

普通高等教育“十一五”精品规划教材

# 土力学土质学 试验指导

朱银红 蒋亚萍 刘宝臣 合编



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

普通高等教育“十一五”精品规划教材

---

# 土力学土质学 试验指导

朱银红 蒋亚萍 刘宝臣 合编



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 提 要

本书参考国标《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)和水利部规程《土工试验规程》(SL 237—1999)而编写,内容包括颗粒分析试验,液塑限试验,密度试验,固结试验,直接剪切试验,压缩试验,三轴压缩试验,回弹模量试验,渗透试验等,目的是为方便学习《土力学》、《土质学》中的土工试验内容,加深对相关理论知识的理解。

本书可供土木工程、勘察技术与工程和水文地质工程地质等专业学科的学生学习相关理论课程时试验所用,另外对从事土工试验、岩土工程勘察的技术人员也具有参考价值。

## 图书在版编目(CIP)数据

土力学土质学试验指导 / 朱银红, 蒋亚萍, 刘宝臣  
编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2010.3  
普通高等教育“十一五”精品规划教材  
ISBN 978-7-5084-7289-8

I. ①土… II. ①朱… ②蒋… ③刘… III. ①土工试验—高等学校—教材 IV. ①TU41

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第037165号

|      |                                                                                                                                                                                                                    |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名  | 普通高等教育“十一五”精品规划教材<br><b>土力学土质学试验指导</b>                                                                                                                                                                             |
| 作 者  | 朱银红 蒋亚萍 刘宝臣 合编                                                                                                                                                                                                     |
| 出版发行 | 中国水利水电出版社<br>(北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038)<br>网址: <a href="http://www.waterpub.com.cn">www.waterpub.com.cn</a><br>E-mail: <a href="mailto:sales@waterpub.com.cn">sales@waterpub.com.cn</a><br>电话: (010) 68367658 (营销中心) |
| 经 售  | 北京科水图书销售中心(零售)<br>电话: (010) 88383994、63202643<br>全国各地新华书店和相关出版物销售网点                                                                                                                                                |
| 排 版  | 中国水利水电出版社微机排版中心                                                                                                                                                                                                    |
| 印 刷  | 北京市兴怀印刷厂                                                                                                                                                                                                           |
| 规 格  | 184mm×260mm 16开本 4.75印张 113千字                                                                                                                                                                                      |
| 版 次  | 2010年3月第1版 2010年3月第1次印刷                                                                                                                                                                                            |
| 印 数  | 0001—2000册                                                                                                                                                                                                         |
| 定 价  | <b>8.50元</b>                                                                                                                                                                                                       |

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

# 前言



实验教学是大学教学必不可少的一个重要实践环节。通过试验教学,不仅能使学生掌握必备的理论知识、实验方法和技能,而且可充分激发学生学习科学文化的兴趣和求知欲,提高他们的思维能力、想象能力、判断能力、试验操作能力以及综合应用能力等。

《土力学》是土木工程专业专业基础课,《土质学》是勘察技术水工专业的专业基础课,学好这两门课程,对于这两个专业学生知识体系的形成和技能培养至关重要。而土工试验作为《土力学》和《土质学》教学的重要组成部分,它能最大限度地调动学生的学习积极性,激发其浓厚的学习兴趣,进而培养学生实事求是的严谨的科学态度和独立分析问题、解决问题的能力及协作能力。

我校的土工试验室,拥有先进的试验设备,可为土木工程、勘察技术、工程管理等专业的本科及高职开出15项土工试验,供学生课内和课外开放试验所用,根据不同专业教学大纲的要求开设不同的试验项目。对于教学大纲所要求的课内试验项目,很多学校均采用自编校本教材作为学生的土工试验指导书,而学生进行课外开放性试验时则没有相应的参考资料,编者经过一年多的努力,最终完成了《土力学土质学试验指导》教材的编写工作。本教材以国标《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)和水利部规程《土工试验规程》(SL 237—1999)为主要依据,参考部分院校的土工试验教学教材编写而成,供相关专业学生课内外使用。

本试验指导除包括大纲要求的试验项目(以\*号标出),还包括学生课外开放试验的项目,供学生自行选做,以丰富课外生活。

另外本试验指导还可供《土力学》、《土质学》的自学者参考。

本教材受到桂林理工大学教材建设基金、桂林理工大学水污染控制实验教学中心(国家级)资助,特此致谢。

由于编者编写时间与能力有限,书中难免存在错漏之处,敬请读者批评指正。

编者

2009年12月

# 目 录

## 前言

|                      |    |
|----------------------|----|
| 试验一 颗粒分析试验           | 1  |
| 第一节 筛析法              | 1  |
| 第二节 密度计法（比重计法）       | 4  |
| 试验二 土粒相对密度试验（相对密度瓶法） | 12 |
| 试验三 含水率试验            | 15 |
| 试验四 测定土的液限和塑限        | 17 |
| 第一节 锥式液限仪测液限         | 17 |
| 第二节 搓条法测塑限           | 19 |
| 第三节 液限、塑限联合测定法       | 21 |
| 试验五 测定土的密度           | 24 |
| 第一节 环刀法              | 24 |
| 第二节 蜡封法              | 26 |
| 试验六 固结试验             | 28 |
| 第一节 压缩试验（杠杆式压缩仪法）    | 28 |
| 第二节 高压固结试验           | 32 |
| 试验七 直接剪切试验           | 36 |
| 试验八 三轴压缩试验           | 41 |
| 试验九 击实试验             | 50 |
| 试验十 回弹模量试验（杠杆压缩仪法）   | 54 |
| 试验十一 渗透试验            | 57 |
| 附录 试验记录表             | 62 |
| 参考文献                 | 69 |
| 结束语                  | 70 |

