

土力学与地基基础

主编 徐云博



 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

土力学与地基基础

主 编 徐云博
副主编 孙彦飞 宋立峰
参 编 陈庆丰 韩瑞芳

内 容 提 要

本书根据高等院校课程改革的培养要求,结合最新颁布的国家标准规范编写。全书共11章,主要内容包括绪论、土的物理性质与工程分类、地基中的应力计算、土的压缩性和地基沉降、土的抗剪强度与地基承载力、土压力与土坡稳定、工程地质勘察与验槽、天然地基上浅基础设计、桩基础、软弱地基处理、区域性地基等。除绪论外,每章章前均有“本章要点”,每章章后附有“知识归纳”“思考与练习”等模块,具有较强的指导意义。

本书可作为高等院校土木工程类相关专业的教材,也可供工程施工技术人员参考用书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

土力学与地基基础/徐云博主编. —北京:北京理工大学出版社, 2016. 8

ISBN 978-7-5682-2827-5

I. ①土… II. ①徐… III. ①土力学—高等学校—教材②地基—基础(工程)—高等学校—教材 IV. ①TU4

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第191485号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

82562903(教材售后服务热线)

68948351(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京紫瑞利印刷有限公司

开 本 / 787毫米×1092毫米 1/16

印 张 / 18

字 数 / 437千字

版 次 / 2016年8月第1版 2016年8月第1次印刷

定 价 / 59.00元

责任编辑 / 陆世立

文案编辑 / 陆世立

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 边心超

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前言

“土力学与地基基础”是土木工程专业一门理论性和实践性都较强的主要专业课，本教材主要作为土木工程专业应用型本科的教学用书，也可作为本专业其他层次应用型人才培养的教学用书以及工程技术专业人员的参考书。

本教材在编写过程中，以《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)、《岩土工程勘察规范(2009年版)》(GB 50021—2001)、《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)、《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)、《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)、《土工试验方法标准(2007版)》(GB/T 50123—1999)等有关设计新规范、新标准为依据，结合应用型本科的特点，以突出实用性和实践性为原则，在保证土力学与地基基础相关理论框架完整性的基础上，适当删减实践中很少应用的艰深理论和对复杂数学公式的推导，并引入一些工程案例，以实用为重点，理论联系实际，从而使本教材具有体系完整、内容精练、重点突出、通俗易懂、紧密结合工程实践的特点。

本教材主要讲述土力学的经典理论、基本原理以及地基基础设计与分析的基本方法，并简要介绍了工程地质勘察的主要内容和方法。除绪论外，每章前均有“本章要点”，每章后还附有“知识归纳”“思考与练习”，以方便教师教学和学生对每章内容的理解掌握，在某些章节后面还增加了与本章有关的土工试验，对于学生独立完成相关试验具有很强的指导意义。

参加编写本教材的人员均为教学一线教师，具有扎实的理论基础、丰富的工程实践经验和教学经验。本教材由河南工程学院徐云博担任主编，孙彦飞、宋立峰担任副主编。具体编写分工如下：第1、10、11章由徐云博编写；第3、5章由孙彦飞编写；第4、8章由宋立峰编写；第2、6章由韩瑞芳编写；第7、9章由陈庆丰编写。

本书在编写过程中，参考了大量公开出版发行的土力学与地基基础方面的书籍，在此谨向其作者表示衷心的感谢！

由于时间仓促，编者水平有限，书中不足和遗漏之处在所难免，欢迎广大读者批评指正。

编者

目录 CONTENTS

第1章 绪论 1

- 1.1 本学科的研究对象和内容 1
- 1.2 本学科的发展历史 2
- 1.3 岩土工程和岩土工程体制 3
- 1.4 本课程的学习方法 4
- 思考与练习 4

第2章 土的物理性质与工程分类 5

- 2.1 土的组成及结构与构造 5
 - 2.1.1 土的固体颗粒(固相) 5
 - 2.1.2 土中水(液相) 8
 - 2.1.3 土中气体(气相) 9
 - 2.1.4 土的结构 9
 - 2.1.5 土的构造 11
- 2.2 土的物理性质指标 11
 - 2.2.1 指标的定义 12
 - 2.2.2 指标的换算 14
- 2.3 土的物理状态指标 16
 - 2.3.1 无黏性土的密实度 17
 - 2.3.2 黏性土的物理特征 19
- 2.4 土的工程分类 22
 - 2.4.1 岩石 22
 - 2.4.2 碎石土 22
 - 2.4.3 砂土 23
 - 2.4.4 粉土 23
 - 2.4.5 黏性土 23
 - 2.4.6 人工填土 24
- 2.5 相关土工试验 24
 - 2.5.1 密度试验 24
 - 2.5.2 土的含水率试验 25

2.5.3 土粒比重试验 26

2.5.4 液限、塑限试验 28

知识归纳 30

思考与练习 31

第3章 地基中的应力计算 33

- 3.1 概述 33
- 3.2 地基中的自重应力 33
 - 3.2.1 竖向自重应力 33
 - 3.2.2 水平向自重应力 35
- 3.3 基底压力 36
 - 3.3.1 基底压力的分布规律 36
 - 3.3.2 基底压力的简化计算 37
 - 3.3.3 基底附加压力 39
- 3.4 地基中的附加应力 40
 - 3.4.1 竖向集中力作用下的附加应力 40
 - 3.4.2 空间问题的附加应力计算 42
 - 3.4.3 平面问题的附加应力计算 48
 - 3.4.4 地基中附加应力的分布规律 49
 - 3.4.5 非均质地基中的附加应力 50

