

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.001



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



ECC 混凝土桩板墙支挡边坡抗震性能 振动台模型试验研究

湛建霖¹, 丁选明¹, 吴琪², 刘学成¹

(1. 重庆大学土木工程学院; 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;
2. 重庆大学溧阳智慧城市研究院, 江苏溧阳 213300)

摘要: 在强震作用下, 传统桩板墙支护结构易出现不可恢复的损伤和变形, 工程水泥基复合材料 (ECC) 具有较高的抗拉强度和拉应变硬化特性, 在约束裂缝开展、抗弯承载力及耗能能力上优于普通钢筋混凝土, 但 ECC 桩板墙支护结构的抗震性能尚不明确。由此, 开展 ECC 桩板墙支护结构 (ECC 桩板) 和普通钢筋混凝土浇筑的桩板墙支护结构 (RC 桩板) 振动台试验, 对比其动力响应和破坏特性。结果表明: ECC 桩板的抗震性能优于 RC 桩板; 在相同的地震动作用下, ECC 桩板支护下边坡的动力响应小于 RC 桩板支护时, 在更高强度的地震动作用下, 相同材料强度的 ECC 桩板可保证边坡稳定性; 在动力作用下, ECC 桩板和 RC 桩板表现出较明显的弹性和弹塑性, 在输入地震动较小时, 两种支护结构的动力响应较为一致; 当输入地震动峰值较大时, ECC 桩板支护下边坡的加速度放大系数为 RC 桩板支护下的 0.77~0.9 倍, ECC 桩板和 RC 桩板的桩背动土压力分布都表现为“双峰型”, RC 桩背动土压力峰值为 ECC 桩背的 5 倍左右; 两种支护结构的桩顶残余位移与震级呈指数关系, RC 桩板的桩顶残余位移为 ECC 桩板的 2 倍。破坏阶段, ECC 桩板仅在嵌固端面出现多条细微裂缝, RC 桩板出现抗弯破坏特征, 钢筋和混凝土相对滑移明显, 位移不可控。

关键词: 桩板式挡墙; 工程水泥基复合材料; 振动台试验; 动力响应

中图分类号: TU435 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2023)05-0081-13

Shaking table model test on seismic performance of retaining slope with ECC anti-sliding sheet pile wall

SHEN Jianlin¹, DING Xuanming¹, WU Qi², LIU Xuecheng¹

(1. School of Civil Engineering; Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Institute for Smart City of Chongqing University in Liyang, Liyang 213300, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: The traditional anti-sliding sheet pile wall is prone to irreparable damage and deformation under strong earthquake. Engineered Cementitious Composite (ECC) has high tensile strength and tensile strain

收稿日期: 2022-08-07

基金项目: 国家自然科学基金 (52178312); 重庆英才计划优秀科学家项目 (cstc2021ycjh-bgzxm0051)

作者简介: 湛建霖 (1998-), 男, 主要从事边坡工程研究, E-mail: sjlcqu@163.com。

丁选明 (通信作者), 男, 教授, 博士, E-mail: dxmhhu@163.com。

Received: 2022-08-07

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52178312); Chongqing Talents Program (No. cstc2021ycjh-bgzxm0051)

Author brief: SHEN Jianlin (1998-), main research interest: slope engineering, E-mail: sjlcqu@163.com.

DING Xuanming (corresponding author), professor, PhD, E-mail: dxmhhu@163.com.

hardening characteristics, and is superior to conventional reinforced concrete in terms of restricting crack development, bending capacity and energy dissipation capacity. But the seismic performance of ECC anti-sliding sheet pile wall supporting structure is not clear yet. Therefore, shaking table tests are carried out on ECC pile-sheet wall (ECC pile-sheet) and RC pile-sheet wall (RC pile-sheet) to compare their dynamic response and failure characteristics. The results show that the seismic performance of ECC pile-sheet is better than that of RC pile-sheet. Under the same ground motion amplitude input, the dynamic response of the slope under ECC pile-sheet is less significant than that under RC pile-sheet, and the ECC pile-sheet with the same compressive strength can ensure the stability of the slope under the action of higher ground motion. ECC pile-sheet and RC pile-sheet show obvious elastic and elastic-plastic stages under dynamic action, and the dynamic responses of the two pile-sheet are consistent when the ground motion is small. When the amplitude of ground motion is large, the acceleration amplification coefficient of slope under ECC pile-sheet is 0.77-0.9 times that under RC pile-sheet. The soil pressure distribution of ECC pile-sheet and RC pile-sheet is "bimodal", and the peak of soil pressure behind RC pile is about 5 times that of ECC pile. The pile top residual displacement and magnitude of the two pile-sheet are distributed in exponential form, and the residual displacement of RC pile sheet is twice that of ECC pile-sheet. In the failure stage, ECC pile-sheet only has several fine cracks on the fixed part, RC pile-sheet is of bending failure characteristics, steel bar and concrete slip obviously, and the displacement is uncontrollable.

Keywords: anti-sliding sheet pile wall; engineered cementitious composite; shaking table test; dynamic response

中国位于环太平洋地震带与欧亚地震带之间,地震断裂带活跃,受欧亚地震带的影响,西部地区地震动尤为频繁。如今,中国西部正在进行大规模基础设施建设,受多山的地形特性影响,建设中存在大量的边坡稳定性问题。边坡支护是一种常见且有效的保持边坡稳定性的技术手段,具有良好且稳定的抗震性能是支护结构选择的重要指标之一。张建经等^[1]在汶川地震后开展了大量公路、铁路边坡震害调查,结果显示,桩板式挡墙、加筋土挡墙、锚索框架等柔性支护结构的破坏占有支护结构破坏的1.4%。其中,桩板式挡墙已经广泛运用于边坡支挡和滑坡治理工程中,姚令侃等^[2]和吉随旺等^[3]的震害调研结果也说明桩板墙具有较好的抗震性能。

桩板式挡墙由抗滑桩发展而来,与传统抗滑桩不同,它是在半埋式悬臂嵌固抗滑桩桩间逐层挂板或搭板形成的^[4]。现有研究中,王丽萍等^[5]通过离心机试验研究了抗滑桩加固边坡的地震响应和桩土相互作用规律,在试验现象中发现,由石膏制成的抗滑桩发生了浅层抗弯破坏,造成边坡的过桩破坏;于玉贞等^[6]采用微混凝土抗滑模型桩,通过离心机模型试验研究了抗滑桩在不同情况下的破坏模式。第1种情况是在静力作用下抗滑桩开裂后受地震动作用继续开裂至完全断桩;第2种情况是静力条件下稳定的边坡加固桩在地震动作用下开裂。姚令侃等^[2]对汶川震害的调查发现,桩板支护结构也表现出部分外倾。由抗滑桩发展而来、具有相似结构特性的桩板墙也面临相同问题。服役期间的

各种外力作用,包括前期地震动作用,都会降低支护结构的工作性能,这与混凝土的材料特性有一定关系。黄哲^[7]通过振动台试验对带有不同程度损伤的桩板墙进行了研究,结果表明,前期损伤降低了支护结构服役期间的功能。已有研究表明,在强震作用下,传统桩板墙结构韧性不足,容易出现脆性破坏。

