

文章编号: 1008-2786-(2017)3-332-08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000229

## 西藏俄拉村滑坡地震动态响应失稳过程

雷清雄,王运生,贺建先,陈明,申通

(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:** 为了研究岩浆岩质边坡在地震作用下的动力响应特征和失稳过程,以西藏俄拉村滑坡为原型建立离散元数值模型,通过输入实测地震动数据,研究该斜坡在地震作用下的动力响应特征和失稳破坏过程。模拟结果表明:(1) 俄拉村滑坡失稳过程为:震动拉裂-剪切阶段→“锁固段”剪断贯通阶段→堆积掩埋夯实阶段;(2) 水平向地震加速度 PGA 具有高程放大效应,且在相同高程坡面 PGA 放大系数较坡体内部大,坡形转折处和坡体凸出部位的放大效应也表现为坡面较坡内显著;(3) 水平向地震加速度 PGA 值自坡体内部向外表现为时而增大、时而减小的节律性规律。研究结果可为岩浆岩质边坡在地震作用下的失稳模式提供依据。

**关键词:** 俄拉村滑坡;失稳过程;地震动响应;离散元模拟

**中图分类号:** TU457;P64

**文献标志码:** A

2013 年 8 月 12 日 5 月 23 分,西藏昌都左贡县、芒康县交界处发生了 Ms6.1 级地震,震源深度 10 km,震中烈度为 VIII,地震造成经济损失达 20 多亿元<sup>[1]</sup>。这次地震诱发了位于昌都吉达乡的俄拉村滑坡。通过对俄拉村滑坡进行详细实地调查,这为研究其失稳过程和地震动响应奠定了基础。

汶川地震以来,许多学者对地震滑坡形成机制和地震动响应进行了研究,并取得了一定的成果。曹琰波等<sup>[2]</sup>通过对唐家山滑坡变形破坏的研究,总结了地震滑坡的运动模式和顺层岩质坡体中不连续结构面对岩质边坡的动力响应规律。申通等<sup>[3]</sup>运用离散元软件对重庆小南海滑坡失稳机理进行了研究。Ashutosh Kainthola 等<sup>[4]</sup>利用 UDEC 软件对玄武岩公路边坡的稳定进行了研究。杨国香等<sup>[5]</sup>提出坡体结构是影响边坡动力响应主要因素,结构面发育的边坡其动力加速度放大系数高于均质结构边坡 15% 左右。周剑等<sup>[6]</sup>利用离散元软件对大型结构

面应力波传播规律进行了研究。言志信等<sup>[7]</sup>利用 FLAC2D 软件对地震作用下顺层岩质边坡的动力响应规律进行分析,分析表明,地震作用下顺层岩质边坡的失稳主要受结构面控制。谭儒蛟等<sup>[8]</sup>以人工合成地震波作为输入波,运用离散单元法对金沙江龙蟠边坡变形岩体进行了全时程动力分析,认为岩质边坡的地震动响应主要受岩体结构面控制。刘汉香等<sup>[9]</sup>基于振动台试验,研究了岩性和岩体结构对斜坡地震加速度的响应。

前人研究成果表明,地震作用下结构面是顺层边坡失稳和地震动响应控制性因素,但对地震作用下岩浆岩边坡失稳过程和地震动响应研究不足。本文以西藏俄拉村滑坡为原型建立数值模拟概化模型,采用离散元软件 UDEC,以实测监测地震数据作为输入波,在数值模型内设置了大量监测点,进行数值模拟。数值模拟旨在反演俄拉村滑坡失稳过程和

收稿日期(Received date):2016-07-11;改回日期(Accepted date):2017-01-05。

基金项目(Foundation item):地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主研究课题(SKLG2015Z001);国家自然科学基金:创新研究群体科学基金(41521002)[SKLGP Independent Found(SKLG2015Z001)];National Natural Science Foundation of China:Innovative Groups of the National Natural Science Foundation of China(41521002) ]

作者简介(Biography):雷清雄(1990-),男,在读硕士研究生,从事地质灾害评价与预测研究[Lei Qingxiong(1990-),male,M.Sc.candidate, research on geological hazard evaluation and prediction] E-mail:1204874764@qq.com

\* 通讯作者(Corresponding author):王运生(1960-),男,博士,教授,主要从事工程地质方面的研究工作[Wang Yunsheng(1960-),male, Ph.D, professor, research on engineering geology] E-mail:wangys60@163.com

