

“十三五”普通高等教育实验实训规划教材

土力学实验指导书

主编 朱秀清



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

“十三五”普通高等教育实验实训规划教材

土力学实验指导书

主编 朱秀清



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书介绍了土工试验常用的试验方法、试验原理、试验仪器设备、试验操作步骤、试验数据记录与处理等。全书内容共6章, 主要内容包括: 土的颗粒分析试验; 土的物理性质指标试验; 土的物理状态指标试验; 土的力学性质指标试验; 创新与探索性试验; 土样制备和饱和。主要章节试验后附有思考题及试验注意事项, 用于读者对相关内容的理解与思考。

本书可作为普通高等学校水利水电工程专业、农业水土工程专业、水文与水资源工程专业、水利工程管理专业等专业的试验教学用书, 也可为土工实验人员及从事相关专业的工程技术人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

土力学实验指导书 / 朱秀清主编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2017. 10

“十三五”普通高等教育实验实训规划教材

ISBN 978-7-5170-6009-3

I. ①土… II. ①朱… III. ①土力学—实验—高等学校—教材 IV. ①TU43-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第267305号

书 名	“十三五”普通高等教育实验实训规划教材 土力学实验指导书
作 者	TULIXUE SHIYAN ZHIDAO SHU 主编 朱秀清
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 6印张 142千字
版 次	2017年10月第1版 2017年10月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	18.00元

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

《土力学实验指导书》是普通高等学校本科水利工程、土木工程等工程类专业的土力学实验教学用书。土力学是建筑工程类专业的一门重要的专业基础课，而土工试验是该课程的重要的实践环节之一。通过试验学生可以巩固、验证、丰富相关的土力学基础知识；也可以熟悉仪器设备的性能、操作、掌握必要的试验技术，获取工程设计必需的基本参数；还可以培养工程意识、协作精神以及综合应用所学专业知解决 ze 实际 ze 问题的能力。

为了能够充分满足开展各类型土力学试验项目的需要，本书每个试验项目内容介绍尽可能详细，包括基本概念、试验方法、实验原理、试验操作步骤、实验数据记录与处理、试验可能产生误差的原因分析及注意事项等，内容实用、易懂，从而使读者能够参照相关内容顺利完成试验。

本书根据 2014 年工程教育认证标准对实验课程的要求，并参照国家及相关行业关于土工试验的规范和规程规定等，把实验类型分为：认知性实验、验证性实验、综合性实验以及设计性实验等。全书共有 6 章，第 1 章为土的颗粒分析试验，包括筛析法和水分法等；第 2 章为土的物理性质指标试验，包括容重与密度试验、含水率（量）试验、比重试验等；第 3 章为土的物理状态指标试验，包括黏性土界限含水率（量）试验、砂土相对密度试验等；第 4 章为土的力学性质指标试验，包括渗透试验、固结（压缩）试验、直接剪切试验、击实试验等；第 5 章为创新与探索性试验，包括三轴压缩试验、无侧限抗压强度试验、无黏性土休止角试验等；第 6 章为土样制备和饱和，包括土样制备和饱和常用仪器设备、试样的制备等。

本书涉及的试验项目较多，读者可以根据专业需求及实验教学课时数、大学生创新创业计划项目实验、实际工程项目课题试验等情况选择实施，培养学生基于科学原理并采用科学方法对复杂工程问题进行研究，包括设计实验、分析与解释数据，并通过相关信息综合得到合理有效的结论的能力。

本书由天津农学院王仰仁教授、中交天津港湾工程研究院有限公司叶国良

高工审阅。

本书在编写过程中引用了许多行业学者、专家在教学、试验、科研中积累的资料，并参考了有关规范规程及高等院校编著的教材的有关内容，在此表示由衷的感谢。由于作者水平有限，书中可能存在错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2017年6月

目 录

前言	
第 1 章 土的颗粒分析试验	1
1.1 概述	1
1.2 筛析法	5
1.3 密度计法（水分法之一）	8
第 2 章 土的物理性质指标试验	17
2.1 容重与密度试验	17
2.2 含水率（量）试验	23
2.3 比重试验	26
第 3 章 土的物理状态指标试验	33
3.1 黏性土界限含水率（量）试验	33
3.2 砂土相对密度试验	39
第 4 章 土的力学性质指标试验	43
4.1 渗透试验	43
4.2 固结（压缩）试验	51
4.3 直接剪切试验	57
4.4 击实试验	61
第 5 章 创新与探索性试验	65
5.1 三轴压缩试验	65
5.2 无侧限抗压强度试验	74
5.3 无黏性土休止角试验	77
第 6 章 土样制备和饱和	79
6.1 概述	79
6.2 土样制备和饱和常用仪器设备	79
6.3 试样的制备	80

