

DOI: 10.11779/CJGE201506017

强震作用下崩塌岩体震裂损伤程度影响因素研究

罗 璞, 裴向军, 黄润秋, 杜 野

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 汶川地震触发了大量的地震滑坡, 其中滑坡岩体普遍出现了不同程度的震裂损伤现象。通过大光包滑坡现场大量的调查工作, 揭示了该滑坡不同部位岩体的震裂损伤程度随埋深、地形地貌及岩性条件的不同呈现出一定的规律性, 基于疲劳试验, 从动力学的角度, 分析了强震作用下崩塌岩体震裂损伤程度的影响因素。试验结果表明: 上限应力是影响岩体震裂损伤程度的首要因素, 应力水平是震动频率影响岩体震裂损伤程度的前提。并基于此分析得出, 滑坡不同部位受控于埋深及地形地貌的差异, 决定了其受到的地震作用力及应力状态各不相同, 是影响岩体震裂损伤程度的动力因素; 而滑坡不同岩性之间岩体结构的差异, 导致其表现出不同的破坏特征, 决定了在相同地震荷载下损伤程度各不相同, 是影响岩体震裂损伤程度的内在因素; 地震爆发初期, 强烈的地震冲击作用力在短时间内对岩体产生的巨大损伤及岩体自身结构的缺陷, 是造成岩体最终震裂损伤的基础。以上研究成果为强震作用下崩塌岩体的震裂损伤程度进行快速的定性评价提供了依据, 并丰富了大光包滑坡滑带岩体碎裂化成因机制研究。

关键词: 大光包滑坡; 震裂损伤; 疲劳试验; 白云岩

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)06-1105-10

作者简介: 罗 璞(1990-), 男, 主要从事地质灾害、工程边坡稳定性评价与工程治理方面的研究工作。E-mail: ljcduthgy@gmail.com。

Influencing factors for damage degree of shattered landslide rock mass under high seismic action

LUO Jing, PEI Xiang-jun, HUANG Run-qiu, DU Ye

(State Key Laboratory of Geo-Hazard Prevention and Geo-Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Massive seismic landslides are triggered by Wenchuan Earthquake, and rock mass of the landslides is generally caught with different degrees of seismic damage. Field investigations of Daguangbao landslide are conducted, and certain regularity is obtained that the damage degree of different rock mass parts relates with buried depth, topography and lithology conditions. The influencing factors for the damage degree of shattered landslide rock mass under high seismic action are investigated through fatigue tests from the viewpoint of dynamics. The test results indicate that the upper limit stress is the primary factor to influence the damage degree of rock mass, and the stress level is the premise of vibration frequency which influences the damage degree of rock mass. Further analysis is proceeded, and it is found that different sites of landslide are controlled by the differences of buried depth and topography, resulting in different seismic forces and stress states, and they are the dynamic factor for the damage degree of rock mass. The differences in the structure of rock mass with different lithologies will lead to different failure characteristics and determine different damage degrees under the same seismic load, and they should be treated as internal factors. The strong damage of rock mass induced by strong impact force of earthquakes at the initial outbreak in a short period and the defects of rock mass structure are the basis of the final rock seismic damage. The aforementioned researches provide a basis for the rapid qualitative evaluation of seismic damage of rock mass under strong earthquakes, and enrich the formation mechanism of the rock mass fragments in Daguangbao sliding zone.

Key words: Daguangbao landslide; seismic damage; fatigue test; dolomite

0 引言

大光包滑坡位于四川省绵阳市安县高川乡, 是汶川地震触发的最大规模的滑坡, 体积方量约达 11.3 亿

基金项目: 科技部支撑计划项目(2011BAK12B03); 四川省科技创新团队项目(2011JTD012)

收稿日期: 2014-07-16

m^3 ，影响范围之大、形成机理之复杂，成为强震动力作用下斜坡失稳成因机制研究中难得的范例，而备受关注。其中，南侧出露的巨大滑动光面及其岩体的高度震裂损伤更是引起了大量地质工作者的研究兴趣。

黄润秋等^[1-2]最先开展了大光包的研究工作，并提出了高强度和长持时的地震作用和滑体溃滑过程中的快速碾压，是导致滑带岩体高度碎裂化的基本因素。许向宁等^[3]提出了白云岩强烈溶蚀砂化层的形成及演化是导致滑带岩体碎裂化的基本因素。但由于该滑坡地震响应和岩体结构的复杂性，一直缺乏对该滑坡岩体震裂损伤情况的力学试验研究，更无从解释大光包滑坡不同部位岩体震裂损伤程度呈现出一定规律性的原因。

而循环荷载作用下岩石的疲劳特性是岩石力学研究的重要内容，一直为研究长期稳定性的重要力学试验手段，葛修润等通过大量研究，得出岩石疲劳破坏存在门槛值^[4]、岩石疲劳破坏的轴向变形量受岩石单轴应力应变全过程曲线控制^[5]等结论。

故本文基于大光包滑坡大量的现场调查工作及前人的研究成果，对滑坡滑床和滑体次级滑动面的两组不同沉积年代的岩体开展了不同上限应力、应力幅值、加载频率的疲劳试验，基于在相同条件下，岩体疲劳寿命越短越容易被震裂的原理，对比两组不同沉积年代白云岩在地震波产生的垂直向周期荷载作用下疲劳特性的差异，并结合大光包不同部位地震动情况，从动力学的角度探讨强震作用下滑坡岩体震裂损伤程度的影响因素，并丰富大光包滑坡滑带岩体碎裂化成因机制研究。

1 大光包滑床及滑体次级滑动面岩体碎裂特征

大光包滑坡南侧出露长度大于 1 km 的滑动光面（图 1）蔚为壮观，是汶川地震触发的大型滑坡中绝无仅有的。光面上滑动擦痕清晰可见，岩性主要为震旦系灯影组（ Z_d^3 ）白云岩，岩体结构高度碎裂化，光面在经过逐年的雨水冲蚀演变成数条 2 m 多深的水流凹坑（图 2），这对于一个岩质边坡而言是十分少见的。并通过现场后续的钻孔、探槽揭露、波速测定等工作^[6]，发现滑床岩体震裂损伤程度呈现出一定的规律，具体表现为：①南侧滑床高程相同，原始埋深越大的位置岩体震裂损伤程度越高；②钻孔^{#8}、钻孔^{#9}位置岩体震裂损伤程度明显高于其他钻孔位置。

