

Advanced Rock and Soli Mechanics

高等岩土力学

主 编 李元松

副主编 张电吉 陈清运 张小敏



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

Advanced Rock and Soli Mechanics

高等岩土力学

主 编 李元松

副主编 张电吉 陈清运 张小敏



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

高等岩土力学/李元松主编;张电吉,陈清运,张小敏副主编. —武汉:武汉大学出版社,2013.6

ISBN 978-7-307-10653-6

I. 高… II. ①李… ②张… ③陈… ④张… III. 岩土力学—高等学校—教材 IV. TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 056474 号

责任编辑:胡 艳 责任校对:刘 欣 版式设计:马 佳

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:通山金地印务有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:26 字数:612千字 插页:1

版次:2013年6月第1版 2013年6月第1次印刷

ISBN 978-7-307-10653-6 定价:45.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

岩石力学是研究岩石(体)在外力作用下的应力、变形及其破坏规律等力学特性的学科,该学科是解决岩石工程相关技术问题的理论基础。岩石属于固体,岩石力学应属于固体力学的范畴。一般从宏观意义上讲,把固体看做连续介质。但是,岩体不但有微观的裂隙,而且有层理、片理、节理以至于断层等不连续面。岩体不是连续介质,而且常表现为各向异性或非均质性。岩石中若含水,则它又表现为两相体。从这些方面来看,岩石力学又是固体力学与地质科学的边缘科学。其应用范围涉及土木建筑、水利水电、铁道、公路、地质、采矿、地震、石油、地下工程、海洋工程等与岩石工程相关的众多工程领域。岩石力学经历了从 19 世纪末至 20 世纪初的初期发展阶段、20 世纪初至 30 年代的经验发展阶段、20 世纪 30 年代至 60 年代的经典理论阶段以及 20 世纪 60 年代至今的现代发展阶段。

土力学是研究土体的应力、变形、强度、渗流及长期稳定性的学科。广义的土力学又包括土的生成、组成、物理化学性质及分类在内的土质学。土力学也是一门实用的学科,该学科是土木工程的一个分支,主要研究土的工程性质,解决与土体相关的工程问题。土力学是为建筑工程、水利工程、交通工程、地下工程、地质灾害防治工程等许多专业领域服务的技术基础学科。它诞生于 1925 年,从 20 世纪 60 年代起进入现代发展阶段。该学科发展至今,其内容已相当广泛,但仍未形成成熟而完整的理论体系。

随着各类建筑物日益向更高、更大、更重、更深方向发展,岩土工程问题已不能仅由土力学或岩石力学的基本知识所能解决,必须发展一种带有很强综合性和很强实践性的学科来阐明解决岩土工程问题的基本原则、理论支撑、配套技术和运作规律,从而把建立现代岩土工程学的迫切任务和把高等岩土力学引入土木工程专业研究生学位课程提上了议事日程。以往高等土力学与高等岩石力学作为独立的课程开设,各相关专业根据行业特点有所侧重,有的开设高等土力学,有的开设高等岩石力学,有的则两门课程均开设。随着大土木概念逐渐深入人心,工程建设规模日益扩大,对岩土工程技术人员的要求逐渐提高,单纯掌握土力学或岩石力学的知识,已不能适应现代工程建设的需求。然而增加学时,分别开设两门课程又与研究生阶段理论课程精简的指导原则相悖。武汉工程大学于 2003 年率先开设高等岩土力学课程,但一直没有完整的配套教材,给备课与课堂教学带来诸多不便。

有鉴于此,作者总结近 10 年的研究生教学经验,尝试将土力学与岩石力学的主要内容融合为一体,编成《高等岩土力学》,其基本思路是:将岩石力学与土力学中基本概念、基础理论、基本方法与基本知识相同的部分归并在一起,比如:将岩土的物理性质、变形特性、强度特性、渗流特性、强度理论、本构关系、数值计算方法等基本相同的内容归并在一起阐述;将岩体、土体具有鲜明特点的内容单独列出,如地基的沉降固结理论、岩体结构面特征、岩石地下工程等内容分别阐释。使高等岩土力学成为既融合了土力学与岩石力学基本概念、基

