

岩体毫秒级变形速率 及能量模拟研究

刘杰 李建林 王瑞红 蔡健 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

岩体毫秒级变形速率 及能量模拟研究

刘杰 李建林 王瑞红 蔡健 著

内 容 提 要

本书精确模拟了岩块变峰变频加载和卸载条件下的岩体弹性位移。在提出错峰现象、变形速率相对于加载速率的滞后时间等岩体动力学新概念的基础上,通过不同波形变频变峰动荷载或者循环加卸载模拟地震、库区水位骤升骤降等诸多动荷载工况对岩体的作用,对砂岩、灰岩和石英云母片岩的变形速率、加载速率及能量进行了毫秒级模拟研究,并在此基础上得到岩石种类、加载波形等因素对毫秒级变形速率及能量变化影响规律。

本书可供水利水电、土木建筑、铁路、公路交通等部门的科研人员及研究生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩体毫秒级变形速率及能量模拟研究 / 刘杰等著

. -- 北京:中国水利水电出版社,2015.9

ISBN 978-7-5170-3690-6

I. ①岩… II. ①刘… III. ①岩石变形特性—研究

IV. ①TU454

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第242686号

书 名	岩体毫秒级变形速率及能量模拟研究
作 者	刘杰 李建林 王瑞红 蔡健 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	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 8.75印张 207千字
版 次	2015年9月第1版 2015年9月第1次印刷
定 价	28.00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

前言

水利水电等工程建设过程中，常常会遇到大量的、复杂的岩体工程结构（简称岩体工程），如高陡边坡、地下洞室、路（坝）基等岩体结构。这些岩体工程中一般都存在岩体稳定性问题，有些问题已成为工程建设进程与安全的重要制约因素。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。这类岩体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，而且多因素联合作用，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。

现阶段，工程中若进行某些特定工程条件下的岩体稳定性预测时，没有相应的试验参数作为支撑，而只能依靠经验获取这些参数，则使得某些工程问题在定量回答时试验基础不充分。例如，遭受爆破震动波影响或地震波影响后岩质劣化的坡体是否稳定？岩质工程在遭受变频变峰载荷时是否稳定？

变频变峰动荷载可模拟地震、库区水位骤升骤降、爆破引发的振动、施工运营期的机械振动等诸多动载荷工况。

核电站围岩、永久船闸岩质边坡、大型水电站地下厂房围岩、道路路基等岩体工程的安全直接影响到核电站和水电站的正常运营，在承载力极限状态内，若出现过大的位移，也会出现设备损毁等灾难性的后果。因此，精确模拟岩体在以地震为主的变峰变频循环载荷下的位移响应是保证其处于正常使用极限状态内的前提。其中，由于重大工程围岩设计要求较高，在地震力未使其超出承载力极限状态时，由于广义塑性变形较小，大部分围岩体处于弹性变形阶段，如何精确模拟岩块变峰变频加载和卸载条件下的岩体弹性位移就是本书要解决的关键问题之一。该问题若得以解决，可作为复杂本构模型分析的基石，在复杂条件下岩体变形中就可以较好地分离出弹性变形和广义塑性变形（包括断裂损伤引发的变形）。

现阶段在实际工程中解决该问题时，岩石多采用线弹性或理想塑性本构，未考虑加载和卸载应力应变曲线的不重合性，未考虑岩体在各受力阶段的变刚度特性。在研究团队的前期试验显示，这些现阶段未重点考虑的因素却会

对岩体位移精确预测产生极大影响。

常规计算中的弹性模量为常数，而实测动荷载下即时弹性模量均随时间变化，且加载和卸载有明显的区别。单轴加载条件下，对试件尺寸为 100mm（高）×50mm（直径）的试件而言，在加载阶段，不考虑岩石弹性模量变化的常规计算将比实测的轴向位移大 0.1482mm，同时常规计算中岩体吸收的应变能也要远大于实测值；在卸载阶段，常规计算将比实测的轴向位移多回弹 0.0940mm，同时常规计算中岩体释放的应变能也要远大于实测值。

上述差异随着岩体尺寸的增大还有不断增大的趋势，当试件尺寸增大为以前的 16 倍大，在相同的轴向应力下，不考虑岩石弹性模量变化的常规计算将比实测的轴向位移大 2.4745mm。在卸载阶段，常规计算将比实测的轴向位移多回弹 2.0mm。

上述分析说明，大尺度岩块尤其是孔隙率较高的岩块，若继续使用常规的弹性阶段线性本构，将会使得位移计算与实测数据出现极大的偏差。这就使变频变峰动荷载下位移能量毫秒级精确模拟研究具有较强的学术研究价值和工程价值。

