



高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列规划教材

Soil Mechanics

土力学

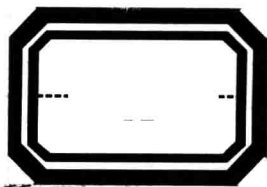
· 平台课课程群 ·

■ 主编 童小东 黎 冰
■ 主审 卢廷浩



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社



高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列规划教材

本书可作为土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列规划教材，也可作为土木工程专业及相关专业的教材。

本书可作为土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列规划教材，也可作为土木工程专业及相关专业的教材。

土 力 学

主编 童小东 黎 冰
主审 卢廷浩



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

土力学/童小东,黎冰主编. —武汉:武汉大学出版社,2014.9
高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列规划教材
ISBN 978-7-307-13819-3

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 154556 号

责任编辑:孙 丽

责任校对:王小倩

装帧设计:吴 极

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:武汉科源印刷设计有限公司

开本:880×1230 1/16 印张:10.25 字数:326 千字

版次:2014 年 9 月第 1 版 2014 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-13819-3 定价:23.00 元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

学术委员会名单

(按姓氏笔画排名)

主任委员:周创兵

副主任委员:方 志 叶列平 何若全 沙爱民 范 峰 周铁军 魏庆朝

委 员:王 辉 叶燎原 朱大勇 朱宏平 刘泉声 孙伟民 易思蓉
周 云 赵宪忠 赵艳林 姜忻良 彭立敏 程 桦 靖洪文

编审委员会名单

(按姓氏笔画排名)

主任委员:李国强

副主任委员:白国良 刘伯权 李正良 余志武 邹超英 徐礼华 高 波

委 员:丁克伟 丁建国 马昆林 王 成 王 湛 王 媛 王 薇
王广俊 王天稳 王曰国 王月明 王文顺 王代玉 王汝恒
王孟钧 王起才 王晓光 王清标 王震宇 牛荻涛 方 俊
龙广成 申爱国 付 钢 付厚利 白晓红 冯 鹏 曲成平
吕 平 朱彦鹏 任伟新 华建民 刘小明 刘庆潭 刘素梅
刘新荣 刘殿忠 闫小青 祁 皓 许 伟 许程洁 许婷华
阮 波 杜 咏 李 波 李 斌 李东平 李远富 李炎锋
李耀庄 杨 杨 杨志勇 杨淑娟 吴 昊 吴 明 吴 轶
吴 涛 何亚伯 何旭辉 余 锋 冷伍明 汪梦甫 宋固全
张 红 张 纯 张飞涟 张向京 张运良 张学富 张晋元
张望喜 陈辉华 邵永松 岳健广 周天华 郑史雄 郑俊杰
胡世阳 侯建国 姜清辉 娄 平 袁广林 桂国庆 贾连光
夏元友 夏军武 钱晓倩 高 飞 高 玮 郭东军 唐柏鉴
黄 华 黄声享 曹平周 康 明 阎奇武 董 军 蒋 刚
韩 峰 韩庆华 舒兴平 童小东 童华炜 曾 珂 雷宏刚
廖 莎 廖海黎 缪宇宁 黎 冰 戴公连 戴国亮 魏丽敏

出版技术支持

(按姓氏笔画排名)

项目团队:王 睿 白立华 曲生伟 蔡 巍

教学实践表明,有效地利用数字化教学资源,对于学生学习能力以及问题意识的培养乃至怀疑精神的塑造具有重要意义。

通过对数字化教学资源的选取与利用,学生的学习从以教师主讲的单向指导的模式而成为一次建设性、发现性的学习,从被动学习而成为主动学习,由教师传播知识而到学生自己重新创造知识。这无疑是锻炼和提高学生的信息素养的大好机会,也是检验其学习能力、学习收获的最佳方式和途径之一。

本系列教材在相关编写人员的配合下,将逐步配备基本数字教学资源,其主要内容包括:

课程教学指导文件

- (1)课程教学大纲;
- (2)课程理论与实践教学时数;
- (3)课程教学日历:授课内容、授课时间、作业布置;
- (4)课程教学讲义、PowerPoint 电子教案。

课程教学延伸学习资源

- (1)课程教学参考案例集:计算例题、设计例题、工程实例等;
- (2)课程教学参考图片集:原理图、外观图、设计图等;
- (3)课程教学试题库:思考题、练习题、模拟试卷及参考解答;
- (4)课程实践教学(实习、实验、试验)指导文件;
- (5)课程设计(大作业)教学指导文件,以及典型设计范例;
- (6)专业培养方向毕业设计教学指导文件,以及典型设计范例;
- (7)相关参考文献:产业政策、技术标准、专利文献、学术论文、研究报告等。

 本书基本数字教学资源及读者信息反馈表请登录 www.stmpress.cn 下载,欢迎您对本书提出宝贵意见。

丛书序

土木工程涉及国家的基础设施建设,投入大,带动的行业多。改革开放后,我国国民经济持续稳定增长,其中土建行业的贡献率达到1/3。随着城市化的发展,这一趋势还将继续呈现增长势头。土木工程行业的发展,极大地推动了土木工程专业教育的发展。目前,我国有500余所大学开设土木工程专业,在校生达40余万人。

