

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240110003

# 强震作用下贡扎典型反倾岩质边坡动力响应研究\*

陈旭东<sup>1</sup>, 唐学武<sup>2</sup>, 王晨<sup>1,3</sup>, 郭明珠<sup>1</sup>, 李鹏飞<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学城市建设学部, 北京 100124; 2. 湖南省地震局, 湖南长沙, 410004;  
3. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

**摘要:** 为研究反倾岩质边坡在强震作用下的动力响应规律, 以西藏自治区芒康县贡扎滑前边坡为原型, 开展大型振动台模型试验。提出基于频率相似的动力相似设计理念。通过分析PGA放大系数研究强震作用下反倾岩质边坡动力响应的基本特征。根据试验宏观现象, 揭示边坡的破坏过程, 并结合Hilbert-Huang变换进行时频域分析。结果表明: (1) PGA放大系数在边坡坡表及内部表现出“高程效应”, 在1/2高程以上的水平方向上表现出“趋表效应”, 边坡表面外凸处的动力响应最强烈。(2) 地震波幅值对边坡动力响应有明显影响, 随输入波幅值增大, PGA放大系数呈递增趋势。在输入波幅值为0.2g时, 边坡出现损伤, PGA放大系数下降。(3) 地震波频率对边坡动力响应规律的影响与坡体自振频率相关, 地震波频率越接近边坡自振频率, 边坡PGA放大效应越显著。从坡内水平方向来看, PGA放大效应对高频率地震波激励更敏感。(4) Hilbert谱表明高程对能量有放大效果。随高程增加, 边际谱累积能量的频率分量变丰富, 累积损伤增加。本试验揭示典型反倾岩质边坡动力响应规律, 为类似边坡的防治提供科学依据。

**关键词:** 反倾岩质边坡; 振动台模型试验; 希尔伯特-黄变换; 动力响应

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)04-0906-12

## Study on Dynamic Response of Gongzha Typical Anti-dip Rock Slope under Strong Earthquake

CHEN Xudong<sup>1</sup>, TANG Xuewu<sup>2</sup>, WANG Chen<sup>1,3</sup>, GUO Mingzhu<sup>1</sup>, LI Pengfei<sup>1</sup>

(1. Department of Urban Construction, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;  
2. Hunan Earthquake Agency, Changsha 410004, China;  
3. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

**Abstract:** To study the dynamic response of anti-dip rock slope under strong earthquake, a large-scale shaking table model test was carried out using the Gongzha pre-slide slope in Mangkang County, Tibet Autonomous Region as the prototype. A dynamic similarity design concept based on frequency similarity was proposed. By analyzing the PGA amplification the prototype, the basic characteristics of the dynamic response of anti-dip rock slope under strong earthquake were studied. According to the macroscopic phenomenon of the test, the failure process of the slope was revealed, and time-frequency domain analysis was carried out using the Hilbert-Huang transform method. The results showed

\* 收稿日期: 2024-01-10; 修回日期: 2024-04-24

基金项目: 国家重点研发计划基金项目(2018YFC1505001)、湖南省地震局防震减灾科研课题(202408)资助

作者简介: 陈旭东(1999—), 男, 硕士。主要从事防灾减灾方面的研究。E-mail: cxd15081523558@163.com

通信作者: 唐学武(1987—), 男, 工程师, 硕士。主要从事地震安全性评价与地震灾害调查。E-mail: 527480544@qq.com

that: (1)the *PGA* amplification factor exhibited an "elevation effect" on both the surface and inside of the slope, and a "surface-trending effect" in the horizontal direction above 1/2 elevation. The dynamic response was the strongest at the convex part of the slope surface. (2) The amplitude of seismic wave had a significant influence on the slope's dynamic response. As the input wave amplitude increased, the *PGA* amplification factor showed an increasing trend. When the input amplitude reached 0.2*g*, the slope was damaged and the *PGA* amplification factor decreased. (3) The influence of seismic wave frequency on the dynamic response of the slope was related to the slope's natural vibration frequency. The closer the seismic wave frequency was to the slope's natural vibration frequency, the more significant the *PGA* amplification effect. Horizontally inside the slope, the *PGA* amplification effect was more sensitive to high-frequency seismic excitation. (4) The Hilbert spectrum indicated that elevation had an amplifying effect on seismic energy. As elevation increased, the frequency components of the cumulative energy in the marginal spectrum became richer, and cumulative damage increased. This experiment reveals the dynamic response characteristics of typical anti-dip rock slope and provides a scientific basis for the prevention and treatment of similar slopes.

**Keywords:** anti-dip rock slope; shaking table model test; Hilbert-Huang transform; dynamic response

## 0 引言

青藏高原东南三江流域横跨青藏高原东南方向高山峡谷区以及藏北高原区,是印度板块与亚欧板块俯冲、碰撞的交界。受甘孜-玉树、昭通-鲁甸、金沙江、雅鲁藏布江、龙门山等断裂带影响<sup>[1]</sup>,该流域及其周边地区新构造运动与地震活动强烈<sup>[2]</sup>。自2008年汶川地震发生以来,相继发生了2010年玉树 *M*<sub>s</sub>7.1级地震、2013年芦山 *M*<sub>s</sub>7.0级地震和2014年鲁甸 *M*<sub>s</sub>6.5级地震等<sup>[3]</sup>。地震诱发崩塌、滑坡等灾害,造成惨重的生命财产损失<sup>[4]</sup>。“十四五”规划中提到,西藏将大力开发清洁能源、完善三江流域规划布局、加快构建系统完善、绿色高效的基础设施体系<sup>[5]</sup>。目前在建和拟建的水利清洁能源工程<sup>[6]</sup>分布于此,成都-拉萨高速公路<sup>[7]</sup>、川藏铁路等<sup>[8]</sup>将从该地区穿过。该地区频发的地震地质灾害会对重大工程建设造成严重威胁。

反倾岩质边坡是常见的边坡类型。当结构面走向与岩层走向近乎平行,而与倾向相反时,就会形成反倾岩质边坡<sup>[9]</sup>。大多数人认为这类边坡是稳定的,但实际上仍有许多反倾岩质边坡发生或可能发生大规模变形破坏并造成严重影响。例如鲁甸地震诱发的红石岩崩塌滑坡<sup>[10]</sup>、汶川地震诱发的流水沟滑坡<sup>[11]</sup>、赤水市旺隆边坡<sup>[12]</sup>等。

国内外学者根据震害资料,采用不同方法对反倾岩质边坡的动力响应规律展开研究。冯细霞

等<sup>[13]</sup>对包含两组正交节理的边坡开展振动台试验,讨论地震波波形、幅值和频率等因素对边坡的影响。刘汉东等<sup>[14]</sup>通过振动台模型试验重点分析了震动强度对边坡动力响应规律的影响。陈伟庚等<sup>[15]</sup>以西南山区铁路沿线的反倾岩质边坡为原型开展试验,采用时频分析方法,对比不同测点加速度峰值放大系数研究边坡响应规律。

目前,相关研究多集中于从时域或频域角度展开讨论,从能量角度进行时频域联合分析的研究较少。对于处理具有时变特性的非平稳非线性地震信号,希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)是首选方法<sup>[16]</sup>。D. Q. Song等<sup>[17]</sup>提出一种基于HHT和边际谱分析地震破坏机理的分析方法,开展振动台试验,结合傅里叶谱识别边坡整体和局部的动力响应。J. C. Chen等<sup>[18]</sup>根据实体滑坡展开振动台模型试验,借助HHT研究土层与岩层瞬时能量分布特征,从累积损伤角度解释边坡破坏模式。

