



新世纪土木工程系列教材

# 岩石力学

黄醒春 主编

陶连金 曹文贵 副主编

2



高等教育出版社

新世纪土木工程系列教材

# 岩石力学

---

黄醒春 主编

陶连金 曹文贵 副主编



高等教育出版社

## 内容提要

本书为新世纪土木工程系列教材之一, 参照最新的专业技术规范编写而成。

本教材共分 8 章, 内容包括: 绪论、岩石的物理力学性质、岩体不连续面的渗流性质、岩体初始应力、地下空间开挖稳定性分析、岩石边坡与基础稳定性分析、岩石力学问题的有限单元法、岩石力学研究的新方法及新领域简介等。

本书可作为高等院校土木工程专业及水利水电工程、采矿工程、地质工程、港口与海岸工程本科生教材以及相关专业工程技术人员自学参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

岩石力学 / 黄醒春主编. —北京: 高等教育出版社,  
2005. 11

ISBN 7-04-017763-3

I. 岩... II. 黄... III. 岩石力学-高等学校-教材 IV. TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 119262 号

策划编辑 赵湘慧 责任编辑 李 澈 封面设计 于 涛 责任绘图 朱 静  
版式设计 王艳红 责任校对 杨雪莲 责任印制 陈伟光

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市西城区德外大街 4 号

邮政编码 100011

总 机 010-58581000

购书热线 010-58581118

免费咨询 800-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

经 销 北京蓝色畅想图书发行有限公司

印 刷 北京奥鑫印刷厂

网上订购 <http://www.landraco.com>

<http://www.landraco.com.cn>

开 本 787×1092 1/16

印 张 19

字 数 460 000

版 次 2005 年 11 月第 1 版

印 次 2005 年 11 月第 1 次印刷

定 价 23.90 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 17763-00

# 教育部高等教育出版社土建类系列教材

## 编辑委员会委员名单

**主任委员：**沈蒲生(湖南大学)

**副主任委员：**(按姓氏笔画排序)

白国良(西安建筑科技大学)

邹超英(哈尔滨工业大学)

周绪红(长安大学)

强士中(西南交通大学)

**委员：**(按姓氏笔画排序)

卫 军 (华中科技大学)

王清湘 (大连理工大学)

江见鲸 (清华大学)

刘 明 (沈阳建筑大学)

张印阁 (东北林业大学)

吴胜兴 (河海大学)

杨和礼 (武汉大学)

周 云 (广州大学)

梁兴文 (西安建筑科技大学)

焦兆平 (广州大学)

霍 达 (北京工业大学)

王 健 (北京建筑工程学院)

叶志明 (上海大学)

关宝树 (西南交通大学)

朱彦鹏 (兰州理工大学)

张家良 (辽宁工学院)

沙爱民 (长安大学)

尚守平 (湖南大学)

赵明华 (湖南大学)

黄醒春 (上海交通大学)

廖红建 (西安交通大学)

## 出版者的话

新世纪土木工程系列教材是我社组织编写出版的“大土木”范畴的专业系列教材。1998年教育部颁布了新修订的《普通高等学校本科专业目录和专业介绍》，新专业目录中土建类土木工程专业覆盖了原来建筑工程和交通土建工程等8个专业。1999年各高校已按新的专业目录招生。开设土木工程专业的各院校把近年来在教育思想与教学观念、教学内容与课程体系、教学方法与教学手段等方面取得的改革成果固化到教学计划和人才培养过程中，设计了从教学思想到教学模式等一系列教学改革方案。大家在教学实践中体会到：专业、课程教学改革必然引起相应的教材改革。我社从1999年开始进行土木工程专业系列教材的策划工作，并于2000年成立了“教育部高等教育出版社土建类系列教材编委会”。

我们编辑出版土木工程系列教材的指导思想是：

1. 紧密结合人才培养模式改革，根据拓宽专业基础、提高综合素质、增强创新能力的要求，调整学生的知识结构。

2. 从各院校调整土建类各专业教学计划出发，加强基础课程到专业课程的有机沟通，用系统的观点和方法建立新的课程体系结构，包括对课程的整合与集成，组织和建设专业核心课程，成套成系列地推出土木工程系列教材。

3. 各门课程教材要具有与本门学科发展相适应的学科水平，以科技进步和社会发展的最新成果充实、更新教材内容，贯彻理论联系实际的原则。

4. 要正确处理继承、借鉴和创新的关系，不能简单地以传统和现代划线，决定取舍，而应根据教学要求进行取舍。继承、借鉴历史和国外的经验，注意研究结合我国的现实情况，择善而从，消化创新。

5. 随着高新技术特别是数字化和网络化技术的发展，在土木工程系列教材建设中，要充分考虑文字教材与音像、电子、网络教材的综合发展，发挥综合媒体在教学中的优势，提高教学效率。在开发研制教学软件的同时，要注意使文字教材与先进的软件接轨，明确不同形式教材之间的关系是相辅相成、相互补充的。

