



中等职业教育国家规划教材

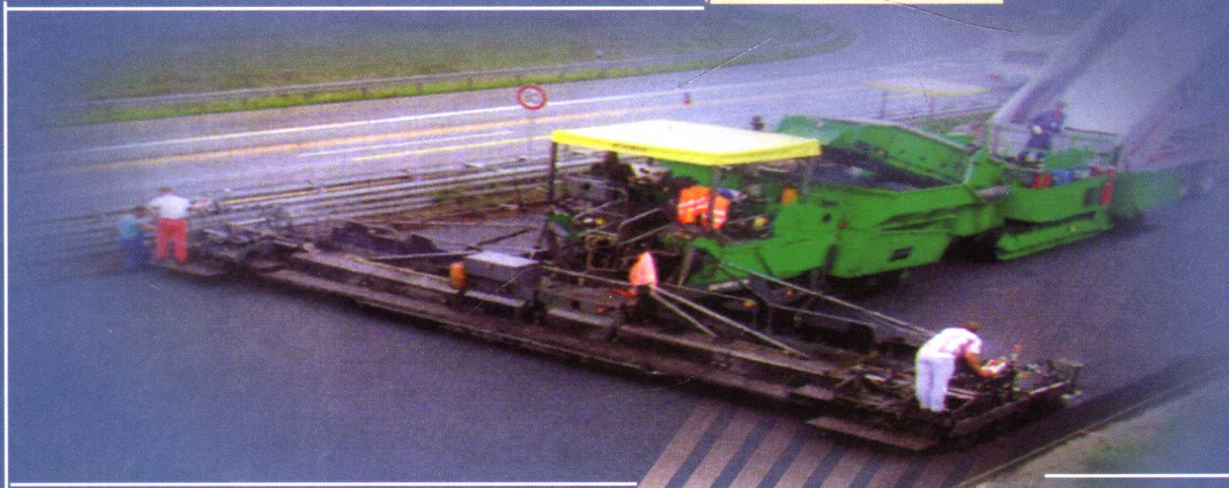
全国中等职业教育教材审定委员会审定

# 道路材料试验

公路与桥梁专业

(第二版)

主编 伍必庆



人民交通出版社

China Communications Press

中等职业教育国家规划教材

Daolu Cailiao Shiyan

**道路材料试验**

(第二版)

(公路与桥梁专业)

主 编 伍必庆  
主 审 张美珍

人民交通出版社

## 内 容 提 要

本书是中等职业教育国家规划教材,主要讲述了道路工程用各种建筑材料的技术性质、组成设计以及常规的试验方法。内容包括筑路用土,砂石材料,石灰和水泥,普通水泥混凝土,稳定土和建筑砂浆,沥青材料,沥青混合料,建筑钢材和木材,并介绍了发展中的材料与应用。

本书作为中等职业学校公路与桥梁专业教学用书,也可供继续教育及职业培训使用,或作为公路工程技术人员的学习参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

道路材料试验/伍必庆主编. —2版. —北京:人民交通出版社, 2007.1

ISBN 978-7-114-06231-5

I. 道… II. 伍… III. 道路工程—建筑材料—材料试验 IV. U414.03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 128541 号

中等职业教育国家规划教材

书 名: 道路材料试验(第二版)(公路与桥梁专业)

著 者: 伍必庆

责任编辑: 郝瑞莘

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 85285838, 85285995

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 廊坊市长虹印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 23

字 数: 563 千

版 次: 2002年7月第1版 2007年1月第2版

印 次: 2007年1月第2版第1次印刷 总第4次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-06231-5

印 数: 16001—21000 册

定 价: 30.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

# 交通职业教育教学指导委员会

## 路桥工程专业指导委员会

主任：柴金义

副主任：金仲秋 夏连学

委员：（按姓氏笔画排序）

王 彤 王进思 刘创明 刘孟林

孙元桃 孙新军 吴堂林 张洪滨

张美珍 李全文 陈宏志 周传林

周志坚 俞高明 徐国平 梁金江

彭富强 谢远光 戴新忠

秘书：伍必庆

## 中等职业教育国家规划教材出版说明

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》精神,落实《面向 21 世纪教育振兴行动计划》中提出的职业教育课程改革和教材建设规划,根据教育部关于《中等职业教育国家规划教材申报、立项及管理意见》(教职成[2001]1 号)的精神,我们组织力量对实现中等职业教育培养目标和保证基本教学规格起保障作用的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教材进行了规划和编写,从 2001 年秋季开学起,国家规划教材将陆续提供给各类中等职业学校选用。

