

陡倾层状岩质边坡动力响应大型振动台模型试验研究*

李振生 巨能攀 侯伟龙 李 果

(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 成都 610059)

摘 要 结合 5·12 汶川地震诱发的大量次生地质灾害,设计并完成了比例为 1:100 的边坡大型振动台模型试验,讨论了相似关系和模型的设计、传感器的布置、模型的建造过程,编制了动荷载加载制度。试验结果表明,边坡对输入动荷载具有放大作用,沿坡面向上, PGA 放大系数呈上升趋势,并具有一定的节律性,其节律性变化规律受坡体岩性、结构面组合和动荷载振动方向的影响;动荷载 X 向振动时的坡面峰值重力加速度(PGA)放大系数明显大于 Z 向振动时的坡面 PGA 放大系数,说明坡体在 X 向振动时的动力响应更为强烈;坡体内 PGA 放大系数在铅直向上呈线性放大,在水平向上表现为节律性变化。试验结果有助于了解陡倾层状岩质边坡在不同动荷载作用下的响应规律,对研究其变形失稳机制和抗震结构设计提供了依据。

关键词 岩质边坡 动力响应规律 振动台模型试验 PGA 放大系数

中图分类号:P642.22 文献标识码:A

LARGE-SCALE SHAKING TABLE MODEL TESTS FOR DYNAMIC RESPONSE OF STEEP STRATIFIED ROCK SLOPES

LI Zhensheng JU Nengpan HOU Weilong LI Guo

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

Abstract This paper is based on a large number of secondary geological disasters induced by the Wenchuan Earthquake. It designs and completes a large-scale shaking table model test of slopes with the scale of 1:100. It discusses the design of similarity relation and the model, sensor layout, process of model construction as well as the seismic wave loading system. The results show that the model slopes have amplification effect to the input dynamic load. Upward along with the slope surfaces, the PGA amplification coefficients have a rise tendency and some rhythmic. The variation law of rhythmic is affected by the lithology of slopes, combination of structural surface and vibration direction of the dynamic loads. Coefficients of the PGA amplification along surface of slopes are significantly greater for the vibration direction of dynamic load to horizontal(X) than for the direction of dynamic load to vertical(Z), which shows that the dynamic response of slopes is stronger when the vibration direction X . The PGA amplification coefficients in the vertical direction of the slope body are amplified linearly. They in the horizontal direction change in rhythm. The results can help to understand the dynamic response rules of steep stratified rock slopes in the effect of different kinds of dynamic loads, and provide a basis to study the mechanism of deformation and instability of slopes under earthquake and the design of anti-earthquake structure.

Key words Rock slope, Dynamic response rules, Shaking table model test, PGA amplification coefficients

* 收稿日期: 2011-10-20; 收到修改稿日期: 2012-03-07.

基金项目: 教育部重点项目支持(20111156), “十二五”国家科技支撑计划(2011BAK12B03)资助.

第一作者简介: 李振声, 岩土工程专业. Email: 157106455@qq.com

1 引言

边坡动力稳定性分析以动力响应规律为重要依据,振动台试验是研究边坡动力响应规律的有效手段之一,其具有试验规模较大、可重复性和可操作性强等方面的优势,所以虽然存在相似关系和边界条件模拟等方面的不足,仍为研究人员所采用来进行边坡动力反应等方面的研究^[1]。

边坡振动台试验取得了较多成果。徐光兴等^[1]研究了地震作用下模型边坡的动力特性与动力响应规律,以及地震动参数对动力特性和动力响应的影响。肖锐铎等^[2]从改变模型的坡度和坡顶宽度、软岩硬岩结合、阶梯状坡形等角度,较系统地研究了双面坡在强震作用下的响应规律。许强等^[3]系统地研究了强震作用下地震力作用方向、坡体结构、坡体形态特征等因素对斜坡变形破坏的影响规律,探讨了强震诱发斜坡失稳破坏的主要模式和过程。梁庆国等^[4]研究了层状岩体边坡在强地震动作用下的变形破坏问题。

目前利用振动台对陡倾层状岩质边坡的动力响应规律进行的研究很少,特别是对不同岩体材料与坡体结构边坡的动力响应规律、变形破坏过程和机制分析的研究几乎未见。因此本文设计了使用硬岩和软岩 2 种材料、反倾和顺层 2 种坡体结构进行组合,置于不同动荷载作用下进行对照的边坡动力响应振动台模型试验,通过对实验结果进行的分析,研究了边坡的动力响应规律。

