

文章编号: 1007-2993(2026)03-0373-11

高填方边坡中排架式 h 型桩的 变形及受力特性研究

吴 腾 邵 尉 楚英军 张 虎 刘 佳
(青岛瑞源工程集团有限公司, 山东青岛 266500)

【摘要】 以青岛某生态修复边坡支护工程为背景, 通过理论模型分析、数值模拟计算, 结合监测数据分析, 对排架式 h 型桩(设置多道横向约束的 h 型桩)在土岩二元地层高填方边坡中的变形及受力特性进行研究。结果表明: 排架式 h 型桩具有更合理的内力分布和更强的控制变形能力, 实测桩顶最大水平位移 8.1 mm, 单位计算宽度上桩身最大弯矩 1423.2 kN·m; 排架式 h 型桩较悬臂桩具有更大的抗弯刚度, 桩身正负弯矩交变, 受力更为合理; 排架式 h 型桩主要由前后排桩及第二道连梁组成的刚架结构发挥抗弯刚度, 桩身内力主要分布在第二道连梁以下, 从而可优化上部结构配筋; 排架式 h 型桩桩间土全长加固对优化结构内力变形并不明显; 排架式 h 型桩连梁与后排桩节点处按固接设计, 可使前后排桩更好地协同发挥抗弯作用, 其受力及变形特性优于铰接设计。研究成果可为排架式 h 型桩在土岩二元地层高填方边坡工程中的设计与施工提供参考。

【关键词】 高填方边坡; 排架式 h 型桩; 数值模拟; 工程监测; 受力及变形特征

【中图分类号】 TU476+.4

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0051

Deformation and stress characteristics of bent-type h-piles in high fill slopes

WU Teng SHAO Wei CHU Yingjun ZHANG Hu LIU Jia
(Qingdao Ruiyuan Engineering Group Co., Ltd., Qingdao 266500, Shandong, China)

【Abstract】 Taking the ecological restoration slope support project of a tributary in Qingdao as the engineering background, the deformation and mechanical characteristics of bent-type h-piles (h-piles with multiple transverse constraints) in high-fill slopes of soil-rock dual strata were investigated through theoretical model analysis, numerical simulation, and monitored data analysis. The results show that bent-type h-piles present a more reasonable internal force distribution and stronger deformation control capacity. The measured maximum horizontal displacement at the pile top is 8.1 mm, and the maximum bending moment of the pile shaft per unit calculated width is 1423.2 kN·m. Compared with cantilever piles, bent-type h-piles possess higher flexural stiffness, and the alternating positive and negative bending moments along the pile shaft lead to a more rational mechanical state. The flexural stiffness of bent-type h-piles is mainly provided by the rigid frame structure composed of the front and rear piles and the second coupling beam. The internal forces of the piles are mainly distributed below the second coupling beam, which allows the optimization of reinforcement in the upper structure. The full-length reinforcement of the soil between bent-type h-piles has no significant effect on optimizing the internal force and deformation of the structure. When the joints between the coupling beams and the rear piles are designed as fixed connections, the front and rear piles can work together more effectively in bending, and the mechanical and deformation performance is superior to that of hinged connections. The research results can provide a reference for the design and construction of bent-type h-piles in high-fill slope projects with soil-rock dual strata.

【Key words】 high-fill slope; bent-type h-type pile; numerical simulation; engineering monitoring; stress and deformation characteristics

0 引言

悬臂式或锚拉式排桩支护结构具有计算模型明确、施工便捷等优点, 被广泛应用于边坡治理工程。

但是对于支护空间有限的高填方边坡, 传统的桩锚式支护结构的适用性受到很大限制。悬臂式抗滑桩往往需要较大的直径及嵌固深度, 对于上软下硬的土岩

作者简介: 吴 腾, 男, 1988 生, 硕士, 高级工程师。研究方向: 岩土工程勘察及基坑、边坡、地基处理等领域的生产科研工作。E-mail: wtisgh@163.com

通信作者: 邵 尉, 男, 1994 生, 硕士, 工程师。研究方向: 岩土工程设计与施工。E-mail: 2578377367@qq.com

二元地层,大直径悬臂式抗滑桩入岩困难,需要较长的施工工期。

“h型桩”支挡结构采用前后排桩及桩间连梁形成组合受力体系,使得桩身受力更加合理,变形也较悬臂桩小^[1-3]。为此国内外专家学者对h型桩进行了大量的相关研究,并在工程实践中不断推广和应用。肖世国^[4]、蒋楚生^[5]、张永杰等^[6]通过理论计算分析,给出了h型桩内力分析的计算方法。一些学者通过有限元模拟h型桩受力及变形特征^[7-10],并结合数值模拟研究h型桩在工程中的大量实践应用^[11-12]。邓友生等^[13]、姚裕春等^[14]通过室内模型试验研究h型桩最优桩间排距等设计参数;杨佳桦等^[15]结合模型试验研究了桁架式h型桩的变形及受力特征。

现有研究多针对普通h型桩,而对桁架式、排架式h型桩的变形及受力机理研究较少,并且研究中默认连梁与后排桩为刚性连接,对连梁与后排桩铰接连接时的受力及变形特性研究较少。本文依托青岛市中德生态园九曲河支流生态修复边坡支护工程,通过PLAXIS数值模拟,对比分析了排架式h型桩和普通h型桩、悬臂桩的受力及变形特征,并对排架式h型桩连梁和后排桩刚接或铰接情况下的受力及变形特征,以及桩间土加固对结构受力及变形的影响进行了研究,结合工程监测数据验证了模型的准确性。研究成果对排架式h型桩设计和施工具有指导意义。

1 工程概况

中德未来城九曲河支流生态修复边坡支护工程位于青岛市。拟建场区地貌类型为山前冲洪积扇,地形起伏较大,区域地质构造不发育,场地及附近区域无活动性断裂等构造通过。拟治理河道及两岸地质条件以第四系填土、强风化花岗片麻岩、中等风化花岗片麻岩为主。填土层回填年限小于10年;强风化岩体完整程度等级为破碎,岩石坚硬程度等级为软岩,岩体基本质量等级为V级;中等风化岩石坚硬程度等级为较硬岩—坚硬岩,岩体基本质量等级为II—IV级,单轴饱和抗压强度标准值52 MPa。

边坡坡顶为规划建邦樱花科学郡住宅楼,采用预应力管桩基础。场地平整后将形成8.6~13.0 m的回填土高边坡,需要对该边坡进行治理。拟治理河道平面位置及右岸边坡如图1所示。

本项目拟治理河道距用地红线水平距离最近处约为6.5 m,边坡最大高度13.0 m,填土层最大厚度15.5 m,填土层下伏强风化—中等风化花岗片麻岩。拟建填土边坡高度较大,受空间条件限制无法放坡,坡顶拟建住宅采用预应力管桩基础限制锚索使用,综

