

DOI: 10.11779/CJGE2023S20012

不同布锚角度锚索抗滑桩抗震性能的离心振动台 试验对比

王 宇^{1,2}, 郑 桐^{*1,2}, 孙 锐^{1,2}, 齐文浩^{1,2}, 李领贵³, 程 阳^{1,2}, 张一鸣^{1,2}

(1. 中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 青海省第五地质勘察院, 青海 西宁 810028)

摘要: 预应力锚索是预应力锚索抗滑桩的重要组成部件, 但其布设角度对预应力锚索抗滑桩抗震性能的影响尚不清晰。鉴于此, 设计并完成了考虑锚索水平布设和倾斜布设的两组离心振动台模型试验, 对比分析了不同布锚角度时坡体地震变形和加速度放大特征以及桩-锚结构的受力特性, 揭示了布锚角度变化对锚索抗滑桩-坡体体系抗震性能的影响规律。结果表明, 不同布锚角度时锚索锚固点附近坡体均存在加速度异常放大现象, 放大系数随输入地震动强度增加而增大; 倾斜布锚时坡体沉降幅度和加速度放大程度明显减小; 倾斜布锚有利于改善桩身的地震受力, 桩身峰值动弯矩和动土压力相比水平布锚时显著降低; 倾斜布锚可以有效减缓锚索内力的增长, 降低桩-锚-坡体体系地震失效的风险。

关键词: 地震滑坡; 预应力锚索抗滑桩; 离心机试验; 地震响应; 布锚角度

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)S2-0110-06

作者简介: 王 宇(1998—), 男, 博士研究生, 主要从事边坡抗震加固方面的研究工作。E-mail: iem_wy@163.com。

Comparative tests on seismic performance of anti-slide piles with prestressed anchor cables with different angles

WANG Yu^{1,2}, ZHENG Tong^{1,2}, SUN Rui^{1,2}, QI Wenhao^{1,2}, LI Linggui³, CHENG Yang^{1,2}, ZHANG Yiming^{1,2}

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake

Administration, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin

150080, China; 3. No.5 Geological and Mineral Survey Institute of Qinghai Province, Xining 810028, China)

Abstract: The prestressed anchor cable is an important component of the anti-slide pile of prestressed anchor cable, but the influences of its arrangement angle on the seismic performance of the anti-slide pile of prestressed anchor cable is not yet clear. To this end, a series of centrifugal model tests considering the horizontal and inclined layout of anchor cables are designed and completed. The seismic deformation and acceleration amplification characteristics of the slope are compared and analyzed under different arrangement angles of anchor cable, as well as the stress characteristics of the pile-anchor structure. It is revealed the influences of arrangement angle of anchor cable change the seismic seismic performance of the anti-slide pile of prestressed anchor cable-slope system. The results show that there is an abnormal amplification phenomenon of acceleration near the anchor point of the anchor cable under different arrangement angles of anchor cable, and the amplification coefficient increases with the increase of input seismic intensity. The settlement amplitude and acceleration amplification of the slope are significantly reduced when the inclined anchor placement is applied. The inclined anchor placement is beneficial for improving the seismic stress on the pile, and the peak dynamic bending moment and dynamic soil pressure of the pile are significantly reduced compared to those under horizontal anchor placement. The inclined anchoring method can effectively slow down the growth of internal forces in anchor cables and reduce the risk of seismic failure in the pile-anchor-slope system.

Key words: earthquake landslide; anti-slide pile of prestressed anchor cable; centrifugal model test; seismic response; anchor arrangement angle of cable

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项项目
(2020C02, 2020C04, 2019B10); 国家自然科学基金项目(51808515, 41172293); 黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2020E020)

收稿日期: 2023-11-30

*通信作者 (E-mail: zhengt0928@163.com)

