

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1176

花岗岩质边坡地震动力响应及破坏特征 大型振动台试验研究

周泽华¹, 吕 艳¹, 苏生瑞¹, 刁钰恒¹, 王祚鹏¹, 王剑昆², 赵 辉³

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 3. 陕西翠华山国家地质公园, 陕西 西安 710105)

摘 要: 地震触发的岩质边坡崩塌常造成巨大的灾害, 特定地质条件下边坡地震动力响应及破坏机制是工程中的重要难题。以翠华山水湫池崩塌为研究对象, 开展振动台试验, 研究地震作用下受断层控制的岩质边坡动力响应及破坏机制。试验发现, 当断层倾角大于临界角时, 不连续界面处的部分反射波与透射波转变为滑行波, 使得断层处加速度响应出现突变; 模型边坡内部加速度峰值放大系数变化特征表现出显著的三阶段变化趋势; 水平加速度响应呈现出随高程增加不断增大的特征, 而竖直加速度峰值放大系数增加幅度较小; 模型边坡的固有频率变化曲线可以分为 3 个阶段, 整体呈现下降的趋势, 表明模型动力特性发生变化。通过对比振动台试验与水湫池崩塌原型, 发现含断层结构岩质边坡的主要破坏模式为边坡顶部在地震荷载作用下首先出现贯通的竖直拉裂缝, 随后断层上盘破碎岩体裂解破坏, 最终沿断层面发生剪切滑动。研究工作将为秦岭花岗岩地震山崩的风险预警提供研究示范, 并为开发秦岭山崩遗迹提供科技支撑。

关 键 词: 水湫池崩塌; 断层; 振动台试验; 地震动力响应特征; 动力破坏特征

中图分类号: P 64

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 04-0918-14

Seismic response and failure characteristics of granite slope using large-scale shaking table test

ZHOU Ze-hua¹, LÜ Yan¹, SU Sheng-rui¹, DIAO Yu-heng¹, WANG Zuo-peng¹,
WANG Jian-kun², ZHAO Hui³

(1. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. China Institute of Geo-Environmental Monitoring, Beijing 100081, China; 3. The Geopark of Shaanxi Cuihua Mountain, Xi'an, Shaanxi 710105, China)

Abstract: Huge hazards are often caused by earthquake-induced rock slope failure. The study of dynamic response characteristics and failure mechanism of the rock slope in certain geological condition is an important issue in geotechnical engineering. Taking the Shuiqiuchi rock slope failure as an object of study, a shaking table test was carried out to study the dynamic response and failure mechanism of rock slope controlled by faults. The testing results show that when the dip angle of the fault is greater than a specific critical angle, part of the reflected and transmitted waves at the discontinuous interface change into sliding waves, resulting in a sudden change in the acceleration response at the fault. The peak acceleration amplification factor inside of the model slope presents a significant three-stage trend. Peak horizontal acceleration amplification factor increases obviously with the increase of elevation, while peak vertical acceleration amplification factor increases slightly with elevation. The natural frequency curve of the model slope can be divided into three stages with a downward trend, which indicates that the dynamic characteristics of the model have changed. By comparing the shaking table test with the Shuiqiuchi rock slope failure prototype, it is found that the main failure mode of the rock slope with fault structure is that the top of the slope first shows vertical tension cracks under the seismic load, followed by cracking damage of the broken rock body on the upper plate of the fault, and finally shear sliding occurs along the fault surface. This research will set example for the early risk warning of granite rock slope failure, and provide the basic data and scientific support for the development of Qinling Mountain geological heritages.

Keywords: Shuiqiuchi rock avalanche; fault; shaking table test; seismic dynamic response characteristics; dynamic failure characteristics

收稿日期: 2021-07-30

修回日期: 2021-09-18

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 41672285); 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开放基金 (No. SKLGP2018K015); 中央高校基本科研业务创新团队支持项目 (No. 300102262908); 山西省地勘项目 (No. 220126200089)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41672285), the Open Fund of State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection Independent Research Project, Chengdu University of Technology (SKLGP2018K015), the Scientific Research and Innovation Projects for the Central Universities (300102262908) and the Shanxi Geological Prospecting Project (220126200089).

第一作者简介: 周泽华, 男, 1992 年生, 博士研究生, 主要从事边坡地震工程方面的研究工作。E-mail: zehua309@yeah.net

通讯作者: 吕艳, 女, 1975 年生, 博士, 副教授, 主要从事地质环境调查评价、地质灾害风险管理、地质景观资源保护利用等方面的研究工作。

E-mail: lyuyan1118@163.com

1 引言

地震触发的山体崩塌是最具破坏性的自然灾害之一^[1-3]，1911年帕米尔高原 Murgab 河左岸以及1933年叠溪地区因地震引发大规模崩塌，造成大量人员伤亡^[4-6]。而特定地质条件下山体边坡地震动力响应及破坏机制是工程中的重要难题。断层是岩体形成后在构造活动作用下形成的破裂面^[7]，在断裂发育的山区，地震触发的山体崩塌引起了广泛的关注^[8]。

陕西省西安市以南的秦岭北缘中段发育一条长约50 km的崩塌带，该崩塌带中大小崩塌体达20余个。翠华山水湫池崩塌遗迹是该崩塌带中堆积形态最为典型的崩塌体。吴成基等^[9-11]最早提出水湫池崩塌除地震诱发崩塌外，暴雨等外营力也可能引起崩塌；南凌等^[12]认为水湫池崩塌是一次强震诱发的快速崩塌；Weidinger等^[13]提出水湫池崩塌的发生可能与公元前780年的一次地震有关；吕艳等^[14-15]在野外调查与勘探基础上，对翠华山天池地段的山崩体形态特征、堆积体结构、成灾范围、形成年代、成因机制及其动力学过程进行研究，但目前对该崩塌动力响应及破坏机制开展的相关研究数量较少。根据对崩塌体及周边山体的野外地质调查，发现有一条断层从其原始坡体中上部穿过，该断层对水湫池崩塌的形成具有重要的控制作用。因此，地震作用下受断层控制的花岗岩质边坡动力响应及破坏机制，是解释秦岭北缘花岗岩崩塌群成因演化机制的必要工作。

由于地震是水湫池崩塌的重要诱因，而振动台在模拟地震荷载方面具有重要的优势，如徐光兴等^[16]通过振动台试验探讨土质边坡的动力响应规律；Yang等^[17]通过构建反倾层状结构边坡模型，研究了边坡模型地震条件下的动力响应规律；董金玉等^[18]通过大型振动台试验模拟了顺层岩质边坡的动力响应特征和破坏过程；成都理工大学许强研究团队开展了大量的不同岩性及结构的大比例尺边坡振动台试验^[19-23]；冯忠居等^[24]通过振动台试验研究了不同地震波作用下嵌岩单桩基础的动力响应特征；Che等^[25]通过数值模拟和振动台试验发现，一组非贯通节理会加强边坡的地震动响应，特别在坡肩位置加速度放大系数会出现一个极大值封闭圈；Song等^[26]研究了顺层岩质边坡的地震响应，提出了一种基于时间域、频率域和时频域的时频联合分析方法。

本文以翠华山水湫池岩质崩塌为研究对象，在详细的地质调查基础上，通过大型振动台试验，研

究了地震作用下受断层控制的岩质边坡动力响应及破坏机制。研究成果可为秦岭崩塌群地质遗迹的开发工作以及该地区受断层及不连续面控制岩质边坡的防护工程和风险预警提供资料。

2 地质概况

水湫池崩塌位于秦岭山脉终南山北麓。面积约 $1.5 \times 10^5 \text{ m}^2$ ，崩塌体厚度30~120 m不等，体积约 $1.8 \times 10^7 \text{ m}^3$ ，高差约为300 m。山崩体自西向东崩落，运动形式以滑崩为主。

现崩塌后壁坡度约为 $65^\circ \sim 70^\circ$ ，高度为160~220 m，后壁出露的基岩为印支期花岗岩侵入体，岩性为二长混合花岗岩。根据崩塌体的相对位置及堆积特征可分为4个区域，即崩塌后壁、中部主堆积区、前缘堆积区（由于无人机拍摄限制未在图中显示）及堰塞湖区（见图1）。



图1 水湫池崩塌体
Fig.1 Shuiqiuchi rock slope failure

基于对水湫池崩塌体及周边山体的野外地质调查，发现有一条断层从其原始坡体中上部穿过。在断层上盘（即已发生崩塌的岩体）中发育有多组方向的节理，经统计，最为发育的节理有3组（见图2），



图2 翠华山主要节理
Fig.2 Main joints in Cuihua Mountain

产状分别为: J1-70°/85°∠65°/70°, J2-70°~85°∠65°/70°, J3-160°~175°∠70°/85°, 其岩体结构类型为块状结构; 断层下盘为岩体结构较为完整。穿过原始坡体的断层为研究区内的杏园坡断层(见图3), 该断层错动面岩性较差, 并伴有断层泥出现。断面倾向南东, 倾角 70°~85°, 与现崩塌后壁坡度相近, 因此可认为该断层是崩塌发生的主要控制要素, 在构建振动台边坡模型时不可忽略。

