

普通高等教育“十二五”规划教材

土力学与地基基础

TULIXUE YU DIJI JICHU

姜晨光 主编



化学工业出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

土力学与地基基础

姜晨光 主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书是普通高等教育“十二五”规划教材。

全书共分为 16 章, 内容主要包括土木结构基础工程学概论, 地球土的基本特征、渗流问题、抗剪强度、有效应力、侧向土压力、固结问题、承载力, 边坡稳定问题, 地球岩石及其基本性质, 土木结构基础设计, 山区地基、软弱地基的工程问题, 土木结构基础设计的基本方法, 基坑工程设计与施工, 基础工程检测及室内试验等。

本书可作为高等院校土木工程、工程管理、交通运输工程、铁道工程、水利水电工程、矿业工程、建筑学、城市规划、环境工程等专业的基础课教材, 也可作为土木工程行业从业人员的工具书。

图书在版编目 (CIP) 数据

土力学与地基基础/姜晨光主编. —北京: 化学工业出版社, 2013. 7
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-122-17372-0

I. ①土… II. ①姜… 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 (2013) 第 100577 号

责任编辑: 满悦芝
责任校对: 边 涛

文字编辑: 荣世芳
装帧设计: 杨 北

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司
787mm×1092mm 1/16 印张 22 $\frac{3}{4}$ 字数 575 千字 2013 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 45.00 元

版权所有 违者必究

《土力学与地基基础》编撰人员名单

主 编：姜晨光

副 主 编：王世周 姜 勇 贺 勇 张协奎 刘小生

（排名不分先后）

参编人员：姜晨光 王世周 姜 勇 贺 勇 张协奎 刘小生

张清峰 冯伟洲 徐 政 刘祥勇 段永强 王军培

纪 苏 沈和荣 承明秋 张道政 范春雨 孙 玉

赵志敏 谭东林 史晓忠 汤庆生 薛志荣 陈家冬

吴 亮 龚士良 何 铭 郑莲和 王耀生 贺云安

唐 宁 李锡甦 王风芹（排名不分先后）

前言

土木结构基础工程学具有悠久的历史，其萌芽出现在“穴居巢处”的人类蛮荒文明时代，那时人类向鸟类学习选树并在树上筑巢从而诞生了独立桩柱式基础（即树为树巢的基础），继而人类在河滩搭建吊脚楼便有了木桩基础。火使人类从蛮荒文明进入古代文明，火改变了人类的饮食习惯，人类也用火来改造自然物（比如烧制砖、瓦）或自然地形（比如都江堰工程）以满足自己的需要并筑城及兴建大型土木建筑，土木结构基础的类型也因而变得多姿多彩。电使人类从古代文明进入近代文明，电为人类提供了动力使人类改造自然的能力得到了飞跃性的提升，人们造出了水泥及各种金属材料，使土木结构基础的性能（比如承载能力）得到了极大的提升。网络信息技术使人类从近代文明进入现代文明，网络信息技术使人类探索未知世界的能力得到了极大的提升，人们通过遥测技术使土木结构基础的构造变得更加精巧（使土木结构基础与周边环境更加协调匹配）。不难看出，土木结构基础工程学与人类文明同步发展，与人类文明息息相关。

土木结构基础工程学与地学、力学、工程结构学联系紧密。任何土木工程结构（包括公路、铁路、各种建筑物、各种构筑物、各类桥梁、各类水工结构、各类线路工程土建结构等）都是建造在一定地层之上的，土木工程结构的全部荷载都是由它下面的地层来承受的，因此，要建造土木工程结构物就必须了解地性，于是就有了土力学。受土木工程结构物影响的那一部分地层被称为地基，土木工程结构物与地基接触的部分被称为基础。土木结构基础工程学的核心是解决土木工程结构物地基与基础的设计与施工问题。不难理解，地基与基础在各种荷载作用下将产生附加应力和变形。因此，为保证土木工程结构物的正常使用及安全必须要求其地基与基础具有足够的强度和稳定性，且其变形也在允许的范围以内。为此，人们通常根据土木工程结构物下覆地层的性质、上部结构要求、荷载特点和施工技术水平等实际情况确定采用适宜的地基和基础形式。土木结构基础工程学经历了几千年的漫长经验积累期，到近代才形成了一定的、尚不完善的理论体系，其存在的问题很多，其中的很多奥秘我们还不甚了解，因此，需要人类不懈地继续探索。

为适应我国高等教育对土木结构基础工程学（即土力学与地基基础）教学的需要，本人以目前世界科技界对土力学与地基基础学科的主流认识为依据编写了本书。本书是笔者在江南大学从事教学、科研和工程实践活动的经验积累之一，也是本人在 30 余年工程生涯中不断追踪科技发展脚步的部分收获。本书的撰写借鉴了当今国内外的最新研究成果和大量实际资料，吸收了许多前人及当代人的宝贵经验和认识，也尽最大可能地包含了当今最新的科技成就。希望本书的出版能有助于土木结构基础工程学（即土力学与地基基础）知识的普及，对从事各类工程建设活动的人们有所帮助，对人与自然的和谐共处及协调发展有所贡献。

全书由江南大学姜晨光主笔完成，江西理工大学刘小生；广西大学张协奎；青岛农业大

学贺勇；莱阳市住房和城乡建设管理局王世周；无锡市滨湖区建设局冯伟洲；无锡地铁集团有限公司徐政、刘祥勇、段永强；无锡市建筑设计研究院有限责任公司王军培、沈和荣、承明秋；江苏中设工程咨询集团有限公司张道政；无锡市建设工程设计审查中心纪苏；无锡市公共工程建设中心范春雨；无锡市勘察设计院有限公司孙玉；无锡民用建筑设计院有限公司赵志敏；无锡市政设计院有限公司谭东林、史晓忠；无锡水文工程地质勘察院汤庆生、薛志荣；江苏地基工程有限公司陈家冬、吴亮；上海市地质调查研究院龚士良；江南大学张清峰、姜勇、何铭、郑莲和、王耀生、贺云安、唐宁、李锡甦、王风芹等同志（编者排名不分先后）分别参与了部分章节的撰写工作。初稿完成后，苏文馨、徐至善、李锦铭、王浩闻、黄建文五位教授级高工提出了不少改进意见，为本书最终定稿做出了重大贡献，谨此致谢。

