

DOI: 10.11779/CJGE201912015

频发微震下上覆软弱岩体边坡动力稳定及失稳模式

杨忠平^{1, 2, 3}, 来云亮^{1, 2, 3}, 刘树林^{1, 2, 3}, 田鑫^{1, 2, 3}, 胡元鑫⁴, 任书霏^{1, 2, 3}

(1. 重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 3. 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; 4. 渝武机场建设指挥部, 重庆 401120)

摘要: 水库蓄水诱发的高频次微小地震对库岸边坡稳定性存在一定影响。采用振动台物理模型试验, 结合 UDEC 离散元分析方法, 以三峡库区杉树槽滑坡为原型, 研究了频发微震作用下典型上覆软弱岩体边坡的累计损伤过程、动力响应特征及破坏模式。结果表明: 在频发微震作用下, 模型边坡自振频率不断降低, 阻尼比不断升高, 完整性降低; 坡体加速度响应在初始阶段和微震阶段体现出“高程效应”和“趋表效应”, 而在小震加载后, 坡体动力响应与上述特征出现偏离; 在反复微震下, 坡体的破坏演化过程可概括为“次级节理发育→次级节理扩展→上部岩体破碎→后缘裂隙扩张→滑面贯通→边坡失稳破坏”阶段; 离散元数值分析结果表明, 上覆软弱岩体边坡在频发微震下的变形主要发生于岩层分界面以上, 后缘裂隙以下的上部岩体, 随着地震次数的增加, 其永久位移不断增大, 边坡稳定性系数不断降低, 边坡破坏特征与振动台试验结果相吻合。

关键词: 频发微震; 上覆软弱岩体边坡; 振动台试验; UDEC 离散元方法; 动力稳定性; 破坏模式

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)12-2297-10

作者简介: 杨忠平(1981—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事环境岩土与边坡稳定性方面的教学与研究工作。E-mail: yang-zhp@163.com。

Dynamic stability and failure mode of slopes with overlying weak rock mass under frequent micro-seismic actions

YANG Zhong-ping^{1, 2, 3}, LAI Yun-liang^{1, 2, 3}, LIU Shu-lin^{1, 2, 3}, TIAN Xin^{1, 2, 3}, HU Yuan-xin⁴, REN Shu-pei^{1, 2, 3}

(1. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University,

Chongqing 400045, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. National Joint

Engineering Research Center for Prevention and Control of Environmental Geological Hazards in the TGR Area, Chongqing University,

Chongqing 400045, China; 4. Headquarters of Chongqing Yulu Airport, Chongqing 401120, China)

Abstract: The micro earthquakes with high frequency induced by reservoir filling may exert an influence on the stability of bank slopes. Based on Shanshucao landslide in the Three Gorge Reservoir area, the shaking table tests and the discrete element method (UDEC) are used to analyze the dynamic response, cumulative damage process and failure modes of a typical slope with overlying weak rock mass under frequent micro-seismic actions. The results are as follows: under the actions of frequent micro-seism, the natural frequency of vibration of the model slope reduced gradually, whereas its damping ratio continues to raise, which shows the decrease of rock integrity. During the initial stage and the micro-seismic action stage, the acceleration response of the slope is characterized by “elevation effect” and “aspect effect”, while the results begin to deviate as the small seism is loaded. The failure evolution process of the model slope can be summarized as “development of the secondary joints→extension of the secondary joints→breaking of the upper rock mass→expansion of the rear crack→formation of the slip plane→failure of the slope”. The discrete element numerical results show that the deformation of the slope with overlying weak rock mass under frequent micro-seismic actions mainly occurs in the upper rock mass, which is above the rock interface and below the rear crack. With the increasing number of earthquakes, the permanent deformation of the slope continues to enlarge, and its stability coefficient decreases simultaneously, which is accordant with the results of the shaking table tests.

Key words: micro-seismic action; slope with overlying weak rock mass; shaking table test; UDEC numerical simulation; dynamic stability; failure mode

0 引言

2003 年长江三峡水利工程开始关闸蓄水以来, 地

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41772306); 国家重点研发计划项目 (2018YFC1504802); 中央高校基本科研业务费项目 (2019CDXYTM0032)

收稿日期: 2019-04-02

***通讯作者:** (E-mail: yang-zhp@163.com)

震频次明显增高,2003 年—2007 年地震年频次从 342 次上升到 1607 次^[1],2003 年 6 月 1 日至 2016 年底,库区重点监测区共记录到 0.5 级以上 6616 次,其中小于 3.0 级的微震和极微震共 6606 次,占地震总数的 99.9%^[2]。水库诱发地震以次数多、范围小、衰减快、震级低、震源深度极浅为特征^[1],与天然地震相比,具有较高的地震动频率、地面峰值加速度和震中烈度^[3]。近年来,三峡库区移民迁建区已形成的高边坡多达 3000 余处,且大部分安全性较低^[4],在诱发地震长期作用下可能引发滑坡等地质灾害,构成安全隐患。

前人基于数值模拟和振动台模型试验等手段,探讨了各类边坡的动力响应特性和失稳破坏规律^[5-10]。近年来频发微震作用下边坡动力稳定性问题受到不少学者的重视。杨忠平等^[11]、刘树林等^[12]通过振动台模型试验和 UDEC 离散元方法对顺层和反倾两类型岩质边坡在频发微震作用下的动力稳定性问题进行了深入研究,随后又针对顺层岩质边坡的不同形式,研究了频发微震作用下陡倾和缓倾两类边坡的动力响应特性及破坏模式;刘新荣等^[13]通过振动台模型试验和 UDEC 离散元方法对顺倾软硬互层边坡在不断微小地震作用下的损伤演化过程及动力稳定性进行了研究。

上述成果对库区顺层、反倾、软硬互层岩质边坡在频发微震下的动力稳定性形成了一定认识,但未以具体的原型边坡作为研究对象,在模型构建时可能无法完全还原实际情况;此外,相比单一岩质边坡,上覆软弱岩体边坡在降雨入渗、风化作用的影响下,岩层分界面附近岩体更易发生软化,易受外营力影响,此类边坡一旦失稳,滑体将向下高速运动,发生滑坡,其速度快,体量大,危险性大,严重威胁附近居民生命财产安全。由此可知,开展频发微震下上覆软弱岩体边坡动力稳定性及失稳模式的研究极为必要。

1 杉树槽滑坡概况

杉树槽位于湖北省宜昌市秭归县沙镇溪镇,地理位置如图 1 所示。作为库区近 5 a 内发生的典型滑坡地质灾害,杉树槽滑坡其岩性组成、规模大小和几何特征在库岸边坡中具有一定代表性。

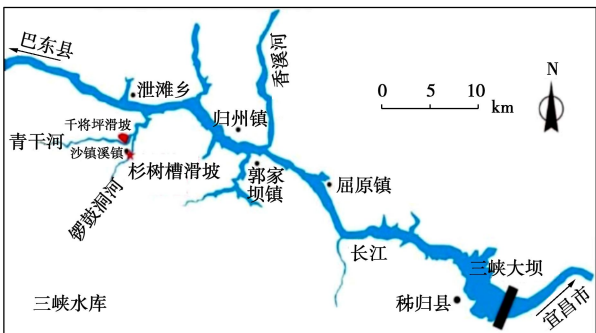


图 1 杉树槽滑坡地理位置^[14]