值得一提的是位于滑床北东方向滑坡主堆积区一原始高程为 2600 m 左右，现今高程 1700 m 左右形似军舰的堆积体北侧背坡同样发育了一长近 600 m，高

约 200 m、平面投影面积约 0.19 km² 的“光面”^[7]（图 3）。此光面是滑体在运动过程中，受黄洞子沟阻挡后发生次级滑动而形成的，岩性主要为泥盆系沙窝子组（ D_s ）白云岩。并通过后期现场对其岩体震裂损伤程度的调查和对比^[6]，发现该位置处岩体的震裂损伤程度明显小于南侧滑床处。



图 1 大光包滑坡俯视图

Fig. 1 Top view of Daguangbao landslide



图 2 雨水冲蚀形成的凹坑

Fig. 2 Rain erosion of pit formation

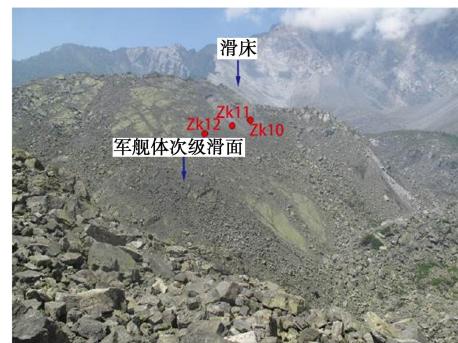


图 3 “军舰体”次级滑动面正视图

Fig. 3 Front view of “Warship” secondary slip surface

以上 3 点关于大光包岩体震裂损伤程度的规律，都引发了笔者对其成因及强震作用下滑坡岩体震裂损伤程度影响因素的思考。从剖面图（图 4）可清楚地得到滑床和次级滑动面之间的位置关系，并通过调查可知次级滑动面的原始埋深在 100 m 左右，而滑床的

原始埋深达 500 m。于是笔者猜想巨大的埋深差距是否为影响岩体震裂损伤程度的因素之一。而随着埋深的增大, 岩体的受压状态越明显, 岩体也就越不容易发生拉破坏^[8], 故考虑到研究对象埋深较大, 采用动循环压缩试验来对两滑面的岩体在不同动力条件下的疲劳特性进行研究。

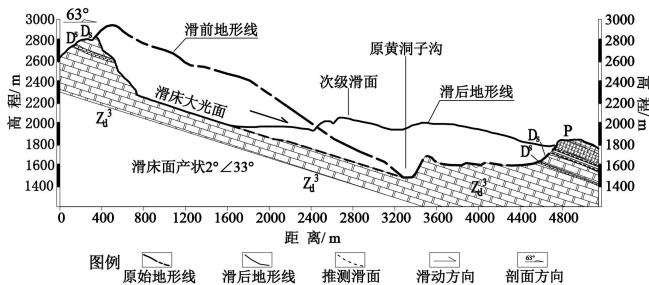


图 4 大光包滑坡典型纵剖面

Fig. 4 Longitudinal profile of Daguangbao landslide

2 岩体震裂损伤室内试验研究

2.1 试验方案

本试验基于在相同的条件下, 岩体疲劳寿命越短越容易被震裂的原理, 并考虑到研究对象埋深较大的特点, 借鉴疲劳试验模拟地震波产生的垂直向周期荷载, 研究不同岩样在不同动力条件下疲劳特性的差异。首先进行静力作用下的单轴压缩试验, (0.1 kN/s 速率加载, 待试样由弹性变形阶段进入了塑性变形阶段后改用位移控制加载速率直至岩样破坏) 来确定疲劳试验所需的参考值。

确定了静态单轴抗压强度后, 以此为依据进行不同动载条件下的疲劳试验。疲劳试验的加载过程分为两阶段, 第一阶段以 0.1 kN/s 的速率加载至疲劳荷载的平均值, 第二阶段以疲劳荷载的平均值作为起点, 对试样施加波形为正弦波的周期荷载, 周期荷载各参数的特征如图 5 所示, σ_{\max} 为上限应力, σ_{\min} 为下限应力, $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$, $\Delta\sigma$ 为荷载幅值; T 为周期, f 为频率, $f = 1/T$ 。此次试验只采用一种加载波形, 侧重研究上限应力、幅值和加载频率对岩石震裂损伤程度的影响。应力以应力比的形式给出, 应力比表示试验设定的应力与岩石静态单轴压缩强度之比, 如上限应力比就是指上限应力与岩石静态单轴压缩强度之比。

试验从南侧滑床处选取震旦系灯影组 (Z_d^3) 新鲜白云岩, 编号为 #1 试样; 在次级滑动面处选取泥盆系沙窝子组 (D_s) 新鲜白云岩, 编号为 #2 试样。在试验过程中进行了声发射的监测, 并为分析岩样的破坏形式, 对岩样破坏后的断口进行了电镜扫描试验。

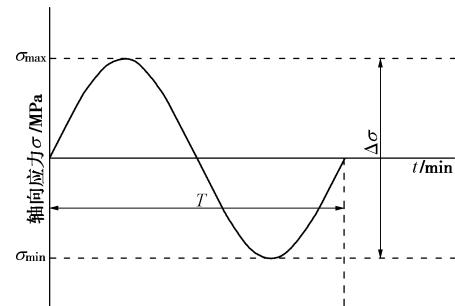


图 5 周期荷载各参数示意图

Fig. 5 Sketch map of waveform of cyclic loading

考虑到滑坡岩体多处于三轴应力状态, 为丰富论文的普适性, 还进行了大量三轴疲劳试验研究, 三轴试验除了根据埋深计算首先施加围压, 待围压稳定后, 再施加轴向循环荷载外, 其他步骤与单轴试验相同。

同时为减小试验结果的离散性, 增强试验的可比性, 减小同种岩性岩样间岩体本身力学性质的差异对试验结果分析所带来的影响, 每个对比小组的试样都尽量从一块岩样上密集钻取, 并通过严格的采样、加工及筛选过程, 试样的加工严格按照国际岩石力学学会建议的方法^[9]进行。并根据岩石变形对应力路径的不依赖性^[10], 都采用疲劳试验加载的第一阶段的应力应变曲线与单轴压缩的应力应变曲线的重叠性要高, 岩石发生疲劳破坏时的极限应变与周期荷载上限应力水平线所对应的静态全过程曲线的应变总量基本相同的标准(图 6), 来筛选试验结果, 保证试验曲线的高度重叠性, 为对比研究提供有价值的参照曲线。