知识归纳 50

思考与练习 51

第4章 土的压缩性和地基沉降 53

- 4.1 土的压缩性和压缩性指标 53
 - 4.1.1 压缩试验 54
 - 4.1.2 压缩系数 55
 - 4.1.3 压缩模量 56
 - 4.1.4 土的载荷试验及变形模量 56

4.2	地基的最终沉降量	58
4.2.1	分层总和法	58
4.2.2	规范法	61
4.3	地基沉降量的组成	67
4.3.1	土的应力历史	67
4.3.2	地基沉降量的组成	68
4.4	地基变形与时间的关系	68
4.4.1	达西定律	69
4.4.2	饱和土的渗透固结	69
4.4.3	单向渗透固结理论	70
4.5	建筑物的沉降观测与地基容许 变形值	72
4.5.1	建筑物沉降观测	72
4.5.2	地基的容许变形值	73
4.6	土的固结试验	74
	知识归纳	78
	思考与练习	79

第5章 土的抗剪强度与地基承载力... 81

5.1	概述	81
5.1.1	土的强度应用	81
5.1.2	土的强度破坏实例	82
5.2	土的抗剪强度	83
5.2.1	库仑定律	83
5.2.2	土的极限平衡条件	84
5.3	土的临塑荷载与临界荷载	87
5.3.1	地基变形的三个阶段	87
5.3.2	临塑荷载	88
5.3.3	临界荷载	90
5.4	地基的极限荷载	91
5.5	地基承载力	94
5.5.1	规范法	95
5.5.2	地基承载力理论公式	97
5.5.3	现场原位测试	98
5.5.4	经验方法	98
5.6	抗剪强度指标的测定	99
5.6.1	直接剪切试验	99
5.6.2	三轴压缩试验	101
5.6.3	无侧限抗压强度试验	103
5.6.4	十字板剪切试验	104
5.6.5	抗剪强度指标的总应力法 和有效应力法表示	105

5.6.6	影响抗剪强度指标的因素 ...	106
	知识归纳	107
	思考与练习	108

第6章 土压力与土坡稳定 110

6.1	概述	110
6.2	静止土压力	111
6.3	朗肯土压力计算	112
6.3.1	基本假设	113
6.3.2	主动土压力	113
6.3.3	被动土压力	115
6.3.4	土压力计算举例	117
6.4	库仑土压力理论	120
6.4.1	基本假设	120
6.4.2	主动土压力	120
6.4.3	被动土压力	122
6.5	规范法计算土压力	123
6.6	挡土墙设计	126
6.6.1	重力式挡土墙设计	126
6.6.2	其他形式挡土墙	132
6.6.3	挡土墙事故实例	134
6.7	土坡稳定分析	135
6.7.1	无黏性土土坡稳定分析	135
6.7.2	黏性土土坡稳定分析	136
6.7.3	人工边坡的确定	138
	知识归纳	140
	思考与练习	141

第7章 工程地质勘察与验槽 144

7.1	工程地质勘察概述	144
7.1.1	工程地质勘察的目的	144
7.1.2	工程地质勘察的分级	144
7.1.3	工程地质勘察的任务	146
7.1.4	工程地质勘察阶段的划分 ...	146
7.2	工程地质勘察方法	148
7.2.1	勘探点的布置	148
7.2.2	工程地质勘探方法	149
7.2.3	室内试验	152
7.2.4	原位测试	152
7.3	工程地质勘察报告	155

7.3.1 工程地质勘察报告书的 内容	156
7.3.2 工程地质勘察报告书的 阅读与使用	156
7.4 验槽	157
7.4.1 验槽的内容	157
7.4.2 验槽的方法	157
7.4.3 基槽的局部处理	158
知识归纳	159
思考与练习	160

第8章 天然地基上浅基础设计 161

8.1 浅基础的类型	161
8.1.1 按基础刚度分类	161
8.1.2 按基础材料分类	162
8.1.3 按基础形式分类	163
8.2 地基与基础设计的基本规定 ...	165
8.2.1 确定地基基础的设计等级 ...	165
8.2.2 规范中对地基变形验算的 基本规定	166
8.2.3 规范对地基基础设计的规 定及设计步骤	167
8.3 基础埋置深度的确定	168
8.3.1 与建筑物有关的条件	168
8.3.2 工程地质和水文地质条件 ...	168
8.3.3 场地建设条件	168
8.3.4 季节性冻土	169
8.3.5 稳定性要求	170
8.4 地基承载力的确定	171
8.4.1 土的地基承载力特征值的 确定	171
8.4.2 岩石地基承载力特征值的 确定	171
8.5 基础底面尺寸确定	172
8.5.1 计算基础底面尺寸	172
8.5.2 地基软弱下卧层承载力 验算	174
8.5.3 地基变形验算	175
8.6 无筋基础设计	176
8.6.1 基础高度	176
8.6.2 构造要求	177