合考虑支护方案的技术可行性、经济合理性、安全可靠,拟采用“排架式h型桩”(在普通h型桩的基础上增设一道连梁形成组合结构)对填方边坡进行支护,边坡典型支护剖面如图2所示。

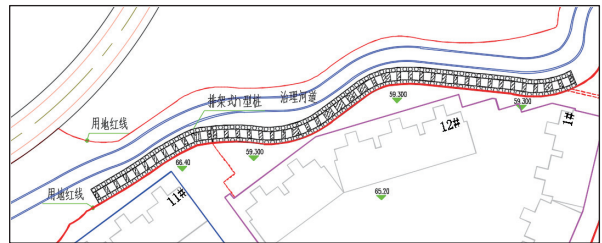


图1 拟治理河道平面位置图

Fig. 1 Plan location of proposed river management

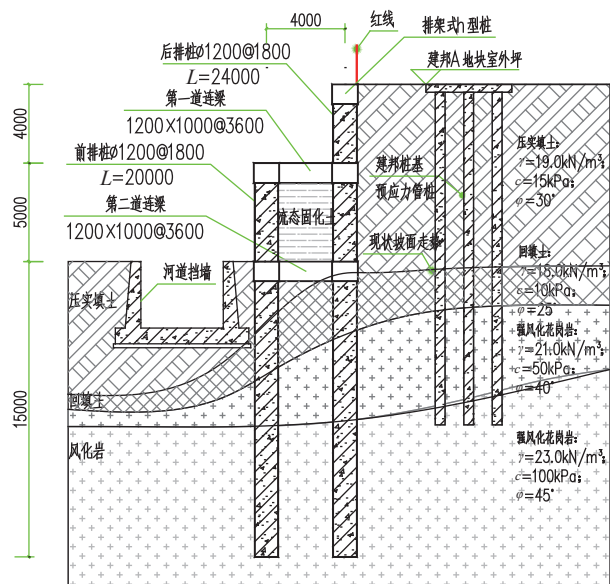


图2 排架式h型桩典型剖面图(单位:mm)

Fig. 2 Typical sectional view of bent-type h-piles (Unit: mm)

2 计算方法简述

2.1 计算分析模型

排架式h型桩后排桩后侧作用水土压力,当后排桩在桩后水土压力作用下产生微小位移,并通过连梁传递至前排桩,前排桩侧被动区受到挤压产生被动土抗力,进一步限制了结构的位移变形。受力特点发挥了平面刚架的特点。同时前后排桩间亦作用有土压力,参照建筑基坑设计规程双排桩受力体系,将桩间土模拟为一系列土弹簧,计算前后排桩桩间土对桩侧的压力。本项目桩底嵌入中等风化花岗片麻岩5 m,故桩底约束按照固端约束考虑。理论计算模型简化为图3。

2.2 荷载及作用力

由于h型桩挡墙上部设置有泄水孔,为简化计算,不考虑河槽顶部标高以上水压力。且挡墙顶0.5

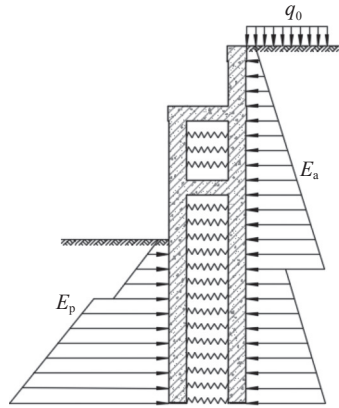


图3 排架式 h 型桩力学分析模型

Fig. 3 Mechanical analysis model of bent-type h-piles

倍边坡高度范围内规划有住宅建筑,故后排桩后侧作用土压力按照修正库仑主动土压力计算:

$$E'_a = E_0 \quad (1)$$

式中: E'_a 为修正主动土压力; E_0 为静止土压力。

作用在前排桩前侧的土压力,可取被动土压力 E_p 和嵌固段上土反力 P_s 的小值:

$$p_s = k_s v + p_{s0} \quad (2)$$

式中: p_s 为分布土反力; k_s 为土的水平反力系数; v 为前排桩在分布土反力计算点使土体压缩的水平位移值; p_{s0} 为初始土反力。

前后排桩间土模拟为一系列土弹簧,桩间土对桩侧的压力为:

$$p_c = k_c \Delta v + p_{c0} \quad (3)$$

式中: p_c 为前后排桩桩间土对桩侧的压力; k_c 为桩间土水平刚度系数; Δv 为前后排桩水平位移差值; p_{c0} 为前后排桩间土对桩侧的初始压力。

以上各参数可参照建筑边坡工程技术规范及建筑基坑支护技术规程相关内容计算,此处不予赘述。

2.3 结构内力计算方法

按照上述模型,结构内力计算可参照结构力学方法相关内容计算。为方便力法方程求解,将图3模型分为上下两部分,上部为悬臂桩,下部为排架式双排桩,上部悬臂桩为静定结构,可按静力平衡方程求解固定端约束力,然后将固定端约束力作用在下部排架式双排桩上,排架式双排桩可按照超静定对称结构应用结构力学中力法或力矩分配法求解内力,具体过程不予赘述。计算模型如图4所示。

3 数值模拟计算

3.1 基本假定及模型建立

PLAXIS 2D 是一款用于岩土工程变形及稳定性

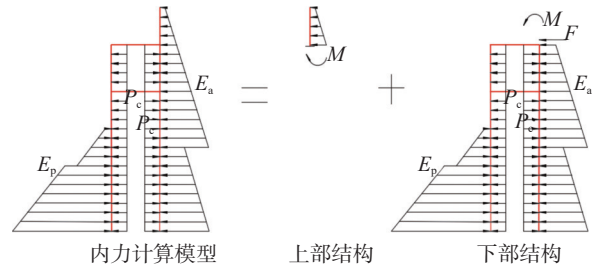


图4 排架式 h 型桩内力计算模型

Fig. 4 Calculation model of internal force of bent-type h-piles

分析的专业有限元计算软件,可以生成复杂的有限元模型并输出详细的计算结果。为分析排架式 h 型桩变形及受力特性,本文采用 PLAXIS 2D 数值分析软件模拟计算排架式 h 型桩变形内力,建模采用平面应变模型,15 节点单元,模型尺寸:54 m(宽)×35 m(深),岩土体采用莫尔-库仑本构模型,排架式 h 型桩采用弹性模型模拟,桩土界面单元的材料模拟选择从相邻土自动生成,模型左右边界设置水平向约束,底部边界设置水平向及竖向约束。

排架式 h 型桩支挡结构建模尺寸为灌注桩直径 $d=1.2$ m,前排桩长 $H_1=20.0$ m,后排桩长 $H_2=24.0$ m,悬臂段 $H_3=4.0$ m,桩端入中等风化岩深度不小于 5.0 m,前后排桩排距(中心距) $L=4.0$ m,连梁截面尺寸:1.2 m(宽)×1.0 m(高),上、下排连梁间距 $S=5.0$ m,与前后排桩刚性连接。

