



土力学

主 编 贾彩虹

提供电子课件

- 采用了最新的国家及有关行业规范和规程
- 大量的工程实例和计算题，强调土力学基本原理的应用，培养分析与处理具体工程问题的能力



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国本科院校土木建筑类创新型应用人才培养规划教材

土 力 学

主 编 贾彩虹

副主编 孟云梅 曹 云



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书共分为 11 章, 主要内容包括绪论、土的组成、土的物理性质及分类、土中应力、土中水的运动规律、土的压缩性、地基沉降、土的抗剪强度、土压力、地基承载力、土坡稳定分析和土在动荷载作用下的特性。旨在通过工程实例, 强调土力学基本原理的应用, 培养学生分析与处理具体工程问题的能力。

本书内容简明扼要, 重点突出, 通俗易懂, 理论联系实际。本书可作为高等院校土木工程专业及相近专业土力学课程的教材或教学参考书, 也可供土建类研究人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

土力学/贾彩虹主编. —北京: 北京大学出版社, 2013. 7

(21 世纪全国本科院校土木建筑类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-22743-5

I. ①土… II. ①贾… 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 143020 号

书 名: 土力学

著作责任者: 贾彩虹 主编

策 划 编 辑: 卢 东 王红樱

责 任 编 辑: 王红樱

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-22743-5/TU·0337

出 版 发 行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> 新浪官方微博: @北京大学出版社

电 子 信 箱: pup_6@163.com

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

印 刷 者: 北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19 印张 440 千字

2013 年 7 月第 1 版 2013 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 38.00 元

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

本书是根据全国高等学校土木工程专业指导委员会对土木工程专业的培养要求和目标,并结合培养创新型应用本科人才的特点和需要编写的。

随着我国经济、社会的快速发展,土木工程的大量实施,社会对高校相关专业学生的应用能力和实践能力越来越看重,并提出了较高的要求。为此,高等教育已逐步由培养研究型人才向培养应用型人才和复合型人才转变,以适应经济和社会发展的需要。

土力学是高等学校土木工程专业必修的一门课程。本书系统地介绍了土力学的基本原理和分析计算方法,采用了国家及有关行业的最新规范和规程,以学生就业所需的专业知识和操作技能为着眼点,着重讲解创新型应用人才培养所需的内容,突出实用性和可操作性。

土力学是一门理论性和实践性都很强的课程。本书充分强调理论联系实际,用较简洁易懂的文字结合图片和实例讲解知识点,并遵循课程教学规律,通过关联知识的系统编排由浅入深、循序渐进引领学生尽快进入专业领域。通过每章节设定的知识目标,并辅以思考题和练习题,让学生能够对本书的基本概念、原理、方法和综合应用有一个更深入的理解,从而使学生对本课程的学习成果得到巩固和加强。书后还给出了必要的参考文献,便于教师备课时参考,也可为希望深入学习的学生提供方便。

本书由南京工程学院教师编写,具体分工如下:绪论、第7章、第8章、第9章由曹云老师编写;第1章、第2章、第3章由孟云梅老师编写;第4章、第5章、第6章、第10章、第11章由贾彩虹老师编写。全书由贾彩虹老师统稿。

