

# 大型岩质滑坡地震变形破坏过程物理试验与数值模拟研究\*

朱 雷 王小群

(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) 成都 610059)

**摘 要** 以汶川地震触发的大光包岩质滑坡为例,结合野外现场调查,以其地质结果为背景,建立起破坏前的物理模型和三维数值模型,利用振动试验台和数值计算方法对滑坡变形破坏过程进行了研究。物理试验与数值模拟方法相互验证,取得了较为一致的结果。研究表明:该滑坡的破坏模式为坡体顶部与中部拉张贯穿破坏→中部沿层面滑移→前缘剪切破坏,中部拉裂缝与主滑面首先形成滑动边界,前缘首先滑出;滑坡变形过程中的加速度与速度响应研究表明其放大效应明显。同时,通过对比基岩与滑带加速度与速度放大系数,显示了结构面对斜坡变形破坏过程的控制作用。

**关键词** 大型岩质滑坡 振动台试验 数值计算 地震动力响应 变形破坏模式

中图分类号:O319.56 文献标识码:A

## PHYSICAL MODELING AND NUMERICAL SIMULATION OF DEFORMATION AND FAILURE PROCESS OF LARGE ROCKSLIDE IN EARTHQUAKE

ZHU Lei WANG Xiaoqun

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

**Abstract** Earthquake is one of the main factors of the generation of a landslide. This paper takes the Daguangbao rockslide triggered by the Ms 8.0 Wenchuan earthquake for example. Based on site investigation, the physical model experiments and numerical model are built to simulate the deformation and failure process of the rockslide. The results of model test match the results of numerical simulation well. The results show that failure model of slide was that the toe and the middle of the slide was shear failure and the top of the slide was tension failure. The tension cracks of slope and the shear oblique layer on the bottom composed the slide boundary. Through the research of acceleration and velocity response, the calculated also resulted that the structural plane played a controlling role in the dynamic response of the rock slope.

**Key words** Large rockslide, Shaking table test, Numerical analysis, Seismic response, Failure model

\* 收稿日期:2012-05-20;收到修改稿日期:2012-07-22.

基金项目:国家自然科学基金项目(41072230).

第一作者简介:朱雷,主要从事岩土体稳定性方面研究. Email: aaclee@126.com

## 1 引言

5·12 汶川地震后,许多学者对斜坡地震作用下的变形破坏,动力响应规律展开了大量的物理试验<sup>[1-3]</sup>和数值模拟<sup>[4-6]</sup>研究,并取得一些重要的成果,然而由于斜坡作为一种地质结构体,其坡体结构的特殊性和复杂性,使其岩体的力学响应具有强烈的非线性,在地震动力作用下,加之岩体的变形及地震波的不规则等等,其力学响应极为复杂。特别是数值模拟和物理模拟等手段进行研究时,往往存在以下不足:从原型概化出来的模型过于简单,数值计算对于复杂模型存在建模与计算等困难,而对物理模拟则存在相似比难以完全实现等问题;物理模拟由于模型尺寸限制、经费限制等诸多因素,往往不能进行多次重复试验而得出令人满意的规律。因此,单凭单一的方法很难对地震作用下斜坡的变形破坏进行准确的分析。

本文结合汶川地震中最大的滑坡——大光包滑坡,结合现场调查,建立起破坏前的三维数值模型和物理模型。利用 FLAC<sup>3D</sup> 软件和振动台对其变形破坏过程进行模拟,2 种方法同时结合、比较、验证,从而对滑坡变形破坏规律有着更加准确的认识。

## 2 工程地质概况

大光包滑坡位于四川省绵阳市安县高川乡泉水村西北侧,安县、绵竹、茂县三县交界部位,距离发震断裂——映秀—北川断裂(陈家坪—白云山断裂)6.5 km(图 1)。该滑坡纵向长度为 4541 m,堆积体