限于编者水平和时间有限，疏漏之处在所难免，敬请读者多提宝贵意见。

姜晨光

2013年6月于江南大学

目 录

第 1 章 土木结构基础工程学概论	1
1.1 土木结构基础工程学的特点	1
1.2 土力学的基本问题	2
1.2.1 土力学在土木工程中的作用	2
1.2.2 土力学的主要学科分支	4
1.2.3 土力学的历史与发展	5
1.2.4 目前土力学中存在的问题	7
1.3 岩石学的基本问题	9
1.3.1 岩石学概貌	10
1.3.2 岩石力学概貌	13
1.4 工程地质学的基本问题	17
1.4.1 工程地质学概貌	17
1.4.2 工程地质学的学科分支	19
1.4.3 工程地质学的研究方法	20
1.4.4 地基勘察的特点与基本要求	22
1.5 土木结构基础设计的基本问题	29
1.6 土木结构基础工程学的历史与发展	32
思考题与习题	33
第 2 章 地球土的基本特征	34
2.1 地球土的形成机理	34
2.2 地球土的物质组成及结构特征	36
2.2.1 土的组成特征	36
2.2.2 土的结构特征	41
2.3 地球土的物理性质	42
2.3.1 地球土的三相比例指标	42
2.3.2 无黏性土(粗粒土)的密实程度	44
2.4 地球土的水理性质	44
2.4.1 黏性土的物理状态	44
2.4.2 土的灵敏度和触变性	45
2.5 地球土的力学性质	45
2.5.1 土的压缩性	45
2.5.2 土的抗剪性	47
2.5.3 土的击实性	48
2.6 地球土的工程分类	49
2.6.1 土木结构基础工程设计中涉及的 岩土的基本特征	49
2.6.2 土木结构基础工程设计中涉及的 岩土的主要工程特性指标	52
2.6.3 浅层平板载荷试验的基本要求	52
2.6.4 深层平板载荷试验的基本要求	53
2.6.5 抗剪强度指标 c 、 φ 标准值的 确定方法	53
2.7 地球土的机械压实机理	54
2.7.1 土的压实原理	54
2.7.2 影响击实效果的主要因素	54
2.7.3 压实标准的确定与控制	55
2.7.4 算例	57
思考题与习题	58
第 3 章 地球土中的渗流问题	60
3.1 地球土中的渗流特征	60
3.2 地球土体渗流的基本理论	60
3.2.1 地球土的层流渗透定律	60
3.2.2 土的渗透试验与渗透系数	62
3.3 二维渗流与流网	65
3.3.1 二维渗流及其渗流方程	65
3.3.2 流网的特征及绘制方法	65
3.4 渗流导致的工程问题	68
3.4.1 渗流力	68
3.4.2 流砂或流土现象	68
3.4.3 管涌现象和潜蚀作用	69
思考题与习题	70
第 4 章 地球土的抗剪强度	71
4.1 地球土的剪切破坏	71
4.1.1 固体间的摩擦强度问题	71
4.1.2 土的抗剪强度理论	72
4.2 地球土的抗剪强度试验	74
4.2.1 常用的抗剪强度试验方法	74
4.2.2 三轴压缩试验中的孔隙压力系数	77
4.3 地球土的抗剪分析	78
4.3.1 饱和黏性土的抗剪强度分析	78
4.3.2 强度问题中的应力路径	81
4.3.3 无黏性土的抗剪强度	82
思考题与习题	83
第 5 章 地球土中的有效应力	84
5.1 地球土中的应力来源及应力计算 基本假定	84
5.2 地球土中的自重应力	85

5.2.1 水位线以上土中的竖向自重应力	85	7.3 地球土固结导致的工程问题	117
5.2.2 层状土的自重应力	85	7.3.1 地基最终沉降量计算的分层 总和法	118
5.2.3 水位线以下土的自重应力	86	7.3.2 考虑应力历史影响的地基最终 沉降计算方法	120
5.2.4 饱和土中孔隙水压力、有效 应力和总应力	86	7.3.3 斯开普敦法计算最终沉降量	123
5.3 地球土中的附加应力	87	7.3.4 地基沉降与时间的关系	125
5.3.1 基础与地基土间基底压力的分布 特征	87	7.3.5 利用沉降观测资料推算后期 沉降量	126
5.3.2 基底压力的简化计算	87	思考题与习题	127
5.3.3 基底附加压力	88	第8章 地球土的承载力	129
5.4 地球土的附加有效应力计算	89	8.1 地球土的承载特征	129
5.4.1 竖向集中力下的地基附加应力	89	8.2 地球土的承载力计算	129
5.4.2 矩形荷载下的地基附加应力计算	90	8.2.1 浅基础地基的破坏	129
5.4.3 圆形荷载下的地基附加应力计算	92	8.2.2 地基的临界荷载	131
5.4.4 均布线荷载和条形荷载下的地基 附加应力计算	92	8.2.3 地基极限承载力的特点	132
5.4.5 非均质和各向异性地基中的附加 应力	94	8.2.4 普朗特和瑞斯纳极限承载力	133
思考题与习题	94	8.2.5 泰萨基极限承载力	134
第6章 地球土中的侧向土压力	96	8.2.6 汉森和维西克极限承载力	136
6.1 地球土中侧向土压力的来源	96	8.3 地球土的承载力测试方法	139
6.2 朗肯土压力理论	97	8.3.1 地球土的承载力测试技术	139
6.2.1 无黏性土的主动土压力	98	8.3.2 地基容许承载力和地基承载力 特征值	141
6.2.2 黏性土的主动土压力	101	思考题与习题	142
6.2.3 无黏性土的被动土压力	101	第9章 边坡稳定问题	143
6.2.4 黏性土的被动土压力	102	9.1 地球边坡的发展与演化	143
6.3 库仑土压力理论	103	9.2 边坡稳定分析的基本方法	143
6.3.1 库仑主动土压力	103	9.2.1 无黏性土坡的稳定性	143
6.3.2 库仑被动土压力	104	9.2.2 黏性土坡稳定性分析的特点	144
6.3.3 黏性土和粉土的库仑主动土 压力	105	9.2.3 黏性土土坡稳定分析的整体圆弧 滑动法	144
6.3.4 朗肯土压力理论和库仑土压力 理论比较	105	9.2.4 黏性土土坡稳定性分析的毕肖 普条分法	145
6.4 其他土压力理论	106	9.2.5 黏性土土坡稳定分析的简布条 分法	147
6.5 侧向土压力导致的工程问题	107	9.2.6 黏性土坡顶开裂时的土坡 稳定性	148
思考题与习题	109	9.2.7 黏性土土体抗剪强度指标及稳定 安全系数的选择	148
第7章 地球土的固结问题	111	9.2.8 黏性土中水渗流时的土坡 稳定性	149
7.1 地球土的固结机理	111	9.2.9 几个典型的地基稳定性问题	150
7.1.1 土的压缩试验	112	9.2.10 提高边坡抗滑稳定性的方法	151
7.1.2 土的压缩曲线与压缩性指标	112	思考题与习题	151
7.1.3 土的原位荷载试验与变形模量	114		
7.2 地球土的固结理论	115		
7.2.1 饱和土的渗透固结问题	115		
7.2.2 泰萨基的一维固结理论	116		

