

DOI: 10.11779/CJGE201402006

地震作用下堆积体边坡振动台模型试验及抛出现象分析

刘婧雯¹, 黄博^{1*}, 邓辉², 凌道盛¹, 郭晓光², 高美奔²

(1. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室,浙江 杭州 310058; 2. 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,四川 成都 610059)

摘要: 国道 213 线都江堰 - 汶川段普遍发育着堆积体边坡。在“5.12 汶川地震”中,此类边坡更易发生滑坡灾害,并伴有独特的山石抛出现象。结合堆积体边坡实例进行振动台模型试验,研究堆积体边坡在多次地震作用下结构损伤累积并最终发生失稳的特征及边坡破坏模式。试验结果表明:堆积体边坡中上覆堆积体与下部基岩存在动力响应差异,边坡滑坡形式不同于静力失稳,表现为裂缝一旦出现便迅速扩展,边坡坡肩处部分小块体在水平和垂直向动力耦合作用下与原结构脱离抛出,这与汶川地震后边坡调研中发现的抛出现象一致。分析了模型边坡块体抛出现象与裂纹形成角度的关系,只有当裂纹角度和竖向加速度组合满足一定的触发条件时,才可能出现抛出现象。

关键词: 堆积体边坡; 物理模拟; 地震破坏机制; 抛出现象

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)02-0307-05

作者简介: 刘婧雯(1988-),女,硕士研究生,主要从事土动力学研究。E-mail: liujingwen198807@163.com.

Shaking table tests and throwing phenomenon of deposit slopes under earthquakes

LIU Jing-wen¹, HUANG Bo¹, DENG Hui², LING Dao-sheng¹, GUO Xiao-guang², GAO Mei-beng²

(1. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. State Key

Laboratory of Geo-Hazard Prevention and Geo-Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The deposit slope is very typical along the highway from Dujiangyan to Wenchuan, China, where “5.12” Wenchuan Earthquake took place. The investigation of “5.12” Wenchuan Earthquake shows that most of the landslides occur in those slopes. In order to study the seismic failure mode of this kind of widely distributed slope, 1g shaking table model tests are carried out to study the mechanism of slope instability. According to the test results, difference responses between the deposit and the rock bed under dynamic conditions make the failure mode of the deposit slope different from those under the static conditions. A throwing phenomenon occurs at the upper part under the combination of horizontal and vertical shaking, which is widely reported in “5.12” Wenchuan Earthquake. A mathematical model is established to analyze the throwing phenomenon under earthquakes, and it is found that this phenomenon can happen only when the crack opening angle meets some conditions.

Key words: deposit slope; physical model; seismic failure mechanism; throwing phenomenon

0 引言

堆积体边坡在中国西南地区分布广泛,这类边坡由岩层及其上覆的第四纪堆积体构成,形成特殊的空间“二元结构”。受岩土体差异性风化等特点影响,这类边坡稳定性低、变形破坏模式复杂,攀西地区滑坡调查统计结果表明^[1],堆积体滑坡约占滑坡事故的61.3%。堆积体边坡稳定性问题在地震条件下更为突出,汶川地震中,大部分滑坡发生在这类边坡中^[2],且其破坏机理与岩质和土质边坡都有所不同,部分边坡堆积区有明显的抛出(而非滑动)特点,如青川东河口滑坡等^[3]。这种边坡破坏模式是在汶川地震中首次观察到的,在其它地震中还未有过报道。黄润秋^[4]认为汶川地震高能量等特点,为抛出现象的产生提供了前提条件。王运生等^[5]也提出了地震高位滑坡形成

条件,认为块体抛出是P波和S波共同作用的结果。

振动台试验是实验室模拟地震的重要手段,其模型相似比从20~500^[6-7]不等。由于承载能力的限制,振动台试验存在一些难点,包括重力失真、尺寸效应等,由此引起的误差不可避免。这些问题一定程度上使得构件力学性能有所提高,出现模型抗震能力比经验认识偏高的情况^[8]。但模型变形破坏的机理与原型是相通的,为重现堆积体边坡在地震下的特殊破坏形式,进一步了解其在动力作用下的变形破坏过程和抛出现象的触发条件,为抗震设计提供参考,本文结合四川省国道213都江堰—汶川新建路段沙窝子高陡边

