

DOI: 10.11779/CJGE201404013

逆层岩质边坡地震动力破坏离心机试验研究

李祥龙^{1, 2}, 唐辉明¹

(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)

摘要: 使用相似材料分别制作了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逆层岩体边坡小比例物理模型, 进行离心机动力试验, 研究边坡的动力响应和破坏机理以及非连续层面和次级节理对其的影响。试验结果证明: 逆层岩体边坡地形放大效应受地震动力输入频率和振幅影响显著; 次级节理对逆层边坡动力稳定性影响很大, 含有次级节理的逆层岩体边坡动力稳定性明显低于不含次级节理的逆层岩体边坡; 两种逆层边坡的破坏模式存在很大的区别, 不含次级节理的边坡破坏从坡脚开始依次向后产生岩层的弯折破坏, 而含有次级节理的边坡破坏从坡体中后部开始依次向坡脚岩层产生贯通破坏, 贯通破坏面倾角明显高于不含次级节理边坡, 并且呈明显的台阶状。

关键词: 逆层岩体边坡; 动力; 离心机模型试验; 次级节理

中图分类号: TU45; O319.56 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)04-0687-08

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。

Dynamic centrifugal modelling tests on toppling rock slopes

LI Xiang-long^{1, 2}, TANG Hui-ming¹

(1. Department of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 2. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract: Two types of physical models for toppling rock slope with intermittent rock planes alone and with both rock planes and secondary rock joints are built of synthetic material, and tested in the centrifuge machine under different seismic loads. The dynamic response and failure mechanism of the two slope models are then recorded and analyzed. The results of the dynamic centrifuge tests reveal that: (1) the topographic amplification effect of the layered rock slope is related to the frequency and amplitude of the input seismic motion; (2) the secondary rock joints inside the rock slope serve to decrease the dynamic stability of the rock slope significantly; (3) the toppling rock slope without secondary rock joints fails in bending and toppling from the slope foot to the rock layer behind accordingly, while the slope with secondary rock joints fails firstly from the upper rock layer due to the penetration of secondary rock joints inside, and then to the underlying rock layers; (4) the dip angle of the final penetrating failure plane for the rock slope with secondary rock joints is much higher than the slope without secondary rock joints, and the failure plane forms in an obvious step-path shape.

Key words: toppling rock slope; dynamic; centrifugal modelling test; secondary rock joint

0 引言

岩质边坡在地震动力作用下产生的破坏是地震诱发的一类常见地质灾害, 逆层岩体边坡受到优势层面和正交次级节理的控制, 在地震过程中可能产生整体的倾倒崩塌破坏, 是地震诱发岩质边坡破坏的重要组成部分。由于地震的突发性和不可预测性, 关于地震发生时刻岩土边坡的动力响应过程和破坏过程的监测数据极为稀少, 完全无法满足研究需要。小比例的边坡模型的离心机试验可以弥补这方面的不足^[1]。边坡模型按照研究对象的工程地质特征小心建造, 符合研究对象的基本特征, 在动力试验过程中利用摄像系统

可以记录下边坡完整的变形破坏过程, 使得研究者不必亲身经历地震边坡破坏事件, 也能够在实验室中直接观察破坏过程。另外, 通过在模型关键位置安装监测装置, 在动力条件下记录模型的响应, 研究者可以相对准确和自由的获取感兴趣的数据, 从而为理论研究提供数据支撑。

逆层岩体边坡的地震动力稳定性的控制因素有很多, 就边坡自身而言, 内部结构面的空间发育特征和

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2011BAK12B09)

收稿日期: 2013-08-06

物理力学特性是主要的控制因素。层状岩体中优势结构面除了包含层面以外,通常还发育有大量的正交次级节理,将层状岩体切割为块状;层状岩体的层面也并非完全贯通,而是包含有局部的原生非贯通部分和产生二次胶结部分。对于逆层岩体边坡动力破坏机理的研究,必须针对层状岩体结构面的上述特征进行展开。

目前针对逆层岩体边坡的地震动力破坏研究,多数采用的是经典的块体滑移倾倒模型^[2-3],只考虑了贯通层面的摩擦作用,并未考虑层面的非贯通部分和正交次级节理对边坡动力破坏过程的影响。并且制作含非贯通结构面的岩质边坡模型非常困难,目前鲜有报道。Zhang 等^[4]在研究逆层岩质边坡倾倒过程中,用电锯在每层岩石中切割出与岩层倾向正交的次级结构面,是为数不多的非贯通结构面模型例子。

Joseph 等^[5]对岩体材料离心机试验方法进行了迄今为止最全面总结,阐述了模型制作方法,边界条件控制方法、离心机试验方法、尺寸效应公式及应用规则等,并对离心机岩体试验的发展指出了方向。但目前制作的岩石离心机试验模型仍然非常简单,还没有关于含有非贯通裂隙的岩体边坡的离心机试验报道,对于岩质边坡的离心机试验还停留对层状体边坡的静力试验层面,鲜有加载动力荷载的试验例子。

针对上述问题,改进了岩质边坡物理模型制作方法,设计了全新的非贯通层面和正交次级节理制作方法,并制作了两种非贯通含有层面和正交次级节理的逆层岩体边坡简单物理模型,以简谐波为基本动力输入,对其进行地震动力响应和破坏过程试验,通过对试验结果的分析,得到了一些有意义的结论。