# 试验一 颗粒分析试验

天然土是由大小不同的颗粒所组成的，从大到几十厘米的漂石至小到几微米的胶粒，土颗粒的大小相差悬殊。土粒的粒径从粗到细逐渐变化时，土的性质也随之相应的发生变化，在工程上把粒径大小相近的土粒，按适当的粒径范围归并为一组，称为粒组，各个粒组随着粒径分界尺寸的不同而呈现出一定的质的变化。土粒的大小及其组成情况，通常以各个粒组的相对含量（各粒组占土粒总量的百分数）来表示，称为土的颗粒级配。由于土粒的形状往往是不规则的，因此很难直接测量土粒的大小，只能用间接的方法来定量地描述土粒的大小及各种颗粒的相对含量。

颗粒分析试验就是测定土中各种粒组所占该土总质量的百分数的试验方法，借以了解颗粒大小分布的情况，供土的分类定名，概略判断土的工程性质及建材选料所用。常用的方法有两种，对粒径大于 0.075mm 的土粒常用筛析法，而对小于 0.075mm 的土粒则用沉降分析的方法，沉降分析又分为密度计法和移液管法。

## 第一节 筛析法\*

### 一、基本原理

筛析法是利用一套孔径不同的标准筛，来分离一定量的砂土中与孔径相应的粒组，而后称量、计算各粒组的相对含量，确定砂土的粒度成分。由于筛孔径过小时在制造和分离技术上有困难，故此法只使用于分离粒径大于 0.075mm、小于 60mm 的粒组。本试验可测定粗粒土中各种粒组所占该土总质量的百分数，借以明确颗粒大小分布情况，供土的分类与概略判断土的工程性质及选料之用。

### 二、仪器设备

(1) 标准筛一套（图 1-1）：粗筛，孔径为 60mm、40mm、20mm、10mm、5mm、2mm；细筛，孔径为 2.0mm、1.0mm、0.5mm、0.25mm、0.075mm。

(2) 普通天平：感量 0.1g，称量 500g（细筛分析

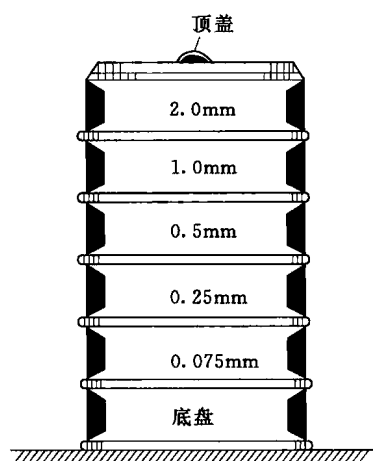


图 1-1 标准筛

\* 教学大纲要求的实验项目。

用)；感量 1g，称量 5000g（粗筛分析用）。

(3) 其他：瓷钵及橡皮头研棒，毛刷、白纸、直尺等。

### 三、操作步骤

(1) 称取风干土样。从松散的或研散的土样中取代表性试样，其数量如下：

最大粒径小于 2mm 者，取 100~300g。

最大粒径在 2~10mm 之间，取 300~900g。

最大粒径在 10~20mm 之间，取 1000~2000g。

最大粒径在 20~40mm 之间，取 2000~4000g。

最大粒径 40~60mm 者，取 4000g 以上。

用四分法来选取试样，方法如下：将土样拌匀，倒在纸上成圆锥形。然后用直尺以圆锥顶点为中心，向一定方向旋转，使圆锥成 1~2cm 厚的圆饼状。继而用直尺划两条相互垂直的直线，使土样分四等份，取走相对的两份，将留下的两份拌匀，重复上述步骤，直到剩下的土样约等于需要的量为止（图 1-2）。

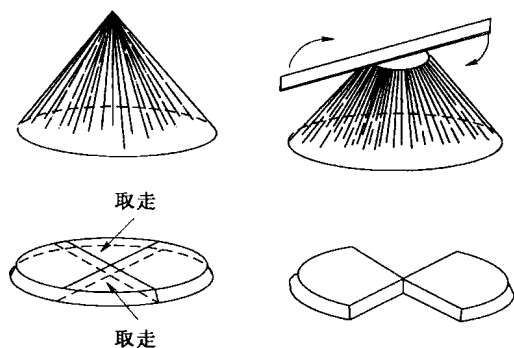


图 1-2 四分法取试样

(2) 将土样过 2mm 筛，称筛上和筛下的试样质量。当筛下的试样质量小于试样总质量的 10%，不作细筛分析；当筛上的试样质量小于试样总质量的 10%，不作粗筛分析。