本书的研究，即是在提出错峰现象、变形速率相对于加载速率的滞后时间等岩体动力学新概率的基础上，通过不同波形变频变峰动荷载或者循环加载卸载模拟地震、库区水位骤升骤降、爆破引发的振动、施工运营期的机械振动等诸多动载荷工况对岩体的作用，对砂岩、灰岩和石英云母片岩的变形速率、加载速率以及能量进行了毫秒级模拟研究，在提出了不同波形变频变峰动荷载下岩体毫秒级变形速率及能量模拟的基础上，得到岩石种类、加载波形、加载频率、加载速率、围压、峰前峰后、加载幅值等因素对毫秒级变形速率及能量变化影响规律。研究成果不仅扩充和发展了岩石动力学理论，而且具有较重大的工程价值。

本书的研究得到了国家自然科学基金重点项目（No. 51439003）、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）、湖北省科学技术厅项目（2011CDB182）；湖北省自然科学基金项目（2011CDB182）；中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金项目（IWHR-SKL-2012221）；宜昌市科学技术研究与开发项目（A2012-302-03）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误之处，敬请读者批评指正。

作者

2014 年 11 月于宜昌

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 研究意义和应用前景	1
1.2 该课题国内外研究现状	3
1.3 本章小结	8
第2章 试验方案及研究方法	9
2.1 岩样筛选与试样制作	9
2.2 试验仪器及设备	10
2.3 本书主要研究工作	11
2.4 本章小结	14
第3章 毫秒级动力作用下相关概念分析	15
3.1 垂向力变化速率与垂向变形速率分析	15
3.2 表观弹性模量	16
3.3 横向变形速率	19
3.4 瞬时泊松比	20
3.5 相位差及滞回环形态分析	21
3.6 本章小结	24
第4章 毫秒级动力作用下位移速率和加载速率预测公式研究	26
4.1 三角波速下加载速率和位移速率预测公式研究	26
4.2 三角波和正弦波加载试验成果分析	37
4.3 正弦波速下加载速率和位移速率预测公式研究	42
4.4 正弦波各荷载峰值下变形速率计算值与实测值对比	44
4.5 错峰现象研究	46
4.6 本章小结	47
第5章 毫秒级动力作用下不同波形能量模拟对比研究	49
5.1 三角波毫秒级能量模拟研究	49
5.2 正弦波毫秒级能量模拟研究	55
5.3 不同频率同一峰值加载下相同波形能量对比研究	60
5.4 同一频率同一峰值加载下不同波形能量对比研究	63
5.5 本章小结	65

第 6 章	毫秒级动力作用下非滞后与滞后时间段对比研究	67
6.1	三角波非滞后与滞后时间段的定义与划分	67
6.2	不同峰值条件下三角波滞后时间对比	68
6.3	不同岩体不同加载速率条件下滞后时间对比	70
6.4	正弦波非滞后与滞后时间段的定义与划分	74
6.5	不同波形不同频率下的滞后时间分析	75
6.6	滞后效应对岩体能量吸收的影响	81
6.7	本章小结	84
第 7 章	不同因素对各计算参数变化规律的影响	85
7.1	加载速率对参数规律变化的影响	85
7.2	围压对参数规律变化的影响	90
7.3	位移速率对参数变化规律的影响	98
7.4	不同岩性对参数变化规律的影响	100
7.5	本章小结	105
第 8 章	循环加卸载峰前峰后加载对比及演化分析	107
8.1	峰前峰后三角波加载试验成果分析	107
8.2	峰前峰后三角波加载表观弹性模量对比研究	110
8.3	峰前峰后三角波加载速率对比研究	110
8.4	峰前峰后三角波加载滞后时间对比分析	114
8.5	峰前峰后三角波加载能量发育对比研究	118
8.6	本章小结	120
第 9 章	结论与展望	122
9.1	主要结论	122
9.2	展望	125
参考文献		127



绪论

1.1 研究意义和应用前景

水利水电等工程建设过程中,常常会遇到大量的、复杂的岩体工程结构(简称为岩体工程),如高陡边坡、地下洞室、路(坝)基等岩体结构物。这些岩体工程中一般都存在岩体稳定性问题,有些问题已成为工程建设进程与安全的重要制约因素。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尤为突出。这类岩体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,而且有多因素联合作用,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。

现阶段,工程中若进行某些特定工程条件下的岩体稳定性预测时,没有相应的试验参数作为支撑,而只能依靠经验获取这些参数,则使得某些工程问题在定量回答时试验基础不充分。例如,遭受爆破震动波影响或地震波影响后岩质劣化的坡体是否稳定?岩质工程在遭受变频变峰载荷时是否稳定?

