

地震动力作用触发的斜坡崩滑效应模拟

崔芳鹏^{1,2}, 许强², 谭儒蛟³, 殷跃平⁴

(1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083;

2. 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;

3. 天津市市政工程设计研究院, 天津 300051; 4. 中国地质调查局, 北京 100037)

摘要: 依据震后实地调查中竖向地震力作用十分明显的现象, 突破传统斜坡动力反应分析中仅考虑水平地震力作用的局限, 运用离散元数值模拟技术, 对北川王家岩斜坡体在具地域性和空间非均质性的地震纵横波时差耦合作用下产生崩滑破坏的动力全过程进行了模拟, 确定了地震动力作用下该斜坡体崩滑破坏的形成机制及主控因素. 研究表明: 该斜坡体的初期崩滑破坏是受到纵波产生的水平和竖向拉裂耦合作用所致, 且以水平拉裂作用占优, 而后期的抛射及碎屑流动则是受到纵横波耦合作用所致; 即纵波的个体作用是触发斜坡体产生初期崩滑破坏的主控因素, 而斜坡体所处地形则是促使破坏后的斜坡体形成后续碰撞解体及碎屑流动的主控因素.

关键词: 时差耦合作用; 斜坡崩滑效应; 王家岩滑坡; 形成机制; 主控因素

中图分类号: P 642.22

文献标识码: A

Numerical Simulation of Collapsing and Sliding Response of Slope Triggered by Seismic Dynamic Action

CUI Fangpeng^{1,2}, XU Qiang², TAN Rujiao³, YIN Yueping⁴

(1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute, Tianjin 300051, China; 4. China Geological Survey, Beijing 100037, China)

Abstract: A simulation was carried out on initial collapsing-sliding and a subsequent running out process of Wangjiayan Landslide in Beichuan County during the Wenchuan Earthquake triggered by single and combined action with time

difference, regionality and spatial heterogeneity of primary and secondary seismic waves based on discrete element method by taking into the consideration the fact that vertical ground motion was still evident in post-earthquake field geological investigation, and formation mechanism and key controlling factors of slope collapsing and sliding under seismic load were determined, which was different with the traditional dynamic response analysis based on a consideration of horizontal seismic load. The result shows that initial collapsing and sliding of the slope are triggered by combined action of vertical and horizontal tension, which plays a dominant role, of primary seismic wave, whereas a subsequent collision and debris flow of slope mass fractured are triggered by combined action of primary and secondary seismic wave. On the other hand, single action of primary seismic wave is the key controlling factor inducing the slope initial collapsing and sliding, and the topography near the slope is the key controlling factor leading to collision and debris flow of the slope mass fractured in later process.

Key words: single and combined action with time difference; collapsing and sliding response of slope; Wangjiayan Landslide; formation mechanism; key controlling factors

强烈地震触发的滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害, 特别是在山岳地区, 其危害程度往往比地震直接造成的危害更大^[1]. 对数次典型地震的致灾统计数据可以看出^[2-4], 强烈地震触发的斜坡崩、滑、流地质灾害造成的人员伤亡数占地震伤亡总人数近三分之一, 其危害程度“不亚于一场大地震”^[5]. 举世瞩目的汶川“5·12”强震更是触发了 15 000 多处滑坡、崩塌、泥石流地质灾害, 估计直接造成 2 万人死

收稿日期: 2009-11-01

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金(2009QD14); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学)开放基金(SKLP2010K004)

第一作者: 崔芳鹏(1979—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为工程地质与地质灾害. E-mail: cuifrb0823@126.com

亡^[6]. 因此,强震触发的斜坡崩、滑、流地质灾害因其巨大的致灾力引起了广泛研究. 周维垣^[7]认为地震等动荷载对岩质边坡的稳定影响主要表现在地震波通过岩层面及岩体结构面时发生的反射及折射作用导致的超压增大及地震荷载与其他因素(水的作用)对斜坡体的共同破坏两个方面. 张倬元^[8]等认为地震对边坡稳定性的影响表现为累积效应和触发效应两个方面. 胡广韬^[9]等提出了边坡动力失稳机制的坡体波动振荡加速效应假说. 毛彦龙^[10]等认为地震动对滑坡形成的影响,主要是通过坡体波动振荡来产生;坡体波动振荡在边坡岩土体变形破坏过程中产生三种效应:累进破坏效应、启动效应和启程加速效应. 祁生文^[11]等认为地震边坡的失稳是由于地震惯性力的作用及地震产生的超静孔隙水压力迅速增大和累积作用所致. 崔芳鹏^[12-14]等认为具地域性和空间非均质性的地震纵横波时差耦合作用导致了地震动力作用下斜坡体初期的崩滑破坏.