国家规划教材是根据教育部最新颁布的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教学大纲(课程教学基本要求)编写,并经全国中等职业教育教材审定委员会审定。新教材全面贯彻素质教育思想,从社会发展对高素质劳动者和中初级专门人才需要的实际出发,注重对学生的创新精神和实践能力的培养。新教材在理论体系、组织结构和阐述方法等方面均作了一些新的尝试。新教材实行一纲多本,努力为学校选用教材提供比较和选择,满足不同学制、不同专业和不同办学条件的学校的教学需要。

希望各地、各部门积极推广和选用国家规划教材,并在使用过程中,注意总结经验,及时提出修改意见和建议,使之不断完善和提高。

教育部职业教育与成人教育司

二〇〇六年六月

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》,落实《面向 21 世纪教育振兴行动计划》中提出的“职业教育课程改革的教材建设规划”,教育部全面启动了中等职业教育国家规划教材建设工作。交通职业教育教学指导委员会路桥工程学科委员会组织全国交通职业学校(院)的教师,根据教育部最新颁布的公路与桥梁专业的主干课程教学基本要求,编写了中等职业教育公路与桥梁专业国家规划教材共 8 种,并通过了全国中等职业教育教材审定委员会的审定。

本套教材的编写融入了全国各交通职业学校(院)公路与桥梁专业的教学改革成果,并结合了最新的技术标准、规范以及公路科技进步等情况,具有较强的针对性。新教材较好地贯彻了素质教育的思想,力求体现以人为本的现代理念,从交通行业岗位群的知识 and 技能要求出发,并结合对培养学生创新能力、职业道德方面的要求,提出教学目标并组织教学内容,在教材的理论体系、组织结构、内容描述上与传统教材有了明显的区别。

《道路材料试验》是中等职业教育公路与桥梁专业国家规划教材之一,内容包括:筑路用土,砂石材料,石灰和水泥,普通水泥混凝土、建筑砂浆和稳定土,沥青材料,沥青混合料,建筑钢材和木材,共 7 章。

参加本书编写工作的有:内蒙古大学职业技术学院伍必庆(编写第二、四、五章)、河南省交通学校宁金成(编写第一章)、山西交通职业技术学院李建刚(编写第三、七章)、广西交通职业技术学院刘芳(编写第六章),全书由内蒙古大学职业技术学院伍必庆担任主编,湖南交通职业技术学院文德云担任责任编委。人民交通出版社聘请湖南交通职业技术学院文德云高级讲师担任本套教材的总撰稿人。

本书由长安大学胡大琳教授担任责任主审,陈栓发、徐江萍副教授审稿。他们对书稿提出了宝贵意见,在此表示衷心感谢。

限于编者经历及水平,教材内容很难覆盖全国各地的实际情况,希望各教学单位在积极选用和推广国家规划教材的同时,注意总结经验,及时提出修改意见和建议,以便再版修订时改正。

交通职业教育教学指导委员会

路桥工程学科委员会

二〇〇二年五月

随着公路特别是高速公路建设事业的快速发展,我国在公路与桥梁工程设计理论、公路建设新材料、公路施工新技术和新工艺等方面的研究取得了许多新的成果。为此,近年来中华人民共和国交通部颁布了一些新的行业标准、规程和规范。为紧跟行业新技术的发展步伐,适应新标准和规范的要求,改正第一版教材中与新标准、规程和规范表述不相吻合的内容,也为了弥补第一版教材在使用过程中的不足,交通职业教育教学指导委员会路桥工程专业指导委员会研究决定,对2002年出版的中等职业教育国家规划教材按以下原则重新编写。

1. 遵循“去旧补新”的原则。根据国家和行业颁布的最新标准、规程和规范以及行业科技进步需要,对原教材中的部分内容进行适当的调整和更新,同时对原教材中的不足和疏忽予以弥补。

2. 突出实践技能的原则。按照教育部对中等职业教育培养目标的定位,吸收近几年职业教育教学改革的经验和成果,力求使新修订的教材更符合中职学生的认知规律、实际应用和职业技能的训练需要,体现“所学即所用,所用即所教”。

