

地震作用下含双层韧性剪切带高陡岩质边坡动力响应研究

刘文静, 邓辉, 周昕

(成都理工大学 环境与土木工程学院, 四川 成都 610059)

摘要: 以澜沧江上游班达水电站坝址区右岸边坡为研究对象, 开展了含双层韧性剪切带的高陡岩质边坡振动台模型试验。通过引入无量纲边坡峰值加速度放大系数, 输入不同类型、激振方向、频率和振幅的地震波, 研究地震作用下含韧性剪切带高陡岩质边坡动力响应规律。试验结果表明: ①随着频率、幅值的增加, 边坡模型动力响应增强, 频率对边坡的动力响应影响程度大于幅值。②边坡模型动力响应具有明显的坡内高程放大效应和坡面的非线性趋表效应。③加载水平向地震波时, 韧性剪切带具有吸能效应, 韧性剪切带越厚吸能效应越明显。④加载竖直向地震波时, 较厚的韧性剪切带对地震波仍具有吸能效应, 较薄且靠近坡表的韧性剪切带对地震波表现出放大效应。

关键词: 高陡岩质边坡; 双层韧性剪切带; 振动台模型试验; 加速度放大系数; 地震动力响应规律

中图分类号: TU 451

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2025) 11-3534-15

Dynamic response of high steep rock slope with a double-layer ductile shear zone under earthquake action

LIU Wen-jing, DENG Hui, ZHOU Xin

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: This study investigated the dynamic response of a high steep rock slope with a double-layer ductile shear zone using the right bank slope of the Banda Hydropower Station dam site area in the upper reaches of the Lancang River as the research subject. Shaking table model tests were conducted to simulate seismic behavior by incorporating the dimensionless peak acceleration amplification factor for the slope and applying seismic waves of varying types, excitation directions, frequencies, and amplitudes. Experimental results showed that: (1) Increased frequency and amplitude enhanced the dynamic response, with frequency exerting greater influence than amplitude. (2) The slope model exhibited evident elevation amplification within the slope and nonlinear near-surface amplification on the slope surface. (3) Under horizontal seismic loading, thicker ductile shear zones demonstrated pronounced energy absorption and dissipation effects. (4) Under vertical seismic loading, thicker zones continued to absorb energy, while thinner near-surface zones amplified seismic wave amplitudes.

Keywords: high steep rock slope; double-layer ductile shear zone; shaking table model test; acceleration amplification factor; seismic dynamic response law

1 引言

自新近纪以来, 在印度洋板块不断向北推移下, 青藏高原持续隆起, 形成了大量的自然高陡边坡。在强震作用下, 这些高陡边坡稳定性降低, 极易发生失稳, 对区域内的人类活动、工程建设构成严重的危害, 影响区域的发展和人民的生命财产安

全^[1-2]。拟建的 BDa 水电站地处藏东南地区, 该区域岩体卸荷强烈, 构造结构面、断层、挤压破碎带等不良地质体发育。受强烈构造活动作用影响, 坝址区右岸坝肩边坡内发育两条力学性质较周围岩体弱的韧性剪切带, 延伸长度超过 10 km, 宽度在 50~130 m 左右。带内受风化卸荷作用影响, 岩体劣化明显, 与周围英安岩层组成了“软硬互层”的构造。

韧性剪切带作为斜坡岩体中强度相对较低的结构面，由于物理力学性质较差，往往成为岩体中的薄弱部分，对斜坡的失稳破坏起着控制性作用^[3-4]。含韧性剪切带边坡的动力响应问题作为斜坡岩体动力稳定性的基础，是一个值得研究的问题。

振动台模型试验是一种直接揭示研究对象在地震作用下响应的研究方法之一^[5-9]，能比较真实地模拟地震对岩体动力特性作用，直观地反映边坡地动力变形特征及破坏过程^[10-13]。目前，国内外学者进行了许多含不同影响因素例如波形、幅值、频率、加载方向等，不同模型例如软硬互层边坡模型、顺层边坡模型、含软弱夹层边坡模型等的振动台试验^[14-21]，并在振动台试验相似材料方面进行大量配比研究，得到了一定的结论和成果^[22-27]。Yang 等^[28]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。Yan 等^[29]研究了地震作用下含软弱层顺倾岩体边坡和上硬下软坡面风化岩体边坡锚固界面上的剪切作用问题。董金玉等^[30-31]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。刘汉香等^[32-34]开展了大量不同岩性及结构的大比例尺边坡振动台试验。Fan 等^[35]研究了顺向坡和反向坡的地震动力反应。但关于含韧性剪切带边坡的振动台试验研究并不多见，尤其是含双层韧性剪切带的动力响应研究国内未有报道。

本次试验以 BDa 水电站上坝址为原型，设计完成了含双层韧性剪切带高陡岩质边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，分析地震强度、地震波频率、地震波类型和韧性剪切带厚度对边坡动力响应的影响。

2 试验方案

2.1 试验原型概况

拟建的澜沧江 BDa 水电站地处青藏高原东南部，位于南北大陆之阿尔卑斯—喜马拉雅巨型山系的东段，是著名特提斯构造域的重要组成部分。研究区为水电站的上坝址区，地层岩性单一，主要为英安岩，地质构造以高程沿河向发育的韧性剪切带、小规模的脆性破裂和 III~V 级结构面为主。研究区坝址右岸地形陡峭，自然边坡总体坡向为 N46° W/SW ∠51°。图 1 为研究区韧性剪切带空间展布图。图中，SL2、SL4、SL6、SL8、SL10 为碎裂松散岩体编号。边坡内发育两条陡倾坡内的韧性剪切带，长度为数十公里。①-1 韧性剪切带：发育于 LCJ 右岸，总体产状为 N60° W/SW ∠75° 左右，宽为 30~60 m；①-2 韧性剪切带：总体走向平行①-1 韧性剪切带并发育于①-1 韧性剪切带 SW 侧，产状为 N65° W/SW ∠75°，宽为 40~100 m。其内糜棱化、

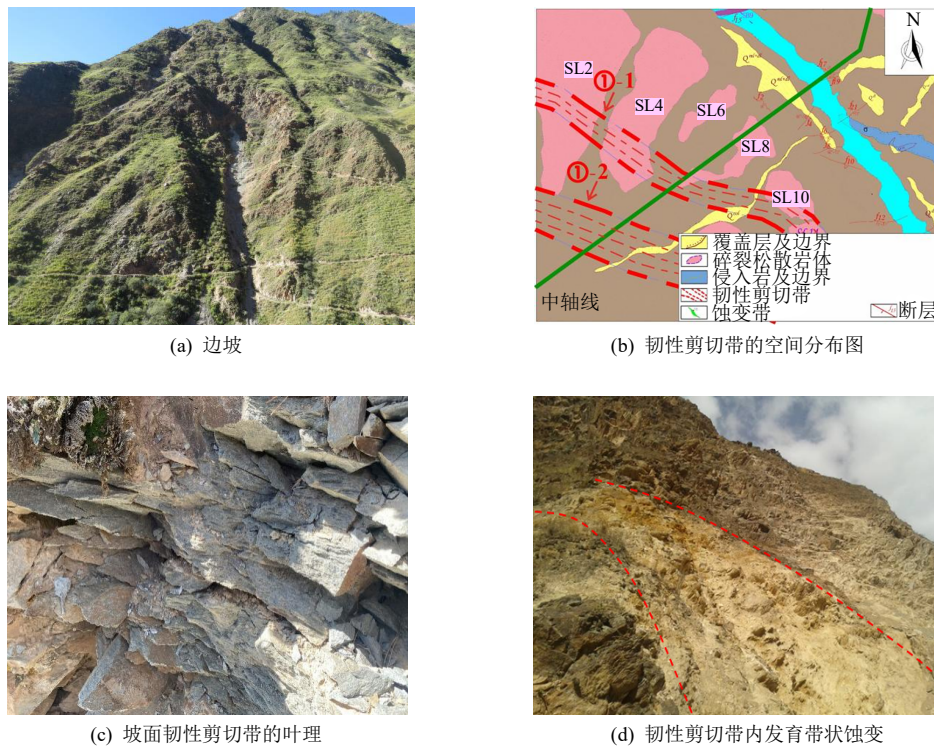


图 1 斜坡和韧性剪切带
Fig.1 Slope and ductile shear zone

片理化严重,局部存在蚀变现象。韧性剪切带由糜棱化英安岩组成,呈条带状分布,力学性质较弱,与周围岩性较好的英安岩形成软硬相间的坡体结构,导致大量张拉裂隙产生,进一步加强坡体卸荷程度,对边坡的稳定性影响巨大。因此,可认为韧性剪切带是边坡在地震作用下变形破坏的主要控制要素,在构建振动台边坡模型时不可忽略。本次振动台试验选择研究区坝轴线剖面进行物理模型的构建。

