

DOI: 10.16285/j.rsm.2023.1208

单、双排桩支护路堑边坡动力响应特性的 振动台试验研究

朱 丹^{1,2}, 蒋关鲁^{1,2}, 陈虹羽^{1,2}, 赵鑫辉³, 黄德贵^{1,2}, 刘乙甫^{1,2}

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学 高速铁路线路工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031;
3. 浙江数智交院科技股份有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘 要: 结合西部艰险山区铁路实际工程背景, 开展了 El-Centro 波作用下单、双排桩支护路堑边坡大型振动台模型试验, 基于位移、加速度等参数深入研究了两种模型边坡动力响应特性的差异, 并结合快速傅里叶变化 (fast Fourier transform, 简称 FFT) 谱探讨了两种边坡出现差异的原因。结果表明: 抗滑桩的支护效果和差异均随输入波幅值的增大而逐渐体现; 当输入波幅值为 0.1g~0.3g 时, 单、双排桩边坡均处于稳定状态, 总体动力响应特性差异较小; 当输入波幅值为 0.4g 时, 两边坡动力响应开始出现较大差异, 单排桩边坡宏观破坏更明显, 坡表位移增大较多, 土体损伤累积, 非线性特征显现; 当输入波幅值为 0.5g~0.6g 时, 两种模型边坡的地震波峰值加速度 (peak ground acceleration, 简称 PGA) 放大系数高程效应明显, 且均在路堑面和桩后坡面处出现塑性区, 抗滑桩的存在有效地抑制了 PGA 放大系数沿坡面向上的增大趋势和坡表双塑性区的贯通, 而单排桩边坡 PGA 放大效应更明显, 塑性区范围更广, 深度更大, 局部失稳更严重, 抗震支护作用相对较弱; 引入 FFT 谱比可知, 单、双排桩边坡在 5~10 Hz 频段振幅放大效应的不同是造成单、双排桩边坡动力响应差异的主要原因; 在地震作用下, 单排桩边坡破坏历经边坡自稳定→坡表土体塑性变形→边坡局部塌陷溃散 3 个阶段, 双排桩边坡破坏历经前两阶段。

关 键 词: 路基工程; 路堑边坡; 单、双排抗滑桩; 振动台试验; 动力响应

中图分类号: U213.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2024) 06-1763-15

Shaking table experimental study on the dynamic response characteristics of single and double-row pile-supported road graben slopes

ZHU Dan^{1,2}, JIANG Guan-lu^{1,2}, CHEN Hong-yu^{1,2}, ZHAO Xin-hui³, HUANG De-gui^{1,2}, LIU Yi-fu^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

2. Key Laboratory of High-Speed Railway Engineering of Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

3. Zhejiang Institute of Communications Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310012, China)

Abstract: Considering the engineering background of the dangerous western mountain railroad, large-scale shaking table model experiments were conducted on embankment slopes supported by single and double-row piles, subjected to El-Centro wave excitations. Based on parameters such as displacement and acceleration, an in-depth investigation was conducted to study the differences in dynamic response characteristics between the two slope models. Moreover, the reasons for the differences between the two slopes were explored using fast Fourier transform (FFT) spectra. The results revealed that both the support effect and the differences in anti-slip piles gradually increased with the increase in the input wave amplitude. At input wave amplitudes of 0.1g–0.3g, both single and double-row pile slopes remained stable, with minimal differences in their overall dynamic response characteristics. However, at an input wave amplitude of 0.4g, significant differences in the dynamic responses of both slopes emerged. Macroscopic damage was more apparent in the single-row pile slope, with high slope surface displacement, accumulated soil damage, and noticeable nonlinear characteristics. At an input wave amplitude of 0.5g–0.6g, both slope models exhibited a pronounced “elevation effect” in the peak ground acceleration (PGA) amplification factor. Additionally, plastic zones were observed

收稿日期: 2023-08-10

录用日期: 2023-11-13

基金项目: 国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作”重点专项 (No.2022YFE0104600); 国家自然科学基金 (No.52378463)。

The work was supported by the National Key Research and Development Program of China “Intergovernmental International Science and Technology Innovation Cooperation” (2022YFE0104600) and the National Natural Science Foundation of China (52378463).

第一作者简介: 朱丹, 女, 1996 年生, 博士研究生, 主要从事路基、边坡铁路路基、边坡防灾减灾等方面的研究工作。E-mail: zhudandanwork@163.com

通讯作者: 蒋关鲁, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事道路与铁道工程方面的研究工作。E-mail: wgljiang@swjtu.edu.cn

on the road cut face and behind the piles in both models. The presence of retaining piles effectively suppressed the upward trend of PGA amplification coefficients along the slope and prevented the connection of plastic zones on the slope surface. Notably, the PGA amplification effect of the single-row pile slope was pronounced, with a wide and deep plastic zone, severe local instability, and relatively weak seismic support effect. The introduction of the FFT spectral ratio revealed that the difference in amplitude amplification effects of single and double-row pile slopes in the 5–10 Hz band was the main reason for the difference in their dynamic responses. Under seismic loading, the failure process of the single-row pile-supported slope involved three stages: initial stability of the slope, plastic deformation of the slope surface soil, and local collapse and disintegration of the slope. In contrast, the double-row pile-supported slope experienced the first two stages of this failure process.

Keywords: roadbed engineering; road graben slopes; single and double-row anti-slide piles; shaking table tests; dynamic response

1 引言

为促进西部地区的经济发展,维持社会繁荣稳定,多条经过西部艰险山区的铁路正在规划建设当中^[1-2],而其沿线环境复杂,不良地质极为发育,又处于地震频发段,在外界因素影响下,极易导致滑坡等地质灾害的发生^[3-4]。

本文所依托工点位于青藏高原的雅鲁藏布江缝合带,地表广泛分布有松散斜坡砂层^[5],其自身稳定性较弱,从而给以路堑形式通过的铁路线路埋下极大的安全隐患,故而需要采取一定的形式对边坡进行支护。考虑到该边坡本身的地质特性和当地极端恶劣的施工环境,为减小施工扰动,保障施工人员的安全,选用机械施工的钻孔灌注桩进行支护,但该支护结构的抗震加固效果尚不明确,因此有必要对边坡的动力响应特性进行深入研究。

因地震具有偶然性、突发性,对真实地震作用时边坡的响应特性进行分析极为困难,而振动台试验能够比较真实且直观地反映地震作用下边坡的宏观特征,是研究边坡动力响应特性的重要手段^[6]。近年来,大量学者利用振动台试验研究了抗滑桩支护作用下边坡的特性。Adachi 等^[7]通过监测桩的弯矩,对比研究了液化地层的侧向流滑作用对桩的破坏机制的影响。叶海林等^[8]通过分析桩后土压力、边坡加速度及位移等数据,研究了不同类型及不同幅值的地震波作用下,抗滑桩的抗震机制及性能。Chen 等^[9]为了研究抗滑桩初始损伤程度对高陡边坡地震破坏模式的影响,设计了相应的振动台试验,分析了边坡在正弦波作用下动力响应特性的变化与差异,揭示了该类边坡的破坏模式。

以上试验都是基于单排抗滑桩进行的,已有研究表明,对于高烈度地震区的高陡边坡加固工程,单排桩支护在性价比方面略有不足^[10]。Zhang 等^[11]在桥基前和桥基后分别设置了一排抗滑桩,基于振动台试验研究了双排抗滑桩加固桥基与碎石坡的地震反应和破坏模式,结果表明,后排抗滑桩可保障

桥基后部土压力的均匀分布,减少了地震对桥基的影响。赖杰等^[12]依托大理西站支护边坡工程开展振动台试验,结合数值模拟进行分析,结果表明,坡体裂缝及加速度响应规律变化有预警边坡灾害的作用,地震作用下后排桩承担了更多的滑坡推力。康景文等^[13]通过对比单、双排桩板结构支护边坡的振动台试验,探讨了在静力及不同加速度峰值地震作用下单、双排桩板结构支护边坡的土压力、加速度及位移变化规律。上述研究中前后排桩之间不存在连梁,属于普通双排桩^[14],在地震作用下,前排桩往往无法充分发挥其抗滑能力。

门架式双排桩作为一种组合式支挡结构,因其抗侧移刚度较大,能够抵抗大型滑坡,具有协调变形等优点和较高的经济性,常在边坡支护的工程中实践应用^[15]。目前对于门架式双排桩支护边坡工程的研究取得了一定的成果^[16-17],但多集中于静力学分析,而缺少其对提高边坡抗震性能方面的研究,工程设计常依赖半经验半理论方法确定加固方案,其结果或偏于保守或存在潜在风险,故开展相关试验研究迫在眉睫。

基于此,本文以西部某艰险铁路典型风积沙路堑边坡为研究对象,旨在探究在相同总桩数量的情况下,分别采用单排桩与梅花形布置的门架式双排桩支护时,该边坡在地震作用下动力响应特性的差异。据此,设计两组大型振动台模型试验,以不同幅值的 El-Centro 波作为地震激励条件,基于自振频率、阻尼比、坡表位移、坡体加速度等参数分析两种模型边坡的响应差异及其原因,深入探究单、双排桩支护路堑边坡的动力损伤机制。利用 FFT 谱分析,揭示单、双排桩支护边坡响应加速度频谱的变化特征及放大效应。研究成果对国内外类似路堑边坡单、双排桩的设计具有重要的理论意义和工程价值。

