



普通高等教育土建类规划教材

土力学

● 张怀静 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育土建类规划教材

土 力 学

主 编 张怀静

副主编 于林平

参 编 郅 彬 刘 洋 彭丽云

主 审 王 健

机 械 工 业 出 版 社

本书是根据高等学校土木工程专业指导委员会对“土力学”课程的要求,注册结构工程师、注册岩土工程师考试大纲中对该课程的要求以及现行国家、行业相关规范,并结合长期教学与工程设计经验编写的。全书共分10章,主要内容包括绪论、土的物理性质及工程分类、土的渗透性与渗流、土中应力、土的压缩性与变形计算、土的抗剪强度、土压力、地基承载力、土坡与地基稳定性、土在动荷载作用下的力学性质以及土工试验。附录为复习题、模拟试卷及其参考答案。

本书可作为高等学校土木工程专业及相近专业的教材,也可作为从事土木工程勘察、设计、施工技术人员和报考土木工程等专业硕士研究生、注册结构工程师、注册岩土工程师考试的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

土力学/张怀静主编. —北京:机械工业出版社, 2011. 8
普通高等教育土建类规划教材
ISBN 978 - 7 - 111 - 35119 - 1

I. ①土… II. ①张… III. ①土力学 - 高等学校 - 教材
IV. ① TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 118042 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

版式设计:霍永明 责任校对:程俊巧

封面设计:张 静 责任印制:杨 曦

北京京丰印刷厂印刷

2011 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·21.5 印张·527 千字

标准书号:ISBN 978 - 7 - 111 - 35119 - 1

定价:43.00 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

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销 售 一 部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销 售 二 部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

“土力学”是土木建筑有关专业的一门重要专业基础课。本书是根据我国高等学校土木工程专业指导委员会编制的《高等学校土木工程专业本科教育培养目标和培养方案及课程教学大纲》对该课程的要求，注册结构工程师、注册岩土工程师考试大纲中对该课程的要求以及现行国家、行业相关规范，并结合长期教学与工程设计经验编写的。为适合宽口径土木工程专业人才培养需求，教材涵盖了土木工程专业建筑工程、道路与桥梁工程、地下工程方向的相关内容。

1925年美国土力学家太沙基（Terzaghi）发表了第一部土力学专著，使土力学成为了一门独立的学科，由于世界各国工程建设的需要，推动了土力学迅速发展。本书作为大学本科教材，选用了土力学中最基本、最成熟的理论与典型的经验，紧密结合新修订的相关国家规范和行业标准，内容尽量做到少而精，力求反映学科发展新水平。通过引入工程实例分析土力学原理在实际工程中的应用现状和发展前景，注重知识的实用性。

为了适应大众化高等教育特点以及应用型人才培养的需求，本书注重深入浅出、突出重点、分解难点。全书共分10章，主要内容包括土的物理性质及工程分类、土的渗透性与渗流、土中应力、土的压缩性与变形计算、土的抗剪强度、土压力、地基承载力、土坡与地基稳定性、土在动荷载作用下的力学性质以及土工试验。为了使学生更好地掌握和应用土力学知识，本书精心编写了具有代表性的例题和习题。为了便于学生自学、复习和自测，本书在附录中设置了复习题、模拟试卷及两者的参考答案。为了满足试验教学需求，本书将土工试验单列为一章。

本书由北京建筑工程学院张怀静任主编、大连水产学院于林平任副主编。第1、3、10章及附录由北京建筑工程学院张怀静编写；第2、8章由北京科技大学刘洋编写；第4、7章由大连水产学院于林平编写；第5、6章由西安科技大学郑彬编写；绪论及第9章由北京建筑工程学院彭丽云编写。全书由张怀静统稿。本书由北京建筑工程学院王健教授主审，对本书提出了许多宝贵的意见和建议，在此表示衷心感谢。北京建筑工程学院研究生韩玲冲、廖俊海协助主编做了许多校对、绘图和排版工作，在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，书中疏漏之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言	
绪论	1
第1章 土的物理性质及工程分类	8
1.1 概述	8
1.2 土的三相组成	8
1.3 土的三相比例指标	21
1.4 无黏性土的密实度	28
1.5 黏性土的物理特征	31
1.6 土的胀缩性、湿陷性和冻胀性	35
1.7 岩土的工程分类	40
习题	50
第2章 土的渗透性与渗流	52
2.1 概述	52
2.2 土的渗透性和渗流定律	54
2.3 流网及其应用	63
2.4 渗流破坏和控制	66
2.5 相关规范关于渗流控制方面的规定	71
习题	74
第3章 土中应力	75
3.1 概述	75
3.2 土中自重应力计算	76
3.3 基底压力的分布与计算	81
3.4 地基附加应力	88
3.5 有效应力	117
习题	120
第4章 土的压缩性与变形计算	122
4.1 概述	122
4.2 土的压缩性	123
4.3 地基的最终沉降量计算	130
4.4 应力历史对地基沉降的影响	139
4.5 太沙基一维固结理论	144
4.6 地基沉降与时间的关系	146
习题	150
第5章 土的抗剪强度	152
5.1 概述	152
5.2 土的莫尔-库仑破坏准则	152
5.3 抗剪强度的测定方法	157
5.4 土的排水和不排水强度	160
5.5 应力路径	167
习题	170
第6章 土压力	171
6.1 概述	171
6.2 挡土墙上的土压力	171
6.3 静止土压力	173
6.4 朗肯土压力理论	174
6.5 库仑土压力理论	182
习题	192
第7章 地基承载力	194
7.1 概述	194
7.2 浅基础地基的破坏形式	195
7.3 地基的临塑荷载和临界荷载	196
7.4 地基的极限承载力	200
习题	206
第8章 土坡与地基稳定性	207
8.1 概述	207
8.2 无黏性土土坡稳定分析	208
8.3 黏性土土坡稳定分析	210
8.4 土坡稳定分析的条分法	212
8.5 任意形状滑动面的土坡稳定分析	221
8.6 边坡稳定性分析的图表法	225
8.7 地基稳定性分析	227
8.8 相关规范关于边坡与地基 稳定性方面的规定	228
习题	234
第9章 土在动荷载作用下的 力学性质	235
9.1 概述	235
9.2 动荷载的类型及其对土体的 作用特点	235
9.3 土在动荷载作用下的力学特性	237
9.4 土的压实	245
9.5 土的振动液化	248
习题	255
第10章 土工试验	257