2.2 试验设备

试验设备采用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三向六自由度大型振动台系统(见图2)。台面尺寸为4 m×6 m,最大负荷为40 t,满载情况下台面的水平向加速度最大可达1.5g,竖向加速度可达1.0g,水平向最大位移可达300 mm,竖向最大位移可达150 mm。振动台工作频率范围为0.1~60.0 Hz,可精确实现不同频率、不同幅值、不同持时的正弦波、三角波、方波和实际地震波的输入和模拟。

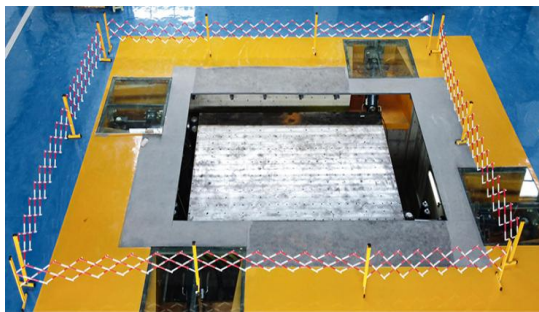


图2 大型振动台
Fig.2 Large shaking table

2.3 相似关系

相似关系设计对于振动台试验至关重要^[36],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。本次物理试验根据 Buckingham π 定理和量纲分析法^[37-39],选取密度、几何尺寸、加速度为控制量,推导相似物理量和相似常数。其相似关系具体参数见表1。

表1 振动台试验相似系数

Table 1 Similarity coefficient of the shaking table test

物理量	相似系数关系	相似比
密度 ρ	C_ρ	1
弹性模量 E	$C_E = C_\rho C_l C_a$	500
泊松比 μ	$C_\mu = 1$	1
黏聚力 c	$C_c = C_\rho C_l C_a$	500
内摩擦角 φ	$C_\varphi = 1$	1
应力 σ	$C_\sigma = C_\rho C_l C_a$	500
应变 ε	$C_\varepsilon = 1$	1
长度 l	C_l	500*
位移 u	$C_u = C_l$	500
时间 t	$C_t = C_l^{0.5} C_a^{-0.5}$	22.36
频率 f	$C_f = C_l^{-0.5} C_a^{0.5}$	0.04
速度 v	$C_v = C_l^{0.5} C_a^{0.5}$	22.36
加速度 a	$C_a = 1$	1*
重力加速度 g	$C_g = C_a$	1
阻尼比 ξ	$C_\xi = 1$	1

注: *表示控制量。

根据风化卸荷程度、韧性剪切带界限为依据,对试样岩样命名。由于研究区边坡岩性单一,除韧性剪切带以外只存在英安岩一种岩性,故强卸荷对于岩石力学特性有很大的影响。因此,本次试验主要考虑微新英安岩、强卸荷英安岩、微新韧性剪切带、强卸荷韧性剪切带4种材料的配比。原岩石和模型相似材料力学参数取值如表2所示。

表2 原岩和相似材料参数取值

Table 2 Parameter values of the original rocks and similar materials

材料种类	地层岩性	密度 /(g·cm ⁻³)	抗压强度 /MPa	弹性模量 E /MPa	内摩擦角 /(°)	黏聚力 c /kPa	泊松比
微新英安岩	原岩	2.68	90.900	31 000	50.2	1 300.0	0.20
	相似材料	2.68	0.182	62	50.2	2.6	0.20
强卸荷英安岩	原岩	2.63	66.600	9 000	35.0	500.0	0.29
	相似材料	2.63	0.133	18	35.0	1.0	0.29
微新韧性剪切带	原岩	2.67	76.200	27 000	48.0	1 000.0	0.21
	相似材料	2.67	0.152	54	48.0	2.0	0.21
强卸荷韧性剪切带	原岩	2.61	40.000	7 000	31.0	400.0	0.31
	相似材料	2.61	0.080	14	31.0	0.8	0.31

由于西南地区高陡岩质边坡研究范围较大，导致物理试验相似比较大，这就要求相似材料满足低弹模、高重度的特点^[40]。故本次试验选取张强勇^[41]、王汉鹏^[42]等开发的材料，铁矿粉、重晶石粉、石英砂为骨料，松香、酒精为胶结剂，石膏粉为调节材料。根据相似材料的力学试验结果获得相似材料的质量配比（见表 3）。为保证参数的准确性，通过控制密度拌制相似材料^[43]。

表 3 相似材料配比
Table 3 Ratio of similar materials

材料种类	铁矿粉	重晶石粉	石英砂	松香	酒精	石膏
微新英安岩	40.65	40.65	9.03	1.67	5	3.0
微新韧性剪切带	32.26	48.39	8.96	0.88	5	4.5
强卸荷英安岩	41.15	41.15	9.14	0.56	5	3.0
强卸荷韧性剪切带	18.89	44.07	26.98	0.56	5	4.5

2.4 监测点布置

本次试验重点在于研究地震波传导穿过不同力学性质的岩层后，该类边坡的动力响应规律和破坏机制，故试验中在斜坡坡面、韧性剪切带与英安岩交接面和坡内分别布置了 22 个加速度传感器。为了反映输入地震波原始的加速度响应，将 TM-A1 和 TM-A2 布置在模型箱外的振动台上（见图 3）。在安置传感器时对其进行防水和抗压预处理，并使其水平放置。将加速度监测点（A1-A7-A12-A16-A19-A20），命名为坡表监测线，记作 PB。将加速度监测点（A1-A2-A3-A4-A5-A6、A7-A8-A9-A10-A11、A12-A13-A14-A15、A16-A17-A18）由低程向高程分别命名为 1 号水平监测线、2 号水平监测线、3 号水平监测线、4 号水平监测线，分别记作 H1、H2、H3、H4。沿韧性剪切带与英安岩交接面的 4 条检测线上的加速度监测点（A6-A11-A15-A18-

A20、A5-A10-A14-A17-A19、A4-A9-A13-A16、A3-A8-A12），由内到外分别命名为 1 号交界面检测线、2 号交界面监测线、3 号交界面监测线、4 号交界面检测线，分别记作 J1、J2、J3、J4。

2.5 模型制作

试验所用模型箱的尺寸为 2.40 m×0.70 m×1.05 m。在尽量保证边坡坡表地形特征的前提下对坡表进行适当概化处理（见图 3）。本次边坡模型采用现浇方式，构建模型为从下到上、逐级浇筑，确保材料紧密连实。由于该边坡存在向坡内陡倾的韧性剪切带，因此本次浇筑选择从外向内浇筑，外侧使用定制木板进行边界支护，用重物抵住，形成边界。为避免模型底部的相对位移，在模型箱底层铺一层 20 目（过 0.85 mm 筛）粗颗粒石英砂，增加底部摩擦力。为了减小侧壁间的摩擦及地震波在边界反射造成的影响，在模型箱长边两侧用玻璃胶黏结了橡胶板^[44-45]。为了方便区分韧性剪切带，在制作韧性剪切带相似材料时加入蓝色食用色素。模型成品见图 4。



图 4 模型成品

Fig.4 Finished model

2.6 加载工况

本次试验的输入波采用研究区拟合地震动数据和正弦波两类。地震波水平加载方向为顺坡向加载，即从坡体内部向坡表方向加载；竖直向加载由模型箱底部竖直向上加载（见图 3）。

2.6.1 输入波的选取

研究区工程场地的基岩水平地震动峰值加速度为 0.22g，竖直向地震输入加速度峰值取水平向加速度峰值的 2/3。由于高陡岩质边坡物理试验的相似比较大，原地震动数据按相似比缩小后无法加载，因此本次试验忽略了时间上的相似比。加载 3 组（I~III）地震动时程曲线如图 5~7 所示。