2 试验方案设计

依托工程路堑边坡横断面如图 1 所示。边坡土

层由上至下分别为松散细砂、稍密细砂、中密粉细砂和基岩，相关地质资料见文献[6]。为提高该路堑边坡的稳定性，工程在线路左侧设置钻孔灌注桩和桩前挡墙。

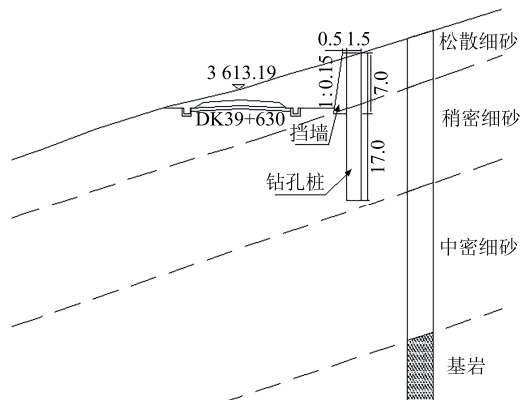


图 1 原型边坡 (单位: m)
Fig.1 Prototype side slope (unit: m)

2.1 试验设备

试验在西南交通大学高速铁路线路工程实验室单向电液伺服驱动式地震模拟振动台进行，该振动台台面尺寸长×宽为 4.0 m×2.0 m，采用刚性模型箱，内部尺寸长×宽×高为 3.7 m×1.5 m×2.1 m；最大容许载重为 25 t，最大设计加速度为 1.2g，可接受±100 mm 的水平向位移。在模型箱振动方向两端设置 8 cm 厚的聚乙烯泡沫板，使其成为柔性边界，以减轻地震波边界反射所造成的模型箱效应。在箱体侧壁涂抹足够量的凡士林，以减轻填筑土体与箱体侧壁间的摩擦耗能^[18]，振动台及模型箱如图 2 所示。

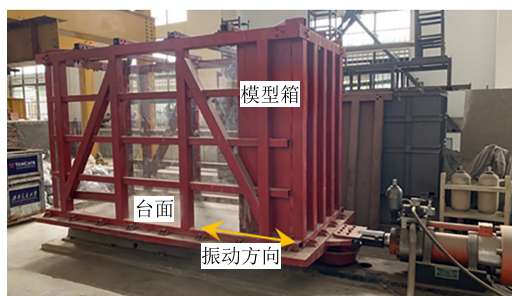


图 2 振动台及模型箱
Fig.2 Shaking table and model box

2.2 相似关系设计

由于实际边坡的复杂性，无法保证振动台试验模型与原型完全一致；考虑到重力场对试验的影响，可将边坡几何比、重度和重力加速度作为主要控制因素，其中，重度和重力加速度的相似常数均为 1。在综合考虑抗滑桩支护效果、路堑边坡实际情况及

振动台尺寸的前提下，将模型与原型边坡的相似比定为 1:30。根据 Buckingham π 定理推导各物理量的相似常数^[19]如表 1 所示。

表 1 模型相似常数表
Table 1 Table of model similarity constants

物理量	相似关系	相似比	备注
边坡几何比 l	C_l	30	主控因素
重度 γ	C_γ	1	主控因素
重力加速度 g	C_g	1	主控因素
黏聚力 c	$C_c = C_l C_\gamma$	30	—
摩擦角 φ	C_φ	1	—
动泊松比 μ	C_μ	1	—
输入加速度 A	C_A	1	—
时间 T	$C_T = (C_l / C_a)^{0.5}$	5.48	—
频率 ω	$C_\omega = (C_a / C_l)^{0.5}$	0.18	—
线位移 s	$C_s = C_l$	30	—
角位移 θ	C_θ	1	—
应变 ε	C_ε	1	—
应力 σ	$C_\sigma = C_l C_\gamma$	30	—
响应加速度 a	C_a	1	—

2.3 模型制作及测点布设

根据地质资料可知，现场工点下伏基岩为弱风化的细中粒角闪黑云花岗岩闪长岩，上部堆积体为不同密实度的细砂。参考模型试验常用的几种相似比材料及其相应的力学性能指标，确定采用红黏土、河砂、水泥作为基岩的原材料^[20]，通过正交试验设计和万能试验机进行压缩试验确定基岩材料配比为细颗粒红黏土：河砂：325# 复合硅酸盐水泥：水=1:0.45:0.22:0.15，通过分层填筑、夯击压实，保证其具备必要的强度和刚度。选用筛分后的细河砂模拟上覆 3 层土体。根据不同含水率和孔隙率配制试样，利用直剪试验确定其力学参数的合理性。具体模型和原型的物理力学指标如表 2 所示。钻孔桩选用 C35 微粒混凝土制作，为保障桩身配筋率、箍筋率与原型一致，选用 8 根直径为 2 mm 的钢筋模拟纵筋，选用间距为 5.5 cm、直径为 1.5 mm 的冷拉钢丝模拟箍筋。单、双排桩模型总桩数量一致，单排桩按照一字形布置，顶部不设连梁；双排桩按照梅花形布置，顶部连梁选用厚 0.8 cm、宽 5 cm 的钢板进行桁架式连接，如图 3 所示。挡土墙采用 C30 微粒混凝土制作。

模型按照每层 5 cm 进行分层填筑和逐级夯实，模型填筑完成后静置 24 h，以保障土体的密实度^[21]。为研究单、双排抗滑桩支护路堑边坡（下文均简称为单、双排桩边坡）在地震作用下的动力响应特性，在各模型边坡中间断面布设加速度计，在坡表布设拉线式位移计。本文所用传感器具体布置情况如图

3 所示。传感器编号第 1 个字符代表试验边坡类型，D 为单排桩边坡，S 为双排桩边坡；第 2 个字符代表传感器类型，D 为位移计，A 为加速度计；位移

计第 3 个字符代表其监测方向，H 为水平方向，V 为竖直方向；加速度计第 3 个字符为数字，代表监测断面号；同类传感器以最后一个数字进行区分。

表 2 模型和原形材料物理力学参数
Table 2 Physical and mechanical parameters of model and prototype materials

材料名称	类型	密度/(kg · m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa	泊松比	含水率/%	孔隙率
松散细砂	模型	1 800	—	21.9	2.5	0.25	1.40	0.58
	原型	1 820	2.1	21.9	—	0.26	1.40	0.58
稍密细砂	模型	1 800	—	24.8	4.2	0.24	2.50	0.54
	原型	1 860	2.2	24.9	—	0.25	2.45	0.54
中密细砂	模型	1 900	—	32.6	5.3	0.24	4.60	0.52
	原型	1 900	6.0	32.8	—	0.27	2.95	0.52
基岩	模型	2 600	—	—	3.0×10 ⁴	0.20	—	—
	原型	2 600	—	—	3.0×10 ⁴	0.20	—	—

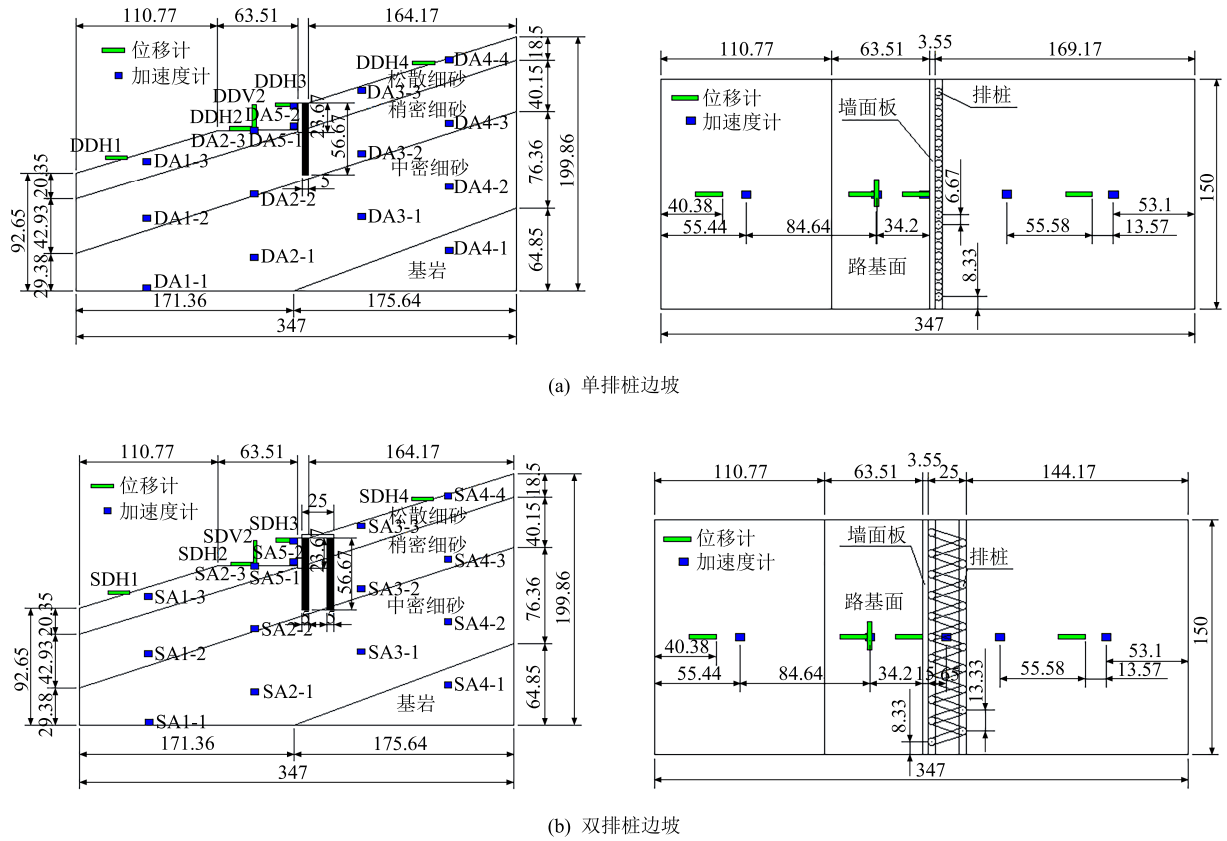


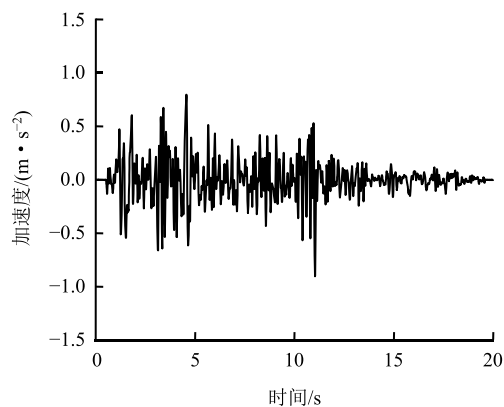
图 3 模型尺寸及测点布置 (单位: cm)
Fig.3 Model size and measurement point arrangement (unit: cm)

