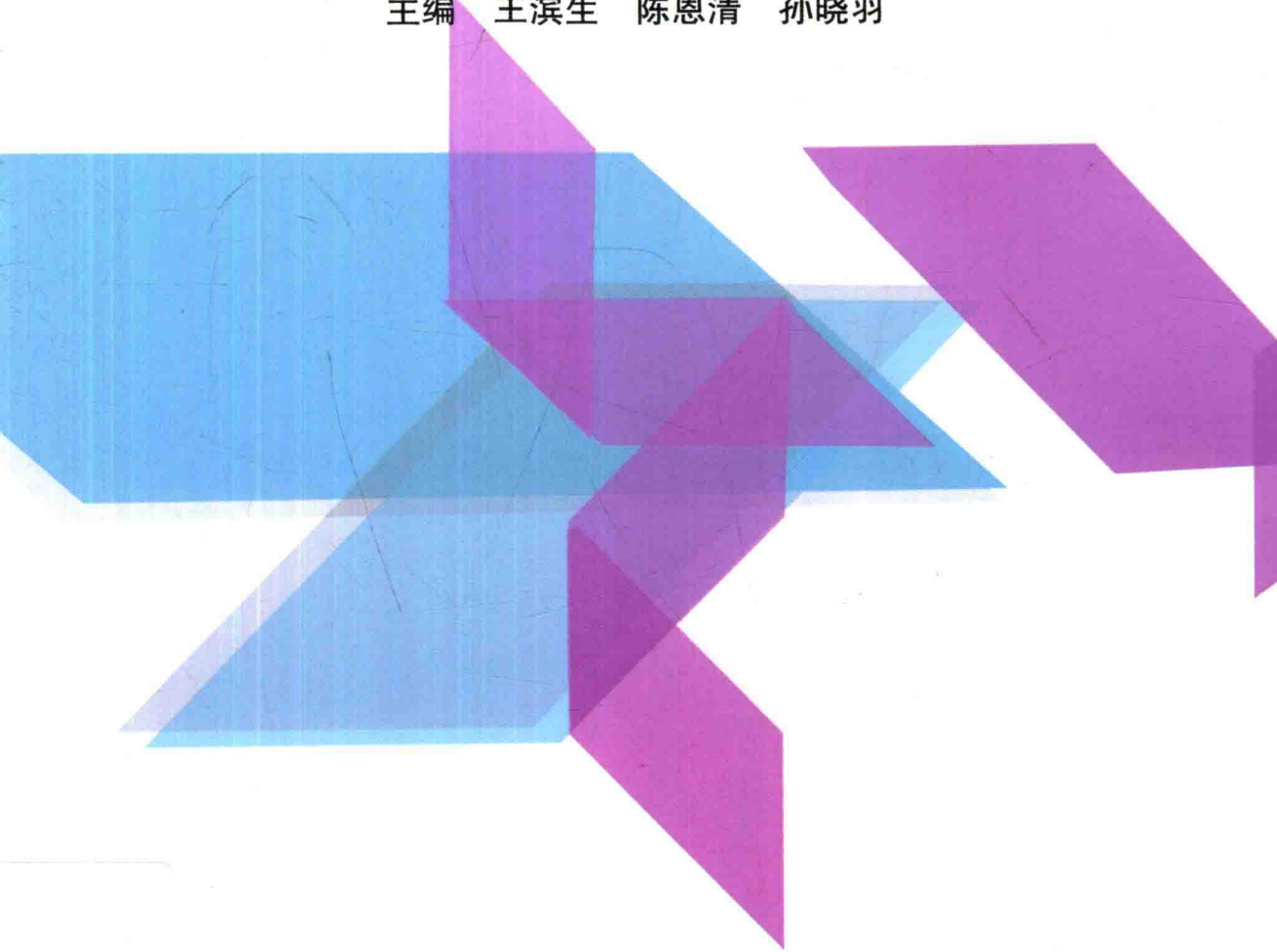


黑龙江省高等教育应用型人才培养系列教材

土力学与地基基础

主编 王滨生 陈恩清 孙晓羽



HEUP 哈尔滨工程大学出版社

黑龙江省高等教育应用型人才培养系列教材

内容简介

土力学与地基基础

主 编 王滨生 陈恩清 孙晓羽

内 容 简 介

本书共分9章,系统阐述了土的物理性质及工程分类、土的渗透性、土中应力、土的压缩性及地基沉降、土的抗剪强度、土压力理论、土坡稳定分析、地基承载力等方面内容,各章后均附有思考题和习题,并给出部分思考题和习题的答案。本书根据作者多年教学改革的实践经验编写而成,内容编排科学合理、重点突出。

本书可作为高等院校土木工程专业本科生教材,也可为相关专业的专科生使用及研究生和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

土力学与地基基础/王滨生,陈恩清,孙晓羽主编.
—哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2015.5
ISBN 978-7-5661-1034-3

I. ①土… II. ①王… ②陈… ③孙… III. ①土力学
②地基-基础(工程) IV. ①TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 098930 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂
开 本 787mm×1 092mm 1/16
印 张 14.5
字 数 373 千字
版 次 2015 年 7 月第 1 版
印 次 2015 年 7 月第 1 次印刷
定 价 38.00 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