2.6.2 正弦波

该类边坡存在双层韧性剪切带，与周围岩性较好的英安岩组成了“硬-软-硬”多组岩层互层的特

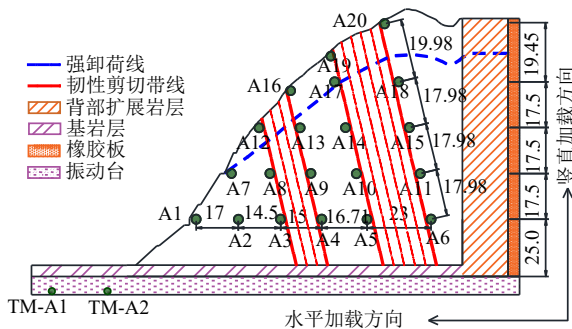


图 3 边坡概化模型及传感器布置图

Fig.3 Slope model and sensor layout

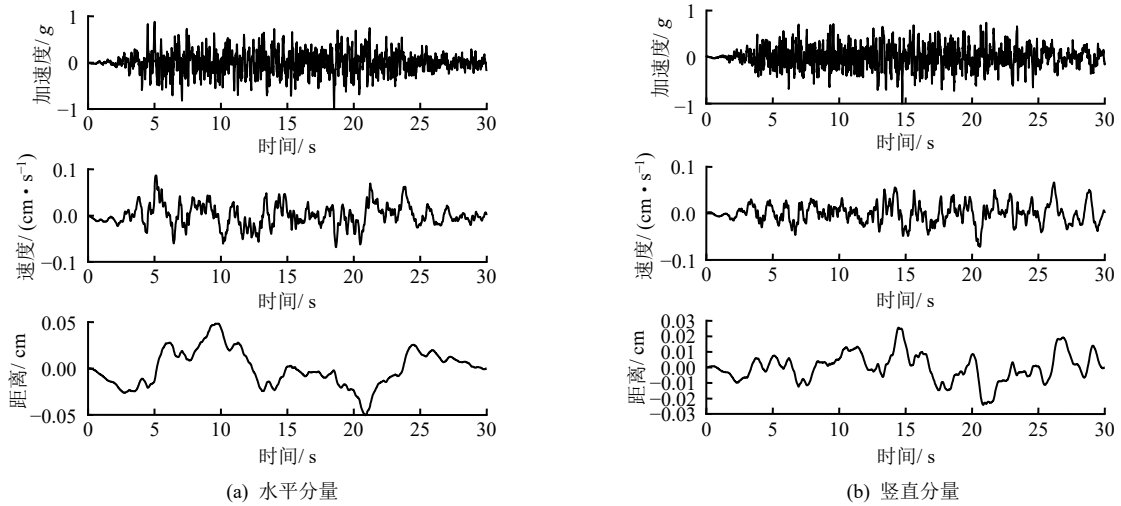


图5 第I组研究区拟合地震动数据

Fig.5 Group I ground-motion data fitting for the study area

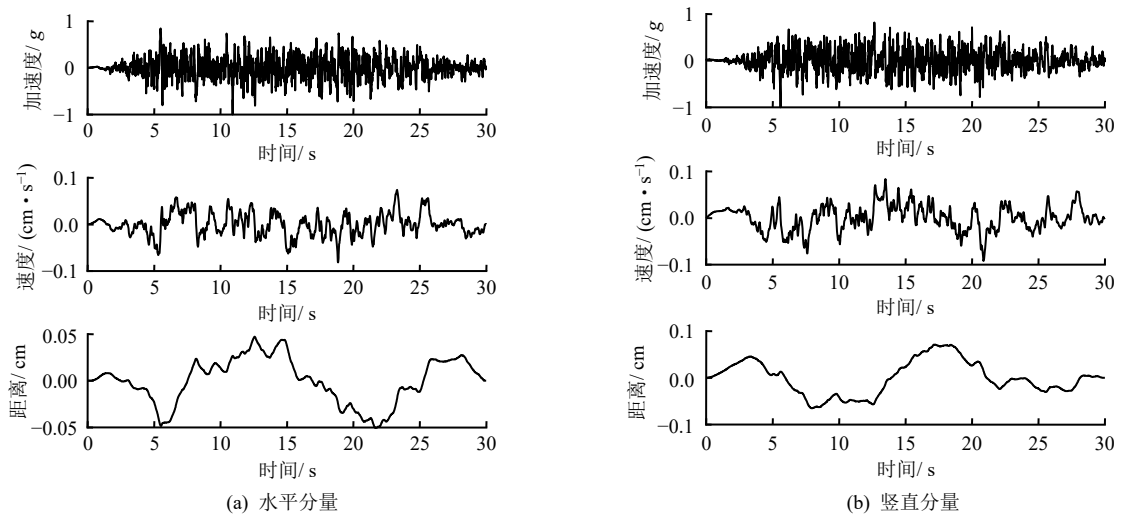


图6 第II组研究区拟合地震动数据

Fig.6 Group II ground-motion data fitting for the study area

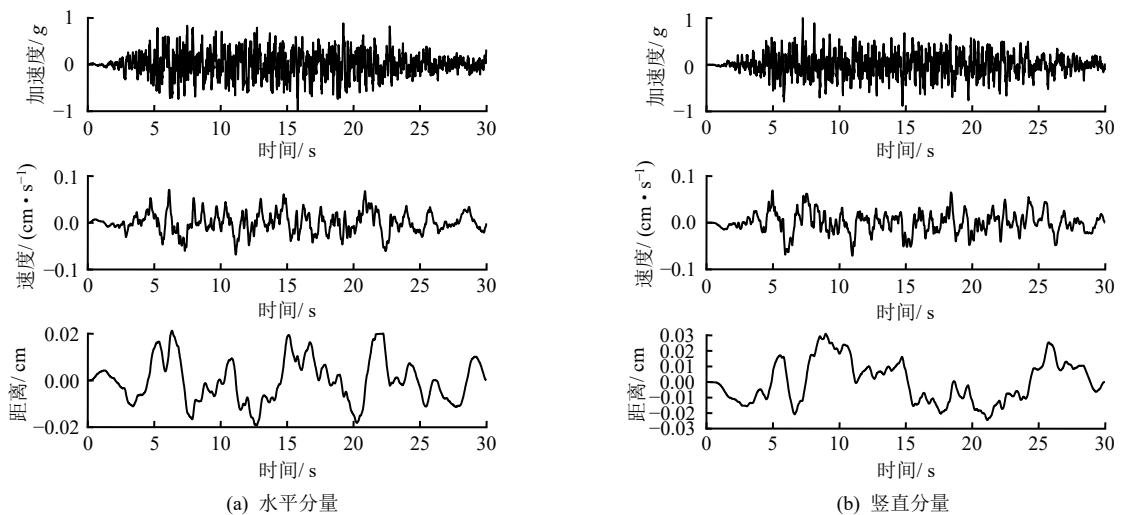


图7 第III组研究区拟合地震动数据

Fig.7 Group III ground-motion data fitting for the study area

殊地质构造。因此在人工拟合地震动加载完成后，由低频、低振幅向高频、高振幅的顺序加载正弦波直至模型完全破坏。本文主要加载 X 、 Z 向（激振方向）、不同频率（5、15、25 Hz）、不同幅值（0.1g, 0.2g, 0.3g, 0.4g, 0.5g, 0.6g, 0.8g, 1.0g, 1.2g, 1.4g）的正弦波，探索该类边坡动力响应一般性规律。

2.6.3 加载方案

试验开始之前和每轮幅值加载前后都需要使用白噪声进行扫描，白噪声幅值为 0.05g，加载持时为 120 s。此举可以用来测定模型结构的动力特征。一般情况下，人工合成波的能量远小于正弦波的能量，因此，本次试验将先激振人工合成波，再激振正弦波^[46]。在正弦加载至 0.8g 幅值后，设计边坡模型的破坏工况。输入波加载方案如表 4 所示。

表 4 加载工况
Table 4 Loading conditions

地震波	激振	频率	幅值	持时
	方向	/ Hz	/ g	/ s
研究区拟合地震动数据 I-H/I-V	X/Z	—	0.15/0.22	15
研究区拟合地震动数据 II-H/II-V	X/Z	—	0.15/0.22	15
研究区拟合地震动数据 III-H/III-V	X/Z	—	0.15/0.22	15
正弦波	Z/X	5/15/25	0.1	15
	Z/X	5/15/25	0.2	15
	Z/X	5/15/25	0.3	15
	Z/X	5/15/25	0.4	15
	Z/X	5/15/25	0.5	15
	Z/X	5/15/25	0.6	15
	X	5/15/25	0.8	15
	X	5/15/25	1.0	15
	X	5	1.2	15
	X	5	1.4	15

3 地震波特征对加速度放大系数的影响

根据前人大量的研究表明，模型与地震波激振方向相同方向上的动力响应明显高于其垂直方向上的动力响应。因此，在本试验中，当激振方向为 X 向时，只分析水平向加速度响应值；当激振方向为 Z 向时，只分析垂直向加速度响应值。本文将引入无量纲加速度放大系数（水平分量和垂直分量分别记作 R_{PHA} 和 R_{PVA} ），其定义为：边坡模型内任意一点的动力响应加速度峰值与振动台台面上动力响应加速度峰值的比值。考虑到韧性剪切带的存在会影响模型中各监测点的加速度峰值，为研究振幅、频率对边坡动力响应的影响，选择未受其影响的 J1 监测线上各点进行分析。

