

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0208

# 含贯通性结构面岩质边坡动力演化规律

朱仁杰<sup>1</sup>, 车爱兰<sup>1</sup>, 严 飞<sup>2</sup>, 文 海<sup>2</sup>, 葛修润<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 2. 云南省交通规划设计研究院, 云南 昆明 650041)

**摘 要:** 针对一种含贯通性顺倾结构面的岩质边坡, 开展地震波场传播特性、动力演化规律和破坏机制研究。基于华丽高速公路金沙江大桥桥址边坡, 实施了数值分析及振动台模型试验。通过地震波场数值模拟, 明确了地震波场受贯通性结构面影响, 在贯通性结构面和坡面之间反复叠加, 加速度放大效应较均质边坡增大约 1.8 倍。振动台模型试验中不断增大地震输入烈度, 加速度响应在烈度为 VIII 度时发生突变, 边坡由弹性响应阶段进入塑性阶段。在裂度为 IX 度时坡脚附近裂缝进一步扩展、贯通, 直至发生整体滑动失稳, 滑动面沿后缘陡倾结构面剪出、贯通性顺倾结构面滑动、下部坡脚附近剪出。强震后受扰动边坡若处在塑性阶段/不稳定阶段, 在其他外力触发下有可能发生滑坡灾害。

**关 键 词:** 岩质边坡; 贯通性顺倾结构面; 振动台试验; 动力演化; 滑动失稳

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2019) 05-1907-09

## Dynamic evolution of rock slope with connective structural surface

ZHU Ren-jie<sup>1</sup>, CHE Ai-lan<sup>1</sup>, YAN Fei<sup>2</sup>, WEN Hai<sup>2</sup>, GE Xiu-run<sup>1</sup>

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Broadvision Engineering Consultants, YCIC, Kunming, Yunnan, 650041, China)

**Abstract:** In this paper, propagation characteristics of seismic wave field, dynamic evolution and failure mechanism of a rock slope with connective structural surface were studied. Based on the engineering background of the bank slope of Jinsha River Bridge, FEM analysis and a shaking table test were designed and completed. According to the results of FEM analysis, the connective structural surface caused significant change of the earthquake wave field. After multiple superposition of seismic wave of slope surface and connective structural surface, the PGA of the slope was 1.8 times of the PGA of a homogeneous slope. With the increasing earthquake intensity in the shaking table tests, the first sudden change happened at grade VIII intensity, and the slope changed from elasticity to plasticity. Expansion, penetration, and even overall sliding happened at the slope at grade IX intensity. Slide surface slipped along steep structural surface on trailing edge and shear outlet neighboring slope toe by shear and slides along penetrating weak structural surface. Therefore, slope may be at the status of plasticity after an intensive earthquake and it may lead to landslide with external forces.

**Keywords:** rock slope; connective bedding structural surface; shaking table test; dynamic evolution; slope instability

## 1 引 言

地震对岩质边坡稳定性的影响可以分为瞬时作用和累积作用两部分。地震烈度足够大时, 瞬时作用会导致边坡破坏, 而当地震烈度较小时, 累积作用则会改变边坡结构和岩体力学性质, 对边坡稳定性产生重要影响<sup>[1]</sup>。高频次的微小地震和地震灾害之后的强降雨都会诱发滑坡灾害<sup>[2]</sup>。我国西部很多地区属于强震地区, 地震频繁, 滇藏铁路金沙江河

谷段岸坡、秦巴山区一级公路桥岸坡均发生过因地震而引发的裂缝乃至滑坡<sup>[3]</sup>, 西南山区的地形险峻、河谷深切, 复杂的地质条件使得线路中桥梁长度占线路长度的比例高<sup>[4]</sup>。随着西部交通的不断开发利用, 越来越多的桥梁基础将修建在复杂地质构造的岩基上, 致使其抗滑稳定性具有复杂性、多元性<sup>[5]</sup>。河岸边坡一旦发生破坏, 将对工程建设和人民财产造成重大损失。因此, 桥梁基础所在的边坡动力稳定性问题成为我国山区高速公路建设中非常突出和

收稿日期: 2018-02-02

基金项目: 国家重点研发计划资助 (No. 2018YFC1504504)。

This work was supported by the National Key R&D Program of China (2018YFC1504504).

第一作者简介: 朱仁杰, 男, 1994 年生, 硕士, 主要从事岩质边坡稳定性研究。E-mail: 903739310@qq.com

通讯作者: 车爱兰, 女, 1969 年生, 博士, 研究员, 主要从事岩土工程测试技术和地震防灾减灾研究。E-mail: alche@sju.edu.cn

亟待解决的重大难题。

由于岩土介质的非线性和边坡动力问题的复杂性,通过理论推导的方式求解边坡动力问题难度很大。相比之下,利用大型振动台开展边坡缩尺模型的地震模拟是一种行之有效的边坡稳定性研究手段<sup>[6]</sup>。在边坡模型制作方面,杨国香等<sup>[7]</sup>使用石膏作为胶结材料,添加铁粉、重晶石粉和石英砂来调节模拟材料的密度、弹性模量、内摩擦角等各项物理参数,并选择了试块砌筑的制作工艺,较好地模拟了岩石材料的密度和弹性模量。Wartman等<sup>[8]</sup>使用黏土作为胶结材料来制作边坡模型,研究了强震作用下边坡的永久变形规律。范刚等<sup>[9]</sup>使用了重晶石、砂子作为物理参数控制剂,并使用了相同配比未经养护烘干的湿材料作为试块砌筑的黏结剂,保证了边坡模型的整体性。在地震作用下含结构面的边坡动力响应研究方面,梁庆国<sup>[10]</sup>、Giri<sup>[11]</sup>、孙志亮<sup>[12]</sup>等通过振动台试验探讨了斜坡在地震动输入下的响应特性,揭示了边坡内地震波波场的传播规律。梁敬轩等<sup>[13]</sup>针对基-覆界面及坡面倾角对边坡的动力响应影响,通过振动台模型试验的研究方式,认为边坡的破坏模式由基-覆界面及坡面倾角共同控制。Che等<sup>[14]</sup>针对包含顺倾不连续结构面的边坡开展振动台试验研究,认为加速度响应沿坡面向上明显放大,且水平加速度占主导。董金玉等<sup>[15]</sup>针对顺倾岩质边坡开展大比例尺振动台试验研究,认为顺倾结构面对加速度的放大作用是边坡失稳的重要影响因素。目前从波场传播特性的角度分析边坡动力响应规律研究尚存在欠缺,针对多次地震累积作用下的边坡动力稳定性研究还较少。