Fig. 1 Geographical position of Shanshucao landslide^[14]

滑坡体空间特征及岩性分布如图 2 所示。

关于杉树槽滑坡失稳机制的研究^[15-16]认为,脆弱的岩体性质和不利的地层结构构成了滑坡发生的内因,而降雨入渗等外营力作用构成了滑坡发生的外因。尽管目前没有相关研究论证该滑坡的发生与频发微震作用的相关性,但因其极为典型,故以之为研究原型,开展频发微震作用下边坡动力稳定性研究。

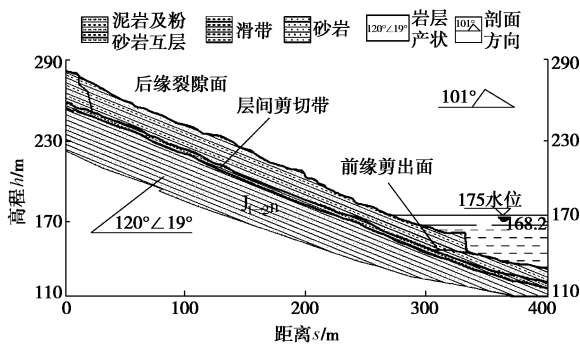


图 2 滑坡滑动前地质剖面^[16]

Fig. 2 Geological profile of landslide before sliding^[16]

2 振动台模型试验设计

2.1 相似材料选取及加载波确定

(1) 相似关系及相似材料

基于 Buckingham π 定理,通过量纲分析法推导出模型试验中各物理量的相似关系:选用力学问题中的质量 M 、长度 L 及时间 T 等 3 个基本物理量,其基本单位分别为 kg, m, s,在量纲系统中 3 个单位之间相互独立,通过三者的乘幂组合可推导出其他物理量的量纲。考虑现场边坡及试验设备的具体情况,选定长度 L 、密度 ρ 和弹性模量 E 作为控制量,并选定控制量相似系数,通过量纲关系推导出其他各物理量的相似系数,最终确定各物理量相似关系如表 1 所示。

振动台试验模型中,将上部泥岩及泥质粉砂岩简化为均质岩体,统称为泥质粉砂岩(1 类岩性),下部为长石石英砂岩(2 类岩性),在二者岩层分界面处设置泥化夹层模拟现场条件(3 类岩性),考虑相似关系,最终确定原型及模型目标参数值如表 2 所示。

根据前人关于振动台模型试验相似材料的研究^[17-19],结合杉树槽滑坡工程地质条件及物理力学试验结果,选用重晶石粉、石英砂、石膏、水、甘油在一定配比下模拟下部基岩,采用黏土、石英砂、液体石蜡、石膏、水在一定配比下模拟上部泥质粉砂岩,考虑到泥化夹层强度较低,模型材料相关参数确定较困难,试验中采用 1~2 cm 厚,较高含水率的软泥进行模拟。在尽可能满足模型目标参数值的原则下,最终确定相似材料最优配比及其模型实际参数值如表 3 所示。

表 1 关键物理量的无量纲 π 项和相似关系

Table 1 Dimensionless π and similarity relation of key physical parameters

物理量	无量纲 π 项	相似关系	相似系数
长度 l	控制量	C_l	200
密度 ρ	控制量	C_ρ	1
弹性模量 E	控制量	C_E	200
泊松比 ν	1	C_μ	1
黏聚力 c	c/E	$C_c = C_E$	200
内摩擦角 φ	1	C_ϕ	1
应力 σ	σ/E	$C_\sigma = C_E$	200
应变 ε	1	C_ε	1
位移 u	u/l	$C_u = C_l$	200
时间 t	$t/(\rho^{0.5} E^{-0.5} l)$	$C_t = C_\rho^{0.5} C_E^{-0.5} C_l$	14.14
频率 f	$f/(\rho^{-0.5} E^{0.5} l^{-1})$	$C_f = C_\rho^{-0.5} C_E^{0.5} C_l^{-1}$	0.07
速度 v	$v/(E^{0.5} \rho^{-0.5})$	$C_v = C_E^{0.5} C_\rho^{-0.5}$	14.14
加速度 a	$a/(E \rho^{-1} l^{-1})$	$C_a = C_E C_\rho^{-1} C_l^{-1}$	1
重力加速 g	$a/(E \rho^{-1} l^{-1})$	$C_g = C_E C_\rho^{-1} C_l^{-1}$	1

表 2 岩体基本参数

Table 2 Basic mechanical parameters of rock mass

岩性	类别	密度 $/(kg \cdot m^{-3})$	弹性模量 $/GPa$	泊松比	内摩擦角 $/(^\circ)$	黏聚力 $/MPa$	单轴抗压强度 $/MPa$
1 类	原型	2600	15~20	0.3	42.5	9.5	96~111
	模型目标值	2600	0.075~0.1	0.3	42.5	0.0475	0.48~0.555
2 类	原型	2570	3.6	0.35	37	4.5	61
	模型目标值	2570	0.018	0.35	37	0.0225	0.305
3 类	原型	1953	—	—	17	0.028	—

表 3 相似材料配比及模型物理力学参数

Table 3 Proportions of similar materials and basic physical and mechanical parameters of model

岩性	类别	密度 /(kg·m ⁻³)	弹性模 量/MPa	泊松 比	内摩 擦角 /(°)	黏聚 力 /kPa	单轴抗压 强度/kPa
长石 石英 砂岩	模型目标值	2600	75~100	0.3	42.5	47.5	480~555
	模型实际值	2587	56.4	0.24	52.6	39.4	624.3
	石英砂：重晶石粉：石膏：水：甘油=0.54：0.31：0.09：0.05：0.01						
泥质 粉砂 岩	模型目标值	2570	18	0.35	37	22.5	305
	模型实际值	2552	22.5	0.31	35.2	31.6	274.4
	黏土：石英砂：石膏：水：液体石蜡=0.63：0.19：0.06：0.08：0.04						
泥化夹层黏土：石英砂：水：甘油=0.43：0.2：0.29：0.08							

(2) 加载方案

采用频发微小地震作为加载波,其特征为振幅低,

频率高,作用次数多,故能较好地模拟水库诱发地震。振动台加载方式为水平向振动加载,方向与边坡倾向一致,加载波采用人工波和白噪声两种类型。其中人工波选取不同频率和振幅的正弦波,主要用于前期微小地震加载对坡体内部的损伤效应研究及边坡的破坏模式研究;白噪声的主要作用是在每次正弦波加载后对坡体进行扫描,进而测定模型边坡的动力特性。

采用振幅为 0.08g (微震) 和 0.15g (小震) 的正弦波加载,考虑相似关系和频发微震的基本特征,在工作范围内尽可能进行高频加载,本试验共考虑了 20, 30, 40 Hz 3 个等级,正弦波每次加载时间为 10 s,每组正弦波加载完成后,进行 30 s 的白噪声扫描,最终确定加载方案如表 4 所示。

