

中华人民共和国国家标准

土工试验方法标准

**GB/T 50123—1999**

条文说明

# 目 次

|                     |       |
|---------------------|-------|
| 1 总 则 .....         | ( 6 ) |
| 3 试样制备和饱和 .....     | ( 8 ) |
| 3.1 试样制备 .....      | ( 8 ) |
| 3.2 试样饱和 .....      | ( 9 ) |
| 4 含水率试验 .....       | (10)  |
| 5 密度试验 .....        | (12)  |
| 5.1 环刀法 .....       | (12)  |
| 5.2 蜡封法 .....       | (12)  |
| 5.3 灌水法 .....       | (12)  |
| 5.4 灌砂法 .....       | (13)  |
| 6 土粒比重试验 .....      | (14)  |
| 6.1 一般规定 .....      | (14)  |
| 6.2 比重瓶法 .....      | (14)  |
| 6.3 浮称法 .....       | (15)  |
| 6.4 虹吸筒法 .....      | (15)  |
| 7 颗粒分析试验 .....      | (16)  |
| 7.1 筛析法 .....       | (16)  |
| 7.2 密度计法 .....      | (16)  |
| 7.3 移液管法 .....      | (19)  |
| 8 界限含水率试验 .....     | (20)  |
| 8.1 液、塑限联合测定法 ..... | (20)  |
| 8.2 碟式仪液限试验 .....   | (23)  |
| 8.3 滚搓法塑限试验 .....   | (24)  |
| 8.4 收缩皿法缩限试验 .....  | (24)  |

|      |                    |      |
|------|--------------------|------|
| 9    | 砂的相对密度试验 .....     | (25) |
| 9.1  | 一般规定 .....         | (25) |
| 9.2  | 砂的最小干密度试验 .....    | (25) |
| 9.3  | 砂的最大干密度试验 .....    | (26) |
| 10   | 击实试验 .....         | (31) |
| 11   | 承载比试验 .....        | (33) |
| 12   | 回弹模量试验 .....       | (35) |
| 12.1 | 杠杆压力仪法 .....       | (35) |
| 12.2 | 强度仪法 .....         | (35) |
| 13   | 渗透试验 .....         | (36) |
| 13.1 | 一般规定 .....         | (36) |
| 13.2 | 常水头渗透试验 .....      | (37) |
| 13.3 | 变水头渗透试验 .....      | (37) |
| 14   | 固结试验 .....         | (38) |
| 14.1 | 标准固结试验 .....       | (38) |
| 14.2 | 应变控制连续加荷固结试验 ..... | (40) |
| 15   | 黄土湿陷试验 .....       | (42) |
| 15.1 | 一般规定 .....         | (42) |
| 15.2 | 湿陷系数试验 .....       | (43) |
| 15.3 | 自重湿陷系数试验 .....     | (43) |
| 15.4 | 溶滤变形系数试验 .....     | (43) |
| 15.5 | 湿陷起始压力试验 .....     | (44) |
| 16   | 三轴压缩试验 .....       | (45) |
| 16.1 | 一般规定 .....         | (45) |
| 16.2 | 仪器设备 .....         | (45) |
| 16.3 | 试样制备和饱和 .....      | (46) |
| 16.4 | 不固结不排水剪试验 .....    | (47) |
| 16.5 | 固结不排水剪试验 .....     | (47) |
| 16.6 | 固结排水剪试验 .....      | (49) |

|      |                  |      |
|------|------------------|------|
| 16.7 | 一个试样多级加荷试验 ..... | (49) |
| 17   | 无侧限抗压强度试验 .....  | (51) |
| 18   | 直接剪切试验 .....     | (52) |
| 18.1 | 慢剪试验 .....       | (52) |
| 18.2 | 固结快剪试验 .....     | (52) |
| 18.3 | 快剪试验 .....       | (53) |
| 18.4 | 砂类土的直剪试验 .....   | (53) |
| 19   | 反复直剪强度试验 .....   | (54) |
| 20   | 自由膨胀率试验 .....    | (56) |
| 21   | 膨胀率试验 .....      | (57) |
| 21.1 | 有荷载膨胀率试验 .....   | (57) |
| 21.2 | 无荷载膨胀率试验 .....   | (57) |
| 22   | 膨胀力试验 .....      | (59) |
| 23   | 收缩试验 .....       | (60) |
| 24   | 冻土密度试验 .....     | (61) |
| 24.1 | 一般规定 .....       | (61) |
| 24.2 | 浮称法 .....        | (61) |
| 24.3 | 联合测定法 .....      | (62) |
| 25   | 冻结温度试验 .....     | (63) |
| 26   | 未冻含水率试验 .....    | (65) |
| 27   | 冻土导热系数试验 .....   | (66) |
| 28   | 冻胀量试验 .....      | (67) |
| 29   | 冻土融化压缩试验 .....   | (69) |
| 29.1 | 一般规定 .....       | (69) |
| 29.2 | 室内冻土融化压缩试验 ..... | (69) |
| 29.3 | 现场冻土融化压缩试验 ..... | (70) |
| 30   | 酸碱度试验 .....      | (71) |
| 31   | 易溶盐试验 .....      | (72) |
| 31.1 | 浸出液制取 .....      | (72) |

|       |                          |      |
|-------|--------------------------|------|
| 31.2  | 易溶盐总量测定 .....            | (72) |
| 31.3  | 碳酸根和重碳酸根的测定 .....        | (73) |
| 31.4  | 氯根的测定 .....              | (73) |
| 31.5  | 硫酸根的测定——EDTA 络合容量法 ..... | (74) |
| 31.6  | 硫酸根的测定——比浊法 .....        | (74) |
| 31.7  | 钙离子的测定 .....             | (75) |
| 31.8  | 镁离子的测定 .....             | (75) |
| 31.9  | 钙离子和镁离子的原子吸收分光光度测定 ..... | (76) |
| 31.10 | 钠离子和钾离子的测定 .....         | (76) |
| 32    | 中溶盐(石膏)试验 .....          | (77) |
| 33    | 难溶盐(碳酸钙)试验 .....         | (78) |
| 34    | 有机质试验 .....              | (79) |
| 35    | 土的离心含水当量试验 .....         | (80) |

# 1 总 则

**1.0.1** 《土工试验方法标准》GBJ123—88(以下简称“原标准”)自1989年实施以来,已有7年多时间,在这期间,岩土工程有一定的发展,要求提供更多、更可靠的计算参数和判定指标,同时,测试技术也有进步,因此,有必要对原标准进行修改,使各系统的土工试验有一个能满足岩土工程发展需要的试验准则,使所有的试验及试验结果具有一致性和可比性。

**1.0.2** 水利、公路、铁路、冶金等系统均有相应的土工试验规程,基本内容与本标准相同,但有些试验方法使用条件不同,为此在一些具体的参数或规定上有特殊要求时,允许以相应的专业标准为依据。

**1.0.3** 现行国家标准《土的分类标准》GBJ 145 属专门分类标准,内容包括对土类进行鉴别,确定其名称和代号,并给以必要的描述。本标准中将土分成粗粒土和细粒土两大类。土的名称和具体分类按现行国家标准《土的分类标准》GBJ 145 确定。土的工程分类试验是土工试验的内容之一,故分类试验应遵照本标准有关试验项目中规定的方法和要求进行。

**1.0.4** 土工试验资料的分析整理,对提供准确可靠的土性指标是十分重要的。内容涉及成果整理、土性指标的选择,并计算相应的标准差、变异系数或绝对误差与精度指标等。根据误差分析,对不合理的数据进行研究、分析原因,或有条件时,进行一定的补充试验,以便决定对可疑数据的取舍或改正。为此,列入附录 A。

**1.0.5** 土工试验所用的仪器应符合现行国家标准《土工仪器的基本参数及通用技术条件》GB/T15406 规定。根据国家计量法的要求,土工试验所用的仪器、设备应定期检定或校验。对通用仪器设

备,应按有关检定规程进行,对专用仪器设备可参照国家现行标准《土工试验专用仪器校验方法》SL110~118 进行校验。

**1.0.6** 执行本标准过程中,有些要求应符合现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GBJ7、《湿陷性黄土地区建筑规范》GBJ25、《膨胀土地区建筑技术规范》GBJ112、《土的分类标准》GBJ 145 和《岩土工程基本术语标准》GB/T 50275 中的规定。

### 3 试样制备和饱和

#### 3.1 试样制备

**3.1.1** 本标准所规定的试验方法,仅适用于颗粒粒径小于 60mm 的原状土和扰动土,对粒径等于、大于 60mm 的土应按有关粗粒料的试验方法进行。

**3.1.2** 原标准中第 2.0.2 至 2.0.4 条规定的试验所需土样的数量以及取土要求等列入附录 B“土样的要求与管理”。

同一组试样间的均匀性主要表现在密度和含水率的均匀性方面,规定密度和含水率的允许差值,使试验结果的离散性减小,避免力学性指标之间相互矛盾的现象。

**3.1.4** 原状土试样制备过程中,应先对土样进行描述,了解土样的均匀程度、含夹杂质等情况后,才能保证物理性试验的试样和力学性试验所选用的试样一致,避免产生试验结果相互矛盾的现象,并作为统计分层的依据。

用环刀切取试样时,规定环刀必须垂直下压,因环刀不垂直切取的试样层次倾斜,与天然结构不符;其次,试样与环刀内壁之间容易产生间隙,切取试样时要防止扰动,否则均会影响测试结果。

**3.1.5** 扰动土试样备样过程中对含有机质的土样规定采用天然含水率状态下的代表性土样,供颗粒分析、界限含水率试验,因为这些土在 105~110°C 温度下烘干后,胶体颗粒和粘粒会胶结在一起,试验中影响分散,使测试结果有差异。

**3.1.6** 扰动土试样制备时所需的加水量要求均匀喷洒在土样上,润湿一昼夜,目的是使制备样含水率均匀,达到密度的差异小。击样法制备试样时,若分层击样,每层试样的密度也要均匀。



## **3.2 试样饱和**

**3.2.2 毛细管饱和法:**原标准中选用叠式或框式饱和器,现修改成用框式饱和器,因为毛细管饱和,水面不宜将试样淹没,而叠式饱和器达不到该要求,否则上层试样浸不到水。

**3.2.3 抽气饱和法:**原标准中没有说明用何种饱和器,仅列出真空饱和装置,本次修改时,条文中明确规定采用叠式或框式饱和器。

## 4 含水率试验

**4.0.1** 原标准中为含水量试验,虽然名称通用,但与定义不符,根据现行国家标准《岩土工程基本术语标准》GB/T 50279 的规定改成含水率试验。

土的含水率定义为试样在 105~110°C 温度下烘至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。

**4.0.3** 含水率试验方法有多种,但能确保质量,操作简便又符合含水率定义的试验方法仍以烘干法为主,故本标准规定以烘干法为标准方法。烘干温度采用 105~110°C,这是因为取决于土的水理性质,以及目前国际上一些主要试验标准,例如美国 ASTM、英国 BS、日本 JIS、德国 DIN,烘干温度在 100~115°C 之间,且多数采用 105~110°C 为标准,故本标准用 105~110°C。对含有机质超过干土质量 5% 的土,规定烘干温度为 65~70°C,因为含有机质土在 105~110°C 温度下,经长时间烘干后,有机质特别是腐植酸会在烘干过程中逐渐分解而不断损失,使测得的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。

试样烘干至恒量所需的时间与土的种类及取土数量有关。本标准取代表性试样 15~30g,对粘土、粉土烘干时间不少于 8h,是根据多年来比较试验而定的,对砂土不少于 6h,由于砂土持水性差,颗粒大小相差悬殊,含水率易于变化,所以试样应多取一些,本标准规定取 50g。采用环刀中试样测定含水率更具有代表性。

**4.0.5、4.0.6** 对层状和网状构造的冻土的含水率试验,因试样均匀程度所取试样数量相差较大,且试验过程中需待冻土融化后进行,为此另列条说明。

**4.0.7** 对层状和网状构造的冻土含水率平行测定的允许误差因均匀性放宽至 **3%**。

## 5 密度试验

### 5.1 环刀法

**5.1.1** 环刀法是测定土样密度的基本方法,本方法在测定试样密度的同时,可将试样用于固结和直剪试验。

**5.1.2** 环刀的尺寸是根据现行国家标准《土工仪器的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。

### 5.2 蜡封法

**5.2.3** 蜡封法密度试验中的蜡液温度,以蜡液达到熔点以后不出现气泡为准。蜡液温度过高,对土样的含水率和结构都会造成一定的影响,而温度过低,蜡溶解不均匀,不易封好蜡皮。

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。因各种蜡的密度不相同,试验前应测定石蜡的密度。

### 5.3 灌水法

**5.3.3** 灌水采用的塑料薄膜袋材料为聚氯乙烯,薄膜袋的尺寸应与试坑大小相适应。

开挖试坑时,坑壁和坑底应规则,试坑直径与深度只能略小于薄膜塑料袋的尺寸,铺设时应使薄膜塑料袋紧贴坑壁,否则测得的容积就偏小,求得偏大的密度值。

## 5.4 灌 砂 法

**5.4.1** 灌砂法比较复杂,需要一套量砂设备,但能准确的测定试坑的容积,适用于我国半干旱、干旱的西部和西北部地区。

**5.4.3** 标准砂的粒径选用  $0.25\sim 0.5\text{mm}$ ,因为在此范围内,标准砂的密度变化较小。

## 6 土粒比重试验

### 6.1 一般规定

**6.1.1** 土粒比重定义为土粒在 105~110℃ 温度下烘至恒量时的质量与同体积 4℃ 时纯水质量的比值。根据现行国家标准《岩土工程基本术语标准》GB/T 50279 仍使用“土料比重”这个无量纲的名词,作为土工试验中的专用名词。

**6.1.2** 当试样中既有粒径大于 5mm 的土颗粒,又含有粒径小于 5mm 的土颗粒时,工程中采用平均比重,取粗细颗粒比重的加权平均值。

### 6.2 比重瓶法

**6.2.1、6.2.2** 颗粒小于 5mm 的土用比重瓶法测定比重,比重瓶有 100mL 和 50mL 两种,经比较试验认为瓶的大小对比重成果影响不大,因用 100mL 的比重瓶可多取些试样,使试样的代表性和试验准确度可以提高。第 6.2.5 条条文中采用 100mL 的比重瓶,也允许采用 50mL 的比重瓶。