第 10 章 地球岩石及其基本性质	153	第 12 章 山区地基的工程问题	222
10.1 地球岩石的特点与分类	153	12.1 山区地基的特点	222
10.1.1 地球的主要造岩矿物	153	12.2 山区地基的常见类型	222
10.1.2 地球岩石的常规分类	153	12.2.1 岩石地基	222
10.1.3 地球岩石的主要工程性质	157	12.2.2 土岩组合地基	223
10.1.4 影响地球岩石工程性质的主要 因素	162	12.2.3 填土地基	224
10.1.5 地球岩石的工程分类	163	12.3 滑坡防治理论与技术	225
10.2 地球围岩的工程性质	166	12.4 岩溶及土洞的处理方法及基本要求	226
10.3 地球围岩的初始应力场	170	12.5 边坡处理及挡墙设计	227
10.3.1 地球围岩初始应力场的形成	170	12.5.1 土质边坡处理与重力式挡墙 设计	227
10.3.2 地球围岩初始应力场的影响 因素	172	12.5.2 岩石边坡处理以及岩石锚杆挡墙 设计	229
10.4 地球围岩的二次应力场及位移场	173	12.5.3 挡土墙主动土压力系数 k_a 的 确定方法	231
10.4.1 岩石工程开挖后围岩的弹性二次 应力状态及位移状态	174	12.5.4 岩石锚杆抗拔试验的基本要求	233
10.4.2 岩石工程开挖后围岩形成塑性 区的二次应力状态及位移状态	178	思考题与习题	233
10.4.3 无支护坑道的稳定性及其破坏	182	第 13 章 软弱地基的工程问题	234
10.5 工程岩体的分级	183	13.1 软弱地基的特点	234
思考题与习题	190	13.2 软弱地基的利用与改良	234
第 11 章 土木工程结构设计	192	13.2.1 软弱地基利用与改良的基本 原则	234
11.1 我国对土木工程结构设计的基本 规定	192	13.2.2 软弱地基利用与改良中的建筑 措施	235
11.1.1 土木工程基础的形式与特点	192	13.2.3 软弱地基利用与改良中的结构 措施	236
11.1.2 土木工程结构设计的基本要求	200	13.2.4 大面积地面荷载处置的技术 措施	236
11.2 基础埋置深度的确定原则	204	13.2.5 大面积地面荷载作用下地基附加 沉降量计算	237
11.2.1 基础埋置深度确定的基本 要求	204	思考题与习题	238
11.2.2 地基土的冻胀性分类及建筑基底 允许冻土层最大厚度规定	206	第 14 章 土木工程结构设计的基本 方法	239
11.3 承载力计算的基本规定	207	14.1 岩石锚杆基础设计	239
11.3.1 不同情况下的承载力计算 规则	207	14.2 无筋扩展基础设计	239
11.3.2 岩基载荷试验的基本要求	210	14.3 扩展基础设计	240
11.3.3 岩石单轴抗压强度试验的基本 要求	210	14.4 柱下条形基础设计	245
11.4 变形计算的基本规定	210	14.5 筏形基础设计	246
11.4.1 土木工程结构物地基变形计算的 基本要求	210	14.5.1 筏形基础设计的基本要求	246
11.4.2 附加应力系数 α 、平均附加应力 系数 $\bar{\alpha}$ 的确定	213	14.5.2 冲切临界截面周长及极惯性矩 计算方法	251
11.5 稳定性计算的基本规定	220	14.6 桩基础设计	252
思考题与习题	221	14.6.1 桩基础设计的基本要求	252
		14.6.2 单桩竖向静载荷试验的基本 要求	258