收稿日期: 2013-05-17

*通讯作者

坡实例, 建立堆积体边坡缩尺模型, 通过 $1g$ 振动台试验观测边坡堆积体与基岩接触面的变形发展过程和边坡破坏现象, 研究此类坡体的破坏模式和抛出机理; 并通过块体受力分析, 推导出抛出现象的触发条件。

1 边坡模型建立及参数选取

1.1 边坡模型设计

国道 213 都江堰—汶川段普遍发育堆积体边坡, 滑坡灾害多发。边坡原型为 213 国道上的沙窝子堆积体边坡, 如图 1 (a) 所示。最大坡高大于 250 m; 下段陡峻, 坡度约 $60^\circ \sim 70^\circ$, 上段稍缓, 坡度 $30^\circ \sim 45^\circ$ 。坡面堆积体由第四纪冲洪积物、崩坡积物组成, 厚度 1~25 m。基岩为泥盆系月里寨群上段 (Dyl^2) 灰岩、千枚岩等, 单斜地层, 岩层产状 $N55^\circ E/NW \angle 40^\circ$, 倾向坡内。灰岩致密坚硬, 性脆。千枚岩性软, 在千枚岩集中段地貌上多形成缓坡或沟槽负地形, 总体上组成软硬互层的岩体结构。由于实际边坡地形凌乱多变且复杂, 为突出堆积体和基岩的相互作用, 对边坡原型进行了简化, 取坡高 210 m, 坡长 225 m, 边坡坡角上缓下陡, 坡度及坡形与沙窝子高陡边坡保持一致。

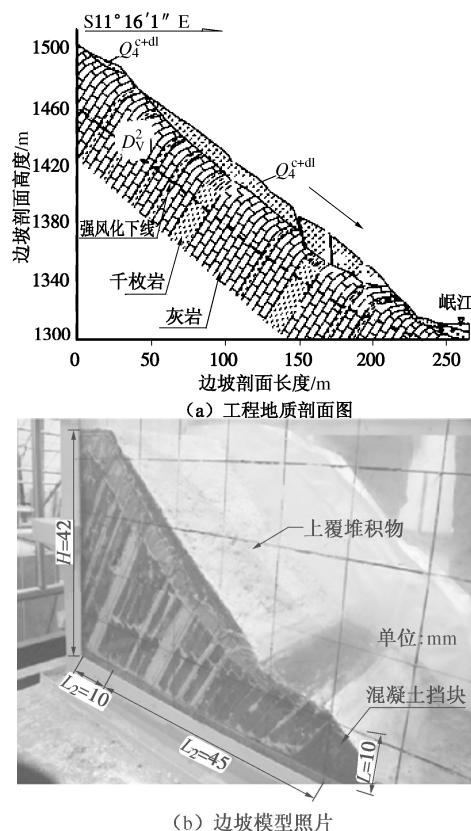


图 1 沙窝子高边坡工程地质剖面图及模型照片

Fig. 1 Geological profile and model photo of Shawozi slope

考虑模型箱尺寸, 模型和原型边坡几何相似常数 λ 取 500, 模型边坡坡高 H 为 0.42 m, 边坡坡长 L_1 为 0.45 m, 边坡坡肩 L_2 为 0.1 m, 模型边坡前缘基座厚度 D 为 0.1 m; 基岩岩层倾角 57° , 边坡坡角从下

到上变化范围为 $24^\circ \sim 45^\circ$, 与原型边坡坡角变化保持一致。根据模型箱的宽度, 取边坡模型宽为 0.34 m, 边坡模型如图 1 (b) 所示。

试验基于 Bockingham π 定理选取与原型密度一致的相似材料制备模型土, 材料密度相似常数为 1, 其他参数的相似关系可由此导出, 见表 1。

表 1 模型试验中的相似关系

Table 1 Similarity relations in model tests

| 物理量 | 单位 | 相似关系 | 相似常数 |
|------------------|-------------------|-----------|------|
| 长度 l | m | λ | 500 |
| 密度 | g/cm ³ | 1 | 1 |
| 加速度 a | m·s ⁻² | 1 | 1 |
| 应力 σ | kPa | λ | 500 |
| 应变 ε | 1 | 1 | 1 |
| 变形模量 G | GPa | λ | 500 |