**6.2.3** 比重瓶的校正有称量校正法和计算校正法,前一种方法准确度较高,后一种方法引入了某些假设,但一般认为对比重影响不大,本标准以称量校正法为准。

**6.2.5** 试样规定用烘干土,认为可减少计算中的累计误差,也适合于含有机质、可溶盐、亲水性胶体等的土用中性液体测定。

试验用水规定为纯水,要求水质纯度高,不含任何被溶解的固体物质。一般规定有机质含量小于 5% 时,可以用纯水,超过 5% 时用中性液体。土中易溶盐含量等于、大于 0.5% 时,用中性液体

测定。

排气方法条文中规定用煮沸法,此法简单易行,效果好。如需  
用中性液体时,应采用真空抽气法。砂土煮沸时砂粒容易跳出,亦  
允许用真空抽气法代替煮沸法。

### **6.3 浮 称 法**

**6.3.1** 浮称法所测结果较为稳定,但大于 20mm 的粗粒较多时,  
用本方法将增加试验设备,室内使用不便,故条文规定粒径大于  
5mm 的试样中 20mm 的颗粒小于 10% 时使用浮称法。

### **6.4 虹 吸 筒 法**

**6.4.1** 虹吸筒法测定比重的结果不稳定,因为粗颗粒的实体积测  
不准,测得的比重值一般偏小。只在粒径大于 5mm 的试样中  
20mm 的颗粒等于、大于 10% 时,使用虹吸筒法。用虹吸筒法测  
定比重时,要特别注意排气,因粗颗粒内部包含着封闭孔隙。

若要测定粗粒土饱和面干比重亦采用虹吸筒法。

## 7 颗粒分析试验

### 7.1 筛析法

**7.1.2** 筛析法颗粒分析试验在选用分析筛的孔径时,可根据试样颗粒的粗细情况灵活选用。

**7.1.5** 当大于 0.075mm 的颗粒超过试样总质量的 10% 时,应先进行筛析法试验,然后经过洗筛过 0.075mm 筛,再用密度计法或移液管法进行试验。

### 7.2 密度计法

**7.2.1** 原标准中适用于粒径小于 0.074mm 的土,现行国家标准《土的分类标准》GBJ 145 中将粒径 0.074mm 已改成 0.075mm,为此,本标准洗筛改成 0.075mm。

**7.2.2** 密度计制造过程中刻度往往不易准确,使用前须进行刻度及弯液面校正,土粒有效沉降距离的校正,但这些校正工作极繁重,目前国内已有生产厂制造甲种密度计准确至 0.5 ,乙种密度计准确至 0.0002 的刻度,并对土粒有效沉降距离及弯液面在出厂前都已进行校正的产品,如果采用此种标准的密度计,且备有检定合格证书,在使用前不需进行密度计校正。其他密度计均需在在使用前按有关《密度计校正规程》进行校正。

**7.2.4** 试样的洗盐:本试验规定了当试样中易溶盐含量大于 0.5% 时,须经过洗盐手续才能进行密度计法颗粒分析试验,试样中含有易溶盐会影响试验成果,见表 1。



表 1 盐渍土洗盐与不洗盐的比较

| 省区 | 土样号 | 含盐量<br>(%) | 粉粒含量(%)<br>0.050~0.005mm |       | 粘粒含量(%)<br><0.005mm |       |
|----|-----|------------|--------------------------|-------|---------------------|-------|
|    |     |            | 洗盐前                      | 洗盐后   | 洗盐前                 | 洗盐后   |
| 新疆 | 146 | 5.26       | 22.33                    | 6.0   | 9.08                | 18.61 |
|    | 147 | 14.66      | 17.23                    | 13.10 | 40.04               | 41.17 |
| 甘肃 | 133 | 2.1        | 62.20                    | 47.50 | 1.50                | 14.00 |
|    | 142 | 2.19       | 54.50                    | 43.50 | 0.50                | 14.00 |
|    | 143 | 1.11       | 24.99                    | 22.47 | 17.99               | 21.34 |
|    | 149 | 5.13       | 20.79                    | 7.21  | 5.25                | 16.52 |
|    | 156 | 0.88       | 41.50                    | 34.70 | 9.50                | 18.00 |

注:按密度计法测定。

从表 1 中可见,未经洗盐的试样与洗盐后的试样的颗粒分析,前者粉粒含量高,粘粒含量低;后者粉粒含量低,粘粒含量高。为此,本试验规定对易溶盐含量大于 0.5% 的试样,应进行洗盐。

含盐量的检验方法,本试验采用电导率法和目测法以供选用,电导率法具有方便、快速估计试样含盐状况的优点。它的原理是根据电导率在低浓度溶液范围内,与悬液中易溶盐浓度成正比关系,电导率因盐性不同而异,但根据实验证明,  $K_{20}$  小于  $1000\mu\text{S}/\text{cm}$  时,相应的含盐量不会大于 0.5%。因此,本试验规定用电导率法检验洗盐应洗到溶液的  $K_{20}$  小于  $1000\mu\text{S}/\text{cm}$ 。并规定当试样溶液的  $K_{20}$  大于  $2000\mu\text{S}/\text{cm}$  时应将含盐量计入,否则会影响试验计算结果。

目测法是比较简易的方法,当没有电导率仪时可采用目测法检验试样溶液是否含盐。

- 1)试样的分散标准。粘性土的土粒可分成原级颗粒和团粒两种。对于颗粒分析的分散标准,有的主张用全分散法,理由是颗粒分析本身应该反映土的各种真实原级颗粒的组成;有的主张用半分散法或微集成法,即不加任何

分散剂使其在水中自然分散,以符合实际土未被完全分散的情况。

对照国内外有关标准对分散标准选择的调查,本试验采用了半分散法,用煮沸加化学分散剂来达到土粒既能充分分散,又不破坏土的原级颗粒及其聚集体。这些分散方法比较符合工程实际,基本上可以使土结构单元在不受任何破坏时,求得土的粒组所占土总质量的百分数。

- 2)分散剂品种问题。国内对土的分散剂品种选用问题有不少争论,主要反映在:从不同土类的角度出发,选用不同的合适的分散剂;从不同的分散理论角度出发,如有的从土悬液 pH 值大小来考虑,有的从粘土的离子交换容量能力来考虑,选用合适的分散剂。

从目前国际上的趋势看,分散剂的品种有采用强分散剂而不再考虑对不同土用不同分散剂的趋势,以便统一标准和方法。美国的ASTM—82已用六偏磷酸钠的搅拌方法。英国BS1377—75也改用六偏磷酸钠加硅酸钠振荡4h的方法。德国DIN18123—71是采用5%焦磷酸钠25mL后搅拌10min的方法。前苏联ГОСТ12536—67,则未作硬性规定,而在一般情况下,采用浓度25%氨水10mL煮沸的方法,如有凝聚现象,才加入焦磷酸钠作为稳定剂。

国内大多数规程也均用钠盐作为分散剂,以六偏磷酸钠使用最广,使用偏磷酸钠和焦磷酸钠的也不少,还有一些单位使用 25% 氨水作分散剂。

- 3)分散剂的选择,应考虑各种不同土类的粘粒矿物组成,结晶性质及浓度,同时又要考虑到试验资料的可比性及国内外交流的需要。根据我国以往对分散剂使用的现状及我国土类分布的多样性,本标准规定了对一般易分散的

土用浓度 4% 六偏磷酸钠作为分散剂。至于特殊的土类，应按工程实际需要及土类的特点选择不同的合适的分散剂。如土中易溶盐含量超过 0.5%，则需经洗盐手续。

### 7.3 移液管法

**7.3.1** 移液管法颗粒分析试验适用于粒径小于 0.075mm 而比重大的土，虽然操作不如密度计法简单和迅速，仍然得到较广泛的应用。

## 8 界限含水率试验

### 8.1 液、塑限联合测定法

**8.1.1** 目前国际上测定液限的方法是碟式仪法和圆锥仪法。各国采用的碟式仪和圆锥仪规格不尽相同,对试验结果有影响,利用碟式仪和我国采用的 76g 锥入土深度 10mm 圆锥仪进行比较,结果是随着液限的增大,两者所测得的差值增大。一般情况下碟式仪测得的液限大于圆锥仪液限。鉴于国际上对液限的测定没有统一的标准,为了使本标准向国际通用标准靠拢。制订本标准时认为与美国 ASTM 碟式仪标准等效是合适的。根据圆锥仪的特点和我国几十年的使用实践,认为圆锥仪操作简单,所测数据比较稳定,标准易于统一,所以本标准中圆锥仪法和碟式仪法均列入。

塑限的测定长期采用滚搓法,该法最大的缺点是人为因素影响大。十多年来,我国一些试验单位用圆锥仪测定塑限,已找出与塑限相对应的下沉深度求得的塑限与滚搓法基本一致,该法定名为液、塑限联合测定法。其主要优点是易于掌握,采用电磁落锥可减少人为因素影响。水利部、交通部公路系统、原冶金工业部和原地质矿产部的土工试验规程中均将该法列入。为此,本标准中规定使用圆锥仪时,采用液、塑限联合测定法;使用碟式仪时,采用滚搓法测定塑限。联合测定法的理论基础是圆锥下沉深度与相应含水率在双对数坐标纸上具有直线关系。

**8.1.2** 本标准中图 8.1.2 液、塑限联合测定仪示意图,实际使用时读数显示有光电式、游标式和百分表式,目前仅光电式有定型产品,故绘制的是液、塑限联合测定仪示意图。

**8.1.3** 试验标准:液限是试样从牛顿液体(粘滞液体)状态变成宾

哈姆体(粘滞塑性)状态时的含水率,在该界限值时,试样出现一定的流动阻力,即最小可量度的抗剪强度,理论上是强度“从无到有”的分界点。这是采用各种测定方法等效的标准。根据以往的研究,卡萨格兰特(Casagrande)得到土在液限状态时的不排水强度约为2~3kPa。而使用76g圆锥,下沉深度10mm时测得土的强度为5.4kPa,比其他液限标准下的强度高几倍(见表2),实际上,按76g圆锥,下沉深度10mm对应的试样含水率不是土的真正液限,不能反映土的真正物理状态,因此,必须改进,使液限标准向国标上通用标准靠拢。本试验采用与碟式仪测得液限时土的抗剪强度相一致的方法来确定圆锥仪的入土深度,作为液限标准。

表2 碟式仪液限土的不排水强度

| 基座材料           | 抗剪强度 $c_u$<br>(kPa) | 资 料 来 源                     |
|----------------|---------------------|-----------------------------|
| 硬 橡 胶          | 2.55                | Seed 等人 (1964)              |
| 胶 木            | 2.04~3.00           | Casagrande (1958)           |
|                | 1.12~2.35           | Norman (1958)               |
|                | 1.33~2.45           | Ycussef 等人 (1965)           |
|                | 0.51~4.08           | Karisson (1977)             |
| 英 国 标 准<br>橡 胶 | 0.82~1.68           | Norman (1958)               |
|                | 0.71~1.48           | Skempton Northey (1952)     |
|                | 1.02~3.06           | Skopek Ter—Stepanian (1975) |

交通部公路系统在制订标准时,用不同质量的圆锥仪(76g, 80g, 100g)对1000多个土样进行对比试验表明,锥质量100g,锥角30°,下沉深度20mm时的含水率作为液限精度最高。原水利电力部制订规程时,对16种不同土类,用76g, 80g, 100g质量的圆锥仪进行比较,测定不同下沉深度下土的十字板剪切强度和无侧限抗压强度的结果表明,以76g锥下沉深度17mm和100g锥下沉深度20mm时的含水率作为液限与美国ASTM D423碟式液限仪测得液限时土的强度(平均值)一致,说明这两种标准与ASTM标准