以贡扎滑坡为原型,开展反倾岩质边坡振动台模型试验,收集加速度数据研究其动力响应规律,采用希尔伯特-黄变换从能量角度揭示其动力响应特征,为边坡防治提供有价值参考。

## 1 试验概况

### 1.1 原型概况

贡扎滑坡位于青藏高原东南缘金沙江上游,西

藏自治区昌都地区芒康县索多西乡贡扎村。坐标为 $29^{\circ}28'49''N, 99^{\circ}3'9''E$ 。滑坡发生时间约为晚更新世,由于区域活动频繁,滑坡仍处于活跃状态,最近的一次崩滑发生在2017年夏季。滑坡区位于金沙江深切区,属于典型的高山峡谷地貌,在滑坡区附近,“V”型河谷尤为明显,局部可见“U”型岸滩。贡扎滑坡高差为720 m,滑后后缘高程3 320 m,前缘坡趾高程2 600 m。岩层倾向坡内,倾角约为 $55^{\circ}\sim 70^{\circ}$ ,倾向为 $N30^{\circ}E$ 。滑坡区可见英砂岩以及少量片岩出露,岩体结构面发育。坡体上部岩性主要为石英砂岩,成层性较好,表面风化强烈;下部为片岩夹片麻岩。滑坡平面图及地质剖面如图1所示。

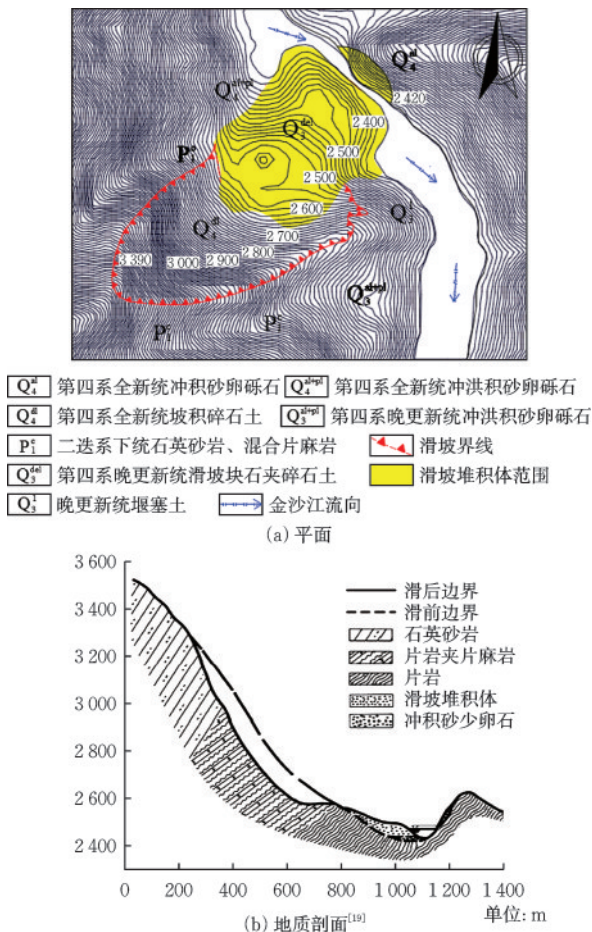


图1 贡扎滑坡  
Fig.1 Gongzha landslide

## 1.2 相似关系设计

振动台模型试验要对地震波的持续时间进行压缩,就必须提高外荷载的频率和材料的应变率<sup>[20]</sup>。但随着加载速率的提高,岩石材料破坏程度、破坏模式、峰值强度、变形参数等会有非线性的

变化。当前振动台模型试验<sup>[21-23]</sup>相似关系的确定方法,大多是选取三个基本物理量结合量纲分析法由静力条件推导出<sup>[24]</sup>,对动力因素的影响考虑不充分。针对相似比的确定提出一种基于频率相似的设计理念:通过材料的相似保证振动台试验中模型与原型的阻尼相似比为1;通过现场地脉动测试得到原型自振频率,白噪声扫描得到模型的自振频率,将二者之比作为频率相似比,再完成动力相似关系的确定,能更真实反应原型在地震作用下的动力响应特性。

使用Matlab程序对滑坡现场地脉动实测数据进行提取分离、滤波和解析计算,绘制贡扎滑坡原型的地脉动谱比图并求取平均值,如图2所示,确定滑坡原型自振频率为2.978 Hz。试验开始阶段,输入0.1g白噪声对模型进行扫描,测试模型初始阶段的动力特性。选取部分测点数据,利用Matlab相对传递函数分析模型在地震波作用下的频谱特性<sup>[25]</sup>,如图3所示,根据曲线峰值确定模型自振频率约为28 Hz。近似取原型与模型的自振频率之比为0.1。结合 Buckingham $\pi$ 定理和量纲分析法,选取长度 $L$ 、密度 $\rho$ 、频率 $f$ 为基本物理量,推导其余物理量的相似关系见表1。

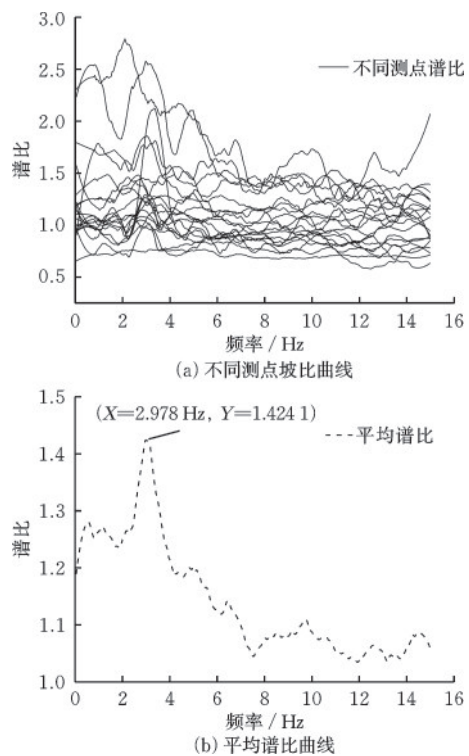


图2 地脉动谱比曲线  
Fig.2 Ground pulsation spectral ratio curves

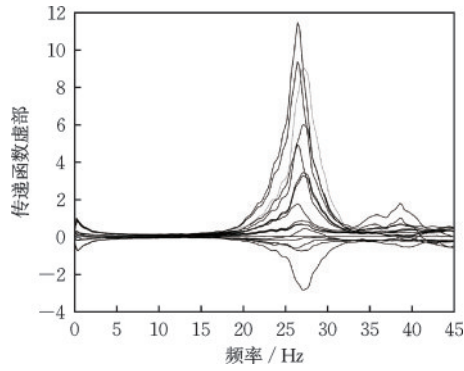


图3 相对传递函数曲线

Fig.3 Relative transfer function curves

表1 相似常数

Table 1 Similarity constants

物理量名称	物理量符号	相似系数
长度*	$L$	$C_L = 100$
密度*	$\rho$	$C_\rho = 1$
频率*	$f$	$C_f = 0.1$
加速度	$a$	$C_a = C_L C_f^2 = 1$
时长	$t$	$C_t = C_f^{-1} = 10$
速度	$v$	$C_v = C_L C_f = 10$
应力	$\sigma$	$C_\sigma = C_\rho C_L^2 C_f^2 = 100$
应变	$\epsilon$	$C_\epsilon = 1$
弹性模量	$E$	$C_E = C_\rho C_L^2 C_f^2 = 100$
黏聚力	$c$	$C_c = C_\rho C_L^2 C_f^2 = 100$
内摩擦角	$\varphi$	$C_\varphi = 1$
泊松比	$\lambda$	$C_\lambda = 1$