设计分析工况为:场地整平至第二道连梁标高处施工灌注桩及下道连梁→施工上部桩、上道连梁及悬臂桩并进行桩间土加固→开挖河道修筑河槽及侧墙→坡顶回填压实至规划设计标高。地层选用同工程监测断面所在位置处典型地层剖面,地层参数选取如表1所示。数值分析模型如图5所示。

表1 岩土体参数取值选取表
Tab. 1 Selection of rock and soil parameters

岩土体	重度 γ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比 μ	弹性模量 E/MPa	抗剪强度	
				黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
回填土	18.0	0.33	10	10	25
压实填土	19.0	0.28	20	15	30
强风化岩	21.0	0.23	200	50	40
中等风化岩	23.0	0.20	2000	100	45
支护桩	25.0	0.15	30000		

3.2 排架式 h 型桩数值模拟分析

采用 PLAXIS 软件模拟计算排架式 h 型桩变形和内力,计算结果如图6、图7所示。

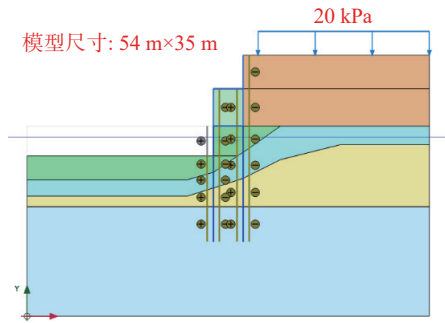


图5 排架式h型桩数值模型

Fig. 5 Numerical modeling analysis of bent-type h-piles

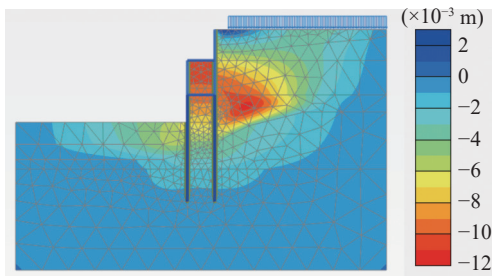
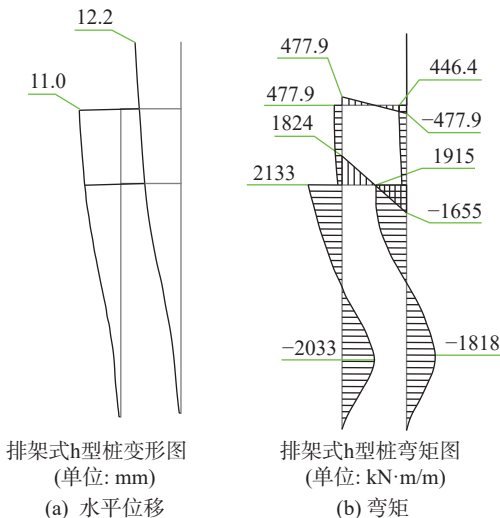


图6 岩土体水平位移云图

Fig. 6 Horizontal displacement cloud map of rock and soil mass

排架式h型桩变形图
(单位: mm)

(a) 水平位移

排架式h型桩弯矩图
(单位: kN·m/m)

(b) 弯矩

图7 排架式h型桩结构水平位移及弯矩分布图

Fig. 7 Horizontal displacement (left) and bending moment (right) of the bent-type h-piles

从图6排架式h型桩岩土体水平位移云图可见,岩土体最大水平位移主要发生在后排桩后土体的中部,前排桩前侧岩土体提供了被动区反力,限制了结构向坑内方向变形。由于排架式h型桩上下连梁组成的框架结构整体向坑内变形带动上下连梁框架间土体一起向坑内位移,排架式h型桩上下两道连梁间土体亦产生较大水平位移。

从图7(a)排架式h型桩结构水平位移模拟计算结果来看,h型桩最大水平位移点发生在后排桩顶部,

最大水平位移为12.2 mm,前排桩顶部水平位移为11.0 mm,可见排架式h型桩应用在建筑边坡工程中具有良好的控制变形能力,满足工程对变形的要求。从图7(b)排架式h型桩弯矩图可见,排架式h型桩弯矩主要发生在由第二道连梁和前后排桩组成的门型刚架结构上,而上部框架结构和悬臂段分布相对较小的内力。下部门型刚架结构上最大弯矩为:前排桩2133 kN·m/m,后排桩1915 kN·m/m,第二道连梁1831 kN·m/m;上部框架结构上最大弯矩为:前排桩477.9 kN·m/m,后排桩446.4 kN·m/m,第一道连梁477.9 kN·m/m;悬臂段最大弯矩为:31.0 kN·m/m。这一内力分布规律有利于指导不同深度处桩身截面尺寸及配筋设计。

3.3 排架式h型桩同悬臂桩对比分析

按截面积等效原则,将前后两排桩桩身截面积等效为单排悬臂桩,采用PLAXIS软件模拟计算其桩身位移及内力,并与排架式h型桩的后排桩身水平位移及内力进行对比分析。悬臂式h型桩数值模型见图8,模拟计算结果如图9所示。

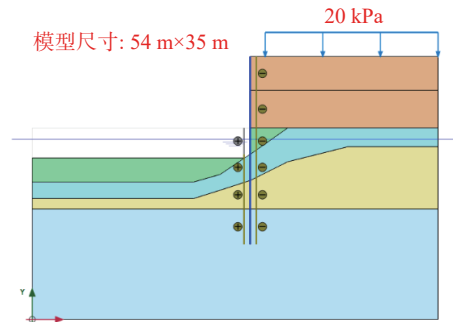


图8 悬臂式桩数值模型

Fig. 8 Numerical modeling of cantilever pile

由图9(a)桩身水平位移可见,排架式h型桩桩身水平位移较悬臂式桩更小,且桩顶具有明显的位移限制作用,排架式h型桩顶水平位移较悬臂式桩顶水平位移减小了54.6%,具有更好的控制变形的能力;由图9(b)桩身弯矩图可知,排架式h型桩身正负弯矩交变,最大弯矩较悬臂式桩减小了72.5%,弯矩分布较悬臂式桩更为合理;由图9(c)桩身剪力图可知,排架式h型桩桩身剪力亦较悬臂式桩小,最大剪力较悬臂式桩减小了72.2%。由此可见,在等效截面积条件下,排架式h型桩较悬臂式h型桩具有更好的控制变形能力,内力分布也更为合理。