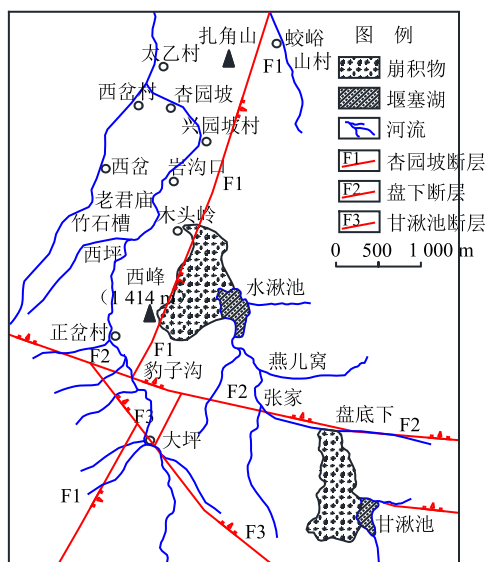


图3 研究区内构造纲要图

Fig.3 Geological map of the study areas

3 振动台试验概况

本次试验使用尺寸为 4 m×6 m 的电伺服式振动台(见图4)。模型箱长×高×宽为 2.8 m×1.4 m×1.0 m。

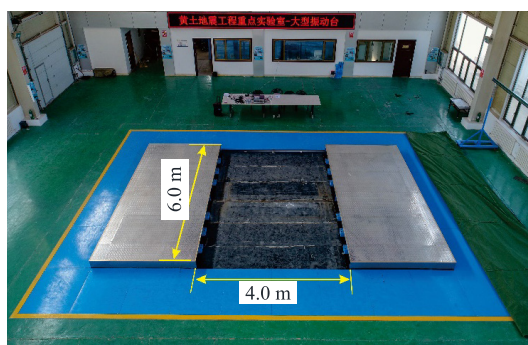


图4 大型振动台

Fig.4 Large-scale shaking table

3.1 相似关系设计

本次试验相似常数如表 1 所示。

3.2 边坡模型设计及制作

根据野外调查的资料, 以含断层结构的水湫池岩质边坡为对象, 考虑到边坡模型箱的整体尺寸,

对模型整体进行缩尺, 缩尺后的模型(见图5)整体尺寸参数为 1.6 m×2.1 m×1.4 m(长×高×宽)。岩石力学参数可参考本课题组已发表的文献^[27]。根据相似理论, 本次试验选取张强等^[28-29]开发的 IBSCM 材料, 该材料包括松香、酒精、铁矿粉、石英砂、重晶石粉和石膏, 配比为 1.00: 5.66: 26.42: 22.02: 61.67: 2.26。为保证参数的准确性^[30], 通过控制密度拌制相似材料。

表1 试验相似常数

Table 1 Test similarity constants

物理量	相似关系	比值
长度	S_l	125
密度	S_ρ	1.0
弹性模量	$S_E = S_\rho S_l$	125
应力	$S_\sigma = S_l S_\rho S_a$	125
内摩擦角	$S_f = 1$	1
黏聚力	$S_c = S_\rho S_l$	125
时间	$S_t = S_l(S_\rho/S_E)^{1/2}$	18.03
频率	$S_f = 1/S_l$	0.055
加速度	$S_a = S_l/(S_l)^2$	1



图5 模型边坡

Fig.5 Model slope

模型分为两部分, 前半部分模拟断层上盘受到节理切割的崩塌体, 后半部分模拟断层下盘较为完整的岩体。为充分模拟断层上盘的破碎岩体, 这一部分由模块砌筑而成, 并根据野外现场统计的节理产状确定块与块之间排布方式以模拟岩体中的结构面, 并使用相同浓度的松香酒精进行黏结, 其内摩擦角与黏聚力分别为 30.4° 和 0.28 MPa^[31], 而翠华山花岗岩节理的内摩擦角和黏聚力分别为 24.5° 和 0.89 MPa^[32], 基本满足相似条件; 断层下盘则是采用相似材料人工夯实堆砌而成。图5给出了制作完成后的边坡模型。

3.3 测试内容及监测点分布

本次试验采用 DH301 加速度传感器, 传感器布

置位置如图6所示。在安置传感器时用塑料薄膜将其包裹, 并使其水平放置。

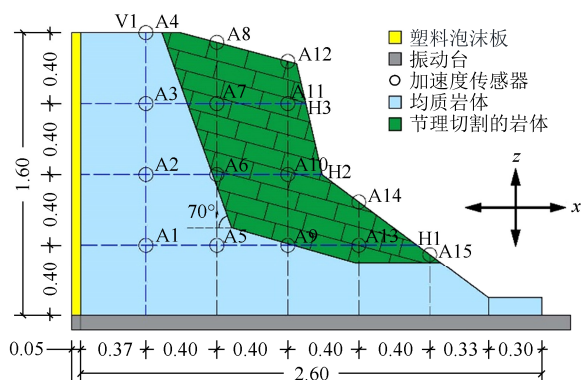


图6 加速度传感器布置方式(单位: m)

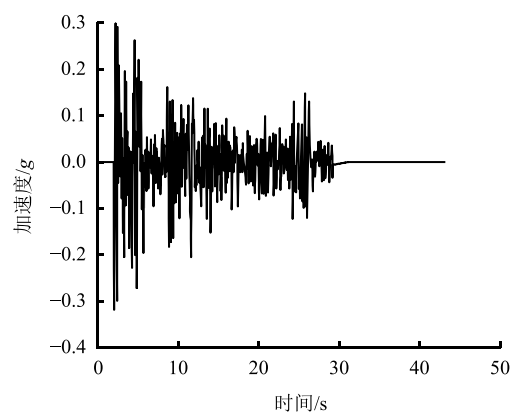
Fig.6 Layout of accelerometer (unit: m)

3.4 输入波的选取及加载方案

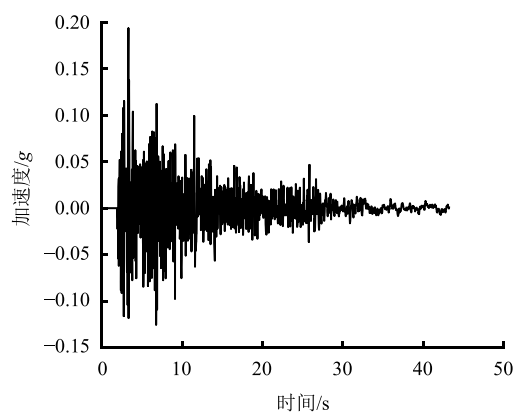
本次试验选择的地震波波形包括 El Centrol 波和汶川卧龙波(见图7、8), 其中 El Centrol 波是远场地震动, 汶川卧龙波是近场地震动。这两种地震的主频较为接近, 其中 X 向和 Z 向汶川卧龙波的主频分别为 2.34 Hz 和 10.21 Hz, X 向和 Z 向 El Centrol 波的主频分别为 2.16 Hz 和 8.65 Hz, 但不同地震波的傅里叶谱幅值相差较大。

为了尽可能完整地呈现水湫池花岗岩质崩塌, 本次试验所模拟的边坡原始高度为 200 m, 根据表1所列的时间比尺 ($S_t=18.03$), 满足这一要求的 El Centrol 压缩波和汶川卧龙压缩波的持时分别为 2.4 s 和 9.9 s。根据许成顺等^[33]的研究, 地震动持时越长, 地震动能量越大。若严格按照时间相似比输入地震动则会导致输入能量过小的问题, 从而无法正确反映原型边坡地震反应特征。受这一因素的制约, 本次试验忽略时间比尺的要求, 选择以边坡原始结构和岩性为主要模拟对象。

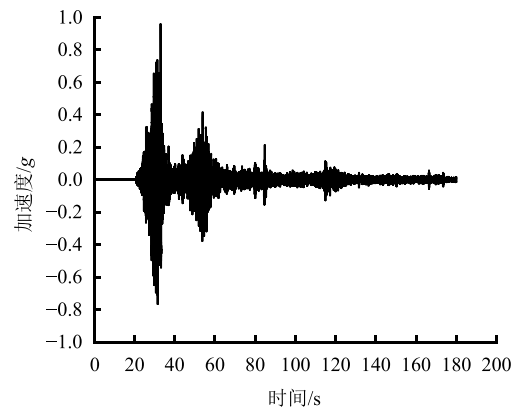
为充分研究受断层控制的岩质边坡动力响应及破坏机制, 本次试验设置了 39 个加载工况。前 20 个加载工况对应的地震波振幅为 $0.1g \sim 0.4g$, 每一级振幅加载 5 个工况, 首先加载正弦波, 随后加载 X 向天然地震波(分别为 ElCentral 波和汶川卧龙波, 下同)和 Z 向天然地震波; 工况 21~35 对应的地震波振幅为 $0.5g \sim 1.0g$, 每一级振幅加载 3 个工况, 首先加载正弦波, 随后加载 X 向汶川卧龙波和 Z 向汶川卧龙波; 当工况 35 完成后, 模型已经出现大变形, 因此工况 36~39 的加载序列分别为 $1.2gX$ 向汶川卧龙波、 $1.2gXZ$ 向汶川卧龙波、 $1.4gXZ$ 向汶川卧龙波和 $1.6gXZ$ 向汶川卧龙波。



