170mm 试样乳胶膜（包裹上透气板、下陶土板），膜厚度采用 0.3～0.5mm 为宜。

7) 液压囊：宜采用 T 型乳胶膜，其尺寸为高 140mm，宽 30mm，长 70mm 和 50mm，膜厚度采用 0.8～1mm 为宜。

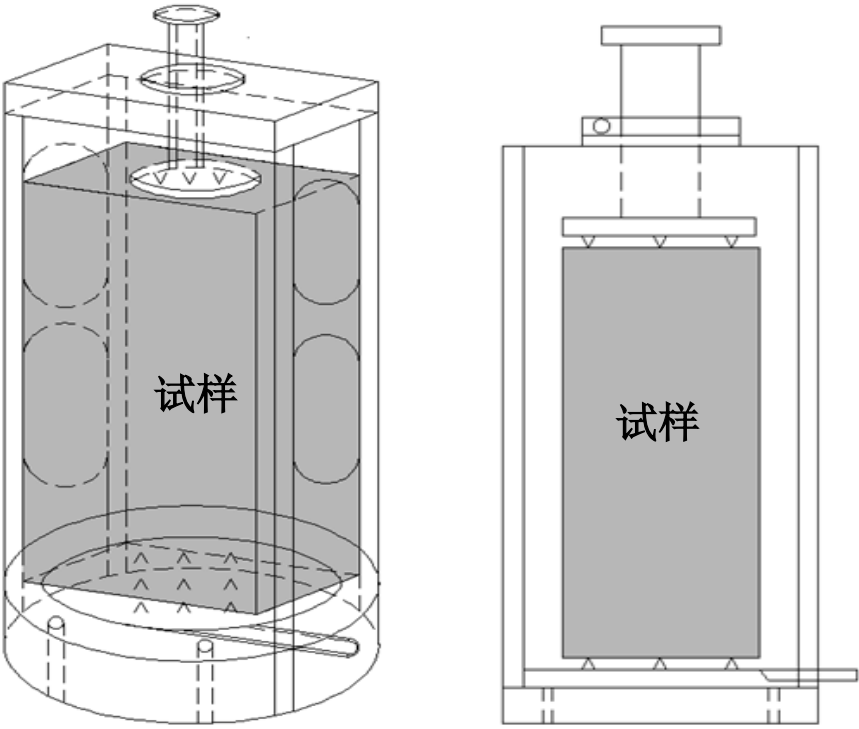


图 12.2.2-1 原状样削样器（立体图）

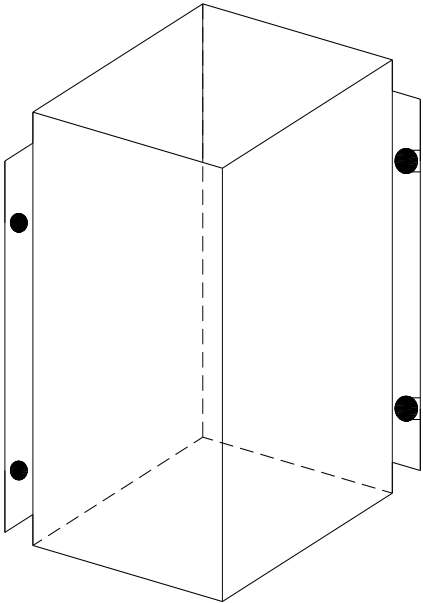


图 12.2.2-1 原状样削样器（立体图）

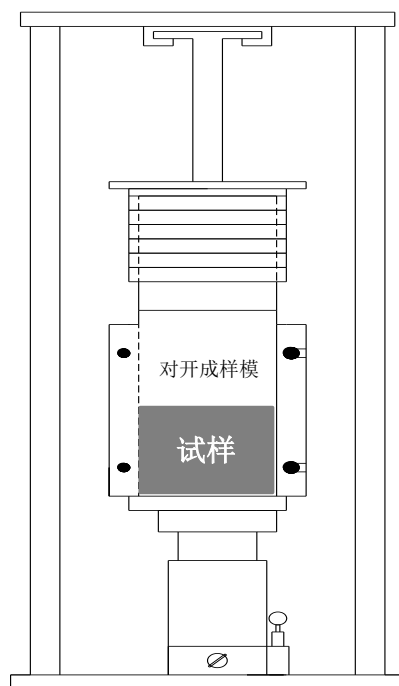


图 12.2.2-3 重塑土压样器

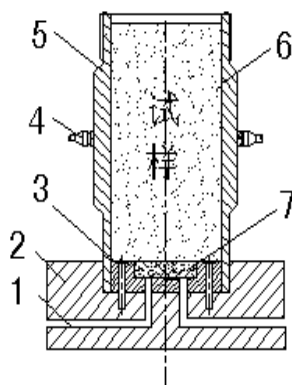


图 12.2.2-4 承样模

1-排水孔；2-底座；3-固定螺栓 4-吸气孔；5-承样筒；6-橡皮膜 7-透水石（陶土板）

【条文说明】：12.2.2 真三轴仪压力室由底座、侧壁外罩和顶盖构成，具有一室四腔的结构。内室中央安装试样乳胶膜密封的试样，四腔放置充水乳胶柔性液压囊。试样乳胶膜包裹试样底内嵌饱和陶土板的底板和试样顶内嵌透气板的顶板，密封试样。内嵌饱和陶土板的底板进、出水孔连通压力室底座进、出孔，连接进水管和排水管。顶帽排气管连通顶部透气板，连接调压阀和气压源，可以控制非饱和土试样孔隙气压力。排水管连接孔压传感器和排水体变量测管，或者，液压/体变控制器，可以量测排水条件下的排水量及不排水条件下的孔隙水压力。压力室结构如图 12.2.2。

常含水率试验中关闭进、出水管阀门，控制试样不排水条件，施加恒定的孔隙气压力，可测试孔隙水压力及基质吸力。常基质吸力试验中打开排水阀，控制试样的孔

隙水压力，施加恒定的孔隙气压力，可测试常基质吸力的排水量。

试样受到竖向刚性板施加荷载，正交两向侧面液压囊施加荷载作用。伺服控制施加三向荷载，控制三向主应力，可控制固结应力状态及真三轴压缩应力路径。试样用试样乳胶膜密封，通过试样顶板、试样帽排气孔连通气压源调压阀控制孔隙气压力，通过试样底板、压力室底座排水孔连通排水体变管，或液压/体变控制器控制孔隙水压力。利用轴平移技术控制或量测非饱和土基质吸力。控制孔隙气压力，量测排水量；或者，控制孔隙气压力及不排水条件，量测孔隙水压力。

为了满足原状土、重塑土立方体或长方体试样三向主应力压缩剪切需要，各向主应力和变形量测需满足相应的测试精度要求。检查试样内水气连通排水、排气通路是否畅通，各向主应力施加荷载机构运动是否正常，连接管接头水、气、油密封情况，试样水、气连通孔隙水、气压力阀打开或关闭情况，以及轴向荷载和正交侧面荷载油、水或气压力阀打开或关闭情况。

真三轴试样包括原状土样和重塑土样，以及原状土和重塑土样的饱和样。原状土样由原位采取标注竖向的土块切削而成，需配备相应的切削样装置；重塑土样可由制备散粒土通过压实方法制备，需配置相应的压样装置。原状样和重塑样的饱和土样需配备竖向长方体试样的饱和器。长方体试样配置密封试样的乳胶膜；针对试样需配置相应的主应力加载机构。

原状土样的制备应符合下列规定：1) 对于从钻孔原状土柱或试坑原状土块，先用削土刀或钢丝锯切取一稍大与目标试样尺寸的土柱，上下端削平，按试样原位采取标注的竖向方向，放在削样器上，旋转土块样调整切削位置，由外罩侧面板限位，进行切削，见图 12.1.3-1。用削土刀紧贴侧板，先由上往下，再由下往上细心切削，最后切削中间，待表面平整后开始切削对应面。一组侧面切削完成后，重新安装削样器外罩，按照上述方法切削正交的另一组侧面，直到土样的四个侧面被削成平整的四个平面，然后按照高度要求，削平上下端面。试样要求切成上下端平整面，且互相平行，相邻侧面互相正交的长方体。在切削过程中，若试样表面因遇砾石而成孔洞，适当用碎土填补。2) 将切好的试样称重，用卡尺量测试样尺寸。取削样剩余土平行测定含水率，取其平均值作为试样的含水率。对于同一组原状试样，密度的差值不宜大于 $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ ，含水率差值不宜大于 1%。

重塑土的制备应符合下列规定：1) 选取一定质量的代表性土样（约 5kg），经烘干（一般采用烘箱，控制温度为 105°C ，烘炙时间不小于 24h）、碾碎、过筛（筛

的孔径应符合规程要求)，测出风干土的含水率，按配置含水率按照要求算出所需加水量。2) 将需加的水量喷洒到土料上，稍静置后装入塑料袋，然后置于封闭容器内至少 20h，使水分扩散均匀。取出土料复测其含水率。若所测的含水率与要求的差值在 1%以内，可进行压实样制备。否则需调整含水率至符合要求为止。3) 应用与试样尺寸一致的压实筒，分层将配置好的土料装入压实筒，按照控制密度要求，压实土试样。与土样表面直接接触的压实活塞的尺寸与试样表面尺寸相同，压实土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，按照试样高度不同，分 7 层击实，通过定位垫块限定每层高度为 20mm。每层土料质量需严格计算称量。每层压实土至要求高度后，将表面刮毛，然后再填加下一层土料。如此继续进行，直至压实完最后一层。将压实筒中的试样两端整平，取出称其质量，各试样的密度最大允许差值为 0.03g/cm^3 。

砂土试样制备应符合下列规定：1) 在压力室底座上安装透水板，密封试样乳胶膜下端。再安装固定成样模，试样乳胶膜上端外翻密封成样模顶口，通过成样模侧壁预设孔抽气，使试样乳胶膜紧贴成样模内壁。2) 根据砂土要求的干密度和试样体积，取相应质量的干砂样，均分为三等分。用长柄小勺将每份砂样装入成样模中，椿捣模内砂土达到该层填充高度。3) 第一层砂样填完后，再装入第二层砂样。如此继续装样，直至模内装满为止。然后在试样顶放置上透气板和试样帽，用试样乳胶膜包裹顶透气板及试样帽，密封试样顶部。关闭底、顶排气阀。4) 通过抽气的方法，在试样内产生一定负压，使试样能够成形。拆除成样模，量测试样尺寸，复核试样干密度。各试样之间的干密度差值，最大允许差值为 0.03g/cm^3 。

12.3 固结常含水率剪切试验

12.3.1 非饱和土固结常含水率真三轴试验操作步骤应符合下列规定：

1 试样安装应符合下列要求：

1) 试样乳胶膜下端包裹内嵌饱和陶土板的底板，底板陶土板下设置排水槽，底板进、排水孔与压力室基座进、排水孔对接，试样底板下放置密封止水垫，通过螺栓连接底板和压力室基座，密封试样乳胶膜下端和进、排水孔。

2) 通过压力室基座进水孔输入蒸馏水，冲刷底板内嵌陶土板下排水槽气泡，排水孔排出气泡水。排水孔连接孔隙水压传感器和孔隙水体变量测管，或者，连接伺服液压/体变控制器。

3) 压力室基座上固定试样乳胶膜，试样乳胶膜顶端由内向外翻出成样模顶端口。试样乳胶膜密封试样设置抽气孔，吸气使试样乳胶膜紧贴成样模内壁。然后，将制备试样放入模内，试样顶设置透气板，将试样乳胶膜顶端包裹顶置透气板。再放置密封垫，将顶置透气板与试样帽排气孔对接，用螺栓连接试样帽和顶置透气板，密封试样的顶端连通排气孔。试样孔隙气通过试样帽排气孔与气压源连通。气压源连通调压阀，调节控制气压值。

4) 压力室基座上安装压力室侧壁外罩，避免压力室外罩安装碰撞扰动试样。将压力室侧壁外罩与底座用螺栓连接，均匀地拧紧螺丝，密封压力室侧壁外罩与底座。

5) 安装压力室顶盖，将压力室顶盖与侧壁外罩用螺栓连接固定，密封压力室内腔。

6) 长方体试样上端面连接刚性板连接加载杆件，试样正交两组侧面均对应压力内腔安装液压囊。液压囊连通加载伺服控制压力/体变控制器的液压缸。

7) 安装轴向传力柱、轴向位移传感器，并通过粗、细调节手柄控制压力室升降台，使传力柱与压力室顶帽接触，轴向位移传感器与压力室外壁接触。

8) 打开大、中、小主应力连通液压管阀门，启动伺服控制液压/体变控制器，驱动各加载液压缸活塞，连通大主应力加载液压油缸和中、小主应力加载充水液压囊，向液压囊充真空水，观察大、中、小主应力测试值，当各向主应力稍许增大时，停止驱动。记录排水管读数，或者液压/体变器活塞位移传感器量测值。

2 参数设置应按下列要求进行：

1) 输入试样初始尺寸和高度。

2) 依据试验需求，可分别选择应力控制方式或应变控制方式。选择应力控制方式时，大主应力 分级荷载按预计破坏的 2.5%~5%取值，或按照预定分级加载条件取值；选择应变控制方式时，直至试样剪切破坏。

3) 依据试验需求，可分别选择等中主应力比 b 试验或等中主应力比 b 等平均球应力 p 试验应力路径。中主应力 b 值取 0~1。

4) 常含水率不排水试样，关闭排水阀，量测孔隙水压力；施加恒定气压力。量测不排水剪切过程基质吸力。

5) 常含水率排水试验，排水管连接液压/体变控制器测量孔隙水压力及排水体变量，施加恒定气压力，试样剪切过程保持常含水率。

6) 试验结束条件为剪切应力达到峰值，且剪切应力衰减趋于稳定值。或者，剪

切应力随轴向应变逐渐增大，且轴向应变达到 15%。

3 固结与剪切应按下列要求进行：

1) 设定参数

试验固结、剪切前，设置试样尺寸；设置试样竖向、水平向固结应力，固结变形稳定标准；剪切过程中主应力比值，或中主应力比值与平均球应力，剪切变形速率（一般指竖向压缩变形速率）；剪切破坏变形标准。

2) 试验固结

施加三向固结应力条件，包括各向均等压力固结和非均等压力固结。液压/体变控制器伺服控制加载三向主应力。试样固结过程控制气压力、不排水，由施加的气压力和通过陶土板测试的孔隙水压力确定基质吸力，达到试样控制的基质吸力。

当固结变形稳定及基质吸力稳定时，固结达到稳定。固结变形稳定的标准为竖向变形小于 0.01mm/h~0.03mm/h，基质吸力小于 1kPa/h。不排水固结时，固结稳定标准为三向正应变确定的试样体变达到 0.01ml/h~0.03ml/h。三向正应变由液压体变控制器量测的液体体积变化量在试样侧面的平均值计算。

3) 剪切试验

固结完成后，按照控制的中主应力比值，或者控制的中主应力比值及平均球应力，进行试样的真三轴压缩剪切，由三向液压/体变控制器伺服控制加载剪切过程中设置的应力路径。真三轴加载作用下试样产生剪切变形，剪切时速率为 0.3mm/h-1.0mm/h。剪切破坏时，试验结束。

4) 试验结束

卸除三向主应力。依次拆除压力室顶盖、试样帽和侧壁外罩，取出四个液压囊。拆除包裹试样的乳胶膜，观察记录试样破坏形态。取出压缩剪切破坏试样，称重，测定含水率。

【条文说明】：12.3.1 非饱和土固结常含水率真三轴试验步骤如下：

试样安装：将制备成长方体土样安装在压力室底座上，且由试样乳胶膜密封侧壁及下透水板和上透气板，并与压力室底座和试样帽连接、密封。安装试样的压力室侧壁外罩和顶盖，压力室侧壁外罩内设置正交两向的四个压力腔，分别安装正交两向对应的两组乳胶液压囊，一组液压囊互相连通，且与伺服驱动液压缸连接。一般，通过竖向刚性加载板连接液压缸驱动的加载杆，液压缸连通伺服驱动液压/体变控制器加载机构。试样正交两组侧面的液压囊连通伺服驱动液压/体变控制器加载机构的液压

缸。试样仅通过压力室底座上内嵌饱和陶土板的透水板排水，仅通过试样顶透气板排气。试样顶排气孔连通调压阀及气压源。试样底排水孔连通孔压传感器、阀门和排水量测管；或者，连通液压/体变控制器。为了控制试样水分不通过顶部透水板排出，透水板下安放透气不透水膜。打开大、中、小主应力液压缸和液压囊连通液压管阀门，启动伺服控制液压/体变控制器，驱动各加载液压缸活塞，连通大主应力加载液压油缸和中、小主应力加载充水液压囊，向真空液压囊充水，观察大、中、小主应力测试值，当各向主应力稍许增大时，停止驱动。记录排水管读数，或者液压/体变器活塞位移传感器量测值。施加各向主应力及孔隙气压力，关闭排水阀门或打开排水阀门，控制试样的含水率不变，或试样基质吸力不变，进行试样固结。

试样参数设置：输入三向均等压力，进行固结。在非饱和土常含水率固结及压缩试验过程中，试样顶透气板下黏贴透气膜，施加固结压力及孔隙气压力，控制加载方式及压缩应力路径，关闭压力室底座排水阀，试样固结和压缩剪切时排气不排水，量测孔隙水压力；或者，连通液压/体变控制器，控制孔隙水压力，量测排水体变量。当固结过程中变形和孔隙水压力趋于稳定时，固结完成。固结完成后，输入真三轴压缩加载控制方式：应力控制和应变控制。每种控制方式又区分为等中主应力比 b 和等平均球应力 p 等中主应力比 b 两类应力路径。应力控制时可以得到试样承受应力作用下变形发展的过程，每级荷载作用下，三向变形趋于稳定，孔隙水压力趋于稳定，该级加载变形结束。应变控制时可以得到一定剪切变形速率条件下试样抵抗剪切作用的变化过程。竖向加载变形速率按照如下分析和试验验证确定为 0.3mm/h - 1.0mm/h 。具体分析如下，非饱和土剪切过程中试样内孔隙水压力产生变化与陶土板下水压力形成压差,为了两者趋于一致,需保持较小的变形速率。控制较小的剪切速率,可使得陶土板下水压力与土样内真实的孔隙水压力一致,进而,保证测试结果的真实性.参考 D. G. Fredlund 非饱和土力学(Soil Mechanics for Unsaturated Soils, D. G. Fredlund)不同图土剪切速率的 $2.1 \times 10^{-4}/\text{s}$ ~ $6.7 \times 10^{-5}/\text{s}$ 。剪切速率可表述为 0.3mm/h - 1.0mm/h 。以粉粒为主的黄土的剪切速率取值为 0.7mm/h ，与剪切速率 0.5mm/h 试验结果比较，取得了近似一致的基质吸力变化曲线。

真三轴压缩剪切：固结完成后，伺服控制加载剪切过程中应力路径：等 b 应力路径，等 b 等 p 应力路径。施加三向主应力，进行真三轴压缩剪切。在真三轴加载作用下试样产生剪切变形，当剪切应力达到峰值，且逐渐衰减，趋于稳定的残余强度时，试验结束；当剪应力随变形而逐渐增大时，竖向应变达到 15%时，试样产生强度破坏，

试验结束。试验结束后，卸除三向主应力。依次拆除压力室顶盖、试样帽、和侧壁外罩，取出四个液压囊。脱去包裹试样的试样乳胶膜，观察记录试样破坏形态。取出压缩剪切破坏试样，称重，测定含水率。

12.3.2 试验仪器标定

1) 荷载、液压和位移传感器标定 先标定竖向荷载传感器，竖向荷载器连接标准荷载标定器，通过液压缸施加竖向荷载，由标准荷载标定器量测液压缸施加竖向荷载，建立液压与标准荷载标定器量测的竖向荷载关系曲线，确定标定系数。再标定竖向位移传感器，通过竖向位移传感器位移由千分表量测位移，建立竖向位移传感器位移与千分表位移关系曲线，确定标定系数。其次，标定高精度液压/体变控制器，将液压加载器、标准滴定管分别与液压/体变控制器的液压缸和体变缸连接，关闭液体体变排出管，对液压/体变控制器的液压缸施加液压，由连接的液压传感器和连通的标准液压表量测液压，建立传感器量测液压与标准液压表量测液压的关系曲线，确定液压标定系数。再次，标定陶土板的标定方法是通过陶土板下孔隙水排水量和孔隙水压力分别由高精度液压/体变控制器量测，确定孔隙水压力标定系数和孔隙气压力标定系数。最后，试样孔隙气压力标定方法是将孔隙气压力由调压阀连通的标准压力表控制。

2) 压力室、液压管标定 一般由压力室四腔安装液压囊，安装钢样，固定钢样竖向端部，液压囊连接水平正交两向液压/体变控制器，施加液压，通过高精度液压/体变控制器量测体变。压力室为厚壁（2.5cm）为不锈钢整体结构，安装钢体试样，液压囊连通管为铜管，在三向均等压力作用下，由小到大依次施加压力，量测压力室、连通管、阀门和接头等产生的体积变形，与三向高精度伺服液压/体变控制器量测的体积变形建立关系曲线，确定体积变形表定系数。

【条文说明】：12.3.2 在试样初始和固结后几何尺寸及固结应力状态基础上，进行了应力、变形及孔隙水压力计算。分析主应力与主应变变化过程，可以得到不同应力路径平面上应力应变曲线及破坏强度。也可以进行不同应力路径平面上的加卸载试验，量测卸载过程的三向荷载和变形，分析卸载过程的主应力与主应变变化过程，可以得到不同应力路径平面上的卸载回弹模量。

12.3.3 试验结果的计算整理应按下列步骤进行：

- 1 试样固结后的高度、面积、体积按附录 E 表 12.2 计算。
- 2 加载剪切过程中应力、变形及孔隙水压力按附录 E 表 12.3 计算。
- 3 不同中主应力比值条件下，以轴向应力与小主应力差值为纵坐标，轴向应变为

横坐标，绘制偏应力-大主应变关系曲线（图 12.3.3-1）。取曲线上的峰值作为破坏点。若曲线峰值不明显，取轴向应变为 15%处的应力作为破坏点。

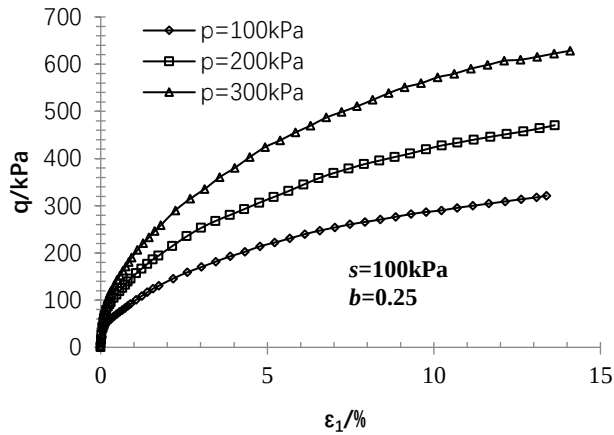


图 12.3.3-1 非饱和土的应力应变曲线

4 在不同中主应力比值条件下，以法向总应力 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，绘制破坏总应力圆及包络线（图 12.3.3-2）。该包络线的倾角为相应中主应力比值条件下内摩擦角 φ_u ，包络线在纵轴上的截距为相应中主应力比值条件下粘聚力 C_u 。

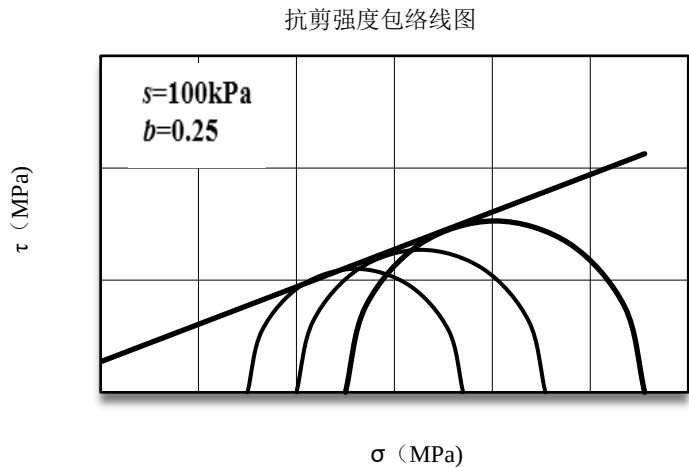


图 12.3.3-2 不同中主应力比值的总应力莫尔圆与强度包线

5 在不同中主应力比值条件下，由测试的法向应力和气压力可得法向净应力 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，以 $\frac{\sigma'_{1f} - \sigma'_{3f}}{2}$ 为半径，绘制破坏净应力圆及包络线（图 12.3.3-3）。该包络线的倾角为相应中主应力比值条件下净应力内摩擦角 φ' ，络线在纵轴上的截距为相应中主应力比值条件下净应力粘聚力 C' 。

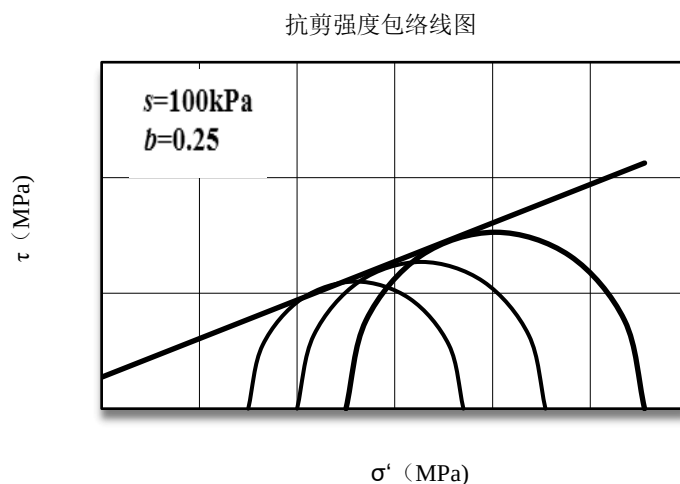


图 12.3.3-3 一定中主应力比值的净应力莫尔圆与强度包线

6 在不同中主应力参数 $b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ 条件下，绘制大、小主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 随轴向应变的变化曲线（图 12.3.3-4）。

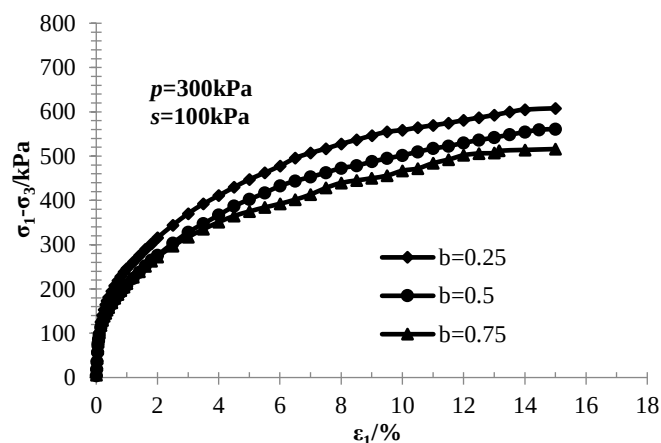


图 12.3.3-4 不同中主应力比的大、小主应力差随轴向应变的变化曲线

12.3.4 本试验的记录格式应符合附录 E 表 12.4 的规定。

12.4 常基质吸力固结排水剪切试验

12.4.1 常基质吸力非饱和土固结排水真三轴试验应按下列步骤进行：

1 试样安装应按下列要求进行：

1) 安装试样乳胶膜下端包裹内嵌饱和陶土板的底板，螺栓连接底板与基座，密封试样乳胶膜下端。打开基座浸水孔阀门，连通进水管，蒸馏水冲刷陶土板下透水板排水槽气泡，排出残留气泡后关闭阀门。基座排水管连接排水体变管或液压/体变控制器。陶土板饱和方法步骤参考土工试验方法标准（GB/T 50123-2019）4.6.3 真空饱和法试验步骤。通过乳胶膜密封空心钢试样，由于空心钢试样顶部透气板施加气压，量测饱和陶土板下充满水，且关闭进、排水管阀门密封，量测陶土板下水压力是否等

于空心钢试样内气压，检验陶土板饱和度。

2) 将试样乳胶膜通过抽气吸附在成样模内壁，安装制备试样。试样上端依次放上滤纸和内嵌透气板。滤纸埋置在试样重塑土内达到试样饱和度，避免滤纸吸水。将试样乳胶膜顶端包裹安装透气板的顶板，用螺栓连接顶板和试样帽，密封试样顶端。试样孔隙气通过试样帽排气孔与气压源连通。气压源连通管连接调压阀，调节控制气压值。

3) 按本规程 12.3.1 条第 1 款 4) ~7) 项的要求安装试样。

4) 试样安装好后，打开压力室底座排水阀，连通排水体变管。或者，连通液压/体变控制器，控制孔隙水压力，量测排水体积；连通试样帽顶部排气调压阀与气压源。记录排水体变管起始读数，或者，液压/体变控制器起始读数。由竖向位移传感器和水平面内正交两向液压/体变控制器量测体变在试样侧面的平均值可得试样变形。标定方法如 12.3.1 第 3 款。

2 试样固结应按下列要求进行：

1) 分别启动轴向大主应力和侧向中、小主应力液压/体变控制器，驱动液压缸活塞，施加总应力。通过连通气源调压阀，调节气压，控制净应力，进行预压；通过连通液压/体变控制器，调节孔隙水压力，控制基质吸力；预压至 5kPa 左右。

2) 根据固结围压大小设定竖向大主应力、中主应力及小主应力的净应力值，施加总应力及孔隙气压力。当基座连通排水量测管时，孔隙水压力为零，由孔隙气压力确定基质吸力。当基座排水管连通液压/体变控制器时，设置孔隙水压力，由孔隙气压力和孔隙水压力确定基质吸力。开始固结，固结过程量测试样体积变形和孔隙水排出量。固结竖向变形由千分表量测，确定标定系数；固结侧向变形由乳胶膜密封的安装位移计的橡胶样通过压力室内腔侧面液压囊施加液压变形，由液压体变量在侧面的平均变形量，建立橡胶样位移计量测位移和液压囊平均变形量关系曲线，确定标定系数。进而，在试样的固结过程中，固结体积变形由竖向位移传感器和水平面内正交两向液压/体变控制量测体变在试样侧面的平均值确定。孔隙水排出量由高精度 0kPa 压力的体变量测。在固结过程中，每 6~8h 冲洗陶土板一次。

3) 各类非饱和土固结过程中试样体积变形和排水量趋于稳定时，完成固结。变形稳定标准为竖向位移 0.01mm/h~0.03mm/h，体变稳定标准为 0.01ml/h~0.03ml/h。排水稳定标准为 0.03ml/h。必须都达到体变稳定标准和排水稳定标准。

4) 固结完成后，记录排水管读数，或者，液压/体变控制器读数。

3 参数设置应符合本规程标准 12.3.1 条第 2 款的要求。

4 试样剪切应符合本规程标准 12.3.1 条第 3 款的要求。剪切速率为 0.1mm/h-0.25mm/h。在剪切过程中，每 6~8h 冲洗陶土板一次

【条文说明】：12.4.1 非饱和土常基质吸力固结排水真三轴试验中，试样安装时先安装试样乳胶膜下端包裹内嵌饱和陶土板的底板，螺栓连接透水板和基座，密封试样乳胶膜下端。打开压力室底座浸水和排水阀，排除陶土板下与浸水管和出水管连通螺旋槽内气体，饱和陶土板水膜与螺旋槽内充满水连通，关闭进水和后关排水阀。安装试样，使试样乳胶膜套在试样上，试样的底面和顶面均放置与试样同湿度的滤纸，试样乳胶膜包裹顶透气板用螺栓连接顶板和试样帽，密封顶端。试样孔隙气与控制气压压力源连通。安装试样的压力室侧壁和顶盖，压力室侧壁可内置正交两向的四个腔分别安装正交两向相对连通的两组乳胶液压囊，液压囊与伺服驱动液压缸连通；也可内置一向侧面刚性板加载机构，正交另一向压力室气压加载。一般，通过竖向刚性加载板连接伺服驱动机构加载。试样排水仅通过压力室底座下透水板排出，试样气压仅通过上透气板连接气压源施加。为了控制试样的基质吸力不变，通过上透气板连接气压源施加气压。在试样附加应力作用下，打开试样底部透水板排水阀，施加各向主应力进行固结，控制试样的基质吸力不变。

在固结剪切过程中，每 6~8h 冲洗陶土板一次，避免陶土板下存在气泡，影响孔隙水压力测试结果。

试验加载控制方式区分为应力控制和应变控制两类，每类控制方式又区分为等 b 和等 p 等 b 两种应力路径。应力控制时可以得到试样承受分级应力作用下变形发展的过程；应变控制时可以得到一定剪切变形速率条件下试样抵抗剪切作用的变化过程。

在非饱和土常基质吸力固结真三轴压缩试验过程中，打开压力室底座排水阀，或控制压力室底座陶土板下水压力，上透气板与一定压力的气压源连通，试样承受一定初始附加应力时施加给定的孔隙气压力，保持孔隙水压力为 0，或不排水，进行固结。在非饱和土常基质吸力固结及压缩试验过程中，试样顶透气板下黏贴透气膜，施加固结压力及孔隙气压力，控制加载方式及压缩应力路径，打开压力室底座排水阀，与大气连通，试样固结和压缩剪切时排气排水，量测排水体变量；或者，连通液压/体变控制器，控制孔隙水压力，量测排水体变量。真三轴压缩剪切过程中排水，固结、剪切过程保持试样基质吸力不变。控制试样加载真三轴剪切过程中的变形速率，或者分级加载，使试样有足够的时间进行水气运动，达到水气平衡状态，可测试固结和加载

剪切过程中常基质吸力的三向荷载和变形。

固结排水常基质吸力剪切过程中,试样排水水分运动,土的孔隙水压力随土骨架变形不断变化,土中水、气运动平衡状态难以形成。控制更小的剪切速率,可使得陶土板下水压力与土样内真实的孔隙水压力一致,进而,保证测试结果的真实性。参考 D. G. Fredlund 非饱和土力学(Soil Mechanics for Unsaturated Soils, D. G. Fredlund)不同土固结排水常基质吸力的剪切速率的 $1.3 \times 10^{-4}/s \sim 8.3 \times 10^{-6}/s$ 。剪切速率近似可表述为 $0.1mm/h \sim 0.25mm/h$ 。剪切速率可表述为 $0.1mm/h \sim 0.25mm/h$ 。以粉粒为主的黄土的剪切速率取值为 $0.15mm/h$,与剪切速率 $0.25mm/h$ 试验结果比较,取得了近似相等的排水量。

依据固结后常基质吸力条件下主应力与主应变变化曲线,可以得到常基质吸力试样不同应力路径平面上应力应变曲线及破坏强度。也可以进行不同应力路径平面上常基质吸力的加卸载试验,量测卸载过程的三向荷载和变形,分析卸载过程的主应力与主应变变化过程,可以得到不同应力路径平面上的卸载回弹模量。

12.4.2 试验结果的计算整理应按下列步骤进行:

1 试验结果计算应符合本规程标准 12.3.2 条 1~2 款的要求。

2 不同中主应力比值条件下,总应力和净应力抗剪强度指标的确定:

1) 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,绘制破坏总应力圆及包络线(图 12.4.1-1)。该包络线的倾角为相应中主应力比值条件下内摩擦角 φ_{cd} ,包络线在纵轴上的截距为相应中主应力比值条件下粘聚力 C_{cd} 。

2) 以法向净应力 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,以 $\frac{\sigma'_{1f} - \sigma'_{3f}}{2}$ 为半径,绘制不同小主应力下的有效破坏应力圆及包络线(图 12.4.1-1)。该包络线的倾角为净应力内摩擦角 φ' ,该包络线在纵轴上的截距为净应力粘聚力 C' 。

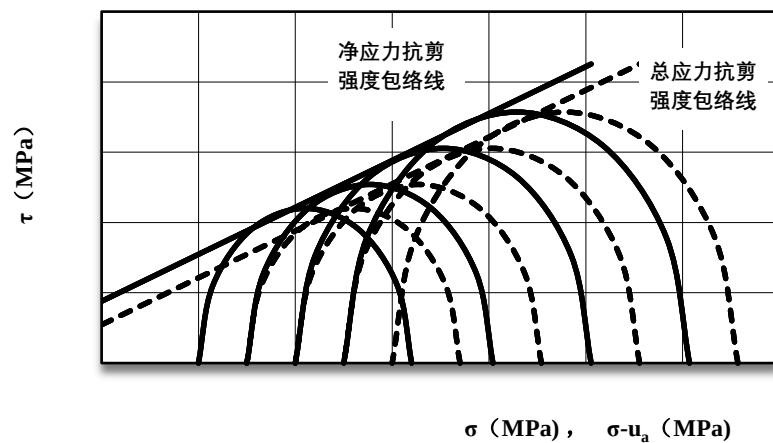


图 12.4.1-1 总应力、净应力强度包络线

12.4.3 本试验的记录格式应符合附录 E 表 12.5 的规定。

附录 E 表 12.1 非饱和土真三轴试验制备试样记录表

制样者		时间	
现场取样编号	含水率（%）	干密度（g/cm³）	
制备试样编号	含水率（%）	干密度（g/cm³）	
原状土（粘土、粉质粘土、黄土等）试样			
制备方法	切削制备		
尺寸	长方体: 70mm×70 mm×140mm（高）		
制备试样	含水率（%）	干密度（g/cm³）	
重塑土（粘土、粉质粘土、黄土等）试样			
制备方法	分层压实		
尺寸	长方体: 70mm×70 mm×140mm（高）		
分层高度	分 7 层压实，每层 20mm（高）		
制备试样	含水率（%）	干密度（g/cm³）	

附录 E 表 12.2 常含水率非饱和土真三轴试验试样固结后高度、面积、体积计算表

试样高度 h_0 (mm) 中主应力作用横断面边长 l_2 (mm) 中主应力方向固结变形 $\Delta\delta_2^c$ (mm) 大主应力方向固结变形 $\Delta\delta_1^c$ (mm) 固结试样横断面面积 A_c (mm ²) 固结试样体积 V_c (mm ³)		固结后试样高度 h_c (mm) 小主应力作用横断面边长 l_3 (mm) 小主应力方向固结变形 $\Delta\delta_3^c$ (mm) 初始试样横断面面积 A_0 (mm ²) 初始试样体积 V_0 (mm ³)
名称	固结前	固结后
试样高度 (mm)	h_0	$h_c = h_0 - \Delta\delta_1^c$
试样边长 (mm)	l_2, l_3	$l_2^c = l_2 - \Delta\delta_2^c, l_3^c = l_3 - \Delta\delta_3^c$
试样面积 (mm ²)	$A_0 = l_2 \cdot l_3$	$A_c = l_2^c \cdot l_3^c$
试样体积 (mm ³)	$V_0 = l_2 \cdot l_3 \cdot h_0$	$V_c = h_c \cdot A_c$

附录 E 表 12.3 常含水率非饱和土真三轴试验的应力、变形及孔隙水压力计算表

大主应力方向荷载 F_1^i (kN)	中主应力方向液压 u_2^i (kPa)	小主应力方向液压 u_3^i (kPa)
大主应力方向面积 A_1^i (mm ²)	中主应力方向面积 A_2^i (mm ²)	小主应力方向面积 A_3^i (mm ²)
大主应力液压缸活塞位移 δ_1^i (mm)	中主应力液压缸活塞位移 δ_2^i (mm)	小主应力液压缸活塞位移 δ_3^i (mm)
固结后试样高度 h_c (mm)	中主应力液压缸内半径 R (mm)	小主应力液压缸内半径 r (mm)
大主应力方向变形 $\Delta\delta_1^i$ (mm)	中主应力方向变形 $\Delta\delta_2^i$ (mm)	小主应力方向变形 $\Delta\delta_3^i$ (mm)
大主应力方向高度 $h_c - \Delta\delta_1^i$ (mm)	中主应力方向边长 l_2^i (mm)	小主应力方向边长 l_3^i (mm)
大主应变 ε_1 (%)	中主应变 ε_2 (%)	小主应变 ε_3 (%)
名称	测试值	计算值
大主应力方向	$\sigma_1^i = \frac{F_1^i}{A_1^i}, A_1^i = l_2^i \cdot l_3^i$	$\sigma_1 = \sigma_1^i$ $\sigma'_1 = \sigma_1 - u_a$
	$\Delta\delta_1^i, l_2^i = l_2^c - \Delta\delta_2^i, l_3^i = l_3^c - \Delta\delta_3^i$	$\varepsilon_1 = \frac{\Delta\delta_1^i}{h_c} \times 100$
中主应力方向	$\sigma_2^i = u_2^i$	$\sigma_2 = \sigma_2^i$ $\sigma'_2 = \sigma_2 - u_a$
	$\Delta\delta_2^i = \frac{\pi R^2 \delta_2^i}{A_2^i}, A_2^i = l_3^i (h_c - \Delta\delta_1^i)$	$\varepsilon_2 = \frac{\pi R^2 \delta_2^i}{A_2^i l_3^i} \times 100$
小主应力方向	$\sigma_3^i = u_3^i$	$\sigma_3 = \sigma_3^i$ $\sigma'_3 = \sigma_3 - u_a$
	$\Delta\delta_3^i = \frac{\pi r^2 \delta_3^i}{A_3^i}, A_3^i = l_2^i (h_c - \Delta\delta_1^i)$	$\varepsilon_3 = \frac{\pi r^2 \delta_3^i}{A_3^i l_2^i} \times 100$
孔隙水压力	u_w^i	$u_w = u_w^i$
孔隙气压力	u_a^i	$u_a = u_a^i$
基质吸力	$s^i = u_a^i - u_w^i$	$s = s^i$

附录 E 表 12.4 常基质吸力非饱和土真三轴固结排水剪切试验记录表

试样高度 h_0 (mm) 中主应力作用横断面边长 l_2 (mm) 中主应力方向固结变形 $\Delta\delta_2^c$ (mm) 大主应力方向固结变形 $\Delta\delta_1^c$ (mm) 固结试样横断面面积 A_c (mm ²) 固结试样体积 V_c (mm ³)		固结后试样高度 h_c (mm) 小主应力作用横断面边长 l_3 (mm) 小主应力方向固结变形 $\Delta\delta_3^c$ (mm) 初始试样横断面面积 A_0 (mm ²) 初始试样体积 V_0 (mm ³)	
名称	固结前	固结后	
试样高度 (mm)	h_0	$h_c = h_0 - \Delta\delta_1^c$	
试样边长 (mm)	l_2, l_3	$l_2^c = l_2 - \Delta\delta_2^c, l_3^c = l_3 - \Delta\delta_3^c$	
试样面积 (mm ²)	$A_0 = l_2 \cdot l_3$	$A_c = l_2^c \cdot l_3^c$	
试样体积 (mm ³)	$V_0 = l_2 \cdot l_3 \cdot h_0$	$V_c = h_c \cdot A_c$	

附录 E 表 12.5 常基质吸力非饱和土真三轴试验记录表

试验者				试验时间			
现场编号		含水率 $w(\%)$		孔隙比 e		液限 $w_L(\%)$	
室内编号		密度 $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$		干密度 $\rho_d(\text{g}/\text{cm}^3)$		塑限 $w_P(\%)$	
试样高度 h_0 (mm)		试样固结高度 h_c (mm)		固结应力 $\sigma_{c1}=\sigma_{c2}=\sigma_{c3}$ (kPa)			
中主应力方向边长 l_3 (mm)		中主应力方向固结边长 l_3^c (mm)		固结孔隙气压力 u_{ca} (kPa)			
小主应力方向边长 l_2 (mm)		小主应力方向固结边长 l_2^c (mm)		固结孔隙水压力 u_{cw} (kPa)			
大主应力方向荷载 F_1^i (kN)		中主应力方向液压 u_2^i (kPa)		小主应力方向液压 u_3^i (kPa)			
大主应力方向面积 A_1^i (mm ²)		中主应力方向面积 A_2^i (mm ²)		小主应力方向面积 A_3^i (mm ²)			
大主应力液压缸活塞位移 δ_1^i (mm)		中主应力液压缸活塞位移 δ_2^i (mm)		小主应力液压缸活塞位移 δ_3^i (mm)			
固结后试样高度 h_c (mm)		中主应力液压缸内半径 R (mm)		小主应力液压缸内半径 r mm)			
大主应力方向变形 $\Delta\delta_1^i$ (mm)		中主应力方向变形 $\Delta\delta_2^i$ (mm)		小主应力方向变形 $\Delta\delta_3^i$ (mm)			
大主应力方向高度 $h_c-\Delta\delta_1^i$ (mm)		中主应力方向边长 l_2^i (mm)		小主应力方向边长 l_3^i (mm)			
大主应变 ε_1 (%)		中主应变 ε_2 (%)		小主应变 ε_3 (%)			
名称		测试值		计算值			
大主应力方向		$\sigma_1^i=\frac{F_1^i}{A_1^i},\ A_1^i=l_2^i\cdot l_3^i$		$\sigma_1=\sigma_1^i$ $\sigma'_1=\sigma_1-u_a$			
		$\Delta\delta_1^i,\ l_2^i=l_2^c-\Delta\delta_2^i,\ l_3^i=l_3^c-\Delta\delta_3^i$		$\varepsilon_1=\frac{\Delta\delta_1^i}{h_c}\times100$			
中主应力方向		$\sigma_2^i=u_2^i$		$\sigma_2=\sigma_2^i$ $\sigma'_2=\sigma_2-u_a$			
		$\Delta\delta_2^i=\frac{\pi R^2\delta_2^i}{A_2^i},\ A_2^i=l_3^i(h_c-\Delta\delta_1^i)$		$\varepsilon_2=\frac{\pi R^2\delta_2^i}{A_2^il_3^i}\times100$			
小主应力方向		$\sigma_3^i=u_3^i$		$\sigma_3=\sigma_3^i$ $\sigma'_3=\sigma_3-u_a$			
		$\Delta\delta_3^i=\frac{\pi r^2\delta_3^i}{A_3^i},\ A_3^i=l_2^i(h_c-\Delta\delta_1^i)$		$\varepsilon_3=\frac{\pi r^2\delta_3^i}{A_3^il_2^i}\times100$			
孔隙水压力		u_w^i		$u_w=const$			
孔隙气压力		u_a^i		$u_a=const$			
基质吸力		$s^i=u_a^i-u_w^i$		$s=u_a-u_w$			
σ_1 (kPa)	σ_2 (kPa)	σ_3 (kPa)	ε_1 (%)	ε_2 (%)	ε_3 (%)	s (kPa)	

13 膨胀力试验

13.1 一般规定

13.1.1 本试验方法适用于非饱和膨胀土和其他具有湿胀特性的岩土材料。

13.1.2 本试验包括以下 2 种类型，应根据工作要求分别采用：

- 1 恒体积法测膨胀力试验；
- 2 三向膨胀力试验。

【条文说明】：13.1.2 本标准规定的膨胀力测定试验，是基于恒体积法。该方法能够克服现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T50123 中采用的加荷平衡法的一些缺点：一是，对于膨胀性较强的土，加水后膨胀极为迅速，从实际操作角度，加荷以维持试样不膨胀较为困难；二是，采用加荷平衡法，试样会经历反复膨胀-压缩的过程，应力路径复杂；三是，加荷平衡法需要在试验过程中不断观察试样膨胀情况，并判断是否加荷，人工消耗较大。

13.2 恒体积法测膨胀力试验

13.2.1 本试验所用的仪器设备（图 13.2.1）包括试样容器、刚性测力框架、位移计等，应符合下列规定：

1 试样容器：由环刀、护环、上压环、透水板、传压板、储水盒组成。

1) 环刀：内径为 61.8 mm 或 79.8 mm，高度为 20 mm，技术性能应符合现行国家标准《土工试验仪器 环刀》SL370 的规定。使用其他尺寸的环刀时，环刀高度应大于试样最大粒径的 10 倍，环刀内径与高度之比应大于 2.5。

2) 上压环：应具有一定的刚度，内径应与环刀的内径相同，并与储水盒刚性连接。

3) 透水板：渗透系数应大于试样的渗透系数，技术性能应符合现行国家标准《透水板》SL152 的规定。

2 刚性测力框架：由刚性框架与轴向力传感器组成。轴向力传感器宜为轮辐式力传感器，最大允许误差应为全量程的 $\pm 1\%$ ，全量程变形必须小于 0.1 mm。

3 位移计：最小分度值为 0.01 mm 的百分表，或准确度为 0.01 mm 的位移传感器。

4 其他：刮土刀、钢丝锯、天平、秒表、吸水球。

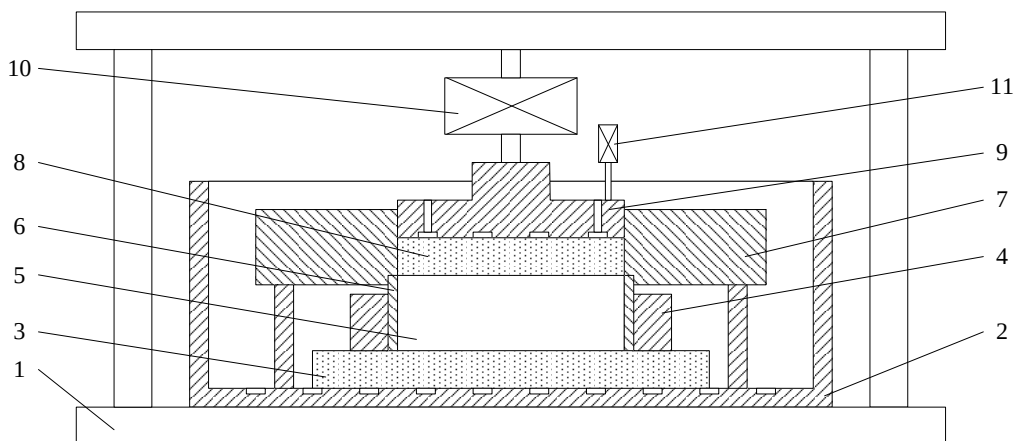


图 13.2.1 恒体积式膨胀仪示意图

1—刚性框架；2—储水盒；3—底部透水板；4—护环；5—试样；6—环刀；7—上压环；
8—顶部透水板；9—传压板；10—轴向力传感器；11—位移计

【条文说明】：13.2.1 本试验所用的仪器设备，应符合下列规定：

1 在试样膨胀过程中，可能会带动环刀向上移动。为了避免环刀失位，要求上压环与储水盒刚性连接以固定环刀。

对于膨润土等强膨胀性土，由于产生的侧向膨胀力较大，常规环刀难以保证良好的侧限约束条件，故应加厚环刀壁以提供足够的侧向刚度。

2 轴向力传感器的变形，会造成试样干密度的减小，故应尽量小。本标准按照不超过试样高度的 0.5 %（即 0.1 mm），对轴向力传感器的变形进行限定。对于相同的轴向力传感器变形，试样干密度越大，其导致的干密度下降越显著。考虑干密度为 2.0 g/cm^3 的情况，0.1 mm 的轴向力传感器变形会引起干密度减小 0.01 g/cm^3 。

13.2.2 根据需要，切取原状土试样或制备给定密度与含水率的扰动土试样。制备方法应按现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T50123 的规定执行。

13.2.3 恒体积法测膨胀力试验，应按下列步骤进行：

1 在储水盒内放置底部透水板、护环和干燥的薄型滤纸，将带有环刀的试样装入护环内，放置并固定上压环，试样上依次放上干燥的薄型滤纸、顶部透水板和传压板。透水板应在使用前风干。

2 将装入试样的储水盒置于刚性测力框架正中，使传压板与刚性测力框架中心对准。施加预压力使试样与仪器上下各部件之间接触，测记轴向力传感器读数。对于原状土试样，预压力应与其原位上覆压力相近。对于扰动土试样，预压力施加引起的试样干密度变化必须小于 0.01 g/cm^3 。

3 安装位移计，将位移计调整到零位或测读初读数。

4 自下而上向储水盒内注入纯水，并保持水面高出试样 5 mm。注水后 1 h 内，宜按下列时间顺序测记轴向力传感器与位移计读数，时间为 0.5 min、1 min、2 min、4 min、8 min、15 min、30 min、1 h。之后宜每隔 1 h 测记轴向力传感器与位移计读数一次，至膨胀力达到峰值。

5 试验结束，吸去储水盒中的水，卸除压力，取出试样，称试样质量，并测定其含水率。

【条文说明】：13.2.3 恒体积法测膨胀力试验，应按下列步骤进行：

2 对于原状土试样，已有研究表明预压力的大小会对膨胀力试验结果有明显影响，应施加尽量与原位上覆压力相近的预压力。对于扰动土试样，预压力会对试样的初始状态产生一定的干扰，需对该干扰的影响加以限定；考虑到干密度是影响扰动土试样膨胀力的关键因素，故通过干密度的改变量（不超过 0.01 g/cm^3 ）对预压力的施加进行限制；预压力引起的干密度改变量，可通过压缩曲线获知。此外，试样与仪器之间、仪器各部件之间的接触变形，也是导致试验过程中试样干密度下降的重要原因；施加一定的预压力，是有效减小接触变形的手段。

4 注水后，膨胀力会急剧增加，故应在试验初期适当增加测记数据的频次。考虑到膨胀力与时间对数的关系曲线一般呈分段线性的特征，本标准按照在对数坐标下均布的原则给定初期的数据测记时间点。通常，膨胀力达到峰值后会维持基本不变，或随时间略有下降。需要注意的是，膨胀力达到峰值并不意味着试样已完全饱和。

13.2.4 试样的膨胀力，应按下列式计算：

$$\sigma_p = \frac{F_p}{A} \times 10 \quad (13.2.4)$$

式中： σ_p — 试样的膨胀力（kPa）；

F_p — 轴向力传感器的峰值读数（N）；

A — 试样面积（ cm^2 ）。

13.2.5 试验结束时的试样最终干密度，应按下列式计算：

$$\rho_{dp} = \frac{h_0}{h_0 + \Delta h_{pf}} \times \rho_{d0} \quad (13.2.5)$$

式中： ρ_{dp} — 试验结束时的试样最终干密度（ g/cm^3 ）；

ρ_{d0} — 试样的初始干密度（ g/cm^3 ）；

Δh_{pf} — 峰值轴向力对应的试样的高度总变形量（mm）；

h_0 — 试样的初始高度 (mm)。

【条文说明】：13.2.5 在试验过程中，试样会不可避免地产生轻微变形，因此试验结束时的干密度会略小于初始干密度。由于干密度是决定膨胀力的关键因素，故应按式 (13.2.5) 计算试验结束时的最终干密度。

13.2.6 恒体积法测膨胀力试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 13.1 和表 13.2 的规定。

13.3 三向膨胀力试验

13.3.1 本试验所用的仪器设备包括三向膨胀仪 (图 13.3.1-1) 及附属设备，应符合下列规定：

1 三向膨胀仪：由仪器框架、透水板、传压板、传压杆、密封盖板、力传感器和注水系统组成 (图 13.3.1-1)。

1) 透水板：宜为方形，氧化铝或不受腐蚀的金属材料制成，其渗透系数应大于试样的渗透系数。

2) 传压板：具有连接仪器框架内空腔与透水板的通孔。

3) 密封盖板：铅垂方向的 2 个密封盖板内，应设有连接注水系统的通孔。

4) 力传感器：宜为轮辐式力传感器，最大允许误差应为全量程的 $\pm 1\%$ ，全量程变形必须小于 0.05 mm。

5) 注水系统：可施加的最大注水压力应大于 100 kPa，注水压力测量的最大允许误差应为全量程的 $\pm 1\%$ 。

2 附属设备应符合下列规定：

1) 压样器 (图 13.3.1-2)：由底座、压样筒、拉杆、导筒、活塞、压样垫环和出样垫环组成。各部件宜选用耐腐蚀不易磨损的不锈钢等材料，加工表面应无明显缺陷。

2) 击样器 (图 13.3.1-3)：由底座、击样筒、拉杆、导筒、击锤、导杆、定位环、出样垫环和出样活塞组成。各部件宜选用耐腐蚀不易磨损的不锈钢等材料，加工表面应无明显缺陷。

3 其他：刮土刀、钢丝锯、天平、秒表、吸水球。

【条文说明】：13.3.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

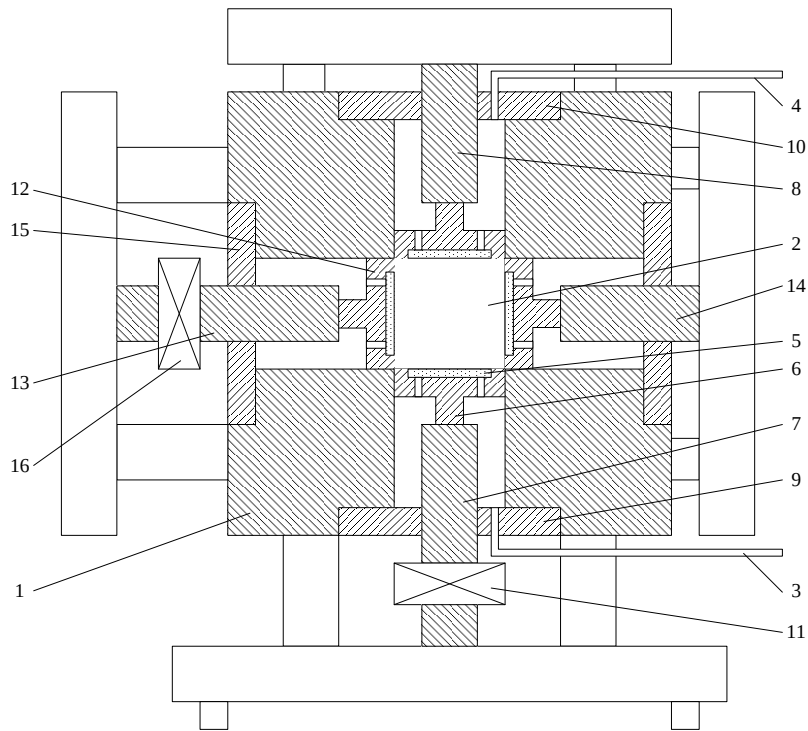
1 三向膨胀仪是基于恒体积法测定膨胀力，在 3 个方向均设置刚性测力框架，通过 3 个力传感器测量膨胀力。力传感器的变形，会造成试样干密度的减小，故应尽量

小。本标准按照不超过 0.05 mm，对力传感器的变形进行限定。考虑试样边长为 20 mm、干密度为 2.0 g/cm³ 的情况，0.05 mm 的力传感器变形会引起干密度减小 0.015 g/cm³。

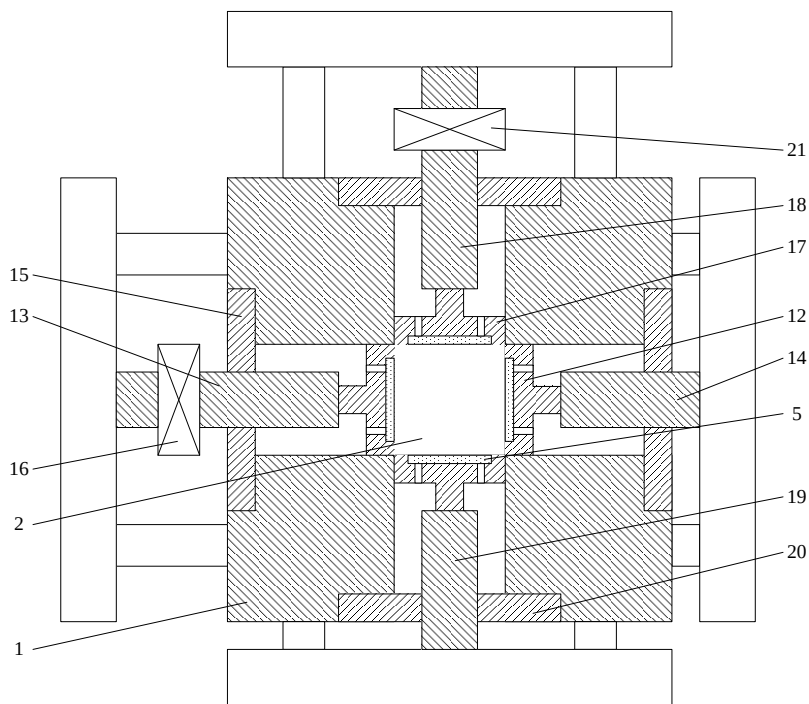
13.3.2 试验前，仪器框架、透水板、传压板、传压杆、密封盖板应保持干燥，力传感器应预热 30 min。

13.3.3 本试验采用的试样为正方体形。边长应大于试样最大粒径的 10 倍，宜为 20～40 mm。

13.3.4 扰动土试样制备应根据预定的干密度和含水率，按现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T50123 规定的步骤备料后，在压样筒内分两层静力压实、或在击样筒内分两层击实，两层土料数量应相等，层间接触面应刨毛；压实或击实完成后，将试样端面整平，从压样筒或击样筒中取出试样。原状土试样制备应将土样切成立方体形试样。对制备好的试样，应测记其质量和尺寸。



(a) 纵剖面示意图



(b) 横剖面示意图

图 13.3.1-1 三向膨胀仪示意图

1—仪器框架；2—试样；3—底部注水管路；4—顶部注水管路；5—透水板；6—Z 向（铅垂方向）底部传压板；7—Z 向底部传压杆；8—Z 向顶部传压杆；9—Z 向底部密封盖板；10—Z 向顶部密封盖板；11—Z 向力传感器；12—X 向传压板；13—X 向传压杆 I；14—X 向传压杆 II；15—X 向密封盖板；16—X 向力传感器；17—Y 向传压板；18—Y 向传压杆 I；19—Y 向传压杆 II；20—Y 向密封盖板；21—Y 向力传感器

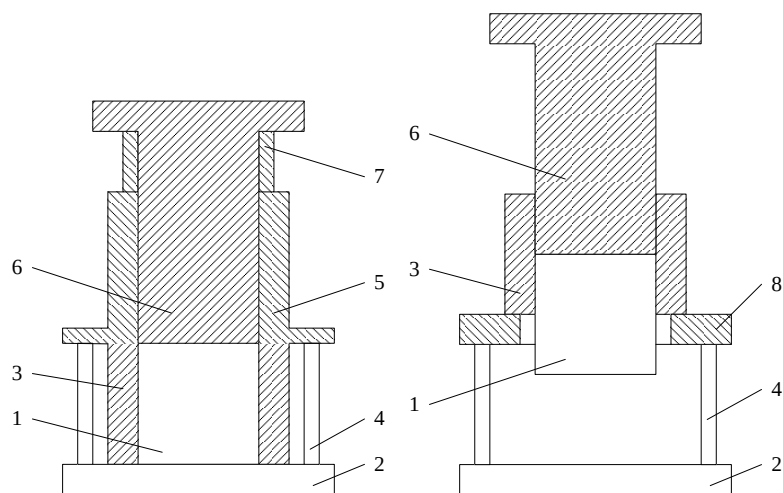


图 13.3.1-2 压样器示意图

1—试样；2—底座；3—压样筒；4—拉杆；5—导筒；6—活塞；7—压样垫环；8—出样垫环

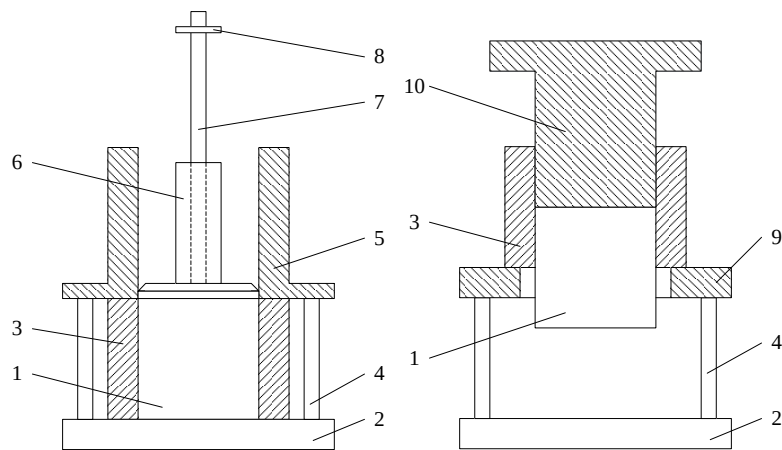


图 13.3.1-3 击样器示意图

1—试样；2—底座；3—击样筒；4—拉杆；5—导筒；6—击锤；7—导杆；8—定位环；9—出样垫环；10—出样活塞

13.3.5 三向膨胀力试验，应按下列步骤进行：

1 使用干燥的薄型滤纸包裹试样，将包裹好的试样装入仪器框架内，调整 X、Y 向传压板和 Z 向（铅垂方向）底部传压板使试样位于仪器框架正中，试样上放置 Z 向顶部透水板和顶部传压板，依次安装 Z 向顶部密封盖板和顶部传压杆。试样安装前，应关闭底部和顶部注水管路阀门。

2 施加预压力使试样与周围各部件之间接触，3 个方向的预压力应尽量相等，测记 3 个方向的力传感器读数。预压力施加引起的试样干密度变化必须小于 0.01 g/cm^3 。

3 打开底部和顶部注水管路阀门，从底部注水管路向仪器主机内注入纯水，待纯水从顶部注水管路流出后，关闭顶部注水管路阀门，施加预定的注水压力。

4 注水后 1 h 内，宜按下列时间顺序测记 3 个方向的力传感器读数，时间为 0.5 min、1 min、2 min、4 min、8 min、15 min、30 min、1 h。之后宜每隔 1 h 测记 3 个方向的力传感器一次，至 3 个方向的膨胀力均达到峰值。

5 试验结束，排空仪器主机内的水，卸除压力，取出试样，称试样质量，并测定其含水率。

【条文说明】：13.3.5 三向膨胀力试验，应按下列步骤进行：

2 试样与仪器之间、仪器各部件之间的接触变形，也是导致试验过程中试样干密度下降的重要原因。施加一定的预压力，是有效减小接触变形的手段。但是，预压力会对试样的初始状态产生一定的干扰，需对该干扰的影响加以限定。考虑到干密度是影响膨胀力的关键因素，故通过干密度的改变量（不超过 0.01 g/cm^3 ）对预压力的施加进行限制。为了尽量保证测试条件的各向同性，要求 3 个方向的预压力应尽量相等。

4 三向膨胀仪测得的各方向膨胀力与时间关系曲线特征是与侧限条件下相同的。因此，在数据测记频次、试验终止条件上，本款与本标准第 13.2.3 条第 4 款关于侧限条件下的要求是一致的。

13.3.6 试样的 X 向膨胀力，应按下式计算：

$$\sigma_{px} = \frac{F_{px} - f_x}{(L_{y0} + \Delta L_y)(L_{z0} + \Delta L_z)} \times 1000 \quad (13.3.6)$$

式中： σ_{px} — 试样的 X 向膨胀力（kPa）；

F_{px} — X 向力传感器的峰值读数（N）；

f_x — 所施加注水压力对应的 X 向传压杆外顶力（N）；

L_{y0} — 试样的初始 Y 向长度（mm）；

L_{z0} — 试样的初始 Z 向长度（mm）；

ΔL_y — 试验结束时试样的 Y 向长度变化量（mm）；

ΔL_z — 试验结束时试样的 Z 向长度变化量（mm）。

13.3.7 试样的 Y 向膨胀力，应按下式计算：

$$\sigma_{py} = \frac{F_{py} - f_y}{(L_{x0} + \Delta L_x)(L_{z0} + \Delta L_z)} \times 1000 \quad (13.3.7)$$

式中： σ_{py} — 试样的 Y 向膨胀力（kPa）；

F_{py} — Y 向力传感器的峰值读数（N）；

f_y — 所施加注水压力对应的 Y 向传压杆外顶力（N）；

L_{x0} — 试样的初始 X 向长度（mm）；

ΔL_x — 试验结束时试样的 X 向长度变化量（mm）。

13.3.8 试样的 Z 向膨胀力，应按下式计算：

$$\sigma_{pz} = \frac{F_{pz} - f_z}{(L_{x0} + \Delta L_x)(L_{y0} + \Delta L_y)} \times 1000 \quad (13.3.8)$$

式中： σ_{pz} — 试样的 Z 向膨胀力（kPa）；

F_{pz} — Z 向力传感器的峰值读数（N）；

f_z — 所施加注水压力对应的 Z 向传压杆外顶力（N）。

13.3.9 试验结束时的试样最终干密度，应按下式计算：

$$\rho_{tdp} = \frac{L_{x0}}{L_{x0} + \Delta L_x} \times \frac{L_{y0}}{L_{y0} + \Delta L_y} \times \frac{L_{z0}}{L_{z0} + \Delta L_z} \times \rho_{td0} \quad (13.3.9)$$

式中： ρ_{tdp} — 试验结束时的试样最终干密度（g/cm³）；

ρ_{td0} — 试样的初始干密度（g/cm³）。

【条文说明】：13.3.9 在各方向上，试样都不可避免地会有轻微变形，因此试验结束时的干密度会略小于初始干密度。由于干密度是决定膨胀力的关键因素，故应计算试验结束时的最终干密度。

13.3.10 三向膨胀力试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 13.3 和表 13.4 的规定。

附录 E 表 13.1 恒体积法测膨胀力试验记录表

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									
1. 试样含水率									
试样情况	盒号	盒质量 (g)	盒加湿土质量 (g)	盒加干土质量 (g)	含水率 (%)	平均含水率 (%)			
试验前									
试验后									
2. 试样密度与饱和度									
试样情况	环刀质量 (g)	环刀加土质量 (g)	试样面积 (cm ²)	试样高度 (cm)	试样质量 (g)	试样体积 (cm ³)	干密度 (g/cm ³)	土粒相对密度	饱和度 (%)
试验前									
试验后									

附录 E 表 13.2 恒体积法测膨胀力试验记录表

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							
预压力 (N)				位移计初读数 (mm)			
最终干密度 (g/cm ³)				峰值膨胀力 (kPa)			
测定时间 (d h min)	经过时间 (d h min)	轴向力读数 (N)	位移计读数 (mm)	仪器变形量 (mm)	膨胀力 (kPa)		

附录 E 表 13.3 三向膨胀力试验记录表

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								
1. 试样含水率								
试样情况	盒号	盒质量 (g)	盒加湿土质量 (g)	盒加干土质量 (g)	含水率 (%)	平均含水率 (%)		
试验前								
试验后								
3. 试样密度与饱和度								
试样情况	试样 X 向长度 (cm)	试样 Y 向长度 (cm)	试样 Z 向长度 (cm)	试样质量 (g)	试样体积 (cm ³)	干密度 (g/cm ³)	土粒相对密度	饱和度 (%)
试验前								
试验后								