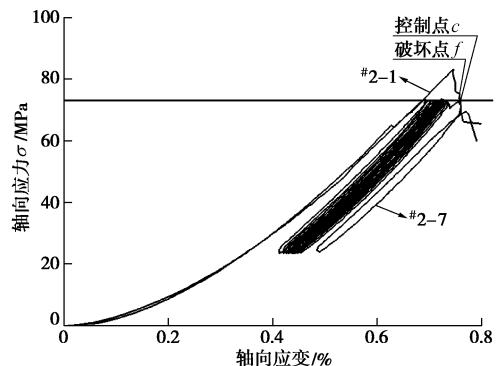


图 6 筛选试验结果的标准

Fig. 6 Standard of best test results

2.2 试验仪器

疲劳试验采用设备为成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室从美国引进的 MTS-815 型岩石测试系统如图 7 所示, 仪器主要的技术参数如下: 轴向最大荷载为静态 3000 kN, 动态 2400 kN; 最大围压为 100 MPa; 疲劳频率范围为 0.01~5 Hz; 应变率适用范围为 $10^{-2} \sim 10^{-7}$ /s; 框架整体刚度为 5.0×10^9 N/m; 适用试件规格为 $\phi 25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$, $\phi 50$

mm×100 mm, 25 mm×25 mm, 50 mm×100 mm 等。

电镜扫描采用的是从日本 Hitachi 公司引进的 S-3000N 型扫描电镜如图 8 所示。



图 7 MTS-815 型岩石测试系统

Fig. 7 MTS-815 rock testing system



图 8 S-3000 N 型扫描电镜

Fig. 8 S-3000 N scanning electron microscope

2.3 试验结果及分析

(1) 单轴压缩试验

在进行疲劳试验前首先需确定两组岩样静载作用下的单轴抗压强度，并获取单轴压缩的全过程曲线，单轴压缩试验结果见表 1。

表 1 单轴压缩试验结果

Table 1 Test results of rock under uniaxial loading

岩性	试验编号	单轴抗压强度/MPa	平均值/MPa
Z_d^3	#1-1	90.12	87.82
	#1-2	86.86	
	#1-3	86.47	
D_s	#2-1	83.30	78.42
	#2-2	77.50	
	#2-3	74.46	

试验结果表明震旦系灯影组 (Z_d^3) 白云岩静态单轴抗压强度略大于泥盆系沙窝子组 (D_s) 白云岩。从单轴压缩全过程曲线(图 9)得出泥盆系沙窝子组 (D_s) 白云岩破坏时产生的应变量更大, 且岩样破坏后还具备一定的残余强度, 呈延性破坏特征, 而震旦系灯影组 (Z_d^3) 白云岩呈脆性破坏特征。以上两种岩样在静载作用下所表现出的力学特性, 都增加了研究人员对其在动载条件下所表现出来的疲劳特性的兴趣。

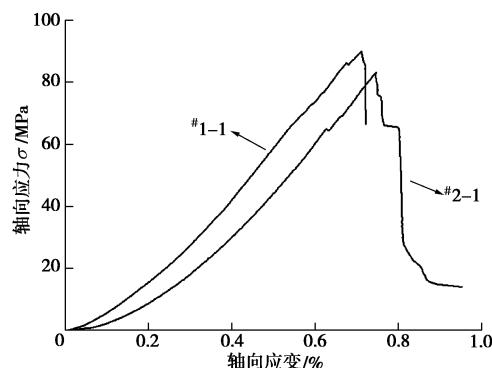


图 9 典型静态单轴压缩全过程曲线

Fig. 9 Typical complete curves under uniaxial compression

(2) 上限应力对岩体震裂损伤的影响

大量的研究表明^[10-12], 应力上限和应力幅值是影响材料疲劳力学性能的主要因素, 故在研究上限应力的影响时采用固定应力幅值的方法, 且对泥盆系沙窝子组 (D_s) 白云岩固定了更高的应力幅值, 上限应力比也同样高于震旦系灯影组 (Z_d^3) 白云岩, 以希望得到更为强烈的响应结果, 试验参数及结果如表 2 所示。限于篇幅, 在此只给出震旦系灯影组 (Z_d^3) 的应力应变曲线图。

表 2 上限应力对疲劳寿命的影响

Table 2 The influence of different upper limit stresses on fatigue life

试验编号	单轴抗压强度参考值/MPa	上限应力比	下限应力比	幅值应力比	加载频率/Hz	循环次数
#1-4	87.82	0.80	0.4	0.50	0.25	260
#1-5	87.82	0.90	0.5	0.50	0.25	8
#2-4	78.42	0.85	0.2	0.65	0.25	283
#2-5	78.42	0.95	0.3	0.65	0.25	51

由图 10, 11 可知在固定应力幅值的情况下, 增大上限应力比提高了周期荷载的平均应力水平, 则每个周期用于裂纹扩展的能量就越多, 疲劳寿命必然降低。故在其他条件相同的情况下, 上限应力越高, 被震裂损伤的程度就越大。

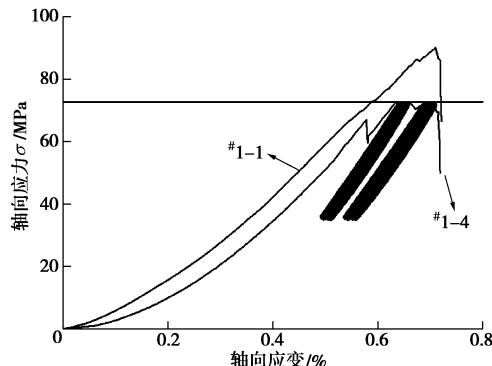


图 10 试样#1-4 的试验曲线

Fig. 10 Test curves of sample No. 1-4

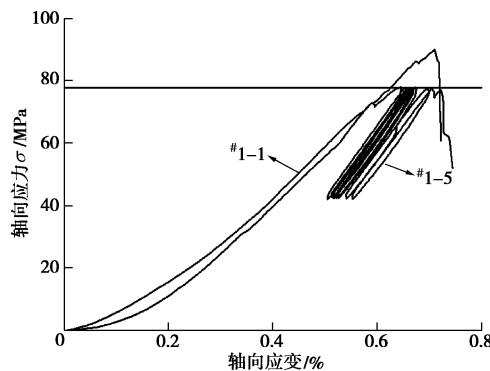


图 11 试样#1-5 的试验曲线

Fig. 11 Test curves of sample No. 1-5

由表 2 中试验结果对比可知, 上限应力对震旦系灯影组 (Z_d^3) 白云岩和泥盆系沙窝子组 (D_s) 白云岩疲劳寿命的影响都较大, 但因泥盆系沙窝子组 (D_s) 固定了更大的幅值, 上限应力比的起点也更高, 却并没表现出更为强烈的影响结果, 故认为上限应力比对震旦系灯影组 (Z_d^3) 震裂损伤的影响更为强烈。

