

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0675

地震作用下水平层状岩质边坡累积损伤与破坏模式研究

刘新荣^{1,2}, 邓志云^{1,2}, 刘永权^{1,2,3}, 刘树林^{1,2}, 路雨明^{1,2,4}

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学 库区环境地质灾害防治国家地方联合工程研究中心, 重庆 400045;
3. 中建地下空间有限公司, 成都 610081; 4. 重庆建工第七建筑工程有限责任公司, 重庆 400059)

摘 要: 研究边坡在反复地震作用下的累积损伤对于库区岩质边坡的长期稳定性分析具有重要意义。结合振动台试验与理论分析方法, 对水平层状岩质边坡在反复地震作用下的累积损伤与破坏模式进行了深入研究。结果表明: 采用混凝土疲劳裂纹扩展的双 K 准则可以很好地解释边坡的累积损伤曲线的变化趋势, 完整的累积损伤演化曲线表现出初始损伤、细观裂纹扩展、宏观裂缝扩展 3 个阶段; 分别采用三次多项式和幂指数建立了微小地震和强震作用下边坡岩体累积损伤演化模型并取得了良好的拟合效果, 微小地震作用下边坡岩体累积损伤曲线表现出初期略微下降、中期线性增长、后期平缓增长的正“S”型的 3 段式特征, 强震作用下边坡岩体累积损伤相比微震作用下有较为快速的增长, 且在边坡破坏前增速加快。频发微震作用下, 水平层状岩质边坡在坡体上部形成阶梯型破坏面并向坡面出露, 在坡体下部形成平直的剪切破坏面, 坡体最终的破坏面呈阶梯状。

关 键 词: 地震作用; 岩质边坡; 振动台试验; 累积损伤; 破坏模式

中图分类号: TV62

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2019)07-2507-10

Study of cumulative damage and failure mode of horizontal layered rock slope subjected to seismic loads

LIU Xin-rong^{1,2}, DENG Zhi-yun^{1,2}, LIU Yong-quan^{1,2,3}, LIU SHU-lin^{1,2}, LU Yu-ming^{1,2,4}

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. National Joint Engineering Research Center of Geohazards Prevention in the Reservoir Areas, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. China Construction Underground Space Co., Ltd., Chengdu 610081, China;
4. Chongqing No.7 Construction Engineering Co., Ltd., Chongqing 400059, China)

Abstract: It is of great practical significance to study the cumulative damage of slope under repeated seismic loads for long-term stability analysis of rock slope in reservoir area. In this paper, shaking table test and theoretical analysis were used to study the cumulative damage and failure mode of horizontal layered rock slope under repeated seismic loads. Results show that the fatigue crack propagation of concrete double K criterion explains the change tendency of the slope of the cumulative damage curve well. The complete cumulative damage evolution curve shows three stages, i.e., the initial damage stage, mesoscopic crack extension stage and macroscopic crack extension stage. The well fitted cubic polynomial and power exponent are adopted to establish the cumulative damage evolution model of slope rock mass under the action of micro-small earthquakes and strong earthquakes respectively. The cumulative damage curve of slope rock mass shows slight dip in the early stage, linear growth in the middle stage and moderate growth in the last stage under the action of micro-small earthquakes, which has the features of the positive "S" type. And the cumulative damage of slope rock mass under the action of strong earthquakes has a relatively rapid growth compared with that under the action of micro-small earthquakes, and the increase rate of which is accelerated before the slope failure. Under the action of frequent micro earthquake, stepped failure surfaces on the upper part of the horizontal layered rock slope are formed and exposed to the slope surface, while straight shear failure surface if formed on the lower part of the slope. The final failure surface of the slope is a stepped one.

Keywords: seismic loads; rock slope; shaking table test; cumulative damage; failure mode

收稿日期: 2018-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41372356)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41372356).

第一作者简介: 刘新荣, 男, 1969 年生, 教授、博士生导师, 主要从事土力学以及地下工程等领域的教学与科研工作。E-mail: liuxrong@126.com

通讯作者: 邓志云, 男, 1990 年生, 博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: dengzhiyuncq@163.com

1 引言

地震是影响边坡稳定性的重要外在因素之一, 研究人员针对地震作用下岩质边坡的稳定性进行了较为深入的研究工作, 但主要集中于强震作用下边坡的动力稳定性研究^[1-7]。对于微震, 由于单次动荷载作用不足以造成岩体的灾难性失稳, 其对边坡稳定性的影响往往受到忽视。但是在反复的波动作用下, 岩体会产生疲劳损伤累积, 承载力与稳定性降低并加速其破坏过程^[8]。三峡库区自 2003 年开始蓄水后, 就一直伴随有微震群活动, 且水库诱发地震的发震频次显著增多, 表现出震源较浅、震级较弱、震次频繁、能量衰减迅速等特点^[9]。研究边坡岩体在反复地震作用下的累积损伤, 对于岩质边坡的长期稳定性分析具有重要的实际意义。

目前已开展的关于微震作用下岩质边坡稳定性的研究十分有限。江泊洵^[10]深入研究了在频发微震作用下三峡库首段典型松散型滑坡体的动力响应与变形机制问题。李兴旺^[11]通过大量的数值模拟分析了库区顺层岩质边坡在频发微震作用下的动力稳定性。赵永等^[12]将实际工程微震监测结果应用于岩体损伤情况研究, 通过数值模拟方法分析了微震监测数据与岩体损伤之间的关系。杨忠平等^[13]结合振动台试验与 UDEC 数值分析等方法, 对反复微小地震作用下库区顺层、反倾岩质边坡的动力稳定性进行了深入研究。

以上研究虽然考虑了频发微震作用的影响, 但多以数值模拟方法为主, 甚少涉及到岩质边坡的损伤演化研究, 且缺乏对水平层状岩质边坡在微震作用下的动力稳定性研究。而文献^[14-17]通过对水平或近水平岩质边坡的研究显示研究水平或近水平层状边坡的稳定性很有必要。如果缺乏对水平层状岩质边坡的动力响应、破坏模式以及应力-应变演化规律的认识, 可能会错误判断其动力稳定性以及变形发展趋势, 不能有针对性指导边坡加固设计, 从而造成安全隐患^[18]。

