

DOI: 10.16285/j.rsm.2022.1642

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

王志颖¹, 郭明珠¹, 曾金艳², 王 晨¹, 刘 晃¹

(1. 北京工业大学 城市建设学部, 北京 100124; 2. 山西省地震局, 山西 太原 030021)

摘 要:以青藏高原金沙江流域下归洼滑坡为原型,开展了含软弱夹层的顺层岩质斜坡振动台模型试验,基于斜坡峰值加速度 PGA 的放大系数和 Hilbert-Huang 变换 (Hilbert-Huang transform, 简称 HHT) 时频特征分析地震作用下含软弱夹层顺层岩质斜坡动力响应规律。试验结果表明:斜坡在地震作用下表现出明显“高程效应”和“趋表效应”,PGA 在坡表距离坡底 1/4 高度处、坡顶、软弱夹层处较大。随着输入地震动强度的增加,斜坡刚度逐渐降低,自振频率逐渐减小。当输入波幅值达到 0.7g 之后,斜坡发生开裂和结构变形。输入波幅值相同的情况下,PGA 放大系数与高程呈正相关,同一测点随着输入波幅值增加,放大系数逐渐下降,不同输入波的类型和时间压缩比对斜坡动力响应影响差异较大。Hilbert 谱显示,高程和软弱夹层对地震波能量有放大作用,高频部分的能量放大尤其明显。Hilbert 边际谱表明,软夹层作用下高频部分的累积能量放大明显,在坡表距离坡底 1/4 高度处的测点能量突然增大,与加速度放大效应部分的结论类似;Hilbert 边际谱显示,随着输入地震波幅值增加,高频部分和代表斜坡自振频率部分的累积能量逐渐降低,输入地震波主频部分的累积能量逐渐占据主导地位,表明斜坡逐渐损伤破坏,斜坡的模式特性逐渐消失。

关 键 词: 振动台试验; 边坡工程; 顺层岩质斜坡; 软弱夹层; 动力响应; HHT 时频分析

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2023) 09—2566—14

Experimental study on dynamic response of bedding rock slope with weak interlayer under earthquake

WANG Zhi-ying¹, GUO Ming-zhu¹, ZENG Jin-yan², WANG Chen¹, LIU Huang¹

(1. Department of Urban Construction, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Earthquake Administration of Shanxi Province, Taiyuan, Shanxi 030021, China)

Abstract: In this study, the “Xiaguiwa” landslide in Jinsha River Basin of Qinghai-Tibet Plateau is taken as a prototype, and the shaking table model test on bedding rock slope with weak interlayer is carried out. The dynamic response of bedding rock slope with weak interlayer under earthquake is studied from the aspects of peak ground acceleration (PGA) amplification factor and Hilbert-Huang transform (HHT) time-frequency characteristics. The results show that the slope exhibits obvious “elevation effect” and “surface effect” under the action of input seismic waves. The PGA is larger at the 1/4 height of the slope surface from the bottom of the slope, the top of the slope, and the weak interlayer. With the increase of the intensity of the input seismic waves, the slope stiffness and natural vibration frequency decrease gradually. When the input wave amplitude reaches 0.7g, the slope cracking and structural deformation occur. When the input amplitudes are the same, the PGA amplification coefficient is positively correlated with the elevation, and decreases gradually with the increase of the input amplitudes at the same measuring point. The influences of different input wave types and time scale factors on the slope dynamic response are significantly different. The Hilbert spectrum shows that the elevation and weak interlayer amplify the energy of seismic waves, especially the high-frequency part. The Hilbert marginal spectrum shows that the weak interlayer could amplify the energy of the high-frequency part. The Hilbert marginal spectrum indicates that the cumulative energy of the high-frequency part is significantly amplified under the influence of soft interlayer, and the energy of the measuring point at the 1/4 height of the slope surface from the bottom of the slope suddenly increases, which is similar to the conclusion of the acceleration amplification effect. The results of Hilbert marginal spectrum shows that with the increase of the

收稿日期: 2022-10-20

录用日期: 2023-02-07

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No.2018YFC1505001)。

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2018YFC1505001).

第一作者简介: 王志颖, 男, 1996 年生, 硕士研究生, 主要从事斜坡地震动力响应相关的研究工作。E-mail: wangzhiying@emails.bjut.edu.cn

通讯作者: 曾金艳, 女, 1970 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事边坡工程、活动构造、地震工程和地球物理勘探研究工作。E-mail: 13903412202@163.com

amplitude of the input seismic wave, the cumulative energy of the high-frequency part and the part representing the natural vibration frequency of the slope gradually decrease, and the energy of the main frequency part of the input seismic wave gradually dominates, indicating that the modal characteristics of the slope gradually disappear.

Keywords: shaking table tests; slope engineering; bedding rock slope; weak interlayer; dynamic response; HHT time-frequency analysis

1 引言

青藏高原是我国最大,也是世界最高的高原,平均海拔超过 4 000 m。青藏高原位于印度板块与欧亚板块之间,板块之间的碰撞和持续推挤、楔入作用使青藏高原产生隆起和强烈变形,造就了复杂多变的地形地貌,并诱发剧烈的地震活动和构造活动^[1]。脆弱的地质环境和强烈的地震活动诱发大量的崩塌和滑坡,造成了大量伤亡和财产损失。岩质斜坡在青藏高原是一种常见的斜坡类型,层状岩质斜坡更是分布广泛,岩质边坡按节理倾向和坡面倾向的关系可分为顺层岩质边坡和反倾岩质边坡^[2]。其中,顺层岩质边坡是最易造成严重破坏的边坡。

对于顺层岩质边坡的研究,国内外学者进行了诸多探讨。振动台试验能够直观地反映边坡的破坏机制和动力响应,因此成为大多数学者研究边坡的主要手段。黄润秋等^[3]通过大型振动台试验,研究反倾和顺层两类结构岩体边坡在强震条件下的地震动力响应,深入揭示了强震条件下层状结构斜坡的动力响应规律和失稳破坏机制。吴多华等^[4]利用振动台试验,分析不同幅值、频率等参数在地震波作用下的边坡动力放大效应和破坏机制。董金玉等^[5]进行了顺层岩质斜坡大型振动台试验,深入揭示了顺层岩质边坡的加速度响应特征和破坏特征,对顺层岩质边坡的破坏机制的研究有重要指导意义。其他学者^[6-10]也进行了大量的研究,并取得了丰硕的成果。

软弱夹层是岩土工程中常出现的工程地质问题,软弱夹层分布广泛,对边坡稳定具有较大影响,是决定边坡稳定性的关键因素,国内外对含软弱夹层的边坡的研究从未停止。龚文惠等^[11]运用弹塑性理论和有限元方法,建立了顺层岩质路堑边坡稳定性的模拟分析模型,并分析了软弱夹层的影响。周飞等^[12]利用振动台试验研究了含不同厚度软弱夹层的岩质斜坡动力响应特性及其影响因素。张社荣等^[13]基于 Sarma 极限平衡法和有限元强度折减法,探讨层状岩质边坡在不同岩层倾角、边坡坡角、结构面间距条件下破坏面位置的变化规律,揭示复杂多层软弱夹层边坡岩体的破坏机制及稳定性特征。陈训龙等^[14]利用振型叠加法和虚拟激励法,建立多

层软弱结构面的顺层岩质边坡非平稳随机地震响应的快速算法。

上述研究主要集中在边坡破坏模式和边坡加速度放大效应方面,对不同影响因素作用下含软弱夹层的层状岩质边坡动力响应的研究并不深入,还有进一步探讨空间,并且研究主要从时域或频域方面进行分析,在各类复杂因素影响下,分析结果并不准确,还可以进行更深入的研究。借助 Hilbert-Huang 变换,处理复杂的地震信号,得到信号在时频域的能量分布,从而更为准确地分析斜坡的动力响应特征^[15]。部分学者利用 HHT 方法研究斜坡的动力响应和破坏机制,具有很强的指导意义。杨长卫等^[7]利用 Hilbert 谱和 Hilbert 边际谱描述顺层和反倾斜坡地震能量在时频域上的传播特征。Song 等^[16-17]通过振动台试验,利用 HHT 方法,基于时频域、频域和时-频域的联合分析,利用地震作用下的 Hilbert 边际谱分析边坡地震破坏机制,探讨坡面和高程的地震波放大效应。

本文以下归洼滑坡为原型,设计完成了含软弱夹层顺层岩质斜坡的振动台模型试验,研究其在地震作用下的动力响应。利用斜坡的加速度响应结果,分析不同强度、不同输入波和软弱夹层的影响,利用 HHT 方法获取斜坡在加速度时-频域的响应特征,分析边坡在地震动作用下的响应特征和地震波的传播特性。