3.4 排架式h型桩同普通h型桩对比分析

普通h型桩即通过一道连梁将前后排桩进行刚性连接组成刚架结构(见图10),而排架式h型桩通过两道连梁将前后排桩进行刚性连接组成刚度更大

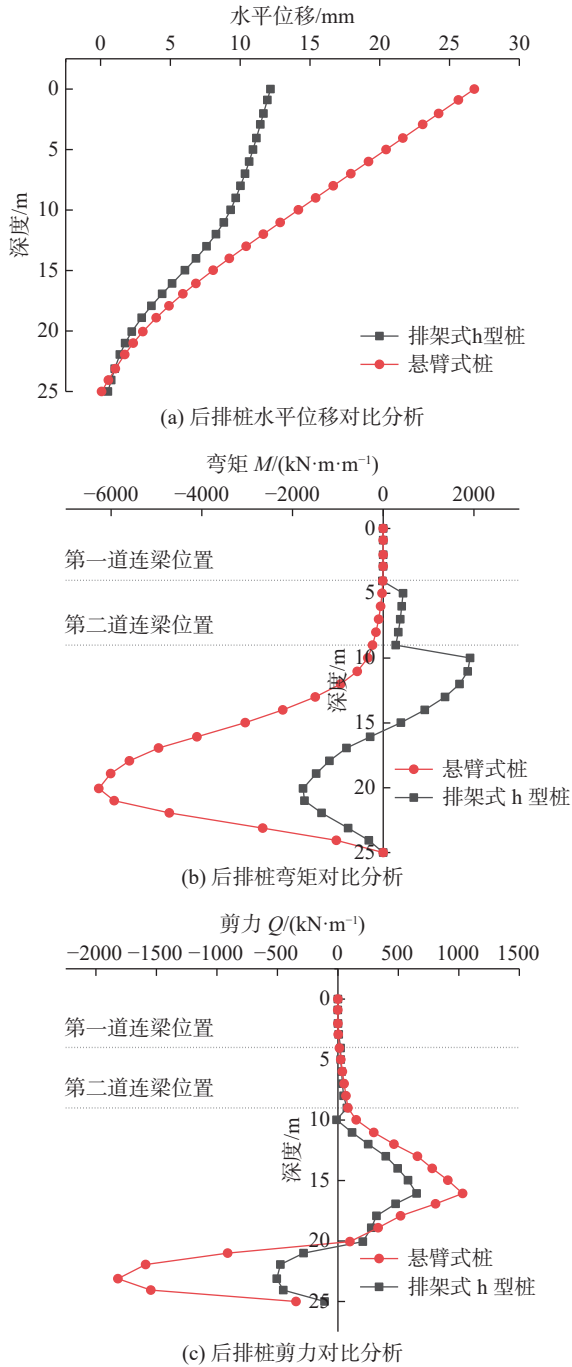


图 9 排架式 h 型桩与悬臂桩变形及内力对比
Fig. 9 Comparison of deformation and internal forces between bent-type h-piles and cantilever piles

的刚架结构(见图 5)。为排除连梁总截面不同对结构内力变形造成的影响,在连梁总截面积不变的情况下,将“排架式 h 型桩”连梁纵向间距调整为“普通 h 型桩”连梁纵向间距的两倍进行模拟,并同“普通 h 型桩”内力变形对比分析。普通 h 型桩数值模型见图 10,模拟计算结果如图 11 所示。

从图 11(a)桩身位移图可以看出,无论是后排桩还是前排桩,排架式 h 型桩桩顶水平位移均较普通

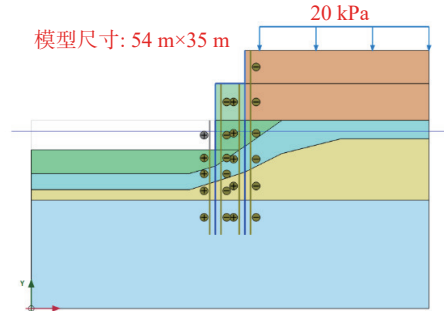


图 10 设置一道连梁的普通 h 型桩数值模型
Fig. 10 Modeling of a common h-shaped pile with a connecting beam

h 型桩小,后排桩桩顶水平位移减小了 10.4%,前排桩桩顶水平位移减小了 16.7%,因此排架式 h 型桩较普通 h 型桩具有更优的控制变形的能力。由图 11(b)桩身弯矩图可以看出,无论是后排桩还是前排桩,在第一道和第二道连梁之间,排架式 h 型桩桩身弯矩均较普通 h 型桩桩身弯矩小,在第一道连梁位置,后排桩弯矩减小了 72.3%,前排桩弯矩减小了 68.8%;在第二道连梁以下位置,排架式 h 型桩桩身弯矩较普通 h 型桩桩身弯矩略有增大,后排桩弯矩增大了 33.0%,前排桩弯矩增大了 47.7%。可见排架式 h 型桩较普通 h 型桩的桩身最大弯矩位置更靠下,出现在第二道连梁位置,而在两道连梁之间的桩身弯矩则更小。从图 11(c)桩身剪力图来看,排架式 h 型桩和普通 h 型桩基本一致。由图 11(d)、图 11(e)可以看出,排架式 h 型桩连梁内力主要分布在第二道连梁上,而第一道连梁内力分布较小,第一道连梁最大弯矩仅为第二道连梁的 24.6%,最大剪力仅为第二道连梁的 26.0%。可见,排架式 h 型桩由前后排桩及第二道连梁组成的门型刚架的刚度较大,从而使上部结构的内力有较大幅度的优化,且较普通 h 型桩具有较优的控制变形能力。

3.5 排架式 h 型桩桩间土加固效果分析

桩间土加固后,桩间土的重度、弹性模量、泊松比及抗剪强度均有所提高。为研究排架式 h 型桩前后排桩桩间土加固对其控制变形及内力优化的效果,本文通过调整桩间土的弹性模量、抗剪强度参数来模拟桩间土的加固,对比分析了桩间土不加固、仅在上下两道连梁之间进行桩间土加固、桩间土全长加固(加固至风化岩面)三种情况,模拟计算参数见表 2,模拟计算结果如图 12 所示。

