

高等学校土木工程专业系列教材

土木工程材料试验指导

● 李九苏 欧阳岚 主编



TUMU GONGCHENG CAILIAO
SHIYAN ZHIDAO



中南大学出版社

www.csupress.com.cn

土木工程材料试验指导

主编 李九苏 欧阳岚
参编 吕建根

中南大学出版社

www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

土木工程材料试验指导/李九苏,欧阳岚主编. —长沙:中南大学出版社,2010.8

ISBN 978-7-5487-0078-4

I. 土... II. ①李... ②欧... III. 土木工程 - 建筑材料 - 实验 - 高等学校 - 教学参考资料 IV. TU5 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 149833 号

土木工程材料试验指导

主编 李九苏 欧阳岚

☐责任编辑 刘 辉

☐责任印制 文桂武

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 长沙市宏发印刷厂

☐开 本 787 × 1092 1/16 ☐印张 7 ☐字数 174 千字

☐版 次 2010 年 8 月第 1 版 ☐2010 年 8 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-5487-0078-4

☐定 价 16.00 元

图书出现印装问题,请与出版社调换

高等学校土木工程专业系列教材
编审委员会

主 任	曾庆元	院士		
委 员	(以姓氏笔画排序)			
	方理刚	王桂尧	刘 杰	刘朝晖
	刘锡军	刘 静	吕 昀	任伯帜
	阮 波	李九苏	李朝奎	余志武
	沈小雄	张向京	杨建军	杨伟军
	周志刚	周建普	周殿铭	钟新谷
	贺跃光	郭少华	徐林荣	高文毅
	唐依民	桂 岚	黄立奎	蒋隆敏
	彭立敏	韩用顺	谭海洋	戴公连
	戴 伟			

出版说明

• • • • •

为了适应培养 21 世纪复合型、应用型创新人才的需要,结合我国高等学校教学现状,立足培养学生能跟上国际经济的发展水平,按照教育部最新制定的教学大纲,遵循“学科属性及好教好学”原则,中南大学出版社组织专家、教授编写了这套“高等学校土木工程专业系列教材”。

土木工程专业作为我国高等学校的专业设置仅十年之久,它是我国高等教育专业设置调整后的一个新兴专业,土木工程专业与建筑工程、交通土建和岩土工程等传统专业相比,在培养目标、教学内容和教学方法上都有较大的区别,以“厚基础、宽口径、强能力”作为学生培养目标,理论阐述以“必需、够用”为原则,侧重定性分析和实际工程应用。

鉴于我国行业技术标准和规范不统一的现状,大部分高校将土木工程专业分为几个专业方向或课程群组织教学,本套教材是在调查十几所高校多年教学实践的基础上进行编写,编委会成员均为长期从事专业教学的资深教师,具有丰富的教学经验和科研水平。本套教材具有以下特点:

1. 以理论“必需、够用”为原则,以工程实际应用为重点

改变了过于注重知识传授和科学体系严密性的传统教学思想,注重应用型人才的特点,结合现行的人才培养计划,做到理论阐述以“必需、够用”为原则,侧重定性分析及其在工程中的应用,充分利用多媒体教学的特点,扩充工程信息量,培养学生的工程概念。

2. 注重培养对象终身发展的需要

土木工程领域范围广,行业标准多,本教材注重专业基础理论与规范的关系,重点阐述规范编制的基本理论、方法和原则,适当介绍土木工程领域的新知识、新技术及其发展趋势,以适应学生今后职业生涯发展的需要。

3. 文字教材和多媒体教学相结合

随着多媒体教学的发展和应用,综合多媒体教学在教学中的优势,提高教学效率,在编写文字教材的同时,配套编写多媒体教案和相关计算软件,使学生适应现代计算技术的发展,提高学生自我训练的能力。

4. 编写严谨规范,语言通俗易懂

根据我国土木工程最新设计与施工规范、规程和技术标准编写,体现了当前我国土木工程施工技术与管理水平,内容精练、叙述严谨。采取逻辑关系严谨、循序渐进的编写思路,深入浅出,图文并茂,文字表达通俗易懂。

