

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.015



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# ECC 桩-消能锚韧性支挡结构的地震响应规律

丁选明, 刘学成, 王春艳, 任寄瑜, 刘诗敏

(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)

**摘要:** 作为地震滑坡治理中最常见的支护结构体系之一, 桩锚结构在强震作用下抗震韧性的提升已成为当前工程领域研究的热点。通过引入黏滞阻尼器以及 ECC 韧性构件对桩锚结构抗震性能进行优化, 并基于振动台试验从宏观破坏现象、模型动力特性、加速度响应、桩身位移响应、动态弯矩响应、动态轴力响应等方面分析新型桩锚结构的动力响应特征。结果表明, 阻尼器的设置能有效降低锚索动态轴力并防止其累积, 最大降低幅度可达 47%, 随着震级的升高, 降低幅度先增大再减小, 并可以通过阻尼器的优化设计对其进行调节; ECC 材料的使用则提高了桩身变形能力, 增强了地震作用下抗滑桩的耗能能力, 克服了因设置阻尼器位移有所增大的问题; 两者的联合作用显著改善了桩锚结构的抗震性能; 地震波频谱特性对新型结构地震响应规律有显著影响, 含有接近边坡基频的频率分量越多, 地震波动力放大效应越突出, 与 Sine\_5Hz 地震波作用相比, 汶川波作用下坡顶 PGA 放大系数增幅可达 100%。

**关键词:** 振动台; 桩锚结构; 消能型锚索; 抗震性能; 黏滞阻尼器

**中图分类号:** TU435 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2025)02-0076-13

## Seismic response characteristics of ECC pile-energy dissipation anchor ductile retaining structure

DING Xuanming, LIU Xuecheng, WANG Chunyan, REN Jiyu, LIU Shimin

(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)

**Abstract:** As one of the most common support structural systems against seismic landslide, pile-anchor structures have become a hot topic of research in the current engineering field for their enhanced seismic resilience under strong earthquake. This study optimizes the seismic performance of pile-anchor structures by introducing viscous dampers and ECC (Engineered Cementitious Composite) ductile components. Based on shake table tests, the characteristics of dynamic behaviors of the new pile-anchor structures are analyzed from aspects of macroscopic failure, model dynamic properties, acceleration response, pile displacement response, dynamic bending moment response, and dynamic axial force response. The experimental results indicate that installation of dampers effectively reduces the dynamic axial force of the anchor cables and prevents its accumulation, with a maximum reduction of up to 47%. The reduction magnitude increases and then decreases

**收稿日期:** 2023-11-20

**基金项目:** 国家自然科学基金(52178312); 重庆市自然科学基金创新群体科学基金(cstc2020jcyj-cxttX0003)

**作者简介:** 丁选明(1979-), 男, 教授, 博士, 主要从事土动力学与工程振动研究, E-mail: dxmhu@163.com。

**Received:** 2023-11-20

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 52178312); The Innovation and Group Science Fund of Natural Science Fund of Chongqing (cstc2020jcyj-cxttX0003)

**Author brief:** DING Xuanming (1979-), professor, PhD, main research interests: soil dynamics and engineering vibrations, E-mail: dxmhu@163.com.

with the increase of the seismic intensity, and it can be adjusted by optimizing the design of the dampers. The use of ECC materials improves the deformation capacity of the pile body, enhances the energy dissipation capacity of the anti-sliding pile under seismic action, and overcomes the problem of increased displacement due to the installation of dampers. The combined effect of both significantly improves the seismic performance of pile-anchor structures. The spectral characteristics of seismic waves possesses significant impact on the seismic response pattern of the new structure. The more frequency components close to the fundamental frequency of the slope contained in the seismic waves, the more prominent the dynamic amplification effect. Compared to the action of Sine\_5Hz, under the effect of the Wenchuan wave, the amplification factor of the PGA (Peak Ground Acceleration) at the top of the slope could increase by up to 100%.

**Keywords:** shaking table; pile-anchor structure; energy dissipating anchor cable; seismic performance; viscous dampers

作为地震引发的主要次生灾害,地震滑坡具有分布范围广、致灾程度重、易形成灾害链等特点<sup>[1-5]</sup>。为了避免地震滑坡造成大量人员伤亡以及基础设施严重破坏,地震滑坡治理已成为当下的研究热点。锚索抗滑桩作为地震滑坡治理中最常见的支护结构体系,其抗震性能引起了大量研究人员的关注<sup>[6-9]</sup>。

学者们已通过数值模拟、理论分析等方式对地震作用下锚索抗滑桩的响应规律、破坏机理进行了充分研究。石洋海等<sup>[10]</sup>提出采用力法计算锚索轴力,以确定锚索与抗滑桩承担滑坡推力的比例。王壮等<sup>[11]</sup>用有限元方法对地震作用下预应力锚索抗滑桩的抗滑效果进行了评价。李晓翠等<sup>[12]</sup>基于有限差分法对预应力桩锚结构进行了参数优化设计,发现桩位对加固边坡稳定性影响较大。模型试验作为现阶段研究结构抗震响应的重要手段,更是被诸多学者用于地震作用下锚索抗滑桩响应特性的研究中。王贵华等<sup>[13]</sup>通过物理模型试验研究了不同布锚形式对锚索抗滑桩变形特征的影响。连静等<sup>[14]</sup>通过大型振动台试验从多个维度探究了地震作用下锚索抗滑桩系统动力特征演化规律。吴曙光等<sup>[15]</sup>通过振动台试验对桩锚结构加固下顺层岩质边坡的地震动力响应进行了分析。

已有研究主要集中于支护结构内力以及被加固边坡动态特性等方面,但大量灾害调研表明,强震作用下传统桩锚结构易发生不可恢复变形以及锚头处冲切破坏<sup>[16-17]</sup>,其抗震性能还有待进一步提高。结构抗震性能优化主要有两种方式,一种是提高结构自身的整体抗震性能,另一种则是减少地层传递至结构的地震能量。为了提高结构自身抗震性能,许多学者将新型材料工程水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composite,简称ECC)引入结构体系中。湛建霖等<sup>[18]</sup>通过使用ECC耗能构件,增强了桩板墙支护结构的抗震性能。高淑玲

等<sup>[19]</sup>发现ECC材料在构件受拉区的使用可以使高强钢筋应力完全发挥,大大提高了构件承载能力。Zhang等<sup>[20]</sup>将ECC材料用于桥墩结构,证明了其具有较好的抗震能力和损伤控制能力。一般通过增设耗能装置减少地层传递至结构的地震能量。大量研究使用黏滞阻尼器作为耗能装置,显著提高了结构抗震性能。何文福等<sup>[21]</sup>通过动力实验分析了黏滞阻尼器在装配式结构中的减震能力,结果表明,黏滞阻尼器能有效延缓构件塑性铰发展,减少结构不可逆损伤。Siarni-Kaleybar等<sup>[22]</sup>通过数值计算研究了黏滞阻尼器对多层钢框架抗震性能的影响,其非线性时程分析结果表明,与原结构相比,带阻尼器结构具有更好的抗震性能。吴克川等<sup>[23]</sup>提出了一种基于性能的设计方法,可使黏滞阻尼器减震结构同时取得较好的位移及地震剪力控制效果。

已有减震消能优化手段仍主要应用于桥梁、高层建筑等领域,在边坡支护结构中应用较少。笔者通过在锚索上设置黏滞阻尼器,使用ECC材料制作抗滑桩,构建新型桩锚结构体系,优化桩锚结构的抗震性能。通过振动台试验,对地震作用下新型桩锚结构的响应规律进行系统研究。

## 1 试验方案设计

### 1.1 测试设备

试验在重庆大学岩土工程试验室进行,所用振动台系统由美国ANCO公司研制。振动台台面尺寸为1.2 m×1.2 m,最大载重为1 t,加载频率为0~50 Hz,可进行水平、垂直双向加载,最大加速度为1.2g,最大加载速度为0.5 m/s,最大加载位移为100 mm。

如图1所示,试验模型放置在固壁式刚性模型箱中,该刚性模型箱尺寸为0.6 m×0.8 m×1.5 m(宽×长×高),并用螺栓固定在振动台台面。模型箱内底部设置2 cm厚碎石,以模拟无摩擦底部边界

