

DOI: 10.11779/CJGE2023S20040

# 地震作用下岩质边坡失稳动力响应离散元分析

刘士奇<sup>1,2</sup>, 王环玲<sup>1</sup>, 程志超<sup>2</sup>, 李宝建<sup>\*2</sup>

(1. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

**摘 要:** 以红石岩边坡为研究对象, 结合细观裂纹发育规律, 采用离散元方法研究地震动力作用下边坡失稳启动机制, 从细观层面揭示红石岩边坡渐进破坏崩塌过程。研究结果表明: 随着地震荷载输入, 软弱夹层区由于强度较低, 发育裂纹较明显; 地震动力下边坡表现为“逐层剥落”的渐进破坏崩塌过程, 解体现象较为严重; 位于临空破坏面的颗粒位移较大, 坡体内部同一竖直方向埋深越大的颗粒位移较小; 颗粒速度变化与输入地震波时程密切相关, 速度曲线与波形基本一致。

**关键词:** 地震动力响应; 红石岩边坡; 离散元; 裂纹; 渐进破坏

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)S2-0253-05

**作者简介:** 刘士奇(1992—), 男, 博士后, 主要从事岩土体动力学方面的研究。E-mail: sddxslq@126.com。

## Dynamic response of rock slope instability under earthquake through discrete element method

LIU Shiqi<sup>1,2</sup>, WANG Huanling<sup>1</sup>, CHENG Zhichao<sup>2</sup>, LI Baojian<sup>2</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

**Abstract:** Taking the Hongshiyuan slope as the research object, combined with microscopic crack development, the discrete element method is used to study the initiation mechanism and failure process of Hongshiyuan slope under seismic dynamics. The results show that with the seismic wave input, cracks develop rapidly in the weak interlayer areas due to low strength. Hongshiyuan slope shows a progressive failure and collapse process of “layer-by-layer peeling off”, and the disintegration phenomenon is more serious. The displacement of particles on the air-facing surface is larger. The larger the buried depth in the same vertical direction inside the slope, the smaller the particle displacement. The variation of particle velocity is closely related to the time history of the seismic waves, and the velocity curve is basically consistent with the shape of waves.

**Key words:** seismic dynamic response; Hongshiyuan slope; discrete element; crack; progressive failure

## 0 引 言

滑坡作为一种较为常见的自然地质灾害, 发生后会对经济、生命等造成重大威胁<sup>[1-3]</sup>。特别是在水电工程中, 存在大量的高陡岩质边坡, 其稳定性严重影响工程安全, 地震动力作用下引起的高速远程滑坡在山地峡谷地区更具有破坏性<sup>[4-5]</sup>。因此, 加强西南地区岩质库岸边坡稳定性研究, 准确地对失稳变形预测预报以及提出合理的加固措施, 对水电工程的建设开发利用就显得尤为重要。

近年来, 中国西部地区连续遭受  $M_s > 7.0$  的地震灾害, 严重威胁重大工程的建设。针对近年来地震滑坡地质灾害, 众多学者进行了详细的地质调查与启动机制研究。殷跃平等<sup>[6]</sup>基于地质概念模型, 对汶川地震大光包滑坡动力响应特征进行研究。郭亚永等<sup>[7]</sup>提出鲁甸地震甘家寨滑坡诱发因素, 依据运动特征将滑

动过程分为4个阶段。

随着计算机技术的发展, 数值模拟方法再现地震滑坡过程和地震边坡动力响应过程逐渐得到广泛应用。离散元在处理地震滑坡大变形过程中更具优势。卞康等<sup>[8]</sup>利用颗粒流技术 PFC 对含大量节理岩质边坡动力条件下破坏过程进行模拟。Wang 等<sup>[9]</sup>研究了整个三维红石岩滑坡的运动过程, 但地震波是通过加载墙体实现的, 并不能很好地表征波传播特性。整体来看, 动力作用下的波传播规律并不清晰, 启动机制并不明确, 有必要继续进行深入研究。

本文以红石岩边坡为研究对象, 基于颗粒流离散元技术, 引入人工边界, 建立边界颗粒作用力施加方

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC1508501)

收稿日期: 2023-11-30

\*通信作者 (E-mail: lee6891481@163.com)