(3) 取筛上的试样倒入依次叠好的粗筛中，筛下的试样倒入依次叠好的细筛中，进行筛析。细筛宜置于振筛机上振筛，振筛时间宜为 10~15min。再按由上而下的顺序将各筛取下，在白纸上用手将筛盘轻扣、摇

晃，直到筛净为止。将漏在白纸上的土粒倒入下层筛盘内，如此顺序，直到最末一层筛盘筛净为止。称各级筛上及底盘内试样的质量，应准确至 0.1g。

(4) 筛后的各级筛上和筛底盘内的试样质量的总和与筛前试样总质量的差值，不得大于试样总质量的 1%，若两者差值小于 1%，可按实验过程中误差产生的原因分配给某些粒组，最终，各粒组百分含量之和应等于 100%。

注意：当粒径小于 0.075mm 的试样质量大于试样总质量的 10% 时，应按密度计法或移液管法测定小于 0.075mm 的颗粒组成。

### 四、数据整理

(1) 小于某粒径的试样质量占试样总质量的百分比  $X$ ，按式 (1-1) 计算：

$$X = \frac{m_A}{m_B} \times d_x \quad (1-1)$$

式中  $X$ ——小于某粒径的试样质量占试样总质量的百分比，%；

$m_A$ ——小于某粒径的试样质量，g；

$m_B$ ——当细筛分析时或用密度计法分析时所取试样质量，粗筛分析时为试样总质量，g；

$d_x$ ——粒径小于 2mm 或粒径小于 0.075mm 的试样质量占总质量的百分数，如试样中无大于 2mm 粒径或无小于 0.075mm 的粒径，或作粗筛分析时， $d_x=100\%$ 。

(2) 制图。由试验结果可以绘制颗粒大小分布曲线：以小于某粒径的试样质量占试样总质量的百分比为纵坐标，颗粒粒径为横坐标，在半对数坐标上绘制颗粒大小分布曲线（也叫粒径级配曲线）。

(3) 不均匀系数按式 (1-2) 计算：

$$C_u = d_{60}/d_{10} \quad (1-2)$$

式中  $C_u$ ——不均匀系数；

$d_{60}$ ——限制粒径，颗粒大小分布曲线上的某粒径，小于该粒径的土含量占总质量的 60%；

$d_{10}$ ——有效粒径，颗粒大小分布曲线上的某粒径，小于该粒径的土含量占总质量的 10%。

(4) 曲率系数按式 (1-3) 计算：

$$C_c = d_{30}^2/(d_{10} \times d_{60}) \quad (1-3)$$

式中  $C_c$ ——曲率系数；

$d_{30}$ ——颗粒大小分布曲线上的某粒径，小于该粒径的土含量占总质量的 30%。

## 五、注意事项

(1) 在进行筛析过程中，尤其是将试样由一器皿倒入另一器皿时，要避免或尽量减少微小颗粒的飞扬。

(2) 过筛后，要检查筛孔中是否夹有颗粒，若夹有颗粒时应将颗粒轻刷下，放入该筛盘上的土样中。

(3) 将留在各筛盘上的土粒称量，准确到 0.1g，并测量试样中最大颗粒直径。若大于 2mm 的颗粒超过全重 50%，则应再进行粗筛。

## 六、成果应用

试验结果可用于土的分类与定名，除有机土外，最合理的土的分类办法一般是根据颗粒级配划分出粗粒土和细粒土两大类，然后再将粗粒土根据级配，细粒土根据稠度进一步详细分类。

在颗粒大小分布曲线上查出几个特殊点  $d_{60}$ 、 $d_{30}$ 、 $d_{10}$ ，即可求得不均匀系数与曲率系数，用来判断土的级配和均一性，供工程使用。不均匀系数  $C_u$  反映大小不同粒组的分布情况， $C_u$  越大表示土粒大小分布的范围越大，其级配越良好，作为填方工程的土料时，则比较容易获得较大的密实度。曲率系数  $C_c$  则反映累计曲线的整体形态，当  $C_c > 3.0$  或  $C_c < 1.0$  时，曲线上会出现局部水平段即曲线的斜率不连续。当  $C_u > 5.0$  且  $1.0 < C_c < 3.0$  时，土的级配良好，反之，则认为是级配不良的土。对于地基土或土料，粒径级配良好指粒径分布范围大，填塞较密实，颗粒大小分布曲线比较平缓， $C_u$  值较大，作为地基强度



高，压缩性低，透水性小，稳定性好。有渗流存在的情况下， $C_u$  太大时，比较容易发生潜蚀，是不利的。

## 七、思考题

- (1) “粒组”与“粒度成分”两术语有什么区别？
- (2)  $C_u$  和  $C_c$  数值的大小，可反映粒径级配曲线的什么状况？
- (3) 根据试验记录，绘制粒径级配曲线，求  $C_u$  和  $C_c$ ，并说明该土的均一性。

