



全国普通高等学校土木工程专业
“卓越工程师教育培养计划”精品教材

土力学

Soil Mechanics

崔高航 韩春鹏 主编

013048507

全国普通高等学校土木工程专业“卓越工程师教育培

土 力 学

主 编：崔高航 韩春鹏
副 主 编：高国付 王海鹏 张 扬
主 审：汤爱平
编写委员会：（按姓氏音序排列）
崔高航 高国付 韩春鹏
王海鹏 邢志强 张 扬
郑 鑫



江苏科学技术出版社



北航

C1656550

TU 43-43
44

702840810

图书在版编目 (CIP) 数据

土力学 / 崔高航, 韩春鹏主编. —南京: 江苏科学技术出版社, 2013. 6
全国普通高等学校土木工程专业“卓越工程师教育培养计划”精品教材
ISBN 978-7-5537-1131-7

I. ①土… II. ①崔… ②韩… III. ①土力学—高等学校—教材 IV. ①TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 088178 号

全国普通高等学校土木工程专业“卓越工程师教育培养计划”精品教材
土力学

主 编 崔高航 韩春鹏
责任编辑 刘屹立
特约编辑 许闻闻
责任校对 郝慧华
责任监制 刘 均

出版发行 凤凰出版传媒股份有限公司
江苏科学技术出版社
出版社地址 南京市湖南路 1 号 A 楼, 邮编: 210009
出版社地址 <http://www.pspress.cn>
经 销 凤凰出版传媒股份有限公司
印 刷 天津泰宇印务有限公司

开 本 787 mm×1 092 mm 1/16
印 张 17.25
字 数 409 000
版 次 2013 年 6 月第 1 版
印 数 2013 年 6 月第 1 次印刷

标准书号 ISBN 978-7-5537-1131-7
定 价 35.00 元

图书如有印装质量问题, 可随时向我社出版科调换。

内 容 简 介

本书系统地阐述了土力学的基本原理,内容主要包括绪论,土的性质与工程分类,土的渗透性和渗流,地基中的应力,土的压缩性与地基变形,土的抗剪强度,土压力计算,地基的承载力,土坡的稳定性等。各章均附有适量“习题与思考”,有助于读者对所学内容的深入理解。教学中各专业可根据学时安排全部或有侧重的选择讲授。

本书适用于高等学校土木工程、水利水电工程、道路桥梁工程、工程管理等专业本科教学,也可供相关专业学生和工程技术人员参考。

前 言

土力学是土木工程及其相关专业的一门重要的专业基础课,在先修力学课程知识的基础上,结合土木工程的需要,学习土的工程性质和土的力学性状分析,为基础工程、地基处理、挡土结构与基坑工程、岩土工程测试等专业课提供重要的理论基础。本书的编写过注意突出以下特色。

(1) 注重知识体系的系统性。

从土的成因、组成到物理力学性质直至工程应用都力求全面系统地介绍,抓住应力—变形—强度—渗流这一主线,建立统一体系,注意联系工程背景及各章节知识点的相互关联和衔接,使知识体系更加科学系统。

(2) 注重理论与工程实践相结合。

土力学是一门理论性和实践性都很强的课程,力求在基本原理和方法的选用上以工程实用为主,并尽量反映国内外的先进技术水平。书中所选例题和习题紧密结合工程实际,使学生能够做到举一反三,有利于学生毕业后顺利进入工作状态,解决工程实践问题。

(3) 密切结合注册执业资格考试大纲。

注册土木工程师(岩土)、注册结构工程师等执业资格考试是我国基础工程设计、勘察、施工人员重要的执业资格考试,考试大纲中涵盖了土力学中的诸多问题。密切结合该考试大纲,不仅有利于读者解决工程实际问题,还有利于读者为必将参加的注册考试打下良好的理论基础。

本书由崔高航、韩春鹏任主编,高国付、王海鹏、张扬任副主编。

第0、3章由东北林业大学崔高航编写,第1章由东北林业大学王海鹏编写,第2章由黑龙江八一农垦大学郑鑫编写,第4章、第7章由南阳理工学院张扬编写,第5章由黑龙江科技学院高国付编写,第6、8章由东北林业大学韩春鹏编写,习题答案由东北林业大学邢志强整理。

本书主审哈尔滨工业大学汤爱平教授认真、细致地审阅和修改了全书,并提出了许多极为有益的建议;东北林业大学研究生刘强强、郑婉、陈景龙参与本书的部分审阅工作;在此一并致以诚挚的谢意。