本理论,同时又能保留岩、土各自特点的一门综合性教程,以适应现代工程建设的需求。

本书旨在对高等岩土力学进行系统融合与阐释。所谓高等岩土力学,是相对于初等岩土力学而言的,初等岩土力学主要包含经典岩土力学的基本部分,可用于解决岩土工程中的一些基本问题,解决问题所采用的理论和方法限于四大经典力学。高等岩土力学的理论与方法会更加全面、系统和深刻,尤其包括初等岩土力学所不能容纳的岩土弹塑性理论、岩土流变学、岩土动力学、可靠性分析理论以及岩土工程数值计算方法等复杂内容。显然,为了保持学科理论体系的完整性和系统性,在《高等岩土力学》中部分重复初等岩土力学的内容是必要的。

岩土力学是为建筑工程、水利工程、交通工程、地下工程、地质灾害防治工程等许多专业领域服务的技术基础学科。众所周知,在不同的领域中,岩土力学理论的应用可能有明显的差别,而且与岩土力学有关的专业技术标准很多,我国技术标准的稳定性又较差,将理论与应用兼顾起来是有困难的。《高等岩土力学》作为教材,应具有相对的稳定性和通用性,并反映带有共性的基本原理和方法。本书重点阐述基本概念、理论和方法;传递研究与设计中的重要信息;反映国内外最新学术成就,并指出仍需进一步深入研究的问题与方法。

教材建设目标:在“重基础,淡专业,宽口径,大土木”原则的指导下,将高等岩石力学与高等土力学的基本概念、基础理论、基本原理和研究方法统一于一体,达到既具有相对稳定的理论框架体系,又能包容本学科最新取得的研究成果;既具有一定的理论水平,又具有较强实用价值,适用于土木工程硕士研究生及高年级本科生使用的基础性教材。

土力学与岩石力学的基础理论框架体系完全相同,研究方法手段也相近,但因长期以来部门割据、行业保护,各自领域按行业特点制定标准、规范,编写教材,使得专业人员知识面狭窄、适应性差。《高等岩土力学》致力于打破传统领域界限,将岩石力学与土力学的基本概念、基本原理、基础理论以及基本符号统一整合,通过一段时间的应用、推广与修改完善,形成完整通用的岩土力学基础理论体系,进而推动我国现行岩土工程规范、标准的统一,从而大大节约工程建设成本。事实上,欧洲规范的统一制定,早已体现这一发展思路。

本书是在武汉工程大学研究生处、教务处关于大学生、研究生教育发展基金项目的资助下完成的,在本书的编写过程中,研究生段鑫和夏进完成了部分文字的输入和图表编辑及校对工作,同时得到土木工程学科和矿业工程学科师生的大力支持,在此一并表示感谢。

鉴于编者水平的局限和编写时间仓促,书中错误与不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。作者联系 E-mail:li_yuan_song@126.com。

作 者

2012 年 12 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 岩土力学的概念、特点及研究方法	1
1.2 岩土力学的研究内容与工程问题	4
1.2.1 岩土力学研究的内容	4
1.2.2 岩土力学研究的工程问题	7
1.3 岩土力学的发展与展望	8
第 2 章 岩土的基本力学特性	16
2.1 基本试验资料	16
2.1.1 直剪试验	17
2.1.2 固结试验	17
2.1.3 常规三轴试验	18
2.1.4 真三轴试验	20
2.2 土的变形特性	20
2.2.1 基本变形特性	21
2.2.2 一般变形特性	21
2.2.3 土的变形机制	23
2.3 土的强度特性	24
2.3.1 土的破坏与强度	24
2.3.2 抗剪强度公式	25
2.3.3 黏性土的强度	26
2.3.4 粗粒土的强度	29
2.3.5 强度影响因素	31
2.4 岩石的基本力学性质	33
2.4.1 岩石的强度	33
2.4.2 岩石的变形	41
2.5 岩体的基本力学性质	50
2.5.1 岩体结构面力学特征	50
2.5.2 岩体的变形	61
2.5.3 岩体的强度	71

