

住房和城乡建设部土建类学科专业“十三五”规划教材
“十三五”江苏省高等学校重点教材（编号：2016-2-034）
高等学校土木工程专业应用型人才培养规划教材
本书获江苏省高校品牌专业建设工程的资助（项目编号：PPZY2015A041）

土力学与地基基础

朱建群 李明东 主编
卢廷浩 主审

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

土力学与地基基础/朱建群, 李明东主编. —北京:
中国建筑工业出版社, 2016.12
高等学校土木工程专业应用型人才培养规划教材
ISBN 978-7-112-20230-0

I. ①土… II. ①朱… ②李… 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 (2017) 第 004295 号

本书系根据《高等学校土木工程本科指导性专业规范》而编写。本书较系统地介绍了土木建设工程中土力学和地基基础的基本原理和分析计算方法, 其内容包括绪论、土的物理性质及工程分类、土的渗透性和渗透问题、土中应力计算、土的压缩性与地基沉降计算、土的抗剪强度、土压力与边坡稳定性、建筑地基、浅基础、桩基础和基坑工程。本书强调土力学与地基基础间的相互融合, 即土力学是为了解决工程建设中与土相关工程问题的理论, 而地基与基础则是土力学理论的运用和实践背景。

为强调本书的实用性, 每章均有较全面的例题、思考与练习题, 且均按最新规范进行编写。为便于学习, 每章首均有本章要点及学习目标, 内容由浅入深, 思路明确, 重点突出。本书可作为普通高等学校土木工程及相关专业的教学用书, 也可供土建工程技术人员参考使用。

为更好地支持本课程的教学, 本书作者制作了多媒体教学课件, 有需要的读者可以发送邮件至 jiangongkejian@163.com 索取。

责任编辑: 仕 帅 吉万旺 王 跃

责任设计: 韩蒙恩

责任校对: 焦 乐 张 颖

住房和城乡建设部土建类学科专业“十三五”规划教材
“十三五”江苏省高等学校重点教材 (编号: 2016-2-034)
高等学校土木工程专业应用型人才培养规划教材
本书获江苏省高校品牌专业建设工程的资助 (项目编号: PPZY2015A041)

土力学与地基基础

朱建群 李明东 主编

卢廷浩 主审

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京建筑工业出版社印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 21 字数: 521 千字

2017 年 7 月第一版 2018 年 9 月第二次印刷

定价: 42.00 元 (赠课件)

ISBN 978-7-112-20230-0

(29716)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

高等学校土木工程专业应用型人才培养规划教材 编委会成员名单 (按姓氏笔画排序)

顾 问：吕恒林 刘伟庆 吴 刚 金丰年 高玉峰
主任委员：李文虎 沈元勤
副主任委员：华 渊 宗 兰 荀 勇 姜 慧 高延伟
委 员：于清泉 王 跃 王振波 包 华 吉万旺
朱平华 张 华 张三柱 陈 蓓 宣卫红
耿 欧 郭献芳 董 云 裴星洙

出版说明

近年来，我国高等教育教学改革不断深入，高校招生人数逐年增加，对教材的实用性和质量要求越来越高，对教材的品种和数量的需求不断扩大。随着我国建设行业的大发展、大繁荣，高等学校土木工程专业教育也得到迅猛发展。江苏省作为我国土木建筑大省、教育大省，无论是开设土木工程专业的高校数量还是人才培养质量，均走在了全国前列。江苏省各高校土木工程专业教育蓬勃发展，涌现出了许多具有鲜明特色的应用型人才培养模式，为培养适应社会需求的合格土木工程专业人才发挥了引领作用。

中国土木工程学会教育工作委员会江苏分会（以下简称江苏分会）是经中国土木工程学会教育工作委员会批准成立的，其宗旨是为了加强江苏省具有土木工程专业的高等院校之间的交流与合作，提高土木工程专业人才培养质量，促进江苏省建设事业的蓬勃发展。中国建筑工业出版社是住房和城乡建设部直属出版单位，是专门从事住房城乡建设领域的科技专著、教材、标准规范、职业资格考试用书等的专业科技出版社。作为本套教材出版的组织单位，在教材编审委员会人员组成、教材主参编确定、编写大纲审定、编写要求拟定、计划出版时间以及教材特色体现和出版后的营销宣传等方面都做了精心组织和协调，体现出了其强有力的组织协调能力。

经过反复研讨，《高等学校土木工程专业应用型人才培养规划教材》定位为以普通应用型本科人才培养为主的院校通用课程教材。本套教材主要体现适用性，充分考虑各学校土木工程专业课程开设特点，选择 20 种专业基础课、专业课组织编写相应教材。本套教材主要特点为：抓住应用型人才培养的主线；编写中采用先引入工程背景再引入知识，在教材中插入工程案例等灵活多样的方式；尽量多用图、表说明，减少篇幅；编写风格统一；体现绿色、节能、环保的理念；注重学生实践能力的培养。同时，本套教材编写过程中既考虑了江苏的地域特色，又兼顾全国，教材出版后力求能满足全国各应用型高校的教学需求。为满足多媒体教学需要，我们要求所有教材在出版时均配有多媒体教学课件。

本套《高等学校土木工程专业应用型人才培养规划教材》是中国建筑工业出版社成套出版区域特色教材的首次尝试，对行业人才培养具有重要的意义。今年正值我国“十三五”规划的开局之年，本套教材有幸整体入选《住房和城乡建设部土建类学科专业“十三五”规划教材》。我们也期待能够利用本套教材策划出版的成功经验，在其他专业、其他地区组织出版体现区域特色的教材。

希望各学校积极选用本套教材，也欢迎广大读者在使用本套教材过程中提出宝贵意见和建议，以便我们在重印再版时得以改进和完善。

中国土木工程学会教育工作委员会江苏分会

中国建筑工业出版社

2016 年 12 月

前 言

土力学与地基基础是我国高等学校土木工程专业的重要专业基础课，理论与实践的结合性强是本课程最为突出的特点。本书定位于应用型高等学校的培养目标，在高等学校土木工程本科指导性专业规范的框架内，突出教材知识点的理论性和实际运用的可行性。

近年来，土力学与地基基础学科发展迅速，教材也呈现出百花齐放的势态。本教材的编写，一方面是基于新技术、新方法带来国家标准和行业规范的不断更新，在地基勘察及基础设计等方面出现了新要求和新内容；另一方面是基于应用型人才培养过程中调整了学时分布，加强了实践教学环节，要求部分知识点突出实用性。为使本教材成为土木工程专业方向的工具书，内容远超出了课程理论课时所对应的要求。编写过程中，编著者听取了部分优秀教师、专家和现场工程师的意见和建议，汲取了他们多年的教学改革和实践经验，参考了近年来出版的优秀教材和文献资料，重点突出了知识点的基础性和系统性，并力求做到叙述简明、文字简练、语言流畅。

本书采用法定的计量单位，所涉及相关规范均采用当前的最新规范。为便于学习，每章章首设置了本章要点及学习目标，章末设有本章小结、思考与练习题。

全书共 11 章，第 1、6、7 章由常州工学院朱建群编写，第 1、8、9 章由淮海工学院李明东编写，第 2 章由常州工学院施维成编写，第 3 章由南京工程学院金华编写，第 4 章由淮海工学院张振东编写，第 5 章由盐城工学院徐桂中编写，第 10 章由淮海工学院赵晓晴编写，第 11 章由合肥学院刘金龙编写。全书由朱建群和李明东完成统稿和修订工作。

本书由河海大学卢廷浩教授主审，朱建群、李明东担任主编，赵晓晴担任副主编。

由于水平有限，书中难免有不当或疏漏之处，恳请同行、专家和各位读者不吝指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
本章要点及学习目标	1
1.1 土、地基与基础	1
1.1.1 认识土	1
1.1.2 地基与基础	2
1.2 土力学与地基基础的学习 内容	3
1.3 学习土力学与地基基础的必要性 和意义	4
1.3.1 地基土与基础是建筑物的基石	4
1.3.2 土力学与地基基础问题是土木工程 领域最常见的工程事故原因	4
1.4 土力学与地基基础的学习特点与 建议	6
本章小结	7
思考与练习题	8
第 2 章 土的物理性质及工程分类	9
本章要点及学习目标	9
2.1 土的三相组成及物理性质	9
2.1.1 土的三相	9
2.1.2 土的颗粒特征	12
2.2 土的三相比例指标及指标 换算	15
2.2.1 土的三相比例指标	15
2.2.2 各指标间的换算关系	18
2.3 黏性土的界限含水率	19
2.3.1 液限、塑限和缩限	19
2.3.2 塑性指数、液性指数	20
2.3.3 土的灵敏度和触变性	21
2.3.4 液限与塑限的测定	21
2.4 无黏性土的密实度	22
2.5 土的工程分类	24

2.6 土的压实性	27
2.6.1 击实试验	27
2.6.2 土的压实特性	30
2.6.3 可松性系数	31
本章小结	31
思考与练习题	32
第 3 章 土的渗透性和渗透问题	33
本章要点及学习目标	33
3.1 概述	33
3.2 毛细现象及其对工程的影响	34
3.2.1 毛细现象	34
3.2.2 毛细现象对工程的影响	35
3.3 土的渗透规律	35
3.3.1 伯努利定理	35
3.3.2 达西定律	37
3.3.3 渗透系数确定方法及其影响 因素	38
3.3.4 成层土的等效渗透系数	42
3.4 渗透力及渗透变形	43
3.4.1 渗流力	43
3.4.2 渗透变形	44
本章小结	45
思考与练习题	46
第 4 章 土中应力	47
本章要点及学习目标	47
4.1 概述	47
4.2 土体的自重应力	48
4.2.1 均质土的自重应力	48
4.2.2 成层土的自重应力	48
4.3 基底压力	49
4.3.1 基底压力分布	50
4.3.2 基底压力的简化计算	50

