

铁路职业教育教材

土力学 与 路基

李文英 张全良 主编

土力学与路基



中国铁道出版社

CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

铁路职业教育教材

土力学与路基

李文英 张全良 主编
杨广庆 主审

中国铁道出版社

2005年·北京

内 容 简 介

本书系统地介绍了土力学与路基的基本知识。第一~第六章为土力学部分,内容包括土的物理性质及工程分类,土中应力,土的压缩性与地基变形计算,土的抗剪强度,地基承载力等。第七~十五章为路基部分,内容包括路基构造,路基排水,路基防护,路基支挡建筑物,高速重载铁路路基等。

本书为高职高专、中等专业学校和职工培训教学用书,也可供相关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

土力学与路基/李文英,张全良主编. —北京:中国铁道出版社,2005.2
铁路职业教育教材
ISBN 7-113-06338-1

I. 土… II. ①李…②张… III. ①土力学-职业教育-教材②铁路路基-职业教育-教材
IV. ①TU43②U213.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 007243 号

书 名: 土力学与路基

作 者: 李文英 张全良 主编

出版发行: 中国铁道出版社 (100054, 北京市宣武区右安门西街 8 号)

责任编辑: 李丽娟

封面设计: 马 利

印 刷: 北京市兴顺印刷厂

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 18.75 字数: 464 千

版 本: 2005 年 2 月第 1 版 2005 年 8 月第 2 次印刷

印 数: 7 001~12 000 册

书 号: ISBN 7-113-06338-1/TU·803

定 价: 27.40 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

编辑部电话: (010) 51873135 发行部电话: (010) 63545969

前 言

本书是根据铁道部中等专业学校建筑工程专业教学指导委员会建议,按照新的教学大纲编写的。

本教材编写时注重考虑了铁路施工及养护专业人员应具备的有关土的工程性质和路基设计与养护方面的专业知识、基本技能的要求。

本书分两部分内容,第一部分为土力学,扼要叙述了土力学的基础知识;第二部分为路基工程,系统地介绍了路基构造、排水、防护、支挡结构、施工、病害防治、防洪抢修等主要内容。同时,根据目前铁路发展趋势,本书还介绍了高速、重载铁路路基的特点、主要技术标准,以及土工合成材料在路基工程方面的应用。本书密切联系现场实际,编写时加强了基本知识,特别是基本技能方面的内容,适用性强。为便于现场有关工程技术人员学习和参考,编写时根据教学需要编写了必要的算例。为帮助读者掌握各章内容,每章后均附有复习思考题。本书可作为铁路施工与养护及相关专业高职、中专学生土力学和路基工程课程的教材,也可供从事路基施工及养护工作的人员自学或参考。

本书由天津铁路工程学校李文英、张全良主编,石家庄铁道学院杨广庆主审。参加编写的有天津铁路工程学校李文英(第一至六章),衡阳铁路工程学校刘成禹(第七、八、九、十四章),天津铁路工程学校张全良(第十、十一、十二章)、柏明立(第十三章)、万宏林(第十五章)。在本书编写过程中,铁道部建筑工程专业教学指导委员会提出了许多宝贵意见,同时也得到了各有关部门的大力支持,在此一并表示感谢。

由于编者水平所限,书中不免存在不足之处,敬请读者批评指正。

编 者

2004年10月

目 录

第一章 土的物理性质与工程分类.....	1
第一节 概 述.....	1
第二节 土的三相组成.....	2
第三节 土的物理状态.....	7
第四节 土的结构与构造	19
第五节 土的工程分类及野外鉴别方法	21
第六节 土的击实性	25
复习思考题	28
第二章 土的渗透性	29
第一节 达西定律	29
第二节 渗透系数与渗透力	30
第三节 土的渗透变形	35
复习思考题	38
第三章 土体中的应力	39
第一节 土的自重应力计算	39
第二节 基底应力的分布与计算	41
第三节 地基附加应力计算	46
第四节 影响土中应力分布的因素	60
复习思考题	60
第四章 土的压缩与地基变形计算	62
第一节 土的压缩性	62
第二节 地基沉降量计算	69
第三节 地基容许沉降量与减小沉降危害的措施	73
复习思考题	75
第五章 土的抗剪强度	76
第一节 土的抗剪强度和破坏理论	77
第二节 土的抗剪强度试验	83
第三节 不同排水条件的强度指标及测定方法	86

第四节 砂类土的振动液化	87
复习思考题	90
第六章 天然地基容许承载力	92
第一节 地基的破坏形态	92
第二节 按《规范》确定地基容许承载力	94
第三节 触探法确定地基容许承载力	104
第四节 几种确定地基承载力方法的比较	108
复习思考题	109
第七章 路基构造	111
第一节 路基横断面	112
第二节 路基面的形状和尺寸	116
第三节 路基边坡	122
复习思考题	123
第八章 路基排水	124
第一节 地面排水设备及其养护	124
第二节 地下排水设备及其养护	127
第三节 站场排水设备及其养护	132
复习思考题	134
第九章 路基防护	135
第一节 路基坡面防护	135
第二节 路基冲刷防护	140
复习思考题	145
第十章 路基支挡建筑物	146
第一节 概 述	146
第二节 土压力计算	150
第三节 重力式挡土墙的设计与检算	160
第四节 重力式挡土墙的构造与施工	171
第五节 挡土墙的养护维修	173
复习思考题	175
第十一章 路基病害及防治	176
第一节 基床病害及防治	176
第二节 路基冻害及其防治	180
第三节 崩坍落石及其防治	183
第四节 滑坡的形成及防治	187