注:\*表示控制量

### 1.3 模型概况

通过反复的材料配比试验确定模型材料配比见表2,原型和模型主要物理力学参数见表3。模型采用厚度50 mm的岩块模拟下部的片岩夹片麻岩,100 mm的岩块模拟上部的石英砂岩,使用石膏粉和粉质黏土的混合物为黏合剂逐层砌筑。边坡模型高1.2 m,坡度45°,倾角60°。模型放置于2.7 m(长)×1.1 m(宽)×1.5 m(高)的模型箱中。箱身和模型之间加设50 mm厚聚乙烯泡沫塑料板,底部加设减震垫层,底部预留直径30 mm的螺栓孔,以减少边界效应和便于固定。边坡模型如图4所示。

本试验在北京工业大学国家重点实验室大型液伺服式振动台上完成。振动台尺寸为3 m×3 m,最大载重10 t,加载频段为0~50 Hz,满足试验加载工况需求。

表2 材料配比

Table 2 Material ratio 单位:%

材料	粉质黏土	重晶水泥	石英砂	石膏	水	甘油
配比	41.3	22.9	11.4	8.7	14.9	0.8

表3 主要物理力学参数

Table 3 Main physical and mechanical parameters

	密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)	弹性模量/ MPa	泊松比
原型	2.7	28.6	47	33.8	0.25
模型	2.5	0.3	44	0.338	0.25



图4 搭建完成的边坡模型

Fig.4 Completed slope model

### 1.4 监测点布置及加载工况

监测点布置情况如图5所示,共布设4个位移传感器和16个加速度传感器,其中加速度传感器A0布置在振动台台面上。在边坡的X和Y向各架设一个摄像机,记录模型斜坡的变形破坏过程。试验逐级加载,加载工况见表4。压缩十倍后的天然波时程曲线及频谱曲线如图6所示。

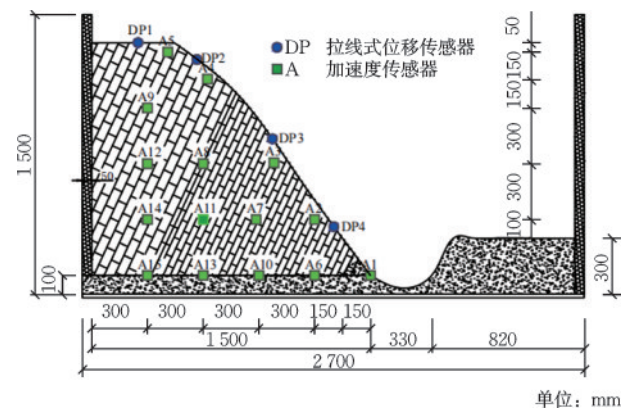


图5 传感器布置

Fig.5 Layout of sensors

表 4 试验加载工况

Table 4 Test loading conditions

工况	加载波形	激振特征
2-5	卧龙波、茂县波	原波、压缩 10 倍, 振幅 0.1g
6-10	正弦波	振幅 0.1g, 激振频率为 10、15、20、25、30 Hz
12-15	卧龙波、茂县波	原波、压缩 10 倍, 振幅 0.2g
16-20	正弦波	振幅 0.2g, 激振频率为 10、15、20、25、30 Hz
22-25	卧龙波、茂县波	原波、压缩 10 倍, 振幅 0.3g
26-30	正弦波	振幅 0.3g, 激振频率为 10、15、20、25、30 Hz
32-35	卧龙波、茂县波	原波、压缩 10 倍, 振幅 0.4g
36-40	正弦波	振幅 0.4g, 激振频率为 10、15、20、25、30 Hz
42-45	卧龙波、茂县波	原波、压缩 10 倍, 振幅 0.5g
46-49	正弦波	振幅 0.5g, 激振频率为 10、15、20、25 Hz
51-54	卧龙波、茂县波	原波、压缩 10 倍, 振幅 0.6g
56-57	正弦波	振幅 0.7g、0.8g, 激振频率为 10 Hz
1、11、21、31、41、50、55	白噪声	0.1g

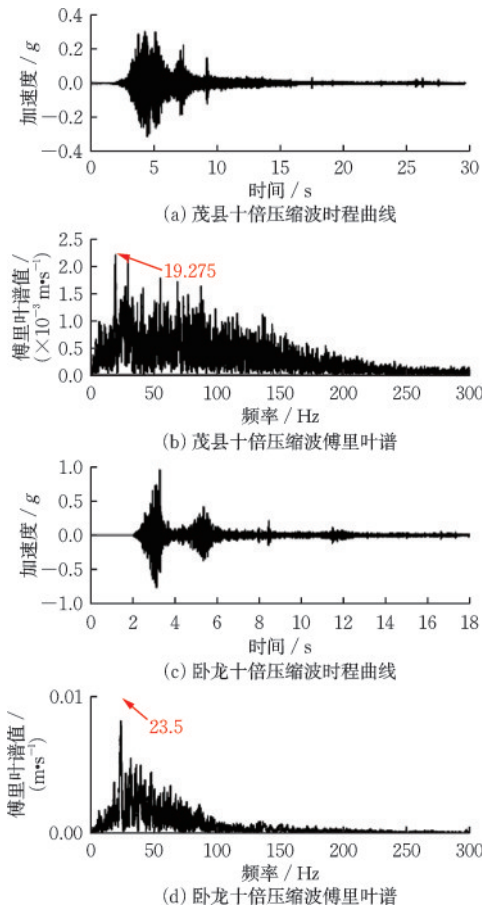


图 6 时程曲线和傅里叶谱

Fig.6 Time history curves and Fourier spectrum

## 2 边坡动力响应规律

### 2.1 基本规律

不同边坡在地震作用下的响应特征不相同。为便于定量分析,参考前人经验,引入PGA放大系数为坡内任一点的峰值加速度与振动台台面峰值加速度的比值<sup>[26]</sup>。以输入 0.3g、0.5g 汶川卧龙十倍压缩波为例绘制PGA放大系数云图,讨论坡表、坡内垂直向和坡内水平向的加速度响应的基本规律。

如图 7 所示,坡体中上部不同位置均表现出显著的PGA放大效应。坡表PGA放大系数显著增大发生在 2/3 坡高处,PGA放大系数随高程非线性增加,具有明显的高程效应。最大值出现在边坡顶部外凸处,分析其原因是由于此处外凸明显、约束较少、稳定性较差<sup>[27]</sup>,同时说明坡表形态对坡表动力响应规律有一定程度的影响。坡内垂直方向上,PGA放大系数整体随高程增加而增大,在坡顶达到最大值,说明高程对边坡内部加速度动力响应有放大效果。坡内水平方向上,由于反倾边坡嵌入式坡体结构,1/2 高程以下PGA放大系数变化不明显,底部的响应水平较低;1/2 高程以上表现出或先减小后增大或持续增大的趋势效应。在边坡外凸部位所在高程处(1 050 mm),由坡内到坡表的趋势效应明显。

