

中华人民共和国行业标准

# 水运工程地基基础试验检测技术规程

**JTS 237—2017**

主编单位：中交天津港湾工程研究院有限公司

中交四航工程研究院有限公司

批准部门：中华人民共和国交通运输部

施行日期：2018年3月1日

人民交通出版社股份有限公司

2018·北京

## 图书在版编目(CIP)数据

水运工程地基基础试验检测技术规程/中交天津港湾工程研究院有限公司,中交四航工程研究院有限公司主编.—北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.2

ISBN 978-7-114-14522-3

I. ①水… II. ①中… ②中… III. ①港口工程—地基—基础(工程)—设计规范 IV. ①U652.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第022719号

中华人民共和国行业标准

书 名:水运工程地基基础试验检测技术规程

著 作 者:中交天津港湾工程研究院有限公司

中交四航工程研究院有限公司

责任编辑:董 方

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.chinasybook.com>

销售电话:(010)64981400,59757915

总 经 销:北京交实文化发展有限公司

印 刷:北京鑫正大印刷有限公司

开 本:880×1230 1/16

印 张:25.25

字 数:565千

版 次:2018年2月 第1版

印 次:2018年2月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-14522-3

定 价:240.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

# 交通运输部关于发布《水运工程地基基础试验检测技术规程》(JTS 237—2017)的公告

2017 年第 54 号

现发布《水运工程地基基础试验检测技术规程》(以下简称《规程》)。本《规程》为强制性行业标准,编号为 JTS 237—2017,自 2018 年 3 月 1 日起实施。《港口工程桩基动力检测规程》(JTJ 249—2001)、《港口工程基桩静载荷试验规程》(JTJ 255—2002)同时废止。

本《规程》由交通运输部水运局负责管理和解释。

特此公告。

中华人民共和国交通运输部

2017 年 12 月 11 日

## 制定说明

本规程是根据交通运输部“关于签订 2010 年度水运工程建设标准新列项目合同的通知”(水运技术便字[2010]238 号)的要求,由交通运输部组织有关单位,在总结我国水运工程地基基础试验检测多年的实践经验基础之上,通过深入调查研究,广泛征求有关单位和专家意见,充分考虑水运工程地基基础试验检测对于保障水运工程建设质量与安全的重要作用,并结合我国水运工程建设的实际情况和发展需要制定而成。

本规程共分 8 章和 7 个附录,并附条文说明,主要包括室内试验、原位试验、基桩检测、现场监测、地基处理典型试验检测等内容。

本规程主编单位为中交天津港湾工程研究院有限公司、中交四航工程研究院有限公司,参编单位为天津港湾工程质量检测中心有限公司、中交第一航务工程局有限公司、中交武汉港湾工程设计研究院有限公司、中交上海三航科学研究院有限公司、上海港湾工程质量检测有限公司、中交第三航务工程勘察设计院有限公司、中交第二航务工程勘察设计院有限公司、中交水运规划设计院有限公司和广州港湾工程质量检测有限公司。本规范编写人员分工如下:

1 总则:李树奇

2 术语:张功新

3 基本规定:喻志发

4 室内试验:杨京方 洪帆 张功新 谢仁红 朱耀庭 苗中海 居炎飞  
付士娟 吴凤娟 刘艳华 李卫 曹永华 邱青长 徐树华  
郑爱荣

5 原位试验:金晓博 胡振明 高潮 曹永华

6 基桩检测:曹金宝 顾伟园 胡振明

7 现场监测:喻志发 梁萌 周琦 邱青长 徐树华

8 地基处理典型试验检测:刘爱民 李树奇 张功新 周琦

附录 A:杨京方 洪帆 朱耀庭 居炎飞 付士娟 张功新 谢仁红 吴凤娟  
刘艳华 李卫 曹永华 曹金宝 顾伟园 胡振明 周琦 邱青长

附录 B:曹金宝

附录 C:曹金宝

附录 D:曹金宝



附录 E:顾伟园

附录 F:徐树华

附录 G:喻志发

本规程于 2015 年 4 月 24 日通过部审,2017 年 12 月 11 日发布,自 2018 年 3 月 1 日起实施。

本规程由交通运输部水运局负责管理与解释。各有关单位在使用过程中发现的问题和意见,请及时函告交通运输部水运局(地址:北京市建国门内大街 11 号,交通运输部水运局技术管理处,邮政编码:100736)和本规程管理组(地址:天津市河西区大沽南路 1002 号,中交天津港湾工程研究院有限公司,邮政编码:300222),以便修订时参考。

## 目次

<b>1</b>	<b>总则</b>	(1)
<b>2</b>	<b>术语</b>	(2)
<b>3</b>	<b>基本规定</b>	(4)
<b>4</b>	<b>室内试验</b>	(5)
4.1	一般规定	(5)
4.2	含水率试验	(6)
4.3	化学分析试样风干含水率试验	(8)
4.4	密度试验	(8)
4.5	比重试验	(10)
4.6	颗粒分析试验	(15)
4.7	界限含水率试验	(24)
4.8	砂的相对密度试验	(29)
4.9	无黏性土休止角试验	(32)
4.10	水分析试验	(32)
4.11	冻土含水率试验	(39)
4.12	冻土密度试验	(41)
4.13	冻结温度试验	(44)
4.14	未冻含水率试验	(45)
4.15	有机质含量试验	(46)
4.16	岩石颗粒密度试验和块体密度试验	(48)
4.17	岩石吸水率和饱和吸水率试验	(52)
4.18	岩石耐崩解性试验	(53)
4.19	岩石膨胀试验	(54)
4.20	岩石冻融试验	(57)
4.21	击实试验	(58)
4.22	承载比试验	(62)
4.23	回弹模量试验	(67)
4.24	渗透试验	(70)
4.25	固结试验	(74)
4.26	三轴压缩试验	(78)
4.27	振动三轴试验	(89)

4.28	孔隙水压力消散试验 .....	(93)
4.29	无侧限抗压强度试验 .....	(98)
4.30	直接剪切试验 .....	(100)
4.31	收缩试验 .....	(102)
4.32	膨胀率试验 .....	(104)
4.33	膨胀力试验 .....	(107)
4.34	静止侧压力系数试验 .....	(107)
4.35	单轴抗拉强度试验 .....	(108)
4.36	共振柱试验 .....	(109)
4.37	弹性模量试验 .....	(114)
4.38	冻胀量试验 .....	(115)
4.39	冻土融化压缩试验 .....	(117)
4.40	黏性土附着力试验 .....	(118)
4.41	岩石单轴抗压强度试验 .....	(119)
4.42	岩石单轴压缩变形试验 .....	(120)
4.43	岩石抗拉强度试验 .....	(122)
4.44	岩石抗剪强度试验 .....	(122)
4.45	岩石点荷载强度试验 .....	(124)
4.46	岩石抗折强度试验 .....	(127)
4.47	土工合成材料试验检测 .....	(128)
<b>5</b>	<b>原位试验 .....</b>	<b>(131)</b>
5.1	一般规定 .....	(131)
5.2	原位密度试验 .....	(131)
5.3	抽水试验 .....	(135)
5.4	压水试验 .....	(138)
5.5	原位直剪试验 .....	(142)
5.6	原位冻胀量试验 .....	(147)
5.7	十字板剪切试验 .....	(148)
5.8	标准贯入试验 .....	(150)
5.9	静力触探试验 .....	(151)
5.10	动力触探试验 .....	(154)
5.11	旁压试验 .....	(155)
5.12	载荷试验 .....	(157)
5.13	波速测试 .....	(161)
5.14	扁铲侧胀试验 .....	(164)
5.15	基底摩擦系数试验 .....	(166)
5.16	现场冻土融化压缩试验 .....	(168)

<b>6 基桩检测</b> .....	(171)
6.1 一般规定 .....	(171)
6.2 高应变法 .....	(172)
6.3 低应变法 .....	(179)
6.4 单桩轴向抗压静载荷试验 .....	(182)
6.5 单桩轴向抗拔静载试验 .....	(187)
6.6 单桩水平静载试验 .....	(188)
6.7 钻芯法 .....	(191)
6.8 声波透射法 .....	(195)
<b>7 现场监测</b> .....	(202)
7.1 一般规定 .....	(202)
7.2 表层沉降观测 .....	(202)
7.3 分层沉降观测 .....	(205)
7.4 孔隙水压力观测 .....	(206)
7.5 地下水位观测 .....	(207)
7.6 表层水平位移观测 .....	(208)
7.7 深层水平位移观测 .....	(210)
7.8 应力应变观测 .....	(211)
7.9 倾斜观测 .....	(213)
7.10 土压力观测 .....	(214)
7.11 振动观测 .....	(215)
7.12 岩体原位应力测试 .....	(216)
7.13 激振法测试 .....	(220)
7.14 水底地层剖面探测 .....	(223)
<b>8 地基处理典型试验检测</b> .....	(225)
8.1 一般规定 .....	(225)
8.2 堆载预压法 .....	(225)
8.3 真空预压法 .....	(226)
8.4 强夯法和强夯置换法 .....	(228)
8.5 深层水泥搅拌法 .....	(229)
8.6 砂桩法 .....	(230)
8.7 降水强夯法 .....	(231)
8.8 高压喷射注浆法 .....	(233)
8.9 爆炸法 .....	(234)
<b>附录 A 试验记录表格</b> .....	(236)
<b>附录 B 基桩检测报告主要内容</b> .....	(306)
<b>附录 C 混凝土桩桩头处理</b> .....	(307)

附录 D	高应变动测传感器安装 .....	(308)
附录 E	水平静载荷试验中 $m$ 值的计算方法 .....	(310)
附录 F	岩体应力参数计算 .....	(312)
附录 G	本规程用词说明 .....	(317)
引用标准名录	.....	(318)
附加说明	本规程主编单位、参编单位、主要起草人、主要审查人、总校人员 和管理组人员名单 .....	(319)
条文说明	.....	(321)



# 1 总 则

**1.0.1** 为统一水运工程地基基础试验检测技术要求,做到数据准确、评价正确、安全适用、技术先进,适应水运工程建设需要,制定本规程。

**1.0.2** 本规程适用于水运工程地基基础的试验和检测。

**1.0.3** 水运工程地基基础试验检测除应符合本规程规定外,尚应符合国家现行有关标准的规定。

## 2 术 语

### 2.0.1 最大干密度 Maximum Dry Density

击实试验所得的干密度与含水率关系曲线上峰值点所对应的干密度。

### 2.0.2 最优含水率 Optimum Moisture Content

击实试验所得的干密度与含水率关系曲线上峰值点所对应的含水率。

### 2.0.3 加州承载比 California Bearing Ratio

用规定尺寸的贯入杆,以一定的速率压入试样内,测得试样在规定贯入量时的贯入阻力,将其与碎石的标准贯入阻力相比得到的比值。

### 2.0.4 回弹模量 Modulus of Resilience

土体在部分侧限条件下,卸载过程中的竖向压力与回弹应变的比值。

### 2.0.5 渗透系数 Hydraulic Conductivity

土中水渗流呈层流状态时,其流速与作用水力梯度呈正比关系的比例系数。

### 2.0.6 固结 Consolidation

饱和土体在外荷载作用下,土体孔隙中的水分逐渐排出,使土体体积减小、密度变大的过程。

### 2.0.7 固结度 Degree of Consolidation

饱和土体在某一荷载下的固结过程中,某一时刻孔隙水压力平均消散值与初始孔隙水压力增量的比值,或某一时刻的压缩量与最终压缩量的比值,以百分率表示。

### 2.0.8 固结系数 Coefficient of Consolidation

土体固结特性的参数,反映土试样在某一荷载下达到某一固结度时固结速率的一个指标,与渗透系数和侧限压缩模量之积成正比。

### 2.0.9 先期固结压力 Pre-consolidation Pressure

土在地质历史上曾受过的最大有效竖向应力。

### 2.0.10 压缩系数 Coefficient of Compressibility

在固结试验中,土试样的孔隙比减小量与有效压力增加量的比值。即  $e \sim p$  压缩曲线上某压力段的割线斜率,以绝对值表示。

### 2.0.11 体积压缩系数 Coefficient of Volume Compressibility

在固结试验中,土样的体积应变增量与有效压力增量的比值,以绝对值表示。

### 2.0.12 压缩指数 Compression Index

压缩试验所得土孔隙比与有效压力对数值关系曲线上直线段的斜率,即  $e \sim \lg p$  压缩曲线上大于先期固结压力后的直线段斜率。

### 2.0.13 回弹指数 Swelling Index

压缩试验时,卸荷回弹所得的孔隙比与有效压力对数值关系曲线的平均斜率。

**2.0.14 压缩模量 Modulus of Compressibility**

土体在侧限条件下受压时,竖向有效压力与竖向应变的比值。

**2.0.15 孔隙水压力系数 Pore Pressure Parameter**

不排水条件下土中孔隙水压力增量与应力增量关系的系数。

**2.0.16 无侧限抗压强度 Unconfined Compressive Strength**

土体在无侧限条件下所能承受的最大轴向应力。

**2.0.17 灵敏度 Sensitivity**

黏性土在含水率不变时,原状样与重塑样的原位十字板剪切试验或无侧限抗压强度试验所得的不排水抗剪强度峰值之比。

**2.0.18 抗剪强度 Shear Strength**

土体或岩体在剪切面上所能承受的极限剪应力。

**2.0.19 抗剪强度参数 Parameters of Shear Strength**

表征土体抗剪性能的指标,包括黏聚力和内摩擦角。

**2.0.20 抗折强度 Flexural Strength**

岩石试件在荷载作用下受弯至折断前所产生的极限应力。

**2.0.21 岩石单轴抗压强度 Uniaxial Compressive Strength**

岩石试样抵抗单轴压力时保持自身不被破坏的极限应力。

**2.0.22 真空度 Degree of Vacuum**

抽真空系统内压力与大气压力差值的绝对值。

**2.0.23 桩身完整性 Pile Integrity**

反映桩身截面尺寸相对变化、桩身材料密实性和连续性的综合定性指标。

**2.0.24 桩身缺陷 Pile Defects**

在一定程度上使桩身完整性恶化,引起桩身结构强度和耐久性降低的桩身断裂、裂缝、缩颈、夹泥(杂物)、空洞、蜂窝、松散等现象的统称。

**2.0.25 单桩静载试验 Static Load Test of Single Pile**

在桩顶部逐级施加轴向压力、上拔力或水平推力,观测桩顶部随时间产生的沉降、上拔位移或水平位移,以确定相应的单桩轴向抗压承载力、单桩轴向抗拔承载力或单桩水平承载力的试验方法。

**2.0.26 分层沉降 Layered Settlement**

地基中每层岩土体的竖向变形。

**2.0.27 水平位移 Horizontal Displacement**

地基或基础上的特征点相对于某竖直线的水平位置变化。

**2.0.28 孔隙水压力 Pore Water Pressure**

土中某点孔隙水承受的压力。

**2.0.29 超静孔隙水压力 Excess Pore Water Pressure**

饱和土体内一点的孔隙水压力中超过静水压力的那部分水压力。



## 3 基本规定

**3.0.1** 计量仪器设备应符合国家现行有关标准的规定,并经过检定或校准,在有效期内使用。

**3.0.2** 现场试验检测前宜制定试验检测工作大纲,并应包括下列主要内容:

- (1) 工程概况;
- (2) 试验检测目的;
- (3) 试验检测依据;
- (4) 试验检测项目及数量;
- (5) 试验检测方法;
- (6) 采用的仪器设备;
- (7) 进度计划;
- (8) 技术、质量、安全等保证措施。

**3.0.3** 试验检测数据应如实记录并签字,严禁涂改或重抄,记录笔误修改应杠改并签字确认。自动化采集系统应经过可靠性验证,数据应及时备份。

**3.0.4** 试验检测报告应包括下列主要内容:

- (1) 工程概况;
- (2) 依据的标准;
- (3) 采用的仪器设备;
- (4) 试验检测项目及数量;
- (5) 试验检测方法;
- (6) 试验检测过程;
- (7) 试验检测结果;
- (8) 结论及建议。

## 4 室内试验

### 4.1 一般规定

**4.1.1** 除冻土试验外,岩土室内试验应在温度为 $5^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度不大于85%的环境下进行;土工合成材料试验应在温度为 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $60\% \pm 10\%$ 的环境下进行。

**4.1.2** 室内岩土试验、土工合成材料试验采用的仪器设备应符合国家现行有关仪器设备标准的规定,其准确性应满足水运行业试验规程的要求。

**4.1.3** 岩土样自取样之日起至试验的时间不宜超过三周。室内存放应标识清楚、严密蜡封,必要时采取适当的防冻、防热、防污染等措施。搬运岩土样时应轻拿轻放。

**4.1.4** 土样打开包装后应立即试验,分割前应对土样的层次、气味、颜色、夹杂物、裂缝、均匀性、扰动程度、分类等进行详细描述和记录。岩石试样制备前,应对岩石的名称、颜色、矿物成分、胶结物性质、胶结程度等进行详细描述和记录。

**4.1.5** 粉土和黏性土分割时应避免破坏土的原始构造,可采用钢丝锯切割,淤泥类土可采用刮刀切割。碎石土和砂土试样制备时可根据需要进行风干、碾散、过筛、匀土、分样、湿化后再经过击实、压实等处理。岩石试验的切割除非有特殊要求,试件规格、加工精度宜符合现行国家标准《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266)的有关规定。

**4.1.6** 岩石试件的干燥和饱和应符合下列规定。

**4.1.6.1** 干燥试件时,在 $105^{\circ}\text{C} \sim 110^{\circ}\text{C}$ 温度下烘干时间不应少于24h。

**4.1.6.2** 当采用自由浸水法饱和试件时,应先注水至试件高度的 $1/4$ 处,以后每隔2h分别注水至试件高度的 $1/2$ 和 $3/4$ 处,6h后将水加至高出试件顶面20mm。试件全部被水淹没后自由吸水时间不应少于48h。

**4.1.6.3** 采用煮沸法时,将称量后的试件放入水槽,注水至试件高度的 $1/2$ ,静置2h,加水使试件浸没,应煮沸6h以上,保持水的深度不变;煮沸停止后静置水槽,待其冷却,取出试件,可用湿纱布擦去表面水分。

**4.1.6.4** 采用真空抽气法饱和试件时,将称量后的试件置于真空干燥器中,注入洁净水,水面高出试件顶面20mm,开动抽气机,抽气的真空压力应接近一个大气压,保持此真空状态直至无气泡发生为止且不应少于4h。

**4.1.7** 土工合成材料制样应符合下列规定。

**4.1.7.1** 土工织物、土工膜和其他片状土工复合材料裁剪前应根据试验项目制定裁剪计划,试件距样品边缘距离不应小于100mm,裁样时宜采用梯形取样法,同一试验项目的不同试件不宜位于同一纵向或横向位置,不可避免时应在检测报告中加以注明。

4.1.7.2 土工格栅制样应符合国家现行有关标准的规定。

4.1.7.3 塑料排水板、软式透水管等条带状土工合成材料裁样时宜沿长度方向均匀分布,同时避免相邻试件用于同一试验项目。同一样品需要同时进行干态和湿态试验时,两种状态试验应从相邻位置进行裁样。

4.1.8 室内试验的废弃物处理应满足环保等相关要求。

## 4.2 含水率试验

4.2.1 含水率试验可采用烘干法、酒精燃烧法或比重法。烘干法可用于黏性土、粉土、砂土、碎石土和岩石的含水率测定;酒精燃烧法可用于有机质含量不超过干质量 5% 的黏性土、粉土和砂土的含水率快速简易测定;比重法可用于砂土的含水率测定。

4.2.2 采用烘干法时应符合下列规定。

4.2.2.1 主要仪器设备应满足下列要求:

- (1) 电热鼓风干燥箱能控制恒温;
- (2) 电子天平最小分度值不大于 0.01g;
- (3) 称量盒耐腐蚀。

4.2.2.2 烘干法测定含水率,应按下列步骤进行:

(1) 取具有代表性试样,黏性土、粉土为 15g ~ 30g,砂土为 50g,碎石土为 1000g ~ 2000g,岩石 40g ~ 200g;放入称量盒内,立即盖好盒盖,擦净盒外部后称量;称量前先将一等质量空的称量盒称量质量并储存于电子天平或电脑中作为去皮质量,每次称量直接读试样的质量;

(2) 打开盒盖,将装有试样的称量盒放入电热鼓风干燥箱内,在 105℃ ~ 110℃ 的恒温下烘干,黏性土、粉土、碎石土烘干时间不少于 8h,砂土不少于 6h,砾类土不少于 4h,岩石不少于 24h;对含有机质超过干质量 5% 的土或含石膏的土,将温度控制在 65℃ ~ 70℃ 的恒温下烘至恒量,烘干时间不少于 12h;

(3) 称量盒从电热鼓风干燥箱中取出后,盖上盒盖,放入干燥容器内冷却至室温,称干试样质量。

4.2.2.3 试样的含水率应按式(4.2.2)计算,并保留至 0.1%。

$$w = \left( \frac{m_0}{m_d} - 1 \right) \times 100 \quad (4.2.2)$$

式中  $w$ ——含水率(%);

$m_0$ ——湿试样质量(g);

$m_d$ ——干试样质量(g)。

4.2.2.4 每个试样应进行 2 次平行测定,取其算术平均值。当含水率小于 40% 时允许平行差值应为 1%,当含水率大于等于 40% 时允许平行差值应为 2%。平行测定的差值大于允许平行差值时,应重新进行试验。

4.2.2.5 含水率试验的记录格式可采用附录 A 中表 A.0.1。

4.2.3 采用酒精燃烧法时应符合下列规定。



#### 4.2.3.1 主要仪器设备应满足下列要求:

- (1) 电子天平的最小分度值不大于 0.01g;
- (2) 酒精纯度不小于 95%;
- (3) 称量盒耐腐蚀。

#### 4.2.3.2 酒精燃烧法试验,应按下列步骤进行:

(1) 取代表性试样,黏性土、粉土为 5g ~ 10g,砂土为 20g ~ 30g,放入称量盒内,按第 4.2.2.2 款规定称取湿土质量;

(2) 打开盒盖,用滴管将酒精滴入盒内,直至试样表面出现自由液面;将盒底在桌面上轻轻敲击,使酒精在试样中浸透均匀;

(3) 点燃盒中酒精,烧至火焰熄灭;

(4) 冷却约 1min 后,按第 4.2.3.2 款第(2)项和第(3)项重复操作;黏性土烧 4 次,砂土烧 3 次;待最后一次燃烧火焰熄灭后,盖上盒盖,冷却后立即称干土质量。

4.2.3.3 每个土样应进行 2 次平行测定,计算方法及允许平行差值应符合第 4.2.2.4 款的规定。

#### 4.2.3.4 试验记录格式可采用附录 A 中表 A.0.1。

#### 4.2.4 采用比重法时应符合下列规定。

4.2.4.1 主要仪器设备应包括玻璃瓶、天平、漏斗、小勺、吸水球、玻璃片、土样盘及玻璃棒等,玻璃瓶和天平应满足下列要求:

- (1) 玻璃瓶的容积不小于 500ml;
- (2) 天平最小分度值不大于 0.5g。

#### 4.2.4.2 比重法测定含水率应按下列步骤进行:

(1) 取代表性砂土试样 200g ~ 300g;

(2) 向玻璃瓶中注入清水至容积 1/3 左右处,然后将试样倒入瓶中,并用玻璃棒搅拌 1min ~ 2min,直到所含气体完全排出为止;

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

(4) 倒出瓶中混合液,洗净,再向瓶中加入清水至全部充满,盖上玻璃片,擦干瓶外壁称量。

#### 4.2.4.3 试样的含水率应按式(4.2.4)计算,并保留至 0.1%。

$$w = \left[ \frac{m(G_s - 1)}{G_s(m_1 - m_2)} - 1 \right] \times 100\% \quad (4.2.4)$$

式中  $w$ ——含水率(%);

$m$ ——湿土质量(g);

$G_s$ ——土粒比重;

$m_1$ ——瓶、水、土、玻璃片质量(g);

$m_2$ ——瓶、水、玻璃片质量(g)。

#### 4.2.4.4 每个土样应进行 2 次平行测定,取其算术平均值。

4.2.4.5 试验记录格式可采用附录 A 中表 A.0.2。

### 4.3 化学分析试样风干含水率试验

4.3.1 本试验方法可用于除有机质含量较高和含石膏较多的土之外的各种土。

4.3.2 主要仪器设备应包括电热鼓风干燥箱、天平、称量盒或水分皿、盛有氯化钙或其他干燥剂的干燥器,并应符合下列规定:

- (1) 电热鼓风干燥箱能控制恒温;
- (2) 天平最小分度值不大于 0.001g。

4.3.3 试验应按下列步骤进行:

(1) 将洁净的称量盒置于电热鼓风干燥箱中,在 105℃ ~ 110℃ 下烘 3h ~ 4h,取出后放入干燥器中冷却至室温,立即用天平称量;重复操作,直至前后两次质量相差不大于 0.001g,记下称量盒质量;

(2) 将风干试样 2g ~ 3g 放入上述称量过的称量盒中,用天平称量;

(3) 将盛试样的称量盒放在电热鼓风干燥箱中,打开盒盖,在 105℃ ~ 110℃ 下烘 6h ~ 8h;

(4) 取出称量盒,盖好盒盖,放在干燥器中冷却至室温,立即称量;

(5) 再将称量盒放入电热鼓风干燥箱中,在 105℃ ~ 110℃ 下烘 3h ~ 4h,取出称量盒,盖好盒盖,放在干燥器中冷却至室温,立即称量;如此反复操作直至前后两次质量相差不大于 0.001g,记下质量。

4.3.4 风干土含水率应按式(4.3.4)计算,并保留至 0.01%。

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m} \times 100 \quad (4.3.4)$$

式中  $w$ ——风干土含水率(%);

$m_1$ ——风干试样加称量盒质量(g);

$m_2$ ——烘干试样加称量盒质量(g);

$m$ ——称量盒质量(g)。

4.3.5 每个土样应进行平行测定,取算术平均值;平行试验误差不大于 0.5%,否则应重做。

4.3.6 试验记录格式可采用附录 A 中表 A.0.3。

### 4.4 密度试验

4.4.1 密度试验可采用环刀法或蜡封法;环刀法可用于黏性土、粉土和可以制样的软土,对于易碎裂土和形状不规则的坚硬土可用蜡封法。

4.4.2 采用环刀法时应符合下列规定。

4.4.2.1 主要仪器设备应满足下列要求:

(1) 环刀符合现行国家标准《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;



(2)天平最小分度值不大于0.01g。

#### 4.4.2.2 环刀法测定密度应按下列步骤进行:

(1)按工程需要取原状土或制备所需状态的扰动土样,整平两端,将环刀内壁涂一薄层凡士林,刃口向下放在土样上;

(2)土样较硬时,用钢丝锯将土样削成略大于环刀直径的土柱,然后将环刀垂直下压,边压边削,直至土样伸出环刀;土样较软时,轻轻将环刀垂直下压直至环刀上沿没入土中,用钢丝锯或切土刀将环刀两端余土削去修平;

(3)擦净环刀外壁,称环刀和土样的总质量。

4.4.2.3 试样的密度和干密度应按式(4.4.2-1)和式(4.4.2-2)计算,并保留至0.01g/cm<sup>3</sup>。

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4.4.2-1)$$

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0.01w} \quad (4.4.2-2)$$

式中  $\rho$ ——试样密度(g/cm<sup>3</sup>);

$m$ ——试样质量(g);

$V$ ——环刀容积(cm<sup>3</sup>);

$\rho_d$ ——干密度(g/cm<sup>3</sup>);

$w$ ——含水率(%)。

4.4.2.4 每个土样应进行平行测定,取算术平均值,平行差值不应大于0.03g/cm<sup>3</sup>,否则应重新进行试验。

4.4.2.5 试验的记录格式可采用附录A中表A.0.4。

#### 4.4.3 采用蜡封法时应符合下列规定。

4.4.3.1 主要仪器设备应包括天平、切土刀、温度计、蜡、烧杯、细线、针及熔蜡加热器等,天平最小分度值不应大于0.1g。

##### 4.4.3.2 蜡封法试验应按下列步骤进行:

(1)切取约30cm<sup>3</sup>的代表性试样,削除松浮表土及尖锐棱角后,系上细线称量;取代表性试样测定含水率;

(2)将蜡加热至刚过熔点,持线将试样徐徐浸入其中,待全部浸入后立即将试样提出,检查试样周围的蜡膜有无气泡存在,当有气泡时用热针刺破,再用蜡液填充针孔,涂平孔口,冷却后称蜡封试样质量;

(3)用细线将蜡封试样吊在天平一端,并使试样浸没于盛有蒸馏水的烧杯中,避免试样碰触烧杯壁,称蜡封试样的水下质量,测定蒸馏水的温度;

(4)取出试样,擦干蜡表面水分,称量其质量;若浸入水分质量超过0.03g,另取试样重做试验。

4.4.3.3 试样的密度和干密度应按式(4.4.3-1)和式(4.4.3-2)计算,并保留至0.01g/cm<sup>3</sup>。

$$\rho = \frac{m_0}{\frac{m_1 - m_2}{\rho_{wT}} - \frac{m_1 - m_0}{\rho_n}} \quad (4.4.3-1)$$

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0.01w} \quad (4.4.3-2)$$

式中  $\rho$ ——试样密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )；

$m_0$ ——试样质量( $\text{g}$ )；

$m_1$ ——蜡封试样质量( $\text{g}$ )；

$m_2$ ——蜡封试样在蒸馏水中的质量( $\text{g}$ )；

$\rho_{wT}$ ——蒸馏水在  $T^\circ\text{C}$  时的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )， $T$  为试验时的水温；

$\rho_n$ ——蜡的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )；

$\rho_d$ ——干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )；

$w$ ——含水率(%)。

**4.4.3.4** 每个土样应进行 2 次平行测定，取算术平均值，其平行差值不应大于  $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ 。

**4.4.3.5** 试验的记录格式可采用附录 A 中表 A.0.5。

## 4.5 比重试验

**4.5.1** 比重试验可采用比重瓶法、浮力法、浮称法和虹吸筒法。比重瓶法可用于粒径小于  $5\text{mm}$  的土；浮力法和浮称法可用于粒径大于或等于  $5\text{mm}$ ，且其中粒径大于或等于  $20\text{mm}$  的土质量小于总土质量的 10% 的土；虹吸筒法可用于粒径大于或等于  $5\text{mm}$ ，且其中粒径大于或等于  $20\text{mm}$  土的含量大于或等于总土质量的 10% 的土。

**4.5.2** 采用比重瓶法时应符合下列规定。

**4.5.2.1** 主要仪器设备应满足下列要求：

(1) 比重瓶的容量为  $100\text{ml}$  或  $50\text{ml}$ ，分长颈和短颈两种；

(2) 天平最小分度值不大于  $0.001\text{g}$ ；

(3) 恒温水槽的分度值不大于  $1^\circ\text{C}$ ；

(4) 温度计的刻度为  $0^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$  时，最小分度值为  $0.5^\circ\text{C}$ 。

**4.5.2.2** 比重瓶可按下列步骤校正：

(1) 将比重瓶洗净、烘干，置于干燥器内，冷却后称比重瓶质量；

(2) 将煮沸后冷却的纯水注入比重瓶；长颈比重瓶注水至刻度处，短颈比重瓶注满纯水，塞紧瓶塞，多余水分自瓶塞毛细管中溢出；调节恒温水槽至  $5^\circ\text{C}$  或  $10^\circ\text{C}$ ，然后将比重瓶放入恒温水槽内，直至瓶内水温稳定；取出比重瓶，擦干外壁，称瓶、水总质量；

(3) 以  $5^\circ\text{C}$  级差调节恒温水槽的水温，逐级测定不同温度下的比重瓶、水总质量，至达到本地区最高自然气温为止；每级温度均进行两次平行测定，取两次测值的平均值，两次测定的差值不得大于  $0.002\text{g}$ ；

(4) 绘制温度与瓶和水总质量的关系曲线。

**4.5.2.3** 土粒比重应按下列步骤测定：



(1) 将比重瓶烘干, 将 15g 烘干土装入 100ml 比重瓶内称量, 或将 12g 烘干土装入 50ml 比重瓶内称量;

(2) 将已装有干土的比重瓶, 注蒸馏水至瓶的 1/2 处, 摇动比重瓶以便排除土中空气; 土样浸泡 20h 以上后, 再将瓶在砂浴中煮沸, 煮沸时间自悬液沸腾时起算, 砂及低液限黏土不少于 30min, 高液限黏土不少于 1h, 使土粒分散; 注意沸腾后调节砂浴温度, 不使土液溢出瓶外;

(3) 长颈比重瓶, 用滴管调整液面恰至刻度处, 擦干瓶外及瓶内壁刻度以上部分的水, 称瓶、水、土总质量; 短颈比重瓶, 将纯水注满, 使多余水分自瓶塞毛细管中溢出, 将瓶外水分擦干后, 称瓶、水、土总质量, 称量后立即测出瓶内水的温度;

(4) 根据测得的温度, 从已绘制的温度与瓶和水总质量关系曲线中查得瓶水总质量;

(5) 砂土煮沸砂粒易跳出时, 采用真空抽气法代替煮沸法排除土中空气, 其余步骤同第(3)项和第(4)项;

(6) 对含有某一定量的可溶盐、亲水性胶体或有机质的土, 用煤油等中性液体测定, 并用真空抽气法排除土中气体; 真空压力表接近一个标准大气压, 抽气时间不少于 1h, 直至悬液内无气泡为止, 其余步骤同第(3)项和第(4)项。

#### 4.5.2.4 试验结果的整理应满足下列要求:

(1) 用蒸馏水测定时, 按式(4.5.2-1)计算;

$$G_s = \frac{m_d}{m_1 + m_d - m_2} \times G_{wT} \quad (4.5.2-1)$$

式中  $G_s$ ——土粒比重, 保留至 0.001;

$m_d$ ——干土质量(g);

$m_1$ ——瓶、水总质量(g);

$m_2$ ——瓶、水、土总质量(g);

$G_{wT}$ —— $T^\circ\text{C}$ 时蒸馏水的比重, 保留至 0.001,  $T$  为试验时的水温;

(2) 用中性液体测定时, 按式(4.5.2-2)计算比重;

$$G_s = \frac{m_d}{m'_1 + m_d - m'_2} \times G_{kT} \quad (4.5.2-2)$$

式中  $m_d$ ——干土质量(g);

$m'_1$ ——瓶、中性液体总质量(g);

$m'_2$ ——瓶、中性液体、土总质量(g);

$G_{kT}$ —— $T^\circ\text{C}$ 时中性液体比重, 保留至 0.001,  $T$  为试验时的水温;

(3) 试验记录格式采用附录 A 中表 A.0.6;

(4) 每个土样进行 2 次平行测定, 取算术平均值, 其平行差值不大于 0.02。

#### 4.5.3 采用浮力法时应符合下列规定。

**4.5.3.1** 主要仪器设备应包括浮力仪(图 4.5.3)、电热鼓风干燥箱、温度计、孔径 5mm 和 20mm 的筛。浮力仪最大称量不应小于 1000g, 最小分度值不应大于 0.001g; 金属网篮



的孔径应小于5mm,直径宜为10cm~15cm,高宜为10cm~20cm;其盛水容器应适合网篮沉入。

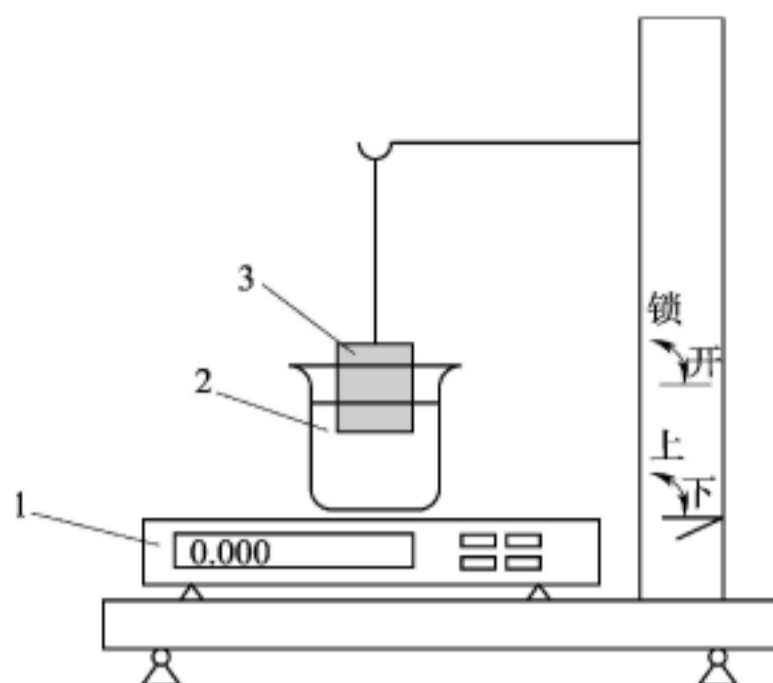


图 4.5.3 浮力法示意图

1-电子天平;2-容器;3-网篮

#### 4.5.3.2 土粒比重应按下列步骤测定:

(1)取代表性试样 500g~1000g;彻底冲洗试样,直至颗粒表面无尘土和其他污物;

(2)称烧杯和杯中水的质量,将金属网篮缓缓浸没于水中,再称烧杯、杯中水和悬没于水中的金属网篮的总质量,并立即测量容器内水的温度;计算出悬没于水中的金属网篮的浮力质量;

(3)将试样浸在水中一昼夜后取出,立即放入金属网篮,缓缓浸没于水中,并在水中摇晃,至无气泡逸出时为止;

(4)称烧杯、杯中水和悬没于水中的金属网篮及试样的总质量;并立即测量容器内水的温度;

(5)取出试样烘干,称量。

#### 4.5.3.3 试验结果的整理应满足下列要求:

(1)土粒比重按式(4.5.3-1)计算;

$$G_s = \frac{m_d}{m_3 - m_1 - m_2} \times G_{wT} \quad (4.5.3-1)$$

式中  $G_s$ ——土粒比重,保留至 0.001;

$m_d$ ——干土质量(g);

$m_3$ ——烧杯、杯中水和悬没于水中的金属网篮及试样的总质量(g);

$m_1$ ——烧杯和杯中水的质量(g);

$m_2$ ——悬没于水中的金属网篮的浮力质量(g);

$G_{wT}$ —— $T^\circ\text{C}$ 时水的比重,保留至 0.001, $T$ 为试验时的水温;

(2)试验记录格式采用附录 A 中表 A.0.7;

(3)土粒平均比重按式(4.5.3-2)计算;

$$G_s = \frac{1}{\frac{P_1}{G_{s1}} + \frac{P_2}{G_{s2}}} \quad (4.5.3-2)$$

式中  $G_s$ ——土粒平均比重,计算至 0.01;

$P_1$ ——大于 5mm 土粒占总质量的百分数(%);

$G_{s1}$ ——大于 5mm 土粒的比重;

$P_2$ ——小于 5mm 土粒占总质量的百分数(%);

$G_{s2}$ ——小于 5mm 土粒的比重;

(4) 每个土样进行平行测定,取其算术平均值,其平行差值不得大于 0.02。

**4.5.4** 采用浮称法时应符合下列规定。

**4.5.4.1** 主要仪器设备应包括浮称天平(图 4.5.4)、电热鼓风干燥箱、温度计、孔径 5mm 和 20mm 的筛。浮称天平最大称量不应小于 1000g,最小分度值不应大于 0.001g;金属网篮的孔径应小于 5mm,直径宜为 10cm ~ 15cm,高宜为 10cm ~ 20cm;其盛水容器应适合网篮沉入。

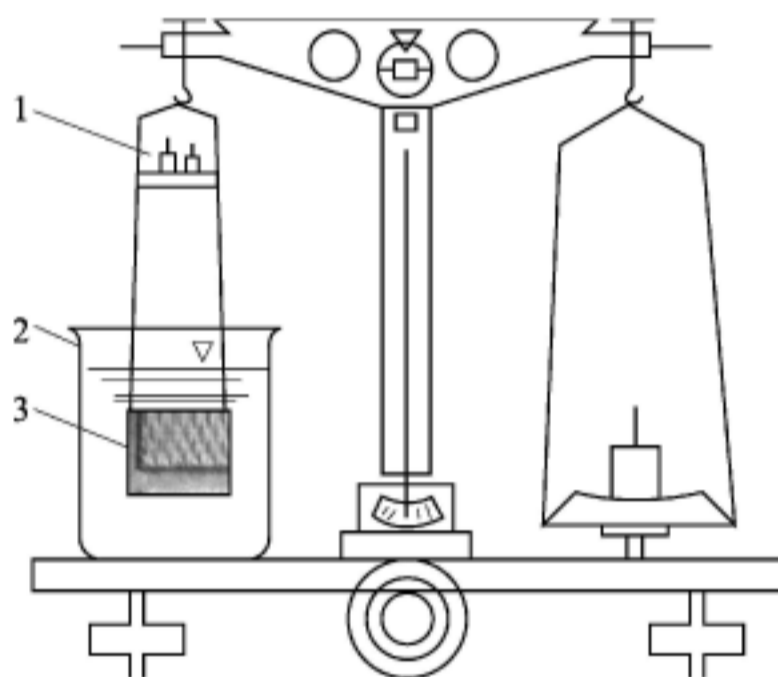


图 4.5.4 浮称法示意图

1-调平平衡砝码盘;2-盛水容器;3-盛粗粒土的金属网篮

**4.5.4.2** 土粒比重的测定应按下列步骤进行:

(1) 取代表性试样 500g ~ 1000g,彻底冲洗试样至颗粒表面无尘土和其他污物;

(2) 将试样浸在水中一昼夜取出后,立即放入金属网篮,缓缓浸没于水中,并在水中摇晃,至无气泡逸出时为止;

(3) 称金属网篮和试样在水中的总质量;

(4) 取出试样烘干,称量;

(5) 称金属网篮在水中质量,并立即测量容器内水的温度。

**4.5.4.3** 试验结果的整理应满足下列要求:

(1) 土粒比重按式(4.5.4)计算;

$$G_s = \frac{m_d}{m_d - (m'_2 - m'_1)} \times G_{wT} \quad (4.5.4)$$

式中  $G_s$ ——土粒比重,计算至 0.001;

$m_d$ ——干土质量(g);

$m'_2$ ——试样和金属网篮在水中总质量(g);

$m'_1$ ——金属网篮在水中质量(g);

$G_{wT}$ —— $T^\circ\text{C}$ 时水的比重,保留至0.001, $T$ 为试验时的水温;

(2) 试验记录格式采用附录 A 中表 A.0.8;

(3) 土料平均比重按式(4.5.3-2)计算;

(4) 每个土样进行平行测定,取算术平均值,其平行差值不大于0.02。

#### 4.5.5 采用虹吸筒法时应符合下列规定。

4.5.5.1 主要仪器设备应包括虹吸筒(图4.5.5)、台秤、量筒、电热鼓风干燥箱、温度计、孔径5mm和20mm的筛;台秤和量筒应满足下列要求:

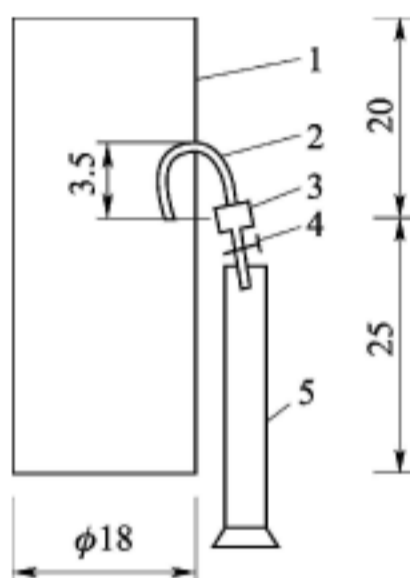


图4.5.5 虹吸筒(单位:cm)

1-虹吸筒;2-虹吸管;3-橡皮管;4-管夹;5-量筒

(1) 台秤最大称量为10kg时,最小分度值不大于1g;

(2) 量筒容积大于2000ml。

#### 4.5.5.2 土粒比重应按下列步骤测定:

(1) 取代表性试样1000g~7000g,将试样彻底冲洗至颗粒表面无尘土和其他污物;

(2) 将试样浸在水中24h后取出,晾干或擦干,称量;

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

(4) 待虹吸筒中水面平静后,开管夹,水通过虹吸管流入量筒中;

(5) 称量筒与水质量后,测量筒内水的温度;

(6) 取出虹吸筒内试样,烘干,称量。

#### 4.5.5.3 试验结果的整理应满足下列要求:

(1) 比重按式(4.5.5)计算;

$$G_s = \frac{m_d}{(m_1 - m) - (m_0 - m_d)} \times G_{wT} \quad (4.5.5)$$

式中  $G_s$ ——土粒比重,保留至0.001;

$m_d$ ——干土质量(g);



$m_1$ ——量筒加水总质量(g)；

$m$ ——量筒质量(g)；

$m_0$ ——晾干试样质量(g)；

$G_{wT}$ —— $T^{\circ}\text{C}$ 时水的比重,保留至0.001, $T$ 为试验时的水温；

(2) 试验记录格式采用附录A中表A.0.9；

(3) 土粒平均比重按式(4.5.3-2)计算；

(4) 每个土样进行2次平行测定,取算术平均值,其平行差值不大于0.02。

## 4.6 颗粒分析试验

**4.6.1** 筛分法可用于分析粒径大于0.075mm、小于等于60mm的土样；密度计法、移液管法均可用于分析粒径小于0.075mm的细粒土。

**4.6.2** 采用筛分法时应符合下列规定。

**4.6.2.1** 主要仪器设备应包括标准筛、天平、摇筛机、电热鼓风干燥箱、筛刷、烧杯、木碾、研钵附带橡皮头研杵；标准筛和天平应满足下列要求：

(1) 标准筛的圆孔粗筛孔径为60mm、40mm、20mm、10mm、5mm、2mm,方孔细筛孔径为2.0mm、1.0mm、0.5mm、0.25mm、0.075mm；

(2) 天平最大称量为5000g时,最小分度值不大于1g；最大称量为1000g时,最小分度值不大于0.1g；最大称量为200g时,最小分度值不大于0.01g。

**4.6.2.2** 风干、松散的土样可用四分法按照下列要求取出具有代表性的试样：

(1) 小于2mm颗粒的土取100g~300g；

(2) 最大粒径小于10mm的土取300g~1000g；

(3) 最大粒径小于20mm的土取1000g~2000g；

(4) 最大粒径小于40mm的土取2000g~4000g；

(5) 最大粒径小于60mm的土取4000g以上。

**4.6.2.3** 无黏性土颗粒级配试验应按下列步骤进行：

(1) 按第4.6.2.2款的规定称取试样,将试样分批过2mm筛；

(2) 将大于2mm的试样按从大到小的顺序,通过大于2mm的各级粗筛；将留在粗筛上的土分别称量；

(3) 2mm筛下的土数量过多时,用四分法缩分至100g~800g；将试样按从大到小的顺序通过小于2mm的各级细筛；用摇筛机进行振摇,振摇时间为10min~15min；

(4) 由最大孔径的筛开始,顺序将各筛取下,在白纸上用手轻叩摇晃,如仍有土粒漏下,则继续轻叩摇晃,至无土粒漏下为止；漏下的土粒全部放入下一级筛内,并将留在各筛上的土样用软毛刷刷净,分别称量；

(5) 筛后各级筛上和筛底土总质量与筛前试样质量之差不大于1%；

(6) 2mm筛下的土不超过试样总质量的10%时,省略细筛分析；2mm筛上的土不超过试样总质量的10%时,省略粗筛分析。

**4.6.2.4** 含有黏土粒的砂砾土应按下列步骤进行：

(1) 将土样放在橡皮板上,用木碾将土团充分碾散,拌匀、烘干、称量;土样过多时,用四分法称取代表性土样;

(2) 将试样置于盛有清水的瓷盆中,浸泡并搅拌,使粗细颗粒分散;

(3) 将浸润后的混合液过 2mm 筛,边搅拌边冲洗过筛,直至筛上仅留大于 2mm 以上的土粒为止,将筛上洗净的砂砾风干称量;按第 4.6.2.3 款的规定进行粗筛分析;

(4) 通过 2mm 筛下的混合液存放在盆中,待稍沉淀,将上部悬液过 0.075mm 洗筛,用带橡皮头的研杵研磨盆内浆液,再加清水、搅拌、研磨、静置、过筛,反复进行,直至盆内悬液澄清;将全部土粒倒在 0.075mm 筛上,用水冲洗,直到筛上仅留大于 0.075mm 净砂为止;

(5) 将大于 0.075mm 的净砂烘干称量,并按第 4.6.2.3 款的规定进行细筛分析;

(6) 小于 0.075mm 颗粒质量超过总土质量的 10% 时,将这部分土烘干、取样,并按密度计法或移液管法分析颗粒组成。

#### 4.6.2.5 试验结果的整理应满足下列列要求:

(1) 小于某粒径颗粒质量百分数按式(4.6.2-1)计算;

$$X = \frac{A}{B} \times 100 \quad (4.6.2-1)$$

式中  $X$ ——小于某粒径颗粒的质量百分数(%),计算至 0.01;

$A$ ——小于某粒径的颗粒质量(g);

$B$ ——试样的总质量(g);

(2) 当小于 2mm 的颗粒用四分法缩分取样时,按式(4.6.2-2)计算试样中小于某粒径的颗粒质量占总土质量的百分数;

$$X = \frac{a}{b} \cdot p \times 100 \quad (4.6.2-2)$$

式中  $a$ ——通过 2mm 筛的试样中小于某粒径的颗粒质量(g);

$b$ ——通过 2mm 筛的土样中所取试样的质量(g);

$p$ ——粒径小于 2mm 的颗粒质量百分数(%);

(3) 在半对数坐标纸上,以小于某粒径的颗粒质量百分数为纵坐标、粒径为横坐标绘制颗粒大小级配曲线,求出各粒组的颗粒质量百分数,以整数表示;

(4) 不均匀系数和曲率系数分别按式(4.6.2-3)和式(4.6.2-4)计算;

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (4.6.2-3)$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}} \quad (4.6.2-4)$$

式中  $C_u$ ——不均匀系数,保留至 0.1 且含两位以上有效数字;

$d_{60}$ ——土中小于该粒径的颗粒质量占总质量的 60% 的粒径(mm);

$d_{10}$ ——土中小于该粒径的颗粒质量占总质量的 10% 的粒径(mm);

$C_c$ ——曲率系数,保留至 0.1 且含两位以上有效数字;



$d_{30}$ ——土中小于该粒径的颗粒质量占总质量的 30% 的粒径 (mm)；

(5) 试验记录格式采用附录 A 中表 A.0.10。

#### 4.6.3 采用密度计法时应符合下列规定。

##### 4.6.3.1 主要仪器设备应满足下列要求：

(1) 甲种密度计，刻度单位以 20℃ 时每 1000ml 悬液内所含土质量的克数表示，刻度为 -5 ~ 50，最小分度值为 0.5；乙种密度计，刻度单位以 20℃ 时悬液的比重表示，刻度为 0.995 ~ 1.020，最小分度值为 0.0002；

(2) 量筒的最大容积为 1000ml，内径为 60mm，高度约 420mm，刻度为 0ml ~ 1000ml，分度为 10ml；

(3) 细筛的孔径为 2mm、0.5mm、0.25mm；洗筛的孔径为 0.075mm；

(4) 天平最大称量为 1000g 时，最小分度值不大于 0.1g；最大称量为 100g 或 200g 时，最小分度值不大于 0.01g；

(5) 温度计的测量范围为 0℃ ~ 50℃，分度值为 0.5℃；

(6) 洗筛漏斗的上口直径略大于洗筛直径，下口直径略小于量筒直径；

(7) 搅拌器的底板直径为 50mm，孔径约为 3mm；

(8) 煮沸设备、离心机、电热鼓风干燥箱、容积为 500ml 的三角烧瓶、容积为 400ml 的烧杯、蒸发皿、研钵、木碾、铝盒、秒表等。

##### 4.6.3.2 试验可采用下列试剂：

(1) 浓度 25% 氨水、氢氧化钠 (NaOH)、草酸钠 ( $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ )、六偏磷酸钠 [ $(\text{NaPO}_3)_6$ ] 或焦磷酸钠 ( $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) 等；

(2) 需要洗盐时，采用 10% 盐酸、5% 氯化钡、10% 硝酸、5% 硝酸银和 6% 双氧水等。

4.6.3.3 密度计分析土样应采用风干土。土样应充分碾散，并通过 2mm 筛。土样风干可在电热鼓风干燥箱内以不超过 50℃ 鼓风干燥，并测定土样的风干含水率。试样干质量为 30g 时所需的风干土质量可按式 (4.6.3-1) 计算，并保留至 0.01g。

$$m = m_d(1 + 0.01w) \quad (4.6.3-1)$$

式中  $m$ ——风干土质量 (g)，保留至 0.01；

$m_d$ ——密度计分析所需干土质量 (g)；

$w$ ——风干土的含水率 (%)。

##### 4.6.3.4 密度计校正按照现行行业标准《土工试验规程》(SL237) 的有关规定执行。

##### 4.6.3.5 土样分散处理应满足下列要求：

(1) 土样需要采用分散剂进行分散处理；各种分散剂均不能分散的盐渍土等土样，需要进行洗盐；

(2) 对于易分散的土采用 25% 氨水作为分散剂，30g 土样中加氨水 1ml；

(3) 用氨水不能分散的酸性土，30g 土样加 0.5mol/L 氢氧化钠溶液 20ml 进行分散；氢氧化钠溶液配制方法为称取 20g NaOH (化学纯)，加蒸馏水溶解后，定容至 1000ml，摇匀；

(4) 用氨水不能分散的中性土，30g 土样加 0.25mol/L 草酸钠溶液 18ml 进行分散；草

酸钠溶液配制方法为称取 33.5g  $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$  (化学纯),加蒸馏水溶解后,定容至 1000ml,摇匀;

(5)用氨水不能分散的碱性土,30g 土样加 0.083mol/L 六偏磷酸钠溶液 15ml 进行分散;六偏磷酸钠溶液配制方法为称取 51g  $(\text{NaPO}_3)_6$  (化学纯),加蒸馏水溶解后,定容至 1000ml,摇匀;

(6)土的 pH 值大于 8 时,用六偏磷酸钠溶液分散效果不好或不能分散时,则 30g 土样加 0.125mol/L 焦磷酸钠溶液 14ml 进行分散;焦磷酸钠溶液配制方法为称取 55.8g  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  (化学纯),加蒸馏水溶解后,定容至 1000ml,摇匀;

(7)用焦磷酸钠溶液等强分散剂仍不能分散的土,采用粒径大于 2mm 的阳离子交换树脂 100g 放入土样中一起浸泡,不断摇荡约 2h,再过 2mm 筛,将阳离子交换树脂分开,然后加入 0.083mol/L 六偏磷酸溶液 15ml;

(8)可能含有水溶盐,采用以上方法均不能分散的土样,要进行水溶盐检验;其方法为取均匀试样约 3g,放入烧杯内,注入 4ml ~ 6ml 蒸馏水,用带橡皮头的玻璃棒研散,再加 25ml 蒸馏水,煮沸 5min ~ 10min,经漏斗注入 30ml 的试管中,塞住管口,放在试管架上静置 24h;管中悬液有凝聚现象时,要进行洗盐。

#### 4.6.3.6 土样采用过滤法洗盐时可按下列方法进行:

(1)将分散用的试样放入调土皿内,注入少量蒸馏水,拌和均匀;将滤纸微湿后紧贴于漏斗上,然后将调土皿中土浆迅速倒入漏斗中,并注入热蒸馏水冲洗过滤;附于皿上的土粒要全部洗入漏斗;滤液混浊时,重新过滤;

(2)漏斗内的液面保持高出土面约 5mm,每次加水后,用表面皿盖住漏斗;

(3)用两个试管各取刚滤下的滤液 3ml ~ 5ml,一管中加入数滴 10% 盐酸和 5% 氯化钡,另一管加入数滴 10% 硝酸和 5% 硝酸盐;任一管中有白色沉淀时,继续清洗至无白色沉淀时为止;将漏斗上的土样洗下,风干取样。

#### 4.6.3.7 密度计法应按下列步骤进行试验:

(1)将称好的风干土样倒入三角烧瓶中,注入蒸馏水 200ml,浸泡一夜;按第 4.6.3.5 款规定加入分散剂;

(2)将三角烧瓶稍加摇荡后,放在电热器上煮沸 40min;用氨水分散时,用冷凝管装置;用阳离子交换树脂时,不需煮沸;

(3)将煮沸后冷却的悬液倒入烧杯中,静置 1min;将上部悬液通过 0.075mm 筛,注入 1000ml 量筒中;杯中沉土用带橡皮头的玻璃棒研磨;加水入杯中,搅拌后静置 1min,再将上部悬液通过 0.075mm 筛,倒入量筒;反复进行,直至静置 1min 后,上部悬液澄清为止;将全部土粒倒入筛内,用水冲洗至仅有大于 0.075mm 净砂为止;量筒内的悬液总量不超过 1000ml;

(4)将留在筛上的砂粒洗入皿中,风干称量,并计算各粒组颗粒质量占总土质量的百分数;

(5)向量筒中注入蒸馏水,使悬液为 1000ml;用氨水作分散剂时,需加入 25% 氨水 0.5ml,使悬液为 1000ml;



(6)用搅拌器在量筒内沿整个悬液深度上下搅拌 1min,往返约 30 次,使悬液均匀分布;

(7)取出搅拌器,开始计时,测记密度计读数直至小于某粒径的土重百分数小于 10% 为止,测记时刻为 0.5min、1min、5min、15min、30min、60min、120min、240min、1440min;每次读数前 10s~20s 将密度计小心放入量筒至约接近估计读数的深度;除 0.5min 及 1min 读数以外,每次读数以后,取出密度计,小心放入盛有清水的量筒中;每次读数后测记悬液温度;

(8)一次做一批土样,先做完每个量筒的 0.5min 和 1min 读数,再按以上步骤将每个土样悬液重新依次搅拌一次,然后分别测记各规定时间的读数;同时在每次读数后测记悬液的温度;

(9)密度计读数均以弯月面上缘为准。

#### 4.6.3.8 试验结果的整理应满足下列要求:

(1)采用甲种密度计时,小于某粒径的试样质量占试样总质量的百分比按式(4.6.3-2)和式(4.6.3-4)计算;

$$X = \frac{100}{m_d} C_G (R_m + m_T + n - C_D) \quad (4.6.3-2)$$

$$C_G = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_{w20}} \times \frac{2.65 - \rho_{w20}}{2.65} \quad (4.6.3-3)$$

式中  $X$ ——小于某粒径的土质量百分数(%),保留至 0.1;

$m_d$ ——干土质量(g);

$C_G$ ——土粒比重校正值,见表 4.6.3-1;

$R_m$ ——甲种密度计读数;

$m_T$ ——温度校正值,见表 4.6.3-2,  $T$  为试验时的水温;

$n$ ——刻度及弯月面校正值;

$C_D$ ——分散剂校正值;

$\rho_s$ ——土粒密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$\rho_{w20}$ ——20℃时水的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

表 4.6.3-1 土粒比重校正值

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



表 4.6.3-2 温度校正值

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

(2) 采用乙种密度计时,小于某粒径的试样质量占试样总质量的百分比按式(4.6.3-4)和式(4.6.3-5)计算;

$$X = \frac{100V}{m_s} C'_G [(R'_m - 1) + m'_T + n' - C'_D] \rho_{w20} \quad (4.6.3-4)$$

$$C'_G = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_{w20}} \quad (4.6.3-5)$$

式中  $V$ ——悬液体积(=1000ml);

$C'_G$ ——土粒比重校正值,见表 4.6.3-1;

$R'_m$ ——乙种密度计读数;

$m'_T$ ——温度校正值,见表 4.6.3-2,  $T$  为试验时的水温;

$n'$ ——刻度及弯月面校正值;

$C'_D$ ——分散剂校正值;

$\rho_s$ ——土粒密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$\rho_{w20}$ ——20℃时水的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

(3) 土粒直径按式(4.6.3-6)或式(4.6.3-7)计算;

$$d = \sqrt{\frac{1800 \times 10^4 \eta}{(G_s - G_{wT}) \rho_{w4} g}} \times \frac{L}{t} \quad (4.6.3-6)$$

$$d = k \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (4.6.3-7)$$

式中  $d$ ——土粒直径(mm),保留至0.0001且含两位有效数字;

$\eta$ ——水的动力黏滞系数( $10^{-6}$ kPa·s),见表4.6.3-3;

$G_s$ ——土粒比重;

$G_{wT}$ ——温度  $T^\circ\text{C}$  时水的比重,  $T$  为试验时的水温;

$\rho_{w4}$ —— $4^\circ\text{C}$  时水的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$g$ ——重力加速度( $981\text{cm}/\text{s}^2$ );

$L$ ——某一时间  $t$  内的土粒沉降距离(cm);

$t$ ——沉降时间(s);

$k$ ——粒径计算系数,与悬液温度和土粒比重有关,其值由表4.6.3-4查得;

表 4.6.3-3 不同温度时水的动力黏滞系数和密度

温度 T °C	动力黏滞系数 $\eta$ $10^{-6}$ kPa·s	密度 $\rho$ $\text{g}/\text{cm}^3$	温度 T °C	动力黏滞系数 $\eta$ $10^{-6}$ kPa·s	密度 $\rho$ $\text{g}/\text{cm}^3$	温度 T °C	动力黏滞系数 $\eta$ $10^{-6}$ kPa·s	密度 $\rho$ $\text{g}/\text{cm}^3$
5.0	1.516	0.999992	15.0	1.144	0.999126	25.0	0.899	0.997074
5.5	1.493	0.999982	15.5	1.130	0.999050	25.5	0.889	0.996944
6.0	1.470	0.999968	16.0	1.115	0.998970	26.0	0.879	0.996813
6.5	1.449	0.999951	16.5	1.101	0.998888	26.5	0.869	0.996679
7.0	1.427	0.999930	17.0	1.088	0.998802	27.0	0.860	0.996542
7.5	1.407	0.999905	17.5	1.074	0.998714	27.5	0.850	0.996403
8.0	1.387	0.999876	18.0	1.061	0.998623	28.0	0.841	0.996262
8.5	1.367	0.999844	18.5	1.048	0.998530	28.5	0.832	0.996119
9.0	1.347	0.999809	19.0	1.035	0.998433	29.0	0.823	0.995974
9.5	1.328	0.999770	19.5	1.022	0.998334	29.5	0.814	0.995826
10.0	1.310	0.999728	20.0	1.010	0.998232	30.0	0.806	0.995676
10.5	1.292	0.999682	20.5	0.998	0.998128	30.5	0.797	0.995524
11.0	1.274	0.999633	21.0	0.986	0.998021	31.0	0.789	0.995369
11.5	1.256	0.999580	21.5	0.974	0.997911	31.5	0.781	0.995213
12.0	1.239	0.999525	22.0	0.963	0.997799	32.0	0.773	0.995054
12.5	1.223	0.999466	22.5	0.952	0.997685	32.5	0.765	0.994894
13.0	1.206	0.999404	23.0	0.941	0.997567	33.0	0.757	0.994731
13.5	1.190	0.999339	23.5	0.930	0.997448	33.5	0.749	0.994566
14.0	1.175	0.999271	24.0	0.919	0.997327	34.0	0.742	0.994399
14.5	1.160	0.999200	24.5	0.909	0.997201	34.5	0.734	0.994230

表 4.6.3-4 粒径计算系数表

温度 (℃)	土 粒 比 重								
	2.45	2.50	2.55	2.60	2.65	2.70	2.75	2.80	2.85
5	0.1385	0.1360	0.1339	0.1318	0.1298	0.1279	0.1261	0.1243	0.1226
6	0.1365	0.1342	0.1320	0.1299	0.1280	0.1261	0.1243	0.1225	0.1208
7	0.1344	0.1321	0.1300	0.1280	0.1260	0.1241	0.1224	0.1206	0.1189
8	0.1324	0.1302	0.1281	0.1260	0.1241	0.1223	0.1205	0.1188	0.1182
9	0.1305	0.1283	0.1262	0.1242	0.1224	0.1205	0.1187	0.1171	0.1164
10	0.1288	0.1267	0.1247	0.1227	0.1208	0.1189	0.1173	0.1156	0.1141
11	0.1270	0.1249	0.1229	0.1209	0.1190	0.1173	0.1156	0.1140	0.1124
12	0.1253	0.1232	0.1212	0.1193	0.1175	0.1157	0.1140	0.1124	0.1109
13	0.1235	0.1214	0.1195	0.1175	0.1158	0.1141	0.1124	0.1109	0.1004
14	0.1221	0.1200	0.1180	0.1162	0.1149	0.1127	0.1111	0.1095	0.1000
15	0.1205	0.1184	0.1165	0.1148	0.1130	0.1113	0.1096	0.1081	0.1067
16	0.1189	0.1169	0.1150	0.1132	0.1115	0.1098	0.1083	0.1067	0.1053
17	0.1173	0.1154	0.1135	0.1118	0.1100	0.1085	0.1069	0.1047	0.1039
18	0.1159	0.1140	0.1121	0.1103	0.1086	0.1071	0.1055	0.1040	0.1026
19	0.1145	0.1125	0.1108	0.1090	0.1073	0.1058	0.1031	0.1028	0.1014
20	0.1130	0.1111	0.1093	0.1075	0.1059	0.1043	0.1029	0.1014	0.1000
21	0.1118	0.1099	0.1081	0.1064	0.1043	0.1033	0.1018	0.1003	0.09900
22	0.1103	0.1085	0.1067	0.1050	0.1035	0.1019	0.1004	0.09900	0.09767
23	0.1091	0.1072	0.1055	0.1038	0.1023	0.1007	0.09930	0.09793	0.09659
24	0.1078	0.1061	0.1044	0.1028	0.1012	0.09970	0.09823	0.96000	0.09555
25	0.1065	0.1047	0.1031	0.1014	0.09990	0.09839	0.09701	0.09566	0.09434
26	0.1054	0.1035	0.1019	0.1003	0.09897	0.09731	0.09592	0.09455	0.09327
27	0.1041	0.1024	0.1007	0.09915	0.09767	0.09623	0.09482	0.09349	0.09225
28	0.1032	0.1014	0.09975	0.09818	0.09670	0.09529	0.09391	0.09257	0.09132
29	0.1019	0.1002	0.09859	0.09706	0.09555	0.09413	0.09279	0.09144	0.09028
30	0.1008	0.09910	0.09752	0.09597	0.09450	0.09311	0.09176	0.09050	0.08927

(4) 以小于某粒径的颗粒百分数为纵坐标、粒径为横坐标,在半对数纸上绘制粒径分配曲线(图 4.6.3);求出各粒组的颗粒质量百分数,并且不大于  $d_{10}$  的数据点至少有一个;与筛分法联合分析时,将两段曲线绘成一平滑曲线;

(5) 试验记录格式采用附录 A 中表 A.0.11。

#### 4.6.4 采用移液管法时应符合下列规定。

##### 4.6.4.1 主要仪器设备应满足下列要求:

- (1) 分析天平最小分度值不大于 0.001g;
- (2) 移液管容积为 25ml,管端侧面开有四个小孔(图 4.6.4);
- (3) 恒温水槽的高度高于量筒;
- (4) 高型小烧杯容积为 50ml;
- (5) 其他仪器设备要求与密度计法相同。



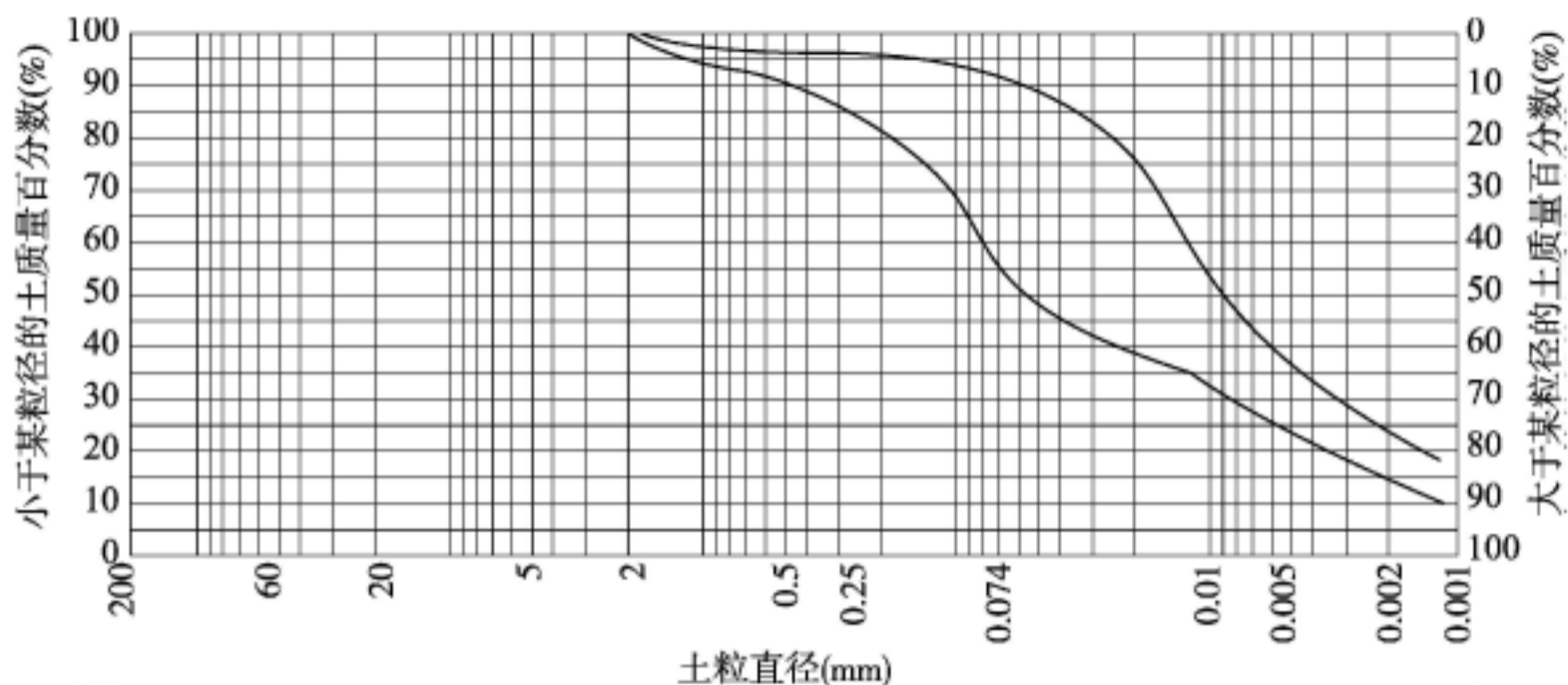


图 4.6.3 粒径分配曲线图

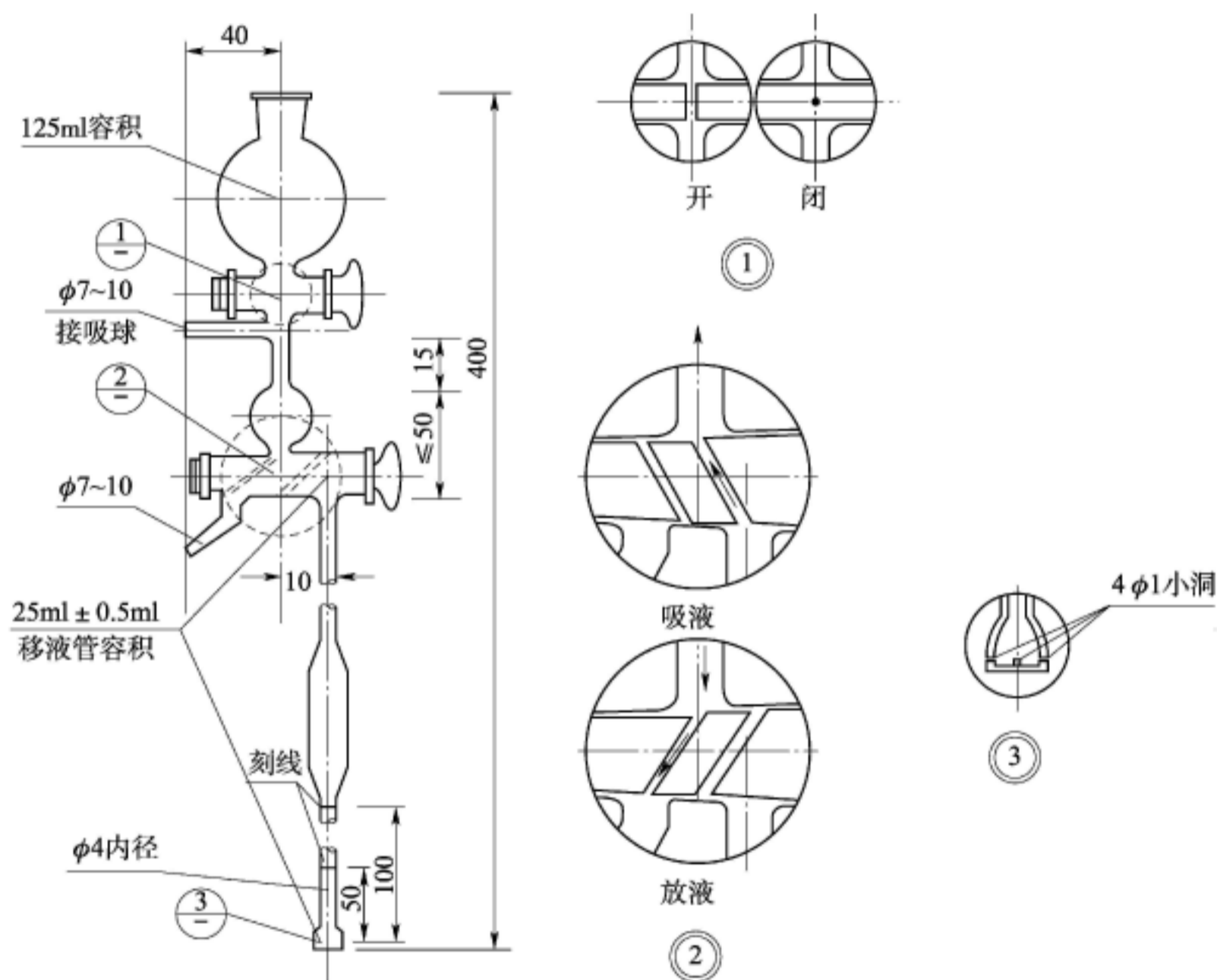


图 4.6.4 移液管(单位:mm)

①-二通阀;②-三通阀;③-移液管口

#### 4.6.4.2 试验应按下列步骤进行:

(1) 取代表性试样,黏性土为 10g ~ 15g,砂土为 20g,按第 4.6.3.7 款第(1)项 ~ 第(5)项制取悬液;

(2) 将盛有土样悬液的量筒放入恒温水槽,使悬液恒温,并记录温度,试验中悬液温度变化不大于  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ;按式(4.6.4-1)计算粒径小于 0.05mm、0.01mm、0.005mm 和其他所需粒径下沉一定深度所需的静置时间;

$$t = \frac{L}{\frac{2}{9}gr^2 \frac{\rho_s - \rho_{wT}}{\eta}} \times 10^4 \quad (4.6.4-1)$$

式中  $t$ ——某粒径土粒下沉一定深度所需的静置时间(s),保留至0.01;

$L$ ——移液管浸入悬液深度(10cm);

$g$ ——重力加速度(981cm/s<sup>2</sup>);

$r$ ——土粒半径(cm);

$\rho_s$ ——土粒密度(g/cm<sup>3</sup>);

$\rho_{wT}$ ——T℃时水的密度(g/cm<sup>3</sup>),T为试验时的水温;

$\eta$ ——纯水的动力黏滞系数(10<sup>-6</sup>kPa·s);

(3)准备好50ml小烧杯,称量;

(4)准备好移液管,活塞①放在关闭位置上,旋转活塞②放在与移液管及吸球相通的位置上;

(5)用搅拌器将悬液上下搅拌各约30次,时间为1min,使悬液分布均匀;停止搅拌,立即开动秒表;

(6)根据各粒径的静置时间提前约10s,将移液管放入悬液中,浸入深度为10cm,连接自来水管所产生的负压或用吸球来吸取悬液;

(7)吸入悬液,至略多于25ml,旋转活塞②180°,与放液管相通,再将多余悬液从放液口放出;

(8)将移液管下口放入已称量的小烧杯中,再旋转活塞②180°,与移液管相通;同时用吸球将25ml悬液全部注入小烧杯内;在移液管上口预先倒入蒸馏水,同时打开活塞①,使水流入移液管中,将这部分水连同管内剩余颗粒冲入小烧杯内;

(9)将烧杯内悬液浓缩至半干,放入电热鼓风干燥箱内在105℃~110℃下烘至恒量,称量小烧杯连同干土的质量。

#### 4.6.4.3 试验结果的整理应满足下列要求:

(1)土中小于某粒径的颗粒含量百分数按式(4.6.4-2)计算;与筛分法联合分析,将两段曲线绘成一平滑曲线;

$$X = \frac{A \times 1000}{25 \times B} \times 100 \quad (4.6.4-2)$$

式中  $X$ ——小于某粒径的颗粒含量百分数(%),保留至0.1;

$A$ ——25ml悬液中颗粒烘干质量(g);

$B$ ——试样总质量(g);

(2)试验记录格式采用附录A中表A.0.12。

## 4.7 界限含水率试验

4.7.1 界限含水率试验可用于粒径不大于0.5mm、有机质含量不大于试样总质量5%的土。



4.7.2 采用液限和塑限联合测定法应符合下列规定。

4.7.2.1 主要仪器设备应包括液塑限联合测定仪、盛土杯、天平、孔径 0.5mm 的筛、调土刀、调土皿、称量盒、研钵(附带橡皮头的研杵或橡皮板、木棒)、干燥器、吸管、凡士林等;液塑限联合测定仪、盛土杯和天平应满足下列要求:

(1)液塑限联合测定仪包括带标尺的圆锥仪、电磁铁、显示屏、控制开关和试样杯;锥质量为  $76\text{g} \pm 0.2\text{g}$ ,锥角为  $30^\circ \pm 0.2^\circ$ ;

(2)盛土杯的直径为 40mm ~ 50mm,高度为 30mm ~ 40mm;

(3)天平的最小分度值不大于 0.01g。

4.7.2.2 试验应按下列步骤进行:

(1)取有代表性的天然含水率或风干土样进行试验;土中含大于 0.5mm 的土粒或杂物时,将风干土样用带橡皮头的研杵研碎或用木棒在橡皮板上压碎,并过 0.5mm 的筛;

(2)当采用天然含水率土样时,取代表性土样不少于 150g;采用风干试样时,取 0.5mm 筛下的代表性土样 200g;将试样分开放入 3 个盛土皿中,加不同数量的蒸馏水,土样的含水率分别控制在锥入深度 3mm ~ 5mm、9mm ~ 11mm 和 16mm ~ 18mm;用调土刀调匀,盖上湿布,放置 18h 以上;

(3)将制备好的土样充分搅拌均匀,分层装入盛土杯,压密,使空气逸出;对于较干的土样,先充分搓揉,用调土刀反复压实;试杯装满后,刮成与杯边齐平;

(4)接通电源,调平机身,打开开关,提起锥杆;将装好土样的试杯放在升降座上,转动升降旋钮,土样表面和锥尖刚好接触时启动开关,让锥体立刻自行下沉,5s 时读取锥入土深度  $h_1$ ;

(5)改变锥尖与土接触位置,锥尖两次锥入位置距离不小于 1cm,再次读取锥入土深度  $h_2$ ;  $h_1$ 、 $h_2$  允许平行误差为 0.5mm,取  $h_1$ 、 $h_2$  平均值作为该点的锥入深度  $h$ ;

(6)去掉锥尖入土处的凡士林,取 10g 以上的土样两个,分别装入称量盒内,称质量,测定其含水率并计算含水率平均值;

(7)重复第(3)项 ~ 第(6)项的步骤,对其他两个锥入土深度土样进行试验。

4.7.2.3 试验结果的整理应满足下列要求:

(1)以含水率为横坐标,圆锥入土深度为纵坐标,在双对数坐标纸上绘制关系曲线,连接三点呈一直线,如图 4.7.2 中 A 线;当三点不在一直线上时,通过高含水率的点和其余两点连成 2 条直线,在圆锥入土深度为 2mm 处查得两个含水率,当两个含水率的差值小于 2% 时,以两点含水率的平均值与高含水率的点连成一直线,如图 4.7.2 中 B 线;当两个含水率的差值大于等于 2% 时,重做试验;

(2)在含水率与圆锥入土深度关系曲线中,查得入土深度  $h = 10\text{mm}$  所对应的含水率,即为该土样对应 10mm 的液限;查得锥入土深度为 2mm 所对应的含水率即为该土样的塑限;

(3)塑性指数按式(4.7.2-1)计算;

$$I_p = w_l - w_p \quad (4.7.2-1)$$

式中  $I_p$ ——塑性指数;

$w_L$ ——液限含水率(%)；

$w_P$ ——塑限含水率(%)；

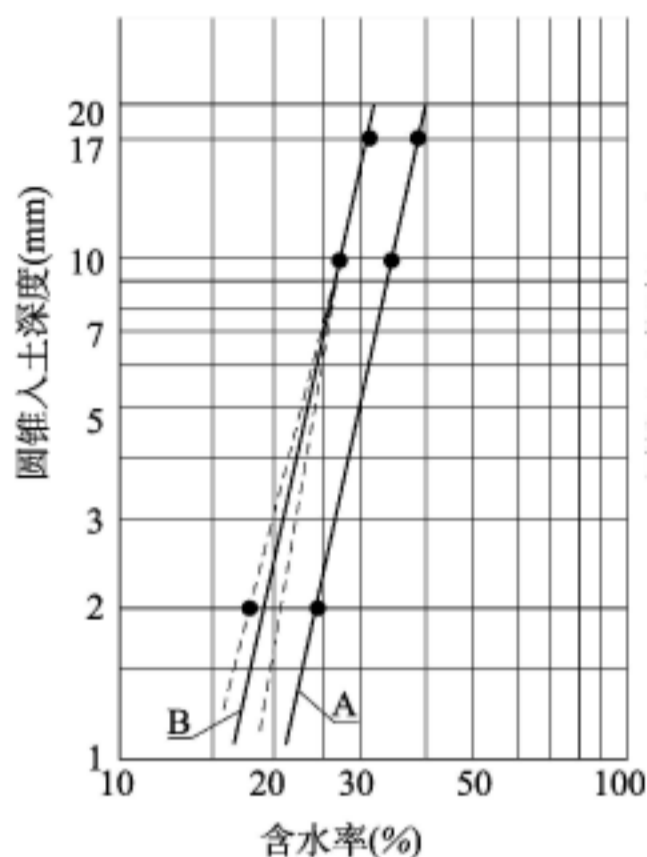


图 4.7.2  $h-w$  关系图

(4) 液性指数按式(4.7.2-2)计算；

$$I_L = \frac{w_0 - w_P}{I_P} \quad (4.7.2-2)$$

式中  $I_L$ ——液性指数,计算至 0.01；

$w_0$ ——土样含水率(%)；

(5) 试验记录格式采用附录 A 中表 A.0.13。

#### 4.7.3 采用液限碟式仪法时应符合下列规定。

4.7.3.1 主要仪器设备应包括碟式液限仪、天平、电热鼓风干燥箱、干燥缸、铝盒、调土刀、孔径为 0.5mm 的筛；碟式液限仪和天平应满足下列要求：

(1) 碟式液限仪(图 4.7.3-1)由土碟和支架组成,并有专用划刀,底座为硬橡胶制成；

(2) 天平的最小分度值不大于 0.01g。

#### 4.7.3.2 试验应按下列步骤进行：

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

(2) 取一部分试样,平铺于铜碟的前半部,用调土刀将碟前沿试样刮成水平,使试样中心厚度为 10mm,用开槽器经蜗形轮的中心沿碟直径将试样划开,形成微型槽；

(3) 以每秒 2 转的速率转动摇柄,使铜碟反复起落,坠击于底座上,数记击数,直至试样两边在槽底的合拢长度为 13mm 为止,记录击数,并在槽的两边各取不少于 10g 的试样,测定含水率；

(4) 将加不同水量的试样,重复第(1)项~第(3)项的步骤测定槽底两边试样合拢长度为 13mm 所需要的击数及相应的含水率,试样为 4~5 个,槽底试样合拢所需要的击数控制在 15~35 次之间,25 次以上及以下各 1 次。



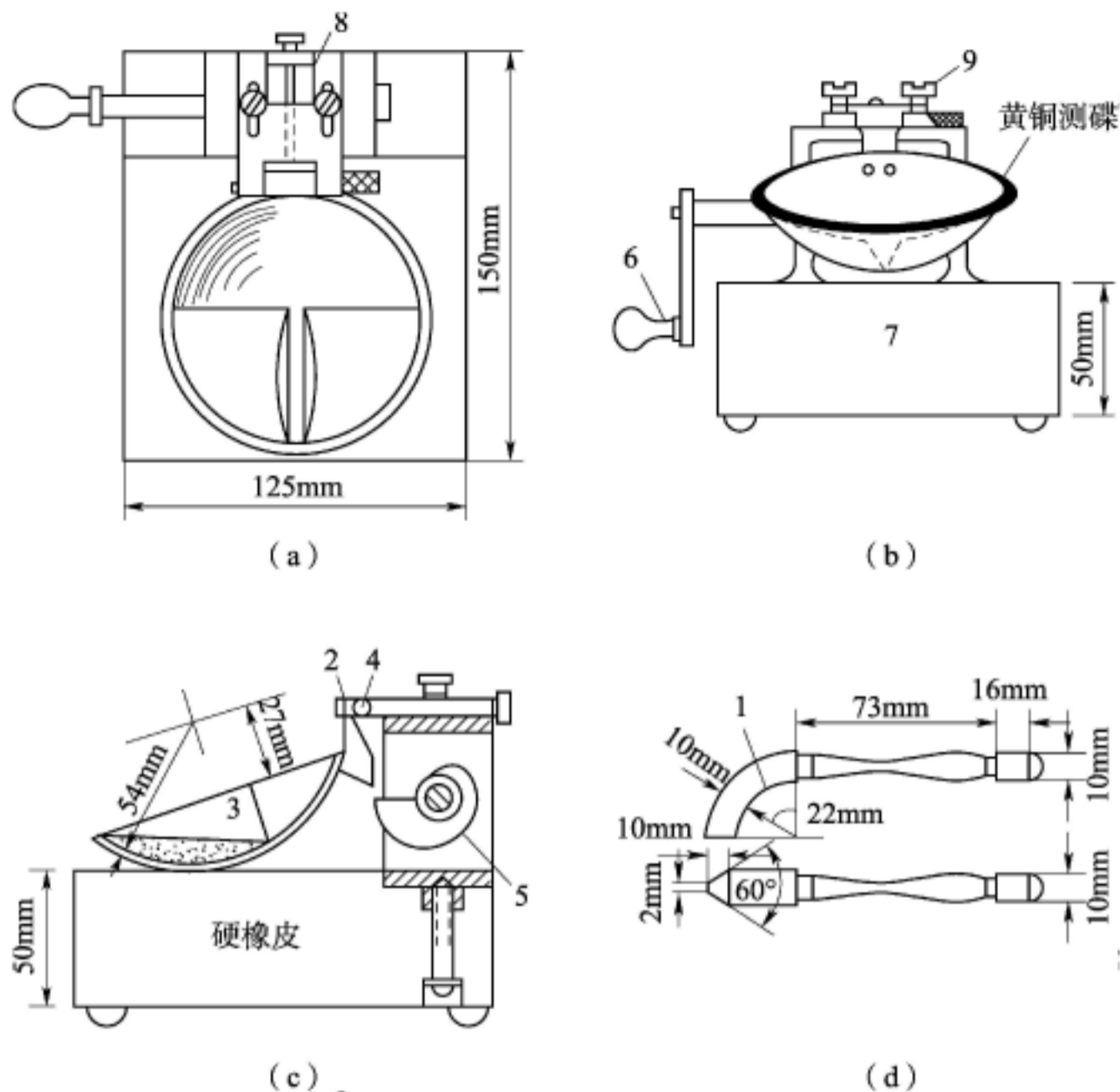


图 4.7.3-1 碟式液限仪

1-开槽器;2-销子;3-铜碟;4-支架;5-蜗形轮;6-摇柄;7-底座;8-调整板;9-螺丝

#### 4.7.3.3 试验结果的整理应按下述方法进行:

(1)按式(4.7.3)计算各击次下合拢时试样的相应含水率;

$$w_n = \left( \frac{m_n}{m_d} - 1 \right) \times 100 \quad (4.7.3)$$

式中  $w_n$ —— $n$  击下试样的含水率(%),保留至 0.01;

$m_n$ —— $n$  击下试样的质量(g);

$m_d$ ——试样的干土质量(g);

(2)试验记录格式采用附录 A 中表 A.0.14;

(3)根据试验结果,以含水率为纵坐标,以击次的对数为横坐标,绘制曲线(图 4.7.3-2),查得曲线上击数 25 次所对应的含水率,即为该试样的液限。

#### 4.7.4 采用塑限滚搓法时应符合下列规定。

4.7.4.1 主要仪器设备应包括毛玻璃板、天平、电热鼓风干燥箱、干燥器、称量盒、调土皿、直径 3mm 的铁丝;毛玻璃板和天平应满足下列要求:

(1)毛玻璃板的尺寸为 200mm × 300mm;

(2)天平最小分度值不大于 0.01g。

#### 4.7.4.2 试验可按下列步骤进行:

(1)按第 4.7.3.2 款第(1)项制备试样,取土样约 50g 备用;试验前,将试样在手中捏



揉至不粘手为止,或放在空气中稍微晾干;

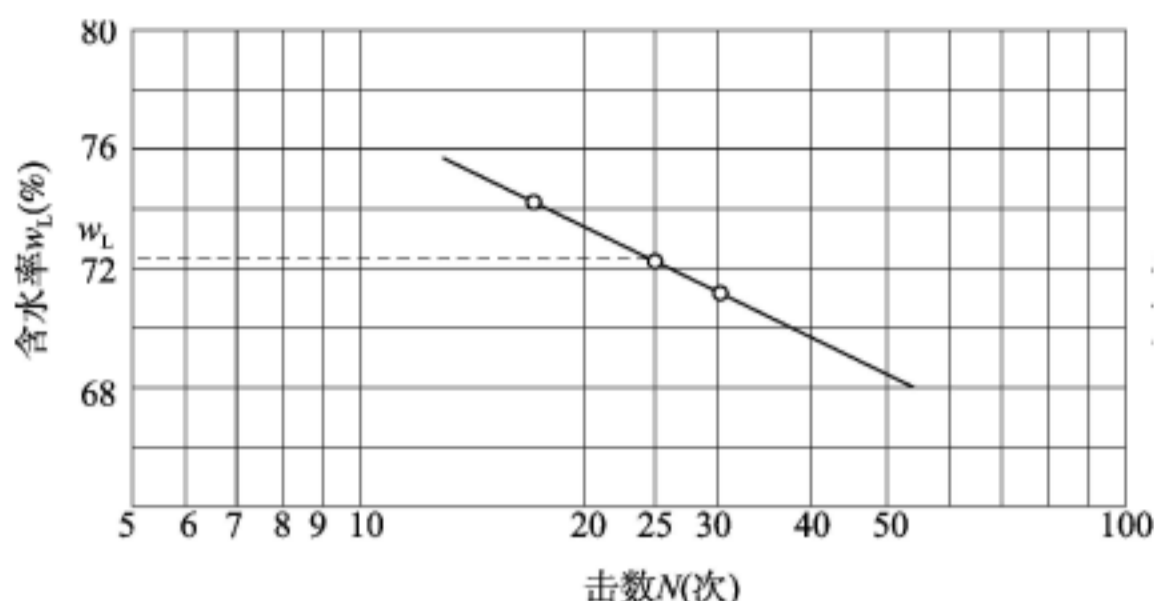


图 4.7.3-2 含水率与击数关系曲线

(2) 取含水率接近塑限的试样一小块,先用手捏成橄榄形,然后再用手掌在毛玻璃板上轻轻搓滚;搓滚时以手掌均匀施压力于土条上,土条长度不超过手掌宽度,并在滚搓时不从手掌下任一边脱出;土条在任何情况下不允许产生中空现象;

(3) 继续搓滚土条,直至土条直径达 3mm 时,产生裂缝并开始断裂为止;若土条搓成 3mm 时仍未产生裂缝及断裂,则试样的含水率高于塑限,将其重新捏成一团,重新搓滚;土条直径大于 3mm 时即行断裂,则试样含水率小于塑限,重新取土加适量水调匀后再搓,直至合格;土条在任何含水率下始终搓不到 3mm 即开始断裂,则认为该土无塑性;

(4) 收集约 3g ~ 5g 合格的断裂土条,放入称量盒内,随即盖紧盒盖,测定其含水率。

#### 4.7.4.3 试验结果的整理应满足下列要求:

(1) 按式(4.7.4)计算塑限;

$$w_p = \left( \frac{m_0}{m_d} - 1 \right) \times 100 \quad (4.7.4)$$

式中  $w_p$ ——塑限(%),保留至 0.1;

$m_0$ ——湿土质量(g);

$m_d$ ——干土质量(g);

(2) 试验记录格式采用附录 A 中表 A.0.15;

(3) 每个土样平行测定,取算术平均值;高液限土允许差值小于或等于 2%,低液限土允许差值小于或等于 1%。

#### 4.7.5 缩限试验时应符合下列规定。

**4.7.5.1** 主要仪器设备应包括收缩皿或环刀、天平、电热鼓风干燥箱或其他含水率测定装置、蜡、烧杯、细线、针、卡尺和制备含水率大于液限的土样所需的仪器;收缩皿、天平和卡尺应满足下列要求:

(1) 收缩皿或环刀的直径 4.5cm ~ 5cm,高为 2cm ~ 3cm;

(2) 天平的最小分度值不大于 0.01g;

(3) 卡尺的最小分度值为 0.02mm。

#### 4.7.5.2 试验应按下列步骤进行:

- (1) 取具有代表性的土样,制备成含水率大于液限的土膏;
- (2) 在收缩皿内涂一薄层凡士林,将土样分层装入皿内,每次装入后将皿底拍击试验台,直至驱尽气泡为止;
- (3) 土样装满后,用刀或直尺刮平表面,立即称收缩皿加湿土质量;
- (4) 将盛满土样的收缩皿放在通风处风干,待土样颜色变淡后,放入电热鼓风干燥箱中烘至恒量,然后放在干燥器中冷却至室温;
- (5) 称收缩皿和干土总质量;
- (6) 用蜡封法测定干试样体积。

#### 4.7.5.3 试验结果的整理应按下列方法进行:

- (1) 缩限含水率用按式(4.7.5-1)计算;

$$w_s = w - \frac{V_1 - V_2}{m_d} \times \rho_w \times 100 \quad (4.7.5-1)$$

- 式中  $w_s$ ——缩限含水率(%),保留至0.1;
- $w$ ——试验前试样含水率(%);
- $V_1$ ——湿试样体积(即收缩皿容积)( $\text{cm}^3$ );
- $V_2$ ——干试样体积( $\text{cm}^3$ );
- $m_d$ ——干试样质量(g);
- $\rho_w$ ——水的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),取  $1\text{g}/\text{cm}^3$ ;
- (2) 液限与缩限之差称收缩指数,按(4.7.5-2)式计算;

$$I_s = w_L - w_s \quad (4.7.5-2)$$

- 式中  $I_s$ ——收缩指数(%),保留至0.1;
- $w_L$ ——土的液限(%);
- (3) 试验记录格式采用附录 A 中表 A.0.16;
  - (4) 每个土样进行 2 次平行测定,取算术平均值,计算至 0.1%;高液限土允许差值不大于 2%,低液限土允许差值不大于 1%。

## 4.8 砂的相对密度试验

**4.8.1** 砂的相对密度试验可用于颗粒直径小于 5mm,且粒径 2mm ~ 5mm 的试样质量不大于试样总质量的 15% 的土。

**4.8.2** 主要仪器设备应包括量筒、长颈漏斗(图 4.8.2-1)、锥形塞(图 4.8.2-1)、砂面拂平器(图 4.8.2-1)、金属容器、振动叉(图 4.8.2-2)、击锤(图 4.8.2-3)和台秤;量筒、长颈漏斗、锥形塞、金属容器、击锤和台秤应符合下列规定:

- (1) 量筒的容积为 500ml 或 1000ml,且后者内径大于 60mm;
- (2) 长颈漏斗的颈管内径约 12mm,颈口磨平;
- (3) 锥形塞为镶于铁杆上的直径约 15mm 的圆锥体;
- (4) 容积为 250ml、内径为 50mm、高度为 127mm 的金属容器,或容积为 1000ml 内径为 100mm、高度为 127mm 的金属容器;

(5) 击锤的锤重为 1.25kg, 落高为 150mm, 锤座直径为 50mm;

(6) 台秤的最小分度值不大于 1g。

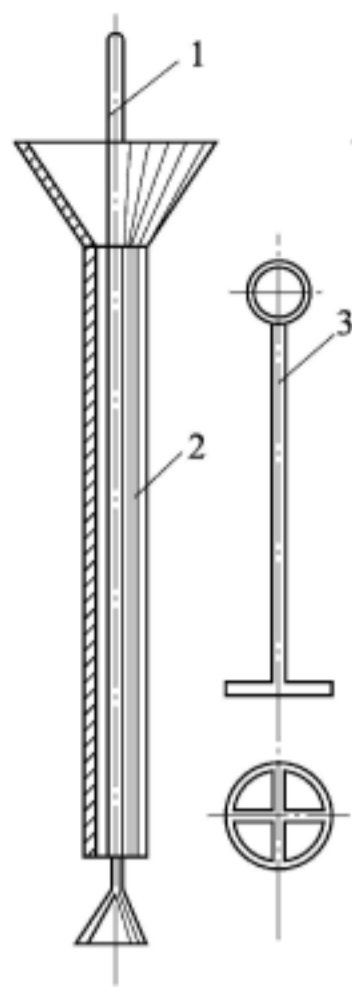


图 4.8.2-1 长颈漏斗

1-锥形塞;2-长颈漏斗;3-砂面拂平器

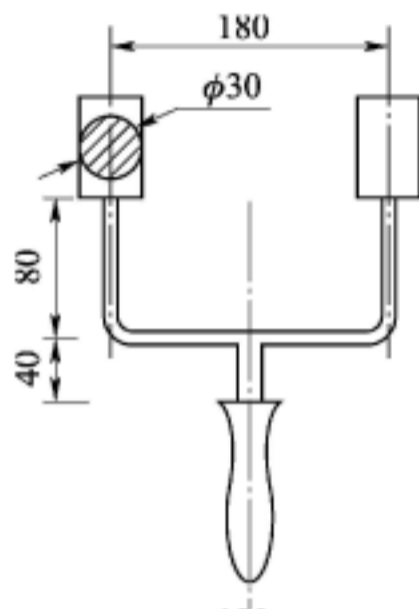


图 4.8.2-2 振动仪(单位:mm)

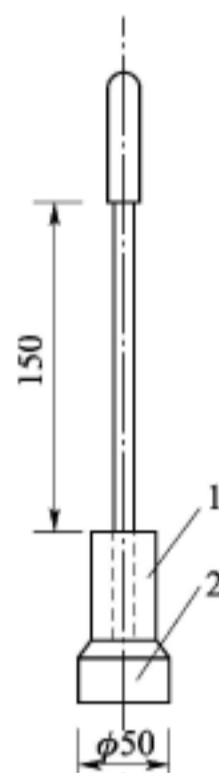


图 4.8.2-3 击锤(单位:mm)

1-击锤;2-锤座

#### 4.8.3 最大孔隙比的测定可按下列步骤进行:

(1) 取代表性试样约 1.5kg, 充分烘干, 用手搓揉或用圆木棍在橡皮板上碾散, 并拌和均匀;

(2) 将锥形塞杆自漏斗下口穿入, 并向上提起, 使锥底堵住漏斗管口, 一并放入容积 1000ml 量筒中, 使其下端与量筒底相接;

(3) 称取试样 700g, 均匀倒入漏斗中, 将漏斗与塞杆同时提高, 移动塞杆使锥体略离开管口, 管口保持高出砂面 1cm ~ 2cm, 使试样缓缓且均匀分布地落入量筒中;

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

(5) 以手掌或橡皮板堵住量筒口, 将量筒倒转, 缓慢地转动量筒内的试样, 并回到原来位置, 如此重复几次, 记下体积的最大值, 估读至 5ml;

(6) 取上述两种方法测得的较大体积值, 计算最大孔隙比。

#### 4.8.4 最小孔隙比的测定可按下列步骤进行:

(1) 取代表性试样约 4kg, 按第 4.8.3.1 款第(1)项的规定处理;

(2) 分三次倒入容器进行振击, 先取上述试样 600g ~ 800g, 倒入 1000cm<sup>3</sup> 容器内, 使振击后的体积略大于容器容积的 1/3, 用振动叉以每分钟 150 次 ~ 200 次的速度敲打容器两侧, 并在同一时间内, 用击锤于试样表面锤击, 每分钟 30 次 ~ 60 次, 直至砂样体积不变为止; 敲打时要用足够的力量使试样处于振动状态; 振击时, 粗砂用较少击数, 细砂用较多击数;



(3) 如用电动最小孔隙比试验仪时,当试样同上法装入容器后,开动电机,进行振击试验;

(4) 按第(2)项的规定进行后两次加土的振动和锤击,第三次加土时先在容器口上安装套环;

(5) 最后一次振毕,取下套环,刮平试样,称量,计算其最小孔隙比。

4.8.5 砂的相对密度可根据测定的最大孔隙比、最小孔隙比和天然孔隙比求得。

4.8.6 试验结果的整理应符合下列规定:

(1) 最小与最大干密度按式(4.8.6-1)和式(4.8.6-2)计算;

$$\rho_{dmin} = \frac{m}{V_{max}} \quad (4.8.6-1)$$

$$\rho_{dmax} = \frac{m}{V_{min}} \quad (4.8.6-2)$$

式中  $\rho_{dmin}$ ——最小干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),保留至0.01;

$m$ ——试样质量(g);

$V_{max}$ ——试样最大体积( $\text{cm}^3$ );

$\rho_{dmax}$ ——最大干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),保留至0.01;

$V_{min}$ ——试样最小体积( $\text{cm}^3$ );

(2) 最大与最小孔隙比按式(4.8.6-3)和式(4.8.6-4)计算:

$$e_{max} = \frac{\rho_w G_s}{\rho_{dmin}} - 1 \quad (4.8.6-3)$$

$$e_{min} = \frac{\rho_w G_s}{\rho_{dmax}} - 1 \quad (4.8.6-4)$$

式中  $e_{max}$ ——最大孔隙比,保留至0.01;

$\rho_w$ ——水的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),取 $1\text{g}/\text{cm}^3$ ;

$G_s$ ——土粒比重;

$e_{min}$ ——最小孔隙比,保留至0.01;

(3) 相对密度按式(4.8.6-5)和式(4.8.6-6)计算;

$$D_r = \frac{e_{max} - e_0}{e_{max} - e_{min}} \quad (4.8.6-5)$$

或

$$D_r = \frac{(\rho_d - \rho_{dmin})\rho_{dmax}}{(\rho_{dmax} - \rho_{dmin})\rho_d} \quad (4.8.6-6)$$

式中  $D_r$ ——相对密度,保留至0.01;

$e_0$ ——天然孔隙比或填土的相应孔隙比;

$\rho_d$ ——天然干密度或填土的相应干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

(4) 试验记录格式采用附录A中表A.0.17;

(5) 每个土样进行平行测定,取算术平均值,其平行差值得超过 $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ 。

## 4.9 无黏性土休止角试验

**4.9.1** 无黏性土休止角试验可用于测定无黏性土在风干状态下或水下状态下的休止角。

**4.9.2** 主要仪器设备应包括休止角测定仪、勺子和水槽；休止角测定仪的  $10.0\text{cm} \pm 0.1\text{cm}$  圆盘可用于粒径小于  $2\text{mm}$  的无黏性土， $20.0\text{cm} \pm 0.1\text{cm}$  圆盘可用于粒径小于  $5\text{mm}$  的无黏性土。

**4.9.3** 试验应按下列步骤进行：

(1) 取一定量代表性土样充分风干或烘干，碾碎后备用；

(2) 根据土样中较大颗粒的大小，选择相应的圆盘，并吊装在制动器上；

(3) 调整底盘至水平状态，转动制动器使圆盘自由下落至底盘上；

(4) 用小勺沿中心连杆四周倾倒试样，小勺离试样表面的高度始终保持在  $1\text{cm}$  左右，直至圆盘外缘完全盖满为止；

(5) 慢慢转动制动器，使圆盘平稳升起，直至底盘上的土样不再滑落为止，测读锥顶与底盘连杆接触处的刻度；

(6) 测定水下状态的休止角时，将盛满试样的圆盘慢慢地沉入水槽底部，锥体全部浸入水中后，等待片刻，待土样充分饱和后，再慢慢转动制动器，使圆盘平稳升起，锥体顶部即将露出水面时，测读锥顶与铁杆接触处的刻度作为水下休止角值。

**4.9.4** 对同一样品应进行平行试验，取算术平均值，试验结果保留至整数位。

## 4.10 水分析试验

**4.10.1** 浸出液的制取可用于各类土；酸碱度测定可采用电测法，试验结果以 pH 值表示；易溶盐总含量的测定可采用烘干法；碳酸根、碳酸氢根含量的测定可采用滴定法，检测下限均为  $5\text{mg/L}$ ；硫酸根离子含量的测定可采用乙二胺四乙酸二钠—钡滴定法，最佳测定范围为  $10\text{mg/L} \sim 150\text{mg/L}$ ；氯离子含量的测定可采用硝酸银滴定法，测定范围为  $3\text{mg/L} \sim 400\text{mg/L}$ ；钙离子含量的测定可采用乙二胺四乙酸二钠滴定法 (EDTA 滴定法)，测定范围为  $4\text{mg/L} \sim 200\text{mg/L}$ ；镁离子含量的测定可采用乙二胺四乙酸二钠滴定法 (EDTA 滴定法)，测定范围为  $3\text{mg/L} \sim 12\text{mg/L}$ 。

**4.10.2** 浸出液制取应符合下列规定。

**4.10.2.1** 主要仪器设备应包括过滤设备、离心机、天平、电动振荡器、广口瓶、细颈瓶、 $2\text{mm}$  分析筛等；过滤设备、离心机和天平应满足下列要求：

(1) 过滤设备包括真空泵、平底瓷漏斗、抽滤瓶；

(2) 离心机的最大转速为  $1000\text{r/min}$ ；

(3) 天平的最小分度值不大于  $0.01\text{g}$ 。

**4.10.2.2** 试验应按下列步骤进行：

(1) 根据土中含盐量和分析项目，称取  $2\text{mm}$  分析筛下风干试样  $50\text{g} \sim 100\text{g}$  置于广口瓶中，按土水比例  $1:5$  加入纯水，在振荡器上振荡  $3\text{min}$  后抽气过滤；另取试样  $3\text{g} \sim 5\text{g}$ ，测定风干含水率；



(2) 将滤纸用纯水浸湿后贴在漏斗底部,漏斗装在抽滤瓶上,连通真空泵抽气,使滤纸与漏斗贴紧,将振荡后的土悬液摇匀,倒入漏斗中抽气过滤,过滤时漏斗用表面皿盖好;

(3) 滤液混浊时,重新过滤;反复过滤仍然混浊,采用离心机分离;所得的透明滤液即为土的浸出液,贮于细颈瓶中供分析用。

#### 4.10.3 酸碱度的测定应符合下列规定。

**4.10.3.1** 主要仪器设备应包括酸度计、电动振荡器或电动磁力搅拌器、天平、容量瓶、广口瓶、烧杯、定性滤纸、温度计等;酸度计和天平应满足下列要求:

(1) 酸度计包括玻璃电极、甘汞电极或复合电极;

(2) 天平的最小分度值不大于 0.01g。

#### 4.10.3.2 试剂制备应满足下列要求:

(1) 制备 pH = 4.01 标准缓冲溶液时,称取 105℃ ~ 110℃ 烘干 2h ~ 3h 的邻苯二甲酸氢钾 ( $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$ ) 10.21g 溶于已除去二氧化碳的纯水中,移入容量瓶中定容至 1000ml;

(2) 制备 pH = 6.87 标准缓冲溶液时,称取 105℃ ~ 110℃ 烘干 2h ~ 3h 的磷酸氢二钠 ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ) 3.53g 和磷酸二氢钾 ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) 3.39g 溶于已除去二氧化碳的纯水中,移入容量瓶中定容至 1000ml;

(3) 制备 pH = 9.18 标准缓冲溶液时,称取硼砂 ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) 3.80g 溶于已除去二氧化碳的纯水中,移入容量瓶中定容至 1000ml;

(4) 制备饱和氯化钾 (KCl) 溶液时,向适量纯水中加入氯化钾 (KCl),边加边搅拌直至不再溶解为止;

(5) 标准缓冲溶液贮于密闭的塑料瓶中,保存使用期不超过 2 个月,出现发霉混浊不能再使用。

#### 4.10.3.3 试验应按下列步骤进行:

(1) 取少许水样盛于小烧杯中,将酸度计上的玻璃电极和甘汞电极或复合电极插入杯中,轻轻摇动烧杯,使水样均匀接触电极 2min ~ 3min,如此反复用水样洗涤 1 ~ 2 次。再取水样 30ml ~ 50ml,按相关仪器的说明书测定 pH 值,准确至 0.01;同时测定水样温度,进行温度补偿;

(2) 测量完毕关闭电源,用纯水洗净电极,并用滤纸吸干电极表面的水分或将玻璃电极浸泡在纯水中。

**4.10.3.4** 两次平行允许误差应小于 0.1,否则重新测定,取两次测值的算术平均值作为试验结果。

#### 4.10.4 易溶盐总量测定应符合下列规定。

**4.10.4.1** 主要仪器设备应包括分析天平、电热鼓风干燥箱、水浴锅、蒸发皿、玻三角、表面皿、移液管、干燥器等;分析天平的最小分度值不大于 0.0001g。

**4.10.4.2** 试剂应包括 15% 的双氧水溶液和 2% 的碳酸钠溶液。

#### 4.10.4.3 本试验应按下列步骤进行:

(1) 用移液管吸取浸出液 50ml ~ 100ml 注入已知质量的蒸发皿中,盖上表面皿,放在水浴锅上蒸干;当蒸干残渣中呈现黄褐色时,加入 15% 双氧水 1ml ~ 2ml,继续在水浴锅上



蒸干,反复处理至黄褐色消失;

(2)将蒸发皿放入电热鼓风干燥箱,105℃~110℃下烘4h~8h;取出后放入干燥器中冷却0.5h,称重;再重复烘干2h~4h,冷却0.5h,称重;反复进行至前后两次质量差值不大于0.001g;

(3)浸出液蒸干残渣中含有大量结晶水时,测得的易溶盐含量偏高,用两个蒸发皿,一个加浸出液50ml,另一个加纯水50ml,然后各加等量2%碳酸钠溶液,搅拌均匀后按第(1)项和第(2)项操作,烘干温度改为180℃。

#### 4.10.4.4 资料的整理应满足下列要求:

(1)未经2%碳酸钠溶液处理时,易溶盐总量按式(4.10.4-1)计算;

$$W = \frac{(m_2 - m_1) \times 1000}{V} \times 1000 \quad (4.10.4-1)$$

式中  $W$ ——易溶盐含量(mg/L);

$m_2$ ——蒸发皿及烘干残渣质量(g);

$m_1$ ——蒸发皿质量(g);

$V$ ——水样体积(ml);

(2)经2%碳酸钠溶液处理的易溶盐总量按式(4.10.4-2)计算。

$$W = \frac{(m_4 - m_3) \times 1000}{V} \times 1000 \quad (4.10.4-2)$$

式中  $W$ ——易溶盐含量(mg/L);

$m_4$ ——蒸发皿、碳酸钠及水样烘干后质量(g);

$m_3$ ——蒸发皿、碳酸钠烘干后质量(g);

$V$ ——水样体积(ml)。

#### 4.10.5 碳酸根、碳酸氢根的测定应符合下列规定。

4.10.5.1 主要仪器设备应包括酸式滴定管、容量瓶、锥形瓶、量筒、电热鼓风干燥箱等;酸式滴定管、容量瓶、锥形瓶应满足下列要求:

(1)酸式滴定管的规格为25ml,最小分度值为0.01ml;

(2)容量瓶的容量为100ml;

(3)锥形瓶的规格250ml。

#### 4.10.5.2 测定用的标准试剂应满足下列要求:

(1)制备酚酞乙醇溶液时,称量0.5g酚酞溶于50ml95%的乙醇中,用纯水稀释至100ml;

(2)制备甲基橙溶液时,称量0.1g甲基橙溶于100ml纯水中;

(3)制备盐酸标准溶液时,将4.2ml密度为1.19kg/L的分析纯盐酸,加纯水稀释至1L;

(4)盐酸标定时,称取经250℃烘干4h的无水碳酸钠(分析纯)0.1g,置于250ml锥形瓶中,加纯水100ml,微热使其溶解;加2~3滴0.1%甲基橙指示剂,用配制好的盐酸标准溶液滴定至橙色,记下盐酸标准溶液用量;标定3次,差值不超过0.001mol/L,取算术平

均值;盐酸标准溶液的浓度按式(4.10.5-1)计算;

$$c_{\text{HCl}} = \frac{m}{53.00V} \times 1000 \quad (4.10.5-1)$$

式中  $c_{\text{HCl}}$ ——盐酸标准溶液的浓度(mol/L);

$m$ ——无水碳酸钠的质量(g);

$V$ ——滴定时消耗盐酸标准溶液的体积(ml)。

#### 4.10.5.3 试验应按下列步骤进行:

(1)测定酚酞碱度时,取水样 100ml 注入 250ml 锥形瓶中,加入 2~3 滴酚酞乙醇溶液,试液不显红色,表示无碳酸根存在;出现红色,则用盐酸标准溶液滴定到溶液呈淡红色为止,记录盐酸标准溶液的用量  $V_1$ ;

(2)测定甲基橙碱度时,在酚酞碱度试验后的溶液中继续加入甲基橙溶液 2~3 滴,用盐酸标准溶液滴定至橙色为止,记录盐酸标准溶液的用量  $V_2$ ;

(3)滴定后的试液作为测定氯离子用。

#### 4.10.5.4 碳酸根、碳酸氢根的质量浓度应按下列公式进行计算:

(1)当  $V_1 > V_2$  时,表明有  $\text{OH}^-$  和  $\text{CO}_3^{2-}$  存在,无  $\text{HCO}_3^-$ ,此时:

$$M_{\text{CO}_3^{2-}} = \frac{c_{\text{HCl}} \times (2V_2) \times 30.01}{V} \times 1000 \quad (4.10.5-2)$$

(2)当  $V_1 = V_2$  时,表明有  $\text{CO}_3^{2-}$  而无  $\text{OH}^-$  和  $\text{HCO}_3^-$  存在,此时:

$$M_{\text{CO}_3^{2-}} = \frac{c_{\text{HCl}} \times (2V_1) \times 30.01}{V} \times 1000 \quad (4.10.5-3)$$

(3)当  $V_1 < V_2$  时,表明有  $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{HCO}_3^-$  存在,无  $\text{OH}^-$ ,此时:

$$M_{\text{CO}_3^{2-}} = \frac{c_{\text{HCl}} \times (2V_2) \times 30.01}{V} \times 1000 \quad (4.10.5-4)$$

$$M_{\text{HCO}_3^-} = \frac{c_{\text{HCl}} \times (V_2 - V_1) \times 61.02}{V} \times 1000 \quad (4.10.5-5)$$

式中  $M_{\text{CO}_3^{2-}}$ —— $\text{CO}_3^{2-}$  的质量浓度(mg/L);

$c_{\text{HCl}}$ ——盐酸标准溶液的浓度(mol/L);

$V_1$ ——用酚酞作指示剂时,消耗盐酸标准液体积(ml);

$V_2$ ——用甲基橙作指示剂时,消耗盐酸标准液体积(ml);

$V$ ——所取水样的体积(ml);

$M_{\text{HCO}_3^-}$ —— $\text{HCO}_3^-$  的质量浓度(mg/L)。

#### 4.10.6 采用硝酸银滴定法测定氯离子应符合下列规定。

4.10.6.1 主要仪器设备应包括酸式滴定管、分析天平、锥形瓶、移液管、容量瓶、电热鼓风干燥箱、坩埚等;酸式滴定管、分析天平、锥形瓶、移液管应满足下列要求:

(1)酸式滴定管的规格为 25ml,棕色;

(2)分析天平最小分度值不大于 0.0001g;

(3)锥形瓶的规格为 250ml;



(4) 移液管的规格为 50ml。

#### 4.10.6.2 试剂应满足下列要求:

(1) 高锰酸钾 ( $\text{KMnO}_4$ ) 的  $c_{\frac{1}{5}\text{KMnO}_4}$  为 0.01mol/L;

(2) 30% 的过氧化氢 ( $\text{H}_2\text{O}_2$ );

(3) 95% 的乙醇 ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ );

(4) 硫酸溶液 ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 的  $c_{\frac{1}{2}\text{H}_2\text{SO}_4}$  为 0.05mol/L;

(5) 氢氧化钠溶液 ( $\text{NaOH}$ ) 的  $c_{\text{NaOH}}$  为 0.05mol/L;

(6) 制备氢氧化铝悬浮液时,溶解 125g 硫酸铝钾 ( $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ) 于 1L 纯水中,加热至  $60^\circ\text{C}$ ;边搅拌边缓缓加入 55ml 浓氨水放置约 1h 后,移至大瓶中,用倾泻法反复洗涤沉淀物,直到洗出液不含氯离子为止;用水稀释至约 300ml;

(7) 制备氯化钠标准溶液时,取氯化钠 ( $\text{NaCl}$ ) 放入瓷坩埚内,在  $500^\circ\text{C} \sim 600^\circ\text{C}$  灼烧 40min ~ 50min 后,在干燥器中冷却;称冷却后的氯化钠 8.2440g 溶于纯水中,移入 1000ml 的容量瓶内,用纯水定容至 1000ml;用吸管吸取 10.0ml 在容量瓶中准确稀释至 100ml;

(8) 制备硝酸银标准溶液时,称取硝酸银 ( $\text{AgNO}_3$ ) 2.3950g 于  $105^\circ\text{C} \sim 110^\circ\text{C}$  烘干 30min 后,倒入 1000ml 容量瓶中用纯水溶解、定容,贮于棕色细口瓶中;用氯化钠标定其浓度;

(9) 制备铬酸钾溶液时,称取铬酸钾 ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ) 5g 溶于少量纯水中,一边搅拌一边逐滴加入硝酸银标准溶液至有红色沉淀生成;摇匀,静置不少于 12h,过滤并用纯水稀释至 100ml;

(10) 制备酚酞指示剂溶液时,称取 0.5g 酚酞溶于 50ml 95% 乙醇中,加入 50ml 纯水,滴入 0.05mol/L 氢氧化钠溶液使呈微红色。

#### 4.10.6.3 干扰的排除应满足下列要求:

(1) 水样混浊或带有颜色,取 150ml 或取适量水样稀释至 150ml 锥形瓶中,置于 250ml 锥形瓶中,加入 2ml 氢氧化铝悬浮液,振荡过滤,弃去最初滤下的 20ml,用干的清洁锥形瓶接取滤液备用;

(2) 有机物含量高或色度高,用茂福炉灰化法预先处理水样,取适量废水样于瓷蒸发皿中,调节 pH 值至 8 ~ 9 之间,置于水浴上蒸干,放入茂福炉中在  $600^\circ\text{C}$  下灼烧 1h,取出冷却后加 10ml 蒸馏水,移入 250ml 锥形瓶中,用蒸馏水清洗三次,一并倒入锥形瓶中,调节 pH 值至 7 左右,稀释至 50ml;

(3) 有机质产生的较轻色度加入 0.01mol/L 高锰酸钾 2ml;煮沸后,滴加乙醇除去多余的高锰酸钾至水样褪色,经过滤后滤液贮于锥形瓶中备用;

(4) 水样中含有硫化物、亚硫酸盐或硫代硫酸盐,加氢氧化钠溶液将水样调至中性或弱碱性,加入 1ml 30% 过氧化氢后摇匀,1min 后加热至  $70^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ ,除去过量的过氧化氢。

#### 4.10.6.4 试验应按下列步骤进行:

(1) 用吸管吸取 50.0ml 水样或经预处理的水样置于 250ml 锥形瓶中,氯化物含量高时,取适量水样用蒸馏水稀释至 50ml;另取一锥形瓶加入 50ml 蒸馏水做空白试验;



(2) 水样 pH 值在 6.5 ~ 10.5 范围内, 直接滴定, 超出此范围的水样以酚酞作为指示剂, 用稀硫酸或氢氧化钠溶液调节至红色刚刚褪去;

(3) 加入 1ml 铬酸钾溶液, 用硝酸银标准溶液滴定至砖红色沉淀刚刚出现时, 记录硝酸银标准溶液的用量  $V_{\text{AgNO}_3}$ ;

(4) 按照上述方法进行空白测定; 记录硝酸银标准溶液用量  $V'_{\text{AgNO}_3}$ 。

**4.10.6.5** 氯离子的质量浓度应按式(4.10.6)计算:

$$M_{\text{Cl}^-} = \frac{c \times (V_{\text{AgNO}_3} - V'_{\text{AgNO}_3}) \times 35.45}{V} \times 1000 \quad (4.10.6)$$

式中  $M_{\text{Cl}^-}$ ——氯离子的质量浓度(mg/L);

$c$ ——硝酸银标准溶液的浓度(mol/L);

$V_{\text{AgNO}_3}$ ——测定水样所消耗硝酸银溶液体积(ml);

$V'_{\text{AgNO}_3}$ ——空白试验所消耗硝酸银溶液体积(ml);

$V$ ——所取水样体积(ml)。

**4.10.7** 硫酸根离子的测定应符合下列规定。

**4.10.7.1** 主要仪器设备应满足下列要求:

(1) 酸式滴定管的规格为 25ml;

(2) 锥形瓶的规格为 250ml;

(3) 移液管的规格为 50ml。

**4.10.7.2** 试剂应满足下列要求:

(1) 甲基红溶液浓度为 0.5g/L;

(2) 盐酸溶液(1+1);

(3) 制备钡镁混合溶液时, 称取氯化钡( $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) 2.44g、氯化镁( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) 1.02g 共溶于纯水中, 稀释至 1000ml, 摇匀; 制成 0.01mol/L 氯化钡( $\text{BaCl}_2$ ) 和 0.005mol/L 氯化镁( $\text{MgCl}_2$ ) 的混合溶液;

(4) 制备氨性缓冲溶液(pH = 10)时, 称取氯化铵( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) 67.5g 溶于 200ml 纯水中, 加入氨水( $\rho = 0.89\text{g/ml}$ ) 570ml, 用纯水稀释到 1000ml, 摇匀;

(5) 制备酸性铬蓝 K - 萘酚绿 B 混合溶液时, 称取酸性铬蓝 K 0.2g 和萘酚绿 B 0.5g 共溶于 100ml 纯水中, 摇匀;

(6) 制备乙二胺四乙酸二钠溶液( $c_{\text{EDTA}} = 0.01\text{mol/L}$ )时, 称取乙二胺四乙酸二钠( $\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{O}_8\text{Na}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) 3.72g 溶于 1000ml 纯水中, 摇匀; 其准确浓度用钙标准溶液( $c_{\text{Ca}^{2+}} = 0.01\text{mol/L}$ ) 标定。

**4.10.7.3** 试验应按下列步骤进行:

(1) 吸取水样 50.0ml 置于 250ml 锥形瓶中, 加甲基红溶液 1 滴, 用盐酸溶液滴定至红色, 再过量 1 ~ 2 滴; 将试液加热煮沸, 趁热加入钡镁混合溶液 10.00ml, 边加边摇动将试液再加热煮沸, 并在近沸的温度下保温 1h, 取下静置, 冷却; 向试液中加入氨缓冲溶液 5ml, 酸性铬蓝 K - 萘酚绿 B 混合溶液 3 ~ 4 滴, 用乙二胺四乙酸二钠溶液滴定到试液呈不变的蓝色即为滴定终点; 记录乙二胺四乙酸二钠溶液的消耗体积  $V_3$ ;

(2) 吸取同一水样 50.0ml, 加入氨缓冲溶液 5ml、酸性铬蓝 K - 萘酚绿 B 混合溶液 3 ~ 4 滴, 用乙二胺四乙酸二钠溶液滴定到终点, 记录乙二胺四乙酸二钠溶液的消耗体积  $V_4$ ;

(3) 另取不含硫酸根的纯水 50.0ml, 按第(1)项操作进行空白测定, 记录乙二胺四乙酸二钠溶液的消耗体积  $V_5$ 。

**4.10.7.4** 硫酸根离子的质量浓度按式(4.10.7)计算:

$$M_{\text{SO}_4^{2-}} = \frac{c(V_4 + V_5 - V_3) \times 96.06 \times 1000}{V} \quad (4.10.7)$$

式中  $M_{\text{SO}_4^{2-}}$ ——硫酸根离子的质量浓度(mg/L);

$c$ ——乙二胺四乙酸二钠的浓度(mol/L);

$V_3$ ——加入钡镁混合液后滴定的乙二胺四乙酸二钠消耗体积(ml);

$V_4$ ——不加入钡镁混合液后滴定的乙二胺四乙酸二钠消耗体积(ml);

$V_5$ ——空白滴定的乙二胺四乙酸二钠消耗体积(ml);

$V$ ——所取水样的体积(ml)。

**4.10.8** 钙离子的测定应符合下列规定。

**4.10.8.1** 主要仪器设备应包括移液管、锥形瓶、酸式滴定管和试剂瓶等; 移液管、锥形瓶和酸式滴定管应满足下列要求:

(1) 移液管的规格为 50ml;

(2) 锥形瓶的规格为 150ml;

(3) 酸式滴定管的规格为 25ml。

**4.10.8.2** 试剂应满足下列要求:

(1) 盐酸溶液(1+1);

(2) 制备氢氧化钠溶液时, 称量氢氧化钠(NaOH)40g 溶于煮沸并冷却的纯水中, 稀释至 500ml, 摇匀, 贮存在聚乙烯塑料瓶中;

(3) 按第 4.10.7.2 款第(5)项的规定制备酸性铬蓝 K - 萘酚绿 B 混合溶液;

(4) 按第 4.10.7.2 款第(6)项的规定制备乙二胺四乙酸二钠(EDTA)溶液。

**4.10.8.3** 试验应按下列步骤进行:

(1) 吸取水样 50.0ml 置于 150ml 锥形瓶中, 投入一小片刚果红试纸, 滴加盐酸溶液至刚果红试纸由红变蓝; 将溶液加热煮沸 1min ~ 2min, 除去二氧化碳, 待溶液冷却后, 加入氢氧化钠溶液 2ml, 摇匀; 再加酸性铬蓝 K - 萘酚绿 B 混合溶液 3 ~ 4 滴, 立即用乙二胺四乙酸二钠溶液滴定至蓝色时, 记录乙二胺四乙酸二钠溶液消耗的体积;

(2) 滴定钙离子后的试液留作测定镁离子用。

**4.10.8.4** 钙离子的质量浓度应按式(4.10.8)计算:

$$M_{\text{Ca}^{2+}} = \frac{c \times V_6 \times 40.08}{V} \times 1000 \quad (4.10.8)$$

式中  $M_{\text{Ca}^{2+}}$ ——硫酸根离子的质量浓度(mg/L);

$c$ ——乙二胺四乙酸二钠溶液的浓度(mol/L);



$V_6$ ——乙二胺四乙酸二钠溶液滴定消耗的体积(ml);

$V$ ——水样的体积(ml)。

#### 4.10.9 镁离子的测定应符合下列规定。

##### 4.10.9.1 主要仪器设备应满足下列要求:

- (1) 移液管的规格为 50ml;
- (2) 锥形瓶的规格为 150ml;
- (3) 酸式滴定管的规格为 25ml。

##### 4.10.9.2 试验的试剂应满足下列要求:

- (1) 盐酸溶液(1+1);
- (2) 按第 4.10.7.2 款第(4)项的规定制备氨性缓冲溶液(pH=10);
- (3) 按第 4.10.7.2 款第(6)项的规定制备乙二胺四乙酸二钠(EDTA)溶液。

##### 4.10.9.3 试验应按下列步骤进行:

(1) 在用乙二胺四乙酸二钠溶液滴定钙离子后的试液中,投入一小片刚果红试纸,逐滴加入盐酸溶液到刚果红试纸由红色恰变为蓝色,摇匀;

(2) 加入氨性缓冲溶液 5ml,用乙二胺四乙酸二钠溶液滴定到试液由酒红色转为不变的蓝色,记录乙二胺四乙酸二钠溶液消耗的体积。

##### 4.10.9.4 镁离子的质量浓度应按式(4.10.9)计算:

$$M_{Mg^{2+}} = \frac{c \times V_7 \times 24.31}{V} \times 1000 \quad (4.10.9)$$

式中  $M_{Mg^{2+}}$ ——镁离子的质量浓度(mg/L);

$c$ ——乙二胺四乙酸二钠溶液的浓度(mol/L);

$V_7$ ——乙二胺四乙酸二钠溶液滴定消耗的体积(ml);

$V$ ——水样的体积(ml)。

### 4.11 冻土含水率试验

4.11.1 烘干法可用于各类冻土的总含水率测定,联合测定法可用于层状或网状构造的黏性土或砂土的冻土。

#### 4.11.2 采用烘干法时应符合下列规定。

##### 4.11.2.1 主要仪器设备应满足下列要求:

- (1) 电热鼓风干燥箱能保持 105℃~110℃ 的温度范围内;
- (2) 电子天平最大称量不小于 200g 时,最小分度值不大于 0.01g;最大称量不小于 5000g 时,最小分度值不大于 1g。

##### 4.11.2.2 试验应按下列步骤进行:

(1) 对于肉眼观察不易看到显著冰晶的整体状构造冻土,主要试验步骤按照本规程第 4.2 节的规定进行;

(2) 对于层状或网状构造的冻土,采用平均试样法测定含水率:视冻土结构均匀程度将土样用四分法取出 1000g~2000g,置于搪瓷盘中使其融化,将融化的土样调拌成均匀



糊状进行称量;土太湿时,多余水分待澄清后可用吸球或吸纸吸出,或让其自然蒸发;土太干时适当加水,从糊状稠度土样中取样测定含水率,按第 4.2 节的规定进行;

(3) 冻土的总含水率进行平行测定。

**4.11.2.3** 资料的整理应按下列规定进行:

(1) 整体状构造冻土的总含水率计算按第 4.2 节的规定进行;

(2) 层状或网状构造的冻土总含水率按式(4.11.2)计算;

$$w_A = \left[ \frac{m_1}{m_2} (1 + 0.01w_n) - 1 \right] \times 100 \quad (4.11.2)$$

式中  $w_A$ ——冻土的总含水率(%),保留至 0.1%;

$m_1$ ——冻土试样的质量(g);

$m_2$ ——调成糊状的冻土试样质量(g);

$w_n$ ——糊状试样的含水率(%)。

(3) 整体状冻土的总含水率测定平行差值满足表 4.11.2 的要求,层状或网状冻土的平行差值不大于 1%。

表 4.11.2 整体状冻土的总含水率平行差值

含水率(%)	≤10	10~30	≥30
平行差值(%)	≤1	≤2	≤3

**4.11.3** 采用联合测定法时应符合下列规定。

**4.11.3.1** 试验的仪器设备应满足下列要求:

(1) 排液筒(图 4.11.3)的内径约 15cm,有效容积约 3000cm<sup>3</sup>;

(2) 台秤的最大量程不小于 5kg,最小分度值不大于 1g;

(3) 量筒的容积 1000ml,最小分度值为 10ml。

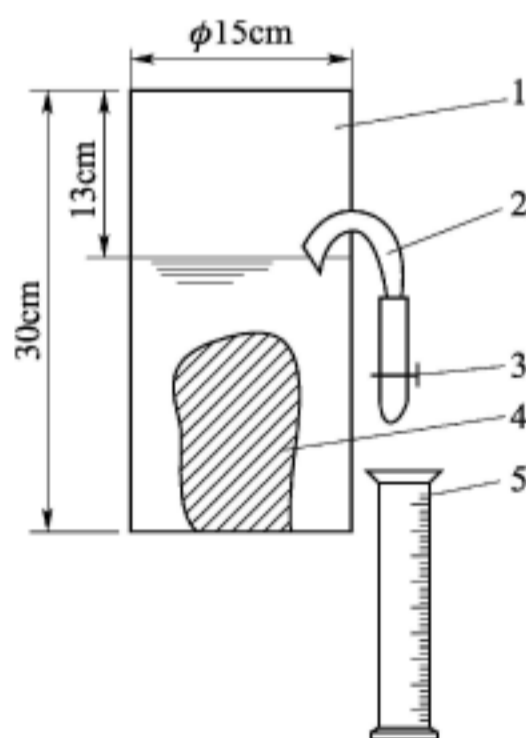


图 4.11.3 排液筒装置示意图

1-排液筒;2-虹吸管;3-止水夹;4-冻土试样;5-量筒

**4.11.3.2** 试验应按下列步骤进行:

(1) 取约为 1000g~1500g 的冻土试样,称质量;

(2) 拧紧虹吸管止水夹,将接近 0℃ 的清水缓慢倒入排液筒,使水面超过虹吸管顶;

(3) 将排液筒置于台秤承载器中部,保持排液筒位置不动,直至试验结束;

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

(5) 将称好的冻土试样轻轻放入排液筒中,随即松开止水夹,排液筒中的水流入量筒内;

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

(7) 使冻土试样在排液筒中充分融化成松散状态;

(8) 往排液筒中再次加入清水,使水面超过虹吸管顶,松开止水夹,排水,水流停止后,拧紧止水夹,并称量排液筒、水和土颗粒质量;

(9) 试验过程中保持水面平稳,排水和放入冻土试样时排液筒不发生上下剧烈晃动。

**4.11.3.3** 冻土的总含水率应按式(4.11.3)计算:

$$w_A = \left[ \frac{m \left( \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right)}{(m_3 - m_1) \frac{\rho_s}{\rho_w}} - 1 \right] \times 100 \quad (4.11.3)$$

式中  $w_A$ ——冻土的总含水率(%),保留至0.1%;

$m$ ——冻土试样的质量(g);

$\rho_s$ ——土的颗粒密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),可实测也可采取经验值;

$\rho_w$ ——水的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$m_3$ ——排液筒、水和土颗粒的总质量(g);

$m_1$ ——排液筒和水的总质量(g)。

## 4.12 冻土密度试验

**4.12.1** 浮称法可用于表面无显著孔隙的冻土;联合测定法可用于层状或网状构造的黏性土、粉土或砂土的冻土;充砂法可用于表面有明显孔隙的冻土;环刀法可用于温度高于 $-3^\circ\text{C}$ 的黏性土、粉土或砂土的冻土。

**4.12.2** 采用浮称法时应符合下列规定。

**4.12.2.1** 主要仪器设备应满足下列要求:

- (1) 天平最大称量范围不小于1000g,最小分度值不大于0.1g;
- (2) 液体密度计的最小分度值为 $0.001\text{g}/\text{cm}^3$ ;
- (3) 温度计的测量范围为 $-30^\circ\text{C} \sim +20^\circ\text{C}$ ,最小分度值为 $0.1^\circ\text{C}$ ;
- (4) 量筒的容积为1000ml,最小分度值为10ml;
- (5) 盛液筒的容积为1000ml~2000ml。

**4.12.2.2** 试验应按下列步骤进行:

- (1) 切取质量为300g~1000g的冻土试样,用细线捆紧,称量其质量;
- (2) 将事先预冷接近冻土试样温度的煤油注入盛液筒,用温度计量测煤油的温度;
- (3) 采用浮称天平(图4.12.2)时,将试样吊在天平的一端,使试样全部浸没于煤油

