

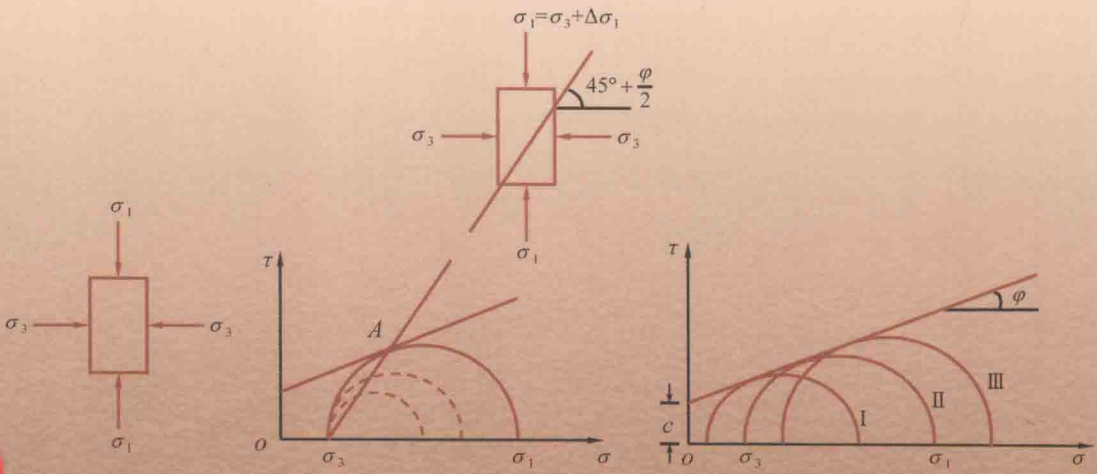
国家一类特色专业 国家卓越工程师教育培养计划
地 质 工 程 专 业 系 列 教 材

SOIL MECHANICS (2nd Edition)

土 力 学

(第二版)

● 王 常 明 编



地 质 出 版 社

国家一类特色专业 国家卓越工程师教育培养计划
地质工程专业系列教材

土力学

(第二版)

王常明 编

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

全书共分七章,第一章主要包括土的有效应力原理、自重应力计算、基底应力和地基附加应力计算;第二章主要阐述了土的压缩性和单向分层总和法、规范推荐法、 $e-\lg P$ 法等地基沉降计算方法;第三章主要介绍一维固结理论和固结沉降的计算;第四章主要包括莫尔-库仑强度理论、抗剪强度试验、黏性土与粗粒土的抗剪强度特性以及砂土的动力剪切特性;第五章主要介绍了朗肯和库仑土压力理论;第六章主要介绍非黏性土土坡稳定性分析方法、黏性土土坡分析中的瑞典条分法、毕肖普法、简布法及传递系数法;第七章主要介绍地基极限承载力和容许承载力的确定方法。内容基本涵盖了土力学的基本理论和计算方法。

本书可作为地质工程、土木工程等专业本科生的教学用书,也可供其他相关专业的教学、生产及科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

土力学/王常明编. —2版. —北京:地质出版社, 2015.8

ISBN 978-7-116-09274-7

I. ①土… II. ①王… III. ①土力学 IV. ①TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 113795 号

Tulixue

责任编辑:李惠娣

责任校对:王素荣

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号, 100083

咨询电话:(010) 66554528 (邮购部); (010) 66554579 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真:(010) 66554582

