

王宇,贾洪彪,赵轩,等.地震作用下均质土坡动力特性的振动台试验研究[J].地震工程学报,2017,39(1):0100-0106.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.01.0100

WANG Yu, JIA Hong-biao, ZHAO Xuan, et al. Shaking Table Tests on Dynamic Characteristics of Homogeneous Soil Slopes during Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(1): 0100-0106. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.01.0100

地震作用下均质土坡动力特性的振动台试验研究^①

王宇¹, 贾洪彪², 赵轩², 唐为民²

(1.广东省水利电力勘测设计研究院, 广东 广州 510145; 2.中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074)

摘要:设计并完成比例尺1:100的边坡振动台模型试验,讨论模型的相似关系、传感器的布置及模型的建造,并编制相应的动荷载加载方案。通过输入不同类型、不同幅值、频率的动荷载,分析模型边坡在地震作用下的动力响应规律以及地震动参数对边坡动力特性和动力响应的影响。试验结果表明,在坡体的表面和坡内的竖直方向上,加速度放大系数均随着高程增加而明显增大。当输入不同压缩比的地震波时,压缩比越大坡体的动力响应越明显,即随着输入动荷载的频率增加,越接近土体的自振频率加速度放大效应越明显;在坡体的同一高程处,坡面的加速度放大系数略大于坡体内的加速度放大系数,表现出一定的趋表效应,同时随着输入地震波振幅的增加,加速度放大系数整体出现递减的趋势。实验结果分析有助于揭示土质边坡在地震作用下的失稳破坏机制,为今后边坡工程的抗震设计提供积极的参考。

关键词:振动台; 土质边坡; 动力响应; 动力特性; 模型实验

中图分类号:TV223; P315.9

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2017)01-0100-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.01.0100

Shaking Table Tests on Dynamic Characteristics of Homogeneous Soil Slopes during Earthquake

WANG Yu¹, JIA Hong-biao², ZHAO Xuan², TANG Wei-min²

(1.Guangdong Hydropower Planning & Design Institute, Guangzhou 510145, Guangdong, China;

2.China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: In this paper, we design and complete a shaking table model test with respect to slope with a scale of 1:100, and discuss the similarity relation of the model, sensor layout, and process of model construction, as well as the seismic wave loading system. We built the model slope in soil with a height of 50 cm, length of 100 cm, and thickness of 45 cm, and performed a series of tests with inputs of different seismic wave types, amplitudes, and frequencies. We discuss the dynamic characteristics and responses of the slope in an earthquake and the influence of the ground motion parameters. The results show that the acceleration responses at the same slope position have obvious differences under different seismic loading inputs. The amplification coefficients of acceleration along the slope surface and in the vertical direction increase smoothly with increasing elevation, and otherwise increases dramatically in the slope body. At the same time, the input frequency of seismic waves has obvious effects on the dynamic slope responses. As it approaches the natural frequency of the model slope, the amplification effect of acceleration is clear-

① 收稿日期:2015-11-18

基金项目:高速远程滑坡早期识别研究(41272309)

作者简介:王宇(1989-),男,硕士,助理工程师,从事水利水电工程地质勘测工作。E-mail:wyhn00@126.com。

ly enhanced with increasing frequency. The amplification coefficients of acceleration on the slope surface are larger than those in the slope body at the same elevation. The amplification coefficients of acceleration decrease with increasing earthquake amplitudes. With an increase in vibration number, the damping ratios increase, and the amplification coefficients of peak acceleration in the slope decrease with increases in the seismic amplitudes. Based on the shaking table test results, we present the influence of the ground motion parameters on the dynamic slope characteristics. The acceleration amplification coefficients increase nonlinearly as the elevation increases, and the distribution of acceleration in slope changes as the input seismic wave frequency changes. Acceleration amplification coefficients increase with increments of seismic wave amplitude, but amplitude does not change the distribution of acceleration in the slope body. The duration time of the input seismic wave has little influence on the distribution and amplitude of acceleration in the slope. These results help reveal the mechanism of slope instability during earthquakes, and can provide valuable references for aseismic slope engineering design.

