

h型抗滑桩受力性能模型试验研究

邓友生^{1,2}, 杨彪², 姚志刚², 高宁¹, 肇慧玲²

(1. 西安交通工程学院 轨道交通工程安全与智能控制重点实验室, 陕西 西安 710300; 2. 西安科技大学 桩承结构研究中心, 陕西 西安 710054)

摘要:针对h型抗滑桩在坡顶荷载作用下的受力特征,通过室内模型试验,分析h型抗滑桩的前桩与后桩的受力机理、桩身弯矩和桩前土压力分布特性。结果表明:在坡顶均布荷载作用下,后排桩的桩身弯矩随桩体埋深的增大呈先增大后减小的抛物线分布,弯矩峰值出现在预设滑面附近;前排桩的桩身弯矩随桩体埋深的增大而增大,弯矩峰值出现在桩顶连梁连接处;后排桩桩前土压力分布随着坡顶荷载的增大而增大,而上部两个测点相对变化幅度较小;在连梁以下部位,前排桩桩前土压力分布趋势与后排桩变化趋势基本一致,而连梁位置处偏小。

关键词:h型抗滑桩;模型试验;桩身弯矩;桩前土压力

文献标识码:A **DOI:**10.13291/j.cnki.djdxac.2024.01.012

滑坡是指斜坡上的土体或岩体受河流冲刷、地下水活动、雨水入渗、地震等影响,部分土体或岩体在重力为主的作用下沿一定的软弱面或者软弱带整体或分散地向下滑动的自然现象^[1]。滑坡是我国比较频发且严重的地质灾害之一,对人类的生命财产安全构成了巨大的威胁。常见的滑坡加固技术有抗滑桩、挡土墙、预应力锚索等。经过多年的发展,抗滑桩技术的设计理论和研究方法已经趋于成熟,是边坡加固和滑坡防护工程中应用最为广泛的一种,尤其是在公路、铁路等领域。虽然抗滑桩有着较好的工程效果,但存在受力不合理、桩顶位移大、使用工况受限等问题。

h型抗滑桩对原有抗滑桩进行改进^[2],使其在地质条件较差的风化岩层或松散地层也能发挥其阻滑能力。h型抗滑桩将前后两根不等长的抗滑桩平行布设,前桩顶部与后桩某部位通过横梁连接形成后排具有悬臂段的空间支护结构,因其形状与字母“h”相似而称为h型抗滑桩^[3]。h型抗滑桩独特的结构形式使其受力更加均匀合理,有效降低了弯矩与剪力,从而降低了滑坡治理的成本^[4]。Wang等^[5]提出了抗滑桩与悬臂梁作用

分析方法,将门架式双排抗滑桩与h型抗滑桩进行对比,结果表明h型抗滑桩具有较好的抗滑能力,在滑坡推力较大的滑坡工程中更具优势。张永杰等^[6]根据h型抗滑桩的承载变形特征,将其分为阻滑段和锚固段,建立了h型抗滑桩内力与变形简化计算方法,结合工程实例研究了不同工况下抗滑桩内力与变形的发展规律,为h型抗滑桩的优化设计提供了参考。白皓等^[7]对岩质边坡和土质边坡h型抗滑桩支挡结构进行模型试验,分析不同工况下结构的承载特性。

虽然h型抗滑桩近年已有相关的研究与工程应用,但有关h型抗滑桩加固滑坡体的力学机制和荷载作用下的力学响应等系统分析相对较少。基于此,本文通过室内模型试验,深入研究h型抗滑桩在坡顶荷载作用下的受力特征,以期为实际工程提供参考。

1 相似原理

相似原理在物理模型试验中常用作指导模型试验的比尺选择问题,为模型试验的实际工况研究提供指导,如尺寸的缩小或放大、参数的提高或

收稿日期:2023-01-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51878554);陕西省自然科学基金研究计划重点项目(2018JZ5012)

第一作者:邓友生(1969—),男,教授。E-mail: dengys2009@126.com

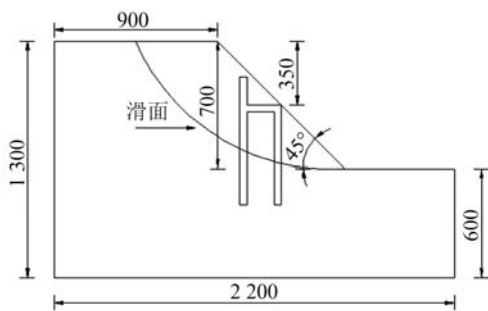
通信作者:杨彪(1997—),男,硕士研究生。316385602@qq.com

降低、介质性能的改变等。在本次试验中控制主要相似变量,结合已有的相关模型试验经验,并综合考虑实际边坡尺寸和室内试验条件,确定模型试验的几何相似比为 $1:10^{[8-9]}$ 。结合相似原理,确定物理模型试验中各物理量的相似比见表1。

