



21世纪高等教育土木工程系列规划教材

土力学与 基础工程

第2版

代国忠 史贵才 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

21 世纪高等教育土木工程系列规划

土力学与基础工程

第 2 版

主 编 代国忠 史贵才
副主编 吴晓枫 夏 雄
参 编 鲁良辉 李雄威 王德玲
主 审 陈国兴



机械工业出版社

本书根据新的《高等学校土木工程本科指导性专业规范》进行编写,较系统地介绍了土力学和基础工程的基本理论知识、分析计算方法及在工程实践中的应用等。教材体现了土力学与基础工程的有机结合,强调了“土力学”是“基础工程”设计和应用理论基础。全书共分为13章,主要内容包括:绪论、土的结构组成与物理性质、土体中的应力计算、土的压缩性与地基沉降计算、土的抗剪强度及土压力、地基承载力及土坡稳定性、浅基础及挡土墙、桩基础、基坑工程、沉井工程、地下连续墙工程、地基处理技术、特殊土地基。本书紧密结合土木工程本科人才培养目标和要求,突出教材的实用性和综合应用性,各章内容由浅入深、概念清楚、层次分明、重点突出,涉及基础工程设计部分均依照我国现行规范进行编写,主要章节附有例题及习题。

本书可作为普通高等学校土木工程专业本科的教学用书,也可作为相关专业师生及工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

土力学与基础工程/代国忠,史贵才主编.—2版.—北京:机械工业出版社,2013.12

21世纪高等教育土木工程系列规划教材

ISBN 978-7-111-44369-8

I. ①土… II. ①代… ②史… III. ①土力学—高等学校—教材②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244661号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:马军平 责任编辑:马军平 李 帅

版式设计:常天培 责任校对:肖 琳

封面设计:张 静 责任印制:李 洋

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2014年1月第2版第1次印刷

184mm×260mm·26.5印张·723千字

标准书号:ISBN 978-7-111-44369-8

定价:49.90元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

第2版前言

本书是21世纪高等教育土木工程系列规划教材之一,并根据新的《高等学校土木工程本科指导性专业规范》进行编写,较系统地介绍了土力学和基础工程的基本理论知识、分析计算方法及在工程实践中的应用等。教材体现了土力学和基础工程的有机结合,并保持各自的独立性。本教材土力学部分为38基本学时(含6学时土力学实验),基础工程部分为32基本学时。授课时可对内容做适当调整。

本书由13章组成,主要内容包括绪论、土的结构组成与物理性质、土体中的应力计算、土的压缩性与地基沉降计算、土的抗剪强度及土压力、地基承载力及土坡稳定性、浅基础及挡土墙、桩基础、基坑工程、沉井工程、地下连续墙工程、地基处理技术、特殊土地基。书中主要章节均附有例题及习题。

本书土力学部分各章内容结构布局合理,既兼顾传统理论,又有创新突破;基础工程部分内容有实质性突破,主要是增加了基坑工程、地基处理技术和特殊土地基的内容。各章内容充实,有一定深度和广度。浅基础及挡土墙、桩基础、基坑工程等章有综合性设计计算实例,可通过教与学实现基础工程设计能力和应用能力的提高。教材各章内容力求实现与《建筑桩基技术规范》《岩土工程勘察规范》《建筑地基基础设计规范》《建筑地基处理技术规范》《建筑基桩检测技术规范》《建筑抗震设计规范》《建筑基坑支护技术规程》《公路路基设计规范》等各类现行技术规范或规程的深入融合,以指导工程设计与施工。

本书力求内容充实、概念清楚、层次分明、覆盖面广、重点突出。本书可作为普通高等学校土木工程本科专业的教学用书,也可作为地基基础课程设计的参考资料,还可作为相关专业师生及工程技术人员的参考书。

本书由常州工学院代国忠教授和史贵才副教授担任主编,南京工业大学陈国兴教授担任主审。全书由代国忠教授制定编写大纲,并编写第2、6、8、9、13章;常州工学院史贵才副教授编写第1、3、5、10章;吴晓枫副教授编写第7、12章;常州大学夏雄副教授编写第4、11章;长江大学王德玲副教授参与了第2、5章编写;常州工学院李雄威副教授参与了第5、6章的编写,鲁良辉讲师参与了第8章的编写。全书由代国忠教授负责统稿。

