

高等院校 土木工程专业教材

GAODENGYUANXIAO

TUMUGONGCHENGZHUANYEJIAOCAI

土质学与土力学 第二版

TUZHIXUE YU TULIXUE

陈国兴 樊良本 陈 甦 等 编著 宰金珉 主审

中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

知识产权出版社

www.cnipr.com



高等院校 土木工程专业教材

TUZHIXUE YU TULIXUE

土质学与土力学

第二版

陈国兴 樊良本 陈 甦 等 编著
宰金珉 主审

中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn
知识产权出版社
www.cnipr.com



江苏省高等学校精品教材

内容提要

本教材系根据全国土木工程专业教学指导委员会对土木工程专业培养规格的要求和目标所规定的《土质学与土力学》教学要求而编写的,充分体现了本学科的理论性、系统性、计算性、实验性及应用性的特点。内容包括:土的物质组成及土水相互作用、土的物理性质及工程分类、土的渗透性与土中渗流、地基中的应力计算、地基变形计算、土的抗剪强度、土压力理论、地基承载力理论、土坡稳定性分析和土的动力特性。

本书可作为高等院校土木工程专业教材,也可作为勘察技术与工程、地质工程、工程管理、交通工程、水文与水资源工程、水利水电工程等专业的教材或教学参考书;同时,可作为土建类研究生的教学参考书,并可供土建类工程技术人员阅读参考。

责任编辑:阳 森 张宝林 E-mail: yangsanshui@vip.sina.com; z_baolin@263.net

文字编辑:董拯民

图书在版编目(CIP)数据

土质学与土力学/陈国兴等编著. —2版. —北京:

中国水利水电出版社:知识产权出版社, 2006

高等院校土木工程专业教材

ISBN 7-5084-3738-1

I. 土... II. 陈... III. ①土质学—高等学校—教材②土力学—高等学校—教材 IV. ①P642.1 ②TU43

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第035789号

高等院校土木工程专业教材

土质学与土力学 第二版

陈国兴 樊良本 陈 魁 等 编著

宰金琨 主审

中国水利水电出版社 出版 发行 (北京市西城区三里河路6号; 电话: 010-68331835 68357319)
知识产权出版社 (北京市海淀区马甸南村1号; 电话、传真: 010-82000893)

全国各地新华书店和相关出版物销售网点经销

北京市兴怀印刷厂印刷

787mm×1092mm 16开 17.75印张 421千字

2002年1月第1版 2006年4月第2版 2006年4月第2次印刷

印数: 5701—12700册

定价: 32.00元

ISBN 7-5084-3738-1

版权所有 侵权必究

如有印装质量问题,可寄中国水利水电出版社营销中心调换

(邮政编码100044, 电子邮件: sales@waterpub.com.cn)

第二版前言

本书第一版出版于2002年1月,其编写的宗旨是适应国家教育部本科专业目录调整后的土木工程专业的培养目标和教学要求。为适应这一形势的发展,南京工业大学、浙江工业大学和苏州科技学院等院校从事《土力学》教学的教师编写了《土质学与土力学》教材。《土质学与土力学》第一版出版后,不少兄弟院校采用该书作为教材或教学参考书,建议本教材进行修订再版,并提出了许多宝贵的修改意见;同时,本教材于2005年被遴选为首批江苏省高等学校精品教材,给编者以很大的鼓舞。根据《关于启动江苏省高等学校精品教材建设工作的通知》的精神,本教材的编写人员为了推进高等学校精品教材建设工作,满足编写单位和兄弟院校的教学需要,决定对本教材进行修订,出版《土质学与土力学》第二版。

本教材第二版仍遵循第一版“内容充实、注重实用、兼顾不同行业、便于自学”的原则,既重视基本理论和概念的阐述,也注重工程应用和学科前沿知识的教学;努力深化教学改革,创新教育教学理念,充分反映国内外课程改革和学科建设的最新成果,注重素质教育、创新能力与实践能力的培养;瞄准国际水平,更新教学内容,确保教材的领先地位,力求使本教材能较好地满足各高等院校的教学要求。

本版教材是在继承第一版的编写原则和基本格局的基础上编写成的,原教材体系保持不变,所使用的标准、规范采用国家颁布的最新版。与第一版教材相比,本版对第3、4章、第9~11章进行了较大幅度的修改,对其他几章也进行了不同程度的修改。全书仍为11章,第1章为绪言;第2章为土的物质组成及土水相互作用;第3章为土的物理性质及工程分类;第4章为土的渗透性与土中渗流;第5章为地基中的应力计算;第6章为地基变形计算;第7章为土的抗剪强度;第8章为土压力理论;第9章为地基承载力理论;第10章为土坡稳定性分析;第11章为土的动力特性。