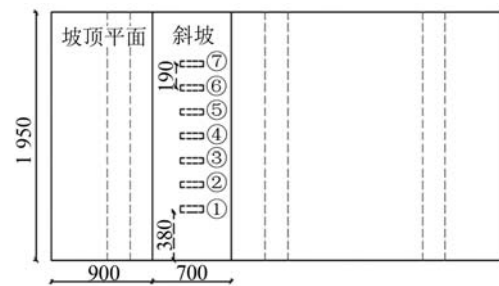
表1 各物理量的相似比

物理量	量纲	相似比	物理量	量纲	相似比
长度	l	$1/n$	应力	$m/(lt^2)$	$1/n$
面积	l^2	$1/n^2$	应变	1	$1/1$
体积	l^3	$1/n^3$	位移	l	$1/n$
重度	$m/(l^2t^2)$	$n/1$	均布力	$m/(lt^2)$	$1/1$
密度	m/l^3	$1/1$	弹性模量	$m/(lt^2)$	$1/n$

注: l 为长度; m 为质量; t 为时间; n 为原型和模型中任意物理量的相似比。



(a) 剖面图



(b) 平面图

图1 边坡模型示意图(单位:mm)

2.2 模型试验桩

在室内模型试验桩材料的选择上,很多学者分别采用了石膏、砂混合物、木棒、钢筋混凝土与钢管^[10-12]等。结合相关模型试验,考虑试验的便利性,本文选用304不锈钢空心方管,截面尺寸为 $40\text{ mm}\times 40\text{ mm}$,壁厚为1 mm,后排桩(长桩)桩长为700 mm,前排桩(短桩)桩长为550 mm,前后排桩通过焊接连接,前后排桩距为150 mm,桩间距为190 mm,桩身布设应变片与土压力盒以监测桩身在荷载作用下的力学响应。

2.3 试验方案

试验装置主要包括模型箱、加载装置和数据采集装置。在边坡模型制备完成后,将模型静置两天,使坡体内部的应力分布重新调整平衡^[13]。模型箱上部有三根固定反力架,使用分离式液压式千斤顶精准控制加载,并实时观测压力表变化,承压板为两块 $40\text{ cm}\times 40\text{ cm}$ 的钢板,厚度为3 cm,可将千斤顶提供的集中荷载转化为均布荷载。在承压

2 模型试验设计

2.1 边坡模型

本次试验在西安科技大学结构大厅大型物理模型试验箱中进行,内部净空尺寸为 $4\text{ m}\times 1.95\text{ m}\times 2\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高)。为方便试验过程的观察及减少界面摩擦影响,模型箱两侧采用厚度为1 cm的钢化玻璃封闭。试验坡体分为滑体、滑面和滑床三部分,滑体采用天然黄土,分层填筑压实;滑面为弧形,采用塑料薄膜模拟;滑床由颗粒级配良好的黄土加砂土混合分层填筑,严格控制压实系数达到90%以上。充分考虑试验边界效应和模型箱尺寸,边坡坡顶长度为1.95 m,宽度为0.9 m,边坡模型用土为配置的最优含水率的黄土,边坡属于欠稳边坡,边坡坡度设置为 45° ,不考虑地下水对边坡稳定性的影响,边坡模型示意图见图1。