6.4 试样饱和.....	83
6.5 试验记录与成果整理.....	86
6.6 土的描述.....	87
参考文献	89

第1章 土的颗粒分析试验

1.1 概 述

颗粒分析试验是测定干土中各种粒组所占该土总质量的百分数的方法，借以明了颗粒大小分布情况，供土的分类及概略判断土的工程性质及选料之用。如在施工现场所进的砂、碎石等施工建筑材料，都必须按规定取样送到实验室进行颗粒分析试验等。

1.1.1 试验目的

土是由各种大小和形状不同的颗粒所组成的，根据颗粒大小将土划分为若干组，称为颗粒粒组。所谓颗粒组成即颗粒级配，就是土中各种粒径范围的粒组在土中的相对比例，通常用占总土质量的百分数来表示。土的粒组组成在一定程度上反映了土的性质。工程上常依据粒组组成对土进行分类，粗粒土主要是依据粒组组成进行分类；细粒土由于矿物成分、颗粒形状及胶体含量等因素，则不能单以粒组组成进行分类，而要借助于塑性图或塑性指数进行分类。颗粒分析试验是测定土中各粒组所占该土总质量的百分数的方法，因此可以了解颗粒大小分布情况，供土的分类及概略判断土的工程性质，也用于进场建筑材料的选料依据。

1.1.2 试验方法

颗粒分析试验的方法主要有两大类：①机械分析法，如筛析法；②物理分析法，如水分法（包括密度计法、移液管法等）。

(1) 筛析法：适用于分析粒径大于 0.075mm 的土样。

(2) 水分法：适用于分析粒径小于 0.075mm 的土样，包括密度计法、移液管法等，本章只介绍密度计法。

(3) 若试样中大于 0.075mm 粒径及小于 0.075mm 粒径都有，则联合使用筛析法及水分法。

为了建立评价土的统一标准，初步判别土的工程特性和评价土作为建筑物地基或建筑材料的适宜性，因此，水利行业标准 SL 237—1999《土工试验规程》根据土的颗粒大小及分布、土的塑性及液限等都对土进行了工程分类。

1.1.3 土的级配指标

土的级配情况是否良好，常用不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 来描述，其表达式分别见式 (1.1) 和式 (1.2)。

不均匀系数

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1.1)$$

曲率系数

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{60}d_{10}} \quad (1.2)$$

式中 d_{60} 、 d_{30} 、 d_{10} ——粒径分布曲线上纵坐标为 60%、30%、10% 时所对应的土粒粒径， d_{10} 称为有效粒径， d_{60} 称为限制粒径。

不均匀系数 C_u 反映粒径曲线坡度的陡缓，表明土粒大小的不均匀程度。 C_u 值愈大，粒径曲线坡度愈缓，表明土粒大小愈不均匀；反之， C_u 值愈小，曲线的坡度愈陡，表明土粒大小愈均匀。工程上常把 $C_u < 5$ 的土称为匀粒土，而把 $C_u \geq 5$ 的土称为非匀粒土。曲率系数 C_c 反映粒径分布曲线的整体形状、连续性、及细粒含量。研究指出： $C_c < 1.0$ 的土往往级配不连续，细粒含量大于 30%； $C_c > 3$ 的土也是不连续的，细粒含量小于 30%；当土的曲率系数 $C_c = 1 \sim 3$ 时，级配的连续性较好。因此要满足级配良好的要求，除土粒大小不均匀 ($C_u \geq 5$) 外，还要求曲线有较好的连续性，符合曲率系数 $C_c = 1 \sim 3$ 的条件。所以，工程中对粗粒土级配是否良好的判定规定如下：

(1) 级配良好的土：能同时满足 $C_u \geq 5$ 及 $C_c = 1 \sim 3$ 的条件。土的多数粒径分布曲线主段呈光滑下凹的型式，坡度较缓，土粒大小连续。

(2) 级配不良的土：不能同时满足 $C_u \geq 5$ 及 $C_c = 1 \sim 3$ 两个条件。土的粒径分布曲线坡度较陡，即土粒大小比较均匀；或土粒虽然不均匀，但其粒径分布曲线不连续，出现水平段，呈台阶状，表明有缺粒段。

