

# 地震荷载作用下陡倾角顺层开挖斜坡的变形破坏模型试验

阿发友<sup>1</sup>, 孔纪名<sup>2</sup>, 倪振强<sup>2</sup>

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院地科系, 昆明 650093; 2. 中国科学院 成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

**摘要:**在汶川地震灾区, 顺层陡倾斜坡是一类地震山地灾害非常发育的斜坡类型, 而开挖往往加剧了斜坡的地震山地灾害。为了重现斜坡的变形破坏过程, 分析斜坡在地震荷载作用下的变形破坏规律。选取平武县平通镇桑树坪滑坡所处斜坡作为顺层陡倾角开挖损伤斜坡的典型实例, 进行地震荷载作用下变形破坏的室内物理模型试验。结果表明, 开挖加剧了斜坡在地震荷载作用下的变形破坏。从破坏形式来看, 顺层陡倾斜坡的坡变形破坏兼具崩塌和滑动二者特征, 与野外调查结果吻合。从整个变形破坏过程来看, 可以划分为以下阶段: a. 地震初始阶段, 此阶段开挖呈楔形体岩层在地震作用下沿层面微小滑动, 坡脚应力剧增; b. 开挖岩层坡脚溃曲阶段; c. 全面下滑阶段; d. 岩层滑动受阻—倾倒阶段。

**关键词:**顺层陡倾斜坡; 开挖; 地震荷载; 变形破坏; 模型试验

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1674-4764(2012)S1-0155-06

## Deformation and Failure Model Test of Steep Dip Excavation Bedding Slope under the Action of Seismic Load

A Fayou<sup>1</sup>, KONG Jiming<sup>2</sup>, NI Zhenqiang<sup>2</sup>

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, P. R. China;

2. Institute of mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, P. R. China)

**Abstract:** In the Wenchuan earthquake, steep dip bedding slope is a kind of slope that seismic mountain disaster very development and the slope earthquake disaster is often exacerbated by the excavation. In order to reproduce the process and analysis regularity of slope deformation and failure under the action of seismic load. The author chooses San Shuping landslide located Pingwu County as the typical examples of steep dip excavation damage bedding slope, and the indoor physical model test of slope deformation and failure under the action of seismic load are carried out. The results show that slope deformation and failure is intensified by the excavation. Collapse and sliding is the main form of failure and the results consistent with the field investigation. From the whole process of deformation and failure of view, it can be divided into the four stages. First, the initial phase of the earthquake. A wedge rock by excavation small slides along the rock layers and the slope toe stress increase sharply under the action of seismic load in this stage. Second, rock layers by excavation break-bend at slope toe. Third, the rock layers by excavation overall decline stage. Last, the rock slide blocked and dumping.

**Key words:** steep dip bedding slope; excavation; seismic loading; deformation and failure; model test

众所周知, 全球范围内沉积岩分布面积约占 75%, 层状岩质地层分布广泛。层状岩质地层的大面积分布, 也将意味着山区公路、水电等大量工程建设将与层状岩质斜坡的开挖密不可分。工程开挖将严重破坏层状岩质地层的连续性和完整性, 造成斜坡应力重新分布。同时, 开挖改变斜坡形态, 影响斜坡的地震动响应。就汶川地震灾区而言, 地震引发了大量的山地灾害<sup>[1-5]</sup>, 层状岩质斜坡成为山地灾害爆发范围最广、数量最多的地区。据调查统计, 在汶川地震引发的 136 处典型滑坡中, 顺层斜坡共计 63 处。其中岩层倾角大于 45° 的陡倾角斜坡 21 处, 占 35.4%。在 21 处陡倾角斜坡中, 开挖斜坡共计 15 处, 占顺层陡倾斜坡总量的 71.9%。可见,

开挖对顺层陡倾斜坡在地震荷载作用下的变形破坏的影响是很显著的。在野外地震灾区现场, 看到的仅仅只是斜坡的最终变形破坏情况, 只能依据一些现存的现象来推断整个斜坡的变形破坏过程, 推断具有一定的主观因素。因此, 进行斜坡变形破坏的室内地震动模型试验, 重现斜坡在地震荷载作用下的变形破坏过程和规律, 对提高斜坡在地震荷载作用下的变形破坏的认识, 以及斜坡治理设计中的动力可靠性设计都具有很大的理论和实际意义。