附录 E 表 13.4 三向膨胀力试验记录表

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													
X 向预压力 (N)		Y 向预压力 (N)		Z 向预压力 (N)		注水压力 (kPa)		X 向外顶力 (N)		Y 向外顶力 (N)		Z 向外顶力 (N)	
最终干密度 (g/cm ³)			X 向峰值膨胀力 (kPa)			Y 向峰值膨胀力 (kPa)			Z 向峰值膨胀力 (kPa)				
测定时间 (d h min)	经过时间 (d h min)	X 向			Y 向			Z 向					
		力读数 (N)	仪器变形量 (mm)	膨胀力 (kPa)	力读数 (N)	仪器变形量 (mm)	膨胀力 (kPa)	力读数 (N)	仪器变形量 (mm)	膨胀力 (kPa)			

14 温控侧限压缩试验

14.1 一般规定

14.1.1 本试验方法适用于非饱和细粒土。

【条文说明】：14.1.1 对于收缩性较强的土，增加吸力可能会引起较为明显的收缩，无法保证试样与环刀壁之间的紧密贴合，进而会存在至少以下两个问题：一是无法保证试验的侧限条件；二是无法准确计算试样的孔隙比。因此，对于收缩性较强的土，若试验涉及吸力增加路径，在严格意义上本标准不适用。

14.1.2 本试验包括以下 3 种类型，应根据工作要求分别采用：

- 1 控制温度和基质吸力为常数的侧限压缩试验；
- 2 控制温度和含水率为常数的侧限压缩试验（不测孔隙水压力）；
- 3 控制温度和净竖向压力为常数的广义持水特性试验。

【条文说明】：14.1.2 与室温下进行控制气压力为常数的常含水率侧限压缩试验（测孔隙水压力）不同，在高温下，由于试样中水蒸气存在不可避免的蒸发，难以保持良好的常含水率条件，因此，本标准不考虑进行控制温度、气压力为常数的常含水率侧限压缩试验（测孔隙水压力）。

14.2 仪器设备

14.2.1 本试验所用的仪器设备（图 14.2.1），应符合下列规定：

1 温控非饱和侧限压缩仪容器：由容器底座、容器顶罩、环刀、护环、高进气值陶土板、多孔薄金属板及加压盖板等组成。

1) 容器底座应设有用以冲洗气泡的螺旋水槽，螺旋水槽的宽度和深度宜为 3 mm，槽内应光滑无尖角。

2) 环刀、高进气值陶土板、多孔薄金属板应符合本标准第 5.2.1 条第 2 款的规定。

3) 容器底座、容器顶罩、环刀、护环的材料热膨胀系数应相同。

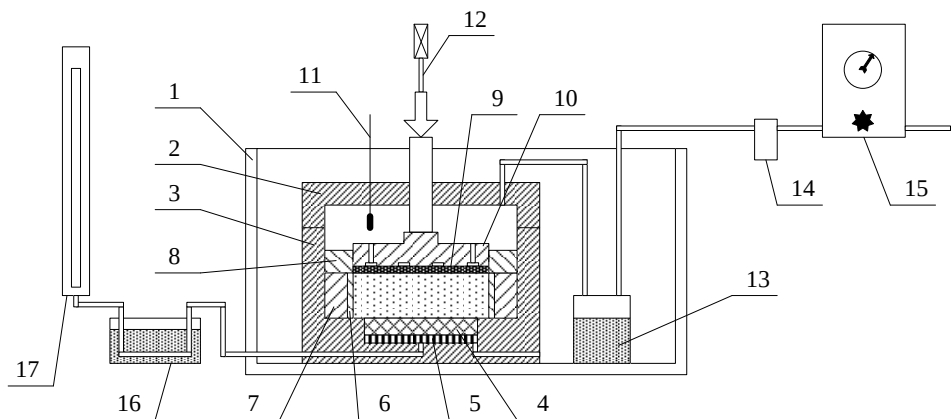
2 加热恒温水浴：最大允许误差应为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，应外包保温材料。

3 加载设备：应能垂直地施加规定的净竖向压力，并长时间保持压力稳定，压力准确度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/T15406 的规定。

4 气压设备：由气压源、气压调压装置、气体润湿装置及冷凝水阱等组成，应符

合下列规定：

- 1) 气压源：应由空压机或氮气瓶提供。
- 2) 气压调压装置：应能长时间保持压力稳定，压力示值的最小分度值应小于、等于 5 kPa。
- 3) 在气压调压装置与压缩仪容器之间，应设置气体润湿装置与冷凝水阱。
- 4) 气体润湿装置应置于加热恒温水浴内。
- 5 变形量测设备：应符合本标准第 5.2.1 条第 6 款的规定。
- 6 排水量测设备：应符合本标准第 5.2.1 条第 7 款的规定；若试样排水量较大，亦在排水量测设备与压缩仪容器之间设置冷却水浴；冷却水浴应能维持水浴内温度保持为室温不变，最大允许误差应为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。
- 7 温度传感器：测温元件应位于压缩仪容器内，且与试样尽量接近；最大允许误差应为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。
- 8 其他：刮土刀、钢丝锯、天平、秒表、吸水球。



1—加热恒温水浴；2—容器顶罩；3—容器底座；4—高进气值陶土板；5—螺旋水槽；6—环刀；7—大护环；8—小护环；9—多孔薄金属板；10—加压盖板；11—温度传感器；12—变形量测设备；13—气体润湿装置；14—冷凝水阱；15—气压调压装置；16—冷却水浴；17—排水量测量装置

图 14.2.1 温控非饱和侧限压缩仪示意图

【条文说明】：14.2.1 本试验所用的仪器设备，应符合下列规定：

- 1 为了尽量消除压缩仪容器各部件之间温度应力的影响，要求容器底座、容器顶罩、环刀、护环等金属部件的材料热膨胀系数相同。
- 2 为了保证温度控制误差不超过 1°C ，加热恒温水浴内应设有搅动水的装置。
- 3 本标准没有规定加载设备的具体形式，可采用杠杆式、气压式或液压式，压力准确度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/T15406 的

规定。

4 气体润湿装置内装有纯水，受热后可产生与试样同温度的饱和蒸汽，进而能有效抑制高温下试样中水分沿气体管路的蒸发。冷凝水阱的作用是捕获高温蒸汽产生的冷凝水，以防止冷凝水损坏气压力调节与测量仪表。

6 排水量的测量准确性与水的温度密切相关。如果排水量较小，排出的高温水可在压缩仪容器与排水量测设备之间的管路内自然降温，不影响排水量测设备内的水温。如果排水量较大，无法实现自然降温，则应设置冷却水浴以强制降温。

14.2.2 试验时的仪器应符合下列规定：

- 1 高进气值陶土板应已饱和，饱和方法可参照本标准第 5.2.3 条的规定执行。
- 2 应在试验设定的最高温度、最大基质吸力下，检查高进气值陶土板是否漏气，具体方法可分别参照第 5.2.4 条的规定进行。
- 3 容器底座的螺旋水槽内的气泡应排除，可参照本标准第 5.2.3 条第 1 款的规定进行。
- 4 各连接处应无漏水漏气现象。

【条文说明】：14.2.2 试验时的仪器应符合下列规定：

2 由于水的表面张力随温度升高而降低，高进气值陶土板的进气值会随温度升高而下降。在高温条件下，高进气值陶土板的实际进气值可能会低于出厂的标称进气值，故饱和后高进气值陶土板的漏气检查应在最高试验温度下进行。

14.3 控制温度和基质吸力为常数的侧限压缩试验

14.3.1 根据需要，切取原状土试样或制备给定密度与含水率的扰动土试样。制备方法应按现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T50123 的规定执行。

14.3.2 试样需要饱和时，应按现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T50123 的规定进行试样的饱和。

14.3.3 控制温度和基质吸力为常数的侧限压缩试验，应按下列步骤进行：

- 1 在压缩仪容器内安装大护环，将带有环刀的试样装入大护环，安装小护环，在试样上放多孔薄金属板和加压盖板，安装容器顶罩，然后将压缩仪容器置于加压框架下，对准加压框架的正中，安装变形量测设备。
- 2 施加 1 kPa 的预压力使试样与仪器上下各部件之间接触良好，将变形量测设备调整到零位或测记其初读数。调整排水管的高度使管中液面与试样中心同高，记录排

水量测设备的初始读数。

3 施加预定的基质吸力，及时补偿因气压力增大引起的加压活塞的顶托作用，保持 1 kPa 的净竖向压力不变。每隔 1h 记录竖向变形量、排水量及温度传感器读数 1 次，直至竖向变形量和排水量均达到稳定。稳定标准是：在连续 2h 内，竖向变形量不超过 0.01 mm，且排水量不超过 12 mm³。

4 启动加热装置，升温至预定的温度，每隔 1h 记录竖向变形量、排水量及温度传感器读数 1 次，直至三者均达到稳定。竖向变形量和排水量的稳定标准按本标准第 14.3.3 条第 3 款的规定执行。温度的稳定标准是：在连续 2h 内，温度传感器读数的变化不超过 1℃。

5 逐级施加设定的各级净竖向压力，每隔 1h 记录竖向变形量、排水量及温度传感器读数 1 次，净竖向压力等级应符合本标准第 5.3.2 条第 5 款的规定。各级净竖向压力下的稳定标准均应按本标准第 14.3.3 条第 3 款的规定执行。

6 需要做回弹试验时，可在某级净竖向压力下竖向变形量和排水量均稳定后逐级卸压，每隔 1h 记录竖向变形量、排水量及温度传感器读数 1 次。卸压过程的稳定标准与加压相同。

7 在试验过程中，应每隔 6~8h 冲洗高进气值陶土板下的气泡 1 次，每次历时 30~40s。试验温度越高，气泡冲洗的间隔应越短。每次冲洗前，应先关闭通向排水量测设备的阀门，冲洗完成后再重新打开该阀门。

8 试验结束，关闭加热装置，然后依次迅速卸除竖向压力和气压力，迅速拆除仪器各部件，取出带环刀的试样。测定试验后含水率。

【条文说明】：14.3.3 控制温度和基质吸力为常数的侧限压缩试验，应按下列步骤进行：

3、4、5 本标准是按照“无荷条件下施加预定的基质吸力—在基质吸力不变条件下升温—在温度、基质吸力不变条件下逐级施加净竖向压力”的路径进行试验方法的规范。可根据需要，将本条第 3、4 款合并进行，即在施加预定基质吸力的同时进行升温。关于变形与排水量的稳定标准，与本标准第 5.3.2 条是一致的。

7 在高温下，由于气体扩散能力的增强，更易在高进气值陶土板下集聚气泡，故应增加冲洗气泡的频次。

14.3.4 对于控制温度和基质吸力为常数的侧限压缩试验，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：

$$e_0 = \frac{G_s \rho_w}{\rho_{d0}} - 1 \quad (14.3.3-1)$$

式中： e_0 — 试样的初始孔隙比；

G_s — 土粒相对密度；

ρ_w — 水的密度 (g/cm^3)；

ρ_{d0} — 试样的初始干密度 (g/cm^3)。

2 试样的初始饱和度 S_{r0} ，应按下式计算：

$$S_{r0} = \frac{G_s w_0}{e_0} \quad (14.3.3-2)$$

式中： S_{r0} — 试样的初始饱和度 (%)；

w_0 — 试样的初始含水率 (%)。

3 各级净竖向压力下稳定后的孔隙比 $e_{1,i}$ ，应按下式计算：

$$e_{1,i} = e_0 - (1+e_0) \frac{\Delta h_{s0} + \Delta h_{sT} + \sum \Delta h_{1pi}}{h_0} \quad (14.3.3-3)$$

式中： $e_{1,i}$ — 某级净竖向压力下稳定后的孔隙比；

Δh_{s0} — 施加预定的基质吸力引起的试样高度变形量 (cm)；

Δh_{sT} — 在基质吸力不变条件下升温引起的试样高度变形量 (cm)；

$\sum \Delta h_{1pi}$ — 某级净竖向压力下稳定后，加载引起的试样高度总变形量 (cm)；

h_0 — 试样的初始高度 (cm)。

4 各级净竖向压力下稳定后的含水率 $w_{1,i}$ ，应按下式计算：

$$w_{1,i} = w_0 - \frac{100 \rho_w (\Delta V_{s0}^w + \Delta V_{1T}^w + \sum \Delta V_{1pi}^w)}{\rho_{d0} V_0} \quad (14.3.3-4)$$

式中： $w_{1,i}$ — 某级净竖向压力下稳定后的含水率 (%)；

ΔV_{s0}^w — 施加预定的基质吸力引起的试样排水量 (cm^3)；

ΔV_{1T}^w — 在基质吸力不变条件下升温引起的试样排水量 (cm^3)；

$\sum \Delta V_{1pi}^w$ — 某级净竖向压力下稳定后，加载引起的试样总排水量 (cm^3)；

V_0 — 试样的初始体积 (cm^3)。

5 各级净竖向压力下稳定后的饱和度 $S_{r1,i}$ ，应按下式计算：

$$S_{r1,i} = \frac{G_s w_{1,i}}{e_{1,i}} \quad (14.3.3-5)$$

式中： $S_{r1,i}$ — 某级净竖向压力下稳定后的饱和度（%）。

6 某一净竖向压力范围内土骨架的压缩系数 α_{1v}^s ，应按下式计算：

$$\alpha_{1v}^s = \frac{e_{1,i} - e_{1,i+1}}{p_{v,i+1} - p_{v,i}} \times 10^3 \quad (14.3.3-6)$$

式中： α_{1v}^s — 某一净竖向压力范围内土骨架的压缩系数（MPa⁻¹）；

$p_{v,i}$ — 某一单位净竖向压力值（kPa）。

7 某一净竖向压力范围内土骨架的压缩模量 E_{1s}^s 和土骨架的体积压缩系统 m_{1v}^s ，应按下列公式计算：

$$E_{1s}^s = \frac{1 + e_0}{\alpha_{1v}^s} \quad (14.3.3-7)$$

$$m_{1v}^s = \frac{1}{E_{1s}^s} = \frac{\alpha_{1v}^s}{1 + e_0} \quad (14.3.3-8)$$

式中： E_{1s}^s — 某一净竖向压力范围内土骨架的压缩模量（MPa）；

m_{1v}^s — 某一净竖向压力范围内土骨架的体积压缩系统（MPa⁻¹）。

8 土骨架的压缩指数 C_{1c}^s 及回弹指数 C_{1s}^s ，应按下式计算：

$$C_{1c}^s \text{ 或 } C_{1s}^s = \frac{e_{1,i} - e_{1,i+1}}{\lg p_{v,i+1} - \lg p_{v,i}} \quad (14.3.3-9)$$

式中： C_{1c}^s — 土骨架的压缩指数；

C_{1s}^s — 土骨架的回弹指数。

9 某一净竖向压力范围内含水率的压排系数 b_{1v}^s ，应按下式计算：

$$b_{1v}^s = \frac{w_{1,i} - w_{1,i+1}}{p_{v,i+1} - p_{v,i}} \times 10 \quad (14.3.3-10)$$

式中： b_{1v}^s — 某一净竖向压力范围内含水率的压排系数（MPa⁻¹）。

10 含水率的压排指数 D_{1c}^s 及回渗指数 D_{1s}^s ，应按下式计算：

$$D_{1c}^s \text{ 或 } D_{1s}^s = \frac{w_{1,i} - w_{1,i+1}}{\lg p_{v,i+1} - \lg p_{v,i}} \quad (14.3.3-11)$$

式中： D_{1c}^s — 含水率的压排指数；

D_{1s}^s — 含水率的回渗指数。

14.3.5 以各级净竖向压力下稳定后的孔隙比为纵坐标，单位净竖向压力为横坐标，绘

制孔隙比与单位净竖向压力的关系曲线。

14.3.6 以各级净竖向压力下稳定后的含水率为纵坐标，单位净竖向压力为横坐标，绘制含水率与单位净竖向压力的关系曲线。

14.3.7 以各级净竖向压力下稳定后的饱和度为纵坐标，单位净竖向压力为横坐标，绘制饱和度与单位净竖向压力的关系曲线。

14.3.8 通过孔隙比与单位净竖向压力的关系曲线，确定当前试验温度与基质吸力下的试样屈服净竖向压力，确定方法应符合本标准第 5.3.15 条的规定。

14.3.9 控制温度和基质吸力为常数的侧限压缩试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 14.1（一）、（二）、（三）的规定。

附录 E 表 14.1 (一) 控制温度和基质吸力为常数的侧限压缩试验记录表

任务单号				试验者						
试样编号				计算者						
试验日期				校核者						
试样说明										
仪器名称及编号										
1. 试样含水率										
试样情况	盒号	盒质量 (g)	盒加湿土质量 (g)	盒加干土质量 (g)	含水率 (%)	平均含水率 (%)				
试验前										
试验后										
2. 试样孔隙比与饱和度										
试样情况	环刀质量 (g)	环刀加土质量 (g)	试样面积 (cm ²)	试样高度 (cm)	试样质量 (g)	试样体积 (cm ³)	干密度 (g/cm ³)	土粒相对密度	孔隙比	饱和度 (%)
试验前										
试验后										

附录 E 表 14.1 (二) 控制温度和基质吸力为常数的侧限压缩试验记录表

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							
变形量表初读数 (mm)		排水量表初读数 (mm)		温度传感器初读数 (°C)			
1. 施加预定的基质吸力 (___kPa)							
测定时间 (d h min)	经过时间 (d h min)		变形量表读数 (mm)		排水量表读数 (mm)		温度传感器读数 (°C)
2. 升温至预定的温度 (___°C)							
测定时间 (d h min)	经过时间 (d h min)		变形量表读数 (mm)		排水量表读数 (mm)		温度传感器读数 (°C)
3. 施加设定的各级净竖向压力							
净竖向压力 (kPa)	测定时间 (d h min)	经过时间 (d h min)	变形量表读数 (mm)	排水量表读数 (mm)	温度传感器读数 (°C)		

附录 E 表 14.1 （三）控制温度和基质吸力为常数的侧限压缩试验记录表

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									
净竖向压力 (kPa)	孔隙比 $e_{1,i}$	含水率 $w_{1,i}$ (%)	饱和度 $S_{r1,i}$ (%)	压缩系数 α_{1v}^s (MPa ⁻¹)	压缩模量 E_{1s}^s (MPa)	体积压缩系数 m_{1v}^s (MPa ⁻¹)	压缩指数 C_{1c}^s	压排系数 b_{1v}^s (MPa ⁻¹)	压排指数 D_{1c}^s

14.4 控制温度和含水率为常数的侧限压缩试验（不测孔隙水压力）

14.4.1 根据需要，切取原状土试样或制备给定密度与含水率的扰动土试样。制备方法应按现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T50123 的规定执行。

14.4.2 控制温度和含水率为常数的侧限压缩试验，应按下列步骤进行：

1 在高进气值陶土板上放置不透水的金属薄板，在压缩仪容器内安装大护环，将带有环刀的试样装入大护环，安装小护环，在试样上依次放不透水的金属薄板和加压盖板，安装容器顶罩，然后将压缩仪容器置于加压框架下，对准加压框架的正中，安装变形量测设备。

2 施加 1 kPa 的预压压力使试样与仪器上下各部件之间接触良好，将变形量测设备调整到零位或测记其初读数。

3 启动加热装置，升温至预定的温度，每隔 1h 记录竖向变形量和温度传感器读数 1 次，直至二者均达到稳定。稳定标准是：在连续 2h 内，竖向变形量不超过 0.01 mm，温度变化不超过 1℃。

4 逐级施加设定的各级压力，每隔 1h 记录竖向变形量和温度传感器读数 1 次，压力等级应符合本标准第 5.5.2 条第 4 款的规定。各级压力下的稳定标准均是：在连续 2h 内，竖向变形量不超过 0.01 mm。

5 需要做回弹试验时，可在某级压力下竖向变形量稳定后逐级卸压，每隔 1h 记录竖向变形量和温度传感器读数 1 次。卸压过程的稳定标准与加压相同。

6 试验结束，关闭加热装置，然后迅速卸除竖向压力，迅速拆除仪器各部件，取出带环刀的试样。测定试验后含水率。

【条文说明】：14.4.2 控制温度和含水率为常数的侧限压缩试验，应按下列步骤进行：

1 为了保证常含水率条件，在试样上下均应放不透水的金属薄板。

4 关于变形的稳定标准，与本标准第 5.5.2 条是一致的。

14.4.3 对于控制温度和含水率为常数的侧限压缩试验，各项指标计算应符合下列规定：

1 试样的初始孔隙比 e_0 ，应按本标准第 14.3.3 条第 1 款的规定进行计算。

2 试样的初始饱和度 S_{r0} ，应按本标准第 14.3.3 条第 2 款的规定进行计算。

3 各级压力下稳定后的孔隙比 $e_{2,i}$ ，应按下列式计算：

$$e_{2,i} = e_0 - (1 + e_0) \frac{\Delta h_{wT} + \sum \Delta h_{2pi}}{h_0} \quad (14.4.3-1)$$

式中： $e_{2,i}$ — 某级压力下稳定后的孔隙比；

Δh_{wT} — 在常含水率条件下升温引起的试样高度变形量（cm）；

$\sum \Delta h_{2pi}$ — 某级压力下稳定后，加载引起的试样高度总变形量（cm）。

4 各级压力下稳定后的饱和度 $S_{r2,i}$ ，应按下式计算：

$$S_{r2,i} = \frac{G_s w_0}{e_{2,i}} \quad (14.4.3-2)$$

式中： $S_{r2,i}$ — 某级压力下稳定后的饱和度（%）；

5 某一压力范围内土骨架的压缩系数 $\alpha_{2v}^{w_0}$ ，应按下式计算：

$$\alpha_{2v}^{w_0} = \frac{e_{2,i} - e_{2,i+1}}{p_{vt,i+1} - p_{vt,i}} \times 10^3 \quad (14.4.3-3)$$

式中： $\alpha_{2v}^{w_0}$ — 某一压力范围内土骨架的压缩系数（MPa⁻¹）；

$p_{vt,i}$ — 某一单位压力值（kPa）。

6 某一压力范围内土骨架的压缩模量 $E_{2s}^{w_0}$ 和土骨架的体积压缩系数 $m_{2v}^{w_0}$ ，应按下列公式计算：

$$E_{2s}^{w_0} = \frac{1 + e_0}{\alpha_{2v}^{w_0}} \quad (14.4.3-4)$$

$$m_{2v}^{w_0} = \frac{1}{E_{2s}^s} = \frac{\alpha_{2v}^{w_0}}{1 + e_0} \quad (14.4.3-5)$$

式中： $E_{2s}^{w_0}$ — 某一压力范围内土骨架的压缩模量（MPa）；

$m_{2v}^{w_0}$ — 某一压力范围内土骨架的体积压缩系数（MPa⁻¹）。

7 土骨架的压缩指数 $C_{2c}^{w_0}$ 及回弹指数 $C_{2s}^{w_0}$ ，应按下式计算：

$$C_{2c}^{w_0} \text{ 或 } C_{2s}^{w_0} = \frac{e_{2,i} - e_{2,i+1}}{\lg p_{vt,i+1} - \lg p_{vt,i}} \quad (14.3.3-6)$$

式中： $C_{2c}^{w_0}$ — 土骨架的压缩指数；

$C_{2s}^{w_0}$ — 土骨架的回弹指数。

8 在常含水率条件下，某一压力范围内饱和度的变化系数 $b_{2v}^{w_0}$ ，应按下式计算：

$$b_{2v}^{w_0} = \frac{S_{r,i} - S_{r,i+1}}{p_{vt,i+1} - p_{vt,i}} \times 10 \quad (14.3.3-7)$$

式中： $b_{2v}^{w_0}$ — 在常含水率条件下，某一压力范围内饱和度的变化系数（MPa⁻¹）。

14.4.4 以各级压力下稳定后的孔隙比为纵坐标，单位压力为横坐标，绘制孔隙比与单

位压力的关系曲线。

14.4.5 以各级压力下稳定后的饱和度为纵坐标，单位压力为横坐标，绘制饱和度与单位压力的关系曲线。

14.4.6 通过孔隙比与单位压力的关系曲线，确定当前试验温度与含水率下的试样屈服压力，确定方法应符合本标准第 5.5.10 条的规定。

14.4.7 控制温度和含水率为常数的侧限压缩试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 14.2（一）、（二）、（三）的规定。

附录 E 表 14.2 （一） 控制温度和含水率为常数侧限压缩试验记录表

任务单号				试验者						
试样编号				计算者						
试验日期				校核者						
试样说明										
仪器名称及编号										
1. 试样含水率										
试样情况	盒号	盒质量 (g)	盒加湿土质量 (g)	盒加干土质量 (g)	含水率 (%)	平均含水率 (%)				
试验前										
试验后										
4. 试样孔隙比与饱和度										
试样情况	环刀质量 (g)	环刀加土质量 (g)	试样面积 (cm²)	试样高度 (cm)	试样质量 (g)	试样体积 (cm³)	干密度 (g/cm³)	土粒相对密度	孔隙比	饱和度 (%)
试验前										
试验后										

附录 E 表 14.2 （二） 控制温度和含水率为常数侧限压缩试验记录表

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				
变形量表初读数（mm）		温度传感器初读数（℃）		
1. 升温至预定的温度（___℃）				
测定时间（d h min）	经过时间（d h min）	变形量表读数（mm）	温度传感器读数（℃）	
2. 施加设定的各级压力				
压力（kPa）	测定时间（d h min）	经过时间（d h min）	变形量表读数（mm）	温度传感器读数（℃）

附录 E 表 14.2 （三） 控制温度和含水率为常数侧限压缩试验记录表

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							
压力 (kPa)	孔隙比 $e_{2,i}$	饱和度 $S_{r2,i}$ (%)	压缩系数 $\alpha_{2v}^{w_0}$ (MPa ⁻¹)	压缩模量 $E_{2s}^{w_0}$ (MPa)	体积压缩系数 $m_{2v}^{w_0}$ (MPa ⁻¹)	压缩指数 $C_{2c}^{w_0}$	饱和度变化系数 $b_{2v}^{w_0}$ (MPa ⁻¹)

14.5 控制温度和净竖向压力为常数的广义持水特性试验

14.5.1 根据需要，切取原状土试样或制备给定密度与含水率的扰动土试样。制备方法应按现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T50123 的规定执行。

14.5.2 宜对试样进行饱和，饱和方法应按现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T50123 的规定执行。

【条文说明】：14.5.2 本标准的广义持水特性试验，主要是针对主干燥段，即从饱和状态开始逐级增加吸力，故需对试样进行饱和。

14.5.3 控制温度和净竖向压力为常数的广义持水特性试验，应按下列步骤进行：

1 试样安装应按本标准 14.3.3 条第 1 款、第 2 款的规定进行。

2 一次连续或分级施加预定的净竖向压力，每隔 1h 记录竖向变形量、排水量及温度传感器读数 1 次，直至竖向变形量和排水量均达到稳定。稳定标准是：在连续 2h 内，竖向变形量不超过 0.01 mm，且排水量不超过 12 mm³。

3 启动加热装置，升温至预定的温度，每隔 1h 记录竖向变形量、排水量及温度传感器读数 1 次，直至三者均达到稳定。竖向变形量和排水量的稳定标准按本标准第 14.5.3 条第 2 款的规定执行。温度的稳定标准是：在连续 2h 内，温度传感器读数的变化不超过 1℃。

4 逐级施加设定的各级基质吸力，应及时补偿气压力改变对净竖向压力的干扰，保持预定的净竖向压力不变。基质吸力等级应符合本标准第 5.6.3 条第 5 款的规定。每隔 1h 记录竖向变形量、排水量及温度传感器读数 1 次。各级基质吸力下的稳定标准均应按本标准第 14.5.3 条第 2 款的规定执行。

5 需要做增湿试验时，可在某级基质吸力下竖向变形量和排水量均稳定后，逐级减小基质吸力，每隔 1h 记录竖向变形量、排水量及温度传感器读数 1 次，稳定标准应按本标准第 14.5.3 条第 2 款的规定执行。

6 试验过程中高进气值陶土板下的气泡冲洗，应按本标准 14.3.3 条第 7 款的规定进行。

7 试验结束，按本标准 14.3.3 条第 8 款的规定进行试样拆除。测定试验后含水率。

【条文说明】：14.5.3 控制温度和净竖向压力为常数的广义持水特性试验，应按下列步骤进行：

2、3、4 本标准是按照“饱和状态下施加预定的净竖向压力—饱和状态下升温—

在温度、净竖向压力不变条件下逐级增加基质吸力”的路径进行试验方法的规范。可根据需要，将本条第 2、3 款合并进行，即在施加预定净竖向压力的同时进行升温。关于变形与排水量的稳定标准，与本标准第 5.6.3 条是一致的。

6 在高温下，由于气体扩散能力的增强，更易在高进气值陶土板下集聚气泡，故应增加冲洗气泡的频次。

14.5.4 对于控制温度和净竖向压力为常数的广义持水特性试验，各项指标计算应符合下列规定：

- 1 试样的初始孔隙比 e_0 ，应按本标准第 14.3.3 条第 1 款的规定进行计算。
- 2 试样的初始饱和度 S_{r0} ，应按本标准第 14.3.3 条第 2 款的规定进行计算。
- 3 各级基质吸力下稳定后的孔隙比 $e_{3,i}$ ，应按下式计算：

$$e_{3,i} = e_0 - (1+e_0) \frac{\Delta h_{p0} + \Delta h_{pT} + \sum \Delta h_{si}}{h_0} \quad (14.5.4-1)$$

式中： $e_{3,i}$ — 某级基质吸力下稳定后的孔隙比；

Δh_{p0} — 施加预定的净竖向压力引起的试样高度变形量（cm）；

Δh_{pT} — 在净竖向压力不变条件下升温引起的试样高度变形量（cm）；

$\sum \Delta h_{si}$ — 某级基质吸力下稳定后，基质吸力变化引起的试样高度总变形量（cm）；

- 4 各级基质吸力下稳定后的含水率 $w_{3,i}$ ，应按下式计算：

$$w_{3,i} = w_0 - \frac{100\rho_w(\Delta V_{p0}^w + \Delta V_{3T}^w + \sum \Delta V_{si}^w)}{\rho_{d0}V_0} \quad (14.5.4-2)$$

式中： $w_{3,i}$ — 某级基质吸力下稳定后的含水率（%）；

ΔV_{p0}^w — 施加预定的净竖向压力引起的试样排水量（cm³）；

ΔV_{3T}^w — 在净竖向压力不变条件下升温引起的试样排水量（cm³）；

$\sum \Delta V_{si}^w$ — 某级基质吸力下稳定后，基质吸力变化引起的试样总排水量（cm³）。

- 5 各级基质吸力下稳定后的饱和度 $S_{r3,i}$ ，应按下式计算：

$$S_{r3,i} = \frac{G_s w_{3i}}{e_{3,i}} \quad (14.5.4-3)$$

式中： $S_{r3,i}$ — 某级基质吸力下稳定后的饱和度（%）。

14.5.5 以各级基质吸力下稳定后的孔隙比为纵坐标，基质吸力为横坐标，绘制孔隙比与基质吸力的关系曲线。

14.5.6 以各级基质吸力下稳定后的含水率为纵坐标，基质吸力为横坐标，绘制含水率与基质吸力的关系曲线。

14.5.7 以各级基质吸力下稳定后的饱和度为纵坐标，基质吸力为横坐标，绘制饱和度与基质吸力的关系曲线。

14.5.8 控制温度和净竖向压力为常数的广义持水特性试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 14.3（一）、（二）、（三）的规定。

附录 E 表 14.3 （一）控制温度和净竖向压力为常数的广义持水特性试验记录表

任务单号				试验者						
试样编号				计算者						
试验日期				校核者						
试样说明										
仪器名称及编号										
1. 试样含水率										
试样情况	盒号	盒质量 (g)	盒加湿土质量 (g)	盒加干土质量 (g)	含水率 (%)	平均含水率 (%)				
试验前										
试验后										
5. 试样孔隙比与饱和度										
试样情况	环刀质量 (g)	环刀加土质量 (g)	试样面积 (cm ²)	试样高度 (cm)	试样质量 (g)	试样体积 (cm ³)	干密度 (g/cm ³)	土粒相对密度	孔隙比	饱和度 (%)
试验前										
试验后										

附录 E 表 14.3 (二) 控制温度和净竖向压力为常数的广义持水特性试验记录表

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							
变形量表初读数 (mm)		排水量表初读数 (mm)		温度传感器初读数 (°C)			
1. 施加预定的净竖向压力 (___kPa)							
测定时间 (d h min)	经过时间 (d h min)		变形量表读数 (mm)	排水量表读数 (mm)	温度传感器读数 (°C)		
2. 升温至预定的温度 (___°C)							
测定时间 (d h min)	经过时间 (d h min)		变形量表读数 (mm)	排水量表读数 (mm)	温度传感器读数 (°C)		
3. 施加设定的各级基质吸力							
基质吸力 (kPa)	测定时间 (d h min)	经过时间 (d h min)	变形量表读数 (mm)	排水量表读数 (mm)	温度传感器读数 (°C)		

附录 E 表 14.3（三） 控制温度和净竖向压力为常数的广义持水特性试验记录表

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			
基质吸力（kPa）	孔隙比 $e_{3,i}$	含水率 $w_{3,i}$ （%）	饱和度 $S_{r3,i}$ （%）

15 温控三轴试验

15.1 一般规定

15.1.1 本试验方法适用于各种非饱和土细粒土，如黄土、膨胀土、膨润土等。

15.1.2 应用温控三轴仪主要做以下 4 种类型，应根据工作要求分别采用：

- 1 控制温度和基质吸力为常数的各向等压固结试验；
- 2 控制温度、基质吸力和净围压等于常数的固结排水剪切试验；
- 3 控制温度和净围压等于常数的不固结排气不排水剪切试验（试验全过程气压为零，不测孔隙水压力）。
- 4 控制温度和净围压等于常数、基质吸力逐步增大的广义持水特性试验。

本标准暂只考虑常规吸力（不超过 1500kPa）的情况。

【条文说明】：15.1.2 应用温控三轴仪主要做以下 4 种类型，应根据工作要求分别采用。温控三轴试验，顾名思义，是在三轴试验的基础上，考虑温度对非饱和土力学特性的影响。本章只考虑最基本、最常用的 4 类温控三轴试验，而不考虑在试验过程中温度变化的试验。

15.1.3 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《土工试验方法标准》（GB/T 50123 — 2019）4.3 节、4.5 节和本标准 3.2 节执行。

15.2 仪器设备与准备工作

15.2.1 本试验所用的温控非饱和土三轴仪，应根据试验吸力的高低分为温控常规吸力非饱和土三轴仪（图 15.2.1-1）和温控高吸力非饱和土三轴仪（图 15.2.1-2），前者用于基质吸力不超过 1500kPa 的土样，后者用于总吸力大于 1500kPa 的土样。二者的区别在于：施加吸力的方式不同，前者提借助高进气值陶土板

用轴平移技术控制试样的基质吸力，后者借助蠕动泵使装在罐中的饱和盐溶液上方的气体和试样中的气体循环流动以控制试样的总吸力。两种温控非饱和土三轴仪均可用压力-体积控制器或步进电机-调压筒及控制系统提供轴向荷载。

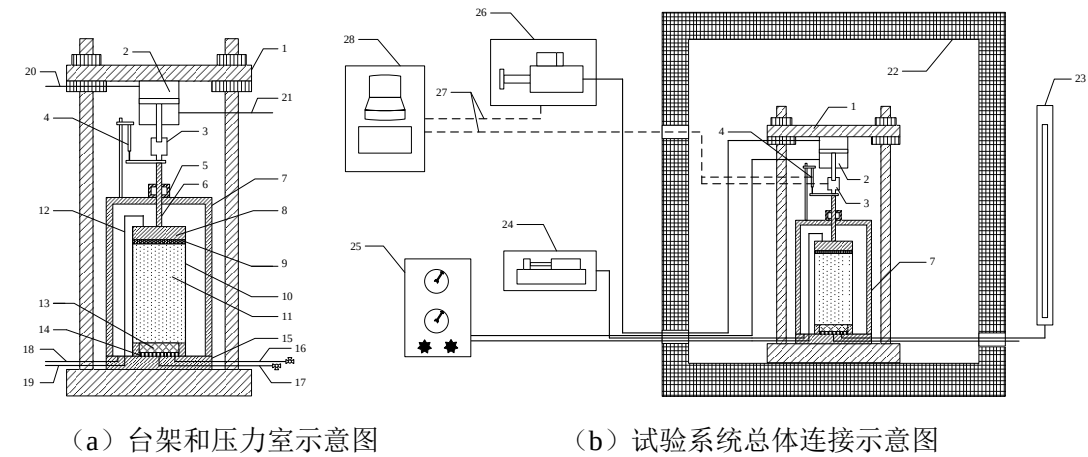


图 15.2.1-1 温控常规吸力非饱和土三轴仪

1-台架；2-竖向加压活塞；3-竖向荷载传感器；4-竖向位移传感器；5-小水室；6-压力室活塞杆；7-压力室；8-试样帽；9-多孔薄不锈钢板；10-乳胶膜；11-试样；12-进气管；13-高进气值陶土板；14-螺旋槽；15-压力室底座；16-螺旋槽水管路；17-螺旋槽水管路 II；18-围压管路（接压力-体积控制器）；19-气压力管路；20-竖向加压活塞进水管路；21-上抬加压活塞气体管路；22-恒温箱；23-排水量测量装置；24-压力-体积控制器（通过围压）；25-气体压力控制柜；26-步进电机（或压力-体积控制器）；27-数据采集线；28-采集控制系统

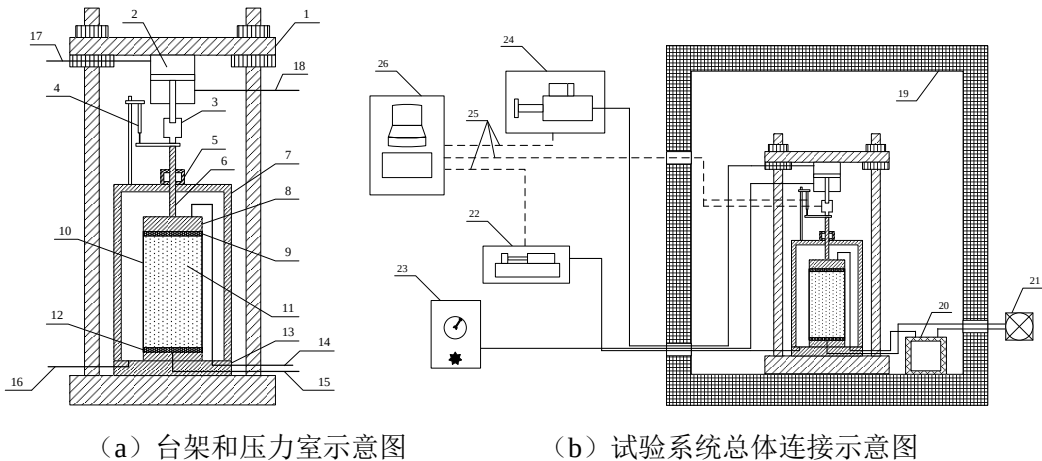


图 15.2.1-2 温控高吸力非饱和土三轴

1-台架； 2-加压活塞； 3-荷载传感器； 4-位移传感器； 5-小水室； 6-压力室活塞杆； 7-压力室； 8-试样帽； 9-上多孔不锈钢板； 10-乳胶膜； 11-试样； 12-下多孔不锈钢板； 13-压力室底座； 14-吸力控制气体循环管路 I； 15-吸力控制气体循环管路 II； 16-围压管路； 17-加压活塞进水管路； 18-上抬加压活塞气体管路； 19-恒温箱； 20-盐溶液罐； 21-蠕动泵； 22-压力-体积控制器（提供围压）； 23-气体压力控制柜； 24-步进电机（或压力-体积控制器）； 25-数据采集线； 26-采集控制系统

15.2.2 温控常规吸力非饱和土三轴仪由具有特殊构造的电热温控箱、合金或不锈钢压力室、周围压力与体变量测设备、孔隙水压力施加设备与量测设备、气压力施加设备与量测设备、轴向荷载传感器与轴向位移传感器、轴向荷载与轴向变形速率控制/数据采集处理系统组成，应符合《土工仪器的基本参数及通用技术条件》GB/T15406 的规定和以下规定：

1 电热温控箱的内部尺寸应不小于长×宽×高 = 80cm×80cm×100cm，内表面应为不锈钢板，加热元件应置于箱体侧面，底板可承受 150 kg 的重量；控制温度的范围应为 0℃ ~ 150℃，温度浮动范围应为 ± 0.1℃；在箱体侧壁应设 3 个直径 2cm 的贯穿孔。

2 压力室须用热膨胀系数的量级为 $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ （20℃时）的合金或不锈钢制作，侧壁厚应不小于 2cm，应能承受不小于 10MPa 的压力；在压力活塞轴套上部应设置一个密封小水室；压力室底座的试样座中必须有螺旋槽，螺旋槽上部应安装高进气值陶土板，高进气值陶土板应用高强度双管胶将其侧面与试样粘结牢固，宜配备进气值为 500kPa 和 1500kPa 两种规格的高进气值陶土板；压力室底座外侧应设 4 个三通阀门，分别与压力室、气压通道、螺旋槽中心和末端相连。

3 周围压力与体变量测设备：应用两台压力-体积控制器分别给试样施加围压和给小水室施加与围压相同的压力，同时用前者量测压力室内水体积变化（据此推知试样体变）；压力-体积控制器的压力分度值应不大于 1kPa，体积分

度值应不大于 1mm^3 。

4 孔隙水压力施加和控制设备：应用一台压力-体积控制器施加和控制水压力，压力-体积控制器的压力分度值应不大于 1kPa ，体积分度值应不大于 1mm^3 。

5 气压力施加-控制设备和量测设备：应用高精度气压阀施加-控制气压力，其分度值为 5kPa ，气压源可由空气压缩机或配备减压装置的高压氮气瓶提供。

6 轴向荷载与轴向变形速率控制/数据采集处理系统：该系统由步进电机及其驱动器、调压筒、数据采集程序系统组成，置于温控箱外面。调压筒由不锈钢制成，与轴向加载活塞之间用不锈钢管连通，内充无气水，不锈钢管内径为 1mm 、外径为 3.2mm ，应能承受 10MPa 的压力。步进电机在微机指令下推动调压筒工作，把调压筒中的水挤进轴向加载荷塞，并对水施加压力。此系统应有不少于 7 档应变速率，以供试验选用；还能通过电机正、反转和自锁达到稳压目的，从而控制试验的轴向荷载为常数。由步进电机、软件和轴向荷载传感器共同控制竖向加载活塞内液压的大小，以达到稳定轴向荷载的目的。故既能控制应变，又能控制应力。如用压力-体积控制器提供轴向荷载，则应通过计算机操控压力-体积控制器，剪切应变速率亦应直接在计算机界面选择。

7 轴向加载活塞和荷载传感器及轴向位移传感器：轴向加载活塞与步进电机的调压筒相通，内装无气水，其横截面积应足够大，以提供足够的轴向荷载。荷载传感器应能长期在水下工作，承受的水压力不低于 1MPa ，工作温度应为 $-20^\circ\text{C} \sim 125^\circ\text{C}$ ；荷载传感器在 20°C 时的精度应为 $\pm 0.1\%\text{F.S.}$ ，温度对其零点的漂移及对线性度的影响均应为 $0.006\%\text{F.S.}/^\circ\text{C}$ 。位移传感器的工作温度应为 $-20 \sim 125^\circ\text{C}$ ，量程应为 $\pm 12.7\text{mm}$ ，非线性应不超过 $\pm 0.25\%\text{F.S.}$ ，在 20°C 时，温度对其零点的漂移及对灵敏度的影响均应小于 $0.018\%\text{F.S.}/^\circ\text{C}$ 。

8 连通压力室和小水室的液压管道、施加孔隙气压力力的管道、孔隙水压力管道、排水管道、施加轴向压力的液压管道、上抬轴向加压活塞的气体管道

均应采用内径 1 mm、外径 3.2mm 的高压不锈钢管，能承受 100 个大气压（大于 10MPa），在 150°C 高温时膨胀变形极小。

9 附属设备：包括重塑土试样制备装置、切土器、原状土分样器、切土盘、承模筒和对开园模，应符合本标准第 9.1.4 条第 6 款的要求。

10 其他附属设备：天平、橡皮膜和多孔薄金属板应分别符合本标准第 9.1.4 条第 7、8、9 款的要求；橡皮膜应能经受 120°C 的高温。

11 排水量测设备：可选用内径 4mm 的有机玻璃管、压力-体积控制器、压差传感器中之一作为排水量测设备，应符合本标准第 5.1.3 条第 6 款的规定。

【条文说明】：15.2.2 由于试验在高于常温环境中持续的时间长（数天以至数周），如何方便地控制温度、如何减小因温度引起的试验误差是必须考虑的问题。为此，采取了一系列措施，包括：特制电热温控箱（把三轴仪放入温控箱是控制温度最方便的方法）；合金或不锈钢压力室；在压力活塞轴套上部设置一个密封小水室（避免因高温导致压力室水分通过轴套被蒸而发造成体变量测误差）、用压力-体积控制器给小水室施加水压力（与压力室的围压同时同步等值施加）；荷载传感器和位移传感器必须选用能在试验温度环境中长时间工作，且其非线性度、温度对零点的漂移及对灵敏度的影响均应达到在常温环境工作的传感器的相应技术参数。

15.2.3 温控高吸力非饱和土三轴仪的吸力控制设备：在压力室的试样座上应放置厚度 3mm 的多孔不锈钢薄板（无需设置螺旋槽和高进气值陶土板）；存放饱和盐溶液的盐溶液罐应用不锈钢制作，宜置于温控箱中，罐中的盐溶液应能提供 2 ~ 500MPa 的吸力；为加快试样湿度达到平衡的时间并控制试样的总吸力为常数，在盐溶液罐和试样之间应设置蠕动泵，蠕动泵应放置在电热温控箱外。

【条文说明】：15.2.3 温控高吸力非饱和土三轴仪的吸力控制设备。由于盐的溶解度、饱和盐溶液上方气体湿度均与温度密切相关，因此，把存放饱和盐溶

液的盐溶液罐放置在温控箱中最好；在盐溶液罐和试样之间设置蠕动泵，以加快试样湿度达到平衡的时间并控制试样的总吸力为常数。

15.2.4 不同温度下的饱和盐溶液上方空气的相对湿度及对应的总吸力应按本标准表 14.2.4 选用。

15.2.5 试验前必须对荷载传感器和位移传感器进行标定。

【条文说明】：15.2.5 试验前必须对荷载传感器和位移传感器进行标定，具体标定方法可参照下述文献[1]的第 3.2 节。

[1] 陈正汉，秦冰. 缓冲/回填材料的热-水-力耦合特性及其应用[M]. 北京：科学出版社，2017。

15.2.6 试验前必须饱和高进气值陶土板，应符合本标准第 9.2.1 条的规定。

15.2.7 在试验前必须标定压力室及其与压力-体积控制器连结的管路在不同温度和压力下的体积变化，应对每一固定的试验温度，按本标准第 9.2.3 条的规定进行；在施加各级围压的同时，必须同步给小水室施加等值的压力。

【条文说明】：15.2.7 在试验前必须标定压力室及其与压力-体积控制器连结的管路在不同温度和压力下的体积变化。应对每一固定的试验温度，按本标准第 9.2.3 条的规定进行；在施加各级围压的同时，必须同步给小水室施加等值的压力。孙发鑫和陈皓曾分别在常温和不同温度下标定进行过标定，可供参考，具体结果分别见表 15.2.7-1 和表 15.2.7-2。

表 15.2.7-1 常温环境下不锈钢压力室和与压力-体积控制器连接管路的体变标定
(孙发鑫，2013)

压力 (kPa)	第 1 次标定体变 (mm ³)	第 2 次标定体变 (mm ³)	体变平均值 (mm ³)
0	0	0	0
10	59	44	51.5
50	232	211	221.5
100	382	390	386.0
200	601	642	621.5
400	950	1030	990.0

800	1600	1710	1655.0
1200	2279	2388	2333.5
1600	2958	3067	3012.5
2000	3669	3728	3698.5
2500	4527	4573	4550.0

表 15.2.7-2 不同温度下不锈钢压力室和与压力-体积控制器连接管路的体变标定
(陈皓, 2015)

围压 (kPa)	20°C时最终体变量 (mm ³)	50°C时最终体变量 (mm ³)	80°C时最终体变量 (mm ³)
0	0	0	0
100	870	656	503
500	1739	1402	1167
1000	2456	1906	1609
2000	3537	2858	2344

15.3 控制温度和基质吸力为常数的各向等压固结试验

15.3.1 本试验所有的仪器设备是温控常规吸力非饱和土三轴仪 (图 15.2.1-1)。

15.3.2 进行本试验前必须先饱和高进气值陶土板, 应按本标准 9.2.1 条进行。

15.3.3 进行本试验前必须标定荷载传感器和位移传感器、压力室及其与压力-体积控制器连结的管路在不同压力下的体积变化, 应分别符合本标准 15.2.5 条和 15.2.7 条的规定。

15.3.4 试样的安装, 应符合本标准第 9.3.4 条的规定; 试样安装完成后, 给试样施加 5kPa 的围压, 同时给小水室施加等值的压力, 待变形稳定后, 记录体变和排水量读数, 作为初始状态。

15.3.5 控制温度和基质吸力为常数的排水各向等压试验, 应按下列步骤进行:

1 给试样施加预定的气压力 (在数值上等于施加的基质吸力, 其值应不低于土样的初始基质吸力), 不宜一步到位, 应按每分钟 25kPa 的速率分多步施加, 必须同时同步等值提高压力室的压力和小水室的压力, 并使压力室压力始终比气压力高 5kPa。

2 在施加基质吸力后，宜按下列时间顺序测记体变和排水量，时间顺序为 5min、10min、30min、1h、2h、4h、6h、8h、10h，至稳定为止。稳定标准是：在两小时内，体变不超过 6mm^3 ，排水量不超过 12mm^3 ，且历时不宜少于 72h。在稳定过程中，每隔 6~8h 冲洗高进气值陶土板和螺旋槽一次。

3 确定试验温度等级，各温度等级宜为 15°C 、 30°C 、 45°C 、 60°C 、 75°C 。

4 设定试验温度，启动温控箱，在温度计达到设定值后，宜按下列时间顺序测记体变和排水量，时间顺序为 10min、20min、40min、1h、2h，至稳定变形和排水稳定为止。稳定标准是：在两小时内，体变不超过 6mm^3 ，排水量不超过 12mm^3 。在稳定过程中，每隔 6~8h 冲洗高进气值陶土板和螺旋槽一次。

5 确定需要给试样施加的各级净各向等值压力（称为净平均应力，用 p 表示，等于施加的室压力与气压力之差），净各向等值压力等级宜为 10、20、30、50、75、100、125、150、175、200、250、300、350、400、450、500、600、800、1000kPa。每级施加的相应的室压力（称为总平均应力，用 p_t 表示）等于每级净平均应力 p 与气压力（用 u_a 表示）之和，即， $p_t = p + u_a$ 。

6 给试样施加第一级净平均应力。对差值超过 25kPa 的相邻两级净平均应力，施加下一级净平均应力时不宜一步到位，应按每分钟 25 kPa 的速率分多步施加，同时同步给小水室施加等值的压力，待达到预定值后，宜按下列时间顺序测记体变和排水量。时间为 5min、10min、30min、1h、2h、4h、6h、8h、10h，至稳定为止。稳定标准是：在两小时内，体变不超过 6mm^3 ，排水量不超过 12mm^3 ，且历时不少于 48h。在稳定过程中，每隔 6~8h 冲洗高进气值陶土板和螺旋槽一次。

7 如需从某一压力下进行卸载，不宜一步卸到位，而应按 -25kPa 的增量，逐步卸载，同时同步给小水室卸除等值的压力，测记每级卸载的体变值和排水量，直到二者达到稳定为止。稳定标准同本标准本条第 6 款。在稳定过程中，

每隔 6~8h 冲洗高进气值陶土板和螺旋槽一次。

8 试验结束，应先卸除压力室的净围压，同时同步给小水室卸除等值的压力，并使剩余的围压高于气压 5kPa，再同时同步等值卸除气压力和剩余围压及小水室的压力；其次，打开温控箱，把温度降到室温；取掉两个排气孔螺钉，放掉压力室中的水，卸除压力室，拆卸试样，量测试样含水率。

【条文说明】：15.3.5 控制温度和基质吸力为常数的排水各向等压试验，应按下列步骤进行：

1 “给试样施加预定的气压力（在数值上等于施加的基质吸力，其值应不低于土样的初始基质吸力），不宜一步到位，应按每分钟 25kPa 的速率分多步施加，必须同时同步等值提高压力室的压力和小水室的压力，并使压力室压力始终比气压力高 5kPa。”这些规定的目的是在给内压力室和小水室加载时尽量保证“同时同步等值”，避免因不同步引起压力室变形和水分蒸发给量测体变造成误差。

2 在施加基质吸力后的稳定标准是：在两小时内，体变不超过 6mm^3 ，排水量不超过 12mm^3 ，且历时不少于 72h。确定此标准的有关依据见本标准条文说明的 5.3.2 条第 4 款和 9.3.5 条第 2 款。

3 确定试验温度等级，各温度等级宜为 15℃、30℃、45℃、60℃、75℃。

当温度超过 80℃后，压力室中水有可能产生气泡，对体变影响大；国外文献中有用硅油作为压力室液体的报道，但使用不便。故本标准只考虑压力室充水的情况，最高试验温度为 75℃。

4 设定试验温度，启动温控箱，在温度计达到设定值后的稳定标准是：在两小时内，体变不超过 6mm^3 ，排水量不超过 12mm^3 。此处对因温度升高引起的变形和排水变化的稳定标准采用与施加吸力或荷载的标准相同。

6 给试样施加第一级净平均应力。稳定标准是：在两小时内，体变不超过

6mm³，排水量不超过 12mm³，且历时不少于 48h。确定此标准的有关依据见本标准条文说明的 9.3.5 条第 4 款。

15.3.6 重新饱和高进气值陶土板，安装下一个试样，改变温度或基质吸力，按照本标准 15.3.5 条第 1~8 款的方法步骤进行试验，直到完成全部试验。

15.3.7 应根据试验结束后量测的试样含水率，对试验过程中的排水量按历时进行校正；同时应把试验过程中量测的体变按本标准 15.2.7 条所测定的标定曲线进行校正。

15.3.8 以试样的初始体积和初始孔隙比为基准，在设定温度和基质吸力共同作用下试样变形稳定后的体应变、孔隙比和比体积，应分别按下列各式计算：

$$\varepsilon_v^{sT} = \frac{\Delta V^{sT}}{V_0} \times 100\% \quad (15.3.8-1)$$

$$e_{sT} = e_0 - (1 + e_0) \varepsilon_v^{sT} \quad (15.3.8-2)$$

$$v_{sT} = 1 + e_{sT} \quad (15.3.8-3)$$

式中： ε_v^{sT} — 在设定温度和基质吸力共同作用下试样变形稳定后的体应变（%）；

ΔV^{sT} — 在设定温度和基质吸力共同作用下试样变形稳定后的体积变化量（应按本标准第 15.2.7 条规定所测定的标定曲线进行校正）（cm³）；

V_0 — 试样的初始体积（cm³）；

e_{sT} — 在设定温度和基质吸力共同作用下试样变形稳定后的孔隙比；

e_0 — 试样的初始孔隙比；

v_{sT} — 在设定温度和基质吸力共同作用下试样变形稳定后的比体积。

15.3.9 以试样的初始体积和初始含水率为基准，在设定温度和基质吸力共同作用下试样排水稳定后的液相体应变和质量含水率，应分别按以下两式计算：

$$\varepsilon_w^{sT} = \frac{\Delta V_w^{sT}}{V_0} \times 100\% \quad (15.3.9-1)$$

$$w_{sT} = w_0 - \frac{1+e_0}{G_s} \varepsilon_w^{sT} \quad (15.3.9-2)$$

式中： ε_w^{sT} — 在设定温度和基质吸力共同作用下试样排水稳定后的液相体应变（%），即试样体积含水率的改变量；

ΔV_w^{sT} — 在设定温度和基质吸力共同作用下试样排水稳定后的排水体积（ cm^3 ）；

w_{sT} — 在设定温度和基质吸力共同作用下试样排水稳定后的质量含水率（%）；

w_0 — 试样的初始质量含水率（%）；

G_s — 土颗粒的相对密度。

15.3.10 以设定温度和基质吸力共同作用下试样体变稳定后的体积和孔隙比为基准，试样在第 i 级净平均应力作用下的体应变、孔隙比和比体积，应按下列各式计算：

$$\varepsilon_{v,i} = \frac{\sum_{j=1}^i \Delta V_j}{V^{sT}} \times 100\% \quad (15.3.10-1)$$

$$e_i = e_{sT} - (1 + e_{sT}) \varepsilon_{v,i} \quad (15.3.10-2)$$

$$v_i = 1 + e_i \quad (15.3.10-3)$$

$$V^{sT} = V_0 - \Delta V^{sT} \quad (15.3.10-4)$$

式中： $\varepsilon_{v,i}$ — 在第 i 级净平均应力作用下试样变形稳定后的体应变；

$\sum_{j=1}^i \Delta V_j$ — 在第 i 级净平均应力作用下试样变形稳定后的体积变化量（不计施加设定温度和基质吸力引起的体积变化量（ cm^3 ），应按本标准第 15.2.7 条所做的标定曲线进行校正）；

V^{sT} — 在设定温度和基质吸力作用下试样变形稳定后的体积（ cm^3 ）；

e_i — 在第 i 级净平均应力作用下试样变形稳定后的孔隙比；

v_i — 在第 i 级净平均应力作用下试样变形稳定后的比体积。

15.3.11 以设定温度和基质吸力作用下试样体变稳定后的体积和含水率为基准，试样在第 i 级净平均应力作用下排水稳定后的液相体应变和质量含水率，应按下列各式计算：

$$\varepsilon_{w,i} = \frac{\sum_{j=1}^i \Delta V_{w,j}}{V_{sT}} \times 100\% \quad (15.3.11-1)$$

$$w_i = w_{sT} - \frac{1 + e_{sT}}{G_s} \varepsilon_{w,i} \quad (15.3.11-2)$$

式中： $\varepsilon_{w,i}$ — 试样在第 i 级净平均应力作用下排水稳定后的液相体应变（%），即试样体积含水率的改变量；

$\sum_{j=1}^i \Delta V_{w,j}$ — 试样在第 i 级净平均应力作用下排水稳定后的总排水量（不计施加基质吸力引起的排水量）（ cm^3 ）；

w_i — 试样在第 i 级净平均应力作用下排水稳定后的质量含水率（%）。

15.3.12 对应于某一设定温度，分别以 ε_v 和 v 为纵坐标，以净平均应力的自然对数（ $\ln p$ ）为横坐标，可绘制各级净平均应力下（包括加载过程和卸载过程）的 $\varepsilon_v - \ln p$ 关系曲线和 $v - \ln p$ 关系曲线。其中， $v - \ln p$ 关系曲线在加卸载过程中可用直线拟合，宜按下两式描述：

$$v = N(s, T) - \lambda(s, T) \ln \frac{p}{p^c} \quad (15.3.12-1)$$

$$v = v_k(s, T) - k \ln p \quad (15.3.12-2)$$

式中： $N(s, T)$ — 对应于设定的温度和基质吸力，描述加载过程的直线之截距；

$\lambda(s, T)$ — 对应于设定的温度和基质吸力，描述加载过程的直线之斜率；

p^c — 参考应力，当 $p = p^c$ 时， $v = N(s, T)$ ；

$v_k(s, T)$ — 对应于设定的温度和基质吸力，描述卸载过程的直线之截距；

k — 对应于设定的温度和基质吸力，描述卸载过程的直线之斜率。

15.3.13 不同设定的温度和基质吸力下的 $v - \ln p$ 关系曲线的直线段斜率，宜按下

式描述：

$$\lambda(s, T) = \lambda(0, T_0) \{ (1 - \gamma) \exp[-\beta s (1 + \frac{T - T_0}{T_0})] + \gamma \} \quad (15.3.13)$$

式中： $\lambda(0, T_0)$ — 饱和土试样在参考温度下的各向等压试验在 $\nu \sim \ln p$ 平面上屈服后的直线段斜率；

T_0 — 参考温度（°C）；

γ — 与试样最大刚度相关的常数；

β — 控制试样刚度随吸力和温度变化增长速率的参数，视为常数。

15.3.14 对应于某一设定温度，分别以 ε_w 和 w 为纵坐标，以净平均应力为横坐标，可绘制各级净平均应力下（包括加载过程和卸载过程）的 $\varepsilon_w - p$ 关系曲线和 $w - p$ 关系曲线。利用式 (15.3.11-2) 可知，两曲线斜率之间的关系应按下式描述：

$$\beta(s, T) = -\frac{1 + e_0}{G_s} K_{wt}(s, T) \quad (15.3.14)$$

式中： $K_{wt}(s, T) = \frac{dp}{d\varepsilon_w}$ — 与净平均应力相关的液相切线体积模量（kPa）， $\varepsilon_w - p$ 关系曲线的斜率，随吸力和温度而变化的参数；

$\beta(s, T)$ — $w - p$ 关系曲线的斜率，随吸力和温度而变化的参数。

15.3.15 试样在设定温度和基质吸力下的初始屈服净平均应力 $p_0(s, T)$ ，应按下列方法确定：

1 分别以 ε_v 、 ν 和 e 为纵坐标，以净平均应力的常用对数（ $\log p$ ）为横坐标，绘制包括加载过程和卸载过程的 $\varepsilon_v - \log p$ 关系曲线、 $\nu - \log p$ 关系曲线和 $e - \log p$ 关系曲线（图 15.3.15）。

2 $\varepsilon_v - \log p$ 曲线可用两段直线近似，两直线的交点对应的净平均应力值即为该试样在设定温度和基质吸力下的初始屈服净平均应力 $p_0(s, T)$ （见图 15.3.15 中的箭头）。

3 类似地，可利用 $\varepsilon_v - \log p$ 关系曲线确定 $p_0(s, T)$ 。

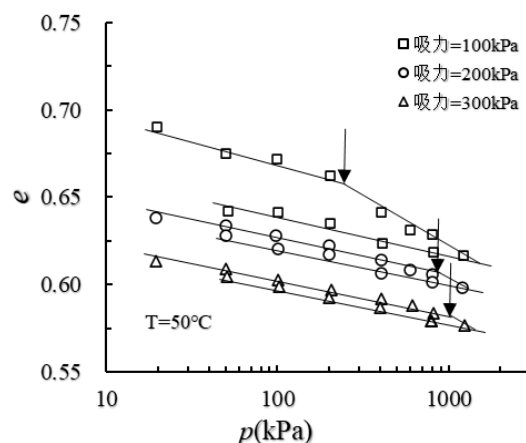


图 15.3.15 某土在控制不同吸力的加卸载过程中的 $e - \log p$ 关系曲线

15.3.16 以基质吸力为纵坐标，以净平均应力为横坐标，绘制设定温度下屈服时基质吸力与屈服净平均应力的关系曲线（图 15.3.16），该曲线称为初始 LC（加载-湿陷）屈服线，宜用下式描述：

$$\frac{p_0(s, T)}{p^c} = \left(\frac{p_{0, T_0}^*}{p^c} \right)^{\frac{\lambda(0, T_0) - \kappa}{\lambda(s, T) - \kappa}} \quad (15.3.16)$$

式中： p_{0, T_0}^* — 饱和土在参考温度下的屈服净平均应力（kPa）。

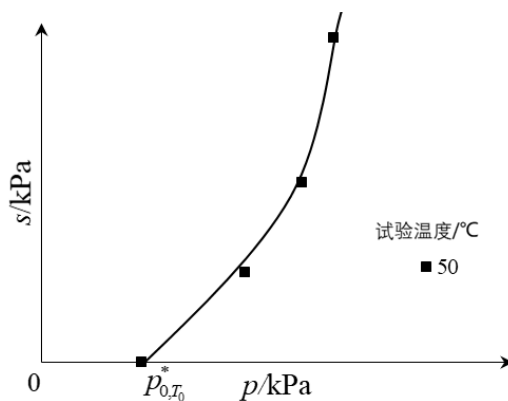


图 15.3.16 设定温度下屈服时基质吸力与屈服净平均应力的关系曲线

【条文说明】：15.3.16 15.3.12、15.3.13 和 15.3.16 把巴塞罗那模型的有关表达式推广到考虑温度影响的情况，以发挥试验资料更大的潜力，为进行非饱和土的热弹塑性变形分析提供方便。

15.3.17 控制温度和基质吸力为常数的各向等压试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 15.1（一）、（二）的规定。

附录 E 表 15.1 (一) 控制温度和基质吸力为常数的各向等压试验记录表

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		土样种类		
土样初始尺寸	直径×高 =	初始干密度(g/cm ³)		
初始质量含水率 (%)		排水量管比例系数	cm ³ / 排水量管 1mm 水柱	
基质吸力 (kPa)		设定温度 (°C)		
试验阶段	在设定温度和基质吸力作用下的固结阶段 (1)	内、外压力室 压力-体积控制器 (PVC)分辨率	压力: 1kPa 体积: 1mm ³	
经历时间	固结阶段 (1) 的体变和排水			
	时间 年 - 月 - 日 - 时 - 分	内 PVC 体变读数 (mm ³)	外 PVC 体变 读数 (mm ³)	排水量管 读数 (mm)
0				
5min				
10min				
30min				
1h				
2h				
4h				
6h				
8h				
10h				
12h				
14h				
16h				
18h				
20h				
22h				
24h				
26h				
28h				
30h				
32h				
34h				
36h				
38h				
40h				
.....				
试样总体变量 (cm ³)				
试样总排水量 (cm ³)				

附录 E 表 15.1 (二) 控制温度和基质吸力为常数的各向等压试验记录表

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		土样种类		
土样初始尺寸	直径×高 =	初始干密度(g/cm ³)		
初始质量含水率 (%)		排水量管比例系数	cm ³ / 排水量管 1mm 水柱	
基质吸力 (kPa)		内、外压力室 压力-体积控制器 (PVC) 分辨率	压力: 1kPa 体积: 1mm ³	
设定温度 (°C)				
试验阶段	各向等压排水固结阶段 (2)			
经历时间	固结阶段 (2) 的体变和排水			
	时间 年 - 月 - 日 - 时 - 分	净各向等压 (kPa)	内 PVC 体变 读数 (mm ³)	排水量管读 数 (mm)
0				
5min				
10min				
30min				
1h				
2h				
4h				
6h				
8h				
10h				
12h				
14h				
16h				
18h				
20h				
22h				
24h				
26h				
28h				
30h				
32h				
34h				
36h				
38h				
40h				
.....				
试样总体变量 (mm ³)				
试样总排水量 (cm ³)				

15.4 控制温度、吸力和净围压都为常数的固结排水剪切试验

15.4.1 本试验所有的仪器设备是温控常规吸力非饱和土三轴仪（图 15.2.1-1）。

15.4.2 进行本试验前必须先饱和高进气值陶土板，应按本标准 9.2.1 条进行。

15.4.3 进行本试验前必须标定荷载传感器和位移传感器、压力室及其与压力-体积控制器连结的管路在不同压力下的体积变化，应分别符合本标准 15.2.5 条和 15.2.7 条的规定。

15.4.4 试样的安装，应符合本标准第 9.3.4 条的规定；试样安装完成后，给试样施加 5kPa 的围压，同时给小水室施加等值的压力，待变形稳定后，记录压力室体变和排水量读数。

15.4.5 本试验的固结阶段，可按本标准的第 15.3.5 条的第 1~6 款进行。为减少试验历时，宜先给试样施加预定的基质吸力和净围压，同时给小水室施加等值的压力，不必待试样变形和排水稳定，紧接着启动温控箱，将温控箱的温度设定为预定值；按下列时间顺序测记体变和排水量：时间为 5min、10min、30min、1h、2h、4h、6h、8h、10h，至稳定为止。稳定标准是：在两小时内，体变不超过 6mm^3 ，排水量不超过 12mm^3 ，且历时不宜少于 72h。在稳定过程中，每隔 6~8h 冲洗高进气值陶土板和螺旋槽一次。

【条文说明】：15.4.5 本试验的固结阶段的稳定标准是：在两小时内，体变不超过 6mm^3 ，排水量不超过 12mm^3 ，且历时不少于 72h。如此规定的理由见本标准条文说明的第 9.4.5 条第 3 款。

15.4.6 试验的剪切阶段，应按下列步骤进行：

1 启动步进电机，选择低速，使轴向荷载传感器与试样帽接触，直到荷载传感器的读数等于压力室的压力与活塞面积的乘积，测记传感器和位移传感器读数，同时测记此时的压力室体变读数和排水读数，将其作为剪切试验的初始值。

2 剪切应变速率宜 $0.0015\%/\text{min} \sim 0.006\%/\text{min}$ 。

3 开始剪切，试样每产生 $0.3\% \sim 0.4\%$ 的轴向应变（或 0.2mm 变形值），测记一次荷载传感器读数、轴向变形值、压力室体变量读数和排水量读数。当轴向应变大于 3% 时，试样每产生 $0.7\% \sim 0.8\%$ 的轴向应变（或 0.5mm 变形值），测记一次。

4 在剪切过程中，每隔 $6 \sim 8\text{h}$ 冲洗高进气值陶土板和螺旋槽一次。

5 当荷载传感器读数出现峰值时，剪切应继续到轴向应变到 $15\% \sim 20\%$ 。

6 如需从某一压力下进行卸载，可让步进电机反转，卸载过程采用的应变速率应与加载过程采用的应变速率相同。在卸载过程中，每隔 $6 \sim 8\text{h}$ 冲洗高进气值陶土板和螺旋槽一次。

7 试验结束，关步进电机，把温度调回到常温，打开温控箱门；用气压力通过上抬加压活塞气体管道把轴向加压活塞顶回原位；同时同步等值卸除压力室的净围压和小水室的压力，并使剩余的围压高于气压 5kPa ，再同时同步等值卸除气压力和剩余围压；取掉两个排气孔螺钉，放掉压力室中的水，卸除压力室，拆卸试样，量测试样含水率。

【条文说明】：15.4.6 剪切应变速率宜 $0.0015\%/\text{min} \sim 0.006\%/\text{min}$ 。理由详见本标准条文说明第 9.4.6 条第 2 款。

15.4.7 重新饱和和高进气值陶土板，安装下一个试样，改变温度、或基质吸力、或净围压，按照本标准 15.4.5 条和 15.4.6 条的方法步骤进行试验，直到完成全部试验。

15.4.8 应根据试验结束后量测的试样质量含水率，对试验过程中的排水量按历时进行校正；同时应把试验过程中量测的体变按本标准 15.2.7 条规定所测定的标定曲线进行校正。