土力学是固体力学的一个分支,也是岩土力学的重要组成部分,是土木工程专业的重要专业基础课,同时,也广泛应用于水利水电、公路桥梁、港口、铁道和国防等行业中。它是利用力学原理和土工试验技术研究土的工程性质和土体性状的学科。本书根据《高等学校土木工程专业指导性专业规范》、现行《岩土工程基本术语标准》(GB/T 50279—98)、《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)、《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001),并结合本课程多年教学改革的实践经验编写而成,符合近年来土力学学科的发展和新时期对土木工程人才培养的要求。

本书在传承经典的同时,适当更新了内容、调整了结构。编写过程中,编者以教学实践、工程实践、对学科的认识和课程的定位为基础,同时借鉴国内外同类教材的优点,在全面介绍土力学经典理论、原理、方法的同时,力图展现学科发展新水平,反映土力学的成熟成果与观点方法。全书概念清楚、层次分明、重点突出,注重联系工程背景及各章节知识点的相互关联与衔接,使知识体系更加科学系统。本书注重理论和概念的准确性和完整性以及内容的充实性和新颖性,着重阐述基本理论、基本原理及新概念、新方法,重视实例和工程问题的介绍,书中图文并茂,并安排了一定的例题和工程背景介绍,方便读者在学习理解土力学的基本概念、基本原理和基本方法的基础上,拓展知识面,提高分析问题,解决问题的能力。

本书各章编写人员如下:第1章、第5章、第6章、第9章由王滨生(哈尔滨工程大学)编写,第2章、第3章、第8章由陈恩清(吕梁学院)编写,第4章、第7章、附录和习题由孙晓羽(哈尔滨工程大学)编写。王滨生负责统稿,经多次修改后定稿。

本书由哈尔滨工程大学何建教授审阅并提出了宝贵建议,对提高本书的质量起了极好的作用,在此表示衷心感谢。

本书的编写和出版得到了校内相关领导、同行专家和出版社同志的关爱和无私帮助,在此表示衷心感谢。

限于时间和编者水平,书中难免会有欠妥甚至错误之处,敬请读者批评指正,以便以后加以修改、充实和提高。

编 者
2015年5月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 土力学的概念及研究对象	1
1.2 土力学学科的发展概况	1
第2章 土的物理性质及工程分类	3
2.1 土的物理性质概述	3
2.2 土的成因	3
2.3 土的三相组成	5
2.4 土的结构和构造	10
2.5 土的物理性质及指标	12
2.6 无黏性土的物理状态指标	18
2.7 黏性土的特性和物理状态指标	21
2.8 地基土的工程分类	23
第3章 土的渗透性	28
3.1 土的渗透性概述	28
3.2 地下水的埋藏类型	28
3.3 土中一维渗透及其规律	29
3.4 土中二维渗透及流网	35
3.5 渗透破坏及防治	38
3.6 毛细水	43
3.7 影响土渗透性的因素	44
第4章 土中应力	48
4.1 土中应力概述	48
4.2 土中自重应力	48
4.3 基底压力和基底附加压力	52
4.4 均质地基中的附加应力	56
4.5 非均质地基中的附加应力	74
第5章 土的压缩性及地基沉降	81
5.1 土的压缩性概述	81
5.2 土的压缩性	81
5.3 有效应力原理及太沙基单向渗透固结理论	85
5.4 地基最终沉降量的计算	91
5.5 应力历史对地基沉降的影响	109
第6章 土的抗剪强度	118
6.1 土的抗剪强度概述	118
6.2 土的抗剪强度理论	118



6.3	土的极限平衡条件	120
6.4	土抗剪强度的测定方法	123
6.5	饱和黏性土的抗剪强度	129
6.6	无黏性土的抗剪强度	135
第7章	土压力理论	139
7.1	土压力理论概述	139
7.2	土压力的分类	139
7.3	静止土压力	140
7.4	朗肯土压力理论	141
7.5	库仑土压力理论	146
7.6	特殊情况下的土压力计算	150
第8章	土坡稳定分析	162
8.1	土坡稳定概述	162
8.2	无黏性土坡的稳定分析	163
8.3	黏性土坡的稳定分析	163
8.4	渗流和地震条件下的土坡稳定分析	177
8.5	土坡稳定分析中的若干问题	180
8.6	土坡失稳的原因及防治措施	181
第9章	地基承载力	185
9.1	地基承载力概述	185
9.2	地基的变形和失稳破坏形式	185
9.3	地基临塑荷载和临界荷载	188
9.4	地基极限承载力	190
9.5	地基承载力确定	196
部分习题答案		201
附录	分变量法求解偏微分方程	216
土力学课程教学大纲		218
参考文献		223

第1章 绪 论

1.1 土力学的概念及研究对象

土是地壳表层的整体岩石经风化、搬运和沉积作用后形成的松散堆积物。从母岩到形成土,经历了漫长的地质年代,其间的风化、搬运和沉积过程是交错进行的,每一个过程都会对土的性质产生影响。岩石矿物成分和风化作用的不同,导致了土体性质的差异;搬运和沉积过程中自然条件的差异和各种随机因素作用,导致了土体具有不同的结构和构造,因此土的类型及性质与其成因有直接关系。

自然状态下,土是由土颗粒和填充于土颗粒孔隙中的水、气体组成的三相体。土颗粒是母岩风化的碎屑物,其矿物成分及粒径的大小直接决定土的基本物理、化学和力学性质。土粒间的孔隙是连续的,因而土体具有渗透性。土中水的存在对土的性质特别是黏性土的力学性质有很大的影响,同一种类型的土中,三相的组成比例不同,土的性质也会出现较明显的差别。