1.2 边坡模型的材料及制作

采用和原型材料密度一致的原则配制模型材料, 为让试验材料力学参数(如黏聚力、模量等)同时满足相似关系, 参考以往经验^[9]选用膨润土、重晶石粉和石蜡油这 3 种对力学特性影响较大的材料。通过反复调整各组分含量, 确定了不同类型岩体相似材料配比, 其物理力学参数满足相似条件要求, 见表 2。

在制作边坡模型时, 将材料按表 2 中配比混合, 制成长 \times 宽 \times 高为 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ 的长方体试块, 养护成型后, 按边坡岩层产状 57° 进行搭砌, 以模拟岩体结构本身存在的层理面。搭砌中按图 1 所示岩体构造选用代表不同岩体的小单元体试块, 按砌筑要求上下各层交错进行, 防止形成横行或竖向贯通的软弱面。

岩体中同时也存在各种结构面, 是岩体边坡的薄弱环节。但由于结构面几何尺寸远小于岩体的几何尺寸, 只有几厘米甚至几毫米厚, 很难根据相似比找到合适的相似材料来模拟。本试验中采用约 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 厚的石英砂填充在试块之间来近似模拟结构面。坡体上部第四纪堆积体部分用 $2 \sim 3 \text{ cm}$ 厚的山砂模拟, 考虑到坡面有一定程度的植被形成表面壳体, 在上层堆积物表面撒薄层石膏模拟表面壳体。同时坡脚前部用混凝土挡块, 形状如图 1 (b), 限制振动过程中模型边坡基座与模型箱之间的相对位移, 以免影响试验结果。

1.3 试验仪器

本试验在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的二维振动试验台上完成, 该设备包含机、电、液一体化二维振动台和模型箱。振动台台面尺寸为 $1.1 \text{ m} \times 1.1 \text{ m}$, 工作原理如图 2 (a) 所示。设备通过液压传动方式施力并锁紧, 使振动台底部和侧向弹簧处于拉伸或压缩状态, 振动台偏离平衡位置, 然后瞬间释放弹簧施振, 从而提供竖直和平面内的振动, 最大振幅 5 cm , 频率 2 Hz 。通过 CA-YD

表2 相似材料物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of similarity materials

| 岩石类别 | 材料配比/质量百分比 重晶石粉:膨润土:石蜡油 | 密度/(g·cm ⁻³) | | | 变形模量/GPa(MPa [*]) | | | 黏聚力/MPa | | |
|--------|----------------------------|--------------------------|-----------|------|-----------------------------|---------|-------|---------|----------|-------|
| | | 地质原型 | 理想材料 | 模型材料 | 地质原型 | 理想材料* | 模型材料* | 地质原型 | 理想材料 | 模型材料 |
| 强风化灰岩 | 70.5:12.5:17 | 2.51 | 2.3~2.6 | 2.34 | 0.2~1.0 | 1~4 | 3.81 | 0.2~1.0 | 0.2~1.0 | 0.83 |
| 未风化灰岩 | 76.5:8:15.5 | 2.61 | 2.4~2.7 | 2.49 | 2.5~4.0 | 6~10 | 8.67 | 2.5~4.0 | 2.5~4.0 | 3.887 |
| 微风化千枚岩 | 65:13:22 | 2.32 | 2.15~2.55 | 2.15 | 1.5~3.5 | 0.6~3 | 0.76 | 1.5~3.5 | 1.5~3.5 | 3.100 |
| 强风化千枚岩 | 65:11:24 | 2.26 | 2.1~2.45 | 2.11 | 0.1~0.5 | 0.2~0.5 | 0.47 | 0.1~0.5 | 0.1~0.51 | 0.400 |