顺层斜坡由于稳定性较差, 滑坡等灾害发生较多, 因此一直以来受到人们的关注, 对其变形破坏的研究也较多。从破坏模式、力学分析、破坏机理、发育环境、影响因素、开挖松

地区、模型试验及地震条件下的变形破坏均有不同程度的研究工作<sup>[1-18]</sup>。从整个研究内容来看,顺层斜坡变形破坏机理的研究已经很多,但是把倾角大于 45°的陡倾角顺层斜坡作为研究对象,把开挖作为一个影响斜坡变形破坏的因素,进行震荷载作用下斜坡变形破坏的物理模型试验研究较为稀少。因此,笔者把平武县平通镇桑树坪滑坡作为陡倾角顺层斜坡典型实例,把开挖作为一个影响斜坡变形破坏的因素,进行震荷载作用下斜坡变形破坏的物理模型试验研究,重现斜坡在地震荷载作用下的变形破坏过程,分析其变形破坏规律。

镇桑树滑坡是 5.12 地震引发的滑坡,为顺层崩滑型滑坡。滑坡区地层岩性为志留系茂县群( $S_{mx}^2$ )灰色绢云母千枚岩,基岩裸露,中等-弱风化,岩层产状  $323^\circ \angle 70^\circ$ 。斜坡自然坡度  $43^\circ$ ,岩层倾角  $>$  斜坡坡度。公路从斜坡中部穿过,开挖高大约 20 m,开挖坡度约  $75^\circ$ ,与岩层倾角接近。

## 1 模型设计

### 1.1 相似性原理

根据相似准则<sup>[19]</sup>,在通过模型试验进行滑坡的物理过程或力学性质的研究时,物理量的相似主要是指一般几何相似、动力学相似以及运动学相似三类(其中一般几何相似即初等几何学相似,它的物理量量纲通常只取长度单位)。结合物理系统各类相似的特点,三者的地位、意义可以这样加以描述,即任二系统,如果在几何学、动力学和运动学上都达到了相似,则该二系统的性能相似。其中,几何学相似较易通过人为的努力实现,而运动学相似又是随着几何学相似和动力学相似而得到表现的。因此,三类相似中动力学相似是关键。凡是在几何相似条件下由动力学相似获得的解,理应满足运动学相似。

依据以上原则,在本次模型试验中,主要采用斜坡的几何相似及动力过程相似为基本条件。即坡度、坡形、结构面倾角、开挖后的斜坡结构以及添加的动力等基本相似。由于对原型物质特性认识程度的限制,包括原型物质特性参数值的选用标准问题等,模型材料与原型物质之间实现完全相似是很困难的,甚至是不可能的,导致模型试验结果与原型的破坏结果在量上很难达到一致。因此,本次模型试验以规律

的相似性为基本准则。试验要求模型所用材料具有高容重、低强度和低弹模的特性。这一认识出发,岩体材料利用水泥、石英砂、粉质黏土和水进行配置。各种材料质量百分比如表 1 所示,表 2 为最终模型材料的物理力学参数。

表 1 试验材料配比 %

材料	水泥	石英砂	粉质粘土	水
含量	2.2	60.6	32	5.2

表 2 模型材料的物理力学参数

含水量/ %	内摩擦角 $\varphi$	内聚力 $c$	$E_s$ / MPa	$\mu$	$r$ / ( $g \cdot cm^{-3}$ )	比重 $G_s$
5.2	29	21	5.26	0.2	2.15	2.71

### 1.2 模型制作

结构面采用分层碾压,层与层之间利用报纸作为接触面,其层间摩擦系数为 0.2。岩层层厚 20~30 cm,模型如图 1 所示。分开挖和无开挖两个模型。

本次模型试验所输入的地震波参数均相同,表 3 给出了地震波参数等各种试验工况信息。图 2 为所输入地震波的水平向和垂直向加速度时程曲线,最大水平加速度为 0.088 g,相当于基本烈度为 7 度地震。

测试内容以测试坡面位移为主,以最能代表斜坡变形破坏的参数为测试对象。主要利用全站仪对固定观测点进行位移观测,固定点间距 15~20 cm,局部加密。同时,利用蛇尺具有类似记忆材料的特性(变形后不反弹),在斜坡竖直方向上埋设蛇尺,每隔 5~8 cm 黏贴应变片进行相对微应变观测。具体布置见图 1。