3.1 激振强度的影响

图 8 是 J1 监测线上各监测点在不同频率、0.1~0.6g 幅值时 R_{PHA} 和 R_{PVA} 的变化趋势。

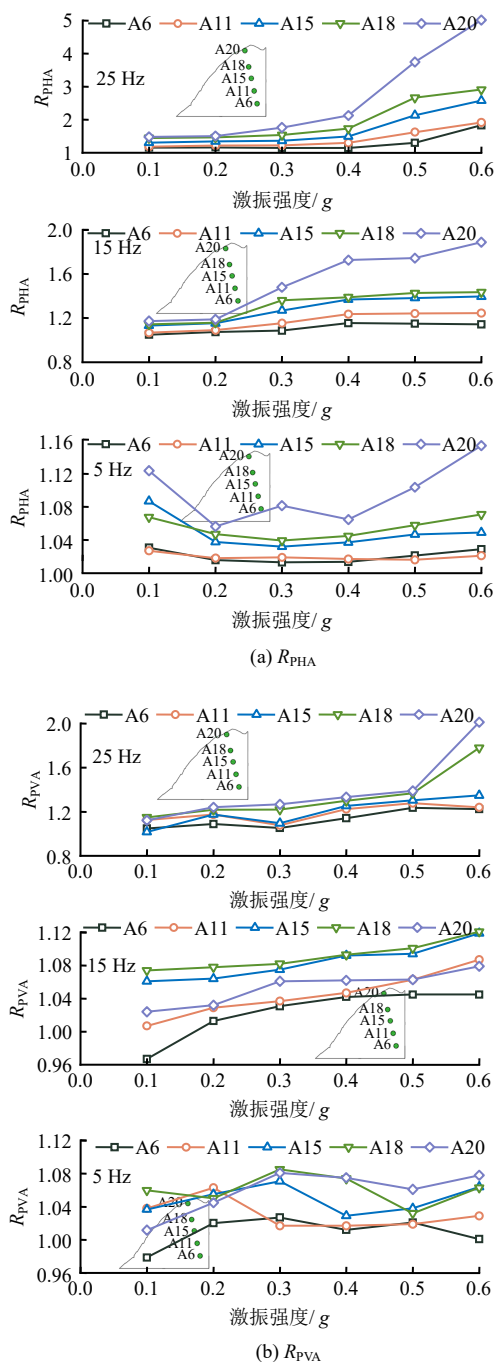


图 8 不同激振幅值加速度放大系数变化特征
Fig.8 Variation characteristics of the acceleration amplification coefficient under different excitation amplitudes

总体上看，水平向动力响应比竖直向动力响应更加明显和强烈。在低频率（5 Hz）的加载工况下，水平向和竖直向的动力响应随振幅的增加所产生的变化不大，边坡模型的动力响应对加载幅值的变化

不敏感, R_{PHA} 为非线性增大, R_{PVA} 整体表现为基本不变化或略微减小。而在高频率 (15、25 Hz) 的加载工况下, 水平向和竖直向的动力响应随振幅的增加所产生的变化较大, 频率越高, 边坡模型动力响应随幅值的增加而发生明显的增强。观察到 A20 号检测点在 0.5g、0.6g 的振幅激励下, R_{PHA} 快速增大, 根据监测点布置图可知该点为模型最高点, 且位于坡表, 表现出了明显的放大效应。同时发现边坡模型中上部监测点的加速度放大系数普遍比中下部的加速度放大系数要大, 频率越高, 该种差异越大, 这也证明了边坡模型动力响应特征存在高程放大效应。

特别地, 在 5 Hz 频率、0.1g 幅值和 0.2g 幅值加载工况下, 边坡模型中低程监测点 R_{PHA} 数值大于 0.3g 幅值及以后不同幅值加载工况下的各个监测点的 R_{PHA} 数值。这是由于在幅值较低的正弦波激励下, 地震波以较低的衰减率传播, 而边坡模型底层的物理和力学特性较为均匀, 波在传播路径中的能量损失较小, 从而增加了底层的加速度放大系数。当振动频率、幅值增高后, 边坡模型趋于一体化, 动力响应特征趋于规律化。

3.2 频率的影响

图 9 是 J1 监测线上各监测点在不同幅值、5、15、25 Hz 时 R_{PHA} 和 R_{PVA} 的变化趋势。

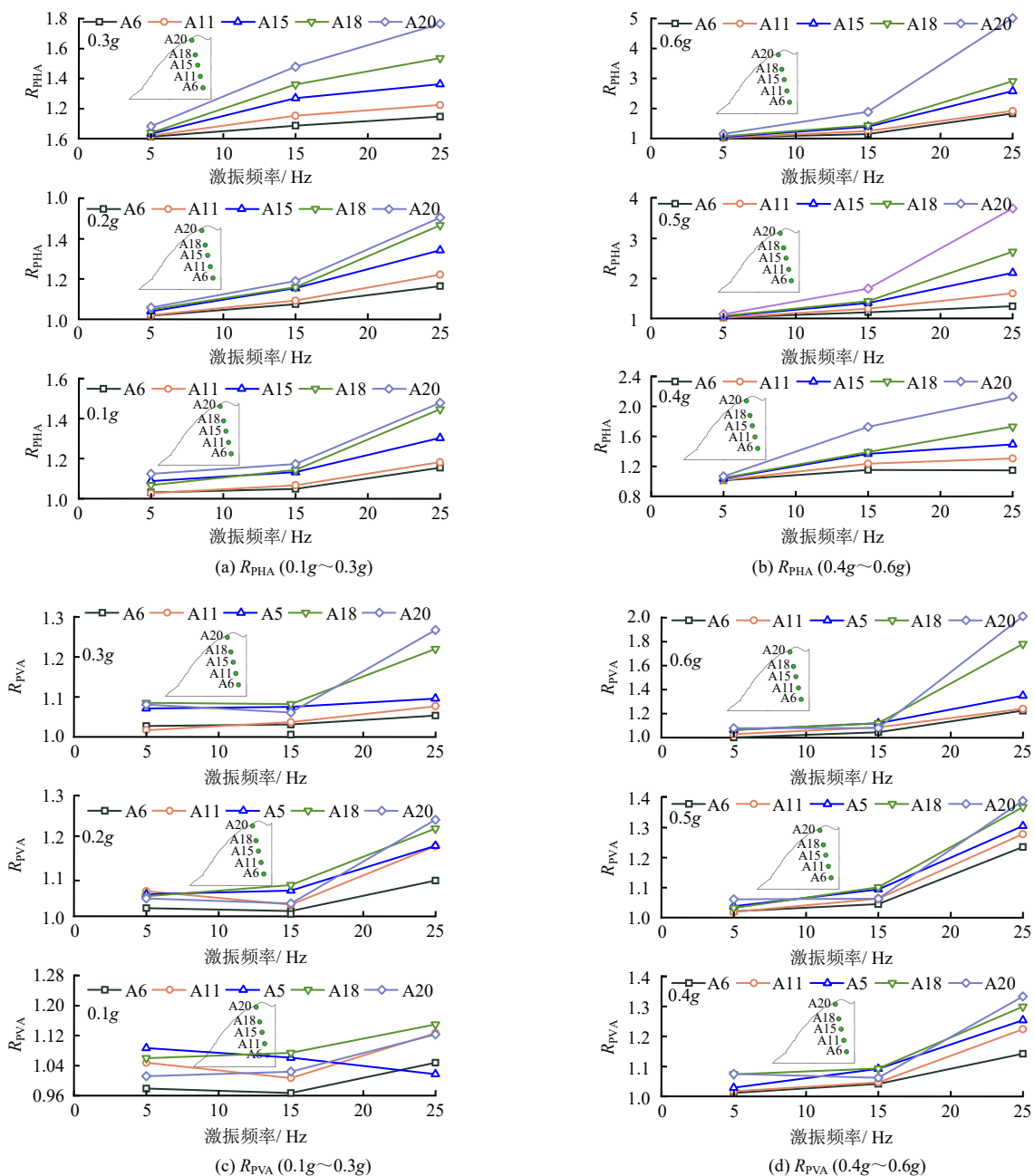


图 9 不同激励频率下加速度放大系数的变化特征

Fig.9 Variation characteristics of the acceleration amplification coefficient at different excitation frequencies

从图中可以发现，在正弦波作用下，随着加载频率从 5~15~25 Hz 升高，边坡模型各个监测点的 R_{PHA} 和 R_{PVA} 发生非线性增加，在振幅相同的情况下，随着频率的增加，各点的加速度放大系数增大，并且频率越高，加速度放大系数增长速率越高。在 25 Hz 时同一幅值各监测点的 R_{PHA} 和 R_{PVA} 达到最大值。