10.1 土的含水率试验	257	10.9 击实试验	294
10.2 土的密度试验	259	附录	301
10.3 土粒相对密度试验	265	附录 I 《土力学》复习题	301
10.4 颗粒分析试验	267	附录 II 《土力学》模拟试卷	313
10.5 土的界限含水率试验	277	附录 III 《土力学》复习题及模拟试卷 参考答案	318
10.6 固结试验	281	参考文献	334
10.7 直接剪切试验	287		
10.8 三轴压缩试验	289		

绪 论

1. 土力学的研究对象

土力学的研究对象为“土”，土是各类岩石经过长期地质营力作用形成的产物，是岩石经风化、剥蚀、搬运、堆积而形成的松散沉积物，颗粒之间没有胶结或弱胶结。土具有成层性，物质组成、物理化学状态基本一致，工程性质大体相仿的同一层土称为土层。由若干厚度不等、性质各异、以一定上下层序组合在一起的土层集合体称为土体。土体由一定的材料组成，具有一定的结构，赋存于一定的地质环境中，且具有不同于一般理想刚体和连续固体的特性——松散性、孔隙性和多相性。

土的形成经历了漫长的地质历史过程，其性质随着形成过程和自然环境的不同而有差异。土与工程建设密切相关，土的性质与力学行为将直接影响到建筑物的安全与稳定。在建筑物设计前，必须对建筑场地及其周边影响范围内土的成因、工程性质、不良地质现象、地下水状况等进行评判，密切结合土的工程性质进行设计和施工，否则，会影响工程的经济效益和安全。此外，由于土体具有松散、多孔和多相的特征，使其与理想的刚体和连续固体有所不同，必须有专门的理论来对其进行研究，用适宜的方法来解决工程中的问题。

土力学是研究土的物理、力学、化学性质以及土体在外界因素（外力、水流及温度等）作用下的应力、应变、强度和稳定性及渗流规律的一门学科，是力学的一个分支；同时它又是一门基础应用学科，将固体力学和流体力学的定律应用到土体上，结合土工试验技术，来解决土建、水利、交通、冶金和国防等建设中与土相关的工程实际问题，如建筑物地基（承担建筑物荷载的地层）、边坡（岩土体在自然重力作用或人为作用而形成一定倾斜度的临空面）、挡土结构物（用来支撑天然或人工斜坡不致坍塌以保持土体稳定性或使部分侧向荷载传递分散到填土上的一种结构物）、隧道（在地层中开凿的两端有地面出入口的水平通道）等的稳定、变形、支护和加固等问题。

2. 土力学的研究内容

土力学涉及的自然学科范围很广，与弹塑性力学、流变力学、水力学、工程地质学等学科有着密切的关系。随着现代生产发展的需要和人们对土的认识的逐渐深入，土力学的研究领域正在不断扩大，在传统土力学的基础上，现已形成许多分支，如软土力学、海洋土力学、非饱和土力学、冻土力学、环境岩土力学、土动力学和土塑性力学等。每个分支学科都在各自领域发挥着重大的作用。随着计算机技术和土工试验技术的不断提高和发展，计算土力学和试验土力学也必将在不久的将来焕发出勃勃的生机。

传统土力学是上述土力学建立的根基，其体系中包含四大基本理论，即有效应力原理、应力分布理论、渗透固结理论和强度破坏理论；包含若干个与工程实践直接相关的应用课题，如地基变形计算、地基承载力计算、土坡稳定性验算和土压力计算等。

本课程介绍的内容属于传统土力学的范畴，是土力学最基本的知识，主要包括土的组成、土的物理性质和工程分类、土的渗透性与渗流、基础与地基接触面上的应力分布和土体中的应力分布、地基的压缩变形及变形与时间的关系、土体的抗剪强度、地基的承载能力和

稳定性、土在动荷载作用下的力学性质等。

3. 土力学的学科特点

土力学是用力学的基本理论来分析土中的问题，而它又区别于一般力学。

理论力学将对象理想化为刚体，材料力学将对象理想化为线弹性的固体，连续介质力学将对象理想化为均匀连续介质，即便是这种理想化的连续介质，对土体来说仍然粗糙。因为土是由不连续的固体颗粒、液体和气体三相组成的，其固体颗粒的矿物成分、粗细、形状、级配、密度及构造，土粒间孔隙中水与气体的比例及形态都对土的力学性质有很大的影响。因此，在土力学中，除运用一般连续介质力学的基本原理之外，还应密切结合土的实际情况进行研究。