变频变峰动荷载可模拟地震、库区水位骤升骤降、爆破引发的振动、施工运营期的机械振动等诸多动载荷工况。

核电站围岩、永久船闸岩质边坡、大型水电站地下厂房围岩、道路路基等岩体工程的安全直接影响到核电站和水电站的正常运营,在承载力极限状态内,若出现过大的位移,也会出现设备损毁等灾难性的后果。因此,精确模拟岩体在地震为主的变峰变频循环载荷下的位移响应是保证其处于正常使用极限状态内的前提。其中,由于重大工程围岩设计要求较高,在地震力未使其超出承载力极限状态时,由于广义塑性变形较小,大部分围岩体处于弹性变形阶段,如何精确模拟岩块变峰变频加载和卸载条件下的岩体弹性位移就是本书要解决的关键问题之一。该问题若得以解决,可作为复杂本构模型分析的基石,在复杂条件下岩体变形中就可以较好地分离出弹性变形和广义塑性变形(包括断裂损伤引发的变形)。

现阶段在实际工程中解决该问题时,岩石多采用线弹性或理想塑性本构,未考虑加载和卸载应力应变曲线的不重合性,未考虑岩体在各受力阶段的变刚度特性。在研究团队的

前期试验显示，这些现阶段未重点考虑的因素却会对岩体位移精确预测产生极大影响，如图 1.1 所示。

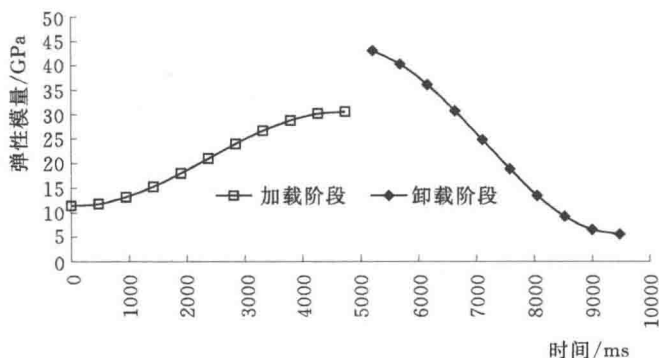


图 1.1 单轴 0.1Hz 正弦波加、卸载条件下砂岩实测
即时弹性模量随时间变化

常规计算中的弹性模量为常数，而实测动荷载下即时弹性模量均随时间变化，且加载和卸载有明显的区别。单轴加载条件下，对试件尺寸为 100mm（高）×50mm（直径）的试件而言，在加载阶段，不考虑岩石弹性模量变化的常规计算将比实测的轴向位移大 0.1482mm [图 1.2 (a)]，同时常规计算中岩体吸收的应变能也要远大于实测值；在卸载阶段，常规计算将比实测的轴向位移多回弹 0.0940mm [图 1.2 (b)]，同时常规计算中岩体释放的应变能也要远大于实测值。

上述差异随着岩体尺寸的增大还有不断增大的趋势，当试件尺寸增大为先前的 16 倍大，在相同的轴向应力下，不考虑岩石弹性模量变化的常规计算将比实测的轴向位移大 2.4745mm (图 1.3)。在卸载阶段，常规计算将比实测的轴向位移多回弹 2.0mm (图 1.4)。