限于编者水平,不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2013年5月

目 录

0 绪论	1
0.1 土力学的概念及其研究内容	1
0.2 土力学学科的发展简史	2
0.3 土力学课程的学习内容和学习要求	4
1 土的性质与工程分类	5
1.1 土的生成	5
1.2 土的物质组成	7
1.3 土粒间相互作用与土的结构构造	18
1.4 土的物理性质指标	22
1.5 无黏性土的相对密实度	26
1.6 黏性土的物理特性	28
1.7 土的击实特性	32
1.8 土的工程分类	36
2 土的渗透性和渗流	45
2.1 土的渗透特性与达西定律	45
2.2 流网及其应用	52
2.3 动水力及渗流破坏	57
2.4 有效应力原理	61
3 地基中的应力	66
3.1 土的自重应力	66
3.2 基底压力	68
3.3 地基附加应力	72
4 土的压缩性与地基变形	97
4.1 土的压缩性	97
4.2 地基的最终沉降量	110
4.3 土的应力历史对土的压缩性影响	126
4.4 土的单向固结理论	130
5 土的抗剪强度	140
5.1 土的抗剪强度与莫尔—库仑强度理论	140
5.2 抗剪强度指标的测定方法	145
5.3 黏性土的抗剪强度	155
5.4 无黏性土的抗剪强度	170

6 土压力计算	176
6.1 挡土墙以及土压力的类型	176
6.2 朗金土压力理论	180
6.3 库仑土压力理论	186
6.4 土压力问题讨论	194
6.5 挡土墙计算	195
7 地基的承载力	205
7.1 地基的破坏形式和地基承载力	205
7.2 地基极限承载力	210
7.3 规范方法确定地基承载力	221
8 土坡的稳定性	232
8.1 影响土坡稳定性的因素	232
8.2 无黏性土坡的稳定性分析	233
8.3 黏性土边坡稳定分析基本方法	234
8.4 瑞典条分法	241
8.5 毕肖普条分法	245
8.6 非圆柱滑动面边坡稳定分析	248
8.7 几点讨论	252
习题答案	255
参考文献	268

0 绪 论

内容提要

本章主要介绍土力学的概念及其研究内容、土力学学科的发展简史以及该课程的学习内容和学习要求,使学生对土力学课程和学习方法有简单的了解。

0.1 土力学的概念及其研究内容

土是地球上最丰富的资源。土的成因多,用途广。什么是土,土有哪些工程性质,如何研究并应用它们为工程建设服务,这些都是土力学要回答的问题。

土是矿物或岩石碎屑构成的松软集合体。由于其形成年代、生成环境及物质成分不同,工程特性亦复杂多变。例如我国沿海及内陆地区的软土,西北、华北和东北等地区的黄土,高寒地区的多年冻土以及分布广泛的红黏土、膨胀土和杂填土等,其性质各不相同。因此在建筑工程设计前,必须充分了解、研究建筑场地相应土(岩)层的成因、构造、地下水情况、土的工程性质、是否存在不良地质现象等,对场地的工程地质条件作出正确的评价。

土力学是利用力学的一般原理,研究土的物理、化学和力学性质及土体在荷载、水、温度等外界因素作用下工程性状的应用科学。它是力学的一个分支,由于土力学的研究对象是以矿物颗粒组成骨架的松散颗粒集合体,其物理、化学和力学性质与一般刚性或弹性固体以及流体等都有所不同。因此,必须通过专门的土工试验技术进行探讨。

在漫长的历史进程中,人类的生产生活所经历的工程建设史是不停地与岩土体打交道的过程,建造了无以计数的各种工程。涉及土力学学科的行业很多,如水利水电、道路桥梁、矿山、能源、港口与航道、城乡建设与市政工程、国防建设等。人们可能会在各种地基条件情况下建造工程,针对不同工程 and 不同地质条件又会选择不同的基础或结构形式,会建造大坝,建设公路、铁路,建造厂房、码头、住宅,还会开挖深基坑,开挖隧道,建设地铁和地下工程,治理河岸与边坡,完成尾矿堆积库、垃圾填埋,等等,可能遇到各种地基类型和土性、复杂地质条件或地质环境。

从土力学的广泛应用范围看,工程上的土体(广义的是岩土体)扮演的角色可分为三类。

- (1) 作为房屋、厂房、码头、路桥等各种类型建筑物的地基,即地基承载角色。
- (2) 作为土石坝、路堤等填筑材料或其他应用的工程材料,即材料角色。
- (3) 作为各类工程设施的环境和人们生产生活的的环境,即工程环境角色。

各类工程建设和地质灾害(滑坡、泥石流、堰塞湖等)的防治几乎都涉及土力学课题。正确运用土力学知识和基本原理是保障合理规划、正确设计、施工期安全、竣工后安全和正常使用的重要因素之一。不同的工程和不同的土体各有特点甚至各有“个性”,呈多样

性和复杂性。总结人类长期的工程实践,就会发现土体的性质和对工程的影响可以归纳出共性课题,即土力学中有关力学性质的三个基本课题:土体稳定、土体变形、土体渗流。围绕解决这三个基本课题,对应有三个基本理论:土体抗剪强度理论、土体压缩与固结理论、土体渗流理论。

(1) 土体稳定问题。土体具有强度特征,因而存在稳定问题,例如土压力计算与挡土墙稳定、地基的稳定、土坝和其他边坡的稳定等。当土体的抗剪强度不足时,将导致土体单元破坏,严重的将导致土体整体破坏和建筑物的失稳。土体抗剪强度理论是研究稳定类课题的理论基础。