表 3 试验工况

斜坡类型	震动频率 /Hz	$A_{X_{max}}$ /g	$A_{Y_{max}}$ /g	采样率 /Hz
顺层陡倾 ( $<45^\circ$ )	5.5	0.088	0.066	1 000

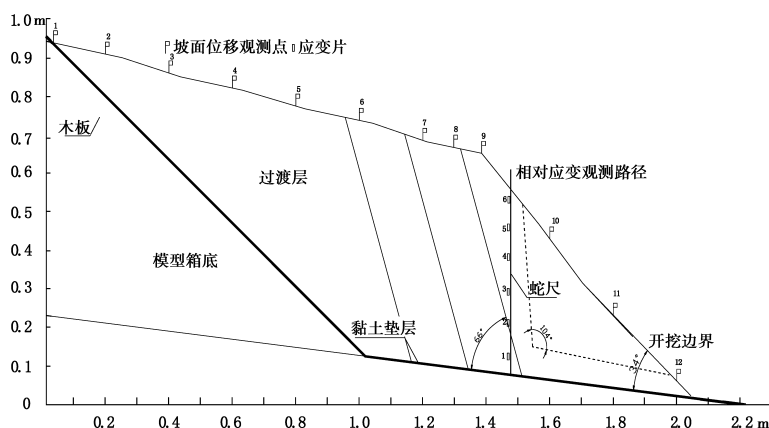


图 1 试验的物理模型示意图

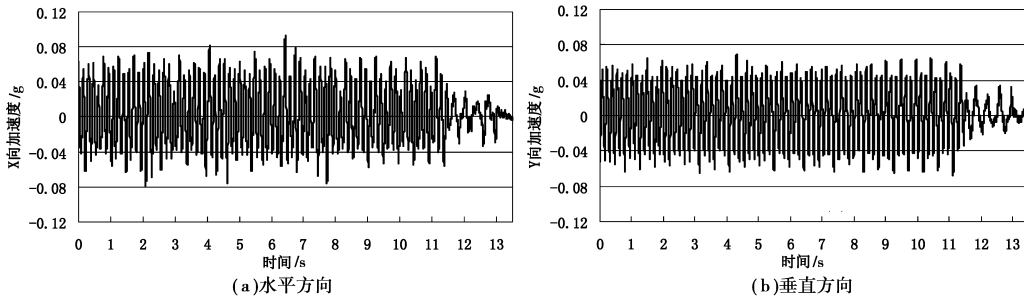


图 2 试验输入地震波的加速度时程曲线

## 2 试验结果分析

### 2.1 静态条件下开挖前后变形破坏分析

在分析静态条件下开挖前后斜坡的变形特征时,对开挖前后 1~7 号(见图 1)地表位移观测点进行了位移监测,同时对埋设的相对应变观测路径进行微应变监测。观测结果表明,开挖后水平向位移在开挖面附近具有增大的趋势,这与顺层中—缓倾斜坡的不同。而竖直向位移开挖后在开挖面附近增大,与顺层中—缓倾斜坡的类似。图 3 为开挖前后 1~6 号应变片的变化曲线,从图可以看出,开挖后微应变增大主要位于开挖坡脚附近,即 3 号应变片位置。此位置刚好接近开挖岩层楔形体尖端部位,最有利于发生溃曲破坏,为应力集中区。在静态条件下,开挖前后坡体无裂缝,未发现宏观变形,整体上保持稳定状态。