14.6.3	桩基础最终沉降量计算方法	259	估算方法	298	
14.6.4	单桩水平静载荷试验的基本要求	261	15.3	基坑工程施工的常用方法及要求	300
14.6.5	单桩竖向抗拔载荷试验的基本要求	263	15.3.1	水泥土搅拌桩围护结构施工要点	301
14.6.6	阶梯形承台及锥形承台斜截面受剪的截面宽度确定方法	264	15.3.2	钢板桩围护结构施工要点	301
14.6.7	摩擦桩单桩竖向承载力估算的引力元法	265	15.3.3	钻孔灌注桩围护结构施工要点	302
14.6.8	基于引力元的群摩擦桩沉降估算方法	268	15.3.4	挖孔灌注桩围护结构施工要点	302
14.7	沉井及地下连续墙设计	269	15.3.5	地下连续墙围护结构施工要点	302
14.7.1	沉井基础及地下连续墙设计的基本要求	269	15.3.6	支撑与土锚结构施工要点	304
14.7.2	沉井的类型和构造	269	15.3.7	土钉墙围护结构施工要点	304
14.7.3	沉井及地下连续墙设计计算	272	15.3.8	逆作法施工要点	304
14.8	特殊土地基上的基础设计	277	15.3.9	基坑土方工程施工要点	305
14.8.1	湿陷性黄土地基设计	277	15.3.10	基坑降水施工要点	306
14.8.2	膨胀土地基设计	280	15.3.11	基坑加固施工要点	306
14.8.3	冻土地区基础工程设计	283	15.3.12	基坑工程信息化监测和施工的基本要点	306
14.8.4	地震区的基础工程设计	286	15.3.13	基坑工程事故的预防	309
思考题与习题		289	思考题与习题		312
第 15 章 基坑工程设计与施工			第 16 章 基础工程检（监）测及室内试验		
15.1	基坑工程的设计施工特点	290	16.1	基础工程检测、监测的基本要求	314
15.2	基坑工程设计的常用方法及要求	291	16.1.1	基础工程检测、监测的基本规定	314
15.2.1	基坑工程设计与施工的总体要求	291	16.1.2	基础工程检验的主要内容及要求	314
15.2.2	基坑工程支护结构内支撑设计与施工的基本要求	292	16.1.3	基础工程施工监测的主要内容及要求	315
15.2.3	基坑工程土层锚杆设计与施工的基本要求	292	16.1.4	土工试验的基本要求及试样制备方法	316
15.2.4	基坑工程逆作法设计与施工的基本要求	293	16.2	土的颗粒分析试验	318
15.2.5	岩体基坑工程设计与施工的基本要求	294	16.3	土的密度试验	323
15.2.6	基坑工程地下水控制设计与施工的基本要求	294	16.4	土的容重 ($d_{4^{\circ}\text{C},\text{H}_2\text{O}}$) 试验	325
15.2.7	基坑工程支护结构稳定性验算的基本要求	295	16.5	土的含水量试验	327
15.2.8	基坑工程抗渗流稳定性计算方法及基本要求	297	16.6	土的界限含水量试验	329
15.2.9	基坑工程土层锚杆试验的基本要求	297	16.7	土的渗透试验	331
15.2.10	基于引力元的基坑坑壁土压力		16.8	土的击实试验	335
			16.9	土的压缩试验	338
			16.10	土的无侧限抗压强度试验	342
			16.11	土的直接剪切试验	344
			16.12	土的三轴剪切试验	347
			思考题与习题		350
			参考文献		351

第1章 土木结构基础工程学概论

1.1 土木结构基础工程学的特点

土木结构基础工程学是研究土木结构物的基础设计及施工理论、技术与方法的科学，土木结构基础工程学是一个具有一定综合性的科学体系，土木结构基础工程学与土力学、岩石学、工程地质学、结构工程学、力学、数学等学科有着非常紧密的联系，土木结构基础工程学以数学为基础、力学为支撑、工程技术科学为工具构建起了自己的科学体系。

任何土木工程结构（包括公路、铁路、各种建筑物、各种构筑物、各类桥梁、各类水工结构、各类线路工程土建结构等）都是建造在一定的地层之上的，土木工程结构的全部荷载都是由它下面的地层来承受的。受土木工程结构物影响的那一部分地层被称为地基，土木工程结构物与地基接触的部分被称为基础。土木结构基础工程学的核心工作是解决土木工程结构物地基与基础的设计与施工问题。不难理解，地基与基础在各种荷载作用下将产生附加应力和变形，因此，为保证土木工程结构物的正常使用及安全必须要求其地基与基础应具有足够的强度和稳定性且其变形也应在允许的范围以内，为此，人们通常根据土木工程结构物下覆地层的变化情况、上部结构要求、荷载特点和施工技术水平等实际情况确定采用适宜的地基和基础形式。目前人们习惯将土木工程结构物地基分为天然地基与人工地基2大类，未经人工处理就可满足设计要求的地基被称为天然地基，若天然地层土质过于软弱（或存在不良工程地质问题）而必须通过人工加固或处理后才能满足设计要求的地基则被称为人工地基。另外，人们还习惯根据土木工程结构物基础埋置深度的不同将土木工程结构基础分为浅基础和深基础2大类，即将埋置深度较浅（一般在数米以内）且施工简单的基础称为浅基础，若浅层土质不良而需将基础置于较深的良好土层上且施工较复杂时则被称为深基础，有些基础虽然埋置在土层内深度较浅但其在水下部分较深也应该作为深基础进行处理（比如深水中的桥墩基础，也被称为深水基础）。大量工程实践表明，土木工程结构物地基与基础设计和施工质量的优劣对整个土木工程结构物的质量和正常使用起着根本的、决定性作用，基础工程属于隐蔽工程，基础工程有缺陷时较难发现也较难弥补和修复，而这些缺陷又往往会直接影响到整个土木工程结构物的使用甚至安全，因此，地基与基础的设计和施工质量具有关键性的作用。基础工程的施工进度对整个土木工程结构物的施工进度具有较大的控制作用，基础工程的造价在整个土木工程结构物造价中也通常会占相当大的比例（尤其是在复杂地质条件下或深水中修建基础），因此，基础工程必须精心设计、精心施工。

总之，进行土木结构基础工程设计及施工必须具备足够的工程地质学知识、岩土工程知识、力学知识、化学知识、结构工程知识、数学知识，与土木结构基础工程设计及施工有关的力学知识包括理论力学、材料力学、结构力学、土力学、岩石力学、流体力学、弹性力学、塑性力学、弹塑性力学、黏弹性力学等，与土木结构基础工程设计及施工有关的结构工程知识包括混凝土结构、钢结构、砌体结构等，与土木结构基础工程设计及施工有关的数学知识包括微积分学、数理统计、概率论、数值分析等。由此可见，土木结构基础工程学是一门多学科集成的综合性科学体系。