15.4.9 以试样的初始体积和初始孔隙比为基准，试样在设定温度、基质吸力和

净围压的共同作用下固结完成后的体应变、孔隙比、高度、横截面积和体积，应分别按下列各式计算：

$$\varepsilon_{vc} = \frac{\Delta V_c}{V_0} \times 100\% \quad (15.4.9-1)$$

$$e_c = e_0 - (1 + e_0)\varepsilon_{vc} \quad (15.4.9-2)$$

$$h_c = h_0(1 - \varepsilon_{vc})^{1/3} \quad (16.4.9-3)$$

$$A_c = A_0(1 - \varepsilon_{vc})^{2/3} \quad (15.4.9-4)$$

$$V_c = A_c h_c = V_0(1 - \varepsilon_{vc}) = V_0 - \Delta V_c \quad (15.4.9-5)$$

式中： ε_{vc} — 试样在设定温度、基质吸力和净围压的共同作用下固结完成后的体应变（%）；

ΔV_c — 试样在设定温度、基质吸力和净围压的共同作用下固结完成后的体积变化量（ cm^3 ），应按本标准 15.2.7 条所测定的标定曲线进行校正；

V_0 — 试样的初始体积（ cm^3 ）；

e_c — 试样在设定温度、基质吸力和净围压的共同作用下固结完成后的孔隙比；

e_0 — 试样的初始孔隙比；

h_0 — 试样的初始高度（ cm ）；

h_c — 试样在设定温度、基质吸力和净围压的共同作用下固结完成后的
高度（ cm ）；

A_0 — 试样的初始横截面积（ cm^2 ）；

A_c — 试样在设定温度、基质吸力和净围压的共同作用下固结完成后的
横截面积（ cm^2 ）；

V_c — 试样在设定温度、基质吸力和净围压的共同作用下固结完成后的
体积（ cm^3 ）。

15.4.10 以试样的初始体积和初始含水率为基准，试样在设定温度、基质吸力和

净围压的共同作用下固结完成后的液相体应变和质量含水率，应分别按以下两式计算：

$$\varepsilon_{wc} = \frac{\Delta V_{wc}}{V_0} \times 100\% \quad (15.4.10-1)$$

$$w_c = w_0 - \frac{1+e_0}{G_s} \varepsilon_{wc} \quad (15.4.10-2)$$

式中： ε_{wc} — 试样在设定温度、基质吸力和净围压的共同作用下固结完成后的液相体应变（%），亦即试样体积含水率的改变量；

ΔV_{wc} — 试样在设定温度、基质吸力和净围压的共同作用下固结完成后的排水体积（cm³）；

w_c — 试样在设定温度、基质吸力和净围压的共同作用下固结完成后的质量含水率（%）；

w_0 — 试样的初始质量含水率（%）；

G_s — 土颗粒的相对密度。

15.4.11 在排水剪切过程中试样所受到的净围压、净大主应力、净平均应力、偏应力和基质吸力，应用下列各式表示和计算：

$$\sigma_3 = \sigma_{3t} - u_a \quad (15.4.11-1)$$

$$\sigma_1 = \sigma_{1t} - u_a \quad (15.4.11-2)$$

$$p = \sigma_3 + \frac{1}{3}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (15.4.11-3)$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (15.4.11-4)$$

$$s = u_a - u_w \quad (15.4.11-5)$$

式中： σ_3 — 净围压（kPa）；

σ_1 — 净大主应力（kPa）；

σ_{1t} — 总大主应力（kPa）

p — 排水剪切过程中的净平均应力（kPa）；

q — 排水剪切过程中的偏应力应力（kPa）；

s — 基质吸力 (kPa) ;

u_a — 孔隙气压力 (kPa) ;

u_w — 孔隙水压力 (kPa) 。

15.4.12 以固结完成后的试样的尺寸为基准, 排水剪切过程中任一瞬时的试样的轴向应变、横截面积、偏应力数值、体应变、径向应变 (小主应变)、偏应变和孔隙比, 应按下列各式计算:

$$\varepsilon_{li} = \frac{\Delta h_i}{h_c} \times 100\% \quad (15.4.12-1)$$

$$A_i = \frac{V_i}{h_i} = \frac{V_c - \Delta V_i}{h_c - \Delta h_i} \quad (15.4.12-2)$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{F}{A_i} \times 10 \quad (15.4.12-3)$$

$$\varepsilon_{vi} = \frac{\Delta V_i}{V_c} \times 100\% \quad (15.4.12-4)$$

$$\varepsilon_{ri} = \varepsilon_{3i} = \frac{1}{2}(\varepsilon_{vi} - \varepsilon_{li}) \quad (15.4.12-5)$$

$$\varepsilon_{si} = \bar{\varepsilon}_i = \frac{2}{3}(\varepsilon_{li} - \varepsilon_{3i}) \quad (15.4.12-6)$$

$$e_i = e_c - (1 + e_c)\varepsilon_{vi} \quad (15.4.12-7)$$

式中: ε_{li} — 在排水剪切过程中试样的轴向应变 (%) ;

Δh_i — 排水剪切过程中试样的高度变化 (cm) ;

V_i — 试样剪切过程中任一时刻的体积 (cm³) ;

h_i — 试样剪切过程中任一时刻的高度 (cm) ;

A_i — 试样剪切过程中任一时刻的面积 (cm²) ;

ΔV_i — 排水剪切过程中试样任一时刻的体积变化量, 等于内压力室中水的体积变化量与活塞杆进入压力室中的体积之和 (cm³), 因围压不变而不必对体变进行校正; 其中活塞进入压力室的体积等于变形百分表读数与测力计百分表读数之差乘以活塞的横截面积 (cm³) ;

$\sigma_1 - \sigma_3$ — 偏应力，亦称主应力差（kPa）；

F — 轴向荷载传感器读数（N）；

ε_{vi} — 排水剪切过程中试样的体应变（%）；

$\varepsilon_{ri} = \varepsilon_{3i}$ — 排水剪切过程中试样的径向应变或小主应变（%）；

$\varepsilon_{si} = \bar{\varepsilon}_i$ — 排水剪切过程中试样的偏应变（%）；

e_i — 排水剪切过程中试样的孔隙比。

15.4.13 以固结完成后的试样尺寸和物性指标为基准，排水剪切过程中的液相体应变、质量含水率与饱和度，应按下列各式计算：

$$\varepsilon_{wi} = \frac{\Delta V_{wj}}{V_c} \times 100\% \quad (15.4.13-1)$$

$$w_i = w_c - \frac{1+e_c}{G_s} \varepsilon_{wi} \quad (15.4.13-2)$$

$$S_{ri} = \frac{G_s w_i}{e_i} \quad (15.4.13-3)$$

式中： ε_{wi} — 排水剪切过程中试样液相的体应变（%），即试样体积含水率的改变量；

ΔV_{wj} — 排水剪切过程中试样排出的水体积（cm³）；

w_i — 排水剪切过程中试样的质量含水率（%）；

S_{ri} — 排水剪切过程中试样的饱和度（%）。

15.4.14 对应于一定的温度，以偏应力为纵坐标，轴向应变为横坐标，绘制偏应力与轴向应变关系曲线（图 15.4.14）。对有峰值的曲线，取其峰值点作为破坏点；对无峰值的曲线，取 15%轴向应变对应的点作为破坏点。

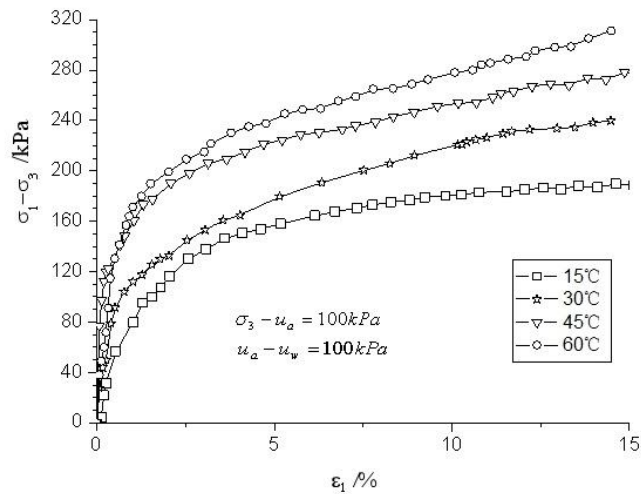


图 15.4.14 某土在控制净围压、吸力和不同温度时三轴剪切的偏应力与轴向应变关系曲线

15.4.15 对应于一定的温度，以体应变为纵坐标，轴向应变为横坐标，绘制体应变与轴向应变关系曲线（图 15.4.15）。

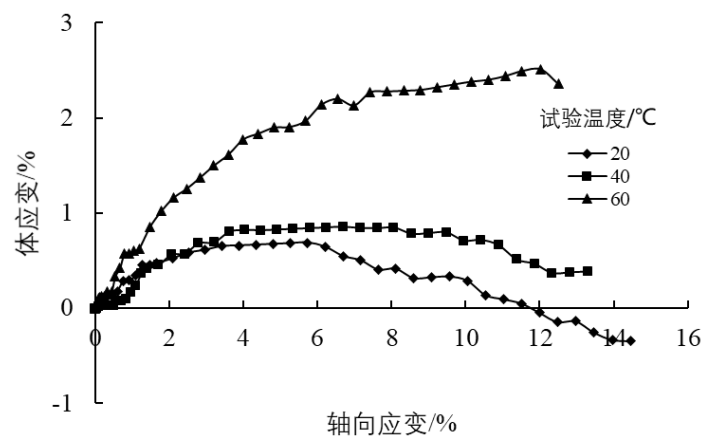


图 15.4.15 某土在控制净围压、吸力和不同温度下三轴剪切的体应变与轴向应变关系曲线

15.4.16 对应于一定的温度，以径向应变为纵坐标，轴向应变为横坐标，绘制径向应变与轴向应变关系曲线（图 15.4.16）。

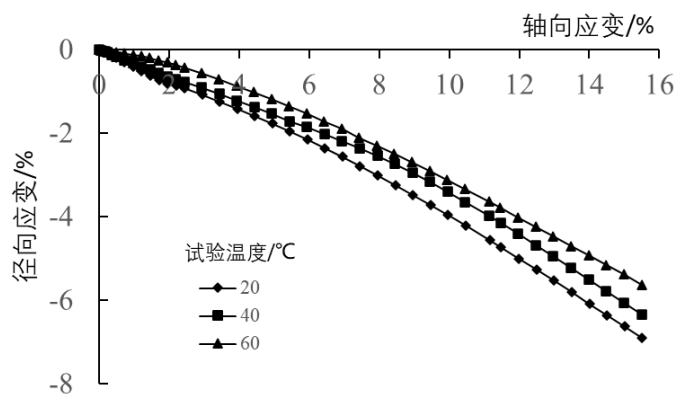


图 15.4.16 某土在控制净围压、吸力和不同温度下

三轴剪切的径向应变与轴向应变关系曲线

15.4.17 对应于一定的温度，以偏应变为纵坐标，轴向应变为横坐标，绘制偏应变与轴向应变关系曲线（图 15.4.17）。

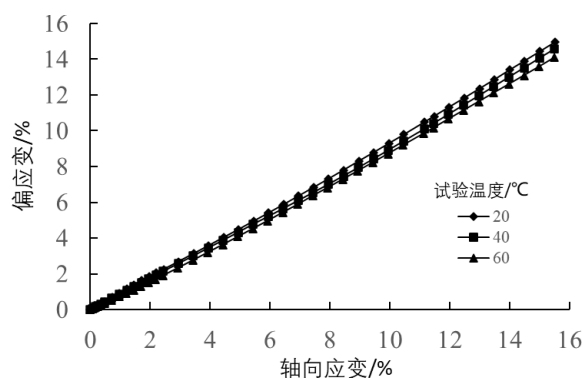


图 15.4.17 偏应变与轴向应变关系曲线

15.4.18 对应于一定的温度，以为液相体应变（或含水率，或饱和度）纵坐标，轴向应变为横坐标，绘制液相体应变与轴向应变关系曲线（图 15.4.18-1）、含水率与轴向应变关系曲线（图 15.4.18-2）。

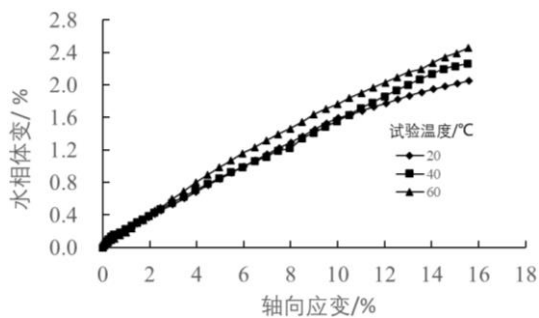


图 15.4.18-1 液相体应变与轴向应变关系曲线

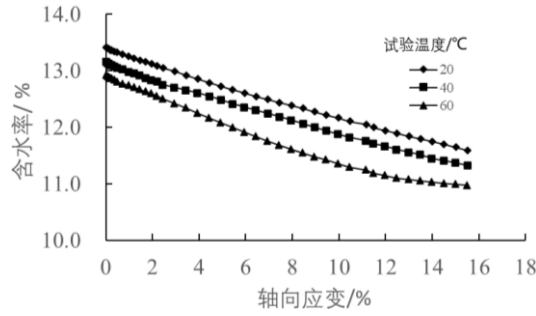


图 15.4.18-2 含水率与轴向应变关系曲线

15.4.19 剪切破坏时的偏应力、净平均应力、基质吸力、净应力摩尔圆的半径和圆心坐标，应按下列各式计算：

$$q_f = (\sigma_1 - \sigma_3)_f \quad (15.4.19-1)$$

$$p_f = (\sigma_{3t} - u_a)_f + \frac{1}{3}(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \sigma_{3f} + \frac{1}{3}(\sigma_1 - \sigma_3)_f \quad (15.4.19-2)$$

$$s_f = (u_a - u_w)_f = (u_a - u_w)_{initial} \quad (15.4.19-3)$$

$$\bar{q} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)_f \quad (15.4.19-4)$$

$$\bar{p} = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)_f \quad (15.4.19-5)$$

式中： p_f — 剪切破坏时的净平均应力（kPa）；

q_f — 剪切破坏时的偏应力应力（kPa）；

s_f — 剪切破坏时的基质吸力（kPa）；

$\bar{p}$ — 剪切破坏时的净应力摩尔园中心坐标（kPa）；

$\bar{q}$ — 剪切破坏时的净应力摩尔园的半径（kPa）。

15.4.20 对应于一定的温度，以 $\bar{q}$ 为纵坐标，以 $\bar{p}$ 为横坐标，绘制破坏时净应力摩尔园的半径和园心坐标的关系曲线（图 15.4.20），可用直线拟合，直线的截距和倾角分别用 $\bar{c}$ 和 $\bar{\phi}$ 表示，则破坏时与破坏面上的净法向应力相关的内摩擦角和总凝聚力，应分别按下式计算：

$$\sin \phi' = \tan \bar{\phi} \quad (15.4.20-1)$$

$$c(c, T) = \frac{\bar{c}}{\cos \bar{\phi}} \quad (15.4.20-2)$$

式中： ϕ' — 与破坏面上的净法向应力相关的内摩擦角（°），不考虑吸力和温度的影响；

$c(s, T)$ — 总凝聚力（kPa），与吸力和温度有关。

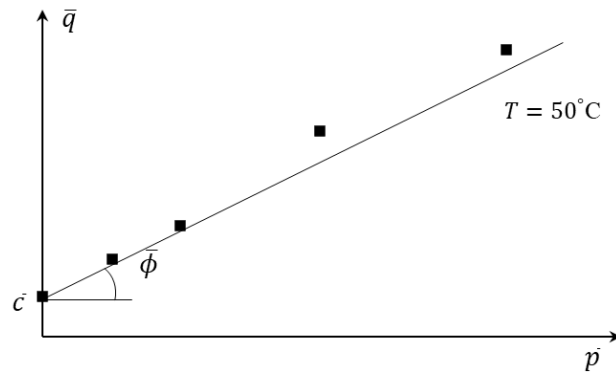


图 15.4.20 破坏时净摩尔圆的半径和园心坐标关系曲线

15.4.21 对应于一定的温度，以破坏时的偏应力为纵坐标，以破坏时的净平均应力为横坐标，绘制破坏时的偏应力和净平均应力的关系曲线（图 15.4.21），可用直线拟合，直线的截距和倾角分别用 ξ 和 ω 表示，则与破坏时破坏面上的净法向应力相关的内摩擦角和总凝聚力，应分别按下式计算：

$$\sin \phi' = \frac{3 \tan \omega}{6 + \tan \omega} \quad (15.4.21-1)$$

$$c = \frac{3 - \sin \phi'}{6 \cos \phi'} \xi \quad (15.4.21-2)$$

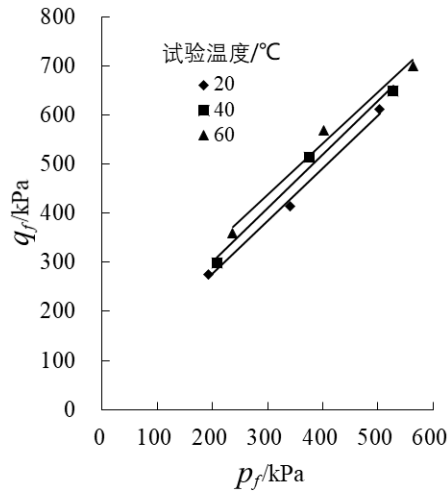


图 15.4.21 某膨胀土在控制净围压、吸力和不同温度下
三轴剪切破坏时的偏应力和净平均应力关系曲线

15.4.22 对应于一定的温度，以总凝聚力为纵坐标，基质吸力为横坐标，绘制总凝聚力与基质吸力关系曲线（图 15.4.22-1），可用直线拟合，直线的截距为 $c(0,T)$ ，倾角为与基质吸力相关的摩擦角 ϕ^b 。进而以 $c(0,T)$ 为纵坐标，以温度为横坐标，绘制 $c(0,T)$ — T 关系曲线（图 15.4.22-2），可用直线拟合，直线的截距和倾角分别为饱和土在常温下的有效凝聚力 c' 和凝聚力随温度增加的系数 k^T 。考虑温度和基质吸力影响的非饱和土的抗剪强度公式宜用下式描述：

$$\tau_{ff} = c' + k^T T + (u_a - u_w)_f \operatorname{tg} \phi^b + (\sigma - u_a)_f \operatorname{tg} \phi' \quad (15.4.22-1)$$

$$c = c' + k^T \cdot T + (u_a - u_w)_f \operatorname{tg} \phi^b \quad (15.4.22-2)$$

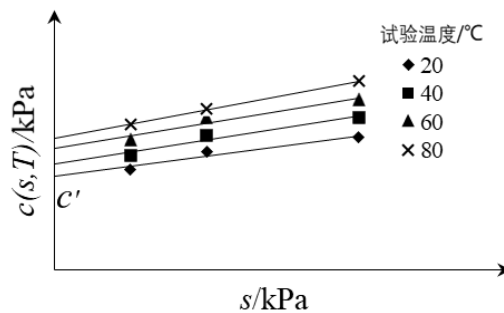


图 15.4.22-1 总凝聚力和基质吸力关系曲线

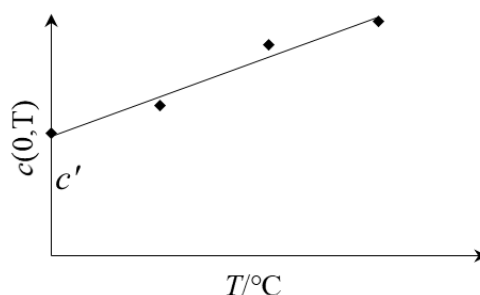


图 15.4.22-2 扣除吸力影响的总凝聚力 and 温度关系曲线

【条文说明】：15.4.22 式 (15.4.22-1) 和式 (15.4.22-2) 是考虑温度影响的非饱和土抗剪强度表达式，其中温度的影响被视为总凝聚力的一部分（与吸力的影响类似），且初步按线性关系考虑。

15.4.23 对应于一定的温度，图 15.4.14 的偏应力与轴向应变关系曲线，宜用下列的双曲线描述：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{a + b\varepsilon_1} \quad (15.4.23-1)$$

$$\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b\varepsilon_1 \quad (15.4.23-2)$$

$$E_i(s, T) = \lim_{\varepsilon_1 \rightarrow 0} \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{d\varepsilon_1} = \frac{1}{a} \quad (15.4.23-3)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} = \lim_{\varepsilon_1 \rightarrow \infty} \frac{\varepsilon_1}{a + b\varepsilon_1} = \frac{1}{b} \quad (15.4.23-4)$$

式中： a — 其几何意义是式 (15.4.23-2) 所示直线（图 15.4.23）的截距，其物理意义是式 (15.4.23-1) 所示双曲线起始斜率（初始切线模量 E_i ）的倒数 (kPa^{-1})，与吸力和温度有关；

b — 其几何意义是式 (15.4.23-2) 所示直线（图 15.4.23）的斜率，其物理意义是式 (15.4.23-1) 所示双曲线渐近线所对应的极限偏应力的倒数 (kPa^{-1})，与吸力和温度有关；

$E_i(s, T)$ ——起始杨氏模量 (kPa)，与吸力和温度有关。

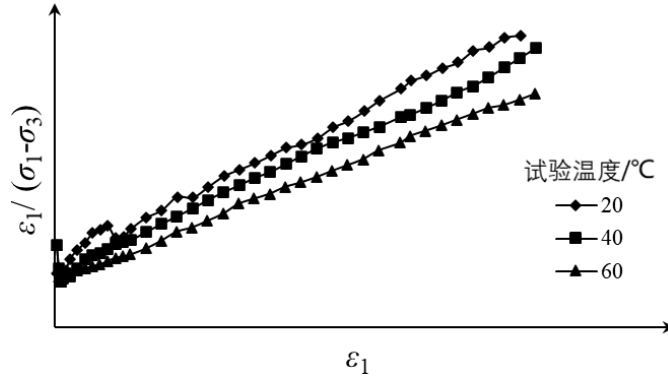


图 15.4.23 在一定净围压、吸力和温度下三轴剪切的 $\frac{\epsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3}$ 与 ϵ_1 关系曲线示意图

15.4.24 对应于一定的温度，以 $\log \frac{E_i}{p_{atm}}$ 为纵坐标， $\log \frac{\sigma_{3t} - u_a}{p_{atm}} = \log \frac{\sigma_3}{p_{atm}}$ 为横坐标，

绘制 $\log \frac{E_i}{p_{atm}}$ 和 $\log \frac{\sigma_3}{p_{atm}}$ 关系曲线（图 15.4.24），可用直线拟合，应按下述描述：

$$E_i(s, T) = \Lambda(s, T) p_{atm} \left(\frac{\sigma_{3t} - u_a}{p_{atm}} \right)^n = \Lambda p_{atm} \left(\frac{\sigma_3}{p_{atm}} \right)^n \quad (15.4.24)$$

式中： $\log \Lambda(s, T)$ —— 图 15.4.24 中直线的截距，与吸力和温度有关，无量纲；

n —— 图 15.4.24 中直线的斜率，与吸力和温度无关，无量纲。

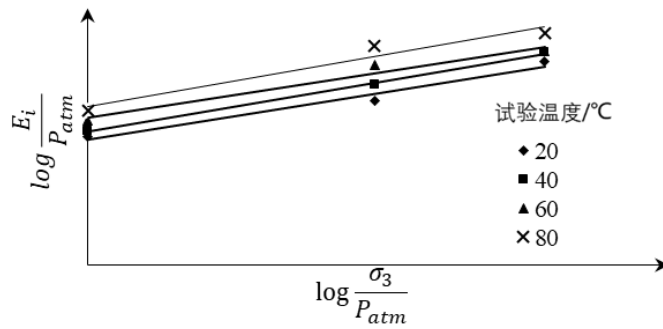


图 15.4.24 $\log \frac{E_i}{p_{atm}}$ 和 $\log \frac{\sigma_3}{p_{atm}}$ 关系曲线示意图

15.4.25 起始模量表达式（15.4.24）中的参数 $\Lambda(s, T)$ 应按以下步骤确定：

1 以 $\Lambda(s, T)$ 为纵坐标，基质吸力为横坐标，绘制 $\Lambda(s, T)$ 和基质吸力关系曲线（图 15.4.25-1），可用直线拟合，宜用下式描述：

$$\Lambda(s, T) = k(0, T) + m_1 \frac{s}{p_{atm}} \quad (15.4.25-1)$$

式中： $k(0, T)$ —— 图 15.4.25-1 所示直线的截距，是基质吸力等于零（饱和土）

时的 $\Lambda(s, T)$ 值, 与温度有关, 无量纲;

m_1 — 图 15.4.25 所示直线的斜率, 无量纲。

2 以 $k(0, T)$ 为纵坐标, 以温度 T 为横坐标, 绘制 $k(0, T)-T$ 关系曲线 (图 15.4.25-2), 可用直线拟合, 宜用下式描述:

$$k(0, T) = k^0 + m_2 T \quad (15.4.25-2)$$

式中: k^0 — 图 15.4.25-2 的截距, 是饱和土在常温下的 $k(0, T)$ 值, 无量纲;

m_2 — 图 15.4.25-2 的斜率, 量纲为 $1/^\circ\text{C}$ 。

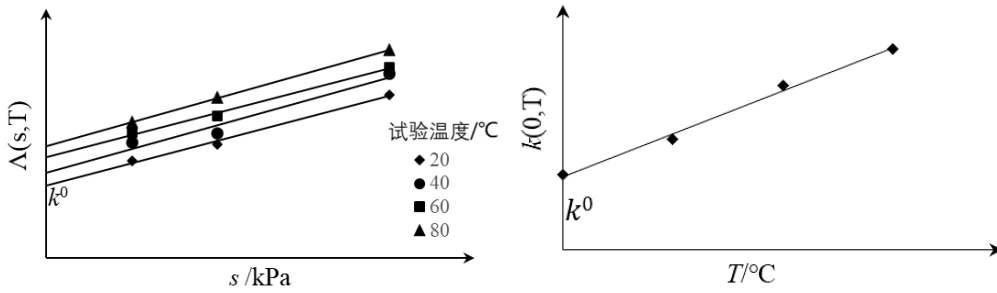


图 15.4.25-1 $\Lambda(s, T)$ 和基质吸力的关系曲线

图 15.4.25-2 $k(0, T)$ 和 T 关系曲线

3 考虑温度和吸力影响的参数 $\Lambda(s, T)$, 应用下式描述:

$$\Lambda(s, T) = k^0 + m_1 \frac{s}{p_{atm}} + m_2 T \quad (15.4.25-3)$$

15.4.26 考虑温度和基质吸力影响的试样的切线杨氏模量, 应按下式计算:

$$\begin{aligned} E_t &= \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{d\varepsilon_1} \\ &= p_{atm} \left[1 - \frac{R_f (1 - \sin \phi') (\sigma_{1t} - \sigma_{3t})}{2c \cos \phi' + 2(\sigma_{3t} - u_a) \sin \phi'} \right]^2 (k^0 + m_1 \frac{s}{p_{atm}} + m_2 T) \left(\frac{\sigma_{3t} - u_a}{p_{atm}} \right)^n \\ &= p_{atm} \left[1 - \frac{R_f (1 - \sin \phi') (\sigma_1 - \sigma_3)}{2(c' + k^T T + s_f \tan \phi^b) \cos \phi' + 2\sigma_3 \sin \phi'} \right]^2 (k^0 + m_1 \frac{s}{p_{atm}} + m_2 T) \left(\frac{\sigma_3}{p_{atm}} \right)^n \end{aligned} \quad (15.4.26)$$

式中: $R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}$ — 破坏比, 暂不考虑基质吸力、围压和温度的影响。

15.4.27 对应于一定的温度、基质吸力和净围压, 试样与净平均应力相关的切线体积模量, 应在应力水平等于 70% 时按下式计算:

$$K_t(s, T) = \frac{1}{3} \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\varepsilon_v} \right]_{L=70\%} \quad (15.4.27)$$

式中： $K_t(s, T) = \frac{dp}{d\varepsilon_v}$ — 与净平均应力相关的试样切线体积模量（kPa），与

吸力和温度有关，暂不考虑净围压的影响；

$$L = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \quad \text{— 应力水平，暂不考虑基质吸力、净围压和温度的影响，无量纲。}$$

响，无量纲。

15.4.28 切线体积模量应按以下步骤确定：

1 以 $K_t(s, T)$ 为纵坐标， s 为横坐标，绘制 $K_t(s, T)$ 和 s 关系曲线（图 15.4.28-1），可用直线拟合，应按下述描述：

$$K_t(s, T) = K_t(0, T) + m_3 s \quad (15.4.28-1)$$

式中： $K_t(0, T)$ — 图 15.4.28-1 中直线的截距，是基质吸力等于零（饱和土）的切线体积模量（kPa），与温度有关，暂不考虑净围压的影响；

m_3 — 图 15.4.28-1 中直线的斜率，无量纲。

2 以 $K_t(0, T)$ 为纵坐标，以 T 为横坐标，绘制 $K_t(0, T) - T$ 关系曲线（图 15.4.28-2），可用直线拟合，应按下式描述：

$$K_t(0, T) = K_t^0 + m_4 (T - T_0) \quad (15.4.28-2)$$

式中： K_t^0 — 图 15.4.28-2 中直线的截距（kPa），是饱和土在常温下的切线体积模量；

m_4 — 图 15.4.28-2 中直线的斜率（kPa / °C）。

3 考虑温度和吸力影响的切线体积模量，应用下式描述：

$$K_t(s, T) = K_t^0 + m_3 s + m_4 (T - T_0) \quad (15.4.28-3)$$

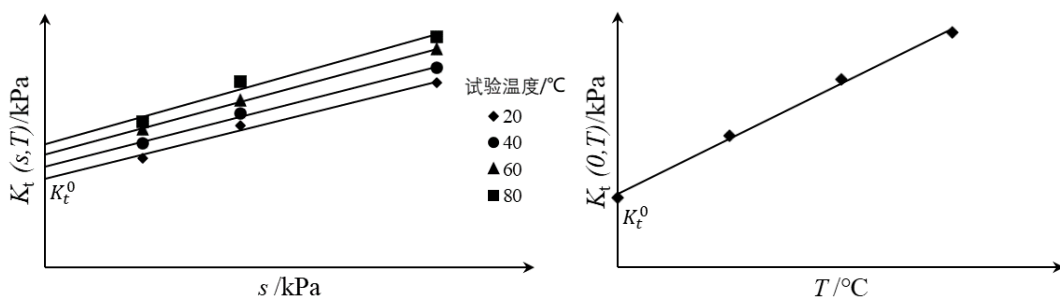


图 15.4.28-1 $K_t(s, T)$ 和 s 关系曲线 图 15.4.28-2 $K_t(0, T)$ 和 T 关系曲线

15.4.29 对应于一定的温度、基质吸力和净围压，液相与净平均应力相关的切线体积模量，应按以下两种方法计算并互相校核：

1 在应力水平等于 70%时按下式计算：

$$K_{wt}(s, T) = \frac{1}{3} \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\varepsilon_w} \right]_{L=70\%} \quad (15.4.29-1)$$

式中： $K_{wt}(s, T) = \frac{dp}{d\varepsilon_w}$ — 与净平均应力相关的液相切线体积模量（kPa），与吸力和温度有关。

2 对于一定的温度，以剪切过程中的含水率为纵坐标，净平均应力为横坐标，绘制含水率与净平均应力关系曲线（图 15.4.29），具有相同基质吸力和不同净围压的一族含水率与净平均应力关系曲线可用一条直线拟合，且不同基质吸力的直线彼此平行，其平均斜率用 $\beta(s, T)$ 表示。把式 (15.4.13-2) 两边对净平均应力求导，解得：

$$\beta(s, T) = -\frac{1+e_c}{G_s} K_{wt}(s, T) \quad (15.4.29-2)$$

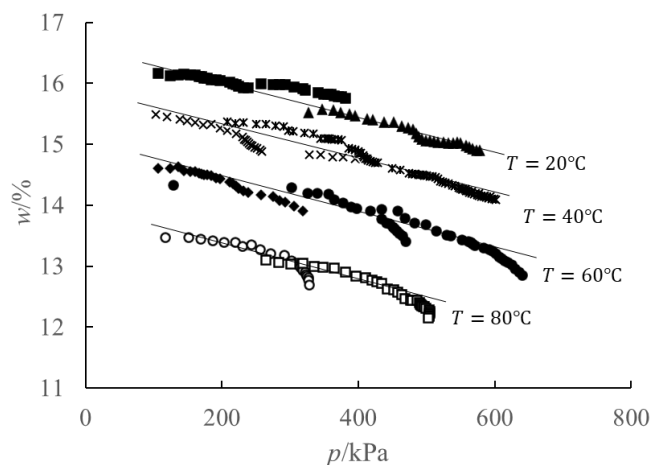


图 15.4.29 某土在一定温度下剪切过程中含水率与净平均应力关系曲线

15.4.30 水相的切线体积模量的具体表达式应按以下步骤确定：

1 以 $K_{wt}(s, T)$ 为纵坐标， s 为横坐标，绘制 $K_{wt}(s, T)$ 和 s 关系曲线（图 9.4.30-1），可用直线拟合，应按下述描述：

$$K_{wt}(s, T) = K_{wt}(0, T) + m_5 s \quad (15.4.30-1)$$

式中： $K_{wt}(0, T)$ — 图 15.4.30-1 中直线的截距，是基质吸力等于零（饱和土）的液相与净平均应力相关的切线体积模量（kPa），或许与温度和净围压有关；

m_5 — 图 9.4.30-1 中直线的斜率，无量纲。

2 以 $K_{wt}(0, T)$ 为纵坐标，以 T 为横坐标，绘制 $K_{wt}(0, T)$ 和 T 关系曲线（图 15.4.30-2），可用直线拟合，应按下式描述：

$$K_{wt}(0, T) = K_{wt}^0 + m_6(T - T_0) \quad (15.4.30-2)$$

式中： K_{wt}^0 — 图 15.4.30-2 中直线的截距（kPa），相应于饱和土在常温下的液相切线体积模量；

m_6 — 图 15.4.30-2 中直线的斜率（kPa / °C）。

3 考虑温度和吸力影响的水相切线体积模量应用下式描述：

$$K_{wt}(s, T) = K_{wt}^0 + m_5 s + m_6(T - T_0) \quad (15.4.30-3)$$

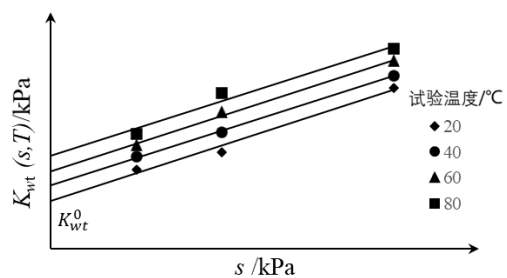


图 15.4.30-1 绘制 k_{wt} 和 s 关系曲线

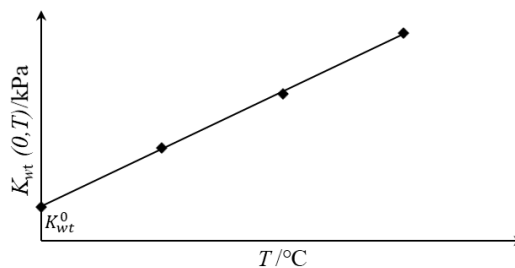


图 15.4.30-2 $k_{wt}(0, T)$ 和 T 关系

【条文说明】：15.4.30 15.4.23 ~ 15.4.30 是把非饱和土的增量非线性报告模型推广到考虑温度影响的情况。

15.4.31 控制温度、基质吸力和净围压为常数的固结排水剪切试验的记录格式应符合本标准附 E 表 15.2（一）、（二）的规定。

附录 E 表 15.2 (一) 控制温度、基质吸力和净围压为常数的固结排水剪切试验记录表

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		土样种类		
土样初始尺寸	直径×高 =	初始干密度(g/cm³)		
初始质量含水率 (%)		排水量管比例系数	cm³ / 排水量管 1mm 水柱	
基质吸力 (kPa)		净围压 (kPa)		
设定温度 (°C)		备注		
试验阶段	在设定温度、基质吸力和净围压作用下的固结阶段	内、外压力室 压力-体积控制器 (PVC)分辨率	压力: 1kPa 体积: 1mm³	
经历时间	固结阶段的体变和排水			
	时间 年 - 月 - 日 - 时 - 分	内 PVC 体变读数 (mm³)	外 PVC 体变 读数 (mm³)	排水量管读数 (mm)
0				
5min				
10min				
30min				
1h				
2h				
4h				
6h				
8h				
10h				
12h				
14h				
16h				
18h				
20h				
22h				
24h				
26h				
28h				
30h				
32h				
34h				
36h				
38h				
.....				
试样总体变量 (cm³)				
试样总排水量 (cm³)				

15.5 控制温度和净围压都为常数的不固结排气不排水剪切试验

(试验全过程气压为零, 不测孔隙水压力)

15.5.1 本试验所有的仪器设备是温控常规吸力非饱和土三轴仪(图 15.2.1-1)。

15.5.2 进行本试验无需在试样底座上放置高进气值陶土板, 应在试样底座上依次放置透水石和滤纸, 在试样顶端应依次放置滤纸和透水石, 透水石和滤纸的含水率应与试样的初始含水率相同。

15.5.3 进行本试验前必须标定荷载传感器和位移传感器、压力室及其与压力-体积控制器连结的管路在不同压力下的体积变化, 应分别符合本标准 15.2.5 条和 15.2.7 条的规定。

15.5.4 试样的安装, 应符合本标准第 9.3.4 条的规定。试样安装结束后, 关闭排水阀, 打开排气阀(与大气相通); 同时同步等值给压力室和小水室施加 5kPa 的压力; 设置试验温度, 启动温控箱升温到预定温度。

15.5.5 同时同步等值给压力室和小水室施加压力到预定围压值。

【条文说明】: 15.5.5 同时同步等值给压力室和小水室施加压力到预定围压值。理由见本标准条文说明第 15.3.5 条第 1 款。

15.5.6 试验的剪切阶段, 应按下列步骤进行:

1 启动步进电机, 选择低速, 使轴向荷载传感器与试样帽接触, 直到荷载传感器的读数等于压力室的压力与活塞面积的乘积, 测记传感器和位移传感器读数, 同时测记此时的压力室体变读数, 将其作为剪切试验的初始值。

2 剪切应变速粘土宜为每分钟应变 0.05% ~ 0.1%; 粉土为每分钟 0.1% ~ 0.5%。

3 其余步骤按本标准 15.4.6 条的第 3、5、7 款进行。

【条文说明】: 15.5.6 剪切应变速粘土宜为每分钟应变 0.05% ~ 0.1%; 粉土为每分钟 0.1% ~ 0.5%。理由详见本标准条文说明第 9.6.6 条第 2 款。

15.5.7 安装下一个试样，改变温度、围压和含水率中的任何一个，按照本标准第 15.5.5 条和第 15.5.6 条的方法步骤进行试验，直到完成全部试验。

15.5.8 应把试验过程中量测的体变按本标准 15.2.7 条规定所测定的标定曲线进行校正。

15.5.9 试验过程中各物性指标、各应力分量、各应变分量的计算应按本标准第 9.6.7~9.6.9 条和第 9.6.15 条的方法计算。

15.5.10 对设定温度，本试验的各种曲线应按本标准第 9.6.10 ~ 9.6.14 条的方法绘制。

15.5.11 对设定温度，试样破坏时与破坏面上的净法向应力相关的内摩擦角和总凝聚力，应分别按下式本标准的第 9.6.16 条或第 9.6.17 条的方法计算。

15.5.12 由本标准第 15.5.11 条所得强度指标是温度和含水率的函数，应进一步分析其与温度和质量含水率的关系（可采用二元回归分析或两次一元回归分析方法）。

15.5.13 控制温度、基质吸力和净围压为常数的不固结排气不排水剪切试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 15.3 的规定。

附录 E 表 15.3 控制温度、基质吸力和净围压为常数的不固结排气不排水剪切试验记录表

(不測孔隙水压力)

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		土样种类			
土样初始尺寸	直径×高 =	初始干密度(g/cm³)			
初始质量含水率 (%)		排水量管比例系数	cm³ / 排水量管 1mm 水柱		
基质吸力 (kPa)		内、外压力室 压力-体积控制器 (PVC) 分辨率	压力: 1kPa 体积: 1mm³		
净围压 (kPa)					
设定温度 (°C)					
试验阶段		剪切阶段	压力室活塞横截面积 (mm²)		
剪切速率 (mm/min)			测力计率定系数 C(N/0.01mm)		
剪切过程的轴向变形、体变和排水					
时间 月 - 日 - 时 - 分	轴向变形 (0.01mm)	轴向荷载 读数 (N)	内 PVC 体变读数 (mm³)	外 PVC 体变 读数 mm³)	排水量管读数 (mm)
	5				
	10				
	20				
	30				
	40				
	60				
	80				
	100				
	120				
	140				
	160				
					
试样总体变量 (mm3)					
试样总排水量 (cm3)					

15.6 控制温度和净围压等于常数、吸力逐步增大的广义持水特性试验

（即同时考虑温度和净围压影响的广义持水特性试验）

15.6.1 本试验所有的仪器设备是温控常规吸力非饱和土三轴仪（图 15.2.1-1）。

15.6.2 进行本试验前必须先饱和高进气值陶土板，应按本标准 9.2.1 条进行。

15.6.3 进行本试验前必须标定荷载传感器和位移传感器、压力室及其与压力-体积控制器连结的管路在不同压力下的体积变化，应分别符合本标准 15.2.5 条和 15.2.7 条的规定。

15.6.4 本试验的土样应采用饱和土样，土样的饱和方法应按《土工试验方法标准》（GB/T 50123—2019）第 4.6 节的方法进行。

15.6.5 试样的安装，应符合本标准第 9.3.4 条的规定；试样安装完成后，给试样施加 5kPa 的围压，同时给小水室施加等值的压力，待变形稳定后，记录压力室体变和排水量读数。

15.6.6 本试验的第一阶段为固结阶段，应按本标准的第 15.3.5 条的第 1~6 款进行。为减少试验历时，宜先给试样施加预定的净围压，同时给小水室施加等值的压力，不必待试样变形和排水稳定，紧接着启动温控箱，将温控箱的温度设置为预定值；按下列时间顺序测记体变和排水量：时间为 5min、10min、30min、1h、2h、4h、6h、8h、10h，至稳定为止。稳定标准是：在两小时内，体变不超过 6mm^3 ，排水量不超过 12mm^3 ，且历时不少于 48h。在稳定过程中，每隔 6~8h 冲洗高进气值陶土板和螺旋槽一次。测记稳定后的体变和排水量。

【条文说明】：15.6.6 固结阶段的稳定标准是：在两小时内，体变不超过 6mm^3 ，排水量不超过 12mm^3 ，且历时不少于 48h。理由见本标准条文说明第 9.7.6 条第 1 款。

15.6.7 本试验的第二阶段为吸力逐级增大阶段，应按下列步骤进行：

- 1 确定施加的吸力等级，吸力等级宜为 5、10、20、30、50、75、100、

125、150、175、200、250、300、350、400、450、500、600、800、1000kPa。

2 在施加每级吸力后，宜按下列时间顺序测记体变和排水量。时间为 5min、10min、30min、1h、2h、4h、6h、8h、10h，至稳定为止。稳定标准是：在两小时内，体变不超过 6mm^3 ，排水量不超过 12mm^3 ，且历时不宜少于 72h。在稳定过程中，每隔 6~8h 冲洗高进气值陶土板和螺旋槽一次。

3 试验结束，把温度调回到室温，打开温控箱；先卸除吸力，再同时同步等值卸除压力室和小水室的压力；取掉两个排气孔螺钉，放掉压力室中的水，卸除压力室，拆卸试样，量测试样含水率。

【条文说明】：15.6.7 在施加每级吸力后的稳定标准是：在两小时内，体变不超过 6mm^3 ，排水量不超过 12mm^3 ，且历时不少于 72h。理由见本标准条文说明的第 9.3.5 条第 2 款的说明。

15.6.8 重新饱和和高进气值陶土板，安装下一个试样，改温度或净平均应力，按照本标准 9.5.6 条的方法步骤进行试验，直到完成全部试验。

15.6.9 应根据试验结束后量测的试样含水率，对试验过程中的排水量按历时进行校正；同时应把试验过程中量测的体变按本标准 15.2.7 条规定所测定的标定曲线进行校正。

15.6.10 以试样的初始体积和初始孔隙比为基准，在初始温度和净平均应力作用下试样变形稳定后的体应变、孔隙比和比体积，应分别按下列各式计算：

$$\varepsilon_v^{pT} = \frac{\Delta V^{pT}}{V_0} \times 100\% \quad (15.6.10-1)$$

$$e_{pT} = e_0 - (1 + e_0) \varepsilon_v^{pT} \quad (15.6.10-2)$$

$$v_{pT} = 1 + e_{pT} \quad (15.6.10-3)$$

式中： ε_v^{pT} — 在设置温度和净平均应力作用下试样变形稳定后的体应变（%）；

ΔV^{pT} — 在设置温度和净平均应力作用下试样变形稳定后的体积变化量（ cm^3 ）；

V_0 — 试样的初始体积 (cm^3) ;

e_{pT} — 在设置温度和净平均应力作用下试样变形稳定后的孔隙比;

e_0 — 试样的初始孔隙比;

v_{pT} — 在设置温度和净平均应力作用下试样变形稳定后的比体积。

15.6.11 以试样的初始体积和初始含水率为基准, 在设置温度和净平均应力作用下试样排水稳定后的液相体应变和质量含水率, 应分别按以下两式计算:

$$\varepsilon_w^{pT} = \frac{\Delta V_w^{pT}}{V_0} \times 100\% \quad (15.6.11-1)$$

$$w_{pT} = w_0 - \frac{1+e_0}{G_s} \varepsilon_w^{pT} \quad (15.6.11-2)$$

式中: ε_w^{pT} — 在设置温度和净平均应力作用下试样排水稳定后的液相体应变(%), 即试样体积含水率的改变量;

ΔV_w^{pT} — 在设置温度和净平均应力作用下试样排水稳定后的排水体积(cm^3);

w_{pT} — 在设置温度和净平均应力作用下试样排水稳定后的质量含水率(%);

w_0 — 试样的初始含水率(%);

G_s — 土颗粒的相对密度。

9.6.12 以设置温度和净平均应力作用下试样体变稳定后的体积和孔隙比为基准, 试样在第 i 级吸力作用下的体应变、孔隙比和比体积, 应按下列各式计算:

$$\varepsilon_{v,i} = \frac{\sum_{j=1}^i \Delta V_j}{V^{pT}} \times 100\% \quad (15.6.12-1)$$

$$e_i = e_{pT} - (1+e_{pT}) \varepsilon_{v,i} \quad (15.6.12-2)$$

$$v_i = 1 + e_i \quad (15.6.12-3)$$

$$V^{pT} = V_0 - \Delta V^{pT} \quad (15.6.12-4)$$

式中： $\varepsilon_{v,i}$ — 在第 i 级吸力作用下试样变形稳定后的体应变；

$\sum_{j=1}^i \Delta V_j$ — 在第 i 级吸力作用下试样变形稳定后的体积变化量 (cm^3)；

V^{pT} — 在设置温度和净平均应力作用下试样变形稳定后的体积 (cm^3)；

e_i — 在第 i 级吸力作用下试样变形稳定后的孔隙比；

v_i — 在第 i 级吸力作用下试样变形稳定后的比体积。

15.6.13 以设置温度和净平均应力作用下试样体变稳定后的体积和含水率为基准，试样在第 i 级吸力作用下排水稳定后的液相体应变和质量含水率，应按下列各式计算：

$$\varepsilon_{w,i} = \frac{\sum_{j=1}^i \Delta V_{w,j}}{V^{pT}} \times 100\% \quad (15.6.13-1)$$

$$w_i = w_{pT} - \frac{1+e_{pT}}{G_s} \varepsilon_{w,i} \quad (15.6.13-2)$$

式中： $\varepsilon_{w,i}$ — 试样在第 i 级吸力作用下排水稳定后的液相体应变 (%)，即试样体积含水率的改变量：

$\sum_{j=1}^i \Delta V_{w,j}$ — 试样在第 i 级吸力作用下排水稳定后的总排水量（不计施加

基质吸力引起的排水量） (cm^3)：

w_i — 试样在第 i 级吸力作用下排水稳定后的质量含水率 (%)。

15.6.14 分别以 ε_v 和孔隙比 e （或 v ）为纵坐标，以吸力的常用对数 ($\log s$) 为横坐标，绘制各级吸力作用下的 ε_v - $\log s$ 关系曲线（图 15.6.14-1）和 e - $\log s$ 关系曲线（图 15.6.14-2）。

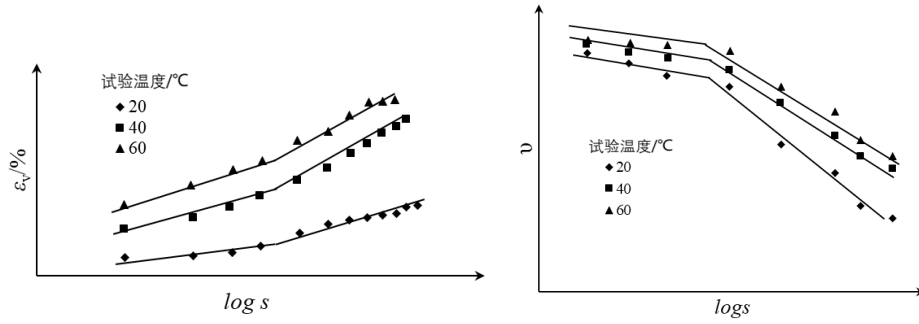


图 15.6.14-1 ε_v - $\log s$ 关系曲线示意图 图 15.6.14-2 e - $\log s$ 关系曲线示意图

15.6.15 以 v 为纵坐标, 以 $\ln(s + p_{atm})$ 为横坐标, 绘制各级基质吸力作用下的 v - $\ln(s + p_{atm})$ 关系曲线, 可用直线拟合, 宜按下式描述:

$$v = N(p, T) - \lambda_s(p, T) \ln(s + p_{atm}) \quad (15.6.15)$$

式中: $N(p, T)$ — 对应于某一净平均应力, 线性拟合吸力加载过程的 v - $\ln(s + p_{atm})$ 关系曲线的直线之截距;

$\lambda_s(p, T)$ — 对应于某一净平均应力, 线性拟合吸力加载过程的 v - $\ln(s + p_{atm})$ 关系曲线的直线之斜率;

15.6.16 分别以 ε_v 、 ε_w 和 w 为纵坐标, 以 $\log \frac{s + p_{atm}}{p_{atm}}$ (或 $\ln \frac{s + p_{atm}}{p_{atm}}$) 为横坐标, 绘制各级基质吸力作用下 $\varepsilon_v - \log \frac{s + p_{atm}}{p_{atm}}$ 的关系曲线 (图 15.6.16-1)、

$\varepsilon_w - \log \frac{s + p_{atm}}{p_{atm}}$ 关系曲线 (图 15.6.16-2) 和 $w - \log \frac{s + p_{atm}}{p_{atm}}$ 关系曲线 (图 15.6.16-

3)。3 张图中的曲线均可用直线拟合, 宜按下列各式描述:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_v^{pT} + \lambda_\varepsilon(p, T) \log \frac{s + p_{atm}}{p_{atm}} \quad (15.6.16-1)$$

$$\varepsilon_w = \varepsilon_w^{pT} + \lambda_w(p, T) \log \frac{s + p_{atm}}{p_{atm}} \quad (15.6.16-2)$$

$$w = w_{pT} - \beta(p, T) \log \frac{s + p_{atm}}{p_{atm}} \quad (15.6.16-3)$$

从式(15.6.13-2)可得:

$$\beta(p, T) = -\frac{1 + e_p}{G_s} \lambda_w(p, T) \quad (15.6.16-4)$$

式中： $\lambda_{\varepsilon}(p,T)$ — 图 15.6.16-1 中直线的斜率；

$\lambda_w(p,T)$ — 图 15.6.16-2 中直线的斜率；

$\beta(p,T)$ — 图 15.6.16-3 中直线的斜率。

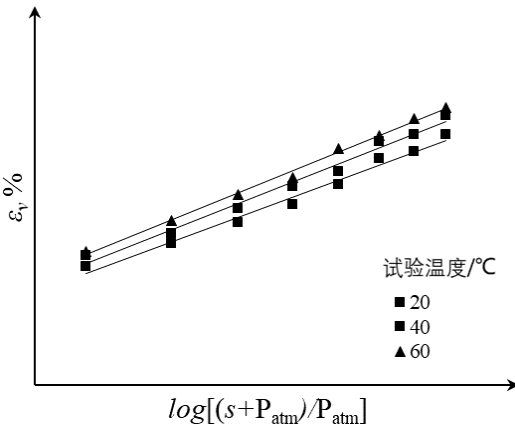


图 15.6.16-1 三轴收缩试验的 $\varepsilon_v - \log \frac{s + p_{atm}}{p_{atm}}$ 关系曲线示意图

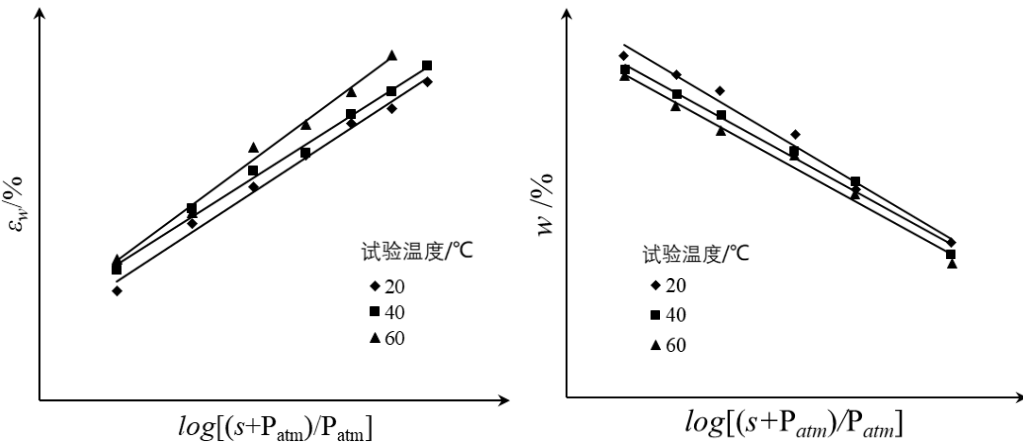


图 15.6.16-2 $\varepsilon_w - \log \frac{s + p_{atm}}{p_{atm}}$ 关系曲线

图 15.6.16-3 $w - \log \frac{s + p_{atm}}{p_{atm}}$ 关系曲线

15.6.17 对 $\lambda_{\varepsilon}(p,T)$ 、 $\lambda_w(p,T)$ 、 $\beta(p,T)$ 进行二元回归分析，或进行两次一元回归分析，可以得到其与净平均应力和温度的关系表达式。

【条文说明】：15.6.17 15.6.15 ～ 15.6.17 目的是完整确定考虑温度影响的非饱和土的增量非线性本构模型的参数。

15.6.18 控制温度和净平均应力为常数而基质吸力逐级增大的广义持水特性试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 15.4（一）、（二）的规定。

附录 E 表 15.4 (一) 控制温度和净平均应力为常数而基质吸力逐级增大的广义持水特性

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		土样种类		
土样初始尺寸	直径×高 =	初始干密度(g/cm ³)		
初始质量含水率 (%)		排水量管比例系数	cm ³ / 排水量管 1mm 水柱	
设定温度 (°C)		净平均应压 (kPa)		
初始基质吸力 kPa)	0	备注		
试验阶段	在设定温度和净平均应力作用下的固结阶段	内、外压力室 压力-体积控制器 (PVC)分辨率	压力: 1kPa 体积: 1mm ³	
经历时间	固结阶段的体变和排水			
	时间 年 - 月 - 日 - 时 - 分	内 PVC 体变数 (mm ³)	外 PVC 体变数 (mm ³)	排水量管读数 (mm)
0				
5min				
10min				
30min				
1h				
2h				
4				
6h				
8h				
10h				
12h				
14h				
16h				
18h				
20h				
22h				
24h				
26h				
28h				
30h				
32h				
34h				
36h				
38h				
40h				
.....				
试样总体变量 (cm ³)				
试样总排水量 (cm ³)				

附录 E 表 15.4 (二) 控制温度和净平均应力为常数而基质吸力逐级增大的广义持水特性

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		土样种类		
土样初始尺寸	直径×高 =	初始干密度(g/cm ³)		
初始质量含水率 (%)		排水量管比例系数	cm ³ / 排水量管 1mm 水柱	
设定温度 (°C)		净平均应压 (kPa)		
初始基质吸力 (kPa)	0	备注		
试验阶段	基质吸力增大阶段	内、外压力室 压力-体积控制器 (PVC)分辨率	压力: 1kPa 体积: 1mm ³	
经历时间	在各级基质吸力作用下的体变和排水			
	时间 年 - 月 - 日 - 时 - 分	基质吸力 (kPa)	内 PVC 体变 数 (mm ³)	排水量管读数 (mm)
0				
5min				
10min				
30min				
1h				
2h				
4h				
6h				
8h				
10h				
12h				
14h				
16h				
18h				
20h				
22h				
24h				
26h				
28h				
30h				
32h				
34h				
36h				
38h				
40h				
.....				
试样总体变量 (cm ³)				
试样总排水量 (cm ³)				

16 蠕变试验

16.1 一般规定

16.1.1 本试验土样应为常含水率或常吸力条件下的黏性土、粉质粘土、粉土、砂土等。

16.1.2 本试验分为控制吸力或含水率条件下的侧限蠕变试验和三轴蠕变试验，目的是测定非饱和土在控制吸力或含水率条件下受一定应力（包括净平均应力和偏应力）作用下的蠕变变形规律和长期强度。

16.1.3 本试验应测定试样的初始吸力以及控制蠕变试验过程中的吸力。

16.1.4 本试验试样的初始吸力宜采用压力板法和轴平移技术量测；试样的持水特性曲线的测定应符合本标准第 4.3 节相关条款之规定。

16.2 仪器设备

16.2.1 本试验仪器包括非饱和土侧限压缩仪、非饱和土三轴蠕变仪。

【条文说明】：16.2.1 本试验仪器压力控制系统和量测系统应满足给试样施加稳定的固结压力和轴向压力，同时又能满足测定应力、应变、体变及孔隙压力的精度要求。

16.2.2 侧限蠕变试验所用仪器设备为非饱和土侧限压缩仪，其示意图见本标准图 5.2.1，由气压室、试样容器、气压设备、加压设备（砝码应力控制式加压）、变形量测设备、孔隙水压力/排水量测设备等部件组成。

【条文说明】：16.2.2 非饱和土侧限压缩仪有关该仪器的细节详及要求见本标准 5.2 节。

16.2.3 三轴蠕变试验所用仪器设备为非饱和土三轴蠕变仪(仪器示意图见图 16.2.3)，由 ①围压控制系统；②基质吸力控制系统；③孔隙水压力控制系统；④轴压系统；⑤压力室；⑥量测及数据采集系统等几部分组成，仪器既可施加

恒定剪切应力又可施加恒定气压。

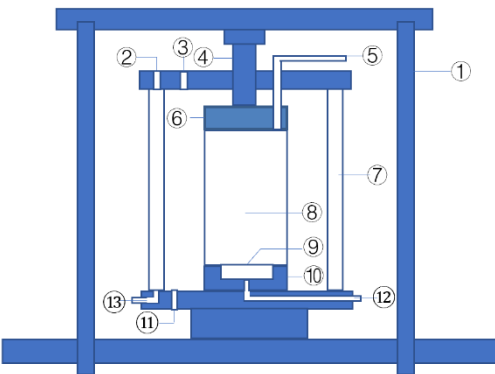


图 16.2.3 非饱和土三轴蠕变试验仪结构示意图

- ①载荷框架；②外压力室排气孔；③内压力室排气孔；④传力杆；⑤孔隙气压力通道；
⑥试样帽；⑦双层压力室；⑧试样；⑨陶土板；⑩试样底座；⑪内压力室围压通道；
⑫孔隙水压力通道外；⑬压力室围压通道

【条文说明】：16.2.3 非饱和土三轴蠕变仪(图 16.2.3)应符合下列规定：

1 仪器设备的检定和校准：参照本标准 5.2 节相关规定对高进气值陶土板进行饱和与检验、加荷设备、测力计及位移计等进行校验，完成对三轴蠕变仪进行变形校正。

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 1 部分：气压式固结仪》GB/T 4935.2 的有关规定。

3 变形量测设备：百分表量程 10mm，分度值为 0.01mm，或最大允许误差应为 $\pm 0.2\%F.S$ 的位移传感器。

4 附属设备：高进气值陶土板（技术要求：进气值、尺寸、孔径与分布），试样制样器（原状削样器、重塑压样器）、刮土刀、钢丝锯、天平、秒表。

16.3 操作步骤

16.3.1 本试验试样制备和保存应符合以下规定：

1 侧限蠕变试验试样尺寸由仪器配套的环刀尺寸确定，宜选用直径 61.8mm，高 20.0mm；三轴蠕变试验试样尺寸根据需要宜选用直径 39.1mm，高 80mm 或 61.8mm，高 124.0mm。

2 原状土试样应符合《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）第 4.5 节相关规定直接由原状土样削制成型。

3 黏性土、粉质粘土、粉土等扰动土试样应符合《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）第 4.4.4 条相关规定压制成型。试样的干密度依据试验要求进行控制，制样时，含水率可按某一给定值进行配制，待水份均匀后，分别用图 16.3.1 所示试样压样器一次性匀速压制而成。

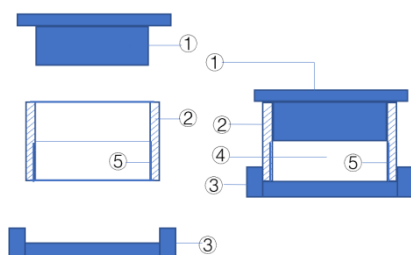


图 16.3.1-1 侧限蠕变试样压样器示意图

① 压样头；②制样圆筒；③底托；④试样；⑤环刀

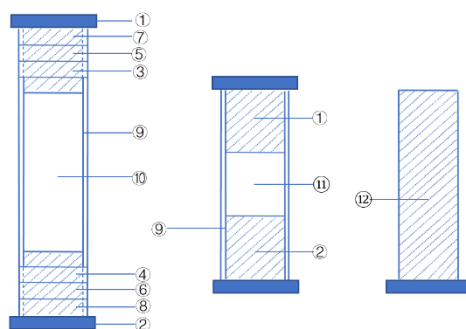


图 16.3.1-2 新型三轴试样压样器示意图

①上压样头；②下压样头；③④⑤⑥⑦⑧开口可拆卸定位环；⑨制样圆筒；⑩土料；

⑪试样；⑫推样头

4 试样含水率控制：制成的试样先放入养护缸内养护数天，然后再采用风干法或水膜转移法将试样的含水率调节到试验要求值，然后将其用保鲜膜包裹，放入密闭养护缸进行养护，待内部水分分布均匀后备用。

5 砂土试样需要在仪器装样过程中直接制备。

【条文说明】：16.3.1 本试验试样制备包括：试样尺寸、制样过程、含水率控制要求、养护要求等。

1 试样尺寸：侧限蠕变试验试样宜选用直径 61.8mm，高 20.0mm；三轴蠕变试验试样根据需要宜选用直径 39.1mm，高 80mm 或 61.8mm，高 124.0mm。

2 制样过程：非饱和原状土试样直接由非饱和原状土样削制成型；非饱和重塑试样的干密度依据试验要求进行控制，制样时，含水率可按某一给定值进行配制，待水份均匀后，分别用图 16.3.1 所示试样压样器一次性匀速压制而成；砂土试样需要在仪器装样过程中直接制备。

3 试样含水率控制及养护要求：制成的试样先放入养护缸内养护数天，然后再采用风干法或水膜转移法将试样的含水率调节到试验要求值，然后将其用保鲜膜包裹，放入密闭养护缸进行养护，待内部水分分布均匀后备用。

16.3.2 试样安装应符合以下规定：

1 侧限蠕变试验试样安装应符合本标准第 5.3.2 条（侧限压缩试验）的规定。

2 三轴蠕变试验试样安装应符合本标准第 9.3.4 条（三轴压缩试验）的规定。

3 试样安装结束后，测记试样孔隙水压力和孔隙气压力初值。

【条文说明】：16.3.2 试样安装同侧限压缩试验或三轴压缩试验，安装结束后，

需测记试样孔隙水压力和孔隙气压力初值。

16.3.3 试样固结应符合以下规定：

1 控制吸力为常数的侧限蠕变试验试样固结应按照本标准第 5.3.2 条施加吸力和净竖向固结压力，记录竖向变形和排水量，直到固结完成。在施加吸力的同时，必须迅速补偿因气压对加压活塞头的顶托作用引起的净竖向压力的减小。固结完成的标准应符合本标准第 5.3.2 条第 4 款和第 7 款的规定，即在 2h 内，竖向变形不超过 0.01mm，排水量不超过 12mm³。在固结过程中，应每隔 6~8h 左右用纯净水冲洗陶土板下面一次，历时 30~40s。固结稳定后测得的数据作为侧限蠕变试验的初始读数。

2 控制吸力为常数的三轴蠕变试验试样固结应按照本标准第 9.3.5 条施加吸力和净围压，记录体变和排水量，直到固结完成。固结完成的标准应符合本标准第 9.3.5 条第 2 款和第 4 款的规定，即在 2h 内，体变不超过 6mm³，排水量不超过 12mm³，且历时不少于 48h。在固结过程中，应每隔 6~8h 左右用纯净水冲洗陶土板下面一次，历时 30~40s。固结稳定后测得的数据作为三轴蠕变试验的初始读数。

3 控制含水率为常数的侧限蠕变试验及三轴蠕变试验试样无需固结，也无须饱和陶土板，但需在陶土板上放置不透水的塑料布或不锈钢薄板，关闭排水阀门。

【条文说明】：16.3.3 试样固结：

1 本试验试样轴向固结压力均通过杠杆式荷载框架由砝码施加。

2 控制吸力为常数的侧限蠕变试验试样固结应按照本标准第 5.3.2 条施加吸力和净竖向固结压力，记录竖向变形和排水量，直到固结完成。

控制吸力为常数的三轴蠕变试验试样固结应按照本标准第 9.3.5 条施加吸力和净围压，记录体变和排水量，直到固结完成。

3 控制含水率为常数的侧限蠕变试验及三轴蠕变试验试样无需固结。

16.3.4 侧限蠕变试验应符合以下规定：

1 控制吸力为常数的侧限蠕变试验，在试验过程中试样孔隙水压力传感器与大气接通，控制基质吸力为常数（即试样所设置的孔隙气压力值），测读试样变形量，并同步测记试样排水量。

2 控制含水率为常数的侧限蠕变试验，试验过程中测读试样蠕变变形量，若试样初始吸力低于 70kPa，可同步测读试样孔隙气压力和孔隙水压力值；若试样初始吸力大于 70kPa，则应对试样内部施加适当的气压力并控制气压力为常数，同步测读试样孔隙水压力值。

3 侧限蠕变试验荷载以砝码形式施加，采取分级加载，净法向应力 p 分 100kPa→200kPa→400kPa→600kPa→800kPa→1000kPa 共 6 级进行施加；每级荷载施加后按普通压缩试验的时间要求（5min、10min、15min、30min、1h、2h、4h、8h、16h、20h）测读试样变形量，24h 以后，每隔 24h 测读试样变形量，当土样 2d 内累计变形量小于 0.01mm（约为 0.05%轴向应变），且排水量不超过 0.01ml（仅适用控制吸力为常数试验，对含水率影响不足万分之一）时，认为本级荷载下侧限蠕变完成，施加下一级荷载；直到最后一级荷载施加并蠕变变形稳定，结束试验。对控制吸力为常数的蠕变试验，在蠕变试验过程中，应每隔 6~8h 左右用纯净水冲洗陶土板下面一次，历时 30~40s。

4 试验结束整理。试验结束后，迅速拆除仪器各部件，取出整块试样，测定试样含水率及干密度。

【条文说明】：16.3.4 控制吸力为常数的侧限蠕变试验，在试验过程中试样孔隙水压力传感器与大气接通，控制基质吸力为常数（即试样所设置的孔隙气压力值），测读试样变形量，并同步测记试样排水量；

控制含水率为常数的侧限蠕变试验，试验过程中测读试样蠕变变形量，若

试样初始吸力低于 70kPa, 可同步测读试样孔隙气压力和孔隙水压力值; 若试样初始吸力大于 70kPa, 则应对试样内部施加适当的气压力并控制气压力为常数, 同步测读试样孔隙水压力值。这是因为初始吸力小于 70kPa 时水不产生汽化现象, 此时试样孔隙水压力值为真实值, 故可以同步测读; 而当初始吸力大于 70kPa 时试样中的水会发生汽化现象, 导致试样孔隙水压力失真, 此时应采取轴平移技术使试样中水不会发生汽化现象, 再进行同步测读。

16.3.5 三轴蠕变试验应符合以下规定:

1 控制吸力为常数的三轴蠕变试验, 在试验过程中试样孔隙水压力传感器与大气接通, 控制基质吸力为常数 (即试样所设置的孔隙气压力值), 测读试样变形量, 并同步测记试样排水量。

2 控制含水率为常数的三轴蠕变试验, 试验过程中测读试样蠕变变形量, 若试样初始吸力低于 70kPa, 可同步测读试样孔隙气压力和孔隙水压力值; 若试样初始吸力大于 70kPa, 则应施加适当的气压力并控制气压力为常数, 同步测读试样孔隙水压力值。

3 三轴蠕变试验荷载以砝码形式施加, 采取分级加载, 净法向应力 p 分 6 级施加, 即 100kPa→200kPa→400kPa→600kPa→800kPa→1000kPa; 按普通压缩试验的时间要求 (5min、10min、15min、30min、1h、2h、4h、8h、16h、20h) 测读试样蠕变变形量, 24h 以后, 每隔 24h 测读试样蠕变变形量, 当试样 2d 内累计变形量小于 0.01mm (约为 0.0125%轴向应变), 且排水量不超过 0.01ml (仅适用控制吸力为常数试验, 对含水率影响不足万分之一) 时, 认为本级荷载下三轴蠕变变形稳定, 施加下一级荷载; 直到最后一级荷载施加并蠕变变形稳定, 结束试验。对控制吸力为常数的蠕变试验, 在蠕变试验过程中, 应每隔 6~8h 左右用纯净水冲洗陶土板下面一次, 历时 30~40s。