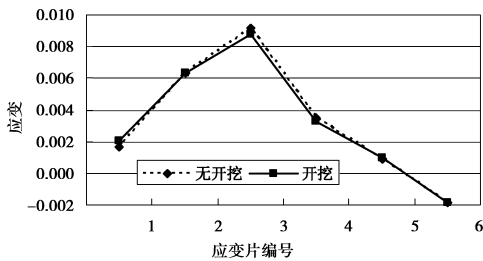


图 3 静态条件下开挖前后应变观测路径变化

### 2.2 地震条件下开挖前后变形破坏分析

在分析地震条件下开挖前后斜坡的变形特征时,对开挖

前后 1~5 号(图 1)地表位移观测点进行了位移监测,对埋设的相对应变观测路径进行微应变监测。同时,对地震前后的坡体做剖面测量,以便记录不同阶段的地貌变化。

表 4 无开挖条件下地震前后观测点坐标 m

观测点	竖向坐标		水平向坐标	
	无开挖	开挖	无开挖	开挖
1	0.847 4	0.832 4	0.453 3	0.455 3
2	0.822 4	0.814 4	0.611 3	0.607 3
3	0.780 4	0.773 4	0.749 3	0.750 3
4	0.731 4	0.724 4	0.929 3	0.929 3
5	0.696 4	0.690 4	1.101 3	1.077 3
6	0.648 4	0.642 4	1.272 3	1.267 3
7	0.611 4	0.606 4	1.485 3	1.476 3
8	0.563 4	0.555 4	1.682 3	1.674 3
9	0.533 4	0.526 4	1.877 3	1.867 3
10	0.350 4	0.347 4	2.061 3	2.054 3
11	0.197 4	0.195 4	2.296 3	2.289 3
12	0.059 4	0.057 4	2.410 3	2.373 3

表 4 为无开挖条件下地震前后观测点的坐标测量值。从表可以看出,地震后斜坡水平向和竖直向均发生了微小位移。图 4 为依据测量坐标所得到的地形剖面,从图可以看出,地震后斜坡整体具有向坡体临空方向的位移,与顺层中—缓倾斜坡的类似。在宏观变形上,地震条件下无开挖斜坡未见沿层面滑动,整体上稳定。但是在坡顶顶部岩层层面出露位置出现横向裂缝(见图 5)。

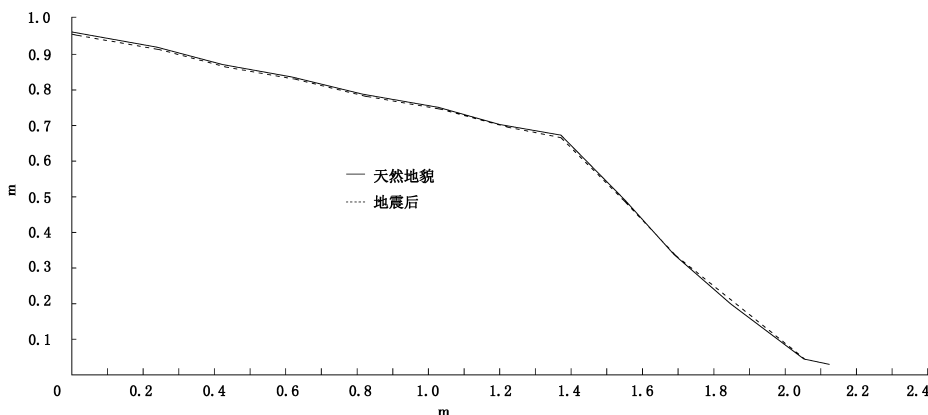


图 4 无开挖条件下地震前后地形剖面

表 5 为开挖条件下地震前后坡体剖面坐标测量结果。图 6 为依据测量坐标所得到的地形剖面,从图可以看出,地震后地形发生了巨大变化,主要是由于斜坡在开挖后的地震过程中变形失稳。在整个地震过程中,坡体上开挖呈楔形体的岩层发生崩滑(见图 7)。崩滑发生在地震第 1 秒,破坏过程短暂。其变形破坏过程首先沿层面向下滑动,然后坡脚开挖变薄岩层发生溃曲破坏,岩层在继续向下滑动中滑动受阻,最后发生倾倒。

表 5 开挖条件下地震前后观测点坐标 m

观测点	水平向坐标		竖向向坐标	
	无开挖	开挖	无开挖	开挖
1	0.722 3	0.353 3	0.030 4	0
2	0.780 3	1.006 3	0.386 4	0.369 4
3	0.928 3	1.102 3	0.537 4	0.567 4
4	1.068 3	—	0.556 4	—
5	1.269 3	1.267 3	0.608 4	0.609 4
	1.481 3	1.477 3	0.644 4	0.643 4
非固定	1.676 3	1.678 3	0.692 4	0.692 4
观测点	1.866 3	1.864 3	0.725 4	0.725 4
	2.293 3	2.292 3	0.815 4	0.814 4