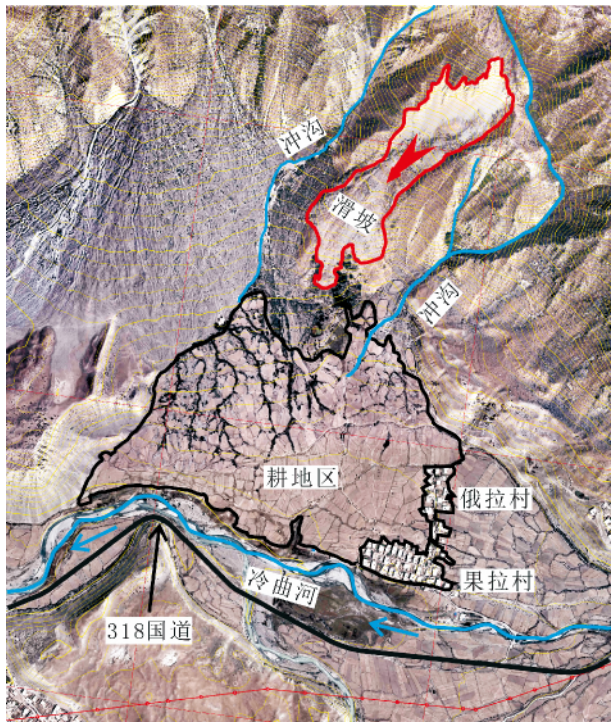


图 1 俄拉村滑坡遥感图

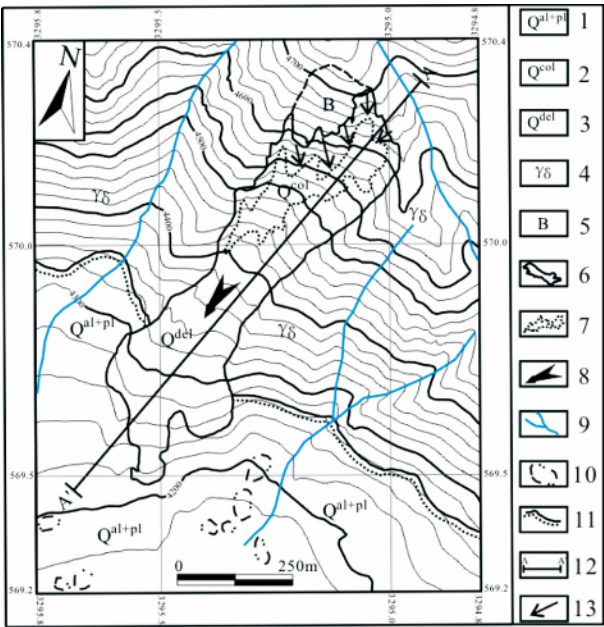
Fig. 1 Remote sensing photos of ELA village landslide

1 俄拉村滑坡概况

俄拉村滑坡位于冷曲河右岸约 913 m 处,与 318 国道隔河相望(见图 1)。中心地理坐标 29°46′23″N,96°43′32″E,行政隶属西藏昌都八宿县吉达乡俄拉村。滑坡平面呈舌形(见图 2),分布高程 4 210 ~4 707 m,相对高差达 497 m,纵向长约 920 m,横

向宽约 275 m,分布面积达  $25 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,滑体平均厚度为 14 m,体积为  $350 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,为一大型滑坡,主滑方向为 334°。

滑坡物质主要由母岩为花岗闪长岩的块碎石土组成,出露岩体为侏罗纪节理发育的花岗闪长岩(见图 3)。坡体中主要发育三组节理:节理 1( $J_1$ )产状为  $306^\circ \angle 64^\circ$ ,节理 2( $J_2$ )产状为  $192^\circ \angle 37^\circ$ ,节



1.冲洪积; 2.崩塌堆积; 3.滑坡堆积; 4.燕山期花岗闪长岩; 5.变形体; 6.滑坡边界; 7.崩塌边界; 8.滑坡主滑方向; 9.水系; 10.耕地; 11.地质界线; 12.剖面线; 13.后期崩塌方向

