



全国高等农业院校教材
全国高等农业院校教学指导委员会审定

土 力 学

谢小妍 主编

中国农业出版社

全国高等农业院校教材
全国高等农业院校教学指导委员会审定

土 力 学

谢小妍 主编

中 国 农 业 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

土力学/谢小妍主编. —北京: 中国农业出版社,
2006. 2

全国高等农业院校教材

ISBN 7-109-09010-8

I. 土... II. 谢... III. 土力学-高等学校-教材
IV. TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 001887 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区农展馆北路 2 号)

(邮政编码 100026)

出版人: 傅玉祥

责任编辑 郑剑玲

中国农业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

2006 年 2 月第 1 版 2006 年 2 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm×960mm 1/16 印张: 15.5

字数: 271 千字

定价: 20.60 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

内 容 简 介

本教材内容包括绪论、土的物理性质及其工程分类、土的渗透性与渗流、土的压缩性和固结理论、土中应力和地基沉降计算、土的抗剪强度、土压力、地基承载力和土坡稳定分析 9 章。本教材的编写具有一定的深度与广度,内容深入浅出,通俗易懂,叙述简洁、思路清晰,注重实用性和教材的特点,重点突出土力学中的概念、基本原理和基本设计方法,根据扩展土木工程专业知识面的原则,结合长期教学和工程设计的经验,根据现行规范编写,根据教材的特点,在每章后列出本章小结、复习思考题和习题。

本书可作为土木工程、农业建筑与环境工程、水利水电工程、港口航道与海岸工程等专业的本科教材,还可以作为其他相近专业的本科教材以及相应专业的成人教育、函授教育教材,也可供土木工程研究、设计、施工和管理的专业技术人员学习参考。

主 编 谢小妍 (华南农业大学)

副 主 编 刘福臣 (山东农业大学)
党进谦 (西北农林科技大学)

编 者 (按编写章节排序)
谢小妍 (华南农业大学)
于林平 (大连水产学院)
党进谦 (西北农林科技大学)
王士杰 (河北农业大学)
刘福臣 (山东农业大学)
上官子昌 (大连水产学院)
黄理军 (湖南农业大学)
李就好 (华南农业大学)
陈 黎 (湖南农业大学)

主 审 廖建三 (广州大学)

前 言

土力学是研究土的力学、工程性质和土体及其相关结构受力变形的一门科学，是土木工程、水利水电工程等专业的一门重要技术基础课。本教材根据全国教材编委会编制的教材教学大纲编写，注重基本概念的阐述和基本原理的工程应用。本书包括了土力学课程的主要内容，即包括土的物理性质及工程分类、土的渗透性与渗流、土的应力计算、土的压缩性与地基沉降计算、土的抗剪强度、地基极限承载力、土压力、土坡稳定分析等内容。

本教材旨在较全面地阐述现代土力学的基本概念、基本理论和设计方法，可作为大土木工程各专业方向，如建筑工程、市政工程、地下工程、道桥工程以及水利工程等专业土力学课程教材，也可供土建、水利专业人员学习参考。通过本课程的学习，读者能了解到土的成因和分类方法，熟悉土的基本物理力学性质，掌握地基沉降、地基承载力、土压力计算方法和土坡稳定分析方法，掌握一般的土工试验方法，达到能应用土力学的基本原理和方法解决实际工程中的稳定、变形和渗流等问题的目的。

本教材编写时注意启发引导，叙述上由浅入深，循序渐进，便于自学。

本教材共九章，由谢小妍任主编，刘福臣、党进谦任副主编。廖建三任主审。第1章由谢小妍编写，第2章由于林平编写，第3章由党进谦编写，第4章由王士杰编写，第5章由刘福臣编写，第6章由上官子昌编写，第7章由黄理军编写，第8章由李就好编写，第9章由陈黎编写。

感谢廖建三院长在百忙中抽时间对本书进行审稿，并提出宝贵意见。

限于编者的水平，我们恳请读者对本书中的缺点及错误提出批评指正。

编 者

2005.11

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 土力学发展概况	1
1.2 土力学课程内容、要求和学习方法	3
1.2.1 土力学课程内容、要求	3
1.2.2 土力学的学习方法	4
第2章 土的物理性质及工程分类	6
2.1 土的成因与结构	6
2.1.1 土的成因	6
2.1.2 土的结构	7
2.2 土的三相组成	8
2.2.1 固体颗粒	8
2.2.2 土中水	12
2.2.3 土中气体	13
2.3 土的物理性质和物理状态指标	14
2.3.1 土的三相图	14
2.3.2 指标的定义	14
2.3.3 指标的换算	17
2.4 土的物理状态	19
2.4.1 无粘性土的密实度	19
2.4.2 粘性土的稠度	22
2.5 土的压实性	25
2.5.1 粘性土的压实性	26
2.5.2 无粘性土的压实性	28
2.6 土的工程分类	28
2.6.1 土的工程分类依据	28