1 顺层岩体边坡试验模型制作

1.1 岩石相似材料制作

模型岩石相似材料应能够模拟真实岩石的物理力学特性,主要包括重度、弹性模量、抗压和抗剪强度等。试验模型中包含非贯通的岩体结构面,并且试验环境为动力环境,因此还需特别考虑相似材料的断裂力学特征和应力波传播特征是否与真实岩石材料相符。在借鉴前人岩石相似材料制作方法的基础上^[5],使用石膏、细砂和水作为岩石相似材料的基本原料,其中石膏采用美国 Hydrostone 公司出品的高强度速凝白石膏,细砂为内华达标准石英砂,粒径小于 200 目,水采用蒸馏水,使用质量比为细砂:石膏:水=1:0.6:0.4 的配合比进行材料制作。

为了取得相似材料的物理力学参数,笔者针对相似材料进行了物理力学常规实验,包括单轴抗压试验、

巴西圆盘法试验和 I 型断裂强度因子试验。试验结果表明制作的相似材料具有同砂岩近似的物理力学参数,并且参数离散度较小,可以作为相似材料模拟中等硬度砂岩的变形和破坏。具体的相似材料物理力学参数见表 1。

表 1 相似材料物理力学参数与典型岩石参数对比

Table 1 Comparison of mechanical properties between synthetic materials and typical rock materials

材料参数	相似材料		砂岩
	平均值	标准差	
密度 ρ /(kg·m ⁻³)	1900	50	2200
单轴抗压强度 σ_c /MPa	68.99	1.01	70
抗拉强度 σ_t /MPa	4.33	0.18	5
弹性模量 E /GPa	13.29	0.2	30
泊松比 ν	0.25	0.05	0.3
剪切波速 V_s /(km·s ⁻¹)	2.0	0.5	2.3
I 型断裂韧度 K_{Ic} /(MPa·m ^{0.5})	0.95	0.15	0.68

1.2 闭合层面制作

层状岩体相似模型的制作,必须满足两个基本的条件:贯通层面完全闭合;非贯通层面部位强度符合原始层面强度。为达到以上要求,笔者设计了一种全新的层状岩体制作方法。该制作方法的基本方针是采用分层制作步骤,利用混合物的流动特性使岩层达到完全的咬合,同时利用特殊的材料涂层制作贯通部分结构面。具体的制作步骤如下:

- (1) 使用模具制作一层岩石材料使该材料中石膏达到初凝程度,此时材料含有大量的水分。
- (2) 用规定标号的砂纸打磨岩层表面,使其达到所需的摩擦系数。
- (3) 使用铅笔在岩层表面标记处贯通部位和非贯通部位。
- (4) 将固态猪油均匀的涂抹在岩石层面贯通部位表面,使表面形成一层很薄的覆盖层。
- (5) 制备相似材料混合物,进而二次倒模,制作下一层岩石材料。
- (6) 重复步骤 (1) ~ (5),直至制作完成所需的模型。

当石膏细砂混合物达到初凝强度时,材料中仍含有大量的自由水,此时的材料表面是湿润的,这有助于材料同下一层岩石材料相互黏结。猪油的作用为隔层,阻止了上一层材料与下一层材料的接触;猪油的融点约为 20℃,而材料中石膏在凝结过程中产生化学反应放热,使猪油在材料凝结过程中融化;由于石膏

细砂混合材料具有丰富的微孔隙, 猪油融化后会渗入材料中, 不会留下夹层。依照此方法, 可以制作完全闭合接触的贯通层面。没有涂抹猪油的部位则发生了黏结, 但黏结强度小于完整材料的强度, 可以用以模拟原生的非贯通层面部位。图 1 (a) 为制作完成的含有一层非贯通岩层的岩石样品。从图中可以看出, 材料中含有完全闭合的岩层。图 1 (b) 为该样品受压破坏后的形态, 从图中可以看出, 贯通部位的岩层面完整, 岩石破坏为沿贯通层面尖端展开的典型翼型破坏, 说明贯通层面部位只存在摩擦接触, 不存在黏结。

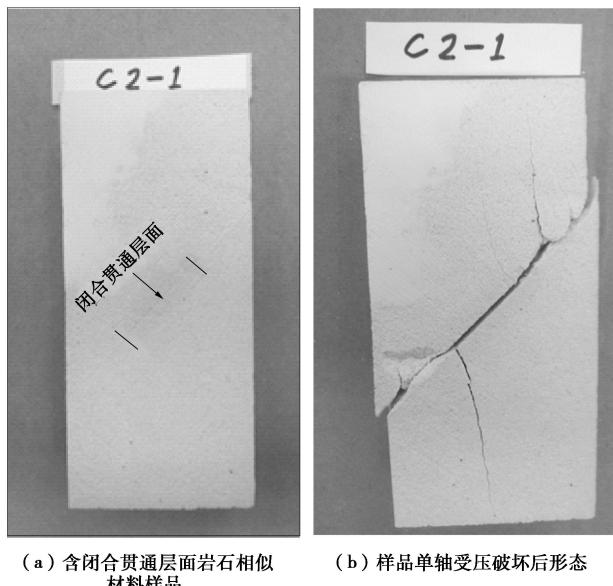


图 1 含闭合贯通层面岩石相似材料样品与单轴受压破坏后形态
Fig. 1 Synthetic rock brick with fully contacted rock plane inside and crack propagation pattern after uniaxial compressive failure

