

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2018.02.10

基于振动台实验的典型滑坡单元体震动滑移特征发现

钱海涛¹, 肖锐铨²

(1. 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085; 2. 国土资源部地质灾害应急技术指导中心, 北京 100081)

摘要: 针对典型滑坡滑动单元在地震过程中的滑移特征, 制作了典型振动台物理模型, 通过输入不同频率、峰值和持时的正弦地震波, 开展了一系列的实验研究工作, 得了一些比较有意义的新成果: (1) 在输入地震波强度足够大时会出现瞬时沿滑带向上的滑移行为, 存在向上和向下两个滑移屈服加速度; (2) 在研究分析中, 不可以坡底输入的地震加速度值而应以滑带处局部加速度值作为判别滑移与否和滑移量大小的计算数据; (3) 滑体沿滑带产生的永久滑移总量随地震波持时增加呈阶梯波状增长; (4) 不同时刻任一周期的振动滑移特征相对独立, 且每一地震波周期时间内具有几乎相同的周期性滑移特征, 总体滑移量是无数周期内滑移量的累加; (5) 在每一地震波周期时间内, 滑体向上和向下的滑移特征受控于相应向上和向下屈服加速度, 其向上和向下滑移矢量和构成每一周期时间内的永久位移。

关键词: 典型地震滑坡滑动单元; 振动台实验; 屈服加速度; 滑移特征

中图分类号: TU411.93

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2018)02-0064-06

New results of the slid characteristics of a typical earthquake landslide model based on shake table tests

QIAN Haitao¹, XIAO Ruihua²

(1. Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China;

2. Consultative Centre for Geo-Hazard Emergency, Ministry of Land and Resources, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to examine the slid characteristics of the typical landslide model triggered by strong earthquakes, physical models for shake tables are created and a series of tests are conducted by inputting sine seismic waves with different frequencies, duration and peaks. The following five interesting findings are obtained from the tests. (1) The slid-body may slide not only downward but also upward along the slid-belt when undergoes a strong shake wave and two yield accelerations (the downward and upward yielding acceleration) exist. (2) The data for slid analysis should be the local acceleration close to the slid-belt other than the acceleration at the bottom of the landslides model. (3) With time growing, the overall displacement of the slid-body along the slid-belt accumulates with the characteristics of the stepped wave in shake-table testes. (4) The slid characteristics of different wave periods are independent of each other and are nearly the same. (5) The slid characteristics of the slid-body are controlled by the downward and upward yielding accelerations and the vector sum of the downward and upward slide displacement along the slid-belt make up the overall permanent displacement in every wave period.

Keywords: typical earthquake landslide model; shake table tests; yield acceleration; slid characters

收稿日期: 2017-08-08; 修订日期: 2017-10-11

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目资助(41202218; 41602323); 中国地震局地壳应力研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项资助(ZDJ2012-17)

第一作者: 钱海涛(1978-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事地震地质灾害研究工作。E-mail: haitao-qian@163.com

地震引发的滑坡灾害早已受到人们的重视并一直是研究的热点,关于其稳定性分析方法,国内外诸多学者进行了大量研究并取得了一系列非常有意义的成果^[1~10]。综合来看,在这些分析方法中,都直接或间接地采纳了一个最基本的模型设定:滑体单元在地震动作用下沿滑带产生滑动,即典型单元滑动模型,如图 1 所示。

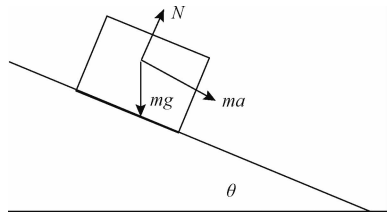


图 1 典型单元滑动模型图

Fig. 1 Typical earthquake landslide model

然而,对于这种典型单元的滑动机理特征,已有研究多是从理论上着手,其人为设置的诸多假设前提可能并不能完全符合实际,不少学者在应用中因此而常存在或多或少的失误,需要切实的实验数据来进行对比分析论证。