印 刷:北京地质印刷厂

开 本:787 mm×1092 mm $\frac{1}{16}$

印 张:13.75

字 数:330 千字

版 次:2015 年 8 月北京第 2 版

印 次:2015 年 8 月北京第 1 次印刷

印 数:1—2000 册

定 价:23.00 元

书 号:ISBN 978-7-116-09274-7

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

国家一类特色专业 国家卓越工程师教育培养计划
地质工程专业系列教材

编写委员会

主任委员：孙友宏

副主任委员：陈剑平 陈 晨

委 员：（按姓氏笔画排序）

王茂森 王常明 牛建军 代树林 刘宝昌
李 欣 杨志双 陈宝义 范建华 佘 磊
赵大军 徐会文 徐佩华

编审委员会

主任委员：苏义脑（中石油集团钻井工程技术研究院）

何满潮（中国矿业大学〈北京〉）

委 员：（按姓氏笔画排序）

王 达（中国地质调查局）
石智军（中煤科工集团西安研究院）
肖树芳（吉林大学）
伍法权（中科院地质与地球物理研究所）
刘佑荣（中国地质大学〈武汉〉）
刘宝林（中国地质大学〈北京〉）
张 伟（中国地质调查局）
郑达辉（吉林大学）
殷 琨（吉林大学）
唐大雄（吉林大学）
鄢泰宁（中国地质大学〈武汉〉）
谭周地（吉林大学）
薄景山（防灾科技学院）

序 一

地质工程专业包括传统的工程地质与探矿工程两个专业方向，它是我国国民经济建设不可缺少的专业。随着人类社会的发展和技术进步，其地位愈加重要，应用领域也日益广泛。地质工程专业除了为传统的地质找矿服务外，当前还广泛应用于工业与民用建筑、重大基础设施建设、地质灾害防治、非常规油气资源开发、海洋资源调查等领域，与人们的生产和生活密切相关。

吉林大学地质工程专业办学已有 63 年的历史，经过几代教师的栉风沐雨、辛勤耕耘，为国家培养了一大批杰出人才，取得了一批高水平的研究成果；而该专业所在的建设工程学院，其学科建设和专业特色也享誉海内外。2007 年，吉林大学地质工程学科被评为国家重点学科，2008 年，勘查技术与工程专业（含地质工程专业）被评为“国家一类特色专业”。2010 年，吉林大学首批进入教育部“国家卓越工程师教育培养计划”，勘查技术与工程专业（地质工程方向）为首批实施专业。

吉林大学建设工程学院的老教师们，根据地质工程专业教学大纲要求并结合自身教学和科研经验，编写了本系列教材。这个系列教材具有如下特点：一是内容新，不仅保留了原有教材的精华，还增加了地质工程学科的国内外最新科研成果，做到继承与创新的统一；二是自成专业体系，全套教材共 20 种，涵盖了地质工程专业两个方向的专业基础课程、专业主干课程和专业特色课程，满足了专业教学的需要；三是通俗易懂，充分利用现代信息技术手段，将大量的工法原理和非可视化的地下过程，变成图像、图形、图示、表格等形式，可供相关专业人员参考。

我认为，这套系列教材反映了吉林大学地质工程专业 60 多年来深厚的学科积累，凝结了几代教师的心血和智慧，值此谨向参加本套教材编写的教师们表示由衷的敬意！相信这套教材的出版将为我国地质工程专业的发展起到更大的促进作用。

是为序。

中国工程院院士



2015 年 7 月 20 日

序 二

地质工程属于工程技术学科，主要服务于资源开发、工程建设、地质灾害防治与地质环境保护等领域。地质工程学科需要面向我国“走新型工业化道路”和“‘走出去’发展战略”的国家目标，以培养和造就一批创新能力强，适应社会对人才培养多样化的需要，满足学生继续深造或就业的不同需要为导向，以此制定专业培养方案。吉林大学地质工程专业是国家“国家卓越工程师教育培养计划”首批实施专业，为此，该校建立了多样化的人才培养模式和与之相适应的课程体系，改革了教学内容、教学方法，设计了多门优势特色课程。这些措施为培养探索研究型、拔尖创新型地质工程专业人才奠定了基础。