鉴于此, 本文结合振动台模型试验与理论分析方法, 对库区水平层状岩质边坡在反复地震作用下的边坡动力特性参数变化规律、累积损伤演化过程与损伤模型、坡体滑面形成过程及失稳模式等方面进行了深入分析。相关结论对于进一步认识水库诱发地震对库区水平层状岩质边坡动力稳定性的影响规律以及库区地质灾害的防治具有一定参考价值。

2 基于振动台试验的水平层状岩质边坡动力特性参数变化规律

2.1 振动台试验设计

振动台试验在美国 ANCO 公司生产的双向(水平、垂直方向)双自由度的地震模拟振动台设备上完成, 其主要技术参数如表 1 所示。

表 1 振动台技术参数

Table 1 Technical parameters of shaking table testing system

台面尺寸 /m ²	最大起重重量 /kg	工作频率范围 /Hz	加载方式	水平最大加速度 /g	垂向最大加速度 /g	水平最大位移 /mm
1.2×1.2	1 000	0~50	液压式	1.2 (1 000 kg)	2.0 (500 kg)	±100

注: 1.2(1 000 kg)为模型边坡最大质量不超过 1 000 kg 时, 水平最大加速度为 1.2g; 2.0(500 kg)为模型边坡最大质量不超过 500 kg 时, 垂向最大加速度为 2.0g。

振动台试验准备工作主要包括相似关系设计与相似材料制作, 边坡模型制作以及试验加载方案设计等。

2.1.1 相似关系设计及相似材料制作

选择弹性模量 E 、密度 ρ 以及时间 t 作为相似系数的基本物理量(控制量), 参考文献^[5, 19-21]确定模型试验关键物理量的相似系数如表 2 所示。

表 2 模型试验关键物理量的相似系数

Table 2 Similarity coefficients of key physical parameters in model test

	物理量	量纲	相似关系	相似系数 (*控制量)
材料 参数	密度 ρ	ML ⁻³	C_ρ	1.00*
	弹性模量 E	ML ⁻¹ T ⁻²	C_E	32.60*
	泊松比 μ	无量纲	C_μ	1.00
	黏聚力 c	ML ⁻¹ T ⁻²	$C_c = C_E C_\rho C_t$	22.80
	内摩擦角 φ	无量纲	C_φ	1.00
	应力 σ	ML ⁻¹ T ⁻²	$C_\sigma = C_E C_\rho C_t$	22.80
	应变 ε	无量纲	$C_\varepsilon = C_\rho C_g C_t C_E^{-1}$	0.70
几何 参数	长度 l	L	$C_l = C_E^{0.5} C_\rho^{-0.5} C_t$	22.9
	位移 u	L	$C_u = C_l C_\varepsilon$	16.00
运动学 参数	时间 t	T	C_t	4.00*
	频率 f	T ⁻¹	$C_f = C_t^{-1}$	0.25
	速度 v	LT ⁻¹	$C_v = C_u C_t^{-1}$	4.00
	加速度 a	LT ⁻²	$C_a = C_u C_t^{-2}$	1.00
	重力加速度 g	LT ⁻²	$C_g = C_u C_t^{-2}$	1.00

参考文献^[12, 19], 本次试验最终选择的相似材料包括: 石英砂、重晶石粉、石膏、水、石膏缓凝剂以及甘油。其中, 石英砂和重晶石粉分别起到粗骨料与细骨料作用, 石膏和水起到胶结作用, 石膏

缓凝剂起到延缓石膏初凝时间的作用,从而保证了模型边坡的浇筑施工时间,甘油起到了保水的作用。

结合三峡库区以砂泥岩、砂岩互层为主的地质条件,模型试验以库区砂岩为原型,相关物理力学参数参考现有文献资料^[10, 13, 22]取值。通过开展常规物理力学特性试验,采用无侧限抗压强度试验得到试样弹性模量和泊松比,采用环刀直剪试验得到试样的黏聚力和内摩擦角,最终确定的模型材料最优配比及其相应物理力学参数,如表 3 所示。

表 3 相似材料配比及其物理力学参数

Table 3 Ratio of similar materials and their physical and mechanical parameters

类别	密度 /(g/cm ³)	弹性模量 /MPa	泊松比 μ	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	单轴抗压 强度 /MPa
原型	2.49	4 200.0	0.30	2 000.0	41.8	34.10
模型目标值	2.49	128.8	0.30	87.7	41.8	1.50
模型实际值	2.50	180.0	0.25	120.0	42.0	1.40

注:相似材料配比为石英砂:重晶石粉:石膏:水:甘油= 1.08: 0.64: 0.36: 0.22: 0.03

2.1.2 边坡模型的制作

鉴于三峡库区大型滑坡岸坡陡峭,斜坡坡角较大^[23]。因此,试验中设计的模型边坡坡角为 60°。受振动台面承载能力的限制,模型边坡的高度设计为 1 m,几何相似系数 $C_c = 22.8$,故原型边坡高度为 22.8 m,水平层状岩质边坡的概化设计模型如图 1 所示。

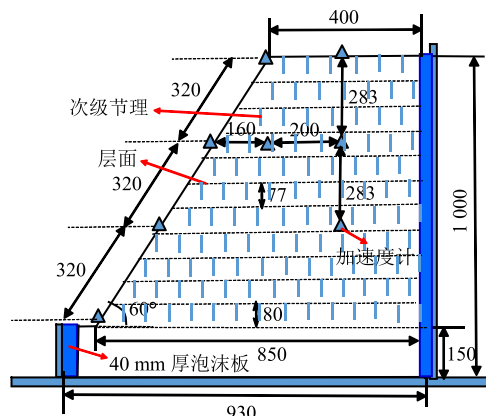


图 1 水平层状岩质边坡的概化模型(单位: mm)

Fig.1 Generalized model of horizontal layered rock slope(unit: mm)

从图 1 可知,模型边坡同时考虑了层面和与层面正交的垂直次级节理,边坡中共设置了 8 个加速度计,其中坡体内部埋设 3 个,坡面及坡顶埋设 5 个。

鉴于振动台对模型重量的限制以及模型分层压

实所需的作业空间,确定模型箱在厚度方向的净空尺寸为 400 mm。在模型箱中完成模型边坡的建造,采用从下到上、分层压实的方式。边坡模型的制作流程为:①根据边坡模型各层的几何尺寸及密度,算出各层所需的混合料;②向干料中分若干次加入水(混合了石膏缓凝剂与甘油),并搅拌均匀;③采用专门加工的小型夯锤压实至设计的密实度,每次碾压的厚度控制在 50~100 mm;④采用薄钢板垂直切割次级节理,切割深度 h 等于 2/3 岩层厚度;⑤分层压实后,在层面均匀铺洒一薄层石英砂;⑥重复上述 5 个步骤,直到达到边坡模型设计的高度。最终制作完成的边坡模型如图 2 所示。