第五节 泥石流及其防治	191
第六节 地区性路基病害及防治	193
复习思考题	206
第十二章 土工合成材料在铁路路基工程中的应用	207
第一节 概 述	207
第二节 基床加固与处理	210
第三节 路基防护	212
第四节 路基排水	215
第五节 加筋土工程	216
第六节 软土地基加固	219
复习思考题	219
第十三章 路基施工与管理	220
第一节 路基施工准备与土质调查	220
第二节 路堤填筑	224
第三节 路堑开挖	229
第四节 既有线改建和增建第二线路基施工	238
第五节 路基工程监理	243
复习思考题	246
第十四章 路基防洪与抢修	247
第一节 防洪准备工作	247
第二节 临险抢护	248
第三节 水害抢修	251
复习思考题	255
第十五章 高速重载铁路路基	256
第一节 概 述	256
第二节 高速重载铁路路基横断面	257
第三节 高速铁路路基基床及过渡段	264
复习思考题	267
附录一 各种边界条件下的库仑主动土压力公式	268
附录二 土工试验指导书	272
参考文献	290

第一章 土的物理性质与工程分类

第一节 概 述

土木建筑工程所称的土,有狭义和广义两种概念。狭义概念所指的土,是岩石风化后的产物,即指覆盖在地表上松散的、没有胶结或胶结很弱的颗粒堆积物。广义的概念则将整体岩石也视为土。

地壳表层的岩石暴露在大气中,受到温度和湿度变化的影响,体积经常膨胀和收缩,不均匀的膨胀和收缩使岩石产生裂缝,岩石还长期经受风、霜、雨、雪的侵蚀和动植物活动的破坏,逐渐由大块崩解为形状和大小不同的碎块,这个产生裂缝和逐渐崩解的过程,称为物理风化。物理风化只改变颗粒的大小和形状,不改变颗粒的成分。物理风化后所形成的碎块与水、氧气、二氧化碳和某些由生物分泌出的有机酸溶液等接触,发生化学变化,产生更细的并与原来的岩石成分不同的颗粒,这个过程称为化学风化。经过这些风化作用所形成的矿物颗粒(有时还有有机物质)堆积在一起,中间贯串着孔隙,孔隙中还有水和空气,这种松散的固体颗粒、水和气体的集合体就称为土。

物理风化不改变土的矿物成分,产生了像碎石和砂等颗粒较粗的土,这类土的颗粒之间没有黏结作用,呈松散状态,称为无黏性土。化学风化产生颗粒很细的土,这类土的颗粒之间因为有黏结力而相互黏结,干时结成硬块,湿时有黏性,称为黏性土。这两类土由于成因不同,因而物理性质和工程特性也不一样,对这点要特别注意。

风化作用生成的土,如果没有经过搬运,堆积在原来的地方,称为残积土。残积土一般分布在山坡或山顶。土受到各种自然力(如重力、水流、风力、冰川等)的作用,搬运到别的地方再沉积下来,就成为沉积土。沉积土是一种最常见的土。

实践经验表明,土的工程特性一方面取决于其原始堆积条件,使组成土的结构构造、矿物成分、粒度成分、孔隙中水溶液的性质不同,另一方面也取决于堆积以后的经历。在沉积过程中,由于颗粒大小、沉积环境和沉积后所受的力等不同,所形成土的类型和性质就不同。一般地说,在大致相同的地质年代及相似的沉积条件下形成的土,其成分和性质是相近的。沉积年代愈长,上覆土层重量愈大,土压得愈密实,由孔隙水中析出的化学胶结物也愈多。因此,老土层的强度和变形模量比新土层的要高,甚至由散粒体经过成岩作用又变成整体岩石,如砂类土成为砂岩,黏土变成页岩等。目前常见的土大都是第四纪沉积层,这个沉积层还正处于成岩过程中,因此一般都呈松散状态。但第四纪是由距今约一百万年开始的相当长的时期,早期沉积的土,在性质上就与近期沉积的土有相当大的差别。这种沉积年代长短对土的性质影响,对黏性土尤为明显。不同的自然地理环境对土的性质也有很大影响。我国沿海地区的软土、严寒地区的多年冻土、西北地区的湿陷性黄土和西南亚热带的红黏土等,除了具有一般土的共性外,还各具有自己的特点。

《规范》将狭义的土分为碎石类土、砂类土和黏性土,此外,还有软土、冻土和黄土等特殊

土。碎石类土和砂类土都是无黏性土。

第二节 土的三相组成

如前所述,土是由固体颗粒、水和气体三部分所组成的三相体系。固体部分一般由矿物质所组成,有时含有有机质(半腐烂和全腐烂的植物物质和动物残骸等),这一部分构成土的骨架,称为土骨架。土骨架间布满相互贯通的孔隙,这些孔隙有时完全被水充满,称为饱和土;有时一部分被水占据,另一部分被气体占据,称为非饱和土;有时也可能完全充满气体,就称为干土。水和溶解于水的物质构成土的液体部分。空气及其他一些气体构成土的气体部分。这三部分本身的性质以及它们之间的比例关系和相互作用决定土的物理力学性质。因此,研究土的性质,首先必须研究土的三相组成。