由于编者水平有限,难免有欠妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2013年5月

目 录

第 0 章 绪论 1

本章小结 5

习题 5

第 1 章 土的组成 6

1.1 概述 7

1.2 土中固体颗粒 9

1.3 土中水和土中气 14

1.4 黏土颗粒与水的相互作用 16

1.5 土的结构和构造 21

本章小结 23

习题 23

第 2 章 土的物理性质及分类 25

2.1 概述 26

2.2 土的三相比例指标 26

2.3 黏性土的物理特征 32

2.4 无黏性土的密实度 36

2.5 土的分类 38

2.6 土的压实机理及工程控制 44

本章小结 49

习题 50

第 3 章 土中应力 52

3.1 概述 53

3.2 土中自重应力 54

3.3 基底压力 57

3.4 地基附加应力 61

本章小结 80

习题 80

第 4 章 土中水的运动规律 82

4.1 概述 83

4.2 土的毛细性 85

4.3 土的冻胀性 86

4.4 土的渗透性 88

4.5 流网及其应用 95

4.6 渗流力与渗透破坏 98

4.7 有效应力原理 103

本章小结 107

习题 107

第 5 章 土的压缩性 109

5.1 概述 110

5.2 室内压缩试验及相关指标 110

5.3 载荷试验及相关指标 120

本章小结 124

习题 124

第 6 章 地基沉降 127

6.1 概述 128

6.2 弹性理论法和现场试验法 131

6.3 工程实用法 136

6.4 沉降计算方法的讨论 152

6.5 饱和黏性土沉降与时间的关系 153

本章小结 165

习题 166

第 7 章 土的抗剪强度 169

7.1 概述 170

7.2 土的抗剪强度理论 171

7.3 土的抗剪强度试验 175

7.4 饱和黏性土的抗剪强度 183

7.5 应力路径在强度问题中的应用 189

7.6 无黏性土的抗剪强度 191

本章小结 192

习题 193

第 8 章 土压力	195	第 10 章 土坡稳定分析	246
8.1 概述	196	10.1 概述	247
8.2 挡土墙侧的土压力	197	10.2 无黏性土坡的稳定性	249
8.3 朗肯土压力理论	199	10.3 黏性土坡的稳定性	249
8.4 库仑土压力理论	206	10.4 条分法土坡稳定分析	254
8.5 土压力计算的进一步讨论	217	10.5 土坡稳定性问题的讨论	264
本章小结	219	本章小结	268
习题	219	习题	268
第 9 章 地基承载力	222	第 11 章 土在动荷载作用下的 特性	271
9.1 概述	223	11.1 土的动力变形特性	272
9.2 浅基础的地基破坏模式	223	11.2 土的压实性	277
9.3 地基临界荷载	225	11.3 土的振动液化	283
9.4 地基极限承载力	230	本章小结	290
9.5 地基容许承载力和地基承载力 特征值	241	习题	290
本章小结	244	参考文献	292
习题	244		

第0章

绪论

1. 土力学的研究内容

土是地球上最丰富的资源。土的成因多,用途多。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?这都是土力学要回答的问题。土力学是研究土体的一门力学,它是研究土体的应力、变形、强度、渗流及长期稳定性的一门学科。广义的土力学又包括土的生成、组成、物理化学性质及分类在内的土质学。土力学也是一门实用的学科,它是土木工程的一个分支,主要研究土的工程性质,解决工程问题。

在自然界中,地壳表层分布有岩石圈(广义的岩石包括基岩及其覆盖土)、水圈和大气圈。岩石是一种或多种矿物的集合体,其工程性质在很大程度上取决于它的矿物成分,而土是岩石风化的产物。土是由岩石经历物理、化学、生物风化作用及剥蚀、搬运、沉积作用等交错复杂的自然环境中所生成的各类沉积物。因此,土的类型及其物理、力学性状是千差万别的,但在同一地质年代和相似沉积条件下,又有性状相似的特点。强风化岩石的性状接近土体,也属于土质学与土力学的研究范畴。

土中固体颗粒是岩石风化后的碎屑物质,简称土粒。土粒集合体构成土的骨架,土骨架的孔隙中存在液态水和气体。因此,土是由土粒(固相)、土中水(液相)和土中气(气相)所组成的三相物质;当土中孔隙被水充满时,则是由土粒和土中水组成的二相体。土体具有与一般连续固体材料(如钢、木、混凝土及砌体等建筑材料)不同的孔隙特性,它不是刚性的多孔介质,而是大变形的孔隙性物质。在孔隙中水的流动显示土的渗透性(透水性);土孔隙体积的变化显示土的压缩性、胀缩性;在孔隙中土粒的错位显示土内摩擦和黏聚的抗剪强度特性。土的密度、孔隙率、含水量是影响土的力学性质的重要因素。土粒大小悬殊甚大,有大于60mm粒径的巨粒粒组,有小于0.075mm粒径的细粒粒组,介于0.075~60mm粒径的为粗粒粒组。

工程用土总的分为一般土和特殊土。广泛分布的一般土又可分为无机土和有机土。原始沉积的无机土大致上可分为碎石类土、砂类土、粉性土和黏性土四大类。当土中巨粒、粗粒粒组的含量超过全重50%时属于碎石类土或砂类土,反之,属于粉性土或黏性土。碎石类土和砂类土总称为无黏性土,其一般特征是透水性大,无黏性;黏性土的透水性小,具有可塑性、湿陷性、胀缩性和冻胀性等;而粉性土兼有砂类土的可液化性和黏性土的可塑性等。特殊土有遇水沉陷的湿陷性土(如常见的湿陷性黄土)、湿胀干缩的胀缩性土(习称膨胀土)、冻胀性土(习称冻土)、红黏土、软土、填土、混合土、盐渍土、污染土、风化岩与残积土等。

综上所述,土的种类繁多,工程性质十分复杂。不同地质年代、不同成因、不同地区乃至不同位置土的性质存在差异,有些甚至差异很大。土还会因环境的变化而发生性质的变化,致使土体的应力变形和稳定因素发生变化。例如,地下水位较大幅度下降,会使土中的应力状态发生变化而使地基产生新的附加变形,发生大面积地面沉降和不均匀沉降,