2.4 加载方案

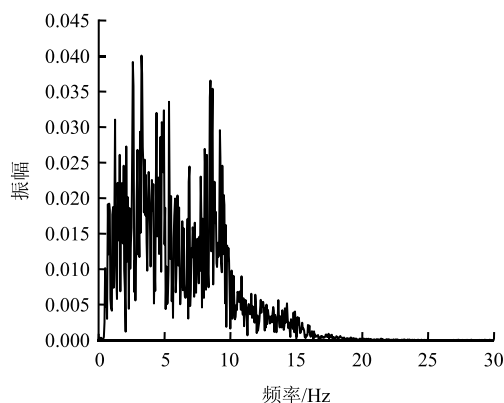
2 组振动台试验均采用单向水平输入的 El-Centro 波作为加载波型。根据许成顺等^[22]的研究可知,地震动能量与其持续时间有关。当振动台时间相似比小于 1:3.16 时,会导致信号畸变和输入能量过小的问题^[23]。本试验根据相似关系推导的时间相似比 $C_T = (C_l/C_a)^{0.5}$ 为 1:5.48<1:3.16,受制于这一因素,本次试验未根据时间相似比对 El-Centro 波进行压缩处理。0.1g El-Centro 波的加速度时程曲

线及傅里叶谱如图 4 所示。由图可知,El-Centro 波强震持续时间约为 10 s,傅里叶谱卓越频段为 0~10 Hz。

输入地震波加速度峰值自 0.1g,按幅值增量为 0.1g,逐级加载至 0.6g。每级地震波荷载加载前,输入幅值为 0.05g、频率范围为 0.5~50 Hz、持续时间为 30 s 的高斯白噪声对模型边坡进行扫频,以分析其动力特性,具体加载序列如表 3 所示。每次加载结束后,停滞 10 min,观测并记录边坡的宏观特



(a) 加速度时程曲线



(b) 傅里叶谱

图4 0.1g El-Centro 波
Fig.4 0.1g El-Centro wave

表3 加载工况表
Table 3 Loaded working condition table

工况	输入地震波	加速度峰值/g	持续时间/s
G0	高斯白噪声	0.05	30
E1	El-Centro 波	0.10	20
G1	高斯白噪声	0.05	30
E2	El-Centro 波	0.20	20
G2	高斯白噪声	0.05	30
E3	El-Centro 波	0.30	20
G3	高斯白噪声	0.05	30
E4	El-Centro 波	0.40	20
G4	高斯白噪声	0.05	30
E5	El-Centro 波	0.50	20
G5	高斯白噪声	0.05	30
E6	El-Centro 波	0.60	20
G6	高斯白噪声	0.05	30

征。

3 试验结果分析

3.1 宏观破坏特征

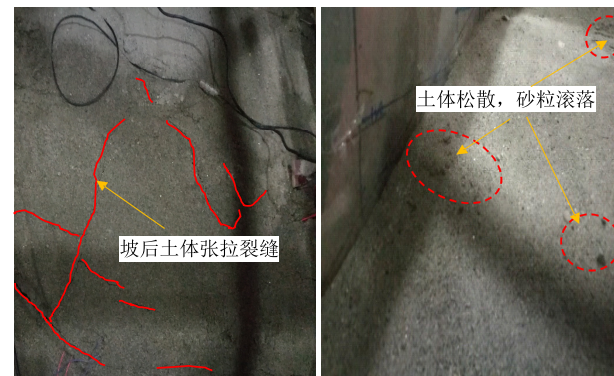
观察试验过程中两种模型边坡的宏观特征可知,当输入波幅值为0.1g~0.3g时,单、双排桩边

坡整体处于稳定状态,路堑面无异常。图 5(a)和图 5(b)为 0.3g 结束后,单、双排桩边坡坡面图。当输入波幅值为 0.4g 时,两种模型边坡桩后坡面均有少量砂粒滚落,单排桩边坡桩后坡面及路堑面出现少量张拉裂缝,裂缝微小且断续,多沿线路纵向分布,见图 5(c)。双排桩边坡无明显宏观变化,见图 5(d)。随着输入波幅值的增大 (0.5g~0.6g),单排桩边坡桩后坡面张拉裂缝不仅数量增多,而且有明显的扩大和延长;坡顶大量砂粒持续滚落,局部出现了溜滑及崩塌下陷现象,见图 5(e),故而在挡墙墙趾处出现大量砂粒堆积;路堑面裂缝数量剧增,且存在



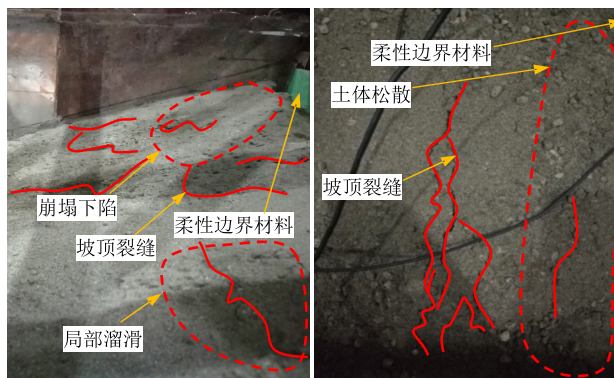
(a) 0.3g 单排桩模型

(b) 0.3g 双排桩模型



(c) 0.4g 单排桩模型

(d) 0.4g 双排桩模型



(e) 0.6g 单排桩模型

(f) 0.6g 双排桩模型

图5 两种模型边坡的破坏特征

Fig.5 Final damage characteristics of two model slopes

明显的震陷现象；边坡整体破坏较为明显。双排桩边坡桩后坡面情况相对良好，坡顶位置亦存在大量沿线路纵向的张拉裂缝；坡表土体因地震作用更为松散，坡顶表层亦有砂粒滚落，但未出现溜滑及崩塌下陷现象，见图 5(f)；路堑面有少量张拉裂缝出现，但震陷现象不明显，故认为该模型边坡整体稳定性较好。

由此可见，以 $0.4g$ El-Centro 波为分界线，输入波幅值低于 $0.4g$ 时，单、双排桩边坡所受影响均较小。输入波幅值为 $0.4g$ 时，两种模型边坡开始出现宏观上可分辨的差异。输入波幅值高于 $0.4g$ 时，单、双排桩边坡宏观现象出现明显差异；单排桩支护能力略有不足，致使边坡表面受损严重；双排桩支护效果较好，边坡表面受损相对较小。

3.2 边坡位移变化

规定水平向位移计以向坡外侧运动为正方向，竖向位移计以向坡上方运动为正方向。图 6 为单、双排桩边坡各位移计在各震级下的累积位移值。累积位移值是指该震级及之前各震级作用下的位移增量之和。

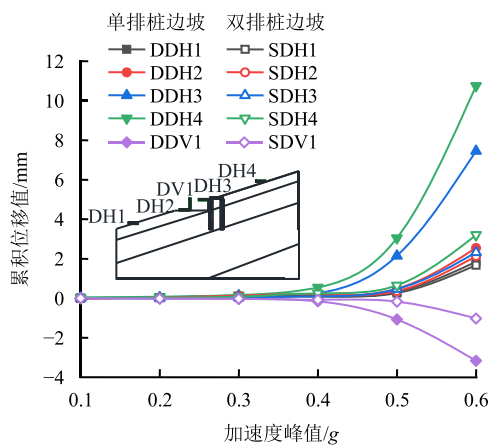


图 6 边坡累积位移响应

Fig.6 Cumulative displacement response of slope

当输入波幅值为 $0.1g \sim 0.3g$ 时，两种模型边坡表面及路堑位移几乎无变化，可见此时两种模型边坡均处于稳定状态，其差异较小。当输入波幅值为 $0.4g$ 时，两种模型边坡在整体性上仍处于稳定状态，模型边坡中下部水平方向产生较小位移，路堑面均无明显下沉。而两种模型边坡上部水平向位移开始出现差异，单排桩模型 DDH4 处的累积位移值为 0.547 mm ，而双排桩模型在同位置的 SDH4 累积位移值仅 0.250 mm ，即桩后坡体相同位置处，单排桩的累积位移约为双排桩的两倍。随着输入波幅值的

继续增大 ($0.5g \sim 0.6g$)，两种模型边坡各测点位移出现明显增加，而两者同一测点处的差异愈发明显。相同工况下，两种模型边坡在 DH1 及 DH2 两测点处的差异较小，最终累积位移差值分别为 0.167 mm 和 0.422 mm 。而两种模型边坡在路堑面处的竖向位移差距增大，单排桩边坡路堑面表现出明显的下沉，竖向位移大幅增加，在 DV1 处与双排桩边坡最终累积位移的差值为 2.139 mm 。此与上文单排桩边坡路堑面宏观特征表现出更为明显的震陷一致。