在以前研究中,同时考虑水平、竖向加速度和两者之间时差对斜坡体破坏作用的研究较少见,或者水平地震力作用被较多地考虑而竖向地震力作用往往被忽视,而多次典型地震的灾后实地调查结果都表明竖向地震动十分明显,尤其在强震的震中附近. 故需同时考虑纵波和横波(两者分别产生水平和竖向加速度,但分属不同体波的加速度之间存在时差)的破坏作用,即水平和竖向加速度的时差和耦合作用更具研究价值,这是本文突破传统斜坡动力响应分析中仅考虑水平地震力作用的局限而体现出的创新性.

1 离散元数值模拟与分析

运用 UDEC 离散元数值模拟技术,对北川王家岩斜坡体在具地域性和空间非均质性的地震纵横波时差耦合作用下产生动力损伤和崩滑破坏的全过程进行了研究,旨在确定地震作用下斜坡崩滑破坏的形成机制和触发主控因素.

1.1 离散元数值模型的建立

模拟选取北川城西王家岩滑坡为研究对象,如图 1 所示,其中 B 为边界监测点, M 为滑床监测点,用以监测斜坡体在地震动力作用下的位移、速度及加速度随时间的变化趋势,该滑坡是汶川地震触发的最严重滑坡灾难,导致了约 1 600 人死亡,数百间房屋被毁. 斜坡体岩性由寒武系砂页岩、片岩构成,为逆向坡,距主中央断裂约 500 m. 滑坡前后缘高差

约 350 m,后缘到剪出口约 200 m,滑程 550 m. 堆积体纵长 400 m,宽 400 m,厚约 30 m,估计体积约 480 万方^[3]. 根据以上数据,建立了离散元数值概化模型,见图 2,模型左侧最高高程 1 014.47 m,右侧最高高程 614.74 m,底部边界位于高程 400 m 处,即模型左侧边界 AB 高 614.47 m,右侧边界 CD 高 214.74 m,底部边界 BD 长 900 m.

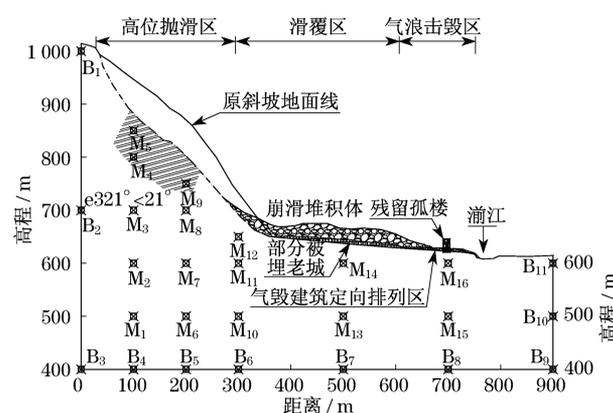


图 1 王家岩滑坡剖面及数值模型监测点分布图

Fig. 1 Profile and distribution of monitoring spots in numerical model of Wangjiayan Landslide

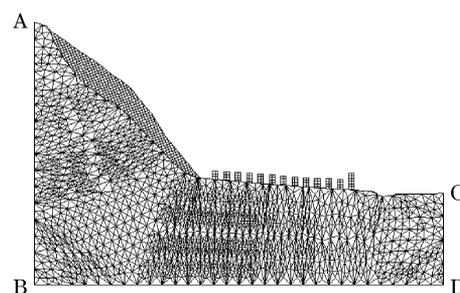


图 2 王家岩滑坡离散元数值模型网格剖分图

Fig. 2 Mesh generation in DEM model of Wangjiayan Landslide

1.2 数值本构模型及材料参数的选取

在离散元数值模型中,由于滑体中单元的自身变形相对其运动距离可忽略不计,故滑体部分(图 2 中左侧上部四边形网格区域)采用刚体本构模型;而虽没有发生明显开裂及运动的滑床部分在地震波作用下也发生了相对其自身尺寸较大的弹塑性变形,故斜坡体滑床部分,如图 2 所示网格区域,采用塑性本构模型和 Mohr-Coulomb 屈服准则.