第3章 岩土渗透性及渗流	84
3.1 概述	84
3.2 岩土的渗透性	85
3.2.1 渗流基本概念	85
3.2.2 渗透定律	86
3.2.3 渗透试验与渗透系数	88
3.3 渗流基本方程	93
3.3.1 基本方程	93
3.3.2 边界条件	94
3.3.3 初始条件	95
3.3.4 基本方程的应用	95
3.4 势流与流网	96
3.4.1 势流与势函数	97
3.4.2 等势线	97
3.4.3 流线	98
3.4.4 流网	98
3.5 渗流有限元计算	99
3.5.1 水头变分方程	100
3.5.2 变分方程的离散	100
3.5.3 浸润面边界的处理	101
3.6 渗透破坏与控制	102
3.6.1 渗流力	102
3.6.2 流砂或流土现象	103
3.6.3 管涌现象和潜蚀作用	104
第4章 岩土强度理论	106
4.1 强度条件的形式	106
4.1.1 第一种形式	106
4.1.2 第二种形式	107
4.1.3 第三种形式	107
4.1.4 破坏曲线	109
4.1.5 岩土类材料的屈服与破坏特性	110
4.2 经典强度理论	110
4.2.1 Coulomb-Mohr 屈服准则	110
4.2.2 Tresca 准则	112
4.2.3 Mises 准则与 Drucker-Prager 准则	114
4.2.4 Lade-Duncan 准则及 Lade 准则	118
4.2.5 格里菲斯(Griffith)理论	123

4.2.6 霍克(Hoek)-布朗(Brown)经验准则	125
4.3 统一强度理论	127
4.3.1 经典强度理论简评	127
4.3.2 二参数强度理论	127
4.3.3 三参数强度理论	128
4.3.4 关于统一强度理论	129
第5章 岩土黏弹塑性理论框架	131
5.1 线弹性理论	131
5.1.1 横观同性介质	131
5.1.2 各向同性介质	132
5.1.3 弹性常数的物理意义与测定	134
5.2 弹塑性理论	136
5.2.1 全量理论与增量理论	136
5.2.2 加载条件与加卸载准则	137
5.2.3 Drucker 公设和 Ильюшин 公设	140
5.2.4 塑性位势流动理论	146
5.2.5 硬化模型与硬化定律	148
5.2.6 弹塑性本构关系及其矩阵	151
5.3 岩土流变理论	157
5.3.1 岩土流变的概念	157
5.3.2 流变模型理论	158
5.3.3 长期强度	175
5.4 滑移线场理论	177
5.4.1 基本方程	178
5.4.2 滑移线场	179
5.4.3 边值问题	181
5.4.4 解析解答	182
5.4.5 数值解答	185
5.5 极限分析理论	186
5.5.1 静力许可应力场	186
5.5.2 运动许可速度场	186
5.5.3 虚功率原理	187
5.5.4 极限分析定理	188
5.5.5 近似解法举例	189
第6章 岩土体变形计算	194
6.1 岩土变形分析方法	194

6.1.1	岩土变形机制	194
6.1.2	变形分析方法	195
6.2	弹性力学公式	196
6.2.1	Boussinesq 公式	196
6.2.2	Cerutti 公式	199
6.2.3	Mindlin 公式	200
6.3	基础最终沉降计算	201
6.3.1	地基应力计算	201
6.3.2	普通分层总和法	202
6.3.3	修正分层总和法	203
6.3.4	应力历史法	204
6.3.5	Skempton-Bjerrum 法	207
6.3.6	有关问题讨论	208
6.4	一维固结计算	209
6.4.1	一维固结方程	209
6.4.2	一维固结计算	211
6.4.3	有关问题讨论	212
6.5	准多维固结计算	213
6.5.1	体积应变与应力	213
6.5.2	非耦合固结方程	213
6.5.3	假设的合理性	214
6.5.4	砂井固结计算	214
6.6	三维固结计算	218
6.6.1	问题的基本方程	218
6.6.2	Biot 方程的推导	219
第7章	岩土的动力特性	221
7.1	岩土中的弹性波理论	221
7.1.1	波在介质中的传播	221
7.1.2	波动方程	221
7.1.3	平面波	222
7.1.4	等直杆中纵波的基本理论	224
7.1.5	岩土中的弹性波	228
7.2	岩土的动力特性	229
7.2.1	动力问题与动荷载	229
7.2.2	岩土动力参数	232
7.2.3	岩土的动力变形特性	236
7.2.4	岩土的动力强度特性	237