板底部及周围均匀铺洒细沙使其均匀受力。主要试验过程见图2。



(a) 夯实基础



(b) 立桩

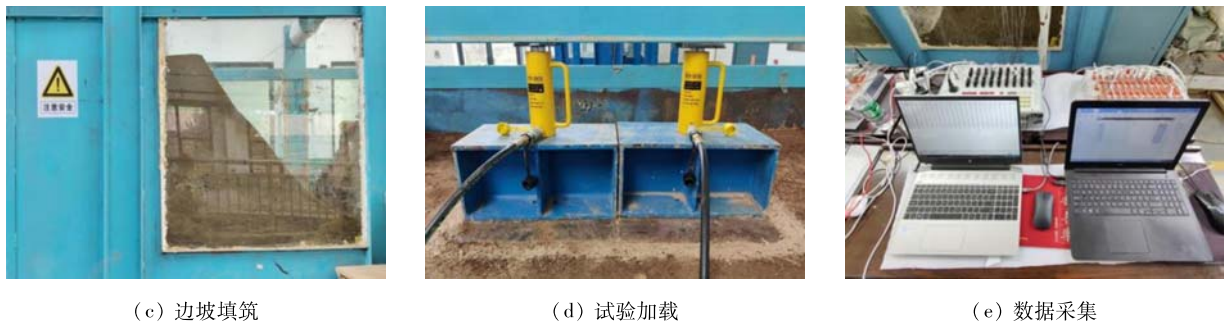


图 2 主要试验过程

本次试验采用慢速维持荷载法,每级荷载为 28.4 kPa,分八级依次加载至 227.2 kPa,每施加一级待桩身应变数据基本不变后再施加下一级荷载,同时记录加载过程中的桩身弯矩、桩前土压力和连梁轴力。抗滑桩应变的采集使用 BF1K-3EB 全桥应变片,中间五根桩应变片的布置如图 3(a)所示。采用 DH3816 静态数据采集系统采集数据,采样频率为 1 Hz。土压力的测量采用 YTDZ0301 型应变式微型土压力盒,量程为 0.1 MPa。在土体分层填筑过程中,在 P4、P5、P6 桩前侧预埋土压力盒,土压力盒沿桩长方向的布置如图 3(b)所示。

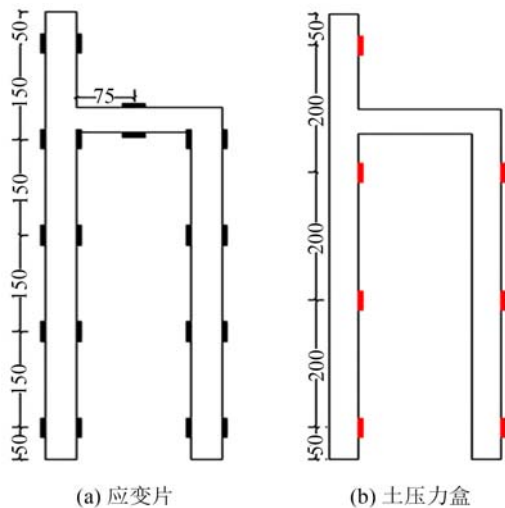


图 3 应变片与土压力盒布置图(单位:mm)

3 试验结果与分析

3.1 桩身弯矩

为研究 h 型抗滑桩在模型试验逐级加载过程中桩身弯矩的变化,将采集的桩身截面应变数据代入材料力学中的弯曲理论计算公式,求出 h 型桩不同桩身截面处的弯矩。利用其结构和荷载的对称性,对 P4、P5、P6 三根 h 型桩的前后排桩的试验数据进行处理,得到 h 型抗滑桩前后排桩平

均弯矩分布曲线。

后排桩桩身弯矩分布见图 4。由图 4 可知,后排桩在各级荷载作用下的桩身弯矩变化规律基本为抛物线,弯矩随着桩体埋深的增大呈现先增大后减小的趋势。由于桩底置于稳定土层,受荷载影响较小,故桩底在各级荷载作用下的弯矩变化较小。在八级荷载作用下,后排桩弯矩峰值为 $-34.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$,较一级荷载增大了 $28.39 \text{ kN} \cdot \text{m}$,弯矩峰值出现在预设滑面上下一定范围内,位于后排桩的中上部,如此可知滑体沿预设圆弧状滑面发生了相对滑动。

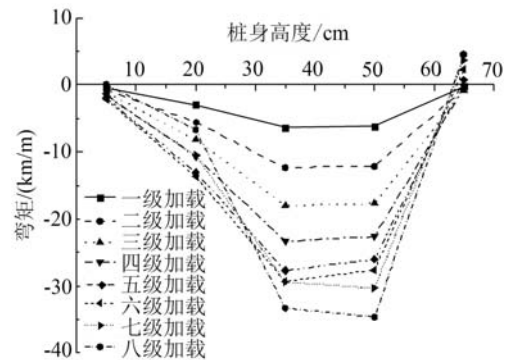


图 4 后排桩桩身弯矩分布

前排桩桩身弯矩分布见图 5。从图 5 可知,前排桩在各级荷载作用下的桩身弯矩变化规律基本一致,弯矩峰值出现在桩顶连梁连接处,从一级荷载到八级荷载,弯矩增大了 5.72 倍。在后排桩向前排桩荷载传递过程中,h 型桩连梁发挥了传递荷载的作用,连梁在荷载传递的过程中受压,桩底弯矩接近于零且变化较小,桩底可视为铰接。从一级荷载到八级荷载,桩身底部两个监测点的数据变动较小,可知前排桩桩身底部受荷载影响较小。桩顶连梁位置处弯矩值增幅较大,故在进行连梁设计时要考虑连接处局部加强措施以保证结构的稳定性。