## 八、试验记录

见附录中记录表 1-1 颗粒分析试验记录（筛析法）。

# 第二节 密度计法（比重计法）\*

## 一、基本原理

密度计法是依据司笃克斯（Stokes）定律进行测定的。当土粒在液体中靠自重下沉时，较大的颗粒下沉较快，而较小的颗粒下沉则较慢。一般认为，对于粒径为  $0.2 \sim 0.002\text{mm}$  的颗粒，在液体中靠自重下沉时，作等速运动，这符合司笃克斯定律。

密度计法，是将一定量的土样（粒径小于  $0.075\text{mm}$ ）放在量筒中，然后加纯水，经过搅拌，使土的大小颗粒在水中均匀分布，制成一定量的均匀浓度的土悬液（ $1000\text{mL}$ ）。静止悬液，让土粒沉降，在土粒下沉过程中，用密度计测出在悬液中对应于不同时间的不同悬液密度，根据密度计读数和土粒的下沉时间，就可计算出粒径小于某一粒径  $d\text{mm}$  的颗粒占土样的百分数。

用密度计进行颗粒分析须作下列 3 个假定：

- (1) 司笃克斯定律能适用于用土样颗粒组成的悬液。
- (2) 试验开始时，土的大小颗粒均匀地分布在悬液中。
- (3) 所采用量筒的直径较比重计直径大得多。

## 二、仪器设备

(1) 密度计：目前通常采用的密度计有甲、乙两种，这两种密度计的制造原理及使用方法基本相同，但密度计的读数所表示的含义则是不同的，甲种密度计读数所表示的是一定量悬液中的干土质量；乙种密度计读数所表示的是悬液比重。

1) 甲种密度计，刻度单位以在  $20^\circ\text{C}$  时每  $100\text{mL}$  悬液内所含土质量的克数来表示，刻度为  $-5 \sim 50$ ，最小分度值为  $0.5$ 。

2) 乙种密度计（ $20^\circ\text{C}/20^\circ\text{C}$ ），刻度单位以在  $20^\circ\text{C}$  是悬液的比重来表示，刻度为  $0.995 \sim 1.020$ ，最小分度值为  $0.0002$ 。

---

\* 教学大纲要求的实验项目。

(2) 量筒：容积为 1000mL，内径约为 60mm，高约 42~45cm，刻度 0~1000mL，分度值为 10mL。

(3) 孔径 2mm，1mm，0.5mm，0.25mm 和 0.075mm 的细筛以及孔径 0.075mm 的洗筛。

(4) 洗筛漏斗：上口直径大于洗筛直径，下口直径略小于量筒直径。

(5) 天平：称量 1000g、最小分度值 0.1g；称量 200g、最小分度值 0.01g。

(6) 搅拌器：轮径 50mm，孔径 3mm，杆长约 450mm，带螺旋叶。

(7) 煮沸设备：电砂浴或电热板（附冷凝管装置）。

(8) 温度计：刻度 0~50℃、最小分度值 0.5℃。

(9) 其他：秒表、锥形烧瓶（容积 500mL）、研钵、木杵、电导率仪等。

### 三、试剂

(1) 分散剂：4%六偏磷酸钠溶液，在 100mL 水中溶解 4g 六偏磷酸钠  $[(NaPO_3)_6]$ 。

(2) 易溶盐检验试剂：5%酸性硝酸银溶液，在 100mL 的 10%硝酸（HNO<sub>3</sub>）溶液中溶解 5g 硝酸银（AgNO<sub>3</sub>）。

(3) 易溶盐检验试剂：5%酸性氯化钡溶液，在 100mL 的 10%盐酸（HCl）溶液中溶解 5g 氯化钡（BaCl<sub>2</sub>）。

### 四、操作步骤

(1) 称取具有代表性的风干土样 200~300g，过 2mm 筛，并求出留在筛上试样质量占试样总质量的百分比。

(2) 测定通过 2mm 筛试样的风干含水率。

(3) 称取干土质量为 30g 的风干试样。干土质量为 30g 的风干土样质量可按式计算。

当易溶盐含量小于 1%时按式（1-4）计算：

$$m_0 = 30 \times (1 + 0.01w_0) \quad (1-4)$$

当易溶盐含量不小于 1%时按式（1-5）计算：

$$m_0 = \frac{30 \times (1 + 0.01w_0)}{1 - 0.01W} \quad (1-5)$$

式中  $m_0$ ——风干土质量，g；

$w_0$ ——风干土含水率，%；

$W$ ——易溶盐含量，%。

(4) 当试样中易溶盐含量大于 0.5%时，则说明试样中含有了足以使悬液成团下降的易溶盐，应进行洗盐。易溶盐含量的检验方法可采用电导法或目测法。

1) 易溶盐含量检验有两种方法，分别为电导法和目测法。

a. 电导法。采用电导率仪，测定  $T^\circ\text{C}$  时试样溶液（土水比为 1:5）的电导率，并按式（1-6）计算 20℃ 时的电导率：

$$K_{20} = \frac{K_T}{1 + 0.02(T - 20)} \quad (1-6)$$

式中  $K_{20}$ ——20℃时悬液的电导率,  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ;