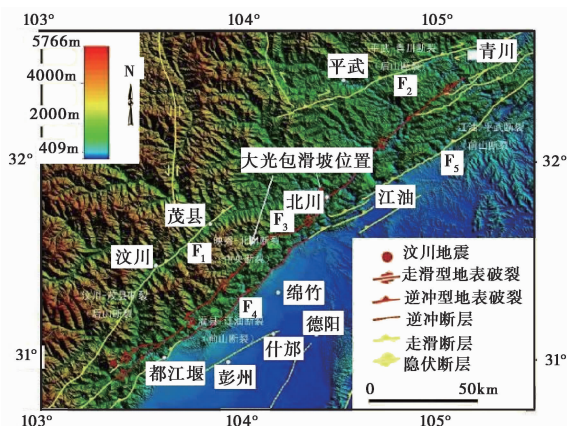


图 1 大光包滑坡与断层的位置关系

Fig. 1 Location relationship between Daguangbao landslide and fractures

的宽度为 2200 m, 滑坡的总面积达  $7.8 \times 10^3 \text{ m}^2$ , 估算体积  $7.5 \times 10^9 \text{ m}^3$ , 是汶川地震中最大的滑坡(图 2)。

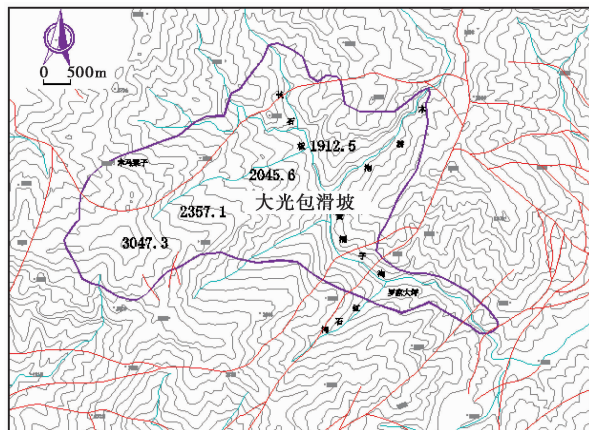
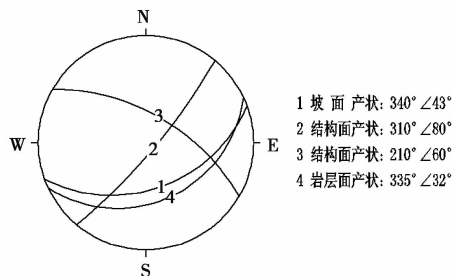


图 2 大光包滑坡平面图

Fig. 2 Plan of Daguangbao landslide



- 1 坡面产状:  $340^\circ \angle 43^\circ$
- 2 结构面产状:  $310^\circ \angle 80^\circ$
- 3 结构面产状:  $210^\circ \angle 60^\circ$
- 4 岩层面产状:  $335^\circ \angle 32^\circ$

图 3 坡体结构面及坡面赤平极射影

Fig. 3 Stereographic projection of surface and joints in slope

### 2.1 滑坡的结构面特征

地震前斜坡坡度  $30^\circ \sim 55^\circ$ , 上陡下缓。根据滑后的现场调查发现,主要受  $N40^\circ W/NE/80^\circ \sim 85^\circ$  结构面控制; 滑坡北侧边界明显受  $N40^\circ W/NE/80^\circ \sim 85^\circ$  和  $N55^\circ \sim 60^\circ E/SE/60^\circ$  两组结构面控制; 大光包滑坡南侧边界为滑坡的主滑动面, 完全受岩层面 ( $N75^\circ E/NW \angle 32^\circ$ ) 控制(图 3)。

### 2.2 滑坡的岩体结构特征

大光包滑坡区地层岩性主要为碳酸盐岩, 受推覆作用以及后期剥蚀作用影响; 滑源区是石炭系总长组, 岩性为泥质岩。由于大光包地势高陡, 是该区域内最高的山体, 具有较好的临空条件, 由于受到后期风化剥蚀作用影响, 高程的坡体风化卸荷结构面较为发育。滑坡后壁调查表明, 层面产状与滑床层面产状 ( $N75^\circ E/NW \angle 32^\circ$ ) 一致, 层间距为 20 ~ 50 cm, 最厚层间距达 1.5 m; 陡倾坡外的结构面发育, 产状  $N10^\circ \sim 25^\circ W/NE \angle 65^\circ \sim 80^\circ$ , 后壁上结构

面严重拉裂,张开度达 2~20cm; 部分区域可见沿层面强烈风化的泥质条带,厚 2~10cm,在地震力作用下,该层面是潜在滑面(图 4)。



图 4 大光包滑坡滑床

Fig. 4 Slide bed of Daguangbao landslide

### 3 滑坡变形破坏过程物理试验

#### 3.1 模型及实验概况

本次试验实验仪器采用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自主研发的液压施加初始位移、液压锁紧、瞬间释放型弹簧式二维振动试验台(图 5)。振动台加速度信号通过 CA-YD 三向型加速度传感器拾取,可直接获取任意时刻对应的加速度值。通过数码摄像机对实验过程进行记录,通过处理可以再现滑坡的变形破坏过程。