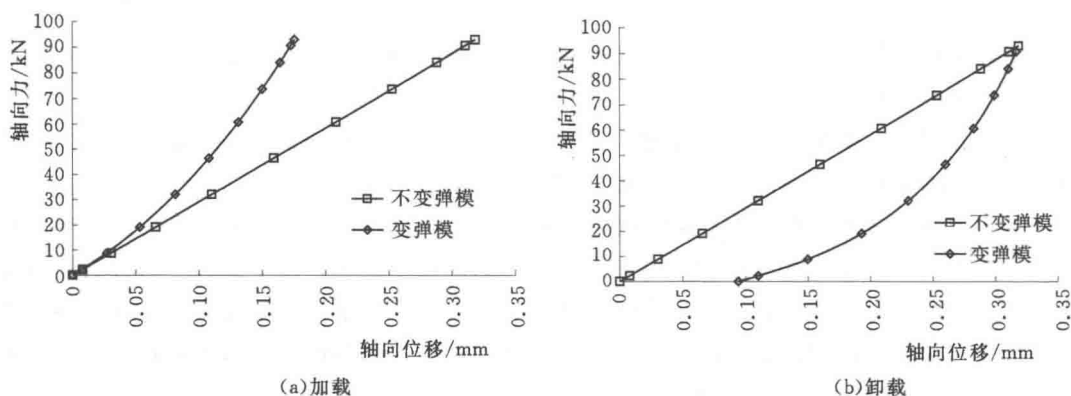


图 1.2 100mm×50mm 试件轴向力-位移图

上述分析说明大尺度岩块尤其是孔隙率较高的岩块若继续使用常规的弹性阶段线性本构，将会使得位移计算与实测数据出现极大的偏差。这就使变频变峰动载下位移能量毫秒



经精确模拟研究具有较强的学术研究价值和工程价值。

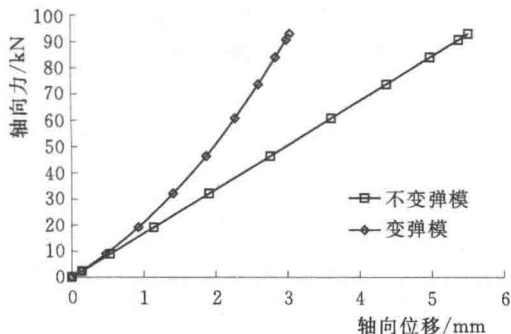


图 1.3 16 倍标准试件加载轴向力-位移对比图

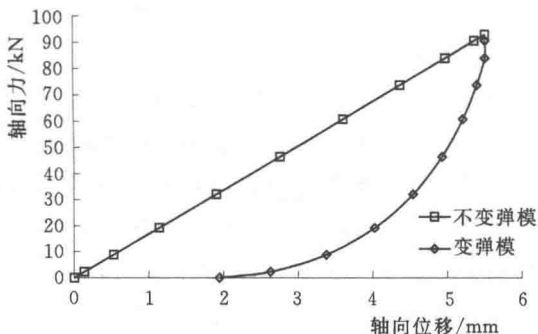


图 1.4 16 倍尺寸卸载时刻轴向力-位移关系图

1.2 该课题国内外研究现状

1.2.1 单轴压缩试验研究现状分析

目前在岩石工程中所使用的岩石变形参数,如弹性模量和泊松比,都来自于压缩试验。对于岩石单轴压缩试验的研究,国内外学者已经有了非常丰富的研究成果。

1966 年, M. Goldstein 等^[1]通过单轴压缩试验研究了节理岩体强度的尺度效应; 1968 年, T. K. Perkins 等^[2-5]通过单轴压缩试验表明, 很多岩石的拉伸弹性模量都远小于压缩弹性模量, 某些岩石两者之比可以达到 10 以上; 1980 年, P. N. Sundaram 等^[6]由于岩石的拉伸弹性模量都远小于压缩弹性模量, 即使在普通的劈裂法试验中, 利用统一公式也会给岩石拉伸应力的计算结果带来比较大的误差; 1981 年, E. T. Brown^[7]通过单轴试验测量岩石材料单轴抗压强度和变形性质; 1995 年, A. Bobet 等^[8-10]对岩石模拟材料试件进行了单轴压缩试验, 研究了次生裂纹萌生、扩展、与汇合的试件断裂贯通机制; 2000 年, X. L. Lei 等^[11]通过单轴压缩试验, 研究了岩石在单轴压缩试验中的破坏过程; 2000 年, V. Rudajev 等^[12]研究了岩石在单轴压缩试验中应力-应变全过程; 2000 年, 国际岩石力学学会 (ISRM) 对单轴压缩试验建议方法草案称 “The ends of the specimen shall be flat to $\pm 0.01 \text{ mm}$ ”^[13]。

同时, 国内从很早开始就有很多学者对于岩石单轴压缩试验进行了大量的研究: 1982 年, 白世伟等^[14]研究了单轴压缩圆柱状岩石试验应力分布均匀性; 1998 年, 尤明庆等^[15]研究了岩石试样单轴压缩的破坏形式, 并分析其承载能力降低的原因; 2002 年, 谢强等^[16]对石灰岩做了岩石的单轴压缩试验, 研究岩石受压及破坏失稳过程中的声发射特性; 2002 年, 郭中华等^[17]依据单轴压缩试验结果分别提出了风干状态下岩石的单轴抗压强度与高径比, 自然状态、饱和状态下岩石的单轴抗压强度与横截面积之间的非线性关系式; 2003 年, 徐涛等^[18]利用损伤力学对脆性岩石在单轴压缩条件下的变形破坏行为进行了理论分析; 2004 年, 尤明庆等^[19]研究了大理岩试样的长度对单轴压缩试验的影响; 2004 年, 吴刚等^[20]分析了单轴压缩下岩石破坏后区的扰动状态; 2004 年, 李庶林等^[21]对单轴



受压岩石破坏全过程进行声发射试验,得到了岩石破坏全过程力学特征和声发射特征;2005年,付小敏^[22]研究了岩石单轴应力-应变全过程变形特性和全过程声发射特征,并作了对应分析;2005年,曾晟等^[23]对石灰岩进行了单轴压缩试验,得到合理的石灰岩损伤统计本构关系,并验证了理论模型;2005,吕明^[24]讨论在单轴压缩条件下脆性岩石破坏的全过程,分析与破裂机制有关的问题及试验中主要影响因素;2006年,王学滨等^[25]研究了单轴压缩岩样应变软化阶段侧向应变与轴向应变的比值(峰后泊松比)的变化规律;2007年,余贤斌等^[26]采用自行研制的岩石直接拉伸试验装置,对砂岩和石灰岩两种岩样进行直接拉伸、劈裂及单轴压缩试验;2007年,胡昕等^[27]通过单轴压缩微细结构试验,对砂岩在单轴压缩条件下微细结构的演化规律进行了分析;2008年,李正川^[28]对各向异性岩石进行了单轴压缩试验,确定了描述岩石横观各向同性特征的5个弹性常数以及各向异性岩石的强度指标,并分析了各参数的变化规律;2010年,张志镇等^[29]通过花岗岩的单轴压缩及声发射试验,研究了试件纵波波速的变化及应力-应变曲线与声发射曲线的关联;2010年,赵恩来等^[30]模拟研究了煤岩单轴压缩过程的电磁辐射特征规律;2010年,熊良宵等^[31]研究了绿片岩的单轴压缩各向异性蠕变试验;2011年,陈新等^[32]通过单轴压缩试验,研究了节理组的产状和节理连通率的连续变化对岩体单轴压缩强度和弹性模量及应力-应变曲线的影响;2011年,邵冬亮等^[33]研究了单轴压缩条件下岩石试件的裂纹破坏过程及其声发射特征;2012年,吴刚等^[34]通过在单轴压缩下实施的声发射测试研究砂岩在不同受力阶段的声发射特点。

