

TUMU



应用型本科院校
土木类专业系列教材

YINGYONGXING BENKE YUANXIAO
TUMULEI ZHUANYE XILIE JIAOCAI



道路与桥梁工程材料

DAOLU YU QIAOLIANG GONGCHENG CAILIAO

主 编 ■ 孙家瑛

副主编 ■ 耿 健 徐亦冬 陈 伟



重庆大学出版社

<http://www.cqup.com.cn>

TUMU



应用型本科院校
土木类专业系列教材

YINGYONGXING BENKE YUANXIAO
TUMULEI ZHUANYE XILIE JIAOCAI



道路与桥梁工程材料

DAOLU YU QIAOLIANG GONGCHENG CAILIAO

主 编 ■ 孙家瑛

副主编 ■ 耿 健 徐亦冬 陈 伟

重庆大学出版社

内 容 提 要

本书以道路与桥梁所需土、砂石、水泥、钢材、沥青等材料为主,结合工程需要对其试验、评定、分析、总结进行全过程教学,系统地论述道路与桥梁工程材料的技术性质和技术要求,全面展示道路与桥梁工程材料的性能评价指标及相应的测试方法,深入分析道路与桥梁工程材料性能影响因素,并进行知识结构分类,在教授道路与桥梁工程材料基本知识的同时,尽可能介绍并引进国内外道路与桥梁工程材料研究及应用领域的前沿性成果。

图书在版编目(CIP)数据

道路与桥梁工程材料/孙家瑛主编. —重庆:重庆大学出版社,2015.2

应用型本科院校土木类专业系列教材

ISBN 978-7-5624-8848-4

I. ①道… II. ①孙… III. ①道路工程—建筑材料
高等学校—教材②桥梁工程—建筑材料—高等学校—教材
IV. ①U414②U444

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 024559 号

应用型本科院校土木类专业系列教材

道路与桥梁工程材料

主 编 孙家瑛

副主编 耿 健 徐亦冬 陈 伟

责任编辑:桂晓澜 版式设计:桂晓澜

责任校对:费 梅 责任印制:赵 晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:邓晓益

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023) 88617190 88617185(中小学)

传真:(023) 88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

万州日报印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:18.5 字数:427千

2015年2月第1版 2015年2月第1次印刷

印数:1—3 000

ISBN 978-7-5624-8848-4 定价:35.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换
版权所有,请勿擅自翻印和用本书
制作各类出版物及配套用书,违者必究

前 言

近年来,随着我国基础设施的大发展,与之相适应的道路与桥梁工程材料也得到了一个大发展,陆续出现了一些新产品和新技术,如无熟料固体废弃物水硬性胶凝材料等,而为指导这些升级换代的新产品和新技术的生产使用,也出现了一个道路与桥梁工程材料相关技术标准的制订更新的转型时期。为更好地学习掌握道路与桥梁工程材料的基本知识,以适应日新月异的道路与桥梁工程技术发展需求,所以编制了本书。

本书由浙江大学宁波理工学院孙家瑛教授主编,各章编写人员如下:浙江大学宁波理工学院孙家瑛教授编写第一章、第二章、第三章、第四章、第九章、第十一章及负责全书统稿,浙江大学宁波理工学院耿健副教授编写第八章、第十章,浙江大学宁波理工学院徐亦冬副教授编写第五章,浙江大学宁波理工学院陈伟工程师编写第六章、第七章。本书采用最新研究报道的科研和应用技术成果,结合最新技术标准,理论联系实际,突出创新性和实用性,并有代表性地介绍了道路与桥梁工程材料最新的研究动态和发展方向,可作为土木工程各专业的教学用书,也可供道路与桥梁工程设计、施工、监理、工程管理人员的参考学习。

由于道路与桥梁工程材料相关技术发展很快,加之我们的水平有限,编写时间仓促,书中难免有不当之处,敬请读者批评指正。

编 者
2014年10月

目 录

1 土的工程性质	1
1.1 土的三相组成	1
1.2 土的物理性质	3
1.3 土的颗粒级配	7
1.4 土的工程分类	12
本章小结	20
习题	21
2 砂石材料	22
2.1 岩石材料	22
2.2 集料	29
2.3 矿质混合料的组成设计	35
2.4 工业废渣	39
本章小结	41
习题	41
3 水硬性胶凝材料	42
3.1 硅酸盐水泥	42
3.2 掺混合材料的硅酸盐系水泥	55
3.3 硅酸盐系特种水泥	63
3.4 铝酸盐水泥	70
3.5 硫铝酸盐水泥	74
3.6 无熟料固体废弃物水硬性胶凝材料	76
本章小结	81