Key words: shaking table; soil slope; dynamic response; dynamic characteristics; model test

0 引言

边坡的稳定性历来是岩土工程所重点关注的问题之一,其中边坡在地震作用下的稳定性更是研究重点。我国是一个山地多而地震又频发的国家,与地震相关的边坡问题不可避免地出现在大量的工程建设中。近年来随着国家经济的快速发展,西部等强地震地区将会建造越来越多的基础设施,而这些地区的边坡地震稳定性问题将更加凸显。

在研究边坡地震动力稳定性方面,振动台模型试验逐渐成为研究边坡动力响应的重要手段。依据相似性原理和量纲分析确定相似材料的配比,采用相似性材料进行模型的建造,利用安放在模型中的各种监测传感器,既可监测边坡内部应力-应变的变化状态,又能再现模型在地震作用下的失稳破坏过程。尽管振动台模型试验在相似关系和边界条件等方面存在一些不足,但因其具有试验规模大、可重复试验,且加载的地震波和试验过程具有很强的可操作性等优势,使得其在岩土工程界得到广泛的应用。

目前利用地震振动台在研究边坡动力稳定性方面已取得了较多成果^[1-2]。早期王思敬等^[3]利用地震振动台试验研究了土石坝等岩质边坡动力稳定性问题;王存玉等^[4]对二滩拱坝动力模型实验中发现,地震对岩质边坡不仅存在竖直向的加速度放大效应,同时也存在水平向的加速度放大效应;随着振动台向大尺寸方向发展,徐光兴等^[5]利用单向电液伺服式地震模拟振动台进行了较大尺寸的土质边坡的动力响应试验;徐强等^[6]利用地震振动台进行了水平层状的上软下硬和上硬下软两种岩性组合研制边坡的振动台试验;杨国香等^[7]设计了两个均质结构和顺层结构的单面坡模型,对比分析研究不同边坡结构模型动力特

性;邱长林等^[8]利用振动台完成了公路路基模型实验,研究了地震动对路基边坡的影响;王丽丽等^[9]利用振动台模型实验研究了结构面上覆不同厚度土层对动力作用下边坡的稳定影响。由于自然界边坡岩体的结构及地震动力的复杂性,利用振动台试验研究边坡的动力特性仍需要不断进行完善。

本文拟对土质边坡进行概化处理并设计完成土质边坡动力特性振动台模型试验,试验综合考虑地震波的类型、频率、振幅等方面,以分析在地震作用下均质土坡的动力特性和动力响应的变化规律。

1 振动台模型试验设计

试验所使用的实验装置是苏州苏试仪器制造厂生产的两轴向三自由度地震模拟振动台,该试验装置采用了日本原装数字控制系统以及动态数据采集系统。振动台的台面尺寸为1 m×2 m,台面最大荷载质量是250 kg,工作频率范围是0.5~80 Hz。振动台可以双向三自由度同时加载,在台面满载情况下,X、Y向最大位移为±100 mm,最大加速度为±2.0g。

1.1 相似关系设计

在试验中,模型能否真实再现所模拟原型结构实际所处的状态是评价试验结果可靠性的关键因素^[10]。对于土质边坡,由于自然土体的物理力学性质复杂各异,当其处于较低应力应变状态时出现一定的非线性,且其各项性质会随着土体的成分、应力应变状态及动荷载加载方向、频率和历时等不同而产生不同变化,很难研制出能全面考虑诸多影响因素的相似材料。鉴于此,本试验拟采用自然状态的土体为试验材料,采用模型的长度、密度和动荷载加速度为控制量,按照相似三定理^[11]导出模型物理量之间的相似关系。模型主要相似常数如表1所列。

表1 模型主要相似常数

Table 1 Primary similarity constants of model

物理量	相似关系	相似常数
长度 L (控制量)	C_l	100
密度 ρ (控制量)	C_ρ	1
加速度 α (控制量)	C_a	1
弹性模量	$C_E = C_l C_\rho$	100
内摩擦角 φ	C_φ	1
内聚力 c	$C_c = C_l C_\rho$	100
时间比尺 t	C_t	3
频率 ω	C_ω	0.33