6. 坚持质量第一。图书是特殊的商品，教材是特殊的图书。教材质量的优劣直接影响教学质量和教学秩序，最终影响学校人才培养的质量。教材不仅具有传播知识、服务教育、积累文化的功能，也是沟通作者、编辑、读者的桥梁，一定程度上还代表着国家学术文化或学校教学、科研水平。因此，遴选作者、审订教材、贯彻国家标准和规范等方面需严格把关。

为了实现本套教材的指导思想，我们组建了由有丰富的教学经验、有较高的学术水平和学术

声望的教师组成的编委会,由编委会研究提出土木工程系列教材的选题及其基本内容与编审原则,并推荐作者。

我们出版本系列教材,旨在为新世纪的土木工程专业学生提供一套经过整合优化的比较系统的专业系列教材,以期为我国的土木工程专业教材建设贡献自己的一份力量。

本系列教材第1版出版之后,在教学实践基础上,将组织修订出版第2版、第3版,希望在不断修订过程中更新内容、消除疏漏,更加适应教学需要。

本系列教材的编写大纲和初稿、修订稿都经过了编委会的审阅,以求教材质量更臻完善。如有疏漏之处,请读者批评指正!

高等教育出版社力学土建策划部

2003年1月

# 前 言

岩石力学由其自身介质物理力学性质特点、荷载特点及其开挖引起的动、静力学响应特点构成了其区别于通常意义下的固体力学学科的独特学科体系。其研究内容来源于岩土工程现场实践所提出的一系列问题,这些内容经研究深化,形成理论后回归到生产实践,并指导生产,接受工程实际的检验。

半个多世纪以来,由于隧道工程、水利工程、矿山工程、交通工程以及建筑工程等相关岩土工程实际的需要,随着现代数学、力学、计算机科学及实验实测方法的迅速发展,许多相关学科、边缘学科和交叉学科不断渗透到岩石力学领域,新兴的科学理论如分形几何、分叉、混沌、突变理论、协同论等应用于岩石力学,促进了岩石力学研究领域的不断拓展、理论体系及其内涵的不断丰富与完善,大大推动了岩石力学的发展。

本书在篇章结构上根据学科内容体系的特点,围绕岩石介质的物理力学性质、初始荷载作用特点、开挖扰动及其稳定性等主干内容要求,兼顾工程实用知识及必要的分析理论与方法,力求系统性、完整性、前沿性,引导学生融会贯通、学以致用并为今后从事本学科相关研究奠定基础。读者万勿停留于背诵书中概念、公式,贵在理解和掌握此中的思路、方法并能运用所学内容说明乃至解决实际岩土工程中提出的问题。

上海交通大学黄醒春编写了第一章、第四章,湖南大学曹文贵编写了第二章和第七章,北京工业大学陶连金、长安大学苏生瑞编写了第五章、第六章,上海交通大学杜守继、吴刚分别编写了第三章、第八章,全书由黄醒春统稿。

同济大学朱合华教授审阅了全部书稿,在此表示衷心感谢。

由于我们水平有限,书中不足之处在所难免,欢迎读者同人批评指正。

编 者  
2005 年

# 目 录

第一章 绪论 .....	1	2.8.1 岩石的波动特性 .....	95
1.1 岩石力学的学科特性与研究范畴 .....	2	2.8.2 岩体弹性波速度的测定方法 .....	98
1.2 岩石力学的研究方法 .....	3	2.8.3 影响岩体波动的因素 .....	101
1.3 岩石力学的发展简史 .....	4	2.8.4 岩石动静变形参数的关系 .....	107
第二章 岩石的物理力学性质 .....	7	第三章 岩体不连续面的渗流性质 .....	109
2.1 岩石的物理性质 .....	7	3.1 概述 .....	109
2.1.1 岩石的质量指标 .....	7	3.2 岩体不连续面的渗流基本理论 .....	109
2.1.2 岩石的空隙性 .....	9	3.2.1 不连续面的渗流性质概述 .....	109
2.1.3 岩石的水理性质 .....	9	3.2.2 不连续面的渗流参数的有限差分数值模拟 .....	111
2.2 岩石的强度特性 .....	14	3.3 岩体不连续面应力对渗流性质的影响 .....	113
2.2.1 完整岩石的强度 .....	14	3.3.1 不连续面正应力对渗流参数的影响规律 .....	113
2.2.2 岩石的强度理论 .....	25	3.3.2 不连续面剪切变形对渗流参数的影响规律 .....	114
2.3 岩石的变形特性 .....	32	3.3.3 渗流应力 .....	115
2.3.1 单轴压缩条件下岩块的变形特性 .....	32	第四章 地应力 .....	117
2.3.2 三轴压缩条件下的岩石变形性质 .....	37	4.1 地应力的基本概念 .....	117
2.3.3 岩石的本构关系 .....	39	4.2 地应力的组成成分和影响因素 .....	118
2.4 岩体结构面的力学性质 .....	42	4.2.1 地应力的组成成分 .....	118
2.4.1 结构面的概念 .....	42	4.2.2 地应力的影响因素 .....	118
2.4.2 结构面的分类 .....	43	4.3 地应力的变化规律 .....	119
2.4.3 岩体破碎程度的分类 .....	44	4.4 地应力的原位实测方法 .....	122
2.4.4 结构面的几何特征 .....	47	4.4.1 水压致裂法地应力测量技术 .....	122
2.4.5 结构面的变形特性 .....	47	4.4.2 套钻孔应力解除法地应力测量技术 .....	127
2.5 岩体的力学性质 .....	56	第五章 地下空间开挖稳定性分析 .....	135
2.5.1 岩体的变形性质 .....	57	5.1 概述 .....	135
2.5.2 岩体的强度性质 .....	61	5.2 深埋圆形巷道围岩应力的弹性解 .....	136
2.5.3 岩体力学性质的原位测试 .....	63	5.2.1 静水压力(侧压系数 $\lambda = 1$ )下围岩 .....	
2.6 工程岩体的分类 .....	72		
2.6.1 工程岩体分类的目的和原则 .....	72		
2.6.2 工程岩体的代表性分类简介 .....	73		
2.7 岩石力学性质的时间效应 .....	84		
2.7.1 岩石的流变 .....	84		
2.7.2 岩石的流变模型 .....	87		
2.8 岩石动力学基础 .....	95		



