

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.0056

# 含顺层断续节理岩质边坡地震作用下的破坏模式与动力响应研究

卞 康<sup>1</sup>, 刘 建<sup>1</sup>, 胡训健<sup>2</sup>, 李鹏程<sup>2</sup>, 陈玲朱<sup>2</sup>, 刘振平<sup>1</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:** 基于二维颗粒流软件 PFC<sup>2D</sup> 的人工合成岩体技术 (SRM), 研究了岩桥倾角和节理间距不同组合形式的含顺层断续节理岩质边坡在地震作用下的破坏模式与动力响应规律。研究结果显示: 在地震动力作用下, 含单潜在滑动面的顺层断续节理岩质边坡呈现出滑移-倾倒的混合破坏特征, 含多潜在滑动面的顺层断续节理岩质边坡则主要发生倾倒破坏; 由顺层断续节理以及岩桥交替连接所组成的潜在滑动面是控制边坡动力稳定性的关键因素。在地震动力作用下, 最靠近坡脚的岩桥段首先萌生翼裂纹, 使得拉应力得到释放, 随后各节理相继萌生裂纹并扩展、贯通, 最终导致坡体发生阶梯状整体失稳。裂纹扩展受顺层断续节理控制, 萌生裂纹中以张拉裂纹为主, 且裂纹数量与输入地震波的加速度曲线具有同步性。另一方面, 节理面的存在对边坡动力响应产生明显影响, 沿坡表以及沿水平方向上的峰值速度、峰值位移随着岩桥倾角的增大、节理间距的减小而增大, 同时节理间距和岩桥倾角对于峰值加速度 (PGA) 放大系数的影响范围主要集中在坡表、坡肩; 沿竖直方向上, 峰值位移随着岩桥倾角、节理间距的增大而减小, PGA 放大系数曲线随高程变化总体呈现 U 型分布特征。

**关 键 词:** 岩质边坡; 地震; 动力响应; 岩桥; 顺层断续节理; PFC

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018)08-0000-09

## Study on failure mode and dynamic response of rock slope with non-persistent joint under earthquake

BIAN Kang<sup>1</sup>, LIU Jian<sup>1</sup>, HU Xun-jian<sup>2</sup>, LI Peng-cheng<sup>2</sup>, CHEN Ling-zhu<sup>2</sup>, LIU Zhen-ping<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract:** Based on the two-dimensional particle flow code software (PFC<sup>2D</sup>), the failure modes and dynamic response laws of rock slope with non-persistent joints in different combinations of dip angle for rock bridge and joint spacing under earthquake are studied. The results show that the bedding non-persistent jointed rock slope with single potential sliding surface presents the sliding-block toppling mixed failure under the action of strong earthquake. And the bedding non-persistent jointed rock slope with multi-potential sliding surface mainly presents the block toppling failure. The potential sliding surface composed of non-persistent joints and alternate connections of rock bridges is the key factor to control the dynamic stability of slope. Under the action of strong earthquake, in the rock section which is closest to the toe of the slope generates the wing crack at first, which causes the tensile stress to be released, and then the joints start to crack and expand, eventually leading to the step-like instability. Crack propagation is controlled by bedding non-persistent joints. Cracks are dominated by tensile cracks, and the number of cracks is synchronous with the acceleration of the input seismic waves. The peak displacements of the slope along the slope surface and along the horizontal direction increase with the rise of the dip angle for the rock bridge and the decrease of the joint spacing. The influence range of the PGA amplification factor is mainly on the slope surface and shoulder. Along the vertical direction, the peak displacement decreases with the dip angle of the rock bridge and the spacing of the joint, and the curve of the PGA amplification factor shows "U" type distribution.

**Keywords:** rock slope; earthquake; dynamic response; rock bridge; non-persistent joint; PFC

收稿日期: 2017-01-11

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2016YFC0401802); 国家自然科学基金重点项目 (No. 51539002); 国家自然科学基金项目 (No. 51779249, No. 51209198, No. 51204158); 中国科学院大学生创新实践训练计划。

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China(2016YFC0401802), the Key Program of National Natural Science of China(51539002), the National Natural Science Foundation of China(51779249, 51209198, 51204158) and the College of Creative Practice Training Program of Chinese Academy of Sciences.

第一作者简介: 卞康, 男, 1982年生, 博士, 副研究员, 主要从事岩土工程地质灾害机理与防控方面的研究工作。E-mail: biankang2002@163.com

## 1 引言

地震作用下的岩质边坡破坏是十分常见的地质灾害,常造成灾害事故所在地众多人员伤亡和巨额财产损失<sup>[1]</sup>。据统计,汶川地震后产生滑坡3 627处、崩塌2 383处,其中60%以上是地震所诱发的岩质边坡的失稳破坏,且呈现出与通常重力环境下的边坡灾害显著不同的特点<sup>[2]</sup>。伴随着西部大开发战略的不断提速,我国西部必将建设更多且大规模的水利水电、交通、矿山等工程,这其中相当一部工程可能位于强震分布区。地震条件下岩质边坡的稳定性已成为制约工程长期顺利运营以及周边居民生命财产安全的关键性技术问题。

岩质边坡是由岩块和结构面所组成的复杂地质结构体,其间往往发育有顺层断续节理,使得该类边坡的稳定性可能受到顺层断续节理和岩桥控制,从而产生复杂多样的破坏模式,如Randa岩崩后产生的阶梯状破坏<sup>[3]</sup>。由于地震作用下边坡变形破坏的过程特性、时效性和累进性<sup>[4]</sup>,加之岩质边坡的破坏模式多受到起控制性作用的结构面的影响,地震作用下含顺层断续节理岩质边坡的时效变形特征、破坏机制以及动力响应特征十分复杂。长期以来,对地震作用下含顺层断续节理岩质边坡的破坏模式与动力响应的研究,与地震对此类边坡稳定性所产生的潜在危害性相比是十分缺乏的;对该问题的深入探索对含顺层断续节理岩质边坡的动力稳定性评价、地震诱发滑坡风险的预测预报和工程治理具有非常重要的现实意义和工程价值。