条件。同时,在刚性箱两端加装 2 cm 厚聚苯乙烯泡沫作为吸波材料,以降低垂直于振动方向的边界影响。模型箱侧壁涂抹凡士林,减小模型箱侧壁对试验模型的摩擦影响。

1.2 动力相似比

为使模型试验尽可能反映原型特性,按照相似定律对原型进行缩尺。在常重力条件下,很难同时满足所有相似准则,因此,选取对试验结果影响较大的 11 个物理量进行相似设计,并在其中选择几何尺寸、密度和加速度 3 个物理量作为控制因素。几何尺寸相似比选择为 10(原型/模型),密度和加速度相似比均定为 1。据此计算其余物理量相似比,并将计算结果列于表 1。

表 1 模型试验相似比尺  
Table 1 Similarity scale of model test

物理量	量纲	比尺(原型/模型)
长度	$L$	10
加速度	$LT^{-2}$	1
重度	$ML^{-2}T^{-2}$	1
重力加速度	$LT^{-2}$	1
弹性模量	$ML^{-1}T^{-2}$	10
粘聚力	$ML^{-2}T^{-2}$	10
内摩擦角		1
时间	$T$	3.162
频率	$T^{-1}$	0.316
应力	$ML^{-2}T^{-2}$	10
应变		1

1.3 试验模型

试验模型如图 1 所示,试验模型高度为 1.5 m,由滑体、基岩、ECC 桩板模型、锚索、阻尼器 5 部分组成,并设置有普通混凝土(Ordinary Concrete,简称

RC)桩板模型及无阻尼器的 ECC 桩锚模型作为对照组。RC 模型配有阻尼器,其与主试验组的区别仅为桩板模型制作材料不同,其余组成完全一致。

试验模型中的边坡由两部分构成:一部分为滑体,另一部分为下部基岩。为更好地反映试验模型原型特性,按照强度相似性进行滑体材料力学性质缩尺,使得材料密度与抗剪强度满足相似比。用河沙、黏土和水制作滑体材料,根据直剪试验结果确定材料配比为黏土:河沙:水=2:27.55:1。配制出的滑体材料密度为 2 g/cm<sup>3</sup>,黏聚力为 6.52 kPa,内摩擦角为 20.38°。使用材料强度较高的 C15 混凝土制作基岩,已达到固定模型桩的作用。受混凝土施工工艺的限制,以图 2 中所示实际滑动面代替理想对数螺旋滑动面。

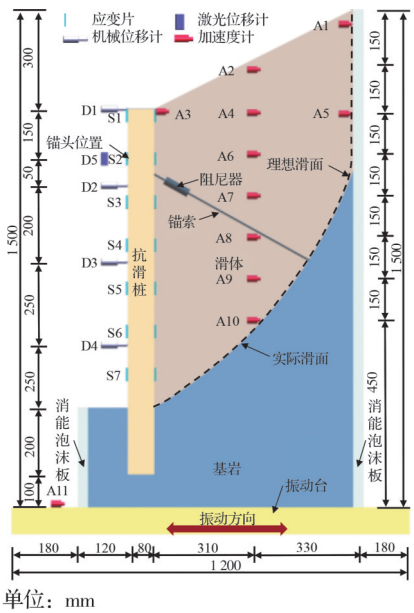


图 2 传感器布置示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of sensor layout

如图 3(a)所示,试验模型的抗滑桩为 80 mm×80 mm 的 ECC 悬臂桩,桩脚嵌固在基岩中。为使试验模型具有对称性,在两侧设置 1/2 横截面尺寸抗滑桩,桩间间距定为 220 mm。桩间混凝土板厚度为 10 mm。抗滑桩模型和桩间板均采用支模整体现浇制成,并以 2 mm 钢丝模拟实际抗滑桩内部钢筋(如图 1 所示)。为了研究地震作用下抗滑桩受力变形规律,需根据相似准则对抗滑桩材料特性进行缩尺。通过调节水灰比、粉煤灰掺量及养护龄期的方式得到弹性模量满足相似关系且仍具有应变硬化特性和超高拉伸应变能力的低强度 ECC 材料。材料配比为粉煤灰:石英砂:水:减水剂:PVA 纤维=0.15:0.85:0.264:0.37:0.009 3,其中 PVA 纤维体积掺量为 2%。抗压强度为 7.2 MPa,弹性模量为 3.2 GPa,抗拉强度 1.3 MPa,极限拉应变超过

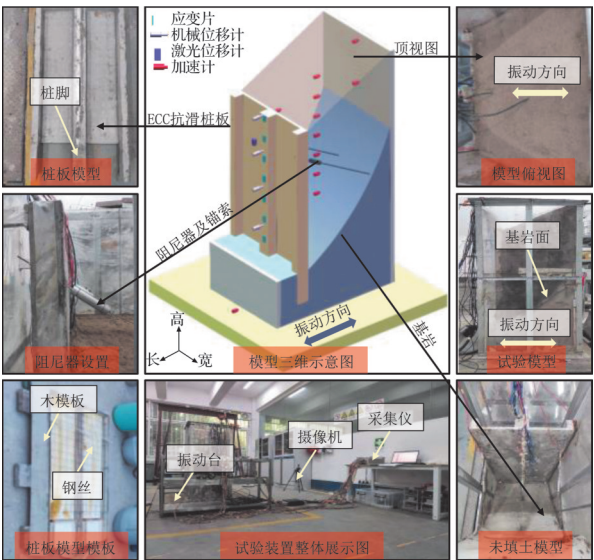


图 1 试验模型整体布置图  
Fig. 1 Overall layout of the test model



2.5%。试验对照组采用的普通混凝土材料也需要根据相似准则进行材料配制,配制比例为水泥:水:福建标准砂=1:1:4,弹性模量为4.2 GPa。如图4、图5所示,ECC材料在各类单元体试验中都表现出更高的韧性,且在破坏时往往呈现多裂缝开裂破坏特征。需要特别说明的是,以上材料参数均基于平行试样5 d龄期测试得到,选定5 d龄期是因为此时材料强度较低,可满足试验相似性要求。

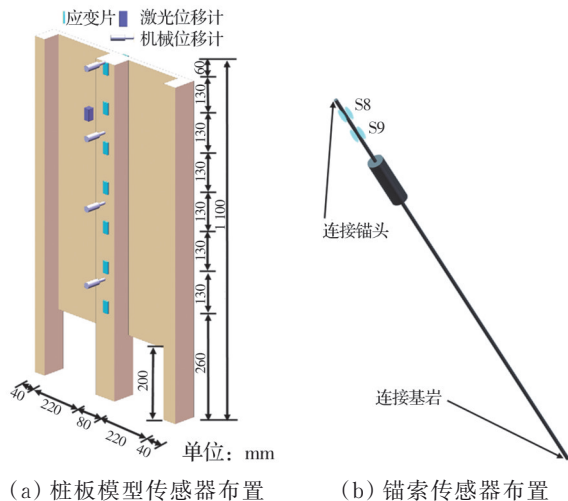


图3 应变片布置位置详图

Fig. 3 Detail of strain gauge layout position

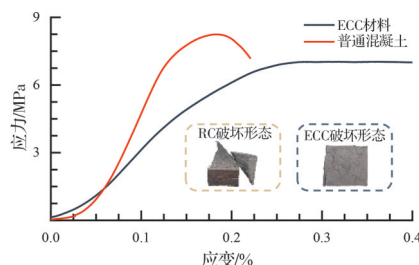


图4 试验材料受压应力-应变曲线

Fig. 4 Compressive stress-strain curves of test materials

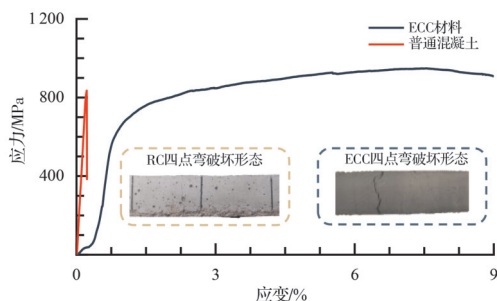


图5 试验材料四点弯荷载位移曲线

Fig. 5 Four-point bending load displacement curves

试验模型的锚索采用4 mm钢绞线。钢绞线前端与阻尼器尾部连接,后端与基岩上的钢环连接。试验模型的阻尼器选取第3代单进出间隙式黏滞液体阻尼器。在地震来临时,抗滑桩运动,桩头会牵