2010年6月,中国工程院和教育部牵头,联合有关部门和行业协(学)会,启动实施“卓越工程师教育培养计划”,以促进我国高等工程教育的改革。其中,“高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划”由住房和城乡建设部与教育部组织实施。

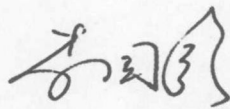
2011年9月,住房和城乡建设部人事司和高等学校土建学科教学指导委员会颁布《高等学校土木工程本科指导性专业规范》,对土木工程专业的学科基础、培养目标、培养规格、教学内容、课程体系及教学基本条件等提出了指导性要求。

在上述背景下,为满足国家建设对土木工程卓越人才的迫切需求,有效推动各高校土木工程专业卓越工程师教育培养计划的实施,促进高等学校土木工程专业教育改革,2013年住房和城乡建设部高等学校土木工程学科专业指导委员会启动了“高等教育教学改革土木工程专业卓越计划专项”,支持并资助有关高校结合当前土木工程专业高等教育的实际,围绕卓越人才培养目标及模式、实践教学环节、校企合作、课程建设、教学资源建设、师资培养等专业建设中的重点、亟待解决的问题开展研究,以对土木工程专业教育起到引导和示范作用。

为配合土木工程专业实施卓越工程师教育培养计划的教学改革及教学资源建设,由武汉大学发起,联合国内部分土木工程教育专家和企业工程专家,启动了“高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列规划教材”建设项目。该系列教材贯彻落实《高等学校土木工程本科指导性专业规范》《卓越工程师教育培养计划通用标准》和《土木工程卓越工程师教育培养计划专业标准》,力图以工程实际为背景,以工程技术为主线,着力提升学生的工程素养,培养学生的工程实践能力和工程创新能力。该系列教材的编写人员,大多主持或参加了住房和城乡建设部高等学校土木工程学科专业指导委员会的“土木工程专业卓越计划专项”教改项目,因此该系列教材也是“土木工程专业卓越计划专项”的教改成果。

土木工程专业卓越工程师教育培养计划的实施,需要校企合作,期望土木工程专业教育专家与工程专家一道,共同为土木工程专业卓越工程师的培养作出贡献!

是以为序。



2014年3月于同济大学四平路校区

前言

对人类而言,土体是一种既熟悉又陌生的对象。熟悉是因为人们每天都会接触到它,近在咫尺;陌生是因为目前人们对它的性质(尤其是力学性质)仍不甚清楚。在人们利用这一自然历史的产物过程中,土体逐渐被用作承载工程建造物的地基。在不断的实践总结与科学研究过程中,逐渐形成了一门力学学科的分支——土力学。在人类的历史记载中,曾发生过很多工程事故,事后的调查发现,大多数事故都是缘于地基基础方面的问题,事故发生的原因可以用土力学的基本原理进行解释,事故的补救方案可以以土力学的知识作为指导。

1998年教育部颁布的专业目录,将原有的房屋建筑、桥梁建筑、地下建筑、岩土勘察、道路工程、铁道工程、矿井建设等相关专业合并为一个专业——土木工程专业。

“土力学”是土木工程专业的大类学科平台课程,该课程所包含的知识既是土木工程专业学生必须掌握的专业知识,同时又是学习“工程地质”“基础工程”“地基处理”等后续课程所必需的基础知识。为了满足专业拓宽后专业教学的需要,高等学校土木工程专业指导委员会通过对国内外同类专业的调查以及教学思想和教学改革的研究,相继制定了一系列教学实施的指导性文件。

在教育部颁布了新的专业目录后,为了满足宽口径专业的要求,很多针对“大土木”的“土力学”教材纷纷在“土力学”教材中的基本原理之外增加了原其他专业的相关规范内容。但是由于目前我国各个行业所采用的规范并未完全统一(甚至有的还存在显著差异),将相关内容罗列在一本教材中便极易导致体系不统一,内容显得杂而繁,不利于学生的学习和理解。以地基土的分类为例,《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)与《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG D63—2007)及《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)对地基土的分类体系就不完全相同,从而导致同一种土在不同规范中的定名可能并不相同。

编者认为,“土力学”既然作为一门力学分支学科(其研究对象为一种特殊的材料——土体),就应与其他力学分支学科(如材料力学、结构力学等)一样,教学的重点应放在基本概念、基本原理的介绍上,而将可能涉及的有关规范内容移至“工程地质”“基础工程”和“地基处理”等专业课程中。在教学中可强调尽管当前规范的体系并不统一,但编制各规范所依据的基本原理都是相通的,同时提醒学生注意以后在工作中应针对具体的工程项目采用相关行业的规范。同样以地基土的分类为例,本书只介绍了地基土的分类原则和大的分类框架体系,至于各行业的具体分类则建议学生参阅相关的规范。

顾名思义,“土力学”的研究对象是“土体”,其研究内容可归结为土体的渗流、变形和强度这三个主要课题。土体是自然界形成的复杂产物,其性状变化很大。

由于“土力学”具有与一般固体力学或水力学不同的特点,一方面,初学者往往感觉到知识点较多,难以掌握;另一方面,又往往认为其理论体系中因存在较多的简化假设而不够严密。因此,希望读者结合该学科的特点,重点掌握基础性知识,同时在学习中还要注重培养解决实际问题的能力。