1.2 模型边界条件

自然界中的边坡是以一种半无限体形式存在的,理论上不存在限制边界,但在实际的模型试验中,由于受到振动台尺寸的限制,只能将试验模型放置在一定尺寸的模型箱中,人为地增加了边界条件。由于人工边界的存在,模型在振动过程中边界上的波动反射以及形态的变化等会给试验带来误差,即所谓的模型箱效应。因此在模型试验中应尽量使模型与原型以同样方式变形以减小模型箱边界的影响^[5]。由于土体本身物理力学性质的复杂性以及地震波在介质中传播的复杂性,在模型试验中很难完全模拟自然边界条件,因此在振动台试验中如何减少模型箱边界的反射波的影响是试验成功的关键。成功的模型箱设计应对整个动力系统的影响最小,以尽量使模型在地震作用下与在自然状况下变形方式相同。

目前振动台模型试验中典型的模型箱有刚性模型箱、层状剪切模型箱、固壁式模型箱以及柔性容器等。本次试验中采用刚性箱体结构。四周采用刚性角钢为骨架,在模型箱一端的内侧加衬柔性材料,模型的一侧采用有机玻璃制作而成,便于在试验过程中观察边坡失稳破坏的过程。模型箱尺寸为 $120\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 45\text{ cm}$ 。

1.3 模型设计及监测点的布置

模型边坡采用单面坡设计,模型高 50 cm ,坡顶宽 45 cm ,模型长约 120 cm 。试验模型采用土体制备,含水量控制在 10% 左右。建造模型时将试验材料均匀搅拌混合,然后倒入试验模型箱中进行制作,采用从下到上、逐层砌筑的方式,每层砌筑 10 cm ,每层砌筑完之后均进行压实。最终的模型如图 1 所示。

为研究边坡在地震作用下的动力特性及动力响应规律,在模型边坡的坡表及坡内不同位置处布置一定数量的加速度传感器,以获得动荷载加载过程

中边坡加速度的响应数据。为减小因安放位置不均匀所造成的影响,所有的加速度传感器均安放在模型中间的纵剖面上。其中水平向加速度传感器 A0 安放在振动台的台面上,以控制输入的地震波同台面响应的地震波形之间的误差;A1~A5 沿边坡坡面每隔 10 cm 高安放一个;在边坡模型的内部同样按高度为 10 cm 的距离安放水平向的加速度传感器 (A6~A10),以分析边坡内部竖向加速度放大响应,A6 点安放在模型的顶部,距离模型箱后壁 12.5 cm 。模型的尺寸及传感器的布置如图 2 所示。



图1 振动台模型试验箱及模型

Fig.1 The model box and model slope used in the test

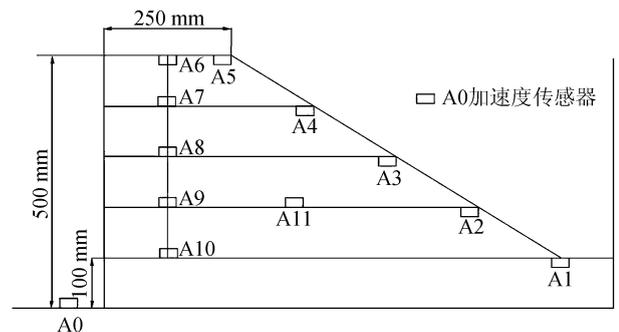


图2 模型结构及传感器布置图

Fig.2 Model structure and layout of sensors

1.4 试验的加载制度

在本次试验过程中,为考虑加载不同类型的波形、频率、振幅的动荷载作用下模型边坡的动力响应规律,施加的动荷载主要为水平向地震波作用,主要有白噪声、El-Centro 波、Taff 波和 Kobe 波。其中白噪声加载时间为 30 s ,对所施加的 El-Centro 波、Taff 波和 Kobe 波均进行压缩,时间压缩比为 3 倍(图 3)。首先对模型加载幅值为 0.3 m/s^2 的白噪声激励,分析试验模型的固有频率,同时在每次施加的动荷载类型、峰值及时间压缩比改变时均加载白噪声激励,分析模型边坡动力响应特性。为考虑不同类型及不同振幅动荷载的影响,将每种波的台面输入