应力 .....	136	7.2.2 单元刚度矩阵 .....	223
5.2.2 不等压(侧压系数 $\lambda \neq 1$ )下围岩		7.2.3 单元等效结点荷载的计算 .....	223
应力 .....	139	7.2.4 结构刚度矩阵和结构结点载荷	
5.3 深埋非圆形巷道围岩应力的弹性解 .....	141	列阵的集成 .....	226
5.3.1 椭圆形巷道 .....	141	7.2.5 引入位移边界条件 .....	229
5.3.2 矩形巷道 .....	142	7.3 岩体结构及支护结构的有限元模拟 .....	231
5.4 群洞围岩弹性应力计算 .....	144	7.3.1 无厚度节理单元 .....	231
5.5 深埋圆形巷道的弹塑性解 .....	146	7.3.2 等厚度节理单元 .....	234
5.6 松散岩体的围岩压力计算 .....	149	7.3.3 层状岩体的模拟 .....	236
5.6.1 浅埋洞室的围岩松动压力计算 .....	150	7.3.4 支护结构的模拟 .....	237
5.6.2 深埋洞室的松散体围岩压力计算 .....	153	7.4 岩体结构开挖与开挖过程的有限元	
5.6.3 塑性松动压力的计算 .....	155	模拟 .....	239
5.7 塑性变形压力的计算 .....	157	7.4.1 岩体结构开挖的有限元模拟 .....	239
5.8 基于刚性块体的分析 .....	158	7.4.2 开挖过程的有限元模拟 .....	240
5.8.1 赤平极射投影简介 .....	159	7.5 岩体结构有限元分析方法 .....	242
5.8.2 巷道围岩可移动块体分析 .....	163	7.5.1 岩体结构弹塑性有限元分析 .....	242
5.9 围岩与支护相互作用分析 .....	166	7.5.2 岩体结构拉伸破坏的无拉力分析 .....	246
5.10 综合法 .....	167	习题与思考题 .....	250
5.11 支护方式和支护结构 .....	168		
5.12 支护结构及支护参数设计 .....	170	<b>第八章 岩石力学研究的新方法及新</b>	
5.12.1 锚杆加固连续岩体 .....	170	<b>领域简介</b> .....	253
5.12.2 锚杆用于非连续岩体的加固 .....	172	8.1 岩石力学分形理论 .....	253
习题与思考题 .....	181	8.1.1 概述 .....	253
<b>第六章 岩石边坡与基础稳定性分析</b> .....	182	8.1.2 分形几何在岩石力学中的应用 .....	255
6.1 边坡稳定性分析 .....	182	8.1.3 结束语 .....	259
6.1.1 边坡应力状态 .....	182	8.2 岩石力学非连续变形分析 .....	260
6.1.2 边坡失稳的基本形式 .....	184	8.2.1 概述 .....	260
6.1.3 边坡稳定性分析方法 .....	190	8.2.2 不连续变形分析方法及其特点 .....	260
6.1.4 边坡变形破坏的防治 .....	204	8.2.3 DDA 程序的发展及其应用现状 .....	261
6.2 地基稳定性分析 .....	206	8.2.4 DDA 理论概要 .....	262
6.2.1 地基岩体内的应力分布特征 .....	207	8.2.5 DDA 计算流程 .....	265
6.2.2 地基失稳的基本形式 .....	210	8.2.6 结束语 .....	267
6.2.3 地基稳定性分析方法 .....	215	8.3 岩石损伤力学 .....	267
习题与思考题 .....	219	8.3.1 损伤及损伤力学 .....	267
<b>第七章 岩石力学问题的有限单元法</b> .....	220	8.3.2 岩石损伤力学的发展历史 .....	268
7.1 概述 .....	220	8.3.3 岩石损伤力学的研究内容 .....	268
7.2 弹性力学有限元基本方程 .....	221	8.3.4 前景与展望 .....	272
7.2.1 利用最小位能原理建立有限元		8.4 扰动状态概念理论 .....	273
方程 .....	221	8.4.1 扰动状态概念 .....	273
		8.4.2 扰动状态概念的基本原理和	
		分析方法 .....	273

