

地震波频率对层状岩质边坡动力响应影响的试验研究

刘汉东¹, 牛林峰¹, 袁富强², 王忠福¹, 姚亮^{1,3}, 宁长春⁴

- (1. 华北水利水电大学, 河南省岩土力学与结构工程重点实验室, 河南 郑州 450045;
2. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 3. 河南东龙控股有限公司, 河南 郑州 450000;
4. 塔里木油田公司油气工程研究院, 新疆 库尔勒 841000)

摘要: 利用振动台模型试验探讨反倾层状岩质边坡的动力响应规律, 通过输入不同频率、激振强度、持时的正弦波, 监测模型边坡的加速度响应, 着重分析频率对模型边坡加速度动力响应特性的影响。试验结果表明: ①地震波频率对模型边坡动力响应的影响有两种不同的表现形式。当输入波频率小于等于模型边坡自振频率时, 随着频率的增大, 模型边坡的高程放大效应增强。②当输入波频率大于模型边坡自振频率时, 随着频率的增大, 模型边坡的高程放大效应减弱甚至消失。模型边坡的动力响应随高程的增加经历先减小后增大的变化趋势; 模型边坡底部的加速度响应相对增强, 甚至大于中上部响应强度; 模型边坡各点的加速度放大系数基本小于1.0。③频率小于等于模型边坡自振频率的地震波往往造成模型边坡顶部和浅表部的变形破坏, 频率大于模型边坡自振频率的地震波则造成模型边坡底部的变形破坏。④频率、激振强度、持时均对模型边坡的动力响应产生影响, 但频率的影响最为显著, 激振强度次之, 持时的影响最弱。

关键词: 振动台试验; 层状边坡; 频率; 动力响应; 加速度放大系数

中图分类号: TU457; TU459+.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2018)02-0077-07

Test research on the influence of seismic wave frequency on the dynamic response of a layered rock slope

LIU Handong¹, NIU Linfeng¹, YUAN Fuqiang², WANG Zhongfu¹, YAO Liang^{1,3}, NING Changchun⁴

- (1. Henan Key Laboratory of Geomechanics and Structural Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450045, China; 2. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China; 3. Henan East Dragon Holdings Ltd, Zhengzhou, Henan 450000, China; 4. Research Institute of Petroleum Engineering, Turim Oilfield Company, Kuerle, Xingjiang 841000, China)

Abstract: The dynamic response of an anti-dip layered rock slope is examined by using shake table model tests. By inputting sine waves of different frequencies, excitation intensity and holding time, the acceleration of response of the model slope is monitored, and the influence of frequency on the dynamic response characteristics of acceleration of the model slope is analyzed emphatically. The results show that ① there are two different forms of the influence of frequency of seismic wave on dynamic response of the model slope. When frequency of the input wave is less than or equal to the natural frequency of the model slope, with the increasing frequency, the elevation amplification effect of the model slope is enhanced. ② When frequency of the input wave is greater than the natural frequency of the model slope, with the increasing frequency, the elevation amplification effect of the model slope is weakened or even disappears. The dynamic response of the model slope decreases first and then increases with the increasing the elevation. The acceleration response at

收稿日期: 2017-07-14; 修订日期: 2017-09-11

基金项目: 国家科技支撑计划项目资助(2015BAB07B08); 华北水利水电大学研究生教育创新计划项目资助(YK2016-04)

第一作者: 刘汉东(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土力学教学与研究工作。E-mail: liuhandong@ncwu.edu.cn

the bottom of the model slope is relatively stronger, even greater than the response intensity of the upper and middle parts. The acceleration magnification factor at each point of the model slope is almost all less than 1.0.

③ The wave whose frequency is less than or equal to the natural frequency often causes deformation and failure of the top and superficial parts of the model slope and the wave whose frequency is greater than the natural frequency causes the deformation of the bottom of the model slope. ④ Frequency, excitation intensity and holding time have an influence on the dynamic response of the model slope, but the frequency has the most significant impact, followed by the intensity of vibration, and the impact of holding time is the weakest.