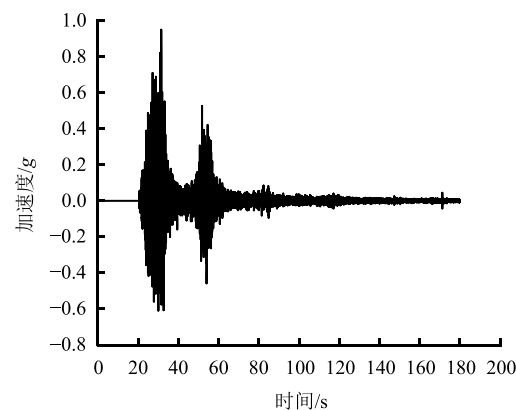
(a) X 向 El Centrol 波



(b) Z 向 El Centrol 波



(c) X 向汶川卧龙波



(d) Z 向汶川卧龙波

图7 地震波加速度时程曲线

Fig.7 Acceleration time-history curves of seismic wave

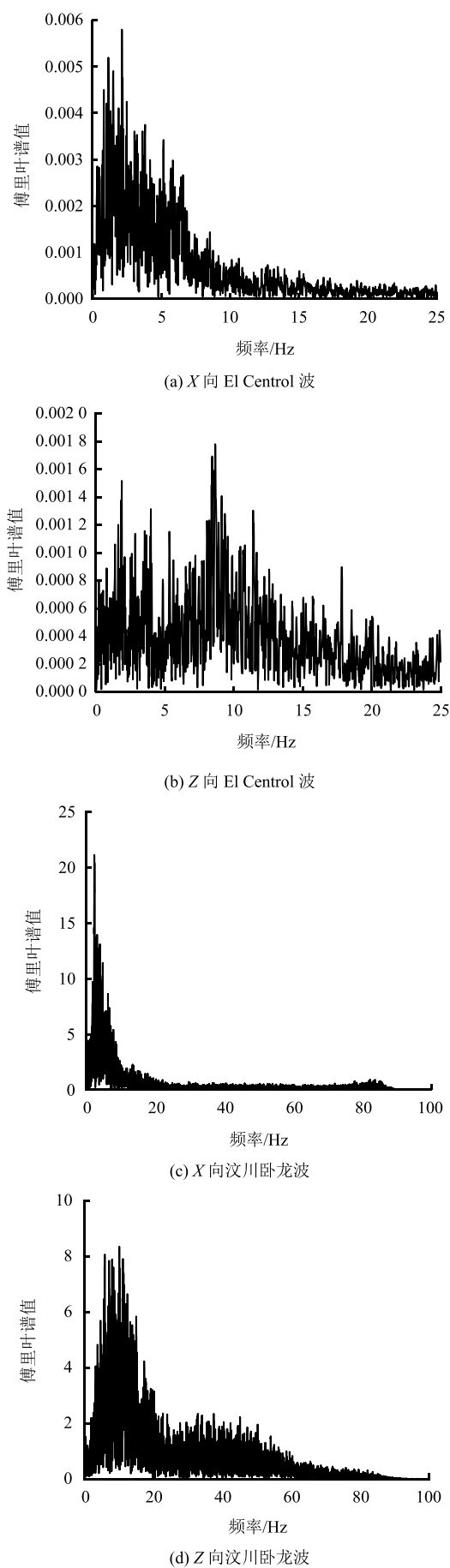


图8 地震波傅里叶谱

Fig.8 Fourier spectrum of seismic wave

4 模型边坡加速度响应特征

本文通过试验过程中各个监测点的加速度峰值（水平向加速度峰值，peak horizontal acceleration, PHA；竖直向加速度峰值，peak vertical acceleration, PVA）研究边坡的动力响应特征，并定义 PHA、PVA 与输入地震波加速度峰值的比值为 PHA 和 PVA 放大系数。

4.1 水平向加速度响应特征分析

图 9~11 为加载地震波激振强度为 $0.1g \sim 0.3g$ 时模型边坡的 PHA 放大系数等值线图，图中虚线为基岩与崩塌体的分界线。可以看出，随着高程的增加，在不同类型以及幅值地震波作用下 PHA 放大系数表现出单调增加的趋势，并且 PHA 放大系数极大值总是出现在坡顶及坡肩处。通过观察坡体中部等值线的分布特征，发现 PHA 放大系数在断层处相对较大，而两侧即断层的上、下盘放大系数较小。分析可知，当地震波垂直入射边坡后，在不连续面发生地震波的反射和波型转换，由于 P 波波速大于 S 波波速，根据 Snell 定理可知，当断层倾角大于临界角时，反射 P 波与透射 P 波将显示类似于全反射