2 振动台试验设计

2.1 实验设备平台

本试验使用的设备平台为中国核动力研究设计院结构动力工程所的三轴向大型地震模拟试验台阵平台(图 1)。该地震模拟平台的承载能力和性能为目前国内最大、最先进的,并且在数字控制、数据采集和测试分析方面达到国际先进水平。

振动台台面大小为 6m×6m,频率范围 0.1~100Hz,3 向 6 自由度加载,最大负载重量 600kN。水平向最大位移 ±150mm,垂直向最大位移 ±100mm,满负载时水平向最大加速度 1g,垂直向最大加速度 0.8g。



图 1 三轴向大型地震模拟试验台阵平台

Fig. 1 Large-scale three-axis earthquake simulation test array platform

2.2 相似关系设计

在振动台试验中,模型和原型相似关系的确定是一个很重要的问题。它对试验的成功与否起到十分关键的作用。但要使模型与原型满足完全的相似是十分困难的,所以必须根据试验的具体要求,使模型和原型在试验的重要因素上满足相似。本试验相似关系设计主要考虑的因素有:

(1) 试验要模拟陡倾层状岩质边坡的动力响应问题,重力场对试验的影响必须加以考虑。由于原型和模型的重力加速度大小相等,因此确定重力加速度相似比 $C_a=1$ 。

(2) 试验主要是模拟边坡在动荷载作用下的反映问题,所以需要满足在动力条件下边坡模型材料力学特征的相似性。

(3) 此外还应考虑振动台性能参数对试验的制约^[6]。

综上所述,本文以模型的长度、材料密度和加速度为控制量,各物理量的相似系数通过相似理论推导得出(表 1)。

2.3 试验模型设计

振动台试验的边坡模型都是放置在模型箱中的。目前使用较多的有刚性模型箱和叠层剪切变形模型箱 2 种。模型箱材料、几何形状的选择既要做到取材容易、经济合理,又要满足振动台试验边界条件的要求,最大限度的减小模型箱边界效应、材料本身刚度对试验结果的影响。

本试验采用刚性模型箱,采用聚乙烯泡沫作为减震层,铺垫在模型箱的前后两端,以减少模型箱边界效应的影响,其厚度为 20cm。模型箱长 3.7m,宽 1.5m,高 2.1m,左右两侧边界采用可透视有机玻璃

表 1 模型主要相似系数

Table 1 Main similar constant of the model

物理量	相似关系	相似系数	注释
长度	S_L	100	控制量
密度	S_ρ	1	控制量
加速度	S_a	1	控制量
弹性模量	$S_E = S_L S_\rho S_a$	100	
速度	$S_v = (S_a S_L)^{1/2}$	10	
位移	$S_u = S_L$	100	
黏聚力	$S_c = S_L S_\rho S_a$	100	
振动频率	$S_\omega = (S_a / S_L)^{1/2}$	0.1	
时间	$S_t = (S_L / S_a)^{1/2}$	10	
泊松比	无因次	1	
内摩擦角	无因次	1	

(图 2)。



图 2 振动台试验模型箱

Fig. 2 Model containers for shaking table test

边坡动力响应特性的影响因素包括坡体结构、地形地貌、岩性特征及振动荷载类型等。试验为了突出主要影响因素,选取了抽象概化的地质体模型。本试验的主要目的是以研究不同岩性与坡体结构对边坡动力响应规律的影响。试验采用以灰岩为代表的硬岩材料和以千枚岩为代表的软岩材料及顺层和反倾 2 种坡体结构,2 个试验模型均采用双向单面“U”型边坡,坡角为 60° 。试验模型的尺寸大小根据所用振动台的尺寸参数和承载能力进行确定。

在试验时,通过利用布置在模型不同部位的加速度传感器,位移计和土压力计采集边坡不同位置在荷载作用下的加速度、位移和土压力的动力响应数据。实验所用加速度计为江苏东华测试有限公司生产三向加速度计,型号为 HD301 和 HD302 型,量程: $0 \sim 20\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; 谐振频率: $0 \sim 12\text{kHz}$; 灵敏度($\text{mV} \cdot \text{ms}^{-2}$): $0 \sim 60(X, Y, Z)$; 频率范围: $0 \sim 1500\text{Hz}(X)$ 、 $0 \sim 1500\text{Hz}(Y)$ 、 $0 \sim 800\text{Hz}(Z)$; 横向灵敏度比: $\leq 5\%$; 直流(零频)响应:可同时测量 X, Y, Z 方