从而影响建筑物的正常使用甚至破坏；再如，基坑开挖，会使土体及邻近建筑物产生应力变形，对稳定产生影响；土中水的渗流会对基坑、边坡稳定产生影响等。

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点建造工程，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，可能遇到各种地基类型和土性复杂的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：一是作为房屋、厂房、码头、路桥等各种类型建筑物的地基，即地基承载角色；二是作为土石坝、尾矿坝、路堤等填筑材料或其他应用的工程材料，即材料角色；三是作为各类工程设施的环境和人们生产生活的环境，例如市政工程、房屋地下室、地铁、基坑等以土体为其环境，工业与生活固体废弃物填埋(堆积)场、尾矿库是人们生产生活的环境，公路、铁路、厂房、住宅区等旁侧的山坡、乃至堰塞湖等，即工程环境角色。

各类工程的建设和地质灾害(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。尽管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，但是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、土体变形和土体渗流。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，土体压缩和固结理论，土体渗流理论。任何工程都要考虑三类基本课题，只不过针对不同土体和工程，它们的侧重点或主要矛盾方面可能不同，但它们通常是相互关联、相互影响的，应当将它们视作整体系统。围绕三个基本课题和基本理论，土力学教材内容实际还包括：土的生成和组成，土的物理性质，土体的应力计算，地基沉降及沉降与时间关系，土体稳定和极限平衡原理的初步应用等。

2. 土力学的发展沿革

18世纪60年代的欧洲工业革命和19世纪中叶的第二次工业革命，推动了社会生产力的发展，出现了水库、铁路和码头等现代工程，提出了许多有待解决的岩土工程问题，如地基承载力、边坡稳定、支挡结构的稳定性等问题；同时施工机械的出现，也为现代岩土工程的发展提供了物质条件；工程中出现事故和难题促使人们进行土力学理论探索和岩土工程的技术创新，开始出现土力学的许多经典理论，这个过程延续了大约160年，为20世纪太沙基土力学体系的形成准备了条件。

有关土力学的第一个理论是1773年由法国科学家库仑(C. A. Coulomb)建立并后来由摩尔(O. Mohr)发展了的土的Mohr-Coulomb强度理论，它为土压力、地基承载力和土坡稳定分析奠定了基础。1776年库仑发表了建立在滑动土楔平衡条件分析基础上的土压力理论。1846年，柯林(A. Collin)用曲线的滑裂面对土坡稳定进行了系统研究，发表了斜坡稳定性的理论。1856年，法国工程师达西(H. Darcy)通过室内渗透实验研究，建立了有

空介质中水的渗透理论,即著名的达西定律。1857年英国学者朗肯(W. J. M. Rankine)提出了建立在土体的极限平衡条件分析基础上的土压力理论,它与库仑理论被后人并称为古典土压力理论,至今仍具有重要的理论价值和一定的实用价值。1869年俄国学者卡尔洛维奇(Карлович)出版了世界上第一本《地基与基础》教程。1885年法国学者布辛奈斯克(J. V. Boussinesq)和1892年弗拉曼(W. Flamant)分别提出了均匀的、各向同性的半无限体表面在竖直集中力和线荷载作用下的位移和应力分布理论,迄今仍为计算地基中应力的主要方法。1889年俄国学者库迪尤莫夫(КУДИУМОВ)首次应用模型试验研究地基破坏基础下沉时地基内土粒位移的情况。20世纪初,土力学继续取得进展,1920年普朗特(L. Prandtl)根据塑性平衡的原理,导出了著名的极限承载力公式。这些早期的著名理论奠定了土力学的基础。

20世纪初,岩土力学的理论与工程应用取得了较好的发展。当时,瑞典、巴拿马、美国、德国等相继发生重大滑坡坍方事故,表明当时的一些分析方法不能满足处理事故的要求,于是纷纷成立了专门委员会或委托专家进行调查研究。例如,瑞典为处理铁路沿线不断出现的坍方问题,在国家铁路委员会内设立岩土委员会;巴拿马运河为处理可能堵塞运河的一段河道边坡事故,成立了专门委员会;美国土木工程师协会设立了研究滑坡的特别委员会;德国的基尔运河为处理施工中的滑坡事故设立了调查委员会;德国的克莱(K. Krey)开始对挡土墙和堤坝所受的土压力进行广泛的调查研究。此外,瑞典由于 Stigbetg 码头的破坏,成立了港口特别委员会,对该码头滑动原因进行分析,由此提出了著名的瑞典圆弧滑动法。1920年,瑞典国家铁路委员会的岩土委员会成立了一个岩土实验室,它可能是世界上第一个岩土实验室。

大约在1913年土力学发生转折的时候,也正是太沙基(K. Terzaghi)对土力学进行探索研究并形成飞跃的阶段。1906—1912年间,年轻的太沙基在所从事的结构工程和水电站工程工作中,看到许多地基工程的意外事故,发现当时对于土的力学性质的认识远未能解决实际的工程问题,于是下决心对土的力学性质进行长期的试验研究,在1921—1923年间形成了土力学的有效应力概念和土的固结理论。1925年是土力学发展道路上的里程碑,太沙基出版了他的经典著作《土力学》,此书是用德文发表的,书名为 *Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage*,之后,又在 *Engineering News Record* 期刊上以“土力学原理”为标题发表系列文章,扼要地介绍了他所研究和发现的成果。这些成果终于奠定了他作为土力学创始人的地位,并使他被公认为是土力学和基础工程方面的权威。