当前对于地震作用下岩质边坡的稳定性和动力响应的研究手段包括震后现场调查、物理模型试验和数值模拟等。在对汶川地震后边(滑)坡破坏的调查统计数据系统分析的基础上,黄润秋等<sup>[2]</sup>研究了汶川地震后边坡破坏数量和影响面积受地形坡度、地质构造、岩性条件等因素的影响规律。物理模型试验法由于能够较真实直观地反映和模拟地震动条件下边坡变形的破坏机制与过程,成为揭示岩质边坡强震动力响应的重要手段<sup>[5-7]</sup>。另一方面,随着计算机技术的发展,数值模拟技术在岩质边坡地震动力稳定性分析中逐渐取得了广泛应用<sup>[8-10]</sup>。但由于涉及的领域涵盖地震工程学、岩体力学、断裂力学、工程地质学等多个学科,且受限于动力条件下裂纹扩展模拟的复杂性,含顺层断续节理岩质边坡在地震条件下的破坏模式与动力响应研究存在较高的难度,对其破坏机制和动力响应规律的认识亟待于进一步深化。

近年来,基于离散元法的颗粒流程序PFC展现了在模拟裂纹扩展和岩体大变形破坏等方面的显著优势,逐渐成为国内外岩石力学和工程领域研究的有力手段<sup>[11-12]</sup>。PFC由于只需定义颗粒与颗粒之间的粘结性质,而不用定义整体的本构关系,避免了宏观本构关系的预先假定<sup>[13]</sup>。鉴于颗粒流模拟技术的优势,本文基于PFC5.0中的人工合成岩体(synthetic rock mass, SRM)模拟技术,通过输入汶川地震中卧龙台所记录的地震波横波,研究了岩桥倾角和节理间距对含顺层断续节理岩质边坡地震条件下的破坏模式和动力响应的影响。研究成果可为含顺层断续节理岩质边坡的动力稳定性评价和加固设计提供参考。

## 2 人工合成岩体原理

岩体是由结构面网络及岩石块体所组成的复杂地质体,由于长期经受着复杂的地质构造作用,往往表现出非均匀性、非连续性、各向异性等特征。结构面作为岩体当中力学性质较差的弱面,很容易发生破坏。由于人工合成岩体技术的提出,使得在PFC中更好地模拟岩体及其力学性质成为可能。在PFC5.0中,人工合成岩体主要由颗粒之间的平行粘结模型和离散裂隙网络两部分组成,如图1所示<sup>[14]</sup>。

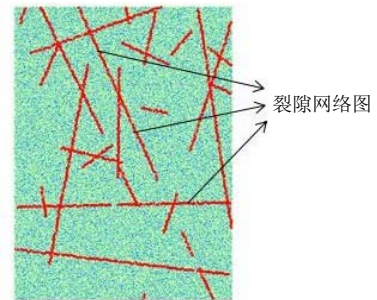


图1 人工合成岩体示意图

Fig.1 Synthetic rock mass diagram

### 2.1 平行粘结模型

在外部荷载作用下,岩石内部的矿物颗粒之间会发生相对位移,颗粒之间的胶结也会受到破坏,从而形成岩石的宏观裂纹。

在PFC5.0中,平行粘结模型是一种适合模拟岩石内部组成结构的微观颗粒接触模型,如图2所示<sup>[15]</sup>。平行粘结模型将颗粒之间的粘结视为一组平行的弹簧,具有抗拉伸、剪切及力矩效应,从而能够有效的模拟岩石内部颗粒之间的粘结。该模型中,除粘结弹簧提供刚度外,接触弹簧也提供刚度,一旦颗粒之间的粘结发生拉伸或者剪切破坏,粘结刚

度便立即失效，而接触刚度仍然发挥作用。当粘结拉应力或剪应力首先超过粘结法向强度或切向强度后，平行粘结发生图 2 中黑短线表示的拉断裂和剪断裂，当颗粒之间萌生大量的微断裂后，便形成宏观可见的裂隙。由于平行粘结模型具有抗拉伸、剪切和力矩效应及粘结破坏-材料宏观刚度劣化等特点，从而适宜于模拟岩体材料的力学性质。

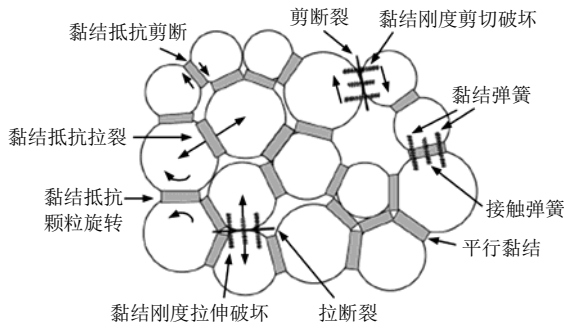


图 2 平行粘结模型示意图

Fig.2 Parallel bonded model diagram

### 2.2 离散裂隙网络

在本文中节理逐条添加到离散裂隙网络中。在 PFC<sup>2D</sup> 中，裂隙节理的主要几何特征包括节理走向以及迹长，离散裂隙网络被视为嵌入到颗粒中。在 PFC 中，平行粘结模型主要用于模拟岩石内部微观颗粒之间的接触，而把与离散裂隙网络交叉的平行粘结模型全部替换为平滑节理接触模型 (smooth-joint contact model)。其微观示意图如图 3 所示<sup>[14]</sup>。