$K_T$ —— $T^\circ\text{C}$ 时悬液的电导率,  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ;

$T$ ——测定时悬液的温度,  $^\circ\text{C}$ 。

当  $K_{20}$  大于  $1000\mu\text{S}/\text{cm}$  时, 应进行洗盐。

b. 目测法。取风干试样 3g 于烧杯中, 加适量纯水调成糊状, 并用带橡皮头的玻璃棒研散, 再加 25mL 纯水, 煮沸 10min, 冷却后经漏斗注入 30mL 的试管中, 静置过夜, 观察试管, 若试管中悬液出现凝聚现象, 应进行洗盐。

2) 洗盐方法。按式 (1-4) 或式 (1-5) 计算并称取干土质量为 30g 的风干试样质量, 准确至 0.01g, 倒入 500mL 的锥形瓶中, 加纯水 200mL, 搅拌后迅速倒入贴有滤纸的漏斗中, 并注入纯水冲洗过滤, 若发现滤液混浊, 则必须重新过滤, 直到滤液的电导率  $K_{20}$  小于  $1000\mu\text{S}/\text{cm}$  或对于 5% 酸性硝酸银溶液和 5% 酸性氯化钡溶液无白色沉淀反应为止。

(5) 将风干试样或洗盐后在滤纸上的试样, 倒入 500mL 锥形瓶, 注入 200mL 纯水, 然后浸泡过夜。

(6) 将锥形瓶置于煮沸设备上煮沸, 煮沸时间为 40min~1h。

(7) 将冷却后的悬液倒入烧杯中, 静置 1min, 并将上部悬液通过 0.075mm 筛, 遗留杯底沉淀物用带橡皮头的研杆研散, 再加适量水搅拌, 静置 1min, 再将上部悬液通过 0.075mm 筛, 如此重复进行, 直至静置 1min 后, 上部悬液澄清为止, 但是须注意的是, 最后所得悬液不得超过 990mL。

(8) 将筛上和杯中砂粒合并洗入蒸发皿中, 倒去清水, 烘干, 称量, 然后进行筛孔径分别为 2.0mm、1.0mm、0.5mm、0.25mm 和 0.075mm 的细筛分析, 并计算大于 0.075mm 的各级颗粒占试样总质量的百分比。

(9) 将已通过 0.075mm 筛的悬液倒入量筒内, 加入 10mL 的 4% 六偏磷酸钠分散剂, 再注入纯水至 1000mL。

(10) 用搅拌器在量筒内, 沿悬液深度上下搅拌 1min, 往复约 30 次, 使悬液内土粒均匀分布, 但在搅拌时注意不能使悬液溅出筒外。

(11) 取出搅拌器, 将密度计放入悬液中的同时, 立即开动秒表, 测记 0.5min, 1min, 2min, 5min, 15min, 30min, 60min, 120min 和 1440min 时的密度计读数。每次读数前 10~20s, 均应将密度计放入悬液中, 且保持密度计浮泡处在量筒中心, 不得贴近量筒内壁。

(12) 每次读数后, 应取出密度计放入盛有纯水的量筒中, 并测定相应的悬液温度, 准确至  $0.5^\circ\text{C}$ , 放入或取出密度计时, 应小心轻放, 不得扰动悬液。

(13) 密度计读数均以弯液面上缘为准。甲种密度计应准确至 0.5, 乙种密度计应准确至 0.0002。

## 五、数据整理

(1) 小于某粒径的试样质量占试样质量的百分比, 可按式 (1-7) 或式 (1-9) 计算。

1) 甲种密度计按式 (1-7) 计算:

$$X = \frac{100}{m_d} C_G (R + m_T + n - C_D) \quad (1-7)$$

式中  $X$ ——小于某粒径的试样质量百分比, %;

$m_d$ ——试样干质量;

$m_T$ ——悬液温度校正值, 查表 1-1;

$C_D$ ——分散剂校正值;

$n$ ——弯液面校正值;

$R$ ——甲种密度计读数;

$C_G$ ——土粒比重校正值, 可按式 (1-8) 计算, 或查表 1-2。

$$C_G = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_{w20}} \times \frac{2.65}{2.65 - \rho_{w20}} \quad (1-8)$$

式中  $\rho_s$ ——土粒密度;

$\rho_{w20}$ ——20℃时水的密度, g/cm<sup>3</sup>,  $\rho_{w20} = 0.998232$  g/cm<sup>3</sup>。

2) 乙种密度计按式 (1-9) 计算:

$$X = \frac{100V_x}{m_d} C_G' [(R' - 1) + m_T' + n' - C_D'] \rho_{w20} \quad (1-9)$$

式中  $m_T'$ ——悬液温度校正值, 查表 1-1;

$n'$ ——弯液面校正值;

$C_D'$ ——分散剂校正值;

$R'$ ——乙种密度计读数;

$V_x$ ——悬液体积 (1000mL);

$C_G'$ ——土粒比重校正值, 可按式 (1-10) 计算, 或查表 1-2。

$$C_G' = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_{w20}} \quad (1-10)$$