图 2 制作完成的水平层状岩质边坡模型

Fig.2 Completed horizontal layered rock slope model

2.1.3 试验加载方案

振动台试验的地震波分为天然波与人工波两种类型,天然波采用湖北省兴山县地震监测台站于 2013 年 12 月 16 日 13 时 04 分监测到的发生于巴东县的 Ms5.1 级库区诱发地震,主震持续时间约 7 s,震源深度约为 5 km;人工波为不同振幅和频率的正弦波。鉴于水库诱发地震具有在较短时间内(1~3 d)连续发震 2~4 次的特点^[10],试验加载中,将 4 个 7 s 左右的天然波(截取了主震部分)拼接并作为一个完整的地震波序列,进而按照时间相似系数($C_t = 4$)进行压缩。经拼接处理并按照时间相似系数压缩后的地震波波形如图 3 所示。

施加的天然波幅值包括 0.04g、0.06g、0.09g、0.15g 以及 0.35g 等 5 个不同等级,施加的正弦波的持时与天然波相同(7 s),频率共考虑了 5、10、15、30 Hz 4 等级,振幅考虑了 0.04g、0.15g、0.20g、0.40g 4 个等级。此外,在边坡各个加载阶段采用白噪声

(随机波)扫描来测定边坡模型的动力特性参数,详细的振动台试验加载方案如表 4 所示。

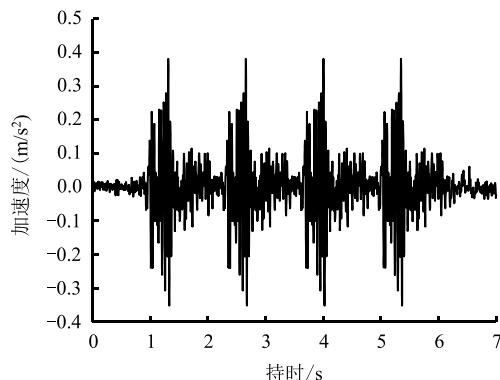


图 3 拼接并压缩后的天然地震波波形

Fig.3 Waveform of natural seismic wave after splicing and compressing

表 4 振动台试验加载方案

Table 4 Loading plan of shaking table test

工况	振幅/g	加载波类型 (X 方向)	持时 /s	频率 /Hz	加载 次数
1	0.08	白噪声 1	30	/	1
2	0.04	正弦波	7	30	1
3	0.04	天然波	7	32	1
4	0.04	正弦波	7	5	1
5	0.04	正弦波	7	10	1
6	0.04	正弦波	7	15	1
7	0.04	正弦波	7	30	1
8	0.04	天然波	7	32	1
9	0.06	天然波	7	32	1
10	0.09	天然波	7	32	1
11	0.15	天然波	7	32	1
12	0.08	白噪声 2	30	/	1
13~62	0.04	天然波	7	32	50
63	0.08	白噪声 3	30	/	1
523	0.35	天然波	7	32	1
524	0.08	白噪声 13	30	/	1
525~574	0.15	正弦波	7	32	50
575	0.08	白噪声 14	30	/	1

注: 63~523 工况之间不断重复 13~63 加载工况,直至作用 500 次微震; 575 工况之后,先重复 525~575 加载工况,直至作用 500 次小震; 500 次小震后,加载 0.2g~0.4g、15 Hz 的正弦波(其中 0.2g 正弦波分 5 次加载,每次 20 次后进行白噪声扫描;随后加载 0.4g 正弦波,每次 20 次直至边坡失稳破坏。白噪声无明显周期性,表中用“/”表示。

表 4 中,前 12 个加载工况用于分析边坡的动力响应基本特征; 500 次微震(0.04g 天然波)、500 次小震(0.15g 正弦波)用于分析随地震作用次数边坡动力特性参数的变化;后期加载的强震(0.2g~0.4g 正弦波)用于得到边坡最终的滑面形成过程以及相应失稳模式。

2.2 边坡模型的动力特性参数变化

边坡模型的动力特性,主要指由相似材料构建而成的模型,其作为一个整体具有的各阶自振频率、阻尼比和振型,它决定了模型边坡在地震等动力荷载作用下的响应模式。对该水平层状岩质边坡模型进行低幅值白噪声扫描,采用现有研究常用的传递函数法^[1, 4, 19],获得了水平层状边坡在各个加载阶段的动力特性参数,其变化规律如图 4 所示。

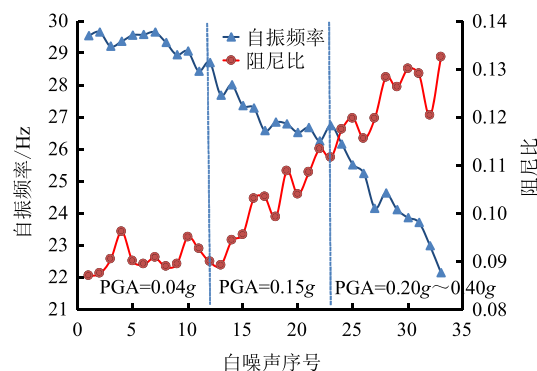


图 4 模型边坡动力特性参数随加载历程的变化

Fig.4 Variations of dynamic characteristic parameters of model slope with loading process

考虑到通过传递函数求解动力特性参数的过程中需要对传函曲线进行平滑处理,这会一定程度上降低阻尼比的求解精度,因此,阻尼比的变化曲线在局部会有一定波动。但从图 3 的整体变化趋势可知:模型边坡的自振频率随着地震作用次数的增加明显下降,而阻尼比则波动上升。其一阶自振频率从加载前的 29.55 Hz 下降到加载完成之后的 22.14 Hz,降幅达到 25.1%;阻尼比则从加载前的 0.087 上升到加载完成之后的 0.133,升幅为 52.3%。可见,随着地震作用次数的增加,边坡自振频率的减小和阻尼比的增大是其动力特性变化的基本规律。