加速度分别设定为 0.63、1.25、2.5 及 5 m/s²,同时对 El-Centro 波进行 3 种不同的时间压缩比,共施加 29

种工况进行激振,以分析地震频谱边坡动力响应的影 响。具体的加载制度如表 2。

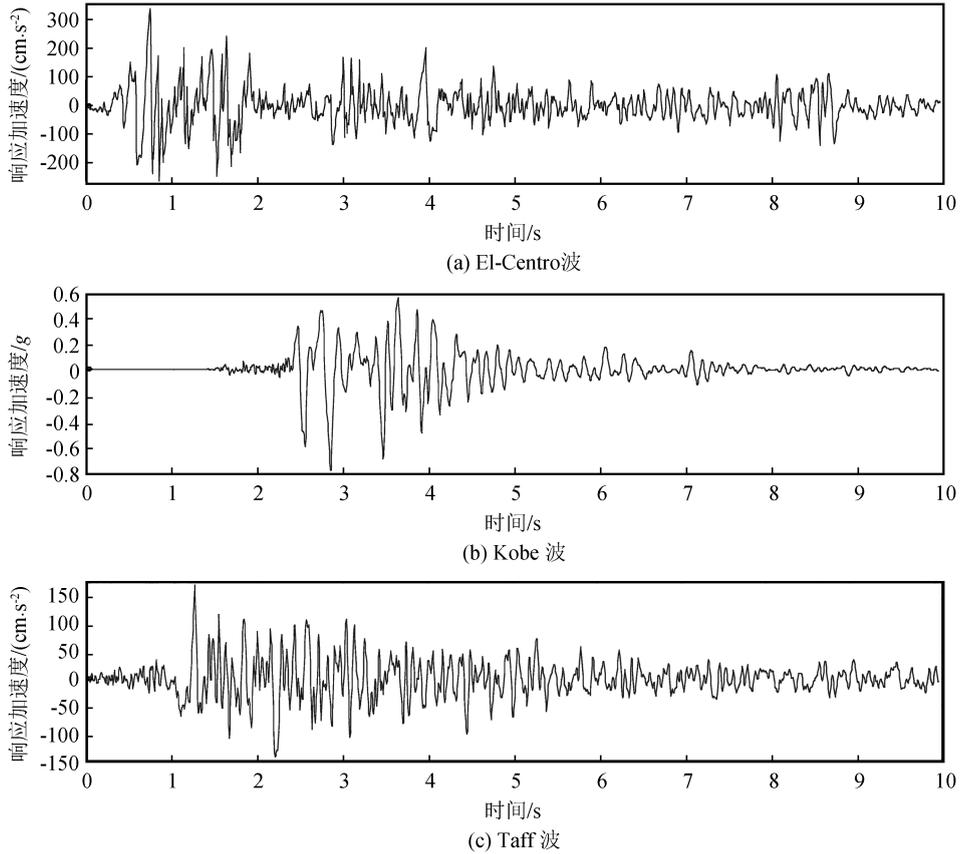


图 3 施加的三种波形曲线

Fig.3 Curve of the three input waves

表 2 地震振动台试验工况加载表

Table 2 Loading conditions of shaking table test

序号	工况	台面输入幅值 / (m · s ⁻²)	时间压缩比	序号	工况	台面输入幅值 / (m · s ⁻²)	时间压缩比
1	白噪声	0.3		16	El-4	1.25	1
2	El-1	0.63	3	17	白噪声	0.3	
3	白噪声	0.3		18	El-5	2.5	3
4	Taff-1	0.63	3	19	白噪声	0.4	
5	白噪声	0.3		20	Taff-3	2.5	3
6	Kobe-1	0.63	3	21	白噪声	0.4	
7	白噪声	0.3		22	Kobe-3	2.5	3
8	El-2	1.25	3	23	白噪声	0.4	
9	白噪声	0.3		24	El-6	5	3
10	Taff-2	1.25	3	25	白噪声	0.5	
11	白噪声	0.3		26	Taff-4	5	3
12	Kobe-2	1.25	3	27	白噪声	0.5	
13	白噪声	0.3		28	Kobe-4	5	3
14	El-3	1.25	1.5	29	白噪声	0.5	
15	白噪声	0.3					

