



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

主编 伍必庆



人民交通出版社

中等职业教育国家规划教材

Daolu Cailiao Shiyan

## 道路材料试验

(公路与桥梁专业)

主 编	伍必庆
责任主审	胡大琳
审 稿	陈栓发
	徐江萍

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。全书共7章。

本书作为中等职业学校公路与桥梁专业教学用书,亦可供公路工程技术人员学习参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

道路试验材料/伍必庆主编.-北京:人民交通出版社,2002.7  
中职国家规划教材  
ISBN 7-114-04339-2

I.道… II.伍… III.道路试验(道路结构)-  
建筑材料-专业学校-教材 IV.U414

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第041857号

### 中等职业教育国家规划教材 道路材料试验

(公路与桥梁专业)

主 编 伍必庆

责任主审 胡大琳

审 稿 陈栓发

徐江萍

版式设计:王静红 责任校对:戴瑞萍 责任印制:杨柏力

人民交通出版社出版

(100013 北京和平里东街10号 010 64216602)

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

北京牛山世兴印刷厂印刷

开本:787×1092·1/16 印张:16 字数:397千

2002年7月 第1版

2002年7月 第1版 第1次印刷

印数:0001—10000册 定价:19.50元

ISBN 7-114-04339-2

U · 03192

## 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,努力为教材选用提供比较和选择,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

二〇〇一年十月

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“职业教育课程改革和教材建设规划”，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册，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。

<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 土的孔隙性结构指标.....	8
第五节 土的物理性质指标间的相互关系 .....	10
第六节 粘性土的性质 .....	14
第七节 土的透水性、毛细性及土中水的运动规律.....	16
第八节 土的颗粒级配 .....	19
第九节 土的工程分类 .....	24
第十节 筑路用土试验 .....	32
<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 .....	59
第四节 矿质混合料的组成设计 .....	64
第五节 砂石材料试验 .....	72
<b>第三章 石灰和水泥</b> .....	98
第一节 石灰 .....	98
第二节 硅酸盐水泥.....	103
第三节 掺混合材料的硅酸盐水泥.....	112
第四节 其它品种水泥.....	115
第五节 石灰和水泥试验.....	117
<b>第四章 普通水泥混凝土、建筑砂浆和稳定土</b> .....	132
第一节 普通水泥混凝土的组成材料.....	132
第二节 普通水泥混凝土的技术性质.....	137
第三节 普通水泥混凝土的配合比设计.....	143
第四节 水泥混凝土的质量管理.....	154
第五节 建筑砂浆.....	156
第六节 无机结合料稳定土.....	159
第七节 普通水泥混凝土、建筑砂浆和稳定土试验 .....	164

<b>第五章 沥青材料</b> .....	180
第一节 石油沥青 .....	180
第二节 煤沥青 .....	187
第三节 乳化沥青 .....	189
第四节 沥青材料试验 .....	191
<b>第六章 沥青混合料</b> .....	208
第一节 概述 .....	208
第二节 热拌热铺沥青混合料 .....	209
第三节 其它沥青混合料简介 .....	223
第四节 沥青混合料试验 .....	226
<b>第七章 建筑钢材和木材</b> .....	238
第一节 建筑钢材 .....	238
第二节 木材 .....	245
<b>参考文献</b> .....	248

# 第一章 筑路用土

## 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,形成为大小不等,未经胶结的一切松散物质。它包括土壤、粘土、矿、岩屑、岩块和砾石等。

土总的特征是颗粒与颗粒之间的连结强度较土粒本身强度低,甚至没有连结性。根据土粒之间有无连结性,大致可将土分为砂类土(砾石、砂)和粘性土两大类。

土从外观颜色看较为复杂,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。土的颜色随着土的成因环境不同,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 mm 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:

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

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、相互排列及其连结关系的组合情况。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(见图 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(见图 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连结成小团下沉,堆积成具有很大孔隙的蜂窝状结构(如图 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,土中的孔隙会大大缩小,土体也会产生较大的沉陷。

(3)絮状结构。粒径小于 0.002mm 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(见图 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。

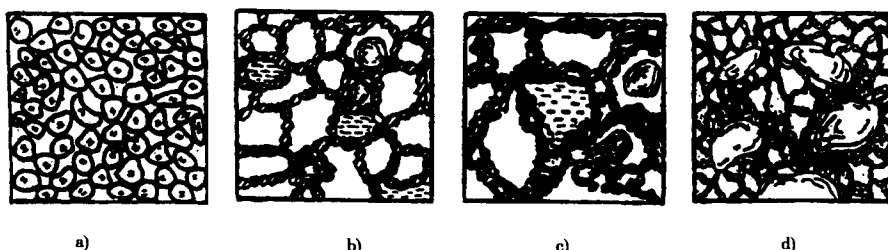


图 1-1 土的结构

a)单粒结构;b)蜂窝结构;c)絮状结构;d)非均粒结构

(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(如图 1-1d)。例如粘粒与砂粒、粉粒所形成的非均粒结构,粘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。