此外，在单排桩边坡路堑面以上区域，即 DDH3 和 DDH4 测点的边坡累积位移值急剧增大，路堑挡墙朝向临空面出现较明显的倾斜，且与同一工况下路堑面及以下区域，即 DDH1 和 DDH2 测点的累积位移值差距也较大。而双排桩边坡相同位置处，即 SDH3 和 SDH4 测点的边坡水平向累积位移值也有所增大，但其值远小于单排桩边坡相同位置处，路堑挡墙朝向临空面略有倾斜，但不明显，与同一工况下路堑面及以下区域，即 SDH1 和 SDH2 测点的累积位移值差距相对较小。两种模型边坡在 DH3 及 DH4 处最终累积位移差值分别为 5.131 mm 和 7.550 mm 。

3.3 模型边坡动力特性

边坡自振频率和阻尼比是描述边坡内部动力响应特性的两个重要参数，可以通过高斯白噪声激励（工况 G0~G6）边坡得到加速度响应数据，利用 MATLAB 中的 Tffestimate 函数计算得到台面加速度响应和边坡内部加速度响应之间的传递函数虚部，根据峰值法和半功率带宽法得到模型边坡的自振频率和阻尼比^[24]。在各白噪声工况下，取不同测点自振频率和阻尼比的平均值^[25]，得到动力参数随地震波加载的变化规律，如图 7 所示。在未加载任

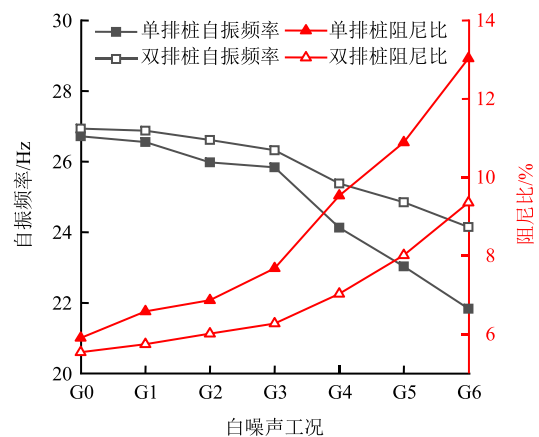


图 7 边坡自振频率及阻尼比随加载工况变化曲线

Fig.7 Variation curves of slope self-oscillation frequency and damping ratio with loading conditions

何地震波前,两种模型边坡的自振频率分别为 26.72、26.94 Hz,阻尼比分别为 5.91%和 5.54%。两种模型边坡的自振频率和阻尼比存在差异,主要原因是边坡自身结构差异和人工压实等外部因素影响。但两者差异微小,可认为两种模型边坡初始状态基本一致。单、双排桩边坡的自振频率均随着输入波幅值的增大而减小,其终值分别为 21.84 Hz 和 24.15 Hz;阻尼比均随着输入波幅值的增大而增大,其终值分别为 13.03%和 9.35%。表明随着地震波的连续激励及激励幅值的不断增大,模型边坡整体刚度下降,内部结构逐渐发生松动,损伤恶化,耗能增加。

将白噪声工况 G1~G6 所得的自振频率、阻尼比分别与工况 G0 所得的自振频率、阻尼比做差值,并将此差值除以工况 G0 的自振频率、阻尼比,即可得到不同工况下模型边坡自振频率的降低率和阻尼比的增加率,结果如图 8 所示。在白噪声工况 G1~G3 时,两种模型边坡自振频率降低率和阻尼比增加率变化均较小,相互之间差异也较小;说明输入波幅值为 0.1g~0.3g 时,两种模型边坡内部损伤均较小,整体稳定性较高;其中,单排桩边坡的阻尼比增长更明显,说明其内部损伤略大。在 G4 工况时,单排桩边坡的自振频率降低率和阻尼比增加率较之前工况有明显增长,说明当输入幅值为 0.4g El-Centro 波后,单排桩边坡开始出现较为明显的内部损伤和整体刚度的退化^[26]。在白噪声 G5、G6 工况时,两种模型边坡自振频率降低率和阻尼比增加率均出现迅速增长,两种模型边坡最终自振频率降低率分别为 10.35%和 18.27%,最终阻尼比增加率分别为 68.78%和 120.54%。由此可见,随着输入波幅值的增大(0.5g~0.6g),边坡内部损伤变得

更为剧烈,整体刚度也出现大幅的退化。相较而言,单排桩边坡自振频率降低率和阻尼比增加率更大,说明单排桩边坡的内部累积损伤更多,整体刚度退化严重,边坡土体的非线性特性更为明显。

综上所述可知,相较于单排桩边坡,双排桩边坡在地震作用下表现出较小的总自振频率降低率和阻尼比增加率。这表明双排桩边坡内部损伤较少,支护结构与边坡的整体稳定性更强,从而实现了更优异的抗震加固效果。

3.4 坡体加速度响应分析

模型边坡的加速度响应规律,可用地震波峰值加速度(peak ground acceleration,简称 PGA)放大系数进行表征分析。PGA 放大系数通过提取模型边坡内部各点的加速度峰值除以台面加速度峰值得到^[27]。两种模型边坡各监测断面 PGA 放大系数如图 9 所示。

由图 9 可知,当输入波幅值为 0.1g~0.5g 时,两种模型边坡各测点 PGA 放大系数总趋势为随着输入波幅值的增大而增大,其中两种模型边坡监测断面 1 底部测点 A1-1 和监测断面 4 底部测点 A4-1 的 PGA 放大系数与台面加速度十分接近,随输入波幅值变化很小。其余监测断面底部测点 PGA 放大系数随输入波幅值增大略有增大,但变化幅值相对较小。同一监测断面各测点 PGA 放大系数增长率随着高程的增加而增大,底部测点的增长率最小,上部测点增长率最大。当输入波幅值为 0.6g 时,单、双排桩边坡各监测断面均出现部分测点的 PGA 放大系数降低的现象。结合两种模型边坡表面位移变化及宏观破坏特征可知,随着输入波幅值的进一步增大,两种模型边坡稳定性变差,坡体塑性损伤严重,改变了地震能量的传递状态,故而导致 0.6g 时 PGA 放大系数减少。

对比两种模型边坡相同位置处测点 PGA 放大系数随输入波幅值的变化可知,当输入波幅值为 0.1g~0.3g 时,两种模型边坡各测点 PGA 放大系数的总体差异较小,增长率较为接近。结合上文可知,此时两种模型边坡表面水平及竖向位移差距也较小,宏观上未出现较为明显的变化与差异,故认为在低幅值 El-Centro 波作用下,单、双排桩边坡整体处于稳定状态。值得注意的是,在输入波幅值为 0.3g 时,两种模型边坡局部测点(监测断面 3 上部测点 A3-3 和监测断面 4 上部测点 A4-4)的 PGA 放大系数开始出现差异,结合阻尼比和自振频率可知,此时单排桩边坡桩后表层土体的损伤略大于双排桩边坡,但宏观上并未形成塑性区贯通后的张拉裂缝以