引着阻尼器活塞头剪切阻尼器内部阻尼液体,以此耗散地震能量。

整个试验模型建造过程为:1)进行桩板模型的支模浇筑,待达到5 d龄期时,将桩板模型的桩脚插入基岩预留孔洞进行固定支撑,这是为了保证抗滑桩在填土期间不受冲击荷载影响;2)进行填土以及分层夯实,通过控制分层填土质量控制填土密度;3)填土达到预设高度时安装锚索与阻尼器,将锚索一端与阻尼器尾部连接,另一端则连接至基岩,接着将阻尼器活塞杆穿过桩身预留孔洞,安装与活塞杆上螺纹配套的螺丝;4)填筑上部剩余土体,完成整个模型的建造。

#### 1.4 传感器布置

试验采用加速度传感器、位移计、应变计等多种类型的传感器。如图1所示,这些传感器被放置在模型中间的纵断面中,以减少边界效应对测量结果的影响。在模型侧面设置数码相机,记录模型的侧向变形。

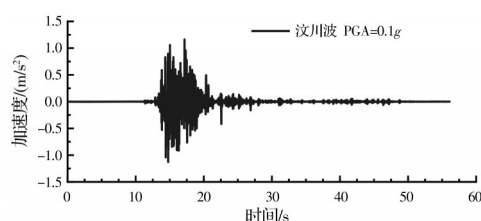
试验共布置15个加速度传感器,其中A11用于测量振动台的输入加速度时程。剩余的加速度传感器放置于滑体内,具体位置见图2。试验共布置5个位移传感器,其中4个是LVDT位移传感器,1个是精度较高的激光位移传感器。由于研究重点为锚头处位移,因此该处采用激光位移传感器测量。除加速度传感器和位移传感器外,试验中还使用了9对应变片来测量地震作用下桩身的动弯矩和锚索的动轴力,应变片布置位置详见图2、图3。

#### 1.5 地震动输入

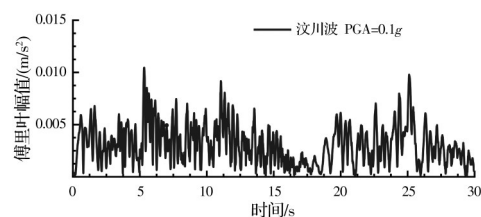
输入地震波原型选用汶川波,按模型时间相似比对原型地震动进行压缩处理,并调整地震动峰值,作为实际输入地震波<sup>[24-25]</sup>。为了充分研究阻尼器、ECC构件对支护结构破坏形态的影响,试验输入地震波还选用了破坏性更强的正弦波,持时定为20 s,频率定为5 Hz。所有基底输入地震动均采用水平激励,其加速度时程曲线及傅里叶谱如图6所示。在初始状态以及不同峰值加速度地震动输入完成后,对模型输入0.05g白噪声扫频,以研究试验过程中整个模型的动力特性变化。试验所有输入工况如表2所示,需要注意的是,在峰值地面加速度(Peak Ground Acceleration, 后文简称PGA)等于0.7g Sine\_5Hz(工况12)地震波作用下,支护结构已经开始出现明显位移变化。为排除天然地震波复杂频谱特性对支护结构最终破坏模式的影响,在后续工况中仅施加了PGA=0.9g、1.0g Sine\_5Hz地震波,并未施加PGA=0.9g、1.0g汶川波。

表 2 试验工况表  
Table 2 All cases of the test

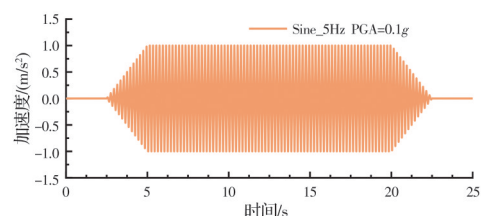
工况	地震波	输入峰值 加速度/ $g$	工况	地震波	输入峰值 加速度/ $g$
1	白噪声	0.05	10	白噪声	0.05
2	汶川波	0.10	11	汶川波	0.70
3	Sine_5Hz	0.10	12	Sine_5Hz	0.70
4	白噪声	0.05	13	白噪声	0.05
5	汶川波	0.30	14	Sine_5Hz	0.90
6	Sine_5Hz	0.30	15	白噪声	0.05
7	白噪声	0.05	16	Sine_5Hz	1.00
8	汶川波	0.50	17	白噪声	0.05
9	Sine_5Hz	0.50			



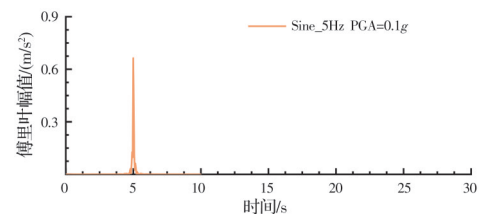
(a) 汶川波加速度时程



(b) 汶川波傅里叶谱



(c) Sine\_5Hz地震波加速度时程



(d) Sine\_5Hz地震波傅里叶谱

图 6 输入地震波时程及其傅里叶谱

Fig. 6 The time history curve of the input seismic wave and its Fourier spectrum

## 2 试验结果分析

### 2.1 宏观破坏现象

模型宏观破坏演变过程如图 7 所示。由图 7 可见,在输入地面峰值加速度小于  $0.5g$  地震波时,试

验模型保持初始状态,未出现明显破坏。直到  $PGA=0.5g$  Sine\_5Hz 地震波(工况 6)作用后,桩背区域与土接触面产生轻微背离,形成缝隙。输入  $PGA=0.7g$  汶川波(工况 11)时坡面右上角出现大量裂隙。振动过程中裂隙持续张开使得坡体右上角位置发生破坏,少量松散土体由坡顶右侧角部滑落。与此同时,桩背区域与土体背离程度进一步加大。继续输入  $PGA=0.7g$  Sine\_5Hz 波(工况 12),坡表面中部位置出现明显横向张拉裂缝。裂隙在振动过程中向斜上部不断发展,两侧横向张拉裂缝有汇合趋势,桩背区域与土体的间隙持续扩张。

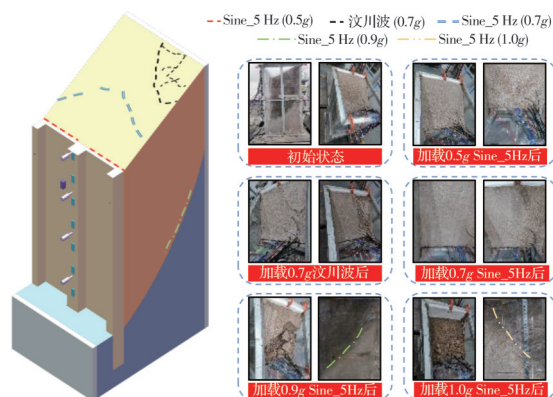


图 7 试验模型宏观破坏演变图

Fig. 7 Macroscopic failure evolution diagram of the test model

输入  $PGA=0.9g$  Sine\_5Hz 地震波(工况 14)时,坡面两侧横向裂缝汇合并贯穿整个截面,使得坡面下部土体破碎严重。大量土体从坡顶滑出,发生越顶破坏。同时从侧面观察到滑体开始有沿基岩面滑动的迹象,基岩面附近土体出现剪切滑移裂缝。继续输入  $PGA=1.0g$  Sine\_5Hz 地震波(工况 16),边坡坡顶被铲平。从另一侧面观察到基岩面附近土体也出现了剪切滑移裂缝,说明全截面贯通滑移面已形成,滑体产生较大的滑动。

综上所述,带消能型锚索的抗滑桩呈现出支护下边坡模型破坏形态受坡顶竖向张拉裂缝和剪切滑裂缝控制,在地震动作用下竖向张拉裂缝不断向下延伸,与沿着剪切滑移的裂缝相交贯通,引发滑体滑动,最终边坡模型滑梯在两种裂隙作用下发生越顶剪切破坏。

加载结束后取出桩板模型,获得的桩身裂缝分布如图 8 所示。由于桩身弯矩最大值出现在嵌固端截面,因此普通混凝土桩与 ECC 抗滑桩均在嵌固端截面附近出现桩背面受拉开裂破坏,但二者拉裂缝形态有明显差异。普通混凝土桩各个桩脚上均只出现一条主裂缝,而 ECC 混凝土桩桩脚上除主裂缝以外可观察到多条细微裂缝,呈现多裂缝破坏特