等效,鉴于目前使用 76g 锥较多,本标准将 76g 锥,下沉深度 17mm 时的含水率作为液限标准。尽管过去用 76g 圆锥仪,下沉深度 10mm 测定液限时土的强度偏高,但由于 50 年代以来一直使用这个标准,需要有一个过渡时期,从实用出发,本标准既采用 76g 锥下沉深度 17mm 时的含水率定为液限的标准,又采用下沉深度 10mm 时的含水率定为 10mm 液限标准。使用于不同目的,当确定土的液限值用于了解土的物理性质及塑性图分类时,应采用碟式仪法或 17mm 时的含水率确定液限;现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GBJ 7 确定粘性土承载力标准值时,按 10mm 液限计算塑性指数和液性指数,是配套的专门规定。

使用圆锥仪测定塑限,是以滚搓法作为比较的,制订过程中,交通部公路系统进行了大量对比试验得出了不同土类塑限时的下沉深度和液限含水率的关系曲线,提出对粘性土用双曲线确定塑限时锥的下沉深度  $h_p$ ,对砂类上用正交三次多项式曲线确定  $h_p$  值(图 1),然后根据  $h_p$  值从本标准图 8.1.5 查得含水率即为塑限。原水利电力部经过对比试验,绘制圆锥下沉深度与塑限时抗剪强度的关系曲线有一剧烈的变化段(图 2),引两直线的交点,该点的下沉深度约为 1.8mm,相对应抗剪强度约 130kPa,与国外塑限时的强度接近,认为该点的含水率即为塑限。为此,建议 76g 锥,下沉深度 2mm 时的含水率定为塑限。

通过实践,有的单位发现,对于粉土用液、塑限联合测定法测得的液、塑限偏低,因此,对下沉深度提出疑义,通过分析认为,本标准的规定有个平均值的概念,同时,由于粉土的液、塑限状态,本身就难以确定,加之下沉速度影响下沉深度不稳定,因此,对粉土进行试验时应特别注意控制下沉深度,本次修订时,鉴于目前积累的资料尚不足以说明此问题,本标准中的塑限仍以圆锥下沉深度 2mm 时的含水率为标准,待积累更多资料后再作修改。

原标准中液、塑限联合测定采用三皿法,即制备 3 份不同含水率的试样进行测定,根据试验发现,3 份试样取得不匀时影响试验

结果。为此,本标准修订时改用一皿法。

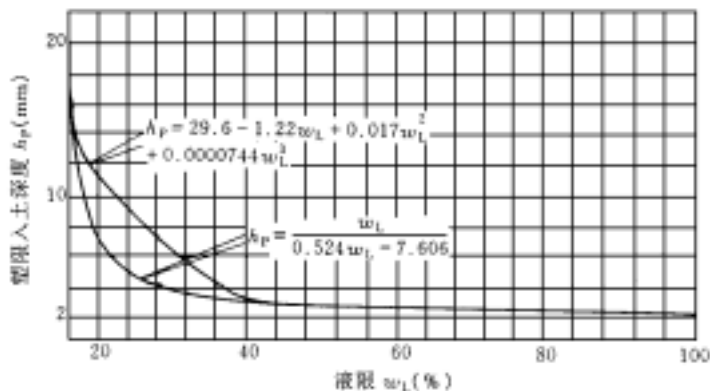


图 1 圆锥下沉深度与液限关系曲线

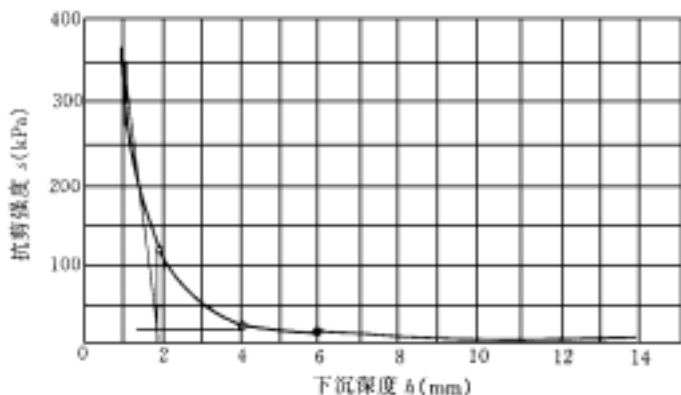


图 2 圆锥下沉深度与塑限时抗剪强度关系

## 8.2 碟式仪液限试验

**8.2.1** 碟式仪测定液限时,由于底座材料和槽刀规格不同,所测得液限时相应的强度是不同的,见表2。卡萨格兰特得到液限时的不排水抗剪强度为2~3 kPa,为此,本标准中使用美国ASTM

D423 所采用的碟式仪规格,便于国际技术交往和对外资工程的开发。

**8.2.3** 槽刀尖端宽度应为 2mm,如磨损应更换。

**8.2.5** 槽底试样的合拢长度可用槽刀的一端量测。

### **8.3 滚搓法塑限试验**

**8.3.1** 长期以来,国内外采用滚搓法测定塑限,该法的缺点主要是标准不易掌握,人为因素影响较大,对低塑性土影响尤甚,往往得出偏大的结果,本标准中已列入液限、塑限联合法可以替代滚搓法,考虑到与碟式仪配套,故仍作为一种试验方法列入本标准。

**8.3.3** 滚搓法测定塑限时,各国的搓条方法不尽相同,土条断裂时的直径多数采用 3mm,美国 ASTM D424 规定为 1/8in(约 3.2mm),我国一直使用 3mm,故本标准仍规定为 3mm。对于某些低液限粉质土,始终搓不到 3mm,可认为塑性极低或无塑性,可按细砂处理。

### **8.4 收缩皿法编限试验**

**8.4.1** 原标准中为土的缩限试验,为与前三节标题统一,改为收缩皿法缩限试验。即用收缩皿法测定土的缩限。本试验区别于原状试样的收缩试验。



## 9 砂的相对密度试验

### 9.1 一般规定

**9.1.1** 相对密度是砂类土紧密程度的指标。对于土作为材料的建筑物和地基的稳定性,特别是在抗震稳定性方面具有重要的意义。

相对密度试验适用于透水性良好的无粘性土,对含细粒较多的试样不宜进行相对密度试验,美国 ASTM 规定 0.074mm 土粒的含量不大于试样总质量的 12%。

相对密度试验中的三个参数即最大干密度,最小干密度和现场干密度(或填土干密度)对相对密度都很敏感,因此,试验方法和仪器设备的标准化是十分重要的。然而目前尚没有统一而完善的测定方法,故仍将原法列入。从国外情况看,最大干密度用振动台法测定,而国内振动台没有定型产品,为此,将美国 ASTM D2049 标准的仪器设备和试验方法附在条文说明中,供各试验室参阅。

### 9.2 砂的最小干密度试验

**9.2.1** 目前国际上对砂的最大孔隙比即最小干密度的测定一般用漏斗法。该法是用小的管径控制砂样,使其均匀缓慢地落入量筒,以达到最疏松的堆积,但由于受漏斗管径的限制,有些粗颗粒受到阻塞,加大管径又不易控制砂样的缓慢流出,故适用于较小颗粒的砂样。

**9.2.2** 用量筒倒转法时,采用慢速倒转,虽然细颗粒下落慢,粗颗粒下落快,粗细颗粒稍有分离现象,但能达到较松的状态,测得最小干密度,故本标准中以慢速倒转法作为测定最小干密度的一种

方法。原标准中将漏斗法和量筒法两种方法分开写,实际试验时,是可以结合在一起进行的,修订时考虑便于使用,将两种方法合并在一起。

### 9.3 砂的最大干密度试验

**9.3.1** 制订原标准时,曾用振动锤击法和振动台法进行比较,结果表明:振动锤击法测得的最大干密度比振动台法测得的密度大(见表3),振动台法是按照美国 ASTM D2049 标准的规定,采用一定的频率、振幅、时间和加重物块,用两种仪器分别进行了干法和湿法试验,表3中标准砂是均匀的中砂,黄砂是级配良好的砂。试验结果表明振动锤击法的干法所测得的干密度最大,故本标准仍以振动锤击法为标准。鉴于国际上采用振动台法较多,而国内又无定型设备,为此,将《美国材料试验学会无凝聚性土相对密度标准试验方法(ASTM D2049—69)介绍》附在此,供参阅。

表3 不同方法测得的最大干密度(g/cm<sup>3</sup>)

| 土 类 | 振 动 台 法 |      | 振动锤击法 |      |
|-----|---------|------|-------|------|
|     | 干法      | 湿法   | 干法    | 湿法   |
| 标准砂 | 1.65    | 1.72 | 1.78  | 1.72 |
| 黄 砂 | 1.88    | 1.94 | 2.04  | 1.96 |

**9.3.2** 用振动锤击法测定砂的最大干密度时,需尽量避免由于振击功能不同而产生的人为误差,为此,在振击时,击锤应提高到规定高度,并自由下落,在水平振击时,容器周围均有相等数量的振击点。

#### [附]美国材料试验学会无凝聚性土相对密度标准试验方法(ASTM D 2049—69)介绍

1 适用范围。本法用于测定无凝聚性、能自由排水的砂土的

相对密度,凡用击实试验不能得出明确的含水率与干密度关系曲线,而且最大密度比振动法得到的最大密度小的粗粒土,其中细粒含量( $<0.075\text{mm}$ )不大于 12%,且有自由排水性能的土,均可用本法测定。本法利用振动压实求其最大密度,用倒转法求最小密度。

## 2 仪器设备。仪器总装置图见图 A,各部件及辅助设备如下:

- 1)震动台:带有座垫的钢质震动台面板,尺寸约为 $30\text{in} \times 30\text{in}$ ( $762\text{mm} \times 762\text{mm}$ ),由半无声式电磁震动机启动,净重超过 $100\text{lb}$ ( $45.4\text{kg}$ ),频率为 $3600\text{r/min}$ ,振幅在 $250\text{lb}$ ( $113.5\text{kg}$ )荷重下由 $0.002\text{in}$ ( $0.05\text{mm}$ )至 $0.025\text{in}$ ( $0.64\text{mm}$ ),交流电压  $230\text{V}$ 。

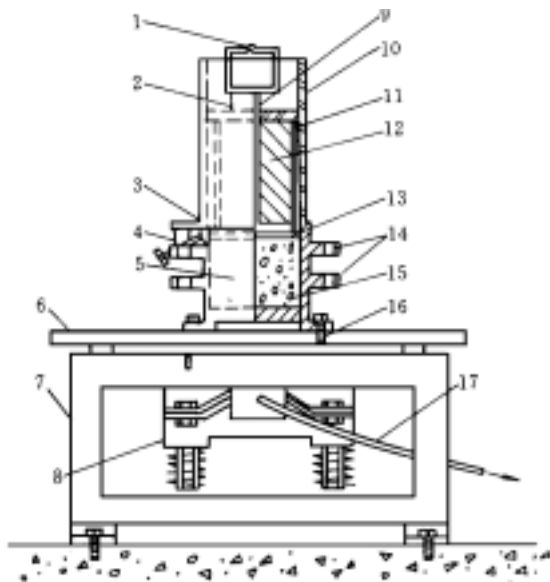


图 A 仪器总装置图

- 1—起吊把手;2—约  $1''$ ( $2.5\text{cm}$ );3—焊接;4—夹具;5— $01\text{ft}$ ( $3.05\text{cm}$ )试样筒;  
6—底板;7—震动台;8—震动机;9— $9.5\text{mm}$  钢杆;10—套筒;11—加重铅;  
12—加重物;13—加重底板;14—导向瓦;15—试样;16—固定螺丝;17—电线

2) 试样筒:圆筒容积为  $0.1 \text{ ft}^3$  与  $0.5 \text{ ft}^3$  ( $2830 \text{ cm}^3$  与  $14160 \text{ cm}^3$ ), 尺寸要求如表 A-1。

表 A-1 试样筒尺寸及所需试样质量

| 土粒最大尺寸<br>in (mm)      | 所需试样质量<br>lb (kg) | 最小密度试验<br>采用的倒注设备 | 试样筒所需尺寸<br>$\text{ft}^3$ ( $\text{cm}^3$ ) |
|------------------------|-------------------|-------------------|--------------------------------------------|
| 3 (76.2)               | 100 (45.3)        | 铲或特大勺             | 0.5 (14160)                                |
| $1 \frac{1}{2}$ (38.1) | 25 (11.3)         | 勺                 | 0.1 (2830)                                 |
| $\frac{3}{4}$ (19.1)   | 25 (11.3)         | 勺                 | 0.1 (2830)                                 |
| $\frac{3}{8}$ (9.5)    | 25 (11.3)         | 漏斗管径(25.4mm)      | 0.1 (2830)                                 |
| $\frac{3}{16}$ (4.76)  | 25 (11.3)         | 漏斗管径(12.7mm)      | 0.1 (2830)                                 |

3) 套筒:每种尺寸的试样筒有一个套筒,它带有固定夹具。

4) 加重底板:每种尺寸的试样筒有一厚  $\frac{1}{2} \text{ in}$  (12.7mm) 的底板。

5) 加重物:每种尺寸的试样筒有一加重物,对于所用的试样筒加重底板与加重物的总重力相当于  $2 \text{ lb/in}^2$  (14kPa)。

6) 加重底板把手:每一加重底板有一个。

7) 量表架及量表:量表量程  $2 \text{ in}$  (50.8mm), 精度  $0.001 \text{ in}$  (0.025mm)。

8) 校正杆:金属制  $3 \text{ in} \times 12 \text{ in} \times \frac{1}{8} \text{ in}$  (76.2mm  $\times$  304.8mm  $\times$  3.2mm)。