2.6.2 建筑地基基础设计规范 (GB 50007—2002) 分类法	29
本章小结	32
复习思考题	32
习题	33
第3章 土的渗透性与渗流	35
3.1 土的渗透性与达西定律	35
3.1.1 渗流引起的工程问题	36
3.1.2 达西定律	36
3.1.3 达西定律的适用范围	39
3.2 渗透系数及其测定	39
3.2.1 渗透系数的测定	39
3.2.2 影响渗透系数的因素	41
3.2.3 成层土的等效渗透系数	42
3.3 渗透力与渗透破坏	44
3.3.1 渗透力	44
3.3.2 渗透变形	45
3.3.3 渗透破坏的防治	49
3.4 二维渗流、流网及其工程应用	49
3.4.1 二维稳定渗流微分方程	50
3.4.2 流函数和势函数	51
3.4.3 流网的特性及绘制	52
3.4.4 流网的应用	53
本章小结	55
复习思考题	56
习题	56
第4章 土的应力计算	58
4.1 土中应力的基本概念	58
4.1.1 土中应力计算的目的及方法	58
4.1.2 土中应力的种类	58
4.2 土的有效应力原理	59
4.2.1 土中两种应力试验	59
4.2.2 有效应力原理	60

4.2.3 有效应力原理应用举例	61
4.3 土的自重应力	65
4.3.1 竖向自重应力	65
4.3.2 水平自重应力	67
4.3.3 地下水位升降及填土对土中自重应力的影响	68
4.4 基底压力	69
4.4.1 基底压力分布	69
4.4.2 基底压力的简化计算	70
4.4.3 基底附加压力	72
4.5 地基的附加应力	74
4.5.1 竖向集中力下的地基附加应力	75
4.5.2 矩形荷载下的地基附加应力	79
4.5.3 竖向圆形分布荷载下的地基附加应力	88
4.5.4 线荷载和条形荷载下的地基附加应力	89
4.5.5 大面积均布荷载下土中附加应力计算	95
4.5.6 地基的非均质性对土中附加应力的影响	96
本章小结	97
复习思考题	98
习题	98
第5章 土的压缩性与地基沉降计算	101
5.1 土的压缩性	101
5.1.1 基本概念	101
5.1.2 土的侧限压缩试验	102
5.1.3 载荷试验	105
5.2 土的固结状态	108
5.2.1 土的回弹曲线、再压缩曲线	109
5.2.2 土的固结状态	109
5.2.3 先期固结压力 p_c 的确定	110
5.2.4 现场压缩曲线	111
5.3 地基最终沉降量计算	112
5.3.1 分层总和法	113
5.3.2 《建筑地基基础设计规范》推荐沉降计算方法	116
5.4 考虑应力历史的沉降量计算	125

5.4.1 正常固结土	125
5.4.2 超固结土	126
5.4.3 欠固结土	127
5.5 土的一维固结理论和基础沉降随时间变化的计算	128
5.5.1 饱和土的渗透固结	128
5.5.2 饱和土的一维固结理论	129
本章小结	135
复习思考题	136
习题	137
第6章 土的抗剪强度	139
6.1 土的抗剪强度理论和极限平衡条件	139
6.1.1 抗剪强度的库仑公式	139
6.1.2 莫尔-库仑强度理论 (极限平衡条件)	140
6.2 土的抗剪强度指标测定	143
6.2.1 直接剪切试验	143
6.2.2 三轴压缩试验	145
6.2.3 无侧限抗压强度试验	147
6.2.4 十字板剪切试验	148
6.3 有效应力原理在抗剪强度问题中的应用	150
6.3.1 有效抗剪强度指标	150
6.3.2 土体中孔隙压力及孔隙压力系数 A 和 B	150
6.4 饱和粘性土的抗剪强度	153
6.4.1 固结不排水抗剪强度 (CU)	153
6.4.2 不固结不排水抗剪强度 (UU)	155
6.4.3 固结排水抗剪强度	156
6.4.4 抗剪强度指标的选择	158
6.5 无粘性土的抗剪强度	159
6.6 影响抗剪强度指标的因素	160
6.6.1 土的矿物成分、颗粒形状和级配的影响	161
6.6.2 含水量的影响	161
6.6.3 土的原始密度	161
6.6.4 土的天然分层	161
6.7 应力路径	162