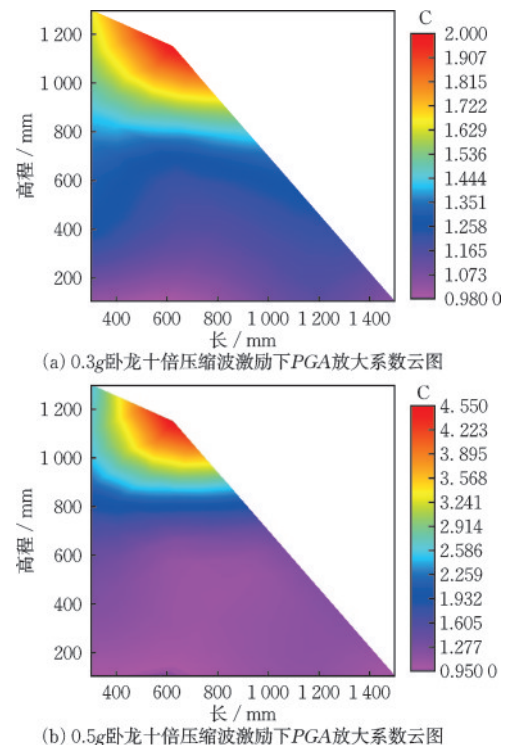


图 7 PGA 放大系数云图

Fig.7 Cloud diagrams of PGA amplification factor

## 2.2 输入波幅值的影响

为研究输入波幅值对边坡动力响应规律的影响,输入频率10、15 Hz正弦波以及汶川茂县波,讨论地震波幅值从0.1g增加到0.5g过程中坡表(A1, A2, A3, A4, A5)和坡内(A13, A11, A8, A4)监测点PGA放大系数变化规律,结果显示输入波幅值对边坡动力响应影响明显。

如图8所示,不同激励条件下,边坡测点的PGA变化情况大不相同。10 Hz正弦波激励下, A4、A5监测点PGA放大系数呈“减小-增大-减小-增大”的趋势,其余监测点总体呈增大趋势,但在输入波幅值为0.2g出现下降。15 Hz正弦波激励下,坡表和坡内监测点PGA放大系数整体随着输入波幅值的增大而增大,但最小值同样出现在0.2g处。分析该现象的原因是,边坡在0.2g幅值正弦波激励下,出现岩体松动,边坡出现局部损伤,刚度降低,减弱了PGA放大效应。茂县波激励下, A4、A5监测点随幅值的增加呈现先减小后增大再减小的趋势, A4监测点PGA放大系数减小发生在输入波

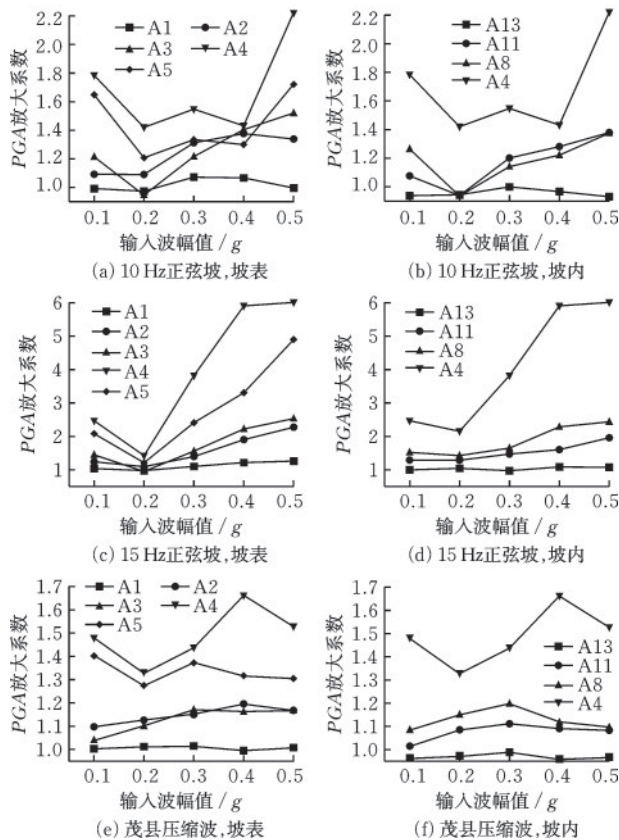


图8 PGA放大系数与输入波幅值的关系曲线

Fig.8 Relationship between PGA amplification factor and wave amplitude

幅值为0.2g和0.5g时, A5减小发生在0.2g和0.4g时,其余监测点PGA放大系数基本呈现先增加后减小的趋势。分析上述现象原因,是边坡在0.2g茂县波激励下发生局部损伤,边坡自振频率降低,在加载0.4g、0.5g茂县波时仍受到局部损伤的影响。

前人关于边坡动力响应规律随输入波幅值的变化规律得出不同的结果<sup>[28-30]</sup>,结合本试验得出的结论以及前人研究成果<sup>[14,31-32]</sup>,认为输入波幅值对边坡的影响同时受边坡材料、边坡构造以及地震波输入方式等多方面影响。

## 2.3 输入波频率的影响

输入幅值0.2g和0.3g正弦波,讨论输入波频率对边坡动力响应规律的影响。施加激励之前,先输入0.1g白噪声,利用Matlab程序计算边坡测点A7、A8和A9的相对传递函数虚部,以此获取此时边坡的自振频率约23 Hz,如图9所示。

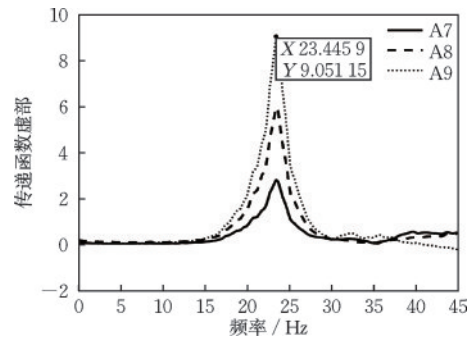


图9 传递函数虚部曲线

Fig.9 Imaginary part curves of transfer function

地震波频率从10 Hz递增到30 Hz过程中坡表(A1, A2, A3, A4, A5)、坡内垂直向(A5, A9, A14, A15)和坡内水平向(A2, A7, A11, A14)监测点PGA放大系数变化规律如图10所示。

坡表监测点中,位于坡脚位置的A1、A2监测点PGA放大系数随频率变化规律不明显,其余测点15~25 Hz PGA放大系数有显著增大,明显高于频率为10 Hz和30 Hz正弦波作用时。坡内垂直方向上,模型底部的A15监测点无明显变化规律,表明在低振幅作用下,模型底部的动力响应表现较弱。其余三个监测点PGA放大系数在频率15~20 Hz增大较多。坡内水平向上,监测点在0.2g正弦波作用下,对频率15~20 Hz激励较敏感;在0.3g正弦波作用下,对频率15 Hz激励最敏感。值得注意的是,坡内水平向监测点PGA放大系数随频率增加