从图 4 还可看出,在不同的地震动峰值加速度(PGA)条件下,坡体的动力响应有所区别。当 PGA 较小(0.04g)时,自振频率与阻尼比的变化幅度相对较小,甚至可以观察到自振频率在初期加载阶段的轻微持续上升(例如白噪声序号 3~7),这表明在较小的地震作用下,有限次数(100~200 次)的地震作用会将边坡振动密实,因此其自振频率出现略微增加;当 PGA 增大(0.15g)时,边坡动力特性参数的变化幅度明显增加,侧面反映出此阶段边坡的损伤累积程度在加快;而当边坡遭遇破坏性地震时(PGA=0.2g~0.4g),模型边坡的自振频率出现了更为明显的下降,这表明边坡在此阶段可能出现了失稳破坏。

3 坡体累积损伤演化过程与累积损伤模型

3.1 边坡岩体损伤理论研究

三峡库区的边坡岩体中,随机分布着大量的初始损伤(如细观的节理裂隙、宏观的层面和破碎带等)。在水库蓄水诱发的多次地震作用下,边坡岩体中将产生大量新的裂纹。在反复的地震应力波的作用下,岩体中的节理、裂隙会不断扩展与贯通,发展成为肉眼可见的主裂缝。在边坡岩体尚未出现明显的破坏迹象之前,判别微小地震作用引起的岩体损伤以及合理的表征损伤参量,是开展微震频发下岩质边坡累积损伤效应研究的前提。

基于声波波速的变化,文献[24]建立了岩体损伤度 D 、岩体完整性系数 K 以及声波波速降低率 η 之间的关系为

$$D = 1 - \frac{E}{E_0} = 1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 = 1 - K = 1 - (1 - \eta)^2 \quad (1)$$

式中: E_0 、 E 分别为爆破前、后岩体的等效弹性模量; v_0 、 v 分别为爆破前、后岩体的声波波速。

根据 Nakata 等[25-26]的研究,当目标结构可视为一维均匀各向同性体时,结构的基本自振频率可近似用脉冲波在整个结构中传播时间倒数的 $1/4$ 来表示。结合弹性波传播理论,当应力波在半无限空间上的有限厚度覆盖层内传播时,应力波波速 v_s 与覆盖层厚度 H 、一阶自振频率 f 之间的关系为

$$v_s = 4fH \quad (2)$$

式(2)建立了波速与一阶自振频率之间的关系,从这一关系可知,当覆盖层厚度一定时,波速与自振频率成正比例关系。

式(1)中, v_0 、 v 可以等效为坡体在地震作用前、后岩体的应力波波速 v_s , 因此将式(2)代入式(1)中,可得基于自振频率的岩体损伤度表达式:

$$D = 1 - \frac{E}{E_0} = 1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 = 1 - \left(\frac{4fH}{4f_0H} \right)^2 = 1 - \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 = 1 - (1 - \gamma)^2 \quad (3)$$

式中: f_0 、 f 分别为地震作用前和地震作用后岩体的一阶自振频率; γ 为岩体自振频率的降低率。

3.2 坡体损伤度 D 的变化规律

将动力特性参数值(自振频率)代入式(3),即可得到边坡在各个加载阶段的 D , 从而可以进一步研究 D 随地震作用次数的变化规律,分析水平层状岩质边坡的损伤累积演化过程。坡体损伤度 D 随

加载历程的变化如图5所示。

从图5可以看出,边坡的损伤度 D 均随着地震作用次数的增加而累积增大,且随着地震荷载幅值的增大,损伤累积的速度显著加快。在微震作用初期,模型边坡的损伤度出现负值,这可能与边坡在有限次数的微震作用下被振动密实的原因有关,这一特殊现象表明,较少次数的微震作用会对边坡稳定性产生有利的作用。

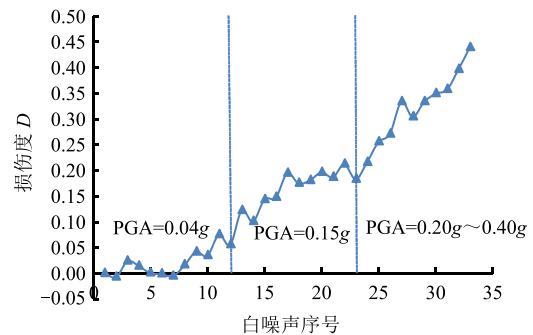


图5 坡体损伤度 D 随加载历程的变化

Fig.5 Variation of slope damage degree D with loading process

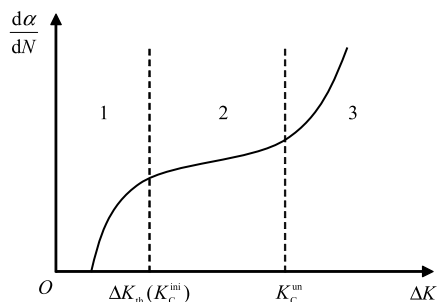
随着微震作用次数进一步增加(试验中为大于200次后),坡体损伤度 D 变为正值且出现小幅增加,这表明此阶段边坡已经开始出现损伤,且损伤随着微震作用次数的增加而累积增大。在地震荷载幅值进一步加大后($\text{PGA}=0.2\text{g}\sim 0.4\text{g}$),边坡岩体的累积损伤度相比微震作用下有较为快速的增长,考虑到微小地震作用下每50次地震加载后进行一次白噪声扫描,而强震作用下每20次地震加载后进行一次白噪声扫描,在相同地震作用次数下,强震作用下坡体损伤度 D 增速会显著大于微小地震作用下坡体损伤度 D 的增速;且在边坡破坏前坡体损伤度 D 增速明显加大,模型边坡逐渐进入临界失稳状态,而在损伤变化曲线上,则表现出随地震作用次数增加损伤度大致呈指数级增长的态势。

3.3 边坡岩体的疲劳裂纹扩张规律与累积损伤模型的建立

在频发微小地震作用下,坡体内裂纹尖端在地震应力波的作用下产生应力集中,裂纹持续扩展并贯通,最终造成岩体的完整性降低。借鉴混凝土疲劳断裂双 K 准则[27-28],岩体在循环应力作用下的疲劳变形过程表现出明显的“三阶段”性质[29],如图6所示,图中, ΔK 为动态应力强度因子幅度, da/dN 为疲劳裂纹的扩展速率, ΔK_{th} (K_{C}^{ini}) 为疲劳裂纹扩展的门槛值, K_{C}^m 为岩体动态断裂韧度。

