

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2016.04.05

基于离散元数值模拟的四川薛城南沟 滑坡形成机制分析

古德章¹,王运生¹,杨青²,申通¹,贺建先¹,顾金¹

(1. 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;
2. 成都理工大学商学院,四川成都 610059)

摘要: 根据南沟滑坡的地质背景及堆积体工程地质特征,结合离散元数值模拟技术,分析南沟滑坡的失稳类型及其成因机制。研究得出如下结论:(1)地震波在经过地形效应放大后,斜坡滑源区竖直峰值加速度 PGA 最大放大 5.1 倍,水平峰值加速度 PGA 最大放大 3.97 倍。(2)运用离散元数值模拟技术,验证了该斜坡体在地震力作用下的滑坡类型为拉裂—溃滑型。(3)在强震作用下,地震波在坡体内不连续结构面处会发生透射和反射现象,从而导致岩体沿层面发生震动溃裂破坏,形成潜在统一滑面,并伴随有坡体的松弛、甚至解体;在强震持续作用下,坡体沿滑面产生整体的溃滑,形成滑坡。

关键词: 地震滑坡;形成机制分析;离散元数值模拟

中图分类号: P642

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2016)04-0024-07

Discrete element simulation analysis of formation mechanism of Nangou landslide in Xuecheng city

GU Dezhang¹, WANG Yunsheng¹, YANG Qing², SHEN Tong¹, HE Jianxian¹, GU Jin¹

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,
Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Business College,
Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: According to the deposit of Nangou landslide's geological background and its accumulation body engineering geology features, combined discrete element numerical simulation, analysis Nangou landslide's instable type and genetic mechanism. Through the research and analysis, we can get conclusions as follows: First, seismic wave shows that slope sliding source area of the vertical peak acceleration PGA magnify 5.1 times, horizontal peak acceleration PGA magnify 3.97 times after enlarged terrain effect. Second, using discrete element numerical simulation technology to validate the landslide types of slope body under earthquake force is cracking-collapse sliding model. Third, under the action of violent earthquake, seismic wave will happen projection and reflection phenomenon in the body of the discontinuous interface, resulting in rock mass crack along the rock surface, forming a unified and potential sliding surface, being accompanied by relaxation of the slope and even collapse. Under the action of earthquake continued, slope produce the overall collapse slide along the slip surface, formation of landslides.

Keywords: earthquake landslide; formation mechanism analysis; discrete element numerical simulation

收稿日期: 2016-03-14; 修订日期: 2016-05-23

基金项目: 中国地质调查局项目(1212011220154); 国家自然科学基金(41072231)

第一作者: 古德章(1990-), 男, 重庆江津人, 硕士研究生, 从事地质工程专业研究。E-mail: goodzhang1990@163.com

针对地震滑坡的类型、形成机制及动力学研究,国内外众多学者展开了深入研究。胡广韬等通过对地震触发滑坡进行大量的调查,提出了“坡体波动震荡加速效应”,认为地震波传播形式不同,对斜坡体产生的效应也不同,进而产生不同的斜坡失稳模式^[1]。王运生等对汶川地震高陡边坡上部或顶部的高位滑坡进行了动力学方面的研究,认为在压缩波的垂直上抛和剪切波的剪切共同作用下,岩体丧失了与下伏基岩的结合,后至的面波经过地形放大效应,将岩体水平斜上抛出^[2]。黄润秋等通过对汶川地震滑坡研究,结合坡体地质结构,将强震触发崩滑灾害的成因机制进行分类,并分析了典型地质灾害的失稳过程,给出了地质力学机制和概念模型^[3]。许强等亦对汶川地震诱发的大型滑坡特征与成因机理进行了研究,论述了汶川地震大型滑坡成因模式,并从不同角度揭示汶川地震触发滑坡的特殊动力特征^[4]。

本文结合现场地质调查,对滑坡堆积体边界条件、结构特征进行了详细的介绍,并对南沟滑坡的形成机制进行了分析。利用离散元模拟条件 UDEC

对滑坡全过程进行了动力分析,并对机制进行了验证。

1 滑坡区工程地质条件

滑坡发生于 2008 年汶川大地震,位于杂谷脑河支流南沟中游,为一典型的深切“V”型河谷,属于中高山斜坡地貌,整体上为一单薄山脊,斜坡坡趾高程为 2 236 m,坡顶高程为 3 247 m,高差达 1 011 m,整体上呈上部陡,中间缓,下部陡的阶梯状,平均坡度约 22°,坡向为 285°,与地震波传播方向相同。