土力学与其他力学学科所研究对象的不同之处还在于土是地质历史的产物。它历经沧桑，经历过漫长的风化、搬运、沉积和地壳运动等过程，形成其独特的性质。原状土一般是不均匀的、各向异性的、有一定的胶结性或特定的结构性，因而重复性极少，严格地讲，世界上没有性质完全相同的两种原状土。同样，在室内试验研究中的重塑土也由于制样、固结方式和程序等差别，很难达到完全一致。而在室内试验中研究原状土，取样扰动或样品的代表性问题，就成了研究工作的主要障碍。

因此，土的力学性质比其他材料复杂得多，而且影响因素也更多。它既服从连续介质力学的一般规律，又具有其特殊的应力-应变关系和特殊的强度、变形规律，有不同于一般固体力学的分析和计算方法。比如土的应力-应变关系是明显的非线性、弹塑性、具有剪胀（缩）性、应变硬化（或软化）、流变性等，且与应力状态、应力历史和应力路径有关，一般呈各向异性，有明显的卸载-再加载滞回圈，存在着各种因素的耦和关系。

此外，土力学既是理论学科，又具备实践学科的特点。土中有许多不确定性的存在，土力学的理论计算结果只能是精度较差的大致的估计，理论与现实的差距只能通过经验来估计和判断。因此，在处理工程中的土力学问题时，不能单凭数学和力学的方法，必须通过的土的现场试验及室内试验测定土的计算参数。正如 Terzaghi 在《工程实用土力学》（1963 年第 2 版）的序言中指出“土力学的理论只有在工程判断的指导下才能被有效的使用，除非已经具有这种判断能力，否则不能成功地应用土力学理论”。

4. 土力学的学习目的

土与土木工程的关系十分密切，多作为地基、周围介质和建筑材料等来使用。若建筑物和构筑物修建在地表（如在土层上修建房屋、桥梁、道路、堤坝等），此时土被用作地基；若建筑物埋置于岩土之中（如隧道、涵洞、地铁等地下建筑），此时土被用作建筑物赖以存在的周围介质或环境；此外，绝大部分建筑材料是直接利用地球表层的岩土或由此合理配置而成（如路堤、土坝等土工构筑物和混凝土、砂浆等），此时土被用作建筑材料来使用。

无论土在工程中扮演何种角色，确保建筑物和构筑物的安全和正常使用是土木工程建设的基本要求，同时也是土力学必须要应对和处理的两大基本问题。土的性质极其复杂，在外界环境、荷载、人类活动等因素作用下极易出现变化，这种变化将直接影响土作为地基、围岩和建筑材料的使用功能，致使地基上部、围岩内部建筑物或由其填筑而成的构筑物的不安全，如饱和砂土在振动荷载下的液化将使地基承载力在短期内急剧降低，致使上部结构失稳而丧失安全性；冻土在温度影响下的冻胀融沉；土体开挖引起的地表下沉；地下水开采引起的地表下沉和路基在动荷载作用下的累积变形等，当变形量超过结构所允许的范围，就会造

成它的倾斜、开裂等，轻者结构会失去正常使用功能，重者会酿成事故。

此外，地基勘察是否准确、土力学参数的选取是否合理都将直接关系到工程的选址、设计和施工，从而影响到其正常使用，如地基承载力直接关系到建筑物的选型和设计、土的抗剪强度指标又是进行土体支护结构设计的必备参数。建筑物施工和使用过程中对土的性质和土体状态的动态监测，也将对其安全施工和正常使用发挥重要的作用，从而达到消除隐患，减少损失的目的，如地下工程施工监测、边坡监测和泥石流地段的监测预警等。

上述土力学理论知识的应用正确与否，直接关系到建筑物的安危。实践证明许多工程事故均涉及土力学问题。例如，加拿大特朗斯康谷仓的破坏就是由于土体强度不足导致地基整体剪切破坏、建筑物丧失稳定的典型工程案例，如图 1 所示。该谷仓建于 1913 年，谷仓的平面为矩形，长 59.44m，宽 23.47m，高度为 31m，由 65 个圆柱形筒仓组成，采用钢筋混凝土筏形基础，厚 2m，谷仓自重 $20 \times 10^4 \text{ kN}$ 。设计时仅根据对邻近建筑物地基的调查确定了地基承载力。谷仓建成后于当年 9 月开始均匀地向仓内装载谷物，至 10 月发现谷仓产生大量快速沉降，1h 内的垂直沉降量竟达到 30.5cm，在其后的 24h 内谷仓倾倒，倾倒后谷仓的西侧下沉达 7.32m，东侧则抬高了 1.53m，整体倾斜达近 27° 。因谷仓采用的是钢筋混凝土筒体结构，整体性很强，筒仓本身完好无损。事后进行勘察分析，发现基底之下为厚达 15m 的淤泥质软黏土层，地基的极限承载力为 251kPa，而谷仓的基底压力已超过 300kPa，从而造成地基的整体滑动破坏。基础底面以下一部分土体滑动，向侧面挤出，使东端地面隆起。为了处理这一事故，在地基中做了 70 多个支承于深 16m 基岩上的混凝土墩，使用了 88 个 50kN 的千斤顶和支承系统，才把仓体逐渐纠正过来，但谷仓位置比原来降低了 4m。