征。该现象说明,ECC混凝土桩具有更高抗震韧性,可以吸收、分散较多地震能量。同时,观察到ECC桩裂缝处有大量粗糙的纤维,说明振动过程中纤维发挥了对水泥基的拉结作用,并有效限制了桩脚裂缝的持续开展。

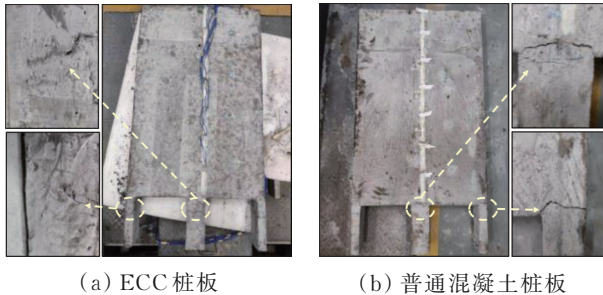


图8 桩板模型开裂破坏图

Fig. 8 Fracture diagram of pile and sheet model

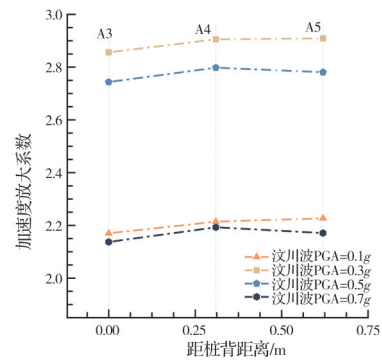
## 2.2 加速度响应规律

震后调查表明,地震中加速度产生的惯性力是边坡失稳破坏的主要原因。在加固边坡动力稳定分析中,必须研究加固边坡内部加速度分布规律。以不同震级天然地震波(汶川波)、Sine\_5Hz地震波作用下滑体内各点加速度响应为依据,研究加固边坡加速度响应规律。采用PGA放大系数描述加速度分布规律,PGA放大系数是指测点峰值加速度与实测输入地震波峰值加速度(A11)的比值。由于 $PGA=1.0g$ 时模型已发生越顶破坏,上部加速度计部分已退出工作,分析加速度分布规律时仅考虑 $PGA \leq 0.9g$ 的工况。

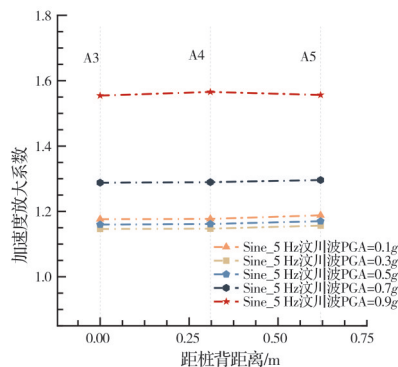
图9为不同震级天然地震波以及Sine\_5Hz地震波作用下PGA放大系数与偏离桩背面距离的关系。由图9可见,无论是在天然地震波作用下还是在Sine\_5Hz地震波作用下,PGA放大系数均由于偏离桩背面距离不同而发生明显变化,说明刚性箱两端加装的聚苯乙烯泡沫有效吸收了地震波,防止了地震波在边界发生反射对实验结果的影响。

图10为不同震级天然地震波以及Sine\_5Hz地震波作用下加速度放大系数随着高程变化的趋势。由图10可以看出,在不同震级天然地震波以及Sine\_5Hz地震波作用下,PGA放大系数均呈现出沿着高度方向非线性增加的趋势,具有显著高程效应。

图11为相同震级( $PGA=0.5g$ )的两种地震波作用下测点A2的加速度时程曲线。由图11可以发现,在汶川波作用下的测点峰值加速度显著大于Sine\_5Hz地震波作用下测点峰值加速度。对比相同震级两种地震波作用下其余测点加速度放大系数的值同样可以发现此特点。而汶川波之所以具



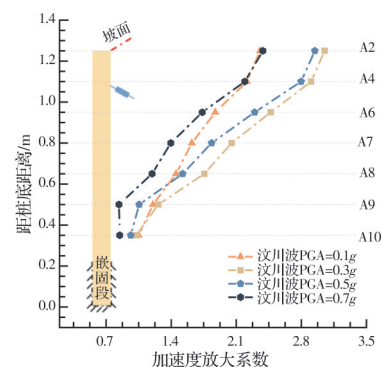
(a) 天然地震波作用下



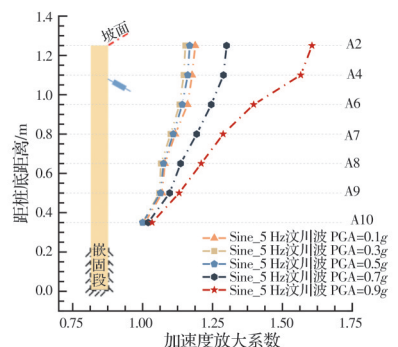
(b) Sine\_5Hz地震波作用下

图9 加速度放大系数沿水平向变化趋势图

Fig. 9 The trend of acceleration amplification factor along the horizontal



(a) 天然地震波作用下



(b) Sine\_5Hz地震波作用下

图10 加速度放大系数沿高程变化趋势图

Fig. 10 The trend of acceleration amplification coefficient along elevation



有更显著的放大效应,可能是因为汶川波的频率成分里含有更多接近试验模型基频的成分,在振动过程中,这些成分会被试验模型放大增强。说明加固边坡在地震中存在显著的“滤波”效应,亦即会对接近边坡基频的波进行放大,同时过滤与边坡基频不符的波。

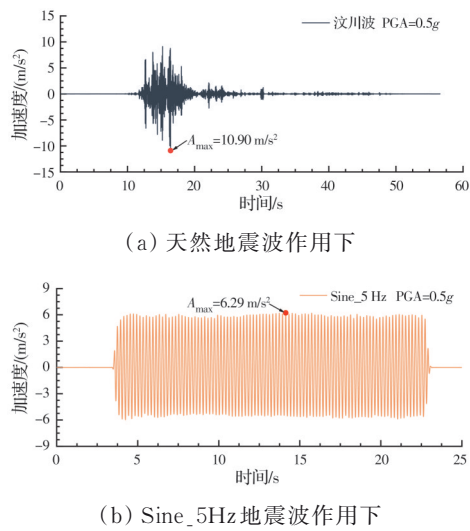


图 11 测点 A2 加速度时程曲线

Fig. 11 Acceleration time history curve of test point A2

表 3、表 4 为不同震级汶川波以及 Sine\_5Hz 地震波作用下各测点加速度放大系数。对比同一测点在不同震级汶川波作用下 PGA 放大系数的值可以发现,在小震作用下( $PGA \leq 0.5g$ ),随着震级的变化,PGA 放大系数呈先增大后减小的趋势。在大震作用下( $PGA > 0.5g$ )则呈增大的趋势。但不同 Sine\_5Hz 地震波作用下,随着震级的升高,各测点加速度放大系数仅呈先减小后增大的趋势。这是因为新型结构的加速度响应受多种因素的控制,一方面,在振动过程中土体非线性特征逐渐加强,会导致加速度响应变小;另一方面,随着震级的升高,新型支护结构桩身会产生明显位移,降低了支护结构对边坡的限制作用,从而无法有效削弱边坡加速度放大效应。汶川波频率组成更加复杂,即使较低震级的输入也会引起较大的结构响应,因此,在输入汶川波时,加速度放大系数主要受结构位移控制,随震级升高而增大。当土体非线性特征发展到一定程度、成为主要控制因素时,加速度放大系数才有所减小。最后,在  $PGA=0.7g$  汶川波输入时,结构位移显著增加,致使加速度放大系数再次增大。相比之下,Sine\_5Hz 波在低震级下引起的结构响应较小,因此,受土体非线性特征控制,加速度响应持续减小,直至加载高震级 Sine\_5Hz 波时才开始

增长。除此,加载 Sine\_5Hz 地震波之前会先加载同震级汶川波,使得土体非线性特征累积增大,对试验结果也有一定影响。

表 3 Sine\_5Hz 地震波作用下各测点加速度放大系数

Table 3 Acceleration amplification coefficient of each measuring point under seismic wave action