4 试验结束整理。试验结束后, 迅速拆除仪器各部件, 取出整块试样, 测

定试样含水率及干密度。

【条文说明】：16.3.5 控制吸力为常数的三轴蠕变试验，在试验过程中试样孔隙水压力传感器与大气接通，控制基质吸力为常数（即试样所设置的孔隙气压力值），测读试样变形量，并同步测记试样排水量；

控制含水率为常数的三轴蠕变试验，试验过程中测读试样蠕变变形量，若试样初始吸力低于 70kPa，可同步测读试样孔隙气压力和孔隙水压力值；若试样初始吸力大于 70kPa，则应对试样内部施加适当的气压力并控制气压力为常数，同步测读试样孔隙水压力值。这是因为初始吸力小于 70kPa 时水不产生汽化现象，此时试样孔隙水压力值为真实值，故可以同步测读；而当初始吸力大于 70kPa 时试样中的水会发生汽化现象，导致试样孔隙水压力失真，此时应采取轴平移技术使试样中水不会发生汽化现象，再进行同步测读。

16.4 计算、制图和记录

16.4.1 本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：

$$e_0 = \frac{\rho_w G_s (1 + 0.01 w_0)}{\rho_0} - 1 \quad (16.4.1-1)$$

式中： e_0 — 初始孔隙比；

ρ_w — 水的密度（g/cm³）；

ρ_0 — 试样的初始密度（g/cm³）；

G_s — 土料相对密度；

w_0 — 试样的初始含水率（%）。

2 第 i 级压力下试样蠕变稳定后的孔隙比 e_i 应按下式计算：

对于侧限蠕变试验：

$$e_i = e_0 - (1 + e_0) \frac{\sum \Delta h_i}{h_0} \quad (16.4.1-2)$$

对于三轴蠕变试验:

$$e_i = e_0 - (1 + e_0) \frac{\sum \Delta v_i}{v_0} \quad (16.4.1-3)$$

式中: e_i — 第 i 级压力下的孔隙比;

e_0 — 初始孔隙比;

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

h_0 — 试样初始高度 (cm);

$\sum \Delta v_i$ — 第 i 级压力下试样的总体积变化量 (cm³);

v_0 — 试样初始体积 (cm³)。

3 第 i 级压力下试样蠕变变形量 Δh_{pi} 应按下式计算:

$$\Delta h_{pi} = h_{p0} - h_{pi} \quad (16.4.1-4)$$

式中: Δh_{pi} — 第 i 级压力下某时刻的试样蠕变变形量 (cm);

h_{p0} — 第 i 级压力下起始试样高度 (cm);

h_{pi} — 第 i 级压力下某时刻试样高度 (cm)。

4 控制含水率为常数的非饱和土不固结蠕变试验试样的基质吸力 s 应按下式计算:

$$s = u_a - u_w \quad (16.4.1-5)$$

式中: s — 试样的基质吸力 (kPa);

u_a — 试样的孔隙气压力 (kPa);

u_w — 试样的孔隙水压力 (kPa)。

5 某一固结应力状态下第 i 级压力三轴蠕变试样的轴向应变 ε_{pi} 应按下式计算:

$$\varepsilon_{pi} = \frac{\Delta h_{pi}}{h_{p0}} = \frac{h_{p0} - h_{pi}}{h_{p0}} = 1 - \frac{h_{pi}}{h_{p0}} \quad 16.4.1-6$$

式中: ε_{pi} — 第 i 级压力下三轴蠕变轴向应变;

Δh_{pi} — 第 i 级压力下某时刻的试样蠕变变形量;

h_{p0} — 第 i 级压力下起始试样高度 (cm) ;

h_{pi} — 第 i 级压力下某时刻试样高度 (cm) 。

【条文说明】：16.4.1 试验资料整理：试验各项指标通过正文 16.4.1 中各式计算得到。

16.4.2 本试验侧限蠕变试验曲线可按下列规定进行绘制：

1 以侧限蠕变变形量 Δh_{pi} 为纵坐标，蠕变历时 t 为横坐标，绘制图 16.4.2-1 非饱和土侧限蠕变变形量与蠕变历时的关系曲线。

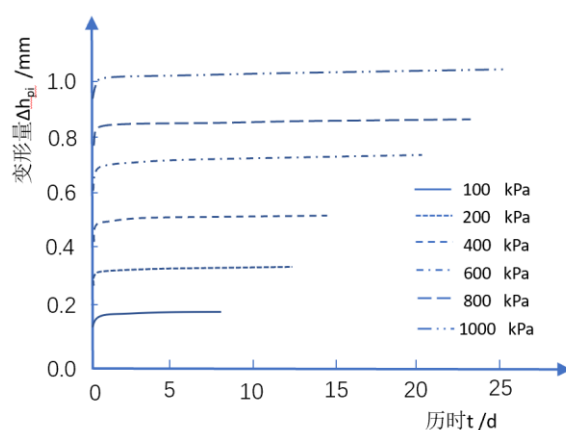


图 16.4.2-1 非饱和土侧限蠕变变形量与蠕变历时的关系曲线

2 以蠕变变形量 Δh_{pi} 的对数为纵坐标，蠕变历时 t 的对数为横坐标，绘制图 16.4.2-2 不同净应力下非饱和土侧限蠕变变形量与蠕变历时的双对数关系曲线。

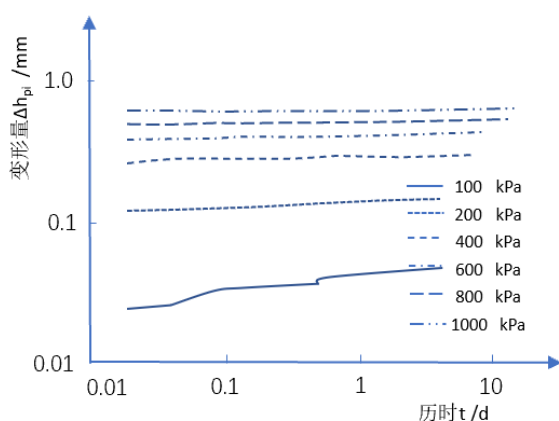


图 16.4.2-2 不同净应力下侧限蠕变变形量与蠕变历时的双对数关系曲线

3 以 24h 侧限蠕变变形量 Δh_{pi} 的对数为纵坐标，蠕变荷载 p 的对数为横坐

标，绘制图 16.4.2-3 非饱和土侧限蠕变变形量与蠕变荷载的 24h 等时曲线。

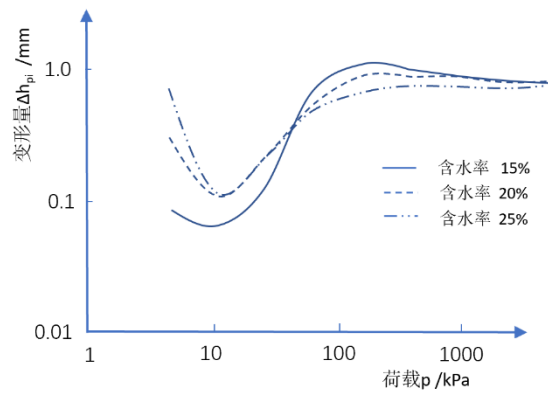


图 16.4.2-3 非饱和土侧限蠕变变形量与蠕变荷载的 24h 等时曲线

【条文说明】：16.4.2 侧限蠕变试验曲线包括：非饱和土侧限蠕变变形量与蠕变历时的关系曲线、不同净应力下非饱和土侧限蠕变变形量与蠕变历时的双对数关系曲线、非饱和土侧限蠕变变形量与蠕变荷载的 24h 等时曲线等。

16.4.3 本试验三轴蠕变试验曲线可按下列规定进行绘制：

1 以三轴蠕变轴向应变 ϵ_{pi} 为纵坐标，蠕变历时 t 为横坐标，绘制图 16.4.3-1 非饱和土三轴蠕变轴向应变与蠕变历时的关系曲线。

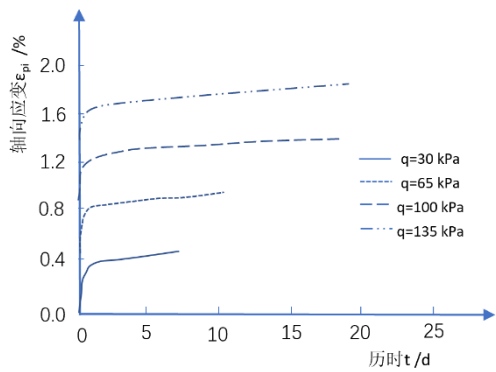


图 16.4.3-1 非饱和土三轴蠕变轴向应变与蠕变历时的关系曲线

2 以三轴蠕变的轴向应变 ϵ_{pi} 为纵坐标，蠕变历时 t 的为横坐标，绘制图 16.4.3-2 非饱和土三轴蠕变破坏时轴向应变与蠕变历时的关系曲线。（注：本处破坏标准采用屈服标准，即各曲线反弯段曲率最大处对应相应受力状态下三轴蠕变破坏时刻）

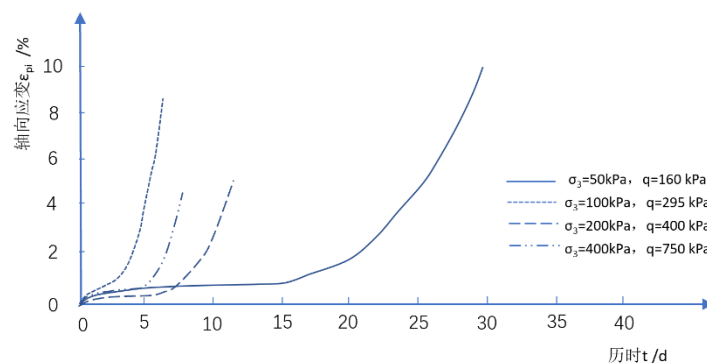


图 16.4.3-2 非饱和土三轴蠕变破坏时轴向应变与蠕变历时的关系曲线

3 以三轴蠕变体应变 ε_{vi} 为纵坐标，蠕变历时 t 的为横坐标，绘制图 16.4.3-3 非饱和土三轴蠕变体应变与蠕变历时的关系曲线。

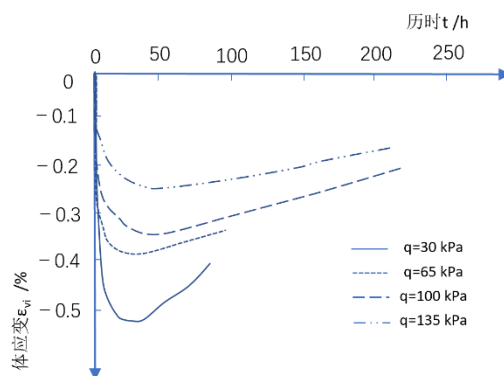


图 16.4.3-3 非饱和土三轴蠕变体应变与蠕变历时的关系曲线

4 以三轴蠕变轴向应变 ε_{pi} 为纵坐标，以偏应力 q 为横坐标，绘制图 16.4.3-4 非饱和土三轴蠕变轴向应变与偏应力等时曲线。

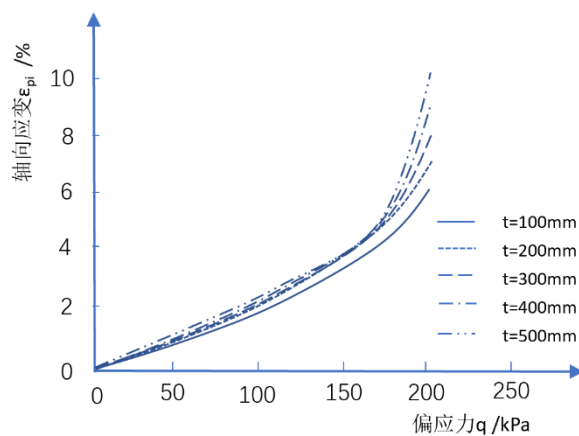


图 16.4.3-4 非饱和土三轴蠕变轴向应变与偏应力等时曲线

5 从试验曲线确定蠕变强度，绘制图 16.4.3-5 非饱和土三轴蠕变长期强度的 Mohr 包络线，据以分析长期强度指标 c_{∞} 、 φ_{∞} 。

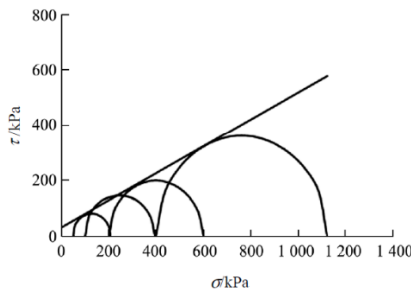


图 16.4.3-5 非饱和土三轴蠕变长期强度 Mohr 包络线

【条文说明】：16.4.3 三轴蠕变试验曲线包括：非饱和土三轴蠕变轴向应变与蠕变历时的关系曲线、非饱和土三轴蠕变破坏时轴向应变与蠕变历时关系曲线、非饱和土三轴蠕变体应变与蠕变历时关系曲线、非饱和土三轴蠕变轴向应变与偏应力等时曲线、非饱和土三轴蠕变长期强度 Mohr 包络线等。

非饱和土三轴蠕变长期强度确定及其 Mohr 包络线绘制说明：

1 本试验三轴蠕变长期强度应用等时应力-应变曲线法求取，首先依据图 16.4.3-1 非饱和土三轴蠕变轴向应变与蠕变历时的关系曲线选取若干时间节点的偏应力-应变数据，绘制成图 16.4.3-4 非饱和土三轴蠕变轴向应变与偏应力等时曲线簇，由曲线簇非线性段曲线的拐点即可得到所试验土样不同工况下的蠕变长期强度；（注：土的蠕变长期强度确定参考《土力学的流变原理》（C.C.维亚洛夫著）第九章及《土的工程性质》（黄文熙主编）第五章）

2 蠕变长期强度确定后，结合试样固结时应力状态，即可绘制一个 Mohr 应力圆，通过不同固结应力状态所对应的 Mohr 应力圆，可进一步得到非饱和三轴蠕变长期强度的 Mohr 包络线，由该线与纵轴的截距和该线的斜率可确定长期强度指标 c_{∞} 和 φ_{∞} 。

16.4.4 本试验侧限蠕变记录表格应符合本标准附录 E 表 16.1、表 16.2 和表 16.3 的规定。

16.4.5 本试验三轴蠕变记录表格应符合本标准附录 E 表 16.4、表 16.5 和表 16.6 的规定。

附录 E 表 16.1 非饱和土侧限蠕变试验记录表 (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 (g)	含水率 w (%)	平均含水率 (%)	
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	
		-	-	-	(1) - (2)	(2) - (3)	(4) / (5) ×100	Σ (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 (g)		试样体积 (cm³)		湿密度 (g/cm³)
	(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									
试样情况			试验前				试验后		
含水率 w (%)									
湿密度 ρ (g/cm³)									
孔隙比 e									
饱和度 S _r (%)									
4.初始基质吸力									
初始孔隙气压力 u _a (kPa)			初始孔隙水压力 u _w (kPa)				初始基质吸力 s (kPa)		

附录 E 表 16.2 控制基质吸力为常数的非饱和土侧限蠕变试验记录表（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					
轴向固结变形量 (cm)			固结后试样高度 (cm)		
经过时间	试样在不同压力下蠕变变形量及试样排水量				
	轴向净压力 ____ (kPa), 基质吸力 s ____ (kPa)				
	时 间	量表读数 (0.01mm)	试样排水量 (cm ³)	孔隙气压力 u_a (kPa)	基质吸力 s (kPa)
0					
5min					
10min					
15min					
30min					
1h					
2h					
4h					
8h					
12h					
16h					
20h					
24h					
48h					
72h					
96h					
120h					
总变形量 (mm)					
仪器变形量 (mm)					
试样总变形量 (mm)					

附录 E 表 16.3 控制含水率为常数的非饱和土侧限不固结蠕变试验记录表（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					
经过时间	试样在不同压力下蠕变变形量及孔隙压力				
	轴向净压力____（kPa）				
	时间	量表读数 （0.01mm）	孔隙气压力 u_a （kPa）	孔隙水压力 u_w （kPa）	基质吸力 s （kPa）
0					
5min					
10min					
15min					
30min					
1h					
2h					
4h					
8h					
12h					
16h					
20h					
24h					
48h					
72h					
96h					
120h					
总变形量（mm）					
仪器变形量（mm）					
试样总变形量（mm）					

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 (g)	含水率 w (%)	平均含水率 (%)	
试验前									
试验后									
2.密度试验									
试样情况	直径 D (cm)	高度 h (cm)	面积 A (cm ²)	体积 (cm ³)	湿土质量 (g)	湿密度 (g/cm ³)	干密度 (g/cm ³)		
试验前									
固结后									
试验后									
3.固结过程									
时间 (min)	量管		体变管		孔隙气压力		孔隙水压力		说明
	读数 (cm ³)	水量变化 (cm ³)	读数 (cm ³)	体变值 (cm ³)	读数 (kPa)	压力值 (kPa)	读数 (kPa)	压力值 (kPa)	
试样变形情况描述									
备 注									

附录 E 表 16.5 控制基质吸力为常数的非饱和土三轴蠕变试验记录表 (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				周围压力 σ_3 (kPa)		
固结比 K_c				轴向固结变形量 (cm)		
固结后试样高度 (cm)				固结后试样面积 (cm ²)		
经过时间	试样在不同压力下三轴蠕变变形量及试样排水量					
	轴向净压力 ____ (kPa), 基质吸力 s ____ (kPa)					
	时 间	量表读数 (0.01mm)	体变读数 (cm ³)	试样排水量 (cm ³)	孔隙气压力 u_a (kPa)	基质吸力 u_s (kPa)
0						
5min						
10min						
15min						
30min						
1h						
2h						
4h						
8h						
12h						
16h						
20h						
24h						
48h						
72h						
96h						
120h						
总变形量 (mm)			备 注			
仪器变形量 (mm)						
试样总变形量 (mm)						

附录 E 表 16.6 控制含水率为常数的非饱和土三轴不固结蠕变试验记录表 (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				周围压力 σ_3 (kPa)		
固结比 K_c				轴向固结变形量 (cm)		
固结后试样高度 (cm)				固结后试样面积 (cm ²)		
经过时间	试样在不同压力下三轴蠕变变形量及孔隙压力					
	轴向净压力 ____ (kPa)					
	时 间	量表读数 (0.01mm)	体变读数 (cm ³)	孔隙气压力 u_a (kPa)	孔隙水压力 u_w (kPa)	基质吸力 u_s (kPa)
0						
5min						
10min						
15min						
30min						
1h						
2h						
4h						
8h						
12h						
16h						
20h						
24h						
48h						
72h						
96h						
120h						
总变形量 (mm)			备 注			
仪器变形量 (mm)						
试样总变形量 (mm)						

17 结构特征试验

17.1 一般规定

17.1.1 本试验方法适用于各种非饱和土,也适用于各种饱和土。

17.1.2 本标准主要做以下 3 种类型, 应根据工作要求分别采用:

1 细观结构演化特征的 CT-三轴试验, 主要试验设备是 CT-三轴仪, 可无损、实时跟踪试验过程, 在扫描的同时, 还给出相应的 CT 数据: 扫描区域的 CT 值 ME 和方差值 SD, ME 反映了扫描区域所有物质点的平均密度, SD 则反映了该区域所有物质点密度的不均匀程度, 二者间接反映了该区域的结构性强弱。

2 微观结构特征试验, 主要试验设备是电子显微镜和环境扫描仪。

3 孔隙结构特征试验, 主要试验设备是压汞装置。

17.2 细观结构演化特征的 CT-三轴试验

17.2.1 本试验所用的设备是 CT-非饱和土三轴试验系统(图 17.2.1), 应符合下列规定:

1 CT 机应为 X 射线卧式螺旋扫描机, 其空间分辨率应为微米—毫米量级, 密度对比分辨率不低于为 0.3% (3HU)。

2 与 CT 机配套的非饱和土三轴仪及台架, 除符合本标准 9.1.4 条和 9.1.5 条的规定外, 必须对 CT 扫描成像的影响很小。

3 非饱和土三轴仪应用压力-体积控制器或步进电机-调压筒及控制系统提供轴向荷载, 既可应变控制, 也可应力控制。

4 压力室应是双层压力室, 压力室底座具有二元结构(图 9.9.2), 应符合本标准 9.9.2 条的规定, 试样的基质吸力宜不超过 1500kPa。

5 浸水设备应采用压力-体积控制器或马氏瓶，既能控制水头，又能实时量测浸水量。

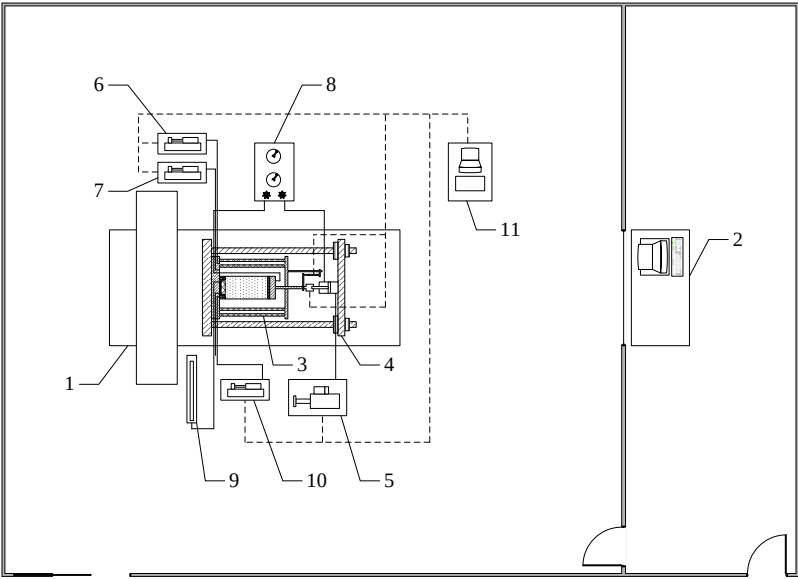


图 17.2.1 CT-非饱和土三轴试验系统

1.CT 机；2.CT 操作台；3. 非饱和土三轴压力室；4. 三轴仪台架；5. 步进电机；6. 压力-体积控制器（与外压力室配套）；7. 压力-体积控制器（与内压力室配套）；8. 气体压力控制柜；9. 排水量测量装置；10. 压力-体积控制器（浸水用）；11. 采集控制系统

【条文说明】：17.2.1 本试验所用的设备是 CT-非饱和土三轴试验系统（图 16.2.1），应符合下列规定：

1 CT 机应为 X 射线卧式螺旋扫描机，其空间分辨率应为微米—毫米量级，密度对比分辨率不低于为 0.3%（3HU）。工业 CT 机的分辨率较高（微米级），但只能在试验开始前或试验结束后对试样进行扫描，不能在试验过程中扫描，因而无法了解试样细观结构的动态演化，故宜采用螺旋扫描机。一般大医院用的 X 射线卧式螺旋扫描机满足要求。

17.2.2 试验前的准备工作、试样安装及各种三轴试验的方法，应符合本标准第 9 章的相关规定；CT 扫描工作应在有关专业人员的指导配合下进行；为获得比较清晰的 CT 图像，宜调整选择合适的窗宽和窗位。

【条文说明】：17.2.2 窗宽是指显示图像时所选用的 CT 值范围，在此范围内的物质按其密度高低从白到黑分为若干个灰阶等级。人的眼睛一般只能分辨出 16 个灰度，若窗宽选定为 80HU，则其可分辨的 CT 数为 $80/16 = 5\text{HU}$ ，即两种物体 CT 数的差别在 5HU 以上即可分辨出来，故窗宽的宽窄直接影响到图像的对比度和清晰度。窗位也称窗中心，是指窗宽上下限 CT 值的平均数。因为不同物质的 CT 值不同，观察其细微差别最好选择该图像的 CT 值为中心（即窗位）进行扫描。窗位的高低影响图像的亮度；窗位低图像亮度高呈白色，窗位高图像亮度低呈黑色。对不同的试验根据视觉要求设定不同的窗宽和窗位。不同的窗宽和窗位不影响试样的 CT 扫描数据。

17.2.3 各向等压固结试验应扫描试样的两个横断面，分别位于试样高度的两个三分点处；宜在试验开始前、各级加载稳定后分别扫描一次，同时测记轴向变形、体积变化和水量变化。

17.2.4 用应变控制式非饱和土三轴仪做控制基质吸力和净围压为常数的固结排水剪切试验在剪切过程应扫描试样的两个横断面，分别位于试样高度的两个三分点处；固结完成后应扫描一次，剪切过程中宜在轴向应变分别达到 3%、6%、9%、12%、15%时各扫描一次，同时测记轴向变形、体积变化和水量变化。

17.2.5 用应力控制式三轴仪做控制吸力和净围压为常数而偏应力逐级增大的固结排水剪切试验，应在固结完成后扫描一次，在各级偏应力作用下变形和排水稳定后分别说明一次，同时测记轴向变形、体积变化和水量变化。

17.2.6 原状黄土在一定应力状态下的湿陷试验（或重塑土样湿化试验）应扫描试样的 3~7 个横断面，分别位于试样高度的四分点和八分点处，对特别关注的部位宜增加扫描断面；浸水过程应分多次完成，在每次浸水开始前应扫描一次，在浸水过程中宜每隔 5~10min 扫描一次，直到变形稳定为止，同时测记轴向变形、体积变化和水量变化。

17.2.7 膨胀土的湿干循环试验，应扫描试样的 3~7 个横断面，分别位于试样高度的四分点和八分点处，对特别关注的部位宜增加扫描断面。增湿过程应分多次完成，在每次增湿开始前应扫描一次，在增湿过程应同时同步等值减少气压力和内外压力室的压力，以使净围压保持不变，每 5~10min 扫描一次，直到变形稳定为止。在减湿过程中应同时同步等值增加气压力和内外压力室的应力，以使净围压保持不变，每 5~10min 扫描一次，直到变形稳定为止。同时测记轴向变形、体积变化和水量变化。

17.2.8 对试样细观结构演化特征的分析，如膨胀土裂隙的发育和闭合、黄土大孔隙的塌陷消失等，应结合宏观变量（如球应力、偏应力、吸力、体应变、偏应变、含水率变化等）和细观数据（ME 和 SD）并借助有关软件（如 Osiris、Matlab 等）进行分析，得到土样的初始屈服应力（图 16.2.8）、细观结构演化特征的数学表达式（演化方程）和土样结构的三维重建图像等；如对重建的土体表面经过透明度处理，则可直观地观察土体内部缺陷的发育过程及最后形成的三维缺陷网络。

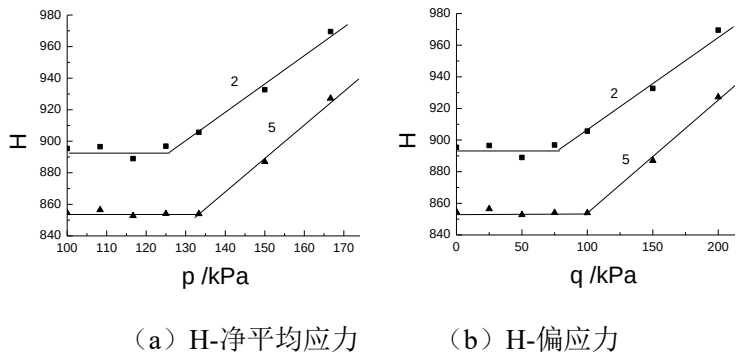


图 17.2.8 某土样在剪切过程中第 2 层和第 5 层的 CT 数均值 H 与应力的关系

【条文说明】：17.2.8 对 CT-三轴试验资料可根据研究工作需要做多方面分析，图 17.2.8 是文献[1]用试验过程中的 CT 数据确定试样的屈服应力，简便易行，值得推广。

[1] 陈正汉, 方祥位, 朱元青, 等. 膨胀土和黄土的细观结构及其演化规律研[J].

岩土力学, 2009, **30**(1): 1–11.

17.2.9 细观结构演化特征的 CT-三轴试验（以控制基质吸力和净围压为常数的固结排水剪切试验的剪切过程为例）记录格式应符合本标准附录 E 表 17.1（一）、（二）的规定。

附录 E 表 17.1 (一) 细观结构演化特征的 CT-三轴试验记录表
(针对控制基质吸力和净围压为常数的固结排水剪切试验)

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			土样种类		
土样初始尺寸	直径×高 =		初始干密度 (g/cm ³)		
初始含水率 (%)			排水量管 比例系数	cm ³ / 排水量管 1mm 水 柱	
基质吸力 (kPa)			内、外压力室 压力-体积控制器 (PVC) 分辨率	压力: 1kPa 体积: 1mm ³	
净围压 (kPa)					
试验阶段	剪切阶段				
测力计率定系数 C(N/0.01mm)			压力室活塞横截面积 (mm ²)		
剪切速率 (mm/min)			试样固结后的 高度 (mm)		
扫描横断面名称及 位置	a 断面—位于试样高度的下三分点处; b 断面—位于试样高度的上三分点处				
扫描次数、扫描断面、轴向变形、体变和排水					
时间 月 - 日 - 时 - 分	轴向变形 (0.01mm)	扫描次数 /断面名称 (次 / a、b)	轴向荷载读数 (N)	内 PVC 体变 读数 (mm ³)	排水量管 读数 (mm)
	0	1 / a、b			
	5				
	10				
	20				
	30				
	40				
	60				
	80				
	100				
					
	240	2 / a、b			
					
	480	3 / a、b			
					
	720	4 / a、b			
					
	960	5 / a、b			
					
	1200	6 / a、b			
					
试样总体变量 (mm ³)					
试样总排水量 (cm ³)					

附录 E 表 17.1 (二) 细观结构演化特征的 CT-三轴试验记录表
(针对在一定应力状态和初始含水率下的浸水湿胀/湿陷/湿化试验)

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		土样种类			
土样初始尺寸	直径×高 =	初始干密度(g/cm³)			
初始含水率（%）		排水量管比例系数	cm³ / 排水量管 1mm 水柱		
净平均应压（kPa）		偏应力（kPa）			
浸水压力（kPa）		试样浸水前的高度			
扫描横断面名称及位置	断面 a、b、c、d、e、f、g，顺序从下到上，依次位于试样高度的 7 个八分点处				
试验阶段	浸水阶段	内、外压力室 压力-体积控制器 (PVC)分辨率	压力：1kPa 体积：1mm³		
经历时间	各级浸水量下的扫描次数、扫描断面、轴向变形和体变				
	时间 月-日-时-分	扫描次数 /断面名称 （次 / a-g）	浸水量 （mm³）	轴向变形读 数（mm）	内 PVC 体变读 数（mm³）
0		1 / a-g	0		
5min					
10min					
30min					
1h					
2h					
4h					
6h					
8h					
10h					
12h					
14h					
16h					
18h					
20h					
22h					
24h					
26h					
.....					
总浸水量（cm³）					
试样总轴向变形（mm）					
试样总体变量（cm³）					
试样最终含水率（%）					

17.3 土的微观结构 SEM 试验

17.3.1 设备要求：扫描电子显微镜，最大放大倍数不小于 10000 倍。

【条文说明】：17.3.1 扫描电子显微镜主要用于观察固体表面的形貌，也能与 X 射线衍射仪或电子能谱仪相结合，构成电子微探针，用于物质成分分析。用于土体微观结构分析的放大倍数一般在 50 倍～8000 倍。

17.3.2 用于 SEM 测试的土体试块的基本要求如下：

1 保持土体原始微观结构，不得扰动；土体结构稳定，能够承受电子束轰击。

2 一般为干燥样，不含水和挥发性物质。

3 具有良好的导电性。定量分析时，试块观测面应具有良好的平整度。

【条文说明】：17.3.2 采用环境扫描电子显微镜进行土体微观结构观测时，可采用原始含水量试块。使用其他扫描电子显微镜时试块必须干燥，不含水分和挥发物质。

17.3.3 试块制备步骤一般包括切割、干燥、观测面的处理，应符合以下规定：

1 切割：将保持原始含水量和微观结构的土样粗切割成一定尺寸的土块，切割过程要尽量避免对土体的扰动。对于用于定性分析的试块尺寸可略大于最终分析用试块的大小；用于定量分析的试块尺寸一般不小于 10cm×10cm×5cm。明确试样观测面的采集方向，方便后续观测面的确定。

2 干燥：常用的干燥方法有风干法、冷冻法和置换法。

1) 风干法适用于含水率≤10%的粉土和粉细砂。将切割好的土块放在敞口的容器中，置于室内环境下自然风干。在风干过程中定时量测土块的尺寸变化，一般 8-24 小时量测 1 次。一旦风干使土块干缩变形大于 2%或出现裂纹，则该方法不适用，应改换其他干燥方法。

2) 冷冻法适用于一般土。将切割好的土块放入冷冻仪中，利用冷冻剂在-

193℃条件下快速冻结，使土块中的孔隙水直接变成非结晶冰，然后在真空环境中使温度回温至-50℃—100℃使孔隙水升华干燥。该方法的优点是对土体结构破坏小，结果准确度高；但对仪器要求高，操作复杂。

3) 置换法适用于粉土和黏性土。将切割好的土块放入敞口容器内，分级缓慢倒入不同配比的置换液，利用置换液置换土块孔隙中的水分，直到全部置换。置换液一般为甲醇、乙醇、丙酮等低表面张力的液体与水的混合液。为了减少置换液快速挥发对土块结构的扰动，分级置换时，置换液中易挥发液体的含量从 20%，30%，40%，逐渐提高到 100%，土块在每级停留时间不少于 8h；浸泡过程中始终保持置换液高于土块表面不小于 1cm。该方法不适用湿陷性土和膨胀性土。也不适用在置换液中浸泡可能发生结构破坏的土。

3 观测面的处理：

1) 非定量分析

干燥试块的观测面可采用揭皮或掰断的方法获得。揭皮方法是采用具有良好胶着性能的胶条，在干燥土块拟观测面上进行黏着撕皮，将拟观测面表层的扰动部分揭去，暴露出未扰动的、完整的、新鲜的观测面。掰断方法是用锋利刀片在干燥试块的中部刻出一条深沟，用手小心掰裂土条，暴露出新鲜、未扰动的观测面；然后先用洗耳球吹、再用胶带撕皮以去除观测面上的浮动颗粒。

2) 定量分析

①对干燥试块进行浸泡硬化。浸泡液由树脂胶和可挥发性溶解剂及固化剂按一定比例混合组成，应具有：良好的流动性，可渗入土样孔隙中；合适的硬化时间，即能保证浸泡液渗入到整个试样中，又可在较短的时间内使试样硬化；不与土体产生化学反应且无毒性污染。

②对浸泡硬化后的试块进行细切割和研磨。硬化后的试块采用切割机切割成扫描电镜设备要求的尺寸，一般为 2cm×2cm×1cm 的样品。然后用砂纸或研磨

机对拟观测面进行分步研磨，由粗到细，并进行表面清洁处理，最终达到在放大 20 倍条件下观察观测面表明平整无污物，没有擦痕无麻点。

【条文说明】：17.3.3 制备浸泡液的主要材料为树脂类材料和稀释剂。树脂类一般为聚乙烯乙二醇、聚酯树脂、环氧树脂，稀释剂一般为乙醇和丙酮。浸泡过程中要保证浸泡液充分渗入和填满土块内部孔隙。添加合适剂量的催化剂使土块内部的稀释剂可以完全挥发，添加合适剂量的硬化剂使土块在较短的时间内硬化。

17.3.4 将制备好的试块用导电胶固定于样品台上，保证样品的稳定性，增强导电性。导电胶干透后方可进行导电处理。

17.3.5 对试块和样品台表面进行导电处理。一般可采用离子溅射镀膜法。

【条文说明】：17.3.5 镀膜必须薄而均匀，镀膜材料本身无结构，能够再现试样表明的固有形态和孔隙特征；镀膜材料还需化学成分稳定，不与构成试样的物质发生化学反应。一般为金、铜或碳材料。

17.3.6 按照扫描电镜的操作方法将准备好的试样和样品台放入样品室内开始观测。观测时首先在低倍数状态下对焦，选择工作电压和工作距离，调整亮度和对比度，使采集到的图像质量达到最优。

17.3.7 进行定量分析时，一个观测面上应选取多个观测点进行观测和采集图像。观测点应均匀分布于观测面。同一个观测面不同观测点的观测条件要保持不变，即放大倍数、工作电压、工作距离、亮度和对比度应保持不变。

17.3.8 土的微观结构 SEM 试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 17.2 的规定。

附录 E 表 17.2 SEM 试样风干过程记录表

任务单号		制备日期		试验者	
试样编号		取样位置		校核者	
试样原始含水率/%		切割方法		试块尺寸	
量测时间		试块尺寸		量测时间	
量测时间		试块尺寸		量测时间	
量测时间		试块尺寸		量测时间	
量测时间		试块尺寸		量测时间	
量测时间		试块尺寸		量测时间	
量测时间		试块尺寸		量测时间	
量测时间		试块尺寸		量测时间	
量测时间		试块尺寸		量测时间	
量测时间		试块尺寸		量测时间	
量测时间		试块尺寸		量测时间	

17.4 压汞试验

17.4.1 一般规定

1 压汞法（Mercury Intrusion Porosimetry，简称 MIP）可量测土材料等多孔介质材料的孔隙体积、孔径分布和孔隙结构。

2 压汞法仅适用于测量外部开放连通的孔隙，无法量测材料样品内部封闭性的孔隙。本测试方法只能给出可侵入孔隙的体积与施加压力相对应的表观孔径间的关系，孔径量测的范围为 6nm (0.006 μm) 至 300 μm 。

【条文说明】：17.4.1 压汞法是基于毛细管现象设计的。在测试土样孔隙的过程中，低压作用下汞仅压入尺寸较大的土样孔隙内，高压作用下汞可压入尺寸较小的土样微孔隙内。假设土样孔隙为圆柱形，为了克服汞和土颗粒表面之间的张力，如图 1 所示，外加压力 $p(d)$ 和孔隙直径 d 的关系满足：

$$p(d) = \frac{-4T_s \cos \theta}{d} \quad (17.4.1)$$

式中： $p(d)$ 外加压力，Pa；

d 土样孔隙直径，m；

T_s 为汞表面张力，N/m；

θ 为汞与土颗粒表面接触角， $^\circ$ 。

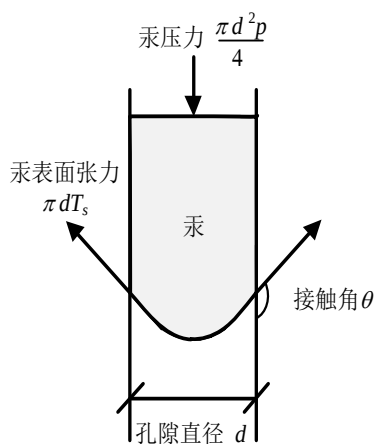


图 1 压汞法原理示意图

17.4.2 试验仪器

1 土样压汞试验仪应包括低压站、高压站、样品管、压力发生装置、压力传感器、真空泵等。根据汞的压入压力范围不同可将仪器分为低压站压汞试验装置（图 17.4.2-1）和高压站压汞试验装置（图 17.4.2-2）。

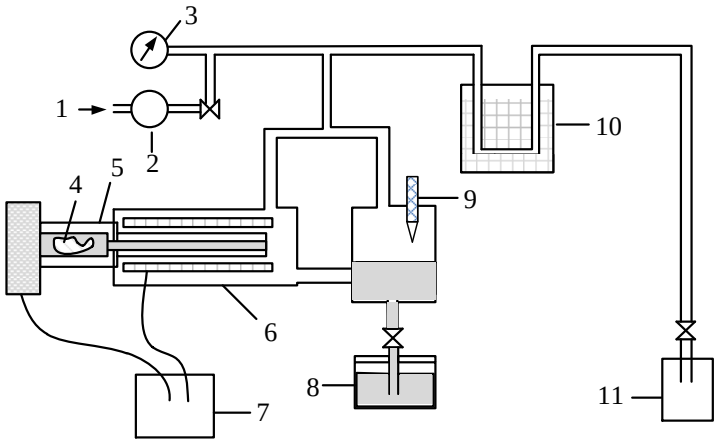


图 17.4.2-1 低压站压汞试验装置示意图

1—干燥气体；2—调压阀；3—压力传感器；4—样品（土样）；5—样品管；6—低压仓；
7—传感电路；8—汞池；9—汞面探头；10—冷阱；11—抽真空装置

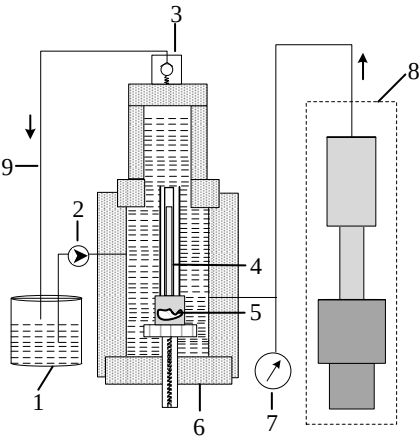


图 17.4.2-2 高压站压汞试验装置示意图

1—储油罐；2—油压泵；3—检查阀；4—样品管；5—样品（土样）；
6—高压仓；7—压力传感器；8—高压发生装置；9—油回路

2 低压站有 2 个站口，其压力范围 4-350 kPa；高压站有 1 个或 2 个站口，压力范围 140 kPa-420 MPa。可量测孔径大约在 6 nm 至 300μm 范围内的孔隙容

积，当要测量孔径大于 6 μm 的孔隙容积，要使用低压站测量。

3 样品管(也称膨胀计)由样品腔和样品管颈组成，常用的有四种，如表 17.4.2 所示。样品腔的容积约为 3 和 6 cm^3 两种，管颈内径有 2 和 4mm，样品管颈体积分别为 0.5 和 2.0 cm^3 。样品体积应控制在样品管颈体积的 50-80%范围内，根据样品的体积选取合适的样品管。

表 17.4.2 常用的四种样品管

样品管编号	样品腔体积 (cm^3)	样品管颈内径 (mm)	样品管颈体积 (cm^3)
P/N 74012	3	2	0.5
P/N 74013	6	2	0.5
P/N 74014	3	4	2.0
P/N 74015	6	4	2.0

4 油系统：应采用封闭的自动过滤循环系统，自动排气阀与泵。冷阱中的冷却剂：宜采用液氮；汞防护：主要利用溢出检测器系统和冷阱防止汞外漏。

17.4.3 实验步骤

1 土体样品的准备：应按照《土工试验方法标准》（GB/T50123）第 4.5 节的规定制备原状土样；或按照本标准第 3.2.4 条的规定制备环刀重塑土样。压汞试验前需要干燥土体样品，干燥方法采用液氮冷冻干燥，干燥后密封于试样瓶中备用，此方法能够较好地保证土样原有的结构。

2 测试前装样：首先应确保样品管清洁干燥，记录干燥样品质量 (精确到 0.001g)，将样品装入样品管(膨胀计)，样品体积应不超过样品腔的一半，汞体积应占样品管体积的 70%以下，以保证测试后低压仓没有汞残留。在研磨玻璃唇沿涂抹一层硅油，在保证密封的前提下尽量减少硅油的涂抹量，拧紧样品管的连接件，并记录下样品管总质量(精确到 0.001g)，在距样品管顶端 20~30mm 处涂抹一层密封脂，将样品管装入低压仓（图 17.4.2-1），开启系统，将样品干土质量等数据输入系统中，设置合适的加压程序，进行低压段测试。

3 低压实验结束后，小心取出样品管，防止汞溢出，称取样品管总重量(含

注入的汞质量)，并记录。

4 再装入高压仓（图 17.4.2-2），输入样品干土质量数据，并设置合适的参数，进行高压段测试。

5 高压测试结束后，合并低压段及高压段的测试数据，并保存数据。

6 实验结束，将样品管中的汞和样品倒入通风橱中专用盛放废汞液和汞污染的样品容器中。

7 用异丙醇或乙醇冲洗样品管，以去除极微量的汞和受污染的样品，再利用低于 100 摄氏度的烘箱烘干样品管，供备用。

【条文说明】：17.4.3 汞是化学实验室的常用物质，毒性很大，且进入人体内不易排出，形成积累性中毒。安全使用汞的操作注意事项如下：

(1) 汞不能直接露于空气中，其上应加水或其他液体覆盖；任何剩余量的汞均不得倒入下水道中。

(2) 储汞容器必须是结实的厚壁器皿，而且器皿应放在瓷盘上；装汞的容器应远离热源。

(3) 万一汞掉到地上、台面或水槽中，应尽可能用吸管将汞珠收集起来，再用能形成汞齐的金属片（Zn、Cu、Sn 等）在汞溅处多次扫除，最后用硫磺粉覆盖。

(4) 实验室温度超过 23℃时，不得进入实验室进行试验操作。

(5) 试验过程中，为防止汞与皮肤接触，全程应带一次性手套，防止溅入眼中；手上有伤口，切勿接触汞。

17.4.4 绘制孔径与对应单位土样品干质量累计汞压入体积量的关系曲线（图 17.4.4-1）、孔径与对应与孔径分布密度的关系曲线（图 17.4.4-2）。

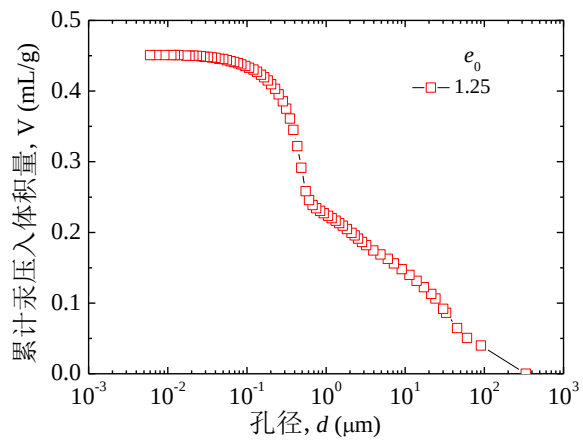


图 17.4.4-1 孔径与单位质量土样累计汞压入体积量关系

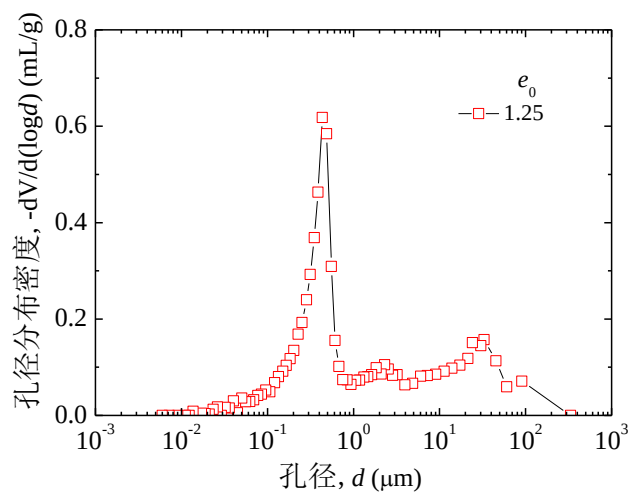


图 17.4.4-2 孔径与孔径分布密度关系

17.4.5 本试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 17.3（一）、（二）的规定。

附录 E 表 17.3（一） 压汞试验样品记录表

工程名称：_____ 试验者：

工程编号：_____ 计算者：

试验日期：_____ 校核者：

编号	试样编号	土样干质量 (g)	样品管编号	压汞试验 生成文件编号

附录 E 表 17.3 （二）进汞退汞过程记录表

工程名称：_____ 试验者：

工程编号：_____ 计算者：

试验日期：_____ 校核者：

序 号	进汞				退汞		
	压力 (kPa)	孔径 d (nm)	汞压入体积 V (mL)	孔径分布密度 $-dV/d\log d$ (mL/g)	压力 (kPa)	孔径 d (nm)	汞压入体积 V (mL)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)

18 化学-力学特性试验

18.1 一般规定

18.1.1 本试验方法适用于测试各种盐渍土和污染土的化学物质含量（或孔隙水溶液浓度），亦即溶质吸力对各种饱和土与非饱和土（包括盐渍土、污染土）力学特性的影响。

18.1.2 本章试验通过测定孔隙溶液浓度 c_i ，并根据范特霍夫（van't Hoff）公式计算溶质吸力 $\Delta\pi$ ，以考虑土中化学物质引起的溶质吸力对其力学特性的影响。

1 挤液法，采用厚壁圆筒活塞式挤液器将孔液挤出，进行化学成分分析，获得孔隙溶液浓度 c_i 。

2 浸洗法，根据孔隙溶液盐度 r 和化学分析结果，计算孔隙溶液浓度 c_i 。具体操作应符合本标准条文说明第 18.1.2 条的规定。

$$\Delta\pi = RT \sum_{i=1}^N c_i \quad (18.1.2)$$

式中： $\Delta\pi$ — 溶质吸力（kPa）；

R — 理想气体常数（ $8.314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ）；

T — 绝对温度（K）；

N — 分子式所含原子总数；

c_i — 孔隙溶液浓度（ $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ）。

【条文说明】：18.1.2 范特霍夫（van't Hoff）公式（式 18.1.2）引自 K.E.范霍尔德（1978），最早由荷兰科学家范特霍夫提出，又称渗透压定律。该定律认为，溶质在稀溶液中所产生的渗透压，等于在同一温度 T 时，将其转化为理想气体并占有溶剂体积 V 时所产生的气压。对稀溶液来说，渗透压与溶液的浓度 c 和温度 T 成正比，它的比例常数就是气体状态方程式中的常数 R 。当溶液中存在多种溶质时，只要浓度很低，应用渗透压定律时，可将渗透压看成是各种溶质贡献的总和，即如式 18.1.2 所示。

K.E.范霍尔德. 物理生物化学[M]. 北京：科学出版社，1978.

浸洗法由 Ying 等 (2019) 提出, 具体实施步骤可依照图 18.1.2-1 所示流程进行。试验记录格式应符合本标准附录 E 表 18.7 的规定。

1 通过样品 1#, 获得待测样品总含水量 m_w 。

2 通过样品 2#, 测得澄清液电导率 EC, 根据标定曲线 (图 18.1.2-2) 中的总盐度线, 获得对应澄清液总盐度 r' ; 结合澄清液质量 m' , 按下式计算得到孔隙溶液总盐质量 m_{sa} :

$$m_{sa} = \sum \frac{m' \cdot r'}{1 - r'} \quad (18.1.2-1)$$

3 样品总含盐度 r_{sample} , 应按下式计算:

$$r_{sample} = \frac{m_{sa}}{m_{sa} + m_w} \quad (18.1.2-2)$$

4 将 r_{sample} 对照标定曲线 (图 18.1.2-2) 中的总盐度线, 获得对应 EC_{sample} 值。根据点 (EC_{sample} , r_{sample}) 所在区域, 可确定待测土样孔隙溶液电导率 EC:

(1) 若点 (EC_{sample} , r_{sample}) 落在盐不饱和区域, 说明待测土样内所含盐全部溶解在孔隙溶液中, 则孔隙溶液的盐度 r 取 r_{sample} ;

(2) 若点 (EC_{sample} , r_{sample}) 落在完全饱和区域, 说明待测土样孔隙溶液完全饱和, 则孔隙溶液的盐度 r 取标定曲线 (图 18.1.2-2) 中溶解盐度最大上限值 ($r_d=260\%$);

(3) 若点 (EC_{sample} , r_{sample}) 落在盐部分饱和区域, 则将 r_{sample} 代入式 18.1.2-3, 求解得到孔隙溶液 EC, 再将 EC 代入式 18.1.2-4, 计算孔隙溶液盐度 r 。

$$EC = -0.0027r^2 + 1.5228r + 0.4093 \quad (18.1.2-3)$$

$$EC = -0.0028r^2 + 1.5573r + 0.6785 \quad (18.1.2-4)$$

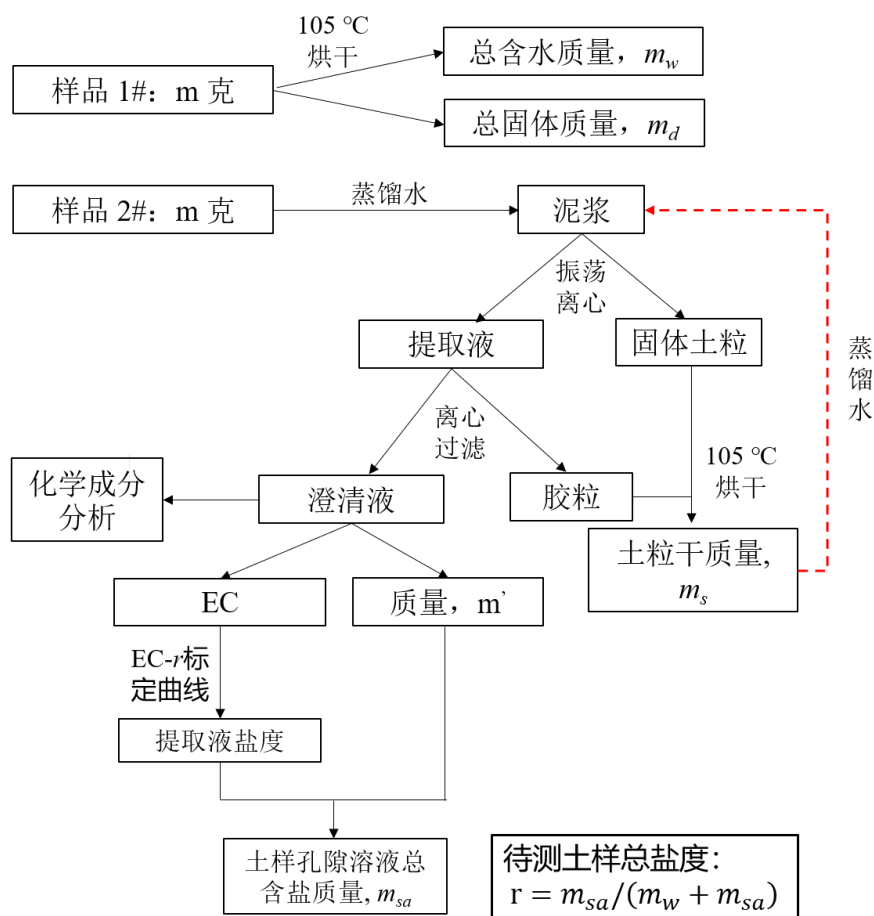


图 18.1.2-1 土样测试操作流程

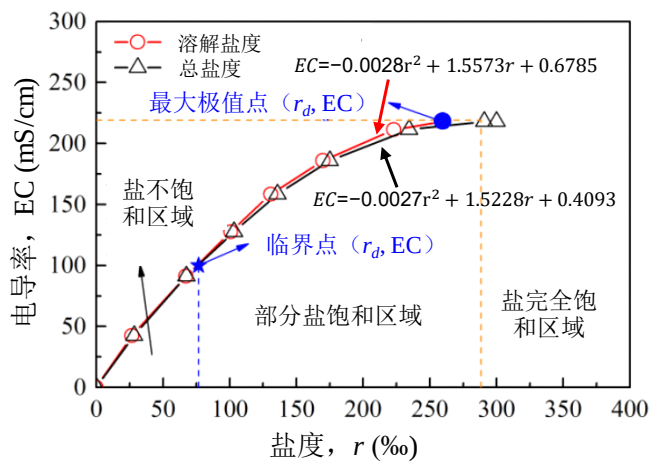


图 18.1.2-2 EC- r 标定曲线

注：图 18.1.2-2 中各区域含义如下。

(1) 盐不饱和区域：所有种类的盐在溶液中的溶解速度大于结晶速度，处于该区域的溶液为不饱和溶液；

(2) 部分盐饱和区域：部分种类盐在溶液中的溶解速度小于结晶速度，处于该区域的溶液仍可继续溶解其他种类盐；

(3) 盐完全饱和区域：所有盐类在溶液中的溶解速度小于结晶速度，处于该区域的溶液为完全饱和溶液。

Z. Ying, M. Duc, Y.J. Cui, N. Benahmed. Salinity assessment for salted soil considering both dissolved and precipitated salts[J]. Geotechnical Testing Journal, doi:10.1520/GTJ20190301

18.1.3 土中常见的化学（污染）物质通常包括酸、碱、重金属和盐类等物质。试验过程中，操作人员应注意采取必要的安全防护措施，如佩戴防护手套、口罩等，针对具有腐蚀性的化学（污染）物质，试验所采用的仪器设备应具有耐腐蚀性。

18.1.4 本章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，并进行检定或校准。

18.1.5 本标准试验用水，除特殊要求外均应为纯水。

18.2 化学物质类型与试验力学参数

18.2.1 根据工程要求，可选用单轴压缩试验、直剪试验和三轴试验等，测试溶质吸力对饱和土与非饱和土力学特性的影响。

18.2.2 根据所含化学成分，不同类型盐渍土和污染土的敏感力学参数及相应的力学试验见表 18.2.1。其中，土中所含各种化学离子应按《土工试验方法标准》（GB/T 50123 - 2019）第 53 章的方法测定。

表 18.2.1 土的力学参数与测定方法

土的名称	$\frac{c(Cl^-)}{2c(SO_4^{2-})}$	$\frac{c(CO_3^{2-}) + c(HCO_3^-)}{c(Cl^-) + 2c(SO_4^{2-})}$	力学参数	测定方法
氯盐渍土	>2.0	—	$c、\varphi$	直剪试验
亚氯盐渍土	>1.0, ≤2.0	—	压缩系数 a_v	单轴压缩试验
碳酸盐渍土	—	>0.3		
亚硫酸盐渍土	>0.3, ≤1.0	—	盐胀系数 δ_{yz} 溶陷系数 δ_{rx}	盐胀/溶陷试验
硫酸盐渍土	≤0.3	—		

注：1. 本表引自《盐渍土地区建筑技术规范》（GB/T 50942-2014）第 3.0.3 条；

2. $c(\text{Cl}^-)$ 、 $c(\text{SO}_4^{2-})$ 、 $c(\text{CO}_3^{2-})$ 、 $c(\text{HCO}_3^-)$ 分别表示氯离子、硫酸根离子、碳酸根离子、碳酸氢根离子在 0.1kg 土中所含毫摩尔数，单位为 mmol/0.1kg。

18.3 试样制备

18.3.1 原状土试样制备应符合下列规定：

1 制备原状环刀试样应符合《土工试验方法标准》（GB/T 50123 - 2019）第 4.5 节的规定。

2 按照本章第 18.1.2 条，测定试样孔隙溶液中相应化学物质浓度 c_i ，计算试样的溶质吸力 $\Delta\pi$ 。

18.3.2 扰动土/重塑土试样制备应符合下列规定：

1 对于扰动土/重塑土，通过控制试样的初始含盐量（孔隙溶液浓度）和含水率实现初始吸力的控制。

2 扰动土/重塑土土样脱盐处理。首先对需要脱盐处理的盐渍土或污染土进行风干、碾碎、过筛（2 mm），再采用蒸馏水，按照土水质量 1：5 的比例浸泡并搅拌 30 min，使土中盐分得到充分溶解；随后静置，待土颗粒沉淀至上部溶液基本澄清后，抽出上部清液并用针管式过滤头（0.45 μm 孔径）过滤后测定其电导率（EC）。当上清液电导率小于 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 时结束脱盐，否则需彻底排掉上部溶液，并往桶中补充等量蒸馏水，重复上述浸泡、搅拌与静置等步骤。将脱盐土样置于 60℃烘箱完全烘干后，重新碾碎并过 2 mm 筛备用。

3 土样配盐处理。按照目标含盐量（孔隙溶液浓度）与含水率，称取一定质量的脱盐土样与相应的盐（盐粒光滑细腻，大小均匀），将二者混合均匀后，采用蒸馏水将土样调配至目标含水率，闷料 24 h 以使土样中水分和化学成分均匀。

4 按照本章第 18.1.2 条，测定试样孔隙溶液中相应化学物质浓度 c_i ，计算试样的溶质吸力 $\Delta\pi$ 。

【条文说明】：18.3.2 扰动土/重塑土试样制备方法参自张悦（2018）。为排除固有易溶盐的影响，需要对交河故城遗址土进行脱处理。首先将原状样风干，

并充分碾碎过 2 mm 筛。称取一定质量干土放入桶中，按水比 1:5 注入去离子水浸泡，并按顺时针方向搅拌半小使土中盐分得到充溶解。随后静置，直至土颗粒沉淀上部溶液基本澄清。抽取 20 mL 上清液，针管式过滤头（0.45 μm 孔径）过滤后，测定溶液电导率。电导率小于 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 时结束脱盐，否则需彻底排掉上部溶液，并往桶中补充等量去离子水重复述的浸泡、搅拌和静置等步骤。将完成脱盐的土体放入烘箱内以 60 $^{\circ}\text{C}$ 低温完全烘干，重新碾碎过 2 mm 筛，密封备用。颗分试验结果证明，土体经过上述步骤脱盐后颗粒径分布的变化很小。

参考文献

张悦，叶为民，王琼，Alessandro Tarantino. 2019. 含盐遗址重塑土的吸力测定及土水特征曲线拟合. 岩土工程学报. Vol. 41(9): 1661-1669

18.4 侧限压缩试验

18.4.1 本试验方法适用于测定饱和/非饱和盐渍土与污染土的压缩系数。评价化学物质含量对土压缩性影响时，应至少进行4组不同化学物质含量的单轴压缩试验。

18.4.2 试验所采用的仪器为侧限固结仪（图18.4.2），由固结容器、加载和变形测量装置三部分所组成。其中，固结容器由环刀、护环、透水板、水槽和加压盖组成。固结仪应具有耐腐蚀性。加载和变形量测部件应符合《土工试验方法标准》（GB/T 50123 - 2019）第17.2节的规定。

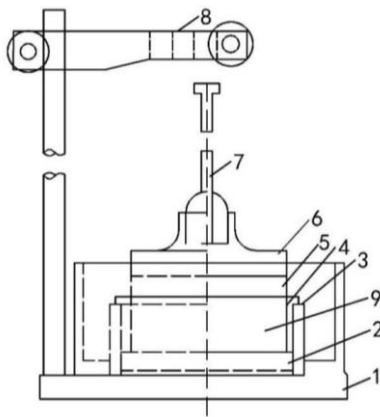


图 18.4.2 固结仪示意图

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

18.4.3 侧限压缩试验应按下列步骤进行：

- 1 参照本章第 18.3 节的规定，制作试样。
- 2 对于饱和试样，应向水槽中注与孔隙溶液相同的化学溶液浸没试样，在水槽化学溶液表面滴入一层硅油防止水分蒸发。进行非饱和试样的压缩试验时，应用凡士林密封加压板周围防止试验过程中试样蒸发失水。
- 3 按《土工试验方法标准》（GB/T 50123 - 2019）第 17.2 节的规定执行侧限压缩试验。
- 4 试验结束后吸去容器中的水，迅速拆除仪器各部件，取出试样按照本章第 18.1.2 条测定孔隙溶液中相应化学物质浓度 c_i ，计算试样的溶质吸力 $\Delta\pi$ 。

18.4.4 对于非饱和试样，可参照本标准第 5 章非饱和单轴侧限压缩试验的相关规定进行试验，试验所采用的仪器应具有耐腐蚀性。

18.4.5 数据处理

- 1 试样的初始孔隙比 e_0 ，应按式 18.4.5-1 计算：

$$e_0 = \frac{(1 + w_0)G_s\rho_w}{\rho_0} - 1 \quad (18.4.5-1)$$

式中： e_0 — 试样的初始孔隙比；

w_0 — 试样的初始含水率（%）；

G_s — 土粒相对密度；

ρ_w — 水的密度（g/cm³）；

ρ_0 — 试样的湿密度（g/cm³）。

- 2 各级压力下试样固结稳定后的孔隙比 e_i ，应按式 18.4.5-2 计算：

$$e_i = e_0 - (1 + e_0) \frac{\sum \Delta h_i}{h_0} \quad (18.4.5-2)$$

式中： e_i — 某级压力下的孔隙比；

h_0 — 试样初始高度（mm）；

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

3 某一压力范围内的压缩系数 a_v ，应按式 18.4.5-3 计算：

$$a_v = \frac{e_i - e_{i+1}}{p_{i+1} - p_i} \quad (18.4.5-3)$$

式中： a_v — 压缩系数 (MPa^{-1})；

p_i — 某级压力值 (MPa)。

4 以孔隙比为纵坐标、压力为横坐标，绘制孔隙比与压力的关系曲线（图 18.4.5-1）；以孔隙比为纵坐标、压力的常用对数为横坐标，绘制孔隙比与压力的对数关系曲线（图 18.4.5-2）；以压缩系数（通常取 100~200 kPa 压力段）为纵坐标、溶质吸力为横坐标，绘制压缩系数-初始溶质吸力关系曲线（图 18.4.5-3）。

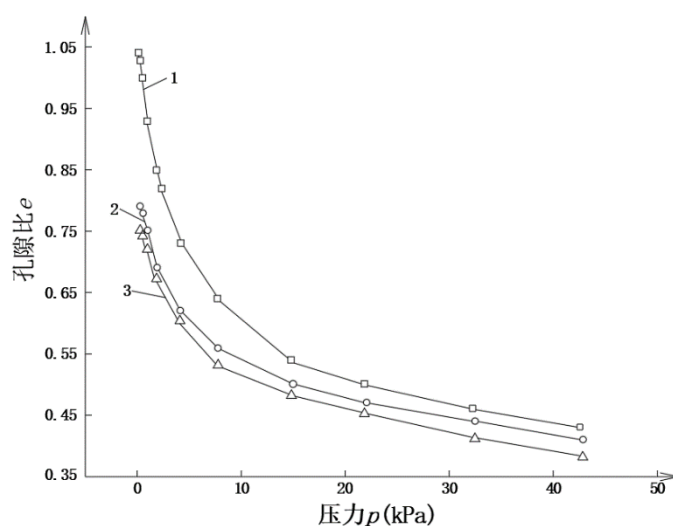


图 18.4.5-1 孔隙比与压力关系曲线

1-氯化钠浓度 0 mol/L；2-氯化钠浓度 2 mol/L；3-氯化钠浓度 4 mol/L

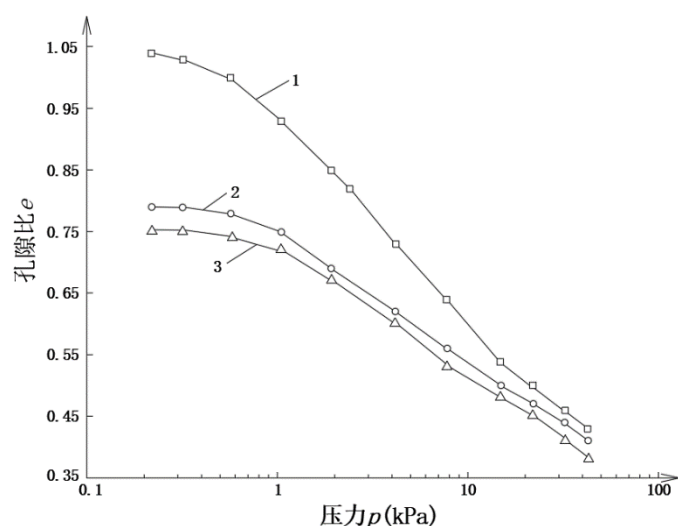


图 18.4.5-2 孔隙比与压力对数关系曲线

1-氯化钠浓度 0 mol/L；2-氯化钠浓度 2 mol/L；3-氯化钠浓度 4 mol/L

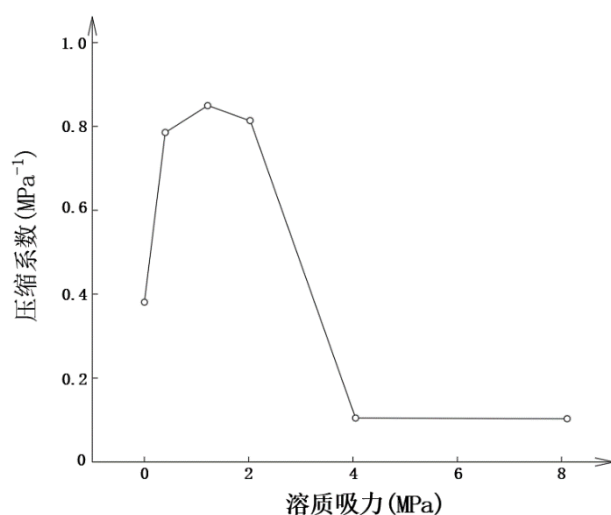
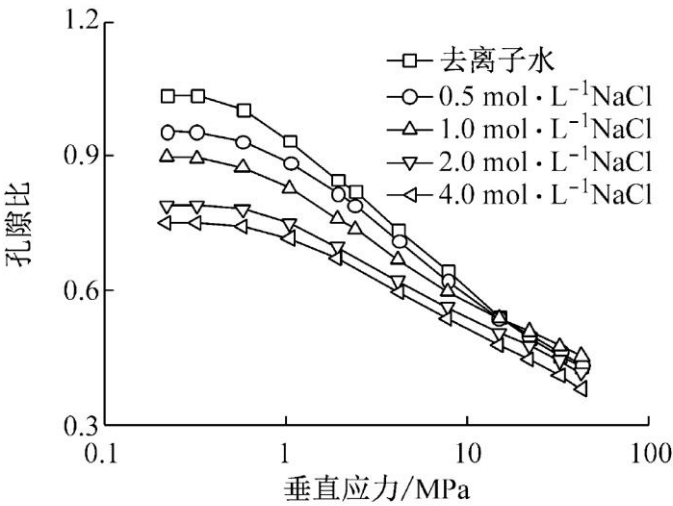


图 18.4.5-3 压缩系数与初始溶质吸力关系曲线

【条文说明】：18.4.5 杜宇航（2019）基于考虑含盐量影响的杨凌黄土的单轴侧限压缩试验发现：随着含盐量增加，土颗粒发生聚集，孔隙变大，压缩系数变大。然而，当含盐量过高时，土颗粒团聚严重，盐分无法再对土颗粒产生有效支撑，因此，压缩系数降低。叶为民等（2017）针对高庙子膨润土，开展了考虑 NaCl 饱和溶液浓度影响的单轴侧限压缩试验，获取了不同浓度溶液饱和试样的压缩曲线，建立了压缩系数与饱和溶液浓度之间的关系。分析表明，随着

NaCl 溶液浓度的增加，试样内部渗透吸力增加，导致土体发生渗透固结；由于集合体的变形随着渗透吸力的增加而降低，试样的压缩系数随着入渗溶液浓度的增加而降低。



不同浓度溶液饱和 GMZ 膨润土试样压缩曲线

参考文献：

杜宇航. 盐渍化作用对黄土工程特性的影响及改良研究[D]. 西北农林科技大学, 2019.

叶为民，张峰，陈宝，陈永贵. 化-力耦合条件下高压实 GMZ01 膨润土体变性能研究进展. 同济大学学报（自然科学版），2017. 45(11): 1577-1584.