在工程建设中,土与结构物之间有着极其密切的关系。当土作为地基支撑上部建筑物(如建筑物、桥梁、道路、堤坝或其他结构物)传来的荷载时,需研究土的应力、变形和强度;作为建筑材料(如修筑道路、堤坝)时,需研究土的组成、渗流、压实性等物理力学性质;作为地下结构(如建造隧道、涵洞、地铁或其他地下建筑)的周围介质或环境时,需研究土的稳定性和其与结构的相互作用。

土力学作为力学的一个分支,它是研究土的基本物理特性,在结构物作用下土的应力、变形、强度、稳定性、渗流以及土与结构物之间相互作用的一门力学学科。

1.2 土力学学科的发展概况

土力学是伴随着地基基础技术的进步而发展起来的。地基基础是一门古老的工程技术,作为地基基础理论的土力学,其发展始于18世纪的欧洲,随着欧洲工业革命的兴起及城市建设的不断发展,在大量兴建的铁路、公路、桥梁和水利工程中,出现了许多与土有关的问题,对这些问题的研究和解决,促使了古典土力学理论的产生。1773年,法国科学院院士物理学家工程师库仑(C. A. De Coulomb)通过试验得出了著名的砂土抗剪强度公式,提出了计算挡土墙(以下简称挡墙)后散体材料土压力的滑动楔体理论;1855年,法国水利工程师水文地质学的奠基人之一达西(H. P. G. Darcy)创立了土的层流渗透定律;1869年,英国力学家土木工程师英国格拉斯哥大学教授朗肯(W. J. M. Rankine)提出了基于极限平衡理论的朗肯土压力理论;1885年,法国科学院院士物理学家数学家巴黎大学教授布辛尼斯克(J. V. Boussinesq)求得了弹性半空间表面在竖向集中力作用下的应力和变形理论解;1916年,瑞典工程师彼得森(K. E. Petterson)提出了黏性土坡稳定分析的圆弧法,1922年,国际水利工程与研究协会第一届理事会主席瑞典岩土工程师瑞典皇家理工学院教授费兰



纽斯(W. K. A. Fellenius)将其发展为整体圆弧滑动面法;1920年,德国物理学家近代力学奠基人之一格丁根大学教授普朗德尔(L. Von Prandtl)提出了地基剪切破坏时的滑动面形状和极限承载力公式。这些古典的理论和方法为土力学的诞生奠定了基础,至今仍不失其理论价值和实用价值。

1925年,美国土力学家哈佛大学教授太沙基(K. Von Terzaghi)总结和发展了以往的成就,创立了土的有效应力原理,将土的应力、变形和强度等力学性质联系起来,1925年在维也纳出版了举世闻名的第一部土力学专著《土力学》(Erdbaumechanik),标志着土力学这门学科的诞生。太沙基又在1943年出版了《理论土力学》,1948年出版了《工程实践中的土力学》,这些著作使得土力学从固体力学中分离出来,成为一门独立的学科,太沙基也被誉为现代土力学之父。土力学是一门边缘学科,同时也是一门与工程建设关系密切的应用学科。鉴于这门学科的重要作用,国际上早在1936年就成立了国际土力学及基础工程协会(International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, ISSMFE),同年在美国哈佛大学召开了第一届会议。1957年,中国土木工程协会设立了土力学及基础工程委员会,而后于1978年又成立了土力学及基础工程学会。

在我国,土力学理论的研究起步较晚,但我国一些学者的成就在国际上仍是具有影响力的。1956年,我国土力学学科奠基人之一黄文熙教授当选为首批中国科学院技术科学学部委员(今称院士),是岩土工程专业首位院士。此后,陆续当选为中科院院士或工程院院士的岩土工程杰出学者有陈宗基、潘家铮、张宗祜、汪闻韶、卢肇钧、孙钧、宋振骐、陈梦熊、钱七虎、周镜、沈珠江、黄熙龄、刘建航、王思敬等三十余位。我国岩土工程学者近几十年所撰写出版的专著、手册、论文集以及译作等在数百部(数千万字)以上,科研成果难以计数。

实际上土及土体堆积物的特性是特别复杂的,除了最简单的问题外,所有的数学计算都相当复杂,要想得到结果,就需花费大量的时间和精力。太沙基在许多场合曾说过:“如果理论不够简单,那么它在土力学中就几乎没有用。”20世纪50年代起,现代科技特别是电子技术成果的大量渗入,在试验测试技术实现自动化的同时,土力学的理论也有了显著的进展。岩土数值模拟包括本构关系和结构分析方法两个方面。黄文熙院士指出:“目前在计算机和计算技术先进的国家,拖后腿的已不是计算技术,而是对土的弹塑性应力-应变特性的认识,对土力学这门学科来讲,它是经历了一场革命,而且这场革命现在还在深化之中。”电子计算机、数值计算方法、本构方程三者互相影响,没有前者,后者不会提到工作日程上。本构关系是反映物质宏观性质的数学模型,把本构关系写成具体的数学表达形式就是本构方程,建立本构方程是理论力学研究的重要内容之一。最有实用价值的本构方程应是解决具体工程实践的最简单方程,沈珠江院士在20世纪70年代末开始进行土的本构关系模型研究,提出了多重屈服面、等价应力硬化理论和三剪切角破坏准则等新概念,在此基础上提出了第一个我国自己提出的模型——沈珠江双屈服面模型。