2 模型边坡的动力响应

边坡的动力响应主要包括边坡在地震作用下各

点的加速度、速度、位移及应力应变的时空变化等。目前的震害调查研究表明,边坡变形失稳的主要原因是由地震引起的与加速度有关的地震惯性力^[12],同

时加速度也是边坡地震响应的核心参数,边坡的加速度反应及其分布规律是评价边坡地震动力响应性状的基本资料,且其测量相对容易。本文就实测坡体各监测点加速度响应值对边坡的动力响应进行分析。

2.1 模型边坡的加速度响应规律

将动态数据采集仪安放在坡表面和坡内,采集各加速度传感器的响应数据,并对其分布规律进行分析

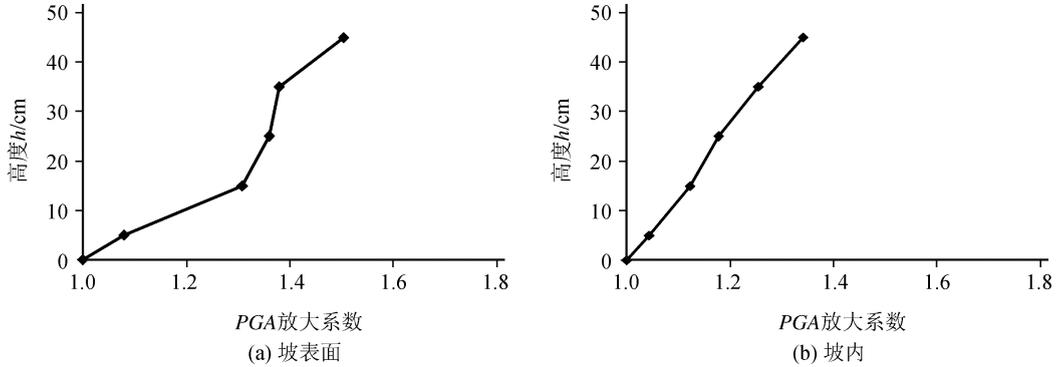


图4 坡面及坡内各测点处PGA放大系数随高度的变化规律

Fig.4 Variation of PGA amplification coefficient of each monitoring point on the slope surface and in the slope with height

图4给出了边坡表面及坡内各测点处PGA放大系数随坡高的变化规律。从图4(a)中可以看出,边坡对输入地震动具有明显的放大作用,沿坡面方向向上,加速度峰值放大系数呈递增趋势,在坡的中部至坡肩陡然增大;而图4(b)表示的坡内各测点的加速度放大系数则呈近线性增加,且坡面的加速度放大系数大于同一高程的坡体内部的加速度放大系数,说明坡体的临空面对动荷载的加速度具有显著的放大作用。

2.2 地震动参数对边坡动力响应的影响

边坡的地震动动力响应与边坡所遭受的地震动特性密切相关。地震动特性包括地震波的类型、幅值及幅频特性。本试验加载制度充分考虑了地震动特性,并对每种影响因素均作试验处理。

2.2.1 地震波类型的影响

对各种幅值的台面输入地震动均进行了El、Kobe及Taff三种波型的试验。以工况8、10及12为例进行说明(图5)。

图5给出了上述工况下坡面加速度传感器A1、A3及A5对应测点处PGA放大系数。从图中可以看出,坡面加速度在Kobe波作用下放大最多,El波次之,Taff波最小,且加速度放大系数在A1处均较小,沿坡面由下向上逐渐增加。由此可见,在不同地震波作用下加速度响应有明显的差异,其原因在于各种地震波的频谱特性存在较大的差异。

总结。为更详细阐明边坡动力响应的规律,同时参考相关的研究成果^[13],引入无量纲的加速度放大系数,定义各测点动力响应加速度峰值与台面实测加速度峰值的比值为加速度放大系数(PGA)。试验结果表明,在各工况地震波的激励下,坡表面和坡内对加速度的响应均具有放大效应,且坡面的响应略大于坡内的响应,现以工况8为例进行描述(图4)。