距桩底 高度/m	加速度放大系数				
	0.1g	0.3g	0.5g	0.7g	0.9g
1.25	1.19	1.15	1.17	1.30	1.61
1.10	1.18	1.15	1.16	1.29	1.57
0.95	1.16	1.13	1.14	1.25	1.40
0.80	1.12	1.10	1.11	1.19	1.29
0.65	1.08	1.07	1.07	1.14	1.21
0.50	1.07	1.06	1.06	1.10	1.13
0.35	1.01	1.00	1.00	1.02	1.03

表 4 汶川地震波作用下各测点加速度放大系数

Table 4 Acceleration amplification coefficient of each measuring point under WenChuan wave action

距桩底 高度/m	加速度放大系数			
	0.1g	0.3g	0.5g	0.7g
1.25	2.36	3.05	2.95	2.39
1.10	2.21	2.91	2.80	2.19
0.95	1.87	2.47	2.30	1.74
0.80	1.62	2.05	1.84	1.40
0.65	1.45	1.76	1.52	1.20
0.50	1.21	1.26	1.06	0.84
0.35	1.05	1.02	0.97	0.85

还需要特别注意的是,在输入  $PGA=0.9$  Sine\_5Hz 地震波时,各点 PGA 放大系数都陡然增大,说明抗滑桩此时可能已经开始破坏,支护结构的限制作用进一步削弱,这与观察到的试验模型宏观破坏现象相符,也说明加速度监测点的异常变化可以作为判断加固边坡破坏状态发展的有效依据。

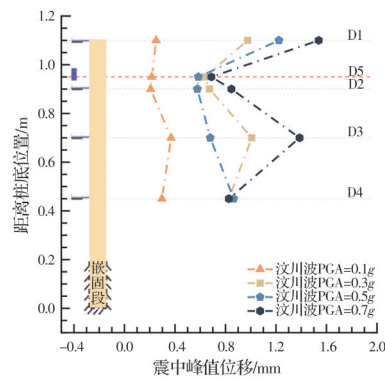
2.3 桩身位移变化规律

挡土结构在地震作用下产生的永久位移是衡量其抗震性能的重要指标,因此着重探究新型结构在地震作用下的永久位移变化规律。除此之外,考虑到振动过程中支护结构峰值位移过大也会对结构安全性造成严重威胁,还对新型结构在地震作用下的峰值位移变化规律进行研究。

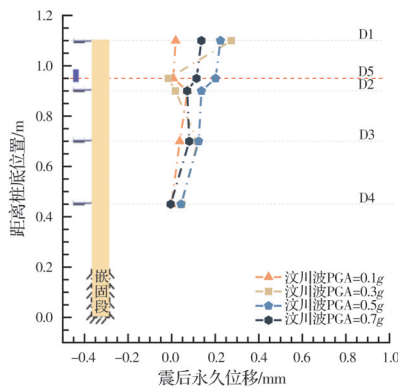
图 12(a)为不同震级汶川波作用下桩身各点峰值位移的分布情况,沿高程方向呈倒“R”型分布。主要是因为桩脚及桩锚头位置受到的约束较强,导致这些区域的位移相对较小。相比之下,桩中部和桩头在土压力作用下位移显著增大,自然形成这种位移分布模式。这表明消能锚索装置在地震作用下能有效限制桩锚头位置的峰值位移。还可以发

现,随着震级的增加,测点 D1、D2、D3 的峰值位移

观破坏现象相符。



(a) 峰值位移分布



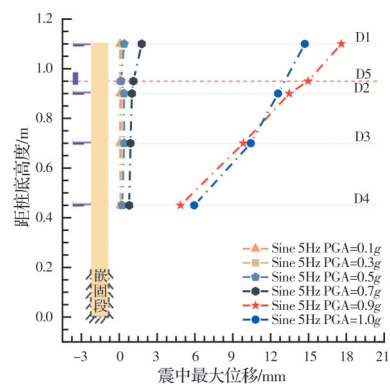
(b) 残余位移分布

图 12 不同震级汶川波作用下桩身位移分布图

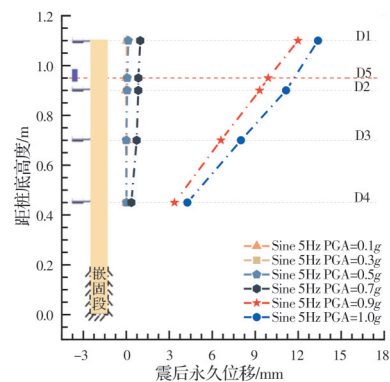
Fig. 12 Displacement distribution of pile under Wenchuan wave action of different earthquake magnitudes

均出现明显增大,但测点 D4、D5 的峰值位移变化不明显。这可能是因为测点 D4 靠近下端约束端,而测点 D5 处于锚头位置,二者位移受到更强的约束,也说明消能型锚索对抗滑桩有明显的限制作用。各个震级汶川波作用下各点残余位移的分布情况则如图 12(b) 所示,可以发现,残余位移与峰值位移分布不一致,大致呈沿高程非线性增大趋势,与峰值位移值相比,各测点残余位移值较小,特别是桩身中下部测点 D4,残余位移接近 0。原因可能是中下部位移主要来自桩的可恢复变形,在地震动结束后变形恢复,导致底部残余位移迅速减小。同时,由于振动过程中消能型锚索上阻尼器被缓慢拔出,峰值位移更小的锚头位置反而有更大残余位移。

各震级 Sine\_5Hz 地震波作用下各点峰值位移如图 13 所示。可以发现,在  $PGA < 0.7g$  时,输入 Sine\_5Hz 地震波各测点峰值位移与残余位移分布规律与汶川波作用下类似。在  $PGA = 0.7g$  Sine\_5Hz 地震波(工况 12)作用下,各测点产生明显的峰值位移与残余位移,且分布规律发生变化。应该是因为此时滑体开始产生滑动,这也与该工况下的宏



(a) 峰值位移分布



(b) 残余位移分布

图 13 不同震级 Sine\_5Hz 作用下桩身位移分布

Fig. 13 Displacement distribution of pile under Sine\_5Hz wave action of different earthquake magnitudes

$PGA = 0.9g$  Sine\_5Hz 地震波(工况 14)作用时桩身各测点峰值位移以及残余位移均急剧增大,说明此时坡体出现大量滑动,各测点残余位移与峰值位移分布规律与之前工况有明显差异,呈现沿高程线性增大趋势。这种差异可能是因为桩的嵌固端开始破坏,而测点位移却以绕桩脚旋转的不可恢复变形为主。这也可解释此工况下桩身各测点位移的急剧增大现象。输入  $PGA = 1.0g$  Sine\_5Hz 地震波(工况 16)时,除激光位移传感器(D5)因量程限制退出了工作以外,其余测点峰值位移与残余位移分布规律与输入  $PGA = 0.9g$  sine 波时基本一致,值得注意的是,在  $PGA = 1.0g$  Sine\_5Hz 地震波作用下,测点 D2、D1 峰值反而比在  $PGA = 0.9g$  Sine\_5Hz 地震波作用下小,这大概率是因为  $PGA = 1.0g$  Sine\_5Hz 地震波作用时消能型锚索已经接近极限工作行程,此时对桩身向外位移具有更强的限制作用。上述现象说明,通过合理设计消能型锚索极限行程能有效防止桩身在强震作用下发生极其不利的变形,即消能型锚索具有相当高的安全性和可靠性。

阻尼器的设置也对结构造成了一定的不利影



响。表 5 列出了 0.9g Sine\_5Hz 波作用下普通 ECC 桩锚结构与带阻尼器 ECC 桩锚结构上各测点残余位移值。可以发现,设置阻尼器会导致结构残余位移显著增大,桩顶残余位移增幅达 126%。但如前文所述,ECC 构件的超强变形能力使得结构并未因此失效,弥补了该项不足。

表 5 0.9g Sine\_5Hz 波作用后不同桩锚结构各测点残余位移  
Table 5 Residual displacements of different pile and anchor structures after 0.9g Sine\_5Hz wave action

距桩底 高度/m	普通 ECC 桩锚 残余位移/mm	带阻尼器桩锚 残余位移/mm
1.10	5.29	11.99
0.90	4.25	9.31
0.70	3.72	6.61
0.45	2.39	3.37