1.2.2 变频变峰载荷对岩石性质影响研究现状分析

运用变频变峰载荷可以在一定程度上模拟库水涨落、地震、爆破等动载导致的岩体劣化,这方面已有的研究成果如下。

在国外,1981年,Memery等^[35]对辉绿岩和花岗岩进行了循环差应力实验,指出当差应力不小于破坏强度的85%时,体积膨胀,这是非弹性行为的表现。1994年,K. R. McCall等^[36]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,基于滞后细观特性弹性单元的假设,讨论了准静态应力-应变状态方程等。A. N. Tutuncu等^[37,38]在单轴应力循环下,对饱和和沉积岩的频率和应变振幅效应进行了研究,在4种饱和和体饱和的Berea砂岩中观测到应力-轴向应变曲线较大的滞回圈,还探讨了在沉积的颗粒状岩石中衰减的机制,即衰减的黏滑滑动和颗粒接触黏着滞后,孔隙空间中饱和液体的类型与在颗粒接触中对 $\sigma-\epsilon$ 曲线滞后有一个大的影响。1981年,D. J. Holcomb^[35]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。1985年,I. D. Mayergoyz等^[39]在滞后非线性数学描述中,说明了应力历史对滞后的影响。

1972年,B. C. Haimson等^[40]研究煤岩在循环荷载作用下的强度和变形特征,对于科学、合理地指导煤炭开采过程中受重复采动影响条件下煤柱尺寸的设计具有重要指导意义。1981年,Holcomb^[35]在研究岩石记忆时,曾将走时和AE(声发射活动)作为样品内部状态的测量,把每一个循环载荷后走时的增加作为损伤的证据,损伤导致走时增加、波速下降、微裂纹张开;走时减小,导致原有裂纹的闭合,波速增大。1998年,Wu



等^[41]于2000年利用光学显微镜和SEM研究了Darley Dale砂岩在压缩破坏中的各向异性损伤的微观力学演化过程,得到了微裂纹密度与应变之间的关系。2010年,He等^[42]在室内对真三轴卸荷状态下石灰岩岩爆过程的声发射特性进行了研究。

国内也有一些学者在相关领域进行研究。在岩石滞后特性研究方面,2003年,席道瑛^[43]探讨了应变硬化和软化以及饱和液体循环载荷作用下对应变随时间变化曲线的影响。席道瑛、陈运平^[44]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。2007年,陈运平等^[45]从应力-应变滞后回线X形的切线模量出发,探讨岩石滞后的定量描述。2010年,肖建清等^[46]通过花岗岩常幅循环加载试验,分析岩石的非线弹性滞后特性。卸载阶段,应变相位滞后于应力相位,加载阶段,应变相位可能滞后、相等或超前于应力相位。2010年,刘建锋等^[47]利用循环加、卸载试验方法对岩石阻尼参数进行测试,得到岩石密度与加、卸载循环塑性变形、滞回环面积、阻尼比、阻尼系数等的变化特征。2011年,任隽等^[48]介绍了岩石滞后非线性弹性的几个物理模型。2012年,唐杰等^[49]通过储层岩样的多重和多级循环加载试验,结合理论分析,研究岩石的非线性阻尼滞后特性。2012年,刘建锋等^[50]研究循环荷载下细砂岩的纵横向变形特征,探讨循环荷载周次及动应力幅值对细砂岩动弹性模量、动泊松比、阻尼比和阻尼系数的影响及与其相互关系。

在疲劳损伤破坏研究方面,2001年,葛修润^[51]研究了最大应力值变化对岩石疲劳破坏的影响,得到了岩石疲劳损伤扩展的规律。2004年,蒋宇^[52]利用岩石多功能力学试验系统和声发射仪进行了单轴疲劳试验。同年,席道瑛^[53]研究分析了岩石的模量、衰减、损伤随循环数的变化规律。2009年,樊秀峰等^[54]开展花岗岩细观疲劳损伤特征的试验研究对于理解花岗岩宏观力学疲劳特性具有重要的理论价值和实践意义。2011年,倪骁慧等^[55]开展花岗岩细观疲劳损伤特征的试验研究。