一、固体颗粒

固体颗粒构成土骨架,它对土的物理力学性质起决定性的作用。研究固体颗粒就要分析粒径的大小及其在土中所占的百分比,称为土的粒径级配。另外,还要研究固体颗粒的矿物成分以及颗粒的形状。这三者之间又是密切相关的。

(一) 颗粒的矿物成分和颗粒分组

土的颗粒一般由各种矿物组成,也含有少量有机质。土粒的矿物成分可分为两类:

1. 原生矿物。即物理风化所产生的粗颗粒矿物,它们就是原来岩石的矿物成分。常见的有长石、石英、角闪石和云母等。

2. 次生矿物。是化学风化后产生的矿物,如颗粒极细的黏土矿物。常见的有高岭土、伊里土和蒙脱土等,矿物成分对黏性土的性质影响很大,例如,黏性土中含有大量蒙脱土时,这种土就具有强烈的膨胀性,它的收缩性和压缩性也大。

颗粒的粗细对土的性质影响也很大。颗粒愈细,单位体积内颗粒的表面积就愈大,与水接触的面积就愈多,颗粒相互作用的能力就愈强。

颗粒具有不同的形状,如块状、片状等,这和土的矿物成分有关,也和土粒所经历的风化搬运过程有关。

颗粒粒径的大小称为粒度,把粒度相近的颗粒合为一组,称为粒组。粒组的划分应能反映粒径大小变化引起土的物理性质变化这一客观规律。一般地说,同一粒组的土,其物理性质大致相同,不同粒组的土,其物理性质则有较大差别。《规范》对粒组的划分见表 1-1。

(二) 用筛析法作土的颗粒大小分析

天然土是粒径大小不同的土粒的混合体,它包含着若干粒组的土粒。各粒组的质量占干土土样总质量的百分数叫做颗粒级配。颗粒大小分析的目的,就是确定土的颗粒级配,也就是确定土中各粒组颗粒的相对含量。颗粒级配是影响土(特别是无黏性土)的工程性质的主要因素,因此常被用来作为土的分类和定名的标准。根据铁道部《铁路工程土工试验方法》(TBJ 102—96)的规定,颗粒大小分析可采用筛析法、密度计法和移液管法。筛析法适用于粒径大于 0.1 mm 但不大于 60 mm 的土,密度计法和移液管法适用于粒径小于 0.1 mm 的土。本书只介绍与路基和混凝土施工关系密切的筛析法。

表 1-1 土的颗粒分组

粒 组 名 称		粒径(mm)	一 般 特 性
漂石(浑圆或圆棱)或块石(尖棱)	大	大于 800	无黏性,孔隙大,透水性大,毛细上升高度极微,不能保持水分,强度大,能承受很大静压,压缩性小
	中	400~800	
	小	200~400	
卵石(浑圆或圆棱)或碎石(尖棱)	大	60~200	
	中	40~60	
	小	20~40	
圆砾(浑圆或圆棱)或角砾(尖棱)	大	10~20	
	中	5~10	
	小	2~5	
砂粒	粗	0.5~2	无黏性,易透水,毛细上升高度不大,遇水不膨胀,干燥时不收缩且松散,不呈现可塑性,能承受较大静压,压缩性较小
	中	0.25~0.5	
	细	0.05~0.25	
粉粒		0.005~0.05	湿润时出现轻微黏性,透水性小,遇水膨胀和干缩都不显著,毛细上升较快,上升高度较大
黏土粒		小于 0.005	黏性大,几乎不透水,湿润时呈可塑性,遇水膨胀和干缩都较显著,压缩性大

用筛析法作土的颗粒大小分析,其主要设备是一套分析筛。这套筛子中的各筛按筛孔孔径大小的不同由上至下排列(最上层筛子的筛孔最大,往下的筛子其筛孔依次减小),上加顶盖,下加底盘,叠在一起。分析筛有粗筛和细筛两种。粗筛的孔径(圆孔)为 60、40、20、10、7.5 和 2 mm,细筛的孔径为 2、1、0.5、0.25 和 0.1 mm。试样的用量为:最大颗粒粒径小于 2 mm 的土,用 100~300 g,最大颗粒粒径大于 2 mm 但小于 10、20、40 mm 的土,分别用 300~900、1 000~2 000 和 2 000~4 000 g,最大颗粒粒径大于 40 mm 者,用 4 000 g 以上。试验时,对于无黏性土,将烘干或风干的土样放入筛孔孔径为 2 mm 的筛进行筛析,分别称出筛上和筛下土的质量。取筛上的土样倒入依次叠好的粗筛最上层筛中筛析,又将筛下粒径小于 2 mm 的土样倒入依次叠好的细筛最上层筛筛析(细筛可放在筛析机上摇筛,摇筛时间一般为 10~15 min),使细土分别通过各级筛孔漏下。称出存留在每层筛子和底盘内的土粒质量,就可以计算出粒径小于(或大于)某一数值的土粒质量占土样总质量的百分数,表 1-2 是某土样颗粒大小分析试验的筛析成果记录。