注: 理想材料数值为根据相似比折算得出的模型材料理想值范围。*号材料单位为括号内单位。

三向加速度传感器, 可获得台面加速度时程曲线。

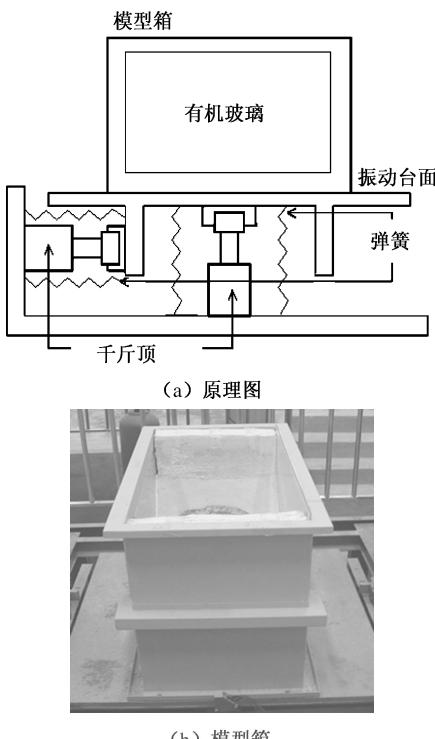


图2 振动台模型箱及原理图

Fig. 2 Model box and schematic diagram of shaking table system

实验配套的 $1.0\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.7\text{ m}$ 刚性模型箱, 见图 2 (b)。模型箱短边采用钢材制作, 长边两侧内嵌有机玻璃板, 可直接观测模型两侧边坡变形情况。模型箱短边内侧放置厚 10 cm 的聚苯乙烯泡沫板, 利用其防震、防水、质轻的特性, 在不增加模型重量的情况下, 减轻模型箱边界效应。

1.4 试验过程

本次试验共历经 15 次振动, 每次振动历时约 9 s , 水平和竖直向的初始位移幅值分别为 3 cm 和 5 cm 。这种振动方式是为了模拟经历多次地震后堆积体边坡逐步损伤累积, 并最终破坏的过程。图 3 给出了第 13 次振动时振动台水平和垂直向加速度时程, 其余各次振动记录的加速度曲线与之相近。

参照目前国内同类试验常采用的物理观测法测量每次振后边坡模型的变形, 即在模型箱侧面有机玻璃板处设置变形破裂位移测量特征点, 根据玻璃板上记

录的初始位移和变形后情况, 测量边坡模型位移量。同时用侧面和顶面的高分辨率摄像机记录每次振动过程, 通过回放再现破裂变形演进过程, 描绘坡体崩塌、破裂运动轨迹, 分析变形破裂的细微结构。

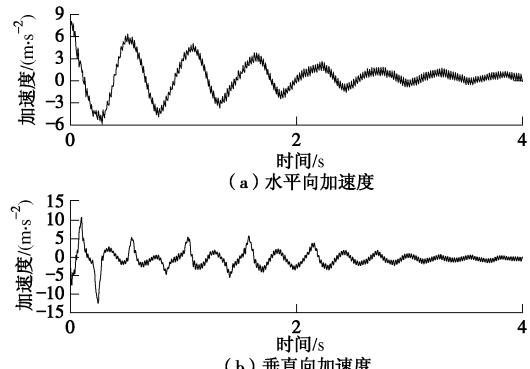


图3 振动台加速度记录图

Fig. 3 Acceleration record of shaking table tests

2 试验结果

2.1 边坡变形发展及失稳模式

在前 9 次振动中, 边坡模型没有发生肉眼可见的变形。第 10~13 次振动中, 坡肩贴近有机玻璃处坡面上出现长 20 cm 的裂缝且随振动不断扩展; 坡肩处堆积物与基岩接触面处发生开裂并逐渐向坡脚延伸。第 14 次振动中, 坡脚处开始开裂, 且可观察到坡脚处坡面明显鼓起, 但尚未形成贯通面。第 15 次振动中坡体瞬间破坏, 上覆堆积体被抛出。变形发展如图 4 所示。