图 5 振动试验台

Fig. 5 The shaking table

以相似原理为基础,并结合研究区域的地质条件和岩体结构特征,依据大光包滑坡现场勘测数据,采用与实际坡体 1:6000 的几何相似比(图 6)。模型所使用的材料为重晶石粉、石英砂、石膏、甘油和水进行配比,其中基岩的模拟材料配比为 32:53:5:1:9,滑体的模拟材料配比为 33.5:55.5:2.5:2.0:

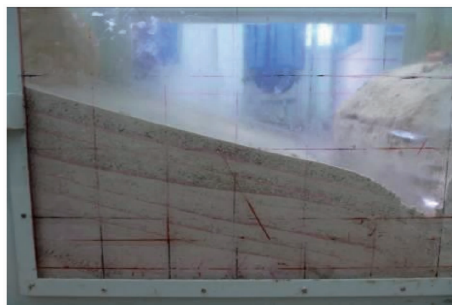


图 6 滑坡模型

Fig. 6 Slope models

6.5,并经过压密而成;岩层的层面用锡箔纸模拟,坡体中软弱结构面采用锡箔纸与添加石蜡油膨润土制成的互层材料(表 1)。滑带倾角设置为 30°,与原型基本一致。为了减小模型的边界效应,在模型两侧均留有一定的自由空间,保证模型自由变形。

表 1 原型和模型材料的主要物理力学参数值

Table 1 Material properties of prototype and model slopes respectively

岩体	类型	弹性模量/ GPa	泊松比	内摩擦角/ (°)	内聚力 c/MPa	重度/ kg·m <sup>-3</sup>
基岩	原型	16.4	0.2	46	2.1	2600
	模型	0.164	0.28	38	0.021	2600
滑体	原型	6.7	0.3	40.7	0.9	2600
	模型	0.067	0.32	30	0.09	2600
滑带	原型	1.2	0.3	21	0.03	2200
	模型	/	/	/	/	2200

相似常数分别取  $C_l = 6000$ 、 $C_\rho = 1$ 、 $C_E = 100$ 。由于试验设备以及试验材料的限制,对于全面相似的模型试验目前还难以开展<sup>[7]</sup>,特别是对于振动模拟试验。但是研究表明<sup>[8]</sup>:针对试验需要解决的问题,可以就其一项或某几项指标进行相似操作,这样是可能的,有效的。特别需要说明的是,本次模型实验主要是针对振动条件下斜坡的变形破坏机制模拟,获取定性结果,所以试验没有要求严格的相似<sup>[9,10]</sup>。只对振动峰值加速度进行相似操作,而相似理论认为,模型的振动加速度应和原型一致。为了更好地显示地震对坡体的破坏作用,在地震波加载时,采用 3 次分级加载,峰值加速度分别为 0.2g、0.4g、0.6g,同时分别记录不同峰值加速度下的破坏特征。图 7 为水平和竖向峰值加速度均为 0.6g 的地震波时程曲线。

#### 3.2 实验过程分析

按照实验方案进行实验,并进行拍照,录像,对

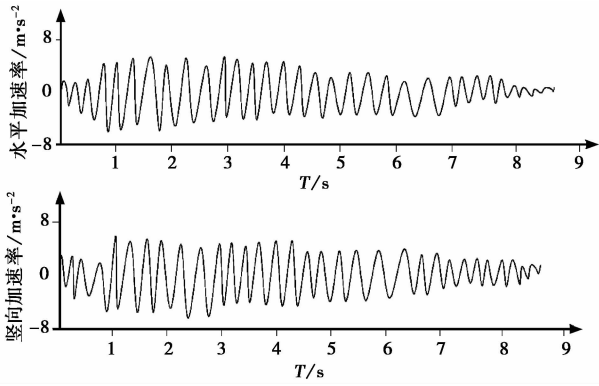


图7 地震加速度历程

Fig. 7 Time-history of acceleration of earthquake

滑坡的变形破裂演化过程进行素描(图8)。在水平加速度为0.2g时,坡体未见明显变形,仅在坡体后缘表部出现细微拉裂缝(图8a);在加速度为0.4g时,坡体后缘拉裂缝向坡体内部发展,深度为10cm,拉裂缝变宽,宽度为0.5cm;同时,滑体中部也出现拉裂缝,滑面处出现滑移裂缝,整个滑体未见明显移动,但层间错动现象明显,结构面显示出明显的控制性作用;随着错动的持续,后缘和中部拉裂缝继续向坡体内部发展,并呈弧状,并在坡体后缘出现沉降带(图9),滑带两侧出现大量拉张裂缝,层间错动,滑移拉裂现象明显(图8c)。在加速度达到峰值