同时,岩石杨氏模量在循环载荷下的变化规律方面也有大量成果,2001年,尤明庆、苏承东^[56]认为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^[57]分析了杨氏模量随应变振幅的增加而减少等滞后现象。2007年,刘云平等^[58]研究了在频率为0.05~4Hz的循环应力作用下大理岩、砂岩的衰减、杨氏模量、泊松比的动态响应。2011年,倪骁慧等^[59]研究了不同频率循环荷载作用下花岗岩细观疲劳损伤特征。2011年,张向阳等^[60]进行了常规单轴压缩试验和循环加、卸载试验,分析岩石变形破坏的损伤、能量。2011年,刘建锋等^[61]对盐岩和大理岩进行了单轴压缩下的加、卸载试验和低周循环加、卸载试验测试,对盐岩和大理岩的卸载模量进行了探讨。

1.2.3 循环载荷对岩石性质影响研究现状分析

岩石循环加、卸载试验是研究岩石动力响应特性的常用方法之一,在实验室内可以用来模拟地震、库水涨落等周期性荷载对岩体性质的影响。国内外众多学者在这方面的研究已经有了丰硕的成果,在循环载荷作用下岩石的应力-应变曲线、强度及变形、动力学响应等方面取得了较为丰富的研究成果。

对于循环载荷下岩石的应力-应变曲线方面的研究,赵克烈等^[62]利用RMT-150C型



岩石力学多功能试验机, 针对盐岩进行了单、三轴周期荷载作用下的疲劳试验, 研究了盐岩的破坏特征、变形特性及损伤, 试验结果表明, 盐岩疲劳破坏终点的变形量受静态轴向应力-应变全过程曲线的控制。陈运平等^[63]在单轴应力循环下, 对饱和沉积岩的频率和应变振幅效应进行了研究, 在4种饱和体饱和的 Berea 砂岩中观测到应力-轴向应变曲线较大的滞回圈, 还探讨了在沉积的颗粒状岩石中衰减的机制, 即衰减的黏滑滑动和颗粒接触黏着滞后, 孔隙空间中饱和液体的类型与在颗粒接触中对 $\sigma-\epsilon$ 曲线滞后有一个大的影响。

陈运平等^[64,65]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, 指出滞后回线的出现是由于岩石在循环荷载下应变相对应力的响应不同造成的。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, 并提出以蝴蝶结形张角的大小来定量度量滞后的程度。为了模拟岩石离散记忆, 席道瑛等^[66]引入滞后非线性弹性材料的宏观模型——PM 模型来描述岩石的非线性弹性特征, 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。同时利用应力-应变状态方程模拟试验观测到的饱和岩石的滞后现象。许江、王鸿等^[67-70]通过对不同加载速率、不同载荷水平和不同水饱和度时周期性循环载荷作用下细砂岩变形特性的试验研究, 分析了周期性循环载荷作用下加、卸载曲线的二次拟合参数, 塑性滞回环的面积及周长的变化规律。苏承东、杨圣奇^[71]基于在伺服试验机上对不同晶粒大理岩样进行单轴循环加、卸载试验, 研究了岩石的变形与强度特征, 得出了岩样循环加、卸载过程的外包络线与单调加载的全程应力-应变曲线相吻合的结论。

对于循环载荷下岩石强度及变形方面的研究, 岩石疲劳破坏在宏观上可视为一个不可逆变形逐渐发展积累、直至失稳破坏的过程, 不可逆变形的大小、增长趋势及总的累积量是岩石疲劳力学性能的本质反映, 这与损伤过程直接相关^[72-77]。在循环载荷的作用下岩石不可逆应变发展存在着3个阶段: 初始应变阶段、等速应变阶段和加速应变阶段, 3个阶段应变的累积将导致岩石的最终破坏, 周期载荷的上限应力和幅值对不可逆应变的发展过程有重要的影响。岩石在循环载荷作用下的疲劳阈值点为静态全过程体积应变的最小点, 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。

随着对岩石本质特征认识的不断深入, 岩石强度理论的研究逐渐由经典强度理论向断裂强度理论、损伤强度理论发展。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^[78]。张向阳等^[79]采集金川二矿区深部的含辉橄榄岩、花岗岩和混合岩, 然后进行了常规单轴压缩试验和循环加、卸载试验, 结果表明循环加、卸载条件下的弹性模量值较常规单轴压缩试验小; 对循环加、卸载应力-应变曲线中的塑性滞环进行了能量分析, 研究表明含辉橄榄岩的能量耗散值最大, 花岗岩次之, 混合岩能耗最小; 能量耗散值与应力呈线性关系, 后次循环加、卸载所耗散的能量不等于前几次能耗值的累加, 主要是由于岩石材料的缺陷和非线性的特征所致。一些学者^[80-81]对一定应力水平下不同加载速率时循环加载次数对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。