限于编者水平,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 土力学、地基及基础的基本概念	1
1.2 土力学与基础工程的发展简史	2
1.3 学习土力学与基础工程的重要性	5
1.4 课程性质和学习要求	7
第2章 土的结构组成与物理性质	9
2.1 概述	9
2.2 土的三相组成及土的结构	10
2.3 土的物理性质指标	14
2.4 土的物理状态指标	17
2.5 土的物理指标室内试验方法	20
2.6 土的压实性	24
2.7 岩土的工程分类	27
本章小结	30
习题	30
第3章 土体中的应力计算	32
3.1 概述	32
3.2 自重应力计算	33
3.3 基底压力计算	35
3.4 地基附加应力计算	38
3.5 有效应力原理	52
本章小结	55
习题	56
第4章 土的压缩性与地基沉降计算	57
4.1 概述	57
4.2 土的固结试验与压缩性指标	58
4.3 地基的最终沉降量计算	66
4.4 应力历史对土的压缩性影响	76
4.5 固结理论及地基沉降与时间的关系	80
本章小结	88
习题	88
第5章 土的抗剪强度及土压力	90
5.1 概述	90
5.2 土的抗剪强度理论	90
5.3 土的抗剪强度试验	94
5.4 砂土振动液化问题	101
5.5 挡土墙的土压力计算	107

本章小结	123
习题	123
第6章 地基承载力及土坡稳定性	125
6.1 概述	125
6.2 地基临塑荷载和临界荷载	127
6.3 地基的极限荷载	130
6.4 地基的承载力和稳定性	138
6.5 土坡的稳定性分析	145
本章小结	158
习题	159
第7章 浅基础及挡土墙	160
7.1 概述	160
7.2 基础埋置深度的确定	163
7.3 基础尺寸的确定	166
7.4 扩展基础设计	168
7.5 连续基础的设计	176
7.6 挡土墙	193
本章小结	200
习题	200
第8章 桩基础	202
8.1 概述	202
8.2 设计规定及桩基构造	204
8.3 桩基竖向承载力计算	212
8.4 桩基沉降计算	226
8.5 桩基水平承载力计算	236
8.6 承台设计计算	252
本章小结	265
习题	266
第9章 基坑工程	267
9.1 概述	267
9.2 支护结构的水平荷载计算及结构分析	271
9.3 基坑地面沉降计算	286
9.4 支护结构的稳定性验算	287
9.5 桩墙支护结构设计	291
9.6 土钉墙	306
9.7 重力式水泥土墙与 SMW 工法	312
9.8 基坑降排水	317
本章小结	327
习题	327
第10章 沉井工程	328
10.1 概述	328
10.2 沉井的构造	330
10.3 沉井作为整体深基础的设计与计算	332
10.4 沉井施工期的结构计算	337

本章小结	351
习题	351
第 11 章 地下连续墙工程	352
11.1 概述	352
11.2 地下连续墙设计计算	353
11.3 地下连续墙逆作法施工技术	359
本章小结	363
习题	363
第 12 章 地基处理技术	364
12.1 概述	364
12.2 换填垫层法	368
12.3 夯实地基法	370
12.4 排水固结法	373
12.5 挤密地基法	379
12.6 化学加固法	389
本章小结	397
习题	398
第 13 章 特殊土地基	399
13.1 概述	399
13.2 软土地基	399
13.3 湿陷性黄土地基	401
13.4 膨胀土地基	405
13.5 冻土地基	410
13.6 其他特殊土地基	413
本章小结	414
习题	415
参考文献	416

第 1 章

绪 论

1.1 土力学、地基及基础的基本概念

1. 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:作为建筑物(房屋、桥梁、道路、水工结构等)地基的土,作为建筑材料(路基材料、土坝材料)的土和作为建筑物周围介质或环境(隧道、挡土墙、地下建筑、滑坡问题等)的土。不管是哪一类情况,工程技术人员最关心的是土的力学性质,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、应力历史和环境条件变化的规律。

土力学(Soil Mechanics)是利用力学的一般原理,研究土的物理、力学特性及其受力后强度和体积变化规律的学科。实际上,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性计算的一门学科。

土力学的研究对象是碎散材料的土,土是一种天然的三相碎散堆积物。而与土力学相近的理论力学研究对象是质点或刚体,材料力学研究对象是单个弹性杆件(杆、轴、梁);结构力学研究对象是若干弹性杆件组成的杆件结构;弹性力学研究对象是弹性实体结构或板壳结构;水力学研究对象是不可压缩的连续流体(水),它们的研究对象是连续固体或连续流体。

在与生产实践的结合过程中,产生了土力学的许多分支,如土动力学、计算土力学、实验土力学、非饱和土力学、冻土力学、环境土力学、海洋土力学、月球土力学等。对区域性土和特殊类土(如湿陷性黄土、膨胀土、软土、盐渍土、污染土等)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。

2. 地基与基础

一般来说,工业与民用建筑、高层建筑、桥梁建筑等各类建筑物均由上部结构与地下基础两大部分组成。通常以室外地面整平标高(或河床最大冲刷线)为基准,基准线以上部分称为上部结构,基准线以下部分称为基础。有关地基与基础的概念如下:

(1) 地基 地基是建筑物荷载作用下产生不可忽略的附加应力与变形的那部分地层。地基可分为天然地基和人工地基,不需要对地基进行处理就可以直接放置基础的天然土层称为天然地基;如天然地层土质过于软弱或有不良的工程地质问题,需要经过人工加固或处理后才能修筑基础的地基称之为人工地基。

(2) 基础 基础是埋藏于地面下承受上部结构荷载,并将荷载传递给下卧层的人工构筑物。一般按基础的埋置深度,可分为浅基础和深基础两大类,但有时其界限不是很明显。

浅基础是指埋深 $h \leq 5\text{m}$,可用简便施工方法进行基坑开挖和排水的基础,如柱下独立基础(钢筋混凝土扩展基础)、条形基础(毛石或素混凝土基础)、筏形基础、交叉梁基础等。

深基础是指埋深 $h > 5\text{m}$, 需用专门施工方法建造的基础, 如桩基、沉井、地下连续墙、箱形基础、较深的筏形基础等。某些基础工程, 在土层内深度虽较浅 ($h \leq 5\text{m}$), 但在水下部分较深, 如深水中的桥墩基础, 也可按深基础进行设计。

(3) 基础工程 基础工程是基础的设计与施工工作, 以及有关的工程地质勘察, 基础施工所需基坑的开挖、支护、降水和地基加固工作的总称。

如图 1-1 所示, 建筑物的上部结构荷载通过基础传至地层中, 使其产生附加应力和变形。若将地层视为一个半无限空间体, 地层中附加应力向四周深部扩散, 并迅速减弱, 当传到某一深度后, 上部结构的荷载引起的附加应力与变形已甚小, 对工程实际的影响可忽略。故一般将基础底部标高至该深度范围内的地层统称为建筑物的地基。对地基承载力和变形起主要作用的地层称之为地基主要受力层 (简称为地基受力层)。在地基受力层范围内, 又将基础底面处的地层称之为持力层, 持力层下的地层称之为下卧层, 若存在强度低于持力层的下卧层则称之为软弱下卧层。

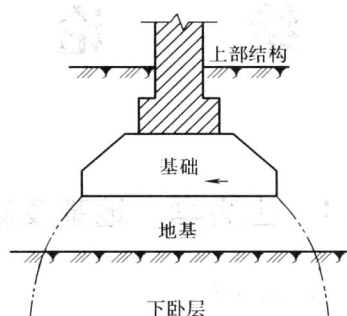


图 1-1 基础与地基示意图

(4) 基础的功能 通过以上分析, 可总结出基础的主要功能有:

1) 扩散压力。当地基土的承载力较低时, 采用锥形或板式的基础形状, 扩大基础的底面积, 可将基础所承受的较大荷载扩散为较低的压力。

2) 传递压力。当上部地层较差时, 采用深基础 (桩基、墩基、地下连续墙、沉井等) 将荷载传递到深部较好的地层 (岩层或砂卵石层)。

3) 调整地基变形。利用厚筏、箱形基础、群摩擦桩等基础所具有的刚度和上部结构共同作用, 以调整地基的不均匀变形或不均匀沉降。

4) 具有抗滑或抗倾覆及减振的作用。由于基础建造在地表以下较牢固的地基上, 因此对于其上部结构来说, 均具有一定的抗滑或抗倾覆及减振的作用。

3. 地基基础设计的基本要求

1) 地基的强度要求。地基要有足够的强度, 在上部结构的荷载作用下, 地基土不应发生剪切破坏或失稳。

2) 地基的变形要求。为确保建筑物的正常使用, 地基不应产生过大沉降或不均匀沉降。

3) 基础结构本身应有足够的强度和刚度。在地基反力作用下, 建筑物基础不会产生过大的强度破坏, 并具有改善沉降与不均匀沉降的能力。

1.2 土力学与基础工程的发展简史

土力学与基础工程包括土力学和基础工程两部分内容。土力学是基础, 基础工程是土力学在土木工程中的具体应用, 两者是密不可分的有机整体。

1. 土力学的发展简史

18 世纪欧洲工业革命开启了土力学的理论研究。法国的库仑 (C. A. Coulomb, 1773 年) 根据试验创立了著名的砂土抗剪强度公式, 提出了计算挡土墙土压力的滑楔理论, 这一理论被认为是土力学的开始。法国的达西 (H. Darcy, 1856 年) 根据对两种均匀砂土渗透试验结果提出了渗透定律。英国的朗肯 (W. J. M. Rankine, 1857 年) 发表了土压力塑性平衡理论, 与库仑理论共同形成了古典土压力理论, 这对后来土体强度理论的发展起了很大作用。法国的布辛奈斯克

(J. Boussinesq, 1885 年) 提出了半无限空间弹性体中应力分布计算公式, 成为计算地基中应力的主要方法, 如今这一理论仍在土力学有关课题中广泛使用。

