



普通高等教育“十二五”规划教材

土力学

主 编 何昌荣 陈 群
副主编 周 成 张 茹



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



普通高等教育“十二五”规划教材

土力学

主 编 何昌荣 陈 群

副主编 周 成 张 茹



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

“土力学”是水利水电工程、土木工程、农业水利工程、道路桥梁工程等专业本科生的必修专业基础课程。本教材重点阐述土力学基本概念、基本原理和方法，将土力学的工程应用贯穿于整个教材，适当介绍了学科的最新成果和发展动态，使该教材的科学性、前沿性、实用性融为一体。本教材主要介绍土的基本性质、土力学基本原理及其应用，包括土的物理性质及工程分类、土体应力计算和有效应力原理、土的渗透性和渗透稳定性、土的压缩性及地基变形计算、土的抗剪强度、填土的压实及其工程性质、土压力及支挡结构、土坡的稳定性分析、地基承载力等内容。

本教材可作为高等院校水利水电工程、土木工程、农业水利工程、道路桥梁工程、地下工程等专业“土力学”课程的本科教材，也可作为岩土工程专业的研究生、教师和工程人员以及相关专业科技工作者的参考书。

图书在版编目（C I P）数据

土力学 / 何昌荣, 陈群主编. — 北京 : 中国水利水电出版社, 2015. 5
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5170-3125-3

I. ①土… II. ①何… ②陈… III. ①土力学—高等学校—教材 IV. ①TU43

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第088037号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 土力学
作 者	主编 何昌荣 陈群 副主编 周成 张茹
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 17.25印张 409千字
版 次	2015年5月第1版 2015年5月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	36.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

本教材由四川大学水利水电学院岩土工程省重点实验室组织编写。20 世纪 50 年代后期，本实验室丘勤宝教授、屈智炯教授编写了我国高校第一本《土力学》教材。1979 年，胡定教授、屈智炯教授和刘双光副教授参与编写了武汉水利水电学院冯国栋教授主编的《岩土力学》。以此为基础，1985 年该书被改编为水利水电类高等学校专业基础课教材《土力学》。2000—2008 年，胡定教授、屈智炯教授参与编写了天津大学杨进良教授主编的《土力学》。本教材结合四川大学土力学课程组多年的教学经验，以水利水电工程专业基础为主，兼顾土木、交通、港口、码头工程等专业编写完成。

本教材依据《教育部关于“十二五”普通高等教育本科教材建设的若干意见》精神编写，注重基本概念、方法、原理的讲解，同时还补充了工程应用的内容。各章内容分为基本内容和稍深或较难的选讲内容（以 * 号标注的为选讲内容）。本课程现行教学大纲的教学时数明显偏少，各专业课根据各自的教学情况可增减选学内容。编者力求将更多更新的土力学内容写入本教材，使它成为一本水利、土木、交通等专业均可采用和参考的本科教材。

本教材由何昌荣教授和陈群教授主编。何昌荣教授编写第 1 章、第 2 章、第 6 章和第 8 章；陈群教授编写第 4 章、第 5 章、第 10 章；周成教授编写第 7 章和第 9 章；张茹教授编写第 3 章；附录由陈群教授、刘恩龙教授和张茹教授编写。王琛副教授、万里讲师参与校稿和图形绘制。全书由西南交通大学周德培教授审阅。

在本书编写过程中，得到了四川大学水利水电学院的大力支持，在此表示感谢。书中错误之处，敬请读者批评指正。

编 者

2014 年 10 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 土及土力学	1
1.2 本学科的特点	1
1.3 本学科的发展历史	2
1.4 学好本课程的方法	5
思考题	6
第 2 章 土的物理性质及工程分类	7
2.1 概述	7
2.2 土的生成	7
2.3 土的三相组成	9
2.4 土的物理性质指标	16
2.5 土的结构及物理状态指标	21
2.6 土的工程分类	26
思考题	31
习题	32
第 3 章 土体应力计算和有效应力原理	33
3.1 概述	33
3.2 土体的自重应力	36
3.3 基底压力与基底附加压力	39
3.4 地基中的附加应力	43
3.5 土的有效应力原理	58
3.6 地基应力问题讨论	64
思考题	67
习题	68
第 4 章 土的渗透性和渗透稳定性	70
4.1 概述	70
4.2 土的渗透性	71