从图 12(a)—图 12(c)可见,桩间土通长加固略优于桩间土不加固,桩顶最大水平位移可减小 1.0%,桩身最大弯矩可减小 2.7%,桩身最大剪力可减小

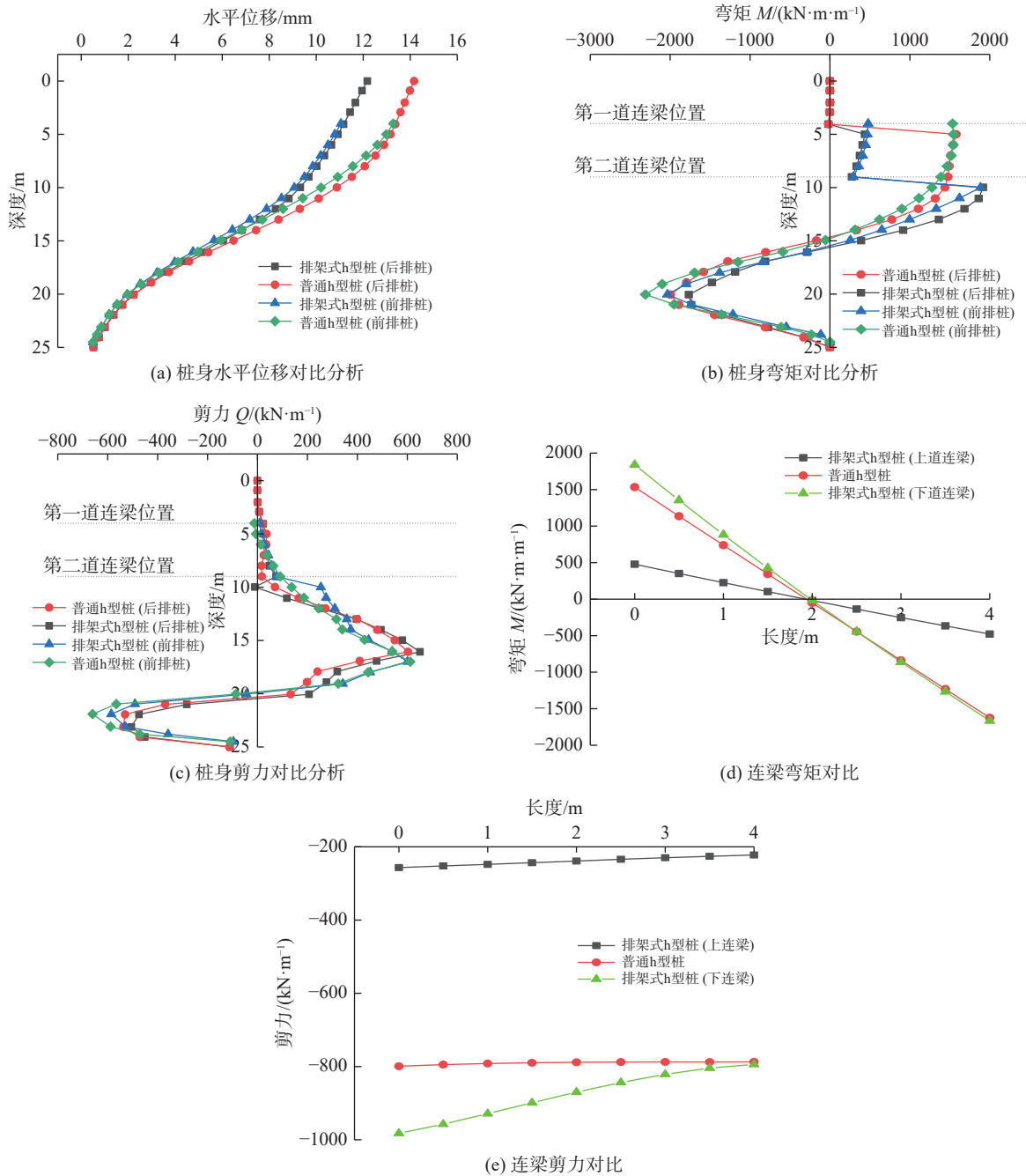


图 11 排架式 h 型桩与普通 h 型桩变形及内力对比

Fig. 11 Comparison of deformation and internal forces between bent-type h-piles and ordinary h-piles

4.6%; 仅在两道连梁间加固和桩间土不加固两种工况下的变形及内力基本相同。从整体来看桩间土加固对排架式 h 型桩的位移及内力影响较小, 即使桩间土得到了加固, 但对于由两道连梁组成的具有更大刚度的 h 型桩结构来看, 加固桩间土提高的土体刚度相对两道连梁组成的 h 型桩的刚度依然很小, 其变形及内力依然主要体现在排架式 h 型桩上。

从图 12(d)、图 12(e)来看, 桩间土是否加固对连梁剪力和弯矩的影响很小。

3.6 连梁与后排桩固接或铰接对比分析

通过 PLAXIS 2D“创建连接”按钮可在连梁与后排桩节点处添加连接方式。本文针对排架式 h 型桩连梁与后排桩采用铰接或刚接时结构变形和内力表现做了对比分析, 模拟计算结果如图 13 所示。

由图 13(a)桩身水平位移对比可见, 连梁与后排桩采用刚接时具有更好的变形控制能力, 相比铰接连接, 后排桩顶水平位移可减小 14.8%, 前排桩顶水平位移可减小 14.7%。图 13(b)桩身弯矩对比情况表

表 2 桩间土加固前后岩土体参数取值表
Tab. 2 Values of geotechnical parameters before and after reinforcement of soil between piles

岩土体(桩间土)	重度 γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比 μ	弹性模量 E /MPa	抗剪强度	
				黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^{\circ}$)
不加固	回填土	18.0	0.33	10	25
	压实填土	19.0	0.28	20	30
上下两道连梁间加固	回填土	19.0	0.30	15	30
	压实填土	19.0	0.28	20	30
桩间土全长加固	回填土	19.0	0.30	15	30
	压实填土	20.0	0.25	25	33