0 引言

受板块运动的影响, 中国西部山区大震频发。大

地震经常诱发数以万计的地震滑坡, 造成大量的人员伤亡和不可预估的经济损失^[1-2]。为了有效防治地震滑坡, 工程师们开发出了预应力锚索抗滑桩。这种结构由悬臂抗滑桩和加设在桩头的预应力锚索组成, 可显著降低对结构尺寸的依赖性, 并在 2008 年汶川地震中展现了杰出的抗震支护能力^[3]。目前, 锚索抗滑桩已广泛应用于中国西部强震区大型或超大型滑坡抗震加固工程, 但其抗震机理研究发展远落后于工程实践^[4]。尤其是锚索-抗滑桩-坡体体系的地震响应影响规律, 至今尚不清晰。

近年来, 一些学者基于 1g 大型振动台试验开展了锚索抗滑桩地震响应的研究^[5-6], 初步揭示了锚索抗滑桩地震受力变形特性, 为进一步认识和总结锚索抗滑桩加固机理奠定了基础。然而, 1g 大型振动台试验不能考虑缩尺后的重力加速度转换^[7], 导致原型和模型之间应力-应变状态不一致, 严重影响边(滑)坡地震响应定量或半定量结论的可靠性。与 1g 大型振动台试验相比, 离心振动台试验能够依靠土工离心机高速旋转产生的加速度实现原型和模型应力-应变关系的完美匹配^[8]。然而, 现有基于该项技术的锚索抗滑桩加固边坡地震响应及加固机理的研究成果却鲜有报道。仅郑桐等^[9]研究了水平布锚的锚索抗滑桩动态受力特性和坡体加速度响应特征。

预应力锚索是锚索抗滑桩的重要组成构件, 但是现有的滑坡防治设计规范(GB/T 38509—2020)^[10]中尚未给出锚索布设角度的明确说明, 导致布锚角度的确定强烈依赖既往工程的成功经验。工程实践发现, 静力条件下预应力锚索的布锚角度显著影响锚索抗滑桩的加固性能^[11]。相比静力作用, 地震作用更加复杂, 锚索的布锚角度如何影响锚索抗滑桩-坡体体系的地震响应, 至今不得而知。

鉴于此, 在既往水平布锚(锚固角度)的锚索抗滑桩加固边坡离心振动台试验基础上, 保持坡体和桩身设计参数不变, 进一步改变锚索的布锚角度, 设计并完成倾斜布锚(锚固角度 15°)的动力离心模型试验, 通过两组模型试验的对比分析, 研究了布锚角度变化对预应力锚索抗滑桩抗震性能的影响规律, 为预应力锚索抗滑桩抗震优化设计提供参考依据。

1 离心机模型试验原理

1.1 试验设备

试验采用了交通运输部天津水运工程科学研究院研制的 TK-C500 港口土工离心机^[12]。该设备主机最大容量为 500 g·t, 最大离心加速度为 250g, 最大半径为 5 m。其配备的双向振动台可提供高精度的水平和垂直双向振动, 最大水平加速度可达 40g, 振动频率范围可达 20~200 Hz。

模型箱采用内部尺寸为 0.8 m×0.4 m×0.65 m 的刚性模型箱。为确保试验过程中地震动的正确传递, 模型箱与振动台之间采用刚性连接, 并在其内部垂直地震动传播方向的两侧各布置 25 mm 的防爆油泥, 用以吸收边界反射^[13-14]。此外, 在模型箱平行于地震动传播方向的两侧内壁上均涂抹凡士林, 以减少模型与模型箱之间的摩擦作用。

1.2 相似比设计

离心模型试验是一种小型物理模型试验, 为保证模型试验能够真实地反映原型的行为, 模型与原型之间应严格满足几何相似、运动相似和动力相似。本试验中相似比拟定为 1:50(模型: 原型), 相似关系参考先前的相关文章^[9]。

1.3 模型制备

模型主要包含 3 个部分: 滑体、基岩和预应力锚索抗滑桩。滑体部分采用原位重塑土制作。基岩部分被认为是刚性的, 并采用土工硬化混合物(粉质黏土: 水泥: 石英砂: 水=1:0.55:1:0.25)制作, 试验过程仅考虑其对滑体的承托作用。试验前, 基于固结不排水(CU)三轴试验, 结合莫尔-库仑准则, 测量并计算了坡体抗剪强度参数。