参加本书编写工作的有:河南交通职业技术学院宁金成(编写第一章),内蒙古大学职业技术学院伍必庆(编写第二、四、五、八章),山西交通职业技术学院李建刚(编写第三、七章),广西交通职业技术学院刘芳(编写第六章)。全书由伍必庆担任主编,山西交通职业技术学院张美珍担任主审。

第二版教材增附教育部颁布的《中等职业学校公路与桥梁专业教学指导方案》中对《道路材料试验》课程的“教学基本要求”,以便于各校组织教学时参考。

交通职业教育教学指导委员会  
路桥工程专业指导委员会

二〇〇六年八月



<b>第一章 筑路用土</b> .....	1
第一节 概述 .....	1
第二节 土的三相组成 .....	2
第三节 土的基本物理性质及其指标 .....	4
第四节 土的其他物理性质指标 .....	7
第五节 土的孔隙性结构指标 .....	8
第六节 土的物理性质指标间的相互关系 .....	10
第七节 黏性土的性质 .....	14
第八节 土的透水性、毛细性及土中水的运动规律 .....	16
第九节 土的颗粒级配 .....	19
第十节 土的工程分类 .....	23
第十一节 筑路用土试验 .....	30
试验一 含水量试验(烘干法、酒精燃烧法) .....	30
试验二 比重试验(比重瓶法) .....	32
试验三 土体密度试验(环刀法、灌砂法) .....	34
试验四 土的最大干密度、最佳含水量试验 .....	39
试验五 黏性土的液限和塑限含水量试验(联合测定仪、 滚搓法) .....	44
试验六 砂性土的渗透系数试验(常水头渗透系数试验) .....	47
试验七 颗粒分析试验(筛分法) .....	50
<b>第二章 砂石材料</b> .....	54
第一节 砂石材料的来源与分类 .....	54
第二节 石料的技术性质和技术要求 .....	55
第三节 集料的技术性质和技术要求 .....	62
第四节 矿质混合料的组成设计 .....	67
第五节 砂石材料试验 .....	74
试验八 岩石的密度试验、毛体积密度试验 .....	74
试验九 石料的饱水率试验(真空法) .....	77
试验十 石料饱水抗压强度试验 .....	79
试验十一 石料和粗集料的搁板式磨耗度试验 .....	80
试验十二 水泥混凝土粗集料压碎指标试验 .....	82
试验十三 粗集料的针、片状含量试验 .....	84

试验十四	粗集料的筛分、表观密度、松装密度试验	86
试验十五	细集料的筛分、表观密度、松装密度试验	91
试验十六	细集料的含泥量、有机质含量、云母含量试验	97
试验十七	细集料砂当量试验	99
试验十八	细集料棱角性试验(间隙率法)	103
试验十九	细集料棱角性试验(流动时间法)	105
试验二十	亚甲蓝试验	106
试验二十一	细集料压碎指标试验	109
<b>第三章</b>	<b>石灰和水泥</b>	<b>113</b>
第一节	石灰和石膏	113
第二节	硅酸盐水泥	117
第三节	掺混合材料的硅酸盐水泥	128
第四节	其他品种水泥	132
第五节	石灰与水泥试验	134
试验二十二	石灰有效氧化钙及氧化镁的测定	134
试验二十三	水泥细度、标准稠度、凝结时间试验	138
试验二十四	水泥安定性试验	143
试验二十五	水泥胶砂软练法标准试件的制备及抗压、 抗折强度的测定	145
<b>第四章</b>	<b>普通水泥混凝土、稳定土和建筑砂浆</b>	<b>150</b>
第一节	普通水泥混凝土的组成材料	150
第二节	普通水泥混凝土的技术性质	158
第三节	普通水泥混凝土的配合比设计	165
第四节	建筑砂浆	181
第五节	无机结合料稳定土	184
第六节	普通水泥混凝土和建筑砂浆试验	189
试验二十六	水泥混凝土混合料坍落度、维勃稠度的测定	190
试验二十七	水泥混凝土拌和物表观密度试验	193
试验二十八	水泥混凝土抗压、抗弯拉强度试验	195
试验二十九	砂浆的和易性及抗压强度试验	198
试验三十	无机结合料稳定土强度试验	200
<b>第五章</b>	<b>沥青材料</b>	<b>206</b>