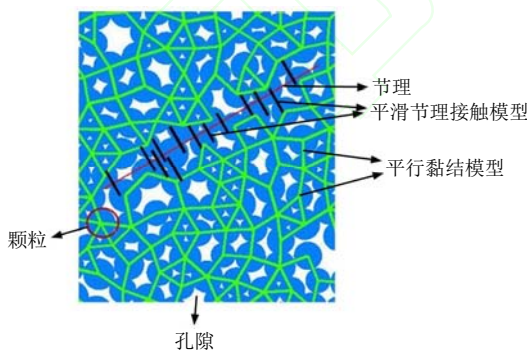


图 3 离散裂隙网络示意图

Fig.3 Discrete fracture network diagram

## 3 颗粒流模型方案

### 3.1 边界条件与地质结构设置

在进行地震作用下边坡的动力响应分析时，需要在模型底部输入地震波加速度时程曲线。为了阻止地震波在模型边界处发生反射现象，需要采用黏滞边界，在 PFC<sup>2D</sup> 中通过在模型两侧和底部边界的法向和切向设置阻尼器来实现。

考虑到真实边坡地质结构的复杂性，在合理概化后，建立含顺层断续节理的岩质边坡模型，其地质结构和动力计算边界条件设置如图 4 所示。图中沿着坡面、水平方向和竖直方向共设置 23 个监测点，监测岩石颗粒的位移、速度、加速度等特征量。

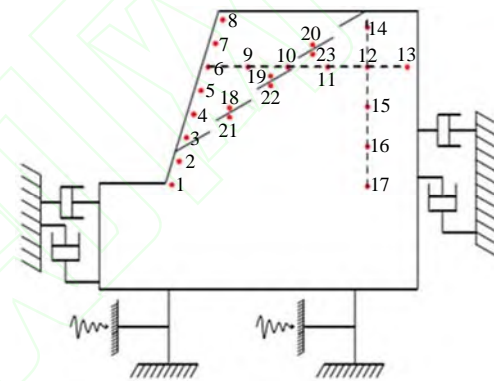


图 4 边坡地质结构、动力计算边界条件及监测点分布

Fig.4 Distribution of geological structures, boundary condition of dynamic calculation and monitoring points of slope

### 3.2 宏细观力学参数

采用单(双)轴压缩、巴西圆盘劈裂等模拟试验来调整边坡模型参数，并通过与室内试验中获得的常见岩石宏观力学参数(如抗拉强度、抗压强度、弹性模量、泊松比、黏聚力和内摩擦角等)相匹配来标定微观参数<sup>[14]</sup>，最终确定在 PFC<sup>2D</sup> 中采用的岩质边坡颗粒流模型的细观参数如表 1 所示，模拟的岩石宏观力学参数如表 2 所示。

本文参考文献<sup>[14]</sup>并通过一系列的数值试验和敏感性分析，最终对颗粒局部阻尼系数取为 0.7。

表 1 岩质边坡颗粒流模型的细观参数

Table 1 Mesoscopic parameters used in the PFC<sup>2D</sup> models

最小粒径 / mm	最大粒径与最小粒径比值	颗粒密度 / (kg/m <sup>3</sup> )	颗粒接触模量 E <sub>c</sub> / GPa	颗粒法向刚度与剪切刚度比值 k <sub>n</sub> /k <sub>s</sub>	颗粒摩擦系数	平行粘结半径乘子	平行粘结法向刚度与剪切刚度比值 k <sub>nb</sub> /k <sub>sb</sub>	平行粘结模量 E <sub>b</sub> / GPa	平行粘结抗拉强度 / MPa	平行粘结黏聚力 / MPa	节理法向刚度 / (N/m)	节理切向刚度 / (N/m)	节理摩擦系数
0.08	1.75	3 100	1.0	1.0	0.7	1.0	1.0	10.0	30.0	27.0	10.0	1.0	0.7



表 2 岩石宏观力学参数表  
Table 2 Macroscopic mechanical properties of simulated rock

单轴抗压强度 /MPa	巴西劈裂抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比	内摩擦角 /( $^{\circ}$ )	黏聚力 /MPa
6.90	0.26	30	0.10	21	2.12

### 3.3 输入地震波

采用 2008 年四川汶川地震中在卧龙所监测到的 E-W 波的前 25 s 作为水平地震波输入模型底部。其加速度时程曲线如图 5 所示。

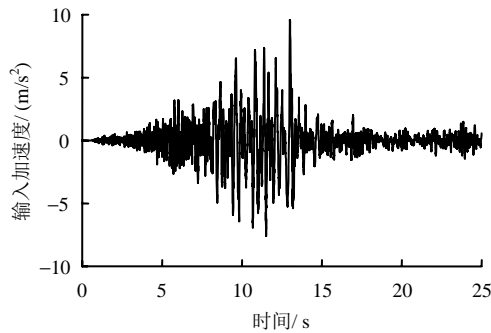


图 5 输入地震波加速度时程曲线

Fig.5 Acceleration time-history curve of earthquake wave

### 3.4 边坡颗粒流模型方案

在 PFC 中,生成最终模型一般有如下 4 个步骤:生成具有完整岩块性质的颗粒集合体、应力初始化、裂隙生成、颗粒粘结设置。

通过建立 4 个岩桥倾角和节理间距不同组合形式下的模型,研究岩桥倾角和节理间距变化对边坡破坏模式的影响。各边坡模型参数如表 3 所示,边坡模型尺寸和边坡顺层断续节理参数示意图如图 6 所示,其中: $L_j$ 为节理长度; $L_r$ 为岩桥长度; $D$ 为节理间距; $\alpha$ 为岩桥倾角; $\beta$ 为节理倾角。