4.3 静水和稳定渗流情况下土的应力状态	80
4.4 渗透力和渗透变形	81
4.5 二维渗流和流网的应用	86
思考题	90
习题	90
第5章 土的压缩性及地基变形计算	92
5.1 概述	92
5.2 土的压缩性	92
5.3 地基的最终沉降量计算	101
5.4 饱和土的一维固结理论	114
5.5 土的三维变形与固结*	122
5.6 地基变形控制	125
思考题	127
习题	128
第6章 土的抗剪强度	130
6.1 概述	130
6.2 土的抗剪强度理论	130
6.3 土的剪切试验	135
6.4 土的应力路径*	143
6.5 无黏性土的剪切特性	147
6.6 黏性土的剪切特性	151
6.7 抗剪强度指标的选用	154
思考题	155
习题	155
第7章 填土的压实及其工程性质	157
7.1 概述	157
7.2 填土的压实试验方法	157
7.3 土的压实性	159
7.4 现场碾压质量控制	163
7.5 细粒土的力学性质*	164
7.6 粗粒土的力学性质*	165
思考题	171
习题	172
第8章 土压力及支挡结构	173
8.1 概述	173
8.2 库仑土压力理论	176
8.3 朗肯土压力理论	180

8.4 常见情况的主动土压力计算	184
8.5 影响土压力的因素及减小土压力的措施	189
8.6 桩式墙上的土压力计算*	192
8.7 挡土墙设计简介	195
思考题	198
习题	198
第9章 土坡的稳定性分析	200
9.1 概述	200
9.2 无黏性土坡的稳定性分析	200
9.3 黏性土坡的稳定性分析	202
9.4 常见的复杂情况下的土坡稳定性分析	215
9.5 土坡稳定性分析的讨论	220
思考题	224
习题	225
第10章 地基承载力	226
10.1 概述	226
10.2 极限平衡法求地基的极限承载力	229
10.3 按塑性变形区的深度确定地基承载力	237
10.4 原位试验确定地基承载力	241
10.5 按规范查表确定地基承载力	245
10.6 有关地基承载力问题的讨论	248
10.7 地基及基础设计简介*	250
思考题	256
习题	256
附录 专业名词汉英对照表	259
参考文献	264

第 1 章 绪 论

1.1 土 及 土 力 学

土是人类文明出现以来与生活生产最密切的自然物质。土是由岩石岩体经过风化（物理的、化学的、生物的）、搬运（风、冰川、河流等）、沉积及地质运动形成的。土是由固态的矿物颗粒、孔隙中水、孔隙中空气三种物质组成的集合物。

工程上的土主要以地基、建筑材料、周围介质三种形式出现。地球上大部分建筑物或构筑物（地面以下的结构物）都是以土作为地基；土作为建筑材料使用的有土堤、土石坝、填筑材料等；作为周围介质的有土质渠道、土质洞室、天然土坡等。

土力学是以工程力学（理论力学、材料力学、结构力学）、水力学及流体力学、水文地质学及工程地质学为基础，结合土工试验（室内和现场），研究土的基本物理、力学性质，解决土的强度、变形和渗透问题的一门专业基础学科。

1.2 本 学 科 的 特 点

1.2.1 课程自身的特点

本课程内容分为基础理论和工程应用两大部分。

基础理论内容有土的物理性质及工程分类、土的渗透性、土中应力、土的压缩和变形性质、土的抗剪强度、填土的力学性质。此部分内容具有以下特点：①每章内容之间相对独立但有关联，且又有相当跨度；②各章之间的关联性、循序渐进性明显不同于工程力学和数学；③只有理论和试验相结合，才能掌握每章的内容和知识。

工程应用部分有地基沉降计算、土压力、土坡稳定性、地基承载力等。每一章介绍一类工程的基本理论和实际应用，所涉及内容的基础理论、工程经验和工程实例的积累就成为专著或规程规范。因此，每一章可参考的相关专著和规程规范较为丰富。学习的目的是掌握基本理论和方法，必须结合试验和实践经验才能更好地解决工程问题。

1.2.2 土的多样性和复杂性

(1) 土的固态矿物有 3000 多种，常见的有 10 多种。土粒粒径小至 0.002mm（胶粒），大至 200mm（漂石、块石）以上。可见组成土的固态土颗粒是千变万化的。

(2) 土体是有空隙的多孔物质，孔隙是气体（空气等）和液体（水）的储存空间。土中的水较多时，土体呈软土甚至泥浆状，难以承担荷载；当土中水足够少时就呈现为坚硬的地基或土块。孔隙中水气多少的不同组合，也形成了工程性质千差万别的土。

(3) 土的矿物成分不同，含量不同，各种土粒粒径不同，受环境影响湿度（水分）及

温度不同,土体的沉积年代及所经历的历史不同,都将明显影响土的工程性质。

(4) 任何土体物理和力学性质自始至终都在发生变化,作为工程应用的土,以施工期和使用期的天、月来度量,这种变化是十分明显的。若以地质年代来度量则更明显。

(5) 作为地基的土体,开挖方式和过程,开挖后受环境影响发生的温度、湿度变化,基础形式、尺寸、埋深、施工方式及周期,特别是软土地基上的施工强度,都将使地基的强度、变形和渗透性等主要工程性质受温度、湿度、荷载大小和加荷速率等多种因素的影响而变化。这个特点完全不同于常用的钢材、混凝土等建筑材料。