本文针对包含贯通性结构面的岩质边坡动力响应和动力演化问题,考虑边坡岩土特性、软弱结构面组合以及多次地震荷载输入的累积效应作为影响边坡动力响应的主要因素,依托具体工程案例,设计并完成包含贯通性结构面的边坡振动台模型试验。分析结构面对地震波传播特性的影响,明确其破坏过程及滑动失稳机制。研究在不同烈度的地震力作用下边坡的动力演化特性。

## 2 大型振动台模型试验

本次振动台模型试验使用中国地震局兰州地震研究所的日本国际计测器大型电伺服式振动台。加载方向分为水平方向及垂直方向。最大水平承载为25 t;最大垂直承载力为15 t;最大加速度水平(满载)为1.7g;最大垂直加速度为1.2g。

### 2.1 工程背景

华丽高速公路金沙江大桥为跨越金沙江而设,路线以东-西走向近垂直的角度跨越金沙江。该地区抗震设防烈度为Ⅷ度,大桥主墩置于金沙江两岸的斜坡中部,采用群桩承台基础。作为华丽高速公路的控制性工程,金沙江大桥位于金沙江中游干流河段的五郎河支流至美河冲沟之间的河道上(如图1所示)。岸坡受到顺河向陡倾角结构面和流层产状影响,多形成阶梯状地形。华坪岸为顺向坡,总体坡度为 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ,工程区出露地层主要为二叠系上统玄武岩组上段( $P_2\beta_3$ ),岩性有玄武岩、杏仁状玄武岩、火山角砾熔岩和凝灰岩,在高分布有二叠系上统黑泥哨组( $P_2h$ )地层,第四系地层在岸坡区也分布较广。桥址区域发育有贯通性凝灰岩结构面和后缘陡倾结构面,如图2所示。由室内试验及现场试验获得的岩体材料的物理力学参数如表1所示。

影响边坡稳定性的主要因素有地形地貌、地层岩性、结构面组合条件以及地震附加荷载等<sup>[16]</sup>。结合华丽金沙江大桥桥址边坡的工程地质等状况,该区域地震频发,地震的累积效应是影响边坡长期稳定性的不利因素,地震附加荷载和结构面组合条件是本区边坡稳定性的主要控制因素。



图1 华坪岸地形地貌

Fig.1 Topography and geomorphology of Huaping slope

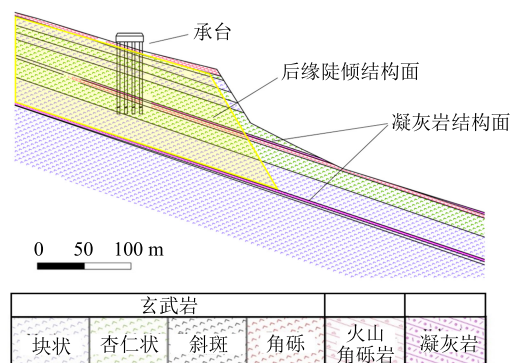


图2 岸坡地质构造图

Fig.2 Geological structure of slope

表 1 边坡材料及模型材料物理力学参数  
Table 1 Ideal mechanical parameters of simulation material land slope material

方法	材料种类	重度 $\gamma$ /(kN/m <sup>3</sup> )	弹性模量 $E$ /MPa	黏聚力 $c$ /kPa	摩擦角 $\phi$ /(°)
岩体物理参数 (原边坡)	玄武岩	30.0	69 000~82 500	11 250.0~14 440.0	46.30~46.90
	凝灰岩	/	/	/	29.00
相似计算结果	玄武岩	30.0	184~220	30.0~38.5	46.30~46.90
	凝灰岩	/	/	/	29.00
模拟材料物理参数	玄武岩	20.4	100	48.4	40.69
	凝灰岩	/	/	/	23.20

2.2 边坡模型

2.2.1 模型的简化

本试验将金沙江大桥华坪岸岸坡作为研究对象。由于边坡抗滑稳定性与工程岩体结构性质有着密切关系，明确岩体结构的特征及不连续面的分布规律，选取浅层主要软弱面进行模拟，忽略深层稳定结构面，合理确定岩体节理的连通率是简化模型的基本原则。基于上述原则，结合岸坡地质构造 (图 2) 设计边坡模型。边坡模型缩尺为 375 倍，坡面为折线坡，以此来模拟台阶状地貌。在模型内设置贯通性凝灰岩结构面和 5 个后缘陡倾结构面 (倾角为 75°，间距为 80 mm)，如图 3 所示。振动台试验所使用的模型箱箱壁为刚性界面，当地震动荷载输入时会存在一定的边界反射，从而使模型的动力响应产生误差，即所谓的“模型箱效应”。为了消除模型箱刚性边界的影响，模型侧向边界处用松散细砂设置 200 mm 厚填充层。模型底部设置与模型材料同样的 100 mm 厚整体垫层。