希望本系列教材的出版,能促进土木工程专业的教材建设,为培养符合市场需要的高水平人才起到积极推动作用。

目 录

第 1 章 试验要求与数据分析	(1)
1.1 试验基本要求	(1)
1.2 试验数据误差分析与数据修约	(1)
1.3 试验数据统计分析	(3)
第 2 章 砂石试验	(8)
2.1 密度试验	(8)
2.2 表观密度试验	(9)
2.3 堆积密度试验	(10)
2.4 筛分析试验	(12)
2.5 石料单轴抗压强度试验	(16)
2.6 石子的压碎指标值试验	(17)
2.7 洛杉矶式磨耗试验	(18)
第 3 章 水泥试验	(20)
3.1 水泥细度试验	(20)
3.2 水泥标准稠度用水量试验(标准法)	(21)
3.3 水泥净浆凝结时间试验	(22)
3.4 水泥沸煮安定性试验(雷氏夹法)	(23)
3.5 水泥胶砂强度试验	(24)
3.6 水泥胶砂流动度测定	(27)
3.7 水泥压蒸安定性试验	(28)
第 4 章 普通混凝土性能试验	(31)
4.1 混凝土拌和物实验室拌和方法	(31)
4.2 混凝土拌和物坍落度试验	(32)
4.3 混凝土拌和物维勃稠度试验	(35)
4.4 水泥混凝土试件成型与养护	(36)
4.5 水泥混凝土立方体抗压强度试验	(38)
4.6 水泥混凝土抗折强度试验	(40)
4.7 水泥混凝土抗渗性试验	(41)

4.8	水泥混凝土抗冻性试验	(42)
第5章 钢筋力学性能试验		
(46)		
5.1	钢筋的拉伸性能试验	(47)
5.2	钢筋的弯曲(冷弯)性能试验	(50)
5.3	钢筋的冲击试验	(51)
5.4	钢筋的疲劳试验	(53)
5.5	钢筋的硬度试验	(54)
第6章 沥青试验		
(56)		
6.1	沥青试样准备方法	(57)
6.2	沥青密度与相对密度试验	(58)
6.3	沥青针入度试验	(61)
6.4	沥青软化点试验	(64)
6.5	沥青延度试验	(66)
6.6	沥青运动粘度试验	(69)
6.7	沥青溶解度试验	(71)
6.8	沥青薄膜加热试验	(73)
6.9	沥青与粗集料的粘附性试验	(75)
第7章 沥青混合料试验		
(78)		
7.1	沥青混合料的制备(击实法)	(78)
7.2	沥青混合料物理指标测定(表干法)	(83)
7.3	沥青混合料马歇尔稳定度试验	(86)
7.4	沥青混合料车辙试验	(89)
7.5	沥青混合料弯曲试验	(92)
7.6	沥青混合料劈裂试验	(94)
7.7	沥青混合料冻融劈裂试验	(97)
7.8	沥青混合料渗水试验	(99)
7.9	沥青混合料配合比设计试验	(100)
参考文献		
(102)		

第1章 试验要求与数据分析

1.1 试验基本要求

土木工程材料试验是土木工程材料课程的重要组成部分。通过试验,预期要达到以下主要目的:一是熟悉、验证、巩固所学的理论知识;二是了解所使用的仪器设备,掌握常用土木工程材料的试验方法;三是更深刻地掌握各种材料的技术性能;最后,更为重要的是要通过试验课程的系统学习和实际操作,力求掌握试验设计方法,熟练试验操作技能,提高对试验结果的分析和表达能力,从而提高动手能力、实践能力和创新能力。

试验内容包括土木工程材料,如水泥、混凝土用集料、混凝土、建筑钢材、石油沥青、沥青混合料等的基本性能。

为了达到试验的目的,试验者应做到以下几点:

(1)掌握基本的试验设计方法和分析方法,掌握正交试验设计、回归分析等试验设计方法和分析方法,并掌握 Excel、Origin 等分析工具。

(2)试验前做好相关内容的预习,明确试验目的、基本原理及操作要点,并应对试验所用的仪器、材料有基本了解。

(3)在试验的整个过程中建立严密和科学的工作秩序,严格遵守试验操作规程,注意观察试验现象,详细做好试验记录。

(4)对试验的结果进行分析,做好试验报告。

(5)在具体试验时,应根据国标或行业所规定的相应试验规程进行,在对试验结果进行分析时,必须明确所遵循的技术标准和规范。

(6)土木工程材料的质量指标和试验结果是有条件的、相对的,与取样、测定和数据处理密切相关。在进行土木工程材料试验的整个过程中,从材料的取样、试验操作到数据处理,都应严格按照国家(或部颁)现行的有关标准和规范进行,以保证试样的代表性,试验条件稳定一致,以及测定技术和计算结果的正确性。

《土木工程材料试验指导》是根据现行国家标准或其他行业规范、资料编写而成,并不包含所有土木工程材料试验的全部内容。同时,由于科学技术水平的进步和生产条件的不断发展,今后遇到本书所述试验以外的试验时,可查阅有关指导文件,并注意各种材料标准或规范的修订动态,以作相应修改。

1.2 试验数据误差分析与数据修约

试验中所得的原始数据必须进行统计归纳、分析整理,找出其内在的本质联系,本节主要介绍试验数据统计分析的基本方法。

1.2.1 测量误差

(1) 随机误差: 在一定的量测条件下进行一系列量测时, 如果量测的误差从表面上看其数值和符号都是不一定的, 不存在任何确定的规律性, 而具有统计性的规律, 这种误差称为随机误差。

(2) 偶然误差: 在一定的量测条件下进行一系列量测时, 量测的误差称为随机误差, 且误差的平均值随量测次数的增加而趋于零, 则这种误差为偶然误差, 即均值为零的随机误差称为偶然误差。

(3) 系统误差: 在一定的量测条件下进行一系列量测时, 如果量测的误差的数值和符号总保持为常数, 或按一定的规律变化, 这种带有系统性和方向性的误差称为系统误差。

1.2.2 数据的可靠性

(1) 精确度: 相同条件下进行多次测量, 各测量结果彼此符合程度或彼此的重复性如何, 量测结果本身随机误差较小, 但离真值偏差较大, 即系统误差大, 在此情况下只说明精度较高。

(2) 正确度: 相同条件下多次量测的平均值与其值的符合程度。量测结果的平均值与其值接近, 但随机误差较大, 所以只说明正确度好而精确度不高。

(3) 准确度: 测量值质量全面表征的指标。只有当精确度高, 正确度也高时, 才能说时准确度高。系统误差和随机误差都很小, 所以量测结果是准确度高。

1.2.3 数字修约规则

有效数字指实际能测到的数字。一般而言, 试验时仪器设备显示的数据均为有效数字, 均应如实记录, 包括估读数字。对于运算过程中的有效数字, 应以误差理论和具体试验项目精度要求作为决定有效数字的基本依据。试验数据总是以一定位数的数字来表示的, 究竟取几位数来表示试验结果才是有效的呢? 是否小数点后面的数字越多就越正确? 或者运算结果保留位数越多就越准确呢? 其实不然, 因为: 第一, 数据中小数点的位置不决定准确度, 而与所用单位大小有关; 第二, 与试验仪器的精度有关, 一般应记录到仪表最小刻度的十分之一位。例如: 某液面计标尺的最小分度为 1 mm, 则读数可以读到 0.1 mm。如液面高为 15.5 mm, 即前两位是直接读出的, 是准确的, 最后一位是估计的, 是欠准的或可疑的, 称该数据为 3 位有效数字。如液面恰好在 15 mm 刻度上, 则数据应记作 15.0 mm。

关于数字修约细则, GB/T 8170 - 2008《数值修约规则与极限数值的表示和判定》中对数字修约规则作了具体规定。各种量测值、计算值需要修约时, 应按下列规则进行:

(1) 在拟舍弃的数字中, 保留数后边(右边)第一个数小于 5(不包括 5)时则舍去。保留数的末位数字不变。例如: 将 14.2342 修约后为 14.2。

(2) 在拟舍弃的数字中, 保留数后边(右边)第一个数大于 5(不包括 5)时, 则进 1。保留数的末位数字加 1。例如: 将 26.4843 修约到保留一位小数, 则修约后为 26.5。

(3) 在拟舍弃的数字中, 保留数后边(右边)第一个数等于 5 时, 5 后边的数字并非全部为零时, 则进 1, 即保留数末位数字加 1。例如: 将 1.0501 修约到保留小数一位, 则修约后为 1.1。

(4)在拟舍弃的数字中,保留数后边(右边)第一个数等于5时,5后边的数字全部为0时,保留数的末位数字为奇数时则进1;若保留数的末位数字为偶数(包括“0”)则不进。

例如:将下列数字修约到保留一位小数

修约前 0.3500 修约后 0.4

修约前 0.4500 修约后 0.4

修约前 1.0500 修约后 1.0

(5)所舍弃的数字,若为两位以上的数字,不得连续进行多次(包括两次)修约。应根据保留后边(右边)第一数字的大小,按上述规定一次修约出结果。例如:将15.4546修约成整数,即为15。

(6)负数修约时,先将它的绝对值按前述步骤的规定进行修约,然后在所得值前面加上负号。

1.2.4 科学计数法

在科学与工程中,为了清楚地表达有效数或数据的精度,通常将有效数写出并在第一位数后加小数点,而数值数量级由10的整数幂来确定,这种以10的整数幂来记数的方法称作科学记数法。例如:0.0097应记作 9.7×10^{-3} 。

1.2.5 有效数的运算

有效数的运算一般应遵循以下原则:

(1)加减法运算。各不同位数有效数相加减,其和或差的有效数等于其中位数最少的一个。

(2)乘除法计算。乘积或商的有效数,其位数与各乘、除数中有效数最少的相同。对于 π 、 e 等常数,因为其有效位数可多可少,根据实际需要选取。

(3)乘方与开方运算。乘方、开方后的有效数与其底数相同。

(4)对数运算。对数的有效数位数与其真数相同。

(5)在4个数以上的平均值计算中,其平均值的有效数字可较各数据中最小有效位数多一位。

(6)所有取自手册上的数据,其有效数按计算需要选取,但原始数据如有限制,则应服从原始数据。

(7)对于没有特别说明的情况,在土木工程材料试验中一般可取3位有效数,因为这已足够精确。

1.3 试验数据统计分析

1.3.1 统计特征

1. 算术平均值

算术平均值反映了样本数据集中的位置,代表一批试验数据的平均水平。算术平均值可用下式表示:

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_i}{n} \quad (1-1)$$

式中: $\bar{X}$ 代表算术平均值; $x_i (i=1, 2, 3, \cdots, n)$ 代表各试验数据值; n 代表试验样本个数。

2. 中位数

将数据按大小顺序排列, 位于正中间的数据称为中位数。

一组试验数据按大小顺序排列, 当测量数据的个数为奇数时, 中间一个数据即为中位数; 当测量数据的个数为偶数时, 中位数为中间相临两个测量值的平均值。它的优点是能简单直观地说明一组测量数据的结果, 且不受两端具有过大误差数据的影响; 缺点是不能充分利用数据, 因而不如平均值准确。

3. 标准差

标准差是衡量数据波动性的指标。标准差可用下式表示:

$$s = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{X})^2 + (x_2 - \bar{X})^2 + \cdots + (x_n - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (1-2)$$