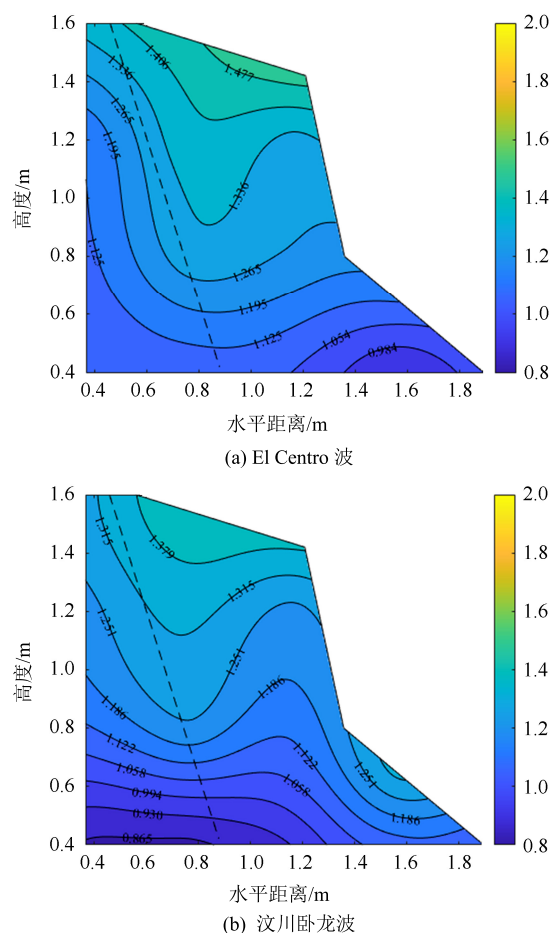


图9 0.1g PHA 放大系数等值线图

Fig.9 Contour maps of 0.1g PHA amplification factor

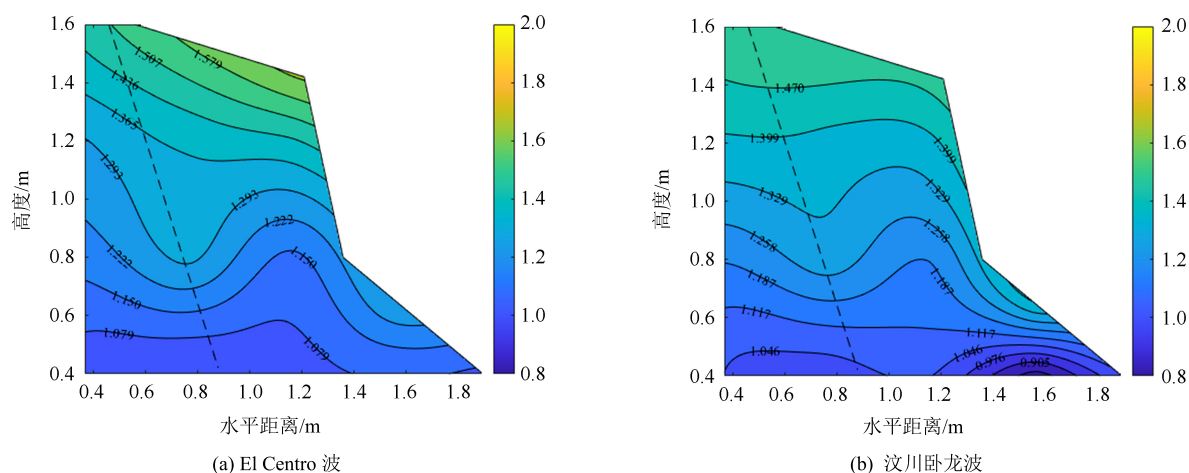


图 10 0.2g PHA 放大系数等值线图
Fig.10 Contour maps of 0.2g PHA amplification factor

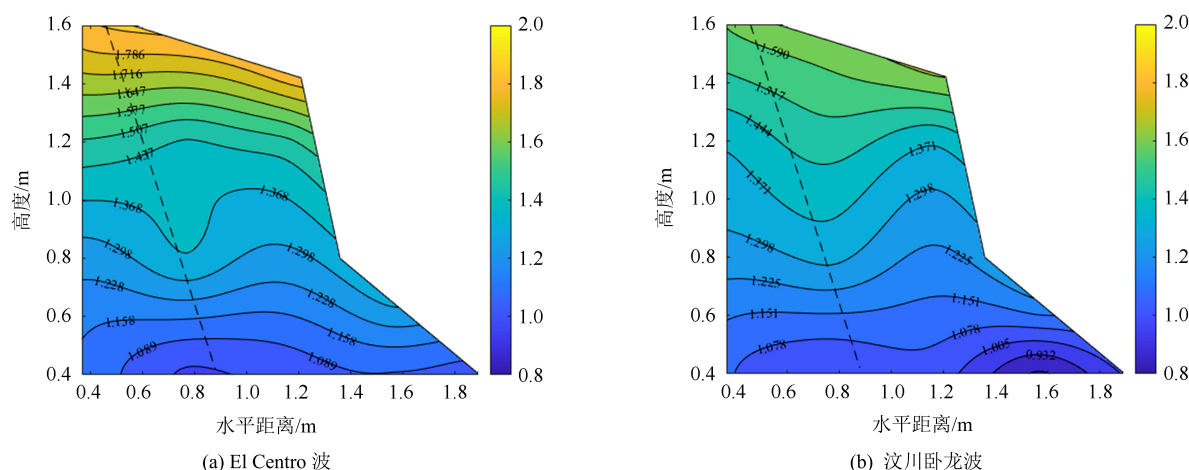


图 11 0.3g PHA 放大系数等值线图
Fig.11 Contour maps of 0.3g PHA amplification factor

的现象,即反射 P 波与透射 P 波将沿着分界面“滑行”。“滑行波”在监测点 A6 处的叠加效应使得 PHA 放大系数出现突变,从而出现加速度放大系数中间大,两侧小的特性。此外,对比不同类型地震波加载下加速度放大系数,发现加载 El Centro 波时模型边坡的放大效应要强于加载汶川卧龙波。

为了全面地反映边坡地震动力响应规律,选取 7 个典型的监测剖面,即沿竖直向剖面 V1 (A1、A2、A3、A4)、V2 (A5、A6、A7、A8)、V3 (A9、A10、A11、A12),水平向剖面 H1 (A1、A5、A9)、H2 (A2、A6、A10)、H3 (A3、A7、A11) 和坡表 (A4、A8、A12、A14、A15) 深入地研究边坡动力响应。

图 12 为不同竖直剖面上 PHA 放大系数与激振强度之间的关系。每个竖直向剖面自下至上前 3 个监测点(例如 V1 剖面的 A1、A2、A3 监测点)上的 PHA 放大系数的变化特征可以分为 3 个阶段。以 V1 剖面的 A1、A2、A3 监测点为例,其变化特征

表现为先增加(振幅为 $0.1g \sim 0.3g$),随后增加幅度减小甚至出现 PHA 放大系数降低的情况(振幅为 $0.3g \sim 0.6g$),最后再次增加(振幅为 $0.6g \sim 0.8g$)。而位于坡顶的 3 个监测点(A4、A8、A12 监测点)的 PHA 放大系数则始终表现出单调增加的变化特征,并且 A4 和 A12 监测点的 PHA 放大系数在 $0.4g$ 时增加幅度突然增大,说明此时在 V1 和 V3 剖面相对高程为 $0.75 \sim 1.0$ 处动力特性发生突变。

图 13 为 A4 监测点在振幅为 $0.1g$ 和 $0.4g$ 时的傅里叶频谱图。随着地震波振幅的增加,模型加速度响应的傅里叶谱峰值频率变化不大,均为 2.5 Hz ,与输入的地震波主频 2.34 Hz 较为接近,但次大傅里叶谱值对应的频率发生了较大的变化, $0.1g$ 时次大傅里叶谱值对应的频率为 5.75 Hz ,而 $0.4g$ 时下降到 3 Hz 左右。结合此时模型边坡并未出现破坏现象,因此可以认为在加载幅值为 $0.4g$ 时边坡模型内部 V1 剖面在相对高程为 $0.75 \sim 1.0$ 处已发生改变。

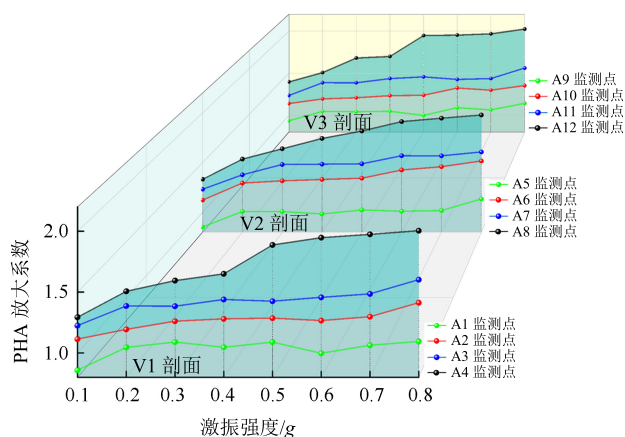


图 12 不同竖直剖面上 PHA 放大系数变化特征
Fig.12 Variation characteristics of PHA amplification factor in each vertical section

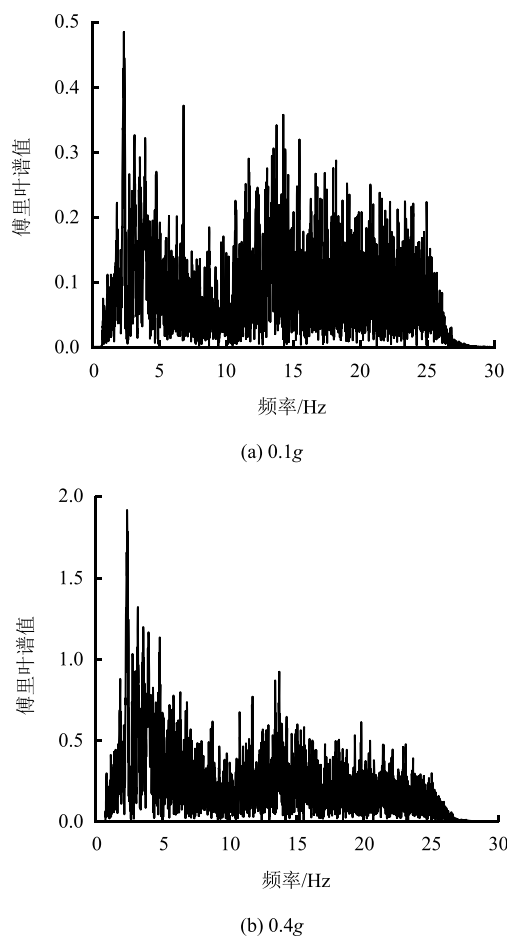


图 13 监测点 A4 傅里叶频谱图
Fig.13 Fourier spectrums of the monitoring point A4

图 14、15 分别给出了 H1、H2、H3 三个水平剖面上及坡面 PHA 放大系数的变化特征。通过 H2 剖面在不同激振强度下 PHA 放大系数的变化特性可以看出,在坡体中部及上部断层处 PHA 放大系数相对较大,而两侧的放大系数较小,这与图 9~11 中得出的规律相同;在坡体底部 PHA 放大系数沿着

H1 剖面无明显变化,这是由于 H1 剖面上的 3 个传感器皆处于断层下盘即均质体内,并且相对高程较低而造成的。坡面 PHA 放大系数则表现出单调增加的变化特征,并且其增加幅度呈现先增加后减小的趋势。坡面在激振强度 $<0.3g$ 时,PHA 放大系数下部增加显著,上部增加缓慢;激振强度 $\geq 0.3g$ 时,下部 PHA 放大系数增加缓慢,上部显著增加。

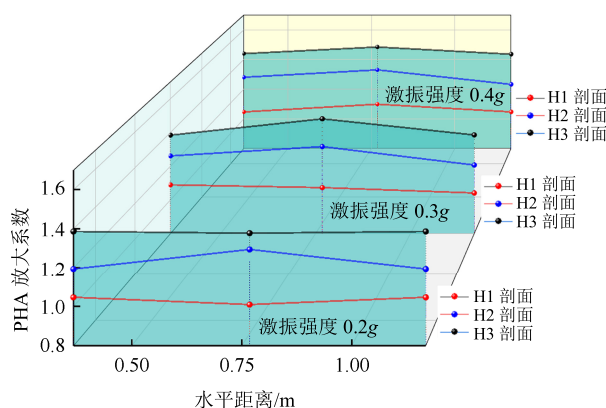


图 14 不同水平剖面 PHA 放大系数变化特征
Fig.14 Variation characteristics of PHA amplification coefficient in each horizontal section

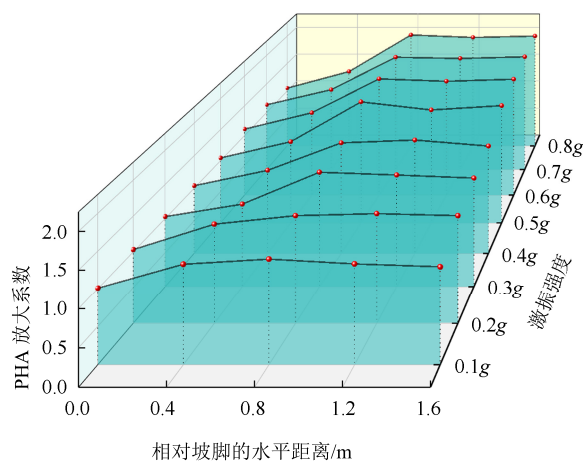


图 15 坡面 PHA 放大系数变化特征
Fig.15 Variation characteristics of PHA amplification factor on the slope surface