以往研究中, 根据试验目的的不同, 模型抗滑桩通常采用铝合金管, 木方或者微粒混凝土桩模拟。其中, 木方和微粒混凝土桩用于研究桩身的破坏模式, 使用铝合金桩便于研究桩的地震受力响应特性。试验更加关注桩的受力响应特性, 因此采用弹性变形较大的铝合金管模拟抗滑桩。锚索则采用直径为 1 mm 的钢绞线进行模拟^[5]。试验中保持了桩身抗弯刚度与原型的一致性。原型桩的弹性模量为 30 GPa, 截面尺寸为 1.5 m×2 m。根据离心相似律, 计算得到矩形铝合金空心管截面尺寸为 30 mm×40 mm(弹性模量=68.9 GPa)。基于式(1)计算得到铝合金空心管壁厚为 2.5 mm。详细的材料设计参数如表 1 所示。

表 1 材料参数

Table 1 Parameters of model materials

构件	物理量	模型	原型
抗滑桩	抗弯刚度/(GPa·m ⁴)	0.49×10 ⁻⁵	30
锚索	预应力/kN	0.049	122.5
	密度/(g·cm ⁻³)	1.829	1.829
滑体	含水率/%	18	18
	内摩擦角/(°)	22	22
	黏聚力/kPa	48	48
基岩	内摩擦角/(°)	40.5	—
	黏聚力/kPa	257	—

$$E_p I_p = N^4 E_m \times (b_m h_m^3 - (b_m - \delta)(h_m - \delta)^3) / 12 \quad (1)$$