该滑坡平面上呈典型的“圈椅”状,剖面形态呈阶梯状,主滑方向约 285°,整体坡度约 22°。滑体长度约 1 625 m,平均宽度为 940 m,最宽 1 350 m,平均厚度为 20 m,最厚约 35 m,平面面积为 $71.0 \times 10^4 \text{ m}^2$,体积约为 $1\,531 \times 10^4 \text{ m}^3$,属特大型滑坡(图 1、图 2)。

滑坡区出露地层主要为第四系堆积物和志留系茂县群(S_{mx}^4)。第四系堆积物主要为残坡积物和滑坡堆积的松散块碎石土,呈灰色-深灰色,结构较松散;块碎石呈棱角-次棱角状,粒径大致 2~30 cm,最大可

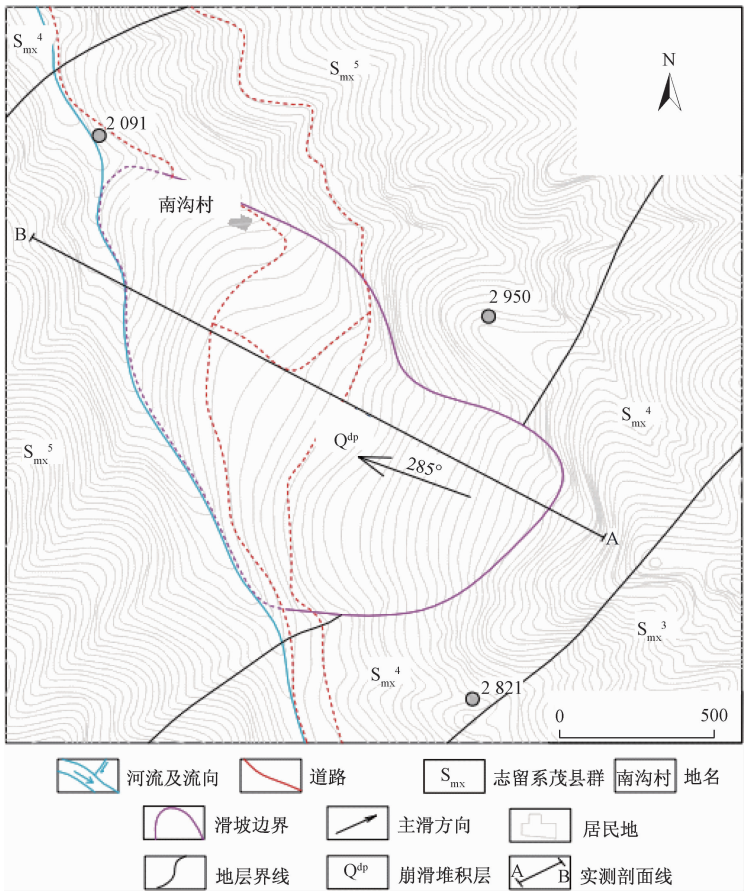


图 1 南沟滑坡工程地质平面图
Fig. 1 Engineering geological plane of Nangou landslide

测斜坡体随时间的变化趋势,设置了一些监测点。

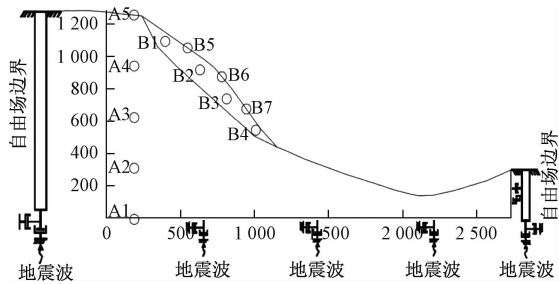


图 3 南沟滑坡数值模型和监测点分布

Fig.3 Numerical model and distribution of monitoring points of Nangou landslide

3.2 材料参数的选取

在离散元数值模型中,滑体部分采用刚体本构模型,滑床采用塑性本构模型以及 M-C 屈服准则。

从调查来看,崩滑体整体由志留系千枚岩碎块石组成,含有石英岩、变质砂岩、泥质灰岩块石。为便于计算和分析,把边坡的地层岩性分为了强风化千枚岩(滑体)和弱风化千枚岩(滑床)两类。结构面分为节理面和岩层面。岩体与结构面的计算参数见表 1、表 2。