习题	81
4 气硬性无机胶凝材料	84
4.1 石膏	84
4.2 石灰	88
4.3 水玻璃	92
本章小结	93
习题	94
5 水泥混凝土	96
5.1 水泥混凝土概述	96
5.2 普通水泥混凝土的组成材料	98
5.3 普通水泥混凝土的技术性质	120
5.4 混凝土质量波动与配制强度	137
5.5 普通水泥混凝土配合比设计	141
5.6 混凝土技术新进展	148
本章小结	160
习题	161
6 建筑砂浆	165
6.1 建筑砂浆的组成	165
6.2 建筑砂浆的技术性质	167
6.3 砌筑砂浆	170
6.4 商品砂浆	175
本章小结	177
习题	177
7 墙体与屋面材料	179
7.1 墙体材料	179
7.2 屋面材料	188
本章小结	190
习题	190
8 建筑金属材料	191
8.1 钢材的分类	191
8.2 钢材的主要技术性能	192
8.3 钢材的化学成分对钢材性能的影响	196
8.4 钢材冷加工与时效	197
8.5 土木工程中常用的钢材	198
8.6 钢材的腐蚀与防护	211
8.7 土木工程中的其他金属材料	213
本章小结	215
习题	215

9 沥青与沥青混合料	219
9.1 沥青材料	219
9.2 沥青混合料	232
本章小结	244
习题	244
10 建筑装饰材料	246
10.1 概述	246
10.2 石材	248
10.3 木材	254
10.4 建筑陶瓷	264
10.5 建筑玻璃	267
10.6 建筑涂料	270
本章小结	272
习题	272
11 工程聚合物材料	274
11.1 高聚物材料概论	274
11.2 高聚物材料在道路桥梁工程中的应用	282
本章小结	283
习题	284
参考文献	285

1

土的工程性质

1.1 土的三相组成

土的三相包括固相、液相和气相。土的三相物质组成是很复杂的。

► 1.1.1 土的固相

土的固相物质分无机矿物颗粒和有机质,称为土的骨架。矿物颗粒由原生矿物和次生矿物组成。原生矿物是指岩浆在冷凝过程中形成的矿物,如石英、长石、云母等。原生矿物经化学风化作用后发生化学变化而形成新的次生矿物,如三氧化二铁、三氧化二铝、次生二氧化硅、黏土矿物、碳酸盐等。次生矿物按其与水的作用可分为可溶的或不可溶的,可溶的按其溶解难易程度又可分为易溶的、中溶的和难溶的。次生矿物的成分和性质均较复杂,对土的工程性质影响也较大。

在风化过程中,往往有微生物的参与,在土中产生有机质成分,如多种复杂的腐殖质矿物。此外,在土中还会有动植物残骸体等有机残余物,如泥炭等。有机质对土的工程性质影响很大。但目前对土的有机质组成的研究还很不够。

► 1.1.2 土的液相

土的液相是指土孔隙中存在的水。一般把土中的水看成是中性的,无色、无味、无嗅,其密度为 1 g/cm^3 ,重度为 9.81 kN/m^3 ,在 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 时冻结,在 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 时沸腾。但实质上,土中水是成分复杂的电解质水溶液,它与土粒间有着复杂的相互作用。

由于土的颗粒表面通常带有负电荷,因此水在带电固体颗粒之间受到表面电荷电场的作用,水分子和水化阳离子就会向颗粒周围聚集,如图 1.1 所示。根据受颗粒表面静电引力作用的强弱,土孔隙中的水可以划分为三种类型:强结合水、弱结合水和自由水。