1.1.4 巨粒土和粗粒土的工程分类

1.1.4.1 分类的基本原则

- (1) 以能反映土性的指标作为分类的依据。
- (2) 能反映土在不同工作条件下的特性。
- (3) 要有一定的逻辑性，成体系，纲目分明，而且简单易记，便于应用。

1.1.4.2 分类指标的选择依据

对巨粒土、粗粒土，主要以粒径大小及其级配作为分类的依据。

1.1.4.3 不同行业使用的分类方法

1. 水利行业标准 SL 237—1999《土工试验规程》分类法

(1) 巨粒土系指巨粒粒组质量大于总质量 50% 的土。巨粒土分为巨粒土、混合巨粒土和巨粒混合土，见表 1.1。

表 1.1 巨粒土分类表

土类	粒组含量		土代号	土名称
巨粒土	巨粒含量 75%~100%	漂石粒含量 > 50%	B	漂石
		漂石粒含量 ≤ 50%	C _b	卵石
混合巨粒土	巨粒含量 50%~75%	漂石粒含量 > 50%	BSI	混合漂石
		漂石粒含量 ≤ 50%	C _b SI	混合卵石
巨粒混合土	巨粒含量 15%~50%	漂石粒含量 > 卵石粒含量	SIB	漂石混合土
		漂石粒含量 ≤ 卵石粒含量	SIC _b	卵石混合土

(2) 大于 0.075mm 的颗粒占土样总质量的 50% 以上的土统称为粗粒土。粗粒土又分为砾类和砂类：粗粒土中的砾组 (2~60mm) 含量超过 50% 为砾类；反之，则为砂类，见表 1.2。

表 1.2 粗 粒 土 分 类 表

土 类	粒 组 含 量		土代号	土名称
砾	细粒含量 < 5%	级配：同时满足 $C_u \geq 5$, $C_c = 1 \sim 3$	GW	级配良好砾
		级配：不同时满足上述要求	GP	级配不良砾
含细粒土砾	细粒含量 5%~15%		GF	含细粒土砾
细粒土质砾	15% < 细粒含量 ≤ 50%	细粒为粉土	GM	粉土质砾
		细粒为黏土	GC	黏土质砾
砂	细粒含量 < 5%	级配：同时满足 $C_u \geq 5$ 及 $C_c = 1 \sim 3$	SW	级配良好砂
		级配：不同时满足上述要求	SP	级配不良砂
含细粒土砂	细粒含量 5%~15%		SF	含细粒土砂
细粒土质砂	15% < 细粒含量 ≤ 50%	细粒为粉土	SM	粉土质砂
		细粒为黏土	SC	黏土质砂

2. 交通部 JTJ 250—98 《港口工程地基规范》分类法

JTJ 250—98 《港口工程地基规范》参照建设部土的分类法将土分为碎石土、砂土、粉土、黏性土和填土 5 大类。本节只介绍砂土及粉土的详细分类。

(1) 砂土。粒径大于 2mm 的颗粒含量不超过总质量的 50%，粒径大于 0.075mm 的颗粒含量超过总质量的 50%。根据颗粒级配按表 1.3 定名。

表 1.3 砂 土 分 类 表

土的名称	粒 组 含 量	土的名称	粒 组 含 量
砾砂	粒径大于 2mm 的颗粒占总质量的 25%~50%	细砂	粒径大于 0.075mm 的颗粒超过总质量的 85%
粗砂	粒径大于 0.5mm 的颗粒超过总质量的 50%	粉砂	粒径大于 0.075mm 的颗粒超过总质量的 50%
中砂	粒径大于 0.25mm 的颗粒超过总质量的 50%		

注 定名时应根据粒径分组由大到小以最先符合者确定。

(2) 粉土。粉土系指塑性指数 $I_p \leq 10$ ，粒径小于 0.075mm 的颗粒超过总质量的 50%，黏粒含量为 $3\% \leq \rho_c < 15\%$ ，可按表 1.4 定名为黏质粉土和砂质粉土。

表 1.4 粉 土 的 分 类

土的名称	黏粒含量 $\rho_c / \%$	土的名称	黏粒含量 $\rho_c / \%$
黏质粉土	$10 \leq \rho_c < 15$	砂质粉土	$3 \leq \rho_c < 10$