6.7.1 应力路径的概念	162
6.7.2 土木工程中的应力路径问题简述	165
本章小结	166
复习思考题	167
习题	168
第7章 土压力	170
7.1 土压力类型以及产生的条件	170
7.1.1 概述	170
7.1.2 土压力的类型	171
7.1.3 静止土压力计算	172
7.2 朗肯土压力理论	172
7.2.1 基本原理	173
7.2.2 主动土压力	174
7.2.3 被动土压力	175
7.3 库伦土压力理论	177
7.3.1 基本假定	177
7.3.2 主动土压力	177
7.3.3 被动土压力	179
7.3.4 粘性土的库伦土压力理论	180
7.3.5 《建筑地基基础设计规范》推荐的公式	180
7.3.6 楔体试算法	181
7.3.7 朗肯理论和库伦理论的比较	183
7.4 几种常见情况的土压力计算	183
7.4.1 填土表面有连续均布荷载	183
7.4.2 填土表面受局部均布荷载	184
7.4.3 分层填土	184
7.4.4 墙后填土有地下水	185
7.5 挡土墙的设计计算	187
7.5.1 挡土墙的类型	187
7.5.2 挡土墙的设计计算	190
本章小结	193
复习思考题	194
习题	194

第8章 地基承载力	196
8.1 概述	196
8.2 地基破坏模式	196
8.3 浅基础的比例界限荷载	198
8.3.1 塑性开展区边界方程	198
8.3.2 比例荷载与临界荷载	200
8.4 浅基础的地基极限承载力	203
8.4.1 普朗德尔承载力理论	203
8.4.2 太沙基承载力理论	206
8.4.3 魏锡克极限承载力公式	208
8.5 地基承载力特征值的确定	211
8.5.1 按地基载荷试验结果确定地基承载力特征值	211
8.5.2 岩基按载荷试验确定地基承载力	212
8.5.3 按《规范》公式确定地基承载力特征值	212
8.5.4 地基承载力特征值的深度与宽度修正	213
本章小结	215
复习思考题	215
习题	215
第9章 土坡的稳定分析	217
9.1 概述	217
9.2 无粘性土坡的稳定分析	218
9.2.1 无渗流的干坡	218
9.2.2 有渗流作用的土坡	219
9.3 粘性土坡的稳定分析	219
9.3.1 圆弧滑动法	220
9.3.2 条分法	222
9.3.3 容许安全系数	230
本章小结	231
复习思考题	231
习题	232
主要参考文献	233

第 1 章 绪 论

1.1 土力学发展概况

土是地壳表层的岩石长期经受物理、化学、生物等风化作用和水流、冰川、风等自然力的剥蚀、搬运及堆积作用而生成的松散堆积物。土与一般建筑材料不同，土是由固体颗粒（固相）、水（液相）和气体（气相）三部分组成，土中的固体颗粒构成土的骨架，骨架之间的孔隙中充填着水和气体，组成土体三相的成分和比例均对土的性质产生影响，土中水可以通过土中的孔隙流动，因而土具有透水性，土颗粒间联结很弱或无联结，在荷载作用下土颗粒会发生相对位移，土中水从孔隙中排出而使孔隙减小，所以土的变形较大，由于土中水从孔隙中排出需要一些时间，所以土的变形需经一定时间方可完成，土的变形除弹性变形外还会产生部分不可恢复的残余变形等。

土力学是研究土的基本物理特性和在荷载作用下的应力、变形、强度、稳定以及渗透等规律的力学特性的一门科学，是用力学原理和土工试验技术研究土的专门性技术科学。任何土木建筑工程都需要与土发生直接关系，如建造房屋建筑物时，土作为建筑物的地基支承上部建筑的全部重量；修筑道路和水利堤坝时，土作为建筑材料而使用；修建运河和地下建筑时，土作为建筑物或构筑物的周围介质存在。为保证土木建筑工程的经济、安全，我们必须研究土在作为建（构）筑物地基、建筑材料和构筑物周围介质时的应力、应变、强度和稳定问题，因此，土力学的建立与发展，始终和工程建设紧密地联系在一起，它来源于工程实践，又服务于工程实践。