为此,本文针对这种滑坡滑动单元在地震动作用下的滑移特征,制作了典型的实体滑动模型,并在振动台上开展了一系列的实验研究工作,取得了一些比较有意义的新成果。

1 振动台模型实验设计

为了尽可能消除外来干扰因素的影响,以对基本模型的地震动力滑移特征有着较为清晰的认识,此次实验几何结构上采用了与图 1 相对应的经典模型,并配以简单规则的正弦波。

1.1 模型几何形态

物理实验模型为单斜面滑块模型,如图 2 和图 3 所示,上部为长方体滑块、下部为滑床、中间薄层为滑带,并设置了缓、中、陡 3 种典型滑带倾角,倾角 θ 分别为 10° 、 20° 和 30° ,对应字母 L、M、H。

1.2 模型材料选取

实验开始前,为确定模型所以材料及其配比,在参考已有相关文献资料^[11~18]的基础上并基于现实情况选取原材料。

滑床物质采用石膏、水泥、铁粉、砂子、水为原料;考虑到预设实验中,滑体物质自身不产生破坏,故采用加钢筋的砂子水泥铁粉;滑带物质采用颗粒为 40~70 目的石英砂和黏土为原料,配置出软、中、硬的 3 种滑

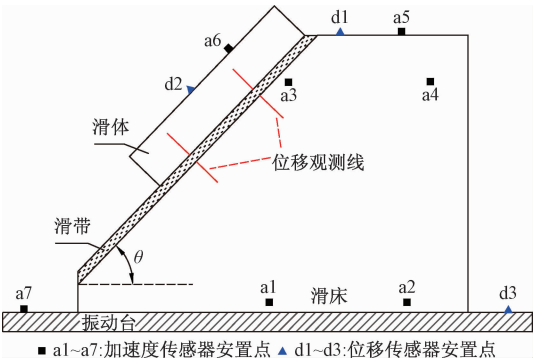


图 2 振动台物理实验模型及监测布置简图

Fig. 2 Layout of physical models and monitoring for the shake table



图 3 滑坡振动台物理实验模型图

Fig. 3 Physical models for the shake table

带材料。通过数十组针对性的配比试验,模型材料最终配比如表 1 所示。

表 1 滑带土材料配比及力学性能

Table 1 Material mixture ratio and corresponding physical and mechanical parameters of the slid-belt

材料构成及配比			对应物理力学性质参数		
			C/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)
黏土:石英砂:水					
滑带	1 软	1.0:1.0:0.4	20.4	9.7	1.95
	2 中	1.0:2.0:1.0	26.7	21.6	2.02
	3 强	1.0:4.0:0.65	3.6	33.7	1.91
滑床	石膏:水泥:铁粉:砂子:水 (2:2:10:2:4:6)		/	/	2.6
滑体	钢筋砂子水泥铁粉		/	/	2.7

1.3 模型工况组合与监测设计

将上述不同角度滑带和不同材质的滑带类型相组合,并排除那些不合实际的组合(因滑带倾角过大同时滑带材料太差,无需动力加载即会产生滑动的组合),共计构建 9 个典型山区地震滑坡工程地质模型,具体见表 2 所示。

如图 1 所示,在振动台物理模型上共布置了 10 个实验监测数据采集传感器:其中模型滑床上不同

高度位置加速度传感器 5 个,为 a1 ~ a5;滑床顶部位移传感器 1 个,编号 d1;滑体上加速度和位移传感器坡度位移传感器各 1 个,分别为 a6 和 d2;在振动台基座上布置了加速度和位移传感器各 1 个分别为 a7 和 d3。此外,还设置 2 条垂直于滑带的红色的位移观测线,以为便于肉眼直观识别滑体相对于滑床的滑动位移。

表 2 模型实验设计概况

Table 2 General design of physical model

物理实体模型		滑带倾角 $\theta/(^{\circ})$	滑带材料	
编号	代号			
模型 1	HH	30	强	3 号
模型 2	HM		中	2 号
模型 3	HL		弱	1 号
模型 4	MH	20	强	3 号
模型 5	MM		中	2 号
模型 6	ML		弱	1 号
模型 7	LH	10	强	3 号
模型 8	LM		中	2 号
模型 9	LL		弱	1 号