(6) 水工建筑物的基础埋深和宽度都较大,上部结构高且重,地层构造难以准确勘察,同一地基经常出现不同土层或地层,同一类地基土的物理力学性质差别也较大,使地基设计和处理都较困难。以工程地质、地基基础原因引起的破坏约占工程失事的1/3。同时,水工建筑物及其地基基础总是与水相伴而生的,各种各样的土与因势而异的水相互作用引起的渗透破坏约占工程失事的1/3。

(7) 我国幅员辽阔,土的成因、工程性质差别较大的特殊土的种类较多。例如:西北、华北地区的黄土,青藏高原、东北地区的冻土,沿江河湖泊及沿海广布的软土,云贵高原为主的红土,全国十几个省(自治区)出现的膨胀土,西北地区为主的盐渍土。这些特殊土的土工试验方法和仪器各不相同,地基设计及施工处理的方法也不同。

1.3 本学科的发展历史

第一时期自人类文明至18世纪的四五千年间,人类从居住自然岩质洞室到人工土质洞室,使用土作为房屋地基和路基。这个时期人类创造了古埃及金字塔、古希腊神庙、中国都江堰水利工程、中国万里长城及中国大运河等,这些都是人类勤劳智慧的结晶,也是全人类的物质文化遗产。每一项工程都是多门学科综合运用到极致创造出来的奇迹。但因科学技术的总结、保存、传承及交流都非常有限,故长时期出现周而复始的低水平重复。

从4000多年前大禹导江治水开始,中国有历史记载或现存的各种较为著名的重大水利工程有数十处之多。公元前485年,吴王夫差开凿了长170km的邗沟(现在的里运河)。公元前246年,秦始皇采纳韩国人郑国的建议,修建了引泾水东注洛水、长达150km的“郑国渠”,灌溉关中良田400万亩。公元前214年,秦始皇为统一广东、广西,修建了长江水系湘江至珠江水系漓江的灵渠。587—610年的23年间,隋朝先后开凿了山阳渚、通济渠和永济渠,形成了北起北京、南至杭州、长达2300km的大运河。

公元前256年,李冰父子带领西蜀人建造了都江堰水利工程(图1-1)。首先以独到的眼光选址都江堰。人工挑土石建造金刚堤,堤首鱼嘴将岷江一分为二,即内江和外江(原岷江河道)。设置飞沙堰,将进入内江多余的水和泥砂,特别是洪期时大量的砂卵石导向外江。内江水经宝瓶口进入成都平原,各种洪水均受宝瓶口控制,不使其过多进入或淹没成都平原。宝瓶口是一座天然节制闸,其位置的选择、精准的尺寸、艰难而又准确的施工,都是非常科学和合理的。历代的治水和工程管理经验,成为丰富科学的都江堰水文化,2001年当之无愧地成为了世界文化遗产和自然遗产。现在都江堰灌溉1300多万亩农田,供水给成都等10余座大中城市,总受益人口近3000万人。沃野千里的“天府之国”

的源头就是都江堰。或者说，没有都江堰，就没有“天府之国”，就没有具有 2000 多年历史的成都，也没有今天繁荣的大成都。可以肯定地说，都江堰还将千秋万代造福于人类。

