

【工程应用】

开挖条件下渠道边坡双排板桩墙 现场试验和数值模拟

杨海浪¹, 李波^{2*}, 胡波², 龚壁卫²

(1. 安徽省引江济淮集团有限公司, 安徽 合肥 230601; 2. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要: 基于引江济淮某双排桩支护渠道边坡的工程原型, 开展新型板桩墙现场监测和数值模拟, 研究渠道开挖条件下双排桩的桩身弯矩以及坡体水平位移等变化规律。分析表明, 当渠道边坡开挖至渠道底部时, 后排桩(桩长 11.5 m)和前排桩(桩长 8 m)的桩顶最大水平位移分别为 19.11 mm 和 18.06 mm, 自桩顶至桩底水平位移逐渐减小; 桩间土体的最大水平位移为 27.82 mm, 随深度增大水平位移逐渐减小, 埋设大于 15 m 时水平位移小于 2 mm; 桩身弯矩随着开挖深度增大而逐渐增大, 自桩顶至桩底弯矩先增大后减小, 桩长 11.5 m 和 8 m 的最大值约为 73 kN·m 和 69 kN·m。现场监测结果和数值模拟参数分析为渠道边坡板桩墙的设计和研发提供依据。

关键词: 边坡工程; 抗滑桩; 现场试验; 板桩墙; 水平位移

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)S-0092-07

Field test and numerical simulation of double-row sheet-pile wall on slope under excavation conditions

YANG Hai-lang¹, LI Bo^{2*}, HU Bo², GONG Bi-wei²

(1. Anhui Provincial Group Limited for Yangtze-to-Huaihe Water Diversion, Hefei 230601, Anhui, China;

2. Key Laboratory Geotechnical Mechanics and Engineering of the Mechanics and Engineering of the Minister of Water Resources,

Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, Hubei, China)

Abstract: Based on the new sheet-pile wall on the slope in Yangtze-to-Huaihe Water Diversion, field tests and numerical simulation was carried out on the purpose of exploring the influence of channel excavation conditions on the bending moment of the double-row piles and the horizontal displacement of the slope. The monitoring results show that the maximum horizontal displacements of the pile tops of the two rows of piles were 19.11 mm and 18.06 mm respectively. The horizontal displacement of the pile top gradually decreased from the top of the pile to the bottom of the pile. The maximum horizontal displacement of the soil between the piles was 27.82 mm. The horizontal displacement gradually decreased with the increase of depth. When the depth was greater than 15 m, the horizontal displacement was less than 2 mm. The bending moment of the pile body gradually increased with the increase of the excavation depth. The bending moment from the top of the pile to the bottom of the pile increased first and then decreased. The maximum pile length of 11.5 m and 8 m were about 73 kN·m and 69 kN·m. The on-site monitoring results and numerical simulation can be used to provide the basis for the design and research of the canal side slope sheet pile wall.

Key words: slope engineering; anti-slide pile; field tests; sheet-pile wall; horizontal displacement

0 引言

抗滑桩作为一种有效的加固手段已广泛应用于各种边坡的治理, 抗滑桩具有刚度大、抵抗水平荷

载能力强的优点, 能够有效阻止边坡的水平方向大变形, 降低边坡产生滑坡风险^[1-4]。

相比传统的抗滑桩加固方式, 双排抗滑桩具有更强的整体稳定性、刚度和抗倾覆能力^[5]。目前国

收稿日期: 2022-02-21

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费 (CKSF2017012/YT); 国家自然科学基金项目 (51308067); 安徽省引江济淮集团有限公司科技项目资助 (YJH-ZT-ZX-20191031216)。

作者简介: 杨海浪 (1991—), 男, 浙江温州人, 本科, 工程师, 主要从事水利水电工程建设管理和研究工作。E-mail: 408903487@qq.com。

*通信作者: 李波 (1982—), 男, 山东泰安人, 博士, 主要从事岩土工程和离心模型试验技术方面的研究。E-mail: auliso2004@126.com。