1.4 地震动加载方案

实验过程中,为研究地震波频谱特性(频率、持时、峰值)对滑坡稳定性的影响,在模型底部通过振动台输入,输入地震波为不同峰值强度、频率和持时的正弦波。

(1) 地震波强度

对不同滑带材料模型,峰值以 0.05g 为起点,以逐步分级增大的方式施加正弦波,每次增加幅度 0.05g,以研究滑动的屈服加速度及相应位移。

实验过程中,注意控制加载,以尽可能精确地获得滑体向上和向下滑动时对应的屈服加速度。

(2) 地震波持时

若初始加载的 30 s 内无滑移产生或出现较大位移(滑体滑落或接近滑落),则停止加载,转为其他强度和频率的地震波,重新开始实验。

若初始 30 s 内有出现少量滑移,下一步则以 1.2 倍左右强度地震波加载 30 s,若滑体滑落或出现较大位移(接近滑落),则此次实验结束。

若还未滑落,则结合滑移情况(总滑移量、滑移速度、滑带上可供滑移的剩余长度)再次提高地震波强度加载 30 ~ 60 s。

上述过程中,若模型发生破坏并滑体呈大幅度滑动以致落地,则终止该次实验。

(3) 地震波频率

为研究输入地震波频率的影响,依次输入不同频

率的地震波重复上述实验过程,对表 2 中的 9 个模型的每一个,均依次输入频率为 5 Hz、10 Hz、15 Hz 和 20 Hz 四种工况的地震波。

2 基于实验的滑移特征发现

2.1 滑移地震屈服加速度分析

滑移的地震屈服加速度,是多年来研究关注的重点问题之一,基于本次实验数据,有以下发现:

(1) 存在向上和向下两个滑移屈服加速度

输入地震动达到某一数值之后,滑体开始出现滑动,即滑动屈服加速度出现,但在输入地震波强度足够大时,会出现瞬时向上的滑移行为。

以 20°滑带倾角和滑带材料 2 的模型在 0.40g、10 Hz 地震动下滑移过程为例,从其滑体滑移曲线的局部放大图(图 4)中明显可见,滑体永久位移呈阶梯性增加,在总体向下不断滑移的过程中,位移短时间内有所减小。这表明当输入地震动超过某一数值的时候,滑体相对滑床会产生瞬间向上的反向滑移,即出现向上的滑移屈服加速度。

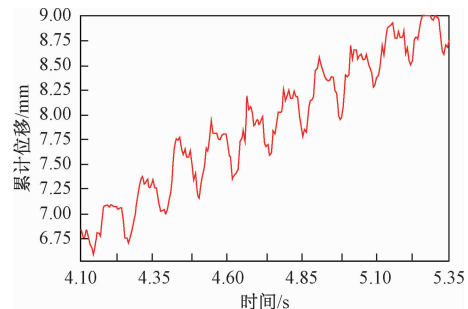


图 4 较大输入加速度时滑动位移曲线局部放大图

Fig. 4 Local enlarged drawing of the displacement under the strong seismic wave

这种现象与理论推测的情形完全吻合,尽管在目前的的研究中,已有学者提出存在这种反向屈服加速的存在,但都停留在理论假设的层次,一直以来缺乏实际资料证实,本次研究首次从模型实验的角度给出了验证。

(2) 屈服加速与输入地震波频率的关系

如果以输入的地震波为参考研究对象,将其对应的屈服加速称为台面输入屈服加速度,根据实验数据发现,开始出现滑移的屈服加速度(台面输入屈服加速度)大小与输入地震波的频率有一定相关性,其随着频率的增加而有所减小,反之随输入地震波频率的减小则有所增大,典型工况记录如表 3 所示。这是目前已有研究未曾发现的现象。

表3 实验所得屈服加速与频率关系对照表

Table 3 Frequencies of input seismic wave and the corresponding yield acceleration in shake table tests