(3) 应力幅值对岩体震裂损伤的影响

对于应力幅值的影响, 采取固定上限应力, 改变下限应力来调节幅值的变幅试验法进行研究, 试验参数及结果如表 3 所示, 其中 1#-6 试样在循环 581 次后无明显的变形破坏迹象, 人为地停止了试验。试验中两组岩样都采用幅值应力比从 0.55 提高到 0.65 来研究应力幅值的影响。限于篇幅, 在此只给出震旦系灯影组 (Z_d^3) 的应力应变曲线图。

表 3 应力幅值对疲劳寿命的影响

Table 3 Influence of different stress amplitudes on fatigue life

试验 编号	单轴抗压强 度参考值 /MPa	上限应 力比	下限应 力比	幅值应 力比	加载频 率/Hz	循环次 数
#1-6	87.82	0.95	0.4	0.55	0.25	581
#1-7	87.82	0.95	0.3	0.65	0.25	2
#2-6	78.42	0.95	0.4	0.55	0.25	275
#2-5	78.42	0.95	0.3	0.65	0.25	51

由图 12, 13 可知在相同的上限应力条件下, 随着应力幅值的增大, 岩石的疲劳寿命逐渐减小。如图 14 所示, 应力幅值越大, 则滞回环的面积越大, 每个周期产生的不可逆变形越大, 每个周期用于裂纹扩展的能量就越多, 疲劳寿命必然降低。故在其他条件相同的情况下, 应力幅值越高, 被震裂损伤的程度就越大。

由表 3 中试验结果的对比可知, 应力幅值对震旦系灯影组 (Z_d^3) 白云岩和泥盆系沙窝子组 (D_s) 白云岩疲劳寿命的影响都较大, 且对震旦系灯影组 (Z_d^3) 疲劳寿命影响程度更大, 故认为应力幅值对震旦系灯影组 (Z_d^3) 震裂损伤的影响更为强烈。

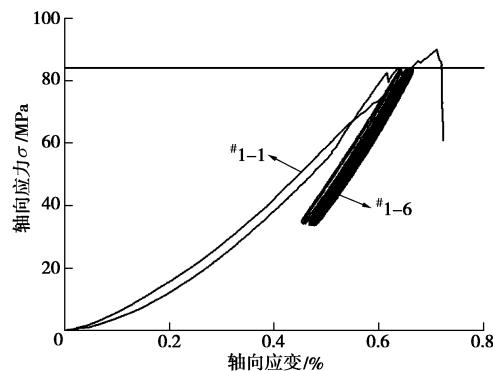


图 12 试样#1-6 的试验曲线

Fig. 12 Test curves of sample No. 1-6

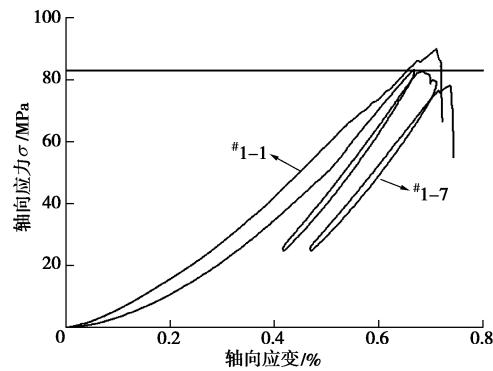


图 13 试样#1-7 的试验曲线

Fig. 13 Test curves of sample No. 1-7

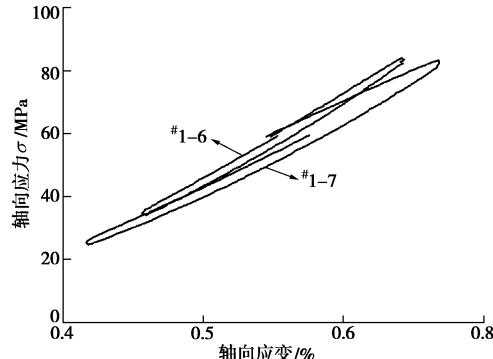


图 14 不同幅值应力下的滞回环

Fig. 14 Hysteretic loop under different stress amplitudes

(4) 加载频率对岩体震裂损伤的影响

对于加载频率的影响, 本文采取固定应力幅值及上限应力比, 提高加载频率的试验方法, 且为了得到泥盆系沙窝子组 (D_s) 白云岩更为强烈的影响结果, 在将其设置同震旦系灯影组 (Z_d^3) 相同的上限应力比的情况下, 设计了更高的幅值, 同时还增大了频率的提高幅度。另为研究在低应力条件下, 加载频率对两组岩体疲劳寿命的影响, 还设计了一组降低了单轴抗压强度参考值的对比试验, 试验参数及结果如表 4 所示, 其中低应力条件下的 4 个试样均未发生疲劳破坏就人为地停止了试验。限于篇幅, 在此只给出震旦系灯影组 (Z_d^3) 的应力应变曲线图。

表 4 加载频率对疲劳寿命的影响

Table 4 Influence of different loading frequencies on fatigue life

试验 编号	单轴抗压 强度参考 值/MPa	上限应 力比	下限应 力比	幅值应 力比	加载频 率/Hz	循环 次数
#1-8	87.82	0.95	0.4	0.55	0.25	311
#1-9	87.82	0.95	0.4	0.55	0.30	17
#2-5	78.42	0.95	0.3	0.65	0.25	51
#2-7	78.42	0.95	0.3	0.65	0.50	20
#1-10	51.00	0.95	0.4	0.55	0.40	329
#1-11	51.00	0.95	0.4	0.55	0.50	300
#2-8	66.50	0.95	0.3	0.65	0.25	174
#2-9	66.50	0.95	0.3	0.65	0.50	186

由图 15, 16 可知加载频率对岩石疲劳力学性能的影响实质上仍然是加载速率的影响^[10]。随着加载频率的增加, 加载速率也逐渐增大, 疲劳寿命必然降低。这是因为在周期荷载的反复作用下, 岩石体内的裂纹是一个不断闭合、张开的过程。加载频率越高, 加卸载速度就越快, 这样张开的裂纹在还未完全闭合的情况下又有新的能量注入, 大大降低了裂纹张开过程中所需要的阻力, 从而加速了裂纹的扩展, 降低了岩石的疲劳寿命。故在其他条件相同的情况下, 加载频率越大, 被震裂损伤的程度就越大。