本次试验中, 边坡失稳可分为两个过程, 一是滑动面的贯通, 二是边坡的整体失稳。从模型试验可以看出, 在动力作用下滑动面的逐步贯通与在静力作用下有所区别。在静力作用下, 堆积体边坡滑面的扩展主要是长期的重力地质作用和降雨侵蚀作用共同产生的。而在动力作用下, 由于上覆堆积体和下部基岩所产生的动力响应的差异, 导致了原本很小的裂纹在不断的抛出压致过程(上覆堆积体被抛出, 再复原产生挤压, 随后再被抛出的过程, 如图 5)中, 受到强烈的拉裂挤压力而迅速扩展, 扩展路径从坡肩不断向坡体中部延展, 最后延伸到坡脚处。当边坡坡脚在重力和拉压力的共同作用下错断后, 滑面贯通。

可认为这种边坡的破坏机制是：在多次反复振动中，堆积体与岩体介质的薄弱联系发生逐步累积损伤，堆积体和基岩的差异响应导致坡体变形不协调，最终造成边坡堆积体沿基覆界面发生较大变形破裂。

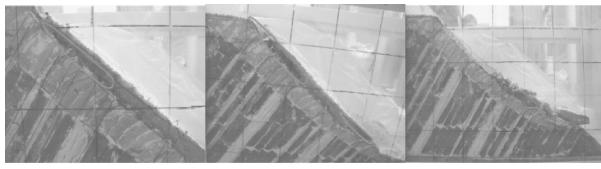


图 4 模型边坡破坏趋势图

Fig. 4 Slope deformation in shaking

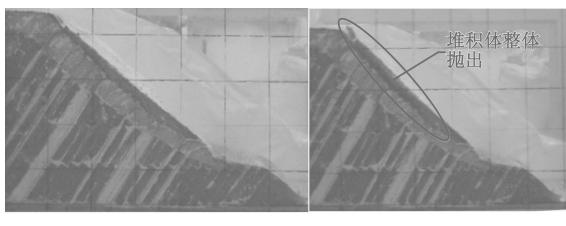


图 5 第 12 次振动过程中堆积体沿坡面法线方向抛出现象

Fig. 5 Throwing of deposits in 12th shaking

2.2 堆积体局部抛出现象

通过摄像回放，发现在振动后期，坡肩及坡体高处上覆堆积体局部被抛出。抛出的颗粒、碎石直径范围 $2\sim10\text{ mm}$ 。图 6 给出了第 13 次振动中，坡顶堆积体发生的局部抛出现象。图中箭头所示堆积块体从坡顶抛出后落到边坡中上部，落地距离距抛出点高差 3 cm、水平距离 $5\sim6\text{ cm}$ 处。换算到原型，水平抛出距离为 $25\sim30\text{ m}$ 。黄润秋^[4]指出，抛出现象的形成就是靠近发震区的坡体，由于地震波的地形放大效应在坡体顶部或上部产生很高的水平加速度响应，从而导致局部被临空抛出。在本次试验中可以观察到模型边坡堆积体坡肩位置出现多处裂纹，块体松动，但松动块体的抛出现象只在局部几处发生。笔者认为局部松动块体的抛出现象除了与初始加速度有关，还与其在振动过程中裂纹产生的角度存在一定的联系，为解释这一现象，根据振动台试验建立力学模型进行分析。

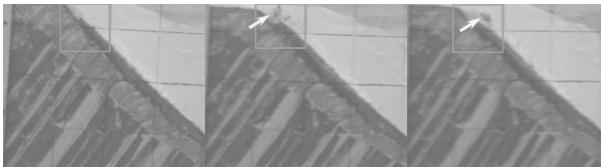


图 6 第 13 次振动中边坡坡顶抛出现象

Fig. 6 Throwing at upper part of slope in 13th shaking

3 抛出现象与裂纹角度分析

根据模型试验中抛出块体的裂纹形状，建立分析模型。抛出块体受力情况如图 7 所示。

设该土块与模型边坡之间的裂隙倾角为 β ，质量

为 mg 。边坡模型则简化为倾角为 θ 的斜面。假定土块与侧壁基岩脱开，与底部基岩界面间只存在支持力 N 和摩擦力 f （设为 $N\tan\varphi$ ， φ 为边坡内摩擦角，试验测得强风化灰岩 φ 为 13° ）；重力 mg （沿坡面方向和坡面法线方向可分解成 $mgsin\beta$ 和 $mgcos\beta$ ）。