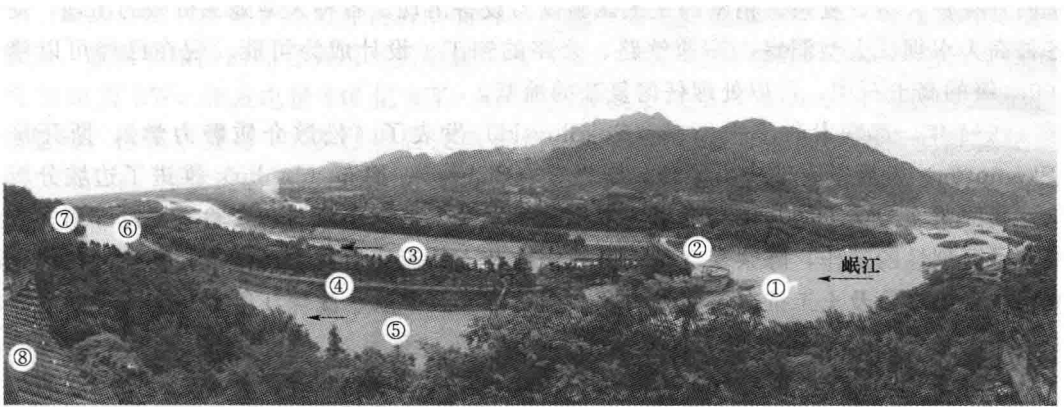


图 1-1 都江堰水利枢纽

①—鱼嘴；②—外江闸；③—外江；④—金刚堤；⑤—内江；⑥—飞沙堰；⑦—宝瓶口；⑧—二王庙

第二个时期是 18 世纪至 1925 年，数学、力学、机械制造已有长足发展，铁路、城堡、土堤、土坝的兴建提出了许多土力学问题。法国库仑（Coulomb）发表土压力理论（1773 年）和土的抗剪强度理论（1776 年），是公认的最早的土力学理论。1875 年朗肯（Rankine）发表了朗肯土压力理论。1885 年布辛涅斯克（Boussinesq）依据弹性理论求解了土中应力。1869 年卡尔洛维奇（Карловнч）发表了世界上第一本地基与基础著作。1900 年莫尔（Mohr）提出了一般材料的抗剪强度理论。该理论和库仑理论结合以后，成为运用广泛的“莫尔-库仑抗剪强度理论”。

20 世纪 20 年代前后，在土的渗透、强度、变形理论和实践方面有了很大的发展和进步，地基承载力、土坡稳定分析、土压力及地基处理方面也有明显进步，改进的新成果不断涌现。1916 年瑞典彼得森（Petterson）提出土坡稳定性分析的圆弧滑动法，1921 年普朗特（Prandtl）发表了地基承载力理论，美国泰勒（Taylor）、瑞典费伦纽斯（Fellenius）进一步发展和完善了土坡圆弧分析方法。

在这 200 年间，人们在大量的工程实践中积累了丰富的资料和经验，理论源于实践，很快又在工程中应用、验证与修改。理论与实践都明确涉及到了土的强度、变形和渗透领域。为土力学成为一门独立学科奠定了基础。

第三个时期是 1925 年太沙基（Terzaghi）发表《土力学》专著至今。该书系统总结和阐述了土力学的理论、试验和计算方法，使土力学真正成为一门独立的学科，并被公认为是近现代土力学的开始。太沙基被誉为土力学的奠基人，现代土力学之父。之后太沙基还提出了饱和土的有效应力原理，饱和土的单向固结力学模型，奠定了固结变形的基础理论，还提出了地基承载力计算公式，条分法土坡稳定计算公式等，特别重视并强调土的分类的重要性，工程实践经验和综合分析判断是工程成败的关键等。

20 世纪 50 年代后期以来是土力学的快速发展时期。其特点是各种理论和公式层出不穷，室内外各种试验仪器设备也在不断出现和改进，大量的中低高度土石坝及土工工程已

积累了丰富经验和资料,设计中的高土石坝和复杂的土工工程也在不断研究。计算机的出现使采用各种土力学理论和复杂计算方法解决工程问题成为可能。机械电子行业的进步使室内外各种大型、复杂、精密的土工试验仪器设备出现。各种大型施工机械的出现,促使各种高大水坝、大型洞室、高速铁路、公路的施工、设计成为可能。现在已经可以修建300m级的高土石坝,可以处理任何复杂的地基。

1954年,苏联索科洛夫斯基(Sokolovski)发表了《松散介质静力学》,斯开普顿(Skempton)发展了有效应力原理,毕肖普(Bishop)、简布(Janbu)推进了边坡分析理论。我国黄文熙在土的强度、变形、本构关系以及土工试验仪器和实验室建设等诸多方面都做了开创性的工作,陈宗基在黄土微观结构及土的流变性质方面做了开拓性的工作,汪闻韶在砂土液化及土工抗震方面做出了杰出贡献,钱家欢、沈珠江等都对土力学的发展做出了杰出贡献,2000年沈珠江出版了《理论土力学》专著。

我国20世纪50年代开始,土工结构和地基基础的试验和设计大部分沿用苏联的相关规程规范,到60年代积累了一定经验和资料以后,借鉴国外的通行方法开始编写符合我国国情的规程规范及教科书等。50年代后期,丘勤宝、屈智炯编写了我国第一本《土力学》教材。到80年代中期,我国各行业部门已修订出版了较为完善的各种规范和专著等。50年代后期开始系统研究黄土、红土的性质,到80年代相关理论和方法已经较为完善和成熟。80年代开始较大规模地研究软土、膨胀土。在软土地基上建造了大量的高速公路、铁路及高重建筑物,上海、广州的地铁大部分都是在软土地层中建造的。现在土工结构和地基基础相关理论、设计、施工和管理方面日趋完善和成熟。

20世纪50年代出现的三轴仪是土力学发展的一个重要标志。到70年代,试样直径从3.91cm发展到30cm、50cm、100cm,试验压力从0.6MPa到6MPa,基本可以解决高土石坝的各种要求。1959年,我国研制成功第一台惯性式振动三轴仪,用以试验研究土在地震等动荷载作用下的工程性质,特别是饱和砂性土的液化问题。80年代初振动三轴试验开始进入了快速发展时期,试样直径从5cm发展到100cm。20世纪80年代初土工离心技术被运用于土工工程,黄文熙称之为土工工程发展的一个重要里程碑。经过30年的发展,无论是离心机数量、主要技术指标、规模、工程应用等已居世界前列。我国室内外土工试验仪器的水平也已进入世界先进行列。