8.6.3 无筋扩展基础的设计计算 ...	178
8.7 钢筋混凝土扩展基础设计	178
8.7.1 墙下钢筋混凝土条形基础 ...	179
8.7.2 柱下钢筋混凝土独立基础 ...	181
8.8 柱下钢筋混凝土条形基础 设计	185
8.8.1 适用范围	185
8.8.2 构造要求	185
8.8.3 设计计算要点	186
8.9 筏形基础设计	187
8.9.1 适用范围	187
8.9.2 构造与计算要求	187
8.10 箱形基础设计	188
8.10.1 适用范围	188
8.10.2 构造要求	189
8.11 控制地基不均匀沉降的措施 ...	189
8.11.1 建筑措施	190
8.11.2 结构措施	191
8.11.3 施工措施	192
知识归纳	193
思考与练习	193

第9章 桩基础 196

9.1 桩基础基本概念及分类	196
9.1.1 桩基础的定义与作用	196
9.1.2 桩基础的适用范围	197
9.1.3 桩基础的分类	197
9.1.4 桩的荷载传递机理	198
9.1.5 桩侧负摩阻力	199
9.2 单桩竖向承载力	201
9.2.1 根据桩身材料强度确定	201
9.2.2 静载荷试验法	202
9.2.3 经验公式法	204
9.3 群桩竖向承载力	209
9.3.1 群桩效应	209
9.3.2 群桩的承载力	210
9.3.3 群桩地基沉降验算	211
9.4 桩基础设计	213
9.4.1 选择桩材、桩型及其几何 尺寸	213
9.4.2 确定单桩竖向承载力	213

9.4.3	确定桩数及布置桩位	213
9.4.4	桩基中的单桩受力验算	215
9.4.5	软弱下卧层验算及沉降 验算	215
9.4.6	桩身结构设计	216
9.4.7	承台的设计	216
9.4.8	绘制桩基施工图	216
9.5	桩的构造要求及施工、验收	221
9.5.1	桩的构造要求	221
9.5.2	承台的构造要求	223
9.5.3	桩基施工	225
9.5.4	基桩及承台的验收	231
9.6	基桩检测	232
9.6.1	检测目的与方法	232
9.6.2	基桩检测工作程序	233
9.6.3	常用方法简介	233
	知识归纳	235
	思考与练习	236

第10章 软弱地基处理 238

10.1	概述	238
10.1.1	建筑物地基处理的目的	238
10.1.2	地基处理的方法及其适用 范围	239
10.1.3	地基处理方法的选用原则 及步骤	240
10.2	换填垫层法	242
10.2.1	适用范围	242
10.2.2	垫层的设计	243
10.2.3	垫层施工要点	244
10.2.4	垫层质量检验	244
10.3	预压法	245
10.3.1	适用范围	245
10.3.2	砂井堆载预压法	245
10.3.3	真空预压法	246
10.3.4	真空预压联合堆载预压法	247
10.3.5	质量检验	247
10.4	压实、夯实、挤密地基	247
10.4.1	压实地基	248
10.4.2	夯实地基	249
10.4.3	挤密地基	251

10.5	复合地基	252
10.5.1	复合地基的承载力计算	252
10.5.2	复合地基处理方法	253
10.6	注浆法	255
10.7	地基加固与基础托换	256
10.7.1	树根桩法	256
10.7.2	静压桩法	257
10.8	组合型地基处理	257
	知识归纳	258
	思考与练习	259

第11章 区域性地基 260

11.1	湿陷性黄土地基	260
11.1.1	湿陷性黄土的基本性质及 影响因素	260
11.1.2	黄土湿陷性评价	261
11.1.3	湿陷性黄土地基的工程 措施	263
11.2	膨胀土地基	264
11.2.1	膨胀土的基本性质及影响 因素	264
11.2.2	膨胀土的胀缩性指标和地 基评价	265
11.2.3	膨胀土地基的工程措施	267
11.3	红黏土地基	268
11.3.1	红黏土的基本性质	268
11.3.2	红黏土地基的工程措施	269
11.4	山区地基	269
11.4.1	土岩组合地基	270
11.4.2	岩溶	272
11.4.3	土洞	274
11.5	冻土地基	275
11.5.1	冻土的特征及分布	275
11.5.2	地基土冻胀性分类及冻土 地基对建筑物的危害	275
11.5.3	冻土地基的工程措施	276
	知识归纳	276
	思考与练习	277

参考文献 278

第1章 绪 论

1.1 本学科的研究对象和内容

土力学是应用力学的方法来研究土的性质的一门应用学科,是工程力学的一个分支。土力学被广泛应用于地基、挡土墙、土工建筑物、堤坝等设计中。受到建筑物荷载影响的土层称为地基。负责传递建筑物荷载的结构部分称为基础。

土在工程中有两类用途:一类是作为建筑物的地基,由地基来承受建筑物的荷载;另一类是把土作为建筑材料,如堤坝、路基。在实际工程中,天然土层具有很强的区域性特征,而且土的性质是非常复杂的。在工程建设前必须充分了解场地的工程地质情况,对土体做出正确的评价。建筑物对土体的影响程度与基础形式、上部荷载等有关。很多情况下,天然土层不能满足工程要求,需要进行地基处理或者对基础进行设计,如确定基础类型、基底面积、埋置深度等。