对于循环载荷下岩石动力特性响应方面的研究,K. Nishi^[83]通过动态试验,分别得到了岩石动剪切模量与阻尼比和围压的关系、岩石动静力学参数之间的关系及饱和岩石在循环载荷下衰减和滞后的可能原因。朱明礼等^[84]使用 RMT-150B 多功能全自动刚性岩石伺服试验机,对花岗岩进行单轴压缩试验和循环加卸载试验,研究花岗岩动应力-动应变曲线滞回特性和动弹性模量与阻尼比同弹性模量之间的规律,研究得出花岗岩在循环载荷作用下的加卸应力-应变曲线形成滞回环,随着循环次数的增加,滞回环向轴向应变增大的方向移动,且越来越密集;花岗岩的滞回环面积和最大弹性应变能都随弹性模量的增加而减少,而动弹性模量则相反,阻尼比先随弹性模量的增大而增大,达到一峰值后,随弹性模量的增大而减少。朱晶晶等^[85]利用改进的大直径 SHPB 试验装置,对花岗岩试件进行单轴循环冲击压缩试验,分析花岗岩在循环冲击载荷下的力学特性及能量吸收规律。研究表明,随着冲击载荷循环作用次数的增加,变形模量变小,试件的屈服应变增大,峰值应力呈降低趋势。岩石的累积比能量吸收值随着冲击次数的增加而增大,且试件破坏前其值增加缓慢,试件破坏时其值急剧增大。朱珍德等^[86]对黑云母花岗岩进行了不同频率的循环加、卸载试验,研究花岗岩动应变-应力滞回曲线、动弹性模量和阻尼比同循环频率之间的规律。结果表明,当循环频率在 0.01~1.0Hz 范围内变化时,随着频率增大,花岗岩滞回环面积、动弹模和阻尼比都增大;通过细观数字图像试验分析发现,循环载荷作用下,随着频率的增大,岩石断口细观裂纹总的数目、面积、分形维数均变大。刘恩龙等^[87]研究砂岩岩样在不同围压作用下以及轴向循环加载时岩样的动力力学性质,分析围压对砂岩岩样的动力力学性质的影响。结果表明,随着围压逐渐增加,试样的残余轴向应变和体变逐渐增加,且剪胀发生时的残余体变也逐渐增加;动力荷载作用时岩样在高围压比低围压下的初始刚度和强度高;不同围压作用下,当应力比较大时,岩样在较小的循环次数下发生破坏;试样的破坏模式为剪切破坏,动力荷载作用下试样形成的局部化破坏带更宽。

1.2.4 研究需完善和扩展的内容

现阶段,变频变峰载荷以及循环载荷对岩石性质影响的研究中还需完善和扩展的内容如下:

(1) 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。得出瞬时变形速率和瞬时载荷速率的关系式,可在已知载荷类型的前提下对时间微段上的瞬时变形速率做出精确预测,进一步可预测岩石在循环载荷条件下的应力-应变图,为精确分析循环加载下的位移和能量转化过程打下基础。现有文献都偏重于从几何角度入手,用某一单一的曲线形式来模拟滞回圈,导致模拟参数物理意义不明确,而且在变换不同的加载模式时模拟的适用性不能保证。

(2) 之前建立的变形预测公式多为几何角度的拟合,且一般未考虑变形速率,未找到变形速率与位移速率的本质对应关系,无法用统一的带严密推导的公式形式对三角波和正



弦波下岩体的位移速率同时进行预测。因此,建立统一的含有围压、孔隙率、初始模量的预测公式,对变频变峰三角波和正弦波下岩体的毫秒级位移速率进行预测成为本研究拟解决的关键问题之一。若载荷为位移控制时,如何对岩样的应力速率进行预测也可考虑用相同的思路解决。

(3) 动载下滞后时间判别标准和发育规律的研究有待进一步深入,这也是精确预测的基础之一。

1.3 本章小结

本章从模拟地震、库区水位骤升骤降、爆破引发的振动、施工运营期的机械振动等诸多动载荷工况对边坡岩体作用的实际情况出发介绍本课题的研究意义及应用前景,详细阐明了单轴压缩、变频变峰载荷和循环荷载作用对岩石性质影响的研究现状,并对现有研究的不完善之处进行分析,提出了研究还需要完善和进一步扩展的内容。

试验方案及研究方法

2.1 岩样筛选与试样制作

本书课题的研究主要结合项目的试验部分来完成,研究的试验部分主要选取湖北宜昌三峡大学附近建筑工地以及三峡库区巴东部分库岸边坡采集的弱胶结多孔隙灰岩、砂岩和四川省大渡河丹巴水电站施工现场采集的石英云母片岩为研究对象。

选择弱胶结多孔隙灰岩、砂岩的原因有以下几个:

(1) 已在西藏如美水电站坝址研究中建立多个三维模型,部分开挖坡面由弱胶结大孔隙砂岩和灰岩构成,还有三峡库区巴东部分库岸边坡就以弱胶结多孔隙砂岩为主。

(2) 分布有弱胶结多孔隙灰岩和砂岩的岩质边坡,在水浸泡下或动载作用下很可能使边坡发生失稳或者形成危险地带,其参数劣化规律决定了边坡的长期稳定性。沉积岩分布广泛,占陆地总面积的 $3/4$ 。大量工程都建设在沉积岩地区,其各种力学性质很具研究价值。而砂岩和灰岩是沉积岩的典型代表,且砂岩是沉积岩中比例最高的岩类。