18.4.6 本试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 18.1~表 18.2 和表 18.7 的规定。

18.5 直剪试验

18.5.1 本试验方法适用于测定饱和/非饱和污染土与盐渍土的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 。评价化学物质含量对土抗剪强度影响时，应至少进行4组不同化学物质含量的直剪试验。

【条文说明】：18.5.1 图表数据引自洪安宇等（2013）。作者对马兰黄土开展考虑氯盐影响的直剪试验，发现：当含盐量小于临界含盐量时，接触作用减少和吸附水膜增厚对盐渍土体强度的减弱效应起着主要作用，此时，随着含盐量

增加，氯盐渍土的抗剪强度及其指标随着含盐量的增加而减小；当含盐量大于临界含盐量时，结晶盐的胶结作用对土体结构的增强效应开始起主要作用，随着含盐量增加，土体抗剪强度及其指标逐渐增大。

参考文献

洪安宇, 杨晓松, 党进谦, 孙果辰. 非饱和氯盐渍土抗剪强度特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(04): 52-55.

18.5.2 本试验所用的主要仪器设备为耐化学腐蚀的应变控制式直剪仪（图 18.5.2）：由剪切盒、竖向加压设备、剪切传动装置、测力计、位移量测系统组成。

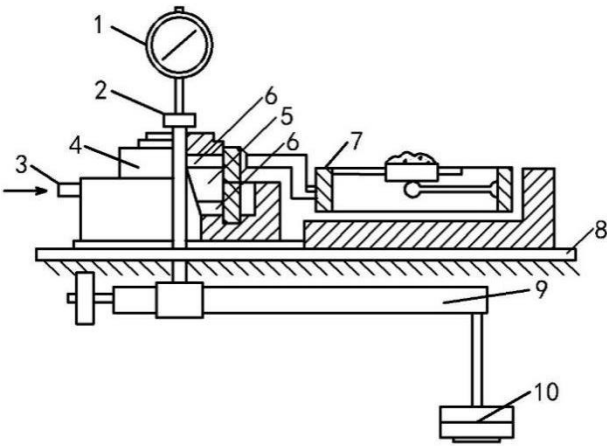


图 18.5.2 应变控制式直剪仪示意图

1-竖向变形百分表；2-竖向加压框架；3-推动座；4-剪切盒；
5-试样；6-透水板；7-测力计；8-台板；9-杠杆；10-砝码

18.5.3 地表变形监测点的布设应符合下列要求：

- 1 参照本章第 18.3 节的规定，制作试样。
- 2 对于饱和试样，向剪切盒内注入与孔隙溶液相同的化学溶液浸没试样，在水槽化学溶液表面滴入一层硅油防止水分蒸发，影响溶液浓度；对于非饱和试样时，应用凡士林密封加压板四周，防止试验过程中试样蒸发失水。
- 3 按《土工试验方法标准》（GB/T 50123 - 2019）第 21 章的规定执行直剪试验。

4 试验结束后，迅速拆除仪器各部件，取出试样按照本章第 18.1.2 条测定孔隙溶液中相应化学物质浓度 c_i ，计算试样的溶质吸力 $\Delta\pi$ 。

18.5.4 剪应力应按式计算：

$$\tau = \frac{C \cdot R}{A_0} \times 10 \quad (18.7.5)$$

式中： τ — 试样所受的剪应力（kPa）；

R — 测力计量表读数（0.01 mm）；

C — 测力计率定系数（N/0.01mm）；

A_0 — 试样断面积（ cm^2 ）。

18.5.5 数据处理

1 以剪应力为纵坐标，剪切位移为横坐标，绘制剪应力与剪切位移关系曲线，取曲线上剪应力的峰值为抗剪强度，无峰值时，取剪切位移 4 mm 所对应的剪应力为抗剪强度。

2 以抗剪强度为纵坐标，竖向压力为横坐标，绘制抗剪强度与竖向压力关系曲线，直线的倾角为内摩擦角 ϕ ，直线在纵坐标上的截距为黏聚力 c （图 18.5.5-1）。

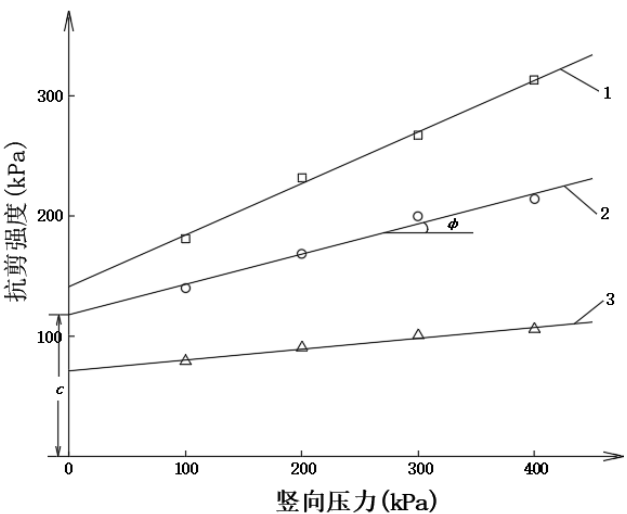


图 18.5.5-1 抗剪强度与竖向压力关系曲线

1-氯化钠含量 2%；2-氯化钠含量 5%；3-氯化钠含量 8%

3 以溶质吸力为横坐标，绘制内摩擦角-溶质吸力关系曲线（图 18.5.5-2）与黏聚力-溶质吸力关系曲线（图 18.5.5-3）。

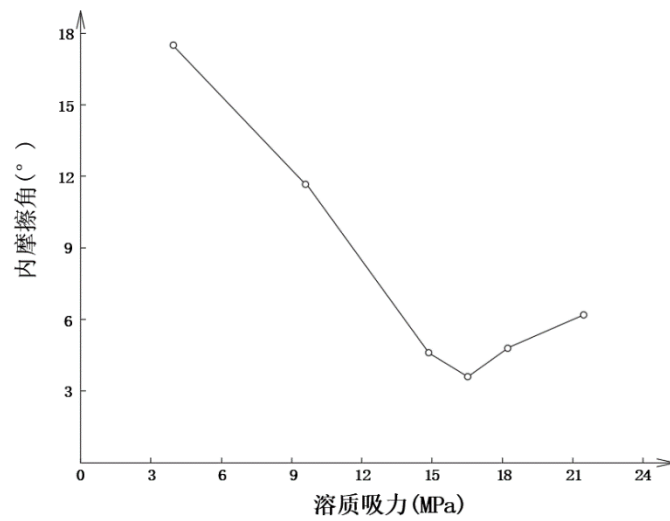


图 18.5.5-2 内摩擦角-溶质吸力关系曲线

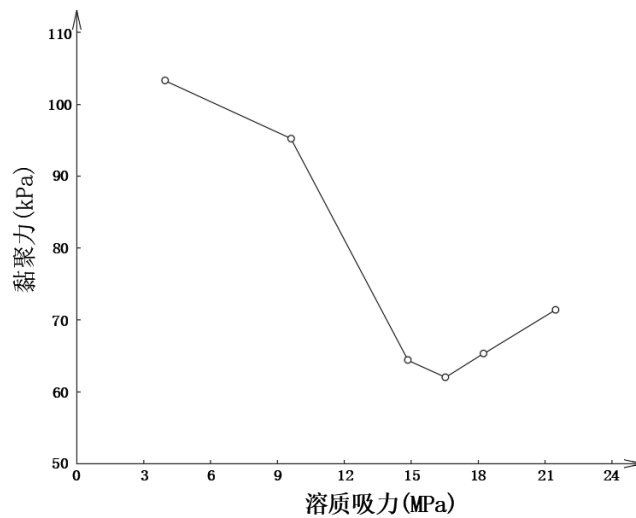


图 18.5.5-3 黏聚力-溶质吸力关系曲线

【条文说明】：18.5.5 图表数据引自洪安宇等（2013）。作者对马兰黄土开展考虑氯盐影响的直剪试验，发现：当含盐量小于临界含盐量时，接触作用减少和吸附水膜增厚对盐渍土体强度的减弱效应起着主要作用，此时，随着含盐量增加，氯盐渍土的抗剪强度及其指标随着含盐量的增加而减小；当含盐量大于临界含盐量时，结晶盐的胶结作用对土体结构的增强效应开始起主要作用，随

着含盐量增加, 土体抗剪强度及其指标逐渐增大。

参考文献

洪安宇, 杨晓松, 党进谦, 孙杲辰. 非饱和氯盐渍土抗剪强度特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(04): 52-55.

18.5.6 本试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 18.3 和表 18.7 的规定。

18.6 三轴试验

18.6.1 本试验适用于测定饱和/非饱和盐渍土和污染土的强度指标。评价化学物质含量对土体强度影响时, 应至少进行 4 组不同化学物质含量的三轴试验。

18.6.2 本试验所用的主要仪器设备, 应符合下列规定:

1 耐化学腐蚀的三轴测试系统(图 18.6.2): 由压力室、轴向压力控制器、围压控制器、反压控制器和水-盐转换器组成。其中, 水-盐转换器充填溶液一侧与试样连接, 充填蒸馏水一侧与反压控制器连接, 起到隔绝化学物质的作用, 防止反压控制器受到化学腐蚀。

2 附属设备: 包括击样器、切土器、原状土分样器、切土盘、承膜筒和对开圆膜。

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

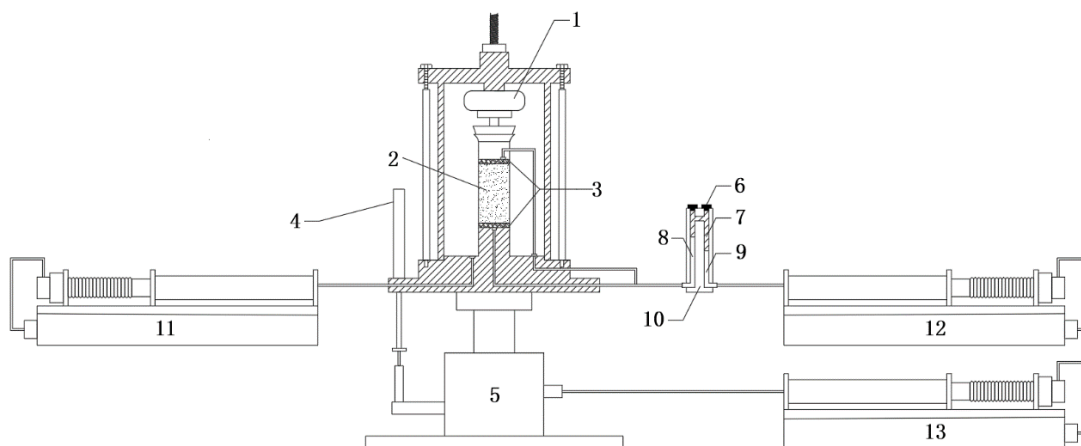


图 18.6.2 考虑化学影响的三轴测试系统示意图

1-LVDT 水下荷载传感器；2-试样；3-透水石；4-位移传感器；

5-底座；6-螺帽；7-硅油；8-去气盐溶液；9-去气蒸馏水；

10-水-盐转换器；11-围压控制器；12-反压控制器；13-轴向控制器

4 橡皮膜：应为具有弹性的乳胶膜，且具有化学耐腐蚀性。

5 透水石：直径与试样直径相等，其渗透系数宜大于试样的渗

18.6.3 三轴试验应按下列步骤进行：

1 参照本章第 18.3 节的规定，制作三轴试样。本试验采用的试样最小直径为 $\Phi 35$ mm，最大直径为 $\Phi 101$ mm，试样高度宜为试样直径的 2~2.5 倍。

2 对于饱和试样，可参照《土工试验方法标准》（GB T50123-2019）第 19 章根据试验要求进行试验，进行不固结不排水（UU）试验时，剪切应变速率宜为 0.5~1.0%/min；进行固结不排水剪（CU）试验时，剪切应变速率宜为 0.05~0.10%/min；进行固结排水剪（CD）试验时，剪切应变速率宜为 0.003~0.012%/min。

3 对于非饱和试样，为确保试验过程中试样中化学物质含量保持恒定，宜进行不固结不排水（UU）试验。相关试验操作请参照《土工试验方法标准》（GB T50123-2019）第 19 章，剪切应变速率宜为 0.5~1.0%/min。

4 试验结束后，迅速拆除仪器各部件，取出试样，测定试样含水率，并按照本章第 18.1.2 条测定孔隙溶液中相应化学物质浓度 c_i ，计算试样的溶质吸力

$\Delta\pi$ ，结合试验控制的基质吸力，二者之和为试样的总吸力。

18.6.4 数据处理

1 根据获得的剪切过程中轴向变形、体积变形、孔隙水压力以及轴向压力数值，以主应力差为纵坐标，轴向应变为横坐标，绘制主应力差与轴向应变关系曲线（图 18.6.4-1）。取曲线上主应力差的峰值作为破坏点，无峰值时，取 15% 轴向应变时的主应力差值作为破坏点。

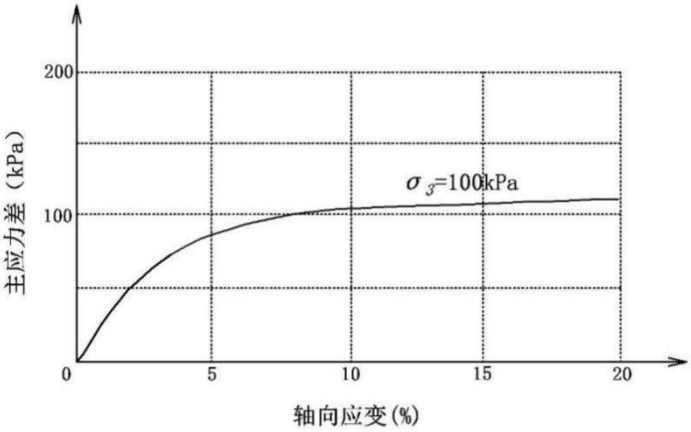


图 18.6.4-1 主应力差与轴向应变关系曲线

2 以剪应力为纵坐标，法向应力为横坐标，在横坐标轴以破坏时的 $\frac{\sigma_{1f}+\sigma_{3f}}{2}$ 为圆心，以 $\frac{\sigma_{1f}-\sigma_{3f}}{2}$ 为半径，在 $\tau-\sigma$ 应力平面上绘制破坏（摩尔）应力圆（图 18.6.4-2），并绘制不同周围压力下破坏（摩尔）应力圆的包线，求出土体的抗剪强度参数。

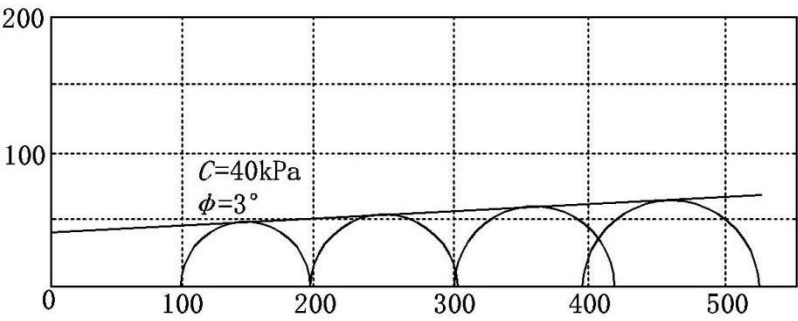


图 18.6.4-2 破坏（摩尔）应力圆

3 绘制内摩擦角/黏聚力-溶质吸力/总吸力/基质吸力关系曲线（图 18.6.4-3）。

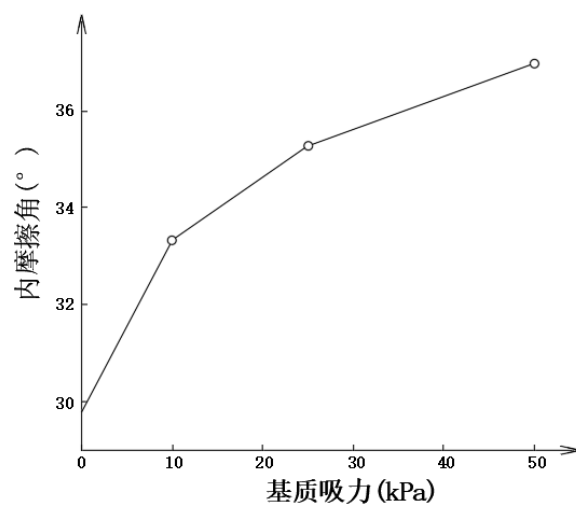


图 18.6.4-2 内摩擦角-基质吸力关系曲线

18.6.5 本试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 18.4~表 18.6 和表 18.7 的规定。

附录 E 表 18.1 固结试验记录（一）

工程编号_____

试验者_____

试样编号_____

计算者_____

试验日期_____

校核者_____

土粒比重 G_s _____

试验前试样高度 h_0 _____mm

试验前孔隙比 e_0 _____

含水率试验

	盒号	湿土质量 (g)	干土质量 (g)	含水率 (%)	平均含水率 (%)
试验前					
试验后					

密度试验

环刀号	湿土质量 (g)	环刀容积 (cm3)	湿密度 (g/cm3)

加压历时 (h)	压力 (MPa)	试样变形量 (mm)	压缩后试样高度 (mm)	孔隙比	压缩系数 (MPa ⁻¹)	压缩模量 (MPa)	固结系数 (cm ² /s)
	P	$\sum \Delta h_f$	$h = h_0 - \sum \Delta h_f$	$e_f = e_0 - \frac{1 + e_0}{h_0} \sum \Delta h_f$	$a_v = \frac{e_f - e_{i+1}}{P_{i+1} - P_s}$	$E_s = \frac{1 + e_0}{a_v}$	$C_v = \frac{T_v \bar{h}^{-2}}{t}$

附录 E 表 18.2 固结试验记录 (二)

工程编号 _____

试验者 _____

试样编号 _____

计算者 _____

试验日期 _____

校核者 _____

(1) 固结试验

压力 经过 时间 (min)	MPa		MPa		MPa		MPa		MPa	
	时间	变形 读数	时间	变形 读数	时间	变形 读数	时间	变形 读数	时间	变形 读数
0										
0.1										
0.25										
1										
2.25										
4										
6.25										
9										
12.25										
16										
20.25										
25										
30.25										
36										
42.25										
49										
64										
100										
200										
23 (h)										
24 (h)										
总变形量 (mm)										
仪器变形量 (mm)										
试样总变形量 (mm)										

(2) 孔隙溶液浓度和溶质吸力

	孔隙溶液 浓度 c_i (mol/L)	理想气体常数 R (J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹)	绝对温度 T (K)	分子式所含原 子总数 N	溶质吸力 $\Delta\pi$ (kPa)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5) = (2) · (3) $\sum_{i=1}^{(4)} (1)$
试 验 前					
试 验 后					

附录 E 表 18.3 直剪试验记录

工程编号_____

试验者_____

试样编号_____

计算者_____

试验日期_____

校核者_____

(1) 直剪试验

仪器编号	(1)	(2)	(3)	(4)
盒号				
湿土质量 (g)				
干土质量 (g)				
含水率 (%)				
量力环系数 (kPa/0.01mm)				
试样质量 (g)				
试样密度 (g/cm ³)				
垂直压力 (kPa)				
固结沉降量 (mm)				

剪切位移 (0.01mm)	量力环读数 (0.01mm)	剪应力 (kPa)	垂直位移 (0.01mm)
(1)	(2)	(3) = (2) * C/A ₀	(4)

(2) 孔隙溶液浓度和溶质吸力

	孔隙溶液 浓度 c_i (mol/L)	理想气体常数 R (J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹)	绝对温 度 T (K)	分子式所含原子 总数 N	溶质吸力 $\Delta\pi$ (kPa)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5) = (2) · (3) $\sum_{i=1}^{(4)} (1)$
试 验 前					
试 验 后					

附录 E 表 18.4 不固结不排水剪三轴试验记录

工程编号_____ 试验者_____

试样编号_____ 计算者_____

试验日期_____ 校核者_____

(1) 含水率

试样 破坏 描述		试样 草图	

盒号			
湿土质量 (g)			
干土质量 (g)			
含水率 (%)			
平均含水率 (%)			

(2) 密度

钢环系数_____ N/0.01mm 剪切速率_____ mm/min 周围压力_____ kPa

试样面积 (cm ²)	
试样高度 (cm)	
试样体积 (cm ³)	
试样质量 (g)	
密度 (g/cm ³)	

(3) 不排水量

轴向变形	轴向应变	校正面积	钢环读数	$\sigma_1 - \sigma_3$
(0.01mm)	$\varepsilon(\%)$	$\frac{A_0}{1-\varepsilon}(\%)$	(0.01mm)	(kPa)

(4) 孔隙溶液浓度和溶质吸力

	孔隙溶液浓度 c_i (mol/L)	理想气体常数 R (J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹)	绝对温度 T (K)	分子式所含原子 总数 N	溶质吸力 $\Delta\pi$ (kPa)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5) = (2) · (3) $\sum_{i=1}^{(4)} (1)$
试验前					
试验后					

附录 E 表 18.5 固结不排水剪三轴试验记录

工程编号_____

试验者_____

试样编号_____

计算者_____

试验日期_____

校核者_____

(1) 含水率

	试验前		试验后	
盒号				
湿土质量 (g)				
干土质量 (g)				
含水率 (%)				
平均含水率 (%)				

(2) 密度

试样高度 (cm)		
试样体积 (cm ³)		
试样质量 (g)		
密度 (g/cm ³)		
试样草图		
试样破坏描述		
备注		

(3) 反压力饱和

周围压力 (kPa)	反压力 (kPa)	孔隙水压力 (kPa)	孔隙压力增量 (kPa)

(4) 固结排水

周围压力_____kPa 反压力_____kPa 孔隙水压力___kPa

经过时间 (h/min/s)	孔隙水压力 (kPa)	量管读数 (mL)	排出水量 (mL)

(5) 不排水剪切

钢环系数____N/0.01mm 剪切速率____mm/min 周围压力____kPa 反压力____kPa 初始孔隙压力____kPa 温度____℃

轴向变形 (0.01mm)	轴向应变 ε (%)	校正面积 $\frac{A_0}{1-\varepsilon}$ (cm ²)	钢环读数 (0.01mm)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	孔隙压力 (kPa)	σ'_1 (kPa)	σ'_3 (kPa)	$\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3}$	$\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}$ (kPa)	$\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}$ (kPa)

(6) 孔隙溶液浓度和溶质吸力

	孔隙溶液浓度 c_i (mol/L)	理想气体常数 R (J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹)	绝对温度 T (K)	分子式所含原子总数 N	溶质吸力 $\Delta\pi$ (kPa)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5) = (2) · (3) $\sum_{i=1}^{(4)} (1)$
试验前					
试验后					

附录 E 表 18.6 固结排水剪三轴试验记录

工程编号_____

试验者_____

试样编号_____

计算者_____

试验日期_____

校核者_____

(1) 含水率

	试验前		试验后	
盒号				
湿土质量 (g)				
干土质量 (g)				
含水率 (%)				
平均含水率 (%)				

(2) 密度

试样高度 (cm)		
试样体积 (cm ³)		
试样质量 (g)		
密度 (g/cm ³)		
试样草图		
试样破坏描述		
备注		

(3) 反压力饱和

周围压力 (kPa)	反压力 (kPa)	孔隙水压力 (kPa)	孔隙压力增量 (kPa)

(4) 固结排水

周围压力_____kPa 反压力_____kPa 孔隙水压力___kPa

经过时间 (h/min/s)	孔隙水压力 (kPa)	量管读数 (mL)	排出水量 (mL)

(5) 排水剪切

钢环系数____N/0.01mm 剪切速率____mm/min 周围压力____kPa 反压力____kPa 初始孔隙压力____kPa 温度____℃

轴向变形 (0.01mm)	轴向应 变 ε (%)	校正面积 $\frac{V_c - \Delta V_i}{h_c - \Delta h_i}$ (cm ²)	钢环读数 (0.01mm)	主应力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	比值 $\frac{\varepsilon_a}{\sigma_1 - \sigma_3}$	量管读数 (cm ³)	剪切排水量 (cm ³)	体应变 $\epsilon_v = \frac{\Delta V}{V_c}$ (%)	径向应变 $\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_v - \varepsilon_a}{2}$ (%)	比值 $\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_a}$	应力比 $\frac{\sigma_1}{\sigma_3}$

(6) 孔隙溶液浓度和溶质吸力

	孔隙溶液浓度 c_i (mol/L)	理想气体常数 R (J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹)	绝对温度 T (K)	分子式所含原子总数 N	溶质吸力 $\Delta\pi$ (kPa)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5) = (2) · (3) $\sum_{i=1}^{(4)} (1)$
试验前					
试验后					

附录 E 表 18.7 浸洗法试验记录

工程编号_____

试样编号_____

试验日期_____

试验者_____

计算者_____

校核者_____

(1) 样品总含水质量

质量 m (g)	总含水质量 m_w (g)	总固体质量 m_d (g)

(2) 样品总含盐度

总含水 质量 m_w (g)	澄清液 质量 m' (g)	澄清液 总盐度 r' (%)	孔隙溶液 总盐质量 m_{sa} (g)	样品 总含盐度 r_{sample} (%)
(1)	(2)	(3)	$(4) = \sum \frac{(2) \cdot (3)}{1 - (3)}$	$(5) = \frac{(4)}{(1) + (4)}$

19 振动三轴试验和共振柱试验

19.1 一般规定

19.1.1 振动三轴试验和共振柱试验目的是分别测定动应变 10^{-4} - 10^{-2} 和 10^{-6} - 10^{-4} 应变范围内非饱和土的动（剪）应力、动（剪）应变、孔隙水压力和孔隙气压力的变化过程，从而确定其在动力作用下的动弹性（剪切）模量、阻尼比、破坏强度、残余变形等动力特性指标。

【条文说明】：19.1.1 对非饱和土，需要用振动三轴仪测试其动（剪）应力、动（剪）应变、孔隙水压力和孔隙气压力的变化过程,分析动弹性（剪切）模量、阻尼比、破坏强度、残余变形等动力特性指标。另外，共振柱试验一般作为振动三轴试验的补充，测试土样在弹性应变阶段的弹性模量和阻尼比曲线，因此，将其与振动三轴试验合并在一章表述。

19.1.2 本试验标准适用于常含水率黏性土、粉质粘土、黏质粉土、粉土、砂质粉土、砂土等。

19.1.3 本试验只做非饱和土的常含水率振动三轴试验，在试验过程中不控制不量测试样的基质吸力。

【条文说明】：19.1.3 由于土的动力特性试验中动荷载幅值变化快速且施加的时间较短，考虑到非饱和土孔隙水压力量测的滞后性，本试验只做非饱和土的常含水率振动三轴试验，在试验过程中不控制不量测试样的基质吸力。

19.2 振动三轴试验

19.2.1 振动三轴试验所采用的主要仪器设备应符合下列规定：

1 振动三轴试验组成（图 19.2.1-1，图 19.2.1-2）及其主机静、动力加载系统均需满足《土工试验方法标准 GB/T50123-2019》第 29.2.1 条之规定。对饱和度不是很高的非饱和土，在固结后不排水、不排气动力剪切条件下,可通过底座透水板测试孔隙气压力，量测压力传感器精度为 1kPa。

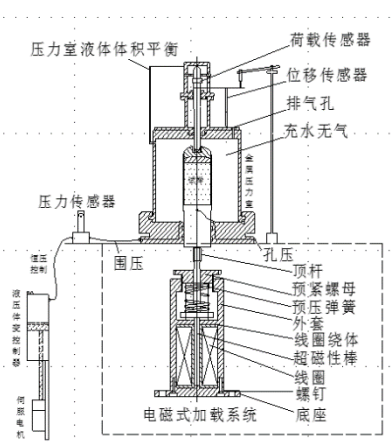
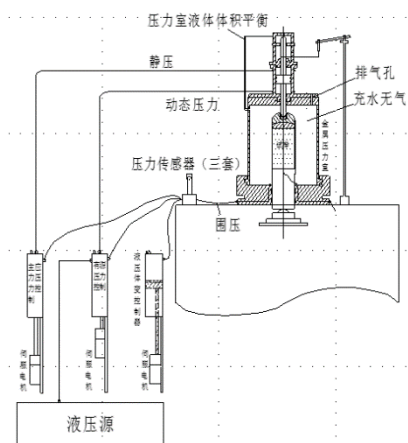


图 19.2.1-1 电液式动三轴仪原理示意图 图 19.2.1-2 电磁式动三轴仪原理示意图

（轴向加载可更换电磁式加载机构）

2 对于高饱和度非饱和土试样，动力试验仍然按照《土工试验方法标准 GB/T50123-2019》规定进行，在固结后不排水、不排气动力剪切条件下,可通过底座透水板测试孔隙水压力，量测压力传感器精度为 1kPa。

3 测试试样荷载、变形和孔隙水压力等参数的动态传感器应满足《地基动力特性测试规范 GB/T 50269-2015》第 9.2.5 条之规定。

4 振动三轴试验的主机动力加载系统，应具有施加正弦波、随机波等不同类型、频率、幅值动荷载的功能，具有应力和应变控制两种加载方式。

5 测量振动过程中试样体积变形，应采用高精度液压体变控制器，压差孔压传感器量测精度应不大于 0.01ml。

【条文说明】：19.2.1 振动三轴试验主要由含有压力室的主机、伺服加载装置、荷载、变形、孔压等量测传感器信号 A/D 转换装置、信号放大控制装置和控制程序等组成。可以对非饱和土施加振动荷载，测试不排水、不排气条件下试样的应力、应变、孔隙气压力。施加荷载的控制方式包括应力式和应变式两种。施加振动荷载的波形主要包括谐波、随机波，可控幅值大小、频率、持时。传感器可按照《土工试验方法标准 GB/T50123-2019》规定标定。

在固结后不排水条件下，控制稳定的孔隙气压力，进行试样的动力剪切，可通过试样底座嵌入的饱和高进气值陶土板测试得到孔隙水压力变化，量测压力传感器精度为 1kPa；但因荷载变化太快，水压力变化滞后很多，所测得的孔隙水压力与试样内真实值并不一致；若在振动剪切结束后不卸除固结压力待固结稳定，可得到试样在试验结束时稳定的基质吸力，用其可近似分析基质吸力变化对非饱和土动强度的影响。

19.2.2 振动三轴仪传感器标定

1 轴向荷载标定：采用标准荷载传感器，通过振动三轴仪轴向加载，量测轴向荷载与标准荷载传感器，标定轴向荷载误差，量测精度应不大于 0.01kN。

2 围压标定：采用标准压力表，连通压力室；通过振动三轴仪围压加载系统，液压（气压）管连通压力室，施加围压，量测围压传感器和标准压力，标定围压传感器量测精度应不大于 1kPa。

3 位移标定：采用千分表，量测位移传感器位移，标定位移传感器电测读数。

4 体积变形量测压差传感器标定：采用液体体积滴定管，测量振动过程中试样体积变形，应采用高精度液压体积控制器对压力室及其管道系统在不同压力下进行体积变化的标定，以实现试样体积变形的精确量测。液压体积控制器测量精度应不大于 0.01ml。

【条文说明】：19.2.2 振动三轴仪包括荷载、位移和孔压三类传感器。对于荷载传感器可连接轴向油缸、荷载传感器、标准荷载传感器，施加荷载，量测荷载传感器、标准荷载传感器测试值，建立两者相关关系曲线，确定荷载标定系数；对于位移传感器，可通过量测传感器 A/D 转换测试值及千分表测试值，建立位移两者关系曲线，确定位移标定系数。对于孔压传感器，通过连接液压装置、安装液压传感器连通管、标准压力表，由小到大施加液压，测试液压传感器和标准压力表，建立两者关系曲线，确定孔压标定系数。

19.2.3 原状试样和重塑试样的制备应符合《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）第 4.3，4.4，4.5 和 19.3 条之规定。

【条文说明】：19.2.3 重塑样制备需均匀，采用分层准压实方法时，接触面处应打毛。

19.2.4 常含水率振动三轴试验要求应符合下列规定：

1 试样的固结应力条件，一般应依据《地基动力特性测试规范 GB/T 50269-2015》9.3.4 之规定，根据试验要求或工程对象的现场条件确定固结应力条件；或者，选择土样的固结围压 1~4 个、固结应力比 1~3 个；固结过程不排水，进行均压固结或偏压固结。

2 测试时应使试样首先在静力作用下固结稳定，对于饱和度较高的非饱和

土，固结稳定标准参考《土工试验方法标准 GB/T50123-2019》17.2.2 条 2 款，可采用轴向变形速率小于 0.01mm/h 或固结体积变形速率小于 0.003ml/h；对于饱和度较低的非饱和土，固结稳定标准采用体变小于 0.003ml/h 且排水量不超过 0.006ml/h。然后在不排水条件下按应力控制或应变控制方式施加动荷载。

3 施加动荷载的频率，应依据《地基动力特性测试规范 GB/T 50269-2015》9.3.9 之规定，且在选择施加随机波时须与工程对象所受动力荷载的卓越频率和等效振次相近。

4 动强度和振陷试验：每一个固结围压下采用 3~4 个试样，分别按不同动应力幅值进行试验，测试振动荷载作用过程中动应力、动应变、动孔隙水压力和动孔隙气压力的变化及破坏振次。动应力幅值的选取以产生不同的破坏振次（如 10 次、20~30 次、100 次左右）为宜。破坏标准在动应变幅值达到 2.5%~10.0% 范围内确定。对于振陷试验，须测定给定动应力或动应变下试样残余变形或振陷变形与振次的关系。

5 试验实测的破坏振次分布范围应覆盖试验要求或工程对象的等效破坏振次；试样动强度的等效循环破坏振次，应根据实际工程对象承受的动荷载特性确定。

6 常含水率动弹性模量与阻尼比试验操作应符合按照《地基动力特性测试规范 GB/T 50269-2015》9.3.6-9.3.8 的有关规定，一般情况下动荷载施加 6~8 级为宜。对于高饱和度试样，应避免振动过程中孔隙水压力明显升高。

【条文说明】：19.2.4 常含水率振动三轴试验首先进行固结，包括固结围压和固结比，达到固结稳定标准后，进行动力剪切。为了能够测试不同围压、不同固结比的动强度和动应力应变骨干曲线，一般确定 4 个不同固结围压和 3 个不同固结比的试验。施加动荷载的控制方式包括应力式和应变式。当测试常含水率非饱和土动强度时，一般进行应力控制式试验，选择合理的动荷载，动力剪切破坏振次宜在 8~100 范围内，可绘制动应力与振次的强度破坏曲线。当测试常含水率非饱和土动应力应变曲线时，将动荷载或动变形分级 6~8 级，每级应力或应变控制作用下，由小到大依次动力剪切，每级荷载作用完成后固结，再进行下一级动力剪切，可绘制每级荷载作用下的应力应变曲线。一般选择每级荷载的第 5 振次应力应变滞回曲线，由其峰值点可绘制动应力应变骨干曲线。前者可得到不同应变幅值的阻尼比，后者可得到动模量随动应变幅值的变化曲

线。对于低湿度非饱和土，通过测试的孔隙气压力，可确定扣除孔隙气压的正应力（即净正应力）。

19.2.5 常含水率振动三轴试验数据处理应符合下列规定：

1 试样的固结应力状态和动应力、动应变、动应变按《土工试验方法标准 GB/T50123-2019》第 29.4.1-29.4.3 条之规定确定。

2 动孔隙气压力、动孔隙水压力和动体应变按式 19.2.5-1—19.2.5-3 计算：

1) 动孔隙气压力：量测不排气条件下试样内孔隙气压力，应准确至 1 kPa：

$$u_a = k_a L_a \quad (19.2.5-1)$$

式中： u_a — 动孔隙气压力（kPa）；

k_a — 动孔隙气压力量测系统单位数字信号标定系数；

L_a — 动孔隙气压力数字信号值（振动前设定为 0）。

2) 动孔隙水压力量测不排水条件下饱和陶土板底孔隙水压力，应准确至 1kPa：

$$u_w = k_u L_u \quad (19.2.5-2)$$

式中： u_w — 动孔隙水压力（kPa）；

k_u — 动孔隙水压力量测系统单位数字信号标定系数；

L_u — 动孔隙水压力数字信号值（振动前设定为 0）。

3) 动体应变

$$\varepsilon_{dv} = \frac{k_\varepsilon L_\varepsilon}{A_c h_c} \times 100 \quad (19.2.5-3)$$

式中： ε_{dv} — 动体积应变（%）；

k_ε — 内室水位量测系统单位数字信号标定系数；

L_ε — 内室水位数字信号值（振动前设定为 0）；

A_c — 试样固结后的面积（cm²）；

h_c — 试样固结后的高度（cm）。

【条文说明】：19.2.5 对于水平场地地基土一般服从 K_0 条件，动三轴试样的固结轴向应力不同于侧向应力。试样的应力状态具有一定固结围压和固结比。固结试样在动荷载作用下，土的孔隙水压力、孔隙气压力、体应变依据传感器测

试结果和孔隙水压力、孔隙气压力、体应变标定系数，确定试验测试的结果。

19.2.6 对动强度、弹性模量和阻尼比试验数据处理应按照《土工试验方法标准 GB/T50123-2019》第 29.4.2-29.4.4 条之规定进行。

1 对同一固结应力条件下多个试样的测试计算结果，绘制动应力比与破坏振次 对数值的关系曲线，如图 19.2.6-1 所示。应按工程要求的等效破坏振次和固结比，在该曲线上确定对应的动应力比。

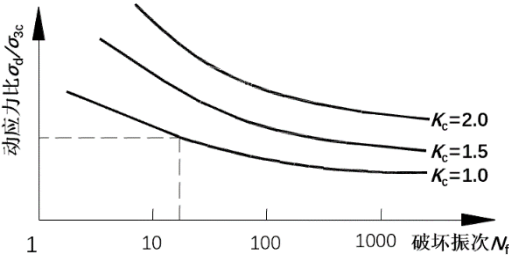


图 19.2.6-1 动强度比与破坏振次的关系曲线示意图

2 同一固结比下，以 3-4 个不同固结围压及振动破坏动应力绘制相应的应力莫尔圆，作莫尔圆的公切线，如图 19.2.6-2 所示，可确定试样的动粘聚力 C_d 和动内摩擦角 φ_d 。

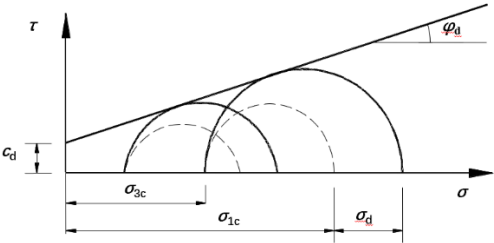


图 19.2.6-2 总剪应力与法向应力关系曲线

3 对于高饱和度试样，潜在破坏面上初始应力比相同的各个试验，可绘制某一破坏振次作用下的动孔压比 与动应力比 的关系曲线，如图 19.2.6-3 所示，亦可根据工程需要，绘制不同初始应力比与不同振次作用下动孔压比与动应力比的关系曲线。

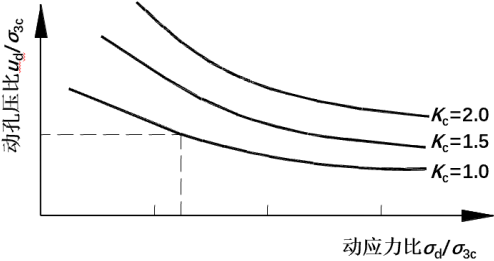


图 19.2.6-3 动孔压比与动应力比间的关系

4 对高饱和度试样，同一固结比下，以 3~4 个不同固结围压及振动破坏动应力绘制相应的有效应力莫尔圆，作莫尔圆的公切线，如图 19.2.6-4 所示，可确定试样的动有效粘聚力 c'_d 和动有效内摩擦角 φ'_d 。

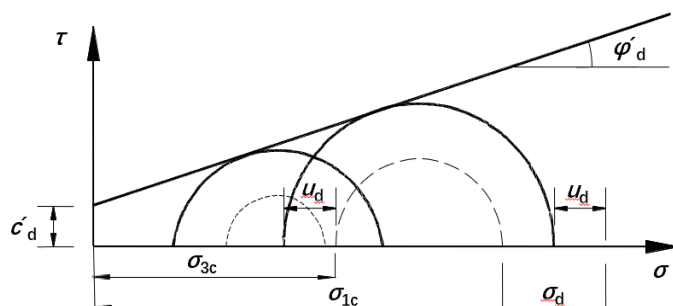


图 19.2.6-4 有效应力的应力强度指标

【条文说明】：19.2.6 在一定土的基本物理性质和静应力条件下，施加不同幅值的动应力，依试样据破坏标准，可测试达到破坏标准的振次，可以得到破坏动应力随振次的变化曲线，从而反映考虑物理性质、静应力、振次的动抗剪切强度；或者反映考虑物理性质、静应力、动应力的破坏振次。从而可以绘出不同物理性质、固结围压、固结比的动抗剪强度与破坏振次曲线。同一试样在不同动应力幅值由小到大依次增大作用下，可得到一定振次的动应力动应变滞回曲线，由不同滞回曲线的峰值点可以得到骨干曲线，骨干曲线的动剪应力与动剪应变比值可得动模量，它随动剪应变幅值的增大而增大。一周内动应力动应变滞回曲线反映了土的粘滞耗能和塑性耗能，与动应力动应变作用功比较视为粘滞耗能比，可确定给定动应变幅值土的阻尼比，建立阻尼比随动剪应变的变化曲线。由此可见，通过动三轴试验可得到反映土动力特性的动强度、动模量和阻尼比。

19.2.7 轴向残余应变计算应符合下列规定：

1 试样的轴向残余应变，应根据记录的试样轴向应力和应变时程曲线确定，见图 19.2.7-1，按公式（19.2.7-1）计算：

$$\varepsilon_p(N) = \frac{h_0 - h_1(N)}{h_0} \quad (19.2.7-1)$$

式中： $\varepsilon_p(N)$ — 动应力往返作用 N 次所产生的轴向残余应变（%）；

h_0 — 动应力作用前试样的高度（mm）；

$h_1(N)$ — 动应力往返作用 N 次后试样的高度（mm）；

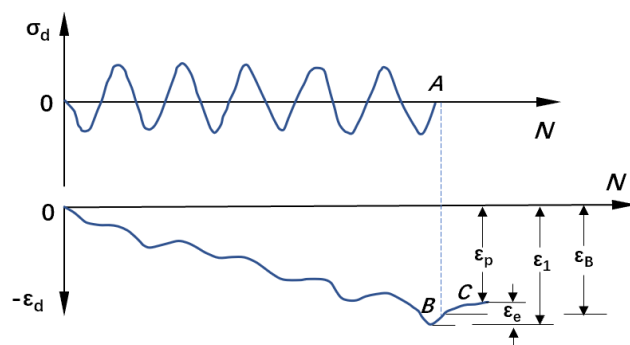


图 19.2.7-1 轴向残余应变示意图

2 对同一固结应力条件下多个试样的不同动应力作用下的测试结果，应绘制制动应力 (σ_d) 与轴向残余应变(ε_p)的关系曲线图，如图 21.1.5.3-2 所示。可根据该关系曲线所对应的曲率半径最小值，确定临界动应力。

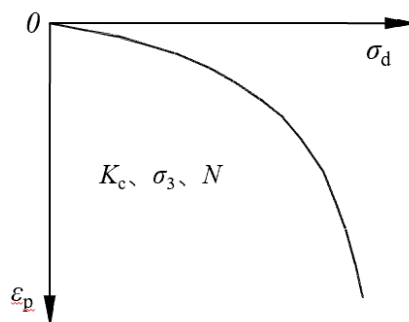


图 19.2.7-2 振陷曲线示意图

【条文说明】：19.2.7 轴向残余应变计算应符合下列规定：

1 图 19.2.7-1 描述了试样在轴向振动循环荷载作用下轴向动应变发生发展过程，其中 A 点表示振动荷载停止的时刻，B 点表示振动荷载停止时轴向动应变瞬时位置，B 点对应的轴向动应变为 ε_B ，C 点表示震动停止后轴向动应变停止变化的位置，表示轴向振动荷载停止前总的动应变值，其值为轴向残余应变值和轴向弹性应变值之和。

2 一般水平场地地基土的静应力服从 K_0 条件；边坡土体中土单元具有不同的大、中、小主应力。在 K_0 条件下三轴应力试样呈偏压固结；在忽略中主应力的真三轴应力条件下，试样也可以简化为常规三轴应力状态，试样也呈偏压固结。对于偏压固结试样，在循环动荷载作用下，产生往返动应变。但由于偏压固结条件下动荷作用改变静荷作用的土骨架，从而引起动应变向偏压作用方向发展，产生残余应变。残余变形的发展不仅与静力固结偏应力有关，还与动荷作用的累积发展有关，其中动应力与轴向残余变形关系曲线所对应的曲率半径

最小值位置处，即为残余应变从缓变到急速增大的转折点，该点所对应的动应力值确定为该试样在所给定固结状态下的临界动应力。

19.2.8 常含水率振动三轴试验记录表应符合本标准附录 E 表 19.1 和 19.2 的规定。

【条文说明】：19.2.8 依据常含水率非饱和土振动三轴试验，可得到振动作用过程土的轴向动应力、轴向动应变、动孔隙水压力及动体应变。可用于分析动孔隙水压力模型，动模量和阻尼比，以及动强度。

附录 E 表 19.1 非饱和土常含水率振动三轴试验记录表（动强度试验）

工程名称			试验日期						
土样编号			试验环境						
试验规程			试验人员						
电子天平 编号			校核人员						
试样状态固结前		固结后	固结条件		试验及破坏条件				
试样直径: <u> </u> (mm) 试样高度: <u> </u> (mm) 试样面积: <u> </u> (cm ²) 试样体积: <u> </u> (cm ³) 试样干密度: <u> </u> (g/cm ³) 试样含水率 (%)		<u> </u> (mm) $\underline{h_c}$ (mm) $\underline{A_c}$ (cm ²) <u> </u> (cm ³) <u> </u> (g/cm ³)	固结应力比: 轴向应力: <u> </u> (kPa) 侧向应力 σ_{30} : <u> </u> (kPa) 固结排水量: <u> </u> (ml) 固结变形量: <u> </u> (mm)		振动频率: <u> </u> (Hz) 给定破坏振次: <u> </u> (次) 均压时孔压破坏标准: <u> </u> (kPa) 均压时应变破坏标准: <u> </u> (%) 偏压时应变破坏标准: <u> </u> (%)				
振	轴向动应变		轴向动应力			动孔隙压力		体变	
次 (次)	轴向 变形 (cm)	动应变 (%)	轴向荷载 (N)	动应力 (kPa)	动应力 比	动孔 隙水 压力 (kPa)	动孔 隙气 压力	体积 变形	体 应变
(1)	(2)	(3) = $\frac{(2)}{h_c} \times 100$	(4)	(5) = $\frac{(4)}{A_c} \times I_t$	(6) = $\frac{(5)}{\sigma_{3c}}$	(7)	(8)	(9)	(10)

注：动孔隙水压力-----陶土板底座水压力

附录 E 表 19.2 光线示波器非饱和土常含水率振动三轴试验记录表（动弹性模量与阻尼比试验）

工程名称		试验日期	
土样编号		试验环境	
试验规程		试验人员	
电子天平编号		校核人员	
试样状态：固结前	固结后	固结条件	
试样直径： <u> </u> (mm) 试样高度： <u> </u> (mm) 试样面积： <u> </u> (cm ²) 试样体积： <u> </u> (cm ³) 试样干密度： <u> </u> (g/cm ³) 试样含水率（%）	<u> </u> (mm) <u>h_c</u> <u> </u> (mm) <u>A_c</u> <u> </u> (cm ²) <u> </u> (cm ³) <u> </u> (g/cm ³)	固结应力比： 轴向应力： <u> </u> (kPa) 侧向应力： <u> </u> (kPa) 固结排水量： <u> </u> (ml) 固结变形量： <u> </u> (mm)	

输出 电 压	动应力				动应变				动孔隙水压力				动模量		阻尼比		
	衰 减 档	光 点 位 移 (cm)	标 定 系 数 (N/cm)	动 应 力 kPa	衰 减 档	光 点 位 移 (cm)	标 定 系 数 (cm/cm)	动 应 变 (%)	衰 减 档	光 点 位 移 (cm)	标 定 系 数 (kPa/cm)	动 孔 压 (kPa)	动 模 量 (MPa)	1/E _d (MPa ⁻¹)	滞 回 圈 面 积 (cm ²)	三 角 形 面 积 (cm ²)	阻 尼 比
(mV)	(1)	(2)	(3)	(4) = 10×ρ	(5)	(6)	(7)	(8) = f ₀ ×100	(9)	(10)	(11)	(12) = (11) × (10)	(13) = f _n	(14) = f ₀	(15)	(16)	(17) = δ ₀ ×δ ₀ = $\frac{1}{N} \ln \frac{A_1}{A_{N+1}}$

19.3 共振柱试验

19.3.1 本试验适用于测定非饱和土试样在周期荷载作用下，小应变（ $10^{-6} \sim 10^{-4}$ ）时的动剪切模量和阻尼比或动弹性模量和阻尼比。本试验采用稳态强迫振动法或自由振动法，激振方式为旋转振动和纵向振动。

【条文说明】：19.3.1 对于动应变 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 范围内的非饱和土，一般处于弹性状态。为了测试弹性动力特性参数，利用土的自振特性和扰动作用下共振特性，可以实现动应力、动应变测试。测试方法常采用共振柱试验方法，通过不同频率的强迫振动和自振，测试土的固有频率，进而计算土的波速，以便分析动模量。

19.3.2 常含水率共振柱试验所用仪器设备（图 19.3.2）应符合《地基动力特性测试规范 GB/T 50269-2015》之规定，且各种动态传感器应符合本标准第 19.2.2 条的规定，其中，动应变测量应达到 $\leq 10^{-6}$ 的要求。

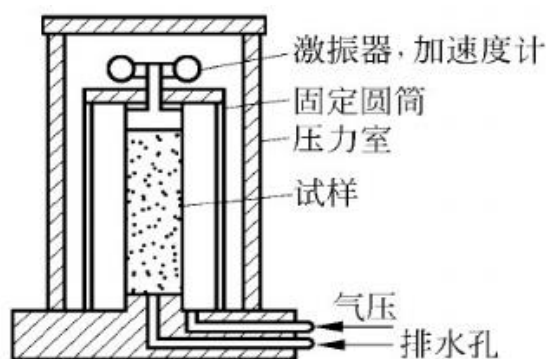


图 19.3.2 共振柱试验仪示意图

【条文说明】：19.3.2 在激振方式作用下，常含水率非饱和共振柱试样的动应变测量应达到 $\leq 10^{-6}$ 的要求。

19.3.3 本实验采用的试样直径为 39.1mm 或 50mm，试样高度为直径的 2 倍-2.5 倍。原状试样和重塑试样的制备应符合《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）第 30.3.1 条第 2 款-第 4 款之规定。

【条文说明】：19.3.3 原状试样和重塑试样的制备分别采用切削法和控制含水率、干密度的压样法制备。试样直径为 39.1mm 或 50mm，试样高度为直径的 2 倍-2.5 倍，避免端部效应影响试验结果。

19.3.4 常含水率下动剪切模量或动弹性模量的测试遵循《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）第 30.3.3 条，30.3.4 条和 30.3.5 条之规定。对于高饱和度

试样，应避免振动过程中孔隙水压力明显升高。

【条文说明】：19.3.4 常含水率非饱和土动剪切模量或动弹性模量的测试，应采用有限振次（10 次）分级动荷由小到大依次施加动荷载，每级动荷载作用完成后进行固结，避免累积动孔隙水压力对动模量测试结果的影响。

19.3.5 常含水率共振柱试验的动剪应变、动轴向应变、动剪切模量、动弹性模量、阻尼比等物理量应按照《土工试验方法标准 GB/T50123-2019》第 30.4.1 条～第 30.4.6 条之规定计算。

19.3.6 常含水率非饱和土共振柱试验的动剪应变、动轴向应变、动剪切模量、动弹性模量、阻尼比等依据振动共振频率、扭转无量纲频率因数和振动位移，以及自振的频率和衰减幅值等计算确定。

19.3.7 动剪切模量（或动弹模量）-动剪应变（或轴向应变）半对数曲线、阻尼比-动剪应变（或轴向应变）半对数曲线和一定围压下最大动剪切模量 应按《土工试验方法标准 GB/T50123-2019》第 30.4.7 条～第 30.4.9 条之规定绘制和确定。

【条文说明】：19.3.7 一定围压条件下，采用强迫振动或自振，测试无量纲因数、自振频率、衰减位移幅值等，确定动剪切模量、阻尼比，建立最大动剪切模量 G_{dmax} —周围压力半对数曲线、动剪切模量（或动弹模量）-动剪应变（或轴向应变）半对数曲线、阻尼比-动剪应变（或轴向应变）半对数曲线。

19.3.8 以最大动剪切模量 G_{dmax} 为纵坐标，围压 σ_3 为横坐标，在双对数纸上绘制关系曲线，如图 19.3.8。该直线的数学表达式如下：

$$G_{dmax} = K \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n p_a \quad (19.3.8)$$

式中：K — 当 $\sigma_3/p_a = 1$ 时的 G_{dmax} 值；

n — 图中直线的斜率；

p_a — 大气压，kPa。

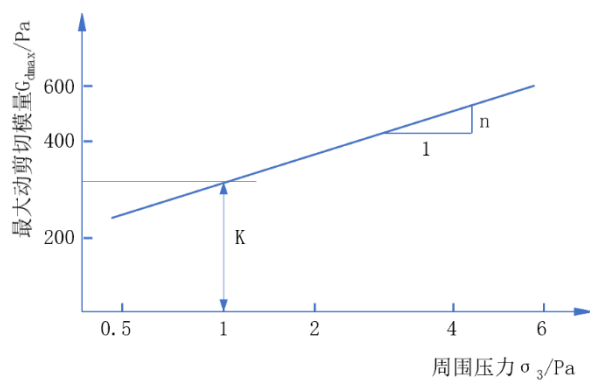


图 19.3.8 最大动剪切模量与周围压力关系曲线

【条文说明】：19.3.8 考虑固结应力对常含水量非饱和土动力模量的影响，分析最大动模量与固结围压与大气压比的半对数关系，建立相应的关系式。

19.3.9 常含水率共振柱试验记录表格应符合《土工试验方法标准 GB/T50123-2019》附录 D 表 D.55-表 D.58。另外，常含水量非饱和土可测试孔隙气压力，高饱和度非饱和土可测试孔隙水压力。

【条文说明】：19.3.9 常含水率共振柱试验强迫振动和自振作用下，常含水量（低饱和度）非饱和土可测试孔隙气压力，高饱和度非饱和土可测试孔隙水压力。故能够分别测试孔隙气压力和孔隙水压力。

20 空心圆柱动扭剪试验

20.1 一般规定

20.1.1 本试验标准适用于常含水率条件下黏性土、粉质粘土、黏质粉土、砂质粉土、粉土、砂土等。

20.1.2 本试验目的是测定非饱和土在动扭剪荷载作用下的动剪应力、动剪应变、动孔隙水压力（高饱和度时）的变化过程，确定非饱和土试样在动扭剪作用下的剪切破坏强度、残余变形、动剪切模量和阻尼比等动力特性指标。

20.1.3 本试验只做非饱和土的常含水率空心圆柱动扭剪试验，在试验过程中不控制不量测试样的基质吸力。

【条文说明】：20.1.3 因本试验过程中动荷载施加时间较短，低饱和度时孔隙水压力表现为吸力，由于获取稳定的吸力值有一定的滞后性，难以在试验过程中同步测量，故不考虑吸力量测及孔压变化过程，仅在高饱和度试验条件下孔隙压力表现为正值时考虑孔压变化过程。

20.2 仪器设备

20.2.1 本试验仪器为空心圆柱动扭剪三轴仪（图20.2.1为仪器示意图），包括主机静、动力力加载控制系统、薄壁圆筒试验扭转加载压力室、测量系统、数据采集和处理系统、附属设备等。仪器应具有良好的频响特性，且性能稳定、灵敏度高和失真小。

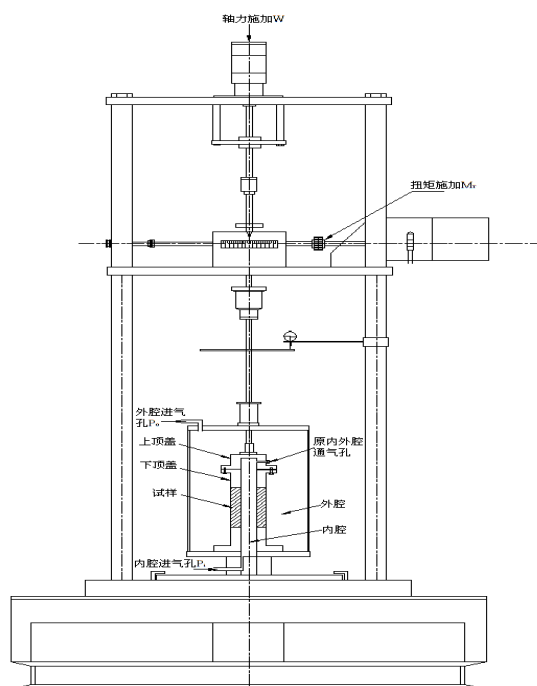


图20.2.1 空心圆柱动扭剪三轴试验仪示意图

20.2.2 仪器主机测试元件包括轴向力、扭矩、空心圆柱内/外室压力、动孔隙水压力、动孔隙气压力、轴向/径向/环向变形、体积变形传感器等。

【条文说明】：20.2.2 空心圆柱试样遭受轴向、扭矩、空心圆柱内/外室压力作用固结。固结完成之后，一般仅施加振动扭转力矩，产生压缩和剪切变形，以及孔隙压力。对于常含水量非饱和土圆筒试样，在不排水、不排气条件下，利用竖向荷载、扭矩、角位移、内腔和外腔体积变形和孔隙传感器，测试振动扭剪作用产生动剪应变、体应变和孔隙气压力。

20.2.3 仪器的主机静力加载系统和孔隙水压力测量系统，应符合现行国家标准《土工试验方法标准》（GB/T50123-2019）的有关规定。

20.2.4 仪器的主机动力加载系统，应具有施加给定数字信号波形的动荷载或动应变的功能。扭剪频率范围应分别满足0.1~10Hz。

20.2.5 仪器的测量系统由测量传感器和计算机采集系统组成。用于测试加载应力、土样变形和孔隙水压力等参数的动态传感器，应满足量程、频响特性和精度等方面的技术要求。记录仪应采用数字采集系统，可实现试验过程中数据的自动采集。

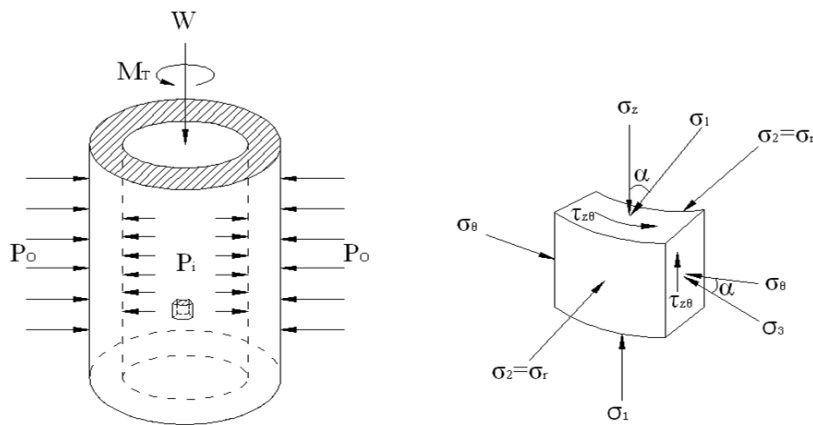
【条文说明】：20.2.5 用于测试加载应力、土样变形和孔隙水压力等参数的动态传感器试验前应进行参数标定，以确保在试验过程中满足量程、频响特性和精度等方面的技术要求。

20.2.6 附属设备：主要包括试样制样器（原状样削样器、重塑样压样器）、平土刀、土钻、刮土刀、钢丝锯、喷壶、天平、土盘、皿盒等。

20.3 操作步骤

20.3.1 本试验试样的制备应符合以下规定：

1 试样为空心圆柱形（图20.3.1-1），可选用两种试样尺寸：外径为70mm、内径为30mm，试样高100mm；或外径为100mm、内径为60mm，试样高150mm。



(a) 试样受荷载情况 (b) 单元体应力状态

图20.3.1-1 空心圆柱形试样及其单元体应力状态示意图

2 空心圆柱试样由符合外轮廓的实心圆柱样加装保护套后经轴向钻孔、中心扩孔、修整达到内径尺寸要求而得到。

3 原状土实心圆柱样制备应符合《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）第4.5节相关规定直接由原状土样削制成型。实心样制成后按本条规定第2款制备得到符合要求的原状土空心圆柱形试样。

4 扰动土实心圆柱样应符合《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）第4.4.4条相关规定由试验土样经风干、碾碎、过筛后的土料压制而成。扰动土试样的干密度依据试验要求进行控制，制样时，含水率可按某一给定值进行配制，待水份均匀后，用实心试样压样器（图20.3.1-2）一次性匀速压制而成。实心样制成后按本条规定第2款制备得到符合要求的扰动土空心圆柱形试样。

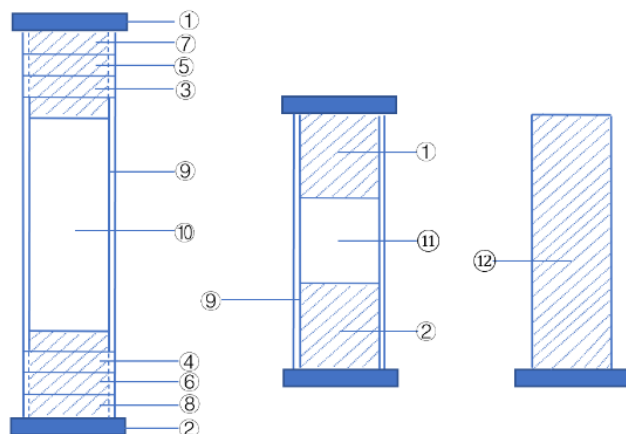


图 20.3.1-2 实心试样压样器示意图

①上压样头 ②下压样头 ③④⑤⑥⑦⑧开口可拆卸定位环 ⑨制样圆筒 ⑩土料 ⑪试样 ⑫推样头

5 试样含水率控制：制成的试样先放入养护缸内养护数天，然后再采用风干法或水膜转移法将试样的含水率调节到试验要求值，然后将其用保鲜膜包裹，放入密闭养护缸进行养护，待内部水分分布均匀后备用。

6 砂土试样需要在仪器装样过程中直接制备。

【条文说明】：20.3.1 本试验试样的制备应符合以下规定：

3 原状土空心圆柱样的制备装置及制备过程见图20.3.1-3：

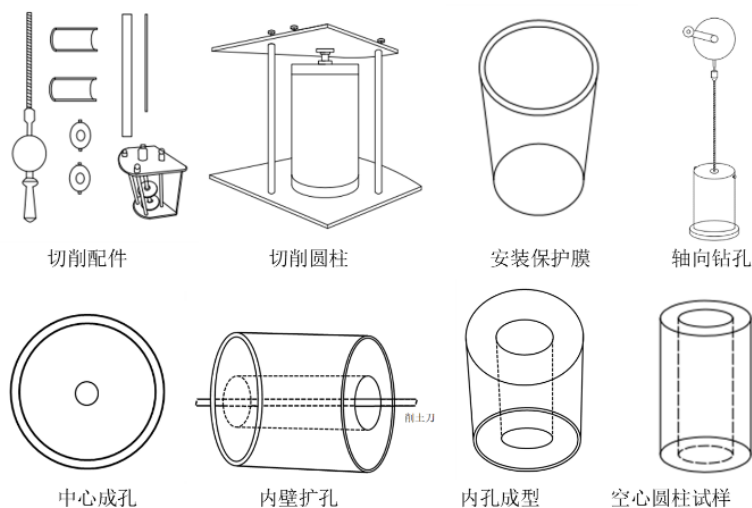


图20.3.1-3 原状土空心圆柱试样制备装置及过程示意图

4 扰动土空心圆柱样的制备装置及制备过程见图20.3.1-4：

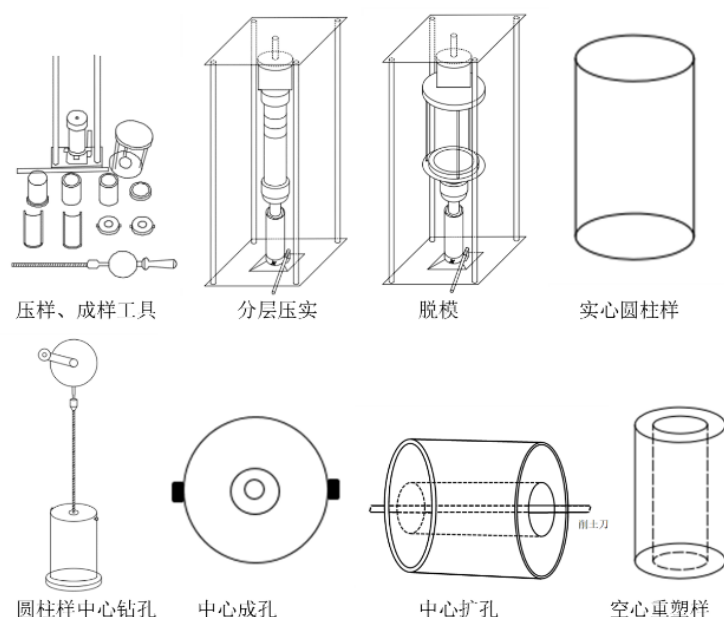


图20.3.1-4 扰动土空心圆柱试样制备装置及过程示意图

5 制成的试样在养护过程中应注意对试样完整性保护，采用风干法调低试样含水率时要采取措施防止试样产生裂缝或开裂，水膜转移法调高试样含水率若使得试样明显变软时要在内外壁进行保护以保证试样不产生变形。

6 砂土试样宜先配至试验要求的含水率，然后按要求满足的试样密度在仪器装样过程中直接制备。

20.3.2 本试验试样安装应符合以下规定：

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，将底座上浮水用抹布擦干。伸展试样内膜使其穿过试样，放置试样于底座上，用成模筒将试样外膜套在试样上；安装压力室，降落试样顶盖使之与试样顶部接触并不使试样受压，试样膜上下端应分别裹住试样下顶盖和试样底座，用橡皮筋扎紧密封。砂土试样安装在制备过程中完成。

2 调节角位移传感器的转轮，使传感器显示仪读数为零，安装压力室外罩，连接试样帽与扭转轴。

3 连接角位移传感器、孔压传感器和轴向位移传感器。

4 给压力室进水，到水面淹没试样帽为止。

20.3.3 本试验试样固结应符合本标准第19.2.4条之相关规定。

20.3.4 本试验静、动力加载应符合以下规定：

1 试样的固结应力条件，应根据试验要求或工程对象的现场应力条件确定，或每一种土样的固结围压可选用1~4个、初始剪应力比可选用1~3个。

2 测试时应使试样在静力作用下固结稳定后，在不排水条件下按应力控制或应变控制施加动荷载。其中，固结变形稳定标准为轴向变形速率小于 0.01mm/h ，固结排水稳定标准为在 2h 内体变不超过 20mm^3 ，且排水量不超过 40mm^3 。

3 施加动荷载的频率，应与工程对象所受动力荷载的卓越频率相近，波形可选择谐波或随机波。

【条文说明】：20.3.4 本试验动强度及振陷试验应符合以下规定：

3 试样动强度的破坏标准区分均压固结、预剪应力均压固结、偏压固结等情况分别选用；对高饱和度土的动强度试验可采用动剪应变幅值达到 5% 或孔隙水压力比达到 0.65 的破坏标准。

20.3.5 本试验动强度及振陷试验应符合以下规定：

1 对于强度试验，采用单级加载法，即按预设的破坏次数确定施加的动荷载的大小，对一个固结变形稳定后的试样，在常含水率不排水不排气条件下，施加动荷载直到达到破坏标准为止。

2 每一个固结围压下采用 $3\sim 4$ 个试样，分别按不同的破坏振次（ 10 次、 $20\sim 30$ 次、 100 次左右）选择动剪应力幅值进行试验，记录动剪应力、动剪应变和动孔隙压力的变化过程。

3 试样动强度的破坏标准按以下情况确定：①均压固结单幅剪应变为 2.5% 、双幅为 5% ；②预剪应力均压固结剪应变为 10% ；③偏压固结轴向应变为 10% ；④高饱和度土的动强度试验的破坏标准，可采用动剪应变幅值达到 5% 或孔隙水压力比达到 0.65 。

4 在给定的动剪应力或动剪应变作用下，测定试样残余变形或振陷变形与振次的关系。

5 试样动强度的等效破坏振次，应根据实际工程对象承受的动荷载特性确定。

6 实测破坏振次的分布范围应覆盖试验要求或工程对象的等效破坏振次。

【条文说明】：20.3.5 本试验动强度及振陷试验应符合以下规定

3 试样动强度的破坏标准区分均压固结、预剪应力均压固结、偏压固结等情况分别选用；对高饱和度土的动强度试验可采用动剪应变幅值达到 5% 或孔隙水压力比达到 0.65 的破坏标准。

20.3.6 本试验动剪模量及阻尼比试验应符合以下规定：

1 对于动模量和动阻尼比试验，采用同一固结状态下逐级加荷的方法，即在对一个固结变形稳定后的试样，在不排水不排气条件下，逐级施加固定振次（一般为 10 次

或一个完整的动力荷载时程)的动荷载,直到试样破坏。

2 测试试样动剪模量和阻尼比时,应在给定振动频率的动剪应力作用下测得试样的动剪应力-动剪应变滞回曲线,动剪应力的作用一般为10次。

3 测试动剪模量和阻尼比随动剪应变幅值的变化时,宜逐级施加动剪应力幅值或动剪应变幅值,后一级的振动变形幅值可比前一级增大1倍,一般情况施加6-8级,每级荷载振后须固结消散水压与孔压。对于高饱和度试样,选用允许施加的动剪应力幅值或动剪应变幅值时,应避免振动过程中孔隙水压力明显升高。

20.3.7 本试验过程宜遵循以下步骤:

- 1 试样固结完成后,关闭外通。打开加载控制系统的电源。对于电液、电气伺服系统,开启压力源使其达到工作状态。调节静力设置旋钮,使加载系统处于工作状态。
- 2 设置所需的动应力和振动次数。选择振动的波形和频率。打开计算机采集系统。
- 3 检查压力系统、动荷载系统和测量系统设置正确后,开始施加动荷载。
- 4 试验结束后,将试验数据保存在计算机中,并查看试验结果是否正常。
- 5 对于电液、电气伺服系统,断开伺服阀活塞与传动杆的连接,逐渐降低油泵、气泵压力,压力完全卸掉后关闭油泵、气泵。关闭测量系统电源。
- 6 拆除压力室及试样,测定试样含水率。
- 7 整理试验记录和资料。