土力学是以工程力学和地质学的知识为基础,研究土体在力的作用下的应力-应变或应力-应变-时间的关系和强度,解决土木工程中地基和基础设计、施工时遇到的问题。土力学问题研究的实际范围是空间半无限体,工程计算分析时其边界是近似的,而土体属于高度非线性材料,岩土试样的性质与原状岩土的性质往往存在较大差别,因此,与土木工程中的其他学科相比,土力学的计算模型往往具有较大的不确定性,需要结合经验、试验进行综合分析。

土力学的研究内容分为基础理论和工程应用两个方面。

基础理论研究主要是研究土在静、动载荷作用下的力学性质,并结合实际工程进行理论分析和数值模拟。考虑静载荷作用时,主要研究:①土的变形特性。通常利用固结仪、三轴压缩仪研究土的固结和次时间效应,以确定相应的参数;②土的强度。通常利用直剪仪、三轴压缩仪、单剪仪等测定土的应力-应变关系,确定抗剪强度指标,研究、建立强度准则和强度理论;③土的渗透性。通常利用渗透仪,研究土孔隙中流体(水或空气)的流动规律,并确定其渗透系数等。对于动载荷,主要研究土的动力性质。通常利用动力三轴仪研究土在动力条件下的应力-应变关系(包括阻尼、动力强度等与频率的关系),应力波在土中的传播规律以及砂土液化规律等。另外,通过试验主要研究土流变性能,建立应力-应变时间关系,长期强度和相应的极限平衡理论。具体包括以下方面:研究土的渗透性和渗流;研究土体的应力-应变和应力-应变-时间的关系以及强度准则和理论;研究在均布荷载或偏心荷载以及在各种形式基础的作用下,基础与地基土体接触面上的应力分布和地基土体中的应力分布,地基的压缩变形及其与时间的关系以及地基的承载能力和稳定性等。本课程的内容只涉及静载荷。工程中最常遇到的是不随时间变化的载荷,如建筑物和设备自重,水压力、土压力。对于载荷随时间变化很慢的动载荷,也可以近似看作静载荷。

工程应用研究主要是通过现场试验和长期观测,研究解决土工建筑物、地基、地下隧道和防护抗震工程等的稳定性及其处理措施以及土体作用于挡土结构物上的侧压力,即土压力的大小和分布规律等工程实际问题;根据极限平衡原理,用稳定性系数评价天然土坡的稳定性并进行人工土坡的设计;计算在自重和建筑物附加荷载作用下土体的侧向压力,为设计挡土结构物提供依据;改进和研制为进行上述研究所必需的技术、方法和仪器设备。

实际工程中土力学涉及的范围主要包括土质学、地质学、工程勘察、地基基础(地基处理、基础工程)、开挖工程(基坑开挖、隧道开挖)、支护工程(基坑支护、边坡支护及泥石流防治)、工程检测与监测等。以上问题其实都可以归结为边坡稳定、土压力和地基承载力三个问题。

1.2 本学科的发展历史

土力学的理论基础,源于18世纪工业革命的欧洲。随着资本主义工业化的发展,陆上交通进入了所谓的“铁路时代”。因此,最初有关土力学的个别理论多与解决铁路路基问题有关。

法国科学家Coulomb在1773年根据试验建立了砂土抗剪强度公式,后来由Mohr进一步发展成为Mohr-Coulomb强度理论。1776年Coulomb又提出了计算挡土墙土压力的滑楔理论。90多年后,英国的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Coulomb理论被后人并称为古典土压力理论。1856年,法国工程师Darcy通过室内渗透试验研究,建立了有孔介质中水的渗透理论,即著名的Darcy定律。1885年,法国学者Boussinesq求得了弹性半空间在竖向集中力作用下的应力和变形的理论解答。这些古典的理论和方法,直到今天,仍不失其理论和实用的价值。

在长达一个多世纪的发展过程中,许多研究者承继前人的研究,总结了实践经验,为孕育本学科的雏形而做出贡献。1922年瑞典的Fellenius为解决铁路塌方问题,提出了著名的瑞典分弧法分析土坡的稳定性。1925年Terzaghi归纳发展了以往的成就,形成了土力学的有效应力原理和土的固结理论并发表了他的经典著作《土力学》,随后又发表了一系列文章,最终奠定了他作为现代土力学创始人的地位。这些比较系统完整的科学著作的出现,带动了各国学者对本学科各个方面的探索。从此,土力学及地基基础就作为独立的学科而取得不断的进展。

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,即压硬性和剪胀性,不再把土体简单化为理想弹性介质或理想弹塑性介质。1963年,英国学者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。

时至今日,土建、水利、桥隧、道路、海口、海洋等有关工程中,以岩土体的利用、改造与整治问题为研究对象的科技领域,因其区别于结构工程的特殊性和各专业岩土问题的共同性,已融合为一个自成体系的新专业——“岩土工程(Geotechnical Engineering)”。