2 试验方案

2.1 试验原型概况

本试验以下归洼滑坡为原型,下归洼滑坡位于四川省甘孜藏族自治州苏洼龙乡金沙江上游,坐标为 29° 37' 28.57"N、99° 0' 54.47"E,气候类型为温带半干旱高原季风气候,年平均温度为 10~15 ℃,年平均降雨量为 600~800 mm,主要集中在夏季。滑坡区处于河谷较开阔区段,主河床位于左岸坡脚,右岸为坡度逐级增加的阶地地貌。两岸山体高程约为 3 000~3 200 m,河岸高程约为 2 470 m,高差较大,总体呈缓“V”字河谷地貌。高程 2 600~3 000 m 为滑坡发育范围,平均坡度为 35°,由于滑坡区高程起伏巨大、降水量稀少、植被稀疏、地表径流季节性分明,河流侵蚀下切作用强烈,造就了险峻的

高山峡谷地貌,为沟谷坡岸的表生改造和变形破坏提供天然条件。滑坡出露岩层产状为 $257^{\circ} \angle 35^{\circ}$ 。下归洼滑坡的地质剖面图如图 1 所示。滑坡区出露的地层岩性主要是角闪岩,局部夹云母片岩层、大理岩等。角闪岩层的岩石应力作用和变质作用痕迹明显,属于变质类硬岩,抗风化能力较强。云母片岩层为软岩夹层,上薄下厚,平均厚度为 3 m,与滑坡主产状发育一致,岩体结构软硬相间导致岩层容易产生滑动。同时,下归洼滑坡靠近金沙江断裂西支,滑坡区西侧为巴塘断裂,东侧为苏洼龙-王大龙断裂,区地震活动强度大,频率高,历史上出现过多次破坏性地震。滑坡区岩体风化、卸荷、蠕滑变形现象强烈,其中强风化岩层厚度为 50 m、卸荷带宽度大于 40 m,深部岩层发育完整连续。综合分析,滑坡存在开挖失稳、冻融、高地应力作用和地震引起失稳等工程地质问题。下归洼是一个典型的溃屈型顺层岩质边坡,坡存在明显分区特性,不同滑坡区域展现了顺层斜坡“溃屈”破坏的不同阶段。

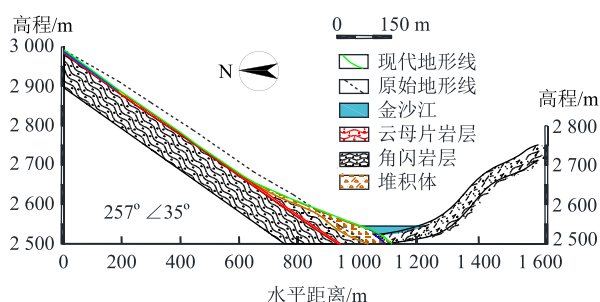


图 1 下归洼滑坡地质剖面图

Fig.1 Geological profile of Xiaguiwa landslide

2.2 试验设备

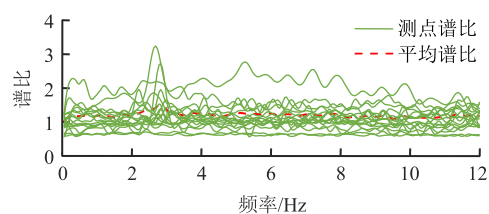
本次振动台模型试验在北京工业大学国家重点实验室的大型电液伺服式振动台上进行。振动台面尺寸为 $3\text{ m} \times 3\text{ m}$,最大承载重量为 10 t,加载频段为 $0 \sim 50\text{ Hz}$,激振方向为水平向单向振动,最大水平位移为 $\pm 100\text{ mm}$ 。满载情况下,水平向的最大加速度为 $1.5g$,满足试验加载工况需求。

2.3 相似设计

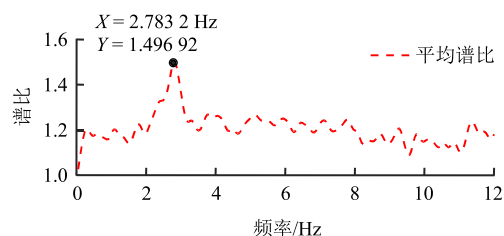
相似关系设计对于振动台试验至关重要,受限于模型箱和振动台尺寸,只能进行缩尺试验。为了使缩尺模型能够客观地反映斜坡原型在地震作用下的动力响应特征,需要根据相似理论,推导出准确的相似关系。根据相似理论,需要保证模型和原型的几何尺寸相似、运动学相似和动力学相似,其中,几何尺寸相似容易实现,运动学相似由几何尺寸相

似和动力学相似控制。因此,动力学相似的控制对试验至关重要。本试验根据 Buckingham π 定理和量纲分析法,选取密度、几何尺寸以及频率作为控制量,推导相似物理量和相似常数。其中,频率的相似主要体现了动力学相似,进而控制运动学相似。本试验利用白噪声确定模型的卓越频率,并且在下归洼滑坡进行了地脉动测试,利用地脉动确定原型的卓越频率,利用两者的结果确定频率的相似常数。

地脉动指地面上的常时微幅振动,是一种主要由人类活动和自然现象引起的稳定非重复性随机波动,地脉动能够较好地反映场地的动力特性。高广运等^[18]认为地震的卓越周期与地脉动的卓越周期有很好的对应关系,利用地脉动可以确定场地卓越周期。日本学者 Nakamura^[19]提出了单点 H/V (H 、 V 分别为同一测点的地脉动水平分量与竖向分量的傅里叶幅值)谱比法后,国内外学者就对此方法进行了广泛的研究与应用,地脉动 H/V 谱比能够较为准确地确定场地的卓越频率已经成为广泛的共识。部分学者^[20-21]对地脉动单点 H/V 谱比法进行研究,利用地脉动谱比得到场地的卓越频率或卓越周期。本文从下归洼滑坡不同位置和高程处选取了 18 个测点进行了地脉动测试,并使用单点 H/V 谱比法对地脉动数据进行处理,测得场地的卓越频率,计算结果如图 2 所示,其中 X 表示谱比峰值对应的频率,即边坡卓越频率; Y 为谱比值,表明边坡卓越频率为 2.783 2 Hz 。



(a) 下归洼滑坡地脉动谱比



(b) 下归洼滑坡地脉动平均谱比

图 2 下归洼滑坡地脉动测试结果

Fig.2 Micro-tremor test results of Xiaguiwa landslide

对斜坡模型施加白噪声激励,可以获取模型的自振频率、阻尼比等参数,其中自振频率可以依靠

传递函数获取。传递函数是表征输入量与输出量联系的一种运算方法，是系统本身的固有性质，与输入量的大小和性质无关。传递函数能够简明地表达输入地震动与滑坡模型地震相应之间的关系，通过传递函数来分析斜坡模型在地震波作用下的频谱特性，可以较为准确地求解斜坡模型的自振频率^[22]。本次试验共布置了 22 个测点，具体测点位置见图 3。斜坡模型完成后首先施加白噪声激励，选取部分测点的数据，利用传递函数进行数据处理测得模型的自振频率。图 4 为模型自振频率的数据处理结果。

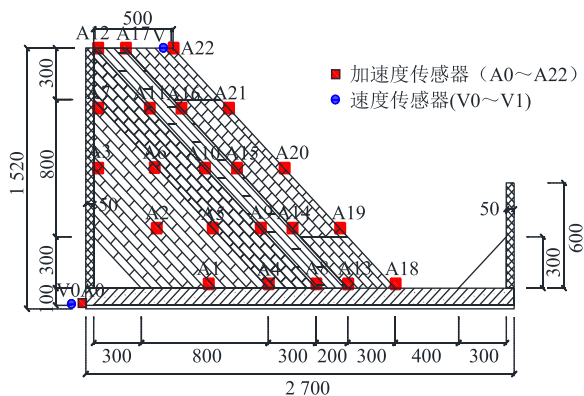


图 3 传感器布置图 (单位: mm)
Fig.3 Layout of sensors (unit: mm)

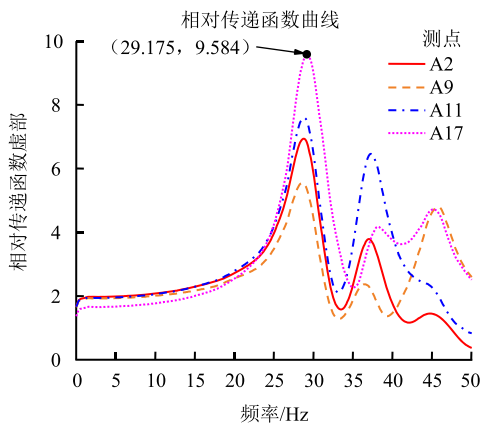


图 4 斜坡模型传递函数
Fig.4 Transfer function of slope model

综上所述，选取模型的密度 ρ 、几何尺寸 L 以及频率 f 作为控制量，其中模型的频率近似为原型的 10 倍，因此取频率的相似常数取 $C_f=0.1$ ，密度和几何尺寸相似常数分别取 $C_\rho=1.0$ 、 $C_L=100.0$ ，其余物理量的相似常数，如表 1 所示。