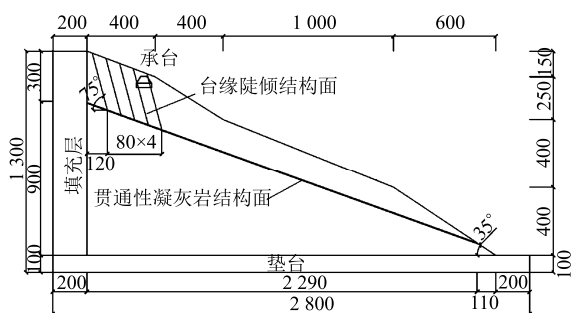


图 3 边坡模型 (单位: mm)  
Fig.3 Model of slope (unit: mm)

2.2.2 模拟材料和制作工艺

根据工程地质条件进行相似比计算，将岩质边坡简化为平面应变问题。考虑影响稳定性的结构面分布，将研究区域选定为水平距离为 900 m，高程差约为 400 m 的边坡范围，确定几何尺寸相似比为 375、加速度相似比为 1、密度相似比为 1 作为控制量，其他物理量根据相似准则计算，如表 2 所示。

表 2 相似准则计算表

Table 2 Similarity criteria calculation

物理量	相似准则	相似比
几何尺寸 $L$	$C_L=375$	375
加速度 $a$	$C_a=1$	1
密度 $\rho$	$C_\rho=1$	1
弹性模量 $E$	$C_E=C_\rho C_L$	375
泊松比 $\mu$	1	1
黏聚力 $c$	$C_c=C_\rho C_a C_L$	375
内摩擦角 $\phi$	1	1

原材料物理参数和相似材料物理参数如表 1 所示。其中，经相似计算后，贯通性凝灰岩结构面厚度不足 5 mm，因此在模拟材料时主要考虑其摩擦角相似性。为了模拟玄武岩的物理力学特性，选择水泥和黏土作为胶结材料，砂、铁粉为主要材料，通过不同配合比、不同材料的密度试验和静三轴试验，确定模拟材料配合比为水泥:砂:铁粉:黏土:混合剂 (速凝剂和减水剂):水，即 0.325: 17.000: 9.000: 0.400: 0.030: 5.000。采用雪弗板作为贯通性凝灰岩结构面模拟材料。后缘陡倾结构面采用砌缝填砂的方式进行模拟。通过常规室内试验、静力三轴试验、直剪试验等得到模拟材料的物理力学参数如表 1 所示。

模型高度达 1.3 m，同时浇筑整个模型势必使得养护时间大大增加，与此同时，浇筑过程中模型不同位置的浇筑时间不同，材料物理参数也会产生差异，整体浇筑而成的模型同时使得传感器的埋置和坡面削坡变得更加困难，因此采用先浇筑试块 (图 4 所示)，后砌筑模型的方式制作模型。为了模拟贯通性凝灰岩结构面，在试块制作阶段于相应位置插入雪弗板 (如图 5 所示)，模型砌筑完成后雪弗板首尾相接形成贯通整个边坡模型的结构面。后缘陡倾结构面采用砌缝的方式进行模拟，在试块养护阶段使用有一定厚度的铁片在设计位置切开砌缝，并用细砂填充。试块浇筑完成后 12 h 脱模，在干燥、阴凉环境下养护 5 d 后达到预期强度。首先在模型箱底砌筑垫层，将垫层顶面打毛，然后依次堆砌坡

体，并采用同样的材料作为黏结剂进行砌筑，制作完成的模型如图 6 所示。



图 4 试块养护  
Fig.4 Samples under maintenance



图 5 插入雪弗板的试块  
Fig.5 A sample with Shaver board

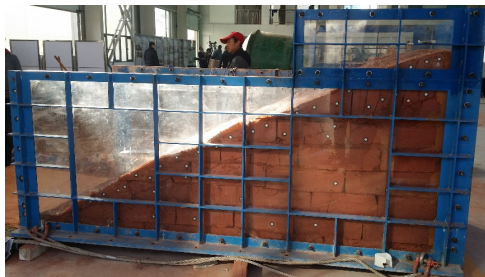


图 6 模型照片  
Fig.6 Photo of model

### 2.3 传感器布置

为了明确边坡模型在地震力作用下的动力响应，在模型内部关键位置进行加速度测试。共布置加速度传感器 20 个，如图 7 所示。

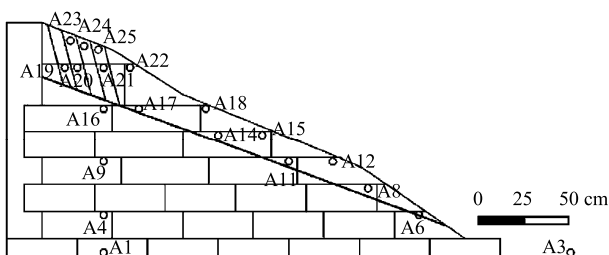


图 7 传感器布置图(单位: cm)  
Fig.7 Layout of sensors (unit: cm)

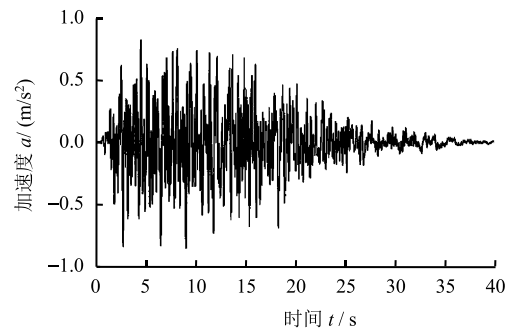
布设原则重点考虑沿垂直向传播特性以及不连续面组合的影响。振动台台面上布置有一枚加速度传感器作为输入波校核。试验中所用的加速度计为 DH301 系列三向电容式加速度计，量程为  $\pm 20 \text{ m/s}^2$ ，采集水平和垂直两个方向的加速度。