---

8.4.3 扰动状态概念的本构方程 .....	278	和内容 .....	283
8.4.4 结束语 .....	280	8.5.4 智能岩石力学的研究现状 .....	284
8.5 智能岩石力学 .....	281	8.5.5 智能岩石力学的未来发展趋势 .....	285
8.5.1 智能岩石力学的由来 .....	281	<b>参考文献</b> .....	286
8.5.2 智能岩石力学及其特征 .....	281		
8.5.3 智能岩石力学的主要研究思路			

# 第一章 绪 论

岩石力学是一门研究岩石在各种不同受力状态下产生变形和破坏规律的学科。

地球的表层称为地壳,其上部最基本的物质是岩石,人类的一切生活 and 生产实践活动都局限在地壳的表层范围内,因而岩石和由岩石派生出来的土构成了人类生存的物质基础以及生活 and 生产实践活动的环境。

岩石是由矿物或岩屑在地质作用下按一定的规律聚集而形成的自然物体。岩石有其自身的矿物成分、结构和构造。岩石的结构是指组成岩石最主要的物质成分、颗粒大小和形状以及相互结合的情况。例如,沉积岩内存在有碎屑结构、泥质结构和生物结构等结构特性。岩石的构造是指其组成成分的空间分布及其相互间的排列关系。例如,沉积岩的层理构造和变质岩中的片理构造等。岩石中的矿物成分和性质、结构、构造等的存在 and 变化,都会对岩石的物理力学性质产生影响。

岩石按其成因可分为三大类:岩浆岩、沉积岩和变质岩。

岩浆岩是岩浆冷凝而形成的岩石。由于组成岩浆岩的各种矿物的化学成分和物理性质较为稳定,它们之间的联结是牢固的,因此岩浆岩通常具有较高的力学强度和均质性。

沉积岩是由母岩(岩浆岩、变质岩和早已形成的沉积岩)在地表经风化剥蚀而产生的物质,通过搬运、沉积和硬结成岩作用而形成的岩石。组成沉积岩的主要物质成分为颗粒和胶结物。颗粒包括各种不同形状及大小的岩屑及某些矿物。胶结物常见的成分为钙质、硅质、铁质以及泥质等。沉积岩的物理力学性质不仅与矿物和岩屑的成分有关,而且与胶结物的性质有很大关系,例如硅质、钙质胶结的沉积岩胶结强度较大,而泥质胶结的沉积岩和一些粘土岩强度就较小。另外,由于沉积环境的影响,沉积岩具有层理构造,这就使得沉积岩沿不同方向表现出不同的力学性状,通常具有层状异性或正交各向异性特性。

变质岩是由岩浆岩、沉积岩乃至变质岩在地壳中受到高温、高压及化学活动性流体的影响下发生变质而形成的岩石。它在矿物成分、结构构造上具有变质过程中所产生的特性,也常常残留有原岩的某些特点。因此,它的物理力学性能不仅与原岩的性质有关,而且与变质作用的性质及变质程度有关。

岩石的物理力学性能的指标是在试验室里用一定规格的试件进行试验而测定的。这种岩石试件是在钻孔中获取的岩芯或是在工程中用爆破以及其他方法所获得的岩块经加工而制成的,用这种方法所采集的标本仅仅是自然地质体中间的岩石小块,称为岩块。因为岩块是不包含有显著弱面的岩石块体,所以通常都把它作为连续介质以及均质体来看待。

除了岩块为主要组成部分外,自然地质还含有各种节理、裂隙、孔隙、孔洞等,这些自然地质

经历了漫长的地质历史过程,经受过各种地质作用。在地应力的长期作用下,在地质体内保留了各种各样的永久变形的现象和地质构造形迹,使地质体内部存在着各种各样的地质界面。例如,不整合、褶皱、断层、层理、片理、劈理和节理等。由此可见,岩体是由岩石块和各种各样的结构面共同组成的综合体。对岩体的强度和稳定性能起作用的不仅是岩块,而是岩块与结构面的综合体,而在大多数情况下,结构面起着支配作用。许多工程实践表明,在某些岩石强度很高的硐室工程、岩基或岩坡工程中,发生大规模的变形破坏,甚至崩塌、滑坡,分析其原因,不是岩石强度不够,而是岩体的整体强度不够,岩体中结构面的存在将大大地削弱岩体整体强度,导致稳定性的降低。