表 4 振动台试验加载方案

Table 4 Loading schemes in shaking table tests

编号	振幅 $/g$	加载波 类型	持 时/s	频率 $/Hz$	加载次数	加载 目的
1	0.08	白噪声	30	—	1	坡体动力特性
2	0.04	正弦波	10	20	1	
3			10	30	1	
4			10	40	1	
5	0.08	白噪声	30	—	1	坡体动力响应基本特征
6	0.15	正弦波	10	20	1	
7			10	30	1	
8			10	40	1	
9	0.08	白噪声	30	—	1	微震作用损伤发展
10	0.04	正弦波	10	40	50 (每次间隔 1 min)	
11	0.08	白噪声	30	—	1	坡体动力特性
重复 10~11 加载工况 9 次, 累计 500 次微震加载						
30	0.15	正弦波	10	40	50 (每次间隔 1 min)	小震作用损伤发展
31	0.08	白噪声	30	—	1	坡体动力特性
重复 30~31 加载工况 9 次, 累计 500 次小震加载						
继续进行振幅为 0.15g, 频率 40 Hz 的正弦波, 直至坡体破坏						小震作用下破坏模式

其中第 1 组工况主要用于获得坡体初始动力特性;第 2~9 组工况用于获取坡体动力响应基本特性;重复第 10~11 组工况实现 500 次微震加载,获取微震作用下坡体损伤发展特征;以同样的方式进行小震加载,获取小震作用下坡体损伤发展特征;最后继续施加小震作用直至坡体完全破坏,得到边坡破坏模式。

2.2 试验设备及试验过程

(1) 试验设备

本试验在 1.2 m×1.2 m 双向双自由度的地震模拟振动台设备上完成,试验系统部分硬件设备如图 3 所

示，其主要技术参数如表 5 所示。在加载过程中，采用压电式 IEPE 加速度传感器（型号为 1A113E），结合 dh5922n 动态数据采集仪对加速度信号进行采集，系统误差小于 0.002g。

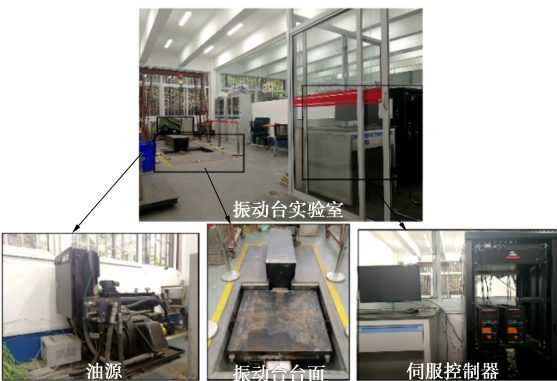


图 3 振动台试验系统

Fig. 3 Shaking table test system

表 5 振动台试验系统主要技术参数

Table 5 Technical parameters of shaking table test system			
台面尺寸 (m×m)	工作频率范围 /Hz	振动方向	最大载重 /kg
1.2×1.2	0~50	水平/竖直/双向 同时	1000
加载 方式	水平向最大加 速度 g	竖直向最大加 速度 g	水平最大 位移/mm
液压式	1.2 (1000 kg) /2.0 (500 kg)	1.2 (1000 kg) /2.0 (500 kg)	100

(2) 模型边坡制作及地震波加载

杉树槽滑坡缩尺概化模型如图 4 所示。

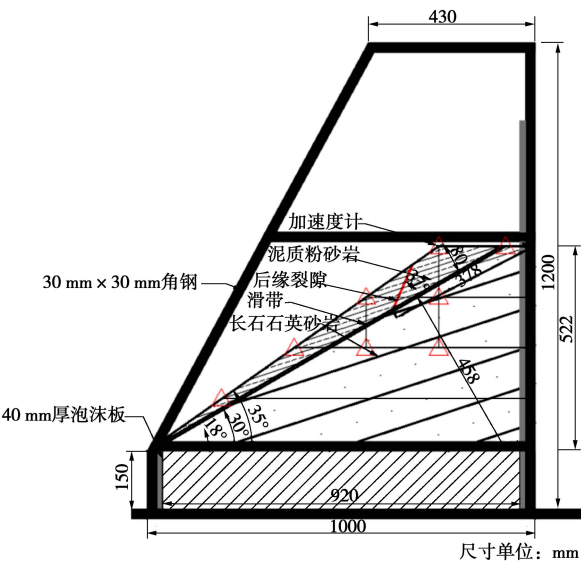


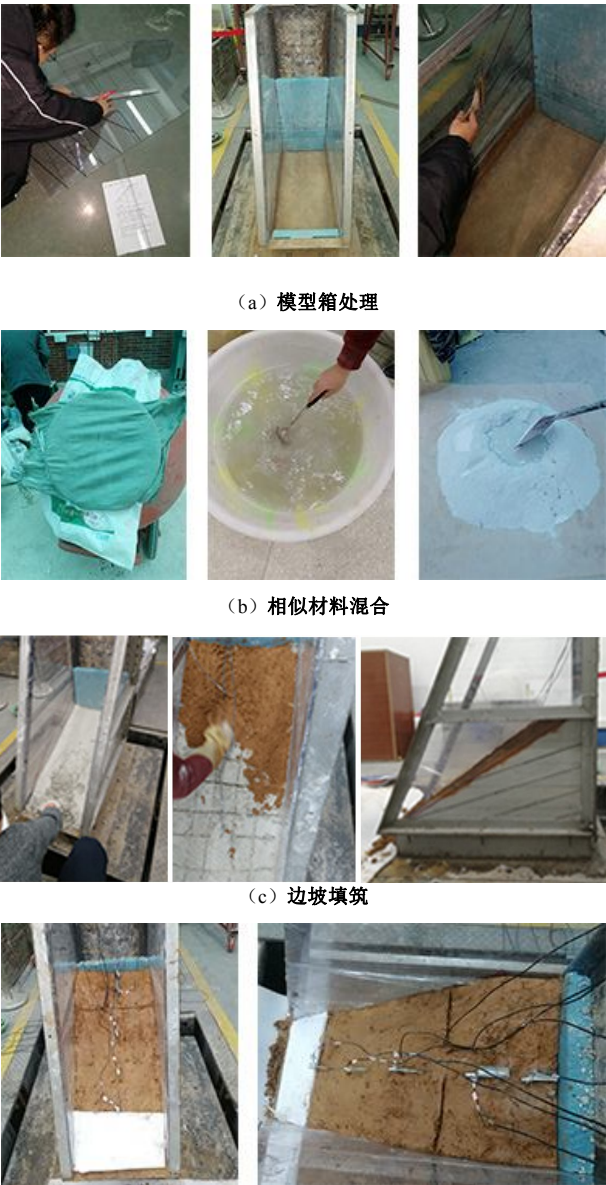
图 4 杉树槽滑坡缩尺概化模型

Fig. 4 Simplified model of Shanshucao landslide

模型边坡长 1 m，高 0.522 m，坡角 35°，下部模拟长石石英砂岩，厚度约 46 cm，上部模拟泥质粉

砂岩，厚度约 8 cm，岩层倾角 18°，二者之间受侵蚀带分割，模型中设计为厚度 1 cm 的高含水率软泥，倾角 30°。在试验过程中应对层面及坡体后缘裂隙进行相应处理。模型箱由 30 mm×30 mm 角钢焊接而成，两侧为透明有机钢化玻璃，模型箱厚度方向为 400 mm，在其前后边界设计 40 mm 厚聚苯乙烯塑料泡沫板以吸收加载方向的地震波，其效果类似于黏滞边界，为减小模型箱两侧钢化玻璃与边坡接触面上的摩阻力，在钢化玻璃内侧黏贴光滑的聚乙烯薄膜，并涂上润滑油进行处理。

