

杨圣奇 著

裂隙岩石力学特性研究 及时间效应分析



科学出版社

裂隙岩石力学特性研究 及时间效应分析

杨圣奇 著

国家自然科学基金项目(50709008)

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统介绍了作者近年来在裂隙岩石力学特性研究及时间效应分析方面所取得的学术成果。本书利用刚性伺服试验机、扫描电镜实时观测系统、流变伺服仪对完整岩石试样、断续预制裂隙岩石试样进行单轴压缩试验、常规三轴压缩试验、细观裂纹实时扩展试验、剪切流变试验和三轴压缩流变试验,研究复杂状态下裂隙岩石试样的强度特征、变形破坏、裂纹扩展及三轴流变等力学特性。全书共分7章,主要包括:绪论、单轴压缩下完整岩石试样力学特性的研究、复杂状态下完整岩石试样力学特性的研究、单轴压缩和不同围压下断续预制裂隙岩石试样力学特性的研究、岩石试样三轴压缩流变力学特性的试验研究和岩石非线性黏弹塑性流变模型的研究。

本书可供从事土木工程、水利工程、矿业工程等研究领域的工程技术人员参考,亦可作为从事岩石力学及其相关专业的科研工作者、高等院校师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

裂隙岩石力学特性研究及时间效应分析 / 杨圣奇著. —北京:科学出版社,2011

(岩石力学与工程研究著作丛书)

ISBN 978-7-03-031375-1

I. ①裂… II. ①杨… III. ①裂隙-岩石力学-研究 IV. ①TU454

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第104995号

责任编辑:刘宝莉 周 炜 / 责任校对:邹慧卿

责任印制:赵 博 / 封面设计:鑫联必升

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码 100717

<http://www.sciencep.com>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销



2011年6月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2011年6月第一次印刷 印张:21 3/4

印数:1—2 000 字数:426 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

岩石作为一种复杂的天然介质,由于漫长的地质构造作用,在其内部孕育了从微观(微裂隙)到细观(晶粒缺陷)再到宏观(断层、节理等)的各种尺度的缺陷,这些缺陷对岩体的强度和破坏特性有着重要的影响,而工程实践中经常需要评价岩体的强度和破坏特性,但由于围压的贡献及缺陷分布的影响,目前对裂隙岩体强度和破坏特性的评价仍然没有获得满意的解答。而且岩石材料的非均质性和尺寸效应现象,也加剧了岩石工程设计时岩石力学参数选取的困难。

岩石流变力学试验不仅是了解岩石流变力学特性最重要的手段,而且是构建岩石流变本构模型的重要基础。水利水电工程高坝坝基大多建于硬岩岩基上,高坝的建设往往伴随着岩石高陡边坡和大型地下洞室群的岩石工程问题,为了预测岩石工程的长期稳定性,有必要开展硬岩的流变力学特性研究,尤其是三轴流变试验研究。岩石流变力学理论作为岩石力学中的前沿课题,近年来,研究工作进展较快,特别是利用实测试验资料反演流变模型参数、进而发展到对未知模型的辨识等。但岩石流变力学理论至今还不很成熟,许多重大岩石工程的建设为岩石流变力学理论研究带来了严峻的挑战,当前岩石流变力学特性和本构模型理论的研究仍是其难点和热点问题。

针对上述问题,以节理裂隙岩体工程稳定与安全为研究目标,本书通过选取一些典型的岩石(如大理岩、砂岩等)为研究对象,利用先进的试验系统(刚性伺服试验机、扫描电镜实时观测系统、三轴流变伺服仪),采用试验研究、理论分析和数值模拟相结合的研究方法,从岩石材料的非均质性出发,对完整岩石试样、断续预制裂隙岩石试样进行单轴压缩试验、细观裂纹实时扩展试验、常规三轴压缩试验、剪切流变试验和三轴压缩流变试验,研究非均质岩石的强度、变形、破坏、能量、裂纹扩展及流变等力学特性。

本书共分7章。第1章详细阐述了国内外岩石尺寸效应、裂隙岩石力学特性及岩石流变力学特性研究现状,评述了前人研究过程中存在的问题和不足之处;第2章研究了尺寸对完整岩石试样强度和变形特性、能量耗散特征及破裂形式的影响,建立了单轴压缩下考虑尺寸效应的岩石损伤统计本构模型,并对不同尺寸岩石试样力学特性进行了数值试验分析;第3章研究了完整大理岩的三轴强度和变形破坏特性,探讨了不同直径煤样强度参数的确定方法;第4章实时观测分析了大理岩单向加载过程中细观裂纹的萌生、扩展、演化和贯通特征,探讨了单轴压缩下裂隙参数分布对脆性大理岩强度和变形特性及宏观贯通模式和裂纹演化特征的影响