4.3.3 基底附加压力	52	6.2.1 一点的应力状态	104
4.4 地基附加应力	52	6.2.2 库仑定律	105
4.4.1 竖向集中力下的地基附加应力	52	6.2.3 莫尔-库仑强度理论	106
4.4.2 竖向分布荷载作用下的地基附加应力	56	6.2.4 土体是否达到破坏状态的判断	106
4.4.3 条形面积上竖向荷载作用下的地基附加应力	62	6.2.5 极限平衡状态	107
4.4.4 非均质和各向异性地基中的附加应力	68	6.3 土的抗剪强度试验	109
4.5 饱和土的有效应力原理	69	6.3.1 直接剪切试验	109
4.5.1 有效应力原理的基本概念	69	6.3.2 三轴压缩试验	110
4.5.2 土中水渗流时(一维渗流)有效应力计算	70	6.3.3 无侧限抗压强度试验	112
本章小结	72	6.3.4 十字剪切板试验	113
思考与练习题	72	6.4 孔隙压力系数	114
第5章 土的压缩性与地基沉降计算	74	6.5 土的剪切性状及抗剪强度指标的选择	117
本章要点及学习目标	74	6.5.1 土的剪切性状	117
5.1 概述	74	6.5.2 不同排水条件下的抗剪强度指标与指标的选用	119
5.2 土的压缩性及压缩指标	75	6.6 砂土的振动液化	121
5.2.1 土的压缩性	75	6.6.1 砂土液化及其工程危害	121
5.2.2 土的压缩性指标	75	6.6.2 砂土液化机理及其影响因素	122
5.3 地基最终沉降量计算	81	本章小结	123
5.3.1 分层总和法	81	思考与练习题	123
5.3.2 规范法	85	第7章 土压力及边坡稳定性	125
5.4 沉降与时间关系——土的单向固结理论	90	本章要点及学习目标	125
5.4.1 饱和土的渗透固结	90	7.1 概述	125
5.4.2 太沙基(Terzaghi)单向固结理论	91	7.1.1 挡土墙的用途及分类	125
5.5 应力历史对土的压缩性影响	97	7.1.2 土压力的种类	126
5.5.1 土的应力历史	97	7.1.3 影响土压力的因素	127
5.5.2 考虑应力历史影响的最终沉降量计算法	98	7.2 静止土压力计算	127
本章小结	100	7.3 朗肯土压力理论	128
思考与练习题	101	7.3.1 基本原理	128
第6章 土的抗剪强度	103	7.3.2 朗肯主动土压力	129
本章要点及学习目标	103	7.3.3 朗肯被动土压力	130
6.1 概述	103	7.3.4 几种特殊情况下的朗肯土压力计算	131
6.2 土的抗剪强度理论	104	7.4 库仑土压力理论	134
		7.4.1 主动土压力计算	134
		7.4.2 被动土压力计算	140
		7.5 关于土压力计算的讨论	141
		7.5.1 两种土压力理论的比较	141

7.5.2 关于挡土结构与土压力的 关系·····	142
7.6 土坡的稳定性·····	143
7.6.1 概述·····	143
7.6.2 无黏性土坡稳定分析·····	144
7.6.3 黏性土坡的圆弧条分法·····	145
本章小结·····	149
思考与练习题·····	150
第8章 建筑地基 ·····	151
本章要点及学习目标·····	151
8.1 建筑地基的破坏形式·····	151
8.1.1 整体剪切破坏·····	151
8.1.2 局部剪切破坏·····	152
8.1.3 冲剪破坏·····	152
8.1.4 地基三种破坏形式对比·····	153
8.2 地基承载力·····	153
8.2.1 地基承载力的理论解·····	153
8.2.2 其他情形下极限荷载的经验 公式·····	155
8.2.3 载荷试验方法确定地基 承载力·····	156
8.2.4 确定地基承载力的其他方法·····	157
8.2.5 地基承载力特征值的深宽 修正·····	159
8.3 地基整体稳定性计算·····	160
8.3.1 一般情况下的地基稳定性 计算·····	160
8.3.2 受边坡影响的地基整体 稳定性·····	160
8.3.3 抗浮稳定性计算·····	161
8.4 建筑地基勘察成果利用·····	161
8.4.1 建筑地基岩土工程勘察报告的 内容·····	162
8.4.2 一般建筑地基的岩土工程勘察 报告成果提取·····	162
8.4.3 浅基础设计中勘察成果核心 信息及其用途·····	162
8.4.4 桩基础设计中勘察成果核心 信息及其用途·····	163
8.4.5 基坑设计中勘察成果核心信息 及其用途·····	163

8.5 特殊土地基·····	163
8.5.1 山区地基·····	163
8.5.2 软弱地基·····	164
8.5.3 液化地基·····	165
8.5.4 土岩组合地基·····	168
8.6 地基变形的危害和减轻措施·····	169
8.6.1 地基变形的危害·····	169
8.6.2 建筑措施·····	169
8.6.3 结构措施·····	170
8.6.4 施工措施·····	171
8.7 地基处理·····	171
8.7.1 置换法·····	171
8.7.2 预压法·····	171
8.7.3 压实和夯实法·····	172
8.7.4 挤密法·····	173
8.7.5 拌合法·····	174
8.7.6 土工合成材料法·····	174
8.7.7 加筋法·····	175
8.7.8 复合地基·····	175
本章小结·····	175
思考与练习题·····	176
第9章 浅基础设计 ·····	177
本章要点及学习目标·····	177
9.1 地基基础设计的基本要求·····	177
9.1.1 总体要求·····	177
9.1.2 地基基础设计等级·····	177
9.1.3 地基基础设计计算内容·····	177
9.1.4 地基基础设计中作用效应和抗力 限值的选取·····	178
9.1.5 地基基础设计中作用组合的 效应设计·····	178
9.2 浅基础的概念、类型和设计 步骤·····	180
9.2.1 基础的类型·····	180
9.2.2 浅基础的类型·····	180
9.2.3 浅基础的适用条件·····	183
9.2.4 浅基础设计内容及步骤·····	183
9.3 基础埋置深度·····	184
9.3.1 确定基础埋深的基本原则·····	184
9.3.2 基础埋深的影响因素·····	185
9.4 基础底面尺寸的确定·····	186

9.4.1 承载力要求	186	10.5 单桩水平承载性能	233
9.4.2 按照持力层地基承载力要求初定 基础底面尺寸	186	10.5.1 水平荷载作用下的单桩受力 特性	233
9.4.3 按软弱下卧层承载力验算复核 基础底面尺寸	189	10.5.2 单桩水平承载力的确定	234
9.5 地基变形验算	191	10.5.3 单桩水平承载力特征值的 确定	236
9.5.1 地基变形特征	191	10.5.4 桩基在水平荷载作用下的理论 分析	237
9.5.2 地基变形要求与验算	192	10.6 群桩基础	247
9.5.3 地基变形过大的调整措施	193	10.6.1 群桩效应	247
9.6 刚性扩展基础设计	193	10.6.2 桩的布置	248
9.6.1 构造要求	194	10.6.3 桩身截面强度计算	250
9.6.2 设计计算	194	10.6.4 桩顶作用效应计算	252
9.7 扩展基础结构设计	196	10.6.5 承载力验算	252
9.7.1 构造要求	196	10.7 特殊条件下桩基竖向承载力 计算	253
9.7.2 结构计算	197	10.7.1 软弱下卧层	253
9.8 高层建筑筏形基础设计	205	10.7.2 负摩阻力	255
9.8.1 构造要求	205	10.7.3 抗拔承载力	258
9.8.2 设计计算	207	10.8 桩基变形计算	259
本章小结	211	10.8.1 桩中心距不大于 6 倍桩径的 桩基	259
思考与练习题	212	10.8.2 单桩、单排桩、疏桩基础	261
第 10 章 桩基础	213	10.8.3 软土地基减沉复合疏桩基础	264
本章要点及学习目标	213	10.9 承台设计	268
10.1 概述	213	10.9.1 承台的概念与作用	268
10.2 桩的分类和选取原则	213	10.9.2 基本要求	268
10.2.1 桩基础的基本结构形式	213	10.9.3 抗冲切计算	270
10.2.2 按材料分类	214	10.9.4 抗剪计算	273
10.2.3 按承载性能分类	214	10.9.5 抗弯计算	275
10.2.4 按施工工艺分类	215	10.9.6 局部承压	277
10.2.5 按成桩工艺对桩周土的影响 分类	215	本章小结	279
10.2.6 桩基选型时应考虑的主要 因素	216	思考与练习题	279
10.3 桩基础的设计内容与步骤	217	第 11 章 基坑工程	281
10.3.1 桩基设计内容	217	本章要点及学习目标	281
10.3.2 桩基设计原则	218	11.1 概述	281
10.3.3 桩长选取	220	11.1.1 基坑工程的概念及特点	281
10.4 单桩竖向承载性能	222	11.1.2 基坑支护结构的类型及适用 条件	281
10.4.1 单桩破坏模式	222	11.1.3 基坑支护结构的设计原则和 设计内容	283
10.4.2 单桩竖向极限承载力	223		
10.4.3 桩的承载力特征值	231		

11.2	基坑支护结构的水平荷载	284	11.5	排桩及双排桩的设计与 施工	297
11.2.1	作用在支护结构上的土压力 强度标准值	284	11.5.1	排桩设计	297
11.2.2	附加荷载作用下的土中附加 应力标准值	286	11.5.2	双排桩设计	300
11.2.3	支护结构顶部以上放坡或土钉 墙时土中附加竖向应力计算	287	11.5.3	排桩的施工	302
11.3	基坑支挡式结构分析	288	11.6	土钉墙	303
11.3.1	支挡式结构分析方法的选用 原则	288	11.6.1	土钉墙的稳定性验算	304
11.3.2	设计工况中最不利作用效应 问题	288	11.6.2	土钉承载力计算	306
11.3.3	平面杆系结构弹性支点法的 结构分析模型	289	11.6.3	土钉墙的构造要求	309
11.3.4	基坑变形控制值	292	11.7	重力式水泥土墙	311
11.4	基坑支护结构稳定性验算	292	11.7.1	重力式水泥土墙的稳定性 验算	311
11.4.1	悬臂式支挡结构嵌固深度 l_d 的 确定	292	11.7.2	重力式水泥土墙承载力验算	313
11.4.2	单层锚杆和单层支撑的支挡式 结构的嵌固深度 l_d 的确定	293	11.7.3	重力式水泥土墙的构造要求	313
11.4.3	锚拉式、悬臂式和双排桩支挡 结构的整体稳定性验算	293	11.8	基坑工程监测	315
11.4.4	坑底抗隆起稳定性验算	295	11.8.1	基本规定	315
11.4.5	坑底以下为软土时的滑动 稳定性验算	295	11.8.2	监测项目	316
11.4.6	渗流稳定性验算	296	11.8.3	监测点布置要求	317
			11.8.4	监测频率	318
			11.8.5	监测报警	319
			本章小结	322	
			思考与练习题	322	
			参考文献	323	