式中: E 为弹性模量; I 为横截面转动惯量; m 代表模型; p 代表原型; b 和 h 分别为横截面宽和高; δ 为铝合金空心管壁厚。

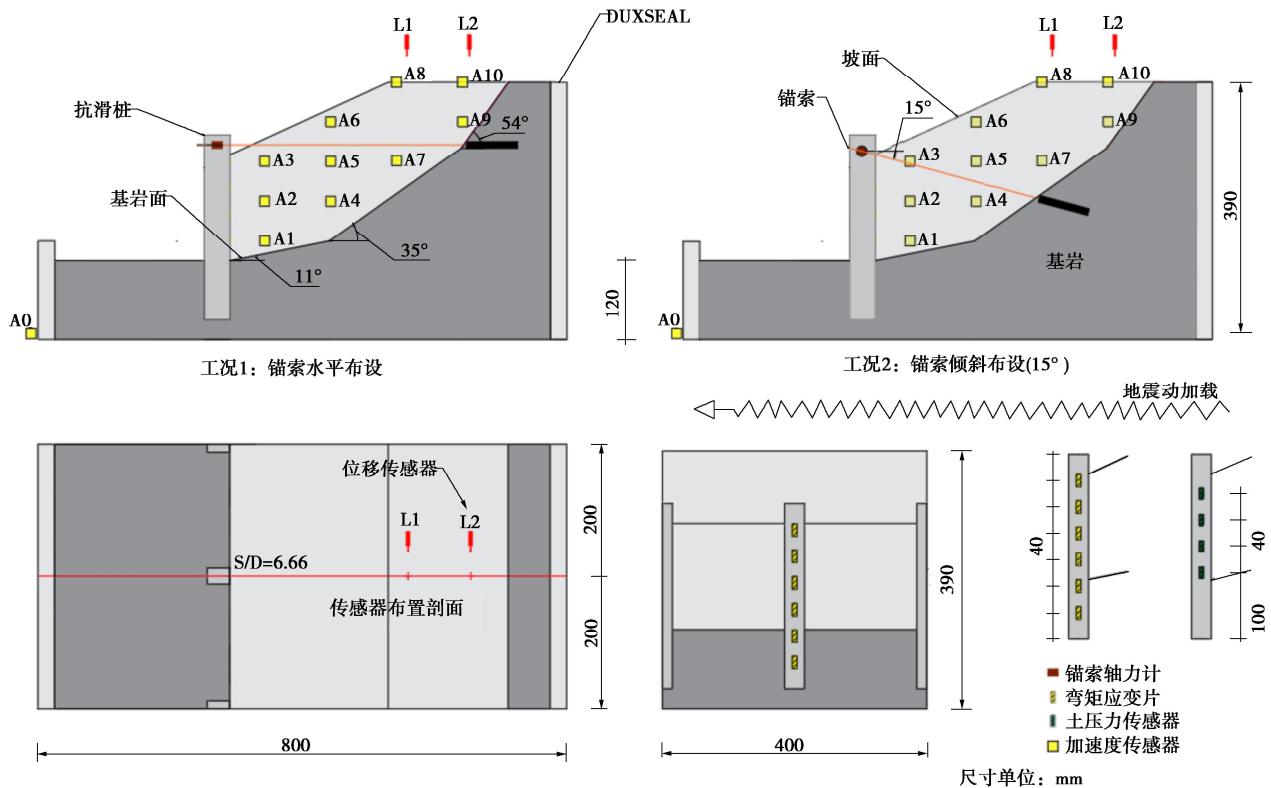


图 1 模型结构及传感器布置

Fig. 1 Model structure and distribution of sensors

对比试验包含水平布锚(工况一)和倾斜布锚(工况二)两种, 布锚角度分别为 0° 和 15° , 两种试验工况保持了坡体和桩身设计参数一致, 仅布锚角度不同(图 1)。下面以工况二为例介绍模型的制作过程:

首先, 在模型箱的内壁上绘制剖面图, 勾勒模型坡体和锚索抗滑桩几何边界在模型箱侧壁无玻璃侧的投影轮廓。采用逐层夯实(每层 30 mm)的方法制作边坡模型。在第一层基岩夯实后, 利用特制的夹具将抗滑桩固定在设计位置上, 而后逐层填入基岩模拟材料, 保持各层夯击次数一致夯实基岩。锚索锚固段按照设计锚固角度定位到指定基岩层位, 试验开始之前, 通过调整预应力螺栓, 使锚索轴力稳定在 49 N。

试验过程中, 所有数据采用离心机数据采集系统进行监测, 该系统主要包括微型土压力传感器(T1-T4)、弯矩传感器(Y1-Y6)、微型轴力计、微型加速度传感器(A1-A10)和 LVDT 位移传感器(L1-L2)等。各种传感器需要在试验前进行标定, 并连接到离心机的自动采集设备上。详细的传感器布局和模型尺寸信息如图 1 所示。

1.4 地震动加载

试验采用汶川地震汉源清溪台站记录反演得到的水平向基岩地震动^[15]。根据拟定的相似比尺, 将原型地震动转化为模型条件下的水平激励。试验过程中,

原型地震动的峰值分别调整为 $0.1g \sim 0.4g$ (阶段 1~4)。如图 2 所示为试验过程中振动台台面记录并转换为原型尺度的输入地震动时程曲线及其傅里叶谱, 后文分析均采用按照相似比尺转换为原型的结果。

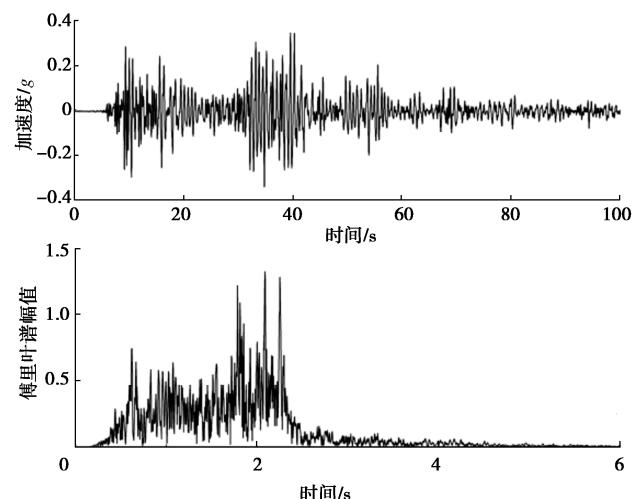


图 2 输入地震动时程和傅里叶频谱(A0, EQ4)