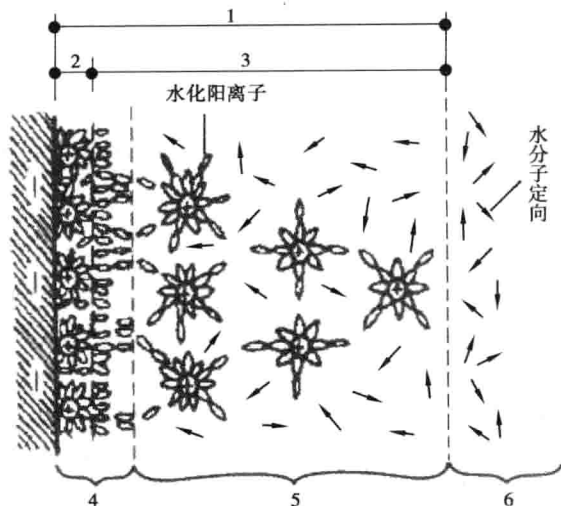


图 1.1 结合水形成的一般图示

1—双电层;2—吸附层;3—扩散层;
4—吸附结合水;5—渗透吸附水;6—自由水

1) 强结合水

强结合水是指紧靠土颗粒表面的水,受表面电荷静电引力最强。静电引力把极性水分子和水化阳离子牢固地吸附在颗粒表面上形成固定层。这部分水的特征是没有溶解能力,不能传递静水压力,不能自由移动,只有吸热变成蒸汽时才能移动。它极其牢固地结合在土粒表面上,其性质接近于固体,密度为 $1.2 \sim 2.4 \text{ g/cm}^3$,冰点极低,有时甚至在 $-78 \text{ }^\circ\text{C}$ 都不冻结,具有极大的黏滞性。如果将完全干燥的土移置在天然湿度的空气中,则土的质量将增加,直到土中吸着强结合水达到最大容量为止。土颗粒越细,土的比表面越大,则最大吸湿容量就越大。强结合水层也称为吸附层或固定层,其厚度很薄,一般仅为 $1 \sim 2$ 个水分子的厚度。

2) 弱结合水

弱结合水就是紧靠强结合水外围的一层水膜。在这层水膜范围内的水分子和水化阳离子仍受到一定程度的静电引力,离颗粒表面距离越远,受静电引力越小。这部分的水仍然不能传递静水压力,但水膜较厚的弱结合水能向邻近较薄水膜处缓慢转移。弱结合水层称为扩散层。固定层和扩散层与土层表面负电荷一起构成所谓的双电层。

3) 自由水

在结合水膜以外的水,为正常的液态水溶液,它受重力的控制而流动,能传递静水压力,称为自由水。自由水又包括毛细水及重力水。毛细水受毛细作用控制的水,它除了受重力作用外,还受到表面张力引起的毛细作用的支配。可以把土的孔隙看作是连续的变截面的毛细管,毛细管中毛细水的上升高度取决于毛细管的直径,毛细管直径越小,上升高度越高。土中的毛细水也会从潜水而上升到一定的高度。毛细水对公路路基的干湿状态及冻害有重要

的影响,对砂类土的强度也有一定的影响。重力水是只受重力控制的自由水,它不受表面张力的影响,在重力或压力差作用下在土中渗流。

土中除结合水、自由水等液态水外,还可能有气态水(呈水蒸汽形态的水)和固态水(呈冰形态的水)存在。不同形态的水,在一定条件下会相互转化,并对土的性质起着重要作用。

► 1.1.3 土的气相

土的气相主要指土孔隙中充填的空气。土的含气量与含水率有密切关系。土孔隙中占优势的是气体还是水,土的性质会有很大的不同。

土中的气体可分为与大气连通的和不连通的两类。与大气连通的气体对土的工程性质影响不大,在受到外力作用时,这种气体能很快地从孔隙中被挤出。而与大气不连通的密封气体对土的工程性质影响较大。在受到外力作用时,随着压力的增大,这种气泡被压缩或溶解于水中,压力减小时,气泡会恢复原状或重新游离出来。这种含气体的土称为非饱和土。非饱和土的工程性质研究已形成土力学的一个新分支。

1.2 土的物理性质

由于土是由固体颗粒、液体和气体三部分组成,各部分含量的比例关系直接影响土的物理性质和土的状态。例如,同样一种土,松散时强度较低,经过外力压密后,强度会提高。对于黏性土,含水量不同,其性质也有明显差别,含水量高,则软,含水量低,则硬。