中,液面超出试样顶面不少于 2cm,称量试样在煤油中的质量;采用电子天平或上皿天平时,将盛液筒先放在称量盘上,称量筒与煤油的质量,再将试样吊在固定的支架上并浸入煤油中,称量其质量;该过程中,试样不能与盛液筒接触;

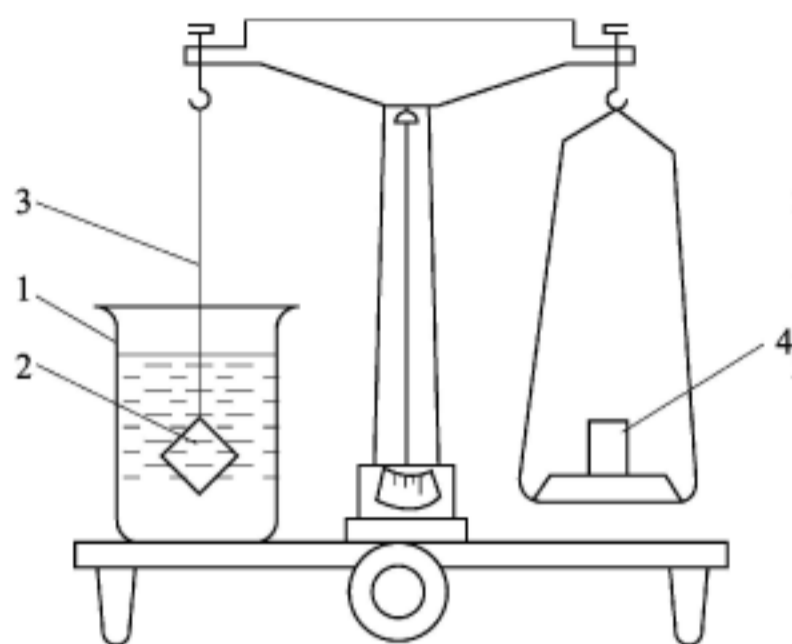


图 4.12.2 浮称法示意图

1-盛液筒;2-试样;3-细线;4-砝码

(4)从煤油中取出冻土试样,削去表层带煤油的部分,按第 4.11 节有关规定取样测定冻土的含水率;

(5)采用 0℃ 水快速测定时,试样表面不能发生融化。

#### 4.12.2.3 资料的整理应满足下列要求:

(1)冻土的密度按式(4.12.2-1)计算;

$$\rho_t = \frac{m_0}{V} \quad (4.12.2-1)$$

式中  $\rho_t$ ——冻土密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),保留至 0.01 $\text{g}/\text{cm}^3$ ;

$m_0$ ——冻土试样质量(g);

$V$ ——冻土试样体积( $\text{cm}^3$ );

(2)采用浮称天平时的冻土试样体积按式(4.12.2-2)计算;

$$V = \frac{m_0 - m_1}{\rho_{mT}} \quad (4.12.2-2)$$

式中  $m_1$ ——用浮称天平测得的试样在煤油中的质量(g);

$\rho_{mT}$ ——试验温度下煤油的密度,可以由实测煤油密度与温度关系曲线查得;

(3)采用电子天平或上皿天平时的冻土试样体积按式(4.12.2-3)计算;

$$V = \frac{m_3 - m_2}{\rho_{mT}} \quad (4.12.2-3)$$

式中  $m_2$ ——盛液筒放在称量盘时筒与煤油的质量(g);

$m_3$ ——试样吊在支架上试样、盛液筒、煤油的总质量(g);

(4)冻土密度试验进行两次平行测定,整体状构造冻土的两次平行测定差值不大于 3%,取算术平均值;层状或网状构造冻土提供两次测定值,不取平均值。

#### 4.12.3 采用联合测定法时应符合下列规定。



4.12.3.1 试验的主要仪器设备及试验步骤应按第4.11.3.1款~第4.11.3.2款执行。

4.12.3.2 冻土的密度应按式(4.12.3)计算:

$$\rho_t = \frac{m_0}{m + m_1 - m_2} \times \rho_w \quad (4.12.3)$$

式中  $\rho_t$ ——冻土的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),保留至 $0.01\text{g}/\text{cm}^3$ ;

$m_0$ ——冻土试样的质量( $\text{g}$ );

$m_1$ ——排液筒和水的总质量( $\text{g}$ );

$m_2$ ——排液筒、水和试样的总质量( $\text{g}$ );

$\rho_w$ ——水的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

4.12.4 采用充砂法时应符合下列规定。

4.12.4.1 主要仪器设备应满足下列要求:

- (1)金属容器的容积为 $1000\text{ml} \sim 2000\text{ml}$ ,且容积已知;
- (2)漏斗的上口直径为 $15\text{cm}$ ,下口直径为 $1.5\text{cm}$ ,高度为 $10\text{cm}$ ;
- (3)天平的最大称量范围不小于 $5000\text{g}$ ,最小分度值不大于 $1\text{g}$ ;
- (4)量砂为粒径介于 $0.25\text{mm} \sim 0.50\text{mm}$ 之间的干燥标准砂。

4.12.4.2 试验应按下列步骤进行:

(1)将漏斗置于已知质量和容积的金属容器上方,使漏斗下口与金属容器上口保持 $10\text{cm}$ 的距离,将接近试样温度的量砂经漏斗灌入到金属容器中,直至金属容器充满砂;用直尺轻轻刮平金属容器上口砂面直至与上缘齐平;灌砂过程中通过补充量砂保持漏斗砂面与漏斗上缘齐平,漏斗和金属容器不能有任何振动;分别称量金属容器质量以及灌满量砂的容器、量砂总质量;量砂的密度按式(4.12.4-1)计算;

$$\rho_n = \frac{m_2 - m_1}{V_0} \quad (4.12.4-1)$$

式中  $\rho_n$ ——量砂密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),保留至 $0.001\text{g}/\text{cm}^3$ ;

$m_2$ ——金属容器和砂的质量( $\text{g}$ );

$m_1$ ——金属容器质量( $\text{g}$ );

$V_0$ ——金属容器的容积( $\text{cm}^3$ );

(2)每一种量砂的密度试验不少于3次,各次试验的平行差值不大于 $0.02\text{g}/\text{cm}^3$ ,否则增加一次试验;最后取各平行差值允许范围内的各次试验值的算术平均值作为量砂的密度值;

(3)将试样的一面削平,称量试样质量后将削平的一面朝下轻轻放入金属容器底部中央,并使试样平整面与金属容器底面紧贴;

(4)将装有冻土试样体积的金属容器置于测定量砂密度的漏斗下方,按第(1)项的步骤将量砂充填于冻土试样周围,保持量砂的温度与冻土试样周围温度基本一致,金属容器充满以后,轻轻刮平砂面至与金属容器上缘齐平,称量此时的金属容器、冻土试样和量砂的总质量。

4.12.4.3 冻土密度试验可按式(4.12.4-2)和式(4.12.4-2)计算:

$$\rho_t = \frac{m_0}{V} \quad (4.12.4-2)$$

$$V = V_0 - \frac{m_3 - m_1 - m_0}{\rho_n} \quad (4.12.4-3)$$

式中  $\rho_t$ ——冻土密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),保留至 $0.01\text{g}/\text{cm}^3$ ;

$m_0$ ——冻土试样质量( $\text{g}$ );

$V$ ——冻土试样体积( $\text{cm}^3$ );

$V_0$ ——金属容器的容积( $\text{cm}^3$ );

$m_3$ ——金属容器、冻土试样和量砂的质量( $\text{g}$ );

$m_1$ ——金属容器的质量( $\text{g}$ );

$\rho_n$ ——量砂密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

**4.12.5** 采用环刀法时应符合下列规定。

**4.12.5.1** 主要仪器设备应满足下列要求:

- (1)天平的最大称量范围不小于 $2000\text{g}$ ,最小分度值不大于 $0.2\text{g}$ ;
- (2)环刀的容积不小于 $500\text{cm}^3$ 。

**4.12.5.2** 试验应在负温环境下按下列试验步骤进行:

(1)取原状土样,削平其上下面,将环刀刃口向下放在土样上;用切土刀、钢丝锯将土样削成略大于环刀直径的土柱,将环刀垂直下压,边压边削,至土样伸出环刀为止,将两端余土削去修平;

(2)擦净环刀外壁称量,计算湿土质量。

**4.12.5.3** 试验的资料整理应按照第4.4.2条的规定进行。

### 4.13 冻结温度试验

**4.13.1** 冻结温度试验可用于原状和扰动的黏性土和砂土。

**4.13.2** 冻结温度试验(图4.13.2)应采用零温瓶、低温瓶、数字电压表、热电偶、塑料管、试样杯和切土刀等设备和用于配置低融冰晶混合物的氯化钠、氯化钙;零温瓶、低温瓶、数字电压表、热电偶、塑料管、试样杯应满足下列要求。

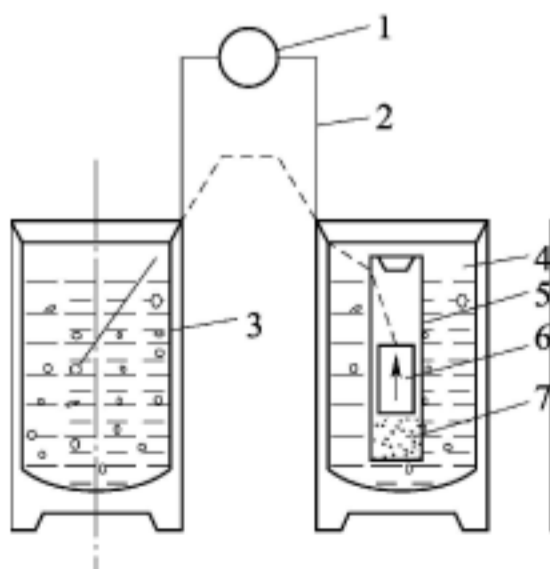


图4.13.2 冻结温度试验装置示意图

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



- (1) 零温瓶的容积为 3.57L, 内盛温度为  $0^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$  冰水混合物;
- (2) 低温瓶的容积为 3.57L, 内盛低融冰晶混合物, 温度以  $-7.6^{\circ}\text{C}$  为宜;
- (3) 数字电压表的量程 2mV, 最小分度值为  $1\mu\text{V}$ ;
- (4) 热电偶由铜和康铜线材制成线径常用 0.2mm;
- (5) 塑料管采用硬质聚氯乙烯管, 内径为 5cm, 壁厚为 5mm, 长为 25cm, 管底密封;
- (6) 试样杯用黄铜制成, 直径为 3.5cm, 高为 5cm, 带有杯盖。

#### 4.13.3 试验应按下列步骤进行:

(1) 原状土土样制备时, 按自然沉积方向放置土样, 从土样筒取出土样; 试样杯内壁涂一薄层凡士林, 杯口向下放在土样上, 将试样杯垂直下压, 并用切土刀沿杯外壁切削土样, 边压边削至土样高出试样杯, 用钢丝锯整平杯口, 擦净外壁, 盖上杯盖, 并取余土测定含水率; 扰动冻土试样制备时, 称取风干土样 200g, 平铺于搪瓷盘内, 按所需的加水量将纯水均匀喷洒在土样上, 充分拌匀后装入盛土器内盖紧, 润湿 24h, 砂土的润湿时间酌减; 将配制好的土样装入试样杯中, 以装实装满为度, 盖上杯盖;

(2) 将热电偶的测温端插入试样中心, 杯盖周侧用硝基漆密封;

(3) 零温瓶内装入用纯水制成直径小于 2cm 的冰块, 倒入纯水, 使水面与冰块面相平, 插入热电偶零温端;

(4) 低温瓶内装入用 2mol/L 氯化钠溶液制成径小于 2cm 的盐冰块, 倒入相同浓度的氯化物溶液, 使之与冰块面相平;

(5) 将封好底且内装 5cm 高干砂的塑料管插入低温瓶内, 把试样杯放入塑料管内; 分别用橡皮塞和瓶盖密封塑料管口和低温瓶口;

(6) 将热电偶测定端与数字电压表相连, 每分钟测量一次热电势, 当电势值突然减小并连续 3 次稳定在某一数值, 相应的温度即为冻结温度。

#### 4.13.4 冻结温度应按式(4.13.4)计算并绘制温度和时间过程曲线:

$$T = \frac{V}{K} \quad (4.13.4)$$

式中  $T$ ——冻结温度( $^{\circ}\text{C}$ );

$V$ ——热电势跳跃后的电压稳定值( $\mu\text{V}$ );

$K$ ——热电偶的标定系数( $^{\circ}\text{C}/\mu\text{V}$ )。

#### 4.13.5 冻结温度试验的记录格式可采用附录 A 中表 A.0.18。

### 4.14 未冻含水率试验

4.14.1 未冻含水率试验可用于黏性土和砂土。

4.14.2 主要仪器设备应符合第 4.13.2 条的规定。

#### 4.14.3 试验应按下列步骤进行:

(1) 称取风干土样 200g, 平铺于搪瓷盘内, 按所需的加水量将纯水均匀喷洒在土样上, 充分拌匀后装入盛土器内盖紧, 润湿 24h, 砂土的润湿时间酌减; 按上述方法制备 3 个试样, 其中 1 个试样按所需的加水量加纯水制备, 另 2 个试样的加水量使试样处于 10mm



液限和塑限状态作为初始含水率;将配制好的土装入试样杯中,以装实装满为度,盖上杯盖;

(2)将制备好的试样按照第4.13.3条第(2)项~第(6)项的步骤进行试验。

**4.14.4** 未冻含水率应按式(4.14.4-1)~式(4.14.4-3)计算:

$$w_u = AT_f^{-B} \quad (4.14.4-1)$$

$$A = w_L T_L^B \quad (4.14.4-2)$$

$$B = \frac{\ln w_L - \ln w_p}{\ln T_p - \ln T_L} \quad (4.14.4-3)$$

式中  $w_u$ ——未冻含水率(%);

A、B——与土的性质有关的常数;

$T_f$ ——冻结温度(冰点)绝对值(°C);

$w_L$ ——液限(%);

$T_L$ ——液限试样的冻结温度绝对值(°C);

$w_p$ ——塑限(%);

$T_p$ ——塑限试样的冻结温度绝对值(°C)。

**4.14.5** 以未冻含水率为纵坐标,冻结温度为横坐标,在双对数纸上绘制关系曲线(图4.14.5);从曲线上可查得需测试样的冻结温度相对应的含水率,即为未冻含水率。

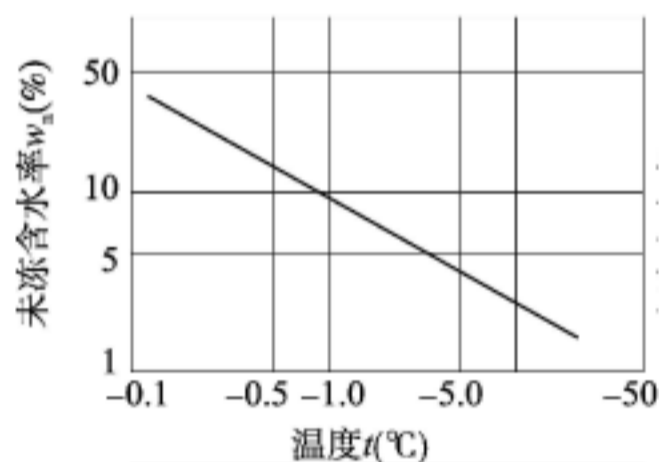


图4.14.5 未冻含水率与温度的关系

**4.14.6** 未冻含水率2次平行试验的差值,在0°C~ -3°C范围内不应超过2%,低于-3°C不应超过1%。

**4.14.7** 未冻含水率试验的记录格式可采用附录A中表A.0.19。

## 4.15 有机质含量试验

**4.15.1** 有机质含量不大于15%的土可采用重铬酸钾容量法有机质含量。

**4.15.2** 主要仪器设备应包括分析天平、油浴锅、加热设备、温度计、酸式滴定管、小漏斗、硬质试管、试管夹、锥形瓶、洗瓶、玻璃棒、容量瓶、干燥器、0.15mm筛子;分析天平、油浴锅、加热设备、温度计应符合下列规定:

(1)分析天平的最小分度值不大于0.0001g;

(2)油浴锅带铁丝笼,内盛植物油;

(3)加热设备包括电炉、电热鼓风干燥箱;

(4) 温度计测量范围为  $0^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$ , 最小分度值为  $0.5^{\circ}\text{C}$ 。

#### 4.15.3 试验所用试剂应符合下列规定:

(1) 制备重铬酸钾标准溶液时, 用分析天平称取经  $105^{\circ}\text{C} \sim 110^{\circ}\text{C}$  烘干并研磨细的重铬酸钾 ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ )  $44.1231\text{g}$ , 溶于  $800\text{ml}$  纯水中, 必要时加热, 缓慢加入浓硫酸  $1000\text{ml}$ , 边加入边搅拌, 冷却后倒入  $2000\text{ml}$  容量瓶中, 用纯水稀释至  $2000\text{ml}$ ; 此标准溶液浓度为  $0.075\text{mol/L}$ ;

(2) 制备硫酸亚铁或硫酸亚铁铵标准溶液时, 称取硫酸亚铁 ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )  $56\text{g}$  或硫酸亚铁铵 ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot \text{FeSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )  $80\text{g}$ , 溶于适量纯水中, 加入  $3\text{mol/L}$  硫酸溶液  $30\text{ml}$ , 用纯水稀释至  $1000\text{ml}$ , 密封贮于棕色瓶中;

(3) 制备邻啡罗啉指示剂时, 称取邻啡罗啉  $1.485\text{g}$  和硫酸亚铁  $0.695\text{g}$  溶于  $100\text{ml}$  纯水中, 密封贮于棕色瓶中。

4.15.4 标准溶液标定时, 应准确取重铬酸钾标准溶液 3 份, 每份  $10\text{ml}$ , 分别注入锥形瓶中, 用纯水稀释至  $60\text{ml}$  左右, 分别加入邻啡罗啉指示剂  $3 \sim 5$  滴, 用硫酸亚铁或硫酸亚铁铵标准溶液滴定, 使溶液由黄色经绿突变至橙红色为止, 按式 (4.15.4) 计算硫酸亚铁 (或硫酸亚铁铵) 标准溶液的浓度, 计算结果应保留至  $0.0001\text{mol/L}$ , 取 3 份结果的算术平均值。

$$c_{\text{FeSO}_4} = \frac{c_{\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7} V_{\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7}}{V_{\text{FeSO}_4}} \quad (4.15.4)$$

式中  $c_{\text{FeSO}_4}$  ——硫酸亚铁标准溶液的浓度 ( $\text{mol/L}$ );

$V_{\text{FeSO}_4}$  ——滴定硫酸亚铁用量 ( $\text{ml}$ );

$c_{\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7}$  ——重铬酸钾浓度 ( $\text{mol/L}$ );

$V_{\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7}$  ——重铬酸钾体积 ( $\text{ml}$ )。

#### 4.15.5 试验应按下列步骤进行:

(1) 用分析天平称取剔除植物根并通过  $0.15\text{mm}$  筛的风干试样  $0.1\text{g} \sim 0.5\text{g}$ , 放入干燥的试管底部, 用滴定管缓慢滴入重铬酸钾标准溶液  $10.00\text{ml}$ , 摇匀, 于试管口插入一小漏斗, 将蒸出的水汽冷凝;

(2) 将试管插入铁丝笼中, 置于  $190^{\circ}\text{C}$  左右的油浴锅内, 试管内的液面低于油面, 温度控制在  $170^{\circ}\text{C} \sim 180^{\circ}\text{C}$ , 待试管内试液沸腾时开始计时, 煮沸  $5\text{min}$ , 取出稍冷, 擦净试管外部油液;

(3) 将试管内试液倒入锥形瓶中, 用纯水洗净试管内部及小漏斗, 并使试液控制在  $60\text{ml} \sim 70\text{ml}$ , 加入邻啡罗啉指示剂  $3 \sim 5$  滴, 用硫酸亚铁或硫酸亚铁铵标准溶液滴定, 当溶液由黄色经绿色突变至橙红色时为止, 记录标准溶液用量, 保留至  $0.01\text{ml}$ ;

(4) 以纯砂代替试样进行空白试验, 按上述步骤操作, 记录硫酸亚铁标准溶液用量。

4.15.6 有机质含量可按式 (4.15.6) 计算, 计算结果保留至  $0.01\%$ , 平行误差不应大于  $0.05\%$ , 取算术平均值。

$$O_m = \frac{c_{\text{FeSO}_4} (V'_{\text{FeSO}_4} - V_{1\text{FeSO}_4}) \times 0.003 \times 1.724 \times 1.1 \times 100}{m_d} \quad (4.15.6)$$



式中  $O_m$ ——有机质含量(%)；

$c_{\text{FeSO}_4}$ ——硫酸亚铁标准溶液浓度(mol/L)；

$V'_{\text{FeSO}_4}$ ——空白滴定硫酸亚铁用量(ml)；

$V_{1\text{FeSO}_4}$ ——试样测定硫酸亚铁用量(ml)；

$m_d$ ——土样干质量(g)。

**4.15.7** 有机质含量试验的记录格式可采用附录 A 中表 A.0.20。

## 4.16 岩石颗粒密度试验和块体密度试验

**4.16.1** 岩石颗粒密度试验可采用比重瓶法；岩石块体密度试验可采用量积法、水中称量法或蜡封法；凡能制备成规则试件的各类岩石，宜采用量积法；除遇水崩解、溶解和干缩湿胀性岩石外，均可采用水中称量法；不能用量积法或水中称量法进行测定的岩石宜采用蜡封法。

**4.16.2** 颗粒密度试验应符合下列规定。

**4.16.2.1** 主要仪器设备应包括试件制备设备、电热鼓风干燥箱、天平、比重瓶、砂浴、恒温水槽、真空抽气设备、干燥器、锥形玻璃漏斗、瓷皿、滴管、中骨匙和温度计等；试件制备设备、电热鼓风干燥箱、天平、比重瓶和干燥器应满足下列要求：

- (1) 试件制备设备包括轧石机、球磨机、瓷研钵或玛瑙研钵、磁铁块和孔径为 0.25mm 的筛；
- (2) 电热鼓风干燥箱能控制恒温；
- (3) 天平的最小分度值不大于 0.01g；
- (4) 比重瓶为短颈量瓶，容积为 100ml；
- (5) 干燥器内装氯化钙或硅胶等干燥剂。

**4.16.2.2** 试样粉碎前应描述岩石名称、颜色、矿物成分、结构、风化程度、胶结物性质等，记录岩石的粉碎方法。

**4.16.2.3** 试样制备时，应取代表性岩石试样在小型轧石机上初碎或手工用钢锤捣碎，再置于球磨机中进一步磨碎，然后用研钵研细，使之全部粉碎成能通过 0.25mm 筛孔的岩粉，用磁铁吸去铁屑。

**4.16.2.4** 试验应按下列步骤进行：

- (1) 将制备好的岩粉放在瓷皿中，置于电热鼓风干燥箱内，在 105℃ ~ 110℃ 的恒温下烘至恒重，烘干时间为 6h ~ 12h，然后放入干燥器内冷却至室温备用；
- (2) 用四分法取两份岩粉，从每份试样中称取 15g，用漏斗灌入洗净烘干的比重瓶中，注入试液至瓶的 1/2 处，摇动比重瓶使岩粉分散；
- (3) 使用纯水作试液时，采用煮沸法或真空抽气法排出气体；使用煤油作试液时，采用真空抽气法排出气体；采用煮沸法排出气体时，煮沸时间自悬液沸腾时算起，不少于 1h；采用真空抽气法排出气体时，抽气时间维持 1h ~ 2h，直至无气泡逸出为止；

(4) 将经过排出气体的比重瓶取出擦干，冷却至室温，向比重瓶中注入已排出气体且同温的试液，使接近满瓶，置于 20℃ ± 2℃ 恒温水槽内，待比重瓶内温度稳定，上部悬液澄



清后,塞好瓶塞,使多余试液自瓶塞毛细孔中溢出;从恒温水槽内取出比重瓶,将瓶外擦干,立即称瓶、试液和岩粉的总质量,测定瓶内试液的温度。

**4.16.2.5** 岩石的颗粒密度应按式(4.16.2)计算,计算值保留至 $0.01\text{g}/\text{cm}^3$ 。

$$\rho_s = \frac{m_d}{m_1 + m_d - m_2} \cdot \rho_0 \quad (4.16.2)$$

式中  $\rho_s$ ——岩石颗粒密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$m_d$ ——干岩粉质量(g);

$m_1$ ——瓶、试液总质量(g);

$m_2$ ——瓶、试液、岩粉总质量(g);

$\rho_0$ ——与试验温度同温的试液密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

**4.16.2.6** 颗粒密度试验应进行平行测定,两次测定的差值不应大于 $0.02\text{g}/\text{cm}^3$ ,取两次测值的算术平均值。

**4.16.2.7** 颗粒密度试验记录格式可采用附录 A 中表 A.0.21。

**4.16.3** 采用量积法测定岩石块体密度试验时应符合下列规定。

**4.16.3.1** 主要仪器设备应包括试件制备设备、电热鼓风干燥箱、天平、游标卡尺、真空抽气设备、水中称量装置、干燥器等;试件制备设备、电热鼓风干燥箱、天平、游标卡尺应满足下列要求:

- (1) 试件制备设备包括钻石机、切石机、磨石机、砂轮机;
- (2) 电热鼓风干燥箱能控制恒温;
- (3) 天平的最大称量为 $100\text{g} \sim 500\text{g}$ ,最小分度值不大于 $0.01\text{g}$ ;
- (4) 游标卡尺的精度精确至 $0.02\text{mm}$ 。

**4.16.3.2** 试件的饱和应按下列方法进行:

(1) 采用自由浸水法饱和试件时,按第 4.1 节的规定自由吸水 48h 后,取出试件并沾去表面水分称量;

(2) 采用煮沸法饱和试件时,按第 4.1 节的规定煮沸后,放置在原容器中冷却至室温,取出并沾去表面水分称量;

(3) 采用真空抽气法饱和试件时,按第 4.1 节的规定抽气后,置于原容器中,在大气压力下静置 4h,取出并沾去表面水分称量。

**4.16.3.3** 试验应按下列步骤进行:

(1) 试件直径或边长不小于 $50\text{mm}$ ,两端面不平整度误差不大于 $0.05\text{mm}$ ,沿试件高度、直径或边长的误差不大于 $0.3\text{mm}$ ;每组试件制备不少于 3 块,不允许缺棱掉角;

(2) 试件描述内容包括岩石名称、颜色、矿物成分、结构、风化程度、胶结物性质等,节理裂隙的发育程度及其分布、试件的形态;

(3) 量测试件尺寸时,用游标卡尺量测试件两端和中间三个断面上相互垂直的两个直径或边长,按平均值计算截面积;圆柱体试件用游标卡尺量测互相垂直的直径与圆周交点四点和中心点的五个高度,立方体或方柱体试件用游标卡尺量测边长的中点和中心点的五个高度;计算结果取平均值;

(4) 测定天然密度时,在保持天然湿度的条件下,岩样开封后立即加工试件和称量;

(5) 测定饱和密度时,按第 4.16.3.2 款的规定进行饱和并称量;

(6) 测定干密度时,将试件置于电热鼓风干燥箱内,在 105℃ ~ 110℃ 的恒温下烘 24h,取出放入干燥器内冷却至室温,称干试件质量。

**4.16.3.4** 岩石的块体密度应按式(4.16.3-1) ~ 式(4.16.3-3)计算,计算结果保留至 0.01g/cm<sup>3</sup>。

$$\rho_0 = \frac{m_0}{A \cdot H} \quad (4.16.3-1)$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{A \cdot H} \quad (4.16.3-2)$$

$$\rho_d = \frac{m_d}{A \cdot H} \quad (4.16.3-3)$$

式中  $\rho_0$ ——天然密度(g/cm<sup>3</sup>);

$m_0$ ——试件的天然质量(g);

$A$ ——试件截面积(cm<sup>2</sup>);

$H$ ——试件高度(cm);

$\rho_s$ ——饱和密度(g/cm<sup>3</sup>);

$m_s$ ——试件强制饱和后的质量(g);

$\rho_d$ ——干密度(g/cm<sup>3</sup>);

$m_d$ ——试件烘干后的质量(g)。

**4.16.3.5** 量积法试验的记录格式可采用附录 A 中表 A.0.22。

**4.16.4** 采用水中称量法测定岩石块体密度时应符合下列规定。

**4.16.4.1** 主要仪器设备应包括电热鼓风干燥箱、天平、水中称量装置、真空抽气设备、干燥器及温度计等;电热鼓风干燥箱和天平应满足下列要求:

(1) 电热鼓风干燥箱能控制恒温;

(2) 天平的最小分度值不大于 0.01g。

**4.16.4.2** 试验应按下列步骤进行:

(1) 取样并进行试件描述,描述内容同第 4.16.3.3 款第(2)项;

(2) 测天然密度时,取样后对所取试件立即进行称量;

(3) 按第 4.16.3.2 款的规定对试件进行饱和,将经自由浸水、煮沸或真空抽气饱和的试件,置于水中称量装置中,称量试件在水中的质量,并测量记录水温;

(4) 将试件置于电热鼓风干燥箱内,在 105℃ ~ 110℃ 的恒温下烘 24h,取出放入干燥器内冷却至室温,称干试件质量。

**4.16.4.3** 岩石的块体密度应按式(4.16.4-1) ~ 式(4.16.4-3)计算:

$$\rho_0 = \frac{m_0}{m_s - m_w} \cdot \rho_{wT} \quad (4.16.4-1)$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_s - m_w} \cdot \rho_{wT} \quad (4.16.4-2)$$



$$\rho_d = \frac{m_d}{m_s - m_w} \cdot \rho_{wT} \quad (4.16.4-3)$$

式中  $\rho_0$ ——天然密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )；  
 $m_0$ ——试件的天然质量( $\text{g}$ )；  
 $m_s$ ——试件强制饱和后的质量( $\text{g}$ )；  
 $m_w$ ——试件强制饱和后在纯水中的质量( $\text{g}$ )；  
 $\rho_{wT}$ ——不同水温时纯水的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )；  
 $\rho_s$ ——饱和密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )；  
 $\rho_d$ ——干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )；  
 $m_d$ ——试件烘干后的质量( $\text{g}$ )。

**4.16.4.4** 记录格式可采用附录 A 中表 A.0.23。

**4.16.5** 采用蜡封法测定岩石块体密度时应符合下列规定。

**4.16.5.1** 主要仪器设备应包括蜡封设备、电热鼓风干燥箱、天平、干燥器、温度计等；蜡封设备、电热鼓风干燥箱和天平应满足下列要求：

- (1) 蜡封设备包括蜡、烧杯、细线、针及熔蜡加热器等；
- (2) 电热鼓风干燥箱能控制恒温；
- (3) 天平的最小分度值不大于 0.01g。

**4.16.5.2** 试验应按下列步骤进行：

(1) 取具代表性的岩石，将其加工成边长 40mm ~ 60mm 的浑圆状岩块，每组试件制备不少于 3 块；

(2) 试件的描述，内容同第 4.16.3.3 款第(2)项；

(3) 测天然密度时，对所取试件立即进行称量；将试件置于电热鼓风干燥箱中，在 105℃ ~ 110℃ 的恒温下烘 24h，取出放入干燥器内冷却至室温，称干试件质量；

(4) 将蜡加热至刚过熔点，烘干试件系上细线，持线将试件徐徐浸入其中，待全部浸入后立即将试样提出，检查试样周围的蜡膜有无气泡存在，当有气泡时用热针刺破，再用蜡液填充针孔，涂平孔口，冷却后称蜡封试样质量；

(5) 用细线将蜡封试样置于天平一端，使试样浸没于盛有蒸馏水的烧杯中，注意试样避免碰触烧杯壁，称蜡封试样的水下质量，测定蒸馏水的温度；

(6) 取出试样，擦干蜡表面上的水分，在空气中称其质量；将其与第(4)项中所称质量相比，质量增加超过 0.03g，另取试样重做试验。

**4.16.5.3** 岩石的块体密度应按式(4.16.5-1)和式(4.16.5-2)计算，计算结果保留至 0.01g/cm<sup>3</sup>。

$$\rho_0 = \frac{m_0}{\frac{m_1 - m_2}{\rho_w} - \frac{m_1 - m_d}{\rho_N}} \quad (4.16.5-1)$$

$$\rho_d = \frac{m_d}{\frac{m_1 - m_2}{\rho_w} - \frac{m_1 - m_d}{\rho_N}} \quad (4.16.5-2)$$



式中  $\rho_0$ ——天然密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )；  
 $m_0$ ——试件的天然质量( $\text{g}$ )；  
 $m_1$ ——封蜡试件的质量( $\text{g}$ )；  
 $m_2$ ——封蜡试件在洁净水中的质量( $\text{g}$ )；  
 $\rho_w$ ——水的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )；  
 $m_d$ ——试件的干质量( $\text{g}$ )；  
 $\rho_N$ ——石蜡的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )；  
 $\rho_d$ ——干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

**4.16.5.4** 记录格式可采用附录 A 中表 A.0.24。

#### 4.17 岩石吸水率和饱和吸水率试验

**4.17.1** 岩石吸水率和饱和吸水率试验可用于遇水不崩解、不溶解或干缩湿胀的岩石；岩石吸水率可采用自由浸水法测定，饱和吸水率可采用煮沸法或真空抽气法测定。

**4.17.2** 主要仪器设备应包括天平、电热鼓风干燥箱、真空抽气设备、煮沸水槽、岩石试件加工设备；天平、电热鼓风干燥箱和岩石试件加工设备应满足下列要求：

- (1) 天平的最小分度值不大于  $0.01\text{g}$ ；
- (2) 电热鼓风干燥箱能控制温度；
- (3) 岩石试件加工设备包括钻石机、磨石机、切石机等。

**4.17.3** 试件的制备应符合下列规定：

- (1) 标准试件采用圆柱体或方柱体，直径或边长为  $48\text{mm} \sim 54\text{mm}$ ，高径比或边长比宜为  $2:1$ ；
- (2) 不规则试件采用边长为  $40\text{mm} \sim 60\text{mm}$  的浑圆形岩块；
- (3) 每组试件不少于 3 个。

**4.17.4** 试验应按下列步骤进行：

- (1) 将试件放入电热鼓风干燥箱，在  $105^\circ\text{C} \sim 110^\circ\text{C}$  温度下烘至恒重，烘干时间为  $12\text{h} \sim 24\text{h}$ ，取出置于干燥器内冷却至室温，称其质量；
- (2) 将称量后的试件置于盛水容器内，注水至试件高度的  $1/4$  处，以后每隔  $2\text{h}$  分别注水至试件高度的  $1/2$  和  $3/4$  处， $6\text{h}$  后将水加至高出试件顶面  $20\text{mm}$ ，试件全部被水淹没后再自由吸水  $48\text{h}$ ；
- (3) 取出浸水试件，用湿纱布擦去试件表面水分，立即称其质量；
- (4) 按第 4.1 节有关规定采用煮沸法或真空抽气法将试件强制饱和，饱和后的试件放置在原容器中，在一个大气压力下静置  $4\text{h}$  后取出试件，用湿纱布擦去表面水分，立即称其质量。

**4.17.5** 试验成果的整理应符合下列规定：

- (1) 按式(4.17.5-1)和式(4.17.5-2)分别计算岩石吸水率、饱和吸水率，计算值保留至  $0.01\%$ ；

$$w_a = \frac{m_1 - m_d}{m_d} \times 100 \quad (4.17.5-1)$$

$$w_{sa} = \frac{m_2 - m_d}{m_d} \times 100 \quad (4.17.5-2)$$

式中  $w_a$ ——岩石吸水率(%)；

$m_1$ ——自由吸水至恒重时试件质量(g)；

$m_d$ ——烘干至恒重时试件质量(g)；

$w_{sa}$ ——岩石饱和吸水率(%)；

$m_2$ ——强制饱和吸水后试件质量(g)；

(2) 饱水系数按式(4.17.5-3)计算,试验结果保留至0.01；

$$K_w = \frac{w_a}{w_{sa}} \quad (4.17.5-3)$$

式中  $K_w$ ——饱水系数；

(3) 组织均匀的试件,取试验结果的平均值作为测定值;组织不均匀的试件,取试验结果的平均值作为测定值,同时列出每个试件的试验结果；

(4) 记录格式采用附录 A 中表 A.0.25。

#### 4.18 岩石耐崩解性试验

4.18.1 岩石耐崩解性试验可用于质地疏松岩石、风化岩石、黏土岩类岩石等。

4.18.2 主要仪器设备应包括电热鼓风干燥箱、天平、耐崩解性试验仪、温度计、干燥器；电热鼓风干燥箱、天平和耐崩解性试验仪应满足下列要求：

(1) 电热鼓风干燥箱能控制温度；

(2) 天平最大称量大于5000g,最小分度值不大于0.1g；

(3) 耐崩解性试验仪由动力装置、圆柱形筛筒和水槽组成,其中圆柱形筛筒长为100mm、直径为140mm、筛孔直径为2mm,如图4.18.2所示。

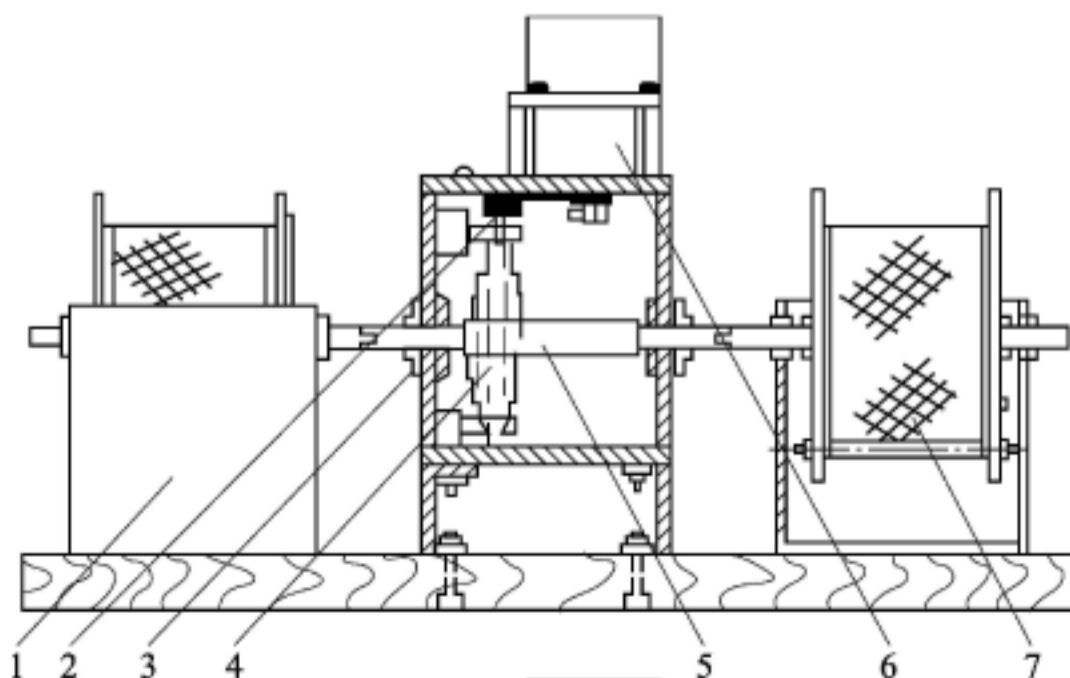


图 4.18.2 耐崩解性试验仪

1-水槽;2-蜗杆;3-轴套;4-蜗轮;5-大轴;6-马达;7-筛筒

### 4.18.3 试件的制备应符合下列规定。

4.18.3.1 在现场采取的试样应密封保持天然含水率。

4.18.3.2 试样制成每块质量为 40g ~ 60g 的浑圆状岩块试件, 每组试验试件的数量不应少于 10 个。

4.18.3.3 试件描述应包括岩石名称、颜色、矿物成分、结构、风化程度、胶结物性质等。

### 4.18.4 试验应按下列步骤进行:

(1) 将试件装入耐崩解试验仪的圆柱形筛筒内, 放入电热鼓风干燥箱, 在 105℃ ~ 110℃ 的温度下烘干不少于 24h, 在干燥器内冷却至室温称量;

(2) 将装有试件的圆柱形筛筒放在水槽内, 向水槽内注入纯水, 使水位在转动轴下约 20mm; 圆柱形筛筒以 20r/min 的转速转动 10min, 将圆柱形筛筒和残留试件在 105℃ ~ 110℃ 的温度下烘干至恒量, 在干燥器内冷却至室温称量;

(3) 重复第(2)项的步骤, 求得第二次循环后的圆柱形筛筒和残留试件质量; 根据需要可以进行 5 个循环;

(4) 试验过程中, 水温保持在 20℃ ± 2℃ 范围内;

(5) 试验结束后, 对残留试件、水的颜色和水中沉积物进行描述; 根据需要, 对水中沉积物进行颗粒分析、界限含水率测定和黏土矿物分析。

### 4.18.5 试验成果的整理应按下列方法进行:

(1) 根据式(4.18.5)计算岩石耐崩解性指数, 计算值保留至 0.1% ;

$$I_{d2} = \frac{m_{t2} - m_{d0}}{m_{d1} - m_{d0}} \times 100 \quad (4.18.5)$$

式中  $I_{d2}$ ——岩石(二次循环)耐崩解性指数(%);

$m_{t2}$ ——圆柱筛筒质量与第二次循环后残留试样烘干质量的和(g);

$m_{d0}$ ——圆柱筛筒烘干质量(g);

$m_{d1}$ ——圆柱筛筒质量与原试样烘干质量的和(g);

(2) 记录格式采用附录 A 中表 A.0.26。

## 4.19 岩石膨胀试验

4.19.1 岩石膨胀试验包括岩石自由膨胀率试验、岩石侧向约束膨胀率试验和保持体积不变条件下的岩石膨胀压力试验, 岩石自由膨胀率试验可用于遇水不易崩解的岩石, 岩石侧向约束膨胀率试验和保持体积不变条件下的岩石膨胀压力试验可用于各类岩石。

4.19.2 试件应在现场采取, 并保持天然含水状态, 不得采用爆破或湿钻法取样。

### 4.19.3 试验应包括下列主要仪器设备:

(1) 钻石机、切石机、磨石机等;

(2) 测量平台;

(3) 自由膨胀率试验仪(图 4.19.3-1);



- (4) 侧向约束膨胀率试验仪(图 4.19.3-2);  
 (5) 膨胀压力试验仪(图 4.19.3-3);  
 (6) 干湿温度计。

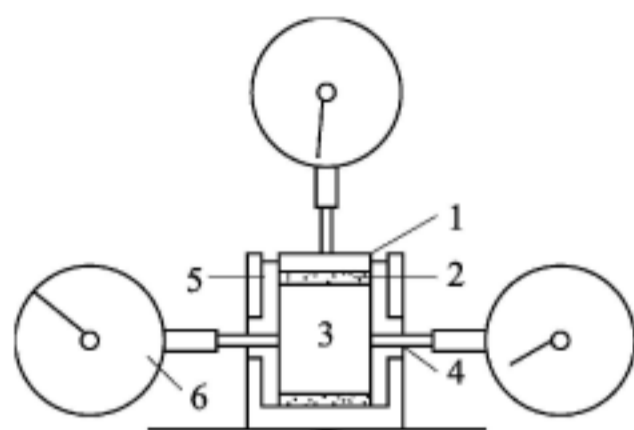


图 4.19.3-1 自由膨胀率试验仪

1-金属板;2-透水板;3-岩石试件;4-橡胶板;5-水;  
 6-指示表

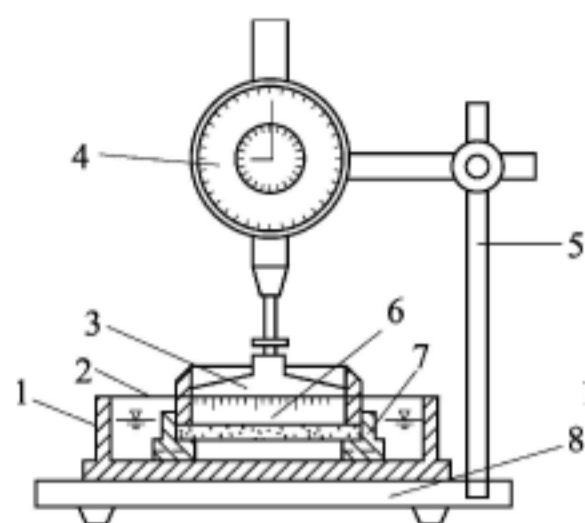


图 4.19.3-2 侧向约束膨胀率试验仪

1-盛水器;2-环刀;3-传递活塞;4-测微表;5-表架;  
 6-试样;7-底座;8-底盘

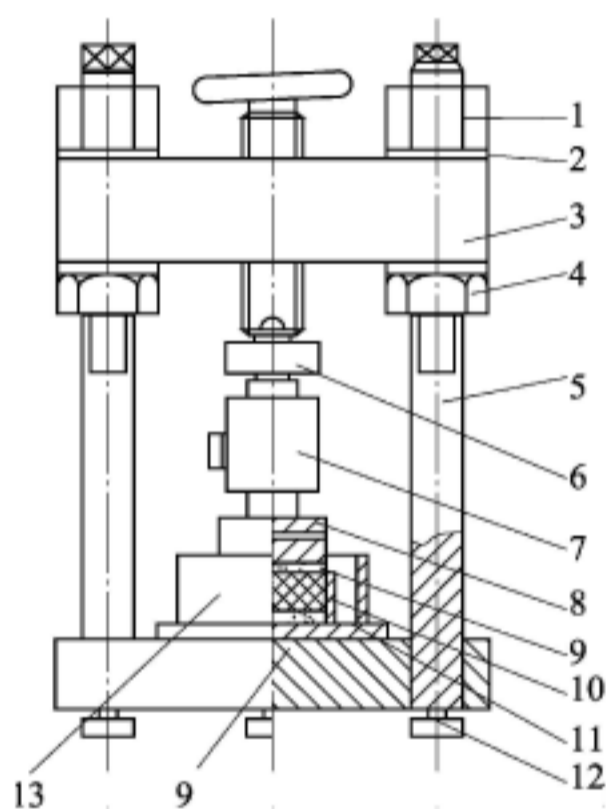


图 4.19.3-3 岩石膨胀压力试验仪

1-螺母;2-平垫圈;3-横梁;4-螺母;5-摆柱;6-接头;7-压力传感器;8-上压板;9-金属透水板;10-试件;11-套环;12-调整件;13-容器

#### 4.19.4 试件的制备应符合下列规定。

**4.19.4.1** 自由膨胀率试验的试件为圆柱形时,其直径宜为 48mm ~ 65mm,试件高度宜等于直径,两端面应平行;形状为正方体时,其边长宜为 48mm ~ 65mm,各相对面应平行。

**4.19.4.2** 侧向约束膨胀率试验的试件应为圆柱体,侧向约束膨胀率试验和保持体积不变条件下的膨胀压力试验的试件高度不应小于 20mm,且大于组成岩石最大矿物颗粒直径的 10 倍,两端面应平行,试件直径宜为 50mm ~ 65mm,同一膨胀方向每组试验试件的数量应为 3 个。

**4.19.4.3** 试件应采用干法加工,天然含水率的变化不应超过 1%。

#### 4.19.4.4 试件描述应包括下列内容:

- (1) 岩石名称、颜色、矿物成分、结构、风化程度、胶结物性质等;
- (2) 膨胀变形和加载方向分别与层理、片理、节理裂隙之间的关系;
- (3) 试件加工方法。

#### 4.19.5 自由膨胀率试验应按下列步骤进行:

- (1) 将试件放入自由膨胀率试验仪内,在试件上下分别放置透水板,顶部放置一块金属板;
- (2) 在试件上部和四侧对称的中心部位分别安装千分表,四侧千分表与试件接触处,宜放置一块薄铜片;
- (3) 读记千分表读数,每隔 10min 读记 1 次,直至连续 3 次读数不变;
- (4) 缓慢地向盛水容器内注入纯水,直至淹没上部透水板并立即读数;
- (5) 在第 1 小时内,每隔 10min 测读变形 1 次,以后每隔 1h 测读变形 1 次,直至连续 3 次读数差不大于 0.001mm 为止;浸水后试验时间不小于 48h;
- (6) 试验过程中,保持水位不变;水温变化不大于 2℃;
- (7) 试验过程中及试验结束后,详细描述试件的崩解、掉块、表面泥化或软化等现象;根据需要对试块进行矿物镜检、X 衍射分析和差热分析。

#### 4.19.6 侧向约束膨胀率试验应按下列步骤进行:

- (1) 将试件放入内壁涂有凡士林的金属套环内,在试件上下分别放置薄型滤纸和透水板;
- (2) 顶部放上固定金属荷载块并安装垂直千分表;金属荷载块的质量能对试件产生 5kPa 的持续压力;
- (3) 试验及稳定标准符合第 4.19.5 条第(3)项~第(6)项的规定;
- (4) 试验结束后,描述试件表面的泥化和软化现象;根据需要对试块进行矿物镜检、X 衍射分析和差热分析。

#### 4.19.7 保持体积不变条件下的膨胀压力试验应按下列步骤进行:

- (1) 将试件放入内壁涂有凡士林的金属套环内,在试件上下分别放置薄型滤纸和金属透水板;
- (2) 安装加压系统及量测试件变形的测表;
- (3) 使仪器各部位和试件在同一轴线上,不出现偏心荷载;
- (4) 对试件施加产生 0.01MPa 压力的荷载,测读试件变形测表读数,每隔 10min 读数 1 次,直至连续 3 次读数不变;
- (5) 缓慢地向盛水容器内注入纯水,直至淹没上部透水板;观测变形测表的变化,当变形量大于 0.001mm 时,调节所施加的荷载,保持试件厚度在整个试验过程中始终不变;
- (6) 开始时每隔 10min 读数 1 次,连续 3 次读数差小于 0.001mm 时,改为每 1h 读数 1 次;当每 1h 读数连续 3 次读数差小于 0.001mm 时,则认为稳定并记录试验荷载;浸水后总试验时间不少于 48h;

(7) 试验过程中,保持水位不变;水温变化不大于  $2^{\circ}\text{C}$ ;

(8) 试验结束后,描述试件表面的泥化和软化现象;根据需要对试块进行矿物镜检、X衍射分析和差热分析。

**4.19.8** 试验成果的整理应按下列规定进行:

(1) 按下列公式计算岩石自由膨胀率、侧向约束膨胀率、保持体积不变条件下的膨胀压力;

$$V_H = \frac{\Delta H}{H} \times 100 \quad (4.19.8-1)$$

$$V_D = \frac{\Delta D}{D} \times 100 \quad (4.19.8-2)$$

$$V_{HP} = \frac{\Delta H_1}{H} \times 100 \quad (4.19.8-3)$$

$$P_s = \frac{F}{A} \quad (4.19.8-4)$$

式中  $V_H$ ——岩石轴向自由膨胀率(%);

$\Delta H$ ——试件轴向变形值(mm);

$H$ ——试件高度(mm);

$V_D$ ——岩石径向自由膨胀率(%);

$\Delta D$ ——试件径向平均变形值(mm);

$D$ ——试件直径或边长(mm);

$V_{HP}$ ——岩石侧向约束膨胀率(%);

$\Delta H_1$ ——有侧向约束试件的轴向变形值(mm);

$P_s$ ——保持体积不变条件下的岩石膨胀压力(MPa);

$F$ ——轴向荷载(N);

$A$ ——试件截面积( $\text{mm}^2$ );

(2) 自由膨胀率、侧向约束膨胀率试验结果保留至 0.1%,保持体积不变条件下的岩石膨胀压力试验结果保留至 0.001MPa;3 个试件平行试验,分别列出每个试件的试验结果,并计算 3 个试件测试结果的平均值,计算值取 3 位有效数字;

(3) 记录格式采用附录 A 中表 A.0.27、表 A.0.28、表 A.0.29。

## 4.20 岩石冻融试验

**4.20.1** 各类岩石的冻融试验宜采用直接冻融法。

**4.20.2** 在严寒地区冻融次数应为 25 次,在寒冷地区冻融次数应为 20 次。

**4.20.3** 主要仪器设备应包括切石机、钻石机、磨石机、低温箱、天平、放大镜、电热鼓风干燥箱;低温箱、天平应满足下列要求:

(1) 低温箱能把温度控制在  $-15^{\circ}\text{C} \sim -25^{\circ}\text{C}$ ;

(2) 天平的最小分度值不大于 0.01g。



**4.20.4 试件制备应满足下列要求:**

- (1) 采用圆柱体作为标准试件,直径为 48mm ~ 54mm、高径比为 2:1;
- (2) 沿加载方向取 6 个试件,试件上、下端面要求平行且磨平,试件端面的平面度公差小于 0.05mm,端面对于试件轴线垂直度偏差不超过 0.25°。

**4.20.5 试验应按下列步骤进行:**

(1) 将试件编号,用放大镜仔细检查,并做外观描述;量出每个试件尺寸,计算受压面积;将试件放入电热鼓风干燥箱,在 105℃ ~ 110℃ 温度下烘干至恒重,烘干时间一般为 12h ~ 24h,取出放入干燥器内冷却至室温,称试件质量;

(2) 将试件采用煮沸法或真空抽气法进行饱和,然后取出擦去表面水分并称饱和试件质量;

(3) 取 3 个试件测定其饱水抗压强度,另 3 个试件做冻融试验;

(4) 将冻融试验试件放入铁盆中,每个试件之间留有一定间距;将铁盆连同试件一起放入已降温到  $-20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  以下的冰箱里,并开始计时;4h 后取出试件,放入  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  的水中融解 4h,如此反复冻融至规定次数为止;

(5) 每隔一定的冻融循环次数(或每次)详细检查各试件有无剥落、裂缝、分层及掉角现象,并记录;

(6) 称量冻融后的试件饱水质量,再将其烘干至恒重,称其质量;按抗压强度试验方法测定冻融试验后的试件饱水抗压强度。

**4.20.6 试验结果的整理应按下列要求进行:**

(1) 岩石冻融质量损失率按式(4.20.6-1)计算,结果保留至 0.1%;冻融后的质量损失率取 3 个试件试验结果的算术平均值;

$$L = \frac{m_d - m_f}{m_d} \times 100 \quad (4.20.6-1)$$

式中  $L$ ——冻融质量损失率(%);

$m_d$ ——试验前烘干试件的质量(g);

$m_f$ ——试验后烘干试件的质量(g);

(2) 岩石冻融系数按式(4.20.6-2)计算,试验结果保留至 0.01;

$$k_f = \frac{R_f}{R_s} \quad (4.20.6-2)$$

式中  $k_f$ ——岩石冻融系数(%);

$R_f$ ——冻融后试件的饱水抗压强度(MPa);

$R_s$ ——未经冻融试件的饱水抗压强度(MPa);

(3) 记录格式可采用附录 A 中表 A.0.30。

**4.21 击实试验**

**4.21.1** 击实试验可用于确定土的最大干密度与最优含水率。

**4.21.2** 击实试验的技术参数应根据工程要求和试样的最大粒径按表 4.21.2 选用。

表 4.21.2 击实试验标准技术参数

试验方法	类别	击锤质量 (kg)	锤底直径 (mm)	落高 (mm)	击实筒			护筒高度 (mm)	层数	每层击数	击实功 (kJ/m <sup>3</sup> )	最大粒径 (mm)
					内径 (mm)	筒高 (mm)	容积 (cm <sup>3</sup> )					
轻型	I-1	2.5	50	300	100	127	997	50	3	27	598.2	20
	I-2	2.5	50	300	152	170	2177	50	3	59	598.2	40
重型	II-1	4.5	50	450	100	127	997	50	5	27	2687.0	20
	II-2	4.5	50	450	152	170	2177	50	3	98	2677.2	40

**4.21.3** 当试样中最大颗粒粒径大于或等于 40mm, 并且大于或等于 40mm 粒径颗粒的含量大于 5% 时, 应采用大尺寸试筒进行击实试验。当大于 40mm 颗粒的含量大于 5% 且小于 30% 时, 应先去除大于 40mm 的颗粒, 并求得其百分率, 采用小于 40mm 部分做击实试验, 并对最大干密度和最优含水率进行校正。大尺寸试筒的最小直径应大于土样中最大颗粒粒径的 5 倍以上, 且击实试验的分层厚度应大于土样中最大颗粒粒径的 3 倍以上。

**4.21.4** 当细粒土中粒径大于等于 0.075mm 的颗粒总含量大于 40% 时, 尚应按照第 4.8 节的方法做大于等于 0.075mm 的部分土的最大干密度试验, 其结果与该土的重型击实试验结果比较, 最大干密度取两种试验结果的最大值。

**4.21.5** 主要仪器设备应包括标准击实仪、电子天平、台秤、标准筛、碾土设备、喷水设备、拌和工具、保湿设备、修土刀、推土器、电热鼓风干燥箱、称量盒和平直尺; 标准击实仪、电子天平、台秤、标准筛应符合下列规定:

(1) 标准击实仪见图 4.21.5-1 和图 4.21.5-2; 击实试验方法和相应设备的主要参数符合表 4.21.2 的规定;

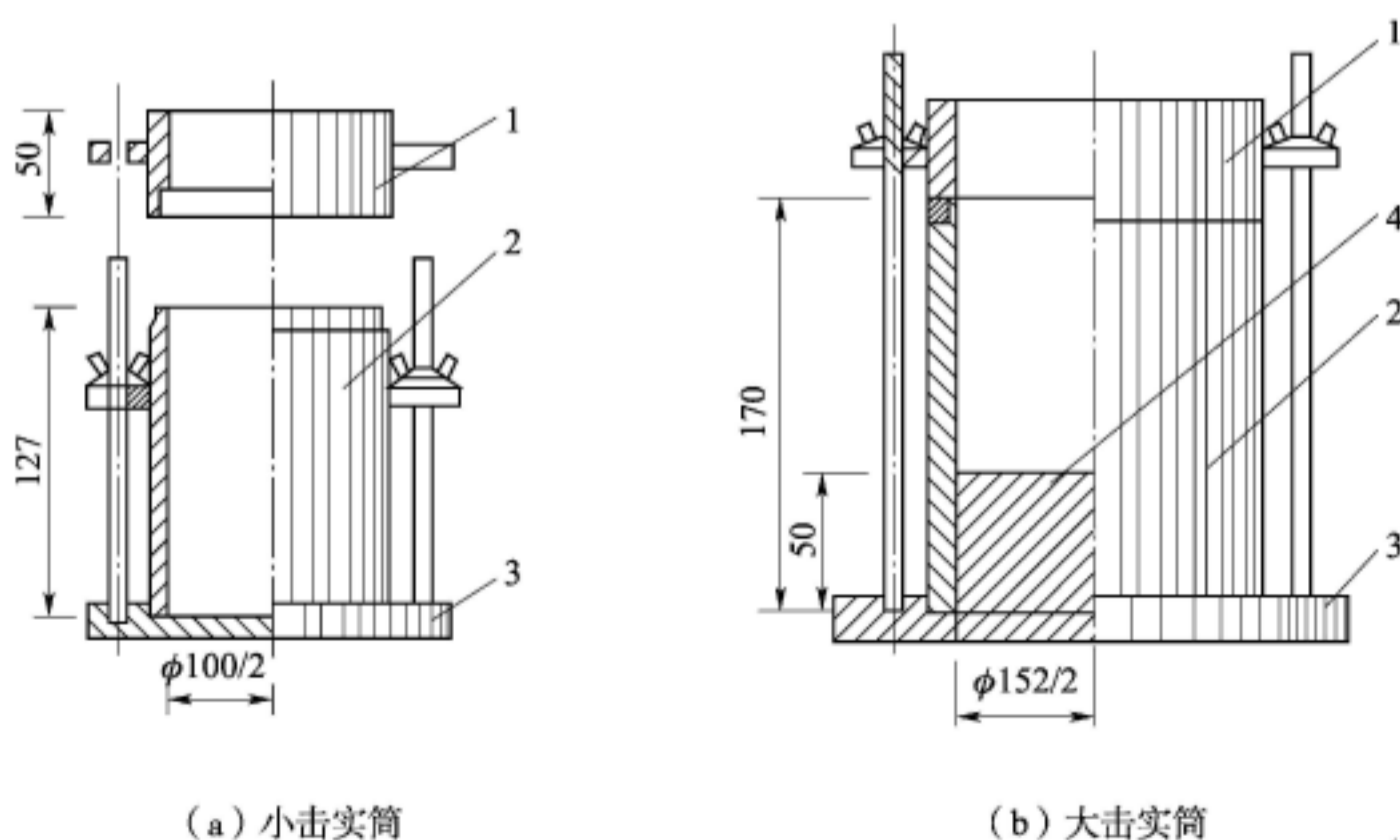


图 4.21.5-1 击实筒(单位:mm)

1-护筒;2-击实筒;3-底板;4-垫块

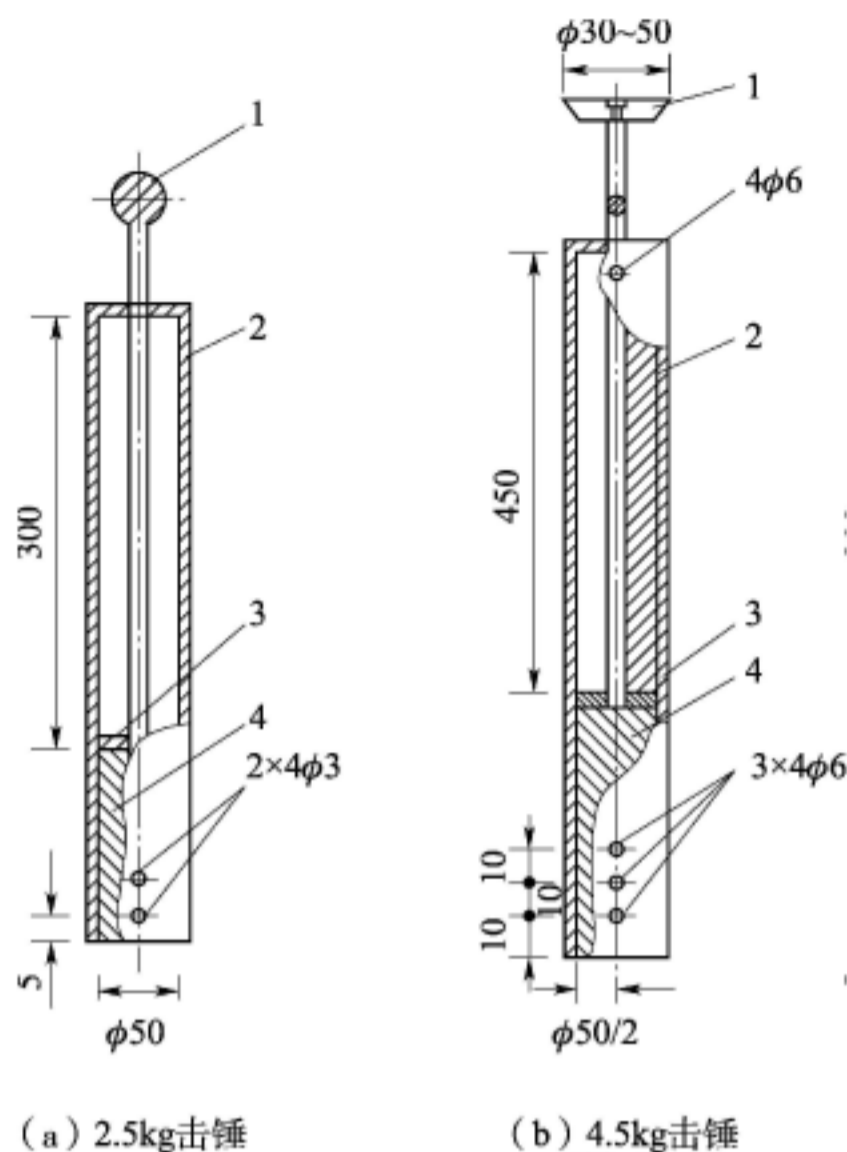


图 4.21.5-2 击锤和导杆(单位:mm)

1-提手;2-导筒;3-硬橡皮垫;4-击锤

- (2) 电子天平的最小分度值不大于 0.01g;  
 (3) 台秤最大称量为 15kg, 最小分度值不大于 1g;  
 (4) 标准筛孔径为 5mm、20mm、40mm。

#### 4.21.6 试样制备应符合下列规定。

4.21.6.1 试样制备可分为干法和湿法两种,按表 4.21.6 准备试料。

表 4.21.6 试料用量

制备方法	试筒内径(mm)	最大粒径(mm)	试料用量(kg)
干法,试样不重复使用	100	20	至少 5 个样,每个 3kg
	152	40	至少 5 个样,每个 6kg
湿法,试样不重复使用	100	20	至少 5 个样,每个 3kg
	152	40	至少 5 个样,每个 6kg

4.21.6.2 干法制备时,应采用四分法取代表性土样,风干碾碎后根据需要过 5mm、20mm 或 40mm 筛,将筛下土样拌和均匀,并测定土样的风干含水率。根据土的塑限预估最优含水率,在最优含水率附近宜选择依次相差 2%~3% 的含水率制备试样。拌匀后黏性土浸润时间不应少于 12h,砂土不应少于 2h。加水量可按式(4.21.6)计算。

$$m'_w = \frac{m_0}{1 + 0.01w_0} \times 0.01(w' - w_0) \quad (4.21.6)$$

式中  $m'_w$ ——所需加水量(g);  
 $m_0$ ——风干试样质量(g);



$w_0$ ——风干试样含水率(%)；

$w'$ ——要求达到的含水率(%)。

**4.21.6.3** 湿法制备时,应将天然含水率的试样碾碎过 5mm、20mm 或 40mm 筛,将筛下土样拌和均匀后,测定土样的天然含水率;对于高含水率土,可不过筛,拣除大于 40mm 的粗颗粒即可。按选用击实筒容积取 5 份试样,其中 1 份应保持天然含水率,其余 4 份应分别风干或加水,使含水率按 2% ~ 3% 递减。制备好的试样应完全搅拌均匀,保证水分均匀分布。

**4.21.7** 击实试验应按下列步骤进行:

(1) 称取击实筒质量并做记录;

(2) 将击实仪放在坚实的地面上,击实筒内壁和底板均匀涂一薄层润滑油,并在筒底或垫块上放置一张蜡纸或塑料薄膜,联接击实筒与底板,安装护筒;

(3) 根据选用试验类型,对每个试样分层击实;小试筒按三层法时,每层击实后的试样高度等于或略高于筒高的 1/3,按五层法时,每层击实后的试样高度等于或略高于筒高的 1/5;大试筒按三层法,先将垫块放入筒内底板上,再装入试样,每层击实后的试样高度等于或略高于筒高的 1/3;击实前先将土面整平,刨毛两层交接面的土面;击实时击锤自由垂直落下,锤迹均匀分布于试样表面;击实完成后,超出击实筒顶的试样高度,小试筒小于 5mm,大试筒小于 6mm;

(4) 卸下护筒,用直刮刀沿击实筒顶修平试样,拆除底板,试样底面超出筒外时,修平并擦净筒外壁,称筒和试样的总质量;

(5) 用推土器从击实筒内推出试样,从中心处取 2 个代表性试样测定含水率,计算至 0.1%,测定含水率用试样的数量符合表 4.21.7 规定。

表 4.21.7 测定含水率用试样的数量

最大粒径(mm)	试样质量(g)	个数
<5	15 ~ 20	2
5	约 50	2
20	约 250	2
40	约 500	2

**4.21.8** 试验资料的整理应符合下列规定。

**4.21.8.1** 击实后的干密度可按式(4.21.8-1)计算。

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0.01w} \quad (4.21.8-1)$$

式中  $\rho_d$ ——干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),保留至 0.01;

$\rho$ ——湿密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$w$ ——含水率(%)。

**4.21.8.2** 土的最大干密度和最优含水率应取干密度与含水率关系曲线(图 4.21.8)上峰值点的纵横坐标值,如果曲线不能绘出明显的峰值,应进行补点或重做。

**4.21.8.3** 试样的饱和含水率可按下式计算,绘制出饱和曲线,见图 4.21.8。

$$w_{\text{sat}} = \left( \frac{\rho_w}{\rho_d} - \frac{1}{G_s} \right) \times 100 \quad (4.21.8-2)$$

式中  $w_{\text{sat}}$ ——饱和含水率(%),保留至0.1%;  
 $\rho_w$ ——温度4℃水的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  
 $\rho_d$ ——试样的干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  
 $G_s$ ——土粒比重。

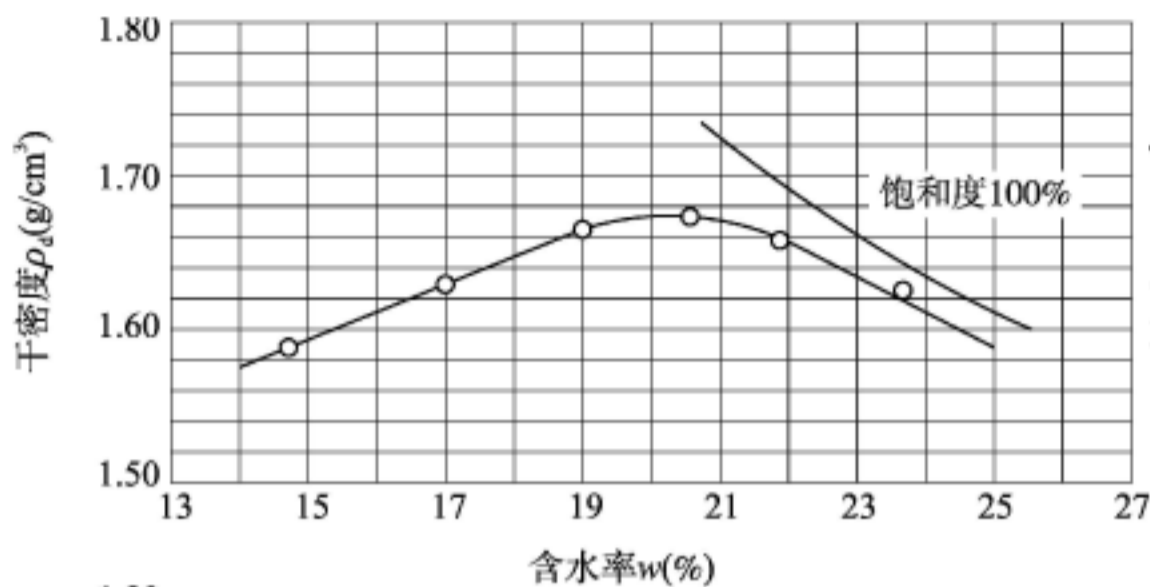


图 4.21.8 含水率与干密度的关系曲线

**4.21.8.4** 当大于40mm颗粒的含量大于5%且小于30%时,应按下列公式分别对试验所得的最大干密度和最优含水率进行校正:

(1) 试样校正最大干密度按下式计算;

$$\rho'_{\text{dmax}} = \frac{1}{\frac{1 - P_s}{\rho_{\text{dmax}}} + \frac{P_s}{\rho_w \cdot G_{s2}}} \quad (4.21.8-3)$$

式中  $\rho'_{\text{dmax}}$ ——校正后的最大干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),保留至0.01;

$P_s$ ——试样中粒径大于40mm颗粒的含量,用小数表示;

$\rho_{\text{dmax}}$ ——粒径小于40mm的试样试验所得的最大干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$\rho_w$ ——温度4℃水的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$G_{s2}$ ——粒径大于40mm颗粒的毛体积比重,保留至0.01;

(2) 试样校正最优含水率按下式计算:

$$w'_{\text{opt}} = w_{\text{opt}}(1 - P_s) + P_s w_2 \quad (4.21.8-4)$$

式中  $w'_{\text{opt}}$ ——校正后试验的最优含水率(%),保留至0.1%;

$w_{\text{opt}}$ ——粒径小于40mm的试样试验所得的最优含水率(%);

$w_2$ ——粒径大于40mm颗粒的吸着含水率(%).

**4.21.8.5** 试验记录格式可采用附录A中表A.0.31。

## 4.22 承载比试验

**4.22.1** 承载比试验可用于各种土和其他材料在规定的试样筒内制样后的试验。

**4.22.2** 试样的粒径宜控制在20mm以内,最大粒径不得超过40mm。

**4.22.3** 主要仪器设备应包括试样筒、击锤、标准筛、膨胀量测定装置、贯入仪或其他荷载装置、带调节杆的多孔板、荷载块、百分表、水槽、导筒、台秤、电子天平、秒表、刮刀、修土

刀、直尺、脱模器；试样筒、击锤、标准筛、膨胀量测定装置、贯入仪或其他荷载装置、带调节杆的多孔板、荷载块、百分表、水槽应符合下列规定：

(1) 试样筒为内径 152mm、高 170mm 的金属圆筒，护筒高度为 50mm；筒内垫块直径为 151mm，高为 50mm；试样筒的形式和尺寸(图 4.22.3-1)与本标准重型击实试验大击实筒相同；

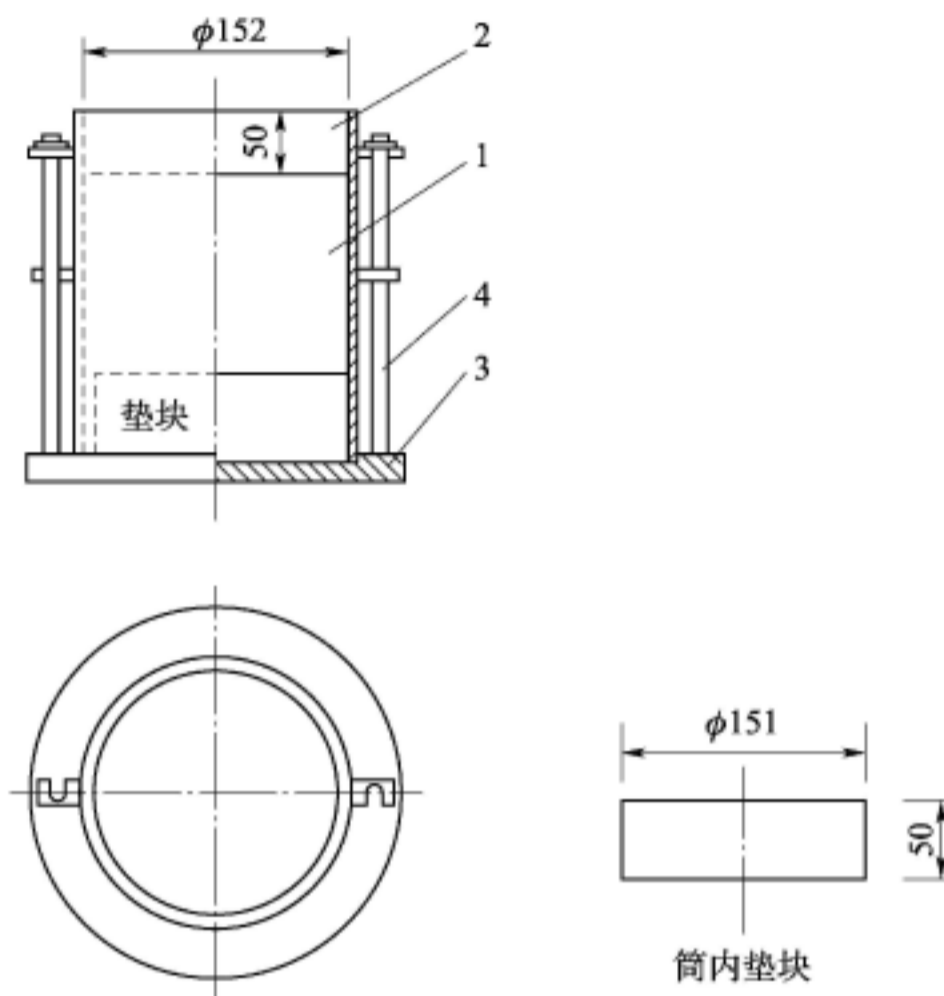


图 4.22.3-1 承载比试筒(单位:mm)

1-试筒;2-护筒;3-夯击底板;4-拉杆

(2) 击锤锤底直径为 50mm，总质量为 4.5kg，落距为 450mm；击锤的形式和尺寸与重型击实试验法相同；

(3) 标准筛的孔径为 5mm、20mm、40mm；

(4) 膨胀量测定装置(图 4.22.3-2)，由百分表和三脚架组成；

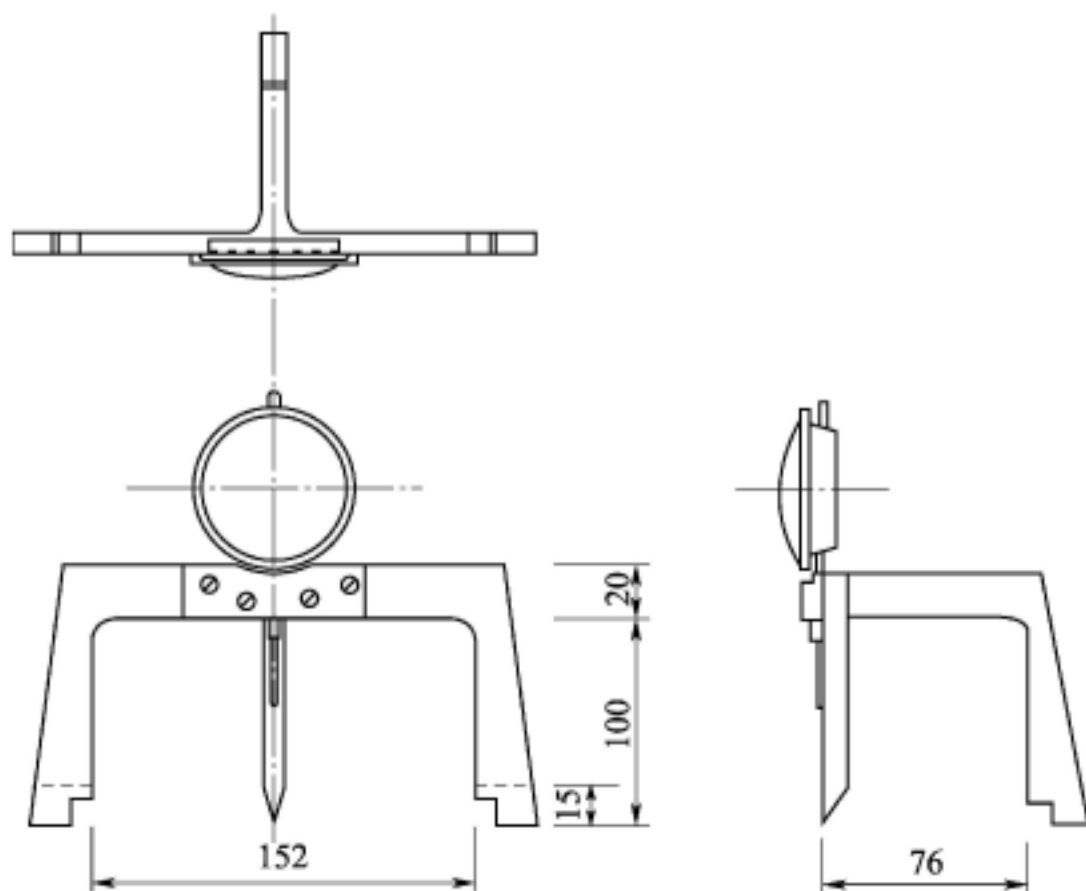


图 4.22.3-2 膨胀量测定装置(单位:mm)



(5) 贯入仪(图 4.22.3-3)或其他荷载装置;最小贯入速度能调节至 1mm/min;贯入杆为端面直径 50mm、杆长约 100mm 的金属柱,杆上配有安装百分表的夹孔;加荷和测力设备量程不低于 50kN;

(6) 带调节杆的多孔板(图 4.22.3-4),板上孔径小于 2mm;

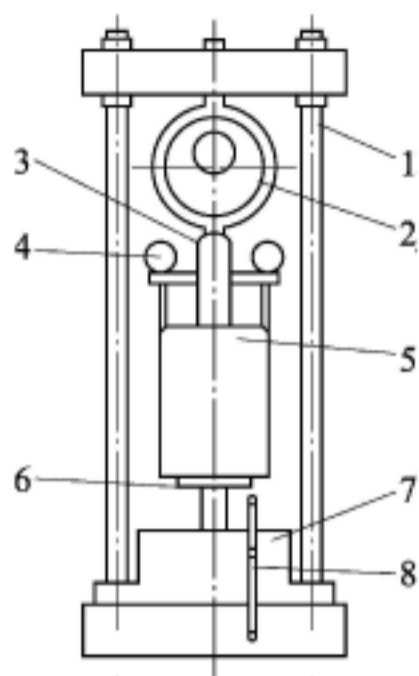


图 4.22.3-3 贯入仪

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

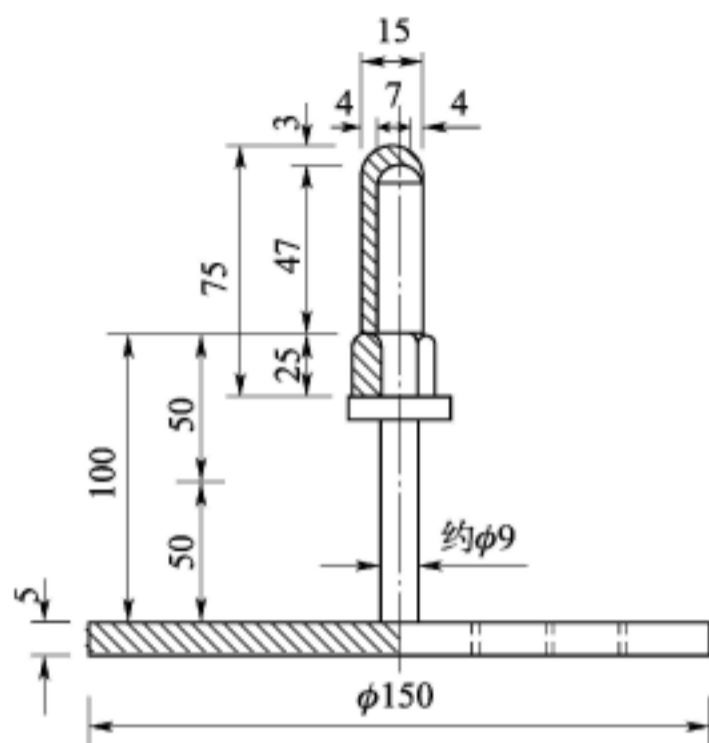


图 4.22.3-4 带调节杆的多孔板(单位:mm)

(7) 荷载块(图 4.22.3-5)的直径为 150mm,中心孔直径为 52mm;共 4 块,每块质量为 1.25kg,并沿直径分为两个半圆块;

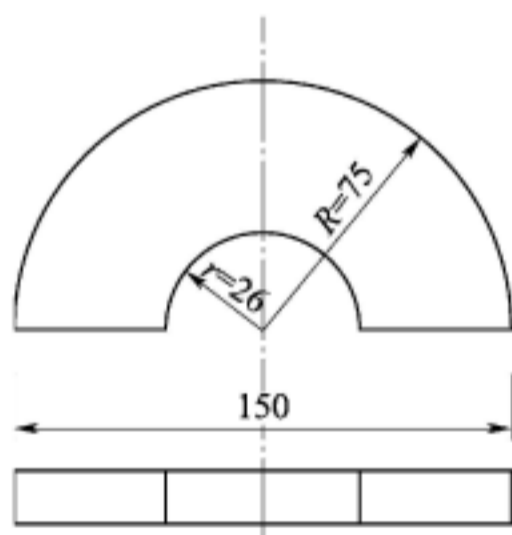


图 4.22.3-5 荷载块(单位:mm)

(8) 百分表共 3 个,最小分度值为 0.01mm;

(9) 水槽做浸泡试件用,槽内水面高出试样顶面 25mm。

#### 4.22.4 试样制备应按下列步骤进行:

(1) 取具有代表性的试样测定风干含水率,测定含水率用的试样数量参照表 4.21.7 确定;备样按大击实筒重型击实试验步骤进行;

(2) 试件的最大干密度和最优含水率按重型击实试验求取;

(3) 按最优含水率制备 3 个试件,制备试件前,将按最优含水率配制的试样浸润,黏性土浸润时间不少于 12h,砂土浸润时间不少于 2h;若需要制备 3 种干密度试件,每种干

密度试件制备 3 个,共制备 9 个试件,试件的干密度控制在最大干密度的 93% ~ 100%, 每层击数分别为 30 次、50 次和 98 次;

(4) 将浸润后的试样按第 4.21.7 条规定进行大试筒重型击实试验制备承载比试验试件,第三层击实完成,试样不高出筒高 6mm;卸下护筒,用直刮刀沿试筒顶修平试样,表面不平整处用细料细心修补,取出垫块,称试样筒和试样总质量。

#### 4.22.5 泡水测膨胀量应按下列步骤进行:

(1) 将一层滤纸铺于试件表面,放上多孔板,并用拉杆将试筒与多孔板固定好;

(2) 倒转试筒,取一层滤纸铺于试件的另一表面,并在该面上放置带有调节杆的多孔板,并在多孔板上加 4 块荷载块;

(3) 放水之前,将整个装置放入水槽,安装好膨胀量测定装置,并读取百分表初读数;

(4) 向水槽内缓缓注水,使水自由进入试件的顶部和底部;在泡水期间,水槽内水面高出试件顶面约 25mm(图 4.22.5);通常试件泡水 96h;

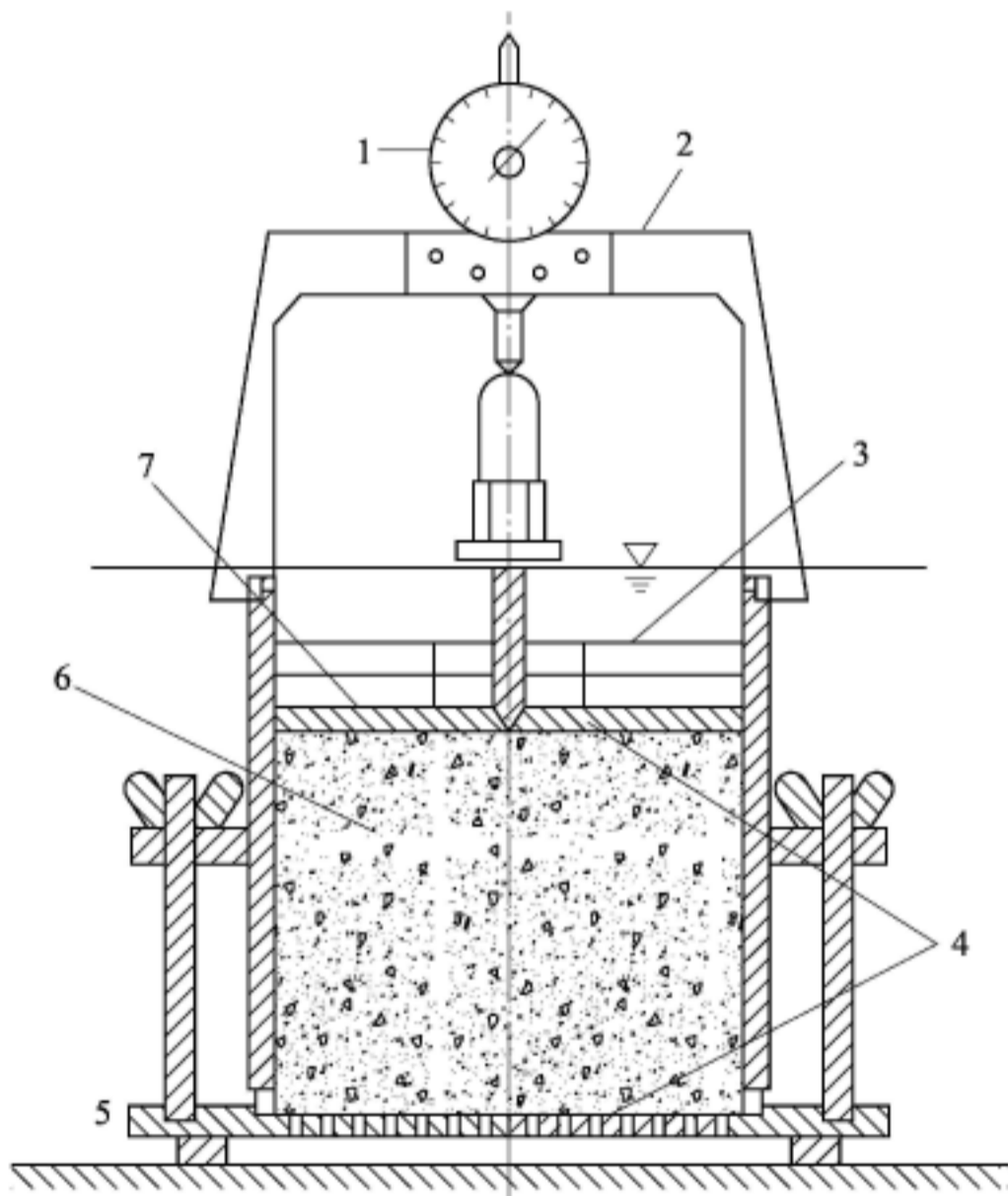


图 4.22.5 浸水膨胀试验装置

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

(5) 泡水终了时,读取试件上百分表的终读数,并按下式计算膨胀率:

$$\delta_w = \frac{\Delta h_w}{h_0} \times 100 \quad (4.22.5)$$

式中  $\delta_w$ ——浸水后试样的膨胀率(%);

$\Delta h_w$ ——浸水前后试样的高度变化(mm),百分表终读数与初读数之差;

$h_0$ ——试样的初始高度(取值 120mm);

(6) 卸下膨胀量测定装置,从水槽中取出试件,吸去试件顶面的水,静置 15min 后,让其排水,卸去荷载块、多孔顶板和多孔底板,取下滤纸,称试件和试筒的总质量,并计算试件的含水率与密度的变化。

#### 4.22.6 贯入试验应按下列步骤进行:

(1) 将泡水测完膨胀量后的试件放在贯入仪或路面材料强度仪的升降台上,调整升降台的高度及扁球座,使贯入杆与试件顶面全面接触,并在试件顶面围绕贯入杆放上 4 块荷载块;

(2) 先在贯入杆上施加 45N 荷载,然后将测力计百分表和测变形百分表读数均调整至零位;

(3) 加荷使贯入杆以 1mm/min ~ 1.25mm/min 的速度压入试件,测定测力计百分表在指定整读数(如 20、40、60)下相应的贯入量,并使贯入量在 2.5mm 时的读数不少于 5 个;试验至贯入量为 10mm ~ 12.5mm 时终止;

(4) 每个土样进行 3 个平行试验,当 3 个试件试验结果所得承载比的变异系数大于 12% 时,去掉一个偏离大的值,取其余 2 个结果的平均值;当变异系数小于 12%,且 3 个平行试验结果计算的干密度偏差小于  $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ ,则取 3 个结果的平均值;如 3 个平行试验结果计算的干密度偏差大于  $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ ,则去掉一个偏离大的值,取其余 2 个结果的平均值。

#### 4.22.7 试验资料的整理应符合下列规定。

4.22.7.1  $p \sim l$  曲线的绘制应以单位压力为横坐标,贯入量为纵坐标,如图 4.22.7 所示。图上曲线 1 是合适的,曲线 2 的开始段是凹曲线,应按下列方法进行修正:通过变曲率点引一切线与纵坐标交于  $O'$  点, $O'$  点即为修正后的原点。

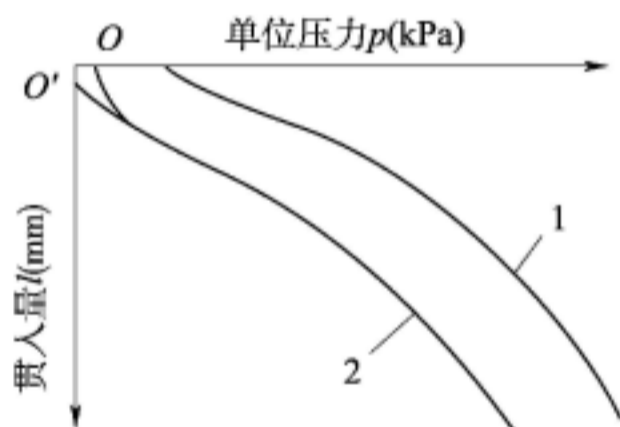


图 4.22.7 单位压力与贯入量( $p \sim l$ )的关系曲线

#### 4.22.7.2 承载比的计算可按下列方法进行:

(1) 贯入量为 2.5mm 时的承载比  $CBR_{2.5}$  按下式计算,保留至 0.1%;

$$CBR_{2.5} = \frac{P}{7000} \times 100 \quad (4.22.7-1)$$

式中  $CBR_{2.5}$ ——贯入量为 2.5mm 时的承载比(%);

$P$ ——单位压力(kPa);

7000——贯入量为 2.5mm 时的标准压力(kPa);

(2) 贯入量为 5.0mm 时的承载比  $CBR_{5.0}$  按下式计算,保留至 0.1%;

$$CBR_{5.0} = \frac{P}{10500} \times 100 \quad (4.22.7-2)$$



式中  $CBR_{5.0}$ ——贯入量为 5.0mm 时的承载比(%)；

10500——贯入量为 5.0mm 的标准压力(kPa)；

(3) 材料的承载比一般采用贯入量为 2.5mm 时的承载比,当贯入量为 5.0mm 时的承载比大于 2.5mm 时的承载比时,则重新进行试验,如果试验结果仍然相同,则采用贯入量为 5.0mm 时的承载比。

**4.22.7.3** 试件的湿密度可按下式计算,保留至  $0.01\text{g/cm}^3$ ；

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (4.22.7-3)$$

式中  $\rho$ ——试件的湿密度( $\text{g/cm}^3$ )；

$m_2$ ——试筒和试件总质量(g)；

$m_1$ ——试筒的质量(g)；

$V$ ——试筒的容积( $\text{cm}^3$ )；

**4.22.7.4** 试件的干密度可按下式计算,保留至  $0.01\text{g/cm}^3$ 。

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0.01w} \quad (4.22.7-4)$$

式中  $\rho_d$ ——试件的干密度( $\text{g/cm}^3$ )；

$\rho$ ——试件的湿密度( $\text{g/cm}^3$ )；

$w$ ——试件的含水率。

**4.22.7.5** 试件泡水后吸水量可按下式计算。

$$W_a = m_3 - m_2 \quad (4.22.7-5)$$

式中  $W_a$ ——泡水后试件的吸水量(g)；

$m_3$ ——泡水后试筒和试件的总质量(g)；

$m_2$ ——试筒和试件的总质量(g)。

**4.22.7.6** 试验记录格式可采用附录 A 中表 A.0.32 和表 A.0.33。

## 4.23 回弹模量试验

**4.23.1** 回弹模量试验可用于不同含水率和不同干密度的黏性土、粉土。根据需要可采用杠杆压力仪法和强度仪法,杠杆压力仪法可用于含水率较大、硬度较小的试样,强度仪法可用于各种湿度、密度的土和加固土。

**4.23.2** 采用杠杆压力仪法时应符合下列规定。

**4.23.2.1** 主要仪器设备应包括杠杆压力仪、试筒、承载板、千分表、秒表；杠杆压力仪、试筒、承载板、千分表、秒表应满足下列要求：

(1) 杠杆压力仪的最大压力为 1500N,如图 4.23.2-1 所示；

(2) 试筒为内径 152mm、高 170mm 的金属圆筒,护筒的高为 50mm；筒内垫块的直径为 151mm,高为 50mm,如图 4.22.3-1 所示；夯击底板与击实仪相同；

(3) 承载板的直径为 50mm,高为 80mm,如图 4.23.2-2 所示；

(4) 千分表 2 只,最大量程为 2.0mm,最小分度值为 0.001mm；

(5) 秒表的最小分度值为 0.1s。

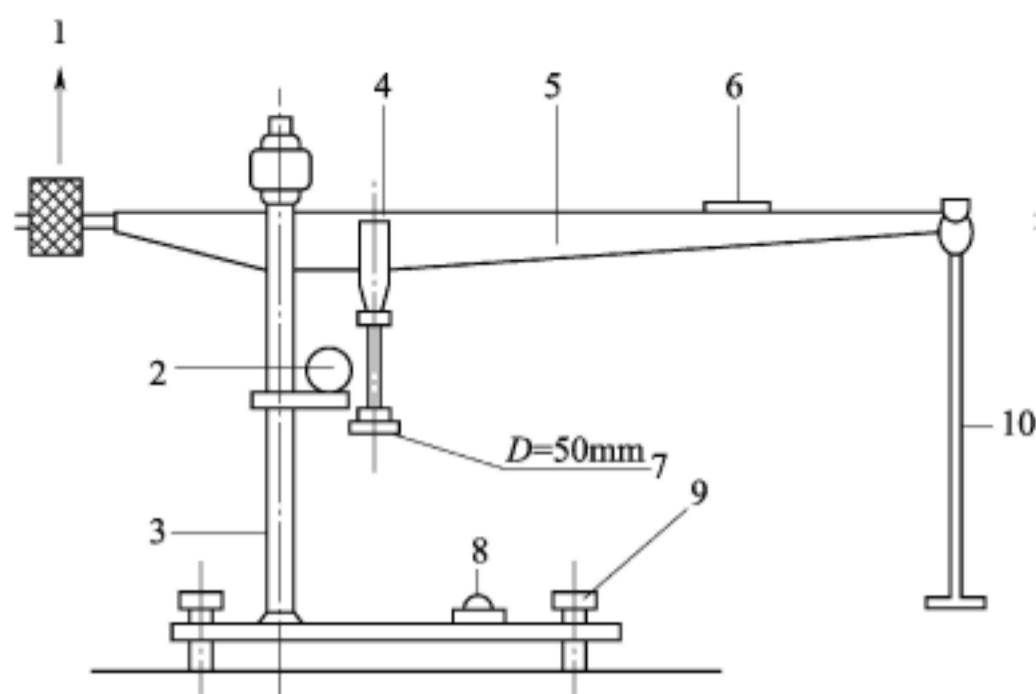


图 4.23.2-1 杠杆压力仪

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

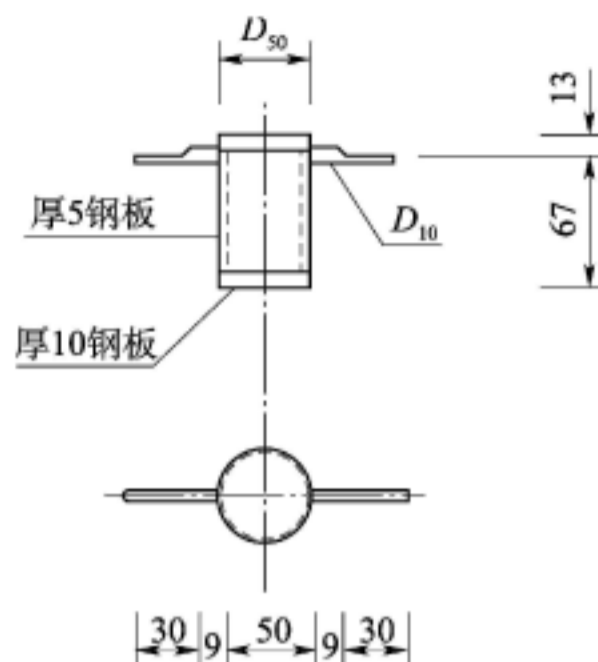


图 4.23.2-2 承载板(单位:mm)

#### 4.23.2.2 试验应按下列步骤进行:

(1) 根据工程的要求选择轻型或重型法,视最大粒径用小筒或大筒按第 4.21.6 条和第 4.21.7 条的规定进行试料准备和击实试验,得出最大干密度和最优含水率;按最优含水率制备试件,以规定击数在击实筒内制备试件;

(2) 将装有试件的击实筒底面放在杠杆压力仪的底盘上,将承载板放在试件的中心位置,并与杠杆压力仪的加压球座对正;将千分表固定在立柱上,并将千分表的测头安放在承载板的表架上;

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

(4) 将预定的最大压力分为 4 ~ 6 级进行加载,需要时第 1 级、第 2 级荷载分别分成两小级进行加载和卸载;每级加载时间为 1min,记录千分表读数,同时卸载,当卸载 1min 时,记录千分表读数,再施加下一级荷载;如此逐级进行加载和卸载,并记录千分表读数,直至最后一级荷载;试验中的最大压力允许略大于预定的最大压力;

(5) 土的回弹模量测定进行 3 次平行试验,每次试验结果与回弹模量的均值之差不超过 5%。

#### 4.23.2.3 试验资料的整理应满足下列要求:

(1) 每级荷载下试样的回弹模量按下式计算:

$$E = \frac{\pi p D}{4l} (1 - \mu^2) \quad (4.23.2)$$

式中  $E$ ——回弹模量(kPa);

$p$ ——承载板上的单位压力(kPa);



$D$ ——承载板直径(cm)；

$l$ ——相应于该级单位压力的回弹变形(加载读数 - 卸载读数)(cm)；

$\mu$ ——土的泊松比,一般取 0.35；

(2)以单位压力为横坐标,回弹变形为纵坐标,绘制  $p \sim l$  曲线,如图 4.23.2-3；

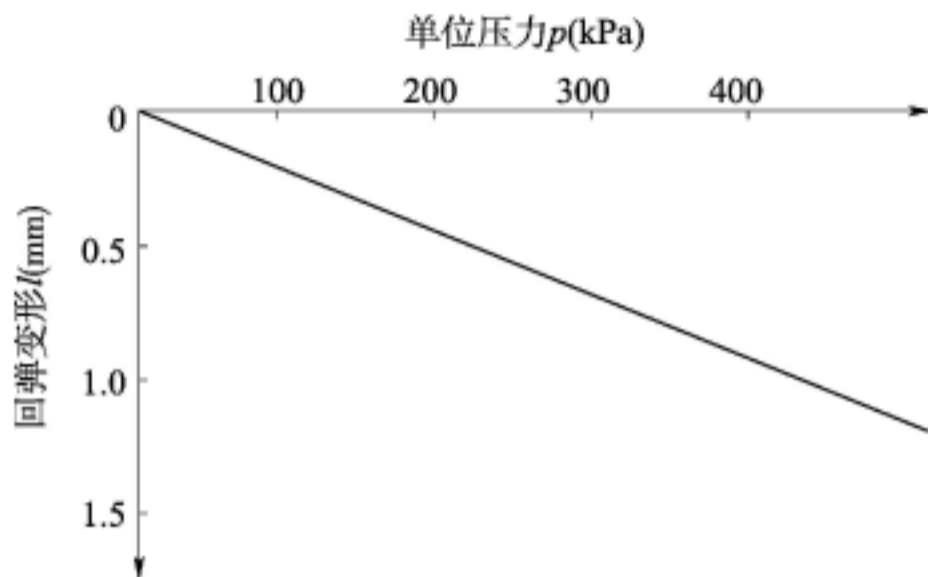


图 4.23.2-3 单位压力与回弹变形( $p \sim l$ )的关系曲线

(3)每个试样的回弹模量取  $p \sim l$  曲线上任一压力与其对应的  $l$  按式(4.23.2)计算；

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

(5)试验的记录格式采用附录 A 中表 A.0.34。

#### 4.23.3 采用强度仪法时应符合下列规定。

##### 4.23.3.1 主要试验设备应满足下列要求：

(1)强度仪同承载比试验贯入仪,见图 4.22.3-3；

(2)试筒符合第 4.23.2.1 款第(2)项的规定；

(3)承载板符合第 4.23.2.1 款第(3)项的规定；

(4)千分表的支杆长为 200mm,直径为 10mm,一端带有长 5mm 与击实筒上螺丝孔联接的螺丝杆,表夹由钢制或硬塑料制成；

(5)其他仪器符合第 4.23.2.1 款第(4)项、第 4.23.2.1 款第(5)项的规定。

##### 4.23.3.2 强度仪法应按下列步骤进行：

(1)试样制备按第 4.23.2.2 款第(1)项的规定进行；

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

(3)用预定的最大压力进行预压,预压方法按第 4.23.2.2 款第(3)项的规定进行；

(4)将预定的最大压力分为 4~6 级进行加载,预先将每级压力折算成测力计百分表的读数,按百分表读数逐级加载,加载卸载按第 4.23.2.2 款第(4)项的规定进行;当试样较硬时,可以不受预定最大压力值的限制,增加加载级数,至需要的压力为止；

(5)进行平行试验的次数和准确度符合第 4.23.2.2 款第(5)项的规定。

##### 4.23.3.3 强度仪法试验资料的整理应满足下列要求：

(1)每级压力下试样的回弹模量按式(4.23.2)计算,其中计算中所用泊松比值一般



取 0.35, 对于具有一定龄期的加固土取 0.25 ~ 0.30;

(2) 试验的  $p \sim l$  曲线绘制按第 4.23.2.3 款第(2)项的规定进行;

(3) 试验的记录格式采用附录 A 中表 A.0.34。

#### 4.24 渗透试验

**4.24.1** 常水头法渗透试验可用于砂土和砾类土, 变水头法渗透试验可用于黏性土和粉土。

**4.24.2** 试验用水应采用水温高于室温  $3^{\circ}\text{C} \sim 4^{\circ}\text{C}$  的纯水或经过滤的清水, 且在试验前用抽气法或煮沸法脱气。

**4.24.3** 采用常水头法时应符合下列规定。

**4.24.3.1** 主要仪器设备应包括常水头渗透仪、天平、温度计、透水石、秒表、木锤、橡皮管、支架等; 常水头渗透仪、天平、温度计、透水石应满足下列要求:

(1) 常水头渗透仪(70 型渗透仪)的封底金属圆筒高为 40cm, 内径为 10cm; 金属孔板距筒底 6cm, 如图 4.24.3-1 所示; 有 3 个测压孔, 相邻测压孔中心距离 10cm; 玻璃测压管内径为 0.6cm; 最小分度值为 0.1cm, 用橡皮管和测压孔连接;

(2) 天平最大称量为 5000g, 最小分度值不大于 1.0g;

(3) 温度计的最小分度值为  $0.5^{\circ}\text{C}$ ;

(4) 透水石的渗透系数大于试样的渗透系数。

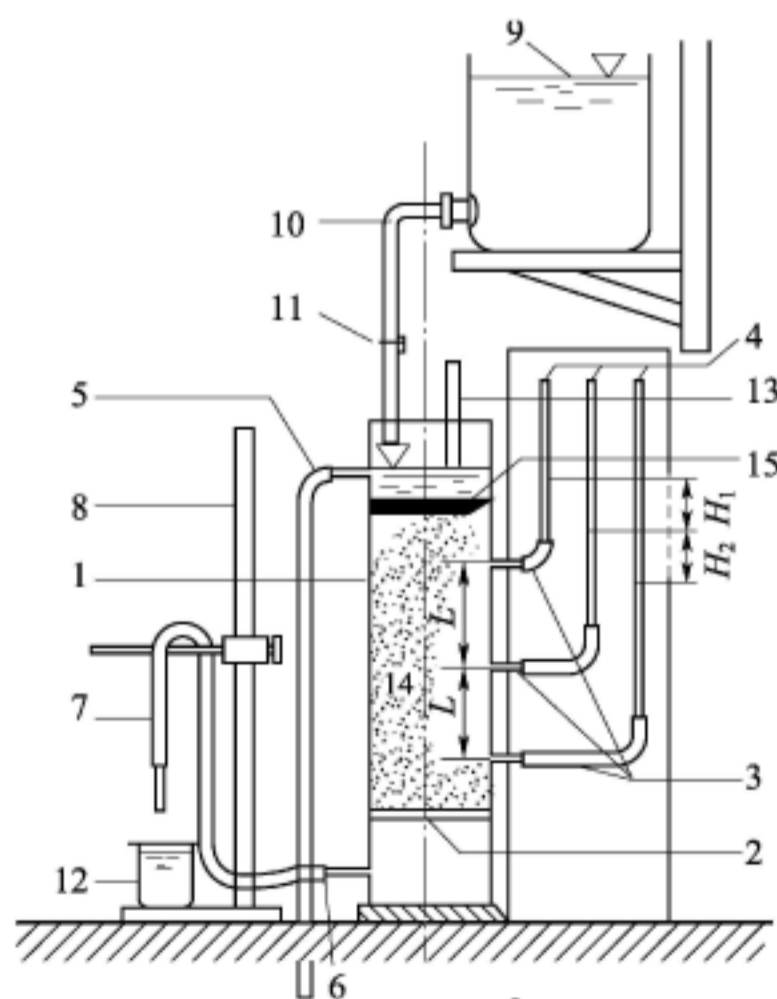


图 4.24.3-1 常水头渗透仪装置

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

**4.24.3.2** 试验应按下列步骤进行:

(1) 按图 4.24.3-1 装好仪器, 并检查各管路接头处是否漏水; 将调节管与供水管连

通,由仪器底部充水至水位略高于金属孔板,关止水夹;

(2)取具有代表性的风干试样 3kg~4kg,并测定其风干含水率;

(3)将试样分层装入圆筒,每层厚 2cm~3cm,用木锤轻轻击实到一定厚度,以控制到所要求的孔隙比;当试样含黏粒较多时,在金属孔板上加铺厚约 2cm 的粗砂过滤层,其渗透系数大于试样的渗透系数;每层试样装好后,连接供水管和调节管,并由调节管中进水,微开止水夹,使试样逐渐饱和;当水面与试样顶面齐平,关止水夹;饱和时水流不能过急;

(4)依上述步骤逐层装试样并进行饱和,至试样高出上测压孔 3cm~4cm 为止;在试样上端铺约 2cm 厚度的砾石作缓冲层,其渗透系数大于试样的渗透系数;待最后一层试样饱和后,继续使水位缓缓上升至溢水孔,当有水溢出时,关止水夹;

(5)试样装好后,量测试样顶面至筒顶高度,计算试样净高;称剩余试样质量,保留至 1.0g,计算装入的试样总质量;

(6)静置数分钟后,检查各测压管水位是否与溢水孔齐平,当不齐平时,用吸水球进行吸水排气处理,直到水位齐平为止;

(7)提高调节管,使其高于溢水孔,然后将调节管与供水管分开,并将供水管置于圆筒内,开止水夹,使水由上部注入圆筒内;

(8)降低调节管口,使位于试样上部 1/3 高度处,形成水位差,使水渗过试样经调节管流出;在渗透过程中调节供水管夹使供水管流量略多于溢出水量,溢水孔始终有余水溢出,以保持圆筒内水位不变,使试验处于常水头下渗透;

(9)测压管水位稳定后,记录测压管水位,计算各测压管间的水位差;

(10)开动秒表,同时用量筒自调节管口接取经一定时间的渗透水,并重复 1 次,接取渗透水时,调节管口不能没入水中;

(11)测记进水与出水处的水温,取平均值;

(12)降低调节管管口至试样中部及下部 1/3 处,以改变水力坡降,按第(8)项~第(11)项规定的步骤重复进行测定;

(13)根据需要,改变试样的孔隙比,测定相应的渗透系数。

#### 4.24.3.3 常水头法的试验资料整理应满足下列要求:

(1)试样的干密度及孔隙比按下列公式计算;

$$m_d = \frac{m}{1 + 0.01w} \quad (4.24.3-1)$$

$$\rho_d = \frac{m_d}{A \cdot h} \quad (4.24.3-2)$$

$$e = \frac{\rho_w \cdot G_s}{\rho_d} - 1 \quad (4.24.3-3)$$

式中  $m_d$ ——试样干质量(g);

$m$ ——风干试样总质量(g);

$w$ ——风干含水率(%);

$\rho_d$ ——试样干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),保留至0.01;

$A$ ——试样断面积( $\text{cm}^2$ );

$h$ ——试样高度( $\text{cm}$ );

$e$ ——试样孔隙比,保留至0.01;

$\rho_w$ ——温度 $4^\circ\text{C}$ 水的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$G_s$ ——土粒比重;

(2) 水温 $T^\circ\text{C}$ 时试样的渗透系数按式(4.24.3-4)计算;

$$k_T = \frac{Q \cdot L}{A \cdot H \cdot t} \quad (4.24.3-4)$$

式中  $k_T$ ——水温 $T^\circ\text{C}$ 时试样的渗透系数( $\text{cm}/\text{s}$ ),保留至三位有效数字;

$Q$ ——时间 $t$ 秒内的渗透水量( $\text{cm}^3$ );

$L$ ——两测压孔中心间的试样高度(10cm);

$A$ ——试样断面积( $\text{cm}^2$ );

$H$ ——平均水位差( $\text{cm}$ );

$t$ ——时间( $\text{s}$ );

(3) 标准温度( $20^\circ\text{C}$ )时试样的渗透系数按式(4.24.3-5)计算,动力黏滞系数比 $\frac{\eta_T}{\eta_{20}}$

与温度的关系见表4.6.3-3;

$$k_{20} = k_T \frac{\eta_T}{\eta_{20}} \quad (4.24.3-5)$$

式中  $k_{20}$ ——标准温度( $20^\circ\text{C}$ )时试样的渗透系数( $\text{cm}/\text{s}$ ),保留至三位有效数字;

$\eta_T$ —— $T^\circ\text{C}$ 时水的动力粘滞系数( $10^{-6}\text{kPa}\cdot\text{s}$ );

$\eta_{20}$ —— $20^\circ\text{C}$ 时水的动力粘滞系数( $10^{-6}\text{kPa}\cdot\text{s}$ );

(4) 当进行不同孔隙比下的渗透系数试验时,在半对数坐标纸上绘制以孔隙比为纵坐标、渗透系数为横坐标的 $e \sim k$ 关系曲线,如图4.24.3-2所示;

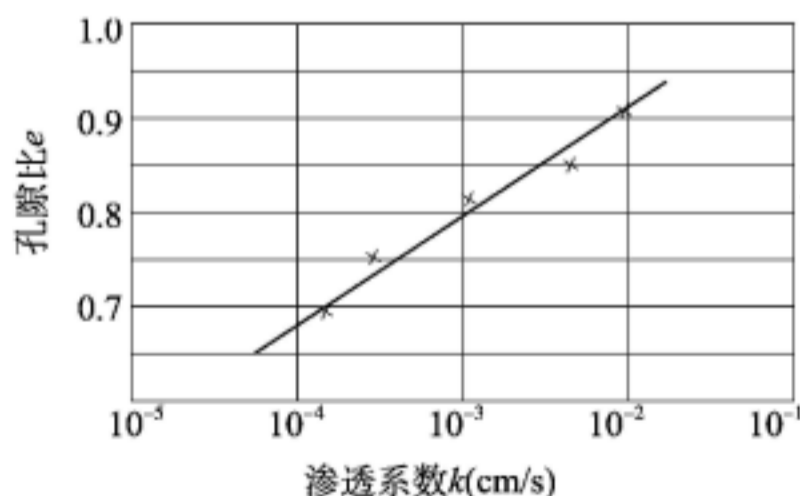


图4.24.3-2 孔隙比 $e$ 与渗透系数 $k$ 关系曲线

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

(6) 试验记录格式采用附录A中表A.0.35。

**4.24.4** 采用变水头法时应符合下列规定。



**4.24.4.1** 主要仪器设备应包括变水头装置、渗透容器、切土器、100ml 量筒、秒表、温度计、钢丝锯、削土刀、凡士林和橡皮管等；变水头装置、渗透容器应满足下列要求：

(1) 变水头装置由渗透容器、变水头管、供水瓶、进水管等组成，如图 4.24.4 所示；变水头管的内径均匀，管径不大于 1cm，管外壁有最小分度为 1.0mm 的刻度，长度为 2m 左右；

(2) 渗透容器由环刀、透水石、套环及上、下盖组成。环刀内径为 61.8mm，高为 40mm；透水石的渗透系数大于  $10^{-3}$  cm/s。

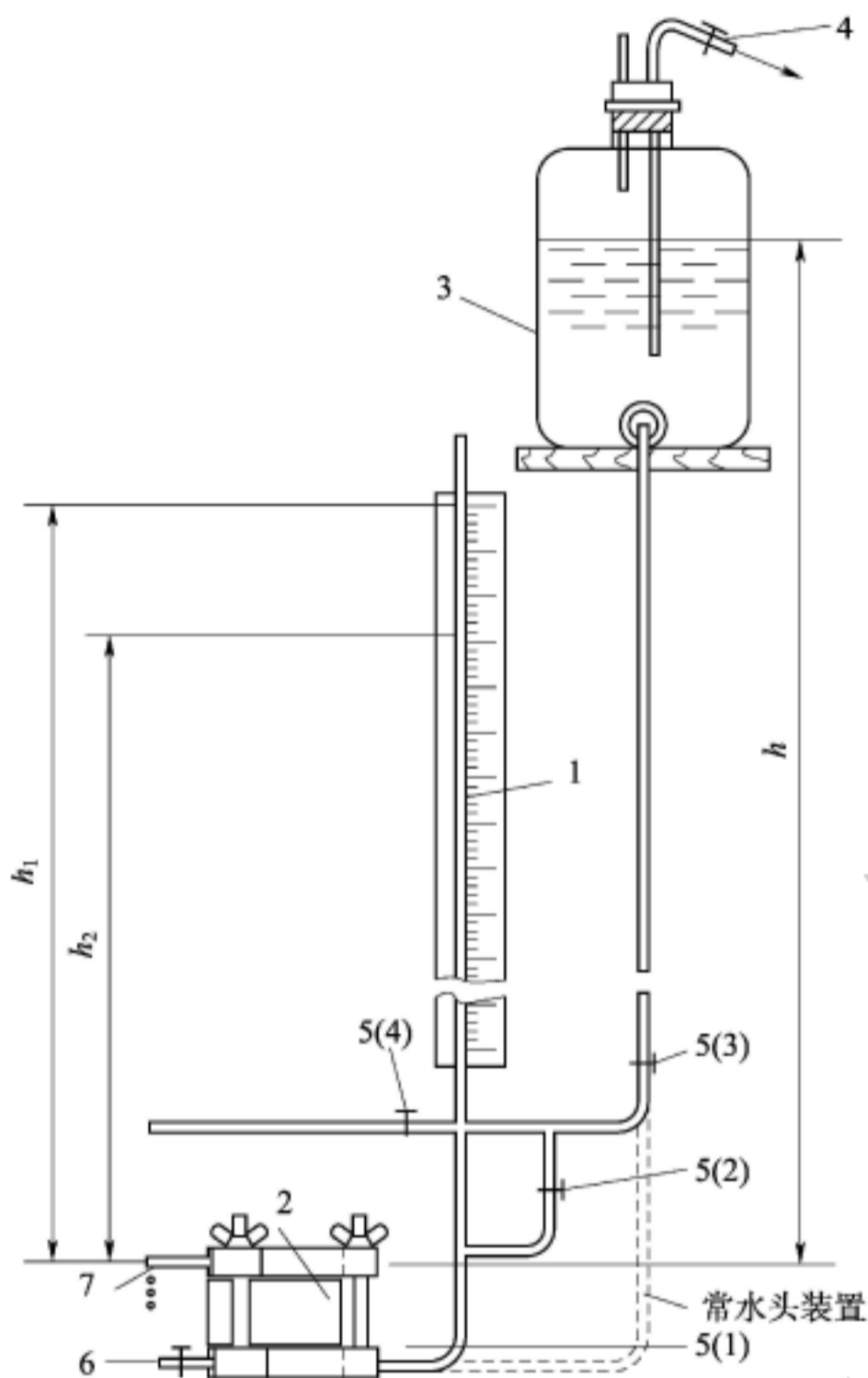


图 4.24.4 变水头渗透装置

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

**4.24.4.2** 试验应按下列步骤进行：

(1) 根据工程需要用环刀在垂直或平行土样层面切取原状试样或扰动土制备成给定密度的试样，并充分饱和；切土时，尽量避免结构扰动，不能用削土刀反复涂抹试样表面；

(2) 将容器套筒内壁涂一薄层凡士林，然后将盛有试样的环刀推入套筒，并压入止水垫圈；把挤出的多余凡士林小心刮净；装好带有透水板的上、下盖，拧紧螺丝，不能漏气漏水；

(3) 把装好试样的渗透容器与水头装置连通，利用供水瓶中的水充满进水管，并注入

渗透容器,开排气阀,将容器侧立,排除渗透容器底部的空气,直至溢出水中无气泡,关排气阀,放平渗透容器;

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

(5)将水头管里充水至所需高度后,关止水夹,开动秒表,同时测记起始水头,经过一段时间后,再测记终止水头;如此连续测记2~3次后,再使水头管水位回升至所需高度,连续测记6次以上试验终止,测记试验开始时与终止时的水温。

#### 4.24.4.3 试验资料的整理应满足下列要求:

(1)渗透系数按下式计算:

$$k_T = 2.3 \frac{a \cdot L}{A \cdot t} \lg \left( \frac{h_1}{h_2} \right) \quad (4.24.4)$$

式中  $k_T$ ——渗透系数(cm/s),保留至三位有效数字;

$a$ ——变水头管截面积( $\text{cm}^2$ );

$L$ ——渗径,等于试样高度(cm);

$A$ ——试样的断面积( $\text{cm}^2$ );

$t$ ——试验从开始至终止的历时(s);

$h_1$ ——开始试验时水头(cm);

$h_2$ ——终止试验时水头(cm);

(2)标准温度下的渗透系数按式(4.24.3-5)计算;

(3)试验允许差和平均渗透系数符合第4.24.3.3款第(4)项的规定;

(4)试验记录表格采用附录A中表A.0.36。

## 4.25 固结试验

**4.25.1** 固结试验可用于饱和土,当只测定压缩指标时,允许用于非饱和土。对于渗透性较大的黏性土、粉土,计算沉降要求精度不高,且不要求固结系数的情况可采用快速固结试验法。

**4.25.2** 主要仪器设备应包括固结容器、加压设备、变形测量设备、刮土刀、钢丝锯、天平、秒表、电热鼓风干燥箱和铝盒;固结容器、加压设备、变形测量设备应满足下列要求:

(1)固结容器由环刀、护环、透水板、加压上盖和量表架等组成,见图4.25.2;环刀直径为61.8mm或79.8mm,高度为20mm,环刀具有一定的刚度,内壁保持较高的光洁度,涂一薄层硅脂或聚四氟乙烯;透水板由透水石或不受腐蚀的金属材制成,其渗透系数大于试样的渗透系数,顶部透水板的直径小于环刀内径0.2mm~0.5mm;

(2)加压设备能垂直施加各级规定的压力,无冲击影响;

(3)变形量测设备为量程10mm的百分表,最小分度值为0.01mm,或准确度为全量程的0.2%的位移传感器。

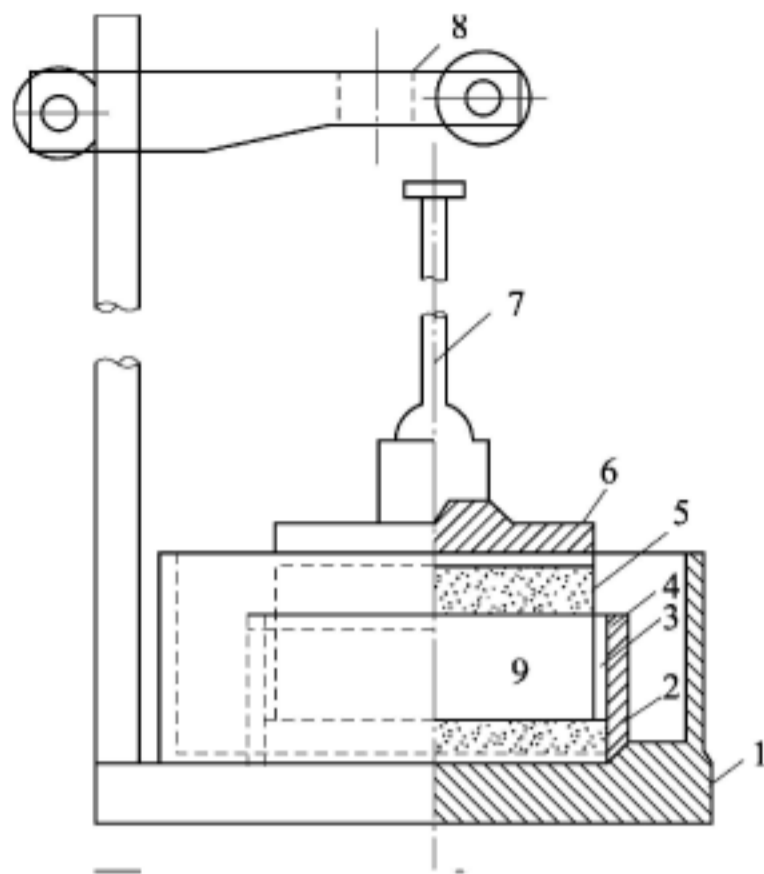


图 4.25.2 固结容器示意图

1-水槽;2-护环;3-环刀;4-导环;5-透水石;6-加压上盖;7-量表导杆;8-量表架;9-试样

#### 4.25.3 采用标准固结试验法时应按下列步骤进行:

(1) 切取原状土试样或制备给定密度与含水率的扰动土试样;选用直径为 61.8mm 或 79.8mm、高度 20mm 的环刀进行制样,并测定试样的含水率及密度;需要饱和时,将试样进行抽气饱和;

(2) 在固结容器内放置护环、透水板和薄滤纸,将带有环刀的试样,小心装入护环,然后在试样上放薄滤纸、透水板和加压盖板,将固结容器置于加压框架下,对准加压框架的正中,安装百分表或位移传感器;对饱和试样,事先浸水饱和滤纸和透水板;对非饱和试样,其湿度尽量与试样湿度接近;

(3) 施加 1kPa 的预压力,使试样与仪器上下各部件之间接触良好,将百分表或位移传感器调整到零位或测读初读数;

(4) 确定需要施加的各级压力;加压等级一般为 12.5kPa、25kPa、50kPa、100kPa、200kPa、400kPa、800kPa、1600kPa、3200kPa;第 1 级的压力根据土的软硬程度采用 12.5kPa、25kPa 或 50kPa,最后一级压力大于土的自重压力与附加压力之和;只需测定压缩系数时,最大压力不小于 400kPa;

(5) 对于饱和试样,在施加第一级荷载后立即向容器中注满水;对非饱和试样,用湿棉布围住透水面;

(6) 需要确定原状土的先期固结压力时,加压率小于 1,或采用 0.5、0.25 倍;最后一级压力使  $e \sim \lg p$  曲线下段出现较长的直线段且不小于 1600kPa;

(7) 需测定沉降速率、固结系数时,加压后按下列时间顺序测记试样的高度变化:6s、15s、1min、2min15s、4min、6min15s、9min、12min15s、16min、20min15s、25min、30min15s、36min、42min15s、49min、64min、100min、200min、400min、23h、24h,至稳定为止,固结稳定标准是最后 1h 变形量不超过 0.01mm;当不需要测定沉降速率时,稳定标准规定为每级压力下固结 24h,依次逐级加压至试验结束;



(8) 需要作回弹试验时,在某级压力固结稳定后退压,直至退到要求的压力,每次退压 24h 后测定试样的回弹量;

(9) 试验结束后吸去容器中的水,迅速拆除仪器各部件,取出整块试样,测定含水率。

#### 4.25.4 标准固结试验资料的整理应符合下列规定:

(1) 试样的初始孔隙比按下式计算:

$$e_0 = \frac{(1 + 0.01w_0)\rho_w G_s}{\rho_0} - 1 \quad (4.25.4-1)$$

式中  $e_0$ ——初始孔隙比;

$w_0$ ——试样的初始含水率(%);

$\rho_w$ ——水的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$G_s$ ——土粒比重;

$\rho_0$ ——试样的初始密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

(2) 各级压力下固结稳定后的孔隙比按下式计算:

$$e_i = e_0 - (1 + e_0) \frac{\Sigma \Delta h_i}{h_0} \quad (4.25.4-2)$$

式中  $e_i$ ——某级压力下的孔隙比;

$\Sigma \Delta h_i$ ——某级压力下试样固结稳定后的总变形量(mm);

$h_0$ ——试样初始高度(mm);

(3) 某一压力范围内的压缩系数按下式计算,保留至  $0.01 \text{MPa}^{-1}$ ;

$$a_v = \frac{e_i - e_{i+1}}{p_{i+1} - p_i} \quad (4.25.4-3)$$

式中  $a_v$ ——压缩系数( $\text{MPa}^{-1}$ );

$e_i, e_{i+1}$ ——第  $i$  级和第  $i+1$  级的孔隙比;

$p_i, p_{i+1}$ ——第  $i$  级和第  $i+1$  级的压力值(MPa);

(4) 某一压力范围内的压缩模量、体积压缩系数按下列公式计算,保留至  $0.01 \text{MPa}$  和  $0.01 \text{MPa}^{-1}$ ;

$$E_s = \frac{1 + e_i}{a_v} \quad (4.25.4-4)$$

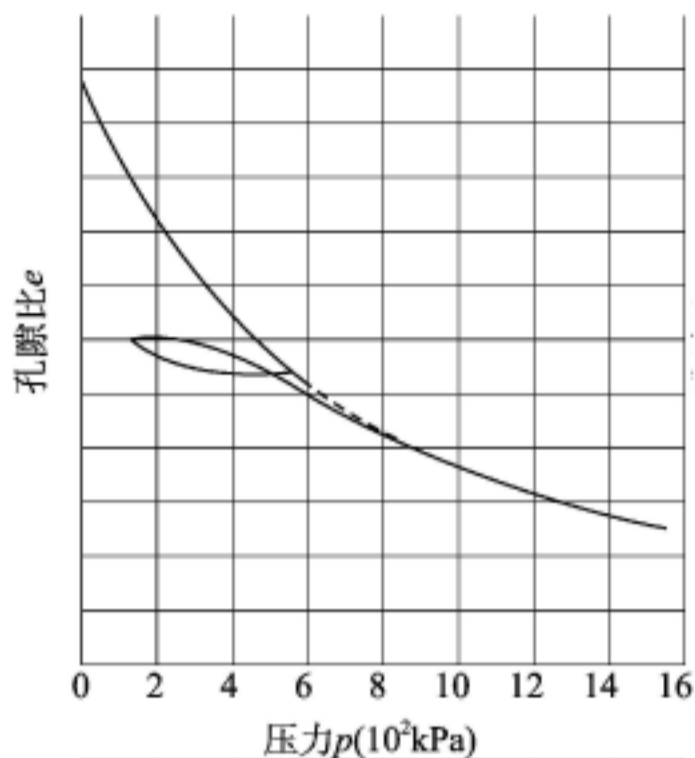
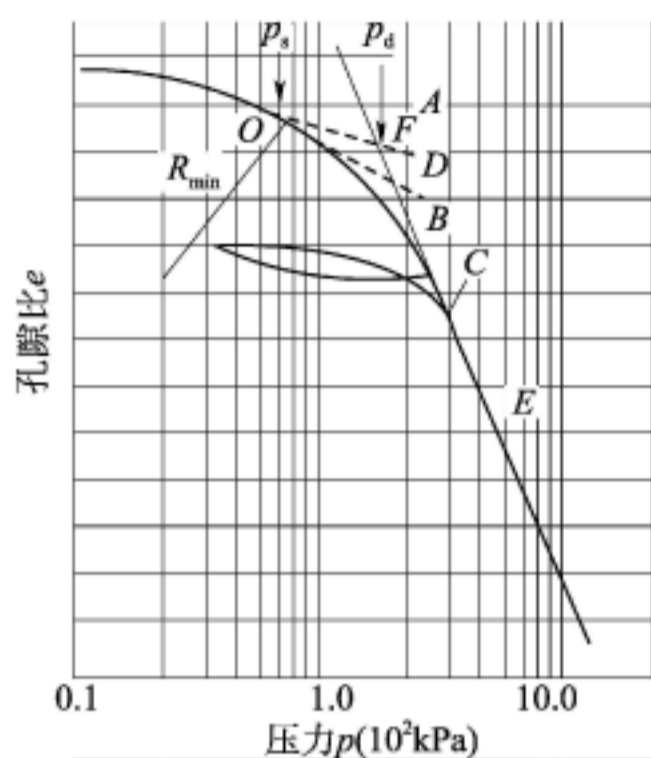
$$m_v = \frac{1}{E_s} = \frac{a_v}{1 + e_i} \quad (4.25.4-5)$$

式中  $E_s$ ——压缩模量(MPa);

$m_v$ ——体积压缩系数( $\text{MPa}^{-1}$ );

(5) 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,如图 4.25.4-1 所示;

(6) 原状土的先期固结压力  $p_c$  的确定方法见图 4.25.4-2,作  $e \sim \lg p$  曲线,在曲线上找出最小曲率半径的点  $O$ ,过  $O$  点作水平线  $OA$ 、切线  $OB$  及  $\angle AOB$  的平分线  $OD$ , $OD$  与曲线的直线段  $EC$  的延长线交于点  $F$ ,则对应于  $F$  点的压力值即为该原状土的先期固结压力  $p_c$ ;

图 4.25.4-1  $e-p$  关系曲线图 4.25.4-2  $e-\lg p$  曲线和求  $p_c$  示意图

(7) 压缩指数、回弹指数按下式计算,均保留至 0.001;

$$C_c \text{ 或 } C_s = \frac{e_i - e_{i+1}}{\lg p_{i+1} - \lg p_i} \quad (4.25.4-6)$$

式中  $C_c$ ——压缩指数;

$C_s$ ——回弹指数;

(8) 采用时间平方根法求算固结系数时,对于某一级压力,以试样的变形  $d$  为纵坐标,时间平方根  $\sqrt{t}$  为横坐标,绘制  $d \sim \sqrt{t}$  曲线如图 4.25.4-3 所示;延长  $d \sim \sqrt{t}$  曲线开始段的直线,交纵坐标轴于  $d_0$  为理论零点;过  $d_0$  绘制另一直线,令其横坐标为前一直线横坐标的 1.15 倍,则后一直线与  $d \sim \sqrt{t}$  曲线交点所对应的时间的平方即为试样固结度达 90% 所需的时间  $t_{90}$ ,按式(4.25.4-7)计算该压力下的固结系数;

$$C_v = \frac{0.848 (\bar{h})^2}{t_{90}} \quad (4.25.4-7)$$

式中  $C_v$ ——固结系数( $\text{cm}^2/\text{s}$ ),保留至 0.001;

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

$t_{90}$ ——固结度达 90% 所需的时间( $\text{s}$ );