法。通过施加地震动，研究地震波传播特征、滑坡启动机制以及渐进失稳过程。

## 1 工程概况

2014 年 8 月 3 日，云南省鲁甸县发生 6.5 级地震，造成牛栏江干流右岸山体崩塌、滑坡形成堰塞湖。坝址区属于构造侵蚀为主的中高山峡谷区，两岸谷深、坡陡，基岩多裸露。

枢纽区出露主要地层如下：奥陶系（O）包括下统红石崖组（O1h）、下统下巧家组（O1q）和中统上巧家组（O2q）；泥盆系（D）主要包括中统曲靖组（D2q）；二叠系（P）包括下统梁山组（P1l）、下统栖霞组（P1q）和下统茅口组（P1m）；第四系（Q）包括崩塌堆积层（Qcol）、坡积层（Qdl）和滑坡堆积层（Qdel）。

## 2 模型建立及加载条件

### 2.1 颗粒流模型

选取剖面Ⅱ—Ⅱ'为研究对象，地层如图 1 所示。红石岩堰塞体物源主要来源于 P1q+m 卸荷区，在动态拉应力和剪应力共同作用下，发生“拉裂-剪切”破坏。数值模型如图 2 所示，该模型共包含 60150 个颗粒，65556 个接触。模型尺寸 x 方向长度 905.27 m，y 方向长度 805.96 m。

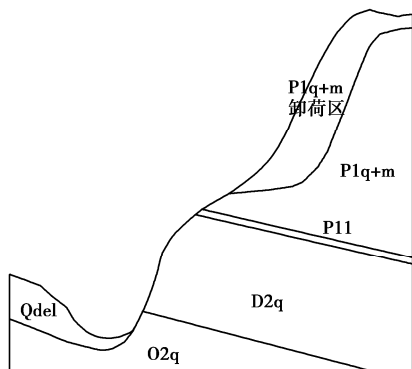


图 1 岩层剖面图  
Fig. 1 Profile of rock strata

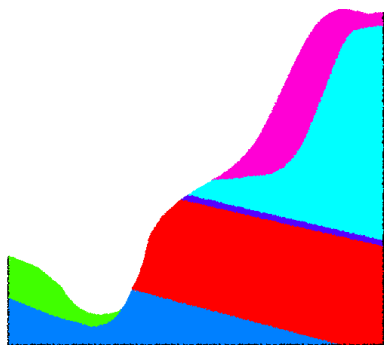


图 2 颗粒流模型  
Fig. 2 Particle flow model

### 2.2 细观参数标定

根据现场及室内试验，地层宏观参数如表 1 所示。PFC 模拟中，对细观参数进行标定。软弱夹层 P1l 的标定过程如图 3 所示。细观参数如表 2 所示。

表 1 岩层宏观力学参数

Table 1 Macro-parameters of rock strata				
材料分区	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	杨氏模量/ GPa	泊松比	单轴强度/ MPa
P1q+m 卸荷区	2650	15	0.22	80
P1q+m	2650	18	0.21	85
P1l	2650	2.5	0.28	10
D2q	2650	15	0.22	75
O2q	2650	20	0.20	90
Q-del	2650	13	0.23	80

表 2 岩层细观力学参数

Table 2 Micro-parameters of rock strata						
参数值	P1q+m 卸荷区	P1q+m	P1l	D2q	O2q	Q-del
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	2650	2650	2650	2650	2650	2650
最小粒径/m	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
粒径比	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
颗粒有效模量/GPa	3.0	4.3	0.75	5.3	5.8	3.0
刚度比	1.25	1.12	1.36	1.18	1.09	1.25
摩擦系数	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
黏结有效模量/GPa	3.0	4.3	0.75	5.3	5.8	3.0
黏结刚度比	1.25	1.12	1.36	1.18	1.09	1.25
黏结法向强度/MPa	25	37	5	42	45	25
黏结切向强度/MPa	25	37	5	42	45	25
法向阻尼	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
切向阻尼	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