为了控制闭合贯通层面的摩擦系数, 不同标号的砂纸被用来打磨层面表面, 并进行了直接剪切测试, 试验结果离散度较小。为了测定非贯通原生层面的强度, 进行了直接剪切试验和 I 型断裂韧度测试试验(图 2, 3)。具体的参数结果见表 2。

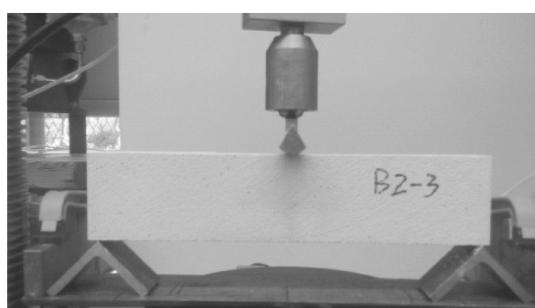


图 2 非贯通层面 I 型断裂韧度测试

Fig. 2 Mode I fracture toughness test for intermittent rock plane

1.3 正交次级节理制作

层状岩体相似材料中的正交次级节理采用传统的

预埋薄片法进行制作, 在制作每层岩层时, 按规定位置预埋塑料薄片, 待材料达到初凝强度后拔出。由于层状岩体材料是分层制作的, 因此在制作正交次级节理时, 应注意制作顺序。

表 2 岩石相似材料层面参数

Table 2 Mechanical properties of synthetic rock plane

贯通层面		非贯通原生层面		
摩擦角 $\varphi_f/(\text{°})$	黏聚力 c_f/kPa	摩擦角 $\varphi_0/(\text{°})$	黏聚力 c_0/kPa	I型断裂韧度 $k_{IC}^p/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}})$
32	2.0	41	85	0.67

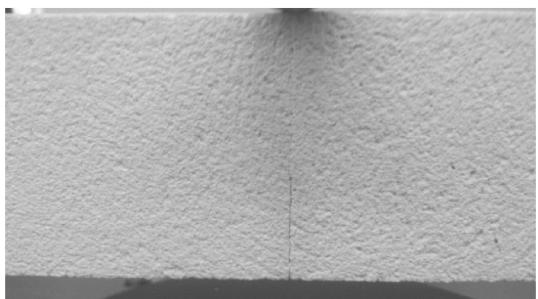


图 3 图 2 中样品 I型张拉破坏后形态

Fig. 3 Mode I fracture propagation of rock plane sample in Fig. 2

1.4 离心机试验相似材料相似比

根据离心机试验的相似性定理^[6], 在高重力环境下表 1 和表 2 中的相似材料物理力学参数的相似比, 除了岩块和层面的 I 型断裂韧度外, 均等于 1, 即模型的参数等于原型的参数, 无需进行相似比换算。

岩石断裂力学所定义的岩石断裂韧度是材料的固有属性, 不随岩石材料的尺度变化而产生改变, 但断裂韧度的单位中包含了长度单位 \sqrt{m} 。而根据离心机试验相似性定理, 长度单位 m 属于几何尺寸单位, 其相似比为 N , 其中 N 为重力加速度 (g)。因此在离心机所产生的高重力环境中, 试验模型的原型断裂韧度为表 1 和表 2 中给出的岩块和层面实际断裂韧度的 \sqrt{N} 倍。这会造成模型边坡在重力环境中内部结构面的断裂韧度高于实际所对应的原型边坡, 进而造成模型边坡的动力稳定性高于所对应的原型边坡, 但并不会对材料内部的层面和正交次级节理的扩展模式以及边坡模型的动力破坏机理产生影响。由于本文所开展的试验主要研究含有非贯通层面和正交次级节理的典型岩质边坡模型的地震动力破坏过程以及结构面网络对边坡动力破坏过程的影响, 均为定性机理研究, 并不涉及具体某一特定边坡的稳定性大小的计算, 因此断裂韧度的相似比不为 1, 并不会对试验的结果产生影响。

2 离心机动力试验环境设定

2.1 试验模型和监测系统安装

试验采用美国加州大学戴维斯分校设计研制的离

心机试验系统, 系统主要包括一台离心半径为 1.5 m 的离心机 (其模型加载平台装载了振动器, 可以提供水平动力输入) 和相关监测系统。所使用的最大离心加速度为 $40g$ 。

为了研究逆层岩体边坡动力破坏机理, 笔者制作了两种小比例试验模型 (图 4~6)。模型高 20 cm, 厚 5 cm, 坡面倾角 75° , 层面倾角为反倾 75° , 在 $40g$ 的重力条件下, 相对应的原型边坡高度为 8 m。Topple_1 为只含有层面的逆层边坡, 每层岩石厚度为 2 cm, 每层层面上部为贯通部分, 下部为非贯通部分; Topple_2 为含有层面和正交次级节理的逆层边坡, 除了含有与 Topple_1 相同的层面构造外, 还包含了贯通率为 0.4 间距为 1 cm 的次级节理。