向,数据采集箱为 YE6230B 型。试验所用各类传感器的布置位置皆位于模型正中纵剖面上。其中加速度计在边坡的坡面和坡内皆有分布。土压力计安装在坡面比较容易出现应力集中的坡脚和坡顶,同时在中部亦有分布。位移计平均布置在坡面,且与坡面上加速度传感器的布置位置相同(图 3)。

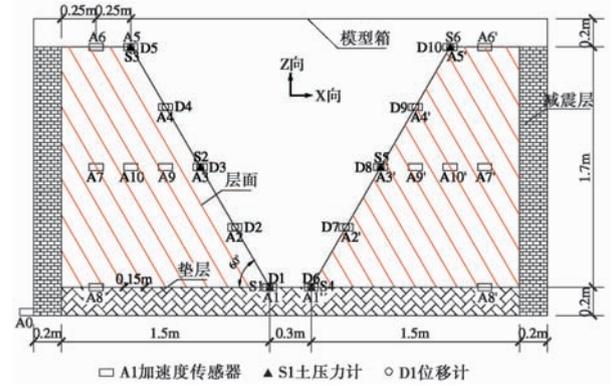


图 3 模型尺寸结构与传感器布置图

Fig. 3 Structure and size of the model sensor layout

2.4 试验模型建造

本试验使用重晶石粉、石英砂、石膏、甘油以及水为基础材料,参照前人研究成果,根据相似关系的要求,通过试验确定了硬岩和软岩模拟材料的配合比。硬岩相似材料的质量组分配比为:重晶石:砂子:石膏:水:甘油 = 44.9:32:12.8:9:1.3; 软岩相似材料的配比为:重晶石:砂子:石膏:水:甘油 = 51.3:32:9:6.4:1.3(表 2)。其中层面参数通过进行土的直剪试验测得。

表 2 模拟材料的主要物理力学参数

Table 2 Main physical mechanical parameters of the simulation materials

岩性	重度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	E / MPa	泊松比	c / MPa	ϕ / ($^\circ$)	层面 c /MPa	层面 ϕ /($^\circ$)
硬岩	27.3	73.7	0.25	0.12	43	0.006	37
软岩	26.8	34.1	0.28	0.043	35	0.001	25

为减少模型箱底部的边界效应,在坡体砌筑之前,使用与坡体相同的材料在模型箱底部铺设 20cm 厚的垫层。在建造模型时,软岩材料按照配比进行现场配置、搅拌,将搅拌好的材料倒入模型箱中,利用模板控制所要砌筑岩层的角度和厚度,夯击压实成形,层与层之间用纸张隔开,充当结构面。模型砌筑完毕一层后,静置一段时间,再砌筑下一层。硬岩材料主要模拟块状岩体,需预先制成一定尺寸的预

制块,在建模时按照预先设计的坡体结构砌筑成形。在砌筑过程中,考虑到斜坡内部以层面作为优势结构面,故层面之间为砌块直接接触,模拟岩石层面性状,同层砌块之间用砌筑材料进行黏连,模拟岩体中发育的不连续结构面。砌筑时,应使边坡底部和垫层的连接牢固,这样荷载才能有效地通过垫层加载到边坡上。

在模型建造过程中,将传感器按照预先设计的分布位置并使用正确的安装方法布置各类传感器,避免在布置过程中,使传感器发生损坏以及由于传感器布置方法有误影响试验数据的准确性。



图4 软岩边坡砌筑

Fig. 4 Soft rock slope build



图5 硬岩边坡砌筑

Fig. 5 Hard rock slope build

3 试验加载过程设计

试验旨在研究不同岩性与坡体结构的陡倾层状边坡在不同类型、频率、振幅和激振方向的动荷载作用下的动力响应规律。其中,动荷载采用天然波和正弦波 2 种。天然波采用卧龙地震台实测的“5·12”汶川地震波($\Delta t=0.005s$,持时 108s)。