20 世纪初开始, 因出现了铁路塌方、地基失稳、差异沉降过大、滑坡等一些重大的工程事故, 对地基问题提出了新的要求, 从而推动了土力学的研究, 使土力学理论得到了迅速发展, 发表了许多有关理论和著作。由瑞典的彼德森 (K. E. Peterson, 1916 年) 提出, 以后又由费伦纽斯 (W. Fellenius, 1936 年) 及美国的泰勒 (D. W. Taylor, 1937 年) 等进一步发展的土坡稳定分析的整体圆弧滑动法。法国的普朗德尔 (L. Prandtl, 1920 年) 发表的地基滑动面计算数学公式。

美籍奥地利人太沙基 (K. Terzaghi, 1925 年) 发表了《土力学》专著一书, 提出了著名的饱和土有效应力原理, 系统地论述了土力学若干重要问题。太沙基指出土具有黏性、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, 提出了饱和土的一维固结理论。有效应力原理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原理, 极大地推动了土力学的发展。太沙基把当时零散的有关定律、原理、理论等按土的特性加以系统化, 从而使土力学形成一门独立的学科。

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。

第一阶段从 20 世纪的 20 年代到 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把土视为线弹性体或刚塑性体, 又根据课题需要把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、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、土坡稳定等与工程密切相关的土力学课题。这一阶段主要取得了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、孔隙压力系数等方面的研究成果, 以及钻取不扰动土样、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。

第二阶段从 20 世纪 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、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特性。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非线性弹性模型和剑桥弹塑性模型。国内学者在这方面也做了不少工作, 如南京水利科学研究所提出的弹塑性模型。土的本构关系代表土工研究的发展趋势, 促进了土力学研究的重大变革, 使土工设计和研究达到新的水平。

从土木工程发展和相关学科的进步考虑, 国内外学者认为 21 世纪土力学发展特点是:

1) 进一步汲取现代数学、力学的成果和利用计算机技术, 深入研究土的非线性、各向异性、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) 充分考虑土工问题的不确定性, 进行风险分析和优化决策, 使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、灰色理论等也将在岩土工程中发挥更大的作用。

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, 建立起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较快发展。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很大发展, 原位测试、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、CT 识别法等也被列入到土工试验方法的行列。

5) 环境土力学将得到极大的重视。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、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、地震等大环境问题也将进入土力学研究的范畴。

6) 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、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。

2. 基础工程的发展简史

基础工程是一项古老的工程技术, 发展到今天已成为一门专门的科学。

在中国, 基础工程伴随着华夏五千年的文明史。考古工作者发现人类早在五千年前就开始建造房屋, 只是当时的基础很简单。如浙江省余姚河姆渡文化遗址, 其房屋底层是架空在埋于地下的木桩基础上的; 西安半坡村遗址中的基础是夯实的红烧土和陶瓷片; 洛阳王湾仰韶文化遗址, 其基础是在墙下挖槽, 槽内填卵石夯实, 类似于近代的换土填层处理人工地基。

春秋战国时期, 夯土的基础与城墙已有相当高的水平。玉门关一带的汉长城用砂、砾石和红柳或芦苇层层压实, 至今其残垣仍有 5~6m 高。很多古代建筑, 如隋朝的赵州石拱桥、郑州超化寺、晋祠的圣母殿水池等, 都是由于基础工程的牢固, 方能历经千百载地下水活动、多次地震或强风后而屹立至今。到了元明清年代, 我国的建筑基础工程得到了进一步发展, 如北京故宫三大殿用灰土台基, 天安门用群桩基础, 前门采用了木筏基础等, 这些都反映出了我国数百年前一些高大重建的基础工程水平。

西方国家, 自 18 世纪兴起工业革命以来, 随着城市建设的扩大, 工厂、铁路、水坝的兴建, 促使土力学理论的产生和基础工程技术的发展。特别是第二次世界大战之后, 基础设计理论、计算方法、施工工艺都有较大发展。如 1893 年美国芝加哥人工挖孔桩问世, 1950 年意大利米兰地下连续墙出现, 1957 年德国首先采用土层锚杆桩墙支护深基坑等; 此外, 全液压抓斗、长螺旋钻进设备、正(反)循环回转钻进设备、双轮铣反循环钻进设备、盾构掘进机等成孔(或洞、槽)机械设备的研制与应用都极大地提高了基础工程施工的效率。

我国改革开放以后, 基础设施建设蓬勃发展, 基础工程的设计理论、施工工艺水平也不断提高, 已与世界同步发展。如大直径桩基础工程, 一般直径为 0.5~6m, 深度可从几十米到上百米; 桩基础竖向承载力计算考虑了群桩效应, 水平承载力计算采用了弹性地基梁 m 法。再如深基坑工程的支护方法、支护结构内力和变形的计算理论等也都很成熟。