振动台试验包括模型箱处理→相似材料混合→模型填筑→加速度计设置→坡体养护及地震波加载等过程，试验主要流程如图 5 所示。



(d) 加速度计设置及模型养护

图 5 模型边坡制作主要过程

Fig. 5 Main process of model slope fabrication

3 试验结果及分析

3.1 模型边坡损伤过程及动力响应规律

(1) 模型边坡累计损伤演化过程

加速度计编号及其在模型边坡中的位置如图 6 所示。每组地震工况加载完成后, 通过白噪声激震, 获得了模型内各测点的响应时程曲线, 如图 7 所示。

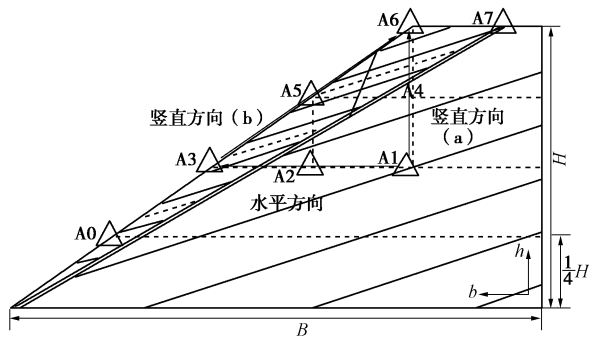


图 6 加速度计编号及位置

Fig. 6 Serial number and position of accelerometer

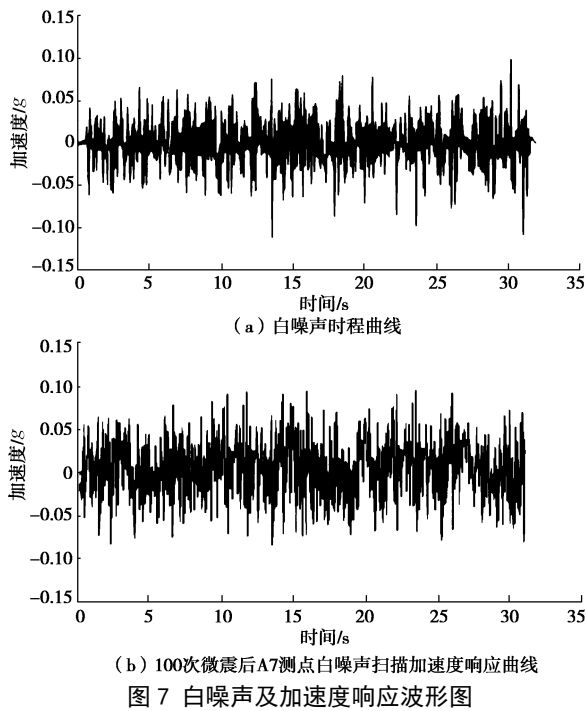


图 7 白噪声及加速度响应波形图

Fig. 7 Wave form of white noise and acceleration response

采用传递函数法, 借助绝对传递函数^[21-22]的虚部进行动力特性参数的识别。最终获得边坡动力特性参数随加载历程的变化如图 8 所示: 模型边坡在频发微震下, 自振频率逐渐减小, 阻尼比逐渐增加。在微震加载阶段, 模型自振频率和阻尼比均显著变化, 其中自振频率减小 8.66%, 阻尼比增大 11.31%; 在小震加载阶段, 自振频率和阻尼比进一步变化, 且幅度较微震阶段增加, 其中自振频率减小 19.60%, 阻尼比增大 35.57%。由此可知, 模型边坡在 500 次微震及 500 次

小震荷载作用下完整性逐渐受到破坏, 坡体损伤程度逐渐增大, 且小震阶段坡体损伤度较微震阶段显著增高。

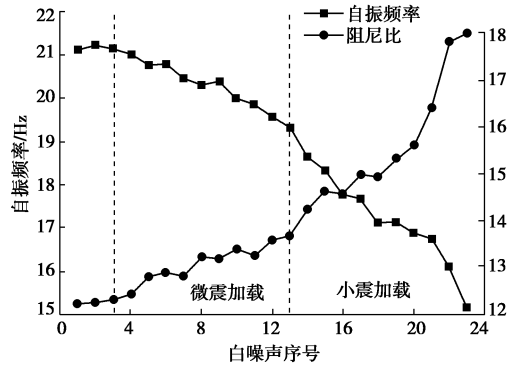


图 8 模型边坡一阶自震频率及阻尼比随加载历程的变化

Fig. 8 Curves of first-order natural frequency and damping ratio of slope models in loading process

(2) 模型边坡动力响应规律

为描述频发微震下模型边坡各测点的动力响应特征, 引入 PGA 放大系数, 其定义为各测点加速度响应峰值与台面实测加速度峰值的比值。通过对比不同加载阶段的 PGA 放大系数的变化, 得到动荷载下坡体损伤发展特征; 通过对比不同测点 PGA 放大系数的不同, 得到地震波在边坡中的传递规律。

选取 A3、A5、A6 作为坡面测点, 选取 A1、A4、A6 作为破体内部测点, 研究竖直方向上 PGA 放大系数的变化, 最终结果图 9 所示。如图 9 可知, 随着地震次数的增加, 破体各测点 PGA 放大系数均降低, 且小震作用下其降低幅度较微震作用下高。分析图 9(a) 可知, 在初始阶段及微震加载过后, 坡体内部测点 PGA 放大系数随高度增高而显著增大, 结果与前人关于“高程效应”^[20]的研究相符, 随着小震加载, 试验结果与之出现偏离, 体现为 A6 测点 PGA 放大系数较 A4 测点减小, 由图 9(b) 可知, 坡体表面测点 PGA 放大系数随高程增加而增大, 体现出“高程效应”。

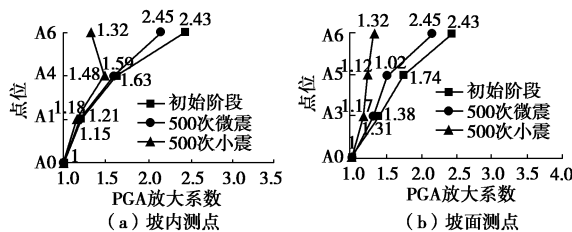


图 9 边坡竖直方向 PGA 放大系数变化

Fig. 9 Variation of PGA amplification factor of slopes along vertical direction

选取 A1、A2、A3 测点实测加速度峰值与台面实测加速度峰值相比, 研究水平方向上 PGA 放大系数的变化, 如图 10 所示。由图 10 可知, 随着地震波加载,