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作用下,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,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,如果既有液态相的水,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。

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则具有一定程度的连结性。粘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,水分子才具有自由活动能力,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。

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连结在一起,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,其连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连结关系,称为“水胶连结”。这同沉积岩的碎屑颗粒之间通过胶结物连结起来成为坚硬岩石在性质上是类似的,只是连结物及其牢固程度有所不同罢了。

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

含细小颗粒较多的粘性土,因水胶连结力强故能成块。当粘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,水胶连结力逐渐增强,土

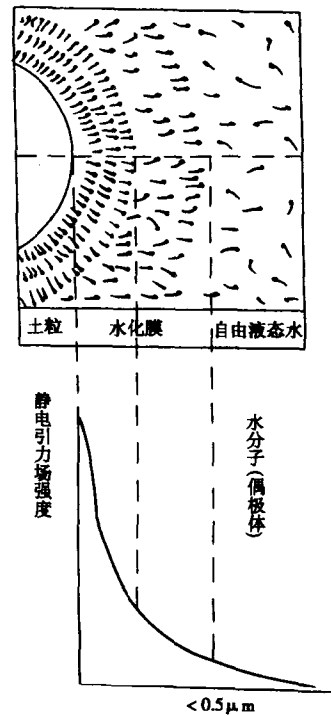


图 1-2 土粒与水相互作用示意图

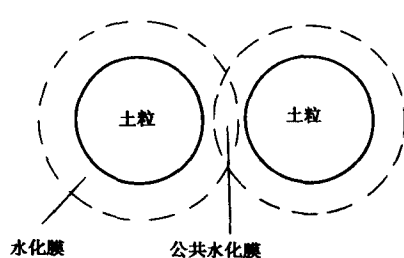


图 1-3 公共水化膜示意图

的体积不断收缩、干硬,表面常因收缩而出现裂缝。许多粘土沉积物表面的龟裂纹,就是这样形成的。反之,当粘土中的水分不断增加时,它的连结力便会变小、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连结力使之软化、崩解。

“粘性土”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连结力而表现为有较强的粘着性而得名。

至于砂土,由于土粒的直径大,质量相对较大,比面积较小,微弱的水胶连结力不足以粘持土粒的重力,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,无粘着力。

## 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连结力有所增强,这对于三相体系的湿砂而言,虽水胶连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,也能将砂粒连结起来。我们把砂粒间的这种松散的连结关系,称为“水连结”。湿砂土之所以用锹能挖成团的道理即在此。

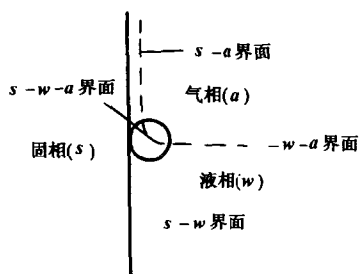


图 1-4 三相界面上弯液面的形成

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。此时水参与的连结力已不足以克服土粒自身的重力,我们把这一现象称为“不连结”或“无连结”。

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连结关系。粘性土为水胶连结,砂土为水连结,砾石等粗大颗粒的土为无连结。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等。

## 第三节 土的基本物理性质及其指标

### 一、土的基本物理性质及测试指标

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。

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,见图 1-5。

图中符号含义如下:

$m$ 、 $V$ ——土的总质量和总体积;

$m_s$ 、 $V_s$ ——土颗粒所占的质量和体积;

$m_w$ 、 $V_w$ ——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  $m_a = 0$ )。

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。

#### 1. 土的质量

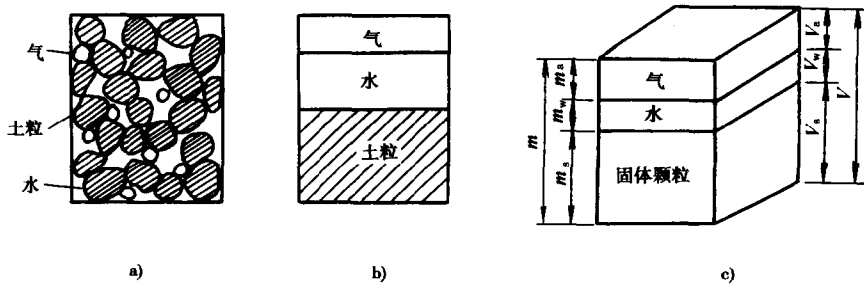


图 1-5 土的三相图

a)实际土体;b)土的三相图;c)土的三相比例图

土的质量包括土粒、孔隙中水和气的质量,土样的总体积可用式(1-2)表示:

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

土样的总质量可用式(1-3)表示:

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

式中符号意义同前。

## 2. 土的密度 $\rho$

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  $1.4\text{g}/\text{cm}^3$ ;亚砂土和亚粘土为  $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ ;粘土可达  $2.0 \sim 2.2\text{g}/\text{cm}^3$ 。

(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,用式(1-5)表示:

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

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,间接的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( $\rho_f$ ):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,可用式(1-6)表示:

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

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

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

$m'_w$ ——土的孔隙中充满水的质量( $\text{g}$ );

$V_n$ ——孔隙的体积;

$\rho_w$ ——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,往往用其它指标推导求得。

(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,使土粒质量被减小。这时的密度即为土粒质量( $m_s$ )加上孔隙中充满水的质量( $V_n \rho_w$ )再减去土的体积在水下产生的浮重之后,所得质量与土的总体积的比值,可用式(1-8)表示:

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

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

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

其余符号意义同前。

式(1-8)可写成  $\rho' = \rho_f - 1$ 。

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;而粘性土的孔隙中有结合水,由于结合水有粘滞性,具有固体特征,它对粘土颗粒就没有浮力作用,因水下粘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。

### 3. 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( $\text{g}$ );

其余符号意义同前。

土粒相对密度只与组成土粒的矿物成分有关,而与土的孔隙大小及其中所含水分多少无关。随着土颗粒的矿物成分不同,其土粒相对密度也不同。砂土的颗粒相对密度较小,一般在  $2.65 \sim 2.75$  之间,粘土的颗粒相对密度较大,约在  $2.75 \sim 2.80$  之间,当土中含有有机质较多

时,土粒相对密度就下降至2.60左右。

## 二、土的其他物理性质及导出指标

土的物理性质除上述土的质量、密度和相对密度外,还有其它物理性质如含水量、饱和含水量、最佳含水量和饱和度等。

### 1. 土的含水量( $w$ )

土的含水量是指土的孔隙中所含水分的数量。即土中水的质量与土颗粒质量之比,用百分数表示:

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100 \quad (1-10)$$

式中:  $w$ ——土的含水量(%);

其余符号意义同前。

土的含水量,准确的说应该是土的含水率。其值愈大,表明土中的水分也愈多。它只能表明土中固相和液相之间的数量关系,而不能表示水充满孔隙的程度。土的含水量通常用烘干法或酒精燃烧法直接测定。

### 2. 土的饱和含水量( $w_{\max}$ )

土的饱和含水量是假定土中的孔隙全部被水充满,达到饱和状态时的含水量。即土的孔隙中充满水分的质量与土颗粒质量的比值,用百分数表示:

$$w_{\max} = \frac{V_n \rho_w}{m_s} \times 100 \quad (1-11)$$

式中:  $w_{\max}$ ——土的饱和含水量(%);

其余符号意义同前。

饱和含水量实质上就是用水的数量来表示土的孔隙体积的大小,即  $V_n = m_w$ 。土的饱和含水量不用实测,可利用有关的物理性质指标导出。

### 3. 土的最佳含水量( $w_{\text{佳}}$ )

土的最佳含水量是材料在标准击实试验条件下,所达到最大干密度时的含水量。一般不用实测,可利用室内击实曲线获得。

### 4. 土的饱和度( $S_r$ )

土的饱和度是土中天然含水量的体积( $V_w$ )与土的全部孔隙( $V_n$ )的比值,表示孔隙被水充满的程度,用百分数表示:

$$S_r = \frac{V_w}{V_n} \times 100 \quad (1-12)$$

或者,用天然含水量( $w$ )和饱和含水量( $w_{\max}$ )的比值来表示:

$$S_r = \frac{w}{w_{\max}} \times 100 \quad (1-13)$$

式中:  $S_r$ ——土的饱和度(%);

其余符号意义同前。

饱和度对砂性土有一定的实际意义。它是反映砂性土干湿状态的物理指标。从公式(1-12)中可知:当  $V_w = 0$ (孔隙中无水),  $S_r = 0$  时,为干燥土,属二相系(固、气);当  $V_w = V_n$ (孔隙中充满水),  $S_r = 1$  时,为饱和土属二相系(固、液);由于  $S_r$  介于 0~1 之间,按照天然砂性土