内外学者主要采用现场试验、室内模型试验和数值模拟等手段, 主要研究了桩间距和排间距等对边坡和桩的变形、加固效果等影响。申永江等^[6]通过建立双排桩有限元数值模型, 并结合某实际工程现场监测, 表明桩排距越大, 后排桩的弯矩和剪力也就越大, 而前排桩的弯矩和剪力却越小。李阳等^[7]采用模型试验和理论分析方法, 研究了不同布桩形式下双排抗滑桩的受力特征, 监测结果表明后排桩桩后土压力在滑面以上呈梯形分布, 滑面以下呈矩形分布, 而前排桩桩前土压力呈梯形分布, 桩身弯矩整体呈“S”型分布。杨波等^[8]采用强度折减的有限元法, 讨论了两排桩在3种不同类型滑坡中, 在不同的折减系数下随排距的变化, 两排桩的桩前抗力、桩后推力、实际承担推力等的变化规律。闫玉平等^[9]采用斜条分法, 基于静力平衡条件推导出作用于前排桩受荷段后侧的推力计算公式, 以及前排桩受荷段后侧坡体推力。

目前, 双排抗滑桩已在滑坡治理或边坡加固中大量采用, 但由于边坡分别对前后排抗滑桩的作用力分配, 以及桩土相互作用下变形规律的相关研究还不完善, 使得双排抗滑桩的设计和计算方法还不成熟。本文依托引江济淮膨胀土渠道边坡工程, 采用现场试验和数值模拟, 研究渠道边坡在开挖过程中双排板桩墙的桩身变形和弯矩以及边坡土体变形规律。

1 试验概况

引江济淮小合分线起点白石天河, 穿越杭埠河

至派河口, 沿线建白山节制枢纽, 杭埠河倒虹吸和派河口泵站枢纽。小合分线全长 18.102 km, 起讫桩号为 PX2+746~20+848, 设计流量 300 m³/s, 设计输水位 6.1~4.1 m, 河道设计底宽 42 m, 河底高程-1.4~0.6 m, 为新开挖输水明渠。其中, 现场试验段选择在 PX16+000~19+900, 为高坡岗地, 地面高程一般 10~18 m, 该段采用两排板桩墙进行加固, 设计断面如图 1 所示。

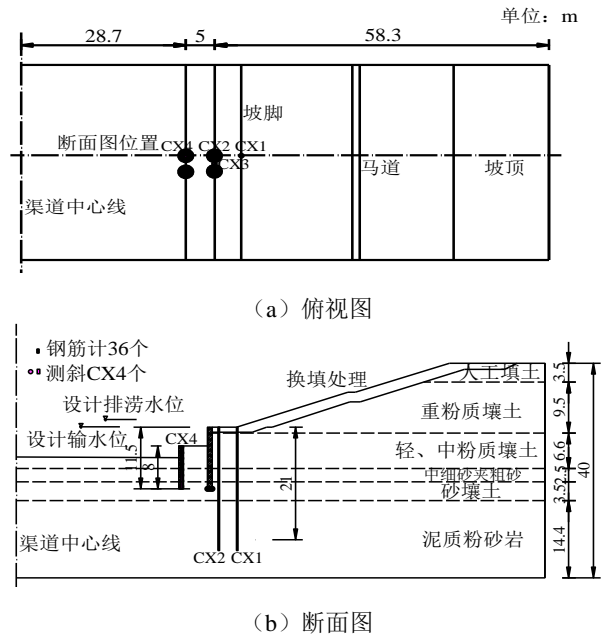


图 1 新型板桩墙现场监测断面布置图

Fig. 1 Arrangement of piles and transducer in double-row sheet-pile wall field test