注 黏粒，指粒径小于 0.005mm 的颗粒。

1.1.5 细粒土的分类

1.1.5.1 分类指标的选择依据

对细粒土，主要以塑性图作为分类的依据，如图 1.1 所示。

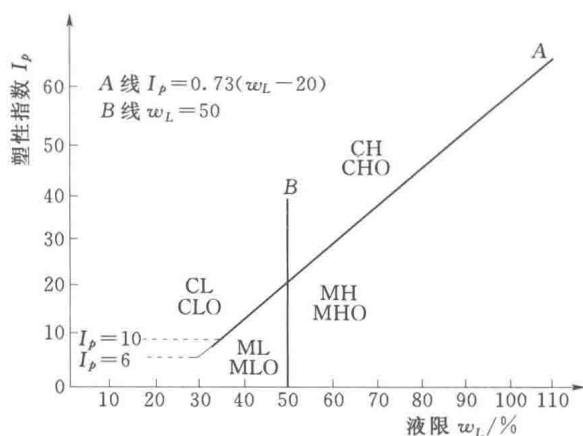


图 1.1 我国 SL 237—1999《土工试验规程》标准采用的塑性图

《土工试验规程》中使用的塑性图是参照国外制定塑性图的经验，并在对我国各地土类加以统计整理的基础上得出的，如图 1.1 所示。图中 A 线是一条折线，其斜线方程式为 $I_p = 0.73(w_L - 20)$ ，在 $w_L = 30\%$ 处与 $I_p = 6$ 的水平线段相交，即 A 线的折点，A 线以上，且 $I_p > 10$ 为黏质土或无机土类；A 线以下为粉质土类或有机质土类 (Organic)。

B 线为 $w_L = 50\%$ 的竖直线，将无机土按液限分为高 (High)、低 (Low) 两档，而将有机质土按液限划分为高 (OH)、低 (OL) 两类，这样就将塑性图划分为 4 个区域，并将细粒土分成 8 类 (CH、CL、MH、ML、CHO、CLO、MHO、MLO)，如图 1.1 所示。各类土的位置、符号、名称详见表 1.5。

表 1.5 细粒土在塑性图上位置及名称

土的塑性指标在塑性图中的位置		土代号	土名称
塑性指数 I_p	液限 w_L		
$I_p \geq 0.73(w_L - 20)$ 和 $I_p \geq 10$	$w_L \geq 50\%$	CH	高液限黏土
		CHO	有机质高液限黏土
	$w_L < 50\%$	CL	低液限黏土
		CLO	有机质低液限黏土
$I_p < 0.73(w_L - 20)$ 和 $I_p < 10$	$w_L \geq 50\%$	MH	高液限粉土
		MHO	有机质高液限粉土
	$w_L < 50\%$	ML	低液限粉土
		MLO	有机质低液限粉土

注 1. 符号为英文第一个字母。

2. 典型土名中其他名称落于相应区域，例如硬质黏土应落于 CL 区。

当遇到各类土搭接情况时，可参考以下规定分类：

(1) 粗细粒组含量百分数处于粗细粒土界线上时，划分为细粒土。

(2) 粗粒土中，粒组含量处于砾类与砂类界线上时，划分为砂类；在良好级配与不良

1.1.5.2 不同行业细粒土的分类方法

1. 交通部 JTJ 250—98《港口工程地基规范》黏性土分类法

黏性土为塑性指数 $I_p > 10$ 的土，分为黏土 ($I_p > 17$)、粉质黏土 ($10 < I_p \leq 17$)。

粉土为 $I_p \leq 10$ 的土。

2. 水利部行业标准 SL 237—1999《土工试验规程》细粒土分类法

小于 0.075mm 的颗粒占 50% 和 50% 以上的土称为细粒土，细粒土可用塑性图来进行分类。SL 237—1999《土

级配的界线上时,按良好级配考虑。

(3) 细粒土中,如处于黏质土与粉质土界线上时,划分为黏质土;在液限高和液限低的界线上时,则按液限高考虑。

1.1.5.3 黏性土的塑性指数和稠度指标

1. 塑性指数

塑性指数的含义:液限和塑限的差值,其表达式见式(1.3)。

$$I_p = w_L - w_p \quad (1.3)$$

式中 I_p ——塑性指数;

w_L ——液限, %;

w_p ——塑限, %。

2. 稠度指标

液性指数 I_L 是土抵抗外力的量度,其值越大,抵抗外力的能力越小,用于评价黏性土的稠度,其表达式见式(1.4)。

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} = \frac{w - w_p}{I_p} \quad (1.4)$$