教材建设是专业建设、课程建设的重要组成部分，是“传道、授业、解惑”的重要工具。吉林大学建设工程学院组织编写的“国家一类特色专业、国家卓越工程师教育培养计划地质工程专业系列教材”涵盖了工程地质和钻掘工程两个方向，包括：工程岩土学、土力学、岩体力学、碎岩工程学等专业基础课，环境地质与工程、工程地质勘察、钻探工艺学、冲击回转钻进、油气钻探等专业主干课，以及岩土工程分析与设计、岩土工程施工等专业特色课程。创编地质工程专业系列教材在我国尚属首次，求全不易，创新更难。吉林大学建设工程学院有60多年学科建设的经验积累，有一大批优秀的专家学者在此耕耘和奉献，取得了一批国内外知名的研究成果，为本套教材的编写与出版奠定了扎实的基础。希冀本套教材能够遵循继承与发展的原则，尽快出版，以助推我国地质工程专业教育的进步和发展。

当今社会的科技发展日新月异，地质工程学科也是如此。近年来，室内常规试验、物理模拟及试验、原位测试等新技术不断应用于地质工程，地质灾害的理论和地基处理技术的研究等都取得了令人瞩目的进展。将这些新理论、新方法、新技术及时应用于专业教育，方能培养出具有创新思维和科学素养的专门人才。唯其如此，方能体现教材的科学性、先进性和实用性。这是教材编写者需要关注的一个重要方面。

会当凌绝顶，一览众山小。寄语攻读地质工程专业的莘莘学子，继承前

辈优良传统，热爱专业，勇攀科技高峰，将来为国家建设做出更大贡献！
欣然应邀，特作此序。

中国科学院院士 

2015年6月12日

前 言

土力学作为高等院校地质工程和土木建筑有关专业的一门重要基础课程，是有关专业的大学生和工程技术人员必须掌握的一门现代科学。在 2004 年出版的《土力学》（王常明编，吉林大学出版社）的基础上，结合吉林大学地质工程专业与土木工程专业的土力学课程教学的基本要求，和当前土力学的发展与应用现状，修订了该教材。书中较系统地阐述了土力学的基本原理、基本概念和基本方法，内容包括土体中的应力计算、地基沉降计算、饱和土的固结变形计算、土的抗剪强度、土压力、土坡稳定性分析和地基承载力。与第一版相比，在内容结构上有所调整，增加了水平荷载作用下的地基附加应力计算、地基回弹变形计算、地基极限承载力等主要公式的推导、土的动力强度特性，并增加了例题与习题。不仅内容系统、重点突出，还增加了可读性，使读者能更好地理解该课程的内容。

该教材编写过程中参考了国内外相关院校的《土力学》教材，并融入了作者多年从事土力学教学的经验。在本书的编写过程中得到了吉林大学教务处及吉林大学建设工程学院的大力支持，也得到了岩土工程系各位老师的热心帮助，在此一并表示感谢。

书中疏漏和错误在所难免，敬请读者批评指正！

编 者

2015 年 2 月于长春

目 录

序 一	
序 二	
前 言	
绪 论	1
一、土力学的研究对象及研究内容	1
二、土力学的发展简史	2
三、土力学的特点及学习方法	3
第一章 土体中的应力	5
第一节 概述	5
一、应力-应变关系的假定	5
二、应力状态	6
第二节 土的有效应力原理	7
第三节 自重应力	8
一、竖向自重应力	8
二、水平向自重应力	10
第四节 基底的接触应力	11
一、基底应力的分布规律	11
二、基底应力的简化计算	12
三、基底附加应力	14
第五节 地基附加应力	15
一、地基附加应力的基本解答	15
二、空间问题的地基附加应力	18
三、平面问题的地基附加应力	26
第六节 影响附加应力的因素	33
一、土体材料的非线性	33
二、成层地基	33
三、变形模量随深度增大的地基	34
四、各向异性地基	35
习 题	35