(9) 采用时间对数法求算固结系数时,对于某一压力,以试样的变形  $d$  为纵坐标,时间对数  $\lg t$  为横坐标,绘制  $d \sim \lg t$  曲线如图 4.25.4-4 所示,在  $d \sim \lg t$  曲线开始线段,选任一时间  $t_1$ ,相应的量表读数为  $d_1$ ,再取时间  $t_2 = \frac{t_1}{4}$  相应的量表读数为  $d_2$ ,则  $2d_2 - d_1$  之值为  $d_{01}$ ;如此再选取另一时间,依同法求得  $d_{02}$ 、 $d_{03}$ 、 $d_{04}$  等,取其平均值即为理论零点  $d_0$ ;延长曲线中部的直线段和通过曲线尾部数点切线的交点即为理论终点  $d_{100}$ ,则  $d_{50} = \frac{d_0 + d_{100}}{2}$ ,对应于  $d_{50}$  的时间即为试样固结度达到 50% 所需的时间  $t_{50}$ ;按式(4.25.4-8)计算该压力下的固结系数;

$$C_v = \frac{0.197 (\bar{h})^2}{t_{50}} \quad (4.25.4-8)$$

式中  $t_{50}$ ——固结度达 50% 所需的时间(s)；

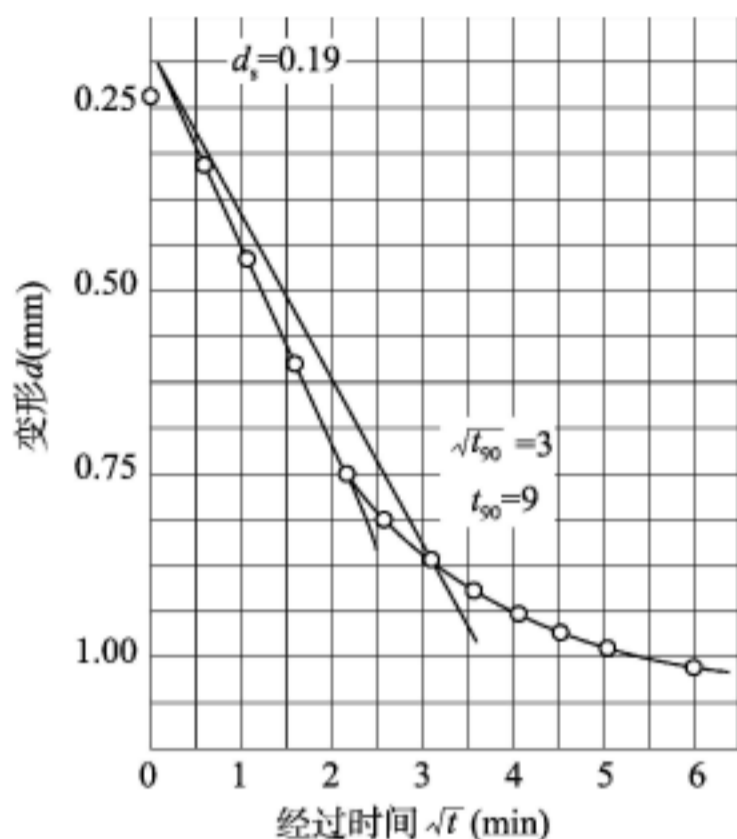


图 4.25.4-3 时间平方根法求  $t_{90}$

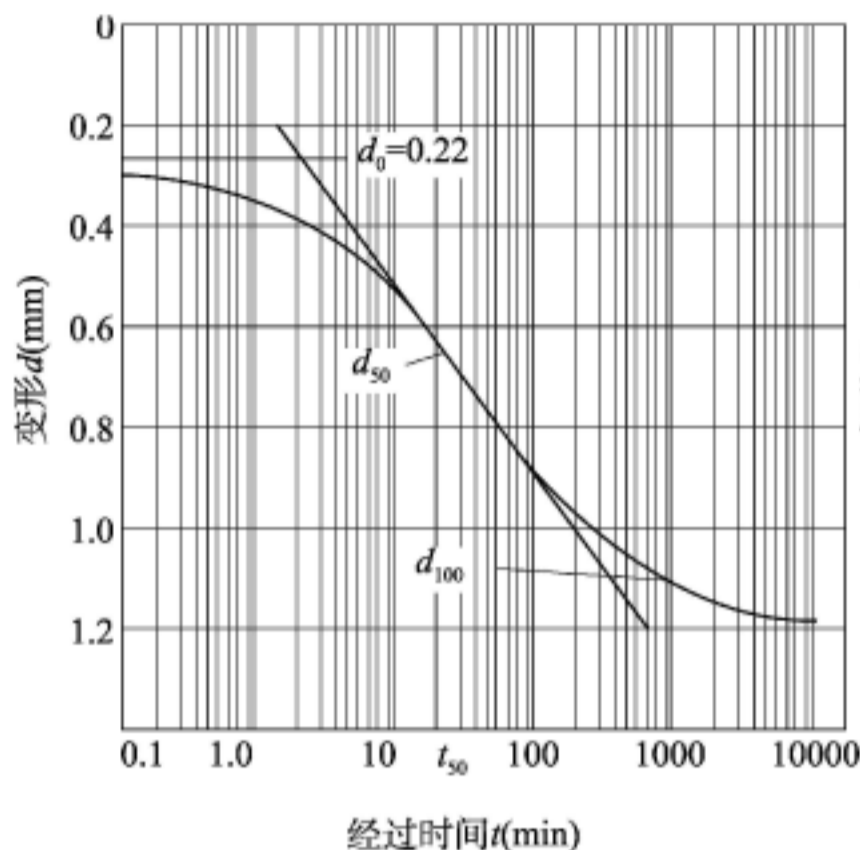


图 4.25.4-4 时间对数法求  $t_{50}$

(10) 试验记录格式采用附录 A 中表 A.0.37 和表 A.0.38。

#### 4.25.5 快速固结试验法应符合下列规定：

(1) 试验操作步骤按第 4.25.3 条的规定进行；试样在各级压力下的固结时间为 1h，仅在最后一级压力下，除测记 1h 的量表读数外，还需测读达压缩稳定时的量表读数；其稳定标准为量表读数每小时变化不大于 0.005mm；

(2) 对快速法所得试验结果，需要校正时按式(4.25.5)计算各级压力下试样校正后的总变形量；

$$\sum \Delta h_i = (h_i)_t \frac{(h_n)_T}{(h_n)_t} = K (h_i)_t \quad (4.25.5)$$

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

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

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

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

$K$ ——校正系数；

(3) 按第 4.25.4 条的规定进行计算和制图；

(4) 试验记录格式采用附录 A 中表 A.0.39。

## 4.26 三轴压缩试验

4.26.1 三轴压缩试验可用于测定黏性土、粉土和砂土的总抗剪强度参数和有效抗剪强度参数。根据排水条件的不同，试验分为不固结不排水剪试验(UU)、固结不排水剪试验



(*CU*)和固结排水剪试验(*CD*)等试验类型。

#### 4.26.2 主要仪器设备应符合下列规定。

4.26.2.1 三轴仪(图4.26.2-1)应由压力室、轴向加压设备、周围压力控制系统、孔隙水力量测系统、反压力控制系统、轴向变形和体积变化量测系统组成。

4.26.2.2 附属设备应包括击样器(图4.26.2-2)、饱和器(图4.26.2-3)、切土盘(图4.26.2-4)、切土器和切土架(图4.26.2-5)、分样器(图4.26.2-6)、承膜筒(图4.26.2-7)和用于冲填土或砂土的制备砂样圆模(图4.26.2-8)。

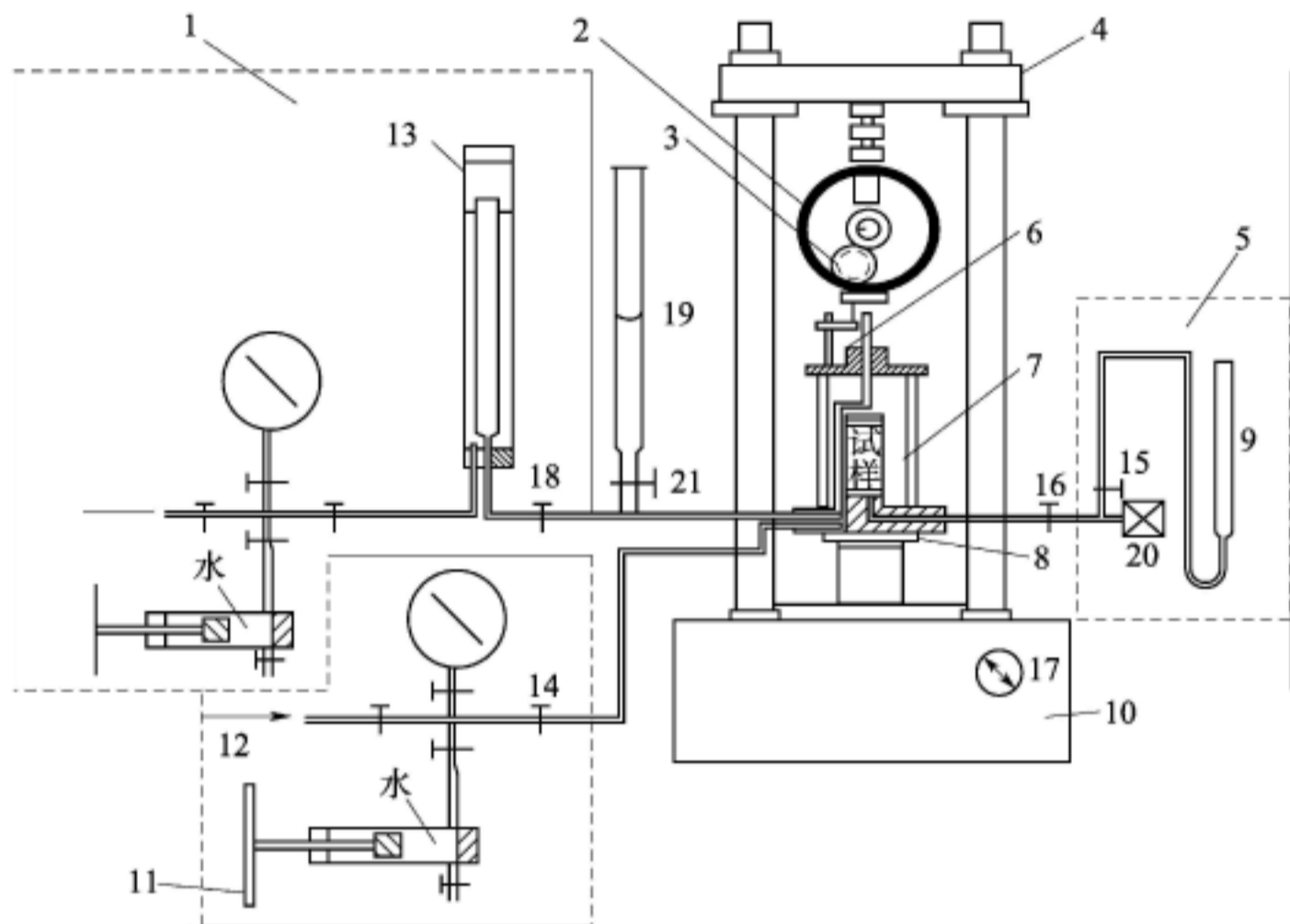


图4.26.2-1 三轴仪组成示意图

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

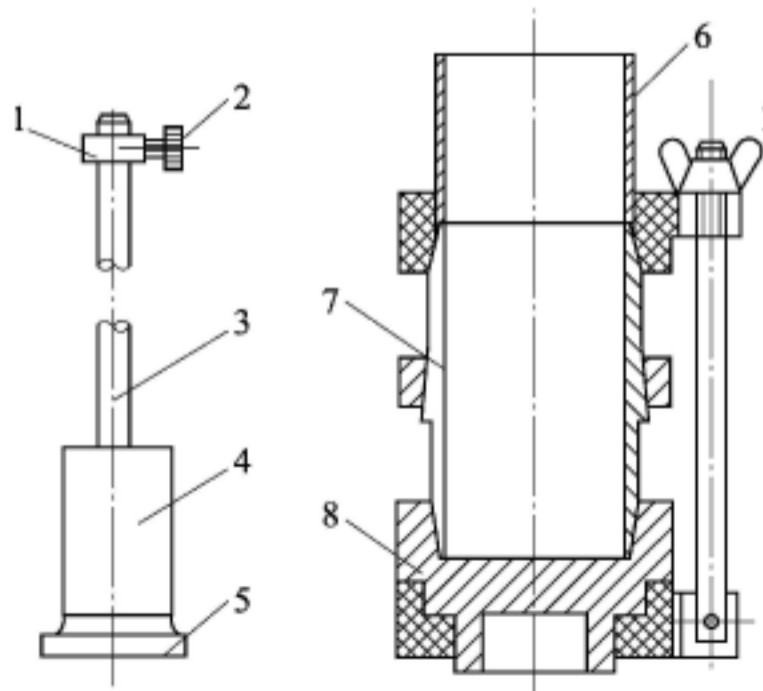


图4.26.2-2 击样器

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

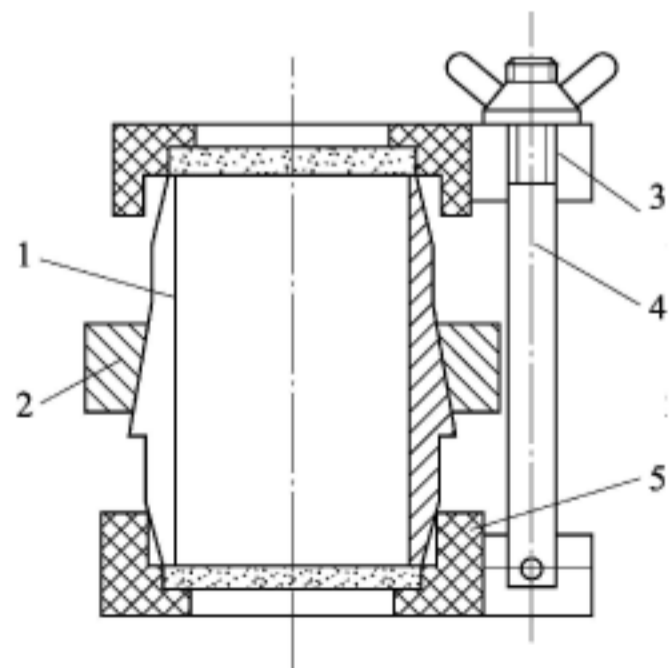


图4.26.2-3 饱和器

1-土样筒;2-紧箍;3-夹板;4-拉杆;5-透水板

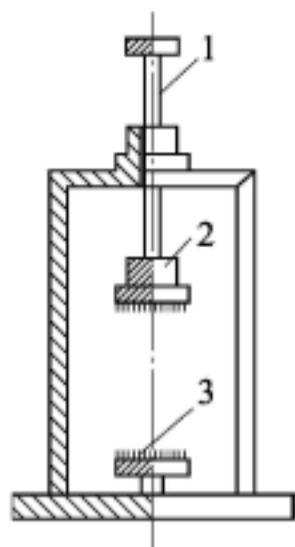


图 4.26.2-4 切土盘  
1-转轴;2-上盘;3-下盘

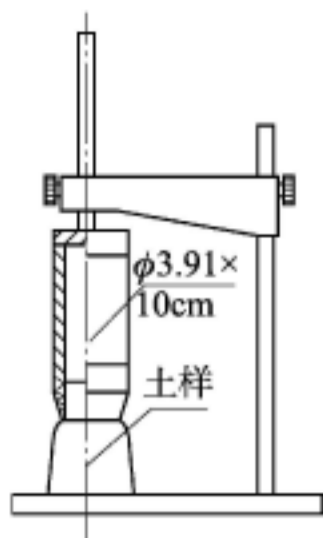


图 4.26.2-5 切土器和切土架

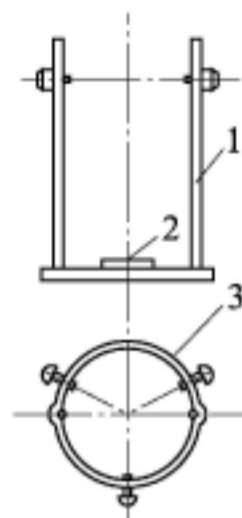


图 4.26.2-6 分样器  
1-滑杆;2-底座;3-钢丝架

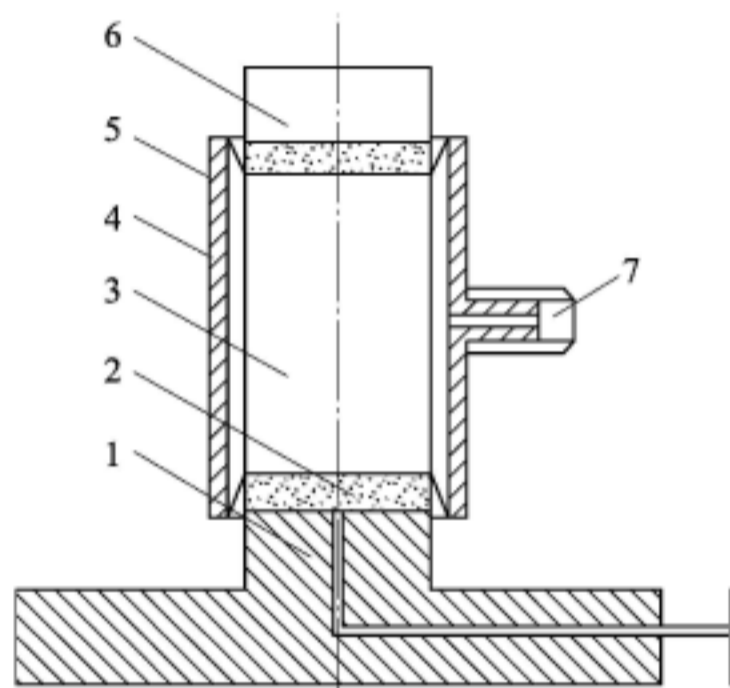


图 4.26.2-7 承膜筒安装示意图  
1-压力室底座;2-透水板;3-试样;4-承膜筒;  
5-橡皮膜;6-上帽;7-吸气孔

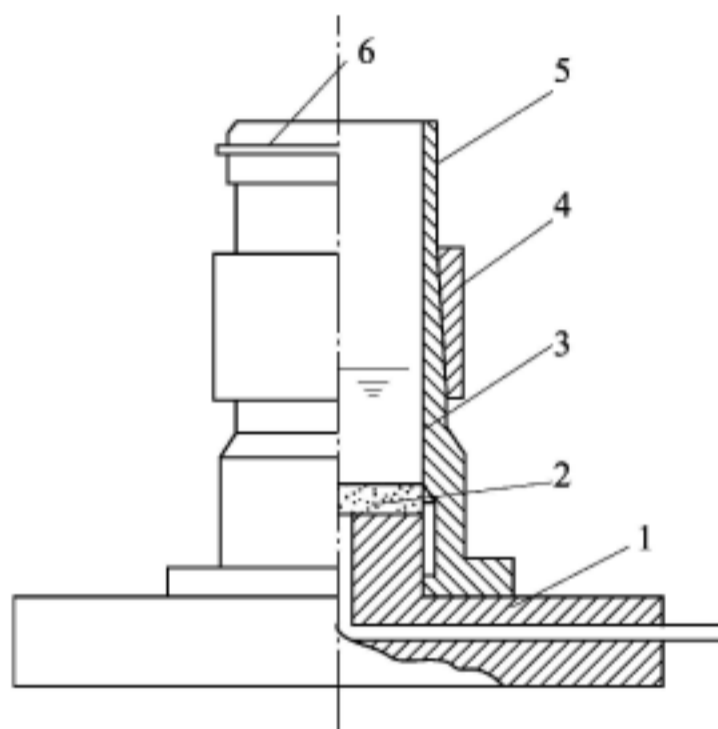


图 4.26.2-8 制备砂样圆模  
1-压力室底座;2-透水板;3-制样圆模(两片合成)  
4-紧箍;5-橡皮膜;6-橡皮圈

**4.26.2.3** 天平最大称量为 200g 时,最小分度值不应大于 0.01g;最大称量为 1000g 时,最小分度值不应大于 0.1g;最大称量为 5000g 时,最小分度值不应大于 1g。

**4.26.2.4** 量表的量程为 30mm,最小分度值不应大于 0.01mm。

**4.26.2.5** 对直径 39.1mm 和 61.8mm 的试样,橡皮膜厚度宜为 0.1mm~0.2mm;对直径 101mm 的试样,橡皮膜厚度宜为 0.2mm~0.3mm。

**4.26.2.6** 试验前应检查下列内容:

(1) 周围压力和反压力的测量精度小于全量程的 1%,采用传感器时,其测量精度小于全量程的 0.5%,根据试样的强度大小,选择不同量程的测力计,最大轴向压力的准确度不低于 1%;

(2) 完全排除孔隙水压力量测系统内的气泡;系统内的气泡用纯水并施加压力使气泡上升至试样顶部沿底座溢出,测量系统的体积变化因数小于  $1.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{kPa}$ ;

(3) 管路通畅,活塞能自由滑动,各连接处无漏水漏气现象;

(4) 在使用前仔细检查橡皮膜,其方法是扎紧两端,在膜内充气,然后沉入水下检查无气泡溢出。



**4.26.3 试样的制备和饱和应符合下列规定。**

**4.26.3.1 试样的制备应满足下列要求：**

(1) 试样直径为 35.0mm、39.1mm、50.0mm、61.8mm 或 101.0mm，高度与直径之比为 2.0~2.5；当试样的直径小于 100mm 时试样的允许最大粒径为直径的 1/10；当试样的直径大于或等于 100mm 时试样的允许最大粒径为直径的 1/5；对于有裂缝、软弱面或构造面的试样，试样直径采用 61.8mm 或 101.0mm；

(2) 原状土试样制备时，根据土样的软硬程度，分别用切土盘和切土器按第(1)项的尺寸要求切削成圆柱形试样，试样两端平整，并垂直于试样轴；当试样侧面或端部有小石子或凹坑时，允许用削下的余土修整；试样切削时尽量避免扰动，并取余土测定试样的含水率；对于较软的土样，用钢丝锯或切土刀切取稍大于规定尺寸的土柱，放在切土盘上下圆盘之间，将钢丝锯或切土刀紧靠侧板，由上而下细心切削，边切削边转动圆盘，直至土样被削成规定的直径为止；对于较硬的土样，用切土刀切取稍大于规定尺寸的土样，放在切土架上，用切土器切削土样，边削边压切土器，直至切削到超出试样高度 2cm 为止；拆开切土器，将试样取出，按要求的高度将两端削平；

(3) 扰动土试样制备时，采用击实法或土膏法；根据预定的干密度和含水率参考第 4.21.7 条的方法制备击实法试样，并测定试样的含水率，试样的含水率与要求的含水率的差值小于  $\pm 1\%$ ；在击样器内分层击实，粉土为 3~5 层，黏性土为 5~8 层，各层土样数量相等，刮毛各层接触面；击完最后一层，将击样器内试样两端整平；

(4) 砂土试样制备时，先在压力室底座上依次放上不透水板、橡皮膜和对开圆膜；将砂料填入对开圆膜内，分三层按预定干密度击实；当制备饱和试样时，在对开圆膜内注入纯水至 1/3 高度，将煮沸的砂料分三层填入，达到预定高度；放不透水板、试样帽、扎紧橡皮膜；对试样内部施加 5kPa 的负压力，使试样能站立，拆除对开膜；

(5) 对制备好的试样称量，计算湿密度，对于同一组试样，密度的差值不大于  $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ ；试样高度和直径用卡尺量测，试样的平均直径按式(4.26.3)计算。

$$D_0 = \frac{D_1 + 2D_2 + D_3}{4} \quad (4.26.3)$$

式中  $D_0$ ——试样的平均直径(mm)；

$D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ ——分别为试样上、中、下部位的直径(mm)。

**4.26.3.2 试样的饱和应满足下列要求：**

(1) 抽气饱和时，将装有试样的饱和器置于真空缸内进行抽气，当真空度接近 1 个大气压后再继续抽气 1h~2h，徐徐注入清水，并保持真空度稳定，待饱和器完全被水淹没即停止抽气，在水下静置 10h 以上，然后取出试样并称其质量；

(2) 水头饱和时，对于粉土或粉质砂土，直接在仪器上用水头饱和；试样装于压力室内，施加 20kPa 周围压力，水头高出试样顶部 1m，使纯水从底部进入试样，从试样顶部溢出，直至流入水量和溢出水量相等为止；当需要提高试样的饱和度时，在水头饱和前，从底部将二氧化碳气体通入试样，置换孔隙中的空气，再进行水头饱和；

(3) 反压力饱和时，反压力系统与围压系统相同，只是用双层体变管代替排水量管；



试样装好后,关闭孔隙水压力阀、反压力阀和体变管阀,测记体变管读数;开周围压力阀,对试样施加 20kPa 的周围压力,开孔隙水压力阀,待孔隙水压力稳定后,测记读数后关孔隙水压力阀;开体变管阀和反压阀,同时施加周围压力和反压力,每级增量 30kPa,缓慢打开孔隙水压力阀,检查孔隙水压力增量,待孔隙水压力稳定后测记孔隙水压力和体变管读数,再施加下一级周围压力和反压力;每施加一级压力都测定孔隙水压力;当孔隙水压力增量与周围压力增量之比  $\Delta u/\Delta\sigma_3 > 0.98$  时,认为试样达到饱和。

**4.26.4** 采用不固结不排水剪试验法时应符合下列规定。

**4.26.4.1** 试样的安装,应按下列步骤进行:

(1) 在压力室的底座上,依次放置不透水板、试样、不透水板试样帽;将橡皮膜套在承膜筒内,两端翻出筒外,从吸气孔吸气,使膜贴紧承膜筒内壁,然后套在试样外,放气,翻起橡皮膜的两端,取出承膜筒,并用橡皮圈将橡皮膜两端与底座及试样帽分别扎紧;

(2) 装上压力室罩,安装时先将活塞提升,以防压力室罩安放后碰撞试样,将活塞对准试样帽中心,并均匀地拧紧底座连接螺母;打开排气孔,向压力室内注水,待水从压力室排气孔溢出时,关闭排气孔,并将轴向测力计对准活塞;

(3) 关体变管阀及孔隙压力阀,开周围压力阀,施加周围压力;周围压力大小与工程的实际荷载相适应,并尽可能使最大周围压力与土体的最大实际荷载大致相等,也可以按 100kPa、200kPa、300kPa、400kPa 施加周围压力;

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

**4.26.4.2** 剪切试样应按下列步骤进行:

(1) 电机启动前,检查各阀门开启或关闭状态;

(2) 剪切应变速率为每分钟应变 0.5% ~ 1.0%,按此调整变速箱排挡;

(3) 启动电动机,合上离合器,开始剪切;在开始阶段,试样每产生 0.3% ~ 0.4% 的轴向应变或 0.2mm 变形值,测记测力计读数和轴向位移计读数各一次;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;当遇到试样特别脆硬或软弱时,加密或减小测记次数;

(4) 当测力计读数出现峰值时,继续剪切至轴向应变超过 5%;当测力计读数不出现峰值时,继续剪切至轴向应变为 15% ~ 20%;

(5) 试样剪切结束后,关闭电动机,脱开离合器,关闭压力阀,使压力表退回到零,将压力室降下,打开排气孔,排除压力室内的水,拆卸压力室外罩,取下试样外面的橡皮膜,描述试样的破坏形状,称取试样的质量和测定含水率。

**4.26.4.3** 试验资料的整理应满足下列要求:

(1) 轴向应变按下式计算,保留至 0.1%;

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h_i}{h_0} \times 100 \quad (4.26.4-1)$$

式中  $\varepsilon_1$ ——轴向应变(%);

$\Delta h_i$ ——剪切过程中试样的高度变化(mm);

$h_0$ ——试样初始高度(mm);

(2) 试样剪切时的面积按下式计算,保留至  $1\text{mm}^2$ ;

$$A_\alpha = \frac{A_0}{1 - 0.01\varepsilon_1} \quad (4.26.4-2)$$

式中  $A_\alpha$ ——试样剪切时的面积( $\text{mm}^2$ );

$A_0$ ——试样初始面积( $\text{mm}^2$ );

(3) 主应力差按下式计算:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{F}{A_\alpha} \times 10^3 \quad (4.26.4-3)$$

式中  $\sigma_1 - \sigma_3$ ——主应力差(kPa);

$\sigma_1$ ——大主应力(kPa);

$\sigma_3$ ——小主应力(kPa);

$F$ ——轴向压力(N);

(4) 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 4.26.4-1);取曲线上主应力差峰值作为破坏点,无峰值时,取 15% 轴向应变时的主应力差值作为破坏点;

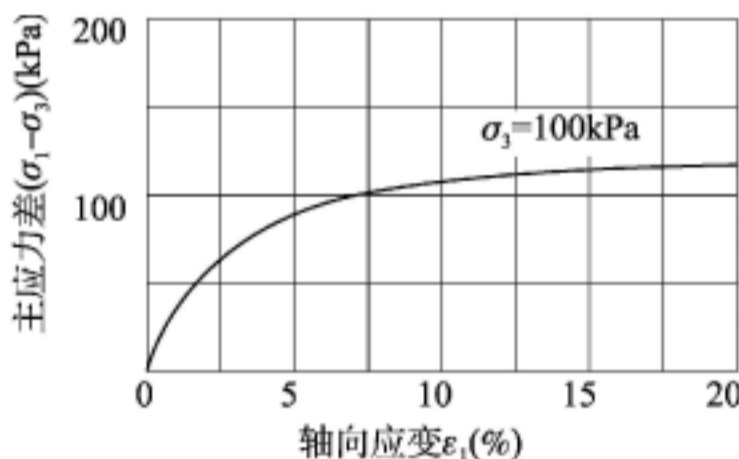


图 4.26.4-1 主应力差与轴向应变关系曲线

(5) 以剪应力为纵坐标,法向应力为横坐标,横坐标上以破坏时的  $\frac{\sigma_{1f} + \sigma_{3f}}{2}$  为圆心,以

$\frac{\sigma_{1f} - \sigma_{3f}}{2}$  为半径,在  $\tau \sim \sigma$  应力平面上绘制破损应力圆,并绘制不同周围压力下破损应力

圆的包线,求出不排水强度参数(图 4.26.4-2);

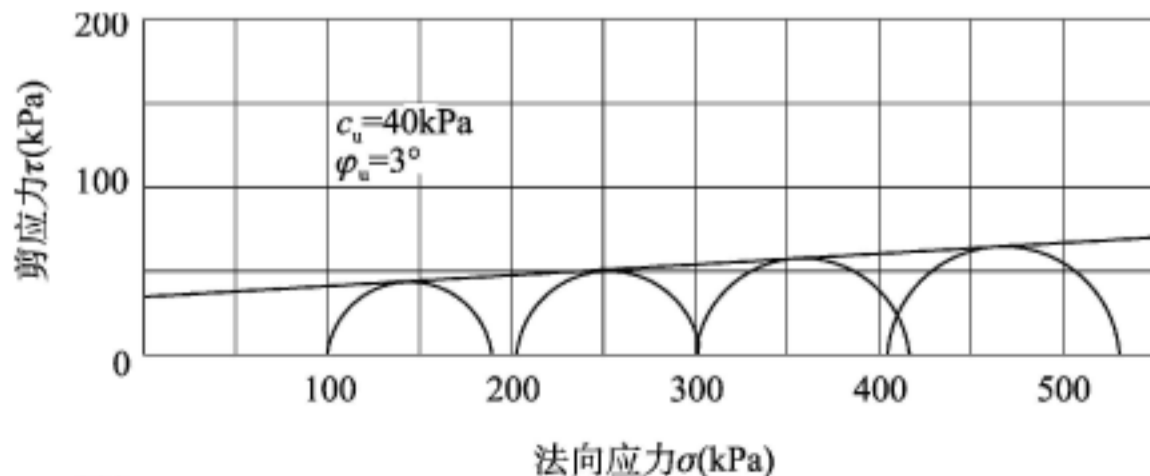


图 4.26.4-2 不固结不排水剪强度包线

(6) 试验记录格式采用附录 A 中表 A.0.40。



#### 4.26.5 采用固结不排水剪试验时应符合下列规定。

##### 4.26.5.1 试样的安装,应按下列步骤进行:

(1) 开孔隙水压力阀和量管阀,使孔隙水压力系统及压力室底座充水排气后,关闭孔隙水压力阀和量管阀;在压力室底座上依次放透水板、湿滤纸、试样、湿滤纸、透水板,必要时在试样的周围贴浸过水的滤纸条 7~9 条;将橡皮膜用承膜筒套在试样外,并用橡皮圈将橡皮膜下端与底座扎紧;

(2) 打开孔隙水压力阀和量管阀,使水缓慢地从试样底部流入,排除试样与橡皮膜之间的气泡,关闭孔隙水压力阀和量管阀;打开排水阀,使试样帽中充水,放在透水板上,用橡皮圈将橡皮膜试样帽上端与试样扎紧,降低排水管,使管内水位位于试样中心以下 20cm~40cm,吸除试样与橡皮膜之间的多余水分,关闭排水阀;需要测定应力应变关系时,在试样与透水板之间放置中间夹有硅脂的两层圆形橡皮膜,膜中间留有直径为 1cm 的圆孔;

(3) 安装压力室罩并充水;调整升降台,同时转动活塞,当轴向测力计有微读数时表示活塞已与试样帽接触,然后将轴向测力计和轴向位移计的读数调整到零位。

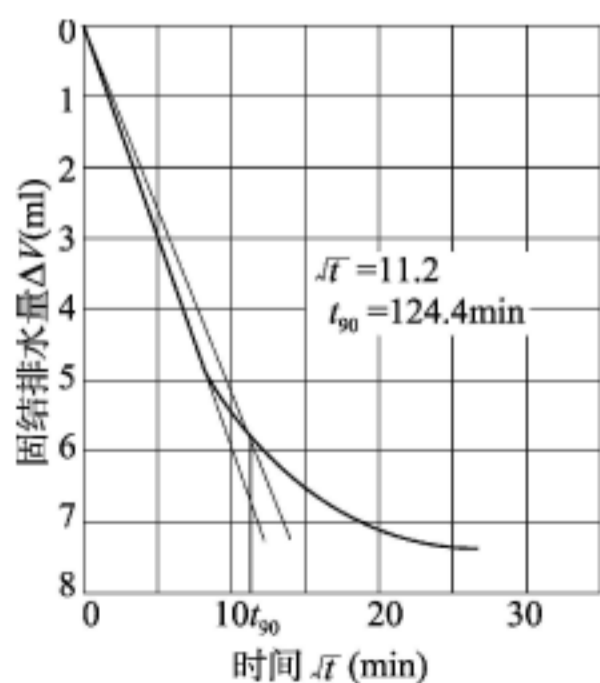
##### 4.26.5.2 试样的排水固结应按下列步骤进行:

(1) 调整量管水面位于试样中心高度,测记排水管水面读数;

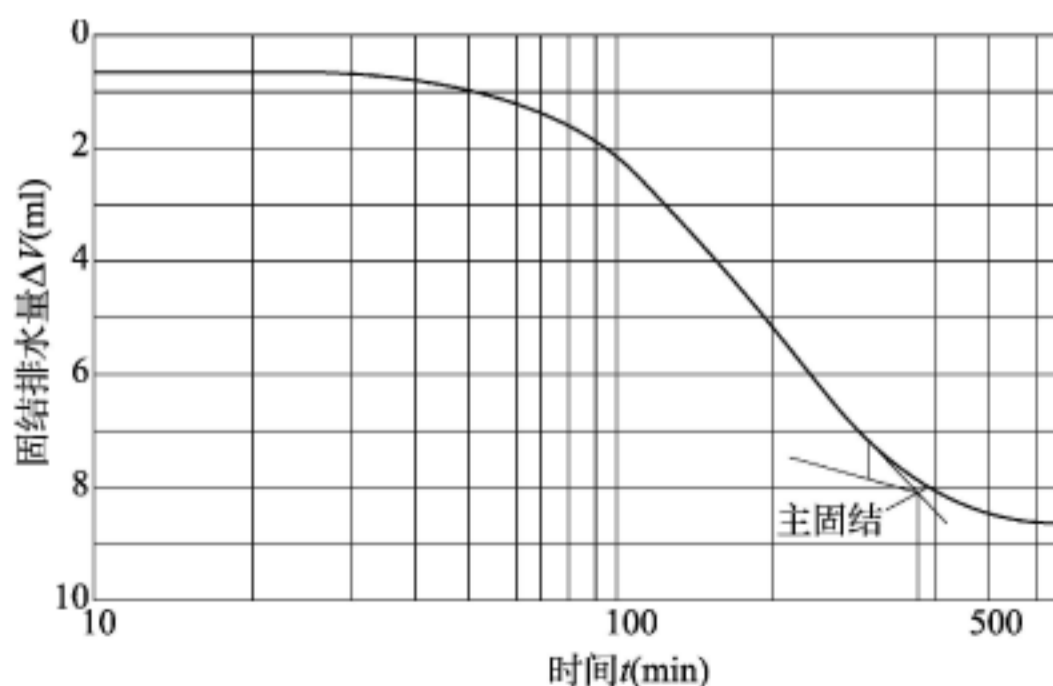
(2) 开孔隙水压力阀,使孔隙水压力等于大气压力,关闭孔隙水压力阀,测记孔隙水压力的起始读数;当需要施加反压时,按第 4.26.3.2 款第(3)项的规定进行;

(3) 施加周围压力,开启孔隙水压力阀,待孔隙水压力稳定后测定孔隙水压力,减去起始读数即为初始孔隙水压力;当不测孔隙水压力时,不做本项要求的试验;

(4) 开启排水管阀,同时记时间读数,按 6s、15s、1min、2min15s、4min、6min15s、9min、12min15s、16min、20min15s、25min、30min15s、36min、42min15s、49min、64min、100min、200min、400min、23h、24h,测记排水管水面和孔隙水压力读数,直到孔隙水压力消散 95% 以上,随时绘制排水量  $\Delta V$  与时间平方根或时间对数曲线见图 4.26.5-1(a)、(b) 或孔隙水压力消散度与时间对数曲线;



(a) 固结排水量与时间平方根曲线



(b) 固结排水量与时间对数曲线

图 4.26.5-1 排水量与排水时间的关系曲线



(5) 固结完成后,关闭排水阀或体变管阀,记下体变管或排水管和孔隙水压力计的读数,微调压力室底座,到测力计读数开始微动时,表示活塞已与试样接触,记下轴向位移计读数,即为固结下沉量  $\Delta h$ ; 依此算出固结后试样高度  $h_c$ ,然后将测力计、垂直位移计读数都调至零。

#### 4.26.5.3 剪切试样应按下列步骤进行:

(1) 黏性土的剪切应变速率为每分钟应变  $0.05\% \sim 0.10\%$ ; 粉土的剪切应变速率为每分钟应变  $0.1\% \sim 0.5\%$ ;

(2) 将测力计、轴向位移计、孔隙水压力读数均调整至零;

(3) 启动电动机,合上离合器,开始剪切,测力计、轴向位移计、孔隙水压力按第 4.26.4.2 款第(3)项、第(4)项的步骤进行测记;

(4) 试样剪切结束后,关闭电动机,脱开离合器,关闭压力阀,使压力表退回到零,将压力室降下,打开排气孔,排除压力室内的水,拆卸压力室外罩,拆除试样,描述试样破坏形状,称取试样的质量和测定含水率。

#### 4.26.5.4 试验资料的整理应满足下列要求:

(1) 试样固结后的高度按下式计算,保留至  $0.1\text{mm}$ ;

$$h_c = h_0 \left( 1 - \frac{\Delta V}{V_0} \right)^{1/3} \quad (4.26.5-1)$$

式中  $h_c$ ——试样固结后高度( $\text{mm}$ );

$h_0$ ——试样固结前高度( $\text{mm}$ );

$\Delta V$ ——试样固结前后体积变化( $\text{mm}^3$ ),由实测或试验前后质量差换算;

$V_0$ ——试样固结前体积( $\text{mm}^3$ );

(2) 试样固结后的面积按下式计算,保留至  $1\text{mm}^2$ ;

$$A_c = A_0 \left( 1 - \frac{\Delta V}{V_0} \right)^{2/3} \quad (4.26.5-2)$$

式中  $A_c$ ——试样固结后面积( $\text{mm}^2$ );

$A_0$ ——试样固结前面积( $\text{mm}^2$ );

(3) 试样剪切时的面积按下列公式计算,保留至  $1\text{mm}^2$ ;

$$A_\alpha = \frac{A_c}{1 - 0.01\varepsilon_1} \quad (4.26.5-3)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h_i}{h_c} \times 100 \quad (4.26.5-4)$$

式中  $A_\alpha$ ——试样剪切时的面积( $\text{mm}^2$ );

$\varepsilon_1$ ——轴向应变( $\%$ );

$\Delta h_i$ ——剪切过程中试样的高度变化( $\text{mm}$ );

(4) 主应力差按式(4.26.4-3)计算;

(5) 有效主应力比按下式计算:

$$\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3} = \frac{\sigma_1 - u}{\sigma_3 - u} \quad (4.26.5-5)$$

式中  $\sigma'_1, \sigma'_3$ ——有效大主应力和有效小主应力 (kPa);

$u$ ——孔隙水压力 (kPa);

(6) 孔隙压力系数按下列公式计算:

$$B = \frac{u}{\sigma_3} \quad (4.26.5-6)$$

$$A = \frac{u_d}{B(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (4.26.5-7)$$

式中  $B, A$ ——孔隙水压力系数;

$u$ ——试样在周围压力下产生的初始孔隙水压力 (kPa);

$u_d$ ——试样在主应力差  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  下产生的孔隙水压力 (kPa);

(7) 根据需要分别绘制主应力差  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  与轴向应变  $\varepsilon_1$  的关系曲线 (图 4.26.5-2), 有效主应力比  $(\sigma'_1/\sigma'_3)$  与轴向应变  $\varepsilon_1$  的关系曲线 (图 4.26.5-3), 孔隙水压力  $u$  与轴向应变  $\varepsilon_1$  的关系曲线 (图 4.26.5-4); 用  $\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right)$  与  $\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \left( \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right)$  作坐标的应力路径关系曲线 (图 4.26.5-5);

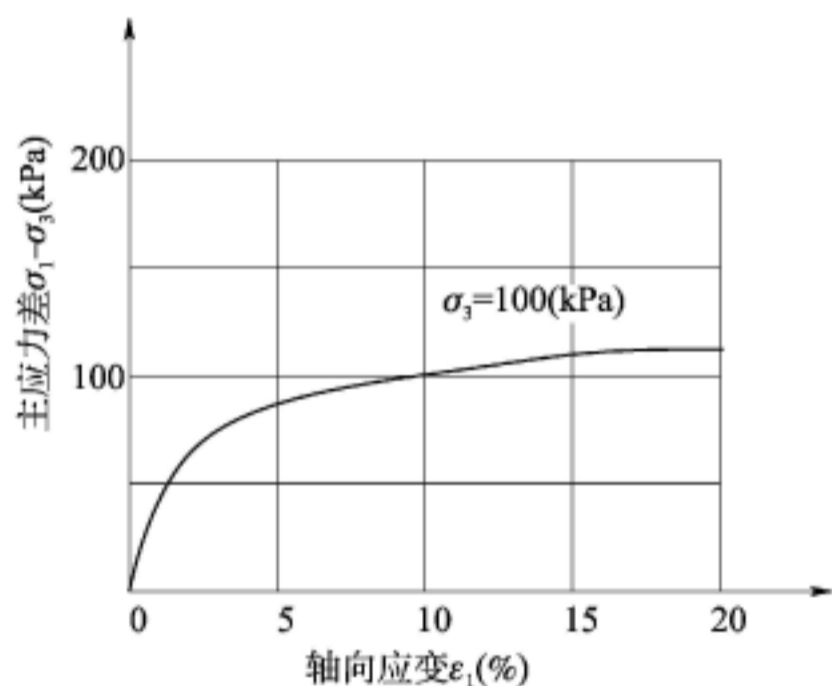


图 4.26.5-2 主应力差与轴向应变关系曲线

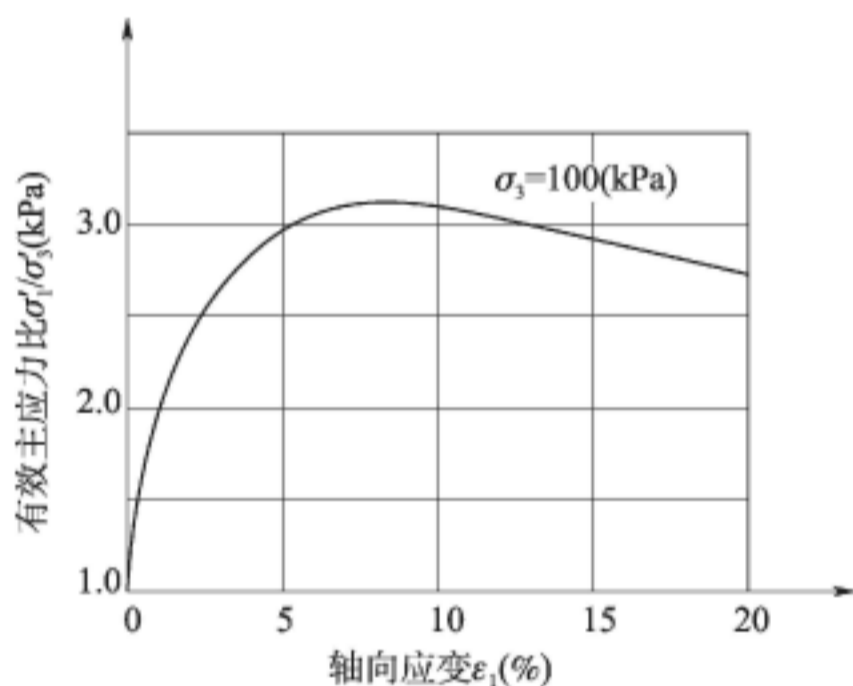


图 4.26.5-3 有效主应力比与轴向应变关系曲线

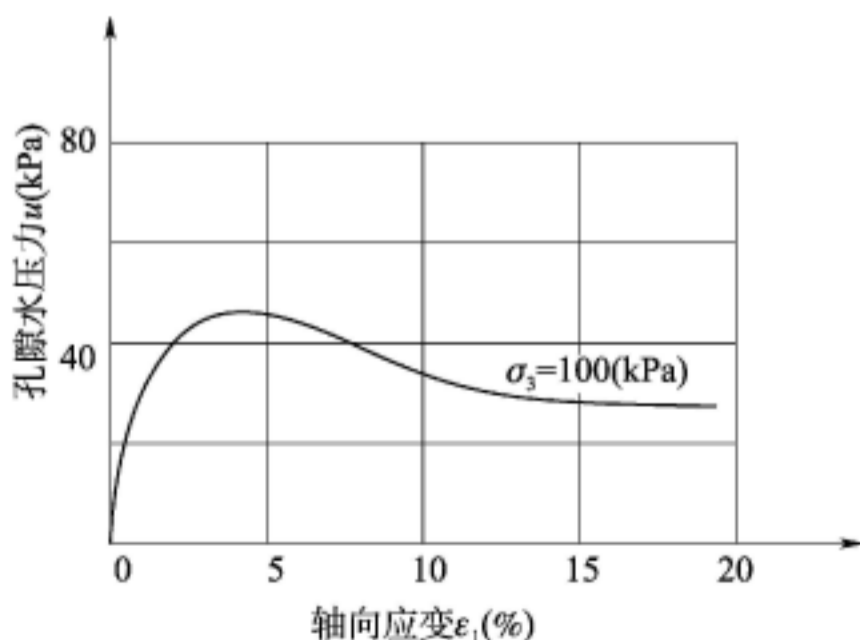


图 4.26.5-4 孔隙水压力与轴向应变关系曲线

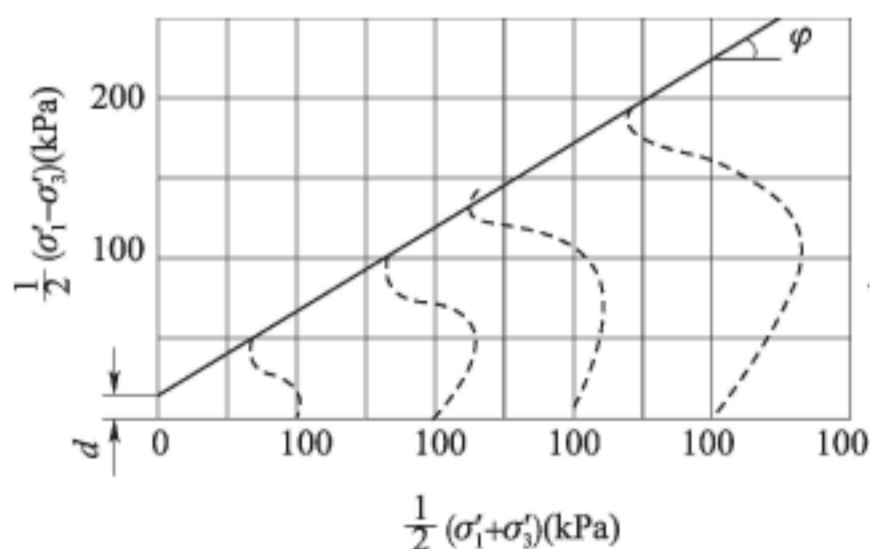


图 4.26.5-5 应力路径曲线(正常固结黏土)

(8) 以  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  或  $\sigma'_1/\sigma'_3$  的峰点值作为破坏点; 如  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  和  $\sigma'_1/\sigma'_3$  均无峰值,

以应力路径的密集点或按一定轴向应变相应的 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 或 $\sigma_1/\sigma_3$ 作为破坏强度值,一般轴向应变取15%,经过论证也可以根据工程情况选取破坏应变;

(9)对固结不排水剪切试验,以法向应力 $\sigma$ 为横坐标,剪应力 $\tau$ 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,绘制破坏总应力圆后,做诸圆包线,即为强度包线, $f$ 注脚表示破坏时的值;该包线的倾角为内摩擦角 $\varphi_{cu}$ ,包线在纵轴上的截距为黏聚力 $C_{cu}$ ,见图4.26.5-6;

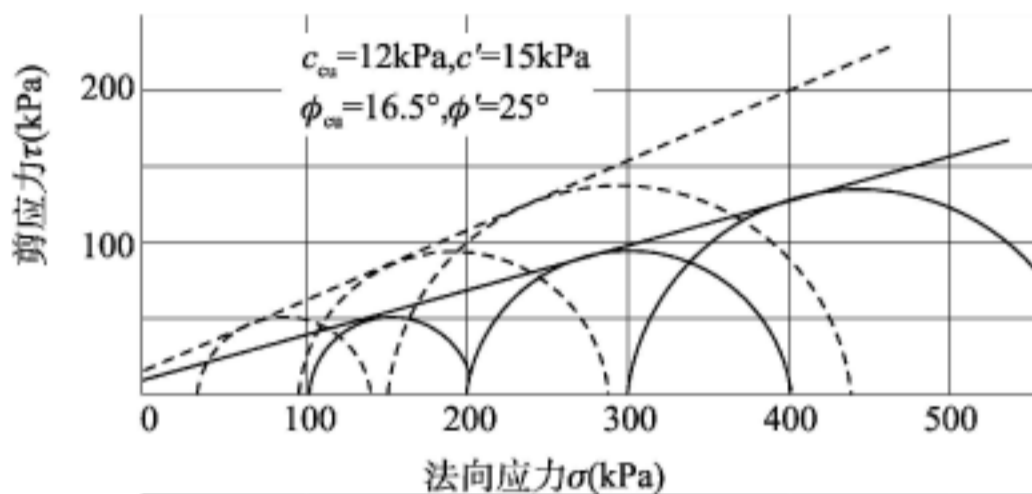


图4.26.5-6 固结不排水剪强度包线

(10)试验记录格式采用附录A中表A.0.41。

#### 4.26.6 采用固结排水剪试验法时应符合下列规定:

- (1)试样安装、固结、剪切按第4.26.5.1款、第4.26.5.2款、第4.26.5.3款规定的步骤进行;但在剪切过程中要求打开排水阀,剪切速度采用每分钟应变0.003%~0.012%;
- (2)试样固结后的高度、面积,按式(4.26.5-1)和式(4.26.5-2)计算;
- (3)剪切时试样面积的校正按下式计算:

$$A_{\alpha} = \frac{V_c - \Delta V_i}{h_c - \Delta h_i} \quad (4.26.6)$$

式中  $A_{\alpha}$ ——校正后的试样剪切面积( $\text{mm}^2$ );

$V_c$ ——试样固结后体积( $\text{mm}^3$ );

$\Delta V_i$ ——剪切过程中试样的体积变化( $\text{mm}^3$ );

$h_c$ ——试样固结后高度(mm);

$\Delta h_i$ ——剪切过程中试样的高度变化(mm);

(4)主应力差按式(4.26.4-3)计算;

(5)有效应力比及孔隙水压力系数,按式(4.26.5-5)、式(4.26.5-6)和式(4.26.5-7)计算;

(6)根据第4.26.5.4款第(7)项的规定,绘制主应力差与轴向应变关系曲线、主应力比与轴向应变关系曲线;

(7)以体积应变为纵坐标,轴向应变为横坐标,绘制体应变与轴向应变关系曲线图;

(8)破损应力圆、有效内摩擦角和有效黏聚力按第4.26.5.4款第(9)项规定的步骤绘制和确定,见图4.26.6;

(9)固结排水剪三轴试验的记录格式采用附录A中表A.0.42。



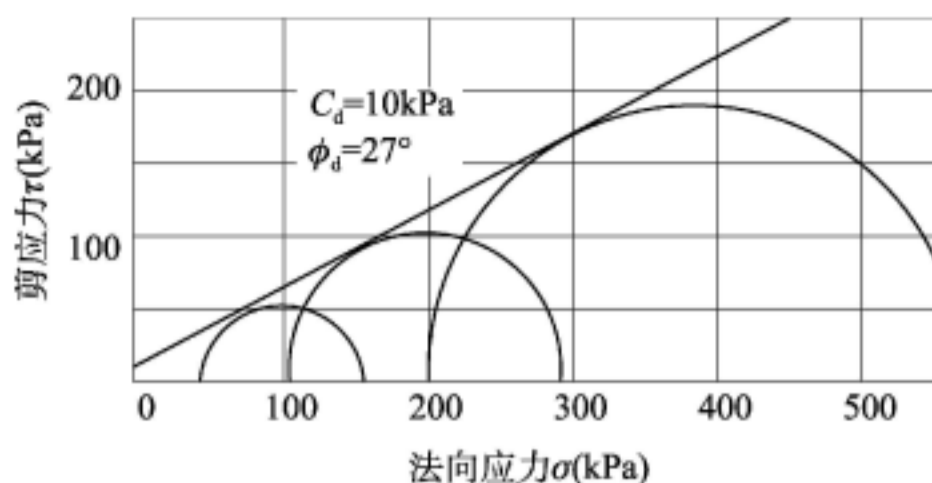


图 4.26.6 固结排水剪强度包线

4.26.7 采用一个试样多级加荷三轴压缩试验时应符合下列规定。

4.26.7.1 一个试样多级加荷三轴压缩试验应采用一个试样多级施加周围压力和轴向压力进行剪切,测定土的总强度参数  $c$ 、 $\varphi$  和有效强度参数  $c'$ 、 $\varphi'$ ;试验可用于无法取得多个试样进行三轴试验的原状硬土、扰动土或有不规则裂隙的裂土。

4.26.7.2 试验的仪器设备应符合第 4.26.2 条的规定。

4.26.7.3 不固结不排水剪试验,应按下列步骤进行:

(1) 试样的安装,按第 4.26.4.1 款规定的步骤进行;

(2) 施加第一级周围压力,试样剪切按第 4.26.4.2 款第(2)项规定的应变速率进行;当测力计读数达到稳定或出现倒退时,记录轴向位移计读数和测力计读数;关闭电机停止剪切,将轴向压力退至零;

(3) 施加第二级周围压力,此时测力计读数因施加周围压力而增加,重新调至原来读数,使测力计与试样帽接触,并按同样的方法剪切到测力计读数稳定;如此进行第三、第四级周围压力下的剪切,累计的轴向应变不超过 20%;

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

(5) 按第 4.26.4.3 款的规定进行计算和绘图,试样的轴向应变按累计变形计算(图 4.26.7-1)。

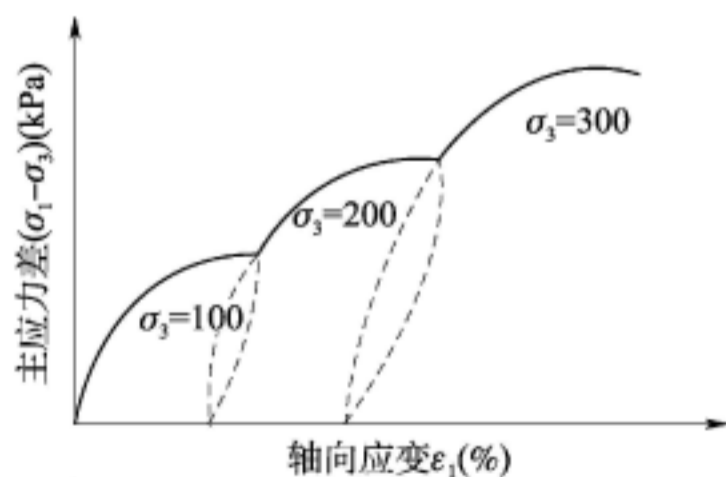


图 4.26.7-1 不固结不排水剪的应力与应变关系曲线

4.26.7.4 固结不排水剪试验,应按下列步骤进行:

(1) 试样的安装按第 4.26.5.1 款规定的步骤进行;

(2) 试样的固结按第 4.26.5.2 款的规定进行;第一级周围压力可以采用 50kPa,第二级和以后各级周围压力不小于前一级周围压力下的破坏大主应力;

(3) 试样的剪切按第 4.26.5.3 款的规定进行;第一级剪切完成后,退除轴向压力,待孔隙水压力稳定后施加第二级周围压力,进行排水固结;

(4) 固结完成后进行第二级周围压力的剪切,并按上述步骤进行第三级周围压力下的剪切,累计的轴向应变不超过 20%;

(5) 试验结束后,拆除试样,称试样的质量,并测定含水率;

(6) 计算及绘图按第 4.26.5.4 款的规定进行;试样的轴向变形,以前一级剪切終了退去轴向压力后的试样高度作为最后一级的起始高度,计算各级周围压力下的轴向应变,见图 4.26.7-2。

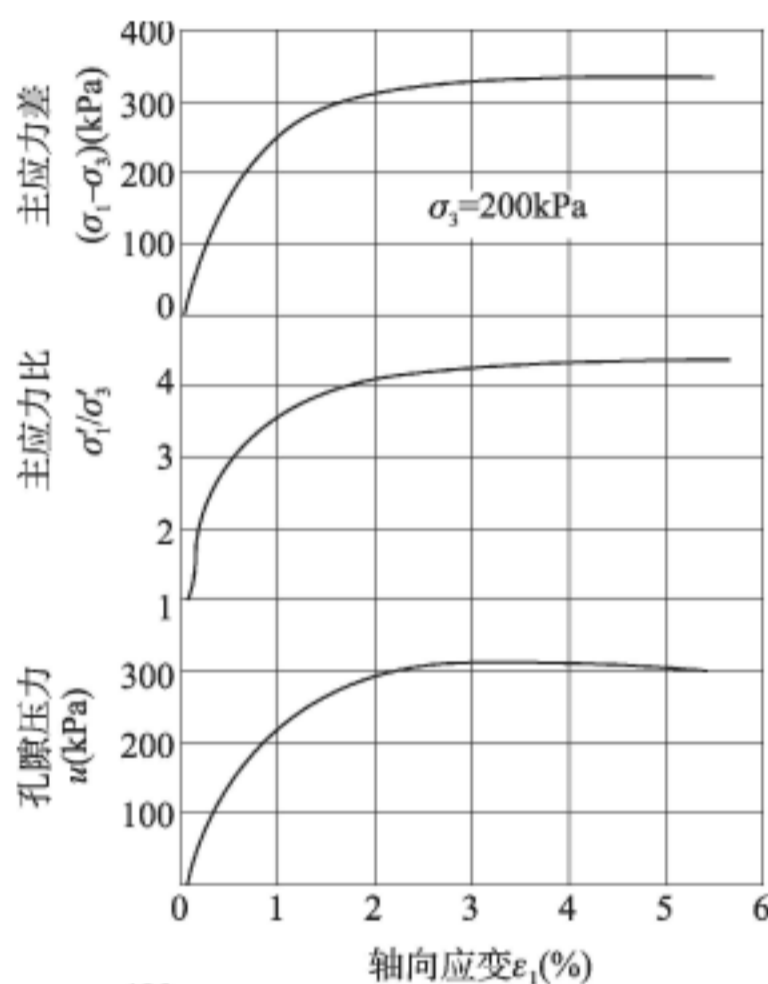


图 4.26.7-2 固结不排水剪应力与应变曲线

**4.26.7.5** 一个试样多级加荷三轴压缩试验的记录格式与第 4.26.4.3 款第(6)项和第 4.26.5.4 款第(10)项要求相同。

## 4.27 振动三轴试验

**4.27.1** 振动三轴试验可用于饱和砂土、粉土和黏性土,宜采用固结不排水试验。

**4.27.2** 主要仪器设备应符合下列规定:

**4.27.2.1** 振动三轴仪应包括主机、静力控制系统、动力控制系统和量测系统。

**4.27.2.2** 附属设备应符合第 4.26.2.2 款的规定。

**4.27.2.3** 天平最大称量为 200g 时,最小分度值不应大于 0.01g;称量为 1000g 时,最小分度值不应大于 0.1g。

**4.27.3** 试验应符合下列规定。

**4.27.3.1** 按照第 4.26.3 条的规定制备试样,直径宜为 39.1mm 或 50mm。试样的饱和应采取向试样内反复通入脱气水,二氧化碳气体或施加反压等措施。试样饱和后,应进行孔隙水压力检测。孔隙水压力系数 B 值小于 0.97 时,应继续排气或施加反压饱和,直



至 B 值满足要求。

#### 4.27.3.2 试样的安装应按下列方法进行：

(1) 先将激振器动圈调至水平位置，打开供水阀，使试样底座充水排气，当溢出的水不含气泡时，按第 4.26.5.1 款的规定安装试样；

(2) 砂样安装在试样制备过程中完成。

#### 4.27.3.3 试样的固结应满足下列要求：

(1) 等向固结时，先对试样施加 20kPa 的侧压力，然后逐级施加均等的侧向压力和轴向压力，直到侧向压力和轴向压力相等并达到预定压力；

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

(3) 对施加反压力的试样，按第 4.26.3.2 款第(3)项的规定施加反压力；

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

(5) 固结完成后关排水阀，并计算振前干密度。

#### 4.27.3.4 动强度(液化)试验应按下列操作步骤进行：

(1) 选择合适的波形参数或加载由现场采集的地震波形，设置合适的振动频率，对振动频率无特殊要求时，采用 1Hz；

(2) 预估动应力并设置变形、振动周次等参数，使仪器设备处于工作状态；

(3) 各项初始参数设置完毕后，对试样施加预估的动应力；

(4) 对等向固结的试样，当孔隙压力等于侧向压力；不等向固结的试样，应变达 10% 时，再振 10~20 周停机；测记振后的排水量和轴向变形量；

(5) 卸除压力，拆除试样，关闭仪器电源，记录试样破坏形态并称试样质量；

(6) 对同一密度的试样，选择 1~3 个固结比，在同一固结比下，选择 1~3 个不同的侧向压力，每一侧向压力下用 3 至 4 个试样，选择 10 周、20~30 周和 100 周左右的振动破坏周次，按第(1)项~第(5)项的规定进行试验。

#### 4.27.3.5 动弹性模量和阻尼比应按下列操作步骤进行：

(1) 仪器的预热和调试按第 4.27.3.4 款第(1)项、第(2)项的规定进行；

(2) 选择动力大小，在不排水条件下对试样施加动应力，测记动应力、动应变和动孔隙水压力，同时绘制动应力和动应变滞回圈，直到预定振次时停机，拆样；

(3) 同一干密度的试样，在同一固结应力比下，在 1~3 个不同的侧压力下试验，每一侧压力，用 5~6 个试样，改变 5~6 级动力，按第(1)项、第(2)项的规定进行试验。

#### 4.27.4 资料的整理应符合下列规定。

##### 4.27.4.1 试样在静应力状态的固结应力比和初始剪应力比应按下列公式计算：

$$K_c = \frac{\sigma'_{1c}}{\sigma'_{3c}} = \frac{\sigma_{1c} - u_0}{\sigma_{3c} - u_0} \quad (4.27.4-1)$$



$$\alpha = \frac{\tau_0}{\sigma'_0} \quad (4.27.4-2)$$

$$\tau_0 = \frac{(K_c - 1)\sigma'_{3c}}{2} = \frac{\sigma_{1c} - \sigma_{3c}}{2} \quad (4.27.4-3)$$

$$\sigma'_0 = \frac{(K_c + 1)\sigma'_{3c}}{2} = \frac{\sigma_{1c} + \sigma_{3c}}{2} - u_0 \quad (4.27.4-4)$$

式中  $K_c$ ——固结应力比；

$\sigma'_{1c}$ ——有效轴向固结应力(kPa)；

$\sigma'_{3c}$ ——有效侧向固结应力(kPa)；

$\sigma_{1c}$ ——轴向固结应力(kPa)；

$\sigma_{3c}$ ——侧向固结应力(kPa)；

$u_0$ ——初始孔隙水压力(kPa)；

$\alpha$ ——初始剪应力比；

$\tau_0$ ——振前试样  $45^\circ$  面上的初始剪应力(kPa)；

$\sigma'_0$ ——振前试样  $45^\circ$  面上的初始有效法向应力(kPa)。

#### 4.27.4.2 动应力和动应变的计算应满足下列要求：

(1) 动应力按下式计算：

$$\sigma_d = \frac{p}{A_c} \times 10^3 \quad (4.27.4-5)$$

式中  $\sigma_d$ ——动应力(kPa), 取初始值；

$p$ ——动荷载(N)；

$A_c$ ——试样固结后面积( $\text{mm}^2$ )；

(2) 动应变按下式计算：

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta h_d}{h_c} \times 100 \quad (4.27.4-6)$$

式中  $\varepsilon_d$ ——动应变(%)；

$\Delta h_d$ ——动变形(mm)；

$h_c$ ——固结后试样高度(mm)。

#### 4.27.4.3 动剪应力、总剪应力、液化应力比的计算应满足下列要求：

(1) 动剪应力按下式计算：

$$\tau_d = \frac{1}{2}\sigma_d \quad (4.27.4-7)$$

式中  $\tau_d$ ——动剪应力(kPa)；

$\sigma_d$ ——动应力(kPa), 取初始值；

(2) 总剪应力按下式计算：

$$\tau_{sd} = \frac{\sigma_{1c} - \sigma_{3c} + \sigma_d}{2} = \tau_0 + \tau_d \quad (4.27.4-8)$$

式中  $\tau_{sd}$ ——总剪应力(kPa)；

- $\sigma_{1c}$ ——轴向固结应力(kPa);  
 $\sigma_{3c}$ ——侧向固结应力(kPa);  
 $\tau_0$ ——振前试样 $45^\circ$ 面上的剪应力(kPa);

(3) 液化应力比按下式计算:

$$\frac{\tau_d}{\sigma'_0} = \frac{\sigma_d}{2\sigma'_0} \quad (4.27.4-9)$$

式中  $\frac{\tau_d}{\sigma'_0}$ ——液化应力比;

$\sigma'_0$ ——振前试样 $45^\circ$ 面上的有效法向应力(kPa)。

**4.27.4.4** 不同固结比时不同侧压力下的动剪应力和振次关系曲线应以动剪应力为纵坐标、以破坏振次的对数为横坐标绘制,如图 4.27.4-1 所示。

**4.27.4.5** 给定振次下不同初始剪应力比时的总剪应力与有效法向应力关系曲线应以振动破坏时试样 $45^\circ$ 面上的总剪应力为纵坐标、以振前试样 $45^\circ$ 面上的有效法向应力为横坐标绘制,如图 4.27.4-2 所示。

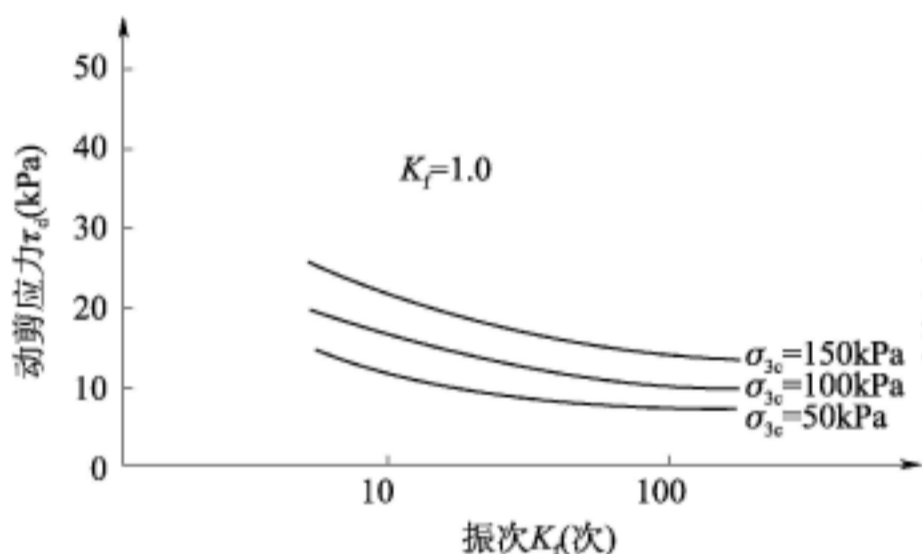


图 4.27.4-1 动剪应力与振次关系曲线

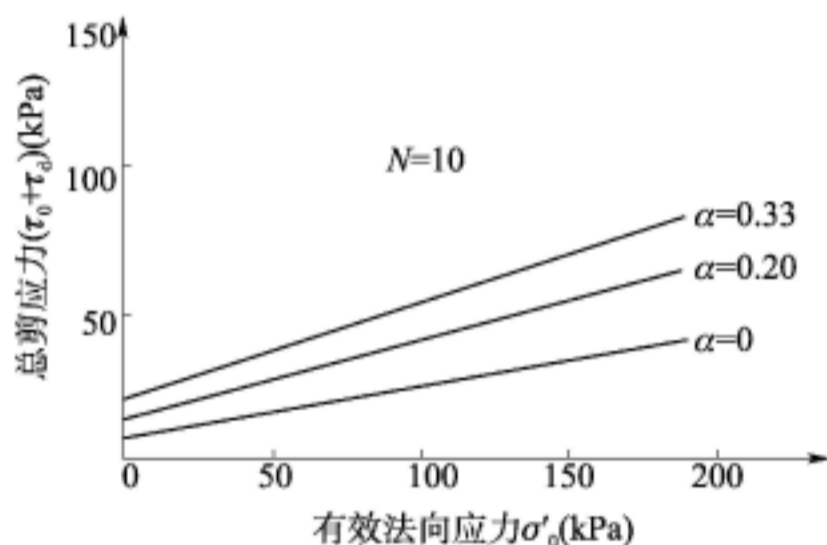


图 4.27.4-2 总剪应力与有效法向应力关系曲线

**4.27.4.6** 不同固结应力比时的液化应力比与振次关系曲线应以液化应力比为纵坐标、以破坏振次的对数为横坐标绘制,如图 4.27.4-3 所示。

**4.27.4.7** 动孔隙水压力比与振次关系曲线应以动孔隙水压力比为纵坐标、以破坏振次的对数为横坐标绘制,如图 4.27.4-4 所示。

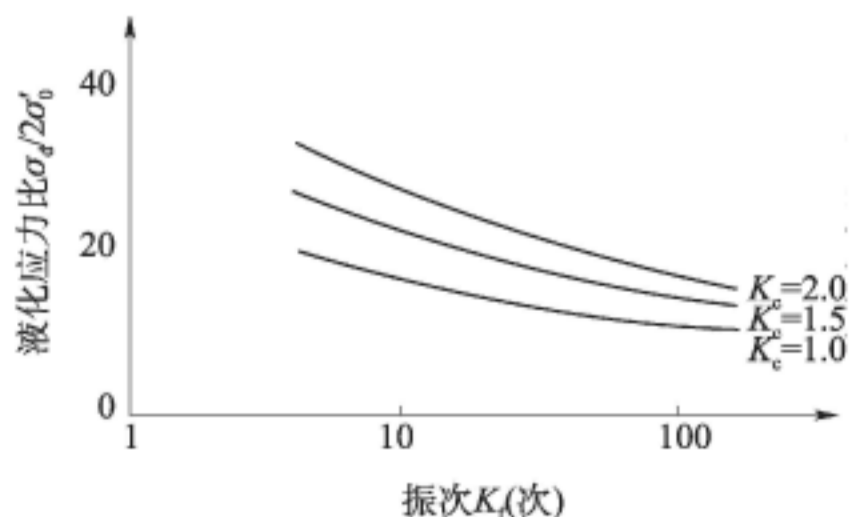


图 4.27.4-3 液化应力比与振次关系曲线

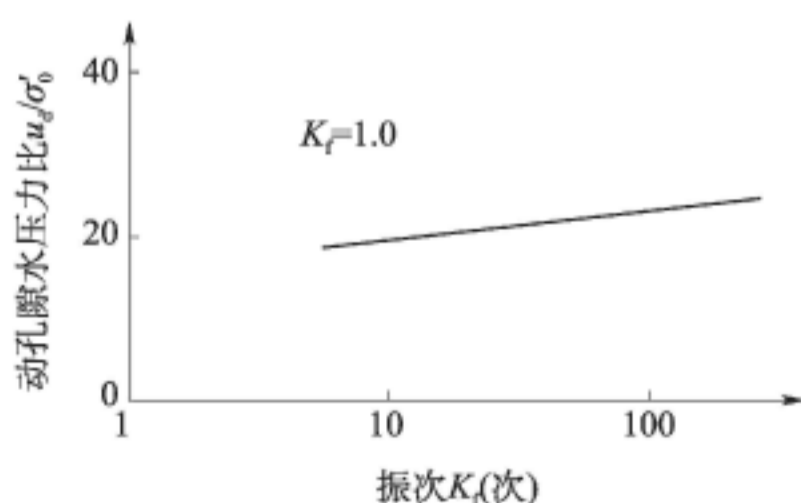


图 4.27.4-4 动孔隙水压力比与振次关系曲线

**4.27.4.8** 动弹模量和阻尼比的计算应满足下列要求:

(1) 动弹性模量按下式计算:

$$E_d = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_d} \quad (4.27.4-10)$$

式中  $E_d$ ——动弹性模量(kPa);

$\sigma_d$ ——动应力(kPa);

$\varepsilon_d$ ——动应变(%);

(2) 阻尼比按下式计算:

$$\lambda_d = \frac{1}{4\pi} \frac{A}{A_s} \quad (4.27.4-11)$$

式中  $\lambda_d$ ——阻尼比;

$A$ ——滞回圈 ABCDA 的面积( $\text{mm}^2$ ), 见图 4.27.4-5;

$A_s$ ——三角形 OAE 的面积( $\text{mm}^2$ );

(3) 以阻尼比为纵坐标, 动应变的对数为横坐标, 绘制不同固结应力的阻尼比与动应变关系曲线, 如图 4.27.4-6 所示。

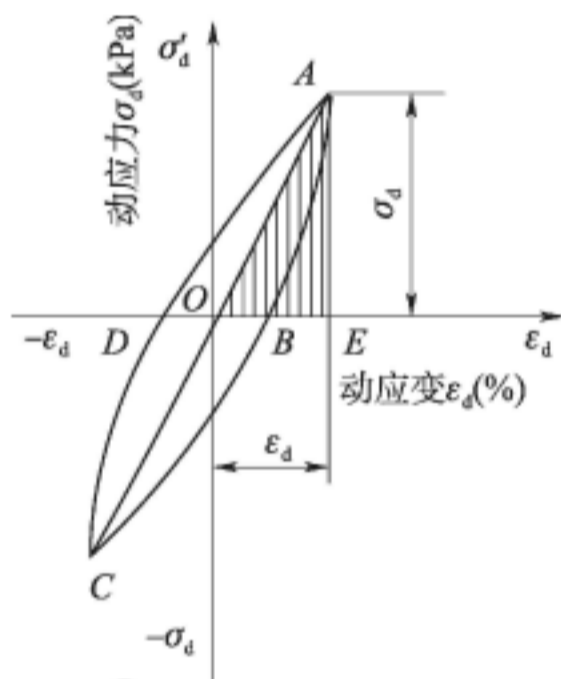


图 4.27.4-5 应力应变滞回圈

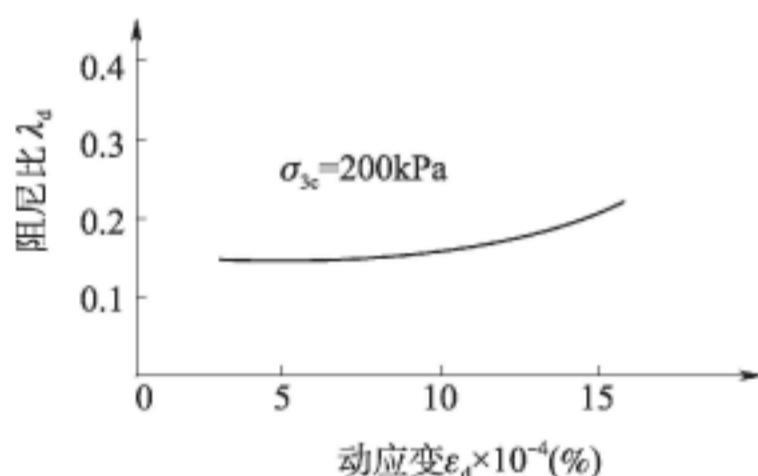


图 4.27.4-6 阻尼比与动应变关系曲线

**4.27.4.9 动强度(液化)试验记录格式**可采用附录 A 中表 A.0.43, 动弹性模量和阻尼比试验记录格式可采用附录 A 中表 A.0.44。

## 4.28 孔隙水压力消散试验

**4.28.1** 孔隙水压力消散试验可用于饱和度大于 85% 的原状黏性土和含水率大于最优含水率的击实黏性土。

**4.28.2** 主要仪器设备应包括三轴压力室、圆膜筒、环刀、天平、橡皮膜; 三轴压力室、环刀、天平、橡皮膜应符合下列规定:

(1) 三轴压力室附有孔隙水压力测量系统、周围压力系统, 见图 4.28.2;

(2) 环刀的直径为 6.18cm、10cm, 两端均有刃口;

(3) 天平最大称量为 200g, 最小分度值不大于 0.01g; 最大称量为 1000g, 最小分度值不大于 0.1g; 最大称量为 5000g, 最小分度值不大于 1g;



(4) 橡皮膜厚度执行第 4.26.2.5 款的规定。

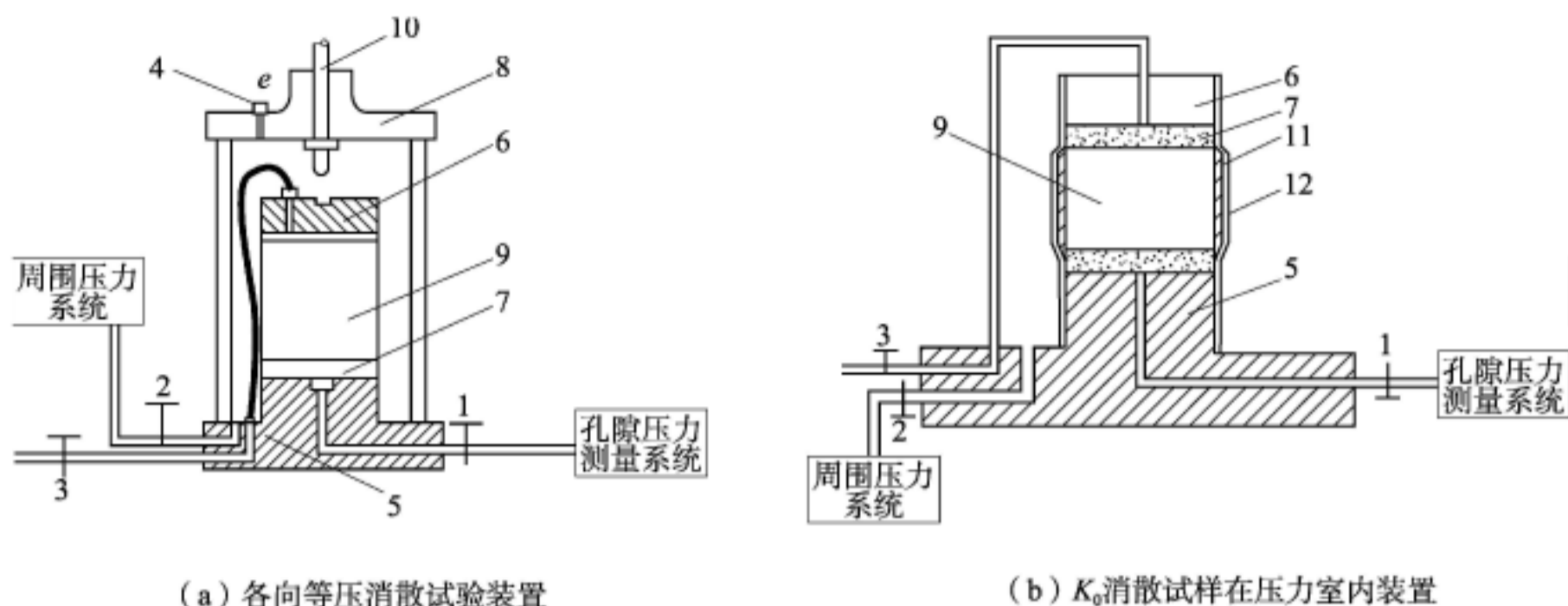


图 4.28.2 孔隙水压力消散试验装置图

1-孔隙水压力阀;2-周围压力阀;3-排水管阀;4-排气阀;5-压力室底座;6-加压上帽;7-透水板;8-压力室;9-试样;10-活塞;11-环刀;12-橡皮膜

**4.28.3 各向等压消散试验应符合下列规定。**

**4.28.3.1 试样的制备应满足下列要求:**

(1) 参照第 4.26.3.1 款第(3)项的规定制备扰动土样,试样尺寸分别为直径 10cm、高 10cm,或直径 61.8mm、高 6.0cm;

(2) 原状样或扰动样如需饱和,将试样进行抽气饱和。

**4.28.3.2 试样的安装应满足下列要求:**

(1) 原状试样或击实试样,按第 4.26.5.1 款第(1)项、第 4.26.5.2 款第(2)项的规定进行,但试样侧面不贴滤纸条;

(2) 按第 4.26.5.1 款第(3)项的规定装上压力室罩,充水,并调整孔隙水压力测量系统的零位;关孔隙水压力阀及量管阀。

**4.28.3.3 打开周围压力阀,应按第 4.26.5.2 款第(2)项和第(3)项的规定施加第 1 级周围压力,测定试样的起始孔隙水压力。**

**4.28.3.4 打开排水管阀,开始计时,进行消散测定;测记孔隙水压力、排水体积应参照下列时间:15s、1min、4min、9min、16min、25min、36min、49min、64min、2h、4h……直至孔隙水压力消散到需要的消散度为止,测读时间可根据实际情况加密或减少,采用零位指示器测定时应旋转调压筒,使零位指示器水银面始终保持不变。关闭排水阀。**

**4.28.3.5 下一级周围压力下的起始孔隙水压力和孔隙水压力消散测定应按第 4.26.5.2 款第(2)项、第(3)项和第 4.28.3.4 款的规定进行。如此 3 次,每次按实际需要压力的 1/3 施加周围压力,也可按实际情况增加消散次数和选择各级周围压力。**

**4.28.3.6 试样在最后一级周围压力下孔隙水压力消散完毕,应关闭周围压力阀、排水管阀和孔隙水压力阀,然后打开排气孔,排去压力室内的水,拆去压力室,擦干橡皮膜外部及压力室底座上的积水。**

**4.28.3.7 拆除试样帽及透水板,脱去橡皮膜后,应迅速取出试样,并用卡尺测量其试**

验后的高度、直径,称质量、烘干,测定其试验后含水率。

#### 4.28.4 $K_0$ 消散试验应符合下列规定。

##### 4.28.4.1 试样的制备应满足下列要求:

(1)用环刀切取原状土样或扰动土样,将带有环刀的试样用活塞板从一端推出 2mm,将超出环刀的试样削去,再将试样推至环刀中部,使试样恰为所需的高度;

(2)试样如需饱和,将试样进行抽气饱和。

##### 4.28.4.2 试样的安装和试验应符合下列规定:

(1)按第 4.26.5.1 款第(1)项的规定,将带有环刀的试样放在压力室底座上;在试样上端放滤纸和透水板,透水板的上下两端嵌入环刀内 1mm;

(2)按第 4.26.5.1 款第(2)项的规定,将带有环刀的试样封于橡皮膜内;排除环刀与橡皮膜之间的气泡,扎好橡皮膜,吸出橡皮膜和环刀之间的多余水分;

(3)按第 4.26.5.1 款第(3)项的规定装上压力室罩,充水,并调整孔隙水压力测量系统的零位。

##### 4.28.4.3 孔隙水压力消散试验过程应满足下列要求:

(1)按第 4.26.5.2 款第(2)项和第(3)项的规定施加第一级周围压力,并测定起始孔隙水压力;

(2)按第 4.28.3.4 款的规定进行消散;

(3)按第 4.26.5.2 款第(2)项、第(3)项和第 4.28.3.4 款的规定,施加下一级周围压力,测定起始孔隙水压力,并进行消散;

(4)按第 4.28.3.6 款、第 4.28.3.7 款的规定,拆除仪器,取下试样,测定试验后的试样高度及含水率。

#### 4.28.5 试验资料的整理应符合下列规定。

##### 4.28.5.1 试样的初始干密度、饱和度和试验前的体积可按下列公式计算:

$$\rho_d = \frac{4m_0}{\pi(1+0.01w)D_0^2h_0} \quad (4.28.5-1)$$

$$S_r = \frac{w}{\frac{\rho_w}{\rho_d} - \frac{1}{G_s}} = \frac{G_s \cdot w}{e_0} \quad (4.28.5-2)$$

$$V_0 = \frac{m_0}{\rho} \quad (4.28.5-3)$$

式中  $\rho_d$ ——初始干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$m_0$ ——试样湿质量( $\text{g}$ );

$w$ ——试样起始含水率(%);

$D_0$ ——试样起始平均直径( $\text{cm}$ ),对  $K_0$  消散试验为常数;

$h_0$ ——试样起始高度( $\text{cm}$ );

$S_r$ ——饱和度(%);

$\rho_w$ ——水的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$G_s$ ——试样土粒比重；

$e_0$ ——初始孔隙比；

$V_0$ ——试验前的体积( $\text{cm}^3$ )；

$\rho$ ——试样初始密度,试验前用环刀法测定( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

**4.28.5.2** 各向等压力下孔隙水压力系数和  $K_0$  条件下孔隙水压力系数可按下列公式计算：

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \quad (4.28.5-4)$$

$$\bar{B} = \frac{\Delta u_i}{\Delta \sigma_1} \quad (4.28.5-5)$$

式中  $B$ ——各向等压力下孔隙水压力系数；

$\Delta u$ ——起始孔隙水压力增量(kPa)；

$\Delta \sigma_3$ ——周围压力增量(kPa)；

$\bar{B}$ —— $K_0$  条件下孔隙水压力系数；

$\Delta u_i$ ——相应于该压力增量下的起始孔隙水压力增量(kPa)；

$\Delta \sigma_1$ ——轴向压力增量(kPa)。

**4.28.5.3** 经任一时间  $t$  后的孔隙水压力消散百分数可按下列式计算：

$$D_c = \left(1 - \frac{u_t}{u_i}\right) \times 100 \quad (4.28.5-6)$$

式中  $D_c$ ——孔隙水压力消散百分数；

$u_i, u_t$ ——分别为起始和  $t$ min 后不排水端的孔隙水压力值(kPa)。

**4.28.5.4** 各向等压力和  $K_0$  条件下任一消散度的消散系数可按式(4.28.5-7)计算,时间因数与消散百分数的对应关系见表 4.28.5 和图 4.28.5-1。

$$C'_v = \frac{T_v}{60t} (\bar{h})^2 \quad (4.28.5-7)$$

式中  $C'_v$ ——消散系数( $\text{cm}^2/\text{s}$ )；

$T_v$ ——任意消散度的时间因数；

$t$ ——消散时间(达任意消散度  $D_c$  所需时间)(min)；

$\bar{h}$ ——消散前后的试样平均高度(cm)。

表 4.28.5 非排水端孔隙水压力消散百分数与时间因数表

$D_c$ (%)	$T_v$	$D_c$ (%)	$T_v$	$D_c$ (%)	$T_v$
0	0	40	0.30	80	0.76
5	0.10	45	0.34	85	0.87
10	0.13	50	0.38	90	1.03
15	0.16	55	0.42	95	1.32
20	0.18	60	0.47	97	1.50
25	0.21	65	0.52	98	1.68
30	0.24	70	0.59	99	1.99
35	0.27	75	0.66		



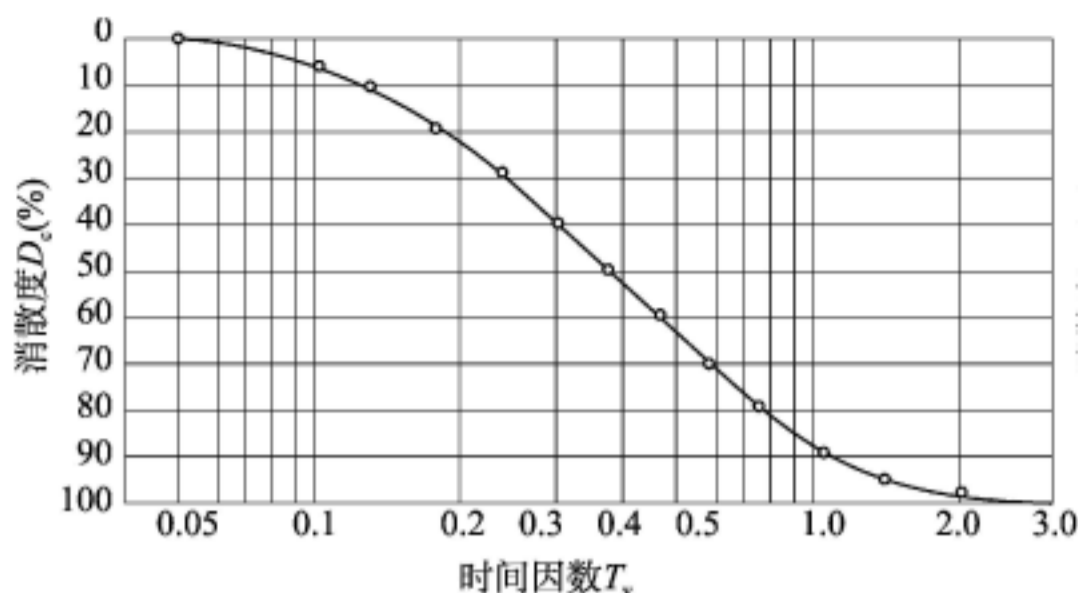


图 4.28.5-1 孔隙水压力消散百分数与时间因数关系曲线

**4.28.5.5** 起始孔隙水压力与压力的关系曲线应以各级周围压力或轴向压力为横坐标,以相应的起始孔隙水压力为纵坐标绘制,如图 4.28.5-2 所示。

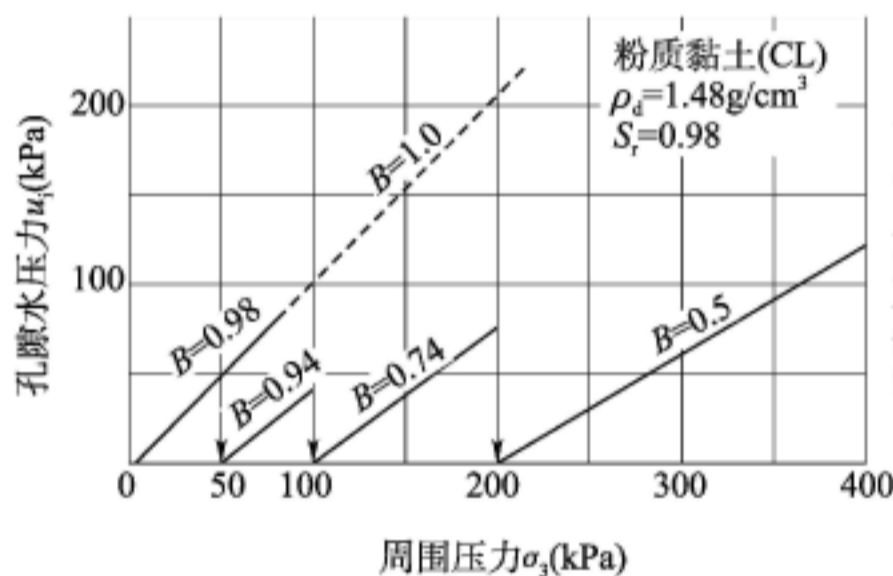


图 4.28.5-2 4 次消散试验中的起始孔隙水压力

**4.28.5.6**  $D_u \sim \lg t$  曲线应以消散百分数为纵坐标,以时间对数为横坐标绘制,如图 4.28.5-3 所示,从该图可按实际消散度的一半或任一消散度的时间,计算消散系数。

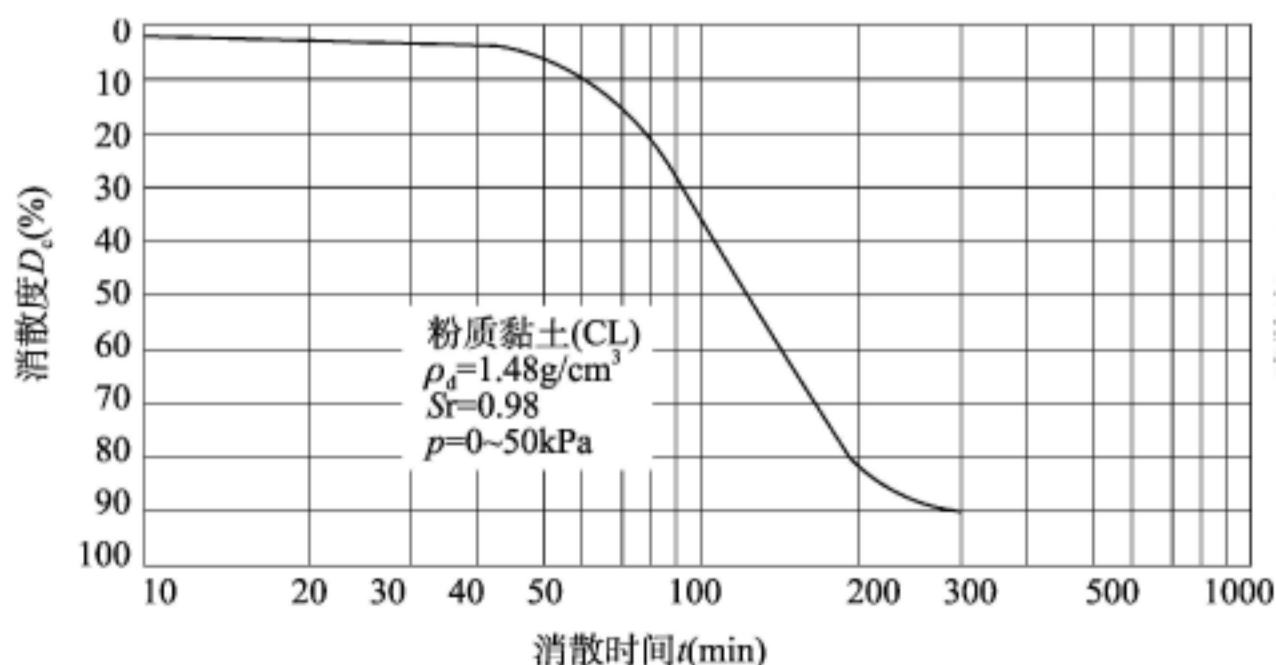


图 4.28.5-3 孔隙水压力消散百分数与时间对数值曲线

**4.28.5.7**  $C'_v \sim \sigma_3$  及  $e \sim \sigma_3$ , 或  $C'_v \sim \sigma_1$  及  $e \sim \sigma_1$  关系曲线应以孔隙比或消散系数为纵坐标,以周围压力或轴向压力为横坐标绘制,如图 4.28.5-4 所示。

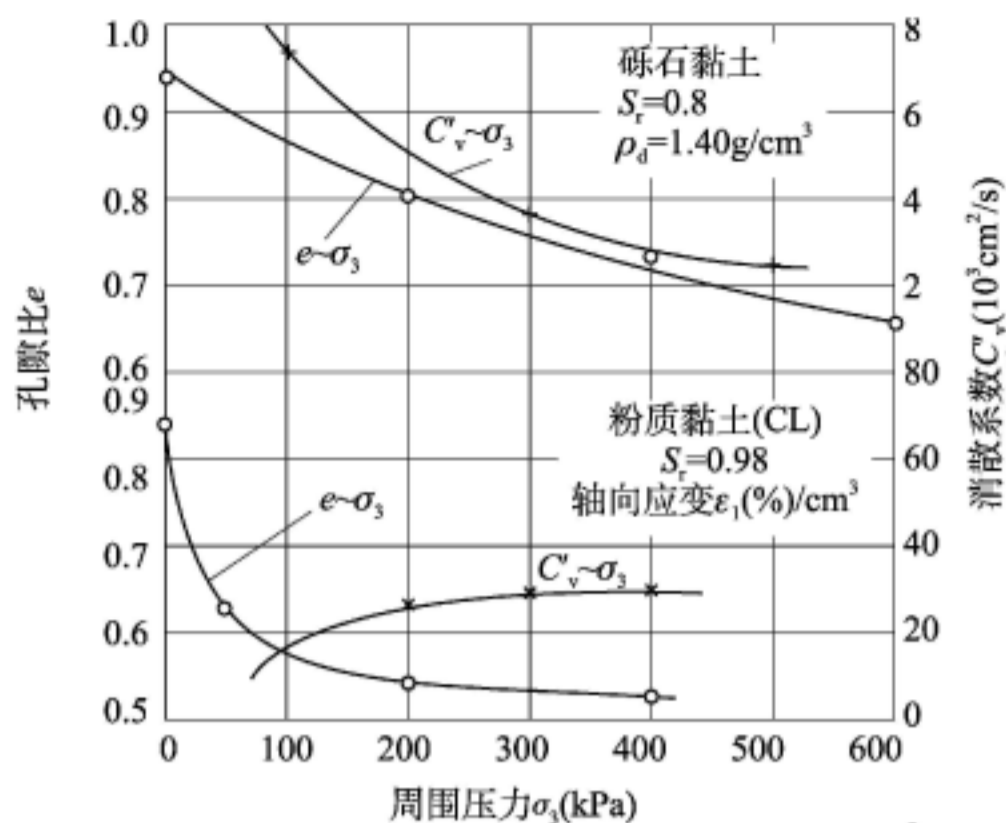


图 4.28.5-4 孔隙比、消散系数与压力曲线

4.28.5.8 试验记录格式可采用附录 A 中表 A.0.45、表 A.0.46。

### 4.29 无侧限抗压强度试验

4.29.1 无侧限抗压强度试验可用于测定饱和黏性土和非饱和黏性土的无侧限抗压强度和灵敏度。

4.29.2 主要仪器设备应包括应变控制式无侧限压缩仪、轴向位移计、重塑筒、天平、秒表、垫板、卡尺、直尺、切土盘、削土刀、钢丝锯、薄塑料布、凡士林；应变控制式无侧限压缩仪、轴向位移计、重塑筒、天平应符合下列规定：

(1) 应变控制式无侧限压缩仪包括测力计、加压框架和升降设备等；根据土的软硬程度选择不同量程的测力计，见图 4.29.2；也可以采用应变控制式三轴仪；

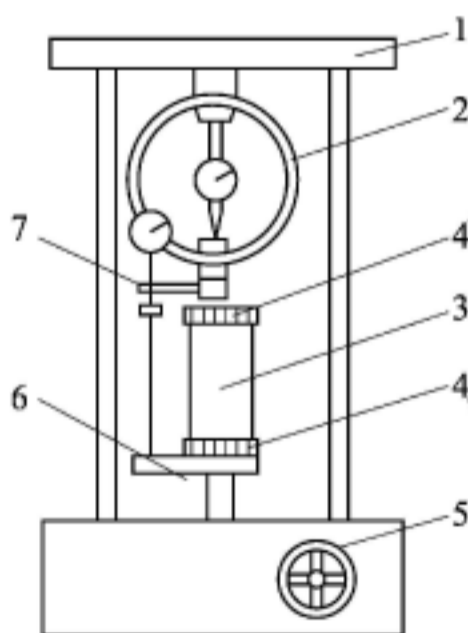


图 4.29.2 应变控制式无侧限压缩仪

1-轴向加荷架;2-轴向测力计;3-试样;4-上、下传压板;5-手轮;6-升降板;7-轴向位移计

(2) 轴向位移计为量程 10mm、最小分度值 0.01mm 的百分表或准确度为全量程 0.2% 的位移传感器；

(3) 重塑筒的筒身可以拆成两半，内径为 35mm ~ 40mm，高为 80mm；

(4)天平最大称量为 1000g,最小分度值不大于 0.1g。

#### 4.29.3 试验应按下列步骤进行:

(1)按第 4.26.3.1 款的规定制备试样;

(2)试样直径采用 35mm~40mm,试样高度与直径之比按土的软硬情况采用 2.0~2.5;

(3)将试样两端抹一薄层凡士林,在气候干燥时,试样周围需抹一薄层凡士林,防止水分蒸发;

(4)将试样放在下传压板或三轴压力室底座上,使升降设备上升至试样与上传压板刚好接触,将测力计读数调整为零;

(5)轴向应变速率为每分钟应变 1%~3%;使升降设备上升进行试验,轴向应变小于 3%时,每隔 0.5%应变或 0.4mm 读数一次;轴向应变等于或大于 3%时,每隔 1%应变或 0.8mm 读数一次;试验在 8min~10min 内完成;

(6)当测力计读数出现峰值时,继续进行 3%~5%的应变后停止试验;当读数无峰值时,试验进行到轴向应变达 20%为止;

(7)试验结束后,迅速使升降设备下降,取下试样,描述破坏后形状,测量破坏面倾角;

(8)当需要测定灵敏度时,立即将破坏后的试样除去涂有凡士林的表面,加少许余土,包于塑料薄膜内用手搓捏,破坏其结构,重塑成圆柱形,放入重塑筒内,用金属垫板将试样挤成与原状试样尺寸、密度相等的试样,并按第(4)项~第(7)项的步骤进行试验。

#### 4.29.4 试验资料的整理应符合下列规定:

(1)轴向应变按下式计算:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h}{h_0} \times 100 \quad (4.29.4-1)$$

式中  $\varepsilon_1$ ——轴向应变(%);

$\Delta h$ ——轴向变形(mm);

$h_0$ ——试样初始高度(mm);

(2)试样面积的校正按式(4.26.4-2)计算;

(3)试样所受的轴向应力按下式计算:

$$\sigma = \frac{F}{A_\alpha} \times 10^3 \quad (4.29.4-2)$$

式中  $\sigma$ ——轴向应力(kPa);

$F$ ——轴向压力(N);

$A_\alpha$ ——校正后的试样面积(mm<sup>2</sup>);

(4)灵敏度按下式计算:

$$S_l = \frac{q_u}{q'_u} \quad (4.29.4-3)$$

式中  $S_l$ ——灵敏度;

$q_u$ ——原状试样的无侧限抗压强度(kPa);

$q'_u$ ——重塑试样的无侧限抗压强度(kPa);



(5) 以轴向应力为纵坐标, 轴向应变为横坐标, 绘制轴向应力与轴向应变关系曲线, 见图 4.29.4; 取曲线上最大轴向应力作为无侧限抗压强度, 当曲线上峰值不明显时, 取轴向应变 15% 所对应的轴向应力作为无侧限抗压强度;

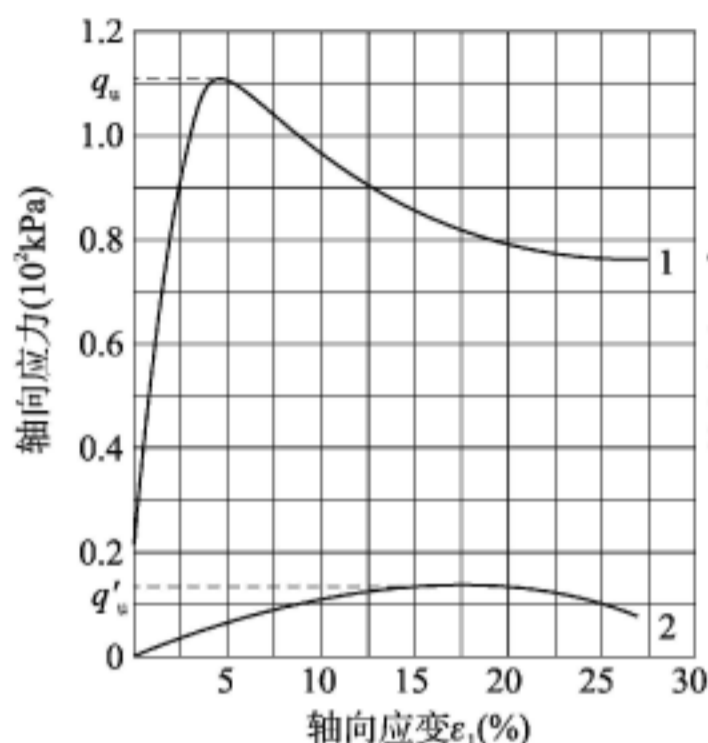


图 4.29.4 轴向应力与轴向应变关系曲线  
1-原状试样; 2-重塑试样

(6) 试验记录格式采用附录 A 中表 A.0.47。

### 4.30 直接剪切试验

**4.30.1** 直接剪切试验分为快剪( $q$ )、固结快剪( $cq$ )和慢剪( $s$ )三种试验方法, 可用于测定细粒土的抗剪强度参数  $c$ 、 $\varphi$  和土颗粒粒径小于 2mm 的砂土的抗剪强度参数  $\varphi$ , 渗透系数大于  $10^{-6}$  cm/s 的细粒土不宜做快剪试验。

**4.30.2** 试验的主要仪器设备应包括应变控制式直剪仪、环刀、天平、位移测量设备、饱和器、削土刀或钢丝锯、秒表、滤纸、直尺; 应变控制式直剪仪、环刀、天平、位移测量设备应符合下列规定:

(1) 应变控制式直剪仪(图 4.30.2)由剪切盒、垂直加压设备、剪切传动装置、测力计、位移量测系统组成;

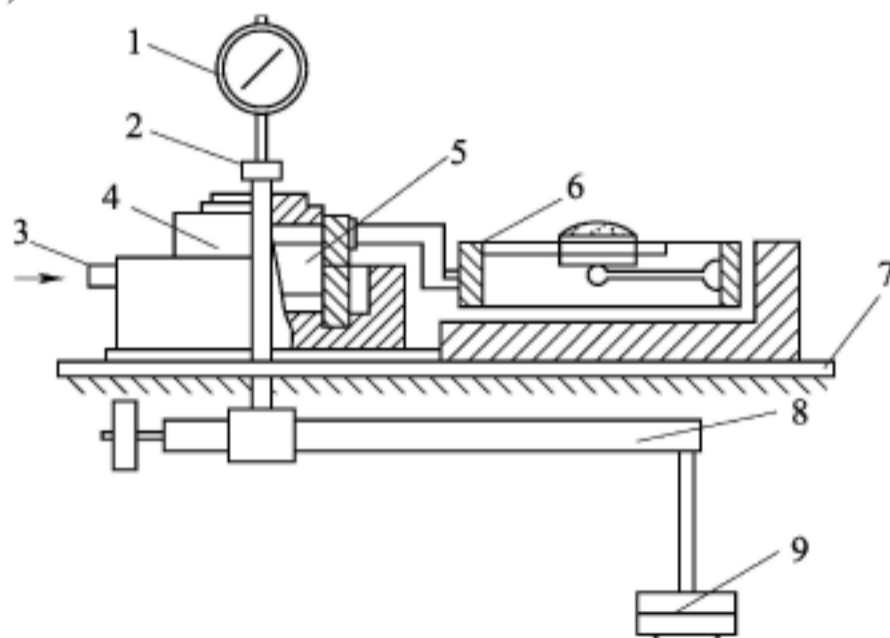


图 4.30.2 应变控制式直剪仪结构示意图

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

(2) 环刀的内径为 61.8mm, 高度为 20mm;

(3) 天平最大称量为 500g, 最小分度值为 0.1g;

(4) 位移量测设备为最大量程为 10mm、最小分度值为 0.01mm 的百分表, 或准确度为全程 0.2% 的传感器。

**4.30.3 试样的制备应符合下列规定。**

**4.30.3.1 黏性土试样制备应满足下列要求:**

(1) 对原状土直接切削形成原状土试样, 对扰动土按给定的干密度及含水率制备试样; 试样制备完成后需测定试样的密度及含水率;

(2) 对于扰动试样需要饱和时, 采用抽气饱和的方法。

**4.30.3.2 砂土试样制备应满足下列要求:**

(1) 取过 2mm 筛孔的代表性风干砂样 1200g 备用; 按要求的干密度和试样体积称每个试样所需风干砂量;

(2) 对准上下盒, 插入固定销, 将洁净的透水板放入剪切盒内;

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

**4.30.3.3 每组试验应取 4 个试样, 在 4 种不同垂直压力  $p$  下进行剪切试验。**

**4.30.4 快剪试验应按下列步骤进行:**

(1) 对准上下盒, 插入固定销; 在下盒内放不透水板, 将装有试样的环刀平口向下, 对准剪切盒口, 在试样顶面放不透水板, 然后将试样徐徐推入剪切盒内, 移去环刀;

(2) 使上盒前端钢珠刚好与测力计接触; 调整测力计读数为零, 顺次加上加压盖板、钢珠、加压框架;

(3) 根据工程实际和土的软硬程度施加各级垂直压力;

(4) 施加垂直压力后, 立即拔去固定销; 以 0.8mm/min ~ 1.2mm/min 的速率剪切, 使试样在 3min ~ 5min 内剪损; 如测力计的读数达到稳定, 或有显著后退, 表示试样已剪损, 否则剪至剪切变形达到 4mm; 若测力计读数继续增加, 则剪切变形达到 6mm 为止, 同时测记测力计读数;

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

**4.30.5 固结快剪试验应按下列步骤进行:**

(1) 按第 4.30.4 条第(1)项和第(2)项的规定进行试样安装和定位, 但试样上下两面的不透水板改为湿滤纸和透水板;

(2) 对于饱和试样, 则在施加垂直压力 5min 后, 往剪切盒水槽内注满水; 对于非饱和土, 仅在活塞周围包以湿棉花, 避免水分蒸发;

(3) 在试样上施加规定的垂直压力后, 每 1h 测记垂直变形读数一次, 直至试样固结变形稳定, 变形稳定标准为每小时不大于 0.01mm;

(4) 试样达到固结稳定后, 按第 4.30.4 条第(4)项和第(5)项规定进行剪切, 剪切后取试样测定剪切面附近试样的含水率。

**4.30.6 慢剪试验应按下列步骤进行:**

(1)按第4.30.4条第(1)项和第(2)项的规定进行试样安装,按第4.30.5条第(3)项的规定进行试样固结;待试样固结稳定后进行剪切,剪切速率小于 $0.02\text{mm}/\text{min}$ ,按式(4.30.6)估算剪切破坏时间;

$$t_f = 50t_{50} \quad (4.30.6)$$

式中  $t_f$ ——达到破坏所经历的时间(s);

$t_{50}$ ——固结度达到50%的时间(s);

(2)剪损标准按第4.30.4条第(4)项的规定选取;

(3)按第4.30.4条第(5)项的规定进行拆卸试样及测定含水率。

**4.30.7 试验资料的整理应符合下列规定:**

(1)剪应力按下式计算,保留至 $0.1\text{kPa}$ ;

$$\tau = \frac{F}{A_0} \times 10^3 \quad (4.30.7)$$

式中  $\tau$ ——剪应力(kPa);

$F$ ——轴向压力(N);

$A_0$ ——试样面积( $\text{mm}^2$ );

(2)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 $4\text{mm}$ 所对应的剪应力为抗剪强度;

(3)以抗剪强度为纵坐标,垂直压力为横坐标,拟合抗剪强度与垂直压力关系直线(图4.30.7),直线的倾角为摩擦角,直线在纵坐标上的截距为黏聚力;

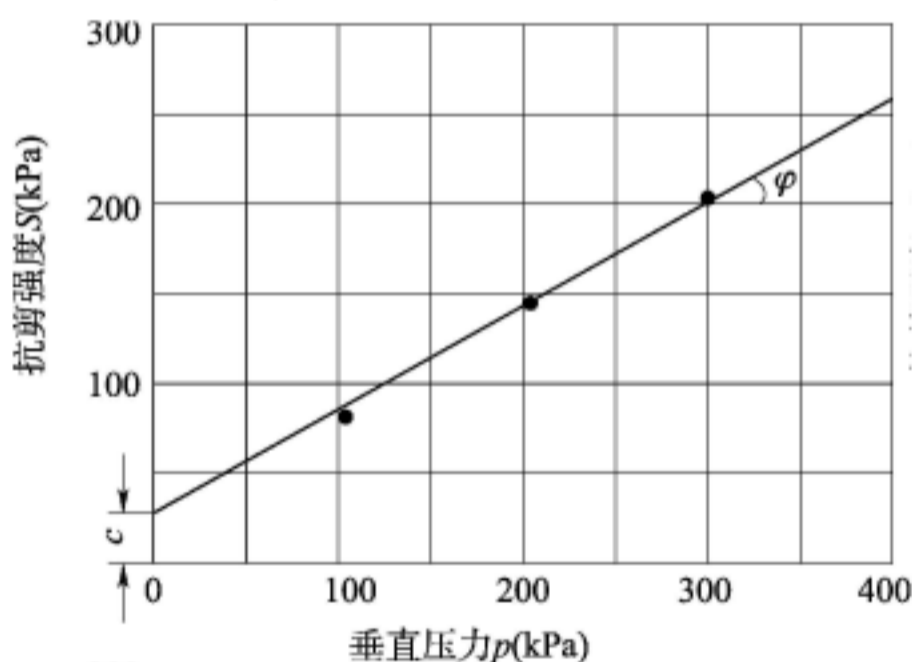


图4.30.7 抗剪强度与垂直压力关系曲线

(4)试验记录格式采用附录A中表A.0.48、表A.0.49。

**4.31 收缩试验**

**4.31.1** 收缩试验可用于原状土和击实黏性土。

**4.31.2** 主要仪器设备应符合下列规定:

(1)收缩仪(图4.31.2)的多孔板上孔的面积占整个板面积的50%以上;

(2)环刀的直径为 $61.8\text{mm}$ ,高度为 $20\text{mm}$ 。



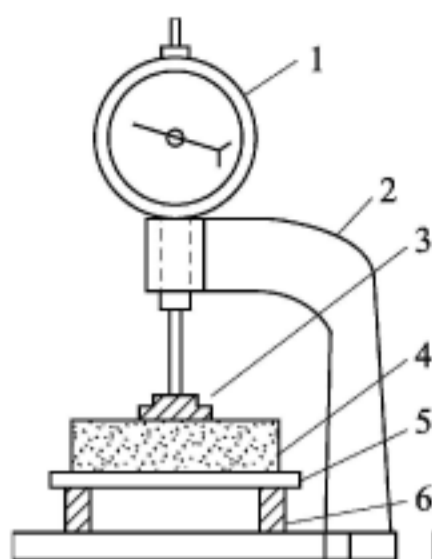


图 4.31.2 收缩仪

1-量表;2-支架;3-测板;4-试样;5-多孔板;6-垫块

**4.31.3 试验应按下列步骤进行:**

(1) 试样制备符合第 4.1 节的规定;将试样推出环刀置于多孔板上,当试样不紧密时采用风干脱环法;称试样和多孔板的质量;装好百分表,记下初始读数;

(2) 在室温不高于 30℃ 条件下进行收缩试验,根据室内温度及收缩速度,每隔 1h ~ 4h 测记百分表读数,并称整套装置和试样质量,保留至 0.1g;2d 后,每隔 16h ~ 24h 测记百分表读数并称质量,至两次百分表读数基本不变;称质量时保持百分表读数不变;在收缩曲线的 I 阶段内,取得不少于 4 个数据;

(3) 试验结束,取出试样,并在 105℃ ~ 110℃ 下烘干,称干土质量;

(4) 按第 4.4 节中的蜡封法测定烘干试样体积。

**4.31.4 试样在不同时间的含水率应按下列式计算:**

$$w_i = \left( \frac{m_i}{m_d} - 1 \right) \times 100 \quad (4.31.4)$$

式中  $w_i$ ——某时刻试样的含水率(%) ;

$m_i$ ——某时刻试样的质量(g) ;

$m_d$ ——试样烘干后的质量(g)。

**4.31.5 线缩率应按下列式计算:**

$$\delta_{s_i} = \frac{z_i - z_0}{h_0} \times 100 \quad (4.31.5)$$

式中  $\delta_{s_i}$ ——试样在某时刻的线缩率(%) ;

$z_i$ ——某时刻的百分表读数(mm) ;

$z_0$ ——百分表的初始读数(mm) ;

$h_0$ ——试样的初始高度(mm)。

**4.31.6 体缩率应按下列式计算:**

$$\delta_v = \frac{V_0 - V_d}{V_0} \times 100 \quad (4.31.6)$$

式中  $\delta_v$ ——体缩率(%) ;

$V_0$ ——试样的初始体积( $\text{mm}^3$ ) ;

$V_d$ ——烘干后试样的体积( $\text{mm}^3$ )。

**4.31.7** 线缩率与含水率关系曲线应以线缩率为纵坐标,以含水率为横坐标绘制(图 4.31.7),并延长第 I、III 阶段的直线段至相交,交点  $E$  所对应的横坐标值即为原状土的缩限。

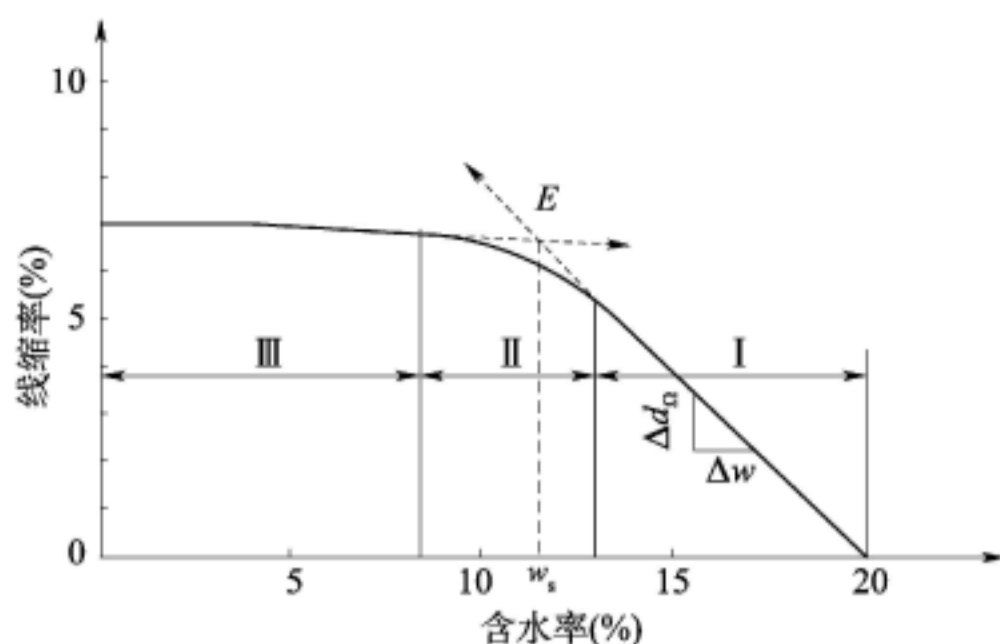


图 4.31.7 线缩率与含水率关系曲线

**4.31.8** 收缩系数应按下式计算:

$$\lambda_n = \frac{\Delta\delta_{si}}{\Delta w} \quad (4.31.8)$$

式中  $\lambda_n$ ——竖向收缩系数;

$\Delta w$ ——收缩曲线上第 I 阶段两点的含水率之差(%);

$\Delta\delta_{si}$ ——与  $\Delta w$  相对应的两点线缩率之差(%).