## 1.1 岩石力学的学科特性与研究范畴

由于岩体是一种天然介质,经历过成岩及地质构造运动作用,具有不连续性、各向异性、非均质性等特性,这使得岩石具有比任何人工材料都复杂的力学性质;其次是岩体在人工开挖前由于自重、地质构造运动的反复作用,温度、地表变形位移等作用而具有初始地应力,且这种初始应力场受地质构造控制,随岩体中能量的不断积聚和释放而相应变化,处于动态平衡状态,在进行地下开挖时将引起岩体局部卸载及应力的重新分布,导致开挖空间围岩应力集中及应力状态改变,乃至引起围岩的失稳破坏。

岩石力学的研究范畴和内容包含以下几个方面:

① 岩体的地质力学模型及其特征。研究岩石和岩体的成分、结构、构造、地质特征和分类,这些对岩体的静、动力学特性有影响。

② 岩石与岩体的物理力学性质。这是表征岩石与岩体的力学性能的基础,岩石与岩体的物理力学性质指标是评价岩体工程稳定性最重要的依据。岩石力学的重要研究内容就是为岩石工程稳定性分析提供系统数据,通过室内和现场试验获取各项物理力学性质数据,研究各种试验的方法和技术,静、动荷载下岩石和岩体力学性能的变化规律。

③ 研究岩体起始应力状态以获取地下结构及围岩稳定性分析所必需的外荷载条件。包括各种原岩应力实测理论和方法、地形地貌及不连续面对起始应力分布的影响、工程区域局部原岩应力场的控制方法。

④ 岩体中开挖卸载引起岩体应力状态的重新分布及围岩应力集中的计算理论、计算方法,围岩稳定性的评价、预测以及由此引申出的支护原理,支护方式、方法,支护结构体系的设计计算理论和方法。

⑤ 施工工艺、施工方法、施工过程对岩体工程稳定性的影响及其优化。

总之,岩石力学以其自身介质物理力学性质特点、荷载特点及其开挖引起的动、静力学响应特点构成了其区别于通常意义下的固体力学学科的独特学科体系。其研究内容来自于岩体工程现场实践所提出的一系列问题,这些内容经过研究深化,形成理论后回归到生产实践中,接受检验。

岩石力学在岩体工程上的应用十分重要。硐室围岩、岩基和岩坡等的稳定与安全皆与岩石力学的恰当应用息息相关。过去由于岩体不稳定而失事的例子实属不少。例如,马尔帕塞(Malpasset)拱坝于1959年12月2日由于坝基岩体位移导致整个拱坝倒塌;意大利瓦依昂

(Vajont)水库于1963年10月9日岩坡滑动,在1 min内约有 $2.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 岩石崩入水库内,顿时造成高达150~250 m的水浪,致使下游郎加郎市的城镇遭到毁灭性的破坏。在我国的水工史上也曾发生过许多岩体工程事故,如1963年发生梅山连拱坝坝基(花岗岩)滑动;20世纪70年代葛洲坝水电站江基坑开挖,发生岩层沿软弱夹层随时间而发展的水平位移;1986年6月湖北省盐池磷矿发生灾难性的大崩塌,高160 m的体积约 $1.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的山体岩石突然崩落,将4层楼房抛至对岸撞碎,造成重大人员伤亡;1981年4月甘肃舟曲县东南5 km白龙江泄流发生重大滑坡,滑动土石方约达 $4.0 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,堵塞了白龙江,形成回水长约4.5 km的水库,严重威胁上下游的安全;四川云阳县城东发生的鸡扒子滑坡,滑坡体达 $1.5 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,前缘约 $1.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ 土石方推入长江之中,使长约600余米的江段水位普遍提高20~25 m,构成了对长江航运安全的严重威胁。从上述事例可认识到,为了选择相对优良的工程场址,防止重大岩体工程事故,保证顺利施工,必须对建筑场地进行系统的岩体力学试验及理论研究和分析,预测岩体的强度、变形和稳定性,为工程设计提供可靠的数据和相关材料。

岩石力学在岩体工程中的应用主要有以下几个方面:

① 地下硐室围岩的稳定性研究。包括地下开挖引起的应力重分布、围岩变形、围岩压力以及围岩加固等理论和技术。

② 岩基的稳定性研究。包括在自然力和工程力作用下岩基中的应力、变形、承载力和稳定性的理论与技术。

③ 岩坡的稳定性研究。包括天然斜坡与人工边坡的稳定性,岩坡的应力分布、变形和破坏,岩坡的失稳等理论和技术。

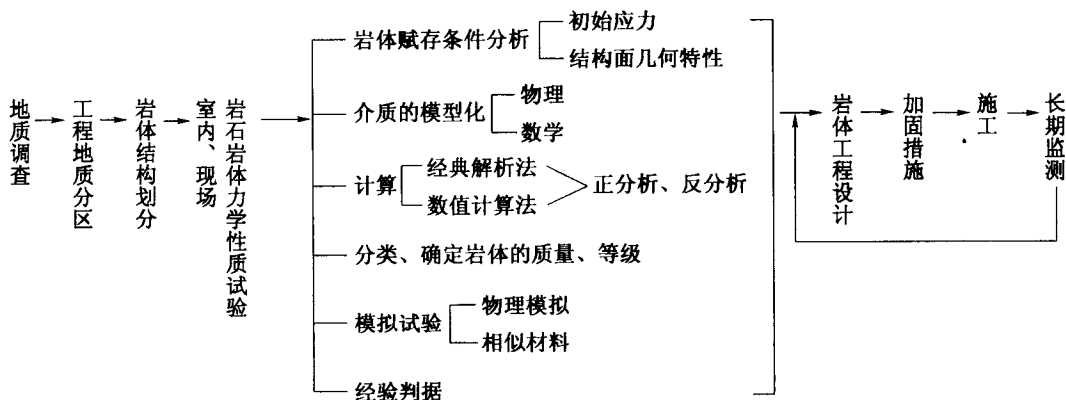
## 1.2 岩石力学的研究方法

科学实验是岩石力学研究工作的基础。岩石力学工作的第一步就是对现场的地质条件和工程环境进行调查分析,建立地质力学模型,进而开展室内外的物理力学性质试验、模型试验或原型试验,作为建立岩石力学的概念、模型和分析理论的基础。

由于岩石具有结构面和结构体的特点,所以进行岩石力学的研究,还要建立岩石的力学模型,以便采用不同的力学理论,如连续介质或非连续介质理论、松散介质或紧密固体理论。在此基础上,按地质和工程环境的特点分别采用弹性理论、塑性理论、流变理论以及断裂或损伤力学理论进行计算分析。目前,尚有许多岩石力学的问题,应用现有的理论、知识,仍然不能得到完善的解答。因此,紧密结合工程实际、重视实践中得来的经验并将其发展上升为理论或充实理论,这是岩石力学理论和技术发展的基本方法。

现代计算技术的迅速发展,计算机已经广泛地应用于岩石力学的计算中,这不仅为岩石力学问题的分析解决了复杂的计算,而且为岩石力学的数值计算方法提供了有效的计算手段。目前,力学范畴的数值方法,如有限元、离散元、边界元等方法,已经在岩石力学中得到了普遍的应用。

为了有效地获取各项数据,岩石力学研究工作的步骤可以表示如下:



以上所示的内容和步骤视岩石特点和工程需求,可作调整。

### 1.3 岩石力学的发展简史

一门学科的诞生和发展都与当时的社会状况、经济发展和工业建设等有关。人类早就与岩石有密切关系。原始人曾利用岩石造成简陋的工具和兵器。人类进化后,又进行挖洞采矿石,利用岩石作为建筑材料,建房屋、水坝、防御工事等。可见,人类与岩石打交道由来已久。但是,将岩石或岩体力学作为一门技术学科并持续地发展起来则是在 20 世纪中期以后的事。

20 世纪初期,在国外,研究自然地质材料的科学已兴起,土力学已受到工程部门所重视。1925 年,太沙基的《建筑土力学》一书,是第一本土力学专著。以后,由于岩体工程的增多,单凭借土力学原理和技术来解决岩体工程问题已不很适用,特别是在第二次世界大战后世界各国在大量兴建各种岩体工程,促进了岩石力学的研究,并使其逐渐发展成一门独立学科——岩石力学。这门学科从 20 世纪 50 年代以来的发展过程中,出现了以地质学为观点的岩石力学学派和以工程为观点的工程岩石力学学派。

以地质学为观点的岩石力学派称奥地利学派,又称萨尔茨堡学派。这个学派是由缪勒 (Miiller L) 和斯体尼 (Stini J) 所开创的。此学派偏重于地质力学方面,主张岩石块与岩体要严格区分,岩体的变形不是岩石块本身的变形,而是岩石块移动导致岩体的变形;否认小岩块试件的力学试验,主张通过现场(原位)力学测定,才能有效地获取岩体力学的真实性质。这个学派创立了新奥地利隧道掘进法(新奥法),为地下工程作了一项重大的技术革新,促进了岩石力学的实用发展。

工程岩石力学派以法国塔洛布尔 (Talober J) 为代表,该学派以工程观点研究岩石力学,偏重于岩石的工程特性方面,注重于弹塑性理论方面的研究,将岩体的不均匀性概化为均质的连续介质,小岩块试件的力学试验与原位力学测试并举。塔洛布尔 1951 年著的《岩石力学》一书是该学派最早的代表著作。尔后,英国的耶格 (Jaeger J C) 于 1969 年按此观点又著有《岩石力学基础》一书,这是一本在国际上较为著名的著作。

1959 年法国马尔帕塞拱坝坝基失事和 1963 年意大利瓦依昂水库岩坡滑动,震动了世界各国岩石力学研究者,因此成立了“国际岩石力学学会”,并于 1966 年在里斯本召开了第一次国际岩石力学大会。从此,每四年召开一次会议,并出版相应的刊物,对促进岩石力学的发展起到了很