工程水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composite, ECC)基于微观力学设计,采用聚乙烯醇(PVA)纤维作为增强材料,使其具有超高韧性和超高延性。已有研究表明,在直接拉伸作用下, ECC具有应变硬化、裂缝细密和超高极限拉应变等特性,其极限拉应变能达到3%以上,是普通混凝土的百倍以上^[8-9]。ECC材料已被广泛应用于实际工程中,以提高结构整体性和抗震性能。Zhang等^[10]开展了ECC短柱和钢筋混凝土短柱的低周往复加载试验研究,结果表明,由ECC材料构成的预应力混凝土短柱的抗裂能力、抗剪强度、塑性变形能力和耗能能力均显著高于同等轴向荷载下的钢筋混凝土短柱。Zhang等^[11]将ECC材料用于桥墩结构,证明其具有较好的抗震能力和损伤控制能力。黄福云等^[12]开展了砂土中ECC桩和钢筋混凝土桩的低周往复模拟静力试验,证明在相同荷载作用下ECC桩破坏程度更轻,抗开裂能力更强,滞回曲线更饱满。

关于将ECC材料运用于桩板式挡墙的研究,目前还未见相关报道。为此,笔者开展了ECC桩板墙

和钢筋混凝土桩板墙的振动台试验,研究两者的地震动响应、抗震性能和变形特性等。

1 试验概况

试验在重庆大学岩土工程实验室完成,振动台台面尺寸为 1.2 m×1.2 m,工作频率 0~50 Hz,最大载重 1 t。水平最大位移 100 mm,最大可施加加速度 1.2g。采用振动台配套设计的刚性模型箱开展试验,考虑到刚性模型箱“边界效应”的影响,对模型箱边界进行处理。在振动方向上,模型箱内侧粘贴 30 mm 厚的聚苯乙烯泡沫塑料板。为减少模型与垂直振动方向的模型箱边界的摩擦,在模型箱内侧有机玻璃板上涂抹一层凡士林。地震动由振动台台面输入,在模型箱底部铺设一层 3 cm 厚的碎石层,以增大摩擦力,底部模拟摩擦边界^[13]。

1.1 模型介绍

中国西南部地形切割相对强烈、山区坡体高差显著、坡面陡峭且险峻,在建设用地区附近存在大量高陡边坡,对公路、铁路、桥梁、水电等工程建设具有较大影响^[14-16]。在汶川 8.0 级地震震害调查中也发现典型的高陡边坡滑坡现象^[17-18]。这类边坡通常由下覆的陡峭基岩和上覆滑体构成,根据现有文献^[19],综合多种边坡破坏类型,结合现有该类边坡的破坏模式和基本参数,设计图 1 所示概化模型,以开

展振动台试验。边坡采用抗滑桩板支护,以保证其稳定性,混凝土桩为边长 10 cm、桩长 110 cm 的方桩,混凝土板为 2 cm 厚的钢筋混凝土板,桩间距 30 cm,对应原型直径 1 m 的混凝土桩板墙支护结构。考虑到振动台尺寸限制,宽度方向布置 3 个混凝土桩。其中两个边桩采用长 10 cm、宽 5 cm 的半桩,关于动力响应的元件布设在中桩断面后,满足一般边坡支护的平面应变特性。

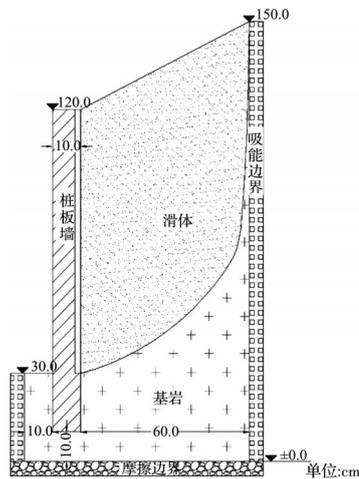
1.2 相似比设计

根据 Buckingham π 定理和现有研究基础^[20],选取几何尺寸 L 、加速度 a 及等效密度 ρ 为基础物理量。几何尺寸相似比 S_L 取为 1:10,质量密度相似比 S_ρ 取为 1:1,因试验在 1g 条件下开展,加速度相似比 S_a 设计为 1:1。其余参数相似比可根据量纲分析得到,具体结果见表 1。

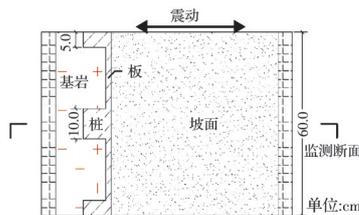
表 1 相似比设计

Table 1 Design of similarity ratio

物理量	相似关系	相似常数
几何尺寸	S_L	1:10(选定)
质量密度	S_ρ	1:1(选定)
加速度	S_a	1:1(选定)
弹性模量	$S_E = S_L S_\rho S_a$	1:10
应力	$S_\sigma = S_L S_\rho S_a$	1:10
应变	S_ϵ	1:1
黏聚力	$S_c = S_L S_\rho S_a$	1:10
内摩擦角	S_ϕ	1:1
时间	$S_t = S_L^{0.5} S_a^{-0.5}$	1:3.16
频率	$S_f = S_L^{-0.5} S_a^{0.5}$	3.16:1



(a) 正视图



(b) 俯视图

图 1 模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of model

1.3 模型所用材料及测点布置

模型试验土体采用由河沙、黏土和水配置而成的相似材料,主要控制滑体强度参数。根据文献^[19]总结并结合相似比,试验所用土体黏聚力为 8 kPa,内摩擦角为 28°。边坡下覆基岩采用 C25 混凝土,保证支护结构具有足够的支反力。钢筋混凝土桩板墙采用微混凝土,ECC 桩板墙采用低强度的 ECC 材料,支护结构中所用钢筋采用镀锌铁丝。微混凝土抗压强度为 8.5 MPa,弹性模量为 4.2 GPa; ECC 抗压强度为 7.2 MPa,弹性模量为 3.5 GPa。因为浇筑过程不采用粗骨料,相对于混凝土,ECC 弹性模量较小^[8]。

采用加速度计、土压力盒及激光位移计监测坡体和支护结构的动力响应和宏观变形。加速度计主要布置在坡体内部,测定坡体沿高程的加速度响应,同时在振动台台面布设一加速度计测定加速度输入;土压力盒布置在模型中桩桩背,间距 15 cm;激光位移计固定在模型箱上,监测支护结构的桩顶

位移。监测布置见图 2。测量时采集精度由采集仪控制,试验后对试验结果进行低通 50 Hz 滤波处理。

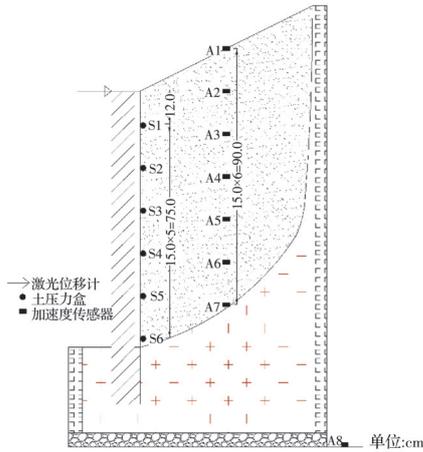


图 2 传感器布置图

Fig. 2 Layout diagram of sensors

1.4 加载方案

试验施加的荷载为单向正弦波地震动作用,震动方向如图 1(b)所示。一般而言,地震动频率集中在 1~2 Hz,考虑到频率相似比,模型试验中输入 5 Hz 的正弦波作为振动激励。结合现有研究,根据时间相似比,设计正弦波作用时间为 20 s,采用的正弦波如图 3 所示。加载的主要工况如表 2 所示。在施加正弦波后,通过施加 0.05g 白噪声作用确定边坡振动特性。