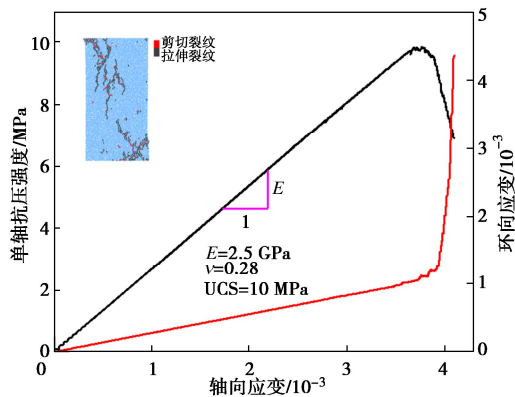


图 3 细观参数标定过程

Fig. 3 Calibration process of micro-parameters

### 2.3 边界设置

采用人工黏性边界作为模型边界控制条件，法向力和切向力可分别通过以下表达式求得：

$$\sigma_n = -\rho V_p v_n \quad (1)$$

$$\sigma_s = -\rho V_s v_s \quad (2)$$

式中： $\sigma_n$  和  $\sigma_s$  为施加在边界上的法向黏结力和切向

黏结力;  $V_p$  和  $V_s$  为连续介质 P 波波速和 S 波波速;  $v_n$  和  $v_s$  为边界颗粒的瞬时法向速度和切向速度。

为了将黏性边界施加到边界颗粒上, 将应力等效为接触力, 满足

$$F = \sigma \times 2R \quad (3)$$

等效二维边界颗粒接触力可以表示为

$$F_n = -2R\rho V_p v_n \quad (4)$$

$$F_s = -2R\rho V_s v_s \quad (5)$$

式中:  $R$  为颗粒半径,  $\rho$  为材料密度。

为防止能量被黏性边界吸收后造成振幅减半, 将入射波幅提高 2 倍, 边界颗粒接触力表示为

$$F_n = 2R\rho V_p (2v_n^e - v_n) \quad (6)$$

$$F_s = 2R\rho V_s (2v_s^e - v_s) \quad (7)$$

式中:  $v_n^e$  和  $v_s^e$  分别为施加在边界颗粒上地震波速度的水平分量和竖直分量。

介质的波速可以根据岩土介质宏观参数求得:

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{3K+4G}{3\rho}} \quad (8)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (9)$$

式中:  $E$ 、 $K$ 、 $G$ 、 $\nu$  和  $\rho$  分别为杨氏模量、体积模量、剪切模量、泊松比和密度。

边界设置和监测点如图 4 所示, 监测点设置 16 个, 分布在坡表 8 个, 坡内部横向 4 个, 竖向 4 个。

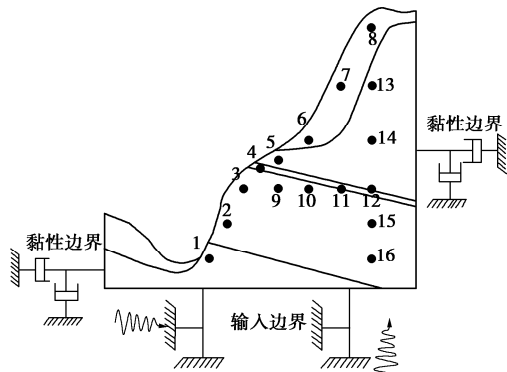


图 4 监测点设置及边界设置

Fig. 4 Setting of monitoring points and boundary

## 2.4 地震动频谱特征

根据云南地震实测资料, “8.03 地震”震中东西向最大水平加速度达  $948.5 \text{ cm/s}^2$ , 竖直加速度约  $504 \text{ cm/s}^2$ 。地震加速度时程谱曲线可见图 5。