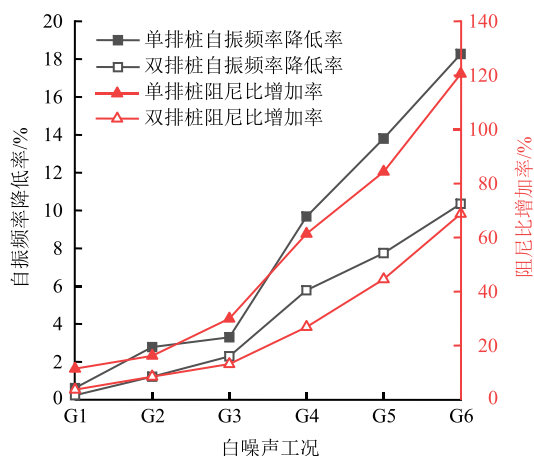


图 8 单、双排桩动力参数变化率

Fig.8 Change rate of dynamic parameters of single and double-row piles

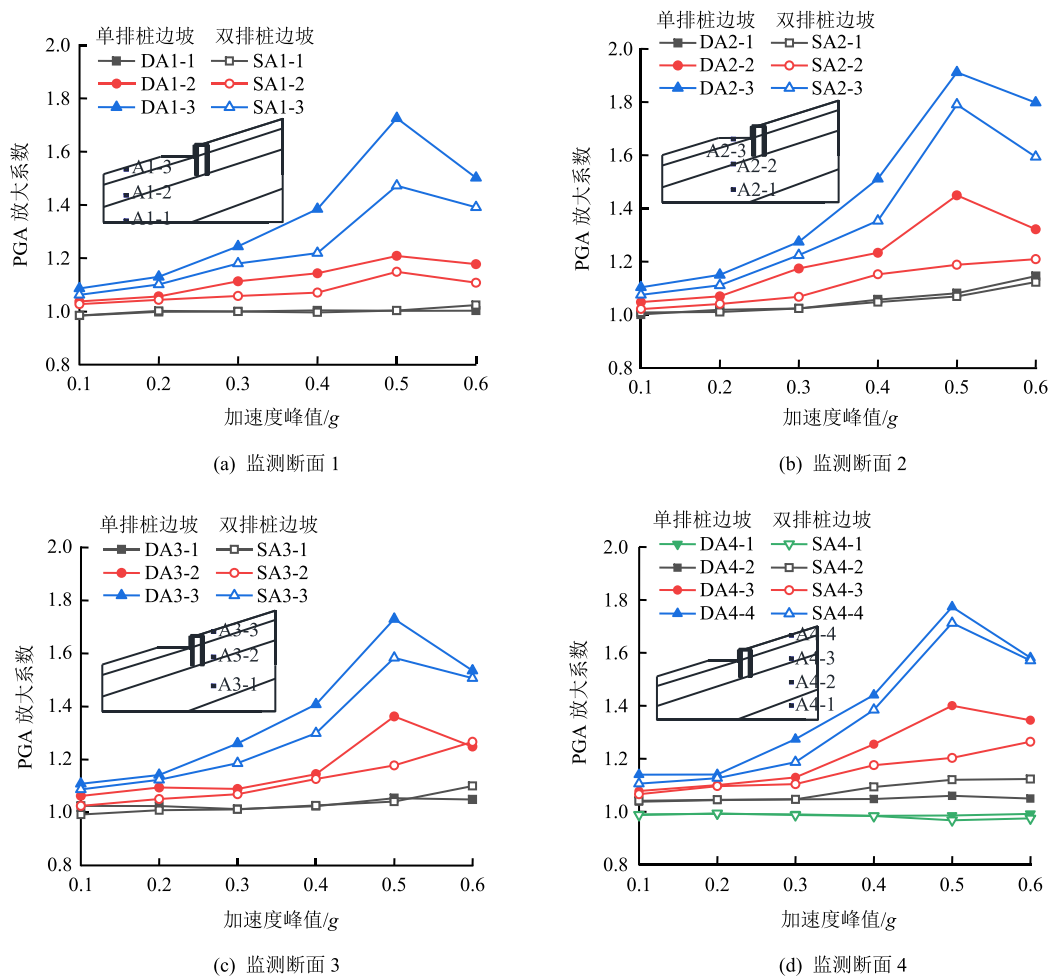


图9 边坡不同监测断面 PGA 变化曲线
Fig.9 PGA variation curves of different monitoring sections of the slope

及较大的累积位移差异,故认为 $0.3g$ 地震波作用下两种模型边坡整体仍保持稳定状态。当输入波幅值为 $0.4g \sim 0.5g$ 时,两种模型边坡底部测点的 PGA 放大系数仍未出现明显差异,但两种模型边坡各监测断面中上部测点 PGA 放大系数的差异愈发显著。同一测点处,单排桩边坡 PGA 放大系数随输入波幅值的增长速率大于双排桩边坡。这与上文单、双排桩边坡表面侧向水平位移和路基面竖向位移出现较大差异,单排桩边坡宏观破坏特征更为明显的现象具有一致性。

而当输入波幅值为 $0.6g$ 时,单、双排桩边坡的差异主要表现为 PGA 放大系数缩小这一现象发生的位置不同,单排桩边坡主要出现在中上部(土层为稍密细砂、松散细砂)位置,双排桩边坡主要出现在上部(土层为松散细砂)位置。究其原因是梅花形布置及增设连梁的双排桩能起到更好的加固作用,减少边坡在各级地震作用下的动力反应,使得坡体塑性损伤相对较小,损失位置也更靠近坡表。双排桩边坡监测断面 1 稍密细砂层也出现了 PGA

放大系数减小的情况,主要是因为单、双排抗滑桩对路堑前侧陡坡的抗震加固作用均不足,路堑前侧土体出现较大的塑性变形。

绘制两种模型边坡表层加速度计 A1-3、A2-3、A5-2、A3-3、A4-4 沿高程及沿水平变化情况,如图 10 所示,其中, z 为传感器所在高度, Z 为模型边坡总高度, h 为传感器至坡前的水平距离, H 为模型边坡坡后至坡前的水平距离。由图可知,当输入波幅值为 $0.1g \sim 0.2g$ 时,两种模型边坡 PGA 放大系数沿坡表高程竖直向上(水平方向从坡前到坡后)呈现缓慢增大的趋势,且两种模型边坡同一测点处的 PGA 放大系数差异亦很小。故可说明在低幅值的地震动作用下,两种模型边坡主要为弹性变形,边坡自身即可保持稳定状态,单、双排抗滑桩的支护作用未得到充分体现。而随着输入波幅值的进一步增大($\geq 0.3g$),边坡逐渐进入非线性变形阶段,单、双排抗滑桩的支护作用更加显著,由图 10(b)可知,同一工况下两种模型边坡表面 PGA 放大系数均先随着边坡自坡前至坡后方向(即随着高程的

增加)呈现出增大趋势,而在抗滑桩及挡土墙附近出现大幅降低,桩后边坡表层 PGA 放大系数又呈现出自坡前向坡后(即随着高程的增加)而增大的趋势。

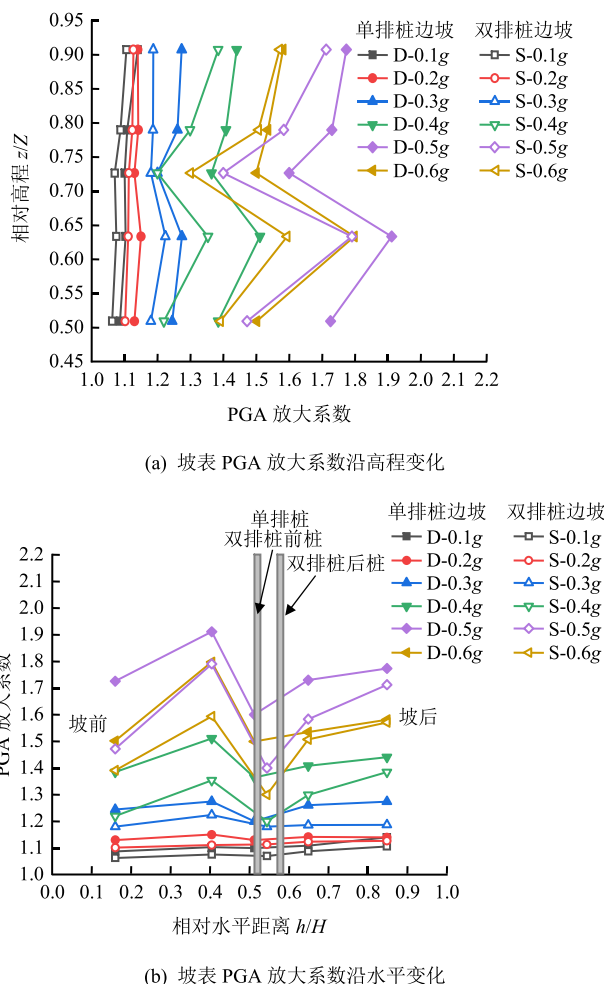


图 10 两种模型边坡表层 PGA 放大系数

Fig.10 PGA amplification coefficients for the surface layer of two model slopes

将模型边坡各测点平面位置及 PGA 放大系数网格化为矩阵后可生成相应 PGA 放大系数等值线云图^[28]。图 11 为单、双排桩边坡在 0.3g~0.6g El-Centro 波作用下的 PGA 放大系数云图。由图可知,随着地震波输入幅值的增大,两种模型边坡模型 PGA 放大系数均有所增大,且在输入波幅值为 0.5g 时达到最大。而在每级地震波作用下,两种模型边坡 PGA 放大系数沿同一竖直面均表现出明显的增加趋势,即存在高程效应。而两种模型边坡 PGA 放大系数沿坡面水平向外并未表现出单纯的趋表效应,而是呈现出波浪形的层状分布,这主要是因为抗滑桩等支挡结构的抗震加固作用减小了边坡的动力反应。对比同一工况下的两种模型边坡

PGA 放大系数云图可知,单排桩边坡的 PGA 放大系数层数相对较多,各层等值线间距较小,总体排布更为密集,故可认为单排桩边坡的动力反应更为强烈。

两种边坡模型在各工况下的 PGA 放大系数最大区域均位于路堑面及其与前端坡面交界处,结合上文坡表响应中路堑面竖向位移随输入波幅值的增大而增大,且存在震陷现象,可认为两种模型边坡在此处出现了第 1 塑性区。考虑到单排桩边坡路堑面震陷现象明显,PGA 放大系数更大,层数更多,可考虑在此处增加支护措施。两种边坡模型在各工况下的 PGA 放大系数次大区域均位于支挡结构后的坡表区域,结合上文桩后坡体位移值更大、宏观破坏特征更明显,可认为此处为第 2 塑性区,因抗滑桩位置及连梁的影响,双排桩边坡桩后坡体动力响应较弱。

3.5 坡表加速度傅里叶谱分析

频谱分析能够较好地反映信号频率的组成及其各自的幅值,是研究地震作用下边坡动力响应的重要手段。对台面测点及两种模型边坡 A4-4 位置处的测点进行快速傅里叶变化(fast Fourier transform, 简称 FFT),得到其加速度 FFT 谱如图 12 所示。

由图 12(a)可知,当输入波幅值为 0.3g 时,两种模型边坡 A4-4 测点的 FFT 谱有增大趋势,但其形态分布相较于台面测点的 FFT 谱无明显变化,卓越频段均为 0~10 Hz。FFT 谱在 2.5 Hz 和 8.5 Hz 附近出现 2 个峰值。故认为此时,边坡土体对输入波的改造作用较为微弱。两种模型边坡在 A4-4 测点处的 FFT 谱幅值略大于台面,说明地震波由边坡底部向顶部传递的过程中,能量有所增大。在卓越频段范围内,单排桩边坡的能量增大更明显。由图 12(b)可知,当输入波幅值为 0.6g 时,两种模型边坡 A4-4 测点的 FFT 谱形态、分布与台面测点的 FFT 谱出现了明显差异,形态分布上表现为由多峰值特征向单峰值转变,峰值频率在 8.5 Hz 附近。由此可见,此时边坡内部结构已经发生了变化。