规律;第5章研究了不同围压下断续预制裂隙大理岩的力学特性,分析了不同围压下裂隙分布对裂隙大理岩强度、变形破坏及能量特征的影响规律;第6章对坚硬大理岩、绿片岩、砂岩进行了三轴压缩流变试验,基于岩石三轴流变力学特性的试验结果,探讨了复杂状态下岩石流变力学特性及其破裂机制;第7章建立了岩石非线性剪切流变模型、岩石非线性黏弹塑性流变模型、岩石非线性蠕变损伤模型及岩石非定常黏弹性流变模型。

本书主要是作者多年来通过参加河海大学博士生导师徐卫亚教授负责的国家自然科学基金海外青年学者合作研究基金(50128908)、国家自然科学基金重点项目(50539110)、国家重点基础研究发展规划“973”项目第七课题(2002CB412707)及锦屏 I 级水电站、向家坝水电站等重大工程科技项目,并依托主持的国家自然科学基金项目(50709008)、中国博士后科学基金项目(20060400909)和江苏省博士后科研资助计划项目(0601036B)的基础上所取得的研究成果。

本书的完成,首先归功于徐卫亚老师的悉心指导与大力支持,在此谨向恩师致以诚挚的感谢和崇高的敬意!作者感谢同济大学孙钧院士、四川大学谢和平院士、清华大学张楚汉院士及中国科学院武汉岩土力学研究所冯夏庭研究员对本书研究工作提出的宝贵意见。感谢河海大学吴中如院士、法国里尔科技大学邵建富教授、谢守益副教授及法国巴黎综合理工大学固体力学实验室主任 Halphen 教授、Serge 研究员及 Duc Nguyen-Minh 研究员的支持和帮助。感谢中国矿业大学靖洪文教授、贺永年教授、韩立军教授和蒋斌松教授的支持和帮助。感谢长江科学院蒋昱州博士、中国矿业大学李玉寿高工、东北大学徐涛博士后和河南大学温森博士对本书部分试验与模拟工作的协助。同时,感谢国家自然科学基金项目(50709008)、中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室专项基金、江苏省“青蓝工程”优秀青年骨干教师项目对本书出版的支持。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏与不妥之处,恳请前辈及同仁不吝赐教。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 岩石尺寸效应研究现状及评述	1
1.1.1 岩石尺寸效应研究现状	2
1.1.2 不同尺寸岩石力学特性研究中的不足	5
1.2 裂隙岩石力学特性试验研究现状及评述	7
1.3 岩石流变力学特性研究现状及评述.....	10
1.3.1 岩石流变力学特性的试验研究现状	11
1.3.2 岩石流变力学特性的理论研究现状	13
1.3.3 岩石流变力学特性研究中的不足	18
1.4 本书主要研究内容.....	20
参考文献	21
第 2 章 单轴压缩下完整岩石试样力学特性的研究	30
2.1 不同尺寸岩石试样单轴压缩试验结果.....	31
2.1.1 岩石试样单轴压缩试验概况	31
2.1.2 标准尺寸岩石试样力学参数的离散性	32
2.1.3 不同尺寸岩石试样单轴压缩试验结果	34
2.2 不同尺寸岩石试样强度和变形特性理论分析.....	36
2.2.1 岩石材料尺寸效应的理论公式	36
2.2.2 岩石材料尺寸效应理论模型中参数物理意义的讨论	39
2.3 不同尺寸岩石试样能量特征分析.....	41
2.3.1 岩石尺寸对能量耗散特征的影响	41
2.3.2 岩石破坏能与尺寸之间的关系	43
2.4 考虑尺寸效应的岩石损伤统计本构模型.....	48
2.4.1 岩石强度的统计特性和损伤本构模型的建立	48
2.4.2 考虑尺寸效应的岩石损伤统计本构模型	51
2.4.3 本构模型预测的理论曲线与试验结果的对比	52
2.4.4 岩石尺寸对损伤特性的影响	55
2.5 岩石试样尺寸效应的机理.....	57
2.5.1 岩石试样强度和变形尺寸效应的机理	57

2.5.2 岩石试样尺寸对宏观破裂模式的影响	59
2.6 不同尺寸岩石试样力学特性的数值试验	61
2.6.1 细观非均质性对标准岩石试样力学特性的影响分析	64
2.6.2 尺寸对岩石试样宏观力学特性的影响分析	71
2.7 本章小结	81
参考文献	82
第3章 复杂状态下完整岩石试样力学特性的研究	86
3.1 粗晶大理岩力学特性的三轴压缩试验研究	86
3.1.1 岩石试样三轴压缩试验概况	86
3.1.2 粗晶大理岩三轴压缩试验结果	87
3.1.3 粗晶大理岩变形特性分析	93
3.1.4 粗晶大理岩强度特性分析	96
3.2 中晶大理岩力学特性的三轴压缩试验研究	100
3.2.1 中晶大理岩三轴压缩试验结果	100
3.2.2 中晶大理岩变形特性分析	106
3.2.3 中晶大理岩强度特性分析	107
3.3 不同直径煤样强度参数确定方法的探讨	111
3.3.1 不同直径煤样三轴压缩试验结果	111
3.3.2 基于广义 Hoek-Brown 准则的煤样强度特性分析	114
3.3.3 切线法理论确定煤样强度参数	116
3.3.4 一种新的强度参数确定方法	119
3.3.5 直径对煤样强度参数的影响	122
3.3.6 结论	125
3.4 本章小结	125
参考文献	126
第4章 单轴压缩下断续预制裂隙岩石试样力学特性的研究	129
4.1 含单个孔洞大理岩裂纹扩展细观试验研究	130
4.1.1 含单个孔洞大理岩裂纹扩展细观物理试验研究	130
4.1.2 含单个孔洞大理岩裂纹扩展细观数值试验研究	133
4.1.3 非均质性对含单个孔洞岩样裂纹扩展特征的影响	138
4.2 含单条裂隙大理岩裂纹扩展细观试验研究	140
4.2.1 岩性特征和试验概况	140
4.2.2 试验结果及分析	142
4.3 含两条裂隙大理岩裂纹扩展细观试验研究	146
4.3.1 岩性特征和试验概况	146