2.4 模型制作

本次试验模型包含硬岩和软岩两种岩性介质，硬岩的原材料质量配比为粉质黏土:重晶石粉:石英砂:石膏:水:甘油 = 32.3:30.2:11.4:12.4:12.7:1.0;

软岩材料质量配比为粉质黏土:重晶石粉:石英砂:石膏:水:甘油 = 41.3:24.7:11.4: 8.7:13.1:0.8。模型的物理力学参数满足相似关系的要求，原型与模型的物理力学参数对比如表 2 所示。

表 1 相似常数表
Table 1 Similarity relations

物理量	相似常数及公式	相似常数
几何尺寸 L	C_L	100.0
密度 ρ	C_ρ	1.0
振动频率 f	C_f	0.1
弹性模量 E	$C_E = C_\rho C_L^2 C_f^2$	100.0
黏聚力 c	$C_c = C_\rho C_L^2 C_f^2$	100.0
内摩擦角 φ	C_φ	1.0
泊松比 λ	C_λ	1.0
应变 ε	C_ε	1.0
应力 σ	$C_\sigma = C_\rho C_L^2 C_f^2$	100.0
速度 v	$C_v = C_L C_f$	10.0
加速度 a	$C_a = C_L C_f^2$	1.0
重力加速度 g	C_g	1.0
时间 t	$C_t = C_f^{-1}$	10.0

表 2 原型与模型主要物理力学参数

Table 2 Main physical and mechanical parameters of prototype and model

岩性	类型	密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	内摩擦 角/ $^\circ$	黏聚力/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
软岩	原型	2.7~3.2	30~50	3.000~5.000	10.000~60.000	0.20~0.40
	模型	3.1	42	0.038	0.100~0.600	0.30
硬岩	原型	2.7	47	28.600	33.800	0.33
	模型	2.5	44	0.300	0.338	0.33

为真实还原斜坡原始结构，试验制作了 4 种不同尺寸的模块模拟斜坡原型的岩体特征和复杂的节理分布，模型设计图如图 5 所示。4 种试块的尺寸分别为 200 mm×200 mm×100 mm、200 mm×200 mm×50 mm、200 mm×100 mm×50 mm 和 100 mm×100 mm×50 mm。模型搭建过程中，上覆硬岩层与基座硬岩层岩性一致，长度、宽度一致。块体间使用黏土黏结，参考前人经验，层与层之间的黏结材料选用滑石粉、石膏及黏土拌制而成，既可以保证黏结面强度，又能有效控制与试块之间的强度差。模型在自主设计的刚性模型箱中搭建，模型箱设计箱体长度为 2.7 m，宽度为 1.1 m，高度为 1.5 m。为方便观察箱内情况，模型箱使用透明亚克力板做围护材料，模型边界采用挤塑材料作为减震层，厚度为 50 mm。底座采用厚度为 20 mm 的钢板，预留直径为 30 mm、间隔为 400 mm 的螺栓孔，便于与振动台台面连接固定。模型成品见图 6。

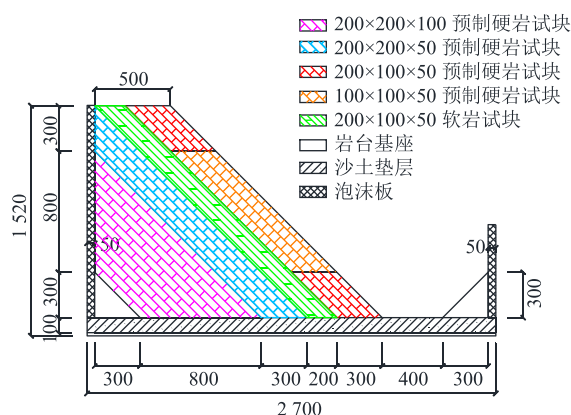


图5 模型设计图 (单位: mm)

Fig.5 Schematic diagram of physical model (unit: mm)



图6 模型成品

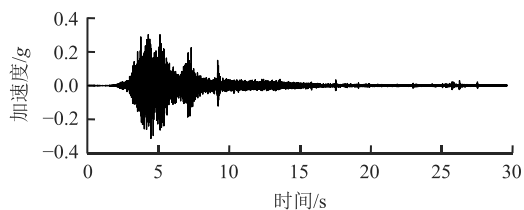
Fig.6 Photo of physical model

2.5 监测点布置

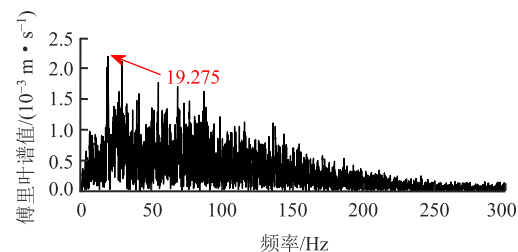
为研究坡体的动力响应规律和破坏机制,试验中在斜坡坡面、岩性分界面和坡内分别布置了 22 个加速度传感器,见图 3。其中, A0 和 V0 布置在模型箱外的振动台上,反映输入地震波原始的加速度响应; A18~A22 布置在坡表, V1 布置在坡肩处,反映坡肩和坡表的加速度状态。A4~A17 布置在不同岩层交界面处,反映岩性差异面的加速度响应规律。

2.6 加载工况

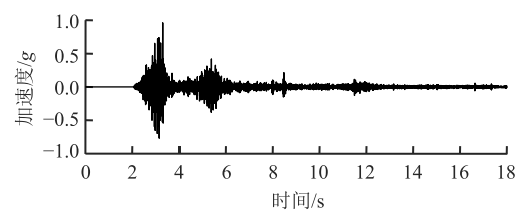
本试验输入的地震波主要由人工波和天然波组成。天然波主要采用汶川卧龙波和汶川茂县波,人工波主要采用 5、10、15 Hz 的正弦波。根据相似关系设计,将天然波进行 10 倍压缩,同时为了对比不同压缩程度输入波的影响,增加了 3 倍压缩的天然波,天然波压缩时仅压缩周期,其余参数保持不变。图 7 为压缩 10 倍后的天然波时程曲线和频谱曲线。为探明不同幅值对斜坡动力响应的影响,为输入波设置了不同的输入幅值。表 3 列举了本试验的加载工况。



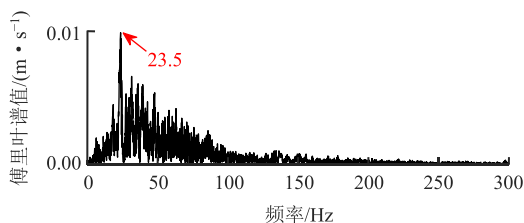
(a) 汶川茂县波时程曲线



(b) 汶川茂县波频谱曲线



(c) 汶川卧龙波时程曲线



(d) 汶川卧龙波频谱曲线

图7 压缩 10 倍后的天然波时程曲线和频谱曲线

Fig.7 Time history curves and spectrum curves of natural wave after 10 times of scaling

3 斜坡动力响应规律

3.1 基本规律

选取幅值 0.3g 和 0.4g 的茂县波作用下的结果,绘制峰值加速度 PGA 等值线图,观察斜坡不同位置的动力响应。图 8 显示的结果表明:在地震波的作用下,斜坡坡表的 PGA 呈现先增大后减小的趋势,在距坡底 1/4 高度处达到最大。坡内测点 PGA 随着高度的增加而逐渐增大,呈现出明显的“高程效应”;沿水平方向,从坡内到坡表整体呈放大趋势,表现出“趋表效应”。斜坡软弱夹层附近和坡顶位置处的峰值加速度较大。金沙江流域典型顺层滑坡的现场调查显示,下归洼滑坡是一个罕见的“溃屈型”顺