2.4 桩身弯矩响应规律

桩身弯矩是抗滑桩设计必须考虑的条件,也研究了其分布规律。需要说明的是,仅对地震动引起的桩身动态弯矩进行分析,而不包括桩身弯矩初始静态值。将使抗滑桩前侧(临空侧)受压的动态弯矩定义为正弯矩。

如图 5 所示,抗滑桩身上布置 7 对应变片,以测

量桩身各位置的应变,再利用应变和弯矩的关系可计算得到各测点弯矩,计算方法如式(1)所示。

$$M=\frac{2EI\varepsilon}{h}=\frac{E\varepsilon bh^2}{6}\tag{1}$$

式中:M为测点的弯矩;E为 ECC 混凝土的弹性模量,取 3.2 GPa;b为桩截面宽度;h为桩截面高度;I为桩截面惯性矩;ε为一对应变片测量应变之差。

图 14 为在 PGA=0.7g Sine\_5Hz 地震波(工况 12)作用下桩身弯矩在不同时刻的分布变化。选取图中这 6 个时刻的依据是结构响应频率与实验加载波形之间的相关性。试验采用了 Sine\_5Hz 波,该波形导致结构的动弯矩响应频率也接近于 5 Hz,对应周期为 0.2 s。为了全面展示桩身动弯矩随时间变化的过程,选取单个周期内的 3 个关键时刻:t(周期开始,桩身正弯矩达到最大值),t+0.1 s 和 t+0.2 s (完整周期结束)进行绘图。以 5、20 s 作为基准点是为了充分反映振动过程中桩身动态弯矩的变化。可以看到,测点动态弯矩正负值反复变化,且正弯矩值大于负弯矩值。这也是由于桩身向外侧运动不会受到土体阻碍,更容易发生向外侧的弯曲变形。在 t=5 s 时刻附近底部测点正弯矩明显小于 t=20 s 时刻附近底部测点正弯矩,而其负弯矩绝对值略大于 t=20 s 时刻附近底部测点负弯矩绝对值。

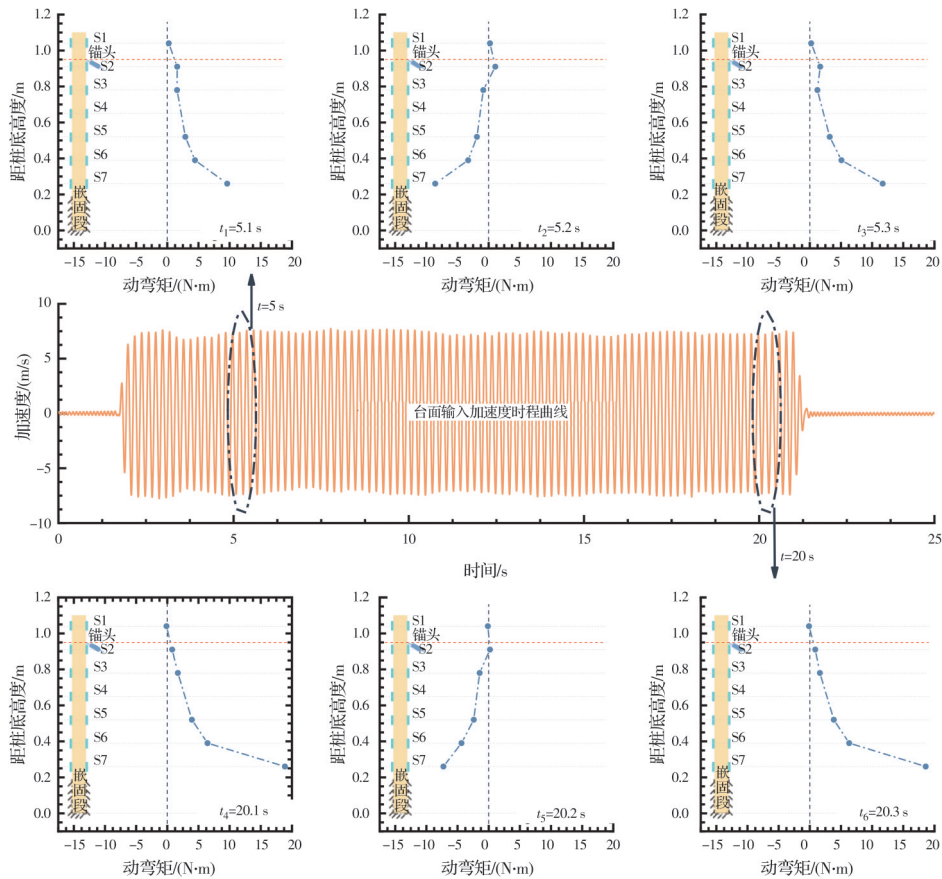
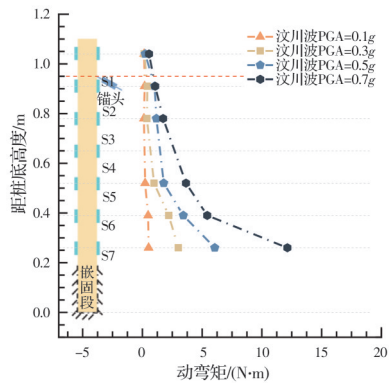


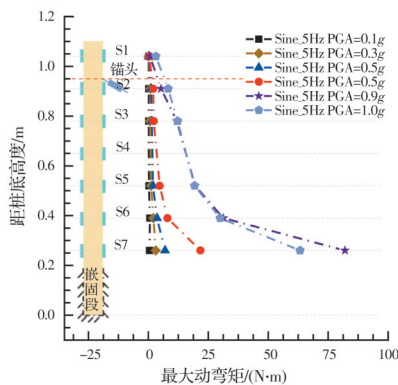
图 14 PGA=0.7g Sine\_5Hz 波作用下各时刻桩身动弯矩分布  
Fig. 14 Dynamic bending moment distribution of pile body at each time under PGA = 0.7g Sine\_5Hz wave action

一方面是因为在振动过程中消能型锚索被拔出伸长,导致锚索约束能力下降,进而使得桩身向外侧的弯曲变形量进一步增大;另一方面则是因为桩身向外不可恢复弯曲变形的逐渐累积。

图15(a)为不同震级汶川波作用下各测点动态弯矩最大值的分布变化情况。可见,同一震级下,汶川波作用下动态弯矩随着高程增加呈非线性减少趋势,底部动态弯矩最大。这可能是因为消能型锚索可被缓慢拔出伸长且前侧无土体阻挡,使得桩身整体更容易向前侧弯曲,此时其受力特征近似于悬臂梁。由图15(a)还可以看出,随着地震荷载的增大(震级增加),底部动态弯矩出现更快增长。这些现象说明,可以把带消能型锚索抗滑桩看作桩头位置位移受到较低刚度约束的普通抗滑桩。



(a) 天然地震波作用下



(b) Sine\_5Hz地震波作用下

图15 地震作用下桩身动态弯矩分布

Fig. 15 Dynamic bending moment distribution of pile under earthquake action

不同震级 Sine\_5Hz 地震波作用下各测点动态弯矩最大值的分布变化情况如图15(b)所示,其分布规律同样与汶川波作用下各测点动态弯矩最大值的分布变化规律相似。在 PGA=0.7g Sine\_5Hz 地震波(工况12)输入时,桩身下部测点动态弯矩出现大幅度增长,结合宏观破坏现象来看,可能是由于滑体开始滑动导致。输入 PGA=0.9g Sine\_5Hz

地震波(工况14)时,滑体产生大量滑动,推动桩向外剧烈变形,使得桩身动态弯矩加速增大。而输入 PGA=1g Sine\_5Hz 地震波(工况16)时,底部测点 S7 动态弯矩缩小,可能是因为在振动过程中桩脚已经发生破坏,形成“塑性”铰,其承载最大动态弯矩能力下降。但其余测点最大动态弯矩仍未出现明显下降,说明在底部出现“塑性”铰后消能锚抗滑桩仍然具有较好的承载能力,能够发挥其设计功能。

