



普通高等教育“十五”国家级规划教材

高等学校水利学科专业规范核心课程教材·水利水电工程

全国水利行业“十三五”规划教材（普通高等教育）

土力学（第5版）

主 编 杨进良 严 驰

主 审 李广信



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



普通高等教育“十五”国家级规划教材

高等学校水利学科专业规范核心课程教材·水利水电工程

全国水利行业“十三五”规划教材（普通高等教育）

土力学（第5版）

主 编 杨进良 严 驰

主 审 李广信



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书系统介绍了土的基本性质、土力学的基本理论、相关试验以及用以解决岩土工程问题的基本方法。

全书共 14 章, 主要内容包括: 绪论; 土的物理性质及工程分类; 土体中的应力; 土的渗透性及渗透稳定; 土的压缩性及地基变形计算; 土的抗剪强度; 填土的力学性质; 土压力; 土坡的稳定性分析; 地基承载力; 土的动力性质; 地基设计; 桩基和地基处理。

书中各章大多附有例题、习题, 部分章节还附有问题和讨论, 用于读者进行练习和加宽加深对相关内容的理解; 书后附有供教学使用的土工试验。

本书是普通高等教育水利水电工程、农业水利工程、港口航道与海岸工程及海洋工程专业的教学用书, 也可供相关专业教学和工程技术人员参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

土力学 / 杨进良, 严驰主编. -- 5版. -- 北京 :
中国水利水电出版社, 2018.8

普通高等教育“十五”国家级规划教材 高等学校水利学科专业规范核心课程教材. 水利水电工程 全国水利行业“十三五”规划教材. 普通高等教育

ISBN 978-7-5170-6770-2

I. ①土… II. ①杨… ②严… 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(2018)第197366号

书 名	普通高等教育“十五”国家级规划教材 高等学校水利学科专业规范核心课程教材·水利水电工程 全国水利行业“十三五”规划教材(普通高等教育) 土力学 (第 5 版) TULIXUE
作 者	主编 杨进良 严驰 主审 李广信
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 (营销中心)
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
刷 印	天津嘉恒印务有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 25.25 印张 599 千字
版 次	1986 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 2018 年 8 月第 5 版 2018 年 8 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	58.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

高等学校水利学科专业规范核心课程教材

编 审 委 员 会

主 任 姜弘道 (河海大学)

副主任 王国仪 (中国水利水电出版社) 谈广鸣 (武汉大学)
李玉柱 (清华大学) 吴胜兴 (河海大学)

委 员

周孝德 (西安理工大学)	李建林 (三峡大学)
刘 超 (扬州大学)	朝伦巴根 (内蒙古农业大学)
任立良 (河海大学)	余锡平 (清华大学)
杨金忠 (武汉大学)	袁 鹏 (四川大学)
梅亚东 (武汉大学)	胡 明 (河海大学)
姜 峰 (大连理工大学)	郑金海 (河海大学)
王元战 (天津大学)	康海贵 (大连理工大学)
张展羽 (河海大学)	黄介生 (武汉大学)
陈建康 (四川大学)	冯 平 (天津大学)
孙明权 (华北水利水电学院)	侍克斌 (新疆农业大学)
陈 楚 (水利部人才资源开发中心)	孙春亮 (中国水利水电出版社)

秘 书 周立新 (河海大学)

丛书总策划 王国仪

水利水电工程专业教材编审分委员会

主 任 余锡平（清华大学）

副主任 胡 明（河海大学）

姜 峰（大连理工大学）

委 员

张社荣（天津大学）

胡志根（武汉大学）

李守义（西安理工大学）

陈建康（四川大学）

孙明权（华北水利水电学院）

田 斌（三峡大学）

李宗坤（郑州大学）

唐新军（新疆农业大学）

周建中（华中科技大学）

燕柳斌（广西大学）

罗启北（贵州大学）

总 前 言

随着我国水利事业与高等教育事业的快速发展以及教育教学改革的不断深入,水利高等教育也得到很大的发展与提高。与1999年相比,水利学科专业的办学点增加了将近一倍,每年的招生人数增加了将近两倍。通过专业目录调整与面向新世纪的教育教学改革,在水利学科专业的适应面有很大拓宽的同时,水利学科专业的建设也面临着新形势与新任务。