4.3.2 试验结果及分析	151
4.3.3 非均质性对含裂隙大理岩裂纹扩展特征的影响	152
4.4 断续预制裂隙脆性岩石试样单轴压缩试验结果	155
4.4.1 试验概况	155
4.4.2 断续预制裂隙脆性大理岩的强度和变形特性	157
4.5 断续预制裂隙脆性岩石试样宏观贯通模式分析	163
4.6 断续预制裂隙脆性岩石试样裂纹演化特征分析	166
4.7 本章小结	171
参考文献	172
第 5 章 不同围压下断续预制裂隙岩石试样力学特性的研究	175
5.1 断续预制裂隙大理岩的三轴压缩试验结果	176
5.1.1 试验大理岩材料	176
5.1.2 预制裂隙岩样制备	176
5.1.3 试验程序	178
5.1.4 断续预制裂隙大理岩轴向应力-轴向应变全程曲线	179
5.1.5 断续预制裂隙大理岩环向应变-轴向应变全程曲线	182
5.2 不同围压下断续预制裂隙大理岩的强度特性	186
5.2.1 基于 Coulomb 准则的断续预制裂隙大理岩强度特性	186
5.2.2 基于 Hoek-Brown 准则的断续预制裂隙大理岩强度特性	189
5.2.3 基于最佳一致逼近多项式理论确定的断续预制裂隙大理岩强度参数	191
5.3 不同围压下断续预制裂隙大理岩裂纹演化和扩容特性分析	193
5.3.1 不同围压下断续预制裂隙大理岩扩容特性分析	194
5.3.2 断续预制裂隙大理岩裂纹损伤阈值与围压的关系	199
5.3.3 断续预制裂隙大理岩峰值强度 σ_p 与裂纹损伤阈值 σ_{cd} 的关系	201
5.4 不同围压下断续预制裂隙大理岩的破裂模式	203
5.5 不同围压下断续预制裂隙大理岩的能量特征	210
5.5.1 完整大理岩能量特征分析	210
5.5.2 断续预制裂隙大理岩能量特征分析	217
5.6 本章小结	220
参考文献	222
第 6 章 岩石试样三轴压缩流变力学特性的试验研究	226
6.1 岩石三轴压缩流变伺服仪	226
6.2 绿片岩三轴压缩流变力学特性的试验研究	228
6.2.1 绿片岩岩性特征和试验概况	228

6.2.2	绿片岩轴向应变规律	230
6.2.3	绿片岩侧向应变规律	231
6.2.4	绿片岩流变速率规律	232
6.2.5	绿片岩流变对应力-应变曲线的影响	234
6.3	大理岩三轴压缩流变力学特性的试验研究	235
6.3.1	大理岩岩性特征和试验概况	235
6.3.2	大理岩轴向和侧向应变规律	236
6.3.3	大理岩流变速率规律	239
6.3.4	大理岩流变对应力-应变曲线的影响	240
6.3.5	大理岩流变过程中的变形特性分析	241
6.4	砂岩三轴压缩流变力学特性的试验研究	245
6.4.1	砂岩岩性特征和试验概况	246
6.4.2	砂岩常规三轴压缩试验结果	247
6.4.3	砂岩流变变形与时间的关系曲线	251
6.4.4	砂岩流变对应力-应变曲线的影响	253
6.4.5	砂岩加速流变力学特性分析	254
6.4.6	煤系薄层(非均质性)对砂岩加速流变力学特性的影响	257
6.4.7	砂岩稳态流变速率分析	260
6.4.8	砂岩长期强度参数的讨论	266
6.5	坚硬岩石三轴压缩流变破裂机制探讨	268
6.5.1	绿片岩和大理岩三轴压缩流变破裂机制	268
6.5.2	砂岩三轴压缩流变破裂机制	271
6.6	本章小结	272
	参考文献	273
第7章	岩石非线性黏弹塑性流变模型的研究	276
7.1	龙滩水电站泥板岩剪切流变力学特性研究	276
7.1.1	试验概况	277
7.1.2	剪切位移规律	278
7.1.3	剪切流变速率	279
7.1.4	剪切强度与时间的关系	281
7.1.5	用于描述加速流变的新元件	284
7.1.6	非线性剪切流变模型	285
7.1.7	剪切流变模型参数的确定及验证	286
7.1.8	结论	289
7.2	岩石非线性黏弹塑性流变模型及其特性分析	289