工况	滑带倾角/(°)	滑带材料编号	输入地震频率/Hz	开始滑移时屈服加速度 g	
				台面输入值	滑带附近值
1	20	3	10	0.25	0.29
2	20	3	5	0.27	0.31
3	10	3	10	0.53	0.61
4	10	3	5	0.58	0.62
5	10	1	20	0.60	0.80
6	10	1	15	0.64	0.79
7	10	1	10	0.70	0.81
8	10	1	5	0.75	0.79
9	10	2	20	0.21	0.272
10	10	2	15	0.24	0.267
11	10	2	10	0.25	0.269
12	30	1	5	0.29	0.326
13	30	1	10	0.27	0.328

结合传感器监测数据进一步分析表明,在其他条件相同的情况下,开始产生滑移时,振动台台面输入屈服加速度大小随输入地震波频率的增加而减小,基于表3的实验数据并参考言志信等的研究成果^[19]分析推测,这种现象的出现与坡体相应于不同频率和强度地震波输入下产生的动力放大效应不同有关,其总体形成的结果是,在滑带附近,促使滑体产生滑动的局部加速度(滑带处屈服加速度)相对稳定,即其取决于滑体质量大小、滑带倾角和滑带物理力学性质,而与输入地震波特性无关。

因此,可以得出结论,即在以后的研究分析中,切不可坡底输入的地震加速度大小为基准,来分析斜坡是否产生滑移和滑移量大小,而应以滑带处局部加速度大小作为判别滑移与否和计算滑移量的基准参考值。

2.2 地震滑移特征的动态分析

根据模型实验资料,滑体相对滑床的永久位移具有以下特征规律:

(1)当输入加速度大小超过某一值时(屈服加速度),滑体开始沿滑带产生滑移,随着时间的增加,其位移大小呈阶梯波状不断递增,如图5所示。

(2)进一步分析可见,其在每一正弦波的周期内(图4和图5),位移具有几乎同步的周期性滑移特征,这种周期性的滑移累积就构成了总体呈阶梯状的永久位移。这表明,每一周期时间内的滑动速度不大、周期累积滑移量有限,每一周期内的滑移量大小基本相同,每一周期振动时间结束时,滑体相对滑床运动的速度基本为零,因此不同时刻任一周期的振动滑移特征可

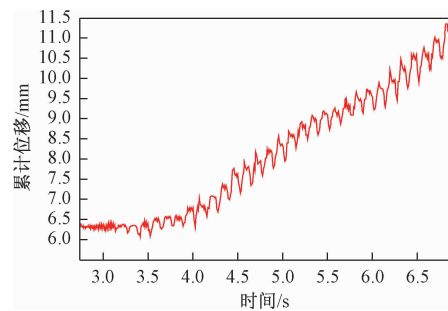


图5 累积位移所呈现的阶梯波状与周期性特征
(模型5、频率10 Hz、峰值0.50g)

Fig. 5 The stepped-wave character of the overall displacement in shake-table tests
(Model 5, 10 Hz and 0.50g)

认为是彼此独立的,总体滑移量是无数周期滑移量的累加。

(3)在输入的地震加速度较大时,在每一正弦波的周期内,滑体在短时间具备相对滑床向上的滑移特性(图4),即每一周期内会产生暂时性的沿滑带向上的滑移,其向上滑移和向下滑移叠加的结果,构成每一周期时间内的永久位移。

在每一周期时间内,当输入加速度超过向下的屈服加速时,滑体相对滑床开始产生向下的滑动,其速度先是逐步增大,随后由于输入加速的减小和反向,其速度逐步减小至零,并在反向加速达到一定值时,开始反向向上滑移。每一周期时间内,其向下永久位移的大小受控于相应向下的屈服加速度,相对反向向上滑移量的大小受控于相应的向上的屈服加速度。

2.3 实验过程中滑体瞬间悬空现象分析

上述地震屈服加速和滑移特征适用的前提条件是:滑体一直与滑带始终保持有效接触不脱离并一直沿滑带滑移。但是在实验过程中还发现,在滑带倾角和输入地震加速度同时较大的“双大”情况下,滑体会由于垂直滑面的分项加速度过大而产生瞬间脱离滑带和滑床的行为,即瞬间的“悬空”行为,滑带物质出现一定程度的破坏,滑体也同时出现一轻微的旋转现象(图6)。