4.2 竖直向加速度响应特征分析

图 16~18 为加载地震波激振强度为 $0.1g \sim 0.3g$ 时模型边坡的 PVA 放大系数等值线图。与 PHA 放大系数存在较大差异。在竖直剖面上,PVA 放大系数变化幅度较小,这一规律同样出现在杨国香^[34-35]、刘汉香^[36]等的文章中,说明无论模型是顺层边坡还是均质边坡,是否含有软弱夹层,在竖向地震波激振作用下加速度放大效应并不明显。在水平剖面上,PVA 放大系数在不同激振强度的 Z 向汶川卧龙作用

下表现为先减小后增大的规律，即在贯通性结构面处 PVA 放大系数较小，两侧 PVA 放大系数较大。分析可知，根据 Snell 定理，当 P 波入射至结构面处时不存在临界角，即不会出现“滑行波”，导致界面处没有 S 波入射时出现波的叠加现象，说明竖向

激振作用与水平激振作用在断层及坡面处的反射折射作用存在差异。图 20 给出了模型边坡在 Z 向汶川卧龙地震波激振作用下 PVA 放大系数沿坡表的变化特征，在不同工况中，PVA 放大系数极大值基本位于坡脚处。

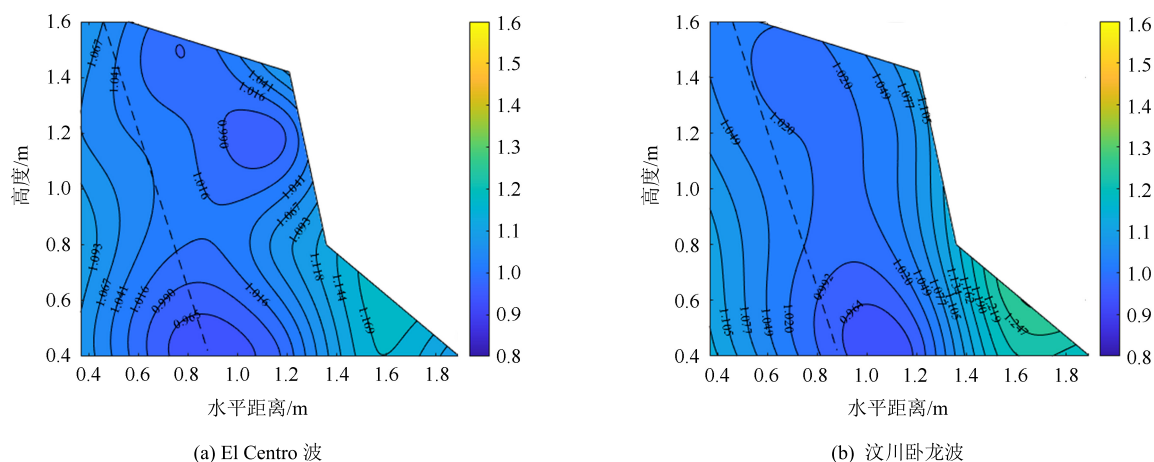


图 16 0.1g PVA 放大系数等值线图
Fig.16 Contour maps of 0.1g PVA amplification factor

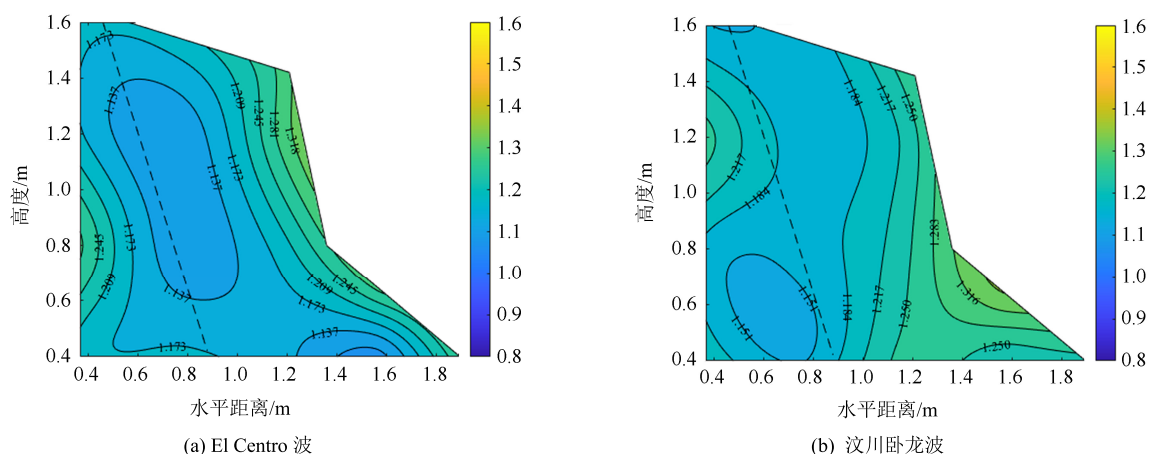


图 17 0.2g PVA 放大系数等值线图
Fig.17 Contour maps of 0.2g PVA amplification factor

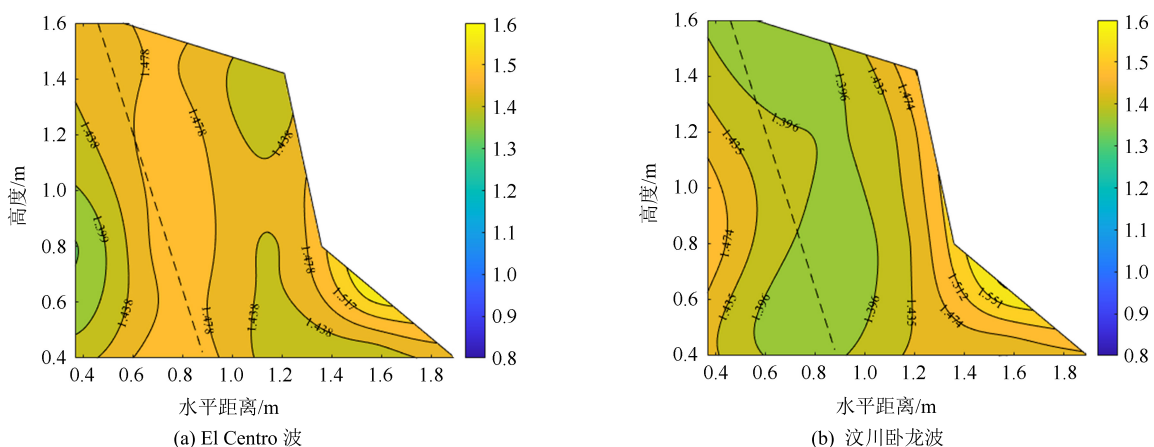


图 18 0.3g PVA 放大系数等值线图
Fig.18 Contour maps of 0.3g PVA amplification factor

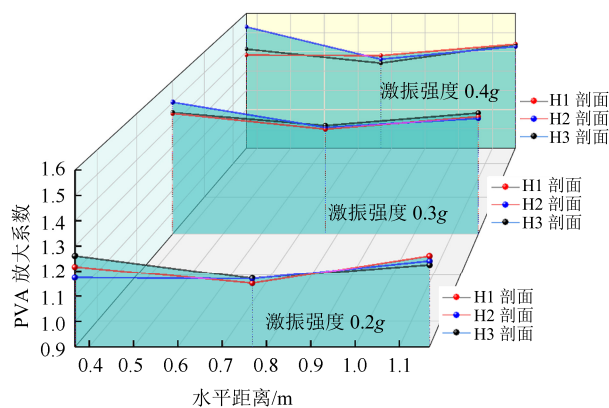


图 19 不同水平剖面 PVA 放大系数变化特征

Fig.19 Variation characteristics of PVA amplification factor in each horizontal section

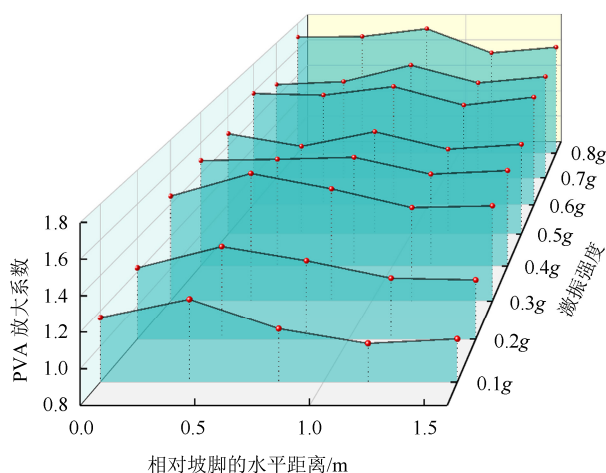


图 20 坡面 PVA 放大系数变化特征

Fig.20 Variation characteristics of PVA amplification factor on slope surface

图 21 为不同竖直剖面上 PVA 放大系数与激振强度之间的关系。不同竖直向剖面监测点上的 PHA 放大系数的变化特征可以分为 3 个阶段。以 V1 剖面为例, 其变化特征表现为先增加 (激振强度为 $0.1g \sim 0.3g$), 随后增加幅度减小甚至出现 PHA 放大系数降低的情况 (激振强度为 $0.3g \sim 0.5g$), 最后再次增加 (激振强度为 $0.5g \sim 0.8g$)。

