

DOI: 10.11779/CJGE201403009

# 层面参数对顺层岩质边坡地震动力破坏过程影响研究

李祥龙<sup>1,2</sup>, 唐辉明<sup>1</sup>, 胡巍<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质环境监测院, 北京 100081;

3. 长江三峡勘测研究院有限公司(武汉), 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 建立3组含有非完全贯通层面和正交次级节理的顺层岩质边坡数值模型, 运用FLAC/PFC2D耦合计算方法进行了地震动力破坏过程模拟试验。试验结果证明: 非贯通层面部分在水平地震动力作用下, 同时存在张拉和剪切两种破坏模式。非贯通层面部分的强度和层面贯通率对顺层边坡地震动力稳定性的影响十分明显, 控制着边坡产生破坏的临界地震动力输入幅值以及产生破坏后边坡的破坏范围大小。贯通层面部分的抗剪强度(即贯通层面的摩擦角)对边坡地震动力稳定性和破坏范围的影响很小, 只有在顺层边坡内部所有岩层层面均完全贯通的前提下才能转变为边坡稳定性主控因素。

**关键词:** 顺层岩质边坡; 非贯通层面; 地震; FLAC/PFC2D耦合计算; 动力稳定性

中图分类号: O319.56; TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)03-0466-08

**作者简介:** 李祥龙(1986-), 博士, 工程师, 现就职于中国地质环境监测院, 从事地质灾害防治研究工作。E-mail: fromheaven1@163.com。

## Effect of bedding plane parameters on dynamic failure process of sliding rock slopes

LI Xiang-long<sup>1,2</sup>, TANG Hui-ming<sup>1</sup>, HU Wei<sup>3</sup>

(1. Department of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 2. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China; 3. Three Gorges Geotechnical Consultants Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Three groups of FLAC/PFC2D hybrid numerical models for sliding rock slopes with intermittent bedding planes and orthogonal secondary rock joints are established, and their seismically induced failure processes are simulated and analyzed. The simulated results reveal that the unbroken parts of the rock bedding planes fail in both tension and shear even when the rock slope is under solely horizontal seismic load. Moreover, the strength and penetration rate of the unbroken rock bedding planes affect the dynamic stability of the slope significantly, and they mainly serve to control the critical dynamic load to induce failure event of the rock slope and the scale of the failure. To the contrary, the shear strength (friction angle) of the broken parts of the bedding planes barely affect the failure process of the rock slope, yet they may occupy the controlling position only when there are no unbroken parts inside the bedding planes.

**Key words:** sliding rock slope; intermittent rock bedding plane; earthquake; FLAC/PFC2D hybrid simulation; dynamic stability

## 0 引言

顺层岩质边坡是最早被学者们所研究的一类潜在危险边坡, 目前对其地震动力破坏机理的研究主要以块体滑动模式为主。块体滑动模式认为, 由于层面的出露, 使得顺层岩质边坡的层面成为潜在的破坏面, 在地震动力作用过程中, 层状岩体可以沿某一层面产生剪切破坏和滑动位移<sup>[1-3]</sup>。该分析方法是建立在顺层岩质边坡块体滑动模型的基础上的, 将滑体简化为被贯通层面所切割而形成的完整块体, 而该简化模型本身就包含着两个基本假设: ①顺层岩质边坡产生滑动位移的前提为层面产生完全的贯通; ②潜在滑动层状

岩体为完整块体, 在动力破坏过程中其仍然保持完整性, 不会产生内部的破坏。上述两种假设均与实际情况不符。目前没有任何的实际证据可以证明层状岩体内的层面在破坏前处于了完全贯通的状态, 并且顺层岩质边坡产生动力破坏后的堆积体通常非常破碎, 这预示着破坏体在还未产生整体向下的滑动过程中, 可能内部就已经产生了解体<sup>[4-8]</sup>。另外在实际的破坏区域可以观察到明显的拉破坏现象, 包括后缘拉裂缝以及层面的张拉破坏。一些学者将这些拉破坏的形成机理

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2011BAK12B09)

收稿日期: 2013-02-25

解释为地震波在边坡表层附近的叠加作用产生的张拉应力, 使岩石内部产生拉破坏; 还有一些学者认为强烈的地形放大效应也会引起岩体产生张拉破坏, 破坏体可以被抛出很远<sup>[9]</sup>。岩体内部发育的层面和节理所组成的结构面网络, 是控制顺层岩质边坡动力稳定性的关键, 因此需要在研究中将其作为重点。为了研究顺层岩质边坡中层面的动力破坏机理以及层面的发育特征和参数对边坡地震动力破坏过程的影响, 本文建立了含有非贯通层面和正交次级节理的顺层岩质边坡 FLAC/PFC2D 耦合计算模型进行地震动力模拟计算, 得出了一些有意义的结论。