(2) 土体变形问题。土体在附加荷载作用下会产生变形而且有些土(如黏性土)的变形还与时间有关,这就要求建筑物的沉降(竖向变形)和不均匀沉降在任何时候都不应超过建筑物的允许值。否则,轻者导致建筑物的倾斜、开裂,降低或失去使用价值,重者将会酿成毁坏事故。土体压缩与固结理论是研究该课题的理论基础。

(3) 土体渗流问题。由于土存在连通的孔隙使得土体具有渗透性,对于某些土工建筑物(如土坝、土堤、岸坡)、水工建筑物地基或其他挡水工程或结构,除了在荷载作用下土体要满足稳定和变形要求外,还要研究渗流对土体应力变形和稳定的影响,以及渗流量问题。达西定律与渗流理论是研究该课题的理论基础。

工程设计中,有时虽然表现为某个方面为主要矛盾,但实际上三个基本课题和基本理论是相互关联的,应当将它们视为整体系统。三个基本理论可以通过应用著名的有效应力原理进行有机的联系,有效应力原理是研究土力学和分析工程问题的钥匙。

围绕三个基本课题和基本理论,土力学教材内容还包括土的生成、组成和物理性质等,土体的应力计算、土压力计算、土体稳定和极限承载力等内容。

0.2 土力学学科的发展简史

1925年太沙基(K. Terzaghi)(见图0-1)发表了第一本《土力学》专著,至今才90余年,土力学已有了自身的理论体系,但到目前为止,土的许多性质还不能被很好地描述。因此,可以说土力学是一门古老而又年轻的学科。土力学学科的发展可大致划分为四个阶段。

人类在形成与发展的漫长历史进程中,总离不开与土打交道,早在几千年以前人类对土的一些性质就有了粗浅的了解,有所认识并利用,逐步地积累了一些经验。古代劳动人民创造了灿烂的文化,留下了令今人叹为观止的工程遗产,例如蜿蜒万里的长城、人工运河、恢宏的宫殿寺院、灵巧的水榭楼台、巍峨的高塔、金字塔等。这些工程无不体现能工巧匠的高超技艺和创新智慧。然而这些成就还仅局限于工程实践经验,受到当时生产力水平的限制,只是代代相传的经验积累,未能形成系统的土力学和工程建设理论。这是漫长历史的经验积累阶段。

18世纪中叶至20世纪20年代是土力学理论和方法逐渐形成的阶段。在18世纪兴起工业革命的欧洲,为满



图0-1 太沙基 K. Terzaghi

足资本主义工业化的发展和市场向外扩张的需要,对工业厂房、城市建筑、铁路、码头等大规模的兴建,提出了许多与土力学相关的问题。近 200 年的历程中,随着这些问题的逐渐解决,提出了许多与土力学相关的理论。1773 年,法国工程师库仑(A. Coulomb)创立了著名的砂土抗剪强度公式,后来又提出了计算挡土墙土压力的滑楔理论(库仑土压力理论)。1869 年,英国朗金(W. J. N. Rankine)又依据强度理论从另一角度推导出了土压力计算公式(朗金土压力理论)。1856 年,法国学者达西(H. Darcy)进行了砂土渗流试验,创立了著名的达西定律(渗流理论)。1885 年,法国学者布辛奈斯克(J. Boussinesq)求解出了竖向集中力作用下弹性半无限空间的应力与变形的理论解,奠定了半无限弹性地基的应力计算方法的基础。1916 年,瑞典工程师彼得森(K. Petterson)提出并由费伦纽斯(W. Fellenius)发展了土坡稳定分析方法(土坡稳定分析的瑞典条分法)。1920 年,法国人普朗德尔(L. Prandtl)发表了平面问题地基极限承载力理论公式。这一阶段是土力学基本理论的奠基阶段。

土力学理论和方法的创立影响着后人。许多学者前赴后继的努力,为本学科的系统发展作出了贡献。1925 年,太沙基归纳了以往的研究成果,提出了一维固结理论,阐述了有效应力原理,发表了第一本《土力学》专著,从此土力学有了自身的理论体系,形成一门独立的学科。有效应力原理形成了近代土力学的理论框架,标志着近代土力学学科理论和方法的开始,太沙基因此而名垂史册。一维固结理论后来又被推广到三维(一般称为拟三维固结理论),1941 年,比奥(A. Biot)提出了三维固结方程(一般称为真三维固结理论)。1955 年,毕肖普(A. W. Bishop)考虑土条间作用力并用有效强度理论提出了土坡稳定分析的条分法。其后,简布(N. Janbu)、摩根斯坦(N. R. Morgenstern)等人又相继提出了考虑不同因素和条件下的土坡稳定分析方法。在土的基本性质研究、强度与稳定分析理论、变形与固结理论、有效应力原理发展、渗流理论的发展与应用等方面,许多学者都作出了重要贡献。