表 1-1 悬液温度校正值

| 悬液温度<br>(℃) | 甲种密度计<br>温度校正值 $m_T$ | 乙种密度计<br>温度校正值 $m_T'$ | 悬液温度<br>(℃) | 甲种密度计<br>温度校正值 $m_T$ | 乙种密度计<br>温度校正值 $m_T'$ |
|-------------|----------------------|-----------------------|-------------|----------------------|-----------------------|
| 10.0        | -2.0                 | -0.0012               | 15.5        | -1.1                 | -0.0007               |
| 10.5        | -1.9                 | -0.0012               | 16.0        | -1.0                 | -0.0006               |
| 11.0        | -1.9                 | -0.0012               | 16.5        | -0.9                 | -0.0006               |
| 11.5        | -1.8                 | -0.0011               | 17.0        | -0.8                 | -0.0005               |
| 12.0        | -1.8                 | -0.0011               | 17.5        | -0.7                 | -0.0004               |
| 12.5        | -1.7                 | -0.0010               | 18.0        | -0.5                 | -0.0003               |
| 13.0        | -1.6                 | -0.0010               | 18.5        | -0.4                 | -0.0003               |
| 13.5        | -1.5                 | -0.0009               | 19.0        | -0.3                 | -0.0002               |
| 14.0        | -1.4                 | -0.0009               | 19.5        | -0.1                 | -0.0001               |
| 14.5        | -1.3                 | -0.0008               | 20.0        | -0.0                 | -0.0000               |
| 15.0        | -1.2                 | -0.0008               | 20.0        | +0.0                 | +0.0000               |

续表

| 悬液温度<br>(℃) | 甲种密度计<br>温度校正值 $m_T$ | 乙种密度计<br>温度校正值 $m_T'$ | 悬液温度<br>(℃) | 甲种密度计<br>温度校正值 $m_T$ | 乙种密度计<br>温度校正值 $m_T'$ |
|-------------|----------------------|-----------------------|-------------|----------------------|-----------------------|
| 20.5        | +0.1                 | +0.0001               | 25.5        | +1.9                 | +0.0011               |
| 21.0        | +0.3                 | +0.0002               | 26.0        | +2.1                 | +0.0013               |
| 21.5        | +0.5                 | +0.0003               | 26.5        | +2.2                 | +0.0014               |
| 22.0        | +0.6                 | +0.0004               | 27.0        | +2.5                 | +0.0015               |
| 22.5        | +0.8                 | +0.0005               | 27.5        | +2.6                 | +0.0016               |
| 23.0        | +0.9                 | +0.0006               | 28.0        | +2.9                 | +0.0013               |
| 23.5        | +1.1                 | +0.0007               | 28.5        | +3.1                 | +0.0019               |
| 24.0        | +1.3                 | +0.0008               | 29.0        | +3.3                 | +0.0021               |
| 24.5        | +1.5                 | +0.0009               | 29.5        | +3.5                 | +0.0023               |
| 25.0        | +1.7                 | +0.0010               | 30.0        | +3.7                 | +0.0023               |

表 1-2

土 粒 比 重 校 正 值

| 土 粒 比 重 | 比 重 校 正 值       |                  |
|---------|-----------------|------------------|
|         | 甲种密度计 ( $C_G$ ) | 乙种密度计 ( $C_G'$ ) |
| 2.50    | 1.038           | 1.666            |
| 2.52    | 1.032           | 1.658            |
| 2.54    | 1.027           | 1.649            |
| 2.56    | 1.022           | 1.641            |
| 2.58    | 1.017           | 1.632            |
| 2.60    | 1.012           | 1.625            |
| 2.62    | 1.007           | 1.617            |
| 2.64    | 1.002           | 1.609            |
| 2.66    | 0.908           | 1.603            |
| 2.68    | 0.993           | 1.595            |
| 2.70    | 0.989           | 1.588            |
| 2.72    | 0.985           | 1.581            |
| 2.74    | 0.981           | 1.575            |
| 2.76    | 0.977           | 1.568            |
| 2.78    | 0.973           | 1.562            |
| 2.80    | 0.969           | 1.556            |
| 2.82    | 0.965           | 1.549            |
| 2.84    | 0.961           | 1.543            |
| 2.86    | 0.958           | 1.538            |
| 2.88    | 0.954           | 1.532            |

(2) 试样颗粒粒径按司笃克斯公式 (1-11) 计算:

$$d = \sqrt{\frac{1800 \times 10^4 \eta}{(G_s - G_{WT}) \rho_{WT} g}} \cdot \frac{L}{t} = K \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (1-11)$$

式中  $d$ ——试样颗粒粒径, mm;

$\eta$ ——水的动力黏滞系数,  $\text{kPa} \cdot \text{s} \times 10^{-6}$ , 可由表 11-1 查得;

$G_s$ ——土粒比重;

$G_{WT}$ —— $T^\circ\text{C}$ 时水的比重;

$\rho_{WT}$ —— $4^\circ\text{C}$ 时纯水的密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;