天然波施加水平 X 向、竖直 Z 向 2 种激振方向,时间压缩比为 10(图 6、图 7)。

正弦波共采用 3 种频率,分别为 5Hz、10Hz、和 15Hz,施加 2 种激振方向,包括水平 X 向和竖直 Z 向。

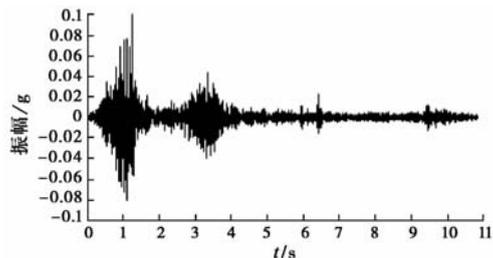


图6 台面输入地震波 X 向加速度时程(工况 11)

Fig. 6 Earthquake acceleration time history of the X direction input by the table(test 11)

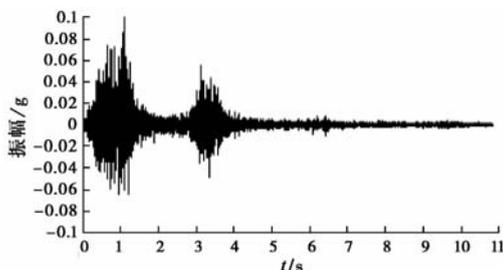


图7 台面输入地震波 Z 向加速度时程(工况 10)

Fig. 7 Earthquake acceleration time history of the Z direction input by the table(test 10)

在试验过程中对模型从小到大逐级施加不同振幅的动荷载。一种工况施加完成后,观测并记录模型的变形和裂缝情况,然后再施加下一种工况。在试验的最后阶段,施加较大振幅的正弦波使试验模型发生彻底破坏,记录模型的变形破坏过程。试验开始之前,以及之后的不同阶段均施加白噪声扫描,以测定模型的动力特性及其变化情况(表 3)。

4 边坡动力响应规律分析

边坡动力响应规律主要有加速度、位移、应力等的响应规律。根据前人的研究结果和实际调查,边坡的变形和失稳主要与加速度及其分布规律有关,而且工程中常用的各种边坡动力稳定分析方法也是以边坡加速度的动力响应规律为基础的。因此,本文重点对加速度响应规律进行了研究。

为研究边坡加速度动力响应规律,采用了 PGA 放大系数的概念。PGA (Peak Ground Acceleration) 为各测点所测得的响应加速度峰值。在一般文献中定义 PGA 放大系数为同一工况下,边坡上各测点的响应加速度峰值与台面所测加速度峰值的比值。但在本实验过程中,振动台上同时存在 2 个模型箱,台面振动时对 2 个模型箱的作用效果不能保证完全相

表3 振动台试验加载工况表

Table 3 Dynamic load system of the shaking table test

编号	荷载类型	振动方向	振幅/g
1	白噪声	\	0.05
2	正弦波 5Hz	Z	0.1
3	正弦波 10Hz		
4	正弦波 15Hz		
5	白噪声	\	0.05
6	正弦波 5Hz	X	0.1
7	正弦波 10Hz		
8	正弦波 15Hz		
9	白噪声	\	0.05
10	天然波	Z	0.1
11	天然波	X	
12	白噪声	\	0.1
13	正弦波 5Hz	Z	0.2
14	正弦波 10Hz		
15	正弦波 15Hz		
16	白噪声	\	0.1
17	正弦波 5Hz	X	0.2
18	正弦波 10Hz		
19	正弦波 15Hz		
20	白噪声	\	0.1
21	天然波	Z	0.2
22	天然波	X	
23	白噪声	\	0.1
24	天然波	Z	0.3
25	天然波	X	
26	白噪声	\	0.1
27	天然波	Z	0.4
28	天然波	X	
29	白噪声	\	0.1
30	天然波	Z	0.5
31	天然波	X	
32	白噪声	\	0.1
33	天然波	Z	0.6
34	天然波	X	
35	白噪声	\	0.1
36	天然波	Z	0.8
37	天然波	X	
38	白噪声	\	0.1

同,并且由于同一模型箱内2个边坡的坡体结构不同,边坡底部与垫层之间的连接方式不同,所以一般的PGA放大系数的计算方法对本文并不适用。需要在原有定义的基础上进行改进,PGA放大系数为边坡上各测点的响应加速度峰值与坡脚处所测的响应加速度峰值的比值。