本书由南京工业大学陈国兴教授主编,南京工业大学宰金珉教授主审。全书由陈国兴教授制定编写大纲,并撰写第3、6、9、11章;浙江工业大学樊良本教授撰写第1、8章;苏州科技学院陈甦教授撰写第7章;南京工业大学韩爱民副教授撰写第2章,梅国雄教授撰写第4章;王旭东教授撰写第5章,南京工业大学蒋刚副教授、陈国兴教授共同撰写第10章。最后,由陈国兴教授

负责全书的修改和定稿工作。

感谢董金梅博士为本书协助统稿与校对所付出的辛勤劳动。

鉴于不少兄弟院校采用本教材，今后在使用过程中，希望各位专家和同仁赐教，以便我们继续修改和提高。

陈国兴

2006年2月于南京

第一版前言

国家教育部于1998年7月颁布了新的本科专业目录,1999年全国高等学校已按新的专业目录招生。调整后的土木工程专业的知识面大大拓宽,相应的专业培养目标和业务要求有了很大变化,涵盖了原来的建筑工程、岩土工程、地下结构工程、交通土建工程、矿井建设和城镇建设等相近的若干专业或专业方向,现有的《土力学》和《基础工程》教材已经不能适应新专业的培养目标和教学要求。因此,编写一本新土木工程专业的土力学和基础工程教材已成为当务之急。为适应这一形势的发展,南京工业大学、浙江工业大学和苏州城建环保学院等院校从事《土力学》和《基础工程》教学的教师,经过充分协商和研究,决定编写一套《土质学与土力学》和《基础工程》教材。本教材的编写是按照全国土木工程专业教学指导委员会对土木工程专业的培养规格要求和目标进行的,是该套姊妹篇教材中的第一册。

根据我们多年的教学经验编写中遵循“内容充实、注重实用、兼顾不同行业、便于自学”的原则,各编写人员积极收集资料,广泛征求意见,吸收国内外比较成熟的知识,既重视基本理论和概念的阐述,也注重工程应用和学科前沿知识的教学,力求使本教材能较好地满足各高等院校的教学要求。全书共分11章,第1章为绪言,第2章为土的物质组成及土水相互作用,第3章为土的物理性质及工程分类,第4章为土的渗透性与土中渗流,第5章为地基中的应力计算,第6章为地基变形计算,第7章为土的抗剪强度,第8章为土压力理论,第9章为地基承载力理论,第10章为土坡稳定性分析,第11章为土的基本动力特性。

本书由南京工业大学陈国兴教授主编,南京工业大学辛金珉教授主审。全书由陈国兴教授制定编写大纲,并撰写第3、6、11章,南京工业大学陈国兴教授、蒋刚博士共同撰写第10章;浙江工业大学樊良本教授(副主编)撰写第1、8章,陈禹副教授撰写第4章;苏州城建环保学院陈甦副教授撰写第7章;南京工业大学韩爱民副教授撰写第2章,王旭东副教授撰写第5章,朱定华博士撰写第9章。最后,由陈国兴教授负责全书的修改和定稿工作。

感谢蒋刚博士和硕士研究生王志华、刘雪珠、张菁莉同学为本书统稿、绘

图与校对所付出的辛勤劳动。

本书的讲义稿已在南京工业大学（原南京建筑工程学院部分）试用两届，但由于业务水平所限，书中仍然难免会有错误和不足之处，敬请读者批评指正。

陈国兴

2001年8月于南京

目 录

第二版前言

第一版前言

第1章 绪言	1
1.1 土质学与土力学	1
1.2 土及其特点	1
1.3 土力学的发展和展望	2
1.4 土力学的特点和研究方法	4
1.5 本课程的学习要求	5
第2章 土的物质组成及土水相互作用	6
2.1 概述	6
2.2 土的粒度成分	6
2.3 土的矿物成分和化学成分	9
2.4 土中的水和气体	12
2.5 土水相互作用	15
2.6 土的结构与构造	21
第3章 土的物理性质及工程分类	28
3.1 概述	28
3.2 土的三相比例指标	28
3.3 无黏性土的密实度	34
3.4 黏性土的物理特征	35
3.5 黏性土的胀缩性	38
3.6 土的工程分类	42
3.7 区域性土的主要特征	52
第4章 土的渗透性与土中渗流	61
4.1 概述	61
4.2 达西定律	62
4.3 渗透系数的测定	65
4.4 渗透力和渗透变形	72
4.5 二维渗流和流网	76
第5章 地基中的应力计算	81
5.1 概述	81
5.2 土中自重应力	81
5.3 基底压力和基底附加压力	84
5.4 地基附加应力	86
5.5 影响土中附加应力分布的因素	106