第二章 地基沉降计算	37
第一节 土的压缩性及其参数	37
一、土的压缩性	37
二、土的变形模量	38
三、变形模量与压缩模量的关系	39
四、应力历史对压缩性的影响	40
第二节 分层总和法	43
一、计算原理	43
二、计算步骤	44
第三节 规范推荐法	46
一、计算原理	46
二、地基沉降计算公式	47
三、地基沉降计算深度	49
四、地基回弹量计算	51
第四节 $e - \lg \sigma$ 法	51
一、正常固结土	51
二、超固结土	52
三、欠固结土	53
第五节 弹性力学计算法	54
一、柔性荷载下的地基沉降	54
二、刚性基础的沉降	56
第六节 考虑三维应力的沉降计算	58
第七节 建筑地基变形允许值	58
习 题	60
第三章 饱和土的固结变形计算	62
第一节 土的渗透性	62
一、达西定律	62
二、渗透系数的测定	64
三、层状地基的等效渗透系数	68
第二节 渗透作用下的应力状态	69
一、渗透力	69
二、不同渗透方向的应力状态	70
三、渗透破坏	71
第三节 一维固结理论	72
一、渗透固结模型	73
二、渗透固结微分方程的建立及其求解	74

三、固结度	77
第四节 固结系数的测定	79
一、时间平方根法	79
二、时间对数法	80
三、三点法	81
第五节 地基沉降与时间关系的计算	82
第六节 黏性土的变形与地基沉降	83
一、瞬时沉降计算	85
二、固结沉降计算	86
三、次固结沉降计算	87
习 题	88
第四章 土的抗剪强度	90
第一节 莫尔-库仑强度理论	90
第二节 土中一点极限平衡条件	91
第三节 土的抗剪强度试验	94
一、直接剪切试验	94
二、三轴剪切试验	95
三、单轴压缩试验	96
四、原位十字板剪切试验	97
第四节 应力路径	98
第五节 孔隙压力系数	101
一、等向应力 $\Delta\sigma_3$ 作用下的孔隙水压力 Δu_3	101
二、偏应力作用下的孔隙水压力 Δu_1	102
第六节 黏性土的剪切特性	103
一、不固结不排水抗剪强度	104
二、固结不排水抗剪强度	104
三、固结排水抗剪强度	106
四、抗剪强度指标的取值	110
第七节 无黏性土的剪切特性	110
第八节 砂土的动力剪切特性	113
一、砂土的动力剪切特性	113
二、砂土的液化现象	115
三、砂土的动强度	115
习 题	119
第五章 土压力	120
第一节 土压力的概念	120

一、挡土结构物的类型	120
二、土压力	121
第二节 静止土压力计算	122
第三节 朗肯土压力理论	123
一、主动土压力	124
二、被动土压力	125
三、墙后为多层土时的土压力计算	127
四、墙后土中存在地下水	128
五、墙后土表面有荷载作用	130
第四节 库仑土压力理论	132
一、主动土压力	133
二、被动土压力	136
第五节 库尔曼图解法	138
第六节 规范推荐公式	139
第七节 朗肯理论与库仑理论的比较	140
一、坦墙问题	140
二、坦墙土压力的计算方法	141
第八节 墙背形状变化时的土压力计算	142
一、折线形墙背	142
二、设置卸载平台的挡土墙	142
第九节 考虑地震作用的土压力	143
第十节 支护结构上的土压力	145
一、悬臂式桩墙上的土压力	145
二、锚碇式桩墙上的土压力	145
三、支撑式桩墙上的土压力	146
习 题	147
第六章 土坡稳定性分析	149
第一节 概述	149
第二节 无黏性土坡的稳定性分析	150
一、均质干坡和水下坡	150
二、有渗流作用的土坡	151
三、部分浸水土坡	151
第三节 黏性土土坡稳定性分析	152
一、整体圆弧滑动稳定分析	153
二、瑞典条分法	154
三、毕肖普法	157

