

岩质边坡 变形稳定性研究

刘杰 李建林 孙旭曙 杨渝南 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

岩质边坡 变形稳定性研究

刘杰 李建林 孙旭曙 杨渝南 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书以岩质边坡稳定性分析为线索,重点针对现阶段岩质边坡稳定分析中的几个关键技术问题展开研究。研究的岩体赋存环境的主要变化因素包括不同的载荷形式、酸性溶液环境、动水环境。研究过程中主要采用能量分析方法、时间效应分析方法、基于有限元的分析方法、基于断裂韧度和屈服准则参数的分析方法。在理论上对原有岩石力学理论进行扩充发展,并将部分研究成果直接用于工程,在实际工程中印证理论分析成果,使其成为工程施工设计的有益参考。

本书可供水利水电、土木建筑、矿山铁路、公路交通等领域的科研人员及研究生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩质边坡变形稳定性研究 / 刘杰等著. -- 北京 :
中国水利水电出版社, 2015. 11
ISBN 978-7-5170-3813-9

I. ①岩… II. ①刘… III. ①岩石—边坡稳定性—研究 IV. ①TU457

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第270474号

书 名	岩质边坡变形稳定性研究
作 者	刘 杰 李建林 孙旭曙 杨渝南 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京时代澄宇科技有限公司
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 18印张 427千字
版 次	2015年11月第1版 2015年11月第1次印刷
定 价	39.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

随着我国国民经济的快速发展,交通、矿山、水利水电等工程领域不可避免地逐步形成了大量的岩石边坡工程,这些边坡工程中一般都存在着岩体稳定性问题,有些问题已成为工程建设进程与安全的重要制约因素。

自然状态下的岩体经过漫长的地质年代作用后,一般处于稳定的平衡状态。由于工程建设的需要,岩质边坡需进行开挖,这样就在本就复杂的岩体自然赋存条件下增加了外界力的扰动因素,研究各种外加载荷和岩体自然赋存条件共同作用下的岩体力学响应,便成为研究岩质边坡变形稳定性的基础工作。

这项研究工作在诸多国内外学者的共同努力下,取得了丰富的研究成果。但由于研究主体是漫长的地质构造作用过程中形成的岩体,其带有许多大小不等、方向各异的结构面的特性,促使岩体在不同的外加载荷和岩体自然赋存条件下表现出多种多样的力学性质,使得现阶段的研究中还有诸多方面需要深入和拓展。

本书在原岩试验、数值模拟和理论公式推导的基础上,进一步充实完善岩体力学理论和方法,结合多个国家自然科学基金项目和省部级研究项目及横向科研项目对复杂环境下岩质边坡稳定性分析中几个关键问题进行了相关研究。主要基于四种方法:能量分析方法、时间效应分析方法、基于有限元的分析方法、基于断裂韧度和屈服准则参数的分析方法,对岩体不同的赋存环境进行研究,赋存环境的主要变化因素包括:不同的载荷形式、酸性溶液环境、动水环境。

本书以解决上述研究方法和领域存在的关键问题为主线,取得了如下研究成果:

(1) 循环载荷和恒载条件下岩体力学响应的研究成果。提出动态泊松比和表观弹性模量的概念;提出两个滞后效应引起的能量损失度量参数;提出应变速率预测公式。

(2) 卸荷原理的研究成果。提出用裂纹应力分区图叠加的方式来进行断裂的定性分析;提出断裂元件,建立考虑时间效应的岩体卸荷拉裂作用的元件组合模型,并分多种特殊情况说明该模型对应的工程岩体类型;建立不考虑时间效应时的岩体卸荷本构关系。

(3) 裂隙断裂韧度和屈服准则参数的研究成果。建立一种经简化后易于实施的对岩体进行断裂损伤分析的方法。

(4) 酸性溶液浸泡试验的研究成果。提出岩体化学反应时间尺度的概念,并给出相应的试验量测分析方法。指出用较高的浓度可以在较短时间内对低浓度的反应速度(用H⁺离子物质的量变化量表征)和低浓度溶液在较长时间内的化学侵蚀效果做出模拟。

(5) 加卸载和浸泡的耦合分析所得结论如下：化学损伤模型的分区中，将岩样分为脱落区、渐进损伤区和无损区；分别用数值模拟和试验照片分析了浸泡中的均化效应与应力应变局部化效应，指出浸泡过程中两种效应均有发生；通过能量分析认为：各部分能量分区面积中，循环破坏时对应的塑性能面积最为恒定，受孔隙率和参数变化的影响最小。