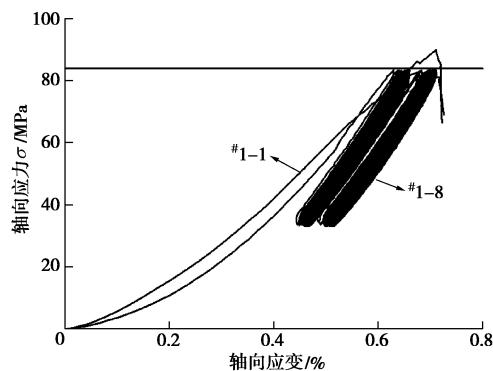


图 15 试样#1-8 的试验曲线

Fig. 15 Test curves of sample No. 1-8

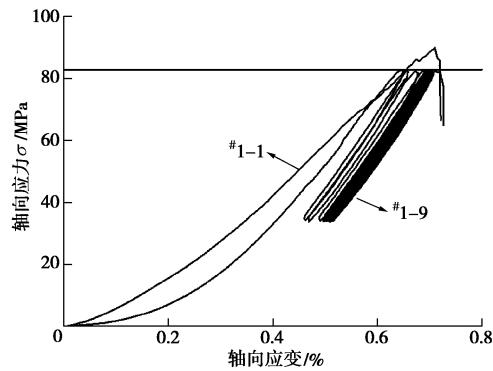


图 16 试样#1-9 的试验曲线

Fig. 16 Test curves of sample No. 1-9

由表 4 中前 4 组试验结果可知, 加载频率对震旦系灯影组 (Z_d^3) 白云岩和泥盆系沙窝子组 (D_s) 白云岩疲劳寿命的影响都较大, 但因泥盆系沙窝子组 (D_s)

在更大的幅值和频率提高幅度的条件下, 却并没表现出更为强烈的影响结果, 故认为加载频率对震旦系灯影组 (Z_d^3) 震裂损伤的影响更为强烈。

通过表 4 中后 4 组试验结果可知, 在低应力状态下, 单单提高加载频率并不能促使岩石发生疲劳破坏, 如图 17 所示, 在低应力条件下单单提高加载频率仅仅改变了岩石的模量, 但滞回环几乎闭合, 说明在周期荷载的作用下岩石并未因为频率的提高而产生更多的不可逆变形。由此可知, 在低应力水平下, 因上限应力并未达到岩石疲劳破坏的门槛值, 仅提高加载频率并不能促使岩石发生疲劳破坏, 故认为应力水平的高低是加载频率影响岩体震裂损伤的前提, 并说明上限应力是影响岩体震裂损伤程度的首要因素。

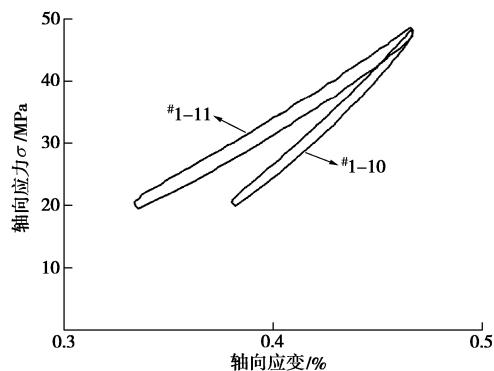


图 17 低应力状态下不同加载速率的滞回环

Fig. 17 Hysteretic loops under different loading frequencies of low-pressure condition

(5) 动载初期对岩体震裂损伤的影响

葛修润等^[12]将岩石在周期荷载作用下轴向不可逆变形的发展规律分为初始阶段、等速阶段和加速阶段。初始阶段的特征表现为: 轴向应变发展较快, 滞回环的面积较大。本文为了研究地震爆发初期的冲击荷载对岩体震裂损伤程度的影响及大光包岩体自身内部结构的缺陷, 对上述疲劳试验的首个周期荷载所产生的不可逆变形量进行了统计, 各统计量对应情况如图 18 所示, 统计汇总见表 5。

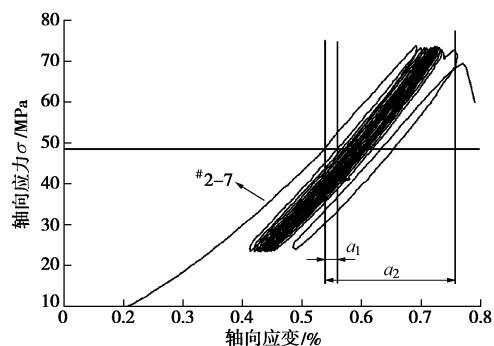


图 18 各统计量的对应情况

Fig. 18 Correspondence of all statistics

表 5 首个周期荷载所产生的不可逆变形量统计表

Table 5 Influence of different stress amplitudes on fatigue life

试验 编号	循环 次数	首个周期累计 不可逆变 形量 $a_1/\%$	周期荷载 产生的总 变形量 $a_2/\%$	首个周期产生的 不可逆变形量占 总量的百分数/%
#1-4	260	0.0479	0.1292	37.07
#1-5	8	0.0472	0.0968	48.76
#1-7	2	0.0305	0.0858	35.55
#1-8	311	0.0188	0.0955	19.69
#1-9	17	0.0284	0.0825	34.42
#2-4	283	0.0191	0.1094	17.46
#2-5	51	0.0184	0.1308	14.07
#2-6	275	0.0135	0.1074	12.57
#2-7	20	0.0198	0.0939	21.09

由统计情况可知, 首个周期荷载所产生的不可逆变形量达到了周期荷载所产生的总变形量的 12%~48%, 所占比例大, 对岩石最终产生疲劳破坏起到了决定性的作用。由此可知, 在地震爆发初期, 突然加载的地震冲击作用力在斜坡内部产生了强烈地震动响应, 打破了岩体原有的平衡状态, 对岩体施加了强烈的冲击破坏力, 大量微裂纹闭合的同时, 新的裂纹发育扩展, 在很短的时间内产生了较为明显的损伤效果。且汶川地震震级高, 大光包滑坡震中距小, 地震能量的释放主要集中于地震触发后的前 40 s, 故认为地震爆发初期强大的地震冲击作用力是造成岩体最终震裂损伤的动力基础。