四、简布法	161
五、图解法	163
第四节 传递系数法	165
第五节 复合滑动面土坡的稳定分析	167
第六节 土坡稳定性分析的几个问题	169
一、坡顶开裂	169
二、成层土及超载	169
三、渗流对土坡稳定性的影响	170
四、地震对土坡稳定性的影响	172
五、抗剪强度指标的选用	173
习 题	173
第七章 地基承载力	175
第一节 地基变形与破坏模式	175
一、竖向荷载作用下地基破坏模式	175
二、倾斜荷载作用下地基破坏模式	176
第二节 地基极限承载力	177
一、普朗特-赖斯纳公式	177
二、太沙基公式	179
三、普遍极限荷载公式	183
四、斯开普顿公式	187
五、影响地基极限承载力的因素	188
第三节 地基容许承载力	189
一、按极限承载力确定	189
二、按塑性区扩展的范围确定地基容许承载力	190
三、按原位试验确定地基承载力	194
四、按地区经验确定地基承载力	196
习 题	200
参考文献	201

绪 论

一、土力学的研究对象及研究内容

建筑物一般由上部结构和基础两部分组成。基础是连接上部结构和地基的桥梁。由于建筑物的修建,导致在基础底面以下一定范围内的原有应力状态发生了改变的地层,称为地基。如图 0-1 所示,上部结构、基础和地基三者之间相互联系、相互影响,构成一个共同工作的整体。组成地基的介质可以是土,也可以是岩石。土力学的研究对象是“土”。

在工程建设中,土往往作为各种建筑物的地基,用来支承由建筑物通过基础传来的荷载。例如,在土层上修建房屋、桥梁等;而像路堤、土坝等土工构筑物,土被用作建筑材料;此外,如隧道、涵洞及地下建筑等,土作为建筑物周围的介质或环境。

土是地壳表层岩石经风化、搬运、沉积等综合作用的自然历史产物,是一种由固体颗粒和孔隙组成的松散集合体。土的颗粒之间存在孔隙,土颗粒之间没有或只有很弱的联结,故土具有强度低、易变形的特性。由于土的成因不同,土的性质也各有差异,其分布和性质复杂。另外,土的性质极易受外界环境(如温度、湿度等因素)的影响。

正是由于土具有这些特征,加上人们对其调查不清或研究不深,导致工程事故屡见不鲜。例如,著名的意大利比萨斜塔就是一个因地基不均匀沉降过大而导致塔身严重倾斜的典型实例(图 0-2)。比萨斜塔是一座 8 层圆柱形的建筑,全部用白色大理石砌成,塔高 55 m,重达 1.42×10^4 t。地基持力层为粉砂,其下为粉土和黏土层。于 1173 年动工兴建,建造中因塔身南倾而停工,之后时停时建,直至 1350 年才完工。此后塔身继续倾斜,至今南侧下沉近 3 m,北侧下沉 1 m 多,南北两端沉降差达 1.8 m,塔顶离中心线已达 5.2 m,倾斜 5.5° ,成为危险建筑物。尽管从 19 世纪开始,意大利政府对斜塔采取了一系列的挽救措施,曾花费近千万美元加固塔身,同时采取了纠偏和地基加固措施,但效果并不明显。

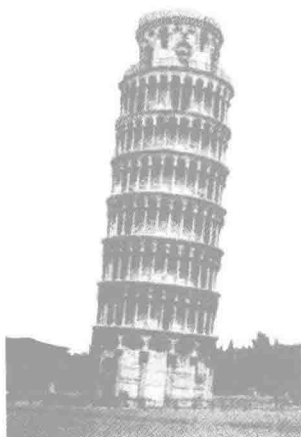


图 0-2 意大利比萨斜塔

加拿大特朗斯康谷仓是一个地基失稳的典型实例(图 0-3)。该谷仓平面呈矩形,南北向长 59.44 m,东西向宽 23.47 m,高 31.00 m,容积 36368 m^3 。谷仓为圆筒仓,每排 13 个圆仓,5 排共计 65 个圆筒仓。谷仓基础为钢筋混凝土