如图 22 为 A4 监测点在振幅为 $0.1g$ 和 $0.4g$ 时的傅里叶频谱图。随着地震波振幅的增加, 模型加速度响应的傅里叶谱峰值频率变化较大, 振幅 $0.1g$ 时为 6 Hz , 输入的地震波主频 10.21 Hz 相差较大; 振幅 $0.4g$ 时为 11 Hz , 与输入的地震波主频较为接近。结合此时模型边坡并未出现破坏现象, 因此可以认为在加载幅值为 $0.4g$ 时边坡模型内部结构已发生改变, 与水平向加速度响应得到的规律相同。

5 模型边坡固有频率分析

固有频率是描述边坡动力特性的参数, 其计算步

骤为^[37-38]:

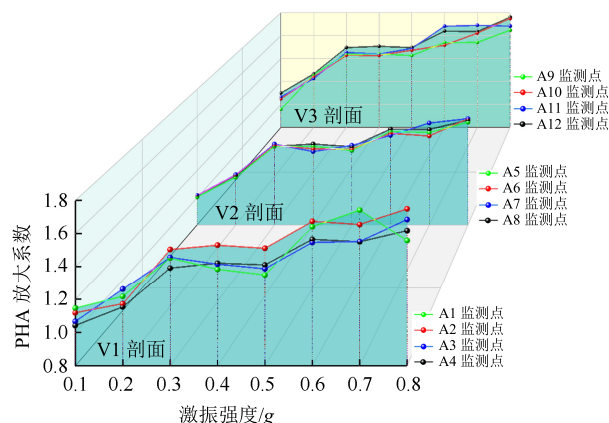
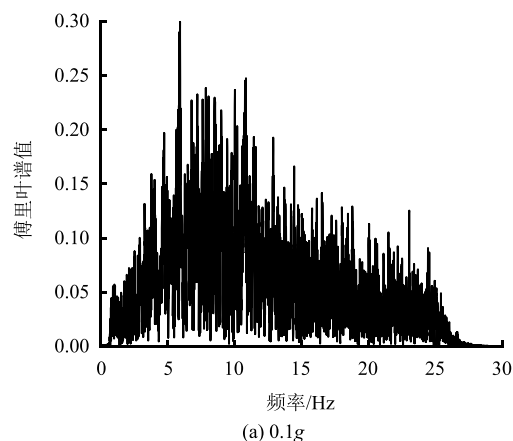
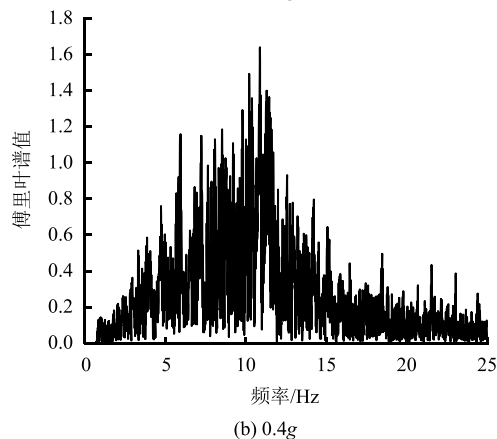


图 21 不同竖直向剖面 PVA 放大系数的变化特征

Fig.21 Variation characteristics of PVA amplification factor in each vertical section



(a) 0.1g



(b) 0.4g

图 22 监测点 A4 傅里叶频谱图

Fig.22 Fourier spectrums of the monitoring point A4

(1) 在地震波加载过程中使用正弦波对模型扫描, 获得加速度传感器中的加速度时程曲线。

(2) 通过不同加速度传感器的加速度时程曲线, 计算传递函数, 计算公式为

$$T(\omega, h_A) = \frac{G_{XY}(\omega, \omega_A)}{G_{XX}(\omega, \omega_A)} \quad (1)$$

式中: h_A 、 $G_{XY}(\omega, \omega_A)$ 以及 $G_{XX}(\omega, \omega_A)$ 分别为高

程、加速度互功率谱和加速度互功率谱。

(3) 作出传递函数虚部曲线, 曲线峰值频率即为模型固有频率, 如图 23 所示。

图 24 为模型固有频率变化曲线。模型边坡固有频率表现出先降低(工况 1~6), 随后变化幅度较小(工况 6~16), 再降低(工况 16~30)的三阶段变化规律。可以看出, 固有频率发生显著变化的时刻早于 PVA 放大系数突变的时刻, 说明模型边坡不同方向的震动形态存在差异。

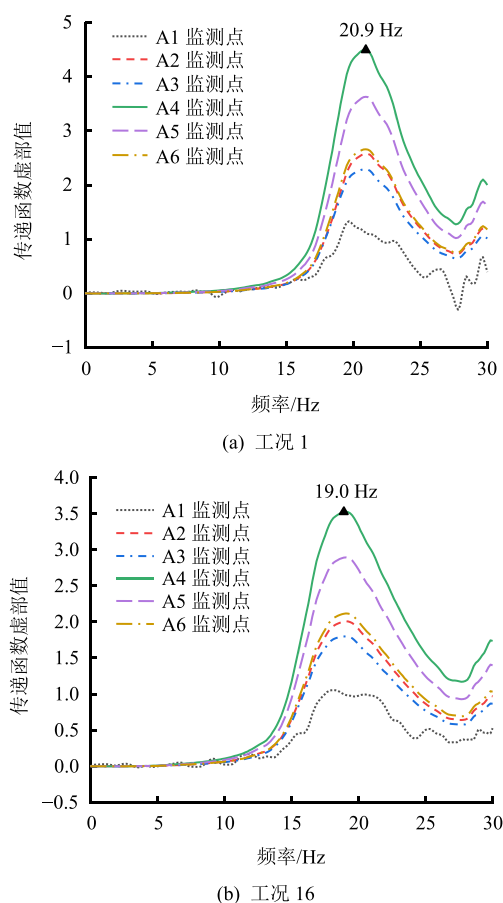


图 23 传递函数虚部值曲线

Fig.23 Imaginary part value curves of transfer function

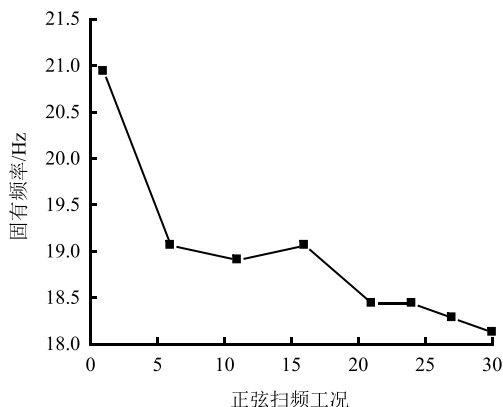


图 24 模型边坡固有频率变化曲线

Fig.24 Natural frequency curve of model slope

6 模型边坡变形破坏特征

6.1 坡体破坏过程

在试验的前 21 个工况中(地震波激振强度为 $0.1g \sim 0.4g$), 模型表面没有变形, 直至工况 22, 即 $0.5g$ 的 X 向汶川卧龙波加载完成后。

6.1.1 初始变形

当工况 22 完成后, 在坡顶处出现两条裂缝, 距坡肩分别为 30 cm 和 60 cm (见图 25(a))。随着试验的进行, 这两条裂缝的宽度也不断增加。由于模型边坡坡顶和坡肩处的加速度放大效应最为明显, 这一部位所受到的地震惯性力最大, 因此首先出现裂缝。同理, 根据 PHA 放大系数在模型内部的响应规律可知, 模型中下部断层处的加速度放大系数大于模型同一水平的其他部位, 因此模型内部的变形或破坏应当首先出现在不连续界面处。但受条件限制, 在试验过程中无法直接观察, 但可以通过分析模型内部边缘谱值的规律间接确定, 受篇幅所限, 这一问题将在后续论文中进行讨论。

6.1.2 明显破坏

随着地震波的持续加载, 坡顶首先出现的裂缝不断扩大, 当工况 35 完成后(地震波激振强度为 $1.0g$), 裂缝宽度达到 2 cm, 如图 25(b)所示。此外在坡体前缘距坡肩约 15 cm 处新出现了一条裂缝。当工况 37 完成后(地震波激振强度为 $1.2g$), 坡顶前缘出现明显的位移(见图 25(c)), 坡面上部出现多条裂纹(见图 25(d)), 坡顶裂缝深度约 10 cm, 模型此时已处于临界状态。

6.1.3 大型崩塌倒山

这一阶段对应工况 38~39(地震波激振强度为 $1.4g \sim 1.6g$)。在地震波加载过程中, 断层上盘模拟破碎岩体部分的相似材料模块首先沿之前工况形成的裂缝裂解破坏, 随后沿断层面破坏。

6.2 模型试验和山崩原型的对比

试验结束后, 模型可以分为 3 个区域(见图 26):