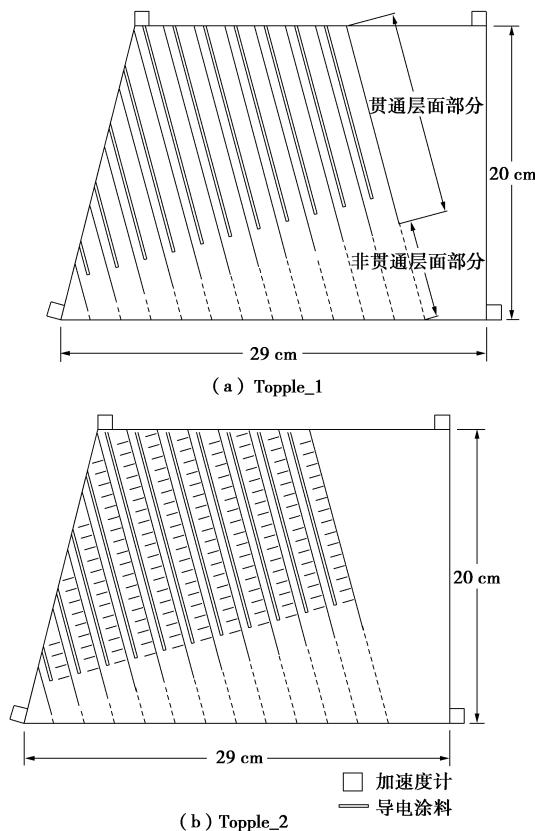


图 4 逆层岩体边坡模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of sliding slope models Topple_1 and Topple_2

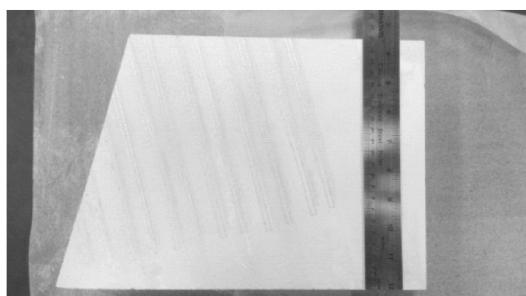


图 5 Topple_1 逆层岩体边坡模型

Fig. 5 Topple_1 slope physical model

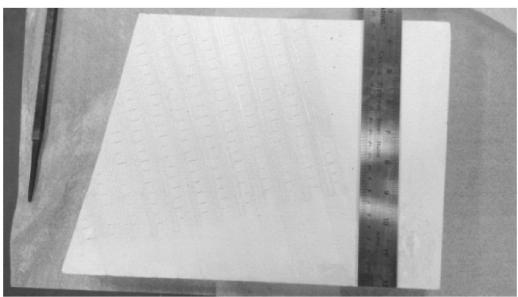


图 6 Topple_2 逆层岩体边坡模型

Fig. 6 Topple_2 slope physical model

试验的监测系统主要分为 3 部分: 关键点加速度监测; 层面破坏时间点监测; 破坏过程影像采集。在边坡模型的表面关键位置和加载平台的底板处安装多个加速度计, 用来监测关键点的加速度; 两个高速摄影机分别捕捉垂向影像和侧面影像; 为了在试验过程中监测层状岩体的破坏先后逆序和破坏过程, 作者设计了一种新的监测方法, 用来捕捉岩层面产生相对滑动的时刻。具体的制作方法是使用 CircuitWork 公司出产的导电涂料在边坡表面的层面处涂画出一条正交与层面延伸方向的细线, 然后将该线通过导线连接到监测系统中构成一条连通的电子回路。当层面破坏产生位移瞬间, 导电涂料断裂, 回路中断, 此行为会被监测系统记录, 这样就得到了该位置层面破坏的准确时刻。

2.2 动力输入校正

试验选取了相应振幅和频率的正弦波作为动力输入波, 输入波分为 3 种, 具体参数见表 3。3 种输入波均采用加速度值进行输入, 为了保证输入波形的稳定性, 所有正弦波的振幅变化都采用了渐变式; 为了分辨电子噪音的大小, 所有的输入波前后都加入了静态时间段。

在试验过程中所有的边坡模型均采用这 3 种动力输入, 输入逆序为 Wave1~3 依次输入。Wave1 为固定频率和振幅的正弦波; Wave2 为固定振幅, 逐渐改变振动频率的正弦波; Wave3 为固定振动频率, 而振幅逐渐增大的正弦波。Wave1 和 Wave2 的振幅很小, 可以保证边坡在试验过程中不产生破坏, 主要用来研究边坡模型的动力响应机制。而 Wave3 的振幅随时间递增, 最大加速度达到了 $10g$, 主要用来研究边坡模型动力破坏的过程和动力稳定性。

图 7~9 为监测系统记录的逆层岩质边坡模型动力加载过程中理想输入波和实际输入波的加速度时程对比图。图中黑色曲线为理想输入波加速度时程, 红色曲线为平台底部加速度时程, 即实际输入波加速度时程。在理想条件下, 理想动力输入波加速度时程曲线应该与加载平台底部的加速度时程相同, 但从图中

表3 试验输入动力波参数

Table 3 Input dynamic wave properties for slope tests

输入波编号	原型振幅 A_p/g	原型频率 f_p/Hz	模型振幅 A_m/g	模型频率 f_m/Hz	原型持时 t_p/s	模型持时 t_m/s	离心加速度 N/g
Wave1	0.1	3	4	120	100	2.5	40
Wave2	0.1	1~5	4	40~200	100	2.5	40
Wave3	0~10	3	0~400	120	100	2.5	40