表 1 岩体物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of slope rock mass

岩性	天然密度 /(kg/m ³)	黏聚力 /MPa	内摩擦 角/(°)	体积模 量/GPa	剪切模 量/GPa
强风化	2300	6	26.5	1250	576
弱风化	2600	8.2	29	1667	1521

表 2 结构面力学参数

Table 2 Meshanical paramerers of structural plane

结构面	法向刚 度/MPa	切向刚 度/MPa	内摩擦 角/(°)	黏聚力 /(GPa/m)	抗拉强度 /(GPa/m)
节理面	2.12	0.98	31	0.5	0.03
岩层面	2.86	1.81	39	1.32	0.8

3.3 模型边界条件的选取

在静力分析达到平衡后,再对模型在底部采用黏滞边界^[7],两侧采用自由场边界进行动力分析,再进行动力问题分析。在坡体底部施加地震力,为有效减少因反射地震波而损失的能量,底边采用竖向约束,两侧采用水平向约束。

3.4 模型动力条件的输入

加速度代表的地震力荷载不能直接施加于黏滞边界上,将附近地震监测台收集、修正后得到的加速度时程曲线,先利用数值积分的方法转化为相应的速度时程曲线,再利用式(2)转化为相应的应力时程曲线后,最后施加于模型底部进行动力分析^[8]。

$$\sigma_n = -2(\rho C_p) v_n \quad (1)$$

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

其中,

$$C_p = \sqrt{\frac{K + 4G/3}{\rho}} \quad (3)$$

$$C_s = \sqrt{G/\rho} \quad (4)$$

其中,

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\mu)} \quad (5)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (6)$$

式中: σ_n ——法向应力;

σ_s ——剪切应力;

ρ ——介质密度;

C_p ——介质的 P 波速度;

C_s ——介质的 S 波速度;

v_n ——竖直方向的质点速度;

v_s ——水平方向的质点速度;

K ——体积模量;

G ——剪切模量;

E ——介质弹性模量;

μ ——泊松比。

薛城镇南沟离汶川很近,因此本文采用经过相应处理的汶川地震时卧龙台站的地震数据作为输入地震波。滑坡处于Ⅷ度烈度区,对应的峰值加速度 PGA^[9]为 1.5 m/s²,本文将汶川地震波缩小为原来的 0.15 倍,使其水平峰值加速度 PGA 正好为 1.5 m/s²,而竖直峰值加速度则变为 1.05 m/s²(原水平、竖直峰值加速度为 9.85 m/s²、7.00 m/s²)(图 4),将处理后的地震波输入模型底部。

4 数值模拟结果与分析

4.1 最大不平衡力

随时间的增加,最大不平衡力的变化曲线见图 5,可知最大不平衡力在 0~40 s 内波动较大,与输入地震波主波能量持续时间一致,验证数值模拟的合理性,整个动力计算过程经历 160 s。

4.2 加速度放大效应分析

边坡对地震波地形放大效应^[10]是南沟滑坡形成的主要原因。为研究斜坡的动力响应规律,本模拟在斜坡体中布置监测点(图 5),选取 A1~A5 为研究对象。通过对比实测加速度时程曲线,各监测点 PGA 及 PGA 放大系数见表 3, A1, A5 加速度时程曲线(图 6)。