坡体各测点上 PGA 放大系数降低,且小震阶段降低幅度显著。在初始阶段和微震阶段,边坡地震响应特征符合前人关于“趋表效应”^[20]的研究,但在 500 次小震后, A3 测点 PGA 放大系数迅速减小,低于 A2,结果不再符合“趋表效应”。

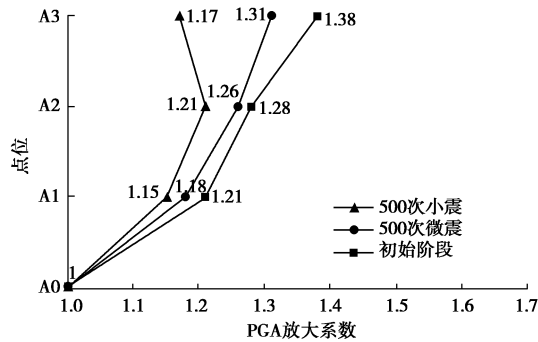


图 10 边坡水平方向 PGA 放大系数变化

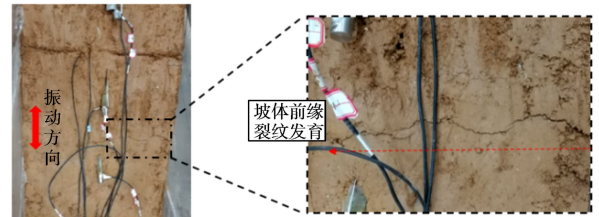
Fig. 10 Variation of PGA amplification factor of slopes along horizontal direction

由此可知,在地震作用下,坡体完整性降低,动力响应变弱。地震波在模型边坡中的传播在初始阶段及微震阶段符合单一岩质边坡中地震波传播的“高程效应”和“趋表效应”,小震加载过后,坡表测点加速度响应特性仍符合“高程效应”,而在竖直内部方向及水平方向上,位于上部岩体中的测点(A3, A6)其 PGA 放大系数低于同一方向上的相邻测点,边坡动力响应规律与“高程效应”与“趋表效应”相反。根据前人关于损伤岩体加速度响应特征的研究^[12],分析认为,在小震作用下,泥化夹层强度降低,岩层分界面及后缘裂隙附近节理开始扩散贯通,岩体滤波作用增强,同时岩石在破碎过程中吸收了一部分能量,故地震波在传至上部岩体时受到吸收和反射,导致上部测点的加速度信号衰减。测试结果与前人关于含不连续面的岩质边坡动力响应特征相符^[23],即:含不连续面的岩质边坡较完整岩质边坡,其坡面和坡内加速度的动力响应均有一定程度的减弱。

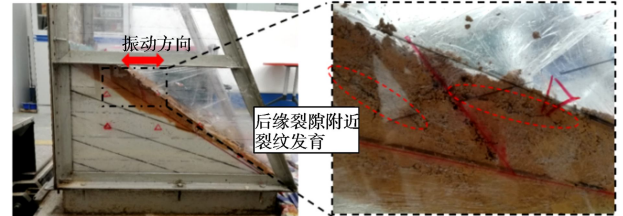
3.2 边坡失稳模式分析

根据试验过程中观察到的结果,将模型边坡破坏失稳演化过程概括为“次级节理发育→次级节理扩展→上部岩体破碎→后缘裂隙扩张→滑面贯通→边坡失稳破坏”等阶段,如图 11 所示。整个加载过程中,下部岩体始终未出现明显的变形或破碎,仅在边坡失稳破坏阶段出现表层的少量剥落。前期加载下,裂隙发育及扩展主要发生在上部岩体中;继续加载,后缘裂隙、前缘裂隙以及岩层分界面夹持下的滑坡切割体初步形成;随着小震作用,切割体向外鼓出,最终在重力及地震荷载共同作用下,前缘剪出面和后缘裂隙贯

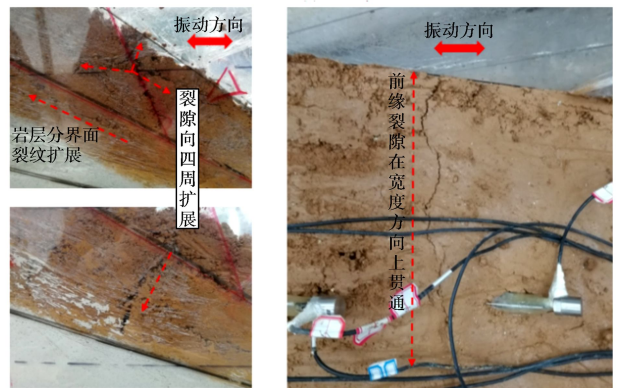
通,滑坡发生。



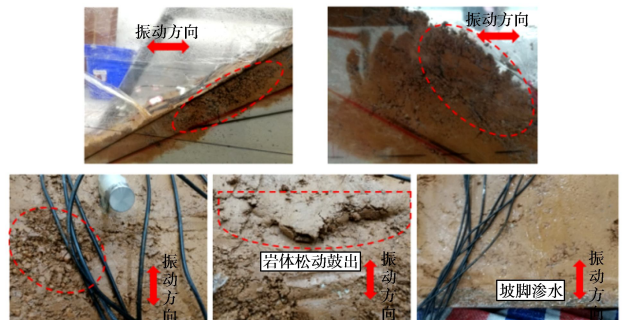
(a) 次级节理发育



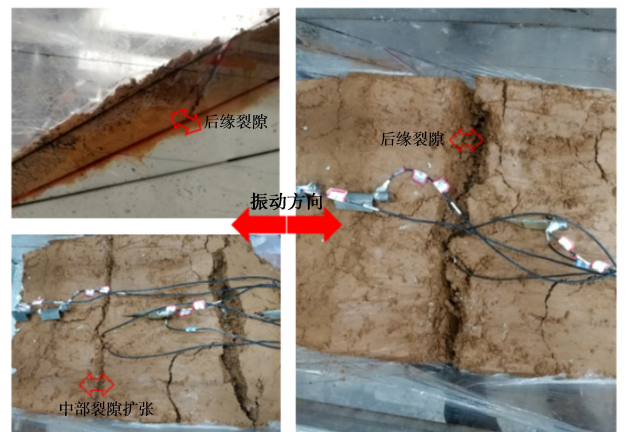
(b) 次级节理扩展



(c) 表层岩体破碎



(d) 后缘裂隙扩张



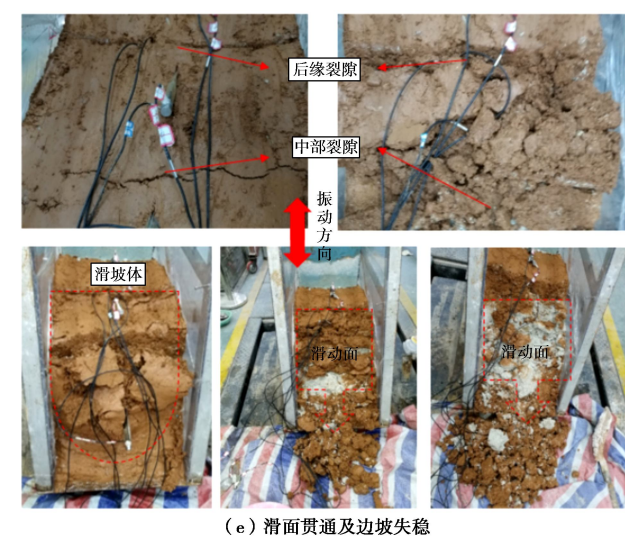


图 11 边坡失稳破坏模式

Fig. 11 Failure modes of slope

边坡失稳各阶段特征如下:

- (1) 次级节理发育阶段。次级节理主要产生于后缘裂隙及岩层分界面附近的上部软弱岩体中，值得注意的是，小震作用下，边坡前缘发展出了一条次级节理，后期构成了边坡失稳的直接因素。
- (2) 次级节理扩展阶段。前期次级节理向各个方向开始扩展并出现新增裂隙；前缘裂隙进一步扩展，在坡体宽度方向上完全贯通，深度方向上也开始下切。直至此阶段，坡体整体上仍未出现明显变形。
- (3) 表层岩体破碎阶段。随着小震作用进一步施加，表层岩体开始破碎，局部呈散体状态，坡脚开始出现渗水，在后缘裂隙和前缘裂隙夹持下的岩体开始向临空面鼓出，表明岩石分界面强度进一步降低，前缘剪出面形成，此时坡体已出现显著变形。
- (4) 后缘裂隙扩张阶段。随着小震持续加载，后缘裂隙开始扩张，宽度由最开始的 5 mm 左右扩张至 12 mm，至滑坡发生前夕，其宽度已扩展至 25 mm，深度也下切至滑带；前期发展出的前缘裂隙也迅速扩张，滑坡发生时，其宽度已至 10 mm 以上。此阶段由前缘裂隙及后缘裂隙夹持中的滑体初步形成并继续向外鼓出，但相对下部基岩仍未产生过大的位移。
- (5) 滑面贯通及边坡失稳阶段。

后期小震作用下，后缘裂隙面及前缘剪出面彻底拉裂，强度丧失，岩层分界面强度迅速降低，在三者的共同切割下，滑面贯通，滑体完全形成，最终在重力及地震荷载的共同作用下，切割体沿泥质滑带发生整体滑动，同时逐渐破裂，呈碎块状滑落至坡脚，边坡彻底失稳破坏。

需指出的是，以上各阶段并非严格按照以上顺序进行，而是有一定穿插。如次级节理扩展的同时，又有新的次级节理开始发育，而表层岩体破碎和后缘裂

隙扩张几乎同时发生。

基于上述试验成果，总结出频发微震下上覆软弱岩体边坡损伤演化模型示意图如图 12 所示。

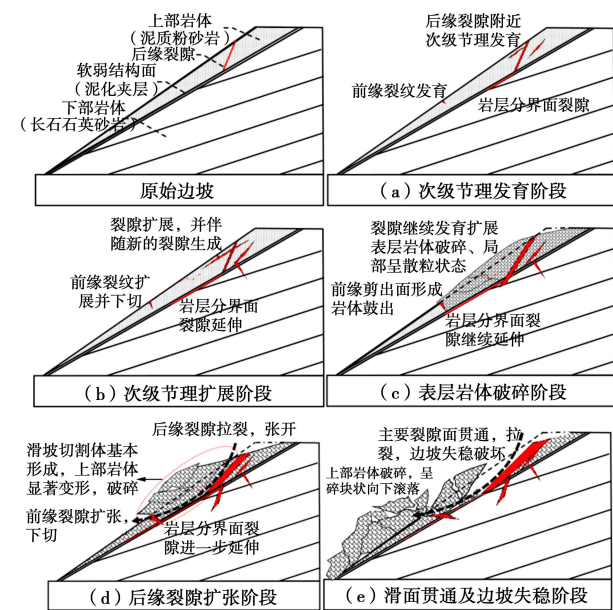


图 12 边坡损伤演化模型示意图

Fig. 12 Schematic diagram of slope damage evolution model

4 频发微震下边坡动力稳定性

由于在振动台试验中未设置位移传感器，仅能通过后期大变形阶段的试验现象得到边坡破坏阶段的变形特征，而未能获取其在前期频发微震下累计损伤阶段的变形规律，同时，模型试验也难以具体给出边坡安全系数等稳定性评价指标。有鉴于此，采用 UDEC 离散元数值分析方法，以杉树槽滑坡为研究原型，分析上覆软弱岩体边坡在频发微震下的动力稳定性。

4.1 边坡模型建立

针对杉树槽滑坡工程地质特征，采用离散元软件 UDEC 进行频发微震下的边坡动力稳定性分析。模型边坡上部岩体为泥质粉砂岩，下部为长石石英砂岩。在表层岩体中设置一软弱节理面以模拟滑坡后缘裂隙。模型几何尺寸如图 13 所示，块体内划分三角形网格，网格单元的尺寸取为 3 m。

岩土体及结构面力学参数如表 6、7 所示，表中“1 类”岩体代表上部泥质粉砂岩，“2 类”代表下部长石石英砂岩。

表 6 岩体计算力学参数

Table 6 Basic mechanical parameters of rock mass						
类别	密度 (kg·m ⁻³)	弹性模 量/GPa	泊松比	内摩擦 角/(°)	黏聚力 /MPa	抗拉强 度/MPa
1 类	2570	3.6	0.35	37.0	4.5	2.5
2 类	2600	15	0.30	42.5	9.5	4.3

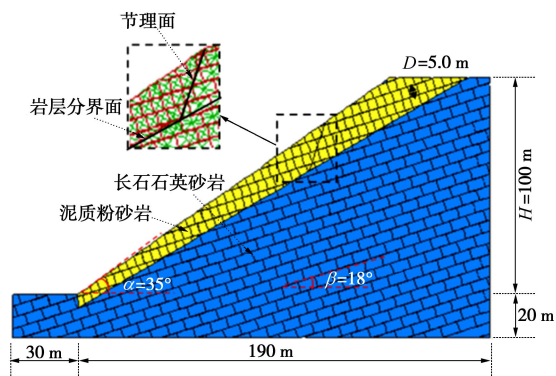


图 13 杉树槽滑坡离散元模型

Fig. 13 Discrete element model of Shanshucao landslide

表 7 结构面参数取值

Table 7 Parameters of bedded planes and joints

类别	黏聚力/kPa	抗拉强度/kPa	内摩擦角/(°)	法向刚度/(GPa·m ⁻¹)	切向刚度/(GPa·m ⁻¹)
1 层面	20	60	25	5.1	3.2
类 次级节理	4	3	15	4.1	2.5
2 层面	30	80	32	10.2	6.4
类 次级节理	6	5	20	8.2	5.1
软弱节理	2	1	15	2.0	1.0

初始平衡计算后，将模型边界条件设置成动力边界，并将 Y 方向的速度和位移固定，最后在模型底部 X 方向施加微震荷载（正弦波： $\lambda=0.08g$ ， $f=30\text{ Hz}$ ）。计算中的阻尼选取为局部阻尼，其阻尼系数取为 0.15。