### 2.4 加载工况

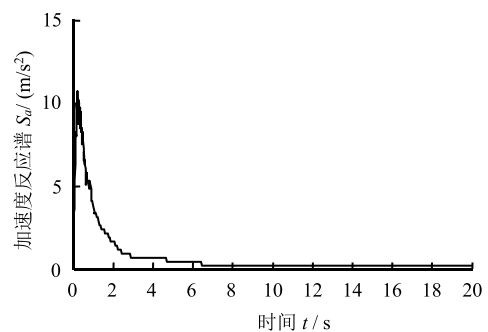
为了研究边坡模型在不同烈度的地震荷载作用下的动力响应，按照烈度为 VI、VII、VIII、IX 度的顺序对模型进行加载，加载工况如表 3 所示。加载地震波依据华丽高速公路金沙江大桥地震动参数安全评价，考虑该边坡工程地质条件和历史地震资料进行合成。合成地震波加速度时程曲线和设计反应谱如图 8 所示。地震波频谱特性如图 9 所示。卓越特性在 1.0~3.5 Hz 之间，输入地震动作用时间为 40 s。

表 3 荷载工况  
Table 3 Cases of loading test

工况序号	激振方向	烈度	$a_{\max}$ /( $\text{m/s}^2$ )
1	水平 $x$	VI度	0.37
2	水平 $x$	VII度	0.74
3	水平 $x$	VIII度	2.97
4	水平 $x$	IX度	4.46



(a) 加速度时程曲线



(b) 设计反应谱

图 8 人工合成波(水平方向)  
Fig.8 Artificial earthquake wave (horizontal direction)



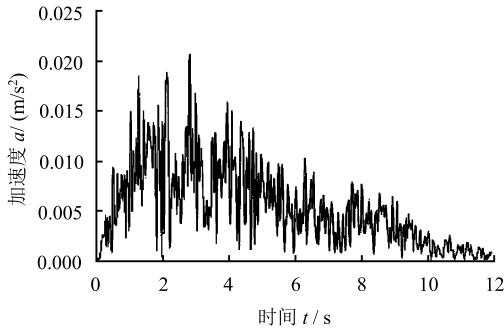


图 9 频谱曲线

Fig.9 Frequency spectrum curve

### 3 边坡动力响应及动力演化规律分析

#### 3.1 贯通性结构面对地震波场传播特性的影响

为了明确贯通性顺倾结构面对地震波场传播特性的影响，首先开展有限元数值分析研究。采用 Abaqus 通用有限元分析软件，基于华丽高速公路金沙江大桥桥址边坡地质及设计资料，将研究对象简化为平面应变问题开展研究。

##### 3.1.1 有限元模型

有限元模型依照岸坡地质构造（图 2）简化而来，主要考虑地形地貌、不连续结构面和地震荷载作用。模型长为 900 m，高为 431 m，坡背顶部以下 150 m 发育有凝灰岩夹层，简化成厚度为 1 m 的软弱结构层，顺平倾角为 15°。边坡顶部发育有后缘陡倾结构面，简化为三道厚 1 m 的软弱层，间距为 30 m，从坡顶贯穿至凝灰岩夹层，顺坡倾角 75°，模型尺寸及结构如图 10 所示。

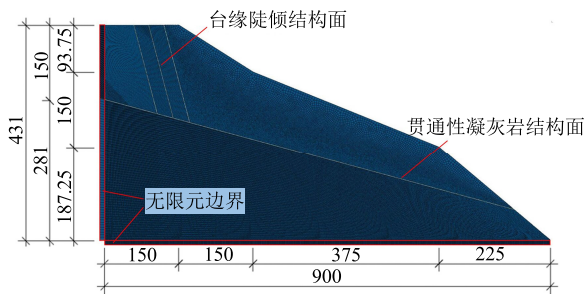


图 10 数值分析模型 (单位: m)

Fig.10 Model of FEM (unit: m)

模型的网格划分主要遵从 Courant 条件，即波的采样间隔应满足  $\Delta t/2 < l/v_s$ ，其中  $l$  为网格尺寸， $v_s$  为材料剪切波速度，网格尺寸  $l$  小于等于介质内波场的 1/10。为了模拟半无限地基，减小模型边界处地震波的反射现象，在模型的底部和左侧设置无限元边界。整个模型总共划分为 109 284 个单元，

其中无限元单元为 784 个。模型材料属性参考表 1 中原边坡岩体物理参数得到。数值分析采用的地震荷载波形与振动台试验一致。共设置两个工况均质边坡和包含贯通性结构面的边坡，分别建立有限元模型，于边坡底部水平加载烈度为 XII 度的人工合成波（峰值加速度为 0.74 m/s<sup>2</sup>）。

##### 3.1.2 地震波场传播特性

将边坡水平方向加速度分布按照时间顺序罗列出来，如图 11、12 所示。对于均质边坡模型，边坡内的加速度波场沿坡面传播并呈现放大效应。对于包含贯通性结构面的边坡模型，加速度波场受贯通性结构面的影响，在结构面和坡面之间反复叠加，加速度放大效应集中在该区域，且放大性更加显著，导致结构面两侧加速度存在较大差异，会形成较大剪切效应，不利于边坡稳定。