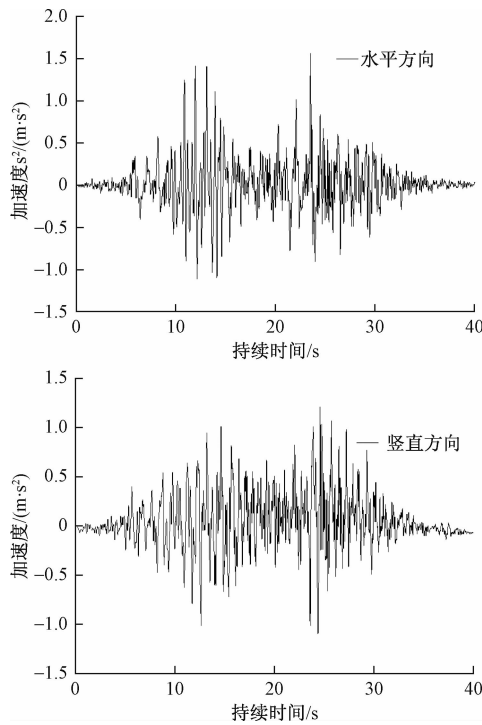


图4 输入地震波加速度时程曲线

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

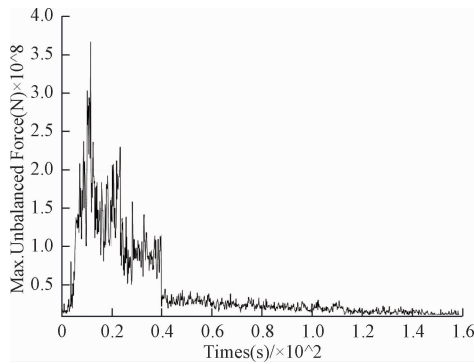


图5 最大不平衡力时程曲线

Fig.5 Time-history curves of the maximum unbalanced force

表3 监测点 A1-A5 加速度峰值 PGA 及放大系数

Table 3 Peak values (PGA) and coefficients of amplification for PGA of monitoring points A1-A5

监测点号 (Monitoring Points)	PGA/(m·s⁻²)		PGA 放大系数	
	水平	竖向	水平	竖向
A₁	-1.63	1.46	1.09	1.39
A₂	2.12	2.00	1.41	1.91
A₃	-3.10	-2.35	2.07	2.24
A₄	-3.93	3.33	2.62	3.17
A₅	5.98	5.35	3.97	5.10

从计算结果可以看出,水平、竖直加速度沿高程都

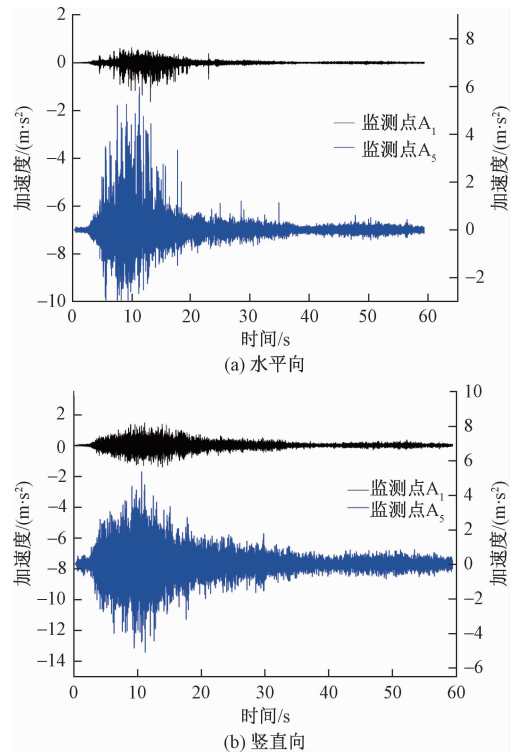


图6 监测点(A1,A5)水平、竖直加速度时程曲线

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

存在显著的放大效应。图7给出了PGA放大系数随高度的变化规律,且接近滑面时,放大系数存在陡增现象^[11]。

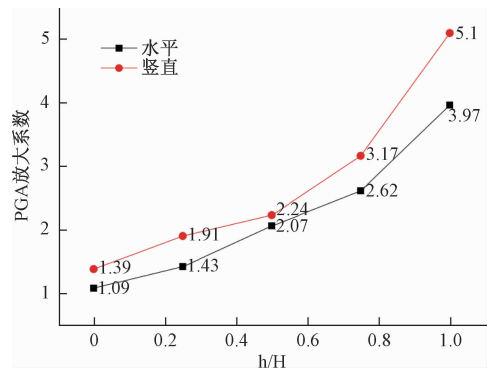


图7 A1-A5 剖面参数放大系数

Fig.7 Magnification coefficients of parameters in profile A1-A5

4.3 斜坡体运动全过程分析

在强震作用下,地震波在坡体内不连续界面处会发生透射和反射现象,从而导致岩体沿层面发生震动溃裂破坏,形成特定的潜在统一滑面,并伴随有坡体的松弛、甚至解体;在强震持续作用下,坡体沿滑面产生整体的溃滑,形成滑坡。