Keywords: shaking table test; rock slope; frequency; dynamic response; acceleration magnification factor

地震作用下边坡稳定性是岩土工程十分关心的问题之一^[1]。我国是多山地、多地震的国家,与地震作用有关的边坡问题大量存在^[2-3]。边坡动力响应规律的研究作为边坡动力稳定分析的基础,有着重要意义。已有不少学者通过数值模拟方法和振动台模型试验对边坡动力响应规律进行了研究^[4-9]。徐光兴等^[10-11]利用振动台试验和 FLAC^{3D}有限差分软件,将地震波按照不同时间比压缩,探讨了输入地震波频率对边坡动力响应的影响;董金玉等^[12]、杨国香等^[13-14]利用振动台试验,通过输入不同频率的正弦波和不同压缩倍数的天然地震波,探讨了地震波频率对顺层、反倾岩质边坡动力响应的影响;刘汉香等^[15]利用振动台试验,探讨了不同频率的正弦波作用下水平层状岩质边坡和均质岩质边坡动力响应规律。

频率作为表征地震波特性的关键参数之一,其对地震作用下边坡动力响应特性有着显著的影响,特别是地震波的卓越频率与边坡自振频率相近时,极易引起边坡动力响应异常,导致边坡失稳破坏。然而就目前的研究成果来看,对地震波频率在边坡动力响应中影响的研究并不深入,要么研究深度不够,要么探讨频段过窄,从地震波频率的角度对反倾层状岩质边坡动力响应规律的研究亦较少见。因此,本次试验研究利用振动台模型试验,构建反倾层状岩质边坡物理模型,

通过输入不同频率、激振强度、持时的水平向正弦波,深入研究地震波频率对反倾层状岩质边坡动力响应规律的影响。

1 试验概况

1.1 模型边坡

试验所用振动台设备是由北京波谱世纪科技发展有限公司开发研制的 WS-Z30-50 小型精密模拟振动台系统。振动台的台面尺寸为 51.6 cm × 38 cm,水平最大荷载为 35 kg,水平最大位移 ±8 mm,水平最大加速度 2g,工作频率为 0.5 ~ 2 500 Hz,能够方便准确输出各种白噪声、正弦波、天然地震波。

试验中选用石膏作为主要试验材料,其与水混合易成型,物理力学性能与岩石相似的特点满足试验要求。在前人研究成果的基础上,初步确定多组配比方案,根据设计配比及岩土试验规程,制作标准试样,每组试验标准试样不少于 5 个,以保证试验结果的客观性,通过单轴压缩试验、劈裂试验、直剪试验等室内试验测得不同配比下制作的试样相应力学参数,选取最接近试验要求的配比作为试验的最终配比,确定水膏比为 1:0.8,使用该配比的石膏浆液浇筑模型,其基本物理力学参数如表 1 所示。设计的反倾层状岩质边坡模型宽 0.12 m,长 0.60 m,高 0.60 m,层面倾角 75°,边坡坡角 60°。

表 1 试验材料物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of test material

密度/ (g·cm ⁻³)	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
0.78	1.06	0.092	66.8	0.22	172.29	34.6

模型边坡用模块堆砌而成(图 1),模块尺寸(长 × 宽 × 高)为 12 cm × 6 cm × 2 cm,模块之间用浓度 40% 的白乳胶进行粘结,其内摩擦角为 30.6°,黏聚力为 115.36 kPa。为减小模型箱的边界效应,在模型箱后壁加衬 5 cm 厚的泡沫板,作为吸波材料,以减小地震

波在边界的反射。此外,为了减少在振动过程中的侧壁摩擦,在模型箱侧面涂抹润滑油起到润滑作用。

本次模型试验并无严格对照的现实原型,构建模型为具有典型反倾层状岩质边坡特点的概念模型,其原型材料力学参数参照《最新工程地质手册》和《岩石



图 1 边坡模型
Fig. 1 Model slope

力学参数取值》选取。根据试验条件和试验目的,结合相似理论^[16-17],选取模型尺寸、密度和弹性模量作为基本量纲,其相似常数为 $S_l = 60, S_\rho = 3, S_E = 100$,按照 Buckingham π 定理和量纲分析法,推导出其余物理量相似常数,模型试验主要相似常数如表 2 所示。