第 6 章 地基变形计算	109
6.1 概述	109
6.2 室内压缩试验及压缩性指标	109
6.3 常用的地基沉降计算方法	113
6.4 应力历史对地基沉降的影响	126
6.5 关于地基最终沉降量计算方法的讨论	133
6.6 饱和土体渗流固结理论	134
第 7 章 土的抗剪强度	153
7.1 概述	153
7.2 土的抗剪强度理论	153
7.3 土的极限平衡条件	155
7.4 抗剪强度指标的测定方法	157
7.5 饱和黏性土的抗剪强度	165
7.6 无黏性土的抗剪强度	167
7.7 影响抗剪强度的主要因素	168
第 8 章 土压力理论	174
8.1 概述	174
8.2 挡土墙土压力	175
8.3 静止土压力	176
8.4 朗肯土压力理论	177
8.5 库仑土压力理论	182
8.6 特殊情况下的土压力计算	188
8.7 埋管土压力	199
第 9 章 地基承载力理论	203
9.1 概述	203
9.2 地基的破坏形式	204
9.3 地基的临塑荷载和临界荷载	205
9.4 地基的极限承载力	209
9.5 地基极限承载力的讨论	223
第 10 章 土坡稳定性分析	226
10.1 概述	226
10.2 无黏性土土坡的稳定性分析	227
10.3 黏性土土坡的稳定性分析	227
10.4 土坡稳定性分析的若干问题	237
第 11 章 土的基本动力特性	244
11.1 概述	244
11.2 土的压实性	247
11.3 土的动强度和变形特性	250
11.4 砂性土液化机理	258
11.5 砂性土地基液化判别	263
11.6 砂性土地基液化程度等级划分	274
参考文献	276

第 1 章 绪 言

1.1 土质学与土力学

土木工程中遇到的各种与土有关的问题,归纳起来可以分为三类,即作为建筑物(房屋、桥梁、道路和水工结构等)地基的土,作为建筑材料(路基材料和土坝材料)的土,以及作为建筑物周围介质或环境(隧道、挡土墙、地下建筑和滑坡问题等)的土。无论哪一类情况,工程技术人员最关心的都是土的力学性质,即在静、动荷载作用下土的强度和变形特性,以及这些特性随时间过程、应力历史和环境条件改变而变化的规律。土力学就是以力学为基础,研究土的渗流、变形和强度特性,并据此进行土体的变形和稳定计算的学科。在与生产实践的结合过程中,又产生了土力学的不同的分支,例如冻土力学、海洋土力学、环境土力学、土动力学和月球土力学等,对区域性土和特殊类土(例如湿陷性黄土、红黏土、胀缩土、软土、盐碱土、污染土和工业废料等)的研究也不断深入。由于土是一种很特殊的材料,在学习土力学时特别要注意区别土与其他材料的特性。

土质学是地质科学的一个分科,研究土的物质组成、物理-化学性质和物理-力学性质,以及它们之间的相互关系,并进一步探讨在自然或人为的因素下,土的成分与性质的变化趋势以及如何利用这种趋势。土质学在发展过程中形成了普通土质学、区域土质学和土质改良学三个分支,其中普通土质学研究广泛分布的各种典型土类的成因、成分、结构、构造及其工程性质的形成规律,是整个土质学的理论基础。本教材主要介绍普通土质学的内容。

土质学与土力学是关系密切的两门学科,都是学习基础工程、地基处理等专业课程的理论基础,是为地基基础工程的正确实践服务的。准确划分土类、评价与改善土的性状是两门学科的共同任务。土木工程的发展对两个学科不断提出新的要求,并促使理论的发展和完善,研究方法和手段更精确先进,而土木工程实践又是检验这些理论方法正确性的唯一标准。在发展过程中两个学科相互渗透、相互促进,土质学的研究成果为土力学研究土的物理力学性质提供了解释和指导,土力学研究中的现代测试技术和方法也推动了土质学的发展。