岩桥倾角和节理间距不同组合形式下边坡颗粒流模型如图 7 所示。

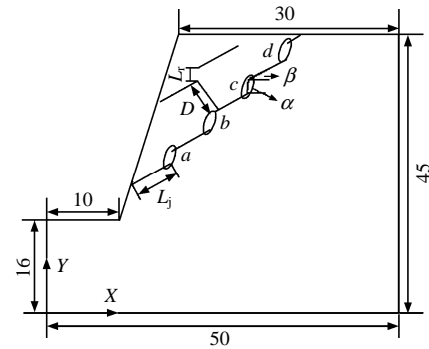
## 4 边坡破坏模式与动力响应研究

针对图 7 所设置的模型,根据图 4 中的监测点布置方案,获取 23 个监测点的速度、加速度、位移

表 3 各边坡模型节理参数

Table 3 The joint parameters of different slope models

模型	$L_j$ /m	$L_r$ /m	$D$ /m	$\alpha$ /( $^{\circ}$ )	$\beta$ /( $^{\circ}$ )
1	6	2		60	30
2	6	2		90	30
3	6	2	5.1	30	30
4	6	2	2.7	30	30



注:图中 a、b、c、d 为岩桥编号

图 6 边坡模型尺寸和顺层断续节理参数示意图(单位:m)

Fig.6 Diagram of model dimension and non-persistent joint in the slope(unit: m)

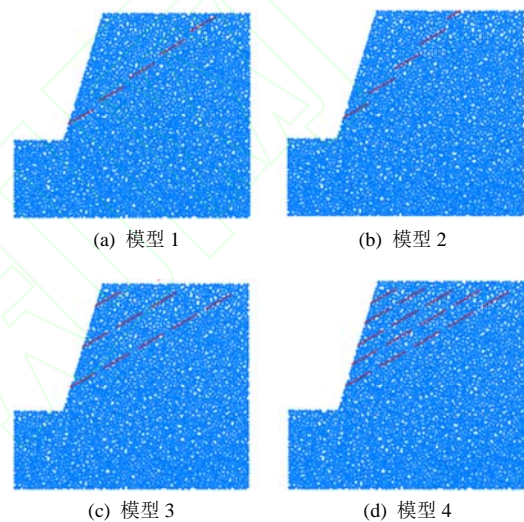


图 7 边坡颗粒流模型节理布置方案

Fig.7 Joint distribution in PFC models for slopes

的时程曲线图,以及地震波输入 25 s 后的边坡破坏图,并据此开展地震作用下边坡破坏模式与动力响应研究。

### 4.1 地震作用下的边坡破坏模式

各模型地震持时 25 s 后的破坏图及对应的位移云图如图 8 所示。由图可知,在地震作用 25 s 之后,各边坡模型均出现显著的裂纹扩展和贯通现象,其中在地震波输入的模型底部和断续节理面上方坡体处裂纹最为密集,且均有底部裂纹向上扩展至节理处。同时,各模型均发育有垂直于岩桥段的张拉裂纹,且向坡表扩展。

4 个模型在裂纹萌生、扩展和贯通时的过程大致类似,如图 9 所示。

在本文所建立的 4 个模型当中,在裂纹萌生、扩展以及贯通时,裂纹数量与输入地震波的加速度曲线均具有同步性。地震加速度与模型 1 的裂纹数量随地震持时的关系曲线如图 10 所示。

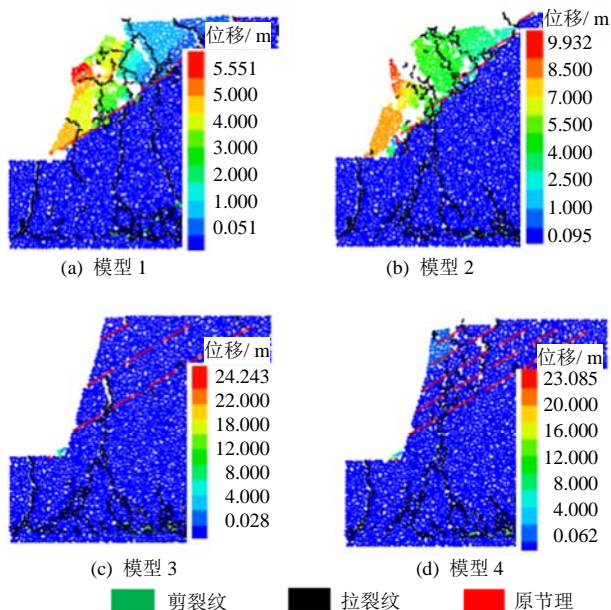


图 8 地震持时 25 s 后各边坡模型破坏图  
Fig.8 Failure diagrams of slope models when the earthquake lasts for 25 s

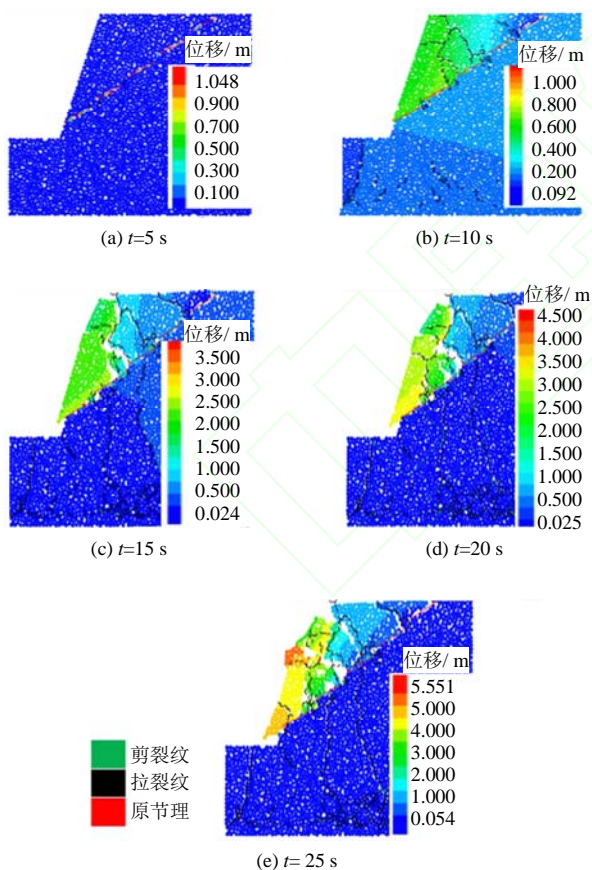


图 9 不同地震持时下边坡模型 1 破坏过程与位移分布图  
Fig.9 The failure process and displacements of Model 1 under different durations of earthquake