图 2 俄拉村滑坡地质工程图

Fig. 2 Engineering geological map of ELA village landslide

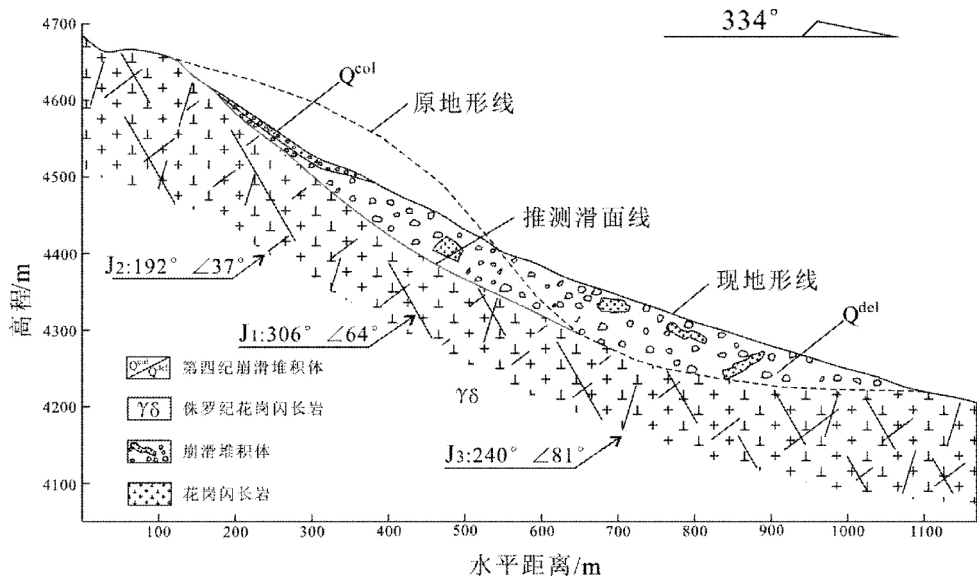


图 3 俄拉村滑坡地质剖面图

Fig. 3 Geological section of ELA village landslide

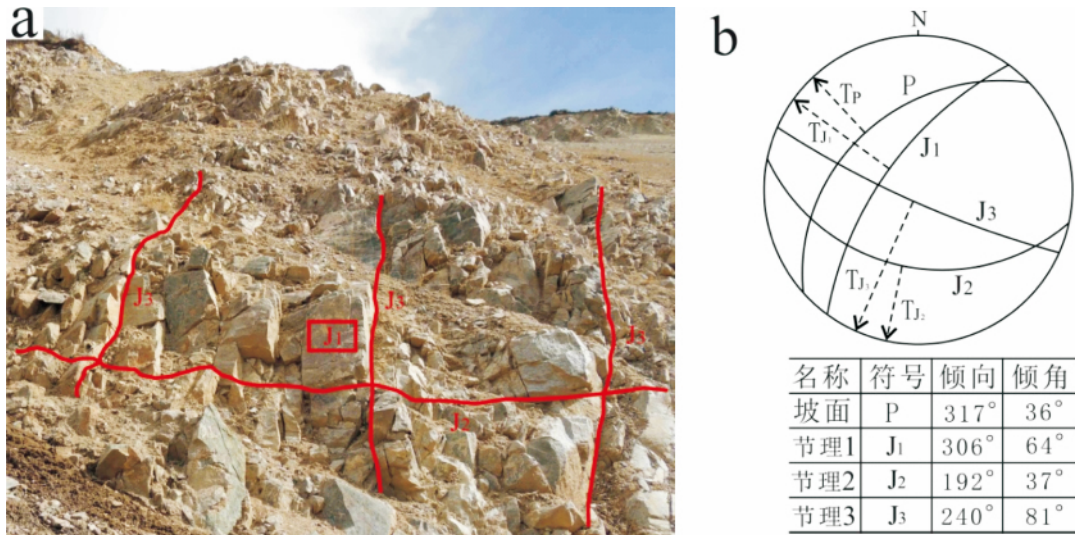


图 4 节理照片和赤平投影  
Fig. 4 Picture and stereographic projection of joints

理 3 (J<sub>3</sub>) 产状为 240°∠81°。J<sub>1</sub> 最发育, J<sub>3</sub> 次之, J<sub>2</sub> 最差, 节理照片和赤平投影如图 4 所示。

2 离散元数值模型及边界条件

根据俄拉村滑坡地质剖面图建立如图 5 所示概化模型, 模型底边宽 1 168 m, 左侧边界高 635 m, 右侧边界高 155 m。在模型中设置坡面坡内监测点,

用以监测地震作用下斜坡水平地震加速度的响应规律。根据实地调查和工程类比, 侏罗纪花岗岩闪长岩基岩岩体物理力学参数见表 1, 结构面 J<sub>1</sub>、J<sub>2</sub> 和 J<sub>3</sub> 物理力学参数见表 2。由于缺少西藏左贡 Ms6.1 级地震监测数据, 本文采用芦山 Ms7.0 级地震泸定冷竹关地震监测点记录数据, 近似模拟地震作用下俄拉村滑坡失稳过程和地震动力响应。芦山 Ms7.0 级地震水平和竖直加速度时程曲线如图 6 所示。