变形累计达到质变后,斜坡就进入到失稳启动阶

段(图8)。运行10.0s时(图8(b)),斜坡后缘已开始发育裂隙,坡脚处块体发生明显错动和明显滑移,滑坡体间的块体出现拉裂;运动20.0s时(图8(c)),在地震波动振荡作用力的持续作用下,坡体获得了一个较大的启动加速度,发生松弛、碎裂的岩土体沿一定的结构面滑动,块体发生大范围的错动,坡顶尤为明显,岩体崩滑形成的崩滑壁已经明显可见。滑体前缘迅速解体,速度增加,沿加速段迅速下滑,由于速度差异,滑体内部碎屑物质块体间相互碰撞,运动状态较紊乱;运行30.0s时(图8(d)),碎屑流^[12]通过陡坡加速区后进入长距离运移阶段。在运移过程中,进一步的碰撞加

速了滑坡体高度碎屑流化。碎屑物质之间相互挤压、碰撞,部分碎屑弹跳爬高,发生跳跃、翻转等,由于碎屑物质间的相互碰撞,导致部分碎屑能量增加和耗尽,最终在沟道中停积下来(证明了该次模拟结果的可靠性);运行40.0s时(图8(e)),碎屑流通过流通区,进入沟道。由于对岸岸坡的阻挡,部分爬高的碎屑流在强烈的碰撞反弹,并获得相反的冲量后折返,与后继下滑的碎屑流相遇并发生碰撞速度迅速降低后,堆积下来,整体滑动基本结束;部分表层岩块被震荡弹落、翻转,进入滑体自稳过程;运行160.0s时,达到稳定状态,滑坡运动结束。