从统计结果中还可得出泥盆系沙窝子组 (D_s) 白云岩首个周期累计不可逆变形量远小于震旦系灯影组 (Z_d^3) 白云岩, 而破坏前产生的总变形量较泥盆系沙窝子组 (D_s) 白云岩更大, 表现出一定的延性, 由此说明震旦系灯影组 (Z_d^3) 白云岩自身隐微裂纹更为发育, 且岩体性质更为硬脆, 两者在动力条件下表现出的力学特性与静力条件下的相似, 故认为岩体自身结构的缺陷是造成岩体最终震裂损伤的内在基础。

(6) 岩体的破坏特征对其震裂损伤的影响

在进行的大量三轴疲劳试验研究中, 试验结果与单轴试验相似: 在三轴应力状态下增大周期荷载的上限应力、幅值、加载频率同样都会降低岩样的疲劳寿命, 且三种因素对震旦系灯影组 (Z_d^3) 白云岩疲劳寿命的影响程度都更为强烈。故限于篇幅, 在此只对三轴试验较单轴试验中的不同点进行论述。

在常规三轴压缩试验中, 因围压的束缚, 使得在其他条件相同的情况下, 岩样的破坏形式表现出比单轴压缩更强的延性, 且围压越大, 延性特征越为明显^[13]。而此规律在本文的动载试验中同样明显, 如三轴疲劳 #3-5 与单轴疲劳 #1-5 试验 (图 19), 在岩样岩体结构相似的前提下, 三轴疲劳试验表现出更强的延性, 破坏需产生的轴向应变也大于单轴疲劳试验, 且两次试验的上限应力和加载频率相同, 三轴疲劳的应力幅值

更高, 但其疲劳寿命却更高, 说明岩样更不易发生疲劳破坏。故在此推断周期荷载上限应力、幅值、加载频率的改变对脆性岩体疲劳寿命的影响程度更为强烈, 岩样破坏特征的差异影响着其对周期荷载变化的响应程度。

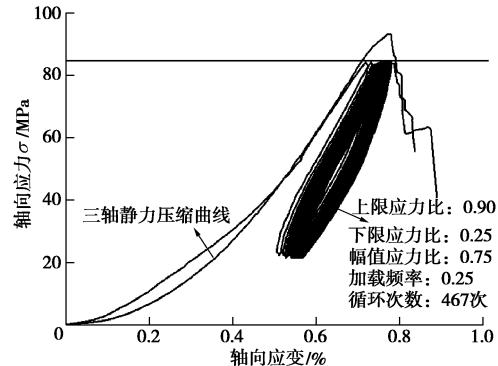
图 19 震旦系灯影组 (Z_d^3) 白云岩三轴疲劳 #3-5 试验曲线

Fig. 19 Triaxial fatigue test curves of sinian period dengying formation dolomite No. 3-5

为验证以上推论, 首先从以下几个方面判断震旦系灯影组 (Z_d^3) 白云岩和泥盆系沙窝子组 (D_s) 白云岩两者的破坏特征:

a) 岩样破坏后承载力丧失情况

由单轴循环荷载作用下岩样破坏后的应力-应变曲线对比图 20 可知震旦系灯影组 (Z_d^3) 白云岩表现出更为强烈的脆性破坏特征, 在岩样破坏后迅速地丧失了承载能力, 而泥盆系沙窝子组 (D_s) 白云岩的承载能力是逐渐降低的, 且具备一定的残余强度, 表现出一定的延性特征, 破坏时所产生的应变量也更大。

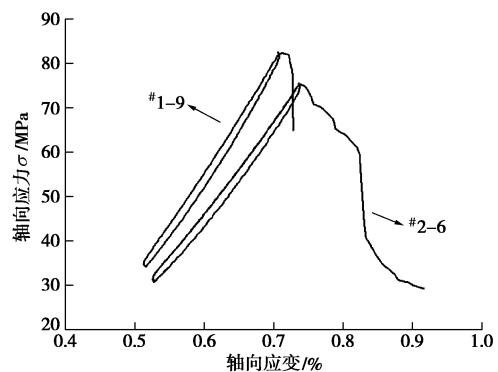


图 20 典型破坏后的应力-应变曲线图

Fig. 20 Stress-strain curves after destruction

b) 声发射和岩样宏观破坏形态

由声发射监测可知震旦系灯影组 (Z_d^3) 白云岩的 AE 数 (图 21 (a)) 是在临近破坏才急剧增多, 且在最大的声发射事件后几乎没有新的声发射事件发生, 说明岩样的能量是在短时间内突然释放的; 且宏观破坏形式以脆性的近轴向劈裂破坏为主 (图 22 (a)), 表现出强烈的脆性破坏特征。而泥盆系沙窝子组 (D_s)

白云岩的 AE 数 (图 21 (b)) 在整个试验的过程中都相对较为均匀, 且在最大的声发射事件后还有新的较强的声发射事件发生, 说明岩样的能量释放较为均匀; 且宏观破坏形式以半脆性的共轭破坏为主 (图 22 (b)), 破断角普遍大于震旦系灯影组 (Z_d^3) 白云岩, 呈现出一定延性破坏的特征^[14]。

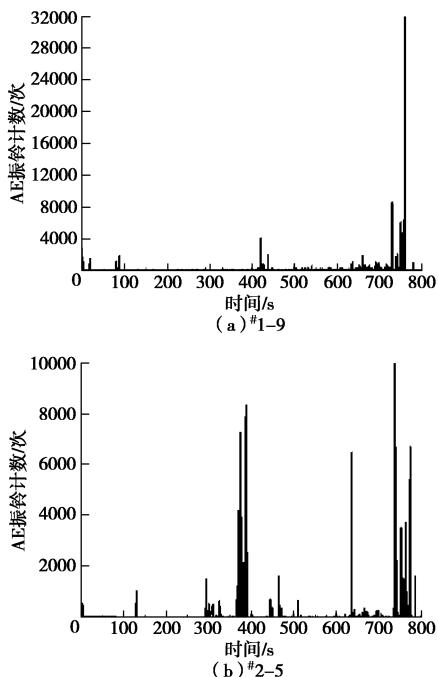


图 21 典型 AE 振铃计数 - 时间曲线

Fig. 21 AE counts number-time curves

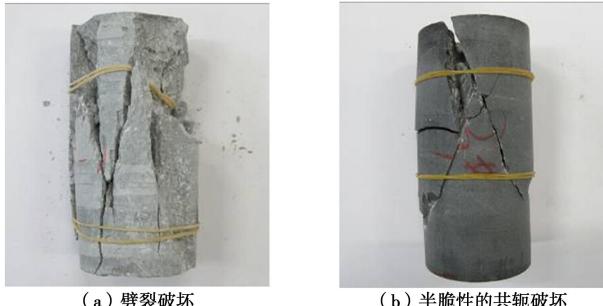


图 22 典型单轴疲劳破坏形态

Fig. 22 Failure modes under uniaxial cyclic loading

c) 电镜扫描 (SEM)