层滑坡。图 8 显示的 PGA 分布也符合溃曲破坏的破坏特征。

表 3 振动台试验地震加载工况

Table 3 Seismic loading conditions of shaking table test

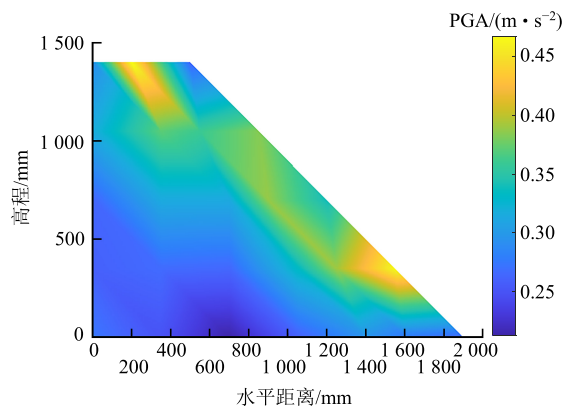
工况序号	振动台激励特征
1	白噪声, 振幅为 0.1g
2~4	正弦波激励频率为 5、10、15 Hz, X 向激励, 振幅为 0.10g
5	白噪声, 振幅为 0.1g
6~8	正弦波激励频率为 5、10、15 Hz, X 向激励, 振幅为 0.15g
9	白噪声, 振幅为 0.1g
10~12	正弦波激励频率为 5、10、15 Hz, X 向激励, 振幅为 0.2g
13	白噪声, 振幅为 0.1g
14~16	茂县波: 压缩 10 倍、3 倍, 原波, 振幅为 0.3g
17~19	卧龙波: 压缩 10 倍、3 倍, 原波, 振幅为 0.3g
20	白噪声, 振幅为 0.1g
21~23	茂县波: 压缩 10 倍、3 倍, 原波, 振幅为 0.4g
24~26	卧龙波: 压缩 10 倍、3 倍, 原波, 振幅为 0.4g
27	白噪声, 振幅为 0.1g
28~30	茂县波: 压缩 10 倍、3 倍, 原波, 振幅为 0.5g
31~33	卧龙波: 压缩 10 倍、3 倍, 原波, 振幅为 0.5g
34	白噪声, 振幅为 0.1g
35~37	茂县波: 压缩 10 倍、3 倍, 原波, 振幅为 0.6g
38~40	卧龙波: 压缩 10 倍、3 倍, 原波, 振幅为 0.6g
41	白噪声, 振幅为 0.1g
42~44	茂县波: 压缩 10 倍、3 倍, 原波, 振幅为 0.7g
45~47	卧龙波: 压缩 10 倍、3 倍, 原波, 振幅为 0.7g
48	白噪声, 振幅为 0.1g
49~51	茂县波: 压缩 10 倍、3 倍, 原波, 振幅为 0.8g
52~54	卧龙波: 压缩 10 倍、3 倍, 原波, 振幅为 0.8g
55	白噪声, 振幅为 0.1g
56~58	正弦波频率为 10 Hz, 幅值为 0.9g、1.0g 和 1.2g

3.2 自振周期变化

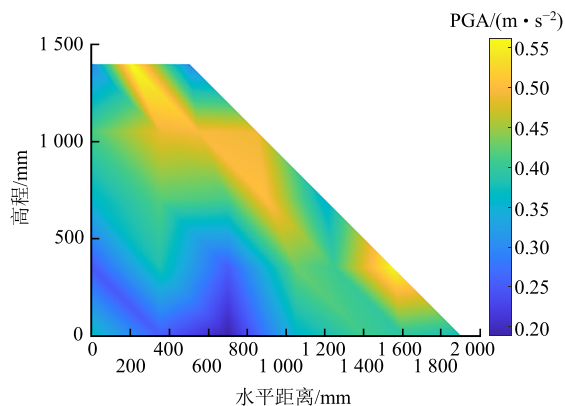
试验共进行了 9 次白噪声激励, 分别在施加不同的激励荷载之间, 用来观测加载之后的斜坡自身特性的变化。利用 3.1 节中提到的传递函数, 求得白噪声激励下斜坡的自振频率。图 9 为 9 次白噪声作用下的斜坡自振频率的变化情况。由图 9 可以得出, 斜坡的自振频率随着加载整体呈减少的趋势, 主要原因是模型内部受到扰动, 导致内部结构发生变化, 并使自振频率降低。其中工况 13 出现小幅的放大趋势, 推测是由于斜坡内部块体挤压导致块体之间逐渐密实, 刚度有所增加, 导致自振周期上升。

3.3 地震动幅值的影响

为研究在地震作用下的斜坡动力响应规律, 引用 PGA 放大系数, 即斜坡上各个测点的加速度响应峰值与振动台台面上的测点 (A0) 的加速度响应峰值的比值, 分析斜坡的动力响应, 此参数可以较为清晰地反映斜坡各个测点的动力响应变化。



(a) 0.3g 茂县波峰值加速度等值线图



(b) 0.4g 茂县波峰值加速度等值线图

图 8 峰值加速度等值线

Fig.8 PGA contours

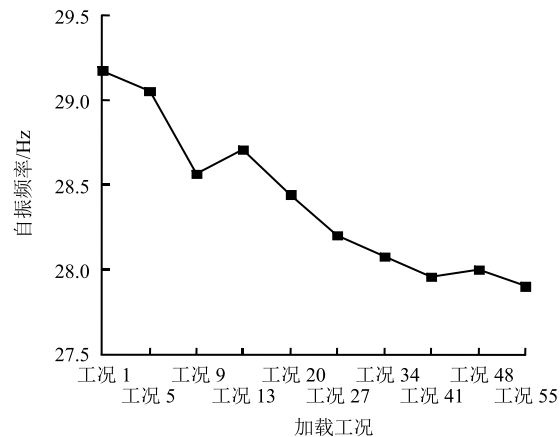
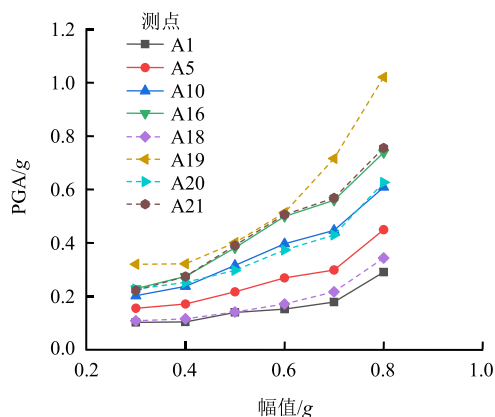


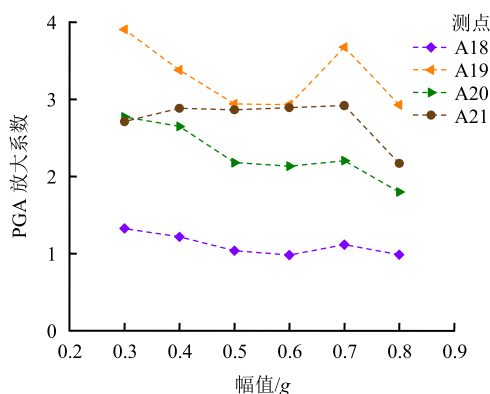
图 9 斜坡自振频率变化情况

Fig.9 Variation of natural vibration frequency of slope

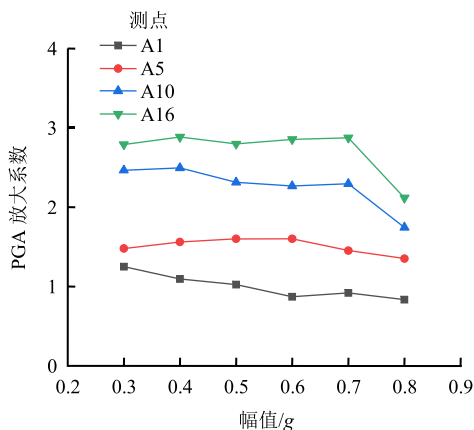
图 10 为压缩 10 倍的茂县波作用下斜坡坡表和坡内不同高度处各个测点在不同输入波幅值作用下的 PGA 与 PGA 放大系数变化情况。图 10(a)是斜坡随着输入幅值变化的 PGA 响应, 从图中可以看到, 随着输入幅值的增加, 各测点的 PGA 均呈上升趋势; 在相同的输入幅值下, 随着高度的增加, 测点的 PGA 也基本呈放大趋势, 其中 PGA 最大的测点



(a) 峰值加速度 PGA



(b) 坡表峰值加速度 PGA 放大系数



(c) 坡内峰值加速度 PGA 放大系数

图 10 斜坡坡表和坡内的 PGA 及 PGA 放大系数变化规律

Fig.10 Variations of PGA and PGA amplification coefficient on slope surface and in slope

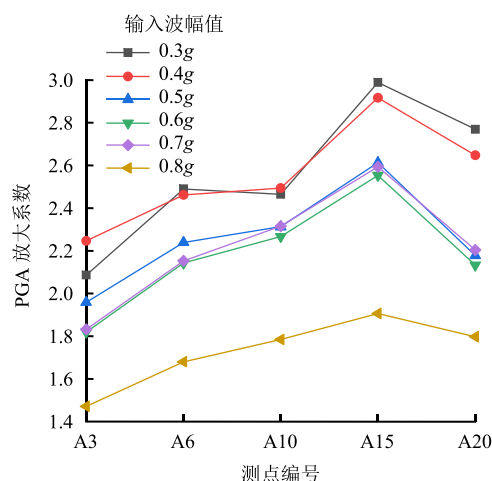
A19 位于距坡底 1/4 高度处。图 10(b)和图 10(c)分别为坡表和坡内测点 PGA 放大系数的变化情况。从图中可以看出,坡表和坡内的 PGA 放大系数变化规律有着明显的差别:坡内测点在相同输入幅值的条件下,PGA 放大系数的大小与测点的高度呈正相关,同一测点的 PGA 放大系数随着幅值的增加缓慢降低,但变化幅度相对较小,0.7g 之后部分测点降低幅度突然增大。同一输入幅值的情况下,坡