第 1 章 绪 论

本章要点及学习目标

本章要点：

土的来源及特点，地基与基础的区别与作用，土力学与地基基础领域的主要工程问题，课程特点及设置。

学习目标：

熟悉土的特点，提升对土的认识；掌握地基与基础的差别及在工程建设中的作用；掌握与土相关的主要工程问题。

1.1 土、地基与基础

1.1.1 认识土

对于土的概念，最早出现于《说文解字》，解释为“土，地之吐生物者也。”土字的笔画分别代表植物地上部分、表土层、植物地下部分和底土层，如图 1-1 所示。《新华字典》对土的解释为“地面上的泥沙混合物”。英文 soil、earth 的解释为“loose soft material in the top layer of the earth's surface of the earth consisting of humus and disintegrated rock in which plants can grow”，意为“地球表面由腐殖质和岩石风化产物构成的松软材料，植物可以在其中生长”。这些概念中主要包括两层含义，其一是从农学角度看，它是植物生长的基质；其二是从材料的角度看，它是一种由岩石风化成的泥（细颗粒）、砂（粗颗粒；“砂”同“沙”，土力学中常用“砂”字）和植物风化成的腐殖质组成的松软材料。在土木工程领域，土是建设环境和填筑材料，因此常用第二层含义，定义为岩石、生物风化产物的松散集合体。各种不同的土，如图 1-2 所示。

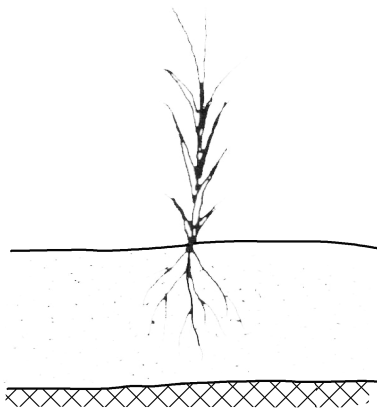


图 1-1 土最早的概念
(取自《说文解字》)

作为一种松散介质，土具有不同于连续固体介质（如金属、混凝土）的特性，具体表现为：

1. 碎散性。风化作用的结果是使整体岩石破碎成分散体，其矿物成分也可能发生改变并伴有有机质的加入。重力、水流和风等的搬运使土颗粒进一步破碎分散，浑圆度和分

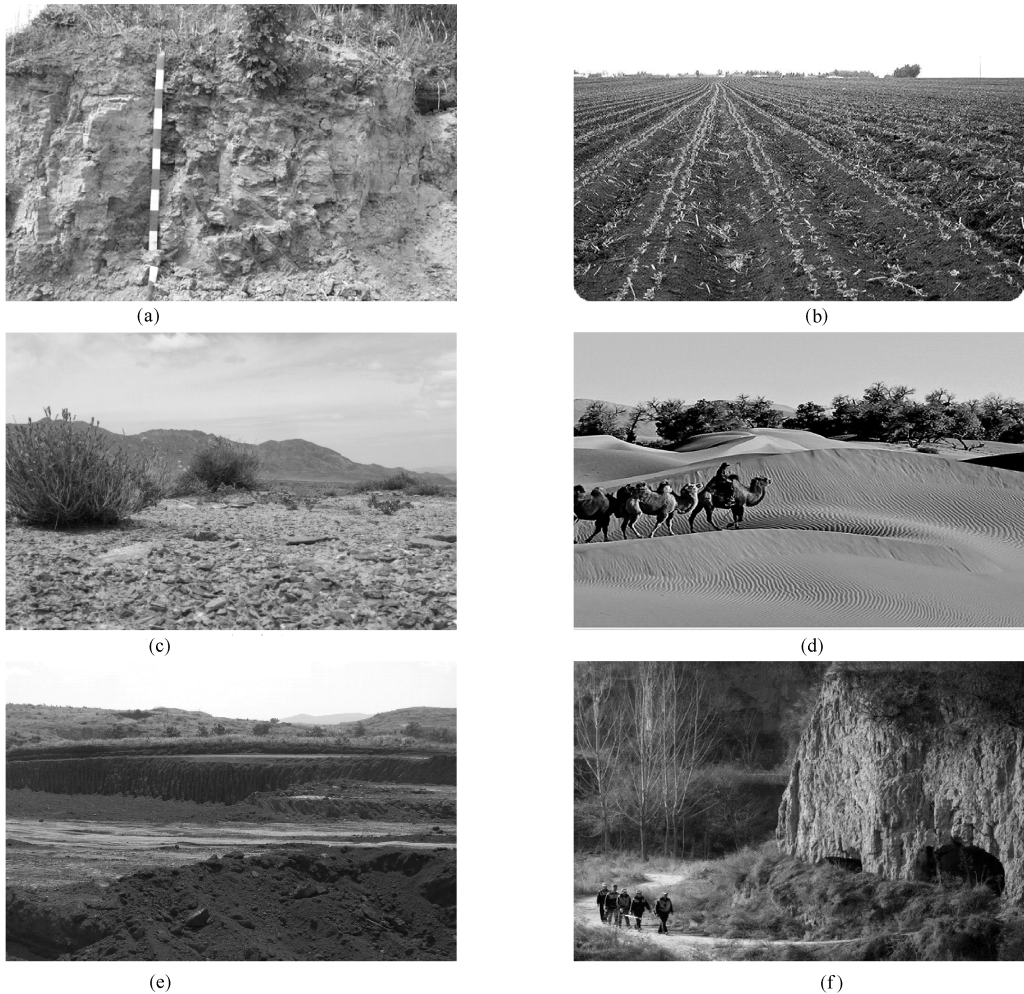


图 1-2 各种类型的土

(a) 常见土；(b) 东北黑土；(c) 戈壁土；(d) 沙漠土；(e) 广西红土；(f) 窑洞黄土

选择性得到提高。搬运过程中同时发生沉积，使土体具有不同的结构与构造。

2. 多相性。碎散的颗粒之间存在着大量的孔隙，孔隙中存在着水和气体，因此，土一般为三相体系。当土体处于饱水或干燥状态时，则为二相系。土颗粒之间的联系微弱，有时甚至没有联结。

3. 多样性。由于形成年代、生成环境及物质成分不同，自然界的土也就多种多样。同一场地，不同深度处土的性质不一样，甚至同一位置的土，其性质还往往随方向而异，如沉积土竖直方向上的透水性有时会弱于水平方向。

土的上述特性决定了其具有较大的透水性和较小的抗剪强度，在压力作用下体积缩小，在大范围内表现出非均质性和各向异性的特点，且随时间而不断变化。

1.1.2 地基与基础

基础是指将上部结构的各种作用传递到地基上的结构组成部分，地基是指支承基础的

土体或岩体，如图 1-3 所示。

基础是结构物的重要组成部分，一般由砖、石、混凝土、钢筋混凝土等材料构成，其作用是传递荷载。有基础传递荷载的过程中，一方面要考虑通过增加基础底面积来减少其单位面积上的荷载，即满足地基的承载能力；另一方面要考虑基础在使用过程中不会因外界环境的变化而裸露于地面，即满足基础自身的安全和正常使用。因此，基础主要尺度设计包括基础底面积和埋置深度的确定。基础的埋置深度是指基础底面到天然地面的距离。因此，基础设计的目标一方面是保证基础自身的安全和正常使用，另一方面是保证地基的安全。

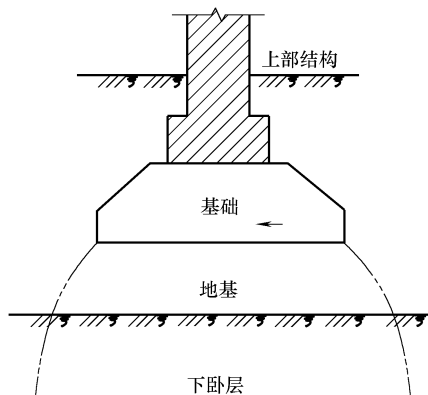


图 1-3 地基与基础示意图

地基按照材料构成可分为土质地基、岩石地基和土岩组合地基。地基的构成要素是土和地下水，土往往成层分布，常用横线表示土层分界线，用 Σ 表示地下水位线。建筑物的所有荷载最终都由地基来承担，地基的作用是支承基础及上部建筑物，同时建筑物荷载也会引起地基的变形，甚至破坏。当地基的强度、变形及稳定性不能满足上部建筑物要求时，可对地基进行预处理，称之为人工地基。反之，当满足上述要求而无需处理时，称为天然地基。由此可见，建筑物地基方面的主要工作是地基的勘察、评价和改良。

1.2 土力学与地基基础的学习内容

土力学是应用工程力学方法来研究土的力学性质的一门学科，主要学习土的物理性质、应力状态、变形特征和强度特性及随时间变化的规律，掌握与土相关工程问题的基本理论，如土压力、边坡稳定性、地基承载力等，是土木工程、交通工程、水利工程、电力工程、地质工程等领域的重要专业基础课程。

地基基础工程是在岩土工程勘察和上部结构设计的基础上进行地基基础设计的工程技术，主要学习地基评价和改良、浅基础结构、深基础结构和基坑围护结构等工程项目的设计理论和方法，确保工程的安全和正常使用。地基基础工程是一种应用工程技术，主要依照现行规范执行，如《建筑地基基础设计规范》GB 50007—2011、《建筑地基处理技术规范》JGJ 79—2012、《建筑基坑支护技术规范》JGJ 120—2011 等，具有很强的应用性。

本书根据《高等学校土木工程本科指导性专业规范》(2011)进行编写，内容包括土的物理性质及工程分类、土中水的运动规律、土中应力计算、土的压缩性与沉降计算、土的抗剪强度与边坡稳定性、地基承载力、天然地基上的浅基础、桩基础和基坑工程等，共分 11 章。绪论部分主要介绍土、地基与基础的概念及与工程的相关性，列举了工程中主要的问题。第 2 章至第 7 章为土力学部分，第 8 章至第 11 章为基础工程部分。土力学部分教学重点内容有：土的物理状态指标、地基附加应力计算、有效应力原理、地基最终沉降量计算、土的固结理论、土的抗剪强度理论、土坡稳定性理论、土压力理论及计算、地基承载力的确定与运用等。基础工程部分教学重点为：基础埋置深度的确定、扩展基础的

设计、连续基础的设计、桩基础的设计计算、基坑支护结构的受力与变形分析等。

通过本课程的学习,学生应掌握土力学与地基基础的基本原理,结合建筑结构及构件设计要求,具备进行一般工程结构物的地基基础设计能力,并对常见的地基基础工程事故,能正确分析产生的原因及合理评价。

1.3 学习土力学与地基基础的必要性和意义

1.3.1 地基土与基础是建筑物的基石

任何建筑物都建造在一定的地层上,建筑物的全部荷载都由它下面的地层来承担。建筑物地基与基础的设计和施工质量的好坏,对整个建筑物的质量和正常使用起到根本性作用。这是因为:基础工程属于地下隐蔽工程,如有缺陷,较难发现,也较难弥补和修复,而这些缺陷往往直接影响整个建筑物的使用甚至安全。另一方面,基础工程的进度,经常控制整个建筑物的施工进度;基础工程的造价,通常在整个建筑物造价中占相当大的比例,尤其是在复杂的地质条件下修建基础更是如此。