在加载水平向正弦波时，A20、A18 的动力响应始终最大，主要是因为它们位于模型边坡最高点，高程放大效应明显。加载高频高幅值水平向正弦波时，A20 的 R_{PHA} 可以达到其他检测点 R_{PHA} 的近 2 倍；而加载 Z 向正弦波时同样也是 A20 的动力响应一般最大，同样表现为高程放大效应，加载高频率高幅值垂直向正弦波时 A20 监测点 R_{PVA} 数值较其他监测点区别不明显。

除了最高坡表点 A20 的监测数据，同一频率不

同幅值加载工况下，各监测点的 R_{PHA} 差异并不大。以动力响应特征最强的 A20 监测点为例，在 5 Hz 频率下，从 0.1g 幅值至 0.6g 幅值， R_{PHA} 变幅保持在 0.03~0.18 之间。而频率的增加使得在同一幅值加载工况下各监测点 R_{PHA} 发生明显变化，同样以 A20 为例，在 0.3g 幅值下，从 5~25 Hz， R_{PHA} 变幅最大达到 0.411。结合上文对振幅的影响分析，我们可知频率对该边坡模型的影响程度大于幅值的影响。

4 模型边坡加速度响应特征

在一般情况下，正弦波比天然波或人工合成波对边坡模型造成的动力响应效果更强。故本次试验先激人工合成波，再激正弦波。

4.1 拟合地震动力响应分析

图 10~12 为加载 3 组人工拟合地震动作用下模型边坡的加速度放大系数变化特征图。

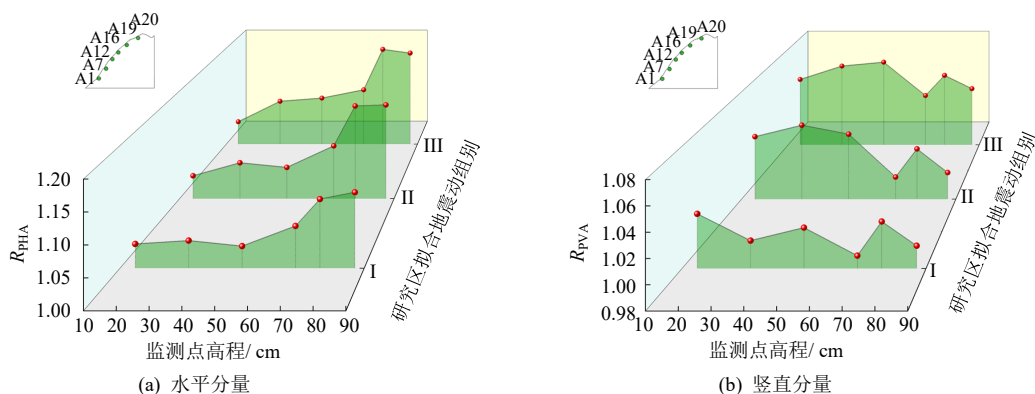


图 10 坡表加速度放大系数变化特征

Fig.10 Variation characteristics of acceleration amplification factor on slope surfaces

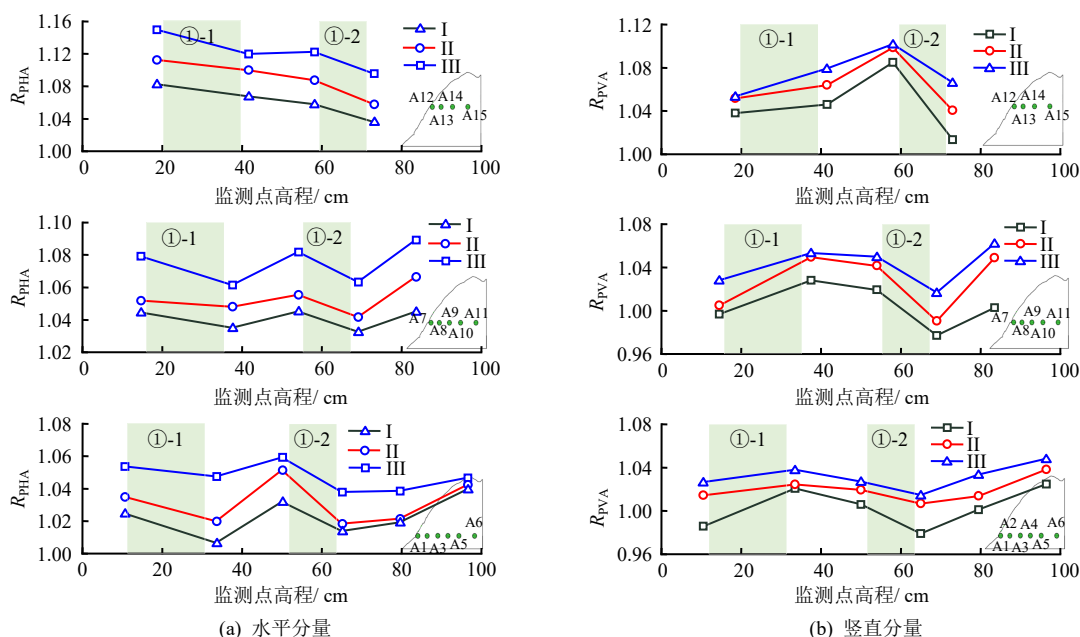


图 11 水平面监测线加速度放大系数变化特征

Fig.11 Variation characteristics of acceleration amplification factor of horizontal monitoring lines

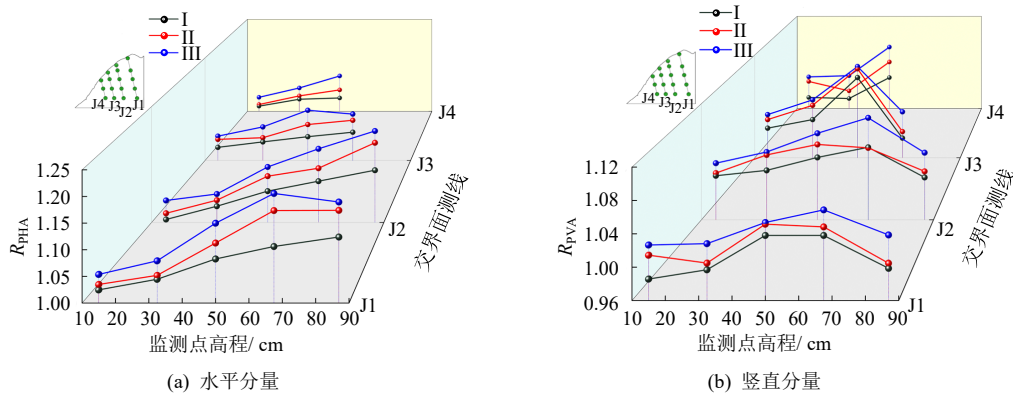


图 12 交界面测线加速度放大系变化特征

Fig.12 Variation characteristics of acceleration amplification factor along the measurement line at the interfaces

在人工拟合地震动加载工况下,第 III 组地震动的动力响应最强。边坡模型存在明显的高程放大效应和趋表效应,高程的增加和向坡表的靠近均会使动力响应越强。在水平向地震动作用下,边坡坡表加速度放大系数最大值在边坡模型最高点处。在竖直向地震动作用下,边坡坡表最高加速度放大系数并不是在最高点,而是在最高点下方①-2 韧性剪切带边界坡表处。不论是水平向地震动或竖直向地震动,边坡高程的动力响应程度远高于边坡模型低程。在水平向地震作用下,不同厚度的韧性剪切带均表现出吸能效应,但差别不明显。在竖直向地震作用下,较厚的韧性剪切带表现出吸能效应,但靠近坡表、较薄的韧性剪切带对地震波有促进作用。

在考虑地震作用下边坡稳定性时,应以第 III 组地震动的加载结果作为参考进行相应工程设计。从地震动力响应方面来说,韧性剪切带的存在对边坡稳定性起到一定的提高作用,但仍需关注竖直地震作用下边坡低程坡表的动力稳定性问题。

4.2 正弦波地震动动力响应分析

在前文中研究了振幅和频率对动力响应的影响,因此对加速度响应基本规律进行研究时,选取 15 Hz 频率、0.1~0.6g 振幅的正弦波监测数据作为研究依据。

4.2.1 水平向加速度响应特征分析

为了全面地反映边坡地震动响应规律,选取 8 个典型的监测剖面(交界面监测线 J1、J2、J3、J4,水平面监测线 H1、H2、H3 和坡表监测线 PB)深入地研究边坡动力响应。图 13 分别给出了坡表及 H1、H2、H3 这 3 个水平剖面上 R_{PHA} 放大系数的变化特征。