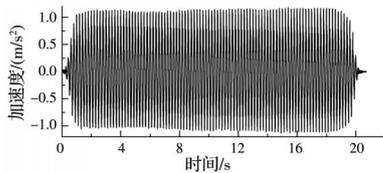


图 3 输入正弦波时程曲线

Fig. 3 Time-history curve of acceleration inputted

表 2 加载工况表

Table 2 Loading condition table

工况序号	输入波类型	峰值加速度/g
1	正弦波	0.1
2	正弦波	0.3
3	正弦波	0.5
4	正弦波	0.7
5	正弦波	0.8
6	正弦波	0.9
7	正弦波	1.0
8	正弦波	1.2

两组试验工况分别为 ECC 桩板墙支护结构(简称 ECC 桩板)和普通钢筋混凝土桩板墙支护结构

(简称 RC 桩板),试验中的其他变量均保持一致,以对比分析 ECC 桩板墙支护结构的抗震性能。

2 试验宏观现象

图 4 为震动前模型,按照试验加载制度逐级施加荷载,在输入地震动幅值较小时,边坡和支护结构近似处于弹性阶段,支护结构和土体保持同步振动,边坡出现小部分颗粒滑落现象,坡面没有裂缝出现。此阶段,RC 桩板和 ECC 桩板都能较好地维持边坡稳定性。

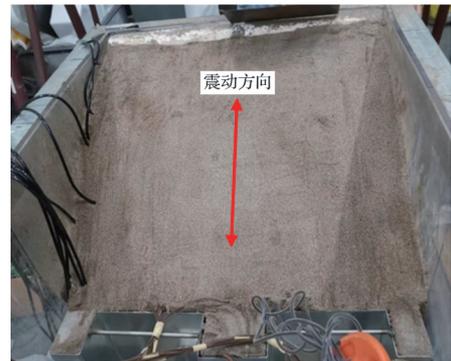


图 4 起震前模型边坡

Fig. 4 Model slope before vibration

当输入的地震动加大时,边坡坡面开始出现裂缝,图 5 展示了该破坏特征。工况 3 实施后,边坡顶端土体出现部分掉落,坡顶出现垂直于振动方向的裂缝。裂缝发展具体为:土体受到水平地震动作用,坡顶先出现水平拉裂缝,拉裂缝出现后沿垂直于坡面方向发展,在模型箱边界位置贯通。此时,

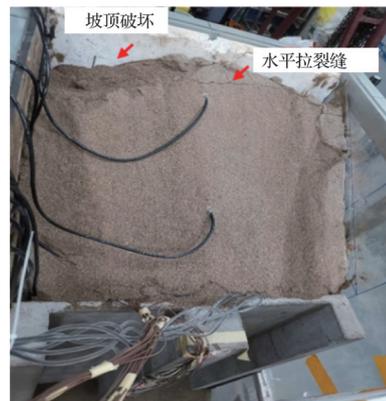


图 5 坡顶局部破坏(0.5g)

Fig. 5 Small scale failure at the top of the slope(0.5g)

模型结构表现出天然边坡的破坏形式,与姚爱军等^[21]、刘婧雯等^[22]、赵安平^[23]开展的边坡振动台模型试验破坏模式一致。

在更强的地震动作用下,坡顶斜坡破坏加剧。坡体的裂缝损伤从表层往深部发展,贯穿的水平裂

缝与坡顶土体内部的剪切裂缝形成破坏体。坡顶土体在地震动作用下表现出越顶破坏特征。同时,两种支护结构也表现出不同程度的前倾,模型都进入弹塑性阶段。对比来看,ECC桩板的变形小于RC桩板。当输入地震动幅值到达 $1.0g$ 时,RC桩板出现突然断裂,图6为现场照片。由于试验场地有限,模型箱前侧为亚克力板,支护结构完全倒塌在亚克力板上,标志着RC桩板彻底失效。对比之下,ECC桩板在强地震动作用下表现更加优异,在 $1.2g$ 地震动加载完成后也没有出现整体坍塌现象,更好地保证了地震作用下边坡的稳定性。

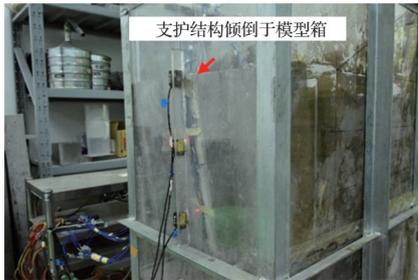


图6 RC桩板失效($1.0g$)

Fig. 6 RC pile-sheet failure($1.0g$)

图7为RC桩板全貌,试验加载完成后,挖出支护的桩板墙结构发现,支护结构在自由段和嵌固段之间出现明显的破坏,表现出典型的嵌岩桩支护结构破坏特征。图8为RC桩板破坏细部,钢筋混凝土支护结构破坏明显,混凝土和内部铁丝相对滑移,出现明显的抗弯破坏特征。ECC桩板并未出现明显的贯通裂缝,如图9所示,仅在坡体侧出现部分小裂缝,未向临空侧发展。



图7 RC桩抗弯破坏($1.0g$)

Fig. 7 RC pile-sheet bending failure($1.0g$)

分析其原因:因具有纤维约束能力,在开裂破坏时,ECC材料破坏程度及抗震能力都优于RC材料。在现有认知中,ECC的极限承载力、变形能力均远大于RC。已有文献证实,相对于普通混凝土

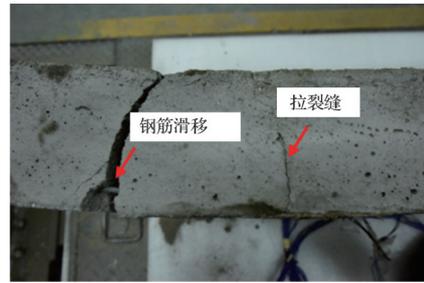


图8 RC桩脚破坏细部图($1.0g$)

Fig. 8 Detail drawing of RC pile-sheet foot damage($1.0g$)



图9 ECC桩板破坏细部图($1.2g$)

Fig. 9 Detail drawing of ECC pile-sheet foot damage($1.2g$)

结构,ECC材料组成构件具有更强的变形和能量耗散能力^[10-12],证明在相同的荷载作用下RC材料会优先于ECC材料到达破坏阶段。两者的破坏模式也类似。ECC桩板支护表现出优于钢筋混凝土桩板支护的特性。

3 动力响应分析

在RC桩板模型加载中, $0.7g$ 加载工况数据波动较大;在 $1.0g$ 地震动作用下,RC结构失效,因此,后续分析中地震动幅值为: $0.1g$ 、 $0.3g$ 、 $0.5g$ 、 $0.8g$ 、 $0.9g$ 。

3.1 加速度响应分析

3.1.1 加速度时程

加速度时程是利用埋设在坡体内的加速度计在地震动作用下测得的加速度随时间变化的数据。选取加速度计A1和振动台台面加速度计A8作为时程分析对象,在 $0.3g$ 地震动作用下进行时程分析。

输入的加速度时程为正弦波,通过加速度计A8测定的台面加速度时程曲线与图3输入波形类似,说明振动台输入波满足输入要求。对图10中时程曲线分析发现,加速度计A8所测得的输入地震的峰值反复出现,输入峰值和加速度计A1响应峰值的时间差距仅为 $0.01s$ 左右,说明不同支护结构对模型中动力波传播速度几乎没有影响。