我国幅员辽阔、地质结构复杂,不同的地区具有不同的地质特征。因此,在进行建筑工程施工勘探的过程中,必须注重对于施工地地质结构的分析和调查,才能够确保建筑物有坚实的基础。现阶段,我国建筑工程施工中存在着诸多的不合理因素,如设计、施工期限、人员及费用等相关问题,这些可控和不可控因素对于建筑工程的施工产生了巨大的影响,尤其是地基基础的处理工作,更是不加重视,对后续的建筑工程施工过程中产生了严重的影响,导致工程质量存在着诸多的问题。只有足够重视和加强建筑工程地基基础的处理工作,才能够切实提高工程质量,保证工程如期保质保量地交付给相关单位使用。

除了作为建筑物的地基外,土体还可作为建筑材料,修筑堤坝与路基,也可作为隧道、地下建筑等构筑物的建筑环境而存在。由此可见,土体与工程建筑的关系十分密切。为保证各类建筑安全经济,使用正常,不发生各类工程事故,必须学习和掌握土体的力学性质及相关理论,熟知地基基础设计原理和先进经验。

1.3.2 土力学与地基基础问题是土木工程领域最常见的工程事故原因

工程实践表明,土力学与地基基础方面的工程问题主要表现在以下三个方面:

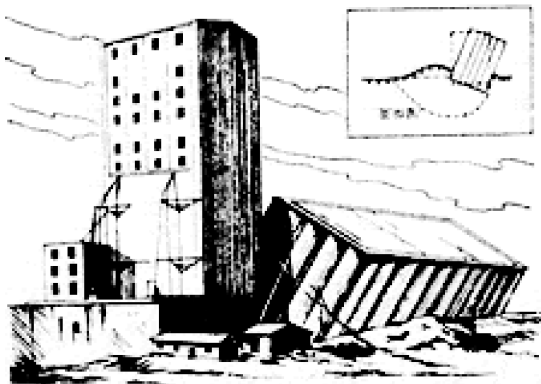


图 1-4 特朗斯康谷仓因承载力不足而倾倒

1. 强度问题。表现为因地基承载力不足而导致建筑物失稳。

案例:加拿大特朗斯康谷仓

该谷仓平面呈矩形,南北向长 59.44m,东西向宽 23.47m,高 31m。谷仓为圆筒仓,5排共计 65个圆筒仓。谷仓基础为钢筋混凝土筏板基础,厚度 61cm,埋深 3.66m。谷仓于 1911年动工,1913年秋完工。谷仓自重 20000t,相当于装满谷物后满载总重量的 42.5%。1913年 9月装谷物,10月 17日当谷仓已装了 31822m³谷物时,

发现其 1h 内竖向沉降达 30.5cm，向西倾斜，24h 后谷仓倾倒，西端下沉 7.32m，东端上抬 1.52m，倾斜度达 $26^{\circ}53'$ ，但上部钢筋混凝土筒仓坚如磐石，如图 1-4 所示。

谷仓失事的原因是：事先未对地基土进行调查，而是根据邻近结构物基槽开挖试验结果，计算得到地基承载力为 352kPa，并应用到此谷仓。1952 年经勘察试验与计算表明，谷仓地基实际承载力为 194~277kPa，远小于谷仓破坏时发生的压力 329.4kPa，因此，谷仓地基因超载发生强度破坏而滑动。

2. 变形问题。表现为土体因某些原因而产生建筑物所不允许的沉降，或因地基土不均匀导致建筑物产生差异变形而开裂，进而影响建筑物的正常使用。

案例 1：苏州虎丘塔

苏州虎丘塔位于苏州市虎丘公园山顶，落成于宋太祖建隆二年（公元 961 年），距今已有 1054 年的历史。全塔 7 层，高 47.5m。塔的平面呈八角形，由外壁、回廊与塔心三部分组成。塔身全部用青砖砌筑，外形仿楼阁式木塔，每层都有 8 个壶门，拐角处的砖特制成圆弧形，建筑精美。1961 年 3 月 4 日，国务院将此塔列为全国重点文物保护单位。

1980 年进行的一项现场调查表明，虎丘塔塔身已向东北方向严重倾斜，不仅塔顶离中心线已达 2.31m，而且底层塔身发生不少裂缝，东北方向为竖直向，西南方向为水平向。因此，该塔因裂缝明显且无稳定迹象成为危险建筑而封闭。勘察结果表明，宝塔倾斜是由于其坐落于不均匀粉质黏土层上，即因地基土层厚度不一而产生差异沉降，进而引起塔身倾斜。通过在塔基四周建造一圈桩排式地下连续墙，并对塔周围与塔基进行钻孔注浆和树根桩加固塔基等措施，对塔身倾斜的发展进行了有效控制。



图 1-5 苏州虎丘塔



图 1-6 意大利比萨斜塔

案例 2：意大利比萨斜塔

比萨斜塔自 1173 年 9 月 8 日动工，至 1178 年建至第 4 层中部、高度 29m 时，因塔明显倾斜而停工。94 年后，1272 年复工，经 6 年时间建完第 7 层，高 48m，再次停工中断 82 年。1360 年再次复工，至 1370 年竣工，前后历经近 200 年。该塔共 8 层，高 55m，全塔总荷重 145MN，相应的地基平均压力约为 50kPa。地基持力层为粉砂，下面为粉土和黏土层。由于地基的不均匀下沉，塔向南倾斜，南北两端沉降差 1.8m，塔顶离中心线已达 5.27m，倾斜 5.5° ，成为危险建筑，如图 1-6 所示。

3. 渗流问题。表现为因土体中水的流动引起管涌、流土等渗流破坏，最终导致构筑物的整体失事。

1998年长江流域发生特大洪水。九江段某防洪堤8月7日13:10发生管涌险情，20min后，在堤外迎水面找到2处进水口，又过了20min，防水墙后的土堤突然塌陷出一个洞，5m宽的堤顶随即全部塌陷，并很快形成宽约62m的溃口，如图1-7所示。1998年长江流域洪水中共发生各种险情6000余处，各种险情的统计图如图1-8所示。

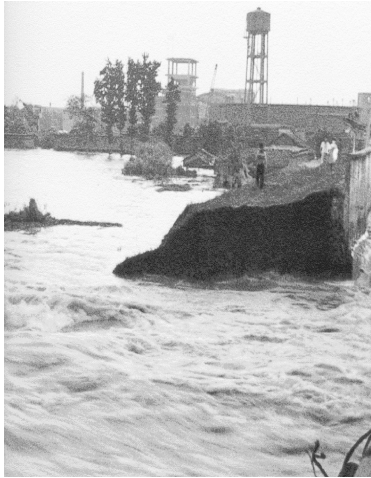


图 1-7 长江洪水中九江段因管涌溃口

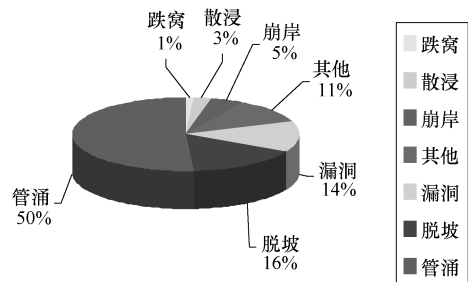


图 1-8 1998年长江流域洪水险情统计图

美国 Teton 坝位于美国 Idaho 州的 Teton 河上，是一座集防洪、发电、旅游、灌溉等功能为一体的综合利用工程。大坝为土质心墙坝，最大坝高 126.5m，坝顶长 945m，于 1972 年 2 月动工，1975 年建成。水库于 1975 年 11 月开始蓄水，1976 年春季库水位迅速上升，拟定水库水位上升限制速率为 0.3m/d。由于降雨，水位上升速率在 5 月份达到 1.2m/d。至 6 月 5 日右侧坝趾高程 1537.7m 处发现流浑水，在高程 1585.0m 也有浑水出露，两股水流有明显加大趋势；11 点 30 分，靠近坝顶的下游坝出现下陷孔洞；11 点 55 分，坝顶开始破坏，形成水库泄水沟槽。从发现流浑水到坝开始破坏经历了约 5h。耐人寻味的是，126.5m 高的 Teton 土坝不在最大坝高的河岸坝段破坏，而在坝高相对较小的河岸坝段破坏；坝体溃决不发生在坝基为冲积层的河床坝段，而发生在坝基为岩基的岸坡坝段。

从以上工程案例可见，基础工程实属百年大计，必须慎重对待。只有深入了解地基情况，掌握勘察资料，经过精心设计与施工，才能使基础工程做到既经济合理，又保证质量。

1.4 土力学与地基基础的学习特点与建议

本课程包括土力学和地基基础两个部分，涉及工程地质学、建筑力学、建筑材料、结构设计和施工等领域，内容广泛，综合性、理论性和实践性均很强。本书从不同角度阐述了作为建筑物地基的土的应力、变形和强度特性，及相关的建筑物基础的安全与稳定问

题,各问题看似独立,但又存在联系。学习过程中应从土木工程专业的要求出发,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、强度特性及计算中的基本概念和原理,结合结构设计原理与混凝土、钢筋混凝土等材料特性,熟悉和掌握地基基础的设计理论计算方法及工程应用。

课程学习中应注重以下几个方面:

1. 土体特性与土工试验的结合

土力学的研究对象为具体的工程材料——土,是经历了漫长的地质历史年代形成的,因而带了“自然”的特点。不同的自然环境造就了不同工程性质的土。对土的正确认识须是在土工试验的基础上,理论应通过试验论证,而不该以试验凑合理论。因此,在相关章节的试验中需认真观察土所表现出的特征。

2. 经典理论与实际工程的结合

经典的土力学理论,如朗肯土压力理论,是在对土体及其边界条件进行了简化的基础上得到的,理论计算结果往往经修正后才会与实际情况相符,这也正是源于土的复杂性、影响因素的多样性和对条件的不可确知性。因此,在土力学与地基基础的学习中不仅要领会和理解经典理论适用的范围和条件,而且在实际案例中需结合具体情况来运用经典理论。