(6) 渗流场试验的研究分析中分别研究了不同围压值、不同轴压值、不同加载路径、不同填充物粒度、不同原岩裂纹等因素影响下渗流量的变化规律。

(7) 基于有限元计算的岩质边坡分析方法改进和工程应用研究成果：提出了基于有限元分析的安全系数重力加载比例计算方法，指出利用现有的有限元分析软件采用重力加载比例法计算边坡的稳定安全系数适用范围较广，效率更高；在扩充了整个评判体系的评判因素的基础上，提出了基于有限元分析的模糊评判新方法。该模糊评判新方法实际操作性较强，能使得较多的影响边坡稳定性因素参与评判，权重分配做到主观与客观相结合。根据工程应用中综合评判的结果看，其判别成功率较高。

本书研究成果在理论上对原有岩石力学理论进行扩充发展，在研究方法和研究技术上提供一些新的思路。研究中还将部分的研究成果直接用于工程，在实际工程中印证理论分析成果，使其成为工程施工设计的有益参考。

本研究得到了国家自然科学基金重点项目 (No. 51439003)、国家自然科学基金面上项目 (No. 51579138) 水利部公益基金项目 (No. 201401029)、国家自然科学基金资助项目 (No. 51279091)、湖北省科学技术厅自然科学基金一般项目 (2014CFB673)、宜昌市科技局其他科学研究计划项目 (A15-302-Q07)、三峡大学青年拔尖人才培养计划科学基金项目 (KJ2014H012) 等多个项目的资助，对此，我们诚表谢意。

对于书中的不妥或疏漏之处，敬请读者批评指正。

作者

2014年11月于宜昌

目 录

前言	
引言	1
第1章 绪论	2
1.1 循环载荷作用下岩体力学特性研究	2
1.1.1 研究的必要性	2
1.1.2 研究的现状	3
1.1.3 研究中的不足	7
1.2 岩体卸荷作用下力学特性研究	7
1.2.1 研究的必要性	7
1.2.2 研究的现状	8
1.2.3 研究中的不足及本书开展的工作	9
1.3 酸性环境下岩体力学特性研究	10
1.3.1 研究的必要性及现状	10
1.3.2 研究中的不足及本书开展的工作	11
1.4 拉剪作用下岩体断裂损伤特性研究	11
1.4.1 研究的必要性	11
1.4.2 研究的现状	12
1.4.3 存在的问题及本书的主要工作	13
1.5 岩质边坡稳定性研究方法	14
1.5.1 岩质边坡稳定性研究现状	14
1.5.2 岩石边坡稳定性分析存在的问题和相关工作	15
1.6 岩体裂隙渗流量的相关研究工作	16
1.7 本章小结	17
第2章 试验设计	18
2.1 岩样的采集与加工	18
2.1.1 采用岩样的原因	18
2.1.2 岩样的种类和切片化验成果	18
2.1.3 采样的筛选	20

2.1.4 采样的工具	20
2.2 试验设备	21
2.2.1 RMT-150C 岩土力学试验系统	21
2.2.2 PHS-29A 数显 pH 计	22
2.2.3 ELE 岩石渗透仪	22
2.3 试验方法	23
2.4 研究技术路线	23
2.5 本章小结	24
第 3 章 循环载荷和恒载下的力学响应研究	25
3.1 循环载荷下力学效应研究	25
3.1.1 从能量的角度来说明三种波形的不同加载效果	25
3.1.2 从能量的角度来说明不同频率正弦波对应变累积量的统计	28
3.1.3 从破坏消耗的总能量来比较各种加载方式	30
3.1.4 不同峰值下个能量的分配与转化示意图	33
3.1.5 试件破坏阈值的选取	34
3.1.6 不同条件下力与变形的时间效应分析	35
3.1.7 加卸载循环的计算分析模型	62
3.1.8 力与弹性模量的关系研究	98
3.2 蠕变作用下的力学效应研究	106
3.2.1 砂岩蠕变值变化规律研究	106
3.2.2 卸载时瞬时恢复弹性变形量分析	107
3.2.3 蠕变和循环载荷对试件体应变的不同影响规律	109
3.3 本章小结	109
第 4 章 节理岩体卸荷条件下力学响应研究	112
4.1 卸荷原理的定性分析	112
4.2 裂纹性质的数值模拟	113
4.2.1 岩体中裂纹的应力集中研究	113
4.2.2 裂纹塑性区的研究	119
4.3 裂纹应力区分析	121
4.3.1 受压时裂纹应力区分布	121
4.3.2 直接叠加与数值模拟结果对比	122
4.3.3 受拉时裂纹的应力分区图	123
4.4 岩体动态卸荷拉裂作用的元件组合模型	126
4.4.1 理想介质的变形性质及力学模型	126
4.4.2 岩石的组合模型	127
4.5 不考虑卸载速率的卸荷岩体本构研究	136
4.5.1 卸荷岩体特点分析	136