9) 倒注设备:装有漏斗状管嘴的金属罐,管嘴直径为  $\frac{1}{2} \text{ in}$  (12.7mm) 和  $1 \text{ in}$  (25.4mm); 罐径  $6 \text{ in}$  (152.4mm), 罐高  $12 \text{ in}$  (304.8mm)。

10) 其他设备:搅拌盘、台秤、起重机(起重重力至少 1.36kN) 等。

3 试样筒体积的率定。利用直接测量试样筒尺寸来计算其体

积。量测时精确到  $0.001\text{in}(0.025\text{mm})$ ,对筒体积计算准确至  $0.0001\text{ft}^3(2.83\text{cm}^3)$ ,对大筒体积准确至  $0.001\text{ft}^3(28.3\text{cm}^3)$ 。再用水校核,测定时要保证水充满筒内,将筒内水称量,测水温  $t^{\circ}\text{C}$ ,再以  $t^{\circ}\text{C}$  下每克水的体积(mL)乘水质量即得筒体积。不同温度下每克水的体积见表 A-2。

表 A-2 不同湿度下每克水的体积(mL/g)

| 温<br>度         | $^{\circ}\text{C}$ | 12      | 14      | 16      | 18      | 20      | 22      | 24      | 26      | 28      | 30      | 32      |
|----------------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                | $^{\circ}\text{F}$ | 53.6    | 57.2    | 60.8    | 64.4    | 68.0    | 71.6    | 75.2    | 78.8    | 82.4    | 86.0    | 89.6    |
| 水的体积<br>(mL/g) |                    | 1.00048 | 1.00073 | 1.00103 | 1.00138 | 1.00177 | 1.00221 | 1.00268 | 1.00320 | 1.00375 | 1.00435 | 1.00497 |

4 试样制备。选用代表性土样在  $110\pm 5^{\circ}\text{C}$  下烘干过筛,筛孔要足够小,使弱胶结的土粒能分散。

5 最小密度的测定。根据试样的最大粒径,选用倒注设备与试样筒,称筒质量并记录:

1)把粒径小于  $3/8\text{in}(9.5\text{mm})$  的烘干土尽量疏松地放入试样筒内,方法是用漏斗管把土均匀稳定地注入,随时调整管口的高度,使自由下落距离为  $1\text{in}(25.4\text{mm})$ ,同时要从外侧向中心呈螺旋线地移动,使土层厚度均匀而不产生分选。当充填到高出筒顶约  $1\text{in}(25.4\text{mm})$ ,用钢质直刃刀沿筒口刮去余土,注意在试验过程中不能扰动试样筒。称量并记录。

2)粒径大于  $3/8\text{in}(9.5\text{mm})$  的烘干土,应用大勺(或铲)将试样铲入试样筒内,勺应紧挨筒内土面,使勺内土粒滑入而不是跌落入筒。必要时用手扶持大颗粒土,以免从勺内滚落入筒。填土直至溢出筒顶,但余土高不大于  $1\text{in}(25.4\text{mm})$ ,用钢质直刃刀将筒面刮平,当有大颗粒时,凸出筒面的体积应能近似地与筒面以下的大孔隙体积抵消。称量并记录。

6 最大密度的测定。测定最大密度(最小孔隙比)用湿法或

干法。

1)干法:先拌和烘干土样,使分布均匀,尽量不要粗细分离。

将土样填入试样筒称量,填法与最小密度的测定相同,通常情况是直接用最小密度试验中装好的筒不再重装。装上套筒,把加重底板放到土面上,加重物放到加重底板上。将震动机调到最大振幅,将此加重的试样震动8min,卸除荷重与套筒,测读量表读数,算出试样体积。如震动过程中细粒上有损失时,需再称量并记录。

2)湿法:有些土在饱和状态时可得最大密度。因此,在试验开始时应同时用干法与湿法作比较,确定何者较大(只要超过1%)。湿法是将烘干试料中充分加水,至少浸泡半小时,最好用天然湿土。装土时充分加水,使有少量自由水积于土面。装完后立即震动6min,在此期间要减小振幅,以防止某些土过分的土沸。在震动的最后几分钟,要吸除土面上的水,再装上套筒,放加重底板,加重物,震动8min。震完后卸除加重物与套筒,测读量表读数,烘干试样并称量记录。

#### 7 最大、最小密度计算:

$$\text{最小密度} \quad \rho_{\min} = \frac{m_d}{V_c}$$

$$\text{最大密度} \quad \rho_{\max} = \frac{m_d}{V}$$

式中  $m_d$  ——干土质量(lb)(g);

$V_c$  ——试样筒率定后的体积(ft<sup>3</sup>)(cm<sup>3</sup>);

$V$  ——土体积 =  $V_c - [(R_i - R_f)/12] \times A$ (ft<sup>3</sup>)(cm<sup>3</sup>);

$R_f$  ——震后在加重底板上的读数(in)(mm);

$R_i$  ——开始读数(in)(mm);

$A$  ——试样筒断面积(ft<sup>2</sup>)(cm<sup>2</sup>)。

## 10 击实试验

**10.0.1** 室内扰动土的击实试验一般根据工程实际情况选用轻型击实试验和重型击实试验。我国以往采用轻型击实试验比较多，水库、堤防、铁路路基填土均采用轻型击实试验，高等级公路填土和机场跑道等采用重型击实较多。重型击实仪的击实筒内径大，最大粒径可以允许达到 20mm。原标准定为 40mm，按 5 层击样超高太大，按 3 层击样可允许达到 40mm。

**10.0.2** 单位体积击实功能是将作用于土面上的总的功除以击实筒容积而得。本标准单位体积功能计算中  $g$  采用  $9.81\text{m/s}^2$ ，若按 10 换算即得  $604\text{kJ/m}^3$  与国外通用标准一致，与交通部公路规程的功能也是相同的。

**10.0.3** 未实试验所用的主要仪器。原标准采用文字叙述，考虑到列表比较清楚，修订中改为表格式，将主要的击实筒、击锤和护筒尺寸列出。其他的主要仪器中，因重型击实试验土料用量多，所以将台秤从 5kg 改为 10kg；增加了标准筛一项，考虑到标准筛亦属计量仪器，也是属于主要的仪器，故增加此项。

**10.0.4** 本条为击实试验的试样制备。本次修改重点补充了重型击实试验的有关内容，原标准条文中内容偏重于轻型击实试验。试样制备的具体操作和本标准第 3.1.5 条相同，因此条文中没有详细叙述。

由于击实曲线一定要出现峰值点，由经验可知，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 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。

注：重型击实试验最优含水率较轻型的小，所以制备含水率可以向较小方向移。

**10.0.5** 试样击实后总会有部分土超过筒顶高,这部分土柱称为余土高度。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。也就是说,此关系曲线是以击实筒容积为体积的等单位功能曲线,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,则关系曲线上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,本标准规定余土高度不应超过 6mm。

**10.0.9** 对轻型击实试验,试样中含有粒径大于 5mm 颗粒的试验结果的校正。土样中常掺杂有较大的颗粒,这些颗粒的存在对最大干密度与最优含水率均有影响。由于仪器尺寸的限制,必须将试样过 5mm 筛,因此,就产生了对含有粒径大于 5mm 颗粒试样试验结果的校正。一般情况下,在粘性土料中,大于 5mm 以上的颗粒含量占总土量的百分数是不大的,大颗粒间的孔隙能被细粒土所填充,可以根据土料中大于 5mm 的颗粒含量和该颗粒的饱和面干比重,用过筛后土料的击实试验结果来推算总土料的最大干密度和最优含水率。如果大于 5mm 粒径的含量超过 30% 时,此时大颗粒土间的孔隙将不能被细粒土所填充,应使用其他试验方法。



## 11 承载比试验

**11.0.1** 本试验主要参考美国 ASTM D1883—78 和 AASHTO—74 规程编制。承载比试验是由美国加州公路局首先提出来的,简称 CBR(California Bearing Ratio 的编写)试验。日本也把 CBR 试验纳入全国工业规格土质试验方法规程(JIS A1211—70)。所谓 CBR 值,是指采用标准尺寸的贯入杆贯入试样中 2.5mm 时,所需的荷载强度与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 所示。

表 4 不同贯入量时的标准荷载强度和标准荷载

| 贯入量<br>(mm) | 标准荷载强度<br>(kPa) | 标准荷载<br>(kN) |
|-------------|-----------------|--------------|
| 2.5         | 7000            | 13.7         |
| 5.0         | 10500           | 20.3         |
| 7.5         | 13400           | 26.3         |
| 10.0        | 16200           | 31.3         |
| 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:

$$P = 162 \times l^{0.61} \quad (1)$$

式中  $P$  ——标准荷载强度(kPa);

$l$  ——贯入量(mm)。

承载比(CBR)是路基和路面材料的强度指标,是柔性路面设计的主要参数之一。

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 166mm,除去垫块的高度 50mm,实际试样高度为 116mm,按 5 层击实,与重型击实的击实筒相同,只能适用粒径小于 20mm 的

土,若按 3 层击样,可采用 40mm,为此,本次修订改成 20mm 或 40mm。

**11.0.3** 本试验制备试样采用风干法,按四分法备料,先根据重型击实试验方法求得试样最优含水率后,再按最优含水率制备所需试样,使试样的干密度与含水率保持与施工时一致。

**11.0.5** 进行 CBR 试验时,应模拟试料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 4 昼夜作为设计状态,国内外的标准均以浸水 4 昼夜作为浸水时间,当然也可根据不同地区、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。

为了模拟地基的上复压力,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,但对于粘性土来说,特别是上复压力较大时,荷载块的影响是无法达到要求的,因此,本次修订规定施加 4 块荷载块(5kg)作为标准方法。

在加荷装置上安装好贯入杆后,需使杆端面与试样表面充分接触,所以先要在贯入杆上施加 45N 的预压力,将此荷载作为试验时的零荷载,并将该状态的贯入量为零点。

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,应对曲线进行修正,以  $O$  点作为修正后的原点。

**11.0.6** 公式中的分母 7000 和 10500 是原标准以  $\text{kgf}/\text{cm}^2$  表示时的 70 和 105 乘以换算系数( $1\text{kgf}/\text{cm}^2 \approx 100\text{kPa}$ )而得。

当制备 3 个干密度试样时,使击实后的干密度控制在最大干密度的 95%~100%。

## 12 回弹模量试验

### 12.1 杠杆压力仪法

**12.1.1** 在采用杠杆压力仪法时,当压力较大时,加卸载将比较困难,因此,主要适用于含水率较大,硬度较小的土。

**12.1.2** 本标准将承载板的直径定为 50mm,是根据交通部公路土工试验规程的规定,因此杠杆压力仪的加压球座直径也相应定为 50mm。目的是与现场承载板试验结果较好地一致。原尺寸 37.4mm 的室内承载板试验得出的回弹模量往往比现场试验偏大很多,为减轻质量,承载板用空心圆柱体。

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。

**12.1.4** 由于加载开始时的土样塑性变形,得出的  $p-l$  曲线有可能与纵坐标轴相交于原点以下的位置,如果仍按读数值计算回弹变形,其中将包括一部分塑性变形,故应对读数进行修正。

### 12.2 强度仪法

**12.2.1** 强度仪法适用于各种湿度、密度的土和加固土。对于硬度较大的土用本法尤为方便。

**12.2.2** 本标准所用的击实筒,仅需在一般击实试验和 CBR 试验所用的试样筒上钻一直径 5mm,深 5mm 的螺丝孔。

强度仪法和杠杆压力仪法所用的承载板相同,两种仪器通用。

**12.2.3** 加载后由于土样的微小变形可能会使测力计发生轻微卸载,对于较硬的上卸载很小可以忽略不计;当土样较软时,可用手稍稍触动强度仪摇把,补上卸掉的微小压力。

## 13 渗透试验

### 13.1 一般规定

**13.1.1** 渗透是液体在多孔介质中运动的现象,渗透系数是表达这一现象的定量指标,由于影响渗透系数的因素十分复杂,目前室内和现场用各种方法所测定的渗透系数,仍然是个比较粗略的数值。

测定土的渗透系数对不同的土类应选用不同的试验方法。试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,后者适用于粘土和粉土。

**13.1.2** 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。本标准规定采用的纯水要脱气,并规定水温高于室温  $3\sim 4^{\circ}\text{C}$ ,目的是避免水进入试样因温度升高而分解出气泡。

**13.1.3** 水的动力粘滞系数随温度而变化,土的渗透系数与水的动力粘滞系数成反比,因此在任一温度下测定的渗透系数应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  $10^{\circ}\text{C}$ ,考虑到标准温度应有标准温度的定义去解释,以及国内各系统采用的标准均为  $20^{\circ}\text{C}$ ,为此,本标准以用  $20^{\circ}\text{C}$  作为标准温度。