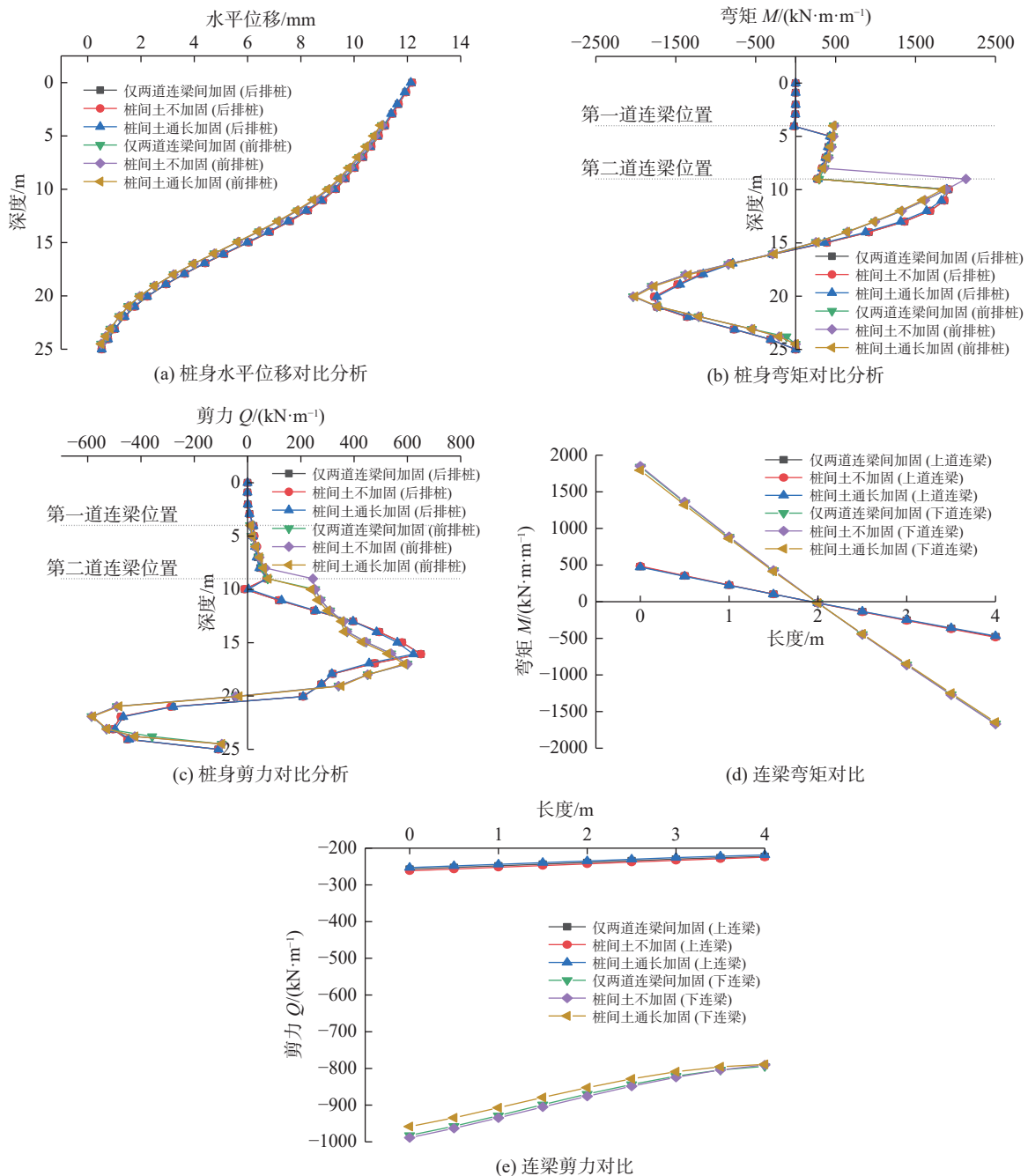


图 12 排架式 h 型桩间土加固的变形及内力对比

Fig. 12 Comparison of deformation and internal forces of soil reinforcement between bent-type h-piles in a row structure

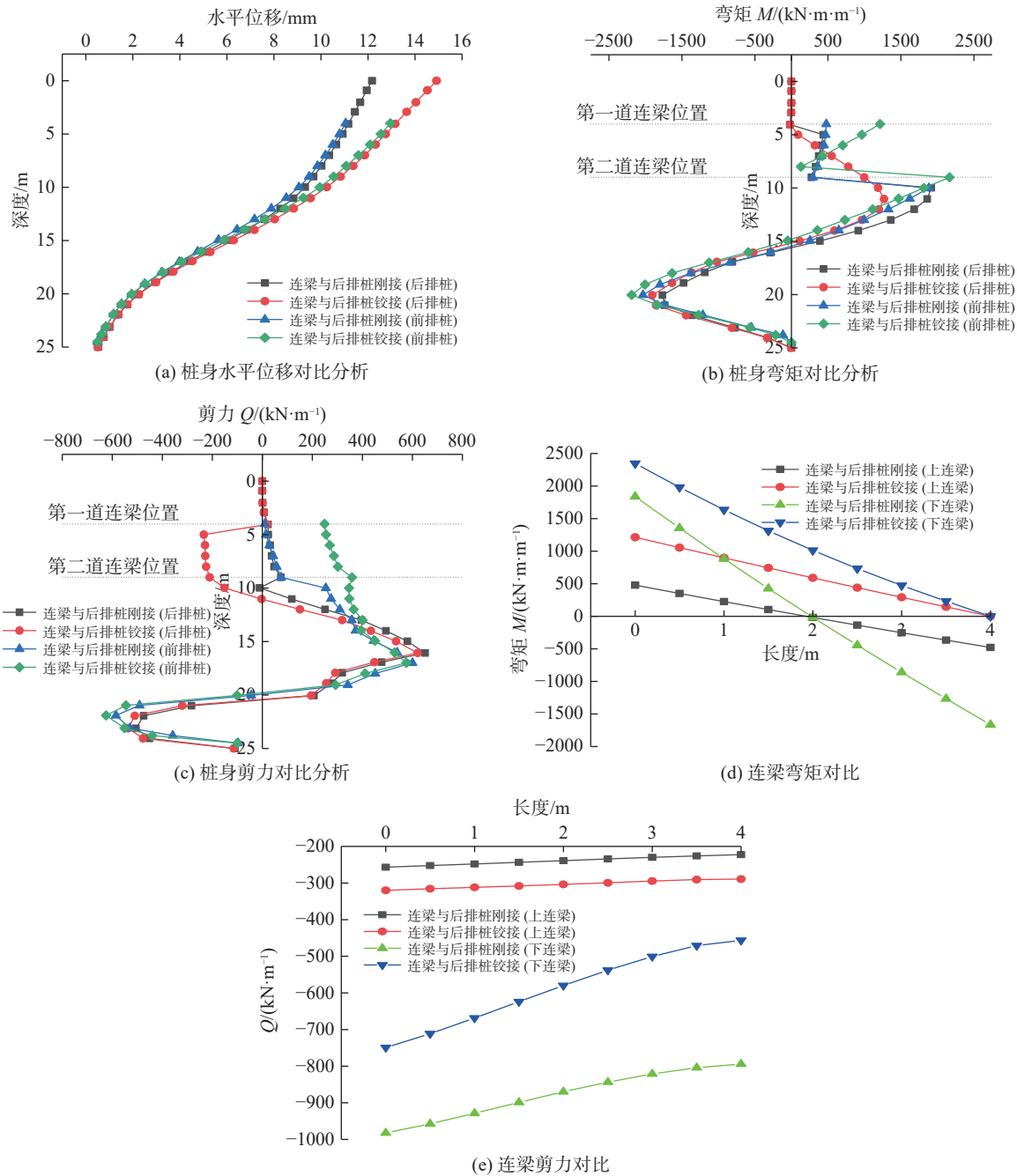


图 13 连梁与后排桩刚接或铰接变形及内力特性

Fig. 13 Deformation and internal force characteristics of rigid or hinged connection between connecting beam and rear pile

明,当连梁与后排桩的节点按刚接设计时,对于后排桩,在连梁位置处桩身弯矩均大于按铰接设计时弯矩,而对于前排桩,在连梁位置处桩身弯矩均小于按铰接设计时的弯矩。图 13(c)桩身剪力图中,当连梁与后排桩的节点按刚接设计时,无论后排桩还是前排桩,在连梁位置处桩身剪力均小于按铰接设计时剪力。可见当连梁与后排桩按铰接设计时,前排桩较后排桩发挥了更大的抗弯作用,而对于连梁与后排桩刚接设计时,前排桩和后排桩发挥的抗弯作用大致相等。由图 13(d)、图 13(e)可见,连梁与后排桩刚接时,连梁

左右两端弯矩正负交替,大小相近,而连梁承受的剪力则进一步向下部连梁转移。因此连梁与后排桩刚接时,连梁弯矩正负交替,受力更为合理,但下连梁要承担更大的剪力。

4 工程应用效果

4.1 工程设计与监测

九曲河支流生态修复工程填方边坡采用排架式 h 型桩支护,设计灌注桩直径 $d=1.2$ m,前排桩长 $H_1=20.0$ m,后排桩长 $H_2=24.0$ m,后排桩悬臂段 $H_3=4.0$ m,桩端入中等风化岩深度不小于 5.0 m,前后排