1.1 地质条件和桩基参数

开展现场试验位置处的地层主要为 6 层, 如表 1 所示。

表 1 土层物理力学性质参数表

Table 1 Physical and mechanical parameters of layered soil

层序	地层名称	承载力标准值/kPa	压缩模量/MPa	饱和固结快剪		固结快剪		允许比降	渗透系数/(cm/s)
				凝聚力/kPa	内摩擦角/(°)	凝聚力/kPa	内摩擦角/(°)		
①	人工填土	110	4.0	25.0	8.0	—	—	0.30	5.0×10 ⁻⁵
②	无膨胀	230	9.0	42.0	16.0	33.0	18.0	0.50	7.0×10 ⁻⁶
	重粉质壤土 弱膨胀	—	—	31.5	15.0	25.0	17.0	—	1.0×10 ⁻⁵
	中膨胀	—	—	27.0	13.5	21.0	15.0	—	3.0×10 ⁻⁵
③	轻、中粉质壤土	180	9.0	16.0	20.0	17.0	22.0	0.25	8.0×10 ⁻⁵
④	中细砂夹粗砂	220	16.0	5.0	32.0	—	—	0.20	3.0×10 ⁻⁵
⑤	砂壤土	240	15.0	20.0	25.0	—	—	0.25	3.5×10 ⁻⁵
⑥	泥质粉砂岩	400	—	—	—	—	—	—	—

①层人工填土 (Q_4^{ml}): 以重、中粉质壤土为主, 褐黄、灰黄色, 软-软可塑状, 稍湿, 属中等压缩性土, 主要分布于堤防段两侧, 部分路面及村庄附近为夹块石、灰渣等杂填土。

②层重粉质壤土 (Q_3^{al}): 含铁锰质结核, 棕黄、棕黄夹灰白等色, 硬可塑-硬塑状, 属中等偏低压缩性土, 普遍分布。本层自由膨胀率为 20.0%~93.5%, 平均值 61.5%, 一般具弱-中等膨胀潜势。

③层轻、中粉质壤土 (Q_3^{al}): 局部为轻粉质壤土、砂壤土, 褐黄、灰白等色, 硬可塑-中密状, 属中等压缩性土, 局部分布。

④层中细砂夹粗砂 (Q_3^{al}): 局部夹重粉质壤土, 灰白, 灰黄等色, 一般为中密-密实, 饱和。主要揭露于圩区中下部。

⑤层砂壤土 (Q_3^{al}): 灰白等色, 密实, 饱和, 此层总体由上至下砂粒含量增多, 黏粒含量减少。主要揭露于岗地中下部。已揭露最大层厚 14.9 m, 最深层底高程-37.64 m。

⑥层泥质粉砂岩 (K): 全风化一般为棕红夹少量灰白色, 呈坚硬黏土或密实砂壤土状; 强风化一般棕红色, 呈碎块和短柱状; 中等风化-新鲜基岩一般为棕红色, 长柱状。

加固采用双排管桩, 管桩为 PRC I 800(130)-C 型管桩, C80, 桩间距 1.2 m, 前排桩长 8 m, 后排桩长 11.5 m; 冠梁, C30, 高 0.4 m, 宽 1 m。PRC 桩在预应力混凝土管桩中加入一定数量的非预应力钢筋, 形成一种新型混合配筋预应力管桩, 水平承载力提高, 变形性能得到改善。桩间挂板采用 C30, 上层高 3.5 m, 下层高 2.5 m, 宽均为 0.4 m, 厚度 0.3 m。冠梁尺寸为 1 m×0.4 m, 采用 C30 混凝土。

1.2 监测布置

处理段监测点平面布置图如图 1 所示。其中, CX 为测斜管, 桩身两侧对称设置振弦式钢筋计。测斜管 CX1 和 CX2 长度为 25 m 左右, CX3 和 CX4 长度分别为 11.5 m 和 8 m, 用以监测边坡土体水平位移以及桩身水平变形。振弦式钢筋计通过监测桩身两侧受力计算得到桩身弯矩, 主要监测传感器, 如表 2 所示。为避免施工过程中对钢筋计信号线的损坏, 对钢筋计信号线尤其是在传感器端部进行了保护和固定^[10]。

1.3 试验步骤

现场试验主要分为两个阶段: 一是 11.5 m 桩施工和传感器埋设, 2020 年 11 月 7 日进行 11.5 m 桩基施工, 测试元件于 2020 年 12 月 1 日埋设完毕,