7.2.1	线性黏弹性流变模型	289
7.2.2	非线性黏弹塑性流变模型	292
7.2.3	非线性流变模型参数的确定及其验证	294
7.2.4	岩石非线性黏弹塑性流变特性分析	296
7.2.5	结论	305
7.3	考虑黏聚力和内摩擦系数的岩石非线性黏弹塑性流变模型	306
7.3.1	岩石长期抗剪强度参数	306
7.3.2	考虑黏聚力和内摩擦系数的非线性黏塑性体	307
7.3.3	考虑黏聚力和内摩擦系数的非线性黏弹塑性流变模型	309
7.3.4	考虑黏聚力与内摩擦系数的非线性黏弹塑性蠕变特性	310
7.3.5	考虑黏聚力与内摩擦系数的非线性黏弹塑性松弛特性	311
7.3.6	结论	314
7.4	岩石非线性流变损伤机制与模型探讨	314
7.4.1	岩石非线性流变损伤机制	314
7.4.2	岩石非线性蠕变损伤模型	317
7.4.3	结论	320
7.5	岩石非定常和非线性黏弹性流变模型及参数辨识	320
7.5.1	定常黏弹性流变模型参数的时间尺度效应	321
7.5.2	非定常黏弹性流变模型及其参数辨识	324
7.5.3	非线性黏弹性流变模型及其参数辨识	329
7.5.4	结论	335
7.6	本章小结	335
	参考文献	336

第 1 章 绪 论

岩石力学特性是岩石力学的主要研究对象,也是岩石工程必须面对的基本问题。为了防止或减小与岩石工程相关的自然灾害(如岩体滑坡、地基失稳及矿柱岩爆)等,人们从强度、变形、损伤、断裂和破坏等各个方面对岩石力学特性进行了深入而持久的研究,并取得了许多重要的研究成果^[1~6]。岩石作为自然界的一种复杂工程介质,人们对其力学特性的研究是随着各项岩石工程的大规模兴建而逐渐展开的,尤其是西部大开发实施,南水北调工程、长江三峡工程及黄河小浪底工程等重大水利水电工程项目的相继开工建设,从而使得各类岩石工程项目越来越多,发展越来越快。这些重大工程项目的兴建极大地促进了对岩石力学特性的研究,同时也使人们越来越深刻地认识到岩石的天然复杂性(如非均质性、各向异性及不连续性等)。而正是由于岩石介质的复杂特殊性,目前人们对其力学特性行为仍不能进行准确且有效地预测和控制,从而使得世界范围内岩石工程灾害仍然发生频繁,因而岩石工程的稳定和安全及时间效应(流变特性)等均成为岩石力学领域的重要研究课题。虽然在材料均质、各向同性、完全线弹性及小变形等假设条件下,弹性力学解决了材料的受力变形问题,但岩石是一种复杂的天然介质,由于漫长的地质构造作用,在其内部孕育了从微观(微裂纹)到细观(晶粒)再到宏观(节理面)的各种尺度的缺陷。在岩石工程建设和长期运营的过程中,由于开挖卸荷、渗流等因素,促使原有的微裂纹发育、扩展直至出现宏观裂纹,而产生工程失稳的例子已有许多,例如,1959年12月发生在法国马尔帕塞(Malpasset)双曲拱坝的溃坝事故就是由于该坝建在微裂纹特别发育的片麻岩上,片麻岩中的微裂纹在渗流作用下发生扩展而导致坝踵前沿岩体出现了宽0.4~0.5m的裂缝,由此而引发的工程事故^[7,8]。因此开展裂隙岩石力学特性的研究及时间效应分析,对于正确评价岩石工程的稳定与安全及深入了解工程岩体的失稳破坏机理等均具有重要的理论和实践意义。

1.1 岩石尺寸效应研究现状及评述

尺寸效应(size effect)也叫尺度效应(scale effect),是岩石材料本身固有的力学特性。很多岩石力学教科书中都将岩石尺寸效应定义为:尺寸越大的岩石,其强度越小的现象^[9~11],但这种定义不够严谨,因为这仅仅考虑了岩石强度的尺寸效应,而没有将变形和其他力学参数的尺寸效应考虑进去,此外随着岩石尺寸的增