1963 年,罗斯科(K. H. Roscoe)等人创建发表了著名的剑桥弹塑性模型,标志着人们对土性质的认识和研究开始进入一个崭新的阶段——现代土力学理论发展阶段。现代土力学理论与近代土力学理论的重要区别在于:近代土力学理论将强度稳定课题、变形固结课题、渗流课题分别研究而自成体系,各课题研究缺乏交叉耦合研究,而且受当时力学学科和科技总体水平的影响,土力学多局限于弹性或刚塑性理论范畴;现代土力学理论更注重于将应力—变形—强度—渗流研究建立统一体系,力求描述土的非线性、弹塑性,乃至黏弹塑性等复杂性质,建立统一的计算模型。针对不同类型土和特殊工程要求,既关注土的共性也关注土的个性,还关注特殊土和特殊环境土的研究。事实上,土体的应力—变形—强度—渗流处于一个共同系统,是相互影响的耦合关系。尽管现代土力学理论发展迅速但还远未达到完善,其发展前景是广阔的,已经取得的一些研究成果得到了实际应用,解决了许多工程问题并产生了效益。现代发展阶段的土力学称为高等土力学(advanced soil mechanics),相对而言本科阶段学习的土力学则属于初等土力学。

回顾新中国成立后的几十年间,围绕着解决工程建设中提出的问题,土力学学科在我国得到了广泛的传播和发展。我国在工程地质勘察、室内及现场土工试验、地基处理、新设备、新材料、新工艺的研究和应用方面,取得了很大的进展。在地基处理方面,振动碾压、振动水冲、深层搅拌、高压旋喷、粉体喷射、真空预压、强夯以及各种土工聚合物和托换

技术等在地建、水利、桥隧、道路、港口、海洋等有关工程中得到了广泛应用,并取得了较好的经济技术效果。随着电子技术及各种数值计算方法对各学科的逐步渗透,土力学的各个领域都发生了深刻的变化,许多复杂的工程问题相应得到了解决,试验技术也日益提高。

土力学学科的发展随着人类社会的进步和其他学科的发展而发展。工程建设需要学科理论,学科理论的发展更离不开工程建设。人类正面临着资源和环境这一严酷生存问题的挑战,有各种各样的工程问题需要解决,而且会越来越复杂。我们相信,随着我国社会主义建设的向前发展,对基础工程要求的日益提高,我国土力学与基础工程学科也必将得到新的更大的发展。

0.3 土力学课程的学习内容和学习要求

土力学的先修课程是工程地质、高等数学、理论力学、材料力学、水力学等,其涉及工程地质学、结构设计和施工等几个学科领域,内容广泛,综合性、理论性和实践性很强。从土木工程专业的要求出发,学习时应重视工程地质学的基本知识,培养阅读和使用工程地质勘察资料的能力;牢固掌握土的应力、变形、强度、渗流和地基计算等土力学基本原理,并能应用这些基本概念和原理,结合有关结构理论和施工知识,分析和解决地基基础问题。

土是一种多孔松散的三相介质,不同于其他各种连续体材料,天然土体物理力学性质十分复杂,受土的成因、物质成分、环境变动等因素影响很大。因此研究土力学课题时不能完全沿用其他力学课程的研究方法。为了实用的目的,本科阶段学习的土力学教材中常常采用一些简单的、理想化的假定来描述土的性质,如计算土中应力时,常假定地基土是各向同性的、均匀的弹性体;当研究土的渗透性时,则假设土是连续的多孔介质;研究土的强度时,又假定土体为理想的刚塑性体。学习中希望能够体会针对不同理论或方法的简化假定条件,要注意灵活应用,不可生搬硬套,依据基本理论解决工程问题时也常常要作出某些比较符合实际的简化假定,但不要背离该理论原先的假定前提。

土力学已形成一定的理论体系,尽管现代土力学理论发展迅速,由“初等”向“高等”发展,但到目前为止,土的许多性质还未被很好的认识,还难以全面客观地模拟和概括天然土体的各种力学行为的全貌。

土力学课程每部分内容既相对独立又相互关联,学习时必须理清头绪,形成体系。土力学是许多后续课程、有关专业课和进一步学习研究的基础,并广泛应用于解决工程问题,例如工程勘察、地基基础设计、基坑设计、支护设计、地基处理、现场测试与分析及地质灾害防治等。虽然不同专业的后续课程内容不尽相同,但都或多或少要运用到土力学基本理论和知识体系以解决实际问题。通过对本门课程的学习,读者应能够熟练运用土力学理论与知识体系,包括应用材料力学、钢筋混凝土结构、工程勘察、施工技术等知识体系,依照安全、经济、环保的原则,力求施工方便,给出合理的工程方案和正确的设计,并能够有所创新。

1 土的性质与工程分类

内容提要

土的性质包括物理性质、力学性质、水理性质以及工程性质等。土是由颗粒(固相)、水(液相)和气(气相)所组成的三相分散体系。土中颗粒的大小、成分及三相之间的比例关系,反映出土的不同物理性质。土的这些物理性质又与力学性质(强度、压缩性、渗透性等)有着密切的联系。

本章从宏观和微观两方面介绍土的三相组成,须熟练掌握土的三相之间的比例关系和各指标的定义、试验和计算方法,掌握无黏性土和黏性土的工程特性,熟悉地基土的分类方法,深入了解工程中常用到的压实原理等知识点。