4.1 坡面加速度动力响应规律

试验结果表明,在不同动荷载的作用下,不同边坡的坡面水平加速度和垂直加速度具有不同的响应规律。图8为工况8—X向正弦波作用下各边坡坡

面水平加速度响应规律;图9为工况11—X向地震波作用下各边坡坡面水平加速度响应规律;图10为工况4—Z向正弦波作用下各边坡坡面垂直加速度响应规律;图11为工况10—Z向地震波作用下各边坡坡面垂直加速度响应规律。

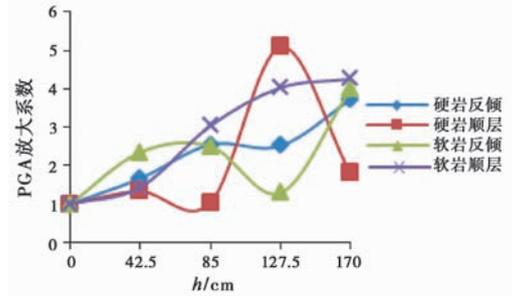


图8 正弦波作用下边坡坡面水平加速度响应规律

Fig. 8 Response rules of horizontal acceleration along slope surface in the effect of sine wave

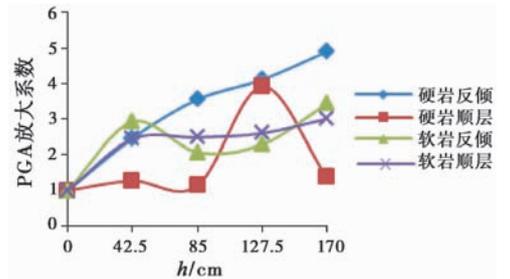


图9 地震波作用下边坡坡面水平加速度响应规律

Fig. 9 Response rules of horizontal acceleration along slope surface in the effect of seismic wave

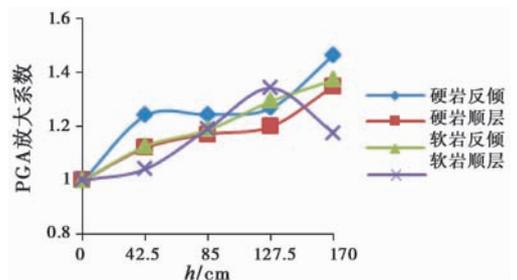


图10 正弦波作用下边坡坡面垂直加速度响应规律

Fig. 10 Response rules of vertical acceleration along slope surface in the effect of sine wave

从上列图中可以看出,4个边坡在不同动荷载的作用下,沿坡面向上,水平和垂直PGA放大系数都呈上升趋势,但其变化过程却不尽相同,其不同之处主要有节律性变化规律和放大系数最大值2个方面。

(1) 节律性变化规律:边坡在动荷载的作用下,其PGA放大系数沿坡面高度增加大多呈节律性变化,既时而增大,时而减小,增大和减小相间。不同

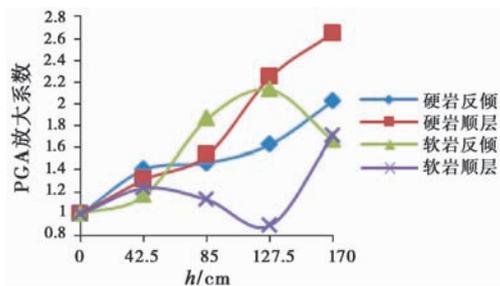


图 11 地震波作用下边坡坡面垂直加速度响应规律

Fig. 11 Response rules of vertical acceleration along slope surface in the effect of seismic wave

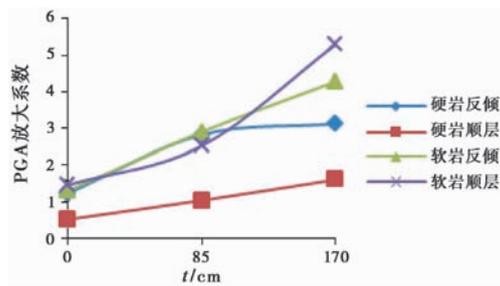


图 12 坡体内铅直向加速度响应规律

Fig. 12 Response rules of acceleration in the slope body in the vertical direction