第一节	石油沥青	206
第二节	煤沥青	223
第三节	乳化沥青	226
第四节	沥青材料试验	232
试验三十一	石油沥青的针入度、延度、软化点试验	234
试验三十二	石油沥青的黏滞度试验	240
试验三十三	石油沥青的加热损失试验	241
试验三十四	石油沥青的闪燃点、脆点试验	243
试验三十五	石油沥青的含水量、黏附性试验	245
<b>第六章</b>	<b>沥青混合料</b>	<b>249</b>
第一节	概述	249
第二节	热拌沥青混合料	251
第三节	其他沥青混合料	277
第四节	沥青混合料试验	286
试验三十六	沥青混合料试件制作方法(击实法)	286
试验三十七	压实沥青混合料密度试验(表干法)	290
试验三十八	沥青混合料马歇尔稳定度试验	294
试验三十九	沥青混合料中沥青含量试验(离心分离法)	297
试验四十	沥青混合料车辙试验(选做)	300
<b>第七章</b>	<b>建筑钢材与木材</b>	<b>304</b>
第一节	建筑钢材	304
第二节	木材	319
第三节	建筑钢材试验	322
试验四十一	钢筋的拉伸试验	322
试验四十二	建筑钢材的硬度和冷弯试验	326
<b>第八章</b>	<b>发展中的材料与应用</b>	<b>332</b>
第一节	乳化沥青稀浆封层	332
第二节	土工布	334
第三节	改性沥青	336
第四节	钢纤维混凝土和碾压混凝土	340
	《道路材料试验》教学基本要求	346
	参考文献	351

# 第一章 筑路用土

## 【内容简介和学习目标】

本章着重介绍土的组成, 土的物理性质及其指标, 土的水理性质, 土的粒度成分及工程分类方法。

通过本章学习, 学生能够根据土的三相体的概念, 进行土的物理性质指标的测试和计算, 描述黏性土的物理性质、物理状态与含水量之间的关系。应用颗粒分析方法和公路土工分类方法, 确定土的类型和名称, 并具有各种土工试验检测能力, 同时能进行土的野外简易鉴别。

## 第一节 概 述

### 一、土粒特征

土是指地壳表层的物质, 在长期风化、搬运、磨蚀、沉积作用的过程中, 形成大小不等、未经胶结的一切松散物质。它包括土壤、黏土、矿、岩屑、岩块和砾石等。

土总的特征是颗粒与颗粒之间的连接强度较土粒本身强度低, 甚至没有联结性。根据土粒之间有无联结性, 大致可将土分为砂类土(砾石、砂)和黏性土两大类。

土从外观的颜色看, 较为复杂, 但以黑、红、白为基本色调。颜色是土颗粒成分的直接反映, 黑色是由所含有机物的腐化(腐殖质)染色而成的; 白色常来自石英和高岭石的本色; 红色主要是由高价氧化铁染色而成。随着土的成因环境不同, 土呈现出多种多样的颜色。

土粒特征主要是形状、粒径、比表面积。

(1)形状 岩石遭到风化剥蚀可裂成碎屑, 有些矿物, 无论粗细, 都仍然保持各自晶体形状, 有块状、球状、板状、片状、柱状等。

(2)粒径 土的颗粒有粗有细, 尽管土粒粗细悬殊, 都属于土质学研究范围。为了便于分辨土的粗细程度, 通常把土粒视为球体, 以其直径尺寸表示土粒的粗细, 工程上常以毫米作为土粒粒径的计量单位。

(3)比表面积 一切几何体, 它的形状、体积和表面之间都有一定的比例关系。在土质学中常用比表面积来表示这一关系, 即以物体的总表面积除以它的总体积, 所得的商称作比表面积, 用  $A_R$  表示, 单位为  $\text{mm}^{-1}$ , 计算公式为:

$$\text{比表面积 } A_R = \frac{\text{物体总表面积}(\text{mm}^2)}{\text{物体总体积}(\text{mm}^3)} = \frac{\pi d^2}{\frac{1}{6}\pi d^3} = \frac{6}{d}(\text{mm}^{-1}) \quad (1-1)$$