结合图 9 和图 10，可以看出，随着地震动加速度逐渐增大，裂纹迅速萌生、扩展并贯通；当地震持时在第 8~14 s 之间时，地震波加速度量值相比

其他时间段有明显提高，此时间段内裂纹数量增长最快。在边坡由于地震动力作用导致破坏的过程中，萌生的拉裂纹数量远多于剪裂纹，且剪裂纹在坡体底部萌生较多。随着地震动加速度增大，在由断续节理和岩桥交替连接所组成的滑动面上部滑体内陆续形成多条破裂面，并逐渐延伸至坡表，导致滑体逐渐崩解成若干块体。

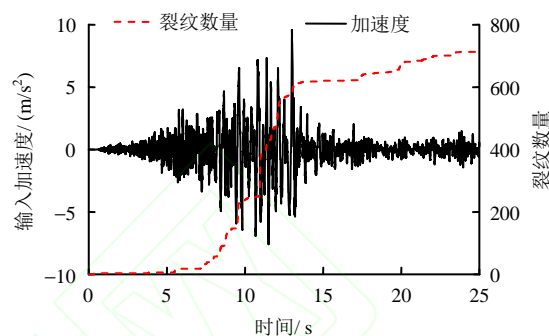


图 10 地震加速度与裂纹数量随地震持时的关系曲线  
Fig.10 Relationship among the earthquake acceleration, the number of cracks and the durations of earthquake

如图 8(a)、8(b)所示，结合上述分析结果可知，在地震动作用下，含单组潜在滑动面的顺层断续节理岩质边坡主要发生滑移-倾倒型混合破坏。由于顺层断续节理的存在以及在地震作用下岩桥部分的贯通，其潜在滑动面形态上呈现明显的阶梯状。一般而言，阶梯状滑动面上方坡体整体位移明显要大于下方坡体位移，同时坡体位移大致可以按照断续节理以及扩展贯通的裂纹进行分区，其中坡脚部分位移最大，坡肩及坡体中部位移次之，坡体后缘位移最小。动力作用下边坡岩桥部分首先贯通，随后由扩展裂纹和岩桥所包围的坡脚部分发生向下滑移，当由岩桥至坡表的裂纹扩展贯通以后，贯通面以下及断续节理面以上的滑体将发生倾倒变形，坡肩部位倾倒趋势尤为显著。随着地震持时的增加，边坡滑动面以上滑体沿坡面向下滑移趋势逐渐明显，且崩解也逐步加剧。

如图 8(c)、8(d)所示，在地震动作用下，含多组潜在滑动面的顺层断续节理岩质边坡以倾倒破坏为主，且坡肩部位倾倒趋势尤为显著。各节理之间会由于裂纹的扩展而形成贯通面，节理面对裂纹向坡表扩展存在一定的阻碍作用。在裂纹扩展过程中，裂纹尖端应力集中，裂纹扩展过程中遇到节理面时，由于应力突然释放，有可能发生方向改变甚至消失。相比较于含单潜在滑动面边坡，含多组潜在滑动面边坡裂隙发育，岩体结构面网络也更加发

育, 由于裂隙之间的更易扩展贯通, 使得边坡更易发生塑性变形。

综上所述, 顺层边坡的动力稳定性和破坏模式受顺层断续节理的发育特征所控制, 当边坡产生整体破坏时, 坡体内部已经产生了大量的小型张拉或者剪切破坏, 坡体在产生宏观滑移前, 已经分解成大小不一、由断续节理和扩展贯通裂纹所组成的块体, 同时随着坡体的滑移, 坡体会继续分解成大量的块体并向坡脚运动, 发生滑动或者倾覆。本文所得出的结论和李祥龙等<sup>[16]</sup>采用相似材料制作边坡物理模型进行离心机动力试验的结论类似, 也从侧面印证了颗粒流模拟方法的可行性与科学性。

#### 4.2 地震作用下的边坡动力响应

动力响应分析对象主要包括峰值位移、峰值速度和峰值加速度, 在本文中采用 PGA 放大系数对峰值加速度 (PGA, peak ground acceleration) 开展分析。本文参考文献<sup>[17]</sup>, 定义坡体内监测点动力响应峰值加速度与输入地震波的峰值加速度 ( $9.57 \text{ m/s}^2$ )

的比值为 PGA 放大系数。

##### 4.2.1 坡表岩体的动力响应

在地震作用下, 边坡表面 8 个监测点 (如图 4 所示) 的峰值速度、峰值位移以及 PGA 放大系数分布如图 11 所示。文中峰值速度、峰值位移和峰值加速度均为合速度、合位移以及合加速度。图中监测点水平距离是指监测点距离模型左下角坐标原点 (如图 6 所示) 的水平距离。