1 FLAC/PFC2D 耦合计算模型

Itasca 公司为 FLAC 和 PFC2D 提供了一种基于 Socket (I/O) 规则的耦合计算方法。其基本的原理是在 FLAC 和 PFC2D 之间建立其专有的数据通信通道, 通过相互传递信息实现同步计算<sup>[10]</sup>。正是通过两种软件的耦合计算实现岩体边坡的地震动力模拟, 以达到取长补短的效果。对于岩质边坡地震动力破坏过程模拟来说, 人们所关心的对象主要为边坡潜在的破坏区域, 而非边坡整体, 因此可以使用非连续性介质方法对边坡潜在破坏区域 (模型中 PFC2D 部分, 如图 1) 进行细致的建模, 使用连续性介质方法对边坡其它部位 (模型中 FLAC 部分, 如图 2 进行粗略的建模。岩体边坡的动力边界条件可以直接在连续性介质边界处设定, 连续和非连续区域相互连接互动形成一个整体 (如图 3)。这种耦合既可以极大的节约计算时间, 也可以解决动力模拟中模型动力边界的设置问题。边坡 PFC2D 模型部分的基本参数见表 1, FLAC 模型部分的基本参数见表 2。FLAC 模型动力阻尼采用 Rayleigh 阻尼, 取值为岩土体常用值,  $\xi_{\min}$  取 0.05,  $f_{\min}$  按照输入动力波卓越频率取值, 本试验取为 5Hz。在 FLAC 模型内部和 PFC2D 模型内部都添加了监测点 (图 3 中黑色圆点), 在地震动力计算中用以监测模型关键位置的位移变化。

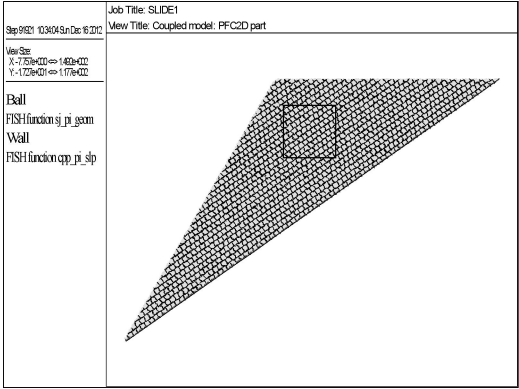


图 1 顺层岩质边坡耦合计算模型 PFC2D 部分  
Fig. 1 PFC2D part of hybrid numerical model

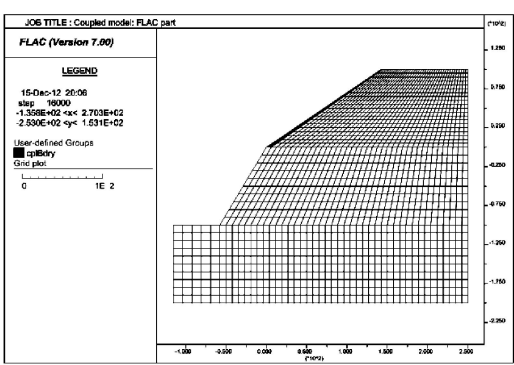


图 2 顺层岩质边坡耦合计算模型 FLAC 部分  
Fig. 2 FLAC part of hybrid numerical model

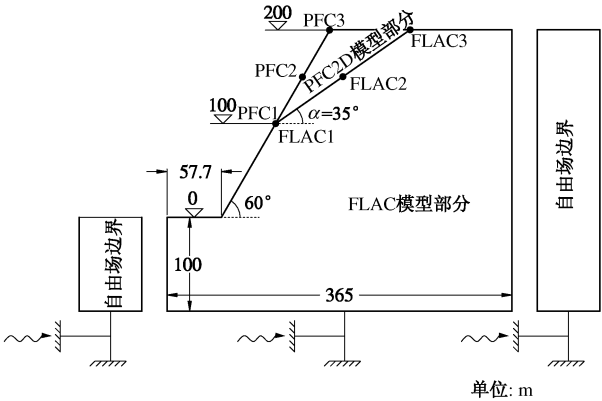


图 3 顺层岩质边坡地震动力破坏过程耦合计算模型示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of FLAC/PFC2D hybrid model for dynamic tests on sliding rock slopes

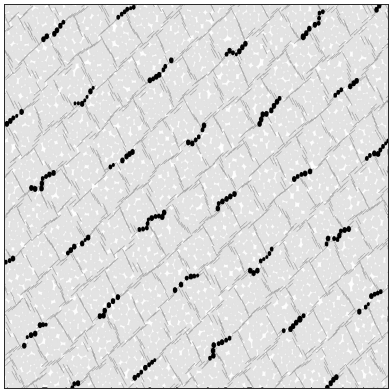


图 4 图 1 中黑框范围模型放大图 (黑色颗粒代表非贯通层面部分)  
Fig. 4 Enlarging view of black box in Fig. 1 (black dots represent unbroken bedding plane parts)

模拟试验所建立的顺层岩质边坡中, 贯通层面部分和非贯通层面部分的关系用层面贯通率  $k$  表示。将贯通次级节理位置放置于每一层岩层中, 次级节理不切割层面。相邻层状岩体内的贯通正交次级节理相互错开, 不在一条直线上。岩体在分别加入层面和贯通节理面后, 在几何形态上呈现砌体形态。层面和次级

节理接触面位置所在的颗粒均采用了 PFC2D 中特殊的 Smooth-Joint 接触模型<sup>[10]</sup>, 用以实现 PFC2D 颗粒间的平直滑动。层状岩体的层面倾角  $\alpha=35^\circ$ , 层面厚度固定为 2 m, 在进行贯通率参数设定时, 每条层面都被划分为 10 m 一个单元, 如贯通率为 0.8, 则每个层面单元中贯通长度为 8 m, 非贯通长度为 2 m (如图 4, 黑色小颗粒代表非贯通层面部分的接触位置)。