式中:  $d$ ——土颗粒直径(mm)。

### 二、土的结构

土的结构是指土粒的大小、形状、表面特征、相互排列及其联结关系的组合情况。它与土粒的矿物成分、沉积条件和沉积过程有关。由于土的工程地质差异与土的结构有很密切的关

系,常将土的结构划分为如下4个基本类型(图1-1)。

(1)单粒结构 土在沉积过程中,较粗的颗粒分别受到重力作用下沉,沉积层中每一个颗粒都与相邻的颗粒互相接触,互相支承,形成单粒结构[图1-1a)],如砂砾、砂土和较粗的粉土,都属于这种单粒结构。

(2)蜂窝结构 较细的土粒在水中受重力作用下沉的速度较慢,由于受土粒间分子引力的影响,一些相互邻近的土粒联结成小团下沉,堆积成具有很大孔隙的蜂窝状结构[图1-1b)],土粒团中形成的蜂窝状孔隙,远远大于土粒本身的尺寸。没有经过压密的蜂窝结构的土体,在外力作用下,土中的孔隙会大大地缩小,土体也会产生较大的沉陷。

(3)絮状结构 粒径小于 $0.002\text{mm}$ 的土粒,在水中可以长时间处于悬浮状态,本身所受重力不足以使其下沉。如果在悬液中加入某种电解质,可以使土粒间的排斥力减弱,土粒相互靠近,凝聚成絮状物体在水中下沉,形成絮状结构[图1-1c)]。这种结构的特点,是细小的土粒结成带状土骨架,再以带状的土骨架组成封闭的空室。土粒间的孔隙小,带状骨架间的孔隙很大。但是,这些孔隙实际上很小,用肉眼是看不见的。

(4)非均粒结构 土在沉积过程中,如果粗细颗粒混合下沉,就会形成粒径大小相差悬殊的土结构,称为非均粒结构[图1-1d)]。例如黏粒与砂粒、粉粒所形成的非均粒结构,黏粒包裹在粗粒表面上,具有弹性。细粒土受粗粒的影响,可形成较紧密的结构。

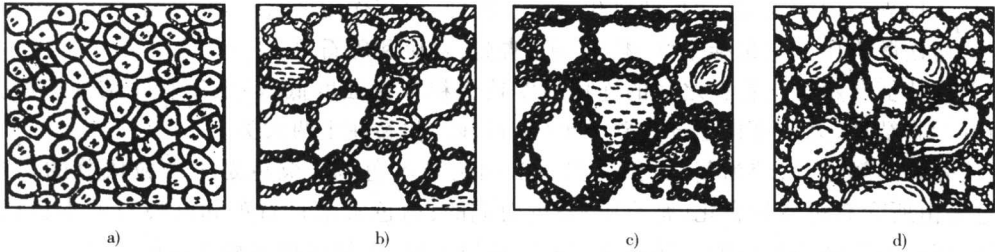


图1-1 土的结构

a)单粒结构;b)蜂窝结构;c)絮状结构;d)非均粒结构

以上4种结构类型,从工程地质观点看,单粒结构中由于地质成因上堆积速度不同,所以颗粒间在相互排列的方式和紧密程度上有所不同,也就形成了松散结构和紧密结构,松散结构的土层不稳定,而紧密结构的土层在建筑物的静力荷重下,不会压缩沉陷,在重力荷载或振动的情况下,孔隙度变化也很小,不会造成破坏,是较理想的结构。蜂窝状或絮状结构都是土粒比较均匀时形成的,这两种土层的孔隙率较大,在荷载作用下会产生较大的沉降。非均粒结构,粗细颗粒混合下沉,相互排列很紧,孔隙较小,结构密实,具有良好的工程地质性质。

## 第二节 土的三相组成

### 一、土的相系组成

土的三相是指土的固相、液相和气相。土的矿物颗粒是构成土的主体部分,为土的固态相,它是土的“骨架”,也叫做“土粒”。

土粒与土粒之间存在孔隙,如果孔隙全部被气体所充斥,就构成了土的气态相部分;如果孔隙全部为水所充满,就构成土的液态相部分。前者称为干土,后者称为饱和土。干土和饱和

土分别是由固相和气相、固相和液相组成,故都称为二相体系。

土粒之间的孔隙中,如果既有液态相水,又有气态相的空气,这种土称为湿土。湿土是介于饱和土和干土之间的,由固相、气相和液相组成,故称为三相体系。

总的来说,一般土都是由固态相的土粒、液态相的水和气态相的空气所组成,故合称为土的三相组成部分。

土的相系组成对土的状态和性质有着密切关系。如砂土,由土粒和空气组成二相体系的干砂土是松散的;由土粒和水组成的二相体系的饱水砂土也是松散的,而三相体系的湿砂土具有一定程度的联结性。黏性土随着相系组成的不同,其状态和性质的变化更为明显。