人类自远古以来就广泛利用土作为建筑地基和建筑材料。在长期的生产实践中，人类积累了丰富的土的知识和在其上建造建（构）筑物的经验。古代许多伟大的建筑，如我国都江堰水利工程、万里长城、隋朝南北大运河、赵州石拱桥、宏伟的宫殿庙宇和世界上知名的建筑物如比萨斜塔、埃及金字塔等的修建，都很好地体现了人类与土打交道，进行工程建设的丰富实践经验和高超的工程技术水平。但是由于社会生产力和技术条件的限制，直到 18 世纪中叶，人类对土的力学性质的认识还停留在经验积累的感性认识阶段。

按太沙基 (K. Terzaghi) 的说法, 土力学始于 1773 年库仑土压力理论的发表。18 世纪, 随着欧洲工业革命的兴起, 大规模的城市建设和水利、道路、铁路兴建的不断展开, 在工程实践中, 遇到了许多与土有关的土力学问题, 促使人们对土进行研究, 把已积累的经验进行理论解释, 随着这些实际工程问题的解决, 土力学的理论才开始逐渐产生和发展。1773 年, 法国 C. A. Coulomb 提出了著名的砂土抗剪强度公式和挡土墙土压力的滑动楔体理论, 为土力学的发展首开先河; 1856 年法国工程师 H. Darcy 研究了砂土的透水性, 创立了砂土渗透性的达西公式; 1857 年英国的 W. J. M. Rankine 从另一途径提出了挡土墙土压力理论, 对后来土体强度理论的发展产生深刻的影响; 1867 年, 捷克工程师 Winkler 提出了铁轨下任一点的接触压力与该点的沉降成正比的假设; 此外, 法国 J. Boussinesq 于 1885 年提出了均匀的、各向同性的半无限弹性体表面在竖直集中力和线荷载作用下的位移和应力分布的理论解答, 这些解答至今还是土力学研究土体受力和变形的重要基础理论; 1920 年, Prandtl 根据塑性平衡理论, 研究了坚硬物体压入较软的、均匀的、各向同性材料的过程, 导出了著名的极限承载力公式; 瑞典的 Fellenius 为解决铁路坍方问题, 于 1922 年提出了土坡稳定分析方法。上述这些古典理论对土力学的发展起了极大的推进作用, 至今仍不失其理论和实用价值, 虽然这一阶段人类在已往实践经验的基础上, 从不同角度对土力学做了探索, 在理论上有了突破, 但当时的理论和规律还是零散的、不系统的, 对土的认识也还仅仅是局部的, 缺乏许多反映土的本质和真实面目的东西, 还不能形成完整的理论, 建立独立的学科, 因此属于土力学的萌芽期。

1925 年, 美国著名科学家、土力学的奠基人 K. Terzaghi 将当时已有的孤立的规律、原理或理论, 按土的特性将它们联系和系统化起来, 系统地论述了若干重要的土力学问题, 提出了著名的有效应力原理, 并且凭借丰富的实践经验和深邃的洞察力发展了土力学原理, 拓宽了土力学领域, 使之成为一门独立的学科, 发表了第一本内容较全面的《土力学》著作。从此, 土力学作为一门独立的学科在世界各地蓬勃发展, 形成了完整的理论体系, 并在工程实践中发挥了重大作用。但是在 20 世纪 60 年代以前, 土力学的发展基本上是以古典弹、塑性理论为基础的“古典土力学”, 即假设土是符合理想弹性体和理想塑性体理论的, 如土中应力和应变一律按弹性体公式计算, 研究地基承载力常采用刚塑体的极限平衡理论等, 实际上, 土的性质很复杂, 不能用一个简单的理论来表达。

20 世纪 60 年代后, 随着认识的不断深化, 人们已越来越不满足于土是理想弹性介质和理想刚性介质这样简单的描述, 同时, 由于现代电子计算机技术

的发展为采用复杂的模型提供了手段,从而使土力学的研究进入一个全新的阶段,即把土在受力以后所表现出来的应力、变形、强度和稳定以及时间因素的影响等特征作为一个整体来研究其本构关系,而高速计算机的出现使得比较复杂的本构关系的研究也成为可能。1963年 Rescoe 发表了著名的剑桥理论(一种土的本构模型理论),第一个全面地考虑了土的压硬性 and 剪胀性的数学模型,作为现代土力学的开端。本构关系的发展和数值分析技术的应用,使得岩土工程的分析能够更加真实地模拟土的特性、边界条件和加荷方式,岩土工作状态预测由定性向定量的方向发展,土的本构关系的研究也对土性的测试技术及其精度提出更高的要求,从而也推动了土工测试技术和取样技术的发展。但是,由于土的复杂性,目前的研究还没有取得统一的认识,通过进一步的研究,一定会对土的应力—应变关系提出更符合土的实际情况的模型,从而摆脱古典弹塑性理论,建立新的土力学理论。