1.3 岩土工程和岩土工程体制

关于岩土工程的定义,在《岩土工程基本术语标准》(GB/T 50279—2014)中为“土木工程中涉及岩石和土的利用、整治或改造的科学技术”。这一定义可以概括为三个层次:

(1)岩土工程是以土力学与基础工程、岩石力学与工程等为基础,并与工程地质学密切结合的综合性学科。

(2)岩土工程以岩石和土的利用、整治或改造作为研究内容。

(3)岩土工程服务于各类主体工程的勘察、设计与施工的全过程,是这些主体工程的组成部分。

岩土工程是土木工程学科的一门重要分支学科,也是寓于土木工程各主体工程之中的学科。但岩土工程又有其特有的、不同于上部结构的规律和研究方法,将它们共同规律从各种主体工程中归纳出来进行研究,有助于更好地解决各类工程中的岩土工程问题,这是岩土工程学之所以能发展成为一门学科的客观基础。

岩土工程按工作内容分为岩土工程勘察、岩土工程设计、岩土工程施工、岩土工程检测和岩土工程管理等;按工程类型分为岩土地基工程、岩土边坡工程、岩土洞室工程、岩土支护工程和岩土环境工程等。

岩土工程体制是指在土木工程领域中,处理岩土工程问题的一种符合市场经济的运行机制,在业主、上部结构设计、岩土工程咨询之间建立相互配合协调的技术和经济关系的一种运行模式。在20世纪中期,Terzaghi等在解决岩土工程问题的过程中,发展了岩土工程技术,创造了这种符合市场经济原则,与工程实践紧密结合的岩土工程咨询业。后来许多市场经济国家按照这种模式建立起岩土工程体制,其服务对象不分行业,其工作内容将与地质调查和设计融为一体,其技术人员具有地质和工程两方面的素养,是一种一揽子服务、全过程服务的技术咨询工作,这也成为岩土工程师从业的成功模式。

从20世纪50年代开始,我国实行的是工程建设的勘察、设计与施工三个阶段的体制,分别由勘察、设计和施工三种不同类型的单位实施。这种体制的特点是勘察、设计与施工单位的分工明确,各负其责。但在实际工程中,总是相互联系、相互制约,例如,地基承载力的确定,不仅与地质条件有关,也与工程条件有关。岩土工程勘察和设计应由一个单位、一个工种来完成。

1986年,国家计划委员会正式发文要求在全国逐步推广岩土工程体制。目前,我国的岩土工程界已出现了多方面的显著变化:①勘察单位从单纯的勘察变为参与岩土工程勘察、设计、施工、检测与监理等全过程;②工程成果报告加深了针对工程的分析评价力度,量化地提出了工程设计方案或工程处理的方案与具体建议,改变了勘察工作局限于“打钻、取样、试验、提报告”的局面;③编制了岩土工程技术标准,开展了注册岩土工程师的考试与注册。

但是这些改革还没有从根本上解决原来的勘察、设计分工的主要弊端,没有触动部门条块分割的状况,没有完全建立岩土工程体制的基本框架。因此,我国岩土工程体制的建立,任重而道远。

1.4 本课程的学习方法

土力学与地基基础是一门实践性较强的专业基础课。本课程的学习方法是：

(1)学习本课程，首先应重视工程地质的基本知识，培养阅读和使用工程地质勘察报告的能力；其次必须牢固掌握土的应力、应变、强度和地基计算等土力学基本原理；进而能够应用这些基本概念和原理，结合其他课程的理论知识，分析和解决实际工程中地基、基础方面的问题。既要注意与其他学科的联系，又要注意紧紧抓住强度和变形这一核心问题。

土工试验是土力学发展的重要条件，摩尔—库仑定律和达西定律都是在试验的基础上建立的土力学基本理论。了解地基勘察和原位测试技术以及室内土工实验方法也是本课程的一个重要方面。实际上，这还是科学地认识土的工程特性的入门台阶和掌握地基基础科学实验基本手段的必由之路。

(2)土力学研究的是土体中最普遍、最基本的规律。土木工程专业的很多课程，如钢筋混凝土、砌体结构、抗震、隧道工程、建筑施工等，都要以土力学为基础。因此，这门课程是学习一系列后续课程的重要基础。

(3)土力学的研究方法与其他学科的研究方法有很多相同之处。充分理解土力学的研究方法，不仅可以深入掌握这门学科，而且也有助于学习其他学科的技术理论和培养正确的分析问题和解决问题的能力，为今后接近实际问题、从事科学研究工作打下基础。



思考与练习

问答题

1. 简述土力学、地基以及基础的概念和相互关系。
2. 本课程有什么特点？
3. 如何学好土力学与地基基础这门课程？

第2章 土的物理性质与工程分类

本章要点

1. 掌握土的三相组成及土的结构构造;
2. 掌握土的物理性质指标的定义及指标之间的相互换算;
3. 掌握无黏性土的密实度及黏性土的界限含水率、液性指数、塑性指数;
4. 了解黏性土的灵敏度与触变性;
5. 熟悉《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)中关于土的分类方法;
6. 掌握密度试验、含水率试验、土粒比重试验以及液塑限试验的试验过程、成果整理及分析。