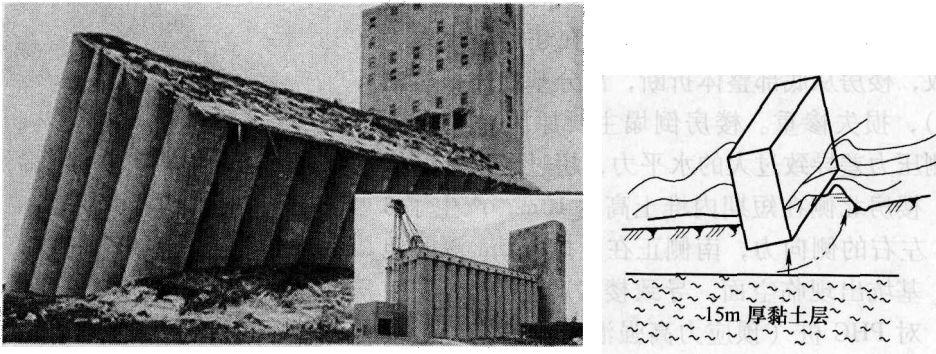


图 1 加拿大特朗斯康谷仓地基破坏事故示意图

举世闻名的意大利比萨斜塔就是土力学中由于地基不均匀沉降而导致建筑物变形破坏的一个典型案例，如图 2 所示。该塔于 1370 年竣工，塔身高约 55m，建成后因地基压缩层产生不均匀沉降，使塔的北侧下沉近 1m，南侧下沉近 3m，塔身倾斜约 5.5° ，塔顶离开铅垂线的距离达到 5.27m。幸亏该塔使用的大理石材质优良，在塔身严重倾斜的情况下尚未出现裂缝。比萨斜塔建成后曾经数次加固，但效果甚微，每年仍下沉约 1mm，目前，倾斜尚未有加速迹象，已成为一座名副其实的危塔。

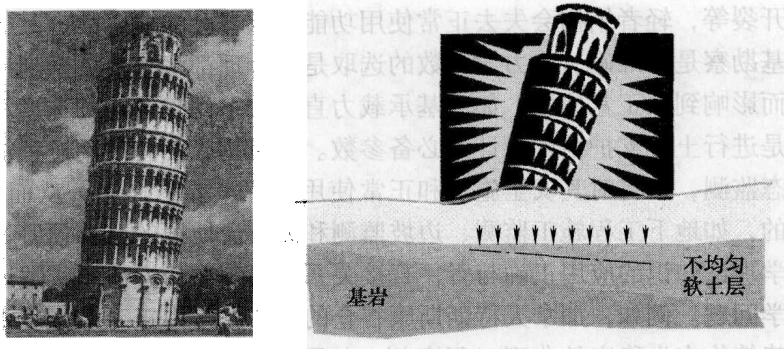


图2 比萨尔斜塔倾斜事故示意图

无独有偶，我国苏州名胜虎丘塔，也发生了类似比萨尔斜塔的倾斜破坏（见图3）。该塔始建于公元959—961年期间，为7级8角形砖塔，塔底直径为13.66m，高为47.5m，全为砖砌，在建筑艺术风格上有独特的创意，被国务院公布为全国重点文物保护单位。1957年塔顶位移达到1.7m，1978年塔顶位移达到2.3m，重心偏离基础轴线0.924m。目前，该塔倾斜严重，重心偏离基础轴线2.31m。经勘察发现，该塔位于倾斜基岩上，覆盖层一边深3.8m，另一边深5.8m。由于在一千余年前建造该塔时，没有采用扩大基础，直接将塔身置于地基上，造成了不均匀沉降，引起塔身倾斜，危及了塔的安全。

近些年国内的“楼脆脆”和“楼歪歪”等事件层出不穷，再一次向人们证明了土力学理论在工程建设中的重大意义。2009年6月27日6时左右，上海闵行区莲花南路罗阳路口一幢13层在建商品楼发生倒塌事故，楼房从底部整体折断，部分基础连根拔出（见图4），损失惨重。楼房倒塌主要原因是受力不均，两侧压力差导致过大的水平力，超过了桩基的抗侧能力。楼房北侧在短期内堆土高达10m，产生了 $3 \times 10^4 \text{ kN}$ 左右的侧向力，南侧正在开挖4.6m深的地下车库，基坑出现临空面，导致楼房产生10cm左右的位移，对PHC桩（预应力高强混凝土桩）产生很大的偏心弯矩，最终破坏桩基，引起楼房整体倾覆。此外，倒塌楼房下的古河道淤积层也是造成事故的诱因之一。事后江欢成院士说：“在建楼房的倒覆事故，简单地说就是无知导致无畏，是认识上缺乏科学态度，是蛮干。”

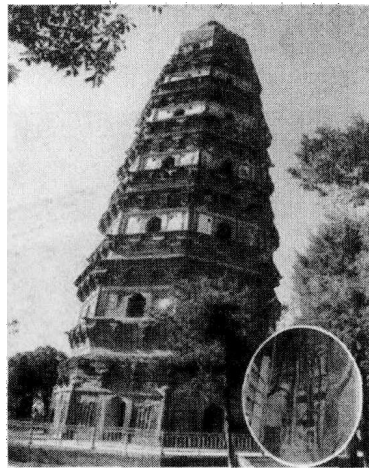


图3 虎丘塔倾斜照片

国内外类似的工程事例很多，这说明对土力学理论缺乏系统研究，对相关的土力学问题分析处理不当，就会造成巨大的、不可挽回的损失，必须引起工程建设者的高度重视。因此，为了确保建筑物的安全和正常使用，工程师就必须认真学习土力学相关知识，并学会用理论联系实际解决工程问题，指导土木工程的设计和施工，真正发挥土力学在工程建设中的巨大作用。