**13.1.4** 由于渗透系数的测值不够正确,试验中应多测几次,取在允许差值范围内的平均值作为实测值。

**13.1.5** 土的渗透性是水流通过土孔隙的能力,显然,土的孔隙大小,决定着渗透系数的大小,因此测定渗透系数时,必须说明与渗

透系数相适应的土的密度状态。

## **13.2 常水头渗透试验**

**13.2.1** 用于常水头渗透试验的仪器有多种,常用的有 70 型渗透仪和土样管渗透仪,这些仪器设备,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。为此,本标准中没有规定采用何种仪器类型,只要求仪器结构简单,试验成果可靠合理。

**13.2.2** 试样安装时,在滤网上铺 2cm 厚的粗砂作为过滤层,在试样顶面铺 2cm 厚的砾石作为缓冲层,过滤层和缓冲层材料的渗透系数应恒大于试样的渗透系数。

**13.2.3** 常水头渗透系数的计算公式是根据达西定律推导的,求得的渗透系数为测试温度下的渗透系数。计算时需要校正到标准温度下的渗透系数。

## **13.3 变水头渗透试验**

**13.3.1** 变水头渗透试验使用的仪器设备除应符合试验结果可靠合理、结构简单外,要求止水严密,易于排气。仪器形式常用的是 55 型渗透仪,负压式渗透仪,为适应各试验室的设备,仪器形式不作具体规定。

**13.3.3** 试样饱和是变水头渗透试验中的重要问题,土样的饱和度愈小,土的孔隙内残留气体愈多,使土的有效渗透面积减小。同时,由于气体因孔隙水压的变化而胀缩,因而饱和度的影响成为一个不定的因素,为了保证试验准确度,要求试样必须饱和。采用真空抽气饱和法是有效的方法。

**13.3.4** 变水头渗透系数的计算公式是根据达西定律利用同一时间内经过土样的渗流量与水头量管流量相等推导而得,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。

## 14 固结试验

### 14.1 标准固结试验

**14.1.1** 本试验以往在国内的土工试验规程中定名为压缩试验,国际上通用的名称是固结试验(**Consolidation Test**),为了与国际通用的名称一致,本标准将该项试验定名为固结试验,同时表明本试验是以泰沙基(**Terzaghi**)的单向固结理论为基础的,故明确规定适用于饱和土。对非饱和土仅作压缩试验提供一般的压缩性指标,不能用于测定固结系数。

**14.1.2** 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秤式。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、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,本标准没有规定具体形式。仪器准确度应符合现行国家标准 **GB 4935** 及 **GB/T15406** 的技术条件。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),应采用准确度为全量程 **0.2%** 的位移传感器。

**14.1.3** 固结仪在使用过程中,各部件在每次试验时是装拆的,透水石也易磨损,为此,应定期率定和校验。

**14.1.4** 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,所反映的各固结阶段的沉降量以及时间过程均有差异。由于国内的仪器,环刀直径均为 **61.8mm** 和 **79.8mm**,高度为 **20mm**,为此,试样尺寸仍用规定的统一尺寸,径高比接近国外资料。

**14.1.5** 关于荷重率。固结试验中一般规定荷重率等于1。由于荷重率对确定土的先期固结压力有影响,特别是软土,这种影响更为

明显,因此,条文中规定:如需测定土的先期固结压力,荷重率宜小于 1,可采用 0.5 或 0.25,在实际试验中,可根据土的状态分段采用不同的荷重率,例如在孔隙比与压力的对数关系曲线最小曲率半径出现前,荷重率应小些,而曲线尾部直线段荷重率等于 1 是合适的。

稳定标准。目前国内外的土工试验标准(或规程)大多采用每级压力下固结 24h 的稳定标准,一方面考虑土的变形能达到稳定,另一方面也考虑到每天在同一时间施加压力和测记变形读数。本标准规定每级荷重下固结 24h 作为稳定标准。试验中仅测定压缩系数时,施加每级压力后,每小时变形达 0.01mm 时作为稳定标准,满足生产需要。前一标准与国际上通用标准一致。对于要求次固结压缩量的试样,可延长稳定时间。一小时快速法由于缺乏理论根据,标准中不列。

**14.1.15** 土的先期固结压力用作图法确定,该法属于经验方法,亦是国际上通用的方法,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  $p_c$  值的确定,为了使确定的  $p_c$  值相对稳定,作图时应选择合适的纵横坐标比例。日本标准(JIS)中规定,在纵轴上取  $\Delta e = 0.1$  时的长度与横轴上取一个对数周期长度比值为 0.4~1.0。我国有色金属总公司和原冶金工业部合编的土工试验规程中规定为 0.4~0.8,试验者在实际工作中可参考使用。

**14.1.16** 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 3 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的  $t$  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。一致认为,按时间对数坡度法确定  $t_{68}$ ,求得的  $\alpha_v$  值

误差较大。因此,本标准仅列入时间平方根法和时间对数法,在应用时,宜先用时间平方根法,如不能准确定出开始的直线段,则用时间对数法。

## 14.2 应变控制连续加荷固结试验

**14.2.1** 应变控制加荷法是连续加荷固结试验方法之一。它是在试样上连续加荷,随时测定试样的变形量和底部孔隙水压力。按控制条件,连续加荷固结试验除等应变加荷(*CRS*)外,尚有等加荷率(*CRL*)和等孔降水压力梯度(*OGC*)试验。

连续加荷固结试验的理论依据仍然是太沙基固结理论。要求试样完全饱和或实际上接近完全饱和。由于在试样底部测孔隙水压力,试样底部相当于标准试验中试样的中间平面。

**14.2.2** 试验过程中,在试样底部测定孔隙水压力,要求仪器结构应能符合试样与环刀、环刀及护环、底部与刚性底座之间密封良好,且易于排除滞留于底部的气泡。

控制的等应变速率是通过加压设备的测力系统传递的,因此,要求测力系统有相应的准确度。

测量孔隙水压力的传感器,要求体积因数(单位孔隙水压力下的体积变化)小,使从试样底部孔隙水的排出可以忽略,而较及时测定试样中的孔隙水压力变化。体积因数采用三轴试验所规定的标准。该试验中,孔隙水压力一般不超过轴向压力的 30%,要求传感器的准确度为全量程的 0.5%。

**14.2.3** 固结容器在使用过程中,各部件在每次试验时是装拆的,为此应定期校验。

**14.2.4** 从已有的试验资料表明,应变速率对一般土(液限低、活动性小)的压缩性指标和固结系数影响不大,但对高液限土(液限大于 100),应变速率大的试验结果表明,土的压缩量偏小(与标准固结试验相比)。因此,为了使不同方法所得的结果具有可比性,要求试验过程中,试样底部孔隙水压力不超过轴向压力  $\sigma$  的某一值,



通过对不同应变速率条件下试样底部孔隙水压力值变化的试验结果表明,对正常固结土,在加荷过程中试样底部孔隙水压力  $u_b$  达到稳定值时,其比值  $u_b/\sigma$  一般在 20%~30%,本标准采用 ASTM4186—82 的规定,  $u_b/\sigma$  取值范围为 3%~20%,根据该范围估计的应变速率如本条文中表 14.2.4,对于特殊土,根据经验可以修正该估计值。

数据采集时间间隔的规定基于以下理由:

- 1 试验开始时,试样底部孔隙水压力迅速增大;
- 2 取足够的读数确定应力应变曲线,当试验数据发生重大变化时,增加读数。

**14.2.7** 计算有效压力时,假定试样中的孔隙水压力处于稳定状态,沿试样的分布为一抛物线。

## 15 黄土湿陷试验

### 15.1 一般规定

**15.1.1** 黄土为第四纪沉积物,由于成因的不同,历史条件、地理条件的改变以及区域性自然气候条件的影响,使黄土的外部特性、结构特性、物质成分以及物理、化学、力学特性均不相同。本标准将原生黄土、次生黄土、黄土状土及新近堆积黄土统称为黄土类土。因为它们具有某些共同的变形特性,需要通过压缩试验来测定。

**15.1.2** 湿陷变形是指黄土在荷重和浸水共同作用下,由于结构遭破坏产生显著的湿陷变形,这是黄土的重要特性。湿陷系数大于或等于 0.015 时,称为湿陷性黄土,当湿陷系数小于 0.015 时,称非湿陷性黄土。

黄土受水浸湿后,在土的自重压力下发生湿陷的,称为自重湿陷性黄土,在土的自重压力下不发生湿陷的,称为非自重湿陷性黄土。

渗透溶滤变形是指黄土在荷重及渗透水长期作用下,由于盐类溶滤及土中孔隙继续被压密而产生的垂直变形,实际上是湿陷变形的继续,一般很缓慢,在水工建筑物地基是常见的。

黄土在荷重作用下,受水浸湿后开始出现湿陷的压力,称为湿陷起始压力。黄土湿陷试验对房屋地基来说,主要是测定自重湿陷系数、起始压力和规定压力下的湿陷系数,而对水工建筑物来说,主要是测定施工和运用阶段相应的湿陷性指标,包括本试验的所有内容。

**15.1.5** 稳定标准。黄土粘性机理与粘土不同,例如水源来自河

流、渠道、塘库则自上而下,若是地下水位上升则自下而上。黄土的变形稳定标准规定为每小时变形量不大于 0.01mm。对于渗透溶滤变形,由于变形特性除粒间应力引起的缓慢塑性变形以外,也取决于长期渗透时盐类溶滤作用,故规定 3d 的变形量不大于 0.01mm。

## 15.2 湿陷系数试验

**15.2.1** 浸水压力和湿陷系数是划分湿陷等级的主要指标,为了对比地基优劣情况,需要在同一条件即规定某一浸水压力下求得湿陷系数。本次修改时,浸水压力是根据现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑规范》GBJ 25 中的规定。而水工建筑物的地基,必须考虑土体的压力强度与结构强度被破坏的作用,分级加荷至浸水时的压力应是恰好代表土层中部断面上所受的实际荷重。在实际荷重下沉降稳定后,根据工程实际情况用自上而下或自下而上的方式,使试样浸水,确定土的湿陷变形。

## 15.3 自重湿陷系数试验

**15.3.1** 土的饱和自重压力应分层计算,以工程地质勘察分层为依据,当工程未提供分层资料时,才允许按取样深度和试样密度粗略的划分层次。

饱和自重压力大于 50kPa 时,应分级施加,每级压力不大于 50kPa。每级压力时间视变形情况而定,为使试验时有个参考,本条文中规定不小于 15min,参考原冶金部规程。

## 15.4 溶滤变形系数试验

**15.4.1** 溶滤变形系数是水工建筑物施工和运用阶段所要求的湿陷性指标。一般在实际荷重下进行试验,浸水后长期渗透求得溶滤变形。

## 15.5 湿陷起始压力试验

**15.5.1** 湿陷起始压力利用湿陷系数和压力关系曲线求得。测定湿陷起始压力(或不同压力下的湿陷系数)国内外都沿用单线、双线两种方法。从理论上和试验结果来说,单线法比双线法更适用于黄土变形的实际情况,如果土质均匀可以得出良好的结果。双线法简便,工作量少,但与变形的实际情况不完全符合,为与现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑规范》(GBJ 25)一致,本标准改成单线法、双线法并列,供试验人员根据实际情况选用。进行双线法时,保持天然湿度施加压力的试样,在完成最后一级压力后仍要求浸水测定湿陷系数,其目的在于与浸水条件下最后一级压力的湿陷系数比较,以便二者进行校核。

## 16 三轴压缩试验

### 16.1 一般规定

**16.1.2** 三轴压缩试验根据排水情况不同分为三种类型:即不固结不排水剪(UU)试验、固结不排水剪(CU)测孔隙水压力( $\overline{CU}$ )试验和固结排水剪(CD)试验,以适应不同工程条件而进行强度指标的测定。

**16.1.3** 本标准规定三轴压缩试验必须制备 3 个以上性质相同的试样,在不同周围压力下进行试验。周围压力宜根据工程实际确定。在只要求提供土的强度指标时,浅层土可采用较小压力 50、100、200、300kPa,10m 以下采用 100、200、300、400kPa。

### 16.2 仪器设备

**16.2.1** 原标准将仪器设备列入不固结不排水试验,考虑到其他类型试验使用仪器设备相同,而安装试样等有差别,故将仪器设备抽出单列一节。

应变控制式三轴仪中的加压设备和测量系统均没有规定采用何种方式,因为三轴仪生产至今在不断改进,前后生产的形式只要符合试验要求均可采用。

**16.2.2** 试验前对仪器必须进行检查,以保证施加的周围压力能保持恒压。孔隙水压力量测系统应无气泡,保证测量准确度。仪器管路应畅通,但无漏水现象。本试验中规定橡皮膜用充气方法检查,亦允许使用其他方法检查。

### 16.3 试样制备和饱和

**16.3.1** 三轴压缩试验试样制备和饱和与其他力学性试验的试样制备不完全相同,因为试样采用圆柱体,有其一套制样设备,另外有特制的饱和器。3 种类型试验均有试样制备和饱和的问题,为此,抽出单列一节。

试样的尺寸及最大允许粒径是根据国内现有的三轴仪压力室尺寸确定的。国产的三轴仪试样尺寸为  $\phi 39.1\text{mm}$ ,  $\phi 61.8\text{mm}$  和  $\phi 101\text{mm}$ ,但从国外引进的三轴仪试样尺寸最小的为  $\phi 35\text{mm}$ ,故本条文规定试样直径为  $\phi 35\sim\phi 101\text{mm}$ 。试样的最大允许粒径参考国内外的标准,规定为试样直径的  $1/10$  及  $1/5$ ,以便扩大适用范围。