总之,土力学与地基基础是一门古老而年轻的学科。古老,是因为其研究对象存在时间之长久,并且在我国灿烂的古代文明中有许多优秀的工程实例,如赵州桥、西北黄土窑洞、各类寺院。年轻,是因为该学科作为独立的学科而存在,源于1921年太沙基(Karl Terzaghi)土体固结理论的提出和1925年《土力学》一书的发表。土力学经历了从最初的小规模、少环节,以经验或简单实验为基础的古老发展阶段,进入到具有相当规模、多方面,以广泛工程实施为背景的传统发展阶段,再到以高、大、重、深建筑物为对象,且以“人地协调”、“持续发展”为目标的现代发展阶段。随着我国基础设施建设和城市化进程的不断推进,对土力学与地基基础提出了新的挑战,也为土木工程建设者提供良好的发展平台,土力学与地基基础学科必将得到更大的发展。

本章小结

土是由岩石经过物理风化和化学风化作用后的产物,是由各种大小不同的土粒按各种比例组成的松散体。在工程中,土或作为建筑物地基,或作为建筑材料,或作为建筑环境而存在。工程中,与土相关的工程问题主要表现在强度问题,变形问题和稳定性问题。大量的工程实践表明,与土相关的工程问题不可忽视,其产生的后果是灾难性的。

土力学是从工程力学范畴里发展起来的,它把土作为物理-力学系统,根据土的应力-应变-强度关系提出力学计算模型,用数学力学方法求解土在各种条件下的应力分布、变形以及土压力、地基承载力与土坡稳定等课题,同时根据土的实际情况评价各种力学计算方法的可靠性与适用性。基础工程是土力学在土木工程中的具体应用。基础是地基与上部结构相承接的人工构筑物,为满足工程建(构)筑物的稳定,越来越多的基础形式涌现。理论性与实践性相结合是本课程最明显的特点。

思考与练习题

- 1-1 何为土？何为地基？何为基础？
- 1-2 土有哪些特征？
- 1-3 与土有关的工程问题主要表现在哪些方面？

第 2 章 土的物理性质及工程分类

本章要点及学习目标

本章要点：

土的三相组成、粒径分布曲线、不均匀系数、曲率系数；土的三相比例指标及相互换算；黏性土的稠度、砂性土的密实度、土的工程分类、土的压实度。

学习目标：

了解土的成因和组成；掌握并熟练计算土的物理性质指标；掌握土的物理状态指标；熟悉土的工程分类和土的压实机理。

我们都有这样的生活经验：在一周边封闭的容器中装入土，并将其夯实，将水洒在土体表面，发现水慢慢不见了。这说明即使很密实的土体中仍存在空隙，使得水有存在的空间，即土不仅仅是土颗粒，还应包括水和空气。

同时，我们还有这样的经历：由细小颗粒组成的土、干燥的砂土在手掌中随风飘落，而黏土却可搓成“面疙瘩”，说明不同土的性质存在巨大差异。为了使工程师有可能根据同类土已知的性质去评价其性能，或提供一个可采用的描述与评价土的方法，土的工程分类就显得尤为重要了。土坝、路堤等工程中将土作为填筑材料而压实时，使用干土还是湿土更易压实，更能得到高的密实度？这就与土的压实机理有关。

2.1 土的三相组成及物理性质

2.1.1 土的三相

土通常由土粒、水和空气三个部分组成，称为土的三相体系。显然，土的三相体系组成情况，特别是固体颗粒的性质，直接影响土的工程特性。同一种土，密实时强度高，松散时强度低；水的含量低时硬，水的含量高时软。这说明土的性质不仅取决于三相组成的性质，而且三相之间的比例关系也是重要的影响因素。

若将土中交错分布的土粒、水和空气三相分别集中起来并分开表示，可构成理想的三相关系图，如图 2-1 所示。在三相图的左侧注明各相的质量或重力，右侧注明各相的体积。（以 V 表示），下标 a 、 w 、 v 、 s 分别表示空气、水、孔隙和土粒。具体表示如下：

V_a ——空气体积；

V_w ——水体积；

V_v ——孔隙体积，有 $V_v = V_w + V_a$ ；

- V_s ——土粒体积；
 V ——总体积，有 $V=V_s+V_v$ ；
 m_a ——空气质量， $m_a=0$ ；
 m_w ——水质量；
 m_s ——土粒质量；
 m ——土体总质量，有 $m=m_s+m_w$ 。

2.1.1.1 土的固相

土的三相组成中，固体颗粒构成土的骨架，其矿物成分及其组成、大小和形状是决定土物理力学性质的重要因素。

1. 土的矿物组成

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。土的固体颗粒物质分为无机矿物颗粒和有机质两类，无机矿物颗粒的成分又分为原生矿物和次生矿物两大类。

(1) 原生矿物

原生矿物是指岩浆在冷凝过程中形成的矿物，如石英、长石、云母等。土中的原生矿物是母岩经物理风化作用（机械破碎的过程）后残留下来的，因此，其物理化学性质较稳定。

(2) 次生矿物

次生矿物是原生矿物因氧化、水化、水解及溶解等化学作用而形成的新的矿物成分，主要有黏土矿物（高岭石、伊利石、蒙脱石）、无定形氧化物（ Al_2O_3 、 Fe_2O_3 ）和盐类（ $CaCO_3$ 、 $NaCl$ ）等。

黏土矿物是次生矿物中数量最多的矿物，主要由各种硅酸盐类矿物分解形成的含水铝硅酸盐，有较强的吸附水能力（尤其由蒙脱石组成的颗粒），表现出塑性，对土的工程性质有极大的影响。由黏土矿物组成的土颗粒极细，一般粒径小于 $5\mu m$ 。

(3) 有机质

土中的有机质主要是动植物分解后的残骸。分解彻底的称为腐殖质，其颗粒极细，粒径小于 $0.1\mu m$ ，呈凝胶状，带有电荷，具有极强的吸附性。工程中，当有机质含量 $W_u > 60\%$ 时，称为泥炭；当 $60\% \geq W_u > 10\%$ 时，称为泥炭质土；当 $10\% \geq W_u \geq 5\%$ 时，称为有机质土；当 $W_u < 5\%$ 时，则称为无机质土。根据土的状态指标，可将有机质土再细分为淤泥质土和淤泥。

有机质的存在对土的工程性质影响很大，主要表现在：随着有机质含量的增加，土的分散性加大，压缩性增大，强度减小，承载力降低。因此，工程中要求有机质含量大于 $3\% \sim 5\%$ 的土不宜作为填筑材料。

2. 黏土颗粒的带电性

我国将小于 $5\mu m$ 的颗粒定义为黏粒。对黏性土来讲，黏粒的含量和类型对土的性质起着决定性的作用，因为黏土颗粒极细，具有很大的比表面积和一定的带电性，当其与水相遇时，会产生复杂的物理化学变化。黏土颗粒的带电现象早在 1809 年就被俄国学者列依斯发现，他在潮湿的黏土块中插入两根玻璃管，管内撒上一层净砂，注入清水至同样高

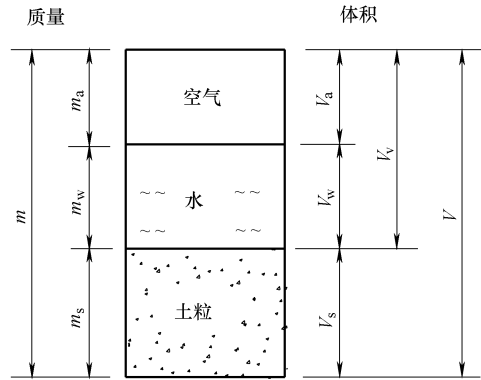


图 2-1 土的三相组成示意图

度，再在两根玻璃管中分别放入正负电极。经过一段时间后，正极玻璃管内的水慢慢混浊，同时水位逐渐下降，这说明极细小的黏粒本身带有一定量的负电荷，在电场作用下向正极移动，这种现象称为电泳。负极的玻璃管内，水仍然是清澈透明的，但水位逐渐升高，说明水分子在电场作用下向负极移动，由于水中含有一定量的阳离子，故水的移动实际是水分子随这些水化了的阳离子一起移动，这种现象称为电渗。电泳、电渗同时发生，统称为电动现象。电动现象可以用来加固软黏土地基，使软土的含水率降低，强度提高。

3. 双电层

表面带有一定量负电荷的黏粒，由于静电引力的作用，在水溶液中将吸引水中的阳离子到土粒表面。越靠近土粒表面，静电作用越大，吸引力越强，阳离子浓度越大；随着距土粒表面距离的增加，静电引力降低，阳离子浓度也逐渐下降，直至与孔隙中水溶液的浓度相近为止，这个层称为反离子层，如图 2-2 所示。土粒表面的负电荷与受土粒表面影响的阳离子层（反离子层）合起来称为双电层。

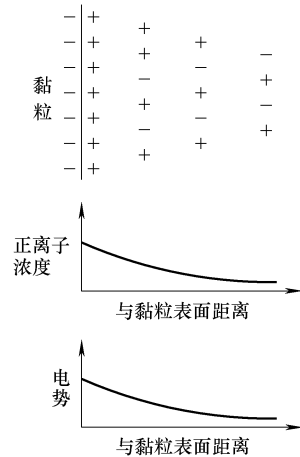


图 2-2 双电层示意图

2.1.1.2 土的液相

土中水按存在形态分为液态水、固态水和气态水。按照水与土相互作用程度的强弱，可将土中水分为结合水和自由水两大类。

1. 结合水

结合水是指受电荷吸引力作用而吸附于土粒表面的水。这种带电分子间吸引力高达几千到几万个大气压，使水分子和土粒表面牢固地吸附在一起。显然，结合水主要受到表面引力的作用，而不服从静水力学规律，其冰点低于 0°C 。

根据电荷作用的强弱，结合水又可分为强结合水和弱结合水。强结合水在最靠近土颗粒表面处，水分子和水化离子排列非常紧密，以致其密度大于 1.0，并有过冷现象，即温度降到零度以下不发生冻结的现象。强结合水没有溶解能力，不能传递静水压力，只有吸热变成蒸汽时才能移动。黏性土中只含有强结合水时，呈固体状态，磨碎后呈粉末状态。弱结合水是紧靠于强结合水外围的结合水膜，可从较厚水膜缓慢迁移到邻近较薄的水膜处，但仍不能传递静水压力。当土中含有较多弱结合水时，土体表现出一定的可塑性。

2. 自由水

自由水是存在于土粒表面电场范围以外的水。它的性质和普通水一样，能传递静水压力，冰点为 0°C ，有溶解能力。自由水可分为重力水和毛细水。

重力水是存在于地下水位以下透水层中的地下水，它在重力或压力差作用下能在土中产生渗流，可对土颗粒和建筑物产生浮力作用。重力水的渗流是地下工程排水的主要控制因素之一，对土中的应力状态和开挖基槽、基坑以及修筑地下构筑物都有重要的影响。