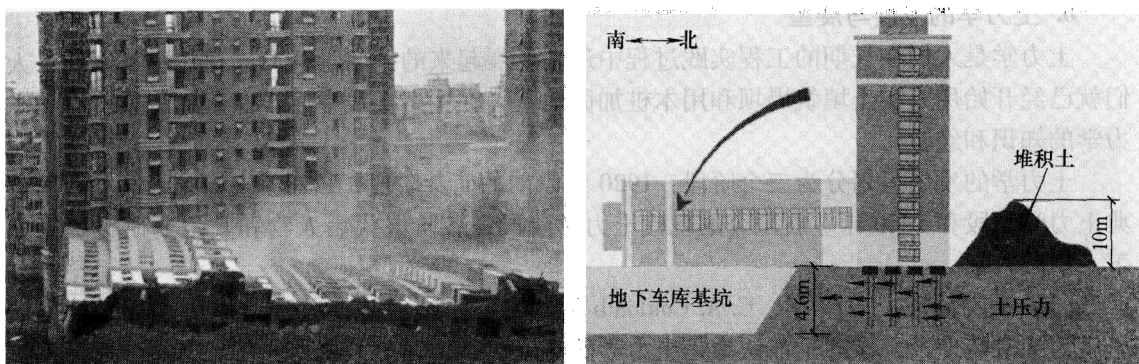


图4 上海“楼脆脆”事故示意图

5. 土力学的学习要点和基本要求

(1) 学习要点 土力学是土木工程、水利水电工程、工程管理、海港工程及工程地质等专业的重要基础课，为他们提供了解决一般工程问题的理论基础。因此，土力学是一门实践性和理论性都比较强的课程，起着从基础课到专业课的桥梁过渡作用，必须花费一定的精力认真学习，才能为后续课程的学习打下坚实的基础。

土力学这门学科自身具备很多特点，内容广泛、综合性、实践性强，故学习应突出重点、顾及全面。下面就如何学习这门课程，提出几点建议以供参考。

1) 着重搞清基本概念、基本理论，掌握基本计算方法，同时还应注意它们的基本假定和使用条件。基本概念、基本理论是进行分析、计算的前提，概念、理论的掌握要重在理解，把握实质；基本计算方法多是一些通用的、易于掌握的方法，应充分理解，熟练掌握。由于土力学问题十分复杂，其中的许多计算理论和公式是在某些假设和简化前提下建立的，如土中应力计算、土的压缩变形与地基固结沉降计算方法、土的抗剪强度理论等。因此，在学习当中应当了解这些理论难以模拟、概括土各种力学性状全貌的不完善之处，注意这些理论在工程实际使用中的适用条件，全面掌握这些基本理论和方法，学会将其应用到工程实际中，并通过实际工程中经验的积累，对其进行验证、完善和发展。

2) 把握各理论之间的相互联系，明晰学习思路。尽管土力学全书内容非常广泛，但各章都是从不同的角度阐述土的应力、变形、渗流及稳定问题，抓住这一线索，找出各章间的内在联系，做到融会贯通，就会使纷杂的土力学的知识变得相对体系化。

3) 重视理论和计算的同时，应注意掌握土力学指标和参数的相关试验技术。解决岩土工程问题的关键步骤之一是土的计算指标和参数的确定，即土的工程性质指标，包括物理性质和力学性质指标，要掌握颗粒分析、密度、含水量和液、塑限等基本物理性质的测定方法和直剪、固结等基本力学性质指标的测定方法，了解三轴试验的基本原理和数据分析处理方法。

(2) 基本要求 通过本课程的学习，使学生了解土的成因、分类方法；熟悉土的基本物理力学性质、土在动载作用下的特性、土的渗透性；掌握土的三相比例指标、土中应力、地基沉降、土的抗剪强度、地基承载力、土压力的计算方法和土坡稳定分析方法；掌握常规土工试验方法，达到能应用土力学的基本原理、方法和现行国家规范解决土木工程问题的目的，并为后续专业课程的学习打下良好的基础。

6. 土力学的发展与展望

土力学是人们在长期的工程实践过程中逐渐发展起来的一门学科。远在几千年以前,人们就已经开始用夯实土填筑堤坝和用木桩加固地基,在生产实践中逐步探索和积累着有关土力学的知识和经验。

土力学的发展可划分为三个阶段:1920年以前的萌芽阶段,1920年至1960年左右的古典土力学阶段和1960年左右至今的现代土力学阶段,各阶段代表人物和其主要研究成果如下。

(1) 萌芽阶段 1773年, C. A. Coulomb 创立了砂土抗剪强度公式,提出了计算挡土墙土压力的滑楔理论,该理论被认为是土力学的开始;1856年, Darcy 研究了土的渗透性,提出了达西渗透公式;1869年, W. G. M. Rankine 基于塑性平衡理论提出了挡土墙土压力理论;1885年, J. Boussinesq 求得弹性半无限空间在竖向集中力作用下的应力和变形的 Boussinesq 解,成为计算地基中应力的主要方法;1920年, Prandtl 应用模型试验,导出了著名的极限承载力公式;1922年, W. Fellenius 提出了土坡稳定分析法。