表测点 A18、A20、A21 的 PGA 放大系数小于 A19,PGA 放大系数变化情况同样表明高程和斜坡的响应的正相关性,在坡表距离坡底 1/4 高度处达到最大,是由于斜坡的破坏机制所决定的。同一测点的 PGA 放大系数随着输入地震波幅值增大,坡内 PGA 放大系数整体平稳,坡表显示逐渐减小,但是变化幅度不大,坡内和坡表测点的 PGA 放大系数在幅值 0.7g 之后都显著减小,A19 变化更为明显。

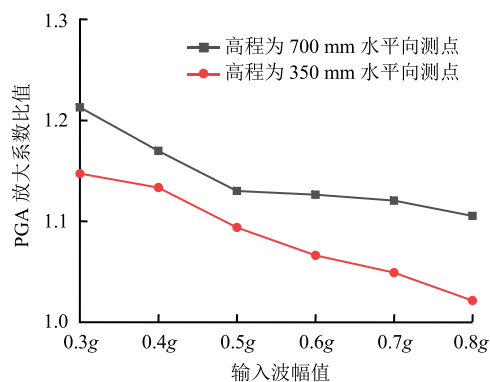
如图 10 所示,随着振动幅度的增加,各测点的 PGA 逐渐增加,但是 PGA 放大系数却逐渐减小,原因是随着输入波幅值增加,加速度响应也在增加,导致斜坡稳定性变差,坡体内部产生损伤,因此坡体传递能量的状况发生改变,对比图 9 中的自振频率的变化就会发现,随着输入波幅值的增加,自振频率逐渐降低,证明斜坡的刚度逐渐降低,同时阻尼逐渐增大,斜坡逐渐开始进入非线性塑性阶段,斜坡吸收地震波能量的能力相对增加,对输入波的放大效应也因此减弱,导致了 PGA 放大系数逐渐降低。在此过程中,由于输入波的增强导致斜坡块体之间的相对密实,从而导致刚度有所增加,使部分测点的放大系数在某个阶段有所增加,但并不影响放大系数的整体变化趋势,在 0.7g 地震波作用下,坡体结构发生较大的开裂变形,尤其是在测点 A19 处更易产生堆积,因此导致放大系数有所增加。

3.4 软弱结构面的影响

为研究软弱夹层两侧斜坡动力响应差异,在斜坡软弱夹层两侧布置了测点。本文选取了不同高程处测点在不同幅值茂县波作用下的试验结果进行分析,结果如图 11 所示。由图 11(a)可以发现,从坡内到坡表 PGA 放大系数整体呈先增大后减小的趋势,高程越低,变化趋势越平稳,在软弱夹层处的测点 A15 达到最大,明显观察到软弱夹层两侧的测点(A10 和 A15)放大系数的变化率要比坡内测点变化率大,这表明软弱结构层放大了地震波的效应;图 11(b)为不同高程处软弱夹层两侧测点 PGA 放大系数比值曲线,结果表明随着振动强度的增加,软弱夹层两侧的放大系数的变化率逐渐减小,说明软弱夹层虽然对地震作用有放大效应,但是振动强度越大,放大作用越弱,原因是随着振动幅度的增加,斜坡的刚度越来越低,软夹层和斜坡的刚度差异越来越小,因此放大作用越来越小,甚至于输入波强度到达一定程度会降低地震效应。例如,杜瑞峰等^[23]的试验结果显示,在爆破地震波作用下软层具有“减震”和“吸能”效应,振动强度达到一定程度软弱夹层会减弱地震波的响应。



(a) 高程 700 mm 处水平向测点 PGA 放大系数



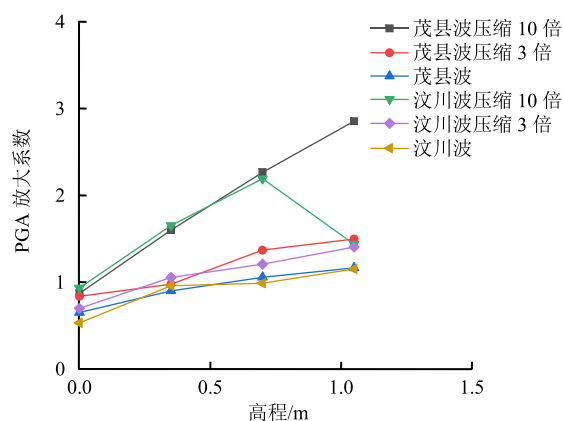
(b) 不同高程处软弱夹层两侧 PGA 放大系数比值

图 11 不同幅值下软弱夹层两侧 PGA 放大系数变化规律
Fig.11 Variations of PGA amplification coefficient on both sides of soft interlayer at different amplitudes

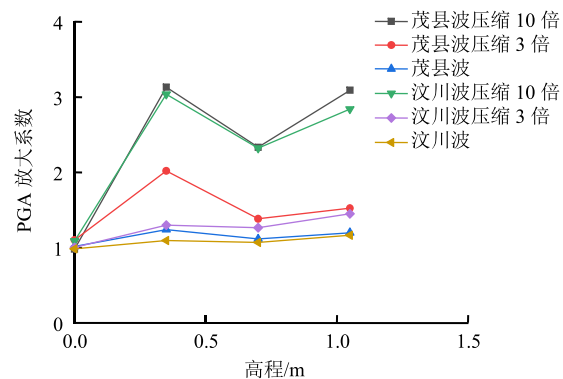
3.5 不同输入波和压缩比的影响

为研究不同输入波类型和不同压缩比对斜坡动力响应的影响,选取坡表(A18、A19、A20、A21)和坡内(A1、A5、A10、A6)两组不同高程处的测点作为研究对象,选取振动强度为 $0.6g$ 时不同压缩程度的茂县波和卧龙波的结果进行分析,结果如图12所示,无论是坡表还是坡内在压缩10倍的茂县波引起的PGA放大系数最大,汶川波原波产生的放大系数最小,在相同类型地震波作用下压缩10倍输入波产生的效应比大于压缩3倍输入波产生的效应,原波产生的效应最小,主要原因是压缩10倍的输入波的主频接近斜坡的自振频率,因此产生效应最大,压缩地震波会导致频率增加,因此压缩倍数越小产生的效应越小,坡表和坡内测点均显示此规律。两种输入波产生的效应也有所不同,茂县波产生的效应比卧龙波产生更为剧烈,根据两种输入波(压缩10倍后)的傅里叶谱可以看出两种输入波的主频都在 20 Hz 左右,茂县波的能量较大,并

且频率分布的范围更广,因此产生的效应更大,坡表的反应更加明显,坡内效应波动较小,主要是材料影响和斜坡内部结构变化导致的。



(a) 坡内测点



(b) 坡表测点

图 12 不同压缩程度地震波作用下的斜坡响应
Fig.12 Slope responses to seismic waves with different time scale factors

3.6 斜坡的加速度时频分析

Huang 等^[15]1998 年提出在 Hilbert 变换之前预先进行经验模态分解算法,结合 Hilbert 变换提出了 Hilbert-Huang 变换,简称 HHT。Huang 等^[24]提出的 HHT 方法主要由经验模态分解(empirical mode decomposition,简称 EMD)和 Hilbert 谱分析(Hilbert spectral analysis,简称 HSA)两部分组成,经验模态分解将非平稳的原始地震信号分解为被若干个不同的固有模态函数(intrinsic mode function,简称 IMF)和一个残差,并且每个分量均满足:①在信号持续时间范围内,过零点的个数和极值点的个数在任何时候都必须相等或相差不超过 1。②由局部最大值确定的上包络与由局部最小值确定的下包络之间的平均值为 0。对每一个 IMF 分量进行 Hilbert 变换得到每一个 IMF 分量的 Hilbert 谱,结合所有分量的 Hilbert 谱能得到原始地震波的 Hilbert 谱,

Hilbert 谱能较好地反映信号在时频域的能量分布和响应特征。对所有的 Hilbert 谱对时间 t 进行积分可以得到各个分量的边际谱。Hilbert 谱可以在时频域上体现 Hilbert 能量分布, 边际谱可以表现地震信号每个频率在整体信号范围内的能量分布。选取压缩 10 倍汶川茂县波作用下测点 A20 的加速度时程曲线进行 EDM 处理后得到 IMF 分量的时程曲线, IMF 分量时程曲线与残差如图 13 所示。EMD 是分解原始信号和数值计算的过程, 因此存在数值误差, Ayenu-Prah 等^[25]认为需要确定一个阈值来区分 IMF, 阈值的公式为