在教育部高教司的领导与组织下,从2003~2005年,各学科教学指导委员会开展了本学科专业发展战略研究与制定专业规范的工作。在水利部人教司的支持下,水利学科教学指导委员会也组织课题组于2005年年底完成了相关的研究工作,制定了水文与水资源工程,水利水电工程,港口、航道与海岸工程以及农业水利工程四个专业规范。这些专业规范较好地总结与体现了近些年来水利学科专业教育教学改革的成果,并能较好地适用不同地区、不同类型高校举办水利学科专业的共性需求与个性特色。为了便于各水利学科专业点参照专业规范组织教学,经水利学科教学指导委员会与中国水利水电出版社共同策划,决定组织编写出版“高等学校水利学科专业规范核心课程教材”。

核心课程是指该课程所包括的专业教育知识单元和知识点,是本专业的每个学生都必须学习、掌握的,或在一组课程中必须选择几门课程学习、掌握的,因而,核心课程教材质量对于保证水利学科各专业的教学质量具有重要的意义。为此,我们不仅提出了坚持“质量第一”的原则,还通过专业教学组讨论、提出,专家咨询组审议、遴选,相关院、系认定等步骤,对核心课程教材选题及其主编、主审和教材编写大纲进行了严格把关。为了把本套教材组织好、编著好、出版好、使用好,我们还成立了高等学校水利学科专业规范核心课程教材编审委员会以及各专业教材编审分委员会,对教材编纂

与使用的全过程进行组织、把关和监督。充分依靠各学科专家发挥咨询、评审、决策等作用。

本套教材第一批共规划 52 种, 其中水文与水资源工程专业 17 种, 水利水电工程专业 17 种, 农业水利工程专业 18 种, 计划在 2009 年年底之前全部出齐。尽管已有许多人为本套教材作出了许多努力, 付出了许多心血, 但是, 由于专业规范还在修订完善之中, 参照专业规范组织教学还需要通过实践不断总结提高, 加之, 在新形势下如何组织好教材建设还缺乏经验, 因此, 这套教材一定会有各种不足与缺点, 恳请使用这套教材的师生提出宝贵意见。本套教材还将出版配套的立体化教材, 以利于教、便于学, 更希望师生们对此提出建议。

高等学校水利学科教学指导委员会

中国水利水电出版社

2008 年 4 月

第5版前言

本书根据2007年8月高等学校水利学科教学指导委员会郑州会议“关于水利学科专业规范核心课程‘十一五’教材建设”审定的核心课程《土力学》教材编写大纲和1990—1995年高等学校水利水电专业本科教材编写出版规划及专业委员会讨论的大纲编写。

自2009年《土力学》第4版出版以来,我国的基本建设发生了很大变化。适应新的形势,在教材中纳入最新成果,更好地服务于教学、科研和生产实践是《土力学》第5版编写的根本目的。考虑到教材覆盖专业面广、内容多的特点,教材中带“*”的章节表示可根据专业要求、学时数量进行选择。

本书系水利水电工程、农业水利工程、港口航道与海岸工程和海洋工程等专业的技术基础课教材,因此在编写内容上适当融入了相关专业内容,以体现其专业特点和增强其适用性。全书由天津大学、四川大学和大连理工大学三校联合编写。天津大学杨进良教授、严驰教授任主编。各章编写分工如下:天津大学杨进良教授编写第1章和第12章;严驰教授编写第4章和第5章;四川大学陈群教授编写第2章和第14章;天津大学邱长林副教授编写第3章;四川大学王琛副教授编写第6章和第7章;天津大学刘润教授编写第8章;李飒教授编写第9章;大连理工大学郭莹教授编写第10章和第13章;天津大学冯士伦副教授编写第11章;天津大学耿久月高级工程师、孙红月工程师编写附录。

清华大学李广信教授担任本书主审。北京工业大学王正宏教授、天津大学要明伦教授审阅了有关章节,并提出了许多指导性意见。天津大学闫澍旺教授、王建华教授审阅了部分章节。编写过程中还得到了四川大学、大连理工大学和天津大学师生的大力支持,在此,对参加本书审阅和为本书做出贡献的师生表示感谢。

本书1986年出版的第1版由武汉水利电力学院冯国栋教授主编;武汉水利电力学院刘祖德教授,成都科技大学胡定教授、屈智炯副教授参与编写。华东水利学院钱家欢教授及华北水利水电学院王正宏副教授共同审阅。