1.2 土力学的基本问题

土力学是研究土的形成、构造以及各种作用条件下土结构及性能变化规律的科学。狭义上讲,土力学主要是解决土体的变形和稳定两大基本问题的(对土木工程而言)。所谓“土”是指岩石风化颗粒的堆积物,所谓“地球土”是指地球表面的整体岩石在大气中经受长期的风化作用而形成的、覆盖在地表上碎散的、没有胶结或胶结很弱的颗粒堆积物。土是岩石风化的产物,具有碎散性、强度低,受力以后易变形,为非连续介质,其体积变化主要是孔隙变化,其剪切变形主要由颗粒相对位移引起。土为三相体系,包括由土骨架组成的固相主体,以水为主的液相部分,以空气为主的气相部分。土体受力后由土骨架、孔隙介质等多相介质共同承担并存在着复杂的相互作用过程且伴有孔隙流体的流动。土是自然界的产物,具有自然变异性(即非均匀性、各向异性、结构性、时空变异性)。由于土为三相体系且具有碎散性和自然变异性,故其力学特性复杂并会表现出独特的变形特性、强度特性、渗透特性,这也就决定了土力学的独特学科特征。大家知道,理论力学的研究对象是质点或刚体,材料力学、结构力学、弹性力学研究的是连续固体(材料力学的研究对象是单个弹性杆件,比如杆、轴、梁。结构力学的研究对象是若干弹性杆件组成的杆件结构。弹性力学的研究对象是弹性实体结构或板壳结构),水力学研究的是连续流体(其研究对象是不可压缩的连续流体,比如水、石油等液体),而土力学的研究对象则是碎散材料(即天然的三相碎散堆积物),土力学研究的核心问题是土体的应力、变形、强度、渗流和长期稳定性,属于工程力学的一个分支。狭义上讲,连续介质力学的基本知识以及描述碎散体特性的理论是土力学的支撑。

1.2.1 土力学在土木工程中的作用

对土木工程而言,土力学主要被用来解决与土的强度、变形、稳定性和渗透特性等有关实际工程问题(原因是土的工程应用非常广泛且存在大量与土有关的工程问题)。土的工程应用主要表现在3个方面,即用作土工建筑材料、用作土木工程结构物基础之地基、用于建筑环境建设。工程技术领域与土有关的工程问题比比皆是,土力学与岩土工程和地下工程等密切相关,典型的与土强度有关的工程事故有加拿大特朗斯康谷仓事故,加拿大特朗斯康谷仓长59.4m、宽23.5m、高31.0m,共由65个圆筒仓组成,自重20000t,为钢筋混凝土筏板基础,基础厚0.61m、埋深3.66m,整个工程1911年动工、1913年完工,1913年9月装谷物,1913年10月17日装到31822t谷物时整个谷仓1小时竖向位移(沉降)达30.5cm,24小时倾斜了 $26^{\circ}53'$ (西端下沉7.32m、东端上抬1.52m,而上部钢筋混凝土筒仓则完好无损)。经调查分析,加拿大特朗斯康谷仓地基土事先未进行实际勘察而仅根据其邻近结构物基槽开挖取土试验结果计算了地基承载力并应用于该谷仓,1952年经勘察试验与计算该谷仓的地基实际承载力远小于谷仓破坏时发生的基底压力,因此导致谷仓地基因超载而发生强度破坏并发生滑动。后来,人们在谷仓下面做了70多个支撑于基岩上的混凝土墩并借助388个50t千斤顶以及支撑系统才把仓体逐渐纠正过来,但其位置也已比原来降低了4m。香港宝城滑坡事故,1972年7月某日清晨,香港宝城路附近两万立方米残积土从山坡上下滑,巨大滑动体正好冲过一幢高层住宅——宝城大厦,顷刻间宝城大厦被冲毁倒塌并砸毁相邻一幢大楼一角约五层住宅,死亡67人。事后调查发现山坡上残积土本身强度较低,由于雨水入渗使其强度进一步大大降低并导致土体滑动力超过土的强度,于是山坡土体发生了滑动。阪神大地震中的地基液化,阪神大地震中神户码头由于地震引起大面积砂土地基液

化后产生很大的侧向变形和沉降,大量的建筑物倒塌或遭到严重损伤,其沉箱式岸墙也因砂土地基液化失稳而滑入海中。所谓“地基液化”是指松砂地基在振动荷载作用下丧失强度而变成流动状态的一种现象。典型的与土变形有关的工程事故有比萨斜塔,比萨斜塔全塔共8层,高度为55m,1590年伽利略曾在此塔做自由落体实验。该塔1173年动工,1178年施工到4层(高约29m)时因倾斜停工,1272年复工并经6年施工至7层(高48m)因倾斜再次停工,1360年再次复工直到1370年竣工。目前该塔向南倾斜且南北两端沉降差1.80m、塔顶已偏离设计中心线5.27m、倾斜 5.5° 。针对该塔的倾斜问题人们进行了大量的调查并找出了其中的原因,即该塔的地基持力层为粉砂,且下面为粉土和黏土层,强度较低、变形较大。于是,人们开始了历时150多年的比萨斜塔纠倾工程,1838~1839年采取的主要措施是挖环形基坑卸载;1933~1935年采取的主要措施是基坑防水处理以及基础环灌浆加固;1990年1月因安全原因封闭;1992年7月采取的主要措施是加固塔身并用压重法和取土法进行地基处理,随后开始正常向游人开放。虎丘塔位于江苏省苏州市虎丘公园山顶,落成于宋太祖建隆二年(公元961年),全塔7层、高47.5m,塔的平面呈八角形。由于年久失修其塔身曾向东北方向严重倾斜,塔顶偏离设计中心线达2.31m且底层塔身产生不少裂缝而成为危险建筑物,因而一段时间内不得不封闭纠倾。为此,人们对其进行了调查分析,发现其倾斜原因是因为其坐落于不均匀粉质黏土层上并产生了不均匀沉降。纠倾处理的方法是在塔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打设树根桩加固塔身,最终获得了成功。日本关西机场位于日本大阪的世界最大人工岛上,人工岛面积 $4370\text{m} \times 1250\text{m}$ 、填筑量 $180 \times 10^6\text{m}^3$ 、平均厚度33m,人工岛1986年开工,1990年人工岛完成,1994年机场运营,机场运营后发现其沉降大且有不均匀沉降,设计时的预测沉降为5.7~7.5m,完成时的实际沉降为8.1m(1990年的沉降速度为5cm/月),预测主固结完成时间为20年,为此比设计超填了3m。典型的与土渗透问题有关的工程事故有山西省洪洞县曲亭水库土坝垮塌事故,曲亭水库为一中型水库,兴建于1959年,2013年2月15日因为坝体渗流导致垮坝,500m长的大坝1/5被冲毁,下泄库水冲毁了同蒲铁路和国道108线使交通中断48小时。美国Teton坝位于美国idaho州,为土坝,高90m、长1000m,建于1972~1975年,1976年6月失事,失事导致直接损失8000万美元、起诉5500起、赔偿2.5亿美元、死亡14人、受灾2.5万人、60万亩土地和32km铁路被毁,事后原因调查为地震引发的渗透破坏,即水力劈裂。Teton坝1976年6月5日上午10:30左右其下游坝面有水渗出并带出泥土,11:00左右洞口不断扩大并向坝顶靠近且泥水流量增加,11:30洞口继续向上扩大,泥水冲蚀了坝基并在主洞的上方又出现一渗水洞,且流出的泥水开始冲击坝趾处的设施,11:50左右洞口扩大加速且泥水对坝基的冲蚀更加剧烈,11:57坝坡坍塌、泥水狂泻而下,12:00过后坍塌口加宽、洪水扫过下游谷底并导致附近所有设施被彻底摧毁。1998年8月7日13:10因洪水导致九江大堤发生管涌险情,20分钟后在堤外迎水面找到2处进水口,又过20分钟防水墙后的土堤突然塌陷出1个洞,随之5m宽的堤顶顷刻间全部塌陷并很快形成一宽约62m的溃口。事后调查发现溃口原因是堤基管涌,见图1-1。所谓“管涌”是指在渗流作用下,无黏性土体中的细小颗粒通过土的孔隙发生移动或被水流带出现象。对于砂性土堤基来讲,当管涌发生时渗流将导致向源侵蚀而使堤防基础下部出现渗流通道,当水头差足够大时侵蚀将加速并掏挖堤防基础,其一旦形成通道后就极易引起砂性土堤基溃决。综上所述,土工结构物或地基有强度、变形、渗透3大问题,土具有相应的强度、变形、渗透特性,因此,土力学可以解决许多工程实践问题,这也正是土力学存在的价值之所在。土力学的基础是土的物理性质,核心是土的渗透特性、变形特性、强度特性(通过3大特性研