4. 变异系数

标准差是表示数据绝对波动大小的指标, 当测量值较大时, 绝对误差一般较大; 而测量值较小时, 绝对误差一般较小。可以用标准差与算术平均值之比来表示误差的大小, 即变异系数。变异系数可用下式表示:

$$C_r = \frac{s}{\bar{X}} \times 100 \quad (1-3)$$

式中: C_r ——变异系数, %。

5. 极差

一组测量数据中最大值和最小值之差, 称为极差。极差可用于衡量一组试验数据的分散性。极差可用下式表示:

$$R = X_{\max} - X_{\min} \quad (1-4)$$

1.3.2 随机误差的正态分布

1. 频数分布

在所有测量结果中, 由于有偶然误差存在, 试验结果有高有低, 有两头小、中间大的变化趋势, 即在平均值附近的数据出现机会最多, 如图 1-1 所示。

2. 正态分布

随机误差一般服从正态分布, 即高斯分布, 其数学表达式见式(1-5)。两组精密度不同的测量值的正态分布见图 1-2。

$$y = f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1-5)$$

式中: y ——概率密度;

x ——测量值;

μ ——总体平均值, 即无限次测量结果的平均值, 无系统误差时即为真值;

σ ——标准偏差。

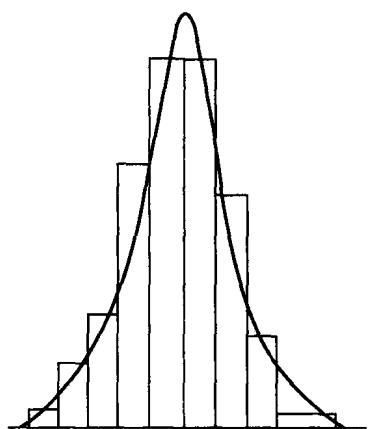


图 1-1 相对频数分布直方图

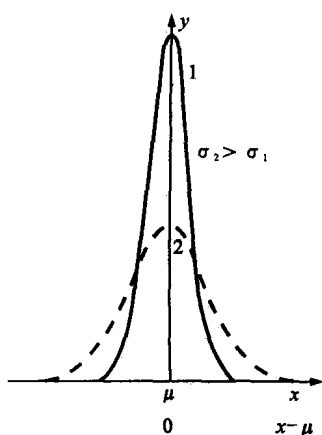


图 1-2 精密度不同的测量值的正态分布图

正态分布满足以下规律:

(1) $x = \mu$ 时, y 值最大, 体现了测量值的集中趋势。大多数测量值集中在算术平均值的附近, 算术平均值是最可信赖值, 能很好地反映测量值的集中趋势。

(2) 曲线以 $x = \mu$ 直线为其对称轴, 说明正误差和负误差出现的概率相等。

(3) 当 x 趋于 $-\infty$ 或 $+\infty$ 时, 曲线以 x 轴为渐近线。即小误差出现概率大, 大误差出现概率小, 出现很大误差概率极小, 趋于零。

(4) σ 越大, 测量值落在 μ 附近的概率越小。即精密度越差时, 测量值的分布就越分散, 正态分布曲线也就越平坦。反之, σ 越小, 测量值的分散程度就越小, 正态分布曲线也就越尖锐。 σ 反映测量值分布分散程度。

3. 标准正态分布

定义统计量 u , 见公式(1-6), 则 u 服从标准正态分布, 此时曲线的形状与 σ 的大小无关。

$$u = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (1-6)$$

4. 随机误差的区间概率

正态分布曲线与横坐标 $-\infty$ 到 $+\infty$ 之间所夹的面积, 代表所有数据出现概率的总和, 其值应为 1, 其概率 P 满足公式(1-7)。

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-u^2/2} du \quad (1-7)$$

随机误差的概率分布见表 1-1。

1.3.3 可疑数据的取舍

1. 试验数据的分布规律

土木工程材料试验过程中获取的试验数据, 大多数服从正态分布规律, 可用观测值的平均值、标准差等统计量来进行描述。但也有部分试验数据并不服从正态分布规律, 称为非正态分布。