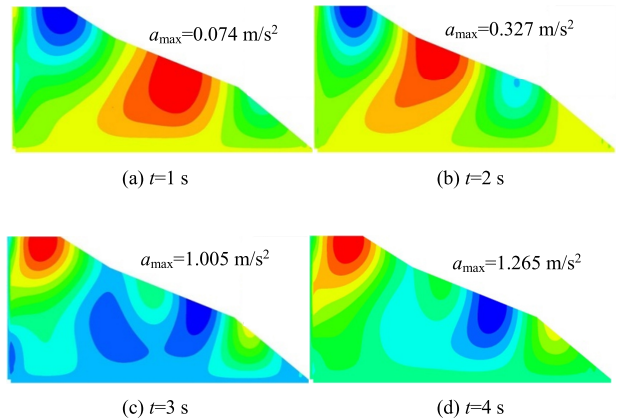


图 11 均质边坡波场快照

Fig.11 Wave field of homogeneous slope

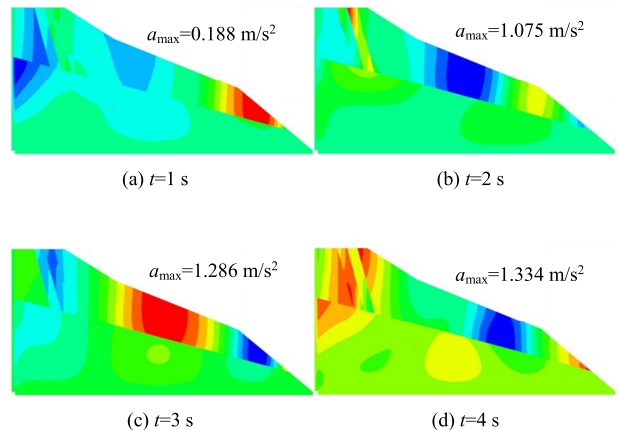


图 12 包含结构面的边坡波场快照

Fig.12 Wave field of slope with discontinuous surface

分别提取两个工况下各点的水平方向加速度最大值，并绘制峰值加速度（PGA）分布图，如图 13 和 14 所示。由图可知，均质边坡内加速度放大特性

单一，加速度最大值位于坡顶，可达 2.3 倍。包含贯通性结构面边坡内加速度放大特性复杂，受到地形地貌和贯通性结构面的影响，在坡顶、坡脚和坡面中部出现了多处加速度放大区域，最大值位于后缘陡倾结构面附近，可达 5 倍。贯通性结构面的存在使得加速度放大效应较均质边坡增大约 1.8 倍，对边坡动力稳定性不利。

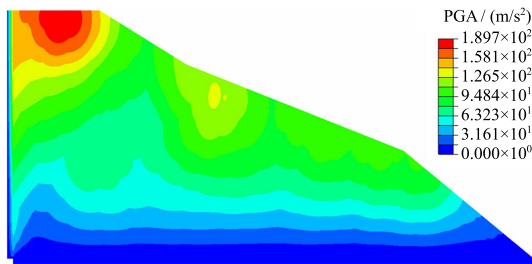


图 13 均质边坡加速度峰值分布图

Fig.13 Distribution of PGA in homogeneous slope

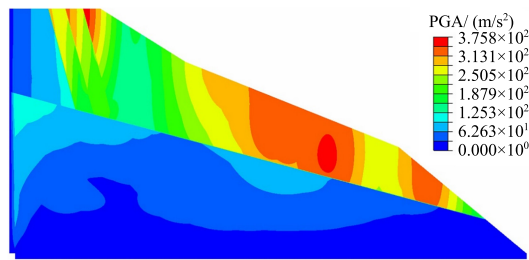


图 14 包含结构面的边坡加速度峰值分布图

Fig.14 Distribution of PGA in the slope with discontinuous surface

## 3.2 边坡动力响应分析

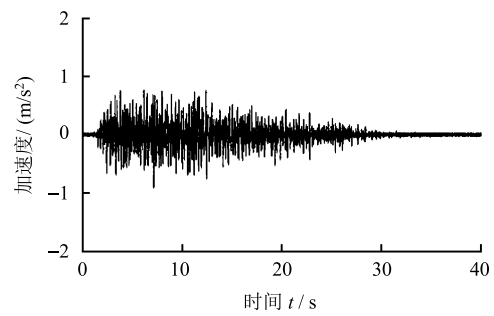
### 3.2.1 加速度响应波形

采集到的加速度波形会受到传感器以及周边环境的影响，如模型箱共振产生的高频噪声，试验厂房共振产生的高频噪声，试验过程中由于发生大变形而产生的传感器松动等。为了消除这些噪声影响，对采集到的加速度波形进行 1~45 Hz 带通滤波，针对个别异常波形，再进行错点剔除和基线校准。

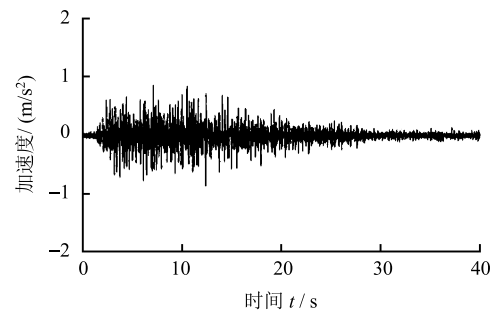
图 15 为工况 2 在峰值加速度为  $0.74 \text{ m/s}^2$ 、水平输入且振动台台面 (A3) 和坡体内部 (A9) 以及坡顶 (A25) 处理后的采集波形。可以看到采集到的加速度波形再现性良好，且边坡对加速度的放大作用明显。