待量测读数稳定后作为初值; 二是渠道内两次开挖, 2020 年 12 月 19 日至 31 日渠道内侧开挖深度 3.5 m, 2021 年 3 月 27 日施工 8 m 桩, 2021 年 3 月 28 日—4 月 19 日开挖渠道内 3 m。现场主要施工过程如图 2 所示。

表 2 主要监测仪器

Table 2 Monitoring items for situ tests

序号	名称	数量	型号和说明
1	钢筋计	36 个	振弦式钢筋应力计, 最大压应力为 210 MPa, 分辨率 0.07%FS, 综合误差 ≤ 1%FS, 防渗水压力 0.5 MPa, 工作温度范围 -20 °C ~ 80 °C。
2	测斜	4 个	Φ70 测斜管, 外径 70 mm, 壁厚 5 mm。测斜仪型号为 DIS-500, 数字化传输, 可通过蓝牙传输和存储。



(a) 桩基施工

(b) 钢筋计埋设



(c) 测斜管连接和埋设



(d) 渠道内土体开挖

图 2 现场试验主要施工阶段

Fig. 2 Site construction

2 监测结果及分析

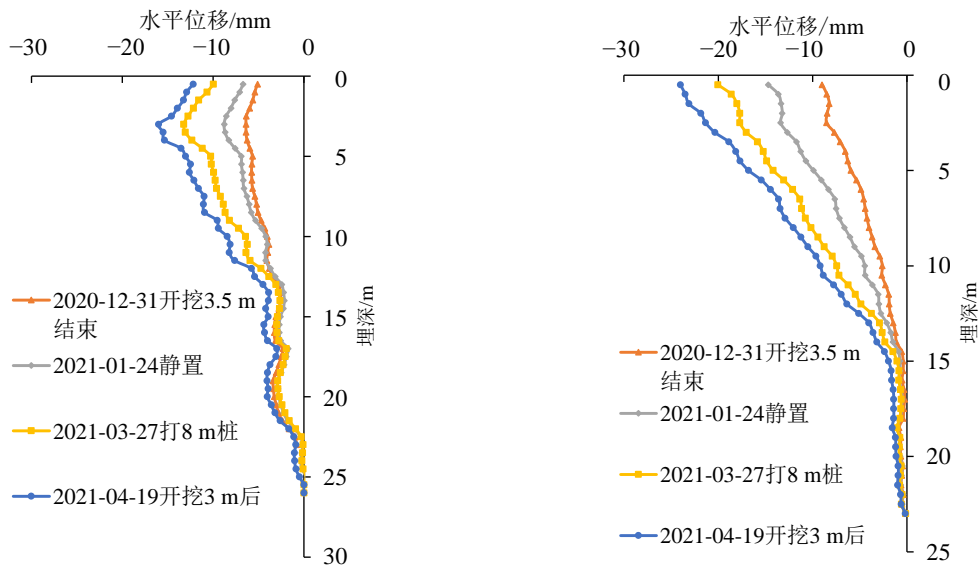
本文现场监测结果分析主要以2020年12月18日测试元件埋设完毕监测结果稳定后作为分析起点, 监测结果主要包括桩身水平变形、边坡土体水平位移以及桩身弯矩, 分别如图3~5所示。