大,其强度有时并非呈减小趋势^[12,13]。在1998年12月颁布的《岩土工程基本术语标准》(GB/T 50279—1998)中将尺寸效应定义为:“岩体中存在不同尺度的不连续面而导致不同尺度试样被测得的力学性质有差异的现象”^[14]。由此可以看出目前对岩石尺寸效应的定义还存在分歧,为了规范岩石力学学科中的基本术语,便于进行科学研究和对比分析,本书认为岩石尺寸效应的准确定义应该为:不同尺寸岩石的强度及变形等力学参数存在差异的现象,且与研究对象、研究内容、研究范围、加载方式及外在条件有很大关系^[15]。

岩石尺寸效应作为岩石力学中重要的研究课题^[16~24],关系到岩石工程设计和数值计算时岩石力学参数的合理选取及岩石本构关系的正确建立。而岩石工程设计和数值计算的关键问题之一,就在于对岩石尺寸效应规律性的正确认识和掌握。以工程地质研究为基础,以岩体结构力学效应为中心,开展岩石尺寸效应规律的研究,对于解决岩石力学参数的预测方法是十分必要的。因此,本节结合岩石尺寸效应的研究现状,评述了岩石尺寸效应研究中存在的问题和不足之处,同时指明了岩石尺寸效应研究的发展方向。

1.1.1 岩石尺寸效应研究现状

尺寸对岩石强度特性的影响规律,前人已经从试验、理论和数值方面作了大量的研究工作,取得了丰硕的成果^[9~34]。1939年,Weibull^[25]最早建立了单轴压缩下岩石强度与体积的关系式,认为岩石强度随着体积的增大而减小,此后,岩石强度尺寸效应引起了愈来愈多人的关注。Dreyer^[26]称岩石强度与试样尺寸无关。Hudson等^[27]分别对直径为19mm、50mm和100mm的长径比为1/2~3的12个大理岩样[岩石试样(rock specimen or rock sample)的简称]进行了单轴压缩试验研究,得出岩石的强度随试样的高径比的变化而变化,显示其具有尺寸效应。李先炜^[28]基于前人得到的岩盐、黏板岩、石灰岩等岩石试样的单轴压缩试验结果,对单轴抗压强度(unconfined compressive strength, UCS)受试样尺寸的影响规律进行了归纳,得出如下四种结论:①岩石强度随试样尺寸的增加而相应地减小;②岩石强度随试样尺寸的增加而相应地增加;③随着试样尺寸的增加,岩石强度的变化在波动;④随着试样尺寸的增加,岩石强度先减小后增加。刘宝琛等^[17]对前人做过的7种岩石单轴抗压强度试验结果进行了总结,获得了具有共性的尺寸效应的规律,建立了岩石强度随试样尺寸呈指数型衰减规律的经验型公式。杨圣奇等^[18]对单轴压缩下不同长径比(L/D)大理岩强度特性进行了分析,获得了大理岩单轴抗压强度与 L/D 之间的关系,并探讨了考虑尺寸效应的应力-应变关系。因而,试样尺寸对单轴抗压强度的影响极为复杂,但根据多数岩样的试验结果,岩样强度随尺寸增大而减小的现象是主要的。

Hoek和Brown^[35]基于前人大量不同类型不同尺寸岩样的试验结果,归纳出

了如图 1.1 所示岩样直径对单轴抗压强度的影响规律,图中的拟合参数 ξ 为 0.18,需要指出的是,尽管图 1.1 中的公式是基于大量不同直径岩样试验结果建立的,但也并非适用于所有类型的岩石,这里的参数 ξ 与岩石类型密切相关,Yoshinaka 等^[29]讨论了岩石类型对参数 ξ 的影响规律。

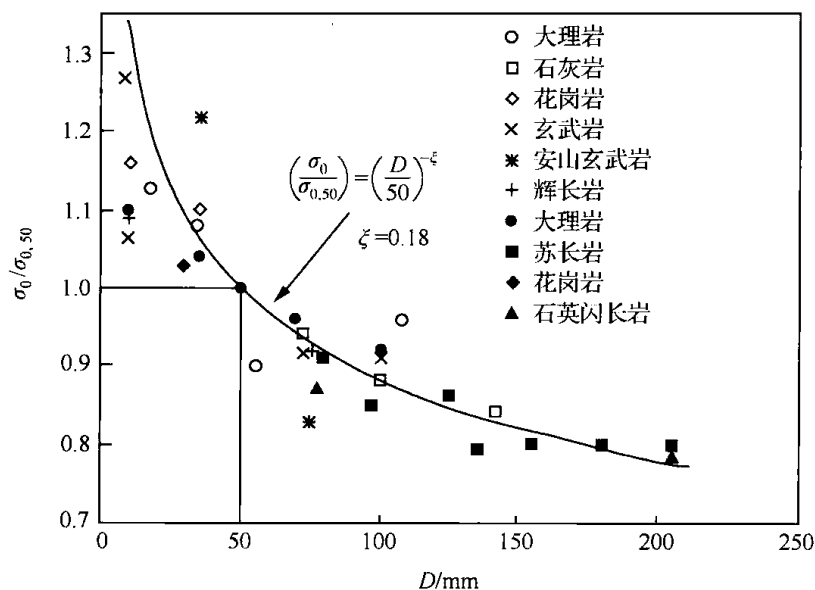


图 1.1 岩样直径对单轴抗压强度的影响^[35]