近年来,随着我国房屋建筑、交通工程、水电工程以及石油开采等大型建设工程的兴起,广大科技工作者对一大批涉及土力学的困难问题进行了深入研究,在他们的辛勤努力下,土力学学科的发展在我国已经取得了长足的进步。

第2章 土的物理性质及工程分类

2.1 土的物理性质概述

土体的物理性质,如轻重、软硬、干湿和松密等在一定程度上决定了土的力学性质,它是土最基本的特性。由于土是一种由土颗粒、水和气体组成的三相体系,土的物理性质由三相物质的性质、相对含量以及土的结构构造等因素决定,矿物成分、颗粒大小的差异和三相比例的不同都导致了不同的物理性质。在进行土力学计算及处理地基基础问题时,不仅要了解各类土的特性,还必须熟练掌握反映土三相组成比例和状态的各指标的定义、测定方法和指标间存在的换算关系,熟悉按有关特征及指标对地基土进行工程分类及初步判定土体的工程性质的方法。因此,本章主要介绍土的成因、土的三相组成、土的物理性质、指标换算、无黏性土和黏性土的物理状态指标等内容。这些是土力学中必须掌握的基本内容,也是评价土的工程性质和分析与解决土的工程技术问题的基础。

2.2 土的成因

土是地壳表层的整体岩石经风化、搬运和沉积作用后形成的松散堆积物。在漫长的地质年代中,地球表面的整体岩石在大气中经受长期的风化作用而破碎,在各种内力和外力作用下,在各种不同的自然环境中堆积下来形成土。堆积下来的土在长期的地质年代中发生复杂的物理化学变化,经压密固结和胶结硬化最终又形成岩石。工程上遇到的土大多数是第四纪沉积物,是土力学研究的主要对象。

2.2.1 风化

岩石在其存在、搬运和沉积的各个过程中都在不断风化。岩石风化后变成粒状的物质,导致强度降低,透水性增强。风化作用根据其性质和影响因素的不同可分为物理风化、化学风化和生物风化三种类型。三者经常是同时进行又相互加剧发展的。

1. 物理风化

长期暴露在大气中的岩石由于受到温度和湿度等各种气候因素的影响,体积胀缩而逐渐崩解和破裂,或者在运动过程中因为碰撞和摩擦而破碎,形成大小和形状各异的碎块,这个过程称为物理风化。物理风化的过程仅使岩石机械破碎,仅限于体积大小和形状的改变,其化学成分没有发生变化,风化产物的矿物成分与母岩相同。物理风化产物无黏性土,如砂和砾石等都是物理风化的产物。

2. 化学风化

地表岩石在水溶液、氧气和二氧化碳等的化学作用下改变了化学成分和矿物成分从而



形成了新的矿物,这个过程称为化学风化。化学风化作用主要有氧化作用、水化作用、水解作用、溶解作用和碳酸化作用等。它不但破坏了岩石的结构,而且使其化学成分改变,从而形成与原来岩石颗粒成分不同的新的矿物。化学风化所形成的细粒土之间具有黏结能力,该产物为黏土矿物,如高岭石、伊利石和蒙脱石等,通常称为黏性土。

3. 生物风化

生物活动过程中对岩石产生的破坏过程称为生物风化。如穴居地下的蚯蚓、鼠类和树根生长等活动都可以引起岩石的机械破碎;生长在岩石表面的细菌和藓类植物分泌的有机酸溶液可产生化学作用,分解岩石的成分,也促使岩石发生变化。

2.2.2 搬运和沉积

土在地表分布极广,成因类型也很复杂。不同成因类型的沉淀物各具有一定的分布规律、地形形态及工程性质,根据土形成后堆积位置的关系,土可分为两大类:残积土和运积土。

1. 残积土

残积土是残留在原地未被搬运的那一部分母岩风化剥蚀后的产物。残积土与基岩之间没有明显的界限,一般分布规律为:上部为残积土,中部为风化带,下部为新鲜岩石。由于未经搬运作用,没有层理构造,且土层中所含的石块为尖棱角状,残积土一般是良好的建筑土料,但作为建筑地基时需注意其土性和厚度常呈现较大的不均匀性和各项异性。

2. 运积土

运积土是岩石风化后经搬运作用离开母岩所在的区域后再沉积下来的堆积物。由于搬运的动力不同,常分为下面几种类型:

(1) 坡积土

坡积土是指由于雨、雪或水流的地质作用将高处岩石的风化产物缓慢地冲刷、剥蚀或由于重力的作用,顺着斜坡向下逐渐移动,最终沉积在较平缓的山坡上而形成的沉积物。坡积土随斜坡自上而下呈现由细而粗的分选现象。组成坡积土的颗粒粗细混杂,土质不均匀,厚度变化大,土质疏松,压缩性较大。

(2) 洪积土

由暴雨或大量融雪骤然集聚而成的暂时性山洪急流,具有很大的剥蚀和搬运能力。它冲刷地表,将大量的基岩风化产物或基岩剥蚀、搬运并堆积于山谷冲沟出口或山前倾斜平原而形成洪积土。由于山洪流出谷口后,流速骤减,被搬运的粗碎屑物质先堆积下来,离山越远,颗粒越细,其分布范围也逐渐扩大。随着离山远近的不同,堆积体内土粒粗细不同,性质很不均匀。