对于含有黏土粒的砂类土的筛析方法,《铁路工程土工试验方法》中另有规定,本书从略。

对土的颗粒大小分析试验结果,可用下列两种方式表达:

1. 表 格 法

列表说明土样中各粒组的土质量占土样总质量的百分数。表 1-3 就是根据表 1-2 列出的该土样的颗粒级配表。

2. 颗粒级配曲线法

用曲线表示土样的颗粒级配。图 1-1 中的曲线 1,就是按筛析法做试验后绘出的颗粒级配曲线。图中横坐标表示粒径,用对数比例尺,纵坐标表示小于某粒径的土质量百分数,用普通比例尺。若颗粒级配曲线平缓,表示土中各种粒径的土粒都有,颗粒不均匀,级配良好;若曲线

陡峻,则表示土粒较均匀,级配不好。在颗粒级配曲线上,可以找到对应于颗粒含量小于10%、30%和60%的粒径 d_{10} 、 d_{30} 和 d_{60} ,这三个粒径组成级配指标:

不均匀系数

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

曲率系数

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \times d_{60}}$$

不均匀系数 C_u 愈大,表示级配曲线愈平缓,级配良好。曲率系数 C_c 用以描述颗粒大小分布的范围。《铁路路基填土压实技术规则》规定,当 $C_u \geq 5$ 且 $C_c \neq 1 \sim 3$,可认为级配是良好的;当 $C_u < 5$ 或 $C_c = 1 \sim 3$,则认为级配是不良的。

表 1-2 颗粒大小分析试验记录(筛析法)

风干土质量=1 000 g		小于 0.1 mm 的土总质量百分数=1.8%			
2 mm 筛上土质量=403 kg		小于 2 mm 的土总质量百分数=59.7%			
2 mm 筛下土质量=597 g		细筛分析时所取试样质量=100 g			
编号	孔 径 (mm)	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(%)	小于该孔径的土占 总土质量百分数(%)
4	10	100	900	90.0	90.0
5	7	195	805	80.5	80.5
6	5	280	720	72.0	72.0
7	2	403	597	59.7	59.7
8	1	28.3	71.7	71.7	42.8
9	0.5	60.7	39.3	39.3	23.5
10	0.25	92.3	7.7	7.7	4.6
11	0.1	97	3.0	3.0	1.8
底盘总计		3			

复核:张虹 2000 年 11 月 5 日
试验:王刚 2000 年 11 月 5 日

计算:李强 2000 年 11 月 5 日

表 1-3 颗粒级配

粒径(mm)	>10	7~10	5~7	2~5	1~2	0.5~1	0.25~0.5	0.1~0.25	<0.1
百分数(%)	10.0	9.5	8.5	12.3	16.9	19.3	18.9	2.8	1.8

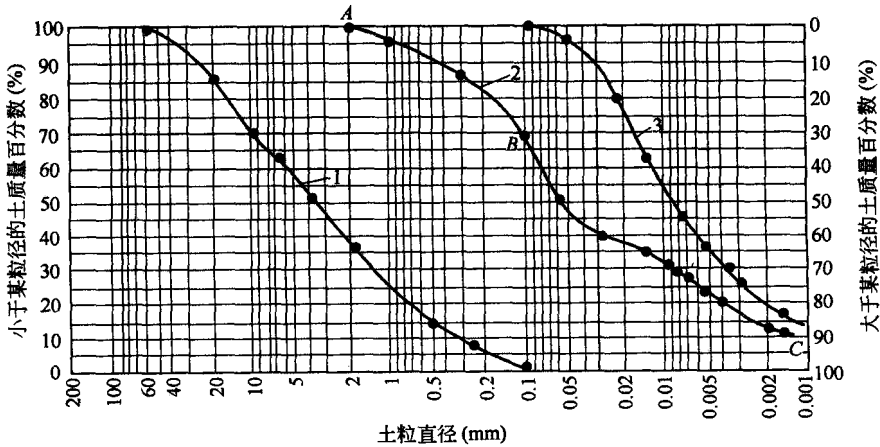


图 1-1 颗粒级配曲线

前已介绍,筛析法适用于粒径大于0.1 mm的土。对于粒径小于0.1 mm的土,应采用密度计法或移液管法。根据密度计法或移液管法的试验结果,同样可绘制颗粒级配曲线。图 1-1 中的曲线 3 是根据密度计法的试验结果绘制的。若某土样中粒径大于0.1 mm的土虽较多,但粒径小于0.1 mm的土仍超过土样总质量的 10%,应采用筛析法和密度计法(或筛析法和移液管法)联合试验。图 1-1 中的曲线 2 是根据筛析法和密度计法联合试验的结果绘制的,其中 AB 段用筛析法,BC 段用密度计法,两段应连成一条光滑的曲线。