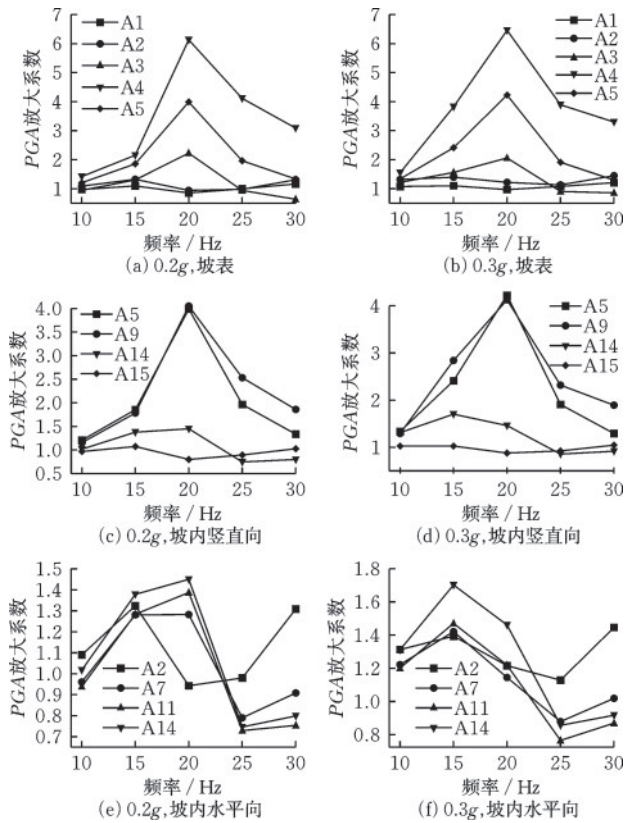


图10  $PGA$ 放大系数与输入波频率的关系曲线

Fig.10 Relationship between  $PGA$  amplification factor and wave frequency

基本呈现先增加后降低再增加的特点,在频率由25 Hz增大到30 Hz的过程中, $PGA$ 放大系数明显增大,说明相比于坡表和坡内竖直向,坡内水平向在高频波激励下,动力响应更强烈。

从结果可以看出,在加载频率达到模型自振频率之前, $PGA$ 放大系数随频率的增加而增加;当加载频率与模型自振频率接近时,动力响应变强烈。这与前人所描述的频率对动力响应规律的影响结论一致<sup>[33-35]</sup>。

### 3 试验现象及时频域分析

#### 3.1 试验现象

高速摄像机记录了边坡破坏的全过程,根据边坡破坏的宏观现象总结反倾岩质边坡破坏规律。

如图11所示,输入波振幅0.2g时(a),边坡坡肩位置出现第一条拉裂缝。0.3g~0.4g时裂纹发展,边坡右上角破坏较明显,这与前文提到的 $PGA$ 放大系数分析时得出的坡表外凸处动力响应最强烈的结论相一致。随着试验进行,边坡坡顶开裂,坡表

中上部出现多条未贯穿的裂纹。试验末端施加了破坏性正弦波,此阶段为破坏阶段,边坡变形逐渐增大,直至彻底失稳破坏。观察到0.7g激励结束时(图11(b)),边坡上部岩块被分割,裂隙较宽,发生局部失稳,且伴随着坡腰下半段轻微隆起现象。0.8g激励结束时(图11(c)),边坡表面裂缝贯穿,出现大面积破坏。边坡中上部大量岩块断裂被震落,内部发生弯折破坏,从侧面看,边坡弯曲倾倒变形严重,中下部岩块被挤压出现错动。

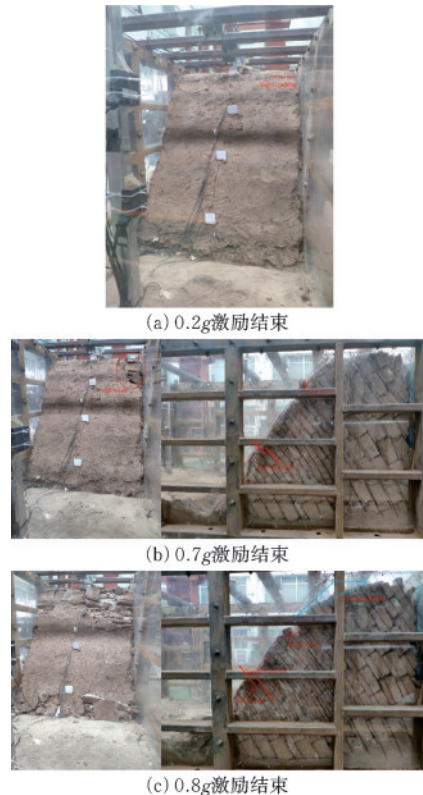


图11 边坡破坏过程

Fig.11 Slope failure process

根据记录的宏观现象,可将该边坡模型的破坏模式总结为:外凸区出现裂缝-裂缝发育-外凸区局部失稳-坡顶及坡肩部位岩块被震落-坡腰下半段轻微隆起,边坡失稳。

#### 3.2 基于 Hilbert 的时频域分析

N. E. Huang 等<sup>[36]</sup>率先提出了经验模态分解(EMD),并在此基础上结合 Hilbert 变换提出了 Hilbert 谱的概念。HHT 信号处理方法主要由 EMD 和 Hilbert 变换两部分组成。EMD 即将原始信号分解成频率从高到低的固有模态函数(intrinsic mode function, 简称  $IMF$ )和一个残差,如式(1)所示。对于数值计算过程中的误差,A. Albert 等<sup>[37]</sup>根据与原

始信号的相关系数提出了阈值的概念,对IMF分量加以区分,如式(2)所示:

$$X(t) = \sum_{i=1}^n IMF_i(t) + r(t) \quad (1)$$

式中, $X(t)$ 为原始信号; $IMF$ 为固有模态函数; $r(t)$ 为残差。

$$\mu_{TH} = \frac{\max(\mu_i)}{10\max(\mu_i) - 3}, i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中, $\mu_i$ 为第*i*个IMF分量与原始信号的相关系数; $n$ 为IMF总数。

图12所示为0.3g茂县十倍压缩波激励下,测点A4频率成分较丰富的前6阶IMF分量分解结果。图13显示各分量与原始信号的相关系数逐渐减小直至平稳,经式(2)计算得出阈值为0.149。根据公式(3)对IMF分量进行信号重建。