边坡在不同动荷载的作用下,其坡面 PGA 放大系数的节律性变化规律不同。这是因为加速度的动力响应规律受高程、坡面和岩性组合的影响。边坡上部所受到的约束较下部少,在底部动荷载的作用下,会发生更剧烈的运动。此外,根据弹性波散射理论,振动应力波在传播过程中遇到异质界面时,为了保持状态平衡,将发生波场分裂现象,主要表现为在自由表面和坡内层面的反射和折射。^[8]在 S 波垂直入射的条件下,在界面处会分解为同类型的反射 S 波和转换型反射 P 波。边坡内任意质点的加速度波由入射 S 波、反射 P 波和反射 S 波叠加而成且不同波场到达质点的延时不同,由此在边坡内形成复杂的振动波场。各边坡由于岩性和结构面的组合形式不同以及同一边坡在不同类型和振动方向的动荷载作用下,在边坡坡面处形成的复合振动波场也各不相同,从而表现为 PGA 放大系数节律性变化规律的不同。

(2)放大系数最大值:从图中可以看出,在 X 向动荷载的作用下,坡面水平 PGA 放大系数的最大值位于 $3 \sim 5.1$ 之间,而在 Z 向动荷载的作用下,坡面垂直 PGA 放大系数最大值基本位于 $1.35 \sim 2.7$ 之间,远远小于坡面水平 PGA 放大系数的最大值。说明边坡在水平向动荷载的作用下产生的动力响应比在垂直向动荷载作用下更为强烈,相应的水平动荷载对边坡产生的破坏也更严重。

4.2 坡体内加速度响应规律

为研究在动荷载作用下的坡体内加速度响应规律,在坡体内的铅直向从低到高布置了 A8, A7, A6 共 3 个加速度传感器,在水平向从外向里布置了 A3, A9, A10, A7 等 4 个加速度传感器。图 12 和图 13 分别为工况 8 作用下坡体内铅直向和水平向的水平加速度响应规律。

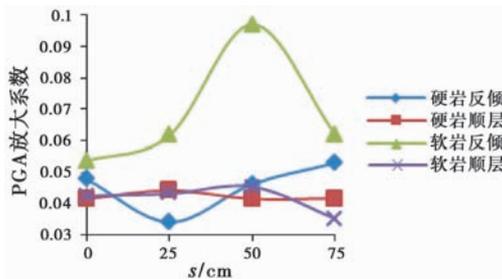


图 13 坡体内水平向加速度响应规律

Fig. 13 Response rules of acceleration in the slope body in the horizontal direction

从图 13 中可以看出,坡体内铅直向的 PGA 放大系数随高程增高而增大,呈较强的线性规律;而水平向的 PGA 放大系数从外到内并未表现出一定的增大或减小趋势,而是时而增大,时而减小,呈现节律性变化的特点。

结合坡面加速度响应规律可以看出,坡面上质点加速度沿高程的分布实际上是边坡内质点动力反应沿高程方向和水平向分布变化规律共同作用的结果。其中加速度放大规律主要与高程有关,而节律性主要受坡体水平向动力响应的影

5 结论

本文设计并完成了比例为 $1:100$ 的边坡大型振动台试验。通过对试验所采集到的动力响应数据进行分析,研究了 4 种不同类型的边坡在水平 X 向、竖直 Z 向的正弦波和地震波动荷载作用下的加速度响应规律,并得到以下几点结论:

(1)在动荷载的作用下,边坡的坡面 PGA 放大系数沿坡面高度增加呈上升趋势,并表现出一定的节律性。经研究发现,节律性变化规律受坡体岩性、结构面组合、动荷载类型和振动方向有关。振动应

力波在异质界面处,会发生波场分裂现象,产生各种应力波相互叠加在界面附近形成复杂的振动波场。坡体岩性、结构面的组合及动荷载类型和振动方向会影响振动波场的形成,从而表现为不同边坡在不同动荷载作用下,其坡面 PGA 放大系数的节律性变化规律各不相同。

(2) X 向动荷载作用下的坡面水平 PGA 放大系数的最大值远大于 Z 向动荷载作用下的坡面垂直 PGA 放大系数最大值。由此可推出,边坡在水平向动荷载的作用下的动力响应比在垂直向动荷载作用下更加剧烈,边坡在水平动荷载作用下发生失稳变形可能性更大。