随着岩土工程及其他相关学科的不断发展, 基础工程在设计计算理论和方法、施工技术和机械设备等方面都有长足的进展。20 世纪 90 年代以来, 颁布实施的现行规范规程有 GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》、JGJ 79—2012《建筑地基处理技术规范》、JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》、JTG D63—2007《公路桥涵地基及基础设计规范》、JGJ 106—2003《建筑基桩检测技术规范》、GB 50021—2001《岩土工程勘察规范》(2009 版)、GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》、JGJ 120—2012《建筑基坑支护技术规程》、JGJ 123—2000《既有建筑地基基础加固技术规范》等。这些现行规范规程是基础工程各个领域取得的科研成果和工程经验的高度概括, 反映了基础工程的发展水平。

目前, 基础工程的关注点之一是在设计计算理论和方法方面的研究探讨, 包括考虑上部结构、基础与地基共同工作的理论和设计方法, 概率极限状态设计理论和方法, 优化设计方法, 数值分析方法和计算机技术的应用等。另外, 随着高层建筑和大跨度大空间结构的涌现、地下空间

的开发等,与之密切相关的两种技术也得到极大的重视。其一,桩基础技术,其中桩土共同工作理论,桩基设计变形控制理论,桩基非线性分析和设计方法,桩基承载力和沉降的合理估算,新的桩型(如大直径成孔灌注桩、预应力管桩、挤扩支盘桩、套筒桩、微型桩等)的研究开发,后注浆技术在桩基工程中的应用,桩基础的环境效应等都成为研究和开发的热点。其二,深基坑支护技术,研究的重点放在土、水压力的估算,基坑支护设计理论和方法的深化——优化设计、静态设计和动态设计、考虑时空效应的方法等;新的基坑支护方法(如复合土钉墙、作为主体结构应用的地下连续墙、锚杆挡墙等)的开发研究;基坑开挖对环境的影响;逆作法技术的应用等也都受到重视。

在地基处理方面,进一步完善复合地基理论,对各类地基处理方法机理的深化研究以及施工检测技术的改进也是基础工程关心的问题。对于深水和复杂地质条件下的基础工程,例如在大型桥梁、水工结构、近海工程中,重要的是深入研究地震、风和波浪冲击的作用,以及发展深水基础(超长大型水下桩基、新型沉井等)的设计和施工方法。

1.3 学习土力学与基础工程的重要性

地基与基础是建筑物的根基,是整个建筑工程的重要组成部分,它的勘察、设计和施工质量直接影响到建筑物的安全、经济和正常使用。由于基础工程均位于地下或水下,施工难度较大,因而其工程造价、工期在整个建筑工程中所占比重也较大。据国内外资料统计,一般多层建筑中地下基础部分的造价占总造价的 $1/4$ 左右,工期占总工期的 $25\% \sim 30\%$,若需人工处理地基或采用深基础,则造价和工期所占比例将更大。在桥梁工程中其基础部分的造价和工期所占比例会更高一些,具体视河流情况和桥梁设计方案而定。

因地基勘察精确,基础设计方案合理,工程施工质量好,成功的实例举不胜举,如建于隋代的赵州桥,建于明代的北京故宫,以及现代的南京长江大桥、润扬长江大桥、上海东方明珠电视塔、上海金茂大厦、上海环球金融中心、人民大会堂、北京奥体中心等。基础工程因多属于地下隐蔽工程,一旦出现事故后,其处理和整治补救较困难。下面以一些发生严重事故的基础工程实例介绍,进一步说明学习土力学与基础工程的重要性。

(1) 意大利比萨斜塔 意大利比萨(Pisa)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,经过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。地坚持力层为粉砂,下面为粉土和黏土层。由于地基的不均匀下沉,至今塔南侧沉降了约3m,北侧沉降了1m多,塔向南倾斜 5.8° ,南北两端沉降差1.8m,塔顶偏离中心线已达5.27m。近年来,该塔每年下沉约1mm左右,成为世界上最著名的基础工程处理难题。直至1993—2001年,采取了堆载与抽土联合纠偏技术,才使比萨斜塔的倾斜得以控制。

(2) 苏州虎丘塔 苏州虎丘塔位于苏州市虎丘公园山顶,建成于宋太祖建隆二年(公元961年),距今已有1050余年。全塔7层,高47.5m,平面呈八角形,青砖砌筑。