(3) 冲积土

河流两岸的基岩及其上部覆盖的松散物质,被河流流水剥蚀后,经搬运、沉积于河道坡度较平缓的地带而形成的沉积土,称为冲积土。冲积土的特点是具有明显的层理结构,经过长距离的搬运过程,颗粒磨圆度好。随着从上游到下游流速的逐渐减小,冲积土具有明显的由粗到细的分选现象,常形成砂层和黏性土层交叠的地层。

(4) 其他沉积土

除了上述几种类型的沉积土外,还有海洋沉积土、湖泊沉积土、冰川沉积土、海陆交互



沉积土和风积土等,它们分别是由海洋、湖泊、冰川以及风化的地质作用而形成的。

2.3 土的三相组成

土是松散的颗粒集合体,它是由固体颗粒、液体和气体三部分组成的。土的固体颗粒一般由矿物质所组成,有时含有胶结物和有机质,土的固体颗粒构成土的骨架,骨架之间贯穿着大量的孔隙。土的液体是指土体孔隙中的水和溶解于水中的矿物质,土中气体是指土体孔隙中的空气和其他气体。土的三相组成决定了土的物理力学性质。

当土中孔隙完全被水充满时,该土称为饱和土;当土中孔隙完全被空气充满时,该土称为干土。饱和土与干土都可以称为两相土。

2.3.1 土的固体颗粒

1. 土粒的矿物成分

土中固体颗粒的成分绝大多数是矿物质,或有少量有机物,它们是构成土的骨架最基本的物质。土的无机矿物成分可分为原生矿物和次生矿物两大类。

原生矿物是岩石物理风化生成的颗粒,其矿物成分与母岩相同,土粒较粗,多呈浑圆状、块状或板状,比表面积(单位体积内颗粒的总面积)小,吸附水的能力较弱,性质稳定,无塑性。对于粗颗粒,比表面积没有很大意义。漂石、卵石或砾石(圆砾、角砾)等粗大粒组都是岩石碎屑,它们的矿物成分与母岩相同。砂粒大部分是母岩中的单矿物颗粒,原生矿物常见的有石英、长石和云母,角闪石和磁铁矿也是原生矿物。

次生矿物是指岩石中矿物经化学风化作用后形成的新的矿物,性质与母岩完全不同,如三氧化二铝、三氧化二铁、次生二氧化硅及各种黏土矿物。由于其粒径非常小(小于 $2\mu\text{m}$),具有很大的比表面积,与水作用能力很强,能发生一系列复杂的物理、化学变化。比表面积的大小直接反应土颗粒与四周介质的相互作用,是反应黏性土性质特征的一个重要指标。黏土矿物主要有高岭石、伊利石和蒙脱石三类。高岭石是在酸性介质条件下形成的,它的亲水性弱,遇水后膨胀性和可塑性小;蒙脱石亲水性强,遇水后具有极大的膨胀性与可塑性;伊利石的亲水性介于高岭石与蒙脱石之间,膨胀性和可塑性也介于高岭石与蒙脱石之间,比较接近蒙脱石,见表2-1。

表2-1 黏土矿物

	高岭石	伊利石	蒙脱石
粒径	大	中	小
比表面积/(m^2/g)	10~20	80~100	800
胀缩性	小	中	大
渗透性	大	中	小
强度	大	中	小
压缩性	小	中	大



2. 土粒的粒组划分

土中固体颗粒的大小及含量,决定了土的物理力学性质。颗粒的大小通常用粒径表示。土颗粒的大小相差悬殊,有大于几十厘米的漂石,也有小于几微米的胶粒,同时,由于土粒的形状往往是不规则的,很难直接测量土粒的大小,故只能用间接的方法来定量描述土粒的大小和各种颗粒的相对含量。土的粒径大小和颗粒的相对含量直接影响土的性质,如土的密实度、土的透水性、土的强度和土的压缩性等。

天然土的粒径一般是连续变化的,为了描述方便,工程上常把大小和性质相近的土粒合并为组,称为粒组。划分粒组的分界尺寸称为界限粒径。对于粒组的划分,各个国家,甚至一个国家的各个部门,可能都有不同的规定。粒组不同,其性质也不同。常用的粒组有石粒、砾粒、砂粒、粉粒和黏粒(表2-2)。以砾粒和砂粒为主要组成成分的土称为粗粒土。以粉粒、黏粒和胶粒为主的土,称为细粒土。

表2-2 土粒的粒组划分

粒组	颗粒名称		粒径 d 的范围/mm
巨粒	漂石(块石)		$d > 200$
	卵石(碎石)		$60 < d \leq 200$
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	$0.5 < d \leq 2$
		中砂	$0.25 < d \leq 0.5$
		细砂	$0.075 < d \leq 0.25$
细粒	粉粒		$0.005 < d \leq 0.075$
	黏粒		$d \leq 0.005$

3. 土的颗粒级配

自然界里的天然土,很少是单一粒组的土,往往由多个粒组混合而成。因此,为了说明天然土颗粒的组成情况,不但要了解土颗粒的大小,而且要了解各种颗粒所占的比例。工程上常用不同粒径颗粒的相对含量来描述土的颗粒组成情况,这种指标称为土的颗粒级配。土的颗粒级配的具体含义是一个粒组中的土粒质量与干土总质量之比,一般用百分比表示。