Fig. 2 Time histories of input acceleration and Fourier spectra (measured by A0, EQ4)

2 试验结果对比

2.1 边坡变形特征

如图 3 所示为地震作用后边坡的破坏情况, 工况一中, 边坡顶部出现贯通的张拉裂隙和大量压剪裂隙, 中柱后土拱出现剥落趋势。而工况二中, 裂隙发育程度远小于工况一, 其张拉裂隙与坡肩的最大距离仅为工况一的 65.4%。两种工况中坡面均未出现裂隙, 表明锚索加设有利于保持坡体的整体性。

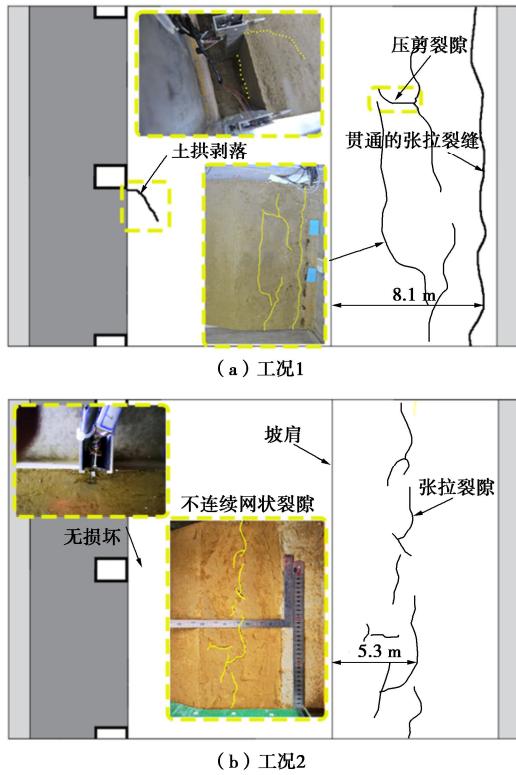


图 3 边坡变形特征示意图

Fig. 3 Feature images of slope deformation

为量化边坡的变形情况, 试验记录了坡肩 (L1) 处沉降时程曲线, 并通过快速傅里叶变换平滑后绘制于图 4 所示。两工况下, 永久沉降均随着输入地震动强度的增加而增加。虽然观察到相同的变化趋势, 但

随着输入地震动强度的增加, 二者之间的差距变得愈发明显。当输入地震动强度达到 0.4g 时, 工况二中的坡肩永久沉降仅为工况一中的 23%。总体而言, 相比水平布锚, 倾斜布锚能够有效降低坡体的沉降幅度和破坏程度。

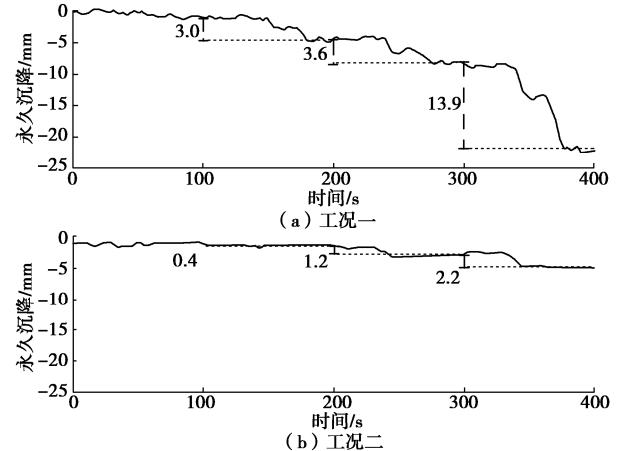


图 4 坡肩永久沉降曲线

Fig. 4 Curves of permanent settlement of slope shoulder

2.2 边坡加速度响应

本文规定加速度放大系数是坡体各测点的峰值加速度与台面 A0 测点的峰值加速度比值。两种工况坡体内部加速度放大系数分布情况如图 5 所示。

两工况下加速度放大系数分布形式相似, 大体上随与坡面的距离增大而减小。其中, 靠近地表的测点 A3、A8、A10 加速度放大系数远高于相邻测点, 表现出显著的地形效应^[16]。值得关注的是, A3 距离锚固点最近, 表现出加速度异常放大。具体而言, 两种工况中 A3 测点加速度放大系数远高于坡体其余测点, 且随地震动强度的增大而增大。两工况下加速度分布梯度差异明显, 随着输入地震动强度增加, 这种差异逐渐显著。