式中 I_L ——液性指数;

w_L ——液限, %;

w_p ——塑限, %;

w ——天然含水率, %。

由上式可知:

$w \leq w_p$, 即 $I_L \leq 0$ 时,坚硬状态。

$w_p < w < w_L$, 即 $0 < I_L \leq 1.0$ 时,土处于可塑状态,可细分为: $0 \leq I_L \leq 0.25$ 时,硬塑状态; $0.25 < I_L \leq 0.75$ 时,可塑状态; $0.75 < I_L \leq 1.0$ 时,软塑状态; $w > w_L$ 时,即 $I_L > 1.0$,流塑状态。

1.2 筛析法

1.2.1 试验原理

筛析法是分析土颗粒分布最简单的方法,将土样通过各种不同孔径的标准筛,并按筛孔径的大小由上至下依次叠好,对颗粒加以筛析,然后再称量筛上土质量,并计算出各个粒组占土总质量的百分数。小于 0.075mm 孔径的颗粒采用水分法进行分析。

1.2.2 仪器设备

- (1) 试验标准筛: 10mm、5mm、2mm、1mm、0.5mm、0.25mm、0.1mm、0.075mm。
- (2) 电子天平: 称量 1000g, 分度值 0.1g; 称量 200g, 分度值 0.01g。
- (3) 台秤: 称量 5kg, 分度值 1g。
- (4) 振筛机: 应带拍打。
- (5) 其他: 烘箱、量筒、漏斗、瓷盘、毛刷、木碾等。

1.2.3 试验步骤

- (1) 按规定数量取出试样,称量准确至 0.1g; 当试样质量多于 500g 时,应准确

至 1g。

(2) 从风干松散的土样中,用四分对角取样法按规定数量取试样(表 1.6)。四分对角取样法:把试样搅拌均匀,铺成矩形,用两条对角线把试样分成 4 份,合并相对角的两部分,根据需要的数量,多次重复进行取样。

表 1.6 取 样 数 量

粒径尺寸/mm	<2	<10	<20	<40	<60
取样数量/g	100~300	300~1000	1000~2000	2000~4000	4000g 以上

(3) 将取好的试样倒入依次叠好的标准筛最上层(最大孔径)筛内,进行筛析。注意:盖好筛盖,两手上下托住,直立水平摇晃,或用筛析机进行筛析。

(4) 筛析 10min(土工试验规程规定 10~15min)后,再按由上而下的顺序将各筛取下,在空瓷盘上用手摇晃轻叩,如有试样漏下,应继续筛析,直到无试样漏下为止。漏下的土粒应全部放入下级筛内。并将留在各筛上的试样分别称量,准确至 0.1g。注:每级筛上称好的试样,均应做好记录后,再倒回本级筛内,以备试验数据有误时进行复查之用。

(5) 各级筛上及底盘内试样质量总和与试样取土质量之差不得大于 1%。注:根据土的性质及工程要求可适当增减不同筛径的分析筛。

1.2.4 数据记录与成果整理

1. 数据记录

筛析法颗粒分析试验记录表见表 1.7。

表 1.7 筛析法颗粒分析试验记录表

试样编号_____ 试验日期_____ 干土质量_____

试验者_____ 计算者_____ 校核者_____

孔径 /mm	留筛土质量 /g	累计留筛土质量 /g	小于该孔径的土质量 /g	小于该孔径的土质量百分数 /%
10.0				
5.0				
2.0				
1.0				
0.5				
0.25				
0.1				
0.075				
底盘总计				

2. 成果整理

(1) 计算小于某粒径的试样质量占试样总质量百分数。根据式(1.5)计算小于某粒径的试样质量占试样总质量的百分数。

$$x = \frac{m_A}{m_B} d_x \quad (1.5)$$

式中 x ——小于某粒径的试样质量占试样总质量的百分数，%；

m_A ——小于某粒径的试样质量，g；

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

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

(2) 计算不均匀系数 C_u 。根据式 (1.6) 计算不均匀系数。

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1.6)$$

式中 d_{60} 、 d_{10} ——粒径分布曲线上纵坐标为 60%、10% 时所对应的土粒粒径， d_{10} 为有效粒径， d_{60} 为限制粒径。

(3) 计算曲率系数 C_c 。根据式 (1.7) 计算曲率系数。

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{60} d_{10}} \quad (1.7)$$

式中 d_{60} 、 d_{30} 、 d_{10} ——分别为粒径分布曲线上纵坐标为 60%、30%、10% 时所对应的土粒粒径， d_{10} 为有效粒径， d_{60} 为限制粒径。