**4.31.9** 收缩试验的记录格式可采用附录 A 中表 A.0.50。

## 4.32 膨胀率试验

**4.32.1** 自由膨胀率试验可用于测定黏土试样在无结构情况下的膨胀率;有荷载膨胀率试验可用于测定原状土或扰动黏土在特定荷载和有侧限条件下的膨胀率;无荷载膨胀率试验可用于测定原状土或扰动黏土在无荷载有侧限条件下的膨胀率。

**4.32.2** 自由膨胀率试验应符合下列规定。

**4.32.2.1** 主要仪器设备应满足下列要求:

- (1) 量筒容积为 50ml,最小分度值为 1ml,容积与刻度需经过校正;
- (2) 量土杯容积为 10ml,内径为 20mm;
- (3) 无颈漏斗上口直径 50mm~60mm,下口直径 4mm~5mm;
- (4) 搅拌器由直杆和带孔圆盘构成(图 4.32.2-1);
- (5) 天平称量 200g,最小分度值不大于 0.01g。

**4.32.2.2** 自由膨胀率试验应按下列步骤进行:

(1) 用四分法取代表性风干土,碾细并过 0.5mm 筛;将筛下土样拌匀,在 105℃~110℃ 温度下烘干,置于干燥器内冷却至室温;

(2) 将无颈漏斗放在支架上,漏斗下口对准量土杯中心并保持距离 10mm,见图 4.32.2-2;

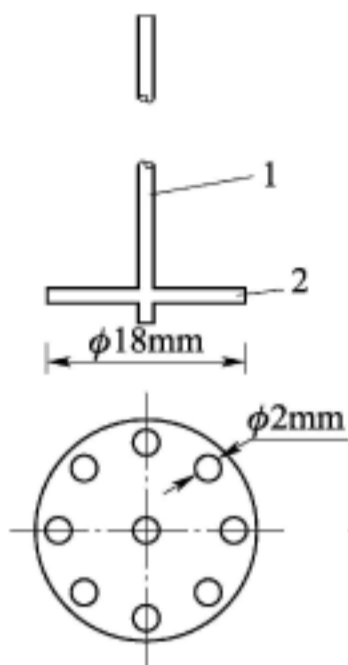


图 4.32.2-1 搅拌器示意图

1-直杆;2-圆盘

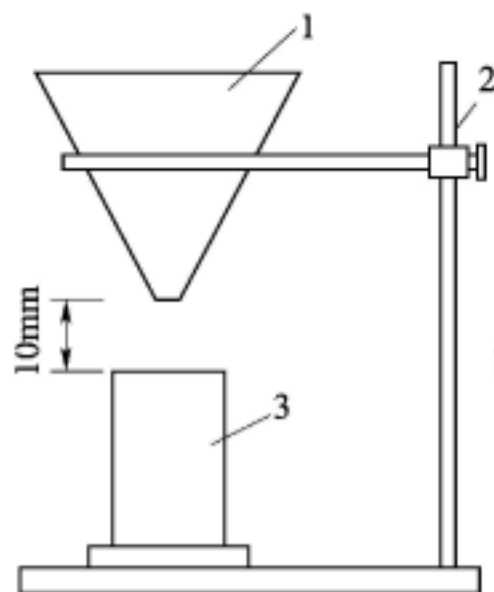


图 4.32.2-2 量样装置

1-漏斗;2-支架;3-量土杯

(3) 用取土匙取适量试样倒入漏斗中,倒土时取土匙与漏斗壁接触,并尽量靠近漏斗底部,边倒边用细铁丝轻轻搅动,当量杯装满土样并溢出时,停止向漏斗倒土,移开漏斗刮去杯口多余土,称量土杯中试样质量,将量土杯中试样倒入匙中,再次将量土杯按图 4.32.2-2 所示置于漏斗下方,将匙中土样按上述方法全部倒回漏斗并落入量土杯,刮去多余土,称量土杯中试样质量;本步骤进行两次平行测定,两次测定的差值不大于 0.1g;

(4) 在量筒内注入 30ml 纯水,加入 5ml 浓度为 5% 的分析纯氯化钠(NaCl)溶液,将试样倒入量筒内,用搅拌器上下搅拌悬液各 10 次,用纯水冲洗搅拌器和量筒壁至悬液达 50ml;

(5) 待悬液澄清后,每 2h 测读 1 次土面读数,估读至 0.1ml,直至两次读数差值不超过 0.2ml,膨胀稳定。

**4.32.2.3** 自由膨胀率应按下式计算,保留至 1.0%。

$$\delta_{ef} = \frac{V_{we} - V_0}{V_0} \times 100 \quad (4.32.2)$$

式中  $\delta_{ef}$ ——自由膨胀率(%);

$V_{we}$ ——试样在水中膨胀稳定后的体积(ml);

$V_0$ ——试样初始体积(ml)。

**4.32.2.4** 本试验应进行两次平行测定。当  $\delta_{ef}$  小于 60% 时,平行差值不得大于 5%;当  $\delta_{ef}$  大于或等于 60% 时,平行差值不得大于 8%,并应取两次测值的平均值作为试验最终结果。

**4.32.2.5** 自由膨胀率试验的记录格式可采用附录 A 中表 A.0.51。

**4.32.3** 有荷载膨胀率试验应符合下列规定。

**4.32.3.1** 主要仪器设备应满足下列要求:

(1) 固结仪(图 4.25.2-1)及附加荷设备,加压上盖为轻质材料并带护环;试验前率定不同压力下的仪器变形量;

(2) 环刀的直径为 61.8mm 或 79.8mm,高度为 20mm;



(3) 位移计为量程 10mm、最小分度值 0.01mm 的百分表或准确度为全量程 0.2% 的位移传感器。

#### 4.32.3.2 试验应按下列步骤进行:

(1) 试样制备符合第 4.1 节的规定;

(2) 试样安装按第 4.25.2.2 款第(1)项和第(2)项的规定进行,并在试样和透水板之间加薄滤纸;

(3) 分级或一次连续施加所要求的荷载,直至变形稳定,测记位移计读数,变形稳定标准为每小时变形不超过 0.01mm,再自下而上向容器内注入纯水,并保持水面高出试样 5mm,记下注水开始时间;

(4) 浸水后每隔 2h 测记读数一次,直至两次读数差值不超过 0.01mm 时膨胀稳定,测记位移计读数;

(5) 试验结束,吸去容器中的水,卸除荷载,取出试样,称试样质量,并测定其含水率。

#### 4.32.3.3 特定荷载下的膨胀率应按下式计算:

$$\delta_{ep} = \frac{z_p + \lambda - z_0}{h_0} \times 100 \quad (4.32.3)$$

式中  $\delta_{ep}$ ——某荷载下的膨胀率(%);

$z_p$ ——某荷载下膨胀稳定后的位移计读数(mm);

$\lambda$ ——某荷载下的仪器压缩变形量(mm);

$z_0$ ——加荷前的位移计读数(mm);

$h_0$ ——试样的初始高度(mm)。

#### 4.32.3.4 试验的记录格式可采用附录 A 中表 A.0.52。

### 4.32.4 无荷载膨胀率试验应符合下列规定。

#### 4.32.4.1 主要仪器设备应符合第 4.32.3.1 款的规定,且有套环。

#### 4.32.4.2 试验应按下列步骤进行:

(1) 试样制备符合第 4.1 节的有关规定;

(2) 试样安装按第 4.25.3 条第(2)项的规定进行;

(3) 自下而上向容器内注入纯水,并保持水面高出试样 5mm,注水后每隔 2h 测记位移计读数一次,直至两次读数差值不超过 0.01mm 时,膨胀稳定;

(4) 试验结束后,吸去容器中的水,取出试样,称试样质量,测定其含水率和密度,并计算孔隙比。

#### 4.32.4.3 任一时间的膨胀率应按下式计算:

$$\delta_e = \frac{z_t - z_0}{h_0} \times 100 \quad (4.32.4)$$

式中  $\delta_e$ ——时间为 t 时的无荷膨胀率(%);

$z_t$ ——时间为  $t$  时的位移计读数 (mm)；

$z_0$ ——加荷前的位移计读数 (mm)；

$h_0$ ——试样的初始高度 (mm)。

**4.32.4.4** 试验宜绘制膨胀率与时间关系曲线。

**4.32.4.5** 试验的记录格式可采用附录 A 中表 A.0.52。

### 4.33 膨胀力试验

**4.33.1** 膨胀力试验常采用加荷平衡法,可用于原状土和击实黏土。

**4.33.2** 试验的主要仪器设备应符合第 4.32.3.1 款的规定。

**4.33.3** 试验应按下列步骤进行:

(1) 试样制备符合第 4.1 节的有关规定;

(2) 试样安装按第 4.25.3 条第(2)项的步骤进行,并自下而上向容器注入纯水,保持水面高出试样顶面;

(3) 百分表开始顺时针转动时,表明试样开始膨胀,立即施加适当的平衡荷载,使百分表指针回到原位;

(4) 当施加的荷载足以使仪器产生变形时,在施加下一级平衡荷载时,百分表指针逆时针转动一个等于仪器变形量的数值;

(5) 当试样在某级荷载下间隔 2h 不再膨胀时,则试样在该级荷载下达到稳定,允许膨胀量不大于 0.01mm,记录施加的平衡荷载;

(6) 试验结束后,吸去容器内水,卸除荷载,取出试样,称试样质量,并测定含水率。

**4.33.4** 膨胀力应按下列式计算:

$$P_e = \frac{W}{A} \times 10^3 \quad (4.33.4)$$

式中  $P_e$ ——膨胀力 (kPa);

$W$ ——施加在试样上的总平衡荷载 (N);

$A$ ——试样面积 ( $\text{mm}^2$ )。

**4.33.5** 膨胀力试验的记录格式可参照附录 A 中表 A.0.53。

### 4.34 静止侧压力系数试验

**4.34.1** 静止侧压力系数试验可用于粒径小于 0.5mm 的原状土或击实土。

**4.34.2** 主要仪器设备应符合下列规定:

(1) 侧压力仪带有杠杆或磅秤式加荷系统和侧压力量测系统;加荷系统最大施加压力为 3200kPa,最小分度值为 5kPa;侧压力量测系统的压力传感器,其准确度不大于预估最大侧压力的 1% F · S;侧压力仪试验装置示意图见图 4.34.2;

(2) 百分表的最大量程为 10mm,最小分度值为 0.01mm;

(3) 环刀的内径 61.8mm,高为 40mm。



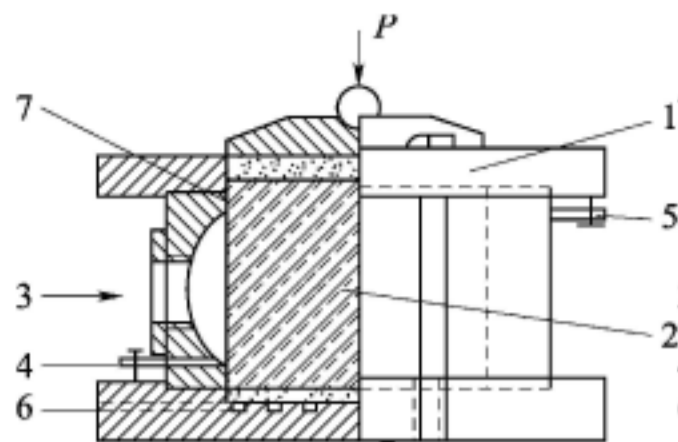


图 4.34.2 侧压力仪试验装置示意图

1-侧压力仪容器;2-试样;3-接压力传递系统;4-进水孔;5-排气孔阀;6-固结排水孔;7-O形圈

#### 4.34.3 试验应按下列步骤进行:

(1)按第 4.1 节的有关规定进行试样制备和试样饱和;

(2)将饱和好的试样推出环刀,在试样两端贴上滤纸、套上橡皮膜并在橡皮膜外涂薄层硅脂后,加入侧压力仪的容器内;

(3)在试样上端依次安放透水板、加压板、钢珠,安装护水圈;向护水圈内注水至水面高出透水板表面;

(4)将侧压力仪容器移入加压框架内,使钢珠与加压框架中心对准;安装量测垂直变形的百分表;调节钢珠与加压框架至刚好接触;

(5)打开侧压力仪容器受压室的排气阀和进水阀,待水将受压室注满后,关闭进水阀和排气阀;

(6)测记压力传感器和百分表的初始读数;

(7)分级施加垂直压力,垂直压力分级为 25kPa、50kPa、100kPa、200kPa、400kPa、800kPa;每次试验施加压力不少于 5 级;

(8)施加每级垂直压力后,每隔 1h 测记压力传感器和百分表的读数一次,直至变形稳定后再施加下一级垂直压力;稳定标准为百分表每 1h 间隔的读数之差值不大于 0.01mm;

(9)试验结束后,退去垂直压力,拆除压力传感器和百分表,吸出护水圈内注水,拆除护水圈、钢珠、加压板和透水板;取出试样并测定其含水率。

4.34.4 侧向压力  $\sigma'_3$  与垂直压力  $p$  的拟合直线应以垂直压力为横坐标,以侧向压力为纵坐标绘制,其斜率即为静止侧压力系数。

4.34.5 静止侧压力系数试验的记录格式可采用附录 A 中表 A.0.54。

### 4.35 单轴抗拉强度试验

4.35.1 单轴抗拉强度试验可用于最大粒径不大于 5mm 的黏性土。

4.35.2 主要仪器设备应符合下列规定:

(1)应变控制式三轴仪的电动机能正反转动;

(2)方形截面制样模的断面为 50mm × 50mm,长度为 150mm;

(3)百分表的量程为 10mm,最小分度值不大于 0.01mm;

(4)天平的最大称量为 1000g,最小分度值不大于 0.1g。

4.35.3 试验应按下列步骤进行:

(1)原状土按三轴压缩试验要求制备试样;试样直径为 61.8mm、高为 125mm,并测试



样含水率和密度;

(2) 扰动土样根据要求的含水率制备土样,湿润 24h;根据要求的干密度和试验体积称取所需的土样,分四层压入制样磨具中制成试样;

(3) 将试样的上、下两端分别与试样帽和三轴仪底座用粘合剂依次胶结,在试样表面均匀地涂薄层凡士林;

(4) 调整底座高度,使钩拉装置与测力计连接;使台座下降至测力计微动;安装轴向位移百分表,将百分表和测力计的读数调整至初始读数;

(5) 开动电机,使试样为每分钟 0.01% ~ 0.03% 拉伸应变速率受拉;试样每产生轴向变形 0.01mm ~ 0.02mm 测记测力计和百分表读数一次,直至试样全部拉断,记录测力计最后读数;接近破坏时、强度低的试样加密读数;试验中要测读测力计的最大读数;

(6) 试验结束后,拆除试样和钩拉装置。

**4.35.4 试验成果整理应符合下列规定。**

**4.35.4.1 轴向拉伸应变和轴向抗拉强度应按下列公式计算:**

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta h}{h_0} \times 100 \quad (4.35.4-1)$$

$$R_t = \frac{F}{A_0} \times 10^3 \quad (4.35.4-2)$$

式中  $\varepsilon_t$ ——轴向拉伸应变(%);

$\Delta h$ ——轴向拉伸变形(mm);

$h_0$ ——试样初始高度(mm);

$R_t$ ——轴向抗拉强度(kPa);

$F$ ——轴向拉力(N);

$A_0$ ——试样面积( $\text{mm}^2$ )。

**4.35.4.2 需要时,可绘制轴向拉应力与轴向拉伸应变关系曲线。**

**4.35.4.3 轴向抗拉强度应取 3 位有效数字。**

**4.35.5 试验的记录格式可采用附录 A 中表 A.0.55。**

## 4.36 共振柱试验

**4.36.1 共振柱试验可用于饱和砂土、粉土和黏性土。**

**4.36.2 主要仪器设备应包括压力室、静力控制系统、激振控制系统、量测系统;压力室、激振控制系统、量测系统符合下列规定:**

(1) 压力室的内部置放激振器、加速度计及试样,底座和试样上压盖板具有辐射状的凸条;

(2) 激振控制系统包括信号发生器、功率放大器、D/A 转换器等;

(3) 量测系统包括加速度计、电荷放大器、频率计、示波器或 A/D 转换器等。

**4.36.3 试样制备和饱和应符合下列规定:**

(1) 采用的试样直径为 50mm,高度与直径之比为 2:1;

(2) 试样数量不少于 3 个;

- (3) 砂土的试样制备在仪器上进行;
- (4) 其他符合第 4.26.3 条的有关规定。

#### 4.36.4 试样安装应按下列步骤进行:

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

(2) 将试样放在底座上,并压入凸条中;在其周围贴 7~9 条宽 6mm 的湿滤纸条;用承膜筒将橡皮膜套在试样外,下端与底座固定,取下承膜筒;用对开圆模夹紧试样,将橡皮膜上端翻出模外;

(3) 对扭转振动,将加速度计和激振驱动系统水平固定在驱动板上,再将驱动板置于试样上端,将旋转轴与试样帽上端连接,翻起橡皮膜并固定在上压盖上;按线圈座编号,将对应的线圈套进磁钢外极;磁极中心至线圈上、下端的距离相等,两对线圈的高度一致,线圈两侧的磁隙相同,并对称于线圈支架,按线圈上的标志接线;

(4) 对轴向振动,将加速度计垂直固定在上压盖上,再将上压盖与激振器相连;当上压盖上下活动自如时,垂直地置于试样上端,翻起橡皮膜并固定在上压盖上;

(5) 用引线将加力线圈与功率放大器相连,并将加速度计与电荷放大器相连;

(6) 拆除对开圆模,装上压力室外罩;转动调压阀,施加周围压力;周围压力根据工程实际确定,或采用 100kPa、200kPa、300kPa、400kPa;打开排水阀,直至固结稳定,关排水阀。

#### 4.36.5 试样固结应符合下列规定:

(1) 等向固结时,先对试样施加 20kPa 的侧向压力,然后逐级施加均等的侧向压力和轴向压力,直到轴向压力和侧向压力相等并达到预定压力;

(2) 不等向固结时,在等向固结变形稳定后,逐级增加轴向压力,直到预定的轴向压力,加压时试样不产生过大的变形;

(3) 采用反压力饱和的试样按第 4.26 节的有关规定进行固结;

(4) 施加压力后先测取试样内的孔隙水压力值,再打开排水阀或体变管阀和反压力阀,使试样排水固结;细粒类土试样的固结稳定标准为 1h 内固结排水量变化不大于  $0.1\text{cm}^3$ ;砂土试样等向固结时,固结稳定标准为关闭排水阀后 5min 内孔隙压力不上升;不等向固结时,固结稳定标准为 10min 内轴向变形不大于 0.01mm;

(5) 固结完成后关排水阀,并计算振前干密度。

#### 4.36.6 动剪切模量和动弹性模量测试时,宜采用稳态强迫振动法,也可采用自由振动法。阻尼比测试时,宜采用自由振动法。

#### 4.36.7 稳态强迫振动法试验应按下列步骤进行:

(1) 开启信号发生器、示波器、电荷放大器和频率计电源,进行预热;

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

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



(4) 进行阻尼比测定时,当激振频率达到系统共振频率后,继续增大频率,这时振幅逐渐减小,测记每一激振频率和相应的振幅电压值;测记 7 至 10 组数据,关仪器电源;绘制振幅与频率关系曲线,见图 4.36.7;

(5) 退去压力,取下压力室罩,拆除试样;需要时测定试样含水率。

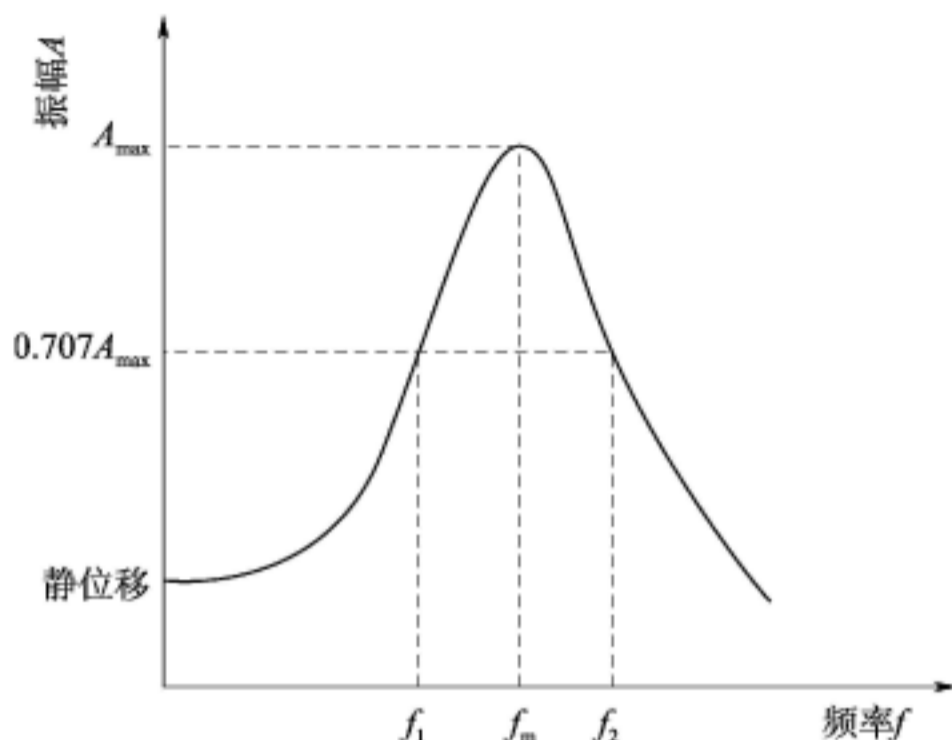


图 4.36.7 稳态强迫振动振幅与频率关系曲线

#### 4.36.8 自由振动法试验应按下列步骤进行:

(1) 开启电荷放大器电源,预热;开计算机系统电源;

(2) 将试验程序输入计算机,开功率放大器电源预热 5min,在计算机控制下进行试验;计算机指令 D/A 转换器控制驱动系统,对试样施加瞬时扭矩后立即卸除,使试样自由振动;在振动过程中,加速度计的信号经过电荷放大器和 A/D 转换器输入至计算机处理;不用计算机采集数据时,需用光线示波器或  $x \sim y$  函数记录仪记录振幅衰减曲线;

(3) 在每一级激振力振动下试验后,逐次增大激振力,继续进行试验,得到在试样应变幅值增大后测试的模量和阻尼比;应变幅值增大到  $10^{-4}$  为止;用计算机采集数据时,记录某一固结压力下、每一激振力时的剪应变、剪切模量和阻尼比;

(4) 在一级固结压力下试验后,增大试样的侧向压力和轴向压力,排水固结后,按第(1)项~第(3)项步骤进行试验;

(5) 关闭仪器电源,退除压力,取下压力室外罩,拆除试样;需要时测定试样含水率。

#### 4.36.9 试验成果整理应符合下列规定。

##### 4.36.9.1 扭转共振时的动剪切模量应按下列公式计算:

$$G_d = \rho \left( \frac{2\pi f_1 h_c}{F_1} \right)^2 \quad (4.36.9-1)$$

$$F_1 \tan F_1 = \frac{1}{T_1} \quad (4.36.9-2)$$

$$T_1 = \frac{I_a}{I_0} \left[ 1 - \left( \frac{f_{at}}{f_1} \right) \right]^2 \quad (4.36.9-3)$$

$$I_0 = \frac{m d_c^2}{8} \quad (4.36.9-4)$$



$$A_{at} = \frac{\delta_{at} f_{at} I_a}{\pi f_t I_0} \quad (4.36.9-5)$$

式中  $G_d$ ——动剪切模量(kPa);  
 $F_t$ ——扭转向无量纲频率因数;  
 $f_t$ ——试验时实测的共振频率(Hz);  
 $f_{at}$ ——仪器激振端压板系统扭转向共振频率(Hz),对于激振端无弹簧-阻尼器的仪器, $f_{at}$ 为0;  
 $\rho$ ——试样固结后密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  
 $T_t$ ——仪器激振端扭转向惯量因数;  
 $I_0$ ——试样转动惯量( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ );  
 $I_a$ ——仪器激振端压板系统的转动惯量( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ );  
 $A_{at}$ ——仪器激振端扭转向阻尼因数;  
 $d_c$ ——试样固结后的直径(cm);  
 $m$ ——试样质量(g);  
 $h_c$ ——试样固结后的高度(cm);  
 $\delta_{at}$ ——仪器激振端压板系统扭转向自由振动对数衰减率。

**4.36.9.2** 自由振动时试样扭转向阻尼比应按下列公式计算:

$$\lambda_{dt} = \frac{1}{2\pi} [\delta_t (1 + S_t) - \delta_{at} S_t] \quad (4.36.9-6)$$

$$\delta_t = \frac{1}{n} \ln \left( \frac{A_1}{A_{n+1}} \right) \quad (4.36.9-7)$$

$$S_t = \frac{I_a}{I_0} \left( \frac{f_{at} F_t}{f_t} \right)^2 \quad (4.36.9-8)$$

式中  $\lambda_{dt}$ ——试样扭转向的阻尼比;  
 $\delta_t$ ——试样系统扭转自由振动的对数衰减率;  
 $S_t$ ——试样系统扭转向能量比;  
 $n$ ——自由振动的周期数;  
 $A_1$ ——第一周的振幅(cm);  
 $A_{n+1}$ ——第  $n+1$  周的振幅(cm)。

**4.36.9.3** 稳态强迫振动法无弹簧-阻尼器时试样扭转向阻尼比应按下列公式计算:

$$\lambda_{dt} = \frac{1}{2} \left( \frac{f_2 - f_1}{f_0} \right) \quad (4.36.9-9)$$

式中  $\lambda_{dt}$ ——试样扭转向的阻尼比;  
 $f_1, f_2$ ——分别为图 4.36.7 关系曲线上 0.707 最大振幅值所对应的频率(Hz);  
 $f_0$ ——最大振幅值所对应的频率(Hz)。

**4.36.9.4** 轴向共振时试样动弹性模量应按下列公式计算:

$$E_d = \rho \left( \frac{2\pi h_c f_1}{F_1} \right)^2 \quad (4.36.9-10)$$

$$F_1 \tan F_1 = \frac{1}{T_1} \quad (4.36.9-11)$$

$$T_1 = \frac{m_a}{m} \left[ 1 - \left( \frac{f_{a1}}{f_1} \right)^2 \right] \quad (4.36.9-12)$$

$$A_{a1} = \frac{\delta_{a1} f_{a1} m_a}{\pi f_1 m} \quad (4.36.9-13)$$

式中  $E_d$ ——试样动弹性模量(kPa)；  
 $F_1$ ——轴向无量纲频率因数；  
 $T_1$ ——仪器激振端轴向惯量因数；  
 $A_{a1}$ ——仪器激振端轴向阻尼因数；  
 $f_1$ ——试验时实测轴向共振频率(Hz)；  
 $f_{a1}$ ——仪器激振端压板系统轴向共振频率(Hz)；  
 $m_a$ ——仪器激振端压板系统的质量(g)；  
 $\delta_{a1}$ ——仪器激振端压板系统轴向自由振动衰减率,由仪器标定时确定。

**4.36.9.5** 试样轴向阻尼比应按下列公式计算：

$$\lambda_{d1} = \frac{1}{2\pi} [\delta_1 (1 + S_1) - \delta_{a1} S_1] \quad (4.36.9-14)$$

$$S_1 = \frac{m_a}{m} \left( \frac{f_{a1} F_1}{f_1} \right)^2 \quad (4.36.9-15)$$

式中  $\lambda_{d1}$ ——试样轴向阻尼比；  
 $S_1$ ——试样系统轴向能量比；  
 $\delta_1$ ——试样系统轴向自由振动时的对数衰减率。

**4.36.9.6** 试样剪应变幅和轴应变幅应按下列公式计算：

$$\lambda_d = \frac{\theta d_c}{3h_c} \times 100 \quad (4.36.9-16)$$

$$\varepsilon_d = \frac{A_1}{h_c} \times 100 \quad (4.36.9-17)$$

式中  $\lambda_d$ ——试样剪应变幅(%)；  
 $\varepsilon_d$ ——试样轴应变幅(%)；  
 $\theta$ ——试样激振端的角位移幅(rad)；  
 $A_1$ ——试样激振端的轴向位移幅(cm)。

**4.36.9.7** 当同时测试动剪切模量和动弹性模量受设备条件限制时,应按下列公式进行参数换算：

$$G_d = \frac{E_d}{2(1 + \mu_d)} \quad (4.36.9-18)$$

$$\gamma_d = \varepsilon_d (1 + \mu_d) \quad (4.36.9-19)$$

式中  $\mu_d$ ——试样动泊松比。

**4.36.10** 试验记录格式可采用附录 A 中表 A.0.56。

### 4.37 弹性模量试验

4.37.1 弹性模量试验可用于饱和的黏性土和砂土。

4.37.2 试验的主要仪器设备应符合下列规定：

(1) 三轴仪采用应力控制式,见图 4.37.2;

(2) 天平最大称量为 200g,最小分度值不大于 0.01g;最大称量为 1000g,最小分度值不大于 0.1g;

(3) 千分表的量程为 2mm,最小分度值为 0.001mm。

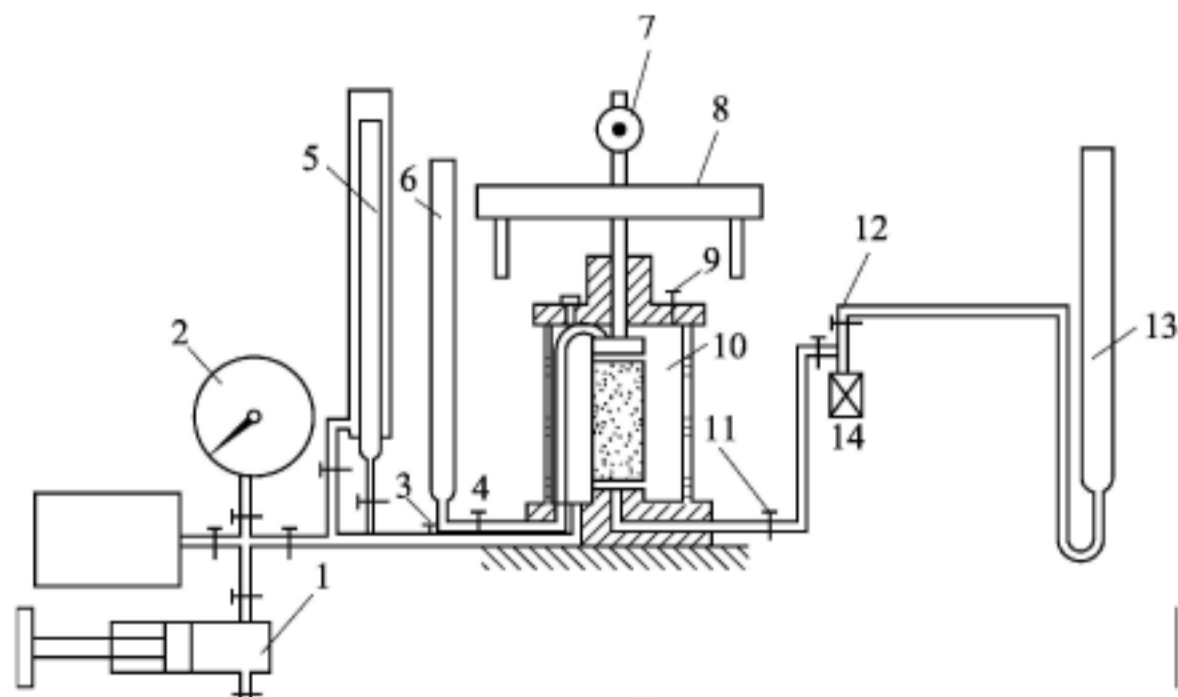


图 4.37.2 应力控制式三轴仪装置

1-调压筒;2-周围压力表;3-周围压力阀;4-排水阀;5-体变管;6-排水管;7-千分表;8-轴向加压设备;9-排气孔;10-压力室;11-孔隙水压力阀;12-量管阀;13-量管;14-孔压传感器

4.37.3 试样应按下列步骤进行试验：

(1) 原状土试样和击实试样制备、饱和、安装和固结按第 4.26 节的有关规定进行；

(2) 试样  $K_0$  固结在应力控制三轴仪上进行；试样安装后，施加周围压力和反压力；将周围压力调至所需反压力值，开周围压力阀和体变管阀，施加反压力；开孔隙水压力阀，待孔压稳定，关体变管阀，测记体变管读数即排水量读数，测记孔隙水压力表读数，关孔隙水压力阀；周围压力的选择与工程实际荷载相适应，最大周围压力大于设计荷载，一般按 50kPa、100kPa、200kPa、400kPa、600kPa 施加；随着试样排水，缓慢地施加轴向压力，务使排水量等于轴向变形量与试样初始面积的乘积，直至孔隙水压力消散到接近施加的反压力，使有效侧向压力与有效轴向压力之比等于静止侧压力系数  $K_0$ ；若不需要加反压力，排水量由排水管测读；

(3) 关排水阀和孔隙水压力阀，将千分表调整至零位；分级施加轴向压力每级压力按预计的试样破坏主应力差的施加；

(4) 施加第 1 级压力，开始计时，测记加压后 1min 时千分表的读数；每隔 1min 施加一级压力，测记千分表读数，施加到第 4 级压力为止；

(5) 在测记第 4 级压力施加 1min 后千分表读数的同时，逐级卸压；每隔 1min 卸去一级，并测记卸压后 1min 的千分表读数，直至施加的轴向压力全部卸去；



(6) 在测记最后一级压力卸去后 1min 千分表读数时,按第(4)项和第(5)项的规定重复加荷、卸荷 4~5 遍后,继续加压,测记每级压力施加 1min 后千分表读数,直至破坏为止;

(7) 关周围压力阀,卸去轴向压力,拆除试样,称试样质量并测定试验后含水率。

**4.37.4** 计算弹性模量时,应绘制加压、卸压与轴向变形关系曲线,如图 4.37.4 所示。将最后一个滞回圈的两端点连成直线,其斜率为土的弹性模量。弹性模量应按下式计算:

$$E = \frac{\sum \Delta p}{\frac{\sum \Delta h}{h_c}} \times 10^3 \quad (4.37.4)$$

式中  $E$ ——试样的弹性模量(kPa);

$\Delta p$ ——每级轴向荷载(N);

$A_0$ ——试样初始面积( $\text{mm}^2$ );

$\sum \Delta h$ ——相应于总压力下的弹性变形(mm);

$h_c$ ——试样固结后高度(mm)。

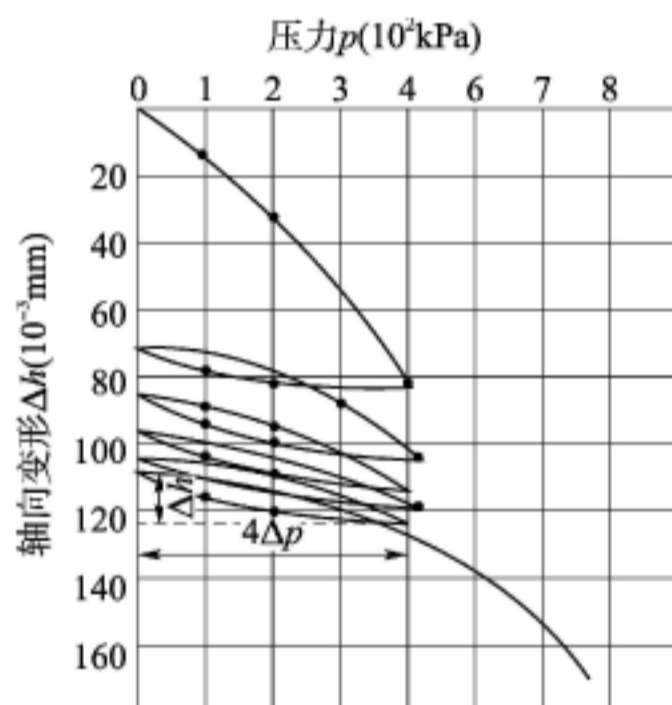


图 4.37.4 加压、卸压与轴向变形关系曲线

**4.37.5** 试验记录格式可采用附录 A 中表 A.0.57。

## 4.38 冻胀量试验

**4.38.1** 冻胀量试验可用于黏性土、粉土和砂土。

**4.38.2** 主要仪器设备应符合下列规定:

(1) 试样盒由外径为 12cm、壁厚为 1cm、高为 10cm 的有机玻璃筒和与之配套的顶板、底板组成(图 4.38.2);有机玻璃筒周侧沿高度每隔 1cm 设热敏电阻温度计插入孔;顶板、底板的结构能提供恒温液循环和外界水源补给通道,并使板面温度均匀;

(2) 恒温箱的容积不小于  $0.8\text{m}^3$ ,内设冷液循环管路和功率为 500W 的加热器,通过热敏电阻温度计与温度控制仪相连,使试验期间箱温保持在  $1^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ ;

(3) 温度控制系统由低温循环浴和温度控制仪组成,提供试验所需的顶板、底板温度;

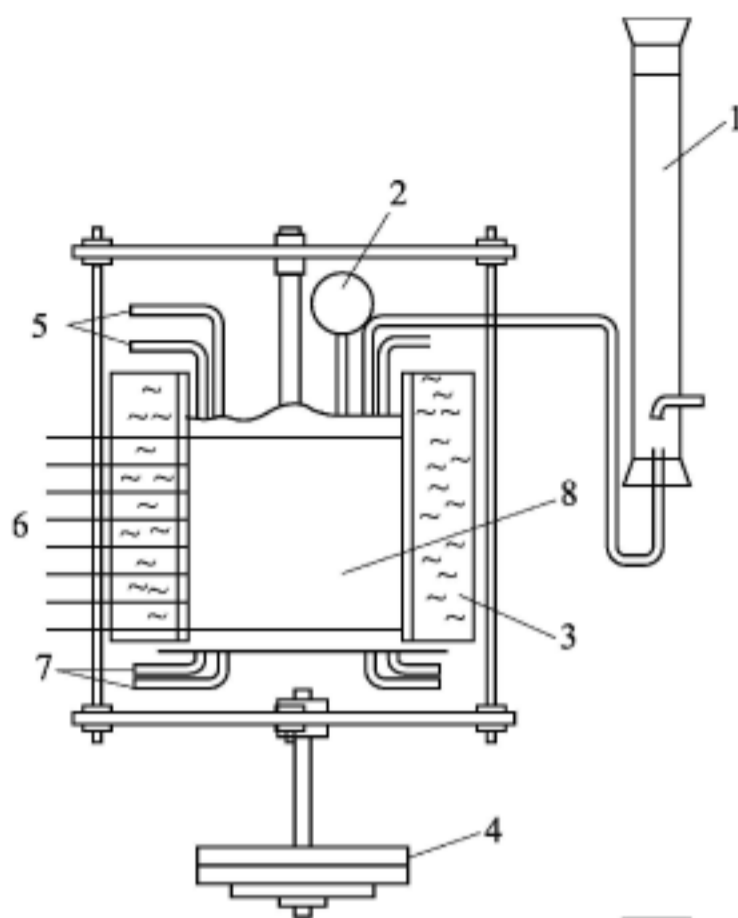


图 4.38.2 试样盒结构示意图

1-供水装置;2-位移计;3-保温材料;4-加压装置;5-正温循环液进出口;6-热敏电阻测温点;7-负温循环液进出口;8-试样

(4) 温度监测系统由热敏电阻温度计、数据采集仪和电子计算机组成,监测试验过程中土样、顶板、底板温度和箱温变化;

(5) 补水系统由恒定水位的供水装置(图 4.38.2)通过塑料管与顶板相连,水位高出顶板与土样接触面 1cm,试验过程中定时记录水位以确定补水量;

(6) 变形监测系统用百分表或量程 30mm、最小分度值 0.01mm 的位移传感器,有条件时采用数据采集仪结合计算机监测试验过程中土样变形量;

(7) 加压系统由液压油源及加压装置或加压框架和砝码组成;加压系统仅在需要模拟原状土天然受压状况时使用,加载等级根据天然受压状况确定。

#### 4.38.3 原状土应按下列步骤进行试验:

(1) 土样按自然沉积方向放置,开启土样筒取出土样;

(2) 用土样切削器将原状土样削成直径为 10cm、高为 5cm 的试样,称量确定密度并取余土测定初始含水率;

(3) 有机玻璃试样盒内壁涂上一薄层凡士林,放在底板上,盒内放一张薄滤纸,然后将试样装入盒内,让其自由滑落在底板上;

(4) 在试样顶面再加上一张薄滤纸,然后放上顶板,并稍稍加力,以使试样与顶板、底板接触紧密;

(5) 将盛有试样的试样盒放入恒温箱内,试样周侧、顶板、底板内插入热敏电阻温度计、试样周侧包裹 5cm 厚的泡沫塑料保温;连接顶板、底板冷液循环管路及底板补水管路,供水并排除底板内气泡,调节水位;安装位移传感器;

(6) 开启恒温箱、试样盒、顶板、底板冷浴,设定恒温箱冷浴温度为  $-15^{\circ}\text{C}$ ,箱内气温为  $1^{\circ}\text{C}$ ,顶板、底板冷浴温度为  $1^{\circ}\text{C}$ ;



(7) 试样恒温 6h, 并监测温度和变形; 待试样初始温度均匀达到 1℃ 以后, 开始试验;

(8) 底板温度调节到 -15℃ 并持续 0.5h, 让试样迅速从底面冻结, 然后将底板温度调节到 -2℃, 使黏土以 0.3℃/h、砂土以 0.2℃/h 的速度下降; 保持箱温和顶板温度均为 1℃, 记录初始水位; 每隔 1h 记录水位、温度和变形量各一次; 试验持续 72h;

(9) 试验结束后, 迅速从试样盒中取出土样, 测量试样高度并测定冻结深度。

#### 4.38.4 扰动土应按下列步骤进行试验:

(1) 称取风干土样 500g, 加纯水拌匀呈稀泥浆状, 装入内径为 10cm 的有机玻璃筒内, 加压固结, 直至达到所需初始含水率后, 将土样从有机玻璃筒中推出, 并将土样高度修正到 5cm;

(2) 继续按第 4.38.3 条第(3)项 ~ 第(9)项的步骤进行试验。

#### 4.38.5 冻胀率应按下列式计算:

$$\eta = \frac{\Delta h}{H_f} \times 100 \quad (4.38.5)$$

式中  $\eta$ ——冻胀率(%);

$\Delta h$ ——试验期间总冻胀量(mm);

$H_f$ ——冻结深度(mm), 不包含冻胀量。

#### 4.38.6 试验的记录格式可采用附录 A 中表 A.0.58。

### 4.39 冻土融化压缩试验

4.39.1 冻土融化压缩试验可用于冻结黏性土、粉土和粒径小于 2mm 的冻结砂土。

4.39.2 主要仪器设备应包括融化压缩仪、原状冻土钻样器、恒温供水设备、加荷和变形测量设备; 融化压缩仪、原状冻土钻样器、加荷和变形测量设备应符合下列规定:

(1) 融化压缩仪(图 4.39.2)的加热传压板采用导热性能好的金属材料制成; 试样环采用有机玻璃或其他导热性低的非金属材料制成, 其内径为 79.8mm, 高为 40.0mm; 保温外套用聚苯乙烯或聚氨酯泡沫塑料;

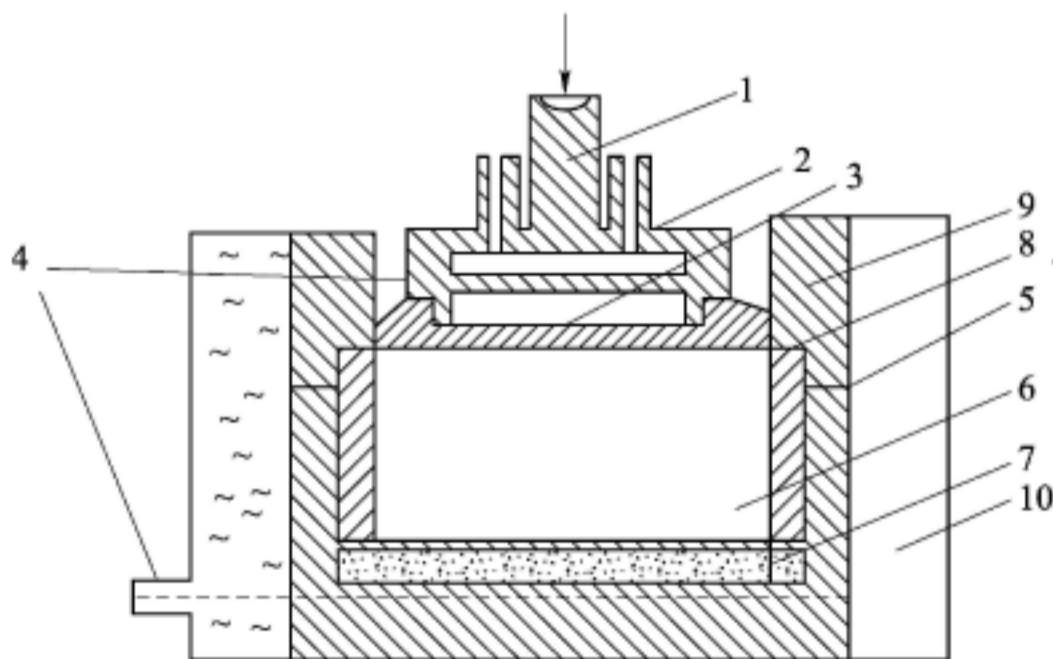


图 4.39.2 融化压缩仪示意图

1-加热传压板; 2-热循环水进出口; 3-透水板; 4-上下排水孔; 5-试样环; 6-试样; 7-透水板; 8-滤纸; 9-导环; 10-保温外套

(2) 原状冻土钻样器由钻架和钻具两部分组成, 钻具开口内径为 79.8mm; 钻样时将



试样环套入钻具内,环外壁与钻具内壁吻合平滑;

(3) 加荷和变形测量设备符合第 4.25.2 条第(2)项和第(3)项的规定。

**4.39.3** 融化压缩仪和加荷设备应定期校准,并做出仪器变形量校正曲线或数值表。

**4.39.4** 试验应在负温环境下进行。严禁在切样和装样过程中使试样表面发生融化。试验过程中试样应满足自上而下单向融化。

**4.39.5** 试验应按下列步骤进行:

(1) 钻取冻土试样,其高度大于试样环高度;从钻样剩余的冻土中取样测定含水率;钻样时保持试样的层面与原状土一致,不能上下倒置;

(2) 冻土试样与试样环内壁紧密接触;刮平上下面,测定冻土试样的密度;

(3) 在融化压缩容器内先放透水板,其上放一张润湿滤纸;将装有试样的试样环放在滤纸上,套上护环;在试样上铺滤纸和透水板,再放上加热传压板,装上保温外套;将融化压缩容器置于加压框架正中;安装百分表或位移传感器;

(4) 施加 1kPa 的压力,调平加压杠杆,调整百分表或位移传感器到零位;

(5) 用胶管连接加热传压板的热水循环水进出口与事先装有温度为 40℃ ~ 50℃ 水的恒温水槽,并打开开关和开动恒温器,保持水温;

(6) 试样开始融沉时即开始计时,分别记录 1min、2min、5min、10min、30min、60min 时的变形量;以后每 2h 观测记录一次,直至变形量在 2h 内小于 0.05mm 时为止,并测记最后一次变形量;

(7) 融沉稳定后,停止热水循环,并开始加荷进行压缩试验;加荷等级视实际需要确定,一般取 50kPa、100kPa、200kPa、400kPa、800kPa 等,最后一级荷载比土层的计算压力大 100kPa ~ 200kPa;

(8) 施加每级荷载后 24h 为稳定标准,并测记相应的压缩量,直至施加最后一级荷载压缩稳定为止;

(9) 试验结束后,拆除仪器各部件,取出试样,测定含水率。

**4.39.6** 融沉系数应按下列式计算:

$$a_0 = \frac{\Delta h_0}{h_0} \quad (4.39.6)$$

式中  $a_0$ ——冻土融沉系数;

$\Delta h_0$ ——冻土融化下沉量(mm);

$h_0$ ——冻土试样初始高度(mm)。

**4.39.7** 融沉后的压缩系数可按第 4.25 节的有关公式计算。

**4.39.8** 试验记录格式可参照附录 A 中表 A.0.59。

#### 4.40 黏性土附着力试验

**4.40.1** 黏性土附着力试验可用于最大粒径不大于 0.5mm 的黏性土,且其液性指数不小于 0.50。

**4.40.2** 主要试验仪器设备应包括测力装置、土样杯、护环、垫圈、加压装置和压板;土样

杯、护环、压板应符合下列规定:

- (1)  $\sqrt[6.3]{}$  土样杯为圆柱形,外径为 35.7mm,深度为 40.0mm,壁厚为 2.0mm,内壁刻有阻力螺纹,且粗糙度不小于  $\sqrt[6.3]{}$ ;
- (2)  $\sqrt[3.2]{}$  护环外径为 35.7mm,有效高度为 0.5mm;
- (3) 压板直径为 45.0mm,厚度为 5.0mm,粗糙度为  $\sqrt[3.2]{}$ ,且具有足够刚度,通常采用铜质材料。

#### 4.40.3 试验应按下列步骤进行:

- (1) 试验采用指定含水率状态试样,当试样中含有粒径大于 0.5mm 的土粒和杂物时,予以剔除;
- (2) 取代表性土样 250g,测定含水率;将试样充分调拌均匀,用准备好垫圈套住杯口,将试样填入试样杯中,不留空隙,对液性指数偏低的试样要充分扰动,密实地填入试样杯中,刮去垫圈上部余土,使土面与垫圈平齐;除去垫圈,土面高出杯口约 0.5mm;
- (3) 将土样杯放置在预先平整的附着力仪底座上;压板对准土样杯口,使压板平面完全接触土面;在压板上部无冲击地施加垂直荷重 20kN,持续 30s;
- (4) 启动拉力设备,平稳拉动压板,缓缓增加拉力,直至土样被拉断,记录测力计的最大读数;
- (5) 擦净压板,重复第(2)项~第(4)项 4 次;删除 5 次测定值中的最大值和最小值,用余下 3 个数值的平均值,按土样杯内径面积计算相应的拉力值作为该土的附着力;若 3 个数值极差大于均值的 20%,重新测试。

#### 4.40.4 黏性土附着力应按式计算:

$$T = \frac{F}{A} \times 10^3 \quad (4.40.4)$$

式中  $T$ ——附着力(kPa),精确至 0.1kPa;

$F$ ——最大拉力值(N);

$A$ ——土样杯面积( $\text{mm}^2$ ),精确至  $1\text{mm}^2$ 。

#### 4.40.5 试验记录格式可参照附录 A 中表 A.0.60。

### 4.41 岩石单轴抗压强度试验

4.41.1 单轴抗压强度试验可用于能制成规则试件的各种岩石。

4.41.2 试验主要仪器设备应包括钻石机、锯石机、磨石机、车床、测量平台、材料试验机等。

4.41.3 试件可用钻孔岩芯或岩块加工制成,宜采用圆柱体,且其直径和精度应符合现行国家标准《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266)的有关规定。试件在采取、运输和制备过程中应避免产生裂缝。

4.41.4 试件含水状态可根据需要选择天然含水状态、干燥状态、饱和状态或其他含水状



态。试件干燥和饱和方法应符合第 4.1 节的有关规定。

**4.41.5** 同一含水状态下每组试验试件的数量不应少于 3 个。

**4.41.6** 试件描述应包括下列内容：

- (1) 岩石名称、颜色、矿物成分、结构、风化程度、胶结物性质等；
- (2) 加荷方向与岩石试件内层理、节理、裂隙的关系及试件加工中出现的问题；
- (3) 含水状态和所使用的方法。

**4.41.7** 试验应按下列步骤进行：

- (1) 将试件置于试验机承压板中心，调整球形座，使试件两端面接触均匀；
- (2) 以每秒 0.5MPa ~ 1.0MPa 的速度加荷直至破坏；记录破坏荷载及加载过程中出现的现象；
- (3) 试验结束后，描述试件的破坏形态。

**4.41.8** 试验成果的整理应符合下列规定：

- (1) 岩石单轴抗压强度按下式计算：

$$R = \frac{P}{A} \quad (4.41.8)$$

式中  $R$ ——岩石单轴抗压强度 (MPa)，精确至 0.001MPa；

$P$ ——试件破坏荷载 (N)；

$A$ ——试件截面积 ( $\text{mm}^2$ )；

- (2) 在试验成果中，列出每一试件的试验值；
- (3) 试验记录格式参照附录 A 中表 A.0.61。

## 4.42 岩石单轴压缩变形试验

**4.42.1** 单轴压缩变形试验可用于能制成规则试件的各类岩石。

**4.42.2** 主要试验仪器设备应包括钻石机、锯石机、磨石机、车床、测量平台、材料试验机、惠斯顿电桥、万用表、兆欧表、电阻应变仪等。

**4.42.3** 试件应符合第 4.41.3 条 ~ 第 4.41.5 条的规定。

**4.42.4** 试件描述应符合第 4.41.6 条的规定。

**4.42.5** 试验应按下列步骤进行：

- (1) 电阻应变片阻栅长度大于岩石颗粒直径的 10 倍，并小于试件的半径；同一试件所选定的工作片与补偿片的规格、灵敏系数等相同，电阻值相差不大于  $\pm 0.2\Omega$ ；
- (2) 贴片位置选择在试件中部相互垂直的两对称部位，以相对面为一组，分别粘贴轴向、径向应变片，并避开裂隙或斑晶；
- (3) 贴片位置打磨平整、光滑，并用清洗液清洗干净，在贴片位置的表面均匀地涂一层防底潮胶液，厚度不大于 0.1mm，范围大于应变片；
- (4) 电阻应变片牢固地粘贴在试件上，纵向或横向电阻应变片的数量不少于 2 片，其绝缘电阻值大于 200M $\Omega$ ；
- (5) 将试件置于试验机承压板中心，调整球形座使试件受力均匀；



(6) 以每秒 0.5MPa ~ 1.0MPa 的速度加荷, 逐级测读荷载与应变值, 直至破坏; 测值不少于 10 组;

(7) 记录加荷过程及破坏时出现的现象, 并对破坏后的试件进行描述。

#### 4.42.6 试验成果的整理应符合下列要求:

(1) 岩石单轴抗压强度按式(4.41.8)计算;

(2) 各级应力按下式计算:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4.42.6-1)$$

式中  $\sigma$ ——各级应力(MPa);

$P$ ——与所测各组应变值相应的荷载(N);

$A$ ——试件截面积( $\text{mm}^2$ );

(3) 绘制应力与纵向应变和横向应变关系曲线;

(4) 岩石平均弹性模量和岩石平均泊松比按下列公式计算:

$$E_{av} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_{lb} - \varepsilon_{la}} \quad (4.42.6-2)$$

$$\mu_{av} = \frac{\varepsilon_{db} - \varepsilon_{da}}{\varepsilon_{lb} - \varepsilon_{la}} \quad (4.42.6-3)$$

式中  $E_{av}$ ——岩石平均弹性模量(MPa);

$\mu_{av}$ ——岩石平均泊松比;

$\sigma_a$ ——应力与纵向应变关系曲线上直线段始点的应力值(MPa);

$\sigma_b$ ——应力与纵向应变关系曲线上直线段终点的应力值(MPa);

$\varepsilon_{la}$ ——应力为  $\sigma_a$  时的纵向应变值;

$\varepsilon_{lb}$ ——应力为  $\sigma_b$  时的纵向应变值;

$\varepsilon_{da}$ ——应力为  $\sigma_a$  时的横向应变值;

$\varepsilon_{db}$ ——应力为  $\sigma_b$  时的横向应变值;

(5) 岩石割线弹性模量及相应的岩石泊松比按下列公式计算:

$$E_{50} = \frac{\sigma_{50}}{\varepsilon_{150}} \quad (4.42.6-4)$$

$$\mu_{50} = \frac{\varepsilon_{d50}}{\varepsilon_{150}} \quad (4.42.6-5)$$

式中  $E_{50}$ ——岩石割线弹性模量(MPa), 精确至 0.001MPa;

$\mu_{50}$ ——应力为  $\sigma_{50}$  的岩石割线泊松比, 精确至 0.01;

$\sigma_{50}$ ——相当于岩石单轴抗压强度 50% 时的应力值(MPa);

$\varepsilon_{150}$ ——应力为  $\sigma_{50}$  时的纵向应变值;

$\varepsilon_{d50}$ ——应力为  $\sigma_{50}$  时的横向应变值;

(6) 在试验成果中, 列出每一试件的试验值;

(7) 试验记录格式参照附录 A 中表 A.0.62。

### 4.43 岩石抗拉强度试验

4.43.1 岩石抗拉强度试验采用劈裂法,可用于能制成规则试件各类岩石。

4.43.2 主要试验仪器设备应符合第 4.41.2 条的规定。

4.43.3 试件的制备应符合下列规定:

(1) 试件采用圆柱体,直径为 48mm ~ 54mm,高度与直径之比为 0.5 ~ 1.0,试件高度大于岩石最大颗粒粒径的 10 倍;

(2) 试件加工精度符合第 4.1.5 条的规定;

(3) 试件含水状态根据需要选择,其天然状态、干燥状态和饱和状态符合第 4.1 节的有关规定;

(4) 同一含水状态下,每组试验试件的数量不少于 3 个。

4.43.4 试件描述应符合第 4.41.6 条的规定。

4.43.5 试验应按下列步骤进行:

(1) 通过试件直径的两端,在试件的侧面沿轴线方向画两条相互平行的线为加荷基线,将两根垫条沿加荷基线固定;对于坚硬和较坚硬岩石选用直径为 1mm 钢丝为垫条,对于软弱和较软弱岩石选用宽度与试件直径之比为 0.08 ~ 0.1 的胶木板为垫条;

(2) 将试件置于试验机承压板中心,调整球座,使试件均匀受力;

(3) 以每秒 0.3MPa ~ 0.5MPa 的速率加荷,直至试件破坏为止,记录破坏荷载;软岩和较软岩适当降低加载速率;

(4) 试验结束后,描述试件的破坏形态;试件最终破坏要求通过两垫条决定的平面,否则为无效试验。

4.43.6 试验成果的整理应符合下列规定:

(1) 岩石抗拉强度按下式计算:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi D \cdot H} \quad (4.43.6)$$

式中  $\sigma_t$ ——岩石的抗拉强度 (MPa),精确至 0.001MPa;

$P$ ——破坏荷载 (N);

$D$ ——试件的直径 (mm);

$H$ ——试件的高度 (mm);

(2) 试验记录格式采用附录 A 中表 A.0.63。

### 4.44 岩石抗剪强度试验

4.44.1 岩石抗剪强度试验可用于测定岩石、岩石结构面的抗剪强度和混凝土或砂浆与岩石的胶结面的抗剪强度。

4.44.2 主要试验仪器设备应包括钻石机、切石机、磨石机、混凝土或砂浆配制设备、养护槽、位移测表、烘箱、干燥器、饱和设备、直剪试验仪、游标卡尺等。

4.44.3 试件的制备应符合下列规定:



(1) 岩石试件尺寸的确定要考虑仪器的设备能力和岩石本身强度;试件的直径或边长不小于 50mm,试件高度与直径或边长相等;

(2) 岩石结构面试件的直径或边长不小于 50mm,试件高度与直径或边长相等,结构面位于试件中部;试件尽量保持原状结构,防止结构面被扰动;

(3) 对于加工困难的岩样允许采用不规则试件,试件用高强度的包封材料包裹;在试件与外框之间填充密实,剪切缝控制在 10mm 左右;

(4) 混凝土或砂浆与岩石胶结面试件为正方体,其边长不小于 150mm;混凝土或砂浆与岩石的接触面位于试件中部,其岩面起伏差控制在边长的 1% ~ 2%;混凝土或砂浆的原材料和配合比根据设计要求确定,骨料最大粒径不大于试件边长的 1/6;在浇注混凝土或砂浆的同时,制备 3 块混凝土或砂浆抗压试件,进行试件养护,达到规定龄期后进行试验,同组试验在同一龄期下进行;

(5) 试件含水状态根据需要选择天然状态、干燥状态或饱和状态;

(6) 同一含水状态下,每组试验试件数量不少于 5 个。

#### 4.44.4 试件描述应符合下列规定:

(1) 岩石名称、颜色、矿物成分、风化程度;

(2) 层理、片理、裂隙的发育程度及其与剪切方向的关系;

(3) 结构面的充填物性质、充填厚度以及试件在采取和制备过程中受扰动的情况;

(4) 混凝土或砂浆与岩石接触面的起伏差、混凝土或砂浆配合比和强度等级。

#### 4.44.5 试件安装应符合下列规定:

(1) 将试件置于直剪仪上,试件的受剪方向与工程岩体的受力方向大致相同,经论证后,确认剪切参数不受施力方向影响时不受此限制;

(2) 试件与剪切盒内壁之间的间隙以填料填实,使试件与剪切盒成为一个整体,预定剪切面位于剪切缝中部;

(3) 法向荷载和剪切荷载的作用方向通过预定剪切面的几何中心;法向位移测表和水平位移测表对称布置,各方向测表不少于两只;调整各测表,记录各测表稳定初始读数。

#### 4.44.6 法向荷载施加应符合下列规定:

(1) 在每个试件上,分别施加不同的法向荷载,法向荷载最大值为工程压力的 1.2 倍;对于结构面中含有软弱充填物的试件,最大法向荷载以不挤出充填物为限;

(2) 法向荷载按等差级数分级,分级数不少于 5 级;

(3) 对于不需要固结的试件,法向荷载一次施加完毕,立即测读法向位移,5min 后再测读一次,即可施加剪切荷载;

(4) 对于需要固结的试件,在法向荷载施加完毕后的第一个小时内,每隔 15min 读数一次,然后每半小时读数一次;当每小时法向位移不超过 0.05mm 时,即认为固结稳定,即可施加剪切荷载;

(5) 在剪切过程中,法向荷载始终保持为恒定。

#### 4.44.7 剪切荷载施加应符合下列规定:

(1) 按预估最大剪切荷载分 10 ~ 12 级,每级荷载施加后,立即测读剪切位移和法向



位移,5min 后再测读一次,施加下一级剪切荷载,当剪切位移明显增大时,适当减小级差;峰值前施加剪切荷载不少于 10 级;

(2) 试件剪切破坏后,将剪切荷载退至零;根据需要,待试件充分回弹后,调整测表,按第(1)项的步骤进行摩擦试验。

#### 4.44.8 剪切破坏标准应符合下列规定之一:

(1) 剪切荷载加不上或无法稳定;

(2) 剪切位移明显变大,在剪应力与剪切位移关系曲线上出现明显突变段;

(3) 剪切位移增大,在剪应力与剪切位移关系曲线上未出现明显突变段,但总剪切位移已达到试件边长的 10%。

#### 4.44.9 剪切破坏后,剪切面的量测和描述应符合下列规定:

(1) 准确量测有效剪切面积;

(2) 剪切面的破坏情况,擦痕的分布、方向和长度;

(3) 剪切面的起伏差,绘制沿剪切方向断面的变化曲线;

(4) 当结构面内有充填物时,描述剪切面的准确位置,充填物的组成成分、性质、厚度等,根据需要测定充填物的物理性质。

#### 4.44.10 试验成果的整理应符合下列规定:

(1) 法向应力和剪应力按下列公式计算,试验结果保留至 0.01MPa;

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4.44.10-1)$$

$$\tau = \frac{Q}{A} \quad (4.44.10-2)$$

式中  $\sigma$ ——法向应力(MPa);

$P$ ——法向荷载(N);

$A$ ——有效剪切面积( $\text{mm}^2$ );

$\tau$ ——剪应力(MPa);

$Q$ ——剪切荷载(N);

(2) 绘制各法向应力下的剪应力与剪切位移及法向位移的关系曲线,根据曲线确定各剪切阶段特征点的剪应力值;

(3) 根据各剪切阶段特征点的剪应力和法向应力值,采用最小二乘法或绘制剪应力与法向应力关系曲线的图解法,确定相应的抗剪强度参数;

(4) 试验记录格式采用附录 A 中表 A.0.64。

### 4.45 岩石点荷载强度试验

4.45.1 岩石点荷载强度试验可用于各类岩石。

4.45.2 主要试验仪器设备应包括电热鼓风干燥箱、干燥器、饱和设备、卡尺或直尺、点荷载试验仪。

4.45.3 试件的制备应符合下列规定。

**4.45.3.1** 试件应采用钻孔岩芯,或从岩石露头、勘探坑槽、平洞、巷道中采取的岩块。试件在采取和制备过程中,应避免产生人为裂隙。

**4.45.3.2** 试件尺寸应满足下列要求:

(1)当采用岩芯试件作径向试验时,试件的长度与直径之比大于1;做轴向试验时,加荷两点间距与直径之比为0.3~1.0;

(2)当采用方块体或不规则块体试件做试验时,尺寸为15mm~85mm,通常采用50mm;加荷两点间距与加荷处平均宽度之比为0.3~1.0;试件长度不小于加荷两点间距。

**4.45.3.3** 试件含水状态宜根据需要选择天然状态、干燥状态或饱和状态。

**4.45.3.4** 试件数量应根据试验性质、含水状态、各向异性特征而定。同一含水状态和同一加荷方向下,岩芯试件每组宜为5~10个;方块体或不规则块体试件每组宜为15~20个。

**4.45.4** 试件描述应包括下列内容:

- (1)岩石名称、颜色、矿物成分、风化程度;
- (2)试件形状、尺寸和制备方法;
- (3)层理、裂隙及其与加荷方向的关系。

**4.45.5** 试验应按下列步骤进行。

**4.45.5.1** 试验前应检查加荷系统,率定、调整测量系统,检查试验仪上下两个加荷锥头是否准确对中等。

**4.45.5.2** 试件安装应满足下列要求:

(1)径向试验时,将岩芯试件放入球端圆锥之间,使上下锥端与试件直径两端紧密接触,两加荷点的连线通过试件直径,量测加荷点间距;加荷点至试样自由端的距离不小于加荷两点间距的0.5倍;

(2)轴向试验时,将岩芯试件放入球端圆锥之间,使上下锥端位于岩芯试件的圆心处并与试件紧密接触;量测加荷点间距及垂直于加载方向的试件宽度;

(3)方块体与不规则块体试验时,选择试件最小尺寸方向为加荷方向;将试件放入球端圆锥之间,使上下锥端位于试件中心处并与试样紧密接触;量测加荷点间距及通过两加荷点最小截面的宽度或平均宽度,加荷点至试样自由端的距离不小于加荷两点间距的0.5倍;

(4)若测软弱面强度,加荷方向分别平行和垂直软弱面,且保证加荷点的连线在同一软弱面中。

**4.45.5.3** 试验时应连续均匀施加荷载,使试件控制在10s~60s内破坏,记录破坏荷载。

**4.45.5.4** 试验结束后,应描述试样的破坏形态。破坏面应贯穿整个试件并通过两加荷点,否则为无效试验。

**4.45.6** 试验成果的整理应符合下列规定。

**4.45.6.1** 未经修正的岩石点荷载强度指数应按下列式计算:



$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (4.45.6-1)$$

式中  $I_s$ ——未经修正的岩石点荷载强度指数 (MPa)；

$P$ ——破坏荷载 (N)；

$D_e$ ——等效岩芯直径 (mm)。

**4.45.6.2** 径向试验的等效岩芯直径可按式(4.45.6-2)计算,轴向、方块体或不规则块体试验的等效岩芯直径可按式(4.45.6-3)计算。

$$D_e = D \quad \text{或} \quad D_e = \sqrt{D \cdot D'} \quad (4.45.6-2)$$

$$D_e = \sqrt{\frac{4b \cdot D}{\pi}} \quad \text{或} \quad D_e = \sqrt{\frac{4b \cdot D'}{\pi}} \quad (4.45.6-3)$$

式中  $D_e$ ——等效岩芯直径 (mm)；

$D$ ——加荷点间距 (mm)；

$D'$ ——上下锥端发生贯入后,试样破坏瞬间的加荷点间距 (mm)；

$b$ ——通过两加荷点最小截面的宽度 (或平均宽度) (mm)。

**4.45.6.3** 当等效岩芯直径不等于 50mm 时,应按下列规定对计算值进行修正：

(1) 当试验数据较多,且同一组试样中等效岩芯直径具有多种尺寸时,根据试验结果,绘制  $D_e^2 \sim P$  的关系曲线;根据曲线查找  $D_e^2 = 2500\text{mm}^2$  时对应的  $P_{s(50)}$  值,按下式计算修正后的岩石点荷载强度指数：

$$I_{s(50)} = \frac{P_{s(50)}}{2500} \quad (4.45.6-4)$$

式中  $I_{s(50)}$ ——经尺寸修正后的岩石点荷载强度指数 (MPa)；

$P_{s(50)}$ —— $D_e^2$  为  $2500\text{mm}^2$  时对应破坏荷载 (N)；

(2) 当试验数据较少,或不适宜用上述方法修正时,修正岩石点荷载强度指数按下列公式计算：

$$I_{s(50)} = F \cdot I_s \quad (4.45.6-5)$$

$$F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^m \quad (4.45.6-6)$$

式中  $F$ ——修正系数；

$I_s$ ——未经修正的岩石点荷载强度指数 (MPa)；

$D_e$ ——等效岩芯直径 (mm)；

$m$ ——修正指数,由同类岩石的经验值确定,可取 0.40 ~ 0.45。

**4.45.6.4** 岩石点荷载强度各向异性指数可按下式计算：

$$I_{a(50)} = \frac{I'_{s(50)}}{I''_{s(50)}} \quad (4.45.6-7)$$

式中  $I_{a(50)}$ ——岩石点荷载强度各向异性指数；

$I'_{s(50)}$ ——垂直于软弱面的岩石点荷载强度指数 (MPa)；

$I''_{s(50)}$ ——平行于软弱面的岩石点荷载强度指数 (MPa)。



**4.45.6.5** 按式(4.45.6-5)计算的垂直和平行软弱面岩石点荷载强度指数应取平均值,平均值的确定应符合下列规定:

(1)当一组有效的试验数据不超过 10 个时,舍去一个最大值和一个最小值,计算算术平均值;

(2)当一组有效的试验数据超过 10 个时,舍去两个最大值和两个最小值,计算算术平均值。

**4.45.6.6** 计算值应取 3 位有效数字。

**4.45.6.7** 试验记录格式可采用附录 A 中表 A.0.65。

#### 4.46 岩石抗折强度试验

**4.46.1** 岩石抗折强度试验可用于能制成规则试件的各类岩石。

**4.46.2** 主要试验仪器设备应包括切石机、磨石机、电热鼓风干燥箱、干燥器、饱和设备、游标卡尺、角尺、压力试验机或万能试验机等。

**4.46.3** 试件的制备应符合下列规定:

(1)试件采用长×宽×高为 120mm×40mm×20mm 长方体;

(2)试件表面平整,相邻面互相垂直,其精度执行第 4.20.4 条第(2)项的规定;

(3)根据需要制备天然状态、干燥状态或饱和状态试件;

(4)同一含水状态下,每组试验试件数量不少于 3 个;若岩石有显著纹理,根据需要制备与纹理垂直及平行的试件各一组。

**4.46.4** 试件描述应包括岩性、结构构造、结构面特性、试件端部和边角形态等。

**4.46.5** 试验应按下列步骤进行:

(1)测量试件中央断面的尺寸;

(2)将试件放在试验机的抗折支架上,跨径为 100mm,采用跨中单点加荷,调整好各支点;

(3)开动试验机,以每秒 0.05MPa~0.1MPa 的速率连续均匀地施加荷载,直至试件折断为止,记录破坏荷载并测量其断面尺寸。

**4.46.6** 试验成果的整理应符合下列规定:

(1)按下式计算抗折强度,试验结果保留至 0.01MPa;

$$R_b = \frac{3P \cdot L}{2b \cdot h^2} \quad (4.46.6)$$

式中  $R_b$ ——岩石的抗折强度(MPa);

$P$ ——破坏荷载(N);

$L$ ——支点跨距(mm),采用 100mm;

$b$ ——试件断面宽度(mm);

$h$ ——试件断面高度(mm);

(2)试验结果取算术平均值,如单个值与平均值之差大于 25% 时,剔除之后再计算算术平均值;

(3) 试验记录格式采用附录 A 中表 A.0.66。

#### 4.47 土工合成材料试验检测

**4.47.1** 土工合成材料试验检测可用于水运工程地基基础工程中运用的各类土工织物、土工格栅、塑料排水板、地基加固用透水管、真空预压密封膜等。

**4.47.2** 常见的土工合成材料试验检测参数可根据土工合成材料在相关工程中的功能作用按表 4.47.2 的规定选择。

表 4.47.2 土工合成材料检测参数表

功能作用	材料名称	检测参数	
		必检参数	选检参数
滤层	土工织物	单位面积质量、厚度、拉伸强度、撕裂强度、等效孔径、渗透系数、顶破强度、刺破强度、动态穿孔	抗老化、直剪摩擦系数等
加筋垫层	土工织物	单位面积质量、厚度、拉伸强度、撕裂强度、等效孔径、渗透系数、顶破强度、刺破强度、接缝拉伸强度	动态穿孔、抗老化、直剪摩擦系数等
	土工格栅	网孔尺寸、拉伸强度、伸长率	单位面积质量、粘焊点剥离力等
防渗层	真空预压密封膜	厚度、纵横向拉伸强度、断裂延伸率、纵横向直角撕裂强度等	单位面积质量、耐静水压力、渗透系数、刺破强度等
排水通道	塑料排水板	断面尺寸、复合体拉伸强度、滤膜拉伸强度、复合体纵向通水量、滤膜等效孔径	复合体单位长度质量、滤膜单位面积质量、芯板压屈强度、粘合缝拉伸强度等；现场打设深度检测
	地基加固用软式透水管	复合体单位长度质量、滤膜单位面积质量、环刚度、滤膜渗透系数、滤膜等效孔径等	管径、管壁厚度、透水面积等

**4.47.3** 土工合成材料试验检测样品应具有良好的代表性,送检的样品应满足下列要求。

**4.47.3.1** 土工织物、土工格栅、塑料膜等片状样品不应少于 3 延米。

**4.47.3.2** 塑料排水板、软式透水管等条状样品不应少于 15 延米。

**4.47.4** 土工合成材料被检样品在试验检测前应一分为三,一份用于试验检测,另两份留存备用。样品留存的保存期自检测报告发出之日起不应少于 1 个月。

**4.47.5** 样品经裁剪后的每一试验参数的有效试件数量应符合下列规定。

**4.47.5.1** 物理性质测定的试件数量不应少于 10 个。

**4.47.5.2** 力学性质和水力学性质试验的试件数量不应少于 5 个。

**4.47.6** 裁剪由两种及以上材料复合而成的土工合成材料时,在不影响各自材料性能的前提下,可对不同材料分别进行试验。

**4.47.7** 塑料排水板实际打设深度检测可通过印有标尺的排水板的刻度值计算,也可采用适宜的电测方法进行检测。

**4.47.8** 土工合成材料的室内老化试验应根据需要分别选择荧光紫外灯、氙弧灯加速老化试验和抗氧化性能试验。现场老化试验应根据需要在工程现场原位老化后再取样进行室内试验。



4.47.9 土工合成材料物理性参数试验仪器设备应符合下列规定。

4.47.9.1 单位长度质量、单位面积质量测定应选用相应量程和最小分度值的电子天平。

4.47.9.2 土工织物、塑料膜等片状试样单位面积质量试样制备应采用专用冲刀裁样。

4.47.9.3 土工织物厚度测定可采用织物厚度仪,密封膜厚度测定可采用塑料膜厚度仪或织物厚度仪。

4.47.10 土工合成材料力学参数试验仪器应符合下列规定。

4.47.10.1 土工合成材料的拉伸试验、压缩试验应采用电子材料试验机。

4.47.10.2 不同种类的材料宜选择不同型式的夹具或夹块,编织土工织物、无纺土工织物、塑料排水板、真空预压密封膜、土工格栅等宜采用气动或液压类夹具。

4.47.11 土工合成材料的水力学特性试验仪器应符合下列规定。

4.47.11.1 试验用的各类过水管宜选择内径大、内壁光滑的金属管或胶管。

4.47.11.2 试验仪器设备应具备  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  的水温恒定能力。

4.47.11.3 塑料排水板通水量仪应具备  $350\text{kPa} \pm 20\text{kPa}$  的围压恒定能力。

4.47.11.4 等效孔径试验用振筛机具有拍击振动能力。

4.47.12 检测样品的检测结果应以所有有效试样的算术平均值计,必要时尚应计算各试样的标准差和变异系数。采用气动或液压类夹具进行拉伸试验,需要测量试样伸长量时,可用拉伸时夹具间距的实际变形量计算;采用手动夹具测量试样伸长量时,宜采用引伸计或以标线名义试验长度的变化量计算。

4.47.13 常见土工合成材料检测报告参数值的有效位数应满足表 4.47.13 的要求。

表 4.47.13 常见土工合成材料试验检测报告参数值有效位数

参数名称	单位	小数点后位数	示例	适用范围	备注
单位面积质量	$\text{g}/\text{m}^2$	0	$151\text{g}/\text{m}^2$	土工织物、塑料膜等	
单位长度质量	$\text{g}/\text{m}$	0	$112\text{g}/\text{m}$	塑料排水板、软式透水管等	
厚度	mm	2	1.25mm	土工织物、塑料膜等	
	mm	1	2.0mm	塑料排水板、土工加筋带等	
等效孔径	mm	2	0.08mm	土工织物、塑料排水板滤膜等	干筛法
网眼尺寸	mm	0	$45\text{mm} \times 45\text{mm}$	土工格栅等	
渗透系数	$\text{cm}/\text{s}$	1	$1.0 \times 10^{-4}\text{cm}/\text{s}$	土工织物、塑料排水板滤膜等	
耐静水压	MPa	1	1.1MPa	真空预压密封膜等	
塑料排水板纵向通水量	$\text{cm}^3/\text{s}$	0	$25\text{cm}^3/\text{s}$	塑料排水板	
断裂力	N	0	700N	塑料土工加筋带	
拉伸强度	MPa	1	18.5MPa	真空预压密封膜等	
	$\text{kN}/\text{m}$	1	$3.5\text{kN}/\text{m}$	塑料排水板、非织造土工织物、土工格栅等	
	$\text{kN}/\text{m}$	0	$4\text{kN}/\text{m}$	编织土工织物、机织土工织物等	



续表 4.47.13

参数名称	单位	小数点后位数	示 例	适用范围	备 注
伸长率	%	0	15%	塑料排水板、土工织物、真空预压密封膜等	
撕裂力	kN	1	1.4kN	长丝机织土工织物等	梯形撕裂法
	kN	2	0.40kN	编织土工织物、非织造土工织物、裂膜丝机织土工织物等	
直角撕裂强度	kN/m	0	41kN/m	真空预压密封膜等	
顶破力	kN	1	3.2kN	土工织物	圆柱顶破 (CBR) 或圆球顶破法
塑料排水板 芯板压屈强度	kPa	0	350kPa	塑料排水板	

## 5 原位试验

### 5.1 一般规定

**5.1.1** 原位试验方法应根据土层情况、工程设计的要求以及建筑物等级等因素确定。

**5.1.2** 原位试验的布置应考虑与钻探和室内试验进行配合和对比,原位试验成果的使用应考虑地区性和经验性。

### 5.2 原位密度试验

**5.2.1** 原位密度试验可用于现场测试土体的密度。

**5.2.2** 原位密度试验包括环刀法、灌砂法、灌水法和核子射线法等,灌砂法、灌水法可用于砾类填土,环刀法、核子射线法可用于黏性土、粉土和砂土。

**5.2.3** 原位密度试验时,应进行两次平行测定,取其平均值为测试值。两次测定的差值不应大于  $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ 。

**5.2.4** 环刀法的仪器设备应符合下列规定:

(1) 环刀内径  $60\text{mm} \sim 80\text{mm}$ ,高度  $20\text{mm} \sim 54\text{mm}$ ,壁厚  $1.5\text{mm} \sim 2.2\text{mm}$ ;

(2) 天平称量  $500\text{g}$ ,最小分度值不大于  $0.1\text{g}$ 。

**5.2.5** 环刀法试验应按下列步骤进行:

(1) 在环刀内壁涂一薄层凡士林,刃口向下放在土体上,将环刀垂直下压,并用切土刀沿环刀外侧切削土体,边压边削至土样高出环刀,将环刀两端土体整平,擦净环刀外壁,称环刀和土的总质量;

(2) 取代表性试样测定含水率;

(3) 切取环刀试样时,对土样的层次、气味、颜色、夹杂物、裂缝和均匀性进行描述。

**5.2.6** 环刀法天然密度应按下列式计算:

$$\rho = \frac{m_0}{V} \quad (5.2.6)$$

式中  $\rho$ ——天然密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),保留至  $0.01\text{g}/\text{cm}^3$ ;

$m_0$ ——湿土质量( $\text{g}$ );

$V$ ——环刀容积( $\text{cm}^3$ )。

**5.2.7** 灌砂法和灌水法的试坑尺寸可按表 5.2.7 选择。

表 5.2.7 试坑尺寸

试样最大粒径 (mm)	试坑尺寸(mm)	
	直径	深度
5~20	150	200
40	200	250
60	250	300

**5.2.8** 灌砂法设备应包括漏斗、漏斗架、防风筒、套环、固定器、量器、台秤、量砂及其他容器和工具,并应符合下列规定。

**5.2.8.1** 漏斗上口直径宜为 200mm,下口直径宜为 15mm,高宜为 110mm。

**5.2.8.2** 防风筒直径宜为 300mm,高宜为 220mm。

**5.2.8.3** 量器直径宜为 150mm~270mm,高宜为 200mm~330mm。

**5.2.8.4** 量砂应采用清洁干燥的均匀砂 20kg~40kg,粒径范围应满足 0.25mm~0.5mm。

**5.2.8.5** 电子台秤称量 10kg~15kg 时,最小分度值不应大于 1g。

**5.2.9** 灌砂法试验应符合下列规定。

**5.2.9.1** 灌砂法试验前应按下列步骤确定量砂的密度:

(1) 试验时分别称量量器质量、量器加玻璃板质量、量器加玻璃板加水的质量;

(2) 将漏斗置于量器上,使漏斗下口距量器上口 100mm,并对正量器中心,量砂经漏斗灌入量器内,不使量器受振动;量砂下落速度一致,直到灌满量筒,使砂面与量器边缘齐平;称量量器加量砂质量;进行 3 次平行测定,取其算术平均值;

(3) 量砂密度按下式计算:

$$\rho_n = \frac{m_{LS} - m_L}{(m_{LW} - m_{LB}) / \rho_w} \quad (5.2.9)$$

式中  $\rho_n$ ——量砂密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),保留至  $0.01\text{g}/\text{cm}^3$ ;

$m_{LS}$ ——量器加量砂质量(g);

$m_L$ ——量器质量(g);

$m_{LW}$ ——量器加玻璃板及水的质量(g);

$m_{LB}$ ——量器加玻璃板质量(g);

$\rho_w$ ——净水密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

**5.2.9.2** 在试验地点宜选择 40cm×40cm 的试验面,铲平并清扫干净。在整平的试验面上挖试坑,应将松动的试样全部取出,放到盛试样的容器内,称试样容器加试样质量和试样容器质量,并取代表性试样,测定其含水率。

**5.2.9.3** 在试坑上放置试验设备,并称量砂容器加量砂质量,使漏斗下口距试坑口 100mm,将量砂经漏斗灌入试坑内,量砂下落速度应与确定量砂密度时的下落速度相同,直至灌满试坑。用直尺刮平量砂表面,多余的量砂应全部回收到量砂容器内,称量砂容器加剩余量砂质量。

**5.2.9.4** 当采用套环进行试验时,应准确地计量灌入套环内量砂的质量和量砂容器加



第1次剩余量砂质量。在套环内挖试坑,应按第5.2.9.2款和第5.2.9.3款的规定取样和灌砂,直至灌满套环。刮下的砂量应全部回收到量砂容器内,称量砂容器加第2次剩余量砂质量。

**5.2.10** 灌砂法试验结果的整理应符合下列规定:

(1)不用套环时按下式计算:

$$\rho = \frac{m_4 - m_6}{\frac{m_1 - m_7}{\rho_n}} \quad (5.2.10-1)$$

(2)采用套环时按下式计算:

$$\rho = \frac{(m_4 - m_6) - [(m_1 - m_2) - m_3]}{\frac{m_2 + m_3 - m_5}{\rho_n} - \frac{m_1 - m_2}{\rho'_n}} \quad (5.2.10-2)$$

式中  $\rho$ ——天然密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),保留至 $0.01\text{g}/\text{cm}^3$ ;

$m_1$ ——量砂容器加原有量砂质量( $\text{g}$ );

$m_2$ ——量砂容器加第1次剩余量砂质量( $\text{g}$ );

$m_3$ ——套环内取出的量砂质量( $\text{g}$ );

$m_4$ ——试样容器加试样质量(包括少量遗留的量砂)( $\text{g}$ );

$m_5$ ——量砂容器加第2次剩余量砂质量( $\text{g}$ );

$m_6$ ——试样容器质量( $\text{g}$ );

$m_7$ ——量砂容器加剩余量砂质量( $\text{g}$ );

$\rho_n$ ——试坑内量砂密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),保留至 $0.01\text{g}/\text{cm}^3$ ;

$\rho'_n$ ——套环内量砂密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),保留至 $0.01\text{g}/\text{cm}^3$ , $\rho'_n$ 与 $\rho_n$ 相差很小时,用 $\rho_n$ 代替;

(3)灌砂法试验的记录格式采用附录A中表A.0.67。

**5.2.11** 灌水法试验设备应包括座板、聚乙烯塑料薄膜、储水筒、台秤、水准仪及其他容器和工具,座板和储水筒应符合下列规定:

(1)座板为中部开有圆孔,外沿呈方形或圆形的铁板,圆孔处设有环套;

(2)储水筒直径均匀,并附有刻度。

**5.2.12** 灌水法试验应按下列步骤进行:

(1)按确定的试坑直径划出坑口轮廓线,将测点处的地表整平,地表的浮土、石块、杂物等予以清除,坑洼不平处用砂铺平;

(2)将座板固定,聚乙烯塑料膜沿环套内壁及地表紧贴铺好;从环套上方将水缓缓注入,至刚满不外溢为止,测记储水筒剩余水位高度,计算座板部分的体积;

(3)将薄膜揭离后,用挖掘工具沿座板挖至要求深度,并将试坑内全部试样装入盛土容器内;取代表性试样测定含水率;分别称试样容器、试样容器加试样质量;

(4)试坑内全部试样取出后,将塑料薄膜沿坑底、坑壁紧密粘贴,向薄膜形成的袋内注水;注水时牵动薄膜,提高薄膜与坑壁的密贴程度,使薄膜与坑壁间的空气得以排出;

(5) 记录储水筒内初始水位高度,将水缓缓注入塑料薄膜中,直至水面与环套上边缘齐平时关闭注水管,持续 3min ~ 5min,测量储水筒内剩余水水位高度。

### 5.2.13 灌水法试验成果的整理应符合下列规定:

(1) 座板部分的容积按下式计算:

$$V_0 = (h_1 - h_2) A_w \quad (5.2.13-1)$$

式中  $V_0$ ——座板部分的容积( $\text{cm}^3$ ),保留至  $0.01\text{cm}^3$ ;

$h_1$ ——储水筒内初始水位高度(cm);

$h_2$ ——储水筒内注水终了时水位高度(cm);

$A_w$ ——储水筒断面积( $\text{cm}^2$ );

(2) 试坑容积按下式计算:

$$V = (H_2 - H_1) A_w - V_0 \quad (5.2.13-2)$$

式中  $V$ ——试坑容积( $\text{cm}^3$ ),保留至  $0.01\text{cm}^3$ ;

$H_2$ ——储水筒内注水终了时水位高度(cm);

$H_1$ ——储水筒内初始水位高度(cm);

(3) 天然密度按下式计算:

$$\rho = \frac{m_0}{V} \quad (5.2.13-3)$$

式中  $\rho$ ——天然密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),保留至  $0.01\text{g}/\text{cm}^3$ ;

$m_0$ ——取自试坑内的试样质量(g);

(4) 灌水法试验的记录格式采用附录 A 中表 A.0.68。

### 5.2.14 环刀法、灌砂法和灌水法密度测试的干密度应按下式计算:

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0.01w} \quad (5.2.14)$$

式中  $\rho_d$ ——干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),计算至  $0.01\text{g}/\text{cm}^3$ ;

$\rho$ ——天然密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$w$ ——含水率(%)。

5.2.15 核子射线法试验在基坑边缘或沟中测试时,仪器的侧面与坑壁的距离不宜小于 0.6m。

### 5.2.16 核子射线法仪器设备应符合下列规定:

(1) 主机由放射源、探测器、微处理器、测深定位装置和其他附件等组成;

(2) 放射源常用铯 137 -  $\gamma$  源和镅 241/铍中子源;

(3) 盖革 - 密勒计数管,接收  $\gamma$  射线;氦 3 - 探测管,接收中子射线;

(4) 微处理器能将探测器接收到的射线信号转换成数据,并经运算后显示检测结果;

(5) 测深定位装置能将放射源定位到预定的测试深度;

(6) 含水量测量范围满足  $0\text{g}/\text{cm}^3 \sim 0.64\text{g}/\text{cm}^3$ ,准确度满足  $\pm 0.004\text{g}/\text{cm}^3$ ;土体密度测量范围满足  $1.12\text{g}/\text{cm}^3 \sim 2.73\text{g}/\text{cm}^3$ ,准确度满足  $\pm 0.004\text{g}/\text{cm}^3$ 。

### 5.2.17 核子射线法试验应符合下列规定:



(1) 进行标准计数或统计试验,检查含水率、密度的标准计数或统计分析结果,其数值在规定的范围内,方可开始检测;

(2) 平整被测材料表面,用导板和钻杆造孔,孔深大于测试深度;

(3) 按规定将仪器就位,并将放射源定位到预定的测试深度,按下启动键开始测试,操作人员退到离仪器 2m 以外的区域;

(4) 当仪器发出测试结束信号后,将放射源退回到安全位置,记录检测结果。

**5.2.18** 核子射线法试验结果可利用微处理器直接读取含水率、天然密度、干密度。

### 5.3 抽水试验

**5.3.1** 抽水试验设计宜包括试验目的、抽水孔和观测孔的布置、钻孔结构、抽水设备的规格及数量、试验设备的安装、现场抽水试验的技术要求,试验记录与校核、渗透性参数计算公式的选择及成果图件的要求。

**5.3.2** 抽水试验应根据工程地质与水文地质条件的复杂程度及其对工程的影响大小选择单孔抽水试验或多孔抽水试验。

**5.3.3** 抽水试验应根据试验段含水层的厚度确定抽水孔段的结构类型。当含水层的厚度不大于 15m 时,宜采用完整孔抽水;当含水层厚度大于 15m 时,可采用非完整孔抽水。

**5.3.4** 抽水试验的试验孔应符合下列规定:

(1) 试验孔深度根据试验的目的确定,孔径选择 200mm ~ 400mm;

(2) 试验孔钻探根据场地地层及井径、井深要求,选择适宜类型的冲击钻机或回转钻机;

(3) 过滤器安装位置与含水层位置一致,井管底部采用铁板或砂网封闭;

(4) 试验孔的滤料规格和填料厚度根据含水层颗粒组成确定,按表 5.3.4 选择;滤料填至超过过滤器上端 3m ~ 5m,再改用黏土回填封闭;非完整井先在井底回填厚度 0.5m 左右的滤料,形成井底滤层;

(5) 成井后及时洗井,洗至水清砂净。

**表 5.3.4 滤料规格和填料厚度**

名称	含水层		滤料直径 (mm)			填料厚度 (mm)
	粒径 (mm)	质量百分比 (%)	规格滤料	混合滤料	形象比拟	
粉砂	0.05 ~ 1.1	50 ~ 70	0.75 ~ 1.5	1 ~ 2	小米粒	100
细砂	0.1 ~ 0.25	> 75	1 ~ 2.5	1 ~ 3	绿豆粒	100
中砂	0.25 ~ 0.5	> 50	2 ~ 5	1 ~ 5	玉米粒	100
粗砂	0.5 ~ 2.0	> 50	4 ~ 7	1 ~ 7	杏核	75 ~ 100
砾石	2.01 ~ 10.0	> 50	7.5 ~ 20.0			50 ~ 75
卵石	> 20.0	> 50	10.0 ~ 20.0			50 ~ 75

**5.3.5** 抽水试验下降段次应根据试验目的、工程性质、地下水条件选择。不同降深的先后次序应遵守下列原则:

(1) 在细颗粒孔隙含水层中抽水,按从小降深到大降深;



(2) 在粗颗粒孔隙含水层或基岩裂隙含水层中抽水,按从大降深到小降深。

**5.3.6** 场地存在两个或两个以上含水层时,可进行混合抽水试验,综合评价;需分别进行水文地质评价时,应进行分层抽水试验。

**5.3.7** 抽水试验前,应采取水样进行水质分析。

**5.3.8** 抽水试验时,应调查抽水试验场地周边是否存在地表水体、水源地、开采井;对可能影响抽水试验的地表水体、水源地、开采井等应进行观测和记录。

**5.3.9** 抽水试验设备应符合下列规定。

**5.3.9.1** 试验孔过滤器的孔隙率不应小于 20%,松散含水层的过滤器内径不应小于 200mm,基岩含水层的过滤器内径不应小于 100mm。过滤器类型可根据场地含水层特性、试验要求、当地经验等按表 5.3.9 选择。

表 5.3.9 过滤器类型选择表

含水层性质		过滤器类型
基岩	岩层稳定	裸孔(不安装过滤器)
	岩层稳定	钢管穿孔过滤器或钢筋骨架(缠丝)过滤器
	裂隙、溶洞有充填	穿孔(或骨架)缠丝过滤器、填砾过滤器
	裂隙、溶洞无充填	穿孔(或骨架)过滤器、不安装过滤器
碎石土类	$d_{20} < 2\text{mm}$	填砾过滤器、缠丝过滤器
	$d_{20} \geq 2\text{mm}$	钢筋骨架(缠丝)过滤器
砂土类	粗砂、中砂	填砾过滤器、缠丝过滤器
	粗砂、粉砂	双层填砾过滤器、填砾过滤器

**5.3.9.2** 抽水试验应根据井径、出水量、水位下降值选择潜水泵、深井潜水泵、空压机、提水抽筒等抽水设备。

**5.3.9.3** 出水量量测设备应符合下列规定:

- (1) 根据出水量选择水表,水表读数至  $0.1\text{m}^3$ ;
- (2) 采用容积法时,量筒充水时间大于 15s,读数到 0.1s;
- (3) 采用堰测法时,堰箱制作尺寸符合试验要求,安装水平,读数精度为  $\pm 1.0\text{mm}$ 。

**5.3.9.4** 抽水试验电子自动水位计应灵敏可靠,不受孔壁附着水或孔内滴水的影响。

**5.3.10** 抽水试验应根据含水层条件选择稳定流或非稳定流试验方法。稳定流抽水试验时,抽水孔内动水水位稳定后的延续时间不应小于 8h。

**5.3.11** 抽水试验时,动水水位、出水量的允许波动范围应满足下列要求:

- (1) 用水泵抽水,水位波动 2cm ~ 3cm,出水量波动率不大于 3%;
- (2) 用空压机抽水,水位波动 10cm ~ 15cm,出水量波动率不大于 5%。

**5.3.12** 抽水试验开始前,应同时观测场地抽水孔、观测孔水位。抽水孔水位宜每小时观测 1 次,连续 3 次水位观测数据相同时,可视为场地天然水位。

**5.3.13** 抽水试验应同时观测抽水孔的出水量和动水水位以及观测孔水位,观测时间宜满足下列要求:

- (1) 稳定流抽水,在开泵后第 5min、10min、15min、20min、25min、30min、60min 各测 1

次,以后每 30min 或 60min 测 1 次;

(2) 非稳定流抽水,在开泵后第 1min、2min、3min、4min、6min、8min、10min、15min、20min、25min、30min、40min、50min、60min、80min、100min、120min 各测 1 次,以后每 30min 测 1 次。

**5.3.14** 抽水结束后应进行恢复水位观测。水位观测宜在停泵后,第 1min、3min、5min、10min、15min、30min、60min 各测 1 次,以后每 60min 测 1 次,连续 3 次观测数据相同时,可停止观测。

**5.3.15** 抽水试验结束后,抽水孔应妥善处理。

**5.3.16** 抽水试验的资料整理应符合下列规定。

**5.3.16.1** 抽水试验结束后应及时整理抽水试验资料,编制必要的图表,发现问题及时分析研究和解决。

**5.3.16.2** 抽水试验资料整理可采用作图法和下列公式计算影响半径:

(1) 潜水、无观测孔时的单孔抽水影响半径按式(5.3.16-1)和式(5.3.16-2)计算;承压水、无观测孔时的单孔抽水影响半径按式(5.3.16-3)和式(5.3.16-4)计算;

$$\lg R = \frac{1.366K(2H-S)S}{Q} + \lg r \quad (5.3.16-1)$$

$$R = 2S \sqrt{H \cdot K} \quad (5.3.16-2)$$

$$\lg R = \frac{2.73K \cdot h \cdot S}{Q} + \lg r \quad (5.3.16-3)$$

$$R = 10S \sqrt{K} \quad (5.3.16-4)$$

式中  $R$ ——影响半径(m);

$K$ ——渗透系数(m/d);

$H$ ——潜水含水层厚度(m);

$S$ ——水位下降值(m);

$Q$ ——出水量( $\text{m}^3/\text{d}$ );

$r$ ——抽水孔半径(m);

$h$ ——承压含水层厚度(m);

(2) 潜水、有一个观测孔时的单孔抽水影响半径按式(5.3.16-5)计算;承压水、有一个观测孔时的单孔抽水影响半径按式(5.3.16-6)计算;

$$\lg R = \frac{S(2H-S) \lg r_1 - S_1(2H-S_1) \lg r}{(S-S_1)(2H-S-S_1)} \quad (5.3.16-5)$$

$$\lg R = \frac{S \lg r_1 - S_1 \lg r}{S-S_1} \quad (5.3.16-6)$$

式中  $r_1$ ——抽水孔至观测孔距离(m);

$S_1$ ——观测孔水位下降值(m);

(3) 潜水、有两个观测孔时的单孔抽水影响半径按式(5.3.16-7)计算;承压水、有两个观测孔时的单孔抽水影响半径按式(5.3.16-8)计算;

$$\lg R = \frac{S_1(2H-S_1) \lg r_2 - S_2(2H-S_2) \lg r_1}{(S_1-S_2)(2H-S_1-S_2)} \quad (5.3.16-7)$$



$$\lg R = \frac{S_1 \lg r_2 - S_2 \lg r_1}{S_1 - S_2} \quad (5.3.16-8)$$

式中  $S_1, S_2$ ——观测孔水位下降值(m);

$r_1, r_2$ ——抽水孔至观测孔距离(m)。

**5.3.16.3** 稳定流完整井抽水试验可采用下列公式计算渗透系数:

(1) 单孔抽水无观测孔时的承压完整井渗透系数按式(5.3.16-9)计算,有一个观测孔时的承压完整井渗透系数按式(5.3.16-10)计算,有两个观测孔时的承压完整井渗透系数按式(5.3.16-11)计算;

$$K = \frac{0.366Q(\lg R - \lg r)}{h \cdot S} \quad (5.3.16-9)$$

$$K = \frac{0.366Q(\lg r_1 - \lg r)}{h(S - S_1)} \quad (5.3.16-10)$$

$$K = \frac{0.366Q(\lg r_2 - \lg r_1)}{h(S_1 - S_2)} \quad (5.3.16-11)$$

式中  $K$ ——渗透系数(m/d);

$Q$ ——出水量( $\text{m}^3/\text{d}$ );

$R$ ——影响半径(m);

$r$ ——抽水孔半径(m);

$h$ ——承压含水层厚度(m);

$S$ ——水位下降值(m);

$r_1, r_2$ ——抽水孔至观测孔距离(m);

$S_1, S_2$ ——观测孔水位下降值(m);

(2) 单孔抽水无观测孔时的潜水完整井渗透系数按式(5.3.16-12)计算,有一个观测孔时的潜水完整井渗透系数按式(5.3.16-13)计算,有两个观测孔时的潜水完整井渗透系数按式(5.3.16-14)计算;

$$K = \frac{0.733Q(\lg R - \lg r)}{(2H - S)S} \quad (5.3.16-12)$$

$$K = \frac{0.733Q(\lg r_1 - \lg r)}{(2H - S - S_1)(S - S_1)} \quad (5.3.16-13)$$

$$K = \frac{0.733Q(\lg r_2 - \lg r_1)}{(2H - S_1 - S_2)(S_1 - S_2)} \quad (5.3.16-14)$$

式中  $H$ ——潜水含水层厚度(m)。

## 5.4 压水试验

**5.4.1** 钻孔压水试验宜随钻孔的加深,自上而下用单栓塞分段隔离进行。对于岩体完整、孔壁稳定的孔段,可连续钻进一定深度,但不宜超过40m,用双栓塞分段进行压水试验。

**5.4.2** 试验段长度宜为5m。同一试验段不宜跨越渗透性相差悬殊的几种岩层。



**5.4.3** 试验钻孔宜采用金刚石或硬质合金钻头清水回转钻进。试验钻孔应符合下列规定:

(1) 在距离压水试验钻孔 10m 以内布置有其他地质目的的钻孔时,先钻压水试验钻孔;

(2) 钻至完整基岩后下套管隔离覆盖层,套管接头不漏水,管脚处采取妥善止水措施;

(3) 预定安置栓塞部位的孔壁平直完整。

**5.4.4** 试验宜按 3 级压力、5 个阶段进行,即  $P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3 \rightarrow P_4 (= P_2) \rightarrow P_5 (= P_1)$ ,其中  $P_1 < P_2 < P_3$ 。 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  宜分别为 0.3MPa、0.6MPa 和 1.0MPa。

**5.4.5** 当试验段位于基岩面以下较浅或岩体软弱时,应适当降低压水试验压力。逐级升压至最大压力值后,当该试段的透水率小于 1Lu,可不再进行降压阶段的压水试验。

**5.4.6** 试验压力宜按下列两种情况计算:

(1) 当用安设在与试段连通的测压管上的压力表测压时,试验压力按下式计算:

$$P = P_p + P_z \quad (5.4.6-1)$$

(2) 当用安设在进水管上的压力表测压时,试验压力按下式计算:

$$P = P_p + P_z - P_s \quad (5.4.6-2)$$

式中  $P$ ——试验压力(MPa);

$P_p$ ——压力表指示压力(MPa);

$P_z$ ——压力表中心至压力计算零线的水柱压力(MPa);

$P_s$ ——管路压力损失(MPa)。

**5.4.7** 压力计算零线应按下列方式确定:

(1) 当地下水位在试段以下时,以通过试段 1/2 处的水平线作为压力计算零线;

(2) 当地下水位在试段之内时,以通过地下水位以上试段 1/2 处的水平线作为压力计算零线;

(3) 当地下水位在试段以上,且属于试段所在的含水层时,以地下水位线作为压力计算零线。

**5.4.8** 使用单管栓塞压水时,应扣除工作管路的压力损失。

**5.4.9** 使用单管栓塞压水,当工作管内径一致,且内壁粗糙度变化不大时,管路压力损失可按下式计算:

$$P_s = \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (5.4.9)$$

式中  $P_s$ ——管路压力损失(MPa);

$\lambda$ ——粗糙系数(MPa/m),水在铁管中流动时  $\lambda = 2 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4}$  (MPa/m);

$L$ ——管长(m);

$d$ ——管径(内径)(m);

$V$ ——水在管中的流速(m/s);

$g$ ——重力加速度( $m/s^2$ )。

**5.4.10** 使用单管栓塞压水,当工作管内径不一致时,管路压力损失应根据实测资料确定,实测工作应满足下列要求:

(1) 测试管路为两套,每套的管径和钻杆总长度相同,但接头数相差3副以上;每套管路的总长度不得小于40m;

(2) 实测流量范围10L/min~100L/min,测点不少于15个,分布均匀,同时用流量表和水箱测定流量,实测工作重复1~2次,以其平均值为计算值;

(3) 在同一坐标纸上绘制两套管路的压力损失与流量关系曲线,从图上量取各流量值相应的压力损失差;

(4) 各种流量下每副接头的压力损失按下式计算:

$$P_{sj} = \frac{\Delta P_s}{n} \quad (5.4.10)$$

式中  $P_{sj}$ ——某流量下每副接头的压力损失(MPa);

$\Delta P_s$ ——该流量下两套管路和的压力损失之差(MPa);

$n$ ——两套管路接头数之差;

(5) 从各种流量下管路压力损失中减去接头的压力损失,计算各种流量下每米钻杆的压力损失值;

(6) 编制各种流量下每米钻杆及每副接头的压力损失图表。

**5.4.11** 压水试验的试验设备应符合下列规定。

**5.4.11.1** 止水栓塞与孔壁应有良好的适应性,止水可靠,长度应大于8倍的孔径。

**5.4.11.2** 当地形条件许可时,宜采用自流供水方法进行压水试验。当采用水泵供水时,供水水泵应满足下列要求:

(1) 在1.0MPa压力下,流量达到100L/min;

(2) 出水均匀,压力稳定,并能保持压力表指针的摆动幅度不大于正负两个最小刻度。

**5.4.11.3** 量测设备应满足下列要求:

(1) 量测压力用的压力传感器压力范围大于试验压力,误差不大于1%;压力表反应灵敏,卸压后指针回零,压力表的工作压力保持在极限压力值的1/3~3/4范围内,精度不小于0.4级;

(2) 流量计能在1.5MPa压力下正常工作,量测范围与供水设备的排水量相匹配,并能测定正向和反向流量;

(3) 电子自动水位计灵敏可靠,不受孔壁附着水或孔内滴水的影响;

(4) 量测时间采用秒表或带有秒针的钟表;

(5) 采用能自动测量压力和流量的记录仪进行压水试验。

**5.4.12** 压水试验的试验方法应符合下列规定:

(1) 试验前洗孔、观测水位,安装栓塞、水泵和量测仪表;

(2) 试验准备工作完成后进行不少于20min的试验性压水,其压力值为正式压水时的压力值,试验性压水过程中,对压水试验的各种设备、仪表进行性能和工作状态综合性



检查;

(3) 压水试验时, 试验压力达到预定压力并保持稳定; 每隔 5min 或 10min 观测一次压入流量; 当压入流量无持续增大趋势, 且 5 次流量读数中最大值与最小值之差小于最终值的 10%, 或最大值与最小值之差小于 1.0L/min 时, 本阶段试验即可结束, 最终流量读数作为计算流量; 将试验压力调整到新的预定值, 重复上述试验过程, 直到完成该试段的试验;

(4) 在降压阶段, 如出现水由岩体向孔内回流的现象, 记录回流情况, 待回流停止, 流量达到上述规定的要求后方可结束本阶段试验;

(5) 试验过程中, 同时观测管外水位, 判断栓塞的止水效果; 如发现管外水位异常, 立即检查相关设施, 并分析原因; 若系栓塞止水失效, 立即采取适当处理措施;

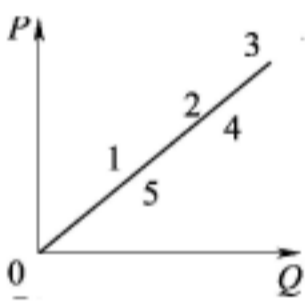
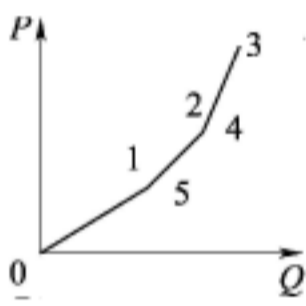
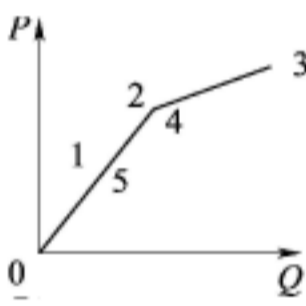
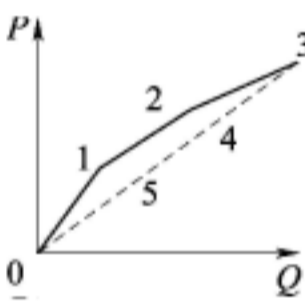
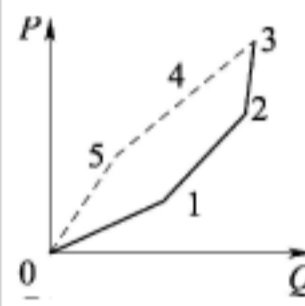
(6) 试验过程中, 注意观察试验孔周边地表有无水流渗出, 并对试验孔附近可能受影响的坑、孔、井、泉等进行观测和记录。

**5.4.13** 压水试验的资料整理应符合下列规定。

**5.4.13.1** 试验后应绘制  $P \sim Q$  曲线、确定  $P \sim Q$  曲线类型和计算试验段透水率等。

**5.4.13.2** 试验段的  $P \sim Q$  曲线类型, 应根据升压阶段  $P \sim Q$  曲线的形状以及其与降压阶段  $P \sim Q$  曲线之间的关系确定。 $P \sim Q$  曲线类型划分及曲线特点见表 5.4.13。

表 5.4.13  $P \sim Q$  曲线类型及曲线特点

类型名称	A(层流)型	B(紊流)型	C(扩张)型	D(冲蚀)型	E(填充)型
$P \sim Q$ 曲线					
曲线特点	升压曲线为通过原点的直线, 降压曲线与升压曲线基本重合	升压曲线凸向 Q 轴, 降压曲线与升压曲线基本重合	升压曲线凸向 P 轴, 降压曲线与升压曲线基本重合	升压曲线凸向 P 轴, 降压曲线与升压曲线不重合, 呈顺时针环状	升压曲线凸向 Q 轴, 降压曲线与升压曲线不重合, 呈逆时针环状

**5.4.13.3** 试验段透水率应按下式计算:

$$q = \frac{Q_3}{L \cdot P_3} \quad (5.4.13-1)$$

式中  $q$ ——试验段的透水率(Lu);

$Q_3$ ——第三阶段的压入流量(L/min);

$L$ ——试验段长度(m);

$P_3$ ——第三阶段的试验压力(MPa)。

**5.4.13.4** 每一试验段的试验成果, 应采用试验段透水率和  $P \sim Q$  曲线类型代号表示, 如 0.26(A)、16(C)、8.6(D)等。

**5.4.13.5** 当试验段位于地下水以下, 透水性较小( $q < 10\text{Lu}$ ),  $P \sim Q$  曲线为 A(层流)



型时,可按下式计算岩体渗透系数:

$$K = \frac{Q}{2\pi H \cdot L} \ln \frac{L}{r_0} \quad (5.4.13-2)$$

式中  $K$ ——岩体渗透系数(m/d);

$Q$ ——压入流量( $\text{m}^3/\text{d}$ );

$H$ ——试验水头(m);

$L$ ——试验段长度(m);

$r_0$ ——钻孔半径(m)。

## 5.5 原位直剪试验

**5.5.1** 原位直剪试验可用于原位测定土体和岩体抵抗剪切破坏的能力。

**5.5.2** 直剪试验点应根据工程地质条件和建筑物的受力特点,选择在具有代表性的地段。地基土直剪试验组数不得少于3组,每一组试验不宜少于3处;岩体试验每一组不宜少于5处。同一组试验体的岩性和地质条件应基本相同。

**5.5.3** 试验的剪切方向应与岩土体的受剪方向或可能引起滑动的方向相一致。

**5.5.4** 试洞或探槽的几何尺寸应满足试验要求,各试验点之间边距不应小于30cm。试洞顶部岩土层厚度必须足以承受最大垂直荷重。探槽两壁应满足斜撑最大推力。

**5.5.5** 探槽开挖前应制定技术措施,确保在开挖过程中槽壁不倒塌,安装剪切盒时试样不受扰动,并保持试验岩土层的天然湿度。

**5.5.6** 采用油压剪切试验装置进行试验时,在试样制备前,应在拟施加横向推力的一侧开槽安装横向千斤顶,对岩石还应在横向加荷反力面上浇注混凝土后座。

**5.5.7** 垂直荷载应根据岩土的性质或技术要求确定。最小垂直荷载不应小于剪切面以上地层的自重压力;最大垂直荷载应大于拟建建筑物设计荷载。

**5.5.8** 现场直剪试验设备应包括加载系统、传力系统、量测系统和试体制作工具等,并应符合下列规定:

(1) 加载系统采用的液压泵、液压千斤顶,规格为500kN~3000kN;采用液压钢枕时,规格为10MPa~20MPa;

(2) 传力系统采用传力柱、钢垫块或板、滚轴排;

(3) 压力表测量精度优于或等于0.4级;垂直变形、水平位移测量选用精度不低于0.01mm的百分表或电测位移传感器。

**5.5.9** 土体直剪试验应符合下列规定。

**5.5.9.1** 试样规格应根据土体的均匀程度及最大颗粒粒径确定,剪切面积不宜小于 $0.3\text{m}^2$ ,高度不宜小于20cm或为最大粒径的4~8倍,试样边长不应小于土体最大粒径的5倍;当需要测试饱和状态下的强度时,应将试样浸水并达到饱和,浸水时间视岩土性质而定,但不宜少于48h。

**5.5.9.2** 试验仪器设备安装之前,应测定滚排摩擦力。

**5.5.9.3** 每个试体上应分别施加不同的垂直荷载,其值为最大垂直荷载的等差值。固

结快剪法宜一次加完垂直荷载,荷载施加后应立即记录垂直变形,此后每 15min 观测一次垂直变形,当每小时垂直变形不大于 0.05mm 时,即认为垂直变形已经稳定,便可施加横向推力。

**5.5.9.4** 采用快剪法进行试验时,应在一次加完垂直荷载后,立即施加横向推力。

**5.5.9.5** 剪切试验加荷和破坏标准应满足下列要求:

- (1) 横向推力施加前,按照同种土体  $c$ 、 $\varphi$  值估算最大推力,按预估最大推力的 1/8 ~ 1/10 分级施加;
- (2) 施加的各级横向推力连续、均匀,要求每分钟记录压力表和百分表读数,当变形相对趋于平稳时,方可施加下一级荷载,直至剪切破坏;
- (3) 当剪切变形急剧增长,压力表压力下降或横向位移与试样宽度之比达到 1/10 时即为剪切破坏;
- (4) 在试验的全过程中,垂直荷载保持稳定;当出现压力降低时及时补荷,如出现超压时及时减荷;
- (5) 试样剪断后如需测记剪切回弹位移,在解除横向推力后测记;
- (6) 试验过程中,随时观察试样以及试样周围土体的异常现象;
- (7) 试验结束后,将试样翻起,立即测量剪切面剪损状态;绘制剪切面的缺损、起伏情况,并对试样进行描述,计算试验后的试样面积;
- (8) 残余抗剪强度试验在峰值试验后,将抗剪试验剪断后的试样推回原处,重新检查调整仪器设备,再次进行剪切试验。

**5.5.10** 岩体直剪试验应符合下列规定。

**5.5.10.1** 沿所确定的剪切面周边将试体与周围岩石切开,试体底面积宜采用 70cm × 70cm,不得小于 50cm × 50cm;试体高度不宜小于边长的一半、试体间距应大于边长的 1.5 倍。

**5.5.10.2** 对试体及所在试验地段应进行地质描述和记录,包括岩石名称、风化破裂程度、岩体软弱面的成因、产状分布状况、连续性及其所夹充填物的性状等。

**5.5.10.3** 剪切面施加垂直荷载及观测应满足下列要求:

- (1) 垂直荷载位于剪切面中心或使垂直荷载和剪切荷载的合力通过剪切面中心;
- (2) 岩体软弱面和软质岩体的最大垂直荷载以不挤出软弱面上的充填物或破坏试体为度;
- (3) 垂直荷载分 4 ~ 5 级,按等差或等比数列施加,等比公比取 2;
- (4) 每级荷载施加时测读、记录垂直位移,测读的时间间隔为 10min 或 15min;当相邻两次测读位移差小于等于 0.05mm 时,施加下一级荷载。

**5.5.10.4** 试体剪切前,应预估最大推力值,并使推力作用线通过剪切面中心。矩形试体应按式(5.5.10-1)计算,梯形试体应按式(5.5.10-2)计算,直角楔体应按式(5.5.10-3)计算,非直角楔体应按式(5.5.10-4)计算。

$$Q_{\max} = (\sigma_n f + c)A \quad (5.5.10-1)$$

$$Q_{\max} = \frac{(\sigma_n f + c)A}{\cos\alpha} \quad (5.5.10-2)$$



$$Q_{\max} = (\sigma_n + \sigma_n f \tan \alpha + c \tan \alpha) A_y \quad (5.5.10-3)$$

$$Q_{\max} = \frac{(\sigma_n f + c) \sin \alpha + \sigma_n \cos \alpha}{\cos(\alpha - \beta)} A \quad (5.5.10-4)$$

式中  $Q_{\max}$ ——最大推力值(kN);

$\sigma_n$ ——法向应力(kPa);

$f$ ——预估的摩擦系数,  $f = \tan \varphi$ ;

$c$ ——预估的黏聚力(kPa);

$A$ ——剪切面面积( $\text{m}^2$ );

$\alpha$ ——剪力作用线倾角( $^\circ$ );

$A_y$ ——试体垂直面面积( $\text{m}^2$ );

$\beta$ ——非直角楔体顶面与岩体较弱面的交角( $^\circ$ )。

**5.5.10.5** 推力加荷等级宜分为 8 ~ 10 级,并每隔 10min 或 5min 施加一级。施加前、后应测记各量测表值。当该级推力引起的剪切位移为前一级的 1.5 倍以上时,下一级推力应减半施加。剪切位移达剪力峰值并出现剪力残余值或剪切位移达剪切面边长的 1/10 时,可终止试验。

**5.5.10.6** 使用斜推法的试体,在剪切过程中应同步扣减施加推力时在剪切面上所增加的垂直荷载。梯形试体的垂直荷载应按式(5.5.10-5) ~ 式(5.5.10-7)计算,直角楔体的垂直荷载应按式(5.5.10-8) ~ 式(5.5.10-10)计算,非直角楔体的垂直荷载应按式(5.5.10-11)、式(5.5.10-6)和式(5.5.10-7)计算。

$$p = \sigma_n - q \sin \alpha \quad (5.5.10-5)$$

$$Q = q \cdot A \quad (5.5.10-6)$$

$$P = p \cdot A \quad (5.5.10-7)$$

$$\sigma_x = \frac{\sigma_n - \sigma_y \cos^2 \alpha}{\sin^2 \alpha} \quad (5.5.10-8)$$

$$Q = \sigma_y \cdot A_y \quad (5.5.10-9)$$

$$P = \sigma_x \cdot A_x \quad (5.5.10-10)$$

$$p = \frac{\sigma_n - q \cos \beta}{\sin \alpha} \quad (5.5.10-11)$$

式中  $p$ ——作用在剪切面上的斜向单位压力(kPa);

$\sigma_n$ ——法向应力(kPa);

$q$ ——作用在剪切面上的斜向单位推力(kPa);

$\alpha$ ——剪力作用线倾角( $^\circ$ );

$Q$ ——作用于试体上的斜向推力(kN);

$A$ ——剪切面面积( $\text{m}^2$ );

$P$ ——作用于试体上的垂直荷载(kN);

$\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ ——作用在试体垂直面  $A_x$  上的压力和水平面  $A_y$  上的单位推力(kPa);

$A_y$ 、 $A_x$ ——水平面和垂直面的面积( $\text{m}^2$ );



$\beta$ ——非直角楔体顶面与岩体较弱面的交角( $^{\circ}$ )。

**5.5.10.7** 使用斜推法的试体,试验前应预估作用在剪切面上的最小法向应力。梯形试体应按式(5.5.10-12)计算,直角楔体应按式(5.5.10-13)计算,非直角楔体应按式(5.5.10-14)计算。

$$\sigma_{\min} = \frac{c}{\cot\alpha - f} \quad (5.5.10-12)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{c}{\tan\alpha - f} \quad (5.5.10-13)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{c}{\tan\beta - f} \quad (5.5.10-14)$$

式中  $\sigma_{\min}$ ——作用在剪切面上的最小法向应力(kPa);

$c$ ——黏聚力(kPa);

$\alpha$ ——剪力作用线倾角( $^{\circ}$ );

$f$ ——预估的摩擦系数,  $f = \tan\varphi$ ;

$\beta$ ——非直角楔体顶面与岩体较弱面的交角( $^{\circ}$ )。

**5.5.10.8** 试验结束后,应依次将剪力和垂直荷载退为零,拆除测量仪表、支架、剪切和垂直加载设备,并描述剪切面尺寸、剪切破坏形式、剪切面起伏差、擦痕的方向和长度、碎块分布状况、剪切面上充填物性质,对剪切面拍照记录。

**5.5.11** 试验资料整理应符合下列规定。

**5.5.11.1** 土体直剪试验垂直应力和剪切应力应按下列公式计算:

$$\sigma = \frac{P'_v + P_H \cdot \sin(\alpha - \theta) + (P_0 + P_L) \cos\theta}{A} \quad (5.5.11-1)$$

$$\tau = \frac{(P_0 + P_L) \sin\theta + P_H \cos(\alpha - \theta) - F}{A} \quad (5.5.11-2)$$

式中  $\sigma$ ——垂直应力(kPa);

$P'_v$ ——油压千斤顶施加的垂直荷载(kN);

$P_H$ ——横向推力(kN),取最大值;

$\alpha$ ——横向推力与水平面的夹角( $^{\circ}$ );

$\theta$ ——剪切面与水平面的夹角( $^{\circ}$ );

$P_0$ ——试样自重(kN);

$P_L$ ——设备自重(kN);

$A$ ——试样的剪切面积( $m^2$ );

$\tau$ ——剪应力(kPa);

$F$ ——滑滚的摩擦力(kN)。

**5.5.11.2** 应根据计算的垂直应力和剪应力绘制剪应力与垂直荷载关系图、剪变系数 $\tau/\sigma$ 和垂直荷载关系图以及剪应力和水平位移关系图。

**5.5.11.3** 岩土的内摩擦角和黏聚力宜采用最小二乘法计算。

**5.5.11.4** 土体残余抗剪强度宜按第5.5.11.1款~第5.5.11.3款的规定进行资料整

理并计算  $c$ 、 $\varphi$  值。

**5.5.11.5** 平推法试体剪切面应力应按下列公式计算：

$$\sigma_n = \frac{P}{A} \quad (5.5.11-3)$$

$$\tau = \frac{Q}{A} \quad (5.5.11-4)$$

式中  $\sigma_n$ ——法向应力(kPa)；

$P$ ——作用于试体上的垂直荷载(kN)；

$A$ ——剪切面面积( $\text{m}^2$ )；

$\tau$ ——剪应力(kPa)；

$Q$ ——推力(kN)。

**5.5.11.6** 梯形试体剪切面应力应按下列公式计算：

$$\sigma_n = \frac{P + Q \sin \alpha}{A} \quad (5.5.11-5)$$

$$\tau = \frac{Q \cos \alpha}{A} \quad (5.5.11-6)$$

式中  $\sigma_n$ ——法向应力(kPa)；

$P$ ——作用于试体上的垂直荷载(kN)；

$Q$ ——推力(kN)；

$\alpha$ ——横向推力与水平面的夹角( $^\circ$ )；

$A$ ——剪切面面积( $\text{m}^2$ )；

$\tau$ ——剪应力(kPa)。

**5.5.11.7** 直角楔体剪切面应力应按下列公式计算：

$$\sigma_n = \sigma_y \cos^2 \alpha + \sigma_x \sin^2 \alpha \quad (5.5.11-7)$$

$$\tau = \frac{1}{2} (\sigma_y - \sigma_x) \sin 2\alpha \quad (5.5.11-8)$$

式中  $\sigma_n$ ——法向应力(kPa)；

$\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ ——作用在试体垂直面  $A_x$  上的压力和水平面  $A_y$  上的单位推力(kPa)；

$\alpha$ ——横向推力与水平面的夹角( $^\circ$ )；

$\tau$ ——剪应力(kPa)。

**5.5.11.8** 非直角楔体剪切面应力应按下列公式计算：

$$\sigma_n = q \cos \beta + p \sin \alpha \quad (5.5.11-9)$$

$$\tau = q \sin \beta - p \cos \alpha \quad (5.5.11-10)$$

$$q = \frac{\sigma_n \cos \alpha}{\cos(\alpha - \beta)} \quad (5.5.11-11)$$

$$p = \frac{\sigma_n \sin \beta}{\cos(\alpha - \beta)} \quad (5.5.11-12)$$

式中  $\sigma_n$ ——法向应力(kPa)；

$q$ ——作用在剪切面上的斜向单位推力(kPa)；

$\beta$ ——非直角楔体顶面与岩体较弱面的交角( $^{\circ}$ );

$p$ ——作用在剪切面上的斜向单位压力(kPa);

$\alpha$ ——横向推力与水平面的夹角( $^{\circ}$ );

$\tau$ ——剪应力(kPa)。

## 5.6 原位冻胀量试验

**5.6.1** 原位冻胀量试验可用于测定黏性土、砂土地基在冻结过程中沿冻深方向的冻胀量。

**5.6.2** 原位冻胀量试验设备应包括分层冻胀仪(图 5.6.2)、冻深器、水准仪和钢钢尺、地下水位管和测钟等。钢钢尺的最小分度值不应大于 1.0mm。

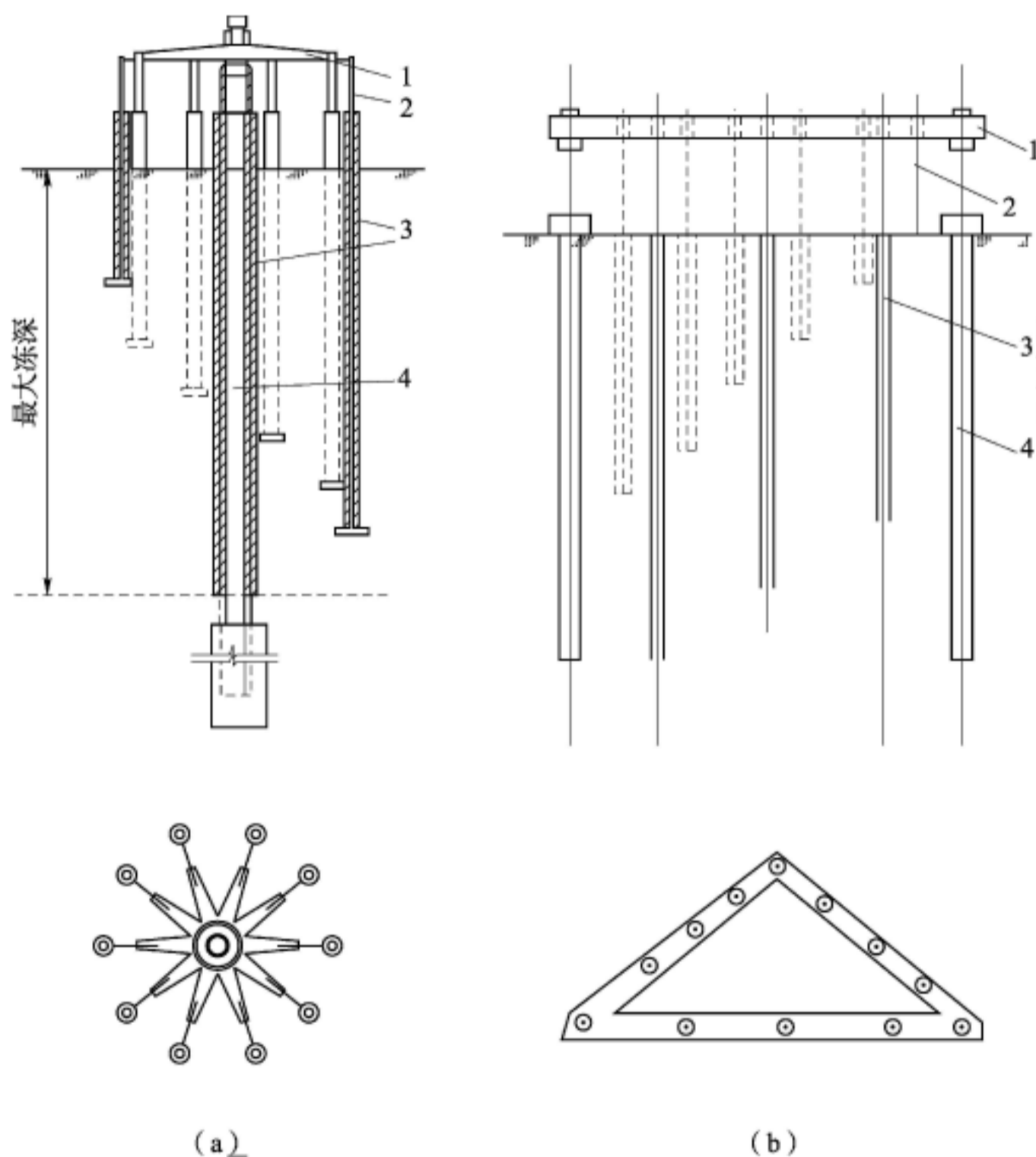


图 5.6.2 分层冻胀仪示意图

1-基准盘(梁);2-测杆;3-套管;4-固定桩(管)

**5.6.3** 试验前应按下列步骤进行试验准备和仪器设备安装:

- (1) 选择有代表性的场地,地表整平,在地表开始冻结前埋设冻胀仪;
- (2) 冻胀仪测杆分层埋设的间距取 20cm ~ 30cm,地表设一个测点,最深点达到最大冻深线,各测杆之间的水平埋设距离不小于 30cm;
- (3) 测杆采用钻孔埋设,孔口加盖保护;当地下水位处于冻结层内时,测杆与套管之



间的空隙用工业凡士林或其他低温下不冻的材料充填;

(4) 架设基准梁的固定杆,在最大冻深范围内加设套管;其打入深度不小于最大冻深线以下 1.0m;

(5) 基准盘或梁距冻前地面的架设高度大于 40cm;

(6) 在冻胀仪附近埋设冻深器和地下水位观测管,并采取保证冻深器外套管在地基土冻胀时稳定不动的措施。

**5.6.4** 试验应按下列步骤进行。

**5.6.4.1** 在地表开始冻结前,应测记各测杆顶端至基准盘或梁上相应固定点的长度,作为起始读数。

**5.6.4.2** 冻结期间可每隔 1d~2d 测记 1 次,融化期可根据需要确定测次。

**5.6.4.3** 观测期间宜用水准仪,每隔半个月校核一次基准盘(梁)固定杆、冻深器、地下水位管顶端的高程变化,并对各项测值进行必要的修正。

**5.6.5** 平均冻胀率应按下列式计算:

$$\eta = \frac{\Delta h}{H_f} \times 100 \quad (5.6.5)$$

式中  $\eta$ ——平均冻胀率(%);

$\Delta h$ ——地表总冻胀量(cm);

$H_f$ ——冻深(cm),以冻结前地面算起的最大冻深。

**5.6.6** 原位冻胀试验成果应绘制平均冻胀量、冻深与时间关系曲线,以冻深为纵坐标,平均冻胀量,冻胀率为横坐标,绘制  $H_f \sim \Delta h \sim \eta$  关系曲线。

## 5.7 十字板剪切试验

**5.7.1** 十字板剪切试验可用于测定饱和软黏土的不排水抗剪强度和灵敏度等参数。

**5.7.2** 十字板剪切试验点的布置,对均质土竖向间距可为 1m,当试验深度处遇有间夹砂土、硬塑土、胶结层等硬层时,应穿过硬层再行试验;也可根据已有勘察资料,选择其间软黏土段进行试验。

**5.7.3** 十字板剪切试验可分为机械式和电测式,其主要技术要求应符合下列规定。

**5.7.3.1** 十字板头和轴杆,板头应由两片高强度金属材料制成。十字板头和轴杆的规格尺寸应符合表 5.7.3 的规定,且尺寸偏差不大于 1%,扭力偏差不大于 2% F·S。对软黏土宜用型号 II 的十字板头和轴杆。

表 5.7.3 十字板头和轴杆的规格尺寸

型号	板宽 (mm)	板高 (mm)	板厚 (mm)	刃角 (°)	轴杆		面积比 (%)
					直径(mm)	长度(mm)	
I	50	100	2	60	13	50	14
II	75	150	3		16	50	13

**5.7.3.2** 机械式十字板剪切试验操作应满足下列要求:

(1) 十字板试验孔使用空心螺纹钻清孔,套管跟进护壁,孔底残留浮土厚度小于

10cm,保证成孔垂直度;

(2) 十字板头用慢速压至试验点位,入土深度不小于套管底端以下 50cm;

(3) 每次试验后量测轴杆的摩擦阻力。

### 5.7.3.3 电测式十字板剪切试验操作应满足下列要求:

(1) 贯入主机的安装要求水平,并能提供满足最大试验深度的反力,探杆夹持器要牢固夹持探杆,不产生相对转动;

(2) 电测式十字板的扭力传感器及其连接导线在水域中工作,其绝缘电阻不小于 300MΩ;

(3) 当十字板头压进地下土层 0.5m 后,稍作停留,待传感器与地温取得热平衡,仪表输出值不变并调零后,再压至试验点位;

(4) 试验结束,将十字板头拔出地面,及时记录仪表不归零读数。

5.7.3.4 十字板剪切试验前,应对测力用的扭力传感器或开口钢环进行校准。校准工作宜在 20℃ ± 5℃ 的室温环境中操作。扭力传感器应连同配套使用的仪器、电缆一同参与校准。

5.7.3.5 十字板剪切速率应以 10s 转动 1° 为标准,其峰值读数或稳定读数宜在 3min ~ 10min 内出现,试验出现峰值后应再继续剪切 1min。试验的剪切强度峰值或稳定值测试完后,应顺扭转方向连续转动探杆 6 圈,测定重塑土的不排水抗剪强度。

5.7.4 水域十字板剪切试验宜固定在套管上进行,潮间浅滩或浅水区域也可采用勘探船与脱开的套管支架平台相结合的方法进行。当水深超过 10m 时,可采用多层套管。

5.7.5 十字板剪切试验成果与分析应符合下列规定:

(1) 对实测原始数据进行检查、校核,并判别有无异常;

(2) 计算各试验点原状土、重塑土的不排水抗剪强度和灵敏度,并提供分层统计值;

(3) 绘制单孔十字板剪切试验不排水抗剪峰值强度、残余强度和灵敏度随深度的变化曲线,必要时绘制抗剪强度与扭转角的关系曲线;

(4) 饱和软黏土不排水抗剪强度计算,对机械式十字板按式(5.7.5-1)计算,对电测式十字板按式(5.7.5-2)计算;

$$c_u = K \cdot \xi \cdot (R_y - R_g) \quad (5.7.5-1)$$

$$c_u = K \cdot \xi \cdot R_y \quad (5.7.5-2)$$

式中  $c_u$ ——原状土的抗剪强度(kPa);

$K$ ——十字板板头常数(50mm × 100mm 板头为 2183.8034m<sup>-3</sup>;75mm × 150mm 板头为 647.0528m<sup>-3</sup>);

$\xi$ ——传感器标定系数(kN · m/mV 或 kN · m/με);

$R_y$ ——原状土剪切破坏时的读数(mV 或 με);

$R_g$ ——杆轴与土摩擦时的读数(mV 或 με);

(5) 重塑土的抗剪强度计算,对机械式十字板按式(5.7.5-3)计算,对电测式十字板按式(5.7.5-4)计算;

$$c'_u = K \cdot \xi \cdot (R_c - R_g) \quad (5.7.5-3)$$



$$c'_u = K \cdot \xi \cdot R_c \quad (5.7.5-4)$$

式中  $c'_u$ ——重塑土的抗剪强度(kPa)；

$R_c$ ——重塑土剪切破坏时的读数(mV)；

(6)土的灵敏度按式(5.7.5-5)计算；

$$S_i = \frac{c_u}{c'_u} \quad (5.7.5-5)$$

式中  $S_i$ ——灵敏度；

(7)根据土层性状、地区经验和试验方法等实际情况,对十字板不排水抗剪强度进行修正。

**5.7.6** 十字板剪切试验成果可用于计算岸坡稳定,计算地基承载力,检验软弱地基的加固效果,测定软土地基破坏面位置和残余强度,判定软黏土的固结历史等。

**5.7.7** 根据土的灵敏度,可按表 5.7.7 对土的结构性进行分类。

表 5.7.7 软土的结构性分类表

灵敏度 $S_i$	结构性分类	灵敏度 $S_i$	结构性分类
$S_i < 2$	低灵敏性	$8 \leq S_i < 16$	极灵敏性
$2 \leq S_i < 4$	中灵敏性	$S_i \geq 16$	流性
$4 \leq S_i < 8$	高灵敏性		

## 5.8 标准贯入试验

**5.8.1** 标准贯入试验可用于砂土、粉土和黏性土,也可用于残积土、极软岩、软岩。

**5.8.2** 标准贯入试验的设备规格应符合表 5.8.2 的规定。

表 5.8.2 标准贯入试验设备规格

落锤		锤的质量(kg)	63.5 ± 0.5
		落距(cm)	76 ± 2
贯入器	对开管	长度(mm)	> 500
		外径(mm)	51 ± 1
		内径(mm)	35 ± 1
	管靴	长度(mm)	50 ~ 76
		刃口角度(°)	18 ~ 20
		刃口单刃厚度(mm)	1.6
钻杆		直径(mm)	42
		相对弯曲	< 1/1000

**5.8.3** 标准贯入试验的技术要求应符合下列规定。

**5.8.3.1** 标准贯入试验孔宜采用回转钻进、并保持孔壁稳定,孔底的废土高度不得超过 5cm。陆域钻孔应保持孔内水位略高于地下水位,水域钻孔应保持孔内水位不低于所在水域地表水位。下放贯入器时不得冲击孔底。

**5.8.3.2** 水域钻孔采用浮式平台时,贯入度量测基面不应受平台晃动的影响。

**5.8.3.3** 采用自动脱钩的自由落锤法进行锤击,贯入器、探杆、导向杆间的连接应紧密,并保持垂直度,避免锤击时的偏心和侧向晃动,锤击速率应小于 30 击/min。

**5.8.3.4** 贯入器打入土中 15cm 后,开始记录每打入 10cm 的锤击数,应以累计打入



30cm 的锤击数为标准贯入试验锤击数。当锤击数已达 50 击,而贯入深度未达 30cm 时,可记录 50 击的实际贯入深度并终止试验,按式(5.8.3)换算成相当于 30cm 的标准贯入试验锤击数。

$$N = \frac{30 \times 50}{\Delta S} \quad (5.8.3)$$

式中  $N$ ——标准贯入试验击数;

$\Delta S$ ——50 击时的贯入度(cm)。

**5.8.4 标准贯入试验成果与分析应符合下列规定。**

**5.8.4.1** 汇编标准贯入试验成果数据表,可按其测试深度标注于钻孔柱状图或工程地质剖面图上,也可绘制单孔标准贯入试验击数与深度关系曲线或直方图。

**5.8.4.2** 当试验土层中夹杂有碎砖瓦、卵石、碎石、砾石、姜石、硬贝壳或薄层胶结层、硬土层等使标准贯入试验击数异常时,应剔除异常值后再分层统计。

**5.8.4.3** 标准贯入试验成果可用于判定砂土、粉土、黏性土的物理状态,估算土的强度、变形参数、地基承载力和单桩承载力,判别砂土和粉土是否液化,评价沉桩、成桩的可能性和地基加固效果等。

**5.8.4.4** 应用标准贯入试验成果时,应根据具体情况确定  $N$  值的修正。

## 5.9 静力触探试验

**5.9.1** 静力触探试验可用于黏性土、粉土、砂土和含有少量碎石的土。

**5.9.2** 静力触探的探头按结构和功能可分为单桥探头、双桥探头和孔压探头。静力触探试验可测定比贯入阻力、锥头阻力、侧壁摩阻力和贯入时的孔隙水压力。静力触探试验的探头规格和探头磨损标准应符合表 5.9.2-1 ~ 表 5.9.2-3 的规定。

表 5.9.2-1 单桥探头规格

型号	锥头直径 (mm)	锥头截面积 (cm <sup>2</sup> )	有效侧壁长度 (mm)	锥角 $\alpha$ (°)
I - 1	35.7	10	57	60 ± 1
I - 2	43.7	15	70	60 ± 1

表 5.9.2-2 双桥探头规格

型号	锥头直径 (mm)	锥头截面积 (cm <sup>2</sup> )	有效侧壁长度 (mm)	摩擦筒表面积 (cm <sup>2</sup> )	锥角 $\alpha$ (°)
II - 1	35.7	10	179	200	60 ± 1
II - 2	43.7	15	219	300	60 ± 1

表 5.9.2-3 探头磨损更换标准

标准锥头直径 (mm)	磨损锥头直径 (mm)	磨损摩擦筒直径 (mm)	磨损锥头高度 (mm)
35.7	<35.16	小于锥头直径	<28
43.7	<43.04		<34

**5.9.3** 触探用探杆应采用高强度无缝钢管,其屈服强度不宜小于 600MPa,工作截面尺寸必须与触探主机的额定贯入力相匹配。

**5.9.4** 静力触探试验应符合下列规定。

**5.9.4.1** 探头的测力传感器应定期进行校准,并应满足下列要求:

- (1) 与其配套使用的仪器及电缆一起参与标定;
- (2) 标定的应力与应变关系呈直线,并通过坐标原点,线性误差不大于  $1\% F \cdot S$ ;
- (3) 分级加荷、卸荷反复进行 3 次以上,重复性误差不大于  $1\% F \cdot S$ ,所加荷载接近空心柱的最大设计荷载,其应力~应变关系直线不能外延使用;
- (4) 标定时顶柱与测力传感器接触良好,转换顶柱方位,其读数误差不大于同一级荷载变量观测值的  $1\% F \cdot S$ ;
- (5) 测力传感器的温度飘移与归零误差不超过  $1\% F \cdot S$ ;
- (6) 测力传感器及其连接导线的绝缘电阻不小于  $500M\Omega$ 。

**5.9.4.2** 水域静力触探试验应在固定平台上进行,或采用水下静力触探设备进行。静力触探平台抗风浪能力应满足试验作业与安全的要求。

**5.9.4.3** 静力触探试验操作要点应满足下列要求:

- (1) 陆域、水域勘探平台上的静力触探机与水下静力触探设备安装要求水平,并能提供确保静探杆贯入与拔起时垂直度和静探机座稳定的反力;
- (2) 静探贯入深度超过 30m 时,孔内要下套管导向与抗弯,防止孔斜与断杆;或配置具有测斜功能的探头,量测触探孔的偏斜角,校正土层界面的深度;遇硬塑或密实的硬层贯入困难,采用泥浆护壁或跟管清孔,进行分段触探,但清孔深度不超过原触探深度已扰动的土层,并距触探段土层顶面 50cm 以上;
- (3) 水上静力触探采用多重套管,外套管直径满足抗水流、风浪和多重套管变径的要求,一般大于 146mm,套管变径根据静探孔的要求和工况条件确定,套管上端固定在作业平台上,套管下端的入土深度保证静探作业顺利进行;
- (4) 将单桥或双桥探头贯入土面下 1m 左右,上提探头 5cm~10cm,使探头传感器处于不受力状态,待探头温度与地温平衡,仪器零位基本稳定后,将仪器调零或记录初始读数,再进行正常连续贯入触探试验;
- (5) 测试时匀速连续贯入,速率为  $1.2\text{m}/\text{min} \pm 0.3\text{m}/\text{min}$ ;
- (6) 孔压静力触探试验的探头在进入地下水位以下的土层前,保持饱和状态,在试验的整个过程中不上提探头;当在预定深度进行孔压消散试验,量测停止贯入后不同时间的孔压值时,不松动探头;
- (7) 静力触探试验点与最近的已有其他勘探点的间距不小于已有勘探点孔径的 25 倍,且不小于 2m。

**5.9.5** 静力触探试验成果分析应符合下列规定。

**5.9.5.1** 对原始记录数据或原始记录曲线应进行深度修正、零漂修正和幅值修正。

**5.9.5.2** 应依据探头的类型分别绘制如下相应的试验曲线:

- (1) 对单桥探头,绘制比贯入阻力与深度的关系曲线( $p_s \sim h$  曲线);
- (2) 对双桥探头,绘制锥头阻力、侧壁摩阻力、摩阻比与深度的关系曲线( $q_c \sim h$ 、 $f_s \sim$



$h$ 、 $R_f \sim h$  曲线)；

(3) 对孔压探头, 绘制孔隙水压力、真锥头阻力、真侧壁摩阻力、静探孔压系数与深度的关系曲线( $u_i \sim h$ 、 $q_T \sim h$ 、 $f_i \sim h$ 、 $B_q \sim h$  曲线), 以及孔压消散过程时刻的孔隙水压力与孔压消散过程时刻的对数的关系曲线( $u_i \sim \lg t$  曲线)。

**5.9.5.3** 成果分析时应根据静力触探贯入曲线的线型特征, 结合场地的钻探资料和地区经验划分土层和判定土性, 并应统计计算单孔各土层的比贯入阻力和锥头阻力、侧壁摩阻力等测试值, 以及各土层测试值的场地平均值或加权平均值。

**5.9.5.4** 成果分析时应根据静力触探试验的测试结果, 结合其他勘察资料和地区经验, 估算土的塑性状态或密实度、压缩性、固结系数、渗透系数、地基承载力、单桩承载力, 判断沉桩的可能性, 进行液化评价, 判断地基处理效果等。

**5.9.6** 各深度的触探值应按下列公式计算:

$$X_d = \xi x'_d \quad (5.9.6-1)$$

$$x'_d = x_d - \Delta x_d \quad (5.9.6-2)$$

$$q_T = q_c + (1 - \alpha) u_T = q_c + \beta(1 - \alpha) u_d \quad (5.9.6-3)$$

$$B_q = \Delta u / (q_T - \sigma_{v0}) \quad (5.9.6-4)$$

$$\Delta u = u_0 - u_w \quad (5.9.6-5)$$

式中  $X_d$ ——深度  $d$  处的触探参数( $p_s$ 、 $q_c$ 、 $f_s$ 、 $u_d$ 、 $u_T$ ) 代号;

$\xi$ ——触探参数的标定系数(kPa/mV);

$x'_d$ ——深度  $d$  处读数的修正值;

$x_d$ ——深度  $d$  处的实测值( $p_s$ 、 $q_c$ 、 $f_s$ 、 $u_d$ 、 $u_T$ ) 代号;

$\Delta x_d$ ——相应于深度  $d$  处的零漂修正量(平差值), 分正、负;

$q_T$ ——总锥尖阻力(kPa);

$q_c$ ——锥头阻力(kPa);

$\alpha$ ——探头有效面积比, 取 0.4;

$u_T$ ——孔压探头贯入时于锥底以上圆柱面处测得的孔隙水压力(kPa);

$\beta$ ——孔压换算系数, 即  $u_T$  与  $u_d$  之比值, 可按表 5.9.6 取值;

$u_d$ ——孔压探头贯入时于锥面处测得的孔隙水压力(kPa);

$B_q$ ——超孔压比;

$\Delta u$ ——探头贯入时土的超孔隙水压力(kPa);

$\sigma_{v0}$ ——土的总自重压力(kPa);

$u_0$ ——探头贯入时的孔隙压力(kPa); 过滤片置于探头锥面上时,  $u_0 = u_d$ ; 过滤片置于锥底圆柱面处时,  $u_0 = u_i$ ;

$u_w$ ——静止孔隙水压力(kPa)。

表 5.9.6 与土质状态有关的  $\beta$  值

土质 状态	中粗砂	粉、细砂		粉土	粉质黏土	黏土	重超固结 黏土
		松散~中密	密实	正常固结及轻度超固结			
$\beta$	1.0	0.7~0.3	<0.3	0.6~0.3	0.7~0.5	0.8~0.4	0.4~0.1



### 5.9.7 各时刻的归一化超孔压比应按下式计算:

$$\bar{V} = (u_t - u_w) / (u_{t=0} - u_w) \quad (5.9.7)$$

式中  $\bar{V}$ ——归一化超孔压比,当  $t=0$  时,  $u_t = u_d$ ,  $\bar{V} = 1$ ; 当孔压完全消散时,  $u_t = u_w$ ,  $\bar{V} = 0$ ;

$u_t$ ——经修正后,在该试验深度任意时刻的孔压值(kPa);

$u_w$ ——静止孔隙水压力(kPa)。

### 5.9.8 地基中试验点处的剩余超孔压应按下式计算:

$$\Delta u_r = u'_w - u_w \quad (5.9.8)$$

式中  $\Delta u_r$ ——剩余孔隙水压力(kPa);

$u'_w$ ——均衡孔隙水压力(kPa);

$u_w$ ——静止孔隙水压力(kPa)。

## 5.10 动力触探试验

5.10.1 圆锥动力触探试验可用于黏性土、砂土、碎石类土、极软岩、软岩等。

5.10.2 圆锥动力触探试验的类型可分为轻型、重型和超重型三种,其规格和适用土类应符合表 5.10.2 的规定。

表 5.10.2 圆锥动力触探类型

类型		轻型	重型	超重型
落锤	锤的质量(kg)	10 ± 0.2	63.5 ± 0.5	120 ± 1.0
	落距(cm)	50 ± 1.0	76 ± 1.0	100 ± 1.0
探头	截面积(cm <sup>2</sup> )	12.6 ± 0.1	43.0 ± 0.4	43.0 ± 0.4
	锥角(°)	60	60	60
探杆直径(mm)		25	42	50
指标		贯入 30cm 的读数 $N_{10}$	贯入 10cm 的读数 $N_{63.5}$	贯入 10cm 的读数 $N_{120}$
主要适用岩土		填土、砂土、粉土、黏性土	砂土、中密以下的碎石土、极软岩	密实和很密的碎石土、软岩、极软岩

5.10.3 圆锥动力触探试验操作要点应符合下列规定。

5.10.3.1 所有连接部件应连接紧密,并采用自动落锤装置,轻型动力触探也可采用手动落锤。

5.10.3.2 触探杆最大偏斜度不应超过 2%,锤击贯入应连续进行,防止锤击偏心、探杆倾斜和侧向晃动,保持探杆垂直度;锤击速率每分钟宜为 15 ~ 30 击。进行水上试验时,发生导向杆与探杆晃动及锤击偏心的情况,应停止试验。

5.10.3.3 每贯入 1m,宜将探杆转动一圈半;当连续贯入深度超过 10m,每贯入 20cm 宜转动探杆一次。砂、圆砾、角砾和卵石、碎石土连续触探深度不宜超过 12m。

5.10.3.4 水域钻孔采用浮式平台时,贯入度量测基面应不受平台晃动的影响。

5.10.3.5 对轻型动力触探,当  $N_{10} > 100$  击或贯入 15cm 锤击数超过 50 击时,可停止试验;对重型动力触探,当连续三次  $N_{63.5} > 50$  击时,可停止试验或改用超重型动力触探。

**5.10.3.6** 探头直径磨损不应大于2mm,锥尖高度磨损不应大于5mm。

**5.10.4** 圆锥动力触探试验成果分析应符合下列规定:

(1)单孔连续圆锥动力触探试验绘制锤击数与贯入深度关系曲线,并统计单孔分层贯入指标平均值;

(2)根据各孔分层的贯入指标平均值,用厚度加权平均法计算场地分层贯入指标平均值和变异系数;

(3)根据圆锥动力触探试验成果,结合地区经验,进行力学分层,评定岩土的统一性和物理性质、土的强度、变形参数、地基承载力、单桩承载力,查明土洞、软硬土层界面、检测地基处理效果等;

(4)应用圆锥动力触探试验成果时,根据具体情况确定锤击数的修正;当采用动力触探击数确定碎石土密实度时,按现行国家标准《岩土工程勘察规范》(GB 50021)中有关规定进行修正。

## 5.11 旁压试验

**5.11.1** 旁压试验可分为预钻式和自钻式两类。预钻式旁压试验可用于黏性土、粉土、砂土、碎石土、残积土、极软岩和软岩;自钻式旁压试验可用于黏性土、粉土、砂土等。

**5.11.2** 旁压试验孔应符合下列规定。

**5.11.2.1** 试验孔的平面布置应具有代表性,在同一场地不宜少于2个孔;试验孔与已有钻孔的水平距离不宜小于3m。

**5.11.2.2** 孔内试验点的垂直间距不宜小于1m,旁压器的测量腔应在同一土层内,同一土层内试验点总数不宜少于6个。

**5.11.2.3** 预钻式旁压试验应根据岩土条件采用适当的成孔方法,其成孔质量应满足下列要求:

(1)孔壁垂直、光滑、截面呈圆形、不受扰动;

(2)成孔直径比旁压器外径大2mm~6mm;成孔深度大于试验深度0.5m;

(3)同一试验孔试验点按自上而下顺序,每一试验段成孔后尽快试验。

**5.11.2.4** 自钻式旁压试验应根据岩土条件调整切削器和冲洗液喷头位置、进尺速率、切削器旋转速率、冲洗液压力与流量。

**5.11.3** 旁压试验的仪器应由旁压器、加压稳定装置、变形量测系统、导管和水箱等组成。按压力可分为低压型和高压型两类,其规格见表5.11.3。

表 5.11.3 常用型号旁压器的技术规格

规格	旁压仪型号	旁压器型号	总长度 (mm)	测试腔长度 (mm)	外径 (mm)	测试腔固有体积 (cm <sup>3</sup> )	测管截面积 (cm <sup>2</sup> )
梅纳型	G-am	AX	800	350	44	535	15.30
		BX	650	200	58	535	15.30
		NX	650	200	70	790	15.30
PY型	PY-A	AP	450	250	50	491	15.28
		带金属保护套型	450	250	55	594	15.28
	PY3-2	普通型	680	200	60	565	13.20