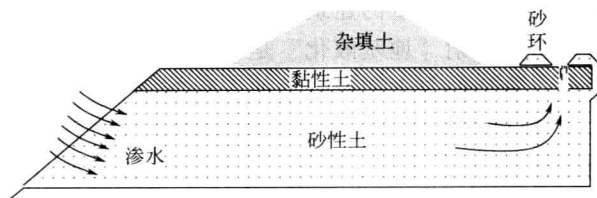


图 1-1 长江堤防工程堤基管涌发生发展过程示意图

究可以探究渗流、流土和湿化问题；地基沉降问题；土的抗剪强度及参数确定问题），导致土的特性发生变化的诱因是土中应力，土力学的具体应用领域非常广泛（典型应用是土压力计算、地基承载力计算、边坡稳定性分析）。土力学理论可以为建筑工程、岩土工程和地下工程等的安全、经济和使用正常保驾护航。

1.2.2 土力学的主要学科分支

宏观上讲，土力学有 4 大分支学科，即理论土力学、实验土力学、应用土力学和计算土力学，4 大分支学科相互联系、互相促进、相互补充。

理论土力学是土力学学科发展的龙头。理论土力学研究的主要对象有 3 个，即饱和土土力学、非饱和土土力学和土动力学，本构理论是其核心，因时间因素而出现的流变特性是理论土力学的重要研究课题。非饱和土土力学是一个带有普遍性和较大覆盖面的重要科学问题，非饱和土土力学理论应建立在对非饱和土力学特性和土中水、气运动规律充分揭示的基础上。土动力学的作用是揭示土在其动力特性方面的特殊规律性，涉及地震动载、液化评判、动本构关系或动力反应和土体动力稳定性分析等诸多内容，原位测试、原型观测与土工动力离心模型试验的成果是土动力学研究的根基。

实验土力学是土力学学科发展的基础。随着工程建设逐渐向高、大、深、重发展，以往基于低压力的土工试验设备和技术受到更大的限制，适应于高应力、粗粒径、大位移、多因素和复杂应力组合的设备和方法得到发展，原位测试的作用更加明显。对以重力为主的细粒土土工建筑物来讲，土工离心模型试验已成为验证计算方法和解决土工问题的一种强有力的手段。微观结构分析试验与宏观力学特性试验结合为岩土结构性指标的确定及结构性模型的构建提供了有利的技术支撑。数值分析和多因素、多环节影响下的计算机仿真分析可在一定程度上缓解复杂条件下土性参数测试的困难和缺陷。如果将土在应力增长下应变的发展视为土材料受荷损伤的反映，声波法、射线法、CT 识别法等材料损伤研究法为土工实验增添了双翼。

应用土力学是土力学学科发展的动力。大量的岩土工程活动拓展了土力学的应用领域，土力学应用的过程也是检验土力学理论和发展土力学理论的必要步骤。人工智能成了应用土力学的重要工具，有了人工智能就可以更好地解决专家生命的有限性和专家思维的延续性之间这一长期存在的矛盾，20 世纪专家和广大岩土工作者积累的丰富经验和对它的进一步总结为建立专家系统的知识库提供了大量的资料并会随着新的经验继续得到新的丰富，目前人工智能已经由初级的模拟思维发展到思维与知识的结合并进一步发展到了用人工神经网络构造专家系统（即能够通过对实例集的自学习和自组织发挥专家的作用），应用土力学的人工智能技术已经可以在一定程度上解决许多土质的地基工程、边坡工程、洞室工程、支护工程以及环境工程中的各种实际问题。另外，土体整治技术也是应用土力学的另一个重要方面，这种整治包括增强性整治、托换性整治和环保性整治，它们以减灾、耐久和保护环境为目的，增强性整治可以包括增密（挤密、振密、夯密、压密）、置换（层状置换、柱状置换）、加筋（均匀加筋、局部加筋）、锚喷、胶固、挖填、排水、防渗等各种地基处理措施（对这