在土力学中,为进一步描述土的物理和力学性质,将土的三相成分比例关系量化,用一些具体的物理量来表示,这些物理量就是土的物理性质指标,如含水量、密度、土粒比重、孔隙比、孔隙率和饱和度等。为了形象、直观地表示土的三相组成,常用三相图来表示土的三相组成,如图 1.2 所示。在三相图左侧,表示三相组成的质量,右侧表示三相组成的体积。

图 1.2 中: m_s 为土颗粒质量, g; m_w 为土中水的质量, g; m 为土的总质量, g。通常认为空气的质量可以忽略,则土样的质量为水和土粒质量之和, $m = m_s + m_w$ 。

V_s 为土粒体积, cm^3 ; V_w 为土中水体积, cm^3 ; V_a 为土中气体体积, cm^3 ; V_v 为土中孔隙体积, $V_v = V_w + V_a$; V 为土的总体积, $V = V_w + V_a + V_s$ 。

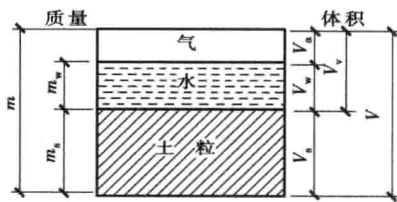


图 1.2 土的三相图

► 1.2.1 实测指标

通过试验测定的指标有土的密度、土粒相对密度和含水量。

1) 土的密度 ρ

土的密度 ρ 是指单位体积土的质量,在三相图中,即总质量与总体积之比。单位是 g/cm^3 ,公式如下:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

黏性土的密度常用环刀法测得,即用一定容积 V 的环刀切取试样,称得质量 m ,即可求得密度 ρ 。 ρ 通常称为湿密度。天然状态下土的密度称为天然密度,天然密度的变化范围较大,一般黏性土 $\rho = 1.8 \sim 2.08 \text{ g/cm}^3$,砂土 $\rho = 1.6 \sim 2.0 \text{ g/cm}^3$,腐殖土 $\rho = 1.5 \sim 1.7 \text{ g/cm}^3$ 。

2) 土粒相对密度 d_s

土粒相对密度 d_s 是土粒的质量与同体积纯蒸馏水在 4°C 时的质量之比,公式如下:

$$d_s = \frac{m_s/V_s}{m_{w1}/V_s} = \frac{\rho_s}{\rho_{w1}} \quad (1.2)$$

式中 ρ_s ——土粒的密度, g/cm^3 , 即单位体积的土粒质量, $\rho_s = m_s/V_s$;

ρ_{w1} —— 4°C 时纯蒸馏水的密度, 等于 1 g/cm^3 。

一般情况下,土粒相对密度在数值上就等于土粒密度,但两者的含义不同,前者是两种物质的质量密度之比,而后者是一种物质(土粒)的质量密度。天然土的颗粒是由不同的矿物组成的,它们的相对密度并不相同。试验测得的是土粒的相对密度的平均值。土粒的相对密度变化范围较小,一般为 $2.65 \sim 2.80 \text{ g/cm}^3$,若土中的有机质含量增加,则土的密度将减小。土粒相对密度可在试验室内用比重瓶法测得。通常也可按经验数值选用,一般土粒的相对密度参考值见表 1.1。

表 1.1 土粒相对密度参考值 单位: g/cm^3

土的名称	砂土	粉土	黏性土	
			粉质黏土	黏土
土的相对密度	2.65 ~ 2.69	2.70 ~ 2.71	2.72 ~ 2.73	2.74 ~ 2.76

3) 土的含水量 ω

土的含水量 ω 是指土中水的质量和土颗粒质量之比,用百分率表示,需通过试验取得,公式如下:

$$\omega = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% \quad (1.3)$$

含水量 ω 是土含水程度(或湿度)的一个重要的物理性质指标。天然土层的含水量变化范围很大,它与土的种类、埋藏条件及其所处的自然地理环境等有关。一般的粗砂,其值接近零,而饱和砂土可达 40%;坚硬黏性土的含水量可小于 30%,而饱和软黏土(如淤泥)可达 60% 甚至更高。一般来说,同一类土(尤其是细粒土),当含水量增加时,其强度就会降低。土的含水量一般用“烘干法”测定。