所含水分的多少,可将砂性土划分为三个状态:

稍湿的	$0 \leq S_r \leq 50\%$
很湿的	$50\% < S_r < 80\%$
饱和的	$80\% < S_r \leq 100\%$

如果发现  $S_r > 100\%$  时,表明三项基本实测指标的测定可能存在误差,应进行检查。

颗粒较粗的砂性土,对含水量的变化不敏感,当含水量发生某种改变时,它的物理力学性质变化不大,所以对砂性土的物理状态可以用饱和度( $S_r$ )来表示。但对粘性土而言,它对含水量的变化十分敏感,随着含水量增加体积膨胀,结构也发生改变,粘性土一般不用  $S_r$  这一指标。

#### 第四节 土的孔隙性结构指标

土不是致密无隙的固体,而是土粒间存在着孔隙的物体。土的孔隙性是指孔隙的大小、形状、数量及连通情况等特征。土的孔隙性决定于土的粒度成分和土的结构,即土粒排列的松散程度。

土的孔隙性结构指标是土的孔隙比、孔隙度(孔隙率)及相对密度等,它反映土的结构而与土中含水多少无关,不仅是状态指标,而且还是结构指标。

下面分别对孔隙性的结构指标作些分析。

##### 1. 孔隙比( $e$ )

孔隙比是指土中孔隙的体积( $V_n$ )与土粒的体积( $V_s$ )的比值,用小数表示:

$$e = \frac{V_n}{V_s} \quad (1-14)$$

式中: $e$ ——土的孔隙比。

其余符号意义同前。

土的孔隙比是反映结构状态的一个指标,它可用来比较土内孔隙总体的大小,但不能反映土中单个孔隙的大小, $e$  越大,土体越松,反之紧密,土的松密是决定土体强度的主要指标。一般在天然状态下的土,若  $e < 0.6$ ,可认为是工程性质良好的土;若  $e > 1$ ,表明土中  $V_n > V_s$ ,是工程性质不良的土。

##### 2. 孔隙度( $n$ )

在天然状态下,土中的孔隙体积与整个土体积的比值,称为孔隙度或孔隙率,用百分数表示:

$$n = \frac{V_n}{V} \times 100 \quad (1-15)$$

具有单粒结构的土,由于颗粒排列松紧不同,孔隙度也有变化,排列紧密的孔隙度小,排列松散的孔隙度大。粒度成分对孔隙度也有很大的影响,不均粒土的孔隙度要小于均粒土的孔隙度。

具有絮状结构的粘性土,单个孔隙很小,但数量很多。水在其中为结合水,所以粘性土的孔隙度可以大于 50%,即  $V_n$  可能大于  $V_s$ 。

当土的结构因受外力而改变时,孔隙度也随之而改变,即  $V$  和  $V_n$  都在改变,故往往要用孔隙比来说明。

$n$  与  $e$  都是反映孔隙性的指标,但在应用上都不同。凡是用于与整个土的体积有关的测试时,一般用  $n$  较为方便;但若要比一种土的变化状态时,则用  $e$  较为准确。由于  $V_n$  是不变的,可视为定值,土在荷载作用下引起变化的是  $V_n$ ,而  $e$  的变化直接与  $n$  的变化成正比,所以  $e$  能更明显地反映孔隙体积的变化。在工程设计和计算中常用  $e$  这一指标。

$n$  和  $e$  不是实测指标,而是利用它们与第三项实测指标的关系导出的。

### 3. 砂类土的相对密实度

相对密实度是反映砂类土在天然状态下松密程度的指标,数值上它等于砂土在最疏松状态和天然状态下孔隙比之差与最疏松状态和最密实状态下孔隙比之差的比值,即:

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (1-16)$$

式中:  $D_r$ ——相对密实度;

$e$ ——土的天然孔隙比;

$e_{\min}$ ——最密实状态的孔隙比;

$e_{\max}$ ——最疏松状态的孔隙比。

相对密实度可以用来判断砂性土的密实状态及其是否有压密的可能性。当  $D_r = 1$  时,土体为密实的;  $D_r = 0$  时,土为最疏松状态,在外力作用下,土体的压缩性很大。按  $D_r$  的大小,砂性土可分为 4 种状态,见表 1-1。

砂土密实度划分

表 1-1

分 级		相对密实度 $D_r$	标准贯入平均击数 $N(63.5\text{kg})$
密实		$D_r \geq 0.67$	30 ~ 50
中密		$0.67 > D_r > 0.33$	10 ~ 29
松散	稍松	$0.33 \geq D_r \geq 0.20$	5 ~ 9
	极松	$D_r < 0.20$	< 5