“土力学”作为一门年轻的学科,发展至今仍存在很多问题,因此希望读者在学习的过程中,勤于思考,敢于问为什么,敢于提出质疑。

为了紧密配合课堂教学,巩固所学理论知识,培养学生的基本技能,本书每章后均附有一定数量的习题。

本书由东南大学童小东、黎冰主编并统稿,河海大学卢廷浩审阅了全书。其他编写单位及人员有:东南大学戴国亮、陶津,浙江大学周建,南京工业大学梅国雄、黄广龙。具体编写分工如下:前言、第1章——童小东;第2章——梅国雄;第3章——戴国亮;第4、5章——周建;第6章——陶津;第7章——黎冰;第8章——黄广龙。另外,研究生周亚丽、梅岭、徐敏、孟丽君、王红伟、严佳佳、邓以亮、李一雯、周文苑等参与了相关资料的整理工作,在此一并表示感谢!

限于编者水平,且时间较为仓促,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。如有宝贵意见和建议,请发至编者邮箱:tongxiaodong@263.net,以使本书内容不断完善。

编者

编者

2014年4月

(III)	塑性指数与土	1.5.0
(SII)	素因指数与土	2.5.0
(SII)	算指数与土	3.0
(4II)	介数与土	4.0
(4II)	实数与土	1.1
(2II)	代土与土	2.1.0
(2II)	代土与土	3.1.0

目

1 土的物理性质及分类	(1)
(1.1) 概述	(2)
(1.2) 土的组成	(2)
(1.2.1) 土中的固体颗粒(土粒)	(2)
(1.2.2) 土中的水	(6)
1.2.3 土中的气	(7)
(1.3) 土的结构和构造	(7)
(1.3.1) 土的结构	(7)
1.3.2 土的构造	(8)
(1.4) 土的基本物理指标	(9)
(1.4.1) 土的三相比例指标	(9)
(1.4.2) 土的质量	(9)
(1.5) 无黏性土的密实度	(12)
1.6 黏性土的物理特性	(12)
(1.6.1) 黏性土的界限含水率	(13)
(1.6.2) 黏性土的塑性指标	(14)
(1.6.3) 黏性土的结构性和触变性	(14)
(1.7) 土的分类	(15)
(1.8) 土的压实性	(17)
(1.8.1) 土的击实试验	(17)
(1.8.2) 代土的压实机理	(18)
(1.8.3) 影响压实效果的因素	(18)
(习题)	(18)
(8.1)	1.1.1
2 土的渗透性与土中渗流	(19)
(2.1) 概述	(20)
(2.2) 达西定律	(20)
(2.2.1) 伯努利方程	(20)
2.2.2 达西定律	(21)
(2.3) 渗透系数的测定	(23)
(2.3.1) 室内试验	(23)
(2.3.2) 现场抽水试验	(24)
(2.3.3) 经验公式	(25)
(2.3.4) 成层土的等效渗透系数	(25)
(2.3.5) 影响土渗透系数的因素	(29)
(2.4) 有效应力原理	(30)
(2.5) 渗流力和渗透破坏	(32)

(8.0)	1.1.1
(0.0)	2.1.1
(0.1)	3.1.1
(0.2)	4.1.1
(0.3)	5.1.1
(1.1)	1.1.1
(1.2)	1.1.1
(1.3)	1.1.1
(1.4) 2.5.1 渗流力	(32)
(1.5) 2.5.2 渗透破坏的主要类型	(32)
(1.6) 2.5.3 渗透破坏的其他类型	(34)
(1.7) 2.5.4 渗透破坏的防治	(34)
(2.6) 2.6.1 三维渗流和流网	(34)
(2.6) 2.6.2 二维渗流运动微分方程	(35)
(2.6) 2.6.3 流网的绘制原则	(35)
(2.6) 2.6.4 流网的绘制方法	(36)
(2.6) 2.6.5 流网的应用	(36)
(2.6) 2.6.6 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.7 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.8 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.9 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.10 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.11 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.12 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.13 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.14 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.15 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.16 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.17 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.18 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.19 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.20 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.21 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.22 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.23 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.24 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.25 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.26 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.27 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.28 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.29 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.30 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.31 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.32 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.33 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.34 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.35 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.36 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.37 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.38 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.39 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.40 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.41 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.42 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.43 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.44 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.45 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.46 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.47 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.48 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.49 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.50 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.51 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.52 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.53 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.54 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.55 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.56 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.57 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.58 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.59 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.60 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.61 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.62 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.63 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.64 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.65 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.66 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.67 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.68 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.69 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.70 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.71 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.72 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.73 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.74 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.75 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.76 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.77 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.78 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.79 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.80 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.81 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.82 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.83 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.84 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.85 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.86 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.87 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.88 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.89 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.90 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.91 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.92 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.93 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.94 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.95 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.96 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.97 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.98 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.99 流网的特性	(36)
(2.6) 2.6.100 流网的特性	(36)