图 14 为不同监测线交界面上 R_{PHA} 加速度放大系数的变化特征。

从总体上看,不同幅值加载工况下各水平面、交界面的变化规律一致。频率相同时,不同幅值加

载工况反应的 R_{PHA} 数值出现明显的分区现象,0.1~0.2g 幅值为低响应区,0.4~0.6g 幅值为高响应区,0.3g 幅值为中等响应区。

在坡表处,随着高程的增加,各监测点的 R_{PHA} 总体呈增长趋势,表现出明显的高程放大效应。

分析图 15,我们可知在地震波由坡内向坡外方向加载时(顺坡向加载), R_{PHA} 通过韧性剪切带后减小,边坡模型 R_{PHA} 的变化趋势为:减小(通过韧性剪切带①-2)→增加→减小(通过韧性剪切带①-1)→增加(到达坡表)。其整体变化趋势呈“w”型。此类现象说明韧性剪切带对地震波有削弱作用,即吸能效应。抛去韧性剪切带的影响,自坡内向坡外方向上,A5 至 A4 监测点,A3 至 A1 监测点的 R_{PHA} 不断增大,这表明在水平方向上,越靠近坡表,其 R_{PHA} 越大,上述现象说明边坡模型表现出明显的趋表效应。特别地,除靠近坡表 A12 监测点数据以外,H3 的其他监测点所反应的规律同 H1、H2 监测线反应的规律相同,造成这种情况的原因是 A12 监测点为 H3 监测线上通过①-1 韧性剪切带后即到达坡表的监测点,韧性剪切带的吸能效应的影响未能有水平方向的空间进行“消除”,导致该类情况发生。

为探明哪些因素对吸能作用产生影响,将通过韧性剪切带前后监测点的 R_{PHA} 变幅值(15 Hz 工况)制成表,如表 5 所示。

对于较厚的①-2 韧性剪切带,随着幅值的增加,在 H2 和 H3 监测线上 R_{PHA} 变幅总体保持增加的趋势,而 H1 监测线上 R_{PHA} 变幅趋势不明显。对于较薄的①-1 韧性剪切带,低幅值工况下,随着监测高程的增加, R_{PHA} 变幅值变化无明显规律,但在 0.3g 幅值及以上加载工况时, R_{PHA} 变幅随着高程的增加而增大,变幅变化明显。整体上看,较厚韧性剪切带的吸能作用随着加载工况幅值和高程的增加而增