土的颗粒粒径及其级配是通过土的颗粒分析试验测定的。常用的方法有两种:对于粒径大于0.075 mm的土粒,常采用筛析法;而对于粒径小于0.075 mm的土粒,则采用沉降分析法。当土中含有颗粒粒径大于0.075 mm和小于0.075 mm的土粒时,可以联合使用密度计法和筛析法。

(1) 筛析法

筛析法是用一套不同孔径的标准筛,将风干、分散并且具有代表性的试样,放入一套从



上到下、孔径由粗到细排列的标准筛进行筛分,然后分别称出留在各筛子上的土重,并计算出各粒组的质量分数,由颗粒分析结果可判断土的颗粒级配及确定土的名称。标准筛孔径由粗筛孔径(60 mm, 40 mm, 20 mm, 10 mm, 5 mm, 2 mm)和细筛孔径(1 mm, 0.5 mm, 0.25 mm, 0.075 mm)组成。

(2) 沉降分析法

该法常用的有密度计法和移液管法。两种方法的理论基础都是斯托克斯定律(Stokes Law),即球状的细颗粒在水中的下沉速度与颗粒直径的平方成正比。

根据颗粒分析试验结果,可以绘制颗粒级配曲线,如图 2-1 所示。因为土粒粒径相差常在百倍、千倍以上,所以表示粒径的横坐标常用对数坐标。曲线的纵坐标则表示小于某粒径的土粒的质量分数。对于不同的土类,可以得到不同颗粒级配曲线。

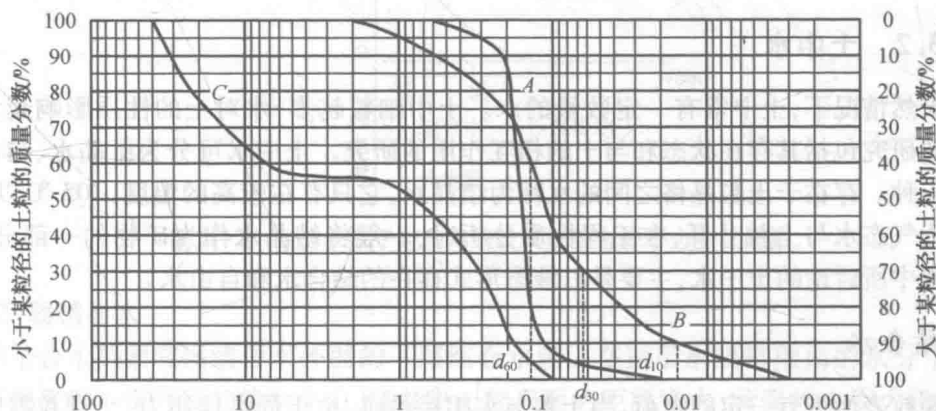


图 2-1 土的颗粒级配曲线示意图

颗粒级配曲线在土木和水利工程中经常用到。从曲线中可直接求得各粒组的颗粒含量及粒径分布的均匀程度,进而估测土的工程性质。如曲线平缓,表示粒径大小相差悬殊,颗粒不均匀,级配良好(见图 2-1 中曲线 B);反之,则颗粒均匀,级配不良(见图 2-1 中曲线 A, C)。为了定量说明问题,工程中常用不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 来反映土颗粒级配情况。 C_u 和 C_c 分别为

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (2-1)$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10}d_{60}} \quad (2-2)$$

式中 d_{60} ——小于该粒径的土粒质量占总土粒质量的 60%,称为限制粒径,mm;

d_{10} ——小于该粒径的土粒质量占总土粒质量的 10%,称为有效粒径,mm;

d_{30} ——小于该粒径的土粒质量占总土粒质量的 30%,称为中值粒径,mm。

C_u 反映了大小不同粒组的分布情况, C_u 越大,表示土越不均匀,即土中粗颗粒和细颗粒的大小相差越悬殊,土体比较容易压实。若土的颗粒级配曲线是连续的, C_u 越大, d_{60} 与 d_{10} 相距越远,则曲线越平缓,表示土中的粒组变化范围大,土粒不均匀;反之, C_u 越小, d_{60} 与 d_{10} 相距越近,曲线越陡,表示土中的粒组变化范围小,土粒均匀。若土的颗粒级配曲线不连续,在该曲线上出现水平段,水平段粒组范围不包含该粒组颗粒。工程中,把 $C_u > 5$ 的土称为不均匀土, $C_u \leq 5$ 的土称为均匀土。



C_c 描述了土的颗粒级配曲线分布的整体形态,反映了曲线的斜率是否连续,即表示是否有某粒组缺失的情况。若曲率系数过大,表示粒径分布曲线的台阶出现在 d_{10} 和 d_{30} 范围内;反之,若曲率系数过小,表示台阶出现在 d_{30} 和 d_{60} 范围内。经验表明,当级配连续时, $1 \leq C_c \leq 3$ 。因此,当 $C_c < 1$ 或 $C_c > 3$ 时,均表示级配曲线不连续。

由此可知,土的级配优劣可由土中土粒的不均匀系数和粒径分布曲线的形状曲率系数衡量。工程上对土的级配是否良好可按如下规定判断:当土的 $C_u > 5$ 且 $1 \leq C_c \leq 3$ 时,级配良好;反之则级配不良。

级配良好的土中,较粗颗粒间的孔隙被较细的颗粒所填充,因而土的密实度较好,相应的地基土的强度和稳定性较好,透水性和压缩性较小,可作为路基、堤坝或其他土建工程的填方土料。