桩排距(中心距) $L=4.0\text{ m}$;连梁截面尺寸:1.2 m(宽) \times 1.0 m(高),水平间距(中心距) $l=3.6\text{ m}$,上、下排连梁间距 $S=5.0\text{ m}$,灌注桩与连梁节点处均设置 1.3 m(宽) \times 1.0 m(高)暗梁。

采用徕卡 TM50 全站仪与附和导线网法,以基准点和工作基点构建监测网络;采用全站仪自由设站法监测围护桩顶水平位移;采用天宝 DiNi03 电子水准仪按二等水准标准测量桩顶竖向位移;采用 JTM-U6000F 测斜仪探测桩体深层水平位移,通过测斜管倾角变化反算位移量;采用土压力盒结合 JTM-V10B 频率计监测桩后土压力,通过频率测量换算压力值。监测工作遵循从整体到局部、先控制后细部的原则,即先建立监测基准网,后建立观测网,逐级布网,分级控制,保证监测成果的精度满足规范要求和工程需要。监测点位布置如图 14 所示。

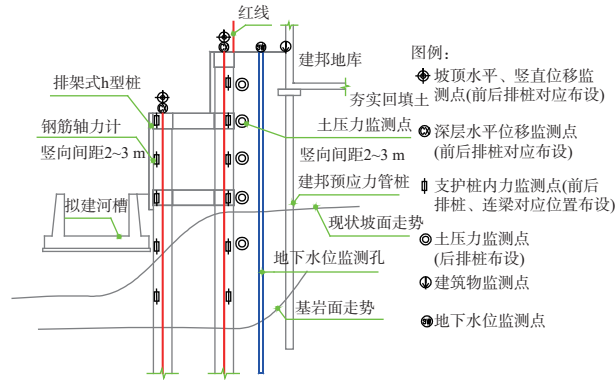


图 14 监测点布置图

Fig. 14 Layout of monitoring points

4.2 数值模拟变形与工程监测变形对比分析

通过在桩内设置测斜仪对排架式 h 型桩桩体深层水平位移进行监测,监测周期持续 1 年,从数据上看变形已基本趋于稳定。前后排桩桩体深层水平位移实测结果和数值模拟计算结果对比情况如图 15 所示。

由图 15 可见,桩体深层水平位移数值模拟计算结果与实测结果在分布形态上基本一致,但数值分析结果大于实测结果,后排桩桩顶水平位移数值模拟结果与实测结果差值率为 33.8%,前排桩桩顶水平位移数值分析结果与实测结果差值率为 31.2%。初步判断,坡顶规划建邦樱花郡住宅采用预应力管桩基础,一定程度上降低了作用在排架式 h 型桩上的土压力,导致实测桩体变形小于计算值。

为验证上述判断,补充建邦樱花郡住宅的管桩基础后重新建模分析,并与实测桩体深层水平位移对比,数值模型见图 16,计算结果如图 17 所示。

由图 17 可见,桩体深层水平位移数值模拟计算

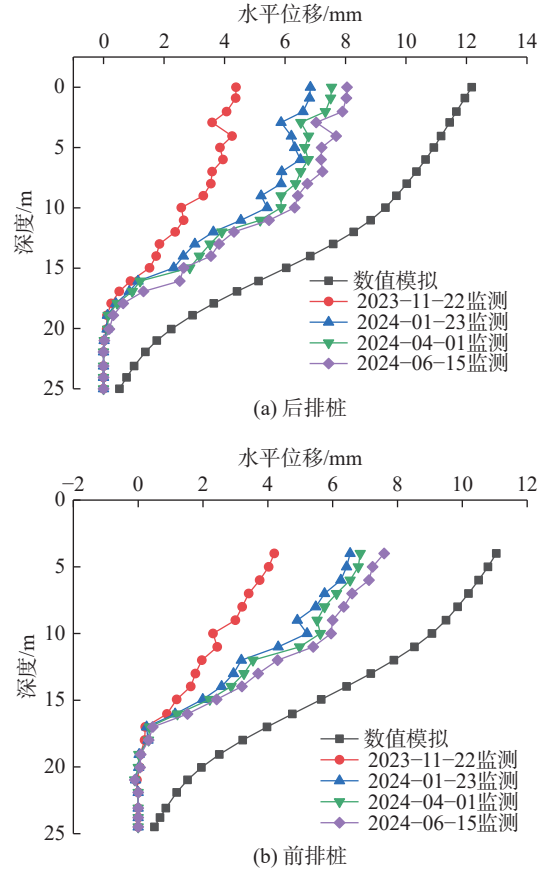


图 15 桩身位移数值模拟与工程监测对比

Fig. 15 Comparison between numerical simulation of pile displacement and engineering monitoring

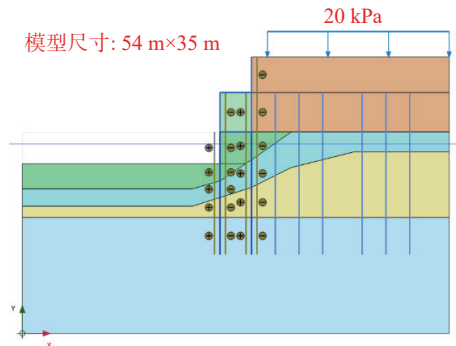


图 16 补充坡顶管桩基础后的排架式 h 型桩数值模型

Fig. 16 Modeling of bent-type h-piles after supplementing pipe pile foundation at slope top

结果与实测结果在分布形态上基本一致,后排桩桩顶水平位移数值模拟结果与实测结果差值率为 11.8%,前排桩桩顶水平位移数值分析结果与实测结果差值率为 8.6%,这说明坡顶建筑物管桩基础对作用于排架式 h 型桩结构上的土压力确有一定分担作用。