可以看出, 实际输入波与理想输入波存在很大差异。因此在试验过程中对岩质边坡的实际动力输入实际上并不是理想输入动力波, 而应该是加载平台所记录的动力波。产生这种差异现象的原因在于, 加载平台底部安装的振动器工作能力存在一个极限, 而这个极限是振动器和高压推动系统的固定参数。当动力输入超过了振动器的工作能力极限后, 振动器无法反馈足够的运动实现相应的理想动力输入。由于振动器的工作能力极限是固定的, 因此实际激发的动力输入与理想动力输入不一定是相同的, 二者之间的关系同理想动力输入的振幅和频率, 以及试验所使用的离心加速度大小有关。目前还没有适合的经验公式来确定振动器的正常工作范围, 最好的方法就是通过试验初步确定振动器的工作能力, 然后再试验中不断调整理想动力输入的参数, 使得实际动力输入达到所需要的振幅和频率。由于试验并不关注特殊的波形下边坡模型的响应, 因此可以直接以加载平台所记录到的动力时程为实际动力输入时程, 即图7~9中的深黑色曲线。

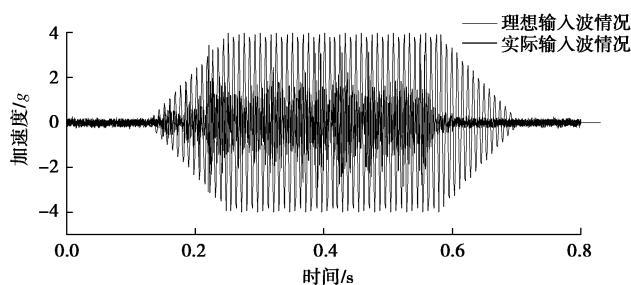


图7 理想 Wave1 输入波与实际 Wave1 输入波加速度时程对比

Fig. 7 Comparison between designed Wave1 input and actual Wave1 input

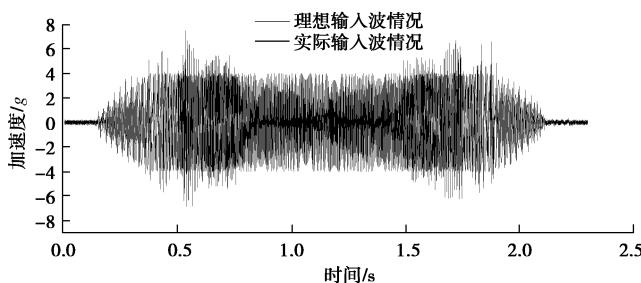


图8 理想 Wave2 输入波与实际 Wave2 输入波加速度时程对比

Fig. 8 Comparison between designed Wave2 input and actual Wave2 input

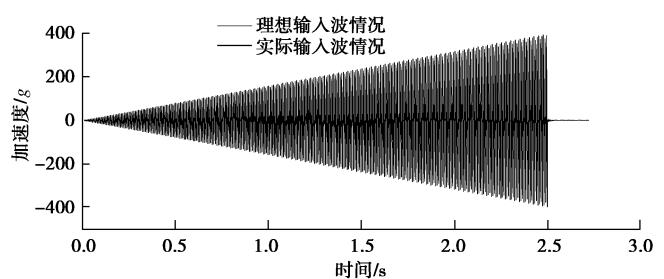


图9 理想 Wave3 输入波与实际 Wave3 输入波加速度时程对比

Fig. 9 Comparison between designed Wave3 input and actual Wave3 input

3 试验结果分析

图10~15为Topple_1和Topple_2试验过程中关键点的加速度时程图。图中深黑色曲线为边坡坡顶关键点加速度时程曲线, 黑色曲线为实际输入动力波加速度时程曲线。为了避免混淆, 从此处开始所有的参数如果没有特别指出, 均默认为原型参数。通过对这些结果的分析, 可以总结出以下规律:

(1) 试验中Topple_1和Topple_2两种边坡在未产生破坏前, 边坡的动力响应模式相似。分别对比Topple_1和Topple_2的Wave1结果和Wave2结果, 可以看出Topple_1和Topple_2边坡坡顶处的动力响应时程曲线形状相似。由此可以得出结论, 地震动力无法使边坡产生局部破坏时, 正交次级节理对逆层岩体边坡地震动力响应机制的影响很小。

(2) 对比Wave2结果, 两种逆层边坡均表现出了明显的地形放大效应, 对比图12和图13, Topple_2边坡地形放大效应比Topple_1边坡显著。这说明正交次级节理的存在可以加剧逆层边坡对地震动力输入的响应幅度。

(3) 两种边坡动力响应的放大效应随输入动力波的频率变化产生很大的变化, 并且变化趋势相似, 以Topple_2边坡为例: 在动力波以1 Hz的固定原型频率将振幅平缓增大到0.1g的过程中, 存在着明显的地形放大效应, 放大系数约为1.3; 当达到最大振幅开始逐渐提高频率, 地形放大效应逐渐减小; 当频率大于2.7 Hz后, 地形放大效应几乎消失, 放大系数约等于1; 当频率进一步增大, 在3.5 Hz至4.0 Hz区间内时, 地形放大效应再次产生, 放大系数超过2.0; 当频