1980年时,塔身已向东北方向严重倾斜,塔顶离中心线已达2.31m,底层塔身出现不少裂缝。虎丘塔发生不均匀沉降的主要原因是:塔无基础,塔墩直接砌筑在人工填土地基上,基底应力过大;塔建于南高北低的岩坡土层上,地基土持力层北厚南薄,产生了不均匀的压缩变形,导致了塔身倾斜;塔基及其周围地面未作妥善处理,因地表水渗入地基、由南向北潜流侵蚀等因素,使塔北人工填土层产生较多孔隙,造成不均匀沉降的发展;塔体由黏性黄土砌筑,灰缝较

宽,塔身倾斜后形成偏心压力,加剧了不均匀压缩变形。

(3) 上海工业展览馆 1954 年兴建的上海工业展览馆中央大厅,因地基约有 14m 厚的淤泥质软黏土,尽管采用了 7.27m 的箱形基础,建成后当年就下沉 600mm。1957 年 6 月展览馆中央大厅四角的沉降最大达 1465.5mm,最小沉降量为 1228mm。1957 年 7 月,经苏联专家及清华大学陈希哲教授、陈梁生教授的观察与分析,认为采取有效措施控制不均匀沉降,该建筑还可以继续使用。

上述事故主要是因地基土的变形过大,或产生较大的不均匀沉降所致。由于地基强度不足造成的地基失稳事故著名例子有加拿大特朗斯康谷仓和阪神大地震中地基液化等。

(4) 加拿大特朗斯康谷仓地基事故 1941 年建于加拿大特朗斯康 (Transcona) 的谷仓,如图 1-2 所示。该谷仓南北长 59.44m,东西宽 23.47m,高 31.00m。基础为钢筋混凝土筏形基础,厚 61cm,埋深 3.66m。谷仓 1911 年动工,1913 年秋完成。谷仓自重 20000t,相当于装满谷物后总重的 42.5%。1913 年 9 月装谷物,至 31822m³时,发现谷仓 1 h 内竖向沉降达 30.5cm,并向西倾斜,24h 后倾倒,西侧下陷 7.32m,东侧抬高 1.52m,倾斜 27°。该谷仓的地基虽破坏,但钢筋混凝土筒仓却安然无恙,后用 388 个 500kN 千斤顶及支撑系统对其基础实施纠正,效果较好,但基础标高比原来降低了 4m。

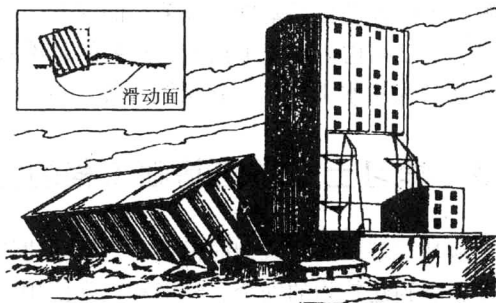


图 1-2 加拿大特朗斯康谷仓地基事故

加拿大特朗斯康谷仓地基事故原因是:

设计时未对谷仓地基承载力进行调查研究,而采用了邻近建筑地基 352kPa 的承载力,事后 1952 年的勘察试验与计算表明,基础下有 16m 厚软黏土层,地基实际承载力为 193.8 ~ 276.6kPa,远小于谷仓地基破坏时 329.4kPa 的地基压力,地基因超载而发生强度破坏。

(5) 阪神大地震中地基液化 地基液化是指松砂地基在振动荷载作用下丧失强度变成流动状态的一种现象。1995 年 1 月 17 日,日本关西兵库县南部发生了里氏 7.2 级的地震。地震引起神户码头大面积砂土地基液化,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。此外,挪威油罐地基的失稳,巴西里约热内卢十一层大楼由于桩基破坏而倒塌等。国内南方某地八层饭店建筑也由于地基承载力不足在封顶后发生了坍塌的事故。近年来,随着高层建筑的涌现和地下空间的开发,深基坑开挖中的事故时有发生。例如,华东某地两起大的基坑工程坍塌事故造成了生命和财产的重大损失。如果土的渗透问题没有解决好,同样会发生滑坡及管涌溃堤等事故。

(6) La Conchita 大滑坡 1995 年 1 月和 3 月,美国南加利福尼亚州的异常强降水诱发了 Los Angeles 县和 Ventura 县的灾难性泥石流、深层滑坡和洪水,该事件中最引人注目的滑坡是 La Conchita 深层滑坡。这一滑坡与当地的一个泥石流叠加作用,摧毁或严重损坏了 La Conchita 小城的十多处民房。发生滑坡时,因居民已提前撤离,幸未造成人员伤亡。

(7) 西藏易贡巨型滑坡 2000 年 4 月 9 日,西藏易贡发生了巨型滑坡,该滑坡高 3330m,堆积体宽约 2500m,总石方量约 $300 \times 10^6 \text{ m}^3$,部分坡体滑入附近湖中后,湖水以每日 0.5m 速度上升。