20世纪中叶,太沙基的《理论土力学》及太沙基和派克(R. B. Peck)合著的《工程实用土力学》是对土力学的全面总结,使岩土工程技术具有了坚实的理论基础,从感性走向理性并对岩土工程的发展产生了深远的影响。

在此期间,费伦纽斯(W. Fellenius)提出了著名的瑞典圆弧法分析土坡的稳定性,而曾是太沙基最重要助手的卡萨格兰德(A. Casagrande)对土力学也做出了很大的贡献。卡萨格兰德在土的分类、土坡的渗流、抗剪强度、砂土液化等方面的研究成果影响至今,如黏性土分类的塑性图中的“A线”即是以他(Arthur)命名的。卡萨格兰德培养了包括简布(N. Janbu)等著名土力学人才,简布在土的压缩性研究、边坡稳定性等方面为土力学的发展做出了杰出的贡献。

此后,太沙基、斯开普敦(A. W. Skempton)、迈耶霍夫(G. G. Meyerhof)、威锡克(A. S. Vesic)和汉森(B. Hansen)等对地基承载力理论分别进行了修补、补充和发展,提出了各种地基承载力公式;泰勒(D. W. Taylor)和简布发展了土坡稳定性理论;比奥(A. M. Biot)建立了土骨架压缩和渗透耦合的三维固结理论等。这些成就为现代土力学的

发展提供了重要理论依据。

现代土力学的概念最早出现在 20 世纪 50 年代初,当时主要考虑了土体的两个基本特性——压硬性和剪胀性。随着土力学理论的发展和工程实践的不断深入,人们已越来越不满足于将土体视为理想弹性介质或理想刚塑性介质这样简单化的描述。另一方面,现代电子计算技术的蓬勃发展也为采用复杂的计算模型提供了可能,从而为现代土力学的建立创造了客观条件。1963 年,罗斯科(K. H. Roscoe)发表了著名的剑桥模型,提出了第一个可以全面考虑土的压硬性和剪胀性的数学模型,创建了临界状态土力学,他的成就标志着现代土力学的诞生。

3. 土力学课程的特点、学习方法和要求

土力学是土木、水利、交通等专业的一门重要的专业基础课,其主要内容包括土的物理性质及分类、土的渗透理论、土中应力计算、地基沉降计算、地基固结理论、地基承载力计算、土压力计算、土坡稳定分析和土的动力性质等。土力学课程每部分内容既相互独立又相互关联,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。因此,本课程是一门实践性和理论性都比较强的课程,在整个教学计划中,它起着从基础课过渡到专业课的桥梁作用,是专业教学前的一个重要环节。

由于土这种材料的复杂性,许多土力学的计算理论和公式是在做出某些假定条件下建立的,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;当研究土的渗透性和变形时,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。学习中要注意针对不同理论或方法的简化假定条件,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做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。

土力学初学者往往有新名词多、头绪多,分块割裂、连贯性差的感觉,其实不然。土力学课程各章虽然有相对独立性,但全课程内容的关联性和综合性很强,有其完整体系。学习中要突出重点、兼顾全面。要做到融会贯通,学会由此及彼、由表及里,建议采取概念—理论—方法—应用—拓展的学习路径。结合理论学习要进行各种物理力学试验,通过试验培养技能并深化理论学习,掌握计算参数的确定方法与原理,着重基本概念的理解和各知识点的贯通。另外,通过一定量的例题和练习,了解相关的工程地质知识、建筑结构和施工知识及其与后续课程的关系。

本课程的具体内容和学习要求如下。

第 1、2 章土的组成和物理性质及分类主要介绍土的组成、三相比指标换算和利用土工指标进行土的分类。要求掌握土的地质成因;能够应用三相图熟练掌握土的物理性质指标与指标换算;掌握土的工程分类原则和方法。

第 3 章土中水的运动规律主要研究土的渗透特性、渗流分析方法和有效应力原理。要求了解渗流课题研究的目的是和意义,掌握土的层流渗透定律及渗透性指标;熟悉渗透性指标的测定方法及影响因素,渗流时渗水量的计算,渗透破坏与渗流控制问题;了解土中二维渗流及流网的概念和应用;掌握有效应力原理并熟练运用。

第 4 章土中应力主要研究在荷载作用下,土体应力状态的变化及其实用计算方法。要求懂得应力计算的目的、用途,了解半无限空间地基的概念和基本假定;熟练掌握土的自

重应力计算方法和地下水对自重应力分布的影响；掌握地基中附加应力计算的基本解答；熟练掌握空间问题和平面问题的地基附加应力计算；了解地基中附加应力的分布特征。

第5、6章土的压缩性和地基沉降主要介绍压缩性指标的试验方法和地基沉降计算方法。要求掌握土的变形特性、固结特性；通过压缩试验、固结试验，理解土的应力历史；熟练掌握太沙基一维固结理论、有效应力原理及其应用；掌握地基变形及变形与时间的关系；掌握地基沉降计算、固结计算。