## 2.5 锚索轴力响应规律

大量震害现场调研表明,由锚索过大轴力引起的锚头冲切破坏是震中锚索抗滑桩失效的主要形式之一<sup>[16-17]</sup>,因此,地震作用下锚索轴力的响应规律应引起重视。考虑到试验过程中锚索受力较小,仍处于线弹性变形阶段,根据式(2)将应变片(S8、S9)测得应变转换为锚索轴力。同样,仅对地震动引起的动态锚索轴力进行分析,对初始静态值仅作简要讨论。

$$F = E \times A \times \epsilon \quad (2)$$

式中: $F$ 为锚索轴力; $\epsilon$ 为活塞杆应变,此处指两对应应变片测得应变数据的平均值; $E$ 为活塞杆弹性模量,试验中为69 GPa。

图16所示为不同震级天然地震波、Sine\_5Hz地震波作用下消能型锚索的动态轴向力峰值。在相同震级下,施加汶川波时锚索轴力峰值大于施加 Sine\_5Hz 地震波时,说明了汶川波对试验模型具有更强的破坏作用。同时可以发现,随着震级升高,锚索轴力增长速度逐渐加快。当施加0.9g Sine\_5Hz 地震波时,锚索轴力峰值达到了210.85 N,这种强烈非线性增长表明,锚索轴力对震级相当敏感,强震作用下锚索轴向力会剧烈增加,这与 Hu 等人<sup>[17]</sup>的研究结果一致。出现这种情形的原因:一方面,在强震作用下滑体开始滑动产生的推力加剧了桩身外倾变形,使得锚索产生了更多的拉伸;另一方面,消能型锚索的工作特性导致锚索上轴力实际上是活塞剪切阻尼器内黏滞液体产生的阻尼力,阻尼力和活塞运动速度的关系如式(3)所示。

$$R = -cv^m \quad (3)$$

式中: $R$ 为阻尼力; $c$ 为阻尼器黏性阻尼系数; $v$ 为活塞运动速度,活塞连接于桩锚头处,由桩身带动其运动,因此 $v$ 可近似等效于桩锚头处运动速度; $m$ 为与黏滞材料性质相关的阻尼参数。强震作用下桩锚头处运动速度加快,进而导致阻尼力的增大,锚索轴向峰值也就出现剧烈增长。

对比不同震级 Sine\_5Hz 地震波作用下普通 ECC 桩锚结构与带阻尼器 ECC 桩锚结构的锚索峰

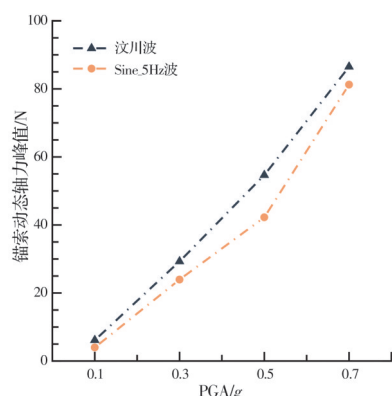


图 16 不同震级地震波作用下锚索动态轴力变化图

Fig. 16 Dynamic axial force variation of anchor cable under seismic waves of different magnitudes

值轴力可以发现,阻尼器的存在可以有效降低锚索轴力。如表 6 所示,在  $PGA=0.5g$  Sine\_5Hz 地震波作用下,阻尼器降低锚索轴力效果最为显著,降幅约为 46%。之后随着震级的升高,桩身运动速度急剧加快,阻尼力大幅上涨,导致阻尼器降低轴力的能力反而有所下降。

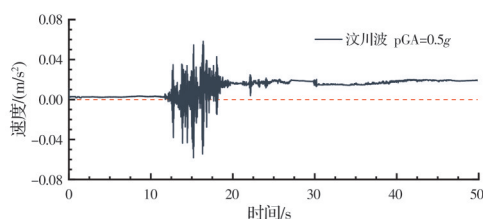
以上分析表明,在整个振动过程中,消能型锚索的轴力与桩身运动速度高度相关,而普通预应力锚索的轴力主要取决于桩身向外位移量的大小。

表 6 Sine\_5Hz 波作用下不同桩锚结构锚索峰值轴力

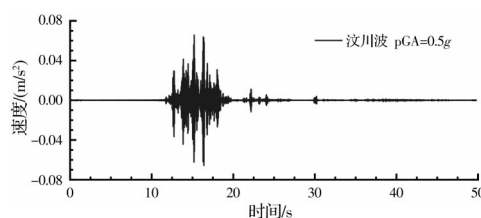
Table 6 Peak axial forces of anchor cables of different pile-anchor structures under Sine\_5Hz wave action

PGA/g	ECC 桩锚索峰值轴力/N	带阻尼器桩锚索峰值轴力/N
0.1	6.18	4.00
0.3	41.49	23.94
0.5	79.12	42.26
0.7	110.45	81.25

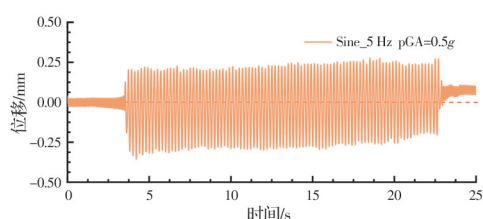
图 17 为  $PGA=0.5g$  地震作用下桩身锚头位置位移时程及速度时程,其中速度时程通过对位移时程使用 Simpson 数值微分方法得到。从图 17 可以看出,震动结束后桩身会产生永久位移,这些位移会导致普通预应力锚索轴力持续增加。但对于消能型锚索而言,桩身产生的永久位移会使阻尼器活塞杆被缓慢拔出而不会使锚索轴力累积上升。从图 17 还可以看出,天然地震波作用下桩身锚头处保持高速运动的时间占比较少,也就是说,在地震作用的大部分时间内,消能型锚索保持着较低的轴力,甚至可以通过调节阻尼器的黏性阻尼系数来降低桩身高速运动时的锚索轴力。综上所述,地震作用下消能型锚索具有更好的力学性能。



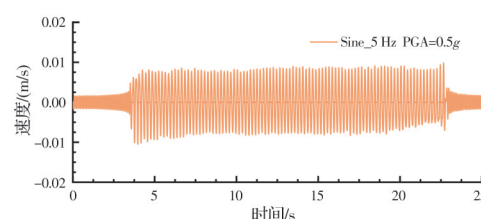
(a) 汶川波作用下位移时程



(b) 汶川波作用下速度时程



(c) Sine\_5Hz 波作用下位移时程



(d) Sine\_5Hz 作用下速度时程

图 17 地震作用下桩身锚头位置位移及速度时程

Fig. 17 Position displacement and velocity time history of pile and anchor head under earthquake

### 3 结论

使用黏滞阻尼器以及 ECC 消能构件构建了消能型桩锚结构,并基于振动台模型试验研究了消能型桩锚结构地震响应规律,分析了地震作用下新型桩锚结构的宏观破坏演化、动力特性变化、加速度响应、桩身位移响应、动态弯矩响应、锚索动态轴力响应等规律,最终得到以下主要结论:

1) ECC 材料极限压应变约为普通混凝土的 2 倍,其受弯变形能力更是其数十倍。地震作用下 ECC 桩基表现出较高的韧性和耗能能力,可以考虑在关键薄弱部位使用 ECC 材料,以增强支护体系的整体抗震性能。

2) 带消能型锚索抗滑桩支护边坡对水平向加速度存在明显高程效应。该放大效应受到地震波频谱特性的影响,地震波含有接近边坡基频的频率



分量越多,其加速度放大现象越明显。与Sine\_5Hz地震波作用下相比,汶川波作用下坡顶PGA放大系数增幅可达100%,因此,在支护结构抗震设计时应考虑地震波频谱特性的影响。

3)消能型锚索的使用会导致锚索抗滑桩在锚头处残余位移产生一定量的增大,在强震作用下桩顶残余位移增大高达126%,但其可以有效限制锚头处峰值位移。通过合理设计消能型锚索极限行程,还能有效防止桩身在强震作用下发生强烈变形。说明消能型锚索具有较高的安全性和可靠性。此外,ECC构件的超高变形能力使得结构位移适当增大并不会导致系统失效,弥补了设置阻尼器后结构位移增大的潜在风险。

4)消能型锚索能有效减小地震作用下锚杆的动态轴力,特别是在PGA=0.5g Sine地震波作用下,锚索峰值轴力可降低约47%。这种削减效果随震级的升高先增大再减小,可通过阻尼器优化设计对其进行调节。此消能型锚索能有效防止锚杆轴力因桩身永久位移发生累积效应,从而避免强震作用下抗滑桩在锚头处发生冲切破坏。