为便于计算和分析,对边坡的地层岩性进行了概化,斜坡岩体主要由寒武系砂页岩、片岩构成,结构面分为岩层面、节理面,岩体与结构面的计算参数(经验值)如表 1 和表 2 所示.

表1 斜坡体物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of slope rock mass

岩性	天然密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	内聚力/MPa	内摩擦角/($^\circ$)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa
页岩	2 550	2.10	25	8.81	4.32
片岩	2 650	2.34	35	10.00	4.92

表2 结构面力学参数

Tab.2 Mechanical parameters of structural plane

岩性	法向刚度/($\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$)	剪切刚度/($\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$)	内摩擦角/($^\circ$)	粘聚力/MPa	抗拉强度/MPa
岩层面	2.12	1.65	38	1.38	0.64
节理面	1.61	0.98	32	0.52	0.03

1.3 数值模型边界条件的选取

静态分析所采用的固定边界或弹性边界,在动力分析中将导致向外传播的地震波反射回模型内部,且不允许必要的能量发散.为解决这一问题,离散元数值模拟在动力分析中采用粘滞边界和自由场边界,模型在底部采用粘滞边界,两侧采用自由场边界,如图3所示.值得注意的是,动力问题的分析必须建立在静力分析的基础上,在静力分析达到平衡状态之后,再施加相应的动力边界条件进行动力分析.斜坡静力分析的边界条件采用底部边界垂直方向约束,两侧边界水平方向约束.

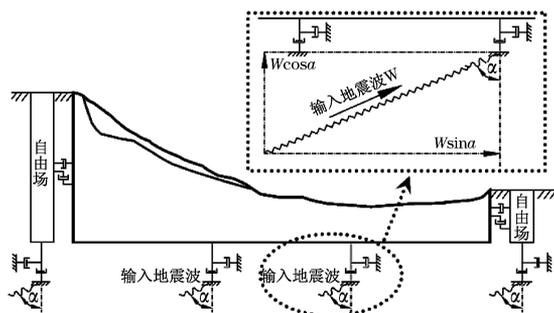


图3 地震波作用下离散元数值模型边界条件示意图

Fig.3 Boundary condition of DEM model subjected to seismic loads

1.4 数值模型动力条件的输入

当地震波以入射角 α 传输至斜坡体时,由其各自的力学作用特征知,纵波在其传输方向的剖面内产生两个力学分量 $F_P \sin \alpha$ 和 $F_P \cos \alpha$, $F_P \sin \alpha$ 产生水平加速度, $F_P \cos \alpha$ 产生竖向加速度;同理,横波在其传输方向的剖面内也产生两个力学分量 $F_S \sin \alpha$ 和 $F_S \cos \alpha$, $F_S \sin \alpha$ 产生竖向加速度,而 $F_S \cos \alpha$ 产生水平加速度.因此,当纵、横波同时作用斜坡体时,水平加速度由力学分量 $F_P \sin \alpha + F_S \cos \alpha$ 产生,竖向加速度由力学分量 $F_P \cos \alpha + F_S \sin \alpha$ 产生(图3).随着震中距的增加,因纵、横波传输速度的差异,致使其

到达特定斜坡体开始产生时间差 Δt (式1),即纵波先传输至并作用斜坡体,经过 Δt 时间之后,横波到达并作用该斜坡体,故某一时刻 t_0 使斜坡体产生竖向加速度的地震作用力分量为 $F_P \cos \alpha \cdot t_0 + F_S \sin \alpha \cdot (t_0 - \Delta t)$,而产生水平加速度的地震作用力分量为 $F_P \sin \alpha \cdot t_0 + F_S \cos \alpha \cdot (t_0 - \Delta t)$ (式2).

$$\Delta t = r \left(\frac{1}{V_S} - \frac{1}{V_P} \right) \quad (1)$$

式中: r 为震源距; V_P 为纵波波速. V_S 为横波波速.

$$\begin{cases} A_H = f(P, S, \alpha, \Delta t)/m = (F_P \sin \alpha \cdot t_0 + F_S \cos \alpha \cdot (t_0 - \Delta t))/m \\ A_V = f(P, S, \alpha, \Delta t)/m = (F_P \cos \alpha \cdot t_0 + F_S \sin \alpha \cdot (t_0 - \Delta t))/m \end{cases} \quad (2)$$

式中: t_0 为纵波作用斜坡体的累计时间; $(t_0 - \Delta t)$ 为横波作用斜坡体的累计时间; m 为受地震力作用的斜坡体质量; A_H 为水平加速度; A_V 为竖向加速度; α 为地震波在斜坡体底部的入射角; Δt 为时间差; f 为地震作用力.