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

式中: μ_{TH} 为阈值; μ_i 为第 i 个 IMF 与原始信号的相关系数; n 为 IMF 的总数。测点 A20 相关系数曲线和阈值如图 14 所示。图中显示各分量的相关系数之间逐渐降低直至平稳, 最大值为 0.94, 阈值为 0.15, 只有前两阶超过阈值, 选择超过阈值的 IMF 分量进行重构, 将重构信号进行希尔伯特谱分析及边际谱分析, 其余测点均采用此方式进行处理。利用 MATLAB 软件编程来完成上述计算和图形绘制。

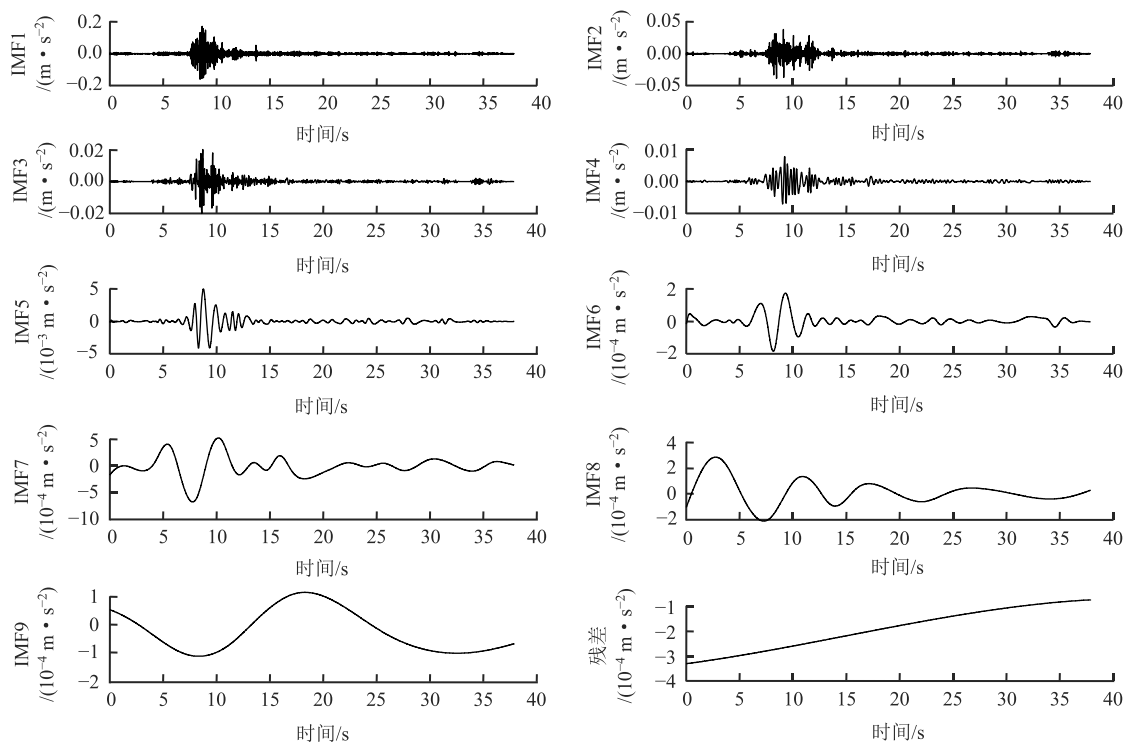


图 13 测点 A21 IMF 分量时程曲线与残差

Fig.13 IMF instantaneous frequency curves and residual errors at measuring point A21

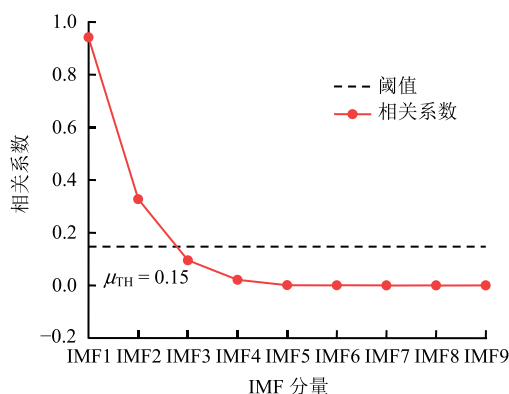


图 14 测点 A20 相关系数曲线和阈值

Fig.14 Correlation coefficient curve and threshold of measuring point A20

图 15 为选取部分测点的 Hilbert 谱结果, 在幅值为 0.3g 时压缩 10 倍茂县波作用下, 所有测点的在时频域时间轴上主要集中在 6~10 s, Hilbert 谱在频率轴上 4 个测点在 26~29 Hz 处都有明显的峰值, 分析认为峰值主要是受斜坡自身特性影响, 在 19 Hz 处有一个能量的突增, 因为接近地震波主频, 所以认为是受输入地震波的影响。除此之外, Hilbert 谱在频率轴上的分布有差异, 测点 A15 和 A21 的 Hilbert 谱形状上发生较大的变化, 测点 A4 和 A9 的在 10~40、25~27 Hz 处能量相对较大, 测点 A15 和 A21 的能量主要集中在 10~50、21~28 Hz 范围内, 位于软夹层以上的测点 A15 和 A21 能量较大的部分分布的频带变宽, 并且高频部分能量激增, 主要原

因是软弱夹层的影响,且由于输入波在传播过程中介质发生变化,波发生反射与折射,放大了输入波能量。上述现象表明,高程对地震波的传播有放大作用,软弱夹层上方的瞬时能量较软弱层下方的瞬时能量放大得更加明显,软弱夹层在地震波的传播中有放大作用,并且高频部分的能量放大更为明显。

为进一步研究斜坡在地震波作用下的动力响应,使 Hilbert 谱对时间轴进行积分,得到 Hilbert 边际谱,边际谱可以反映某一频率上持续时间范围内累积的总能量,反映斜坡的局部变形特征,为斜坡在地震作用下的损伤程度的分析提供了可靠的依据。图 16 为不同测点和不同加载情况下的边际谱,图 16(a)为坡表上的 4 个测点的边际谱,A18 形状为双峰,A19~A21 为 4 个峰,第 1 个峰在 19~21 Hz,其值接近输入波主频,可以认为主要由输入波影响,第 2 峰在 26~27 Hz,第 3、4 个峰在 32~39 Hz 范围内,这 3 个峰值产生主要是由于斜坡固有特性的影响,第 2 峰值频率接近斜坡的自振频率,因此产生的能量较大,第 3、4 个峰值也受斜坡自身特性的影响,因此产生峰值。从图 16(a)和图 16(b)来看,随着高程的增加,各个频率的累计能量逐渐增加,

在距离坡底 1/4 高度处的测点 A19 产生的能量较大,这与 3.3 节处在 A19 产生的加速度响应较大的结论相呼应,图 16(b)中发现当输入波穿过软弱夹层之后高频部分(35~41 Hz)的累计能量有明显的放大,甚至接近整个边际谱的幅值。图 16(c)和图 16(d)分别为测点 A9 和 A15 在不同幅值输入波作用下的边际谱,从图 16(c)和图 16(d)两者对比也可以看出,位于软弱夹层之上的测点 A15 能量峰值大于软弱夹层下部的测点 A9,并且 A15 的高频部分(35~41 Hz)的累积能量有比较明显的峰值,而测点 A9 则不明显,4 个测点的结果证明软弱夹层能放大高频的能量。随着输入波强度的增加,边际谱也随之发生变化,随着振动强度的增加,强度在 0.6g~0.7g 时第 1 峰值比起 0.3g~0.5g 输入波作用时的第 1 峰值能量放大明显;同时,第 2 峰值对应的频率逐渐减小,输入波强度到了 0.7g 时,第 2 峰值频率在 21 Hz 左右,逐渐接近输入波主频,高频部分内的能量明显降低,第 3、4 峰值的能量随着振动强度的增加而变化不明显,证明高频部分的能量逐渐被吸收,这是斜坡刚度降低造成的。上述现象表明,随着输入波强度的增加,斜坡固有频率的影响逐渐失