岩桥倾角对于岩桥的破坏模式有着重要影响, 已有研究成果显示<sup>[18]</sup>, 岩桥倾角小于  $90^\circ$  时, 岩桥主要发生剪切贯通破坏; 岩桥倾角大于等于  $90^\circ$  时, 岩桥主要发生张拉贯通破坏。由图 11 可知, 沿坡表峰值速度与峰值位移均随着岩桥倾角的增加而增加。对比岩桥倾角分别为  $60^\circ$  和  $90^\circ$  的模型 1、2 可知, 两组模型的峰值速度与峰值位移在坡表中部差距最大, 而在坡脚和坡肩差距较小, 可见岩桥倾角的差异对于边坡坡表动力响应的影响在坡表中部更为突出。

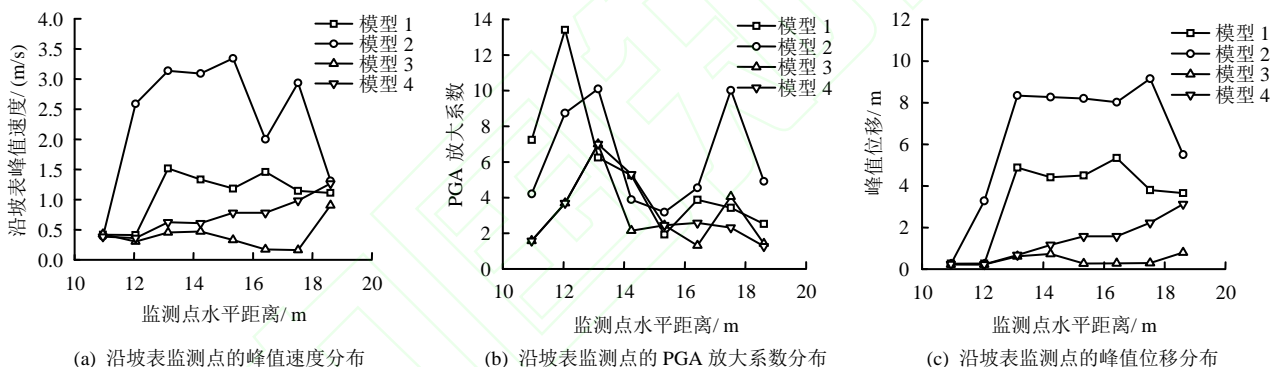


图 11 沿坡表监测点的峰值速度、PGA 放大系数和峰值位移分布

Fig.11 Peak velocities, the PGA amplification factor and peak displacements along the slope surface

节理间距会影响岩体的完整性, 从而对边坡稳定性产生影响<sup>[19]</sup>。模型 3、4 的节理间距分别为 5.1 m 和 2.7 m, 且两者间仅有节理间距存在差异。由图 11 可知, 当顺层断续节理间距减小时, 坡表各监测点的峰值速度、峰值位移和 PGA 放大系数均有增加, 可见当其他因素相同时, 顺层断续节理发育越密集的岩质边坡, 在地震作用下越容易发生破坏。

##### 4.2.2 边坡沿水平方向上岩体的动力响应

在地震作用下, 边坡沿水平方向上监测点 (点 6、9、10、11、12 和 13, 如图 4 所示) 的峰值速度、峰值位移和 PGA 放大系数分布如图 12 所示。

总体而言, 越靠近边坡坡表, 沿水平方向上监测点的峰值速度和峰值位移越大。可见边坡沿水平方向上岩体的动力响应程度与岩体和坡表的距离存在明显关联。

随着岩桥倾角增加, 边坡沿水平方向上岩体的动力响应规律总体呈现出峰值速度与峰值位移增大的变化趋势。由曲线变化趋势可知, 岩桥倾角对边坡沿水平方向上岩体的动力响应存在一定的影响范围, 局限于坡表附近。

随着节理间距的减小, 边坡沿水平方向上各监测点的峰值速度和峰值位移均有所增加, 且越靠近坡表该趋势越显著。此外, 点 11、12、13 之间的峰值速度与峰值位移基本一致, 说明节理间距对于边坡沿水平方向上岩体动力响应的影响同样存在一定的范围, 影响区域主要集中在距离坡表较近的位置。

除模型 2 的监测点 10 外, 沿水平方向上的监测点 PGA 放大系数基本一致, 说明岩桥倾角和节理间距对同一高程的监测点的 PGA 放大系数影响不明显。



### 4.2.3 边坡沿竖直方向上岩体的动力响应

在地震作用下，边坡沿竖直方向上监测点（点 12、14、15、16 和 17，如图 4 所示）的峰值速度、

峰值位移、PGA 放大系数分布如图 13 所示。图中监测点高度是指监测点距离模型左下角坐标原点（如图 6 所示）的高度。

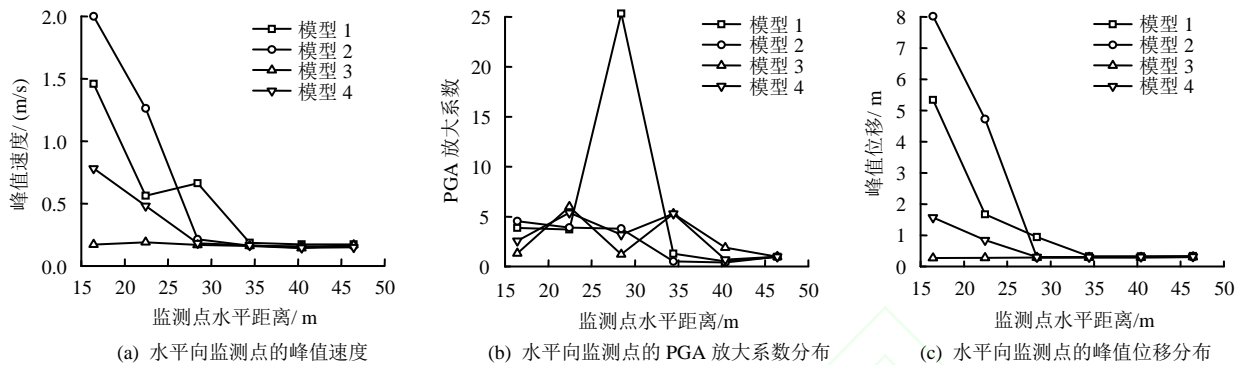


图 12 沿水平方向上监测点的峰值速度、PGA 放大系数和峰值位移分布

Fig.12 Peak velocities, the PGA amplification factor and peak displacements along the horizontal direction