4.3.1 地基沉降计算原理	(68)	6.2.1 土压力的类型	(111)
4.3.2 初始沉降	(69)	6.2.2 影响土压力的因素	(112)
4.3.3 最终固结沉降	(70)	6.3 静止土压力的计算	(112)
4.3.4 次固结沉降	(80)	6.4 朗肯土压力理论	(114)
4.3.5 无黏性土的沉降计算	(80)	6.4.1 基本原理和假定	(114)
4.4 土的一维固结理论	(81)	6.4.2 主动土压力	(115)
4.4.1 太沙基一维固结理论	(81)	6.4.3 被动土压力	(116)
4.4.2 固结度	(84)	6.4.4 几种特殊情况下的朗肯土 压力	(117)
4.5 地基沉降计算简要讨论	(87)	6.5 库仑土压力理论	(120)
4.5.1 按沉降控制设计思路	(87)	6.5.1 主动土压力	(120)
4.5.2 沉降预测	(87)	6.5.2 被动土压力	(122)
4.5.3 沉降计算误差分析	(89)	6.5.3 几种特殊情况下的库仑土 压力	(122)
习题	(89)	习题	(124)
5 土的抗剪强度	(91)	7 地基承载力	(125)
5.1 概述	(92)	7.1 概述	(126)
5.2 土的抗剪强度理论	(92)	7.2 浅基础的地基破坏模式	(126)
5.2.1 莫尔-库仑强度理论	(92)	7.2.1 三种破坏模式	(126)
5.2.2 极限平衡条件	(93)	7.2.2 地基破坏模式的影响因素与 判别	(127)
5.3 土的抗剪强度试验	(95)	7.2.3 地基的破坏过程	(128)
5.3.1 直接剪切试验	(96)	7.3 地基的界限荷载	(128)
5.3.2 三轴压缩试验	(97)	7.3.1 地基塑性变形区边界方程	(128)
5.3.3 无侧限抗压强度试验	(98)	7.3.2 地基的临塑荷载和临界荷载	(129)
5.3.4 十字板剪切试验	(98)	7.4 地基极限承载力	(132)
5.4 三轴压缩试验中的孔隙水压力系数及 应力路径	(100)	7.4.1 普朗德尔-赖斯纳极限承载力	(132)
5.4.1 三轴压缩试验中的孔隙水 压力	(100)	7.4.2 太沙基极限承载力	(133)
5.4.2 孔隙水压力系数	(100)	7.4.3 汉森极限承载力	(135)
5.4.3 应力路径	(101)	7.4.4 关于地基极限承载力的讨论	(136)
5.5 饱和黏性土的抗剪强度	(103)	7.5 载荷试验确定地基承载力	(136)
5.5.1 不固结不排水抗剪强度(简称 不排水抗剪强度)	(103)	7.5.1 浅层平板载荷试验	(136)
5.5.2 固结不排水抗剪强度	(104)	7.5.2 深层平板载荷试验	(137)
5.5.3 固结排水抗剪强度(简称排水 抗剪强度)	(105)	习题	(138)
5.5.4 抗剪强度的影响因素	(105)	8 土坡稳定性	(139)
5.5.5 抗剪强度指标的选用	(106)	8.1 概述	(140)
5.6 无黏性土的抗剪强度	(107)	8.1.1 滑动面的形状	(140)
习题	(108)	8.1.2 滑动面的位置	(140)
6 土压力	(110)	8.2 均质无黏性土土坡的稳定性	(141)
6.1 概述	(111)	8.3 黏性土土坡的稳定性	(141)
6.2 土压力的类型与影响因素	(111)	8.3.1 圆弧滑动法	(141)
		8.3.2 瑞典条分法	(143)

8.3.3 毕肖普条分法	(144)	8.4.3 考虑地震影响的土坡稳定性	(148)
8.4 复杂条件下的土坡稳定性	(146)	8.4.4 复合滑动面的土坡稳定性	(149)
8.4.1 成层土和坡顶作用有荷载时的 土坡稳定性	(146)	习题	(149)
8.4.2 考虑渗流的土坡稳定性	(147)	参考文献	(150)

土的物理性质及分类

土是地壳表层由岩石风化、搬运、沉积、固结而形成的松散颗粒状集合体。土的主要成分包括固体颗粒、水和空气。土的性质随其组成、结构和构造的不同而变化。土的分类主要依据其颗粒大小、塑性指数和液性指数等指标。土的性质对工程建设和农业生产都有重要影响。

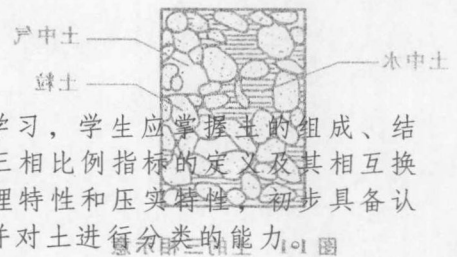
课前导读

内容提要

本章主要内容包括土的组成、结构和构造、土的物理指标、土的三相组成、土的三相比例指标、土的性质、土的分类和压实特性等。本章的教学重点为土的三相组成、土的三相比例指标、土的性质、土的分类和压实特性。本章的教学难点为土的三相比例指标的换算、土的性质、土的分类和压实特性。

能力要求

通过本章的学习，学生应掌握土的组成、结构和构造、土的物理指标、土的三相组成、土的三相比例指标的定义及其相互换算关系、土的性质和压实特性，初步具备认识土的物理特性并对土进行分类的能力。



土里边的土 2.1

土是由固体颗粒、水和空气组成的三相体系。土的性质随其组成、结构和构造的不同而变化。土的分类主要依据其颗粒大小、塑性指数和液性指数等指标。土的性质对工程建设和农业生产都有重要影响。