### 5.11.4 旁压试验操作主要技术要求应符合下列规定。

5.11.4.1 旁压试验的加压等级可为预估极限压力的1/8~1/12。也可参照表5.11.4选用。

表 5.11.4 试验的加压等级

土的工程特性	加压等级 $\Delta P$ (kPa)	
	临塑压力前	临塑压力后
淤泥、淤泥质土、流塑的黏性土、粉土,饱和或松散粉细砂	$\Delta p \leq 15$	$\Delta p \leq 30$
软塑的黏性土、粉土,稍密很湿的粉细砂,稍密的中、粗砂	$15 < \Delta p \leq 25$	$30 < \Delta p \leq 50$
可塑至硬塑的黏性土、粉土,中密至密实很湿的粉细砂,稍密至中密的中、粗砂	$25 < \Delta p \leq 50$	$50 < \Delta p \leq 100$
坚硬的黏性土、粉土,密实的中、粗砂	$50 < \Delta p \leq 100$	$100 < \Delta p \leq 200$
中密至密实的碎石类土、极软岩、软岩	$100 < \Delta p$	$200 < \Delta p$

5.11.4.2 各级压力下的相对稳定时间宜为1min或3min,并分别按下列要求测记测管的水位下降值或旁压器测量腔扩张体积量:

- (1) 稳定时间为1min的,按15s、30s、60s测记;
- (2) 稳定时间为3min的,按1min、2min、3min测记。

5.11.4.3 当扩张体积相当于测量腔的固有体积时,或压力达到仪器的容许最大压力时,应终止试验。

### 5.11.5 旁压试验资料的整理和应用应符合下列规定。

5.11.5.1 应采用校正后的压力与体积变量绘制压力与体积曲线( $p \sim V$ 曲线)。

5.11.5.2 可按下列方法从压力与体积曲线( $p \sim V$ 曲线)上确定初始压力、临塑压力和极限压力:

- (1) 将旁压曲线直线段延长与 $V$ 轴相交,由交点作与 $p$ 轴平行线,相交于曲线的一点,其对应的压力为初始压力值;
- (2) 取旁压曲线直线段的终点,即曲线与直线段的第二个切点所对应的压力为临塑压力值;
- (3) 旁压曲线过临塑压力,趋向于与 $V$ 轴平行的渐近线时,其对应的压力为极限压力值;当极限压力值不能直接求取时,用曲线外延法或压力与体积倒数曲线( $p \sim 1/V$ 曲线)法求取。

5.11.5.3 旁压模量可按下列式计算:

$$E_m = 2(1 + \mu)(V_c + V_m) \frac{\Delta p}{\Delta V} \quad (5.11.5-1)$$

式中  $E_m$ ——旁压模量(kPa);

$\mu$ ——地基土的泊松比,可按表5.11.5取值;

$V_c$ ——旁压器测量腔初始固有体积( $\text{cm}^3$ );

$V_m$ ——平均体积增量,为旁压曲线上直线段两端点压力所对应的体积增量之和的一半( $\text{cm}^3$ );

$\Delta p$ ——旁压曲线上直线段的压力增量(kPa);

$\Delta V$ ——对应于 $\Delta p$ 的体积增量( $\text{cm}^3$ )。



表 5.11.5 泊松比  $\mu$  值

土的名称	碎石土	砂土	粉土	粉质黏土	黏土
$\mu$	0.27	0.30	0.35	0.38	0.42

**5.11.5.4** 采用临塑压力法确定地基容许承载力可按式(5.11.5-2)计算,采用极限压力法确定地基容许承载力可按式(5.11.5-3)计算。

$$f = p_f - p_0 \quad (5.11.5-2)$$

$$f = \frac{p_L - p_0}{F} \quad (5.11.5-3)$$

式中  $f$ ——地基容许承载力(kPa);

$p_f$ ——临塑压力(kPa);

$p_0$ ——初始压力(kPa);

$p_L$ ——极限压力(kPa);

$F$ ——安全系数,取 2~3。

**5.11.5.5** 静止侧压力系数可按下式估算:

$$K_0 = \frac{p_0}{z \cdot \gamma} \quad (5.11.5-4)$$

式中  $K_0$ ——静止侧压力系数;

$p_0$ ——初始压力(kPa);

$z$ ——旁压器中心点至地面的土柱高度(m);

$\gamma$ ——土的重度( $\text{kN}/\text{m}^3$ )。

## 5.12 载荷试验

**5.12.1** 浅层平板载荷试验可用于测定承压板下应力主要影响范围内岩土体的承载力和变形特性,适用于浅层地基土。

**5.12.2** 浅层平板载荷试验点的平面布置应具有代表性,同一岩土层不应少于 3 个点,当场地内岩土体不均匀时,应适当增加试验点。试验点位置应布置在基础底面高程处;对复合地基,承压板底面高程应与桩顶设计高程相适应。

**5.12.3** 浅层平板载荷试验的试坑或试井底的岩土应避免扰动,保持其原状结构和天然湿度,并应在承压板下铺设不超过 20mm 的砂垫层找平,尽快安装试验设备。

**5.12.4** 浅层平板载荷试验点试坑宽度或直径不应小于承压板宽度或直径的 3 倍。基准梁及加荷平台支点或锚桩宜设在试坑以外,且与承压板边的净距不应小于 2m。

**5.12.5** 浅层平板载荷试验设备应按下列规定进行。

**5.12.5.1** 浅层平板载荷试验承压板面积不应小于  $0.25\text{m}^2$ 。对软土和颗粒较大的填土不应小于  $0.5\text{m}^2$ ,对于经过换填、预压、注浆等处理后的地基不应小于  $1.0\text{m}^2$ ,夯实地基不宜小于  $2.0\text{m}^2$ ;岩基载荷试验承压板的面积不宜小于  $0.07\text{m}^2$ 。

**5.12.5.2** 荷载测量可用设置在千斤顶上的荷重传感器直接测定,也可采用并联于千斤顶油路的压力表或压力传感器测定油压,根据千斤顶率定曲线换算荷载。传感器的测

量误差不应大于 1%，压力表精度应优于或等于 0.4 级。

**5.12.5.3** 承压板的沉降可采用百分表或电测位移计量测，其精度不应低于  $\pm 0.01\text{mm}$ 。

**5.12.5.4** 加载反力装置提供的反力不得小于预估最大加载量的 1.2 倍。

**5.12.6** 浅层平板载荷试验方法应符合下列规定。

**5.12.6.1** 载荷试验加荷方式应采用分级维持荷载沉降相对稳定法，加荷等级宜取 10~15 级，并不应少于 8 级，荷载量测精度不应低于施加的最大荷载的  $\pm 1\%$ 。当以确定地基变形模量为目的时，试验应进行至出现比例界限点以后 1~2 级荷载为止；当以确定地基承载力为目的时，试验应进行至能获得极限荷载或者最后一级荷载达到设计荷载的 2 倍为止。

**5.12.6.2** 当试验对象为土体时，每级荷载施加后，间隔宜为每 10min、10min、10min、15min、15min 测读一次沉降，以后宜间隔 30min 测读一次沉降，当连续 2h 每小时沉降量小于等于 0.1mm 时，可认为沉降已达到相对稳定标准，并可施加下一级荷载。当试验对象为岩体时，间隔宜为每 1min、2min、2min、5min 测读一次沉降，以后宜间隔 10min 测读一次，当连续 3 次读数差小于等于 0.1mm 时，可认为沉降已达到相对稳定标准，并可施加下一级荷载。试验对象为复合地基时，每加一级荷载前后均应各读记承压板沉降量一次，以后每半个小时读记一次；当一小时内沉降量小于 0.1mm 时，即可加下一级荷载。

**5.12.6.3** 当需观测弹性回弹值时，对土体每级卸荷量为加荷增量的 2 倍，应每隔 30min 观测一次，每级荷载观测 1h，荷载全部卸除后继续观测 3h，观测时间间隔为 30min。对岩体每级卸荷量为加荷增量的 2 倍，应每隔 10min 观测一次，测读 3 次后可卸载下一级；当全部卸载后，测读满 30min 且回弹量小于 0.01mm 时，可认为稳定。

**5.12.6.4** 浅层平板载荷试验过程中，当出现下列现象之一时，可终止加荷：

- (1) 承压板周围土明显侧向挤出、隆起或产生裂缝；
- (2) 本级荷载的沉降量大于前级荷载的沉降量的 5 倍，荷载与沉降曲线出现明显陡降；
- (3) 在某一级荷载下，24h 内沉降速率不能达到稳定标准；
- (4) 总沉降量超过承压板宽度或直径的 1/12；
- (5) 总加荷量已达到设计要求值的 2 倍以上。

**5.12.7** 浅层平板载荷试验资料的整理和应用应符合下列规定。

**5.12.7.1** 资料整理首先应绘制荷载与沉降曲线 ( $p \sim s$  曲线)。

**5.12.7.2** 变形模量  $E_0$  应根据  $p \sim s$  曲线的初始直线段，承压板为圆形时按式 (5.12.7-1) 确定，承压板为方形时按式 (5.12.7-2) 确定。

$$E_0 = 0.785(1 - \mu^2) d \frac{P}{s} \quad (5.12.7-1)$$

$$E_0 = 0.886(1 - \mu^2) b \frac{P}{s} \quad (5.12.7-2)$$

式中  $E_0$ ——试验土层的变形模量 (MPa)；



$\mu$ ——地基土的泊松比;

$d, b$ ——承压板的直径、边长(m);

$p$ —— $p-s$  曲线线性段的压力(kPa);

$s$ ——对应于施加压力的沉降量(mm)。

**5.12.7.3** 地基土的泊松比可按表 5.11.5 采用。

**5.12.7.4** 地基承载力确定方法应满足下列要求:

(1) 达到第 5.12.6.4 款第(1)~(4)项规定时,取破坏前的最后一级荷载为其极限荷载;

(2) 当在  $p-s$  曲线上存在明显的直线段时,以比例界限  $p_0$  值作为承载力特征值;当比例界限  $p_0$  值与极限荷载  $p_u$  接近时,将  $p_u$  除以安全系数 2.0~3.0,作为承载力特征值;

(3) 当在  $p-s$  曲线上没有明显的直线段时,可按相对变形值确定;在  $p-s$  曲线较平缓的区段选取承载力,对一般黏性土、软土采用相对沉降不大于 0.02 对应的压力作为承载力特征值;当极限荷载  $p_u$  小于  $p_{s/b=0.02}$  的 2 倍时,以  $p_u/2$  作为承载力特征值;对低压缩性土、砂土采用相对沉降 0.010~0.015 对应的压力作为承载力特征值;对软岩、较软岩采用相对沉降 0.001~0.002 对应的压力作为承载力特征值;

(4) 对复合地基,当在  $p-s$  曲线上没有明显的直线段时,按相对变形值确定;对沉管砂石桩、振冲碎石桩和柱锤扩桩复合地基,取  $s/b$  或  $s/d$  等于 0.01 所对应的压力;对灰土挤密桩、土挤密桩复合地基,取  $s/b$  或  $s/d$  等于 0.008 所对应的压力;对水泥粉煤灰碎石桩或夯实水泥土桩复合地基,对以卵石、圆砾、密实粗中砂为主的地基,取  $s/b$  或  $s/d$  等于 0.008 所对应的压力;当以黏性土、粉土为主的地基,取  $s/b$  或  $s/d$  等于 0.01 所对应的压力;对水泥土搅拌桩或旋喷桩复合地基,取  $s/b$  或  $s/d$  等于 0.006 所对应的压力;按当地经验确定相对变形值时,若原地基土为高压缩性土层,相对变形值的最大值不大于 0.015;

(5) 复合地基载荷试验,当采用边长或直径大于 2m 的承压板进行试验时, $b$  或  $d$  按 2m 计;

(6) 按相对变形值确定的承载力特征值不大于最大加载压力的一半;

(7) 同一土层参加统计的试验点不少于 3 点,各试验实测值的极差不超过其平均值的 30% 时,取该平均值作为处理地基的承载力特征值;当极差超过平均值的 30% 时,需分析极差过大的原因,增加试验数量,结合工程具体情况确定地基的承载力特征值。

**5.12.7.5** 基准基床系数可根据承压板的边长为 30cm 的浅层平板载荷试验,按下式计算:

$$K_v = \frac{P}{s} \quad (5.12.7-3)$$

式中  $K_v$ ——基准基床系数( $\text{kN}/\text{m}^3$ );

$\frac{P}{s}$ —— $p-s$  曲线直线段的斜率; $p-s$  曲线无直线段时, $p$  取临塑荷载的一半

(kPa),  $s$  为对应于该  $p$  值的沉降值(m)。

**5.12.8** 螺旋板载荷试验可用于测定承压板下应力主要影响范围内地基土的承载力和变



形特性,适用于深层地基土或地下水位以下的地基土。

**5.12.9** 螺旋板载荷试验点的平面布置应具有代表性,同一土层不应少于3个点,当地内地内土体不均匀时,应适当增加试验点。

**5.12.10** 螺旋板载荷试验设备按下列规定进行。

**5.12.10.1** 应采用国际标准型螺旋承压板,承压板厚度为5mm,投影面积为 $0.02\text{m}^2$ 、螺距为45mm,或厚度为5mm、投影面积为 $0.05\text{m}^2$ 、螺距为60mm。

**5.12.10.2** 荷载测量设备符合第5.12.5.2款的规定。

**5.12.10.3** 承压板的沉降测量设备符合第5.12.5.3款的规定。

**5.12.10.4** 加载反力装置提供的反力不得小于预估最大加载量的1.2倍。

**5.12.11** 螺旋板头入土时,应按每转一圈下入一个螺距进行操作,减少对土的扰动。

**5.12.12** 螺旋板载荷试验方法应符合下列规定。

**5.12.12.1** 加荷观测应符合下列规定:

(1)采用应力法时,用油压千斤顶分级加荷,每级荷载对砂土和中、低压缩性的黏性土、粉土采用50kPa;对高压缩性土采用25kPa;每加一级荷载后,第1小时内按5min、10min、15min、15min、15min间隔观测沉降,以后按30min的时间间隔观测沉降,达到相对稳定后施加下一级荷载;相对稳定标准为2h内每小时沉降量不超过0.1mm;

(2)采用应变法时,对砂土和中、低压缩性土采用 $1\text{mm}/\text{min} \sim 2\text{mm}/\text{min}$ 加荷速率,每下沉1mm~2mm测读压力一次;对高压缩性土采用 $0.25\text{mm}/\text{min} \sim 0.50\text{mm}/\text{min}$ 加荷速率,每下沉0.25mm~0.50mm测读压力一次。

**5.12.12.2** 当需观测弹性回弹值时,对土体每级卸荷量为加荷增量的2倍,应每隔30min观测一次,每级荷载观测1h,荷载全部卸除后继续观测3h,观测时间间隔为30min。

**5.12.12.3** 试验过程中,当出现下列现象之一时,可终止加荷:

(1)荷载-沉降( $p \sim s$ )曲线上,有可判定极限荷载陡降段,且沉降量超过0.04倍承压板直径;

(2)本级沉降量大于前一级沉降量的5倍;

(3)在某一级荷载下,24h内沉降速率不能达到稳定标准;

(4)总加荷量已达到设计要求值的2倍以上。

**5.12.13** 螺旋板载荷试验资料的整理和应用应符合下列规定。

**5.12.13.1** 资料整理首先应绘制荷载与沉降曲线( $p \sim s$ 曲线)。

**5.12.13.2** 变形模量 $E_0$ 应根据 $p \sim s$ 曲线的初始直线段,按下式确定:

$$E_0 = \omega \frac{p \cdot d}{s} \quad (5.12.13)$$

式中  $\omega$ ——与试验深度和土类有关的系数,可按表5.12.13选用;表中 $d/z$ 为承压板直径和承压板底面深度之比;

$p$ —— $p-s$ 曲线线性段的压力(kPa);

$d$ ——承压板的直径(m);

$s$ ——对应于施加压力的沉降量(mm)。

表 5.12.13 螺旋板载荷试验计算系数  $\omega$ 

土类 $d/z$	碎石土	砂土	粉土	粉质黏土	黏土
0.30	0.477	0.489	0.491	0.515	0.524
0.25	0.469	0.480	0.482	0.506	0.514
0.20	0.460	0.471	0.474	0.497	0.505
0.15	0.444	0.454	0.457	0.479	0.487
0.10	0.435	0.446	0.448	0.470	0.478
0.05	0.427	0.437	0.439	0.461	0.468
0.01	0.418	0.429	0.431	0.452	0.459

**5.12.13.3** 地基土的泊松比可按表 5.11.5 采用。

**5.12.13.4** 地基承载力确定方法应满足下列要求：

- (1) 试验达到第 5.12.12.3 款第(1)~(3)项规定时,取前一级荷载作为极限荷载;
- (2) 当在  $p \sim s$  曲线上存在明显的直线段时,以比例界限  $p_0$  值作为承载力特征值;当比例界限  $p_0$  值与极限荷载  $p_u$  接近时,将  $p_u$  除以安全系数 2.0~3.0,作为承载力特征值;
- (3) 当在  $p \sim s$  曲线上没有明显的直线段时,可按相对变形值确定;在  $p \sim s$  曲线较平缓的区段选取承载力,对一般黏性土、软土采用相对沉降不大于 0.02 对应的压力作为承载力特征值;当极限荷载  $p_u$  小于  $p_{s/b=0.02}$  的 2 倍时,以  $p_u/2$  作为承载力特征值;对低压缩性土、砂土采用相对沉降 0.010~0.015 对应的压力作为承载力特征值;
- (4) 按相对变形值确定的承载力特征值不大于最大加载压力的一半;
- (5) 地基承载力特征值的统计执行第 5.12.7.4 款第(7)项的规定。

## 5.13 波速测试

**5.13.1** 波速测试可用于测定各类岩土体的压缩波、剪切波、瑞利波的速度。

**5.13.2** 根据试验目的不同可采用单孔法、跨孔法或面波法。

**5.13.3** 用于测试岩土波速的主要仪器设备应由振源、检波器、采集与记录系统构成,并应符合下列规定。

**5.13.3.1** 振源应符合下列规定：

- (1) 单孔法测试时,剪切波振源采用锤和上压重物的木板或混凝土板;压缩波振源采用锤和金属板;
- (2) 跨孔法测试时,剪切波振源采用剪切波锤或标准贯入试验装置;压缩波振源采用电火花或爆炸激振;
- (3) 面波法测试时,采用大锤、炸药激振或稳态激振器激振,并保证面波测试所需的频率及激振能量。

**5.13.3.2** 检波器应采用三分量检波器,其谐振频率为 8Hz~27Hz,检波器应置于密封防水的无磁性圆筒内。孔内检波器应附有能将检波器固定于孔壁的装置。

**5.13.4** 单孔法测试应符合下列规定。

**5.13.4.1** 剪切波振源木板的长轴中垂线应对准测试孔中心,孔口与木板的垂直距离



宜为 1.0m ~ 3.0m,木板与地面应紧密接触;压缩波振源金属板距孔口的距离宜为 1.0m ~ 3.0m。

**5.13.4.2** 振源高程宜与孔口高程一致。

**5.13.4.3** 测试时应根据地质分层将三分量传感器设置在孔内预定深度处固定,测点间距宜为 1.0m ~ 3.0m,测试工作宜自下而上进行。

**5.13.4.4** 剪切波测试时,应沿木板长轴方向分别敲击其两端,记录极性相反的两组振动波形。

**5.13.4.5** 压缩波测试时,可通过锤击金属板、落锤或爆炸产生压缩波,记录振动波形。

**5.13.5** 跨孔法测试应符合下列规定。

**5.13.5.1** 测试场地宜平坦,测试时可设置一个振源孔,两个或两个以上接收孔;振源孔和接收孔应布置在一条直线上,可一次成孔或分段成孔。

**5.13.5.2** 试验孔的间距应根据岩性、地层厚度和测试要求确定。在保证直达波首先到达测试传感器的条件下,土层宜取 2.0m ~ 5.0m,岩层宜取 8.0m ~ 15.0m。

**5.13.5.3** 钻孔应垂直,宜用泥浆或硬聚氯乙烯塑料套管护壁。

**5.13.5.4** 振源与接收孔内的三分量传感器应设置在同一水平面上;测点竖直间距宜为 1.0m ~ 2.0m。

**5.13.5.5** 剪切波测试时,应采用剪切波锤或标准贯入试验装置激振。压缩波测试时,宜采用电火花或爆炸激振。

**5.13.5.6** 当测试深度大于 15.0m 时,应对测试孔进行倾斜度及倾斜方位的测试,测点间距不应大于 1.0m。

**5.13.6** 面波法测试应符合下列规定。

**5.13.6.1** 瞬态面波测试记录通道不应少于 12 道,道间距宜为 1.0m ~ 2.0m;应在排列延长线方向,距排列首端或末端检波器 2.0m ~ 5.0m 处激发。

**5.13.6.2** 稳态瑞利波测试记录通道宜为 2 ~ 4 道,道间距宜为 1.0m ~ 2.0m;稳态激振频率宜由高向低变化,频率的步长应随测试深度增加而减小。

**5.13.7** 单孔法测试资料整理应符合下列规定。

**5.13.7.1** 压缩波到达检测点的时间,应采用竖向传感器记录的压缩波初至时间。

**5.13.7.2** 剪切波到达检测点的时间,应采用水平传感器记录的两组极性相反剪切波交汇点的初至时间。

**5.13.7.3** 当确定压缩波、剪切波的初至时间有困难时,也可利用同向轴确定有效波到达检测点的时间,各检测点同向轴的组合应为同一波前面。

**5.13.7.4** 压缩波或剪切波从振源到测点的时间,应按下列公式进行斜距校正:

$$t = K \cdot t_L \quad (5.13.7-1)$$

$$K = \frac{H + H_0}{\sqrt{S^2 + (H + H_0)^2}} \quad (5.13.7-2)$$

式中  $t$ ——压缩波或剪切波从振源到达测点经斜距校正后的时间(s);

$K$ ——斜距校正系数;



$t_L$ ——压缩波或剪切波从振源到达测点的实测时间(s);

$H$ ——测点的深度(m);

$H_0$ ——振源与孔口的高差(m);当振源低于孔口时, $H_0$ 为负值;

$S$ ——从板中心到测试孔孔口的水平距离(m)。

**5.13.7.5** 每一波速层的压缩波波速和剪切波波速,应按下式计算:

$$v = \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (5.13.7-3)$$

式中  $v$ ——波速层的压缩波波速或剪切波波速(m/s);

$\Delta H$ ——波速层的厚度(m);

$\Delta t$ ——压缩波或剪切波传到波速层顶面和底面的时间差(s)。

**5.13.8** 跨孔法测试资料整理应符合下列规定。

**5.13.8.1** 压缩波和剪切波到达检测点的时间应执行第5.13.7.1款和第5.13.7.2款的规定。

**5.13.8.2** 当确定压缩波、剪切波的初至时间有困难时,也可利用同向轴确定有效波到达检测点的时间,同一深度检测点的同向轴应为同一波前面。

**5.13.8.3** 每个测试深度的压缩波波速和剪切波波速,应按下式计算:

$$v = \frac{\Delta S}{t_2 - t_1} \quad (5.13.8)$$

式中  $v$ ——压缩波或剪切波波速(m/s);

$\Delta S$ ——由振源到两个接收孔测点距离之差(m);

$t_2$ ——压缩波或剪切波到达第2个接收孔测点的时间(s);

$t_1$ ——压缩波或剪切波到达第1个接收孔测点的时间(s)。

**5.13.9** 面波法测试资料整理应符合下列规定。

**5.13.9.1** 面波数据资料预处理时,应检查现场采集参数的输入正确性和采集记录的质量,并应采用具有提取面波频散曲线功能的软件,获取测试点的面波频散曲线。

**5.13.9.2** 频散曲线的分层,应根据曲线的曲率和频散点的疏密变化综合分析,分层完成后,反演计算剪切波层速度和层厚。

**5.13.9.3** 应根据实测瑞利波速度和泊松比,按下列公式计算剪切波波速:

$$v_s = \frac{v_R}{\eta_s} \quad (5.13.9-1)$$

$$\eta_s = \frac{0.87 - 1.12\mu_d}{1 + \mu_d} \quad (5.13.9-2)$$

式中  $v_s$ ——剪切波速度(m/s);

$v_R$ ——面波速度(m/s);

$\eta_s$ ——与泊松比有关的系数;

$\mu_d$ ——动泊松比。

**5.13.10** 地基的动剪切模量、动泊松比和动弹性模量应按下列公式计算:

$$G_d = \frac{\gamma v_s^2}{g} \quad (5.13.10-1)$$

$$\mu_d = \frac{(v_p/v_s)^2 - 2}{2[(v_p/v_s)^2 - 1]} \quad (5.13.10-2)$$

$$E_d = 2(1 + \mu_d) \frac{\gamma v_s^2}{g} \quad (5.13.10-3)$$

式中  $G_d$ ——动剪切模量(kPa);  
 $\gamma$ ——重度(kN/m<sup>3</sup>);  
 $g$ ——重力加速度(m/s<sup>2</sup>);  
 $v_s$ ——剪切波速度(m/s);  
 $\mu_d$ ——动泊松比;  
 $E_d$ ——动弹性模量(kPa);  
 $v_p$ ——压缩波速度(m/s)。

## 5.14 扁铲侧胀试验

**5.14.1** 扁铲侧胀试验可用于软土、一般黏性土、粉土、黄土、松散至中密砂土等,可用于判别土类,确定黏性土的状态,估算静止土压力系数和计算水平基床系数等。

**5.14.2** 每次试验前后均应进行膜片率定,膜片的合格标准应符合下列规定:

- (1)膜片膨胀至0.05mm时的气压实测值为5kPa~25kPa;
- (2)膜片膨胀至1.10mm时的气压实测值为10kPa~110kPa。

**5.14.3** 扁铲侧胀试验孔的垂直度偏差不应大于2%。

**5.14.4** 扁铲侧胀试验设备应包括压力源、贯入设备和测量系统,并应符合下列规定。

**5.14.4.1** 扁铲探头的技术性能应满足下列要求:

- (1)探头长230mm~240mm、厚度14mm~16mm、宽度94mm~96mm,探头前缘刃角12°~16°;
- (2)探头在平行于轴线长度内,弯曲度在0.5%内,贯入前缘偏离轴线不超过1mm;
- (3)探头侧面圆形不锈钢膜片直径60mm,平装于板头一侧板面上,膜片内侧设置的感应盘机构能准确控制三种特殊位置的状态。

**5.14.4.2** 气电管路的技术性能应满足下列要求:

- (1)气电管路由厚壁、小直径、耐高压、内部贯穿铜质导线的尼龙管组成,两端装有连通探头的接头,绝缘性能良好,直径最大不超过12mm,能输送气压并准确地传递特定信号;
- (2)用于率定的管路长度以1m为宜。

**5.14.4.3** 控制装置应满足下列要求:

- (1)压力表显示最小分度值不大于1kPa;
- (2)传送膜片达到特定位移量时的信号采用蜂鸣器和检流计显示;蜂鸣器和检流计在膜片膨胀量小于0.05mm或大于等于1.10mm时接通,大于等于0.05mm且小于



1. 10mm 时断开;

(3) 气电管路、气压计、校正器及率定附件等组成的率定装置能准确测定膜片膨胀位置是否符合标准,对膜片进行标定和老化处理。

#### 5.14.4.4 贯入设备应满足下列要求:

(1) 贯入设备的额定起拔力不小于额定贯入力的 120%;贯入和起拔时,施力作用线垂直基座基准面;

(2) 探杆采用高强度无缝钢管,其屈服强度不小于 600MPa,工作截面尺寸与贯入主机的额定贯入力相匹配,探杆弯曲度不大于 0.2%,探杆两端螺纹轴线的同轴度公差为 0.1mm,探杆无裂纹和损伤。

#### 5.14.4.5 压力源应安装压力调节器,高压气体应为干燥的氮气。

5.14.5 试验前应检查测量系统、贯入设备和压力源,使之满足试验要求。

5.14.6 试验时,应以匀速将探头贯入土中,贯入速率宜为  $2\text{cm/s} \pm 0.5\text{cm/s}$ 。

5.14.7 试验深度应以膜片中心为基准点,探头达到预定深度后,应以匀速加压或减压测定膜片膨胀至 0.05mm、1.10mm 和回到 0.05mm 的压力  $A$ 、 $B$ 、 $C$  值。

#### 5.14.8 测读压力值应符合下列规定:

(1) 扁铲探头贯入至预定深度,蜂鸣器鸣响(电流计动作),关闭排气阀,慢慢打开微调阀,缓慢增加压力,在蜂鸣器和电流计停止响动瞬间,读取压力  $A$  值;

(2) 压力从零到  $A$ ,加压时间控制在 15s 左右;若试验土层均匀, $A$  值从已测的上一点值预估,低于预估值阶段快速加压,然后缓慢加压到  $A$ ;

(3) 记录  $A$  值后,继续缓慢加压,待蜂鸣器鸣响瞬间,读取压力  $B$  值;

(4) 记录  $B$  值后,快速减压至蜂鸣器停响为止,再缓慢卸掉剩余压力,蜂鸣器再响时,读取压力  $C$  值;

(5) 试验点间距取 20cm ~ 50cm, $C$  压力值每隔 1.0m ~ 2.0m 测读一次。

5.14.9 测试过程中,不应松动、碰撞探杆,也不得施加使探杆产生上、下位移的力。

5.14.10 试验遇下列情况之一者,应停止贯入,并在记录表上注明:

(1) 贯入主机的负荷达到其额定荷载的 120%;

(2) 贯入时探杆出现明显弯曲;

(3) 反力装置失效;

(4) 无信号或测不到压力  $B$  值,或  $B$  值时有时无;

(5) 气电管路破裂或被堵塞;

(6) 试验中校核( $B - A$ )值时出现  $B - A < \Delta A + \Delta B$ 。

5.14.11 每孔试验结束时应立即提升探杆,取出扁铲探头,并对膜片进行再标定,将标定的  $\Delta A$ 、 $\Delta B$  记录归档。

5.14.12 扁铲侧胀试验数据应按下列公式修正:

$$p_0 = 1.05(A - Z_m + \Delta A) - 0.05(B - Z_m - \Delta B) \quad (5.14.12-1)$$

$$p_1 = B - Z_m - \Delta B \quad (5.14.12-2)$$

$$p_2 = C - Z_m + \Delta A \quad (5.14.12-3)$$



式中  $p_0$ ——膜片向土中膨胀之前的接触压力(kPa);  
 $A$ ——膜片膨胀至 0.05mm 时气压的实测值(kPa);  
 $Z_m$ ——未调零时的压力表初读数(kPa);  
 $\Delta A$ 、 $\Delta B$ ——空气中标定膜片分别膨胀至 0.05mm、1.10mm 时的气压实测值(kPa);  
 $B$ ——膜片膨胀至 1.10mm 时气压的实测值(kPa);  
 $p_1$ ——膜片膨胀至 1.10mm 时的压力(kPa);  
 $p_2$ ——膜片回到 0.05mm 时的终止压力(kPa);  
 $C$ ——膜片回到 0.05mm 时气压的实测量(kPa)。

**5.14.13** 应根据  $p_0$ 、 $p_1$  和  $p_2$  按下列公式计算侧胀模量、水平应力指数、土类指数、侧胀孔压指数:

$$E_D = 34.7(p_1 - p_0) \quad (5.14.13-1)$$

$$K_D = \frac{p_0 - u_w}{\sigma'_{v0}} \quad (5.14.13-2)$$

$$I_D = \frac{p_1 - p_0}{p_0 - u_w} \quad (5.14.13-3)$$

$$U_D = \frac{p_2 - u_w}{p_0 - u_w} \quad (5.14.13-4)$$

式中  $E_D$ ——侧胀模量(kPa);  
 $p_1$ ——膜片膨胀至 1.10mm 时的压力(kPa);  
 $p_0$ ——膜片向土中膨胀之前的接触压力(kPa);  
 $K_D$ ——水平应力指数;  
 $u_w$ ——试验深度处的静水压力(kPa);  
 $\sigma'_{v0}$ ——试验深度处土的有效自重压力(kPa);  
 $I_D$ ——土类指数;  
 $U_D$ ——侧胀孔压指数。

## 5.15 基底摩擦系数试验

**5.15.1** 基底摩擦系数试验可用于测试平底混凝土板与地基土接触面上的摩擦系数。

**5.15.2** 试验应在建筑物基底设计高程上进行。如果地面上的土质情况与基底处的相同,亦可在地面上进行。

**5.15.3** 基底摩擦试验应采取试验地点的地基土样进行必要的室内测定,测定内容应包括抗剪强度、密度、含水率、液限、塑限等。

**5.15.4** 试验主要仪器设备应由千斤顶、压力表、拉力计、百分表和辅助设备等组成,并应符合下列规定:

- (1) 附压力表的千斤顶 4~6 个,起重量 150kN~200kN;压力表为 1.5 级;
- (2) 拉力计的量程为 0kN~100kN,最小分度值为全量程的 1.0%;
- (3) 百分表 2~4 个,量程 10mm~25mm,最小分度值 0.01mm;

(4) 辅助设备包括钢丝绳、滑轮、三脚架、锚座、荷重台、起重葫芦、秒表、土锚、工字梁、槽钢、垫块、滚珠轴承、链条钳等。

**5.15.5** 试验的压力表、拉力计和百分表应按有关规定进行检定。

**5.15.6** 试验应根据设备条件确定试验方案,可采取应力控制或应变控制方案,并选择适当的地点,整平足够的试验场地。

**5.15.7** 试验的试块应按原型建筑物所设计的混凝土标号,在现场浇注或预制试验用的混凝土块。在混凝土试块浇注后,地基若是黏性土时,应使土浸水饱和。为便于地基充分浸水,在浇注时宜预留竖向小孔若干个。试块养护约 7 天后方可使用。

**5.15.8** 试验开始前,应检查设备的灵活性和支撑设备的可靠性。

**5.15.9** 试验应根据设计荷重来确定最大的垂直压力,并以此按等量分成 3~4 级垂直压力进行试验。垂直压力施加可采用如下方法:

(1) 若采用重物加荷时,先在混凝土试块上搁置加荷平台,均匀地逐渐加上重物,避免加荷时发生偏心现象;

(2) 若采用千斤顶加荷,架设好反力装置,按顺序装上千斤顶和滚珠轴承,作用力位于试体的中心。

**5.15.10** 试验施加垂直压力后,应让土体在此压力下进行压缩,当垂直变形不大于 0.01mm/h,架设测试水平位移的百分表即可开始剪切。

**5.15.11** 试验剪切时施加水平力的速率应适当选择,可每隔 1min 施加水平力 1 次,控制试验在 20min 内剪完。施加水平力可按下列方法:

(1) 若采用应力控制时用滑轮组施加,于施加水平力的加载平台逐级加荷,并用拉力计计量;第一级加荷约为总垂直荷载的 1/10,以后逐级减少,使其剪切破坏时的最后一级荷载约为垂直荷载的 1/20;先用起重葫芦将加荷平台吊起,待加荷时再徐徐放下,避免加载引起冲击力;

(2) 若采用应变控制时用千斤顶加荷,根据土试体面积和千斤顶活塞面积的大小,事先算出千斤顶的出力,然后控制千斤顶上压力表的读数,保证每级剪切力的大小在规定的数值上。

**5.15.12** 试验在施加每一级水平力时,均应测记剪切力和土试块的水平位移量及垂直位移量。位移量应在加下一级水平力前测试,同时观测周围土的变形现象。当剪切变形急剧增长或剪切变形量达试体尺寸的 1/10 时,即认为土体已经破坏,可停止试验。

**5.15.13** 重复第 5.15.10 条~第 5.15.12 条,测定不同垂直压力下试块的抗剪强度。

**5.15.14** 试验资料整理应符合下列规定。

**5.15.14.1** 作用于试块上的垂直压力应按下列公式计算:

(1) 采用重物加载按下式计算;

$$\sigma = \frac{W}{A} \quad (5.15.14-1)$$

式中  $\sigma$ ——作用于试块上的垂直压力(kPa);

$W$ ——作用于加荷台上的总荷载(kN);



$A$ ——试体或混凝土试块的面积( $\text{m}^2$ );

(2)采用千斤顶法加载按下式计算。

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5.15.14-2)$$

式中  $\sigma$ ——垂直千斤顶上压力表的读数(kPa);

$F$ ——作用于试块上的垂直总压力(kN);

$A$ ——试体或混凝土试块的面积( $\text{m}^2$ )。

**5.15.14.2** 土体剪应力或抗滑强度应按下式计算:

$$\tau = \frac{F_H}{A} \quad (5.15.14-3)$$

$$s = \frac{F_H}{A} \quad (5.15.14-4)$$

式中  $\tau$ ——土体的剪应力(kPa);

$s$ ——土体的抗滑强度(kPa);

$F_H$ ——试体或地基土破坏时的水平力(kN),当采用滑轮组加荷时,根据滑轮组合计算求得,当用千斤顶加载时,则为水平千斤顶上压力表的读数乘千斤顶活塞面积;

$A$ ——土试体或混凝土试块的面积( $\text{m}^2$ )。

**5.15.14.3** 绘制剪应力与剪切位移曲线,应按现行国家标准《岩土工程勘察规范》(GB50021)的要求确定比例强度、屈服强度和峰值强度。

**5.15.14.4** 根据不同垂直压力的试验,应以抗剪强度为纵坐标,垂直压力为横坐标,绘制抗剪强度与垂直压力关系曲线,确定相应的强度参数。

**5.15.15** 摩擦系数为不同垂直荷重下的最大水平荷重与垂直荷重的比值。

## 5.16 现场冻土融化压缩试验

**5.16.1** 现场冻土融化压缩试验可用于除漂石以外的各类冻土。

**5.16.2** 试验应在现场试坑内进行。试坑深度不应小于季节融化深度,对于非衔接的多年冻土应等于或超过多年冻土层的上限深度。试坑底面积不应小于 $2\text{m} \times 2\text{m}$ 。

**5.16.3** 试验前应进行冻结土层的岩性和冷生构造的描述,并取样进行物理性质试验。

**5.16.4** 主要仪器设备应符合下列规定:

(1)内热式传压钢板为圆形或方形的中空式平板,有足够刚度,承受上部荷载时不发生变形,面积不小于 $5000\text{cm}^2$ ;

(2)加热系统根据加热方式和要求确定;传压板加热用电热或水(汽)热,加热均匀,加热温度不超过 $90^\circ\text{C}$ ;传压板周围形成一定的融化圈,其宽度不小于传压板直径的0.3倍;

(3)加荷系统通过传压杆自设在坑顶上的加荷装置将荷载传递到试验位置;加荷方式采用千斤顶或压块;当冻土的总含水率超过液限时,加荷装置的压重不大于传压板底面



高程处的原始压力；

(4) 沉降测量系统采用百分表或位移传感器,最小分度值不大于 0.1mm;

(5) 温度测量系统由热电偶及数字电压表组成,最小分度值为 0.1℃。

**5.16.5** 试验前应按下下列步骤进行试验准备和仪器设备的安装:

(1) 开挖试坑,整平坑底面,不破坏基土,必要时进行坑壁保护;

(2) 在传压板的边侧打钻孔,孔径 3cm ~ 5cm,孔深以 50cm 为宜;将五支热电偶测温端自下而上每隔 10cm 逐个放入孔内,并用黏土填实钻孔;

(3) 坑底面铺砂找平,铺砂厚度不大于 2cm;

(4) 将传压板放置在坑底中央砂面上;

(5) 安装加荷装置,使加荷点处于传压板中心部位;

(6) 在传压板周边等距安装 3 个沉降位移计;

(7) 接通加热、测温系统,并进行安全和安装可靠性检查后,向传压板施加等于该处上部原始土层的压力且不小于 50kPa,直至传压板沉降稳定后,调整位移计至零读数,做好记录。

**5.16.6** 试验应按下下列步骤进行:

(1) 施加等于原始土层的上覆压力;接通电源,使传压板下和周围冻土缓慢均匀融化;每隔 1h 测记一次土温和位移;

(2) 当融化深度达到 25cm ~ 30cm 时,切断电源停止加热;用钢钎探测一次融化深度,并继续测记土温和位移;当融化深度接近 40cm 时,每 15min 测记一次融化深度;当 0℃ 温度达到 40cm 时测记位移量,并用钢钎测记一次融化深度;

(3) 当停止加热后,依靠余热不能使传压板下的冻土继续融化达到 0.5 倍传压板直径的深度时,继续补热,直至满足这一要求;

(4) 经上述步骤达到融沉稳定后,开始逐级加荷进行压缩试验;加荷等级视实际工程需要确定,对黏性土取 50kPa,砂土取 75kPa,含巨粒土取 100kPa,最后一级荷载比上层的计算压力大 100kPa ~ 200kPa;

(5) 施加一级荷载后,每 10min、20min、30min、60min 测记一次位移计示值,此后每 1h 测记一次,直至传压板沉降稳定后再加下一级荷载;

(6) 取 3 个位移计测得沉降量的平均值作为本级荷载的沉降量;

(7) 沉降稳定标准对黏性土取 0.05mm/h,砂和含巨粒土取 0.1mm/h;

(8) 试验结束后,拆除加荷装置,清除垫砂和 10cm 厚表土,然后取 2 ~ 3 个融化压实土样,用作含水率、密度及其他必要的试验;挖除其余融化压实土测量融化圈。

**5.16.7** 进行下一土层的试验时,应刮除表面 5cm ~ 10cm 土层。

**5.16.8** 融沉系数应按下式计算:

$$a_0 = \frac{S_0}{H_0} \quad (5.16.8)$$

式中  $a_0$ ——融沉系数;

$S_0$ ——冻土融沉( $p \approx 0$ )阶段的沉降量(cm);

$H_0$ ——融化深度 (cm)。

**5.16.9** 融化压缩系数应按下列公式计算：

$$a_{tc} = \frac{\Delta\delta}{\Delta p} K \quad (5.16.9-1)$$

$$\Delta\delta = \frac{S_{i+1} - S_i}{H_0} \quad (5.16.9-2)$$

式中  $a_{tc}$ ——融化压缩系数；

$\Delta\delta$ ——相应于某一压力范围的相对沉降；

$\Delta p$ ——压力变化值 (kPa)；

$K$ ——系数，黏土为 1.0，粉质黏土为 1.2，砂土为 1.3，巨粒土为 1.35；

$S_{i+1}, S_i$ ——第  $i+1$ 、 $i$  级荷载作用下的沉降量 (cm)；

$H_0$ ——融化深度 (cm)。

**5.16.10** 绘制相对沉降量与压力关系曲线时应以相对沉降量为纵坐标，压力为横坐标，见图 5.16.10。

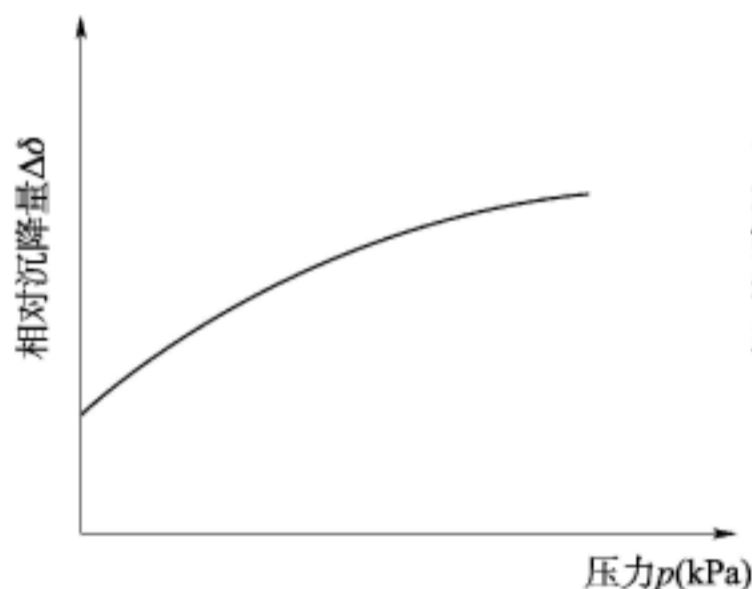


图 5.16.10 单位变形量 - 压力关系曲线

**5.16.11** 试验的记录格式可采用附录 A 中表 A.0.60。

## 6 基桩检测

### 6.1 一般规定

**6.1.1** 基桩检测方法应根据检测目的、检测方法的适应性、桩基的设计条件、成桩工艺等按表 6.1.1 合理选择,必要时应采用两种或多种检测方法。

表 6.1.1 检测方法及检测目的

检测方法	检测目的
高应变法	判定单桩竖向抗压承载力是否满足设计要求; 检测桩身缺陷及其位置,判定桩身完整性类别; 分析桩侧和桩端土阻力; 进行打桩过程监控
低应变法	检测桩身缺陷及其位置,判定桩身完整性类别
单桩轴向抗压静载试验	确定单桩轴向抗压极限承载力; 判定竖向抗压承载力是否满足设计要求; 通过桩身应变、轴向位移测试,测定桩侧、桩端阻力; 验证高应变法的单桩竖向抗压承载力检测结果
单桩轴向抗拔静载试验	确定单桩竖向抗拔极限承载力; 判定竖向抗拔承载力是否满足设计要求; 通过桩身应变、轴向位移测试,测定桩的抗拔侧阻力
单桩水平静载试验	确定单桩水平临界荷载和极限承载力,推定土抗力参数; 判定水平承载力或水平位移是否满足设计要求; 通过桩身应变、位移测试,测定桩身弯矩
声波透射法	检测灌注桩桩身缺陷及其位置,判定桩身完整性类别
钻芯法	检测灌注桩桩长、桩身混凝土强度、桩底沉渣厚度,判定或鉴别桩端持力层岩土性状,判定桩身完整性类别

**6.1.2** 进行单桩轴向抗压静载荷试验的桩,宜同时进行高应变法比对试验,为后续基桩的检验提供依据。

**6.1.3** 受检桩选择应均匀、随机,具有代表性。出现下列情况的桩应进行检测:

- (1) 施工质量有疑问的桩;
- (2) 局部地基条件出现异常的桩;
- (3) 承载力验收检测时完整性检测中判定的Ⅲ类桩;
- (4) 设计方认为重要的桩;
- (5) 施工工艺不同的桩。

**6.1.4** 打入式预制桩有下列要求之一时,应采用高应变法进行试打桩的沉桩过程监测:

- (1) 控制打桩过程中的桩身应力;



- (2) 确定工艺参数;
- (3) 选择沉桩设备;
- (4) 选择桩端持力层。

**6.1.5** 设计需要时,应进行单桩轴向抗压、轴向抗拔或单桩水平静载试验确定轴向抗压、轴向抗拔或水平承载力。

**6.1.6** 对施工或检测结果有疑问时,应进行验证检测与扩大检测,且应符合下列规定。

**6.1.6.1** 当需要对单桩轴向抗压承载力进行验证时,验证方法应采用单桩轴向抗压静载荷试验。

**6.1.6.2** 桩身浅部缺陷可采用开挖验证。

**6.1.6.3** 桩身或接头存在裂隙的预制桩可采用高应变法验证,管桩可采用孔内摄像的方法验证。

**6.1.6.4** 单孔钻芯检测发现桩身混凝土质量问题时,宜在同一基桩增加钻芯验证并根据前、后钻芯结果对受检桩重新评价。

**6.1.6.5** 对低应变法检测中不能明确完整性类别的桩或Ⅲ类桩,可根据实际情况采用静载法、钻芯法、高应变法、开挖等适宜的方法验证检测。

**6.1.6.6** 桩身混凝土实体强度可在桩顶浅部钻取芯样验证。

**6.1.6.7** 当采用低应变法、高应变法和声波透射法检测桩身完整性发现有Ⅲ、Ⅳ类桩存在,且检测数量覆盖的范围不能为补强或设计变更方案提供可靠依据时,宜采用原检测方法,在未检桩中继续扩大检测,其中,声波透射法可改用钻芯法。

**6.1.6.8** 当单桩承载力或钻芯法检测结果不能满足设计要求时,应分析原因并扩大检测。

**6.1.7** 试验应进行下列准备工作:

- (1) 收集工程总体布置的有关资料;
- (2) 收集工程所在区域的地质、地形、水文和气象等有关资料;
- (3) 收集邻近工程已有的试桩资料;
- (4) 编制试验大纲并进行试验设计。

**6.1.8** 基桩检测报告的主要内容可参照附录 B。

## 6.2 高应变法

**6.2.1** 高应变法可用于检测混凝土预制桩、灌注桩、钢桩以及组合桩的单桩轴向抗压承载力和桩身完整性,也可用于监测打入桩沉桩时的桩身应力和锤击能量。

**6.2.2** 检测桩的数量应根据地质条件和桩的类型确定,宜取总桩数的 2% ~ 5%,并不得少于 5 根。对地质条件复杂、桩的种类较多或其他特殊情况,宜取上限。

**6.2.3** 当进行桩的轴向抗压极限承载力检测时,检测桩在沉桩、成桩后至检测时的间歇时间,对黏性土不应少于 14d,对砂土不应少于 3d;对水冲沉桩不应少于 28d,对灌注桩,除应满足上述有关时间规定外,其混凝土的强度等级尚应达到设计要求。

**6.2.4** 仪器设备应符合下列规定。

**6.2.4.1** 检测仪器的主要技术性能指标不应低于现行行业标准《基桩动测仪》(JG/T 3055)中规定的2级标准,且应具有保存、显示实测力与速度信号和信号处理与分析的功能。

**6.2.4.2** 检测仪器应定期进行标定,标定的周期应符合国家计量法规的有关规定。

**6.2.4.3** 高应变检测专用重锤应整体铸造、材质均匀、形状对称、锤底平整,高径比或高宽比不得小于1。进行承载力检测时,锤的重量应大于预估单桩竖向抗压极限承载力的1.0%。

**6.2.4.4** 除导杆式柴油锤、振动锤外,筒式柴油锤、液压锤、蒸汽锤等具有导向装置的打桩机械均可作为锤击设备。

**6.2.4.5** 检测时,桩的贯入度可采用精密水准仪等光学仪器测定。

**6.2.5** 检测前的准备工作应符合下列规定。

**6.2.5.1** 检测桩顶面应平整,桩顶高度应满足锤击装置的要求,桩头应能承受重锤的冲击,对已受损或其他原因不能保证锤击能量正常传递的桩头应在检测前进行处理。混凝土桩头的处理方法可按附录C的规定执行。

**6.2.5.2** 桩顶应设置桩垫,桩垫宜采用胶合板、木板、纤维板或棕绳等材质均匀的材料。

**6.2.5.3** 传感器的安装应符合附录D的规定。

**6.2.6** 现场检测参数的取值应符合下列规定。

**6.2.6.1** 检测桩的截面积、桩身材料质量密度和弹性模量应在测点处取值。

**6.2.6.2** 桩长应取传感器安装位置至桩底间的距离。

**6.2.6.3** 桩身应力波波速的设定应满足下列要求:

(1)对钢桩,波速值设定为5120m/s;

(2)对混凝土桩,根据经验波速设定,并根据实测波速进行调整。

**6.2.6.4** 桩身材料质量密度的设定应符合下列规定:

(1)对钢桩,质量密度设定为 $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ;

(2)对混凝土预制桩,质量密度设定为 $2.45 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \sim 2.60 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ;

(3)对混凝土灌注桩,质量密度设定为 $2.40 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

**6.2.6.5** 桩身材料弹性模量设定值应按式(6.2.6)计算:

$$E = \rho \cdot c^2 \times 10^{-6} \quad (6.2.6)$$

式中  $E$ ——桩身材料弹性模量(MPa);

$\rho$ ——桩身材料质量密度( $\text{kg/m}^3$ );

$c$ ——桩身应力波波速(m/s)。

**6.2.6.6** 力传感器和加速度传感器标定系数应采用国家法定计量机构开具的标定系数。

**6.2.7** 当检测过程中出现下列情况之一时,应及时检查、调整或停止检测:

(1)测试仪器失灵;

(2)传感器松动、测点处混凝土开裂、桩身出现明显缺陷且缺陷程度加剧;



(3) 测试信号异常或连续采集时信号无规律、离散性较大。

**6.2.8** 承载力检测时应实测桩的贯入度,单击贯入度宜在 2mm ~ 6mm 之间。

**6.2.9** 测试信号的选取应符合下列规定。

**6.2.9.1** 锤击后出现下列情况之一时,其信号不得作为承载力分析计算的依据:

- (1) 力的时程曲线最终未归零;
- (2) 锤击严重偏心,两侧力信号幅值相差超过 1 倍或一侧力信号呈现受拉状态;
- (3) 传感器出现故障;
- (4) 测点处混凝土开裂或出现明显塑性变形;
- (5) 其他信号异常情况。

**6.2.9.2** 分析计算轴向抗压承载力的信号,宜取锤击能量较大的前几锤信号。

**6.2.10** 分析计算前,应根据实测信号按下列方法确定平均波速。

**6.2.10.1** 桩底反射明显时,可根据下列方法确定波速:

(1) 根据速度波第一峰上升沿的起点到桩底反射峰上升沿的起点之间的时差与已知桩长值确定平均波速,见图 6.2.10-1;

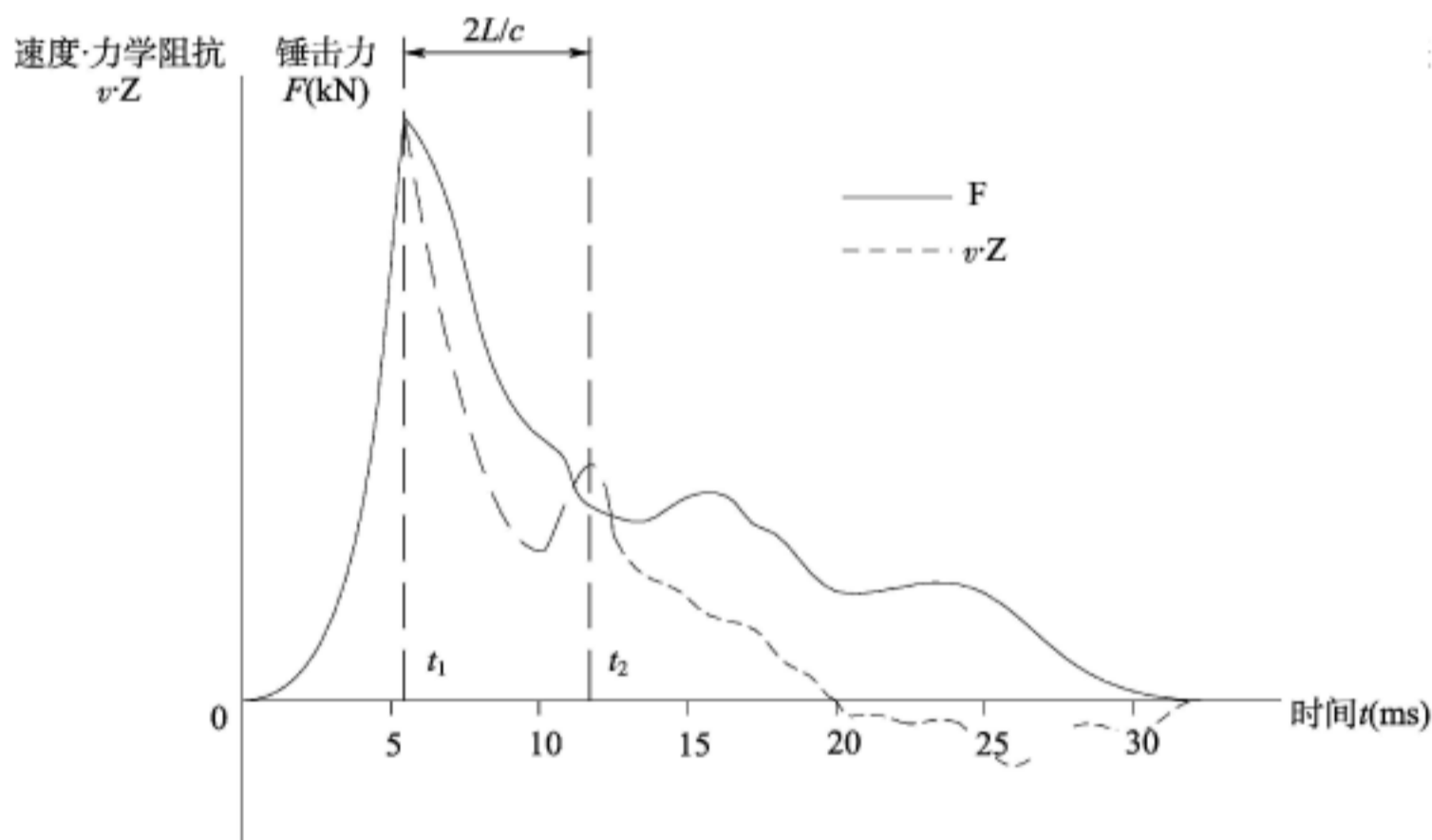


图 6.2.10-1 速度波法确定桩身波速示意图

$F$ —某时刻测点处实测的锤击力(kN); $L$ —测点以下桩长(m); $v$ —某时刻测点处实测的速度(m/s); $Z$ —桩身截面力学阻抗(kN·s/m); $t$ —锤击力作用下应力波反射到测点处的时间(ms); $c$ —桩身应力波波速(m/s)

(2) 根据实测信号下行波上升沿的起点和上行波下降沿的起点之间的时差与已知桩长值确定平均波速,见图 6.2.10-2,下行波和上行波的幅值按式(6.2.10-1)和式(6.2.10-2)计算:

$$F_d = \frac{1}{2}(F + v \cdot Z) \quad (6.2.10-1)$$

$$F_u = \frac{1}{2}(F - v \cdot Z) \quad (6.2.10-2)$$

式中  $F_d$ ——某时刻测点处测得的下行波的幅值(kN);



$F$ ——某时刻测点处实测的锤击力(kN)；

$v$ ——某时刻测点处实测的速度(m/s)；

$Z$ ——桩身截面力学阻抗(kN·s/m)；

$F_u$ ——某时刻测点处测得的上行波的幅值(kN)。

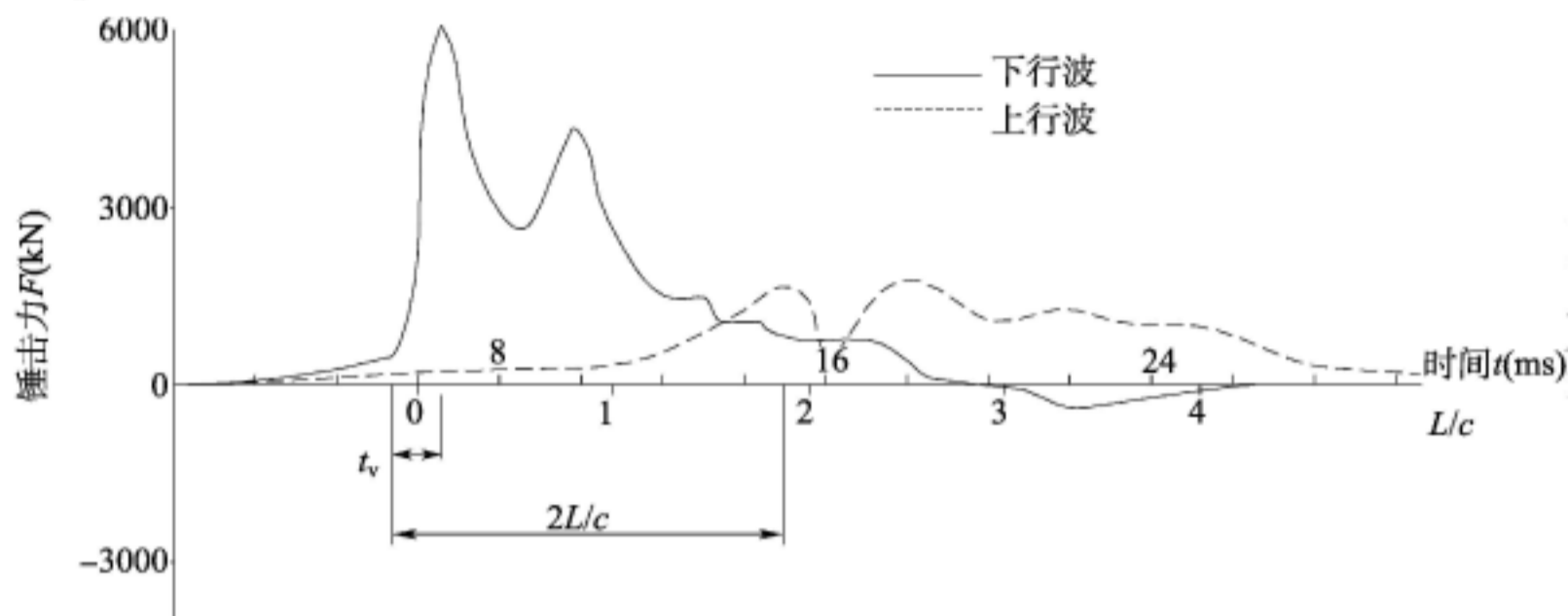


图 6.2.10-2 下行波法确定桩身波速示意图

$F$ —某时刻测点处实测的锤击力(MN); $L$ —测点以下桩长(m); $t$ —锤击力作用下应力波反射到测点处的时间(ms); $c$ —桩身应力波波速(m/s)

**6.2.10.2** 桩底反射信号不明显时,宜根据桩长、混凝土波速的经验值和邻近桩的波速值综合确定。

**6.2.11** 高应变实测的力和速度信号第一峰起始比例失调时,不得进行比例调整。

**6.2.12** 高应变法在出现下列情况时,应进一步验证其轴向抗压承载力:

- (1) 桩身存在缺陷,无法判定桩的竖向承载力时,采用静载荷试验方法;
- (2) 触变效应的影响,预制桩在多次锤击下承载力下降时,采用静载荷试验方法;
- (3) 单击贯入度大,桩底同向反射强烈且反射峰较宽,侧阻力波、端阻力波反射弱,即波形表现出竖向承载性状明显与勘察报告中的地基条件不符合时,采用静载荷试验方法;
- (4) 嵌岩桩桩底同向反射强烈,且在时间 $\frac{2L}{c}$ 后无明显端阻力反射时,采用静载荷试验

验证或采用钻芯法核验。

**6.2.13** 单桩承载力的确定应符合下列规定。

**6.2.13.1** 确定单桩承载力宜优先采用实测曲线拟合法,并应满足下列要求:

- (1) 桩和土的力学模型能反映桩土系统应力应变的实际性状;
- (2) 用实测的速度、力或上行波信号作为边界条件进行拟合;
- (3) 曲线拟合时间段长度不小于 $\frac{5L}{c}$ ;
- (4) 拟合分析所选参数在岩土工程的合理范围内,各单元所选取的土的最大弹性位移值不得超过相应桩单元的最大计算位移值;
- (5) 最终的拟合曲线与实测曲线基本吻合;
- (6) 贯入度的计算值与实测值接近。

**6.2.13.2** 当采用 CASE 法确定单桩承载力时,应满足下列要求:

(1) 检测桩材质均匀、截面相等或基本相等;

(2) 根据同一工程中相同类型桩的动、静对比试验确定土的阻尼系数;当不具备动、静对比试验条件时,通过实测曲线拟合法确定土的阻尼系数,其拟合桩数不少于该工程动测桩数的 30%,且不少于 5 根;

(3) 单桩承载力按式(6.2.13-1)、式(6.2.13-2)和式(6.2.13-3)计算;

$$R_c = \frac{1}{2}(1 - J_c)[F(t_1) + Z \cdot v(t_1)] + \frac{1}{2}(1 + J_c)[F(t_2) - Z \cdot v(t_2)] \quad (6.2.13-1)$$

$$Z = \frac{A \cdot E}{c} \quad (6.2.13-2)$$

$$t_2 = t_1 + \frac{2L}{c} \quad (6.2.13-3)$$

式中  $R_c$ ——CASE 法确定的单桩极限承载力(kN);

$J_c$ ——CASE 法阻尼系数;

$F$ ——某时刻测点处实测的锤击力(kN);

$t_1, t_2$ ——速度波第一峰和第二峰对应的时刻(ms);

$F(t_1), F(t_2)$ —— $t_1, t_2$  时刻测点处实测的锤击力(kN);

$v(t_1), v(t_2)$ —— $t_1, t_2$  时刻测点处实测的速度(m/s);

$Z$ ——桩身截面力学阻抗(kN·s/m);

$A$ ——桩身截面积( $m^2$ );

$E$ ——桩身材料弹性模量(MPa);

$L$ ——测点以下桩长(m);

$c$ ——桩身应力波波速(m/s);

(4) 对于土阻力明显滞后于  $t_1 + \frac{2L}{c}$  时刻发挥的情况,将式(6.2.13-1)中的  $t_1$  延时,确定  $R_c$  的最大值;

(5) 对于土阻力先于  $t_1 + \frac{2L}{c}$  时刻发挥并产生桩中上部强烈反弹的情况,通过计入卸载回弹的土阻力对  $R_c$  进行修正。

**6.2.14** 桩身完整性评价可采用  $\beta$  法,按表 6.2.14 进行,并应符合下列规定。

表 6.2.14 桩身完整性评价标准

$\beta$ 值	完整性评价	完整性等级
$\beta = 1.0$	完整桩	I
$0.8 \leq \beta < 1.0$	基本完整桩	II
$0.6 \leq \beta < 0.8$	明显缺陷桩	III
$\beta < 0.6$	严重缺陷桩或断桩	IV

**6.2.14.1** 使用表 6.2.14 时应结合桩身性状综合判别。

**6.2.14.2** 等截面桩且缺陷断面位置  $x$  以上部位土阻力未出现卸载回弹时, 桩身完整性系数和桩身缺陷断面位置应分别按式(6.2.14-1)和式(6.2.14-2)计算。

$$\beta = \frac{[F(t_1) + Z \cdot v(t_1)] - 2\Delta R + [F(t_x) - Z \cdot v(t_x)]}{[F(t_1) + Z \cdot v(t_1)] - [F(t_x) - Z \cdot v(t_x)]} \quad (6.2.14-1)$$

$$x = \frac{1}{2000}(t_x - t_1) \cdot c \quad (6.2.14-2)$$

式中  $\beta$ ——桩身完整性系数;  
 $t_1$ ——速度波第一峰对应的时刻(ms);  
 $t_x$ ——速度波缺陷反射峰对应的时刻(ms);  
 $F(t_1)$ 、 $F(t_x)$ —— $t_1$ 、 $t_x$ 时刻测点处实测的锤击力(kN);  
 $v(t_1)$ 、 $v(t_x)$ —— $t_1$ 、 $t_x$ 时刻测点处实测的速度(m/s);  
 $Z$ ——桩身截面力学阻抗(kN·s/m);  
 $\Delta R$ ——缺陷以上部位土阻力估计值(kN), 等于缺陷反射起始点的锤击力减去速度与桩身截面力学阻抗的乘积, 见图 6.2.14;  
 $c$ ——桩身应力波波速(m/s);  
 $x$ ——缺陷断面位置与测点间的距离(m)。

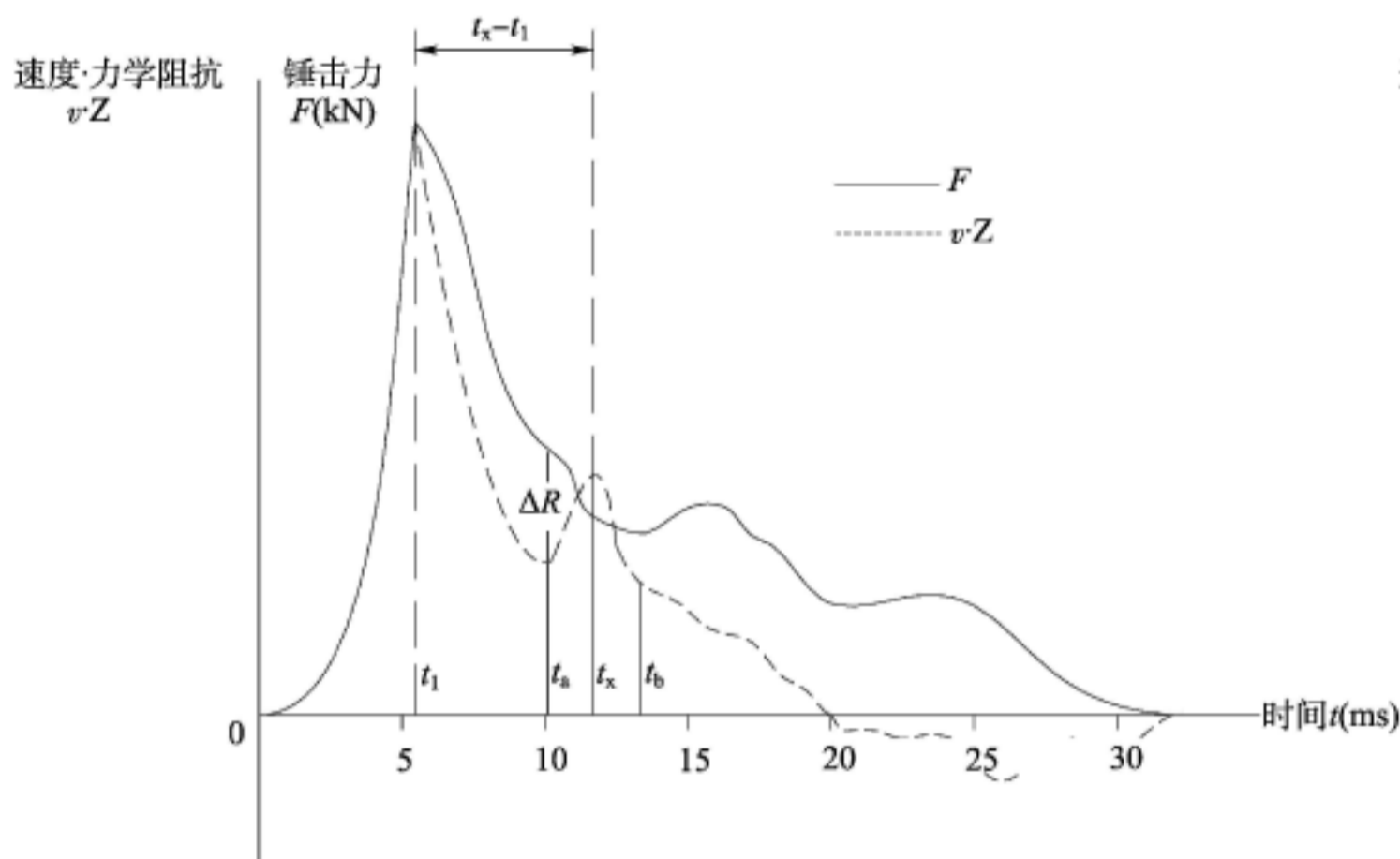


图 6.2.14 桩身完整性系数计算示意图

$F$ -某时刻测点处实测的锤击力(kN);  $L$ -测点以下桩长(m);  $v$ -某时刻测点处实测的速度(m/s);  $Z$ -桩身截面力学阻抗(kN·s/m);  $t$ -锤击力作用下应力波反射到测点处的时间(ms);  $c$ -桩身应力波波速(m/s)

**6.2.14.3** 在判别桩的缺陷位置或缺陷程度时, 应对实测力信号和速度信号的判别分析, 并观测在连续锤击情况下缺陷程度的变化情况。

**6.2.14.4** 出现下列情况之一时, 桩身完整性评价应按工程地质条件和施工工艺, 结合实测曲线拟合法或其他检测方法综合进行:

- (1) 桩身有扩径;
- (2) 混凝土灌注桩桩身截面渐变或多变;



(3) 力和速度曲线在峰值附近比例失调, 桩身浅部有缺陷;

(4) 力波上升缓慢, 力与速度曲线比例失调;

(5) 缺陷断面位置以上部位的土阻力出现卸载回弹。

**6.2.15** 高应变法检测结果具有下列情况之一者应判定为不合格:

(1) 轴向极限承载力不满足设计要求;

(2) 桩身完整性类别为Ⅲ类和Ⅳ类桩。

**6.2.16** 进行试打桩测试时, 应符合下列规定。

**6.2.16.1** 试打桩位置的工程地质条件应具有代表性, 按实际需要确定所需测试的土层和高程。

**6.2.16.2** 试打桩的桩型、材质、沉桩锤型、桩锤落距和垫层材料应与工程桩相同。

**6.2.16.3** 桩端持力层宜根据试打桩实测承载力与贯入度的关系, 结合场地工程地质勘察资料综合确定。

**6.2.16.4** 打桩终锤标准宜通过试打桩测得的承载力与贯入度的关系, 以承载力为基准制定, 代表桩数不宜少于 3 根。

**6.2.16.5** 根据桩的试打测试所估算的桩的承载力值, 应为初打测得的静土阻力值与地基土的强度恢复系数的乘积, 并应进行复打测试校核, 复打桩数不宜少于 3 根, 复打至初打的间歇时间应符合第 6.2.3 条的规定。

**6.2.17** 桩身锤击应力监测应包括桩身锤击拉应力和锤击压应力两部分。桩身应力最大值的监测应符合下列规定。

**6.2.17.1** 桩身锤击拉应力宜在预计桩端进入软土层或桩端穿过硬土层进入软土层时进行测试。

**6.2.17.2** 桩身锤击压应力宜在桩端进入硬土层或桩侧土阻力较大时进行测试。

**6.2.18** 最大桩身锤击拉应力可按式(6.2.18-1)和式(6.2.18-2)计算:

$$\sigma_{10} = \frac{1}{2A} \left[ Z \cdot v \left( t_1 + \frac{2L}{c} \right) - F \left( t_1 + \frac{2L}{c} \right) - Z \cdot v(t_y) - F(t_y) \right] \quad (6.2.18-1)$$

$$t_y = t_1 + \frac{2(L-X)}{c} \quad (6.2.18-2)$$

式中  $\sigma_{10}$ ——最大桩身锤击拉应力(kPa);

$A$ ——桩身截面面积( $\text{m}^2$ );

$Z$ ——桩身截面力学阻抗( $\text{kN} \cdot \text{s}/\text{m}$ );

$t_1$ ——速度波第一峰对应的时刻(ms);

$t_y$ ——速度波缺陷反射峰对应的时刻(ms);

$v \left( t_1 + \frac{2L}{c} \right)$ 、 $v(t_y)$ —— $t_1 + \frac{2L}{c}$ 、 $t_y$ 时刻测点处实测的速度( $\text{m}/\text{s}$ );

$F \left( t_1 + \frac{2L}{c} \right)$ 、 $F(t_y)$ —— $t_1 + \frac{2L}{c}$ 、 $t_y$ 时刻测点处实测的锤击力(kN);

$c$ ——桩身应力波波速( $\text{m}/\text{s}$ );

$X$ ——与  $t_y$  时刻对应的计算点与测点间的距离(m)。

**6.2.19** 最大桩身锤击压应力可按式(6.2.19)计算:

$$\sigma_p = \frac{F_{\max}}{A} \quad (6.2.19)$$

式中  $\sigma_p$ ——最大桩身锤击压应力(kPa);

$F_{\max}$ ——实测的最大锤击力(kN);

$A$ ——桩身截面面积( $m^2$ )。

**6.2.20** 当打桩过程中突然出现贯入度骤减甚至拒锤时,应考虑与桩端接触的硬层对桩身锤击压应力的放大作用。

**6.2.21** 桩锤实际传递给桩的能量应按式(6.2.21)计算。

$$E_n = \int_0^T F \cdot V dt \quad (6.2.21)$$

式中  $E_n$ ——桩锤实际传递给桩的能量(kJ);

$T$ ——采样结束的时刻(s);

$F$ ——某时刻测点处实测的锤击力(kN);

$V$ ——某时刻测点处实测的速度(m/s)。

**6.2.22** 高应变法检测报告除应满足附录 B 的要求外,还应包括下列内容:

(1) 给出实测的力与速度信号曲线;

(2) 计算中实际采用的桩身波速值和 CASE 法阻尼系数;

(3) 实测曲线拟合法承载力或 CASE 法承载力;

(4) 采用实测曲线拟合法时所选用的各单元桩土模型参数、拟合曲线、土阻力沿桩身分布图;

(5) 测试时的实测贯入度;

(6) 试打桩和打桩监测时所采用的桩锤型号、桩垫类型;实测总锤击数、桩周静土阻力、桩身锤击拉应力和压应力、桩身完整性和桩锤实际传递到桩身的能量等参数与桩入土深度的关系、承载力与贯入度的关系;

(7) 检测桩合格性判定结论。

### 6.3 低应变法

**6.3.1** 低应变法可用于检测混凝土预制桩、灌注桩的桩身完整性,判定桩身缺陷的程度及位置。

**6.3.2** 低应变法检测应采用反射波法,其有效检测桩长范围应通过现场试验确定。

**6.3.3** 对单节预制混凝土桩,检测桩数不得低于总桩数的 10%,且不得少于 10 根。对多节预制混凝土桩,检测桩数不得低于总桩数的 20%,且不得少于 10 根。对混凝土灌注桩,当采用低应变动力检测法检测桩身完整性时,检测桩数应为总桩数的 100%。

**6.3.4** 对于沉桩中发生贯入度过大等异常情况或存在其他影响桩身结构可靠性因素的桩,应进行检测,检测数量不计入正常抽检比例内。



### 6.3.5 检测仪器设备应符合下列规定。

6.3.5.1 检测仪器的主要技术性能指标应符合现行行业标准《基桩动测仪》(JG/T 3055)的有关规定,并应具有信号显示、储存和处理分析功能。

6.3.5.2 检测仪器应定期进行标定,标定的周期应符合国家计量法规的有关规定。

6.3.5.3 激振设备应包括能激发宽脉冲和窄脉冲的力锤和锤垫,力锤可装有力传感器。

### 6.3.6 检测前的准备工作应符合下列规定。

6.3.6.1 检测桩桩身强度应不低于设计强度的70%,且不小于15MPa。

6.3.6.2 检测桩的桩顶应密实、平整,桩头处理应符合附录C的要求。

6.3.6.3 检测前应对电源、仪器设备、传感器、信号线等逐项进行检查,性能正常方可进行测试。

### 6.3.7 测试参数设定应符合下列规定。

6.3.7.1 时域信号记录的时间段长度应在 $\frac{2L}{c}$ 时刻后延续不少于5ms;幅频信号分析的频率范围上限不应小于2000Hz。

6.3.7.2 设定桩长应为桩顶测点至桩底的施工桩长,设定桩身截面积应为施工截面积。

6.3.7.3 桩身波速可根据本地区同类型桩的测试值初步设定。

6.3.7.4 采样时间间隔或采样频率应根据桩长、桩身波速和频域分辨率合理选择;时域信号采样点数不宜少于1024点。

6.3.7.5 传感器的设定值应按计量标定或校准结果设定。

### 6.3.8 传感器安装和激振操作应符合下列规定。

6.3.8.1 传感器安装应稳固并与桩顶垂直;用橡皮泥、凡士林或黄油等耦合剂粘结时,粘结效果宜通过实测波形判断。

6.3.8.2 最佳激振方式应通过试验选定。对实心桩,激振点宜选择在桩中心,检测点宜在距桩中心 $\frac{2}{3}$ 半径处;对空心桩,激振点和检测点宜选择在桩壁厚的 $\frac{1}{2}$ 处;对直径大于1.0m的桩,激振点不宜少于4处。激振点与传感器的距离不宜小于100mm,并应避开钢筋笼的主筋影响,激振应沿轴向进行。

6.3.8.3 既有结构下桩的检测,可采用桩侧切割小平台进行竖向激振,传感器安装于另一小平台或采用侧置传感器的方法进行。

6.3.8.4 激振力锤和锤垫的选择应通过现场敲击试验确定;桩底或桩身下部缺陷反射信号宜用宽脉冲获取,桩身上部缺陷反射信号宜用窄脉冲获取。

### 6.3.9 信号采集和筛选应符合下列规定。

6.3.9.1 不同检测点或多次实测时域信号一致性较差时,应分析其原因,选择有代表性的时域信号进行分析。

6.3.9.2 应根据实测信号反映的桩身完整性情况,确定是否需要增加检测点数量,或变换激振点和检测点位置。

6.3.9.3 每个检测点记录的有效信号不宜少于3锤。



**6.3.9.4** 当桩底反射信号不明显时,可对信号进行放大处理;有疑问的桩应改变激振设备或传感器位置进行多次检测,相互验证。

**6.3.10** 桩身应力波波速平均值的确定应符合下列规定。

**6.3.10.1** 当桩长已知、桩底反射信号明确时,在地基条件、桩型、成桩工艺相同的基桩中,选取不少于5根I类桩的桩身波速值按式(6.3.10-1)、式(6.3.10-2)和式(6.3.10-3)计算其平均值:

$$c_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i \quad (6.3.10-1)$$

$$c_i = \frac{2000L}{t_r} \quad (6.3.10-2)$$

$$c_i = 2L \cdot \Delta f \quad (6.3.10-3)$$

式中  $c_m$ ——桩身应力波波速的平均值(m/s);

$n$ ——参加应力波波速平均值计算的基桩数量( $n \geq 5$ );

$c_i$ ——第*i*根受检桩的桩身应力波波速值(m/s);

$L$ ——测点以下桩长(m);

$t_r$ ——桩底反射波到达的时间(ms),可由时域波形图上读取;

$\Delta f$ ——完整桩的特征频率(Hz),可由频谱图上读取。

**6.3.10.2** 当无法按上款确定时,应力波波速的平均值可根据本地区相同桩型及成桩工艺的其他桩基工程的实测值,结合桩身混凝土的骨料品种和强度等级综合确定。

**6.3.11** 桩身缺陷的断面位置应按式(6.3.11-1)和式(6.3.11-2)计算:

$$x = \frac{1}{2000} \cdot t'_x \cdot c_m \quad (6.3.11-1)$$

$$x = \frac{1}{2} \cdot \frac{c_m}{\Delta f'_x} \quad (6.3.11-2)$$

式中  $x$ ——桩身缺陷至传感器安装点间的距离(m);

$t'_x$ ——缺陷部位反射波到达时间(ms),可由时域波形图上读取;

$c_m$ ——桩身应力波波速的平均值(m/s);

$\Delta f'_x$ ——缺陷桩的特征频率(Hz),可由频谱图上读取。

**6.3.12** 桩身完整性应根据实测信号的波形、波速、相位、振幅和频率等特征,按表6.3.12的规定,并结合地质情况和施工过程进行综合评价。

表 6.3.12 桩身完整性评价标准

类别	完整性描述	完整性评价
I	检测波波形无异常反射、波速正常、桩身完好	完整桩
II	检测波波形有小畸变、波速基本正常、桩身有轻微缺陷、对桩的使用没有影响	基本完整桩
III	检测波波形出现异常反射、波速偏低、桩身有明显缺陷、对桩的使用有一定影响	明显缺陷桩
IV	检测波波形严重畸变、桩身有严重缺陷或断桩	严重缺陷桩或断桩

注:对同一场地、地质条件相近、桩型和成桩工艺相同的基桩,因桩端部分桩身阻抗与持力层阻抗相匹配导致实测信号无桩底反射波时,可按本场地同条件下有桩底反射波的其他桩实测信号判定桩身完整性类别。

**6.3.13** 桩身完整性类别为Ⅲ类桩、Ⅳ类桩应判定为不合格桩。

**6.3.14** 对桩身截面多变且变化幅度较大的灌注桩,应采用其他方法辅助验证低应变法检测的有效性。

**6.3.15** 对于嵌岩桩,桩底时域反射信号为单一反射波且与锤击脉冲信号同向时,应采取钻芯法、静载试验或高应变法核验桩端嵌岩情况。

**6.3.16** 低应变法检测报告除应满足附录 B 的要求外,还应包括下列内容:

- (1) 桩身完整性检测的实测信号曲线;
- (2) 桩身应力波波速取值;
- (3) 桩身完整性描述、缺陷的位置及桩身完整性类别;
- (4) 检测桩合格性判定结论。

## 6.4 单桩轴向抗压静载荷试验

**6.4.1** 单桩轴向抗压静载荷试验可用于锚桩法的试验桩轴向抗压极限承载力的确定或工程桩轴向抗压承载力的检验。

**6.4.2** 为设计提供依据时,试验桩的单桩轴向抗压静载荷试验应加载至破坏;检验工程桩的单桩轴向抗压承载力试验,最大加载量应达到设计要求,无设计要求时最大加载量不应小于单桩承载力特征值的 2.0 倍。

**6.4.3** 试验桩的数量应根据地质条件、桩的材质、桩径、桩长、桩尖型式和工程总桩数等确定。总桩数在 500 根以下,试桩数不应少于 2 根;总桩数每增加 500 根,宜增加 1 根试桩;地质条件复杂、桩的类型较多等情况可按地区经验酌情增加。

**6.4.4** 试验桩的位置应根据工程总体布置、工程进度、地质、地形、水文条件和设计要求等确定。试验桩的尺寸、入土深度和进入持力层的深度应具有代表性。

**6.4.5** 在距离试验桩 3m ~ 10m 范围内应具有钻孔资料。钻孔底标高和桩端标高的高程差不宜小于 3 ~ 5 倍桩径或桩宽,摩擦桩尚应符合下列规定。

**6.4.5.1** 一般黏性土宜取 5m ~ 8m。

**6.4.5.2** 老黏性土、中密和密实砂土宜取 3m ~ 5m。

**6.4.5.3** 碎石类土宜取 2m。

**6.4.6** 试桩、锚桩和基准桩的布置应符合下列规定。

**6.4.6.1** 锚桩应以试验桩为中心对称布置,宜采用四根锚桩作反力桩,四根锚杆呈正方形或矩形。

**6.4.6.2** 试验桩与锚桩、基准桩之间的中心距离不应小于 4 倍桩径或桩宽,且不应小于 2m;基准桩与锚桩的中心距离不应小于 3 倍桩径或桩宽;对桩端进入良好持力层且桩径大于或等于 1.2m 的大直径试验桩,其与锚桩、基准桩的中心距不应小于 3 倍桩径。

**6.4.7** 试验桩在沉桩后到进行加载的间歇时间,黏性土不应少于 14d;砂土不应少于 3d,淤泥或淤泥质土中的摩擦桩不应少于 25d,水冲沉桩不应少于 28d。灌注桩加载时混凝土强度等级应达到设计强度要求且不少于 28d。当试验桩需再次进行抗压试验时,间歇时间应超过 3d。



**6.4.8** 试验前应对锚桩进行抗拔能力验算;试验中应对锚桩上拔量进行监测,其上拔量应控制在设计允许范围内。

**6.4.9** 在水域进行静载荷试验应搭设牢固的试桩平台。平台不得与试验桩或基准桩相连,其高程应考虑水位和风浪等的影响。平台应设置必要的护栏、人行爬梯、安全标识、信号灯、救生设备、通信和交通等安全设施。

**6.4.10** 在风、浪等气象、水文条件恶劣的情况下不得进行试验;试验期间距离试验桩 50m 范围内不得进行打桩作业,并应避免各种振动影响,严禁船舶碰撞试验平台。

**6.4.11** 试验前应收集试验桩、基准桩、锚桩和工程桩的结构图、沉桩资料和动测试验资料,对仪器设备进行调试和检查。

**6.4.12** 需要测试桩身内力时,试验前应预埋必要的应力、应变测试元件。

**6.4.13** 锚桩法轴向抗压静载荷试验装置应由反力系统、加载系统和测量系统三部分组成,如图 6.4.13 所示,并应符合下列规定。

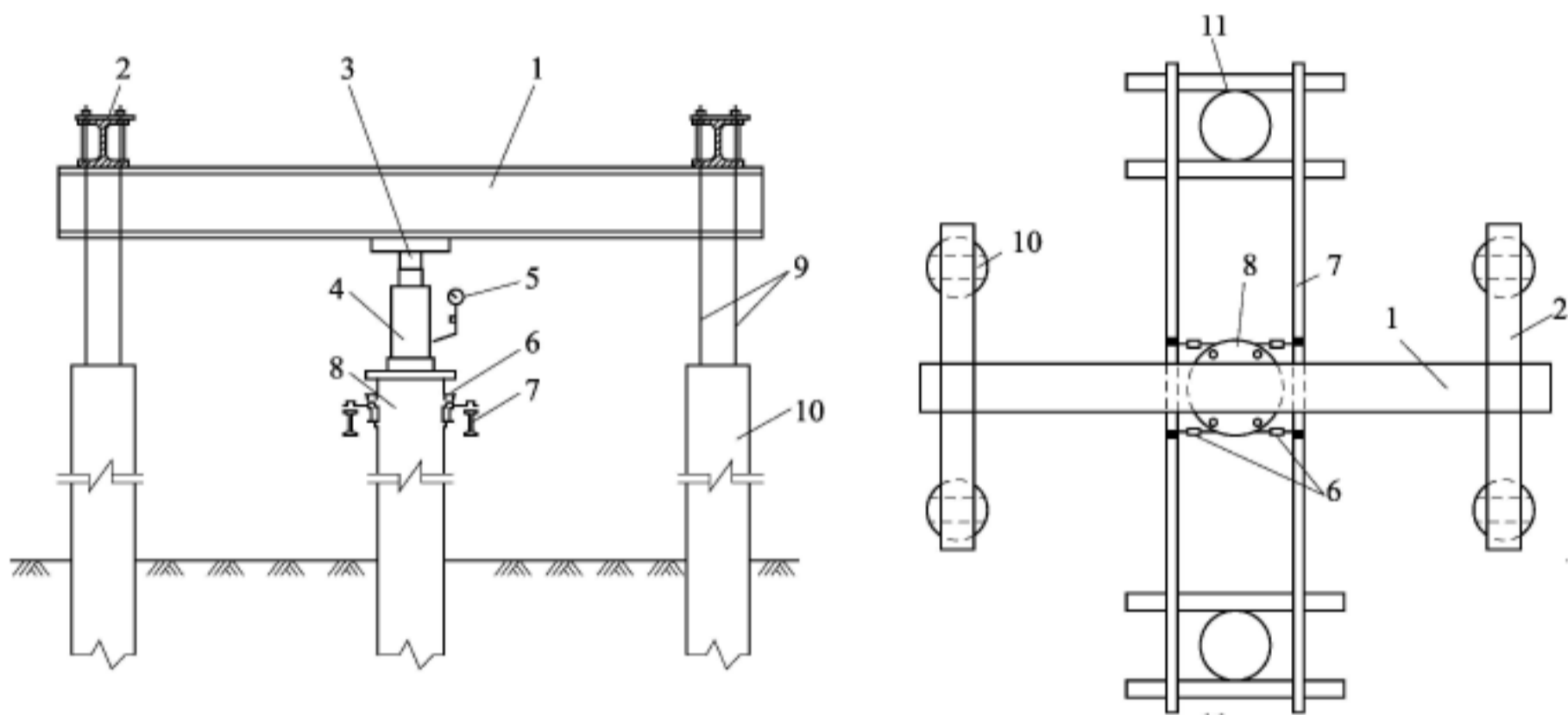


图 6.4.13 锚桩法轴向抗压静载试验装置

1-主梁;2-次梁;3-传感器;4-千斤顶;5-压力表;6-百分表;7-基准梁;8-试验桩;9-锚筋;10-锚桩;11-基准桩

#### 6.4.13.1 反力系统应满足下列要求:

- (1) 反力系统所提供的反力不小于最大加载量的 1.3 ~ 1.5 倍;
- (2) 反力系统的所有构件满足强度和变形要求;
- (3) 锚桩及张锚体系满足抗拔要求;
- (4) 整个反力系统装置整体稳定。

**6.4.13.2** 试验加载宜采用油压千斤顶。当采用两台及以上千斤顶加载时应采用并联方式同步工作,且满足下列要求:

- (1) 千斤顶的型号及规格相同;
- (2) 所有千斤顶的合力通过试验桩的纵轴线;
- (3) 加载设备、油压系统在最大加载时的压力不超过规定工作压力的 80% ;
- (4) 当采用自动加载时,在千斤顶上安装压力表进行荷载复核,压力表的精确度优于



或等于 0.4 级。

#### 6.4.13.3 沉降测量系统应满足下列要求：

(1) 沉降测量系统为独立系统,基准梁具有足够的刚度,安设在基准桩上,一端固定,另一端简支,采取措施减少温度等因素的影响;

(2) 沉降测量采用 4 个位移传感器或百分表,沿桩周均布安设,测量平面在桩顶下 0.2m ~ 1.0m 范围内;

(3) 采用大量程位移传感器或百分表的量程不小于 50mm,测量误差不大于 0.1% F. S,分辨率优于或等于 0.01mm。

#### 6.4.13.4 试验过程中应采取防雨、防晒、防震和防碰撞等措施。

#### 6.4.14 试验应符合下列规定。

6.4.14.1 轴向抗压静载荷试验可采用快速维持荷载法或慢速维持荷载法,有经验时也可采用循环加载法。外海试桩宜采用快速维持荷载法。

6.4.14.2 当试验需要测定桩的轴向刚性系数时,在永久荷载标准值到永久荷载与可变荷载标准值的组合值之间,应至少往复加载、卸载 3 次,取趋于稳定的一次循环的首尾测定值进行计算。

#### 6.4.14.3 试验加载、卸载应满足下列要求：

(1) 加载分级进行,采用逐级等量分级,每分级荷载为最大加载量或预估最大试验荷载的 1/10 ~ 1/12,第一级荷载取 2 倍的分级荷载;

(2) 卸载分级进行,采用逐级等量分级,每级卸载量取加载时分级荷载的 2 倍;

(3) 加载、卸载时,确保荷载传递平稳、持续、无冲击,每级加载、卸载时间不少于 1min。

#### 6.4.14.4 当采用快速维持荷载法加载时,每级荷载应维持 60min。

6.4.14.5 当采用慢速维持荷载法加载时,应满足某级荷载作用下 60min 内对应沉降值不大于 0.1mm 的相对稳定标准。

#### 6.4.14.6 每一级荷载维持时间应按表 6.4.14 的规定执行。

表 6.4.14 每级荷载维持时间

荷载级	试验方法	
	快速维持荷载法	慢速维持荷载法
新加载级	60min	至 60min 内对应沉降值不大于 0.1mm 为止
卸载级	15min	60min
卸载为零	60min	180min
循环加载、卸载的中间荷载级	5min	15min
循环加载、卸载的首尾荷载级	15min	60min

6.4.14.7 快速维持荷载法加载时,沉降测读时间应为加载后第 5min、15min、30min、60min;卸载至零后沉降测读时间应为第 5min、15min、30min、60min。

6.4.14.8 慢速维持荷载法加载时,沉降测读时间应为加载后第 5min、15min、30min、60min,以后每隔 30min 测读一次,直到试桩沉降达到相对稳定标准;卸载时沉降测读时间

应为第 5min、15min、30min、60min。卸载至零后测读时间应为第 5min、15min、30min、60min,以后每隔 30min 测读一次,维持时间结束时再测读一次。

**6.4.14.9** 试验过程中应及时记录或打印各项测试数据,进行数据整理汇总,绘制荷载~沉降曲线( $Q \sim s$  曲线)、沉降~时间对数曲线( $s \sim \lg t$  曲线)等。试验桩轴向抗压静载荷试验记录表可按附录 A 中表 A.0.69 执行。

**6.4.14.10** 试验符合下列条件之一时可终止加载:

(1) 某级荷载作用下,桩顶沉降量大于前一级荷载作用下沉降量的 5 倍或  $Q \sim s$  曲线出现可判定极限承载力的陡降段,且桩顶总沉降量超过 40mm;

(2) 采用慢速维持荷载法试验,在某级荷载作用下,24h 未达到稳定标准;

(3)  $Q \sim s$  曲线没有明显陡降段,桩顶总沉降量达 60mm~80mm 或达到设计要求的最大允许沉降量;

(4) 检验性试验已加载至设计要求的最大加载量。

**6.4.14.11** 当桩身埋设有传感器时,传感器数据的测读时间宜与沉降的测读时间相同。

**6.4.15** 试验检测数据的计算分析应符合下列规定。

**6.4.15.1** 确定试验桩的单桩轴向抗压承载力时,应绘制荷载~沉降曲线( $Q \sim s$  曲线)、沉降~时间对数曲线( $s \sim \lg t$  曲线)等,见图 6.4.15。

**6.4.15.2** 当桩身埋设有传感器时,应计算并绘制桩身轴力分布图,确定各土层桩侧摩阻力和桩端阻力。

**6.4.16** 单桩轴向抗压极限承载力应按下列规定确定。

**6.4.16.1** 当  $Q \sim s$  曲线上出现可判定极限承载力的陡降段时,可取明显陡降段起始点相对应的荷载作为极限承载力。极限承载力可采用下列方法确定:

(1) 当  $\frac{\Delta s_m}{\Delta Q_n} \leq f(L)$ ,  $\frac{\Delta s_{n+1}}{\Delta Q_{n+1}} > f(L)$  或  $\frac{\Delta s_{n+1}}{Q_{n+1}} / \frac{\Delta s_n}{\Delta Q_n} > 5 \frac{\Delta s_{n+1}}{Q_{n+1}}$ , 且  $S_{n+1} > 40\text{mm}$  时,第  $n$  级对

应的荷载为极限承载力,见图 6.4.15(a),其中  $f(L) = \frac{3.3}{L} - 0.04$ ,  $L$  为桩身长度(m);

(2) 当  $Q/Q_{\max} \sim s/d$  曲线有明显陡降段时,挤土桩的曲线斜率开始转变为大于 0.3 或大直径开口管桩等低挤土桩的曲线斜率开始转变为 0.2 的点所对应的荷载为极限承载力, $d$  为桩径;

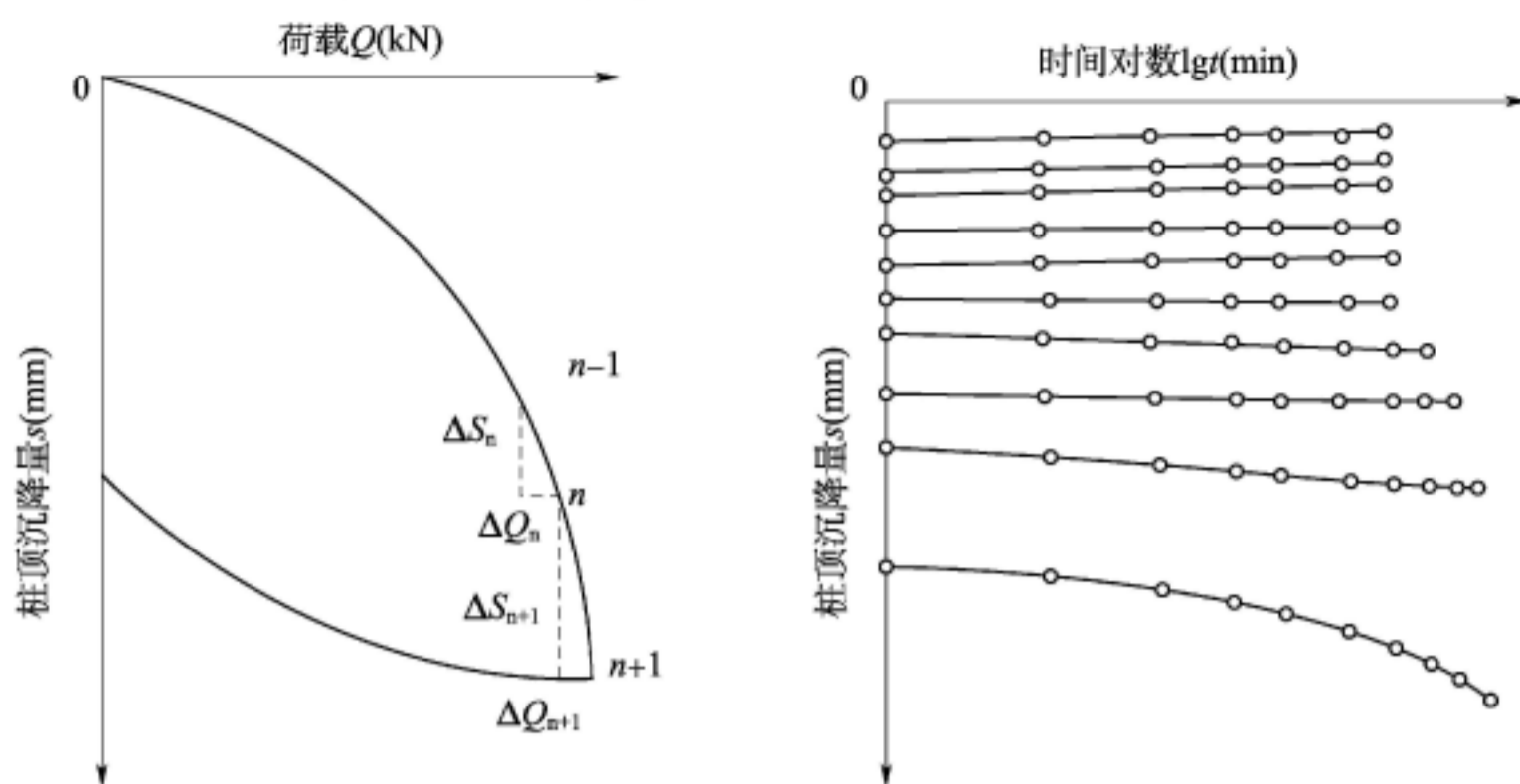
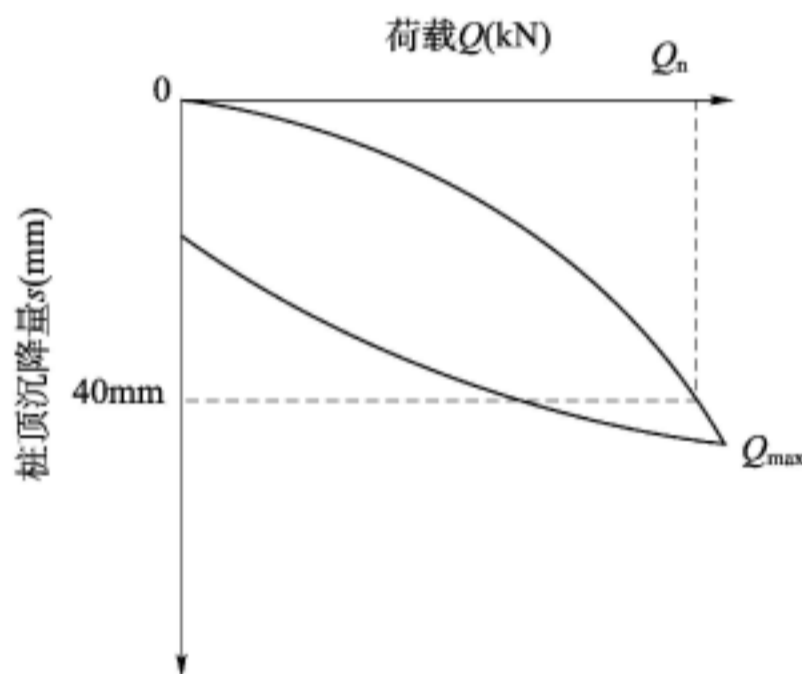
(3) 当  $s \sim \lg t$  曲线中出现斜率明显变化或尾部曲线明显向下曲折时,取斜率明显变化或尾部曲线明显向下曲折的前一级荷载作为极限承载力,见图 6.4.15(b)。

**6.4.16.2** 当试验桩出现第 6.4.14.10 中第(2)项的终止条件时,且  $Q \sim s$  曲线上没有可判定极限承载力的陡降段,应取该终止条件下的前一级荷载作为极限承载力。

**6.4.16.3** 当试验桩出现第 6.4.14.10 中第(3)项的终止条件时,且  $Q \sim s$  曲线上没有可判定极限承载力的陡降段,应取  $Q \sim s$  曲线上桩顶总沉降量  $s = 40\text{mm}$  所对应的荷载作为极限承载力,见图 6.4.15(c)。对钢管桩和桩长超过 50m 的混凝土桩所取用的桩顶总沉降量应适当加大。



## 6.4.16.4 极限承载力应取初压值。

(a) 有陡降段的 $Q-s$ 曲线(b)  $s-lgt$ 曲线(c) 无明显陡降段的 $Q-s$ 曲线图 6.4.15  $Q-s$  及  $s-lgt$  曲线

$Q$ -作用于桩顶的轴向受压荷载(kN);  $Q_{max}$ -作用于桩顶的最大轴向受压荷载(kN);  $Q_u$ -基桩轴向抗压极限承载力;  $s$ -桩顶沉降量(mm);  $n$ -加载级数;  $\Delta Q_n$ -第  $n$  级加载量(kN);  $\Delta S_n$ -第  $n$  级加载的沉降量(mm);  $\Delta Q_{n+1}$ -第  $n+1$  级加载量(kN);  $\Delta S_{n+1}$ -第  $n+1$  级加载的沉降量(mm)

**6.4.17** 试验桩的轴向抗压极限承载力标准值应根据试验桩地质条件等综合确定。当各试验桩条件基本相同且数量不少于 2 根时,极限承载力标准值可按下列规定确定:

(1) 当桩的极限承载力最大值与最小值之比不大于 1.3 时,取平均值作为单桩轴向抗压极限承载力标准值;

(2) 当桩的极限承载力最大值与最小值之比大于 1.3 时,分析原因,结合工程的实际情况,确定单桩极限承载力标准值,必要时增加试桩数量。

**6.4.18** 当需要测试桩侧摩阻力和桩端阻力时,应将应变测定值换算成相应截面的轴向力,绘制桩身轴向力分布图(图 6.4.18),并应根据轴向力分布,确定各土层桩侧极限摩阻力和桩端极限阻力。



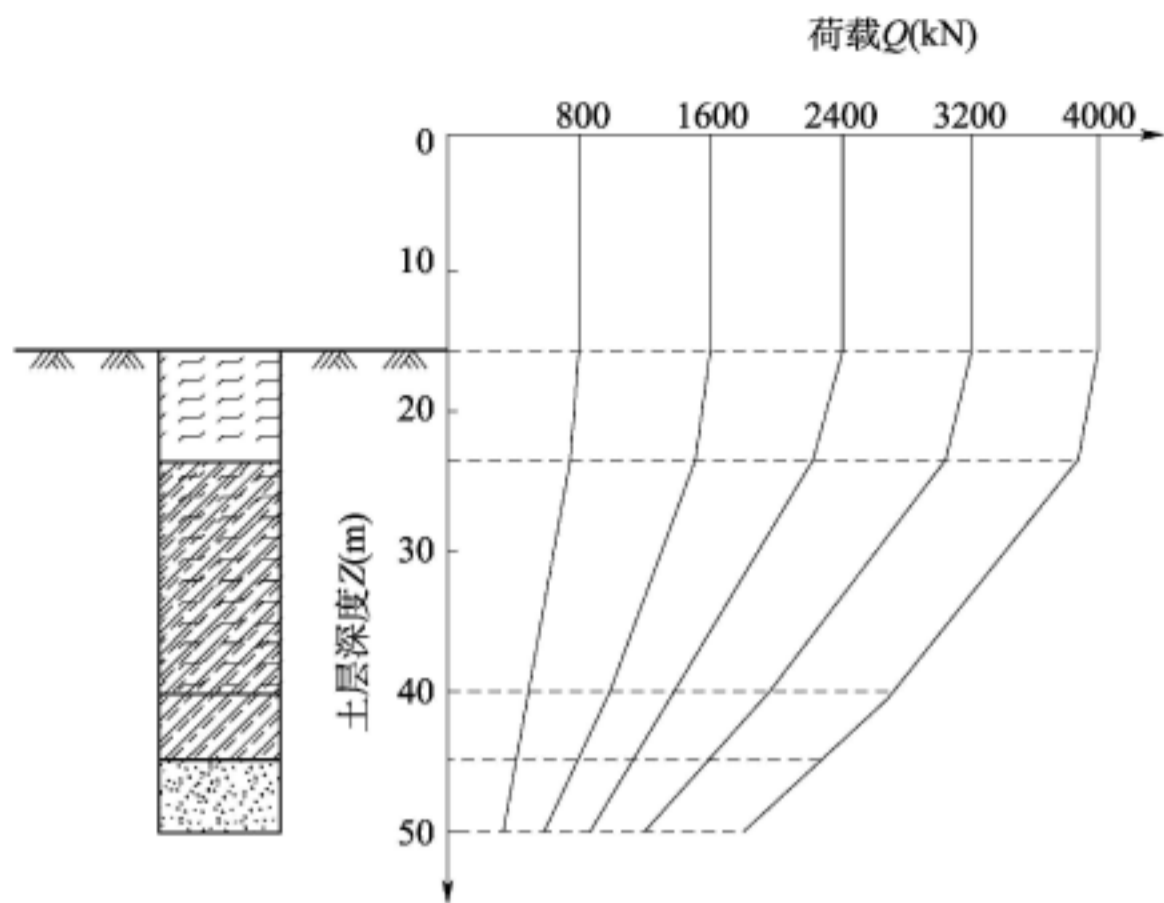


图 6.4.18 桩身轴向力分布

$Q$ -作用于桩顶的轴向受压荷载(kN); $Z$ -土层深度(m)

6.4.19 基桩检测报告的主要内容可参见附录 B。

## 6.5 单桩轴向抗拔静载试验

6.5.1 单桩轴向抗拔静载荷试验可用于锚桩法的桩轴向抗拔极限承载力的确定或工程桩轴向抗拔承载力的检验。

6.5.2 为设计提供依据时,单桩轴向抗拔静载荷试验应加载至破坏;检验工程桩的单桩轴向抗拔承载力试验,最大加载量应达到设计要求。

6.5.3 工程桩不得用于确定轴向抗拔极限承载力的试验。

6.5.4 轴向抗拔静载试验可利用抗压试验桩进行,抗压试验结束至抗拔试验开始的间歇时间应超过 3d。

6.5.5 轴向抗拔试验桩应满足试验荷载作用下的强度要求,成桩工艺和质量控制标准应与工程桩一致,主筋应通长布置。

6.5.6 轴向抗拔静载试验的其他要求应按第 6.4.3 条~第 6.4.12 条的有关规定执行。

6.5.7 试验装置应由反力系统、加载系统和测量系统三部分组成,锚桩法轴向抗拔静载荷试验装置如图 6.5.7 所示,并应符合下列规定。

6.5.7.1 宜采用工程桩提供支座反力,反力系统应按第 6.4.13.1 款执行。

6.5.7.2 试验加载应按第 6.4.13.2 款执行。

6.5.7.3 位移测量系统应按第 6.4.13.3 款执行。

6.5.7.4 试验过程中应采取防雨、防晒、防震和防碰撞等措施。

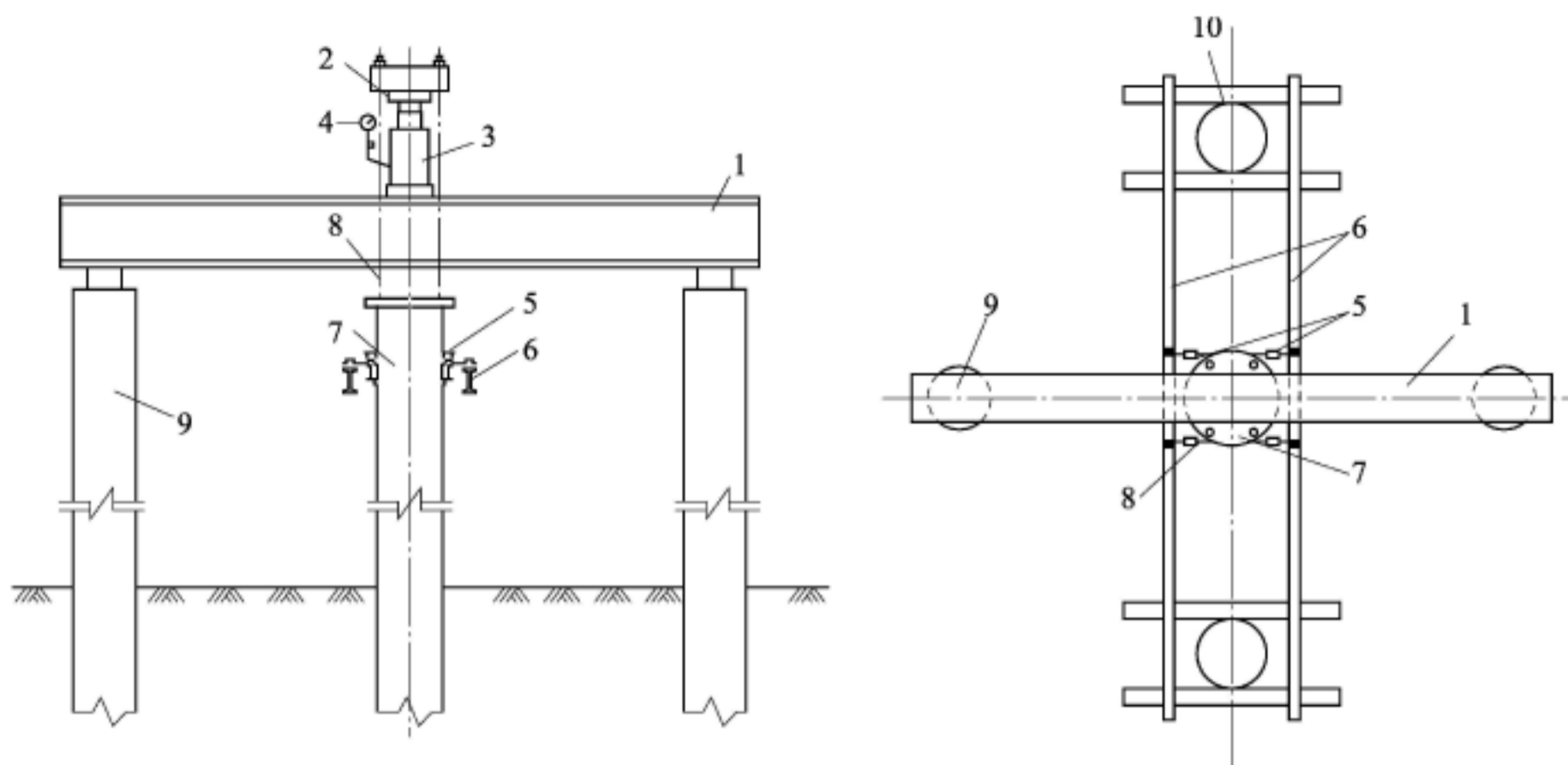


图 6.5.7 锚桩法轴向抗拔静载试验装置

1-钢梁;2-传感器;3-千斤顶;4-压力表;5-百分表;6-基准梁;7-试验桩;8-拉筋;9-反力桩;10-基准桩

### 6.5.8 试验应符合下列规定。

6.5.8.1 轴向抗拔静载试验宜采用慢速维持荷载法。

6.5.8.2 试验方法应按第 6.4.14.1 款 ~ 第 6.4.14.8 款的相关规定执行。

6.5.8.3 试验过程中应及时记录或打印各项测试数据,进行数据整理汇总,应绘制上拔荷载 ~ 桩顶上拔量曲线( $Q_{up} \sim s_{up}$  曲线)、桩顶上拔量 ~ 时间对数曲线( $s_{up} \sim \lg t$  曲线)等。异常情况应及时作详尽记录。试验桩轴向抗拔静载荷试验记录可采用附录 A 中表 A.0.70。

6.5.8.4 试验符合下列条件之一可终止加载:

- (1) 某级荷载作用下,钢筋拉应力达到钢筋抗拉强度设计值;
- (2) 某级荷载作用下,桩顶上拔量为前一级荷载作用下的 5 倍;
- (3) 桩顶累计上拔量超过 100mm;
- (4) 检验性试验已加载至设计要求的最大加载量。

6.5.8.5 当桩身埋设有传感器时,传感器数据的测读时间宜与位移的测读时间相同。

### 6.5.9 单桩轴向抗拔极限承载力应按下列方法确定:

- (1) 对陡升的  $Q_{up} \sim s_{up}$  曲线,取明显陡升段起始点对应的荷载作为极限承载力;
- (2) 对无明显陡升的  $Q_{up} \sim s_{up}$  曲线,取  $s_{up} \sim \lg t$  曲线尾部明显弯曲的前一级荷载作为极限承载力;
- (3) 当试桩加载未达到极限破坏,桩的轴向抗拔承载力取最大试验荷载值。

6.5.10 当桩身埋设有传感器时,应计算并绘制桩身轴向力分布图,确定各土层的桩侧摩阻力。

6.5.11 试验桩的轴向抗拔极限承载力标准值应按第 6.4.17 条执行。

6.5.12 基桩检测报告的主要内容可参见附录 B。

## 6.6 单桩水平静载试验

6.6.1 单桩水平静载试验可用于桩顶自由的试验桩水平极限承载力的确定或工程桩水



平承载力和相应桩顶水平位移的检验。

**6.6.2** 为设计提供依据时,单桩水平静载试验应加载至桩身结构破坏或桩顶出现较大位移,确定试验桩的水平极限承载力,推定水平地基反力系数;检验工程桩水平承载力和相应桩顶水平位移的试验,应按设计要求加载至最大荷载或最大位移。

**6.6.3** 试验桩的数量应根据设计要求和工程地质条件确定,不宜少于2根。

**6.6.4** 试验桩位置应根据设计要求选取有代表性的地点,也可利用轴向静载荷试验桩进行水平静载试验。

**6.6.5** 在距离试验桩3m~10m范围内应具有工程地质钻孔资料。泥面以下16倍桩径或桩宽深度范围内,每隔1m应具有土样的物理力学性能指标;16倍桩径或桩宽以下深度,间距可适当加大。有条件时可进行现场十字板剪切、静力触探或旁压试验。当桩身埋设有传感器时,可测定桩身横截面的弯曲应变,计算桩身弯矩。

**6.6.6** 试桩、推力支承桩和基准桩之间的相对位置应符合下列规定。

**6.6.6.1** 试验桩中心与推力支承桩的合力应在同一条轴线上。

**6.6.6.2** 试验桩与推力支承桩之间的净距不宜小于5倍桩径或桩宽,拉力支承桩与试验桩净距不宜小于10倍桩径或桩宽,且不宜小于6m;基准桩与试验桩、推力支承桩的中心距离不宜小于5倍桩径或桩宽。

**6.6.7** 试验桩在沉桩后到进行加载的间歇时间应按第6.4.7条执行。利用已完成轴向抗压静载试验的桩进行水平静载试验时,其间歇时间不宜少于2d。

**6.6.8** 当桩内埋设测试元件时,各测试断面的传感器应沿受力方向对称布置在远离中性轴的受拉和受压主筋上。

**6.6.9** 水平荷载作用点高程宜与实际工程桩基承台底高程一致。水平力的方向应通过试验桩截面中心。

**6.6.10** 试验前应对锚桩进行抗拔能力验算。

**6.6.11** 在水域进行水平静载试验应按第6.4.9条规定搭设牢固的试桩平台。

**6.6.12** 试验期间对环境条件的要求应按第6.4.10条执行。

**6.6.13** 试验前应收集试验桩、基准桩、锚桩和工程桩的结构图、沉桩资料和动测试验资料,对仪器设备进行调试和检查。

**6.6.14** 试验过程中应采取防雨、防晒、防震和防碰撞等措施。

**6.6.15** 试验装置应由反力系统、加载系统和测量系统三部分组成,如图6.6.15所示,并应符合下列规定。

**6.6.15.1** 反力系统应满足下列要求:

- (1)反力装置所提供的反力不小于最大加载量的1.3~1.5倍;
- (2)验算反力装置的所有构件满足刚度要求。

**6.6.15.2** 试验加载应满足下列要求:

- (1)加载设备采用卧式千斤顶;
- (2)符合第6.4.13.2款的有关规定;
- (3)最大加载能力为预估最大试验荷载的1.3~1.5倍;



(4) 千斤顶与试验桩接触部位设置球型铰支座, 试验桩的加力点进行局部加强或增大受力面积。

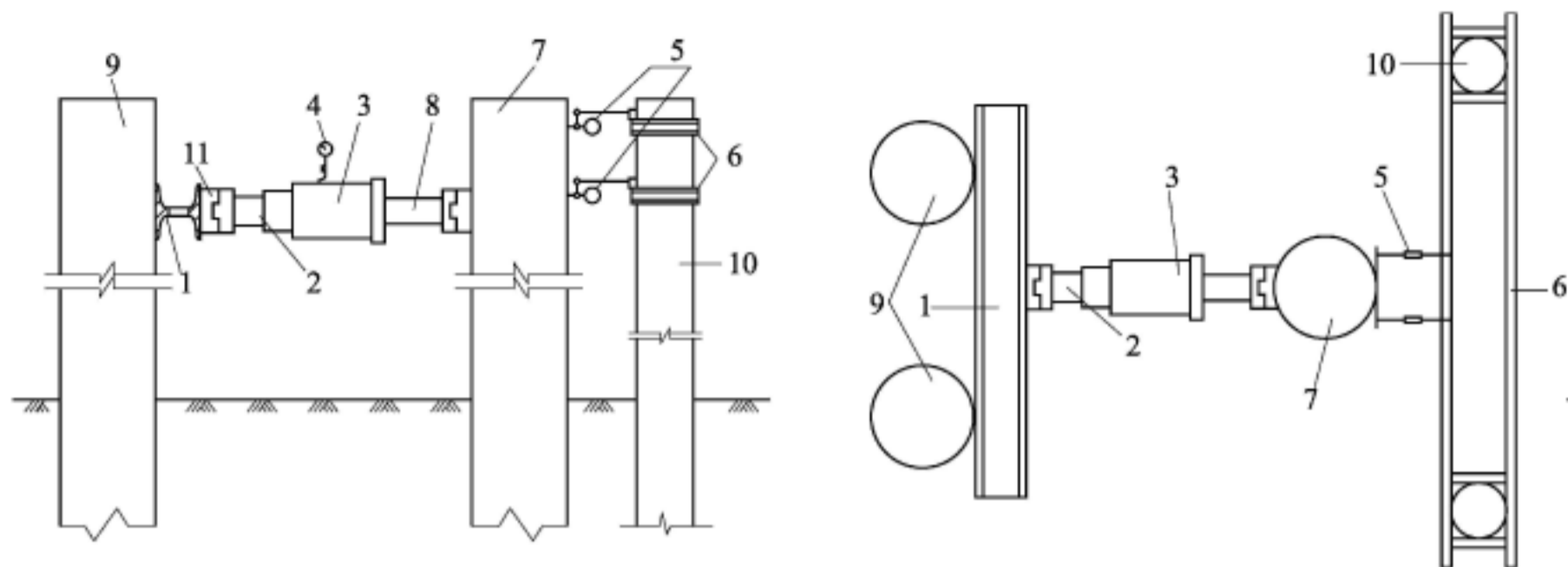


图 6.6.15 水平静载试验装置图

1-横梁;2-传感器;3-千斤顶;4-压力表;5-百分表;6-基准梁;7-试验桩;8-垫块;9-反力桩;10-基准桩;11-球铰

### 6.6.15.3 水平位移测量系统应满足下列要求:

(1) 水平位移测量系统为独立系统, 基准梁具有足够的刚度, 安设在基准桩上, 一端固定, 另一端简支, 采取措施减少温度等因素的影响;

(2) 在水平力作用平面的受检桩两侧对称安装两个大量程位移传感器或百分表, 位移传感器或百分表量程不小于 50mm, 最小分度值不大于 0.01mm;

(3) 当需要测量桩顶转角时, 在水平力作用平面以上 50cm 处再对称安装两个大量程位移传感器或百分表, 截面转角的测试精度不低于 5"。

6.6.15.4 测试桩身弯曲应变时, 测点应布置在泥面至设计第一弯矩零点处的区段内, 测点间距不宜大于 1m。同一截面内的测点, 应设在最大拉应变和最大压应变处。

### 6.6.16 试验应按下列规定进行。

6.6.16.1 水平静载荷试验可采用单向单循环水平维持荷载法, 需要时也可采用单向多循环水平维持荷载法或其他方法。

#### 6.6.16.2 试验加载、卸载应满足下列要求:

(1) 加载分级进行, 采用逐级等量分级, 每分级荷载为最大加载量或预估最大试验荷载的 1/10, 第一级荷载取 2 倍的分级荷载;

(2) 卸载分级进行, 采用逐级等量分级, 每级卸载量取分级荷载的 2 倍;

(3) 加载、卸载时确保荷载传递平稳、持续、无冲击。

6.6.16.3 采用单向单循环水平维持荷载法, 加载时每级荷载应维持 20min, 测读时间间隔 5min; 卸载时每级荷载应维持 10min, 测读时间间隔为 5min; 卸载至零后应每隔 10min 测读桩顶的残余位移量, 测读 30min。

6.6.16.4 采用单向多循环水平维持荷载法, 每级荷载施加后, 应恒载 4min 后测读, 再卸载至零, 停 2min 后测读, 此为一循环。每级荷载应循环 5 次进入下一级荷载。

#### 6.6.16.5 试验符合下列条件之一可终止加载:

(1) 已加载至试验要求的最大荷载值或最大位移;

(2) 某级荷载作用下, 桩的水平位移急剧增加、位移速率明显增大;

(3) 桩身断裂或地基土出现明显的斜裂缝。

**6.6.16.6** 当桩身埋设有传感器时, 传感器数据的测读时间宜与水平位移的测读时间相同。

**6.6.17** 试验桩水平静荷载试验记录可采用附录 A 中表 A.0.71。试验检测数据的计算分析应根据试验内容不同, 分别绘制下列相应的曲线:

(1) 绘制水平荷载 ~ 力作用点位移( $H \sim Y$ )曲线;

(2) 绘制水平荷载 ~ 时间 ~ 变形( $H \sim t \sim Y$ )曲线;

(3) 绘制水平荷载 ~ 位移梯度( $H \sim \Delta Y / \Delta H$ )曲线;

(4) 绘制水平荷载对数 ~ 位移对数( $\lg H \sim \lg Y$ )曲线;

(5) 绘制水平荷载 ~ 水平地基反力系数随深度增长的比例系数( $H \sim m$ )曲线;

(6) 绘制水平地基反力 ~ 位移( $P \sim Y$ )曲线;

(7) 绘制桩身弯矩分布曲线、桩身挠度变形曲线、桩顶或泥面处转角的变化曲线。

**6.6.18** 试验桩水平极限承载力应根据  $H \sim Y$  曲线(图 6.6.18)第二折点前一级荷载或  $\lg H \sim \lg Y$  曲线上折点的前一级荷载等综合确定, 其中钢桩应取  $\lg H \sim \lg Y$  曲线上第一折点, 其他桩应取  $\lg H \sim \lg Y$  曲线上的第二折点。当采用  $H \sim Y$  曲线、 $\lg H \sim \lg Y$  曲线难以确定桩的水平极限承载力时, 可采用水平荷载 ~ 位移梯度( $H \sim \Delta Y / \Delta H$ )曲线等方法综合确定。桩身折断或受拉钢筋屈服时水平极限承载力应取前一级荷载。

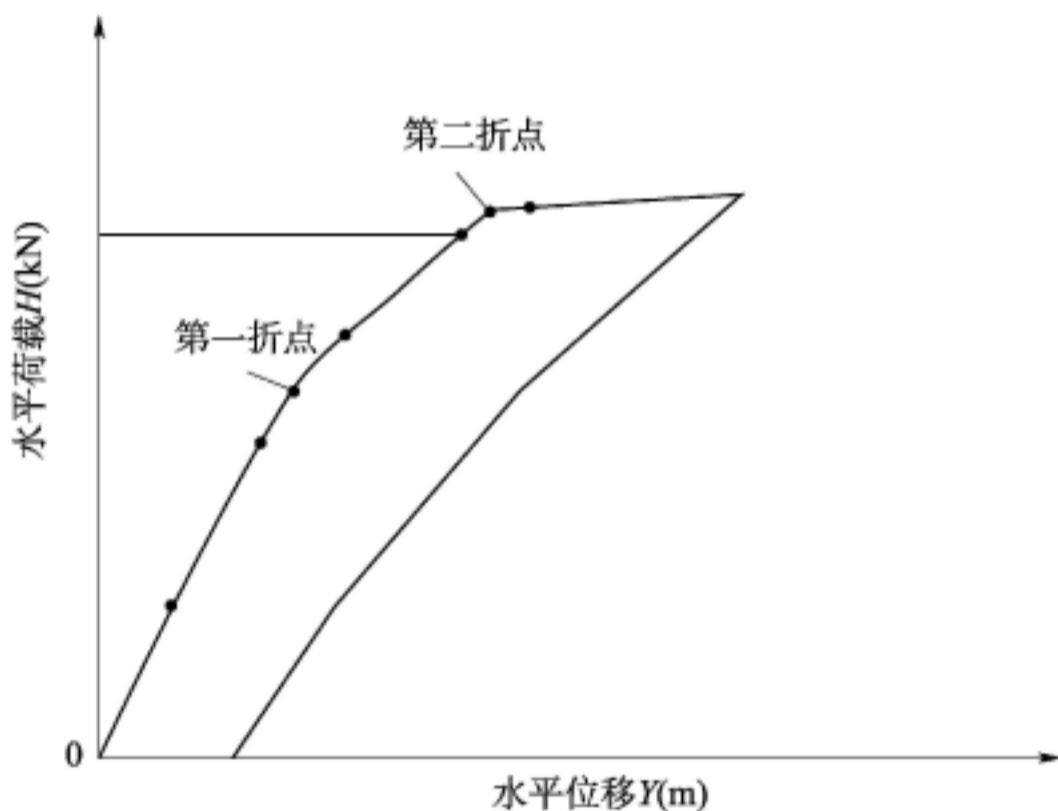


图 6.6.18 水平荷载 - 力作用点位移关系( $H - Y$ )曲线

$H$  - 水平荷载(kN);  $Y$  - 水平荷载作用下桩在作用点处的水平位移(m)

**6.6.19** 试验桩的水平极限承载力标准值应按第 6.4.17 条执行。

**6.6.20** 水平地基反力系数随深度增长的比例系数  $m$  值可按附录 E 的方法计算。

**6.6.21** 基桩检测报告的主要内容可参见附录 B。

## 6.7 钻芯法

**6.7.1** 钻芯法可用于检测混凝土灌注桩的混凝土强度、桩身完整性、桩长、沉渣厚度, 判定或鉴别桩端持力层岩土性状。受检桩径宜大于或等于 800mm, 长径比不宜大于 30。



**6.7.2** 钻取芯样宜采用液压钻机,主要技术性能应符合下列规定:

- (1) 额定最高转速不低于 790r/min;
- (2) 转速调节范围不少于 4 档;
- (3) 额定配用压力不低于 1.5MPa。

**6.7.3** 钻机应配备单动双管钻具以及相应的孔口管、扩孔器、卡簧、扶正稳定器和可捞取松软渣样的钻具。钻杆应顺直,直径宜为 50mm。

**6.7.4** 钻头应根据混凝土设计强度等级选用合适粒度、浓度、胎体硬度的金刚石钻头;外径不宜小于 100mm,钻头胎体不得有肉眼可见的裂纹、缺边、少角、倾斜及喇叭口变形。

**6.7.5** 水泵的排水量应为 50L/min ~ 160L/min,泵压应为 1.0MPa ~ 2.0MPa。

**6.7.6** 锯切芯样试件用的锯切机应具有冷却系统和牢固夹紧芯样的装置,配套使用的金刚石圆锯片应有足够刚度。

**6.7.7** 加工芯样试件端面使用的补平器和磨平机应满足芯样制作的要求。

**6.7.8** 受检桩的钻芯孔数、钻孔位置和入持力层深度应符合下列规定:

(1) 桩径小于 1200mm 钻 1 孔,桩径为 1200mm ~ 1600mm 钻 2 孔,桩径大于 1600mm 钻不少于 3 孔;

(2) 当钻芯孔为一个时,在距桩中心 10cm ~ 15cm 的位置开孔;当钻芯孔为两个或两个以上时,开孔位置在距桩中心 0.15D ~ 0.25D 内均匀对称布置;

(3) 对桩端持力层的钻探,每根受检桩不少于 1 孔,且钻探深度满足设计要求;

(4) 当选择钻芯法对桩长、桩底沉渣、桩端持力层进行验证检测时,受检桩的钻芯孔数为 1 孔。

**6.7.9** 钻机设备安装应稳固、底座水平。钻机立轴中心、天轮中心(天车前沿切点)与孔口中心应在同一铅垂线上,应确保钻机在钻芯过程不发生倾斜、移位,钻芯孔垂直度偏差不应大于 0.5%。

**6.7.10** 当桩顶面与钻机底座的距离较大时,应安装孔口管,孔口管应垂直、牢固。

**6.7.11** 钻进过程中,钻孔内循环水流不得中断,应根据回水含砂量及颜色调整水泵水量和钻进速度。

**6.7.12** 提钻卸取芯样时,应拧卸钻头和扩孔器,严禁敲打卸芯。

**6.7.13** 每回次进尺宜控制在 1.5m 内;钻至桩底时,应采取适宜的钻芯方法和工艺钻取沉渣、测定沉渣厚度,并采用适宜的方法对桩端持力层岩土性状进行判定或鉴别。

**6.7.14** 钻取的芯样应由上而下按回次顺序放进芯样箱中,芯样侧面上应清晰标明回次数、块号、本回次总块数,应对混凝土芯样、桩底沉渣、桩端岩土层及异常情况进行详细编录。

**6.7.15** 钻芯结束后,应对标有桩长、孔深的芯样和标有工程名称、桩号、钻芯孔号、检测单位名称的标示牌的全貌进行拍照。

**6.7.16** 钻芯孔应采用 0.5MPa ~ 1.0MPa 压力水泥浆从孔底往上回灌封闭;对异常的钻芯孔应封存留待处理。

**6.7.17** 截取混凝土抗压芯样试件应符合下列规定:

- (1) 当桩长为 10m ~ 30m 时,每孔截取 3 组芯样;当桩长小于 10m 时,取 2 组,当桩长



大于 30m 时,不少于 4 组;

(2) 上部芯样位置距桩顶设计高程不大于 1 倍桩径或 2m,下部芯样位置距桩底不大于 1 倍桩径或 2m,中间芯样等间距截取;

(3) 缺陷位置能取样时,截取一组芯样进行混凝土抗压试验;

(4) 如果同一基桩的钻芯孔数大于一个,其中一孔在某深度存在缺陷时,在其他孔的该深度处截取芯样进行混凝土抗压试验。

**6.7.18** 当桩端持力层为中、微风化岩层且岩芯可制作成试件时,应在接近桩底部位 1m 内截取岩石芯样;遇分层岩性时宜在各层取样。

**6.7.19** 每组芯样应制作 3 个芯样抗压试件。芯样试件的加工和测量应符合有关的规定。

**6.7.20** 芯样试件的抗压强度试验应符合现行国家标准《普通混凝土力学性能试验方法》(GB/T 50081)的有关规定。

**6.7.21** 混凝土芯样试件抗压强度应按式(6.7.21)计算:

$$f_{cu} = \frac{4P}{\pi d^2} \quad (6.7.21)$$

式中  $f_{cu}$ ——混凝土芯样试件抗压强度(MPa),精确至 0.1MPa;

$P$ ——芯样试件抗压试验测得的破坏荷载(N);

$d$ ——芯样试件的平均直径(mm)。

**6.7.22** 桩底岩芯单轴抗压强度试验以及岩石单轴抗压强度标准值的确定,宜按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》(GB50007)执行。

**6.7.23** 每根受检桩混凝土芯样试件抗压强度按下列规定确定:

(1) 取一组 3 块试件强度值的平均值为该组混凝土芯样试件抗压强度代表值;

(2) 同一受检桩同一深度部位有两组或两组以上混凝土芯样试件抗压强度代表值时,取其平均值为该桩该深度处混凝土芯样试件抗压强度代表值;

(3) 受检桩中不同深度位置的混凝土芯样试件抗压强度代表值中的最小值为该桩混凝土芯样试件抗压强度代表值。

**6.7.24** 桩底的沉渣厚度允许值应符合现行国家标准《建筑地基基础工程施工质量验收规范》(GB50202)的规定。

**6.7.25** 桩端持力层岩土性状应根据芯样特征、岩石芯样单轴抗压强度试验、标准贯入试验结果,综合判定桩端持力层岩土性状。

**6.7.26** 每根受检桩的桩身完整性类别可按下列方法综合判定:

(1) 结合钻芯孔数、现场混凝土芯样特征、芯样试件单轴抗压强度试验结果,按表 6.7.26-1 的规定和表 6.7.26-2 的特征进行综合判定;