第7章土的抗剪强度主要讨论土的极限平衡理论、土的抗剪强度指标的试验方法和工程应用。要求深刻理解极限平衡概念，掌握土的抗剪强度公式与应用；掌握直剪、三轴等获得强度指标的试验方法。理解不同排水条件下砂土和黏性土的剪切性状和强度特征，结合有效应力原理体会参数的合理取值与正确应用。

第8、9、10章土压力、地基承载力和土坡稳定分析主要讲解土的抗剪强度理论的应用。要求分别掌握挡土墙侧土压力计算、地基承载力确定和土坡稳定分析的各种方法，结合有效应力原理弄清强度参数如何取用，初步了解土与结构的相互作用原理。通过这三章的学习，熟悉土压力计算、地基稳定分析和承载力定、土坡稳定分析的各种方法，学会正确运用简化假设解决实际问题，能够引申运用土力学理论原理，将知识系统化。

第11章土在动荷载作用下的特性主要介绍土的压实和振动液化机理及其影响因素，简要介绍周期荷载下土的变形、强度特性以及土的动力特征参数。要求掌握土的压实性及压实性指标；熟悉土的压实度对工程的评定标准、地基液化判别与防治。

本章小结

土力学是研究土体的一门力学，它是研究土体的应力、变形、强度、渗流及长期稳定性的一门学科。土力学是土木工程的一个分支，主要研究土的工程性质，解决工程问题。

土力学的发展历史可以划分为古典土力学和现代土力学两个阶段。古典土力学可以归结为一个原理和两个理论，即有效应力原理，饱和土的固结理论和土体极限平衡理论；现代土力学则以本构模型为基础，逐渐发展非饱和土固结理论和逐渐破坏理论，形成理论土力学、计算土力学、实验土力学和应用土力学四个分支。

土力学的章节内容主要包括土的物理性质及分类、土的渗透理论、土中应力计算、地基沉降计算、地基固结理论、地基承载力计算、土压力计算、土坡稳定分析和土的动力性质等。学习时必须理清头绪，形成体系。应重视室内土工试验和现场原位测试测定土的物理力学性质指标，加深对土力学的学习目的和兴趣。

习 题

简答题

- (1) 简述土力学的研究内容。
- (2) 简述土力学的发展沿革。
- (3) 试述土力学课程的特点和学习要求。

第1章

土的组成

教学目标

本章主要讲述土的物质组成、水土相互作用和土的结构和构造。通过本章学习，达到以下目标：

- (1) 熟练掌握土粒的颗粒级配，了解土粒的矿物成分；
- (2) 掌握土中液态水分类和土中气；
- (3) 了解水土相互作用；
- (4) 掌握土的结构和构造。

教学要求

知识要点	能力要求	相关知识
概述	(1) 掌握物理风化作用的定义 (2) 掌握化学风化作用的定义 (3) 了解土的成因类型	(1) 物理风化 (2) 化学风化 (3) 生物风化 (4) 土的成因类型
土中固体颗粒	(1) 了解土粒粒组的划分方法 (2) 掌握颗粒级配定义、级配分析试验、级配累计曲线 (3) 了解土粒的矿物成分	(1) 土颗粒大小与级配 (2) 土粒的矿物成分
土中水和土中气	(1) 掌握土中液态水的分类 (2) 掌握土中气对土工程性质的影响	(1) 土中水 (2) 土中气
黏土颗粒与水的相互作用	(1) 了解黏土矿物的结晶结构 (2) 掌握高岭石、伊利石、蒙脱石的亲水性比较 (3) 了解黏土颗粒表面带电性 (4) 掌握双电层概念	(1) 黏土矿物的结晶结构与亲水性 (2) 黏土颗粒和水的相互作用
土结构和构造	(1) 掌握土的三种结构 (2) 了解土的构造特征	(1) 土的结构 (2) 土的构造



基本概念

土的固体颗粒、土中水、土中气、双电层、土的结构。



引例

土的物质成分包括有作为土骨架的固态矿物颗粒, 孔隙中的水及气体。因此, 土是由颗粒(固相)、水(液相)和气(气相)所组成的三相体系。各种土的颗粒大小和矿物成分差别很大, 土的三相间的数量比例也不尽相同, 而且土粒与其周围的水又发生了复杂的物理化学作用。所以, 要研究土的性质就必须了解土的三相组成, 以及在天然状态下土的结构和构造等特征。