在进行斜坡崩滑离散元模拟时,由于模型底部采用粘滞边界,故需将现场实测加速度时程^[15](据汶川地震地面峰值加速度监测记录,距映秀镇西南约4 km的监测点 $a_H = 2.0 \text{ g}$, $a_V = 1.5 \text{ g}$)与PGA峰值放大系数经验数据,将模型底部输入的峰值加速度修正为约0.5 g,然后将经过修正得到的加速度时程曲线利用数值积分的方法转化为相应的速度时程曲线,再将速度时程曲线转化为相应的应力时程曲线施加于数值模型底部.

因北川王家岩滑坡距离震中映秀镇约125.90 km,故由地震纵横波波速差异导致其到达王家岩斜坡体的时间差约为13.57 s.又因地震波传播至斜坡时已非垂直入射,即地震波在斜坡底部入射角为 $\alpha \approx \arctg(L/H) \approx (125.9/14)83.65^\circ$.因此,地震纵波对斜坡体的周期拉压作用在水平和垂直方向上均产生

分量,形成水平和竖向加速度;历时约 13.57 s 后,地震横波到达斜坡体,其同样产生水平和竖向加速度.在进行数值模拟时,输入地震纵波产生的水平与竖向加速度约 13.57 s 后,再输入地震横波产生的竖向和水平加速度,此时由水平和竖向加速度转化的水平和竖向速度已经是纵、横波分别产生的水平和竖向速度在数值上的叠加(图 4),据此考察斜坡体数值模型在个体及耦合动力条件作用下崩滑破坏的全过程.

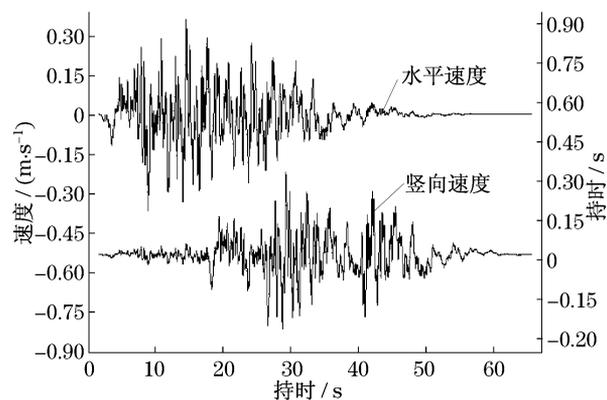


图 4 输入数值模型的水平、竖向速度时程曲线

Fig. 4 Time-history curves of horizontal and vertical velocity inputted in numerical model