岩石是由多种矿物组成的天然材料, 在力学性质方面, 各种矿物一般都表现为各向异性的特性, 且静动荷载作用下微观裂纹的扩展方式也有所区别, 故对静动荷载作用下岩样的断口进行了电镜扫描试验。震旦系灯影组 (Z_d^3) 白云岩在静动荷载作用下裂纹萌生的临界应力通常大于或等于裂纹扩展的临界应力, 此时由于沿解理开裂所消耗的应变能最小, 故断裂形式多表现为沿晶的脆性断裂 (图 23 (a)), 破坏机理多为拉张破坏; 而泥盆系沙窝子组 (D_s) 白云岩在静动

荷载作用下微裂纹多穿晶萌生, 有时晶体还发生了塑性变形^[15] (图 23 (c)), 破坏机理多为剪切破坏; 而循环荷载作用下, 无论是拉张断口还是压剪断口, 都可发现明显的疲劳条纹 (图 23 (b)、(d))。由此再次证明在静动荷载作用下震旦系灯影组 (Z_d^3) 白云岩较泥盆系沙窝子组 (D_s) 白云岩都表现出更加强烈的脆性破坏特征。

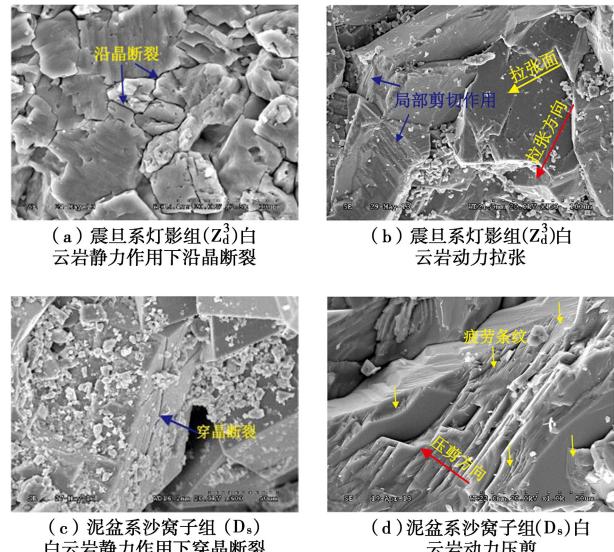


图 23 不同静动荷载作用下岩样断口的微观破坏形态

Fig. 23 Micro damage of rock fracture under static and dynamic loadings

综上所述: 在静动荷载作用下震旦系灯影组 (Z_d^3) 白云岩较泥盆系沙窝子组 (D_s) 白云岩都表现出更加强烈的脆性破坏特征, 且增大周期荷载的上限应力、幅值、加载频率对震旦系灯影组 (Z_d^3) 白云岩疲劳寿命的影响程度都更为强烈。由此验证了周期荷载上限、幅值、加载频率的改变对脆性岩体的影响程度更为强烈, 岩样破坏特征的差异同样影响着其对周期荷载变化的响应程度的推论。

3 震裂损伤程度影响因素分析

3.1 岩体结构差异

震旦系灯影组 (Z_d^3) 白云岩和泥盆系沙窝子组 (D_s) 白云岩之间自身结构的差异性, 导致两者在静动荷载作用下表现出不同的破坏特征, 最终决定了两者对周期荷载上限应力、幅值、加载频率改变的响应强烈程度, 其中震旦系灯影组 (Z_d^3) 白云岩表现出更为强烈的脆性破坏特征, 破坏所需产生的轴向变形更小, 故周期荷载条件的改变对其疲劳寿命的影响更为强烈; 且因震旦系灯影组 (Z_d^3) 白云岩自身隐微裂纹更为发育, 所以在相同强度的地震力作用下震旦系灯影组 (Z_d^3) 白云岩震裂损伤程度更高, 这是造成南侧

滑床岩体比滑体次级滑动面岩体震裂损伤程度更高的内在因素。

3.2 层位埋深及地形差异

南侧滑床高程相同位置处, 地形的变化不突出, 地震动的响应程度相近, 而在此基础上, 层位原始埋深越大位置处, 上覆岩土体层越厚, 受到垂直向地震荷载的上限应力越大, 而考虑到上限应力是影响疲劳寿命的首要因素, 当上限应力没有达到岩体应力门槛值^[12]时, 岩体就不会发生疲劳破坏, 故南侧滑床高程相同的位置, 层位埋深越大处岩体震裂损伤程度越高。

同理, 如图4所示, “军舰体”次级滑动面原始埋深远远小于滑坡滑床, 受到垂直向地震荷载的上限应力远远小于滑坡滑床, 这是造成南侧滑床岩体比滑体次级滑动面岩体震裂损伤程度更高的动力因素。

而钻孔^{#8}、钻孔^{#9}所在位置靠近门槛石沟, 为两面临空的单薄山脊附近, 对地震波的传播具有更为显著的放大效应^[16-17], 该位置岩体受到垂直向地震荷载的上限应力和应力幅值更大、频率更高, 且受到水平向地震荷载也更大, 岩体间围压的束缚力更小, 发生脆性破坏的可能性更高, 故岩体的震裂损伤程度更高。

综上所述, 强震作用下, 滑坡不同部位受控于埋深及地形地貌的差异, 决定了其受到的地震作用力以及应力状态各不相同, 这是影响岩体震裂损伤程度的动力因素。

4 认识与展望

基于不同动力条件下的疲劳试验, 结合大光包滑坡不同部位岩体的震裂损伤程度随埋深、地形地貌及岩性的差异而呈现出的一定规律性, 从动力学的角度分析强震作用下滑坡岩体震裂损伤程度的影响因素, 得出以下4点认识与展望。

(1) 大光包滑坡震旦系灯影组(Z_d^3)白云岩和泥盆系沙窝子组(D_s)白云岩承受垂直向地震荷载的上限应力和幅值越大、频率越高, 岩体的震裂损伤程度越高。在相同强度的地震力作用下震旦系灯影组