1.2.5 绘制级配曲线

求出各粒组的颗粒质量百分数，以小于某粒径的试样质量占试样总土质量的百分数为纵坐标，以对数坐标作为横坐标表示粒径 (mm)，在形成的单对数坐标纸上进行绘制颗粒大小分布曲线，又称为土的级配曲线，如图 1.2 所示。

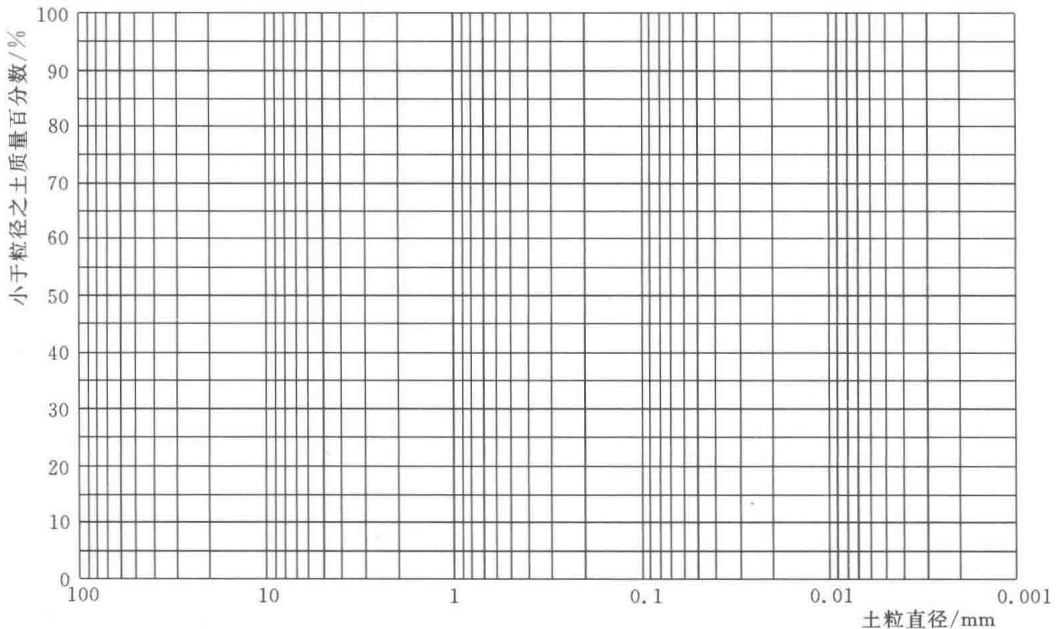


图 1.2 颗粒大小分布曲线

1.2.6 试验注意事项

- (1) 试验前用铜刷将分析筛清理干净，筛上不得遗留颗粒堵塞筛孔。
- (2) 将土样倒入依次叠好的筛子中进行筛析。
- (3) 试验时应小心操作，不要使颗粒散落丢失，影响试验结果。
- (4) 筛析法采用振筛机，在筛析过程中应能上下振动，水平转动。
- (5) 称重后干砂总重精确至 $\pm 2\text{g}$ 。

1.3 密度计法（水分法之一）

密度计法适用于分析粒径小于 0.075mm 的土样，若试样中含有大于 0.075mm 的粒径时，应同时使用密度计法和筛析法。

密度计分甲种和乙种。甲种密度计读数表示 1000mL 悬液中的干土重；乙种密度计读数表示悬液比重。两种密度计其制造原理和使用方法并无不同之处。

1.3.1 试验原理

密度计法是将一定质量的试样加入 4% 浓度的六偏磷酸钠 10mL ，混合成 1000mL 的悬液，并使悬液中的土粒均匀分布。此时悬液中不同大小的土粒下沉速度快慢不一。一方面根据斯笃克（Stokes, G. G, 1845）定律计算悬液中不同大小土粒的直径；另一方面用密度计测定其相应不同大小土粒质量占试样总质量的百分数。