2.1 土的组成及结构与构造

土是地球表面的坚硬岩石在一系列风化作用下形成的大小悬殊的颗粒,经过不同的搬运方式,在各种自然环境中沉积生成的松散沉积物。一般情况下,土是由固体颗粒(固相)、水(液相)和气体(气相)所组成的三相体系。固体颗粒包括矿物颗粒和有机质,并由其构成土的骨架,骨架间有许多孔隙,则被水、气所填充。若土中孔隙全部为水所充满时,称为饱和土;若孔隙全部为气体所充满时,称为干土;土中孔隙同时有水和气体存在时,称为非饱和土。饱和土和干土是两种特殊情况的土,均为两相体系。土体三个组成部分本身的性质以及他们之间的比例关系和相互作用决定着土的物理力学性质。

2.1.1 土的固体颗粒(固相)

土的固体颗粒是土的主要组成部分,是决定土的性质的主要因素。土颗粒的大小、形状、矿物成分及颗粒级配对土的物理力学性质有很大的影响。

1. 粒组划分

自然界中的土都是由大小不同的土粒组成。随着土粒由粗到细逐渐变化,土的性质也相应地发生变化。颗粒的大小称为粒度,通常以粒径表示。工程上将各种不同的土粒按其粒径范围,划分为若干粒组,每个粒组之内土的工程性质相似。划分粒组的分界尺寸称为界限粒径。土的粒组划分方法各行业部门并不完全一致,目前常用的一种土粒粒组的划分方法是根据国家标准《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007)规定的界限粒径 200 mm、60 mm、2 mm、0.075 mm、0.005 mm 把土粒分为六大粒组:漂石(块石)、卵石(碎石)、砾粒、砂粒、粉粒和黏粒。粒组划分见表 2-1。

表 2-1 粒组划分

粒组	颗粒名称		粒径 d 的范围/mm	一般特征
巨粒	漂石(块石)		$d > 200$	透水性很大, 无黏性, 无毛细水
	卵石(碎石)		$60 < d \leq 200$	
粗粒	砾粒	粗砾	$20 < d \leq 60$	透水性大, 无黏性, 毛细水上升高度不超过粒径大小
		中砾	$5 < d \leq 20$	
		细砾	$2 < d \leq 5$	
	砂粒	粗砂	$0.5 < d \leq 2$	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		$0.005 < d \leq 0.075$	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		$d \leq 0.005$	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、卵石和圆粒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. 粉粒或称粉土粒, 粉粒的粒径上限 0.075 mm 相当于 200 号筛的孔径。
3. 黏粒或称黏土粒, 黏粒的粒径上限也有采用 0.002 mm 为标准的。

2. 土的颗粒级配

天然土体中包含大小不同的颗粒, 为了表示土粒的大小及组成情况, 通常以土中各个粒组的相对含量(即各粒组占土粒总量的百分数)来表示, 称为土的颗粒级配。

土的颗粒级配是通过土的颗粒分析试验测定的。《土工试验方法标准(2007 版)》(GB/T 50123—1999)中规定: 对于粒径小于或等于 60 mm、大于 0.075 mm 的粗粒组, 可用筛分法测定; 对于粒径小于 0.075 mm 的细粒组, 可用沉降分析法测定。沉降分析法又分为密度计法(比重计法)、移液管法等。

筛分法试验是用一套孔径不同的标准筛(如 20 mm、10 mm、5 mm、2 mm、1 mm、0.5 mm、0.25 mm、0.1 mm、0.075 mm), 按从上到下筛孔逐渐减小放置。将事先称过质量的烘干土样过筛, 称出留在各筛上的土的质量, 然后计算占总质量的百分数, 即可求得各个粒组的相对含量。

沉降分析法是根据球状的细颗粒在水中下沉的速度与颗粒直径的平方成正比的原理, 把颗粒按其在水中的下沉速度进行粗细分组。在试验室具体操作时, 可采用密度计法(比重计法)或移液管法测得某一时间土粒沉降距离 L 处土粒和水混合悬液的密度, 据此可计算小于某一粒径的累计百分含量。采用不同的测试时间, 可计算出细颗粒各粒组的相对含量。

根据颗粒分析试验结果, 可以绘制出如图 2-1 所示的土的级配曲线。图中纵坐标表示小于某粒径的土粒累计百分含量, 横坐标表示土粒粒径, 以 mm 表示。由于土体中所含粒组的粒径往往相差几千倍、几万倍甚至更大, 且细粒土的含量对土的性质影响很大, 必须清楚表示, 因此, 将粒径的坐标取为对数坐标利用颗粒级配曲线可以对粗粒土进行分类定名, 还可以评价土的不均匀程度及连续程度进而判断土的级配好坏。