1.1 土的生成

土是以岩石颗粒为主体骨架的无胶结或弱胶结的松散堆积物。岩石颗粒是土体的固相物质,是组成土体固体部分的主要物质。除固相物质之外,颗粒之间存在孔隙,土体中的孔隙绝大部分是相互连通的,一般由液体或者气体充填,液体及气体可以在孔隙间流动,因而土的物质成分包含固相、液相和气相。土体的三相性质导致土的力学特性比其他材料(如钢铁、木材等)更为复杂,由于土中三相物质比例的不同,土的状态和物理力学性质会存在很大差异。

1. 土的成因

1) 地质作用

地质作用引起地壳组成物质、地壳构造、地表形态等地壳不断地变化。地质作用可分为内力地质作用和外力地质作用。内力地质作用是指地内热能、重力能、地球旋转能、化学能、结晶能等多种因素引起地壳包括地幔上部岩石圈的构造运动。构造运动可使岩石变形、变位,形成各种构造形迹,使岩层褶皱与断裂,地表隆陷甚至海陆变迁。内力地质作用决定了地表高山峡谷、大陆海洋等地表的基本形态。外力地质作用主要与太阳辐射能、潮汐能和生物能、位能等有关。按照作用方式不同,外力地质作用可分为物理作用、化学作用和生物作用。

土体的许多物理力学性质受土粒大小、形状和矿物成分控制。土的矿物成分取决于形成土的母岩的矿物组成和风化过程。

2) 风化作用

天然土的主要来源是岩石风化的产物,其次是地球生物残骸分解过程中的残留物质。岩石在太阳辐射、大气、水和生物作用下出现破碎、疏松、剥蚀、搬运沉积及矿物成分次生变化的现象,称为风化作用。暴露在地壳表面的大部分岩石都处在不断变化的物理化学条件下,而且地表富含氧气、二氧化碳和水,因而岩石极易发生风化。

物理风化是地表岩石在原地发生机械破碎而不改变其化学成分也不产生新矿物的风化作用过程。如矿物岩石的热胀冷缩、冰劈作用、层裂和盐分结晶等作用均可使岩石由大

块变成小块以至完全碎裂。物理风化主要是岩石在不断冷热过程中反复膨胀和收缩引起的,膨胀和收缩的反复变化使岩石变成岩块,岩块破碎成更小的岩块、岩屑,岩块、岩屑又进一步破碎,这个过程是岩石分解、颗粒不断变细的过程。

化学风化是指地表岩石受到水、氧气和二氧化碳的作用发生化学成分和矿物成分变化而形成新矿物。化学风化主要通过溶解作用、水化作用、水解作用、碳酸化作用和氧化作用等形式完成。化学风化过程中生成的绝大部分可溶盐被溶滤作用带走或被植物吸收。

剥蚀、搬运、沉积与风化作用在大自然中相辅相成,只有当岩石被风化后,才易被剥蚀。而当岩石被剥蚀后,才能露出新鲜的岩石,使之继续风化。风化产物的搬运是剥蚀作用的主要体现。当岩屑随着搬运介质,如风或水等流动时,会对地表、河床及湖岸带产生侵蚀。这样也就产生更多的碎屑,为沉积作用提供了物质条件。

2. 土的成因类型

母岩风化后,形成尺寸较小的岩屑或矿物颗粒。经水流、风或冰川等动力搬运作用,在一定的环境条件下沉积下来,形成土层。由于搬运力周期性变化,在某地点沉积的土层上面可能再沉积性质不同的其他土层,也可以使原来沉积的土层重新被搬运到新的地点沉积。不同时期的沉积物,经过自重压密,有时还经过生物作用,形成分布在地球表面的沉积土。

根据土形成后堆积位置的关系,土可分为残积土和运积土两大类。

残积土是指岩石经风化后仍留在原地未经搬运的堆积物。残积土的厚度和风化程度主要取决于气候条件和暴露时间,同时也受风化和搬运作用强弱及岩体的构造作用影响。由于残积土未经搬运作用,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,但作为建筑地基时要注意其土性和厚度常呈现较大的不均匀性和各向异性。

运积土是指岩石风化后经水流、风和冰川等动力搬运离开生成的母岩所在区域后再沉积下来的堆积物。由于搬运的动力不同,常分为冲积土、风积土、冰碛土等。

1) 冲积土

冲积土是指在降水形成的地表径流作用下,冲刷、带动或搬运土粒,经过一段搬运距离后在较平缓的地带沉积下来的土层。冲积土的主要类型有山区洪积土、河谷冲积土、山前平原冲积土、平原河谷冲积土、三角洲冲积土等。由于流水所能带走土粒的最大尺寸与其流速的平方成正比,水的流速又与水力坡降有关,大小不同的土粒随着河流流速的改变堆积在不同的部位,这使冲积土产生明显的分选特性。

2) 风积土

由风力带动土粒经过一段搬运距离后沉积下来的堆积物称为风积土。干旱地带粉质土粒细小,土粒之间的连接力很弱,易被风力带动向天空或沿地面移动,经过长距离搬运后再沉积下来就形成了风积土,因此风积土常在干旱和半干旱地区大面积分布,主要有砂土和黄土。风所能带走的颗粒大小取决于风速,因此,颗粒随风向也有一定的分选。风积土没有明显层理,颗粒以细砂粒和粉粒为主,同一地区颗粒较均匀。