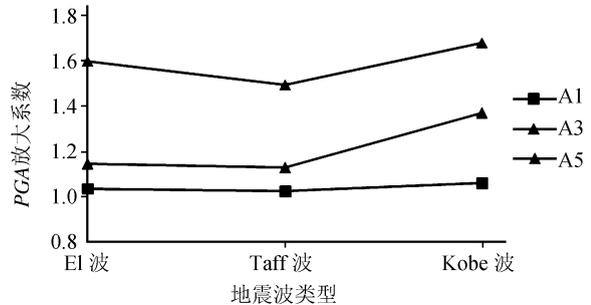


图5 不同地震波类型作用下边坡表面各测点PGA放大系数

Fig.5 PGA amplification coefficient of each point on the slope surface under the action of different seismic waves

2.2.2 地震波幅值的影响

为研究地震波幅值对边坡动力响应的影响,对3种输入地震波均进行了时间压缩比为3、幅值分别为0.63、1.25、2.5及5.0 m/s²的激振试验。试验结果表明,各种地震波作用下坡体加速度响应表现出相似的规律。图6所示为El-1,El-2,El-6~8工况下坡面加速度传感器A3、A5对应测点处PGA放大系数。

从图6可以看出,PGA放大系数随振幅增大呈现明显的递减趋势。随着输入地震动强度的增加,土体表现出明显的非线性特性,土层的滤波作用逐渐增强,坡面下半部分甚至出现加速度峰值减小的现象。

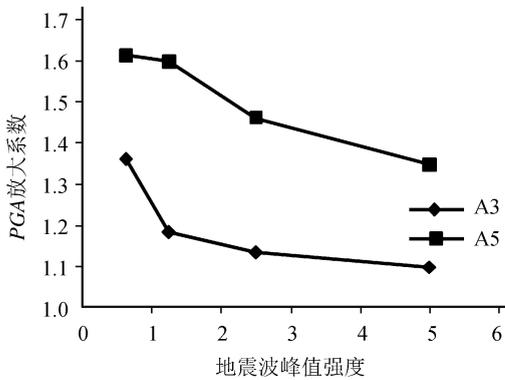


图 6 不同地震波峰值强度下坡面 A3 和 A5 处 PGA 放大系数

Fig.6 PGA amplification coefficients of A3 and A5 under different peak strength of seismic wave

2.2.3 地震波频率的影响

为探讨输入地震波频率对边坡动力响应的影响,对 EI 波进行幅值为 1.25 m/s^2 、时间压缩比分别为 3、1.5 及 1 的动荷载加载试验。图 7 给出了工况 8、14 及 16 下坡面加速度传感器 A3、A5 对应测点处的 PGA 放大系数。

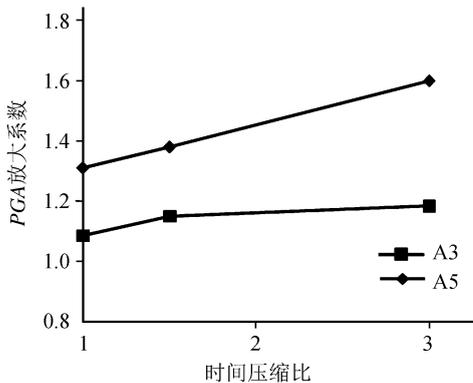


图 7 坡内的加速度放大系数

Fig.7 PGA amplification coefficients of points in the slope

从图 7 中可以看出,随着输入地震波频率的增加,坡面各测点 PGA 放大系数呈明显的增大趋势。同时对各种施加压缩比的地震波进行频谱分析,发现压缩比为 1、1.5 及 3 的地震波所对应的卓越频率分别为 $1\sim 4 \text{ Hz}$ 、 $2\sim 8 \text{ Hz}$ 及 $3\sim 18 \text{ Hz}$ 。压缩比为 3 的地震波频段较宽、振幅较大,其中包含了土的卓越周期,因此当输入地震波的频率增加时,土体的振幅会增大,呈现出加速度放大系数增大的趋势。