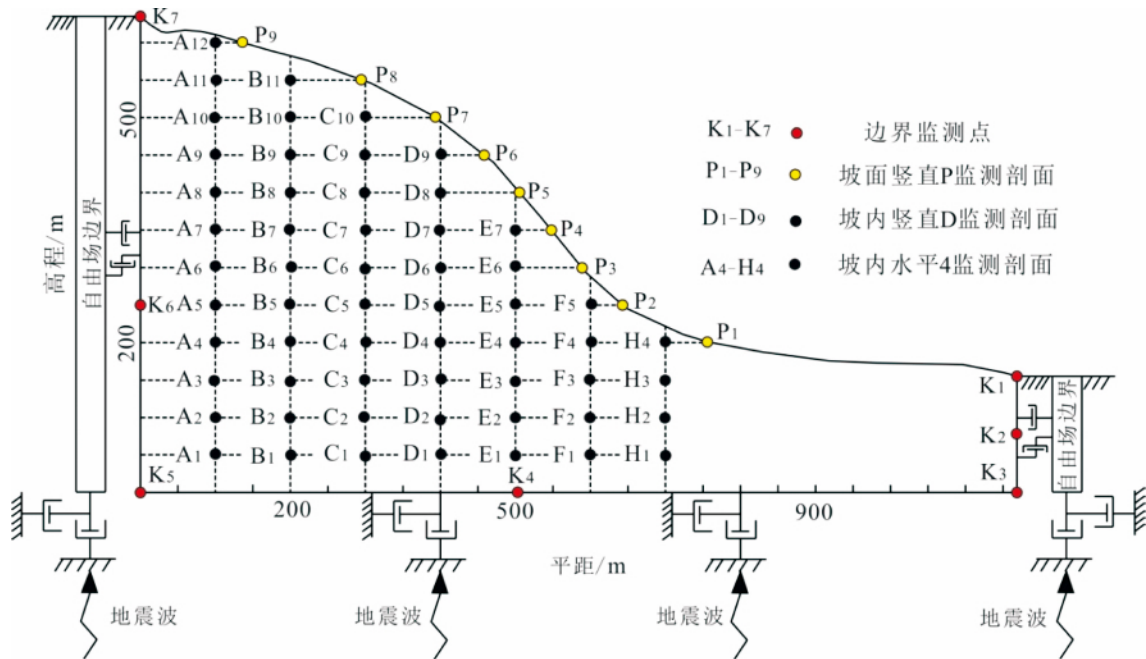


图 5 俄拉村滑坡数值模型及监测点分布图  
Fig. 5 Numerical model and distribution of monitoring points of ELA village landslide

表 1 斜坡岩体物理力学参数

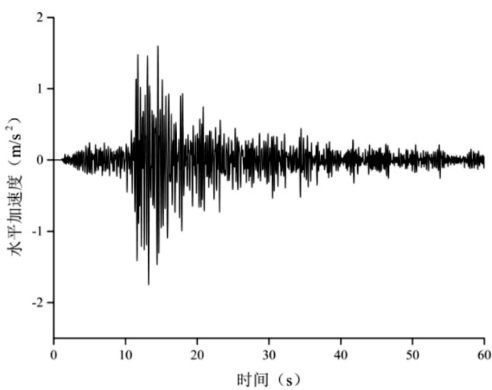
Tab.1 Physico-mechanical parameters of slope rock mass

岩性	天然密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	黏聚力/MPa	内摩擦角/ $^{\circ}$	体积模量/GPa	剪切模量/GPa
花岗闪长岩	2457	1.2	15	25.1	12.9

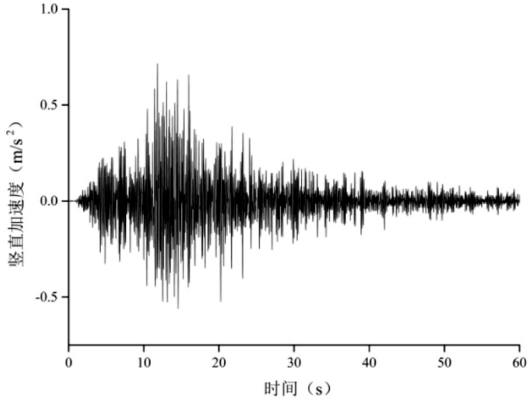
表 2 结构面力学参数

Tab.2 Mechanical parameters of structural planes

结构面	法向刚度/ $\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$	剪切刚度/ $\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$	内摩擦角/ $^{\circ}$	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa
节理 1	2.13	1.52	30	1.04	0.28
节理 2	2.41	1.63	34	1.24	0.64
节理 3	2.38	1.57	33	1.15	0.37



(a) 水平加速度



(b) 竖直加速度

图 6 芦山 Ms7.0 级地震冷竹关加速度记录

Fig.6 Acceleration records of Lengzhuguan at Lushan earthquake

边界条件按以下步骤设置: (1) 底部边界竖直方向约束, 两侧边界水平方向约束, 令其在自重应力下达到平衡; (2) 放松模型位移边界条件, 改为左右侧自由场边界、底部边界垂直位移约束并改为黏滞边界, 这样可以减少地震波的反射而损失能量, 地震动力荷载加在斜坡底部边界上。