①后缘启动区, 此处为预设的光滑断层面, 长度约为 60 cm; ②中部滑动区, 坡体坡体破坏后形成的块体在此处运动, 部分块体在摩擦力的作用下堆积于此, 对应水湫池崩塌原型的中部主堆积区; ③坡脚堆积区, 对应原型中的前缘堆积区, 其最终形态与实际地形有较大出入, 这一现象是振动台的尺寸大小造成的。通过振动台试验与水湫池崩塌原型的对比, 我们发现含断层结构岩质边坡的主要破坏模式为边坡顶部在地震荷载作用下首先出现贯通的竖直拉裂缝, 随后断层上盘破碎岩体裂解破坏, 最终沿断层面发生剪切滑动。

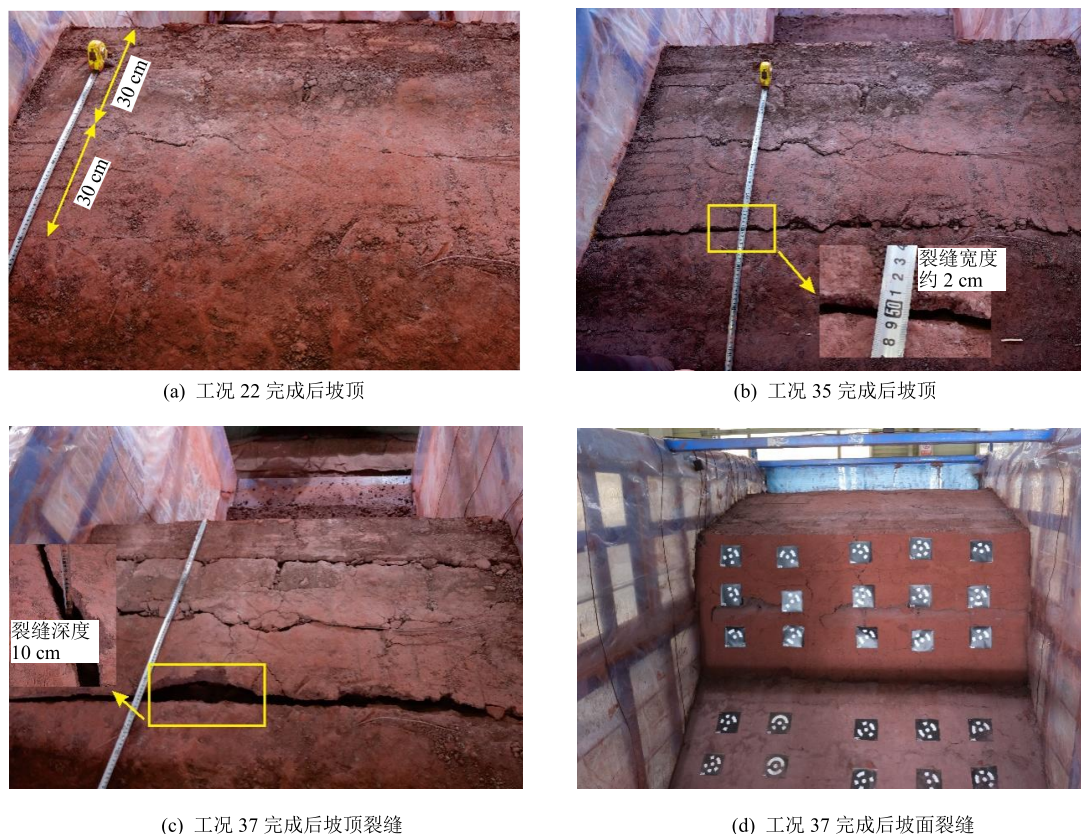


图 25 模型变形特征

Fig.25 Deformation characteristics of model slope

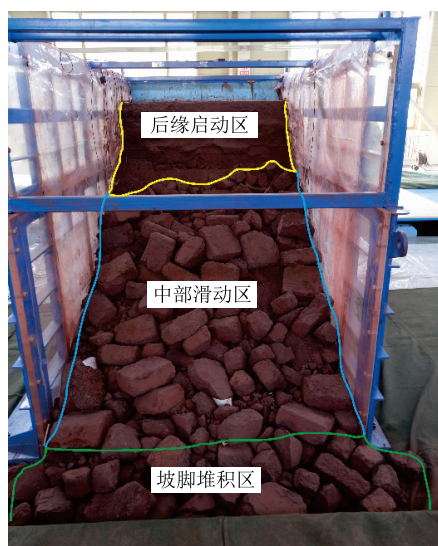


图 26 模型破坏特征

Fig.26 Failure of model slope

7 结 论

(1) 模型边坡中、下部监测点（例如 V1 剖面的 A1、A2、A3 监测点）PHA 放大系数的变化特征可以分为 3 个阶段，即先增加，随后增加幅度减小甚至降低，最终再次增加的规律，而模型顶部监测点的 PHA 放大系数则始终表现出单调增加的变化

特征。此外，当激振强度达到 $0.4g$ 时，坡顶监测点上的 PHA 放大系数增加幅度突然增大，说明此时在相对高程为 $0.75 \sim 1.0$ 处动力特性发生突变，这一现象与加速度响应的傅里叶谱峰值频率体现出的规律相同。

(2) 模型竖直剖面上不同高程处的 PVA 放大系数放大效应较弱，而随着激振强度的增加，PVA 放大系数的变化特征可以分为 3 个阶段，即先增加，随后增加幅度变缓甚至降低，最终再次增加的规律。

(3) 模型边坡在不同方向地震波激振作用下断层处加速度响应与其他位置相比存在显著差异，在 X 向地震波激振作用下断层处 PHA 放大系数相对较大，上、下盘处 PHA 放大系数相对较小；在 Z 向地震波激振作用下断层处 PVA 放大系数相对较小，上、下盘处 PVA 放大系数相对较大。这一现象的出现与模型内部断层处的全反射的现象有关。

(4) 随着地震波的加载，模型边坡固有频率表现出先急剧降低，后变化幅度较小，再降低的三阶段变化规律。模型固有频率的变化规律与 PHA 和 PVA 放大系数的变化规律相似，但是固有频率发生显著变化的时刻早于 PVA 放大系数突变的时刻，说明模型边坡不同方向的震动形态存在差异。

(5) 模型边坡的破坏过程分为初始变形、明显破坏和大型崩塌倒山。通过振动台试验与水湫池崩塌原型的对比, 我们发现含断层结构岩质边坡的主要破坏模式为边坡顶部在地震荷载作用下首先出现贯通的竖直拉裂缝, 随后断层上盘破碎岩体裂解破坏, 最终沿断层面发生剪切滑动, 即边坡坡顶拉裂→断层上盘岩体裂解→破碎岩体沿断层发生剪切破坏。

参考文献

- [1] 潘懋, 李铁锋. 灾害地质学[M]. 2 版. 北京: 北京大学出版社, 2012: 108-113.
PAN Mao, LI Tie-feng. Disaster geology[M]. 2nd ed. Beijing: Peking University Press, 2012: 108-113.
- [2] 许强, 黄润秋, 殷跃平, 等. 2009 年 6·5 重庆武隆鸡尾山崩滑灾害基本特征与成因机制初步研究[J]. 工程地质学报, 2009, 17(4): 433-444.
XU Qiang, HUANG Run-qiu, YIN Yue-ping, et al. The Jiweishan landslide of June 5, 2009 in Wulong, Chongqing: characteristics and failure mechanism[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2009, 17(4): 433-444.
- [3] 魏昌利, 张瑛, 冯文凯, 等. 岷江上游地质灾害发育强度与规律分析[J]. 工程地质学报, 2019, 27(3): 640-650.
WEI Chang-li, ZHANG Ying, FENG Wen-kai, et al. Analysis of intensity and regularity of geohazards in upper reaches of Minjiang river[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2019, 27(3): 640-650.
- [4] STROM A L. Catastrophic slides and avalanches[M]// SASSA K, CANUTI P. Landslides—disaster risk reduction. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [5] 四川省地震局. 1933 年叠溪地震[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1983.
Sichuan Seismological Bureau. Diexi earthquake in 1933[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1983.
- [6] 许向宁, 王兰生. 岷江上游叠溪地震区斜坡变形破坏分区特征及其成因机制分析[J]. 工程地质学报, 2005, 13(1): 68-75.
XU Xiang-ning, WANG Lan-sheng. On the mechanism of slope deformation-failures and the distribution characteristics in a high earthquake-intensity area[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2005, 13(1): 68-75.
- [7] 刘佑荣, 唐辉明. 岩体力学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 12-13.
LIU You-rong, TANG Hui-ming. Rockmass mechanics[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 12-13.
- [8] 黄润秋, 李为乐. “5.12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2585-2592.
HUANG Run-qiu, LI Wei-le. Research on development and distribution rules of geohazards induced by Wenchuan earthquake on 12th May, 2008[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(12): 2585-2592.
- [9] 吴成基, 惠振德, 刘丽敏. 翠华山山崩地貌景观及旅游开发研究[J]. 陕西师大学报(自然科学版), 1994, 22(增刊): 52-56.
WU Cheng-ji, HUI Zhen-de, LIU Li-min. Landslide landscape and tourism development in Cuihua Mountain[J]. **Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)**, 1994, 22(Suppl.): 52-56.
- [10] 吴成基, 孟彩萍. 西安翠华山山崩地质遗迹资源保护[J]. 山地学报, 2002(6): 757-760.
WU Cheng-ji, MENG Cai-ping. The research on the protection of landslide geological remains resource in Xi'an Cuihua Mountain[J]. **Journal of Mountain Science**, 2002(6): 757-760.
- [11] 吴成基, 彭永祥. 西安翠华山山崩地质遗迹及资源评价[J]. 山地学报, 2001(4): 359-362.
WU Cheng-ji, PENG Yong-xiang. The resource of geological remains by landslide in Cuihua Mountain, Xi'an and resource evaluation[J]. **Journal of Mountain Science**, 2001(4): 359-362.
- [12] 南凌, 崔之久. 西安翠华山古崩塌性滑坡体的沉积特征及其形成过程[J]. 山地学报, 2000(6): 502-507.
NAN Ling, CUI Zhi-jiu. The deposit characteristics of the paleo-avalanche landslide in Xi'an Cuihua Mountain and analysis of its generative process[J]. **Journal of Mountain Science**, 2000(6): 502-507.
- [13] WEIDINGER J T, WANG Jia-ding, MA Nai-xi. The earthquake-triggered rock avalanche of Cuihua, Qinling Mountains of China, the benefits of a lake-damming prehistoric natural disaster[J]. **Quaternary International**, 2002, 93-94: 207-214.
- [14] 吕艳, 董颖, 张茂省, 等. 陕西翠华山山崩地质遗迹特征、成因及景观价值[J]. 地球学报, 2015, 36(2): 220-228.
LÜ Yan, DONG Ying, ZHANG Mao-sheng, et al. Characteristics, genetic mechanism and landscape value of the rock avalanche in Cuihua Mountain Area, Shannxi Province[J]. **Acta Geoscientica Sinica**, 2015, 36(2): 220-228.
- [15] 吕艳, 王根龙, 张新社. 翠华山山崩地质遗迹景观离散元数值模拟[J]. 工程地质学报, 2013, 21(3): 443-449.
LÜ Yan, WANG Gen-long, ZHANG Xin-she. Numerical