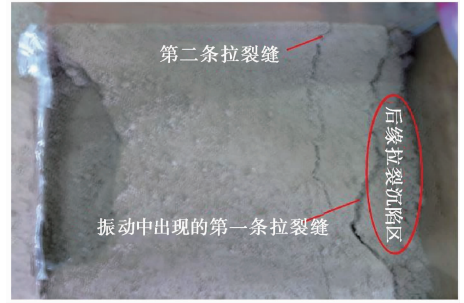


图9 振动中模型的变形破坏

Fig. 9 Deformation and failure during vibration process

0.6g时,坡体出现了大范围的破坏,拉张裂缝向坡体深部发展,中部拉裂缝首先与主滑面连通,前缘滑体向沟谷方向滑移了5cm(图10)。

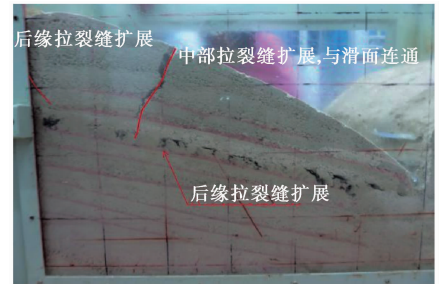


图10 振动结束后的模型

Fig. 10 Slope models after vibration

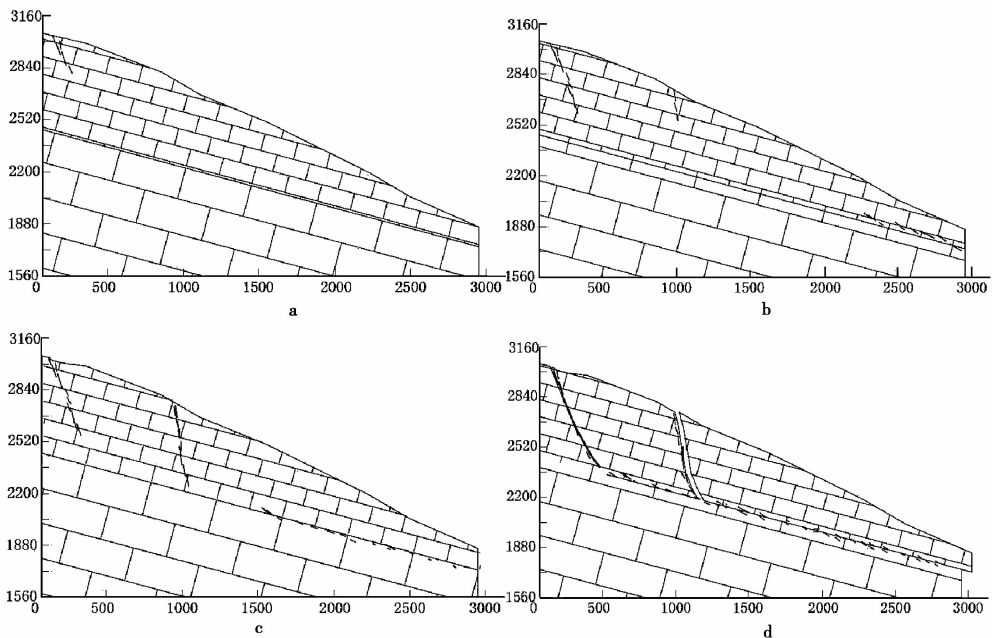


图8 滑坡变形破裂演化图

Fig. 8 Deformation and failure process of slope

a. 后缘出现拉裂缝; b. 中部出现裂缝; c. 拉裂缝向坡体内发展; d. 滑带贯通,前缘滑体开始下滑

### 3.3 实验结果分析

通过振动台试验对大光包滑坡的变形破坏过程进行模拟,结果表明,大光包滑坡的变形破坏过程不是一次性完成的,其变形破坏积累过程显著,在地震动力长时间的作用下,坡体后缘拉裂边界首先形成,接着,坡体中部也产生拉裂缝,随后,主滑动面形成,首先与中部拉裂缝形成前端滑体的滑动边界,前端滑体下滑。