些措施的加强机理、设计施工、质量控制、效果检验、经济效益以及经验总结都已成为应用土力学的长久性工作内容);托换性整治主要解决建筑物的增层加高、改型换貌或事故处理以满足其连续服役要求;环保性整治主要面对的是废渣、废液、尾矿、污水、粪便、化肥、生活及建筑垃圾等对土体和水体的浸入和污染而形成的污染土介质(需了解其生物、化学、物理、力学特性以解决各种问题,比如土介质中污染水的治理;固体废物深埋处置工程中岩土介质、固体废物和地下水的相互作用;多孔介质中渗流与污染物的运移规律以及工程应用与工程措施等。另外,环保性整治还包括由于大气降水、灌溉、地震、开挖等引起的边坡失稳问题,也包括由于煤矿开采、盐矿开采、油气开采、地下水抽汲、黄土浸湿、疏松土湿化、喀斯特发展以及振动等引起的各类地面下沉问题)。应用土力学的第三个方向是人工合成材料的应用,目前人工合成材料已在排水、防渗、滤层、加筋等各个方面取得了良好效果,但对它的设计理论和应用技术的研究还非常欠缺,大量的潜力尚待发掘,大量的经验有待总结,问题的核心是土体与其中各类复合体或结构体之间的相互作用问题(包括力的传递机理、合理布置方式以及材料与结构类型等,于是人们借助智能监控测试使设计与施工相互反馈、全面优化)。当然,古文物保护也涉及应用土力学问题和岩石力学问题。

计算土力学是土力学学科发展的翅膀,计算土力学使理论土力学、实验土力学和应用土力学得以融合互通并提供土力学的精确度和效率(计算土力学离不开建模、建模离不开理论、理论离不开实践),计算土力学的发展为复杂土工问题的数值计算或模拟试验提供了可能,计算土力学是计算机技术、数值方法和土性规律正确而有机的结合(当然,由于土力学研究对象本身和所处环境条件的复杂性以及理论建立中各种假定的简化性,任何计算都不可能囊括一切情况。因此,土力学的计算应该建立针对不同类型问题的理论、方法和软件并成为一个完整的系列且其计算结果还必须与专家的综合判断相结合,这才是土力学解决问题的正确途径)。

1.2.3 土力学的历史与发展

土力学的发展经历了一个漫长的历史时期,土力学产生于人类工程活动经验的积累中,具有悠久的历史(其萌芽可追溯到公元前1000年左右),1776年的Coulomb强度定律[即库仑土压力理论,Charles-Auguste de Coulomb是法国科学家(1736~1806),1773年他开始研究最大最小原理在某些与建筑有关的静力学问题中的应用问题并于后来提出Coulomb强度理论定律和土压理论]标志着近代土力学的萌芽,1856年的Darcy定律[即达西定律,法国科学家Henry Philibert Gaspard Darcy(1803~1858)创立]、1857年的Rankine新的土压力理论[即朗肯土压力理论,英国科学家William John Maquorn Rankine(1820~1872)创立]促进了近代土力学的发展,1925年的Terzaghi(Karl Von Terzaghi,1883~1963,美籍奥地利土力学家)有效应力原理及渗透固结理论标志着土力学作为一门独立学科的诞生(因此,不少人将泰萨基视为土力学的奠基人和土力学之父并认为他1925年出版的德文版土力学专著《Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage》为土力学学科诞生的标志),1936第一届国际土力学及基础工程会议确立了土力学的科学地位。历史上对土力学发展做出过贡献的科学家很多,他们中的典型代表有William John Maquorn Rankine、Christian Otto Mohr、Donald Wood Taylor、Ralph Brazelton Peck等。土力学发展到今天已经形成了一个庞大的学科体系。

泰萨基主要功绩之一是他将当时已有的孤立的规律、原理或理论按土的特性将它们联系和系统化起来总结提出了土的3个特性(即“黏性”、“弹性”和“渗透性”),并凭借其丰富的实践经验和深邃的洞察力发展了土力学原理,拓宽了土力学领域并使之成为一门独立的学

科,有效应力原理的建立充分体现了泰萨基作为土力学一代宗师的睿智和创造性(有效应力原理的出现对土力学以后的发展产生了重大影响而且至今仍是认识和研究土的性状的一个重要原理。在这个原理中泰萨基充分意识到超孔隙压力对土的抗剪强度的影响并认定需要用排水剪切试验来测定有效强度)。土力学自成为独立学科以来大致可分为两个阶段,即1925年~20世纪60年代的近代土力学阶段;20世纪60年代至今的现代土力学阶段。第一个阶段的土力学基本是在泰萨基理论的范围内活动并发展了相应的试验和测试技术且广泛地与岩土工程实践相结合,但由于土的性质实在太复杂,因此许多问题都没能真正搞清(各种研究均是从土的各个侧面局部地、割裂地进行,有时把土当作弹性体,有时又把土当作刚塑性体,对土的性状研究也仅片面着眼于土的强度而不能很好地顾及土的固有本质的完整性,从而导致许多问题无法深入研究下去,有些即使研究了也无法加以论证和得出结果,从而使人们对土的真实性状的认识与预测存在很大偏差),这一阶段虽然没有很多突破性的进展,但仍取得了连续的进步,比如伏斯列夫的黏性土抗剪强度的理论、斯肯普顿的软土稳定分析法及孔隙压力系数理论、贝伦的软黏土性状研究、毕肖普和亨开尔的三轴试验技术、有效应力分析法、卡萨格兰地的总应力法等。1960年在美国科罗拉多召开的黏性土抗剪强度研讨会为近代土力学做了总结并开启了现代土力学的大门。20世纪60年代以来计算机技术的迅速发展使土力学获得了活力并在岩土工程实践中得到迅速推广应用,以罗斯科为代表的临界状态土力学的创立使人们对土的本构关系的研究步入了一个新的境界,人们开始把土受力后所表现出来的应力、变形、强度和稳定以及时间因素的影响等特征作为一个整体来研究(即构建土的本构关系),本构关系的发展和数值分析技术应用使得岩土工程的分析能在一定程度上模拟土的特性、边界条件和加荷方式,岩土工作状态预测也由定性向定量方向发展,同时也推动了土工测试技术和取样技术的发展,然而,由于土的性质的复杂性和岩土工程的许多不确定性导致各种本构关系的预测精度和理论成果不断地受到人们的质疑,因此验证的技术和实践的检验仍然备受重视,现场的原位试验和对土工建筑物的原型观测被置于越来越重要的地位,进而有了“Learn-as-you-go”途径和基于实测资料的反分析法(日本的樱井春辅首先提出),与此同时,离心模拟技术也得到了长足发展并被认为是室内研究和分析复杂土性及岩土工程性状的有效验证和预测手段,尽管土的本构关系研究貌似将土的各方面特性作为一个整体有机地联系起来,但其实并未把土真正当作土来对待(土的大多数本构关系大多是从其他学科中借用过来的,比如金属材料的本构理论。在这些本构理论中无法充分考虑岩土这种复杂材料的真面目,土的某些“个性”被抹杀掉了),于是人们开始重视土的结构性问题。目前,土力学研究的热点主要有以下几项:①土的微观和细观研究,以探究土的非线性、弹塑性、剪胀剪缩性、各向异性、流变性、应力路径影响等问题。②土体的原位试验和无损探测,以克服从野外取土到实验室后土结构性的巨大变化以及在应力状态等方面的改变。③非饱和土的研究,非饱和土性质的复杂性主要由于土中气相的存在而引起,土、水 and 气三相交界面上的吸力是非饱和土研究的核心问题,它对非饱和土的力学性质有很大影响,但由于吸力测定和研究的困难,人们常借用土-水特征曲线表征;非线性分析,针对土稳定或破坏状态的分岔或混沌现象引进非线性原理及方法,比如分维理论、分叉理论、突变理论等。④新本构理论,所谓“土的本构关系”是指土在外力作用或外界因素变化情况下所表现出来的行为性状的定量关系,比如应力-应变-时间关系、温度-应变关系等,它是土力学研究的中心问题之一。新本构理论有2个发展趋势,即精细本构模型、简约本构模型。精细本构模型的特点是充分反映土的各种主要特性,故对参数测定有相当高的要求。简约本构模型的特点是简洁、方便计算、技巧性高。目前最为广泛使用的有限单元法是以位移作为形函数的,相当