1971年,邓肯(Duncan)提出了第一个土的非线性弹性应力应变 $E-\mu$ 模型,即土的本构关系,稍后出现了英国剑桥弹塑性模型。70年代末,黄文熙先生倡导并带头研究土的本构关系,相继出现了清华大学弹塑性模型、南科院模型、成都科技大学的 $K-G$ 非线性弹性模型等。各种理论的本构模型达数百个,运用较广泛的是 $E-\mu$ 和 $K-G$ 模型。

20世纪60年代中期,国外将有限元等数值计算技术运用于结构工程,稍后运用于岩土工程。我国70年代开始运用于岩土工程,到90年代后期已经积累了相当丰富的经验和资料,计算结果已经成为工程综合判断的主要依据之一。

20世纪70年代,我国水利水电行业建造了坝高100m级的土石坝,80—90年代掌握了200m级土石坝的关键技术。近年来,以瀑布沟心墙堆石坝(坝高186m,2009年建成)、水布垭面板堆石坝(坝高234m,2009年建成)、糯扎渡心墙堆石坝(坝高265m,2012年建成)、双江口心墙堆石坝(坝高314m,待建)为代表,表明我国已掌握300m级

高土石坝的关键技术。加上三峡工程和溪洛渡水利水电工程的修建，表明在岩土工程领域我国已进入世界先进行列。

长江三峡工程位于湖北省宜昌市境内，长江中游三峡的末端，是一座集发电、防汛、航运、灌溉和旅游的综合利用水利枢纽工程（图 1-2）。水库总库容 393.0 亿 m^3 ，发电装机 2240 万 kW，年发电量 846 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。拦河混凝土坝坝高 175m。左岸设两道万吨、5 级船闸，相邻布置有 10 多台坝后发电机组。原河道中段布置溢洪道，泄洪流量超过 $70000 \text{ m}^3/\text{s}$ 。溢洪道右侧布设发电厂房，安装了 10 多台发电机组。在右岸坝肩及山体部位，又布设了地下厂房的数台发电机组。三峡工程是世界上发电装机最大的水电站，也是世界上防汛、航运能力最强的水利枢纽工程之一。

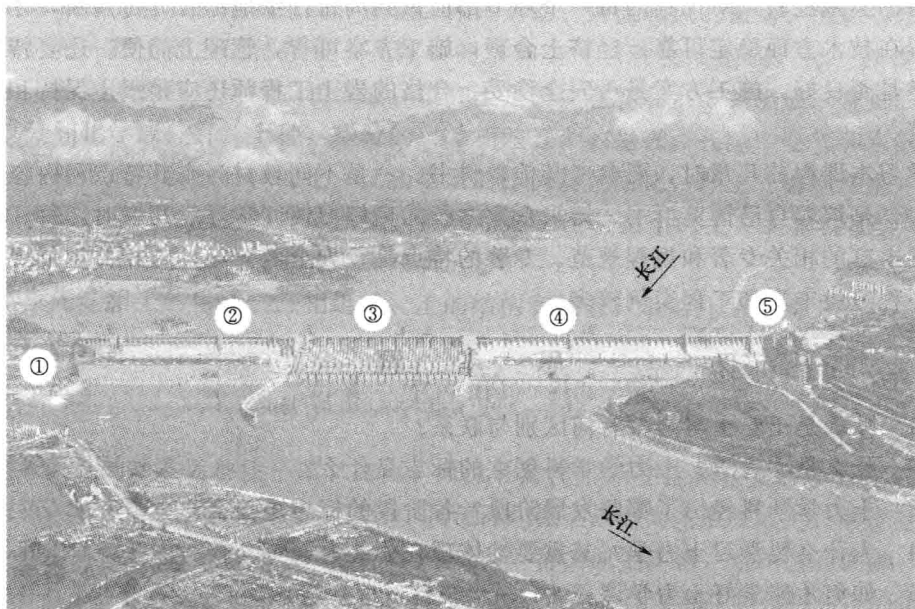


图 1-2 三峡工程

①—右岸地下厂房；②—右岸厂房；③—溢洪坝段；④—左岸厂房；⑤—船闸

土力学和岩石力学是岩土工程的主要基础理论。岩土工程广泛应用于水利水电工程、市政工程、公路、铁路（含城市地铁）、矿山、港口码头等工程。这些行业和部门在我国大规模、高速度地发展了 20 多年，做出了显著的成绩，积累了丰富的经验，同时也开拓了更为广泛的领域和市场，为年轻人投身于岩土工程领域展现了无限的光明前景。