20.4 试验数据处理

20.4.1 本试验试样的静、动应力及应变指标应按下列规定计算:

1 试样轴力、内围压、外围压、扭矩、轴向位移、外径位移、内径位移、扭转角位移和孔隙水压力等物理量,应按仪器的标定系数及试样尺寸,由测试记录值进行换算确定。

2 试样轴向应力、环向应力、径向应力和剪应力应按下列公式计算:

$$\sigma_z = \frac{W}{\pi(R_{c0}^2 - R_{ci}^2)} + \frac{P_0 R_{c0}^2 - P_i R_{ci}^2}{R_{c0}^2 - R_{ci}^2} \quad (20.4.1-1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P_0 R_{c0} - P_i R_{ci}}{R_{c0} - R_{ci}} \quad (20.4.1-2)$$

$$\sigma_r = \frac{P_0 R_{c0} + P_i R_{ci}}{R_{c0} + R_{ci}} \quad (20.4.1-3)$$

$$\tau_{z\theta} = \frac{3M_T}{2\pi(R_{c0}^3 - R_{ci}^3)} \quad (20.4.1-4)$$

式中: σ_z — 试样轴向应力(kPa);

σ_θ — 试样环向应力(kPa);

σ_r — 试样径向应力(kPa);

$\tau_{z\theta}$ — 试样剪应力(kPa);

W — 试样轴力(N);

p_o — 试样外围压(kPa);

p_i — 试样内围压(kPa);

M_T — 试样扭矩(N·m);

R_{co} — 固结完成后试样外径(mm);

R_{ci} — 固结完成后试样内径(mm)。

3 试样大主应力、中主应力和小主应力及主应力旋转角应按下列公式计算:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} + \sqrt{\frac{(\sigma_z - \sigma_\theta)^2}{4} + \tau_{\theta z}^2} \quad (20.4.1-5)$$

$$\sigma_2 = \sigma_r \quad (20.4.1-6)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} - \sqrt{\frac{(\sigma_z - \sigma_\theta)^2}{4} + \tau_{\theta z}^2} \quad (20.4.1-7)$$

$$\frac{1}{2} \tan 2\alpha = \frac{\tau_{\theta z}}{\sigma_z - \sigma_\theta} \quad (20.4.1-8)$$

式中: σ_1 — 试样大主应力(kPa);

σ_2 — 试样中主应力(kPa);

σ_3 — 试样小主应力(kPa);

α — 试样主应力旋转角(°)。

4 试样轴向应变、环向应变、径向应变和剪应变应按下列公式计算:

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta h}{h_{cs}} \quad (20.4.1-9)$$

$$\varepsilon_\theta = -\frac{u_o + u_i}{R_{co} + R_{ci}} \quad (20.4.1-10)$$

$$\varepsilon_r = -\frac{u_o - u_i}{R_{co} - R_{ci}} \quad (20.4.1-11)$$

$$\gamma_{\theta z} = \frac{2\theta(R_{co}^3 - R_{ci}^3)}{3h_{cs}(R_{co}^2 - R_{ci}^2)} \quad (20.4.1-12)$$

式中: σ_z — 试样轴向应变;

σ_θ — 试样环向应变;

σ_r — 试样径向应变;
 $\gamma_{z\theta}$ — 试样剪应变;
 Δh — 试样轴向位移(mm);
 u_o — 试样外径位移(mm);
 u_i — 试样内径位移(mm);
 θ — 试样扭转角位移(rad);
 h_{cs} — 固结完成后试样高度(mm)。

5 试样大主应变、中主应变和小主应变应按下列公式计算:

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_z + \varepsilon_\theta}{2} + \sqrt{\frac{(\varepsilon_z - \varepsilon_\theta)^2}{4} + \gamma_{\theta z}^2} \quad (20.4.1-13)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_r \quad (20.4.1-14)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_z + \varepsilon_\theta}{2} - \sqrt{\frac{(\varepsilon_z - \varepsilon_\theta)^2}{4} + \gamma_{\theta z}^2} \quad (20.4.1-15)$$

式中: ε_1 — 试样大主应变;
 ε_2 — 试样中主应变;
 ε_3 — 试样小主应变。

【条文说明】: 20.4.1 本试验试样的静、动应力及应变指标计算中未考虑动孔隙压力。

20.4.2 试样的动弹性模量和动剪切模量, 应分别根据记录的轴向动应力-动应变滞回曲线和剪切动应力-动应变滞回曲线按下列公式计算:

$$E_d = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_d} \quad (20.4.2-1)$$

$$G_d = \frac{\tau_{z\theta}}{\gamma_{z\theta}} \quad (20.4.2-2)$$

20.4.3 在测试记录的动应力、动应变的时程曲线上, 应按本标准20.3.5条第3款规定的破坏标准确定破坏振次。相应于该破坏振次的动强度比, 应按下列公式计算:

$$R_f = \frac{q}{2\sigma_{0c}} \quad (20.4.3-1)$$

$$q = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]} \quad (20.4.3-2)$$

$$\sigma_{0c} = (\sigma_{1c} + \sigma_{2c} + \sigma_{3c})/3 \quad (20.4.3-3)$$

式中: R_f — 动强度比;
 q — 试样广义剪应力幅值(kPa);

- σ_{0c} — 初始平均固结应力(kPa);
- σ_{1c} — 试样固结完后的大主应力值(kPa);
- σ_{2c} — 试样固结完后的中主应力值(kPa);
- σ_{3c} — 试样固结完后的最小主应力值(kPa)。

20.4.4 本试验动强度试验的试验曲线可按下列规定进行绘图:

- 1 在测试得到的动剪应力、动剪应变及动孔隙水压力（高饱和度时）时程曲线上，应按本标准第20.3.4条第3款确定的破坏标准来确定破坏振次。
- 2 对同一固结应力条件下多个试样的测试计算结果，绘制动剪应力比 τ_d/σ_{3c} 与破坏振次 N_f 对数值的关系曲线，如图20.4.4-1所示。应按工程要求的等效破坏振次 N_{fe} 和固结比 K_c ，在该曲线上确定对应的动剪应力比。

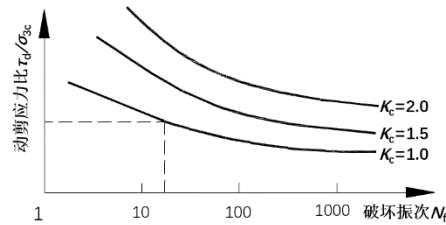


图20.4.4-1 动剪应力比与破坏振次的关系曲线示意图

- 3 同一固结比下，由本试验标准20.4.1有关公式求取要求振次下振动破坏动剪应力对应的振动破坏动应力，以3-4个不同固结围压及振动破坏动应力绘制相应的应力莫尔圆，作莫尔圆的公切线，如图20.4.4-2所示，可确定试样的动粘聚力 c_d 和动内摩擦角 φ_d 。

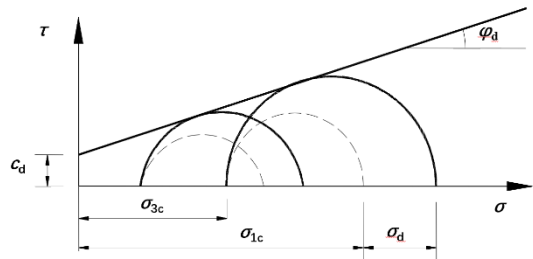


图20.4.4-2 总剪应力与法向应力关系曲线

- 4 对于高饱和度试样，潜在破坏面上初始动剪应力比相同的各个试验，可绘制某一破坏振次作用下的动孔压比与动剪应力比的关系曲线，如图23.4.4-3所示，亦可根据工程需要，绘制不同初始动剪应力比与不同振次作用下动孔压比与动剪应力比的关系曲线。

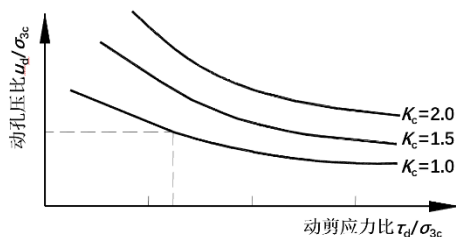


图20.4.4-3 动孔压比与动剪应力比间的关系

5 对高饱和度试样，同一固结比下，由本试验标准20.4.1有关公式求取要求振次下破坏动剪应力对应的破坏动应力，由动孔压比与动剪应力比间的关系曲线求取相应的动孔隙水压力值，以3-4个不同固结围压及破坏动应力绘制相应的有效应力莫尔圆，作莫尔圆的公切线，如图20.4.4-4所示，可确定试样的动有效粘聚力 c'_d 和动有效内摩擦角 φ'_d 。

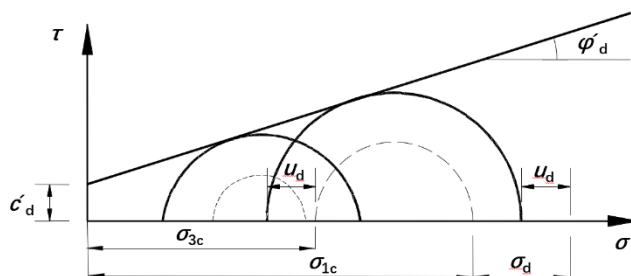


图20.4.4-4 有效应力的应力强度指标求取示意图

【条文说明】：20.4.4 本试验动强度试验的试验曲线可按下列规定进行绘图：

1 在进行高饱和度试样试验过程中应记录动孔隙水压力变化，并绘制动孔隙水压力时程曲线。

4对于高饱和度试样试验，可类比饱和土试样试验绘制某一破坏振次作用下的动孔压比与动剪应力比的关系曲线或不同初始动剪应力比与不同振次作用下动孔压比与动剪应力比的关系曲线。

5 对高饱和度试样试验，可类比饱和土试样试验确定试样的动有效粘聚力 c'_d 和动有效内摩擦角 φ'_d 。

20.4.5 本试验动剪模量与阻尼比计算应符合下列规定：

1 试样动剪模量应根据记录的试样动剪应力-动剪应变骨干曲线（图20.4.5-1），按式20.4.5-1～20.4.5-2计算：

$$G_d = \frac{\tau_d}{\gamma_d} \quad (20.4.5-1)$$

$$G_0 = 1/a \quad (20.4.5-2)$$

式中: G_d — 动剪模量 (MPa);

G_0 — 最大动剪模量 (MPa);

τ_d — 动剪应力幅 (kPa);

γ_d — 动剪应变幅 (%);

a — $\gamma_d/\tau_d \sim \gamma_d$ 线性关系的截距 (kPa^{-1})。

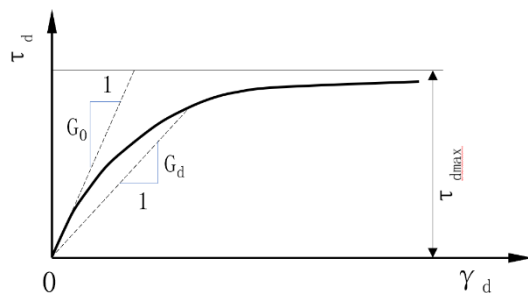


图20.4.5-1 动剪应力与动剪应变关系骨干曲线 (示意图)

动剪切模量与动剪应变关系曲线如图20.4.5-2所示。

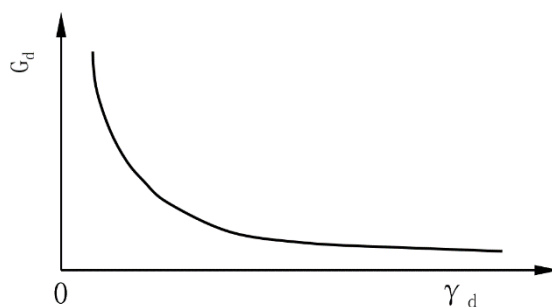


图20.4.5-2 动剪切模量与动剪应变的关系曲线 (示意图)

2 试样阻尼比, 应根据记录的试样滞回曲线 (图20.4.5-3), 按式20.4.5-3计算:

$$\lambda = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (20.4.5-3)$$

式中: λ — 阻尼比;

ΔW — 滞回曲线所包围的面积;

W — 三角形 $\triangle OAB$ 的面积。

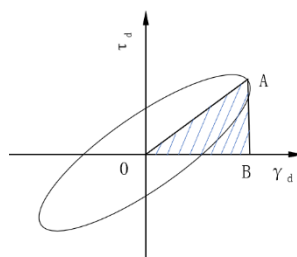


图20.4.5-3 非饱和土动剪应力~动剪应变关系滞回曲线

20.4.6 本试验残余应变计算应符合下列规定：

1 试样的轴向残余应变，应根据记录的试样动剪应力和轴向应变时程曲线确定，见图20.4.6-1，按式20.4.6-1计算：

$$\varepsilon_p(N) = \frac{h_0 - h_1(N)}{h_0} \quad (20.4.6-1)$$

式中： $\varepsilon_p(N)$ — 动应力往返作用 N 次所产生的轴向残余应变（%）；

h_0 — 动应力作用前试样的高度（mm）；

$h_1(N)$ — 动应力往返作用 N 次后试样的高度（mm）。

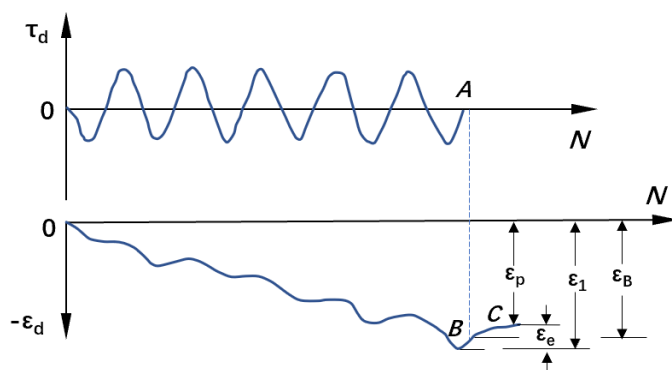


图20.4.6-1 轴向残余应变示意图

2 对同一固结应力条件下多个试样的不同动剪应力作用下的测试结果，应绘制动剪应力 与轴向残余变形 的关系曲线图，如图20.4.6-2所示。可根据该关系曲线所对应的曲率半径最小值，确定临界动剪应力。

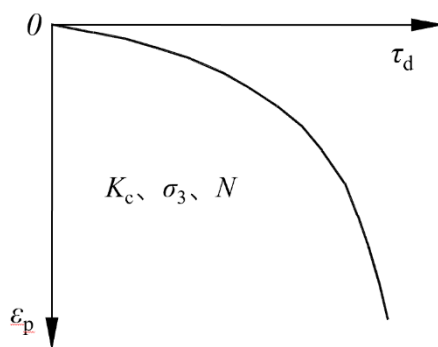


图20.4.6-2 振陷曲线示意图

【条文说明】：20.4.6 本试验残余应变计算应符合下列规定：

1 图20.4.6-1描述了试样在剪切振动循环荷载作用下轴向动应变发生发展过程，其中A点表示振动荷载停止的时刻，B点表示振动荷载停止时轴向动应变瞬时位置，B点对应的轴向动应变为 ε_B ，C点表示振动停止后轴向动应变停止变化的位置， ε_1 表示轴向振动荷载停止前总的动应变值，其值为轴向残余应变 ε_p 量值和轴向弹性应变 ε_e 量值之和。

2 一般水平场地地基土的静应力服从 K_0 条件；边坡土体中土单元具有不同的大、中、小主应力。在 K_0 条件下三轴应力试样呈偏压固结；在忽略中主应力的真三轴应力条件下，试样也可以简化为常规三轴应力状态，试样也呈偏压固结。对于偏压固结试样，在循环动荷载作用下，产生往返动应变。但由于偏压固结条件下动荷作用改变静荷作用的土骨架，从而引起动应变向偏压作用方向发展，产生残余应变。残余变形的发展不仅与静力固结偏应力有关，还与动剪应力作用的累积发展有关，其中动剪应力与轴向残余变形关系曲线所对应的曲率半径最小值位置处，即为残余应变从缓变到急速增大的转折点，该点所对应的动剪应力值确定为该试样在所给定固结状态下的临界动剪应力。

20.4.7 本试验记录表格应符合本标准附录E表20.1和表20.2的规定。

附录 E 表 20.1 非饱和土常含水率空心圆柱动扭剪试验记录表（动强度与振陷试验）

工程名称				试验日期					
土样编号				试验环境					
试验规程				试验人员					
电子天平编号				校核人员					
试样状态：固结前		固结后		固结条件			试验及破坏条件		
试样外径：____(mm) 试样内径：____(mm) 试样高度：____(mm) 试样面积：____(cm ²) 试样体积：____(cm ³) 试样干密度：____(g/cm ³) 试样含水率：____(%)		_____(mm) _____(mm) h _c : _____(mm) A _c : _____(cm ²) _____(cm ³) _____(g/cm ³) _____(%)		固结应力比： 轴向应力：____(kPa) 外腔侧向应力 σ_{3out} ： _____(kPa) 内腔侧向应力 σ_{3in} ： _____(kPa) 固结排水量：____(ml) 固结变形量：____(mm)			振 动 频 率：____(Hz) 给 定 破 坏 振 次：____(次) 均压时孔压破坏标准： _____(kPa) 均压时应变破坏标准： _____(%) 偏压时应变破坏标准：____(%)		
振 次 (次)	动剪应变		动剪应力			动孔隙水压力		体变	
	扭转形 (cm)	动剪应变 (%)	扭矩 (kN·m)	动剪应力 (kPa)	动剪应 力比	动孔压 (kPa)	动 孔压比	体积 变形	体应变

21 渗水模型试验

21.1 一般规定

21.1.1 本试验适合于黏土、粉土和细砂的扰动土样试验。

21.1.2 本试验是基于 γ 射线法测量水分在土体中的运移，可以测量一维土柱和二维土箱土样的水分动态过程，土箱中土体的顶面可以是水平的，也可以是倾斜的（模拟边坡或路堤侧面）。可以模拟常水头入渗，也可模拟控制降雨强度的降雨入渗或蒸发。

【条文说明】：21.1.2 本试验是基于 γ 射线法测量水分在土体中的运移，可以测量一维土柱和二维土箱土样的水分动态过程。

21.1.3 本试验的测控系统完全由计算机自动控制，测量数据可以在线显示、绘图和保存。在脱机状态下，可以用 Excel 对数据进行再处理和分析。

21.2 仪器设备

21.2.1 本试验所用的渗水模型试验装置由二维土箱（或一维土柱）、恒定供水系统的马氏瓶、降雨器和试验测控系统组成，应符合以下规：

1 二维土样的土箱如图 21.2.1-1（a）所示。土箱形状为矩形，长度宜为 100cm~150cm，高度宜为 100cm~150cm，宽度宜为 15cm~20cm；土箱底部设直径为 0.3cm，间距为 5cm 的透气孔，透气孔按梅花形排列，如图 21.2.1-1（b）所示。放射源侧的土箱侧板用透明钢化玻璃制作，其余三面 and 底面用钢板制作。在钢化玻璃板面上设置坐标线，其中横坐标 x 的间隔宜为 5cm，纵坐标 z 的间隔宜为 5cm，纵坐标线也是装填土样时的填土参照控制线。纵横坐标线的交点就是含水率量测点，在 x - z 平面内共有测点 800 个左右。

一维土柱内径宜为 10cm~15cm，长（高）宜为 100cm~150cm 的有机玻璃管或塑料管。

2 二维渗水模型试验所配恒水头供水装置的马氏瓶如图 21.2.1-1（a）所示。考虑到模型试验用水量大，宜配备两个马氏瓶；马氏瓶设置在土箱接近顶部适当位置的两侧。马氏瓶的直径宜为 30cm，净高不小于 80cm；马氏瓶上设有灌水孔、橡皮塞、放气阀、测尺、马氏瓶进气口、针阀、进水阀和进水管。

对于一维试验可配置一个马氏瓶供水。供水马氏瓶的直径宜为 6cm，净高不小于 80cm。

马氏瓶用支撑固定。支撑由支撑底座、支撑、可调节套、固定螺丝、马氏瓶底部固定板、固定支架、滑套和顶丝组成，如图 21.2.1-1 (a) 所示。

3 降雨器如图 21.2.1-1 (a) 所示。降雨器由降雨板、承压板、医用针头、测压管、进水阀门、进水管和流量计组成。降雨板和承压板用有机玻璃制作，医用针头按梅花形布置，针头密度可以根据要求设计，针头的粗细可以根据降雨强度的不同使用不同型号的注射用针头，测压管的作用是在医用针头上部形成不同的水头，降雨强度随水头变化呈线性变化关系。流量计可以用电磁流量计或超声波流量计。

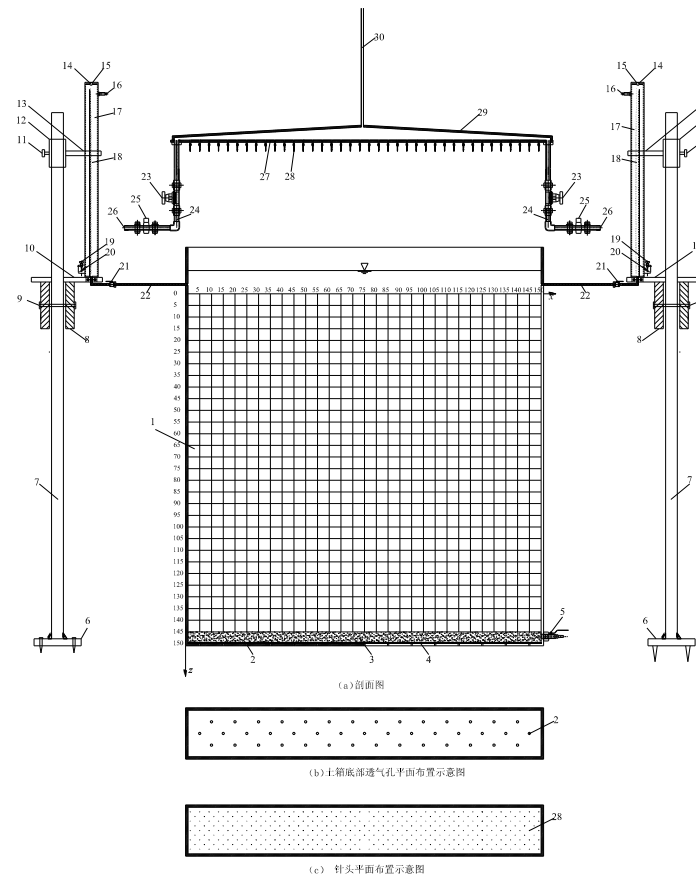


图 21.2.1-1 土箱和恒水头供水装置的供水马氏瓶装置图

1—被测土体（土箱）；2—透气孔；3—混合砂垫层；4—120 目纱网；5—放水阀；6—支撑底座；7—支撑；8—可调节套；9—固定螺丝；10—马氏瓶底部固定板；11—顶丝；12—滑套；13—固定支架；14—灌水孔；15—橡皮塞；16—放气阀；17—马氏瓶；18—测尺；19—针阀；20—马氏瓶进气口；21—进水阀；22—进水软管；23—进水阀门；24—进水管；25—流量计；26—接水源；27—降雨板；28—医用针头；29—承压板；30—测压管

4 渗水试验测控系统由 γ 射线放射源、能谱探头、三个方向的驱动电机、机械传动的移动式测架系统、位移传感器和采集器、现场坐标显示器、 γ 射线自动定标器以及测控仪、计算机和打印机组成，如图 21.2.1-2 所示。

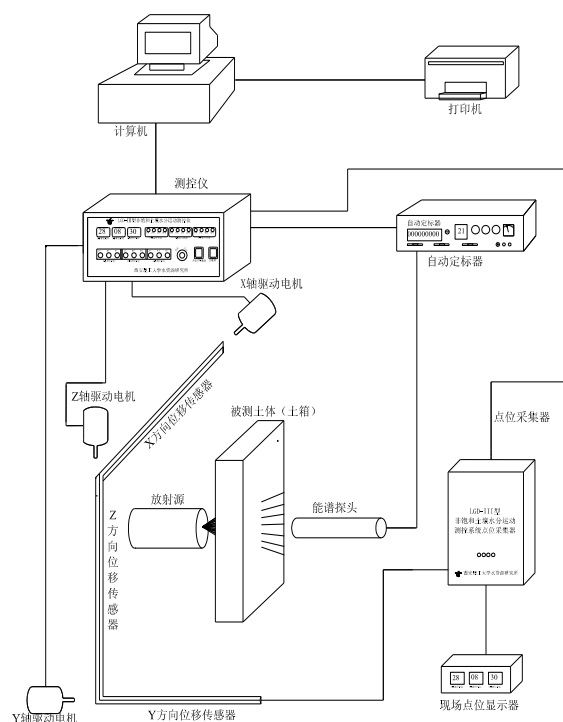


图 21.2.1-2 土壤水分模拟试验测控系统结构原理示意图

γ 射线放射源的活度应不超过 $3.7 \times 10^7 \sim 3.7 \times 10^8 \text{Bq}$ ，可选用 ^{137}Cs 作为 γ 射线放射源。放射源和自动定标器宜选用北京核仪器厂生产的 FJ-374A 通用闪烁探头和 FH-463B 自动定标器。

能谱探头传感器采用 FJ374A 型 γ 能谱探头，其主要技术指标为：

- 1) 能量分辨率：对 ^{137}Cs 的光电峰好于 11%，对 ^{239}Pu 的 16keV α 射线峰好于 65%。
- 2) 能量线性：好于 1%。
- 3) 能量范围：6keV $\sim$ 3MeV。
- 4) 稳定性： ^{137}Cs 的光电峰，八小时连续工作，峰位漂移小于满度的 $\pm 2\%$ 。
- 5) 温度系数： $\leq 1\% / ^\circ\text{C}$ 。
- 6) 使用环境温度： $0^\circ\text{C} \sim +40^\circ\text{C}$ 。
- 7) 环境相对湿度： $\leq 90\%$ (在 $+30^\circ\text{C}$)。
- 8) 供电电源：低压：-12V，高压：正极性。

自动定标器采用北京核仪器厂生产的 FH-463B 自动定标器，其主要技术指标为：

- 1) 阈值可调范围：0.1V $\sim$ 5V 连续可调。线性偏差 $\leq \pm 0.5\%$ 。
- 2) 道宽可调范围：0.1 $\sim$ 3V。
- 3) 输入脉冲极性：正或负。

- 4) 输入脉冲宽度: $0.1\mu\text{s}\sim 100\mu\text{s}$ 。
- 5) 分辨时间: $\leq 200\text{ns}$ 。
- 6) 定时范围: $K\times 10\text{n s}$ ($K=1\sim 9$, $n=0\sim 6$)。
- 7) 最高计数率: $\leq 4.5\text{MHz}$ 。
- 8) 最大计数容量: $1.5\times 10^7-1$ 。
- 9) 高压输出极性: 正或负。
- 10) 高压输出范围: $0\text{V}\pm 50\text{V}\sim (\pm 1500\text{V})\pm 10\text{V}$ 连续可调
- 11) 高压长期稳定性: 开机预热 30 分钟后, 连续工作八小时, 高压输出变化 $\leq \pm 0.3\%$ 。

- 12) 高压温度系数: $\leq \pm 0.05\%/^{\circ}\text{C}$ 。
- 13) 甄别阈温度系数: $\leq \pm 3\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ 。
- 14) 低压输出: $\pm 10\text{V}$, $+5\text{V}$ 。
- 15) 使用环境温度: $5\sim 40^{\circ}\text{C}$ 。
- 16) 使用环境湿度: 90% (30°C)。
- 17) 供电电源: $220\text{V}\pm 10\%$, 50Hz 。

采集器的主要技术指标为:

- 1) x 水平坐标采集点数为 96 点, 点距 5cm 。
- 2) y 坐标采集点数为 32 点, 间距 5cm 。
- 3) z 坐标采集点数为 64 点, 间距 5cm 。
- 4) 坐标采集精度 0.1cm 。
- 5) 供电电压 12V 。

现场坐标显示器的技术指标为:

- 1) x 坐标显示范围 $0\sim 150\text{cm}$ 。
- 2) z 坐标显示范围 $0\sim 150\text{cm}$ 。
- 3) y 坐标显示范围 $0\sim 100\text{cm}$ 。
- 4) 坐标显示方式: 液晶显示。

测控仪的主要技术指标为:

- 1) 定位控制精度: $\pm 0.2\text{cm}$
- 2) 测点代表范围: 2cm 直径的长为透射土体厚度范围的柱状体。

放射源和能谱探头应固定在移动式测架上, 由驱动电机带动, 在计算机控制下

沿着设定的轨道运行。在移动式测架上设位移指示器，位移指示器和位移传感器组成了坐标检测系统，当位移指示器与某一方向位移传感器中设定的点重合时，计算机可以直接显示出土箱中某点当前的位置坐标。

测控运动系统应符合如下要求：由三个驱动电机带动放射源和能谱探头分别沿 x 、 y 、 z 三个正交方向运动（图 21.2.1-2）。 y 方向的运动用于调整放射源和探头之间的水平间距，最大调节距离不小于 100cm，最小调节步长根据试验要求确定，其调节过程应该在正式试验以前完成，一次试验的过程中不允许对该方向进行操作。 x 和 z 方向为探头和放射源进行土体水分测量的运行方向，其中 x 方向为水平运行方向，运动范围宜为 0~150cm， z 方向为竖直运行方向，运动范围宜为 0~150cm， x 、 z 方向的最小运行步长根据试验要求确定，宜为 3~5cm。为了保证运行安全，各方向的运行端点须设限位开关。

5 本试验常用的辅助测量仪器为秒表、烧杯、洗耳球、灌水漏斗、橡皮塞、止水夹、量筒、直尺、凡士林、取土器、夯土器等。

【条文说明】：21.2.1 本试验所用的渗水模型试验装置由二维土箱（或一维土柱）、恒定供水系统的马氏瓶、降雨器和试验测控系统组成，应符合以下规定：二维土箱渗水模型试验装置效果图如图 21.2.1-3 所示。 γ 射线法测量土壤含水率的工作原理是：放射性同位素（铯 137（ ^{137}Cs ）发出的 γ 射线穿过土样时，被固体土样和水分所吸收，使放射性的强度衰减，在固体土样部分不变的情况下， γ 射线强度的改变只取决于土样的含水率，只要事先测出被测土样的 γ 射线强度，再测出一定含水率对应的 γ 射线强度，即可得到土样的含水率。

本试验测控系统为非饱和土渗水模型试验系统测控仪，测控仪面板（下面简称测控仪）元件布置如图 21.2.1-4 所示。测控仪面板上可操作的开关有：1 个工作模式选择档位开关，可选择“自动”或“手动”模式；9 个按键，供手动控制伺服系统运行或停止；2 个船形开关为总电源开关和点位采集器电源控制开关。

其中电源开关的操作为：按上边“1”标志，打开电源；按下边“0”标志，关闭电源。

测控仪的测量点坐标显示，只有当前点坐标在被测点位上时，才显示该点位。此时点位坐标以数码显示。当前点不在被测点位上时，不显示数码，只以亮点提示。伺服系统由当前被测点到达下一被测点时，显示相应的坐标数码，并有声音提示。

测控仪具有以下控制方式：1) 手动模式；2) 自动模式。

测控仪背板元件布置如图 21.2.1-5 所示。该系统的连线都是特制的专用电缆，其

信号交换有特殊的定义。为了本系统的安全和试验者的试验得以正常进行，请不要将插头任意互换，也不要用的规格的市售电缆代替！

其中背板上的保险管 FUSE，其电流为 0.5A，更换时必须选用相同规格。

测控系统软件操作可详见《非饱和土渗水模型试验系统》操作手册。

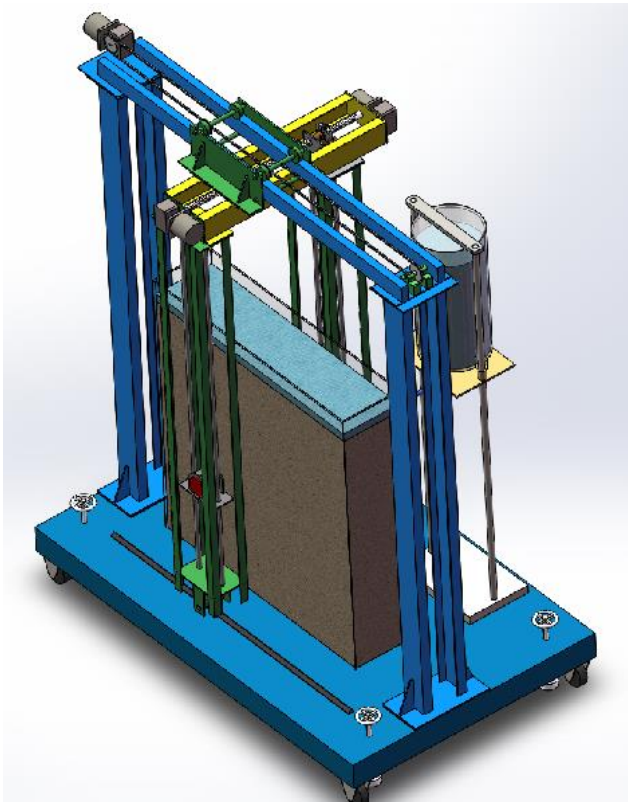


图 25.2.1-3 二维土箱渗水模型试验装置效果图

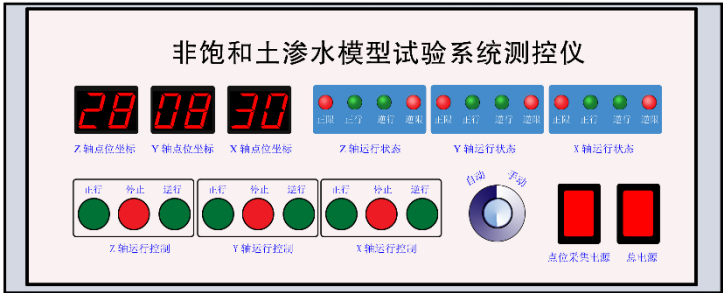


图 21.2.1-4 测控仪面板元件布置

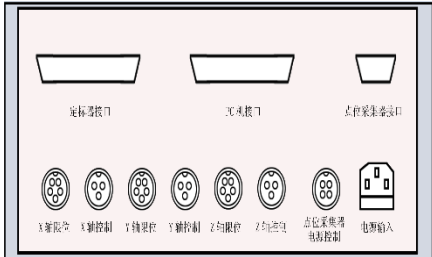


图 21.2.1-5 测控仪背板元件布置示意图

21.2.2 本试验所用的放射源必须屏蔽，试验完成后必须妥善保管，以减小放射源对周

围环境的影响。

屏蔽设施必须为铅罐，铅罐的直径不小于 70mm，长度不小于 100mm，放射源嵌在铅罐的中间位置，在放射源的前面 20mm 长范围内用海绵或棉花堵塞，在海面或棉花的前面为一塞体，在塞体上钻 8mm 小孔作为照射孔，塞体必须用顶丝与铅罐固定，如图 21.2.2-1 所示。

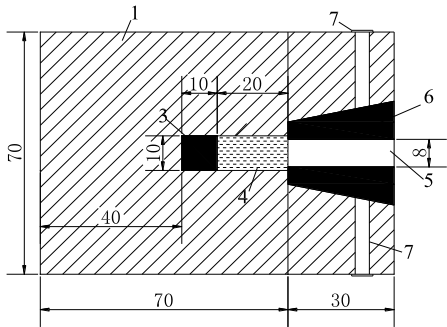


图 21.2.2-1 放射源屏蔽设施（铅罐）

1—铅罐；2—铅盒；3—放射源；4—海绵或棉花；
5—照射孔；6—塞体，7—顶丝

放射源的保管设施为方形铅盒，如图 21.2.2-2 所示。铅盒为方形，外边长不小于 280mm，壁厚不小于 40mm，铅盒的顶部设铅盒盖，铅盒盖的厚度不小于 40mm；不使用放射源时，将装有放射源的铅罐保存在铅盒中。

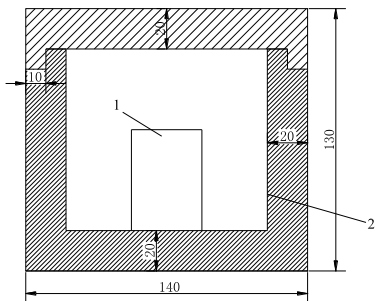


图 21.2.2-2 放射源保管设施

1—铅罐；2—铅盒

【条文说明】：21.2.2 本试验所用的放射源必须屏蔽，试验完成后必须妥善保管，以减小放射源对周围环境的影响。

根据国际放射防护标准和材料吸收特性参数计算，试验用活度的放射源，需要的铅屏蔽厚度为 6mm，本实验的铅屏蔽厚度为 30mm，是国际放射防护标准的 5 倍。经实测，除照射孔前面一定范围以外，其他部位距放射源 1 米以外的区域，放射源射线对环境的影响可以忽略，不会对人体造成任何不利伤害。因此，在实际使用时，不可在放射源照射孔前端活动；一般地，放射性射线对人体照射的损伤与照射累积量有关，

因此，当对放射源进行安装或者卸除时要注意不要让有放射源铅罐的照射孔较长时间（超过 1min）对人进行照射。

21.3 扰动土样的制备与仪器的安装

21.3.1 渗水试验的扰动土样制备应按下列步骤进行：

1 将取自工程的土料风干碾碎过 2mm 筛，按《土工试验方法标准》（GB/T 50123 — 2019）第 5 章的方法测定土样的初始含水率 w_0 和土样的干密度 ρ_d 。

2 根据土样的干密度，计算每层装填土样厚度（各层厚度均为 5cm）需要装填的土料质量，将土料装入土箱（或土柱）后整平，用夯土器击实至与分层线平齐，将土样顶面打毛。

3 将第二层土料称出装入土箱（或土柱）内，整平表面，重复上述第 2 款的方法，直到最后一层土样压实整平为止。

4 一般地，土样装填至距离土箱顶部 20cm 位置为宜。

21.3.2 安装供水装置、降雨器和测控系统。

1 马氏瓶供水装置的安装

将恒水头供水装置的马氏瓶按照图 21.2.1-1（a）安装在土箱的两个侧面（或土柱的一侧），将支撑底座固定在地面上，用支撑上的固定螺丝固定可调节套，用顶丝固定与马氏瓶连接的固定支架。

2 降雨器的安装

降雨器可以直接放置在土箱（或土柱）顶部，也可以通过支架固定在土箱或（土柱）的上方一定高度处。

3 测控系统的安装。

测控系统的放射源和能谱探头安装在移动式测架上，并将驱动电机与机械传动的移动式支架相连接，调整移动式支架的 x 、 y 、 z 方向使其对准测量方向以及起始点的位置。

测控系统的放射源、能谱探头和移动式支架安装完成后，将点位采集器、自动定标器以及 x 、 y 、 z 方向的位移传感器的引线 with 计算机采样系统连接。

一般地，先安装能谱探头，待将 γ 射线环境辐射强度测量完成后，再安装放射源。

21.4 试验方法

21.4.1 用马氏瓶给土样供水的渗水试验应按以下步骤进行：

- 1 根据 21.3.1 的步骤给土箱（或土柱）装填土样。
- 2 当未安装放射源时，用自动定标器测量试验环境的 γ 射线强度 I_e ，可以测量 3~5 次，取其平均值作为试验环境的 γ 射线强度。此测量完成后再安装放射源。
- 3 打开土壤水分模拟试验测控系统，调节 z 方向位移传感器的高度，在距离土面上部 8cm 处，用试验测控系统测量穿过空土箱或空土柱的 γ 射线强度 I ，在同一高度不同位置可以测量 3~5 次，取其平均值作为空土箱（或空土柱）的 γ 射线透射强度。
- 4 将马氏瓶固定在支撑上，支撑底座与地面必须牢固连接。
- 5 根据土箱（或土柱）土样表面以上的设计水深，计算出水的体积，准备好与该体积相同的水量放在量筒中作为备用水。
- 6 在土样表面覆盖一层塑料薄膜。
- 7 设定土样表层的水深和表层水面的位置，松开支撑上的固定螺丝和顶丝，用可调节套和滑套调节马氏瓶进气口的高度，使其进气口高度与土样表层水面高度同高，进气孔高度调节完成后，拧紧可调节套上的固定螺丝和滑套上的顶丝。
- 8 给马氏瓶加水。打开马氏瓶上的放气阀，关闭进水阀。用量筒通过灌水漏斗给马氏瓶灌水，当马氏瓶中水面到达放气阀出口高度附近时，将马氏瓶放气阀关闭。
- 9 由计算机操控驱动电机，调整 x 、 y 、 z 坐标使得放射源和探头对准所测点的位置。
- 10 用试验测控系统测量待测各点穿过土箱（或土柱）含水率为 w_0 时的 γ 射线强度 I_1 （初值测量）。
- 11 打开马氏瓶进水阀，然后将量筒中备用的水洒在土样表面，备用水倒入后，取出土样表面的塑料薄膜，同时用秒表开始计时。
- 12 按一定的时间间隔（大约 30min 左右），用试验测控系统测量设定点土样含水率为 w 后的 γ 射线透射强度 I_2 ，

在计算机控制下当放射源和探头通过机械系统的带动到达某一测点后，计算机启动自动定标器对射线穿过介质后的强度进行测量，按照自动定标器上设定的采样时间（经验值为 30s），等待数据稳定后，计算机采集自动定标器的数据，并保存到指定的文件中进行计算，求得土样含水率，同时显示、存储测量和计算结果。

一个测点测量完成以后，计算机指导机械系统运行，带动放射源和传感器到下

一个测点测量。

测量数据可以在离线情况下由 Excel 电子表格软件进行处理和分析。

13 当土箱（或土柱）中的土样完全发生渗透并达到稳定时（或试验已达到研究目标时）测量结束。

14 提高马氏瓶进气口的高度，此高度距离土面为 18cm。打开马氏瓶给土箱（或土柱）充水，使土箱（或土柱）土面以上的水深保持为 18cm，调节试验测控系统 z 方向的高度，使其位于水面以下 9cm 处，用试验测控系统测量穿过土箱（或土柱）中盛水时的 γ 射线透射强度 I_0 ，在同一高度不同位置可以测量 3~5 次，取其平均值作为土箱（或土柱）盛水时的 γ 射线强度。

21.4.2 用降雨器和马氏瓶给土样供水的渗水试验步骤

1 根据 21.3.1 的步骤给土箱（或土柱）装填土样。

2 当未安装放射源时，用自动定标器测量试验环境的 γ 射线强度 I_e ，可以测量 3~5 次，取其平均值作为试验环境的 γ 射线强度。此测量完成后再安装放射源。

3 打开土壤水分模拟试验测控系统，调节 z 方向位移传感器的高度，在距离土面上部 8cm 处，用试验测控系统测量穿过空土箱或空土柱的 γ 射线强度 I ，在同一高度不同位置可以测量 3~5 次，取其平均值作为空土箱（或空土柱）的 γ 射线透射强度。

4 将降雨器固定在土箱或（土柱）的上方。

5 将马氏瓶固定在支撑上，支撑底座与地面必须牢固连接。

6 给马氏瓶加水。打开马氏瓶上的放气阀，关闭进水阀。用量筒通过灌水漏斗给马氏瓶灌水，当马氏瓶中水面到达放气阀出口高度附近时，将马氏瓶放气阀关闭。

7 在土样表面覆盖一层塑料薄膜。

8 打开降雨器上的进水阀门，使水流通过进水阀门进入降雨器，开始降雨，观测降雨器上面的测压管中水头的变化，直到测压管中的水头达到与设定降雨强度相应的水头高度。

9 当测压管中的水头稳定后，说明降雨强度已为某定雨强，开始读取流量计中的流量。

10 由计算机操控驱动电机，调整 x、y、z 坐标使得放射源和探头对准所测点的位置。

11 用试验测控系统测量待测各点穿过土箱（或土柱）含水率为 w_0 时的 γ 射线强度 I_1 （初值测量）。

12 取掉土样表面的塑料薄膜，同时用秒表开始计时。

13 按一定的时间间隔（大约 30min 左右），用试验测控系统测量设定点土样含水率为 w 后的 γ 射线透射强度 I_2 ，

14 在计算机控制下当放射源和探头通过机械系统的带动到达某一测点后，计算机启动自动定标器对射线穿过介质后的强度进行测量，按照自动定标器上设定的采样时间（经验值为 30s），等待数据稳定后，计算机采集自动定标器的数据，并保存到指定的文件中进行计算，求得土壤含水率，同时显示、存储测量和计算结果。

一个测点测量完成以后，计算机指导机械系统运行，带动放射源和传感器到下一个测点测量。

测量数据可以在离线情况下由 Excel 电子表格软件进行处理和分析。

15 当土箱（或土柱）中的土样完全发生渗透并达到稳定时（或试验已达到研究目标时）测量结束。

16 调节马氏瓶进气口的高度，此高度距离土面为 18cm。打开马氏瓶给土箱（或土柱）充水，使土箱（或土柱）中的水面高度距离土面为 18cm。调节试验测控系统 z 方向的高度，使其位于水面以下 9cm 处，用试验测控系统测量穿过土箱（或土柱）中盛水时的 γ 射线透射强度 I_0 ，在同一高度不同位置可以测量 3~5 次，取其平均值作为土箱（或土柱）盛水时的 γ 射线强度。

21.4.3 测点水的质量吸收系数应按下式计算：

$$\mu_w = \frac{1}{L} \ln \frac{I - I_e}{I_0 - I_e} \quad (21.4.3)$$

式中： μ_w — 水的质量吸收系数（ cm^2/g ）；

I — 穿过空土箱或空土柱的 γ 射线强度（脉冲数/s）；

I_0 — 土箱（或土柱）盛水时的 γ 射线强度（脉冲数/s）；

I_e — 试验环境的 γ 射线强度（脉冲数/s）；

L — 土箱（或土柱）的厚度（cm）。

【条文说明】：21.4.3 测点水的质量吸收系数应按下式计算：

$$\mu_w = \frac{1}{L} \ln \frac{I - I_e}{I_0 - I_e} \quad (21.4.3)$$

式（21.4.3）的参考文献为：

张建丰，张志昌，李涛.土壤水动力过程物理模拟[M].北京：中国水利水电出版社，2020,102-107.

21.4.4 的含水率应按下式计算：

$$w = w_0 + \frac{\ln I_1 - \ln I_2}{\mu_w L} \quad (21.4.4)$$

式中： w_0 — 初始时刻 t_1 土样的质量含水率，即初始质量含水率（%）；

W — t_2 时刻土样中的质量含水率（%）；

I_1 — γ 射线穿过土样含水率为 w_0 后的 γ 射线强度（脉冲数/s）；

I_2 — γ 射线穿过土样含水率为 w 后的 γ 射线强度（脉冲数/s）。

根据不同入渗时刻各测点的含水率数值，利用本试验系统的后处理软件可绘制出相应时刻的含水率场，如图 21.4.4-1 和图 21.4.4-2 所示。其中图 21.4.4-1 为不同深度测点含水率随时间变化曲线；图 21.4.4-2 为不同入渗时刻的质量含水率在入渗深度方向的分布。

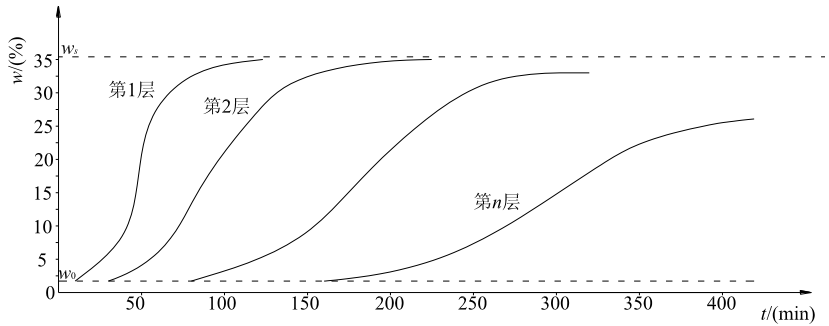


图 21.4.4-1 不同深度单点土样质量含水率随时间变化曲线

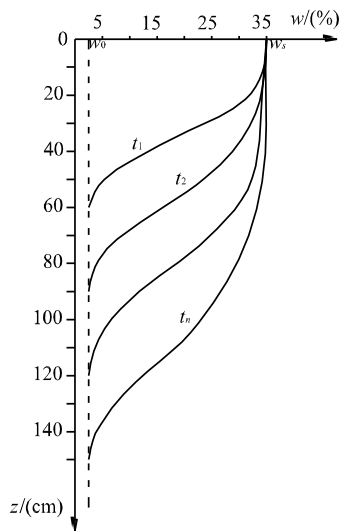


图 21.4.4-2 不同入渗时刻的质量含水率在入渗深度方向的分布

【条文说明】：21.4.4 测点的含水率应按下式计算：

$$w = w_0 + \frac{\ln I_1 - \ln I_2}{\mu_w L} \quad (21.4.4)$$

该式的出处与式 (21.4.3) 相同。

21.4.5 入渗量的测定与计算

Δt 时段的入渗量应按下式计算：

$$F_1(\Delta t) = A_1(h_{1i} - h_{01}) \quad (21.4.5-1)$$

$$F_2(\Delta t) = A_2(h_{2i} - h_{02}) \quad (21.4.5-2)$$

式中： $F_1(\Delta t)$ — 第一个马氏瓶在 Δt 时段的入渗量 (cm^3) ；

$F_2(\Delta t)$ — 第二个马氏瓶在 Δt 时段的入渗量 (cm^3) ；

h_{1i} — t_i 时刻第一个马氏瓶水面读数 (cm) ；

h_{2i} — t_i 时刻第二个马氏瓶水面读数 (cm) ；

h_{01} — t_0 时刻 (初始时刻) 第一个马氏瓶水面读数 (cm) ；

h_{02} — t_0 时刻 (初始时刻) 第二个马氏瓶水面读数 (cm) ；

A_1 和 A_2 — 第一个和第二个马氏瓶的横截面积 (cm^2) 。

累积入渗量应按下式计算：

$$F(t) = F_1(\Delta t) + F_2(\Delta t) \quad (21.4.5-3)$$

式中： $F(t)$ — 累计入渗量 (cm^3) 。

21.4.6 入渗率的测定与计算：

累计入渗量 $F(t)$ 与入渗时间 t 的关系可用如下的幂函数描述：

$$F(t) = at^b \quad (21.4.6-1)$$

入渗率应按下式计算：

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = abt^{b-1} \quad (21.4.6-2)$$

式中： $f(t)$ — 入渗率 (%) ；

$F(t)$ — 累积入渗量 (cm^3) ；

a 和 b — 拟合常数。

21.4.7 渗水试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 21.1 和表 21.2 的规定。

附录 E 表 21.1 渗水模型试验的累积入渗量测定记录表

[illegible]

附表 表 21.2 渗水模型试验 γ 射线强度测定记录表[illegible]

22 原位含水率与基质吸力试验

22.1 一般规定

22.1.1 原位含水率试验采用时域反射法，原位基质吸力试验采用张力计法、热传导法。

22.1.2 时域反射法（TDR）可用于测定天然土的含水率，以及土堤、道路填料等回填土的含水率，测试温度范围为 0~40℃。

【条文说明】：22.1.2 时域反射法通过测定土体的介电常数来间接计算土体水分含量，具有测定精度高、稳定性好、速度快、能连续定点监测土体含水率等优点。此测试方法不适用于冻土或温度超过 40℃的土体，可能不适用于某些有机土体或高塑性黏土（高电导率会导致电信号衰减）。

22.1.3 采用张力计法、热传导法测试原位基质吸力应根据场地条件与工作要求而选定。

1 张力计法直接量测土体负孔隙水压，再由孔隙气压减去负孔隙水压而得基质吸力，常规真空表型负压计测量范围为 0-70kPa，不适用于在干旱地区和寒冷地区的测量；

2 热传导传感器法利用标准多孔陶瓷材料在不同湿度下导热性能的不同，制作热传感器间接量测土的基质吸力，可量测的基质吸力范围为 10~1500kPa，但不适于寒冷地区使用。

【条文说明】：22.1.3 原位基质吸力试验采用张力计法、热传导法：

1 张力计法是一种直接量测土体负孔隙水压的方法，再由孔隙气压减去负孔隙水压而得到基质吸力，优点是体型小，易携带，测读方便。常规真空表型负压计测量范围为 0-70kPa，当孔隙水压接近于负 1 个大气压时，水会汽化，张力计连接管内会出现气穴或气蚀，无法正确读取数值。干旱地区基质吸力一般较大，超出常用量程，而寒冷地区则易出现冻结，张力计不适用于干旱地区和寒冷地区的测量。目前许多学者致力于高量程张力计的研制，可以克服气穴或气蚀现象，可测吸力达到 1500kPa 或更高，但准备工作非常复杂，价格较昂贵，不宜在现场推行使用。

2 热传导法是间接测定基质吸力的方法，量测的基质吸力范围为 10~1500kPa。本方法不适用于冰冻环境，因为陶瓷体和土中的孔隙水在冰冻环境中无法自由迁移。

22.2 时域反射法

22.2.1 时域反射法（TDR）测试仪器主要由信号发生器、中心探针、同轴电缆、同轴

电缆接头、圆柱形模具、击实棒、天平、温度计等组成，测试装置如图 22.2.1-1、22.2.1-2 所示。

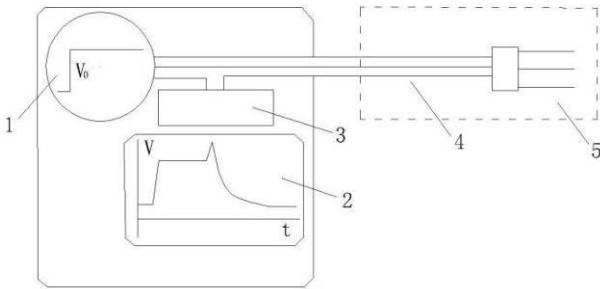


图 22.2.1-1 TDR 测试含水率装置示意图

1-信号发射器；2-示波器；3-采样器；4-同轴电缆；5-传输线系统

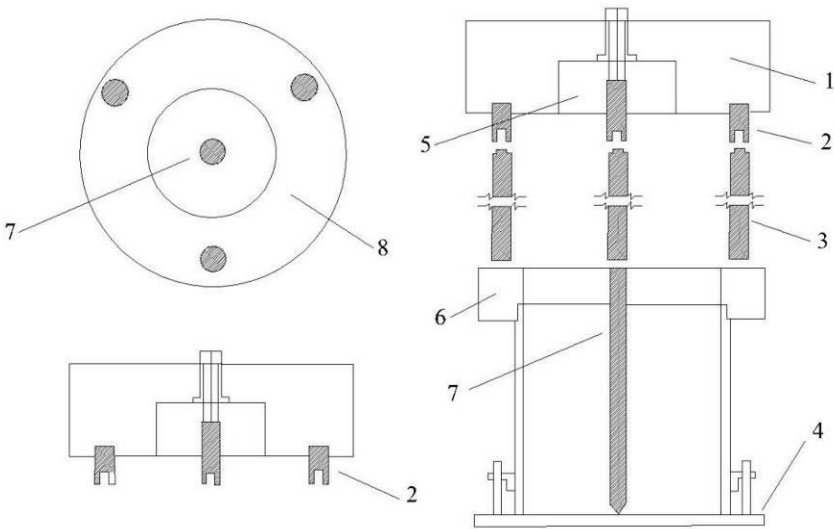


图 22.2.1-2 TDR 同轴式探头构造示意图

1-不锈钢块；2-螺杆；3-加长螺杆；4-绝缘底座；

4-同轴转换器中的绝缘介质；6-金属环；7-中心探针；8-同轴电缆接头

1 信号发生器：试验采用的信号发生器采集数据点的时间间隔不应大于 $16 \times 10^{-12} \text{s}$ ；

2 中心探针：试验采用的中心探针为普通钢针，探针长度不应小于 150mm，且不宜大于 250mm；

3 同轴电缆：连接 TDR 测试仪和探头；

4 同轴电缆接头：连接同轴电缆和探头；

5 圆柱形模具：由圆柱形桶、绝缘底座、金属环等组成；

6 天平：用以称量土和圆柱形模具的质量，称量大于 10kg，分度值 1g；

7 击实棒：用于模具填土过程中的击实，也可用于其他满足试样均匀压实要求的夯实装置；

8 温度计：测试范围 0 至 50℃，分度值 0.5℃；

9 游标卡尺：量程 250mm，分度值 0.02mm。

22.2.2 时域反射法试验应按下列步骤进行：

1 现场试验前应对测试设备进行室内标定（在 15~25℃环境下进行）：

1) 将现场取回的土样烘干，研磨成细颗粒后过 2mm 筛，确定大约 5-6 个需要配制的目标含水率（包含预估原位土体的天然含水率），将配制好的土样装入密封袋中，在保湿缸中静置 48~72h，期间搅拌两次，以利水分均匀；

2) 测量模具尺寸以及中心探针长度 L_c ，称量模具桶重量 M_1 ，并计算模具桶的容积 V ；

3) 将配制好的土样放入模具桶中，分层击实至与原位土体相同的密度，刮平表面，称量模具桶和土体的总重量 M_2 ，模具中土体重量 $M = M_2 - M_1$ ；

4) 将探针插入模具土样中，测量并记录探针外露长度 L_e ；

5) 连接 TDR 仪器，进行测试，得到如图 22.2.2-1 所示波形图，记录表观长度 l_a 、第一电压降 V_1 和长期电压 V_f ，测试完毕后，拔出探针。分别取模具桶中的土样上、中、下部分适量土体放到称量盒中，用现行《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019) 烘干法规定测试含水率，三份土样含水率的平均值即为模具土体含水率 w_m ；

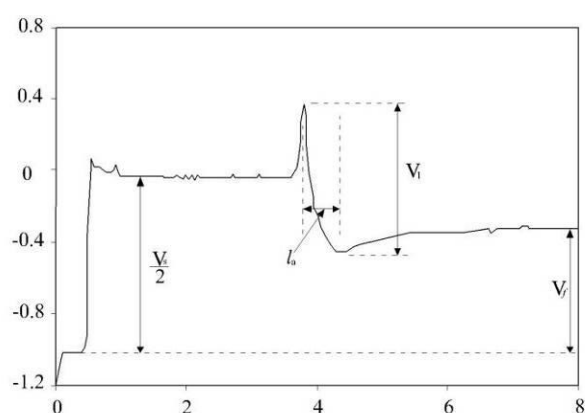


图 22.2.2-1 TDR 测试土体含水率的波形示例图

6) 重复上述过程，测试其他含水率土样，记录全部数据；

7) 试验结束后, 通过计算获得所有土样的介电常数 K_m 、含水率 w_m , 结合水的密度 ρ_w 和土的干密度 ρ_d 数据, 绘出 $\sqrt{K_m} \frac{\rho_w}{\rho_d}$ 与 w_m 的拟合直线, 如图 22.2.2-2 所示

(K_m 为试验得到的模具中土的介电常数, ρ_w 为水的密度, ρ_d 为模具中土的干密度, w_m 为模具中土的含水率), 获取标定参数 a 和 b , 其中 a 为该最佳拟合直线的截距, b 为该最佳拟合直线的斜率;

8) 绘制 $\frac{V_1}{V_f} \cdot \frac{\rho_w}{\rho_d}$ 与 K_m 散点图, 如图 22.2.2-3 所示, 采用最小二乘法, 如式 22.2.2 所示, 获得标定参数 c 、 d 、 f (c 值通常在 0.002~0.150, d 值通常在 0.005~0.040, f 值通常在 0.100~1.000)。

$$\min \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{V_1(i)}{V_f(i)} \frac{\rho_w}{\rho_d} \right) - \left(c + d(K(i)-1) - c \cdot \exp(-f \cdot (K(i)-1)) \right) \right]^2 \quad (22.2.2)$$

式中: i — 第 i 次试验;

n — 试验总次数。

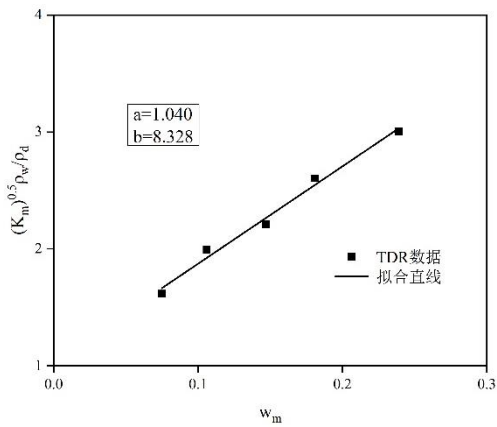


图.22.2.2-2 获取标定参数 a 、 b 示例图

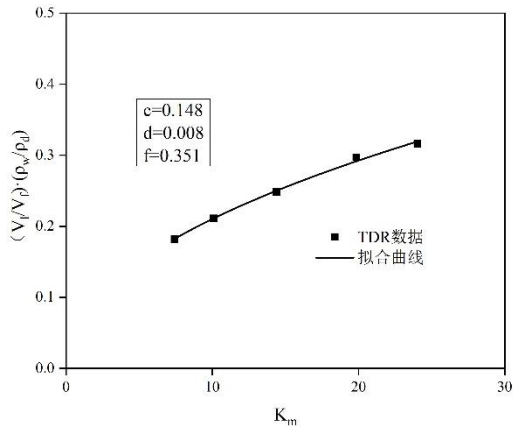


图.22.2.2-3 获取标定参数 c 、 d 、 f 示例图

2 现场试验应按以下步骤进行:

- 1) 测量中心探针长度 L_c ;
- 2) 平整测试位置地面, 选择有代表性区域插入探针, 探针与土之间应无空隙, 并测量中心探针外露长度 $L_{e,i}$;
- 3) 连接同轴电缆、同轴电缆接头和 TDR 测试仪, 打开设备;
- 4) 擦拭探针的顶面和同轴电缆接头的端部, 将两者连接, 并使接头与探针顶部居中位置充分接触;

5) 启动 TDR 测试仪，观察输出信号；

6) 进行测试，得到如图 22.2.2-1 所示波形图，记录表观长度 $l_{a,i}$ 、第一电压降 $V_{1,i}$ 和长期电压 $V_{f,i}$ ，测试完毕后，拔出探针；

7) 若测试土体为黏性土，且土体温度估计在 15 至 25℃ 的范围之外，则将温度计插入由中心杆留下的孔中，等待温度稳定，并记录温度。

【条文说明】：22.2.2 现场试验测试若未出现特征信号，可将同轴电缆接头绕轴线稍微旋转以更好接触。

22.2.3 时域反射法试验的计算应符合下列规定。

1 原位测试土体的表观介电常数由下式计算：

$$K_i = \left[\frac{(l_a)_i}{L_i} \right]^2 \quad (22.2.3-1)$$

式中： K_i — 原位土的介电常数；

$(l_a)_i$ — 现场测量土体 TDR 波形图中记录的表观长度；

L_i — 探针插入土中的长度， $L_i = L_c - L_{e,i}$ 。

2 含水率的计算应符合下列规定：

1) 从现场测试 TDR 波形中获取源电压 V_s 、第一电压降 $V_{1,i}$ 和长期电压 $V_{f,i}$ ；

2) 原位第一电压降与长期电压降在 20℃ 的比值校正由下式计算：

$$\left(\frac{V_{1,i}}{V_{f,i}} \right)_{20^\circ\text{C}} = \frac{V_{1,i}}{V_{f,i}} \times TCF_{VR} \quad (22.2.3-2)$$

式中： TCF_{VR} — 温度 T (°C) 的修正因数，无黏性土 ($4^\circ\text{C} \leq T \leq 40^\circ\text{C}$)

$$TCF_{VR} = \frac{80 + \frac{V_{f,i}}{0.5V_s}(T - 20)}{(1.08 - 0.004T)(40 + 2.0T)}, \quad \text{黏性土} \quad (4^\circ\text{C} \leq T \leq 40^\circ\text{C})$$

$$TCF_{VR} = \frac{80 + \frac{V_{f,i}}{0.5V_s}(T - 20)}{(0.94 + 0.003T)(40 + 2.0T)}。$$

3) 原位土的含水率由下式计算：

$$\left(\frac{V_{1,i}}{V_{f,i}} \right)_{20^\circ\text{C}} = \frac{V_{1,i}}{V_{f,i}} \times TCF_{VR} \quad (22.2.3-3)$$

式中： $\rho_{d,i}$ — 原位土的干密度， $\rho_{d,i} = \frac{\left(\frac{V_{1,i}}{V_{f,i}}\right)_{20^{\circ}\text{C}} \rho_w}{c + d(K_{i,20^{\circ}\text{C}} - 1) - c \cdot \exp[-f(K_{i,20^{\circ}\text{C}} - 1)]}$ ；

$V_{1,i}$ — 原位土的第一电压降；

$V_{f,i}$ — 原位土的长期电压降；

w_i — 原位土的含水率；

a, b, c, d, f — 标定系数。

【条文说明】：22.2.3 表观介电常数对土体略受温度影响，并取决于土体类型，需要进行温度校准。经验表明，对于温度介于 15℃和 25℃之间的土体，校正前后差别相对较小。原位含水率计算按本标准第 22.2.3 条的方法对温度进行校正。

22.2.4 本试验室内标定记录格式应符合本标准附录 E 表 22.1 的规定。

22.2.5 本试验现场试验记录格式应符合本标准附录 E 表 22.2 的规定。

附录 E 表 22.1 时域反射法 (TDR) 室内标定记录表

土样 编号	$\rho(\text{kg/m}^3)$				w_m (%)	ρ_d (kg/m^3)	L (m)		l_a (m)	$\sqrt{K_m}$	V_I (V)	V_f (V)
	V (m^3)	M_l (kg)	M_I (kg)	M (kg)			L_c (m)	L_e (m)				
1												
2												
3												
4												
5												
标定参数	a				b		c		d		f	

注: ρ 为模具中土的湿密度, $\rho = \frac{M}{V}$; ρ_d 为模具中土的干密度, $\rho_d = \frac{\rho}{1 + w_m}$; L 为探针插入土样深度, $L = L_c - L_e$; K_m 为模具中土的介电常数, $K_m = \left[\frac{l_a}{L} \right]^2$ 。

附录 E 表 22.2 时域反射法（TDR）现场试验记录表

任务单号					试验者	
试验地点					计算者	
试验深度					校核者	
仪器名称					试验日期	
仪器编号					土层性状	
试验点	源电压 V_s (V)	土体温度 $T(^{\circ}\text{C})$	表观长度 $l_{a,i}(\text{m})$	第一电压降 $V_{L,i}(\text{V})$	长期电压 $V_{fi}(\text{V})$	含水率 $w_i(\%)$

22.3 张力计法

22.3.1 张力计法的仪器设备应符合下列要求：

1 常规真空表型负压计测量范围为 0~ 70kPa，由陶瓷头、硬塑料管、集气管、计量指示器等部件组成（本标准图 4.2.2），其中硬塑料管通常由低导热、无腐蚀塑料制成，计量指示器的精度根据试验数据的需要确定。

2 高量程张力计测量范围可大于 70 kPa，由含陶土板、高精度传感器等部件组成。

22.3.2 张力计法试验应按下列步骤进行：

1 张力计准备：张力计使用前应确保陶瓷头无堵塞、无裂缝，然后将陶瓷头用脱气水浸润饱和，同时将硬塑料管和陶瓷头充满，并尽可能去除张力计中的空气，使内部处于高真空状态。测试前应按本标准第 4.2.3 条的方法对张力计进行检验。

2 零位校正：仪器密封后，将陶瓷头置于空气中蒸发 2h，并将陶土管的一半浸入脱气水中，等待真空表指针缓缓回零直至不动，此时读数即为仪器的零位校正值。

3 现场安装：在原位土体内钻孔至待测深度（以陶瓷头中心计算），钻孔器直径宜略小于陶瓷头直径。在钻孔内倒入少许泥浆，垂直插入张力计，使陶瓷头与土体紧密接触，将周围填土捣实，防止雨水沿张力计管壁渗至测点位置；

4 数据采集：张力计安装好后与周围土体进行一定时间的平衡，便可开始数据采集，每日至少读取一次数据。

5 检查：定期检查集气管中的空气量，若超过集气管容积的 1/2，则需缓慢打开橡皮塞重新补满脱气蒸馏水。

【条文说明】：22.3.2 零位校正：仪器密封后，真空表至测点（陶土头中部）间存在一个静水压力值，此静水压力差应予以消除，需进行零位校正。检查：定期检查集气管中的空气量，若超过集气管容积的 1/2，需缓缓打开橡皮塞重新补满脱气蒸馏水。根据经验，如果埋设前张力计内空气已除尽，且土的湿度在仪器可量测范围内，则 10~25 天内不用补脱气蒸馏水。定期检查管中空气量，是保证土体负孔隙水压力测量准确性的必要措施。

22.3.3 张力计法试验的数据计算应符合下列规定：

测量值减去零位校正值，即为测点的实际吸力。一般在测量表层土体吸力时，此校正值可忽略不计。测点的实际吸力计算公式为：

$$s = H_1 - H_2 \quad (22.3.3)$$

式中：s — 测点的实际吸力；

H_1 — 张力计的测量值；

H_2 — 零位校正值，测量方法参照本标准 22.3.2。

22.3.4 本试验记录格式应符合本标准附录 E 表 22.3 的规定。

附录 E 表 22.3 张力计法试验记录表

任务单号				试验者	
试验地点				计算者	
试验深度				校核者	
仪器名称				试验日期	
仪器编号				土层性状	
测定时间			气象条件（阴、晴、雨、雪、℃）	张力计读数	
d	h	min			

22.4 热传导法

22.4.1 仪器设备主要为热传导传感器，其主要元件为多孔陶瓷体、电阻加热器和测温装置。传感器整体输出精度不应低于 5%。

22.4.2 试验步骤

1 率定热传导传感器：可采用压力板仪率定。将热传导传感器埋入土样，一起放置于压力板仪的陶土板上，土样的含水率应在低基质吸力下能发生变化；率定过程中，改变进气压，量测相应输出电压的变化及测试土样含水率的变化；根据获取的传感器输出电压与含水率的对应关系，以及反映土样含水率和基质吸力关系的土水特征曲线，获得传感器率定曲线，如图 22.3.2 所示。