通过实验,可以将滑坡的变形破坏演化过程概述为3个阶段:

#### (1) 裂缝扩展,层间错动

在水平和竖向地震力的作用下,坡体后缘和中部形成产生拉裂缝,并不断向坡体内部扩展,坡体开始沿着控制性结构面开始发生错动。

#### (2) 滑面贯通

当控制性的滑移面与中部、后缘拉裂面贯通,坡体成为了不稳定滑体。

#### (3) 坡体解体,滑塌

在持续的振动下,坡体开始解体,沿着滑移面逐级下滑。

## 4 滑坡的变形破坏过程三维数值模拟

### 4.1 三维模型的建立

根据震前滑坡的地质资料,并结合地震后滑坡区域的地形变化及边界条件和结构面,建立起了三维数值模型(图11),为了减小边界对计算结果的影响,边界采用了自由场边界<sup>[11]</sup>,以吸收地震波的反射。模型采用的直角坐标系为:  $X$  轴为滑坡滑动方向,  $Y$  轴垂直于滑坡的滑动方向,  $Z$  轴铅直,以向上为正。沿  $X$  方向为 3200m,沿  $Y$  方向为 1200m,竖直方向为 1500m。

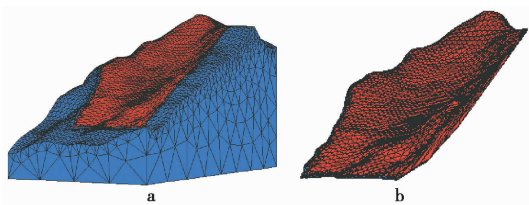


图11 三维有限差分数值计算模型

Fig. 11 3D finite difference model

a. 整体模型; b. 滑体模型

### 4.2 计算参数选取

为了便于计算,对模型进行了概化,将滑带下基岩和滑体分别视为一种岩体,通过对现场岩体及控制性结构面的详细调查,取样进行力学试验<sup>[12]</sup>并结合工程参数类比法,得到斜坡岩体和滑带物理参数(表2)。由于研究区域没有地震台站,本文选取了距研究区 15km 处的加速度实测数据作为输入地震波(图12),来近似模拟大光包滑坡的变形与破坏过程。由于地震波的能量主要集中在前 60s,因此本文只取前 60s 地震波输入。本次计算采用的阻尼为局部阻尼,参数取为 0.1。

表2 边坡岩体力学参数表

Table 2 Mechanical parameters of rock slope

岩体	变形模量/ GPa	泊松比	内摩擦角/ (°)	凝聚力 c/MPa	抗拉强度/ MPa	重度/ kg·m <sup>-3</sup>
基岩	16.4	0.2	46	2.1	3.2	2600
滑体	6.7	0.3	40.7	0.9	2.1	2500
滑带	1.2	0.3	21	0.03	0.1	2200

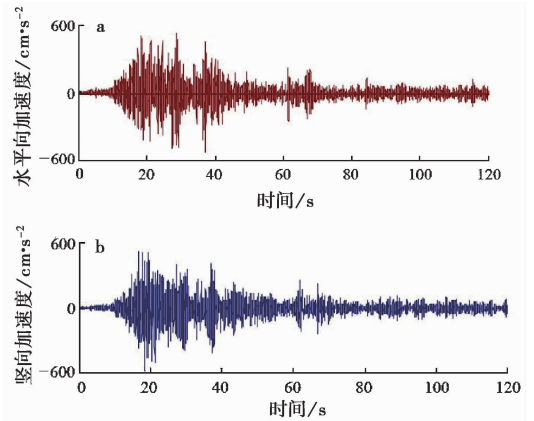


图12 地震加速度时程

Fig. 12 Time-history of acceleration of earthquake

a. 水平加速度时程曲线; b. 竖向加速度时程曲线

### 4.3 滑坡的变形过程模拟

滑坡的变形破坏是一个渐变的过程,是变形从小到大,也是一个从量变的积累到质变的复杂的力学过程。总体来说,就是一个滑坡发生变形,破坏,运动的过程。为了研究大光包滑坡的滑带变形特征在计算过程中记录了不同时刻计算结果。