(3) 由于硅质胶结等胶结程度较好的灰岩和砂岩自身的长期稳定性较好,对水浸泡并不敏感,研究主要针对弱胶结的灰岩和砂岩,本研究针对的弱胶结包含碳酸盐胶结和泥质胶结。

(4) 考虑到水浸泡条件下的岩石参数劣化的敏感性,同时考虑较大孔隙率下岩体的加载和卸载非线性特性会更为明显,针对吸水率大于 3% 的灰岩和砂岩进行研究。

(5) 灰岩和砂岩在地表大量分布,可部分试件采用现场采样,部分试件在宜昌周边地区采样,降低采样成本。

(6) 岩土试验的结果常常表现出很强的离散性,该离散性会在一定程度上掩盖某些力学变化规律。而沉积岩形成过程中的微裂隙对岩石力学性质的影响最小,可以最大限度地避免微观裂隙造成的数据离散。

同时选取石英云母片岩作为研究对象,原因主要有以下几点:

(1) 丹巴水电站引水系统围岩主要由石英岩、长英质变粒岩、石英云母片岩、二云片岩、角闪岩等岩性组成。其中石英岩、长英质变粒岩、石英云母片岩、角闪岩为硬岩或较硬岩,累计长度逾 14000m ,约占引水系统总长的 81.5% ,成洞条件较好。但其中的二云片岩为软岩,初步分析累计长度逾 3000m ,约占引水系统总长的 18.5% ,因此有必要对石英云母片岩的力学特性进行试验研究。



(2) 针对丹巴引水隧洞含二云片岩软岩洞段,对二云片岩各向异性进行模拟,对其地下构造应力作用下的力学参数进行反演分析,参数反分析采用室内岩石物理力学试验力学参数作为数值模拟的基本参数,为后面数值模拟计算分析深埋条件下软岩开挖成洞和软岩支护稳定问题提供必要条件。

(3) 本次采样选取的主要是弱风化或弱松弛或挤压变形石英云母片岩,通过单轴循环加、卸载试验或者三轴试验得到其动力学特性,并与灰岩以及砂岩的动力学特性进行对比研究,这在先前的研究中是没有过的,有很大的工程以及科研意义。

取样采用水钻法,由于钻芯机不同规格的原因,灰岩和砂岩部分岩样直径取 54mm,部分试样取 50mm,长度均为 100mm。根据《水利水电工程岩石试验规程》(SL 264—2001)、《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)以及国际岩石力学学会推荐标准,石英云母片岩试样按 50mm×100mm (直径×长度)圆柱体进行制备。为避免岩性不均匀以及个体差异性带来试验结果的离散性,同组试验岩样均取自一块完整岩体。试样制备采用水钻法钻孔取芯,为了避免各向异性对岩石力学特性试验结果的影响,制备岩石试样时沿同一个方向加工。岩样直径误差不大于 0.3mm,端面不平整度误差不大于 0.05mm,端面与试件轴线间最大偏差均不大于 0.25°。同时采用回弹试验、超声波检测、点荷载测试、片理角度测量和孔隙率测量共同对岩样进行分组筛选,以减小数据离散性。

2.2 试验仪器及设备

试验所采用主要仪器及设备如下:

(1) 岩石钻芯机(图 2.1)。岩石钻芯机由底座、套筒、立柱、工作台和电气控制部分组成,钻芯套筒有直径为 54cm 的,也有直径为 50cm 的,该取芯机可用于室内取芯,也可以带到室外取芯。

(2) 岩石切割机(图 2.2)。用砂轮切割或修剪小岩芯,也可用于切割矩形或方形标本。

(3) RMT-150C 岩土力学试验系统。RMT-150C 岩土力学试验系统是进行岩石力学性能试验的大型综合试验设备。可进行变幅值变频量变波形的循环载荷施加,进行单轴、三轴、拉伸和剪切等试验。设备如图 2.3 所示。

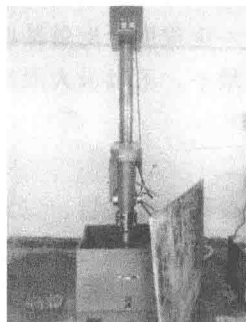


图 2.1 岩石钻芯机

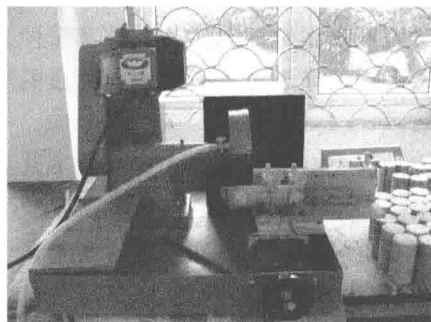


图 2.2 岩石切割机



图 2.3 RMT-150C 岩土力学试验系统