## 二、土的相系组成之间的相互作用

### 1. 固态相与液态相

在土的相系组成中,土粒的矿物成分、颗粒形状、大小及其组织结构,对土的工程性质有着决定性的影响。然而,当土粒之间有水存在时,则水对土粒间所起的作用就显得更为重要。一般来说,由于细小的土粒表面具有带游离价的原子或离子绕其周围,而形成静电引力场(图 1-2)。因水分子为偶极体,以  $O^{2-}$  为阴极、 $H^+$  为阳极,在土粒表面静电引力场的作用下,产生“同号电荷相斥,异号电荷相吸”的效应,且随场强距离由近而远,其活动能力由小而大。愈靠近土粒表面,水分子排列得愈紧密而整齐,几乎完全失去了自由活动的能力。距土粒表面渐远,其强度渐小,水分子也逐渐不那么整齐、紧密了,但仍不能完全自由。只有在场强之外,水分子才具自由活动的能力,成为自由液态水。这些部分或完全地失去自由活动能力的水分子,在土粒四周所形成的一层水膜,称为水化膜。水化膜受静电引力的影响,其密度比一般自由液态水大,愈靠近土粒表面密度愈大。其力学性质也与自由液态水不同,有似固态相,故把水化膜列为固态相与液态相的过渡型。

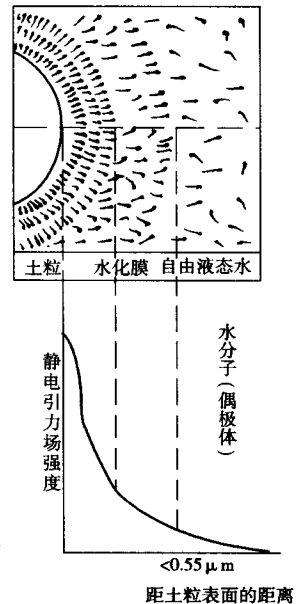


图 1-2 土粒与水相互作用示意图

两个相邻的土粒比较靠近时,各自形成的水化膜就有一部分重合起来,形成公共水化膜(图 1-3)。公共水化膜对细粒土的性质有很大的影响,因为它能把相邻的土粒牢固地联结在一起,尤其是当水中含有盐类时,它们的离子也参与到公共水化膜中去,其联结能力就会更为加强。相邻土粒通过公共水化膜所形成的这种比较牢固的联结关系,称为“水胶联结”。这同沉积岩的碎屑颗粒之间通过胶结物联结起来成为坚硬岩石,在性质上类似的,只是联结物及其牢固程度有所不同罢了。

水胶联结力的强度与土粒的大小有着很密切的内在联系。水胶联结力与土粒表面积成正比,而与土粒的体积成反比。即联结力与比面积成正比,比面积愈大,联结力也愈大。

含细小颗粒较多的黏性土,因水胶联结力强故能成块。当黏性土中含水量减少时,孔隙中自由液态水逐渐减少,土粒逐渐靠近,水胶联结力逐渐增强,土的体积不断收缩、干硬,表面常因收缩而出现裂缝。许多黏土沉积物表面的龟裂纹,就是这样形成的。反之,当黏土中的水分不断增加时,它的联结力便会变小、变软,体积膨胀;当其自由液态水超过饱和时,则公共水化膜减少,土粒间甚至会完全失去联结力使之软化、崩解。

“黏性土”这个名词的来源,就是因为它含有较多的细小土粒,使之具有较大的水胶联结力

而表现为有较强的黏着性而得名。

至于砂土,由于土粒的直径大、质量相对较大,比面积较小,微弱的水胶联结力不足以黏持土粒的重力,土粒间有相互脱离的趋势,故二相系的干砂土和饱和砂土都呈松散状态,无黏着力。