我国对土力学的研究始于1945年黄文熙在中央水利实验处创立的第一个土工试验室,但是,大规模的研究则是在新中国成立后,随着一批海外留学人员回国和20世纪50年代初大批青年参加工作后才开始的。50多年来,各方面都取得了长足的进展,建立了许多有关地基基础专业的研究机构、施工队伍和土工试验室,培养了大量的土力学专业人才,不少学者提出了许多重要成果,为土力学的发展和完善作出积极的贡献。

经过长期的工程实践和大量的科学研究,我国已制定了符合我国工程特点的设计和施工规范,建立起一套较完整的计算理论和设计方法。现行的《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)、《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002)、《建筑地基基础工程施工质量验收规范》(GB 50202—2002)和其他一些相关规范显示了本领域科学研究和工程实践的综合水平,使我国的土力学计算和设计方法更趋完善。

从目前的发展趋势来看,土力学的发展大致可分为以下几个方面:土的微观和细观的研究、非饱和土的研究、非线性科学在岩土工程中的研究应用、新的本构理论的研究、非确定性方法的研究应用、环境方面问题的研究、土的加固与改良技术等。

1.2 土力学课程内容、要求和学习方法

1.2.1 土力学课程内容、要求

土力学课程的内容共为9章,主要包括绪论、土的物理性质及工程分类、

土的渗透性与渗流、土的应力计算、土的压缩性与地基沉降计算、土的抗剪强度、地基极限承载力、土压力、土坡稳定分析等内容。通过本课程的学习,应了解土的成因和分类方法,熟悉土的基本物理力学性质,掌握地基沉降、地基承载力、土压力计算方法和土坡稳定分析方法,掌握一般的土工试验方法,达到能应用土力学的基本原理和方法解决实际工程中的稳定、变形和渗流等问题的目的。

1.2.2 土力学的学习方法

土力学是土木工程、水利水电工程和港口工程等专业的技术基础课程,它与工程地质、水力学、高等数学、材料力学、结构力学、弹性力学等课程密切相关,需要这些课程作为基础。土力学课程的内容既有系统理论分析和推演,也有实践经验的积累和工程实录;而土力学理论中还有许多难于模拟、概括的土的工程特性的问题,需要我们付出更大的努力去寻找解决问题的方法。在学习土力学课程时,需要注意以下几个方面:

①要认真学习土的三相组成概念,注意影响土的力学性质的本质因素是其物理性质,而土的三相性是理解和掌握土的其他物理力学特性的基础。注意土所具有的区别于其他材料的特性,了解土力学是通过什么方法发现以及用什么物理概念或公式去描述土区别于其他材料特性的。

②土力学中引用了许多其他学科的理论,在学习时,应注意土力学所引用的其他学科理论本身的假设和适用范围,分析土力学在利用这些理论解决土的力学问题时又新增了什么假定,以及这些新的假定与实际问题的符合程度如何,从而能够应用这些基本概念和原理搞清楚土力学中的原理、定理和方法的来龙去脉,弄清研究问题的思路。

③在学习土力学的过程中,要善于转变对问题求解的思维方式。土力学问题除试验部分外,多是根据土的基本力学性质,应用数学及力学计算,得出最后使用结果。学习这一部分时应避免陷于单纯的理论推导,而忽略了推导过程中引用的条件和假设,只有这样才能正确地将理论应用于工程实际。在土力学中,许多问题的解答都有必要的简化假定,因而必然带来一定的误差;对同一问题的求解,往往会因为假定不同,因而方法不同、结果不同。同时,运用建立在弹性理论与力学公式上的计算方法,计算出的结论有时会与实际情况有某些出入。用习惯于高等数学求唯一解的思维方式往往不适应解决土的工程问题,要逐渐接受和掌握多种方法求解一个问题、对多种解答做综合评判的思维方式。

④注意综合利用土性知识和土力学理论解决地基实际问题。由于地基土形