## 参考文献

- [1] 宋章,张广泽,蒋良文,等.川藏铁路主要地质灾害特征及地质选线探析[J].铁道标准设计,2016,60(1):14-19.  
SONG Z, ZHANG G Z, JIANG L W, et al. Analysis of the characteristics of major geological disasters and geological alignment of Sichuan-Tibet railway [J]. Railway Standard Design, 2016, 60(1): 14-19. (in Chinese)
- [2] 殷跃平.汶川八级地震地质灾害研究[J].工程地质学报,2008,16(4):433-444.  
YIN Y P. Researches on the geo-hazards triggered by Wenchuan earthquake, Sichuan [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(4): 433-444. (in Chinese)
- [3] 白仙富,杨志全,胡斌,等.区域地震滑坡灾害定量评估研究进展和展望[J].地震工程学报,2023,45(6):1408-1424.  
BAI X F, YANG Z Q, HU B, et al. Research progress and prospect of the quantitative evaluation of regional earthquake-induced landslide disasters [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(6): 1408-1424. (in Chinese)
- [4] 王兰民,柴少峰,薄景山,等.黄土地震滑坡的触发类型、特征与成灾机制[J].岩土工程学报,2023,45(8):1543-1554.  
WANG L M, CHAI S F, BO J S, et al. Triggering types, characteristics and disaster mechanism of seismic loess landslides [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(8): 1543-1554. (in Chinese)
- [5] 张永双,杜国梁,姚鑫,等.塔吉克斯坦M<sub>s</sub>7.2级地震滑坡危险性快速评估及其对中国西部边疆山区巨灾风险防控的启示[J].地质学报,2023,97(5):1371-1382.  
ZHANG Y S, DU G L, YAO X, et al. Rapid assessment of landslide susceptibility induced by M<sub>s</sub> 7.2 earthquake in Tajikistan and its enlightenment on disaster risk prevention and control in western frontier mountainous region of China [J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(5): 1371-1382. (in Chinese)
- [6] 杨芸,蒋良淮,罗强,等.预应力锚索抗滑桩减震外锚结构振动台模型试验研究[J].振动与冲击,2023,42(18):295-303.  
YANG Y, JIANG L W, LUO Q, et al. Shaking table test on pre-stressed anchor cable anti-slide pile with an external anchor structure and a buffer spring [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(18): 295-303. (in Chinese)
- [7] 张卢明,岳建国,张建经,等.强震作用下核电厂顺层软岩高边坡组合支挡结构抗震性能研究[J].地震工程学报,2020,42(3):742-750.  
ZHANG L M, YUE J G, ZHANG J J, et al. Seismic behavior of the composite retaining structures in case of nuclear power plants in high soft-rock slopes under strong earthquakes [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(3): 742-750. (in Chinese)
- [8] 陶连金,文虎,贾志波,等.基于性能的组合边坡加固设计方法研究[J].工程地质学报,2022,30(5):1620-1628.  
TAO L J, WEN H, JIA Z B, et al. Research on design method of slope reinforced by pile-anchor combination [J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(5): 1620-1628. (in Chinese)
- [9] 胡顺彩,裴强,丁彧,等.罕遇地震作用下锚索抗滑桩加固边坡的抗震性能[J].煤炭技术,2022,41(10):73-76.  
HU S C, PEI Q, DING Y, et al. Seismic performance of anchor cable anti-slip pile reinforced slopes under rare earthquakes [J]. Coal Technology, 2022, 41(10): 73-76. (in Chinese)
- [10] 石洋海,王贤能.力法计算锚索抗滑桩内力分担比及其应用[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(4):92-97.  
SHI Y H, WANG X N. Application of the structural mechanics method to calculate the internal force sharing ratio of anchor cable and anti-slide pile for retaining structure [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): 92-97. (in Chinese)
- [11] 王壮,苏雷,时伟,等.地震作用下不同支护结构对滑坡加固效果研究[J].工程地质学报,2023,31(1):176-187.  
WANG Z, SU L, SHI W, et al. Reinforcement effect

- of different support structures against landslide under earthquake [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2023, 31(1): 176-187. (in Chinese)
- [12] 李晓翠, 甘磊, 甘胜, 等. 滑坡体预应力锚索抗滑桩参数优化设计研究[J]. *水利水电科技进展*, 2023, 43(4): 98-104.
- LI X C, GAN L, GAN S, et al. Study on parameter optimization design of anti-slide piles with pre-stressed anchor cable for landslide mass [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2023, 43(4): 98-104. (in Chinese)
- [13] 王贵华, 李长冬, 贺鑫, 等. 不同布锚方式对锚索抗滑桩受力与变形影响的物理模型试验研究[J]. *地质科技通报*, 2022, 41(6): 262-277, 315.
- WANG G H, LI C D, HE X, et al. Physical model test on the effect of different anchoring methods on the mechanical and deformation characteristics of anchored slide-resistant piles [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(6): 262-277, 315. (in Chinese)
- [14] 连静, 温浩, 童心豪, 等. 覆盖型边坡-锚索抗滑桩动力学特征演化规律与成因机制的大型振动台试验研究[J/OL]. *铁道学报*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2104.u.20230404.1753.004.html>.
- LIAN J, WEN H, TONG X H, et al. Study of large shaking table test on evolution of dynamic characteristics and formation mechanism of bedrock and overburden layer slope with stabilizing piles and anchor cables [J/OL]. *Journal of the China Railway Society*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2104.u.20230404.1753.004.html>. (in Chinese)
- [15] 吴曙光, 毛振南, 潘林, 等. 含建筑桩基的顺层岩质边坡桩锚支护体系振动台模型试验研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2024, 46(2): 11-22.
- WU S G, MAO Z N, PAN L, et al. Shaking table model test study of pile-anchor support system for bedding rock slope with building pile foundation [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2024, 46(2): 11-22. (in Chinese)
- [16] JIA Z B, TAO L, BIAN J, et al. Research on influence of anchor cable failure on slope dynamic response [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2022, 161: 107435.
- [17] 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.
- [18] 湛建霖, 丁选明, 吴琪, 等. ECC混凝土桩板墙支挡边坡抗震性能振动台模型试验研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2023, 45(5): 81-93.
- SHEN J L, DING X M, WU Q, et al. Shaking table model test on seismic performance of retaining slope with ECC anti-sliding sheet pile wall [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2023, 45(5): 81-93. (in Chinese)
- [19] 高淑玲, 郭亚栋, 吴耀泉. ECC/钢筋混凝土叠合梁正截面受弯承载力试验与理论研究[J]. *土木建筑与环境工程*, 2017, 39(2): 123-131.
- GAO S L, GUO Y D, WU Y Q. Experimental analysis and calculation theory on normal section flexural capacity of ECC/steel reinforced concrete composite beams [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2017, 39(2): 123-131. (in Chinese)
- [20] 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.
- [21] 何文福, 康嘉志, 刘文燕, 等. 装配整体式黏滞阻尼器减震框架试验及参数分析研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2023, 43(2): 103-112.
- HE W F, KANG J Z, LIU W Y, et al. Test and parameter analysis of precast monolithic frame with a viscous damper [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2023, 43(2): 103-112. (in Chinese)
- [22] SIAMI-KALEYBAR R, TEHRANI P. Effects of using different arrangements and types of viscous dampers on seismic performance of intermediate steel moment frames in comparison with different passive dampers [J]. *Structures*, 2021, 33: 3382-3396.
- [23] 吴克川, 陶忠, 潘文, 等. 基于性能的屈曲约束支撑与黏滞阻尼器组合减震结构设计方法[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2021, 43(3): 83-92.
- WU K C, TAO Z, PAN W, et al. Performance-based design method of combined energy dissipation structure with buckling restrained brace and viscous damper [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(3): 83-92. (in Chinese)
- [24] 吕西林, 陈跃庆, 陈波, 等. 结构-地基动力相互作用体系振动台模型试验研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2000, 20(4): 20-29.
- LU X L, CHEN Y Q, CHEN B, et al. Shaking table testing of dynamic soil-structure interaction system [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2000, 20(4): 20-29. (in Chinese)
- [25] 徐光兴, 姚令侃, 高召宁, 等. 边坡动力特性与动力响应的大型振动台模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(3): 624-632.
- XU G X, YAO L K, GAO Z N, et al. Large-scale shaking table model test study on dynamic characteristics and dynamic responses of slope [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(3): 624-632. (in Chinese)