毛细水不仅受到重力的作用，还受到表面张力的支配，能沿着土的细孔隙从潜水面上升到一定的高度。毛细水上升现象对于公路路基的干湿状态及建筑物的防潮有重要影响。

2.1.1.3 土的气相

土中的气体存在于土孔隙中未被水所占据的部分，包括与大气连通的和不连通的两

类。与大气连通的气体对土的工程性质没有多大的影响，成分与大气相似，当土受到外力作用时，这类气体很快从孔隙中挤出。与大气不连通的密闭气体对土的工程性质有很大的影响，在压力作用下，这类气体可被压缩或溶解于水中，而当压力减小时，气泡会恢复原状或重新游离出来。含气体的土称为非饱和土，非饱和土的工程性质研究已成为土力学的一个新分支。

在淤泥、泥炭等有机土中，由于微生物的分解作用，在土中积蓄了一定数量的可燃气体和有害气体（如硫化氢、甲烷等）。含气的土层在自重作用下长期得不到压密，而形成高压缩性土层。施工时要注意土中有害气体的危害。

2.1.2 土的颗粒特征

2.1.2.1 粒组划分及其表示方法

1. 土颗粒的大小和形状

天然土中土粒大小变化悬殊，如大颗粒的粒径 $d > 200\text{mm}$ ，细粒土粒径 $d < 0.005\text{mm}$ ，两者粒径相差几万倍。土粒形状也不一样，有块状、粒状、片状等。土粒大小和形状不仅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，通常以粒径表示。工程上常把大小、性质相近的土粒合并为一组，称为粒组。划分粒组的分界尺寸称为界限粒径。粒组之间的分界线是人为划定的，划分时应使粒组界限与粒组性质的变化相适应，并按一定的比例递减关系进行。根据我国《土的工程分类标准》GB/T 50145—2007 规定的 5 个界限粒径 200、60、2、0.075 和 0.005 mm，其粒组划分标准见表 2-1。

粒组划分

表 2-1

粒组统称	粒组名称	粒径 d 范围(mm)	一般特征	
巨粒	漂石(块石)	$d > 200$	透水性大,无黏性,无毛细水,不易压缩	
	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,不能保持水分,毛细水上升高度很小,压缩性较小
		中砾	$5 < d \leq 20$	
		细砾	$2 < d \leq 5$	
	砂粒	粗砂	$0.5 < d \leq 2$	易透水,无黏性,毛细水上升高度不大,饱和松细砂在振动荷载作用下会产生液化,一般压缩性较小,随颗粒减小,压缩性增大
		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,湿时有微黏性,毛细水上升高度较大,有冻胀现象,饱和并很松时在振动荷载作用下会产生液化	
	黏粒	$d \leq 0.005$	透水性差,湿时有黏性和可塑性,遇水膨胀,失水收缩,性质受含水率的影响较大,毛细水上升高度大	

2. 粒径分布曲线

自然界中的土一般是由几种粒组混合而成。为了说明天然土颗粒的组成情况，不仅要了解土颗粒的大小，还要了解各种颗粒所占的比例。土粒的大小及其组成情况，通常以土

中各个粒组的相对含量（指土样各粒组的质量占土粒总质量的百分数）来表示，称为土的颗粒级配或粒度成分。

通常，工程中采用粒径分布曲线表示土的颗粒级配或粒度成分，如图 2-3 所示。图中的横坐标为粒径，由于土粒粒径的值域很宽，因此用对数坐标表示。纵坐标为小于某粒径的土粒质量百分比。

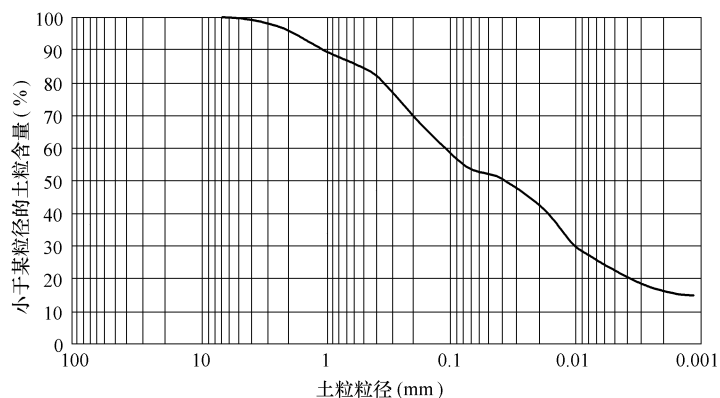


图 2-3 土的粒径分布曲线

2.1.2.2 不均匀系数和曲率系数

由粒径分布曲线的形态可以大致判断土粒的均匀程度或级配是否良好，颗粒不均匀，级配良好；反之，则颗粒均匀，级配不良。为了定量说明问题，工程中常用不均匀系数 C_u 反映土颗粒粒径分布的均匀性，用曲率系数 C_c 反映土的粒径分布曲线形态。

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

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

式中 d_{60} 、 d_{30} 、 d_{10} ——分别表示土的粒径分布曲线上的某粒径，小于该粒径的土粒质量占土的总质量的 60%、30% 及 10%；其中， d_{10} 被称为有效粒径， d_{60} 被称为限制粒径。

不均匀系数 C_u 反映了大小不同粒组的分布情况，即土粒大小（粒度）的均匀程度。 C_u 越大表示粒度的分布范围越广，土粒越不均匀，级配越良好。曲率系数 C_c 描述了级配曲线分布的整体形态，表示是否有缺失的情况。

当土体同时满足 $C_u \geq 5$ 和 $C_c = 1 \sim 3$ 两个条件时，土的级配良好，为不均匀土；如不能同时满足，则为级配不良。

工程中用级配良好的土作为土建工程的填方用料，容易获得较大的密实度。

2.1.2.3 粒度分析方法

土的颗粒粒径及其级配是通过土的颗粒分析试验测定的。常用的方法有两种：对于粒径大于 0.075mm 的土粒，常用筛分法；对于粒径小于 0.075mm 的土粒，则用沉降分析法。

筛分法是用一套不同孔径的分析筛把各种粒组分离出来。分析筛分粗筛和细筛，粗筛的孔径为 60、40、20、10、5、2mm，细筛的孔径为 1.0、0.5、0.25、0.075mm。

通过 0.075mm 筛的土粒用筛分法无法再加以细分，这就需要沉降分析法。沉降分

析法是依据 Stokes 定律进行测定的, 即当土粒在液体中靠自重下沉时, 较大的颗粒下沉较快, 而较小的颗粒下沉则较慢。沉降分析法测定土的粒度成分可用两种方法, 即密度计法和移液管法。密度计是用来测定液体密度的一种仪器, 对于不均匀的液体, 从密度计读出的密度只表示浮泡形心处的液体密度。移液管法是用一种特定的装置在一定深度处吸出一定量的悬液, 用烘干的方法求出其密度。用上述两种方法都可以求出土粒的粒径和累计百分含量。

2.1.2.4 土的结构及构造

1. 土的结构

试验表明, 即使对于同一种土, 其原状土样和重塑土样(将原状土样破碎, 在试验室内重新制备的土样, 称为重塑土样)的力学性质有很大区别, 甚至用不同方法制备的重塑土样, 尽管组成一样, 密度一样, 但其性质也会有所差别。这说明, 土的结构对土的性质有很大影响。土的结构是指土粒在空间的排列和它们之间的相互联结。土的天然结构是在风化、沉积的整个历史过程中形成的, 土因其风化、沉积环境不同而形成各式各样的结构。

按土颗粒的排列及联结形式不同, 土的结构分为单粒结构、蜂窝结构和絮状结构, 如图 2-4 所示。

(1) 单粒结构

单粒结构主要是粗粒土的结构形式。粗粒土(无黏性土, 粒径大于 0.075mm)的比表面积小, 粒间作用力以重力为主, 颗粒在重力作用下下沉时, 一旦与已经稳定的颗粒相接触, 找到自己的平衡位置, 稳定下来, 就形成单粒结构, 这种结构的特点是颗粒之间为点与点的接触。单粒结构又分为松散和密实两种状态。

1) 松散的单粒结构

当颗粒缓慢沉积, 没有经受很高的压力作用, 特别是没有受过动力作用时, 所形成的结构为松散的单粒结构。此时, 结构骨架的稳定性较差, 当受到振动及其他外力作用时, 土粒易发生移动, 土中孔隙减少, 会引起很大变形。这种土层未经处理一般不宜作为建筑物地基或路基, 如图 2-4 (a) 所示。

2) 密实的单粒结构

松散的单粒结构受较大的压力作用, 特别是受动力作用后变密, 则成为密实的单粒结构。由于土粒排列密实, 在动、静荷载作用下都不会产生较大的变形, 所以强度较大, 压缩性较小, 是良好的天然地基, 如图 2-4 (b) 所示。

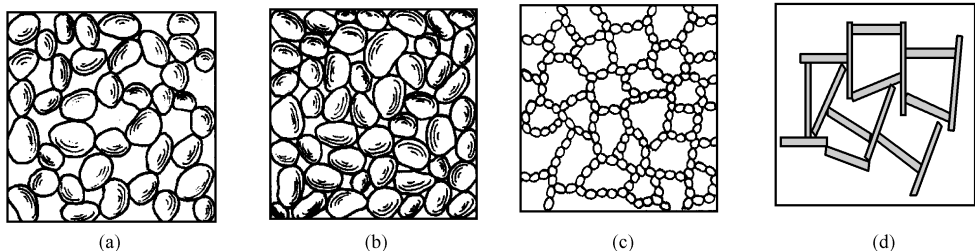


图 2-4 土的结构示意图

(a) 松散的单粒结构; (b) 密实的单粒结构; (c) 蜂窝结构; (d) 絮状结构

(2) 蜂窝结构

蜂窝结构主要是粉粒或细砂粒组成的土的结构形式。粒径为 $0.075\sim 0.005\text{mm}$ (粉粒组) 的土粒在水中沉积时,基本上以单个土粒下沉。在遇到已沉积的土粒时,当土粒之间的分子引力大于其重力作用,土粒就停留在最初的接触点上不再下沉,逐渐形成土粒链。土粒链组成架立结构,形成具有较大孔隙的蜂窝状结构,如图 2-4 (c) 所示。

架立作用和粒间具有蜂窝结构的土有很大孔隙。但由于弓架作用和一定程度的粒间联结,使其可承担一般的水平静载荷。当受到较高水平荷载或动力荷载时,其结构将破坏,导致严重的地基沉降。