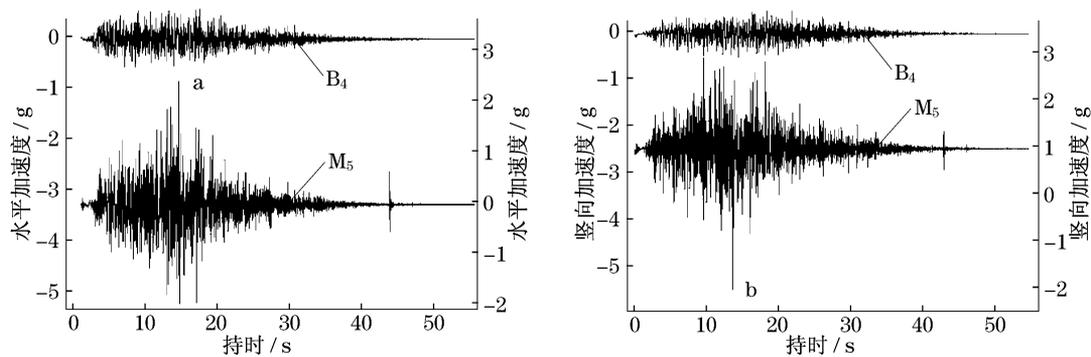


图 5 模型监测点(B_4, M_5)水平、竖向加速度时程曲线

Fig. 5 Time history of acceleration of monitoring points in numerical model

从图 6 的水平速度时程曲线可看出,接近坡面处水平速度峰值出现在动力反应历时约 5.79 s 处(即 *c* 点),此时水平速度绝对值约 $0.71 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;最后,接近坡面处放大系数最小的是竖向速度.其放大系数约 1.14. 竖向速度时程曲线看出,接近坡面处竖向速度峰值出现在动力反应历时约 13.61 s(即 *d* 点)处,此时竖向速度绝对值约 $0.49 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 由图 7 看出,在该剖面上竖向加速度的放大效应最为明显,在接近坡面($h/H \approx 1$)处,其放大倍数约 5.91.

1.5.2 斜坡体震荡、抛射运动全过程分析

事实上,对位于龙门山断裂带范围内的斜坡体而言,其经受的地震波序依次是起始震源纵波→起始震源横波→中间震源纵波→中间震源横波→本地震源纵波→本地震源横波.而本文为着重分析始自起始震源的地震纵横波的时差作用,把中间、本地震源等效到起始震源发出的地震波作用,以着重考察由初始震源距的增大而引起的纵横波的时差作用^[13].

1.5 数值模拟结果与分析

1.5.1 加速度、速度动力响应分析

由图 5 和图 6 看出,在地震波作用下,斜坡体内部的 $B_4 - M_5$ 剖面上的水平、竖向加速度,水平、竖向速度自监测点 B_4 至 M_5 均发生不同程度的放大效应.

从图 5 的竖向加速度时程曲线可看出,接近坡面处竖向加速度峰值出现在动力反应历时约 13.64 s 处(即 *b* 点),此时竖向地震加速度绝对值约 2.99 g;接近坡面处的水平加速度放大倍数达到了约 4.09. 接近坡面处水平加速度峰值出现在动力反应历时约 13.56 s 处(即 *a* 点),此时地震水平加速度绝对值约 2.42 g;此外,接近坡面处的水平速度放大倍数达到了约 1.37.

由图 8b 和 8c 可知,斜坡体后缘在 6.0 s 已开始发育裂隙,并在 10.0 s 时后缘完全松散,为其发生进一步大范围破坏及抛射提供了前提.由于模型中地震纵横波时差为 13.57 s,故数值模型在 6.0 s~10.0 s 之间运行时,横波尚未到达斜坡体,故斜坡体是在地震纵波于模型底部产生的水平和垂直震荡作用下发生的破坏,考察破坏区域附近的监测点 M_5 还可发现,在斜坡体破坏时(数值模型运行于 7.0 s~10.0 s 之间时),该监测点的水平速度在 $-0.54 \sim 0.23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,竖向速度在 $-0.32 \sim 0.31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,

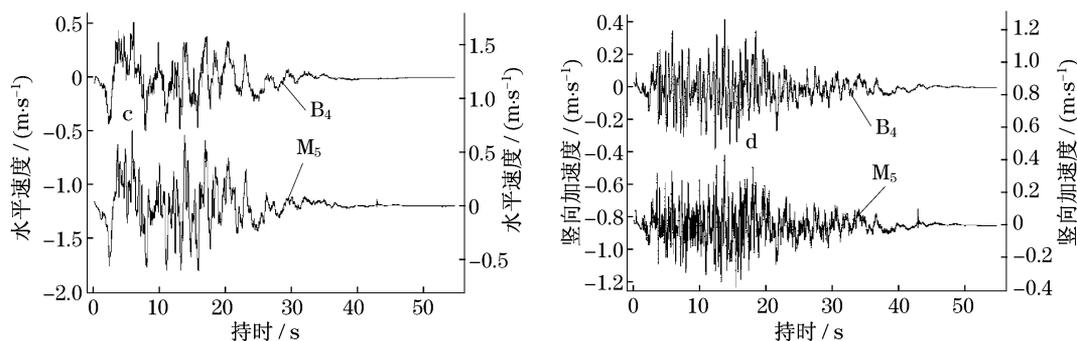
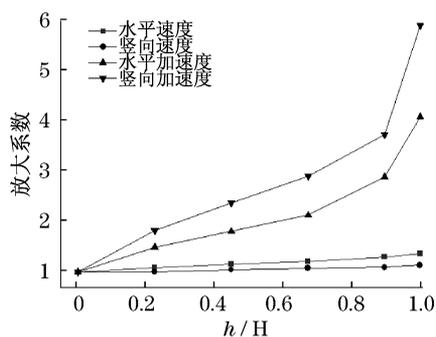
图6 模型监测点(B_4 , M_5)水平、竖向速度时程曲线