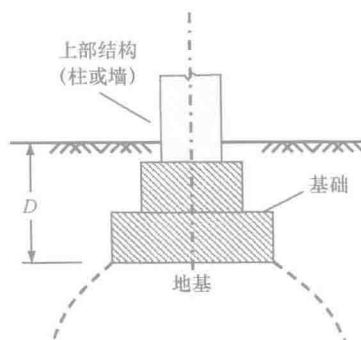


图 0-1 地基与基础
D—基础埋深

土筏板基础,厚度 61 cm,埋深 3.66 m。谷仓于 1911 年动工,1913 年完工,空仓质量 20000 t,相当于装满谷物后满载总质量的 42.5%。从 1913 年 9 月开始装谷物,于 10 月 17 日当谷仓装 31822 m^3 谷物时,发现 1 h 内竖向沉降达 30.5 cm,结构物向西倾斜,并在 24 h 内谷仓倾斜,倾斜度离垂线达 $26^\circ 53'$,谷仓西端下沉 7.32 m,东端上抬 1.52 m。1952 年经勘察试验与计算,谷仓地基实际承载力为 193.8~276.6 kPa,远小于谷仓破坏时发生的压力 329.4 kPa,因此,谷仓地基因超载发生剪切破坏而滑动。事后在基础下做了 70 多个支撑于基岩上的混凝土墩,使用 388 个 50 t 千斤顶以及支撑系统,才把仓体倾斜逐渐纠正过来,但整个仓体的位置比原来降低了 4 m。

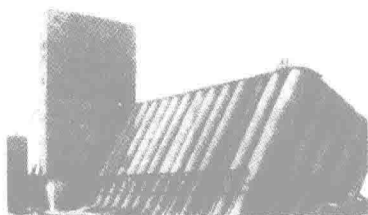


图 0-3 加拿大特朗斯康谷仓

由上述实例可见,地基在整个建筑中起着关键的作用,地基的变形或破坏直接影响整个结构的安全和使用。因此,在建筑地基基础的设计和计算中,首要的任务必须研究土的力学性状及其与建筑物相互作用的力学过程。具体地说,土力学主要的研究内容是:

- (1) 土的力学性质;
- (2) 地基应力和变形计算理论,研究地基在受到荷载作用后的变形规律;
- (3) 地基的强度特性和理论;
- (4) 与工程实践直接相关的地基稳定性、土坡稳定性和土压力等问题。

土力学是力学的一个分支,是为解决建筑物的地基基础、土工建筑物和地下结构物的工程问题服务的。

二、土力学的发展简史

土力学的发展大致可分为三个阶段。

1. 土力学的萌芽阶段

土力学和其他学科一样是人们长期生产实践的产物。人类自古以来就广泛利用土作为建筑物地基和建筑材料。如劳动人民很早就利用土来防治洪水,古代的大型建筑,如埃及的金字塔和中国举世闻名的万里长城、南北大运河、黄河大堤、隋朝修建的河北省赵州桥以及宏伟的宫殿、寺庙、宝塔等的成功建造,都积累了丰富的经验,具有重要的科学价值。

2. 古典土力学

直到 18 世纪中期,随着大量建筑物的兴建,促使人们对土进行深入研究,开始对积累的经验进行理论上的解释。1773 年,法国科学家库仑 (Coulomb C A) 发表了著名的滑动楔体理论,假定挡土墙后的土体出现一楔体,研究楔体上力的平衡而求取主动土压力和被动土压力。接着,库仑于 1776 年又发表了土的抗剪强度理论。