2.3.2 土中水

在天然情况下,土中常有一定数量的水。土中细粒越多,水对土的性质影响越大。对土中水的研究包括其存在状态和与土的相互作用的研究。土中水可分为结晶水、结合水和自由水三种。存在于土粒晶格之间的水称为结晶水,它只有在较高的温度($105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上)下才能化为气态水与土粒分开,在工程性质分析时,一般将结晶水作为矿物的一部分处理。土木工程中所讨论的土中水,主要是以液态形式存在的结合水和自由水。

1. 结合水

土颗粒表面带有一定的电荷,当土粒与水相接触时,由于静电作用力,土颗粒将吸引水化离子和水分子,形成双电层,如图 2-2 所示。在双电层影响下的水膜称为结合水,也称吸着水。在电场作用力范围内,水中的阳离子和极性分子被吸引在土颗粒周围,距离土颗粒越近,作用力(p)越大;距离(r)越远,作用力(p)越小,直至不受电场力(p)作用。结合水的特点是包围在土颗粒四周、不传递静水压力、不能任意流动,极性水分子被吸附后呈定向排列。由于土颗粒的电场有一定的作用范围,因此结合水有一定的厚度,其厚度首先与颗粒的黏土矿物成分有关。在三种黏土矿物中,由蒙脱石组成的土颗粒尽管其单位质量的负电荷最多,但其比表面积较大,因此单位面积上的负电荷反而较少,结合水层较薄。高岭石则相反,结合水层较厚。伊利石介于二者之间。其次,结合水的厚度还取决于水中阳离子的浓度和化学性质,若水中阳离子浓度越高,则靠近土颗粒表面的阳离子也越多,极性分子越少,结合水也就越薄。

根据静电引力的强弱,结合水可分为强结合水和弱结合水。

(1) 强结合水

强结合水是指紧靠土粒表面的结合水,受表面静电引力最强。这部分水的特征是排列致密且定向性强,没有溶解盐类的能力,不能传递静水压力,不能自由移动,温度高于 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时可蒸发。它极其牢固地结合在土粒表面上,具有固体的特性,密度为 $1.2 \sim 2.4\text{ g/cm}^3$,冰点为 $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$,具有极大的黏滞性、弹性和抗剪强度。如果将干燥的土样放在天然湿度和湿度的空气中,土的质量会增加,直到土中强结合水达到最大吸着度为止。土粒越细,土的比表面积越大,则土的吸着度就越大。黏性土只有强结合水存在时,才呈固体状态。

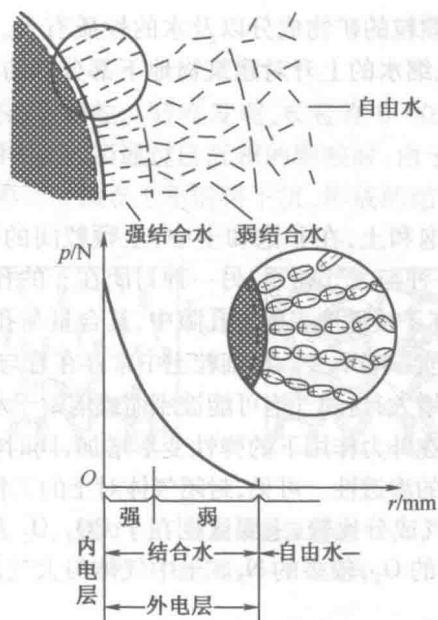


图 2-2 结合水分子定向排列及其所受电分子力变化简图

(2) 弱结合水

弱结合水是紧靠强结合水外围的一层结合水膜。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,随着离土粒表面的距离增大,所受静电引力迅速降低,距土粒表面稍远的地方,水分子虽仍为定向排列,但不如强结合水那么紧密和严格。这层水仍然不能传递静水压力,水膜较厚处的弱结合水能向邻近较薄的水膜缓慢移动,但与重力无关,而是具有黏滞性。当土中含有较多的弱结合水时,土具有一定的可塑性。例如砂粒比表面积较小,含薄膜水较少,几乎不具有可塑性。而黏性土的比表面积较大,含薄膜水较多,其可塑范围较大,这就是黏性土具有黏性的原因。

2. 自由水

存在于土孔隙中的不受电场引力作用的水称为自由水。它的性质和普通水一样,能传递静水压力并溶解盐类,冰点为 0°C 。自由水按其移动所受作用力的不同分为重力水和毛细水两类。

(1) 重力水

重力水是在土孔隙中受重力作用能自由流动的水,具有一般液态水的共性,存在于地下水位以下的透水层中。重力水在土的孔隙中流动时,能传递水压力,带走土中细颗粒,而且能溶解土中的盐类。这两种作用会使土的孔隙增大,可压缩性提高,抗剪强度降低。地下水位以下的土粒受水的浮力作用,其应力状态会发生变化。在水头作用下,重力水会产生动水压力,对开挖基坑、排水等方面均会产生较大的影响。

(2) 毛细水

毛细水是受到水与空气界面处表面张力作用的自由水。毛细水分布在土颗粒间相互连通的弯曲孔道。由于水分子与土颗粒之间的附着力和水、气界面上的表面张力,地下水将沿着这些孔道被吸引上来,而在地下水位以上形成一定高度的毛细管水带。毛细现象与