从曲线的坡度陡缓可以大致判断土粒的均匀程度和级配好坏。如曲线的坡度缓, 表示

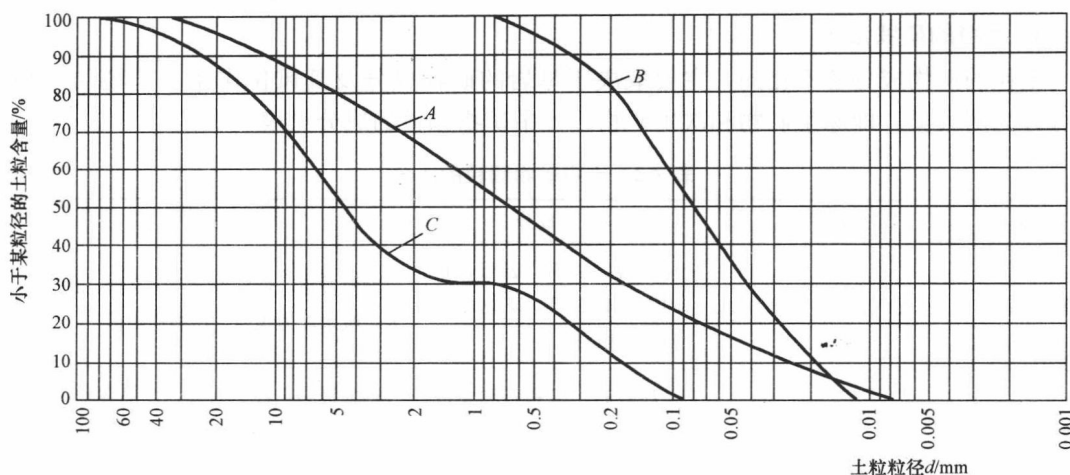


图 2-1 土的级配曲线

土的粒径分布范围宽，粒径大小相差悬殊，土粒不均匀，级配良好；反之，如曲线的坡度陡，则表示土的粒径分布范围窄，粒径大小相差不多，土粒较均匀，级配不良。

为了定量反映土的不均匀性，工程上常用不均匀系数 C_u 来描述颗粒级配的不均匀程度：

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

式中 d_{60} ——小于某粒径的土粒质量占土总质量为 60% 时相应的粒径，即限定粒径；

d_{10} ——小于某粒径的土粒质量占土总质量为 10% 时相应的粒径，即有效粒径。

不均匀系数 C_u 值越大， d_{60} 与 d_{10} 相距越远，曲线越平缓，土粒粒径分布范围越广，土粒大小越不均匀，土易被压实； C_u 值越小， d_{60} 与 d_{10} 相距越近，曲线越陡，土粒粒径分布范围越狭窄，土粒大小越均匀，土不易被压实。一般情况下，工程上把 $C_u < 5$ 的土视为均匀的，属级配不良；把 $C_u > 10$ 的土视为不均匀的，属级配良好，这种土作为填方或垫层材料时，易于获得较大的密实度。

实际上，对于级配连续的土，采用单一指标 C_u ，即可达到比较满意的判别结果。但对于级配不连续的土，即缺乏中间粒径（ d_{60} 与 d_{10} 之间的某粒组）的土，级配曲线呈现台阶状（图 2-1 中 C 线），尽管其不均匀系数较大，但由于缺乏中间粒径的土，一般孔隙体积较大，所以，土的不均匀系数大，未必表明土中粗细土粒的搭配一定就好。此时，再采用单一指标 C_u 确定土的级配好坏是不够的，还要同时考虑级配曲线的整体形状。所以，需参考曲率系数 C_c 值：

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

式中 d_{30} ——土的粒径分布曲线上的某粒径，小于该粒径的土粒质量为总土粒质量的 30%。

一般认为，砂类土或砾类土同时满足 $C_u \geq 5$ 和 $C_c = 1 \sim 3$ 两个条件时，则定名为级配良好砂或级配良好砾；若不能同时满足上述两个条件，则为级配不良砂或级配不良砾。

对于级配良好的土，较粗颗粒间的孔隙被较细的颗粒所填充，这一连锁填充效应，使得土的密实度较好。此时，地基土的强度和稳定性较好，透水性和压缩性也较小。

3. 土粒的矿物成分

土粒的矿物成分各不相同，主要取决于母岩的矿物成分及其风化作用。土粒的矿物成分可分为两大类，即原生矿物和次生矿物，土中矿物颗粒的成分见表 2-2。

表 2-2 土中矿物颗粒的成分

名称	成因	矿物成分	特征
原生矿物	岩石经过物理风化形成	石英、长石、云母、角闪石、辉石等，矿物成分与母岩相同	颗粒较粗，性质稳定，无黏性，透水性较大，吸水能力很弱，压缩性较低
次生矿物	原生矿物经化学风化(成分改变的过程)后形成	高岭石、伊利石和蒙脱石等，矿物成分与母岩不同	颗粒极细，种类很多，以晶体矿物为主。次生矿物主要是黏土矿物。次生矿物性质较不稳定，具有较强的亲水性，遇水易膨胀

2.1.2 土中水(液相)

土中水即为土的液相，其含量对土(尤其是黏性土)的性质影响较大。土中水除了一部分以结晶水的形式紧紧吸附于固体颗粒的晶格内部外，还存在结合水和自由水两大类。

1. 结合水

黏土颗粒表面通常带负电荷，在土粒电场范围内，极性分子的水和水溶液中的阳离子，在静电引力的作用下，被牢牢吸附在土颗粒周围，形成一层不能自由移动的水膜，这种水称为结合水。在土粒形成的电场范围内，随着距离土颗粒表面的远近不同，水分子和水化离子的活动状态及表现性质也不相同。根据水分子受到静电引力作用的大小，结合水分为强结合水和弱结合水，如图 2-2 所示。