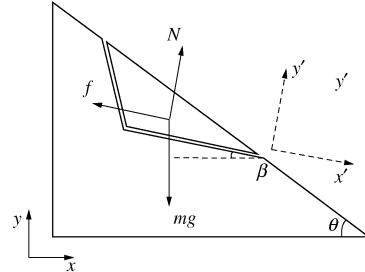


图 7 土块的受力示意图

Fig. 7 Force analysis of throwing block

以地球为惯性系建立方程：

$$x'\text{方向: } mg \sin \beta - N \tan \varphi = m(a_x + a'_x), \quad (1)$$

$$y'\text{方向: } -mg \cos \beta + N = m(a_y + a'_y). \quad (2)$$

式中 a'_x ， a'_y 为块体相对于边坡模型的加速度在 x' ， y' 方向分量； a_x ， a_y 为边坡模型绝对加速度在 x' ， y' 方向上分量，与加速度传感器实测的边坡模型水平和竖直方向的绝对加速度 A_x ， A_y 有如下关系：

$$a_x = \cos \beta A_x - \sin \beta A_y, \quad (3)$$

$$a_y = \sin \beta A_x + \cos \beta A_y. \quad (4)$$

由实测 A_x ， A_y 积分可得模型速度和位移，如图 8 所示，可见基岩向下做加速运动时，质量块最易与基岩脱离。由视频资料及图 8， $t=0.2445\text{ s}$ 时，发生抛出现象。此时， $A_y=-12.44\text{ m/s}^2$ ， $A_x=-4.63\text{ m/s}^2$ 。

$a'_x > 0$ 时块体与边坡有相对运动，由式 (1) 推出 $a'_x = g \sin \beta - g \cos \beta \tan \varphi - a_x$ 。

求解临界条件， $a'_x = g \sin \beta - g \cos \beta \tan \varphi - a_x \geq 0$ ，

$$a_{x(t=0.2445)} = \cos \beta A_x - \sin \beta A_y$$

$$= -4.634 \cos \beta + 12.44 \sin \beta.$$

将 $g=10\text{ m/s}^2$ ， $\varphi=13^\circ$ ， $a_{x(t=0.2445)}$ 带入，得当 $\beta \geq -135.8^\circ$ 时（ β 逆时针转动方向为负），块体就会发生相对运动，具备抛出启动条件。

在 y' 方向上进行分析，在切向方向条件满足时，只有当 $N=0$ ， $a'_y > 0$ 时，才有可能发生抛出。

当 $N=0$ 时，由式 (2) 推出 $a'_y = -a_y - g \cos \beta$ ，

$$a_{y(t=0.2445)} = \sin \beta A_x + \cos \beta A_y$$

$$= -4.63 \sin \beta - 12.44 \cos \beta$$

$$\Rightarrow a'_y = -(-4.63 \sin \beta - 12.44 \cos \beta) - 10 \cos \beta > 0$$

$$\Rightarrow \beta > -27.78^\circ \text{ 时才满足要求。}$$

综合切向和法向条件，当 $\beta > -27.78^\circ$ 时抛出现象才可发生。试验中观察到的抛出块体与坡体间的裂纹角度和上述推导情况相符。这表明，抛出现象的启动需要具备一定的初始条件，只有当堆积块体在一定角