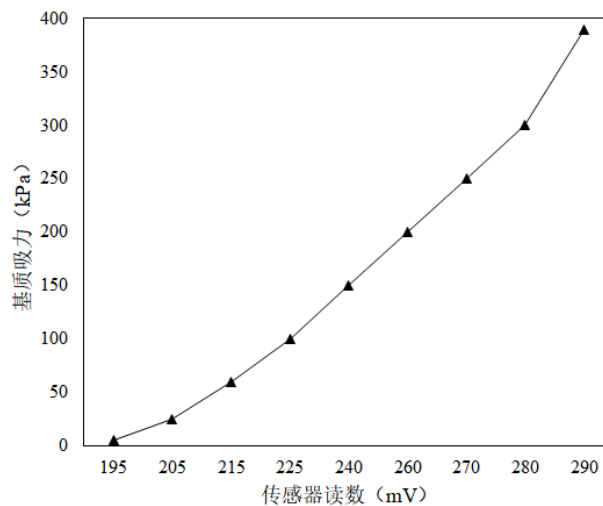


图 22.4.2 传感器率定曲线示例

- 2 将热传导传感器探头插入土中至待测深度；
- 3 陶瓷体和土中孔隙水进行平衡，经过一定时间后，两者吸力基本相同；
- 4 进行数据采集，记录传感器的输出电压值。

【条文说明】：22.4.2 测试前需对探头进行率定，以提高精度，若率定条件和现场不一致，误差可能较大。热传导探头易受损，但测量结果的可靠性与埋设探头和土体的紧密接触程度相关。率定用土样可采用 90%黏土与 10%砂的混合土，在低基质吸力情况下土样的含水率应也可改变。

22.4.3 数据处理：根据陶瓷体的率定曲线，推算出土的基质吸力。

22.4.4 本试验率定曲线记录格式应符合本标准附录 E 表 22.4 的规定。

22.4.5 本试验记录格式应符合本标准附录 E 表 22.5 的规定。

附录 E 表 22.4 热传导法率定曲线记录表

基质吸力 (kPa)	试验编号及各级吸力对应的土样含水率 (%)			
	1	2	3	4

附录 E 表 22.5 热传导法试验记录表

任务单号		试验者	
试验地点		计算者	
试验深度		校核者	
仪器名称		试验日期	
仪器编号		土层性状	
试验点	传感器读数 (mV)	备注	

23 孔内剪切试验

23.1 一般规定

23.1.1 本试验适用于砂土、粉土、黏土等土类。

【条文说明】：23.1.1 通过原位试验获取岩土体强度参数一直是岩土工程领域的重要研究课题，钻孔剪切试验是一种通过在钻孔侧壁上进行直剪试验来测定土体黏聚力和内摩擦角的原位测试方法。

23.2 仪器设备

23.2.1 仪器设备主要包括：孔内剪切装置、上拔力提供系统、法向力提供系统、连接构件以及传感器系统和数据端，应符合以下规定：

1 孔内剪切装置主要包括剪切头和气缸活塞，不锈钢剪切头，面积宜为 64.5cm^2 左右；

2 上拔力提供系统主要包括底板、上拔力测量装置、传动平台、轴承、蜗轮蜗杆、档杆、挡块、摇杆；

3 法向力提供系统主要包括压力源输出装置、压力表和气管等，压力表测量范围应为 $0\sim 500\text{kPa}$ ，精度不低于 2kPa ；

4 传感器系统和连接构件主要包括剪力表、塑料气管和钢丝绳等，剪力表测量范围应为 $0\sim 350\text{kPa}$ ，精度不低于 2kPa 。

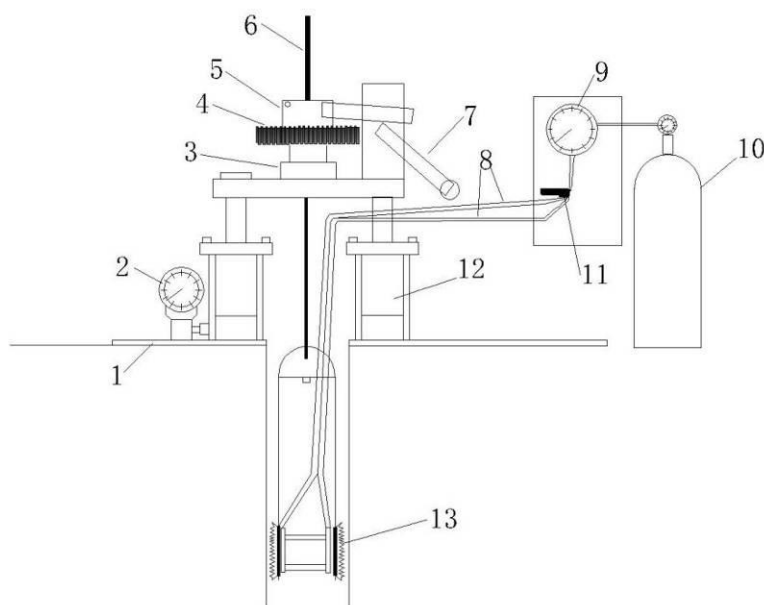


图 23.2.1 孔内剪切试验仪结构图

1-底盘；2-剪力表；3-轴承；4-齿轮；5-拉杆夹具；拉杆；7-曲柄手轮；
8-气管；9-压力表；10-气瓶；11-压力阀门；12-液压千斤顶；13-剪切头

【条文说明】：23.2.1 钻孔剪切试验设备主要有美国 Lowa 钻孔剪切试验仪和法国 Phicometer 钻孔剪切试验仪，而前者应用更为广泛，故作为制定本条标准的主要参考。

23.3 操作步骤

23.3.1 仪器标定：试验前应检查气动加压设备是否正常，并对剪切应力及法向压力测量仪表进行标定，绘制标定曲线（图 23.3.1）。

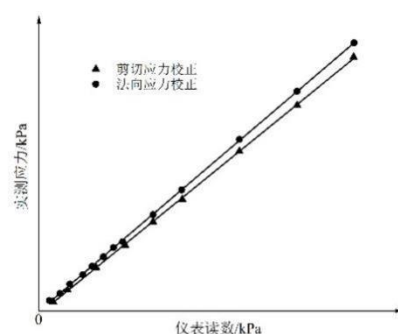


图 23.3.1 标定曲线示意图

23.3.2 钻孔：针对不同含水率或饱和度状态的土体，利用人工或者机械进行干法垂直成孔，孔径范围为 75~80mm，成孔后可使用修孔器将孔壁修整光滑。测试之前检查孔洞及孔壁完整性，对浅部钻孔可借手电筒肉眼观察，对中部和深部钻孔可根据取样土体和钻孔剪切设备综合判断。钻孔过程中留取土样以便测试，含水率测试可参照现行《土工试验方法标准》(GBT 50123-2019) 5.2 节、5.3 节规定执行，其他基本物性指标也宜在实验室完成，据此计算现场土体的饱和度。

23.3.3 安装就位：设备装配成型后，调整设备整体水平，进行钻孔对中，将剪切探头放入孔中预定试验位置。

23.3.4 测定初值：试验前，将剪切头和拉杆在试验深度处悬空，并用拉杆夹钳将拉杆固定，记录剪切表上的初始读数，剪切应力测试时应扣除初始剪切应力。

23.3.5 加压固结：通过手持式压力源对气缸活塞加压，使剪切板扩展并紧紧压在钻孔壁上，对剪切刀头加压，向孔壁施加法向压力。初始正应力宜取土体无侧限抗压强度的 1/3-1/2，较硬土体可适当取大值。从第二级开始，逐级应力增加值应根据土质情况进行调整，土质较软时可取 5-15kPa，土质较硬时可取 15-100kPa（相关建议值如表 23.3.5）。加压后等待土体固结，固结时间根据土类和含水率及排水条件而定，含砂

较多、含水率较低且排水良好的土，固结时间可为 5 分钟；排水条件一般的其他土，可控制在 10 分钟；排水不畅的软弱土，可适当延长至 15-20 分钟。每个测点至少取得 4 个数据。

表 23.3.5 法向压力增量建议值

软硬程度	土类描述	逐级增加值/kPa
极软	接近液限的超软淤泥或黏土、极松散或超过临界孔隙率砂	5
软	软黏土、淤泥或松砂	10
中硬	中密度淤泥或砂、中等硬度黏土	20
硬	密砂、淤泥或黏土	50
极硬	胶结砂、超固结黏土或页岩	100
	其他	35

【条文说明】：23.3.5 孔内剪切试验(BST)加载方式有两种，一种是逐级加载剪切，即在同一试验位置逐级增加固结压力，逐级进行剪切；另一种是单级加载剪切，即在不同的位置进行各级压力的固结剪切试验。许多试验都表明只要剪切头能完全嵌入土中使得压力完全施加于土体，逐级加载剪切方式得到的试验结果可靠，逐级加载剪切的固结时间为累积时间，节约了大量的试验时间。每级法向压力的增量值确定，综合了多位学者的建议值（表 23.3.5）作为主要参考，同时考虑了试验过程中测试所需压力大小及仪表量程。

加压固结时间主要依据土类和含水率及排水条件而设定。Wineland J D(1975)建议逐级加载剪切的第一级压力固结时间 10min，之后每级压力固结时间可缩减为 5min。Handy R L(2009) 与 Theodore D B(2012)认为非饱和黏土、砂以及饱和和无黏性土，各级法向压力下固结时间一般可取 5min；对于饱和黏性土，通常需要 10~20min；当法向压力采用逐级加载时，在上级已施加压力基础上施加更大法向压力，后续固结时间一般需 5~10min。Lutenegger A J 与 Tierney K F(1986) 量测了黏土在固结阶段、剪切阶段和剪切后阶段的孔隙压力，结果表明在剪切过程中产生了较高的孔隙压力，需要 20min 固结时间消除多余的孔隙压力。Drnevich V P(1987) 与 Bechtum T (2012) 建议充分的固结时间为 20 min。国内使用的钻孔剪切试验设备基本都未配置在试验固结和剪切阶段测量孔隙压力的附件，无法量化排水条件以及剪切过程中孔压变化对土体抗剪强度参数的影响。于永堂、郑建国与刘争宏等(2016)在非饱和黄土地层进行 BST 试验采用的初始固结压力维持时间为 15min，其后各级压力的维持时间为 5min；孔令伟、李晶晶与安然等(2017、2019、2020)先后针对南阳膨胀土、哈佳高速铁路粉质黏土与

厦门地铁花岗岩残积土开展了较为系统的 BST 试验，膨胀土与粉质黏土试验采用逐级加载剪切方式，为能使其充分固结，第一级固结压力维持时间为 20min，之后每级压力固结时间为 10min；花岗岩残积土 BST 试验采用单级加载剪切方式，每级固结压力维持时间为 15min。美国材料与试验协会(ASTM)标准 D18.02.12 建议试验前固结时间至少为 5min，饱和黏土需要 15min 固结时间才可能使多余的孔隙水压力消散。本条文综合国内外试验结果选取固结时间，含砂较多、含水率较低且排水良好的土，固结时间可为 5 分钟；排水条件一般的其他土，可控制在 10 分钟；排水不畅的软弱土，可适当延长至 15-20 分钟。

23.3.6 提拉剪切：待土体固结完成后均匀摇动手轮，向上匀速提拉剪切探头，手轮摇动速率可控制为 1-2r/s，保持竖向平移速率为 0.025-0.05 mm/s。每转一圈记录称重控制器上读数。若连续摇动手轮三圈后，剪力表读数变化幅度小于 0.5kPa（视传感器灵敏度而定）或摇动手轮后连续两次出现下降，即可认为该级压力下土体已剪破。回转弯柄以卸除剪切力，根据分级压力增量，继续增大法向压力，重复第 23.3.4 条和 23.3.5 条步骤。

【条文说明】：23.3.6 美国材料与试验协会(ASTM)标准 D18.02.12 建议提拉剪切的手轮摇动速率可控制为 2r/s，垂直平移速率为 0.05 mm/s。经验表明，孔内剪切试验在剪切位移达到 5.0 mm 之前已达到最大剪切应力读数。本条文以 ASTM 标准为参考，手轮摇动速率可控制为 1-2r/s，竖向平移速率为 0.025-0.05 mm/s。

23.3.7 数据初判：完成一组试验后，可采用图解法获得黏聚力和内摩擦角数值。图解法以剪切强度为纵坐标，法向压力为横坐标，绘制剪切强度-法向压力关系曲线，根据上述曲线判断测试结果是否合理，若合理则可继续进行下一组试验，若不合理则取出剪切头，清理干净后转动 90°方向放置原位置重新试验。

23.3.8 结束试验：试验结束后，卸除剪切应力和法向压力，从钻孔中提出剪切头并清洁。

23.4 计算、制图和记录

23.4.1 对取得的试验数据，以剪切应力为纵坐标、剪切应变为横坐标，绘制成剪切应力-剪切应变关系曲线，如图 23.4.1-1 所示；将最大剪切应力作为抗剪强度，绘制抗剪强度与对应的法向应力的关系曲线，并进行线性拟合，直线的倾角为内摩擦角，直线在纵坐标上的截距为黏聚力，如图 23.4.1-2 所示。

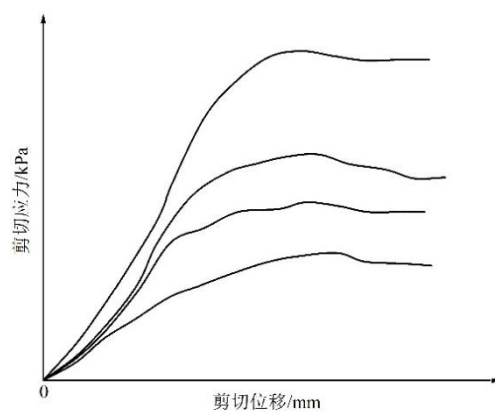


图 23.4.1-1 剪切应力-剪切位移关系曲线

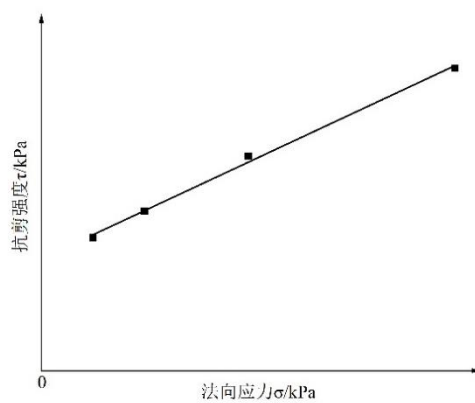


图 23.4.1-2 抗剪强度-法向应力关系曲线

23.4.2 孔内剪切试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 23.1 的规定。

附录 E 表 23.1 孔内剪切试验记录表

任务单号				试验者	
试验孔编号				计算者	
试验点编号				校核者	
孔内剪切头编号				试验日期	
孔口标高 (m)				地下水位 (m)	
试验深度 (m)				试验土层描述	
土体含水率(%)				土体湿密度(g/cm ³)	
剪切速率 (mm/s)				抗剪强度 (kPa)	
深度 (m)	法向应力 (kPa)	固结时间(min)	手轮转数(转)	剪切位移 (mm)	剪切应力 (kPa)

24 原位多场综合监测

24.1 一般规定

24.1.1 非饱和土原位多场综合监测包括气象观测、含水率监测、基质吸力监测、变形观测、裂隙测试等，本试验方法适用于自然因素或人为活动对非饱和土地场的影响或灾害防治效果的监测。

24.1.2 非饱和土原位多场综合监测除应符合本规程的规定外，还应符合《工程测量规范》(GB 50026-2020)、《全球定位系统(GPS)测量规范》(GB/T 18314-2009)、《地面气象观测规范》(GB/T 35221-2017)等国家现行的有关标准、规范的规定。

24.1.3 非饱和土原位多场综合监测方法的选择应根据监测对象、监测内容、场地条件和方法适用性等因素综合确定，在保证监测数据可靠有效的前提下，监测方法宜简便易行。

24.1.4 监测仪器、设备和元器件应满足监测量程和精度要求，具有良好的稳定性和可靠性。监测仪器与设备应定期进行检定或校准；元器件应在使用前标定，标定资料和校核记录齐全，并应在规定的校准有效期内适用。

24.2 仪器设备

24.2.1 气象观测设备宜采用自动气象观测系统，其功能应包括温度、湿度、风向、风速、雨量、蒸发量、地温等全部或部分气象要素的自动采集，自动气象观测系统技术性能应满足表 24.2.1 的要求。

表 24.2.1 自动气象观测系统技术性能要求表

测量要素	测量范围	分辨力	准确度	平均时间	采样速率
气温	- 50 - +50℃	0.1℃	0.2℃	1min	6 次/min
相对湿度	0-100%	1%	4%(≤80%) 8%(>80%)	1min	6 次/min
气压	500-1100hPa (任意 200hPa)	0.1hPa	0.3hPa	1min	6 次/min
风向	0°-360°	3°	5°	3s 2min 10min	1 次/5
风速	0-60m/s	0.1m/s	(0.5+0.03V)m/s (0.3+0.03V)m/s		
降水	雨强 0-4mm/min	0.1mm	0.4mm(≤10mm) 4%(>10mm)	累计	1 次/min

日照	0-24h	60s	0.1h	累计	
蒸发	0-100mm	0.1mm	1.50%	累计	
地温	- 50 - +80℃	0.1℃	0.5℃ 0.3℃(基准站)	1min	6 次/min
总辐射	0-1400W/m ²	1w/m ²	5%	1min	6 次/min
净全辐射	-200-1400W/m ²	1W/m ²	15%-20%	1min	6 次/min
直接辐射	0-2000W/m ²	1W/m ²	2%	1min	6 次/min

【条文说明】：24.2.1 自动气象站中，气温、湿度、风向、风速、雨量、蒸发量、地温等可分别采用铂电阻温度传感器、湿敏电容湿度传感器、风向传感器、风杯风速传感器、翻斗式雨量传感器、超声测距蒸发量传感器、铂电阻地温传感器等，传感器的技术性能指标应符合现行《地面气象观测规范》(GB/T 35221-2017) 第 7.2 条的规定要求。

24.2.2 含水率监测设备：时域反射法的监测设备应满足第 22.2 条的相关要求。

24.2.3 基质吸力监测设备：张力计法、热传导法的监测设备应分别满足本规范第 22.3 条、第 22.4 条的相关要求。

24.2.4 变形观测设备：经纬仪、水准仪、全站仪，激光测距仪、全球定位系统(GPS)，测斜仪等监测设备，设备的技术性能指标应符合《工程测量规范》(GB 50026-2020)、《全球定位系统(GPS)测量规范》(GB/T 18314-2009)等国家现行的有关标准、规范的规定。

【条文说明】：24.2.4 水平和竖向位移监测设备应符合现行《工程测量规范》(GB 50026-2020)第 10.1.3 条的技术要求；采用 GPS 进行基准点观测、导线与水准测量进行监测点监测时，监测设备应满足现行《全球定位系统(GPS)测量规范》(GB/T 18314-2009)的技术要求。

24.2.5 地表裂缝：可采用游标卡尺或数码相机，或数字裂缝测量仪等监测设备。

【条文说明】：地表裂缝监测也可以采用其他精度不低于 1mm 的监测方法与设备。

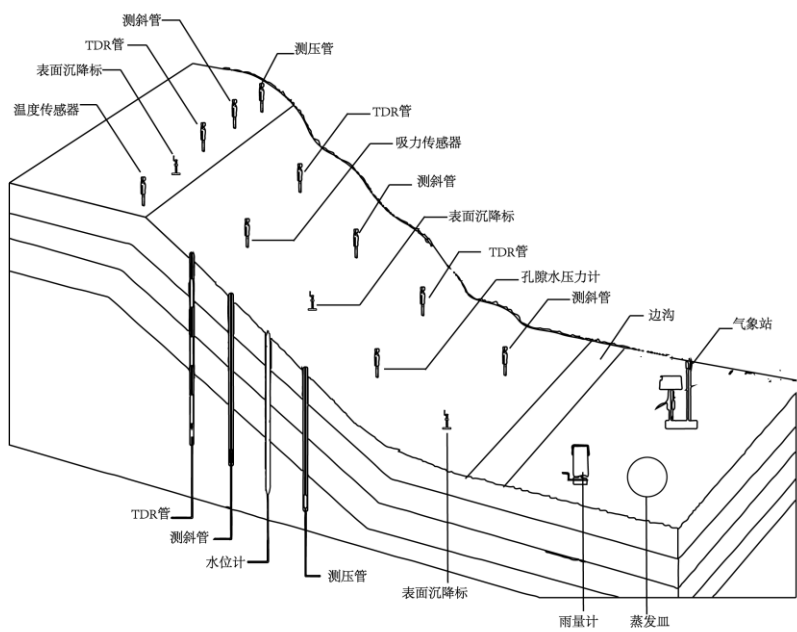
24.2.6 裂隙测试：可采用高清数码相机，或相机功能较强的智能手机等测试设备；配备分度值不小于 1mm 的刻度尺作为长度参照物。

【条文说明】：24.2.6 选择测试设备时，相机的像素要求与测试精度要求相关，如测试长度为 200mm，宽度为 160mm，精度要求为 0.1mm，则长度与宽度方面需要的像素分别是 $200/0.1=2000$ 、 $160/0.1=1600$ ，则相机需要的最低像素为 $2000 \times 1600 = 3200000$ ，即 320 万像素。将带有准确长度刻度的参照物放置于裂隙附近并与裂隙一同拍摄，便

于在摄影图像处理时对裂隙长度和宽度进行准确标定，且参照物的刻度越长，最小刻度越小，标定的精度越高。

24.3 实施方法

24.3.1 场地内仪器设施的布置应互不干扰，便于观测操作。观测场地内仪器设施的布置可参考图 24.3.1。



(a) 三维剖面布置示意图

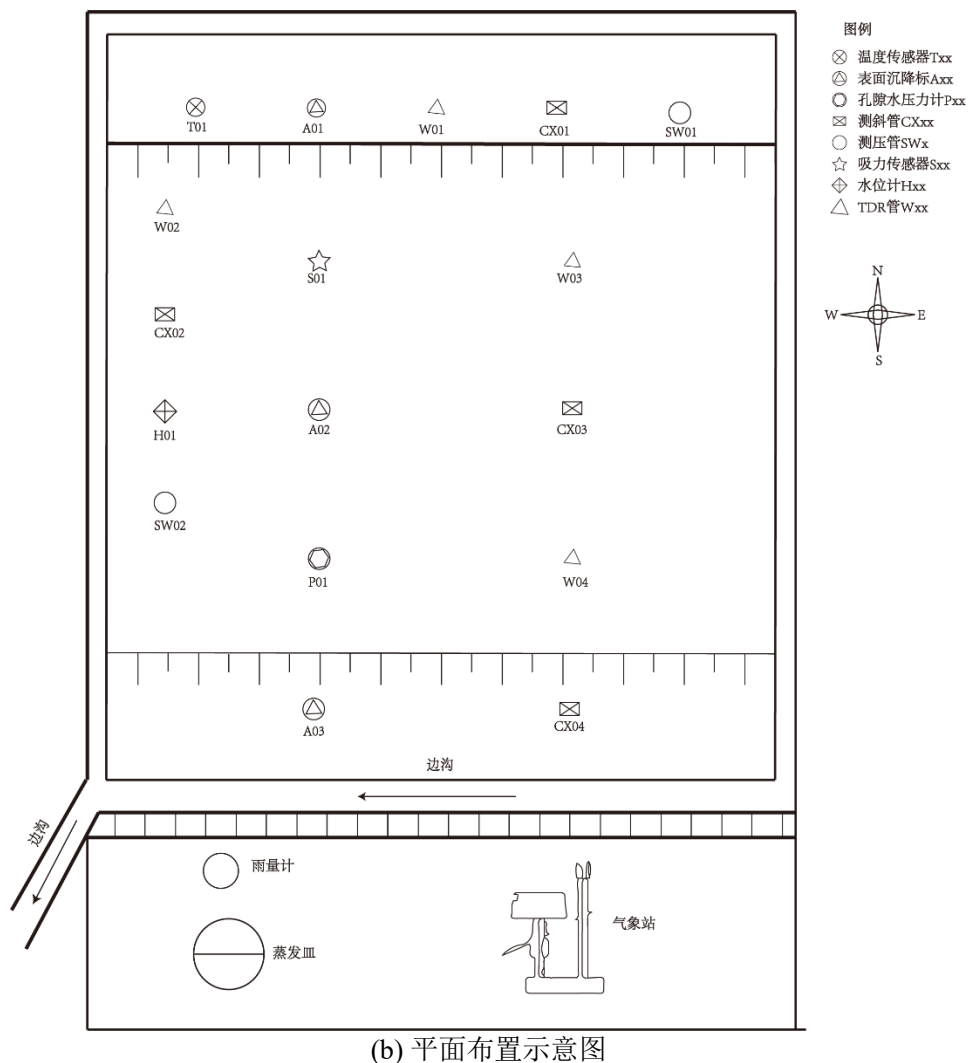


图 24.3.1 仪器设施布置参考示意图

注：测斜管适用于边坡等需水平位移监测项目，如地形平坦可不设置。

【条文说明】：24.3.1 关于非饱和土原位多场综合的监测设计、仪器设备选型与仪器设施安装埋设等工作，国内已开展了多年的探索研究，如中国科学院武汉岩土力学研究所在国家重大基础研究前期研究专项“裂土在多雨炎热环境下的力学模型与成灾机理研究”的支持下，在广西南宁地区建立了缓坡、陡坡与坡面种草 3 种类型膨胀土边坡的原位监测系统，采用小型气象站、土体含水率 TDR 系统、烘干法、温度传感器、测斜管和沉降板跟踪测试了边坡含水率、温度、变形等随气候的演化规律，并在此基础上，采取多种手段同步获得了边坡膨胀土含水率、胀缩变形、变形模量和渗透特性在气候影响下的响应特征；长江科学院在实施国家科技支撑计划项目过程中，深入开展了南水北调中线膨胀土（岩）地段渠道破坏机理和处理技术研究，基于南阳、新乡两个试验段的现场观测资料和仪器埋设经验，全面系统总结了膨胀土渠道的监测技术，有效指导了南水北调中线膨胀土渠道的安全监控。本条文的观测场地内仪器设施的布

置参考图 24.3.1 主要借鉴了以上监测布置方案，可适用于边坡或平坦地形，对于边坡等需水平位移监测项目需要设置测斜管，如地形平坦可不设置侧斜管。

24.3.2 自动气象观测应符合下列规定：

1 自动气象观测

观测项目应包括降水量、降水强度、气温、湿度、蒸发、风向、风速等气候指标的总量及其过程量。

2 自动气象站观测场地选择应符合下列要求：

1) 场地气象站设置点位四周应具有一定范围的空旷空间，点位边缘与障碍物的距离不小于障碍物顶部与仪器口高差的 2 倍；

2) 有合理专用场地面积，场地四周设置由反光不强材料制成的围栏；

3) 设置气象站场地的点位无影响降水观测的植物或作物，安装前应清除可能影响观测的植被，如阔叶树等。

3 气温和湿度：宜测量离地面 1.5 米高度处的气温和湿度，气温以摄氏度（℃）为单位，取 1 位小数，相对湿度以百分数（%）表示，取整数。

4 降水量和降水强度：降水量为某一时段内的未经蒸发、渗透或流失的降水，在水平面上积累的深度，以毫米（mm）为单位，取 1 位小数；降水强度为单位时间的降水量，通常测定 5 分钟、10 分钟和 1 小时内的最大降水量。

5 蒸发量：蒸发量为水面蒸发量，是一定口径的蒸发器中，在一定时间间隔内因蒸发而失去的水层深度，以毫米（mm）为单位，取 1 位小数。

【条文说明】：24.3.2 自动气象观测应符合现行《自动气象站观测规范》(GB/T 33703-2017)的规定要求。

24.3.3 地温观测：地温包括地表温度和不同深度的土体温度；温度包括裸露土体表面的地面温度及最高、最低温度；浅层地温包括离地面 5、10、15、20cm 深度处的土体温度；深层地温包括离地面 40、80、160、320cm 深度处的土体温度。地温以摄氏度（℃）单位，取 1 位小数。

24.3.4 含水率监测：时域反射法应符合本标准第 22.2 条的相关要求。

24.3.5 基质吸力监测：张力计法应符合本标准第 22.3 条的相关要求；热传导法应符合本标准第 22.4 条的相关要求。

24.3.6 变形监测：水平位移、竖向位移监测网主要技术要求应分别符合现行《工程测量规范》(GB 50026-2020)第 10.2.4 条、第 10.3.3 条的要求；采用 GPS 进行监测时，基

准点的选择和监测点的布设应符合现行《全球定位系统(GPS)测量规范》(GB /T 18314-2009) 第 7.2、7.3 与 7.4 条的要求。深部位移监测时，水平位移可采用埋设测斜管的形式，分层沉降可采用埋设分层沉降管、管外套磁环的形式。

24.3.7 地表裂缝观测：当采用游标卡尺量测时，在裂缝两侧应预先制作水泥墩并埋设头部磨圆的钢筋，通过量测圆钢之间距离的变化，获得裂缝变化数据（如图 24.3.7）；当采用裂缝监测仪时，按照设备的技术要求进行。

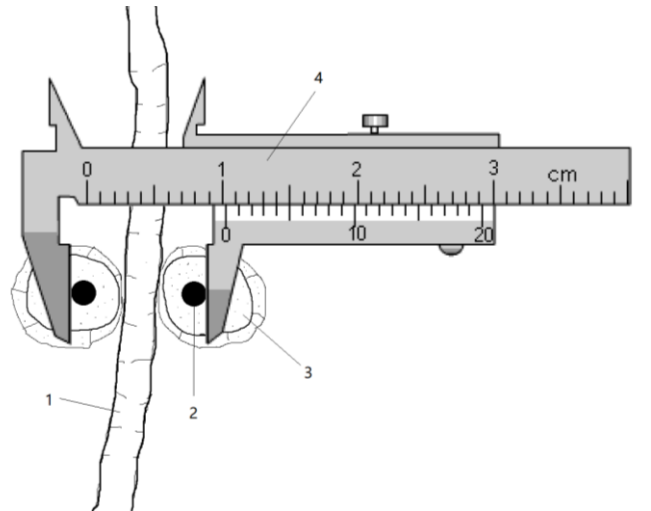


图 24.3.7 游标卡尺法测试地表裂缝示意图

1-地表裂缝 2-圆钢 3-水泥墩 4-游标卡尺

【条文说明】：24.3.7 采用游标卡尺量测地表裂缝时，在裂缝两侧预先制作水泥墩的作用在于固定监测用的圆钢标志，不得影响原有裂缝的发育。

24.3.8 裂隙测试应符合下列规定：

1 裂隙测试工作面准备：根据待测裂隙的大小准备工作面，裂隙可按表 24.3.8.1 进行分类。测试沿深度方向的裂隙时，选择开挖好的竖向平整剖面；测试沿水平方向的裂隙时，选择平整的地表面。

表 24.3.8.1 裂隙类别

裂隙类别	裂隙延伸长度
微裂隙	< 1cm
小裂隙	1~50cm
大裂隙	50~200cm
长大裂隙	> 200cm

- 2 长度参照物放置：在待测试裂隙附近放置长度参照物，如图 24.3.8 所示；
- 3 待测裂隙拍摄：调整相机角度，使镜头轴线与待测裂隙面垂直；调整相机与裂隙面的距离或焦距，使待测裂隙面及参照物完整出现在显示屏上；采用自动或手动模式进行拍摄，获得亮度均匀的裂隙图像。

4 裂隙图像处理：包括灰度化、二值化、去杂等步骤。



图 24.3.8 摄影图像法测试裂隙示意图

1-待测开挖面；2-裂隙；3-参照物；4-相机；5-山坡；6-地面

【条文说明】：24.3.8 工程上，一般根据裂隙的延伸长度划分为微裂隙、小裂隙、大裂隙和长大裂隙等4类。微裂隙的延伸长度小于1cm，小裂隙的延伸长度为1~50cm，大裂隙的延伸长度为50cm~200cm，长大裂隙的延伸长度一般大于200cm。裂隙宽度也是重要的裂隙特征参数，一般采用平均值进行分析，且与裂隙长度存在一定的关联性，基于目前还没有足够的测试统计数据，本条文在裂隙分类时也暂不考虑裂隙宽度。

保持镜头轴线与待测裂隙面垂直的目的在于减小图像倾角，提高图像边缘的裂隙测试精度；获得亮度均匀的裂隙图像，是后续图像处理获得较高精度的前提。

裂隙图像处理时，灰度化、二值化、去杂等步骤可按下列方法进行：

1) 灰度化。数码相机拍摄的图像一般为彩色图像，直接处理工作量较大，需要先对图像进行灰度化处理。从彩色空间到灰度空间有多种算法，可采用RGB三分量加权平均法：

$$f(i, j) = 0.30R(i, j) + 0.59G(i, j) + 0.11B(i, j) \quad (24.3.8-1)$$

式中， $R(i, j)$ 、 $G(i, j)$ 及 $B(i, j)$ 代表RGB图像在*i*行*j*列位置处的三种颜色分量幅值， $f(i, j)$ 为转化后得到的灰度图像在*i*行*j*列位置处幅值，各常数为权系数。

2) 二值化。为进一步减少后期处理的计算量，需将灰度图像转化为二值图像，即图像取值仅包含0或者1，其中0若表示黑色，1则表示白色。二值化的目的是利用阈值对图像实现分割处理，其中阈值选取需根据实际情况合理确定，图像分割算法有直方图阈值法，迭代法和大津法等，大津法目前最为常用。

3) 去杂。图像二值化后，需要对一些原因引起的杂点进行人工或自动去除。

24.4 计算和记录

24.4.1 裂隙图像处理可使用相关处理软件或程序，包括面积裂隙率、裂隙平均宽度、裂隙长度、裂隙倾角、分块面积等特征信息，其中裂隙倾角可制作成玫瑰图或直方图。

1 面积裂隙率，应按下式计算：

$$\delta_f = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{A} \quad (21.4.1-1)$$

式中： δ_f — 面积裂隙率；

A_i — 第*i*条裂隙的面积，像素点数或 mm^2 ；

A — 裂隙图像总面积，像素点数或 mm^2 。

2 裂隙平均宽度按下式计算：

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{L} \quad (21.4.1-2)$$

式中： $\bar{d}$ — 裂隙平均宽度，像素点或 mm ；

L — 裂隙总长度，为所有裂隙骨架化后的像素点总数或其对应的实际长度。

3 裂隙图像中一个像素点对应的实际长度，应按下式计算：

$$l = \frac{l_c}{m_c} \quad (21.4.1-3)$$

式中： l — 裂隙图像中一个像素点对应的实际长度， mm ；

l_c — 在裂隙图像中参照物上选定的刻度长度， mm ；

m_c — 上述参照物上选定的刻度长度所对应的像素点数。

【条文说明】：24.4.1 面积裂隙率的计算可以直接使用有关图像处理软件，其他参数一般需要借助上述或其他文献报道的方法获得。关于裂隙图像的处理，南京大学、中国科学院武汉岩土力学研究所等单位都已开展多年的研究工作，且编制了相关的程序或源代码供免费使用。

24.4.2 监测数据整理应及时快速、准确可靠，在经济和技术条件具备的情况下宜逐步实现监测数据采集和计算的自动化。

24.4.3 数据整理可采用比较法、作图法、特征值统计法及数学模型法。使用数学模型定量分析时，应同时采用其他方法进行定性分析，进行对比验证。

24.4.4 数据分析应明确监测物理量的大小、变化规律、趋势及影响因素的关系与相关程度。

24.4.5 监测成果的内容应真实、准确、完整，并应以文字和图表相结合的形式予以表达，按时报送。

24.4.6 监测成果报告应包含工程概况、监测网点布设、监测方法与仪器设备、监测人员、监测数据处理与分析、监测图件、结论与建议等。

24.4.7 降水量、降水强度、气温、湿度、蒸发、风向、风速等气候指标的记录格式参照现行《地面气象观测规范》(GB /T 35221-2017)的规定要求。

24.4.8 含水率的记录格式应符合本标准附录 E 表 22.1 的规定。基质吸力记录格式应符合本标准附录 E 表 22.2~表 22.3 的规定。

24.4.9 水平位移和竖向位移监测记录格式应符合本标准附录 E 表 24.1 的规定。

24.4.10 裂隙测试的记录格式应符合本标准附录 E 表 24.2 的规定。

附录 E 表 24.1 水平位移和竖向位移监测记录表

点号	水平位移量/mm				备注	竖向位移量/mm				备注
	本次测试值	单次变化	累计变化量	变化速率		本次测试值	单次变化	累计变化量	变化速率	
说明	所填写数据正负号的物理意义； 测点损坏的状况（如被压，被毁）； 备注中注明该测点数据正常或超限状况。			测点布置示意图						
工况										

附录 E 表 24.2 裂隙测试记录表

任务单号				试验者	
位置说明				计算者	
试验日期				校验者	
位置编号	图像编号	面积裂隙率 (%)	裂隙总长度 (cm)	裂隙平均宽度 (cm)	备注

25 三轴试样全表面变形数字图像测量

25.1 一般规定

25.1.1 本试验方法适用于细粒土和最大粒径小于 20mm 的粗粒土。

【条文说明】：25.1.1 本试验方法的原理是：采用亚像素角点识别算法，由相机记录的试验过程中试样橡皮膜上各单元节点的空间位置测定位移。经数据有效性检验、误差修正、坏点识别处理、坐标转换、曲面展开、图像拼接得到试样全表面的平面图，再通过插值计算得到试样的位移和应变（包括体变）分布。

25.1.2 本试验方法既适用于非饱和土试样，也适用于饱和土试样。

25.1.3 本试验方法可用于三轴试验、平面应变试验和振动三轴试验等试验中试样的局部变形（应变）场及整体变形（应变）测量。

25.1.4 在配备高围压设备的前提下，本试验方法可用于从低围压（1MPa）到高围压（20MPa）的三轴试验。

25.1.5 在配备温控设备的前提下，本试验方法可用于高低温（-25℃~ 80℃）环境的三轴试验。

25.2 仪器设备

25.2.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 试样全表面变形数字图像测量系统（图 25.2.1）：由试样全表面变形数字图像测量装置和配套的测量软件组成；其中测量装置包括：图测压力室、工业相机、镜头、相机支架、支架固定杆和柔性遮光罩。

2 试样全表面变形数字图像测量系统应配套土工试验机或万能材料试验机使用。

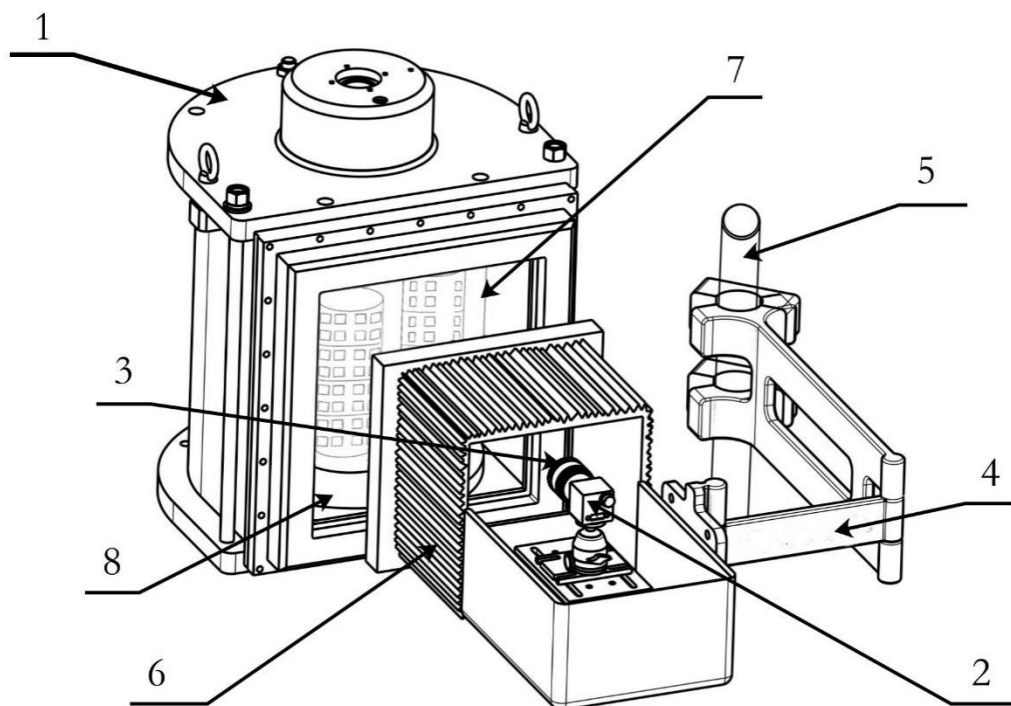


图 25.2.1 试样全表面变形数字图像测量系统

1-压力室；2-工业相机；3-镜头；4-相机支架；5-支架固定杆；6-柔性遮光罩；7-平面镜；8-LED 灯

【条文说明】：25.2.1 图像测量系统的精度检定应符合下列规定：

图像测量系统的试样变形测量精度优于亚毫米，应变测量精度优于 10^{-4} 。

影响三轴试样全表面变形图像测量系统精度的因素有镜头畸变、标定样的尺寸误差、测量环境的噪声干扰等。采用三种方法检测测量系统的测量精度：（1）标定板检测；（2）电阻式应变仪检定；（3）体积变形量水管检测。

1 标定板检测方法

通过测量高精度标定板，检定测量系统及测量方法的测量不确定度。高精度标定板见图1，该板是石英材质，制作精度为 $\pm 0.25 \mu\text{m}$ 。

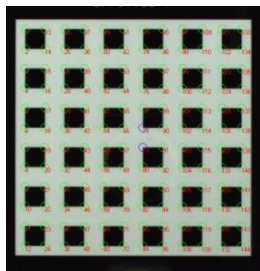


图 1 高精度标定板图像

测量视场范围为 $165\text{mm(H)} \times 124\text{mm(V)}$ ，温度 20°C ，试验光照及室内温度环境保

持稳定。对标定板进行静止状态下的多次重复测量，结果如图2所示，标定板上各节点测量结果的标准差在0.02个像素左右，具有较高的测量稳定性。

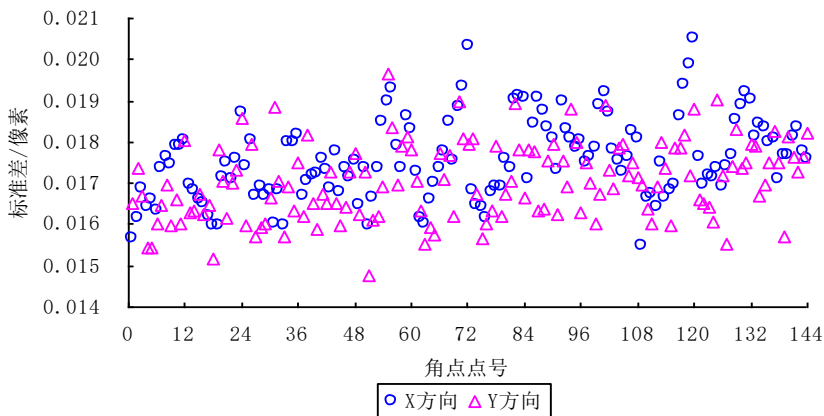


图 2 标定板各节点重复测量的标准差

采用平均值方法计算出当前条件下的像素当量值 δ ，即一个像素所代表的实际长度，单位mm/像素。表1和表2分别是X方向和Y方向的测量结果，由数据可以看出，多次测量结果与实际值的误差很小，X方向最大绝对误差为0.006mm，相对误差0.09%；Y方向最大绝对误差为0.008mm，相对误差0.08%。

表 1 X 方向测量结果

标定板两角 点距离/mm	测量平均值 /像素	标准差 sd /像素	标准误差 se(不确定度)	测量值 /mm	绝对误差 /mm	相对误差 /%
55.000	431.5290	0.0223	0.0007	54.9984	0.0016	0.00
45.000	353.0744	0.0224	0.0007	44.9993	0.0007	0.00
35.000	274.6562	0.0237	0.0007	35.0049	-0.0049	-0.01
25.000	196.1563	0.0215	0.0007	25.0001	-0.0001	0.00
15.000	117.7443	0.0242	0.0008	15.0065	-0.0065	-0.04
5.000	39.1967	0.0233	0.0007	4.9956	0.0044	0.09

表 2 Y 方向测量结果

标定板两角 点距离/mm	测量平均值 /像素	标准差 sd /像素	标准误差 se(不确定度)	测量值 /mm	绝对误差 /mm	相对误差 /%
55.000	431.3428	0.0215	0.0007	54.9919	0.0081	0.01
45.000	353.0016	0.0239	0.0008	45.0042	-0.0042	-0.01
35.000	274.5616	0.0244	0.0008	35.0039	-0.0039	-0.01
25.000	196.1335	0.0225	0.0007	25.0051	-0.0051	-0.02

15.000	117.7093	0.0241	0.0008	15.0068	-0.0068	-0.05
5.000	39.2519	0.0234	0.0007	5.0042	-0.0042	-0.08

2 电阻式应变仪检定方法

应用电阻式应变仪进行铝棒的10-50kN循环加载应变测试试验，比较图像测量与应变片（其精度为 10^{-6} 微应变）测量的结果。选用直径为39.1mm的圆柱，表面印有黑色方格，在黑色方格构成的空白处贴有横向和竖向应变片，分别用于测量径向变形和轴向变形，如图3所示。计算径向应变和轴向应变并与应变片测量值进行比较，结果如图4所示，可以看到两者符合很好。

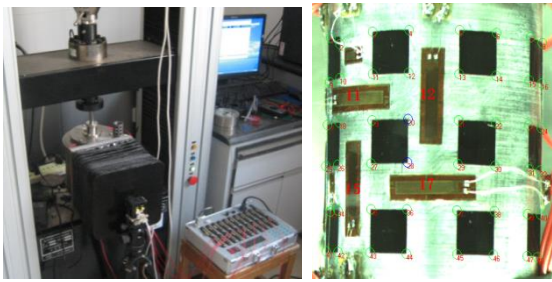
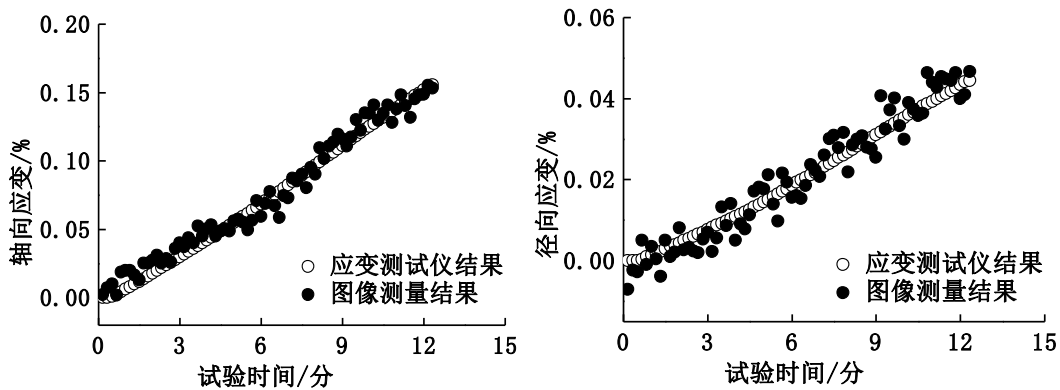
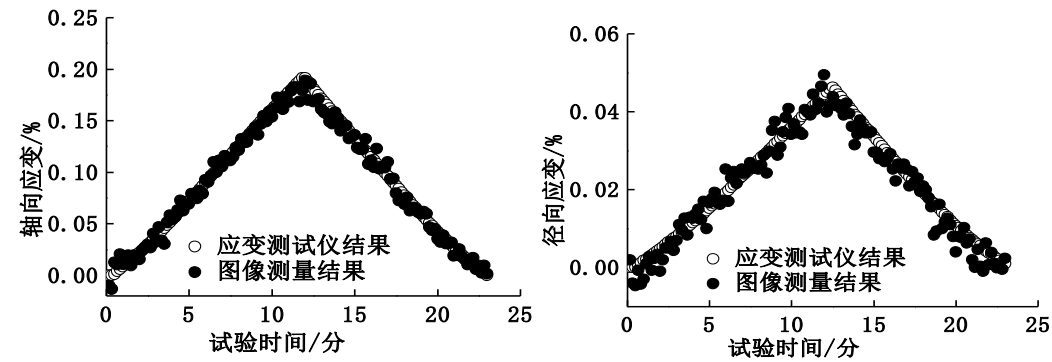


图3 铝圆柱的循环应变测试系统



(a) 单调加载试验结果

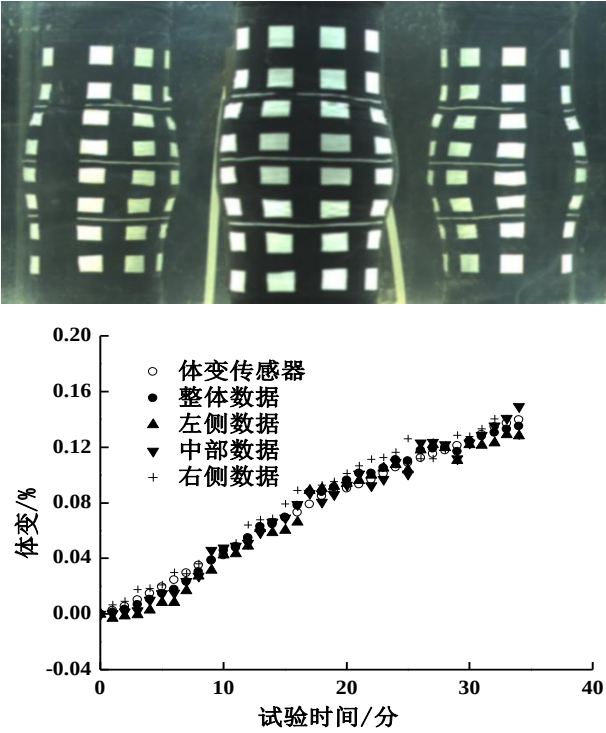


(b) 循环加载实验结果

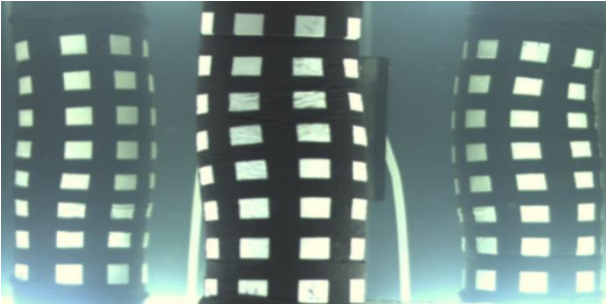
图4 典型的精度检定试验结果

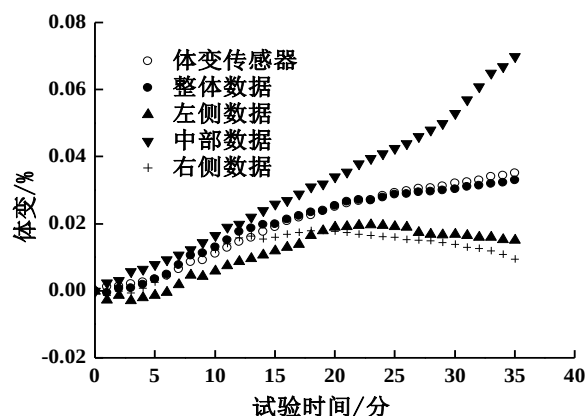
3 体积变形量水管检测方法

分别采用图像测量和量水管配合差压传感器测量剪切过程中试样的体变。分别列出每个投影面单独计算的体变值和经均化处理后的全表面整体体变值。图5是两组试验破坏时的试样形态和体变结果曲线，由于施加的围压不同，试样分别发生鼓胀破坏和剪切破坏。由图5(a)和图5 (b)可见，无论试样发生鼓胀破坏还是剪切破坏，土样整体体积变化与量水管的测量值均符合很好。



(a) 鼓胀破坏体变结果及破坏时刻对应的试样图片





(b) 剪切破坏体变结果及破坏时刻对应的试样图片

图 5 饱和砂土三轴排水剪切试验体积变形测量结果

25.2.2 试样全表面变形数字图像测量系统的主要部件应符合下列规定：

1 图测压力室（如图 25.2.1 所示）由底盘、试样底座、平面镜、圆柱体试样、试样加载帽、环形 LED 灯、压力室上盖、半圆筒状的压力室外腔、平面钢化玻璃组成。图测压力室与现行国家标准《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）的压力室不同，其前面板为平面钢化玻璃，压力室腔体内部安装有两面互成 120°的平面镜，位于圆柱体试样的后方。

2 图测压力室应配套土工试验机或万能材料试验机使用（如图 25.2.2-1 所示）。配套土工试验机应符合现行国家标准《土工试验仪器 三轴仪 第 1 部分：应变控制式三轴仪》、《土工试验仪器 三轴仪 第 2 部分：应力控制式三轴仪》、《土工试验仪器 三轴仪 第 3 部分：动三轴仪》（GB/T 15406-2009）的规定，配套万能材料试验机应符合现行国家标准《电液伺服万能试验机》（GB 16826-2008）第 5.3.4 条的规定。

3 图像测量系统应满足下列要求：相机支架固定在试验机台面的可旋转立柱上；柔性遮光罩一端固定在相机支架上，另一端可以自由伸缩调整，试验时将其安装在图测压力室前面板的平面钢化玻璃上用于隔绝外界光线干扰，试验结束时可以摘除；工业相机固定在相机支架上，位于图测压力室正前方，位置可调整；工业相机的光轴与图测压力室前面板的平面钢化玻璃垂直，配合图测压力室内部两面互成 120°的平面镜捕捉试样全表面图像；试验时计算机实时显示土样图像。

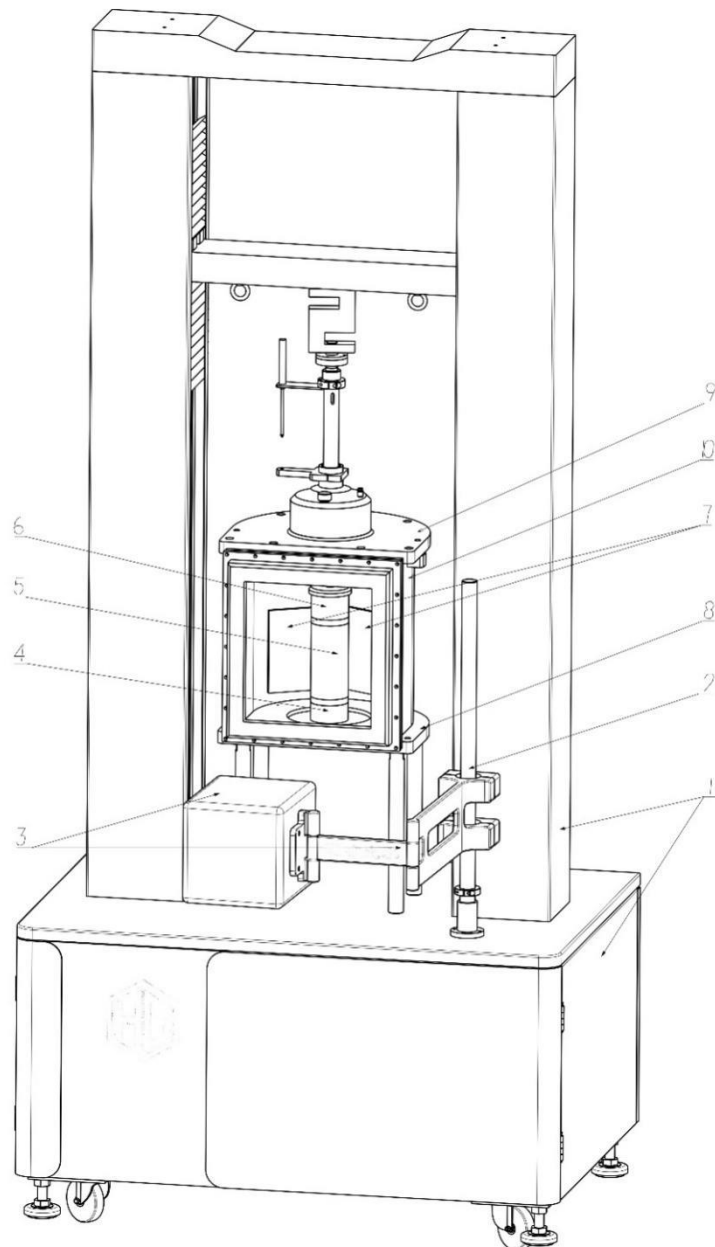


图 25.2.2-1 试样全表面变形数字图像测量系统与试验主机配套示意图

1-三轴加载主机；2-支架固定杆；3-相机支架；4-环形 LED 灯；5-圆柱体试样；6-试样加载帽；7-平面镜；8-图测压力室底座；9-图测压力室上盖；10-图测压力室外腔

4 试样表面必须印有可跟踪识别的测量标记。被测试样为连续介质时，可直接在试样表面上印制测量标记。试样为土或者需要密闭施加围压的材料时，可以在包裹试样的橡皮膜上印制测量标记。试样的表面被离散成若干个四节点有限单元，网格的角点作为有限单元的节点，以亚像素精度识别并实时跟踪和记录每一节点的坐标信息，得到各个测点的变形过程。以直径为 39.1mm、高 80mm 的圆柱体试样为例。试样包

裹在黑色橡皮膜内，在黑色橡皮膜表面印制 8 行×8 列、尺寸为 7mm×7mm 共计 64 个白色方块，形成测量标记（图 25.2.2-2）。

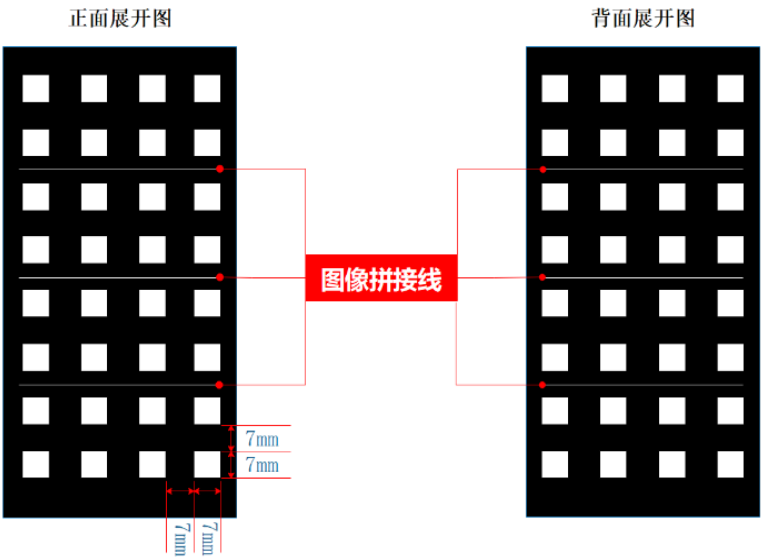


图 25.2.2-2 试样表面标记块（点）印制图例

5 试样全表面变形数字图像测量系统的配套采集软件运行应符合下列要求：

- 1) 计算机硬件最低配置：CPU 主频 2.0 G Hz，内存容量 2 G，硬盘剩余容量 1 G，屏幕分辨率 1366×768；
- 2) 计算机软件配置：Windows 操作系统，.net framework 4。

25.2.3 试样全表面变形数字图像测量系统规格型号选择应符合下列规定：

- 1 根据图像采集相机的分辨率、图测压力室的工作压强和应用领域，变形图测系统可分为不同的规格和型号，其参数应符合本标准表 25.2.3 的规定。
- 2 根据不同的试验条件，选择不同规格和型号的试样全表面变形数字图像测量系统进行试验。

表 25.2.3 试样全表面变形数字图像测量系统规格型号列表

型号	相机分辨率	图测压力室耐压	图像测量频率	适用场景	试样大小	适配加载方式
WD-STTS-1.0	2592×1944	1.0MPa	2Hz	三轴圆柱试样的剪切、拉伸、渗透、压缩试验变形测量	Φ≤50mm	静态加载
WD-STTS-	2592×194	≤20MPa	2Hz	三轴圆柱试样的剪切、拉伸、渗透、压缩试验变形测量	Φ≤50mm	静态加载

1a	4					
WD-STTS-2.0	1280 ×102 4	1.0MPa	200Hz	三轴圆柱试样的剪切、拉伸、渗透、压缩试验变形测量	$\Phi \leq 50\text{mm}$	动、静态加载
WD-STTS-3.0	5496 ×367 2	1.0MPa	2Hz	三轴圆柱试样的剪切、拉伸、渗透、压缩试验变形测量	$\Phi \leq 100\text{mm}$	静态加载
WD-STTS-4.0	2592 ×194 4	1.0MPa	2Hz	平面应变试验、真三轴试验的立方体试样前表面变形测量	$L \times H \leq 80\text{mm} \times 80\text{mm}$	静态加载
WD-STTS-4a	1280 ×102 4	1.0MPa	200Hz	平面应变试验、真三轴试验的立方体试样前表面变形测量	$L \times H \leq 80\text{mm} \times 80\text{mm}$	动、静态加载

25.2.4 试样全表面变形数字图像测量系统的误差修正应符合下列规定：

试样全表面变形数字图像测量系统使用之前需由生产厂商提供综合镜头畸变、图测压力室变形、物距误差、图像折射和反射误差等误差修正参数，并据此对测量数据进行修正。

25.2.5 试样全表面变形数字图像测量系统的精度应符合下列规定：

试样全表面变形数字图像测量系统的试样变形测量精度优于亚毫米，应变测量精度优于 10^{-4} ，参见条文说明。

25.3 操作步骤

25.3.1 三轴试样制备应符合下列规定：

1 本试验采用的试样尺寸应按《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）第 19.3.1 条第 1 款的规定进行；

2 原状土样的试样制备应按《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）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 3.2 节的规定进行；

4 砂土样的试样制备应按《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）第 19.3.1 条第 4 款的规定进行；

5 试样的安装应按《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）第 19.4.1 和第 19.5.1 条的规定进行，且应将印有白色网格的黑色橡皮膜替换第 19.4.1 和第 19.5.1 条中的橡皮膜，保证试样在位于黑色橡皮膜中间的六行白色网格区域内。

【条文说明】：25.3.1 后处理软件使用详见《三轴试样全表面变形数字图像测量》操作手册。

25.3.2 三轴试样饱和应符合下列规定：

1 抽气饱和应按《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）第 19.3.2 条第 1 款的规定进行；

2 水头饱和应按《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）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《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）第 19.3.2 条第 3 款的规定进行。

25.3.3 图测压力室和试样的安装应按下列步骤进行：

1 按《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）第 30.3.3 条第 1 款的规定对试样底座充水；

2 将试样放在图测压力室底座上，安放试样时，应使橡皮膜中间的图像拼接线位于试样中间截面位置，捆扎的橡皮筋置于网格的上下两端，不遮挡网格；

3 安放试样加载帽，连接底座的黑色排水管应位于试样的正后方；

4 检查图测压力室的内外壁是否有残余水珠或少量杂质，并将水珠或杂质擦拭干净。将图测压力室底座密封圈放入密封圈缝隙，安放图测压力室；

5 将图测压力室上盖的加载杆对准试样帽中心并缓慢落下，随后均匀旋紧四周螺丝拧紧压力室上盖；

6 接通照明光源并检查试样是否充满整个视窗，使试样正面的四列网格均匀对称分布在视野中，同时使左右平面镜中均能分布三列网格。

25.3.4 向图测压力室注水。打开图测压力室排气孔和注水孔，连通围压系统，向压力室注入无气水，待无气水注满后及时关闭排气孔和注水孔。向图测压力室施加 5kPa 的围压，同时撤掉试样内部的负压，保证试样稳定地直立在三轴压力室底座上。

25.3.5 启动试验主机，使试验机力传感器的端头与加载杆接触。

25.3.6 测量参数设置和图像获取应按下列步骤进行：

1 启动采集软件，点击“开始试验”菜单，进入试验参数配置页面；

2 在“土样信息”栏中填写试样基本信息，其中“初始周长”和“高度测量值”，是对安装好的试样进行 3 次周长和高度测量（图 25.3.6），确保试样尺寸与《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）第 19.3.1 条第 1 款规定的尺寸一致；

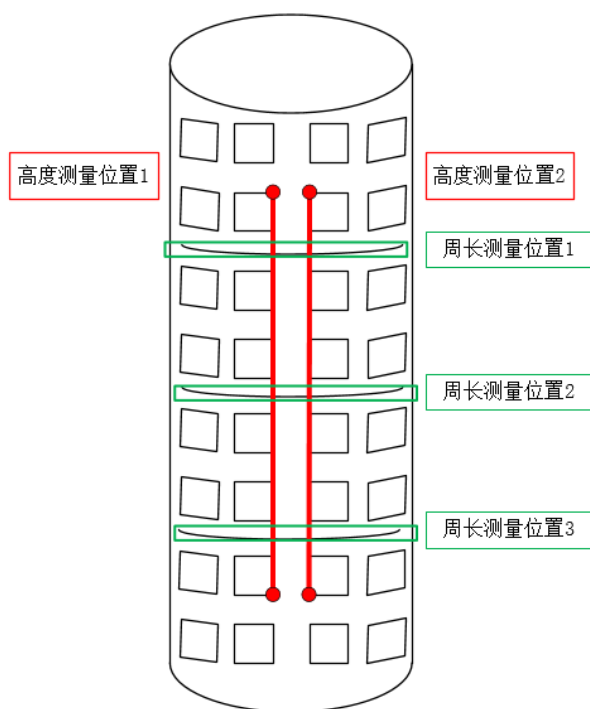


图 25.3.6 试样初始周长和高度测量位置示意图

3 点击“试验设置”菜单，填写数据存储文件位置和图像采集参数信息。试验参数设置说明见表 25.3.6 的规定。

表 25.3.6 试验设置说明

序号	项目	涵义
1	是否保存原始图像文件	用户勾选后，即可保存试验过程中拍摄的所有图像，方便用户后期对本次实验的再分析；如若用户不想保存试验过程图像则无需勾选；需要确保有足够的磁盘空间用于采集图像的存储。
2	信息文件名	试验试样基本信息存储文件名，默认为 TestInfo.txt，用户可以根据实际情况进行修改。
3	数据文件名	记录试验角点坐标数据，默认为 TestData.txt，用户可以根据实际情况进行修改。
4	采样时间	设置试验图像采集的时间间隔，单位秒，设置范围 1~1000s。
5	是否先固结	如果当前试验是先固结后剪切，则勾选； 如果试验直接进行剪切，不勾选。

- 4 点击“开始拍摄”按钮，相机自动启动并拍摄；
- 5 若需更改上述步骤中设置的参数信息，点击“取消试验”，即可回到参数配置界面；
- 6 若提示获取图像失败，需检查相机连接和驱动程序。

7 试验前相机的调整应按照规定进行：

1) 宜使试样及平面镜中的试样图像充满整个镜头，即最上面一行和最下面一行尽量靠近镜头的上下部分；

2) 宜使试样位于初始图像中央部位，并应在图像的左右两侧预留拍摄区域，防止试样剪切膨胀后跳出成像框；

3) 镜头焦距的调整以图像整体清晰为宜，避免因试样变形后局部图像不清晰引起的测量误差。

25.3.7 测量点的识别应按下列步骤进行：

1 按本标准第 25.3.6 条第 7 款规定调整好试样位置和相机，点击“停止拍摄”，采集软件界面将显示当前拍摄的图像（图 25.3.7-1）。

2 点击采集软件的“开始选点”，随后采集软件界面显示测量点的识别结果（图 25.3.7-2）。测量点识别特征及测量点识别颜色说明见表 25.3.7-1 和表 25.3.7-2 的规定。选点前后的图像保存在本标准第 25.3.6 条第 1 款设置的数据存储目录 InnerValues 文件夹中。

3 检查测量点识别效果，并依据本标准第 25.3.6 条第 7 款的规定，重复执行本标准第 25.3.7 条第 3 款的规定，使得有效区域（其中，第一行和最后一行标记块为非有效区域）中全部为绿色识别点或黄色识别点数量在 1/5 以内，严禁存在红色识别点。

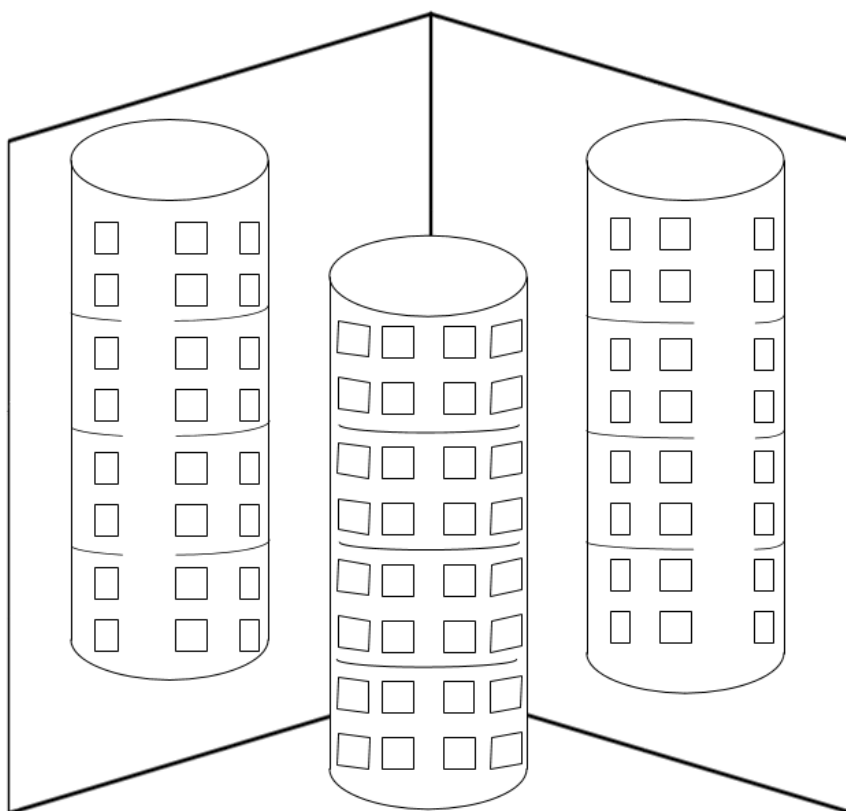


图 25.3.7-1 三轴试验图像测量示意图

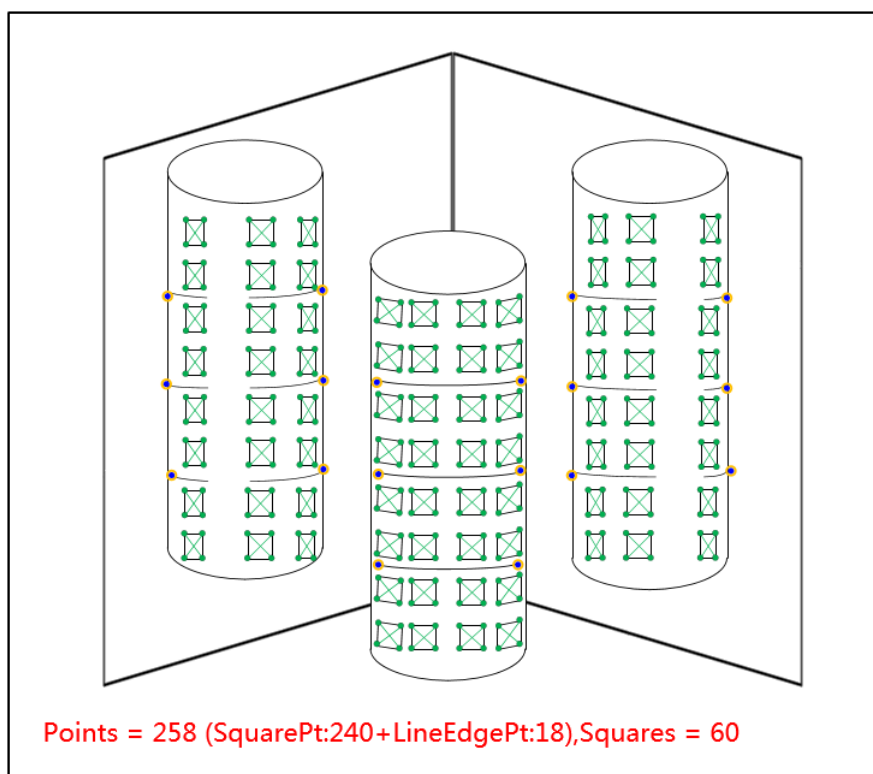


图 25.3.7-2 捕捉识别测量点及其标记示意图

表 25.3.7-1 测量点识别特征说明

特征	说明
方格	离散试样的有限单元，方格的角点是被跟踪的有限元节点
横线	左右两部分图像与中间部分图像拼接用的特征线

表 25.3.7-2 测量点识别颜色说明

颜色	说明
绿色	识别出标记点，并且可以跟踪测量
黄色	没有准确识别出标记点，但是根据周边已识别出的点可以确定测量标记点，并且可以跟踪测量
红色	未识别出标记点，在该点处不能准确跟踪测量