率大于 4.0 Hz 后, 由于已经超过振动器工作极限, 实际输入动力波幅值急剧减小, 模型处于微弱的高频振动中, 可以观察到此时监测系统记录的时程曲线信号与整个曲线首尾两端的电子噪音幅值相当, 因此当频率大于 4.0 Hz 后, 结果不具备实际研究意义。

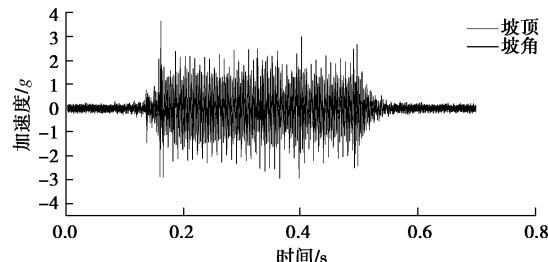


图 10 Topple_1 边坡 Wave1 动力输入下关键点加速度时程
Fig. 10 Acceleration time history of Topple_1 slope under Wave1

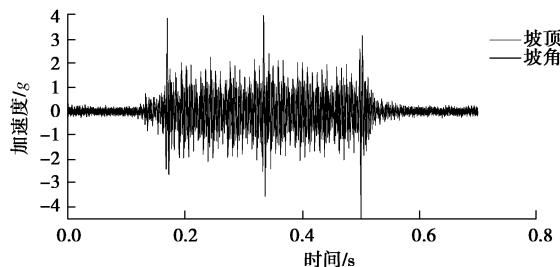


图 11 Topple_2 边坡 Wave1 动力输入下关键点加速度时程
Fig. 11 Acceleration time history of Topple_2 slope under Wave1

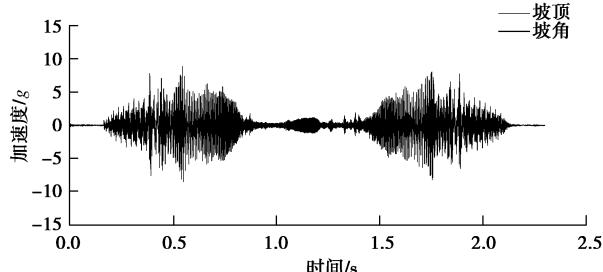


图 12 Topple_1 边坡 Wave2 动力输入下关键点加速度时程
Fig. 12 Acceleration time history of Topple_1 slope under Wave2

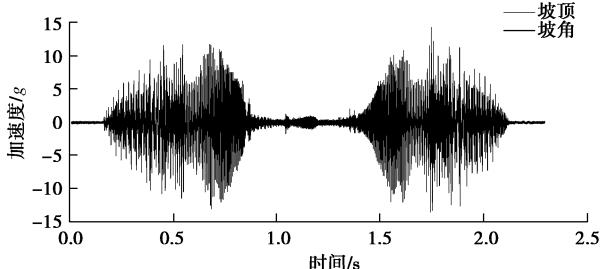


图 13 Topple_2 边坡 Wave2 动力输入下关键点加速度时程
Fig. 13 Acceleration time history of Topple_2 slope under Wave2

(4) 观察逆层边坡在 Wave3 动力输入条件下的动力破坏过程, 可以发现逆层边坡动力破坏模式为倾倒破坏。由于存在贯通的岩石层面和底部非贯通的原

生层面, 因此岩层在震动过程中呈现近似于直立悬臂梁受迫震动的响应方式。当动力输入进一步增大时, 岩层产生了折断, 并发生倾向于临空面的倾倒破坏。

(5) 由于加速度计测量的极限为 200g, 两种边坡在破坏时坡顶的加速度都超过了加速度计的测量极限值, 无法真实记录实际的破坏加速度值。不过对比 Wave3 结果中两种边坡的破坏时刻, 仍可以肯定 Topple_2 边坡动力稳定性小于 Topple_1 边坡。根据 Wave3 试验结果, Topple_1 边坡产生整体破坏时刻为 0.864 s, 对应的实际模型输入加速度 68g; Topple_2 边坡产生整体破坏时刻为 0.600 s, 对应时刻的实际模型输入加速度振幅 47g。

(6) 对于 Topple_1 边坡, 由于只含有层面而不含次级节理, 边坡在动力破坏过程中破坏面为贯通层面与非贯通层面的分界点。根据断裂力学理论, 此处为层面裂纹的尖端, 在受力时会产生局部的应力集中, 是最危险的破坏点。导电涂料所形成的破坏时刻监测系统在试验过程中监测到, 在动力条件下, Topple_1 边坡坡脚部位的岩层首先产生张拉破坏, 使得坡脚的锁固力丧失, 进而导致边坡岩层从坡脚部位开始形成底部拉裂面, 并迅速向后部岩层贯通。当边坡坡脚产生破坏面后, 在极短的时间内边坡内部所有岩层都沿底部产生了张拉破坏, 边坡整体发生倾倒 (图 16)。破坏后测量得到底部的破坏面倾角约为 15° (图 18)。