1.1 概述

在自然界, 土的形成过程是十分复杂的, 是地壳表层的岩石在阳光、大气、水和生物等因素影响下, 经风化、剥蚀、搬运、沉积形成的产物。地壳表层的坚硬岩石, 在长期的风化、剥蚀等外力作用下, 破碎成大小不等的颗粒, 这些颗粒在各种形式的外力作用下, 被搬运到适当的环境里沉积下来, 就形成了土。因此通常说土是岩石风化的产物。

工程中遇到的大多数土都是在第四纪地质时期内形成的。第四纪地质年代又分为更新世和全新世。更新世距今 12000 年~1 百万年, 全新世距今小于 12000 年。

风化作用包括物理风化、化学风化和生物风化, 它们经常是同时进行, 而且是相互加剧发展的。

(1) 物理风化是岩石和土的粗颗粒经受各种气候因素的影响, 如风、霜、雨、雪的侵蚀, 温度、湿度等的变化, 导致不均匀膨胀与收缩, 使岩石产生裂隙, 或者在运动过程中因碰撞和摩擦而破碎, 于是岩体逐渐崩解为碎块和细小颗粒。这种风化作用, 只改变颗粒的大小与形状, 不改变原来的矿物成分。它们的矿物成分仍与原来的母岩相同。

(2) 化学风化是指母岩的表面和碎散的颗粒受环境因素(如水、空气以及溶解在水中的氧气和碳酸气等)的作用而改变其矿物的化学成分, 形成新的矿物, 也称次生矿物。常见的化学风化作用如下。

① 水解作用。指原生矿物被分解, 并与水进行化学成分的交换, 形成新的次生矿物, 如正长石经水解作用后, 形成高岭石。

② 水化作用。土中有些矿物与水接触后发生化学反应, 水按一定的比例加入矿物的组成中, 改变矿物原有的分子结构, 形成新的矿物。例如, 土中的 CaSO_4 (硬石膏) 水化后成为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (含水石膏)。

③ 氧化作用。指土中的矿物与氧结合形成新的矿物, 如黄铁矿氧化后第一阶段成为 FeSO_4 (铁矾), 进一步氧化第二阶段变成 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (硫酸铁), 在氧和水的作用下进一步变成 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (褐铁矿)。

其他还有溶解作用、碳酸化作用等。

(3) 生物风化是指由动物、植物和人类活动对岩体的破坏。例如, 长在岩石裂隙中的树, 因树根伸展而使岩石裂隙扩展开裂; 劈山修路、挖掘隧道、开采矿石等活动形成的土, 其矿物成分没有变化。

在自然界中, 岩石和土在其存在、搬运和沉积的各个过程中都在不断进行风化, 由于

形成条件、搬运方式和沉积环境的不同，自然界的土有不同的成因类型。

根据土的形成条件，常见的成因类型如下。

(1) 残积土(residual soils)。是指岩石经风化后未被搬运而残留于原地的碎屑堆积物，它的基本特征是颗粒表面粗糙、多棱角、无分选、无层理。

(2) 坡积土(slope debris)是指残积土受重力和暂时性流水(雨水、雪水)的作用，搬运到山坡或坡脚处沉积起来的土，坡积颗粒随斜坡自上而下呈现由粗而细的分选性和局部层理。

(3) 洪积土(diluvial soils)是指残积土和坡积土受洪水冲刷、搬运，在山沟出口处或山前平原沉积下来的土，随离山由近及远有一定的分选性，颗粒有一定的磨圆度。

(4) 冲积土(alluvial soils)是指受河流的流水作用搬运到河谷坡降平缓的地带沉积下来的土，这类土经过长距离的搬运，颗粒是有较好的分选性和磨圆度，常具有层理。

(5) 湖积土(marsh deposits)是指在湖泊及沼泽等极为缓慢水流或静水条件下沉积下来的土，或称淤积土，这类土除了含大量细微颗粒外，常伴有生物化学作用所形成的有机物，成为具有特殊性质的淤泥或淤泥质土。

(6) 海积土(marine deposits)是指由河流流水搬运到海洋环境下沉积下来的土。

(7) 风积土(aeolian deposits)是指由风力搬运形成的土，其颗粒磨圆度好，分选性好。我国西北黄土就是典型的风积土。

(8) 冰积土(glacial deposits)是指由冰川或冰水挟带搬运形成的沉积物，其颗粒粗细变化大，土质不均匀。

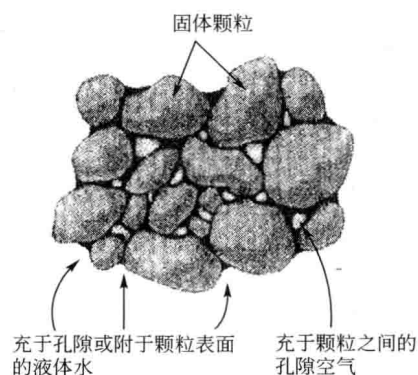


图 1.1 土的组成示意图

(9) 污染土(contaminated soil)是指由于致污物质的侵入，使土的成分、结构和性质发生了显著变异的土，包括工业污染土、尾矿污染土和垃圾填埋场渗滤液污染土等。