坡顶测点 A4-4 与台面测点的 FFT 谱特征对比只能展现出形态与分布的差异,故引入参数 FFT 谱比,对坡顶测点 A4-4 的地震动放大效应^[29]及相应峰值频率^[30]进行分析。FFT 谱比定义为测点响应加速度与台面输入加速度 FFT 谱的比值。图 13 为在 0.3g~0.6g El-Centro 波作用下,两种模型边坡 A4-4 测点经滤波和平滑处理后的加速度 FFT 谱比曲线。

由图 13 可知,两种模型边坡的 FFT 谱比较为

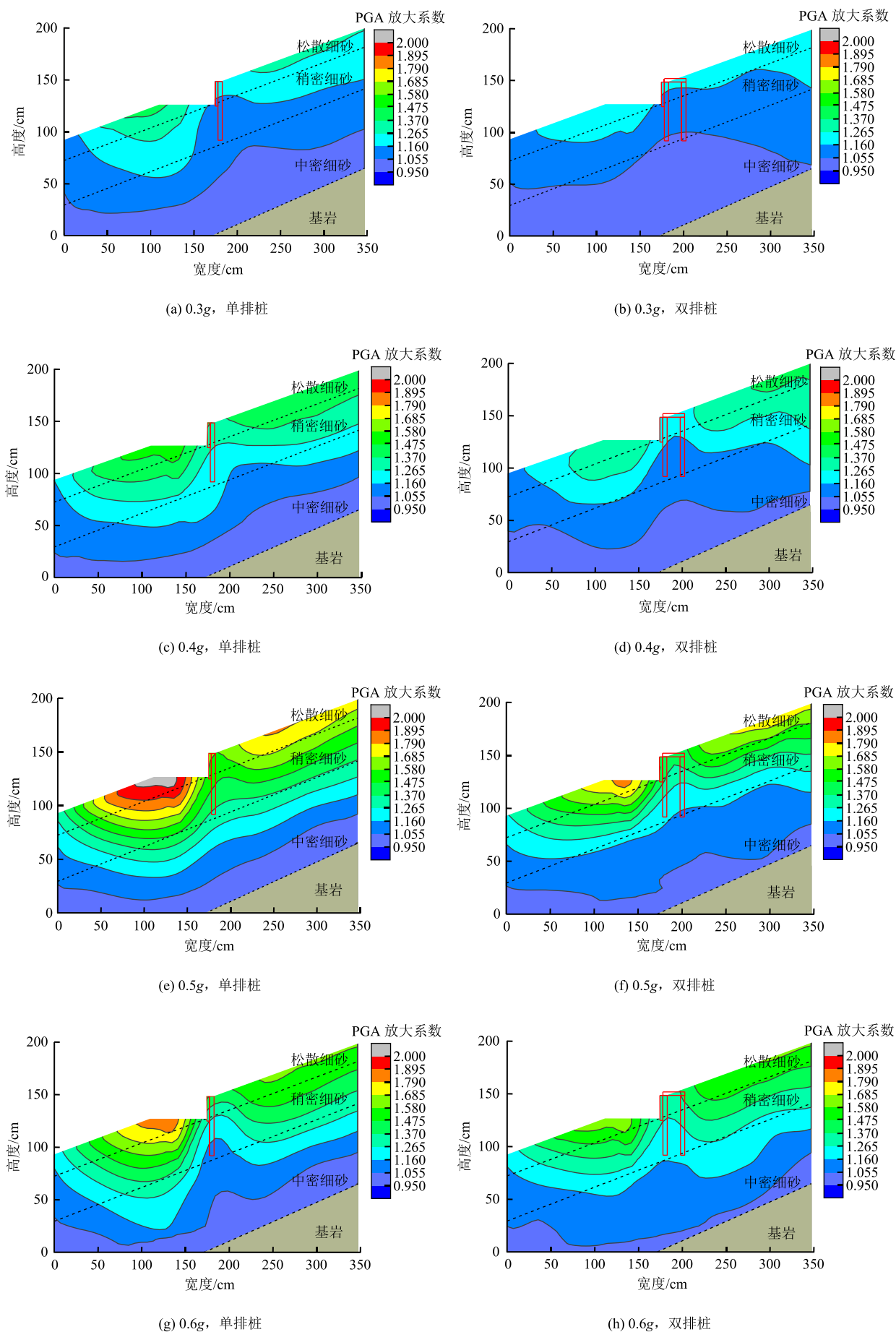


图 11 边坡 PGA 放大系数云图
Fig.11 Nephograms of PGA magnification factor of slope

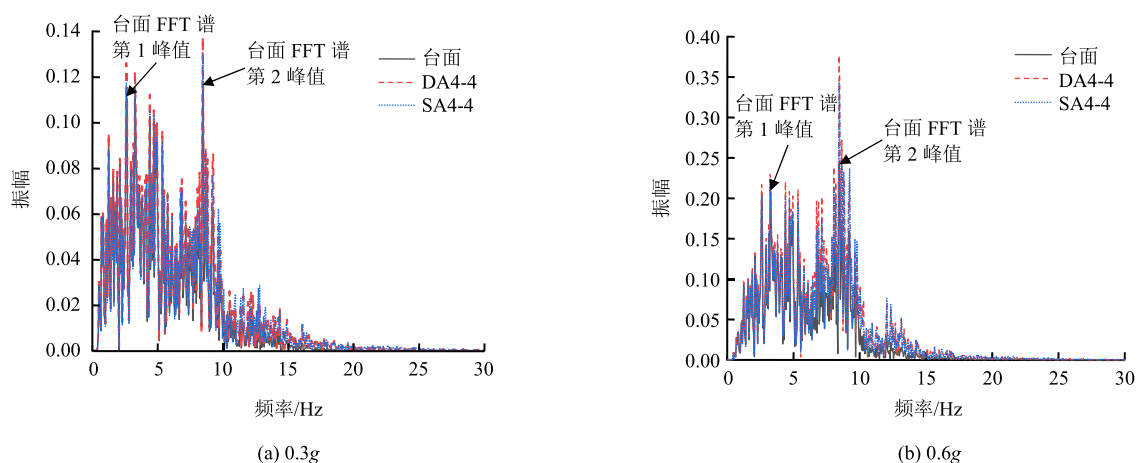


图 12 台面及坡顶加速度 FFT 谱

Fig.12 FFT spectrum of acceleration on the table and slope top

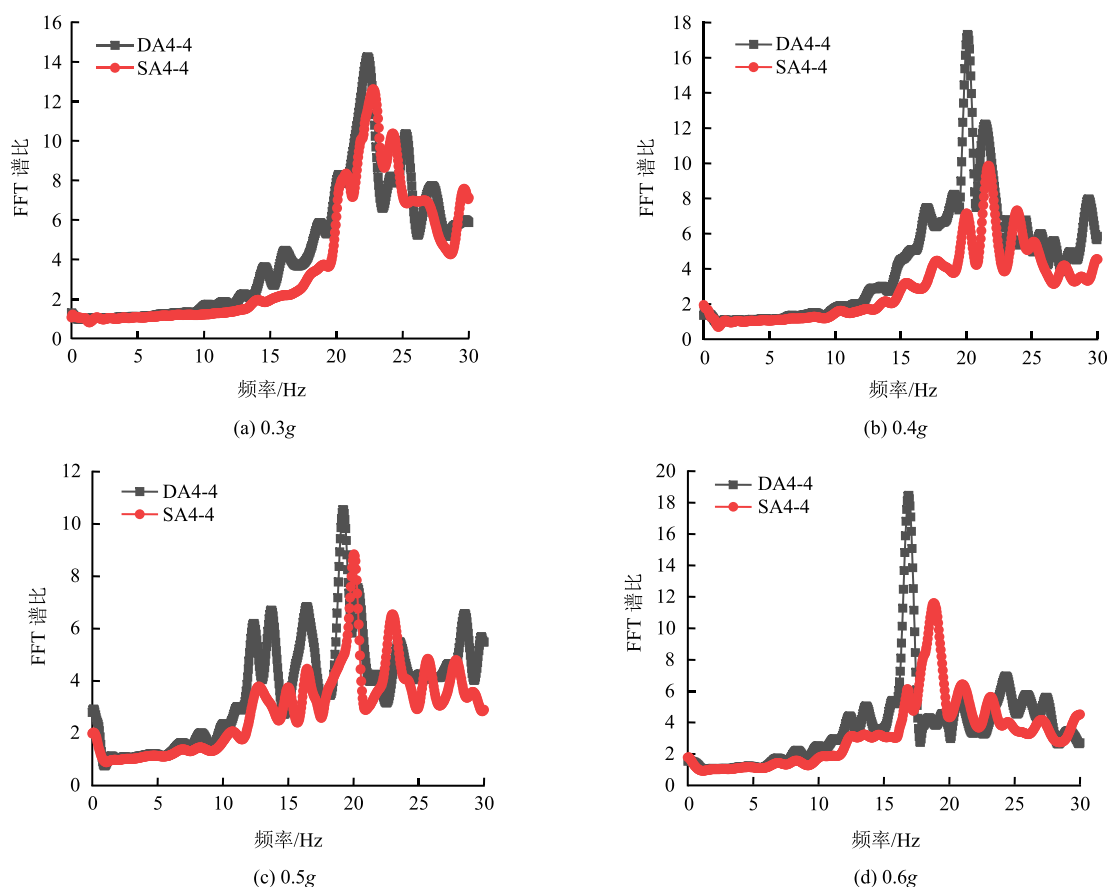


图 13 坡顶加速度 FFT 谱比

Fig.13 FFT spectral ratio of acceleration at slope top

相似。在 0~10 Hz 频段,当输入波幅值为 0.3g 时,两种模型边坡的 FFT 谱比表现出明显的相似,两者之间的差异并不明显,最大 FFT 谱比值为 0.43,即两者对地震动的放大倍数相差 0.43 倍。然而随着输入波幅值的增加 (>0.3g),在 5~10 Hz 频段,两种模型边坡的 FFT 谱比差异显著增大,最大 FFT 谱比值差值分别为 0.67、0.79 和 0.84,单排桩边坡 FFT 谱比值更大,即单排桩边坡在此频段的动力响应更为