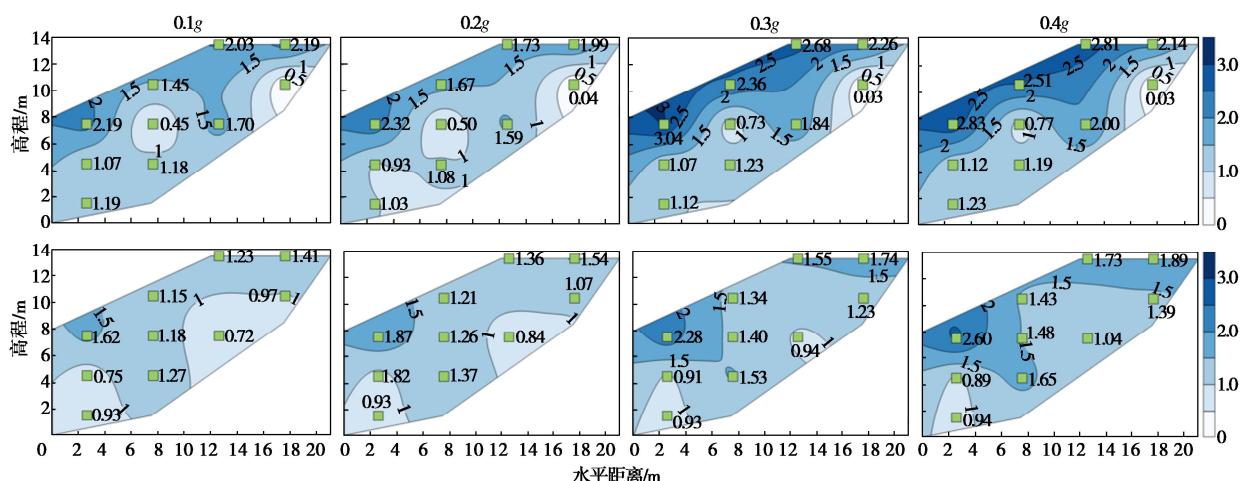


图 5 加速度放大系数等值线图

Fig. 5 Contour distribution map of acceleration amplification factor

2.3 桩后动土压力

依据时程数据, 绘制了各地震阶段下桩后动土压力峰值沿高程的分布曲线(图 6)。两种工况下, 桩后动土压力最大值均由 T1 测点获得, 水平布设时峰值动土压力可达 217.8 kPa, 倾斜布设时只有 100.7 kPa。各测点动土压力峰值随输入地震动的增大而增大, 但分布形式基本不变。不同于拟静力法假定的矩形或梯形分布, 桩后动土压力峰值分布形态呈现“倒梯形”, 布锚角度的变化对“倒梯形”分布影响有限, 表明不同布锚角度都会引起桩-锚索-土体之间的强烈动力相互作用^[17]。