(1) 桩身和土体水平变形

图3(a)和(b)分别为边坡坡脚和11.5 m桩

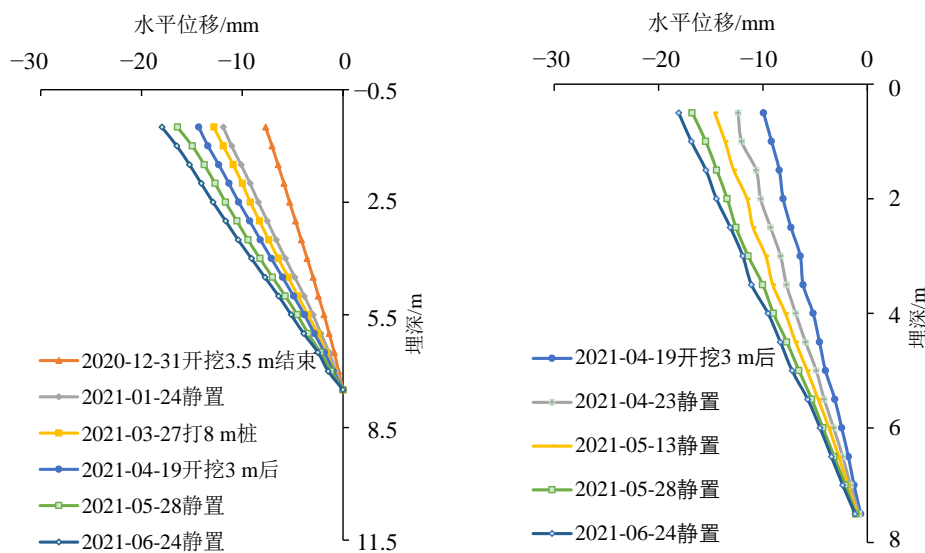
间土沿深度方向的水平位移分布图。分析表明, 随着开挖过程水平位移逐渐增大, 坡脚CX1水平位移沿深度先增大后减小, 截至2021年4月19日时最大水平位移为16.0 mm, 深度为3.5 m; 桩间土CX2水平位移沿深度逐渐减小, 顶部水平位移最大, 截至2021年4月19日时最大水平位移为24.0 mm。

图3(c)和(d)分别为桩长11.5 m和8 m桩身沿深度方向的水平位移分布图, 图4为桩身和坡体的水平位移随时间的变化曲线。



(a) 坡脚土体水平位移 CX1

(b) 桩间土体水平位移 CX2



(c) 桩长 11.5 m 管桩 CX3

(d) 桩长 8 m 管桩 CX4

图3 桩身和坡体的水平位移

Fig. 3 Horizontal displacement of the pile and slope

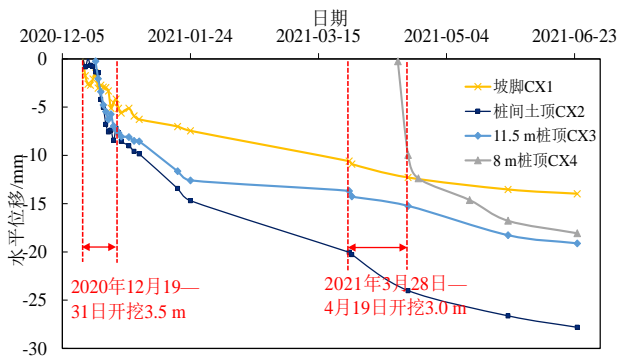


图4 桩顶和坡脚土体水平位移随时间变化

Fig. 4 Varies of horizontal displacement of soil on the pile top and slope toe

分析表明, 渠道内土体开挖时桩身水平变形显著增大, 当开挖 I (2020 年 12 月 19—31 日开挖 3.5 m) 和开挖 II (2021 年 3 月 28 日—4 月 19 日开挖 3.0 m) 开挖条件下两种桩长的桩身水平位移均增大。开挖 I 阶段时, 只有桩长 11.5 m 已经施工, 桩顶及其桩间土土顶水平位移较大, 最大水平位移增量分别约为 4 mm (桩顶) 和 4.9 mm (土顶), 坡脚土体 CX1 水平位移增量近 6.0 mm (见图 4); 而开挖 II 阶段时, 桩长 11.5 m 和 8 m 桩均已施工完毕, 此时 8 m 桩变形量较大, 最大水平位移增量分别约为 12 mm, 而 11.5 m 桩顶及其桩间土土顶水平位移相对较小, 分别为 1 mm (11.5 m 桩顶) 和 4.0 mm (土顶), 此时坡脚土体 CX1 水平位移增量较小, 仅有 1.4 mm, 表明开挖 II 条件下由于双排桩共同加固支护坡脚处的位移显著减小。两个阶段的开挖完成后观测结果表明, 水平位移均已趋于稳定, 增幅逐渐减小。