于给土体强加了位移连续的限制,而实际上土体内是应力连续的,位移却难得连续(比如土的开裂、滑坡),因此有限元法是不完全符合土的个性的。离散元法、流形元法等新数值分析方法可以略微弥补有限元法的缺陷。⑤非确定性方法,土和岩土工程都具有大量的不确定性因素,将它们作为确定性问题处理就会抹杀它的随机特性从而导致很大的偏差,故土的随机特性受到重视,岩土工程的设计方法由定值设计转为可靠性设计,概率理论和优化决策理论登上土力学的舞台,概率论、模糊分析、灰色理论等不确定性数学理论得以应用于土力学。⑥环境土力学研究,岩土工程(土力学的研究对象)处于复杂环境之中必然会受到各种物理、化学的应力、热、磁以及海浪或地震波等的作用。因此,环境土力学应运而生,环境土力学不仅仅局限于废料、废土的利用和处理以及地下工程引起的对地面建筑物的影响等小环境问题,而且也包括土壤荒漠化、洪水、区域性滑坡、泥石流、地震灾害和火山喷发等大环境问题。⑦土的加固与改良,天然土有时不能满足岩土工程大型化、精细化和复杂化的需要,因此就必须处理土、改良土,于是就有了土工合成材料、涉土金属材料、涉土混凝土等,也就有了土与其他材料的共同作用问题。⑧经验的回归与观测方法的改良,无助中的泰萨基曾有一句名言“土力学既是一门科学,又是一门艺术。工程实践经验具有不可替代的重要意义”。于是,基于经验的专家系统(即将专家们的智慧存储在计算机中以备咨询和处理疑难问题)、神经网络等方法得以发展。工程实践经验决定于可靠的观测数据,观测方法的可靠性至关重要,因此,“观测法”的应用被提升到了一个新的高度。当代世界各国超高大坝、超高层建筑、地下空间开发、矿山深井建设、核电站、越江越海隧道、巨型电站、南水北调等巨型工程的兴建以及各种环境地质灾害(比如地震、山体滑坡等)的频发大大刺激了土力学的发展与进步,各种研究方法及手段不断进步,各种各样的工程勘察、试验及地基处理新设备得以研制,电子计算机的应用水平和实验测试技术的自动化程度不断提高(目前,已经能够模拟、计算三维复杂条件下的许多工程问题),土力学的研究也呈现出一种前所未有的蓬勃之势。

1.2.4 目前土力学中存在的问题

土力学学科目前已基本搭建起了完整的理论体系并在工程实践中发挥了重大作用。现代土力学所要回答的两大基本问题仍然是土体的变形和稳定问题,不同之处在于复杂土木工程所要回答的已不再是一维竖向变形以及沿给定面上的抗剪强度问题,而是应考虑各种因素对变形和稳定的影响问题(比如荷载的多维性以及荷载随时间的变化,重复荷载,振动荷载,地层条件和边界形状的复杂性,土体类型和结构的复杂性,饱和程度变化,物理状态变化,渗流和孔隙压力特征,土与结构的相互作用,时间、温度等因素的影响,等等),从而导致了土体本构理论、土体强度理论、土体固结理论、土体流变理论、非饱和土力学理论、土压力理论、边坡稳定和地基承载力理论、土动力学理论、环境土力学理论、地基加固方法及理论的繁荣。尽管如此,由于土的复杂性导致土力学中的许多学科领域还很不成熟。

传统土力学理论是解决饱和土问题的,其试验方法也是针对饱和土的,故得出的规律也主要适用于饱和土。工程中遇到饱和土的情况非常罕见,大量的土均为非饱和土,将非饱和土问题用饱和土的方法进行处理是欠妥的(因为不少土在饱和前后力学性质会有很大变化,比如膨胀土浸水后体积会膨胀、黄土浸水后体积会收缩,且它们的强度在浸水后都会降低,因此,用饱和土的方法是难以反映由非饱和到饱和所引起的力学性质变化的)。于是,有人试图以吸力解释非饱和土问题并借以构建非饱和土理论体系,但其中的问题仍然很多。

地基加固技术和理论尽管很多但均不太成熟,尽管已有很多方法均得到了实际工程应用(比如托换技术、锚固技术、纠偏技术、换土法、预压法、强夯法、各种形式的复合地基、