1.4 学好本课程的方法

(1) 首先要具备扎实的基础理论知识，包括数学、工程力学、水力学、水文地质学和工程地质学、土质学等。计算机及辅助设计技术也必须熟练掌握。

(2) 各章节跨度较大，既有关联又相对独立，与数学和工程力学的循序渐进式有很大差别。因此，前面的内容和每一章的开头都要下工夫认真学习，尽快建立起各章节的知识

结构,抓住主要概念(含假设、原理等)并深刻理解。

(3) 必须进行土工试验。土力学的理论要由试验实现和验证,试验结果与理论结合才能解决实际工程问题。合格的岩土工程师必须具备严格认真负责的态度、坚实宽广的理论基础和熟练的土工试验技能,包括室内、现场试验和原型观测技术。

(4) 几乎所有土力学的理论都进行了各种假设,各种理论中包括的物理力学指标或参数须由试验确定,这两个环节都有各种影响因素引起的误差。因此,不能将理论计算结果作为设计施工的唯一依据,应经理论、试验、计算,特别是工程经验的综合分析判断以后予以确定。

综上所述,合格的岩土工程师应具备广博扎实的理论基础,理论联系实际的工作作风,丰富的实践经验,对工程的每一个环节都应做到周密仔细地综合分析判断,才能使每一个工程在技术方面稳定可靠,经济上合理,施工方案可行,管理上简便。还要特别关注社会效益是否良好,施工方案是否安全稳妥。合格的岩土工程师还应是水土保持和环境保护的典范。

在学习本课程前几章时,要参考其他教科书。一是不同教材各有其特点和内容的侧重点不同,二是培养自己博览群书、博采众家之长的良好习惯。学习后几章时,每一章都应参考查阅丰富的相关专著和规程规范。专著的特点是较为全面详细,与相关规程规范结合密切,工程经验丰富和工程实例较多。

思 考 题

- 1-1 什么是土?土与岩石有何区别与联系?
- 1-2 什么是土力学?土力学学科创立的标志是什么?
- 1-3 土力学学科经历了哪些发展阶段?各阶段的标志是什么?
- 1-4 为什么要学习土力学?其重要性体现在哪些方面?
- 1-5 如何才能学好土力学课程?

第2章 土的物理性质及工程分类

2.1 概 述

地球表面的岩石经地质运动、风化、冰川运动、河流和风的搬运、沉积等形成千变万化的土。每一种土都由固体颗粒、孔隙中的水和空气三种物质组成，每一种物质称为一相。干土是固体颗粒和空气二相组成，饱和土是固体颗粒和水二相组成。常见固体颗粒的矿物成分和化学成分有几十种，颗粒的尺寸相差五个数量级，孔隙中空气和水的比例多少及变化，就形成了各种各样的土。三相物质的比例及其变化，即土的物理性质，也是基本性质的改变，直接影响土的力学性质。物理和力学性质是土的主要工程性质。有时候水、土的化学性质也会明显影响土的工程性质。

本章先介绍土的生成、三相组成、土的结构和状态，最后介绍土的工程分类。

2.2 土 的 生 成

漫长复杂的地质运动使平原、高山、河流和海洋不断变化和相互转换，使岩层产生断层、裂隙、节理等产状。以崩坍、风蚀、河流冰川搬运滚磨为主形成的土，主要改变了岩块的大小和形状，没有改变其矿物成分和化学成分，称为原生矿物，也叫岩石矿物。常见的原生矿物有石英、长石、云母等。较小的固体颗粒再经温度、湿度和生物作用为主的化学风化和生物风化形成的土，称为次生矿物，也叫黏土矿物，常见的有高岭石、伊利石、蒙脱石等。

按照土中有机质含量的多少，土又分为有机质土和无机质土。以生物风化为主形成的土中有机质含量较多时，称为有机质土。水利工程中使用的土，有机质含量（重量百分比）应小于2%，市政、公路和铁路工程要求小于5%，作为农业的土壤则希望有机质多一些。

2.2.1 以物理风化为主形成的土

(1) 残积土。岩石岩块风化后未经搬运残留在原地的土，一般是在山顶和较缓山坡的上部，颗粒大小差别大，棱角分明，地层无明显层理特征。工程性质较好。

(2) 坡积土。残积土被风、雨水、冰雪搬运至山坡和坡脚堆积起来的土，有分选性和层理特征。工程性质中等。

(3) 洪积土。被暴雨洪水冲刷并搬运至河口、沟口及相对平缓地带沉积下来的土，土粒呈现近粗远细分布，有层理性和磨圆性。工程性质差别较大。

(4) 冲积土。冰川洪水较长时间和距离搬运土粒以后的沉积土，磨圆性及层理性明显。河流中上游的土粒较大，例如砂卵石，下游的土粒则以粉黏粒为主，例如黏土及软黏土。冲积土的工程性质复杂，差别较大。