(8) 长江堤基管涌 1998 年长江全流域特大洪水时,万里长江堤防经受了严峻的考验,一些地方的大堤垮塌,大堤地基发生严重管涌,洪水淹没了大片土地,人民生命财产遭受巨大的威

胁。仅湖北省沿江段就查出 4974 处险情,其中重点险情 540 处中,有 320 处属地基险情;溃口性险情 34 处中,除 3 处是涵闸险情外,其余都是地基和堤身的险情。

国内外基础工程事故的种类归纳起来有地基严重下沉、建筑物倾斜、建筑物墙体和基础开裂、地基滑动、地基溶蚀、土坡滑动失稳、堤基管涌等,这些都是由土的特性所决定的。基础工程方面的事故具有突发性、灾害性和全局性的特点,不仅会使工程全军覆没,而且常殃及四邻,危害环境。为了防止工程事故的发生,在工程的各个阶段都应十分重视场地地基勘察、基础设计与施工、工程检测等各个环节。

由此可见,基础工程是建筑物的根基,实属百年大计,必须认真对待,坚持做到准确勘察、周密设计、精心施工,杜绝各类基础工程事故的发生。这正是学习土力学与基础工程的重要性之所在。

1.4 课程性质和学习要求

1. 课程性质

本课程包括土力学(专业基础课)和基础工程(专业课)两部分,是土木工程专业必修的重要课程,也是一门实践性很强的课程。本课程主要反映学科发展的新成就、新概念、新方法与新技术,突出土力学与基础工程理论与实践的有机结合。

2. 学习目的

学习本课程的目的掌握土的工程性质,掌握土的物理力学性质指标的测试方法及其与建筑物相互作用的力学过程;掌握浅基础、深基础和深基坑工程的设计计算原理和计算方法,并使学生具有分析解决基础工程问题的初步设计能力。

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、地基的最终沉降量计算、土的固结理论、土的抗剪强度理论、挡土墙的土压力计算、地基的极限荷载及地基承载力特征值的确定、土坡的稳定性分析等。

基础工程部分教学重点内容有:基础埋置深度的确定、扩展基础设计、连续基础的设计、重力式挡土墙设计、桩基础设计计算、支护结构的受力及变形计算、桩墙支护结构内力计算、沉井的设计与计算及地基处理技术等。

通过本课程学习,学生应掌握土力学基本原理和概念、地基基础设计基本原理,并运用这些原理,结合有关结构设计理论,分析和解决地基基础问题;具有进行一般工程基础设计规划的能力,同时具有从事基础工程施工管理的能力,对于常见的基础工程事故,能正确分析发生事故的原因,并作出合理的评价。

3. 学习要求

本课程涉及土力学、工程地质学、结构工程、岩土工程、基础工程等学科领域,其内容广泛,综合性强。学习时,应该重视土力学与基础工程的基本知识,培养阅读和使用工程地质勘察资料的能力,并牢固地掌握土的应力、变形、强度和地基计算等土力学基本原理,从而能够应用这些基本概念和原理,结合有关建筑结构设计理论和施工知识,分析和解决地基基础问题。其基本要求如下:

- 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) 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、土压力理论等是其中主要的一些理论,需要理解它们的概念,掌握其计算原理。
- 3) 掌握主要的计算方法,如三相指标的换算、强度计算、变形计算、土压力计算、边坡稳

定计算等,了解它们在工程实践中的应用,这是学习基础工程的基础。

4) 掌握基本的土力学实验方法和成果分析,了解工程地质勘察和原位测试技术的应用。

5) 掌握浅基础、桩基础、沉井基础、地下连续墙、基坑支护和地基处理方法的基本原理和适用范围,具备合理选择基础形式、地基处理方法与基坑支护方法的初步能力。

6) 基本掌握常用的基础与基坑工程的设计计算知识,并初步具有常见的基础工程设计计算的工作能力;熟悉常用的深基础与基坑工程施工技术方法、常用机具与施工工艺,并具有工程施工组织与管理的能力。

此外,要能够正确地使用《建筑地基基础设计规范》、《建筑桩基技术规范》、《建筑地基处理技术规范》、《公路桥涵地基及基础设计规范》、《岩土工程勘察规范》、《建筑抗震设计规范》、《湿陷性黄土地区建筑规范》、《膨胀土地区建筑技术规范》、《建筑基坑支护技术规程》等现行规范或规程,解决地基基础设计中所遇到的有关问题。强调现行规范与地区经验的结合,并应充分考虑地基、基础和上部结构的共同作用,重视施工质量和现场测试工作。

第2章

土的结构组成与物理性质

【本章要求】 了解土的形成和特性，土的结构与构造，以及土的工程特性；正确理解土的三相组成、土的固体颗粒与级配等基本概念；掌握土的物理性质指标及换算关系，土的物理状态指标及其测定方法；初步掌握岩土的工程分类及土的压实特性。