土的上述形成过程决定了它具有特殊物理力学性质(图 1.1)。与一般建筑材料相比，它具有以下 3 个基本特性。

(1) 散体性。颗粒之间无黏结或有一定的黏结，存在大量孔隙，可以透水透气。

(2) 多相性。土是由固相(土骨架)、液相(水)和气相(空气)三相体系所组成。相系之间质和量的变化直接影响它的工程性质。

(3) 自然变异性。土是在自然界漫长的地质历史时期演化形成的多矿物组合体，性质复杂，不均匀，且随时间还在不断变化的材料。

由此可见，散体性、多相性和自然变异性决定了土的力学特性非常复杂，其变形特性、强度特性和渗透特性是土力学研究和面对的主要问题。

本章将介绍土中固体颗粒、土中水和土中气、水与土相互影响的原理及土的结构和构造。

1.2 土中固体颗粒

1.2.1 土颗粒大小与级配

1. 土粒大小与粒组

土粒大小称为粒度，通常以粒径(grain diameter)表示。粗大土粒其形状呈块状或粒状，随着搬运或风化程度不同而呈现不同的形状；细小土粒主要呈片状。对于粗粒土，当某土粒刚好通过某直径筛孔时，定义该粗粒土的粒径等于该筛孔孔径。对于细粒土，当土粒在水中沉降的速率与某直径的圆球在相同温度的水中沉降的速率相同时，则视该圆球的直径为土粒的粒径。

在自然界中存在的土，都是由大小不同的土粒组成。土粒的粒径由粗到细逐渐变化时，土的性质也相应地发生变化。通常把工程性质相近的，介于一定尺寸范围的土粒划分为一组，称为粒组(fraction)，并给以常用的名称。广泛采用的粒组有：漂石粒、卵石粒、砾粒、砂砾、粉粒、黏粒和胶粒。划分粒组的分界尺寸称为界限粒径。各个粒组随着分界尺寸的不同，而呈现出一定的质的变化。

目前土的粒组划分办法并不完全一致，各个国家，甚至一个国家中的某个部门的规定也不尽相同。表 1-1 是一种常用的土粒粒组的划分方法。

表 1-1 土粒粒组的划分 [《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007)]

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		$200\sim60$	
粗粒	圆砾或角砾颗粒	粗	$60\sim20$	透水性大，无黏性，毛细水上升高度不超过粒径大小
		中	$20\sim5$	
		细	$5\sim2$	
	砂砾	粗	$2\sim0.5$	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	$0.5\sim0.25$	
		细	$0.25\sim0.075$	
细粒	粉粒		$0.075\sim0.005$	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，速度较快，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；毛细水上升高度较大，但速度较慢

注：① 漂石、卵石和圆砾颗粒均呈一定的磨圆形状(圆形或亚圆形)；块石、碎石和角砾颗粒都带有棱角。

② 粉粒或称粉土粒，粉粒的粒径上限 0.075mm 相当于 200 号标准筛的孔径。

③ 黏粒或称黏土粒，黏粒的粒径上限也有采用 0.002mm 为准，例如公路土工试验规程 (JTG E40—2007)。

土中某粒组的含量定义为一定质量的干土中，该粒组的土粒质量占干土总质量的百分数。土中各个粒组的相对含量称为土的级配(gradation)。土的级配好坏将直接影响到土的工程性质。级配良好的土，压实时能达到较高的密实度，孔隙率低，因而，压实后的土透水性小，强度高，压缩性低。反之，级配不良的土，压实后的密度小，强度低，透水性差。

2. 颗粒级配分析试验

测定土中各粒组颗粒质量所占该土总质量的百分数，以确定土的粒径分布范围的试验称为土的颗粒级配分析试验(又称为粒度成分分析试验)。该试验的目的是了解土的颗粒级配，为土的工程分类、判别土的工程性质和建材选料等用途提供数据。常用的测定方法有筛分法(sieve analysis method)和沉降分析法(settlement analysis method)。前者适用于粒径大于 0.075mm 的巨粒组和粗粒组，后者适用于粒径小于 0.075mm 的细粒组。当土内兼含大于和小于 0.075mm 的土粒时，两类分析方法可联合使用。

筛分法试验是将风干、分散的代表性土样通过一套自上而下孔径由大到小的标准筛



图 1.2 标准筛

(例如 20mm、2mm、0.5mm、0.1mm、0.075mm)，称出留在各个筛子上的干土重，即可求得各个粒组的相对含量。通过计算可得到小于某一筛孔直径土粒的累计质量及累计百分含量。

【例题 1.1】 从干砂样中称取质量 1000g 的试样，放入如图 1.2 所示的标准筛，经充分振摇后，称得各级筛上的土粒质量，见表 1-2 中的第二行，试求土内各粒组的土粒含量。