本书 2000 年出版的第 2 版由天津大学杨进良教授主编；四川大学胡定教授、屈智炯教授，天津大学闫澍旺教授参与编写。天津大学陈环教授主审，天津大学要明伦教授审阅了有关章节。

本书 2006 年出版的第 3 版由天津大学杨进良教授主编；四川大学胡定教授、屈智炯教授，天津大学闫澍旺教授、严驰副教授、耿久月高级工程师、孙红月工程师参与编写。天津大学陈环教授主审，天津大学要明伦教授审阅了部分章节。

本书 2009 年出版的第 4 版由天津大学杨进良教授主编，四川大学胡定教授、屈智炯教授，天津大学闫澍旺教授、严驰教授、耿久月高级工程师、孙红月工程师参与编写。天津大学陈环教授主审，天津大学要明伦教授审阅了部分章节。

受水平所限，书中错误之处一定不少，敬请读者批评指正。

编者

2018 年 1 月

目 录

总前言

第 5 版前言

第 1 章 绪论	1
1.1 土力学的研究对象与研究内容	1
1.2 土力学发展简介	3
1.3 土力学在工程建设中的地位	5
1.4 土力学课程的特点及学习方法	8
第 2 章 土的物理性质及工程分类	10
2.1 概述	10
2.2 土的生成	10
2.3 土的三相组成	11
2.4 土的物理性质指标	20
2.5 土的结构及物理状态指标	25
2.6 土的工程分类	32
习题	37
第 3 章 土体中的应力	39
3.1 概述	39
3.2 土体的自重应力	39
3.3 基底压力	42
3.4 地基中的附加应力	44
3.5 土的有效应力原理	61
3.6 土体附加应力的一些其他问题	65
习题	68
第 4 章 土的渗透性及渗透稳定	71
4.1 概述	71
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	77
4.4 土的渗透稳定	79

4.5	二维渗流和流网的应用	85
4.6	有关土渗透性的几个问题	88
	习题	91
第5章	土的压缩性及地基变形计算	93
5.1	概述	93
5.2	土的压缩性	93
5.3	地基最终变形计算	100
5.4	饱和黏土的一维固结理论	112
5.5*	土的多维变形与固结	122
5.6	地基变形计算几个问题的讨论	125
	习题	126
第6章	土的抗剪强度	130
6.1	概述	130
6.2	莫尔-库仑强度理论	131
6.3	土中一点的极限平衡条件	132
6.4	土的剪切试验	137
6.5*	土的应力路径	147
6.6	无黏性土的剪切特性	151
6.7	黏性土的剪切特性	153
6.8	土的抗剪强度指标的选用	156
	习题	157
第7章*	填土的力学性质	159
7.1	概述	159
7.2	细粒料击实特性	159
7.3	细粒料力学性质	162
7.4	粗粒料击实特性	163
7.5	粗粒料力学性质	165
	习题	172
第8章	土压力	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	一些常见情况的主动土压力计算	185
8.5	影响土压力的因素及减小主动土压力的措施	190
8.6*	桩式墙上的土压力计算	192
8.7*	涵洞与埋管上的土压力计算	195
	习题	199

第 9 章 土坡的稳定性分析	203
9.1 概述	203
9.2 无黏性土边坡的稳定性分析	204
9.3 黏性土边坡的稳定性分析	205
9.4 几种特殊情况下的土坡稳定性分析	213
9.5* 土坡非圆弧滑动面的稳定性分析	220
9.6 土坡稳定分析的讨论	225
习题	231
第 10 章 地基承载力	234
10.1 概述	234
10.2 按塑性变形区的深度确定地基承载力	236
10.3 浅基础地基的极限承载力	240
10.4 原位试验确定地基承载力	252
10.5 按规范查表确定地基承载力	256
10.6 有关地基承载力问题的讨论	259
习题	262
第 11 章 土的动力性质	264
11.1 土体受到的动荷载及其特征	264
11.2 地震与震害	264
11.3 饱和砂土的振动液化	269
11.4 土的动力性能参数及其测定	282
11.5 土体的动力计算方法	285
习题	289
第 12 章* 地基设计	291
12.1 概述	291
12.2 工程地质资料的收集与地基勘察	292
12.3 基础类型的选择及埋置深度、平面尺寸的确定	294
12.4 地基验算	297
12.5 现场观测	300
习题	302
第 13 章 桩基	304
13.1 概述	304
13.2 桩的荷载传递机理	306
13.3 单桩轴向承载力	307
13.4 单桩水平承载力	315
13.5 桩基计算	320
13.6 桩的负摩擦力	325