表 1-1 随机误差概率分布

u	测量值 x 出现区间	概率/%
$\pm 1\sigma$	$x = u \pm \sigma$	68.3
$\pm 1.96\sigma$	$x = u \pm 1.96\sigma$	95.0
$\pm 2\sigma$	$x = u \pm 2\sigma$	95.5
$\pm 2.58\sigma$	$x = u \pm 2.58\sigma$	99.0
$\pm 3\sigma$	$x = u \pm 3\sigma$	99.7

2. 可疑数据的取舍方法

在平行试验或重复性试验中,个别的试验数据可能会出现异常,当发现有某个过大或过小的可疑数据时,应按数理统计方法加以判别并进行取舍,常用的方法有三倍标准差法和格拉布斯法等。

(1) 三倍标准差法。

由正态分布的 $3s$ 原则可知,每个测量值落在 $(\bar{X} \pm 3s)$ 的概率为 99.73%,那么落在这个区间之外的概率仅为 0.27%,因此在有限的试验次数中发生这种情况的可能性是很小的。一旦试验数据中出现这种结果,则可以认为是可疑的,是不可靠的,故可以剔除。当某一试验数据 (x_i) 与其算术平均值 $\bar{X}$ 之差大于 3 倍标准偏差时,该数据应该舍弃,见公式(1-8)。

$$|x_i - \bar{X}| > 3s \quad (1-8)$$

另外,当某一试验数据与平均值之差大于 2 倍标准偏差(即 $|x_i - \bar{X}| > 2s$)时,该试验数据可作为存疑数据对待,根据其他情况进行综合判断,决定保留或剔除。

(2) 格拉布斯法。

进行 n 次重复试验,测得结果为 $x_1, x_2, \dots, x_n$,假定试验结果 x_i 服从正态分布。将按其由小到大顺序重新排序,得:

$$x(1) \leq x(2) \leq \dots \leq x(n) \quad (1-9)$$

根据顺序统计原则,计算标准化顺序统计量 g :

$$\text{当最小值 } x_{(1)} \text{ 可疑时, } g = \frac{\bar{X} - x_{(1)}}{s}; \text{ 当最大值 } x(n) \text{ 可疑时, 则 } g = \frac{x_{(n)} - \bar{X}}{s}。$$

根据格拉布斯统计量的分布,在要求的显著性水平 α (一般可取 $\alpha = 0.05$) 下,可求得判别可疑数据的临界值 $g_0(\alpha, n)$,常见的格拉布斯系数见表 1-2。格拉布斯法的判别标准为:

$$g \geq g_0(\alpha, n) \quad (1-10)$$

1.3.4 回归分析法

在进行试验结果分析时,经常要用到回归分析法。所谓回归分析法,是在掌握大量观察数据的基础上,利用数理统计方法建立因变量与自变量之间的回归关系函数表达式。回归分析中,当研究的因果关系只涉及因变量和一个自变量时,称为一元回归分析;当研究的因果关系涉及因变量为两个或两个以上自变量时,叫做多元回归分析。此外,回归分析中,又依据描述自变量与因变量之间因果关系的函数表达式是线性的还是非线性的,分为线性回归分析和非线性回归分析。通常线性回归分析法是最基本的分析方法,遇到非线性回归问题可以

借助数学手段转化为线性回归问题进行处理。

为了便于计算,在进行回归分析时,可以借助 Origin、Matlab 等数据处理软件或电子表格 Excel 来进行。

表 1-2 . 格拉布斯系数 $g_0(\alpha, n)$

n	α		n	α		n	α	
	0.01	0.05		0.01	0.05		0.01	0.05
3	1.15	1.15	13	2.61	2.33	23	2.96	2.62
4	1.49	1.46	14	2.66	2.37	24	2.99	2.64
5	1.75	1.67	15	2.70	2.41	25	3.01	2.66
6	1.94	1.83	16	2.74	2.44	30	3.10	2.74
7	2.10	1.94	17	2.78	2.47	35	3.18	2.81
8	2.22	2.03	18	2.82	2.50	40	3.24	2.87
9	2.32	2.11	19	2.85	2.53	50	3.34	2.96
10	2.41	2.18	20	2.88	2.56	100	3.59	3.17
11	2.48	2.24	21	2.91	2.58			
12	2.55	2.29	22	2.94	2.60			