1. 斯笃克定律

斯笃克研究了球体颗粒在悬液中的下沉问题，认为不同球体颗粒在悬液中的下沉速度 v 与它们的直径大小 d 有关，这种反映悬液中颗粒下沉速度和粒径关系的规律，称为斯笃克定律。按照这一定律，土颗粒在溶液中下沉时，较大的土粒首先下沉，经过某一时段 t ，只有比某一粒径 d 小的土粒仍然浮在悬液中，这些土粒在悬液中通过铅直距离 L ，在时间 t 内下沉速度：

$$v = \frac{L}{t} = \frac{(\rho_s - \rho_w)}{1800\eta} g d^2$$

$$\text{或} \quad d = \sqrt{\frac{1800\eta v}{(\rho_s - \rho_w)g}} = \sqrt{\frac{1800 \times 10^4 \eta L}{(G_s - G_{wT})\rho_{w0} g t}} \quad (1.8)$$

式中 η ——纯水的动力黏滞系数， $\times 10^{-6} \text{kPa} \cdot \text{s}$ ；

d ——土颗粒粒径， mm ；

ρ_s ——土粒的密度， g/cm^3 ；

G_s ——土粒的比重；

ρ_w ——水的密度， g/cm^3 ；

ρ_{w0} ——温度 4°C 时水的密度， g/cm^3 ；

G_{wT} ——温度 $T^\circ\text{C}$ 时水的比重；

L ——某一时间 t 内土粒的沉降距离， cm ；

t ——沉降时间， s ；

g ——重力加速度， cm/s^2 。

为了简化计算,用如图 1.3 所示的斯笃克列线图,可求得粒径 d 。此时,悬液中在 L 范围内所有土粒的直径都比算得的 d 小,而大于 d 的土粒都下沉到比 L 大的深度处。