(2) 桩身弯矩

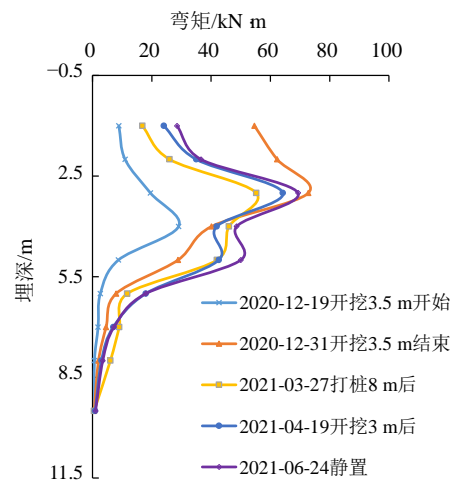
本文中桩身弯矩通过测试竖向钢筋的应力, 然后换算出截面的弯矩^[11]。由桩身各点钢筋测力计的读数可以计算出抗滑桩在各级荷载下完整的弯矩分布, 计算公式如下:

$$M = \frac{E_c}{E_s} \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{b} I_c \quad (1)$$

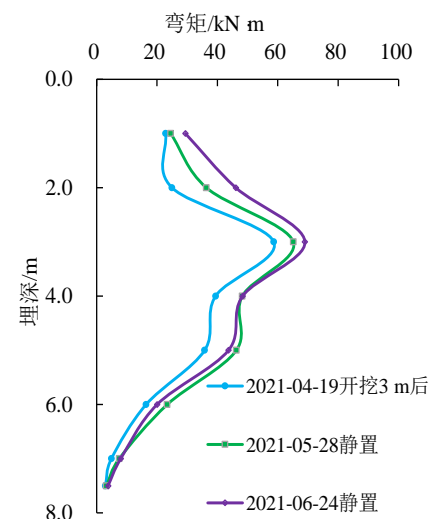
式中: M 为板桩墙计算弯矩; b 为对称布置的钢筋计之间的距离, 此处为 400 mm; σ_1 和 σ_2 为一对钢筋计应力计算值, 以拉为正, 压为负; E_c 和 E_s 分别为混凝土和钢筋计弹性模量; I_c 为量测量断面处的惯性距。计算得到桩身弯矩如图 5 所示。

分析表明, 自桩顶向下, 桩身弯矩基本呈先增大后减小的趋势; 随着渠道开挖 3.5 m (开挖 I) 过程中, 此时只施工了 11.5 m 桩, 该桩的桩身弯矩逐渐增大, 最大值约为 73 kN m; 当 8 m 桩施工后,

继续开挖渠道内 3 m (开挖 II) 时, 此时 11.5 m 的桩身弯矩较开挖 I 时有所减小, 而 8 m 桩的桩身弯矩逐渐增大, 8 m 桩身弯矩最大值为 69 kN m, 表明双排桩共同起到加固支护的作用。



(a) 桩长 11.5 m 桩身弯矩



(b) 桩长 8 m 桩身弯矩

图5 桩身弯矩沿桩身分布规律

Fig. 5 Distribution law of pile bending moment along the pile

3 基于原型条件的数值模拟

基于原型尺寸以及地层和桩基参数, 建立开挖条件下渠道边坡双排板桩墙的平面有限元模型, 网格划分如图 6 所示。

主要模拟工况为: 地应力平衡、斜坡开挖至 11.5 m 桩顶部、施工 11.5 m 桩、开挖至 8 m 桩顶部、施工 8 m 桩、开挖至渠底高程 -1.3 m、渠道内水位变动 (设计最低输水位 4.2 m, 设计排涝水位 5.8 m)。土层①~⑤采用硬化模型, 取回弹模量为压缩模量的 3 倍; 桩采用弹性模型, 设置桩土界面。数值模