综合分析看来,这或与实验过程中滑体质量不够大有关(不够抵挡垂直滑面的加速度),而实际自然界的大多数滑坡,一般由于滑体够大够重,不易产生这种“悬空”脱离行为。

但是,对于某些坡面很陡、节理切割严重的斜坡,其单块滑体的质量较小,在遭遇强地震动的情况下,则很有可能会出现岩石块体脱离滑带的现象,即出现



图6 伴随悬空出现的滑体旋转和滑带破坏现象

Fig. 6 Rotation of the slid-body and disruption of the slid-belt accompany the suspending in shake table tests

“抛射”或“弹射”现象。这与目前一些学者的野外调查分析结果相一致^[18~20]。本次实验的成果,对这些学者的理论分析研究提供了有力的实验支撑。

3 结论

(1)存在向上和向下两个滑移屈服加速度。输入地震动达到某一数值之后,滑体开始出现向下的滑动,向下屈服加速度出现;在输入地震波强度足够大时,会出现瞬时沿滑带向上的滑移行为,即向上的屈服加速度出现。

(2)在研究分析中,不可以坡底输入的地震加速度大小为基准,来分析斜坡是否产生滑移和滑移量大小,而应充分考虑斜坡结构和岩土体特性对地震波的放大效应,以滑带处局部加速度大小作为判别滑移与否和计算滑移量的基准参考值。

(3)滑体沿滑带产生的永久滑移总量随地震波持时增加呈阶梯波状增长。

(4)在地震波的周期时间内,永久位移具有几乎相同的周期性滑移特征,不同时刻任一周期的振动滑移特征相对独立,总体滑移量是无数周期内滑移量的累加。

(5)在每一地震波周期时间内,滑体均可能出现相对滑床的瞬时向上和向下滑移行为,其滑移特征受控于相应向上和向下屈服加速度,其向上和向下滑移矢量叠加构成每一周期时间内的永久位移。

参考文献:

- [1] Newmark N M. Effects of earthquakes on dams and embankments[J]. Geotechnique, 1965, 15(2):139-160.
- [2] 王思敬. 岩石边坡动态稳定性的初步探讨[J]. 地质科学, 1977, 12(4):372-376. [WANG S J. Preliminary notes on the dynamics stability of rock

slopes [J]. Scientia Geological Sinica, 1977, 12(4):372-376. (in Chinese)]

- [3] Repetto P C, Bray J D, Byrne R J, et al. Seismic analysis of landfills, Progress in geotechnical engineering practice[J]. ASCE Central Pennsylvania Section Hershey, Pa. 1993.
- [4] KRAMER S L, SMITH M W. Modified Newmark model for seismic displacements of compliant slopes [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(7):635-644.
- [5] 辛鸿博,王余庆. 岩土边坡地震崩滑及其初判准则 [J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5):591-594. [XIN H B, WANG Y Q. Earthquake-induced landslide and avalanche [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(5):591-594. (in Chinese)]
- [6] 薄景山,徐国栋,景立平. 土边坡地震反应及其动力稳定性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(2):116-120. [BO J S, XU G D, JING L P. Seismic response and dynamic stability analysis of soil slopes [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(2):116-120. (in Chinese)]
- [7] 李忠生. 地震危险区黄土滑坡稳定性研究[M]. 北京:科学出版社, 2004:104-132. [LI Z S. Research on the stability of loess-landslide in earthquake-prone area [M]. Beijing: Science Press, 2004:104-132. (in Chinese)]
- [8] 祁生文,伍法权,严复章,等. 岩质边坡动力反应分析[M]. 北京:科学出版社, 2007:1-125. [QI S W, WU F Q, YAN F Z, et al. Dynamic response analysis of rock slope [M]. Beijing: Science Press, 2007:1-125. (in Chinese)]
- [9] 刘立平,雷尊宇,周富春. 地震边坡稳定分析方法综述[J]. 重庆交通学院学报, 2001, 20(3):83-88. [LIU L P, LEI Z Y, ZHOU F C. The evaluation of seismic slope stability analysis methods[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2001, 20(3):83-88. (in Chinese)]
- [10] 刘红帅,薄景山,刘德东. 岩土边坡地震稳定性分析研究评述[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(1):164-171. [LIU H S, BO J S, LIU D D. Review on study of seismic stability analysis of rock-soil slopes [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(1):164-171. (in Chinese)]
- [11] 韩伯鲤,陈霞龄,宋一乐,等. 岩体相似材料的研究 [J]. 武汉水利电力大学学报, 1997, 30(2):6-9. [HAN B L, CHEN X L, SONG Y L, et al. Research on similar material of rock mass[J]. Journal