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

$L$ ——某一时间内的土粒沉降距离, cm;

$t$ ——沉降时间, s;

$K$ ——粒径计算系数 =  $\sqrt{\frac{1800 \times 10^4 \eta}{(G_s - G_{WT}) \rho_{WT} g}}$ , 与悬液温度和土粒比重有关, 可由表 1-3 查得。

表 1-3 粒径计算系数  $K$  值表

| K<br>值<br>温度<br>( $^\circ\text{C}$ ) | 土粒<br>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                                    |          | 0.1304 | 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  | 0.1094  |
| 14                                   |          | 0.1221 | 0.1200 | 0.1180 | 0.1162 | 0.1149 | 0.1127 | 0.1111 | 0.1095  | 0.1080  |
| 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 | 0.1103 | 0.1090 | 0.1073 | 0.1088 | 0.1031 | 0.1088  | 0.1014  |
| 20                                   |          | 0.1130 | 0.1111 | 0.1093 | 0.1075 | 0.1059 | 0.1043 | 0.1029 | 0.1014  | 0.1000  |
| 21                                   |          | 0.1118 | 0.1099 | 0.1081 | 0.1064 | 0.1043 | 0.1033 | 0.1018 | 0.1003  | 0.0990  |
| 22                                   |          | 0.1103 | 0.1085 | 0.1067 | 0.1050 | 0.1035 | 0.1019 | 0.1004 | 0.0990  | 0.09767 |
| 23                                   |          | 0.1091 | 0.1072 | 0.1055 | 0.1038 | 0.1023 | 0.1007 | 0.0993 | 0.09793 | 0.09659 |

续表

| K<br>值<br>温度<br>(℃) | 土粒<br>比重 | 2.45    | 2.50    | 2.55    | 2.60    | 2.65    | 2.70    | 2.75    | 2.80    | 2.85    |
|---------------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                     |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| 24                  |          | 0.1078  | 0.1061  | 0.1044  | 0.1028  | 0.1012  | 0.0997  | 0.09823 | 0.0960  | 0.09555 |
| 25                  |          | 0.1065  | 0.1047  | 0.1031  | 0.1014  | 0.0999  | 0.09839 | 0.09701 | 0.09566 | 0.09434 |
| 26                  |          | 0.1054  | 0.1035  | 0.1019  | 0.1003  | 0.09879 | 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  | 0.0991  | 0.09752 | 0.09597 | 0.09450 | 0.09311 | 0.09176 | 0.09050 | 0.08927 |
| 35                  |          | 0.09565 | 0.09405 | 0.09255 | 0.09112 | 0.08968 | 0.08835 | 0.08708 | 0.08686 | 0.08468 |
| 40                  |          | 0.09120 | 0.08968 | 0.08822 | 0.08684 | 0.08550 | 0.08424 | 0.08301 | 0.08186 | 0.08073 |

(3) 制图。以小于某粒径的试样质量占试样总质量的百分比为纵坐标，以颗粒粒径为对数横坐标，在单对数坐标上绘制颗粒大小分布曲线。必须注意的是，当试样中既有小于 0.075mm 的颗粒，又有大于 0.075mm 的颗粒时，应考虑到小于 0.075mm 的试样质量占试样总质量的百分比，即应按式 (1-7) 或式 (1-9) 所得的计算结果，再乘以小于 0.075mm 的试样质量占总质量的百分比，然后再分别绘制密度计法和筛析法所得的颗粒大小分布曲线，并将曲线连成一条平滑的曲线。

## 六、密度计校正

密度计在制造过程中，其浮泡体积及刻度往往不易准确，况且密度计的刻度是以纯水为标准的。当悬液中加入分散剂后，悬液的比重则比原来增大，因此，密度计在使用前应对刻度、弯液面、土粒沉降距离、温度、分散剂等的影响进行校正。

### 1. 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℃，以弯液面上缘为准，测记水面在量筒上的读数并划一标记，然后将密度计缓慢放入量筒中，使水面达密度计的最低刻度处（以弯液面上缘为准）时，测记水面在量筒上的读数并再划一标记，水面在量筒上的两个读数之差即为密度计的浮泡体积，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之后，将密度计垂直向上缓慢提起，并使水面恰好落在两标记的中间，此时，水面与浮泡的相切处（以弯液面上缘为准），即为密度计浮泡的中心，将密度计固定在三脚架上，用直尺量出浮泡中心至密度计最低刻度的垂直距离。

(3) 测定 1000mL 量筒的内径（准确至 1mm），并计算出量筒的截面积。

(4) 量出密度计最低刻度至玻璃杆上各刻度的距离，每 5 格量距 1 次。

(5) 按式 (1-12) 计算土粒有效沉降距离：

$$L = L' - \frac{V_b}{2A} = L_1 + \left( L_0 - \frac{V_b}{2A} \right) \quad (1-12)$$

式中  $L$ ——土粒有效沉降距离, cm;

$L'$ ——水面至密度计浮泡中心的距离, cm;

$L_1$ ——最低刻度至玻璃杆上各刻度的距离, cm;