第2章 砂石试验

砂石材料是土木工程中大量使用的原材料,其技术性质必须符合相关标准的规定。通过测定密度、表观密度、体积密度、堆积密度等指标,可了解砂石材料的物理性能,也可计算出砂石材料的孔隙率及空隙率,从而了解其结构与构造特征。由于材料结构和构造特征是决定材料强度、吸水率、抗渗性、抗冻性、耐腐蚀性、导热性及吸声等性能的重要因素,因此,可以通过试验了解砂石材料的物理力学性质,并进一步掌握砂石材料的特性和使用功能。

2.1 密度试验

材料的密度是指材料在绝对密实状态下,单位体积的质量。因此,砂石材料的密度是砂石材料所固有的特性,跟孔隙多少无关。

2.1.1 仪器与材料

李氏瓶(见图2-1)、筛子(孔径0.20 mm或900孔/cm²)、量筒、烘箱(见图2-2)、干燥器、物理天平、温度计、漏斗、小勺等。

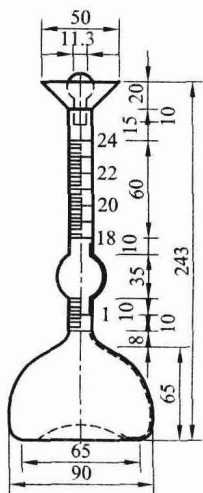


图2-1 李氏比重瓶
(单位:mm)

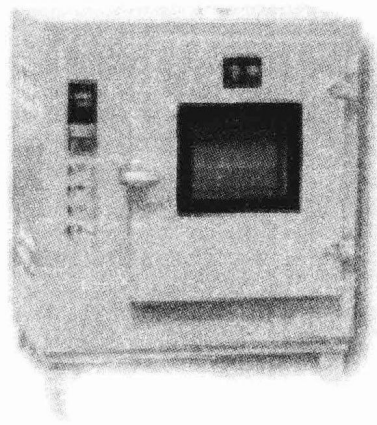


图2-2 烘箱

(1)将试样破碎、磨细,全部通过0.20 mm孔筛后,放到 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的烘箱中,烘至恒重。

(2)将烘干的粉料放入干燥器中冷却至室温待用。

2.1.2 试验方法与步骤

(1) 在李氏瓶中注入无水煤油至突颈下部, 记下刻度(V_1)。

(2) 用天平称取 60 ~ 90 g 试样(m_1), 用小勺和漏斗小心地将试样徐徐送入李氏瓶中(不能大量倾倒, 会妨碍李氏瓶中空气排出或使咽喉位堵塞), 直至液面上升至 20 mL 左右的刻度为止。

(3) 用瓶内的煤油将粘附在瓶颈和瓶壁的试样洗入瓶内煤油中, 转动李氏瓶使煤油中气泡排出, 记下液面刻度(V_2)。

(4) 称取未注入瓶内剩余试样的质量(m_2), 计算出装入瓶中试样质量 m 。

(5) 将注入试样后的李氏瓶中液面读数 V_2 减去未注前的读数 V_1 , 得出试样的绝对体积 V 。

2.1.3 结果计算

(1) 按下式计算出密度(精确至 0.01 g/cm^3):

$$\rho = \frac{m_1 - m_2}{V_2 - V_1} \quad (2-1)$$

(2) 密度试验需用两个试样平行进行, 以其计算结果的算术平均值作为最后结果。但两次结果之差不应大于 0.02 g/cm^3 , 否则重做。

2.2 表观密度试验

表观密度是指材料在自然状态下, 单位体积(包括材料的绝对密实体积与内部封闭孔隙体积)的质量。试验方法有容量瓶法和广口瓶法, 其中容量瓶法用来测定砂的表观密度, 广口瓶法用来测定石子的表观密度。以砂和石子为例分别介绍两种试验方法。