除了上述典型的研究成果外,郭培军^[30]将分形理论应用于岩石强度尺寸效应的研究中。杨友卿^[31]基于岩石微元强度服从于正态分布的假设,将损伤力学与分形几何理论相结合起来,定量地分析了岩石强度的尺寸效应。Enever 和 Wu^[32]对空心圆柱岩样的强度尺寸效应进行了探讨。朱珍德等^[36]将灰色系统理论引入到石英砂岩、砂岩及灰岩等脆性岩石强度尺寸效应的试验研究中,并应用 GM (1,1) 模型建立了岩石单轴抗压强度与试样高径比之间的非线性关系。周国林等^[24]在对剪切破坏模式下岩石的变形和破坏局部化观察和本构模型模拟分析的基础上,提出了一个考虑岩石材料非均质性和局部化特性的新的强度准则,并利用该准则定量描述了岩石强度的尺寸效应,指出岩石强度尺寸效应主要表现为直径效应。

关于尺寸对岩石变形特性影响规律的研究,代表性成果如下:郭志^[37]通过对同直径不同长度绢英岩进行单轴压缩试验研究,得到了岩石变形模量及破裂形式随着长度的变化而变化,但并没有获得明确结论。尤明庆和华安增^[38]基于 Hudson 的试验结果,对岩样尺度与全程曲线之间的关系进行了讨论,分析了岩样形状和尺寸对峰后弱化过程的影响,并以此对矿柱岩爆机理进行了探讨。潘一山和魏建明^[19]采用刚性伺服试验机对同直径不同长度的砂岩进行了试验研究,指出峰值强度后随着试样长度增加,岩石脆性增大,并利用梯度塑性变形理论进行了分析。

杨圣奇等^[13,22]在中国科学院武汉岩土力学研究所研制的 RMT-150B 伺服试验机上对不同晶粒大理岩样的尺寸效应进行了单轴压缩试验研究,得到长度越长的岩样,峰后越脆,且直径一定时随着长度的增大,岩样破裂形式由竖向劈裂变为剪切破坏。王学滨等^[39]利用剪切应变梯度塑性理论,建立了单轴受压下岩样尺寸效应的塑性剪切应变梯度模型,并模拟了岩石软化段应力-应变关系的影响规律,指出尺寸效应的根本原因是岩石的局部化;同时他还基于可以考虑微结构相互作用的非局部理论,研究了由于剪切局部化引起的试样长度的尺寸效应^[40]。

但是以上研究成果主要针对岩块而言,而岩体是由岩块和结构面组成,岩体的力学特性很大程度上取决于结构面的力学特性,因此对岩体尺寸效应的原位试验研究更能反映工程实践,代表性成果如下:周火明等^[41]采用室内及现场岩体力学试验和数值模拟等手段,对长江三峡工程永久船闸边坡卸荷带岩体变形参数进行了研究,指出岩体变形模量随着尺寸的增大而呈衰减规律。王家来和左宏伟^[42]通过建立单轴压缩下含裂纹岩样的功能平衡方程,运用概率统计与分形理论相结合的方法,导出了岩体弹性模量尺寸效应的表达式,揭示了岩体弹性模量尺寸效应内部结构的本质。地下工程的开挖、洞室的掘进及露天矿区边坡掘成活动,实质上就是卸去岩体等一方面的应力或应变,促使岩体中储存的能量释放,引起岩体中裂隙张开、结构松散,从而造成对岩体工程稳定的不利影响因素,因此研究卸荷岩体力学特性对于了解岩体工程破坏机制和加固机理具有重大指导意义,鉴于此,李建林和王乐华^[20]根据三峡工程船闸高边坡岩体的物理仿真卸荷试验,研究了卸荷岩体的尺寸效应问题,指出岩体的应力-应变关系、抗压强度、抗拉强度、变形模量、泊松比及岩体的各向异性均随着岩体的尺寸变化而变化,即随着尺寸的加大而降低。

由于岩石介质及岩石力学问题的复杂性与不确定性,岩石工程中的许多问题往往不能得到解析解,而只能借助于有限元、离散元、边界元、块体元、流形元及拉格朗日元等数值方法来解决。近年来,这些数值方法在岩石力学中得到了广泛应用^[10,43,44]。有些岩石力学科技工作者也运用数值模拟方法来解决岩石尺寸效应问题,并取得了一些有益的研究成果。目前通过数值模拟方法来研究岩石尺寸效应问题的主要有如下三种软件:一是东北大学岩石破裂与失稳研究中心开发的岩石破裂过程分析系统 RFPA^{2D}^[33,34,45~47]。Tang 等^[34]采用该软件研究了岩石材料的长径比及体积与强度的关系,并得到岩石强度随长径比及体积增大而呈幂律衰减的规律。同时文献^[34]还指出长径比相同的岩样,其尺寸并不影响岩石峰值强度前的弹性变形过程,但对峰值强度后的变形特性有着重要影响。二是冯夏庭开发的细胞自动机方法 RFPCA^[48~51]。Pan 等^[49]采用开发的细胞自动机方法模拟了单轴压缩下岩石尺寸效应,模拟获得的同直径不同长度岩样破裂模式与文献^[22]的试验结果吻合较好;李明田和张敏学^[51]模拟了拉伸断裂过程中的尺寸效应,模拟得到的尺寸效应律与 Bazant 尺寸效应律具有很好的一致性。三是拉格朗日元