4.5.2 试验模型	137
4.5.3 本构的拟合及其改进	137
4.5.4 工程应用	150
4.6 本章小结	153
第5章 屈服准则参数和岩体的断裂韧度研究	155
5.1 Drucker-Prager 准则参数与岩体断裂韧度	155
5.1.1 Drucker-Prager 准则	155
5.1.2 拉剪裂纹的端部应力	155
5.1.3 D-P 准则参数与 K_{IC} , K_{IIIC}	156
5.2 Coulumb-Mohr 准则参数与岩体的断裂韧度	157
5.2.1 Drucker-Prager 准则与 Coulumb-Mohr 准则外接	158
5.2.2 D-P 准则与 C-M 准则内接	158
5.2.3 平面应变的条件下	159
5.3 Hoek-Brown 准则参数与岩体断裂韧度	160
5.3.1 一般情况	160
5.3.2 平行共线裂纹	161
5.4 裂纹随机分布时的屈服准则参数与岩体断裂韧度	161
5.4.1 裂纹在整个空间随机分布	161
5.4.2 裂纹在特定空间随机开展	165
5.5 微裂纹区扩展半径 r 的确定	166
5.5.1 微裂纹区扩展半径 r 的假定	166
5.5.2 计算实例	166
5.6 推导得出的几组关系式的对比	167
5.7 损伤度分区	167
5.7.1 断裂准则	167
5.7.2 试验数据分析	168
5.7.3 未破坏区的细分	170
5.8 工程应用	171
5.8.1 工程概况及计算模型	171
5.8.2 有限元计算方案	171
5.8.3 有限元计算结果及分析	172
5.8.4 方案二和方案三的结果比较	178
5.8.5 计算值与监测值的对比	179
5.9 本章小结	180
5.9.1 结论	180
5.9.2 建议	181
第6章 酸性溶液浸泡的试验研究	182
6.1 对浸泡的时间尺度的分析和试验方法	182

6.1.1	研究时间尺度的必要性	182
6.1.2	时间尺度方法研究	182
6.2	不同岩性浸泡后岩样表面的形态差别	184
6.2.1	表面形态分析	184
6.2.2	微观解释	186
6.3	钙质中-细砂岩浸泡时间尺度分析	187
6.3.1	采样的筛选	187
6.3.2	岩样性质	187
6.3.3	试验方案	187
6.3.4	试验成果分析	187
6.3.5	化学损伤模型研究	192
6.4	本章小结	194
第7章	加卸载和浸泡的耦合分析	195
7.1	浸泡前后岩石强度变化	195
7.2	化学损伤模型的建立	196
7.2.1	化学损伤模型的分区	196
7.2.2	浸泡后模型弹性模量预测	197
7.2.3	浸泡后模型弹性模量预测值与实测值比较	199
7.3	浸泡中的均化效应与应力应变局部化	199
7.3.1	试验现象分析	200
7.3.2	浸泡后的均化效应研究	200
7.3.3	数值模型试验的数据分析	202
7.3.4	浸泡的缺陷放大作用	209
7.4	浸泡前后能量分配方式和循环破坏包络线面积比较	211
7.5	浸泡前后直接加载破坏对应的能量消耗变化	212
7.6	从破坏模式来分析能量转化	216
7.7	本章小结	216
第8章	岩体渗流的试验研究	218
8.1	无充填时轴压、围压和裂隙深度的影响	218
8.1.1	不同裂隙深度下的围压与流速关系分析	218
8.1.2	不同裂隙深度下的轴压与流速关系分析	220
8.2	填充物不密实时加载路径的影响研究	221
8.3	0.25~0.5mm 砂粒填充时渗流规律研究	224
8.3.1	不同围压与轴压下的数据汇总	224
8.3.2	砂粒填充条件下不同开度的影响	227
8.4	不同填充物粒度的影响分析	228
8.5	岩体通过加载裂隙渗流的规律	231

8.6 本章小结	234
第9章 基于有限元计算的岩质边坡分析方法研究	236
9.1 有限元重力加载比例法与强度折减法对比研究	236
9.1.1 有限元强度折减法	236
9.1.2 有限元重力加载比例法的原理和步骤	237
9.1.3 计算结果对比分析	239
9.1.4 有限元计算过程中的特殊情况	243
9.1.5 计算效率的比较	245
9.2 基于有限元分析的边坡稳定性模糊评判方法研究	246
9.2.1 引言	246
9.2.2 现有研究中存在的不足和改进	247
9.2.3 经过修正的评价因子和分级标准	250
9.2.4 隶属度的确定	250
9.2.5 基于有限元分析的权重比	251
9.2.6 综合模糊评判	255
9.2.7 模-精评判体系改进	256
9.2.8 工程应用	257
9.3 本章小结	258
第10章 结论及今后的研究方向	261
10.1 循环与蠕变的研究结论	261
10.2 卸荷原理的研究结论	262
10.3 裂隙断裂韧度和屈服准则参数的研究结论	264
10.4 酸性溶液浸泡试验的研究结论	264
10.5 加卸载和浸泡的耦合分析所得结论	265
10.6 渗流场试验的研究分析所得结论	265
10.7 基于有限元计算的岩质边坡分析方法改进	266
10.8 今后的研究方向	267
参考文献	269