7.3 土的振动液化	239
7.3.1 土的振动液化机理及试验分析	239
7.3.2 影响土液化的主要因素	242
7.3.3 地基液化判别与防治	244
第8章 岩土工程问题	249
8.1 挡墙岩土压力	249
8.1.1 Rankine 土压力理论	249
8.1.2 Coulomb 土压力理论	251
8.1.3 有关问题说明	259
8.2 岩土地基工程	260
8.2.1 概述	260
8.2.2 地基临界荷载	262
8.2.3 无重介质承载力公式	265
8.2.4 Terzaghi 承载力公式	266
8.2.5 Meyerhoff 承载力公式	268
8.2.6 岩基承载力	269
8.2.7 有关问题说明	271
8.3 岩土边坡工程	273
8.3.1 概述	273
8.3.2 稳定分析理论	275
8.3.3 Fellenius 条分法	276
8.3.4 Bishop 条分法	277
8.3.5 Janbu 条分法	278
8.3.6 Morgenstern-Price 条分法	279
8.3.7 有关问题说明	281
8.4 岩土地下工程	284
8.4.1 概述	284
8.4.2 地下工程围岩应力	285
8.4.3 围岩压力与控制	293
8.5 深部岩体力学问题	303
8.5.1 深部岩体的特点	303
8.5.2 深部岩体工程力学特性	304
8.5.3 深部岩体工程施工设计特点	305
第9章 岩土力学数值分析方法	306
9.1 概述	306
9.1.1 岩土工程问题的基本特点	306

9.1.2 岩土工程数值分析方法的类型	307
9.2 有限元法	308
9.2.1 有限元法的基本方程	309
9.2.2 初始地应力与等效节点力	313
9.2.3 施工过程的模拟	317
9.2.4 岩体力学中的有限元法特点	319
9.2.5 有限元法求解岩土力学问题的步骤及实例	324
9.3 边界元法	328
9.3.1 直接边界元法基本方程	328
9.3.2 间接边界元法基本方程	331
9.3.3 边界元法求解平面问题的步骤	334
9.4 有限差分法	337
9.4.1 有限差分基本方程	338
9.4.2 平面问题有限差分方程	339
9.4.3 显式有限差分算法——时间递步法	341
9.4.4 三维问题有限差分法方程	344
9.5 离散元法	347
9.5.1 离散元法的基本方程	347
9.5.2 离散元法的计算机实施	349
9.5.3 参数的选择和本构模型	353
9.6 应用岩土数值分析方法应注意的问题	361
第10章 岩土力学的最新进展	363
10.1 智能岩土力学	363
10.1.1 专家系统及应用	364
10.1.2 人工神经网络及应用	366
10.1.3 其他研究	368
10.2 细观岩土力学	369
10.2.1 光学显微镜观测方法	370
10.2.2 电子显微镜观测方法	370
10.2.3 声发射方法	370
10.2.4 计算机断层成像观测方法	371
10.3 不确定性岩土力学	371
10.3.1 模糊数学分析方法	371
10.3.2 灰色系统分析方法	372
10.3.3 岩石的可靠性分析	374
10.4 其他方法	382
10.4.1 岩石损伤力学研究	382

10.4.2 分形岩土力学研究	386
10.4.3 岩土力学耦合分析	391
10.5 岩土力学系统	395
10.5.1 概述	395
10.5.2 岩土力学系统的基本问题	396
10.5.3 岩土力学系统演化过程	398
10.5.4 岩土力学系统演化过程和演化规律研究的发展趋势	400
参考文献	401