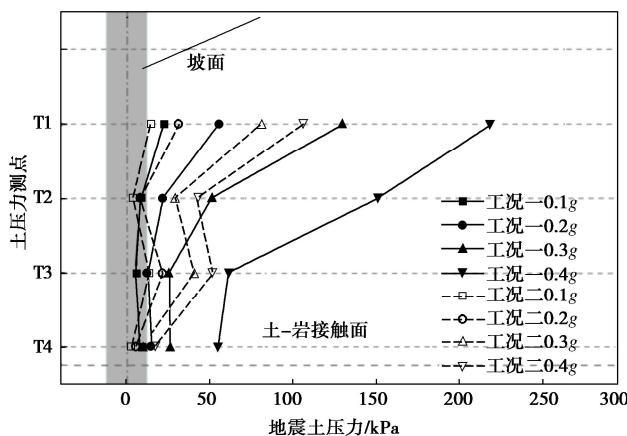


图 6 桩身动土压力峰值分布

Fig. 6 Distribution of the peak dynamic earth pressure of the pile

2.4 锚索轴力

根据轴力的时程曲线, 提取并绘制了各地震阶段轴力峰值的变化情况, 如图 7 所示。两工况下, 锚索轴力峰值均随输入地震动强度的增大而增大。随着输入地震动强度增加, 二者锚索轴力峰值增量差异愈发明显。工况一中, 锚索峰值轴力增长速率快速增加, 输入 $PGA=0.4g$ 时, 达到最大值 22.36 kN。与之相比, 工况 2 的锚索峰值轴力增长速率相对稳定, 输入 $PGA=0.4g$ 时, 轴力峰值仅为工况一的 43.5%。

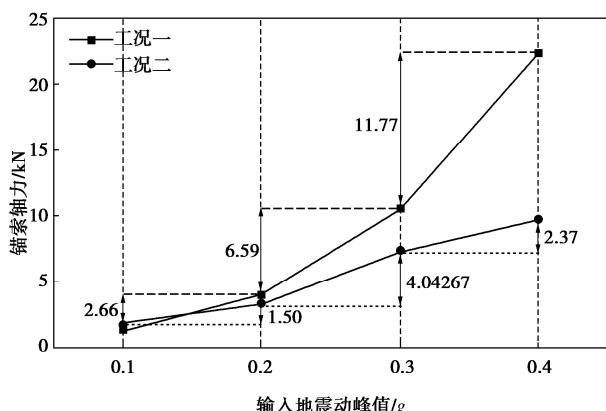


图 7 锚索轴力峰值随输入地震动变化曲线

Fig. 7 Curves of peak axial force of cable with input ground motion

2.5 桩身动弯矩

提取试验过程中记录的(Y1-Y6)弯矩时程数据, 绘制了各地震阶段下桩身动弯矩峰值分布曲线, 如图 8 所示。两工况下桩身动弯矩峰值沿桩身呈“S”形分布, 最大值出现在基岩面附近(Y5)。随着输入地震动强度增加, 各测点的弯矩峰值增加, 但分布形式不变。至阶段 4 时, 工况一中最大动弯矩(Y5)为 6.91 MN·m, 而工况二中仅为 4.66 MN·m。

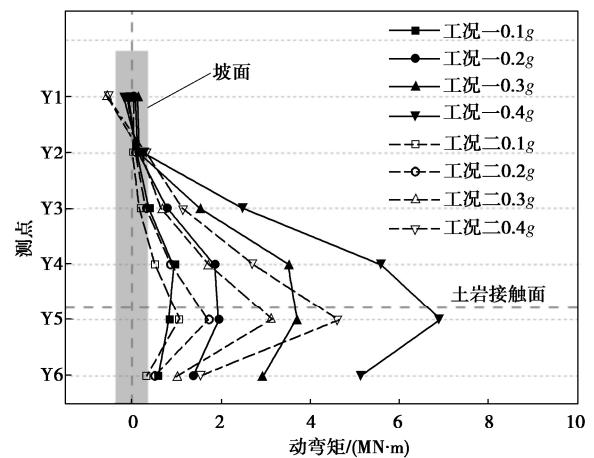


图 8 桩身动弯矩峰值分布

Fig. 8 Peak distribution of dynamic bending moment of piles

3 结 论

本文基于两组 50g 条件下锚索抗滑桩加固边坡的离心机对比试验, 对比分析了锚索水平布设和倾斜 15° 布设条件下锚索抗滑桩抗震性能的差异, 主要得到以下 3 点结论。

(1) 锚固点附近坡体加速度异常放大在不同布锚角度的工况中均存在, 倾斜布锚有利于降低坡顶沉降幅度和减轻坡体破坏程度, 并可在一定程度上减小锚固点附近的加速度放大。