- simulation of Cuihua rock avalanche with discrete element method[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2013, 21(3): 443-449.
- [16] 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 characteristics and dynamic responses of slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(3): 624-632.
- [17] YANG G X, QI S W, WU F Q, et al. Seismic amplification of the anti-dip rock slope and deformation characteristics: a large-scale shaking table test[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2018, 115: 907-916.
- [18] 董金玉, 杨继红, 伍法权, 等. 顺层岩质边坡加速度响应规律和滑动堵江机制大型振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 2): 3861-3867.
- DONG Jin-yu, YANG Ji-hong, WU Fa-quan, et al. Large-scale shaking table test research on acceleration response rules of bedding layered rock slope and its blocking mechanism of river[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(Suppl. 2): 3861-3867.
- [19] 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. Large-scale shaking table test of acceleration dynamic responses characteristics of slopes[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(12): 2420-2428.
- [20] 刘汉香, 许强, 徐鸿彪, 等. 斜坡动力变形破坏特征的振动台模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 334-339.
- LIU Han-xiang, XU Qiang, XU Hong-biao, et al. Shaking table model test on slope dynamic deformation and failure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Suppl. 2): 334-339.
- [21] 刘汉香, 许强, 范宣梅, 等. 地震动强度对斜坡加速度动力响应规律的影响[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1357-1365.
- LIU Han-xiang, XU Qiang, FAN Xuan-mei, et al. Influence of ground motion intensity on dynamic response laws of slope accelerations[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(5): 1357-1365.
- [22] 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 Han-xiang, XU Qiang, WANG Long, 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.
- [23] LIU H X, XU Q, LI Y R, et al. Response of high-strength rock slope to seismic waves in a shaking table test[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 2013, 103(6): 3012-3025.
- [24] 冯忠居, 张聪, 何静斌, 等. 强震作用下嵌岩单桩时程响应振动台试验[J]. 岩土力学, 2021, 42(12): 3227-3237.
- FENG Zhong-ju, ZHANG Cong, HE Jing-bin, et al. Shaking table test of time-history response of rock-socketed single pile under strong earthquake[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(12): 3227-3237.
- [25] CHE A L, YANG H K, WANG B, et al. Wave propagations through jointed rock masses and their effects on the stability of slopes[J]. **Engineering Geology**, 2016, 201: 45-56.
- [26] SONG D Q, CHEN Z, KE Y, et al. Seismic response analysis of a bedding rock slope based on the time-frequency joint analysis method: a case study from the middle reach of the Jinsha River, China[J]. **Engineering Geology**, 2020, 274, 88-96.
- [27] 吕艳, 周泽华, 刁钰恒, 等. 秦岭甘湫池花岗岩质崩塌振动台试验研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(5): 1373-1386.
- LÜ Yan, ZHOU Ze-hua, DIAO Yu-heng, et al. Large scale shaking table test of Ganqiuchi rock granite avalanche in Qinling Mountains[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2021, 29(5): 1373-1386.
- [28] 张强勇, 李术才, 郭小红, 等. 铁晶砂胶结新型岩土相似材料的研制及其应用[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2126-2130.
- ZHANG Qiang-yong, LI Shu-cai, GUO Xiao-hong, et al. Research and development of new typed cementitious geotechnical similar material for iron crystal sand and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(8): 2126-2130.
- [29] 王汉鹏, 李术才, 张强勇, 等. 新型地质力学模型试验相似材料的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1842-1847.
- WANG Han-peng, LI Shu-cai, ZHANG Qiang-yong, et al. Development of a new geomechanical similar material[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(9): 1842-1847.
- [30] 吕艳, 刁钰恒, 周泽华, 等. 大型振动台试验花岗岩相

- 似材料配比研究[J]. 地震工程学报, 2021, 43(5): 1150-1159.
- LÜ Yan, DIAO Yu-heng, ZHOU Ze-hua, et al. Proportion of granite similar material used in large-scale shaking table tests[J]. **China Earthquake Engineering Journal**, 2021, 43(5): 1150-1159.
- [31] 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, 2988.
- DONG Jin-yu, YANG Guo-xiang, WU Fa-quan, 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, 2988.
- [32] 刘世杰. 翠华山甘湫池地震崩塌成因机理及动力学特征研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- LIU Shi-jie. A study on genetic mechanism and dynamics characteristics of the Ganqiuchi seismic rock avalanche in Cuihua Mountain[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [33] 许成顺, 豆鹏飞, 高崑成, 等. 地震动持时压缩比对可液化地基地震反应影响的振动台试验[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 147-155.
- XU Cheng-shun, DOU Peng-fei, GAO Liu-cheng, et al. Shaking table test on effects of ground motion duration compression ratio on seismic response of liquefied foundation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(1): 147-155.
- [34] 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.
- [35] 杨国香, 叶海林, 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 Guo-xiang, YE Hai-lin, WU Fa-quan, et al. Shaking table model test on dynamic response characteristics and failure mechanism of antidip layered rock slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(11): 2214-2221.
- [36] 刘汉香, 周逸飞, 李欣. 层状复合岩体边坡动力特性及地震响应特性的振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(4): 676-689.
- LIU Han-xiang, ZHOU Yi-fei, LI Xin. Shaking table test of dynamic responses of a layered complex rock slope under earthquake[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2021, 40(4): 676-689.
- [37] 范刚. 含软弱夹层层状岩质边坡地震响应及稳定性判识时频方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- FAN Gang. The dynamic response and time-frequency method for seismic stability evaluation of layered rock slope with weak intercalated layer[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [38] 范刚, 张建经, 付晓, 等. 传递函数在场地振动台模型试验中的应用研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2869-2876.
- FAN Gang, ZHANG Jian-jing, FU Xiao, et al. Application of transfer function to on-site shaking table test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(10): 2869-2876.

上接第 917 页

- [16] HUANG M S, WANG H Y, TANG Z, et al. Basal stability analysis of braced excavations in anisotropic undrained clay using streamline velocity fields[J]. **Acta Geotechnica**, 2021, 16(4): 1175-1186.
- [17] HUANG M S, TANG Z, YUAN J Y. Basal stability analysis of braced excavations with embedded walls in undrained clay using the upper bound theorem[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2018, 79: 231-241.
- [18] 郑刚, 俞丹瑶, 程雪松, 等. 考虑土体强度不均匀性时宽窄基坑坑底隆起稳定研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊 1): 1-4.
- ZHENG Gang, YU Dan-yao, CHENG Xue-song, et al. Basal heave stability of wide and narrow excavations considering non-homogeneous features of soft clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(Suppl. 1): 1-4.
- [19] CHEN R P, LI Z C, CHEN Y M, et al. Failure investigation at a collapsed deep excavation in very sensitive organic soft clay[J]. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, 2015, 29(3): 04014078.
- [20] 张旷成, 李继民. 杭州地铁湘湖站“08.11.15”基坑坍塌事故分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 1): 338-342.
- ZHANG Kuang-cheng, LI Ji-min. Accident analysis for “08.11.15” foundation pit collapse of Xianghu Station of Hangzhou metro[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(Suppl. 1): 338-342.