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 年法国工程师达西 (Darcy H) 在研究砂土透水性的基础上,提出了著名的达西定律。1857 年英国朗肯 (Rankine W J M) 假定挡土墙后土体为均匀的半无限空间体,应用弹塑性理论来解土压力问题。这一土压力理论与库仑土压力理论统称为古典土压力理论。在土体的应力分布与计算方面,1885 年布辛奈斯克 (Boussinesq J) 在研究半无限空间体表面作用有集中力

的情况下,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地基应力计算的基础。以后,很多学者对土力学的专门课题进行了研究,如1916年,由瑞典的彼得森(Petterson K E)首先提出,继而由美国的泰勒(Taylor D W)和瑞典的费伦纽斯(Fellenius W)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问题的分析中。

1920年,法国普朗特(Prandtl L)发表了地基滑动计算的数学公式,至今仍是计算地基承载力的基本公式。此后,太沙基(Terzaghi K)、汉森(Hansen J B)、魏锡克(Vesic A S)、斯开普顿(Skempton)等相应提出了地基极限承载力的计算公式。

1925年太沙基编著了《土力学》,在总结实践经验和大量试验的基础上系统论述了土力学中若干重要问题,提出了著名的土的有效应力原理和固结理论,对土力学的发展做出了突出贡献,也标志土力学真正成为一门独立学科。

3. 现代土力学

20世纪五六十年代,处于对土力学理论和技术的完善和发展阶段。1955年,毕肖普(Bishop A W)提出土坡稳定性计算中考虑竖向条间力的方法,应用有效强度指标计算土坡稳定性。20世纪50年代后期,简布(Janbu N)与摩根斯坦(Morgenstern N R)等人相继提出了考虑条间力、滑动面可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,索科洛夫斯基将古典塑性理论引入了土力学中,在有关地基、土坡和挡土墙的稳定分析方面,都获得了严格的理论和数值解。

电子计算机的问世和应用,使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-应变本构模型(如邓肯-张模型、剑桥模型)的建立,土的微观结构的研究;费莱德伦德(Fredlund D G)以及我国众多学者,对于非饱和土的研究,将土的基本特性、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。

我国在土力学方面研究成果卓著,陈宗基关于土的微观结构的研究、黄文熙教授关于土的硬化模型的研究、南京水利科学研究院建立的土的本构关系模型等都是对岩土工程的贡献。无论是关于土的基本性质的研究,还是原位测试技术,无论是在土力学的理论研究,还是在地基基础工程实践方面,我国都取得了宝贵的经验。特别是近年来,大型工程的兴建,为土力学的应用提供了广阔的天地。

然而,越来越多的人认识到,土力学的实际应用离不开经验;许多实际问题不但不能用经典土力学理论解释,即使现有的非线性和弹塑性本构理论也无能为力;室内土样试验的结果又常常不能反映现场的实际情况,这就迫使人们寻求解决实际土力学问题的新思路、新的测试技术,而计算机技术的迅速发展,为未来土力学的发展提供了强大的支持。

三、土力学的特点及学习方法

土是自然历史的产物,其物理力学性质复杂而多变。在研究土的力学性质时,必须注意土的成因、微观结构和宏观的特征、边界条件及自然环境的变化等。根据不同地区土的特点,合理地选用符合实际的测试手段和试验方法,正确选用有关指标和参数,不断完善理论公式,既重视所运用的基础理论,更要重视工程实践,做到理论和实践结合。

土力学是基于土的基本性质，利用力学、数学知识和土工试验、现场原位测试技术来研究土的应力-应变关系和强度机制，解决工程中土的变形、强度与稳定性问题，是一门偏于计算的理论课程。数学、力学是建立土力学计算理论和方法的重要手段，而测试技术的不断改进和计算机技术的发展，对发展土力学理论尤为重要。因此，在学习土力学课程的过程中，需要结合工程力学、弹性力学等力学知识，掌握土的应力、变形、边坡稳定性、地基承载力、土压力等土力学基本原理和计算方法，并重视新技术、新方法的应用，为工程实践中解决地基基础及岩土工程问题奠定坚实的基础。