二、土中的水

在天然土的孔隙中通常含有一定量的水,它可以处于各种不同的状态。土中的细颗粒越多,土的分散度越大,水对土的性质影响越大。例如,含水量很大的黏性土比较干的黏性土软的多,土中的固体颗粒与水接触就相互起作用。试验证明,土颗粒的表面带有负电荷。水分子(H_2O)是极性分子,就是说带正电荷的 H^+ 和带负电荷的 OH^- 各位于水分子的两端,见图 1-2 (a)所示。这样的分子会被颗粒表面的负电荷吸引而定向地排列在颗粒的四周如图 1-2(b)和(c)所示,离颗粒表面愈近,吸引力愈大。土中水按其所受土粒的吸引力大小可分为下列几种形态。

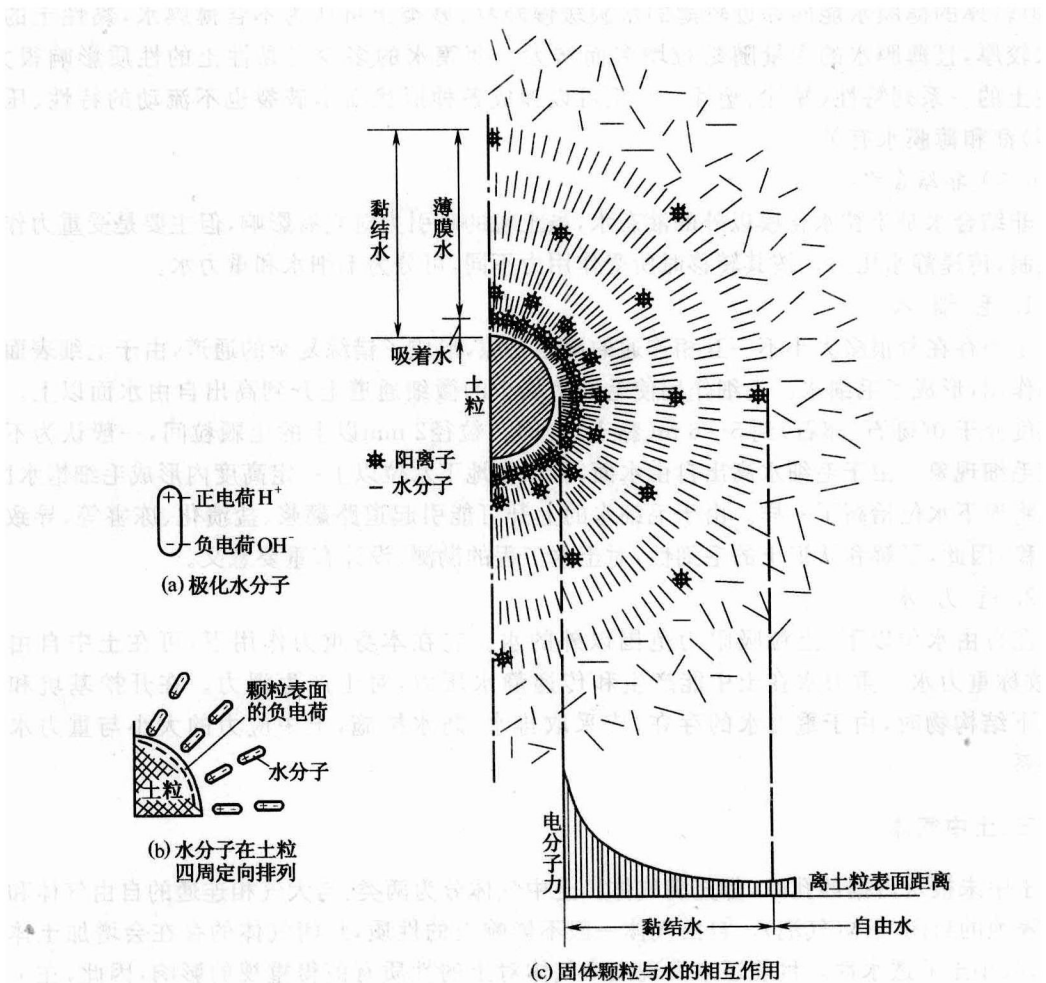


图 1-2 土中固体颗粒与水的相互作用

(一) 结 合 水

这部分水是借土粒的电分子引力吸引在土粒表面的水,对土的工程性质影响极大。它又可分为如下几种。

1. 吸着水(强结合水)

吸着水是被颗粒表面负电荷紧紧吸附在土粒周围很薄的一层水。这种水的性质接近于固体,不冻结;不因重力影响而转移,不传递静水压力,不导电,具有极大的黏滞性、弹性和抗剪强度,其剪切弹性模量达20 MPa,只有在105℃以上的温度烘烤时才能全部蒸发。这种水对土的性质影响较小。土粒可以从潮湿空气中吸附这种水。仅含吸着水的黏土呈干硬状态或半干硬状态,碾碎则成粉末。砂类土也可能有极少量吸着水,仅含吸着水的砂类土成散粒状。

2. 薄膜水(弱结合水)