表 1 边坡 PFC2D 部分模型基本参数

Table 1 Basic parameters of PFC2D part of slopes		
参数名称	参数符号	数值
颗粒密度	$\rho_d$	2410 kg/m <sup>3</sup>
颗粒最小半径	$R_{\min}$	0.2 m
颗粒线弹性模量	$E$	45 GPa
未黏结颗粒接触摩擦系数	$f$	0.577
平行黏结键法向强度	pb_sn	60 MPa
平行黏结键剪切强度	pb_ss	60 MPa
岩块密度	$\rho$	2000 kg/m <sup>3</sup>
岩块线弹性模量	$\bar{E}$	45 GPa
岩块泊松比	$\nu$	0.25
岩块单轴抗压强度	$\sigma_c$	62.9 MPa
岩块单轴抗拉强度	$\sigma_t$	24.1 MPa

表 2 层状节理岩体高边坡 FLAC 部分模型基本参数

Table 2 Basic parameters of FLAC part of slopes		
参数名称	参数符号	参数值
岩块密度	$\rho$	2200 kg/m <sup>3</sup>
岩块线弹性模量	$E$	70 GPa
岩块泊松比	$\nu$	0.25

模拟试验采用正弦波作为模拟地震输入, 其固定频率为 5 Hz, 持续时间为 5 s, 加速度振幅随时间逐渐变大, 最大振幅为 1g (9.81 m/s<sup>2</sup>), 在实际应用中采用速度时程输入至 FLAC 边坡模型底部节点。图 5 为地震波的速度时程图。

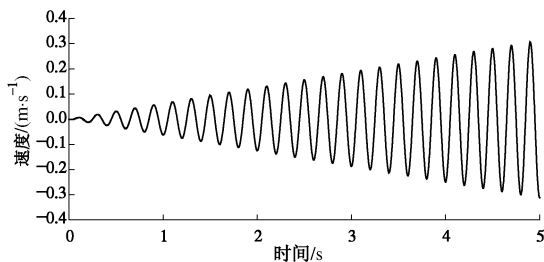


图 5 输入地震波速度时程图

Fig. 5 Time history of velocity of input seismic motion

2 模拟动力试验

按照上文中设计的方法建立了 3 组顺层岩质边坡 PFC2D/FLAC 耦合计算模型, 分别进行动力破坏过程模拟试验, 用来研究层面的 3 种主要参数对边坡地震动力破坏过程和动力稳定性的影响: 非贯通层面部分

强度, 贯通层面部分强度 (即贯通层面内摩擦角) 和层面贯通率。具体的试验分组、模拟参数选取和试验结果见表 3。

2.1 耦合动力模拟结果验证

为了验证动力耦合计算是否成功, 需要首先对试验 1-1 计算完成后得到的 PFC2D 模型部分和 FLAC 模型部分监测点 (监测点位置见图 3) 的速度时程曲线和位移时程曲线进行对比分析。图 6 为试验 1-1PFC2D 模型部分和 FLAC 模型部分的监测点位移时程曲线; 图 7 为试验 1-1FLAC 模型部分的监测点速度时程曲线。从图 6 可以看出, 处于 PFC2D 模型和 FLAC 模型连接处相同位置上的 PFC1 监测点时程曲线和 FLAC1 监测点位移时程曲线完全重合, 这说明耦合动力计算过程中的数据传递是准确的。另外对比图 7 中 PFC2D 模型中坡面最底部监测点 PFC1 和顶部监测点 PFC3 的速度时程曲线, 可以发现明显的地形放大效应。另外从图 6 中还可以看出, 当边坡产生滑动破坏后, 处于潜在破坏区域内的监测点 PFC2 和 PFC3 均开始形成地震永久位移, 并随着滑动破坏的进行逐渐增大。以上监测点结果可以说明 FLAC/PFC2D 耦合计算是成功的。