(2) 古典土力学阶段 1923年, K. Terzaghi 创立土体一维固结理论和有效应力原理,使土力学成为一门独立的学科;1941年, Boit 提出土体固结计算的一般方法;继太沙基(Terzaghi)之后,卡萨格兰德(Casagrande)、泰勒(Taylor)、斯肯普顿(Skempton)以及世界各国许多学者对土的抗剪强度、土的变形、土的渗透性、土的应力-应变关系和破坏机理进行了大量研究工作,并逐渐将土力学的基本理论普遍应用于解决各种不同条件下的工程问题。

(3) 现代土力学阶段 1963年, Roscoe 发表了著名的剑桥模型,提供了一个可以全面考虑土的压硬性和剪胀性的数学模型,宣告了现代土力学的开端。伴随着工程建设事业的蓬勃发展,土力学围绕从宏观到微观结构、本构关系与强度理论、物理模拟与数值模拟、测试与监测技术、土质改良等方面取得了长足进展。同时计算机技术的应用又为这门学科注入了新的活力,实现了测试技术的自动化,提高了理论分析的准确性,标志着本学科进入一个新的时期。至此,土力学已拓生出理论土力学、试验土力学、计算土力学和应用土力学四大分枝。

从土力学创立,经过了近百年的发展,它已经取得了丰硕的成果并在工程建设领域发挥着重大的作用,但是学科的发展是无止境的,与此同时,现代大型建筑、高层建筑、高速公路、高速铁路和地下空间开发对土力学提出了更高的要求,势必会出现更多新的领域等待探索、新的问题等待研究。

(1) 区域性土分布和特性的研究 经典土力学是建立在无结构强度理想的黏性土和无黏性土基础上的,但由于形成条件、形成年代、组成成分、应力历史不同,土的工程性质具有明显的区域性。对各类各地区域性土的工程性质,开展深入系统的研究是土力学发展的方向之一。

(2) 多因素影响和符合实际、更具有应用价值的本构模型的研究 实际工程土的应力-应变关系非常复杂,具有非线性、弹性、塑性、粘性、剪胀性、各向异性等,同时,应力路径、强度发挥度以及岩土的状态、组成、结构、温度等均对其有影响。企图建立能反映各类岩土的、适用于各类岩土工程理想本构模型是困难的,或者说是是不可能的。因此,研究建立用于解决实际工程问题的实用模型或建立能进一步反映某些土体应力-应变特性的理论模

型将是土力学研究的重要问题。

(3) 不同介质间相互作用及共同分析的研究 土体由固、液、气三相组成,其中固相是以颗粒形式的散体状态存在。固、液、气三相间相互作用对土的工程性质有很大的影响。土体应力-应变关系的复杂性从根本上讲都与土颗粒相互作用有关。从颗粒间的微观作用入手研究土的本构关系是非常有意义的。通过土中三相相互作用研究还将促进非饱和土力学理论的发展。

(4) 土工试验技术的研究 土工试验技术不仅在工程建设实践中十分重要,而且在理论的形成和发展过程中也起着决定性作用,应在土工试验中大力引进和发展现代测试技术,如虚拟测试技术、电子测量技术、光学测试技术、航测技术、电磁场测试技术、声波测试技术和遥感测试技术等,提高测试结果的可靠性、可重复性和可信度,这将对土力学理论的发展和完善起到重要的作用。

(5) 计算技术的研究 虽然土工计算分析在大多数情况下只能给出定性分析结果,但该结果对工程师决策意义重大,因此,应重视各种数值计算方法、专家系统、AutoCAD 技术和计算机仿真技术等 in 土木工程中的应用,提高非确定性计算方法如有限元法、有限差分法 (FLAC)、离散单元法 (DEM)、不连续变形分析方法 (DDA)、流形元法 (MEM) 和半解析元法 (SAEM) 等在土力学中的应用,为工程建设提供有力指导,为理论分析的发展奠定坚实基础。

第1章 土的物理性质及工程分类

1.1 概述

地壳的表层是由基岩及其覆盖土组成的。岩石发生风化作用后，原来高温高压下形成的矿物被破坏，形成一些在常温常压下较稳定的新矿物，构成陆壳表层风化层。风化层之下的完整的岩石称为基岩，所谓覆盖土是指覆盖于基岩之上各类土的总称。土是由岩石经风化、剥蚀、搬运、沉积作用形成的松散沉积物。没有经过搬运，堆积在原来地方的土称为残积土，一般分布在山顶或山坡上。土由于生成条件、环境的不同，土的成分、结构和构造的也不同，其物理力学性质相差很大。土既可以作为建筑工程材料，用来烧制砖瓦或作为路基材料，也可以作为建筑物及构筑物地基。不加处理就能满足强度和变形要求，直接进行工程建设的地基，称为天然地基；经过换土垫层、排水固结等措施处理后才能进行工程建设的地基，称为人工地基。

土是由固相、液相、气相组成的三相体系，其中固相指的是土颗粒，它是土的骨架；液相指的是土中的水；气相指的是土中的气体。土在特定的条件下也可以为二相体系，如当土中没有水或没有气体的时候。土是在自然界漫长的地质历史时期演化形成的多矿物组合体，各种土的矿物成分、颗粒大小不尽相同，故土体性质复杂，极不均匀，因此，土的三相之间的比例关系差别很大。同时，在荷载作用下土中的气体和水可以排出，三相之间的比例关系还会随时间、荷载条件和气候条件等不断发生变化，这将直接影响土的工程性质。因此，要研究土的性质，就必须研究土的三相组成以及土的结构、构造等特征。