法 FLAC^{3D}。王学滨^[52]采用 FLAC^{3D} 软件对单轴压缩下不同尺寸岩样的变形局部化破坏进行了数值分析,研究了平面应变状态下岩样的尺寸效应,指出随着岩样高度的增加,剪切带倾角有增加的趋势;增加试样宽度,剪切带倾角的宽度也增加,且剪切带变得不平直。周火明等^[53]采用 FLAC^{3D} 研究了不同加载尺寸对层状复合岩体变形特性的影响,并指出随着加载面积的增大,层状复合岩体等变形模量逐渐减小,且趋于稳定。

此外,何满潮等^[54]通过建立工程岩体的连续性模型,研究了工程岩体力学参数的尺寸效应,指出单轴抗压强度、弹性模量、残余强度、内摩擦角和黏聚强度均随着岩体尺寸的增大而减小,且当岩体尺寸增大到 10m 以后,再增大岩体尺寸,其力学参数不会发生多大变化。其提出的工程岩体数值力学实验新方法,为准确确定工程岩体力学特性参数开辟了一条崭新的途径。

1.1.2 不同尺寸岩石力学特性研究中的不足

通过前面的叙述不难看出,对单轴压缩下岩石强度尺寸效应的研究出现了多种矛盾的结论,主要是由于岩石是一种内在缺陷分布不同的非均质材料,换言之,如果岩石是一种均质材料,那么同种类型的大尺寸岩样的强度与小尺寸岩样的强度应该相同,即岩石强度根本就不存在尺寸效应;如果岩石是一种内在缺陷分布相同的非均质材料,那么随着尺寸的增大,同种类型的岩石强度就一定表现为逐渐降低的现象,根本不会出现小尺寸岩样强度小于大尺寸岩样强度的现象^[12,28],这实质上从另一方面表明了,在这种假设前提下,同一尺寸的岩石强度,离散性很小^[12]。另外一个不可忽略的影响因素是,岩样尺寸应有足够大的变化范围才能反映出强度尺寸效应。文献[28]中的岩样尺寸变化范围较小,岩石材料的非均质性可能掩盖了强度尺寸效应,从而使得强度对尺寸不敏感。文献[17]中的岩样尺寸变化范围较大,尺寸对强度就比较敏感。尽管采用数值模拟方法得到的大多数结果与试验吻合得较好,但需要特别说明的是,同一尺寸下,由数值模拟得到的岩样强度离散性很小^[33],因而由于岩石具有极端非均质性,岩石真实的力学性质比通过数值模拟得到的要复杂得多。此外,前人对岩石尺寸效应的研究成果几乎都是基于岩石在单轴压缩下得到的,而现场真实岩体大多处在三轴应力状态下。所以要理解岩石真实的力学特性,就必须在承认岩石材料极端非均质性的基础上,对单轴和三轴应力状态下、不同尺寸岩石的力学特性进行试验研究,以明确各种应力状态下尺寸对岩石的力学响应^[5]。

目前岩石的尺寸效应,尤其是单轴压缩下岩石的尺寸效应,是国内外广泛关注的研究热点。但总体来看,其研究进展仍比较缓慢,主要原因是这方面的试验研究难度比较大。首先岩石试样尺寸应有足够大的变化范围才能反映出尺寸效应。已有文献表明^[17,55],对单轴压缩状态下岩石尺寸效应的试验研究,岩样(立方体)的

最大尺寸(边长)为 276cm,最小尺寸为 1.9cm。而对于三轴压缩试验而言,一方面,试验机的三轴压力盒的容积是一定的,岩样的尺寸不可能足够大;另一方面,围压对岩石尺寸效应也有着重要影响。这两个方面,是迄今很少见到常规三轴应力状态下岩石尺寸效应研究成果报道的主要原因。同样至今未见到单轴拉伸下岩石尺寸效应试验研究成果报道的原因主要是单轴拉伸试验比较困难。一方面,岩样加工制作起来比较麻烦;另一方面,对加工好的岩样均等地施加应力也比较困难,而且单轴直接拉伸试验得到的结果离散性很大,可信度不高,于是人们寻求劈裂试验、弯曲试验等来代替直接拉伸试验。其次,由于岩石材料的非均质性,致使同一尺寸下岩石试验结果的离散性很大,因而要使得实验室岩样试验结果呈现明显的规律性,则要求每个尺寸均有足够数量的试样,而这在尺寸很大的情况下往往是很困难的。文献[17]对单轴压缩下岩石强度尺寸效应的研究就深刻反映了这一点。