(5) 湖积土。细小土粒在入湖的河口及近湖区沉积的土, 有机质含量较高, 一般为软土、淤泥质土及淤泥。工程性质较差。

(6) 海积土。细小土粒被搬运至江河入海口附近的沉积土, 多数呈软土状态, 少数为淤泥类土。工程性质差。

(7) 风积土。由风力较长距离搬运及滚磨以后的沉积土, 磨圆性及分选性明显。我国西北、华北地区的黄土就是典型的风积土。工程性质与水相关, 差别较大。

2.2.2 化学风化作用及其产物

产生化学风化的主要条件是湿度(水分多少)、温度、时间、其他物质的介入及作用等。

(1) 水解作用。土粒矿物与水进行化学成分的交换, 形成新的矿物。例如正长石经水解以后形成高岭石。

(2) 水化作用。土粒矿物与水进行化学反应, 形成新的矿物。例如土中的硬石膏(CaSO_4)与水产生化学反应以后成为含水石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)。

(3) 氧化作用。某些矿物与氧结合以后形成新的矿物。例如黄铁矿(FeS_2)氧化以后变成铁矾石(FeSO_4)。

其他化学风化形式还有溶解作用、碳酸化作用等。

2.2.3 土的生成环境、条件及年代对土的工程性质的影响

(1) 应力历史。相同土层因沉积年代、环境变化及土层厚度增减变化等因素, 其压缩性、抗剪强度等也随之变化。

(2) 区域环境。青藏高原及东北地区常年气温低, 形成季节性冻土和常年冻土。冻土的冻胀融陷性质直接影响工程安全。西北、华北大陆性干旱气候条件下形成的黄土, 常态与饱水状态下工程性质差别甚大。主要分布于西南地区的膨胀土, 在高温和充沛雨水作用下, 具有吸水膨胀, 失水收缩的特性。

(3) 沉积环境。平原、湖沼地区, 江河下游段及入海口三角洲地区(例如长江和珠江的入海口三角洲地区), 沉积了深厚的细小土粒, 形成软土, 甚至淤泥和淤泥质土, 工程性质很差。暴雨洪水挟带泥沙在溪沟江河出口及宽阔平缓地带沉积, 形成冲积扇或冲积平原(例如成都平原、长江中下游平原等), 土粒粗细分选明显, 地层复杂且变化较大, 工程性质差别较大, 见图2-1。

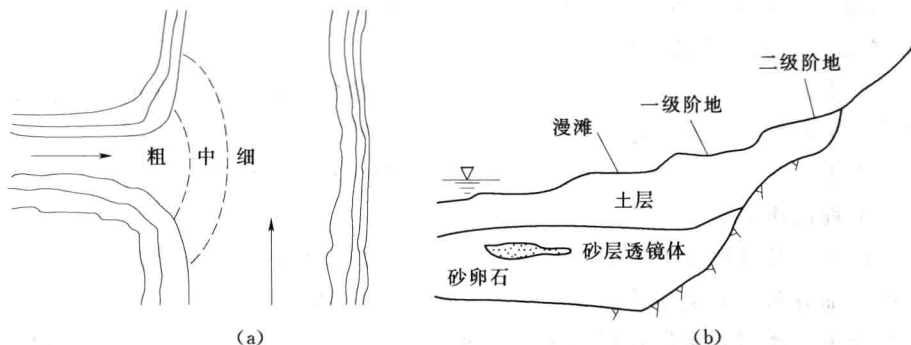


图2-1 洪冲积地层示意图

(a) 平面图; (b) 剖面图

(4) 环境条件变化。地下水位升降、土的结构扰动都明显影响土的工程性质。地下水下降使地表及建筑物沉降，一般情况下地下水位上升也会使地表产生明显的沉降，但有时候沉降较小甚至出现膨胀回弹。素称老黏土（ $Q_1 \sim Q_3$ ，表 2-1）的土层一般情况下适宜作为建筑物的地基，但遇水和扰动以后工程性质差别甚大。

陆地表面除基岩出露区外，多为第四纪土层（表 2-1 中的全新世 Q_4 ）覆盖。结合工程地质知识，深入理解土的成因与工程性质的关系，是土力学最重要的基础。

表 2-1 土的 形成年代

纪（或系）	世（或纪）		年代（距今）/万年
第四纪	全新世	Q_4^3 （晚期）	<0.25
		Q_4^2 （中期）	$0.25 \sim 0.75$
		Q_4^1 （早期）	$0.75 \sim 1.2$
	更新世	Q_3 （晚更新世）	$1.2 \sim 12.8$
		Q_2 （中更新世）	$12.8 \sim 73$
		Q_1 （早更新世）	$73 \sim 248$

2.3 土的三相组成

土由固相土粒、液相水和气体三相组成。固体部分构成土的骨架，土骨架的孔隙充满水时，称为饱和土，被气体充满时，称为干土。三种物质自身的性质及其比例关系，决定土的物理、力学性质。