Fig.6 Time history of velocity of monitoring points in numerical model

图7 $B_4 - M_5$ 剖面上的参数放大系数Fig.7 Magnification factors of parameters in profile $B_4 - M_5$

可见斜坡体破坏的主控因素是水平和竖直拉裂的耦合作用,并以水平拉裂作用占优,但水平和竖直拉裂作用都是地震纵波产生的.此后,斜坡体便在纵波的作用下进一步破碎,直至后期横波到达后斜坡体在纵横波的耦合作用下发生后期的震荡抛射、碎屑流动(图8d~f)及地震动力作用消失后的破碎斜坡体自稳过程^[10].

2 结论

通过研究,得出以下主要结论:

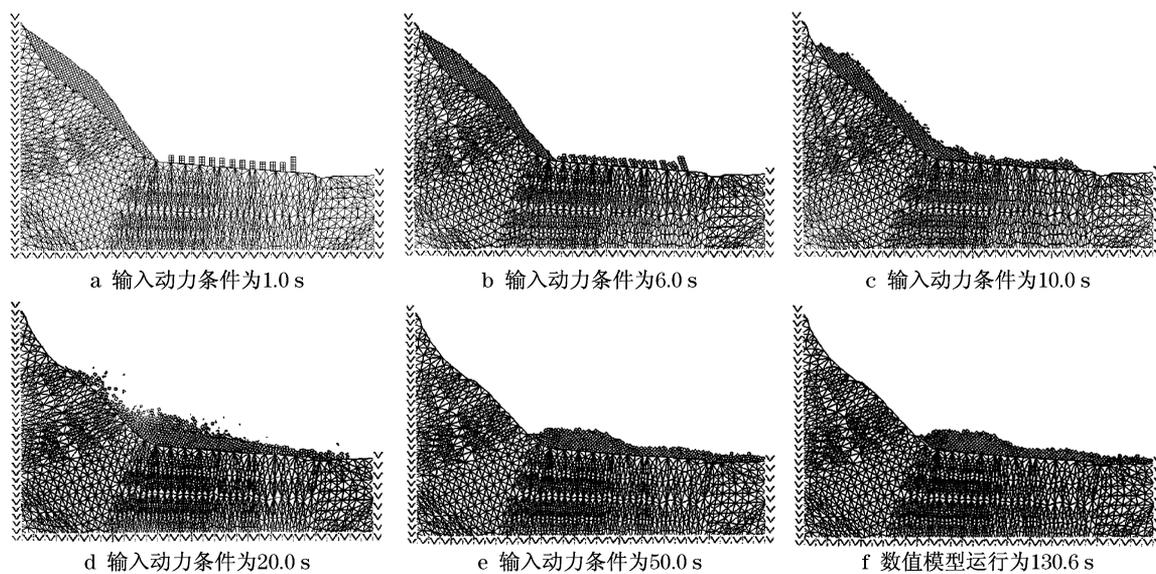


图8 数值模型运行不同时间时对应的单元运动状态

Fig.8 Motion state corresponding to different running time of discrete element model

(1) 由模拟结果知,该斜坡体在地震纵波作用于其7.00 s后坡体后缘即开始破裂,而横波比纵波延迟13.57 s到达斜坡体,故其初期崩滑破坏是受到纵波水平和竖向拉裂的耦合作用,且以水平拉裂作用占优,即斜坡体发生初期崩滑破坏的主控因素是

地震纵波的个体作用.在斜坡体破裂后,其后期的抛射及流动过程则是受到地震纵横波的耦合作用所致.