从以上宏观变形分析可以看出,开挖损伤岩层发生了变形破坏,开挖对地震荷载作用下顺层陡倾斜坡的变形破坏影响很大。为了进一步分析开挖对斜坡变形破坏的影响,对开挖前后地震条件下 1~5 号地表位移观测点进行观测。图 8 为开挖前后水平向和竖向位移曲线。从图可以看出,地震条件下开挖前后水平向位移基本无变化,竖向位移也很小。由于此 5 个观测点均位于非开挖岩层上,说明开挖对陡倾角顺层斜坡的影响范围有限,变形破坏只发生于开挖损伤岩层范围。



图 5 无开挖斜坡地震条件下坡顶裂隙分布照片

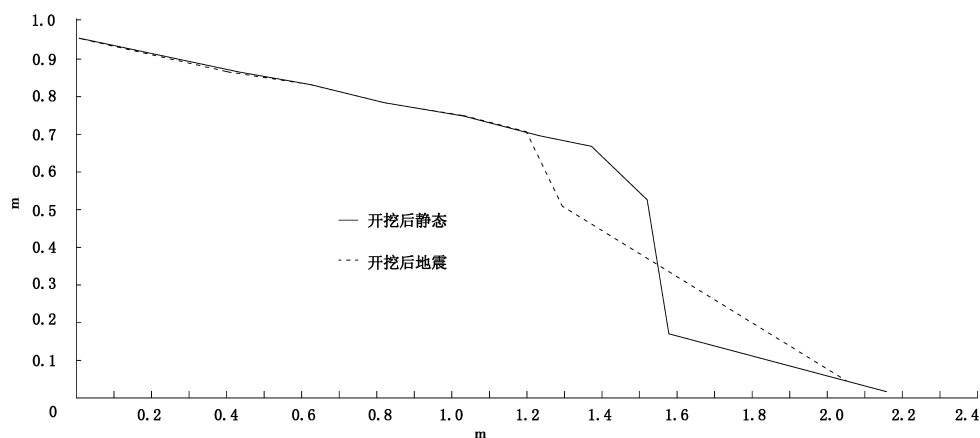


图 6 开挖条件下地震前后地形剖面



图 7 开挖楔形层面发生崩滑

从相对应应变观测路径(图 9)可以看出,相对应应变观测路径在开挖岩层层面位置发生严重弯曲,说明开挖损伤岩层曾经发生较大滑动或变形。图 10 为地震条件下 1~3 号应变片在开挖前后的最终应变变化曲线,可以看出开挖后应变明显增大。

从以上分析可以看出,无论是宏观变形还是定量观测,都说明了开挖对顺层陡倾角斜坡在地震荷载作用下变形破坏的影响是很大的。从整个地震过程的变形破坏特征来看,可以将顺层陡倾角开挖斜坡的变形破坏过程划分为以下阶段,如图 11 所示。