► 1.2.2 换算指标

除了上述 3 个实测指标之外,还有 6 个可以通过计算求得的指标,称为换算指标,包括土的干密度、饱和密度、有效密度、孔隙比、孔隙率和饱和度。

1) 土的干密度 ρ_d

土的干密度 ρ_d 为土被完全烘干时的密度,若忽略气体的质量,干密度在数值上等于单位

体积中土粒的质量,公式如下:

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \quad (1.4)$$

土的干密度越大,土越密实,强度越高,压缩性越低。

2) 土的饱和密度 ρ_{sat}

土的饱和密度 ρ_{sat} 为孔隙完全被水充满时土的密度,公式如下:

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_s + V_v \rho_w}{V} \quad (1.5)$$

式中 ρ_w ——水的密度,接近或等于 1 g/cm^3 。

3) 土的有效密度 ρ'

土的有效密度 ρ' 为地下水位以下,单位体积中土粒的质量与同体积水的质量之差,也称为土的浮密度,公式如下:

$$\rho' = \frac{m_s - V_s \rho_w}{V} \quad (1.6)$$

土的三相比例指标中的质量密度指标有 4 个,即土的密度、干密度、饱和密度和有效密度。土的单位体积的重力(即土的密度与重力加速度的乘积)称为土的重力密度,简称重度 γ ,单位为 kN/m^3 。与之对应,重度指标也有 4 个,即土的重度 γ 、干重度 γ_d 、饱和重度 γ_{sat} 及力效重度 γ' 。其定义均以重力代替质量,也就是将所有的密度乘以重力加速度 $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$ 所得,实用时可近似取 10 m/s^2 。

同一土的各密度或重度之间,在数值上有如下关系:

$$\rho_{\text{sat}} \geq \rho \geq \rho_d > \rho' \text{ 或者 } \gamma_{\text{sat}} \geq \gamma \geq \gamma_d > \gamma'$$

4) 土的孔隙比 e

土的孔隙比 e 是指孔隙的体积与土粒体积之比,公式如下:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1.7)$$

孔隙比是一个重要的物理性质指标,可以用来评价天然土层的密实程度。一般 $e < 0.6$ 的土是密实的低压缩性土, $e > 1.0$ 的土是疏松的高压缩性土。

5) 孔隙率 n

孔隙率 n 是指孔隙的体积与土的总体积之比,用百分数表示,公式如下:

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\% \quad (1.8)$$

土的孔隙比和孔隙率都是用来表示孔隙体积比值的。相同颗粒形成的土,当其孔隙比和孔隙率不同时,土的密实程度也不同。它们随土的形成过程中所受到的压力、粒径级配和颗粒排列的不同而有很大差异。一般来说,粗粒土的孔隙率小,如砂类土的孔隙率一般在 30% 左右,细粒土的孔隙率大,如黏性土的孔隙率有时可高达 70%。

6) 饱和度 S_r

土的饱和度 S_r 是指土孔隙中液体充满的程度,它等于液体所占的体积与孔隙的体积之



比,用百分数表示,公式如下:

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% \quad (1.9)$$

很显然,干土的 $S_r = 0$,饱和土的 $S_r = 100\%$ 。通常根据饱和度的大小可以将砂土的湿度分为三种类型: $S_r \leq 50\%$ 稍湿, $50\% < S_r \leq 80\%$ 很湿, $S_r > 80\%$ 饱和。

► 1.2.3 三相指标的换算

土的三相比例指标之间可以相互换算,根据上述 3 个试验指标,可以用换算公式求得全部换算指标,也可以用某几个指标换算其他的指标,这种换算关系见表 1.2。下面介绍导出换算公式的基本方法。