(1)强结合水。强结合水是受到土颗粒表面强大的吸引力而牢固地结合在土颗粒表面的结合水。

其性质接近于固体，不能传递静水压力，没有溶解盐类的能力，冰点为 $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，密度为 $1.2\sim 2.4\text{ g/cm}^3$ ，在温度达到 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时，才能被蒸发，具有极大的黏滞度、弹性和抗剪强度。黏性土中只含有强结合水时，呈固体状态，磨碎后则呈粉末状态，砂土中的强结合水很少，仅含强结合水时呈散粒状。

(2)弱结合水。弱结合水是强结合水以外，电场作用范围以内的水。它也受颗粒表面电荷所吸引而定向排列于颗粒四周，但电场作用力随远离颗粒而减弱。它是一种黏滞水膜，仍不能传递静水压力，但较厚的弱结合水膜能向邻近较薄的水膜缓慢转移。弱结合水的存在是黏性土在某一含水量范围内表现出可塑性的原因。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。

2. 自由水

自由水是指存在于土粒形成的电场范围以外能自由移动的水。自由水和普通水相同，有溶解能力，冰点为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，能传递静水压力。按自由水移动时所受作用力的不同，自由水可分为重力水和毛细水。

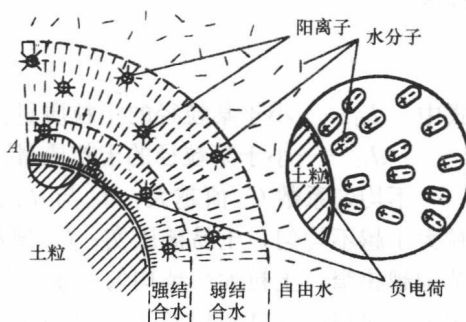


图 2-2 黏粒表面的水

(1)重力水。重力水是指在重力或压力差的作用下，能在土中自由流动的水。一般指地下水位以下的透水土层中的地下水，对于土粒和结构物的水下部分起浮力作用。重力水在土孔隙中流动时，对所流经的土体施加动水压力。施工时，重力水对基坑开挖、排水等方面均有很大影响。

(2)毛细水。土体内部存在着相互贯通的弯曲孔道，可以看成许多形状不一、大小不同、彼此连通的毛细管。由于受到水与空气界面的表面张力的作用，地下水将沿着这些毛细管逐渐上升，从而在地下水位以上形成一定高度的毛细水。毛细水的上升高度和速度与土中孔隙的大小和形状、颗粒尺寸以及水的表面张力等有关。在工程中，毛细水的上升高度和速度对于建筑物地下部分的防潮措施和地基土的浸湿、冻胀等有重要影响。当土孔隙中局部存在毛细水时，使土粒之间由于毛细压力互相靠近而压紧，如图 2-3 所示，土因此会表现出微弱的凝聚力，称为毛细凝聚力。这种凝聚力的存在，使潮湿砂土能开挖一定的高度，但干燥以后，毛细凝聚力消失，就会松散坍塌。

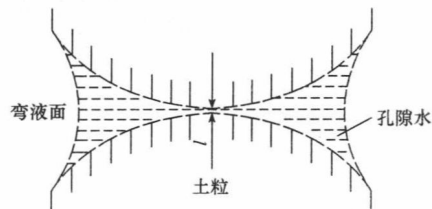


图 2-3 毛细水压力示意图

2.1.3 土中气体(气相)

土中气体即为土的气相，存在于土孔隙中未被水占据的空间。土中气体分为自由气体和封闭气体。

1. 自由气体

自由气体与大气连通，在粗粒土中，常见自由气体，在外力作用下，自由气体极易排出，它对土的性质影响不大。

2. 封闭气体

封闭气体与大气隔绝，在细粒土中，常存在封闭气体，封闭气体不能排出，在压力作用下可被压缩或溶解于水中，压力减小时又能有所复原，使土的渗透性减小、弹性增大、延长土体受力后变形达到稳定的时间，对土的性质影响较大。

土中气体的成分与大气成分比较，主要的区别在于 CO_2 、 O_2 、 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 和较多的 N_2 。土中气体与大气交换越困难，两者的差别就越大。与大气连通不畅的地下工程施工中，要注意 O_2 的补给，以保证施工人员的安全。

2.1.4 土的结构

土颗粒之间的相互排列和联结形式称为土的结构。土粒的形状、大小、位置和矿物成分以及土中水的性质与组成，对土的结构有直接的影响。土的结构可分为单粒结构、蜂窝结构和絮状结构三种类型。

1. 单粒结构

单粒结构是由较粗大土粒在水或空气中下落沉积而形成的，是碎石类土和砂类土的主要结构形式。因颗粒较大，土粒间的分子吸引力相对很小，颗粒间几乎没有联结，在沉积过程中颗粒间力的影响与重力相比可以忽略不计，即土粒在沉积过程中主要受重力控制。这种结构的特征是土粒之间以点与点的接触为主。根据其排列情况，可分为疏松状态和紧