- of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1997, 30(2):6-9. (in Chinese)]
- [12] 左保成,陈从新,刘才华,等. 相似材料试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1805-1808. [ZUO B C, CHEN C X, LIU C H, *et al.* Research on similar material of slope simulation experiment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1805-1808. (in Chinese)]
- [13] 王汉鹏,李术才,张强勇,等. 新型地质力学模型试验相似材料的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1842-1847. [WANG H P, LI S C, ZHANG Q Y, *et al.* Developmrnt of a new geomechanical similar material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineerin, 2006, 25(9): 1842-1847. (in Chinese)]
- [14] 苏伟,冷伍明,雷金山,等. 岩体相似材料试验研究[J]. 土工基础, 2008(5): 73-75. [SU W, LENG W M, LEI J S, *et al.* Test study of similar material in rock m ass[J]. Soil Engineering and Foundation, 2008(5): 73-75. (in Chinese)]
- [15] 董金玉,杨继红,杨国香,等. 基于正交设计的模型试验相似材料的配比试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 31(1): 44-49. [DONG J Y, YANG J H, YANG G X, *et al.* Research on similar material proportioning test of model test based on orthogonal design[J]. Journal of China coal society, 2012, 31(1): 44-49. (in Chinese)]
- [16] 邹威,许强,刘汉香. 大型振动台试验相似材料研究[J]. 山地学报, 2012, 30(4): 497-501. [ZOU W, XU Q, LIU H X. Similar m materials in large-scale shaking table model test [J]. Journal of Mountain Science, 2012, 30(4): 497-501. (in Chinese)]
- [17] 李文杰,葛毅鹏,张芳芳. 基于相似理论的相似材料配比试验研究[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2013, 23(1): 7-12. [LI W J, GE Y P, ZHANG F F. The similar material ratio test based on similarity theory[J]. Journal of Luoyang Institute of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 23(1): 7-12. (in Chinese)]
- [18] 张建,王小群,王兰生,等. 大光包滑坡启动机制的物理模拟试验[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(3): 58-62. [ZHANG J, WANG X Q, WANG L S, *et al.* Physical simulation on the formation mechanism of the Daguangbao landslide [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(3): 58-62. (in Chinese)]
- [19] 言志信,张学东,张森,等. 基于双向地震作用下边坡共振特性与固有频率研究[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(3): 46-51. [YAN Z X, ZHANG X D, ZHANG S, *et al.* Study on resonance characteristics and natural frequency of slope under bi-directional seismic action [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(3): 46-51. (in Chinese)]
- [20] 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): 433-44. [YIN Y P. Researches on the geo-hazards triggered by Wenchuan earthquakes, Sichuan [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(4): 433-44. (in Chinese)]
- [21] 孙萍,张永双,殷跃平,等. 东河口滑坡-碎屑流高速远程运移机制探讨[J]. 工程地质学报, 2009, 17(6): 737-744. [SUN P, ZHANG Y S, YIN Y P, *et al.* Discussion on long run-out sliding mechanism of Donghekou landslide-debris flow [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(6): 737-744. (in Chinese)]
- [22] 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, 2011, 29(5): 598-607. [LI X Z, KONG J M. Types and characteristics of typical landslides triggered by “5. 12” Wenchuan earthquake[J]. Journal of Mountain Science, 2011, 29(5): 598-607. (in Chinese)]

责任编辑:张明霞