2.3 坡体对输入地震动的影响

在上述分析中坡体和坡面的动力反应呈现出一定的差异性。由于边坡临空面的影响,坡体和坡面各点的加速度反应时程同输入的动荷载加速度时程不

同,表现在坡体所呈现的地震动强度和台面输入的动荷载强度不同,坡体内会产生大量不同方向和类型的反射波。模型的上部较底部所受的约束要少,当施加动荷载时更易发生强烈振动。同时依据弹性波散射理论,当传播介质中存在异质界面时,地震应力波为保持状态平衡会出现波场分裂现象,其表现形式为在坡体表面反射、在坡体内部的不连续面发生发射和折射,而各种类型的反射和折射波会相互叠加形成复杂的地震波场。石崇等^[14]依据平面射线理论和方法,推导出地震作用下单面坡的高程放大效应的理论解,得出边坡的高程放大效应是地震波在边坡自由面反射作用下形成的结论;卢爱红等^[15]利用波的传播理论研究地震波在边坡表面的传播效应,认为经过反射和叠加后的地震波波幅与介质的位置和参数相关,同时与波的频率和速度有关;杨风威等^[16]依据弹性波几何射线理论,分析平面简谐波自坡底入射时计算出坡体内质点加速度放大系数的表达式,揭示了边坡质点加速度放大效应机制。

3 结论

本文利用地震振动台设计并完成比例为 $1:100$ 的边坡模型试验,主要研究地震作用下土质边坡的动力响应规律,分析各种地震动力参数对边坡模型的动力特性和动力响应等的影响,并得出如下结论:

(1) 在施加的地震波荷载作用下,坡面和坡体内部的竖直方向加速度放大系数沿高程具有明显的放大效应,且其呈现出非线性特征,随高程的增加坡面处的加速度放大系数剧增,而坡内的加速度放大系数则是逐渐增加,在与坡体同一高程处,坡面的加速度放大系数略大于坡体内部,呈现出趋表效应。

(2) 当地震波的振动幅值逐渐增加时,加速度放大系数在同一动荷载作用下沿高程逐渐增加,但随着振动次数的增加,放大系数总体表现为递减的趋势。输入地震波的频率对坡体的动力响应具有明显的影响,随着频率的增加,越接近土体边坡的自振频率坡体加速度放大效应就会越显著,且当施加不同类型的动荷载时,坡体的加速度响应均有不同的变化。

同时也看到本文试验模型中的相似关系仍存在一些不足,很难完全模拟实际野外土坡在地震作用下的变化规律,但在试验模型变形较小或未遭到破坏时,由相似比所引起的误差较小,其试验结果仍具有一定的参考价值。边坡在地震作用下的动力响应问题涉及到工程地质学和地震学两门学科,是一个比较复杂的问题,其动力响应特征和变化规律仍需要进一

步的研究和探索。另外在试验过程中考虑了过多因素,如采用正交试验法进行分析,采用物理模拟和数值模拟技术相结合的方法,会使结果更加严谨。

参考文献(References)