1.2 土 及其 特点

“土”一般是指岩石经风化、剥蚀、搬运和沉积过程形成的松散堆积物,在地质年代上形成于第四纪,故又称为“第四纪沉积物”。广义的土也包括岩石在内。与其他材料相比,土具有以下特点。

一、土是自然历史的产物

首先,土不是人工制造的,不像钢材、砖和混凝土等材料那样可以按需要制造和使用,只能适应它的特性并合理加以利用。例如,选择合适的地基持力层和基础形式,增加

上部结构对土变形的适应性,以及设计合理的挡土结构等。在某些情况下可以对土进行改造(地基处理),目的是更好地加以利用。但地基处理方法必须适合土的特性,并符合土力学的基本原理,其应用也有一定的范围。

其次,土的性质与其自然历史(包括起源和形成后的变化过程)有很大关系。母岩及其风化过程,搬运碎屑的介质与途径,沉积的环境及其变化,以及沉积物受到的压力、温度、干燥、风化、淋滤、胶结和生物活动等作用,都会影响土的性质。不同的母岩风化后形成的土不同,静水中沉积的土与流水中沉积的土不同,干燥寒冷环境中形成的土与温暖潮湿环境中形成的土不同,沉积年代久远的和新近沉积的土不同,以及超固结土与正常固结土不同等。

为了更好地利用土,必须对土的自然历史以及它对土的特性的影响有更深入的了解和研究。

二、土的分散性

土不像钢材和混凝土那样是较为“标准”的连续介质,而是相系组合体。一般认为土由三相物质(土粒、水和气)组成,饱和土则是两相(土粒和水)。松散的土颗粒堆积成土骨架,水和气体充塞在骨架间的孔隙中。三相物质同时存在,其成分、相对含量和相互作用决定了土的物理力学性质。

土的分散性使土具有很高的压缩性、土粒间的相对移动性和很大的渗透性,直接影响土的强度和变形特征。例如,土的剪切破坏主要是土颗粒间联系的破坏,土的变形主要是土孔隙体积的变化,土中水是在土的孔隙中流动的,以及对土的强度和变形有极大影响等,这是与连续介质完全不同的。

在土力学中也常常利用连续体力学的规律,例如,土中应力的计算,渗流方程,以及本构关系等,但在具体应用中应结合土的分散特性,还要用专门的土工试验技术研究土的物理化学特性,以及强度、变形和渗透等特殊的力学性能。

1.3 土力学的发展和展望

土力学是一门古老而又年轻的科学。中外许多历史悠久的著名建筑、桥梁和水利工程都不自觉地应用土力学原理解决了地基承载力、变形和稳定等问题,使其千年不坏,流传至今。而18世纪欧洲工业革命开启了土力学的理论研究。太沙基(Terzaghi)认为,库仑(Coulomb, 1776年)提出的挡土墙土压力理论是土力学的开始。19世纪,欧洲出现了不少著名的研究成果,例如朗肯(Rankine, 1857年)借助土的极限平衡分析建立的朗肯土压力理论,达西(Darcy, 1856年)根据对两种均匀砂土渗透试验结果提出的渗透定律,布辛奈斯克(Boussinesq, 1885年)提出的表面竖向集中力在弹性半无限体内部应力和变形的理论解答,如今仍在土力学有关课题中广泛使用。20世纪初,出现了一些重大的工程事故,例如,德国的桩基码头大滑坡、瑞典的铁路坍方和美国的地基承载力问题等,对地基问题提出了新的要求,从而推动了土力学的发展。普朗德尔(Prandtl, 1920年)发表了地基滑动面的数学公式,彼德森(Peterson, 1915年)提出以后又由费伦纽斯(Fellenius, 1936年)、泰勒(Taylor, 1937年)等发展了的计算边坡稳定性的圆弧滑动法等,就是这一时期的重要成果。土力学作为一门独立的学科,一般认为从太沙基1925年出版

的第一本《土力学》著作开始。太沙基把当时零散的有关定律、原理和理论等按土的特性加以系统化,从而形成一门独立的学科。他指出,土具有黏性、弹性和渗透性,按物理性质把土分成黏土和砂土,并探讨了它们的强度机理,提出了一维固结理论,建立了有效应力原理。有效应力原理真实地反映了土的力学性质的本质,使土力学确立了自己的特色,成为土力学学科的一个重要指导原理,极大地推动了土力学的发展。