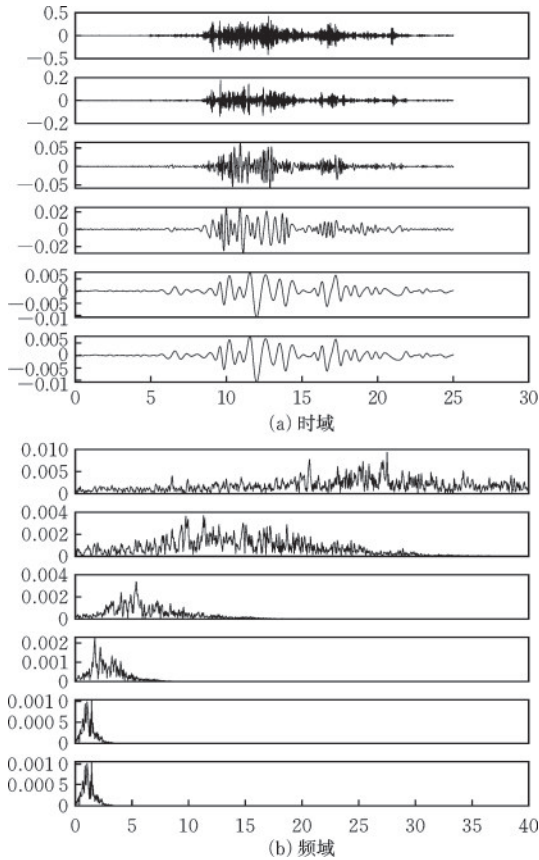


图12 测点A4 IMF分量EMD结果

Fig.12 EMD result of IMF components at measuring point A4

$$X(t) = \sum_{i=1}^m IMF_i(t), 1 \leq m \leq n \quad (3)$$

式中, $m$ 表示大于阈值的IMF分量数。

将IMF分量的Hilbert谱求和即可得到原始信号的Hilbert谱,Hilbert谱能反映信号在时频域的能量分布规律,其幅值表示瞬时频率能量。

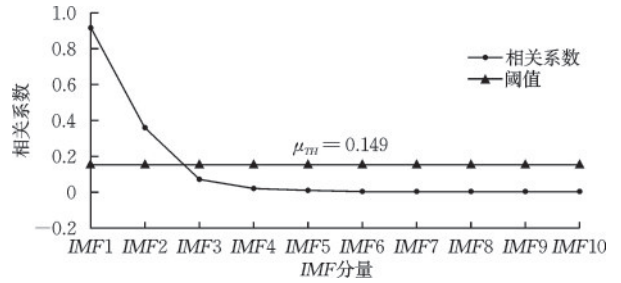


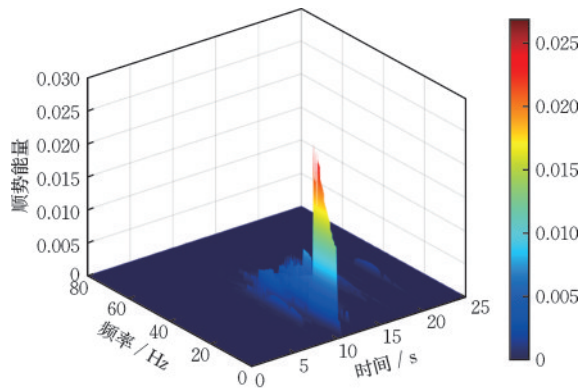
图13 IMF分量与原始信号的相关系数曲线

Fig.13 Correlation coefficient curves between IMF components and original signal

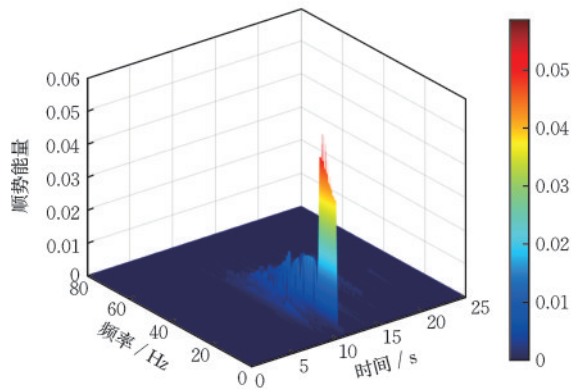
0.3g茂县十倍压缩波激励下,A13、A11、A8、A4的Hilbert谱如图14所示。结果显示所有测点在时频域时间轴上集中在8~13s,在频率轴的分布情况有差异。A13和A11能量集中分布在8~20 Hz,A8主要集中在10~18 Hz、22~30 Hz范围内,A4在15~35 Hz处能量较大。位于坡表外凸区的A4频率分布丰富,由上文可知A4处最易受损伤,说明Hilbert谱的频率丰富程度可推断边坡的损伤程度。从A13-A4,Hilbert谱能量分布频带逐渐由低频向高频移动,分析原因是由于测点位置的岩性不同,输入波传播过程中遇到不同介质分界面产生了复杂的反射、透射、折射等,导致坡体上部能量集中的频率范围略高于坡体下部。随着高程的增加,瞬时能量的峰值逐渐增大,说明高程对能量传播有放大效果。

边际谱表示为瞬时频率的总能量。将所有的Hilbert谱对时间*t*进行积分可以得到各个分量的Hilbert边际谱,将某一瞬时频率在所有时刻的能量累积,计算出原信号中与该频率对应的总能量。在地震波持续激励下,边坡模型内部会发生累积损伤,结构发生破坏,导致能量不能完全传递而产生能量损失,进而使边际谱幅值发生改变。因此,通过对边际谱的分析可明确边坡的累积损伤。

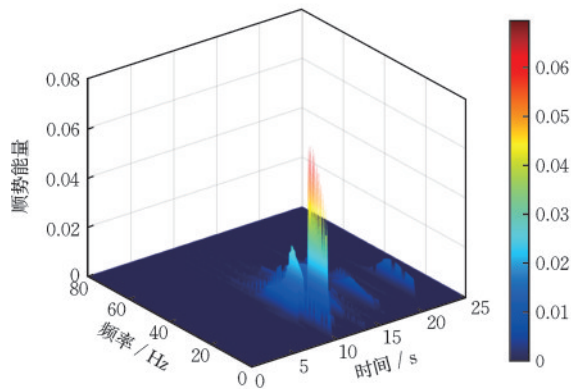
0.3g、0.5g茂县十倍压缩波激励下,沿坡脚到坡顶的监测点边际谱如图15(a~b)所示。随高程增加,坡表地震能量被明显放大,A4放大效果最显著。强度0.3g时,A1峰值不明显,其余监测点为三峰,第一峰值频率为11~16 Hz,A2-A5第二峰值频率分别为22、23、25、18 Hz,第三峰值频率分别为28、29、31、26 Hz。强度0.5g时,A1和A2为双峰,A3、A4和A5为四峰,四个峰值频率分别为20~24 Hz,25~29 Hz,31~34 Hz,36~40 Hz。结果显示,第一、二峰的峰值频率接近输入波主频,主要受输入波的影响。从坡脚到坡顶,边坡累积能量的频率分量越来



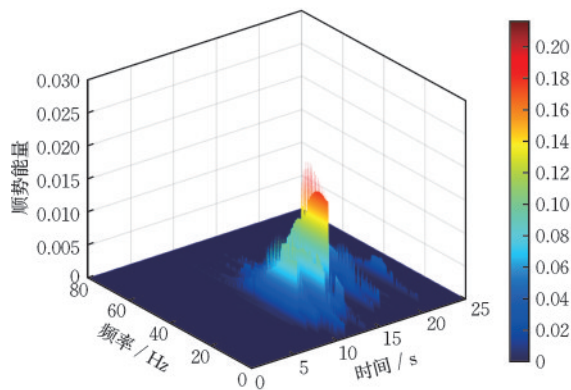
(a) 0.3g茂县十倍压缩波激励下A13测点Hilbert谱



(b) 0.3g茂县十倍压缩波激励下A11测点Hilbert谱



(c) 0.3g茂县十倍压缩波激励下A8测点Hilbert谱



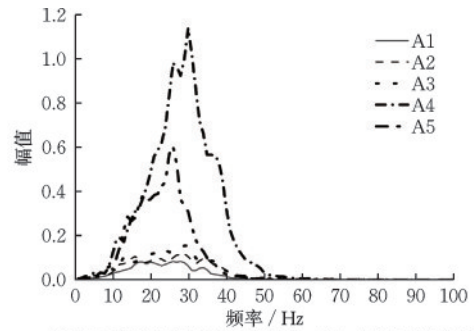
(d) 0.3g茂县十倍压缩波激励下A4测点Hilbert谱

图14 部分测点的Hilbert谱

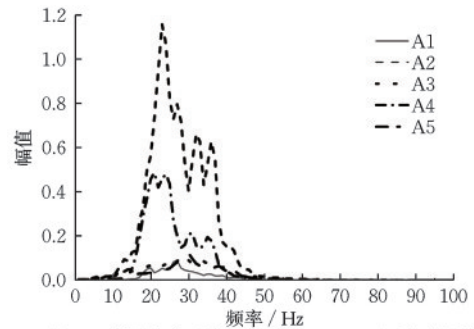
Fig.14 Hilbert spectrum of selected measuring points