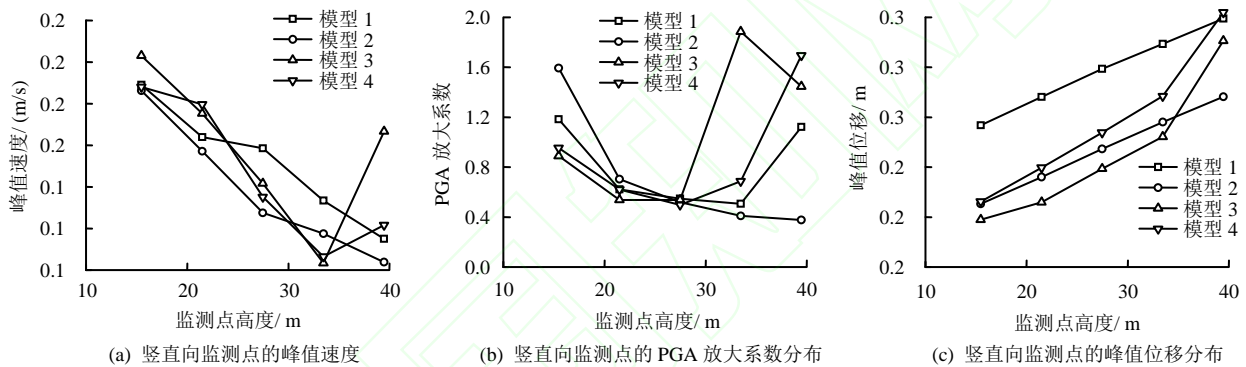


图 13 沿竖直方向上监测点的峰值速度、PGA 放大系数和峰值位移分布

Fig.13 Peak velocities, the PGA amplification factor and peak displacements along the vertical direction

总体而言，各模型沿竖直方向上监测点的峰值速度随着高程增加而减小；峰值位移随高程增加呈线性增大趋势。说明在地震作用下，含顺层断续节理边坡岩体的峰值位移存在明显的高程放大效应，使得坡顶岩体先于坡底岩体产生崩解和倾倒破坏；除模型 2 外，其余模型的 PGA 放大系数曲线随高程变化呈现 U 型分布特征。

随着岩桥倾角增大，边坡沿竖直方向上监测点的峰值速度与峰值位移均有所减小。PGA 放大系数则随着高程的变化呈现相反分布规律：从坡体中部至坡底，岩桥倾角与监测点 PGA 放大系数呈现正相关变化规律；从坡体中部至坡顶，岩桥倾角与监测点 PGA 放大系数呈现负相关的变化趋势。

随着节理间距减小，边坡沿竖直方向上监测点的峰值速度变化相对不明显，峰值位移则有所增加；PGA 放大系数则随着高程的变化同样呈现相反分布规律：从坡体中部至坡底，节理间距与监测点 PGA 放大系数呈现负相关变化规律；从坡体中部至

坡顶，节理间距与监测点 PGA 放大系数呈现正相关的变化趋势。

总结可知，地震波在含裂隙边坡中传播，当遇到断续节理时，应力波会产生反射和折射，当应力波传播至边坡表层后，也会在岩体表层产生反射和折射，使得岩体内部的应力波发生局部的叠加，从而使得含断续节理的边坡产生独一无二的动力响应规律<sup>[20]</sup>。

将本文结论与李祥龙等<sup>[21]</sup>使用相似材料分别制作只含有非连续的层面和同时含有非连续的层面和非贯通的次级节理顺层岩体边坡小比例物理模型，进行离心机动力试验的试验结果，以及 Che<sup>[22]</sup>，王斌<sup>[23-24]</sup>等采用水泥、沙、铁粉、黏土与混合剂制成类岩材料，在边坡内部按照一定的规律设置表面摩擦系数极低的特氟龙布模拟断续节理，设计并完成含不连续节理的岩质高陡边坡大型振动台模型试验进行结果对比分析，得出结论类似，侧面印证了本文采用颗粒流模拟的正确性。

## 5 结 论

本文基于二维颗粒流软件 PFC<sup>2D</sup>, 通过采用人工合成岩体技术, 研究了岩桥倾角和节理间距不同组合形式的含顺层断续节理岩质边坡在地震条件下的破坏模式与动力响应规律。结论如下:

(1) 在地震动力作用下, 含单组潜在滑动面的顺层断续节理的岩质边坡呈现出滑移-倾倒的混合破坏模式。坡脚首先发生滑移破坏, 当由岩桥至坡表的裂纹扩展贯通以后, 贯通面以下及断续节理面以上的滑体将发生倾倒变形, 坡肩部位倾倒趋势尤为显著。含多组潜在滑动面的顺层断续节理的岩质边坡则以倾倒破坏为主, 且坡肩部位倾倒趋势尤为显著。由顺层断续节理以及岩桥交替连接所组成的潜在滑动面是控制边坡动力稳定性的关键因素。

(2) 在地震作用下, 边坡岩桥段最先发生破坏, 靠近坡脚处的岩桥首先萌生翼裂纹, 之后其他岩桥也接连发生破坏, 且萌生垂直于岩桥向坡表扩展的张拉裂纹。张拉裂纹占边坡萌生裂纹总量的绝大部分, 剪切裂纹只在坡体底部发育。随着地震动加速度增大, 在断续节理和岩桥交替连接所组成的边坡滑动面上部滑体内陆续形成多条破裂面, 并逐渐延伸至坡表, 导致滑体逐渐崩解。