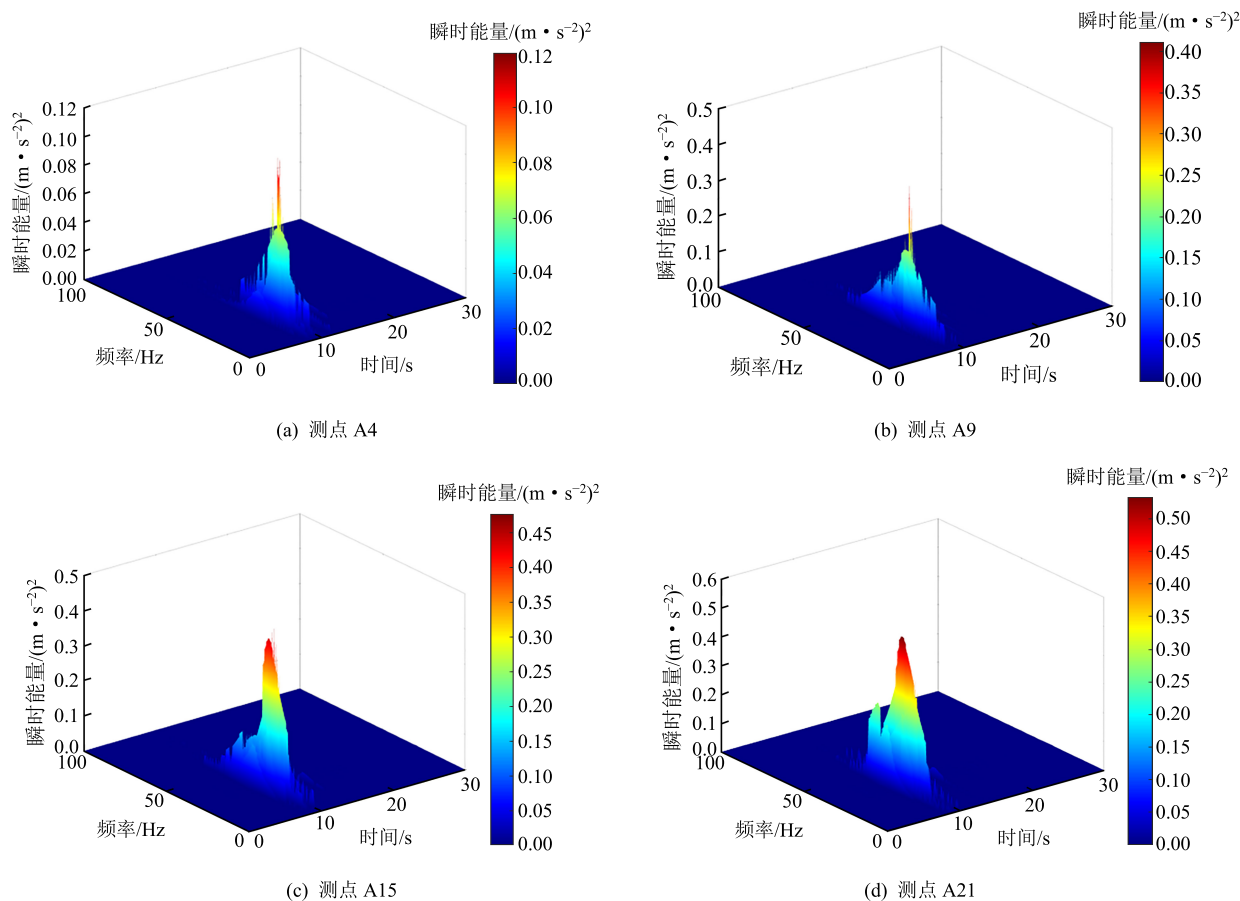


图 15 不同测点的 Hilbert 谱

Fig.15 Hilbert spectra of different measuring points

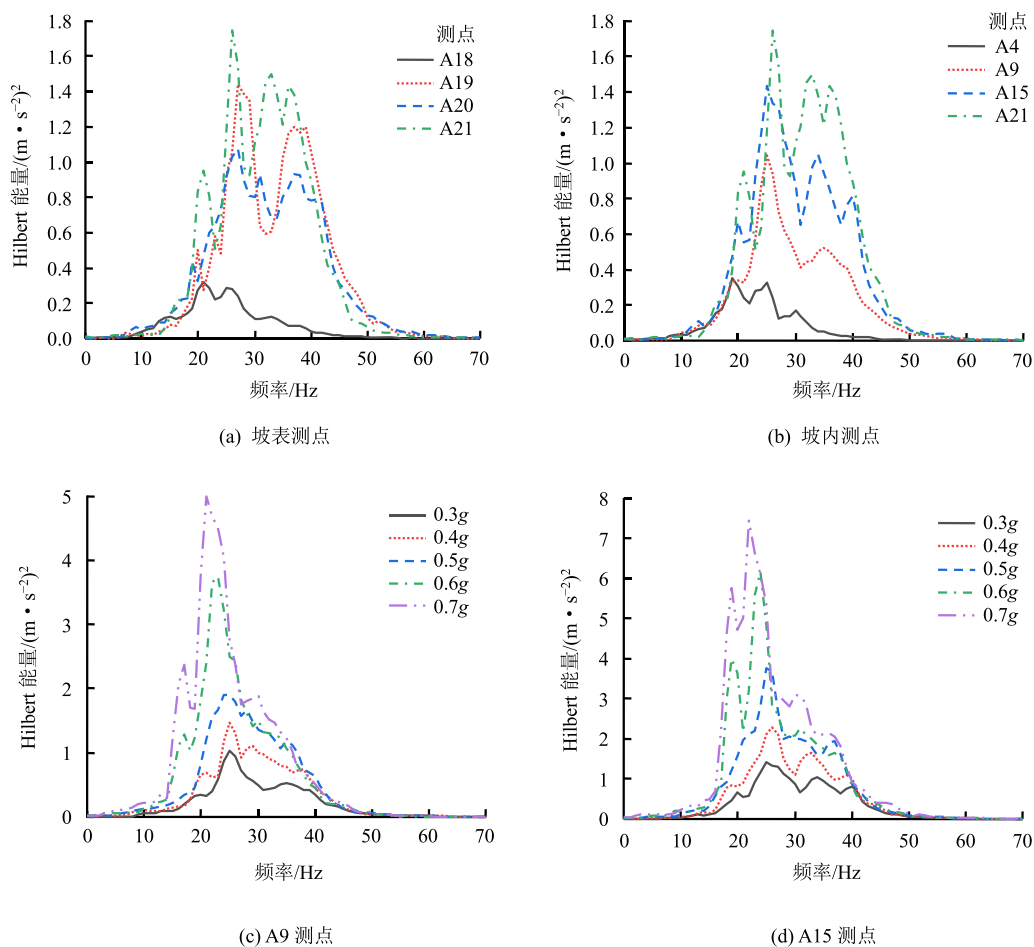


图 16 不同测点和不同加载情况下的边际谱

Fig.16 Marginal spectra under different measuring points and different loading conditions