在地震波输入 2s 时,坡顶处出现位移集中区(图13a),并且随着地震波的不断输入,顶部的位移集中区域不断扩大,并且向下扩展。

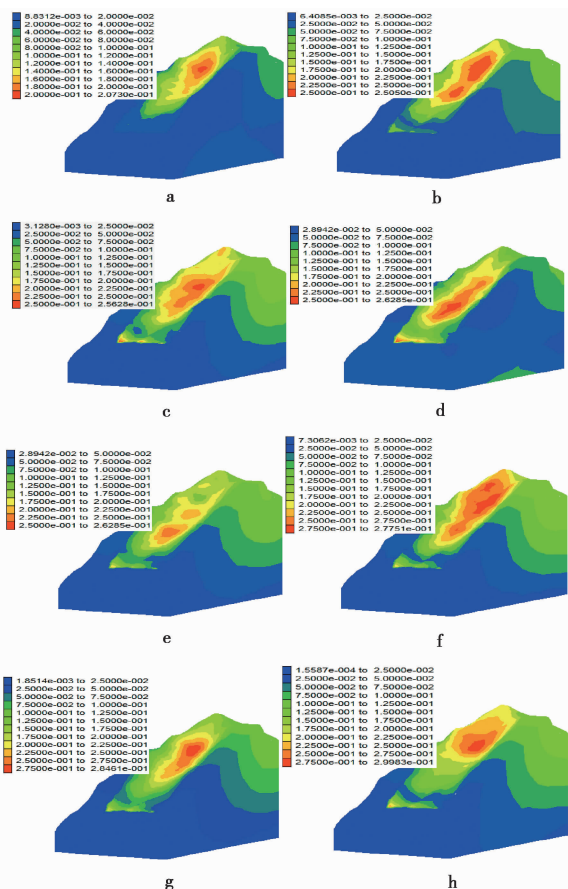


图 13 不同时刻斜坡位移云图

Fig. 13 Nephograms of slope displacement at different times

a.  $t=2s$ ; b.  $t=11s$ ; c.  $t=12s$ ; d.  $t=13s$ ; e.  $t=15s$ ;f.  $t=17s$ ; g.  $t=18s$ ; h.  $t=20s$ 

在地震波输入 4s 时,坡角处形成剪切应变集中区域(图 14a),并且随着时间的增长,剪切应变逐步沿着滑带向坡顶延伸(图 14)。

当地震波输入 11s 时,一方面,剪切应变沿着滑带继续向上延伸并达到最大值,塑性区贯通(图 14f)。另一方面,随着振动的不断持续,坡顶的位移集中区域出现了转移,位移极值区不断地向下延伸,滑体的中部长时间停留(图 13d~f),地震能大量消耗在滑体的中部,出现了拉应力集中,剪出口处岩体的位移逐渐增大,也就是说,该区域地震响应最明显,可能是最先出现岩体破坏的区域。

数值计算结果表明,该滑坡中部和顶部的位移响应变化剧烈,特别是中部区域,主滑动面贯通后,位移极值区长时间在该区域停留,该区域可能最先发生破坏。

### 3.4 滑坡破坏模式研究

通过前面的振动台试验并结合对滑体变形积累

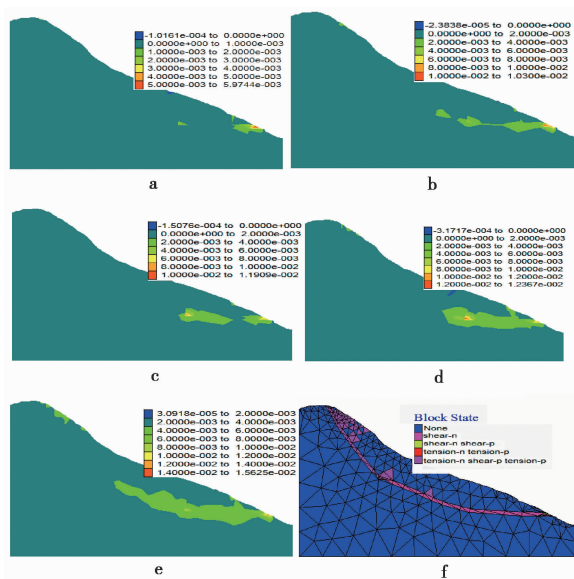


图 14 斜坡剪切应变云图和塑性区图

Fig. 14 Nephograms of shear strain and plastic strain zone of slope

a.  $t=4s$  时剪应变; b.  $t=5s$  时剪应变; c.  $t=7s$  时剪应变;d.  $t=9s$  时剪应变; e.  $t=11s$  时剪应变; f.  $t=11s$  时塑性区图