3 数值模拟结果与分析

3.1 最大不平衡力及边界条件检验

将芦山地震荷载输入模型底部, 最大不平衡力随时间的变化曲线如图 7 所示。由图可知, 计算开始后不平衡力逐渐增加, 并在 20.7s 时达到峰值 6081MPa, 当运行 40s 以后不平衡力趋于零, 表明计算模型趋于基本稳定, 计算收敛。

为了检验边界条件是否合理, 在模型底部及两侧设置边界监测点  $K_1 - K_7$ , 并分别选取左右自由场边界监测点  $K_6$ 、 $K_2$  以及底部黏滞边界监测点  $K_4$  作为模型边界条件的检验点, 其加速度时程曲线如图

8 所示。由图可知, 左右自由场边界和底部黏滞边界记录的水平和竖向加速度时程曲线波形与图 6 中实际输入的加速度时程波形基本吻合, 说明模型动力边界条件设置正确。

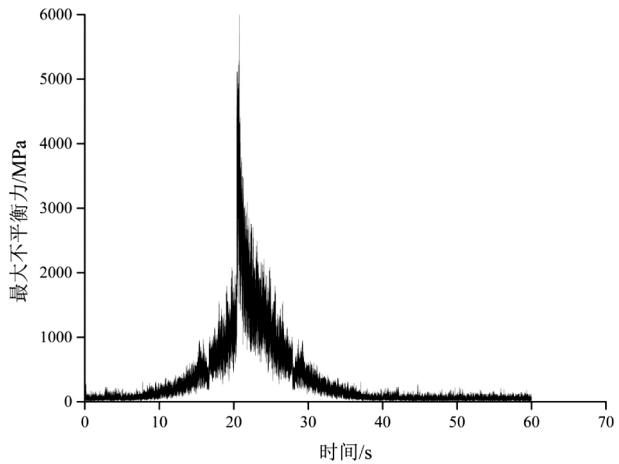


图 7 地震作用下最大不平衡力随时间的变化曲线

Fig.7 Variation curve of the maximum unbalanced force with time under seismic loading



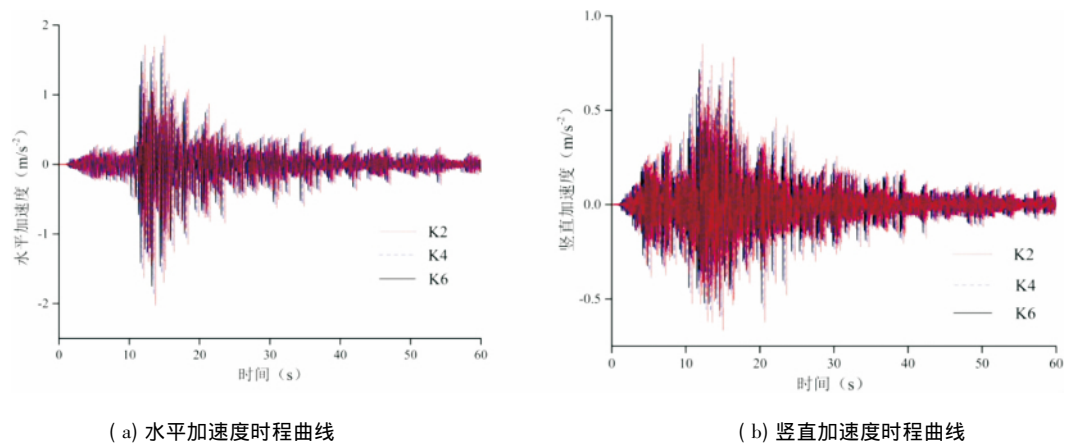


图 8 模型边界监测点加速度时程曲线

Fig. 8 Time-history curves of acceleration of monitoring points at model boundary

3.2 西藏俄拉村滑坡的失稳过程

对西藏俄拉村滑坡的启动、运移、堆积过程进行了离散元数值模拟计算(见图9)。通过实地调查和数值模拟的综合分析,可将西藏俄拉村滑坡失稳过程分为3个不同阶段,它们的主要特征概括如下:

- 1) 震动拉裂-剪切阶段: 10s~20s 阶段,在地震作用下,坡肩部位沿主控节理  $J_1$  发生震动拉裂,使节理面扩展延伸;坡形凸出部位出现拉张裂隙,而在坡脚部位出现剪切破坏。
- 2) “锁固段”剪断贯通阶段: 20s~50s 阶段,在地震动力及自重力作用下,应力不断向锁固段集中,引起锁固段渐进破坏、不断缩短,直至贯通。当运行到 50s 时,在地震波动振加速效应及锁固段弹性应变能加速效应共同作用下,部分岩体发生抛掷现象。
- 3) 堆积掩埋夯实阶段: 50s~70s 阶段,抛掷岩