(Z_d^3)白云岩震裂损伤程度更高, 其中上限应力是影响岩体震裂损伤程度的首要因素, 应力水平的高低是加载频率影响岩体震裂损伤程度的前提。

(2) 滑坡不同部位埋深和地形的差异, 决定了其受到的地震作用力以及应力状态各不相同, 是影响岩体震裂损伤程度的动力因素; 而滑坡不同岩性之间岩体结构的差异, 导致其表现出不同的破坏特征, 决定了在相同地震荷载下震裂损伤程度各不相同, 是影响岩体震裂损伤程度的内在因素。

(3) 地震爆发初期, 强烈的地震冲击作用力在短

时间内对岩体产生的巨大损伤及岩体自身结构的缺陷, 是造成岩体最终震裂损伤的基础。

(4) 汶川地震强大的水平作用力^[16]减小了岩体间围压的束缚, 为单轴应力状态提供了条件, 说明用单轴疲劳试验来研究大光包岩体震裂损伤的可行性, 且试验结果表明在单轴应力状态下岩体更容易发生震裂损伤。通过力学试验很好地从动力学的角度解释了强震作用下滑坡岩体震裂损伤程度的影响因素, 为不同岩性特征、不同位置条件的岩体在地震力作用下可能产生的震裂损伤程度进行快速的定性评价提供了依据, 但由于地震动的复杂性及震裂损伤影响因素的多样性, 在强震作用下岩体的震裂损伤问题上, 特别是定量评价标准等方面, 还需进行更多深入的研究。

参考文献:

- [1] 黄润秋, 裴向军, 李天斌. 汶川地震触发大光包巨型滑坡基本特征及形成机制分析[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 730-741. (HUANG Run-qiu, PEI Xiang-jun, LI Tian-bin. The basic characteristics and formation mechanism of Daguangbao large-scale landslide triggered by Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6): 730-741. (in Chinese))
- [2] 黄润秋, 裴向军, 张伟锋, 等. 再论大光包滑坡特征与形成机制[J]. 工程地质学报, 2009, 17(6): 725-736. (HUANG Run-qiu, PEI Xiang-jun, ZHANG Wei-feng, et al. Further examination on characteristics and formation mechanism of Daguangbao landslide[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(6): 725-736. (in Chinese))
- [3] 许向宁, 李胜伟, 王小群, 等. 安县大光包滑坡形成机制与运动学特征讨论[J]. 工程地质学报, 2013, 21(2): 269-281. (XU Xiang-ning, LI Sheng-wei, WANG Xiao-qun, et al. Characteristics of formation mechanism and kinematics of Daguangbao landslide caused by Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(2): 269-281. (in Chinese))
- [4] 葛修润, 任建喜, 蒲毅彬, 等. 岩石疲劳损伤扩展规律 CT细观分析初探[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 191-195. (GE Xiu-run, REN Jian-xi, PU Yi-bin, et al. Primary study of CT real-time testing of fatigue meso-damage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(2): 191-195. (in Chinese))
- [5] 葛修润, 蒋宇, 卢允德, 等. 周期荷载作用下岩石疲劳变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1581-1585. (GE Xiu-run, JIANG Yu, LU Yun-de, et al. Testing study on fatigue deformation law of rock under cyclic

- loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(10): 1581 – 1585. (in Chinese))
- [6] 杜野. 大光包巨型滑坡“滑带”岩体碎裂化研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013. (DU Ye. Study on the “slip band” rock mass disintegration of Daguangbao giant landslide [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013. (in Chinese))
- [7] 叶坤. 大光包巨型滑坡堆积特征及“刹车效应”研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012. (YE Kun. Study on accumulation characteristics and the “braking effect” of Daguangbao massive landslide[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [8] 言志信, 史盛, 党冰, 等. 水平地震力作用下岩体破坏机理探究[J]. 地震工程学报, 2013, **35**(2): 203 – 207. (YAN Zhi-xin, SHI Sheng, DANG Bing, et al. Research on the failure mechanisms of rock masses under level seismic loading[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, **35**(2): 203 – 207. (in Chinese))
- [9] 国际岩石力学学会实验室和现场试验标准化委员会. 岩石力学试验建议方法[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1982: 2 – 5. (Laboratory of International Society for Rock Mechanics and Committee of Field Experiment Standard. Proposed method to rock mechanics test[M]. Beijing: Coal Industry Publishing House, 1982: 2 – 5. (in Chinese))
- [10] 蒋宇. 周期荷载作用下岩石疲劳损伤及变形发展规律[D]. 上海: 上海交通大学, 2003. (JIANG Yu. Fatigue failure and deformation development law of rock under cyclic load[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2003. (in Chinese))
- [11] 肖建清. 循环荷载作用下岩石疲劳特性的理论与实验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009. (XIAO Jian-qing. Theoretical and experimental investigation on fatigue properties of rock under cyclic loading[D]. Changsha: Central South University, 2009. (in Chinese))
- [12] 葛修润, 卢应发. 循环荷载作用下岩石疲劳破坏和不可逆变形问题的探讨[J]. 岩土工程学报, 1992, **14**(3): 56 – 60. (GE Xiu-ren, LU Ying-fa. Researches on rock fatigue failure and irreversible deformation under cycle loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, **14**(3): 56 – 60. (in Chinese))
- [13] 刘泉声, 刘恺德, 朱杰兵, 等. 高应力下原煤三轴压缩力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(1): 24 – 34. (LIU Quan-sheng, LIU Kai-de, ZHU Jie-bing, et al. Study of mechanical properties of raw coal under high stress with triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(1): 24 – 34. (in Chinese))
- [14] 王在泉, 张黎明, 孙辉, 等. 不同卸荷速度条件下灰岩力学特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(4): 1045 – 1050. (WANG Zai-quan, ZHANG Li-ming, SUN Hui, et al. Experimental study of mechanical properties of limestone under different unloading velocities[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(4): 1045 – 1050. (in Chinese))
- [15] 崔圣华. 强震巨型滑坡滑带碎裂岩体微观分析及静动力破损能机制研究——以安县大光包滑坡为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2014. (CUI Sheng-hua. Microstructure and static and dynamics damage mechanism of the slipping cataclastic rock of largest scale landslide—a case of Dagungbao landslide in Anxian[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014. (in Chinese))
- [16] 殷跃平, 王猛, 李滨, 等. 汶川地震大光包滑坡动力响应特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(10): 1969 – 1982. (YIN Yue-ping, WANG Meng, LI Bin, et al. Dynamic response characteristics of Daguangbao landslide triggered by Wenchuan earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(10): 1969 – 1982. (in Chinese))
- [17] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994. (ZHANG Zhuo-yuan, WANG Shi-tian, WANG Lan-heng. Principles of engineering geological analysis[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994. (in Chinese))