(2) 地震纵波产生的水平和竖向拉裂的耦合作用是触发斜坡体产生初期崩滑破坏的主控因素,而

斜坡所处地形(如高程差、沟谷延伸方向)则是促使破坏后的斜坡体形成后续碰撞解体及碎屑运动过程的控制诱发因素。

(3) 地震作用下斜坡体动力响应特征值的放大效应表明,其放大系数值从大到小依次是:竖向加速度>水平加速度>水平速度>竖向速度,且放大系数值与坡高成正比增长关系.该结果与斜坡体发生初期崩滑破坏的形成机制及主控因素相符合,即地震纵波产生的水平速度起到了优势破坏作用。

以上结论为建立地震动力作用触发斜坡崩滑破坏主控因素的早期识辨技术体系的建立提供了理论依据和参考。

参考文献:

- [1] 李忠生. 国内外地震滑坡灾害研究综述[J]. 灾害学, 2003, 18(4): 64.
LI Zhongsheng. The state of the art of the research on seismic landslide hazard at home and abroad [J]. Journal of Catastrophology, 2003, 18(4): 64.
- [2] 祁生文, 伍法权, 严福章, 等. 岩质边坡动力反应分析[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
QI Shengwen, WU Faquan, YAN Fuzhang, et al. Rock slope dynamic response analysis[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [3] 殷跃平. 汶川八级地震地质灾害研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(4): 433.
YIN Yueping. Research on the geo-hazards triggered by Wenchuan Earthquake, Sichuan [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(4): 433.
- [4] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 1988.
HU Yuxian. Earthquake engineering [M]. Beijing, Seismological Publishing House, 1988.
- [5] 郑颖人, 叶海林, 黄润秋. 地震边坡破坏机制及其破裂面的分析探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1714.
ZHENG Yingren, YE Hailin, HUANG Runqiu. Analysis and discussion of failure mechanism and fracture surface of slope under earthquake [J]. Chinese Journal of Rock and Engineering, 2009, 28(8): 1714.
- [6] 殷跃平. 汶川地震地质与滑坡灾害概论[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
YIN Yueping. Introduction of seismic geology and landslide hazard triggered by Wenchuan Earthquake [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009.
- [7] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
ZHOU Weiyuan. Higher rock mechanics[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Publishing House, 1990.
- [8] 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, 1993.
ZHANG Zhuoyuan, WANG Shitian, WANG Lansheng. Analytical theory of engineering geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.
- [9] 胡光韬. 滑坡动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
HU Guangtao. Dynamic landslide [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995.
- [10] 毛彦龙, 胡光韬, 毛新虎, 等. 地震滑坡启程剧动的机理研究及离散元模拟[J]. 工程地质报, 2001, 9(1): 74.
MAO Yanlong, HU Guangtao, MAO Xinhui, et al. Mechanism of set-out violent-slide of slope mass during earthquake and its simulation by using discrete element method [J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(1): 74.
- [11] 祁生文, 伍法权, 刘春玲, 等. 地震边坡稳定性的工程地质分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2792.
QI Shenwen, WU Faquan, LIU Chunling, et al. Engineering geology analysis on stability of slope under earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2792.
- [12] 崔芳鹏. 地震 P-S 波时差耦合作用的斜坡崩滑效应研究[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2009.
CUI Fangpeng. Study on collapsing and sliding response of slope triggered by single and combined action with time difference of P and S seismic waves [D]. Beijing: Chinese Academy of Science, Institute of Geology and Geophysics, 2009.
- [13] 崔芳鹏, 胡瑞林, 殷跃平, 等. 纵横波时差耦合作用的斜坡崩滑效应离散元分析——以北川唐家山滑坡为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 319.
CUI Fangpeng, HU Ruilin, YIN Yueping, et al. Discrete element analysis of collapsing and sliding response of slope triggered by time difference coupling effects of P and S seismic waves—taking Tangjiashan landslide in Beichuan county for example [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 319.
- [14] 崔芳鹏, 殷跃平, 许强, 等. 地震纵横波时差耦合作用的斜坡崩滑响应研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(8): 1266.
CUI Fangpeng, YIN Yueping, XU Qiang, et al. Collapsing and sliding response of slopes triggered by single and combined action with time difference of P and S seismic waves [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(8): 1266.
- [15] 殷跃平. 汶川八级地震滑坡特征分析[J]. 工程地质学报, 2009, 17(1): 29.
YIN Yueping. Features of landslides triggered by the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(1): 29.
- [16] 许强, 黄润秋. “5·12”汶川大地震诱发大型崩滑灾害动力特征初探[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 721.
XU Qiang, HUANG Runqiu. Kinetics characteristics of large landslides triggered by “5·12” Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6): 721.