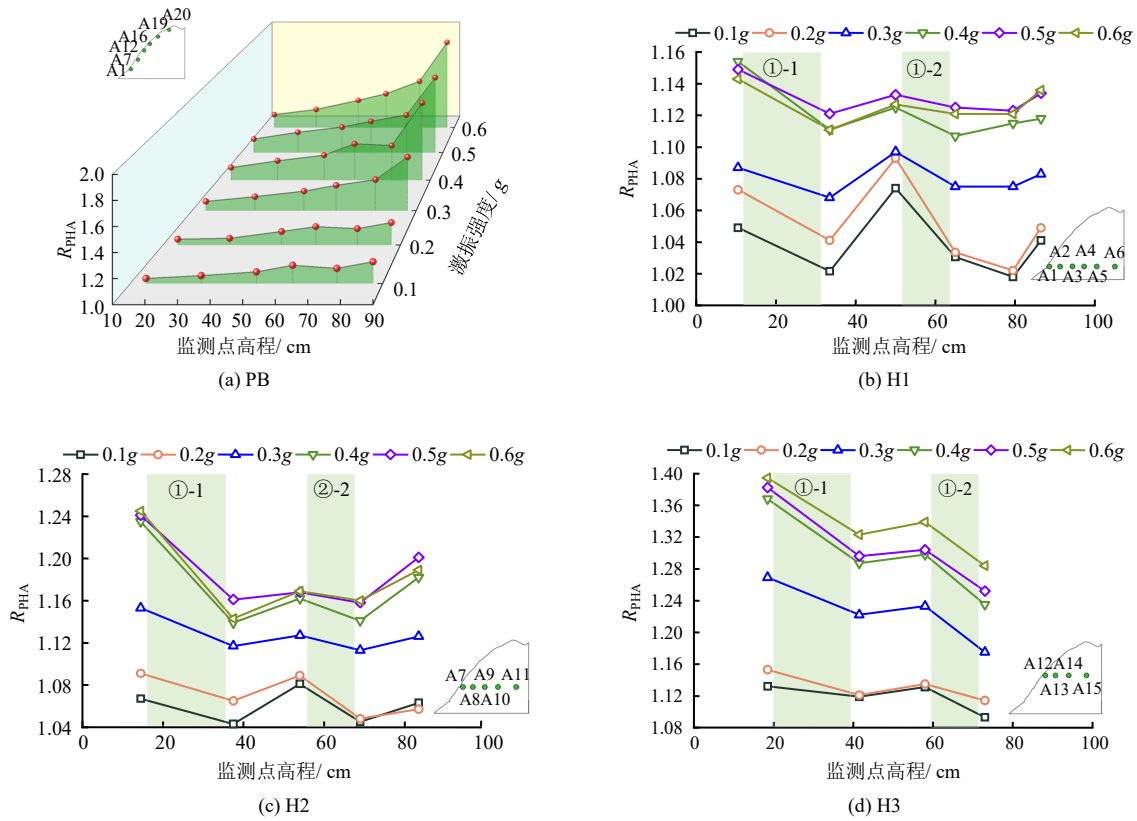


图 13 R_{PHA} 的变化特征
 Fig.13 Variation characteristics of R_{PHA}

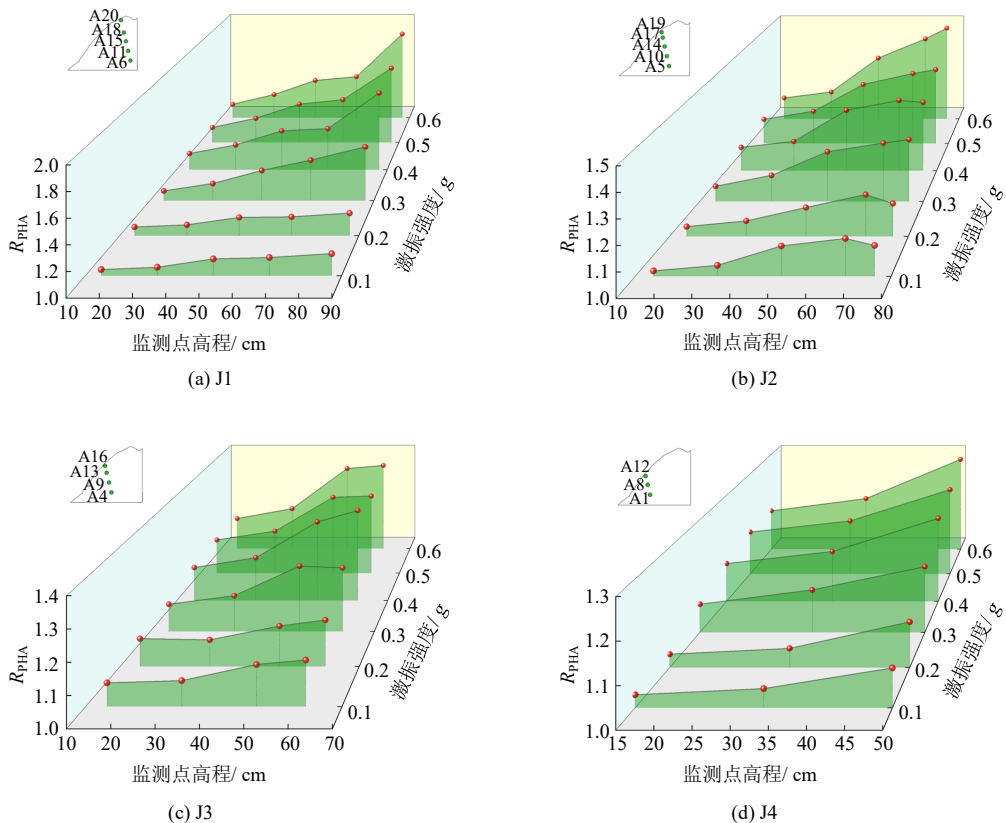


图 14 R_{PHA} 的变化特征
 Fig.14 Variation characteristics of R_{PHA}

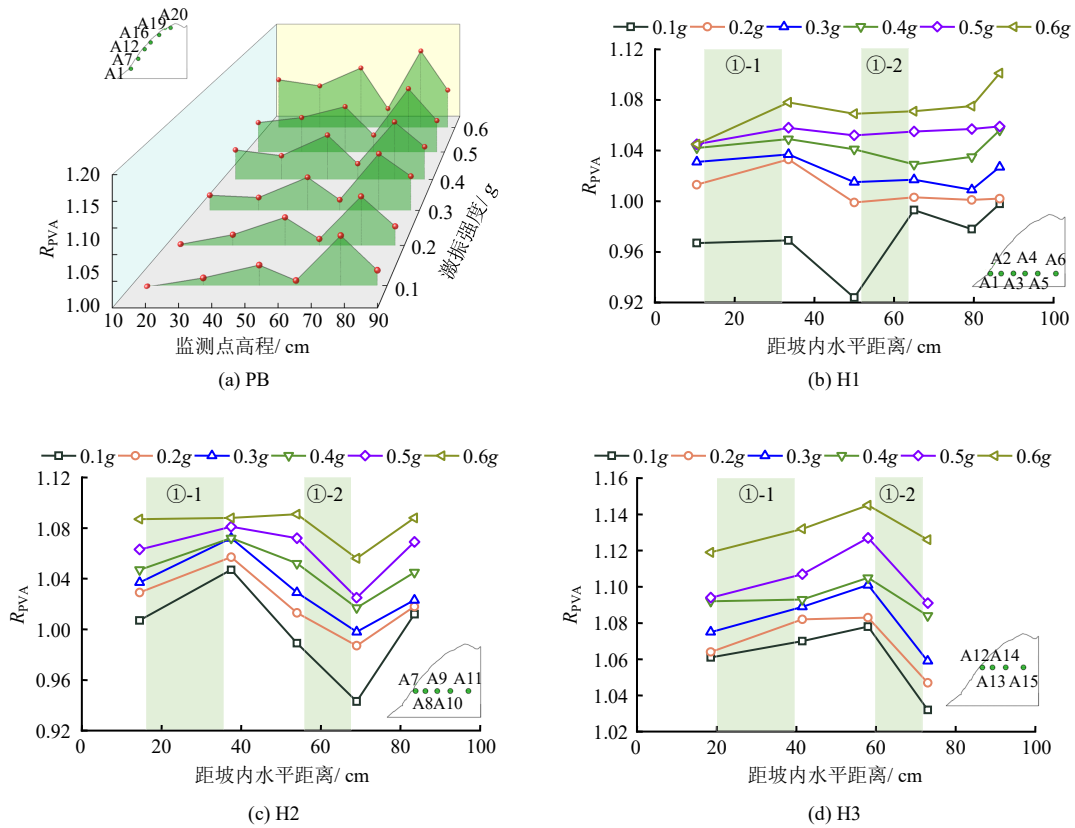


图 15 R_{PVA} 变化特征
Fig.15 Variation characteristics of R_{PVA}

表 5 R_{PHA} 变幅值
Table 5 R_{PHA} variation values

检测线	韧性剪切带	监测点	0.1g 变幅	0.2g 变幅	0.3g 变幅	0.4g 变幅	0.5g 变幅	0.6g 变幅
1 号水平监测线	①-1	A4→A3	-0.012	-0.045	-0.023	-0.022	-0.014	-0.011
	①-2	A6→A5	-0.028	-0.032	-0.021	-0.046	-0.030	-0.035
2 号水平监测线	①-1	A9→A8	-0.037	-0.040	-0.023	-0.022	-0.019	-0.020
	①-2	A11→A10	-0.025	-0.028	-0.045	-0.095	-0.081	-0.095
3 号水平监测线	①-1	A13→A12	-0.024	-0.019	-0.044	-0.057	-0.038	-0.049
	①-2	A15→A14	-0.013	-0.033	-0.049	-0.081	-0.091	-0.076

强。较薄韧性剪切带的吸能作用随着高程的增加同样增强，但吸能效应对幅值变化不敏感。

4.2.2 竖直向加速度响应特征分析

有关研究表明在高震区并非只有水平向的地震波有较大影响，竖直向地震波同样会造成一定程度的影响，对竖直向加速度响应基本规律进行研究。图 15 分别给出了坡表及 H1、H2、H3 3 个水平剖面上放大系数 R_{PVA} 的变化特征。

图 16 为不同监测线交界面上 R_{PVA} 加速度放大系数的变化特征。

从图 16(a)观察到，在边坡模型低程处，随着高程的增加，坡表各监测点的 R_{PVA} 增加幅度较小。在

经过①-1 韧性剪切带层面后， R_{PVA} 下降，在 0.6g 幅值加载工况下降低幅度最大，之后随着高程增加，监测点 R_{PVA} 增大，在经过①-2 韧性剪切带层面后再次降低，在 0.6g 加载工况下，坡表 A19 的 R_{PVA} 达到最大。

在水平方向的监测线上，越向坡表靠近，各个监测点的 R_{PVA} 总体上有增加的趋势，同样表现出趋表效应。

沿韧性剪切带层面上，随着高程的增加，边坡模型内部各监测点的 R_{PVA} 总体上呈增加的趋势，表现为高程放大效应。各交界面监测线监测点由微新岩层进入强卸荷岩层后，各层面的 R_{PVA} 降低。

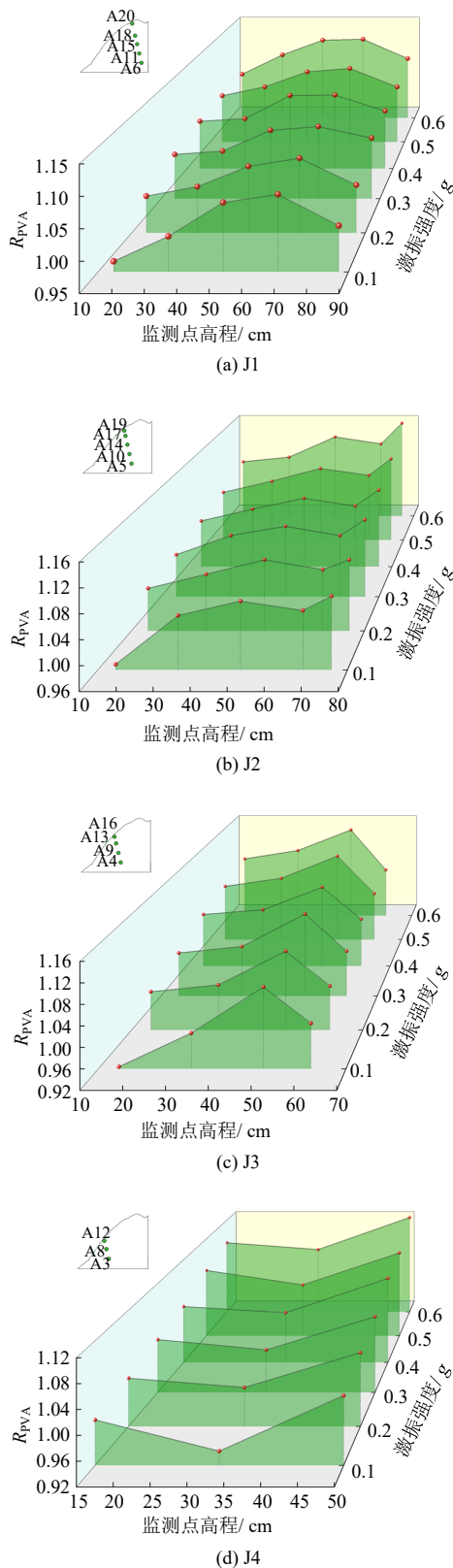


图 16 R_{PVA} 变化特征

Fig.16 Variation characteristics of R_{PVA}

自坡内向坡外水平方向上, R_{PVA} 的变化趋势总趋势总体为: 增加 (经过①-2 韧性剪切带层) → 减小 (经过①-1 韧性剪切带层) → 增大 (接近坡表)。

由于竖直向地震波加载是由模型底部加载, 在次试验中, 韧性剪切带层右侧 (距离坡脚越远处) 的监测点受到的地震波将穿过韧性剪切带层。在此概念基础上, 我们发现在 H2、H3 号水平检测线上, ①-1 韧性剪切带层靠坡内侧监测点的 R_{PVA} 大于靠坡外侧监测点的 R_{PVA} , 即韧性剪切带层对地震波有放大趋势, 在低程水平监测线上该现象不明显。同样的, 分析得出①-2 韧性剪切带对地震波有吸能作用。综上所述, 在加载竖直向地震波时, 较薄的“弱岩层” (①-1 韧性剪切带层) 对地震波有放大作用, 较厚的“弱岩层” (①-2 韧性剪切带层) 对地震波有削弱作用。该种现象可能是由于该边坡模型内存在陡倾坡内韧性剪切带层, 复杂的地质结构使得地震波在传播时发生折射和反射, 最终导致该类情况发生。