3) 冰碛土

由冰川剥落、搬运形成的堆积物称为冰川沉积土。其中,几乎未经流水搬运直接留存于冰层中的土称为冰碛土。其特征是不成层,所含颗粒粒径的范围很宽,小至黏粒和粉粒,大至巨大的漂石。粗颗粒的形状是次圆或次棱角的,有时还有磨光面。胶结的冰碛土,特别是经过冰荷载作用的冰碛土,已经产生了很大的压缩量,这些土层具有密度大、压

缩性小和强度大的良好工程性能,因此可作为理想的建筑物地基。由冰川融化水流搬运、堆积在冰层外围的冲积土称为冰水冲积土,具有与河流冲积土类似的性质,通常由砾石、砂和粉砂组成,是优良的透水材料和混凝土骨料。

除了岩石风化形成的无机土外,有些土的有机质含量较高,称为有机土或有机质土。有机土或有机质土在区域分布上各有成因,性质复杂。就成因而言,例如形成于沼泽地的土,大多为沼泽土,这类土的形成条件是在停滞或流动不畅且动植物大量繁殖的浅水地区,构造运动或环境变化使得大片动植物遗骸完全或部分分解,腐烂变质残留于土中,从而含有大量有机质。就有机质含量而言,充分腐化的、有机质的质量含量大于土固体质量60%的土称为泥炭土;未完全腐化还保留有植物残余物、有机质的质量含量占土固体质量10%~60%的土称为泥炭质土;有机质的质量含量占土固体质量5%~10%的土称为有机质土。工程建设中有机质土较为常见,呈浅灰至深灰色,有臭味,为黏土或粉土类,其物理力学性质主要表现为密度低、含水率高,压缩性高、强度低且灵敏度高。

1.2 土的物质组成

1.2.1 土的固相

1. 土的矿物成分

组成土粒的矿物称为成土矿物,其成分主要取决于成土母岩的矿物成分及其所承受的风化作用。土中的无机矿物是岩石风化后的产物,它是土中矿物的主要部分。成土矿物按照其与母岩的关系分为原生矿物和次生矿物,此外,还包括水溶盐和有机质。

1) 原生矿物

原生矿物是母岩经过物理风化作用形成的与母岩矿物成分相同的土粒,仅形状和颗粒大小发生变化,化学成分没有变化。土颗粒一般较粗,多呈棱角状、浑圆状、块状或板状,吸附水的能力弱,性质比较稳定,无塑性。实际上,由于岩石风化的速度很慢,在漫长的地质历史时期内,土颗粒一直经受着物理、化学风化作用。原生矿物的化学性质稳定或比较稳定,在岩石中含量丰富、硬度较高,不容易被完全化学风化,具有强或较强的抗水性和抗风化能力,亲水性弱或较弱。原生矿物常见的有石英、长石、云母,其次为角闪石、磁铁矿等。

2) 次生矿物

土体中的次生矿物是岩石在风化成土的过程中生成的新矿物,是原生矿物进一步因氧化、水化、水解及溶解等化学作用的产物。通常次生矿物构成的土粒极细,且多呈片状或针状,其性质较不稳定,有较强的吸附水的能力。次生矿物形成的土大多是弱透水性,具有可塑性,含水率的变化常引起土的物理力学性质发生明显变化。在自然界,最常见的次生矿物有黏土矿物、含水氧化物、氢氧化物和各种盐类。

黏土矿物是次生矿物中数量最多的矿物,常见的黏土矿物有高岭石、伊利石和蒙脱石三类。黏土矿物主要是由各种硅酸盐类矿物分解形成的含水铝硅酸盐,它在土中的相对含量即使不大,也对土的工程性质有极大的影响。

3) 水溶盐

水溶盐实际上是可溶性次生矿物,以固体形式存在于土体中,组成土体的固体部分。

土体中的水溶盐根据其在水中溶解度的大小,可分为易溶盐、中溶盐及难溶盐三类。土中盐类的溶解和结晶会影响到土的工程性质,硫酸盐类还对金属和混凝土有一定的腐蚀作用,故工程中对易溶盐和中溶盐的含量有一定限制,如土坝的填土要求总量不超过 8%,铁路路堤填土不超过 5%,其中硫酸盐应不超过 2%。由于土中盐类的存在,对孔隙水中离子的浓度和类型会产生影响,这又是影响土物理性质的因素之一。

4) 有机质

有机质通常富集于局部土层,土中的有机质对土的性质产生显著影响。有机质含量低于 5% 的土称作无机土。土中的有机质由动植物残骸分解物组成,分解彻底的称为腐殖质。腐殖质的颗粒极细,多呈凝胶状,带有电荷,具有极强的吸附性。有机质含量对土的性质影响很大,当土体的含水率较高时,有机质的存在将使土体产生随含水率的变化具有可逆转的膨胀或收缩变形,但当含水率低于某界限后,土体的性质将发生不可逆变化。如用含有有机质的土,烘干做液塑限试验,比用天然含水率的土做液塑限试验,得到的液限和塑性指数要低很多。