- [1] 刘小生,王钟宁,汪小刚,等.面板坝大型振动台模型试验与动力分析[M].北京:中国水利水电出版社,2005.
LIU Xiao-sheng, WANG Zhong-ning, WANG Xiao-gang, et al. Shaking Table Model Test and Dynamic Analysis of Core Faceplate Rockfill Dam [M]. Beijing: China Water Power Press, 2005. (in Chinese)
- [2] 黄润秋,李果,巨能攀.层状岩体斜坡强震动力响应的振动台试验[J].岩石力学与工程学报,2013,32(5):865-875.
HUANG Run-qiu, LI Guo, JU Neng-pan. Shaking Table Test on Strong Earthquake Response of Stratified Rock Slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5):865-875. (in Chinese)
- [3] 王思敬.岩石边坡动态稳定性的初步探讨[J].地质科学,1977,12(4):372-376.
WANG Si-jing. Preliminary Notes on the Dynamic Stability of Rock Slopes[J]. Chinese Journal of Geology, 1977, 12(4):372-376. (in Chinese)
- [4] 王存玉,王思敬.斜坡模型振动试验研究[M].岩体工程地质学问题(七).北京:科学出版社,1987:1-102.
WANG Cun-yu, WANG Si-jing. Study of Dynamic Characteristics of Slopes by Physical Modeling Test—Engineering Geological Mechanics Problems of Rock Mass[M]. Beijing: Science Press, 1987:1-102. (in Chinese)
- [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 on the Dynamic Characteristics and Seismic Responses of Slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3):624-632. (in Chinese)
- [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. Study on Slope Dynamic Responses of Accelerations by Large-scale Shaking Table Test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(12):2420-2428. (in Chinese)
- [7] 杨国香,伍法权,董金玉,等.地震作用下岩质边坡动力响应特性及变形破坏机制研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(4):696-702.
YANG Guo-xiang, WU Fa-quan, Dong Jin-yu, et al. Study of Dynamic Response Characters and Failure Mechanism of Rock Slope under Earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4):696-702. (in Chinese)
- [8] 邱长林,张庆建.路基地震峰值加速度响应特性振动台试验研究[J].地震工程学报,2014,36(4):778-783.
QIU Chang-lin, ZHANG Qing-jian. Shaking Table Tests on Response Characteristics of Seismic Peak Acceleration of Subgrade[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4):778-783. (in Chinese)
- [9] 王丽丽,梁庆国,孙文,等.不同厚度层状边坡动力响应的模型试验研究[J].地震工程学报,2013,35(3):590-596
WANG Li-li, LIANG Qing-guo, SUN Wen, et al. Model Test on Dynamic Response of Layered Slopes with Different Thicknesses[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3):590-596.
- [10] 吕西林,陈跃庆,陈波,等.结构-地基动力相互作用体系振动台模型试验研究[J].地震工程与工程振动,2000,20(4):20-29.
LV Xi-lin, CHEN Yue-qing, CHEN Bo, et al. Shaking Table Testing of Dynamic Soil-structure Interaction System[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20(4):20-29. (in Chinese)
- [11] 罗先启,葛修润.滑坡模型试验理论及其应用[M].北京:中国水利水电出版社,2008:84-92.
LUO Xian-qi, GE Xiu-run. Theory and Application of Model Test on Landslide[M]. Beijing: China Water Power Press, 2008:84-92. (in Chinese)
- [12] 刘小生,王钟宁,汪小刚,等.面板坝大型振动台模型试验与动力分析[M].北京:中国水利水电出版社,2005.
LIU Xiao-sheng, WANG Zhong-ning, WANG Xiao-gang, et al. Shaking Table Model Test and Dynamic Analysis of Core Faceplate Rockfill Dam [M]. Beijing: China Water Power Press, 2005. (in Chinese)
- [13] 刘春玲,祁生文,童立强,等.利用FLAC3D分析某边坡地震稳定性[J].岩石力学与工程学报,2004,23(16):2730-2733
LIU Chun-lin, QI Sheng-wen, DOGN Li-qiang, et al. Stability Analysis of Slope under Earthquake with FLAC3D[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16):2730-2733. (in Chinese)
- [14] 石崇,周家文,任强,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 Jia-wen, REN Qiang, et al. Ray Theory Solution of the Elevation Amplification Effect on a Single-free-face Slope[J]. Journal of Hohai University: Natural Science, 2008, 36(2):238-241. (in Chinese)
- [15] 卢爱红,茅献彪,张连英.应力波在岩体中传播的叠加效应[J].徐州工程学院学报:自然科学版,2008,23(3):74-79.
LU Ai-hong, MAO Xian-biao, ZHANG Lian-ying. Accumulation Effect of Stress Wave Propagation in the Rock Mass[J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology: Natural Science, 2008, 23(3):74-79. (in Chinese)
- [16] 杨风威,李海波,齐三红,等.平面应力波在岩质边坡中的传播规律研究[J].岩石力学与工程学报,2015(增刊1):2623-2631
YANG Feng-wei, LI Hai-bo, QI San-hong, et al. Study of Regularity of Plane Stress Wave Transmitting in Rock Slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Suppl):2623-2631. (in Chinese)