2.3.1 土的固相

土粒构成土的骨架承担荷载后产生相应的变形，对土的物理力学性质起决定性作用。对土的固相的研究包括土粒的尺寸、形状、矿物成分及其在土中所占的重量百分比。

2.3.1.1 土粒粒组及级配

1. 土粒粒组

按工程性质有明显差异的粒径大小将土颗粒划分成粒组。国内外广泛采用的粒组有漂石（块石）、卵石（碎石）、砾石、砂、粉粒和黏粒，共 6 个粒组。表 2-2 是我国水利部现在采用的粒组分界（注：我国各部门粒组划分标准并不完全一致，使用时可参考相应规范及规程）。

土颗粒的形状是不规则的，粗粒土近似球体，细粒土呈针片状。粗粒土用通过的筛孔直径度量土粒粒径，细粒土的粒径是根据在水中下沉的速度按等效球体换算，其直径称为当量粒径，作为土的等效粒径。

2. 土粒大小分析方法

土的颗粒大小分析方法有筛析法和水分法。水分法又有密度计法和移液管法两种。

筛析法适用于粒径大于 0.075mm 的土，水分法适用于粒径小于 0.075mm 的土。对粗细颗粒混杂的土，则需同时使用上述两种方法。图 2-2 为颗粒分析试验成果。两种试验方法的具体操作详见水利部颁布的 SL 237—1999《土工试验规程》。

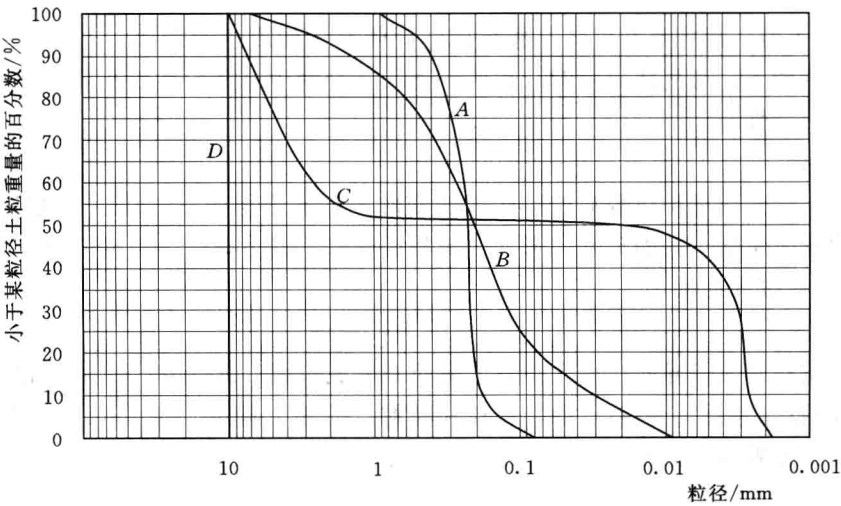
表 2-2 土 粒 大 小 分 组

粒组名称	粒组划分		粒径 d 的范围/mm	主 要 特 征
巨粒组	漂石、块石		$d>200$	透水性强，无黏性，不持水，无毛细管水
	卵石、碎石		$200\geq d>60$	
粗粒组	砾粒 (圆砾、角砾)	粗砾	$60\geq d>20$	透水性强，无黏性，不持水，毛细管水弱
		中砾	$20\geq d>5$	
		细砾	$5\geq d>2$	
	砂粒	粗砂	$2\geq d>0.5$	透水性较强，无黏性，不持水，毛细管水上升很小
		中砂	$0.5\geq d>0.25$	
		细砂	$0.25\geq d>0.075$	
细粒组	粉粒		$0.075\geq d>0.005$	透水性弱，有黏性，持水性较强，毛细管水上升较高
	黏粒		$d\leq 0.005$	相对不透水，黏性强，毛细管水可上升数米

注 $d>0.075\text{mm}$ 以上的统称粗粒土、无黏性土、透水土或粒状土，粉粒和黏粒称为细粒土或黏性土。

3. 土粒的级配

土中各种粒组的重量占该土总重量的百分数，称为土粒的级配。土粒级配常用土粒粒径分布曲线（又称为土的级配曲线或颗分曲线）表示，如图 2-2 所示。土的粒径分布曲线可以反映出以下情况。



土样 编号	土粒组成/%				d_{60}/mm	d_{30}/mm	d_{10}/mm	C_u	C_c
	2~20	0.075~2	0.005~0.075	<0.005					
A	0	100	0	0	0.24	0.22	0.18	1.33	1.12
B	7	73	20	0	0.27	0.12	0.031	8.71	1.72
C	44	5	9	42	2.60	0.0031	0.0026	1000.0	0.0014
D	100	0	0	0	10	10	10	1	1

图 2-2 几种土的粒径分布曲线