(3) 节理间距和岩桥倾角对地震波在坡体内的传播存在明显影响。当顺层断续节理间距减小或者岩桥倾角增加时, 坡表各监测点的峰值速度、峰值位移、PGA 放大系数均有增加。随着岩桥倾角增大或节理间距减小, 边坡沿水平方向岩体的峰值速度和峰值位移均呈增加趋势, 但影响范围主要集中在靠近坡表的部位。边坡沿垂直方向岩体的峰值位移则随岩桥倾角或节理间距的增大而减小, PGA 放大系数曲线随高程变化总体呈现 U 型分布。

(4) 输入地震波加速度和边坡裂纹数量具有良好的 consistency, 地震波加速度接近峰值的临近时间段也是裂纹数量增长最快的时间段。

## 参 考 文 献

- [1] 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 Hai-bo, XIAO Ke-qiang, LIU Ya-qun. Factor of safety analysis of bedding rock slope under seismic load[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(12): 2385—2394.
- [2] 黄润秋, 李为乐. “5.12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2585—2592.  
HUANG Run-qiu, LI Wei-le. Research on development and distribution rules of geohazards induced by Wenchuan earthquake on 12th may, 2008[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(12): 2585—2592.
- [3] BRIDEAU M A, YAN M, STEAD D. The role of tectonic damage and brittle rock fracture in the development of large rock slope failures[J]. **Geomorphology**, 2009, 103(1): 30—49.
- [4] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1525—1544.  
HUANG Run-qiu. Geodynamic process and stability control of high rock slope development[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(8): 1525—1544.
- [5] 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.
- [6] 许强, 刘汉香, 邹威, 等. 斜坡加速度动力响应特性的大型振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(12): 2420—2428.  
XU Qiang, LIU Han-xiang, ZOU Wei, et al. Large-scale shaking table test study of acceleration dynamic responses characteristics of slopes[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(12): 2420—2428.
- [7] 付晓, 张建经, 周立荣. 多级框架锚索和抗滑桩联合作用下边坡抗震性能的振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 462—470.  
FU Xiao, ZHANG Jian-jing, ZHOU Li-rong. Shaking table test of seismic response of slope reinforced by combination of anti-slide piles and multi-frame foundation beam with anchor cable[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(2): 462—470.



- [8] LIU Y Q, LI H B, ZHAO J, et al. UDEC simulation for dynamic response of a rock slope subject to explosions[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2004, 41(4): 599—604.
- [9] LI X. Finite element analysis of slope stability using a nonlinear failure criterion[J]. **Computers & Geotechnics**, 2007, 34(3): 127—136.
- [10] GUO MINGWEI, GE XIURUN, WANG SHUILIN. Slope stability analysis under seismic load by vector sum analysis method[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2011, 3(3): 282—288.
- [11] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(8): 1329—1364.
- [12] LAM CAMONES, EDAV JR, RPD FIGUEIREDO, et al. Application of the discrete element method for modeling of rock crack propagation and coalescence in the step-path failure mechanism[J]. **Engineering Geology**, 2013, 153(2): 80—94.
- [13] 李新坡, 何思明. 节理岩质边坡破坏过程的PFC<sup>2D</sup>数值模拟分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(增刊 1): 70—75.
- LI Xin-po, HE Si-ming. Numerical analysis of the failure of heavily jointed rock slopes using PFC<sup>2D</sup>[J]. **Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)**, 2010, 42(Supp.1): 70—75.
- [14] Itasca Consulting Group Inc.. PFC, Version 5.0[M]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc., 2014.
- [15] ZHANG X P, WONG L N Y. Crack initiation, propagation and coalescence in rock-like material containing two flaws: a numerical study based on bounded-particle model approach[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2013, 46(5): 1001—1021.
- [16] 李祥龙, 唐辉明, 王立朝. 顺层岩体边坡地震动力破坏离心机试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(4): 729—736.
- LI Xiang-long, TANG Hui-ming, WANG Li-chao. Centrifuge modelling tests on dynamic failure of bedding rock slopes[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(4): 729—736.
- [17] 廖少波. 强震作用下块状岩体边坡稳定性研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2013.
- LIAO Shao-bo. Study on stability of block rock slope under strong earthquake[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013.
- [18] 岑夺丰, 黄达, 黄润秋. 岩质边坡断续裂隙阶梯状滑移模式及稳定性计算[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 695—706.
- CEN Duo-feng, HUANG Da, HUANG Run-qiu. Step-path failure mode and stability calculation of jointed rock slopes[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(4): 695—706.
- [19] 郝宪杰, 冯夏庭, 周扬一, 等. 节理间距对柱状节理玄武岩隧洞稳定的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊 1): 3337—3347.
- HAO Xian-jie, FENG Xia-ting, ZHOU Yang-yi. Influence of joint space to stability of columnar jointed basaltic rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(Supp.1): 3337—3347.
- [20] CHE AILAN, YANG HONGKAI, WANG BIN, et al. Wave propagations through jointed rock masses and their effects on the stability of slopes[J]. **Engineering Geology**, 2015, 201: 45—56.
- [21] 李祥龙, 唐辉明, 王立朝. 顺层岩体边坡地震动力破坏离心机试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(4): 729—736.
- [22] CHE AILAN, YANG HONGKAI, WANG BIN, et al. Wave propagations through jointed rock masses and their effects on the stability of slopes[J]. **Engineering Geology**, 2015, 201: 45—56.
- [23] 王斌, 车爱兰, 葛修润. 岩质高陡边坡动力响应及失稳机制大型振动台模型试验研究[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(7): 951—956.
- [24] 王斌. 强震作用下含不连续面高陡岩质边坡动力响应振动台试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.