目前对砂性土的  $e_{\max}$ 、 $e_{\min}$  不能准确测定,加之要取原状砂土的土样也十分困难,故对砂土  $D_r$  值所测定的误差也很大。对此在实际工程中,常利用标准贯入试验法或静力触探试验法,在现场测定其近似值,以作为  $D_r$  分级的参考。标准贯入试验法是用 63.5kg 的铁锤,悬高 76cm 自由下落,使之锤击内径 35mm、外径 51mm、长 500mm 的标准贯入器,向砂土层中贯入 15cm 后开始记数直至贯入 30cm 深处所需的锤击数  $N$ ,对照表 1-1 评价所测砂土层的天然密实度。

### 4. 压实方与天然密实方间的换算系数

路基工程设计图纸给出的土、石方数量,是按工程的几何尺寸计算出来的压实方,必然存在着天然密实方与压实方之间的量差。

由于土石方作业的土壤种类、存在形式、天然密实度各不相同,而且设计要求的填方密实度也不相同,所以压实方与天然密实方间换算系数也不是定值,最好是通过试验分别确定。下面介绍一下压实、压实度、压实系数的概念。

压实:对土或其它筑路材料施加动的或静的外力,以提高其密实度的作业。

压实度:土或其它筑路材料压实后的干密度与最大干密度之比,以百分率表示:



$$R = \frac{\rho_{\text{实}}}{\rho_{\text{max}}} \times 100 \quad (1-17)$$

式中： $R$ ——压实度(%)；

$\rho_{\text{实}}$ ——工地实测压实后的干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )；

$\rho_{\text{max}}$ ——试验室击实试验得出的最大干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

压实系数：土或其它筑路材料经压实后要求的压实度与该种材料天然密实度之比：

$$K = \frac{R_{\text{标}}}{R_{\text{天}}} \quad (1-18)$$

式中： $K$ ——压实系数；

$R_{\text{天}}$ ——土或其它筑路材料的天然密实度；

$R_{\text{标}}$ ——土或其它筑路材料经压实后要求达到的压实度。

## 第五节 土的物理性质指标间的相互关系

前面介绍的土的物理性质指标，除土粒相对密度  $G_s$  外，一部分与土的结构有关，如孔隙比  $e$ 、孔隙度  $n$ 、干密度  $\rho_d$ 、相对密实度  $D_r$ ；另一部分与土的结构、含水量同时有关，如饱和含水量  $w_{\text{max}}$ 、含水量  $w$ 、饱和密度  $\rho_t$ 、水下密度  $\rho'$ 、最佳含水量  $w_{\text{佳}}$ 、饱和度  $S_r$  等。这些物理性质指标实际上就是土固相、液相和气相在质量和体积方面不同组合上所构成的不同比值，即三者之间的质量与质量、质量与体积、体积与体积相互组成不同性质的指标。在工程地质测设中，只有准确地掌握了这些概念，才能正确地评价土质。

为了进一步了解各指标的内容及其相互关系，现将上述各项指标的定义、指标来源以及对指标的实际应用等方面，归纳为“土的物理性质主要指标一览表”，供对照参考，如表 1-2。

土的物理性质主要指标一览表

表 1-2

指标名称	表达式	参考数值	指标来源	实际应用
相对密度 $G_s$ (比重)	$G_s = \frac{m_s}{V_s \rho_w}$	2.65 ~ 2.75	由试验确定	1. 换算 $n$ 、 $e$ 、 $\rho_d$ ； 2. 工程计算
密度 $\rho$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	$\rho = \frac{m}{V}$	1.60 ~ 2.20	由试验确定	1. 换算 $n$ 、 $e$ ； 2. 说明土的密度
干密度 $\rho_d$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	$\rho_d = \frac{m_s}{V}$	1.30 ~ 2.00	$\rho_d = \frac{\rho}{1+w}$	1. 换算 $n$ 、 $e$ ； 2. 粒度分析、压缩试验资料整理
饱和密度 $\rho_t$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	$\rho_t = \frac{m_s + V_n \rho_w}{V}$	1.80 ~ 2.30	$\rho_t = \frac{\rho(G_s - 1)}{G_s(1+w)}$	
水下密度 $\rho'$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	$\rho' = \frac{m_s + V_n \rho_w}{V}$	0.8 ~ 1.30	$\rho' = \frac{\rho(G_s - 1)}{G_s(1+w)}$	1. 计算潜水面以下地基土自重应力； 2. 分析人工边坡稳定