引 言

水电工程、采矿工程、筑路工程、地下工程常常会遇到大量的岩体工程问题，且易发生事故。就水利水电工程而言，如大坝基础、电站进出口边坡、人工边坡、地下洞室、库岸坝肩等，其变形和稳定问题往往是工程建设中的关键问题之一，制约着整个工程的建设。

我国的水能资源 80% 以上都分布在西部地区（但开发利用量不足 10%），然而，受地质构造和气候条件的影响，西部地区地形地貌、地质条件十分复杂，在这一地区修建水电工程，不可避免地会遇到大量复杂的工程技术难题，岩质高陡边坡问题是这些难题中的突出问题之一。该地区的高边坡具有以下显著特点：①边坡高陡，高度在 300~1000m；②地应力高，现今边坡内部的水平或近水平应力在 15MPa 以上；③地震烈度高，部分地段地震烈度高达 9 度；④地质环境和岩体条件复杂；⑤暴雨和泄洪雨雾强度大、历时长。

在如此复杂的岩体赋存条件下，高边坡的失稳屡见不鲜，如 1985 年 12 月 24 日，天生桥二级闸道边坡开挖时发生滑坡；1989 年 1 月 7 日漫湾水电站左岸开挖时发生 10.6 万 m^3 的滑坡，使工期推迟一年，被迫移走一台机组，而且增加了 500 万 kN 抗滑力的加固工程；隔河岩水电站由于左岸洞挖导致边坡失稳，近 20 万 m^3 岩体发生解体，边坡处理工程延误工期近 3 个月。天生桥二级厂房边坡在 1986 年开挖后即发生近 150 万 m^3 的山体蠕变位移，迫使边坡开挖暂时中断，进行了减载、排水、施力、预加应力锚索；龙羊峡水电站下游虎山坡在 1989 年 7 月山体滑坡，总塌滑量 81 万 m^3 ，给电站安全运行带来严重威胁。因此，在我国水利水电建设中，边坡工程普遍存在着严重问题，有些问题已成为制约工程建设成败的关键，严重地影响到整个工程的建设进程与造价，也威胁着人民生命财产的安全。

因此，对边坡工程的研究，尤其是复杂情况下岩质边坡的稳定、变形研究，具有十分重大的现实意义和经济价值。在边坡的稳定与变形研究中，只有在正确认识边坡岩体的力学特性，并在实际计算过程中合理考虑这些力学特性，才能使计算结果具有分析研究的价值，才能对实际工程进行指导。

第 1 章 绪 论

水利水电工程中常常会遇到大量的岩石边坡工程，这些边坡工程中一般都存在着岩体稳定性问题，有些问题已成为了工程建设进程与安全的重要制约因素。随着西部水电大开发逐渐展开，该问题在蓬勃发展的水电工程建设中显得更为突出。这类边坡工程有一个共同的特点就是所建边坡工程一般进行了人工开挖，边坡既高又陡，地质条件复杂，环境因素恶劣，不仅有强烈的荷载作用，并且多因素联合作用。因此，针对边坡工程的研究是水利水电工程边坡中一个突出的问题，该研究对水利水电工程的安全性具有十分重要的意义。

本书就是主要以岩质边坡稳定性分析为线索，重点针对现阶段岩质边坡稳定分析中的几个方面内容展开研究，希望研究成果在理论上对原有岩石力学理论进行扩充发展，在研究方法和研究技术上提供一些新的思路。研究中还将部分的研究成果直接用于工程，在实际工程中印证理论分析成果，并力求使计算分析的成果成为工程施工设计的有益参考。研究过程中主要采用四种方法：能量分析方法、时间效应分析方法、基于有限元的分析方法、基于断裂韧度和屈服准则参数的分析方法，对岩体不同的赋存环境进行研究。赋存环境的主要变化因素包括：不同的载荷形式、酸性溶液环境、动水环境。

下面将对本书研究涉及的相关领域研究成果作一定的介绍，以此为基础，找出现有研究中需要发展完善的内容，指导研究技术路线的形成和研究方法的选用。

1.1 循环载荷作用下岩体力学特性研究

1.1.1 研究的必要性

岩体和金属一样，都具有疲劳破坏的特性，但由于岩体的非均质性和组成结构的随机性都强于金属，导致其疲劳破坏的演变过程比金属更为复杂，更不易描述。例如，在周期荷载作用下，岩体不可逆变形的总量随着循环次数的增加而增长；但在不同的应力水平下，不可逆变形的发展趋势具有显著的，甚至是质的差异。应力水平很低时，最初几次的循环荷载将导致产生较大的不可逆变形；随着循环次数之增加，其不可逆变形的增长率逐步衰减，最终趋向于一个比较稳定的常值。但是当应力水平达到某一“门槛”值后，情景则迥然不同；循环次数之增加将促使不可逆变形的加速增长，最终导致整个试件的破坏^[1]。研究这些现象不但有一定的理论价值，还有较强的工程应用价值。