大作用。

在我国,岩石力学作为一门专门学科起步较晚,尽管我们的祖先曾创建过震动全世界的工程建设,如岷山都江堰、自贡深达数百米的盐井、万里长城等。但是,由于我国长期的经济和工业的落后,束缚了生产力的发展,也限制了岩体工程的发展。在新中国成立后,随着社会主义建设事业的发展,大规模的厂矿、交通、国防、水利等基本建设的兴起,对岩石力学的发展起到了重大的推动作用。回顾我国岩石力学的发展,大体上可划分为三个阶段:第一阶段,20世纪50年代至60年代中期,这一时期,我国也建设了一些中、小型的岩体工程,也进行了与其相适应的岩石力学试验研究工作,但这时期的理论和试验研究与国外相似,是运用材料力学、土力学、弹塑性理论等作为基础来开展的。1958年三峡岩基组的成立,开始了岩石力学研究的系统规划和实施。这一时期是我国岩石力学发展的萌芽阶段。第二阶段,20世纪60年代中期至70年代中期,由于大部分工程停建和缓建,使岩石力学发展非常缓慢,成为我国自解放以来岩石力学发展的低谷。第三阶段,20世纪70年代后期至今,在各项大规模工程的兴建中,提出了许多岩石力学的新课题,岩石力学研究进入了一个全面的蓬勃发展的新阶段。我国岩石力学工作者结合重大工程,为提高岩石力学的理论水平和测试技术,开展了大规模的室内和原位测试研究工作,总结了一系列成功的经验与失败的教训。不仅成功地解决了像葛洲坝和三峡坝区、湖北的大冶和江西的德兴露天矿场、秦山核电站岩基与高边坡以及上德长隧道工程等一系列岩体工程问题,而且在岩石力学理论研究方面(如岩体结构、岩石流变、岩坡和围岩稳定性、岩石的损伤破坏机理研究等)皆有重大的成就,这些成就在国际上占有重要的地位。

自1978年以来,我国陆续成立了分属各有关学会的岩石力学专业机构,如中国水利学会岩土力学专业委员会、中国力学学会岩土力学专业委员会、中国煤炭学会岩石力学与支护专业委员会等。其中,水利水电岩土力学情报网办起了《岩石力学》的专业期刊。1985年在我国正式成立中国岩石力学与工程学会,办起了《岩石力学与工程学报》、《岩土工程学报》等。自20世纪70年代末期,国内许多高校相继出版了《岩石力学》或《岩体力学》教材。以上所述的工作和成就,对推动我国岩石力学学科的发展和学术水平的提高起到了积极的作用。

近年来,随着现代数学、力学和计算机科学的迅速发展以及岩土工程实践的需要,许多学科已渗透到岩石力学领域,新兴的科学理论如分形几何、分叉、混沌、突变理论、协同论等应用于岩石力学,并不断开创出新的研究领域,大大推动了岩石力学的发展。

首先,分形-岩石力学作为一种定义在分形度量空间的岩石力学理论,于20世纪70~80年代被应用于自然分形效应的岩石介质变形破坏规律研究中。在理论上将岩石微观、细观、宏观理论研究统一在新的理论体系之中,为解决岩石力学理论与工程实践中的难题创出新路。目前,分形-岩石力学的研究已进入第二个层次,即对岩石分形的物理机制和演化规律的研究。研究者将分形理论与岩石损伤和断裂力学有机结合,从刻画岩石材料细观结构入手,在微观、细观、宏观不同层次上揭示岩石和岩体的力学机理、行为和演化过程。在应用分形维数反映岩石损伤演化程度;考虑分形效应对岩石动态断裂的影响;用分形几何描述岩石节理与断裂表面形态、断层分布以及力学行为;岩土分形孔隙网络、分形矿尘粒子形状、分布和流动规律;根据矿震的分维变化预测冲击地压和岩爆;岩石破碎的块度分布与岩体强度和稳定性分析等方面进行了广泛深入的研究。与此同时,分形数学也在不断发展和完善,在分形空间有关力学量的定义和力学定律的普适性问题仍在探讨之中。

其次,考虑到岩体是非连续介质,通常存在各种类型的地质结构面,在力学性质上呈现出非连续性和非线性。岩石力学研究者研究和发展离散介质数值模拟方法来解决实际的工程问题。其中,如何建立描述具有非连续性的岩体结构力学行为的数值模型已成为岩石力学领域的研究热点。自1968年Goodman首次提出在数值分析中考虑岩体的节理单元以来,岩体不连续性研究日益受到重视,并取得了很大进展,现已广泛应用到岩体工程中。岩体不连续变形分析(discontinuous deformation analysis,简称DDA法)是由我国旅美学者石根华博士提出用于解决不连续块体系统运动和变形的一种新型数值方法,它与Cundall P A提出的离散元法(DEM)以及日本学者Kawai提出的刚体—弹簧法(RBSM)统称为分析、研究块体系统运动和变形的三大方法。