表 2 模型试验主要相似常数

Table 2 Primary similitude coefficients of the model			
物理量	相似关系	相似常数	备注
长度	S_l	60	控制量
位移	$S_\mu = S_l S_e$	60	
密度	S_ρ	3	控制量
弹性模量	S_E	100	控制量
黏聚力	$S_c = S_E$	100	
内摩擦角	S_ψ	1	
应力	$S_\sigma = S_E$	100	
应变	S_e	1	
时间	$S_t = S_\rho^{1/2} S_E^{-1/2} S_l$	10.4	
加速度	$S_a = S_E S_\rho^{-1} S_l^{-1}$	0.6	
速度	$S_v = S_E^{1/2} S_\rho^{-1/2}$	5.8	

1.2 监测点分布

考虑到试验条件以及避免破坏模型边坡完整性等因素,本次试验共布设 12 个加速度传感器,其中 5 个

属于 DH8302 动态信号测试分析系统(以下简称动采系统)配套的 IEPE 加速度传感器,编号为 DC1—DC5,其质量 50 g,轴向灵敏度 95 ~ 100 mV/g,频响 0.5 ~ 5 kHz;另外 7 个为振动台系统自带的 ICP 单向加速度传感器,编号为 ZT1—ZT7,其质量 25 g,轴向灵敏度 100 mV/g,频响 0.5 ~ 10 kHz。各加速度传感器按照图 2 所示,分布于模型边坡的不同部位,监测各部位的动力响应。在模型堆砌过程中,按照监测点的设计分布及各加速度传感器的形状大小预留安装孔槽,将加速度传感器安置于相应孔槽,用相同配比的石膏浆液对加速度传感器进行封堵固定,待加速度传感器稳固后进行振动台试验。

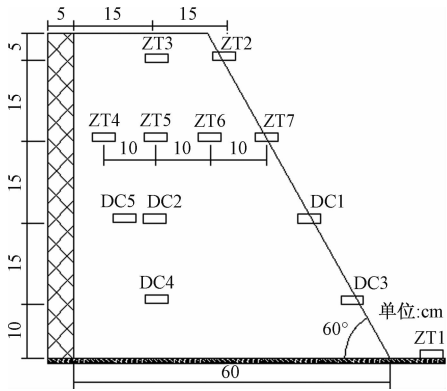


图 2 监测点分布

Fig. 2 Distribution of the monitoring points

1.3 加载方案

试验过程中输入地震波以正弦波为主,输入不同频率、激振强度、持时的正弦波,监测模型边坡各点的加速度响应数据,研究地震波频率对边坡动力响应规律的影响。地震波的输入方向为水平方向,试验前先输入加速度峰值为 0.05g,持时 60 s 的白噪声(图 3)测试模型边坡初始动力特性,然后输入水平向加速度峰值为 0.10g 的 5 Hz 正弦波(图 4),并依次增加正弦波的加速度峰值和频率进行加载,每次加载完成后,对边坡模型进行白噪声扫描,记录边坡模型的加速度动力响应及频谱特征变化。