(土) 土里边的土 1.1.1

土是由固体颗粒、水和空气组成的三相体系。土的性质随其组成、结构和构造的不同而变化。土的分类主要依据其颗粒大小、塑性指数和液性指数等指标。土的性质对工程建设和农业生产都有重要影响。

1.1 概 述

土体(soil mass)简称土,是岩体(rock mass)经过物理和化学风化作用,在各种自然环境中形成的沉积物。土再经过固结成岩作用,又可形成岩体(沉积岩)。

作为形状不规则、粒径大小不等的颗粒的集合体,土包括土颗粒(简称土粒)和土颗粒之间的孔隙(部分孔隙体积被水填充,其余孔隙体积被气体占据)。在一年四季中,若温度低于冰点,孔隙中的水(孔隙水)将凝结为冰,导致土粒相互分离,造成土体积膨胀;当冰融化为水时,土粒又相互靠紧,造成土体积缩小。这种土被称为“季节性冻土”(seasonal frozen soil)。如果冰常年不化,这种冰-土混合物被称为“多年冻土”(perennially frozen soil)。显而易见,孔隙水是一个状态变量,可以随着温度处于水蒸气、液态水或固态冰等状态。孔隙水量的多少取决于气候条件、土颗粒排列的密实程度以及土是否处于饱和状态。

土可以分为“残积土”(residual soil)和“运积土”(transported soil)。残积土由母岩在原地风化后形成。在土层和岩层的交界区域常含有不同尺寸的、具有棱角的岩石碎块。岩体在一个地方被风化,风化产物再经过风、水、冰或重力的搬运作用至现在位置所形成的土称为运积土。“残积土”和“运积土”这两个概念是相对而言的,因为当前的残积土是由岩体在原地风化而形成,而这些岩体又可能是由更早地质时期的运积土经过固结成岩作用而形成的,后来的地壳抬升使得这些岩体再次暴露成为风化作用的新对象。石灰岩、砂岩和页岩等沉积岩是早期地质年代运积土典型的固结成岩产物。这些岩层被抬升,经受风化作用后再变成土,然后又开始新一轮的地质循环。

相比较而言,残积土一般具有较好的工程性质;而经历搬运作用的运积土,则往往工程性能较差。运积土的典型特征为颗粒粒径小,孔隙体积大,通常具有高压缩性。但是,上述结论并不是绝对的,也存在性能较差的残积土和性能较好的运积土。有关土的形成方面的内容详见《工程地质学》教材。

土是由土粒(固相)、水(液相)和气(气相)组成的三相混合物。从理论上讲,只含有土粒和水而没有气的土处于饱和状态;只含有土粒和气而没有水的土处于干燥状态;由土粒、水 and 气三者共同组成的土处于非饱和状态。研究土这种多相混合体的物理力学性质,应重视组成土的各相的性质。图 1-1 为土的三相示意。

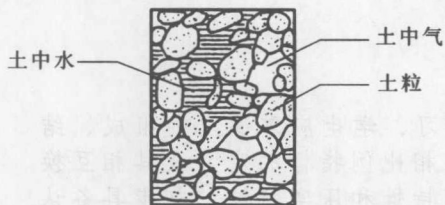


图 1-1 土的三相示意

土的三相组成物质的性质、相对含量以及土的结构、构造等因素,必然会影响到土的物理性质,而土的物理性质又在一定程度上决定了其力学性质。所以,研究土的力学性质必须首先研究其物理性质。

本章主要介绍土的组成、土的结构构造、土的物理性质指标、土的物理特征及分类。

1.2 土的组成

根据我们的生活常识,土是离散颗粒的集合体,砂土是粒状体的集合体。那么黏土也是粒状体的集合体吗?图 1-2 是黏土在电子显微镜下的照片。可以看出,黏土也是由微小的粒状体组成的集合体。

1.2.1 土中的固体颗粒(土粒)

固体颗粒构成土的骨架,其大小、形状、矿物成分等是决定土体物理性质的重要因素。

1.2.1.1 土粒粒组及级配

天然土体的土粒大小可能相差很大,其形状也可能各不相同。土粒的大小通常以粒径(grain size)来评价。对土粒按粒径大小、工程性质划分的组,称为粒组(fraction)。划分粒组的分界粒径尺寸称为界限粒径(grain boundary)。由于土粒本身的形状并不规则,所以前述粒径均为名义粒径,所指的并非土粒的真实直径,而是土粒能通过的最小筛孔的直径,或与土粒在静水中具有相同下沉速率的理想球体直径。目前,世界各国对土的粒组的划分标准并不完全一致,我国的各个行业部门之间也未达成共识,但其划分原则大同小异。表 1-1 为我国国家标准《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007)中规定的粒组划分。

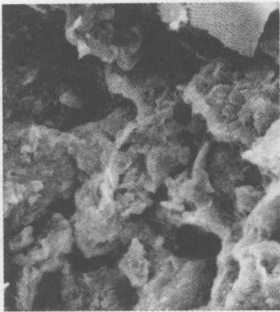


图 1-2 黏土在电子显微镜下的照片

表 1-1 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		$d \leq 0.005$

黏粒和粉粒以 $0.005\text{mm}(5\mu\text{m})$ 为界的依据是,该值是用机械粉碎土粒所能达到的下限值。欧美国家则将 $2\mu\text{m}$ 作为黏粒与粉粒的界限值。