从物理的观点，定量地描述土粒的物理特性、土的物理状态，以及三相比比例关系（即构成土的各种物理指标）是非常必要的。土的三相组成物质、三相比比例、土的结构和构造不同，土的密度、密实程度、软硬或干湿状态等就会有所不同，土的物理性质又在一定程度上决定了它的力学性质（如压缩性、强度、渗透性等），因此土的物理性质是土最基本的工程特性。

1.2 土的三相组成

1.2.1 土的固体颗粒

土的固体颗粒（简称土颗粒或土粒）的大小、形状、矿物成分及其组成情况是决定土的物理力学性质的重要因素。粗大的土粒往往是岩石经物理风化形成的碎屑，其形状呈块状或粒状；细小的土粒往往是化学风化形成的次生矿物（如颗粒极细的黏土矿物）和有机质，其形状主要呈片状。土颗粒越细，单位体积内颗粒的表面积就越大，与水接触的面积就越多，颗粒间相互作用的能力就越强。

1. 土粒粒度与粒组

组成土的各个土粒的特征，即土粒的个体特征，主要包括土粒的大小和形状。

在自然界中存在的土，都是由大小不同的土粒组成。土粒的大小可以相差很多，粗的有几十厘米，细的可以小于千分之几毫米。土粒的大小由粗到细逐渐变化时，其性质就会相应地发生变化，就会从无黏性、透水性强的土转变为有黏性、透水性弱的土，因此，土粒的大小对土的性质影响很大。土粒的大小称为粒度，通常以粒径（外接圆直径）表示。介于一定粒度范围内的土粒，称为粒组。各个粒组随着分界尺寸的不同，而呈现出一定质的变化。划分粒组的分界尺寸称为界限粒径。目前，土的粒组划分方法除国家标准，还有行业标准，虽然各个标准并不完全一致，但遵循的原则是相同的，即划分为同一粒组的土，其物理力学性质应较为接近。

GB/T 50145—2007《土的工程分类标准》将土划分为巨粒、粗粒和细粒三大粒组，每个粒组又根据粒径范围将土分为漂石或块石、卵石或碎石、砾粒、砂粒、粉粒及黏粒，其中砾粒和砂粒又细分为粗、中、细三个级别。具体的划分方法见表 1-1，表中漂石与块石、卵石与碎石的粒径范围相同，但漂石、卵石的磨圆度较高，呈一定的磨圆状（圆形或亚圆形），块石、碎石颗粒均呈棱角状。

表 1-1 土粒粒组划分

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 $20 < d \leq 60$	透水性大,无黏性,毛细水上升高度不超过粒径大小
		中 $5 < d \leq 20$	
		细 $2 < d \leq 5$	
	砂粒	粗 $0.5 < d \leq 2$	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 $0.25 < d \leq 0.5$	
		细 $0.075 < d \leq 0.25$	
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	≤ 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,且速度较慢

图 1-1 为 JTG E40—2007《公路土工试验规程》粒组划分图，对比表 1-1 和图 1-1，可以发现两者的界限粒径相同，但颗粒名称略有不同，如前述的碎石此处为小块石。

200		60		20		5		2		0.5		0.25		0.075		0.002/mm	
巨粒组				粗粒组										细粒组			
漂石 (块石)	卵石 (小块石)	砾(角砾)						砂						粉粒	黏粒		
		粗		中		细		粗		中		细					

图 1-1 粒组划分图

2. 土的颗粒级配 (粒度成分)

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 (土样中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。

土的颗粒级配是通过土的颗粒分析试验测定的, 常用的测定方法有筛分 (析) 法和沉降分析法 (包括密度计法和移液管法)。筛分法适用于粒径小于等于 60mm 且大于 0.075mm 的巨粒组和粗粒组; 沉降分析法适用于粒径小于 0.075mm 的细粒组。当土内兼含大于和小于 0.075mm 的土粒时, 两类分析方法可联合使用。筛分法和沉降分析法的试验步骤见第 10.4 节。

3. 颗粒级配 (粒度成分) 累计曲线

根据颗粒级配分析试验结果, 常采用累计曲线法表示土的颗粒级配。该法是比较全面和通用的一种图解法, 其特点是可直观判别土的级配状况, 特别适用于比较几种土的级配好坏。颗粒级配累计曲线 (见图 1-2) 的横坐标为粒径, 由于土粒粒径的变化范围很大, 相差常在百倍、千倍以上, 因此, 宜采用对数坐标表示; 纵坐标为小于 (或大于) 某粒径的土的质量百分数 (或称累计百分含量)。由粒径累计曲线的陡缓可以大致判断土粒均匀程度或级配是否良好。如果曲线较陡, 表示粒径大小相差不多, 土粒较均匀, 即级配不良; 如果曲线较平缓, 则表示粒径大小悬殊, 土粒不均匀, 即级配良好。从图 1-2 中可以判断, 曲线 03 代表的土样比曲线 01 代表的土样级配要好。