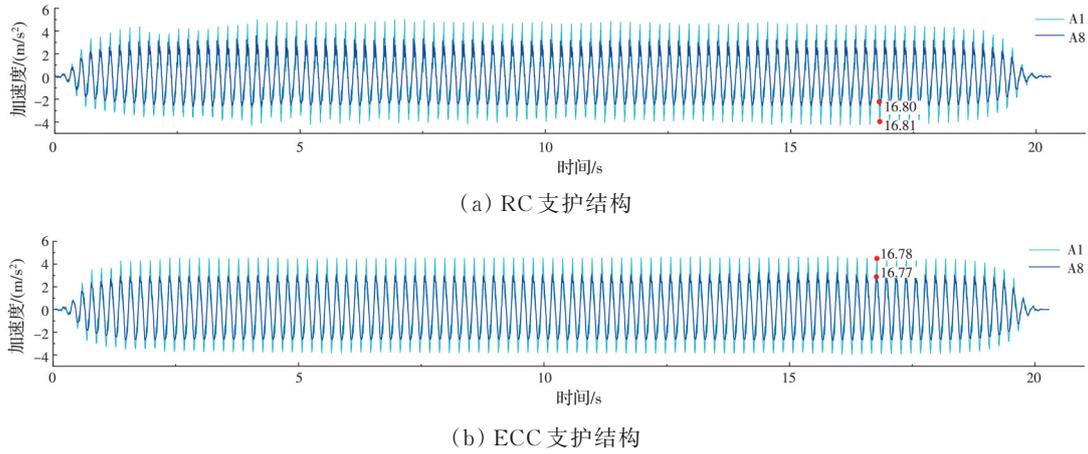


图 10 工况 2 加速度时程曲线

Fig. 10 Acceleration time history curve of working condition 2

针对不同工况下模型施加的白噪声,通过加速度计 A1 和 A8 的时程进行模型动力参数确定。采用传递函数法,借助相对传递函数^[24-26]虚部对动力参数进行识别。获得的边坡自振频率和阻尼比随输入的峰值加速度变化曲线如图 11 所示。其中,峰值加速度为 0 的状态为模型振动开始前,其余各点为对应峰值加速度加载后的自振频率和阻尼比。在 0.5g 地震动作用后,土体出现越顶破坏,加速度计 A1 被抛出土体,故图 11 为 0.5g 及以下的动力参数变化分析。可以看出,随着输入加速度的增大,边坡模型的自振频率总体降低,阻尼比逐渐上升。自振频率和阻尼比的变化趋势随着输入加速度峰值的增大而增大,模型整体震动特性呈非线性变化。在工况 3(0.5g)作用后,边坡自振频率为初始的 90%,阻尼比为初始的 1.2 倍。通过对图 11 中 ECC 支护和 RC 支护下边坡特性进行对照发现,震动前,二者自振频率和阻尼比的数值相差在 2% 以内;同时,在震动施加过程中二者的材料特性变化规律一致,认为两组试验可以通过直接对照监测数据进行

分析。

3.1.2 加速度放大效应

采用加速度响应峰值和加速度放大系数 2 个指标对模型加速度动力响应特性进行分析,采用 PGA 和 PHA 分别表示地表加速度峰值(Peak Ground Acceleration)和测点水平向加速度峰值(Peak Horizontal Acceleration)。因表层斜坡在 PGA 过大时出现越顶破坏,在 PGA 较大时,加速度计 A1 测得的 PHA 数据不准确,以下加速度分析选取坡体内部加速度计 A2~A7 开展。

图 12 给出了不同幅值地震动输入下沿高程各点的加速度峰值响应曲线。可以直观地看出,两种支护结构下加速度响应 PHA 与输入的峰值加速度 PGA 曲线较为一致。在输入地震动峰值较小时,不同高程的加速度响应 PHA 与输入的 PGA 一致,放大效应有限。随着地震动峰值的增大,沿高程曲线的非线性增强。

输入 PGA 幅值在 0.1g~0.5g 范围内,高程 75 cm 以上的 PHA 呈线性放大趋势。高程 75 cm 以下,坡体内部加速度与输入加速度的峰值较为一致。这是由于顶部加速度计比较靠近坡面,同时存在浅表动力效应^[27],动力波在表层反射,增大了表层土体的 PHA。输入地震动幅值超过 0.5g 以后,沿高程的 PHA 曲线逐渐表现出非线性的放大趋势,PHA 放大的分界点逐渐下移,高程 45 cm 位置处就开始呈非线性趋势。这与随着输入地震动峰值的增大,边坡损伤增强,边坡从顶部到底部的整体性衰减有关。在振动过程中,上层土体的剪切模量逐渐减小,阻尼比逐渐增大,一方面会衰减土体的动力响应;但另一方面,边坡上层部分土体在地震动下发生越顶破坏,造成同一加速度计在地震动作用下的埋深变浅,浅层动力效应增强。两方面因素的叠加会对边坡的加

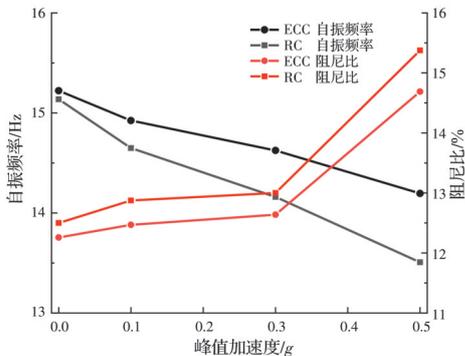


图 11 自振频率和阻尼比随输入加速度峰值的变化曲线
 Fig. 11 Changing curve of natural frequency and damping ratio with the input acceleration peak value

速度响应产生影响^[28]。此外,根据已有研究,输入地震波波形对加速度放大效应具有一定影响^[19, 27-28]。一般而言,正弦波作用下,加速度放大系数随着PGA的增大而增大,这对于峰值越大,地震动作用下加速度放大效应增强也有一定影响。

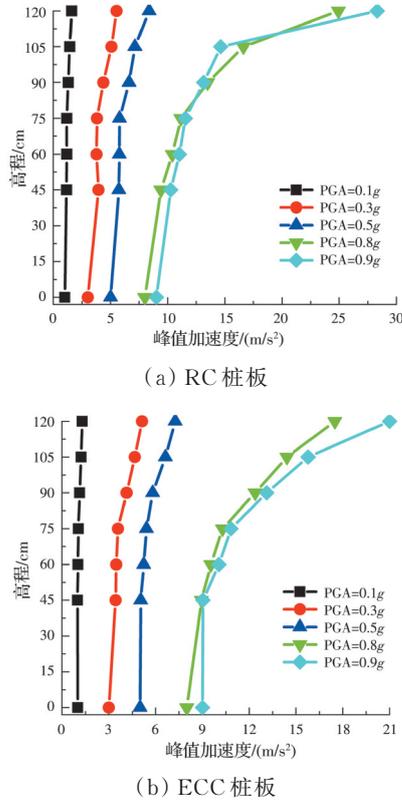


图 12 峰值加速度沿高程曲线
Fig. 12 Curves of peak acceleration along elevation

加速度放大效应通常采用峰值加速度放大系数来表述,即加速度计 A1~A7测得的PHA与台面加速度计A8处实测PGA值的比值^[29]。加速度沿高程放大的特性在以往文献中都有所证明,图 13为RC桩板和ECC桩板沿高程加速度放大系数图。明显看出,地震动输入过大时,其放大系数与输入峰值较小时不同。输入地震动较小时,其加速度放大系数最大值出现在高程位置最大的加速度计A2处,其值不超过1.5。随着地震动输入的增大,其最大的加速度放大系数位置并未发生变化,都出现在坡顶部分,但峰值已经在2.5左右。RC桩板和ECC桩板表现出相近的趋势。