拟得到了开挖条件下桩顶变形和桩身弯矩, 计算结果与现场监测结果对比, 并进一步拓展模拟渠道水位变化工况, 如图 7 和表 3 所示。

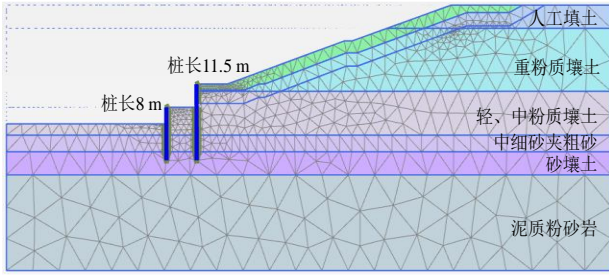
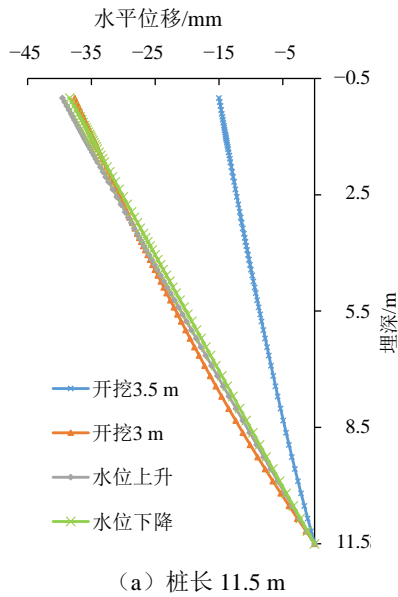
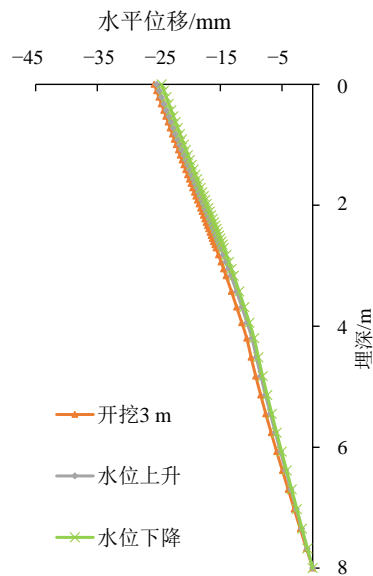


图 6 基于原型条件的数值模拟网格

Fig. 6 Numerical model based on prototype conditions



(a) 桩长 11.5 m



(b) 桩长 8 m

图 7 桩身水平位移数值模拟结果

Fig. 7 Numerical simulation results of horizontal displacement of piles

表 3 数值模拟与现场监测结果对比

Table 3 Comparison of numerical simulation and field monitoring results

研究方法	管桩板桩墙			
	桩顶最大 水平位移/mm		桩身最大 弯矩/kN·m	
	后排桩 11.5 m	前排桩 8 m	后排桩 11.5 m	前排桩 8 m
现场监测	25.34	20.89	73.0	86.0
数值模拟	38.25	26.69	36.9	38.3
开挖	38.00	25.00	84.0	69.7
水位上升	39.00	26.00	66.10	71.8
水位下降				

分析表明, 数值模拟与现场监测得到桩身水平位移基本一致, 进一步采用数值模拟分析水位上升至设计排涝水位和水位下降至设计最低输水位两种工况, 结果表明水位上升和水位下降使得桩身弯矩有一定的增大, 但桩身水平位移基本没有变化。

4 结论

本文选择渠道边坡双排板桩墙额典型断面进行现场试验, 通过埋设钢筋计、测斜管等进行现场监测, 得到了开挖条件下双排桩的桩身弯矩以及坡体水平位移等变化规律。现场实测结果表明, 随着渠道内土体的开挖, 双排桩的桩身弯矩以及坡体水平位移均显著增大, 两排桩共同起到加固作用。开挖 I 阶段时, 只完成了 11.5 m 桩施工, 自桩顶向下桩顶水平位移逐渐减小, 而桩身弯矩先增大后减小, 最大弯矩为 73 kN·m。开挖 II 阶段时, 11.5 m 桩和 8 m 桩均已施工完毕, 11.5 m 管桩桩顶水平位移逐渐增大, 但增幅减小, 最大水平位移为 19.11 mm, 最大桩身弯矩减小为 64 kN·m; 8 m 桩的桩顶水平位移最大值为 12 mm, 弯矩为 69 kN·m。现场监测结果表明, 当后续进行渠道中心位置土体开挖时双排板桩墙共同支撑, 桩顶最大水平位移小于 20 mm, 且随着时间变形趋于稳定, 边坡加固效果显著, 有效控制边坡变形。进一步的数值模拟结果表明水位上升和水位下降使得桩身弯矩有一定的增大, 但桩身水平位移基本没有变化。