【解】 留在孔径 2mm 筛上的土粒质量为 100g，则小于 2mm 的土粒质量为 1000g－

100g=900g，小于 2mm 的土粒含量为 900/1000=90%。同样可算得小于其他粒径的土粒含量，见表 1-2 中的第五行。

表 1-2 筛分试验结果

筛孔径(mm)	2.0	1.0	0.5	0.25	0.15	0.075	底盘
各级筛上的土粒质量(g)	100	100	250	300	100	50	100
小于各级筛孔径的土粒含量(%)	90	80	55	25	15	10	
粒组(mm)	>2	2~1	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.15	0.15~0.075	<0.075
各粒组的土粒含量(%)	10	10	25	30	10	5	10

由小于 2mm 和 1mm 的土粒含量分别为 90%和 80%，可得到 2mm 和 1mm 粒组的土粒含量为 10%。同样可算得其他粒组的土粒含量，见表 1-2。

沉降分析法的理论基础是土粒在水(或均匀悬液)中的沉降原理如图 1.3 所示。当土样被分散于水中后，土粒下沉时的速度与土粒形状、粒径、密度(质量)及水的黏滞度(vis-

cosity)有关。当土粒简化为理想球体时,土粒的沉降速度可以用 G. G. 斯托克斯(Stokes, 1845)定律来确定,细小的圆球在静水中将均匀下沉,下沉速率与圆球的直径平方成正比。

$$v = \frac{\rho_s - \rho_w}{18\eta} g d^2 \quad (1-1)$$

式中 v ——土粒在水中的沉降速度(cm/s);

g ——重力加速度(981cm/s^2);

ρ_s ——土粒的密度(g/cm^3);

d ——土粒的直径(cm);

ρ_w ——水的密度(g/cm^3);

η ——水的黏滞度($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)。

进一步考虑将速度 v 和土粒密度 ρ_s 分别表

示为

$$v = \frac{\text{距离}}{\text{时间}} = \frac{L}{t} \text{ 和 } \rho_s = d_s \rho_w \approx d_s \rho_w \text{ [见 2.2 节式(2-1)]}$$

代入式(1-1),可变换为

$$d = \sqrt{\frac{18\eta}{(d_s - 1)\rho_w g}} \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (1-2)$$

水的 η 值由温度确定,斯托克斯定律假定:①颗粒是球形的;②颗粒周围的水流是线流;③颗粒大小要比分子大得多。理论公式求得的粒径并不是实际的土粒尺寸,而是与实际土粒在液体中具有相同沉降速度的理想球体的直径,称为水力当量直径。此时,土粒沉降距离 L 处的悬液密度,可采用密度计法(即比重计法)或移液管法测得,并可由此计算出小于该粒径 d 的累计百分含量。采用不同的测试时间 t ,即可测得细颗粒各粒组的相对含量。

3. 土的颗粒级配累计曲线

根据颗粒大小分析试验结果,常采用颗粒级配累计曲线表示土的颗粒级配。该法是比较全面和通用的一种图解法,其特点是可简单获得定量指标,特别适用于几种土级配好与差的相对比较。土的颗粒级配累计曲线的横坐标为粒径,由于土粒粒径在很大范围分布,因此采用对数坐标表示;纵坐标为小于(或大于)某粒径的土粒累计质量百分比(图 1.4)。从曲线的形态上,可以大致判断土粒均匀程度或级配是否良好。如曲线平缓,则表示粒径大小相差悬殊,土粒不均匀,级配良好;反之,则表示粒径大小相差不多,土粒较均匀,级配不良。

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 反映土颗粒级配的不均匀程度。两者定义的表达式如下:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1-3)$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}} \quad (1-4)$$

式中 d_{60} 、 d_{30} 、 d_{10} ——相当于小于某粒径土质量累计百分含量为 60%、30% 及 10% 对应的粒径,分别称为限制粒径、中值粒径和有效粒径。

对一种土显然有 $d_{60} > d_{30} > d_{10}$ 的关系存在。不均匀系数 C_u 反映大小不同粒组的分布

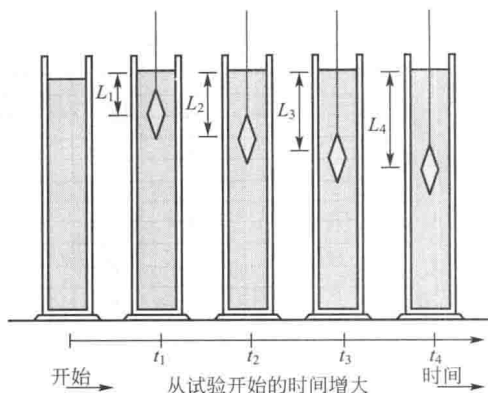


图 1.3 土粒在悬液中的沉降