3.1.3 不同支护结构加速度响应特性对照

根据试验观察到的宏观现象和监测数据显示,试验中施加的地震动幅值和模型的响应可以通过输入的加速度幅值分为3个阶段,即小震(0.1g)、中震(0.5g)、大震(0.9g)进行对比分析。

图 14(a)给出了3个阶段中不同支护结构下边

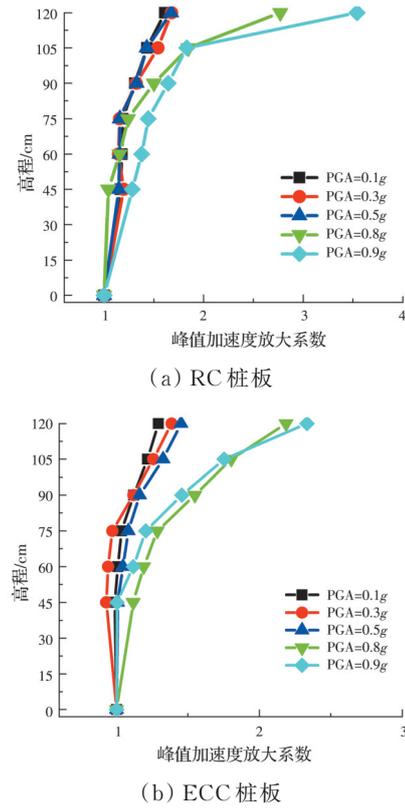
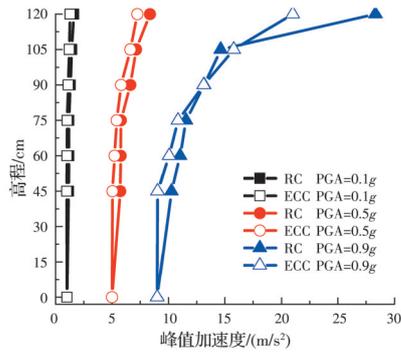


图 13 加速度放大系数沿高程曲线
Fig. 13 Curves of acceleration amplification factor along elevation

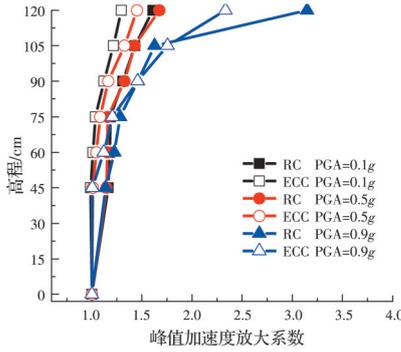
坡的加速度峰值。对于峰值加速度沿高程的分布可以看出,中小震作用下,ECC支护和RC支护结构的加速度响应差距较小,基本保持一致。图 14(b)的加速度放大系数分析中也有类似结论。这是因为在中小地震动输入下,支护结构处于弹性响应阶段,ECC和RC具有相近的弹性模量和密度,符合弹性动力学基本理论。但在大震作用下,两者差距逐渐明显,RC桩板支护下的加速度动力响应明显大于ECC桩板支护,图 14(b)中除了高程105 cm的点,其他点在RC桩板支护下加速度响应为ECC桩板支护下的1.1~1.3倍,这与支护结构的弹塑性状态有一定关系。在弹塑性阶段,相较于RC材料,ECC材料的滞回曲线更加饱满,在往复运动中能量耗散更大^[30]。另一方面,ECC桩板支护下边坡的桩顶位移较小,相对于RC桩板支护模型,其边坡整体性更好,边坡坡顶的脱落也相对较少,表层动力效应较弱,坡体内的波动传播相对简单,动力波叠加较小。

3.2 土压力动力响应

主要考虑地震动作用下桩板墙后动土压力,地震动土压力是指不考虑静力作用,仅考虑由地震引起的土压力变化^[31]。每次动力作用前将施振起点的土压力归零,仅测定地震引发的动土压力变化。



(a) 峰值加速度



(b) 加速度放大系数

图 14 加速度响应对比

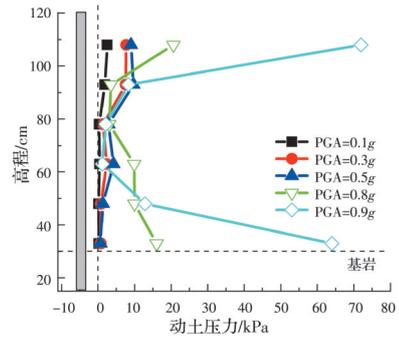
Fig. 14 Comparison of acceleration response

3.2.1 动土压力分布

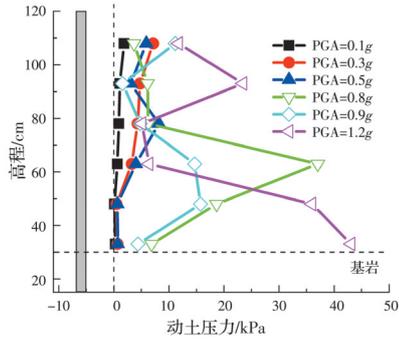
图 15 给出了 RC 桩板和 ECC 桩板支护模型在不同地震动峰值作用下的桩后动土压力峰值分布和大小。动土压力的分布基本可以分为两阶段进行概述。在输入地震动较小,即 $PGA \leq 0.5g$ 时,动土压力呈二次函数分布形式,动土压力峰值出现在桩板墙上上部,且随着输入地震动峰值的增大,动土压力峰值也逐渐增大,与现有研究中的动土压力分布形式一致^[32-34]。同时,随着地震动峰值的增大,支护结构位移增大,动土压力分布曲线的下部变得饱满,动土压力合力作用点逐渐下移。当地震动输入峰值过大,PGA 超过 $0.5g$ 时,动土压力分布形式发生改变,RC 支护模型和 ECC 支护模型的变化情况不一,具体对比见后文分析。总体上表现为:支护结构下部的动土压力快速增大,这与随着输入地震动幅值的增大,滑体出现滑动趋势有关。同时,动土压力分布模式也发生转变,由起初的二次函数单峰值分布逐渐转变为双峰值分布。

3.2.2 不同支护结构动土压力响应对照

图 16 给出了 RC 桩板和 ECC 桩板在不同 PGA 下的动土压力分布曲线。总体而言,ECC 支护下桩背的动土压力峰值比 RC 支护下小,动土压力合力作用点更低。在地震动峰值较小阶段,两者分布模式一致,具体差距体现在动土压力数值上。此阶段



(a) RC 桩板



(b) ECC 桩板

图 15 动土压力分布沿高程曲线

Fig. 15 Curves of dynamic earth pressure distribution along elevation

中,坡体与支护结构整体性较好,尤其是桩下部,支护结构和坡体相对运动弱,动土压力较小;因 ECC 桩板的加速度放大系数小于 RC 桩板,其产生的动土压力也小于 RC 桩板。在地震动输入峰值超过 $0.5g$ 时,两者的动土压力分布形式转为双峰值分布形式,在支护结构中上部表现为两个峰值。相对而言,ECC 桩板动土压力的峰值点比 RC 桩板更低。在 $0.9g$ 峰值加速度作用下,RC 桩板与 ECC 桩板的动土压力分布差异较大。ECC 桩板的动土压力分布依旧保持着桩中部和上部双峰值动土压力分布模式,仅在数值上有所增大。RC 桩板的动土压力分布转变为上下双峰值分布形式,其数值为 ECC 桩板的 5 倍以上。这与输入地震动峰值过大有关,在该地震动作用下,RC 桩板出现较大位移,桩土相对运动显著,与于玉贞等^[35]开展的离心机试验结果一致,动土压力也出现 2 个峰值的情况,更加接近于 ECC 桩板。于玉贞等^[35]采用铝合金矩形截面薄壁管模拟混凝土桩,体现出弹性支护结构特性,证明在相同的 PGA 作用下 ECC 桩板相比 RC 桩板更多地表现为弹性状态,ECC 桩板的支护效果比 RC 桩板好,这与 ECC 材料具有的抗拉应变硬化特性有关。而 RC 桩板表现出更多的塑性特性,出现明显的滑动位移,动土压力在滑面位置处异常集中,产生动土压力异常。