4.2 计算结果分析

在坡表等距布置位移监测点共 4 个，其位置及各点 X 方向的位移如图 14 所示：在频发微震作用下，坡肩处位移极小，边坡变形主要发生于后缘裂隙以下部位；前 200 次微震作用下，边坡整体变形较小，随着地震波继续加载，边坡变形逐步增大，600 次地震加载后，边坡变形迅速增大，直至边坡进入破坏阶段。

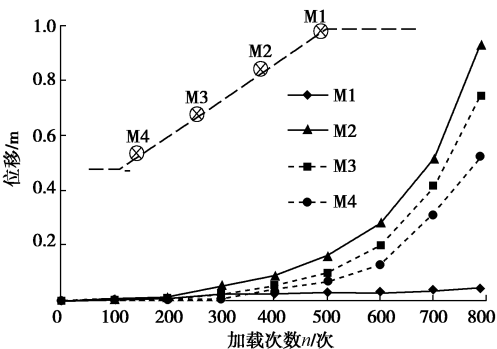


图 14 杉树槽库岸边坡的监测点位移随地震波加载次数的变化曲线

Fig. 14 Displacement curves of monitoring points with number of seismic action of bank slope of Shanshucao reservoir

边坡安全系数随地震作用次数的变化曲线如图

15 所示，在不断微震作用下，边坡安全系数不断减小，并在 700 加载后加快下降，最终下降至 1.0 以下，边坡失稳破坏。

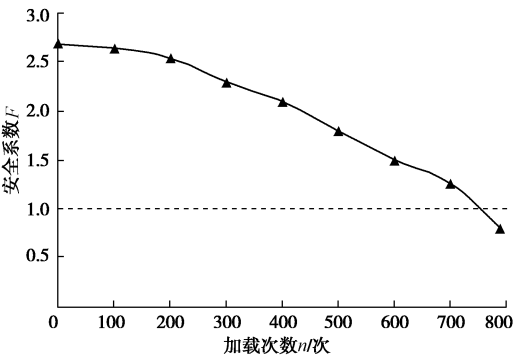


图 15 杉树槽边坡安全系数随地震波加载次数变化曲线

Fig. 15 Variation curves of safety factor of slope with number of seismic action of Shanshucao slope

边坡在反复微震作用下的变形发展过程如图 16 所示。在最初 200 次的微震作用下，坡体位移很小，小于 2.5 cm，局部次级节理发育；500 次微震作用后，后缘裂隙以下的泥质粉砂岩变形增大，软弱结构面附近裂隙开展明显；700 次地震作用后，边坡变形增大至 20 cm 以上，此时软弱节理面附近的泥质粉砂岩变得破碎，张拉裂缝进一步开展；继续加载，边坡开始破坏。图 17（a）为边坡失稳破坏前的临界状态，此时坡体的滑动趋势已非常显著：边坡后缘裂隙拉裂，前缘剪出面形成，滑移体前缘在坡脚出露；荷载继续施加超过临界状态后，坡体表层泥质粉砂岩开始沿“软弱节理面+岩层分界面”整体滑移，如图 17（b）所示，整个滑坡过程表现为切割体的整体下滑及块状破碎，下部岩体始终未出现破碎或过大的变形，边坡失稳破坏特征与振动台模型试验结果相吻合。

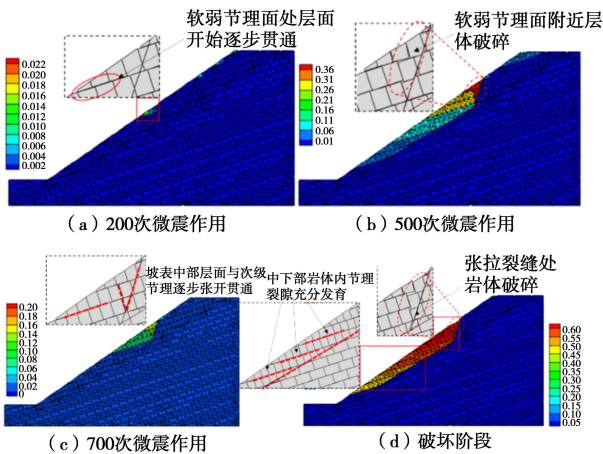


图 16 频发微震作用下边坡的变形发展过程

Fig. 16 Development of deformation of slope under frequent micro-seismic actions

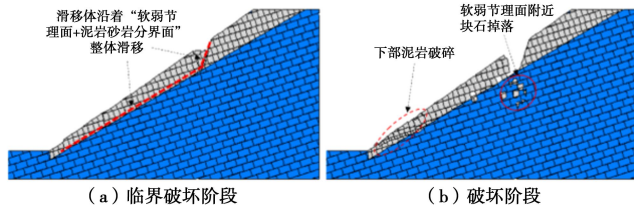


图 17 杉树槽库岸边坡在反复微震下的破坏模式

Fig. 17 Failure modes of bank slope of Shanshucao reservoir under repeated small earthquakes

由此可知, 杉树槽库岸边坡在反复微震作用下 (0.08g 正弦波, V 级烈度) 测点位移不断增大, 边坡安全系数不断变小。在初期加载阶段边坡变形较小, 坡体稳定性良好; 随着微震作用次数增加, 上部软弱岩体节理裂隙发育并扩展, 表层岩体位移不断增大; 坡滑前, 整个滑移体变得十分破碎, 坡体表层滑移体开始沿着“软弱节理面+岩层分界面”整体滑移。整个滑坡过程表现为滑移体的整体快速下滑, 同时伴随着滑体的块状破碎。各阶段边坡损伤特征与振动台模型试验结果吻合, 由此进一步验证了频发微震下上覆软弱岩体边坡的失稳破坏模式。

5 结 论

(1) 上覆软弱岩体边坡在频发微震作用下, 自振频率逐渐减小, 阻尼比逐渐增加, 边坡损伤度不断增大, 且随着地震波幅值的加大及地震次数的增多, 边坡损伤速度加大。

(2) 上覆软弱岩体边坡在初始阶段及微震阶段地震作用下动力响应体现出“高程效应”及“趋表效应”, 后期小震加载后, 坡表测点加速度响应仍满足“高程效应”, 而坡内水平及竖直方向上测点加速度响应不再满足上述特征, 具体体现为: 岩层分界面以上测点 PGA 放大系数低于同一方向上岩层分界面以下相邻测点。

(3) 在反复微震作用下, 边坡表层岩体节理和裂隙发育扩展, 上部软弱岩体受到岩层分界面、后缘裂隙面及前缘剪出面的切割形成滑移体, 最终导致边坡失稳, 其表现为滑移体整体快速下滑和块状破碎。坡体在反复微震下的破坏演化过程可概括为次级节理发育→次级节理扩展→上部岩体破碎→后缘裂隙扩张→滑面贯通→边坡失稳破坏等阶段。

(4) UDEC 离散元分析结果表明, 上覆软弱岩体边坡在频发微震下的变形主要发生于岩层分界面以上, 后缘裂隙面以下的表层岩体, 随着地震次数的增加, 上部软弱岩体永久位移不断增大, 边坡稳定性系数不断降低, 其失稳破坏特征与振动台试验结果相吻合。