第1章 绪 论

1.1 岩土力学的概念、特点及研究方法

岩石力学(Rock Mechanics)是研究岩石或岩体在外力作用下的应力、变形及其破坏规律等力学特性的学科,该学科是解决与岩石工程相关技术问题的理论基础。岩石属于固体,岩石力学应属于固体力学的范畴。一般,从宏观意义上把固体看做连续介质,但是岩体不但有微观裂隙,而且有层理、片理、节理以至于断层等不连续面。岩体不是连续介质,而且常表现为各向异性或非均质性。岩石中若含水,它又表现为两相体。从这些方面来看,岩石力学又是固体力学与地质科学的边缘科学。其应用范围涉及采矿、土木建筑、水利水电、铁道、公路、地质、地震、石油、地下工程、海洋工程等与岩石工程相关的众多工程领域。

土力学(Soil Mechanics)是研究土体的应力、变形、强度、渗流及长期稳定性的学科。广义的土力学又包括土的成因、组成、物理化学性质及分类在内的土质学。土力学也是一门实用的学科,它是土木工程的一个分支,主要研究土的工程性质,解决与土体相关的工程问题。

从上述两门学科的定义可以看出,其内容与方法以及研究目标与应用范围非常相似或相互交融,其主要差异仅体现在“岩石”与“土体”的材料特性,如果忽略这种差异,则两者基本相同,因而可合并成为一门统一的学科——岩土力学。

岩土力学(Rock and Soil Mechanics)是研究岩土体在外力作用下的应力、变形及其破坏规律等力学特性的一门学科,其目的是解决岩土工程相关的技术问题。

岩石(Rock)是组成地壳的基本物质,它是由矿物或岩屑在地质作用下按一定规律凝聚而成的自然地质体。按成因,可分为岩浆岩、沉积岩和变质岩。

岩体(Rockmass)是指一定工程范围内的自然地质体,它经历漫长的自然历史过程,经受各种地质作用,并在地应力长期作用下,其内部保留各种永久变形和各种地质构造形迹,如不整合、褶皱、断层、层理、节理、劈理等不连续面。岩石与岩体的重要区别就是岩体包含若干不连续面。

岩体结构(Rockmass Structure)是指岩体中结构面与结构体的排列组合特征。因此,岩体结构包括两个基本要素,即结构面和结构体。通常所谓结构面,是指岩体内具有一定方向、延展较大、厚度较小的面状地质界面,包括物质的分界面和不连续面,它是在地质发展历史中、尤其是地质构造变形过程中形成的。被结构面分割而形成的岩块,四周均被结构面所包围,这种由不同产状的结构面组合切割而形成的单元体称为结构体。

土中固体颗粒是岩石风化后的碎屑物质,简称土粒。土粒集合体构成土的骨架,土骨架的孔隙中存在液态水和气体。因此,土是由土粒(固相)、土中水(液相)和土中气(气相)所组成的三相物质;当土中孔隙被水充满时,则是由土粒和土中水组成的二相体。土体具有与一般连续固体材料(如钢、木、混凝土及砌体等建筑材料)不同的孔隙特性,它不是刚性的多孔介质,而是大变形的孔隙性物质。在孔隙中,水的流动显示土的透水性(渗透性);土孔隙体积的变化显示土的压缩性、胀缩性;在孔隙中,土粒的错位显示土内摩擦角和黏聚力的抗剪强度特性。土的密度、孔隙率、含水量是影响土力学性质的重要因素。土粒大小悬殊甚大,有大于 60mm 粒径的巨粒粒组,有小于 0.075mm 粒径的细粒粒组,有 0.075 ~ 60mm 粒径的粗粒粒组。