自土力学作为一门独立学科以来,大致可以分为两个发展阶段。第一阶段为20~60年代,称为古典土力学阶段。这一阶段的特点是在不同的课题中分别将土视为线弹性体或刚塑性体,又根据课题需要将土视为连续介质或分散体。这一阶段的土力学研究主要在太沙基理论基础上,形成以有效应力原理、渗透固结理论和极限平衡理论为基础的土力学理论体系,研究土的强度与变形特性,解决地基承载力和变形、挡土墙土压力和土坡稳定等与工程密切相关的土力学课题。这一阶段的重要成果有关于黏性土抗剪强度、饱和土性状、有效应力法和总应力法、软黏土性状及孔隙压力系数等方面的研究,以及钻探取不扰动土样、室内试验(尤其三轴试验)技术和一些原位测试技术的发展,对弹塑性力学的应用也有了一定认识。第二发展阶段自60年代开始,称为现代土力学阶段。其最重要的特点是把土的应力、应变、强度和稳定等受力变化过程统一用一个本构关系加以研究,改变了古典土力学中把各受力阶段人为割裂开来的情况,从而更符合土的真实性。这一阶段的出现依赖于数学、力学的发展和计算机技术的突飞猛进。较为著名的本构关系有邓肯的非线性弹性模型和剑桥大学的弹塑性模型。国内学者在这方面也做了不少工作,例如南京水利科学研究所提出的弹塑性模型。由于本构关系对计算参数的种类和精度要求更高,因此也推动了测试和取样技术的发展。虽然这种方法目前尚未广泛应用于工程中,也无法替代简化的和经验的传统方法。但是它代表了土工研究的发展趋势,促使土力学发生重大变革,使土工设计和研究达到新的水平。

从土木工程的发展和相关学科的进步考虑,国内外学者认为21世纪的土力学的发展特点如下:

(1) 进一步汲取现代数学、现代力学的成果和充分利用计算机技术,深入研究土的非线性、各向异性和流变等特性,建立新的更符合土的真实特性的本构模型,以及将该模型用于解决实际问题的计算方法。

(2) 充分考虑土和土工问题的不确定性,进行风险分析和优化决策,岩土工程的定值设计方法逐步向可靠度设计转化。这需要大量的工程统计资料。概率论、模糊数学和灰色理论等也将在岩土工程中起更大的作用。

(3) 对非饱和土的深入研究,充分揭示土粒、水、气三相界面的表面现象对非饱和土力学特性的影响,建立非饱和土强度变形的理论框架。

(4) 土工测试设备和测试技术将得到新的发展。高应力、粗粒径、大应变、多因素和复杂应力组合的试验设备和方法得到发展,原位测试和土工离心试验等得到更大应用,计算机仿真成为特殊的土工试验手段,声波法、 γ 射线法和CT识别法等也将列入土工试验方法的行列。

(5) 环境土力学得到极大的重视。炉渣、粉煤灰、尾矿石的利用和处理,污染土和污染水的性质和治理,固体废料深埋处置方法中废料、周围土介质和地下水的相互作用以及污染物的扩散规律等研究将大大加强。由开矿、抽水以及各种岩土工程活动造成的地面沉

降和对周围环境的影响及防治继续受到重视。此外,沙漠化、盐碱化、区域性滑坡、洪水、潮汐、泥石流和地震等大环境问题也将进入土力学研究的范畴。

(6) 土质学的研究进一步深入,用微观和细观的手段,研究和揭示岩土力学特性的本质。

(7) 人工合成材料的应用。人工合成材料在排水、防渗、滤层和加筋等方面已得到很好的应用,但对其与土一起作为复合材料的相互作用机理的了解尚很初步,设计理论和方法还很不完善,对这种复合材料的深入研究将给土力学研究增加新的内容。

1.4 土力学的特点和研究方法

如前所述,土力学是为岩土工程服务的一门学科。而影响岩土工程的因素众多,工程地质、水文地质、环境、气象和施工,以及其他人为的和时间的因素都能影响岩土工程的成败,这就是岩土工程的不确定性。而作为岩土工程原始依据的勘测资料具有局限性,由于土层的复杂性和取样的不连续性、小土样和原位土层的差异、土样扰动的影响、试验条件与实际工程情况的区别等,即便最认真细致的勘测也可能存在偏差。此外,准确分析和利用勘测资料也不是容易的事。而设计参数的误差往往导致结论的大偏差,其影响甚至超过计算方法的选择。