表 1.2 土的三相比例指标换算公式

名称	符号	三相比例指标表达式	常用换算公式	常见的数值范围
密度	ρ	$\rho = \frac{m}{V}$	$\rho = \rho_d(1+w)$ $\rho = \frac{d_s(1+w)}{1+e} \rho_w$	1.6 ~ 2.0 g/cm ³
土粒相对密度	d_s	$d_s = \frac{m_s}{V_s \rho_w} = \frac{\rho_s}{\rho_w}$	$d_s = \frac{S_r e}{w}$	黏性土:2.72 ~ 2.75 粉土:2.70 ~ 2.71 砂土:2.65 ~ 2.69
含水量	w	$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100\%$	$w = \frac{S_r e}{d_s}$ $w = \frac{\rho}{\rho_d} - 1$	20% ~ 60%
干密度	ρ_d	$\rho_d = \frac{m_s}{V}$	$\rho_d = \frac{\rho}{1+w}$ $\rho_d = \frac{d_s}{1+e} \rho_w$	1.3 ~ 1.8 g/cm ³
饱和密度	ρ_{sat}	$\rho_{sat} = \frac{m_s + V_v \rho_w}{V}$	$\rho_{sat} = \frac{d_s + e}{1+e} \rho_w$	1.8 ~ 2.3 g/cm ³
有效密度	ρ'	$\rho' = \frac{m_s - V_v \rho_w}{V}$	$\rho' = \rho_{sat} - \rho_w$ $\rho' = \frac{d_s - 1}{1+e} \rho_w$	0.8 ~ 1.3 g/cm ³
孔隙比	e	$e = \frac{V_v}{V_s}$	$e = \frac{w d_s}{S_r}$ $e = \frac{d_s(1+w) \rho_w}{\rho} - 1$	黏性土和粉土:0.40 ~ 1.20 砂土:0.30 ~ 0.90
孔隙率	n	$n = \frac{V_v}{V} \times 100\%$	$n = \frac{e}{1+e}$ $n = 1 - \frac{\rho_d}{d_s \rho_w}$	黏性土和粉土:30% ~ 60% 砂土:25% ~ 45%
饱和度	S_r	$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\%$	$S_r = \frac{w d_s}{e}$ $S_r = \frac{w \rho_d}{n \rho_w}$	0 ~ 100%

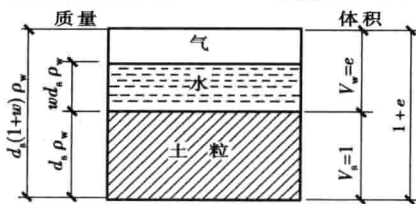


图 1.3 土的三相指标换算图

将图 1.2 两侧的量值分别除以 V_s ,同时引入实测指标后,图 1.2 两侧的量值即如图 1.3 所示。此时土粒体积 $V_s = 1$,则孔隙体积为 e ,总体积为两部分之和 $V = 1 + e$ 。土粒的质量 $m_s = d_s \rho_w$,水的质量 $m_w = \omega d_s \rho_w$ 。总质量 $m = m_s + m_w = (1 + \omega) d_s \rho_w$ 。于是由各

指标定义可得:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{G_s(1+w)\rho_w}{1+e} \quad (1.10)$$

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} = \frac{G_s\rho_w}{1+e} = \frac{\rho}{1+w} \quad (1.11)$$

$$e = \frac{G_s\rho_w}{\rho_d} - 1 = \frac{G_s(1+w)\rho_w}{\rho} - 1 \quad (1.12)$$

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_s + V_v\rho_w}{V} = \frac{(G_s + e)\rho_w}{1+e} \quad (1.13)$$

$$\rho' = \frac{m_s - V_s\rho_w}{V} = \frac{m_s + V_v\rho_w - V\rho_w}{V} = \rho_{\text{sat}} - \rho_w = \frac{(G_s - 1)\rho_w}{1+e} \quad (1.14)$$

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{e}{1+e} \quad (1.15)$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{m_w}{V_v\rho_w} = \frac{wG_s}{e} \quad (1.16)$$

以上公式推导中,是以 $V_s = 1$ 作为计算的出发点,也可以用其他量作为单位值进行推导。这是因为三相量的指标都是相对的比例关系,不是量的绝对值,因此在换算中可以根据具体情况决定采用某种方法。

1.3 土的颗粒级配

► 1.3.1 土粒大小及粒组划分

自然界中土的颗粒大小十分不均匀,性质各异。土颗粒的大小,通常以颗粒直径大小来表示,简称粒径,单位为 mm;土粒并非理想的球体。通常为椭球状、针片状、棱角状等不规则形状,因此粒径只是一个相对的、近似的概念,应理解为土粒的等效粒径。土的粒径变化范围极大,大的可达数千毫米以上,小的可小于万分之一毫米,随着粒径的变化,土粒的成分和性质也逐渐发生变化。