在自然界中很难遇到由单一粒组的土粒所组成的土,绝大多数土都是由几种粒组的土粒混合而成。因此,研究天然土中土粒的组成情况,不仅要了解土粒的大小,而且要了解各种粒组土粒所占的比例。以各粒组土粒的重量占土粒总重的百分数表示土中各粒组土粒的含量,称为土的颗粒级配(gradation of grain)。土的颗粒级配由颗粒分析试验得到。在颗粒分析试验中,对粗粒土,可采用筛析法(sieve analysis method);对细粒土,因为其粒径过小,用筛析法无法分析,故需采用水中沉降法(sedimentation method)、密度计法或移液管法(densimeter method/pipette method)。

筛析法如图 1-3 所示,将筛按筛孔从小到大依次叠置,在最上层的筛中放入干燥的土试样,加盖后振动,最后称量留在各个筛里的试样的重量,从而得出各粒组土粒所占的重量百分比。

水中沉降法利用了粒径大的颗粒沉降快(沉降速率与粒径的平方呈正比)这一特性,从而区分出不同粒径大小的土粒。密度计法是将通过 0.075mm 筛的试样放入水中,充分搅拌后静置,然后隔一定时间用密度计测量悬浊液的比重,根据悬浊液比重随时间的变化,并结合粒径大的土粒沉降快这一特性,从而求出粒径分布。

水中沉降法的试验原理详见图 1-4,密度计法及移液管法试验的详细方法请参考有关资料。

将试验结果绘在单对数坐标纸上(横坐标为粒径,采用对数坐标;纵坐标为小于某粒径的土重含量,采用普通算术坐标),得到粒径与小于某粒径土重百分含量的关系图,该曲线称为颗粒级配曲线(grain size distribution curve),见图 1-5。由级配曲线的坡度可以大致判断土粒的均匀程度。如曲线较陡,表示土粒大小相差不多,土粒较均匀;反之,曲线平缓,表示土粒大小相差较大,土粒不均匀。

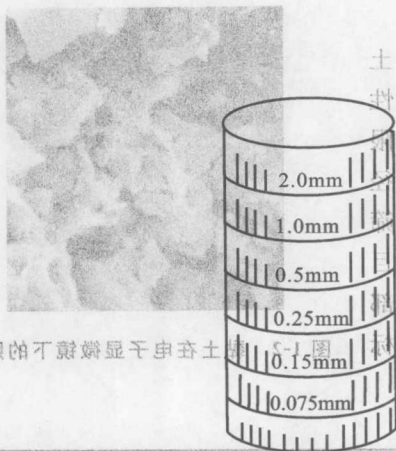


图 1-3 筛析法试验示意

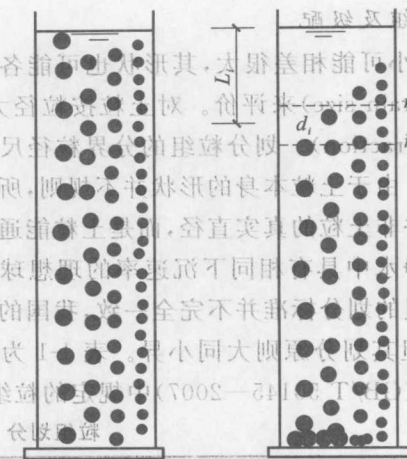


图 1-4 水中沉降法的试验原理示意

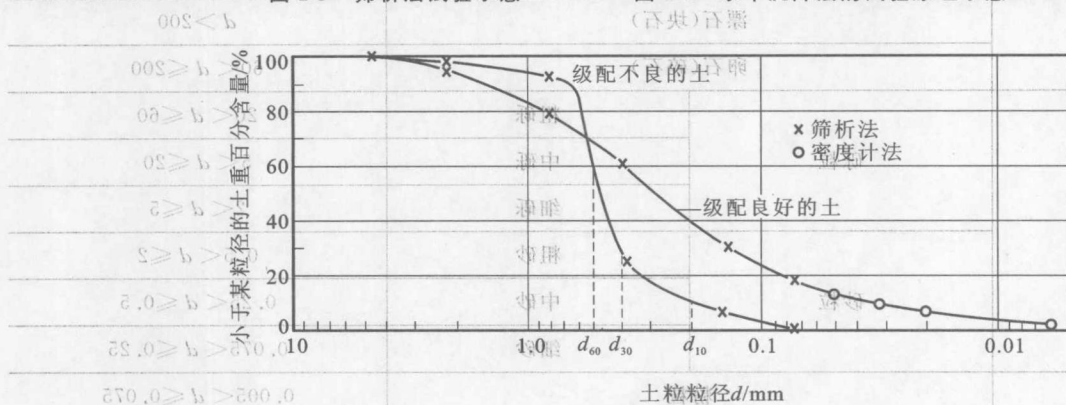


图 1-5 颗粒级配曲线

根据颗粒级配曲线可得到以下各特征指标:

- ① 限制粒径 (constrained grain size) d_{60} , 小于该粒径的土粒重量占土总重量的比例为 60%。
- ② 中值粒径 (median grain size) d_{30} , 小于该粒径的土粒重量占土总重量的比例为 30%。
- ③ 有效粒径 (effective grain size) d_{10} , 小于该粒径的土粒重量占土总重量的比例为 10%。