在工程运营阶段，岩体在周期荷载作用下的力学性质对工程的长期稳定性具有重要意义。例如，山区中周期荷载作用下高速公路、铁路、桥梁的岩基，反复排、蓄水过程中大

坝坝基的变形和稳定性,以及岩体在不可预料地震荷载作用下的响应等工程问题,都需要对岩石的疲劳特性有深入的研究。具体分类如下^[2]:

(1) 坝肩边坡岩体,受到拱坝的推力(由拱坝自身重力,温度应力和库水推力引起)作用。随着库水位的涨落,该推力作用也在从大到小、从小到大的不断循环中。这样的循环上限值较大,但下限值一般不会降到0,即不会出现全卸载。对应库水位不同的升降速率,库水骤降的工况,荷载变化速率最快。

(2) 一些高架桥悬索桥的承力岩体,桥上载荷不断在改变,对其承力岩体形成循环加卸载的效应。

(3) 一些机构,如偏心的机器转子等都可能带来承力岩体的载荷不断加卸载。

(4) 安装机组的地下厂房围岩和机组机座岩体。

(5) 文献[3]中试验结果表明,在进行煤柱设计时,应考虑不同煤岩类型即煤岩组分、结构以及是否受采动应力的反复作用影响。如果煤柱受到采动应力的反复作用。例如,条带开采、房柱式开采及多层重复采动影响,为确保煤柱的安全稳定,应适当加大煤柱的强度安全系数,同时应根据煤层条件,加以区别对待,对于煤层层理、节裂发育、煤体破碎、强度较低的煤层,应在正常煤柱强度预计的基础上,加大安全储备系数,以此进行煤柱尺寸设计和采动沉陷预计。

文献[1]也指出,一些大坝坝基观测资料也显示出经过数年或十余年的周期蓄水-放水后,坝基岩体的变形趋向于稳定,每一蓄放水循环周期所导致的不可逆变形量趋向于一个稳定值,且量值很小。如果,某一大坝的岩基变形观测值经过多年的蓄水-放水循环后未见有衰减,或者甚至于出现加剧的趋势时,那就意味着坝基岩体内出现了严重的不正常工作状态,需予以高度重视,认真查清原因和采取相应措施。

笔者在下述研究中从力学加载控制因素的角度统一了几种不同的单轴力学加载方式,认为单轴状况下的载荷形式都可以用分级循环加载方式来表示,其余载荷形式均是该方式的特殊表现,各种载荷形式下的力学响应和相关力学参数均可根据分级循环加载试验获取。分级循环加载方式还能提供力学参数的动态演化过程。

综上所述,研究岩石的损伤累积引发的疲劳破坏是具有实际意义的。

1.1.2 研究的现状

岩石一般是包含着许多孔洞、裂缝等不连续面的非均匀非线性体,所以在循环载荷作用下岩石表现出一些与简单载荷作用下完全不一样的特性,已有相关研究成果表明,在周期性循环载荷作用下岩石的应变将呈现出滞回特性^[4-7],岩石的破坏一般为疲劳破坏且存在疲劳破坏“门槛值”^[1]。

1968年,Gordon和Davis^[8]首次报道了循环加载作用下饱和岩石的滞后现象,并指出在应变大约 10^{-6} 以下时衰减是线性的。1981年,Spencer^[9]发现在饱和岩石中存在应力弛豫、衰减和模量弥散。Holcomb^[10]通过辉绿岩和花岗岩的循环差应力试验,研究了膨胀岩石的记忆、弛豫和损伤。循环差应力作用下的准弹性行为具有“记忆”特性。当岩石样品回到某种先前的差应力状态时,膨胀岩石中的滞后回线就会封闭,记忆就是通过材料特性滞后回线的封闭来显示的。同年,Memery对辉绿岩和花岗岩进行了循环差应力试验,指

出当差应力大于或等于破坏强度的 85% 时, 体积膨胀, 这是非弹性行为的表现, 在某些方面, 它们又显示更典型的准弹性行为, 由闭合的滞回曲线证明了岩石的记忆性。