**16.3.2、16.3.3** 试样制备。原状试样制备用切土器切取即可。扰动土试样可以采用压样法和击样法。压样法制备的试样均匀,但时间较长,故通常采用击样法制备,击样法制备时建议击锤的面积应小于试样的面积。击实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,粘土为 5~8 层。

**16.3.5** 原状试样由于取样时应力释放,有可能产生孔隙中不完全充满水而不饱和,试验时采用人工方法使试样饱和,扰动土试样也需要饱和。饱和方法有抽气饱和、水头饱和、反压力饱和,根据不同的土类和要求饱和程度而选用不同的方法。

当采用抽气饱和和水头饱和试样不能完全饱和时,在试验时应对试样施加反压力。反压力是人为地对试样同时增加孔隙水压力和周围压力,使试样孔隙内的空气在压力下溶解于水,对试样施加反压力的大小与试样起始饱和度有关。当起始饱和度过低时,即使施加很大的反压力,不一定能使试样饱和,加上受三轴仪压力的限制,为此,当试样起始饱和度低时,应首先进行抽气饱和,然后再加反压力饱和。

## 16.4 不固结不排水剪试验

**16.4.1** 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。

**16.4.2** 轴向加荷速率即剪切应变速率是三轴试验中的一个重要问题,它不仅关系到试验的历时,而且也影响成果,不固结不排水剪试验,因不测孔隙水压力,在通常的速率范围内对强度影响不大,故可根据试验方便来选择剪切应变速率,本条文规定采用每分钟应变 0.5%~1.0%。

**16.4.6** 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( $\sigma_1 - \sigma_3$ )的峰值作为破坏标准是可行的,而且易被接受,然而有些土很难选择到明显的峰值,为了简便,主应力差无峰值时采用应变 15% 时的主应力差作为破坏值。

## 16.5 固结不排水剪试验

**16.5.1** 为加快固结排水和剪切时试样内孔隙水压力均匀,规定在试样周围贴湿滤纸条,通常用上下均与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  $\phi 39.1\text{mm}$  的试样,一般采用 6mm 宽的滤纸条 7~9 条;对直径  $\phi 61.8\text{mm}$  和  $\phi 101\text{mm}$  的试样,可用 8~10mm 宽的滤纸条 9~11 条。

在试样两端涂硅脂可以减少端部约束,有利于试样内应力分布均匀,孔隙水压力传递快,国外标准将此列入条文,国内也有单位使用,为使试验时有所选择,以便积累资料和改进试验技术,本条文编制时考虑这一内容,并规定测定土的应力应变关系时,应该

涂硅脂。

**16.5.2** 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% 作为判别固结稳定标准。

**16.5.3** 剪切时,对不同的土类应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。在三轴固结不排水剪试验中,在试样底部测定孔隙水压力,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。由于粘土和粉土的剪切速率相差较大,故本条文对粘土和粉土分别作规定。

**16.5.4~16.5.6** 试样固结后的高度及面积可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,本标准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积计算剪损面积。

**16.5.10~16.5.14** 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。整理试验成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。



## 16.6 固结排水剪试验

**16.6.1** 固结排水剪试验是为了求得土的有效强度指标,更有意义的是测定土的应力应变关系,从而研究各种土类的变形特性。为使试样内部应力均匀,应消除端部约束,为此,装样时应在试样两端与透水板之间放置中间涂有硅脂的双层圆形乳胶膜,膜中心应留有 1cm 的圆孔排水。

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。通过比较采用每分钟应变  $0.003\% \sim 0.012\%$  的剪切应变速率基本上可满足剪切过程中不产生孔隙水压力的要求,对粘土可能仍有微量的孔隙水压力产生,但对强度影响不大。

## 16.7 一个试样多级加荷试验

**16.7.1** 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。

**16.7.2** 试样剪切完后,须退除轴向压力(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,这样可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。

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主应力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。

试样的面积校正与多个试样试验方法相同。

**16.7.3 固结不排水剪试验**,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,必须退去上一级剪切时施加的轴向压力。

试样的面积校正,应按分级计算方法进行,即第一级周围压力下试样剪切终了时的状态作为下一级周围压力下试样的初始状态。本条文提到的计算规定,是指本标准第 16.5.6 条计算公式中的  $A$ ,应为本级周围压力下固结后试样的计算面积,  $\varepsilon_1$  为本级压力下的剪切变形(不累计)。

## 17 无侧限抗压强度试验

**17.0.1** 无侧限抗压强度是试样在侧面不受任何限制的条件下承受的最大轴向应力。试验的适用范围以往规定为“能切成圆柱状，且在自重作用下不发生变形的饱和软粘土”。美国 **ASTM** 标准规定“适用于那些具有足够粘性，而允许在无侧限状态下进行试验的饱和粘性土”。因为无侧限抗压强度试验的主要目的是快速取得土样抗压强度的近似定量值。英国 **BS1377** 标准规定“适用于饱和的无裂隙的粘性土”。为此，本条文的适用范围规定为饱和粘性土，但需具有两个条件：一个是在不排水条件下，即要求试验时有一定的应变速率，在较短的时间内完成试验；另一个是试样在自重作用下能自立不变形，对塑性指数较小的土加以限制。

**17.0.4** 本试验明确规定应变速率和剪切时间，目的是针对不同试样，控制剪切速率，防止试验过程中试样发生排水现象及表面水分蒸发。

测定土的灵敏度是判别土的结构受扰动对强度的影响程度，因此，重塑试样除了不具有原状试样的结构外，应保持与原状试样相同的密度和含水率。天然结构的土经重塑后，它的结构粘聚力已全部消散，但放置一段时间后，可以恢复一部分，放置时间愈长，恢复程度愈大，所以需要测定灵敏度时，重塑试样试验应立即进行。

**17.0.8** 试样受压破坏时，一般有脆性破坏及塑性破坏两种，脆性破坏有明显的破坏裂面，轴向压力具有峰值，破坏值容易选取，对塑性破坏的试样，应力无峰值，选取应变为 15% 的抗压强度为破坏值，与三轴压缩试验一致，但试验应进行到应变达 20%。重塑试样的取值标准与原状试样相同即峰值或 15% 轴向应变所对应的轴向应力为无侧限抗压强度。

## 18 直接剪切试验

### 18.1 慢剪试验

**18.1.1** 直接剪切试验是最直接的测定抗剪强度的方法。仪器结构简单,操作方便。由于应力条件和排水条件受仪器结构的限制,国外仅用直剪仪进行慢剪试验。本标准规定慢剪试验是主要方法,并适用于细粒土。

**18.1.2** 采用应变控制式直剪仪,为适应不同试验方法的需要,宜配置变速箱和电动剪切装置,便于试验。

**18.1.3** 关于固结稳定标准。考虑到不同土类的固结稳定时间不同,因此,本条文规定对粘土和粉土采用垂直变形每小时不大于 0.005mm 为稳定标准。

慢剪试验的剪切速率应保证在剪切过程中试样能充分排水,测得的慢剪强度指标稳定,以往资料表明,剪切速率在 0.017~0.024mm/min 范围内,试样能充分排水,为此本条文规定采用 0.02mm/min 的剪切速率。也可用本条文式(18.1.3)估算。

为绘制完整的剪应力与剪切位移的关系曲线,易于确立破坏值,剪切过程中测力计读数有峰值时,应继续剪切至剪切位移达 4mm,测力计无峰值时,应剪切至剪切位移达 6mm。

### 18.2 固结快剪试验

**18.2.1** 由于仪器结构的限制,无法控制试样的排水条件,仅以剪切速度的快慢来控制试样的排水条件,实际上对渗透性大的土类还是要排水的,测得的强度参数  $\varphi$  值就偏大,为此,本条文规定渗透系数小于  $10^{-6}$ cm/s 的土类,才允许利用直剪仪进行固结快剪试

验测定土的固结快剪的强度参数。对渗透系数大于  $10^{-6}\text{cm/s}$  的土应采用三轴仪进行试验。

**18.2.3** 固结快剪试验的剪切速率规定为  $0.8\text{mm/min}$ ,要求在  $3\sim 5\text{min}$  内剪损,其目的是为了在剪切过程中尽量避免试样有排水现象。

### **18.3 快剪试验**

**18.3.1** 快剪试验适用于主体上施加荷重和剪切过程中都不发生固结和排水的情况,这一点在直剪仪是很难达到的。为此,只能对土类加以限制,仅适用于渗透系数小于  $10^{-6}\text{cm/s}$  的细粒土。

**18.3.3** 快剪试验的剪切速率规定为  $0.8\text{mm/min}$ ,要求在  $3\sim 5\text{min}$  内剪损,实际上即使加快速率也难免排水,对于渗透系数大于  $10^{-6}\text{cm/s}$  的土类,应在三轴仪上进行。

### **18.4 砂类土的直剪试验**

**18.4.3** 影响砂土抗剪强度除颗粒大小、形状外,试样的密实度是主要因素,为此,制备试样时,同一组的密度要求尽量相同。

砂土的渗透性较大,剪切速率对强度几乎无影响,因此,可采用较快的剪切速率。

## 19 反复直剪强度试验

**19.0.1** 反复直剪强度试验是测定试样残余强度。残余强度是指粘性土试样在有效应力作用下进行排水剪切,当强度达到峰值强度以后,随着剪切位移的增大,强度逐渐减小,最后达到稳定值。残余强度的测定是随着具有泥化夹层的地基工程、硬裂隙粘土坡的长期稳定、古滑坡地区的工程研究而提出的,故本条文规定适用于粘土和泥化夹层。

**19.0.2** 测定残余强度的仪器除直剪仪外,还有环剪仪等,目前国内测定该项指标的仪器尚少,常用直剪仪进行排水反复直剪强度试验。本条文采用应变控制式反复直剪仪,即在直剪仪上增加反推装置、变速装置和可逆电动机。

**19.0.3** 测定土的残余强度,制备试样时要求软弱面或泥化夹层处于试样高度的中部,即正好是剪切面,目的是测得符合工程实际情况的强度值。

测定土的残余强度要求在剪切过程中土中孔隙水压力得到完全消散,因此,必须采用排水剪,且剪切速率要求缓慢。国内曾先后对粘土、粉质粘土进行了不同剪切速率的对比试验,得出高液限粘土宜采用  $0.02\text{mm}/\text{min}$ ,低液限粘土宜采用  $0.06\text{mm}/\text{min}$  的剪切速率。肯尼(Kerney)曾采用  $0.017\sim 0.024\text{mm}/\text{min}$  的速率在直剪仪上进行,并指出,在此剪切速率范围内测得的强度值变化不大。日本曾用单面直剪仪对“丸の内粘土”用 7 种不同的剪切速率进行试验,试验表明,当剪切速率小于  $0.027\text{mm}/\text{min}$  时,抗剪强度稳定。国外测定残余强度的最快速率均小于  $0.06\text{mm}/\text{min}$ 。根据以上资料,本条文规定粘土采用  $0.02\text{mm}/\text{min}$ ,粉土采用  $0.06\text{mm}/\text{min}$  的剪切速率。反推速率要求不严格,只是复位,不测剪应力,故规定

为  $0.6\text{mm}/\text{min}$ 。

残余强度的稳定值的基本要求是剪切面上颗粒充分定向排列。采用环剪仪进行试验时,剪切至剪应力稳定即可停止试验,而采用反复直剪试验时,强度是随着剪切次数的增加而逐渐降低,颗粒逐渐达到定向排列,最后强度达到稳定值。斯开普顿(SkemP-ton)对伦敦粘土试样剪切 6 次获得残余强度,他认为当强度达到峰值后,继续剪切到位移达  $25\sim 50\text{mm}$  可降低到稳定值。诺布尔(H.L.Noble)在直剪仪上以  $0.004\text{mm}/\text{min}$  的速率进行试验,每次剪切  $25\text{mm}$ ,反复剪  $10\sim 15$  次,总位移达  $50\sim 75\text{mm}$ ,可达到稳定值。国内有单位以  $0.025\text{mm}/\text{min}$  的速率反复剪切,试验结果表明,不同颗粒组成的试样,所需要的总位移是不一样的,一般讲粘粒含量大的试样,需要的总位移量小些,反之亦然,粉土一般需要  $40\sim 48\text{mm}$ ,粘土  $24\sim 32\text{mm}$ ,为此,本条文除规定最后二次剪切时测力计读数接近外,对粉质粘土要求总剪切位移量达  $40\sim 50\text{mm}$ ,粘土总剪切位移量达  $30\sim 40\text{mm}$ 。

**19.0.5** 关于试样面积的校正。用直剪仪测定土的残余强度时,由于每次剪切位移较大,上半块试样与仪器下盒铜壁边缘接触的部分随着剪切位移增加而增大,剪切过程中所测的剪应力包括了试样与试样间,试样与仪器盒之间两部分,根据比较试验资料,以仪器盒与土的摩擦代替土与土的摩擦所产生的误差不大,故一般可不作校正,本条文中没有考虑校正,若遇到某些土类影响较大,则参考有关资料进行校正。