从图可以看出,完整的疲劳累积损伤演化曲线

表现出 3 个明显的阶段：初始损伤阶段（起裂区）、细观裂纹扩展阶段（稳定扩展区）以及宏观裂缝扩展阶段（失稳破坏区）^[29]。而岩石的起裂韧度 K_C^{ini} 和断裂韧度 K_C^{m} 是划分 3 个阶段的重要临界参数。下文将分别对微小地震与强震作用两个阶段水平层状边坡岩体的疲劳裂纹扩张规律作出分析。



1—初始损伤阶段 2—细观裂纹扩展阶段 3—宏观裂纹扩展阶段

图 6 疲劳裂纹扩张过程“三阶段”示意图^[27]

Fig.6 Schematic diagram of three stages of expansion of the fatigue crack^[27]

根据模型边坡的累积损伤演化曲线特点，考虑到边坡岩体在微小地震作用阶段与强震作用阶段的损伤累积速度存在较大差异，针对微小地震与强震作用两个阶段分别建立了边坡岩体的疲劳累积损伤模型。

3.3.1 微小地震作用阶段

采用三次多项式对边坡岩体累积损伤演化数据进行回归分析，如下式所示：

$$D = A_1 N^3 + A_2 N^2 + A_3 N + A_0 \quad (4)$$

式中： N 为微小地震作用阶段的白噪声序号； A_0 、 A_1 、 A_2 、 A_3 均为待定系数。通过多项式拟合得出： $A_0 = 0.0340$ ， $A_1 = -8 \times 10^{-5}$ ， $A_2 = 0.0031$ ， $A_3 = -0.0212$ 。模型边坡在微小地震作用阶段的疲劳累积损伤演化拟合曲线如图 7 所示。

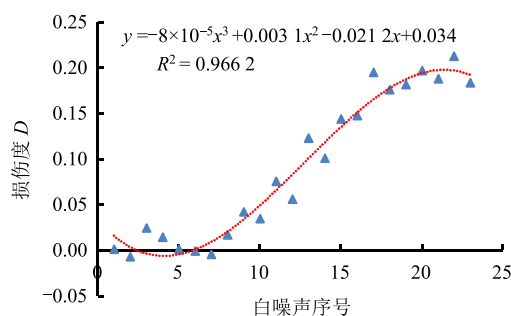


图 7 微小地震作用下模型边坡的疲劳累积损伤演化拟合曲线

Fig.7 Regression curve of fatigue cumulative damage evolution of model slope under micro-small earthquake

采用三次多项式拟合模型边坡在微小地震作用下的疲劳累积损伤演化曲线拟合效果较为理想 ($R^2 = 0.9662$)。从图 7 得到的拟合函数曲线形状可知，在频发微小地震作用下，边坡岩体的损伤度 D 首先会出现小幅下降，体现了边坡在有限次数的微震作用会被震动密实的一般规律。随着地震作用次数的增加，边坡的损伤累积进入快速增长阶段，累积损伤度 D 随地震作用次数增加几乎呈线性增大趋势，从边坡岩体疲劳裂纹扩展的角度分析，此时岩体疲劳裂纹已经进入细观裂纹扩展阶段（稳定扩展区），模型边坡的局部损伤变形逐渐累积，并达到一定程度。当动态应力强度因子幅度 ΔK 持续增长并达到疲劳裂纹扩展的门槛值 ΔK_{th} (K_C^{ini}) 时，初始裂纹起裂扩展并逐步形成细观裂纹，在此阶段疲劳裂纹呈稳定扩展趋势，其扩展速率 da/dN 随 ΔK 的增大而增大。当坡体内的初始裂纹逐渐扩展并形成细观裂纹之后，细观裂缝向宏观裂缝过渡则需要更大的 ΔK ，由于微小地震在坡体内细观裂纹尖端引起 ΔK 有限，此时边坡的损伤累积速度将逐渐放缓，在累积损伤曲线上则表现为微小地震加载后期的平缓增长段。从上述分析可知，在微小地震作用阶段，边坡的非线性累积损伤演化曲线表现出初期略微下降、中期线性增长、后期平缓增长的“S”型的 3 段式特征。

3.3.2 强震作用阶段

模型边坡从白噪声工况 WN-24 开始遭受强震作用 ($\text{PGA} = 0.2g \sim 0.4g$)，提取模型边坡在白噪声工况 24 之后的损伤数据，根据模型边坡在这一阶段的损伤累积演化曲线特点，采用幂指数对强震地震作用下边坡岩体累积损伤演化数据进行回归分析，采用的幂指数如下：

$$D = B_1 e^{B_2 N} \quad (5)$$

式中： B_1 、 B_2 均为待定系数。其中 $B_1 = 0.0471$ ， $B_2 = 0.0671$ ，模型边坡在强震作用阶段的疲劳累积损伤演化拟合曲线如图 8 所示。

采用幂指数拟合坡体在强震作用下的损伤累积曲线拟合效果较为理想 ($R^2 = 0.9220$)。从图 8 得到的拟合函数曲线形状可知，在强震地震作用下，边坡岩体的损伤累积速度显著增加，坡体的损伤度 D 大致呈现出幂指数增加趋势。从边坡岩体疲劳裂纹扩展角度，可认为边坡岩体在该阶段进入了宏观裂缝扩展阶段（失稳破坏区）。在该阶段，由于地震荷载幅值的增大，边坡岩体在先前形成的细观裂缝尖端处动态应力强度因子幅度 ΔK 增加至岩体动态断