5 结 论

本文研究了地震作用下含双层韧性剪切带边坡动力响应规律, 得到以下主要成果和结论。

(1) 随着频率、幅值的增加, 边坡模型动力响应越强。水平向和竖直向的动力响应在低频率工况下随幅值的增加变化不明显, 在高频率工况下随幅值的增加变化幅度大。频率对该边坡的动力响应影响程度大于幅值的影响。

(2) 在水平和竖直地震作用下, 沿韧性剪切带层面向坡顶, 边坡模型内各监测点 R_{PHA} 、 R_{PVA} 呈现增长趋势。沿水平面向坡表方向上, 边坡模型内各监测点 R_{PHA} 和 R_{PVA} 发生非线性增长趋势。含韧性剪切高陡岩质边坡的趋表效应和高程放大效应明显。

(3) 在水平地震荷载作用下, 韧性剪切带表现为对地震波有吸能效应; 而在竖直向地震荷载作用下, 较厚韧性剪切带对地震波有削弱作用, 而较薄韧性剪切带对地震波起放大作用。

参 考 文 献

[1] OHNSON L, TURNER K. Impact of earthquake-induced forces on slope stability: a case study[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2019, 48(8): 841-856.

[2] DAVIS S, KIM R. Evaluating the dynamic response of slopes in high seismic regions[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2017, 21(6): 906-924.

[3] WILLIAMS R, DANIELS T. Ductile shear zones and

- seismic response in slope models[J]. **Geotechnique**, 2018, 68(4): 322-339.
- [4] FRANKLIN A, HARWOOD C. Role of ductile shear zones in earthquake triggered landslides[J]. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, 2015, 15: 1773-1785.
- [5] ALI K P, ZAKIEH E. Shaking table tests on polymeric-strip reinforced-soil walls adjacent to a rock slope[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2021, 49: 737-756.
- [6] RAMAKRISHNA U, MOHAN S C. Shake-table testing of two adjacent similar building frames connected with optimal viscoelastic dampers[J]. **Innovative Infrastructure Solutions**, 2024, 9, 38.
- [7] 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.
- [8] 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.
- WANG Zhi-ying, GUO Ming-zhu, ZENG Jin-yan, et al. Experimental study on dynamic response of bedding rock slope with weak interlayer under earthquake[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(9): 2566-2578.
- [9] 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.
- [10] FENG Xia-xia, JIANG Qing-hui, ZHANG Xiao-bo, et al. Shaking table model test on the dynamic response of anti-dip rock slope[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2019, 37: 1211-1221.
- [11] 叶海林, 郑颖人, 杜修力, 等. 边坡动力破坏特征的振动台模型试验与数值分析[J]. **土木工程学报**, 2012, 45(9): 128-135.
- YE Hai-lin, ZHENG Ying-ren, DU Xiu-li, et al. Shaking table model test and numerical analysis on dynamic failure characteristics of slope[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2012, 45(9): 128-135.
- [12] PETER A B, ZHANG Y B, HE J X, et al. Evaluating the dynamic response and failure process of a rock slope under pulse-like ground motions[J]. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, 2023, 14(1): 216613.
- [13] AYDAN O, TAKAHASHI Y, IWATA N, et al. Dynamic response and stability of un-reinforced and reinforced rock slopes against planar sliding subjected to ground shaking[J]. **Journal of Earthquake and Tsunami**, 2018, 12(4): 1841001.
- [14] 李振生, 巨能攀, 侯伟龙, 等. 陡倾层状岩质边坡动力响应大型振动台模型试验研究[J]. **工程地质学报**, 2012, 20(2): 242-248.
- LI Zhen-sheng, JU Nen-gpan, HOU Wei-long, et al. Large-scale shaking table model tests for dynamic response of steep stratified rock slopes[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2012, 20(2): 242-248.
- [15] LI L Q, JU N P, ZHANG S, et al. Shaking table test to assess seismic response differences between steep bedding and toppling rock slopes[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2017, 78: 519-531.
- [16] 冯志仁, 刘红帅, 于龙. 地震作用下弱夹层岩质边坡地表放大效应[J]. **防灾减灾工程学报**, 2014, 34(1): 96-100.
- FENG Zhi-ren, LIU Hong-shuai, YU Long. Surface amplification effect of bedding rocky slope with weak interlayer under earthquake[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2014, 34(1): 96-100.
- [17] SONG D Q, CHE A L, CHEN Z, et al. Seismic stability of a rock slope with discontinuities under rapid water drawdown and earth-quakes in large-scale shaking table tests[J]. **Engineering Geology**, 2018, 245: 153-168.
- [18] FAN G, ZHANG J J, WU J B, et al. Dynamic response and dynamic failure mode of a weak intercalated rock slope using a shaking table[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2016, 49(8): 3243-3256.
- [19] DU H, SONG D Q, CHEN Z, et al. Prediction model

- oriented for landslide displacement with step-like curve by applying ensemble empirical mode decomposition and the PSO-ELM method[J]. **Journal of Cleaner Production**, 2020, 270: 122248.
- [20] LIU H X, XU Q. 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.
- [21] 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**, 2020, 133: 106112.
- [22] 李振生, 巨能攀, 侯伟龙, 等. 陡倾层状岩质边坡动力响应大型振动台模型试验研究[J]. **工程地质学报**, 2012, 20(2): 242-248.
- LI Zhen-sheng, JU Neng-pan, HOU Wei-long, et al. Large-scale shaking table model test study for dynamic response of steep stratified rock slopes[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2012, 20(2): 242-248.
- [23] 梁庆国, 韩文峰, 马润勇, 等. 强地震动作用下层状岩体破坏的物理模拟研究[J]. **岩土力学**, 2005, 26(8): 1307-1311.
- LIANG Qing-guo, HAN Wen-feng, MA Run-yong, et al. Physical simulation study on dynamic failures of layered rock masses under strong ground motion[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(8): 1307-1311.
- [24] WU D H, LIU Y Q, LI H B, 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.
- [25] 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.
- [26] HAN B L, CHEN X L, SONG Y L, et al. Research on similar material of rock mass[J]. **Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering**, 1997, 30(2): 6-9.
- [27] WANG H P, LI S C, ZHENG X F, et al. Research progress of geomechanical model test with new technology and its engineering application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 28(Suppl.1): 2765-2771.
- [28] 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.
- [29] YAN Z X, LIU C B, LONG Z, et al. Experimental study on seismic response of anchorage of bedding rock slope with weak layer[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2020, 42(12): 2180-2188.
- [30] 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): 2977-2988.
- DONG Jin-yu, YANG Guo-xiang, WU Fa-qun, 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): 2977-2988.
- [31] DONG J Y. Study on dynamic response and sliding failure process of rock slope under earthquake[D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [32] 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.
- [33] 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.

- [34] 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.
- [35] FAN G, ZHANG J J, WU J B, et al. Dynamic response and dynamic failure mode of a weak intercalated rock slope using a shaking table[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2016, 49: 3243-3256.
- [36] YANG G X. Study on failure mechanism and dynamic response rules of rock slope under earthquake[D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [37] LU P, WU H B, QIAO G, et al. Model test study on monitoring dynamic process of slope failure through spatial sensor network[J]. **Environmental Earth Sciences**, 2015, 74(4): 3315-3332.
- [38] NIU J Y, JIANG X L, YANG H, et al. Seismic response characteristics of a rock slope with small spacing tunnel using a large-scale shaking table[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2018, 36: 2707-2723.
- [39] 张敏政. 地震模拟实验中相似律应用的若干问题[J]. 地震工程与工程振动, 1997, 17(2): 52-58.
ZHANG Min-zheng. Study on similitude laws for shaking table tests[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 1997, 17(2): 52-58.
- [40] 罗先启, 葛修润. 滑坡模型试验理论及其应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 84-92.
LUO Xian-qi, GE Xiu-run. Theory and application of model test on landslide[M]. Beijing: China Water Power Press, 2008: 84-92.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
LU 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.
- [44] 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 Xia-xia, JIANG Qing-hui, ZHANG Hui-chao, et al. Shaking table test on seismic response rock slope[J]. **Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis**, 2018, 38(3): 575-582.
- [45] WU D H, LIU Y Q, LI H B, 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.
- [46] GU K S, GUO M Z, TANG X W, et al. Dynamic response and spectrum characteristics of antidip rock slopes under earthquake[J]. **China Earthquake Engineering Normal**, 2022, 44(1): 62-71.