## 3 模拟结果分析

### 3.1 速度场

图 6 为地震作用下速度场云图, 体现了地震波在

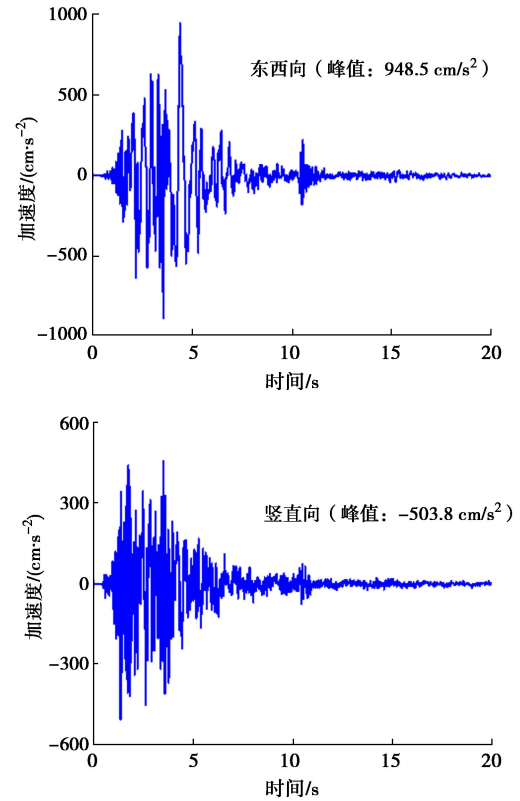


图 5 地震动时程曲线

Fig. 5 Time-history curves of ground motion

红石岩山体中的传播特性以及边坡动力破坏特征。地震初期阶段, 能量密度较低, 边坡整体保持稳定, 未发生局部破坏。软弱夹层区域发育有拉伸裂纹, 发生挤压和滑动, 该区域有明显的波速下降现象。P1q+m 卸荷区也逐渐在下部区域发生局部破坏, 显示出逐步垮塌特性。此时速度在陡坎区达到最大, 为  $3.86 \text{ m/s}$ 。

软弱夹层区逐渐整体破坏, P1q+m 卸荷区裂纹从底部向上沿岩层分界线发育, 上部滑塌岩体块度较大。加载后期, 滑塌体在自重作用下持续运动, 卸荷区垮塌程度较大, 但并未全部破坏失稳。

### 3.2 位移场

图 7 为红石岩滑坡位移场演化云图。P1q+m 卸荷区底部岩体颗粒优先滑塌, 5s 时该区域颗粒位移达到  $8 \text{ m}$  左右。7s 之后, 滑坡岩体呈现“逐层剥落”现象, 岩体逐渐碎裂, 解体较为严重, 卸荷区底部岩体滑动失稳后, 上部岩体失去支撑作用, 破坏应力超过颗粒间黏结强度, 导致滑体崩解。

岩体颗粒位移特征主要与高程有关, 最大颗粒位移可达  $400 \text{ m}$ 。P1q+m 岩层其他区域没有发生整体失稳滑动, 上部岩体完整性保持较好。可以看到, 二维计算可以较好地反映动力作用下山体崩塌启滑机制。

### 3.3 监测点位移特征

图 8 为所有监测点位移曲线。位于滑体部分的颗粒 6 和 7 位移最大, 20s 时分别为  $61.31 \text{ m}$  和  $90.68 \text{ m}$ 。