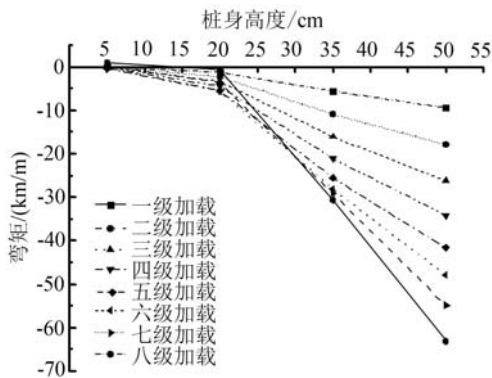
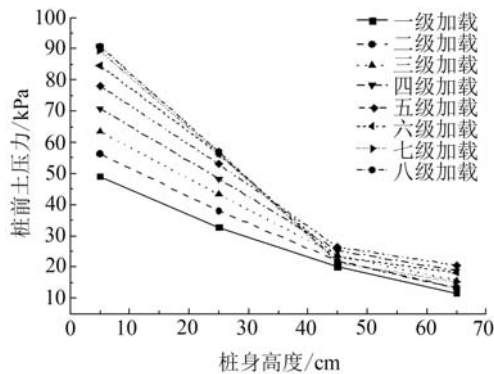


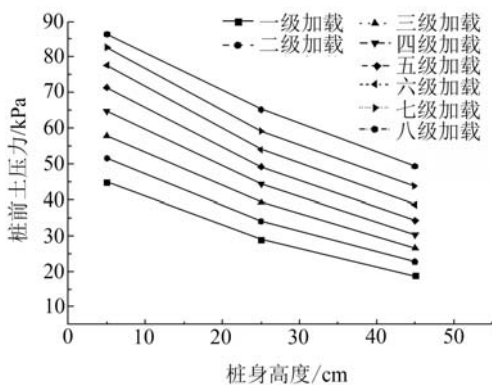
图5 前排桩桩身弯矩分布

3.2 桩前土压力

桩前土压力对桩身具有约束作用,在土体出现塑性变形前,桩前土压力越大表明土体对桩的支撑作用越好。抗滑桩在抵抗滑坡推力的同时可充分利用桩前稳定土体的支撑作用。在荷载作用下 P4、P5、P6 的前后排桩的桩前土压力分布曲线见图6。



(a) 后排桩



(b) 前排桩

图6 桩前土压力分布曲线

由图6可知,后排桩桩前土压力分布情况为随着坡顶荷载的逐级增加均匀变化,上部两个测点相对变化幅度较小,越靠近桩底锚固段附近桩

前土体提供的土体抗力越大。前排桩桩前土压力分布趋势与后排桩连梁以下规律一致,除连梁位置外整体偏小。桩顶连梁连接处在一级荷载作用下与后排桩土压力接近,随着各级荷载的增加,前排桩桩顶处土压力大小逐级增加,由 18.72 kPa 增大至 49.28 kPa,增大了 1.63 倍。

3.3 连梁轴力

连梁轴力分布曲线见图7。从图7可知,随着荷载级数的增加,连梁轴力相应增大,从一级荷载到八级荷载,连梁轴力由 1.3 kN 增大至 8.92 kN,增大了 5.86 倍。假定连梁受压为正,由图可知,连梁在荷载传递过程中进行前后排桩的荷载传递,进一步验证了横梁传力的规律。

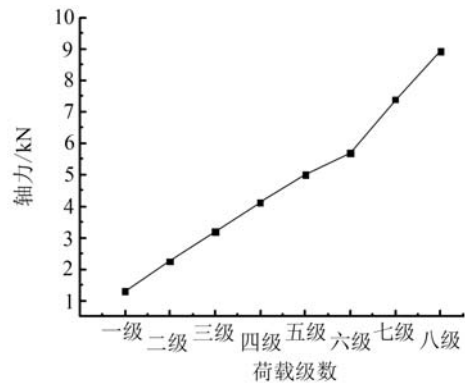


图7 连梁轴力分布曲线

4 结论

本文通过 h 型抗滑桩室内模型试验,分析了 h 型抗滑桩后排桩、前排桩、连梁的受力特性及桩前土压力分布情况,得到如下结论:

(1) h 型抗滑桩后排桩在各级荷载作用下的桩身弯矩的变化规律呈抛物线状,具体表现为后排桩桩身弯矩随着桩体埋深的增大呈先增大后减小的趋势,弯矩峰值出现在预设滑面附近。

(2) 前排桩桩身弯矩峰值出现在桩顶连梁附近,从荷载后排桩向前排桩传递过程中, h 型抗滑桩连梁发挥了传递作用,桩顶连梁位置处弯矩值增幅较大,在进行连梁设计时要考虑连接处局部加强措施以保证结构的稳定性。

(3) 前排桩和后排桩桩前土压力分布随着坡顶荷载的逐级增大均匀增加,前排桩桩顶连梁连接处在一级荷载作用下与后排桩土压力接近,随着各级荷载的增大,前排桩桩顶处土压力大小逐级增大,由 18.72 kPa 增大至 49.28 kPa,增大了 1.63 倍。

参考文献:

- [1]周杨. h型抗滑桩在边坡治理中的力学效应研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012.
- [2]宁宇,黄青富,郝李坤,等. 联合h型桩在滑坡体阻滑中应用数值模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(23): 10004-10012.
- [3]许佳佳,王晓健. h型抗滑桩加固边坡的优化分析[J]. 水电能源科学, 2016, 34(2): 113-115.
- [4]王羽,赵波. h型抗滑桩结构机理与工程数值分析研究[J]. 公路工程, 2015, 40(6): 5-9.
- [5]WANG Y, CHAI H J. Analysis of mechanism for h type of anti-sliding piles[C]//2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment. Henan: IEEE, 2010.
- [6]张永杰,周欢,冯夏庭,等. h型抗滑桩简化计算方法及其影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊1): 2935-2943.
- [7]白皓,王武斌,廖知勇,等. 软岩陡坡椅式桩支挡结构受力变形模型试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊2): 221-228.
- [8]邓友生,李令涛,彭程谱,等. 静动荷载下桩网结构路基模型试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(8): 2149-2156.
- [9]邓友生,杨彪,王一雄,等. 拱形抗滑结构模型试验研究[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2022, 36(6): 681-688.
- [10]李永辉,张信,张鼎浩,等. 曲面滑坡条件下h型抗滑桩受力性状模型试验研究[J/OL]. 工程力学. (2022-12-05) [2023-01-13]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail//11.2595.03.20221202.1550.002.html>.
- [11]邓友生,彭程谱,杨彪,等. 空间弧形抗滑桩支护结构模型试验及参数分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44(5): 847-856.
- [12]邓友生,冯爱林,杨敏,等. 煤矸石桩-土工格室复合路基承载特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2023, 57(4): 833-841.
- [13]欧明喜. h型抗滑桩力学机理及其工程应用研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012.

Model Tests on Mechanical Behavior of h-Type Anti-Slide Pile

DENG Yousheng^{1,2}, YANG Biao², YAO Zhigang², GAO Ning¹, ZHAO Huiling²

(1. Key Laboratory of Rail Traffic Engineering Safety & Intelligent Control, Xi'an Traffic Engineering Institute, Xi'an 710300, China; 2. Pile-Supported Structures Research & Test Center, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Aiming at the stress characteristics of h-type anti-slide piles under the load of the top of the slope, the mechanism of the front pile and the rear pile, the bending moment of the pile shaft and the distribution of the soil pressure in front of the pile are analyzed through scale model test in laboratory. The results show that under the load of the top of the slope, the bending moment of the pile shaft of the rear row pile is increased first and then decreased with the increase of the pile burial depth, and the peak moment appears near the pre-set slip surface. The bending moment of the front pile is increased with the depth of the pile, and the maximum value appears at the joint of the pile top and beam. The distribution of earth pressure in front of the rear pile is increased with the increase of the load at the top of the slope, while the relative change range of the two measuring points in the upper part is small. In the position below the link beam, the trend of earth pressure distribution in front of the front pile is basically the same as that of the rear pile, while the position of the link beam is small.

Keywords: h-type anti-slide pile; model test; pile bending moment; earth pressure in pile front