(3) 絮状结构

对细小的黏粒 (粒径小于 0.005mm) 或胶粒 (粒径小于 0.002mm),其重力作用很小,能够在水中长期悬浮,不因自重而下沉。这种土粒在水中运动,相互碰撞而吸引逐渐形成小链环状的土粒集合体,质量增大而下沉,当一个小链环碰到另一个小链环时相互吸引,不断扩大形成大链环,称为絮状结构,如图 2-4 (d) 所示。由于土粒的角、边常带正电荷,土粒的面带负电荷。角、边与面接触时吸引力最大,因此絮状结构以土粒之间角、边与面的接触或边与边的搭接形式为主,具有很大的孔隙。

絮状结构的土实际是不稳定的,例如在很小的施工扰动下,土粒之间的连接脱落造成结构破坏,强度降低。但土粒之间的联结强度 (结构强度) 往往由于长期的压密和胶结作用而得到加强。所以,粒体间的联结特征是影响这一类土工程性质的主要因素之一。

2. 土的构造

土体的宏观结构称为土的构造,是指土体形成过程中的层理、裂隙及大孔隙等宏观特征。土的构造主要有以下四种类型:

(1) 层状构造

它是在土的形成过程中,由于不同阶段沉积的物质成分、颗粒大小或颜色的不同而呈现的成层特征,常见的有水平层理构造和交错层理构造。

(2) 裂隙状构造

土体中有很多不连续的小裂隙,如某些硬塑或坚硬状态的黏土构造,黄土的柱状裂隙等。裂隙的存在大大降低土体的强度和稳定性,增大透水性,对工程不利。

(3) 分散构造

土层中土粒分布均匀,性质相近,如砂与卵石层为分散构造。

(4) 结核状构造

细粒土中混有粗颗粒或包裹物,如结核体、腐殖物、贝壳等。

2.2 土的三相比例指标及指标换算

2.2.1 土的三相比例指标

除了土中各相自身的特征对土的性质具有决定性作用外,各相间的相互比例关系也会对土的性质产生重要影响。将土体之相间质量、体积的相互比例关系称为土的三相比例指标,其中土的密度、土粒比重和土的含水率为基本实验指标,可通过室内实验确定,其余

为换算指标。

1. 土的密度和重度

土的密度为天然状态下单位体积土的质量，用 ρ 表示，其表达式为：

$$\rho = m/V \quad (2-3)$$

土的密度变化范围较大。一般黏性土和粉土 $\rho = 1.8 \sim 2.0 \text{ g/cm}^3$ ；砂土 $\rho = 1.6 \sim 2.0 \text{ g/cm}^3$ ；腐殖土 $\rho = 1.5 \sim 1.7 \text{ g/cm}^3$ 。土的密度可采用“环刀法”“蜡封法”及“灌砂法”等测定。

土的重度定义为单位体积土的重量，用 γ 表示，其表达式为：

$$\gamma = G/V = mg/V = \rho \cdot g \quad (2-4)$$

式中 γ ——土的重度 (kN/m^3)；

G ——土的重量 (kN)；

g ——重力加速度， $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$ ，工程上为了计算方便，取 $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。

2. 土粒相对密度（土粒比重）

土粒质量与同体积 4°C 时水的质量之比，称为土粒相对密度，用 d_s （或 G_s ）表示，为无量纲量，其表达式为：

$$d_s = \frac{m_s/V_s}{\rho_{w1}} = \frac{\rho_s}{\rho_{w1}} \quad (2-5)$$

式中 d_s ——土粒相对密度，无量纲；

ρ_{w1} —— 4°C 时纯水的密度 (g/cm^3)， $\rho_{w1} = 1 \text{ g/cm}^3$ ；

ρ_s ——土粒的密度 (g/cm^3)，即单位体积土粒的质量， $\rho_s = m_s/V_s$ 。

土粒相对密度可在实验室内用比重瓶法测定。由于土粒相对密度取决于土粒的矿物成分，因此，同类土的土粒相对密度变化不大，通常可按经验数值选用，参考值见表 2-2。

土的相对密度参考值

表 2-2

土的名称	砂土	粉土	黏性土	
			粉质黏土	黏土
土的相对密度	2.65~2.69	2.70~2.71	2.72~2.73	2.74~2.76

3. 含水率

土的含水率定义为土中水的质量与土粒质量之比，用 w 表示，以百分数计，其表达式为：

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% = \frac{m - m_s}{m_s} \times 100\% \quad (2-6)$$

含水率 w 是标志土的干湿程度的一个重要物理指标。含水率越小，土越干；反之土很湿或饱和。

天然土层的含水率变化范围很大。干的粗砂，其值可接近于零，而饱和砂土，可达 40%；坚硬黏性土的含水率可小于 30%，而饱和软黏土（如淤泥）可达 60% 或更大。土的含水率可采用烘干法测定。

4. 孔隙比 e

土的孔隙比是土中孔隙体积与土粒体积之比，即：

$$e = V_v/V_s \quad (2-7)$$

孔隙比用小数表示, 可用来评价土的密实程度。一般 $e < 0.6$ 的土是密实的低压缩性土, $e > 1.0$ 的土是松散的高压缩性土。

5. 孔隙率 n

土的孔隙率是土中孔隙的体积与土的总体积之比, 以百分数计, 即:

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\% \quad (2-8)$$

土的孔隙率与孔隙比之间有下列关系:

$$n = \frac{e}{1+e} \times 100\% \quad (2-9a)$$

$$e = n / (1-n) \quad (2-9b)$$

一般情况下, e 和 n 越大, 土越疏松。

6. 饱和度 S_r

工程上往往需要知道孔隙中充满水的程度, 这可用饱和度 S_r 表示。土的饱和度 S_r 定义为土中被水充满的孔隙体积与孔隙总体积之比, 即:

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% \quad (2-10)$$

土的饱和度是一个辅助性指标, 可以用来评价土的干湿状态。完全干燥的土 $S_r = 0$; 完全饱和的土 $S_r = 100\%$ 。根据土的饱和度, 可以把砂土分为稍湿 ($S_r \leq 50\%$), 很湿 ($50\% < S_r \leq 80\%$) 和饱和 ($S_r > 80\%$) 三种状态。

7. 土的干密度 ρ_d 和土的干重度 γ_d

土的干密度指单位体积土体中干土的质量, 即:

$$\rho_d = m_s / V \quad (2-11)$$

土的干重度指单位体积土体中干土的重量, 即:

$$\gamma_d = \rho_d g \approx 10\rho_d \quad (2-12)$$

一般情况下, $\rho_d = 1.3 \sim 2.0 \text{ g/cm}^3$, $\gamma_d = 13 \sim 20 \text{ kN/m}^3$ 。土的干密度越大, 土越密实。土的干密度常用作填土夯实的控制指标。

8. 土的饱和密度 ρ_{sat} 和土的饱和重度 γ_{sat}

土的饱和密度为孔隙中全部充满水时, 单位体积土体的质量, 即:

$$\rho_{\text{sat}} = (m_s + V_v \rho_w) / V \quad (2-13)$$

土的饱和重度为孔隙中全部充满水时, 单位体积土体的重量, 即:

$$\gamma_{\text{sat}} = \rho_{\text{sat}} g \approx 10\rho_{\text{sat}} \quad (2-14)$$

一般情况下, $\rho_{\text{sat}} = 1.8 \sim 2.3 \text{ g/cm}^3$; $\gamma_{\text{sat}} = 18 \sim 23 \text{ kN/m}^3$ 。

9. 土的有效重度 γ'

处于地下水位以下的土体, 将扣除水浮力后单位体积土所受的重力称为土的有效重度 γ' (或称之为浮重度)。当认为水下土是饱和时, 它在数值上等于饱和重度 γ_{sat} 与水的重度 γ_w ($\gamma_w = \rho_w g$) 之差, 即:

$$\gamma' = \frac{m_s g - V_s \rho_w g}{V} = \frac{m_s g + V_v \rho_w g}{V} - \frac{(V_v + V_s) \rho_w g}{V} \quad (2-15)$$

一般情况下, $\gamma' = 8 \sim 13 \text{ kN/m}^3$ 。各重度指标有如下关系: $\gamma_{\text{sat}} \geq \gamma \geq \gamma_d \geq \gamma'$ 。

以上指标需通过基本试验指标通过换算得到。

2.2.2 各指标间的换算关系

在测定出土的三个基本试验指标：土粒密度、含水率和重度后，可以换算出其余各个指标。常采用三相图进行各指标间关系的推导。

如图 2-5 (a) 所示，令 $V_s=1$ ，根据孔隙比的定义，可得到孔隙体积 $V_v=e$ ，这样，土的总体积 $V=1+e$ ；根据土粒密度 d_s 定义，土的重量 $W_s=d_s V_s \rho_w g=d_s \gamma_w$ 。根据土的含水率的定义，土中水的重量 $W_w=w W_s=w d_s \gamma_w$ ，这样，土的总重量 $W=W_s+W_w=d_s \gamma_w+w d_s \gamma_w=d_s \gamma_w(1+w)$ 。再根据有关定义，可得土的各项物理性质指标。

此外，还可根据图 2-5 (b) 进行计算。令 $V=1$ ，则根据土的重度定义可知，土的重量为 γ ，土粒重量为 $\frac{\gamma}{1+w}$ ，水的重量为 $\frac{w\gamma}{1+w}$ ；土粒体积为 $\frac{\gamma}{d_s \gamma_w(1+w)}$ ，孔隙体积为 $1-\frac{\gamma}{d_s \gamma_w(1+w)}$ ，孔隙中水的体积为 $\frac{w\gamma}{(1+w)\gamma_w}$ 。至此各相重量及体积均已确定，即可求得其他的换算公式。

$$\text{土的重度: } \gamma = \frac{W}{V} = \frac{(1+w)d_s \gamma_w}{1+e}$$

$$\text{土的干重度: } \gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{d_s \gamma_w}{1+e} = \frac{\gamma}{1+w}$$

$$\text{土的孔隙比: } e = \frac{d_s \gamma_w(1+w)}{\gamma} - 1 = \frac{d_s \gamma_w}{\gamma_d} - 1$$

$$\text{土的饱和重度: } \gamma_{\text{sat}} = \frac{W_s + V_v \gamma_w}{V} = \frac{d_s \gamma_w + e \gamma_w}{1+e} = \frac{\gamma_w(d_s + e)}{1+e}$$

$$\text{土的有效重度: } \gamma' = \frac{W_s - V_s \gamma_w}{V} = \frac{d_s \gamma_w - \gamma_w}{1+e} = \frac{\gamma(d_s - 1)}{d_s(1+w)}$$

$$\text{土的饱和度: } S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{w d_s \gamma_w / \gamma_w}{e} = \frac{w d_s}{e} = \frac{w d_s \gamma}{d_s \gamma_w(1+w) - \gamma}$$

$$\text{土的孔隙率: } n = \frac{e}{1+e} = 1 - \frac{\gamma}{d_s(1+w)\gamma_w}$$

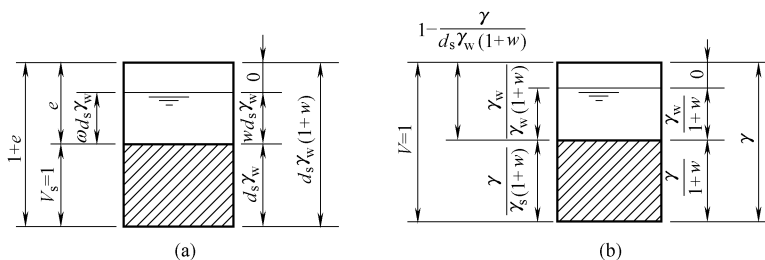


图 2-5 土的三相图及各参数关系

【例题 2-1】 一土样经试验测得，重度 $\gamma=15.9\text{kN/m}^3$ ，土粒相对密度 $d_s=2.65$ ，土的含水率 $w=44\%$ ，求孔隙比、饱和度和干重度。