13.7* 桩基技术几个问题简介	326
习题	329
第 14 章* 地基处理	331
14.1 概述	331
14.2 软黏土地基处理	332
14.3 松散土地基处理	348
14.4 特殊土地基处理	351
习题	355
附录 土工试验	357
一、颗粒分析试验 (密度计法)	357
二、界限含水率试验	363
三、渗透试验	366
四、固结试验	371
五、直接剪切试验	376
六、三轴压缩试验	379
七、击实试验	387
参考文献	390

第 1 章 绪 论

1.1 土力学的研究对象与研究内容

1.1.1 土力学的研究对象

1. 土和土体

土力学的研究对象是土，因此，学习土力学必须了解土的概念。

众所周知，地球的地表由岩石和土组成。未经风化的岩石，其矿物颗粒间具有较强的联结，结构致密，具有较高的强度，不易被水通过，不可压缩或压缩性甚小，一般为坚硬的块体；土是岩石风化的产物，是母岩经风化、搬运和沉积等地质作用形成的岩石碎屑和土颗粒集合体。土颗粒之间的联结强度远小于颗粒本身的强度。颗粒间具有孔隙，而孔隙中通常有水和气体，故土为散体。细粒土强度较低，而且压缩性较大，不易被水通过，粗粒土则具有较高的强度、较小的压缩性和较大的透水性。土由于其自身特点和受周围环境影响而具有复杂多变的性质。

土和岩石的同异，一方面由于土来自岩石，常常保留原岩石的矿物成分，其成分和性质与岩石有着密不可分的联系，正因如此，通常将研究岩石和土的学科称为“岩土力学”，将岩石和土的工程问题称为“岩土工程”。另一方面由于土的松散性特点，又使得两者的物理力学性质迥然不同。

为研究方便，工程界将土按不同影响因素划分为不同类别。如土按其有机质含量的不同，可分为有机土和无机土；按其颗粒间黏聚程度的不同，可分为黏性土和无黏性土；按颗粒级配和塑性指数不同可分为碎石土、砂土、粉土和黏性土等。不同的土其物理力学性质常存在明显的差异。

工程建筑物和土有着极密切的关系，它们或以土为材料（如堤、坝、路基）；或以土为地基（如房屋、闸坝、码头）；或以土为环境（如隧道、涵洞、运河）。因此，土的性质对于建筑物具有直接而重大的影响。

此外，土力学研究的是由土构成的土体。土体在自重和外力作用下，应力发生变化，导致建筑物沉降、失稳或发生渗透变形。所以，无论将土作为材料、环境还是地基，研究的都是由土构成的土体。

2. 地基和基础

建筑物一般由上部结构和基础两部分组成。由于建筑物的修建而引起其下土体应力状态发生改变的土层称为地基。基础是建筑物上部结构和地基的连接部分。图 1-1 为房屋建筑的独立柱、水利水电工程的溢流坝和港口工程中扶壁式码头的地基与基础示意图。从图 1-1 可以看出，上部结构、基础和地基三者之间相互联系、相互影响（有些水工建筑物上部结构和基础间并无明显界限），构成一共同工作的整体。