有机质含量对土的工程性质有很大的影响。一般规律是,随着有机质含量的增加,土的分散性加大,天然含水率增高(有机土的含水率可高达 200% 以上),干密度减小(有些有机土干密度可低于 1 g/cm^3),胀缩性增加(有机土的胀缩性可大于 50%),压缩性增大,强度减小,承载力降低,对工程极为不利。通常土层表面范围土的有机质含量较其下层丰富,修筑建筑物一般将有机质含量高的上部土层清除,工程上称为清基。作为堤坝等土工建筑物填筑用料的有机质含量也有限制,如我国的相关规范要求筑坝土料有机质含量不超过 5%,防渗结构土料有机质含量不超过 2% 等。

2. 黏土矿物

黏土矿物是一种复合的铝—硅酸盐晶体(所谓晶体是指原子、离子在空间有规律的排列,不同的几何排列形式称为晶体结构,组成晶体结构的最小单元称为晶胞),颗粒呈片状,是由硅片和铝片构成的晶胞组叠而成的。硅片的基本单元是硅—氧四面体。它是由 1 个居中的硅离子和 4 个在角点的氧离子所构成的,如图 1-1(a)所示。由 6 个硅—氧四面体组成一个硅片,如图 1-1(b)所示。硅片底面的氧离子被相邻两个硅离子所共有,简化图形如图 1-1(c)所示,梯形的底边表示氧原子面。铝片的基本单元则是铝—氢氧八面体,它是由 1 个铝离子和 6 个氢氧根离子所构成的,如图 1-2(a)所示。4 个八面体组成一个铝片。每个氢氧根离子被相邻两个铝离子所共有,如图 1-2(b)所示,简化图形如图 1-2(c)所示。大多数黏土矿物是由硅片和铝片构成的晶胞组叠而成的,依硅片和铝片的组叠形式的不同,可以分为高岭石、蒙脱石和伊利石三种主要类型。

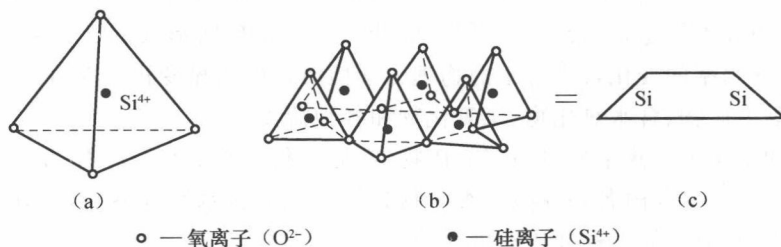


图 1-1 硅片的结构

(a) 硅氧四面体;(b) 硅片;(c) 硅片简化图

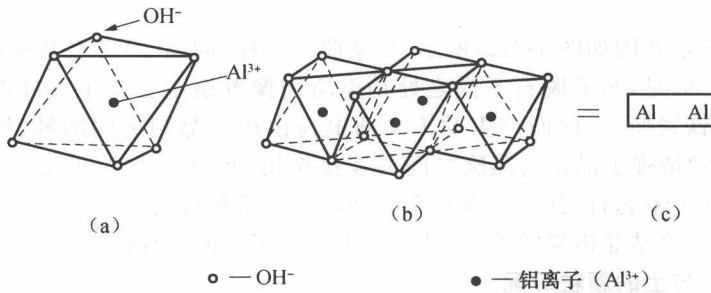


图 1-2 铝片的结构

(a) 铝—氢氧八面体；(b) 铝—氢氧结晶格架示意图；(c) 铝—氢氧结晶格架简化图

1) 高岭石

其结晶格架示意图如图 1-3(a)所示,它是由一层硅氧晶片和一层铝—氢氧晶片组成的晶胞,属于 1 : 1 型结构单位层或两层型。高岭石矿物就是由若干重叠的晶胞构成的。这种晶胞一面露出氢氧基,另一面则露出氧原子。晶胞之间的连接是氧原子与氢氧基之间的连接,氢氧根中的氢与相邻晶胞中的氧形成氢键,它具有较强的连接力,因此晶胞之间的距离不易改变,水分子不能进入,晶胞活动性较小,使得高岭石的亲水性、膨胀性和收缩性均小于伊利石,更小于蒙脱石。它的水稳性好,可塑性低,压缩性低,亲水性差。