体和架空岩体在重力作用下发生堆积夯实。

4 斜坡地震加速度的动力响应规律

为了探索斜坡对地震加速度动力响应规律,在模型坡内和坡面上分别设置了监测点(见图5)。在坡内水平向上每隔 100 m 布置一个竖直剖面,布置了 A-H 共 7 个竖直剖面;在坡内竖直向上每隔 50 m 布置一个水平剖面,布置了 1-12 共 12 个水平剖面。在坡面上不同高程处分别设置了监测点  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ 、 $P_5$ 、 $P_6$ 、 $P_7$ 、 $P_8$ 、 $P_9$ , 其中  $P_1$  设置在坡脚处,  $P_2$  设置在坡形转折处,  $P_5$  设置在斜坡坡面凸出部位,而  $P_9$  则设置在坡肩处。为了便于分析,本文引入 PGA 放大系数,即斜坡任意一点的响应加速度峰值与模型底部上响应加速度峰值的比值<sup>[10]</sup>。

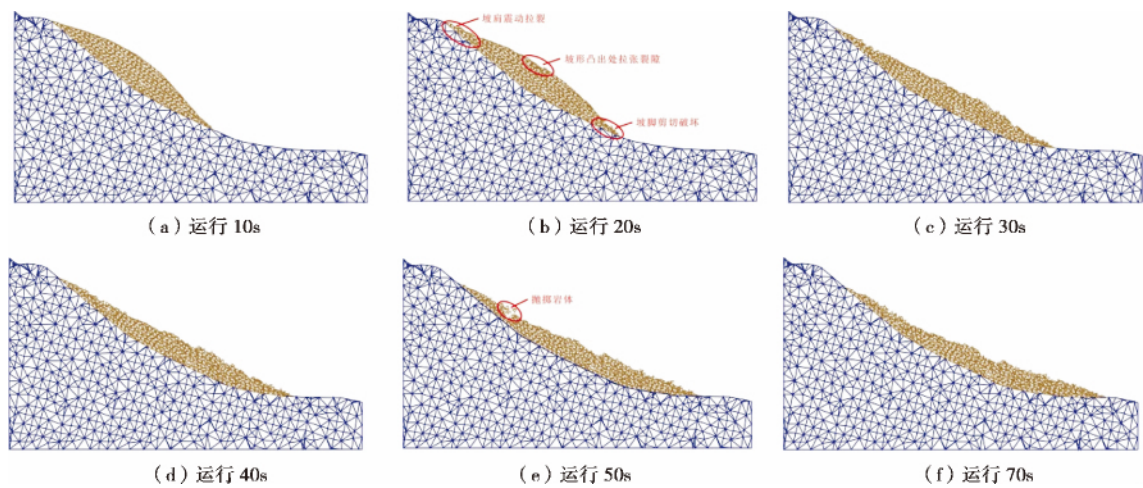


图 9 数值模型运行不同时间对应运动状态

Fig. 9 Movement states at different running time of numerical model

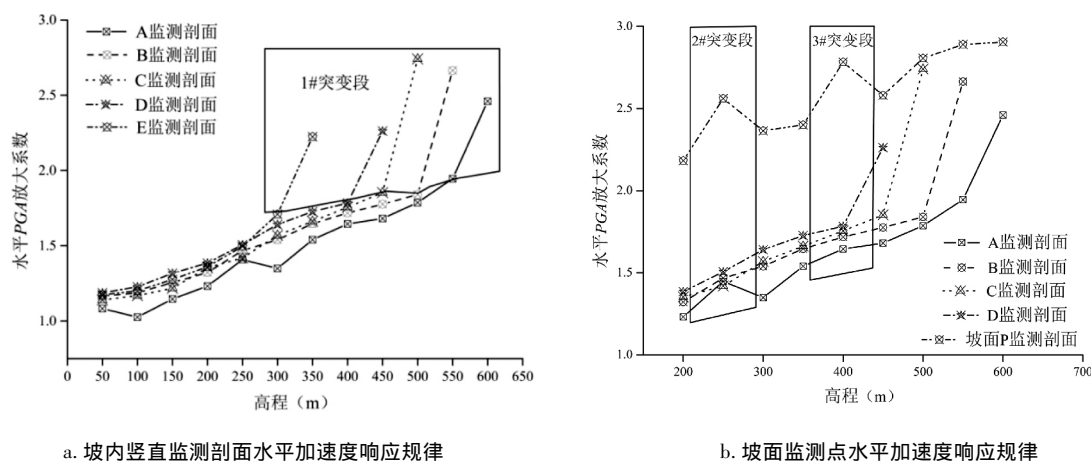


图10 水平响应加速度峰值放大系数随高程的变化规律

Fig. 10 Change laws of horizontal PGA amplifications with elevations

本节将着重分析,在地震作用下斜坡水平加速度动力响应规律。

#### 4.1 水平加速度沿竖直向响应规律

坡内和坡面不同高程处水平 PGA 放大系数变化规律如图 10 所示,其中 A-E 监测剖面表示平距分别为 100 m、200 m、300 m、400 m、500 m 的竖直监测剖面,而 p 监测剖面表示坡面竖直监测剖面(见图 5)。从图 10(a)中可以看出,坡内竖直监测剖面的水平 PGA 放大系数随高程呈非线性增大趋势,这与许强等<sup>[10]</sup>进行的大型振动台试验结果具有一致性,并在 1#线框(接近坡肩临空面)出现了突变,且越靠近临空面发生突变的高程值越低。表明在坡内高程对水平加速度有明显放大效应,同时坡肩临空面对水平加速度放大效应更加显著。