参考文献:

- [1] 陈德基, 汪雍熙, 曾新平. 三峡工程水库诱发地震问题研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1513 - 1524. (CHEN De-ji, WANG Yong-xi, ZENG Xin-ping. A study of reservoir-induced earthquake of three gorges project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1513 - 1524. (in Chinese))
- [2] 郑守仁. 三峡工程水库大坝安全及长期运用研究与监测检验分析[J]. 长江技术经济, 2018, 2(3): 1 - 9. (ZHEN Shou-ren. Study on the safety and long-term application of the three gorges project reservoir dam and its monitoring inspection and analysis[J]. Technology and Economy of Yangtze River, 2018, 2(3): 1 - 9. (in Chinese))
- [3] 孟庆筱, 冯光钰, 梅启双, 等. 三峡库首区非构造型水库地震的烈度衰减[J]. 西北地震学报, 2011, 33(增刊 1): 434 - 437. (MENG Qing-xiao, FENG Guang-yu, MEI Qi-shuang, et al. Intensity attenuation of non-tectonic reservoir earthquake in the head region of three gorge reservoir[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(S1): 434 - 437. (in Chinese))
- [4] 殷跃平. 三峡库区边坡结构及失稳模式研究[J]. 工程地质学报, 2005, 13(2): 145 - 154. (YIN Yue-ping. Human-cutting slope structure and failure pattern at the three gorges reservoir[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(2): 145 - 154. (in Chinese))
- [5] LI An-jui, QIAN Zhi-guang, JIANG Jing-cai, et al. Seismic slope stability evaluation considering rock mass disturbance varying in the slope[J]. Ksce Journal Of Civil Engineering, 2019, 23(3): 1043 - 1054.
- [6] LIU Chuan-zheng, WANG Gang, HAN Wei. Effect of slip surface's continuity on slope dynamic stability based on infinite slope model[J]. Mathematics Mathematics, 2019, 7(1): 1 - 20.
- [7] SONG Dan-qing, CHE Ai-lan, ZHU Ren-jie, et al. Dynamic response characteristics of a rock slope with discontinuous joints under the combined action of earthquakes and rapid water drawdown[J]. Landslides, 2018, 15(6): 1109 - 1125.
- [8] BROOJERDI M S, BEHNIA M, AGHCHAI M H. Dynamic analysis of rock slopes using the distinct element method: a case study at the right abutment of the upper gotvand dam, iran[J]. Journal of African Earth Sciences, 2018(145): 53 - 67.
- [9] UKRITCHON B, KEAWSAWASVONG S. Discussion on "seismic displacement along a log-spiral failure surface with crack using rock hoek-brown failure criterion"[J]. Soil

- Dynamics And Earthquake Engineering, 2018(110): 141 - 144.
- [10] GANJEH R S, MEMARIAN H, KHOSRAVI M, et al. A comparison between effects of earthquake and blasting on stability of mine slopes: a case study of chadormalu open-pit mine[J]. Journal of Mining and Environment, 2019, **10**(1): 223 - 240.
- [11] 刘树林, 杨忠平, 刘新荣, 等. 频发微小地震作用下顺层岩质边坡的振动台模型试验与数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(10): 2264 - 2276. (LIU Shu-lin, YANG Zhong-ping, LIU Xin-rong, et al. Shaking table model test and numerical analysis of the bedding rock slopes under frequent micro-seismic actions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(10): 2264 - 2276. (in Chinese))
- [12] 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. (in Chinese))
- [13] 刘新荣, 何春梅, 刘树林, 等. 高频次微小地震下顺倾软硬互层边坡动力稳定性研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(3): 430 - 438. (LIU Xin-rong, HE Chun-mei, LIU Shu-lin, et al. Study on dynamic stability of the slopes with interbeddings of soft and hard layers under high frequency minor earthquakes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(3): 430 - 438. (in Chinese))
- [14] 王 鸣, 易 武. 三峡库区杉树槽滑坡地质特征与成因机制分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2015, **37**(5): 44 - 47. (WANG Ming, YI Wu. Geological characteristics and formation mechanism of Shanshucao landslide in three gorges reservoir area[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2015, **37**(5): 44 - 47. (in Chinese))
- [15] 喻 章. 杉树槽滑坡滑带土强度衰减特性及失稳机理研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018. (YU Zhang. Study on strength attenuation characteristics of slip soil and failure mechanism of Shanshucao landslide[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018. (in Chinese))
- [16] 易 武, 黄鹏程. 湖北省杉树槽滑坡成因机制分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, **35**(3): 89 - 93. (YI Wu, HUANG Peng-cheng. Formation mechanism of Shanshucao landslide in Hubei province[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2016, **35**(3): 89 - 93. (in Chinese))
- [17] 徐 楚, 胡新丽, 何春灿, 等. 水库型滑坡模型试验相似材料的研制及应用[J]. 岩土力学, 2018, **39**(11): 4287 - 4293. (XU Chu, HU Xin-li, HE Chun-can, et al. Development and application of similar material for reservoir landslide model test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(11): 4287 - 4293. (in Chinese))
- [18] 钱海涛, 肖锐铨. 基于振动台实验的典型滑坡单元体震动滑移特征发现[J]. 水文地质工程地质, 2018, **45**(2): 64 - 69. (QIAN Hai-tao, XIAO Rui-hua. New results of the slid characteristics of a typical earthquake landslide model based on shake table tests[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, **45**(2): 64 - 69. (in Chinese))
- [19] 曹礼聪, 周羽哲, 马东华, 等. 含倾斜夹层场地动力响应分析的大型振动台试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2019, **54**(5): 953 - 961. (CAO Li-cong, ZHOU Yu-zhe, MA Dong-hua, et al. Large shaking table test on the seismic response of the site with tilted interlayer[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, **54**(5): 953 - 961. (in Chinese))
- [20] 刘永权. 频发微震下库区顺层岩质边坡累积损伤演化机理及稳定性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017. (LIU Yong-quan. Study on cumulative damage evolution mechanism and stability of bedding rock slope in reservoir area under frequent microseismic[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017. (in Chinese))
- [21] 陆伟东. 基于 matlab 的地震模拟振动台试验的数据处理[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2011, **33**(6): 1 - 4. (LU Wei-dong. Matlab-based data processing of shaking table test[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2011, **33**(6): 1 - 4. (in Chinese))
- [22] 崔江余, 杜修力. 河谷自由场地震动经验传递函数研究[J]. 水利学报, 2001, **32**(10): 58 - 61. (CUI Jiang-yu, DU Xu-li. Study on empirical transfer function of gorge free field ground motion[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, **32**(10): 58 - 61. (in Chinese))
- [23] 范亚伦, 张伟宾, 周志军, 等. 含不连续面岩质边坡动力响应研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, **14**(6): 1184 - 1191. (FAN Ya-lun, ZHANG Wei-bin, ZHOU Zhi-jun, et al. Research on dynamic response of rock slopes with discontinuous joints[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, **14**(6): 1184 - 1191. (in Chinese))