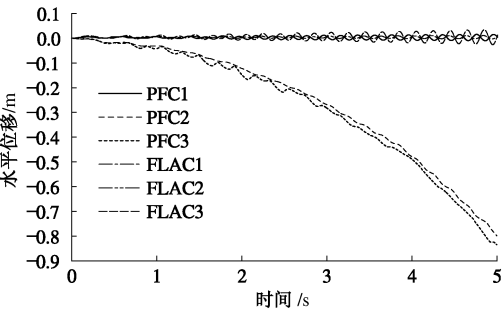


图 6 试验 1-1 PFC2D 模型部分关键点位移时程曲线

Fig. 6 Time history of displacement monitoring position in PFC2D

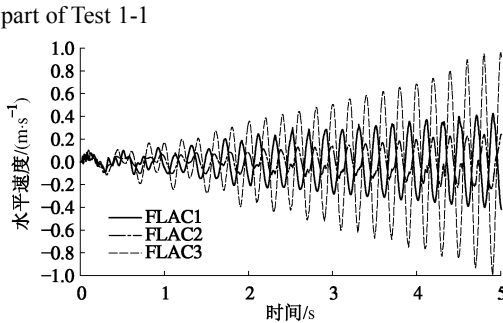


图 7 试验 1-1 FLAC 模型部分关键点速度时程曲线

Fig. 7 Time history of velocity at monitoring position in FLAC

part of Test 1-1

2.2 非贯通层面强度的影响

第一组模拟试验(1-1 至 1-4)结果见图 8 至图 11。其中图 8 为试验 1-2 边坡地震动力破坏过程中每整数



表 3 边坡模型动力模拟试验参数及试验结果

Table 3 Test parameters and results of dynamic failure process simulation

		试验参数				试验结果		
试验分组	试验编号	非贯通层面抗拉强度 $\sigma_p$ /MPa	非贯通层面抗剪强度 $\tau_p$ /MPa	贯通层面模型摩擦角 $\varphi_p$ /(°)	层面贯通率 $k$	边坡形成第一条贯通破坏面时刻 $t_c$ /s	该时刻对应的地震波加速度幅值 $A_c$ /g	第一条贯通破坏面所围破坏区域面积 $S_c$ /m <sup>2</sup>
非贯通层面部分抗拉强度影响试验	1-1	12	36	28	0.8	1.13	0.226	492
	1-2	4	12	28	0.8	1.13	0.226	492
	1-3	2	6	28	0.8	1.02	0.204	1643
	1-4	1	3	28	0.8	0.57	0.114	2657
贯通层面部分强度影响试验	2-1	3	9	24	0.8	1.02	0.204	492
	2-2	3	9	26	0.8	1.05	0.211	492
	2-3	3	9	30	0.8	1.11	0.222	520
	2-4	3	9	32	0.8	1.35	0.269	492
层面贯通率影响试验	3-1	3	9	28	0.9	1.10	0.220	2006
	3-2	3	9	28	0.85	1.12	0.224	899
	3-3	3	9	28	0.75	1.18	0.236	462
	3-4	3	9	28	0.7	1.56	0.313	377

秒时刻内部非贯通层面和非贯通正交次级节理破坏分布图 ( $t=1$  s), 图中红色线段代表产生张拉破坏的非贯通层面或非贯通正交次级节理, 蓝色线段代表产生剪切破坏的非贯通层面或非贯通正交次级节理; 图 9 试验 1-2 边坡地震动力破坏过程中每整数秒时刻坡体位移矢量图 ( $t=1$  s), 所有的位移图中位移矢量单位长度相同, 均为 2 m; 图 10 为试验 1-2 边坡地震动力破坏过程中每整数秒时刻坡体内部宏观破坏面分布图 ( $t=1$  s), 图中红色线段代表产生了大于 0.01 m 的相对张拉或滑动位移的层面或正交次级节理; 图 11 为试验 1-1 至 1-4 边坡地震动力破坏过程中  $t=1$  s 时刻坡体内部宏观破坏面分布图。

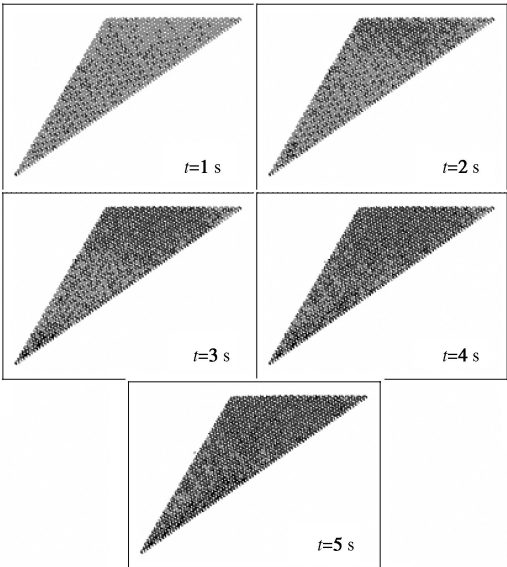


图 8 试验 1-2 边坡地震动力破坏过程中内部结构面破坏分布图  
Fig. 8 Distribution of structural destruction of rock mass of Test 1-2

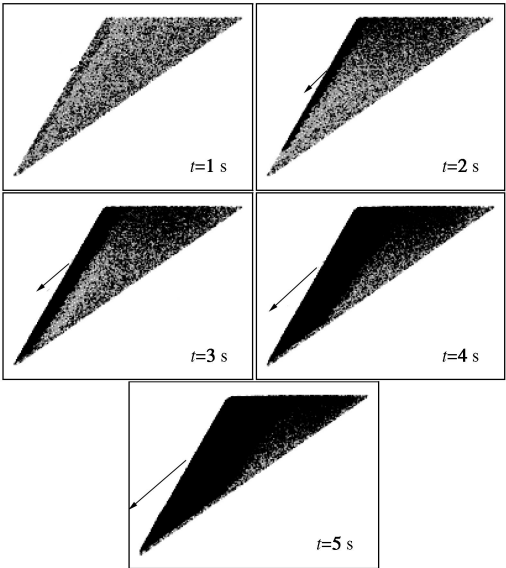


图 9 试验 1-2 边坡地震动力破坏过程中坡体位移矢量图  
Fig. 9 Slope displacement vectors of Test 1-2

从试验结果可以看出, 本组试验中的 4 个不同非贯通层面强度的边坡模型地震动力破坏过程存在着共同的特点:

(1) 顺层节理岩体边坡的地震动力破坏基本模式为滑动破坏。由于正交次级节理的存在, 边坡破坏面不是某条单一的层面, 而是由贯通的层面部分和贯通的正交次级节理相互连通组合而成, 其形态上呈现明显的阶梯状。

(2) 顺层节理岩体边坡在地震动力破坏过程中, 产生滑动破坏的区域不是固定的, 而是随着地震动力幅值的增大, 破坏区域逐渐发育扩展增大, 向边坡岩体内部扩展。特别需要注意的是, 图 10 中的宏观破坏