## 20 自由膨胀率试验

**20.0.1** 本试验的目的是测定粘土在无结构力影响下的膨胀潜势,初步评定粘土的胀缩性。自由膨胀率是反映土的膨胀性的指标之一,它与土的粘土矿物成分、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。

**20.0.2** 国内各工厂生产的量筒,刻度不够准确,对计算成果影响甚大,故规定试验前必须进行刻度校正。

**20.0.3** 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粘粒含量的差异,为了取得相对稳定的试验条件,本条文规定采用 0.5mm 过筛,用四分对角法取样,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。

粘土颗粒在悬液中有时有长期混浊的现象,为了加速试验,采用加凝聚剂的方法,但凝聚剂的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。



## 21 膨胀率试验

### 21.1 有荷载膨胀率试验

**21.1.1** 有荷载膨胀率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。

**21.1.2** 仪器在压力下的变形会影响试验结果,应予校正。对于固结仪可利用按本标准第 14.1.3 条规定率定的校正曲线。

**21.1.3** 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。

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。

### 21.2 无荷载膨胀率试验

**21.2.1** 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。

**21.2.3 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,但有时透水石会沾带试样表层土,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(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 5。

表 5 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 | 0.189 | 0.011 | 0.159 | 0.319 | 0.250 |
| 浸水前后百分表读数差值(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。

## 22 膨胀力试验

**22.0.1** 膨胀力是粘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,某些粘土的膨胀力可达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。但在现场应尽量接近原位情况。

**22.0.3** 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 6 中试验资料表明,膨胀力随允许膨胀量的增大而增加,当允许膨胀量由 0.01 增至 0.1mm 时,膨胀力将提高 50% 左右。为了提高试验准确度,允许膨胀量应限制到 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。

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,为此规定加荷平衡后 2h 不再膨胀作为稳定是可行的。

表 6 试样允许膨胀量与膨胀力的关系

| 允许变形值<br>(mm) | 密 度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 孔隙比  | 试验前<br>含水率<br>(%) | 试验后<br>含水率<br>(%) | 膨胀力<br>(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          |

## 23 收缩试验

**23.0.1** 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。

**23.0.3** 扰动土的收缩试验,分层装填试样时,要切实注意不断挤压拍击,以充分排气。否则不符合体积收缩等于水分减小的基本假定,而使计算结果失真。

**23.0.7** 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。

## 24 冻土密度试验

### 24.1 一般规定

**24.1.1、24.1.2** 冻土密度是冻土的基本物理指标之一。它是冻土地区工程建设中计算上的冻结或融化深度、冻胀或融沉、冻土热学和力学指标、验算冻土地基强度等需要的重要指标。测定冻土的密度,关键是准确测定试样的体积。本条文规定的4种方法是目前常用的方法。

**24.1.3** 考虑到国内不少单位没有低温试验室,故规定无负温环境时应保持试验过程中试样表面不得发生融化,以免改变冻土的体积。

### 24.2 浮称法

**24.2.1** 浮称法是根据物体浮力等于排开同体积液体的质量这一原理,通过称取冻土试样在空气和液体中的质量算出浮力,并换算出试样体积,求得冻土密度,因此,对于不同土质、结构、含冰状况的各类冻土均可采用。

**24.2.3** 浮称法试验中所用的液体常用的是煤油,有时用 $0^{\circ}\text{C}$ 的纯水。为避免液体温度与试样温度差过大造成试样表面可能发生融化,煤油温度应接近试样温度;使用 $0^{\circ}\text{C}$ 纯水时应快速测定。

煤油的密度与温度的关系较大,也与其品种有关,故所用的煤油应进行不同温度下的密度率定。

**24.2.7** 冻土的基本构造有整体状、层状和网状,不同构造的冻土,均匀性差别较大。因此,冻土密度平行试验的差值较之融土密度平行试验的差值要大。整体状冻土的结构一般比较均匀,故要求

平行试验差值为  $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ , 与融土试验的规定一致, 而层状和网状构造冻土的结构均匀性差, 平行试验的差值往往大于  $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ , 此时, 可以提供试验值的范围。

### 24.3 联合测定法

**24.3.1** 由于前述冻土结构的不均匀性, 用一般方法分别取试样测定密度和含水率时, 往往出现二个指标不协调。例如用分别测定的含水率和密度指标计算出的饱和度, 有时大于 100%, 这就与指标的物理意义相矛盾。联合测定法是采用一个体积较大的试样同时测定密度和含水率, 从而解决了上述分别测定中存在的问题。

整体状构造的粘质冻土, 特别是高塑性粘土在水中不易搅散, 土孔隙中的气体不能完全排出, 因而影响试验准确度, 故规定本试验适用于砂质冻土和层状、网状构造的冻土。

**24.3.3** 试验过程中, 排液筒中水面的稳定对试验成果的准确度至关重要。为了做到这一点, 台秤要稳固地安放在水平台面上, 排液筒要放在称盘的固定位置, 称重加砝码和充水排水时均应平稳, 不致造成称盘上下剧烈晃动。

## 25 冻结温度试验

**25.0.1** 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载荷。

**25.0.2** 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  $-10\sim+20^{\circ}\text{C}$ , 测温, 则可省略零温瓶、数字电压表和热电偶。

**25.0.3** 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 (icecrystal)。冰晶生长的温度称为水的冻结温度或冰点, 结晶中心是在比冰点更低的温度下才能形成, 所以土中水冰结的时间过程一般须经历过冷、

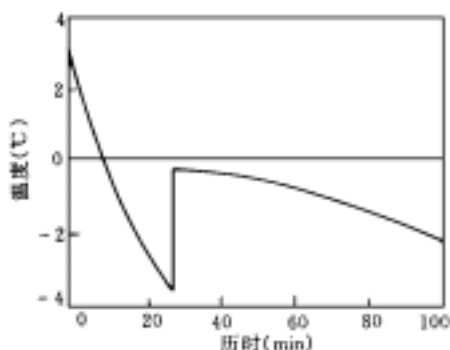


图 3 土中水冻结的时间过程

跳跃、恒定和递降 4 个降低(图 3)。当出现跳跃时,电势会突然减小,接着稳定在某一数值,此即为开始冻结。

土中水的过冷及其持续时间主要取决于土的含水率和冷却速度。土温接近  $0^{\circ}\text{C}$  时,土中水可长期处于不结晶状态。土温低于  $0^{\circ}\text{C}$  且快速冷却时,过冷温度高且结束时间早。当土的含水率低于塑限后,过冷温度降低。室内试验中,当土的含水率大于塑限时,土柱端面温度控制为  $-4^{\circ}\text{C}$ ,一般过冷时间在半小时之内即可结束。



## 26 未冻含水率试验

**26.0.1** 土体冻结后并非土中所有的液态水全部冻结成冰,其中始终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,未冻含水率减少。

**26.0.5** 未冻含水率的测定方法有许多种,诸如量热法、核磁共振法、时域反射计法和超声波法等。这些方法大都需要复杂而昂贵的仪器,一般单位难以采用。本试验方法是依据未冻含水率与负温为指数函数规律,采用已知含水率的试样,测定其冻结温度,推求未冻含水率,此法具有快速、简便等优点,其平行差值稍大于融土,为此纳入本试验方法标准。

## 27 冻土导热系数试验

**27.0.3** 导热系数的测定方法分两大类：稳定态法和非稳定态法。稳定态法测定时间较长，但试验结果的重复性较好；非稳定态法具有快速特点，试验结果重复性较差。因此，本试验采用稳定态法。稳定态法中，通常使用热流计法，但国产热流计的性能欠佳，故采用比较法，以石蜡作为标准原件，可认为其导热系数是稳定的。

操作中应注意铜板平整且接触紧密，否则会影响试验结果。

基于稳定态比较法应遵循测点温度不随时间而变化的原则，但实际上很难做到测点温度绝对不变，因此规定连续 3 次同一点测温差值小于  $0.1^{\circ}\text{C}$ ，则认为已满足方法原理。

## 28 冻胀量试验

**28.0.1** 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,必须对工程所在地区的主体作出冻胀敏感性评价,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,为对冻胀敏感性作出正确评价,试验一般应采用原状土进行。若条件不允许,非采用扰动土不可时,应在试验报告中予以说明。本试验方法与目前美国、俄罗斯等国所用方法基本一致。所得数据用于评价该种土的冻胀量略偏大,从工程设计上偏安全。

**28.0.3** 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型关系。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粘土以  $0.3^{\circ}\text{C/h}$ 、砂土以  $0.2^{\circ}\text{C/h}$  的速度下降,是照顾各类土的特点并处于试验所得冻胀量较大的情况。

**28.0.6** 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,例如俄罗斯国家建筑委员会颁布的标准 (ГОСТ 28622—90) 按表 7 划分;美国寒区研究和工程实验室是规定冻结速度为  $1.3\text{cm/d}$  的条件下,用平均冻胀速度按表 8 进行分级;我国国家现行标准《冻土地区建筑地基基础设计规范》JTJ 118 的分级如表 9;国家现行标准《水工建筑物抗冰冻设计规范》SL 211 则按冻胀量进行划分(见表 10)。

表 7 冻胀性分级表

(ГОСТ 28622—90)

|        |               |                   |                   |                    |             |
|--------|---------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------|
| 冻胀率(%) | $\eta \leq 1$ | $1 < \eta \leq 4$ | $4 < \eta \leq 7$ | $7 < \eta \leq 10$ | $\eta > 10$ |
| 冻胀等级   | 不冻胀           | 弱冻胀               | 冻 胀               | 强冻胀                | 特强冻胀        |

表 8 冻胀性分级表

(美国寒地研究和工程实验)

|                  |             |                      |                      |                      |             |
|------------------|-------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------|
| 平均冻胀速度<br>(mm/d) | $v_v < 0.5$ | $0.5 < v_v \leq 2.0$ | $2.0 < v_v \leq 4.0$ | $4.0 < v_v \leq 8.0$ | $v_v > 8.0$ |
| 冻胀等级             | 不冻胀         | 弱冻胀                  | 冻 胀                  | 强冻胀                  | 特强冻胀        |

表 9 冻胀性分级表

(《冻土地区建筑地基基础设计规范》)

|        |               |                     |                     |                    |             |
|--------|---------------|---------------------|---------------------|--------------------|-------------|
| 冻胀率(%) | $\eta \leq 1$ | $1 < \eta \leq 3.5$ | $3.5 < \eta \leq 6$ | $6 < \eta \leq 12$ | $\eta > 12$ |
| 冻胀等级   | 不冻胀           | 弱冻胀                 | 冻 胀                 | 强冻胀                | 特强冻胀        |

表 10 冻胀性分级表

(《水土建筑物抗冰冻设计规范》)

|                     |                    |                         |                          |                           |                  |
|---------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|------------------|
| 冻胀性级别               | I                  | II                      | III                      | IV                        | V                |
| 冻胀量 $\Delta h$ (mm) | $\Delta h \leq 20$ | $20 < \Delta h \leq 50$ | $50 < \Delta h \leq 120$ | $120 < \Delta h \leq 220$ | $\Delta h > 220$ |

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存在  $\eta = \Delta h / H f$  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,故本条文规定可按冻胀率作为评价指标,在数值上暂取与国家现行标准《冻土地区建筑地基基础设计规范》JTJ 118 一致。

## 29 冻土融化压缩试验

### 29.1 一般规定

**29.1.1** 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,这个压力值大致为  $0 \sim 0.4 \text{ MPa}$ ,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。

### 29.2 室内冻土融化压缩试验

**29.2.3** 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  $h/d \geq 1/2$ ,最小直径取  $5 \text{ cm}$ ,对于不均匀的层状和网状构造的粘土,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为  $45 \text{ cm}^2$ 、 $78 \text{ cm}^2$ ,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,试样环应

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。

**29.2.5** 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,循环热水的温度应加以控制。根据已有试验,本条文规定水温控制在  $40\sim 50^{\circ}\text{C}$ 。加热循环水应畅通,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,可适当降低水温,以控制  $4\text{cm}$  高度的试样在  $2\text{h}$  内融化完为宜。

测定融沉系数  $a_0$  值时,本条文规定施加  $1\text{kPa}$  的荷载。这主要是考虑克服试样与环壁之间的摩擦力。而且,冻土在融化过程中单靠自重下沉的过程往往很长,所以,施加这一小量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。