### 3.2.2 加速度放大规律分析

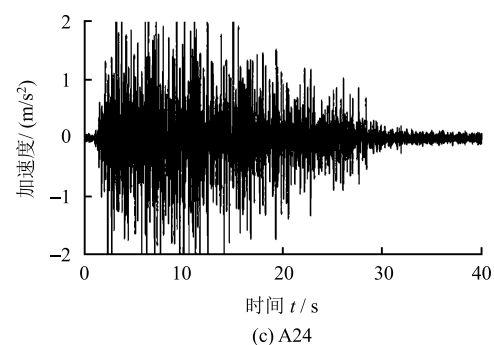
采用峰值加速度放大系数  $M_{\text{PGA}}$  评价边坡加速度响应特性。 $M_{\text{PGA}}$  为坡内各测点 PGA 与振动台台面测点峰值加速度的比值，即  $M_{\text{PGA}} = \text{PGA}_i / \text{PGA}_0$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )，其中  $\text{PGA}_i$  为各测点测得的峰值加速度，



(a) A3



(b) A9



(c) A24

图 15 Ⅶ度水平输入时各观测点加速度波形 ( $0.74 \text{ m/s}^2$ )

Fig.15 Acceleration response waveforms along slope for intensity VII at artificial wave ( $0.74 \text{ m/s}^2$ )

$\text{PGA}_0$  为台面加速度计 A3 采集波形的峰值加速度。分别计算各工况各测点的  $M_{\text{PGA}}$ ，根据其位置信息绘制各工况坡内  $M_{\text{PGA}}$  等值线图，如图 16 所示。边坡内  $M_{\text{PGA}}$  分布规律复杂。与数值分析结果类似，在坡顶和坡脚出现了多处加速度放大区域，且不同地震烈度下观测到的  $M_{\text{PGA}}$  分布具有较高相似性。随着输入波地震烈度的增大， $M_{\text{PGA}}$  呈现逐渐减小的趋势。 $M_{\text{PGA}}$  最大值出现在烈度为Ⅶ度的地震力输入下，最大值可达 3.7 倍。

对比图 14 的数值分析结果可知，两种研究手段均表明以贯通性凝灰岩结构面为分界，结构面下部坡体的  $M_{\text{PGA}}$  较小，结构面与坡面间的  $M_{\text{PGA}}$  较大。数值分析和模型试验揭示的加速度最大值分布位置大致相同，位于坡顶和坡脚附近。可以认为对于包含贯通性顺倾的岩质边坡，贯通性结构面对其稳定性起控制性作用。

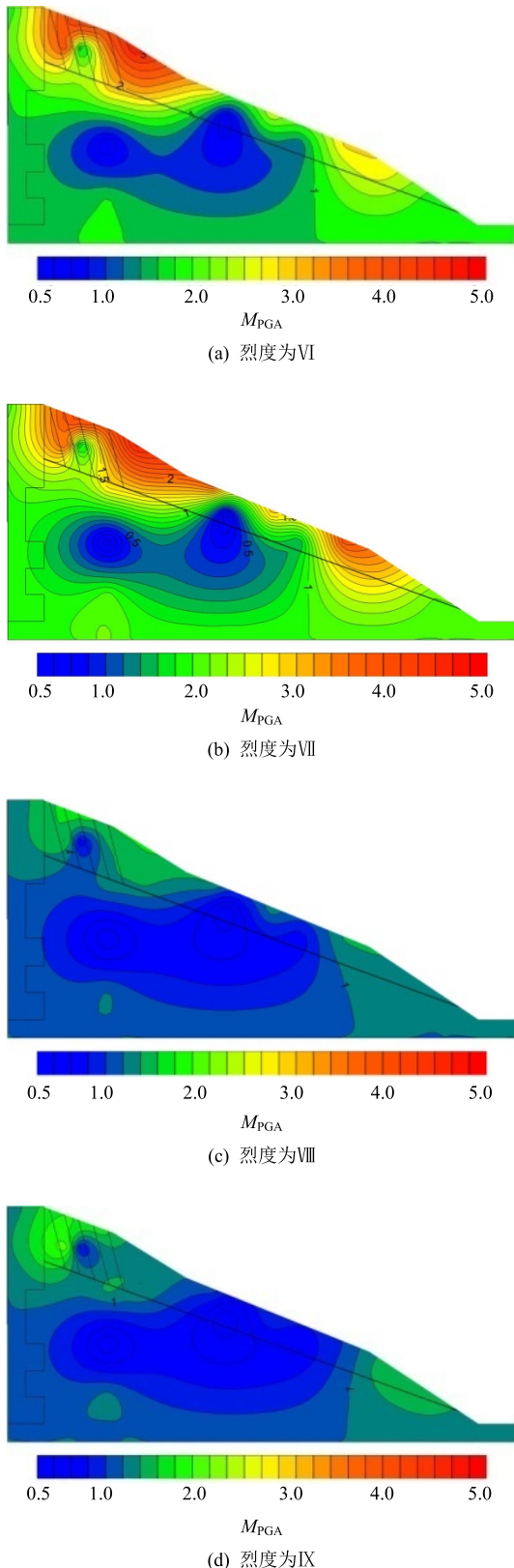


图 16 水平荷载作用下  $M_{PGA}$  等值线图  
 Fig.16 Contour map of  $M_{PGA}$  during horizontal load

### 3.3 边坡动力演化规律分析

为了研究加速度演化规律和边坡破坏过程之间的关系，绘制边坡内各测点水平  $M_{PGA}$  随地震力输入的变化关系图，如图 17 所示。由图可知，边坡

的动力演化过程可以分为 3 个阶段。第 1 阶段是弹性阶段（地震输入峰值加速度小于  $2.97 \text{ m/s}^2$ ，烈度为 VIII 度），随着地震输入荷载增大，边坡内各点加速度响应线性减小。第 2 阶段是塑性阶段（地震输入峰值加速度大于  $2.97 \text{ m/s}^2$ ，且小于  $4.46 \text{ m/s}^2$ ，烈度为 VIII 度至 IX 度），当地震输入峰值加速度达到  $2.97 \text{ m/s}^2$ ，由于震动累积作用，在结构面及其周围产生大量微裂缝和微滑移，边坡内各点加速度响应由线性减小转变为增大趋势。随着地震输入荷载继续增大，这些微裂缝进一步扩张、加深并相互连通。最后，第 3 阶段是破坏阶段（地震输入峰值加速度大于  $4.46 \text{ m/s}^2$ ），边坡发生整体滑坡破坏。可以认为，强震后受扰动边坡可能处在塑性阶段/不稳定阶段，在其他外力触发下有可能发生滑坡灾害。