2.2.1 砂的表观密度试验

1. 主要仪器设备

容量瓶(500 mL)、天平、干燥器、浅盘、铝制料勺、温度计、烘箱、烧杯等。

2. 试验方法及步骤

(1) 试样制备。将 660 g 左右的试样在温度为 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘干至恒重, 并在干燥器内冷却至室温, 分为大致相等的两份待用。

(2) 称取烘干的试样 300 g(m_0), 精确至 1 g, 将试样装入容量瓶, 注入冷开水至接近 500 mL 的刻度处, 摇转容量瓶, 使试样在水中充分搅动, 排除气泡, 塞紧瓶塞。静置 24 h。

(3) 静置后用滴管添水, 使水面与瓶颈 500 mL 刻度线平齐, 再塞紧瓶塞, 擦干瓶外水分, 称取其质量(m_1), 精确至 1 g。

(4) 倒出瓶中的水和试样, 将瓶的内外表面洗净。再向瓶内注入与前面水温相差不超过 2°C , 并在 $(15 \sim 25)^\circ\text{C}$ 范围内的冷开水至瓶颈 500 mL 刻度线, 塞紧瓶塞, 擦干瓶外水分, 称取其质量(m_2), 精确至 1 g。

3. 结果计算

(1) 按下式计算砂的表观密度 d_s (精确至 10 kg/m^3):

$$d_s = \left[\frac{m_0}{m_0 + m_2 - m_1} \right] \times 1000 \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (2-2)$$

(2) 表观密度应用两份试样分别测定, 并以两次结果的算术平均值作为测定结果, 精确至 10 kg/m^3 , 如两次测定结果的差值大于 20 kg/m^3 时, 应重新取样测定。

2.2.2 石子表观密度试验

1. 主要仪器设备

广口瓶、烘箱、天平、筛子、浅盘、带盖容器、毛巾、刷子、玻璃片等。

2. 试样制备

将试样筛去 4.75 mm 以下的颗粒, 用四分法缩分至表 2-1 规定的数量, 洗刷干净后, 分成大致相等的两份备用。

表 2-1 表观密度试验所需试样数量

最大粒径/mm	小于 26.5	31.5	37.5	63.0	75.0
最少试样质量/kg	2.0	3.0	4.0	6.0	6.0

3. 试验方法与步骤

(1) 将试样浸水饱和后, 装入广口瓶中, 装试样时广口瓶应倾斜放置, 然后注满饮用水, 用玻璃片覆盖瓶口, 以上下左右摇晃的方法排除气泡。

(2) 气泡排尽后, 向瓶内添加饮用水, 直至水面凸出到瓶口边缘, 然后用玻璃片沿瓶口迅速滑行, 使其紧贴瓶口水面。擦干瓶外水分后, 称取试样、水、瓶和玻璃片的质量(m_1), 精确至 1 g 。

(3) 将瓶中的试样倒入浅盘中, 置于 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘干至恒重, 取出放在带盖的容器中冷却至室温后称出试样的质量(m_0), 精确至 1 g 。

(4) 将瓶洗净, 重新注入饮用水, 用玻璃片紧贴瓶口水面, 擦干瓶外水分后称出质量(m_2), 精确至 1 g 。

4. 试验结果计算

(1) 按下式计算石子的表观密度 d_c (精确到 10 kg/m^3):

$$d_c = \left[\frac{m_0}{m_0 + m_2 - m_1} \right] \times 1000 \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (2-3)$$

(2) 表观密度应用两份试样分别测定, 并以两次结果的算术平均值作为测定结果, 如两次结果之差大于 20 kg/m^3 , 应重新取样试验; 对颗粒材质不均匀的试样, 如两次试验结果之差值超过 20 kg/m^3 , 可取 4 次测定结果的算术平均值作为测定值。

2.3 堆积密度试验

堆积密度是指粉状或颗粒状材料, 在堆积状态下, 单位体积(包括组成材料的孔隙、堆积状态下的空隙和密实体积之和)的质量。堆积密度的测定根据所测定材料的粒径不同, 而采