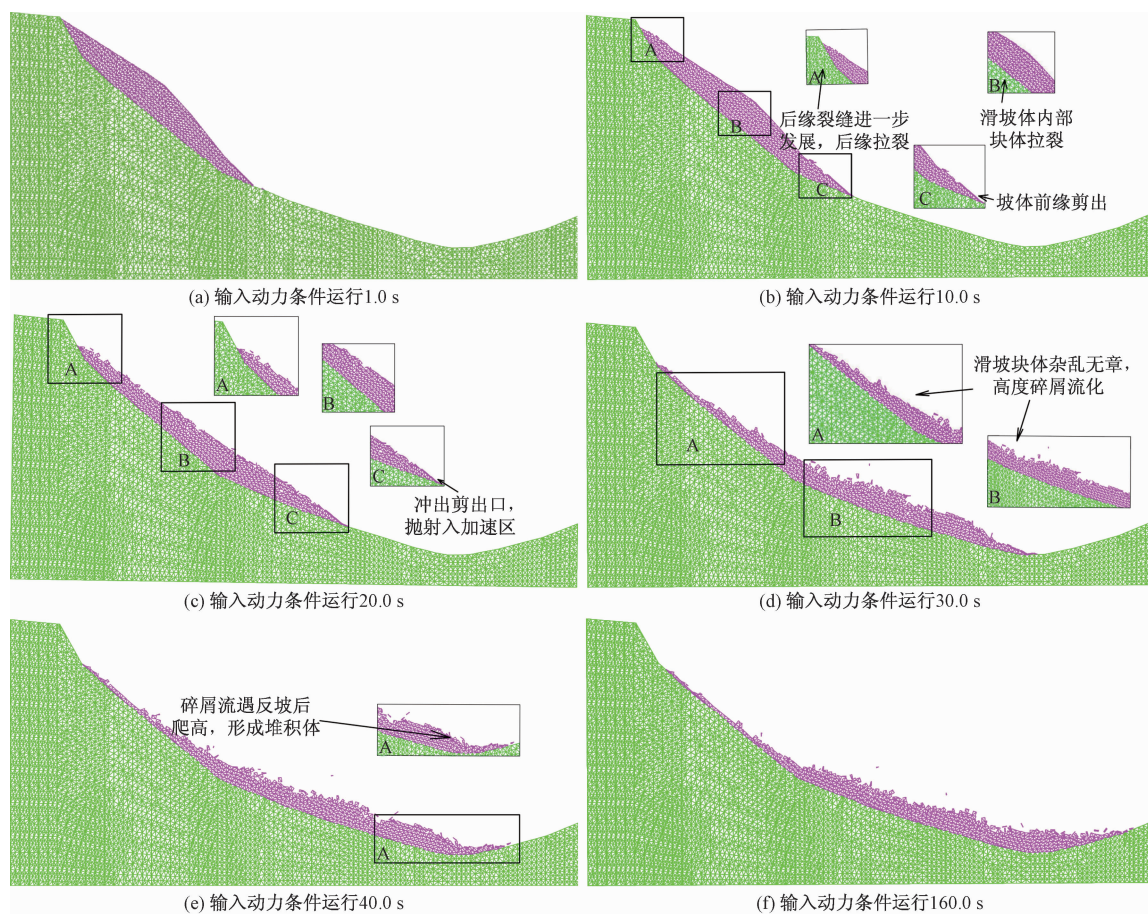


图8 各个时间模拟运行所对应的不同运动状态

Fig.8 Movement states of landslide element an different running states of numerical model

通过以上数值分析,失稳模式为震动拉裂—溃滑型^[13-14]。在强震作用下,地形放大效应明显,坡体震动拉裂、破裂解体、溃滑,进而形成后缘陡峻的拉裂面,下部坡体剪断,形成统一滑面高速下滑。

5 结论

(1)斜坡地形放大效应在强震区是客观存在的。

模拟结果表明,地震加速度沿高程方向具有明显的放大效应,竖直加速度PGA最大放大5.1倍,水平加速度PGA最大放大3.97倍,且加速度放大系数竖向大于水平向。

(2)动力过程:滑坡失稳模式为河谷卸荷,应力重分布——构造强烈,岩体结构面发育——地震作用,岩体累进性破坏——岩体抛出,解体形成滑坡。

参考文献:

- [1] 毛彦龙, 胡广韬. 地震滑坡启程剧动的机理研究及离散元模拟[J]. 工程地质学报, 2001, 9(1): 74-80.
MAO Yanlong, HU Guangtao. 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): 74-80.
- [2] 王运生, 徐鸿彪, 罗永红, 等. 地震高位滑坡形成条件及抛射运动程式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2360-2368.
WANG Yunsheng, XU Hongbiao, LUO Yonghong, et al. Study of formation conditions and toss motion program of high landslides induced by earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11): 2360-2368.
- [3] 黄润秋. 汶川 8.0 级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1239-1249.
HUANG Runqiu. Mechanism and geomechanical modes of landslide hazard triggered by Wenchuan 8.0 earthquake[J]. Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1239-1249.
- [4] 许强. 汶川大地震诱发地质灾害主要类型与特征研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2009, 20(2): 86-93.
XU Qiang. Main types and characteristics of the geohazards triggered by the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2009, 20(2): 86-93.
- [5] 王涛, 马寅生, 龙长兴, 等. 四川汶川地震断裂活动和次生地质灾害浅析[J]. 地质通报, 2008, 27(11): 1913-1922.
WANG Tao, MA Yinsheng, LONG Changxing, et al. Fault activity of the Wenchuan earthquake in Sichuan, China and seismic-secondary geohazards [J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(11): 1913-1922.
- [6] 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]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(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(2): 667-675.
- [7] Lysmer J, Kuhlemeyer R L. Finite dynamic model for infinite media [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1969, 95(4): 859-878.
- [8] 朱爱军. 数值流形方法研究及其在岩土工程中的应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
ZHU Aijun. Study on numerical manifold method and application in geotechnical engineering [D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.
- [9] 许强, 李为乐. 汶川地震诱发大型滑坡分布规律研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 818-826.
XU Qiang, LI Weile. Distribution of larger-scale landslides induced by the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(6): 818-826.
- [10] 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]. Journal of Mountain Science, 2013, 31(2): 200-210.
- [11] 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, 2015, 29(2): 319-327.
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 of example [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 29(2): 319-327.
- [12] Bagnold R A. The flow of cohesionless grains in fluids [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1956, 249(964): 235-297.
- [13] 许强, 董秀军. 汶川地震大型滑坡成因模式[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2011, 36(6): 1134-1142.
XU Qiang, DONG XiuJun. Genetic types of large-scale landslides induced by Wenchuan Earthquake [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2011, 36(6): 1134-1142.
- [14] 李秀珍, 孔纪名. “5·12”汶川地震诱发典型滑坡的类型和特征[J]. 山地学报, 2012, 29(5): 598-607.
LI Xiuzhen, KONG Jiming. Types and characteristics of typical landslides triggered by “5·12” Wenchuan earthquake [J]. Journal of Mountain Science, 2012, 29(5): 598-607.