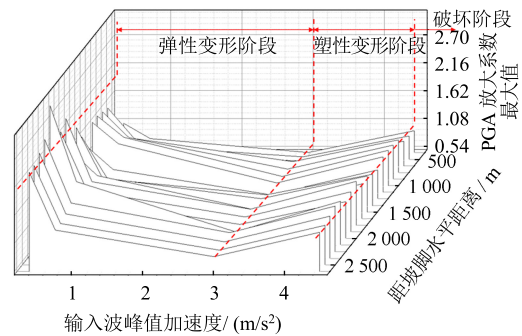


图 17 水平地震输入下  $M_{PGA}$  演化图  
 Fig.17 Evolution of  $M_{PGA}$  under horizontal earthquake motion

## 4 地震力作用下边坡破坏机制分析

每个工况加载结束之后，采用目测和照片记录的方式，对模型表面的裂缝和变形情况进行描绘。边坡发生整体失稳破坏前的裂缝发展过程如图 18 所示。在烈度较小的 VI、VII 度地震荷载作用下，边坡模型的破坏形式主要表现在裂缝的产生和开展；地震荷载达到 VIII、IX 度时，模型表面观测结果（图 18(a)）显示，坡脚附近剪出口处垂直于坡面方向的裂缝逐渐加深、扩展、相互连接直至贯通。模型侧面观测结果（图 18(b)）显示，贯通性凝灰岩结构面附近出现大量的垂直于结构面的裂缝分布，且不断增加、扩展，呈现明显的拉剪破坏模式。

边坡模型在地震烈度为 IX 度水平方向输入时发生整体滑动失稳，破坏后的边坡模型如图 19 所示。根据表面变形状态以及模型拆除过程中观察到的模型内部裂缝贯通情况，绘制边坡破坏模式并分析滑动面所在位置，如图 20 所示。从图中可以看到，剪出口位置位于坡脚以上  $60 \text{ cm}$ ， $3 \text{ cm}$  宽裂缝垂直于



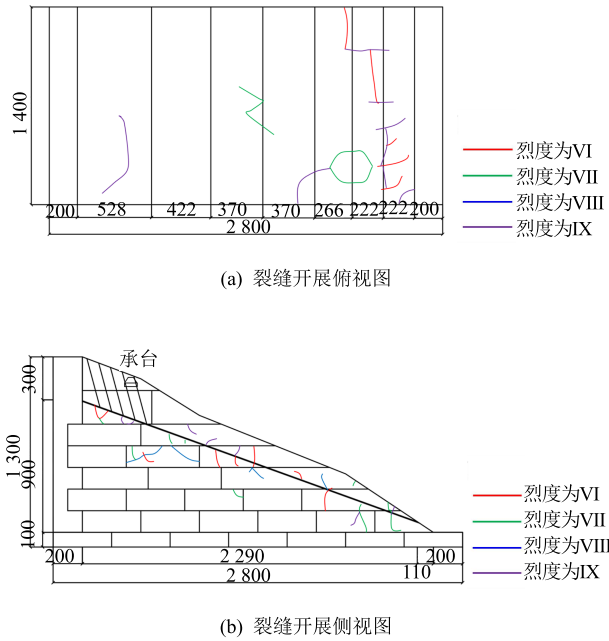


图 18 破坏过程描述 (单位: cm)  
Fig.18 Description of failure process (unit: cm)



图 19 模型破坏后照片  
Fig.19 Photo of the model after failure

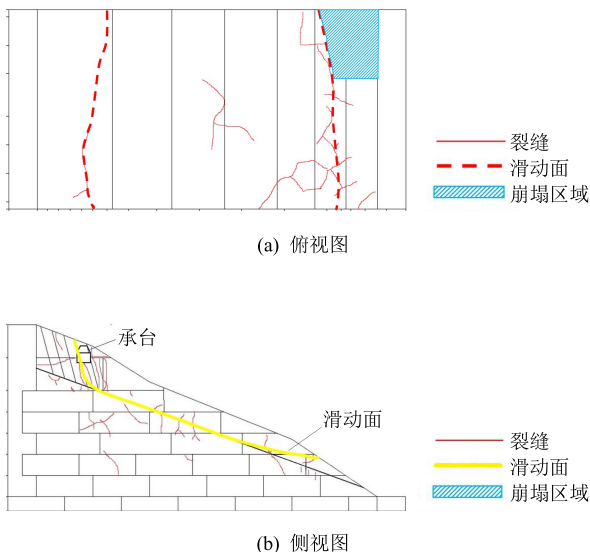


图 20 破坏结果描述  
Fig.20 Description of cracked model

坡面方向贯通;于承台下部陡倾结构面处出现 4 cm 宽拉裂裂缝,裂缝垂直于坡面方向贯通。可以认为,滑动面沿后缘陡倾结构面剪出、沿贯通性凝灰岩结构面滑动、下部坡脚附近剪出。