1983 年, Akai^[11] 提出岩石循环载荷下的破坏受静态全过程轴向应变控制等。与此同时, 葛修润和联邦德国卡尔斯鲁厄大学土岩力学所的 Th. Mutschler^[12-14] 合作共同完成了周期载荷下薄层灰岩大型三轴试件的力学性能试验研究, 指出在循环载荷的作用下岩石不可逆应变发展存在着三个阶段并提出以应变来度量岩体的强度和破坏; 而且通过试验还发现: 在周期载荷作用下, 不可逆应变的总量随着循环次数的增加而增长; 但在不同的应力水平下, 不可逆应变的发展趋势具有显著的, 甚至是质的差异。应力水平很低时, 最初几次的循环载荷将导致产生较大的不可逆应变; 随着循环次数的增加, 其不可逆应变增长率逐步衰减, 最终趋向于一个比较稳定的常值, 但是当应力水平达到某一“阈值”后, 情景则迥然不同; 循环次数之增加将促使不可逆应变的加速增长, 最终导致整个试件的破坏。试验结果表明, 这一特征应力值略低于常规三轴试验中的所谓“屈服值”; 还发现在循环载荷的应力-应变曲线图中, 在剪切应力水平较低时, 第一次循环的滞后环很大, 随循环次数增加, 滞后环逐步缩小; 当剪切应力水平已接近破坏值时, 随着循环次数的增加, 滞后环越来越大。

1994 年, McCall K. R.^[15] 又将由不同成分组成的非均匀材料模型的宏观弹性性质与许多细观的滞回弹性单元联系起来, 提出岩石的滞后非线性弹性的基本原因在于岩石含有大量诸如裂纹、孔洞等细观结构特征, 这些细观弹性单元控制了准静态的状态方程和弹性波的响应。1998 年, Tutuncu 等^[16,17] 利用试验分析了影响沉积岩非线性弹性行为的一些主要因素: 频率、应变振幅和饱和流体特性; 在相同的应力条件下, 超声波、测井频段 (20kHz)、低频和静态测量得到的杨氏模量和泊松比是不同的, 还证明砂岩在很大的频率范围内具有频率相关性弹性行为 (黏弹性); 一系列单轴应力循环测量表明, 在低频 (0.01Hz) 时杨氏模量随应变振幅的增加而减小, 衰减随应变振幅的增加而增加。

国内也有一些学者对岩石的滞后特性进行了研究。

2003 年, 席道瑛^[4] 在 MTS 上进行超过砂岩屈服强度的正弦波 (频率为 5~15Hz) 加载试验。通过对 σ - ϵ 滞回曲线和滞回曲线的面积、体应变随轴向应变的变化, 探讨了岩石在循环载荷作用下微损伤的演化, 通过轴向应变随时间的变化, 探讨了循环载荷作用下的应变硬化和软化以及饱和液体对应变随时间变化曲线的影响。2004 年, 陈运平^[5] 通过对饱和砂岩和大理岩的循环荷载试验, 分析了饱和岩石在循环荷载下的应力-应变滞后回线、瞬时杨氏模量、泊松比的 X 形变化曲线, 以及杨氏模量随应变振幅的增加而减少等滞后现象, 并分析了施加外力的应变振幅对衰减的影响。2005 年, 许江^[6] 通过不同加载速率和不同载荷水平的周期性循环载荷作用下细砂岩变形特性的试验研究, 探讨了岩石在周期性载荷作用下的变形特性。结果表明: 细砂岩在周期性循环载荷作用下的卸载曲线与加载曲线不重合, 形成一封闭的滞回曲线, 且该滞回曲线在低载荷水平下从第 2 次循环起逐渐趋于稳定; 不同加载速率和不同载荷水平时, 周期性循环载荷作用下加卸载曲线的二次拟合参数从第 2 次循环起变化不大, 并逐渐趋于不变; 周期性循环载荷作用下, 岩石变形的响应程度与加载速率和载荷水平有关。同年, 席道瑛^[7] 引入一种滞后非线性弹性材料的宏观模型——Preisach - Mayergoyz 模型 (PM 模型) 来模拟岩石离散记忆, 认为多孔饱和岩石

的滞后特性是其具有离散记忆特性的原因。同时,还可以利用应力-应变状态方程来模拟试验观测到的饱和岩石的滞后现象。2006年,王鸿^[18]通过对循环载荷条件下细粒砂岩在不同载荷水平、不同位移速率时的变形特性及其塑性滞回环演化规律的分析,发现在相同位移速率和相同载荷水平条件下,同一次循环时岩石变形曲线的加载段与卸载段的相应拟合参数值不同。陈运平^[19]分析了在循环荷载作用下,孔隙饱和岩石呈现出闭合的应力-轴向(径向)应变滞后回线、轴向应变-径向应变滞后回线和X形的瞬时弹性模量(杨氏模量和泊松比)等滞后非线性弹性特征,引入一种滞后非线性弹性材料的宏观模型 Preisach-Mayergoyz 模型(PM 模型)来描述岩石的这些特征。在 PM 模型中,孔隙饱和岩石的滞后非线性弹性特征由 PM 密度空间、施加的应力历史和岩石的滞后细观单元(HMU)的弹性特性所决定。席道瑛、陈运平^[20]通过试验得知,在加卸载阶段弹性模量随应变变化趋势各不相同,导致瞬时弹性模量与应变成不对称蝴蝶结形;以3种不同黏滞系数的孔隙液体饱和的合肥砂岩、自贡长石砂岩和大理大理岩,分别进行不同频率的循环加载试验,获得随孔隙流体黏滞系数增大,蝴蝶结形张角增大,滞后增强,随频率增高,弹性模量增大。