(7) 对于 Topple_2 边坡, 内部含有层面和正交次级节理, 在动力破坏过程中产生的破坏和 Topple_1 边坡存在明显区别。由于正交次级节理的广泛分布, 在震动过程中, Topple_2 边坡内部最高的应力集中不再分布于层面尖端, 而是分布于次级节理尖端。边坡的破坏是由于次级节理产生张拉破坏, 形成贯通面产生整体倾倒。破坏时刻监测系统监测到, 边坡内部首先产生破坏的部位不再是坡脚, 而是在边坡的中后部。但此时边坡仍未产生整体的失稳, 只是沿内部的正交次级节理开始产生破坏面; 当动力输入幅度进一步增大时, 更多的岩层沿次级节理产生张拉破坏, 破坏面迅速贯通连接; 坡脚岩层最后产生张拉破坏, 使得边坡整体失稳, 在瞬间产生大规模的倾倒破坏。观察高速摄影机的影像记录可以发现, 边坡在倾倒破坏瞬间, 岩体内部已经产生了许多的次级节理的贯通, 岩体在倾倒过程中已经开始分解为小的块体。当破坏体接触到底板后, 在碰撞作用下分解为许多岩石块体, 呈扇形堆积于底板处 (图 17)。

(8) Topple_2 边坡破坏完成后破坏面位置和形态与 Topple_1 边坡差别明显。破坏后边基岩处可以看到存在两条贯通的破坏面。上部的破坏面为真正的倾倒破坏底面, 而下部的破坏面虽然贯通, 但岩块并未

随边坡破坏体产生倾倒, 而是仍然位于原位置。出露的真实破坏底面倾角约为 50° 而下部的贯通面倾角约为 35° (图 19)。两条破坏面均由内部正交次级节理产生的张拉破坏所形成的破坏面和贯通层面相互组合连接而成, 并都呈现明显的阶梯状。

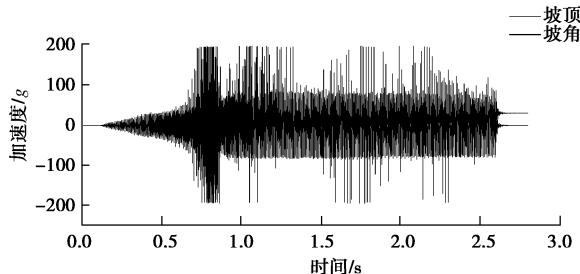


图 14 Topple_1 边坡 Wave3 动力输入下关键点加速度时程

Fig. 14 Acceleration time history of Topple_1 slope under Wave3

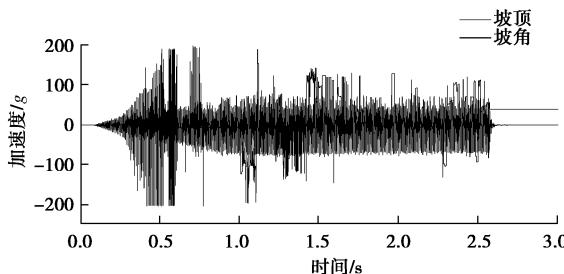


图 15 Topple_2 边坡 Wave3 动力输入下关键点加速度时程

Fig. 15 Acceleration time history of Topple_2 slope under Wave3



图 16 Topple_1 边坡动力破坏形态

Fig. 16 Failure condition of Topple_1 slope

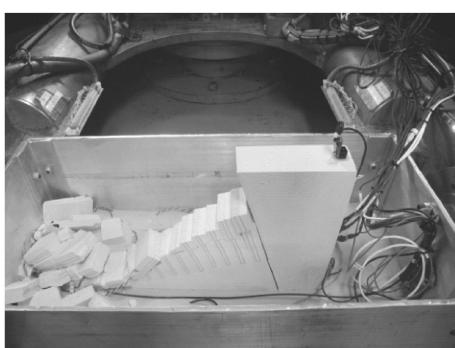


图 17 Topple_2 逆层边坡动力破坏形态

Fig. 17 Failure condition of Topple_2 slope

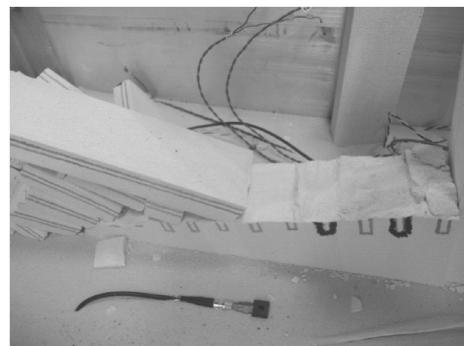


图 18 Topple_1 边坡贯通破坏面

Fig. 18 Failure plane of Topple_1 Slope



图 19 Topple_2 边坡贯通破坏面

Fig. 19 Failure plane of Topple_2 slope

4 讨 论

以上对试验结果的分析中显示出了很多有趣的现象, 下面就这些现象进行分析:

(1) 含有次级节理的逆层岩体边坡动力稳定性明显低于不含次级节理的逆层岩体边坡, 说明次级节理对逆层边坡动力稳定性影响很大。不仅如此, 两种逆层边坡的破坏模式也存在很大的区别。不含次级节理的逆层边坡破坏从坡脚开始, 依次向后产生岩层的弯折破坏; 含有次级节理的逆层边坡破坏从坡体中后部开始, 坡脚岩层最后产生贯通破坏, 进而形成整体的失稳, 破坏出露面呈明显的阶梯状。