(a)地震初始阶段。此阶段开挖呈楔形体岩层在地震作用下沿层面微小滑动,坡脚应力剧增。

(b)开挖岩层坡脚溃曲阶段。随着地震的持续,坡脚开挖岩层变薄部位无力支撑上部岩体重量,在坡脚附近发生溃

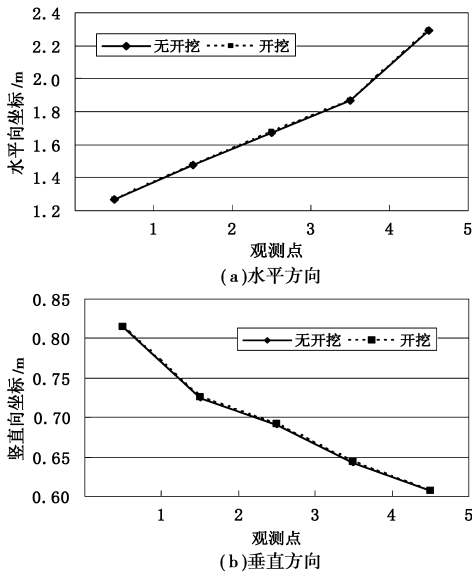


图 8 地震条件下开挖前后地表位移变化曲线



图 9 埋设的应变路径变形照片

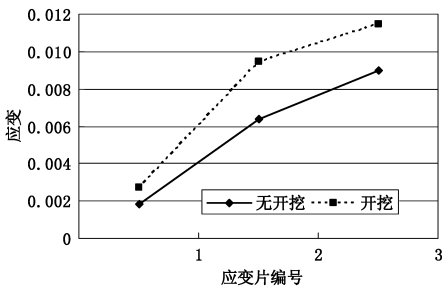


图 10 开挖前后斜坡内各应变观测点微应变大小曲线

曲破坏。

(c) 全面下滑阶段。此阶段由于开挖岩层坡脚已经发生溃曲破坏,在地震作用下岩层全面开始下滑。

(d) 岩层滑动受阻—倾倒阶段。岩层在下滑过程中滑动受阻,同时巨大的竖直向下加速度促使下滑岩层向临空方向倾倒,岩层解体碎裂。

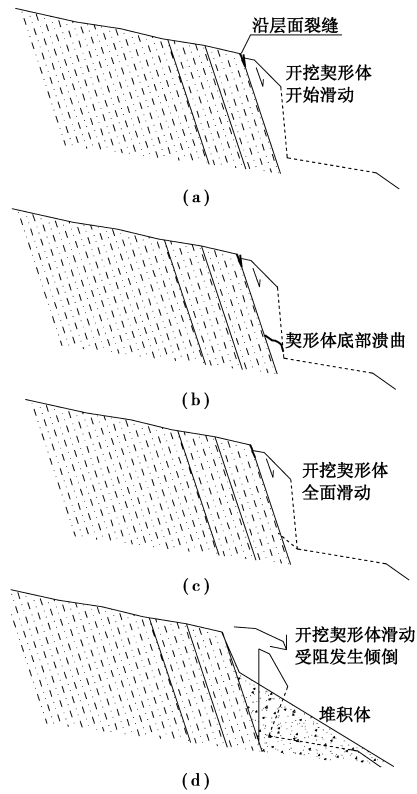


图 11 陡倾角顺层开挖斜坡在地震过程中的变形破坏过程

### 3 结论

笔者选取平武县平通镇桑树坪滑坡所处斜坡作为顺层陡倾角开挖斜坡的典型实例,对其进行了地震荷载作用下变形破坏的室内物理模型试验。结果表明:

1) 开挖对顺层陡倾角斜坡在地震荷载作用下变形破坏的影响是很大的,对斜坡稳定不利。无论是宏观变形还是定量观测结果,均表明开挖加剧了斜坡的变形破坏。

2) 地震荷载作用下顺层陡倾角开挖斜坡的变形破坏具有独特性。从破坏形式来看,兼具崩塌和滑动二者特征。从整个变形破坏过程来看,可以划分为以下阶段:地震初始阶段(此阶段开挖呈楔形体岩层在地震作用下沿层面微小滑动,坡脚应力剧增)—开挖岩层坡脚溃曲阶段—全面下滑阶段—岩层滑动受阻—倾倒阶段。

总之,地震荷载作用下斜坡变形破坏的模型试验研究是提高对斜坡变形破坏机理认识的一个途径,同时可以为斜坡的抗震设计提供理论支持。但是,斜坡在地震荷载作用下的变形破坏是一个复杂的过程,笔者主要研究陡倾角斜坡在开挖和无开挖两个状态下的变形破坏,模型中结构面只考虑了岩层层面,模型简化较多。斜坡作为一个地质体,结构类型多样,内部结构复杂,需要进一步开展研究工作。

#### 参考文献:

[1] Li Y F, Wang Z Y, Shi W J, WANG Xuzhao. Slope Debris Flows in the Wenchuan Earthquake Area[J]. Journal of Mountain Science, 2010, 7(3): 226-233.