许江^[21]通过对周期性循环载荷作用下3种不同应力水平时砂岩滞回曲线演化规律的试验研究发现:岩石滞回曲线是否发生变化将取决于应力水平等外在因素,一般而言,在较低应力水平情况下,其滞回曲线所围的面积随循环次数增加有可能就趋于稳定,但在较高应力水平时,其滞回曲线所围的面积随循环次数增加将呈减少—恒定—增加的演化趋势。2007年,王鸿、许江^[22]通过周期性循环载荷作用下的烘干、自然干燥、饱水等3种不同水饱和度时细粒砂岩变形特性及其滞回曲线演化规律的试验研究,分析结果发现随着岩石含水量的不断增加,岩石的强度、变形及其弹性模量将随之减小,每次循环形成的滞回曲线的变化有越加明显的演化趋势。但是随着循环次数的增加各个应变相对残余变量均逐渐趋于稳定,同时发现岩石变形的弹性后效现象受含水量的影响甚微。

关于循环载荷下岩石疲劳损伤破坏的研究现状如下。

1992年,葛修润、卢应发^[23]等利用MTS电液伺服刚性压力机进行了大量单轴循环载荷试验,试验证明了岩石在循环载荷作用下的确存在疲劳门槛值点,且该点为静态全过程体积应变的最小点。同时也发现随着循环次数的增加,环向不可逆应变和轴向不可逆应变的增量都逐渐减少,最后趋于常数,轴向应变趋于稳定;随着循环次数的增加,体积应变的增量基本不变;以及对岩石做循环试验时,当循环幅值应力小于岩石过峰值应力后所具有的门槛值应力时,其应变规律和刚度系数仍具有上述特点。当循环载荷幅值高于阈值时,循环试验的应变规律与前述截然不同,岩石疲劳将发生破坏。在岩石疲劳破坏应变所控制的观点基础上,进一步提出了体积应变作为疲劳破坏控制量的观点。试验结果表明:载荷差、载荷率、频率对岩石循环不可逆应变的发展都有一定的影响。但载荷率和频率相对幅值载荷和载荷差的影响可以忽略不计,即岩石的疲劳寿命只要由幅值载荷所决定。

2001年,葛修润^[24]用自主研发的CT机专用三轴加载试验设备,进行了实时的岩石疲劳损伤演化CT细观试验,从细观尺度证实了岩石疲劳破坏存在门槛值,研究了循环荷载最大应力值的变化对岩石疲劳破坏的影响机理,得到了岩石细观疲劳损伤扩展的初步规律。

到2003年,葛修润^[25]利用自主研发成功的RMT-150B岩石力学试验系统完成了单轴循环载荷作用下砂岩、大理岩和花岗岩试件疲劳应变特性的研究。试验结果表明:岩石的疲劳破坏受到静态应力-应变全过程曲线的控制,疲劳破坏终点的应变量与该周期载荷的上限应力在静态应力-应变全过程曲线后区对应的应变量相当,此规律适用于不同岩性的岩石;周期载荷作用下,岩石轴向不可逆应变发展可以划分为3个阶段。周期载荷的上限应力和幅值是影响岩石疲劳寿命的主要因素。2004年,又利用RMT-150B岩石多功能力学试验系统和Locan 320声发射仪进行了大量的单轴疲劳试验^[26],试验过程中同步记录岩石试件的位移和声发射信息,然后进行比照分析,研究了循环载荷作用下岩石疲劳破坏过程中的应变规律和声发射特征,揭示了疲劳破坏过程中的应变规律、声发射特性以及两者之间的联系,从宏观不可逆应变和微观损伤的角度对岩石疲劳破坏过程进行了分析,确定了轴向应变呈现疏—密—疏的3阶段规律和横向应变的2阶段规律,论述了选择轴向应变作为宏观损伤参量的合理性。他们还利用其研制的CT机专用三轴加载试验设备,进行了实时的岩石疲劳损伤演化CT细观试验,得到了岩石细观疲劳损伤扩展的初步规律,从细观尺度证实了岩石疲劳破坏存在门槛值,研究了循环载荷最大应力值的变化对岩石疲劳破坏的影响机理,得到了岩石细观疲劳损伤扩展的初步规律。同年,席道瑛^[27]通过对大庆石油饱和长石砂岩的单轴循环试验和橘红色砂岩的三轴循环破坏试验,获得了应变随时间变化曲线(类似一条常载荷的蠕变曲线),并研究分析了岩石的模量随循环数增加而下降,衰减随循环数的增加而增大,损伤随循环数的增加而增大直至破坏的变化规律。2006年,吴献强、丁德馨^[28]从宏观力学性能和微观损伤两方面,对周期荷载作用下岩石疲劳损伤特性进行了深入地分析。岩石的疲劳破坏过程宏观上可视为一个轴向不可逆变形逐渐发展积累,直到失稳破坏的过程。微观上是一个微裂纹萌生、扩展和贯通,最终断裂的过程。并指出岩石疲劳损伤的宏观力学特性只不过是微观损伤演化的综合表现而已。