去了主导地位，而输入波的影响逐渐控制斜坡的能量变化，说明斜坡逐渐发生损伤变形，斜坡本身的模态特性影响不再明显，当输入波的频率完全成为主导时，斜坡就会破坏。

4 斜坡破坏机制分析

本试验布置的高速摄像机可以记录边坡在受到强震作用时变形破坏的全过程。图 17 为斜坡破坏

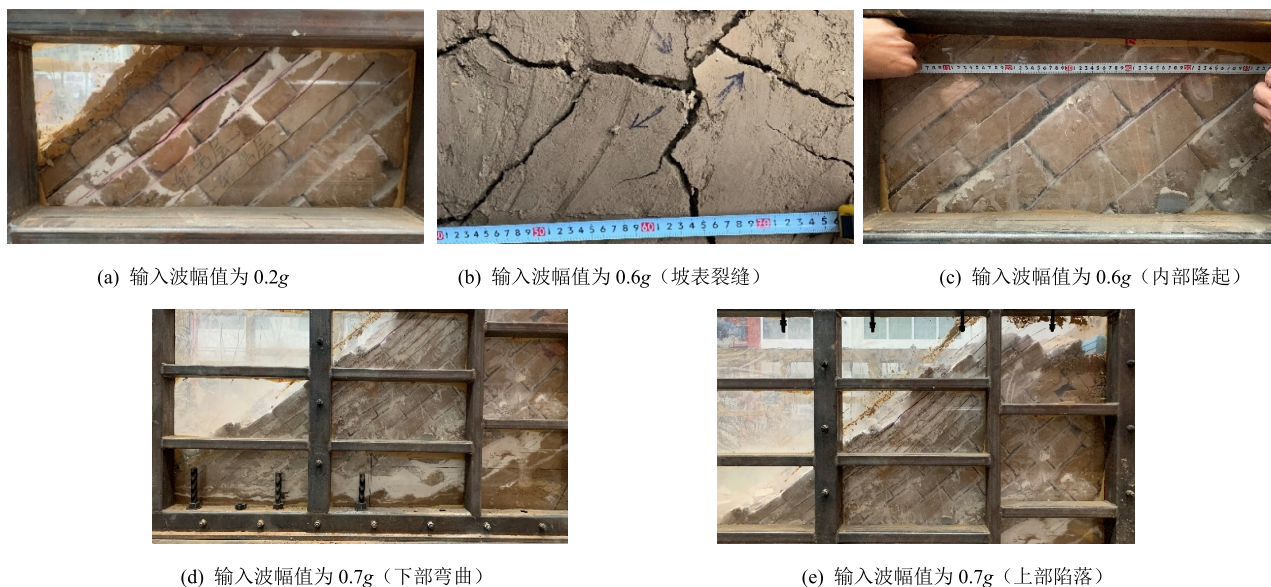


图 17 斜坡破坏现象记录照片

Fig.17 Photos of recorded slope failure

现象的记录照片。当输入波幅值为 $0.2g$ 时,模型坡内岩层总体变形不明显,变形主要出现在软硬岩性分界处、薄厚岩层分界处和坡表,薄厚岩层分界处产生轻微隆起,坡表中上部覆盖层出现平行于走向的细小裂纹,软岩层位置产生轻微下陷,如图 17(a) 所示。输入波在从 $0.3g$ 增大到 $0.6g$ 过程中,斜坡坡表开始产生大量裂缝,边坡下部薄岩层产生明显隆起,岩层和覆盖土层下沉持续增加,层间产生错动,现象如图 17(b)、17(c) 所示。当输入幅值达到 $0.7g$ 时,边坡的变形更加剧烈,坡脚处薄岩层弯曲明显,层间节理宽度增加,岩块之间缝隙间隙增大;坡腰处软岩层面有少量下陷,软岩层间轻微错动;坡底厚硬岩层产生断裂现象,坡内裂缝由坡中的薄厚岩层分界处向下发育;坡顶岩层出现明显的陷落和弯曲,边坡整体已处于欠稳定状态,如图 17(d)、17(e) 所示。

根据宏观试验现象,可大体将模型边坡的失稳变形破坏过程分为 4 个阶段:岩层轻微沉降弯曲阶段—底部岩层弯曲隆起阶段—隆起面折断碎裂阶段—整体低位剪出阶段。不同厚度岩层分界面和软硬岩性分界面为边坡滑动的控制性节理面,岩层初始折断位置由不同厚度岩层分界面向上和向下垂直层面发育,与坡脚的剪切滑移面和坡顶的拉裂面连通,形成完整贯通的滑移面。破坏现象符合“溃屈”式变形原理,与下归洼滑坡现场调查的“溃屈”现象相吻合。

5 结 论

本文通过振动台试验,研究地震作用下含软弱夹层的顺层岩质斜坡动力响应,主要得到以下结论:

(1) 斜坡在输入地震波作用下表现出了明显“高程效应”和“趋表效应”,斜坡的破坏主要产生在软弱夹层和距离坡底 $1/4$ 高度处。斜坡自振频率逐渐降低,斜坡内部结构发生损伤,导致斜坡刚度降低,当输入波强度达到 $0.7g$ 之后,斜坡逐渐失稳。

(2) 输入地震动幅值对斜坡的影响较大,随着幅值的增加,各测点的 PGA 均增大,输入波幅值相同的情况下,放大系数与高程呈正相关,其中位于坡表距离坡底 $1/4$ 高度处的放大系数最大。同一测点 PGA 放大系数随着幅值的增加而下降,主要原因是斜坡内部结构发生变化,整体刚度降低,斜坡逐渐进入非线性塑性阶段,斜坡吸收地震波能量的能力逐渐增强,对输入波的放大作用减弱。部分测点放大系数上升,是斜坡内部块体在输入波作用下趋于密实产生的短时的刚度增加导致的。

(3) 软夹层能够有效地放大地震效应,随着输入地震波强度的增加,软夹层的放大效应越来越弱,甚至可能降低地震效应。随着压缩程度的增加,输入波主频越来越接近斜坡的自振频率,斜坡产生的效应增大。茂县波地震地震能量更大,分布的频率范围更广,导致茂县波比卧龙波产生的地震效应更大。

(4) Hilbert 谱表明高程对地震波能量的传播有放大作用,软弱夹层能够放大地震波响应,尤其是高频部分。边际谱表明高程与斜坡的累积能量呈正相关,软弱夹层可以有效地放大高频部分累积能量;随着振动强度的增加,高频部分的能量逐渐被斜坡吸收,代表斜坡特性的频率部分的累积能量逐渐降低,逐渐失去主导地位,主导频率向着输入波主频靠近,斜坡随着振动强度的增加逐渐损伤破坏,斜坡固有模态特性的影响不再明显。

(5) 模型边坡的失稳变形破坏过程分为 4 个阶段:岩层轻微沉降弯曲阶段—底部岩层弯曲隆起阶段—隆起面折断碎裂阶段—整体低位剪出阶段。破坏现象符合“溃屈”式变形原理,与现场地质调查现象相吻合。

参 考 文 献

- [1] 邓起东,程绍平,马冀,等. 青藏高原地震活动特征及当前地震活动形势[J]. 地球物理学报, 2014, 57(7): 2025-2042.
DENG Qi-dong, CHENG Shao-ping, MA Ji, et al. Seismic activities and earthquake potential in the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(7): 2025-2042.
- [2] 蒋明镜,江华利,廖优斌,等. 不同形式节理的岩质边坡失稳演化离散元分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(2): 167-174.
JIANG Ming-jing, JIANG Hua-li, LIAO You-bin, et al. Distinct element method analysis of the failure evolution of rock slope with different types of joint[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(2): 167-174.
- [3] 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 slopes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(5): 865-875.

- [4] 吴多华, 刘亚群, 李海波, 等. 地震荷载作用下顺层岩体边坡动力放大效应和破坏机制的振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(10): 1945-1956.
WU Duo-hua, LIU Ya-qun, LI Hai-bo, et al. Shaking table tests on dynamic amplification and failure mechanism of layered rock slopes under seismic actions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2020, 39(10): 1945-1956.
- [5] 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 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.
- [6] 邹威, 许强, 刘汉香, 等. 强震作用下层状岩质斜坡破坏的大型振动台试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(4): 143-149.
ZOU Wei, XU Qiang, LIU Han-xiang, et al. Large-scale model test study on failure of layered rocky slope under strong ground motion[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Dynamics**, 2011, 31(4): 143-149.
- [7] 杨长卫, 张良, 董陇军, 等. 基于振动台试验的顺层及反倾岩质斜坡地震响应差异性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(2): 271-281.
YANG Chang-wei, ZHANG Liang, DONG Long-jun, et al. Research on the difference of dynamic responses between bedding and toppling rock slopes based on shaking table test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2022, 41(2): 271-281.
- [8] 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-xinag, 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.
- [9] 郭明珠, 谷坤生, 张合, 等. 强震作用下含软弱夹层顺层岩质斜坡动力响应规律试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(5): 1306-1316.
GUO Ming-zhu, GU Kun-sheng, ZHANG He, et al. Experimental study of dynamic response law of bedding rock slope with weak interlayer under strong earthquake[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(5): 1306-1316.
- [10] 许明, 余小越, 赵元平, 等. 顺倾层状碎裂结构岩质边坡地震动力响应及破坏模式分析[J]. 岩土力学, 2023, 44(2): 362-372.
XU Ming, YU Xiao-yue, ZHAO Yuan-ping, et al. Analysis of seismic dynamic response and failure mode of bedding rock slope with laminated fractured structure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(2): 362-372.
- [11] 龚文惠, 王平, 陈峰. 顺层岩质路堑边坡稳定性的敏感性因素分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 812-816.
GONG Wen-hui, WANG Ping, CHEN Feng. Analysis of sensitivity factors to stability of bedding rock cutting slope[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(4): 812-816.
- [12] 周飞, 许强, 刘汉香, 等. 地震作用下含水平软弱夹层斜坡动力响应特性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(1): 133-139.
ZHOU Fei, XU Qiang, LIU Han-xiang, et al. An experimental study of dynamic response characteristics of slope with horizontal weak interlayer under earthquake[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(1): 133-139.
- [13] 张社荣, 谭尧升, 王超, 等. 多层软弱夹层边坡岩体破坏机制与稳定性研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1695-1702.
ZHANG She-rong, TAN Yao-sheng, WANG Chao, et al. Research on deformation failure mechanism and stability of slope rock mass containing multi-weak interlayers[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(6): 1695-1702.
- [14] 陈训龙, 龚文惠, 邱金伟, 等. 基于振型叠加法的顺层边坡非平稳随机地震响应及动力可靠度分析[J]. 土木工程学报, 2022, 55(1): 109-116.
CHEN Xun-long, GONG Wen-hui, QIU Jin-wei, et al. Non-stationary random seismic response and dynamic reliability analysis of bedding rock slopes based on mode superposition method[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2022, 55(1): 109-116.
- [15] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. **Proceedings Mathematical Physical & Engineering**, 1998, 454: 903-995.
- [16] SONG D, LIU X, HUANG J, et al. Energy-based analysis of seismic failure mechanism of a rock slope with discontinuities using Hilbert-Huang transform and marginal spectrum in the time-frequency domain[J]. **Landslides**, 2021, 18(1): 105-123.