太沙基(1959年)在给法国人洛西埃(Lossier, 1958年)写的《土力学的信心危机》一文的答复中指出了土力学的特点:土力学具有“科学性”和“艺术性”的双重特性,即土力学不是一门“精确”的科学,与其说它接近桥梁工程或机械工程,不如说更接近医学。对于医学,“临床经验”是十分重要的。或者说土力学是工程实践中的一个工具,但不是像计算尺和计算机那样按指示书使用就行的工具,而是像地球物理勘探那样需要长时间实践才有把握掌握的工具。

派克(Peck, 1969年)总结了土力学中的“观察法”,可表述为:在有足够(但不一定很详细)勘测资料的基础上,根据地质知识对土层的最可能性态和最不利条件下的可能偏差作出评价,并据此作出简化假设和进行设计。在设计中应确定需要在施工过程中实施观察的量(如沉降、孔隙水压力等),并且按简化假设预估这些量的数值(包括在最不利情况下的相应数值)是多少,同时考虑最不利情况发生时如何选择补救措施或改变设计。最后在施工中观察那些量,并对观察结果作出评价,必要时修改设计,以适应现场的实际情况。派克指出,观察法的局限性在于只能用于在施工过程中有可能修改设计的场合,有时还可能延长工期。但是观察法是有利于降低造价和避免灾害的。派克提倡的观察法,就是现在所说的“动态设计”概念。

雷生第斯(Resendiz, 1979年)又对过分依赖观察法,过分强调从理论上找到普遍性规律的困难及危险提出自己的看法。他认为同其他学科一样,要在土力学领域内作出理论上的概括,需要以下四个过程:

- (1) 识别过程,即从原型观察的个别事例来识别哪些是有意义的(有效的)变量。
- (2) 归纳过程,即把有关的变量归纳成最少数量的独立变量,这要求舍弃一些无关的、次要的变量,在许多情况下要用到量纲分析。
- (3) 模拟过程,即探求从归纳过程得到的诸独立变量之间的关系式;

(4) 验证过程,即把以上求得量之间的关系式同现场实例比较。其中,模拟过程可以有模型试验、数学分析两种经典方法和计算机数值分析方法。

从以上阐述中可以看出,土力学学者都非常重视理论和实践两个方面,他们在某一篇文章中强调其中一方面是因为当时工程界具有忽视另一方面的倾向。太沙基关于“科学性”和“艺术性”的论述精辟地反映了土力学的特点:一方面,土力学有严密的科学性,在工程实践中绝不能违反土力学的基本原理,否则会导致工程的失败和酿成重大事故;另一方面,土力学又非常强调实践经验,强调地区特点,这是保证工程完美的基础。一方面,需要先进的数学力学知识和计算机技术,以便更快捷、更精确地解决复杂岩土工程问题;另一方面,计算模型、计算参数的选择和计算结果的分析还是需要丰富的经验,也不能否定传统方法在工程中所起的作用。这些认识,无论是在土力学课题的研究中,岩土工程的设计或施工中,还是在土力学课程的学习中,都是非常重要的。

1.5 本课程的学习要求

本教材的内容以经典土力学为主,在学习本课程时,要求如下:

(1) 了解土的基本物理力学性质和土的分类,以及这些性质与土的组成和结构的关系。

(2) 必须牢固掌握土力学的基本原理和理论。强度理论、有效应力原理、渗透理论、固结理论和土压力理论等是其中主要的一些理论,需要理解它们的本质概念。

(3) 掌握主要的计算方法,例如,三相指标的换算、强度计算、变形计算、土压力计算和边坡稳定计算等,了解它们在工程实践中的应用,这是学习后续的专业课程如基础工程和地基处理等的基础。

(4) 掌握基本的土力学试验方法和成果分析,了解原位测试技术的应用。

(5) 更重要的是如前所述,掌握土力学的学科特点和分析方法,能真正地把这门课的知识用于解决实际问题。相信在教师 and 学生的共同努力下,本教材会成为大家学习专业课程和解决岩土工程问题的有效工具。

第2章 土的物质组成及土水相互作用

2.1 概 述

土是自然界中性质最为复杂多变的物质。土的物质成分起源于岩石的风化（物理风化和化学风化）。地壳表层的坚硬岩石，在长期的风化和剥蚀等外力作用下，破碎成大小不等的矿物颗粒，这些颗粒在各种形式的外力作用下，被搬运到适当环境里沉积下来，就形成了土。初期形成的土是松散的，颗粒之间没有任何联系。随着沉积物逐渐增厚，产生上覆土层压力，使得较早沉积的颗粒排列渐趋稳定，颗粒之间由于长期的接触产生了一些胶结，加之沉积区气候干湿循环、冷热交替的持续影响，最终形成了具有某种结构联结的地质体（土体），并通常以成层的形式（土层）广泛覆盖于前第四纪坚硬的岩层（岩体）之上。