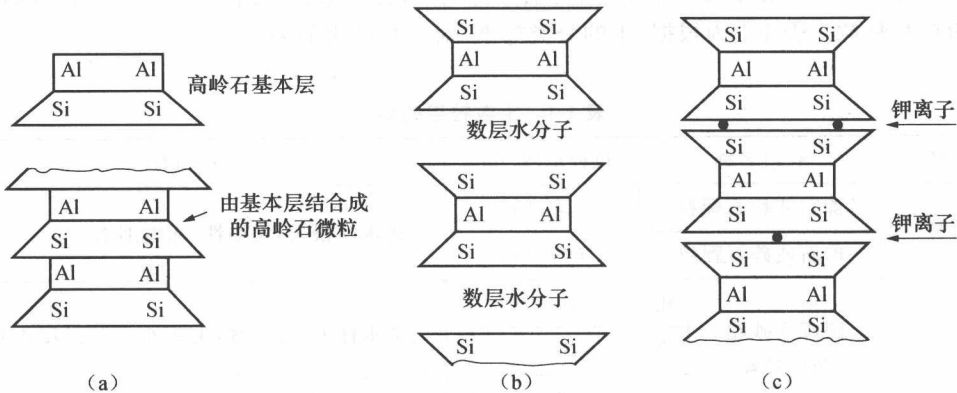


图 1-3 三种黏土矿物结晶格架示意图

(a) 高岭石；(b) 蒙脱石；(c) 伊利石

2) 蒙脱石

其结晶格架示意图如图 1-3(b)所示,可见其晶胞是由两层硅氧晶片之间夹一层铝—氢氧晶片所组成的,称为 2 : 1 型结构单位层或三层型晶胞。由于晶胞之间是 O^{2-} 对 O^{2-} 的连接,当非分子间的相互作用力(范德华力)相互连接,其键力很弱,很容易被具有氢键的水分子楔入而分开;另外,夹在硅片内的 Al^{3+} 常为低价的其他离子(如 Mg^{2+})所替换,在晶胞之间出现多余的负电荷,它可以吸附其他阳离子(如 Na^+ 、 Ca^{2+} 等)来补偿。这种阳离子吸引极性水分子成为水化离子,充填于结构单位层之间,从而改变晶胞间距离,甚至完全分散到单晶胞。因此,蒙脱石的晶格是活动的,吸水后体积发生膨胀,可增大数倍,脱水后则可收缩。膨胀土就是由于黏粒中含有一定数量的这类矿物的缘故,一般含量在 5% 以上,就会有明显的膨胀性。另外,它还具有高塑性、高压缩性、低强度、低渗透性,液限可达 150%~700%,塑性指数可达 100~650。

3) 伊利石

其结晶格架示意图如图 1-3(c)所示,与蒙脱石一样,同属 2:1 型结构单位层,晶胞之间键力也较弱。但是,与蒙脱石不同之处是类质同像置换主要发生在硅四面体中,约有 20% 的硅被铝、铁置换,由此而产生的不平衡电荷由进入晶胞之间的钾、钠离子(主要是 K^+)来平衡,钾键增强了晶胞与晶胞之间的连接作用,水分子难以进入。所以遇水膨胀、失水收缩能力低于蒙脱石,其力学性质介于高岭石与蒙脱石之间。

可见,土的矿物结晶格架的差异,从本质上决定了它的工程性质不同。

3. 土粒粒组与土的颗粒级配

1) 土粒粒组

天然土体土粒大小相差悬殊,大的有几十厘米,小的只有千分之几毫米;形状也不一样,有块状、粒状、片状等。这与土的矿物成分有关,也与土粒所经历的风化、搬运过程有关。

土粒的大小称为粒度。在工程中,粒度不同、矿物成分不同,土的工程性质也就不同。例如颗粒粗大的卵石、砾石和砂,大多数为浑圆和棱角状的石英颗粒,具有较大的透水性而无黏性;颗粒细小的黏粒,则属于针状或片状的黏土矿物,具有黏滞性而透水性低。因此工程上常把大小、性质相近的土粒合并为一组,称为粒组。而划分粒组的分界尺寸称为界限粒径。对于粒组的划分方法,目前各个国家、各个部门并不统一。根据《土的分类标准》(GBJ 145—1990),按规定的界限粒径 200 mm、60 mm、2 mm、0.075 mm 和 0.005 mm,将土粒粒组先粗分为巨粒、粗粒和细粒三个统称,再细分为六个粒组:漂石(块石)、卵石(碎石)、砾粒、砂粒、粉粒和黏粒。表 1-1 为根据《土的分类标准》对土粒粒组的划分。

表 1-1 土粒粒组的划分

粒组统称	粒组名称	粒径范围/mm	一般特征
巨粒	漂石或块石颗粒	>200	透水性很大,无黏性,无毛细水
	卵石或碎石颗粒	60~200	
粗粒	圆砾或砂粒 角砾颗粒	粗	透水性大,无黏性,毛细水上升高度不超过 粒径大小
		中	
		细	
	砂粒	粗	易透水,当混入云母等杂质时透水性减小, 而压缩性增加;无黏性,遇水不膨胀,干燥时松散; 毛细水上升高度不大,随粒径变小而增大
		中	
		细	
细粒	粉粒	0.005~0.075	透水性小,湿时稍有黏性,遇水膨胀小,干 时稍有收缩;毛细水上升高度较大较快,极易 出现冻胀现象
	黏粒	<0.005	透水性很小,湿时有黏性、可塑性,遇水膨 胀大,干时收缩显著;毛细水上升高度大,但 速度较慢

注:① 漂石、卵石和圆砾颗粒均呈一定的磨圆状(圆形或亚圆形);块石、碎石和角砾颗粒均呈棱角状。

② 粉粒可称为粉土粒,粉粒的粒径上限 0.075 mm 相当于 200 号筛的孔径。

③ 黏粒可称为黏土粒,黏粒的粒径上限也有以 0.002 mm 为标准的。