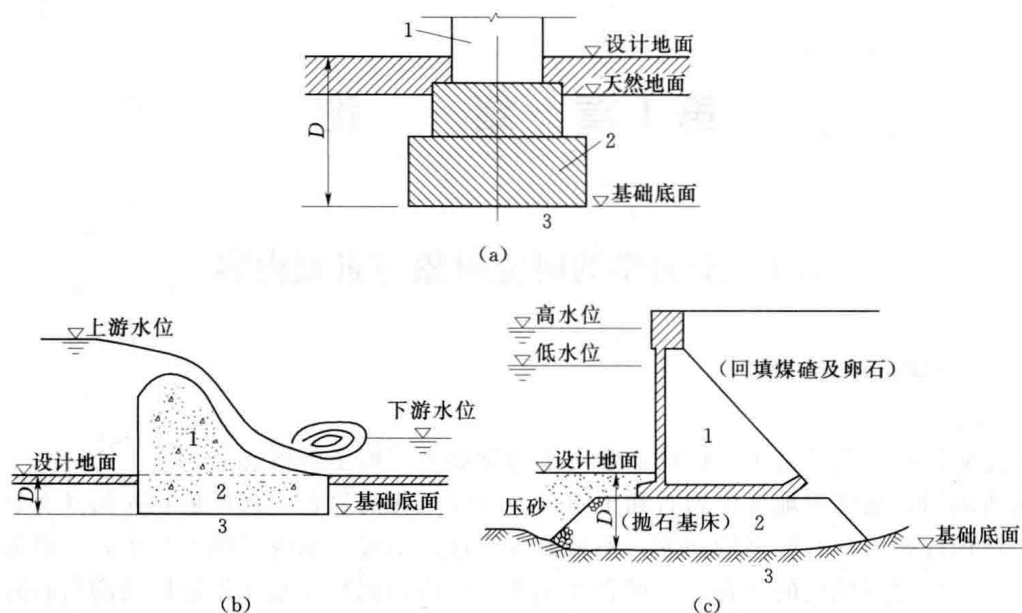


图 1-1 地基与基础示意图

(a) 独立柱; (b) 溢流坝; (c) 扶壁式码头

1—上部结构; 2—基础; 3—地基

基础通常被埋入土中, 设计地面至基础底面的距离称为基础的埋置深度, 用 D (或 d) 表示。按埋置深度 (或埋置深度与宽度比值) 的不同, 基础可分为深基础和浅基础。

地基按是否经过人工处理, 可分为天然地基和人工地基。天然地基省工省料, 且经济, 应优先采用。当天然地基不能满足建筑物对沉降和稳定的要求时, 必须对地基进行处理, 即采用人工地基。

正确认识地基和基础的概念尤为重要。通常建筑物的基础破坏很少, 多数属于地基土体破坏。所以, 不能把地基和基础破坏混为一谈。

1.1.2 土力学的研究内容

土由于其成因的不同和外力作用的多样性, 使其研究内容广泛而复杂。土力学包括以下主要研究内容。

1. 土的基本性质

一般而论, 土的基本性质系指土本身具有的性质, 这里主要指土的物理性质, 但宏观上讲也包含由外力作用引起的力学性质。它们是研究地基基础问题和改善地基条件的主要依据。其具体内容包括: 土的生成和组成、土的物理性质指标、土的结构和状态、土的分类以及土和土体受力后渗透、压缩及强度变化的基本性能。

2. 土体中的应力分布和计算

土体中的应力分布和计算是进行地基变形和土体稳定计算的基础。了解应力分布规律, 正确进行应力计算是建筑物沉降和稳定计算的前提。研究表明, 饱和土体的变形和强度只决定与土的有效应力, 土的有效应力原理是土力学的基本理论。

3. 地基变形计算

荷载作用于地基,地基产生变形,导致建筑物沉降。揭示在一定环境和力的作用下地基土体内部各点应力与变形相互联系、相互制约的规律是土力学研究的重要内容之一。其中包括:①某时刻地基的变形量(变形随时间的变化过程)计算;②地基的最终变形计算;③反映地基变形随时间变化过程中,孔隙水的渗流挤出、土体固结度增长的渗透与固结的关系问题等。

4. 土体稳定性分析

稳定性分析的目的在于揭示在外力和周围综合环境作用下,土体单元的临界稳定条件和极限状态条件,以便根据这些条件,对土的渗透稳定以及土体的强度稳定性问题进行评估。其中包括:①土的渗透稳定;②建(构)筑物填土、土坡和地基等土体有关的稳定;③动荷载作用下土体的稳定等。

5. 土与建筑物相互作用分析

土和建筑物是两个相互联系、相互影响的统一体,因此,研究建筑物的沉降和稳定,必须研究土与建筑物的相互作用和协同工作问题。其中包括:①上部结构、基础和地基间力的传递;②建筑物和土体间的应力应变协调;③与地基稳定相关的土体和建筑物之间的摩擦;④围绕沉降和稳定问题采取的改善土和土体的性质而适应两者要求的措施,如地基设计与处理。

上述基本内容既有理论也有实践,它们之间密切联系、相互依存,构成土力学课程的完整体系。

不言而喻,土力学是以土和由其构成的土体为研究对象,研究土的特性及土体受力后应力、变形、强度和稳定性的学科,是为解决建筑物的地基基础、土工构筑物 and 地下结构物的工程问题服务的,它是力学的一个分支。