- [2] Cui P, Zhu Y, Han Y, et al. The 12 May 2008 Wenchuan Earthquake lakes: distribution and preliminary risk evaluation [J]. Landslides, 2009, 6(3):209-223.
- [3] Huang R Q, Li W L. Development and distribution of geo-hazards triggered by the 5. 12 Wenchuan Earthquake in China [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(4):810-819.
- [4] Huang R Q, Li W L. Analysis of the geo-hazards triggered by the 12 May 2008 Wenchuan Earthquake, China [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2009, 68 (3): 363-371.
- [5] Qiang X, Fan X M, Huang R Q, et al. Landslide dams triggered by the Wenchuan Earthquake, Sichuan Province, south west China [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2009, 68(3): 373-386.
- [6] 任光明. 顺层坡滑坡形成机制的物理模拟及力学分析 [J]. 山地研究, 1998, 16(3): 182-187.  
REN Guangming. The Physical Simulation and Mechanical Analysis on Landslides Formation Mechanism on consequent Slope [J]. Journal of Mountain Research, 1998, 16(3): 182-187.
- [7] 白云峰. 顺层滑坡的发育环境及分布特征 [J]. 自然灾害学报, 2004, 13(3): 39-43.  
BAI Yunfeng. Development environment and distribution characteristics of bedding plane landslides [J]. Journal of Natural Disasters, 2004, 13(3): 39-43.
- [8] 林森, 代树林. 层状岩体顺层滑动边坡破坏机制及锚固机制的研究 [J]. 铁道建筑, 2010(8): 97-99.  
LIN Sen, DAI Shulin. Study on failure and anchoring mechanisms for sliding slope of layered rock [J]. Railway Engineering, 2010(8): 97-99.
- [9] 张毅, 朱宏伟, 项琴. 顺层路堑边坡稳定性影响因素分析 [J]. 西部交通科技, 2009(10): 24-27.  
ZHANG yi, ZHU Hongwei, XIANG qin. The Influence of Factors on the Stability of Parallel slope [J]. Western China Communications Science & Technology, 2009(10): 24-27.
- [10] 李安洪, 周德培, 冯君. 顺层岩质路堑边坡破坏模式及设计对策 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(sup1): 2915-2921.  
LI Anhong, ZHOU Depei, FENG Jun. Failure modes of bedding rock cutting slope and design countermeasures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (sup1): 2915-2921.
- [11] 冯君, 周德培, 李安洪. 顺层岩质边坡开挖松弛区试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 840-845.  
FENG Jun, ZHOU Depei, LI Anhong. Physical modeling research on relaxation region of consequent rock slope induced by road cutting [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5): 840-845.
- [12] 孙书伟, 马惠民, 张忠平. 顺层高边坡开挖松动区研究 [J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1665-1668.  
SUN Shuwei, MA Huimin, ZHANG Zhongping. Study on disturbed zone of cutting bedding high rock slope [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1665-1668.
- [13] 冯君, 周德培, 李安洪. 顺层岩质边坡开挖稳定性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1474-1478.  
FENG Jun, ZHOU Depei, LI Anhong. Research on stability of rock bedded slopes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(9): 1474-1478.
- [14] 冯君, 周德培, 李安洪. 顺层岩质边坡开挖模型试验及稳定性影响因素分析 [J]. 工程地质学报(英文版), 2005, 13(3): 294-299.  
FENG Jun, ZHOU Depei, LI Anhong. test and numerical modeling of the stability of rock bedded slope [J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(3): 294-299.
- [15] 陈从新, 黄平路, 卢增木. 岩层倾角影响顺层岩石边坡稳定性的模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 476-481, 486.  
CHEN Congxin, HUANG Pinglu, LU Zengmu. Study on correlation between stability of consequent rock slope and obliquity of rock layer by simulation experiment [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 476-481, 486.
- [16] 刘勇, 张继春, 肖清华. 振动作用下顺层岩质边坡滑移失稳的试验研究 [J]. 路基工程, 2008(2): 3-5.  
LIU Yong, ZHANG Jichun, XIAO Qinghua. Model Test the Sliding and Instability of Bedded Slope under the Action of Vibration [J]. Subgrade Engineering, 2008(2): 3-5.
- [17] 肖克强, 李海波, 刘亚群, 等. 地震荷载作用下顺层岩体边坡变形特征分析 [J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1557-1564.  
XIAO Keqiang, LI Haibo, LIU Yaqu, et al. Study on deformation characteristics of bedding slopes under earthquake [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1557-1564.
- [18] 李海波, 肖克强, 刘亚群. 地震荷载作用下顺层岩质边坡安全系数分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2385-2394.  
LI Haibo, XIAO Keqiang, LIU Yaqu. Factor of safety analysis of bedding rock slope under seismic load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12): 2385-2394.
- [19] 罗先启, 葛修润. 滑坡模型试验理论及其应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 16-27.

(编辑 王维朗)