### 29.3 现场冻土融化压缩试验

**29.3.1** 本试验与暖土荷载试验方法相似。这种方法可适用于除漂石( $d > 200\text{mm}$ )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。

**29.3.4** 传压板面积小于  $5000\text{cm}^2$  时,试验误差较大,故规定不宜小于此面积。形状可为圆形(直径  $798\text{mm}$ )或正方形(边长  $707\text{mm}$ )。

## 30 酸碱度试验

**30.0.1** 酸碱度通常以氢离子浓度的负对数,即 pH 表示。pH 值的测定可用比色法、电测法,但比色法不如电测法方便、准确。因此,本条文选用电测法。电测法实际上是一种以 pH 值标记的电位计,故称为酸度计。

**30.0.2** 酸度计是由选择性玻璃电极、甘汞参比电极和二次仪表电位计组成。作为电极产品玻璃电极和甘汞电极一般是分开出售,复合电极是将这两种电极合并为一支电极,只是形式不同。其测定原理实际上是一样的。

**30.0.3** 标准缓冲溶液,如果能够买到市售 pH 标准缓冲试剂,可按说明书配制以代替本条文的 pH 标准缓冲溶液的配制。

**30.0.5** 试样悬液的制备,土水比例大小对测定结果有一定影响。土水比例究竟用多大适宜,目前尚无一致结论。国内外以用土水比例 1:5 较多,故本条文也采用 1:5,振荡 3min,静置 30min。

## 31 易溶盐试验

### 31.1 浸出液制取

**31.1.3** 用水浸提易溶盐时,土水比例和浸提时间的选择,是力求将易溶盐从土中完全溶解出来,而又能尽量减少中、难溶盐的溶解。关于土水比例,根据各种盐类在水中溶解度不同,合理地控制土水比就有可能将易溶盐与中、难溶盐分开,即土水比例愈小,中、难溶盐被浸出的可能性愈小。如有采用 1:2.5、1:1 等土水比例的,但土水比愈小,会给操作带来困难愈大。因此,国内普遍选用 1:5 的土水比例。关于浸提时间,在同一土水比例下,浸提时间不同,试验结果亦有差异。浸提时间愈长,中、难溶盐被溶解的可能性愈大,土粒和水溶液间离子交换反应亦显著。所以浸提时间宜短不宜长。研究表明,浸提时间在 2~3min 即可。为了统一试验条件,本条文采用 1:5 土水比例,浸提时间为 3min。

浸出液过滤,在试验中经常遇到过滤困难,特别是粘土,需要很长时间才能获得需要的滤液数量,而且不易得到清澈的滤液。因此,本条文推荐采用抽气过滤方法效果较好,操作也简便,过滤速度快。如果滤液混浊,则应改用离心或超级滤心过滤。

### 31.2 易溶盐总量测定

**31.2.4** 易溶盐总量测定,本条文采用烘干法。由于此法不需特殊仪器设备,测定结果比较精确,故在室内试验中应用广泛。国内外有资料推荐电导法,虽然简单快速,但是易溶盐属多盐性混合物,其摩尔电导率因盐性不同而异。因此,测得电导率与实际含量,因盐性不定比例而存在着不稳定的差异,故本标准未列。



加 2% 碳酸钠( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )的目的,是使钙离子( $\text{Ca}^{2+}$ )、镁离子( $\text{Mg}^{2+}$ )的硫酸盐、氯盐转化为碳酸盐以除去大量结晶水,此残渣应在  $180^\circ\text{C}$  烘干,才能得到较稳定的试验结果。

### 31.3 碳酸根和重碳酸根的测定

**31.3.4** 碳酸根和重碳酸根的测定应在土浸出液过滤后立即进行,否则将由于大气中二氧化碳( $\text{CO}_2$ )的侵入或浸出液 pH 的变化引起二氧化碳释出而影响试验结果。

本条文使用的双指示剂是采用酚酞和甲基橙指示剂,滴定终点 pH 值分别为 8.3 和 4.4。目前有些单位采用混合指示剂代替甲基橙指示剂,目的是为提高滴定终点的分辨效果,但是混合指示剂的配方并不统一,因此,本条文未采用混合指示剂。

**31.3.5** 根据现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB50021 有关土对混凝土腐蚀性判定(以  $\text{mg/kg}$  土表示)和盐渍土分类规定:盐渍土按含盐性质分类,是采用含盐质量摩尔浓度的比值进行分类的。盐渍土按含盐量分类,是采用含盐质量分数进行分类的,因此试验成果必须分别计算提供两个不同量的名称和单位。

质量摩尔浓度,过去采用计量单位是  $\text{mmol}/100\text{g}$  土,按照国家法定计量单位,单位中不得含有数值,因此,本条文采用计量单位为  $\text{mmol/kg}$  土,与现行国家标准《量和单位》GB3102.8 的规定一致。

含盐量的计算为说明各数值的定义而分别列出,在实际工作中可以将公式简化,直接将数值代入。

### 31.4 氯根的测定

**31.4.1** 氯根的测定,除采用硝酸银容量法之外,还有采用硝酸汞滴定法、硫氰酸汞光度法以及近来建立的离子色谱法等。但是这些方法一般仅适用于氯根浓度较低的试样,操作也不如硝酸银容量法简便,有些还需要专门的仪器设备。因此,本条文选择被广泛采用的硝酸银容量法。

**31.4.5** 见本标准第 31.3.5 条的条文说明。

### **31.5 硫酸根的测定** —EDTA 络合容量法

**31.5.1** 硫酸根常量的测定方法,最经典的是硫酸钡质量法,此方法虽然准确,但操作烦琐,设备笨重,近年逐步地已被 EDTA 络合容量法所替代,我国环保部门的水质监测和矿泉饮用水等均已认定 EDTA 络合容量法为标准方法。因此,本条文也认定此方法为常量的测定方法。

关于含盐度质量分数  $w_B$  (%)按土水比为 1:5 计算与质量浓度  $\rho_B$  (g/L)的关系为:

$$w_B : \rho_B = \frac{V_B C_B M_B \times 500}{V_s} : \frac{V_c C_B M_B \times 1000}{V_s} \quad (2)$$

$$w_B / \rho_B = \frac{500}{1000} = \frac{1}{2} \quad (3)$$

式中  $V_B$ 、 $C_B$ 、 $M_B$ ——分别为物质 B 的体积、浓度和摩尔质量  
( $V_B$ :L,  $C_B$ :mmol/L,  $M_B$ :kg/mol)

$V_s$ ——取试液的体积(L)。

所以 0.025(%)相当于 0.050g/L(50mg/L)。

**31.5.5** 见本标准第 31.3.5 条的条文说明。

### **31.6 硫酸根的测定** —比浊法

**31.6.1** 低含量硫酸根的测定方法很多,其中有硫酸钡比浊法、铬酸钡光度法,原子吸收光度法、离子色谱法等。在这些方法中以比浊法最为简便,其准确性亦基本可满足这一指标的实际要求。国内多数单位的仪器设备容易满足。因此,本条文对低含量的硫酸根测定,选用硫酸钡比浊法。

**31.6.5** 见本标准第31.3.5条的条文说明。但比浊法测定结果是

硫酸根百分含量,因此,质量摩尔浓度必须由百分含量换算而得。

### 31.7 钙离子的测定

**31.7.1** 钙的测定方法很多,但是钙的常量测定目前采用最普遍的是 EDTA 容量法,它具有设备简单、操作简便的特点。因此,本条文选用此方法。

**31.7.3** 本方法测定钙的指示剂,可用钙指示剂(Calconcarboxylic Acid)或紫尿酸铵(Murexide),在强碱介质中与钙指示剂络合终点由红变蓝色,与紫尿酸铵络合终点由红变紫色,两者的终点指示效果,后者不如前者指示效果好,故本条文选用钙指示剂。

**31.7.4** 当土浸出液中镁离子( $Mg^{2+}$ )含量高时,将生成大量氢氧化镁[ $Mg(OH)_2$ ]沉淀,影响终点判别,遇此情况时,可先滴定一定量 EDTA 标准溶液(不得过量)后,加 1mol/L 氢氧化钾(KOH)溶液,放置片刻,再加入 0.5% 氰化钾(KCN)和 1% 盐酸羟胺和指示剂,然后继续滴定至终点,可获得比较好的指示效果。

**31.7.5** 见本标准第 31.3.5 条的条文说明。

### 31.8 镁离子的测定

**31.8.1** 常量镁离子的测定方法也很多,但目前被广泛采用的为 EDTA 容量法,同钙一样具有快速、简便,不需专用设备的优点。因此本条文采用此方法。

**31.8.4** EDTA 测定镁,实际上是先测定钙、镁离子含量再减去  $Ca^{++}$  含量。所以,本方法为求得镁离子含量,必须同时测定钙离子的含量。测定钙、镁离子含量的指示剂,可用铬黑 T(Eriochrome black T)或铬蓝黑(Eriochrome blue black),两者的滴定终点均由红变为蓝色,但是前者比后者的终点指示更为灵敏,故本条文选用铬黑 T 指示剂。

**31.8.5** 见本标准第 31.3.5 条的条文说明。

### **31.9 钙离子和镁离子的原子吸收分光光度测定**

**31.9.1** 低含量钙、镁离子的测定,可用原子吸收法或火焰光度计法,鉴于原子吸收分光光度计已普遍应用,成为化学分析的常规仪器,它的操作快速、简便,灵敏度又比火焰光度计法高,故本条文选用原子吸收分光光度计法。

**31.9.5** 见本标准第 31.3.5 条和第 31.6.5 条的条文说明。

### **31.10 钠离子和钾离子的测定**

**31.10.1** 钠、钾离子的测定,以往是采用差减法计算钠、钾离子总含量,而不能将钠、钾离子含量分开计算,同时还由于种种因素带来的误差较大,故本标准未列入。鉴于火焰光度计测定钠、钾离子的方法已得到普遍应用,该方法还具有操作简便、快速、灵敏度高,又能同时对钠、钾离子含量分开测定等优点,故本条文列入火焰光度计法。

**31.10.5** 见本标准第 31.3.5 条和第 31.6.5 条的条文说明。

## 32 中溶盐(石膏)试验

**32.0.1** 中溶盐含量测定,也可用 EDTA 容量法,该法虽然设备简单、操作快速,但难溶盐大量共存对测定有影响,故本条文仍采用经典的标准方法,酸浸提——质量法。

**32.0.4** 本条文是以石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )代表土中中溶盐的含量。对酸不溶物的测定未列入。如属石膏土,需要测定酸不溶物。可将本试验酸浸提过滤残渣进行烘干、称量,计算而得。

### 33 难溶盐(碳酸钙)试验

**33.0.1** 难溶盐测定除用气量法外,还可采用中和法(适用于难溶盐含量高的土)和碱吸收法(适用于较精密的测定),但这两种方法都各具有其局限性,而气量法则具有操作简便,又能满足土中难溶盐实际含量的测定范围,因而被普遍采用。故本条文选用气量法。

**33.0.5** 气量法的计算是以测量产生的二氧化碳体积为基础,它与测量时的温度和大气压力关系密切,本条文表 33.0.5 提供二氧化碳密度仅适用于大气压力大于或等于 98.925kPa 范围,对地处海拔高的地区,大气压力一般小于 98.925kPa。遇此情况则不能用本条文式(33.0.5—1)计算,因此,本条文增列式(33.0.5—2)以满足海拔高,大气压力小于 98.925kPa 地区的需要。

## 34 有机质试验

**34.0.1** 有机质的测定方法很多,如有质量法、容量法、比色法、双氧水氧化法等。这些方法经过反复比较认为以重铬酸钾容量法为最好,它具有操作简便、快速、再现性好,不受大量碳酸盐存在的干扰,设备简单,适合于批量试样的试验,在土工试验中已广泛采用。因此,本条文选用重铬酸钾容量法。但是采用此法测得有机质偏低,一般只有有机质实际含量的 90%,因此,有的资料认为对测定结果应乘以 1.1 校正因数加以校正。也有人建议以灼烧减量估计有机质含量。但是灼烧的结果不仅烧去有机质,而且还烧去结合水和挥发性盐类,从而使测定结果偏高,偏高大小与土中存在的结合水和挥发性盐类的多少有很大关系。一般比容量法可高出数十倍不等,因此,本条文未列入。如果土中含有大量粗有机质,在一定条件下,也可考虑采用灼烧减量法。

**34.0.2** 有关资料介绍油浴可采用石蜡、硫酸、磷酸等,但这些介质都不理想,均具有污染环境,烟雾具有腐蚀剂刺激性,有害健康。本条文选用植物油相对地说比较安全。

**34.0.3** 本试验用指示剂种类有二苯胺、邻啡罗啉等。二苯胺虽然便宜,但配制麻烦,对环境污染,对健康不利,近来已广泛采用较昂贵的邻啡罗啉为指示剂。它具有易配制、安全和滴定终点易掌握等优点,故本条文采用该指示剂。

**34.0.4** 消煮温度范围和时间必须严格控制,这是本试验方法规定的统一条件,否则将对试验结果产生很大影响。

## 35 土的离心含水当量试验

**35.0.1** 土的离心含水当量试验是应用离心技术测定土的离心含水当量,用于近似地估算土的空气孔隙比和滞留率(或滞水能力)。本试验参照美国 ASTM 岩土工程试验标准编制。

**35.0.3** 本条文规定离心试验后称坩埚和湿土(土样表面出现自由水不允许倒掉)总质量,而后将坩埚放入烘箱内,烘至其质量不变,再称坩埚和干土总质量,以此计算土的离心含水当量。而美国规定离心试验后将试样取出,放入铝盒后称量,这样对试样的含水率会有影响。

**35.0.4** 原公式中有湿滤纸和干滤纸质量,本次修改时将滤纸去掉后称量,故现公式中不计其质量。