在吸着水外面一定范围内的水分子,仍会受到颗粒表面负电荷的吸引力作用而吸附在颗粒的四周,这种水称为薄膜水。显然,离颗粒表面愈远,分子所受的电分子力就愈小,因而薄膜水的性质随着离开颗粒表面距离的变化而变化,从接近于吸着水至变为自由水。薄膜水从整体来说呈黏滞状态,但其黏滞性是从内向外逐渐降低的。它仍不能传递静水压力,但较厚的薄膜水能向邻近较薄的水膜缓慢转移;砂类土可认为不含薄膜水,黏性土的薄膜水较厚,且薄膜水的含量随黏粒增多而增大。薄膜水的多少对黏性土的性质影响很大,黏性土的一系列特性(黏性、塑性——土可以捏成各种形状而不破裂也不流动的特性、压实性等)都和薄膜水有关。

(二) 非结合水

非结合水是土粒水化膜以外的液态水,虽土粒的吸引力对它有影响,但主要是受重力作用的控制,传递静水压力。按其转移时所受作用力不同,可分为毛细水和重力水。

1. 毛 细 水

土中存在着很多大小不一互相连通的微小孔隙,形成了错综复杂的通道,由于毛细表面张力的作用,形成了毛细水。毛细作用使毛细水从土的微细通道上升到高出自由水面以上。上升高度介于0(砾石、卵石)到5~6 m(黏土)之间。粒径2 mm以上的土颗粒间,一般认为不会出现毛细现象。由于毛细水高出自由水面,可以在地下水位以上一定高度内形成毛细饱水区,好像将地下水位抬高了一样。由于毛细水的上升可能引起道路翻浆、盐渍化、冻害等,导致路基失稳,因此,了解和认识土的毛细性,对土木工程的勘测、设计有重要意义。

2. 重 力 水

在自由水位以下,土粒吸附力范围以外的水。它在本身重力作用下,可在土中自由移动,故称重力水。重力水在土中能产生和传递静水压力,对土产生浮力。在开挖基坑和修筑地下结构物时,由于重力水的存在,应采取排水、防水措施,土中应力的大小与重力水也有关系。

三、土中气体

土中未被水占据的孔隙,都充满气体。土中气体分为两类:与大气相连通的自由气体和与大气隔绝的封闭气体(气泡)。自由气体一般不影响土的性质,封闭气体的存在会增加土体的弹性,减小土的透水性。目前还未发现土中气体对土的性质有值得重视的影响,因此,在工程上一般都不予考虑。

第三节 土的物理状态

土的三相组成的性质,特别是固体颗粒的性质,直接影响到土的工程特性。但是同样一种土,密实时强度高,松散时强度低。对于细粒土,含水量少时则硬,含水量多时则软。这说明土的性质不仅决定于三相组成的性质,而且三相之间的比例关系也是一个很重要的影响因素。

一、土的三相组成在量上的比例特征

因为土是三相体系,不能用一个单一的指标来说明三相间量的比例。对于一般连续性材料,例如钢或混凝土等,只要知道密度 ρ 就能直接说明这种材料的密实程度,即单位体积内固体的质量。对于三相体的土,同样一个密度 ρ ,单位体积内可以是固体颗粒的质量多一些,水的质量少一些,也可以是固体颗粒的质量少一些而水的质量多一些,因为气体的体积可以不相同。因此要全面表明土的三相量的比例关系,就需要有若干个指标。

(一) 土的三相图

为了使这个问题形象化,以获得清楚的概念,在土力学中,通常用三相草图表示土的三相组成,如图 1-3 所示。在三相图的左侧,表示三相组成的体积;在三相图的右侧,则表示三相组成的质量。

图中符号如下:

V ——土的总体积;

V_v ——土的孔隙部分体积;

V_s ——土的固体颗粒实体的体积;

V_w ——水的体积;

V_a ——气体体积;

m ——土的总质量;

m_w ——水的质量;

m_s ——固体颗粒质量。

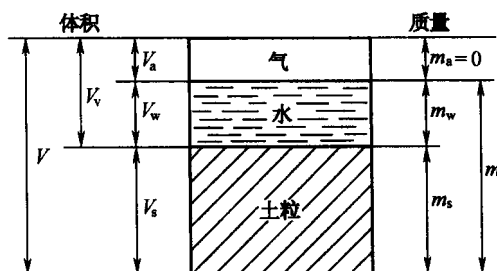


图 1-3 土的三相示意图

在上述的这些量中,独立的有 V_s 、 V_w 、 V_a 、 m_w 、 m_s 五个量。 1 cm^3 水的质量等于 1 g ,故在数值上 $V_w=m_w$ 。此外,当我们研究这些量的相对比例关系时,总是取某一定数量的土体来分析。例如取 $V=1\text{ cm}^3$ 或 $m=1\text{ g}$,或 $V_s=1\text{ cm}^3$ 等等,因此又可以消去一个未知量。这样,对于这一定数量的三相土体,只要知道其中三个独立的量,其他各量就可以从图中直接算出。所以,三相草图是土力学中用以计算三相量比例关系的一种简单而又很有用的工具。

(二) 确定三相比例关系的基本试验指标

为了确定三相草图各量中的三个指标:密度、相对密度和含水量,就必须通过实验室的试验测定。通常做三个基本物理性质试验。它们是:土的密度试验、土粒相对密度试验和土的含水量试验。有关试验方法参见“土工试验规程”或实验指示书。