表 6.7.26-1 桩身完整性分类表

桩身完整性类别	分 类 原 则
I 类桩	桩身完整
II 类桩	桩身有轻微缺陷,不会影响桩身结构承载力的正常发挥
III 类桩	桩身有明显缺陷,对桩身结构承载力有影响
IV 类桩	桩身存在严重缺陷

- (2) 混凝土出现分层现象, 截取分层部位的芯样进行抗压强度试验。抗压强度满足设计要求的, 判为Ⅱ类; 抗压强度不满足设计要求或未能制作成芯样试件的, 判为Ⅳ类;
- (3) 存在水平裂缝的, 判为Ⅲ类;
- (4) 多于三个钻芯孔的桩身完整性参照表 6.7.26-2 的三孔特征判定。

表 6.7.26-2 桩身完整性判定

类别	特 征		
	单 孔	两 孔	三 孔
Ⅰ	混凝土芯样连续、完整、胶结好, 芯样侧面表面光滑、骨料分布均匀, 芯样呈长柱状、断口吻合		
	芯样侧面仅见少量气孔	局部芯样侧面有少量气孔、蜂窝麻面、沟槽, 但在两孔的同一深度部位的芯样中未同时出现	局部芯样侧面有少量气孔、蜂窝麻面、沟槽, 但在三孔的同一深度部位的芯样中未同时出现
Ⅱ	混凝土芯样连续、完整、胶结较好, 芯样侧面表面较光滑、骨料分布基本均匀, 芯样呈柱状、断口基本吻合		
	局部芯样侧面有蜂窝麻面、沟槽或较多气孔。 芯样骨料分布极不均匀、芯样侧面蜂窝麻面严重或沟槽连续; 但对应部位的混凝土芯样试件抗压强度满足设计要求, 否则应判为Ⅲ类	芯样侧面有较多气孔, 连续的蜂窝麻面、沟槽或局部混凝土芯样骨料分布不均匀, 但在两孔的同一深度部位的芯样中未同时出现。 芯样侧面有较多气孔, 连续的蜂窝麻面、沟槽或局部混凝土芯样骨料分布不均匀, 且在两孔的同一深度部位的芯样中同时出现; 但该深度部位的混凝土芯样试件抗压强度代表值满足设计要求, 否则应判为Ⅲ类。 任一孔局部混凝土芯样破碎段长度不大于 10cm, 且另一孔的同一深度部位的混凝土芯样质量完好, 否则应判为Ⅲ类	芯样侧面有较多气孔, 连续的蜂窝麻面、沟槽或局部混凝土芯样骨料分布不均匀, 但在三孔的同一深度部位的芯样中未同时出现。 芯样侧面有较多气孔, 连续的蜂窝麻面、沟槽或局部混凝土芯样骨料分布不均匀, 且在三孔的同一深度部位的芯样中同时出现, 但该深度部位的混凝土芯样试件抗压强度代表值满足设计要求, 否则应判为Ⅲ类。 任一孔局部混凝土芯样破碎段长度不大于 10cm, 且另外两孔的同一深度部位的混凝土芯样质量完好, 否则应判为Ⅲ类
Ⅲ	大部分混凝土芯样胶结较好, 无松散、夹泥现象, 但有下列情况之一: 局部混凝土芯样破碎段长度不大于 10cm。 芯样不连续完整、多呈短柱状或块状	任一孔局部混凝土芯样破碎段长度大于 10cm 但不大于 20cm, 且另一孔的同一深度部位的混凝土芯样质量完好, 否则应判为Ⅳ类	任一孔局部混凝土芯样破碎段长度大于 10cm 但不大于 30cm, 且另外两孔的同一深度部位的混凝土芯样质量完好, 否则应判为Ⅳ类。 任一孔局部混凝土芯样松散段长度不大于 10cm, 且另外两孔的同一深度部位的混凝土芯样质量完好, 否则应判为Ⅳ类
Ⅳ	有下列情况之一: 因混凝土胶结质量差而难以钻进。 混凝土芯样任一段松散或夹泥。 局部混凝土芯样破碎长度大于 10cm	有下列情况之一: 任一孔因混凝土胶结质量差而难以钻进。 混凝土芯样任一段松散或夹泥。 任一孔局部混凝土芯样破碎长度大于 20cm。 两孔在同一深度部位的混凝土芯样破碎	有下列情况之一: 任一孔因混凝土胶结质量差而难以钻进。 混凝土芯样任一段夹泥或松散段长度大于 10cm。 任一孔局部混凝土芯样破碎长度大于 30cm。 其中两孔在同一深度部位的混凝土芯样破碎、夹泥或松散

注: ①如果上一缺陷的底部位置高程与下一缺陷的顶部位置高程的高差小于 30cm, 则定为两缺陷处于同一深度部位;

②完整性类别由Ⅳ类往Ⅰ类依次判定。



**6.7.27** 桩基质量评价应按单桩进行,应对每一根受检桩的桩身完整性类别、桩身混凝土强度、桩长、桩底沉渣厚度和桩端持力层岩土性状做出评价。

**6.7.28** 钻芯孔偏出桩外时,应仅对钻取芯样部分进行评价。

**6.7.29** 钻芯检测报告除应满足附录 B 的要求外,还应包含下列内容:

- (1) 钻芯设备情况;
- (2) 检测桩数、钻孔数量、开孔相对位置,架空、混凝土芯进尺、持力层进尺、总进尺,混凝土试件组数、岩石试件个数;
- (3) 采用附录 A 中表 A.0.72 ~ 表 A.0.75 的格式做好记录;
- (4) 芯样单轴抗压强度试验结果;
- (5) 芯样彩色照片;
- (6) 异常情况说明。

## 6.8 声波透射法

**6.8.1** 声波透射法可用于混凝土灌注桩的桩身完整性检测,判定桩身缺陷的位置、范围和程度。

**6.8.2** 发射换能器与接收换能器应符合下列规定:

- (1) 圆柱状径向振动,沿径向无指向性;
- (2) 外径小于声测管内径,有效工作段长度不大于 150mm;
- (3) 谐振频率为 30kHz ~ 60kHz;
- (4) 水密性满足 1MPa 水压不渗水。

**6.8.3** 声波检测仪应符合下列规定:

- (1) 具有实时显示和记录接收信号的时程曲线以及频率测量或频谱分析的功能;
- (2) 最小采样时间间隔小于或等于  $0.5\mu\text{s}$ ,声波幅值测量相对误差小于 5%,系统频带宽度为 1kHz ~ 200kHz,系统最大动态范围不小于 100dB;
- (3) 声波发射脉冲为阶跃或矩形脉冲,电压幅值为 200V ~ 1000V;
- (4) 具有首波实时显示功能;
- (5) 具有自动记录声波发射与接收换能器位置功能。

**6.8.4** 声测管埋设应符合下列规定:

- (1) 声测管内径大于换能器外径;
- (2) 声测管有足够的径向刚度,声测管材料的温度系数与混凝土接近;
- (3) 声测管下端封闭、上端加盖、管内无异物;
- (4) 声测管连接处平顺过渡,管口高出混凝土顶面 100mm 以上;
- (5) 浇灌混凝土前将声测管有效固定,各声测管之间基本平行。

**6.8.5** 声测管应沿钢筋笼内侧呈对称形状布置(图 6.8.5),声测管埋设数量应符合下列规定:

- (1)  $D \leq 800\text{mm}$ ,不少于 2 根管;
- (2)  $800\text{mm} < D \leq 1600\text{mm}$ ,不少于 3 根管;
- (3)  $D > 1600\text{mm}$ ,不少于 4 根管;



(4) 当桩径  $D$  大于 2500mm 时, 增加预埋声测管数量。

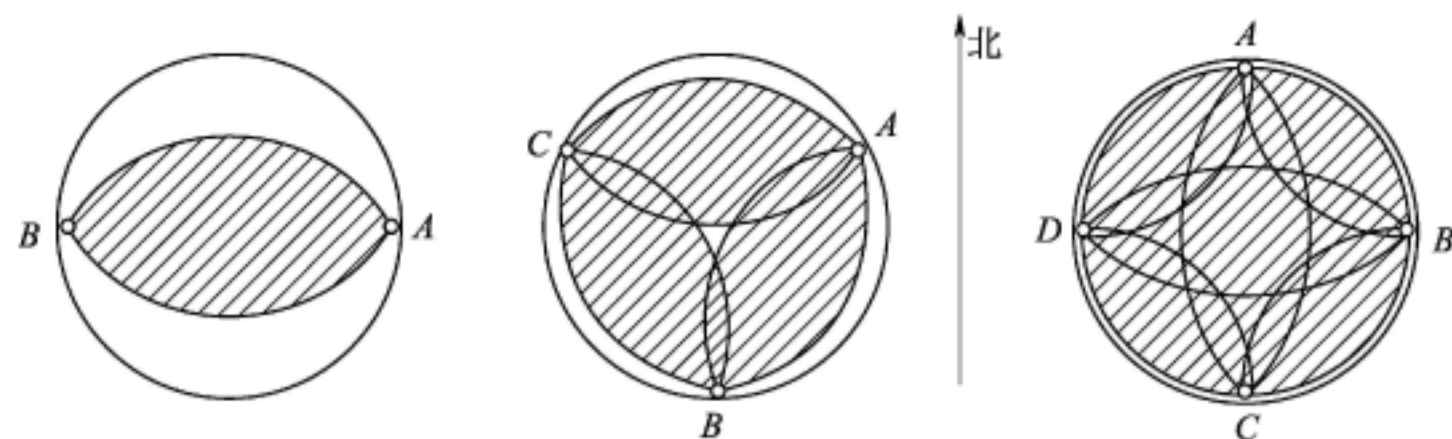


图 6.8.5 声测管布置示意图

**6.8.6** 检测剖面组编号时, 可按正北方向顺时针旋转依次编号, 并应符合下列规定:

- (1) 2 根管时, AB 剖面编号为 1;
- (2) 3 根管时, AB 剖面、BC 剖面、CA 剖面编号分别为 1、2、3;
- (3) 4 根管时, AB 剖面、BC 剖面、CD 剖面、DA 剖面、AC 剖面、BD 剖面编号分别为 1、2、3、4、5、6。

**6.8.7** 现场检测时, 受检桩混凝土强度应达到设计强度的 70%, 且不小于 15MPa 时, 现场检测前准备工作应符合下列规定:

- (1) 采用率定法确定仪器系统延迟时间;
- (2) 计算几何因素声时修正值;
- (3) 在桩顶测量相应声测管外壁间净距;
- (4) 将各声测管内注满清水, 检查声测管畅通情况, 换能器能在声测管全程范围内正常升降。

**6.8.8** 现场平测和斜测应符合下列规定。

**6.8.8.1** 应将发射换能器与接收换能器通过深度标志分别置于两个声测管道中。平测时, 发射换能器与接收换能器应始终保持相同深度 (图 6.8.8(a)); 斜测时, 发射换能器与接收换能器应始终保持固定高差 (图 6.8.8(b)), 且两个换能器中点连线的水平夹角不应大于  $30^\circ$ 。

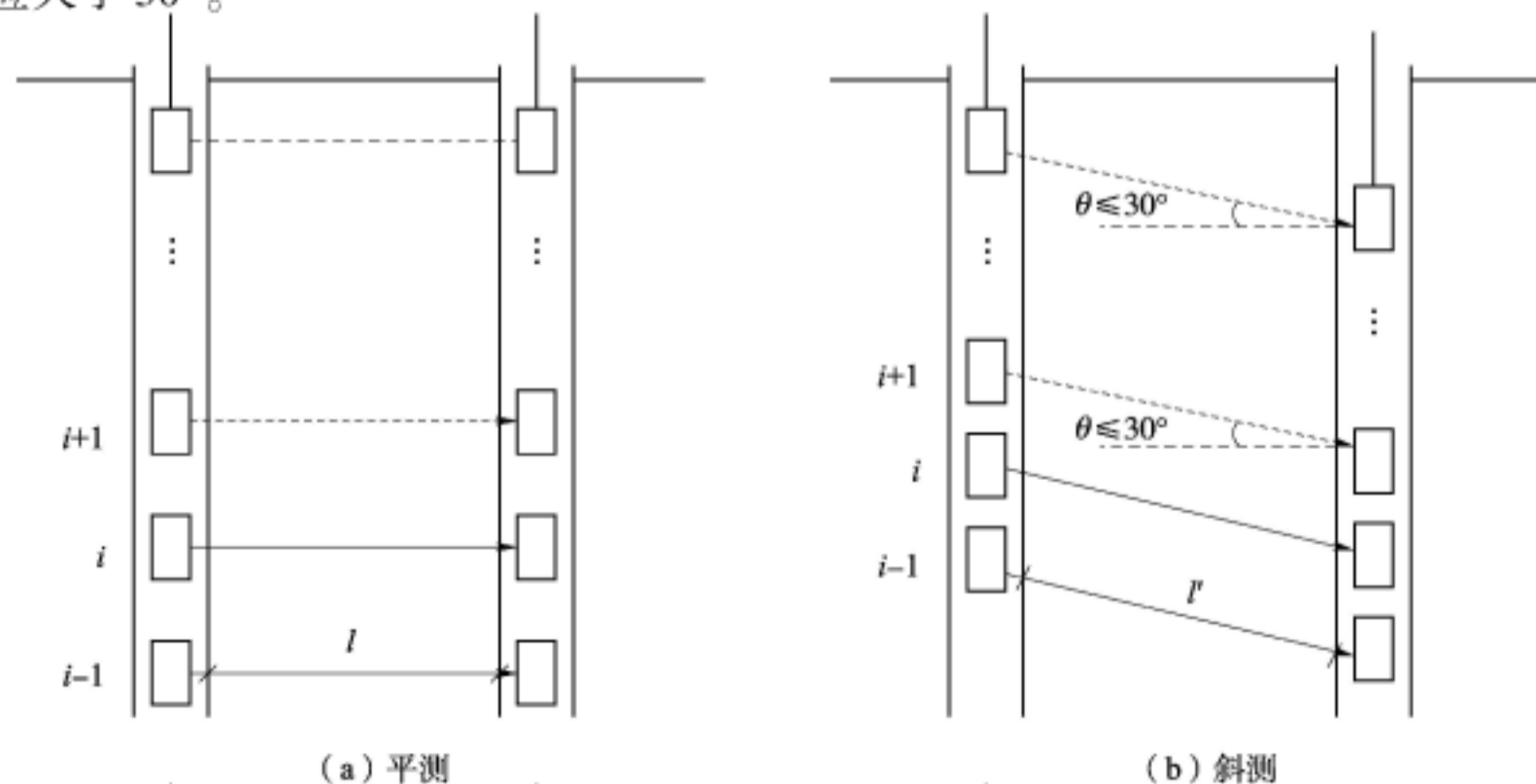


图 6.8.8 平测、斜测示意图

**6.8.8.2** 检测过程中,应将发射换能器与接收换能器同步升降,声测线间距不应大于100mm,并应及时校核换能器的深度。检测时应从桩底开始向上同步提升发射换能器与接收换能器进行检测,提升过程中应根据桩的长短进行1~3次换能器高差校正,提升过程中应确保测试波形的稳定性,提升速度不宜超过0.5m/s。

**6.8.8.3** 对于每条声测线,应实时显示和记录接收信号的时程曲线,读取首波声时、幅值,当需要采用信号主频值作为异常点辅助判据时,还应读取信号主频值,保存检测数据时应同时保存波列图信息。

**6.8.8.4** 在同一受检桩各检测剖面的平测或斜测过程中,声测线间距、声波发射电压和仪器设置参数应保持不变。

**6.8.9** 在桩身质量可疑的声测线附近,应采用增加声测线或采用扇形扫测(图6.8.9)、交叉斜测、CT影像技术等方式进行复测和加密测试,进一步确定缺陷的位置和空间分布范围。采用扇形扫测时,两个换能器中点连线的水平夹角不应大于 $40^\circ$ 。

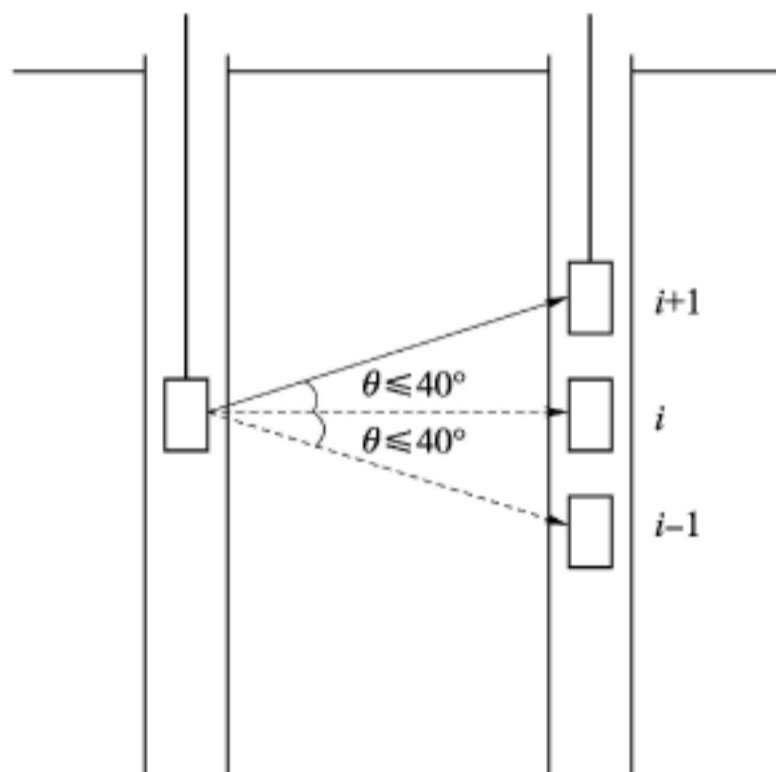


图 6.8.9 扇形扫测示意图

**6.8.10** 当因声测管倾斜导致声速数据有规律地偏高或偏低变化时,应先对管距进行合理修正,然后对数据进行统计分析。当实测数据明显有规律地偏离正常值而又无法进行合理修正,检测数据不得作为评价桩身完整性的依据。

**6.8.11** 当采用平测时,各声测线的声时 $t_{ci}(j)$ 、声速 $v_i(j)$ 、波幅 $A_{pi}(j)$ 及主频 $f_i(j)$ 应根据现场检测数据,按式(6.8.11-1)、式(6.8.11-2)、式(6.8.11-3)和式(6.8.11-4)计算,并绘制声速~深度( $v_i(j) \sim z$ )曲线和波幅~深度( $A_{pi}(j) \sim z$ )曲线,需要时可绘制辅助的主频~深度( $f_i(j) \sim z$ )曲线以及能量~深度曲线。

$$t_{ci}(j) = t_i(j) - t_0 - t' \quad (6.8.11-1)$$

$$v_i(j) = \frac{l'_i(j)}{t_{ci}(j)} \quad (6.8.11-2)$$

$$A_{pi}(j) = 20 \lg \frac{a_i(j)}{a_0} \quad (6.8.11-3)$$

$$f_i(j) = \frac{1000}{T_i(j)} \quad (6.8.11-4)$$



式中  $t_{ci}(j)$ ——第  $j$  检测剖面第  $i$  声测线声时 ( $\mu\text{s}$ ) ;  
 $t_i(j)$ ——第  $j$  检测剖面第  $i$  声测线声时测量值 ( $\mu\text{s}$ ) ;  
 $t_0$ ——仪器系统延迟时间 ( $\mu\text{s}$ ) ;  
 $t'$ ——几何因素声时修正值 ( $\mu\text{s}$ ) ;  
 $i$ ——声测线编号,应对每个检测剖面自下而上(或自上而下)连续编号;  
 $j$ ——检测剖面编号,按第 6.8.6 条编组;  
 $v_i(j)$ ——第  $j$  检测剖面第  $i$  声测线声速 ( $\text{km/s}$ ) ;  
 $l'_i(j)$ ——第  $j$  检测剖面第  $i$  声测线的两声测管的外壁间净距离 ( $\text{mm}$ ),当两声测管基本平行时取为两声测管管口的外壁间净距离;  
 $A_{pi}(j)$ ——第  $j$  检测剖面第  $i$  声测线的首波幅值 ( $\text{dB}$ ) ;  
 $a_i(j)$ ——第  $j$  检测剖面第  $i$  声测线信号首波峰值 ( $\text{V}$ ) ;  
 $a_0$ ——零分贝信号幅值 ( $\text{V}$ ) ;  
 $f_i(j)$ ——第  $j$  检测剖面第  $i$  声测线信号主频值 ( $\text{kHz}$ ),或由信号频谱分析求得主频;  
 $T_i(j)$ ——第  $j$  检测剖面第  $i$  声测线首波周期 ( $\mu\text{s}$ ) 。

**6.8.12** 当采用斜测时, $l'_i(j)$ 取发射换能器中点对应的声测管外壁处与接受换能器中点对应的声测管外壁处之间的净距,应由桩顶面两声测管的外壁间净距和发射换能器与接收换能器的高差计算得到。

**6.8.13** 当采用平测或斜测时,第  $j$  检测剖面的声速异常判断的概率统计值应按下列方法确定:

(1) 将第  $j$  检测剖面各声测线的声速值  $v_i(j)$  按式(6.8.13-1)由大到小依次排序,即:

$$v_1(j) \geq v_2(j) \geq \cdots v_k \geq \cdots v_{i-1}(j) \geq v_i(j) \geq v_{i+1}(j) \geq \cdots v_{n-k}(j) \geq \cdots v_{n-1}(j) \geq v_n(j)$$

(6.8.13-1)

式中  $v_i(j)$ ——第  $j$  检测剖面第  $i$  声测线声速,  $i=1,2,\dots,n$ ;

$n$ ——第  $j$  检测剖面的声测线总数;

$k$ ——拟去掉的低声速值的数据个数,  $k=0,1,2,\dots$ ;

$k'$ ——拟去掉的高声速值的数据个数,  $k'=0,1,2,\dots$ ;

(2) 对逐一去掉  $v_i(j)$  中  $k$  个最小数值和  $k'$  个最大数值后的其余数据,按下列公式进行统计计算:

$$v_{01}(j) = v_m(j) - \lambda \cdot s_x(j) \quad (6.8.13-2)$$

$$v_{02}(j) = v_m(j) + \lambda \cdot s_x(j) \quad (6.8.13-3)$$

$$v_m(j) = \frac{1}{n-k-k'} \sum_{i=k'+1}^{n-k} v_i(j) \quad (6.8.13-4)$$

$$s_x(j) = \sqrt{\frac{1}{n-k-k'-1} \sum_{i=k'+1}^{n-k} (v_i(j) - v_m(j))^2} \quad (6.8.13-5)$$

$$C_v(j) = \frac{S_x(j)}{v_m(j)} \quad (6.8.13-6)$$

式中  $v_{01}(j)$ ——第  $j$  剖面的声速异常小值判断值;



$v_{02}(j)$ ——第  $j$  剖面的声速异常大值判断值;

$v_m(j)$ —— $(n-k-k')$  个数据的平均值;

$S_x(j)$ —— $(n-k-k')$  个数据的标准差;

$C_v(j)$ —— $(n-k-k')$  个数据的变异系数;

$\lambda$ ——由表 6.8.13 查得的与  $(n-k-k')$  相对应的系数;

表 6.8.13 统计数据个数  $(n-k-k')$  与对应的  $\lambda$  值

$n-k-k'$	10	11	12	13	14	15	16	17	18	20
$\lambda$	1.28	1.33	1.38	1.43	1.47	1.50	1.53	1.56	1.59	1.64
$n-k-k'$	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
$\lambda$	1.64	1.69	1.73	1.77	1.80	1.83	1.86	1.89	1.91	1.94
$n-k-k'$	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58
$\lambda$	1.96	1.98	2.00	2.02	2.04	2.05	2.07	2.09	2.10	2.11
$n-k-k'$	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78
$\lambda$	2.13	2.14	2.15	2.17	2.18	2.19	2.20	2.21	2.22	2.23
$n-k-k'$	80	82	84	86	88	90	92	94	96	98
$\lambda$	2.24	2.25	2.26	2.27	2.28	2.29	2.29	2.30	2.31	2.32
$n-k-k'$	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145
$\lambda$	2.33	2.34	2.36	2.38	2.39	2.41	2.42	2.43	2.45	2.46
$n-k-k'$	150	160	170	180	190	200	220	240	260	280
$\lambda$	2.47	2.50	2.52	2.54	2.56	2.58	2.61	2.64	2.67	2.69
$n-k-k'$	300	320	340	360	380	400	420	440	470	500
$\lambda$	2.72	2.74	2.76	2.77	2.79	2.81	2.82	2.84	2.86	2.88
$n-k-k'$	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
$\lambda$	2.91	2.94	2.96	2.98	3.00	3.02	3.04	3.06	3.08	3.09
$n-k-k'$	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000
$\lambda$	3.12	3.14	3.17	3.19	3.21	3.23	3.24	3.26	3.28	3.29

(3) 按  $k=0, k'=0, k=1, k'=1, k=2, k'=2, \dots$  的顺序, 将参加统计的数列最小数据  $v_{n-k}(j)$  与异常判断值  $v_{01}(j)$  进行比较, 当  $v_{n-k}(j) \leq v_{01}(j)$  时, 去掉最小数据; 将最大数据  $v_{k'+1}(j)$  与  $v_{02}(j)$  进行比较, 当  $v_{k'+1}(j) \geq v_{02}(j)$  时去掉最大数据, 每次剔除一个数据, 然后对剩余数据构成的数列重复式(6.8.13-2) ~ 式(6.8.13-5)的计算步骤, 直到式(6.8.13-7)和式(6.8.13-8)成立:

$$v_{n-k}(j) > v_{01}(j) \quad (6.8.13-7)$$

$$v_{k'+1}(j) < v_{02}(j) \quad (6.8.13-8)$$

(4) 第  $j$  检测剖面的声速异常判断概率统计值按式(6.8.13-9)确定:

$$v_0(j) = \begin{cases} v_m(j)(1-0.015\lambda) & \text{当 } C_v(j) < 0.015 \text{ 时} \\ v_0(j) & \text{当 } 0.015 \leq C_v(j) \leq 0.045 \text{ 时} \\ v_m(j)(1-0.045\lambda) & \text{当 } C_v(j) > 0.045 \text{ 时} \end{cases} \quad (6.8.13-9)$$

式中  $v_0(j)$ ——第  $j$  检测剖面声速异常判断概率统计值。

**6.8.14** 受检桩的声速临界值应按下列方法确定:

(1) 根据预留同条件混凝土试件或钻芯法获取的芯样试件的抗压强度与声速对比试验, 结合本地区经验, 分别确定桩身混凝土声速的低限值  $v_L$  和平均值  $v_p$ ;

(2) 当  $v_L < v_0(j) < v_p$  时, 按式(6.8.14-1)确定;

$$v_c(j) = v_0(j) \quad (6.8.14-1)$$

式中  $v_c(j)$ ——第  $j$  检测剖面的声速异常判断临界值;

$v_0(j)$ ——第  $j$  检测剖面的声速异常判断概率统计值;

(3) 当  $v_0(j) \leq v_L$  或  $v_0(j) \geq v_p$  时, 分析原因,  $v_c(j)$  的取值参考同一桩的其他检测剖面的声速异常判断临界值或同一工程相同桩型的混凝土质量较稳定的受检桩的声速异常判断临界值综合确定;

(4) 对只有单个检测剖面的桩, 其声速异常判断临界值等于检测剖面声速异常判断临界值; 对于 3 个及 3 个以上检测剖面的桩, 取各个检测剖面声速异常判断临界值的算术平均值, 按式(6.8.14-2)计算该桩各声测线声速异常判断临界值。

$$v_c = \frac{\sum_{j=1}^{m_s} v_c(j)}{m_s} \quad (6.8.14-2)$$

式中  $v_c$ ——受检桩桩身混凝土声速异常判断临界值;

$m_s$ ——受检桩的检测剖面总数。

**6.8.15** 当声速不大于异常判断临界值时, 声速可判定为异常。

**6.8.16** 波幅异常判断的临界值应按式(6.8.16-1)和式(6.8.16-2)计算。波幅值小于波幅异常临界值时, 波幅可判为异常。

$$A_m(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_{pi}(j) \quad (6.8.16-1)$$

$$A_c(j) = A_m(j) - 6 \quad (6.8.16-2)$$

式中  $A_m(j)$ ——第  $j$  检测剖面各声测线波幅平均值(dB);

$A_{pi}(j)$ ——第  $j$  检测剖面第  $i$  声测线的波幅值;

$A_c(j)$ ——第  $j$  检测剖面波幅异常判断的临界值;

$n$ ——第  $j$  检测剖面的声测线总数。

**6.8.17** 当采用信号主频值作为辅助异常声测线判据时, 主频 ~ 深度曲线上主频值明显降低的声测线可判定为异常。

**6.8.18** 当采用接收信号的能量作为辅助异常声测线判据时, 能量 ~ 深度曲线上接收信号能量明显降低可判定为异常。

**6.8.19** 当采用斜率法的  $PSD$  值作为辅助异常声测线判据时,  $PSD$  值应按式(6.8.19)计算。根据  $PSD$  值在某深度处的突变, 应结合波幅变化情况进行异常声测线的判定。

$$PSD(j, i) = \frac{[t_{ci}(j) - t_{ci-1}(j)]^2}{z_i - z_{i-1}} \quad (6.8.19)$$

式中  $t_{ci}(j)$ ——第  $j$  检测剖面第  $i$  声测线声时( $\mu s$ );

$t_{ci-1}(j)$ ——第  $j$  检测剖面第  $i-1$  声测线声时( $\mu s$ );



$z_i$ ——第  $i$  声测线深度(m)；

$z_{i-1}$ ——第  $i-1$  声测线深度(m)。

**6.8.20** 桩身缺陷的空间分布范围可根据下列情况判定：

- (1) 桩身同一深度上各检测剖面桩身缺陷的分布；
- (2) 复测和加密测试的结果。

**6.8.21** 桩身完整性类别应结合桩身缺陷的数量、缺陷处声测线的声学特征、缺陷的空间分布范围按表 6.8.21 进行综合判定。

表 6.8.21 桩身完整性判定

类别	特征
I	所有声测线声学参数无异常,接收波形正常; 存在声学参数轻微异常、波形轻微畸变的异常声测线,异常声测线在任一检测剖面的任一区段内纵向不连续分布,且在任一深度横向分布的数量小于检测剖面数量的 50%
II	存在声学参数轻微异常、波形轻微畸变的异常声测线,异常声测线在一个或多个检测剖面的一个或多个区段内纵向连续分布,或在一个或多个深度横向分布的数量大于或等于检测剖面数量的 50%; 存在声学参数明显异常、波形明显畸变的异常声测线,异常声测线在任一检测剖面的任一区段内纵向不连续分布,且在任一深度横向分布的数量小于检测剖面数量的 50%
III	存在声学参数明显异常、波形明显畸变的异常声测线,异常声测线在一个或多个检测剖面的一个或多个区段内纵向连续分布,但在任一深度横向分布的数量小于检测剖面数量的 50%; 存在声学参数明显异常、波形明显畸变的异常声测线,异常声测线在任一检测剖面的任一区段内纵向不连续分布,但在一个或多个深度横向分布的数量大于或等于检测剖面数量的 50%; 存在声学参数严重异常、波形严重畸变或声速低于低限值的异常声测线,异常声测线在任一检测剖面的任一区段内纵向不连续分布,且在任一深度横向分布的数量小于检测剖面数量的 50%
IV	存在声学参数明显异常、波形明显畸变的异常声测线,异常声测线在一个或多个检测剖面的一个或多个区段内纵向连续分布,且在一个或多个深度横向分布的数量大于或等于检测剖面数量的 50%; 存在声学参数严重异常、波形严重畸变或声速低于低限值的异常声测线,异常声测线在一个或多个检测剖面的一个或多个区段内纵向连续分布,或在一个或多个深度横向分布的数量大于或等于检测剖面数量的 50%

注:①完整性类别由 IV 类往 I 类依次判定;

②对于只有一个检测剖面的受检桩,桩身完整性判定应按该检测剖面代表桩全部横截面的情况对待。

**6.8.22** 声波透射检测报告除应满足附录 B 的要求外,还应包括下列内容:

- (1) 声测管布置图及声测剖面编号;
- (2) 受检桩每个检测剖面声速~深度曲线、波幅~深度曲线,并将相应判据临界值所对应的标志线绘制于同一个坐标系;
- (3) 当采用主频值、PSD 值、接收信号能量进行辅助分析判定时,绘制主频~深度曲线、PSD 曲线、能量~深度曲线;
- (4) 各检测剖面实测波列图;
- (5) 必要时,对加密测试、扇形扫测的有关情况进行说明;
- (6) 当对管距进行修正时,注明进行管距修正的范围及方法。



## 7 现场监测

### 7.1 一般规定

7.1.1 监测单位应按照设计要求结合工程具体条件选用监测仪器设备,且在安设后有必要的保护措施。有条件时应优先采用自动化采集、传输系统。

7.1.2 现场监测时宜同时记录气象、水文、边界条件等周边环境变化情况。

7.1.3 当发生有感地震、大洪水、爆破、台风等特殊情况下,应对重点部位加强观测,并加强巡视检查。

7.1.4 现场监测资料应按设计要求及时报送,设计无要求时可按周报、月报、异常报等形式报送。出现数据异常时,监测单位应综合分析各监测项目数据和现场工况后确定是否发出安全预警。

7.1.5 监测资料应包括测点布置、监测数据、数值变化趋势、周边环境等情况及相应的图表,并给出结论及建议。

### 7.2 表层沉降观测

7.2.1 表层沉降观测的基准点及工作基点的布设应符合下列规定:

7.2.1.1 基准点应选在地基稳固、便于观测和不受影响的地点。一个测区的基准点不应少于3个。

7.2.1.2 基准点远离观测点或不便直接观测时,可布设工作基点,其点位应稳固,便于观测。

7.2.1.3 基准点和工作基点的埋设应满足下列要求:

(1) 基准点埋设在测区以外的基岩或坚硬岩土层上,基准点和工作基点的标石按现行行业标准《水运工程测量规范》(JTS 131)的要求埋设;

(2) 观测值受波浪、水流等影响较大时,加设金属保护管。

7.2.2 表层沉降观测应根据工程实际情况选用水准仪、静力水准仪、电磁波测距仪、液体压差式沉降仪、单点位移计、全站仪或GNSS接收机等仪器。

7.2.3 表层沉降观测点应结合工程特点布设在下列位置:

- (1) 沉降或伸缩缝两侧;
- (2) 不同结构分界处;
- (3) 不同基础或地基交接处;
- (4) 码头的前、后沿;
- (5) 墩式结构的四角;

(6)地基处理工程不易被破坏的位置;

(7)设计要求的其他位置。

**7.2.4** 表层沉降观测点标志可采用普通水准标石或用直径 25cm 的水泥管现场浇灌,埋深宜为 1m~2m,并使标石底部埋在冰冻线以下。地基处理类工程可采用钢板、水泥墩等材料制作测点,其尺寸不宜小于 0.5m×0.5m。

**7.2.5** 水准测量时应符合现行国家标准《国家一、二等水准测量规范》(GB/T 12897)和《国家三、四等水准测量规范》(GB/T 12898)的有关规定,监测路线宜采用闭合路线,其测量精度应符合表 7.2.5-1 的规定,高程中误差应符合表 7.2.5-2 的规定。

表 7.2.5-1 水准测量法精度

等级	监测方法要求	往返互差、附和或环线闭合差(mm)
一等	可采用国家一等水准精度(设双转点,视线≤15m,前后视距差≤0.3m,视距累积差≤1.5m)。精密液体静力水准测量、微水准测量等	$\leq 0.15\sqrt{n}$
二等	采用国家一等水准测量和精密液体静力水准测量	$\leq 0.30\sqrt{n}$
三等	按《工程测量规范》(GB50026)二等水准测量和液体水准测量进行	$\leq 0.60\sqrt{n}$
四等	按《工程测量规范》(GB50026)三等水准测量和短视线三角高程测量进行	$\leq 1.40\sqrt{n}$

注:表中  $n$  为测段的测站数。

表 7.2.5-2 观测点的观测精度和适用范围

等级	高程中误差(mm)	适用范围
一等	±0.5	对变形特别敏感的工程
二等	±1.0	对变形比较敏感的工程
三等	±2.0	一般工程
四等	±4.0	对观测精度要求比较低的工程

注:可根据需要按观测点的高程中误差或相邻变形观测点高差中误差确定测量等级。

**7.2.6** 当采用静力水准测量时,应符合下列规定:

(1)监测前,对监测头的零点差进行检验;

(2)保持连通管路无压折,管内液体无气泡;

(3)监测头的圆气泡居中;

(4)两端测站的环境温度相差不大;

(5)仪器对中误差不大于 2mm,倾斜度不大于 10';

(6)采用两台仪器对向观测,或采用一台仪器往返观测;液面稳定后开始测量;每监测一次,读数 3 次,取其平均值作为监测值。



**7.2.7** 采用电磁波测距三角高程测量,垂直角宜采用 1"级仪器中丝法对向监测 6 测回,测回间垂直角互差不应大于 6";测距长度宜小于 500m,测距中误差不应超过 3mm;觇高程和仪器高应精确量至 0.1mm;测站监测前后各测量一次气温、气压,计算时加入相应改正。

**7.2.8** 采用液压式沉降仪进行表层沉降观测时,相对不动点应埋入相对稳定层不小于 2m,并做好信号电缆的保护工作。

**7.2.9** 采用单点位移计时,应在埋设前估算场地的最大沉降量,确保量程满足要求。

**7.2.10** 地基处理工程的表层沉降观测,当监测标志需升高或降低时,应在升高或降低前、后各观测一次。

**7.2.11** 采用 GNSS 测量高程时,应符合现行行业标准《水运工程测量规范》(JTS 131)的有关规定。

**7.2.12** 观测成果的整理应包括但不局限于下列内容:

- (1) 计算表层沉降,两次测量值之差即为该时间段的表层沉降;
- (2) 计算表层沉降速率;
- (3) 绘制累计沉降~时间曲线、荷载~时间曲线、沉降速率~时间曲线;
- (4) 推算最终沉降量和固结度。

**7.2.13** 对于地基处理类工程,地基最终沉降量推算应有完整的实测沉降  $P \sim S \sim t$  曲线。在用经验公式推算最终沉降量前,应剔除实测  $S \sim t$  曲线上的不合理点,并拟合成一条光滑曲线。

**7.2.14** 地基最终沉降量的推算可采用下列方法:

- (1) 采用“三点法”按式(7.2.14-1)推算;

$$S_{\infty} = \frac{S_3(S_2 - S_1) - S_2(S_3 - S_2)}{(S_2 - S_1) - (S_3 - S_2)} \quad (7.2.14-1)$$

式中  $S_{\infty}$ ——根据实测沉降曲线推算的地基最终沉降量;

$S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ ——满载后,实测沉降曲线中对应于  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$  时刻的沉降量, $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$  满足  $t_1 - t_2 = t_2 - t_3 = \Delta t$ ;

(2) 采用“经验双曲线法”时,根据已拟合的实测  $S \sim t$  光滑曲线,按式(7.2.14-2)和式(7.2.14-3)推算。

$$S_{\infty} = S_0 + \frac{1}{\beta} \quad (7.2.14-2)$$

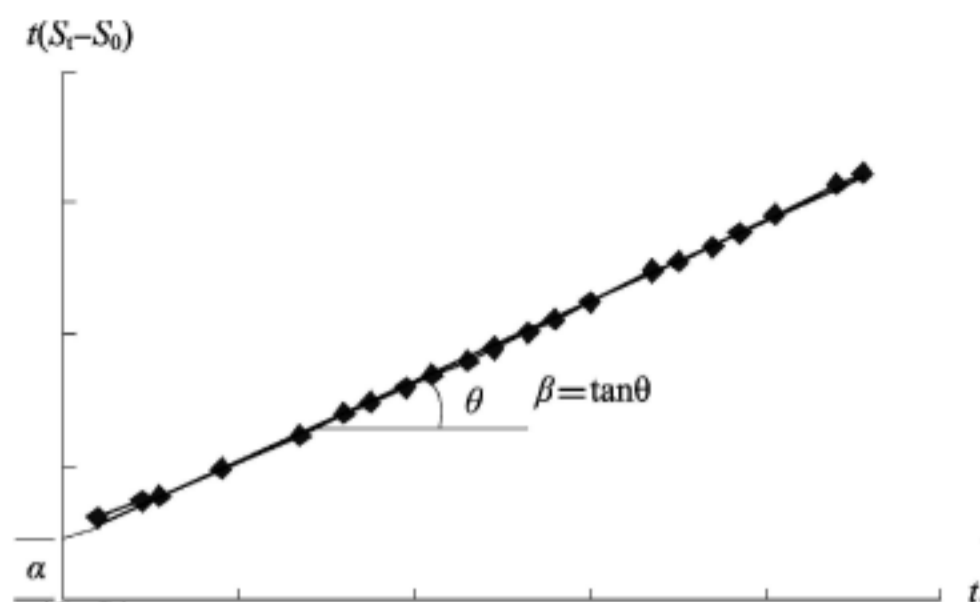
$$S_t = S_0 + \frac{t}{\alpha + \beta t} \quad (7.2.14-3)$$

式中  $S_0$ ——满载时,即  $t=0$ (假定)时的地基沉降量(mm);

$S_t$ —— $t$  时刻的地基沉降量(mm);

$\alpha$ 、 $\beta$ ——与地基及荷载有关的常数,根据式(7.2.14-3)用图解法求出(图 7.2.14);

$t$ ——从满载开始的时间。

图 7.2.14 图解法求解  $\alpha$   $\beta$  值

7.2.15 根据沉降数据推算的固结度按式(7.2.15)计算。

$$U_t = \frac{S_t}{S_\infty} \times 100 \quad (7.2.15)$$

式中  $U_t$ —— $t$  时刻的固结度(%)；

$S_t$ —— $t$  时刻的地基沉降量(mm)；

$S_\infty$ ——地基的最终沉降量(mm)。

### 7.3 分层沉降观测

7.3.1 根据工程实际情况,监测单位可选择使用电磁式分层沉降仪、液压式沉降仪或多点位移计等仪器进行分层沉降观测。

7.3.2 分层沉降观测应测量地基各层土的沉降量、沉降速率以及有效压缩层的厚度。

7.3.3 分层沉降观测点的设置应沿铅垂线方向,宜在土层的交界面布置测点,每一土层不得少于1点;最浅的观测点应设在地基顶面或基础底面下不小于0.5m处,最深的观测点应设在岩石层或超过压缩层理论深度处,工程需要时经论证也可设在适当深度处。

7.3.4 分层沉降观测测点的埋设宜采用钻孔法。

7.3.5 分层沉降观测精度应满足设计要求,设计无要求时应按分层沉降观测点相对于邻近工作基点的高程中误差的要求确定。

7.3.6 分层沉降观测的每个监测点应平行测定2次,读数差不大于 $\pm 2\text{mm}$ 。

7.3.7 分层沉降测点顶高程的观测宜采用精密水准仪。

7.3.8 采用磁性分层沉降仪时,应确保磁性沉降环的钢片牢固地嵌入设计位置,磁环向下应有足够的沉降距离;导管可选择PVC硬塑管或可压缩金属软管,钻孔深度应超过最下部测点0.5m~1.0m;导管口下端应封死,接头处做密封处理防止泥、砂和水进入管内;导管内应灌入清水,以抵消水对导管的浮力;导管沉放到位后,应在钻孔与导管之间回填现场干细土或中粗砂,回填速度不宜过快。

7.3.9 采用液压式沉降仪时,不动点应埋入相对稳定层不小于2m,并做好信号电缆的保护工作。

7.3.10 采用多点位移计时,可根据工程情况选用灌浆螺纹锚头、液压锚头、填装式锚头或弹簧套紧锚头等类型。



### 7.3.11 观测成果的整理应包括但不局限于下列内容:

- (1) 计算各测点的沉降;
- (2) 计算各测点沉降速率;
- (3) 计算两相邻测点之间的土层压缩率;
- (4) 绘制累计分层沉降~时间曲线、荷载~时间曲线、各测点沉降速率~时间曲线。

## 7.4 孔隙水压力观测

7.4.1 监测单位应根据监测目的、土层的渗透性质和测试期的长短等条件选用封闭式或敞口式孔隙水压力计,并应符合下列规定。

7.4.1.1 电测式孔隙水压力计适用于各种渗透性质的土层。当量测误差小于等于2kPa时,应使用电测式孔隙水压力计;使用期大于1个月、测试深度大于10m或在一个观测孔中多点同时量测时,宜选用电测式孔隙水压力计。

7.4.1.2 流体压力式和开口式孔隙水压力计适用于渗透系数 $K$ 大于 $1 \times 10^{-5}$  cm/s的土层。当量测允许误差大于等于2kPa时,可选用液压式孔隙水压力计;当量测允许误差大于等于10kPa时,可选用气压式孔隙水压力计。流体压力式孔隙水压力计使用期不宜超过1个月;液压式孔隙水压力计不宜在气温低于零摄氏度时使用。

7.4.2 选用孔隙水压力计应满足下列要求:

7.4.2.1 量程应满足被测压力范围的要求,可取静水压力与超孔隙水压力之和的2倍;

7.4.2.2 压力计的技术参数应满足现行行业标准《水运工程试验检测仪器设备技术标准》(JTS 238)的有关规定。

7.4.3 孔隙水压力观测点的布置应符合下列规定。

7.4.3.1 监测位置应具有代表性,并应在最危险断面布置观测点。

7.4.3.2 有安全要求的工程每个观测断面至少应有3个部位布置监测孔,包括地基中部、地基边缘和地基外部可能破坏范围内的敏感部位。

7.4.3.3 每一部位沿深度方向布设孔隙水压力计以2m~4m间距为宜,并且每一土层应至少布置1个测点。

7.4.3.4 同一钻孔中没采取特别隔离密封措施不宜埋设多个孔隙水压力计。采用单孔单埋时,同组孔隙水压力计的水平间距不宜超过3m。

7.4.4 孔隙水压力计埋设方法可采用压入法、钻孔法、填埋法等。埋设前应符合下列要求:

- (1) 排除透水石及管路中的空气;
- (2) 核查标定数据,记录探头编号,测读初始读数。

7.4.5 埋设孔隙水压力计时应符合下列规定。

7.4.5.1 采用钻孔法埋设孔隙水压力计时,钻孔直径宜为110mm~130mm,不宜使用泥浆护壁成孔,钻孔应圆直、干净;封口材料宜采用直径10mm~20mm的干燥膨润土球。

7.4.5.2 孔隙水压力计周围必须回填透水填料。透水填料宜选用干净的中粗砂、砾砂或粒径小于10mm的碎石块。透水填料层高度宜为0.6m~1.0m。

7.4.5.3 上下两个孔隙水压力计之间应有高度不小于1m的隔水填料分隔,宜选用直

径 2cm 左右的风干黏土球作填料。在投放黏土球时,应缓慢、均衡投入,确保隔水效果。

**7.4.5.4** 观测孔口应用隔水填料填实封严,防止地表水渗入。

**7.4.5.5** 观测孔口部应设置有效的防护装置,并设立明显的标志,孔隙水压力计导线应有防潮、防水措施。

**7.4.6** 在软弱土层中埋设单个孔隙水压力计时,宜采用压入埋设法。应根据埋设深度和压入难易程度,直接将孔隙水压力计缓慢压入预定深度,或钻进成孔到埋设预定深度以上 0.5m ~ 1.0m 处,再将孔隙水压力计压到预定深度,其上孔段用隔水填料全部填实封严。

**7.4.7** 在填方工程中宜采用填埋法。

**7.4.8** 孔隙水压力计埋设后应准确测定初始值,并应符合下列规定。

**7.4.8.1** 埋设结束后,应逐日定时量测,观测初始值的稳定性。

**7.4.8.2** 测量值达到以下规定时可视为稳定:

(1) 电测式孔隙水压力计、液压式孔隙水压力计连续 3d 读数差小于 2kPa;

(2) 气压式孔隙水压力计连续 3d 读数差小于 10kPa。

**7.4.8.3** 初始值应取稳定后读数的平均值。

**7.4.9** 在观测孔隙水压力时,应测量埋设位置附近的地下水位。

**7.4.10** 观测成果的整理应包括下列主要内容:

(1) 计算各测点的孔隙水压力值;

(2) 计算各测点两次测量间隔时间内的孔隙水压力变化值;

(3) 计算超静孔压值、超静孔压比、固结度;

(4) 绘制孔隙水压力 ~ 时间曲线、荷载 ~ 时间曲线、超静孔压比 ~ 时间曲线。

**7.4.11** 采用排水固结法进行地基处理时,可按式(7.4.11)计算孔隙水压力固结度:

$$U'_t = \frac{\Delta u}{u} \times 100 \quad (7.4.11)$$

式中  $U'_t$ —— $t$  时刻的孔隙水压力固结度(%);

$\Delta u$ ——孔隙水压力消散值(kPa);

$u$ ——总超静孔压值(kPa)。

## 7.5 地下水位观测

**7.5.1** 当地下水位变动影响工程质量和安全时,应进行地下水位观测。

**7.5.2** 地下水位观测可采用钻孔埋设水位管法、预埋传感器法或水尺监测法。监测时应根据工程实际情况选择使用钢尺水位计或自记水位计等仪器。

**7.5.3** 采用水位计观测水位时,其观测精度不应低于 2mm;采用水尺监测法时,观测精度不宜低于 10mm。

**7.5.4** 检验降水效果的水位观测宜布置在降水区内,采用轻型井点管降水时可布置在总管的两侧,采用深井降水时应布置在两孔深井之间,水位孔深度宜在最低设计水位下 2m ~ 3m。采用真空预压时测点宜布置在加固区外 2m ~ 3m 处。

**7.5.5** 地下水位观测点的设置应符合下列规定。



**7.5.5.1** 地下水位观测点的布置应根据监测的地基基础类型确定。

**7.5.5.2** 地下水位应布置在具有代表性的断面上和易产生破坏的敏感区域,各断面地下水位不宜少于3个监测点。

**7.5.6** 潜水水位管应在施工前埋设,滤管长度应满足测量要求,且应采取措施避免地表水的影响;承压水位监测时被测含水层与其他含水层之间应采取有效的隔水措施。

**7.5.7** 水位管埋设后,应逐日连续观测水位并取得稳定初始值。

**7.5.8** 采用钻孔埋设水位管法时应采用水准仪测出水位管顶的高程,计算水位变化。

**7.5.9** 观测成果的整理应包括但不局限于下列内容:

- (1) 计算水位变化值;
- (2) 绘制水位~时间曲线、荷载~时间曲线。

## 7.6 表层水平位移观测

**7.6.1** 水平位移观测基准点及工作基点的布设除应符合第7.2.1条的规定外,尚应符合下列规定。

**7.6.1.1** 采用视准线法进行水平位移观测时,两端应布设基准点或工作基点,视准线偏离测点的距离不应大于20mm。并应在视准线上至少布设2个检查点。

**7.6.1.2** 平面基准点和工作基点应采用具有强制归心装置的观测墩。

**7.6.2** 监测单位应根据工程实际情况、监测等级和监测要求等选用全站仪、经纬仪、激光测距仪、电磁波测距仪或GNSS接收机等仪器进行表层水平位移观测。

**7.6.3** 表层水平位移点的布设应与变形体紧密结合,选择在既能代表该部位变形体的变形特征又便于监测的位置。

**7.6.4** 表层水平位移根据监测要求和现场条件可选用下列方法:

- (1) 测量监测点特定方向的位移时,选用视准线法、激光准直线法或测边角法等;
- (2) 测量监测点任意方向的位移时,视监测点的分布情况,采用前方交会法、方向差交会法、导线测量法或极坐标法等;

(3) 对监测内容较多的大测区或监测点远离稳定地区的测区,采用三角、三边、边角测量与基准线相结合的综合测量方法等。

**7.6.5** 用交会法进行水平位移监测时,交会方向不宜少于3个;测角交会法的交会角,应在 $60^\circ \sim 120^\circ$ 之间,测边交会法的交会角,宜在 $30^\circ \sim 150^\circ$ 之间。

**7.6.6** 用极坐标法进行水平位移监测时,宜采用双测站极坐标法,其边长应采用钢尺丈量或电磁波测距仪测定。当采用钢尺量距时,不宜超过一尺段,并应进行尺长、温度和高差等项改正。

**7.6.7** 测站点应采用有强制对中装置的监测墩,监测点应安置反光镜或觇牌等强制对中装置或其他固定照准标志。

**7.6.8** 当采用经纬仪投点法或小角法时,应检验经纬仪的垂直轴倾斜误差;当垂直角超出 $3^\circ$ 时,应进行垂直轴倾斜改正。

**7.6.9** 当采用视准线法时,应符合下列规定。

**7.6.9.1** 视准线的两个基点应选择在较稳定的区域,并具备高一级的基准点经常校核的条件,且便于安置仪器和监测。

**7.6.9.2** 视准线离各种障碍物应有 1m 以上的距离。

**7.6.9.3** 当采用活动觇牌法监测时,监测前应测定其零位差,其量距精度不应低于 1/2000。

**7.6.9.4** 基点和监测点宜浇筑带强制对中装置的监测台或监测墩,墩面离地表 1.2m 以上,各监测台或监测墩面宜位于同一高程面内。

**7.6.9.5** 视准线的长度不宜超过 300m,当视线超过 300m 时,可分段监测。

**7.6.10** 当采用引张线法时,应符合下列规定。

**7.6.10.1** 引张线长度大于 200m 时,宜采用浮托式。

**7.6.10.2** 引张线两端,可设置倒垂线作为校核基准点。

**7.6.10.3** 引张线宜采用直径为 0.8mm~1.2mm 的不锈钢丝。

**7.6.10.4** 监测时,测回较差不应超过 0.2mm。

**7.6.11** 当采用正、倒垂线法时,应符合下列规定。

**7.6.11.1** 应根据垂线长度,合理确定重锤质量或浮子的浮力。

**7.6.11.2** 垂线宜采用直径为 0.8mm~1.2mm 的不锈钢丝或因瓦丝。

**7.6.11.3** 单段垂线长度不宜大于 50m。

**7.6.11.4** 需要时,正倒垂可结合布设。

**7.6.11.5** 测站应采用有强制对中装置的监测墩。

**7.6.11.6** 垂线监测可采用光学垂线坐标仪,测回较差不应超过 0.2mm。

**7.6.12** 当采用激光测量法时,应符合下列规定。

**7.6.12.1** 激光经纬仪、激光导向仪、激光准直仪等激光器宜安置在变形区影响之外或受变形影响较小的区域。激光器应采取防尘、防水措施。

**7.6.12.2** 安置激光器后,应同时在激光器附近的激光光路上设立固定的光路检核标志。

**7.6.12.3** 整个光路上应无障碍物,目标板应稳固设立在变形比较敏感的部位并与光路垂直;目标板的刻画,应均匀、合理。监测时应将接收到的激光光斑,调至最小、最清晰。

**7.6.13** 当采用 GNSS 测量法时,其监测技术要求应符合现行行业标准《水运工程测量规范》(JTS 131)中的有关规定。

**7.6.14** 当采用全站仪自动跟踪测量监测时,应符合现行国家标准《工程测量规范》(GB 50026)中的有关规定。

**7.6.15** 表层水平位移的监测精度应符合表的规定:

表 7.6.15 表层水平位移监测精度

等级	点位中误差(mm)	适用范围
一等	±1.5	对变形特别敏感的工程
二等	±3.0	对变形比较敏感的工程
三等	±6.0	一般性工程
四等	±12.0	对监测精度要求比较低的工程

注:当水平位移变形测量用坐标向量表示时,向量中误差为表中相应等级点位中误差的  $1/\sqrt{2}$ 。

**7.6.16** 观测成果的整理应包括下列主要内容:



- (1) 计算表层水平位移值;
- (2) 计算表层水平位移速率;
- (3) 绘制表层水平位移 ~ 时间曲线、荷载 ~ 时间曲线、表层水平位移速率 ~ 时间曲线。

## 7.7 深层水平位移观测

**7.7.1** 水运工程地基基础的深层水平位移监测宜采用测斜仪监测法。

**7.7.2** 深层水平位移观测应根据工程实际情况、监测等级和监测要求等选用滑动式测斜仪或固定式测斜仪。当现场条件不利于仪器保护和数据采集或需要进行自动采集时,宜采用固定式测斜仪。

**7.7.3** 深层水平位移监测点的位置和数量应根据监测目的和要求确定。沿水平向的监测点位间距应根据工程性质和重要性确定,宜取 20m ~ 200m,滑动式测斜仪的竖直向监测点间距可取 0.5m 或 1.0m。每个水平位移监测断面的监测点位不应少于 2 个。

**7.7.4** 测斜仪监测法应符合下列规定。

**7.7.4.1** 测斜导管可采用铝合金或塑料管,其弯曲性能应以适应被测主体的位移情况为适宜。测斜导管内纵向的十字导槽应润滑顺直,管端接口应紧密。

**7.7.4.2** 用钻孔埋设测斜导管时,测斜导管底端埋入相对稳定层应不小于 2m,或覆盖层足够深处;接长管道时,应使导向凹槽严格对正,不得偏扭;导管之间的连接应牢固可靠,防止泥、砂进入管内。

**7.7.4.3** 固定式测斜仪应放置在测斜导管内,竖直向间距应根据工程需要选取,宜为 1.5m ~ 3.5m。连接杆之间应有能灵活转动的万向接头。

**7.7.4.4** 测斜导管理设后,应将滑动式测斜仪放入导管一直到孔底,并使导向轮处于凹槽里。若导向轮跳出凹槽,应提起测斜导管重新埋设。

**7.7.4.5** 钻孔埋设测斜导管后,应使一组凹槽方向与预计的位移方向一致。然后回填钻孔,应使回填料与孔周介质符合反滤及密度要求。

**7.7.4.6** 导管的底部应密封,避免泥、砂进入。现场应做好保护仪器的醒目标记。

**7.7.4.7** 当埋设位置在水下时,宜采用固定式测斜仪,并将信号电缆引至施工区域之外,做好保护措施。

**7.7.4.8** 滑动式测斜仪测量时,应将测斜仪的导向轮放入水平位移方向的凹槽,直至导管底部,将电缆线与接收指示器连接,打开开关。读数稳定后,应提升电缆线到欲测位置,读数。每次应保证在同一位置处。将测斜仪提升到管口后,应旋转 180°,再按上述步骤进行测量,消除测斜仪本身的固有误差。

**7.7.5** 观测成果的整理应包括下列主要内容:

- (1) 计算各测点的水平位移累计值;
- (2) 计算各测点两次测量间隔时间内的水平位移变化值;
- (3) 计算水平位移速率;
- (4) 绘制深层水平位移 ~ 时间曲线、荷载 ~ 时间曲线、深层水平位移速率 ~ 时间曲线。

## 7.8 应力应变观测

**7.8.1** 监测单位应根据工程特点、应力应变状况及施工计划合理布置测试断面和测点,使监测成果应能反映应力、应变分布及最大值、最小值和方向。

**7.8.2** 应力应变观测宜在现场预埋测点,采用测读仪人工或自动记录的方式进行观测。

**7.8.3** 测试断面的选择应符合下列原则:

- (1) 理论设计计算书提供的具有代表性的应力应变大的危险断面;
- (2) 受力复杂,需要详细分析的断面;
- (3) 断面形状不规则,有突变处的截面;
- (4) 设计要求的其他位置。

**7.8.4** 测试断面上测点布置应符合下列规定。

**7.8.4.1** 主应力方向已知时,轴向受力构件应在其断面上、下或左、右沿轴向布置测点;受弯构件应在其最大弯矩处断面的边缘或四角沿轴向布置测点;压弯构件应在其断面的四角上布置不少于四个轴向测点。

**7.8.4.2** 当主应力方向未知时,测点可布置在受弯构件的正应力与剪应力较大的部位、断面形状不规则或有突变处、汇交力系的杆件节点部位。

**7.8.4.3** 重要受力部位一个测点应布置两个传感器。

**7.8.4.4** 对称结构断面可适当减少测点数量。

**7.8.5** 应结合施工工艺、地质条件、工程特点等因素综合选取应变计或应力计,且量程应满足被测内力范围的要求,其上限可取最大设计值的2倍;分辨率不宜低于 $0.2\% F \cdot S$ ,精度不宜低于 $\pm 0.5\% F \cdot S$ 。传感器的选取应考虑环境温度对测量数据的影响。

**7.8.6** 现场测试前应进行下列准备工作:

- (1) 测点位置表面打磨、清洁;
- (2) 测量导线布置、连接,测试仪器布置;
- (3) 测量仪器调试。

**7.8.7** 测试前应对仪器进行力学性能、温度性能、防水性能等的校验,满足现场使用要求。

**7.8.8** 埋设前,应根据监测设计要求完成预留槽孔、导管、集线箱壁龛及各种预埋件的施工和加工,并对埋设点位置进行测量放样。按要求进行电缆连接和编号,应将埋设仪器及附件进行试安装,检查仪器性能,确认各项工作无误。

**7.8.9** 仪器埋设时,应使仪器保持正确位置及方向。埋设仪器周围进行回填时,应剔除大于8cm的骨料,且应由人工分层密实。仪器埋设后,应对仪器进行检测、调试,发现问题及时处理或更换,确认工作正常后做好标记,防止人为或机械损坏仪器。

**7.8.10** 仪器埋设应符合下列规定。

**7.8.10.1** 单向仪器埋设的角度误差不应超过 $1^\circ$ ,位置误差不应超过2cm。

**7.8.10.2** 双向仪器应保持相互垂直,相距8cm~10cm,且其中心线与结构表面的距离



应相同。

**7.8.10.3** 应变计组应固定在支座及支杆上,支杆伸缩量应大于 0.5mm,支座定向孔应能固定支杆的位置和方向。仪器方位的角度误差不应超过  $\pm 1^\circ$ 。

**7.8.10.4** 基岩应变计标距长度应为 1m ~ 2m。埋设孔径应大于仪器最大直径 4cm ~ 5cm,且位于埋设孔中心。孔内杂质应清除,并冲洗干净,排除积水。埋设时应用膨胀水泥砂浆填孔;当采用普通水泥时,应掺适量膨胀剂。宜在仪器中间嵌一层 2mm 厚的橡皮或油毛毡,防止砂浆对仪器变形的影响。仪器方向的误差不应超过  $\pm 1^\circ$ 。

**7.8.10.5** 钢板计夹具与钢板焊接时应采用模具定位。夹具焊接后,应冷却至常温后安装应变计。埋入混凝土内的钢板计应设保护盖,夹具表面应涂沥青。

**7.8.11** 压应力计埋设时应符合下列规定:

(1) 垂直方向埋设时,混凝土面冲洗凿毛,底面水平,在底面铺 6mm 厚水泥砂浆垫层;水泥砂浆垫层初凝后,用更稠的水泥砂浆放在垫层上,将应力计放在水泥砂浆层上,边旋转边挤压,排除气泡和多余水泥砂浆,上部放置 10kg 压重块;随时用水准仪或水平尺校正仪器,保持水平;压重 12h 后,浇筑混凝土,取出压重块;整个过程不碰撞仪器;

(2) 水平方向和倾斜方向埋设时,混凝土与仪器承压面结合紧密,仪器的位置和方向正确。

**7.8.12** 钢筋计应尽量焊接在同一直径的受力钢筋并保持在同一轴线上,受力钢筋之间的绑扎接头应距仪器 1.5m 以上。钢筋计的焊接可采用对焊、坡口焊或熔槽焊。焊接时及焊接后,宜在靠近传感器端用湿毛巾包裹,在湿毛巾上浇水冷却,仪器温度不应超过  $60^\circ\text{C}$ ,且不得在焊缝处浇水。

**7.8.13** 测缝计可采用预埋套筒或打孔的方式埋设。预埋套筒时,应在混凝土振捣密实后挖去混凝土露出套筒,打开套筒盖,取出填塞物,安装测缝计,回填混凝土。采用打孔法时,孔径应大于 9cm,深度宜为 50cm。

**7.8.14** 裂缝长度变化测量可采用在裂缝端头作标记,配合钢卷尺测量距离的方法进行。裂缝宽度定性监测时可采用跨缝粘贴薄玻璃片或其他薄片状脆性材料监测,定量监测可采用裂缝测宽仪、刻度放大镜人工测读或跨缝粘贴裂缝扩展片的电测方法进行测量。裂缝深度可采用裂缝测深仪量测。埋设裂缝计时,应在埋设位置上将捣实的混凝土挖深约 20cm 的坑,将裂缝计放入,回填混凝土。

**7.8.15** 传感器电缆牵引应按设计要求实施并符合下列规定。

**7.8.15.1** 水平牵引可直接埋设在混凝土内或加槽钢保护。

**7.8.15.2** 向上牵引时可沿混凝土柱或钢筋上引。

**7.8.15.3** 向下牵引时宜预埋电缆或导管,导管中应设钢丝绳或其他承受电缆自重的附件。

**7.8.15.4** 电缆应避免承受过大的拉力或接触尖锐的物体,在关键部位应用橡皮或麻布等材料包扎。

**7.8.16** 观测成果的整理应包括下列主要内容:

(1) 计算各测点的应力应变值及其变化速率;



(2) 绘制应力应变值~时间曲线、施工工况~时间曲线、应力应变速率~时间曲线。

## 7.9 倾斜观测

**7.9.1** 倾斜观测可用于水工建筑物主体的倾斜观测。

**7.9.2** 倾斜观测应根据观测方法选择垂球、经纬仪、倾斜仪、激光铅直仪或近景摄影仪等设备。

**7.9.3** 倾斜观测方法应符合下列规定。

**7.9.3.1** 倾斜观测点和测站点的布设应满足下列要求：

(1) 倾斜观测点沿竖直线按顶部和下部对应设置；

(2) 倾斜观测点与水平位移、垂直位移观测点同时设置；

(3) 当从水工建筑物外部观测时，测站点的点位选在与倾斜方向成正交的方向线上距照准目标 1.5~2.0 倍目标高度的固定位置；当利用水工建筑物内部竖向通道观测时，将通道底部中心点作为测站点；

(4) 按前方交会法布设的测站点，基线端点的选设满足测距或长度丈量的要求；按方向线水平角法布设的测站点，设置好定向点。

**7.9.3.2** 倾斜观测点位的标志设置应符合下列规定：

(1) 水工建筑物顶部和墙体上的观测点标志采用埋入式照准标志；当有特殊要求时，则专门设计；

(2) 不便埋设标志的塔形、圆形建筑以及竖直构件，照准视线所切同高边缘确定的位置或用高度角控制的位置作为观测点位；

(3) 位于地面的测站点和定向点，根据不同的观测要求，使用带有强制对中装置的观测墩或混凝土标石；

(4) 对于一次性倾斜观测项目，观测点标志采用标记形式或直接利用符合位置与照准要求的建筑特征部位，测站点采用小标石或临时性标志。

**7.9.3.3** 当从水工建筑物外部观测时，宜选用下列经纬仪观测法：

(1) 投点法——观测时，在底部观测点位置安置水平读数尺等量测设施；在每测站安置经纬仪投影时，按正倒镜法测出每对上下观测点标志间的水平位移分量，再按矢量相加法求得水平位移值作为倾斜量、位移方向作为倾斜方向；

(2) 测水平角法——对塔形、圆形建筑或构件，每测站的观测以定向点作为零方向，测出各观测点的方向值和至底部中心的距离，计算顶部中心相对底部中心的水平位移分量；对矩形建筑，在每测站直接观测顶部观测点与底部观测点之间的夹角或上层观测点与下层观测点之间的夹角，以所测角值与距离值计算整体的或分层的水平位移分量和位移方向；

(3) 前方交会法——所选基线与观测点组成最佳构形，交会角在  $60^\circ \sim 120^\circ$  之间；水平位移计算，采用直接由两周期观测方向值之差解算坐标变化量的方向差交会法，或采用按每周期计算观测点坐标值，再以坐标差计算水平位移的方法。

**7.9.3.4** 当水工建筑物具有足够的整体刚度时，宜选用倾斜仪直接观测法，可采用水



管式倾斜仪、水平摆倾斜仪、气泡倾斜仪或电子倾斜仪进行观测。倾斜仪应具有连续读数、自动记录和数字传输的功能。监测水工建筑物上部层面倾斜时,仪器可安置在建筑顶层。监测基础倾斜时,仪器可安置在基础面上,以所测基础面的水平倾角变化值反映和分析基础倾斜的变化程度。

**7.9.3.5** 当水工建筑物顶部与下部之间具有竖向通视条件时,宜选用下列观测方法:

(1)吊垂球法——在顶部或所需高度处的观测点位置上,直接或支出一点悬挂适当重量的垂球,在垂线下的底部固定毫米格网读数板等读数设备,直接读取或量出上部观测点相对底部观测点的水平位移量和位移方向;

(2)激光铅直仪观测法——在顶部适当位置安置接收靶,在其垂线下的地面或地板上安置激光铅直仪或激光经纬仪,按一定周期观测,在接收靶上直接读取或量出顶部的水平位移量和位移方向;作业中仪器严格置平、对中,旋转 $180^\circ$ 观测两次取其中数;

(3)激光位移计自动测计法——位移计安置在建筑下部,接收装置设在顶部;当位移计发射激光时,从光线示波器上直接获取位移图像及有关参数,并自动记录成果;

(4)正垂线法——垂线选用直径 $0.6\text{mm} \sim 1.2\text{mm}$ 的不锈钢丝或因瓦丝,并采用无缝钢管保护;垂线上端锚固在通道顶部或所需高度处的支点上,稳定重锤、浮子的油箱中装有阻尼液;观测时,由观测墩上安置的坐标仪、光学垂线仪、电感式垂线仪等量测设备,按一定周期测出各测点的水平位移量。

**7.9.3.6** 当水工建筑物立面上观测点数量较多或倾斜变形比较明显时,可采用近景摄影测量法或激光3D扫描法,具体技术要求应另行设计。

**7.9.3.7** 倾斜观测精度应符合表7.9.3的规定。

表 7.9.3 倾斜观测点的观测精度和适用范围

等 级	点位中误差 (mm)	高程中误差 (mm)	适 用 范 围
一等	$\pm 1.5$	$\pm 0.5$	对变形特别敏感的建筑物
二等	$\pm 3.0$	$\pm 1.0$	对变形比较敏感的建筑物
三等	$\pm 6.0$	$\pm 2.0$	一般建筑物和岸坡
四等	$\pm 12.0$	$\pm 4.0$	对观测精度要求比较低的建筑物和岸坡

注:①当水平位移用坐标向量表示时,向量中误差为表中相应等级点位中误差的 $1/\sqrt{2}$ ;

②垂直位移观测,可根据需要按变形观测点的高程中误差或相邻变形观测点高差中误差确定测量等级。

**7.9.4** 观测成果的整理应包括下列主要内容:

- (1)计算各测点的倾斜值、倾斜角度;
- (2)计算各测点的倾斜速率值;
- (3)绘制倾斜值~时间曲线、施工工况~时间曲线、倾斜速率~时间曲线。

## 7.10 土压力观测

**7.10.1** 土压力观测可用于回填土中土压力及挡土结构所受土压力观测。

**7.10.2** 土压力传感器的测量范围和分辨率应满足观测设计要求,其上限可取最大设计土压力的1.2倍。

**7.10.3** 压力计的技术参数应满足现行行业标准《水运工程试验检测仪器设备技术标准》(JTS 238)的有关规定。

**7.10.4** 土压力观测方法应符合下列规定。

**7.10.4.1** 土压力观测点的设置应满足下列要求:

(1) 观测断面具有代表性;

(2) 观测点的位置和数量根据观测目的和要求确定;每个断面的观测点估算土压力情况分土层布置;当土层厚度大于 3m 时,每层土的观测点总数不少于 3 个;同一观测断面的观测点间距不超过 2m;应力变化较大的土层观测点加密布置。

**7.10.4.2** 土压力传感器的埋设应满足下列要求:

(1) 土压力传感器埋设前,进行稳定性、水密性的检验和压力标定、温度标定等工作;

(2) 土压力传感器的埋设采用土中直接埋设或结构接触式埋设等方法,埋设过程中有土压力膜保护措施;

(3) 土压力传感器的测力面与所测土压力方向垂直并紧贴被监测对象;

(4) 埋设土压力传感器时减少对周围土体的扰动,土压力传感器与周围土体充分接触,接触面的回填土密实度与周围土体一致;

(5) 土压力传感器埋设以后,立即进行检查测试并确定稳定压力初始值;

(6) 土压力传感器导线有防潮、防水措施,在导线引出部位设置有效的防护装置,并设立明显的标志。

**7.10.5** 观测成果的整理应包括下列主要内容:

(1) 计算各测点的土压力值;

(2) 计算各测点两次测量间隔时间内的土压力变化值;

(3) 绘制土压力~时间曲线、荷载~时间曲线。

## 7.11 振动观测

**7.11.1** 振动观测可用于爆破、打桩、强夯等施工振源引起的地基基础动力反应观测。

**7.11.2** 振动观测仪器的选用应符合下列规定。

**7.11.2.1** 观测仪器应采用自动化仪器,其功能应满足实时控制和数据采集、数据处理、图形输出等要求。

**7.11.2.2** 观测仪器的测量范围和分辨率应满足观测要求。

**7.11.2.3** 振动观测应根据观测要求和振型阶数等选择加速度计、速度计或位移计等拾振器,其连接导线应采用屏蔽电缆并采取有效的防护措施。

**7.11.2.4** 观测仪器的输出阻抗和输出电平应与记录仪匹配。

**7.11.2.5** 观测仪器应具有防尘、防潮、防水性能,其工作温度应在  $-10^{\circ}\text{C}$  ~  $50^{\circ}\text{C}$  范围内。

**7.11.2.6** 观测仪器应每年在标准振动台上进行系统灵敏度系数的标定,确定灵敏度系数随频率变化的曲线。

**7.11.3** 振动观测方法应符合下列规定。



**7.11.3.1** 观测场地内测线应沿振动衰减方向进行布置,并沿测线不同距离处设置测点,每个测点应同时检测水平径向、水平切向和垂直向三个分向的振动参数。

**7.11.3.2** 测线和测点的位置及数量应满足振动观测设计要求。

**7.11.3.3** 传感器安装应满足下列要求:

(1)测点表面为坚硬岩石或混凝土时,采用生石膏粉、环氧砂浆、环氧树脂胶或其他强度粘合剂;测点表面为土质时,先将表面覆土夯实,将传感器直接埋入夯实土中,并与周围土体紧密接触,或打设钢钎制作安装面;

(2)传感器定位方向与所测量的振动方向一致;当测量垂直向分量时,传感器测振方向垂直于地面;当测量水平径向分量时,传感器测振方向垂直于由观测点至振源连线方向;当测量水平切向分量时,传感器测振方向平行于由观测点至振源连线方向。

**7.11.4** 数据处理应提供动力反应时域曲线和频域曲线,并绘制各测点振动加速度、振动速度和振动位移随距振源的距离变化曲线图。

## 7.12 岩体原位应力测试

**7.12.1** 岩体应力测试可用于完整或较完整的岩体,测试可采用钻孔孔壁应变法、孔底应变法或孔径变形法测求岩体空间应力和平面应力。

**7.12.2** 孔壁应变法测试应符合下列规定。

**7.12.2.1** 测点布置应满足下列要求:

- (1)在测点的测段内,岩性均一、完整;
- (2)同一测段内,有效测点不少于2个。

**7.12.2.2** 地质描述应包括下列内容:

- (1)钻孔钻进过程中的情况;
- (2)岩石名称、结构及主要矿物成分;
- (3)岩体结构面的类型、产状、宽度、充填物性质;
- (4)测点的地应力现象;
- (5)提供区域地质图、测区工程地质图、测点工程地质剖面图和钻孔柱状图。

**7.12.2.3** 主要仪器设备应包括下列各项:

- (1)钻机;
- (2)金刚石钻头包括小孔径钻头、套钻解除钻头、扩孔器、磨平钻头和锥形钻头;各类钻头规格与应变计配套;
- (3)浅孔孔壁应变计或空心包体式孔壁应变计;
- (4)静态电阻应变仪;
- (5)安装器;
- (6)岩芯围压率定器。

**7.12.2.4** 测试准备应满足下列要求:

- (1)根据测试要求,选择适当场地,安装并固定好钻机;
- (2)用套钻解除钻头钻至预定的测试深度,取出岩芯,进行描述;

(3)用磨平钻头磨平孔底,用锥形钻头打喇叭口;

(4)用小孔径钻头钻中心测试孔,深度视应变计要求长度而定;中心测试孔与解除孔同轴,两孔孔轴偏差不大于2mm;

(5)中心测试孔钻进过程中,施力均匀并一次完成,取出岩芯进行描述;当孔壁不光滑时,采用金刚石扩孔器扩孔;当岩芯不能满足测试要求时,重复第(2)项~第(4)项步骤,直至找到完整岩芯位置;

(6)用水冲洗中心测试孔直至回水不含岩粉为止;

(7)根据所选类型的孔壁应变计和粘结剂要求,对中心测试孔孔壁进行干燥处理或清洗。

#### 7.12.2.5 浅孔孔壁应变计安装应满足下列要求:

(1)在中心测试孔孔壁和应变计上均匀涂上粘结剂;

(2)用安装器将应变计送入中心测试孔,就位定向,施加并保持一定的预压力,使应变计牢固地粘结在孔壁上;

(3)待粘结剂充分固化后,检查系统绝缘值,不小于100M $\Omega$ ;

(4)取出安装器,量测测点方位角、倾角及埋设深度。

#### 7.12.2.6 空心包体式孔壁应变计安装应满足下列要求:

(1)在应变计内腔的胶管内注满粘结剂胶液;

(2)用安装器将应变计送入中心测试孔,就位定向,然后推动安装杆,切断定位销钉,挤出粘结剂;

(3)其他执行第7.12.2.5款第(3)项和第(4)项的规定。

#### 7.12.2.7 测试及稳定标准应满足下列要求:

(1)从钻具中引出应变计电缆,连接电阻应变仪;

(2)向钻孔内冲水10min后,每隔10min读数一次,连续三次读数相差不大于5 $\mu\epsilon$ 时,即认为稳定,并将最后一次读数作为初始读数;

(3)用套钻解除钻头在匀压匀速条件下,进行连续套钻解除,每钻进2cm读数一次;

(4)套钻解除深度超过孔底应力集中影响区;当解除至一定深度后,应变计读数趋于稳定,终止钻进;最终解除深度,即应变计中应变丛位置至解除孔孔底深度,不小于解除岩芯外径的2.0倍;

(5)向钻孔内继续冲水,每隔10min读数一次,连续三次读数相差不大于5 $\mu\epsilon$ 时,则认为稳定,取最后一次读数作为最终读数;

(6)在套钻解除过程中,当发现异常情况时,及时停钻检查,进行处理并记录;

(7)检查系统绝缘值;退出钻具,取出装有应变计的岩芯,进行描述。

#### 7.12.2.8 岩芯围压试验应按下列步骤进行:

(1)现场测试结束后,将解除后带有应变计的岩芯放入岩芯围压率定器中,进行围压试验,其间隔时间不超过24h;

(2)将应变计电缆与电阻应变仪连接,对岩芯施加围压;率定的最大压力大于预估的岩体最大主应力,压力分为5~10级,按最大压力等分施加;



(3) 采用大循环加压时,每级压力下读数一次,两相邻循环最大压力时的读数不超过  $5\mu\varepsilon$  时,终止试验;大循环的次数不少于三次;

(4) 采用一次逐级加压时,每级压力下至读取稳定读数,每隔 10min 读数一次,连续三次读数相差不大于  $5\mu\varepsilon$  时,即认为稳定,施加下一级压力。

#### 7.12.2.9 测试成果整理应满足下列要求:

(1) 根据岩芯解除应变值和解除深度,绘制解除过程曲线;

(2) 根据围压试验资料,绘制压力与应变关系曲线,计算岩石弹性模量和泊松比;

(3) 岩体应力参数计算,见附录 F;

(4) 测试记录包括工程名称、钻孔编号、钻孔位置、孔口高程、测点编号、测点位置、测试方法、地质描述、测试深度、相应于解除深度的各应变片应变值、各应变片及应变丛布置、钻孔轴向方位角和倾角、围压试验资料。

#### 7.12.3 孔底应变法测试应符合下列规定。

##### 7.12.3.1 测点布置应满足下列要求:

(1) 当测试岩体空间应力状态时,布置交会于岩体某点的三个测试孔,两个辅助测试孔与主测试孔夹角为  $\pm 45^\circ$ ,三个测试孔在同一平面内;测点布置在交会点附近;

(2) 其他符合 7.12.2.1 款的要求。

##### 7.12.3.2 地质描述内容同第 7.12.2.2 款的要求。

##### 7.12.3.3 主要仪器设备应包括下列各项:

(1) 钻机;

(2) 金刚石钻头;包括套钻解除钻头、粗磨钻头、细磨钻头。各类钻头规格应与应变计配套;

(3) 孔底应变计;

(4) 静态电阻应变仪;

(5) 安装器;

(6) 钻孔烘烤设备;

(7) 岩芯围压率定器。

##### 7.12.3.4 测试准备应满足下列要求:

(1) 根据测试要求,选择适当场地,安装并固定好钻机,按预定的方位角和倾角进行钻进;

(2) 用套钻解除钻头钻至预定的测试深度,取出岩芯,进行描述。当不能满足测试要求时,继续钻进直至找到合适位置;

(3) 用粗磨钻头将孔底磨平,再用细磨钻头进行精磨;孔底应平整光滑;

(4) 根据所选类型的孔底应变计和粘结剂要求,对孔底进行干燥处理或清洗。

##### 7.12.3.5 应变计安装应满足下列要求:

(1) 在孔底平面和孔底应变计底面分别均匀涂上粘结剂;

(2) 用安装器将应变计送至孔底中央部位,经定向定位后对应变计施加一定的预压力,使应变计牢固地粘结在孔底上;

(3)待粘结剂充分固化后,取出安装器,量测测点方位角及埋设深度;

(4)检查系统绝缘值,不小于 $100\text{M}\Omega$ 。

#### 7.12.3.6 测试及稳定标准应满足下列要求:

(1)读取初始读数时,钻孔内冲水时间不少于30min;

(2)每解除1cm读数一次;

(3)最终解除深度不小于解除岩芯直径的0.8;

(4)其他符合7.12.2.7款的规定。

7.12.3.7 岩芯围压试验应按第7.12.2.8款规定的步骤进行。试验时应变计应位于围压器中间,另一端接装直径和岩性相同的岩芯。

#### 7.12.3.8 测试成果整理应满足下列要求:

(1)根据岩芯解除应变值和解除深度,绘制解除过程曲线;

(2)根据围压试验资料,绘制压力与应变关系曲线,计算岩石弹性模量和泊松比;

(3)岩体应力参数计算见附录F;

(4)测试记录包括工程名称、钻孔编号、钻孔位置、孔口高程、测点编号、测点位置、测试方法、地质描述、测点深度、相应于解除深度的各应变片应变值、各应变片位置、钻孔轴向方位角、围压试验资料。

#### 7.12.4 孔径变形法测试应符合下列规定。

7.12.4.1 测点布置应符合第7.12.3.1款的要求。

7.12.4.2 地质描述内容同第7.12.2.2款的要求。

7.12.4.3 主要仪器设备应包括下列各项:

(1)钻机;

(2)金刚石钻头:包括小孔径钻头、套钻解除钻头、扩孔器、磨平钻头和锥形钻头。各类钻头规格与孔径变形计配套;

(3)四分向钢环式孔径变形计;

(4)静态电阻应变仪;

(5)安装器;

(6)岩芯围压率定器。

7.12.4.4 测试准备应符合第7.12.2.4款中第(1)项~第(6)项的要求。

7.12.4.5 变形计安装应满足下列要求:

(1)将孔径变形计与应变仪连接,然后装上定位器,用安装器将变形计送入中心测试孔内;根据中心测试孔直径调整触头长度,孔径变形计应变钢环的预压缩量为 $0.2\text{mm} \sim 0.4\text{mm}$ ;在将孔径变形计送入中心测试孔的过程中,观测应变仪的读数变化情况;

(2)将孔径变形计送至预定位置后,适当锤击安装杆端部,使孔径变形计锥体楔入中心测试孔内,与孔口紧密接触;

(3)退出安装器,记录定向器读数,量测测点方位角及深度;

(4)检查系统绝缘值,不小于 $100\text{M}\Omega$ 。

7.12.4.6 测试及稳定标准应符合第7.12.2.7款的规定。



**7.12.4.7** 岩芯围压试验应按第 7.12.2.8 款规定的步骤进行。

**7.12.4.8** 测试成果整理应满足下列要求：

(1) 按式(7.12.4)计算孔径变形计各测量元件孔径应变；

$$\varepsilon_i = K \cdot \frac{\varepsilon_{ni} - \varepsilon_0}{d} \quad (7.12.4)$$

式中  $\varepsilon_i$ ——各级解除深度的应变值；

$\varepsilon_{ni}$ ——各级解除深度的应变仪读数；

$\varepsilon_0$ ——初始读数；

$K$ ——测量元件率定系数(mm)；

$d$ ——中心测试钻孔直径(mm)。

(2) 根据套钻解除时的应变仪读数计算的应变值和解除深度,绘制解除过程曲线；

(3) 根据围压试验资料,绘制压力与孔径变形关系曲线,计算岩石弹性模量和泊松比；

(4) 岩体应力参数计算见附录 F；

(5) 测试记录包括工程名称、钻孔编号、钻孔位置、孔口高程、测点编号、测点位置、测试方法、地质描述、测试深度、相应于解除深度的各应变片应变值、孔径变形计触头布置、钻孔轴向方位角、中心测试孔直径、各元件率定系数、围压试验资料。

### 7.13 激振法测试

**7.13.1** 激振法测试可用于天然地基和人工地基动力特性的测定。

**7.13.1.1** 测试方法根据机器基础类型可分为强迫振动测试和自由振动测试两种。属于周期性振动的机器基础地基,宜采用强迫振动测试;属于非周期性的机器基础地基,宜采用自由振动测试。

**7.13.1.2** 测试基础应分别做明置和埋设两种情况的振动测试。

**7.13.1.3** 进行埋设基础的振动测试时,四周的回填土应分层夯实。

**7.13.2** 测试仪器与设备应符合下列规定。

**7.13.2.1** 激振法测试仪器与设备由激振设备、拾振器、放大器、采集和记录装置、数据分析装置构成,其规格和精度应满足下列要求：

(1) 强迫振动测试的激振设备,能产生单一的垂直或水平的简谐振动;机械式激振设备的工作频率为 3Hz ~ 60Hz,电磁式激振设备的扰力不小于 2000N；

(2) 自由振动测试的竖向激振采用铁球,其质量为基础质量的 1/100 ~ 1/150。水平回转向振动采用木锤或橡胶锤；

(3) 拾振器采用竖直和水平方向的速度传感器,其通频带为 2Hz ~ 80Hz,阻尼系数应为 0.65 ~ 0.70,电压灵敏度不小于 30V·s/m,最大可测位移不小于 0.5mm；

(4) 放大器采用带低通滤波功能的多通道放大器,其振幅一致性偏差小于 3%,相位一致性偏差小于 0.1ms,折合输入端的噪音水平低于 2 $\mu$ V。电压增益大于 80dB；

(5) 采集和记录装置采用多通道数字采集和存储系统,其模/数转换器(A/D)位数不

小于 12 位,幅度畸变小于 1.0dB,电压增益小于 60dB;

(6) 数据分析装置具有频谱分析、抗混淆滤波、加窗及分段平滑等功能。

#### 7.13.2.2 测试仪器与设备的使用应满足下列要求:

(1) 机械式激振器在夏天加稠的润滑油,冬天加较稀的润滑油,其可控硅调速器的电源与测试仪器所用交流电从总电源处分开供电;电磁式激振器调节好顶杆的适中位置;

(2) 仪器间的输入、输出阻抗相匹配,其连接导线有屏蔽作用,电源绝缘良好并设置地线;

(3) 仪器有防尘、防潮性能,其工作温度在  $-10^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$  范围内;在现场测试时,对测试设备、仪器均有防雨、防晒和防振动等保护措施;

(4) 测试仪器每年在标准振动台上进行系统灵敏度系数的标定,确定灵敏度系数随频率变化的曲线;标定时,选择低频台。

#### 7.13.3 试验准备应符合下列规定。

7.13.3.1 测试基础应置于设计基础工程的邻近处,其基底高程应与设计基础的高程一致,其下覆土层结构宜与设计基础的土层结构相同。

7.13.3.2 基坑坑壁至测试基础侧面的距离应大于 0.5m;坑底面应保持测试土层的原状结构,测试基础底面与坑底面应在同一水平面。

7.13.3.3 当试坑底面位于水位以下时,在进行测试基础的浇筑前应排水。试验时,应使水位保持在测试基础底面处。

7.13.3.4 天然地基或人工地基的测试基础应为块体基础,其尺寸宜采用  $2.0\text{m} \times 1.5\text{m} \times 1.0\text{m}$ ,其数量不宜少于 2 个,当超过 2 个时,超过部分的测试基础可改变其面积和高度。对竖向加固的人工地基,块体基础的底面积宜符合基础下加固体的等效加固面积。

7.13.3.5 桩基础应采用 2 根桩,桩间距取设计桩基础的间距,应制作桩台作为测试基础。桩台边缘至桩轴的距离可取桩间距的 1/2;桩台的长宽比应为 2:1,其高度不宜小于 1.6m,当需要做不同桩数的对比测试时,应增加桩数及相应桩台面积。

7.13.3.6 当设计采用大而轻的基础时,应按相应的比例采用小质量比的模型测试基础。

7.13.3.7 测试基础浇筑前,基底土层表面应用水平尺找平。

7.13.3.8 测试基础的混凝土强度等级不宜低于 C15。测试基础的制作尺寸应准确,浇筑的混凝土应振捣密实,其顶面应抹平。浇筑后短时间不能进行试验时,可暂时用素土回填,试验时再将其清除。

7.13.3.9 当采用机械式激振设备时,在浇筑测试基础时应预埋连接激振器底架的地脚螺栓或预留孔,地脚螺栓的埋置深度应大于 0.4m,下端应为弯钩形;地脚螺栓或预留孔在测试基础平面上的位置应满足下列要求:

(1) 预埋地脚螺栓的间距与激振器底架的螺栓孔距一致;

(2) 竖向振动测试时,激振设备的竖向扰力与基础的重心在同一竖直线上;

(3) 水平振动测试时,水平扰力在基础沿长度方向的轴线上。

7.13.3.10 当采用预制的测试基础时,应将其平稳吊入采用水平尺找平的试坑内,预



压一定时间后方可进行试验,砂土预压时间宜为 5h ~ 12h,黏性土预压时间不宜少于 24h。

#### 7.13.4 强迫振动测试应符合下列规定。

**7.13.4.1** 安装机械式激振设备时,应将地脚螺栓拧紧,在测试过程中螺栓不应松动。安装电磁式激振设备时,其竖向扰力作用点应与测试基础的重心在同一竖直线上,水平扰力作用点宜在基础水平轴线侧面的顶部。

**7.13.4.2** 传感器应用橡皮泥或石膏固定在测试基础上,激振设备的扰力作用点及传感器安装位置可按下列方式设置:

(1) 竖向振动测试时,其扰力作用点与测试基础的重心在同一竖直线上;在基础顶面沿长度方向轴线的两端各布置一台竖向传感器(图 7.13.4-1);

(2) 水平回转振动测试时,激振设备的扰力为水平向,水平扰力作用点在基础水平轴线侧面的顶部;在基础顶面沿长度方向轴线的两端各布置一台竖向传感器,在中间布置一台水平向传感器(图 7.13.4-2)。

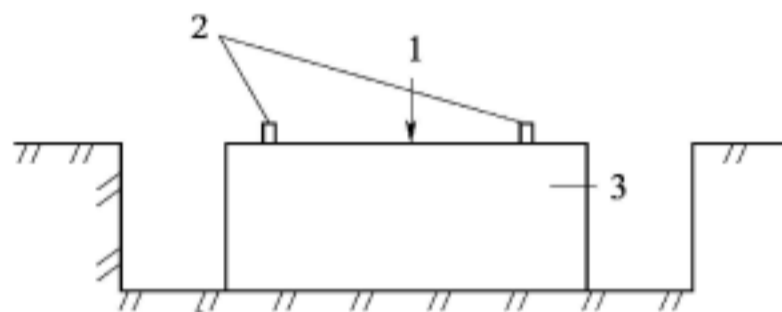


图 7.13.4-1 竖向振动测试布置图

1-激振力方向;2-竖向传感器;3-测试基础

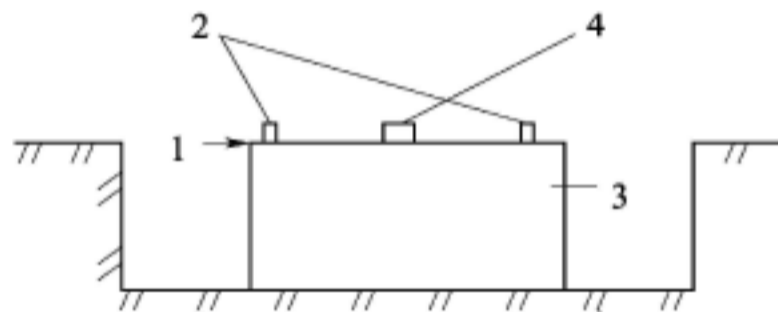


图 7.13.4-2 水平回转振动测试布置图

1-激振力方向;2-竖向传感器;3-测试基础;4-水平传感器

**7.13.4.3** 传感器设置后,应量测其距离。

**7.13.4.4** 试验过程中,应避免或减少其他振源对试验的干扰。

**7.13.4.5** 激振器试转时,应检查设备安装情况,发现异常应及时处理。

**7.13.4.6** 幅频响应测试时,激振设备的扰力频率间隔,在共振区外不宜大于 2Hz,在共振区内应小于 1Hz;共振时的振幅不宜大于  $150\mu\text{V}$ 。

**7.13.4.7** 采用显示器监视输出的振动波形,待波形为正弦波时应进行记录。发现异常时,应查明原因并及时重做试验。

#### 7.13.5 自由振动测试应符合下列规定。

**7.13.5.1** 竖向自由振动的测试,可采用铁球自由下落,冲击测试基础顶面的中心处。

**7.13.5.2** 水平回转自由振动的测试,可水平冲击测试基础水平轴线侧面的顶部。

**7.13.5.3** 传感器的布置,应与强迫振动测试时的布置相同。

**7.13.5.4** 测试次数均不应少于 3 次,实测基础的固有频率和最大振幅的相对误差应小于 3%,否则应检查测试系统,查明原因后及时重做试验。

**7.13.5.5** 传感器设置后,应量测其距离。

**7.13.5.6** 试验过程中,应避免或减少其他振源对试验的干扰。

#### 7.13.6 资料整理应符合下列规定。

**7.13.6.1** 强迫振动测试应提供下列资料:

(1) 竖向振动测试的基础竖向振幅随频率变化的幅频响应曲线 ( $A_z \sim f$  曲线)、地基

竖向阻尼比、基础竖向振动的参振总质量、地基的抗压刚度和抗压刚度系数、单桩抗压刚度和桩基抗弯刚度；

(2) 水平回转耦合振动测试的基础顶面测试点沿 X 轴的水平振幅随频率变化的幅频响应曲线( $A_{x\varphi} \sim f$  曲线)、基础顶面测试点由回转振动产生的竖向振幅随频率变化的幅频响应曲线( $A_{z\varphi} \sim f$  曲线)、地基水平回转向第一振型阻尼比、基础水平回转耦合振动的参振总质量、地基的抗弯刚度和抗弯刚度系数。

#### 7.13.6.2 自由振动测试应提供下列资料：

(1) 竖向振动测试的地基竖向阻尼比、基础竖向振动的参振总质量、地基的抗压刚度和抗压刚度系数、单桩抗压刚度和桩基抗弯刚度；

(2) 水平回转耦合振动测试的地基水平回转向第一振型阻尼比、地基的抗弯刚度和抗弯刚度系数。

#### 7.13.6.3 测试报告除应符合第 3.0.4 条的规定外,尚应包括下列内容：

- (1) 试验目的及要求；
- (2) 试验场地的位置、地形、地貌及地质情况；
- (3) 试验仪器、设备的主要性能；
- (4) 资料整理方法；
- (5) 各测点典型的  $A \sim f$  曲线或振型波形、试验成果汇总表；
- (6) 对测试结果的分析与评价。

#### 7.13.6.4 桩基应提供下列动力参数：

- (1) 单桩的抗压强度；
- (2) 桩基抗剪刚度系数；
- (3) 桩基竖向和水平回转向第一振型的阻尼比；
- (4) 桩基竖向和水平回转向的参振质量。

#### 7.13.6.5 天然和人工地基应提供下列动力参数：

- (1) 地基的抗压、抗剪、抗弯刚度系数；
- (2) 地基竖向和水平回转向第一振型的阻尼比；
- (3) 地基竖向和水平回转向的参振质量。

7.13.6.6 由测试资料计算地基动力参数的具体方法,可按现行国家标准《地基动力特性测试规范》(GB/T 50269)使用。

### 7.14 水底地层剖面探测

7.14.1 水底地层剖面探测可用于水底基岩面以上第四纪松散覆盖层的探测。

7.14.2 探测线和参比的勘探孔应根据测区的地质条件、工程性质和勘察技术要求合理布置。探测线间距应小于同阶段勘探线的间距,并在探测线的垂直方向上布置相交的检查探测线,检查探测线的数量不宜少于 3 条。

7.14.3 水底地层剖面探测应符合下列规定。

7.14.3.1 水底地层剖面仪的主要技术指标应满足表 7.14.3 的要求。



表 7.14.3 水底地层剖面仪的主要技术指标

类 型	工作水深 $h$ (m)	水底面以下探测记录深度(m)	记录分辨率(cm)	工作频率(kHz)
浅地层剖面仪	$2 < h < 100$	30 ~ 50	20 ~ 30	3.5 ~ 14
中地层剖面仪		< 100	< 100	0.25 ~ 5

**7.14.3.2** 水底地层剖面探测可采用舷挂式或拖曳式。采用舷挂方式进行探测时,换能器入水深度不应小于 0.5m;采用拖曳方式进行探测时,震源和水听器阵应拖曳在船尾涡流区外,并等浮在一定深度。

**7.14.3.3** 探测前应在测区内进行试航探测,依据试航获得的最佳地层穿透深度和分辨率,确定探测作业参数,同时将噪声和干扰降低到最小的程度。

**7.14.3.4** 探测船应平稳航行,减少噪声,作业时沿测线方向应匀速持续航行,航行船速不应大于 6kn,不应随意停船或倒车,转换测线时不应小角度转弯;应采用卫星定位系统导航,并同步进行探测点定位。探测点高程宜采用 GNSS 接收机测量。由于受风浪、水流、潮汐等环境因素的影响,探测船不能正常作业时,应停止探测。在环境噪声大、水底地形坡度陡峭的水域,不应采用水底地层剖面仪探测。

**7.14.3.5** 记录剖面图像应清晰、完整,无图像模糊、空白、间断等现象。水深变化时应及时调整记录仪扫描时间、延迟时间及炮间距。中间漏测或缺失部分不应大于 50m,累计漏测不得大于测线总长的 2%,否则应补测。

**7.14.3.6** 现场应随时观察记录剖面图像,并进行初步分析,发现可疑目标,应根据具体情况和工程要求,增设补充测线。

**7.14.4** 水底地层剖面探测资料整理及成果利用应包括下列内容:

- (1) 识别剖面记录图像上各种干扰信号;
- (2) 进行剖面地震层序划分,及主测线与检查测线层序的比较,分析各层序的空间形态与接触关系,并与勘探钻孔分层资料相对比,确定各层序的地质特征与工程特征;
- (3) 根据反射结构、振幅、连续性、频率等地震参数,进行地震相分析,推测沉积相与沉积物类型,识别浅层气、故河谷、滑坡、断层、侵蚀沟槽等地质现象和界限;
- (4) 根据剖面地震层序与地震相分析资料,以及工程需要,编制相应的地层剖面图和地质特征图。

## 8 地基处理典型试验检测

### 8.1 一般规定

8.1.1 试验前应收集下列资料:

- (1) 委托方的具体试验检测要求;
- (2) 已有的水文、地质资料;
- (3) 设计要求;
- (4) 施工方法;
- (5) 现场周边环境。

8.1.2 试验应在有代表性的场地上进行。

8.1.3 典型试验应进行方案设计和施工组织设计,设计和施工可参照现行行业标准《水运工程地基设计规范》(JTS 147)和《水运工程地基基础施工规范》(JTS 206)的有关规定。

8.1.4 试验成果除应包括第 3.0.4 条的内容外,还应包括施工情况、大面积施工推荐方案。

### 8.2 堆载预压法

8.2.1 典型试验宜分区进行,每个试验小区的面积不宜小于  $2500\text{m}^2$ ,可分别选用不同的排水板间距或不同的预压荷载。

8.2.2 试验区施工过程中的监测项目应按表 8.2.2 的要求设置。

表 8.2.2 堆载预压法试验监测项目一览表

地表沉降	孔隙水压力	深层水平位移	深层分层沉降	地下水位	试验区外侧边桩位移	周边建筑物的位移和沉降
★	★	★	★	★	△	△

注:“★”表示必测项目,“△”表示选测项目。

8.2.3 打设塑料排水板前、堆载开始前和卸载前后均应测量场地高程。

8.2.4 试验区各监测项目设置的数量和监测频率应符合表 8.2.4 的规定。

表 8.2.4 堆载预压法试验监测仪器设置数量和监测频率

监测项目	仪器布置数量	监测频率
地表沉降	每 $800\text{m}^2 \sim 1000\text{m}^2$ 布置 1 个,且每个试验区不少于 5 个	加载初期每天 1 次,中后期 2~3 天 1 次
孔隙水压力	每个试验区不少于 1 组,沿深度每个土层均有测点,土层较厚时可设置多个测点,需要时对重点加固土层多布置几个测点	加载初期每天 1 次,中后期 2~3 天 1 次



续表 8.2.4

监测项目	仪器布置数量	监测频率
深层水平位移	根据试验区的边界条件布置	初期1~2天1次,中后期3~4天1次
深层分层沉降	每个试验区不少于1组,沿深度每个土层均有测点,土层较厚时可设置多个测点	初期1~2天1次,中后期3~4天1次
地下水位	根据试验区的边界条件布置	初期1~2天1次,中后期3~4天1次
试验区外侧边桩位移	根据试验区的边界条件布置,每组不少于5个测点,沿与试验区边线垂直方向每2m~3m布置1个	初期1~2天1次,中后期3~4天1次
周边建筑物的位移和沉降	根据周边建筑物的具体情况布置	初期1~2天1次,中后期3~4天1次

注:①试验区周围有建筑物和地下管线时,水平位移应加密观测;

②出现异常情况时应加密观测。

8.2.5 试验区加固前后的检验项目应按表 8.2.5 的规定进行设置。

表 8.2.5 堆载预压法试验前后检验项目

检验项目	原状取土常规物理力学指标试验	现场十字板剪切试验	载荷试验	标准贯入试验	静力触探试验
加固前	★	★	—	△	△
加固后	★	★	△	△	△

注:“★”表示必检项目,“△”表示选检项目,“—”表示无要求项目。

8.2.6 试验小区各检验项目设置的数量应符合表 8.2.6 的规定。

表 8.2.6 每个试验小区检验项目设置数量和要求

检验项目	布置数量	要求
原状取土常规物理力学指标试验	加固前后均不少于3孔	深度至排水板打设深度以下2m,每米取1个土样进行相关的室内试验
现场十字板剪切试验	加固前后均不少于3孔	深度至排水板打设深度以下2m,每米测试1次
标准贯入	加固前后均不少于3孔	
静力触探	加固前后均不少于3孔	深度至排水板打设深度以下2m,连续测试
载荷试验	加固后不少于3个	—

8.2.7 加固前的地基土检验应在打设塑料排水板前进行,加固后的检验应在卸载3天后进行。

### 8.3 真空预压法

8.3.1 典型试验宜分区进行,每个试验小区的面积不宜小于3000m<sup>2</sup>,可分别选用不同的排水板间距或不同的施工工艺。

8.3.2 试验区施工过程中的监测项目应按表 8.3.2 的要求设置。

表 8.3.2 真空预压法试验监测项目一览表

地表沉降	孔隙水压力	深层水平位移	深层分层沉降	膜下真空度	地下水位	试验区外侧边桩位移	周边建筑物的位移和沉降	排水板内部的真空压力
★	★	★	★	★	★	△	△	△

注:“★”表示必测项目,“△”表示选测项目。

8.3.3 打设塑料排水板前、铺设密封膜后和真空预压停泵卸载后均应测量场地高程。

8.3.4 试验区各监测项目设置的数量和监测频率应符合表 8.3.4 的规定。

表 8.3.4 真空预压法试验监测仪器设置数量和监测频率

监测项目	仪器布置数量	监测频率
地表沉降	每 800m <sup>2</sup> ~ 1000m <sup>2</sup> 布置 1 个,且每个试验区不少于 5 个	加载初期每天 1 次,中后期 2 ~ 3 天 1 次
孔隙水压力	每个试验区不少于 1 组,沿深度每个土层均有测点,土层较厚时可设置多个测点,需要时对重点加固土层多布置几个测点	加载初期每天 1 次,中后期 2 ~ 3 天 1 次
深层水平位移	根据试验区的边界条件布置	初期 1 ~ 2 天 1 次,中后期 3 ~ 4 天 1 次
深层分层沉降	每个试验区不少于 1 组,沿深度每个土层均有测点,土层较厚时可设置多个测点	初期 1 ~ 2 天 1 次,中后期 3 ~ 4 天 1 次
膜下真空度	每 800m <sup>2</sup> ~ 1000m <sup>2</sup> 布置 1 个,且每个试验区不少于 5 个	2h ~ 4h 监测 1 次
地下水位	根据试验区的边界条件布置	初期 1 ~ 2 天 1 次,中后期 3 ~ 4 天 1 次
试验区外侧边桩位移	根据试验区的边界条件布置,每组不少于 5 个测点,沿与试验区边线垂直方向每 2m ~ 3m 布置 1 个	初期 1 ~ 2 天 1 次,中后期 3 ~ 4 天 1 次
周边建筑物的位移和沉降	根据周边建筑物的具体情况布置	初期 1 ~ 2 天 1 次,中后期 3 ~ 4 天 1 次
排水板内部的真空压力	每个试验区不少于 1 组,沿深度每 3m ~ 4m 布置 1 个测点	初期每天 1 次,中后期 2 ~ 3 天 1 次

注:①试验区周围有建筑物和地下管线或采用真空联合堆载预压时,水平位移应加密观测;

②出现异常情况时应加密观测。

8.3.5 试验区加固前后的检验项目应按表 8.3.5 的规定进行设置。

表 8.3.5 真空预压法试验前后检验项目

检验项目	原状取土常规物理力学指标试验	现场十字板剪切试验	载荷试验	标准贯入试验	静力触探试验
加固前	★	★	—	△	△
加固后	★	★	△	△	△

注:“★”表示必检项目,“△”表示选检项目,“—”表示无要求项目。

8.3.6 试验区四周采用黏土密封墙时,应对密封墙体的渗透系数进行检验。检验孔的间距不宜大于 50m,且沿深度方向每米测试检验 1 次,施工过程中出现异常时宜进行复检。

8.3.7 试验小区各检验项目设置的数量应符合表 8.3.7 的规定。

表 8.3.7 每个试验小区检验项目设置数量和要求

检验项目	布置数量	要求
原状取土常规物理力学指标试验	加固前后均不少于 3 孔	深度至排水板打设深度以下 2m,每米取 1 个土样进行相关的室内试验
现场十字板剪切试验	加固前后均不少于 3 孔	深度至排水板打设深度以下 2m,每米测试 1 次
标准贯入	加固前后均不少于 3 孔	
静力触探	加固前后均不少于 3 孔	深度至排水板打设深度以下 2m,连续测试
载荷试验	加固后不少于 3 个	—
密封墙渗透系数	密封墙每 20m ~ 50m 布置 1 个钻孔,每米取 1 个土样	—

8.3.8 加固前的地基土检验应在打设塑料排水板前进行,加固后的检验应在真空预压卸载 3 天后进行,黏土密封墙的检验应在铺密封膜前进行。



## 8.4 强夯法和强夯置换法

8.4.1 典型试验宜分区进行,每个试验小区的面积不宜小于  $2500\text{m}^2$ ,可分别选用不同的夯点间距、不同的施工工艺。

8.4.2 试验区施工过程中的监测项目应按表 8.4.2 的要求设置。

表 8.4.2 强夯法和强夯置换法试验监测项目一览表

地表沉降	夯沉量	孔隙水压力	深层水平位移	地下水位	试验区外侧边桩位移	周边建筑物的位移和沉降	振动加速度	深层分层沉降
★	★	★	★	★	△	△	△	△

注:“★”表示必测项目,“△”表示选测项目。

8.4.3 试验区施工过程中各监测项目设置的数量和监测频率应符合表 8.4.3 的规定。

表 8.4.3 强夯法和强夯置换法试验监测仪器设置数量和监测频率

监测项目	仪器布置数量	监测频率
地表沉降	按 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 方格网进行测量	每遍夯击前后各测量 1 次,强夯置换时记录填料量
夯沉量	逐点测量	每击测试 1 次
孔隙水压力	每个试验区不少于 1 组,沿深度每个土层均应有测点,土层较厚时可设置多个测点,需要时对重点加固土层多布置几个测点	强夯期间连续观测,其余时间每 1~2 天测试 1 次
深层水平位移	根据试验区的边界条件布置	强夯期间每天观测 1 次,其余时间每 2~4 天测试 1 次
地下水位	根据试验区的边界条件布置	强夯期间每 1~2 小时观测 1 次,其余时间每 1~2 天测试 1 次
试验区外侧边桩位移	根据试验区的边界条件布置,每组边桩不少于 5 个,沿与试验区边线垂直方向每 $2\text{m} \sim 3\text{m}$ 布置 1 个	强夯期间每天观测 1 次
周边建筑物的位移和沉降	根据周边建筑物的具体情况布置	强夯期间每天观测 1 次,其余时间每 2~4 天测试 1 次
振动加速度	根据试验区的边界条件布置,每组测点不少于 5 个,沿与试验区边线垂直方向每 $5\text{m} \sim 10\text{m}$ 布置 1 个	强夯期间连续观测
深层分层沉降	每个试验区应不少于 1 组,沿深度每个土层均有测点,土层较厚时可设置多个测点	强夯期间每天观测 1 次,其余时间每 2~4 天测试 1 次

注:①试验区周围有建筑物和地下管线时对水平位移应加密观测;

②出现异常情况时应加密观测。

8.4.4 监测仪器应在强夯施工前布设。

8.4.5 试验前后的检验项目应按表 8.4.5 的规定进行设置。

表 8.4.5 强夯法和强夯置换法试验前后的检验项目

检验项目	原状取土常规物理力学指标试验	载荷试验	动力触探试验	置换墩着底情况	标准贯入试验	静力触探试验
加固前	△	—	★	—	△	△
加固后	△	★	★	★	△	△

注:“★”表示必检项目,“△”表示选检项目,“—”表示无要求项目。

### 8.4.6 试验区各检验项目设置的数量应符合表 8.4.6 的规定。

表 8.4.6 每个试验区检验项目设置数量和要求

检验项目	布置数量	要求
原状取土 常规物理力学指标试验	加固前后均不少于 3 孔	深度至强夯影响深度以下 2m, 每米取 1 个土样进行相关的室内试验, 遇砂土或人工填土做标贯试验
载荷试验	加固后不少于 3 个	—
动力触探试验	加固前后均不少于 3 孔	深度至强夯影响深度以下 2m, 连续测试
置换墩着底情况	强夯置换点数的 1%, 且不少于 3 根	—
标准贯入试验	加固前后均不少于 3 孔	深度至强夯影响深度以下 2m, 每米测试 1 次
静力触探试验	加固前后均不少于 3 孔	深度至强夯影响深度以下 2m, 连续测试

8.4.7 加固前的地基土检验应在强夯施工前进行, 加固后的检验应在施工结束一定时间后进行。对砂土和碎石土地基, 间隔时间可取 1~2 周; 对黏性土地基, 可取 3~4 周; 对粉土地基, 可取 2~3 周。

## 8.5 深层水泥搅拌法

8.5.1 典型试验宜选用不同水泥掺量分别进行, 必要时也可考虑不同水泥品种、不同外加剂、不同水灰比和不同施工工艺的现场试验。每种工况的试验桩数量不宜少于 10 根。典型试验前应先进行室内配比试验, 室内配比试验可参照国家有关现行标准执行。

8.5.2 搅拌桩施工过程中应根据需要对地表隆起、深层水平位移和表层水平位移进行监测。

8.5.3 试验区各监测项目设置的数量和监测频率应符合表 8.5.3 的规定。

表 8.5.3 深层水泥搅拌法试验监测仪器设置数量和监测频率

监测项目	仪器布置数量	监测频率
地表隆起	按方格网进行测量	施工前后各测量 1 次
深层水平位移	根据试验区的边界条件布置	施工期间每天观测 1 次, 施工结束后 1 周内观测 2~3 次
表层水平位移	根据试验区的边界条件布置, 每组边桩应不少于 3 个, 沿与试验区边线垂直方向每 2m~3m 布置 1 个	施工期间每天观测 1 次

注: ①试验区周围有建筑物和地下管线或施工区域涉及边坡稳定时对侧向位移应加密观测;

②出现异常情况时应加密观测。

8.5.4 监测仪器应在搅拌桩施工前布设。

8.5.5 试验区各检验项目应按表 8.5.5 的规定进行设置。

表 8.5.5 深层水泥搅拌法试验检验项目

检验项目	原状取土常规物理力学指标试验	载荷试验	钻孔取芯	轻型动探试验	开挖桩头观察	标准贯入试验	动力触探试验	静力触探试验	现场十字板试验
加固前	★	—	—	—	—	△	△	△	△
加固后	△	★	★	△	△	△	△	△	△

注: ①“★”表示必检项目, “△”表示选检项目, “—”表示无要求项目;

②对于水下水泥搅拌桩, 载荷试验可作为选检项目。

8.5.6 试验区各检验项目设置的数量应符合表 8.5.6 的规定。



表 8.5.6 各检验项目设置数量和要求

检验项目	布置数量	要求
原状取土常规物理力学指标试验	不少于 3 孔	深度至下卧持力层或搅拌桩底高程以下 2m, 每米取 1 个土样进行相关的室内试验, 遇砂土或人工填土做标贯试验
载荷试验	每种工况不少于 6 个	包括单桩载荷试验和复合地基载荷试验均不少于 3 个, 必要时也可进行多桩复合地基载荷试验
钻孔取芯	每种工况搅拌桩的钻孔取芯数量不宜少于 6 根	按照龄期 28d、60d 和 90d 分别进行检验, 水上搅拌桩必要时考虑龄期 120d、180d 的搅拌桩无侧限抗压强度检验
轻型动探试验	每种工况搅拌桩不少于 3 根	—
开挖桩头观察	每种工况搅拌桩不少于 3 根	成桩 7d 后进行
标准贯入试验	不少于 3 孔	深度至下卧持力层或搅拌桩底高程以下 2m, 每米测试 1 次
动力触探试验	不少于 3 孔	深度至下卧持力层或搅拌桩底高程以下 2m, 连续测试
现场十字板试验	不少于 3 孔	深度至下卧持力层或搅拌桩底高程以下 2m, 每米测试 1 次
静力触探试验	不少于 3 孔	深度至下卧持力层或搅拌桩底高程以下 2m, 连续测试

8.5.7 搅拌桩的轻型动探检验宜在成桩 3 天内进行, 载荷试验宜在成桩 28 天后进行。

8.5.8 典型试验成果除包括第 8.1 节中的内容, 还应包括试验前室内配合比试验结果。

## 8.6 砂 桩 法

8.6.1 典型试验宜选用不同置换率分别进行, 必要时也可考虑不同桩径、不同桩距和不同施工工艺的现场试验。每种工况的试验桩数量不宜少于 10 根。

8.6.2 试验区施工过程中应根据需要对地表沉降、地下水位、孔隙水压力、深层水平位移和表层水平位移进行监测。

8.6.3 试验区各监测项目设置的数量和监测频率应符合表 8.6.3 的规定。

表 8.6.3 砂桩法试验监测仪器设置数量和监测频率

监测项目	仪器布置数量	监测频率
地表沉降	按方格网进行测量	施工前测量 1 次, 并记录每桩的填砂量, 施工后每 2~3 天观测 1 次, 直至沉降速率连续 5 天小于 1.5mm/d 为止
深层水平位移	根据试验区的边界条件布置	施工期间每天观测 1 次, 施工结束后再观测 1 周, 每 2~3 天测试 1 次
孔隙水压力	每个试验区不少于 1 组, 沿深度每个土层均应有测点, 土层较厚时可设置多个测点, 需要对重点加固土层多布置几个测点	
地下水位	根据试验区的边界条件布置	施工期间每天观测 1 次
表层水平位移	根据试验区的边界条件布置, 每组应不少于 3 个测点, 沿与试验区边线垂直方向每 2m~3m 布置 1 个	

注: ①试验区周围有建筑物和地下管线或施工区域涉及边坡稳定时对水平位移应加密观测;

②出现异常情况时应加密观测。

8.6.4 监测仪器应在砂桩施工前布设。

8.6.5 试验区各检验项目应按表 8.6.5 的规定进行设置。

表 8.6.5 砂桩法试验检验项目

检验项目	原状取土常规物理力学指标试验	载荷试验	标准贯入试验	动力触探试验	静力触探试验	现场十字板试验
加固前	★	—	—	△	△	△
加固后	★	★	★	△	△	△

注:①“★”表示必检项目,“△”表示选检项目,“—”表示无要求项目;

②原状取土常规物理力学指标试验、静力触探和现场十字板检验主要用于对桩间土的改善情况进行检验,标准贯入和动力触探主要用于对砂桩质量的检验,载荷试验可分为单桩载荷试验和复合地基载荷试验;

③对于水下砂桩,载荷试验可作为选检项目。

8.6.6 试验区各检验项目设置的数量应符合表 8.6.6 的规定。

表 8.6.6 各检验项目设置数量和要求

检验项目	布置数量	要求
原状取土常规物理力学指标试验	加固前后原状取土均不少于 3 孔	深度至下卧持力层或砂桩底高程以下 2m,每米取 1 个土样进行相关的室内试验,遇砂土或人工填土做标贯试验
载荷试验	每种工况砂桩不少于 3 个	包括单桩载荷试验和复合地基载荷试验,必要时也可进行多桩复合地基载荷试验
标准贯入	每种工况砂桩不少于 3 根	深度至砂桩底部
动力触探	不少于 3 孔	深度至下卧持力层或砂桩底高程以下 2m,每米测试 1 次
现场十字板	不少于 3 孔	
静力触探	不少于 3 孔	深度至下卧持力层或砂桩底高程以下 2m,连续测试

8.6.7 加固前的检验应在砂桩施工前进行,加固后的检验应间隔一定时间后进行。对黏性土地基,间隔时间不宜少于 4 周。对粉土地基,不宜少于 3 周。对砂土和杂填土地基,不宜少于 1 周。

8.6.8 加固后的桩间土检验位置应在相邻几根砂桩所围区域的形心。

## 8.7 降水强夯法

8.7.1 典型试验宜分区进行,每个试验小区的面积不宜小于 2500m<sup>2</sup>,可选用不同的降水强夯施工工艺和施工参数。

8.7.2 试验区施工过程中的监测项目应按表 8.7.2 的要求设置。

表 8.7.2 试验监测项目

地表沉降	孔隙水压力	地下水位	深层水平位移	夯沉量	夯坑周围隆起量	表层水平位移	深层分层沉降	振动加速度	周边建筑物的位移和沉降
★	★	★	★	★	★	△	△	△	△

注:“★”表示必测项目,“△”表示选测项目。

8.7.3 试验区各监测项目设置的数量和监测频率应符合表 8.7.3 的规定。



表 8.7.3 每个试验区监测仪器布置数量和监测频率

监测项目	仪器布置数量	监测频率		
		降水期间	强夯期间	强夯间歇期间
地表沉降	按照每 800m <sup>2</sup> ~ 1000m <sup>2</sup> 布置 1 个,且每个试验区不少于 5 个	1 次/d	每遍强夯整平后	1 次/d
孔隙水压力	每个试验区不少于 1 组,沿深度每个土层均设置测点,土层较厚时设置多个测点	2 次/d	连续观测	2 次/d
地下水位	按照每 800m <sup>2</sup> ~ 1000m <sup>2</sup> 布置 1 个,且每个试验区不少于 5 个	2 次/d	1 次/2h	2 次/d
深层水平位移	根据试验区的边界条件布置	1 次/d	1 次/d	1 次/2d
夯沉量	每个夯点均进行测量		每次夯击后	
表层水平位移	根据试验区的边界条件布置,每组不少于 5 个测点,沿与试验区边线垂直方向每 2m ~ 3m 布置 1 个	1 次/d	1 次/d	1 次/2d
深层分层沉降	每个试验区不少于 1 组,沿深度每个土层均设置测点,土层较厚时设置多个测点	1 次/d	1 次/d	1 次/2d
夯坑周围隆起量	每个夯点均进行测量		每次夯击后	
振动加速度	根据试验区的边界条件布置,每组测点不少于 5 个,沿与试验区边线垂直方向每 2m ~ 3m 布置 1 个		连续观测	
周边建筑物的位移和沉降	根据周边建筑物的具体情况布置	1 次/d	1 次/d	1 次/2d

注:①试验区周围有建筑物和地下管线对侧向位移应加密观测;

②出现异常情况时应加密观测。

#### 8.7.4 试验区加固前后的检验项目应按表 8.7.4 的规定进行设置。

表 8.7.4 试验前后检验项目

检测项目	原状取土常规物理力学指标试验	载荷试验	现场十字板剪切试验	静力触探试验	标准贯入试验
加固前	★	—	△	△	△
加固后	★	★	△	△	△

注:“★”表示必检项目,“△”表示选检项目,“—”表示无要求项目。

#### 8.7.5 试验区各检验项目设置的数量和要求应符合表 8.7.5 的规定。

表 8.7.5 每个试验区检验项目设置数量和要求

检验项目	布置数量	要求
原状取土常规物理力学指标试验	加固前后均不少于 3 孔	钻孔深度至降水强夯影响深度以下 2m,每米取 1 个土样进行常规物理力学指标试验,遇砂土或人工填土做标贯试验
现场十字板试验	加固前后均不少于 3 孔	测试深度至降水强夯影响深度以下 2m,每米测试 1 次
载荷试验	加固后不少于 3 点	—
静力触探试验	加固前后均不少于 3 孔	测试深度至降水强夯影响深度以下 2m
标准贯入试验	加固前后均不少于 3 孔	测试深度至降水强夯影响深度以下 2m,每米测试 1 次

#### 8.7.6 试验区加固效果检验应在降水强夯施工结束 7 天后进行。

## 8.8 高压喷射注浆法

**8.8.1** 典型试验根据土质条件、施工条件及加固要求,可选用不同的高压喷射注浆施工工艺和施工参数,每种试验方案的施工桩数不应少于10根。

**8.8.2** 高压喷射注浆施工过程中应根据需要对地表沉降、深层水平位移、表层水平位移和地下水位进行监测。

**8.8.3** 试验区各监测项目设置的数量和监测频率应符合表8.8.3的规定。

表 8.8.3 监测仪器设置数量和监测频率

监测项目	仪器布置数量	监测频率
地表沉降	按方格网进行测量	施工前后各测量1次
深层水平位移	根据试验区的边界条件布置	施工期间每天观测1次,施工结束后再观测1周,每2~3天测试1次
表层水平位移	根据试验区的边界条件布置,每组不少于3个测点,沿与试验区边线垂直方向每2m~3m布置1个	施工期间每天观测1次
地下水位	根据试验区的边界条件布置	施工期间每天观测1次,施工结束后再观测1周,每2~3天测试1次

注:①试验区周围有建筑物和地下管线或施工区域涉及边坡稳定时对水平位移应加密观测;

②出现异常情况时应加密观测。

**8.8.4** 试验区加固前后的检验项目应按表8.8.4的规定进行设置。

表 8.8.4 试验前后检验项目

检测项目	原状取土常规物理力学指标试验	钻孔取芯	开挖桩头	载荷试验	现场十字板试验	静力触探试验	标准贯入试验	抽(压)水试验
加固前	★	…	…	…	△	△	△	…
加固后	★	★	★	△	△	△	△	△

注:“★”表示必检项目,“△”表示选检项目,“…”表示无要求项目。

**8.8.5** 典型试验加固效果检验项目的选择及设置要求应符合表8.8.5的要求。

表 8.8.5 加固效果检验项目的选择及设置要求

检验项目	布置数量	要求
原状取土常规物理力学指标试验	加固前后均不少于3孔	钻孔深度至注浆深度以下2m,每米取1个土样进行常规物理力学指标试验,加固后钻孔布置在桩间中心处,遇砂土或人工填土做标贯试验
载荷试验	加固后不少于3点	竖向旋喷桩地基承载力检验采用复合地基载荷试验和单桩载荷试验
桩体钻孔取芯单轴抗压强度试验	加固后不少于6根	钻孔深度至注浆深度以下2m,连续取样以判断桩体完整性,同时每2米取1个试样,进行28d龄期单轴抗压强度试验
开挖桩头	加固后不少于2根	开挖深度不小于2m



续表 8.8.5

检验项目	布置数量	要求
现场十字板试验	加固前后均不少于 3 孔	测试深度至注浆深度以下 2m, 每米测试 1 次, 加固后测试位置在桩间中心处
静力触探试验	加固前后均不少于 3 孔	测试深度至注浆深度以下 2m, 加固后测试位置在桩间中心处
标准贯入试验	加固前后均不少于 3 孔	测试深度至注浆深度以下 2m, 每米测试 1 次, 加固后测试位置在桩间中心处
抽(压)水试验	加固后不少于 3 点	防水帷幕抗渗能力检验采用现场抽水或压水试验

8.8.6 典型试验加固效果检验宜在高压喷射注浆施工结束 28 天后进行。

8.8.7 典型试验成果除包括第 8.1 节中的内容, 还应包括试验前室内配合比试验内容。

## 8.9 爆炸法

8.9.1 典型试验宜分段进行, 每个试验段长度不宜小于 50m, 可选用不同的爆炸施工工艺和施工参数。

8.9.2 试验段施工过程中的监测项目应按表 8.9.2 的要求设置。

表 8.9.2 试验监测项目

全断面测深	地表沉降	深层水平位移	深层分层沉降	边桩位移	孔隙水压力	振动加速度	周边建筑物的位移和沉降
★	★	★	△	△	△	△	△

注:“★”表示必测项目,“△”表示选测项目。

8.9.3 试验区各监测项目设置的数量和监测频率应符合表 8.9.3 的规定。

表 8.9.3 监测仪器设置数量和监测频率

监测项目	仪器布置数量	监测频率
全断面测深	每 5m 设 1 个横断面且不少于 3 个断面, 每个断面 1m ~ 2m 设 1 个测点且不少于 3 个测点, 测深范围包括全边坡	每次爆炸施工前后测量 1 次
地表沉降	在堤身中央沿堤长方向每 10m 设置 1 个观测点且不少于 5 点	施工结束后每星期观测 1 次, 每测点观测持续时间不少于 6 个月
深层水平位移	在堤身中央沿堤长方向每 30m 设置 1 个观测点且不少于 2 点	
深层分层沉降	在堤身中央沿堤长方向每 30m 设置 1 个观测点且不少于 2 点	
表层水平位移	根据试验段的边界条件布置, 每组不少于 3 个测点, 沿与试验区边线垂直方向每 2m ~ 3m 布置 1 个	
孔隙水压力	每个试验段不少于 1 组, 在设计落底深度以下每个土层设置测点, 土层较厚时设置多个测点	

续表 8.9.3

监测项目	仪器布置数量	监测频率
振动加速度	根据试验段的边界条件布置,每组测点不少于5个,沿与试验区边线垂直方向每2m~3m布置1个	每次爆炸施工期间连续观测
周边建筑物的位移和沉降	根据周边建筑物的具体情况布置	施工期间每天观测1次,施工结束后每星期观测1次,每测点观测持续时间不少于6个月

注:①试验区周围有建筑物和地下管线或施工区域涉及边坡稳定时对水平位移应加密观测;

②出现异常情况时应加密观测。

#### 8.9.4 试验段加固前后的检验项目应按表 8.9.4 的规定进行设置。

表 8.9.4 试验前后检验项目

检测项目	原状取土常规物理力学指标试验	钻孔探摸	物探试验	载荷试验	现场十字板试验	静力触探试验	标准贯入试验	动力触探试验
加固前	★	—	—	—	△	△	△	△
加固后	△	★	△	△	—	—	—	△

注:“★”表示必检项目,“△”表示选检项目,“—”表示无要求项目。

#### 8.9.5 典型试验加固效果检验项目的选择及设置要求应符合表 8.9.5 的要求。

表 8.9.5 加固效果检验项目的选择及设置要求

检验项目	布置数量	要求
原状取土常规物理力学指标试验	加固前后不少于3孔	钻孔深入下卧层不少于5m,每米取1个土样进行常规物理力学指标试验,遇砂土或人工填土做标贯试验
钻孔探摸	加固后沿堤长方向每30m布置1个钻孔断面,且不少于3个,每断面布置钻孔不少于5个,对地质情况变化较大或复杂的堤段加密钻孔	钻孔深入下卧层不少于2m
物探试验	加固后沿堤长方向每30m布置1个横断面;按落底宽度、深度和最大腰宽等要求分别在堤中、落底宽度两侧边缘检测3个纵断面	辅以钻孔探摸资料分析
载荷试验	加固后不少于3点	—
现场十字板试验	加固前后均不少于3孔	测试深度至下卧层以下5m,每米测试1次
静力触探试验	加固前后均不少于3孔	测试深度至下卧层以下5m
标准贯入试验	加固前后均不少于3孔	测试深度至下卧层以下5m
动力触探试验	加固前后均不少于3孔	测试深度至下卧层以下5m,每米测试1次



## 附录 A 试验记录表格

表 A.0.1 含水率试验记录表(烘干法、酒精燃烧法)

试验编号				试验日期			
试验依据				主要仪器设备			
试验条件		温度 ℃;相对湿度 %					
试样号	称量盒号	称量盒质量 (g)	湿试样+称量盒质量 (g)	干试样+称量盒质量 (g)	含水率 (%)	含水率平均值 (%)	
备注:							

试验:

计算:

校核:























表 A.0.9 比重试验记录表(虹吸筒法)

试验编号						试验日期					
试验依据						主要仪器设备					
试验条件			温度 ℃;相对湿度 %								
野外编号	室内编号	温度(℃)	水的比重	烘干土质量(g)	风干土质量(g)	量筒质量(g)	量筒加排开水质量(g)	排开水质量(g)	吸着水质量(g)	比重	平均值
备注											

试验:

计算:

校核:

表 A.0.10 颗粒分析试验记录表(筛分法)

试验编号					试验日期			
试验依据					主要仪器设备			
试验条件		温度      ℃;相对湿度      %						
筛前总土质量:		小于 2mm 土质量:			小于 2mm 土占总土质量百分比(%):			
孔径 (mm)	累积留 筛土 质量 (g)	小于该 孔径土 质量 (g)	小于该 孔径土质量 百分比 (%)	孔径 (mm)	累积留 筛土 质量 (g)	小于该 孔径的 土质量 (g)	小于该 孔径土 质量百分比 (%)	占总土 质量 百分比 (%)
60				2.0				
40				1.0				
20				0.5				
10				0.25				
5				0.075				
2								
颗粒大小级配曲线:								
备注								

试验:

计算:

校核:





表 A.0.12 颗粒分析试验表(移液管法)

试验编号				试验日期			
试验依据				主要仪器设备			
试验条件		温度 ℃;相对湿度 %					
取样深度(m)					土样说明		
>0.075mm 颗粒含量(%)					<0.075mm 颗粒含量(%)		
总干土质量(g)					土粒比重		
粒径 (mm)	杯号	杯+ 土质量 (g)	杯质量 (g)	25ml 吸管内 土质量 (g)	1000ml 量筒内 土质量 (g)	小于某粒径 土质量百分数 (%)	小于某粒径土质量 占总土质量百分数 (%)
<0.05							
<0.01							
<0.005							
<0.001							
备注							

试验:

计算:

校核:

表 A.0.13 液限塑限联合试验记录表

试验编号				试验日期				
试验依据				主要仪器设备				
试验条件		温度 ℃;相对湿度 %		取土深度(m)				
试验项目		试验次数		1		2		
						3		
入土深度	$h_1$							
	$h_2$							
	$\frac{1}{2}(h_1 + h_2)$							
含水率	盒号							
	盒质量(g)							
	盒+湿土质量(g)							
	盒+干土质量(g)							
	水分质量(g)							
	干土质量(g)							
	含水率(%)							
备注								

试验:

计算:

校核:

表 A.0.14 液限碟式仪法试验记录表

试验编号		试验日期	
试验依据		主要仪器设备	
试验条件	温度 ℃;相对湿度 %	土样说明	
盒号		1	2
盒质量(g)			
盒+湿土质量(g)			
盒+干土质量(g)			
水分质量(g)			
干土质量(g)			
液限含水率(%)			
平均液限含水率(%)			
备注			

试验:

计算:

校核:

表 A.0.15 塑限滚搓法试验记录表

试验编号		试验日期	
试验依据		主要仪器设备	
试验条件	温度 ℃;相对湿度 %	土样说明	
盒号		1	2
盒质量(g)			
盒+湿土质量(g)			
盒+干土质量(g)			
水分质量(g)			
干土质量(g)			
液限含水率(%)			
平均液限含水率(%)			
备注			

试验:

计算:

校核:



表 A.0.16 收缩皿法缩限试验记录表

试验编号		试验日期			
试验依据		主要仪器设备			
试验条件	温度 ℃;相对湿度 %	土样制备说明			
室内编号		I		II	
收缩皿编号		1	2	3	4
液限(%)					
皿 + 湿土质量(g)					
皿 + 干土质量(g)					
皿的质量(g)					
含水率(%)					
皿的容积(cm <sup>3</sup> )					
干土体积(cm <sup>3</sup> )					
缩限平均值(%)					
收缩指数					
备注					

试验:

计算:

校核:

表 A.0.17 相对密度试验记录表

试验编号		试验日期			
试验依据		主要仪器设备			
试验条件	温度 ℃;相对湿度 %				
试验项目		最大孔隙比		最小孔隙比	
试验方法		漏斗法		振击法	
试样 + 容器质量(g)					
容器质量(g)					
试样质量(g)					
试样体积(cm <sup>3</sup> )					
干密度(g/cm <sup>3</sup> )					
平均干密度(g/cm <sup>3</sup> )					
比重					
孔隙比					
天然干密度(g/cm <sup>3</sup> )					
天然孔隙比					
相对密度					
备注					

试验:

计算:

校核:

































表 A.0.30 岩石抗冻性试验记录表

试验编号				试验日期												
试验依据				主要仪器设备												
试验条件				温度 ℃;相对湿度 %				样品描述								
冻融循环次数 下试件剥落、裂 缝、分层及掉角 检查情况	次数 编号	1	2	3	冻融后质量 损失率 (%)	试验前烘干 试件的质量 (g)	试验后烘干 试件的质量 (g)	冻融后质量 损失率 (%)	平均值 (%)	冻融后 吸水率 (%)	冻融试验后 试件饱水质量 (g)	试验后烘干 试件的质量 (g)	冻融后 吸水率 (%)	平均值 (%)		
	10															
	15															
	25															
试件 编号	冻融 情况	高 (mm)				顶面直径(边长) (mm)		底面直径(边长) (mm)		面积 (mm <sup>2</sup> )			极限 荷载 (kN)	抗压强度测值 (MPa)		冻融 系数
		单个值		平均值		单个值	平均值	单个值	平均值	顶面	底面	平均值		单个值	平均值	
	冻融															
	未冻融															