根据颗粒级配曲线, 可以确定颗粒级配的两个定量指标: 不均匀系数 (coefficient of uniformity) C_u 和曲率系数 C_c (coefficient of curvature) 其定义如下:

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

曲率系数 C_c 反映了级配曲线的平滑程度。通常认为 $C_u \geq 5$ 且 $1 \leq C_c \leq 3$ 的土级配良好。

不均匀系数 C_u 反映了不同粒组的颗粒分布情况, 即土粒大小的均匀程度。 C_u 越大表示土粒粒径的分布范围越大, 土粒大小越不均匀, 其级配越好, 因为这样的土在填筑时容易被压实。需要提醒读者注意的是, 根据英文名称的含义, C_u 对应的中文名称应为“均匀系数”而非“不均匀系数”。

曲率系数 C_c 反映了级配曲线的平滑程度。通常认为 $C_u \geq 5$ 且 $1 \leq C_c \leq 3$ 的土级配良好。

1.2.1.2 土的矿物成分

土的矿物成分主要取决于母岩的成分及其所经受的风化作用。土的固体颗粒物分为无机矿物颗粒和有机质。

(1) 无机矿物颗粒

无机矿物颗粒的成分有原生矿物和次生矿物两大类。

① 原生矿物 (primary mineral)。

原生矿物是母岩经物理风化作用形成的原岩碎屑,其矿物成分与母岩相同(常见的有石英、长石和云母),物理化学性质比较稳定,颗粒往往较为粗大,与水的作用能力弱。

② 次生矿物(secondary mineral)。

次生矿物是原生矿物经化学风化作用形成的新矿物(如高岭石、伊利石和蒙脱石等黏土矿物),颗粒较为细小,且多呈片状,与水的作用能力很强。

以下简要介绍三种主要黏土矿物的结构特征及其基本工程特性。

黏土矿物是一种复合的铝-硅酸盐晶体,颗粒呈片状,是由硅氧晶片(简称“硅片”)和铝氢氧晶片(简称“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。它由1个居中的硅原子和4个在角点的氧原子所构成[图1-6(a)]。铝片的基本单元是铝-氢氧八面体,它由1个铝原子和6个氢氧基所构成[图1-6(b)]。硅片和铝片构成了两种类型的晶胞,即由一层硅片和一层铝片构成的二层型晶胞(1:1型晶胞)和由两层硅片中间夹一层铝片构成的三层型晶胞(2:1型晶胞)。黏土矿物根据硅片和铝片组叠形式的不同,可以分为高岭石、伊利石和蒙脱石三种主要类型。

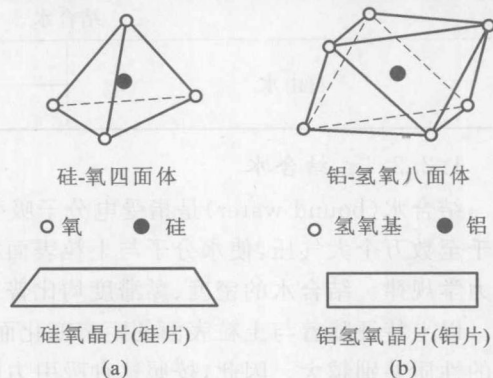


图 1-6 黏土矿物晶片示意

(a) 硅片; (b) 铝片

a. 高岭石(kaolinite)。其晶胞为二层型晶胞,由一层硅片和一层铝片组成[图1-7(a)]。这种晶胞一面露出氢氧基,另一面则露出氧原子。晶胞之间的联结是靠氧原子与氢氧基之间的氢键,具有较强的联结力,因此晶胞之间的距离不易改变,水分子难以进入,晶胞的活动性较小,使得高岭石的亲水性、膨胀性和收缩性均较弱。

b. 伊利石(illite)。其晶胞为三层型晶胞,由两层硅片之间夹一层铝片组成[图1-7(b)]。晶胞之间的联结是靠氧原子与氧原子之间的范德华力,联结力较弱,其膨胀性和收缩性均强于高岭石。但是,伊利石在构成时,部分硅片中的 Si^{4+} 被低价的 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 等所取代,因而在相邻晶胞间将出现若干正价阳离子 K^+ 以补偿晶胞中正电荷的不足。嵌入的 K^+ 离子,增强了伊利石晶胞之间的联结。

c. 蒙脱石(montmorillonite)。其晶胞为三层型晶胞,由两层硅片之间夹一层铝片组成[图1-7(c)]。晶胞之间的联结是靠氧原子与氧原子之间的范德华力,联结力较弱,很容易被具有氢键的水分子侵入而分开;另外,夹在硅片内的铝离子常被低价的其他离子所替换,在晶胞之间出现多余的负电荷,它可以吸附其他阳离子来补偿。这种阳离子吸引极性水分子成为水化离子,从而改变晶胞的距离,甚至使其完全分散为单晶胞。因此,当土中蒙脱石含量较高时,土具有较强的吸水膨胀性和脱水收缩性。