尽管前人对岩石尺寸效应的研究已取得一定的进展,但由于岩石具有非均质性、各向异性、不连续性等特点,再加上工程岩体具有复杂的地质环境和条件,因而对于岩石尺寸效应的研究仍有许多问题有待进一步探讨^[15]:①目前对岩石尺寸效应的研究基本上是针对完整岩石而言,而且岩样尺寸均较小,很少考虑裂隙岩样,实质上现场工程岩体在一定程度上已经遭到破坏。因而为了定量和准确地描述岩石尺寸效应的规律,需进行大量考虑内部裂纹、节理及断层等不连续面的大尺度岩样的试验研究。②由于对岩石尺寸效应进行试验研究耗资大,而尺寸效应的理论分析又困难重重,因此计算机的迅速发展为岩石尺寸效应的研究提供了坚实的基础,利用数值方法来模拟不同尺寸岩石的力学行为已逐步被人们认为是一种常规研究方法。所以在提倡岩石尺寸效应试验研究和理论分析的同时,岩石尺寸效应的数值模拟应成为岩石尺寸效应研究中的重要内容。③地下工程中矿柱的失稳破坏及冲击地压、岩爆现象的频繁发生,均是由于岩体构件中储存的能量突然释放所致,而这种释放的能量又与尺寸有着很大的关系。因此必须对岩石能量尺寸效应进行系统研究,这将有助于矿柱尺寸的选取及评价有限的原位试验的代表性。④工程岩体不仅是一种材料,而且总是处于一定的应力-应变环境中,岩石力学特性与应力路径、加载速率、温度和围压有着很大的关系。因而力图为建立完善的本构理论关系提供试验基础,必须深入研究不同应力路径、加载速率、温度和围压作用下岩石尺寸效应的规律。⑤随着测试技术与手段的日新月异与飞速发展,采用计算机层析技术、扫描电镜及声发射等先进技术,从微细观层次上揭示不同尺寸岩石的破坏机制,探寻岩石尺寸效应的机理,也将成为未来岩石尺寸效应研究的重要途径。

1.2 裂隙岩石力学特性试验研究现状及评述

岩石是一种复杂的地质体,其内部含有各种各样尺度不等的缺陷(如断层、节理、裂隙及软弱面等)。岩体经常沿着预先存在的断层或节理处发生滑移性破坏。已建的或者在建的许多岩石工程呈现出断续结构特征(图 1.2)^[56],为了探究各种岩石工程(如坝基岩石工程、节理岩石高边坡工程、核废料处置岩石工程等)的失稳破坏机制,近几十年来,岩石力学工作者对裂隙岩石力学特性进行了大量的试验、理论和数值研究。这些研究^[57~68]已经充分表明,岩石内部裂隙的分布(如裂隙长度、裂隙倾角及岩桥长度等)对材料强度、变形及破坏特性有着重要的影响。迄今为止,对预制裂隙材料(包括类岩石材料和真实岩石材料)力学特性进行试验研究的方法主要有如下三种:



图 1.2 由岩体内部节理面滑移引发的结构性破坏^[56]

(1) 单轴和双轴压缩下,模型材料(或类岩石材料)的物理试验。

(2) 单轴压缩下,采用一些数值软件(如 RFPA^{2D}、FROCK 等),对二维模型试样进行的数值试验。

(3) 单轴压缩下,对真实岩石材料进行的物理试验。

由于制作模型试样相对容易实施,因而上述第一种试验方法为国内外众多研究学者所采用,获得了较多的研究成果。这种试验方法通过将岩体的工程效应(如结构特征和赋存环境等)统一到模型试验中去,通过石膏、水泥砂浆、重晶石等与其他混合料按一定比例配制,并通过在模型试样中掺入裂隙片(如云母和纸片等)和薄钢片来预制和模拟张开和闭合裂隙,从而来研究断续节理裂隙岩体的力学特性。Bobet、Zhu 等、Wong 等及 Bobet 等^[57~64]已经研究了含两条张开和闭合裂隙的二维模型试样的裂纹演化和扩展机制。图 1.3 给出了 Wong 和 Chau^[63]获得的单轴压缩下含 2 条裂隙的二维模型试样的 3 种典型扩展模式。Bobet 和 Einstein^[64]通过对 2 条非重叠裂隙的模型试样进行单轴和双轴压缩试验,结果表明,翼形裂纹通常从裂隙尖端产生但逐渐向两条预制裂隙中部区域偏斜,然而随着围压的增加,这种偏斜将不再发生。Wong 等^[62]通过物理实验研究了双轴作用下不同几何分布和不同围压的断续预置裂隙岩石三维裂纹的萌生、扩展和贯通机制,结果清楚显示裂纹贯通机制主要受加载条件与预置裂隙几何分布的影响,在双轴加载条件下,裂