裂韧度 K_C^m ，随后细观裂纹逐渐转化成宏观裂缝，疲劳裂纹加速扩展并最终导致边坡岩体发生失稳破坏。

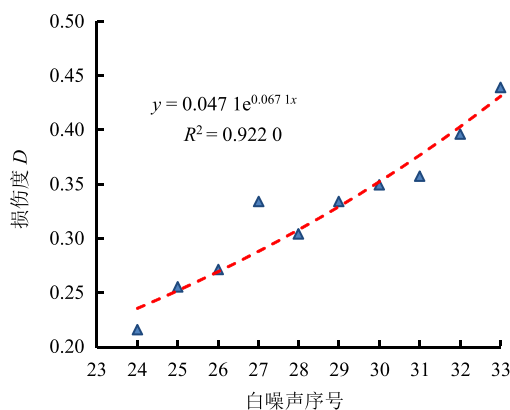


图8 强震作用下模型边坡的疲劳累积损伤演化拟合曲线
Fig.8 Regression curve of fatigue cumulative damage evolution of model slope under strong earthquake

4 坡体滑面形成过程及失稳模式

随着地震作用次数的增加，边坡的损伤不断累积。在振动台试验中，模型边坡的损伤发展表现为次级节理、层面的逐渐扩展贯通，当形成宏观的贯通滑面时，边坡失稳破坏。在振动台试验中，观察到水平层状坡在多次地震作用下的损伤累积、滑面形成及失稳破坏过程如图9所示。

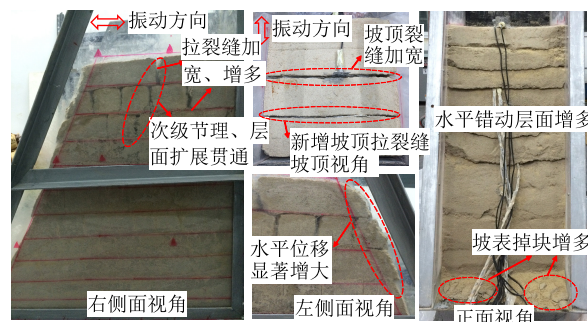
根据试验中观察到的边坡变形及裂缝发展特征，将水平层状岩质边坡在多次地震作用下的滑面形成及失稳破坏过程划分为以下4个阶段：层间次级节理拉裂及岩层水平错动阶段、竖向拉裂缝加宽增多及岩层水平位移增大阶段、阶梯型破坏面贯通形成阶段以及坡体失稳破坏阶段。

(1) 层间次级节理拉裂及岩层水平错动阶段。如图9(a)所示，对于水平层状岩质边坡，坡体在水平地震作用下的振动方向与层面平行，垂直于层面的次级节理会因岩层的水平运动而形成拉应力，因抗拉强度较低，层间次级节理将最先被拉裂。由于边坡动力响应的“高程效应”^[13]，边坡上部岩层受到的水平地震力较大，因此竖向拉裂缝将主要出现在边坡上部岩层中（前3层）。次级节理被拉裂后，边坡上部岩层的抗滑力主要由水平层面的抗剪强度来提供，随着地震作用次数的增加，层面在循环剪切作用下逐渐扩展贯通，其抗剪强度逐渐降低。当岩层遭受的水平地震力超过层面提供的剪切强度后，岩层将出现一定量的水平位移，而上部岩层的水平位移会使得坡顶产生贯通的竖向拉裂缝、坡表出现

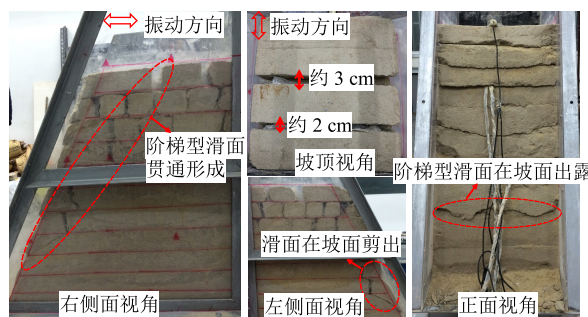
少量掉块现象。



(a) 阶段1: 层间次级节理拉裂、岩层沿水平层面错动



(b) 阶段2: 竖向拉裂缝加宽增多、岩层水平错动位移增大



(c) 阶段3: 阶梯型破坏面贯通形成并在坡面出露



(d) 阶段4: 滑体下滑堆积、坡体失稳破坏

图9 水平层状边坡的滑面形成过程及失稳破坏模式
Fig.9 Sliding surface forming process and failure mode of horizontal layered slope

(2) 竖向拉裂缝加宽增多及岩层水平位移增大阶段。如图9(b)所示，随着地震作用次数的增加，出现水平错动位移的岩层数量增多，上部岩层的水平错动位移量累积增大，原有的竖向拉裂缝不断加宽、新的次级节理拉裂缝逐渐增多。由于边坡各岩层的水平位移量存在差异，相邻岩层间的次级节理

在扩展贯通后会沿层面连接而形成阶梯状贯通破坏面。

(3) 阶梯型破坏面贯通形成阶段。如图 9(c)所示, 随着边坡下部岩层水平位移的增大及竖向拉裂缝的增多, 第 2 阶段形成的阶梯状贯通破坏面将从坡体上部岩层向下部岩层扩展, 且向坡面方向靠拢, 并最终在坡面出露。同时, 阶梯型滑面在坡面出露时呈现出斜向剪出的轮廓特征, 表明此处的岩层出现了剪切破坏, 形成了一条平直的剪切破坏面。当下部岩层被剪断后, 一条贯通的呈阶梯状的破坏面(滑面)正式形成, 因竖向拉裂缝进一步增多, 破坏面以上的滑体极为破碎, 模型坡体处在临界失稳状态。

(4) 坡体失稳破坏阶段。如图 9(d)所示, 当形成贯通型破坏面后, 坡体在几次较小的地震(幅值为 $0.04g$)作用下即出现失稳破坏, 由于边坡在出现整体崩滑前已经极为破碎, 滑体失稳破坏后在坡角及坡底呈现碎裂块体堆积状态, 一些未随滑体整体失稳的岩块残留在坡体上部, 由于其稳定性极差, 形成了随时可能崩落的危岩块体。

在坡体整体失稳破坏后, 继续作用几次较小的地震, 坡体上部的危岩将崩落至坡脚。将坡底及坡脚堆积的碎裂块体全部移除后, 可以清晰地观察到边坡基座上的阶梯型破坏面, 如图 10 所示。