土中孔隙的大小、形状、土颗粒的矿物成分以及水的性质有关。工程中,应特别注意毛细水上升的高度和速度,因为毛细水的上升对建筑物地下部分的防潮措施和地基土的冻胀都有重要影响。

2.3.3 土中气体

含有气体的土称为非饱和土,在非饱和土中,土颗粒间的孔隙由液体和气体充满。土中气体有两种存在形式:一种与大气相通;另一种封闭在土的孔隙中,与大气隔绝。

与大气相通的气体存在于接近地表的土孔隙中,其含量与孔隙体积大小及孔隙被填充的程度有关,它对土的工程性质影响不大。在细粒土中常存在着与大气隔绝的封闭的气泡,在受到外力作用时,随着压力的增大,这种气泡可能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,使土在外力作用下的弹性变形增加,同时,土中封闭气体的存在还能阻塞土中的渗流通道,减小土的渗透性。可见,封闭气体对土的工程性质影响较大。

土中气体的成分与大气成分比较,主要区别在于 CO_2 、 O_2 及 N_2 的含量不同。一般土中气体含有更多的 CO_2 ,较少的 O_2 ,较多的 N_2 。土中气体与大气的交换越困难,二者的差别就越大。

2.4 土的结构和构造

2.4.1 土的结构

土的结构是指土颗粒的大小、形状、表面特征、相互排列及其联结关系的综合特征。一般分为单粒结构、蜂窝结构和絮状结构三类。

1. 单粒结构

单粒结构是无黏性土的基本组成形式,由较粗的砾石颗粒、砂粒在自重作用下沉积而成。因颗粒较大,颗粒间没有联结力,有时仅有微弱的假黏聚力,土的密实程度受沉积条件影响。如土粒受波浪的反复冲击推动作用,其结构紧密,强度大,压缩性小,是良好的天然地基。而洪水冲积形成的砂层和砾石层,一般较疏松(见图 2-3),由于孔隙大,土的骨架不稳定,当受到动力荷载或其他外力作用时,土粒易于移动,以趋于更加稳定的状态,同时产生较大变形,这种土不宜做天然地基。如果细砂或粉砂处于饱和疏松状态,则在强烈震动作用下,土的结构会趋于紧密,在瞬间变成流动状态,即所谓“液化”,土体强度丧失,在地震区将产生震害。

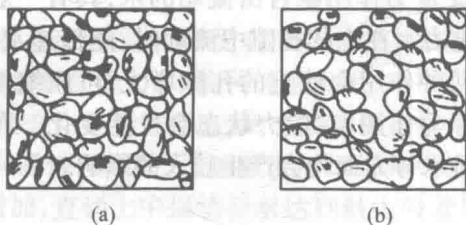


图 2-3 单粒结构示意图

(a) 紧密的单粒结构; (b) 疏松的单粒结构

2. 蜂窝结构

组成蜂窝结构的颗粒主要是粉粒。研究发现,粒径在 $0.005 \sim 0.05 \text{ mm}$ 的颗粒在水中沉积时,仍然是以单个颗粒下沉的,当通过已沉积的颗粒时,由于它们之间的相互引力大于自重,因此土粒停留在最初的接触点上不能再下沉,形成的结构就像蜂窝一样,具有很大的孔隙(见图 2-4)。

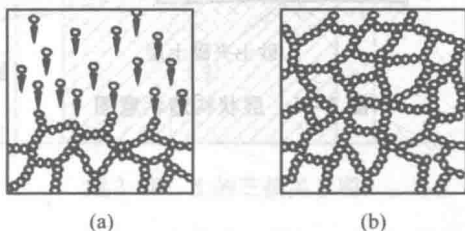


图 2-4 蜂窝结构示意图

(a) 颗粒正在沉积;(b) 沉积完成

3. 絮状结构

粒径小于 0.005 mm 的黏粒在水中处于悬浮状态,不能靠自重下沉。当这些悬浮在水中的颗粒被带到电解质浓度较大的环境(如海水)中时,黏粒间的排斥力因电荷中和而破坏,就会聚集成絮状黏粒集合体,因自重增大而下沉,与已下沉的絮状集合体相接触,形成孔隙很大的絮状结构,也称二级蜂窝结构(见图 2-5)。

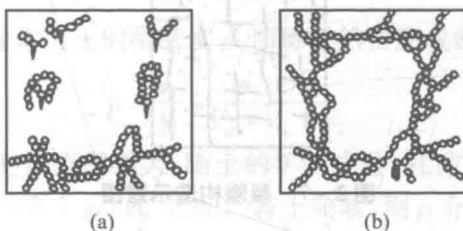


图 2-5 絮状结构示意图

(a) 絮状集合体正在沉积;(b) 沉积完成

具有蜂窝结构或絮状结构的土,因为存在大量的细微孔隙,所以渗透性小、可压缩性大、强度低且土粒间联结较弱,受扰动时,土粒接触点可能脱离,导致结构强度损失,土粒强度迅速下降。然而,随着时间的增长,强度还会逐渐恢复。这类土颗粒间的联结力往往由于长期的压密作用和胶结作用而得到加强。

2.4.2 土的构造

土的构造是指同一土层中颗粒或颗粒集合体相互间的分布特征。通常分为层状构造、分散构造和裂隙构造三类。

1. 层状构造

层状构造是土粒在沉积过程中,由于不同阶段沉积的物质成分和颗粒大小不同,沿竖