【解】 此题可根据土的三相比例指标换算关系式计算。

$$\text{孔隙比: } e = \frac{d_s \gamma_w (1+w)}{\gamma} - 1 = \frac{2.65 \times 10 \times (1+0.44)}{15.9} - 1 = 1.4$$

$$\text{饱和度: } S_r = w d_s / e = \frac{0.44 \times 2.65}{1.4} = 0.833$$

$$\text{干重度: } \gamma_d = \frac{\gamma}{1+w} = \frac{15.9}{1+0.44} = 11.042 \text{ kN/m}^3$$

【例题 2-2】 已知饱和土的重度 $\gamma = 16.9 \text{ kN/m}^3$ ，土的含水率 $w = 49\%$ ，求干重度和孔隙比。

【解】 此题可利用饱和土的饱和度 $S_r = 100\%$ 这个条件。

$$\text{干重度: } \gamma_d = \frac{\gamma}{1+w} = \frac{16.9}{1+0.49} = 11.342 \text{ kN/m}^3$$

根据饱和度与孔隙比的关系 $S_r = \frac{w d_s}{e}$ ，得：

$$d_s = \frac{S_r e}{w} = \frac{1 \times e}{0.49} = 2.041e$$

$$\text{又: } e = \frac{d_s \gamma_w}{\gamma_d} - 1 = \frac{2.041e \times 10}{11.342} - 1 = 1.8e - 1$$

$$\text{则, 孔隙比: } e = 1 / (1.8 - 1) = 1.25$$

2.3 黏性土的界限含水率

黏性土由于含水率不同，可呈现出固态、半固态、可塑状态及流动状态，如图 2-6 所示。显然，不同状态的土，表现出的工程性质也会不同。可塑状态是指具有一定含水率的土体在外力作用下，可以塑成任何形状而不发生裂缝，当外力解除后，土仍保持已有变形而不恢复原状。

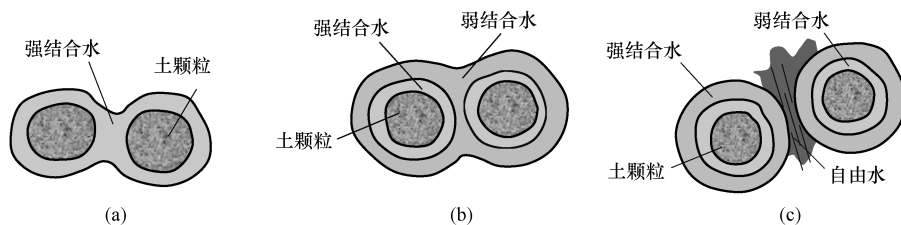


图 2-6 黏性土的状态

(a) 固态或半固态；(b) 可塑状态；(c) 流动状态

2.3.1 液限、塑限和缩限

黏性土从一种状态转变为另一种状态的分界含水率称为界限含水率，即阿太堡界限 (Atterberg Limit)，包括液限 w_L 、塑限 w_P 和缩限 w_S 。

1. 液限

液限又称液性界限、流限，它是土体流动状态与可塑状态的界限含水率，是可塑状态的上限含水率，用 w_L 表示。

2. 塑限

塑限又称塑性界限，它是土体可塑状态与半固体状态的界限含水率，是可塑状态的下限含水率，用 w_p 表示。

3. 缩限

缩限是土体半固体状态与固体状态的界限含水率。土体由半固体状态不断蒸发水分过程中体积不断缩小，直到体积不再缩小时的界限含水率称为缩限，用 w_s 表示。

黏性土的界限含水率和土粒组成、矿物成分、土粒表面吸附阳离子的性质等有关，并受诸因素的综合影响。因此，界限含水率对黏性土的分类和工程性质的评价有着重要意义。

2.3.2 塑性指数、液性指数

1. 塑性指数

塑性指数是指液限 w_L 与塑限 w_p 的差值（省去%符号），用符号 I_P 表示，即：

$$I_P = w_L - w_p \quad (2-16)$$

注意，塑性指数用不带百分号的数值表示。例如，某一土样的 $w_L = 32.6\%$ ， $w_p = 15.4\%$ ，则塑性指数 $I_P = 17.2$ ，而非 17.2% 。

塑性指数越大，土处于可塑状态的含水率范围就越大。因此塑性指数的大小与土中结合水的含量有关。土粒越细，比表面积越大，土的黏粒或亲水矿物（如蒙脱石）含量越高，土处于可塑状态的含水率范围就越大。

由于塑性指数在一定程度上综合反映了影响黏性土特征的各种重要因素，因此，工程上普遍按塑性指数对黏性土进行分类。

2. 液性指数

液性指数是指黏性土的天然含水率 w 与塑限含水率 w_p 的差值与塑性指数 I_P 之比值，表征土的天然含水率与界限含水率之间的相对关系，用符号 I_L 表示，即：

$$I_L = \frac{w - w_p}{I_P} = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} \quad (2-17)$$

从上式可见，当土的天然含水率 $w < w_p$ 时， $I_L < 0$ ，天然土处于坚硬状态； $w > w_p$ 时， $I_L > 1$ ，土处于流动状态；当 I_L 介于 $0 \sim 1$ 之间，土处于可塑状态。因此，可以利用液性指数 I_L 作为黏性土状态的划分指标。 I_L 值越大，土质越软；反之，土质越硬。判断黏性土物理状态的标准见表 2-3。

判别黏性土物理状态的标准（GB 5007—2011、JTG D63—2007）

表 2-3

状态	坚硬	硬塑	可塑	软塑	流塑
液性指数 I_L	$I_L \leq 0$	$0 < I_L \leq 0.25$	$0.25 < I_L \leq 0.75$	$0.75 < I_L \leq 1.0$	$I_L > 1.0$

必须指出，液限和塑限都是利用重塑土测定的，因此，液性指数没有反映土的原状结构的影响。保持原状结构的土，在其含水率达到液限以后，仍可能有一定的强度而不处于流动状态。但当土的结构遭受震动、挤压等作用而破坏后，土的结构便立即丧失而呈流动状态。因此，在基础施工中，应注意保护基槽，尽量减少对地基土结构的扰动。

2.3.3 土的灵敏度和触变性

土体的结构特性对强度有着重要的影响作用，尤其是黏性土。工程中反映细粒土结构特性的指标和性质主要有灵敏度和触变性。

1. 灵敏度

灵敏度是指黏性土的原状土无侧限抗压强度 (q_u) 与结构完全破坏的重塑土 (保持含水率和密度不变) 的无侧限抗压强度 (q'_u) 的比值, 即:

$$S_t = q_u / q'_u \quad (2-18)$$

灵敏度反映黏性土结构性的强弱, 根据灵敏度数值大小分为三类土:

$S_t > 4$	高灵敏土
$2 < S_t \leq 4$	中灵敏土
$S_t \leq 2$	低灵敏土

2. 触变性

结构被破坏的土, 若静置不动, 则土颗粒和水会重新排列组合, 形成新的结构, 强度会得到一定程度的恢复。这种含水率不变, 密度不变, 土的强度因重塑而降低, 又因静置而有所恢复的性质, 称为触变性。

2.3.4 液限与塑限的测定

液限和塑限联合测定法是目前最常用的测定土体液、塑限的方法, 用于划分土类、计算天然稠度和塑性指数, 供工程设计和施工使用。此试验方法适用于粒径不大于 0.5mm, 且有机质含量不大于试样总质量 5% 的土。

液塑限联合测定法试验所需的仪器设备主要有: 圆锥仪 (锥质量为 100g 或 76g, 锥角为 30°, 目前读数多为光电式, 见图 2-7), 盛土杯 (直径 50mm, 深度 40~50mm), 天平 (称量 200g, 感量 0.01g), 及调土刀、吸管、凡士林等附件与用品。本试验原则上采用天然含水率的土样制备试样, 但也允许用风干土制备试样。

1) 土样制备。当采用天然含水率的土样时, 应剔除大于 0.5mm 的颗粒, 然后分别按接近液限、塑限和二者的中间状态制备不同稠度的土膏, 静置湿润。静置时间视原含水率的大小而定。当采用风干土样时, 取过 0.5mm 筛的代表性土样约 200g, 分成 3 份, 分别放入 3 个盛土皿, 加入不同数量的纯水, 使分别达到液限、塑限和两者的中间状态的含水率, 调成均匀土膏, 然后放入密封的保湿缸, 静置 24h。

2) 将制备的土膏充分调拌均匀, 填入盛土杯中, 填样时不应留有空隙, 对较干的试样应充分揉搓, 密实地填入试样杯中, 填满后刮平表面, 将盛土杯放在联合测定仪的升降座上。

3) 取圆锥仪, 在圆锥上抹一薄层凡士林以润滑其表面, 接通电源, 使电磁铁吸住圆锥。

4) 调节屏幕准线, 使初始读数位于零位刻度线上, 调节升降座螺母, 当锥尖刚好与土面接触时, 计算指示灯亮, 圆锥仪即可自由落下, 延时 5s, 读数指示管亮, 即可读数。如要手动操作, 可把开关扳向“手动”一侧。当锥尖与土接触, 接触指示灯管亮, 而圆锥仪不下落, 需按手动按钮, 使圆锥仪自由落下。读数 h_1 后, 要按仪器复位按钮, 以便下次再用。