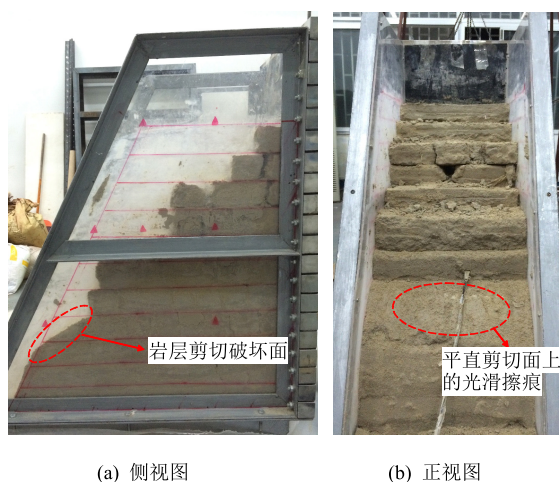


图 10 水平层状边坡的阶梯型破坏面

Fig.10 Stepped failure surface of horizontal layered slope

由图 10 可知, 边坡的失稳破坏面在中上部呈现出典型的阶梯状起伏, 每个台阶起伏由水平层面与正交次级节理组合而成, 而破坏面在下部的坡面出露部位变得极为平直, 具有明显的剪切破坏特征, 在剪切面上可以观察到明显的光滑擦痕。从试验中观察到的坡体破坏现象可知, 破坏面下部的斜向剪

切面一旦扩展贯通, 坡体将出现整体失稳, 此处的岩体是控制边坡出现整体失稳的关键块体。

基于试验中观察到的模型边坡破坏现象, 将 4 个典型坡体的滑面形成及失稳演化过程归纳为如图 11 所示的示意图。

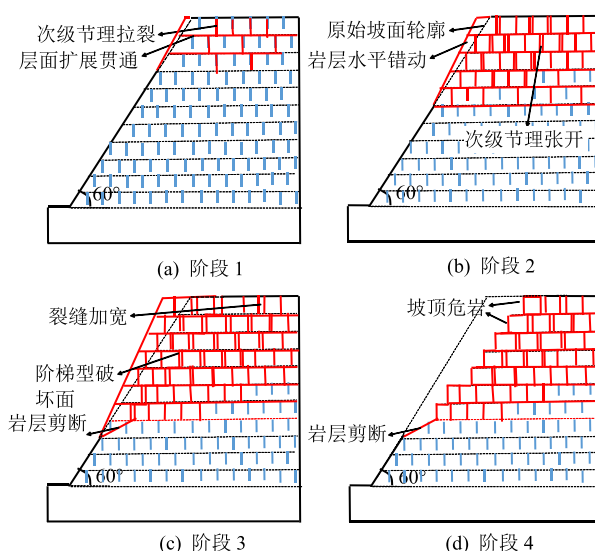


图 11 坡体的失稳演化过程示意图

Fig.11 Schematic diagram of the instability evolution process of slope

5 结 论

(1) 基于传递函数理论, 以自振频率的变化来定义坡体损伤变量, 并给出了损伤度 D 的求解表达式, 得到了模型边坡的累积损伤发展曲线。

(2) 采用混凝土疲劳裂纹扩展的双 K 准则可以很好地解释累积损伤曲线的变化趋势。随着地震荷载幅值及作用次数的增加, 模型边坡的累积损伤演化曲线均表现出了明显的 3 阶段的变化特征: 初始损伤阶段、细观裂纹扩展阶段、宏观裂缝扩展阶段。

(3) 分别采用三次多项式和幂指数建立了边坡岩体在微小地震、强震作用两个阶段的非线性疲劳累积损伤演化模型, 曲线拟合效果良好。在微小地震作用阶段, 边坡的非线性累积损伤演化曲线表现出初期略微下降、中期线性增长、后期平缓增长的正“S”型的 3 段式特征; 在强震作用下, 边坡岩体的累积损伤度相比微震作用下有较为快速的的增长, 且在边坡破坏前增速加快。

(4) 在频发微震作用下, 水平层状坡的层面首先发生水平错动, 进而岩层中的次级节理被拉裂, 各层拉裂的次级节理与错开的层面交汇连通, 最终形成了在坡面出露的阶梯型破坏面, 边坡失稳前岩体完整性较差, 滑体失稳后的坡脚堆积物极为破碎。

参考文献

- [1] 门玉明, 彭建兵, 李寻昌, 等. 层状结构岩质边坡动力稳定性试验研究[J]. 世界地震工程, 2004, 20(4): 131—136.
MEN Yu-ming, PENG Jian-bing, LI Xun-chang, et al. Research on vibration testing of models for dynamic stability of rock slope with layered structures[J]. **World Information on Earthquake Engineering**, 2004, 20(4): 131—136.
- [2] 王勇智, 戚炜, 门玉明, 等. 强震区岩体动力破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1841—1844.
WANG Yong-zhi, QI Wei, MEN Yu-ming, et al. Experimental research of dynamic failure mechanism of rockmass in meizoseismal area[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(11): 1841—1844.
- [3] 董金玉, 杨国香, 伍法权, 等. 地震作用下顺层岩质边坡动力响应和破坏模式大型振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 2977—2982.
DONG Jin-yu, YANG Guo-xiang, WU Fa-quan, et al. The large-scale shaking table test study of dynamic response and failure mode of bedding rock slope under earthquake[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(10): 2977—2982.
- [4] 杨国香, 伍法权, 董金玉, 等. 地震作用下岩质边坡动力响应特性及变形破坏机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 696—702.
YANG Guo-xiang, WU Fa-quan, DONG Jin-yu, et al. Study of dynamic response characters and failure mechanism of rock slope under earthquake[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(4): 696—702.
- [5] 叶海林, 郑颖人, 杜修力, 等. 边坡动力破坏特征的振动台模型试验与数值分析[J]. 土木工程学报, 2012, 45(9): 128—135.
YE Hai-lin, ZHENG Ying-ren, DU Xiu-li, et al. Shaking table model test and numerical analysis on dynamic failure characteristics of slope[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2012, 45(9): 128—135.
- [6] 梁敬轩, 胡卸文, 叶正晖, 等. 大型堆积体边坡基-覆界面及坡面动态响应特性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2249—2260.
LIANG Jing-xuan, HU Xie-wen, YE Zheng-hui, et al. Dynamic response characteristics of slope surface and rock-soil boundary in deposit slope[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(8): 2249—2260.
- [7] 卞康, 刘建, 胡训健, 等. 含顺层断续节理岩质边坡地震作用下的破坏模式与动力响应研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 3029—3037.
BIAN Kang, LIU Jian, HU Xun-jian, et al. Study on failure mode and dynamic response of rock slope with non-persistent joint under earthquake[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(8): 3029—3037.
- [8] 邵鹏, 张勇, 贺永年, 等. 应力波反复作用下断续节理岩体疲劳破坏试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(22): 4180—4184.
SHAO Peng, ZHANG Yong, HE Yong-nian, et al. Experimental study on fatigue failure of intermittent jointed rock masses subjected to repeated stress wave[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(22): 4180—4184.
- [9] 王儒述. 三峡水库与诱发地震[J]. 国际地震动态, 2007, 339(3): 12—21.
WANG Ru-shu. The Three Gorges reservoir and induced earthquake[J]. **Recent Developments in World Seismology**, 2007, 339(3): 12—21.
- [10] 江泊洵. 频发微震作用下三峡库首段典型滑坡变形机制及动力响应研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2012.
JIANG Ji-wei. Research on the deformation mechanism and dynamic response of typical landslides in Three Gorges reservoir in case of frequent microseisms[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2012.
- [11] 李兴旺. 频发微震作用下顺层岩质边坡的稳定性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
LI Xing-wang. The analysis of the stability of bedding slope under the effect of frequent seismic[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [12] 赵永, 杨天鸿, 张鹏海, 等. 基于微震参数的岩体损伤过程数值模拟分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(1): 213—220.
ZHAO Yong, YANG Tian-hong, ZHANG Peng-hai, et al. Numerical simulation of rock damage process based on microseismic parameters[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2018, 35(1): 213—220.
- [13] 杨忠平, 刘树林, 刘永权, 等. 反复微震作用下顺层及反倾岩质边坡的动力稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(7): 1277—1286.
YANG Zhong-ping, LIU Shu-lin, LIU Yong-quan, et al. Dynamic stability analysis of bedding and toppling rock slopes under repeated micro-seismic action[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(7):