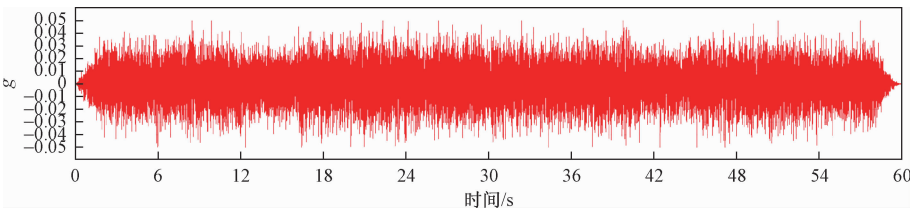


图 3 白噪声加速度时程曲线

Fig. 3 Acceleration time history of the white noise

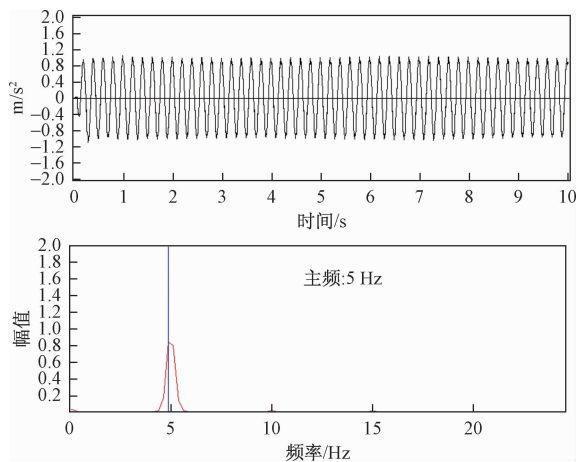


图4 正弦波加速度时程曲线及傅里叶谱

Fig. 4 Acceleration time history and its Fourier spectrum of the sine wave

2 震动频率的影响

为了更好地分析在不同频率正弦波作用下模型边坡的动力响应特性,试验中采用 5, 10, 15, 20, 25 Hz 正弦波。在参考前人研究成果的基础上^[14~15],定义各测点的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,用来表示各测点的加速度响应强度。模型中 ZT3, ZT5, DC2, DC4 加速度传感器在坡内从上到下依次排列, ZT2, ZT7, DC1, DC3 加速度传感器在坡面从上到下依次排列,并且 ZT3 和 ZT2、ZT5 和 ZT7、DC2 和 DC1、DC4 和 DC3 的高程相同(图 2),采用相对高程 h/H 表示各测点的位置, h 指测点到坡底的垂直高度, H 指模型边坡的总高度。

2.1 频率对响应规律的影响

选取激振强度为 0.15g 时,不同频率正弦波作用下模型边坡加速度动力响应特性为例进行分析。图 5 为模型边坡在不同频率正弦波作用下沿高程方向加速度响应变化规律,从图 5 中可以看出,当正弦波频率小于等于 15 Hz 时,随着高程的增加,加速度放大系数持续增大;当 $h/H > 1/2$ 时,加速度放大显著,在坡顶处达到最大;并且随着激振频率的增加,加速度放大系数的增长幅度变大,模型边坡的加速度动力响应表现出明显的高程放大效应。这一现象与徐光兴等^[10~11]研究结论相符,因为随着振动的持续和频率的增加,正弦波频率不断接近模型自振频率,动力响应愈发强烈。当正弦波频率为 15 Hz 时,模型边坡的加速度动力响应达到最大,加速度放大系数的增长幅度也达到最大,通过对白噪声监测数据的处理分析得出,该阶段模型

边坡的自振频率为 15.3 Hz,此时输入正弦波频率与模型边坡自振频率相近。

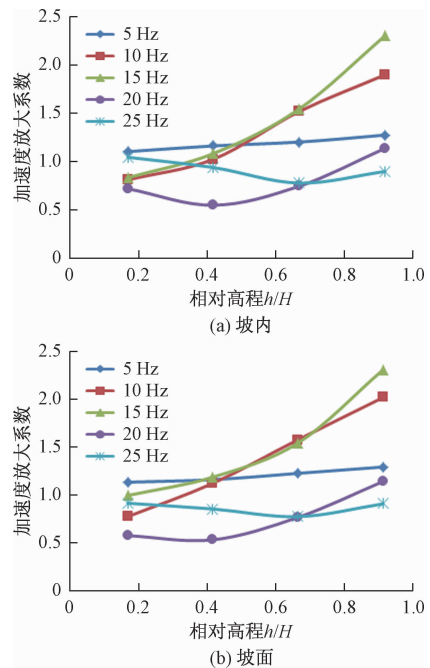


图5 不同频率正弦波作用下模型边坡动力响应变化规律

Fig. 5 Changes of the dynamic response of the slope under different frequency sine waves

然而当正弦波频率大于 15 Hz(模型边坡自振频率)时,模型边坡的动力响应特性呈现出另一种情形。从图 5 中可以看出,当正弦波频率大于 15 Hz 时,模型边坡的高程放大效应减弱甚至消失,加速度放大系数随高程的增加,表现出先减小后增加的变化趋势,并且随着频率的增加,减小的范围变大;相对高程较小时,25 Hz 正弦波作用下的加速度放大系数大于 20 Hz 正弦波作用下的加速度放大系数,相对高程较大时则相反;模型边坡的加速度放大系数几乎全部小于 1.0。以上试验现象说明,模型边坡对频率小于等于模型边坡自振频率的地震波具有放大作用,对频率大于模型边坡自振频率的地震波存在抑制作用。在频率大于模型边坡自振频率的地震波作用下,模型边坡底部加速度响应强于具有一定高程部位的加速度响应,并且随着频率的增加,这种特性更加明显;模型边坡底部加速度响应也随着频率的增加而增强。频率大于模型边坡自振频率的地震波作用下模型边坡的这种加速度响应特性是模型边坡的抑制作用与高程放大作用相互影响的结果。在模型边坡下部,模型边坡的高程放大效应微弱,模型边坡的抑制作用使得地震波在向上传播过程中能量不