工程用土总的分为一般土和特殊土。广泛分布的一般土又可分为无机土和有机土。原始沉积的无机土大致上可分为碎石类土、砂类土、粉土和黏性土四大类。当土中巨粒、粗粒粒组的含量超过全重 50% 时,属于碎石类土或砂类土;反之,属于粉土或黏性土。碎石类土和砂类土总称为无黏性土,其一般特征是透水性大、无黏性;黏性土的透水性小;而粉土的性质介于砂类土和黏性土之间。特殊土有遇水沉陷的湿陷性土、湿胀干缩的胀缩性土、冻胀性土、红黏土、软土、填土、混合土、盐渍土、污染土、风化岩与残积土等。

岩土力学用力学的基本理论分析岩土中的工程问题,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,对于岩土体来说,仍然很粗糙。首先,所有岩石工程中的“岩石”,是一种天然地质体,或称为岩体,它具有复杂的地质结构和赋存条件,是典型的“不连续介质”;其次,岩体中存在地应力,是由于地质构造和重力作用等形成的内应力。由于岩土工程开挖引起的地应力以变形能的形式释放,正是这种“释放荷载”才是引起岩石工程变形和破坏的作用。因此,岩土力学的研究思路和研究方法与以外荷载作用为特征的材料力学、结构力学等有本质的不同。

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,土粒间孔隙水与气体的比例及形态对土的力学性质和工程性质有很大的影响。因此,除运用一般连续介质力学的基本原理外,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、各向异性的,有一定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。而室内试验中研究原状土,取样扰动或样品的代表性成为研究工作的主要障碍。

此外,岩土力学既是基础理论学科,又具备实践科学的特点。最近的研究表明,无论是岩土体结构,还是其赋存状况、赋存条件,均存在大量的不确定性,岩土力学的理论计算结果只能是精度较差的大致估计,理论与现实的差距只能通过经验估计和判断。因此,必须改变传统的固体力学的确定性研究方法,而从“系统”的概念出发,采用不确定性方法进行岩土

力学的研究。“岩土体”是自然系统,“岩土工程”是人地系统,其行为和功能与施工因素密切相关。

由于岩土力学是一门边缘交叉科学,研究的内容广泛、对象复杂,这就决定了岩土力学研究方法的多样性。根据所采用的研究手段或所依据的基础理论所属学科领域的不同,岩土力学的研究方法可大概归纳为以下四种:

(1)工程地质研究方法:着重于研究与岩土体的力学性质有关的岩土体地质特征,如用岩矿鉴定方法了解岩土体的类型、矿物组成及结构构造特征;用地层学方法、构造地质学方法及工程勘察方法等了解岩土体的成因、空间分布及岩体中各种结构面的发育情况等;用水文地质学方法了解赋存于岩土体中地下水的形成与运移规律等。

(2)科学实验方法:科学实验是岩土力学发展的基础,包括实验岩土力学参数的测定、模型试验、现场原位试验及监测技术、地应力的测定和岩体构造的测定等。试验结果可为岩土变形和稳定性分析计算提供必要的物理力学参数。同时,还可以用某些试验结果(如模拟试验及原位应力、位移、声发射监测结果等)直接评价岩土体的变形和稳定性,以及探讨某些岩土力学理论问题。随着岩土力学的不断发展,其涉及的实验范围也越来越宽,如地质构造的勘测、大地层的力学测定等可为岩土力学提供必要的研究资料。另外,室内岩土微观测定也是岩土力学研究的重要手段。近代发展起来的新实验技术已不断应用于岩土力学领域,如遥感技术、激光散斑和切层扫描技术、三维地震勘测成像和三维地震 CT 成像技术、微震技术等,都已逐渐为岩土工程服务。

(3)数学力学分析方法:数学力学分析是岩土力学研究中的一个重要环节,它是通过建立工程岩土结构的力学模型和利用适当的分析方法,预测工程岩土体在各种力场作用下的变形与稳定性,为岩土工程设计和施工提供定量依据,其中,建立符合实际的力学模型和选择适当的分析方法是数学力学分析的关键。目前常用的力学模型有刚体力学模型、弹性及弹塑性力学模型、流变模型、断裂力学模型、损伤力学模型、渗透网络模型、拓扑模型等。常用的分析方法有:①数值分析方法,包括有限差分法、有限元法、边界元法、离散元法、无界元法、流形元法、不连续变形分析法、块体力学和反演分析法等;②模糊聚类 and 概率分析,包括随机分析、可靠度分析、灵敏度分析、趋势分析、时间序列分析和灰色系统理论等;③模拟分析,包括光弹应力分析、相似材料模型试验、离心模型试验等。在边坡研究中,还普遍采用极限平衡的分析方法。