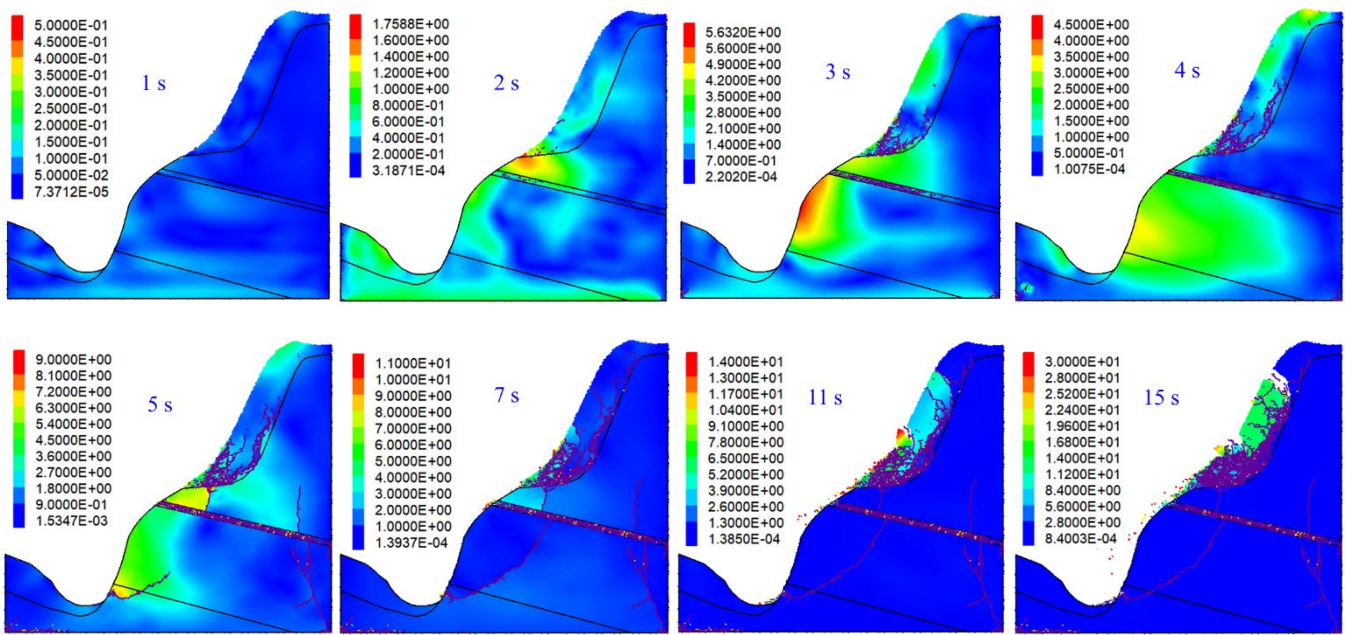


图 6 动力响应速度云图（紫色为拉伸裂纹，白色为剪切裂纹）

Fig. 6 Velocity contours of dynamic response (purple color: tensile crack; white color: shear crack)

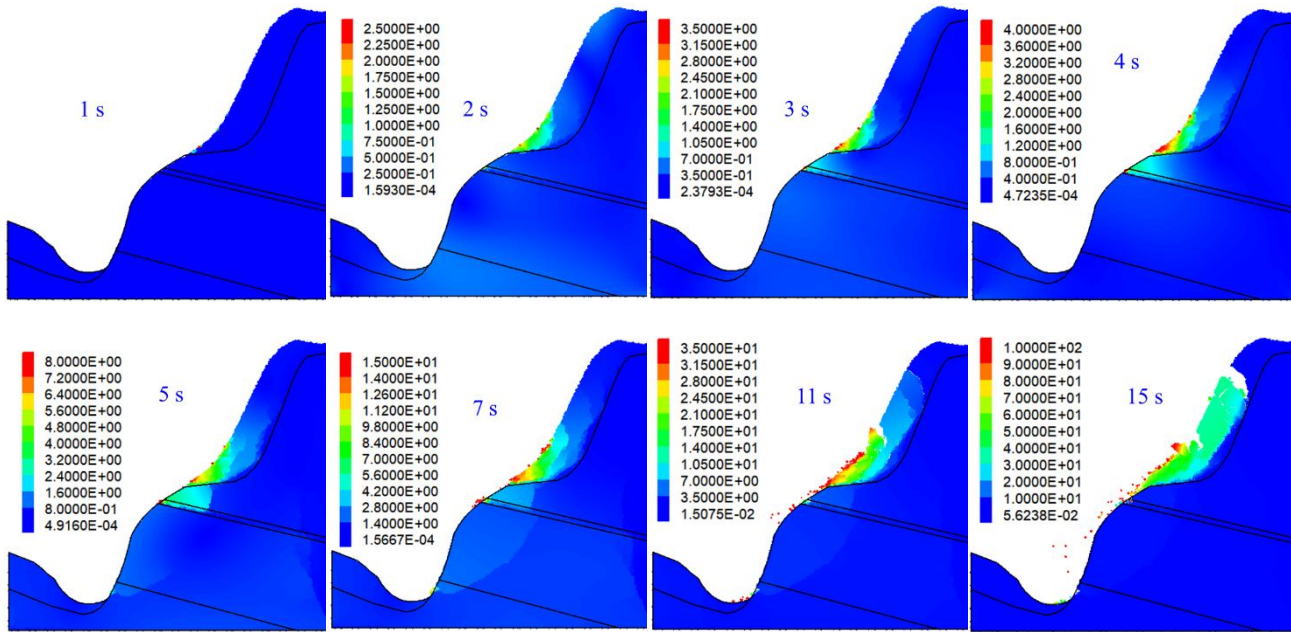
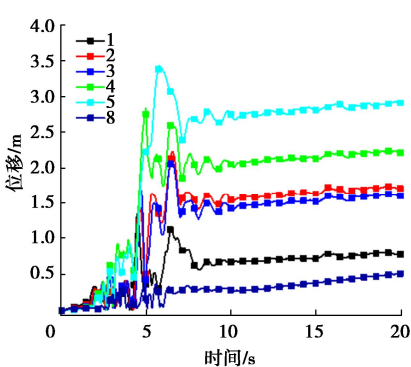