越丰富,说明随着高程的增加,坡表的损伤在累积增加。A4监测点高频峰值较大,证明累积能量较大,这与前文提到的外凸处动力响应最强烈的结论一致。

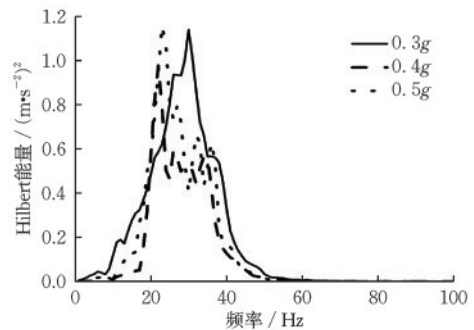
图15(c~d)为监测点A4和A8在不同幅值输入波激励下的边际谱曲线,可以看出,坡表A4监测点的能量峰值大于坡内A8监测点,且A4在较高频



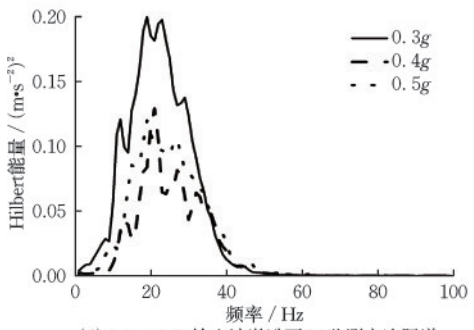
(a) 0.3g茂县十倍压缩波激励下, A1-A5测点边际谱



(b) 0.5g茂县十倍压缩波激励下, A1-A5测点边际谱



(c) 0.3g~0.5g输入波激励下A4监测点边际谱



(d) 0.3g~0.5g输入波激励下A8监测点边际谱

图15 不同测点的边际谱

Fig.15 Marginal spectra of different measuring points

部分的能量分布较 A8 更丰富,说明边坡的累积损伤与高程呈正相关。图 15(c)显示幅值 0.3g 输入波激励下能量在 30 Hz 附近最为集中,随着输入波强度的增加,能量集中的频率范围降低至 20~25 Hz,逐渐接近输入波主频,推断输入波强度 0.3g 时,坡表发生损伤,导致刚度下降,高频能量被吸收。图 15(d)显示幅值 0.4g 和 0.5g 输入波激励下边际谱能量低于 0.3g 激励时,说明此时边坡内部的损伤导致能量不能完全传递,0.3g~0.5g 激励时边坡内部处于不稳定状态。

## 4 结 论

(1) 边坡 PGA 放大系数在坡表和坡体内部表现出明显的“高程效应”,在 1/2 高程以下的水平方向上规律不明显,1/2 高程以上的水平方向上表现出“趋表效应”。坡表形状对 PGA 放大系数的变化规律有影响,坡表外凸处的动力响应最强烈。

(2) 输入波幅值对边坡动力响应有明显影响。PGA 放大系数随输入波幅值增大整体表现出增大趋势。但在 0.2g 的地震波激励下,边坡出现了内部损伤,导致 PGA 放大系数明显下降。输入波频率对边坡动力响应有一定程度影响。PGA 放大系数明显增大发生在 15~25 Hz,认为这与边坡自振频率有关,当激振频率与边坡自振频率接近时,动力响应变强烈。坡内水平向动力响应的变化规律更易受高频率地震波的影响。

(3) 根据宏观试验现象,将边坡破坏总结为:外凸区出现裂缝-裂缝发育-外凸区局部失稳-坡顶及坡肩部位岩块被震落-坡腰下半段轻微隆起,边坡失稳。

(4) 坡内竖直方向测点的 Hilbert 谱在时间轴上集中在 8~13 s,在频率轴分布的丰富程度存在差异,根据 Hilbert 谱的频率丰富程度可推断边坡的损伤程度,瞬时能量的峰值随高程增加而增加,说明高程对能量传播有放大效果;坡表测点的 Hilbert 边际谱表明随高程增加,地震能量被明显放大,边坡累积能量的频率分量越来越丰富,坡表的损伤累积增加;Hilbert 边际谱第一、二峰的峰值频率接近输入波主频,认为主要受输入波的影响。

## 参考文献:

[1] 白永健,倪化勇,葛华. 青藏高原东南缘活动断裂地质灾害效应研究现状[J]. 地质力学学报, 2019, 25(6):

1116-1128.  
 Bai Y J, Ni H Y, Ge H. Research status of geological hazard effects of active faults in the southeastern margin of Qinghai-Xizang Plateau [J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25 (6): 1116-1128. (in Chinese)  
 [2] 戴福初,邓建辉. 青藏高原东南三江流域滑坡灾害发育特征[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(5): 3-15.  
 Dai F C, Deng J H. Development characteristics of landslide disasters in Sanjiang Watershed in southeastern Qinghai-Xizang Plateau [J]. Engineering Science and Technology, 2020, 52 (5): 3-15. (in Chinese)  
 [3] 杨志华,郭长宝,吴瑞安,等. 青藏高原巴塘断裂带地震滑坡危险性预测研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 91-101.  
 Yang Z H, Guo C B, Wu R A, et al. Study on hazard prediction of seismic landslide in Batang fault zone of Qinghai-Xizang Plateau [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2021, 48(5): 91-101. (in Chinese)  
 [4] 裴振伟,年廷凯,吴昊,等. 滑坡地质灾害应急处治技术研究进展[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(6): 1382-1394.  
 Pei Z W, Nian T K, Wu H, et al. Research progress of landslide geological disaster emergency management technology [J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction Engineering, 2021, 41(6): 1382-1394. (in Chinese)  
 [5] 中共西藏自治区委员会关于制定国民经济和社会发展的“十四五”规划和二〇三五年远景目标的建议[N]. 西藏日报(汉), 2021-01-14(01).  
 [6] 樊启祥,林鹏,蒋树,等. 金沙江下游大型水电站岩石力学与工程综述[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2020, 60(7): 537-556.  
 Fan Q X, Lin P, Jiang S, et al. Summary of rock mechanics and engineering of large hydropower stations in the lower reaches of Jinsha River [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2020, 60 (7): 537-556. (in Chinese)  
 [7] 吴孝敏,邹云,陈书红. 川藏高速公路(西藏段)北线选线方案研究[J]. 公路交通技术, 2020, 36(1): 1-8.  
 Wu X M, Zou Y, Chen S H. Study on route selection of north line of Sichuan-Tibet Expressway (Xizang Section) [J]. Highway Traffic Technology 2020, 36(1): 1-8. (in Chinese)  
 [8] 宋章,张广泽,蒋良文,等. 川藏铁路工程地质特征及地质选线原则[J]. 铁道建筑, 2017(2): 142-145.  
 Song Z, Zhang G Z, Jiang L W, et al. Engineering geological characteristics and geological route selection principles of Sichuan-Tibet Railway [J]. Railway Construc-