对比图 16 中  $M_{PGA}$  分布结果和图 20 中的破坏现象描绘可知,加速度在贯通性结构面和坡面间呈现显著放大效应,贯通性结构面以上坡体发生整体滑动失稳,说明地震波场在结构面和坡面之间的反复叠加是边坡滑动破坏的重要原因。对比图 17 动力演化规律和图 18 破坏过程描述可知,边坡于塑性阶段发生裂纹扩展,于破坏阶段发生整体滑动破坏。动力响应规律和破坏现象存在较好一致性,均揭示了贯通性顺倾结构面对边坡滑动起控制作用。

### 5 结 论

(1) 数值分析和振动台模型试验研究均揭示了地震波场在贯通性顺倾结构面与坡面间存在反复叠加效应,加速度放大特性较均质边坡增大约 1.8 倍。明确了贯通性顺倾结构面对边坡稳定起控制性作用。

(2) 随着地震力的增大,可以将加速度演化过程概括为 3 个阶段。第 1 阶段是弹性变形阶段( $M_{PGA}$  线性减小),第 2 阶段是塑性变形阶段( $M_{PGA}$  突变),第 3 阶段是滑动失稳阶段(坡脚附近裂缝贯通,边坡沿贯通性顺倾结构面发生整体滑动失稳)。

强震后大量的边坡处在塑性变形阶段/不稳定阶段,在地震力、降雨等触发下,可能发生滑动失稳,须予以监测和处治。

### 参 考 文 献

[1] 方火浪,高原,银鸽,等. 基于累积损伤理论的土石坝地震永久变形分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 627-634.  
FANG Huo-lang, GAO Yuan, YIN Ge, et al. Earthquake-induced permanent deformation of rockfill dams based on cumulative damage theory[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(4): 627-634.

[2] 杨忠平,刘树林,刘永权,等. 反复微震作用下顺层及反倾岩质边坡的动力稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(9): 1-9.  
YANG Zhong-ping, LIU Shu-lin, LIU Yong-quan, et al. Dynamic stability analysis of bedding and toppling rock slopes under repeated micro-seismic action[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(9): 1-9.



- [3] 郭长宝. 滇藏铁路金沙江河谷段工程地质条件研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2007.  
GUO Chang-bao. Engineering geological research on the Jinsha River valley section of the Yunnan-Tibet Railway[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2007.
- [4] 李宁, 程国栋, 谢定义. 西部大开发中的岩土力学问题[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(3): 268—272.  
LI Ning, CHENG Guo-dong, XIE Ding-yi. Geomechanics development in civil construction in Western China[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(3): 268—272.
- [5] 胡卸文, 朱海勇, 吕小平, 等. 大跨度高塔柱桥基边坡稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 1): 3177—3182.  
HU Xie-wen, ZHU Hai-yong, LÜ Xiao-ping, et al. Study on foundation slope stability of large-span high tower bridge[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Suppl.1): 3177—3182.
- [6] 徐光兴, 姚令侃, 高召宁, 等. 边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 Guang-xing, YAO Ling-kan, GAO Zhao-ning, et al. Large-scale shaking table model test study on dynamic characteristics and dynamic responses of slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(3): 624—632.
- [7] 杨国香, 伍法权, 董金玉, 等. 地震作用下岩质边坡动力响应特性及变形破坏机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 696—702.  
YANG Guo-xiang, WU Fa-quan, DONG Jin-yu, et al. Study of dynamic response characters and failure mechanism of rock slope under earthquake[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(4): 696—702.
- [8] WARTMAN J, SEED R B, BRAY J D. Shaking table modeling of seismically induced deformations in slopes[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2005, 131(5): 610—622.
- [9] 范刚, 张建经, 付晓. 含泥化夹层反倾岩质边坡动力响应的大型振动台试验[J]. 地震工程学报, 2015, 37(2): 422—427.  
FAN Gang, ZHANG Jian-jing, FU Xiao. Large-scale shaking table test to study dynamic responses of anti-inclined rock slopes interlayered with silt[J]. **China Earthquake Engineering Journal**, 2015, 37(2): 422—427.
- [10] 梁庆国, 韩文峰, 马润勇, 等. 强地震动作用下层状岩体破坏的物理模拟研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1307—1311.  
LIANG Qing-guo, HAN Wen-feng, MA Run-yong, et al. Physical simulation study on dynamic failures of layered rock masses under strong ground motion[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(8): 1307—1311.
- [11] GIRI D, SENGUPTA A. Dynamic behavior of small-scale model slopes in shaking table tests[J]. **International Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 4(1): 1—11.
- [12] 孙志亮, 孔令伟, 郭爱国. 不同含水状态堆积体边坡地震响应特性大型振动台模型试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2433—2441, 2460.  
SUN Zhi-liang, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo. Large-scale shaking table test on seismic behavior of deposit slopes with varying moisture content[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(7): 2433—2441, 2460.
- [13] 梁敬轩, 胡卸文, 叶正晖, 等. 大型堆积体边坡基-覆界面及坡面动态响应特性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2249—2260.  
LIANG Jing-xuan, HU Xie-wen, YE Zheng-hui, et al. Dynamic response characteristics of slope surface and rock-soil boundary in deposit slope[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(8): 2249—2260.
- [14] CHE A, YANG H, WANG B, et al. Wave propagations through jointed rock masses and their effects on the stability of slopes[J]. **Engineering Geology**, 2016, 201: 45—56.
- [15] 董金玉, 杨国香, 伍法权, 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, 32(10): 3746—3754.  
DONG Jin-yu, YANG Guo-xiang, WU Fa-quan, et al. The large-scale shaking table test study of dynamic response and failure mode of bedding rock slope under earthquake[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(10): 3746—3754.
- [16] ISHIMARU M, KAWAI T. Basic study on the evaluation of seismic stability of rock slope using centrifuge model test[J]. **Journal of Japan Society of Civil Engineers, (Ser. C, Geosphere Engineering)**, 2011, 67: 36—49.