【本章重点】 土的固体颗粒与级配，土物理性质指标及换算关系，土的物理状态指标及粘性土的液限和塑限测定方法。

2.1 概述

1. 土的形成

土是由岩石经风化、剥蚀、搬运、沉积后，形成的固体矿物、水和气体的集合体。不同的风化作用，形成不同性质的土。风化包括物理风化、化学风化和生物风化等。

地壳表层的坚硬岩石，在长期的风化、剥蚀等外力作用下，破碎成大小不等的颗粒，这些颗粒在各种形式的外力作用下，被搬运到适当的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（工程地质学中称为土体），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。堆积下来的土在漫长的地质年代中发生复杂的物理化学变化，逐渐压密、岩化，最终又形成岩石。岩石和土交替形成，是自然界的一种重复循环过程。

工程上遇到的大多数土都是在第四纪地质时期内形成的。第四纪地质年代又分为更新世和全新世，更新世距今1.2万~100万年，全新世距今小于1.2万年。

2. 土的基本特性

1) 碎散性。土是非连续介质，土受到外力以后极易发生变形，且体积变化主要是土的孔隙发生变化，土的剪切变形主要是由颗粒相对位移所引起的，土的强度低。

2) 三相体系。土本身是多相介质，它由固相（土骨架）、液相（水）和气相（空气）三相体系所组成。这就决定了土在受到外力时，将由土骨架、孔隙、介质共同承担外力作用，存在较复杂的相互作用关系，且存在孔隙流体流动的问题。

3) 自然变异性。土具有非均匀性、各向异性、结构性、时空变异性等自然变异属性。

由此可见，碎散性、三相体系和自然变异性决定了土的力学特性非常复杂，其变形特性、强度特性和渗透特性是土力学研究和面对的主要问题。

2.2 土的三相组成及土的结构

2.2.1 土的三相体系

天然形成的土通常由固体颗粒、液体水和气体三个部分组成，通常称为土的三相体系。土的三相组成中各部分的质量和体积之间的比例关系，随着各种条件的变化而改变，如天气的晴雨、地下水位的升降、建筑物施加的荷载等。

土的三相体系组成的情况，特别是固体颗粒的性质，直接影响土的工程特性。另外，同一种土，密实时强度高，松散时强度低。对于细粒土，含水量小时硬，含水量大时则软。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。例如：固体 + 气体（无液体）为干土，此时黏土呈坚硬状态；固体 + 气体 + 液体为湿土，此时黏土多为可塑状态；固体 + 液体（无气体）为饱和土。

若将土中交错分布的固体颗粒、水和气体三相分别集中起来，可构成理想的三相组成图，如图 2-1 所示。在三相组成图的左侧，注明各相的质量，右侧注明各相的体积。

图 2-1 中各符号的意义如下：

V_s 、 V_w 、 V_a ——土的固体颗粒、土中水、土中气的体积 (cm^3 , m^3)；

V_v ——土的孔隙部分体积 (cm^3 , m^3)， $V_v = V_w + V_a$ ；

V ——土的总体积 (cm^3 , m^3)， $V = V_s + V_w + V_a$ ；

m_w 、 m_s ——土中水质量、固体颗粒质量 (g, kg)；

m_a ——土中气体的质量 (g, kg)，相对较小，可以忽略，即 $m_a \approx 0$ ；

m ——土的总质量 (g, kg)， $m = m_s + m_w$ 。

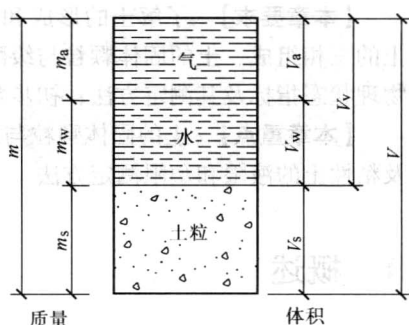


图 2-1 土的三相组成示意图

2.2.2 土的固体颗粒与级配

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。原生矿物是母岩经物理风化作用（机械破碎的过程）形成的，其物理化学性质较稳定，矿物成分与母岩相同。

2) 次生矿物。次生矿物是原生矿物经化学风化作用后形成的新矿物，主要有黏土矿物（如蒙脱石、伊利石、高岭石）、无定形氧化物（如 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 ）和盐类（如 CaCO_3 、 NaCl ）等。

3) 有机质。微生物参与风化过程，在土中产生有机质成分，如腐殖质。土中腐殖质含量多，会使土的压缩性增大。对有机质含量大于 3% ~ 5% 的土，不宜作为填筑材料。

2. 土颗粒的大小和形状

天然土中土粒大小变化悬殊，如大颗粒漂石的粒径 $d > 200\text{mm}$ ，细粒土黏粒直径 $d <$