许多学者对循环载荷下岩石的杨氏模量进行了研究。

2000年,许江、冯涛等^[29]通过低应力水平下不同加载速率时循环加载次数对三城目安山岩的应变及其杨氏模量影响的试验研究成果发现:即使在低应力水平下,岩石也表现出明显的非弹性性质,且当载荷回复到零时,岩石内部仍然还保留有一定大小的残余应变;随着循环加载次数的增加,岩石应变曲线的线性度增强,杨氏模量增大,但其增加的幅度主要产生在第二循环,自第三循环起,这种变化变得很小了;将岩石试件放置一段时间之后再进行试验时,杨氏模量有所减小,但当继续进行循环加载时,其杨氏模量又大致回复到了放置前的大小;不管加载速率怎样变化,其杨氏模量随循环加载次数的变化均具有大致相同的变化规律。

2001年,尤明庆、苏承东^[30]利用伺服试验机对岩样进行常规三轴的加载、卸载试验,研究岩样变形特性与应力状态的关系。岩石内部存在裂隙,加载过程中裂隙会闭合、滑移,逐步产生摩擦力。其最大值受到轴向应力和围压的显著影响,但具体数值是否达到最大摩擦力由局部应力状态决定。卸载时摩擦力的作用方向会发生改变,并抑制裂隙面之间滑移变形的恢复,使岩样内部产生残余变形。围压对杨氏模量的影响与岩石内部的损伤状态有关,但岩石的损伤特征不能从岩样轴向压缩的加载或卸载杨氏模量直接反映。

2004年,陈运平等^[31]通过对饱和砂岩和大理岩的循环载荷试验,分析了饱和岩石在循环载荷下的应力-应变滞后回线、瞬时杨氏模量、泊松比的X形变化曲线,以及杨氏模量随应变振幅的增加而减少等滞后现象,探讨了饱和岩石在循环载荷下的滞后和衰减现象的微观机理,并研究了不同孔隙流体和不同性质的岩石在循环载荷试验条件下应力-应变曲线的细微差异,发现其应力-应变滞回曲线的形状是不同的。

另外,一些学者从不同的加载速率^[32]、不同的加载路径^[33]、不同的应力状态、不同的岩性、加卸载过程方面研究了岩石的力学特性^[34-43]。

1.1.3 研究中的不足

现阶段循环载荷作用下岩体力学特性研究中还存在如下不足。

(1) 能量分析法不但能对宏观的现象作出合理的解释,还能对微观的作用机理作出相应的推测。而上述研究很少从能量的观点对试验成果进行系统的分析,极少数研究中出现少量文字的定性分析。针对此,各种影响因素对能量分配的定量分析是本研究中的重点问题。

(2) 现有的疲劳破坏准则与某些试验数据差异较大,本研究拟从能量的观点出发,提出新的疲劳破坏准则。

(3) 卸载段和加载段的弹性能塑性能和断裂能演化规律,可以较清晰地解释一些加卸载条件下岩体的不同力学响应。这部分内容在之前的研究中很少被提及。

(4) 从力学定义上将循环加卸载、岩体直接加载破坏和岩体恒载下蠕变这几种不同的岩体所处力学环境统一起来是很有价值的,同时,如何从能量的观点对各载荷形式进行区分也有一定的研究意义,这些都是之前的研究中未进行的工作。

(5) 上述研究中未涉及试件高度对其循环载荷下力学特性的影响研究。

(6) 建立瞬时变形速率和瞬时载荷速率的关系并在试验中进行验证也是之前研究中尚需完善的重要内容之一。

1.2 岩体卸荷作用下力学特性研究

1.2.1 研究的必要性

工程岩体,尤其是开挖卸荷岩体,其岩体的受荷历程与岩体参数呈现出的是卸荷的过程。如图1.1的应力-应变曲线所示。该图揭示:不同岩体工程有着不同的受力过程,不同的受力过程呈现出不同的受力特性,不同的受力特性要用不同的理论与方法进行分析研究,才能符合实际。也就是说,卸荷岩体力学与传统岩体(石)力学有应力路径、力学参数、屈服条件和分析方法等不同。

岩体工程在加载和卸荷条件下,其力学特征有着本质的区别。岩石本身在加载和卸荷条件下力学特征的就有差别,而在岩体中有许多各种类型的节理,这些结构面在加载力学状态下,仍有很好的力学特征。但在卸荷条件下,特别是卸荷量很大的情况下和出现拉应力以后,岩体中结构面的力学条件将发生本质的变化。这些结构面迅速劣化岩体质量,从