$L_0$ ——密度计浮泡中心至最低刻度的距离, cm;

$V_b$ ——密度计浮泡体积,  $\text{cm}^3$ ;

$A$ ——1000mL 量筒的截面积,  $\text{cm}^2$ 。

(6) 用所量出的最低刻度至玻璃杆上各刻度的不同距离  $L_1$  值代入式 (1-12), 可计算出各相应的土粒有效沉降距离  $L$  值, 并绘制密度计读数与土粒有效沉降距离的关系曲线, 从而根据密度计的读数就可得出土粒有效沉降距离。

## 2. 刻度及弯液面校正

试验时密度计的读数是以弯液面的上缘为准的, 而密度计制造时其刻度是以弯液面的下缘为准, 因此应对密度计刻度及弯液面进行校正。

将密度计放入  $20^\circ\text{C}$  纯水中, 此时密度计上弯液面的上缘、下缘的读数之差即为弯液面的校正值。

## 3. 温度校正

密度计刻度是在  $20^\circ\text{C}$  时刻制的, 但试验时的悬液温度不一定恰好等于  $20^\circ\text{C}$ , 而水的密度变化及密度计浮泡体积的膨胀, 会影响到密度计的准确读数, 因此需要加以温度校正。

密度计读数的温度校正可从表 1-1 查得。

## 4. 土粒比重校正

密度计刻度系假定悬液内土粒的比重为 2.65, 若试验时土粒的比重不是 2.65, 则必须加以校正, 甲、乙两种密度计的比重校正值可分别按式 (1-8) 和式 (1-10) 计算, 或由表 1-2 查得。

## 5. 分散剂校正

在用密度计读数时, 若在悬液中加入分散剂, 则也应考虑分散剂对密度计读数的影响。具体方法是将 1000mL 的纯水恒温至  $20^\circ\text{C}$ , 先测出密度计在  $20^\circ\text{C}$  纯水中的读数, 然后再加试验时采用的分散剂, 用搅拌器在量筒内沿整个深度上下搅拌均匀, 并将密度计放入溶液中测记密度计读数, 两者之差, 即为分散剂校正值。

# 七、试验记录

见附录中记录表 1-2 颗粒大小分析试验记录 (密度计法)。



## 试验二 土粒相对密度试验 (相对密度瓶法)\*

### 一、基本原理

土粒相对密度，旧称土粒比重，是指土粒在  $105\sim 110^{\circ}\text{C}$  温度下烘至恒量时的质量与同体积  $4^{\circ}\text{C}$  时纯水质量的比值，无量纲。土粒密度这一概念，指土的固体部分的单位体积质量。由于  $4^{\circ}\text{C}$  时纯水的密度为  $1\text{g}/\text{cm}^3$ ，故土粒密度与土粒相对密度两者在数量上相等。测土粒相对密度时，土的固体部分的质量  $m_d$  用精密天平测得。土粒体积一般用测量排出与土粒同体积之液体的体积的方法测得，通常用相对密度瓶法测定土粒体积。此法适用于粒径小于  $5\text{mm}$  的各类土。

在用相对密度瓶法测定固体体积时，必须注意所排除的液体体积确能代表固体颗粒的真实体积。土中若含有气体，实验时必须将气体排尽，否则会影响测试精度。一般可用煮沸法或抽气法排除土内气体。所用的液体一般为纯水。砂土宜用真空排气法，对含有大量的可溶盐类、有机质和亲水性胶体的土必须用中性液体，如煤油、汽油、甲苯和二甲苯代替纯水，此时必须用抽气法排气，真空表读数宜接近当地一个大气压值，抽气时间不得少于  $1\text{h}$ 。

### 二、仪器设备

(1) 相对密度瓶：容量  $100\text{mL}$  或  $50\text{mL}$ ，分长颈和短颈两种，短颈也叫毛细式相对密度瓶（图 2-1）。

(2) 分析天平：称量  $200\text{g}$ ，感量  $0.001\text{g}$ 。

(3) 砂浴（或可调电加热器）：应能调节温度。

(4) 恒温水槽：准确度应为  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

(5) 温度计：测温范围  $0\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，精确至  $0.5^{\circ}\text{C}$ 。

(6) 其他：纯水、小漏斗、磁钵及研棒等。

### 三、操作步骤

(1) 相对密度瓶校准。

1) 将相对密度瓶洗净，烘干，置于干燥器内，冷

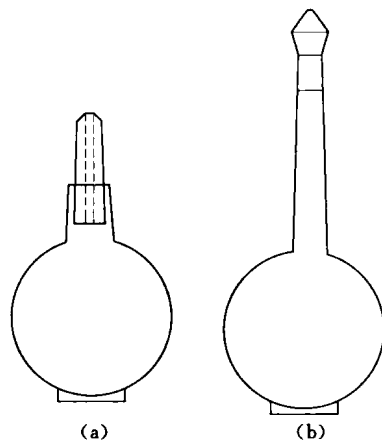


图 2-1 相对密度瓶  
(a) 毛细式；(b) 长颈式

\* 教学大纲要求的实验项目。