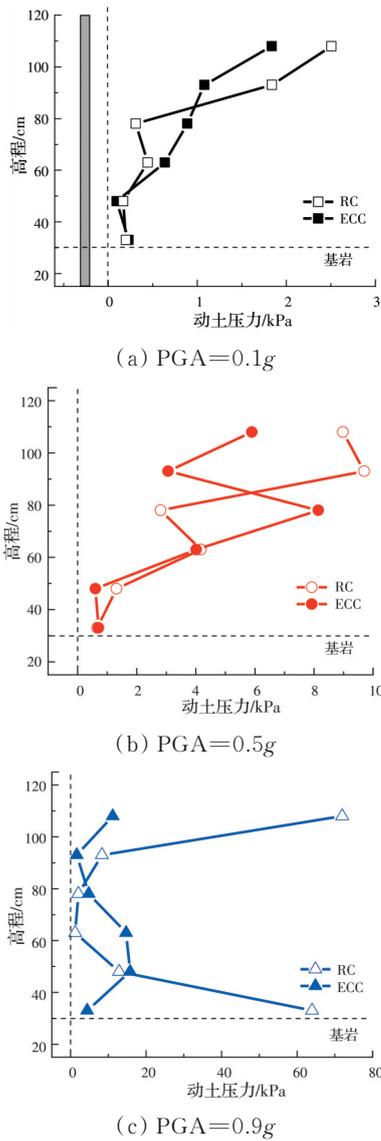


图 16 土压力分布对比

Fig. 16 Comparison of earth pressure distribution

3.2.3 动土压力分布模式讨论

关于动土压力分布模式的转变和发展做出以下讨论:若不考虑土体滑动趋势,支护结构与土体在震动下水平运动。按照鞭梢效应,高程越高,动响应越明显。因土体与支护结构动力参数存在差异,根据结构动力学原理可知,高程越高,土体与支护结构之间相对运动越强,动土压力表现为图 17(a)所示的考虑动力效应的“上部大、下部小”的分布模式。但因材料特性和地形效应,边坡有一定的下滑趋势,在水平地震动作用下,土体下滑趋势加剧。按照现有研究,下滑的动土压力在支护结构下部可能形成土拱,其动土压力分布模式如图 17(b)所示^[36-37]。而当支护结构位移进一步增大时,土拱效应减弱,按照库伦土压力研究,动土压力分布为三角形模式,分布见图 17(c)。

试验中,当输入地震动较小时,土体下滑趋势

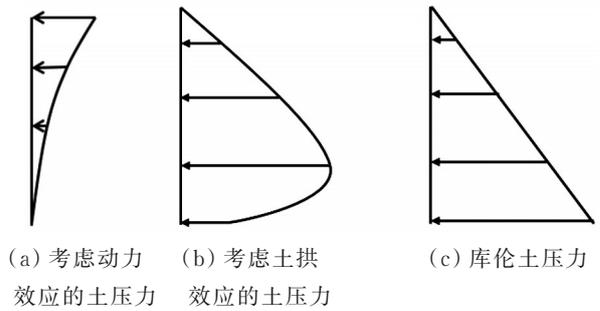


图 17 动土压力分布模式

Fig. 17 Dynamic earth pressure distribution model

有限,桩后动土压力主要受图 17(a)所示的动力效应控制,表现为动土压力沿高程增大的趋势,对应着图 16(a)中 PGA=0.1g 状态下的动土压力分布,也与已有研究^[32-34]结论一致。当输入地震动较大时,土体下滑趋势明显,受动力效应和下滑趋势共同作用,桩后动土压力表现为中上部双峰值的分布模式。当支护结构转动位移有限时,其滑动产生的动土压力分布为图 17(b)所示的抛物线形式,二者叠加,表现为图 16(b)中 PGA=0.5g 所示的动土压力。而且,随着输入地震动的增大,双峰值效应越发明显,在 ECC 桩板和 RC 桩板的动土压力分布中都表现出相同的特性。在于玉贞等^[35]开展的离心机试验中也表现出类似的双峰值特性。在后续的地震动输入中,滑动产生的动土压力逐渐向图 17(c)所示的库伦土压力转变,滑动面的动土压力快速增大,表现为图 16(c)中 RC 支护下的土压力状态。

可以发现,图 16(c)中 ECC 支护动土压力表现为图 17(b)中考虑土拱效应的动土压力分布模式。在 PGA=0.9g 时,由于 ECC 支护桩顶位移约为 RC 支护桩顶位移的一半,位移较小时滑动效应下的动土压力分布如图 17(b)所示。同时,从图 15(b)中可以看出,当 PGA=1.2g 时,ECC 支护表现为图 17(c)所示的滑动土压力分布模式,此时,其桩顶位移与 RC 支护在 0.9g 下的桩顶位移相当。进一步说明了结合动力效应和滑动效应进行动土压力分析具有合理性,且通过考虑桩的位移发展,滑动效应下的动土压力分布在进行转变时得到证明。

由于 ECC 桩板的材料特性,其加速度放大效应小于 RC 桩板,在考虑动力效应时,保证了 ECC 桩板的动土压力数值小于 RC 桩板。由于其位移控制能力和应变硬化特性,ECC 桩板因滑动效应产生的动土压力分布模式由图 17(b)转向图 17(c)时对应的地震动峰值比 RC 桩板更大,延迟了滑动面动土压力的激增。

另外,值得说明的是,震动过程中的越顶破坏导致支护结构顶面以上土体被抛出,可能会导致桩顶的

动土压力因土体抛出的动力作用出现异常值。如图 16(c)中 RC 支护结构的桩顶动土压力值超过 60 kPa。

3.3 桩顶位移响应

支护结构的位移是反映支护结构稳定性的重要评价标准,也是基于性能设计理念中重要的控制指标^[38]。支护结构位移是地震动和支护结构抗力共同作用的结果。图 18 为 RC 桩板在 0.3g 和 0.9g 峰

值加速度作用下的时程曲线。地震动作用下,桩顶的位移时程表现为与输入一致的正弦波曲线,桩顶位移随着地震动时间的增长而增大,当地震动输入结束后,桩顶残留一定位移。当输入地震动峰值较小时,桩顶位移以弹性位移为主,震后残余位移基本为 0,在 0.9g 地震动作用下,桩顶位移中塑性位移占总位移比例增大,震后产生较大的不可恢复变形。