(2) 针对逆层岩质边坡在动力作用下内部变形的特征, 可以将岩层理想化为底部固定的悬臂梁, 受到分布荷载作用产生变形和破坏, 如图 20 所示。图 20 (a) 为不含次级节理层状岩体受力示意图; 图 20 (b) 为图 20 (a) 模型层面尖端起裂扩展后示意图; 图 20 (c) 为含次级节理层状岩体受力示意图。图 20 (a) 中岩体沿层面尖端产生张拉破坏, 根据岩石断裂力学理论, 此时层面尖端受力状态属于 II 型受力状态, 即远端应力以剪应力为主, 尖端沿 I 型应力强度因子最大方向产生张拉破坏, 呈近水平方向扩展, 形成图 20 (b) 的状态; 图 20 (c) 岩体内部应力集中区域为

次级节理尖端, 其受力状态属于 I 型受力状态, 即远端应力以拉应力为主, 会产生沿次级节理延伸方向的扩展, 方向同样近水平, 也就是说, 图 20 (b) 状态和图 20 (a) 状态近似等效。由此可以看出, 次级节理的存在可以近似的等效为层面尖端已经产生近水平向扩展后的状态, 显然此状态的岩体强度小于层面尖端没有产生近水平向扩展破坏前的强度。因此, 含有次级节理的层状岩体总是优先沿次级节理产生破坏。对于本文中逆层边坡的试验模型, 前部岩层由于受到坡面的切割, 岩层长度小于后部岩层, 将这个特点代入岩层理想化受力模型, 即前部岩层悬臂梁的长度小于后部岩层。根据结构力学理论, 在震动过程中, 后部岩层受到的分布荷载面积更大, 同时由于长度的增大抗弯强度变得更小, 更容易产生破坏。这解释了为何含有次级节理的逆层岩体边坡动力破坏的起点不是在坡脚, 而是在坡体中后部。

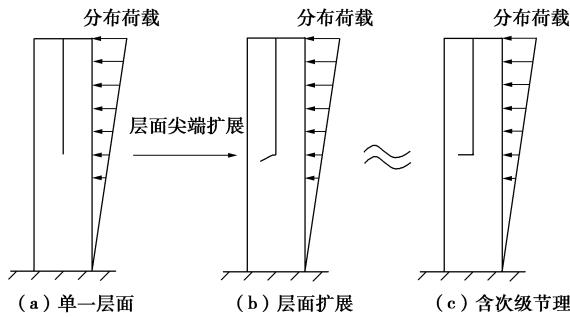


图 20 逆层边坡内部岩层动力破坏理想模型示意图

Fig. 20 Schematic diagram of the rock joint breaking mechanism in the reverse rock slope under dynamic load

(3) 由于含有次级节理的逆层边坡在震动过程中总是沿次级节理产生破坏, 而含有次级节理岩层的抗弯强度远小于完整岩层的抗弯强度, 因此含有次级节理的逆层岩体边坡破坏后出露的破坏面倾角大于完整岩层的破坏面倾角。

5 结 论

使用相似材料制作了含有非连续的层面和非贯通的次级节理逆层岩体边坡物理模型, 并对其进行了离心机动力试验。揭示了许多现象, 现总结如下:

(1) 对岩石相似材料的试验结果证明本文所设计的岩石相似材料制作方法、闭合接触层面和次级节理制作方法能够较好的符合真实层状岩体的物理力学特性。其中岩石相似材料采用石膏和细砂及水的混合物

通过标准化的制备方法制成, 其物理力学特性与沉积砂岩近似; 设计了新的工艺和新的方法, 首次实现了完全闭合接触的贯通层面的制作; 设计并制作了逆层岩体边坡的小比例相似材料模型。

(2) 试验结果证明层状岩体中广泛发育的正交次级节理对层状岩质边坡的动力响应和动力破坏均存在很大的影响。含有正交次级节理的层状岩体边坡地形放大效应更大, 动力稳定性更差; 层状岩体边坡动力破坏的过程中包含了次级节理的贯通。

(3) 逆层节理岩体边坡在水平地震动力输入的条件下, 主要产生沿正交次级节理破坏面和贯通层面组合而成的贯通面发生倾倒破坏, 破坏顺序与不含次级节理的逆层岩质边坡不同, 中后部节理首先产生张拉破坏, 然后迅速扩展, 最后坡脚岩层内的次级节理产生破坏, 使边坡整体失稳。

参 考 文 献:

- [1] HOEK E. The design of a centrifuge for the simulation of gravitational force field in mine models[M]. CSIR National Mechanical Engineering Research Institute, 1965.
- [2] BRAY J W, GOODMAN R E. The theory of base friction models[C]//International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Pergamon, 1981, **18**(6): 453 - 468.
- [3] ADHIKARY D P, DYSKIN A V, JEWELL R J, et al. A study of the mechanism of flexural toppling failure of rock slopes[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1997, **30**(2): 75.
- [4] ZHANG G, ZHAO Y, SHI G H, et al. Toppling failure simulation of rock slopes by numerical manifold method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(6): 800 - 805.
- [5] JOSEPH P G, EINSTEIN H H, WHITMAN R V. A Literature Review of Geotechnical Centrifuge Modeling with Particular Emphasis on Rock Mechanics[R]. DTIC Document, 1988.
- [6] JOSEPH P G, EINSTEIN H H. Rock modeling using the centrifuge[R]. Massachusetts Inst of TECH Cambridge Dept of Civil Engineering, 1988.