1. 土的密度(ρ)

土的密度定义为土在天然状态下单位体积的质量,用下式表示:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_s + m_w}{V_s + V_v} \quad (\text{g/cm}^3) \quad (1-1)$$

在天然状态下,单位体积土所受的重力,称为土的天然重度,简称重度,用下式表示:

$$\gamma = \frac{W_T}{V} = \frac{mg}{V} = \frac{(m_s + m_w)g}{V} \quad (\text{kN/m}^3) \quad (1-2)$$

式中 g ——重力加速度 ($g=9.81 \text{ m/s}^2$, 工程上有时为了计算方便, 取 $g=10 \text{ m/s}^2$);

W_T ——土样的总重力。

其他符号意义同前。

应该明确, 重度并不是实测指标。通常是实测土的密度 ρ 再算出重度 γ 。根据牛顿第二定律, 可知 $m = \frac{W_T}{g}$, 用体积 V 分别去除此式的左右两侧, 得土的密度和重度的关系式为

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \quad \text{或} \quad \gamma = \rho \times g \quad (1-3)$$

土的重度与土的含水量和密实度有关, 一般土的重度为 $16 \sim 22 \text{ kN/m}^3$ 。

2. 土粒相对密度(或比密度)

土粒相对密度定义为土粒的质量与同体积纯蒸馏水在 4°C 时的质量之比, 即

$$G_s = \frac{m_s}{V_s \times \rho_w} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (1-4)$$

式中 ρ_s ——土粒的密度, 即单位体积土粒的质量, $\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$;

ρ_w —— 4°C 时纯蒸馏水的密度 (g/cm^3)。

因为 $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$, 故实用上, 土粒相对密度在数值上即等于土粒的密度, 即 $G_s = \rho_s$, 是无量纲数。

天然土颗粒由不同的矿物所组成, 这些矿物的相对密度各不相同。试验测定的是土粒的平均相对密度。土粒的相对密度变化范围不大。细粒土(黏性土)一般在 2.70 至 2.75 左右; 砂土的相对密度为 2.65 左右。土中有机质含量增加时, 土的相对密度减小。

单位体积土粒的重量称为土粒重度。土粒重度不是实测指标, 通常是通过实测土粒相对密度 G_s 再算出土粒重度 γ_s , 由土粒重度的定义, 可得出 G_s 与 γ_s 的关系式:

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} = \frac{m_s g}{V_s} = G_s \times g \quad (\text{kN/m}^3) \quad (1-5)$$

式中 W_s ——土样内土粒重力。

3. 土的含水量 W

土的含水量定义为土中水的质量与土粒质量之比, 以百分数表示, 即

$$W = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% = \frac{m - m_s}{m_s} \times 100\% = \left(\frac{m}{m_s} - 1 \right) \times 100\% \quad (1-6)$$

式中 W ——土的含水量。

土的天然含水量变化很大。干的砂类土, 含水量约为 $0 \sim 3\%$, 饱和软黏土的含水量可达 $70\% \sim 80\%$ 。一般情况下, 对同一类土, 当含水量增大时, 其强度就降低。

(三) 确定三相量比例关系的其他常用指标

测出土的密度 ρ , 土粒的相对密度 G_s 和土的含水量 W 后, 就可以根据图 1-3 所示的三相草图, 计算出三相组成各自在体积和重量上的数值。工程上为了便于表示三相含量的某些特征, 定义如下几种指标。下面几个指标是根据其定义和三个实测指标换算得出, 故称为导出指标。

1. 表示土中孔隙含量的指标

工程上常用孔隙比 e 或孔隙度 n 表示土中孔隙的含量。其定义为:

孔隙比 e ——指孔隙体积与固体颗粒实体体积之比,表示为

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1-7)$$

孔隙比用小数表示。对同一类土,孔隙比越小,土越密实;孔隙比越大,土越松散。它是表示土的密实程度的重要物理性质指标。

由定义可知,孔隙比可能大于 1。

孔隙度 n ——指孔隙体积与土体总体积之比,用百分数表示,亦即

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\% \quad (1-8)$$

由定义知,孔隙度恒小于 1。

下面根据孔隙比的定义和三个实测指标来推导孔隙比的换算关系式。

从三个实测指标的定义及其表达式可知,物理性质指标的计算结果与所取土样的体积(或质量)大小无关。因此,可假设土样的土粒体积 $V_s = 1$ 个单位体积,土样其余部分的体积和质量可用其他物理性质指标来表示。如图 1-4(a)所示。现对图 1-4(a)各部分的体积和质量的关系说明如下:假设 $V_s = 1$,根据式(1-4)可得土粒质量 $m_s = G_s$,再根据式(1-6),可得水的质量 $m_w = m - m_s = Wm_s = WG_s$;故土的总质量 $m = m_s + m_w = G_s(1+W)$ 。根据式(1-1),得土的总体积 $V = \frac{m}{\rho} = \frac{G_s(1+W)}{\rho}$;而孔隙体积 $V_v = V - V_s = \frac{G_s}{\rho}(1+W) - 1$;水的体积可根据水的密度 1 导出,即 $V_w = \frac{m_w}{1} = m_w = WG_s$;另根据孔隙比的定义,还可得出 $V_v = e \cdot V_s = e$ 和 $m = \rho V = \rho(1+e)$ 。