## 2. 固态相、液态相与气态相

在三相体系中,土粒的孔隙里既有水又有空气,三者交界处存在着一个弯曲的界面(图1-4)。在液—气之间,水分子受液体内部水分子的吸引使液体趋向收缩而产生表面张力。在固—液—气三相界面处的水分子,由于靠近土粒而受密度较大的水化膜的牵引,并在表面张力作用下,其接触处便形成弯曲的自由液面,称之为弯液面。由弯液面产生的力,称为“毛细力”。可见,在三相体系中由于气态相的存在使粒间的联结力有所增加,这对于三相体系的湿砂而言,虽水胶联结力不足以克服砂的重力,但由于公共水化膜的力量再加上毛细力,故也能将砂粒联结起来。我们把砂粒间的这种松散的联结关系,称为“水联结”。湿砂土之所以用锹能挖成团的道理即在此。

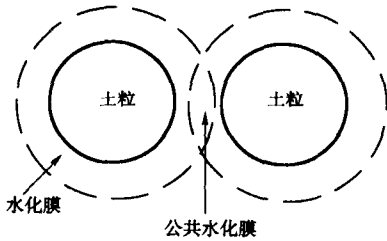


图 1-3 公共水化膜示意图

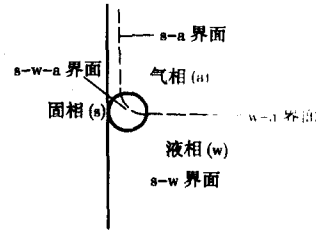


图 1-4 三相界面上弯液面的形成

至于比砂粒更大的土粒,如砾石,即使是三相体系,由于体积大,比面积相对太小,毛细力也不能起什么作用了。这种有水参与的联结力已不足以克服土粒自身的重力,我们把这一现象称为“不联结”或“无联结”。

由上述可知,土的相系之间的相互作用,随着土粒的大小不同而具有不同的联结关系。黏性土为水胶联结,砂土为水联结,砾石等粗大颗粒的土为无联结。除土粒的大小外,影响水化膜厚度的因素还有土的矿物成分和化学成分等。

## 第三节 土的基本物理性质及其指标

土的物理性质是指土的各组成部分(固相、液相和气相)的数量比例、性质和排列方式等所表现的物理状态,如轻重、干湿、松密程度等。土的物理性质是土最基本的工程地质性质,它在工程地质中,不仅要结合土的成分、结构、含水、含气的情况来了解其物理性质的特点和变化规律,而且还要通过试验取得其物理性质各项指标的数据,以作为工程设计的依据。

对于土体中的三相各自的质量、体积与总体积的相对比值,为了便于分析和计算的方便,一般将土的三相关系用简图加以表达(图1-5)。

土的物理性质指标可以用各相之间的比例关系表示,通常测试的指标是土的质量、密度和相对密度。

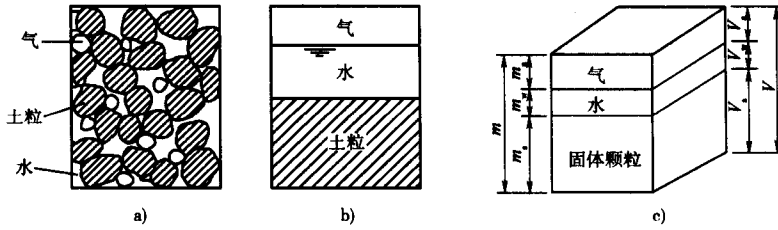


图 1-5 土的三相图

a)实际土体;b)土的三相图;c)土的三相比例图

$m, V$ -土的总质量和总体积; $m_s, V_s$ -土颗粒所占的质量和体积; $V_u$ -孔隙的体积; $m_w, V_w$ -土中水分所占的质量和体积; $m_a, V_a$ -孔隙中气体所占的质量和体积(气体的质量很小可忽略不计,即  $m_a=0$ )

## 一、土的质量

土的质量包括土粒、孔隙中水和气体的质量,土样的总体积可由式(1-2)表示:

$$V = V_u + V_w + V_s \quad (1-2)$$

土样的总质量可用式(1-3)表示。

$$m = m_u + m_w + m_s \text{ 或 } m = m_w + m_s \quad (1-3)$$

式中符号意义同前。

## 二、土的密度

土的密度是指土的总质量与土的总体积的比值。根据孔隙中水分情况可将土的密度分为天然密度( $\rho$ )、干密度( $\rho_d$ )、饱和密度( $\rho_f$ )和水下密度( $\rho'$ )。

(1)天然密度( $\rho$ ) 也称湿密度,是指天然状态下,土的单位体积的质量。

从三相图可知:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_s + m_w}{V} \quad (1-4)$$