从图 10(b)中坡面监测剖面水平 PGA 放大系数变化曲线可以看出,坡面监测剖面的水平 PGA 放大系数也随高程呈非线性增大趋势,并在 2#线框(坡形转折处)和 3#线框(坡形凸出处)出现了突变,这与罗永红等<sup>[11]</sup>对汶川地震地形放大效应的研究结果具有一致性。表明在坡面高程对水平加速度也具有明显放大效应,同时坡形转折处和坡形凸出处对水平加速度放大效应更加显著。

在图 10(b)中对比坡面监测剖面与坡内监测剖面水平 PGA 放大系数变化趋势可以看出,坡面放大系数总体大于坡内放大系数,坡内监测剖面在 2#线框(坡形转折处)和 3#线框(坡形凸出处)并没有出现突变。表明坡形(坡形转折处和坡形凸出处)对水平加速度放大效应只出现在坡面。

综上所述,水平加速度具有高程放大效应,且坡面高程放大效应比坡内高程放大效应显著;而坡形

放大效应只出现在坡面。

#### 4.2 水平加速度沿水平向响应规律

坡内不同水平距离处水平 PGA 放大系数变化规律如图 11 所示,其中 1-5 监测剖面表示高程分别为 50 m、100 m、150 m、200 m、250 m 的水平监测剖面(见图 5)。从图 11 可以看出,坡内水平监测剖面水平 PGA 放大系数随水平距离呈现时而增大、时而减小的节律性逐渐增大,这与祁生文等<sup>[12]</sup>对边坡动力响应的数值分析结果具有一致性。表明水平地震加速度在水平向具有水平节律效应。

### 5 结论

本文设计并完成了俄拉村滑坡离散元数值计算。基于模拟过程和监测的动力响应数据,探讨了

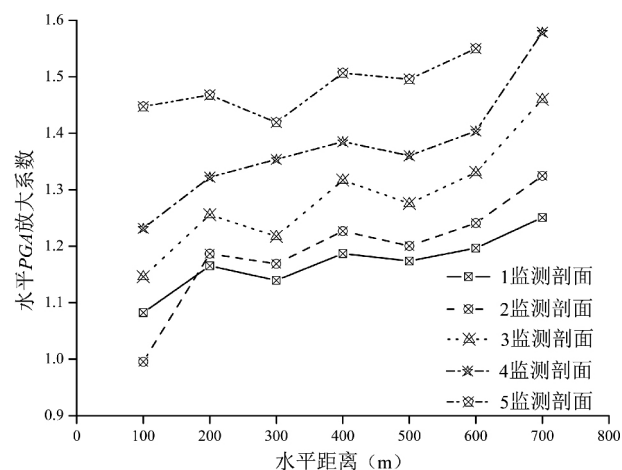


图11 水平响应加速度峰值放大系数随水平距离的变化规律

Fig. 11 Change laws of horizontal PGA amplifications with horizontal distance

滑坡形成过程和水平加速度动力响应的基本规律,得到了以下几点结论:

(1) 俄拉村滑坡失稳过程为:震动拉裂-剪切阶段→“锁固段”剪断贯通阶段→堆积掩埋夯实阶段;

(2) 对坡内和坡面竖直监测剖面的水平加速度响应峰值作放大系数曲线,结果表明,地震作用下水平加速度具有明显的高程放大效应,且坡面高程放大效应比坡内高程放大效应更显著;水平加速度在坡面坡形转折处和坡形凸出处出现突增,而水平加速度在坡内并没有出现明显突增,表明坡形放大效应在坡面比在坡内更显著;