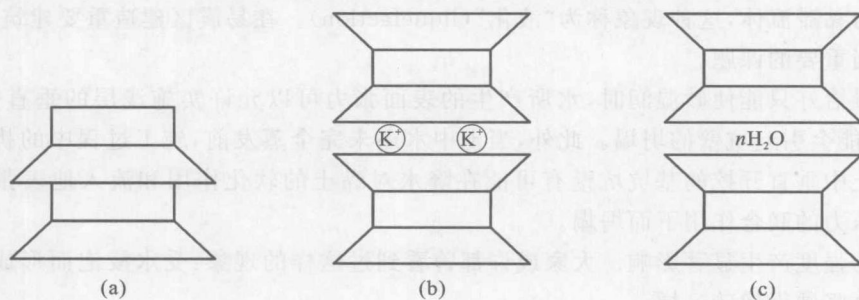


图 1-7 黏土矿物结构单元示意

(a) 高岭石; (b) 伊利石; (c) 蒙脱石

(2) 有机质(organic matter)

土中的有机质主要包括未分解、半分解的动植物残体以及腐殖质。所谓腐殖质,是土中未腐烂的有机质在有空气的环境下被细菌侵蚀后所生成的具有酸性、含氮量很高的高分子有机化合物。腐殖质是土中有机质的主要部分,为黑色、无定形的有机胶体。

有机质可吸收大量的水。因此,当土中含有较多的有机质时,会造成土的强度和抵抗变形的能力降低。

1.2.2 土中的水

土中的水称为孔隙水,其可以处于液态、固态或气态。一般的液态水可视为中性、无色、无味、无臭的液体。但实际上,土中水是成分复杂的水溶液,它与土粒有着复杂的相互作用。土中水在不同作用力之下处于不同的状态,根据主要作用力的不同,工程上对土中水的分类见表 1-2。

表 1-2

土中水的分类

水的类型		主要作用力
结合水		物理化学力
自由水	毛细水	表面张力及重力
	重力水	重力

1.2.2.1 结合水

结合水(bound water)是指受电分子吸引力吸引后吸附于土粒表面的土中水。这种电分子吸引力高达数千至数万个大气压,使水分子与土粒表面牢固地黏结在一起。结合水受土粒表面引力的控制而不遵循静水力学规律。结合水的密度、黏滞度均比普通水稍高,冰点比普通水稍低,且只有吸热变成水蒸气后才能移动。以上特征随着与土粒表面的距离变化而变化,越靠近土粒表面的水分子,受土粒的吸引力越强,与正常水的性质差别越大。因此,按照这种吸引力的强弱,可将结合水进一步分为强结合水和弱结合水。

强结合水是指紧靠土粒表面的结合水膜,亦称吸着水。它没有溶解盐类的能力,不能传递静水压力,只有吸热变成水蒸气后才能移动。这种水极其牢固地结合在土粒表面,其性质接近于固体。

弱结合水是紧靠于强结合水外围的结合水膜,亦称薄膜水。它也不能传递静水压力。当土中含有较多的弱结合水时,土就具有一定的可塑性。弱结合水离土粒表面越远,其受到的电分子吸引力越弱,并逐渐过渡到自由水。弱结合水的厚度对黏性土的黏性特征及工程性质有很大影响。

1.2.2.2 自由水

自由水(free water)是指存在于土粒表面电场影响范围以外的水。它的性质与正常水一样,可传递静水压力。

自由水的形成可能是由早期的地质作用所造成,也有可能是由近期的降水或诸如水管破裂等其他外因所引起。土中所含水量的增大会降低土的强度。任何种类的土,其孔隙中的自由水都会承受一定大小的压力(通常称为孔隙水压力),孔隙水压力的提高会降低土的强度。当孔隙水压力提高到一定程度时,土的强度可能降低为零——对于砂土来说,最终的结果为形成黏滞流体。处于较为疏松状态的饱和砂,当受到瞬时震动时也会变为黏滞流体,这种现象称为“液化”(liquefaction)。在易震区建造重要建筑(如发电厂)时,防止液化是一个相当重要的课题。

当土中水的量恰好只能使砂湿润时,水所产生的表面张力可以允许实施浅层的垂直开挖。然而,一旦土中水蒸发,则可能会引起坑壁的坍塌。此外,当土中水还未完全蒸发前,施工过程中的扰动就可能导致坑壁的坍塌。在黏土中垂直开挖的基坑坑壁有可能在降水对黏土的软化作用和流入地表张裂缝的过量地表水所产生的静水压力的联合作用下而坍塌。

水可对黏土的强度产生显著影响。大家或许都曾看到过这样的现象:受水浸泡而形成的软泥巴甚至泥浆在干燥后往往会坚硬得像砖一样。

地下水位(Ground Water Table,GWT)的变化会对人类产生不利的后果,特别是当水位下降时。水对土体会产生浮力,水位的降低可消除浮力,并使土体的有效重量增大,有效重量的增加量就等于浮力的消除量。这将会导致土体变得更加密实,因为对下伏土层来说,上覆土层重量的增加即为应力的增加。如果下伏土层的孔隙体积较大,则可能会产生很大的地面沉降量。在国内外的许多城市,因开采地下水已造成了最深达数米的区域地面沉降。在施工现场地通过抽水来降低地下水位,也有可能产生在短时期内产生 30~50mm 的地面沉降。如果邻近的建筑物不能承受这些附加的沉降,则必将引发工程事故和法律纠纷。

自由水按其所受作用力的不同,可分为重力水(gravitational water)和毛细水(capillary water)。