过程可知,在长时间的地震动力作用下,一方面,形成坡体后缘和中部的震动拉裂区,另一方面形成了沿层面滑动剪切面;导致坡体破坏失稳。

同时,随着振动的持续,坡体的位移集中区顺着坡表呈由上往下,再由下往上不断变换,坡表位移幅值随时间呈周期变换,位移幅值停留时间越长的区域越容易最先发生破坏。主滑面贯通后,坡体中部首先出现位移集中区,并长时间停留,该区域首先发生滑塌,随后,位移集中区转移到坡顶部,同时,由于中下部坡体滑塌,上部坡失去部分抗力,也发生滑塌,这中破坏模式也与现场调查结果一致<sup>[13]</sup>。

### 4.5 加速度与速度响应特征

为了进一步研究斜坡的动力响应以及结构面对地震斜坡的控制作用,在模型中设置了大量的监测点(图 15)。通过记录监测点的加速度,可以发现,无论是加速度还是速度,都存在明显的放大现象。监测点的加速度和速度峰值见表 3,表 4。

由表 3 可知,斜坡同一部位的水平加速度放大倍数较大,竖向加速度放大系数较小。在通过软弱结构面后,加速度放大系数减小。

对加速度与速度的放大效应的分析,可以得出以下结论:在地震波穿越软弱夹层时发生界面动应力效应,通过软弱结构面后加速度明显变小,使得夹

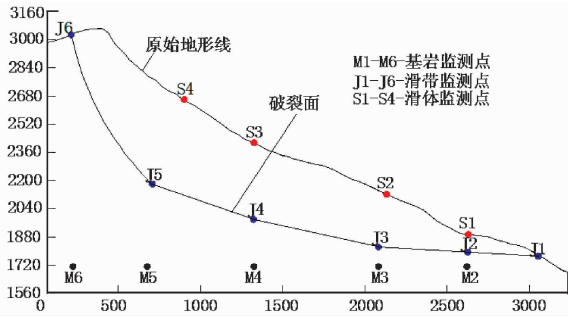


图 15 大光包滑坡地震分析模型剖面图与监测点分布图  
Fig. 15 Seismic dynamic model and distribution of monitoring points of Daguangbao landslide

表 3 监测点速度、加速度峰值

Table 3 Peak values of velocity and acceleration of monitoring points

监测点号	加速度峰值/ $m \cdot s^{-2}$		速度峰值/ $m \cdot s^{-1}$	
	水平	竖向	水平	竖向
J2	36.4	28	2.51	1.36
M2	28.7	11	1.87	1.02
S1	11.1	9	0.93	0.42
J4	26.1	14.6	1.25	0.72
M4	16.5	9.2	1.13	0.61
S3	10.7	7.1	0.72	0.47
J6	18	15.2	1.15	0.83
M6	11.9	8.4	0.83	0.55

表 4 监测点速度、加速度放大系数

Table 4 Amplification factors of velocity and acceleration of monitoring points

监测点号	加速度放大系数		速度放大系数	
	水平	竖向	水平	竖向
J2	5.97	4.67	3.59	2.72
M2	4.70	1.83	2.67	2.04
S1	1.82	1.50	1.33	0.84
J4	4.28	2.43	1.79	1.44
M4	2.70	1.53	1.61	1.22
S3	1.75	1.18	1.03	0.94
J6	2.95	2.53	1.64	1.66
M6	1.95	1.40	1.19	1.10

层上下的岩体动力响应不一致,最终导致相对位移变大,充分论证了软弱结构面对边坡控制作用,也符合岩体结构控制论的观点<sup>[14]</sup>。

## 5 结论

结合野外现场调查,采用振动试验台和有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup>对其变形累积过程、动响应规律及破坏过程进行模拟,得到如下结论:

(1) 利用振动台对滑坡的变形破坏过程进行试验研究,结果表明,大光包滑坡的破坏模式为坡体顶部拉张破坏→中部拉裂破坏→前缘剪切破坏。中部拉裂缝首先与滑面形成滑动边界,前缘首先滑出。这也与现场调查的情况较为符合。

(2) 通过振动台试验和数值计算方法对该滑坡的变形过程进行了模拟,结果表明:虽然地震作用下斜坡的变形破坏是很短时间内完成的,但坡体的变形仍然是一个短时间内渐进的过程,同时数值计算中滑坡渐变过程较好地验证了振动台试验结果。