图 7 动力响应位移云图

Fig. 7 Displacement contours of dynamic response

其他坡面监测点位移在 3 s 到 7 s 时变化剧烈，这是由于该时间段地震动时程较大所致。颗粒 1，2，3 处于基岩较稳定区域，颗粒间黏结强度较大，没有发生失稳，位移量较小。颗粒 4 尽管处于较为破碎的软弱夹层带，但受边坡地形结构影响，上部岩体对其挤压，没有发生滑动。位于 P1q+m 卸荷区顶部的颗粒 8 位移量最小，表明地震作用下并未使得顶部区域全部垮塌。同一高程情况下，离临空面越接近，颗粒位移越大。随高程增加，颗粒位移量增大。





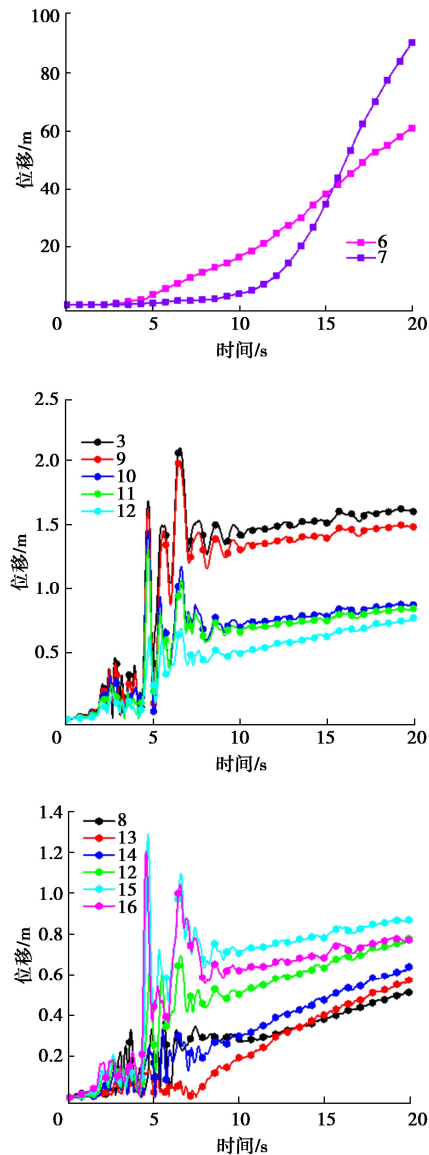


图 8 监测点位移曲线

Fig. 8 Displacement curves of monitoring points

## 4 结 论

(1) 颗粒流模拟计算中, 为避免地震波在模型边界反射, 引入人工边界, 根据波速对颗粒施加反向接触力, 使得计算结果更加准确可靠。

(2) 地震动在从底部向上传播过程中, 会导致软弱夹层出现裂隙, 伴随有波速下降现象; P1q+m 处岩层滑体呈现动态、渐进累积破坏过程, 表现出滑体逐渐崩塌的解体现象, 与实际滑坡较为一致。

### 参考文献:

[1] HUANG R Q. Some catastrophic landslides since the twentieth century in the southwest of China[J]. Landslides, 2009, 6(1):

69-81.

- [2] KEEFER D K, LARSEN M C. Assessing landslide hazards[J]. Science, 2007, 316(5828): 1136-1138.
- [3] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1525-1544. (HUANG Runqiu. Geodynamical process and stability control of high rock slope development[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1525-1544. (in Chinese))
- [4] XU L F, MENG X W, XU X G. Natural hazard chain research in China: a review[J]. Natural Hazards, 2014, 70(2): 1631-1659.
- [5] 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理分析[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 730-741. (HUANG Runqiu, PEI Xiangjun, LI Tianbin. Basic characteristics and formation mechanism of the largest scale landslide at Daguangbao occurred during the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6): 730-741. (in Chinese))
- [6] 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 Yueping, 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))
- [7] 郭亚永, 葛永刚, 陈兴长, 等. 云南鲁甸地震甘家寨滑坡基本特征及失稳机制[J]. 山地学报, 2016, 34(5): 530-536. (GUO Yayong, GE Yonggang, CHEN Xingchang, et al. Basic characteristics and failure mechanism of the Ganjiazhai landslide triggered by the Ludian earthquake, Yunnan[J]. Mountain Research, 2016, 34(5): 530-536. (in Chinese))
- [8] 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 Xunjian, 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. (in Chinese))
- [9] WANG H L, LIU S Q, XU W Y, et al. Numerical investigation on the sliding process and deposit feature of an earthquake-induced landslide: a case study[J]. Landslides, 2020, 17(11): 2671-2682.

(编校: 明经平)