(2) 地震作用下, 桩身动土压力呈“倒梯形”分布, 动弯矩呈不对称的“S”形分布。布锚角度变化可以有效地降低桩身受力的大小和增长速率, 但是对桩身动土压力和动弯矩分布形式的影响并不显著。

(3) 随着地震动强度的增加, 锚索的轴力变化趋势与边坡顶部的沉降趋势一致。锚索布设角度的变化对轴力的大小和增长速率的变化趋势有显著影响。合适的布锚角度可以有效降低桩-锚加固体系失效的风险。

参考文献:

- [1] CHIGIRA M, WU X, INOKUCHI T, et al. Landslides induced by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China[J]. Geomorphology, 2010, 118: 225-238.

- [2] YIN Y P, WANG F W, SUN P. Landslide hazards triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China[J]. *Landslides*, 2009, **6**(2): 139-152.
- [3] ZHANG J, QU H L, LIAO Y, et al. Seismic damage of earth structures of road engineering in the 2008 Wenchuan earthquake[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, **65**(4): 987-993.
- [4] QU H, LI R, ZHANG J, et al. A novel approach for seismic design of anchored sheet pile wall[J]. *Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette*, 2016, **23**(2): 455-463.
- [5] 曲宏略, 张建经, 王富江. 预应力锚索桩板墙地震响应的振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(2): 313-320. (QU Honglue, ZHANG Jianjing, WANG Fujiang. Seismic response of prestressed anchor sheet pile wall from shaking table tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(2): 313-320. (in Chinese))
- [6] 艾 挥, 吴红刚, 陈小云. 单锚点与多锚点抗滑桩的动力响应对比试验研究[J]. 科学技术与工程, 2016, **16**(20): 264-270. (AI Hui, WU Honggang, CHEN Xiaoyun. Research on the dynamic response of single anchor and multi anchor anti slide pile with seismic wave[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, **16**(20): 264-270. (in Chinese))
- [7] GARALA T K, MADABHUSHI G S P. Seismic behaviour of soft clay and its influence on the response of friction pile foundations[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2019, **17**(4): 1919-1939.
- [8] GHOSH B, MADABHUSHI S P G. Centrifuge modelling of seismic soil structure interaction effects[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2007, **237**: 887-896.
- [9] 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 Tong, LIU Hongshuai, YUAN Xiaoming, 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))
- [10] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 滑坡防治设计规范: GB/T 38509—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020. (Standardization Administration of the People's Republic of China. Code for the Design of Landslide Stabilization: GB/T 38509—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese))
- [11] CHEN H, ZHANG G, CHANG Z, et al. Failure analysis of a highway cut slope with anti-slide piles[J]. *Geofluids*, 2021: 6622214.
- [12] WANG J, LIU H, LIU H, et al. Centrifuge model study on the seismic responses of shield tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, **92**: 103036.
- [13] CILINGIR U, MADABHUSHI S P G. Effect of depth on seismic response of circular tunnels[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, **48**(1): 117-127.
- [14] HERON C M, HAIGH S K, MADABHUSHI S P G. A new macro-element model encapsulating the dynamic moment-rotation behaviour of raft foundations[J]. *Géotechnique*, 2015, **65**(5): 442-451.
- [15] LIU H S, BO J S, LI P, et al. Site amplification effects as an explanation for the intensity anomaly in the Hanyuan Town during the Wenchuan Mw 7.9 earthquake[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2016, **15**(3): 435-444.
- [16] BRENNAN A J, MADABHUSHI S P G. Amplification of seismic accelerations at slope crests[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, **46**(5): 585-594.
- [17] 曲宏略, 张建经, 朱大鹏. 预应力锚索桩板墙抗震设计计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(增刊 2): 4149-4156. (QU Honglue, ZHANG Jianjing, ZHU Dapeng. Research on aseismic design of prestressed anchor sheet pile wall[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, **32**(S2): 4149-4156. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)