(3) 坡体内 PGA 放大系数在铅直向上呈线性放大,在水平向上表现为节律性变化。坡面的加速度响应是由这两个方向的加速度分布规律共同作用而成。

参 考 文 献

- [1] 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 Guangxing, Yao Lingkan, Gao Zhaoning, et al. Large-scale shaking table model test study on dynamic characteristics and dynamic responses of slope. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(3): 624 ~ 632.
- [2] 肖锐铨,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 Ruihuan, Xu Qiang, Feng Wenkai, et al. Shaking table simulation experiment on deformation failure mechanism of double sides slope in condition of intense earthquake. Journal of Engineering Geology, 2010, **18**(6): 837 ~ 843.
- [3] 许强,陈建君,冯文凯,等. 斜坡地震响应的物理模拟试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, **41**(3): 266 ~ 272.
Xu Qiang, Chen Jianjun, Feng Wenkai, et al. Study of the seismic response of slopes by physical modeling. Journal of Sichuan University(Engineering Science), 2009, **41**(3): 266 ~ 272.
- [4] 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 Qingguo, Han Wenfeng, Ma Runyong, et al. Physical simulation study on dynamic failures of layered rock masses under strong ground motion. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(8): 1307 ~ 1311.
- [5] 于玉贞,邓丽军,等. 砂土边坡地震动力响应离心模型试验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, **47**(6): 789 ~ 792.
Yu Yuzhen, Deng Lijun, et al. Centrifuge model test of the seismic response behavior of a sand slope. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2007, **47**(6): 789 ~ 792.
- [6] 李育枢,李天斌,等. 黄草坪2[#]隧道洞口段减震措施的大型振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(6): 1128 ~ 1136.
Li Yushu, Li Tianbin, et al. Large-scale shaking table test for vibration-absorption measures of portal section of Huangcaoping tunnel No. 2. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(6): 1128 ~ 1136.
- [7] 沈建,陈新民,魏平,等. 土质边坡地震稳定性动力模型试验研究综述[J]. 工业建筑, 2010, **40**(S1): 625 ~ 628.
Shen Jian, Chen Xinmin, Wei Ping, et al. Review on the dynamic model tests of seismic stability of soil slopes. Industrial Construction, 2010, **40**(S1): 625 ~ 628.
- [8] 许强,刘汉香,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 Hanxiang, et al. Large-scale shaking table test study of acceleration dynamic responses characteristics of slopes. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(12): 2420 ~ 2428.
- [9] 蒋树屏,蒋华,王晓雯,等. 高烈度地震区公路隧道洞口段大型振动台模型试验方案设计[J]. 公路, 2009, (10): 245 ~ 249.
Jiang Shuping, Jiang Hua, Wang Xiaowen, et al. Design test scheme of large scale shaking table model for tunnel outlet of highway tunnel in seismic region with strong motion. Highway, 2009, (10): 245 ~ 249.
- [10] 祁生文,伍法权,等. 岩质边坡动力反应分析[M]. 北京:科学出版社, 2007.
Qi Shengwen, Wu Faquan, et al. Rock Slope Dynamic Response Analysis. Beijing: Science Press, 1987.
- [11] 石崇,周家文,仁强,等. 单面边坡高程放大效应的射线理论解[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008, **36**(2): 238 ~ 241.
Shi Chong, Zhou Jiawen, Ren Qiang, et al. Ray theory solution of the elevation amplification effect on a single-free-face slope. Journal of Hohai University(Natural Science), 2008, **36**(2): 238 ~ 241.
- [12] 许强,黄润秋. 5·12 汶川大地震诱发大型崩塌灾害动力特征初探[J]. 工程地质学报, 2008, **16**(6): 721 ~ 729.
Xu Qiang, Huang Runqiu. Kinetics characteristics of large landslides triggered by May 12th Wenchuan earthquake. Journal of Engineering Geology, 2008, **16**(6): 721 ~ 729.
- [13] 张菊明,王思敬. 层状边坡岩体滑动稳定的三维动力学分析[J]. 工程地质学报, 1994, **2**(3): 1 ~ 12.
Zhang Juming, Wang Sijing. 3-D dynamic analysis of rock sliding on the layered rock slope. Journal of Engineering Geology, 1994, **2**(3): 1 ~ 12.
- [14] 陶连金,苏生瑞,张悼元,等. 节理岩体边坡的动力稳定性分析[J]. 工程地质学报, 2001, **9**(1): 32 ~ 38.
Tao Lianjin, Su Shengrui, Zhang Zhuoyuan, et al. Dynamic stability analysis of jointed rock slope. Journal of Engineering Geology, 2001, **9**(1): 32 ~ 38.