(4)整体综合分析方法:针对整个工程以系统工程为理论基础,运用多种方法手段进行研究的一种综合分析方法。这是岩土力学与岩土工程研究中极其重要的一套工作方法。由于岩土力学与工程研究中每一环节都是多因素的,且信息量大,因此必须采用多种方法,并考虑多种因素(包括工程的、地质的及施工的因素等)进行综合分析和综合评价。应特别注重理论和经验相结合,才能得出符合实际情况的正确结论。就岩土工程而论,因为在岩土工程问题中,存在工程、地质及施工等多方面的不确定性因素,整体综合分析方法必须以不确定性分析方法为指导。只有采用不确定性研究方法,才能彻底摆脱传统的弹性力学、结构力学的确定性分析方法的影响,从而使研究和分析的结果更符合实际,更可靠和实用。现代非

线性科学理论、信息科学理论、系统科学理论、模糊数学、人工智能、灰色理论和计算机科学技术的发展等为不确定性分析方法奠定了必要的理论基础。

1.2 岩土力学的研究内容与工程问题

1.2.1 岩土力学研究的内容

岩土力学是近代发展起来的一门新兴学科和边缘学科,是一门应用性和实践性很强的应用基础学科,它的应用范围涉及采矿、土木建筑、水利水电、铁道、公路、地质、地震、石油、地下工程、海洋工程等众多的与岩土工程相关的工程领域。一方面,岩土力学是上述工程领域的理论基础;另一方面,正是上述工程领域的实践,促使岩土力学的诞生和发展。岩土力学的主要内容主要有:

1.2.1.1 岩土的工程地质特征

岩土体工程地质特征研究的基本任务是岩土体的成因、应力历史及赋存环境的研究,其主要内容有岩石、岩体、土体的概念,矿物成分及其结构构造,岩土体的工程分类,岩体结构特征,土体颗粒级配,赋存环境对岩土体力学性质和工程性质的影响以及原始地应力等方面的研究。

1.2.1.2 岩土的性质与岩土试验

岩土的性质主要指物理性质和力学性质。岩土力学理论计算是重要的,但获取岩土体力学参数更为重要。在 Terzaghi 之前,人们对岩土性质的了解非常有限,设计堤坝、地基和边坡等岩土工程结构完全是凭经验进行。Terzaghi 作为岩土力学的奠基人,是第一个重视岩土的性质和岩土试验的人。相对于其他材料,要获取可靠的岩土参数困难得多。此外,岩土性状不仅因岩土类别不同而不同,而且随环境因素的变化而变化,所以必须以发展变化的眼光研究岩土的性质。由于岩土的力学性质的复杂性,目前对分析模型的研究和计算参数的确定仍落后于计算技术的发展,这方面的不当所引起的误差通常远大于计算方法本身的误差。

就岩土的力学性质乃至整个岩土力学而言,本构特性是关键。广义地讲,描述材料力学性质的数学表达式均称为本构方程(Constitutive Relation),说明材料力学特性的理论称为本构理论,包括机理的基本假定(Basic Assumption)、本构方程的建立和特性参数规律性的研究,例如,应力与应变之间的关系、破坏状态下应力或应变分量之间的关系(即强度条件)、渗流速度与水力坡降之间的关系(即渗流定律)等,都属于本构方程。在本书中,本构方程仅指反映材料变形性质的数学关系,特别是应力与应变之间的关系。