自然界中土一般都是由大小不等的土粒混合而组成的,也就是不同大小的土颗粒按不同的比例搭配关系构成某一类土,比例搭配(级配)不一样,则土的性质各异。因此,研究土的颗粒大小组合情况,也是研究土的工程性质一个很重要的方面。所谓土的颗粒大小组合情况,在工程上就是按土颗粒(粒径)大小分组,称为粒组。每个粒组都以土粒直径的两个数值作为其上下限,并给以适当的名称,简言之,粒组就是人为划分的一定的粒径区间,以毫米表示。从土的工程性质角度出发,粒组的划分一般应考虑三个原则:其一,符合粒径变化所引起的质的变化规律,即每个粒组具有相同或相似的成分与性质;其二,与粒组的分析技术条件相适应,即不同大小的土粒可采用不同的适用方法进行分析;其三,粒组界限值力求服从简单的数学规律,以便于记忆与分析,即各粒组界限值是 200, 20, 2 mm。这三条中,第一条是最重要的。目前我国现行《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)对粒组划分方案见表 1.3。

表 1.3 土的粒组划分方案

粒组统称	粒组名称		粒径 d/mm	分析方法	主要特征	
巨粒	漂石(块石)粒		$d > 200$	直接测定	透水性很大,压缩性极小,颗粒间无黏结,无毛细性	
	卵石(小块石)粒		$60 < d \leq 200$	筛分法		
粗粒	砾粒	粗砾	$20 < d \leq 60$			
		中砾	$5 < d \leq 20$			
		细砾	$2 < d \leq 5$			
	砂粒	粗砂	$0.5 < d \leq 2$		静水沉降法	透水性大,压缩性小,无黏性,有一定毛细性
		中砂	$0.25 < d \leq 0.5$			
		细砂	$0.075 < d \leq 0.25$			
细粒	粉粒		$0.002 < d \leq 0.075$	透水性小,压缩性中等,毛细上升高度大,微黏性		
	黏粒		$d \leq 0.002$		透水性极弱,压缩性变化大,具黏性和可塑性	

粒组划分及详细程度各国并不一致,其中砂粒与粉粒界限值有所不同,有 0.075, 0.06 和 0.05 mm 等三种方案,但本质上差别不大。20 世纪 80 年代以前,我国以 0.05 mm 作为砂粒与粉粒的界限值,与苏联、东欧诸国一致,后经修订改为 0.075 mm。粉粒与黏粒的界限值也有三种不同的值,即 0.005, 0.002 和 0.001 mm,土壤学中以 0.001 mm 作为该两组的界限值。小于 0.002 mm 的土粒中很少有未风化物,以次生矿物为主;而在 0.002 ~ 0.005 mm 土粒中,尚有未风化的原生矿物,所以以 0.002 mm 粒径作为黏、粉粒两组界限值是有一定依据的,并为许多国家所采用。我国的《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007)多年来采用 0.005 mm 作为该两粒组的界限值,而《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)仍采用 0.002 mm 作为黏粒和粉粒的界限值,是在工程实际中总结了土的工程性质。

目前,我国广泛应用的粒组划分方案是符合量变到质变的规律的,同时,该方案与现代粒组分析技术及观察技术相适应,如粒径大于 200 mm 的土粒可直接测其粒径大小,粒径大于 2mm 的土粒,用粗筛分离粒组,用肉眼观察颗粒大小与矿物成分,也可进行岩石的薄片研究;砂粒可用细筛分离粒组,用双目镜观察;粉粒与黏粒可按颗粒在静水中的沉降原理进行分离,并测定各粒组的相对含量;粉粒可用显微镜观察,黏粒常用电子显微镜观察。

► 1.3.2 粗度成分及其确定方法

土的粒度成分是指干土中各种不同粒组的相对含量(以干土质量的百分比表示),它用来描述土的各种不同粒径的分布特征。它是通过土的颗粒分析试验测定的,在土的分类和评价土的工程性质时,常需测定土的粒度成分。目前,颗粒分析的试验方法可分为筛分析方法和静水沉降方法两大类。

(1) 筛分法

将风干、分散的代表性土样通过一套筛孔直径与土中各粒组界限值相等的标准筛,称出经过充分过筛后留在各筛盘上的土粒质量,即可求得各粒组的相对百分含量。目前我国采用的标准筛的最小孔径为 0.075 mm(或 0.1 mm)。