式中: $\rho$ ——土的天然密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

其余符号意义同前。

天然密度测定,通常是用环刀法、灌砂法测定。土的密度一般在  $1.6 \sim 2.2 \text{ g}/\text{cm}^3$  之间,砂土为  $1.4 \text{ g}/\text{cm}^3$ ;亚砂土和亚黏土为  $1.6 \text{ g}/\text{cm}^3$ ;黏土可达  $2.0 \sim 2.2 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

(2)干密度  $\rho_d$  是指干燥状态下单位体积土的质量,即土中固体土粒的质量( $m_s$ )与土的体积的比值。

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \quad (1-5)$$

式中: $\rho_d$ ——干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

其余符号意义同前。

土的干密度实际上是土中完全没有天然水分的密度,它是土的密度的最小值。土的干密度直接与土中所含土粒质量的多少有关,也就是与土结构的紧密程度有关,间接地与土粒的矿物成分有关。某一土样的干密度值的大小主要取决于土的结构。因为它在这一状态下与含水量无关。因此,土的结构影响着干密度的值,干密度值越大,土越密实。干密度在一定程度上反映了土粒排列的紧密程度,在工程中常用它作为压实的控制指标。



(3)土的饱和密度( $\rho_t$ ) 是指土的孔隙中全被水充满的情况下,单位体积土的质量。即土粒的质量( $m_s$ )及孔隙中满水的质量( $m'_w$ )之和与土的总体积( $V$ )的比值。

$$\rho_t = \frac{m_s + m'_w}{V} \quad (1-6)$$

或者:

$$\rho_t = \frac{m_s + V_n \cdot \rho_w}{V} \quad (1-7)$$

式中: $\rho_t$ ——土的饱和密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$m'_w$ ——土的孔隙中满水的质量( $\text{g}$ );

$\rho_w$ ——水的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

其余符号意义同前。

土的饱和密度的大小,与土中孔隙体积和组成土粒矿物成分及其密度有关。土中孔隙体积小,土粒密度大,土的饱和密度就大,反之则小。含有机质较多的淤泥质土,孔隙体积特大,其饱和密度就小,一般只有  $1.4 \sim 1.6 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。对饱和密度这一指标不用实测,往往用其他指标推导求得。

(4)水下密度( $\rho'$ ) 也称浮密度或浸水密度。是指土在地下水面以下,单位体积的质量。因土处于水面以下,孔隙全被水充满,同时又受到水的浮力作用,使土粒质量减轻。这时的密度即为土粒质量( $m_s$ )加上孔隙中满水的质量( $V_n \cdot \rho_w$ )再减去土的体积在水下产生的浮重( $V \cdot \rho_w$ )之后,所得质量与土的总体积的比值。

$$\begin{aligned} \rho' &= \frac{m_s + V_n \cdot \rho_w - V \cdot \rho_w}{V} \\ &= \frac{m_s + V_n \cdot \rho_w - V_n \rho_w - V_s \cdot \rho_w}{V} \\ &= \frac{m_s - V_s \cdot \rho_w}{V} \end{aligned} \quad (1-8)$$

式中: $\rho'$ ——水下密度 ( $\text{g}/\text{m}^3$ );

$\rho_w$ ——水的密度( $\rho_w \approx 1$ )。

式(1-8)可写成  $\rho' = \rho_t - 1$ 。

式中符号意义同前。

在工程计算中,地下水位以下土层的密度,都要采用浮密度指标。砂性土和卵石土在自由水作用下,便受到同体积水重的浮力;而黏性土的孔隙中有结合水,由于结合水有黏滞性,具有固体特征,它对黏土颗粒就没有浮力作用,因水下黏土所承受的浮力并非同体积水重的浮力,计算时应视紧密程度折减。

### 三、土粒的相对密度

是指土固体物质本身的密度。即土在  $105 \sim 110^\circ\text{C}$  下烘至恒重时的质量与同体积  $4^\circ\text{C}$  时蒸馏水质量的比值。土粒的相对密度可用下式表达:

$$G_s = \frac{m_s}{m_w} = \frac{m_s}{V_s \rho_w} \quad (1-9)$$

式中: $G_s$ ——土粒的相对密度;

$m_w$ —— $4^\circ\text{C}$  时同体积蒸馏水的质量( $\text{g}$ );