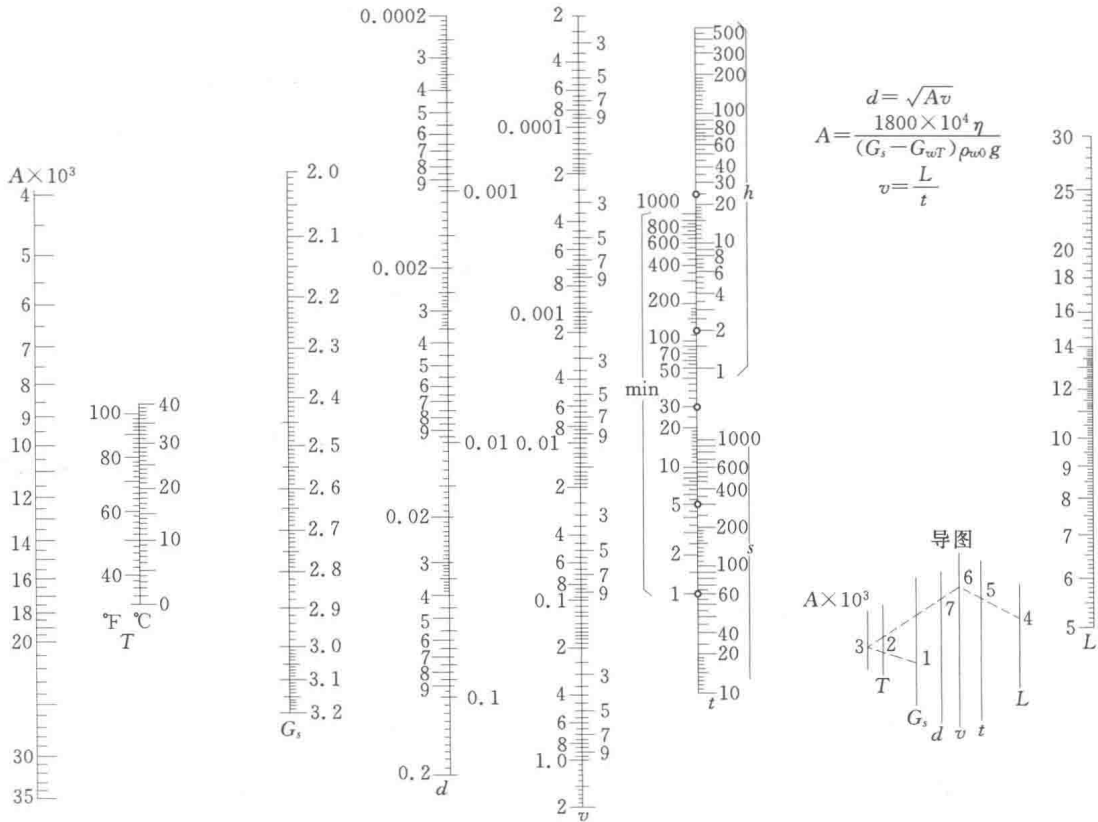


图 1.3 斯笃克列线图

2. 悬液中土粒质量的百分数

设 V 为悬液的体积, m_s 为该悬液内所含土颗粒总质量, 则开始时悬液单位体积内的土粒质量为 $\frac{m_s}{V}$, 土粒的体积为 $\frac{m_s}{V \rho_{s0} G_s}$, 单位体积的悬液是由土粒和水组成, 则水的体积应为 $1 - \frac{m_s}{G_s \rho_{w0} V}$, 水的质量为 $\rho_{wT} \left(1 - \frac{m_s}{G_s \rho_{w0} V}\right)$, 式中 ρ_{wT} 为试验开始时温度为 $T^\circ\text{C}$ 时水的密度。那么开始时土粒均匀分布的悬液密度为

$$(\rho_{su})_i = \frac{m_s}{V} + \rho_{wT} \left(1 - \frac{m_s}{G_s \rho_{w0} V}\right)$$

或

$$(\rho_{su})_i = \rho_{wT} + \frac{m_s}{V} \left(\frac{\rho_s - \rho_{wT}}{\rho_s}\right) \tag{1.9}$$

式中符号的意义同前。

从量筒中液面下深度 L 处, 取一微小体积的悬液进行研究。从开始下沉至 t 时刻, 悬液内大于粒径 d 的土粒, 都通过此微小体积而下沉, 小于粒径 d 的土粒一部分已通过此微小体积的底部, 另一部分同时进入该体积的顶部, 因此该微小体积内小于粒径 d 的数

量保持不变。设时间为 t ，该微小体积内小于粒径 d 的土粒质量为 m'_s ，则与总体积 V 内土粒质量 m_s 之比为 X ，即

$$X = \frac{m'_s}{m_s} \times 100\%$$

则单位体积内小于粒径 d 的土粒质量为 $\frac{m_s X}{V}$ 。经过时间 t 后在深度 L 处该微小体积悬液的密度，可由式 (1.9) 求得

$$\rho_{sat} = \rho_{wT} + \frac{m_s X}{V} \frac{\rho_s - \rho_{wT}}{\rho_s}$$

或

$$X = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_{wT}} \frac{V}{m_s} (\rho_{sat} - \rho_{wT}) \times 100\% \quad (1.10)$$

用密度计测得任何时间 t ，任何深度 L 处 1000mL 悬液内的密度 ρ_{sat} ，即可按式 (1.10) 算得小于某粒径 d 的土粒质量的百分数。

3. 密度计的校正

目前通常采用的密度计有甲、乙两种，其制造原理和使用方法基本相同。甲种密度计 (图 1.4) 读数表示 1000mL 悬液中所含土量的克数，乙种密度计的读数表示悬液密度。两种密度计通常是在温度为 20℃ 时刻划的，而且土粒比重都以 2.65 为基准。在使用密度计时，由于使用条件的变化等原因，产生了系统误差，需要进行以下校正。

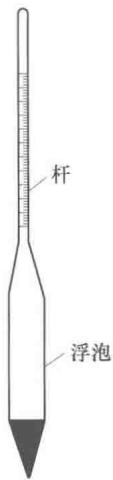


图 1.4 甲种密度计示意图

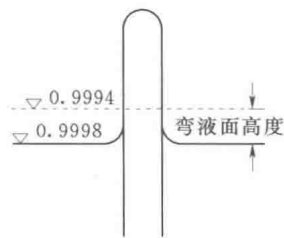


图 1.5 弯液面校正

(1) 刻度及弯液面校正。由于密度计在制造时刻度可能出现的误差，使用前必须经过检验校正。此外，密度计的刻度是以弯液面底为准，而在使用时，由于悬液混浊，读数以弯液面顶部为准，如图 1.5 所示。应校正后才能用于计算 (校正值由实验室给出)。

(2) 温度校正。密度计的刻度一般是在 20℃ 时进行的，使用时悬液温度不等于 20℃，水的密度及密度计浮泡体积发生变化，需加以校正，可以从表 1.8 查得温度校正值。