面形成过程显示, 边坡在动力破坏初期形成的破坏面较为陡峭, 并且破坏面很浅, 在这种条件下, 边坡将会产生表层岩体的崩塌和滚落。

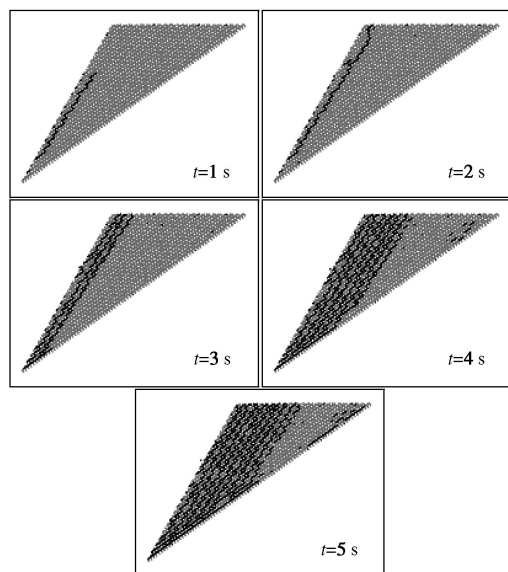


图 10 试验 1-2 边坡地震动力破坏过程中坡体内部宏观破坏面分布图

Fig. 10 Distribution of macroscopic failure plane inside slope of Test 1-2

(3) 在地震动力破坏过程中, 顺层岩质边坡内部的非贯通层面部分有的产生剪切破坏, 有的产生张拉破坏。其中产生剪切破坏的层面数量多于产生张拉破坏的层面数量。

(4) 在地震动力幅值较小时, 顺层边坡内部的非贯通层面主要产生剪切破坏, 破坏区域集中于边坡坡脚部位。随着地震动力幅值的增大, 坡体内部开始出现产生张拉破坏的非贯通层面, 其破坏区域集中于坡体的中上部。

除了以上的共同特征之外, 该组试验结果还证明了岩体中非贯通层面部分的强度对顺层岩质边坡的地震动力稳定性和动力破坏过程有很大的影响, 对比图 11 中该组 4 个试验在同一时刻时的边坡内部宏观破坏面分布图, 随着非贯通层面部分的强度的减小, 在相同的地震动力输入幅值作用时边坡的破坏区域逐渐增大。试验 1-1 和试验 1-2 非贯通层面强度较高, 边坡产生的第一条贯通破坏面处于同一位置, 即边坡坡面表层。试验 1-3 和试验 1-4 非贯通层面强度较低, 边坡产生的第一条贯通破坏面深入坡体内部, 而不局限于表层岩体。

由此可以看出, 顺层岩质边坡内部非贯通层面部分的强度不仅影响边坡的动力稳定性, 而且会影响边坡在受到相同振幅的地震动力作用时所能形成的破坏范围的大小。顺层岩质边坡如果不存在明显的软弱层

面, 在地震动力破坏过程中边坡内部的任何层面都有可能成为破坏面的一部分。边坡在地震动力破坏过程中随着地震动力强度的增强, 可能会先后发育多条贯通的滑动破坏面。而传统的顺层岩质边坡地震动力稳定性分析方法通常假设边坡会沿一条固定的潜在破坏面产生滑动破坏, 这样等于人为得限制了边坡的破坏范围。在这种情况下, 当地震动力作用较小时, 计算得到的边坡在此破坏范围内可能是稳定的, 但实际上边坡可能在一个更靠近表层的较小范围内已经产生了滑动破坏。这说明人为假定潜在破坏范围的方法有可能导致计算得到的边坡动力安全系数偏大。

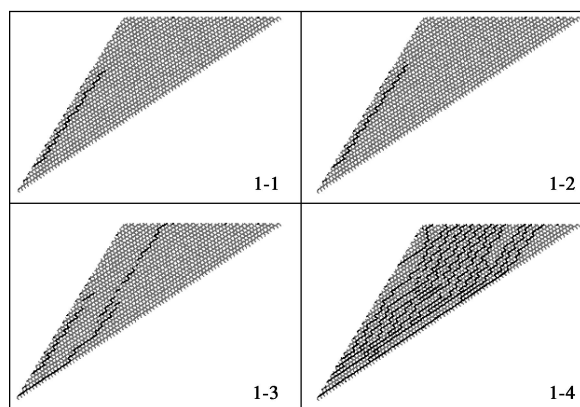


图 11 试验 1-1 至 1-4 边坡地震动力破坏过程中坡体内部宏观破坏面分布图 ( $t=1$  s)

Fig. 11 Distribution of macroscopic failure plane inside slope of Tests 1-1 to 1-4 at  $t=1$  s

基于上述特征, 设计了一种新的顺层岩质边坡动力破坏综合判定方法。主要采用两个参数作为顺层边坡滑动破坏的判据: ①顺层岩质边坡在地震动力作用下形成第一条贯通破坏面时的地震动力加速度幅值; ②边坡形成的第一条贯通破坏面所围的破坏区域体积 (模拟模型为二维模型, 因此在文中破坏区域大小以面积衡量)。

表 3 中显示了该组试验按照上述判定方法得到的边坡滑动破坏稳定性参数。从表中可以看出, 随着边坡内部非贯通层面强度的减小: ①使边坡形成第一条贯通滑动破坏面的地震动力加速度幅值相应的变小; ②第一条贯通破坏面所围的破坏区域面积相应的变大 (见图 12)。

通过该结果可以得到结论, 对于顺层岩质边坡受地震动力作用情况, 边坡内部非贯通层面部分的强度的减小会降低边坡的动力稳定性, 并显著增大边坡产生动力破坏的初始临界破坏范围; 当地震动力强度超过边坡动力稳定性所能承受的强度后, 边坡产生滑动破坏, 其破坏范围随着地震动力强度的增大而进一步扩大。