剧烈。由上文可知,输入波的卓越频段为 0~10 Hz,故可认为在高幅值地震波 (0.4g~0.6g) 条件下,两种模型边坡在 5~10 Hz 频段的动力响应差异是导致边坡内部损伤和宏观破坏特征差异的主要原因。在 10~30 Hz 频段,两种模型边坡之间一直存在较为明显的差异,单排桩边坡的 FFT 谱比大于双排桩边坡。

两种模型边坡最大 FFT 谱比频段,即为它们各

自的共振频段,随着输入波幅值的增大而逐渐前移,这与上文边坡自振频率随输入地震动幅值的增大而减小保持一致。比较两种模型边坡在不同地震动幅值下的最大 FFT 谱比频段可知,当输入波幅值为 $0.3g$ 时,两种模型边坡最大 FFT 谱比频段基本一致,然而随着地震动幅值的增大,单排桩边坡的最大 FFT 谱比频段明显降低,而双排桩边坡最大 FFT 谱比频段也有所降低,但相对较小,与上文地震作用下,单排桩边坡的自振频率降低率更大一致。

4 边坡损伤机制分析

总结两种模型边坡随输入波幅值产生差异损伤的过程如图 14 所示。当输入波幅值为 $0.1g \sim 0.2g$ 时,单、双排桩支护作用不明显,边坡自身即可保持稳定状态,故两模型边坡动力响应未出现明显差异。当输入波幅值为 $0.3g$ 时,单、双排桩边坡开始出现动力响应的差异,表现为单排桩边坡整体阻尼比增加率更大,局部测点的 PGA 放大系数增长明显,主要原因是在地震波作用下,两模型边坡土体产生差异损伤,但因单、双排抗滑桩的支护作用,两者在宏观上并未产生明显的差异和损伤,整体仍处于稳定状态。当输入波幅值为 $0.4g$ 时,单、双排桩边坡出现了明显的整体差异,单排桩边坡内部损伤和整体刚度退化较为显著;宏观出现可辨差异,

单排桩边坡桩后坡面及路面出现少量微小且断续的张拉裂缝;桩后坡体相同位置处,单排桩边坡的累计位移约为双排桩边坡的两倍。当输入波幅值为 $0.5g \sim 0.6g$ 时,单、双排桩抗震加固作用的差异进一步凸显,单排桩边坡动力响应更为剧烈,宏观损伤严重,存在整体失稳破坏的风险;而双排桩边坡仅存在局部破坏,整体仍处于较稳定状态。双排桩的布设方式是造成上述差异的主要原因,梅花形布设使得前后排桩有效分担桩后土体的推力,同时连梁充分发挥其桁架作用,提高了双排桩协调变形能力,从而进一步增强了双排桩的抗震性能。

根据上文,可将抗滑桩支护的路堑边坡的损伤过程总结为 3 个阶段:

(1) 边坡自稳定阶段(单排桩边坡为 $0.1g \sim 0.3g$, 双排桩边坡为 $0.1g \sim 0.4g$): 边坡整体表现为弹性变形,稳定性强,坡表出现少量砂粒滚落的现象。

(2) 坡表土体塑性变形阶段(单排桩边坡为 $0.4g$, 双排桩边坡为 $0.5g \sim 0.6g$): 坡顶及路面出现张拉裂缝,桩前出现砂粒堆积的现象,说明此时土体出现了较大的塑性变形。

(3) 边坡局部塌陷溃散阶段(单排桩边坡为 $0.5g \sim 0.6g$): 在这一阶段,裂缝区域开始扩展贯通,边坡桩后表层坡体及路面出现局部失稳破坏。

从两种模型边坡的损伤过程可看出该路堑边坡的失稳模式为震裂-溃散型^[31],单、双排桩均发挥其侧向约束作用,阻止边坡两塑性区的贯通,提高边坡整体稳定性。在 $0.1g \sim 0.6g$ El-Centro 波作用下,单排桩边坡发生了 3 阶段的损伤破坏,而双排桩边坡仅发生前两阶段的损伤破坏,说明双排桩边坡具有更高的安全储备,其抗震加固效果明显优于单排桩。

振动台试验较好地揭示了单、双排桩支护的路堑边坡在地震作用下的损伤过程,可为类似边坡的防治提供一定的参考。

5 结 论

本文通过振动台试验,研究了在 El-Centro 波作用下,单、双排桩支护路堑边坡的动力响应,主要得出以下结论:

(1) 输入波幅值对单、双排桩模型边坡的影响较大,随着幅值的增加,边坡内部损伤逐渐累积,整体刚度下降。输入波幅值为 $0.1g \sim 0.3g$ 时,两模型边坡总体动力响应相似,均处于稳定状态。输入波幅值为 $0.4g$ 时,单排桩边坡出现少量张拉裂缝,

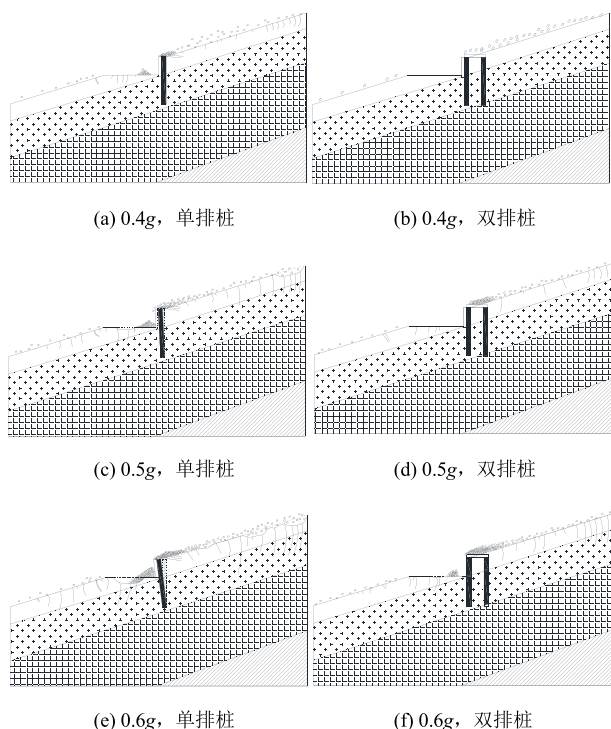


图 14 两种模型边坡差异损伤过程示意图

Fig.14 Schematic diagram of the differential damage process of two model slopes

地震损伤更严重, 非线性特征更明显。输入波幅值为 $0.5g \sim 0.6g$ 时, 单排桩边坡局部破坏严重, 路堑面震陷, 整体稳定性低, 双排桩边坡表层土体松散, 存在张拉裂缝。

(2) 两模型边坡 PGA 放大系数总体随输入波幅值的增大而增大, 存在明显的高程效应。输入波幅值为 $0.6g$ 时, 两模型边坡部分测点 PGA 放大系数出现缩减, 主要是因为边坡内部塑性损伤累积, 改变了地震能量的传递状态。结合宏观特征可知, 两种模型边坡均存在双塑性区, 分别位于路堑面附近和坡顶处, 应考虑在相关位置增设其他支护措施; 单排桩边坡塑性区范围更广, 破坏更严重。

(3) 单、双排桩的支护作用随输入波幅值的增大而体现, 单、双排桩有效抑制了 PGA 放大系数沿坡面向上而增大的趋势, 其侧向约束作用也抑制了双塑性区贯通。由于布置方式及连梁的存在, 双排桩的抗震加固作用明显优于单排桩, 其桩后坡体塑性损伤明显减弱, 整体稳定性高。

(4) FFT 谱、FFT 谱比表明, 输入波卓越频段、形态分布及幅值均会影响边坡的动力响应特性。输入幅值为 $0.4g \sim 0.6g$ 时, 单、双排桩边坡在 $5 \sim 10$ Hz 频段地震动谱放大效应的差异是两者动力响应特性差异的主要原因。

(5) 抗滑桩支护的路堑边坡损伤过程可分为 3 个阶段: 边坡自稳定阶段→坡表土体塑性变形阶段→边坡局部塌陷溃散阶段, 表现为震裂-溃散型失稳模式。在 $0.1g \sim 0.6g$ El-Centro 波作用下, 单排桩边坡损伤破坏历经 3 阶段, 双排桩边坡损伤破坏历经前两阶段。