25.3.8 测量点跟踪识别应按下列步骤进行：

1 选点结束后点击采集软件的“开始试验”，进入到试验主页面。根据试验要求点击“开始固结”或者“开始剪切”，随后采集软件界面实时显示轴向应变、径向应变随时间的变化曲线和相机拍摄的图像。

2 试验结束后点击“固结结束”或“剪切结束”按钮，即停止图像测量跟踪，并结束试验。

25.4 试验数据后处理

25.4.1 后处理软件使用应按下列步骤进行：

- 1 运行试验数据后处理软件；
- 2 导入试验数据。点击“试验数据导入”按钮，导入试验基本信息、图像测量特征点坐标数据、试验机传感器载荷数据；
- 3 试验数据导入完成显示。试验数据成功导入后程序显示试样直径、试样高度、加载方式等信息；
- 4 后处理软件数据处理过程。点击“开始处理”按钮，程序即对试验数据进行校验、测量误差修正、像素当量确定、镜面内图像转换和修正、试样表面展铺和拼接、节点位移计算及应变计算，数据处理完成后，自动弹出输出文件目录，输出载荷信息、轴向应变、径向应变、体积应变等文件。

25.4.2 试验数据后处理输出以下结果文件和图形曲线：

- 1 后处理输出文件

- 1) 01 序号文件，包括各角点的直角坐标和柱坐标随时间的变化，各角点的剪应变、体应变、径向应变及轴向应变随时间的变化，用于绘制等值线场的位移和应变信息；
- 2) 02 序号文件，为各节点坐标随时间的变化；
- 3) 11 序号文件，为试样整体的轴向应变、径向应变、体应变和轴向应力随时间的变化，用于绘制应力应变曲线；
- 4) 21 序号文件，包括 192 个角点的坐标及剪应变随时间的变化，192 个角点的坐标及体应变随时间的变化，192 个角点的坐标及径向应变随时间的变化，192 个角点的坐标及轴向应变随时间的变化，用于绘制等值线及试样场图；
- 5) 22 序号文件，包括 192 个角点的剪应变随时间的变化，192 个角点的径向应变随时间的变化，192 个角点的轴向应变随时间的变化；
- 6) Hoopstrain All 文件，将试样分成 12 个截面，每个截面的平均环向应变；
- 7) 31 序号文件，包括 192 个角点的水平位移及垂直位移随时间的变化。

2 试验曲线输出

利用本标准第 25.4.2 第 1 款规定的数据输出结果，根据需要可分别绘制应力-应变关系曲线、轴向应变-径向应变关系曲线、轴向应变-体积应变关系曲线、试样轴向应变场、试样径向应变场、应力水平场、莫尔圆及破坏包线等关系曲线，如图 25.4.2-1~25.4.2-12 所示。

1) 应力应变关系曲线

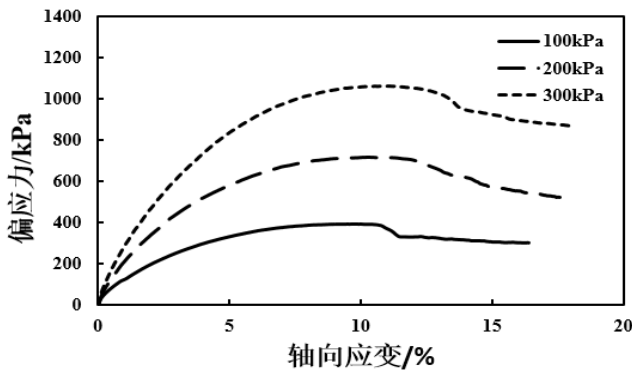


图 25.4.2-1 不同围压应力应变关系曲线

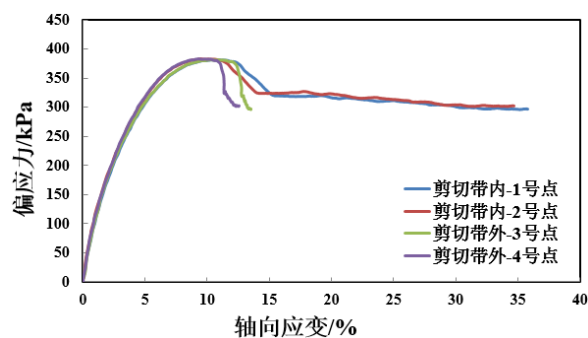


图 25.4.2-2 不同点偏应力-轴向应变关系曲线

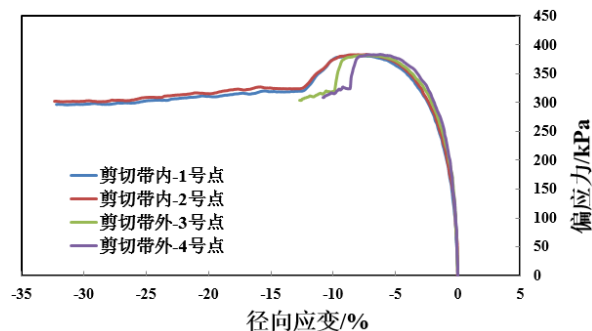


图 25.4.2-3 不同点偏应力-径向应变曲线

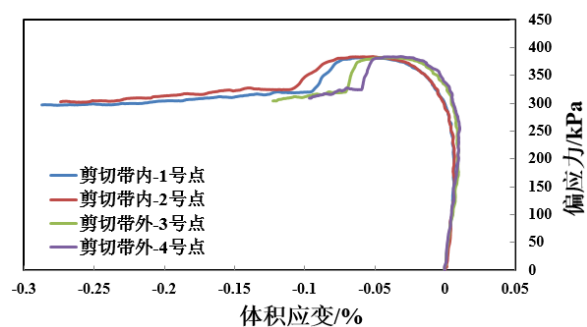


图 25.4.2-4 不同点偏应力-体积应变曲线

2) 应变随时间变化关系曲线

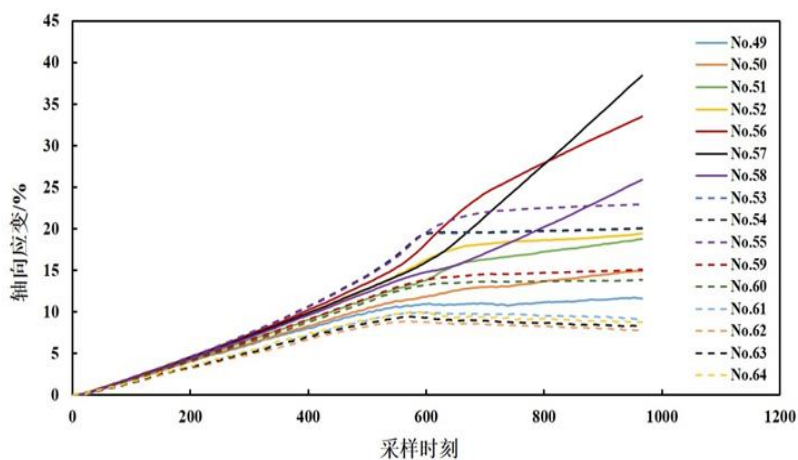


图 25.4.2-5 不同采样点的轴向应变随时间变化关系曲线

3) 各点应变关系曲线

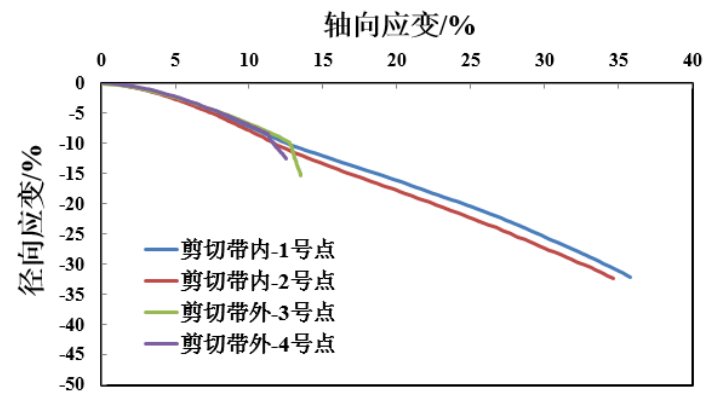


图 25.4.2-6 径向应变-轴向应变曲线

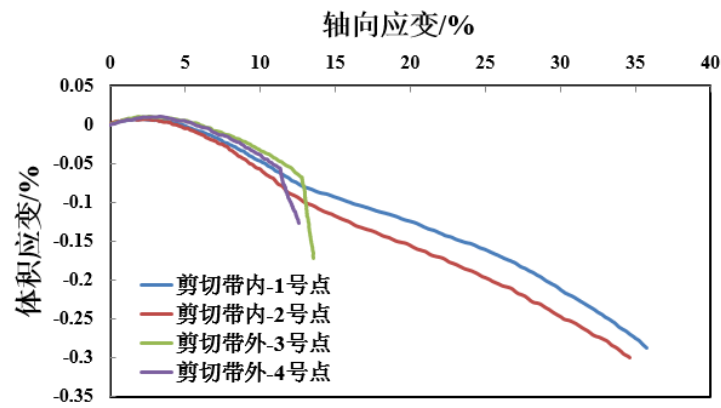


图 25.4.2-7 体积应变-轴向应变曲线

4) 变形和应变场图

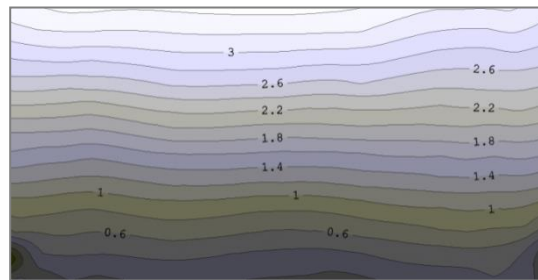


图 25.4.2-8 试样轴向变形场图

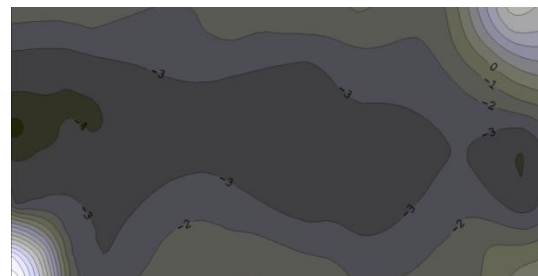


图 25.4.2-9 试样径向应变场图

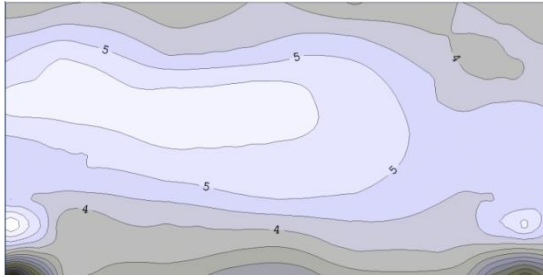


图 25.4.2-10 试样轴向应变场图

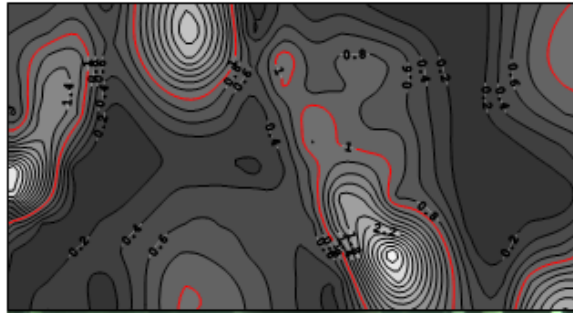


图 25.4.2-11 应力水平场图

5) 莫尔圆及破坏包线

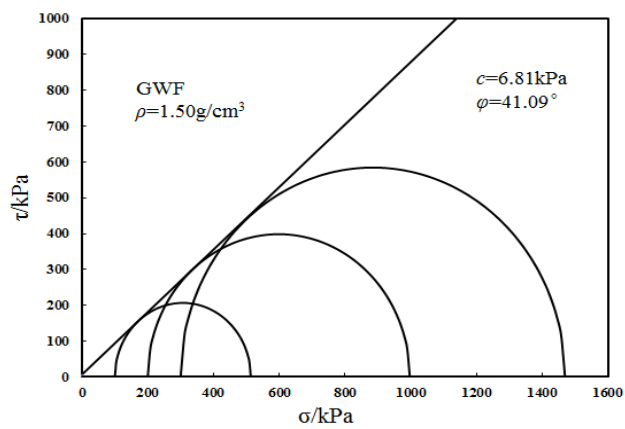


图 25.4.2-12 莫尔圆及破坏包线图

25.4.3 三轴试样全表面变形数字图像测量记录格式应符合本标准附录 E 表 25.1 的规定。

附录 E 表 25.1 三轴试样全表面变形数字图像测量记录表

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				三轴仪加载方式			
相机分辨率				是否保存原始图像文件			
测量点识别结果				数据噪声处理模式			
试样尺寸： 试样名称： 试样类别： 制样试样干密度：				周围压力= kPa; 剪切应变速率= mm/min; 图像测量采集频率= Hz; 固结时间： min; 饱和状态： %; 剪切停止条件：			
角点编号	时刻点	横向坐标	纵向坐标	轴向应变 (%)	径向应变 (%)	体积应变 (%)	剪应变 (%)

26 三轴土样含水率分布测试试验

26.1 一般规定

26.1.1 本方法适用于三轴试验进行中的土样含水率分布状态实时测试。

26.1.2 本方法适用于细粒土。

26.1.3 本方法是以土体电阻率与土体含水率存在定量关系为基础，利用范德堡电阻率测法，定量测试细粒土含水率。

【条文说明】：26.1.3 土体电阻率是一种间接测量土体含水率的重要方法。范德堡法是一种广泛应用于均匀厚度的任意形状固体金属、半导体、电解质溶液等的电阻率不侵入测试方法。因此，将范德堡法（L. J. van der Pauw, 1958）引入土体的电阻率测试中，具有不破坏土样、接触电阻影响小的优点，且可实现与土样的力学性质试验，在狭小空间内同步进行。本方法通过四个惰性电极水平地置于试样外表面，并连接如图 26.2.1-1 所示电路，带入公式(26.3.2)即可得到电极一定范围内的平均电阻率（冯怀平, 2017），平均范围可通过有限元模拟、查阅有关文献得到（Feng, 2019）。

参考文献

- [1] L. J. VAN DER PAUW. A Method of Measuring the Resistivity and Hall Coefficient on Lamellae of Arbitrary Shape[J]. Philips Technical Review, 1958(20): 220–224.
- [2] 冯怀平, 马德良, 王志鹏, 等. 基于范德堡法的非饱和土电阻率测试方法[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(04): 690–696.
- [3] FENG HP, MA DL, WU ZX, etc.. Resistivity test technology of triaxial soil sample based on vdP method[C]//7th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils, AP-UNSAT. 2019. Nagoya, Japan: Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2019.

26.2 仪器设备

26.2.1 本试验所用的仪器设备应符合下列规定：

- 1 范德堡法测量仪（图 26.2.1-1）应符合以下规定：

1) 恒流源 A: 输出波形正弦波, 输出电流有效值 $1\text{mA} \sim 10\text{mA}$, 输出频率 $1\text{kHz} \sim 10\text{kHz}$, 可显示输出有效值;

2) 电压表 V: 量程 $0 \sim 2500\text{mV}$, 最小分辨率 12bit, 类型采用有效值直出或最小采样速率 40kSPS 示波器;

3) 双刀双掷开关: 可选手动或者自动切换类型;

4) 信号线: 0.05m^2 RVV4。

5) 电极材质: 惰性金属, 厚度 0.05mm 。

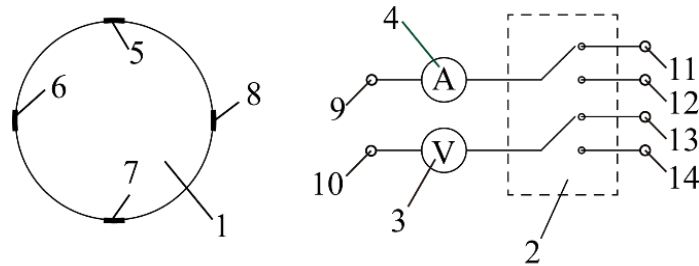


图 26.2.1-1 范德堡法测量仪原理示意图

1—土样; 2—双刀双掷开关; 3—电压表; 4—恒流源; 5—电极 M; 6—电极 N;

7—电极 O; 8—电极 P; 9—接线柱(接电极 N); 10—接线柱(电极 P);

11—接线柱(电极 O); 12—接线柱(电极 M); 13—接线柱(电极 M); 14—接线柱(电极 O)

2 标定试验夹具（图 26.2.1-2）应符合以下规定:

1) 夹具材质: 高强材料, 推荐铁氟龙;

2) 尺寸: 内直径 (D_1) 等于三轴样直径, 高 (H_1) 为 20mm ;

3) 电极材质: 惰性金属, 厚度 0.05mm ;

4) 电极尺寸: 宽 5mm , 长为 20mm ;

5) 电极间距: 取 $1/4$ 内环周长;

6) 固定方法: 使用导电胶将信号线粘贴至电极背面, 使用双面胶将电极固定到夹具内壁。

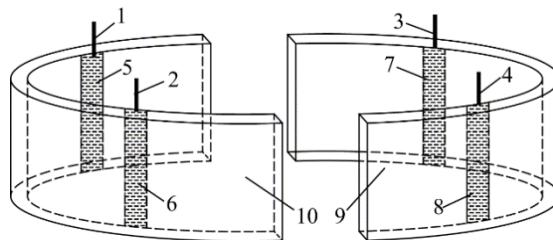


图 36.2.1-2 夹具

1—信号线 M; 2—信号线 N; 3—信号线 O; 4—信号线 P; 5—电极 M; 6—电极 N;

7—电极 O；8—电极 P；9—夹具右环；10—夹具左环

3 三轴样双层电极膜（图 26.2.1-3）应符合以下规定：

- 1) 橡胶模尺寸：与三轴试样相同，试样直径（ D_2 ）、高（ H_2 ）；
- 2) 电极材质：应与 26.2.1 中标定试验夹具采用相同电极；
- 3) 电极尺寸：宽 5mm，长为 20mm；
- 4) 布置形式：沿三轴样长度方向双层布置，横向间距取 $1/4$ 试样周长(l)，

$l = 1/4\pi D_2^2$ ，电极中心竖向间距取 $H_2 / 2$ ；

5) 固定方法：使用导电胶将信号线粘贴至电极背面，使用双面胶将电极固定到橡胶膜；

6) 使用方式：橡胶模置于三轴膜和三轴样之间。

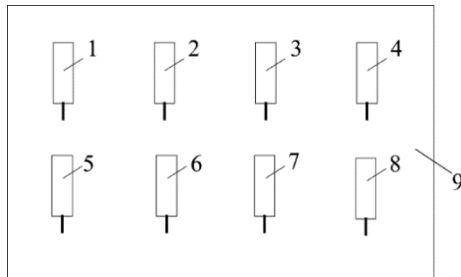


图 26.2.1-3 双层电极膜

1~4—第一层电极和导线；5~8—第二层电极和导线；9—橡胶模

26.2.2 本试验所用的其他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 $105^{\circ}\text{C} \sim 110^{\circ}\text{C}$ 的其他能源烘箱；
- 2 电子天平：称量 200g，分度值 0.01g；
- 3 其他：干燥器、称量盒、导电胶、双面胶、橡皮绳、三轴膜。

26.3 标定试验

26.3.1 标定试验应按下列步骤进行：

- 1 按照预设干密度配置土样，每组不少于 4 个不同含水率试样，试样直径 D_1 ，高 H_1 。试样制备完后静置在保湿器中 24h；
- 2 将试样放置进夹具内，使用橡皮筋固定左、右环；
- 3 将可调交流恒流源的有效电流调节至 1mA，频率 1kHz；
- 4 使用信号线连接夹具与范德堡法测量仪；

- 5 读取交流恒流源电流有效值 $I_{VDP,1}(mA)$ ，读取电压表数值 $V_{VDP,1}(mV)$ ；
- 6 切换双刀双掷开关；
- 7 读取交流恒流源电流有效值 $I_{VDP,2}(mA)$ ，读取电压表数值 $V_{VDP,2}(mV)$ ；
- 8 试验完成后，使用烘干法测量质量含水率 w_1 ；

26.3.2 电阻率应按下列公式计算：

$$\exp(-\pi d^* V_{VDP,1} I_{VDP,1}^{-1} \rho^{-1}) + \exp(-\pi d^* V_{VDP,2} I_{VDP,2}^{-1} \rho^{-1}) = 1 \quad (26.3.2)$$

式中： d^* — 电极有效长度，取电极长度（m）；

ρ — 电阻率（ $\Omega \cdot m$ ）。

26.3.3 电阻率与含水率换算

- 1 电阻率与含水率换算应按下列公式计算

$$\rho = A \cdot \exp(Bw) \quad (26.3.3)$$

式中： A 、 B — 拟合参数；

ρ — 电阻率（ $\Omega \cdot m$ ）；

w — 含水率（%）。

2 以电阻率为纵坐标，质量含水率为横坐标，绘制不同压实系数下电阻率随含水率变化曲线，如图 26.3.3 所示，拟合结果如表 26.3.3 所示。目前，试验精度结果如图 26.3.3 所示。

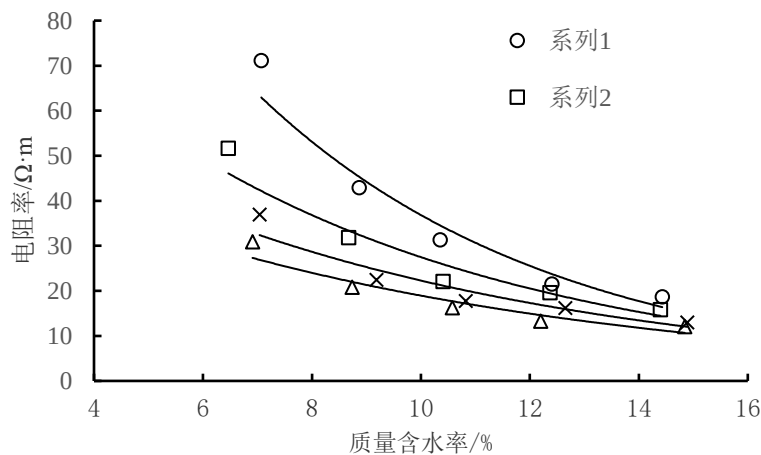


图 26.3.3 不同压实系数电阻率与质量含水率曲线

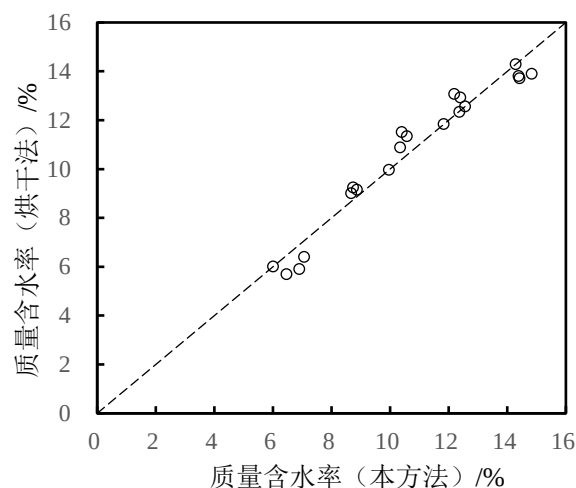


图 26.3.4 结果对比

表 26.3.3 拟合结果

土质名称	温度	压实度	参数 A	参数 B	R ²
粉黏土	25℃	80%	229.39	-0.183	0.9544
粉黏土		85%	118.55	-0.164	0.944
粉黏土		90%	78.70	-0.126	0.9233
粉黏土		95%	61.91	-0.118	0.915

26.3.4 本试验应进行 3 次平行试验，试验结果取算术平均值，其最大允许平行差值应为 ± 0.5 。

26.3.5 本标定试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 26.1 规定。

26.4 三轴试样含水率分布试验

26.4.1 三轴试样表面含水率分布试验应按下列步骤进行：

- 1 按照预设含水率和干密度制备试样，试样制备完后静置在保湿器中 24h；
- 2 将多层电极膜包裹三轴试样，使用三轴膜固定置于设备上；
- 3 将可调交流恒流源的有效电流调节至 1mA，频率 1kHz；
- 4 使用信号线连接夹具与范德堡法测量仪；
- 5 读取交流恒流源电流有效值 $I_{VDP,1}(mA)$ ，读取电压表数值 $V_{VDP,1}(mV)$ ；
- 6 切换双刀双掷开关；
- 7 读取交流恒流源电流有效值 $I_{VDP,2}(mA)$ ，读取电压表数值 $V_{VDP,2}(mV)$ ；
- 8 多次测量时应重复步骤 5~7。

26.4.2 三轴试样电阻率应按下列公式计算：

$$\exp(-\pi d^* V_{\text{VDP},1} I_{\text{VDP},1}^{-1} \rho^{-1}) + \exp(-\pi d^* V_{\text{VDP},2} I_{\text{VDP},2}^{-1} \rho^{-1}) = 1 \quad (26.4.2)$$

式中： d^* — 电极有效长度，取 $0.3D_2$ （吴忠学，2019）；

ρ — 试样电阻率。

26.4.3 三轴试样含水率应按下列公式计算：

$$\rho = A \cdot \exp(Bw) \quad (26.4.3)$$

式中： A 、 B — 拟合参数，取标定实验结果；

26.4.4 本试验应进行 2 次平行试验，试验结果取算术平均值，其最大允许平行差值应为 ± 0.7 。

26.4.5 三轴试样含水率分布试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 26.2 规定。

附录 E 表 26.1 三轴土样表面含水率标定试验记录表

任务单号				试验者			
试验日期				计算者			
范德堡法测试仪编号				校核者			
标定夹具标号							
试样编号	试样说明	$V_{\text{VDP},1}$ (mV)	$I_{\text{VDP},1}$ (mA)	$V_{\text{VDP},2}$ (mV)	$I_{\text{VDP},2}$ (mA)	ρ ($\Omega \cdot \text{m}$)	试样含水率（拱杆 法）
		(1)	(2)	(3)	(4)	式(26.3.2)	(5)
拟合参数 A				拟合参数 B			

附录 E 表 26.2 三轴试样表面含水率分布试验记录表

任务单号						试验者			
试验日期						计算者			
范德堡法 测试仪编号						校核者			
标定夹具 标号									
参数 A						参数 B			
试样 编号	试样 说明	层 1				层 2			
		$V_{\text{VDP},1}$ (mV)	$I_{\text{VDP},1}$ (mA)	ρ ($\Omega \cdot \text{m}$)	含水率 (%)	$V_{\text{VDP},2}$ (mV)	$I_{\text{VDP},2}$ (mA)	ρ ($\Omega \cdot \text{m}$)	含水率 (%)
		(1)	(2)	式(26.4.2)	式(26.4.3)	(3)	(4)	式(26.3.2)	式(26.4.3)

27 土的分散性鉴别试验

27.1 一般规定

27.1.1 本试验方法分为泥球试验、孔隙水阳离子试验、分散值 (F) 方法、野外调查方法。

【条文说明】：27.1.1 分散土是一种在水力坡降很低条件下由于土颗粒间的排斥力超过吸引力而导致土体产生分散流失的细粒土。它在世界各地特别是干旱半干旱地区分布广泛，属于一种水敏性的特殊土，抗蚀抗冲能力很低，容易形成管涌、洞穴、冲沟等破坏，对建筑物的安全性造成严重威胁。所以，根据渗透稳定性将细粒土分为非分散土、过渡土和分散土。

27.1.2 本试验方法适用于细粒土。

【条文说明】：27.1.2 美国《ASTM (American Society of Testing Materials)》的双密度计试验 (D4221)、针孔试验 (D4647) 适用于粘粒含量大于 12% 和塑性指数大于 4 的粘性土，碎块试验 (D6572) 适用于粘粒含量大于 12% 和塑性指数大于 8 的粘性土，英国《BS (British Standards)》(1377-5) 中规定双密度计试验、碎块试验、针孔试验均不适用于粘粒含量小于 10% 和塑性指数小于等于 4 的土。但是，近期工程实践和相关研究表明，有部分土的粘粒含量虽然低于 10%，但是由于土中同时含有引起分散的化学成分，导致此种类型的土兼具物理和化学分散，这部分土体更易出现冲蚀破坏。因此，对于粘粒含量低于 10% 的土样也需要进行分散性研究。所以，本标准规定这些试验方法适用于粗粒组 (大于 0.075mm) 小于总质量 25% 的细粒土。

27.2 泥球试验

27.2.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

- 1 试验筛：孔径 2mm。
- 2 温度计：刻度 0~50℃，最小分度值 0.5℃。
- 3 时钟。
- 4 其他设备：量筒、500mL 烧杯、小刀、镊子、搪瓷碗、搪瓷盘。

27.2.2 本试验所用的试剂应符合下列规定：

- 1 纯水。

【条文说明】：27.2.2 美国《ASTM》碎块试验 (D6572) 中规定，采用纯水进行试

验。英国《BS》(1377-5)碎块试验中规定,采用 0.001M NaOH 溶液进行试验。本标准规定采用纯水进行试验。

27.2.3 泥球试验应按下列步骤进行:

1 本试验宜采用天然含水率试样。若土样含水率比较高,土样不均匀,则可适当晾干,过 2mm 筛,装袋密封待用。

2 将一定量土样放入搪瓷碗中,加入适量纯水将土样调成均匀膏状,放置片刻,用手将膏状土样抻成直径约 15mm 表面光滑的泥球。如土样较干,可加水后静置片刻。

3 将白色瓷盘放在水平稳定的工作台上。

4 把盛有 200mL 纯水的无色烧杯放入瓷盘中,并保持水温基本恒定。

5 用镊子将泥球小心放入烧杯中,试验期间不得摇晃烧杯和移动瓷盘。

6 记录泥球放入烧杯的时间,观察泥球在水中胶粒的分散情况和烧杯中水的浑浊情况。

7 在 5min、10min、30min、1h、3h 和 6h 时观察和记录土的反应程度。每次测量水温,水的温度应在 $21\pm 6^{\circ}\text{C}$ 范围。注意测量时温度计要小心轻放,不要扰动土块和水体。

8 试验过程中和结束时,对泥球在水中的崩解状况拍照,作为影像试验资料保存。

【条文说明】: 27.2.3 泥球试验应按下列步骤进行:

1 由于烘干或风干土样会造成土颗粒结构和孔隙水的物理化学性质发生不可逆的变化,导致试验结果出现偏差。因此,在泥球试验和孔隙水阳离子试验中均采用保持天然含水率的土样进行制备试样。

2 美国《ASTM》碎块试验(D6572)、英国《BS》(1377-5)碎块试验中规定碎块采用天然土或重塑土。但是试验过程中发现,这些呈立方体的土块含有一定量的气体,当土块放入水中后由于气体迸发而扰动水体,导致土中的胶粒发生位移,使得水体浑浊,容易造成误判。而且,如果保持天然含水率的土块的均匀性较差,则试验结果的可靠性降低。与天然土或重塑土的土块相比,本规范中提出的泥球由于含水率较大,土颗粒已吸水膨胀,胶结物已产生溶解,土球内部的结构不均匀应力基本消除,土颗粒崩解时没有气体迸发,而且土颗粒吸附阳离子的双电层充分扩展,能够真实反映土颗粒间的斥力与引力关系。所以,本标准规定采用泥球进行试验。

7 对于典型的分散土,当泥球放入水中后,很快就有胶粒析出。对于典型的非分

散土，泥球在 2~3h 左右崩解完全或更长时间。经过对钠基蒙脱石和钙基蒙脱石对比分析研究，发现钠基蒙脱石的泥球放入水中后，即刻出现胶粒分散，但是钙基蒙脱石则在 6h、12h 和 24h 泥球仍保持原形状。因此，本标准规定试验最长时间为 6h。试验的最长时间根据需要也可适当延长，但应在试验报告中予以注明。

27.2.4 泥球试验评价土的分散性应按表 27.2.4 的规定进行判别。

表 27.2.4 泥球试验评价土的分散性标准

类别	反应	浸水后特征
非分散土	没有反应	土-水界面清晰。泥球不崩解，或崩解后水中没有出现浑浊，或稍浑浊后很快又变清。
过渡土	轻微反应	土-水界面轻微模糊。在崩解的土块表面附近或周围有轻微的肉眼可见的胶粒悬液产生的浑浊水。如果“云雾状”明显，则划分为分散土；如果“云雾状”不明显，则划分为非分散土。
分散土	中等反应	土-水界面模糊。在崩解的土块表面附近或周围可明显地看到粘粒悬液产生的云雾状。“云雾状”在杯底扩散 10mm 左右。
	严重反应	土-水界面完全模糊。在整个杯底大量的浓胶粒悬液呈云雾状，在烧杯的各个方向均可看见胶粒悬液。

【条文说明】：27.2.4 泥球试验是从胶体化学的基本观点出发，认为某些细粒土在水中产生分散性的原因是胶体颗粒的析出，因而采用胶体析出的程度不同作为鉴定标准。

泥球试验简便易行，在野外和室内均可快速简单的操作，而且可在野外进行现场试验，研究河水或库水对土的分散性影响。此试验有良好的再现性。

27.2.5 泥球试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 27.1 的规定。

27.3 孔隙水阳离子试验

27.3.1 本试验所用的主要仪器设备应符合下列规定：

- 1 试验筛：孔径 2mm。
- 2 天平：称量 5000g，最小分度值 0.5g；称量 200g，最小分度值 0.01g。
- 3 抽滤设备：包括抽滤瓶、平底瓷漏斗、真空泵。
- 4 离心机：转速为 1000~5000r/min。
- 5 其他设备：细口瓶、漏斗、滤纸、漏斗架、玻璃棒、烘箱等。

27.3.2 本试验所用的试剂应符合下列规定：

- 1 纯水。

27.3.3 孔隙水溶液预备程序应符合下列规定：

1 本试验宜采用天然含水率试样。若土样含水率比较高，土样不均匀，则可适当晾干，去掉粗砂或砾石颗粒，过 2mm 筛。

2 称取约 100g 土样，测定土样的含水率，将剩余土样装袋密封待用。

3 称取适量土样，并加入一定量的纯水，使含水率达到液限。按下式计算应加水量，放置一昼夜，使土样含水均匀。

$$m_w = \frac{m}{1 + 0.01w_0} \times 0.01(w_L - w_0) \quad (27.3.3)$$

式中： m_w — 加水质量（g）；

m — 土样质量（g）；

w_0 — 土样含水率（%）；

w_L — 液限（%）。

4 将土样调成土膏，采用离心机或抽滤设备将孔隙水提取出来。

5 当发现提取出来的孔隙水浑浊时，应采用滤纸进行过滤。如果仍然浑浊，可采用离心机再次分离。

6 所得的透明溶液，即为孔隙水溶液，贮于细口瓶中供分析用。

【条文说明】：27.3.3 孔隙水溶液预备程序应符合下列规定：

1 本条规定的理由与第 27.2.3 条的相同。

6 当孔隙水溶液呈现颜色时，可能是有色无机离子或大量有机质的存在，颜色的存在会影响各种离子的测定，一般可用过氧化氢进行脱色处理。

27.3.4 孔隙水溶液阳离子试验应按下列步骤进行：

1 钙离子（ Ca^{2+} ）的测定：

应符合现行国家标准《土工试验方法标准》（GB/T 50123）第 53.7.1 条～4 条的规定。

2 镁离子（ Mg^{2+} ）的测定：

应符合现行国家标准《土工试验方法标准》（GB/T 50123）第 53.8.1 条～4 条的规定。

3 钠离子（ Na^+ ）和钾离子（ K^+ ）的测定：

应符合现行国家标准《土工试验方法标准》（GB/T 50123）第 53.9.1 条～3 条的规定。

【条文说明】：27.3.4 钙、镁离子的测定方法比较多，但目前被广泛采用的是 EDTA（乙二胺四乙酸二钠）容量法，具有设备简单、操作方便的特点。因此，本标准选用此方法。由于在计算钠百分比时，需要的是钙、镁离子之和，因此在采用 EDTA 容量法测定钙、镁离子时，根据情况需要，可不用单独进行钙离子的测定，直接进行镁离子的测定，此时消耗 EDTA 的量即是钙镁离子共同消耗 EDTA 的量。

钠、钾离子的测定方法目前多采用火焰光度计，具有操作简便、快速、灵敏度高特点。因此，本标准选用此方法。

由于原子吸收分光光度计已成为化学分析的比较常规仪器，而且操作快速、简便，灵敏度高，可满足低含量钙、镁、钠、钾离子的测定，故也可使用。

27.3.5 孔隙水阳离子的含量应按下列公式计算，计算至 0.01mmol/L，平行误差不大于 0.1mmol/L，取算术平均值：

1 钙离子含量：

$$C(\frac{1}{2}Ca^{2+}) = 2 \frac{C_e \times V_{e1}}{V} \times 10^3 \quad (27.3.5-1)$$

式中： $C(\frac{1}{2}Ca^{2+})$ — 钙离子的摩尔浓度（ $\frac{1}{2}$ mmol/L）；

C_e — EDTA 标准溶液浓度（mol/L）；

V_{e1} — 滴定钙离子时 EDTA 标准溶液用量（mL）；

V — 试验时吸取孔隙水溶液量（mL）。

2 镁离子含量：

$$C(\frac{1}{2}Mg^{2+}) = 2 \frac{C_e(V_e - V_{e1})}{V} \times 10^3 \quad (27.3.5-2)$$

式中： $C(\frac{1}{2}Mg^{2+})$ — 镁离子的摩尔浓度（ $\frac{1}{2}$ mmol/L）；

C_e — EDTA 标准溶液浓度（mol/L）；

V_{e1} — 滴定钙离子时 EDTA 标准溶液用量（mL）；

V_e — 滴定钙镁含量时 EDTA 标准溶液用量（mL）；

V — 试验时吸取孔隙水溶液量（mL）。

3 钠离子含量：

$$C(Na^+) = \frac{N \times K_n}{23} \quad (27.3.5-3)$$

式中： $C(Na^+)$ — 钠离子的摩尔浓度（mmol/L）；

K_n — 由标准曲线查得的钠离子含量 (mg/L) ;

N — 孔隙水溶液的稀释倍数, 当直接测量时, $N=1$;

23 — 钠离子的摩尔质量 (g/mol) 。

4 钾离子含量:

$$C(K^+) = \frac{N \times K_k}{39} \quad (27.3.5-4)$$

式中: $C(K^+)$ — 钾离子的摩尔浓度 (mmol/L) ;

K_k — 由标准曲线查得的钾离子含量 (mg/L) ;

N — 孔隙水溶液的稀释倍数, 当直接测量时, $N=1$;

39 — 钾离子的摩尔质量 (g/mol) 。

27.3.6 钠百分比的含量应按下列公式计算:

$$T_{DS} = C\left(\frac{1}{2}Ca^{2+}\right) + C\left(\frac{1}{2}Mg^{2+}\right) + C(Na^+) + C(K^+) \quad (27.3.6-1)$$

$$P_s = \frac{C_{Na^+}}{T_{DS}} \quad (27.3.6-2)$$

式中: $C(Na^+)$ — 孔隙水溶液中钠离子含量 (mmol/L) ;

$C(K^+)$ — 孔隙水溶液中钾离子含量 (mmol/L) ;

$C\left(\frac{1}{2}Ca^{2+}\right)$ — 孔隙水溶液中钙离子含量 ($\frac{1}{2}$ mmol/L) ;

$C\left(\frac{1}{2}Mg^{2+}\right)$ — 孔隙水溶液中镁离子含量 ($\frac{1}{2}$ mmol/L) ;

T_{DS} — 孔隙水中阳离子总量 ($\frac{1}{n}$ mmol/L) ;

P_s — 钠百分比。

【条文说明】: 27.3.6 美国《ASTM》孔隙水提取分析试验方法 (D4542) 只是提及了孔隙水的提取与测试方法, 没有进一步说明其在评价分散土的作用。孔隙水阳离子试验的判别标准是美国著名的岩土工程专家 J.L. Sherard 依据针孔试验的结果提出的 (Sherard, J. L., Dunnigan, L. P., Decker, R. S., Identification and Nature of Dispersive Soils, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 102: 287–301.) 。

在孔隙水阳离子试验中, 多采用钠百分比进行判别土样的分散性。有的文献中还根据下式计算 K 值和 S_{AR} (钠吸附比) 评价土的分散性。

$$K = (C(\text{Na}^+) + C(\text{K}^+)) / \sqrt{C(\frac{\text{Ca}^{2+}}{2}) + C(\frac{\text{Mg}^{2+}}{2})} \tag{1}$$

$$\text{SAR} = C(\text{Na}^+) / \sqrt{\left(C(\frac{\text{Ca}^{2+}}{2}) + C(\frac{\text{Mg}^{2+}}{2}) \right) / 2} \tag{2}$$

式中：S_{AR}——钠吸附比；

采用 K 值和 S_{AR} 评价土样的分散性，应分别按表 1、表 2 的规定进行判别。

表 1 用 K 值鉴定土样分散性的经验值

类别	K 值
非分散土	<0.2
过渡土	0.2~0.3
分散土	>0.3

表 2 用钠吸附比鉴定土样分散性的经验值

孔隙水阳离子浓度（TDS）mmol/L	分散土的钠吸附比（SAR）近似分界线
5	>2.7
10	>4.2
100	>13

27.3.7 孔隙水阳离子试验评价土样的分散性应按图 27.3.7 的规定进行判别。

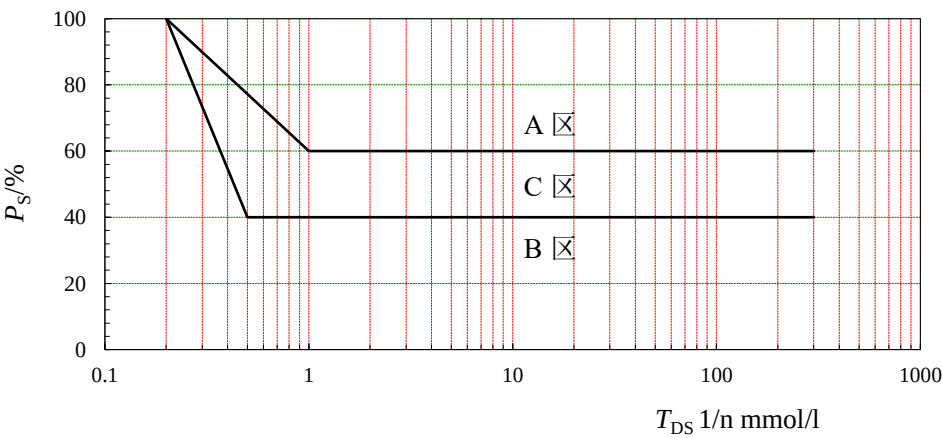


图 27.3.7 土的分散性与 T_{DS}、P_S 的关系

说明：以 T_{DS} 为横坐标，P_S 为纵坐标在半对数坐标纸中绘制 P_S 和 T_{DS} 关系曲线图。如果土样的点落在 A 区，属于分散土；落在 B 区，属于非分散土；落在 C 区，属于过渡土。

27.3.8 孔隙水阳离子试验的记录格式应符合本标准附录 E 表 27.2、27.3 的规定。

27.4 分散值（F）方法

27.4.1 分散值方法的 F 值应按下列公式计算：

$$F_1=4-0.01(2W_L+P_c) \quad (27.4.1-1)$$

$$F_2=4-0.01(2W_L+P_c-P_s) \quad (27.4.1-2)$$

$$F_3=4-0.01(2W_L+P_c-P_s)+0.1pH \quad (27.4.1-3)$$

式中： F_n — 土的分散值；

W_L — 液限（%）；

P_c — 粘粒（<0.005mm）含量（%）；

P_s — 钠百分比（%）；

pH — 酸碱度。

【条文说明】：27.4.1 分散值公式中的液限、粘粒含量、pH 值，是土的物理化学性质的基本参数，应按照相关土工试验规范中规定的方法进行测定。钠百分比采用本标准中孔隙水阳离子试验测定结果。

27.4.2 分散值（ F ）方法评价土的分散性应按下列步骤进行：

1 根据土的液限和粘粒含量计算 F_1 值，如果 F_1 值大于 3.26，则土样属于物理性分散土；如果 F_1 值小于等于 3.26，则继续引入钠百分比计算 F_2 值，见图 27.4.2。

2 如果 F_2 值大于 4.06，土样属于化学性分散土；如果小于 3.16，属于非分散土；如果在 3.16 和 4.06 之间，不能确定，则继续引入 pH 值计算 F_3 值，见图 27.4.2。

3 如果 F_3 值大于 4.50，可判别为化学性分散土；介于 4.00 和 4.50 之间，可判别为过渡土；小于 4.00，可判别为非分散土，见图 27.4.2。

【条文说明】：27.4.2 分散值（ F ）方法是基于大量试验数据统计分析而得到的一组经验判别公式。研究表明，根据分散值判别的结果，与室内试验的结果吻合较好，因此，分散值判别的结果可作为土的分散性预判，或室内试验结果的佐证。如果分散值判别的结果与室内试验结果有出入时，应以室内试验结果为最终鉴定结果。

研究表明，土产生分散破坏的内在因素主要有两种情况，第一种情况是土中粘粒含量较低；第二种情况是土中含有较多的钠离子和酸碱度呈碱性，而且这两种因素须同时存在。将第一种情况引起的分散称之为物理性分散，将第二种情况引起的分散称之为化学性分散。

单纯的物理性分散土在针孔试验中表现为分散性，但在泥球试验中表现为非分散性，属于一种低凝聚性土。这种土虽然具有分散的特性，但是由于其分散是粘粒含量低引起的，因此可作为低凝聚性土处理。还有一种物理性分散土，在针孔试验中表现为分散性，同时在泥球试验中也表现为分散性，即物理性分散和化学性分散同时存在。

此类土的分散性更强，危害性很大。但是，这种土由于粘粒含量低，往往认为其不符合美国《ASTM》和英国《BS》分散土的判别范畴，而没有引起足够重视，酿成后患。

27.4.3 分散值（ F ）方法的记录格式应符合本标准附录 E 表 27.4 的规定。

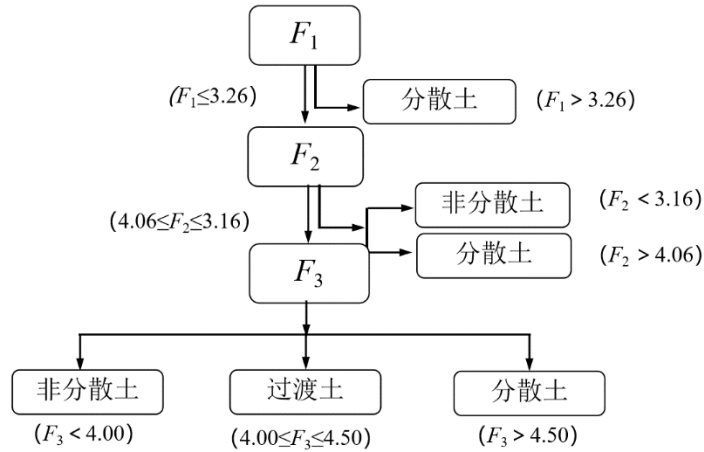


图 27.4.2 分散值（ F ）方法的判别程序与评价标准

27.5 野外调查方法

27.5.1 野外调查方法应按下列现象进行：

1 分散土分布的地区，下雨后路旁的水沟、水坑和河道里流的水都是浑浊的。水坑里的水长期浑浊，呈黄色或咖啡色。水坑干涸后坑底会留下很细的粘土沉积，干后出现龟裂。

2 分散土分布的地区，有坡度的地方会出现冲沟和孔洞等异常冲蚀形式的表面迹象。如通过分散土地区的防洪和灌溉用的挖方渠道以及自然河道，边坡容易受到冲蚀，沟底容易被淘深；道路的路基边坡也容易在雨水的作用下受到侵蚀，表面形成冲沟。

3 在料场如果可以看到新鲜的土层断面或土块在雨水的作用下仍然基本上保持完好，则土料可能为非分散土。

4 调查过程中，对典型的地形、地貌、各类地表水蚀情况、植被生长状况等进行拍照，作为影像资料保存。

5 由于泥球试验简单易行，可在料场区现场取具有天然含水率的土样，按照本标准第 27.2 节的规定进行。

【条文说明】：27.5.1 表层土有可能在多年的雨水浸蚀和植物覆盖作用下，其物理化学性质发生变化，如含有较多的有机质，其分散性较弱，表现为非分散土的特征。因此，自然土坡的表层一般不具有分散性。

由于分散土的分布有可能呈层状，表层土没有表面冲蚀迹象并不能保证整个剖面

的土体就是非分散土。

从地质成因角度分析，迄今所碰到的分散土大部分都是洪积、坡积、湖相沉积和黄土沉积形成的冲积土。在某些地区，已经发现了由海相沉积成的粘土岩和页岩而形成的残积土具有分散性。

由岩浆岩和变质岩原地风化而形成的细粒土、石灰岩风化形成的土一般是非分散土。

分散土的野外调查是初步了解土料特性的必要手段，也是室内试验结果的佐证。如果野外调查的结果与室内试验结果有出入时，应以室内试验结果为最终鉴定结果。

27.5.2 野外调查方法的记录格式应符合本标准附录 E 表 27.5 的规定。

附录 E 表 27.1 泥球试验记录表

任务单号										试验者			
试验日期										计算者			
试验用水										校核者			
土样 编号	5min		10min		30min		1h		3h		6h		判别
	反应 程度	温度 (℃)	反应 程度	温度 (℃)	反应 程度	温度 (℃)	反应 程度	温度 (℃)	反应 程度	温度 (℃)	反应 程度	温度 (℃)	

附录 E 表 27.2 孔隙水溶液中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 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										
土样 编号	含 水 率	吸取 孔隙水 溶液体积	EDTA 标准溶液				Ca ²⁺ 含量 (1/2 mmol/L)		Mg ²⁺ 含量 (1/2 mmol/L)	
			浓度	滴定 Ca ²⁺ 用量	滴定 Ca ²⁺ +Mg ²⁺ 用量	滴定 Mg ²⁺ 用量	计算值	平均值	计算值	平均值
	(%)	V	Ce	Ve1	Ve	Ve-Ve1				
		(mL)	(mol/L)	(mL)	(mL)	(mL)				

附录 E 表 27.3 孔隙水溶液中 Na⁺、K⁺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							
土样 编 号	稀释 倍数 (N)	Na ⁺			K ⁺		
		吸收值	浓度		吸收值	浓度	
			(mg/L)	(mmol/L)		(mg/L)	(mmol/L)

附录 E 表 27.4 分散值 (F) 方法判别表

任务单号							计算者				
试验日期							校核者				
土样编号	液限 (%)	粘粒 含量 (%)	钠离子 百分比 (%)	pH 值	F_1 判别结果		F_2 判别结果		F_3 判别结果		判别 结果
					F_1 值	结果	F_2 值	结果	F_3 值	结果	

附录 E 表 27.5 野外调查方法记录表

任务单号		调查者	
调查日期		参与者	
调查地点		天气状况	
土样编号	调查内容与结果		初步判别

附录 A 土-水特征关系曲线快速测定试验要点

A.0.1 土水特征关系快速测定试验，应符合常规轴平移技术测定土水特征关系曲线的一般规定。

A.0.2 本试验方法分为一步流动方法与多步流动方法，

A.0.3 试验测试前的准备及操作应该符合下列要求：

1 试样与多孔陶土板饱和：试样与陶土板先置于真空抽气饱和装置中，抽气、浸水饱和。陶土板也可采用压力法饱和；

2 系统管路及气泡量测管饱和：向试验系统管路中注水排气，进行测量系统的饱和。

3 压力室底部气泡排出：对底部进行冲刷，排尽陶土板底部的气泡，记录气泡量测管的示数。

A.0.4 多步流动法测试土水特征关系曲线，应符合下列操作要点

1 称量饱和试样的质量，置于陶土板上，密封压力室，让试样平衡，记录溢出水质量；

2 施加初步吸力，约为土样预估进气值。直至达到吸力平衡，获得初始吸力及初始饱和度；

3 对试样施加第一级吸力，采集时间-溢出水量数据；无需等到该级吸力下的平衡，继续施加第二级吸力，采集时间-溢出水量数据；依次连续施加吸力使试样排水，获得每一级吸力步下溢出水量与时间数据；施加吸力过程中，每一级吸力下按照设定的时间加载，无需达到平衡状态；

4 吸力加载步与加载时间需根据土性确定，也可按照如下经验进行：

对于砂性土，吸力总步长为 6-8 步，初始吸力步 5-10 kPa，加载时间为 4-5h，最大吸力可达 80 kPa；对于粉质土，吸力总步长为 8-10 步，初始吸力步为 10-20 kPa，加载时间为 8-12 h，最大吸力可达 290 kPa；对于粉黏质土，吸力总步长 9-12 步，初始加载吸力步为 10-20 kPa，加载时间为 8-12 h，最大吸力可达 490 kPa。对于黏质土，吸力总步长 11-14 步。初始加载吸力步 10-30 kPa，加载时间为 12-24 h，最大吸力可达 1450 kPa。

5 脱湿段结束后应对压力室底部进行冲刷，并记录冲刷后气泡体积，对试样溢出

水量进行校正；

6 确定特征时间 τ 与容水率 C ：用实测的含水量随时间的演化曲线，采用最小二乘法得出每级吸力步对应孔隙水流动特征时间 τ 与容水率 C ；

7 确定平衡状态的饱和度：利用获得的每一基质吸力步下的 C_i 和 τ_i 值，计算平衡状态时的饱和度与渗透系数，获得平衡态下的土水特征关系曲线与渗透系数关系曲线。

A.0.5 一步流动法测试土水特征关系曲线，应符合下列操作要点：

- 1 试样的称量与装样与多步流动法相同；
- 2 施加第一级吸力，第一级吸力约为土样预估进气值。记录溢出水质量，直至达到吸力平衡；
- 3 对试样施加较大的吸力值，记录溢出水质量，直至达到吸力平衡，获得脱湿段溢出水随时间变化的曲线；大吸力值的选择如下：对于砂土通常设为 80 kPa，粉土为 290 kPa，粘性土为 1400 kPa；
- 4 脱湿段结束后对压力室底部气泡进行冲刷，记录冲刷完成后气泡体积，根据溢出气泡的体积对脱湿溢出水量进行校正；
- 5 卸载为零，记录吸湿溢出水质量，直至达到吸力平衡；得到吸湿段溢出水随时间变化的曲线；
- 6 进行数值反演分别获得土体在脱湿与吸湿条件下的土水特征关系曲线及渗透系数函数。

附录 B 膨胀土的膨胀性快速判别的电导率测试法要点

B.0.1 本附录提供一种快速判别膨胀土膨胀性的电导率测试方法。

B.0.2 取代表性土样约 1000g，剔除其中砂砾及杂质，将土样晾晒干燥或采用烘箱低温烘干，分散成散粒状；将风干后的土样碾碎，过 0.5mm 细筛，将筛下的土样拌匀。

1 采用四分法取土样 100~150g，放入 300ml 的烧杯内，按照土的液限含水率计算需要注入的水量。

2 将称量好的纯净水注入盛有风干黏性土的烧杯内，加水过程中应同时进行搅拌，使土水混合均匀，直至调配成均匀、液限状土膏。试验用纯净水的电导率应小于 5ms/m。

3 将土壤电导率探头插入土膏，并确保探针完全没入土膏之中，等待约 30 秒，测读土样的电导率读数，记录试验时室温、电导率读数。

4 取测试完成后的剩余土膏，按照《土工试验方法标准》（GB/T 50123 — 2019）第 5 章的方法测定土样含水率。

5 按照土样的液限含水率-2%~+8%计算注入水量，每次含水率变化 2%，重复本标准本条第 1~5 款的步骤进行试验。

B.0.3 以土样电导率为纵坐标，以土样含水率为横坐标，绘制土样电导率与含水率的关系曲线（图 B.0.3），以曲线趋于平缓时的渐近线对应的电导率即为土样的稳定电导率。

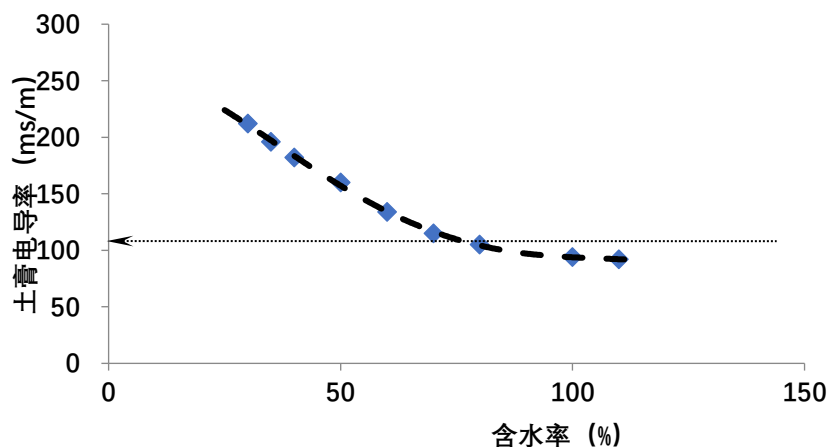


图 B.0.3 电导率与含水率的关系曲线

B.0.4 膨胀土的膨胀性快速判别

1 按照经验公式进行判定:

根据不同地区、不同岩性膨胀土(岩)自由膨胀率与电导率的试验统计数据,得到式(B.0.4)。其中,经验系数 α 随土性在0.45~0.78之间变化。在南阳膨胀土地区, α 取0.5时的相关系数 R^2 达到0.96~0.98;在其他地区(如安徽、云南等), α 取0.7时的相关系数 R^2 达到0.88。如各地区根据本地膨胀土(岩)的具体试验数据对经验系数进行率定,则相关系数不低于0.9。

通过经验公式 B.0.4 可计算得到土样的自由膨胀率,再按照《膨胀土地区建筑技术规范》第 2.3.3 条之规定进行膨胀土的膨胀潜势分类。

自由膨胀率应按下式计算:

$$\delta = \alpha \times S_w \quad (\text{B.0.4})$$

式中: δ — 土样自由膨胀率(%);

S_w — 土样电导率($\text{ms}\cdot\text{m}^{-1}$);

α — 地区经验系数,一般取0.5~0.7。

2 按照本地区膨胀土的自由膨胀率与电导率的标定曲线进行判定。

根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)第 24 章的相关规定,对本地区代表性膨胀土样开展自由膨胀率试验,同时,根据本标准的试验方法对样品进行电导率测试;

以代表性土样的自由膨胀率为纵坐标,以该土样的稳定电导率为横坐标,绘制自由膨胀率和稳定电导率的关系曲线,并对该曲线进行线性回归,确定二者之间的线性相关系数 α ;

根据本标准 B.0.2 条进行电导率测试,得到土壤的稳定电导率,再根据公式 B.0.4-1 推求本地区土样的自由膨胀率,按照《膨胀土地区建筑技术规范》第 2.3.3 条之规定,完成对本地区膨胀土的膨胀潜势分类。

附录 C “8”字形试样单轴拉伸试验方法要点

C.0.1 “8”字形试样单轴拉伸试验方法包括两种：单轴应变控制拉伸试验和单轴应力控制拉伸试验。

C.0.2 单轴应变控制式拉伸试验的加载系统宜采用由固定支座、滑动支座、滑动导轨和电动机组成的水平加载模式；电动机位移速率精度应为 0.01mm/min；拉应力传感器的准确度应为全量程 0.03%；如图 C.0.2-1 所示。“8”字形拉伸模具应可以拆成四瓣，通过固定螺丝固定于滑动支座、固定支座上，能够保证各部分的轴线在同一条水平线上，模具内腔大小应采用图 C.0.2-2 标注的尺寸。

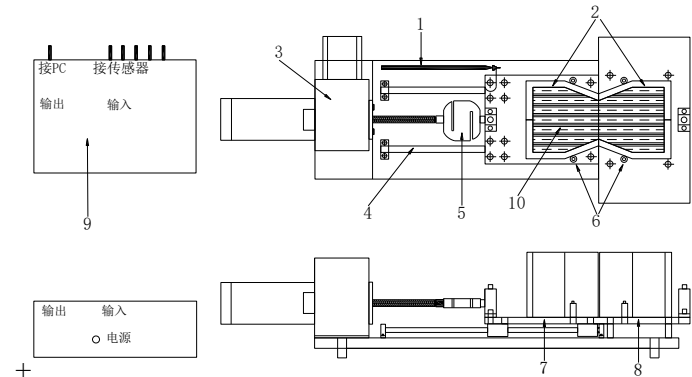


图 C.0.2-1 单轴应变控制拉伸试验仪

- 1.位移传感器；2.拉伸模具；3.电动机；4.滑动导轨；5.拉应力传感器；
6.固定螺丝；7.滑动支座；8.固定支座；9.数据采集与控制系统；10.土样

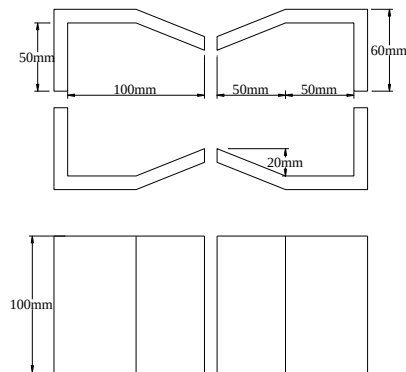


图 C.0.2-2 “8”字形拉伸模具尺寸

C.0.3 轴应力控制式拉伸试验仪器及连接形式应符合下列规定：加载装置宜采用由加载盘、滑轮、牵引线、固定支座、滑动支座、滑动导轨组成的系统；加载砝码质量为 100g、200g、500g、1000g，应符合砝码标准（GB/T4176-2011）；试样的轴向拉力用加载盘施加，拉应力传感器的准确度应为全量程 0.03%；位移传感器准确度应为全量

程 0.1%，如图 C.0.3 所示。“8”字形拉伸模具应符合第 C.0.2 条款规定。

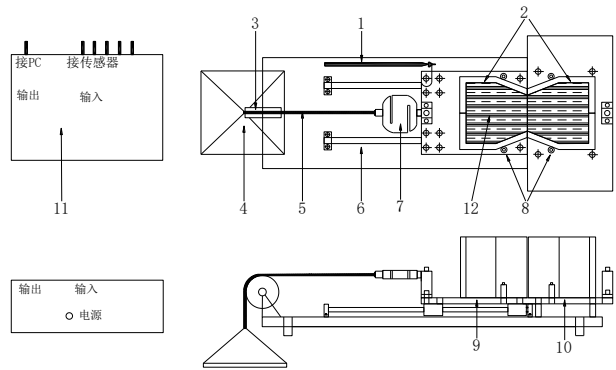


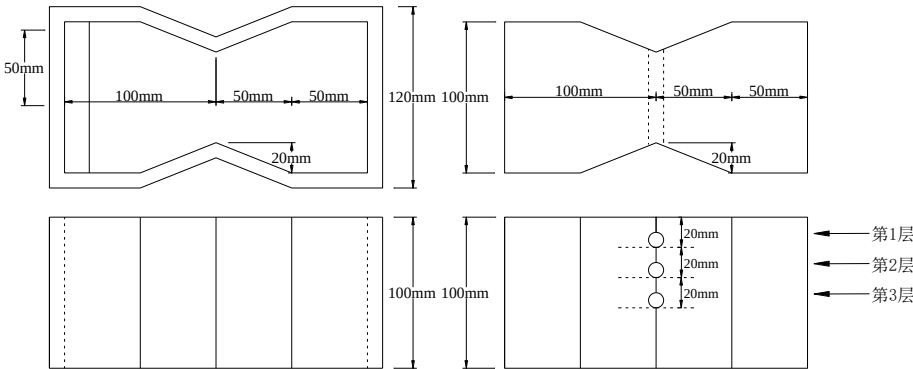
图 C.0.3 单轴应力控制拉伸试验仪

1.位移传感器；2.拉伸模具；3.滑轮；4.加载盘；5.牵引线；6.滑动导轨；

7.拉力传感器；8.固定螺丝；9.滑动支座；10.固定支座；11.信号采集器；12.土样

C.0.4 “8”字形试样尺寸宜选用长 200mm，宽 100mm，厚 60mm，中间颈缩部位宽 60mm，试样包括重塑土样和原状土样两种。

C.0.5 重塑土样应采用“8”字形制样模具和“8”字形压样活塞进行制备，模具和活塞形状和尺寸应符合图 C.0.5 要求。



(a) “8”字形制样模具 (b) “8”字形压样活塞

图 C.0.5 “8”字形制样模具及“8”字形压样活塞

C.0.6 重塑土样的制备采用“8”字形压样活塞在“8”字形制样模具内将土样分三层压实，分层厚度宜为 20mm，各层接触面应刨毛。

C.0.7 做单轴应变控制式拉伸试验应在试样表面及侧边抹一薄层凡士林，防止在准备和测试过程中水分蒸发；电动机拉伸位移速率宜为 0.1-1mm/min；传感器读数采集间隔宜为 1-10 秒/次；试样全部拉断后，停止加载。

C.0.8 做单轴应力控制式拉伸试验时，每级荷载施加稳定时间宜为 10s，以避免土体颗粒的蠕动和土颗粒间粘结强度的恢复；并在试样接近破坏时，宜选用较小重量的砝码进行加载。

C.0.9 试样的轴向拉伸应力应按下列式计算：

$$\sigma = \frac{T}{A} \times 1000 \quad (\text{C.0.9})$$

式中： σ — 试样轴向拉应力（kPa）；

T — 试样承受拉力（N）；

A — 试样断面积（mm²）；

C.0.10 绘制拉应力与拉伸位移关系曲线，取应力上升段的最高点为抗拉强度。

附录 D 非饱和黄土的构度试验要点

D.0.1 本试验的目的是测试非饱和黄土结构性的构度指标，它是反映非饱和黄土初始结构性的物理性质指标之一，与非饱和黄土的粒度、密度和湿度指标一起描述非饱和黄土的物理力学基本性质。

D.0.2 非饱和黄土结构性的构度指标由扰动灵敏度和浸水灵敏度的乘积确定。扰动灵敏度等于非饱和原状土和非饱和重塑土的无侧限抗压强度之比，浸水灵敏度等于饱和原状土与非饱和原状土的无侧限抗压强度之比。

D.0.3 试验设备为常规应变控制式三轴仪。

D.0.4 原状土试样的制备应符合《土工试验方法标准》（GB/T 50123—2019）第 4.5 节的规定。

D.0.5 重塑非饱和土试样的含水率、干密度、尺寸相同应与原状试样相同，重塑试样的制备应符合《土工试验方法标准》（GB/T 50123—2019）第 4.4 节的规定。

D.0.6 试样的饱和方法应符合《土工试验方法标准》（GB/T 50123—2019）第 4.6 节的规定。

D.0.7 试验方法和步骤应符合《土工试验方法标准》（GB/T 50123—2019）的 20 章的规定。

D.0.8 以轴向净应力为纵坐标，轴向应变为横坐标，绘制非饱和土轴向净应力-应变曲线。取曲线上的最大轴向净应力作为无侧限抗压强度 q_u 。若峰值轴向净应力不明显，取轴向应变为 15% 处的净应力作为无侧限抗压强度 q_u 。饱和土的无侧限抗压强度取应力应变曲线峰值轴向应力，或者轴向应变为 15% 处的轴向应力。

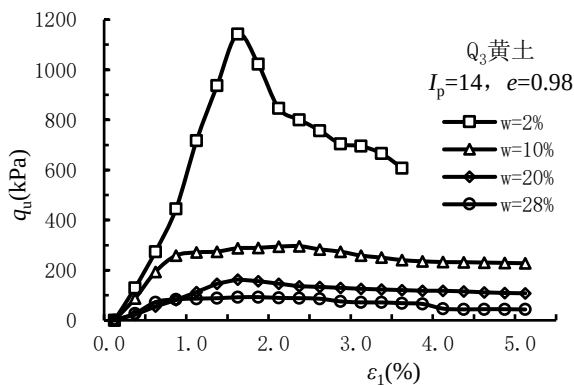


图 D.0.8 应变控制式单轴抗压试验应力应变曲线

D.0.9 构度指标应按下列式确定：

$$m_u = m_1 \cdot m_2 = \frac{(q_u)_o}{(q_u)_r} \cdot \frac{(q_u)_o}{(q_u)_s} = \frac{(q_u)_o^2}{(q_u)_r \cdot (q_u)_s} \quad (\text{D.0.9})$$

式中： m_u — 构度；

m_1 — 反应结构扰动灵敏度；

m_2 — 反应结构浸水灵敏度；

$(q_u)_o$ — 原状土的无侧限抗压强度（kPa）；

$(q_u)_r$ — 重塑土的无侧限抗压强度（kPa）；

$(q_u)_s$ — 饱和土的无侧限抗压强度（kPa）。