试验:

计算:

校核:

表 A.0.31 击实试验记录表

试验编号						试验日期							
试验依据						主要仪器设备							
试验条件		温度      ℃;相对湿度      %											
试验 序号	干密度					含水率							
	筒 + 土质量 (g)	筒质量 (g)	湿土 质量 (g)	湿密度 (g/cm <sup>3</sup> )	干密度 (g/cm <sup>3</sup> )	盒 号	盒 + 湿土质量 (g)	盒 + 干土质量 (g)	盒质量 (g)	湿土 质量 (g)	干土 质量 (g)	含水率 (%)	平均 含水率 (%)
1													
2													
3													
4													
5													
最大干密度				g/cm <sup>3</sup>	最优含水率			%	饱和度			%	
大于 40mm 颗粒含量				%	校正后最大干密度			g/cm <sup>3</sup>	校正后最优含水率			%	
备注:													

试验:

计算:

校核:



表 A.0.32 CBR 试验记录表(膨胀量)

试验编号		试验日期	
试验依据		主要仪器设备	
试验条件		温度 ℃;相对湿度 %	
试件编号		1	2
击实筒编号			
含水率	盒 + 湿土质量(g)		
	盒 + 干土质量(g)		
	盒质量(g)		
	含水率(%)		
	平均含水率(%)		
密度	筒 + 试样质量(g)		
	筒质量(g)		
	湿密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )		
	干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )		
	干密度平均值( $\text{g}/\text{cm}^3$ )		
膨胀率	浸水前试样高度(mm)		
	浸水后试样高度变化量(mm)		
	膨胀率(%)		
	膨胀率平均值(%)		
吸水	浸水后筒 + 试样质量(g)		
	吸水量(g)		
	吸水量平均值(g)		
备注:			

试验:

计算:

校核:

表 A.0.33 CBR 试验记录表(贯入试验)

试验编号			试验日期						
试验依据			主要仪器设备						
试验条件			温度 ℃;相对湿度 %						
试件编号			试件编号						
贯入量(0.01mm)			荷载(kPa)		贯入量(0.01mm)			荷载(kPa)	
量表 I	量表 II	平均值	测力计 读数	单位 压力	量表 I	量表 II	平均值	测力计 读数	单位 压力
CBR <sub>2.5</sub> =			(%)		CBR <sub>2.5</sub> =			(%)	
CBR <sub>5.0</sub> =			(%)		CBR <sub>5.0</sub> =			(%)	
CBR =			(%)		CBR =			(%)	
平均 CBR =			(%)						
备注:									

试验:

计算:

校核:









表 A.0.37 固结试验记录表(1)

试验编号				试验日期				
试验依据				主要仪器设备				
试验条件		温度      ℃;相对湿度      %						
试样面积		土粒比重		取土深度				
含水率试验								
试样情况		盒号	盒+湿土质量 (g)	盒+干土质量 (g)	盒质量 (g)	含水率 (%)	平均含水率 (%)	
试验前	饱和前							
	饱和后 (或饱和土)							
试验后								
密度试验								
试样情况		环刀号	环刀+土质量 (g)	环刀质量 (g)	土质量 (g)	试样体积 (cm <sup>3</sup> )	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	
试验前	饱和前							
	饱和后(或饱和土)							
试验后								
固结系数计算								
加压历时 (h)	压力 (kPa)	试样总变形 (mm)	压缩后试样 高度(mm)	孔隙比	压缩模量 (MPa)	压缩系数 (MPa <sup>-1</sup> )	排水距离 (cm)	固结系数 (cm <sup>2</sup> /s)
0								
24								
24								
24								
备注:								

试验:

计算:

校核:



表 A.0.38 固结试验记录表(2)

试验编号				试验日期			
试验依据				主要仪器设备			
试验条件	温度      ℃;相对湿度      %						
试样面积			土粒比重			取土深度	
经历时间 (h. min. s)	压力(kPa)						
	50		100		200		400
	时间	量表读数 (0.01mm)	时间	量表读数 (0.01mm)	时间	量表读数 (0.01mm)	时间 量表读数 (0.01mm)
0s							
6s							
15s							
1min							
2min15s							
4min							
6min15s							
9min							
12min15s							
16min							
20min15s							
25min							
30min15s							
36min							
42min15s							
60min							
23h							
24h							
总变形量 (mm)							
仪器变形量 (mm)							
试样总 变形量 (mm)							
备注:							

注:此表仅用于人工采集数据记录,当使用仪器自动采集时,可由打印仪器自动采集记录替代。

试验:

计算:

校核:

表 A.0.39 快速固结试验记录表

试验编号			试验日期		
试验依据			主要仪器设备		
试验条件	温度      ℃;相对湿度      %				
试样面积		土粒比重		取土深度	
试样初始高度 $h_{20} =$ mm		$K = (h_n)_T / (h_n)_I =$			
加压历时 (h)	压力 (kPa)	校正前试样 总变形量 (mm)	校正后试样 总变形量 (mm)	压缩后试样 高度 (mm)	孔隙比
1					
1					
1					
1					
1					
1					
1					
1					
1					
稳定					
备注:					

注:此表仅用于人工采集数据记录,当使用仪器自动采集时,可由打印仪器自动采集记录替代。

试验:

计算:

校核:





表 A.0.41 固结不排水剪三轴试验记录表

试验编号			试验日期							
试验依据			主要仪器设备							
试验条件	温度	℃;相对湿度	%							
(1) 含水率										
项目	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										
试验高度(cm)										
试验体积(cm <sup>3</sup> )										
试验质量(g)										
密度(g/cm <sup>3</sup> )										
试样草图及试样破坏描述										
(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)		排除水量(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 (%)	校正 面积 (cm <sup>2</sup> )	钢环 读数 (0.01mm)	主应力差 (kPa)	孔隙水 压力 (kPa)	$\sigma'_1$ (kPa)	$\sigma'_3$ (kPa)	$\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3}$	$\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}$ (kPa)	$\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}$ (kPa)
备注:										

注:此表仅用于人工采集数据记录,当使用仪器自动采集时,可由打印仪器自动采集记录替代。

试验:

计算:

校核:

表 A.0.42 固结排水剪三轴试验记录表

试验编号			试验日期							
试验依据			主要仪器设备							
试验条件	温度	℃;相对湿度	%							
(1) 含水率										
项目	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										
试验高度(cm)										
试验体积(cm <sup>3</sup> )										
试验质量(g)										
密度(g/cm <sup>3</sup> )										
试样草图及试样破坏描述										
(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 (%)	校正 面积 (mm <sup>2</sup> )	钢环 读数 (0.01mm)	主应力差 (kPa)	孔隙水 压力 (kPa)	$\sigma'_1$ (kPa)	$\sigma'_3$ (kPa)	$\sigma'_1/\sigma'_3$	$\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}$ (kPa)	$\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}$ (kPa)
备注:										

注:此表仅用于人工采集数据记录,当使用仪器自动采集时,可由打印仪器自动采集记录替代。

试验:

计算:

校核:

表 A.0.43 振动三轴试验记录表(动强度与液化试验)

试验编号				试验日期				试验条件		温度 ℃;相对湿度 %	
试验依据				主要仪器设备							
固结前			固结后			固结条件			试验及破坏条件		
试样直径 (mm)				试样直径 (mm)				试样干密度 (g/cm <sup>3</sup> )		固结排水量 (cm <sup>3</sup> )	
试样高度 (mm)				试样高度 (mm)				轴向固结应力 (kPa)		给定破坏振次 (次)	
试样面积 (cm <sup>2</sup> )				试样面积 (cm <sup>2</sup> )				侧向固结应力 (kPa)		均压时孔压破坏标准 (kPa)	
试样体积 (cm <sup>3</sup> )				振动频率 (Hz)				试样干密度 (g/cm <sup>3</sup> )		均压时应变破坏标准 (%)	
固结应力比			试样体积 (cm <sup>3</sup> )			固结变形量 (mm)			偏压时应变破坏标准 (%)		
振次 (次)	动应变			动应力				动孔隙水压力			
	光点位移 (cm)	标定系数 (cm/cm)	动应变 (%)	光点位移 (cm)	标定系数 (N/cm)	动应力 (kPa)	液化应力比	光点位移 (cm)	标定系数 (kPa/cm)	动孔压 (kPa)	动孔压比
备注:											

注:此表仅用于人工采集数据记录,当使用仪器自动采集时,可由打印仪器自动采集记录替代。

试验:

计算:

校核:



表 A.0.44 振动三轴试验记录表(模量与阻尼比试验)

试验编号		试验日期		试验条件	温度	℃;相对湿度	%										
试验依据		主要仪器设备															
固结前		固结后			固结条件												
试样直径	(mm)	试样直径	(mm)	固结应力比													
试样高度	(mm)	试样高度	(mm)	轴向固结应力 (kPa)													
试样面积	(cm <sup>2</sup> )	试样面积	(cm <sup>2</sup> )	侧向固结应力 (kPa)													
试样体积	(cm <sup>3</sup> )	试样体积	(cm <sup>3</sup> )	固结排水量 (cm <sup>3</sup> )													
试样干密度	(g/cm <sup>3</sup> )	试样干密度	(g/cm <sup>3</sup> )	固结变形量 (mm)													
输出电压 (mV)	动应力			动应变			动孔隙水压力			动模量		阻尼比					
	衰减档	光点位移 (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)	$\frac{1}{E_d}$ (MPa <sup>-1</sup> )	滞回圈 面积 (cm <sup>2</sup> )	三角形 面积 (cm <sup>2</sup> )	阻尼比
备注:																	

注:此表仅用于人工采集数据记录,当使用仪器自动采集时,可由打印仪器自动采集记录替代。

试验:

计算:

校核:

表 A.0.45 孔隙水压力消散试验记录表(一)

试验编号		试验日期					
试验依据		主要仪器设备					
试验条件	温度      ℃;相对湿度      %						
试样状态		试样含水率					
项目	试验前	试验后	项目      试验前      试验后				
试样直径(cm)			试样质量(g)				
试样高度(cm)			干土质量(g)				
试样体积(cm <sup>3</sup> )			水质量(g)				
试样质量(g)			含水率(%)				
密度(g/cm <sup>3</sup> )			饱和度(%)				
干密度(g/cm <sup>3</sup> )			备注:试验后的试样体积等于试验前试验体积减去体积变化				
比重							
周围压力 或轴向压力 (kPa)	试样 干土质量 (g)	试样 体积 (cm <sup>3</sup> )	干密度 (g/cm <sup>3</sup> )	孔隙比	消散 50% 所需时间 (min)	试样 平均高度 (cm)	消散 系数 (cm <sup>2</sup> /s)
备注:							

注:此表仅用于人工采集数据记录,当使用仪器自动采集时,可由打印仪器自动采集记录替代。

试验:

计算:

校核:

表 A.0.46 孔隙水压力消散试验记录表(二)

试验编号		试验日期					
试验依据		主要仪器设备					
试验条件	温度      ℃;相对湿度      %						
1. B( $\bar{B}$ )测试							
时间 (h)	经过时间 (min)	周围压力或轴向压力 (kPa)	孔隙水压力 (kPa)	孔隙压力系数			
2. 排水消散							
时间 (h min)	经过 时间 (min)	孔隙水 压力 (kPa)	孔隙水压力 消散百分数 (%)	排水管 读数 (cm <sup>3</sup> )	体积 变化 (cm <sup>3</sup> )	试样 高度 (cm)	消散系数 (cm <sup>2</sup> /s)
备注:							

注:① $u_0$  为起始孔隙水压力, $V_0$  为排水管初始读数;

②此表仅用于人工采集数据记录,当使用仪器自动采集时,可由打印仪器自动采集记录替代。

试验:

计算:

校核:



表 A.0.47 无侧限抗压强度试验记录表

试验编号		试验日期			
试验依据		主要仪器设备			
试验条件	温度	℃;相对湿度	%		
试验前试样高度		cm		试样破坏情况描述	
试验前试样直径		cm			
试验前试样面积		cm <sup>2</sup>			
试样质量		g			
试样密度		g/cm <sup>3</sup>			
轴向变形		0.01mm			
测力计率定系数		N/0.01mm(或 N/mV)			
原状试样无侧限抗压强度		kPa			
重塑试样无侧限抗压强度		kPa			
测力计量表度数 (0.01mm)	轴向变形 (0.01mm)	轴向应变 (%)	校正后面积 (cm <sup>2</sup> )	轴向荷载 (N)	轴向应力 (kPa)
备注					

注:此表仅用于人工采集数据记录,当使用仪器自动采集时,可由打印仪器自动采集记录替代。

试验:

计算:

校核:

表 A.0.48 直接剪切试验记录表(一)

试验编号	试验日期						试验条件			温度 ℃;相对湿度 %					
试验依据	主要仪器设备														
试样编号	1			2			3			4			5		
项目	起 始	饱 和 度	剪 后	起 始	饱 和 度	剪 后	起 始	饱 和 度	剪 后	起 始	饱 和 度	剪 后	起 始	饱 和 度	剪 后
湿密度 (g/cm <sup>3</sup> )															
含水率 (%)															
干密度 (g/cm <sup>3</sup> )															
孔隙比															
饱和度 (%)															

试验:

计算:

校核:

表 A.0.49 直接剪切试验记录表(二)

试验编号		试验日期		
试验依据		主要仪器设备		
试验条件	温度      ℃;相对湿度      %			
试样编号:	剪切前固结时间(min):			
剪切前压缩量(mm):	剪切历时(min):			
垂直压力(kPa):	抗剪强度(kPa):			
测力计率定系数:	N/0.011mm			
手轮转数 (转)	测力计读数 (0.01mm)	剪切位移 (0.01mm)	剪应力 (kPa)	垂直位移 (0.01mm)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
...				
32				
备注:				

注:此表仅用于人工采集数据记录,当使用仪器自动采集时,可由打印仪器自动采集记录替代。

试验:

计算:

校核:







表 A.0.52 膨胀率试验记录表(有荷载法、无荷载法)

试验编号			试验日期			
试验依据			主要仪器设备			
试验条件	温度      ℃;相对湿度      %					
试验状态			膨胀量测定			
项目	试验前	试验后	测定时刻 (d. h. min)	经过时间 (min)	量表读数 (0.01mm)	膨胀率 (%)
环刀+湿土质量(g)						
环刀+干土质量(g)						
环刀质量(g)						
湿土质量(g)						
干土质量(g)						
含水率(%)						
试样体积(cm <sup>3</sup> )						
试样密度(g/cm <sup>3</sup> )						
干密度(g/cm <sup>3</sup> )						
土粒比重						
孔隙比						
备注:						

试验:

计算:

校核:



表 A.0.53 膨胀力试验记录表

试验编号			试验日期			
试验依据			主要仪器设备			
试验条件	温度      ℃;相对湿度      %					
试验状态			膨胀力测定			
项目	试验前	试验后	测定时刻 (d. h. min)	平衡荷重 (N)	压力 (kPa)	仪器变形量 (0.01mm)
环刀 + 湿土质量(g)						
环刀 + 干土质量(g)						
环刀质量(g)						
湿土质量(g)						
干土质量(g)						
含水率(%)						
试样体积( $\text{cm}^3$ )						
试样密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )						
干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )						
土粒比重						
孔隙比						
备注:						

试验:

计算:

校核:







表 A.0.56 共振柱试验记录表

表 A.0.56-1 试样状态

试验编号				试验日期				
试验依据				主要仪器设备				
试验条件	温度 ℃;相对湿度 %							
项目	直径 (cm)	高度 (cm)	面积 (cm <sup>2</sup> )	体积 (cm <sup>3</sup> )	质量 (g)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	含水率 (%)	干密度 (g/cm <sup>3</sup> )
饱和前								
固结前								
固结后								

试验:

计算:

校核:

表 A.0.56-2 计算参数

试验编号				试验日期				
试验依据				主要仪器设备				
试验条件	温度 ℃;相对湿度 %							
荷载		频率因素			加速度计			
周围压力 (kPa)	轴向压力 (kPa)	扭转向	轴向	标定系数 mV/(981cm/s <sup>2</sup> )	距离 (cm)			

试验:

计算:

校核:

表 A.0.56-3 激振端参数

试验编号				试验日期				
试验依据				主要仪器设备				
试验条件	温度 ℃;相对湿度 %							
质量 (g)	转动惯量 (kg·m <sup>2</sup> )		共振频率 (Hz)			衰减率		
	试样	激振端	扭转向	轴向	扭转向	轴向		

试验:

计算:

校核:

表 A.0.56-4 稳态强迫振动法

试验编号				试验日期			
试验依据				主要仪器设备			
试验条件	温度 ℃;相对湿度 %						
测定次数	共振频率 (Hz)	最大电压值 (mV)	共振圆频率 (rad/s)	动剪位移 (轴变形) (cm)	动剪(轴)应变 (%)	动剪切(弹性)模量 (kPa)	阻尼比

试验:

计算:

校核:

表 A.0.56-5 自由振动法

试验编号				试验日期										
试验依据				主要仪器设备										
试验条件	温度 ℃;相对湿度 %													
输出电压 (mV)	自振周期 (s)					自振振幅 (cm)					动剪应变 (%)	动剪切模量 (kPa)	阻尼比	
	1	2	3	4	平均	1	2	3	4	平均				

试验:

计算:

校核:

表 A.0.57 弹性模量试验记录表

加荷、卸荷(固结压力:轴向\_\_\_ kPa,侧向\_\_\_ kPa)

试验编号				试验日期			
试验依据				主要仪器设备			
试验条件	温度 ℃;相对湿度 %						
荷重级编号	荷载增量 (N)			加荷压缩量 (1min 位移计读数)			卸荷回弹量 (1min 位移计读数)
1							
2							
3							
4							
5							
6							

试验:

计算:

校核:









表 A.0.61 岩石单轴抗压强度试验记录表

试验编号			试验日期			试验依据							
主要仪器设备			试验条件			温度 ℃;相对湿度 %			岩石名称				
试样 编号	含水 状态	试件 编号	试件直径(mm)			试件高度(mm)			压力 与层理关系 (⊥或//)	破坏 荷载 (kN)	岩石单轴 抗压强度 (MPa)	试件描述	备注
			单值		平均值	单值		平均值					
		(1)											
		(2)											
		(3)											
		(1)											
		(2)											
		(3)											
		(1)											
		(2)											
		(3)											

试验:

计算:

校核:



表 A.0.62 岩石单轴压缩变形试验记录表

试验编号				试验日期									
试验依据				主要仪器设备									
试验条件		温度 ℃;相对湿度 %		岩石名称									
试件直径(mm)				试件高度(mm)									
试件状态													
试件试验前描述													
试件号	各级荷载 (kN)	各级应力 (MPa)	纵向应变					横向应变					
			1号片	2号片	3号片	4号片	平均	1号片	2号片	3号片	4号片	平均	
试件试验后描述													
备注													

试验:

计算:

校核:



表 A.0.64 岩石抗剪强度试验记录表

试验编号				试验日期				
试验依据				主要仪器设备				
试验条件	温度      ℃ ; 相对湿度      %							
试件号			岩石名称			剪切面积(mm <sup>2</sup> )		
试件描述								
垂直千斤顶 活塞面积 (mm <sup>2</sup> )		垂直压力表 读数 (MPa)		垂直荷载 (kN)		附加垂直 荷载 (kN)		垂直应力 (MPa)
摩阻力 (kN)			水平千斤顶 活塞面积 (mm <sup>2</sup> )					
观测时间	水平压力表 读数 (MPa)	水平 荷载 (kN)	剪应力 (MPa)	测表读数 (0.01mm)		位移值 (0.01mm)		
				水平	垂直	水平	垂直	
备注:								

试验:

计算:

校核:











表 A.0.68 原位密度试验记录表(灌水法)

试验编号					试验日期				
试验依据					主要仪器设备				
天气									
试坑 编号	储水筒水位 (cm)		储水筒断面积 (cm <sup>2</sup> )	试坑体积 (cm <sup>3</sup> )	试样质量 (g)	湿密度 (g/cm <sup>3</sup> )	含水率 (%)	干密度 (g/cm <sup>3</sup> )	试样重度 (kN/cm <sup>3</sup> )
	初始	終了							
备注:									

试验:

计算:

校核:







表 A.0.71 试验桩水平静载荷试验记录

工程名称				试验桩型规格						试桩编号					
沉桩日期				桩顶高程(m)						入土深度(m)					
试桩日期				桩端高程(m)						天气					
水平荷载高程				水平位移上表高程						水平位移下表高程					
试验依据				主要仪器设备											
序号	水平荷载 (kN)	压力表读数 (MPa)	测读时间 (h:min)	位移计(百分表)读数(0.01mm)						水平位移				桩顶转角弧度	备注
				上表			下表			上表		下表			
				表1	表2	平均	表1	表2	平均	本次	累计	本次	累计		

试验:

计算:

校核:

表 A.0.72 受检桩设计施工资料表

工程名称						工程地点			桩型	
桩号	桩径 (mm)	混凝土 设计强度 等级	设计桩顶 高程 (m)	检测时 桩顶高程 (m)	施工 桩底高程 (m)	施工 桩长 (m)	混凝土 浇灌日期	设计持力层 岩土性状	单桩承载 特征力值 (kN)	备注

记录:

校核:

表 A.0.73 钻芯法检测现场操作记录表

工程名称						孔号	检测日期				
时间		钻进(m)			芯样 编号	芯样长度 (m)	残留 芯样	芯样初步描述及异常情况记录			
自	至	自	至	累计							

检测:

记录:

校核:

表 A.0.74 钻芯法检测芯样编录表

工程名称						日期				
桩号/钻芯孔号		桩径		混凝土设计强度等级						
项目	分段(层) 深度 (m)	芯 样 描 述				取样编号 取样深度(m)	备注			
桩身混凝土		(混凝土钻进深度,芯样连续性、完整性、胶结情况、表面光滑情况、断口吻合程度、混凝土芯是否为柱状、骨料大小分布情况,以及气孔、空洞、蜂窝麻面、沟槽、破碎、夹泥、松散的情况)								
桩底沉渣		(桩端混凝土与持力层接触情况、沉渣厚度)								
持力层		(持力层钻进深度,岩土名称、芯样颜色、结构构造、裂隙发育程度、坚硬及风化程度;分层岩层应分层描述)				(强风化或 土层时的动 力触探或标 贯结果)				

检测:

记录:

校核:

表 A.0.75 钻芯法检测芯样综合柱状图

桩号/孔号		混凝土设计强度等级			桩顶高程		开孔时间	
施工桩长		设计桩径			钻孔深度		终孔时间	
层序号	层底 高程 (m)	层底 深度 (m)	分层 厚度 (m)	混凝土/岩土芯 柱状图 (比例尺)	桩身混凝土、 持力层描述	序号 芯样强度 深度(m)	备注	
				□ □ □				

注:□代表芯样试件取样位置。

编制:

校核:



## 附录 B 基桩检测报告主要内容

### B.0.1 封面和扉页。

**B.0.1.1** 报告封面应包括报告标题、工程名称、报告编号、检测单位名称、检测资质证书的编号及出具报告日期。

**B.0.1.2** 报告扉页应包括检测项目负责人、检测人员、报告编写人、审核人和技术负责人的签名。

**B.0.2** 检测报告封面应在封面的左上角加盖计量认证章,封面和检测结论页应加盖检测单位报告专用章。

### B.0.3 前言。

- (1) 建设、委托、设计、监理和施工单位名称;
- (2) 工程名称、工程地点、检测目的和检测日期;
- (3) 桩基设计与施工概况。

### B.0.4 场地工程地质条件。

- (1) 勘察单位名称;
- (2) 工程地质概况;
- (3) 检测桩位及相应的钻孔柱状图或表。

### B.0.5 试验依据。

### B.0.6 检测仪器、设备。

- (1) 仪器生产厂商、型号及编号;
- (2) 仪器检定单位及检定证书编号。

### B.0.7 检测方法。

### B.0.8 检测结果。

### B.0.9 检测结论。

## 附录 C 混凝土桩桩头处理

- C.0.1** 混凝土桩应先凿掉桩顶部的破碎层以及软弱或不密实的混凝土。
- C.0.2** 桩头顶面应平整,桩头中轴线与桩身上部的中轴线应重合。
- C.0.3** 桩头主筋应全部直通至桩顶混凝土保护层之下,各主筋应在同一高度上。
- C.0.4** 距桩顶 1 倍桩径范围内,宜用厚度为 3mm ~ 5mm 的钢板围裹或距桩顶 1.5 倍桩径范围内设置箍筋,间距不宜大于 100mm。桩顶应设置钢筋网片 1 ~ 2 层,间距 60mm ~ 100mm。
- C.0.5** 桩头混凝土强度等级宜比桩身混凝土提高 1 ~ 2 级,且不得低于 C30。
- C.0.6** 高应变法检测的桩头测点处截面尺寸应与原桩身截面尺寸相同。
- C.0.7** 桩顶应用水平尺找平。

## 附录 D 高应变动测传感器安装

**D.0.1** 检测时至少应在桩侧沿桩轴线对称安装两只加速度传感器和两只力传感器,见图 D.0.1;传感器的中心应处于同一横截面上,同侧的力传感器和加速度传感器间的水平距离不宜大于 80mm;传感器与桩顶间的垂直距离,对一般桩型不宜小于 2 倍桩径或边长,对直径大于 1m 的桩,不宜小于 1 倍桩径;安装完毕后,传感器的中心轴应与桩中心轴保持平行。

**D.0.2** 安装传感器的桩身表面应均匀、密实、平整,且其周围无缺陷或截面突变,否则应采用磨光机将其磨平。

**D.0.3** 传感器的安装宜采用膨胀螺栓固定,螺栓孔应与桩侧表面垂直,安装后的传感器应紧贴桩身表面,锤击时传感器不得产生滑动。

**D.0.4** 水上检测时,应采取预防措施防止传感器或导线接头进水。

**D.0.5** 锤击时,应将传感器电缆固定在桩身上,预防振动受损。



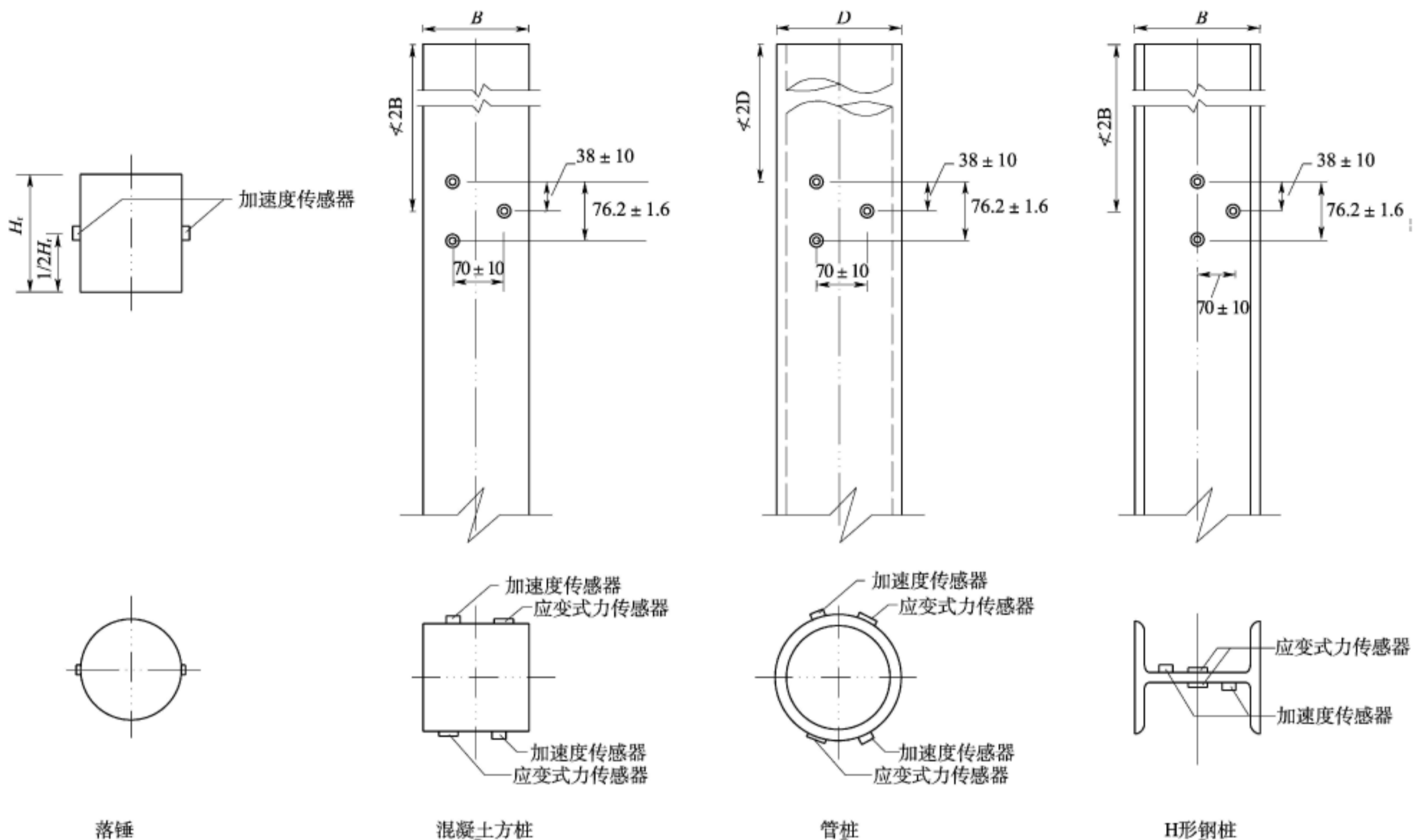


图 D.0.1 传感器安装示意图 (单位: mm)

## 附录 E 水平静载荷试验中 $m$ 值的计算方法

**E.0.1** 弹性长桩水平地基反力系数随深度增长的比例系数  $m$  值得计算,应对弹性长桩在水平荷载下的位移进行分析,位移分析示意图见图 E.0.1。

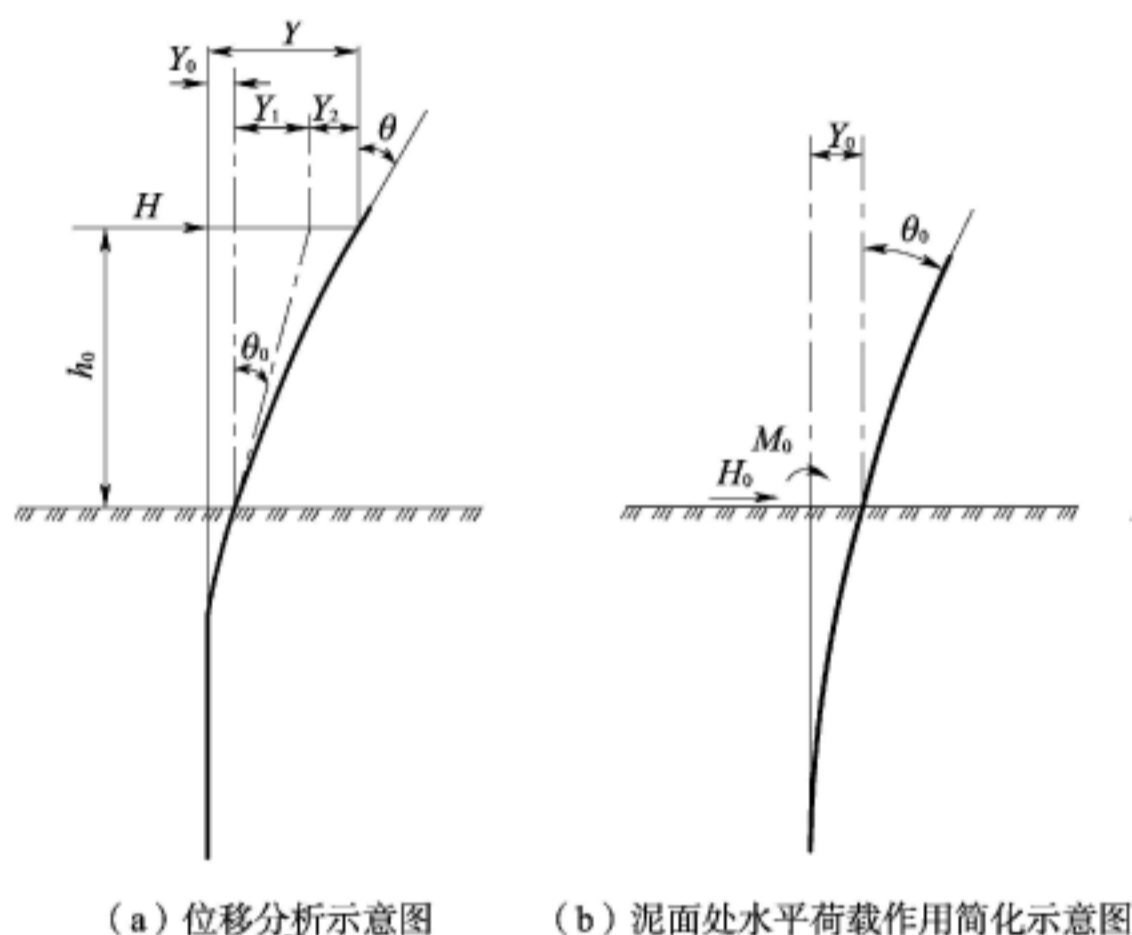


图 E.0.1 弹性长桩在水平荷载作用下的位移分析示意图

$H$ -水平荷载(kN);  $H_0$ -作用在泥面处的水平荷载(kN);  $M_0$ -作用在泥面处的弯矩(kN·m);  $Y$ -水平荷载作用下桩在作用点处的水平位移(m);  $Y_0$ -水平荷载作用下泥面变形引起桩在泥面高程处的水平位移(m);  $Y_1$ -水平荷载作用下桩身泥面处截面转角引起水平荷载作用点处的水平位移(m);  $Y_2$ -假定泥面高程处桩身为固端,水平荷载作用下引起桩身水平荷载作用点处的水平位移(m);  $\theta_0$ -水平荷载作用下桩在泥面高程处截面转角(rad);  $\theta$ -水平荷载作用下桩顶截面转角(rad)。

**E.0.2**  $\theta_0$  和  $Y_0$  的取值宜采用实测数据,当无实测数据时,可按下列公式计算:

$$\theta_0 = \theta - \frac{Hh_0^2}{2E_p I} \quad (\text{E.0.2-1})$$

$$Y_0 = Y - \theta h_0 + \frac{Hh_0^3}{6E_p I} \quad (\text{E.0.2-2})$$

式中  $\theta_0$ ——水平荷载作用下桩在泥面高程处截面转角(rad);

$\theta$ ——水平荷载作用下桩顶截面转角(rad);

$H$ ——水平荷载(kN);

$h_0$ ——水平荷载作用点至泥面的距离(m);

$E_p$ ——桩身材料的弹性模量(kN/m<sup>2</sup>);

$I$ ——桩截面的惯性矩( $\text{m}^4$ )；

$Y_0$ ——水平荷载作用下泥面变形引起桩在泥面高程处的水平位移( $\text{m}$ )；

$Y$ ——水平荷载作用下桩在作用点处的水平位移( $\text{m}$ )。

**E.0.3**  $m$  值应按下列方法进行计算。

**E.0.3.1** 在同级水平荷载作用下,应由式(E.0.3-1)求得桩的相对刚度系数  $T$  值,由式(E.0.3-2)求得  $m$  值。

$$Y_0 = 2.441 \frac{H_0 T^3}{E_p I} + 1.621 \frac{M_0 T^2}{E_p I} \quad (\text{E.0.3-1})$$

$$T = \sqrt[5]{\frac{E_p I}{m b_0}} \quad (\text{E.0.3-2})$$

式中  $Y_0$ ——水平荷载作用下泥面变形引起桩在泥面高程处的水平位移( $\text{m}$ )；

$H_0$ ——作用在泥面处的水平荷载( $\text{kN}$ )；

$T$ ——桩的相对刚度系数( $\text{m}$ )；

$E_p$ ——桩身材料的弹性模量( $\text{kN}/\text{m}^2$ )；

$I$ ——桩截面的惯性矩( $\text{m}^4$ )；

$M_0$ ——作用在泥面处的弯矩( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )；

$m$ ——桩侧地基土的水平抗力系数随深度增长的比例系数( $\text{kN}/\text{m}^4$ )；

$b_0$ ——桩的换算宽度( $\text{m}$ ),等于 2 倍桩径或桩宽。

**E.0.3.2** 当直接计算  $m$  值有困难时,可采用试算法进行计算。先假设一个  $m$  值,由式(E.0.3-2)求得  $T$  值,由式(E.0.3-1)求得  $Y_0$  值,与式(E.0.2-2)计算的  $Y_0$  值比较,反复试算,当两个  $Y_0$  值相符时,假设的  $m$  值即为所求值。



## 附录 F 岩体应力参数计算

### F.1 基本规定

**F.1.1** 数据整理应符合下列规定。

**F.1.1.1** 应取有效测点数据。

**F.1.1.2** 应根据解除深度与应变的关系曲线,分析曲线特征,选取稳定值作为应变计算值,或以专家判定选取应变计算值。

**F.1.2** 坐标系应符合下列规定:

(1) 岩体应力测试计算坐标系采用右手系;

(2) 大地坐标系  $o-XYZ$ ——轴  $Z$  为铅垂向上,轴  $X$  为正北方向或建筑物轴线,其方位角为  $\beta_0$ ;

(3) 钻孔坐标系  $o-xyz$ ——轴  $z$  为钻孔轴向,指向孔口为正;轴  $x$  为水平向;按右手系确定  $y$  轴,位于上半空间的指向为正;

(4) 当采取三孔交会测试时,钻孔坐标系为  $o-x_i y_i z_i$ ,  $i$  为 1~3。

**F.1.3** 测点处坐标应符合下列规定:

(1) 钻孔孔壁应变法——由孔口向孔内方向确定坐标,钻孔坐标系  $x$ 、 $y$  轴为测点处坐标  $x$ 、 $y$  轴;由围岩向孔轴方向确定测点孔壁处坐标,平行钻孔坐标系  $z$  轴为孔壁坐标  $z$  轴,按左手系垂直  $z$  轴为  $\theta$  轴;

(2) 其他形式测试均由孔口向孔内方向确定坐标,钻孔坐标系  $x$ 、 $y$  轴为测点处坐标  $x$ 、 $y$  轴。

**F.1.4** 钻孔方向应符合下列规定:

(1) 钻孔倾角  $\alpha_i$  以仰角为正;

(2) 钻孔方位角  $\beta_i$  为钻孔在水平面上投影线的方位;

(3) 当钻孔为铅垂向时,  $\beta_i$  为垂直  $x$  轴方向或正东向;

(4) 倾角和方位角单位为度。

**F.1.5** 测量元件序号应符合下列规定:

(1) 孔壁应变计:  $i$  为布置在孔壁上的应变丛序号,  $j$  为应变丛内应变片序号,  $\theta$  为应变丛与  $x$  轴的夹角,  $\varphi$  为应变片与  $\theta$  轴的夹角;

(2) 孔底应变计:  $i$  为测试钻孔序号,  $j$  为应变计中应变片序号,  $\theta$  为应变片与  $x$  轴的夹角;

(3) 钻孔变形计:  $i$  为测试钻孔序号,  $j$  为触头测试方向序号,  $\theta$  为测试方向与  $x$  轴夹角;

(4) 夹角以逆时针方向为正, 单位为度。

## F.2 孔壁应变法应力参数计算

**F.2.1** 孔壁应变法大地坐标系中空间应力分量应按下列公式计算:

$$E\varepsilon_{ij} = A_{xx}\sigma_x + A_{yy}\sigma_y + A_{zz}\sigma_z + A_{xy}\tau_{xy} + A_{yz}\tau_{yz} + A_{zx}\tau_{zx} \quad (\text{F.2.1-1})$$

$$A_{xx} = (l_x^2 + l_y^2 - \mu l_z^2) \sin^2 \varphi_j - [\mu(l_x^2 + l_y^2) - l_z^2] \cos^2 \varphi_j - 2(1 - \mu^2) [(l_x^2 - l_y^2) \cos 2\theta_i + 2l_x l_y \sin 2\theta_i] \sin^2 \varphi_j + 2(1 + \mu)(l_y l_z \cos \theta_i - l_x l_z \sin \theta_i) \sin 2\varphi_j \quad (\text{F.2.1-2})$$

$$A_{yy} = (m_x^2 + m_y^2 - \mu m_z^2) \sin^2 \varphi_j - [\mu(m_x^2 + m_y^2) - m_z^2] \cos^2 \varphi_j - 2(1 - \mu^2) [(m_x^2 - m_y^2) \cos 2\theta_i + 2m_x m_y \sin 2\theta_i] \sin^2 \varphi_j + 2(1 + \mu)(m_y m_x \cos \theta_i - m_x m_z \sin \theta_i) \sin 2\varphi_j \quad (\text{F.2.1-3})$$

$$A_{zz} = (n_x^2 + n_y^2 - \mu n_z^2) \sin^2 \varphi_j - [\mu(n_x^2 + n_y^2 - n_z^2)] \cos^2 \varphi_j - 2(1 - \mu^2) [(n_x^2 - n_y^2) \cos 2\theta_i + 2n_x n_y \sin 2\theta_i] \sin^2 \varphi_j + 2(1 + \mu)(n_y n_z \cos \theta_i - n_x n_z \sin \theta_i) \sin 2\varphi_j \quad (\text{F.2.1-4})$$

$$A_{xy} = 2(l_x m_x + l_y m_y - \mu l_z m_z) \sin^2 \varphi_j - 2[\mu(l_x m_x + l_y m_y) - l_z m_z] \cos^2 \varphi_j + 4(1 - \mu^2) [l_y m_y \cos 2\theta_i - (l_x m_y + l_y m_x) \sin 2\theta_i] \sin^2 \varphi_j + 2(1 + \mu) [(l_y m_z + l_z m_y) \cos \theta_i - (l_x m_z + l_z m_x) \sin \theta_i] \sin 2\varphi_j \quad (\text{F.2.1-5})$$

$$A_{yz} = 2(m_x n_x + m_y n_y - \mu m_z n_z) \sin^2 \varphi_j - 2[\mu(n_x l_x + n_y l_y) - n_z l_z] \cos^2 \varphi_j + 4(1 - \mu^2) [n_y l_y \cos 2\theta_i - (n_x l_y + n_y l_x) \sin 2\theta_i] \sin^2 \varphi_j + 2(1 + \mu) [(n_y l_z + n_x l_y) \cos \theta_i - (n_x l_z + n_x l_x) \sin \theta_i] \sin 2\varphi_j \quad (\text{F.2.1-6})$$

$$A_{zx} = 2(n_x l_x + n_y l_y - \mu n_z l_z) \sin^2 \varphi_j - 2[\mu(n_x l_x + n_y l_y) - n_z l_z] \cos^2 \varphi_j + 4(1 - \mu^2) [n_y l_y \cos 2\theta_i - (n_x l_y + n_y l_x) \sin 2\theta_i] \sin^2 \varphi_j + 2(1 + \mu) [(n_y l_z + n_x l_y) \cos \theta_i - (n_x l_z + n_x l_x) \sin \theta_i] \sin 2\varphi_j \quad (\text{F.2.1-7})$$

式中

$E$ ——围岩弹性模量(MPa);

$\varepsilon_i$ ——序号为  $i$  应变丛  $j$  应变片应变计算值;

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ ——岩体空间应力分量(MPa);

$A_{xx}, A_{yy}, A_{zz}, A_{xy}, A_{yz}, A_{zx}$ ——应力系数;

$\mu$ ——围岩泊松比;

$\varphi_j$ ——序号为  $j$  应变片的倾角( $^\circ$ );

$\theta_i$ ——序号为  $i$  应变丛的极角( $^\circ$ );

$l_x, m_x, n_x, l_y, m_y, n_y, l_z, m_z, n_z$ ——测试钻孔坐标系各轴对于大地坐标系的方向余弦。

**F.2.2** 采用空心包体进行孔壁应变法测试时, 在计算中应根据空心包体几何尺寸、材料变形参数进行修正。空心包体应提供有关技术参数。

## F.3 孔底应变法应力参数计算

**F.3.1** 孔底应变法大地坐标系中空间应力分量应按下列公式计算:

$$E\varepsilon_{ij} = A_{xx}^i \sigma_x + A_{yy}^i \sigma_y + A_{zz}^i \sigma_z + A_{xy}^i \tau_{xy} + A_{yz}^i \tau_{yz} + A_{zx}^i \tau_{zx} \quad (\text{F. 3. 1-1})$$

$$A_{xx}^i = \lambda_{i1} l_{xi}^2 + \lambda_{i2} l_{yi}^2 + \lambda_{i3} l_{zi}^2 + \lambda_{i4} l_{xi} l_{yi} \quad (\text{F. 3. 1-2})$$

$$A_{yy}^i = \lambda_{i1} m_{xi}^2 + \lambda_{i2} m_{yi}^2 + \lambda_{i3} m_{zi}^2 + \lambda_{i4} m_{xi} m_{yi} \quad (\text{F. 3. 1-3})$$

$$A_{zz}^i = \lambda_{i1} n_{xi}^2 + \lambda_{i2} n_{yi}^2 + \lambda_{i3} n_{zi}^2 + \lambda_{i4} n_{xi} n_{yi} \quad (\text{F. 3. 1-4})$$

$$A_{xy}^i = 2(\lambda_{i1} l_{xi} m_{xi} + \lambda_{i2} l_{yi} m_{yi} + \lambda_{i3} l_{zi} m_{zi}) + \lambda_{i4} (l_{xi} m_{yi} + m_{xi} l_{yi}) \quad (\text{F. 3. 1-5})$$

$$A_{yz}^i = 2(\lambda_{i1} m_{xi} n_{xi} + \lambda_{i2} m_{yi} n_{yi} + \lambda_{i3} m_{zi} n_{zi}) + \lambda_{i4} (m_{xi} n_{xi} + n_{xi} m_{xi}) \quad (\text{F. 3. 1-6})$$

$$A_{zx}^i = 2(\lambda_{i1} n_{xi} l_{xi} + \lambda_{i2} n_{yi} l_{yi} + \lambda_{i3} n_{zi} l_{zi}) + \lambda_{i4} (n_{xi} l_{yi} + l_{xi} n_{yi}) \quad (\text{F. 3. 1-7})$$

$$\lambda_{i1} = 1.25(\cos^2 \theta_{ij} - \mu \sin^2 \theta_{ij}) \quad (\text{F. 3. 1-8})$$

$$\lambda_{i2} = 1.25(\sin^2 \theta_{ij} - \mu \cos^2 \theta_{ij}) \quad (\text{F. 3. 1-9})$$

$$\lambda_{i3} = -0.75(0.645 + \mu)(1 - \mu) \quad (\text{F. 3. 1-10})$$

$$\lambda_{i4} = 1.25(1 + \mu) \sin^2 \theta_{ij} \quad (\text{F. 3. 1-11})$$

式中

$\varepsilon_{ij}$ ——序号为  $i$  测试钻孔中的  $j$  应变片应变计算值；

$A_{xx}^i, A_{yy}^i, A_{zz}^i, A_{xy}^i, A_{yz}^i, A_{zx}^i$ ——序号  $i$  测试钻孔的应力系数；

$l_{xi}, m_{xi}, n_{xi}, l_{yi}, m_{yi}, n_{yi}, l_{zi}, m_{zi}, n_{zi}$ ——序号  $i$  测试钻孔坐标系各轴对于大地坐标系的方向余弦；

$\lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \lambda_{i3}, \lambda_{i4}$ ——序号  $i$  测试钻孔与泊松比和应变片夹角有关的计算系数；

$\theta_{ij}$ ——序号为  $i$  测试孔中  $j$  测试方向应变片倾角( $^\circ$ )。

**F. 3. 2**  $\lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \lambda_{i3}, \lambda_{i4}$ 适用于一般的孔底应变计,也可根据试验或建立的数学模型确定计算系数。

#### F. 4 孔径变形法应力参数计算

**F. 4. 1** 孔径变形法大地坐标系中空间应力分量应按下列公式计算：

$$E\varepsilon_{ij} = A_{xx}^i \sigma_x + A_{yy}^i \sigma_y + A_{zz}^i \sigma_z + A_{xy}^i \tau_{xy} + A_{yz}^i \tau_{yz} + A_{zx}^i \tau_{zx} \quad (\text{F. 4. 1-1})$$

$$A_{xx}^i = l_{xi}^2 + l_{yi}^2 - \mu l_{zi}^2 + 2(1 - \mu^2) [(l_{xi}^2 - l_{yi}^2) \cos 2\theta_{ij} + 2l_{xi} l_{yi} \sin 2\theta_{ij}] \quad (\text{F. 4. 1-2})$$

$$A_{yy}^i = m_{xi}^2 + m_{yi}^2 - \mu m_{zi}^2 + 2(1 - \mu^2) [(m_{xi}^2 - m_{yi}^2) \cos 2\theta_{ij} + 2m_{xi} m_{yi} \sin 2\theta_{ij}] \quad (\text{F. 4. 1-3})$$

$$A_{zz}^i = n_{xi}^2 + n_{yi}^2 - \mu n_{zi}^2 + 2(1 - \mu^2) [(n_{xi}^2 - n_{yi}^2) \cos 2\theta_{ij} + 2n_{xi} n_{yi} \sin 2\theta_{ij}] \quad (\text{F. 4. 1-4})$$

$$A_{xy}^i = 2(l_{xi} m_{xi} + l_{yi} m_{yi} - \mu l_{zi} m_{zi}) + 4(1 - \mu^2) [(l_{xi} m_{xi} - l_{yi} m_{yi}) \cos 2\theta_{ij} + (l_{xi} m_{yi} + m_{xi} l_{yi}) \sin 2\theta_{ij}] \quad (\text{F. 4. 1-5})$$

$$A_{yz}^i = 2(m_{xi} n_{xi} + m_{yi} n_{yi} - \mu m_{zi} n_{zi}) + 4(1 - \mu^2) [(m_{xi} n_{xi} - m_{yi} n_{yi}) \cos 2\theta_{ij} + (m_{xi} n_{yi} + n_{xi} m_{yi}) \sin 2\theta_{ij}] \quad (\text{F. 4. 1-6})$$

$$A_{zx}^i = 2(n_{xi} l_{xi} + n_{yi} l_{yi} - \mu n_{zi} l_{zi}) + 4(1 - \mu^2) [(n_{xi} l_{xi} - n_{yi} l_{yi}) \cos 2\theta_{ij} + (n_{xi} l_{yi} + l_{xi} n_{yi}) \sin 2\theta_{ij}] \quad (\text{F. 4. 1-7})$$

式中

$\varepsilon_{ij}$ ——序号为  $i$  测试钻孔中的  $j$  测试方向中心测试孔孔径应变计算值；



$A_{xx}^i, A_{yy}^i, A_{zz}^i, A_{xy}^i, A_{yz}^i, A_{zx}^i$ ——序号  $i$  测试钻孔的应力系数;

$\theta_{ij}$ ——序号为  $i$  测试孔中  $j$  测试方向钢环触头极角( $^\circ$ );

$l_{xi}, m_{xi}, n_{xi}, l_{yi}, m_{yi}, n_{yi}, l_{zi}, m_{zi}, n_{zi}$ ——序号  $i$  测试钻孔坐标系各轴对于大地坐标系的方向余弦。

**F.4.2** 当只在一个测试钻孔内进行垂直于钻孔轴线平面内各应力分量沿孔深度变化趋势分析时,作平面应力假定,应按下式计算各平面内的应力分量:

$$E\varepsilon_j = [1 + 2(1 - \mu^2) \cos 2\theta_j] \sigma_x + [1 - 2(1 - \mu^2) \cos 2\theta_j] \sigma_y + 4(1 - \mu^2) \cos 2\theta_j \tau_{xy} \quad (\text{F.4.2})$$

## F.5 空间主应力参数计算

**F.5.1** 空间主应力计算应符合下列规定。

**F.5.1.1** 空间主应力应按下列公式计算:

$$\sigma_1 = 2 \cos \frac{\omega}{3} \sqrt{-\frac{P}{3} + \frac{1}{3} J_1} \quad (\text{F.5.1-1})$$

$$\sigma_2 = 2 \cos \frac{\omega + 2\pi}{3} \sqrt{-\frac{P}{3} + \frac{1}{3} J_1} \quad (\text{F.5.1-2})$$

$$\sigma_3 = 2 \cos \frac{\omega + 4\pi}{3} \sqrt{-\frac{P}{3} + \frac{1}{3} J_1} \quad (\text{F.5.1-3})$$

$$\omega = \arccos \left[ \frac{Q}{2 \sqrt{-\left(\frac{P}{3}\right)^3}} \right] \quad (\text{F.5.1-4})$$

$$P = -\frac{1}{3} J_1^2 + J_2 \quad (\text{F.5.1-5})$$

$$Q = -2 \left( \frac{J_1}{3} \right)^3 + \frac{1}{3} J_1 J_2 - J_3 \quad (\text{F.5.1-6})$$

$$J_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (\text{F.5.1-7})$$

$$J_2 = \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2 \quad (\text{F.5.1-8})$$

$$J_3 = \sigma_x \sigma_y \sigma_z - \sigma_x \tau_{yz}^2 - \sigma_y \tau_{zx}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2 - 2\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx} \quad (\text{F.5.1-9})$$

式中  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ——岩体空间主应力(MPa)。

**F.5.1.2** 各主应力对于大地坐标系各轴的方向余弦应按下列公式计算:

$$l_i = \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (\text{F.5.1-10})$$

$$m_i = \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (\text{F.5.1-11})$$

$$n_i = \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (\text{F.5.1-12})$$

$$A = \tau_{xy} \tau_{yz} - (\sigma_y - \sigma_i) \tau_{zx} \quad (\text{F.5.1-13})$$

$$B = \tau_{xy}\tau_{zx} - (\sigma_x - \sigma_i)\tau_{yz} \quad (\text{F.5.1-14})$$

$$C = (\sigma_x - \sigma_i)(\sigma_y - \sigma_i) - \tau_{xy}^2 \quad (\text{F.5.1-15})$$

**F.5.1.3** 各主应力方向应按下列公式计算:

$$\alpha_i = \arcsin n_i \quad (\text{F.5.1-16})$$

$$\beta_i = \beta_0 - \arcsin \frac{m_i}{\sqrt{1 - n_i^2}} \quad (\text{F.5.1-17})$$

式中  $\alpha_i$ ——主应力  $\sigma_i$  的倾角( $^\circ$ );

$\beta_0$ ——大地坐标系 X 轴方位角( $^\circ$ );

$\beta_i$ ——主应力  $\sigma_i$  在水平面上投影线的方位角( $^\circ$ )。

**F.5.2** 按式(F.4.2)进行平面应力分量解时,平面主应力参数计算应符合下列规定。

**F.5.2.1** 平面主应力应按下列公式计算。

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} [ (\sigma_x + \sigma_y) + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} ] \quad (\text{F.5.2-1})$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2} [ (\sigma_x + \sigma_y) - \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} ] \quad (\text{F.5.2-2})$$

**F.5.2.2** 主应力方向应按下列公式计算:

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (\text{F.5.2-3})$$

式中  $\alpha$ —— $\sigma_1$  与 X 轴夹角( $^\circ$ )。

**F.5.3** 岩体应力测试属多值测试,空间应力参数最佳值的确定宜采用下列方法:

(1)按数理统计的线性方程解,求得空间应力最佳值,计算岩体空间应力参数最佳值;

(2)根据不同组合计算空间应力参数,取优势方向的应力参数平均值,作为岩体空间应力参数最佳值;

(3)根据区域地质构造、地形条件、影响工程区的主要结构面产状和特性、建筑物特性,结合第(1)项和第(2)项的方法,按专家判定确定岩体空间应力参数最佳值。

## 附录 G 本规程用词说明

为便于在执行本规程条文时区别对待,对要求严格程度的用词说明如下:

(1) 表示很严格,非这样做不可的,正面词采用“必须”,反面词采用“严禁”;

(2) 表示严格,在正常情况下均应这样做的,正面词采用“应”,反面词采用“不应”或“不得”;

(3) 表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的,正面词采用“宜”,反面词采用“不宜”;

(4) 表示允许选择,在一定条件下可以这样做的采用“可”。



## 引用标准名录

1. 《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266)
2. 《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》(GB/T 15406)
3. 《岩土工程勘察规范》(GB 50021)
4. 《普通混凝土力学性能试验方法》(GB/T 50081)
5. 《建筑地基基础设计规范》(GB50007)
6. 《建筑地基基础工程施工质量验收规范》(GB50202)
7. 《国家一、二等水准测量规范》(GB/T 12897)
8. 《国家三、四等水准测量规范》(GB/T 12898)
9. 《地基动力特性测试规范》(GB/T 50269)
10. 《工程测量规范》(GB 50026)
11. 《水运工程试验检测仪器设备技术标准》(JTS 238)
12. 《水运工程测量规范》(JTS 131)
13. 《水运工程地基设计规范》(JTS 147)
14. 《水运工程地基基础施工规范》(JTS 206)
15. 《土工试验规程》(SL 237)
16. 《基桩动测仪》(JG/T 3055)

## 附加说明

## 本规程主编单位、参编单位、主要起草人、 主要审查人、总校人员和管理组人员名单

主编单位:中交天津港湾工程研究院有限公司

中交四航工程研究院有限公司

参编单位:天津港湾工程质量检测中心有限公司

中交第一航务工程局有限公司

中交武汉港湾工程设计研究院有限公司

中交上海三航科学研究院有限公司

上海港湾工程质量检测有限公司

中交第三航务工程勘察设计院有限公司

中交第二航务工程勘察设计院有限公司

中交水运规划设计院有限公司

广州港湾工程质量检测有限公司

主要起草人:李树奇(中交天津港湾工程研究院有限公司)

喻志发(中交天津港湾工程研究院有限公司)

张功新(中交四航工程研究院有限公司)

杨京方(中交天津港湾工程研究院有限公司)

(以下按姓氏笔画为序)

付士娟(中交天津港湾工程研究院有限公司)

李卫(中交天津港湾工程研究院有限公司)

刘爱民(中交天津港湾工程研究院有限公司)

刘艳华(中交水运规划设计院有限公司)

朱耀庭(中交天津港湾工程研究院有限公司)

吴凤娟(中交第二航务工程勘察设计院有限公司)

邱青长(中交四航工程研究院有限公司)

苗中海(天津港湾工程质量检测中心有限公司)

居炎飞(中交武汉港湾工程设计研究院有限公司)

郑爱荣(中交天津港湾工程研究院有限公司)

金晓博(中交第三航务工程勘察设计院有限公司)

周琦(中交四航工程研究院有限公司)  
洪帆(中交武汉港湾工程设计研究院有限公司)  
胡振明(中交第三航务工程勘察设计院有限公司)  
顾伟园(中交上海三航科学研究院有限公司)  
徐树华(中交天津港湾工程研究院有限公司)  
高潮(中交天津港湾工程研究院有限公司)  
曹永华(中交天津港湾工程研究院有限公司)  
曹金宝(上海港湾工程质量检测有限公司)  
梁萌(中交第一航务工程局有限公司)  
谢仁红(广州港湾工程质量检测有限公司)

主要审查人: 李悟州

(以下按姓氏笔画为序)

仇伯强、蔡波、程新生、林佑高、陈允进、苏林王、  
徐满意、唐彤芝、朱济祥

总校人员: 刘国辉、吴敦龙、董方、喻志发、叶国良、刘爱民、曹金宝、  
朱耀庭、侯晋芳、李斌、郭玉斌、赵岩

管理组人员: 李树奇(中交天津港湾工程研究院有限公司)  
喻志发(中交天津港湾工程研究院有限公司)  
刘爱民(中交天津港湾工程研究院有限公司)  
朱耀庭(中交天津港湾工程研究院有限公司)  
梁爱华(中交天津港湾工程研究院有限公司)



中华人民共和国行业标准

# 水运工程地基基础试验检测技术规程

JTS 237—2017

条文说明



## 目 次

<b>1</b>	<b>总则</b> .....	(327)
<b>3</b>	<b>基本规定</b> .....	(328)
<b>4</b>	<b>室内试验</b> .....	(329)
4.1	一般规定 .....	(329)
4.2	含水率试验 .....	(329)
4.3	化学分析试样风干含水率试验 .....	(330)
4.4	密度试验 .....	(330)
4.5	比重试验 .....	(331)
4.6	颗粒分析试验 .....	(332)
4.7	界限含水率试验 .....	(334)
4.8	砂的相对密度试验 .....	(335)
4.10	水分析试验 .....	(335)
4.13	冻结温度试验 .....	(335)
4.14	未冻含水率试验 .....	(336)
4.15	有机质含量试验 .....	(336)
4.16	岩石颗粒密度试验和块体密度试验 .....	(336)
4.17	岩石吸水率和饱和吸水率试验 .....	(337)
4.18	岩石耐崩解性试验 .....	(338)
4.19	岩石膨胀试验 .....	(338)
4.20	岩石冻融试验 .....	(339)
4.21	击实试验 .....	(339)
4.22	承载比试验 .....	(340)
4.23	回弹模量试验 .....	(341)
4.24	渗透试验 .....	(341)
4.25	固结试验 .....	(342)
4.26	三轴压缩试验 .....	(343)
4.27	振动三轴试验 .....	(346)
4.28	孔隙水压力消散试验 .....	(348)
4.29	无侧限抗压强度试验 .....	(351)
4.30	直接剪切试验 .....	(351)
4.31	收缩试验 .....	(353)



4.32	膨胀率试验 .....	(353)
4.33	膨胀力试验 .....	(354)
4.34	静止侧压力系数试验 .....	(355)
4.35	单轴抗拉强度试验 .....	(355)
4.36	共振柱试验 .....	(356)
4.37	弹性模量试验 .....	(356)
4.38	冻胀量试验 .....	(356)
4.39	冻土融化压缩试验 .....	(357)
4.40	黏性土附着力试验 .....	(358)
4.41	岩石单轴抗压强度试验 .....	(358)
4.42	岩石单轴压缩变形试验 .....	(358)
4.43	岩石抗拉强度试验 .....	(359)
4.44	岩石抗剪强度试验 .....	(359)
4.45	岩石点荷载强度试验 .....	(359)
4.46	岩石抗折强度试验 .....	(359)
4.47	土工合成材料试验检测 .....	(360)
<b>5</b>	<b>原位试验 .....</b>	<b>(362)</b>
5.1	一般规定 .....	(362)
5.2	原位密度试验 .....	(362)
5.3	抽水试验 .....	(362)
5.4	压水试验 .....	(362)
5.5	原位直剪试验 .....	(363)
5.6	原位冻胀量试验 .....	(363)
5.7	十字板剪切试验 .....	(363)
5.8	标准贯入试验 .....	(365)
5.9	静力触探试验 .....	(365)
5.10	动力触探试验 .....	(366)
5.11	旁压试验 .....	(366)
5.12	载荷试验 .....	(367)
5.13	波速测试 .....	(367)
5.14	扁铲侧胀试验 .....	(368)
5.15	基底摩擦系数试验 .....	(368)
5.16	现场冻土融化压缩试验 .....	(369)
<b>6</b>	<b>基桩检测 .....</b>	<b>(370)</b>
6.1	一般规定 .....	(370)
6.2	高应变法 .....	(370)
6.3	低应变法 .....	(372)

6.4	单桩轴向抗压静载荷试验 .....	(373)
6.5	单桩轴向抗拔静载试验 .....	(374)
6.6	单桩水平静载试验 .....	(374)
6.7	钻芯法 .....	(374)
6.8	声波透射法 .....	(375)
<b>7</b>	<b>现场监测 .....</b>	<b>(383)</b>
7.1	一般规定 .....	(383)
7.2	表层沉降观测 .....	(383)
7.3	分层沉降观测 .....	(384)
7.4	孔隙水压力观测 .....	(384)
7.5	地下水位观测 .....	(384)
7.6	表层水平位移观测 .....	(384)
7.7	深层水平位移观测 .....	(384)
7.8	应力应变观测 .....	(385)
7.9	倾斜观测 .....	(385)
7.10	土压力观测 .....	(385)
7.11	振动观测 .....	(385)
7.12	岩体原位应力测试 .....	(386)
7.13	激振法测试 .....	(387)
7.14	水底地层剖面探测 .....	(389)
<b>8</b>	<b>地基处理典型试验检测 .....</b>	<b>(390)</b>
8.1	一般规定 .....	(390)
8.2	堆载预压法 .....	(390)
8.3	真空预压法 .....	(390)
8.4	强夯法和强夯置换法 .....	(390)
8.5	深层水泥搅拌法 .....	(391)
8.6	砂桩法 .....	(391)
8.7	降水强夯法 .....	(392)
8.8	高压喷射注浆法 .....	(392)
8.9	爆炸法 .....	(392)





# 1 总 则

**1.0.1** 水运工程建设在近年来得到了蓬勃发展,但水运工程地基基础方面没有统一的试验检测规范,造成规范、标准的选用比较混乱,可能造成工程事故,影响工程的质量,因此,迫切需要在行业内统一试验、检测技术要求,也符合《水运工程建设标准体系表》的要求。

**1.0.2** 根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007 - 2011)的规定,“地基”是指支承基础的土体或岩体;根据《港口工程基本术语标准》(GB/T 50186 - 2013)的规定,“基础”是指将建(构)筑物和各种设施的上部结构所承受的各种作用和自重传递到地基的结构组成部分。

**1.0.3** 本条所指的国家现行有关标准,在各章节中单独指明。

## 3 基本规定

**3.0.2** 本条所指的现场试验检测包括了原位试验、基桩检测、现场监测和地基处理典型试验检测。

## 4 室内试验

### 4.1 一般规定

**4.1.2** 由于土工合成材料试验检测市场较小,目前国内外从事相关类型的试验设备研发生产的厂家不多,国家或行业标准规范中也缺乏相关类型的仪器设备的产品标准,加之各行业的标准规范之间存在一些差异,因此同种试验的仪器设备千变万化,其中部分试验检测单位根据自己的试验经验研制开发的试验仪器占有一定比例。不论采用何种型式的检测仪器设备,首先要满足试验规程或试验参数的要求。

除了试验机、电子天平等通用仪器设备之外,土工合成材料试验检测还有许多专用设备,如透水性测定仪、塑料排水板通水量测定仪等,有些仪器结构较为特殊,综合多个专业的计量检定,国家或行业没有相应的计量检定规程或校准方法,不便于经常拆卸或组装,有些经过拆装后仪器的整体性能可能受到一定影响,需要专业技术人员或专业工具进行调试,因此需要建立可行的仪器设备内部校准或验证的办法,在保证仪器设备性能完好的情况下,可以适当延长检定或校准的周期,同时加强对仪器设备的日常检查和维护。

**4.1.6.3、4.1.6.4** 煮沸和抽气时间:国外规程规定的煮沸和抽气时间均比较长。一般认为适当延长煮沸和抽气时间是必要的。参考国标、水电规程,在本规程中,只提出煮沸和抽气时间的下限:即煮沸 6h 以上,抽气 4h 以上。

**4.1.7.2** 《土工合成材料 塑料土工格栅》(GB/T 17689)中有规定。

### 4.2 含水率试验

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

烘干法操作简便、精度高、应用广,故本规程以此法为室内试验的标准方法。在野外如无电热鼓风干燥箱或要求快速测定含水率时,依土的性质和工程情况分别采用酒精燃烧法和比重法。

**4.2.2.2(1)、4.2.3.2(1)、4.2.4.2(1)** 关于代表性试样选取及试样的数量问题。进行含水率试验时,常因各种因素影响试验成果:如土层的不均匀,试样数量过少,扰动土样拌和不均,钻探取土时,取土器和筒壁的挤压,土样在运输和存放期间保护不当等等,为此,选取含水率试验的试样要根据试验目的和要求而定。若为了了解全土层综合而概略的天然含水率,可以沿土层剖面竖向切取土样,拌和均匀测定其含水率;若是配合压缩、抗剪强度、渗透试验,要在切取试样环刀的上下两面选取土样,这样测得含水率的结果可能由于土样层次不均有所差异,但有助于了解土层的真实情况和对试验成果的分析。



关于试样的数量问题。对烘干法为使试验结果准确可靠,同时考虑到烘焙时间的长短,细粒土规定 15g ~ 30g;砂土和砾类土因持水性较差,颗粒大小相差悬殊,水含量易于变化,所以试样要多取一些。对有机质含量超过 5% 的土,采用烘干法时,可以取 50g。当采用酒精燃烧法测定含水率时,为使酒精用量不过大,根据实践经验,规定黏性土 5g ~ 10g,砂土 20g ~ 30g。

**4.2.2.2 (2)** 鉴于目前国内外主要土工试验标准多数以 105℃ ~ 110℃ 为标准,故规定烘干温度为 105℃ ~ 110℃。

对含有机质的土,由于在 105℃ ~ 110℃ 恒温下,经长时间烘干后,有的有机质(特别是腐殖酸)会在烘干过程中逐渐分解而不断损失,使测得的失去“水量”比实际的要大,测得的含水率比实际的含水率大,土中有机质含量越高误差就越大。故对有机质含量超过干土质量 5% 的土,规定烘干温度为 65℃ ~ 70℃。

**4.2.2.4、4.2.3.3、4.2.4.4** 关于平行试验和平行差值。规程采用平行试验目的是为了 避免操作中间发生的错误;对原状土通过平行试验还可以进一步了解含水率的均匀程度。为了保证试验精度,规定平行试验的允许误差是合理的。对于比重法测定含水率,因精确度较差,只规定了平行测定,允许误差可以参考烘干法的规定斟酌使用。

### 4.3 化学分析试样风干含水率试验

**4.3.1** 风干含水率是风干试样在温度 105℃ ~ 110℃ 下烘至恒量时,失去水分的质量与恒量时试样的质量之比,以百分比(%)表示。

本试验的目的是测定风干试样的含水率,将其作为其他试验中风干试样质量换算成烘干试样质量的依据。本试验采用烘干法。

**4.3.2** 分析天平内的干燥剂,常用的有无水氯化钙、硅胶以及硫酸,要注意及时更换。干燥器要固定,其中干燥剂用一段时间后要更换或烘干再用。

**4.3.3 (1)** 在本试验条件下,烘焙时失去的水分主要是吸湿水。其质量随空气的相对湿度、试样的成分以及颗粒的大小而异。本方法适用于各种土,但当试样中有机质含量较高时,本方法误差较大,改用真空干燥法测定含水率。含石膏较多的试样,烘焙温度采用 55℃ ~ 60℃。

**4.3.3 (3)** 土样烘焙时间按规定执行,任意增减会造成误差。烘焙时要注意电热鼓风干燥箱中的温度分布情况。称量盒放在电热鼓风干燥箱底层,因此处温度较高。

**4.3.3 (4)** 称量盒盖严后放在干燥器内冷却,每次冷却时间一致。称量盒称量的先后次序要固定,以利恒量。

**4.3.3 (5)** 每次称量时,称量盒的数量不要过多,一般 4 ~ 6 只为宜。称量时动作要迅速,否则会因吸湿而难以恒量。

### 4.4 密度试验

**4.4.2** 环刀法是测定土样密度的基本方法,其操作简便而准确,在室内和野外普遍采用。本方法在测定试样密度的同时,可以将试样用于固结和直剪试验。

**4.4.2.1** (1) 环刀的尺寸是根据现行国家标准《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》GB/T 15406 的规定选用内径 61.8mm 和 79.8mm, 高 20mm。

**4.4.2.2** (2) 用环刀切取土样时, 为防止土样扰动, 先切一个较环刀内径略大的土柱, 然后将环刀垂直下压, 为避免环刀下压时挤压四周土样, 边压边削, 直至土样伸出环刀, 将两端修平。对含水率较高的土, 在刮平环刀上下面时要细心, 最好一次刮平, 防止水分损失。另外, 环刀由于经常使用, 会有所磨损, 根据使用情况加以校正, 以保证试验精度。

**4.4.3** 易碎裂, 难以切削的土样, 其密度测定可以用蜡封法。

**4.4.3.2** (2) 将土样浸入溶解的蜡中密封时, 如果蜡的温度过高, 对土样的含水率和结构都会造成一定的影响, 而温度太低会使蜡溶解不均匀, 不易封好蜡皮。故蜡的温度要求控制在刚过熔点。

封蜡时, 为避免易碎裂土样的扰动和蜡封试样内气泡的产生, 最好将土样一次徐徐沉浸在蜡液中。

**4.4.3.2** (3) 蜡封试样在水中的质量, 系指试样在水中所受的重力与浮力之差。蜡封试样的质量和蜡封试样在蒸馏水中的质量之差, 与蒸馏水在  $t^{\circ}\text{C}$  时的密度的比值, 即为蜡封试样的体积; 当再减去试样上蜡的体积之后, 即得原试样的体积。

蜡封试样在水中的质量与水的密度有关, 水的密度随温度而变化, 条文中规定测定水温的目的是为了消除因水密度变化而产生的影响。

**4.4.3.3** 因各种蜡的密度不相同, 试验前要测定蜡的密度。密度试验中使用的石蜡, 选用 55 号石蜡为宜, 其密度以实测为准。如无条件实测, 可以采用其密度的近似值  $0.92\text{g}/\text{cm}^3$  进行计算。石蜡密度的测定根据“阿基米德原理”, 采用静水力学天平称量法或采用 500ml ~ 1000ml 广口瓶比重法进行。

## 4.5 比重试验

### 4.5.2 比重瓶法

1 土粒比重是土的基本物理性指标之一, 是计算孔隙比和评价土类的主要指标。

关于比重的定义, 以往国内《土工试验规程》和常见教科书上一般将比重定义为: 土粒在温度  $100^{\circ}\text{C} \sim 105^{\circ}\text{C}$ , 烘至恒重时的重量与同体积  $4^{\circ}\text{C}$  时蒸馏水重量的比值。近年来, 国外某些书刊中给出这样的定义: 给定体积材料的质量(或密度)与等体积水的质量(或密度)的比值。

本试验适用于粒径小于 5mm 的土。

颗粒小于 5mm 的土用比重瓶法测定。根据土的分散程度、矿物成分、水溶盐和有机质的含量又分别规定用纯水和中性液体测定, 排气方法也根据介质的不同分别采用煮沸法和真空抽气法。

2 目前各单位多用 100ml 的比重瓶, 也有采用 50ml 的。比较试验表明, 瓶的大小对比重结果影响不大, 但因 100ml 的比重瓶可以多取些试样, 使试样的代表性和试验的精度提高, 所以本规程建议采用 100ml 的比重瓶, 但也允许采用 50ml 的比重瓶。

比重瓶校正一般有两种方法: 称量校正法和计算校正法。前一种方法精度比较高, 后



一种方法引入了某些假设。但一般认为对比重影响不大。本试验以称量校正法为准。

3 关于试样状态,规定用烘干土,但考虑到烘焙对土中胶粒有机质的影响尚无一致意见,所以规定一般应用烘干试样,也可以用风干或天然湿度试样。一般规定有机质含量小于5%时,可以用纯水测定。

从资料上看,易溶盐含量小于0.5%时,用纯水和中性液体测得的比重几乎无差异。含盐量大于0.5%时,比重值差1%以上,因此规定含盐量大于0.5%时,用中性液体测定。

排气方法,规程中选用煮沸法为主。如需用中性液体时,则采用真空抽气法。

粗、细粒土混合料比重的测定,本规程规定分别测定粗、细粒土的比重,然后取加权平均值。

#### 4.5.3 浮力法

颗粒大于5mm的砾石、碎石等粗粒,颗粒本身有孔隙存在。孔隙又分封闭的与开敞的两部分。浸水时开敞部分为水所填充,封闭部分水不能浸入。因此,粗粒比重的种类通常以视比重、干比重、饱和面干比重和比重四种方法来表示。

规程中采用视比重,这样比较方便,因为一般指的孔隙,实际上是指被水充填的孔隙。

浮力法所测结果较为稳定。但大于20mm粗粒较多时,采用本方法将增加试验设备,室内使用不便。因此,规定粒径大于5mm的试样中大于或等于20mm颗粒含量小于10%时用浮力法。

### 4.6 颗粒分析试验

#### 4.6.3 密度计法

1 本规程选用的试剂供作分散处理和洗盐之用,其中六偏磷酸钠和焦磷酸钠属强分散剂。

2 密度计分析用的土样采用风干土。试样质量为30g,即悬液浓度为3%。

3 根据对分散剂和分散方法的试验研究结果,分散剂和分散方法如下:

进行土的分散之前,用煮沸后的蒸馏水,按1:5的土水比浸泡土样,摇振3min,澄清约半小时后,用酸度计或pH试纸测定土样悬液的pH值。按照酸性土、中性土、碱性土分别选用分散剂。酸性土指 $\text{pH} \leq 6.5$ 的土,中性土指 $6.5 < \text{pH} \leq 7.5$ 的土,碱性土指 $\text{pH} > 7.5$ 的土。这样,避免了采用一种分散剂所带来的偏差。

对30g土样,酸性土加0.5mol/L氢氧化钠20ml,中性土加0.25mol/L草酸钠18ml,碱性土加0.083mol/L六偏磷酸钠15ml。若土的pH值大于8,六偏磷酸钠分散效果不好或不好分散时,另用30g土样加0.125mol/L焦磷酸钠14ml进行分散。加入以上分散剂稍加振荡,煮沸40min,即可分散。

对于用强分散剂(如焦磷酸钠)仍不能分散的土样,可以用阳离子树脂(粒径大于2mm)100g投入浸泡的土样中,不断搅拌,使之进行交换,历时约2h,观察其不起泡时为止,说明此时离子交换基本完成。再过2mm筛,将阳离子树脂与土样悬液分开,然后在土样悬液中加入0.083mol/L六偏磷酸钠15ml,不煮沸即可分散。交换后的树脂,加盐酸处



理,使之恢复后,仍能继续使用。

水溶盐检验时,若管中悬液有凝聚,在沉淀物上部呈松散絮绒状,说明试样中含有足以使悬液中土粒成团下降的水溶盐。

#### 4 密度计土粒沉降距离校正

(1)测定密度计浮泡体积。在 250ml 量筒内倒入约 130ml 纯水,并保持水温为 20℃,测定量筒内水面读数(以弯液面上缘为准)后画一标记。将密度计放入量筒中,使水面达密度计最低分度处(以弯液面上缘为准),同时测记水面在量筒上的读数(以弯液面上缘为准)后再画一标记。两者之差,即为密度计浮泡的体积。读数准确至 1ml;

(2)测定密度计浮泡体积中心。在测定密度计浮泡体积后,将密度计向上缓缓垂直提起,使水面恰落至两标记的正中间,此时水面与浮泡相切(以弯月面上缘为准),即为浮泡体积中心。将密度计固定于三足架上,用直尺准确量出水面至密度计最低分度的垂直距离;

(3)测定 1000ml,量筒内径(准确至 1mm),并算出量筒面积;

(4)量出自密度计最低分度至玻璃杆上各分度处的距离,每隔 5 格或 10 格量距 1 次;

(5)按下式计算土粒有效沉降距离。

$$L = L' - \frac{V_b}{2A} = L_1 + \left( L_0 - \frac{V_b}{2A} \right) \quad (4-1)$$

式中  $L$ ——土粒有效沉降距离(cm);

$L_1$ ——自最低刻度至玻璃杆上各分度的距离(cm);

$L_0$ ——密度计浮泡中心至最低分度的距离(cm);

$V_b$ ——密度计浮泡体积( $\text{cm}^3$ );

$A$ ——1000ml 量筒面积( $\text{cm}^2$ )。

(6)用所量出的不同  $L_1$  代入上式,计算出如图 4-1 相应的  $L$  值。

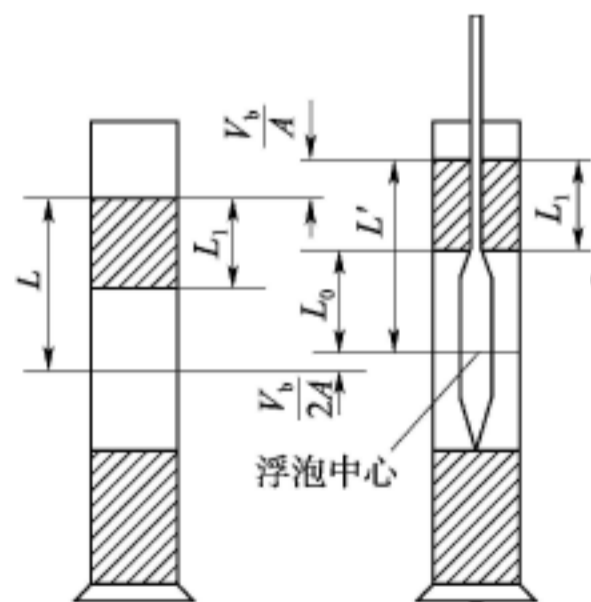


图 4-1 土粒有效沉降距离校正

#### 4.6.4 移液管法

1 本试验方法适用于粒径小而比重大的细粒土。

2 移液管法不能保证吸取同一深度处的悬液,因此,规定将移液管端部略为放大,侧面加开四个小孔,既能保证悬液不致流失,又可以吸取近似同一深度处平面的悬液。

3 温度越高,悬液静置时间越短。在不同温度 40℃ ~ 60℃ 下,用移液管法和密度计法进行了比较试验,结果表明:误差不大,但为保险起见,采用 50℃ 没有问题。一般情况下,可以采用 40℃,这样可以缩短试验时间。

如无恒温水槽,则在室温变化不大的情况下(在测定时间内,室温变化小于 0.5℃),也可以采用室温法。方法是将吸液深度从 10cm 减为 5cm,按实际悬液温度计算某粒径的静置时间,取此值的一半作为吸取悬液的时间。1000ml 或 2000ml 量筒均可以采用。

## 4.7 界限含水率试验

### 4.7.2 液限和塑限联合测定法

1 新中国成立以来,我国一直采用 76g 平衡锥来测定土的液限,相应的人土深度为 10mm。根据 1000 多组土样的液限试验,发现 76g 锥 10mm 液限与美国 ASTM D4318 所列卡式碟式仪测得的结果相差较大,按 76g 锥 10mm 液限时土的抗剪强度明显高于卡式碟式仪测得液限时土的抗剪强度。

2 水利部在修订液塑限联合测定的过程中,曾组织全国 13 个单位对各地 16 种土(从低液限到高液限)用 FG-II 型光电式联合测定仪进行了第二次液塑限对比试验,根据对比结果,76g 锥入土深度 17mm 作为液限和 100g 锥入土深度 20mm 作为液限时抗剪强度与美国 ASTM D4318 碟式仪液限时抗剪强度基本一致。

3 英国标准(BS 1377)及香港标准均采用 80g 锥(锥角 30°)入土 20mm 时的含水率作为液限,《公路土工试验规程》(JTG E40)、《土工试验规程》(SL 237)规定 76g 锥入土深度 17mm 时的含水率为液限,《土工试验方法标准》(GB 50123)、《铁路工程土工试验规程》(TB 10102)同时规定 76g 锥 17mm 液限和 10mm 液限。

4 我国《建筑地基基础设计规范》(GB50007)及交通部有关标准《水运工程岩土勘察规范》(JTS 133)、《港口工程地基规范》(JTS 147-1)等规范均规定,确定土的塑性指数  $I_p$  时采用 76g 圆锥入土 10mm 对应的含水率作为液限进行计算。

5 综上,虽然国际上、国内有 76g 锥 17mm 液限和 10mm 液限,但水运行业实际使用 76g 圆锥入土 10mm 对应的含水率作为液限,因此,本规程规定试验时只给出 76g 锥 10mm 液限,以便行业内协调一致。

### 4.7.4 塑限滚搓法

1 塑限试验长期以来采用滚搓法。该法虽存在许多缺点,如标准不易掌握,人为因素较大,但由于该试验法的物理概念明确,且试验人员已在实践中积累了许多经验,国际上有很多国家采用此法,故本规程仍然保留滚搓法。

2 国内外在测定塑限的规定中,搓条方法不尽相同,土条断裂时的直径多数采用 3mm,我国其他行业标准均采用 3mm,故本规程采用 3mm。关于滚搓速度,各国均无具体要求,美国 ASTM D424 规定滚搓速度为每分钟 80 ~ 90 次;英国 BS 1377 规定,手指的压力必须使滚搓 5 ~ 10 个往返后,土条直径由 6mm 减至 3mm,高塑性黏土则允许往返 10 ~ 15 次。这种规定太细、太死,不易掌握,也无必要,故本规程不作具体规定。对于某些低液限砂类土,始终搓不到 3mm,则认为塑性极低或无塑性,按极细砂处理。



#### 4.7.5 缩限试验

1 缩限试验所用收缩皿的直径最好大于高度,以便于蒸发干透,或用液限试验杯代替。但环刀是不适宜的,因它不便振动排气,不便挤压,同时环刀与玻璃杯之间容易跑水流土。

2 分层装填试样时,要注意不断挤压拍击,以充分排气。否则,不符合体积收缩等于水分减少的基本假定,而使计算结果失真。本规程要求收缩皿底和皿壁要平滑弯曲,为的是易于装土排气。改用蜡封法代替水银排开法测定体积,在于防止污染。

### 4.8 砂的相对密度试验

4.8.1 通过砂的相对密度试验可以求无凝聚性土的最大与最小孔隙比,用于计算相对密度,借此了解该土在自然状态或经压实后的松紧情况和土粒结构的稳定性。

### 4.10 水分析试验

4.10.3.3 当直接对土的悬浊液进行酸碱度试验时,称取过2mm筛的风干土样10g,倒入广口瓶中,加入纯水50ml(土水比1:5)振荡3min,静置30min后,将悬浊液倒入小烧杯。

4.10.4.3 土中的易溶盐包括所有氯化物盐类、易溶的硫酸盐和碳酸盐类,还包括水溶性有机质等。在采用烘干法测定水溶性盐总量时,用双氧水除去烘干残渣中的有机质后,即为水溶性盐总量。

4.10.7.4 公式中的96.06表示与1.00ml乙二胺四乙酸二钠标准溶液( $c_{\text{EDTA}} = 0.01\text{mol/L}$ )相当的以毫克表示的硫酸根质量。

4.10.8.2(3)由于酸性铬蓝K与萘酚绿B二种试剂的出厂质量不同,最好通过试验再确定合适的混合比例,或者分别配制0.2%酸性铬蓝K溶液与0.5%萘酚绿B溶液,在滴定时分别加入,两者的加入量根据滴定终点是否清晰来确定。

### 4.13 冻结温度试验

4.13.1 土的冻结是以土中孔隙水结晶为特征。冻结温度是判别土是否处于冻结状态的指标。纯水的结冰温度为 $0^{\circ}\text{C}$ ,土中水分由于受到土颗粒表面能的束缚且含有化学物质,其冻结温度均低于 $0^{\circ}\text{C}$ 。土的冻结温度主要取决于土颗粒的分散度、土中水的化学成分和外加荷载。

4.13.2 本试验采用热电偶测温法,因此需要零温瓶和低温瓶。若采用贝克曼温度计(分辨度为 $0.05^{\circ}\text{C}$ 、量程为 $-10^{\circ}\text{C} \sim +20^{\circ}\text{C}$ )测温,则省略零温瓶、数字表和热电偶。

4.13.3 土中的液态水变成固态的冰这一结晶过程大致要经历三个阶段:先形成很小的分子集团,称为结晶中心或称生长点(germs);再由这种分子集团生长变成稍大一些团粒,称为晶核(nuclei);最后由这些小团粒结合或生长,产生冰晶(ice-crystal)。从冻结过程的温度曲线上,可以看出:第一阶段,土体开始冷却和过冷,此时土中水尚未冻结成冰,其持续时间取决于土中的水量和冷却速度;第二阶段,土中冰晶已形成,由于水结晶而放出



大量的潜热,使土体温度剧烈上升;第三阶段,孔隙水结冰阶段,这阶段中土体的稳定温度就是土中水的冻结温度。所以,土中水冻结的时间过程一般要经历过冷、跳跃、恒定及降低阶段。当出现跳跃时,热电势会突然减小,接着稳定在某一数值,此即为开始冻结。因而规程中规定:“当电势值突然减小并连续三次稳定在某一数值(该稳定温度即为冻结温度),试验结束”。

#### 4.14 未冻含水率试验

土体冻结后并非土中所有的液态水全部冻结成冰,其中保持一定数量的未冻水。未冻含水率不但是热工计算的必需指标,而且是冻土物理力学性质变化的主导因子。未冻含水率主要取决于土的分散度、矿物成分、土中水的化学成分及温度和外载。对于给定土质,未冻含水率始终与温度保持动态平衡关系,即随温度升高,未冻含水率增大,随温度降低,未冻含水率减小。

**4.14.1** 测定的方法有许多种,诸如量热法、微波法、核磁共振法等。它们分别以热量平衡、微波吸收和核磁共振等原理为依据。量热法是一种经典的方法,其试验原理明确,具有一定的准确度,但操作及计算较繁;其他方法大都需要复杂而昂贵的仪器,一般单位难以采用。

本规程采用的方法是依据未冻含水率与负温为指数函数的规律,通过测定不同初始含水率的冻结温度(冰点),利用双对数关系计算出未冻含水率的两点法。该法能满足试验准确度的要求,同时,与冻结温度试验方法相同。

**4.14.3 (1)** 未冻含水率随初始含水率的变化略有变化。初始含水率过小,会因冰点测定不准而带来较大的误差。因此,不同初始含水率宜在液限和塑限中间。

**4.14.3 (2)** 可以将制备好的三个不同初始含水率的试样,同时放入装试样杯的聚氯乙烯管内,一起进行试验。

#### 4.15 有机质含量试验

**4.15.1** 重铬酸钾容量法是测定土中有机质比较通用的方法。它是通过强氧化剂重铬酸钾加热来氧化有机质,以氧化剂的消耗量求出有机质的量。用过量的重铬酸钾-硫酸溶液,在加热条件下氧化土中有机质,剩余的重铬酸钾则用硫酸亚铁或硫酸亚铁铵的标准溶液滴定,从而得到氧化有机质的重铬酸钾的消耗量,根据重铬酸钾的消耗量乘上换算系数,计算出土中有机质的含量。

由于重铬酸钾容量法氧化能力有一定限度,故有机质含量大于15%(150g/kg)的土样是不适用的。

**4.15.6** 公式中,0.003为 $1/4$ 碳原子的摩尔质量(kg/mol),1.724为有机碳换算成有机质的因数,1.1为氧化校正系数。

#### 4.16 岩石颗粒密度试验和块体密度试验

**4.16.2** 岩石颗粒密度是岩石固相物质的质量与其体积的比值。该试验即为原比重



试验。

**4.16.2.1** (4)本规程只采用容积为 100ml 的短颈比重瓶,是考虑了岩石的不均一性和我国现有的实际条件。

**4.16.2.3** 本款要求试样破碎成岩粉,其目的是减少岩石不均一性的影响。

试件粉碎后的最大粒径,不含闭合裂隙。国内外有关规定中,除个别采用最大粒径不超过 0.125mm 外,绝大多数规定过 0.25mm 筛。根据实测资料,当最大粒径为 1mm 时,对试验成果影响甚微。根据我国现有的技术条件,本试验规定岩石粉碎成岩粉后,需全部通过 0.25mm 筛。

**4.16.2.4** (3)对含有磁性矿物的岩石,当岩石粉碎时采用瓷研钵或玛瑙研钵。对含水溶性矿物的岩石,使用煤油作试液。纯水密度可以查物理手册,煤油密度要求实测。

**4.16.3** 岩石块体密度是试件质量与试件体积的比值。根据岩石的含水状态,岩石块体密度分为干密度、饱和密度和湿密度等。选择试验方法时要注意:

(1)选择岩石块体密度的试验方法时,主要考虑试件制备的难度和水对岩石的影响;

(2)对于黏土类岩石,将试件置于熔蜡中会引起含水率的变化;若先烘干试件,又将产生干缩,使试件体积缩小,都会使岩石块体密度受到影响,这是蜡封法测定黏土类岩石块体密度最大弱点。高分子涂料法能在常温下封闭试件,并确保试验过程中试件含水率和试件体积恒定不变,在取得经验的基础上,允许用高分子涂料法代替蜡封法测定岩石块体密度。

(3)用量积法测定岩石块体密度,能适用于制成规则试件的各类岩石,方法简易,计算成果准确,而且不受试验环境的影响,但采用量积法时,要保证试件制备具有足够的精度。

**4.16.3.3** (4)用量积法测定岩石块体密度时,对于具有干缩湿胀的岩石,试件体积量测在烘干前进行,避免试件烘干对计算密度的影响。

**4.16.5** 蜡封法一般用不规则试件,试件表面有明显棱角或缺陷时,对测试结果有一定影响,因此要求试件加工成浑圆状。

**4.16.5.2** (4)用蜡封法测定岩石块体密度时,要掌握好熔蜡温度,温度过高容易使蜡液浸入试件缝隙中,温度低了会使试件封闭不均,不易形成完整蜡膜,因此,本试验规定的熔蜡温度略高于石蜡的熔点(57℃)。石蜡密度变化较大,在进行蜡封法试验时,需对石蜡的密度进行测定,其方法与岩石块体密度试验中水中称量法相同。

**4.16.5.3** 鉴于岩石属于不均质体,并受节理裂隙等结构面的影响,不可能使同组岩石的每个试件试验成果都一致。在试验成果中,列出每一试件的试验值,不必求平均值。

#### 4.17 岩石吸水率和饱和吸水率试验

**4.17.1** 岩石的吸水率和饱和吸水率能有效地反映岩石微裂隙的发育程度,可以用来判断岩石的抗冻和抗风化等性能。

**4.17.3** 试样的形状:一般都没有严格的规定。本规程允许采用不规则试样,但需要指出的是,采用规则试样测定吸水率和饱和吸水率,不仅操作方便,提高效率,而且也有利于建



立各指标之间的相互关系,所以尽可能采用规则试样。当只能用不规则试样试验时,试样形态要近似立方体,绝不允许用边角废料进行试验。

**4.17.4 (1)** 烘干试样的标准:本试验采用称量控制,将试样反复烘干至称量达到恒量为止。即在  $105^{\circ}\text{C} \sim 110^{\circ}\text{C}$  下烘至恒重。对于恒量,有两种解释:一种认为两次称量之差不超过  $0.05\text{g}$ ,即达到恒量;另一种规定相邻  $24\text{h}$  两次称量之差不超过后一次称量的  $0.1\%$ 。后者考虑了试样质量与时间的因素,因此后一种规定比较合理。为了研究试样烘干与时间的关系,不少单位进行了比较试验,试样在  $20\text{h}$  以内,已全部达到恒量。为逐步求得统一,本规程规定在  $105^{\circ}\text{C} \sim 110^{\circ}\text{C}$  下烘  $12\text{h} \sim 24\text{h}$  作为试样烘干的标准。

**4.17.4 (2)** 吸水稳定标准:试验资料证明,浸水  $24\text{h}$  平均可以达到绝对吸水率的  $85\%$ ,浸水  $48\text{h}$  可以达到  $94\%$ ,继续浸水的吸水量很小,因此,在大气压力下吸水的稳定标准规定采用  $48\text{h}$ ,完全能够反映岩石试样的吸水特征。

**4.17.5 (2)** 岩石的吸水率与饱和吸水率之比,定义为饱水系数,它是评价岩石抗冻性的一种指标。一般来说,岩石的饱水系数为  $0.5 \sim 0.8$ 。饱水系数愈大,说明常压下吸水后留余的空间有限,岩石愈容易被冻胀破坏。因而岩石的抗冻性就差。

#### 4.18 岩石耐崩解性试验

**4.18.1** 耐崩解性试验的目的是确定岩石试样在一定条件下的崩解量、崩解指数、崩解时间和崩解状况。崩解指数主要是用于岩石分类。

岩石的耐崩解性试验是用来评价岩石在经过两次干燥和湿润标准循环之后,抵抗软化及崩解的能力。耐崩解性指数为试件干湿循环后残留的质量与原质量之比,以百分数表示。

质地疏松、风化、含有亲水性黏土矿物的岩石,在水中容易发生崩解剥落现象。对于坚硬完整岩石一般不需进行此项试验。如有需要,对于较坚硬岩石(耐崩解指数高的岩石),可以用多次,如  $5$  次、 $10$  次等循环次数的耐崩解指数用于考察该岩石的耐崩解性。

耐崩解性试验对于用来进行岩石之间的分类和对比非常合适。适于在本试验中容易进行崩解的岩石,建议同时按本规程相关土工试验的方法进一步鉴定,例如测定液限、塑限、颗拉分析、矿物成分及含量等。

**4.18.4 (2)** 岩石的耐崩解指数大小与所用水解液性质有关。试验所用的水解液如果不是  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  的洁净水,而是自来水、天然地下水、海水、稀释酸或分散剂等,则需要在试验报告中加以说明。

#### 4.19 岩石膨胀试验

1 试验过程中要注意,侧向约束膨胀率试验仪中的金属套环高度不小于试件高度与两块透水板厚度之和。如果金属套环高度不够,会引起试件浸水饱和后出现三向变形。岩石膨胀压力试验中为使试件变形始终不变,要随时调节所加的荷载;采用杠杆式加压系统,要随时调整砝码重量;采用螺杆式加压系统,要随时调整测力钢环或压力传感器的读数。膨胀压力试验仪要求进行各级压力下仪器自身变形的测定,并在加压时扣除仪器变



形,使试件变形始终为零。

2 岩石结构对于测定其膨胀性质有着重要影响,因而要尽可能地使用原状岩石样品来做试验。如样品松散或太破碎不能得到原状样品时,如常见的满布节理情况,可以参照《公路土工试验规程》(JTG E40)测试其膨胀性。当报告试验成果时,要描述所遵循的试验步骤。

3 鉴于岩石属于不均质体,并受节理、层面、裂隙等结构面的影响,不可能使同组岩石试件的每个试验结果都一致。在试验结果中,列出每一试件的试验值,同时求出平均值。

#### 4.20 岩石冻融试验

4.20.1 直接冻融法是岩石在饱水状态下经受规定次数的冻融循环后测定岩石抵抗破坏能力的试验方法,其质量损失量和残留强度,可以作为评价岩石抗冻性的指标。

4.20.2 严寒地区是指最冷月的月平均气温低于 $-15^{\circ}\text{C}$ ,寒冷地区是指最冷月的月平均气温 $-15^{\circ}\text{C} \sim -5^{\circ}\text{C}$ 。

4.20.6 岩石的抗冻性用两个直接指标表示,一个为冻融系数,另一个为质量损失率。冻融系数是冻融试验后的试件饱水抗压强度与冻融试验前的试件饱水抗压强度的比值;质量损失率是冻融试验前后的干试件质量差与冻融试验前干试件质量的比值,用百分数表示。

岩石的抗冻性与其矿物成分、结构特征有关,而同岩石的吸水率指标关系更加密切。岩石的抗冻性主要取决于岩石中大开口孔隙的发育情况、亲水性和可溶性矿物的含量及矿物颗粒间的连接力。大开口孔隙越多,亲水性和可溶性矿物含量越高时,岩石的抗冻性越低;反之,越高。

判断岩石抗冻性能好坏有三个指标,即(1)冻融后强度变化;(2)质量损失;(3)外形变化。一般认为,抗冻系数大于75%,质量损失率小于2%时,为抗冻性好的岩石;吸水率小于0.5%,软化系数大于0.75以及饱水系数小于0.8的岩石,具有足够的抗冻能力。

每次冻融后,观察和描述有无破坏现象,最后一次总检查,着重描述剥落、裂缝和边角损坏等情况。

#### 4.21 击实试验

4.21.1 击实试验是为了确定试样在某一击实功作用下干密度随含水率的关系,以了解土的压实特性,为工程设计和施工质量控制提供依据。

4.21.2 不同标准所用击实筒容积稍有不同,但计算的击实功比较接近,本试验轻型击实和重型击实的实际计算击实功分别为 $598.2\text{kJ}/\text{m}^3$ 、 $2687.0\text{kJ}/\text{m}^3$ (II-1)、 $2677.2\text{kJ}/\text{m}^3$ (II-2)。试验结果表明,在单位体积击实功相同的情况下,击实试验的结果相同。

4.21.3 当试样中含有较大的颗粒,如碎(砾)石等,对于求最大干密度和最优含水率都有一定影响。所以试验规定要过40mm的筛。如40mm筛上颗粒(即超尺寸颗粒)较多(5%~30%)时,所得结果误差较大,要求对超尺寸颗粒的试料直接用大试筒(容积

2177cm<sup>3</sup>)做试验,或把小于40mm部分做击实试验,按第4.21.8.4款对最大干密度和最优含水率进行校正。

当细粒土中的粗粒土总含量大于40%,还要用其他方法做粗粒土最大干密度试验,其结果与重型击实试验结果比较,最大干密度取两种试验结果的最大值,最优含水率则对应取值。

**4.21.6** 根据试验类型的不同,分别采用干法和湿法准备土样。由于击实曲线一定要出现峰值点,由经验可以知道,最大干密度的峰值往往都在塑限含水率附近,根据土的压实原理,峰值点就是孔隙比最小的点,所以建议有2个含水率高于塑限,有2个含水率低于塑限,以使试验结果不需补点就能满足要求。

**4.21.7** 标准击实试验所得的击实曲线是指余土高度为零时的单位体积击实功能下土的干密度和含水率的关系曲线,由于实际操作中总是存在或多或少的余土高度,如果余土高度过大,则关系曲线的干密度就不再是一定功能下的干密度,试验结果的误差会增大。因此,为了控制人为因素造成的误差,根据比较试验结果及有关资料,本规程规定小试筒余土高度不超过5mm,大试筒余土高度不超过6mm。

## 4.22 承载比试验

**4.22.1** 本试验方法主要依据 ASTM D1883-78、ASHTO-74 规程编制,承载比试验是由美国加利福尼亚公路局首先提出的,简称 CBR (California Bearing Ratio) 试验。所谓 CBR 值,是指采用标准尺寸的贯入杆贯入试件中 2.5mm 时,单位压力对标准碎石压入相同贯入量时标准荷载强度的比值。标准荷载与贯入量之间的关系如表 4-1 所示。

表 4-1 标准荷载与贯入量关系表

贯入量 (mm)	标准荷载强度 (kPa)	标准荷载 (kN)
2.5	7000	13.7
5.0	10500	20.3
7.5	13400	26.3
10.0	16200	31.8
12.5	18300	36.0

标准荷载强度与贯入量之间的关系用下式表示:

$$p = 162L^{0.61} \quad (4-2)$$

式中  $p$ ——标准荷载强度 (kPa);

$L$ ——贯入量 (mm)。

CBR 是路基土和路面材料的强度指标,是柔性路面设计的主要参数之一。在我国的柔性路面设计中,虽以路基土和路面材料的回弹模量值作为设计参数,但在现场测试中 CBR 值的离散性较大。不少单位,特别是科研单位,为便于参考国外有关 CBR 方面的资料进行设计,促进国际学术交流,仍将 CBR 试验列入相应试验规范。

**4.22.2** 本试验方法只适用于室内扰动土的 CBR 试验。由于击实筒高为 170mm,除去垫块的高度 50mm,实际试样高度 120mm,按五层击实,粒径宜控制为 20mm 的土,对含粒径



40mm 颗粒的土,分三层击实。

**4.22.4** 本试验采用风干试料,按四分法备料,先按击实试验求得试样的最优含水率后,再按最优含水率制备所需试样。

**4.22.5** 为了模拟地基的上覆压力,在浸水膨胀和贯入试验时,试样表面需要加荷载块,尽管希望能施加与实际荷载或设计荷载相同的力,但对于黏性土来说,特别是上覆压力较大时,荷载块的影响是无法达到上述要求的。因此,规定施加 4 块荷载块(5kg)作为标准方法。

进行 CBR 试验时,模拟试样在使用过程中处于最不利状态,贯入试验前一般将试样浸水饱和,国内外的标准均以浸水 96h 作为浸水时间,因此,本规程规定浸水饱和 96h 作为设计状态。当然,也可以根据不同地区、地形、排水条件、路面结构等情况适当改变试样的浸水方法和浸水时间,使 CBR 试验更符合实际情况。

**4.22.7** 绘制单位压力( $p$ )和贯入量( $l$ )的关系曲线时,如发现曲线起始部分呈反弯,则表示试验开始时贯入杆端面与土表面接触不好,需要对曲线进行修正,以  $O'$  点作为修正后的原点。

### 4.23 回弹模量试验

**4.23.1** 回弹模量试验是通过对试样进行规定压力下的加载和卸载,测定土的回弹变形量以确定土的回弹模量值。

**4.23.2.1** 本标准承载板的直径为 50mm,杠杆压力仪的加压球座直径为 50mm。室内试验回弹变形很小,尤其在加载初始阶段,估读误差大,故测定变形的量表采用千分表。

**4.23.2.3** 由于加载开始时的土样塑性变形,得出的  $p \sim l$  曲线有可能与纵坐标轴相交于不通过原点的位置,如果仍按读数值计算回弹模量变形,其中将包括一部分塑性变形,故要求对读数进行修正。

**4.23.3.2** 加载后由于土样的微小变形可能会使测力计发生轻微卸载,对于较硬的土卸载很小可以忽略不计;当土样较软时,可以用手稍稍触动强度仪摇把,补上卸掉的微小压力。

### 4.24 渗透试验

**4.24.1** 渗透是液体在多孔介质中运动的现象。测定土的渗透系数对不同的土类选用不同的试验方法。实验类型分为常水头渗透试验和变水头渗透试验,前者适用于砂土,后者适用于黏土和粉土。国外有的规程规定:常水头渗透试验适用于渗透系数较大的土样;即  $k = 10^{-2} \text{ cm/s} \sim 10^{-3} \text{ cm/s}$ ;变水头渗透试验适用于渗透系数较小的土样,通常指  $k = 10^{-3} \text{ cm/s} \sim 10^{-6} \text{ cm/s}$ ;也就是说上述两种方法仅适用于  $k = 10^{-2} \text{ cm/s} \sim 10^{-6} \text{ cm/s}$ ,至于极高和极低透水性的土,需要采用特殊的试验方法或通过间接的推算求取渗透系数。

**4.24.2** 关于试验用水问题。水中含气对渗透系数的影响主要由于水中气体分离,形成气泡堵塞土的孔隙,致使渗透系数逐渐降低,因此,试验中要求用无气水,最好用实际作用于土中的天然水。本规程规定采用的纯水要脱气,并规定水温高于室温  $3^{\circ}\text{C} \sim 4^{\circ}\text{C}$ ,目的



是避免水进入试样因温度升高而分解出气泡。

**4.24.3.1** (1)用于常水头渗透试验的仪器有多种,本规程所列适合粗粒土的常水头仪器(70型渗透仪)作为仪器设备,操作方法和量测技术等方面与国外大同小异,国内各单位通过多年来的工作实践认为是可行的。

**4.24.3.3** (2)水的动力黏滞系数随温度而变化,土的渗透系数与水的动力黏滞系数成反比,因此,在任一温度下测定的渗透系数换算到标准温度下的渗透系数。关于标准温度,目前各国不统一,美国采用 $20^{\circ}\text{C}$ ,日本采用 $15^{\circ}\text{C}$ ,前苏联采用 $10^{\circ}\text{C}$ ,考虑到国内各系统采用的标准均为 $20^{\circ}\text{C}$ ,因此,本规程以 $20^{\circ}\text{C}$ 作为标准温度。常水头渗透系数的计算公式是根据达西定律推导的,求得的渗透系数为测试温度下的渗透系数。计算时需要校正到标准温度下的渗透系数。

**4.24.4.1** 用于变水头渗透试验的仪器设备有多种,如南55型渗透仪、土样管渗透装置及负压式渗透仪,土样管渗透装置适用于粗粒土,且准确度较差。变水头渗透试验使用的仪器设备要求结构简单,止水严密,易于排气。

**4.24.4.2** 土样的饱和度愈小,土的孔隙内残留气体愈多,使土的有效渗透面积减小。同时,由于气体因孔隙水压的变化而胀缩,因而饱和度的影响成为一个不定的因素,为了保证试验准确度,要求试样饱和。实践证明采用真空抽气饱和法是有效的方法。

**4.24.4.3** 变水头渗透系数的计算公式求得的渗透系数也是测试温度下的渗透系数,同样需要校正到标准温度下的渗透系数。 $2.3$ 为 $\ln$ 和 $\lg$ 的换算系数。

## 4.25 固结试验

**4.25.1** 固结试验(Consolidation Test)是以Terzaghi的单向固结理论为基础的,适用于饱和土。对非饱和土可以采用该试验的方法测定压缩指标,不能用于测定固结系数。

**4.25.2** 固结试验所用固结仪的加荷设备,目前常用的是杠杆式和磅称式。近年来,随着工程建设的发展,以及测定先期固结压力,需要高压力、高精度的压力设备,目前国内也有用液压式和气压式等加荷设备,本规程没有规定具体形式。垂直变形量测设备一般用百分表,随着仪器自动化(数据自动采集),也可以采用准确度为全量程 $0.2\%$ 的位移传感器。

试样尺寸。在国外资料中,对试样的径高比作了规定,实践证明,在相同的试验条件下,高度不同的试样,所反应的各项固结阶段的沉降量以及时间过程均有差异。国内的仪器环刀直径为 $61.8\text{mm}$ 和 $79.8\text{mm}$ ,高度为 $20\text{mm}$ ,径高比接近国外标准( $3.5\sim 4.0$ )。

**4.25.3** 试验结果表明:荷载率小时,由于对试样的扰动程度小,因而求得的先期固结压力较大,也比较准确。因此在测定土的先期固结压力时,规程规定了加压率小于 $1$ ,或采用 $0.5$ 、 $0.25$ ,在实际试验中,根据土的状态分段采用不同的加压率,例如在孔隙比与压力的对数关系曲线最小曲率半径出现前,加压率要小一些,而曲线尾部直线段加压率等于 $1$ 是合适的。

本规程规定每级荷载下固结 $24\text{h}$ 作为稳定标准。当只需测定压缩系数的试样,施加每级压力后,固结稳定标准是最后 $1\text{h}$ 变形量不超过 $0.01\text{mm}$ 。当不需要测定沉降速率



时,稳定标准规定为每级压力下固结 24h,依次逐级加压至试验结束。当试样渗透系数大于  $10^{-5}$  cm/s 时,以主固结完成作为稳定标准。对某些高液限土,24h 以后尚有较大的压缩变形时,稳定标准可以调整为试样变形每小时变化都小于 0.005mm。

土太软时,如果第一级压力太大,则易造成土样挤出,因此,规程规定第一级压力视土的软硬程度而定,推荐为 12.5kPa、25kPa 或 50kPa。

**4.25.4 (6)** 土的先期固结压力用作图法确定,该法属于经验方法,亦是国际上通用方法,在作图时,绘制孔隙比与压力的对数关系曲线。纵横坐标比例的选择直接影响曲线的形状和  $p_c$  值确定,为了使确定的  $p_c$  值相对稳定,作图时要选择合适的纵横坐标比例。建议纵轴上取  $\Delta e = 0.1$  的长度与横坐标取一个对数周期长度比值为 0.4 ~ 1.0。尽管这样,用图解法求得的结果并不总是可靠的。要较可靠地求得该压力,需要进一步研究确定天然地层中黏土压缩曲线的方法。

**4.25.4 (8) ~ (9)** 固结系数的确定方法有多种,常用的有时间平方根法、时间对数法和时间对数坡度法。按理,在同一组试验结果中,用三种方法确定的固结系数应该比较一致,实际上却相差甚大,原因是这些方法是利用理论和试验的时间和变形关系曲线的形状相似性,以经验配合法,找某一固结度  $U$  下,理论曲线上时间因数  $T_v$  相当于试验曲线上某一时间  $t$  值,但实际试验的变形和时间关系曲线的形状因土的性质、状态及荷载历史而不同的,不可能得出一致的结果。经验证明,按时间对数坡度法确定  $t_{68}$ ,求得的  $C_v$  值误差较大。因此,本规程仅列入时间平方根法和时间对数法,在应用时,建议先用时间平方根法,如不能准确定出开始的直线段,则用时间对数法。

**4.25.5** 快速试验法是每级荷载下固结 1h,最后一级荷载固结 24h,以两者变形之比作为校正系数校正变形量。

## 4.26 三轴压缩试验

**4.26.1** 三轴压缩试验是测定土的抗剪强度的一种方法,通常用 3 ~ 4 个圆柱形试样,分别在不同的恒定周围压力下,施加轴向压力,进行剪切直至破坏,然后根据摩尔 - 库仑理论,求得抗剪强度参数:凝聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$ 。

三轴压缩试验能控制试验过程中的排水条件,根据工程施工和运用的实际情况选择不同排水条件的试验。无论黏性土或砂土均适用。通常分为不固结不排水剪试验(UU 试验),固结不排水剪试验(CU 试验)和固结排水剪试验(CD 试验)。

不固结不排水剪试验(UU 试验)是在施加周围压力和增加轴向压力直至破坏过程中均不允许试样排水,测得总抗剪强度参数  $c_u$ 、 $\varphi_u$ 。这种方法适用的条件是土体受力而孔隙压力不消散的情况。当建筑物施工速度快,土体渗透系数较低(如小于  $A \times 10^{-4}$  cm/s),而排水条件又差时,为考虑施工期的稳定,可以采用 UU 试验。对于非饱和土,如压实填土,或未饱和的天然地层,这种土的强度随  $\sigma_3$  的增加而增加。但当随  $\sigma_3$  增加到一定值,空气逐渐溶解于水而达到饱和时,强度不再增加。强度包线并非直线。因此,用总应力方法分析时,要按规定的压力范围内选取  $c_u$ 、 $\varphi_u$ 。如非饱和地层预计施工期可能有雨水入渗或地下水位上升会使土体饱和,则试样要在剪切前予以饱和。



固结不排水剪试验(CU)是试样先在某一周围压力作用下排水固结,然后在保持不排水的情况下,增加轴向压力直至破坏,测得总抗剪强度参数  $c_{cu}$ 、 $\varphi_{cu}$  或有效抗剪强度参数  $c'$ 、 $\varphi'$  和孔隙水压力系数。试验主要目的有二:一是借测量孔隙压力求得土的有效强度参数  $c'$ 、 $\varphi'$ ,以便进行土体稳定的有效应力分析;二是求得总应力强度指标  $c_{cu}$ 、 $\varphi_{cu}$ 。

固结排水剪试验(CD)是试样先在某一周围压力作用下排水固结。然后在允许试样充分排水的情况下增加轴向压力直到破坏,测得有效抗剪强度参数  $c'$ 、 $\varphi'$  和变形参数。采用应变控制式三轴仪的固结排水剪比较费时,故仅应用于较透水的土料。在测试土的应力应变关系时,为了模拟实际工程的排水条件,也需用应变控制三轴压缩仪的固结排水剪试验成果来确定变形模量、泊松比和剪切模量等变形指标。

**4.26.2** 三轴压缩仪分为应变控制式和应力控制式两种。前者操作方便,应用广泛,故本规程中各种试验方法均采用此种仪器;后者操作较麻烦,难以测定峰值以后的应力应变曲线,本规程不介绍。目前,很多实验室已使用全自动三轴仪。

关于孔隙水压力量测系统,除了不能残留气泡外,要有一定的灵敏度,量测时不允许孔隙水流动。试样内孔隙水的流动,会导致:一是不能准确地测定孔隙水压力值,特别在低压缩性的土中显得特别重要;其次是在透水性小的土中会导致时间滞后现象,使得读数难以稳定。本规程规定孔压测量系统的体积因数不能大于  $1.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{kPa}$ 。(即当零位指示器的毛管直径为 0.1cm 时,孔隙压力测量系统在 500kPa 压力下,毛管水银面上升不超过 9mm)。

对于孔隙水压力系统采用的传感器,要求体积因数小,线性误差和重复性误差小,时漂要满足试验要求。传感器体积因数的测定,可以采用精密的双套体变管的方法,将传感器接在体变管的量测系统中(体变管内管更换成毛细管),排除气泡,用调压筒加压,记下压力值与体积变化值,做出压力与体变的关系曲线,即可求出传感器的体积因数。

**4.26.2.6** 三轴压缩试验操作复杂,技术要求高,需要的土样也多,如不小心从事,就得不到正确的试验成果;本规程规定了对仪器预先进行检查,以避免因仪器上的毛病给试验带来误差。

**4.26.3.1** 《应变控制式三轴仪》(GB 4540)中,三轴试验试样直径分别为  $D = 39.1 \text{ mm}$ ,  $D = 61.8 \text{ mm}$  及  $D = 101 \text{ mm}$ 。国外引进的三轴仪试样直径最小为  $D = 35 \text{ mm}$ ,日本《土壤无围压缩试验方法》(JIS A 1216 - 2009)有  $D = 50 \text{ mm}$  的,新加坡也有使用,本规程一并列入。由于试样直径  $D$  与试验土粒粒径  $d$  之比对强度有一定影响,如  $D/d$  的比值超过某一范围,则所测得的强度偏大。故本规程对试样直径  $D$  与允许的最大土粒粒径作规定。

细粒土试样分为原状样和扰动样两种。原状样一般用原状土块或钻孔原状土柱在切土器上切取。扰动土试样的制备方法有压样法、击实法、搓碾法、石膏法等。不同的制备方法所得试样的强度有所差别。一般来说,制备方法与现场情况类似较好,故以击实法和搓碾法为宜。

击实法分层是为使试样均匀,层数多,效果好,但分层过多,一方面操作麻烦,另一方面层与层之间的接触面太多,操作不注意会影响土的强度,为此,本条文规定:粉土为 3 ~ 5 层,黏性土为 5 ~ 8 层。



**4.26.3.2** 试样饱和方法有抽气饱和、浸水饱和、水头饱和等,其中以抽气饱和法效果较好。据对粉质黏土的对比试验表明:用抽气法饱和度达到95%,浸水饱和和水头饱和在持续数昼夜后仅达到85%左右。有些资料亦表明:用抽气法饱和度达到90%~95%。故本规程建议以抽气饱和法为主,若研究软化的影响,则要用水头饱和法。

目前国内外已把对试样施加反压力作为一种常用的饱和方法。对于渗透性小的黏性土,抽气法难以达到完全饱和,即使试样达到了完全饱和,而仪器底座、孔隙压力系统及安装过程中,试样与橡皮膜等之间的残余气泡也难以驱净,不能满足试验过程中完全饱和,反压力的一个作用是使试样及仪器的测量系统都达到完全饱和,反压力的另一个作用是使试样的孔隙水压力升高后,在剪切过程中有剪胀的试样不致出现负的孔隙水压力。

**4.26.4.1** 本试验在对试样施加周围压力后,即施加轴向压力,使试样在不固结不排水条件下剪切。因不需要排水,试样底部和顶部均放置不透水板或不透水试样帽,当需要测定试样的初始孔隙水压力系数或施加反压力时,试样底部和顶部需放置透水板。

**4.26.4.2** 轴向加荷速率即剪切应变速率关系到试验的历时,在通常的速率范围对强度影响不大,可以根据试验方便来选择剪切应变速率,本规程规定采用每分钟应变0.5%~1.0%。

破坏标准的选择是正确选用土的抗剪强度参数的关键;由于不同土类的破坏特性不同,不能用一种标准来选择破坏值。从实践来看,以主应力差( $\sigma_1 - \sigma_3$ )的峰值,主应力差无峰值时采用应变15%时的主应力差作为破坏值。

#### 4.26.5 固结不排水剪试验

**4.26.5.1** 为加快固结过程和剪切时试样内孔隙水压力均匀传递,国内外都普遍在试样周围贴湿滤纸条。通常用上下均匀透水板相连的滤纸条,如对试样施加反压力,宜采用间断式(滤纸条上部与透水板间断1/4或试样中部间断1/4)的滤纸条,以防止反压力与孔隙水压力测量直接连通。滤纸条的宽度与试样尺寸有关。对直径 $\varphi 39.1\text{mm}$ 的试样,一般采用6mm宽的滤纸条7~9条;对直径 $\varphi 61.8\text{mm}$ 和 $\varphi 101\text{mm}$ 的试样,采用8mm~10mm宽的滤纸条9~11条。

**4.26.5.2** 排水固结稳定判别标准有两种方法:一种是以固结排水量达到稳定作为固结标准;另一种是以孔隙水压力完全消散作为固结标准。在一般试验中,都以孔隙水压力消散度来检验固结完成情况,故本条文规定以孔隙水压力消散95%以上作为判别固结稳定标准。

**4.26.5.3** 剪切时,对不同的土类选择不同的剪切应变速率,目的是使剪切过程中形成的孔隙水压力均匀增长,能测得比较符合实际的孔隙水压力。在剪切过程中,试样剪切区的孔隙水压力是通过试样或滤纸条逐渐传递到试样底部的,这需要一定时间。剪切应变速率较快时,试样底部的孔隙水压力将产生明显的滞后,测得的数值偏低,故本条文对黏土和粉土的剪切速率分别作规定。

**4.26.5.4** 试样固结后的高度及面积根据实际的垂直变形量和排水量两种方法计算,因为在试验过程中,装样时有剩余水存在,且垂直变形也不易测准确,为此,本规程采用根据等向应变条件推导而得的公式,并认为饱和试样固结前后的质量之差即为体积之差,剪



切过程中的校正面积按平均断面面积计算剪损面积。

固结不排水剪试验的破坏标准除选用主应力差的峰值和轴向应变 15% 所对应的主应力差作为破坏值外,增加了有效主应力比的最大值和有效应力路径的特征点所对应的主应力差作为破坏值。以有效主应力比最大值作为破坏值是可以理解的,也符合强度定义。而应力路径的实质是应力圆顶点的轨迹。应用有效应力路径配合孔隙水压力的变化进行分析,往往可以对土体的破坏得到更全面的认识。整理试验结果能较好地反映试样在整个过程中的剪胀性和超固结程度。有效应力路径和孔隙水压力变化曲线配合使用,还可以验证固结不排水剪试验和排水剪试验的成果。为此,将应力路径线上的特征点作为选择破坏值的一种方法。

#### 4.26.6 固结排水剪试验

(1) 固结排水剪试验的剪切应变速率对试验结果的影响,主要反映在剪切过程中是否存在孔隙水压力,如剪切速度较快,孔隙水压力不完全消散,就不能得到真实的有效强度指标。通过采用每分钟应变 0.003% ~ 0.012% 的剪切应变速率基本上能满足剪切过程中不产生孔隙水压力的要求,对黏土可能仍有微量的孔隙水压力产生,但对强度影响不大。

#### 4.26.7 一个试样多级加荷试验

**4.26.7.1** 三轴压缩试验中遇到试样不均匀或无法切取 3 ~ 4 个试样时,允许采用一个试样多级加荷的三轴试验。由于采用一个试样避免了试样不均匀而造成的应力圆分散,各应力圆能切于强度包线,但一个试样的代表性低于多个试样的代表性,且土类的适用性问题没有解决,为此,本条文规定一个试样多级加荷试验只限于无法切取多个试样的特殊情况下采用,并不建议替代作为常规方法采用。

**4.26.7.3** 试样剪切完后,要退除轴向压力(测力计调零),使试样恢复到等向受力状态,再施加下一级周围压力,这样能够消除固结时偏应力的影响,不致产生轴向蠕变变形,以保持试样在等向压力下固结,故本条文作了退除轴向压力的规定。试样的面积校正与多个试样试验方法相同。

**4.26.7.4** 一个试样多级加荷试验过程中,往往会出现前一级周围压力下的破坏大于下一级的周围压力,这样试样受到“预压力”的作用,使受力条件复杂,为消除这一影响,规定后一级的周围压力应等于或大于前一级周围压力下试样破坏时的大主应力。试样在每级周围压力下固结,为使试样恢复到等向固结状态,需要退去上一级剪切时施加的轴向压力。试样的面积校正,按分级计算方法进行,即第一级周围压力下试样剪切終了时的状态作为下一级周围压力下试样的初始状态。

### 4.27 振动三轴试验

**4.27.1** 振动三轴试验是室内进行土的动力特性测定时较普遍采用的一种方法,通过测定饱和土在动应力作用下的应力、应变和孔隙水压力的变化过程,可以确定其在动力作用下的破坏强度(包括液化)、应变大于  $10^{-4}$  时的动弹性模量和阻尼比等动力特性指标。在室内进行土的动力特性试验,主要包括两方面的内容:一是确定土的动强度,用以分析



动态作用条件下地基和结构物的稳定性,特别是砂土的振动液化问题;二是确定剪切模量和阻尼比,用以计算土体在一定范围内引起的位移、速度、加速度或应力随时间的变化。

振动三轴试验是应用圆柱形试样,在轴向与侧向均等或不均等压力下,通过轴向等幅周期循环载荷作用,测定应力、应变及孔隙水压力的变化,从而求得土的动力参数。试验过程中,不仅要现场土体的静应力状态进行模拟,而且还要将实际地震波按震级大小进行简化模拟,按动荷载施加。

采用单向激振式三轴仪试验时,为了模拟土体实际应力状态,要求用饱和试样进行试验,试验过程中需要测定动孔隙水压力。因受仪器性能限制,本试验适用于饱和的砂土、粉土和黏土等细粒土。对于抗震分析来说,由于震前的试样在静力作用下已经固结,而在震动作用下,又因作用时间短,相应于在基本不排水条件下施加了动剪应力,故本试验建议在固结不排水条件下进行。

**4.27.2.1** 振动三轴仪按产生激振力的激振方式不同,分为电磁激振单向激振和双向激振、气动力激振式和液压激振式,每种类型又有多年来的发展,研制成功了微机控制和数据采集的电磁式振动三轴仪。本试验是以电磁单向激振三轴仪为对象进行编写的。

#### **4.27.3.1** 试样的制备

(1) 试样直径。本规程规定采用 39.1mm 和 50mm 两种,主要符合国内仪器情况。

(2) 扰动土试样制备要求成型良好,密度均匀,完全饱和,结构状态尽可能接近现场情况,试样制备是整个试验中关键性的环节。

(3) 当前砂样成型均采用模(对开或三瓣)、抽气(使橡皮内膜紧贴模壁,保证形状均匀,尺寸合格),并施加负压(使试样挺立,便于拆模和量取试样尺寸)等三个措施,效果良好。量取试样直径时,一般取上、中、下三个数据,必要时考虑橡皮膜厚度的校正。

为了达到密度均匀,常用在一定试模体积内装相应干砂量(取决于控制的密度)的方法控制。当干装或湿装时,常将按预定密度和体积计算称取的干砂或湿砂分成 5~6 等份,每份填装与同密度相应的体积内,最后进行饱和。当直接填装饱和砂时,常用两种方法:一种方法是将称取的砂样浸水饱和,再按一定方法(取决于要求的密度)正好装满预定的体积;另一种方法是直接从盛有已备妥的饱和砂土的量杯中取砂装样,称装样前后量杯的质量,计算实际装入的干砂量。

对于一组试验中的各个试样,固结后的密度要基本接近于要求的控制密度。

#### **4.27.3.4** 动强度(液化)试验

(1) 对于动强度,因为有时间因素的影响,通常定义为在一定动应力重复次数  $N_f$  下,产生某一指定破坏应变  $\varepsilon_f$  所需的动应力。如果  $N_f$  值可以按 H. B. Seed 对不同震级提出的等效循环次数来确定的话,即对 7、7.5 级和 8 级地震分别取出 10 次、20 次和 30 次,那么破坏应变的标准不同,相应的动强度的基础也不同。但是破坏应变这个概念具有两方面的含义:一是试样达到真正破坏时相应的应变;一是工程对象所能允许经受的破坏应变。前者从研究土的变化出发,后者从研究工程对象稳定性出发。当然土体达到破坏时,由它做成的构筑物或地基自然发生破坏,所以上述两种含义基本一致。但是,土在各向不等压固结情况下受动荷作用时,变形常连续增长,而土体并无明显破坏的情况。此时,为



了在设计上合理采用动强度指标,最好将二者联系起来确定不同建筑物设计时应该取用的破坏应变标准。为此,试验要提出不同破坏应变标准时的动强度曲线以供不同的建筑物设计时分析应用。对饱和试样,一定的破坏标准自然同一定的孔隙水压力相联系。

通过数年来的试验实践,在选择破坏标准时很少用极限平衡条件来评定土体抗震稳定性,故本试验中没有列极限平衡标准。

(2)本试验规定动弹性模量和阻尼比的测定是在不排水条件下施加动荷载,但其前提条件是在施加动荷过程中,试样上的有效应力不改变。因此,振动次数不要过多,否则产生孔隙水压力使测得的动弹性模量偏低。本试验未具体规定振动次数,一般是低于10次。采用一个试样进行试验时,由于试样在前一级动荷振动预定次数 $N$ 时,将引起孔隙水压力的一定发展,此时进行第二级动荷下的振动,该孔隙水压力将影响第二级动荷下的变形,即每一级动荷下的变形将受到前面各级动荷的累积影响,故本试验未列入一个试样多级加荷的试验方法。但对黏性土,这种影响较小,允许采用一个试样逐级试验。

**4.27.4.4、4.27.4.5** 在整理动强度的试验成果时,首先对一定的密度、一定的固结比、不同侧向压力,绘制达到破坏标准时循环次数与动剪应力关系曲线,然后,在此关系曲线的基础上,根据不同要求对土的动强度成果进行整理。由于土的动抗剪强度与静抗剪强度不同,不仅与法向应力大小有关,而且与振次、初始剪应力有关,所以在整理试验成果时,采用绘制某一振次下不同初始剪应力比时的总剪应力与法向应力关系曲线,由此,确定给定振次时土体中任一平面的动强度。

**4.27.4.6** 目前,砂土液化试验的结果,常用液化应力比同达到液化标准时的循环振次 $N$ 的关系表示。对于不含黏粒的砂土,此种关系曲线表明:不同固结应力比下,不管 $\sigma_0$ 的大小,试验点基本落在同一条 $\frac{\sigma_d}{2\sigma'_0} \sim N_f$ 曲线上。这说明在通常的固结压力范围内,液化应力比与循环振动次数有关,与固结压力无关,利用这一特点,在某一固结应力比下,允许只选用一个侧向固结压力进行液化试验。

**4.27.4.8** 地震荷载作用时,土体上反复作用着应力,使土体产生动应变,而土具有非线性和滞后性,在一个循环振动周期内的应力应变关系曲线将呈现出一个狭长的封闭滞回圈。对于这种特性,广泛采用等效割线动弹性模量和阻尼比来表示土的应力应变关系。在振动三轴试验中,施加轴向动应力,测定轴向动应变时,同样可以绘出每一周的滞回曲线,以此求得动模量和阻尼比。振动三轴试验不适用于小应变范围。需要求小应变范围内的动弹性模量和阻尼比时,采用共振柱试验。

## 4.28 孔隙水压力消散试验

**4.28.1** 孔隙水压力消散试验是将试样置于三轴压力室使之承受各向均等的周围压力或在 $K_0$ 条件下承受轴向压力作用,测定受轴向压力作用产生的孔隙水压力消散系数 $C_v$ 、消散百分数 $D_c$ 及孔隙水压力系数 $B$ 、 $\bar{B}$ ,故称孔隙水压力消散试验。

按有效应力法校核施工期土坝坝坡的稳定性和地基在上部荷载作用下的稳定性时,需要估算土体中的孔隙水压力。观测结果证明:当土的渗透系数约为 $10^{-5} \text{ cm/s} \sim 10^{-7} \text{ cm/s}$

时,土体在施工期的孔隙水压力有一定程度的消散。因此,对渗透系数满足上述范围的填土、土坝及地基的土体而言,需精确估算施工期的孔隙水压力,根据填土的固结系数(又称消散系数  $C_v$ )、施工速率和边界的排水条件,采用差分法或有限单元法求得。

如果能测得固结试验中的孔隙水压力消散过程,并根据消散度来确定固结系数则更为合理。

**4.28.2** 仪器的装置情况和三轴固结不排水测孔隙压力试验的仪器装置基本相同。测定饱和土的孔隙水压力消散有时历时较长,采用水银零位指示器的孔隙压力测量系统,需人工随时进行调节,工作不便。因此,建议采用符合长期稳定、体积因数小、灵敏度高的压力传感器。

### 4.28.3 各向等压消散试验

**4.28.3.1** 孔隙水压力消散试验的试样尺寸,不一定按三轴压缩试验径高比的要求。为了使试样的孔隙水压力消散时间尽量减小,试样的径高比  $D/H$  不小于 1。试样直径  $D$  的选择根据土类而定。对于含黏粒较多的土,试样直径可以采用 6.18cm;对渗透性系数大于  $10^{-6}$ cm/s 的土及裂隙土等直径采用 10.0cm。径高比  $D/H$  采取 1.5~2.0。

**4.28.3.5** 关于周围压力的大小与消散次数。在实际施工中,土层上的荷载并非一次全部施加,为了符合实际情况,周围压力要分级施加,分级消散。分级的次数,规程规定为 3 次,每次为实际需要荷载的 1/3。各试验室根据实际情况(包括仪器的能力)在试验设计时酌情考虑。

**4.28.5.3、4.28.5.4** 关于孔隙水压力消散度和消散系数确定的基本原理,用图 4-2 所示予以说明。设有如图中所示一饱和的黏土试样,被包在橡皮膜中,上下两端各放一透水板。开始时不允许试样排水,施加一荷载增量  $\Delta p$ ,试样内的孔隙压力  $u_i$  等于  $\Delta p$ ,如图中  $t$  等于 0 时的水压线所示。

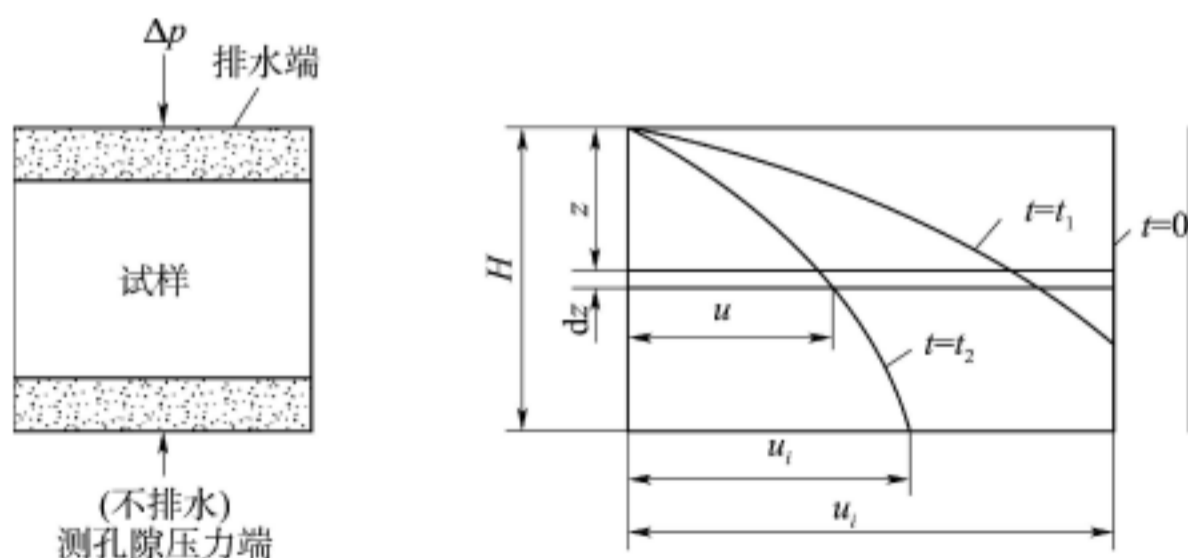


图 4-2 试样布置及孔隙水压力分布线图

待孔隙水压力稳定后,让上端排水,水压线随时间而改变,它反映试样的孔隙水压力消散过程或试样的固结过程。如果在试样底面不排水端测得孔隙水压力的消散过程,则得到试样底部的固结特性曲线,即消散度  $D_c$  与时间  $t$  关系曲线。