- tion, 2017(2): 142-145. (in Chinese)
- [9] 王喆, 陈志坚. 反倾岩质边坡倾倒变形影响因素分析[J]. 甘肃科学学报, 2022, 34(3): 88-92.  
Wang Z, Chen Z J. Analysis of influencing factors of toppling deformation of anti-dip rock slope [J]. Journal of Gansu Science, 2022, 34(3): 88-92. (in Chinese)
- [10] 刘汉东, 赵亚文, 董金玉, 等. 含软弱岩层反倾岩质边坡地震动力响应与破坏模式[J]. 地球科学, 2022, 47(12): 4373-4389.  
Liu H D, Zhao Y W, Dong J Y, et al. Seismic dynamic response and failure mode of anti-dip rock slope with weak strata [J]. Geoscience, 2022, 47(12): 4373-4389. (in Chinese)
- [11] 郭剑, 魏小佳, 王刚. 芦山灾区流水沟滑坡基本特征及成因机制研究[J]. 公路工程, 2015, 40(2): 15-19, 33.  
Guo J, Wei X J, Wang G. Study on basic characteristics and genetic mechanism of Liushuigou landslide in Lushan disaster area [J]. Highway Engineering, 2015, 40(2): 15-19, 33. (in Chinese)
- [12] 史文兵, 李洪建, 曾臻, 等. 平缓反倾红层边坡变形破坏机制研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(5): 881-888.  
Shi W B, Li H J, Zeng Z, et al. Study on deformation and failure mechanism of gentle anti-dip red slope [J]. Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(5): 881-888. (in Chinese)
- [13] 冯细霞, 姜清辉, 张慧超, 等. 岩质边坡地震响应振动台试验研究[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(3): 575-582.  
Feng X X, Jiang Q H, Zhang H C, et al. Shaking table test study on seismic response of rock slope [J]. Vibration, Testing and Diagnosis, 2018, 38(3): 575-582. (in Chinese)
- [14] 刘汉东, 牛林峰, 王忠福, 等. 震动强度对反倾层状岩质边坡动力响应规律的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(4): 677-683.  
Liu H D, Niu L F, Wang Z F, et al. Influence of vibration intensity on dynamic response law of anti-tilting layered rock slope [J]. Journal of disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(4): 677-683. (in Chinese)
- [15] 陈伟庚, 刘洋, 王栋, 等. 西南山区铁路沿线反倾岩质边坡地震动力响应振动台试验研究[J]. 铁道建筑, 2021, 61(4): 93-96.  
Chen W G, Liu Y, Wang D, et al. Shaking table test on seismic dynamic response of anti-dip rock slope along railway line in Southwest mountainous area [J]. Railway Construction, 2021, 61(4): 93-96. (in Chinese)
- [16] Song D Q, Chen Z, Ke Y T, 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: 105731.
- [17] Song D Q, Chen Z, Chao H, et al. Numerical study on seismic response of a rock slope with discontinuities based on the time-frequency joint analysis method [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume, 2020, 133: 106112.
- [18] Chen J C, Wang L M, Wang P, et al. Failure mechanism investigation on loess-mudstone landslides based on the Hilbert-Huang transform method using a large-scale shaking table test [J]. Engineering Geology, 2022, 302: 106630.
- [19] 郭明珠, 王晨, 谷坤生, 等. 薄厚岩组合型斜坡动力响应与破坏机制的振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(11): 2173-2185.  
Guo M Z, Wang C, Gu K S, et al. Shake table model test study on dynamic response and damage mechanism of slopes with thin and thick rock combination [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(11): 2173-2185. (in Chinese)
- [20] 党亚倩, 王团结, 汪洪菊, 等. 加载速率对岩石材料力学性质与能量演化特征的影响[J]. 金属矿山, 2022, 51(12): 45-51.  
Dang Y Q, Wang T J, Wang H J, et al. Effect of loading rate on mechanical properties and energy evolution characteristics of rock materials [J]. Metal Mine, 2022, 51(12): 45-51. (in Chinese)
- [21] 黄志全, 李纪良, 王闯, 等. 强震作用下陡倾顺层岩质边坡动力响应与破坏模式研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(1): 217-227.  
Huang Z Q, Li J L, Wang C, et al. Study on dynamic response and failure mode of steep bedding rock slope under strong earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(1): 217-227. (in Chinese)
- [22] 宋丹青, 黄进, 刘晓丽, 等. 地震作用下金沙江某跨江桥梁岩质岸坡动力响应分析[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(2): 45-53.  
Song D Q, Huang J, Liu X L, et al. Dynamic response analysis of rocky bank slope of a bridge across the Jinsha River under earthquake [J]. Engineering Science and Technology, 2021, 53(2): 45-53. (in Chinese)
- [23] 詹志发, 祁生文, 何乃武, 等. 强震作用下均质岩质边坡动力响应的振动台模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(5): 946-954.  
Zhan Z F, Qi S W, He N W, et al. Vibration table model test of dynamic response of homogeneous rock

- slope under strong earthquake [J]. Chinese Journal of Engineering Geology, 2019, 27(5): 946-954. (in Chinese)
- [24] 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. Similar skills of structural dynamic model test [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2000, 40(1): 1-8. (in Chinese)
- [25] 杨长卫, 童心豪, 吴东升, 等. 基于振动台试验的基覆型边坡损伤演化规律与快速识别方法研究[J]. 铁道学报, 2023, 45(6): 123-130.  
Yang C W, Tong X H, Wu D S, et al. Research on damage evolution law and rapid identification method of foundation cover slope based on shaking table test [J]. Journal of Railway Science, 2023, 45(6): 123-130. (in Chinese)
- [26] Griffiths D, Bollinger G. The effect of Appalachian Mountain topography on seismic waves[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1979, 69(4): 1081-1105.
- [27] 陈宇航, 李俊锋. 坡表形态对边坡稳定性影响及力学分析[J]. 甘肃水利水电技术, 2022, 58(7): 37-41, 54.  
Chen Y H, Li J F. Influence of slope surface shape on slope stability and mechanical analysis [J]. Gansu Water Conservancy and Hydropower Technology, 2022, 58(7): 37-41, 54. (in Chinese)
- [28] 郭明珠, 谷坤生, 梁洲婕, 等. 强震作用下反倾岩质斜坡动力特性及动力参数影响研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2022, 38(2): 279-287.  
Guo M Z, Gu K S, Liang Z J, et al. Study on dynamic characteristics and influence of dynamic parameters of anti-dip rock slope under strong earthquake [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2022, 38(2): 279-287. (in Chinese)
- [29] 王志颖, 郭明珠, 曾金艳, 等. 地震作用下含软弱夹层顺层岩质斜坡动力响应的试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(9): 2566-2578, 2592.  
Wang Z Y, Guo M Z, Zeng J Y, et al. Experimental study on dynamic response of bedding rocky slopes with weak interlayers under earthquake [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(9): 2566-2578, 2592. (in Chinese)
- [30] 王学伍. 地震作用下顺层岩质边坡动力响应规律及其破坏机制[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.  
Wang X W. Dynamic response law and failure mechanism of bedding rock slope under earthquake [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [31] 邓龙胜, 范文. 黄土边坡动力响应的影响效应研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(4): 483-490.  
Deng L S, Fan W. Study on the influence of dynamic response of loess slope [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(4): 483-490. (in Chinese)
- [32] 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 R Q, Li G, Ju N P. Shaking table test of strong seismic response of stratified rock slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5): 865-875. (in Chinese)
- [33] 李朝阳, 向波, 蒋瑜阳. 岩质边坡的自震频率对其加速度放大系数的影响[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2023, 32(4): 1-5.  
Li C Y, Xiang B, Jiang Y Y. Influence of self-vibration frequency of rock slope on its acceleration amplification factor [J]. Journal of Hunan City University (Natural Science), 2023, 32(4): 1-5. (in Chinese)
- [34] 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 on dynamic response of anti-dip rock slope with muddy interlayer [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2015, 37(2): 422-427. (in Chinese)
- [35] 刘汉东, 耿正, 王忠福, 等. 反倾岩质边坡动力响应及地震动参数影响研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(4): 70-76.  
Liu H D, Geng Z, Wang Z F, et al. Study on dynamic response and influence of ground motion parameters of anti-dip rock slope [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2019, 40(4): 70-76. (in Chinese)
- [36] Huang N, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, 1998, 454: 903-995.
- [37] Albert A, Nii Attoh-okine. A criterion for selecting relevant intrinsic mode functions in empirical mode decomposition [J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2010, 1(2): 1-24.

(本文编辑: 周小潭)