(3) 对坡内水平监测剖面的水平加速度响应峰值作放大系数曲线,结果表明,地震作用下水平加速度在水平向具有时而增大、时而减小的节律效应。

#### 参考文献(References)

- [1] 高锦瑞,尼玛·文升梁,等.西藏左贡6.1级地震浅析[J].高原地震,2015,27(1):31-36[GAO Jinrui,NI Ma,WEN Shengliang,et al. Discussion on ZuoGong Ms6.1 earthquake in XiZang[J]. Plateau Earthquake Research,2015,27(1):31-36]
- [2] 曹琰波,戴福初,许冲,等.唐家山滑坡变形运动机制的离散元模拟[J].岩石力学与工程学报,2011,30(增1):2878-2887[CAO Yanbo,DAI Fuchu,XU Chong,et al. Discrete element simulation of deformation and movement mechanism for Tangjiashan landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(Supp.1):2878-2887]
- [3] 申通,王运生,吴龙科.重庆小南海滑坡形成机制离散元模拟分析[J].岩土力学,2014,35(增2):667-675[SHEN Tong,WANG Yunsheng,WU Longke. Discrete element simulation analysis of formation mechanism of Xiaonanhai landslide in Chongqing city[J]. Rock and Soil Mechanics,2014,35(Supp.2):667-675]
- [4] KAINTHOLA Ashutosh,SINGH P. K.,SINGH T. N. Stability investigation of road cut slope in basaltic rockmass,Mahabaleshwar,India[J]. Geoscience Frontiers,2015,6:837-845.
- [5] 杨国香,伍法权,董金玉,等.地震作用下岩质边坡动力响应特征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 Guoxiang,WU Faquan,DONG Jinyu,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]
- [6] 周剑,张路青,胡瑞林,等.大型结构面产状影响下应力波传播规律研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(4):769-780[ZHOU Jian,ZHANG Luqing,HU Ruilin,et al. Study of rules of stress waves propagation under various attitudes of large-scale fractures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(4):769-780]
- [7] 言志信,张森,张学东,等.顺层岩质边坡地震动力响应及地震动参数影响研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(增2):3522-3528[YAN Zhixin,ZHENG Sen,ZHANG Xuedong,et al. Study of dynamic response of bedding rock slope under earthquake and influence of ground motion parameters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(Supp.2):3522-3528]
- [8] 谭儒蛟,李明生,徐鹏道,等.地震作用下边坡岩体动力稳定性数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2009,28(增2):3986-3992[TAN Rujiao,LI Mingsheng,XU Pengxiao,et al. Numerical simulation of dynamic stability of slope rock mass under seismic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(Supp.2):3986-3992]
- [9] 刘汉香,许强,侯红娟.岩性及岩体结构对斜坡地震加速度响应的影响[J].岩土力学,2013,34(9):2482-2488[LIU Hanxiang,XU Qiang,HOU Hongjuan. Influence of lithology and rock structure on slope seismic acceleration responses[J]. Rock and Mechanics,2013,34(9):2482-2488]
- [10] 许强,刘汉香,邹威,等.斜坡加速度动力响应特性的大型振动台试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(12):2420-2428[XU Qiang,LIU Hanxiang,ZOU Wei,et al. Study on slope dynamic responses of accelerations by large-scale shaking table test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(12):2420-2428]
- [11] 罗永红,王运生.汶川地震诱发山地斜坡震动的地形放大效应[J].山地学报,2013,31(2):200-210[LUO Yonghong,WANG Yunsheng. Mountain slope ground motion topography amplification effect induced by Wenchuan earthquake[J]. Mountain Research,2013,31(2):200-210]
- [12] 祁生文,伍法权,孙进忠.边坡动力响应规律研究[J].中国科学(E辑),2003,33(增1):28-40[QI Shengwen,WU Faquan,Sun Jinzhong. Study on dynamic responses of slope[J]. Science in China(Series E),2003,33(Supp.1):28-40]

## Analysis on Failure Process and Seismic Response of Ela Village Landslide in Tibet

LEI Qingxiong ,WANG Yunsheng ,HE Jianxain ,CHEN Ming ,SHEN Tong

( State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection , Chengdu University of Technology , Chengdu 610059 ,China)

**Abstract:** Based on prototype of Ela village landslide at Tibet ,a discrete element numerical simulation model was carried out to study seismic responses of the slope and its unstable failure process. We used a commercial software UDEC to conduct the seismic responses under dynamic loads which were monitoring seismic data. The main numerical simulation results could be summarized as follows: ( 1) The failure process of Ela village landslide was divided into three stages , i. e. ,vibration tension cracking and shearing stage→"locked section" cutting through stage→accumulation and buried compaction stage; ( 2) the horizontal PGA amplification factor increased with elevation and the factor on the surface was larger than the inner , and the amplification effect was obvious at the slope break or convex slope; ( 3) the monitoring data revealed that the horizontal PGA varied with the rhythmic regularity of increasing intervals from inner part to slope surface. The results provided a reference for the mechanism of slope failure under earthquake.

**Key words:** Ela village landslide; failure process; seismic responses; discrete element method