天然形成的土通常由固体颗粒、液体水和气体三个部分（俗称为三相）组成。固体颗粒是土的最主要物质成分，由许多大小不等、形态各异的矿物颗粒按照各种不同的排列方式组合在一起，构成土的骨架，亦称为土粒。天然土体中土粒的粒径分布范围极广，不同土粒的矿物成分和化学成分也不一样，其差别主要由形成土的母岩成分及搬运过程中所遭受的地质营力所控制。

土是松散沉积物，土粒间存在孔隙，通常由液体的水溶液和气体充填。天然土体孔隙中的水并非纯水，其中溶解有多种类型和数量不等的离子或化合物（电解质）。若将土中水作为纯净的水看待，根据土粒对极性水分子吸引力的大小，则吸附在土粒表面的水有结合水和非结合水之分。对于非饱和土而言，孔隙中的气体通常为空气。

土的上述三个基本组成部分不是彼此孤立地、机械地混合在一起，而是相互联系、相互作用，共同形成土的基本特性。颗粒微细的土粒具有较大的表面能量，它们与土中水相互作用，产生一系列表面物理化学现象，直接影响着土性质的形成和变化。

土的结构这一术语主要用于从微观的尺度描述土粒的排列组合和粒间联结，而土的构造则从宏观上反映了不同土层（包括夹层）的空间组合特征。土的成分和结构共同决定了土的工程性质。

本章关于土的物质组成、土水相互作用和土的结构构造的阐述，构成了土质学的主要研究内容，这对于从本质上把握土在荷载作用下的工程性质是必不可少的。土的任何复杂的工程行为必然有其内在的控制因素，对此我们可以从关于土的本质的研究中找到解答。

2.2 土的粒度成分

一、粒组及其划分

天然形成的土，土粒的大小悬殊、性质各异。土粒的大小通常以其平均直径 d 表示，简称为粒径（又称为粒度），一般以毫米（mm）为单位。界于一定粒径范围内的土粒，其

大小相近、性质相似，称为粒组。土中各粒组的相对百分含量，称为土的粒度成分。

自然界中土的粒径变化幅度很大。工程上所采用的粒组划分：首先，满足在一定的粒度范围内，土的工程性质相近这一原则，超过了这个粒径范围，土的性质就要发生质的变化；其次，粒组界限的确定，视起主导作用的特性而定，而且要考虑与目前粒度成分的测定技术相适应。我国目前广泛采用两种粒组划分方案，如表2-1所示。

表2-1 我国的粒组划分方案

粒组的粒径范围 (mm)	粒 组 的 名 称				
	方案 1		方案 2		
$d>200$	漂石粒 (块石粒)		巨粒	漂石粒 (块石粒)	
$200\geq d>60$	卵石粒 (碎石粒)			卵石粒 (碎石粒)	
$60\geq d>20$					
$20\geq d>2$	圆砾粒 (角砾粒)		粗粒	砾粒	粗砾粒
$2\geq d>0.5$	砂粒	粗			细砾粒
$0.5\geq d>0.25$		中		粗	
$0.25\geq d>0.075$		细		中	
$0.075\geq d>0.005$	粉粒			细粒	粉粒
$0.005>d$	黏粒		黏粒		

注 漂石、卵石和圆砾粒呈一定的磨圆状 (圆形或亚圆形)，块石、碎石和角砾粒带有棱角。

方案1应用于现行国家标准《建筑地基基础设计规范》(GB 5007—2002)和《岩土工程勘察规范》(GB 500021—2001)。方案2见国家标准《土的分类标准》(GBJ 145—90)。可以看出，两种方案的划分基本一致，唯一不同的是方案2将方案1中卵石粒的粒径下限由20mm提高到60mm，以便与世界上多数国家的一般规定相一致。

二、粒度成分的测定方法

土的粒度成分，通常以土中各粒组的质量百分率来表示，这就要求对土进行粒度分析，分离出土中各个粒组，分别称取质量，然后计算出各粒组的质量占该土总质量的百分数。不同类型的土，采用不同的分析方法。粗粒土采用筛析法，细粒土采用静水沉降分析法。

(1) 筛析法。对于粒径大于0.075mm的粗粒土，可用筛析法测定粒度成分。试验时，将风干、分散的代表性土样通过一套孔径不等标准筛 (20、2、0.5、0.25、0.1mm和0.075mm)，称出留在各个筛子上的土的质量，即可求出各个粒组在土样中的相对含量。