断耗散,致使在模型边坡下部加速度动力响应随高程的增加而逐渐变弱。但是随着高程的继续增加,模型边坡的高程放大效应变得显著,强于抑制作用,于是模型边坡的动力响应又随高程的增加而变强。频率越高,模型边坡的抑制作用越明显,模型边坡加速度动力响应沿高程向上不断减弱的范围就越大,底部的加速度动力响应也越强烈。

模型边坡的这种动力响应特性也体现在其宏观变形中,当频率小于等于其自振频率时,模型边坡的变形破坏集中在顶部和浅表部,出现弯曲倾倒和松动(图6a)。当频率大于模型边坡自振频率时,模型边坡的变形破坏集中在模型底部,出现深入坡体的横向裂缝(图6b)。正是模型边坡底部裂缝的不断发育,最终引起了模型边坡的整体崩塌溃坏(图6c)。

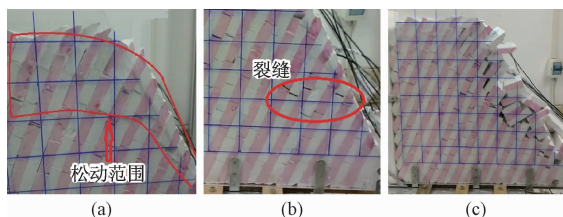


图6 模型不同部位变形破坏

Fig. 6 Deformation and failure of the different parts of the model slope

2.2 频率、激振强度、持时影响强度分析

图7给出了频率、激振强度、持时对模型边坡动力响应特性的影响,图7a是不同频率正弦波作用下模型边坡各测点加速度动力响应特征,从图7a中可以看出不同频率对应的曲线形态有较大差异,说明频率不仅影响模型边坡动力响应的强弱,还影响响应加速度在坡内的分布特征;图7b是正弦波频率为10 Hz时,在不同激振强度作用下模型边坡的动力响应特征,从图7b中可以看出,激振强度的增加使得各测点的加速度放大系数产生变动,变动幅度小于因频率变化而带来的变动幅度(图7a),不同激振强度对应的曲线形态几乎保持不变,说明激振强度影响模型边坡动力响应的强弱,但不改变响应加速度在坡内的分布特征;图7c是频率为20 Hz,激振强度为0.10g时,不同持时正弦波作用下模型边坡的动力响应特性,从图7c中可以看出,持时对模型边坡动力响应的影响微弱,在模型边坡中上部,随着持时增加,加速度放大系数略微增大,而下部各点加速度放大系数则几乎保持不变。其中的部分认识与杨国香等^[14]研究成果相符。试验结果说明作为表征震动波特征的关键参数,频率对模型边坡的

动力响应影响最大,其次是激振强度,影响最小的是持时。

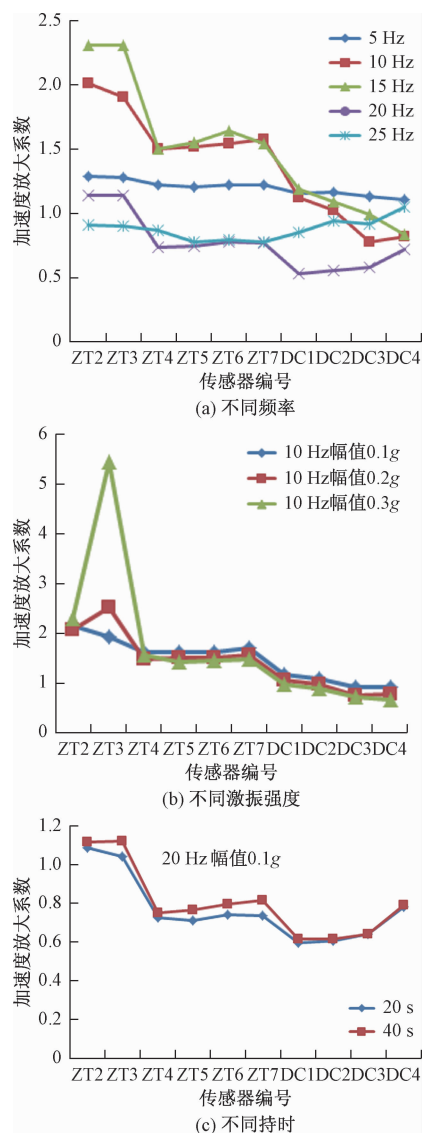


图7 频率、激振强度、持时对模型边坡动力响应特性的影响

Fig. 7 Effect of frequency, excitation intensity and time on the dynamic response of model slope