4.3 工程实际应用效果评价

九曲河生态修复治理工程填方边坡采用排架式 h 型桩支护结构,解决了高填方边坡垂直支护难题,取得了良好的支护效果,支护工程竣工效果如图 18

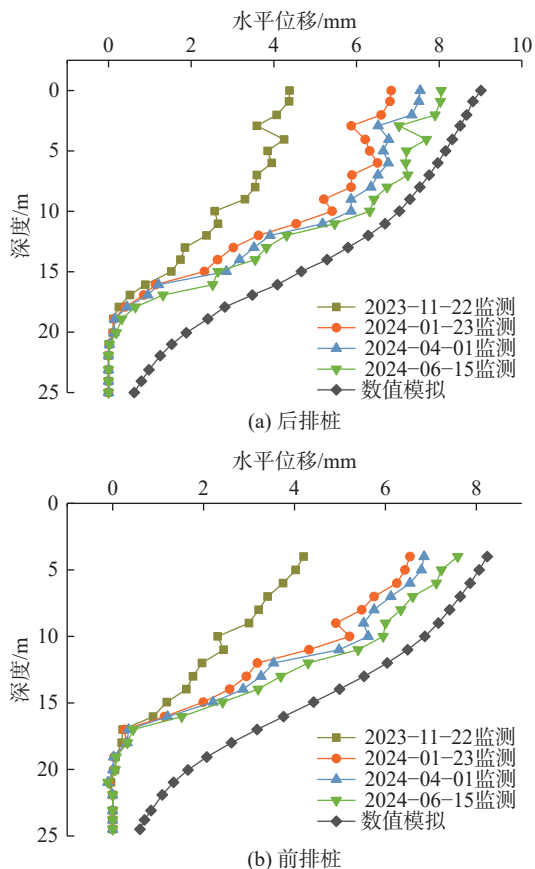


图 17 考虑坡顶管桩基础时的排桩水平位移实测与模拟对比分析

Fig. 17 Comparative analysis of measured and simulated horizontal displacement of piled walls considering the foundation of pipe piles at the top of the slope

所示。边坡位移监测周期持续 1 年, 监测数据显示边坡变形已基本收敛, 后排桩实测桩顶水平位移为 8.1 mm, 前排桩实测桩顶水平位移为 7.6 mm, 边坡变形控制效果较为理想。



图 18 九曲河边坡支护工程竣工效果

Fig. 18 Completion drawing of Jiugu Riverside slope support project

5 结论

(1) 排架式 h 型桩适用于支护空间有限、锚索施工受限、地层上软下硬的高填方边坡支护工程。

(2) 与悬臂桩和普通 h 型桩相比, 排架式 h 型桩具有更优的内力分布和控制变形能力, 已应用于“九

曲河生态修复治理工程”高大填方边坡支护, 通过实际工程监测桩顶最大水平位移 8.1 mm, 单位计算宽度上桩身最大弯矩 1423.2 kN·m; 取得较好的工程应用效果。

(3) 桩间土加固对排架式 h 型桩支护体系受力与变形控制效果并不明显。排架式 h 型桩连梁同后排桩宜按固接进行设计。

研究成果可为排架式 h 型桩在土岩二元地层高填方边坡工程中的设计与施工提供参考。

参考文献

- [1] 罗勇, 姜波, 李春峰, 等. h 型抗滑桩滑坡治理中的变形特性及内力研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(6): 1702-1710. (LUO Y, JIANG B, LI C F, et al. Research on the deformation and internal force characteristics of h-type anti-slide piles in landslide treatment[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(6): 1702-1710. (in Chinese))
- [2] 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]. 工程力学, 2024, 41(7): 134-146. (LI Y H, ZHANG X, ZHANG D H, et al. Model test on mechanical behavior of h-type anti-slide pile under curved landslide[J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(7): 134-146. (in Chinese))
- [3] 李兵, 赵如雄, 马洪生, 等. 圆截面 h 型抗滑桩受力与变形分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(S2): 1023-1027. (LI B, ZHAO R X, MA H S, et al. Analysis on the stress and deformation of circular section h-type anti-slide piles[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(S2): 1023-1027. (in Chinese))
- [4] 肖世国. 边(滑)坡治理中 h 型组合抗滑桩的分析方法及工程应用 [J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2146-2152. (XIAO S G. Analytical method for h-type combined anti-sliding pile retaining landslide or excavated slope and its application to practical projects[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2146-2152. (in Chinese))
- [5] 蒋楚生. 椅式抗滑桩的内力计算 [J]. 路基工程, 2004(1): 57-59. (JIANG C S. Internal force computation of chair type slide-resistant pile[J]. Subgrade Engineering, 2004(1): 57-59. (in Chinese))
- [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(S1): 2935-2943. (ZHANG Y J, ZHOU H, FENG X T, et al. Simplified calculation method and affecting factors analysis of h-type anti-slide pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S1): 2935-2943. (in Chinese))

- [7] 应宏伟, 初振环. 深基坑带撑双排桩支护结构有限元分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S2): 4325-4331. (YING H W, CHU Z H. Finite element analysis of deep excavation with braced retaining structure of double-row piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S2): 4325-4331. (in Chinese))
- [8] 欧孝夺, 唐迎春, 崔 伟, 等. h 型抗滑桩模型试验及数值模拟 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1936-1943. (OU X D, TANG Y C, CUI W, et al. Model test and numerical simulation of h-shaped anti-sliding pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(9): 1936-1943. (in Chinese))
- [9] 王继晟, 熊传祥. h 型抗滑桩工作性状有限元分析 [J]. 土工基础, 2014, 28(1): 53-56. (WANG J S, XIONG C X. Finite element analysis of h-type piles for landslide mitigations[J]. Soil Engineering and Foundation, 2014, 28(1): 53-56. (in Chinese))
- [10] 詹智麒, 徐光黎. 不同布桩方式对 h 型双排桩支护结构影响的数值模拟 [J]. 安全与环境工程, 2020, 27(3): 193-199. (ZHAN Z Q, XU G L. Numerical simulation of the impact of different pile arrangement on the supporting structure of h-shaped double-row piles[J]. Safety and Environmental Engineering, 2020, 27(3): 193-199. (in Chinese))
- [11] 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. (WANG Y, ZHAO B. The structural mechanism and numerical simulation of h-type anti-sliding pile[J]. Highway Engineering, 2015, 40(6): 5-9. (in Chinese))
- [12] 柳治国. ANSYS 在 h 形抗滑桩设计中的应用 [J]. 公路工程, 2013, 38(3): 144-147,154. (LIU Z G. Application of ANSYS on the design of h form anti-slide pile[J]. Highway Engineering, 2013, 38(3): 144-147,154. (in Chinese))
- [13] 邓友生, 杨 彪, 姚志刚, 等. h 型抗滑桩受力性能模型试验研究 [J]. 大连交通大学学报, 2024, 45(1): 73-77. (DENG Y S, YANG B, YAO Z G, et al. Model tests on mechanical behavior of h-type anti-slide pile[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2024, 45(1): 73-77. (in Chinese))
- [14] 姚裕春, 魏永幸, 李安洪. 椅式桩板结构变形破坏特征模型试验研究分析 [J]. 高速铁路技术, 2019, 10(1): 6-10. (YAO Y C, WEI Y X, LI A H. Model test study on deformation and failure characteristics of chair-shaped pile-sheet structure[J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(1): 6-10. (in Chinese))
- [15] 杨佳桦, 王 凯, 邓丽华, 等. 桁架式抗滑桩与两种抗滑桩结构内力分析对比 [J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(S2): 607-610. (YANG J H, WANG K, DENG L H, et al. Comparison and analysis of internal force of trussed slide resistant pile's structure with two kinds of anti-slide pile's[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(S2): 607-610. (in Chinese))

收稿日期: 2025-02-08