1.2 土力学发展简介

1.2.1 土力学发展史

土力学学科的发展可大致概括为四个阶段,即经验积累阶段、理论提高阶段、形成独立学科阶段和现代土力学阶段。

1. 经验积累阶段

人类自远古以来就广泛利用土作为建筑物的地基和建筑材料。“水来土掩”是我国古代劳动人民用土防御洪水的写照。古代伟大的建筑(如我国的长城、大运河、灌溉渠道、桥梁、宫殿、庙宇)以及世界上著名建筑物的建造都积累了丰富的经验。但由于社会生产力和技术条件的限制,直至18世纪中叶,土力学的研究还停留在感性认识阶段。

2. 理论提高阶段

18世纪产业革命后,随着大量建筑物的兴建和科技进步,促使人们对土作进一步的研究,开始对积累的经验做理论上的解释。

1776年,法国库仑(C. A. Coulomb)在试验的基础上提出了土的抗剪强度理论,指出,无黏性土的强度取决于粒间摩擦力,黏性土的强度由黏聚力和粒间摩擦力两部分组

成。同时,还发表了著名的滑动楔体理论,假定挡土墙后的土体中出现一楔体,通过研究楔体上力的平衡而求主动土压力和被动土压力。

进入19世纪50年代,很多学者致力于土压力和渗流方面的研究。1856年,法国达西(H. Darcy)在研究砂土透水性的基础上,提出了著名的达西定律。同时期,斯笃克(G. G. Stokes)研究了固体颗粒在液体中的沉降规律问题。1857年,英国朗肯(W. J. M. Rankine)假定挡土墙后土体为均匀的半无限空间体,应用极限平衡的概念论来解土压力问题。这一土压力理论与库仑土压力理论并称古典土压力理论。在土体的应力分布与计算方面,1885年,法国布辛奈斯克(V. J. Boussinesq)研究了半无限空间体表面作用有集中力的情况,提出了土中应力的解析解,称为布辛奈斯克课题,它是各种竖直分布荷载下应力计算的基础。

以后,很多学者对土力学的专门课题进行了研究,如1916年,由瑞典彼得森(K. E. Petterson)首先提出,继而由美国泰勒(D. W. Taylor)和瑞典费伦纽斯(W. Fellenius)等进一步发展了的圆弧滑动法。该方法被广泛用于土坡稳定分析。

1920年,法国普朗特(L. Prandtl)提出了地基滑动面计算的数学公式,用于计算地基承载力。

3. 形成独立学科阶段

1925年,美国太沙基(K. Terzaghi)著名的教科书*Erdbaumechnik*的出版,被公认为是近代土力学的开始。他在总结实践经验和大量试验的基础上提出了很多独特的见解,其中,著名的有效应力原理和固结理论,是对土力学学科的突出贡献。

20世纪50—60年代,基本上处于土力学理论和技术完善和发展阶段。1955年,英国毕肖普(A. W. Bishop)发展了古典的圆弧滑动法,提出土坡稳定计算中考虑条间水平力的方法,并应用有效强度指标计算土坡稳定。20世纪50年代后期,挪威简布(N. Janbu)与加拿大摩根斯坦(N. R. Morgenstern)等人相继提出了考虑条间力,滑动面取任意形状的土坡稳定计算方法,在强度理论、强度计算等方面进一步发展了莫尔-库仑准则。

在土压力和承载力方面,俄国索科洛夫斯基(B. B. Соколовский)将古典塑性理论引进了土力学,在散体极限平衡方面,有关地基、土坡和挡土墙的稳定分析方面,都获得了严格的数值解,并著有专著《散体静力学》。

4. 现代土力学阶段

随着电子计算机的问世和应用,土力学进入了全新的发展阶段。新的非线性应力应变关系和应力应变模型(如邓肯-张模型、剑桥模型)的建立;土的微观结构的研究;加拿大费瑞德伦德(D. G. Fredlund)以及我国众多学者对于非饱和土的研究等,将土的基本性质、有效应力原理、固结理论、土的动力特性以及流变学的研究推向了新的阶段。从1936年开始,每4年一次的国际土力学与基础工程会议一直延续至今。各大洲区域性的土力学会议每2~4年召开一次。国际性的土工刊物《土工技术》(*Geotechnique*)已创刊多年。各种岩土工程的期刊、规范和规程相继颁布。这些会议的召开、期刊和规范标准的制定有力地推动了学科的交流和发展。

1.2.2 我国土力学学科发展现状

我国是具有悠久建筑历史的国家。随着历史的沿革,本学科的发展取得了长足的进