1976年,Dougill首先进行了岩石类材料损伤力学研究。Dragon和Morz在1979年应用损伤概念提出了能反映应变软化的岩石与混凝土的弹塑性本构关系,认为塑性膨胀率与损伤直接相关,并建立了相应连续介质损伤力学模型,Mazars等人于1983年将此模型应用于混凝土的损伤,使混凝土的力学模型更符合实际。随后,Krajcinovic,Kavchanaov,Costin等分别从不同的角度将损伤力学应用于岩石材料,同时从岩石本身的组构特征出发,探讨其损伤的机理,建立相应的模型和理论。Lemaitre于1985年采用等效应变概念提出一个应力应变关系,并且认为只需将常规本构关系中的应力用有效应力替换,这个本构关系就能描述其应变性能。日本学者Kyoya于1985年和Kawamoto于1988年分别将损伤力学理论引入节理岩体的研究中,用一个二阶对称张量代表岩体中节理裂隙的几何特征。1987年,Frantziskonis和Desai提出岩石损伤模型并应用于岩石软化的分析。把岩石看作具有初始损伤,Kawamoto等于1988年提出了描述节理的二阶损伤张量。Vallippan于1990年则研究了岩石的横观各向异性损伤问题。随后几年中,关于有序分布微裂纹、接触裂纹表面摩擦裂纹群稳定性、加载导致各向异性和脆性损伤表征的研究工作不断取得突破,物体中的损伤随着变形而发展并最终导致破坏的过程和规律亦取得进展。以动力学为基础进行的损伤研究最早见Hongliang和Ahrens在实验室通过对冲击荷载作用下岩石的损伤研究,提出用P波波速来定义损伤变量。损伤力学近10年的发展已取得很多成果,它由脆性岩石研究进入延性、塑性损伤的研究,且已在岩石动态损伤力学的研究领域引起人们的瞩目。近几年来,相似分形、人工神经网络、人工智能以及计算机已广泛应用于损伤力学分析,取得了很大成就,并且在矿山开采沉陷、地下洞室、岩爆、岩体稳定及滑坡等节理岩体工程问题中得到应用,为上述问题的研究开辟了新途径。经过力学界,岩石力学与工程界诸多学者的不懈努力,岩石损伤力学作为一个新的分支学科已初具雏形,这一领域的研究也已形成良好的势头。

1974年,美国著名学者Desai教授首次提出扰动状态概念(Disturbed State Concept, DSC),为工程材料提供了一种全新的、统一的本构模拟方法。近十几年来,在美国国家科学基金会(NSF)的资助下,Desai教授及其合作者对扰动状态概念进行了全面而深入的研究,已基本形成了扰动状态概念理论的分析体系,扰动状态概念理论已较为系统化,扰动状态概念的研究已取得了丰硕的成果,其中的一些研究成果已在工程实践中得到了应用和推广。现在,可以利用扰动状态概念理论描述在不同荷载(加载、卸载及循环加载)作用下,材料的硬化及软化行为、岩石类材料界面和节理的力学响应,分析砂土液化机理,建立电子封装材料的本构关系以及进行相关的数值模拟等。在国内,关于扰动状态概念理论的研究开展不久,有关的研究状况参见有关文献。

总之,岩石力学学科随着大规模工程建设及相关学科理论与方法的发展而迅猛发展,逐渐形成自身完善的理论体系并呈现良好的发展势头。



## 第二章 岩石的物理力学性质

岩石的物理力学性质是岩石力学研究的最基本的内容,其性质指标也是岩石力学研究和岩石工程设计的基本参数与依据。

### 2.1 岩石的物理性质

岩石由固体、液体和气体三相介质组成。其物理性质是指因岩石三相组成部分的相对比例关系不同所表现出来的物理状态。与工程密切相关的物理性质参数有密度、重度(密度)、相对密度(比重)、孔隙比、水理性、抗冻性、抗风化性等。

#### 2.1.1 岩石的质量指标

岩石的质量指标主要包括重度、密度和相对密度。岩石单位体积(包括岩石空隙体积)的重度,称为岩石的重度。根据岩石试样的含水情况不同,岩石重度可以分为天然重度、干重度和饱和重度,分别用  $\gamma$ ,  $\gamma_d$ ,  $\gamma_{sat}$  表示。

$$\begin{cases} \gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_r + W_w}{V_a + V_r} \\ \gamma_d = \frac{W_r}{V} = \frac{W_r}{V_a + V_r} \\ \gamma_{sat} = \frac{W}{V} = \frac{W_r + V_a \gamma_w}{V} \end{cases} \quad (2.1.1)$$

式中  $W$ ——岩石试样的总重量;  
 $W_r$ ——岩石的重量;  
 $W_w$ ——岩石试样空隙中水的重量;  
 $V$ ——岩石试样的总体积;  
 $V_r$ ——岩石的体积(不包含岩石中空隙);  
 $V_a$ ——岩石试样中空隙的体积;  
 $\gamma_w$ ——水的重度。

岩石单位体积(包括岩石空隙体积)的质量称为岩石的密度。根据岩石试样的含水情况不同,岩石密度可分为天然密度、干密度和饱和密度,分别用  $\rho$ ,  $\rho_d$ ,  $\rho_{sat}$  表示。如果设岩石试样的总质量(包括空隙中的水)为  $m$ , 岩石的质量为  $m_r$ , 岩石试样空隙中水的质量为  $m_w$ ,  $\rho_w$  为水的密