参考文献

[1] 钮新强, 蔡耀军, 谢向荣, 等. 南水北调中线膨胀土边坡变形破坏类型及处理[J]. 人民长江, 2015, 46(3):

- 144-146.
- NIU Xin-qiang, CAI Yao-jun, XIE Xiang-rong, et al. Failure types of expansive soil slope in middle route project of south-to-north water diversion and its treatment[J]. *Yangtze River*, 2015, 46(3): 144-146.
- [2] 祁斌, 常波, 吴益平. 双排抗滑桩滑坡推力分配影响因素分析[J]. *工程地质学报*, 2011, 19(3): 359-363.
- QI Bin, CHANG Bo, WU Yi-ping. Analysis of factors affecting distribution of landslide thrust force for double-row antioslide piles[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011, 19(3): 359-363.
- [3] 阿比尔的, 郑颖人, 赖杰, 等. 牌坊坝滑坡双排桩+锚索支护性能研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2016, 12(4): 1033-1038.
- ABI Er-di, ZHENG Ying-ren, LAI Jie, et al. Study on supporting properties of double-row piles with anchor in slide of Paifang dam[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, 12(4): 1033-1038.
- [4] 申永江, 杨明, 项正良. 双排长短组合桩与常见双排桩的对比研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(增刊2): 96-100.
- SHEN Yong-jiang, YANG Ming, XIANG Zheng-liang. Comparative study on double-row piles with different lengths several common anti-slide piles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(S2): 96-100.
- [5] 郑刚, 李欣, 刘畅, 等. 考虑桩土相互作用的双排桩分析[J]. *建筑结构学报*, 2004, 25(1): 99-106.
- ZHENG Gang, LI Xin, LIU Chang, et al. Analysis of double row piles in consideration of the pile-soil interaction[J]. *Journal of Building Structures*, 2004, 25(1): 99-106.
- [6] 申永江, 吕庆, 尚岳全. 桩排距对双排抗滑桩内力的影响[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(7): 1033-1037.
- SHEN Yong-jiang, LV Qing, SHANG Yue-quan. Effect of pile row distance on internal stress of double-row anti-slide piles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(7): 1033-1037.
- [7] 李阳, 南亚林, 贺海超, 等. 黄土双排抗滑桩模型试验研究[J]. *安全与环境学报*, 2021, 48(1): 1009-1014.
- LI Yang, NAN Ya-lin, HE Hai-chao, et al. Research on model test of double row anti slide piles in loess[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 48(1): 1009-1014.
- [8] 杨波, 郑颖人, 赵尚毅, 等. 双排抗滑桩在三种典型滑坡的计算与受力规律分析[J]. *岩土力学*, 2010, 31(增刊1): 237-244.
- YANG Bo, ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, et al. Two-row anti-slide piles in three kinds of typical landslide computations and stress rule analysis[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(S1): 237-244.
- [9] 闫玉平, 肖世国. 双排抗滑桩加固滑坡的前桩后侧推力算法[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(4): 55-63.
- YAN Yu-ping, XIAO Shi-guo. A calculation method for thrust on the fore piles of double-row stabilizing piles used to reinforce landslides[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(4): 55-63.
- [10] 程文亮, 李波, 刘勇, 等. 预应力管桩制作过程中钢筋计埋设研究[J]. *内蒙古工业大学学报*, 2021, 41(1): 32-39.
- CHENG Wen-liang, LI Bo, LIU Yong, et al. The study on installing technique of vibrating string extensometer in the production process of prestressed pipe pile[J]. *Journal of Inner Mongolia University of Technology*, 2021, 41(1): 32-39.
- [11] 焦志斌, 刘永绣. 地下连续墙测试中弯矩的计算方法探讨[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(增刊): 1485-1488.
- JIAO Zhi-bin, LIU Yong-xiu. Calculation methods of bending moment in diaphragm wall tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(S): 1485-1488.