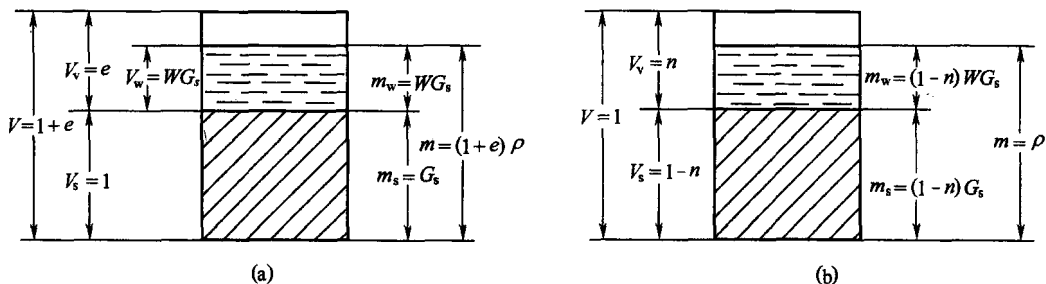


图 1-4 土的三相换算图

在作以上说明以后,即可根据图 1-4(a)推导孔隙比和三个实测指标的换算关系式。

$$m = m_s + m_w = G_s(1+W) = \rho(1+e)$$

由 $G_s(1+W) = \rho(1+e)$ 可得

$$e = \frac{G_s}{\rho}(1+W) - 1 = \frac{\gamma_s}{\gamma}(1+W) - 1 \quad (1-9)$$

需要说明的是,推导式(1-9)时是以土粒体积 $V_s = 1$ 作为计算的出发点。但是,由于各物理性质指标都是三相间量的比例关系,而不是量的绝对值,因此,取其他量(例如设土的体积 $V = 1$)作为计算的出发点,也可以得出相同的换算关系式。图 1-4(b)是假设 $V = 1$ 个单位体积所得出的三相换算图,现根据图 1-4(b)推导孔隙度的换算关系式:

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{m}{V} = \frac{m_s + m_w}{V} \\ &= (1-n)G_s + (1-n)G_s W \end{aligned}$$

$$= (1-n)G_s(1+W)$$

$$\text{所以} \quad n = 1 - \frac{\rho}{G_s(1+W)} = 1 - \frac{\gamma}{\gamma_s(1+W)} \quad (1-10)$$

在土力学和地基的计算中,孔隙比 e 的应用较为广泛。因此,如采用三相换算图计算土的物理性质指标,常采用图 1-4(a)所示,即假定 $V_s=1$ 。

孔隙比和孔隙度都是用以表示孔隙体积分量的概念。两者之间可以用下式互换:

$$n = \frac{e}{1+e} \times 100\% \quad (1-11)$$

$$\text{或} \quad e = \frac{n}{1-n} \quad (1-12)$$

土的孔隙比或孔隙度都可用来表示同一种土的松、密程度。它随土形成过程中所受的压力、粒径级配和颗粒排列的状况而变化。一般来说,粗粒土的孔隙度小,细粒土的孔隙度大。例如砂类土的孔隙度一般是 28%~35%;黏性土的孔隙度有时可高达 70%。这种情况下,单位体积内孔隙的体积比土颗粒的体积大很多。

2. 表示土中含水程度的指标

含水量 W 当然是表示土中含水程度的一个重要指标。此外,工程上往往需要知道孔隙中充满水的程度,这就是土的饱和度 S_r 。定义饱和度为:

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% \quad (1-13)$$

饱和度的换算关系式可根据定义和图 1-4 求得。

由图 1-4(a),得

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{WG_s}{e} \quad (1-14)$$

由图 1-4(b),得

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{m_w}{V_v} = \frac{(1-n)WG_s}{n} \quad (1-15)$$

显然,干土的饱和度 $S_r=0$,而饱和土的饱和度 $S_r=1$ 。

3. 表示土的密度和重度的几种指标

土的密度除了用上述 ρ 表示以外,在工程计算中,还常用饱和密度和干密度。而 ρ 称为天然密度或湿密度。相应的定义分别为:

(1) 饱和密度 ρ_{sat} 和饱和重度 γ_{sat}

饱和密度——孔隙完全被水充满时土的密度,表示为

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_s + V_v \rho_w}{V} = \frac{m_s + V_v}{V} \quad (1-16)$$

上式中的 ρ_w 为水的密度,即 4℃ 时单位体积土的质量, $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$ 。孔隙中完全充满水时土的重度称为饱和重度,用下式表示

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{sat}} &= \frac{m_s g + V_v \gamma_w}{V} = \frac{m_s g + V_v \rho_w g}{V} \\ &= \frac{(m_s + V_v) g}{V} \quad (\text{kN/m}^3) \end{aligned} \quad (1-16a)$$

上式中的 γ_w 为水的重度,即 4℃ 时单位体积土的重力,土工计算中取 $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$ 。