3 结论

(1) 当输入波频率小于等于模型边坡自振频率时,随着频率的增大,越接近模型边坡的自振频率,模型边坡的高程放大效应越显著,模型边坡的动力响应越强烈。

(2) 当输入波频率大于模型边坡自振频率时,随着频率的增大,模型边坡的高程放大效应减弱甚至消失;在一定高程内,模型边坡的加速度动力响应随高程的增加而减弱,频率的增加使得模型边坡中出现这种

变化规律的区域向上延伸;模型边坡底部的加速度动力响应相对增强,甚至大于中上部响应强度,频率的增加使得这种现象更明显;然而模型边坡各点的加速度放大系数基本小于 1.0。

(3) 频率小于等于模型边坡自振频率的地震波往往造成模型边坡顶部、浅表部的变形破坏,引起局部的松动开裂,甚至出现掉块、抛出现象;频率大于模型边坡自振频率的地震波则造成模型边坡底部的变形破坏,产生深入坡体内部的横向裂缝,裂缝的发育则会引起模型边坡的整体崩塌溃坏。

(4) 频率、激振强度、持时均对模型边坡的动力响应产生影响,但频率的影响最为显著,激振强度次之,持时的影响最弱。

参考文献:

- [1] 郝建斌. 地震作用下边坡稳定性研究进展[J]. 世界地震工程, 2014, 30(1): 145 - 153. [HAO J B. Progress of research on stability of slope subjected to seismic excitation [J]. World Earthquake Engineering, 2014, 30(1): 145 - 153. (in Chinese)]
- [2] 钱海涛, 张力方, 修立伟, 等. 中国地震地质灾害的主要类型与分布特征[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(1): 199 - 127. [QIAN H T, ZHANG L F, XIU L W, et al. Types and distribution characteristics of earthquake induced geological disasters in China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(1): 199 - 127. (in Chinese)]
- [3] 刘传正, 温铭生, 刘艳辉, 等. 汶川地震区地质灾害成生规律研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(5): 1 - 16. [LIU C Z, WEN M S, LIU Y H, et al. Regional assessment on geological disasters in "5. 12" Wenchuan seismic area, China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(5): 1 - 16. (in Chinese)]
- [4] 言志信, 张刘平, 曹小红, 等. 地震作用下顺层岩质边坡动力响应规律及变形机制研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊 1): 54 - 58. [YAN Z X, ZHANG L P, CAO X H G, et al. Dynamic response and deformation mechanism of a bedding rock slope under earthquakes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(Sup 1): 54 - 58. (in Chinese)]
- [5] 刘云鹏, 邓辉, 黄润秋, 等. 反倾软硬互层岩体边坡地震响应的数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(3): 30 - 37. [LIU Y P, DENG H, HUANG R Q, et al. Numerical simulation of seismic response of anti-dumping rock slope interbedded by hard and soft layers [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(3): 30 - 37. (in Chinese)]
- [6] 周洪燕. 边坡地震响应及动力稳定性分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2013. [ZHOU H Y. Research on seismic response and dynamical stability of slope [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013. (in Chinese)]
- [7] 雷天. 基于振动台模型试验的黄土斜坡失稳机理研究[D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所, 2014. [LEI T. Study on the instability mechanism of loess slope based on shaking table model test [D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology, 2014. (in Chinese)]
- [8] 范刚, 张建经, 付晓. 含泥化夹层反倾岩质边坡动力响应的大型振动台试验[J]. 地震工程学报, 2015, 37(2): 422 - 427. [FAN G, ZHANG J J, FU X. Large-scale shaking-table test of study dynamic responses of anti-inclined rock slopes interlayered with silt [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(2): 422 - 427. (in Chinese)]
- [9] 陈新民, 沈建, 魏平, 等. 下蜀土边坡地震稳定性的大型振动台试验研究(II)——试验结果及分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(6): 587 - 594. [CHEN X M, SHEN J, WEI P, et al. Large-scale shaking table test of seismic stability of Xiashu loess slope: analysis of test results (II) [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(6): 587 - 594. (in Chinese)]
- [10] 徐光兴, 姚令侃, 李朝红, 等. 边坡地震动力响应规律及地震动参数影响研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 918 - 923. [XU G X, YAO L K, LI Z H, et al. Dynamic response of slopes under earthquakes and influence of ground motion parameters [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 918 - 923. (in Chinese)]
- [11] 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 G X, YAO L K, GAO Z N, et al. Large-scale shaking table studying on dynamic characteristics and dynamic responses of slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 624 - 632. (in Chinese)]
- [12] 董金玉, 杨国香, 伍法权, 等. 地震作用下顺层岩质边坡动力响应和破坏模式大型振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 2977 - 2982. [DONG