(2) 静水沉降分析法。粒径小于0.075mm的粉粒或黏粒现有技术难以筛分，一般可根据土粒在水中匀速下沉时的速度与粒径的理论关系，用比重计法或移液管法测定。

三、粒度分析成果表示方法

实验得到的粒度分析资料，可以采用多种方法表示，借以找出粒度成分变化的规律性。最常用的表示方法是列表法和累计曲线法。

(1) 列表法。将粒度分析的成果，用表格的形式表达。这种方法可以清楚地用数量说明土样各粒组的含量，但当土样数量较多时，不能获得直观的结果。

(2) 累计曲线法。以粒径 d 为横坐标，以该粒径的累计百分含量为纵坐标，绘制颗粒级配的累计曲线。累计曲线的坐标系一般采用半对数坐标。因为土粒粒径大小相差常在百

倍、千倍以上,为清楚地反映细粒组成,粒径 d 宜用对数坐标表示,如图2-1所示。

根据累计曲线,可以求出反映颗粒组成特征的级配指标不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 。

不均匀系数按下式计算:

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

式中 d_{60} ——限定粒径,即土样中小于该粒径的土粒质量占土粒总质量的60%,mm;

d_{10} ——有效粒径,即土样中小于该粒径的土粒质量占土粒总质量的10%,mm。

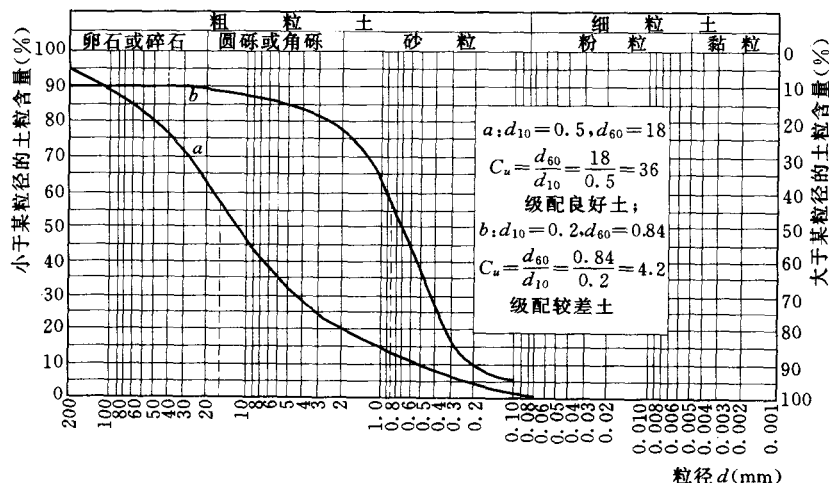


图2-1 颗粒级配累计曲线

曲率系数按下式计算:

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

式中 d_{30} ——土样中小于该粒径的土粒质量占土粒总质量的30%的粒径值,mm。

工程中,当 $C_u \geq 5$ 、 $C_c = 1 \sim 3$ 时,称土的级配良好,为不均匀土,表明土中大小颗粒混杂,累计曲线显得平缓;若不能同时满足上述要求,则称土的级配不良,为均匀土,表明土中某一个或几个粒组含量较多,累积曲线中段显得陡直。

d_{10} 之所以称为有效粒径,是因为它是土中最有代表性的粒径。其物理含义是:由一种粒径土组成的理想均匀土,如与另一个非均匀土具有相等的透水性,那么这个均匀土的粒径应与这个不均匀土的粒径 d_{10} 大致相等。 d_{10} 常见于机械潜蚀,透水性、毛细性等经验公式中。

【例2-1】 有 a 、 b 两个土样,根据粒度分析试验成果所作的颗粒级配累计曲线如图2-1所示。试分别判断两个土样的颗粒级配情况。

解: 对土样 a , $d_{10} = 0.5$, $d_{30} = 4.2$, $d_{60} = 18$, 按式(2-1)和式(2-2)求得不均匀系数 $C_u = 36$, 曲率系数 $C_c = 1.96$; 对土样 b , $d_{10} = 0.2$, $d_{30} = 0.4$, $d_{60} = 0.84$, 按同样公式可求得不均匀系数 $C_u = 4.2$, 曲率系数 $C_c = 0.95$ 。所以,土样 a 为级配良好的不均匀土,作为填方工程的土料时,比较容易获得较小的孔隙比(较大的密实度);土样 b