度下开裂形成松动块体后, 才可能在一定的竖向加速度下发生块体抛出。汶川地震中, 堆积体边坡裂隙发育完全, 且有足够的垂直向地震加速度, 因此出现块体抛出的现象。

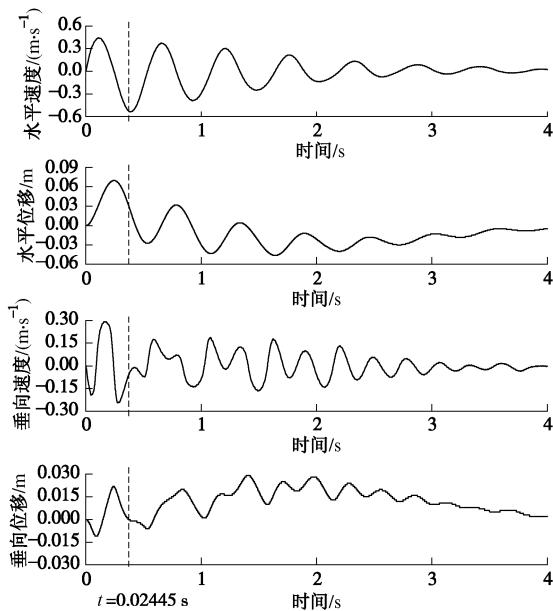


图 8 振动台速度和位移图

Fig. 8 Displacement and velocity curves of shaking table tests

4 结 论

通过振动台试验对地震作用下堆积体边坡模型进行模拟和分析, 可以得出以下 3 点结论:

(1) 边坡在动力作用下失稳模式与其在静力作用下不同, 堆积体与岩体介质“二元结构”之间的薄弱联系发生逐步累积损伤, 在上覆堆积体和下部基岩间动力差异响应下, 坡体破坏加剧, 裂缝一旦出现, 便迅速扩展直至贯通。

(2) 试验中边坡高处表现出向坡体临空方向抛出的动力特性, 与汶川地震中的抛出现象一致。此抛出现象是由于水平和垂直地震加速度作用耦合效应。

(3) 堆积体边坡上的松动块体, 只有在适当的裂隙角度和足够的垂直地震加速度同时作用下, 才会发生抛出现象。

参考文献:

- [1] 廖秋林, 李晓, 郝钊. 土石混合体的研究现状及研究展望[J]. 工程地质学报, 2006, 14(6): 800–807. (LIAO Qiu-lin, LI Xiao, HAO Zhao. Current status and future trends of studies on rock and soil aggregates[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(6): 800–807. (in Chinese))
- [2] 吉随旺, 唐永建, 胡德贵, 等. 四川省汶川地震灾区干线公路典型震害特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1250–1260. (JI Sui-wang, TANG Yong-jian, HU De-gui, et al. Analysis of typical seismic damages of highways in Wenchuan Earthquake-induced hazard areas in Sichuan Province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1250–1260. (in Chinese))
- [3] 许强, 黄润秋.“5.12”汶川大地震诱发大型崩滑灾害动力特征初探[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 721–729. (XU Qiang, HUANG Run-qiu. Kinetics characteristics of large landslides triggered by Wenchuan Earthquake on 12th May[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6): 721–729. (in Chinese))
- [4] 黄润秋. 汶川 8.0 级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1239–1249. (HUANG Run-qiu. Mechanism and geomechanical modes of landslide hazards triggered by Wenchuan 8.0 Earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1239–1249. (in Chinese))
- [5] 王运生, 徐鸿彪, 罗永红, 等. 地震高位滑坡形成条件及抛射运动程式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2360–2368. (WANG Yun-sheng, XU Hong-biao, LUO Yong-hong, et al. Study of formation conditions and toss motion program of high landslides induced by earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11): 2360–2368. (in Chinese))
- [6] 肖锐铧, 许强, 冯文凯, 等. 强震条件下双面坡变形破坏机理的振动台物理模拟试验研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 837–843. (XIAO Rui-hua, XU Qiang, FENG Wen-kai, et al. Shaking table simulation experiment on deformation failure mechanism of double sides slope in condition in tense earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(6): 837–843. (in Chinese))
- [7] 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 characteristic and dynamic responses of slope[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 624–632. (in Chinese))
- [8] 郑敏政. 地震模拟实验中相似律应用的若干问题[J]. 地震工程与工程振动, 1997, 17(2): 52–58. (ZHENG Min-zheng. Study on similitude laws for shaking table tests[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1997, 17(2): 52–58. (in Chinese))
- [9] 左保成, 陈从新, 刘才华, 等. 相似材料试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1805–1808. (ZHUO Bao-cheng, CHEN Cong-xin, LIU Cai-hua, et al. Research on similar material of slope simulation experiment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1805–1808. (in Chinese))