- J Y, YANG G X, WU F Q, *et al.* The large-scale shaking table test study of dynamic response and failure mode of bedding rock slope under earthquake [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(10): 2977 – 2982. (in Chinese)]
- [13] 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 G X, WU F Q, DONG J Y, *et al.* Study of dynamic responses characteristics and failure mechanism of rock slope under earthquake[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(4): 696 – 702. (in Chinese)]
- [14] 杨国香, 叶林海, 伍法权, 等. 反倾层状结构岩质边坡动力响应特性及破坏机制振动台模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(11): 2214 – 2221. [YANG G X, YE L H, WU F Q, *et al.* Shaking table model test on dynamic response characteristics and failure mechanism of anti-dip layered rock slope [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(11): 2214 – 2221. (in Chinese)]
- [15] 刘汉香, 许强, 王龙, 等. 地震波频率对岩质斜坡加速度动力响应规律的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(1): 125 – 133. [LIU H X, XU Q, WANG L, *et al.* Effect of frequency of seismic wave on acceleration response of rock slopes [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(1): 125 – 133. (in Chinese)]
- [16] 袁文忠. 相似理论与静力学模型试验[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1998. [YUAN W Z. Simulation theory and static model test[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1998. (in Chinese)]
- [17] 林皋, 朱彤, 林蓓. 结构动力模型试验的相似技巧[J]. *大连理工大学学报*, 2000, 40(1): 1 – 8. [LIN G, ZHU T, LIN B. Similarity technique for dynamic structural model test[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2000, 40(1): 1 – 8. (in Chinese)]

责任编辑: 张明霞

(上接第 76 页)

- [8] LADANYI B, JOHNSTON G H. Behavior of circular footings and plate anchors embedded in permafrost [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1974, 11: 531 – 553.
- [9] BALIGH M M. Theory of deep static cone penetration resistance[R]. Report No. R75-56, Department of Civil and Environmental Engineering, 1975, MIT, USA.
- [10] LU Q, RANDOLPH M F, HU Y, *et al.* A numerical study of cone penetration in clay [J]. *Geotechnique*, 2004, 54(4): 257 – 67.
- [11] LIYANAPATHIRANA D S. Arbitrary Lagrangian Eulerian based finite element analysis of cone penetration in soft clay [J]. *Computers and Geotechnics*, 2009, 36: 851 – 860.
- [12] Abu-Farsakh M, Tumay M, Voyiadjis G. Numerical parametric study of piezocone penetration test in clays [J]. *Int J Geomech*, 2003, 3(2): 170 – 181.
- [13] YU H S, HERRMANN L R, BOULANGER R W. Analysis of steady state cone penetration in clay[J]. *J Geotech Geoenviron Eng*, ASCE 2000, 126(7): 594 – 605.
- [14] TEH C I, HOULSBY G T. An analytical study of the cone penetration test in clay [J]. *Geotechnique*, 1991, 41(1): 17 – 34.
- [15] YU H S. Cavity expansion methods in geomechanics [M]. Rotterdam: Balkema, 2000.
- [16] HERRMAAN L R. Finite element analysis of contact problems [J]. *J Engng Mech*, ASCE 1978, 104: 1043 – 1059.
- [17] LU Q, HU Y, RANDOLPH M F. FE analysis for T-bar and ball penetration in cohesive soil [C]//Proc 10th Int Offshore and Polar Engineering Conf. ISOPE 2000, 2: 617 – 623.
- [18] David Durban, Norman A Fleck. Singular plastic fields in steady penetration of a rigid cone [J]. *J Appl Mech*, 1993, 59(4): 706 – 710.

责任编辑: 张明霞