(3) 对滑坡的加速度与速度放大效应的研究表明:加速度与速度具有放大效应,其中,水平加速度放大效应最为明显,同时也进一步论证了结构面对边坡动力响应的控制作用。

(4) 数值模拟结果与振动台实验相互验证,数值模为滑坡变形破坏过程、动力响应提供了大量的量化数据。而物理试验可以直观地再现滑坡的变形破坏全过程,2种研究方法结合,使得对滑坡变形破坏的规律更加深入的了解。

## 参 考 文 献

- [1] 许强, 陈建君, 等. 斜坡地震响应的物理模拟试验研究, 四川大学学报(工程科学版), 2009, **41**(3): 266~272.  
Xu Qiang, Chen Jianjun, et al. Study of the seismic response of slopes by physical modeling. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2009, **41**(3): 266~272.
- [2] 徐光兴, 姚令侃, 高召宁, 等. 斜坡动力特性与动力响应的大型振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(3): 624~632.  
Xu Guangxing, Yao Lingkan, Gao Zhaoning, et al. Large-scale shaking table model test study on dynamic Characteristics and dynamic responses of slope. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(3): 624~632.
- [3] 董金玉, 杨国香, 等. 地震作用下顺层岩质边坡动力响应和破坏模式大型振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **10**(3): 2978~2982.  
Dong Jinyu, Yang Guoxiang, et al. The large-scale shaking table test study of dynamic response and failure mode of bedding rock slope under earthquake. Rock and Soil Mechanics, 2011, **10**(3): 2978~2982.

- [4] 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): 319~327.  
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 seismic waves—Taking Tangjiashan landslide in Beichuan county for example. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(2): 319~327.
- [5] 毕忠伟, 张明, 金峰, 等. 地震作用下边坡的动态响应规律研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(增1): 180~183.  
Bi Zhongwei, Zhang Ming, Jin Feng, et al. Dynamic response of slopes under earthquakes. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(S1): 180~183.
- [6] 杨庆华, 姚令侃, 杨明. 地震作用下松散堆积体崩塌的颗粒流数值模拟[J]. 西南交通大学学报, 2009, **44**(4): 580~584.  
Yang Qinghua, Yao Lingkan, Yang Ming. Particle flow numerical simulation of landslide of loose slopes under seismic loading. Journal of Southwest Jiao tong University, 2009, **44**(4): 580~584.
- [7] 杨俊杰. 相似理论与结构模型试验[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2005.  
Yang Junjie. Similarity Theory and Structure Model Test. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2005.
- [8] 王存玉, 王思敬. 边坡模型振动试验研究. 岩体工程地质力学问题(七)[M]. 北京: 科学出版社, 1987.  
Wang Cunyu, Wang Sijing. Experimental vibrating study of rock slope model[C]. Geology Institute of China Academy. Problems of Engineering Geomechanics for Rock Mass (7). Beijing: Science Press, 1987.
- [9] 李育枢, 李天斌, 王栋, 等. 黄草坪2<sup>#</sup>隧道洞口段减震措施的大型振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(6): 1129~1135.  
Li Yushu, Li Tianbin, Wang Dong, et al. Large-scale shaking table test for vibration-absorption measures of portal section of Huangcaoping tunnel no. 2. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(6): 1129~1135.
- [10] 许向宁. 高地震烈度区山体变形破裂机制地质分析与地质力学模拟研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2006.  
Xu Xiangning. Geological Analysis and Geomechanics Analog Study of Mountain Deformation-Failure Mechanism in High Earthquake-Intensity Area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006.
- [11] Itasca Consulting Group Inc. FLAC<sup>3D</sup>(Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions), Version 2.0, Users Manual (Volume V) [R]. USA: Itasca Consulting Group in. c, 1997.
- [12] 李世贵. 汶川5·12地震诱发大光包巨型滑坡形成机理与运动特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2010.  
Li Shigui. Study of the formation mechanism and dynamic characteristics of Daguangbao massive landslide induced by 5.12 wechuan earthquake. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010.
- [13] 殷跃平, 成余粮, 王军. 汶川地震触发大光包巨型滑坡遥感研究[J]. 工程地质学报, 2011, **19**(5): 674~684.  
Yin Yueping, Cheng Yuliang, Wang Jun. Remote sensing research on Daguangbao gigantic rockslide triggered by Wenchuan earthquake. Journal of Engineering Geology, 2011, **19**(5): 674~684.
- [14] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.  
Sun Guangzhong. Rock Mass Structure Mechanics. Beijing: Science Press, 1988.