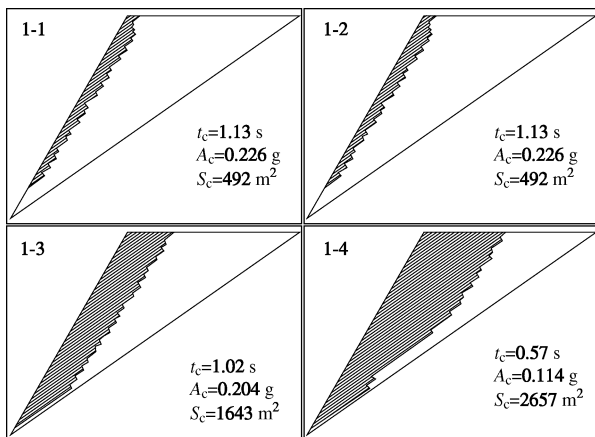


图 12 边坡首条贯通破坏面所围区域示意图 (试验 1-1 至 1-4)

Fig. 12 Schematic diagram of failure scale divided by firstly generated penetrating failure plane (Tests 1-1 to 1-4)

### 2.3 贯通层面强度的影响

顺层节理岩体边坡内部的层面不仅有非贯通的部分, 还存在有贯通的部分。这些贯通层面部分在自重应力场的作用下处于闭合接触状态, 接触面没有抗拉强度, 只是靠粗糙的表面所产生的抗剪切强度来抵抗下滑力。在地震动力条件下, 边坡内部的贯通层面间会产生相对滑动, 进而对边坡动力破坏过程产生影响。第二组试验 (2-1 至 2-4) 即为研究贯通层面的抗剪切强度对顺层岩质边坡边坡地震动力破坏的影响。

对比图 13 中该组不同模型在相同地震动力幅值作用下的宏观破坏面分布图, 可以发现贯通层面抗剪强度对其影响很小。从表 3 中可以看出, 随着贯通层面抗剪强度的增大, 边坡形成首条贯通破坏面所需施加的地震动力强度幅值逐渐增大, 首条贯通破坏面所围破坏区域的面积几乎不变。从图 14 中可知, 本组试验的 4 个边坡首条贯通破坏面所处位置几乎完全相同, 均位于坡面表层。

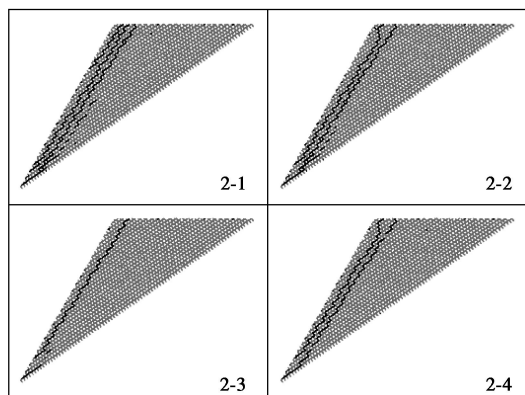
图 13 试验 2-1 至 2-4 边坡地震动力破坏过程中坡体内部宏观破坏面分布图 ( $t=2$  s)

Fig. 13 Distribution of macroscopic failure plane inside slope of Tests 2-1 to 2-4 at  $t=2$  s

根据上述结果分析, 可以得出如下结论:

(1) 贯通层面抗剪强度对顺层岩质边坡地震动力稳定性有一定的影响, 随着抗剪强度的提高, 高边坡动力稳定性有所上升, 但影响较小。

(2) 贯通层面抗剪强度不影响顺层岩质边坡在地震作用较小时首先产生的表层岩体滑动破坏范围, 但随着地震动力强度的提升, 贯通层面抗剪强度增大会导致边坡后续破坏范围的减小。

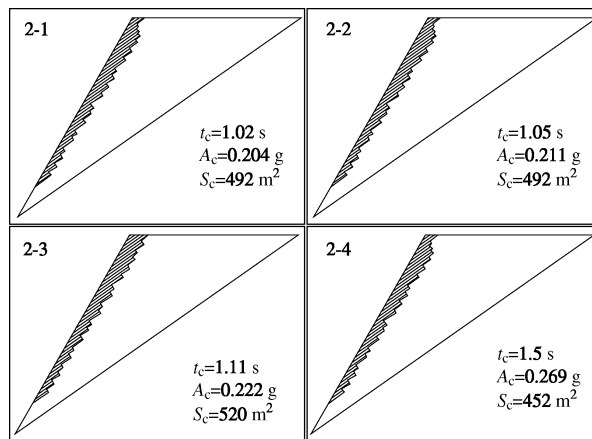


图 14 边坡首条贯通破坏面所围区域示意图 (试验 2-1 至 2-4)

Fig. 14 Schematic diagram of failure scale divided by firstly generated penetrating failure plane (Tests 2-1 to 2-4)

### 2.4 层面贯通率的影响

第三组试验 (3-1 至 3-4) 研究了岩体内部层面的贯通率对边坡动力破坏过程的影响。从图 15 中可以看出, 层面贯通率对边坡内部破坏面的扩展模式、扩展过程和扩展范围都有非常明显的影响。对于试验 3-1 模型, 在  $t=2$  s 时刻其内部破坏面出现了沿底部层面的贯通扩展, 同时刻模型顶部后缘也产生了由张拉破坏产生贯通的正交次级节理和贯通层面部分相互连接形成的后缘张拉破坏面。随着地震动力强度逐渐增大, 这两条破坏面迅速贯通, 同时在破坏区域内部有形成了多条破坏面, 并随着地震动力强度增大而产生贯通, 使得破坏区域的岩体完全破碎解体。对于试验 3-2、3-3 和 3-4 模型, 其破坏面扩展贯通模型与试验 3-1 相同, 但形成相同的破坏程度所需的地震动力强度, 随着层面贯通率的减小而增大。