(2) 静水沉降法

首先应将土中集合体分散制成悬液,然后根据不同粒径的土粒在静水中的沉降速度不同的原理,测定细粒组的颗粒级配。土粒在静水中沉降时受到土粒的重力和液体水的阻力两种力的作用,斯托克斯(Stokes)根据这两种力的平衡条件建立了土粒直径与沉降速度的关系,公式如下:

$$v = \frac{\rho_s - \rho_w}{18\eta} g d^2 \quad (1.17)$$

式中 v ——土粒在静水中的沉降速度, cm/s;

d ——土粒直径, mm;

g ——重力加速度, cm/s²;

ρ_s ——土粒密度, g/cm³;

ρ_w ——水的密度, g/cm³;

η ——水的动力粘滞系数, 10⁻⁶ kPa · s。

公式 1.17 中水的密度与水的动力粘滞系数随液体的温度而变化,对于某一种土的悬液来说,当悬液温度不变时,公式中 g, ρ_s, ρ_w 和 η 均为定值,故为一常数,用 A 表示,则公式 1.17 变为:

$$v = \frac{\text{距离}}{\text{时间}} = \frac{L}{t} \text{ 和 } \rho_s = G_s \rho_w \approx G_s \rho_w \quad (1.18)$$

斯托克斯公式反映的是土粒直径(d)与时间(t)和深度(h)之间的关系,土粒沉降速度与其直径的平方成正比,即大颗粒比小颗粒下沉快得多,利用该公式进行细粒组的测定,是将制备好的悬液(土粒与水)经充分搅拌、停止搅拌后,可测得经某一时间,土粒从悬液表面下沉至某一深度处所对应的颗粒直径,这样就可以将大小不同的土粒分离开来或求小于颗粒径 d 的颗粒在土中的百分含量。

斯托克斯公式是在下列假定条件下推导出来的:

- ①悬液的浓度很小,使颗粒相互不碰撞而自由下沉;
- ②悬液的粘滞系数是常数;
- ③土粒密度相等;
- ④土粒呈球形;
- ⑤土粒直径远大于水分子直径;
- ⑥沉速很小;
- ⑦土粒水化膜厚度等于零。

但在实际中除土粒远大于水分子外,其他条件均无法满足,在应用该原理时,必须在试验技术上采用相应的措施,如采用悬液的浓度为 1% ~ 3%;总液温度在试验过程中保持不变或者进行温度校正;土粒密度取平均密度;土粒为不规则形状,可引用“等效直径”的概念,所谓

“等效直径”是指土粒沉降速度与某一粒径的球形颗粒的沉降速度相等,那么这球形颗粒的直径即为该土粒的等效直径;为保持土粒的沉速较小,一般适用于 <0.075 (或 0.1) mm 的土粒。虽然在实验技术上采取了相应的措施,仍不免存在一些误差,但一般均能满足实际生产上的精度要求。

目前测定土的粒度成分的方法有比重计法、虹吸比重瓶法、移液管法。各种方法的仪器设备有其自身特点,但它们的测试原理均建立在斯托克斯定律基础上。

► 1.3.3 粒度成分表示方法

常用的粒度成分的表示方法有表格法、累计曲线法和三角坐标法。

1) 表格法

以列表形式直接表达各粒组的百分含量,它用于粒度成分的分类是十分方便的,见表 1.4 和表 1.5。

表 1.4 粒度成分的累计百分含量表示法

粒径 d_i /mm	粒径小于等于 d_i 的累计百分含量 p_i /%		
	土样 a	土样 b	土样 c
10	—	100.0	—
5	100.0	75.0	—
2	98.9	55.0	—
1	92.9	42.7	—
0.5	76.5	34.7	—
0.25	35.0	28.5	100.0
0.10	9.0	23.6	92.0
0.075	—	21.0	89.6
0.010	—	10.9	40.0
0.005	—	6.7	28.9
0.001	—	1.5	10.0

表 1.5 粒度成分分析结果

粒组	土样 a	土样 b	土样 c
10 ~ 5	—	25.0	—
5 ~ 2	1.1	20.0	—
2 ~ 1	6.0	12.3	—
1 ~ 0.5	16.4	8.0	—
0.5 ~ 0.25	41.5	6.2	—