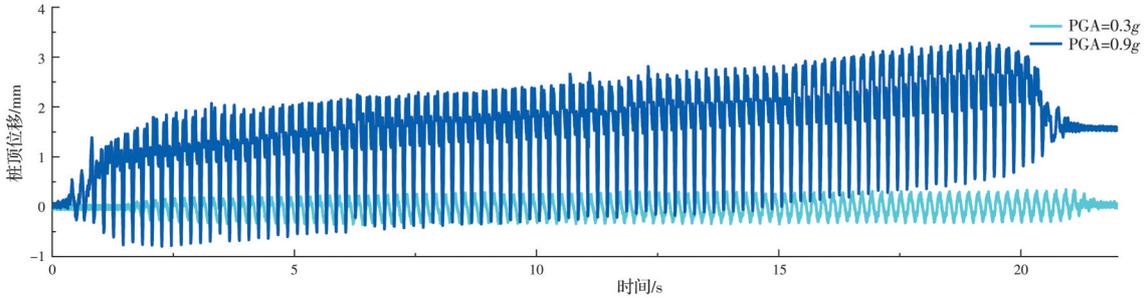


图 18 RC 桩顶位移时程

Fig. 18 Displacement time history of RC pile-sheet

其他震动强度下 RC 桩板和 ECC 桩板的残余桩顶位移和输入 PGA 之间的关系曲线如图 19 所示。在 1.0g 地震动作用下,RC 桩板支护结构彻底崩塌,位移计失去测量能力,图中仅依靠量测来代替该工况的位移,以分析支护结构的变形特性。随着输入 PGA 的增大,桩顶位移逐渐变大,桩顶残余位移与输入的地震动幅值呈指数分布,分布函数为 $y = A_1 e^{x/t_1} + y_0$,具体系数见图 19。

板大,这是因为 ECC 弹性模量比 RC 小,而此时支护结构基本处于弹性阶段,桩顶位移受弹性模量控制。而当输入地震动超过 0.5g 后,RC 桩板的桩顶残余位移急剧增大,增速远大于 ECC 桩板,桩顶残余位移是 ECC 桩板的 2 倍以上。这与作用在支护结构上的动土压力分布和大小有关,同时,ECC 材料的应变硬化特性也能有效控制位移发展,说明在大震作用下 ECC 桩板具有更好的位移控制能力。

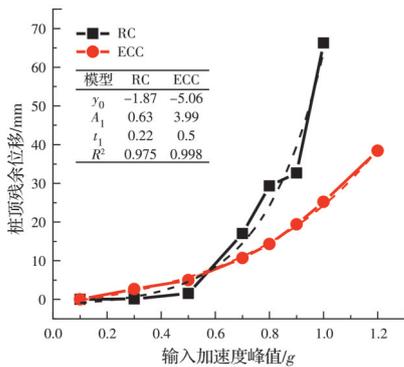


图 19 桩顶残余位移

Fig. 19 Residual displacement of pile-sheet

桩顶残余位移随着输入加速度峰值的增大而增大,这与支护结构的工作性态和坡体材料的抗剪强度降低有关。随着加速度峰值的增大,作用在支护结构上的土压力变大,支护结构性状由弹性发展到弹塑性。可以看出,在输入地震动较小阶段,桩顶残余位移随着加速度峰值的增加增长较慢,而输入地震动较大时桩顶位移变化趋势加剧。当输入地震动较小时,ECC 桩板的桩顶残余位移比 RC 桩

4 结论

基于 ECC 桩板墙结构和 RC 桩板墙结构的振动台模型试验,通过对比坡体加速度、桩后动土压力、桩顶位移等物理量的动力响应和大震作用下的破坏模式,得出以下结论:

1) 相对于 RC 桩板墙支护结构,ECC 桩板墙具有较好的抗震能力,具体表现为:在较大峰值地震动输入下,ECC 桩板墙相对于 RC 桩板墙变形小;在相同峰值地震动作用下,RC 桩板墙出现典型的抗弯破坏,而 ECC 桩板墙仅出现少量裂缝。

2) ECC 桩板墙和 RC 桩板墙支护的边坡表现出相近的波动特性,主要体现在波速、自振频率和阻尼比上,但 ECC 桩板模型的地震动响应相对于 RC 桩板模型更弱,其加速度放大系数更小,动土压力合力更小,动土压力分布合力点更低,更有利于减少支护结构的变形。

3) 随着输入地震动峰值加速度的增大,桩板支护结构的动力响应表现出明显的弹性-弹塑性两阶段:弹性阶段,ECC 桩板的动力响应与 RC 桩板差距

不大;弹塑性阶段,加速度放大系数的沿高程放大效应增强,土压力分布由单峰值分布转为双峰值分布。桩顶残余位移与输入加速度峰值呈指数关系。

4)当输入地震动较大时,支护结构表现为弹塑性响应阶段,ECC桩板支护下边坡的加速度放大系数为RC桩板支护下的0.77~0.9倍,RC桩板的动土压力峰值为ECC桩板的5倍左右,RC桩板的桩顶残余位移为ECC桩板的2倍。

参考文献

- [1] 张建经,冯君,肖世国,等.支挡结构抗震设计的2个关键技术问题[J].西南交通大学学报,2009,44(3):321-326.
ZHANG J J, FENG J, XIAO S G, et al. Discussions on two key technical problems for seismic design of retaining structures [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(3): 321-326. (in Chinese)
- [2] 姚令侃,冯俊德,杨明.汶川地震路基震害分析及对抗震规范改进的启示[J].西南交通大学学报,2009,44(3):301-311.
YAO L K, FENG J D, YANG M. Damage analysis of subgrade engineering in Wenchuan earthquake and recommendations for improving seismic design code [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(3): 301-311. (in Chinese)
- [3] 吉随旺,唐永建,胡德贵,等.四川省汶川地震灾区干线公路典型震害特征分析[J].岩石力学与工程学报,2009,28(6):1250-1260.
JI S W, TANG Y J, HU D G, et al. Analysis of typical seismic damages of highways in Wenchuan earthquake-induced hazard areas in Sichuan Province [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1250-1260. (in Chinese)
- [4] 李海光.新型支挡结构设计工程实例[M].北京:人民交通出版社,2004.
LI H G. Design and engineering example of new retaining structure [M]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese)
- [5] 王丽萍,张嘎,张建民,等.抗滑桩加固黏性土坡变形规律的离心模型试验研究[J].岩土工程学报,2009,31(7):1075-1081.
WANG L P, ZHANG G, ZHANG J M, et al. Centrifuge modeling of cohesive soil slopes reinforced by stabilizing piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(7): 1075-1081. (in Chinese)
- [6] 于玉贞,李荣建,李广信,等.抗滑桩静力与动力破坏离心模型试验对比分析[J].岩土工程学报,2008,30(7):1090-1093.
YU Y Z, LI R J, LI G X, et al. Centrifuge modeling of static and dynamic failure of stabilizing piles in slope [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(7): 1090-1093. (in Chinese)
- [7] 黄哲.桩板墙动力损伤响应特性的振动台试验研究[D].成都:西南交通大学,2020.
HUANG Z. Shaking table test on dynamic damage response characteristics of pile sheet wall [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [8] LI V C. Engineered cementitious composites (ECC): Bendable concrete for sustainable and resilient infrastructure [M]. Berlin, Germany: Springer, 2019.
- [9] 徐世焯,李贺东.超高韧性水泥基复合材料研究进展及其工程应用[J].土木工程学报,2008,41(6):45-60.
XU S L, LI H D. A review on the development of research and application of ultra high toughness cementitious composites [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(6): 45-60. (in Chinese)
- [10] ZHANG Y X, DENG M K, DONG Z F. Seismic response and shear mechanism of engineered cementitious composite (ECC) short columns [J]. Engineering Structures, 2019, 192: 296-304.
- [11] ZHANG N, GU Q, DONG Y, et al. Seismic performance of bridges with ECC-reinforced piers [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 146: 106753.
- [12] 黄福云,周志明,庄一舟,等.整体桥高性能混凝土桩-土相互作用试验研究[J].岩土力学,2022,43(3):591-601.
HUANG F Y, ZHOU Z M, ZHUANG Y Z, et al. Experiment on interaction of high performance concrete pile-soil in IAJBs [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(3): 591-601. (in Chinese)
- [13] 徐炳伟.大型复杂结构-桩-土振动台模型试验研究[D].天津:天津大学,2010.
XU B W. Shaking table test studying large-scale soil-pile-complex structure interaction [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese)
- [14] 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 D, JIANG G L, LIU W H, 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. (in Chinese)
- [15] 徐奴文.高陡岩质边坡微震监测与稳定性分析研究[D].辽宁大连:大连理工大学,2011.
XU N W. Study on microseismic monitoring and stability analysis of high steep rock slope [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [16] 王士天,黄润秋,李渝生.雅砻江锦屏水电站重大工程