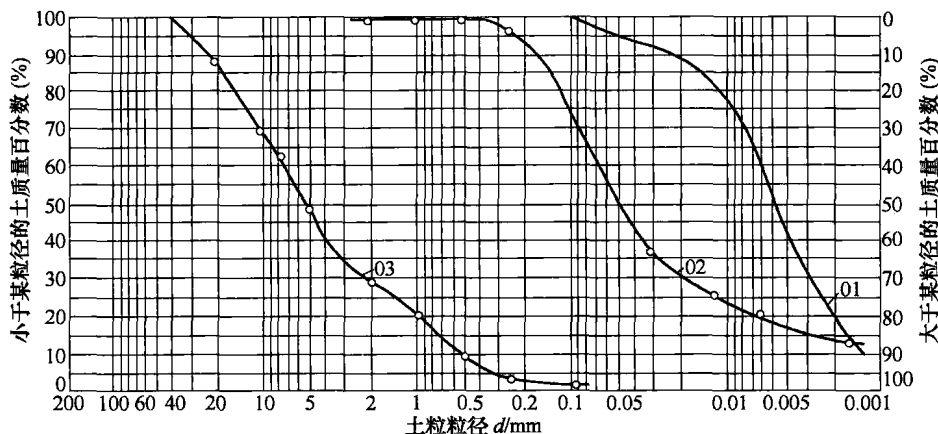


图 1-2 颗粒级配累计曲线

根据颗粒级配累计曲线除了可以定性判断土的级配状况, 还可以通过曲线计算不均匀系数 C_u 及曲率系数 C_c 来定量判别土的级配状况。 C_u 、 C_c 的定义表达式如下

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

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10}d_{60}} \quad (1-2)$$

式中 d_{60} ——颗粒级配累计曲线上相当于小于某粒径的土质量百分数为 60% 对应的粒径, 称为限制粒径 (mm);

d_{30} ——颗粒级配累计曲线上相当于小于某粒径土的质量百分数为 30% 对应的粒径,

称为中值粒径 (mm);

d_{10} ——颗粒级配累计曲线上相当于小于某粒径土的质量百分数为 10% 对应的粒径, 称为有效粒径 (mm)。

对一种土, 显然 $d_{60} > d_{30} > d_{10}$ 。

不均匀系数 C_u 反映大小不同粒组的分布情况, 即土粒大小的均匀程度。 C_u 越大, 表示粒度的分布范围越大, 土粒越不均匀, 其级配越良好。曲率系数 C_c 描写的是累计曲线分布的整体形态, 反映了限制粒径 d_{60} 与有效粒径 d_{10} 之间各粒组含量的分布情况。

在一般情况下, 工程上把 $C_u < 5$ 的土看做均粒土, 属级配不良; $C_u > 10$ 的土, 属级配良好。例如, 在图 1-2 中, 对于曲线 01 代表的土样, $d_{10} = 0.0013\text{mm}$, $d_{60} = 0.006\text{mm}$, $C_u = d_{60}/d_{10} = 4.61 < 5$, 属于级配不良; 对于曲线 03 代表的土样, $d_{10} = 0.5\text{mm}$, $d_{60} = 7.5\text{mm}$, $C_u = d_{60}/d_{10} = 15 > 10$, 属于级配良好。

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, 由于缺乏中间粒径 (d_{60} 与 d_{10} 之间的某粒组), 仅采用单一指标 C_u 则难以有效判定土的级配好坏; 将曲率系数 C_c 作为第二个指标与 C_u 共同判定土的级配, 则更加合理。很显然, 在 C_u 相同的条件下, C_c 过大或过小, 均表明土中缺少中间粒组, 各粒组间孔隙的连锁充填效应较差, 级配不良。一般认为, 砾类土或砂类土同时满足 $C_u \geq 5$ 和 $C_c = 1 \sim 3$ 时, 则为良好级配砾或良好级配砂; 如不能同时满足, 则可以判定为级配不良砾或级配不良砂。

颗粒级配累计曲线可以在一定程度上反映土的某种性质。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, 这一连锁充填效应, 使得土的密实度加强。因此, 级配良好的地基土, 其强度和稳定性较好, 透水性和压缩性也较小。选用级配良好的土作为填方工程的建筑材料, 则比较容易获得较大的密实度。此外, 对于粗粒土, 不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 也是评价其渗透性的重要指标。

4. 土粒的矿物成分

土中固体颗粒的矿物成分绝大部分是矿物质, 或多或少含有有机质。土粒的矿物成分主要取决于母岩的成分及其母岩所经历的风化作用类型。土粒的矿物按其成分分为两大类: 一类是岩浆在冷凝过程中形成的矿物, 称为原生矿物, 如石英、长石、云母等, 原生矿物颗粒是原岩经物理风化形成的, 其物理化学性质较稳定, 成分与母岩相同; 另一类是原生矿物经化学风化后所形成的新矿物, 称为次生矿物, 如三氧化二铁、三氧化二铝、次生二氧化硅、黏土矿物、碳酸盐等, 其成分与母岩不同。次生矿物按其与水的作用可分为可溶的或不可溶的。次生矿物的性质复杂, 对土的工程性质影响较大。当微生物参与风化作用时, 土中便产生有机质成分, 土中有机质一般是混合物, 与组成土粒的其他成分稳固地结合在一起, 按其分解程度可分为未分解的动植物残体、半分解的泥炭和完全分解的腐殖质, 一般以腐殖质为主。腐殖质主要成分是腐殖酸, 它具有多孔的海绵状结构, 具有比黏土矿物更强的亲水性和吸附性, 因此, 有机质对土的工程性质影响也很大。

土中矿物成分与土粒粒组存在着一定的内在联系。块石、碎石、砾粒往往是岩石经物理风化作用形成的原岩碎屑, 是比较稳定的原生矿物; 砂粒大部分是母岩中的单矿物颗粒, 如石英、长石等; 粉粒的矿物成分是多样性的, 主要有石英和难溶盐 (碳酸镁、碳酸钙等) 的颗粒; 黏粒的矿物成分主要有黏土矿物、氧化物、氢氧化物和各种难溶盐类, 它们都是次生矿物。