试样底部不排水端的消散度  $D_c$  (%) 定义为:

$$D_c = \left( 1 - \frac{u_1}{u_i} \right) \times 100 \quad (4-3)$$



根据单向固结理论,得到不排水端的消散度  $D_c$  与  $T_v$  的理论关系为:

$$\begin{aligned} D_c &= 1 - \frac{u_i}{u_i} \\ &= 1 - \frac{4}{\pi} \left( e^{-\frac{\pi^2}{4} T_v} - \frac{1}{3} e^{-\frac{9}{4} \pi^2 T_v} + \frac{1}{5} e^{-\frac{25}{4} \pi^2 T_v} \right) \end{aligned} \quad (4-4)$$

消散度  $D_c$  与一般平均固结度  $U$  两者定义不同。根据单向固结理论,则得平均固结度为:

$$U = 1 - \frac{8}{\pi^2} \left( e^{-\frac{\pi^2}{4} T_v} + \frac{1}{9} e^{-\frac{9}{4} \pi^2 T_v} + \frac{1}{25} e^{-\frac{25}{4} \pi^2 T_v} \right) \quad (4-5)$$

比较式(4-4)、(4-5),都取1项(实际上当  $T_v > 0.16$  时已满足)则:

$$\frac{1 - D_c}{1 - U} \approx \frac{\pi}{2} \quad (4-6)$$

式(4-6)表明平均固结度与底部消散度的关系。

按式(4-3)算出  $D_c \sim T_v$  的关系值,见本规程的表 4.28.5-1,查得某一消散度相应的  $T_v$  后,按(4-7)式得到某一消散度下的消散系数  $C'_v$ :

$$C'_v = \frac{H^2}{t} T_v \quad (4-7)$$

消散度不同,消散系数也不同,本规程建议按试样实际消散度  $D_c = 50\%$  (即  $T_{50} = 0.38$ ) 来推算消散系数,它相当于平均值。至于采用多大的消散度或固结度,视工程具体情况预估确定。

关于各向等压力和  $K_0$  条件排水固结的差别,根据理论推导,得出:

$$C_{v1} = \frac{3(1-v)}{1+v} C_{v3} \quad (4-8)$$

式中  $v$ ——有效应力下的泊松比。

根据一些正常固结黏土的比较试验资料表明:在试样底部测量孔隙水压力,固结初期, $K_0$  条件比各向等压力固结的孔隙水压力消散的较快;而在某一时间后, $K_0$  条件的消散比各向等压力的消散又迟缓。这就说明平均主应力的减小和有效主应力差增大对孔隙水压力消散的影响。因此,在选择试验方法时,要考虑土体在实际工程中所处的部位和所受的应力条件。需要指出的是,在大多数的实际问题中,土体是在各向不均等压力下固结的。如天然土层在自重下的固结,相当于  $K_0$  条件。而碾压土坝中或地基中,土体固结时有一些侧向移动的,不符合  $K_0$  条件,也并非各向等压力。

**4.28.5.7** 将室内消散试验所得的试样在周围压力  $\sigma_3$  或垂直压力  $\sigma_1$  下产生的起始孔隙水压力  $u_i$  绘制成  $u_i \sim \sigma_3$  与  $u_i \sim \sigma_1$  曲线,则曲线的坡度分别为孔隙水压力系数  $B$  和  $\bar{B}$ 。孔隙水压力系数的大小除了取决于试样的受力状态外,还决定于试样在前一级压力下的消散度。因此,上述的  $B$  和  $\bar{B}$  值仅代表室内试验条件下所测出的孔隙水压力系数。在设计初步估算中,可以采用试验的第一级压力下测出的孔隙水压力系数  $B$  和  $\bar{B}$  作为孔隙水压力消散计算中的起始孔隙水压力系数。



## 4.29 无侧限抗压强度试验

**4.29.1** 无侧限抗压强度试验是用圆柱试样,在无侧向应力下,测定其最大的轴向力即抗压强度  $q_u$ 。

**4.29.3** (2) 试样高度与直径的比值,对无侧限抗压强度试验值有很大影响。比值较大的试样,在加荷后往往发生歪斜,得出较小的结果;反之,比值较小时,由于试样两端受加压板的约束,在两端附近各形成一锥状的不变形区域,致使试样内产生不均匀变形,影响试样中心部位的应力分布,从而歪曲了试验结果。因此,试样的高度与直径要有适当的比值。试验结果表明:当试样高度与直径的比值大于 2 时,两端加压板的约束对试样中心部位应力分布的影响较小。采用试样高度与直径的比值不小于 2 是合适的。故本规程建议该比值为 2 ~ 2.5。

至于试样直径大小,根据国内试验单位的取土情况,建议采用 35mm ~ 40mm。重塑土试样尺寸与原状土尺寸相同,以避免由于试样尺寸不同而产生的误差。

**4.29.3** (3) 当轴向荷载作用于试样时,试样与加压板之间即发生与侧向膨胀力方向相反的摩擦力。该力使两端土的侧向膨胀受到限制,故试样变成鼓状。垂直变形愈大,鼓状愈大。这样,试样内的应力分布就不均匀。为了减少该影响,在试样两端抹一薄层凡士林。如果气候干燥,试样侧面也涂一薄层凡士林,以防水分蒸发。但是在做重塑土试验时,要把抹凡士林的一层土刮去。

**4.29.3** (5) 如试验的土样渗透性较小,试验历时较短,则认为试验前后的含水率不变。但历时过短,试验不便,故限制加荷时间约为 8min ~ 10min。本条规定应变速率每分钟为 1% ~ 3%。

**4.29.3** (8) 天然结构的土经重塑后,它的结构凝聚力已全部消失,但若放置时间较长,又可以恢复一部分。放置时间愈长,恢复程度愈大。所以,规程规定试样重塑后立即进行试验。

**4.29.4** (2) 关于试验过程中,试样面积的修正是假定试样体积在轴向变形过程中不发生改变的情况下求得其平均断面。三轴不固结不排水试验,也是采用此方法进行试样面积修正的,也可以用某一轴向变形下试样最大的断面积来计算,但在试验过程中测定断面积较困难,所以目前很少采用该法。

**4.29.4** (5) 试样受压破坏时,一般分脆性破坏及塑性破坏两种。脆性破坏具有明晰的破裂面,而塑性破坏时没有破裂面。应力应变关系曲线也大致有两种:一种是具有峰值或稳定值的;另一种是不具有峰值或稳定值而是应力随应变渐增的。选择破坏值时,对于有明显峰值或稳定值的,以峰值或稳定值为抗压强度;对于没有峰值或稳定值的,本规程规定以应变 15% 的抗压强度为破坏值。

## 4.30 直接剪切试验

**4.30.1** 直接剪切仪的最大缺点是不能有效地控制排水条件。对渗透性较大的土,进行快剪试验时,所得的结果,用库仑公式表示时,具有较大的内摩擦角,且总应力强度指标往



往偏大。本规程规定,对渗透系数大于  $A \times 10^{-6} \text{cm/s}$  的土不宜作快剪试验。

三种试验方法的原理如下:

(1) 快剪试验(q),是在试样上施加垂直压力后立即快速施加水平剪切力。

(2) 固结快剪试验(cq),是在试样上施加垂直压力,待排水固结稳定后,快速施加水平剪切力。

(3) 慢剪试验(s),是在试样上施加垂直压力及水平剪切力的过程中,均使试样排水固结。

用直接剪切试验确定土的强度参数  $c$  和  $\varphi$  的方法主要有三种,即快剪、固结快剪和慢剪。每种试验方法适用于一定排水条件下的土体,相应于工程所处的工程状态。因此,在选择试验方法时,要注意所采用的方法尽量反映土的特性和工程所处的工作阶段,并与分析计算方法相匹配。

**4.30.2** (1) 常用的直接剪切仪分为应变控制式和应力控制式两种。应变控制是控制试样产生一定位移,测定其相应的水平剪应力;应力控制则是对试样施加一定水平剪切力,测定其相应的位移。应变控制直接剪切仪的优点是能较准确地测定剪应力和剪切位移曲线上的峰值和最后值,且操作方便。故本规程以此种仪器作为主要仪器。

**4.30.4** (3) 黏性土的抗剪强度与垂直压力的关系并不完全符合库仑方程的直线关系。对于正常固结土,在一般荷载(100kPa ~ 400kPa)作用下,可以认为是直线关系。垂直荷载大小根据预计土体所受的力来决定。对于先期固结土,在选择垂直荷载时,要考虑先期固结压力  $p_c$  值,设计压力小于先期固结压力  $p_c$ ,施加的最大垂直压力不大于  $p_c$ ;设计压力大于先期固结压力  $p_c$ ,垂直压力大于  $p_c$ 。

**4.30.4** (4) 剪切速率是影响土的强度的一个重要因素,它从两方面影响土的强度:一方面是剪切的快慢影响试样的排水固结强度;另一方面是对黏滞阻力的影响,剪切速率愈快黏滞阻力愈大,强度也愈大;反之亦然。不过在常规试验中,对于黏滞阻力的影响,通常不考虑。

规程中规定:在 3min ~ 5min 内剪损,其目的就是为了在剪切过程中尽量避免试样的排水固结。然而,对于高含水率、低密度的土或透水性大(渗透系数大于  $10^{-6} \text{cm/s}$ )的土,即使再加快剪切速率,也难避免排水固结,因而对于这类土,建议用三轴仪测定其不排水强度。

**4.30.5** (3) 试样在每级垂直荷载作用下,要固结到主固结完成。关于固结稳定标准,规定为:每小时内垂直位移计读数变化不超过 0.01mm,认为已达到固结稳定。

**4.30.6** (1) 慢剪试验要求在剪切过程中试样的孔隙水压力完全消散。因此试验要有充分的时间。参照国内经验,规程中规定剪切速率应小于 0.02mm/min,也可以根据固结 50% 的时间  $t_{50}$  的 50 倍计算剪切时间,结果相差不大。

**4.30.7** (2) 破坏值的选定,常有两种情况:若剪应力 ~ 剪切位移关系曲线中具有明显峰值或稳定值,则取峰值或稳定值作为抗剪强度值。若剪应力随剪切位移不断增长,无峰值或无稳定值时,则以相应于选定的某一剪切位移相应的剪应力值作为强度值。国内一般采用最大位移为试样直径  $D$  的 1/15 ~ 1/10,即对于直径 61.8mm 的试样,其最大剪切位



移量约为 4~6mm。法国中央土木试验室规程取剪切位移为  $D/10$ , 美国水道实验站试验规程取剪切位移为  $D/6$ 。本规程中规定取剪切位移为 4mm 时的剪应力值来确定抗剪强度, 同时要求试验的剪切位移达 6mm。

以剪切位移作为选值标准, 虽然方法简单, 但从理论上讲不太严格, 因各种不同类型破坏时的剪切位移并不完全相同, 即使对同一种土, 在不同的垂直载荷作用下, 破坏剪切位移亦不相同, 因而只有在破坏值难以选取时, 才允许采用此法。

### 4.31 收缩试验

**4.31.1** 收缩试验的目的是测定原状土试样和击实土试样在自然风干条件下的线缩率、体缩率、缩限及收缩系数等指标。

**4.31.3** 扰动土的收缩试验分层装填试样时, 为了充分排气, 要不断挤压拍击。否则不符合体积收缩等于水分减小的基本假定, 而使计算结果失真。

**4.31.7** 随着土体含水率的减小土的收缩过程大致分为三个阶段, 即直线收缩阶段 (I), 其斜率为收缩系数; 曲线过渡阶段 (II), 随土质不同, 曲率各异; 近水平直线阶段 (III), 此时土体积基本上不再收缩。

### 4.32 膨胀率试验

**4.32.2** 本试验的目的是测定黏土在无结构力影响下的膨胀潜势, 初步评定黏土的胀缩性。自由膨胀率是反映土的膨胀性的指标之一, 它与土的黏土矿物成分、胶粒含量、化学成分和水溶液性质等有着密切的关系。自由膨胀率是指用人工制备的烘干土, 在纯水中膨胀后增加的体积与原体积之比值, 用百分数表示。

**4.32.2.1** 为防止因量筒刻度不够准确对计算成果造成影响, 规定试验前要进行刻度校正。

**4.32.2.2** 自由膨胀率试验中的试样制备是非常重要的, 首先是土样过筛的孔径大小, 用不同孔径过筛的试样进行比较试验, 其结果是过筛孔径越小, 10ml 容积的土越轻, 自由膨胀率越小。不同分散程度也会引起黏粒含量的差异, 为了取得相对稳定的试验条件, 本条文规定采用 0.5mm 过筛, 用四分法取样, 并要求充分分散。

试样用体积法量取, 紧密或疏松会影响自由膨胀率的大小, 为消除这个影响因素, 规定采用漏斗和支架, 固定落距, 一次倒入的方法, 并将量杯的内径统一规定为 20mm, 高度略大于内径, 便于在装土、刮平时避免或减轻自重和振动的影响。

搅拌的目的是使悬液中土粒分散, 充分吸水膨胀, 搅拌的方法有量筒反复倒转和上下来回搅拌两种。前者操作困难, 工作强度大; 后者有随搅拌次数增加, 读数增大的趋势, 故本条文规定上下各搅拌 10 次。

黏土颗粒在悬液中有时有长期混浊的现象, 为了加速试验, 采用加凝聚剂的方法, 但凝聚剂的浓度和用量实际上对不同土类有不同反映, 为了增强可比性, 本条文统一规定采用浓度为 5% 的氯化钠溶液 5ml。

**4.32.3** 有荷载膨胀率试验是指试样在特定荷载及有侧限条件下浸水膨胀稳定后试样增



加的高度(稳定后高度与初始高度之差)与试样初始高度之比,用百分比表示。

**4.32.3.1** 仪器在压力下的变形会影响试验结果,试验前校正。

**4.32.3.2** 有荷载膨胀率试验会发生沉降或胀升,安装量表时要予以考虑。

一次连续加荷是指将总荷重分几级一次连续加完,也可以根据砝码的具体条件,分级连续加荷,目的是为了为了使土体在受压时有个时间间歇,同时避免荷重太大产生冲击力。施加的总荷载指的是上覆土质量或上覆土加建筑物附加荷载。

为保持试样始终浸在水中,要求注水至试样顶面以上5mm。为了便于排气,采取逐步加水。同一种试样,荷载越大,稳定越快;无荷载时,膨胀稳定越慢。对不同试样,则反映出膨胀率越大,稳定越慢,历时越长,因此本条文规定2h的读数差值不超过0.01mm作为稳定标准是可行的,但要防止因试样含水率过高或荷载过大产生的假稳定,因此本条文规定测定试样试验前、后的含水率、计算孔隙比,根据计算的饱和度推断试样是否已充分吸水膨胀。

**4.32.4** 无荷载膨胀率试验是指试样在无荷载有侧限条件下浸水后的膨胀量与初始高度之比,用百分比表示。

**4.32.4.2** 试样尺寸对膨胀率是有影响的。在统一的膨胀稳定标准下,膨胀率随试样的高度增加而减小,随直径的增大而增大。为了在无荷载条件下试验时间不致拖得太长,选用高度为20mm的试样。

膨胀率与土的自然状态关系非常密切,初始含水率、干密度都直接影响试验成果,为了防止透水石的水分影响初始读数,要求先将透水石烘干,再埋置在切削试样剩余的碎土中1h,使其大致具备与试样相同的湿度。

无荷载膨胀率试验中,有些规程规定不放滤纸,以排除滤纸变形对试验结果的影响,但有时透水石会黏带试样表层土,使试验后物理指标的测定受到影响,国内有单位采用薄型滤纸(类似打字纸中间的垫纸),在不同压力下量测其浸水前后的变形量,结果见表4-2。

表 4-2 滤纸浸水前后的变形量

压力(kPa)	50	100	200		400		
浸水前百分表读数(mm)	0.129	0.089	0.169	0.009	0.159	0.319	0.249
浸水后百分表读数(mm)	0.129	0.090	0.169	0.011	0.159	0.319	0.250
变形量(mm)	0	0.001	0	0.002	0	0	0.001

由表可见这种滤纸浸水前后的变形量相差很小,可以忽略对试验的影响。

稳定标准规定每隔2h百分表读数差值不大于0.01mm,与有荷载膨胀试验一致。

### 4.33 膨胀力试验

**4.33.1** 膨胀力是黏土遇水膨胀而产生的内应力。在伴随此力的解除时,土体发生膨胀,从而使土基上建筑物与路面等遭受到破坏。根据实测,当不允许土体发生膨胀时,某些黏土的膨胀力达到1600kPa,所以对膨胀力的测定是有现实意义的。在室内测定膨胀力的方法和仪器有多种,国内外采用最多的是以外力平衡内力的方法,即平衡法。本条文亦规

定采用平衡法。但在现场要尽量接近原位情况。

**4.33.3** 平衡法的允许变形标准,在平衡法试验中,平衡不及时或加了过量的压力都会影响到土的潜能势的发挥。表4-3中的试验资料表明,膨胀力随允许膨胀量的增大而增加,当允许膨胀量由0.01mm增至0.1mm时,膨胀力将提高50%左右。为了提高试验准确度,允许膨胀量可以限制到0.005mm。但由于仪器本身的变形和量测准确度不够,引起操作上的困难,所以本条文规定允许膨胀量为0.01mm。

表4-3 试样允许膨胀量与膨胀力的关系

允许变形值 (mm)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	孔隙比	试验前含水率 (%)	试验后含水率 (%)	膨胀力 (kPa)
0.01	2.0	0.61	16.9	22.3	119
0.05	2.0	0.61	16.9	22.3	140
0.10	2.0	0.61	16.8	22.1	182
0.20	2.0	0.61	16.6	21.9	208

试验资料表明,达到最大膨胀力的时间并不长,浸水后在短时间内变化较大,以后则趋于平缓,为此规定加荷平衡2h后不再膨胀作为稳定是可行的。

#### 4.34 静止侧压力系数试验

**4.34.1** 静止侧压力系数是土体在无侧向变形条件下,有效侧向应力与有效垂向应力之比

**4.34.3** 规定试样在试验前饱和,安装完成后向护水圈内注水,是为了保证在试验过程中,试样始终处于饱和状态,以利于准确测定试样的有效侧向压力。

由于水温变化较大时,水体积的膨胀或收缩导致水压力发生变化而影响量测结果,试验要求对环境的温度变化进行控制。

垂直压力的分级和各级压力下的变形稳定标准,与固结试验的要求相同。一方面是达到要求的变形稳定标准时,可以认为试样在压力作用下已经完成主固结,此时测得的侧压力能代表有效侧压力;另一方面,可以利用固结试验的结果来估算各级压力下的主固结时间。

#### 4.35 单轴抗拉强度试验

**4.35.1** 土的单轴抗拉强度试验是试样在无侧限条件下,受轴向拉力作用破坏时,单位面积上所承受的荷载。本试验采用直接拉伸法。

**4.35.2** 本试验只采用应变控制式三轴仪,如采用应力控制式三轴仪试验,也可以参照执行。本试验方法中应力控制直接采用测力计控制施加拉伸荷载。

**4.35.3** 试验中需注意以下几点:

(1) 扰动土试样的强度,随试样制备后时间的增长,强度也有所提高。由于本规程其他试验对扰动土试样制备后,均没有提出试样养护时间的要求,所以本试验方法也不单独提出,如果需要,根据土的性质,经试验后确定具体养护时间。



(2) 当试样拉断后,测力计的最后读数所反映的荷载即为剩余试样、试样帽和钩拉的重力之和。因此,采用本规程式(4.35.4-2)计算时,要减去上述重量。在计算各级拉应力时,也以断裂处的应力为准。

#### 4.36 共振柱试验

**4.36.1** 共振柱试验的目的是测定试样在周期荷载作用下,应变量为  $10^{-6} \sim 10^{-4}$  时的动剪切模量和扭转向阻尼比或动弹性模量和轴向阻尼比。试验采用稳态强迫振动法和自由振动法,激振方式为扭转振动和轴向振动。

在试验室内测试地基土动力性质的方法有很多种,各有优缺点。共振柱法是国内外工程实际应用最广泛的方法之一,试验仪器已有定型产品。

**4.36.2** 本试验室用的仪器,扭转向激振与轴向激振的激振端压板系统,无弹簧-阻尼器与有弹簧-阻尼器的各种类型共振轴仪都可以采用,但都要满足有关设备和仪器的基本要求。

共振柱在使用前,需按仪器的使用要求对仪器的特征常数进行标定。

**4.36.3** 本试验方法推荐采用圆柱体试件,而不采用空心圆柱体试件,是因为本规程的其他试验均采用圆柱体试件。

**4.36.8** 本条对所测得数据进行试验成果整理时,均以土的力学模型是理想黏弹性体模型为基础,同时考虑土的动模量与动阻尼比都随应变幅变化而变化,以反映土的应力应变关系的非线性特征。由于试样激振端压板系统的质量影响,使试验成果整理较为复杂。而当激振端还具有弹簧-阻尼器时,只能通过专有的计算机程序才能完成。本条只列出最简单情况下处理试验数据的公式,在工程应用中根据地基特性和选用的模型进行计算。

#### 4.37 弹性模量试验

**4.37.1** 对各向同性的纯弹性材料,在外力作用下,变形是纯弹性的,外力卸去后,材料恢复到原有尺寸。通常用简单的拉伸或压缩试验测定其弹性模量。

土体并非弹性体,在外力作用下,变形是弹塑性的,当外力卸去后,仍保留一部分残余变形。土体的应力应变关系曲线特征是:加荷和卸荷变形不是同一规律,因此,应力应变之间没有单值关系。卸荷后再加荷,应力应变曲线形成滞回圈,滞回圈随加荷、卸荷的次数增加逐渐变窄,交点逐渐提高。

土的弹性模量定义为应力与弹性应变之比。用反复加荷、卸荷分离应变的方法作为制定本试验方法的基本出发点。

**4.37.4** 随着加荷、卸荷的次数增加,试样的应力应变关系形成一个封闭的、狭窄的滞回圈,用直线连接滞回圈的两个端点,其斜率即是弹性模量。

#### 4.38 冻胀量试验

**4.38.1** 土体不均匀冻胀是寒区工程大量破坏的重要因素之一。因此,各项工程开展之前,需要对工程所在地区的土体做出冻胀敏感性评价,以便采取相应措施,确保工程构筑



物的安全可靠。因为原状土和扰动土的结构差异较大,为对冻胀敏感性做出正确评价,试验一般采用原状土进行。若条件不允许,采用扰动土试验时,要在试验报告中予以说明。本试验方法与目前美国、俄罗斯等国所用方法基本一致,所得数据用于评价该种土的冻胀量略偏大,从工程设计上偏安全。

**4.38.3** 土体冻胀量是土质、温度和外载条件的函数。当土质已确定且不考虑外载时,温度条件就至关重要。其中起主导作用的因素是降温速度。冻胀量与降温速度大致呈抛物线形关系。考虑到自然界地表温度是逐渐下降的,在本试验中规定底板温度黏土以 $0.3^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 、砂土以 $0.2^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的速度下降,是兼顾各类土的特点并处于试验所得冻胀量较大的情况。

**4.38.5** 在特定条件下土的冻胀量是确定的,但是在土的冻胀性评价方法和等级划分标准上目前国内外不尽一致。分析国内外现有的冻胀划分方法和标准,并考虑到冻胀率与冻胀量之间的关系,可以根据室内试验所得的冻胀率按天然土层的冻深换算冻胀量,故本条文只规定了冻胀率的计算公式。

### 4.39 冻土融化压缩试验

**4.39.1** 冻土融化时在荷载作用下将同时发生融化下沉和压密。在单向融化条件下,这种沉降量完全符合普通土力学中的一维沉降关系。融化下沉是在土体自重作用下发生的,而压缩沉降则与外部压力有关。目前国内外在进行冻土融化压缩试验时首先是在微小压力下测出冻土融化后的沉降量,计算冻土的融沉系数,然后分级施加荷载测定各级荷载下的压缩沉降,并取某压力范围计算融化压缩系数。由此可以计算冻土融化压缩的总沉降量。已有试验证明在一定压力范围内,孔隙比与外压力基本呈线性关系,这个压力范围大致为 $0 \sim 0.4\text{MPa}$ ,因此,在一般实际应用和试验条件下,在这个压力范围内按线性关系确定的融化压缩系数可以有足够的精度。

**4.39.2** 冻土融化压缩试验的试样尺寸,国外取高度( $h$ )与直径( $d$ )之比大于 $1/2$ ,最小直径取 $5\text{cm}$ ,对于不均匀的层状和网状构造的黏土,则根据其构造情况加大直径,使 $h/d = 1/3 \sim 1/5$ 。国内曾采用的试样环面积 $45\text{cm}^2$ 、 $78\text{cm}^2$ ,试样高度有 $2.5\text{cm}$ 、 $4\text{cm}$ 。考虑到便于采用,本条文中固结仪改装融化压缩仪,故规定可取试验环直径与固结仪大直径( $7.98\text{cm}$ )一致,高度则考虑冻土构造的不均匀性,取 $4\text{cm}$ ,这样高度与直径之比基本为 $1:2$ 。

为了模拟天然地基土的融化过程,在试验过程中使试样满足单向融化至为重要。为此,除采用循环热水单向加热外,试样环采用导热性较低的非金属材料(胶木、有机玻璃等)制作,并在容器周围加保温套,试验时在负温环境下或较低室温下进行,以保证试样不发生侧向融化。

**4.39.5** 试验中当融化速度超过天然条件下的排水速度时,融化土层不能及时排水,使融化下沉发生滞后现象。当遇到试样含冰(水)率较大时,若融化速度过快土体常发生崩解现象,使土颗粒与水分一起挤出,导致试验失败或融沉系数 $a_0$ 值偏大,因此循环热水的温度要加以控制。根据已有试验资料,本条文规定水温控制在 $40^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 。加热循环水时,水温要逐渐升高。当试样含冰(水)率大或试验环境温度较高时,可以适当降低水温,



以控制 4cm 高度的试样在 2h 内融化完为宜。

测定融沉系数  $a_0$  值时,本条规定施加的荷载主要是考虑克服试样与环壁之间的摩擦力。而且,冻土在融化过程中单靠自重下沉的过程往往很长,所以,施加这一小量荷载可以加快下沉速度,又不致对融化土骨架产生过大的压缩,对  $a_0$  的影响甚微。

#### 4.40 黏性土附着力试验

**4.40.1** 对于粉土、砂土以及液性指数大于 0.50 的黏性土,其附着力很小,测试的实际意义不大。

**4.40.2** 试验中要求土样杯内壁粗糙度不小于压板粗糙度,以防止试验过程中试样从土样杯中拔出。土样杯的尺寸是影响试验精度的重要因素,本条文规定主要是依据水运行业各单位的多年实践经验,以及综合考虑试验精度和试验的可操作性确定的尺寸。

$\sqrt[3.2]{}$  表示用去除材料方法获得的表面粗糙度,轮廓算术平均偏差  $R_a$  的上限值为  $3.2\mu\text{m}$ ,下限值不限制。去除材料方法常见的有车、铣、钻、磨、剪切、抛光、腐蚀、电火花加工、气割等。

**4.40.3** 拉力的加荷速率对测试结果有显著影响,根据多年实践经验,大部分黏性土可以采用每秒 0.3kPa 的加荷速率。

#### 4.41 岩石单轴抗压强度试验

**4.41.1** 岩石单轴抗压强度试验是试件在无侧限条件下,受轴向力作用破坏时,单位面积上所承受的荷载。本试验采用直接压坏试件的方法来求得岩石单轴抗压强度,或在进行岩石单轴压缩变形试验的同时测定岩石单轴抗压强度。

**4.41.3** 鉴于圆形试件具有轴对称特性,应力分布均匀,而且试件可以直接取自钻孔岩芯,在室内加工程序简单,本试验推荐圆柱体作为标准试件的形状。

**4.41.7** 加荷速度对岩石强度测定有一定影响。本试验所规定的每秒 0.5MPa ~ 1.0MPa 的加荷速度,与当前国内外习惯使用的加荷速度一致。在试验中,根据岩石强度的高低选用上限或下限。对软弱岩石,加荷速度适当降低。

**4.41.8** 鉴于岩石属不均质体,并受节理裂隙等结构面的影响,不可能使同组岩石的每个试件试验成果都一致,因此,规程中只要求列出每一试件的试验值。

#### 4.42 岩石单轴压缩变形试验

**4.42.1** 岩石单轴压缩变形试验是测定试件在单轴压缩应力条件下的纵向及横向应变值,据此计算岩石弹性模量和泊松比。本试验采用电阻片法测定岩石试件的变形参数,也可以采用千分表或其他量测元件测定岩石变形,在计算时将变形换算成应变。

**4.42.5** 试验时采用分点测量,有利于判断试件受力状态的偏心程度,以便及时调整试件位置。

**4.42.6** 本试验用两种方法计算岩石弹性模量和泊松比,即岩石平均弹性模量与岩石割线

弹性模量及相对应的泊松比。根据需要,也可以确定任何应力下的岩石弹性模量和泊松比。

#### 4.43 岩石抗拉强度试验

**4.43.1** 岩石抗拉强度有两类试验方法,即直接拉伸法和间接拉伸法,各有特点。本规程推荐劈裂法,又称巴西法,为间接拉伸法,是在试件直径方向上,施加一对线性荷载,使试件沿直径方向破坏,间接测定岩石的抗拉强度。

**4.43.5** (1)根据岩石软硬程度选定垫条。垫条的硬度与试件硬度相匹配,垫条硬度过大,试件易产生贯入现象;垫条硬度过低,垫条本身易变形,两者都影响试验成果。

#### 4.44 岩石抗剪强度试验

**4.44.1** 岩石直剪试验是将同一类型的一组岩石试件,在不同的法向荷载下进行剪切,根据库仑表达式确定岩石的抗剪强度参数。

**4.44.9** 当剪切位移量不大时,直接采用试件剪切面积作为有效剪切面积。当剪断后位移量过大时,采用剪断时试件上下相互重叠的面积作为有效剪切面积。

#### 4.45 岩石点荷载强度试验

**4.45.1** 岩石点荷载强度试验是将试件置于上下一对球端圆锥之间,施加集中荷载直至破坏,以测定岩石点荷载强度和其各向异性指数的一种试验方法。

**4.45.3.2** 无论是岩芯样(径向和轴向)、切割成的方块体样或未加切割的不规则样都可以进行点荷载试验,但试样尺寸、加荷点间距要满足规程要求。

**4.45.3.4** 岩石的含水状态及各向异性特征对点荷载强度试验成果影响较大,因此规程要求对不同含水状态以及平行、垂直层面加荷的试件分组进行,同时为保证试验成果的精度,对试件数量做出了规定。

**4.45.5.2** 当试件中存在软弱面时,规程规定加荷方向应分别平行和垂直软弱面,目的是获取各向异性岩石的最小和最大点荷载强度。

**4.45.6** 在计算点荷载强度时,引入了等效岩芯直径  $D_e$  的概念,并对径向、轴向、方块体和不规则块体试件等效岩芯直径的计算作出了规定。对于径向试验,计算  $I_e$  时所取的等效岩芯的直径  $D_e$ ,当上下锥端不发生贯入时,即为两加荷点间的距离  $D$ 。对于轴向、方块体及不规则块体试验,等效岩芯的直径  $D_e$  由计算确定。

#### 4.46 岩石抗折强度试验

**4.46.1** 岩石抗折强度根据工程实际需要选择不同形状和不同尺寸的试样进行试验,并根据断面形状选用相应的计算公式。

**4.46.3** 本规程规定试件规格为长 120mm,宽 40mm,高 20mm,沿用了原地质矿产部的规定。《公路工程岩石试验规程》(JTG E41-2005)中长 250mm,宽 50mm,高 50mm。

**4.46.5** 《公路工程岩石试验规程》(JTG E41-2005)中跨距选择 200mm,本规程选择 100mm,与试件尺寸协调。



## 4.47 土工合成材料试验检测

**4.47.1** 土工合成材料在各行各业运用已经非常普及,但不同材料在不同行业运用范围还是存在不同,本规程主要针对水运工程地基基础工程中运用的土工合成材料的试验检测。

**4.47.2** 鉴于土工合成材料的特殊性,对其检测既是“水运工程地基基础试验检测规程”的所包含的内容、也是“水运工程材料试验检测规范”的所包含的内容,根据中国工程建设标准化协会水运专业委员会 2011 年 12 月“三亚会议”的意见,“《水运工程地基基础试验检测技术规程》中有关土工合成材料的内容侧重检测要求,具体检测方法参见《水运工程材料试验检测技术规范》”,因此在本规程中只是规定了土工合成材料试验检测的基本要求,各相关试验的具体规定在《水运工程材料试验检测规范》中体现。

**4.47.2** 在土工合成材料的产品标准中通常给出相关产品的所有指标数据,但是在实际运用过程中可能只有部分试验参数具有实际的意义,设计单位可以根据其在实际工程中发生的作用,确定试验参数和参数指标值。

**4.47.3 ~ 4.47.4** 本规程规定的送检样品数量较多,主要是为了便于对有争议的样品安排复检的需要。

**4.47.5** 本规程提出“有效试件数量”意在明确删除一些非产品质量原因导致的试验值的偏差,如拉伸试验时的钳口处断裂试件的试验值明显比“真值”偏低等。

**4.47.6** 部分由两种及以上材料复合出来的土工合成材料,不同的材料的作用和特点也不完全一样,如塑料排水板的塑料板芯和包裹的滤膜两者之间材质差别较大、作用也不同,因此试验检测时除了复合体的一些试验参数之外,还需分别对滤膜的干湿态拉伸强度、滤膜的等效孔径等参数以及塑料芯板的压屈强度等参数进行试验。

**4.47.7** 研究表明,当前主要的 5 种排水板测深技术包括:数字式可测深排水板、施工自动记录仪法、单线抽丝法、双线电阻法、单线脉冲法。其中,单线脉冲法与施工过程无关,测量简单,精度较好,优势较为明显。室内试验表明,单线脉冲法的室内水中的测试精度大约在 1.5%。现场试验表明,对大部分工程而言,其测试精度可以控制在 2% 以内。

**4.47.10** 各种经验表明,土工合成材料的力学试验强度与试验机的稳定性、试验加荷速率等存在很大关系,电子材料试验机作为材料检测中较为先进的试验机类型,与传统的试验机相比具有加强的优越性,目前已经相当普及,因此作出规定。

土工合成材料因为种类较多,各种材料的特性也不一样,不同的夹具对被检测材料具有不同的适宜性,因此规程规定根据需要选择不同类型的夹具或夹块。

**4.47.11** 水力学试验仪器的过水管内的水头损失尽量小,同时避免过水路径的断面大小突变导致水流不稳。

**4.47.12** 目前有部分相关的规范规程对土工合成材料的试验数据处理按照试件数量规定了临界值或变异系数的范围,在一定程度上对试验数据的处理起到了指导作用,实践表明,选择合适的临界值对部分材料(较均质材料)、部分参数(如单位面积质量),采用规定的临界值范围统计是适宜的。但是由于大多数土工合成材料的试验值都具有离散型大的

特点,特别是力学性能指标,如撕裂强度、伸长率、渗透系数等参数,统计时往往都具有较大的标准差和变异系数,超出临界值范围的几率也非常大。经征求一些相关检测单位的意见,本规程仍沿用传统的简单算术平均值作为检测结果。

由于土工合成材料的“复合”特点,拉伸试验时,同一试件内部不同点位的变形程度也不一致,采用局部范围的引伸计有时与整个试件拉伸时测试的伸长率有一定差值。从整个试件的伸长率看,以夹具的变形量计算伸长率更直观一些,且具有很强的操作性和实际意义,因此,对用气动或液压类夹具进行拉伸试验计算伸长率时做出了建议。对于一些强度较高的机制土工织物、土工加筋带等拉伸试验,需要采取其他形式的夹具,可以通过“画标线”、“量长度”等办法。均匀性很好的条状、片状材料,可以根据需要采用引伸计测量试样的伸长率。

**4.47.13** 工程实践中,经常遇到因为标准不统一(国家标准或行业标准、试验方法或产品要求等)、设计单位沿用旧标准等方面的原因,导致同一试验的参数名称不一致、试验参数的单位、试验值的修约等也不一致,本规程对水运工程地基基础检测中常用材料的试验参数进行了统一。



## 5 原位试验

### 5.1 一般规定

**5.1.2** 根据钻探和室内试验资料,对原位检测试验成果进行综合分析,可以提高成果的准确性。

### 5.2 原位密度试验

**5.2.2** 环刀法、灌砂法和灌水法是传统的原位密度试验方法。核子法是一项新发展起来的无损、快速检测技术。

**5.2.8** 选择适当粒径,使量砂密度变化较小,以提高试验结果的准确性。根据经验,粒径在 0.25mm~0.50mm 范围内的量砂密度较稳定。

**5.2.17** (1) 目的是为了为了保证核子射线法试验仪器的测试结果的准确性和精度。

### 5.3 抽水试验

**5.3.4** 抽水试验孔的孔径不能过小,以便安装过滤器、水泵和观测动水位,规程推荐 200mm~400mm。

**5.3.9.2** 因为潜水泵安装方便,种类多,且易于满足不同井径、流量和扬程的试验要求,常常作为首选。

**5.3.16.3** 抽水试验方法以稳定流为主,故只列出了稳定流的有关公式。

### 5.4 压水试验

**5.4.1** 一般多采用自上而下的分段压水试验法。另有要求时,也可以采用全孔压水试验或自下而上的压水试验。

**5.4.2** 压水试验求得的透水率是试段的平均值。

**5.4.5** 表示岩体渗透性的指标是透水率,单位为吕荣,1 吕荣的定义是试验压力为 1MPa 时,每米试验段每分钟压入的流量为 1L。

**5.4.11.1** 水压式和气压式止水栓塞止水可靠,在孔壁不规则时止水效果较好。

**5.4.12** 为确保试验成果的可靠,试验前洗孔时要最大限度地清除附在孔壁上或裂隙中的岩粉和孔底残留物。

**5.4.13.5** 当透水率较小( $q < 10Lu$ ),且  $P \sim Q$  曲线为 A 型(层流)时,采用规程公式计算渗透系数。当透水率较大时,用压水试验方法求得的渗透系数准确性较差。



## 5.5 原位直剪试验

**5.5.7** 原位直剪试验遵循的理论公式是库仑定律。确定试样垂直荷载时要考虑岩土特性、上覆自重压力以及技术要求,常规选择 100kPa、200kPa、300kPa、400kPa。

**5.5.9.2** 滚排在使用前,规程要求测定其摩擦力与垂直荷载的关系,表达式为  $f = aP_v + b$ , 确定系数  $a$  和  $b$  的值。

**5.5.9.5** 剪切破坏标准,一种情况是剪切变形不断增加,而横向千斤顶上的压力值下降,另一种是用试样的位移量控制,当横向位移达到试样边长 1/10 时,即为剪切破坏。

**5.5.10** 岩体直剪试验,当剪切面水平或接近水平时,采用平推法或斜推法;当剪切面较陡时,采用楔形体法。

**5.5.11.2** 根据  $\sigma \sim \tau$  一元回归直线和  $\tau \sim s$  曲线等,判断各个试样的比例界限值、峰值以及残余强度值。

**5.5.11.3** 最小二乘法公式如下:

$$c = \frac{\sum \sigma^2 \cdot \sum \tau - \sum \sigma \cdot \sum (\sigma \cdot \tau)}{n \sum \sigma^2 - (\sum \sigma)^2} \quad (5-1)$$

$$\tan \phi = \frac{n \sum (\sigma \tau) - \sum \sigma \cdot \sum \tau}{n \cdot \sum \sigma^2 - (\sum \sigma)^2} \quad (5-2)$$

## 5.6 原位冻胀量试验

**5.6.1** 土的冻胀性可以通过原位试验和室内试验进行测试。原位冻胀量试验方法简单,测试结果可靠,但试验工作量大,周期长。

**5.6.2** 分层冻胀仪有单独式和迭合式。单独式制作简单,用钻孔法埋设,对土的原有结构破坏较小,对地下水位高于冻深的地区尤为适用。迭合式能集中在一点观测分层冻胀,有利于成果的整理分析,缺点是制作和埋设较麻烦,同时,由于埋设孔较大,仪器埋入后对周围土的温度场有影响。从观测数据的可靠性考虑,推荐单独式分层冻胀仪。

**5.6.3** 沿深度分层间距根据需要确定。冻深大取大一些的间距。

## 5.7 十字板剪切试验

**5.7.3** 目前我国常用的机械式十字板剪切仪有开口钢环式十字板剪切仪;电测式十字板剪切仪有电阻应变式十字板剪切仪。开口钢环式十字板剪切仪使用时期较早,利用蜗轮、蜗杆通过探杆扭转插入土层中的十字板头,借助开口钢环与百分表测定土体的抵抗力矩,该仪器需钻机配合成孔;电阻应变式十字板剪切仪是后来发展起来的一种仪器与试验方法,与机械式十字板剪切仪的主要区别在于测力装置不用钢环,而是在十字板头上端连接一个贴有电阻应变片的扭力传感器,试验时通过加压贯入与回转装置,将十字板头压入到土层中的试验深度,扭转十字板头,由电子系统直接量测土的抵抗力矩。在试验过程中不需要钻机成孔、进行机械安装与轴杆摩擦力校正等作业,操作较机械式十字板剪切仪简便许多,试验成果也较稳定,因此得到较广泛的应用。两种十字板剪切仪由于工作原理与试



验方法有所不同,测试的结果也有所差异,一般机械式十字板剪切仪的测试值较电测式十字板剪切仪大,两者相差 10% ~ 20%。水上十字板剪切试验,除了同样受到试验仪器与工艺及土质的影响外,还要受到水流、潮汐、风浪等水上各种因素的影响,机械式与电测式两种仪器的测试值的差异往往更大。因此,十字板剪切试验要考虑两种不同仪器测试值的差异,严格遵守操作规范,尽可能避免或减少各种干扰因素的影响,客观反映试验的测试结果。

**5.7.3.1** 50mm × 100mm 与 75mm × 150mm 两种不同规格十字板头的试验结果并非总是相同,75mm × 150mm 规格的十字板头通常在浅部软弱的淤泥、淤泥质黏性土层中使用。使用的十字板头要清洗干净,无损坏变形,否则会使十字板头的厚度与面积比发生变化,试验时对土体的扰动增大,使测得土的抗剪强度偏小。

**5.7.4** 水域十字板剪切试验一般在水上固定勘探平台上进行,在潮间浅滩区可以利用搁浅的勘探船、筏,但由于水上固定勘探平台使用成本高,还需配备相应的辅助设备,至今尚未在我国工程勘察中普及使用,由此造成十字板剪切试验这种原位测试勘探手段,在水域工程中的应用受到较大的限制。

近年来,水运工程相关勘察设计单位成功地创造了一种在潮间滩地或浅水区进行水上十字板剪切试验的施工作业方法。这种施工作业方法是用勘探船作为浮动式作业平台,把机械式或电测式十字板剪切仪连接在入土固定并与勘探船脱开的套管上,把套管作为支架进行试验。现这种试验作业工艺方法,已成为这些勘察设计单位进行水上十字板剪切试验的常用手段。

为了使这种相对较经济、简便的水上十字板剪切试验作业工艺方法,能得到推广应用,本规程编写组曾对这种试验作业工艺方法的可靠性与适应性作了进一步的研究,在天津与上海两地进行了勘探船搁浅与浮起两种不同作业状况的十字板剪切试验对比,对比试验结果表明,这两种作业方式的试验效果基本一致,不存在本质的差别,不但测试的过程基本一致,而且测试的结果也基本一致。

根据多年的水上十字板剪切试验的经验,一般在水深不超过 10m 的浅水区和风力小于 6 级的工况条件下,也就是自然条件不足以影响试验正常进行的情况下,可以采用这种水上十字板剪切试验作业工艺方法。由于电测式十字板剪切仪影响因素相对较少,性能较稳定,效率高,更适宜这种水上十字板剪切试验作业工艺方法使用。采用此水上试验作业工艺方法注意以下几点:

1) 勘探船、筏根据本规程的有关规定确定。

2) 连接十字板剪切仪的支架套管的直径不小于 146mm,并根据水深和试验深度的要求,设置抗探杆弯曲的内套管。

3) 作业时套管支架平台与勘探船脱开,并考虑潮汐对作业的影响。

**5.7.5** (7) 国内外研究资料认为,十字板剪切试验所测得的土的不排水抗剪强度为峰值,高于土的长期不排水抗剪强度,并与土的性状直接相关,随着软黏性土的含水率增大,黏粒含量的增高,这种差异的反映愈是明显,在工程中应用时,需根据土质条件,对实测的十字板不排水抗剪强度作相应的修正。《铁路工程地质原位测试规程》(TB10018—2003)规定,当软黏性土的  $I_p \leq 20$  时,不作修正;当  $20 < I_p \leq 40$  时,修正系数  $\mu$  为 0.9。国外



Daccal 等建议,  $I_L \leq 1.1$  的软黏性土, 当  $I_p \leq 20$  时, 不作修正, 当  $20 < I_p \leq 40$  时, 修正系数  $\mu$  为  $1 \sim 0.88$ ;  $I_L > 1.1$  的软黏性土, 当  $I_p \leq 20$  时, 修正系数  $\mu$  为  $0.88 \sim 0.8$ , 当  $20 < I_p \leq 40$  时, 修正系数  $\mu$  为  $0.8 \sim 0.7$ 。但对实测的十字板不排水抗剪强度如需进行必要的修正时, 不仅要依据土质的具体情况, 还必须考虑试验方法和地区工程实践的经验等实际情况, 综合确定作为工程应用参数的十字板不排水抗剪强度推荐值。

## 5.8 标准贯入试验

**5.8.1** 标准贯入试验一般用于砂土、粉土和黏性土, 虽然对一般工程中软塑~流塑的软土意义不大, 但考虑到在水运工程疏浚方面, 其对软塑~流塑的软土仍是主要的勘察手段, 故仍定为适用于整个黏性土。考虑到目前使用的一些地区性规范和经验关系, 故将残积土、极软岩、软岩也包括进去。

**5.8.2** 依据现行国家标准《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)(2009年版)的相关要求, 刃口单刃厚度为 1.6mm。

**5.8.3** 标贯测试时, 贯入度量测基面一般选择套管口或平台面, 水域钻孔采用浮式平台时, 受波浪影响平台面是晃动的, 若套管跟平台固定, 则套管口也随平台一起晃动, 这种情况下, 将套管口或平台面作为贯入度量测基面是不妥当的, 需要采取措施避免这一因素影响。

**5.8.4** 由于标准贯入试验击数离散性大, 故依据单孔少量标贯试验资料提供整体场地的设计参数是不可靠的; 在统计分析时, 要剔除个别异常值。

标贯的修正问题, 国外对  $N$  值的传统修正包括: 饱和粉细砂的修正、地下水位的修正、土的上覆压力修正。国内长期以来并不考虑这些修正, 而着重考虑杆长修正。杆长修正是依据牛顿碰撞理论, 杆件系统质量不超过锤重二倍, 限制了标贯使用深度小于 21m, 但实际使用深度已远超过 21m, 最大深度已达 100m 以上; 通过实测杆件的锤击应力波, 发现锤击传输给杆件的能量变化远大于杆长变化时的能量的衰减, 故建议不作杆长修正的  $N$  值是基本的数值。但考虑过去建立的  $N$  值与土性参数、承载力的经验关系, 所用  $N$  值均经杆长修正, 而抗震规范评定砂土液化时,  $N$  值又不作修正。故在实际应用  $N$  值时, 要按具体岩土工程问题, 参照有关规范考虑是否作杆长修正或其他修正。

## 5.9 静力触探试验

**5.9.2** 目前国内静力触探仍主要使用单桥与双桥探头, 但在国际上有许多国家与地区, 已把能测孔压、孔斜等的多功能探头作为常用探头, 并取得了良好的效果。提倡使用多功能探头, 积累工程经验, 以推动静力触探试验技术水平的提高与发展。

**5.9.4.2** 目前国内水域静力触探试验, 基本上多在水上固定勘探与试桩平台或搁浅的勘探船上进行, 水下静力触探尚未普及, 处于引进与研制阶段。国外水下静力触探技术及设备已较为成熟, 按其工艺分为海床静探(Seabed CPT)和井下静探(Downhole CPT)。海床静探是把静探机潜入水底作业, 以水底泥面为基准, 将探头及探杆直接连续地贯入水底土层中, 这种工艺和设备较适宜在水深一般不大于 30m 的港口、航道等水运工程中应用。



但在密实的砂层中,往往一次连续贯入的深度难以满足要求,需进行分段触探。井下静探的工艺特点是采用钻探与静力触探相结合的推进方式,探头通过置于钻孔内的管内锥探总成加压贯入钻孔底部的土层,单次可以贯入1m,每回次共贯入3m,钻探主要是为下一次的触探清除探头已触探经过的土层,这种静探工艺方法对于孔深较大的勘探孔来说,不能通过一次连续贯入或几次贯入完成,难以保证触探过程的连续性与完整性。

## 5.10 动力触探试验

**5.10.1** 考虑到目前使用的一些其他行业规范、地区性规范和经验关系,故将极软岩、软岩也包括进去。

**5.10.2** 轻型圆锥动力触探,非常适用于施工验槽、填土勘察、查明局部软弱土层、洞穴等分布;重型动力触探是应用最广的一种,其规格与国际通用标准一致;超重型动力触探规格与国标接近,适用于碎石土。

**5.10.3** 本条操作要点主要考虑了影响试验成果的因素,其中锤击能量和触探杆与岩土间的侧壁摩阻力是主要因素,锤击速度是次要因素,而在黏性土中击入的间歇也会使侧壁摩阻力增大。

动探测试时,贯入度量测基面一般选择套管口或平台面,水域钻孔采用浮式平台时,受波浪影响平台面是晃动的,若套管跟平台固定,则套管口也随平台一起晃动,这种情况下,将套管口或平台面作为贯入度量测基面是不妥当的,要采取措施避免这一因素影响。

**5.10.4** 根据动力触探成果进行土层划分时注意超前和滞后现象,上为硬土层下为软土层,超前约为0.5m~0.7m,滞后约为0.2m;上为软土层下为硬土层,超前约为0.1m~0.2m,滞后约为0.3m~0.5m。超前滞后范围内值、临界深度以内的值均不反映真实土性,故不参加统计。

依据动力触探成果评定土性参数和设计参数,均基于地区经验的基础上。当采用动力触探击数确定碎石土密实度时,可以按国家标准《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)(2009年版)中的附录B进行修正。

## 5.11 旁压试验

旁压试验系指通过旁压器在钻孔内对孔壁施加横向压力使土体产生相应变形的一种原位测试方法,又称横压试验。该试验所得的旁压曲线特征值有初始压力、临塑压力、极限压力,用于确定地基承载力和旁压模量等;自钻式旁压试验尚用于测求土的原位水平应力、静止侧压力系数。

**5.11.5.2** (3)当需外延压力与体积曲线( $P \sim V$ 曲线)确定极限压力时,外延部分一般不超过试验曲线的20%;外延困难时采用压力与体积倒数曲线( $P \sim 1/V$ 曲线)确定,但该曲线不少于3个点,以旁压器测量腔固有体积与2倍初始压力对应的体积之和的倒数( $1/(V_0 + 2V_0)$ )对应的压力为极限压力。

**5.11.5.5** 静止侧压力系数采用自钻式旁压仪进行试验,自钻式旁压试验钻进对孔壁土层的扰动和天然应力的改变较小,初始压力接近原位水平应力,故可以用于估算静止侧

压力系数。

## 5.12 载荷试验

**5.12.2** 由于地基往往由多层土组成,简单地把试验点选在主要持力层分布地段或把试验深度选在基底持力层高程上,当土层变化复杂时,载荷试验反映的压板下影响深度以内的地基土性状将与基础下实际地基土性状出入很大,因此,载荷试验的位置、试验层位的选择要在基本了解了场地地层条件、设计参数的条件下决定,尽量选择有代表性的地段、深度进行试验,以做到有的放矢。

**5.12.3** 载荷试验设备安装过程中,试验面铺设中、粗砂是为了使压板与试验面有良好接触,以保证承压板承受均布荷载,不产生偏心荷载。

**5.12.4** 平板载荷试验是基于竖向荷载作用在半无限体表面的弹性理论的一种测试方法。因此,试坑的宽度要满足压板下土体的受力条件。试坑宽度不小于3倍的压板直径或边长是假定为半无限体的起码条件。

**5.12.5.1** 本条规定了载荷试验承压板的基本尺寸,试验时结合工程的具体情况选择合适的承压板。圆形承压板,符合轴对称的弹性理论。地基处理后的承压板基本尺寸参考了《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)。

**5.12.5.2** 使用千斤顶、压力表、油泵进行试验,当最大使用量程大于额定最大量程的80%时,可能产生漏油、卸压、计量精度下降等现象。因此,在试验前要计算好加载量和最大试验压力,选择合适的千斤顶和压力表,以免影响试验。为保证试验量测精度,规定压力表的精度优于或等于0.4级。

**5.12.5.4** 载荷试验通常情况下采用外堆重物提供反力、千斤顶加荷的方式。注意外荷平台地面要高于千斤顶一定距离,且平台堆载后不要有向下的弯曲变形,以防止试验土层在试验未开始便承受了预压,影响试验结果。

**5.12.6.1** 稳定法平板载荷试验即通常定义上的慢速维持荷载法或沉降相对稳定法,在岩土工程中应用广泛。这是一种最接近于上部荷载施加过程中地基与基础相互作用的试验方法,用于确定基础地面以下主要持力层的承载力和排水条件下的固结变形特性,效果较理想。

**5.12.6.2** 试验的承压板沉降在某级荷载施加后,一般情况下在1h之内便完成该级荷载下总沉降的80%以上。因此,规定的前1h观测时间间隔较短,目的在于了解沉降的发生、发展趋势。

**5.12.6.4** 承压板周围土体明显倾向基础、隆起或产生裂缝,表明试验土体已发生了剪切破坏,其所承受的荷载已达到极限强度。沉降量急剧增大,荷载~沉降曲线出现陡降段,或24h内沉降不能达到稳定标准时,不论沉降的增加是等速的或加速的,均表明试验土体已经出现塑性变形,其所承受的荷载已使土体达到了变形破坏的极限状态。

## 5.13 波速测试

**5.13.2** 单孔法测试方法较多,有采用孔口激振,孔内接收以及孔内激振,孔内接收的方



法。主要应用于岩土工程勘察中的波速测试和换填垫层法、强夯法加固地基的质量检测。跨孔法须采用多个试验孔进行测试,操作较复杂,对较深的地层波速测试不适用。面波法较普遍地应用于岩土工程勘察中的波速测试和换填垫层法、强夯法加固地基的质量检测。

**5.13.3** 当有可靠依据时,单孔法激振方法也采用在孔口浇筑混凝土块甚至打入短桩。

**5.13.4** 板式激振离测试孔的距离根据第一层土的厚度和其下是否存在高速层来确定,规程规定为 1.0m ~ 3.0m。当第一层土的厚度较大时一般大值,即不超过 3.0m;当其下存在高速层时取小值,即不小于 1.0m。

**5.13.5** 跨孔法的孔间距离不大于临界距离,以避免折射波的干扰。

**5.13.7** 实际工作中要比较相邻孔及多孔波速值,如果波速值基本一致,则认为无折射影响。

**5.13.9** 面波频散曲线反映地层面波速度随深度的变化情况,有条件时跟已有的钻孔资料对比,进行深度校正。

#### 5.14 扁铲侧胀试验

**5.14.2** 膜片在试验前后的率定值是不同的,故要求在每个孔的试验前后进行率定。

**5.14.8** 判定液化及浅部土层的试验间距常采用 20cm,厚土层及下部土层试验间距放宽,最大不超过 50cm。

**5.14.8 ~ 5.14.10** 试验过程中要经常检查 A 和 B 的值,使满足有关条件。并量测记录试验孔的地下水位,以便计算扁铲参数。

#### 5.15 基底摩擦系数试验

**5.15.1** 混凝土板在垂直和水平荷载作用下沿地基表面开始滑动时,在二者接触面上的垂直压力和抗剪强度的临界关系符合库仑定律  $\tau = \sigma \tan \varphi + c$ 。

**5.15.6** 试验方案中,试验尺寸是一个重要的参数。在一般情况下,两种不同的坚硬材料的摩擦系数是和试板大小及垂直压力无关的,考虑到地基土的特殊性,试板下及试板各侧面周围土体的在各级荷载下的变形和应力分布,将对摩擦阻力的试验结果产生影响,而试板单位面积上分担的边界长度(试板的周边总长/试板面积)越大,则影响越大,为了降低试板单位面积分担的边界长度(也称周面比),试板如果太小,成果不准确,但也不能过大,过大时,需增加试验的垂直和水平荷载,增加试验难度和费用。根据经验,一般现场试验采用的尺寸为  $0.5\text{m}^2 \sim 1.0\text{m}^2$ ,对黏性土选大些,对均匀砂土可以稍小,对不均匀的砂卵石一般大于  $0.6\text{m}^2$ 。

**5.15.7** 对于黏性土地基,原则上采用就地浇筑试板,对于装配式预制混凝土板建筑物,为反映建筑物的实际工作情况,可以采用预制试板。对于砂土,一般选用预制试板。

**5.15.9 ~ 5.15.10** 垂直荷重的施加方法一般有两种,一种是直接加重法,另一种是千斤顶法。水平荷重施加方法也有两种,一种是通过滑轮组和定向滑轮直接加重,另一种是千斤顶法。

**5.15.14** 在进行地基土对混凝土板的抗滑试验中,试板滑动时,其底部往往黏结一薄层



土,而不是沿试板与地基土的接触面平移,破坏面有时发生在地基表层土内部。一般试验完成后,要翻开试板,观察试板下地基的实际破坏情况,以便对试验资料进行综合分析。

## 5.16 现场冻土融化压缩试验

**5.16.1** 本试验与暖土荷载试验方法相似。这种方法适用于除漂石( $d > 200\text{mm}$ )以外的各种冻土,可以逐层进行试验,取得建筑场地预计融化深度内冻土的融化压缩性质即融沉系数和压缩系数,但由于这种方法试验设备和操作比较复杂,劳动强度大,因此,一般只对较重要的工程或室内试验难于进行的含巨粒土、粗粒土和富冰冻土才采用这种方法。

**5.16.4** 传压板面积小于  $5000\text{cm}^2$  时,试验误差较大,故规定不小于此面积。形状可以是圆形(直径  $798\text{mm}$ )或正方形(边长  $707\text{mm}$ )。

**5.16.6** 计算施加的荷载时,包括了加荷设备的重量。

## 6 基桩检测

### 6.1 一般规定

**6.1.1** 施工前基桩检测一般指工程前期试桩,而施工后基桩检测则往往安排在基桩施工过程中穿插进行。本条强调检测方法合理选择搭配,目的是提高检测结果的可靠性和检测过程的可操作性。表 6.1.1 所列 7 种方法是基桩检测中最常用的检测方法,在具体选择检测方法时,要求根据检测目的、内容和要求,结合各检测方法的适用范围和检测能力,考虑设计、地质条件、施工因素和工程重要性等情况确定,不允许超适用范围滥用。同时也要兼顾实施中的经济合理性,即在满足正确评价的前提下,做到快速经济。大直径灌注桩桩身完整性一般同时选用两种或多种的方法检测,使各种方法能相互补充印证,优势互补。另外,对设计等级高、地质条件复杂、施工质量变异性大的桩基,或低应变完整性判定可能有技术困难时,提倡采用直接法(静载试验、钻芯和开挖,管桩可以采用孔内摄像)进行验证。

**6.1.3** 由于检测成本和周期问题,很难做到对桩基工程全部基桩进行检测。施工后验收检测的最终目的是查明隐患、确保安全。为了在有限的检测数量中更能充分暴露桩基存在的质量问题,优先检测本条第 1~5 款所列的桩,其次再考虑随机性。

**6.1.4** 对于较长或超长的打入式预制桩,采用高应变法进行沉桩过程监测可以有效降低桩的破损率、选择合理入土深度。

### 6.2 高应变法

**6.2.2** 对做过静载荷试验的桩基工程,其工程桩的检测比例取总桩数的 2%,并不少于 5 根;对于未做过静载荷试验的桩基工程,其检测比例取总桩数的 5%,并不少于 5 根。

**6.2.3** 沉桩过程中,桩周土体受到冲击而破坏,土体强度下降;沉桩结束后,桩周土体强度随时间逐渐恢复的现象称作时间效应。根据岩土工程方面的研究,时间效应的规律一般用指数曲线反映。在沉桩之初,承载力的增长极为迅速,随着时间的推移越来越慢。土的黏性越大,承载力的增长速度也越慢,趋于稳定所需的时间也越长,因此从沉桩至复打检测要规定一定的间歇时间。

**6.2.4.2** 仪器系统使用过程中,精确度会发生变化,因此需要定期标定。

**6.2.4.4** 导杆式柴油锤荷载上升时间过于缓慢,容易造成速度响应信号失真。

**6.2.5.3** 实践证明,传感器安装技术是检测工作成功与否的先决条件,要予以高度重视,安装要规范化。对安装传感器的间距做出要求,主要是为了确保得到高质量的测试信号。



**6.2.8** 贯入度的大小与桩尖刺入或桩端压密塑性变形量相对应,是反映桩侧、桩端土阻力是否充分发挥的一个重要信息。贯入度小,即通常所说的“打不动”,使检测得到的承载力低于极限值。本条是从保证承载力分析计算结果的可靠性出发,给出的贯入度合适范围,不能片面理解成在检测中减小锤重使单击贯入度不超过6mm。贯入度大且桩身无缺陷的波形特征是 $\frac{2L}{c}$ 处桩底反射强烈,其后的土阻力反射或桩的回弹不明显。贯入度过大造成的桩周土扰动大,高应变承载力分析所用的土的力学模型,对真实的桩-土相互作用的模拟接近程度变差。

**6.2.9.1** 检测结果的可信度与测试信号有直接关系,因此要求选取的测试信号规范并具有代表性。

**6.2.9.2** 采用打桩机锤击沉桩时测到的锤击信号,不同击次下锤击能量有所变化,长汇集能量越大,桩周土阻力发挥越充分。

**6.2.11** 通常情况下,如正常施打的预制桩,力和速度信号在第一峰处应该基本成比例,即第一峰处的 $F$ 值与 $V \cdot Z$ 值基本相等(见图6.2.10-1)。信号随意比例调整均是对实测信号的歪曲,并产生虚假的结果。如通过放大实测力或速度进行比例调整的后果是计算承载力不安全。因此,为保证信号真实性,禁止将实测力或速度信号重新标定。这一点必须引起重视,因为有些仪器具有比例自动调整功能。

**6.2.12** 当出现本条所述四款情况时,因高应变法难于分析判定承载力和预示桩身结构破坏的可能性,建议进行验证检测。

**6.2.13.1** 本条对曲线拟合时间段长度作出规定,是为了使曲线拟合能包含土阻力响应区段的全部土阻力信息。港口工程一般以长桩为主,取 $\frac{5L}{c}$ 已能满足上述要求。

**6.2.13.2** CASE法阻尼系数 $J_c$ 定义为仅与桩端土性状有关,一般遵循随土中细粒含量增加阻尼系数增大的规律。 $J_c$ 的取值是否合理在很大程度上决定了计算承载力的准确性。因此,规定根据同条件下的静动对比试验或实测曲线拟合法来确定阻尼系数。

**6.2.14** 高应变桩身完整性检测通常随单桩承载力检测同步进行,因其能量较大,在测试深度及准确性方面均优于低应变检测,但相对费用较大、时间较长,因此未普遍采用。

**6.2.16** 试打桩测试可以为选择工程桩的桩型、桩长、桩端持力层和沉桩锤型提供依据。

**6.2.16.3** 通过对试打桩实测承载力与贯入度的相关分析,可以对地质资料进行校核,并对设计选定的持力层等有关参数提出修正意见。

**6.2.16.4** 传统沉桩停锤标准由设计人员根据打桩动力公式及经验确定,通常以贯入度或高程为依据,其理论根据是贯入度或高程与单桩承载力具有某种对应关系,出发点是为确保桩的承载力能满足设计要求。由于设计人员受到经验和方法上的局限,地质资料不够详尽或数据不够准确,对不同的桩锤性能与贯入度的关系考虑得不够全面,有时按设计要求贯入度操作出现沉桩困难现象。由于高应变动力检测技术可以即时、方便而又比



较可靠地确定桩的承载力,故在沉桩过程中对不同贯入度情况下桩的承载力进行测试,可以得到满足承载力的贯入度。在同一场地上选取几根有代表性的桩,测定其承载力相应的贯入度,进而根据贯入度与承载力的关系制定合理的沉桩停锤标准,这样的停锤标准更加科学合理。

**6.2.16.5** 桩的承载力原则上以桩周土体强度完全恢复后的复打测试结果为准。水运工程因施工工期紧、费用高,有时初打后打桩船难以重返原位,不具备复打条件;由于在地质条件相近情况下土体恢复系数比较接近,因此,可以在检测过程中有选择地对一定数量的桩进行初、复打试验,从而得到各场地土体的平均恢复系数,然后推广到具有相同条件、相同规格的其他初打桩的测试。

### 6.3 低应变法

**6.3.2** 由于受桩周土约束、激振能量、桩身材料阻尼和桩身截面阻抗变化等因素的影响,应力波从桩顶传至桩底再从桩底反射回桩顶的传播为一能量和幅值逐渐衰减过程。若桩过长(或长径比较大)或桩身截面阻抗多变或变幅较大,往往应力波尚未反射回桩顶甚至尚未传到桩底,其能量已完全衰减或提前反射,致使仪器测不到桩底反射信号,而无法评定整根桩的完整性。因此具体工程的有效检测桩长,要通过现场试验,依据能否识别桩底反射信号,确定该方法是否适用。对于最大有效检测深度小于实际桩长的长桩、超长桩检测,尽管测不到桩底反射信号,但若有效检测长度范围内存在缺陷,则实测信号中必有缺陷反射信号。因此,低应变法仍然可以用于查明有效检测长度范围内是否存在缺陷。

**6.3.3** 对多节混凝土预制桩,接头质量缺陷是较常见的问题,因此加大检测比例。

**6.3.6.2** 桩顶条件和桩头处理好坏直接影响测试信号的质量。因此,要求受检桩桩顶的混凝土质量、截面尺寸与桩身设计条件基本等同。灌注桩凿去桩顶浮浆或松散、破损部分,露出坚硬的混凝土表面;桩顶表面平整干净且无积水;妨碍正常测试的桩顶外露主筋要割掉。对于预应力管桩,当法兰盘与桩身混凝土之间结合紧密时,可以不进行处理,否则,采用电锯将桩头锯平。当桩头与承台或垫层相连时,相当于桩头处存在很大的截面阻抗变化,对测试信号会产生影响。因此,测试时桩头要与混凝土承台断开;当桩头侧面与垫层相连时,除非对测试信号没有影响,否则要求断开。

**6.3.8.4** 瞬态激振通过改变锤的质量及锤头材料,改变冲击入射波的脉冲宽度及频率成分。锤头质量较大或硬度较小时,冲击入射波脉冲较宽,低频成分为主;当冲击力大小相同时,其能量较大,应力波衰减较慢,适合于获得长桩桩底信号或下部缺陷的识别。锤头较轻或硬度较大时,冲击入射波脉冲较窄,含高频成分较多;冲击力大小相同时,虽其能量较小并加剧大直径桩的尺寸效应影响,但较适宜于桩身浅部缺陷的识别及定位。

**6.3.10** 对实测信号值进行平均处理是提高信噪比的有效手段;选择具有良好的一致性且不含零漂及高频干扰成分的信号值进行平均,则效果更佳。



## 6.4 单桩轴向抗压静载荷试验

**6.4.1** 本方法适用于以锚桩法进行的单桩轴向抗压静载试验,也可以根据现场条件选择压重平台反力装置、锚桩压重联合反力装置、地锚反力装置等。

**6.4.2** 单桩抗压静载试验分为:为设计提供依据时的极限承载力试验和为工程桩进行验证的检验性试验。

极限承载力试验指桩加载到破坏状态前或出现不适于继续承载的试验,其加载量比检验性试验大,一般在专供作破坏性试验的桩上进行;在工程桩正式施工前进行,试验成果可以作为设计依据,使工程桩的设计既安全又经济合理。

检验性试验主要是验证工程桩的承载能力能否满足设计要求,不用做到破坏。在工程桩施工过程中抽样进行,了解工程桩承载能力是否达到原设计要求,以便发现有不满足时采取措施补救。

**6.4.6** 规程规定试桩、锚桩和基准桩之间的距离是为了保证加载时相互不产生影响。

**6.4.8** 试验前对锚桩进行抗拔能力验算,并监测锚桩的上拔量,防止因桩偏位、安装不对称等因素引起的四根锚桩受力不均匀,常常留有一定的安全储备。

**6.4.13.1** 反力装置的形式有多种,本方法虽以锚桩法为例,但其他方法的反力装置也要满足本条的规定,确保试验的安全、有效。锚桩法静载荷试验是最常用的一种方法,该装置由主梁、边梁、千斤顶、锚桩、拉杆及其附件组成,千斤顶加荷时的反力由主梁传到次梁,再通过拉杆和连接件传到锚桩,使锚桩承受上拔力。四锚法受力明确,荷载对称,试验安全,特别适用于水上工程。

**6.4.13.2** 千斤顶的型号及规格相同、合力中心与桩轴线重合主要是为了防止加载偏心,和反力装置的失稳。试验过程中,加载系统要承受 40MPa ~ 60MPa 的高压,为安全起见,留有一定的富余量,规程要求不超过规定工作压力的 80%。

**6.4.13.3** 在静载试桩过程中测量试验桩的桩顶或桩身位移,基准点要尽量不受外界因素的干扰,水上试桩一般用打入桩作为基准桩。基准梁安设在基准桩上时,为了避免因温度变化而使基准梁发生扭曲变形,影响位移测试精度,规定一端固定,另一端简支。

**6.4.14.1** 慢速维持荷载法是我国桩基试验规范首推的一种确定单桩轴向抗压承载力的方法。港口和外海工程由于受到潮位、风浪等众多因素影响,试桩周期不能过长,规程推荐采用快速法。

**6.4.14.3** 静载荷试验分级进行,按试桩预估最大承载力或设计规定的最大控制荷载进行分级,一般分成 10 ~ 12 级。若要使用结果精度高一些,则加载级差小一些。

**6.4.14.10** 在正常情况下,如果试桩过程中出现可以终止加载的条件,可以认为试桩已经破坏。但在遇到桩身环向裂缝、灌注桩的桩底沉渣影响等情况,有可能还未能得出极限土阻力值,要继续加载。当在沉降较小时就出现试桩破坏的情况,结合施工工艺及完整性检测结果进行综合分析判别。

**6.4.15** 确定单桩轴向抗压极限承载力时,常绘制桩的荷载 ~ 沉降( $Q \sim s$ )曲线和沉降 ~

时间对数( $s \sim \lg t$ )曲线,必要时也可以绘制 $\lg Q \sim \lg s$ 曲线、 $s \sim \lg Q$ 曲线等。

**6.4.18** 测定桩端阻力和桩侧摩阻力时,一般将应变片或应变计测得的应变值换算成相应截面的轴向力,绘制桩身轴力分布图,从轴力分布图可以确定各层土的桩侧摩阻力和桩端阻力。

## 6.5 单桩轴向抗拔静载试验

**6.5.2** 当单桩抗拔静载试验为设计提供依据时,加载至破坏时为了判别出极限承载力。检验性试验主要是验证工程桩的承载能力能否满足设计要求。两者都需要有足够的安全储备。

**6.5.7.1** 桩的抗拔承载力较大时,推荐采用锚桩承担反力,既安全又方便安装。

**6.5.8.3** 根据实测位移及荷载数据绘制 $Q_{up} - s_{up}$ 曲线、 $s_{up} - \lg t$ 曲线,也可以绘制 $s - \lg Q$ 曲线、 $\lg Q - \lg s$ 曲线等。

## 6.6 单桩水平静载试验

**6.6.9** 试验桩的条件与工程桩的实际工作条件接近,试验结果才能真实反映工程桩的实际工作过程,使获得的试验数据更具代表性,不产生附加的弯矩而影响测试结果,才能更好地确定单桩水平临界荷载和极限荷载,或对工程桩的水平承载力进行检验和评价。因此规程规定使水平荷载的作用点高程与实际工程桩承台高程一致。

**6.6.15.2** 水平荷载试验时桩的水平位移一般比较大,特别是水上试桩,作用点位移较大,所以要求千斤顶有较大的行程,试验设备的加载能力为预计最大试验荷载的1.3~1.5倍。

**6.6.15.3** 为防止力作用点处产生局部挤压破坏,用钢垫块进行局部加强。当需要求得地面以上桩的转角时,根据上下表位移差与表面距离的比值计算得到。

## 6.7 钻 芯 法

**6.7.1** 钻芯法检测的主要目的是检测桩身混凝土质量、桩底沉渣、桩身完整性及桩身持力层的岩土性状等。

**6.7.3** 桩较长时,使用扶正稳定器确保钻芯孔的垂直度。

**6.7.4** 芯样试件的直径一般不小于骨料最大粒径的3倍,在特殊情况下不小于骨料最大粒径的2倍。从经济合理的角度综合考虑,规程要求选用外径不小于100mm的钻头。当受检桩采用商品混凝土、骨料最大粒径小于30mm时,可以选用外径为91mm的钻头;如果不检测混凝土强度,可以选用外径为76mm的钻头。

**6.7.7** 芯样制作首先是锯切芯样,然后是对芯样端部进行处理。锯切芯样时,尽可能保证芯样不缺角、两端面平行。当芯样端部不满足要求时,采取补平器或磨平机进行处理。

**6.7.8** 桩端持力层岩土性状的准确判断直接关系到受检桩的使用安全。《建筑地基基础设计规范》(GB 50007)规定:嵌岩灌注桩要求按端承桩设计,桩端以下三倍桩径且不小于



5m 范围内无软弱夹层、断裂破碎带和洞穴分布,且在桩底应力扩散范围内无岩体临空面。虽然施工前已进行岩土工程勘察,但有时钻孔数量有限,对较复杂的地质条件,很难全面弄清岩石、土层的分布情况。基于此,规程规定钻探深度满足设计要求。

**6.7.9** 钻进初始阶段要对钻机立轴进行校正,及时纠正立轴偏差,确保钻芯过程不发生倾斜、移位。出现钻芯孔与桩体偏离时,要立即停机记录,分析原因。当有争议时,进行钻孔测斜以判断是受检桩倾斜超过规程要求还是钻芯孔倾斜超过规定要求。

**6.7.13** 当持力层为中、微风化岩石时,将桩底 0.5m 左右的混凝土芯样、0.5m 左右的持力层以及沉渣纳入同一回次。当持力层为强风化岩层或土层时,可以采用合金钢钻头干钻等适宜的钻芯方法和工艺钻取沉渣并测定沉渣厚度。

**6.7.15** 先拍彩色照片,后选取芯样试件。

**6.7.17** 考虑到基桩施工的特殊性,评价单根受检桩的混凝土强度比评价整个桩基工程的混凝土强度更合理;同时作为受力构件的混凝土桩,薄弱部位的强度(结构承载能力)能否满足使用要求,直接关系到结构安全。因此,规定按上、中、下截取芯样试件。缺陷位置能取样试验时,截取一组芯样进行混凝土抗压试验。如果同一基桩的钻芯孔数大于一个,其中一孔在某深度存在蜂窝麻面、沟槽、空洞等缺陷,芯样试件强度可能不满足设计要求,在其他孔的相同深度部位取样进行抗压试验是非常必要的,在保证结构承载能力的前提下,减少加固处理费用。

**6.7.22** 与工程地质钻探相比,桩端持力层钻芯的主要目的是判断或鉴别桩端持力层岩土性状,因单桩钻芯所能截取的完整岩芯数量有限,当岩石芯样抗压强度试验仅仅是配合判断桩端持力层岩性时,检测报告中可以不给出岩石单轴抗压强度标准值,只给出单个芯样单轴抗压强度检测值。

按岩土工程勘察的做法和《建筑地基基础设计规范》(GB 50007)的相关规定,通常需要有多桩、多孔且在岩石的地质年代、名称、风化程度、矿物成分、结构、构造相同条件下至少钻取 6 个以上完整岩石芯样,才有可能确定岩石单轴抗压强度标准值。

对桩底岩芯单轴抗压强度试验,也可以直接参照本规程的有关章节内容执行。

**6.7.23** 虽然桩身轴力上大下小,但从设计角度考虑,桩身承载力受最薄弱部位的混凝土强度控制。因此,规定受检桩中不同深度位置的混凝土芯样试件抗压强度代表值中的最小值为该桩混凝土芯样试件抗压强度代表值。

**6.7.26** 通过芯样特征对桩身完整性分类,有比低应变法更直观的一面,也有“一孔之见”代表性差的一面。本规程强调完整性判断要根据混凝土芯样表观特征和芯样强度以及缺陷分布情况进行综合判定,关注缺陷部位能否取样制作成芯样试件以及缺陷部位的芯样试件强度的高低。

## 6.8 声波透射法

**6.8.1** 声波透射法是利用声波的透射原理对桩身混凝土介质状况进行检测。当桩径小于 0.6m 时,声测管的声耦合会造成较大的测试误差,因此该方法适用于桩径不小于 0.6m,在灌注成型过程中已经预埋了两根或两根以上声测管的基桩的完整性检测;基桩



经钻芯法检测后(有两个以及两个以上的钻孔)需进一步了解钻芯孔之间的混凝土质量时也可以采用本方法检测。

由于桩内跨孔测试的测试误差高于上部结构混凝土的检测,且桩身混凝土纵向各部位硬化环境不同,粗细骨料分布不均匀,因此该方法不用于推定桩身混凝土强度。

**6.8.2** 声波换能器有效工作面长度指起到换能作用的部分的实际轴向尺寸,该长度过大将夸大缺陷实际尺寸并影响测试结果。

换能器的谐振频率越高,对缺陷的分辨率越高,但高频声波在介质中衰减快,有效测距变小。选配换能器时,在保证有一定的接收灵敏度的前提下,原则上尽可能选择较高频率的换能器。提高换能器谐振频率,可以使其外径减少到30mm以下,有利于换能器在声测管中升降顺畅或减小声测管直径。但因声波发射频率的提高,将使声波穿透能力下降。所以,本规程仍推荐目前普遍采用的30kHz~60kHz的谐振频率范围。

桩中的声波检测一般以水作为耦合剂,换能器在1MPa水压下不渗水也就是在100m水深能正常工作,这可以满足一般的工程桩检测要求。对于超长桩,需要考虑更高的水密性指标。

当测距较大接收信号较弱时,选用带前置放大器的接收换能器更佳,或采用低频换能器,提高接收信号的幅度。

有的声波换能器配置了扶正器,可以防止换能器在声测管内摆动影响测试声参数的稳定性。

**6.8.3** 由于混凝土灌注桩的声波透射法检测没有涉及桩身混凝土强度的推定,因此系统的最小采样时间间隔放宽至0.5 $\mu$ s。首波自动判读采用阈值法或其他方法,对于判定为异常的波形,人工校核数据。

**6.8.4** 声测管内径与换能器外径相差过大时,声耦合误差明显增加;相差过小时,影响换能器在管中的移动,因此两者差值取10mm为宜。声测管管壁太薄或材质较软时,混凝土灌注后的径向压力可能会使声测管产生过大的径向变形,影响换能器正常升降,甚至导致试验无法进行,因此要求声测管有一定的径向刚度,如采用钢管、镀锌管等管材,一般不采用PVC管。由于钢材的温度系数与混凝土相近,能避免混凝土凝固后与声测管脱开产生空隙。声测管的平行度是影响测试数据可靠性的关键,因此,规程规定各声测管之间基本平行。

**6.8.5** 桩中预埋3根声测管时可以构成3个检测剖面,声波的有效检测范围覆盖了绝大部分桩身横截面,因此其声测管利用率是最高的,这符合检测工作既准确又经济的双重要求。因此规程把预埋三根声测管的桩径范围放宽,大多数工程桩的桩径都在这个范围内。

**6.8.6** 桩内预埋n根声测管可以有 $m_s = C_n^2$ 个检测剖面,预埋2根声测管有1个检测剖面,预埋3根声测管有3个检测剖面,预埋4根声测管有6个检测剖面,预埋5根声测管有10个检测剖面。

声测管按规定的顺序编号,便于复检、验证试验,以及对桩身缺陷的加固、补强等工程处理。

检测剖面、声测线和检测横截面的编组和编号见图6-1。

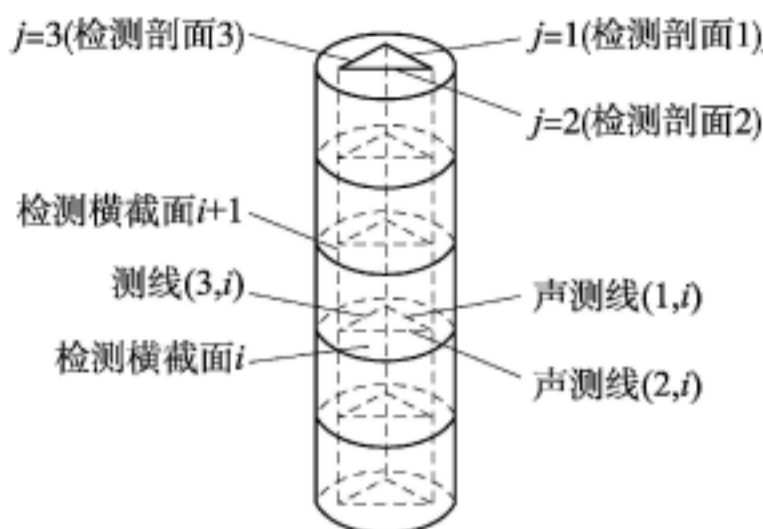


图 6-1 检测剖面、声测线、检测横截面编组和编号示意图

### 6.8.7 本条说明如下：

1 原则上，桩身混凝土满 28 天龄期后进行声波透射法检测是合理的。但是，为了加快工程建设进度、缩短工期，当采用声波透射法检测桩身缺陷和判定其完整性类别时，常常需要适当将检测时间提前，以便能在施工过程中尽早发现问题，及时补救，赢得宝贵时间。这种适当提前检测时间的做法基于以下两个原因：一是声波透射法是一种非破损检测方法，不会因检测导致桩身混凝土强度降低或破坏；二是在声波透射法检测桩身完整性时，没有涉及混凝土强度问题，对各种声参数的判别采用的是相对比较法，混凝土的早期强度和满龄期后的强度有一定的相关性，而混凝土内因各种原因导致的内部缺陷一般不会因时间的增长而明显改善。因此，原则上只要求混凝土硬化并达到一定强度即可进行检测。一般当采用低应变法或声波透射法检测桩身完整性时，受检桩混凝土强度至少达到设计强度的 70%。

2 率定法测定仪器系统延迟时间的方法是将发射、接收换能器平行悬于清水中，逐次改变点源距离并测量相应声时，记录若干点的声时数据并作线性回归的时距曲线：

$$t = t_0 + b \cdot l \quad (6-1)$$

式中  $b$ ——直线斜率 ( $\mu\text{s}/\text{mm}$ )；  
 $l$ ——换能器表面净距离 ( $\text{mm}$ )；  
 $t$ ——声时 ( $\mu\text{s}$ )；  
 $t_0$ ——仪器系统延迟时间 ( $\mu\text{s}$ )。

3 声测管及耦合水层声时修正值按下式计算：

$$t' = \frac{d_1 - d_2}{v_1} + \frac{d_2 - d'}{v_w} \quad (6-2)$$

式中  $d_1$ ——声测管外径 ( $\text{mm}$ )；  
 $d_2$ ——声测管内径 ( $\text{mm}$ )；  
 $d'$ ——换能器外径 ( $\text{mm}$ )；  
 $v_1$ ——声测管材料声速 ( $\text{km}/\text{s}$ )；  
 $v_w$ ——水的声速 ( $\text{km}/\text{s}$ )；  
 $t'$ ——声测管及耦合水层声时修正值 ( $\mu\text{s}$ )。

### 6.8.8 本条说明如下：



1 由于每一个声测管中的测点可能对应多个检测剖面,而声测线则是组成某一检测剖面的两声测管中测点之间的连线,它的声学特征反映的是其声场辐射区域的混凝土质量,有明确的对应关系,故规程采用“声测线”,而不是“测点”。径向换能器在径向无指向性,但在垂直面上有指向性,且换能器的接收响应随着发、收换能器中心连线与水平面夹角 $\theta$ 的增大而非线性递减。因此为了达到斜测的目的,同时测试系统又有足够的灵敏度,规定水平夹角不大于 $30^\circ$ 。

2 声测线间距将影响桩身缺陷纵向尺寸的检测精度,间距越小,检测精度越高,但需花费更多的时间。一般混凝土灌注桩的缺陷在空间有一定的分布范围。规定声测线间距不大于 $100\text{mm}$ ,满足工程检测精度的要求。当采用自动提升装置时,声测线间距还可以进一步减小。

换能器提升过程中电缆线始终处于张拉状态,换能器位置是准确的,而下降过程中换能器在水中受到一定的悬浮力,下沉不及时可能导致电缆线处于松弛状态,从而导致换能器位置不准确,因此规程规定从桩底开始同步提升换能器进行检测,保证记录的换能器位置的准确性。

自动记录声波发射与接收换能器位置时,提升过程中电缆线带动编码器计数卡线轮转动,编码器计数卡线轮转动值换算得到换能器位置。电缆线与编码器卡线轮之间滑动、卡线轮直径误差等因素均会导致编码器位置计数与实际传感器位置有一定误差,因此要求进行 $1\sim 3$ 次高差校正。此外,自动记录声波发射与接收换能器位置时,如果同步提升声波发射与接收换能器的提升速度过快,会导致换能器在声测管中剧烈摆动,甚至与声测管管壁发生碰撞,对接受的声波波形产生不可预测的影响。因此规定了换能器的同步提升速度,保证测试波形的稳定性。

3 在现场对可疑声测线要结合声时(声速)、波幅、主频、实测波形等指标进行综合判定。

4 同一根桩检测时,强调各检测剖面声波发射电压和仪器设置参数不变,目的是使各检测剖面的声学参数具有可比性,便于综合判定。

**6.8.9** 经平测或斜测普查后,找出各检测剖面的可疑声测线,再经加密平测(减小测线间距)、交叉斜测等方式既可以检验平测普查的结论是否正确,又可以依据加密测试结果判定桩身缺陷的边界,进而推断桩身缺陷的范围和空间分布特征。

**6.8.10** 当声测管平行时构成某一检测剖面的两声测管外壁在桩顶面的净距离 $l$ 等于该检测剖面所有声测线测距,当声测管弯曲时,各声测线测距将偏离 $l$ 值,导致声速值偏离混凝土声速正常取值,一般情况下声测管倾斜造成的各测线测距变化沿深度方向有一定规律,表现为各条声测线的声速值有规律地偏离混凝土正常取值,此时可以采用高阶曲线拟合等方法对各条测线测距作合理修正,然后重新计算各测线的声速。

如果不对斜管进行合理的修正,将严重影响声速的临界值的合理取值,因此本条规定声测管倾斜时要作测距修正。但是,对于各声测线声速值的偏离沿深度方向无变化规律的,不能随意修正。因堵管导致数据不全,只能对有效检测范围内的桩身进行评价,不能整桩评价。



**6.8.11** 在声测中,不同声测线的波幅差异很大,采用声压级(分贝)来表示波幅更方便。式(6.8.11-4)用于模拟式声波仪通过信号周期来推算主频率;数字式声波仪具有频谱分析功能,可以通过频谱分析获得信号主频。

**6.8.13** 本条解释如下:

1 同批次混凝土试件在正常情况下强度值的波动是服从正态分布规律的,这已被大量的实测数据证实。由于混凝土构件的声速与其强度存在较好的相关性,所以其声速值的波动也近似地服从正态分布规律。灌注桩作为一种混凝土构件,可以认为在正常情况下其各条声测线的声速测试值也近似服从正态分布规律。这是用概率法计算混凝土灌注桩各剖面声速临界值的前提。

2 如果某一剖面有  $n$  条声测线,相当于进行了  $n$  个试件的声速试验,在正常情况下,这  $n$  条声测线的声速值的波动可以认为是服从正态分布规律的。但是,由于桩身混凝土在成型过程中,环境条件的影响或人为过失的影响或测试系统的误差等都将会导致  $n$  个测试值中的某些值偏离正态分布规律,在计算某一剖面声速临界值时,要剔除偏离正态分布的声测线,通过对剩余的服从正态分布规律的声测线数据进行统计计算就可以得到该剖面桩身混凝土在正常波动水平下可能出现的最低声速,这个声速值就是判断该剖面各声测线声速是否异常的临界值。

3 本规程在计算剖面声速临界值时采用了“双边剔除法”。一方面,桩身混凝土硬化条件复杂、混凝土粗细骨料不均匀、桩身缺陷、声测管耦合状况的变化、测距的变异性(将桩顶面的测距设定为整个检测剖面的测距)、首波判读的误差等因素可能导致某些声测线的声速值向小值方向偏离正态分布。另一方面,混凝土离析造成的局部粗骨料集中、声测管的耦合状况的变化、测距的变异、首波判读的误差、以及部分声测线可能存在声波沿环向钢筋的绕射等因素也可能导致某些声测线声速测值向大值方向偏离正态分布,这也属于非正常情况,在声速临界值的计算时也要剔除,否则两边的数据不对称,加剧剩余数据偏离正态分布,影响正态分布特征参数  $v_m$  和  $s_x$  的推定。

双剔法是按照下列顺序逐一剔除:(1)异常小,(2)异常大,(3)异常小,……,每次统计计算后只剔一个,每次异常值的误判次数均为1,没有改变原规范的概率控制条件。

在实际计算时,先将某一剖面  $n$  条声测线的声速测试值从大到小排列为一数列,计算这  $n$  个测试值在正常情况下(符合正态分布规律下)可能出现的最小值  $v_{01(j)} = v_{m(j)} - \lambda \cdot S_{x(j)}$  和最大值  $v_{02(j)} = v_{m(j)} + \lambda \cdot s_{x(j)}$ ,依次将声速数列中大于  $v_{02(j)}$  或小于  $v_{01(j)}$  的数据逐一剔除(这些被剔除的数据偏离了正态分布规律),再对剩余数据构成的数列重新计算,直至式(6.8.13-7)和式(6.8.13-8)同时满足,此时认为剩余数据全部服从正态分布规律。 $v_{01(j)}$  就是判断声速异常的概率法统计值。

由于统计计算的样本数是10个以上,因此对于短桩,可以通过减小声测线间距获得足够的声测线数。

桩身混凝土均匀性采用离差系数  $C_v = s_{x(j)} / v_{m(j)}$  评价。

为比较“单边剔除法”和“双边剔除法”两种计算方法的差异,将21根工程桩共72个检测剖面的实测数据分别用两种方法计算得到各检测剖面的声速临界值,如图6-2所示。

1#~15#(对应剖面为1至48)桩身混凝土均匀、质量较稳定,两种计算方法得到的声速临界值差异不大(“双边法”略高);16#~21#(对应剖面为49~72)桩身存在较多缺陷,混凝土质量不稳定,两种计算方法得到的声速临界值差异较大,“单边法”得到的临界值甚至会出现明显不合理的低值,而“双边法”得到的声速临界值则比较合理。

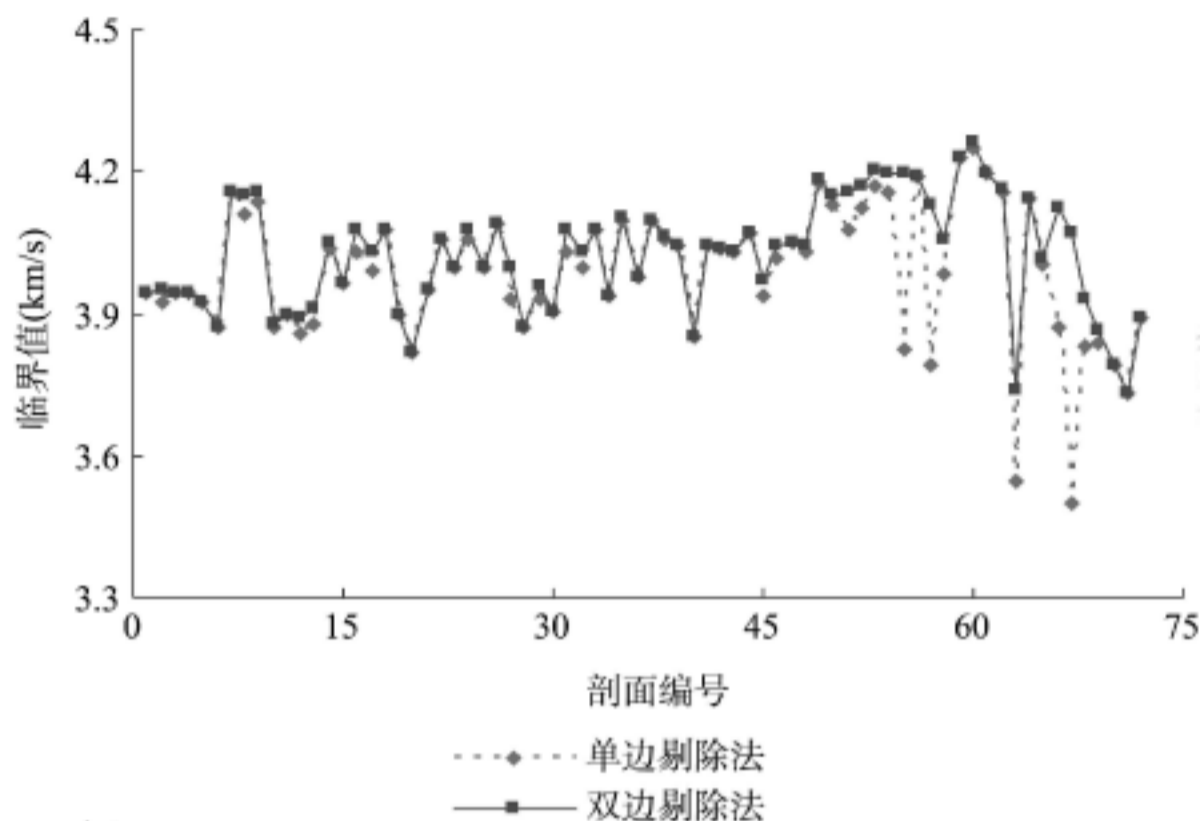


图 6-2 双边法与单边法的临界值

再分别将两种计算方法对同一根桩的各个剖面声速临界值的标准差进行统计分析,结果如图 6-3 所示。由该图可以看到,“双剔法”计算得到的每根桩各个检测剖面声速临界值的标准差普遍小于“单剔法”。在工程上,同一根桩的混凝土设计强度,配合比、地质条件、施工工艺相同,不同检测剖面(自下而上)不存在明显差异,各剖面声速临界值应该是相近的,其标准差趋于变小才合理。所以“双剔法”比“单剔法”更符合工程实际情况。

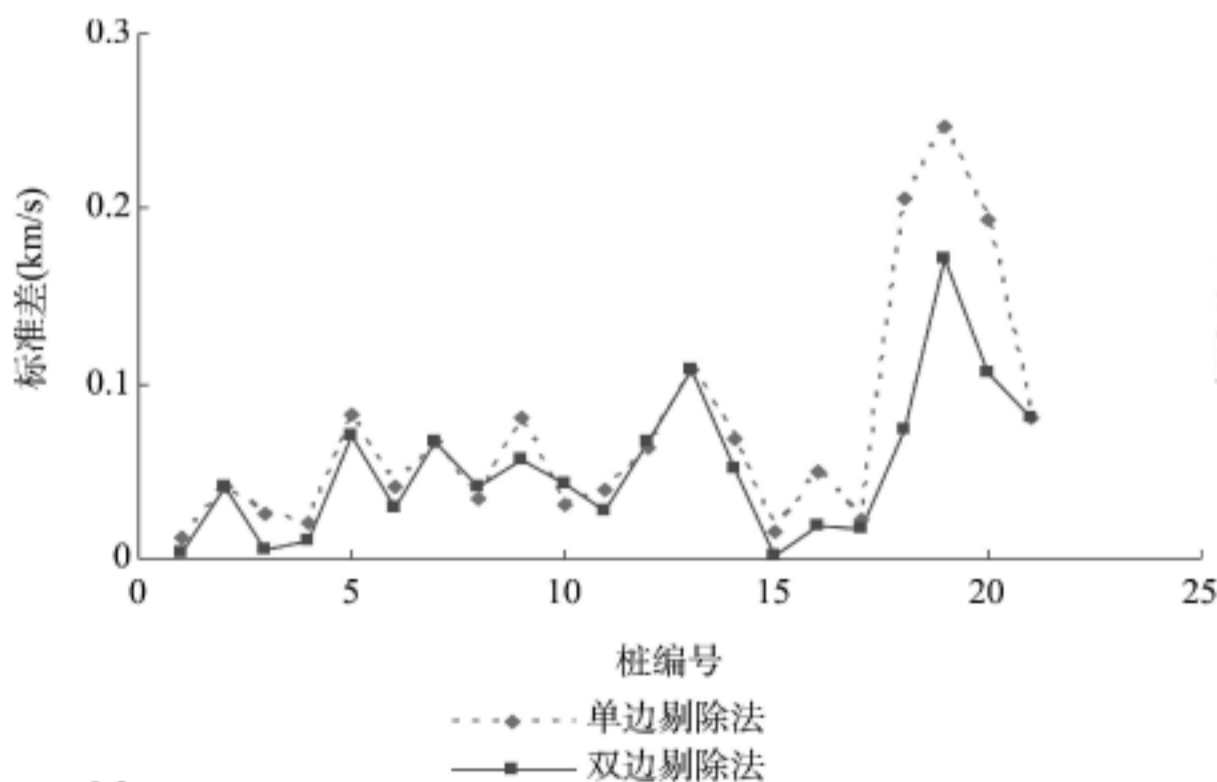


图 6-3 双边法与单边法的标准差

双剔法的结果更符合规程总则——安全适用。一方面对于混凝土质量较稳定的桩,双剔法临界值接近或略高于单剔法(在工程上偏于安全);另一方面对于混凝土质量不稳定的桩,尤其是桩身存在多个严重缺陷的桩,双剔法有效降低了因为声速标准差过大而导



致声速临界值过低(如小于 3500m/s),从而漏判桩身缺陷而留下工程隐患的可能性。

4 当桩身混凝土质量稳定,声速测试值离散小时,由于标准差  $s_{x(j)}$  较小,可能导致临界值  $v_{01(j)}$  过高从而误判;另一方面当桩身混凝土质量不稳定,声速测试值离散大时,由于  $s_{x(j)}$  过大,可能会导致临界值  $v_{01(j)}$  过小从而导致漏判。为尽量减小出现上述两种情况的几率,对变异系数  $C_{v(j)}$  作了限定。

通过大量工程桩检测剖面统计分析,发现将  $C_{v(j)}$  限定在 [0.015, 0.045] 区间内,声速临界值的取值落在合理范围内的几率在 90% 以上。

**6.8.14** 本条说明如下:

1 当桩身混凝土未达到龄期而提前检测时,要对  $v_L$ 、 $v_p$  的取值作适当调整。

2 概率法从本质上说是一种相对比较法,它考察的只是各条声测线声速与相应检测剖面内所有声测线声速平均值的偏离程度。当声测管倾斜或桩身存在多个缺陷时,同一检测剖面内各条声测线声速值离散很大,这些声速值实际上已严重偏离了正态分布规律,基于正态分布规律的概率法判据已失效,此时,不能将概率法临界值  $v_{0(j)}$  作为该检测剖面各声测线声速异常判断临界值  $v_c$ ,式(6.8.14-1)就是对概率法判据值作合理的限定。

3 同一桩型是指施工工艺相同、工程地质条件相近、混凝土的设计强度和配合比相同的桩。

4 声速的测试值受非缺陷因素影响小,测试值较稳定,不同剖面间的声速测试值具有可比性。取各检测剖面声速异常判断临界值的平均值作为该桩各剖面内所有声测线声速异常判断临界值可以减小各剖面间因为用概率法计算的临界值差别过大造成的桩身完整性判别上的不合理性。另一方面,对同一根桩,桩身混凝土设计强度和配合比以及施工工艺都是一样的,应该采用同一个临界值标准来判定各剖面所有声测线对应的混凝土质量。

**6.8.16** 波幅临界值判据式为  $A_{pi(j)} < A_{m(j)} - 6$ ,即选择当信号首波幅值衰减量为对应检测剖面所有信号首波幅值衰减量平均值的一半时的波幅分贝数为临界值,在具体应用中要注意下面几点:

波幅判据没有采用如声速判据那样的各检测剖面取平均值的办法,而是采用单剖面判据,这是因为不同剖面间测距及声耦合状况差别较大,使波幅不具有可比性。

此外,波幅的衰减受桩身混凝土不均匀性、声波传播路径和点源距离的影响,所以要考虑声测管间距较大时波幅分散性而采取适当的调整。

因波幅的分贝数受仪器、传感器灵敏度及发射能量的影响,所以要在考虑这些影响的基础上再采用波幅临界值判据。

当波幅差异性较大时,与声速变化及主频变化情况相结合进行综合分析。

**6.8.17** 声波接收信号的主频漂移程度反映了声波在桩身混凝土中传播时的衰减程度,而这种衰减程度又能体现混凝土质量的优劣。接收信号的主频受诸如测试系统的状态、声耦合状况、测距等许多非缺陷因素的影响,测试值没有声速稳定,对缺陷的敏感性不及波幅。在实用时,作为声速、波幅等主要声参数判据之外的一个辅助判据。

在使用主频判据时,要保持声波换能器具有单峰的幅频特性和良好的耦合一致性,若

采用 FFT 方法计算主频值,还要保证足够的频域分辨率。

**6.8.18** 接收信号的能量与接收信号的幅值存在正相关性,可以将约定的某一足够长时间段内的声波信号时域曲线的绝对值对时间积分后得到的结果(或约定的某一足够长时段内的声波信号时域曲线的平均幅值)作为能量指标。接收信号的能量反映了声波在混凝土介质中各个声传播路径上能量总体衰减情况,是测区混凝土质量的全面、综合反映,也是波形畸变程度的量化指标。

**6.8.19** 在桩身缺陷的边缘,实测声时将发生突变,桩身存在缺陷的声测线对应声时~深度曲线上的突变点。经声时差加权后的 PSD 判据图更能突出桩身存在缺陷的声测线,并在一定程度上减小了声测管的平行度差或混凝土不均匀等非缺陷因素对数据分析判断的影响。在实际应用时可以先假定缺陷的性质(如夹层、空洞、蜂窝等)和尺寸,来计算临界状态的 PSD 值,作为 PSD 临界值判据,但需对缺陷区的声波波速作假定。

**6.8.20** 声波透射法与其他的桩身完整性检测方法相比,具有信息量更丰富、全面、细致的特点;可以依据对桩身缺陷处加密测试(斜测、交叉斜测、扇形扫测以及 CT 影像技术)来确定缺陷几何尺寸;可以将不同检测剖面在同一深度的桩身缺陷状况进行横向关联,来判定桩身缺陷的横向分布。

**6.8.21** 表 6.8.21 围绕桩身缺陷这个核心,综合考虑桩身缺陷的数量(对应异常声测线的数量)、缺陷的程度(对应异常声测线的声学特征)、空间分布范围(对应异常声测线连续分布的空间范围),对桩身完整性等级进行判定,体现了声波透射法的特点。缺陷空间分布范围大小的判定是一个相对的概念,是缺陷的几何尺寸与桩径、桩长等几何参数相比较的结果。桩身缺陷数量多或少的判断也与桩的几何尺寸有关。

**6.8.23** 实测波形的后续部分能反映声波在接、收换能器之间的混凝土介质中各种声传播路径上总能量衰减状况,其影响区域大于首波,因此检测剖面的实测波形波列图有助于测试人员对桩身缺陷程度及位置直观地判定。



## 7 现场监测

### 7.1 一般规定

**7.1.1** 监测仪器和设施的布置既能较全面地反映工程的运行状态,又能突出重点和少而精。仪器和设施布设后要设置醒目标志,并告知各参建单位其位置,明确监测的重要性、损坏惩罚措施。常规人工测量在恶劣天气下无法采集到准确数据,复杂工况施工干扰监测仪器和数据,采用自动化采集设施可以解决这个问题。

**7.1.2** 周边环境的变化往往影响到监测数据,因此,同时记录这些信息有利于数据分析。

**7.1.3** 有感地震、大洪水、爆破等特殊情况会对工程的安全不利,因此规程要求加强观测。

**7.1.4** 单一监测项目数据超标不一定能全面反映工程实际,可能出现误报的情况,综合分析后方可以确定地基是否真正处于危险状态。

### 7.2 表层沉降观测

**7.2.1** 为了能检查基准点的稳定性和保证观测精度,按《水运工程测量规范》(JTS 131)的要求,本规程也作了必要的限制规定。

**7.2.2** 通视条件好、有稳定水准点的工程适合选用水准仪,测点上面有覆盖物、通视条件差、没有稳定水准点的工程适合采用静力水准仪、液体压差式沉降仪和位移计。在精度符合工程要求的情况下,可以选择全站仪、GNSS 接收机测量表层沉降。

**7.2.4** 地基处理类工程的表层沉降观测多数情况下不是长期观测,因此对测点的要求稍做降低。

**7.2.8** 水运工程地基基础监测工程多数是隐蔽工程,信号电缆损坏后难以修复,因此,在布设时要提前做好保护措施。

**7.2.13 ~ 7.2.14** 在实际工程的沉降观测中,一般无法观测到地基的最终沉降量,因此,由实测沉降确定最终沉降量,只能采用推算的方式。

不少情况需要用实测沉降推算最终沉降:如软土地基加固工程,需要知道已消除了多少沉降,最终沉降是多少,固结度是否达到要求;对消除沉降精度要求高,沉降对控制工程量有较大影响工程。上述情况均要求进行沉降观测,由实测沉降推算最终沉降。

利用沉降曲线推算最终沉降量,要有完整的  $P \sim S \sim t$  曲线,即: $P \sim t$  曲线要完整,满足设计、施工要求的实测时间段,对沉降有影响的荷载没有漏项; $S \sim t$  曲线中没有漏测(某一时段沉降值因未测到而按沉降值为零考虑)的时间段;满载后具有一定数量的观测点。实测沉降曲线经剔除不合理测点并进行圆滑处理后方可进行最终沉降量推算。



具有完整  $P \sim S \sim t$  曲线的工程,可以将实测  $P \sim S \sim t$  曲线假定为某一曲线线型。目前采用的推算方法基本上都是经验公式,主要有“三点法”和“经验双曲线法”等。三点法实质上是在沉降曲线关系服从  $s_t = s_\infty \times (1 - e^{-\beta t})$  (此中隐含着应力-应变关系为线性关系即按照太沙基固结理论设定压缩系数为常量)条件下推导出来的,所以其应用有明显的局限性,采用该方法,三点中起点的位置和三点之间的时间间隔根据当地经验选取,随机选取时,不同计算起点、不同时间间距计算出的最终沉降量的值偏差较大,用三点法,需要具备一定经验。经验双曲线法是目前应用的另一种方法,经大量应用发现,该方法所选择的线型与实测沉降时程曲线相关系数达 95% 以上,该方法适用于满载(某一级荷载满载)后荷载不再变化的情况。

### 7.3 分层沉降观测

**7.3.1** 通视条件好、有稳定水准点、仪器易于保护的工程可以采用电磁式分层沉降仪,保护困难、无稳定水准点、通视不佳的工程可以采用液压式沉降仪或多点位移计。

**7.3.7** 测量测点顶高程是为了换算纵向各测点的高程。

### 7.4 孔隙水压力观测

**7.4.1** 封闭式孔隙水压力计包括电测式、流体压力式,敞口式孔隙水压力计包括各种开口测量管、水位计。

**7.4.1.1** 电测式孔隙水压力计包括振弦式、电阻式、差动变压式等。

**7.4.1.2** 流体压力式包括液压式、气压式等。

**7.4.3.3** 水下工程常在泥面或砂面布置一个测点,以便计算时剔除水位变化的影响。

**7.4.5.4** 如果没有隔水材料,会导致整个钻孔内的测头联通,测得的孔隙水压力不能反映实际土层的孔隙水压力。

**7.4.9** 有地下水位观测数据则可以计算各测点的超静孔隙水压力。

### 7.5 地下水位观测

**7.5.4** 真空预压区内的水位在业内仍有争议,一部分人认为区内没有稳定的水位面,土体处于饱水状态,另一部分人认为区内有水位面。如果在区内布置测点,实际测量过程会导致真空度下降,且测得的值也不稳定,因此,本条建议布置在区外。

### 7.6 表层水平位移观测

**7.6.13** GNSS 用于水平位移测量时精度较低,谨慎采用。

**7.6.15** 监测精度引自《水运工程测量规范》(JTS 131—2012)。

### 7.7 深层水平位移观测

**7.7.4.3** 根据工程经验,如果把固定式测斜仪直接埋入土体中,其测量的方向不易固定,导致数据分析困难,因此,本款规定需要把仪器放入测斜导管内。

7.7.4.5 钻孔与测斜导管之间的空隙会影响监测数据,需要回填填料,使之结合紧密。

## 7.8 应力应变观测

7.8.1 本规程已对土压力和孔隙水压力观测进行了规定,因此,本节所指的应力观测是指除土压力观测和孔隙水压力观测外的结构受力应力观测。

7.8.5 温度对传感器的影响非常大,故有此规定。

7.8.12 焊接时温度升高,极易导致传感器损坏,所以仪器部位要进行冷却。焊接过程若将传感器与测读仪器连接,可以实时观察传感器的状态,一旦损坏,及时更换。

## 7.9 倾斜观测

7.9.3.6 近年来,随着技术的进步,激光扫描仪和基于数码相机的数字近景摄影测量方法有了进一步的发展,并在建筑变形测量及相关领域得到应用,值得关注。由于这两种技术的特殊性,实际用于建筑变形测量时,要根据精度要求、现场作业条件和仪器性能等,进行专门的技术设计,必要时进行技术论证。

7.9.3.7 本款引用了现行行业标准《水运工程测量规范》(JTS 131—2012)第9.1.1条的规定。

## 7.10 土压力观测

7.10.4.2 常见的土压力传感器土中直接埋设或结构接触式埋设方法如图7-1所示。

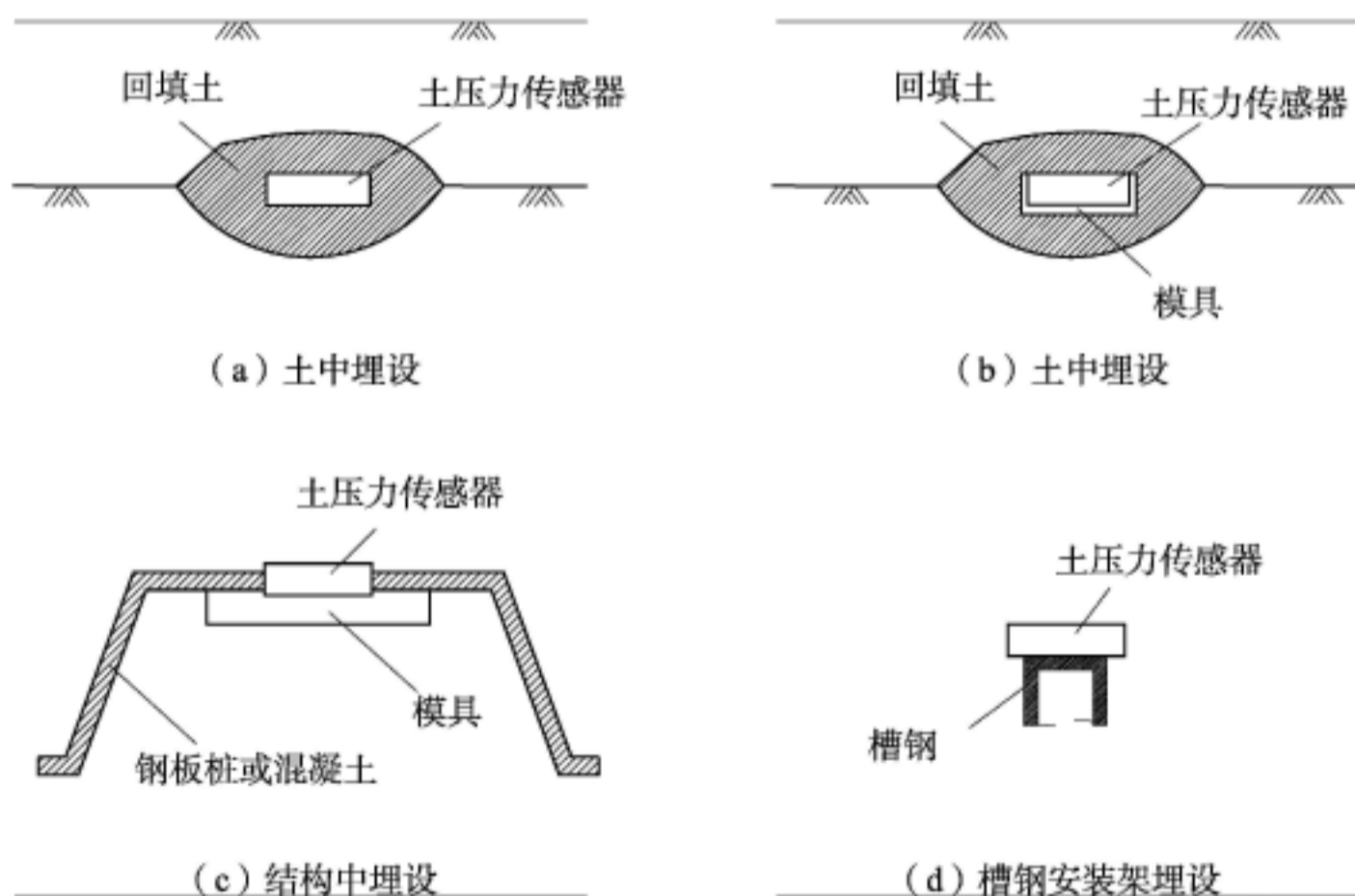


图7-1 几种常见的土压力传感器埋设形式

## 7.11 振动观测

7.11.2 主要引用了行业标准《水运工程水工建筑物原型观测技术规范》(JTS 235—2016)中的第8.2.5条的规定。



**7.11.3.3** 常用刚性接触粘结剂推荐使用生石膏粉,其凝固时间短,粘结性符合刚性接触,监测完成后易清理传感器;打设钢钎制作安装面,现场操作繁琐,建议采用填埋方式进行安装。

## 7.12 岩体原位应力测试

**7.12.1** 孔壁应变法测试采用孔壁应变计,即在钻孔孔壁粘贴电阻应变片,量测套钻解除后钻孔孔壁的岩石应变,按弹性理论建立的应变与应力之间的关系式,求出岩体内该点的空间应力参数。

孔底应变法测试采用孔底应变计,即在钻孔孔底平面粘贴电阻应变片,量测套钻解除后钻孔孔底的岩石平面应变,按弹性理论建立的应变与应力之间的关系式,求出岩体内该点的平面应力参数。

孔径变形法测试采用孔径变形计,即在钻孔内埋设孔径变形计,量测套钻解除后钻孔孔径的变形,经换算成孔径应变后,按弹性理论建立的应变和应力之间的关系式,求出岩体内该点的平面应力参数。

**7.12.2** 孔壁应变法,分为浅孔孔壁应变计测试和深孔孔壁应变计测试。浅孔孔壁应变计测试要求测试深度不大于 30m,主要为防止应变计引出电缆在钻杆内被绞断。30m 的测试深度一般能满足水运工程要求,故纳入本规程只对浅层孔壁应变计测试方法做出规定。

**7.12.2.3** 工程中常用的为浅孔孔壁应变计,但空心包体式孔壁应变计也已在工程中被广泛应用。由于岩石应变通过包体传递至电阻应变片,因此在测试前要对空心包体式孔壁应变计进行率定。

要求各类钻头规格与应变计配套是为了减少中心测试孔安装应变计的误差,以及套钻解除后的岩心满足弹性理论中厚壁圆筒的条件。

**7.12.2.4** 由于黏结技术的进步,对于有水钻孔可以采用适用于水下黏结的粘结剂。当采用一般黏结剂时,适用于在无水孔内进行测试,同时对孔壁进行干燥处理后再涂黏结剂。

**7.12.2.7** 最小套钻解除深度要超过孔底应力集中影响区,这一深度大致相当于测孔内粘贴应变计中应变丛部位至解除孔孔底的距离达到解除岩芯外径的 1/2 以后,一般定为应变计中应变丛位置至解除孔孔底深度,不小于解除岩芯 1.0 倍的外径。为保证成果的可靠性,本规程将解除深度定为 2.0 倍。

为保证测试成果的可靠性,一个测段需布置若干个测点进行测试,并保证有 2 个测点为有效测点,各测点尽量靠拢。

需测试工程岩体中的原岩应力状态时,要求测试深度超过岩体中的应力扰动影响区,同时测段避开断层或节理裂隙密集带。

关于套钻解除过程中分级读数方法,有分级停钻测读和连续钻进分级测读两种方案,分级读数目的是为了绘制解除曲线,两种方法均能满足。考虑到钻孔技术的进步,电阻应变仪已具备自动量测和记录功能,连续钻进可以避免再次钻进发生冲击载荷。故本规程



推荐匀压匀速连续钻进分级测读。

**7.12.2.9** 岩石弹性模量和泊松比也可以参考室内岩块试验成果。

**7.12.3.1** 测求岩体内某点的空间应力状态,本规程推荐前交会法,成果符合实际情况。当受条件限制时,也可以采用后交会法,但要说明。

**7.12.3.4** 清洁剂一般采用丙酮,清洗后采用风吹干或用红外线光源进行烘烤。

**7.12.3.5** 根据有关研究,在钻孔孔底平面中央三分之一直径范围内,应力分布较为均匀,孔底应变计内电阻片的位置尽量粘贴在该范围以内。

**7.12.3.6** 解除深度在超过解除岩芯直径的 0.5 以后,基本上开始不受孔应力集中的影响,本规程确定为岩芯直径的 0.8。此外,可以考虑岩芯围压率定器要求的岩芯长度,予以适当加长。

**7.12.4.5** 根据以往工程实测经验,应变钢环的预压缩量控制在 0.2mm~0.4mm 范围内时,一般可以满足套钻解除全过程中孔径的变化。若超出该范围,取出变形计,更换适当长度的触头重新安装。

**7.12.4.8** 根据式(7.12.4)计算的结果是中心测试孔的孔径相对变形,为与其他测试统一,以及应力测试的习惯用语和计算方便,本规程仍称为应变。

## 7.13 激振法测试

**7.13.1** 激振法适用于原位测试天然地基、人工地基(包括换填法、预压法、强夯法、振冲法、挤密砂桩法、深层搅拌法等人工加固地基)及桩基的动力特性参数。

天然地基、人工地基与桩基的测试方法、使用的设备和仪器、现场工作、数据处理方法等相同,仅是测试基础的尺寸不同。块体基础适用于除桩基础以外的天然地基和人工地基的测试。本方法中提到的测试基础即包括块体基础和桩基础(含桩台)。

**7.13.1.1** 测试方法不同,由测试资料计算的地基动力参数也不完全一致,因此测试方法的选择,要与设计基础的振动类型相符合。这样所得到的地基动力特性参数,才能更符合设计基础的实际情况。

**7.13.1.2** 进行明置基础的测试可以获得基础下地基的动力参数;进行埋设基础的测试可以获得埋设后对动力参数提高的效果。有了这两者的动力参数,就可以进行机器基础的设计,因此测试基础要分别做明置和埋设两种情况的振动测试。

**7.13.1.3** 基础四周回填土是否夯实,直接影响埋置作用对动力参数提高的效果,因此在进行埋设基础的振动测试时,四周的回填土一定要分层夯实。

**7.13.2.1** 机械式激振设备的扰力一般能满足要求。由于块体基础水平回转耦合振动的固有频率在软弱地基上的竖向振动固有频率较低,因此要求激振设备的最低频率,最好在 3Hz 就可以测得振动波形,这样测出的完整资料才能较好地满足数据处理的需要;而桩基础的竖向振动固有频率高,要求激振设备的最高工作频率,最好能达到 60Hz 以上,以便能测出桩基础的共振峰。电磁式激振设备的工作频率范围很宽,只是扰力太小时对桩基础的竖向振动激不起来,因此规定扰力不小于 2000N。

**7.13.3.1** 由于地基的动力参数与土的性质有关,如果测试基础下的地基土与设计的



地基土不一致,测试资料计算的动力参数就不能用于设计基础,因此试验基础的位置要选择在建附近相同的土层上。试验基础的基底高程,最好与拟建基础基底高程一致。但考虑到有的动力机器基础高度大,基底埋置深,如将小的试验基础也置于同一高程,现场施工与测试工作均有困难,此时,视基底高程的深浅以及基底土的性质确定。关键是要掌握好试验基础与拟建基础底面的土层结构相同。

**7.13.3.2** 基坑坑壁至试验基础侧面的距离要大于0.5m,其目的是为了在做基础的明置试验时,基础侧面四周的土压力不会影响到基础底面土的动力参数。但若距离太大,作埋置测试时,回填土的工作量大。根据现场具体情况使距离略大于0.5m即可。坑底保持原状土,否则将直接影响测试结果。

**7.13.3.4** 本款规定了块体基础的尺寸和数量。块体数量最少2个,超过2个时可以改变超过部分的基础面积保持高度不变,获得底面积变化对动力参数的影响,或改变超过部分的基础高度而保持面积不变,获得底压力变化对动力参数的影响。对竖向加固的复合地基可以按照双桩或多桩承担的地基处理面积制作块体基础,其底面积不小于 $3.0\text{m}^2$ 。基础尺寸要保证扰力中心和基础重心在一垂线上,高度要保证地脚栓的锚固深度,又便于测试基础埋深对地基动力参数的影响。机器基础的底面一般为矩形,为了使试验基础与设计基础的底面形状相类似,本款规定了采用矩形基础,且其长、宽、高均具有一定比例。

**7.13.3.5** 桩基的刚度,不仅与桩的长度、截面大小和地基土的种类有关,还与桩的间距、桩的数量等有关。试验基础的桩数不能太多,根据以往试验的经验,1根桩(带桩台)的测试效果不理想,2根桩、4根桩(带桩台)的测试效果比较好,但4根桩的测试费用较大,因此本款规定为2根桩,如现场有条件做不同桩数的对比时,也可以增加4根桩和6根桩的测试。由于桩基的固有频率比较高,桩台的高度应该比天然地基的基础高度大,故规定为1.6m。桩台边缘至桩轴的距离等于桩间距的 $1/2$ ;桩台的长宽比为 $2:1$ ,规定的目的是为了使2根桩的测试资料计算的动力参数,在折算为单桩时,可以将桩台划分为1根桩的单元体进行分析。

**7.13.3.7** 坑底面为水平面,测试基础浇灌后才能保持器重心、底面形心、竖向激振力位于同一垂线上。

**7.13.3.8** 基础顶面如果做得特别粗糙,高低不平,在安装激振器时,基底板与基础顶面接触不好,传感器也放不平稳,直接影响测试效果。因此,基础顶面的混凝土要随捣随平,不能事后用水泥砂浆抹平。

**7.13.3.9** 在现场做准备工作时,一定要注意基础上预埋螺栓或预留螺栓孔的位置。预埋螺栓的位置要严格按试验图纸上的要求,不能偏离,只要有一个螺栓偏离,激振器的底板就安装不进去。预埋螺栓可以采用定位模具以保证位置准确。为了灌浆方便,预留螺栓孔的面积一般不小于 $0.1\text{m} \times 0.1\text{m}$ 。螺栓的长度不小于0.4m,主要是为了保证在受动力时有足够的锚固力,不被拉出,具体加工时螺栓下端常制成弯钩或焊一块铁板,以增强锚固力。在试验工作结束以前,螺栓的螺丝扣一定要保护好,以免碰坏。

**7.13.4.1** 在振动测试过程中,地脚螺栓很容易被震松,一旦被震松后,测的数据就不准。为避免地脚螺栓在测振过程中被震松,在测试前,在地脚螺栓上放上弹簧垫圈,然后



再用两个螺母将其拧紧,每测完一次,都要检查一下螺母是否被震松,如在测试过程中有松动,将机器停下拧紧后重新测定,松动时测的资料作废。

**7.13.4.6** 在共振区以内(即  $0.75f_m \leq f \leq 1.25f_m$ ,  $f_m$  为共振频率),频率尽可能测密一些,最好是  $0.5\text{Hz}$  左右,这样便于找到峰点,减少误差。共振时的振幅不大于  $150\mu\text{V}$ ,一是因为振幅大了,峰点更难测得;二是振幅太大,影响地基土的动力参数。周期性的机器基础,当  $f \geq 10\text{Hz}$  时,其振幅都不会大于  $150\mu\text{V}$ 。

**7.13.5.1** 竖向自由振动测试时,为减少高频波的影响,避免基础顶面被冲坏,可以在基础顶面中心放一块稍厚的橡胶垫。有时会出现波形不好的情况,测试时要注意检查波形是否正常。

**7.13.5.2** 基础水平振动测试多采用木锤敲击,敲击点在基础侧面轴线顶端,比较易于产生回转振动。可以沿长轴线(与强迫振动时水平激振力的方向一致)敲击,也可以沿短轴线敲击。提供设计所用参数时,要与设计基础水平扰力的方向一致。

## 7.14 水底地层剖面探测

**7.14.1** 水底地层剖面仪根据其工作水深、探测记录深度、记录分辨率、工作频率等技术指标,分为水底浅地层剖面探测、水底中地层剖面探测、水底深地层剖面探测;其中水底浅地层剖面探测、水底中地层剖面探测在港口、航道等水运工程水域勘察中,适用于第四纪松散覆盖层,作为水运工程水域勘察的辅助手段。这种勘探方法虽然快速、方便,但有其局限性,不能直接获得土质指标,分层需与钻孔资料相对比,分层界限的精度相对较低。一般在选址规划或可行性研究阶段的勘察工作中采用这种勘探方法;当有足够的相关资料时,也可以在初步设计阶段、施工图设计阶段或施工期等勘察工作中配合使用。水底地层剖面探测通常同时进行侧扫声呐探测,以了解水下地貌、小尺度障碍物等情况。

**7.14.2** 在缺少工作经验的地区进行水底地层剖面探测,布置检查探测线和参比勘探孔是非常必要的,因为这是判断探测工作质量和探测剖面进行地质分层的重要依据。一般探测线两端的距离较大,至少在探测的两端与中间要有检查探测线和参比勘探孔。

**7.14.3 ~ 7.14.4** 参照现行国家标准《海上平台厂址工程地质勘察规范》(GB 17503)的有关规定,对水底浅地层剖面探测、水底中地层剖面探测现场作业的技术关键点和探测成果资料整理工作,进一步做了具体的规定,以保证探测工作的质量与安全。



## 8 地基处理典型试验检测

### 8.1 一般规定

**8.1.1** 地基处理是经验性很强的工作,相同的处理工艺、相同的设备,在不同成因的场地上处理效果也不尽相同,一个地区成功的经验在另一个地区使用,也需要根据场地特点对施工工艺进行调整,才能取得满意的效果。因此试验前需要收集试验区的水文、地质、周边环境资料等,以检验设计参数的合理性。

**8.1.4** 典型试验时的施工参数、施工设备与检测结果是确定大面积施工参数的重要依据。

### 8.2 堆载预压法

**8.2.3** 场地高程测量是获得地基沉降的一个重要手段,尤其是打设塑料排水板期间的沉降,一般都是靠测量打设塑料排水板前和堆载前场地高程来获得的。

**8.2.4** 堆载预压时靠近加固区的土体会产生向加固区外侧的位移,对周围的建筑物和地下管线有一定的影响,需要加密观测。

**8.2.7** 由于打设塑料排水板施工会对地基土产生一定的扰动,所以加固前的地基土检验需在打设塑料排水板前进行,这样可以真实地反应加固前地基土的实际情况。

### 8.3 真空预压法

**8.3.1** 条文规定每个试验小区的面积不宜小于  $3000\text{m}^2$ ,主要是考虑到边界条件对真空预压加固效果的影响,只有试验区面积足够大时(非长条形),试验区的加固效果才能真正代表大面积施工时的加固效果。

**8.3.3** 场地高程测量是获得地基沉降的一个重要手段,尤其是打设塑料排水板期间的沉降,一般都是靠测量打设塑料排水板前和铺设密封膜后场地高程来获得的。

**8.3.4** 真空预压区周边  $15\text{m}$  范围内地基土的水平位移比较明显, $20\text{m}$  以外地基土受真空预压施工的影响较小,因此每组边桩布置不少于 5 个,且每  $2\sim 3\text{m}$  布置 1 个。

**8.3.6** 目前对黏土密封墙还没有很好的控制标准,一般都是通过密封墙体的渗透系数和黏粒含量来进行控制。

**8.3.8** 由于打设塑料排水板施工会对地基土产生一定的扰动,所以加固前的地基土检验需在打设塑料排水板前进行,这样可以真实地反应加固前地基土的实际情况。

### 8.4 强夯法和强夯置换法

**8.4.1** 条文规定每个试验小区的面积不宜小于  $2500\text{m}^2$ ,主要是考虑到边界条件对加固

效果的影响,只有各监测和检验项目布置在夯点所围区域内部时,所得到的试验区加固效果才能真正代表大面积施工时的加固效果。

**8.4.3** 孔隙水压力观测结果是确定间隔时间的重要依据,而强夯期间孔隙水压力变化的峰值不易捕捉,因此规定强夯期间孔隙水压力要连续观测。

**8.4.5** 检验项目中的选检项目主要是根据现场土质情况进行选择。

**8.4.7** 强夯施工期间对地基土有一定的扰动,其强度恢复需要一定的时间,且不同土质的恢复期也不一样,所以加固后的检验要在施工结束一定时间后进行,以便真实地反映地基土的加固效果。

## 8.5 深层水泥搅拌法

**8.5.2** 当试验区附近有构筑物或土坡时,需要对深层水平位移和表层水平位移进行监测。

**8.5.3** 施工期间对试验区附近构筑物或土坡的不良影响最大,施工结束后随着搅拌桩龄期的增加,其强度逐渐增长,对构筑物或土坡的不良影响越来越小,所以深层水平位移在施工结束一周后可以停止观测。

**8.5.5** 检验项目中的选检项目主要是根据现场土质情况进行选择。载荷试验是了解地基承载力最直观的方式,规程规定必检,但对于水下水泥搅拌桩,载荷试验的难度很大且费用高,可以根据工程条件和重要程度决定是否需要进行载荷试验。

**8.5.7** 搅拌桩早期强度增长较快,轻型动探检验在成桩1~2d内还可以进行,超过3d后搅拌桩的强度较高,将无法进行。搅拌桩成桩28d后,搅拌桩的承载力主要取决于桩周的侧摩阻力和桩端阻力,所以载荷试验要求在成桩28d后进行。

## 8.6 砂桩法

**8.6.2** 当试验区附近有构筑物或土坡时,需要对地表沉降、地下水位、深层水平位移和表层水平位移进行监测。

**8.6.3** 施工期间对试验区附近构筑物或土坡的不良影响最大,施工结束后随着时间的推移,被加固土体的强度逐渐增长,对构筑物或土坡的不良影响越来越小,所以深层水平位移和地下水位在施工结束一周后可以停止观测。

**8.6.5** 载荷试验是了解地基承载力最直观的方式,规程规定必检,但对于水下砂桩,载荷试验的难度很大且费用高,可以根据工程条件和重要程度决定是否需要进行载荷试验。另外,结合港珠澳大桥的建设,水下砂桩应用逐渐成熟,根据国家科技支撑计划课题二“外海厚软基桥隧转换人工岛设计与施工关键技术”(2011BAG07B02)相关研究成果编写而成的《水下挤密砂桩施工质量检测标准》(现正在征求意见阶段)已经列为交通运输部行业标准,可以供技术人员参考。

**8.6.7** 砂桩施工期间对地基土有一定的扰动,其强度恢复和固结排水需要一定的时间,且不同土质的恢复期也不一样,所以加固后的检验要在施工结束一定时间后进行,以便真实地反映地基土的加固效果。



**8.6.8** 砂桩对桩间土都有一定的固结排水加固效果,从排水固结理论来看,相邻几根砂桩所围区域的形心位置由于排水距离最长,排水固结效果略差。

## 8.7 降水强夯法

**8.7.1** 条文规定每个试验小区的面积不小于  $2500\text{m}^2$ ,主要是考虑到边界条件对加固效果的影响。只有试验区面积足够大时,试验区的加固效果才能真正代表大面积施工时的加固效果。

**8.7.3** 孔隙水压力观测结果是确定强夯间隔时间的重要依据,而强夯期间孔隙水压力变化的峰值不易捕捉,因此规定强夯期间孔隙水压力要连续观测。

**8.7.4** 检验项目中的选检项目主要是根据现场土质情况进行选择。

**8.7.6** 强夯施工期间对地基土有一定的扰动,其强度恢复需要一定的时间,且不同土质的恢复期也不一样,所以加固后的检验要在施工结束一定时间后进行,以便真实地反映地基土的加固效果。对于加固效果检验的时间,碎石土和砂土地基一般取施工结束后  $7\text{d} \sim 14\text{d}$ ;粉土和黏性土地基一般取施工结束后  $14\text{d} \sim 28\text{d}$ 。

## 8.8 高压喷射注浆法

**8.8.1** 高压喷射注浆法(jet grouting)是用高压水泥浆通过钻杆由水平方向的喷嘴喷出,形成喷射流,以此切割土体与土拌和形成水泥石加固体的地基处理方法。

**8.8.2** 当试验区附近有构筑物或土坡时,需要对深层水平位移和表层水平位移进行监测。

**8.8.3** 施工期间对试验区附近构筑物或土坡的不良影响最大,施工结束后随着高压喷射注浆桩龄期的增加,其强度逐渐增长,对构筑物或土坡的不良影响越来越小,所以深层水平位移在施工结束一周后可以停止观测。

**8.8.4** 在严格控制施工参数的基础上,根据具体情况选定加固效果检验方法。开挖检查法虽简单易行,通常在浅层进行,但难以对整个固结体的质量做全面检查。钻孔取芯是检验单孔固结体质量的常用方法,选用时需以不破坏固结体和有代表性为前提,可以在  $28\text{d}$  后取芯或在未凝以前软取芯(软弱黏性土地基)。标准贯入和静力触探在有经验的情况下也可以应用。载荷试验是地基处理后检验地基承载力的良好方法。抽水或压水试验通常在工程有防渗漏要求时进行,采用地基沉降观测及基坑开挖过程测试和观察是全面检查地基处理质量的不可缺少的重要方法。

**8.8.6** 高压喷射注浆法处理地基的强度离散性大,在软弱黏性土中,强度增长速度较慢。规程规定检验时间在喷射注浆后  $28\text{d}$  进行,以防固结体强度不高时,因检验而受到破坏,影响检验的可靠性。

## 8.9 爆炸法

**8.9.1** 爆炸法包括水下爆炸夯实法和爆炸排淤填石法。水下爆炸夯实法是指在水下块石、砾石地基或基础表面布置裸露药包或在表面上方布置悬浮药包,利用爆炸振动使地基



和基础密实的方法。爆炸排淤填石法是指在抛石体外缘一定距离和深度的淤泥质地基中埋放群炸药包,起爆瞬间在淤泥中形成空腔,抛石体随即坍塌充填空腔,经多次爆炸推进,最终达到置换淤泥的方法。采用爆炸法处理地基长度大于300m时,建议设试验段,获取合适的抛填、爆炸施工参数后再全面铺开施工,试验段长度可以取50m~200m。

**8.9.3** 施工结束后对地表沉降、水平位移和孔隙水压力等进行观测,其成果可以判定堤坝稳定性情况,反映堤基处理质量。

**8.9.5** 物探试验采用探地雷达法进行。地质雷达是根据电磁波在介质中传播的速度和传播时间,计算得到介质的厚度,介质不同,传播速度也不同,即可区别堆石体和淤泥,是检测堆石体淤泥面下形状的一种快速无损检测方法。天线中心频率不同,其探测深度及分辨率也不同,根据实际需要选择不同频率天线。该方法具有快速、高效、成本低、无破坏等优点,但精确程度较差。根据钻探成果修正物探法的有关计算参数后,可以提高检测精确度。