在试验基础上建构的本构理论是唯象的,即描述材料宏观力学现象。唯象理论的合理性在于所依据的是宏观试验,而所得结论仍然用于宏观实际,也就是以宏观世界作为出发点,建立宏观理论,反过来又用于宏观世界,并由宏观世界来检验其正确性。毫无疑问,通过宏观试验掌握岩土的力学性质是重要的,但仅仅停留在唯象的描述上是不够的。对岩土的基本现象和岩土的性质从内在机制上做出说明非常重要。换句话说,对于岩土的性质,不仅要知其然,还要知其所以然。这就要求必须弄清岩土的成因、组成、结构及外部作用是怎样

影响岩土力学性质的。

为了研究岩土的力学性质,岩土力学试验是必需的,而且试验技术的改进至关重要。人们早已发现,岩土试验成果会因试验方法和技巧的不同而有较大出入,由此引起的计算误差通常比不同计算方法引起的误差更大。因此,有经验的工程师更为重视选择有代表性的试样、选用符合实际的试验方法和提高试验技巧及精度。自岩土力学诞生以来,人们在岩土力学性质试验研究方面付出了异常艰苦的劳动,能够更好地模拟现场条件的新型试验技术不断涌现,例如,除了常规室内试验外,发展了大型高压三轴试验、平面应变试验、高压固结试验、大型直剪试验、应力路径控制三轴试验等。但复杂应力状态下的试验技术仍有待发展。

1.2.1.3 理论研究数值分析

饱和土由固体颗粒、水两种物质组分构成。颗粒形成骨架,水充填于固体颗粒之间的孔隙中。在外力作用下,各组分中产生的应力存在着相互约束关系,各组分的变形也存在相互约束关系。饱和土固液相之间的关系采用有效应力原理描述,而固体颗粒之间的相互作用用连续方程反映。对土体进行力学分析时,可以采用两种基本方法,即有效应力分析法和总应力分析法。前者将土骨架和孔隙水分开考虑,采用土的排水指标,即用有效应力指标进行分析;而后者则将土体视为单质固体,分析方法与普通固体力学没有什么区别。

岩体与完整的岩石材料不同,岩体中除存在相对完整、坚硬的岩石块体外,还存在着节理、层理和断层等各种不连续的地质结构面。岩体在不连续地质界面的切割下,形成一定的岩体结构,并赋存于一定的地质环境(地应力、地下水、地温、地热等)之中。结构面在岩体不同部位的发育程度和分布规律的差异,使岩体工程性质呈现显著的不连续性、非均质性和各向异性。由于岩体被各种地质界面切割,具有不连续性和多裂隙性,因此岩体常常被称为节理岩体、裂隙岩体或不连续岩体。岩体在外力作用下的变形强度特性要比其他材料复杂得多。

从力学角度分析,岩土体被视为连续介质就意味着它服从连续介质力学的普遍规律,即变形和应力都是连续的,且满足平衡微分方程、几何方程、本构方程、变形协调方程、定解条件。此外,根据分析结果,可用材料的强度理论判断其是否破坏。连续介质力学理论及计算方法都已相当成熟,特别是结合有限单元法等数值方法以后,复杂的本构方程、不规则的边界条件、材料的不均匀性及各向异性都已不成问题。但是,岩土力学问题有其特殊性,必须有针对性地发展计算理论与方法。

在现代岩土力学中,数值方法(Numerical Method)、特别是有限单元法获得了广泛应用。事实上,许多复杂的岩土力学问题都不能获得解析解,必须借助现代计算技术。例如,人们对施工过程中岩土体的力学行为越来越关注,而这种过程只能靠数值模拟才能预先了解。采用数值方法分析岩土力学问题是可行的,但其应用尚不成熟。目前还无法做到准确的定量分析,数值结果通常只能定性地应用,但数值计算能使我们了解岩土体哪些部位薄弱,可能出现什么问题,这样的信息在工程决策中具有不可替代的导向作用。在我国土石坝设计规范中,已规定高土石坝要做有限元应力变形计算。经典土力学计算方法简便、直观,这是工程师喜欢的主要原因。若能在较完善分析和丰富经验的基础上做出合理修正,经典计算方法将具有更大的实用价值。在这方面,数值方法可望做出重要贡献。