本组试验各模型地震动力破坏判据参数见表 3。从表中可以得出以下结果:

(1) 随着层面贯通率的减小, 边坡形成首条贯通破坏面所需施加的地震动力强度幅值逐渐增大, 首条贯通破坏面所围破坏区域的面积显著减小 (见图 16)。

(2) 层面贯通率对边坡动力破坏强度和破坏范围的影响非常显著。图 17 为根据表 3 中试验结果所绘制的首条贯通破坏面形成所需地震动力加速度幅值

和所围破坏区域的面积与层面贯通率的关系曲线。从图中可以看出,层面贯通率较大时,其变化对顺层岩质边坡地震动力破坏范围影响强烈;当层面贯通率较小时,其变化对边坡形成初始动力破坏的临界地震动力加速值影响强烈。

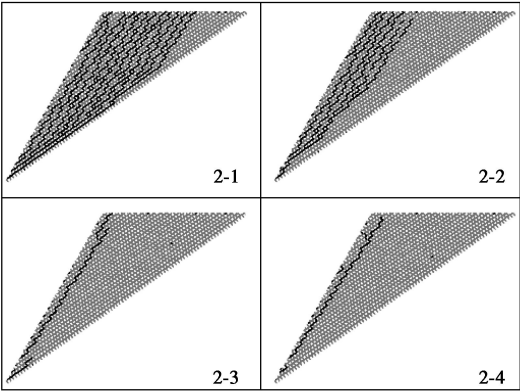


图 15 试验 3-1 至 3-4 边坡地震动力破坏过程中坡体内部宏观破坏面分布图 ( $t=2\text{ s}$ )

Fig. 15 Distribution of macroscopic failure plane inside slope of Tests 3-1 to 3-4 at  $t=2\text{ s}$

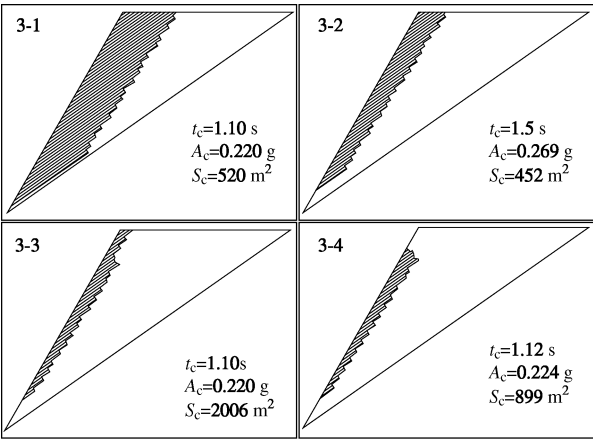


图 16 边坡首条贯通破坏面所围区域示意图 (试验 3-1 至 3-4)

Fig. 16 Schematic diagram of failure scale divided by firstly generated penetrating failure plane (Tests 3-1 to 3-4)

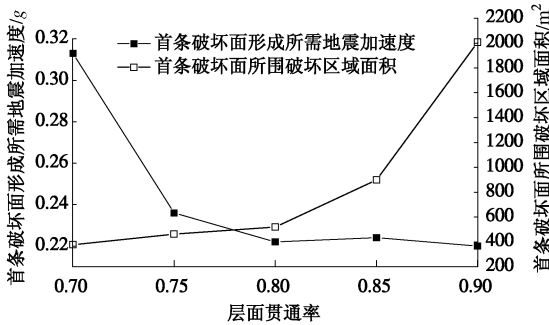


图 17 层面贯通率与顺层岩质边坡地震动力稳定性评价参数的关系曲线

Fig. 17 Relationship curves of bedding plane penetration rate and two stability analysis parameters

3 结 语

顺层节理岩体高边坡的基本地震动力破坏模式为滑动破坏。在地震动力作用下,岩体内部产生层面的剪切破坏和张拉破坏,以及正交次级节理的张拉破坏,形成的贯通层面部分和贯通正交次级节理相互连接,组成了边坡的宏观滑动破坏面,因此破坏面通常呈阶梯状。试验结果证明:即使是在水平地震作用下,非贯通层面也不止会产生剪切破坏,还会产生张拉破坏。因此在对边坡地震动力稳定性的研究中,必须考虑到层面抗拉强度的影响。

针对顺层边坡内部的岩石层面,主要进行了非贯通层面部分的强度、贯通层面部分的抗剪强度、层面贯通率 3 个参数对顺层边坡地震动力破坏过程影响的研究。研究表明,非贯通层面部分的强度和层面贯通率对顺层边坡地震动力稳定性的影响十分明显,它们控制了边坡产生破坏的临界地震动力输入幅值,以及产生破坏后边坡的破坏范围大小。贯通层面部分的抗剪强度(即贯通层面的摩擦角)对顺层边坡地震动力稳定性和破坏范围的影响较小,属于次要控制因素。这个结论与传统的边坡滑动破坏控制因素分析结论存在着明显的区别。学者们通常认为顺层边坡的抗滑力主要来自其内部贯通面的粗糙起伏所形成的摩擦力,认为这是顺层边坡地震动力稳定性的主控因素。根据本章试验结果,只有在顺层边坡内部所有岩层层面均完全贯通的条件下,传统的摩擦抗滑理论才能够成立。而在实际的顺层节理岩体中,层面通常不是完全贯通的,而是包含了分贯通的部分,已经形成二次胶结的原贯通层面部分。因此,在对顺层节理岩体边坡进行层面调查统计时,应关注非贯通层面的抗拉强度和抗剪强度,以及层面的贯通率,并将它们视为控制边坡动力稳定性的主控因素,而不是贯通层面的抗剪强度。