- 1277—1286.
- [14] 沈强, 陈从新, 汪稔. 三峡库区水平层状岩质边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊 2): 16—20.
SHEN Qiang, CHEN Cong-xin, WANG Ren. Study on stability of horizontal bedded rocky slopes in Three Gorges reservoir area[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(Suppl. 2): 16—20.
- [15] 李果. 近水平层状岩质边坡稳定性评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.
LI Guo. Flat rock strata slope stability evaluation[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008.
- [16] 黄绍祺, 吉随旺, 朱学雷, 等. 西攀路昔格达地层滑坡分析[J]. 公路交通科技, 2005, 22(6): 41—44.
HUANG Shao-bin, JI Sui-wang, ZHU Xue-lei, et al. Analysis on Xiageda landslide in Xipan expressway[J]. **Journal of Highway and Transportation on Research and Development**, 2005, 22(6): 41—44.
- [17] 石广明. 某近水平层状岩质滑坡的形成化理和演化机制[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
SHI Guang-ming. The formation mechanism and evolution process of nearly horizontal bedded rock landslide[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015.
- [18] 胡训健, 卞康, 李鹏程, 等. 水平厚层状岩质边坡地震动力破坏过程颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(9): 2156—2168.
HU Xun-jian, BIAN Kang, LI Peng-cheng, et al. Simulation of dynamic failure process of horizontal thick-layered rock slopes using particle flow code[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(9): 2156—2168.
- [19] 刘汉香. 基于振动台试验的岩质斜坡地震动力响应规律研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
LIU Han-xiang. Seismic responses of rock slopes in a shaking table test[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [20] 杨兵, 孙明祥, 王润民, 等. 土体含水率对边坡动力破坏模式及动力响应影响的振动台试验研究[J/OL]. 岩土工程学报, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20170526.0938.006.html>.
YANG Bing, SUN Ming-xiang, WANG Run-min, et al. Shaking table test on influence of water content of soil on dynamic failure mode and dynamic response of slope[J/OL]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, <http://kns.cnki.net/detail/32.1124.TU.20170526.0938.006.html>.
- [21] 侯红娟. 水平层状斜坡地震动力响应特性的振动台试验研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
HOU Hong-juan. The seismic dynamic response characteristics of the shaking table test on horizontally layered slope[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [22] 水利水电科学研究院. 岩石力学参数手册[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
Science China Institute of Water Resources and Hydropower Rese. Handbook of rock mechanics parameters[M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1991.
- [23] 陈剑, 李晓, 杨志法. 三峡库区滑坡的时空分布特征与成因探讨[J]. 工程地质学报, 2005, 13(3): 305—309.
CHEN Jian, LI Xiao, YANG Zhi-fa. On the distribution and mechanism of landslides in the Three Gorges reservoir area[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2005, 13(3): 305—309.
- [24] 朱传云, 喻胜春. 爆破引起岩体损伤的判别方法研究[J]. 工程爆破, 2001, 7(1): 12—16.
ZHU Chuan-yun, YU Sheng-chun. Study on the criterion of rock mass damage caused by blasting[J]. **Engineering Blasting**, 2001, 7(1): 12—16.
- [25] NAKATA N, SNIEDER R, KURODA S, et al. Monitoring a building using deconvolution interferometry. I: earthquake-data analysis[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 2013, 103(3): 1662—1678.
- [26] NAKATA N, SNIEDER R. Monitoring a building using deconvolution interferometry. II: ambient vibration analysis[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 2014, 104(1): 204—213.
- [27] 黄达海, 宋玉普, 赵国藩. 具有宏观裂纹混凝土结构的起裂特性研究[J]. 土木工程学报, 2000, 33(4): 63—66.
HUANG Da-hai, SONG Yu-pu, ZHAO Guo-fan. Study on initial fracture properties of cracked concrete[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2000, 33(4): 63—66.
- [28] 李朝阳, 宋玉普, 车轶. 混凝土的单轴抗压疲劳损伤累积性能研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(2): 38—40.
LI Chao-yang, SONG Yu-pu, CHE Yi. Study on cumulative damage behavior of concrete under uniaxial cyclic load[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2002, 35(2): 38—40.
- [29] 闫长斌. 爆破作用下岩体累积损伤效应及其稳定性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006.
YAN Chang-bin. Study on cumulative damage effects and stability of rock mass under blasting loading[D]. Changsha: Central South University, 2006.