参 考 文 献

- [1] 宋章, 朱颖, 魏永幸, 等. 滇藏铁路三江并流区工程地质减灾选线研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(2): 1-6.
SONG Zhang, ZHU Ying, WEI Yong-xing, et al. Research on the engineering geological hazards-reduction route selection in Three Parallel Rivers regions for the Yunnan-Tibet Railway[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2019, 36(2): 1-6.
- [2] 罗运武, 韩鹏, 郑光玉, 等. 川藏铁路雅安至康定段环保选线研究[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(8): 1-5.
LUO Yun-wu, HAN Peng, ZHENG Guang-yu, et al. Research on the environment-friendly railway route selection of Ya'an-Kangding section of Sichuan-Tibet Railway[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2017, 34(8): 1-5.
- [3] 杨宗佶, 丁朋朋, 王栋, 等. 川藏铁路(康定至林芝段)沿线滑坡风险分析[J]. 铁道学报, 2018, 40(9): 97-103.
YANG Zong-ji, DING Peng-peng, WANG Dong, et al. Landslide risk analysis on Sichuan-Tibet Railway (Kangding to Nyingchi section)[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2018, 40(9): 97-103.
- [4] 张永双, 杜国梁, 郭长宝, 等. 川藏交通廊道典型高位滑坡地质力学模式[J]. 地质学报, 2021, 95(3): 605-617.
ZHANG Yong-shuang, DU Guo-liang, GUO Chang-bao, et al. Research on typical geomechanical model of high-position landslides on the Sichuan-Tibet traffic corridor[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(3): 605-617.
- [5] 严健, 何川, 汪波, 等. 雅鲁藏布江缝合带深埋长大隧道群岩爆孕育及特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4): 769-781.
YAN Jian, HE Chuan, WANG Bo, et al. Inoculation and characters of rockbursts in extra-long and deep-lying tunnels located on Yarlung Zangbo suture[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(4): 769-781.
- [6] ZHANG C L, SU L J, JIANG G L, et al. Seismic behaviour of sandy cutting slope in large-scale shaking table test[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2023, 82(1): 43.
- [7] ADACHI Y, MIURA K, MIHARA M, et al. Model shaking table test on the damage to pile foundation in earthquake-induced lateral flow of ground with non-liquefied surface layer[C]//The 13th International offshore and Polar Engineering Conference. Honolulu, Hawaii: ISOPE, 2003.
- [8] 叶海林, 郑颖人, 李安洪, 等. 地震作用下边坡抗滑桩振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(2): 251-257.
YE Hai-lin, ZHENG Ying-ren, LI An-hong, et al. Shaking table tests on stabilizing piles of slopes under earthquakes[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(2): 251-257.
- [9] CHEN H Y, JIANG G L, ZHAO X H, et al. Seismic response evaluation of high-steep slopes supported by anti-slide piles with different initial damage based on shaking table test[J]. *Materials*, 2022, 15(11): 3982.
- [10] 刘昌清, 蒋楚生, 梁瑶, 等. 高烈度地震区高边坡支挡结构振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊 2): 3798-3802.
LIU Chang-qing, JIANG Chu-sheng, LIANG Yao, et al.

- Study of shaking table test for high slope retaining structure on highly seismic region[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(Suppl.2): 3798-3802.
- [11] ZHANG C L, JIANG G L, LEI D, et al. Large-scale shaking table test on seismic behaviour of anti-slide pile-reinforced bridge foundation and gravel landslide: a case study[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2021, 80(2): 1303-1316.
- [12] 赖杰, 刘云, 辛建平, 等. 大理西站支护边坡振动台试验及数值模拟[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(5): 870-878.
- LAI Jie, LIU Yun, XIN Jian-ping, et al. Shaking table test and numerical analysis on reinforced slope at Dali West Railway Station[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2020, 54(5): 870-878.
- [13] 康景文, 刘昌清, 邓夷明, 等. 地震力作用下单排与双排桩支挡结构性状试验对比分析[J]. 地震工程学报, 2021, 43(1): 195-204.
- KANG Jing-wen, LIU Chang-qing, DENG Yi-ming, et al. Contrastive experimental analysis of characteristics of single- and double-row pile retaining structures under earthquakes[J]. **China Earthquake Engineering Journal**, 2021, 43(1): 195-204.
- [14] WU H G, PAI L F. Shaking table test for reinforcement of soil slope with multiple sliding surfaces by reinforced double-row anti-slide piles[J]. **Journal of Mountain Science**, 2022, 19(5): 1419-1436.
- [15] ZHAO B, WANG Y S, WANG Y, et al. Retaining mechanism and structural characteristics of h type anti-slide pile (hTP pile) and experience with its engineering application[J]. **Engineering Geology**, 2017, 222: 29-37.
- [16] 申永江, 邓飏, 杨明, 等. 门架式双排抗滑桩的弹塑性模型与计算分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 1): 149-155.
- SHEN Yong-jiang, DENG Biao, YANG Ming, et al. Elastoplastic models and calculation analysis of portal double-row anti-slide piles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(Suppl.1): 149-155.
- [17] 申永江, 杨明, 项正良. 双排长短组合桩与常见双排桩的对比研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增刊 2): 96-100.
- SHEN Yong-jiang, YANG Ming, XIANG Zheng-liang. Comparative study on double-row piles with different lengths several common anti-slide piles[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(Suppl.2): 96-100.
- [18] 李丞, 苏立君, 张崇磊, 等. 粉土密实度对斜坡动力响应特性影响的振动台试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(11): 4124-4136.
- LI Cheng, SU Li-jun, ZHANG Chong-lei, et al. Shaking table tests on influences of dense degree of silt on dynamic response characteristics of slopes[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2021, 52(11): 4124-4136.
- [19] 雷达, 蒋关鲁, 刘伟豪, 等. 前后排抗滑桩加固滑坡桥基的振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(9): 2297-2304.
- LEI Da, JIANG Guan-lu, LIU Wei-hao, et al. Shaking table test on slope foundation of bridge reinforced with two rows of anti-slide piles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(9): 2297-2304.
- [20] 付正道, 蒋关鲁, 刘琪, 等. 含倾斜夹层滑坡内抗滑桩和桥基耦合作用的试验与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(9): 2152-2161.
- FU Zheng-dao, JIANG Guan-lu, LIU Qi, et al. Experiment and numerical simulation on interaction between piled bridge foundation and stabilizing piles in the slope with intercalated layer[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2018, 37(9): 2152-2161.
- [21] 胡垚, 雷华阳, 雷峥, 等. 三向地震作用下叠交隧道地震响应振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(增刊 2): 104-116.
- HU Yao, LEI Hua-yang, LEI Zheng, et al. Shaking table test on seismic response of stacked tunnels under three-directional earthquake wave excitation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(Suppl.2): 104-116.
- [22] 许成顺, 豆鹏飞, 高嵩成, 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.
- [23] 雷浩, 吴红刚, 钱建国, 等. 空间小净距交叉隧道动力响应振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(5): 92-100.
- LEI Hao, WU Hong-gang, QIAN Jian-gu, et al. Shaking table tests for dynamic responses of crossing tunnels with small space clearances[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2023, 42(5): 92-100.

- [24] 魏明, 罗强, 蒋良淮, 等. 填土加筋对悬臂式挡墙地震响应影响的模型试验研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(19): 237-247.
- WEI Ming, LUO Qiang, JIANG Liang-wei, et al. Model tests for effect of fill reinforcement on seismic response of cantilever retaining wall[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2022, 41(19): 237-247.
- [25] LIU X R, HE C M, LIU S L, et al. Dynamic response and failure mode of slopes with horizontal soft and hard interbeddings under frequent microseisms[J]. **Arabian Journal for Science and Engineering**, 2018, 43(10): 5397-5411.
- [26] 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 Ming-zhu, WANG Chen, GU Kun-sheng, 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.
- [27] ZHOU Z J, LEI J T, SHI S B, et al. Seismic response of aeolian sand high embankment slopes in shaking table tests[J]. **Applied Sciences**, 2019, 9(8): 1677.
- [28] 冯海洲, 蒋关鲁, 郭玉丰, 等. 降雨后地震作用下基覆型边坡动力响应特性的振动台试验研究[J]. 中国铁道科学, 2023, 44(3): 1-12.
- FENG Hai-zhou, JIANG Guan-lu, GUO Yu-feng, et al. Shaking table test on dynamic response characteristics of bedrock and overburden layer slope under earthquake after rainfall[J]. **China Railway Science**, 2023, 44(3): 1-12.
- [29] 巴振宁, 吴孟桃, 梁建文. 坡体几何参数与弹性模量对岩质斜坡地震动力响应的影响: IBEM 求解[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(8): 1578-1592.
- BA Zhen-ning, WU Meng-tao, LIANG Jian-wen. Influence of geometric parameters and elastic modulus on seismic dynamic response of rock slopes by IBEM[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2019, 38(8): 1578-1592.
- [30] STOLTE A C, COX B R, LEE R C. An experimental topographic amplification study at Los Alamos National Laboratory using ambient vibrations[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 2017, 107(3): 1386-1401.
- [31] 杨兵, 王植, 邹晗轩, 等. 不同类型地震波作用下堆积体边坡动力响应及失稳特征研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(增刊 1): 202-210.
- YANG Bing, WANG Zhi, ZOU Han-xuan, et al. Dynamic response and failure characteristic of accumulation slope under action of different kinds of seismic load[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2019, 52(Suppl.1): 202-210.
-
- 上接第 1762 页
- [14] LI J C, YUAN W, LI H B, et al. Study on dynamic shear deformation behaviors and test methodology of sawtooth-shaped rock joints under impact load[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2022, 158: 105210.
- [15] HAN Z Y, LI J C, WANG H J, et al. Initiation and propagation of a single internal 3D crack in brittle material under dynamic loads[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2023, 285: 109299.
- [16] 柴少波, 宋浪, 刘欢, 等. 酸性干湿循环下充填节理岩石劣化性能试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(11): 2993-3002.
- CHAI Shao-bo, SONG Lang, LIU Huan, et al. Experimental study on deterioration characteristics of filled jointed rock under dry-wet cycles in acidic environment[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(11): 2993-3002.
- [17] 王文东, 邓华锋, 李建林, 等. 基于有效受剪面积的节理面吻合度量化方法研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(增刊 1): 249-258.
- WANG Wen-dong, DENG Hua-feng, LI Jian-lin, et al. Quantitative method of joint matching degree based on effective shear area[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(Suppl.1): 249-258.
- [18] YAO W, XU Y, WANG W, et al. Dependence of dynamic tensile strength of Longyou sandstone on heat-treatment temperature and loading rate[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2016, 49(10): 3899-3915.