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. (in Chinese))

[2] 何 铮,徐卫亚,石 崇,等. 顺层岩质高边坡地震变形破坏机制三维数值反演研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3512 - 3518. (HE Zheng, XU Wei-ya, SHI Chong, et al. 3D dynamic response back analysis of failure mechanisms of a

- high dip bedding rock slope in earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(11): 3512 - 3518. (in Chinese))
- [3] 祁生文. 考虑结构面退化的岩质边坡地震永久位移研究[J]. 岩土工程学报, 2007**29**(3): 452 - 457. (QI Sheng-wen. Evaluation of the permanent displacement of rock mass slope considering deterioration of slide surface during earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(3): 452 - 457. (in Chinese))
- [4] 殷跃平. 汶川八级地震滑坡特征分析[J]. 工程地质学报, 2009(1): 29 - 38. (YIN Yue-ping. Features of landslides triggered by the Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2009(1): 29 - 38. (in Chinese))
- [5] ALZO'UBI A, MARTIN C D, CRUDEN D M. A discrete element damage model for rock slopes in rock mechanics[C]// 1st Canada-U S Rock Mechanics Conference. Vancouver, 2007.
- [6] SHIMIZU Y, AYDAN O, ICHIKAWA Y, et al. Model study on dynamic failure modes of discontinuous rock slopes[C]// Proc International Symposium on Engineering in Complex Rock Formations, Beijing, 1986 Science Press, 1987.
- [7] SCHOLTES L, DONZE F. Modelling progressive failure in fractured rock masses using a 3D discrete element method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, **52**(0): 18 - 30.
- [8] BRIDEAU M, 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.
- [9] 殷跃平. 汶川八级地震滑坡高速远程特征分析[J]. 工程地质学报, 2009, **17**(2): 153 - 166. (YIN Yue-ping. Rapid and long run-out features of landslides triggered by the wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, **17**(2): 153 - 166. (in Chinese))
- [10] Itasca. PFC2D manuals[M]. Minneapolis, HC Itasca Company, 2011.

## 2014 中国隧道与地下工程大会 (CTUC) 暨中国土木工程学会隧道及地下工程分会第十八届年会 (第 1 号通知)

中国土木工程学会隧道及地下工程分会将于 2014 年 10 月底在浙江省杭州市召开 2014 中国隧道与地下工程大会暨中国土木工程学会隧道及地下工程分会第十八届年会。本次年会将围绕“现代城市地下空间的综合利用及绿色隧道工程”主题, 通过“现代城市地下空间开发的先进理念与设计”、“隧道及城市地下工程的先进修建技术”、“隧道及城市地下工程的防灾、减灾和环保、节能技术”等 3 个分主题进行研讨。本次年会收录的论文将正式出版发行。欢迎业内科技工作者踊跃投稿并积极参加会议。

**主办单位:** 中国土木工程学会隧道及地下工程分会

**承办单位:** 浙江大学城市学院; 杭州市建设委员会; 协办单位: 待定。

**会议主题:** 现代城市地下空间的综合利用及绿色隧道工程。

**分组报告与讨论主题:** ①现代城市地下空间开发的先进理念与设计; ②现代城市地下空间开发利用的国际新动态; ③现代城市地下空间的规划、设计与研究; ④现代城市地下空间开发利用的可持续发展研究; ⑤现代城市地下工程低碳节能与环保。

**隧道及城市地下工程的先进修建技术:** ①城市轨道交通工程修建技术; ②越江及海底隧道工程修建技术; ③复杂山岭隧道工程修建技术; ④城市地下空间施工技术; ⑤隧道及地下工程的新技术、新设备、新材料、新工艺。

**隧道及城市地下工程的防灾、减灾和环保、节能技术:** ①隧道及地下工程全寿命周期风险管理; ②隧道及地下工程施工对周边环境影响及控制; ③隧道及地下工程监控量测及超前预报; ④隧道及地下工程健康监测与耐久性; ⑤隧道及地下工程病害检测与修复技术; ⑥隧道及地下工程节能降耗新技术。

**论文征集:** 论文应围绕会议议题展开, 要求内容具体、明确、严谨, 且未公开发表。会议挑选部分优秀论文在《现代隧道技术》(EI 刊源) 正刊出版, 其余将以《现代隧道技术》增刊形式出版, 论文格式与要求参见《现代隧道技术》投稿指南。

**重要日期:** 论文提交 2014 年 4 月 30 日, 论文录用通知 2014 年 7 月 31 日, (上述日期均为最后截止日期)。

**联系人:** 魏 纲, 张 菁; 电话: 0571-88018805, 0571-88284399; e-mail: tuwb2014@126.com; 网址: <http://www.cces-tuwb.com/index.asp>, 通讯地址: 浙江省杭州市拱墅区湖州街 51 号, 理 2-315, 邮编: 310015。

(大会组委会 供 稿)