- 地质问题研究[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1995.
- WANG S T, HUANG R Q, LI Y S. Research on the major engineering geology issue of Jinping hydropower station on the Yalongjiang River [M]. Chengdu: Chengdu Technology University Press, 1995.
- [17] 黄润秋. 汶川8.0级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1239-1249.
- HUANG R Q. Mechanism and geomechanical modes of landslide hazards triggered by Wenchuan 8.0 earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1239-1249. (in Chinese)
- [18] 李秀珍, 孔纪名. “5.12”汶川地震诱发典型滑坡的类型和特征[J]. 山地学报, 2011, 29(5): 598-607.
- LI X Z, KONG J M. Types and characteristics of typical landslides triggered by “5.12” Wenchuan earthquake [J]. Journal of Mountain Science, 2011, 29(5): 598-607. (in Chinese)
- [19] 杨兵, 杨翔, 杨涛, 等. 地震荷载作用下震裂-溃滑型边坡破坏过程及动力响应振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(Sup1): 3279-3290.
- YANG B, YANG X, YANG T, et al. Shaking table model test on dynamic response and failure process of shatter-burst sliding slope under earthquake load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(Sup1): 3279-3290. (in Chinese)
- [20] IAI S. Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field [J]. Soils and Foundations, 1989, 29: 105-118.
- [21] 姚爱军, 史高平, 梅超. 悬臂抗滑桩加固边坡地震动力响应模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(Sup2): 53-58.
- YAO A J, SHI G P, MEI C. Experimental model study of seismic response of slope reinforced by cantilever stabilizing piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33 (Sup2): 53-58. (in Chinese)
- [22] 刘婧雯, 黄博, 邓辉, 等. 地震作用下堆积体边坡振动台模型试验及抛出现象分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 307-311.
- LIU J W, HUANG B, DENG H, et al. Shaking table tests and throwing phenomenon of deposit slopes under earthquakes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 307-311. (in Chinese)
- [23] 赵安平, 冯春, 李世海, 等. 地震力作用下基覆边坡模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 515-523.
- ZHAO A P, FENG C, LI S H, et al. Experimental research on seismic failure mode and supporting for slope of bedrock and overburden layer [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 515-523. (in Chinese)
- [24] 蒋良滩, 姚令侃, 吴伟, 等. 传递函数分析在边坡振动台模型试验的应用探讨[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1368-1374.
- JIANG L W, YAO L K, WU W, et al. Transfer function analysis of earthquake simulation shaking table model test of side slopes [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1368-1374. (in Chinese)
- [25] 杨忠平, 来云亮, 刘树林, 等. 频发微震下上覆软弱岩体边坡动力稳定及失稳模式[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(12): 2297-2306.
- YANG Z P, LAI Y L, LIU S L, et al. Dynamic stability and failure mode of slopes with overlying weak rock mass under frequent micro-seismic actions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41 (12): 2297-2306. (in Chinese)
- [26] 王兰民, 蒲小武, 吴志坚, 等. 地震和降雨耦合作用下黄土边坡动力响应的振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(7): 1287-1293.
- WANG L M, PU X W, WU Z J, et al. Shaking table tests on dynamic response of loess slopes under coupling effects of earthquakes and rainfalls [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(7): 1287-1293. (in Chinese)
- [27] 蒋良滩, 姚令侃, 胡志旭, 等. 地震扰动下边坡的浅表动力效应与锚固控制机理试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(5): 164-174.
- JIANG L W, YAO L K, HU Z X, et al. Experimental study on slope's superficial dynamic effect and anchoring prevention mechanism under earthquake disturbance [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(5): 164-174. (in Chinese)
- [28] 郑桐, 刘红帅, 袁晓铭, 等. 锚索抗滑桩地震响应的离心振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(11): 2276-2286.
- ZHENG T, LIU H S, YUAN X M, et al. Experimental study on seismic response of anti-slide piles with anchor cables by centrifugal shaking table [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(11): 2276-2286. (in Chinese)
- [29] 涂杰文, 刘红帅, 汤爱平, 等. 基于离心振动台的堆积型滑坡加速度响应特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(7): 1361-1369.
- TU J W, LIU H S, TANG A P, et al. Acceleration response of colluvial landslide based on centrifugal shaking table test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(7): 1361-1369. (in Chinese)
- [30] 单奇峰. 装配式框架结构梁柱节点优化设计及抗震性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- SHAN Q F. Optimization design and seismic behaviors of precast frame beam-column joint [D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)
- [31] 文畅平, 江学良, 杨果林, 等. 桩板墙地震动力特性的

- 大型振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 976-985.
- WEN C P, JIANG X L, YANG G L, et al. Large-scale shaking table model test study of seismic response characteristics of sheet-pile retaining wall [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5): 976-985. (in Chinese)
- [32] LIN Y L, CHENG X M, YANG G L, et al. Seismic response of a sheet-pile wall with anchoring frame beam by numerical simulation and shaking table test [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 115: 352-364.
- [33] ZHANG C L, JIANG G L, SU L J, et al. Large-scale shaking table model test on seismic performance of bridge-pile-foundation slope with anti-sliding piles: A case study [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(3): 1429-1447.
- [34] MA N, WU H G, MA H M, et al. Examining dynamic soil pressures and the effectiveness of different pile structures inside reinforced slopes using shaking table tests [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 116: 293-303.
- [35] 于玉贞, 邓丽军. 抗滑桩加固边坡地震响应离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1320-1323.
- YU Y Z, DENG L J. Centrifuge modeling of seismic behavior of slopes reinforced by stabilizing pile [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(9): 1320-1323. (in Chinese)
- [36] 侯键, 夏唐代, 陈炜昀, 等. 考虑土拱效应的挡土墙地震主动土压力静力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(Sup1): 2825-2832.
- HOU J, XIA T D, CHEN W Y, et al. Static study of seismic active earth pressure on retaining walls considering soil arching effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Sup1): 2825-2832. (in Chinese)
- [37] 吴明, 彭建兵, 徐平, 等. 考虑土拱效应的挡墙后土压力研究[J]. 工程力学, 2011, 28(11): 89-95.
- WU M, PENG J B, XU P, et al. Study on earth pressure against rigid retaining walls considering soil arching effects [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(11): 89-95. (in Chinese)
- [38] HU H Q, HUANG Y, XIONG M, et al. Investigation of seismic behavior of slope reinforced by anchored pile structures using shaking table tests [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 150: 106900.

(编辑 黄廷)