

文章编号: 1007-2993(2024)01-0001-06

湖中基坑-双排钢管桩围堰受力变形分析

庄戌哲¹ 袁聪聪² 何小辉³ 曾晨³ 石钰锋² 丁海滨² 孟凡市¹

(1. 中铁十四局集团第四工程有限公司, 山东济南 250002; 2. 华东交通大学江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室, 江西南昌 330013; 3. 南昌轨道交通集团有限公司, 江西南昌 330038)

【摘要】 为便于施工, 位于水域中的基坑工程通常需要施作围堰来保证施工场地干燥, 但目前对围堰变形的研究尚不完善。以南昌艾溪湖隧道工程为研究背景, 利用 Midas GTS NX 有限元软件, 研究围堰宽度、拉杆位置对双排钢管桩围堰变形规律的影响, 并通过将模拟计算结果与实测数据进行对比, 验证了模型的合理性。研究表明: 围堰宽度有一个合适的范围, 过小过大均会造成围堰变形过大。在本工程中, 围堰合理宽度范围为 3.5 ~ 4.5 m, 围堰宽度的改变对围堰内基坑开挖变形影响较小; 综合两侧钢管桩变形来看, 拉杆设置在围堰顶部 0.8 m 处时两侧钢管桩变形较小。

【关键词】 双排钢管桩围堰; 变形; HSS 模型; 基坑

【中图分类号】 U25

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.01.001

Analysis of Force and Deformation of a Double-row Steel Pipe Pile Cofferdam in a Foundation Pit in a Lake

Zhuang Xuzhe¹ Yuan Congcong² He Xiaohui³ Zeng Chen³ Shi Yufeng²
Ding Haibin² Meng Fanshi¹

(1. China Railway 14th Bureau Group 4th Engineering Co., Ltd., Jinan 250002, Shandong, China; 2. Jiangxi Key Laboratory of Infrastructure Safety Control in Geotechnical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 3. Nanchang Rail Transit Group Co., Ltd., Nanchang 330038, Jiangxi, China)

【Abstract】 Cofferdams need to be used to ensure the dry construction site for foundation pit located in water areas. However, the study on cofferdams deformation is still not perfect. Based on the research background of Aixihu Tunnel project in Nanchang, Midas GTS NX finite element software was used to study the influence of cofferdam width and tie bar position on the deformation law of double-row steel pipe pile cofferdam. The model is proved to be correct by comparing the simulation results with the actual measurements. The results show that the cofferdam width has an appropriate range, too small and too large will cause the cofferdam deformation is too large. In this project, the reasonable width of cofferdam should be 3.5 ~ 4.5 m. The change of cofferdam width has little influence on the excavation deformation of cofferdam foundation. Considering the deformation of both sides of the steel pipe pile, the deformation of the tie rod is small when it is set at 0.8 m on the top of the cofferdam.

【Key words】 double-row steel pipe pile cofferdam; deformation; HSS model; foundation pit

0 引言

围堰作为隔水挡土的临时设施, 在水域工程建设中应用广泛。目前常见围堰有土石围堰、钢围堰、混凝土围堰等。其中土石围堰施工简便, 可就地取材施工, 但是围堰占地面积大, 且表面没有处理时易被水流冲刷; 钢围堰占地面积小, 钢板桩可重复利用, 结构简单, 一般需与内支撑组合使用; 混凝土围堰结构

稳固, 防渗性能好, 但是造价较高, 一般用于永久或半永久设施。双排钢管桩围堰结合土石围堰与钢围堰而成, 主要结构有两侧钢管桩、堰芯填土、拉杆等, 具有防渗能力强、抗倾覆能力好、占地面积小等优点^[1]。

目前, 诸多学者对双排钢板桩围堰受力变形开展了相关研究。数值模拟方面, 吴留伟等^[2]、许亮^[3]对深厚软土地基下的双排钢板桩围堰的结构安全性

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51878276); 南昌轨道交通集团科研项目(2019HGKYB002)

作者简介: 庄戌哲, 男, 1973年生, 汉族, 山东济南人, 教授级高级工程师, 主要从事基坑工程研究与管理。E-mail: miaogaoo936@163.com

进行了分析。江杰等^[4]提出了双排钢板桩围堰体系冗余度的定义及公式,结合数值定量计算各参数冗余度来指导设计。杨熠^[5]分析了不同拉杆标高、围堰宽度对围堰稳定性影响,并结合冗余度探讨了围堰变形对各参数的敏感性。黄建^[6]采用罚函数接触算法模拟双排钢板桩围堰各结构接触面,分析了不同水位下的围堰受力变形特征。Hwang等^[7]对比了稳态、瞬态渗流下双排钢板桩围堰变形的数值计算结果与实测结果,发现前者与实测结果更相近。付猛等^[8]分析了不同降水速率时的钢板桩位移和拉杆轴力。Zhao等^[9]发现增加拉杆能有效减少双排板桩围堰弯矩。Gui等^[10]分析出洪峰来临时某双排钢板桩围堰发生失稳破坏的原因是拉杆焊接处强度较低。模型试验方面, Mohammod等^[11]建立了双排钢板桩离心试验模型,发现临水侧钢板桩弯矩较小,堰芯填土剪切变形导致了围堰破坏。陈香月等^[12]开展

单、双排钢板桩现场载荷试验,发现在水平荷载下两者整体变形趋势较为一致,仅深部变形有差异。

上述研究多为针对围堰本身的研究,未考虑围堰内基坑开挖的影响。为此,以艾溪湖隧道为工程背景,考虑基坑开挖对围堰受力变形的影响,建立数值计算模型对基坑开挖过程中双排钢管桩围堰的受力变形特性进行了分析。

1 工程概况及数值模型

1.1 工程概况

艾溪湖隧道工程位于南昌市青山湖区,该隧道呈东西向穿越艾溪湖,全长 2664 m(见图 1)。隧道穿越艾溪湖段采用围堰明挖法施工,即通过设置围堰隔水、隔土制造出干燥施工场地以便开挖,围堰总长约 761 m。经过方案比选,最终选择双排钢管桩夹心土围堰。

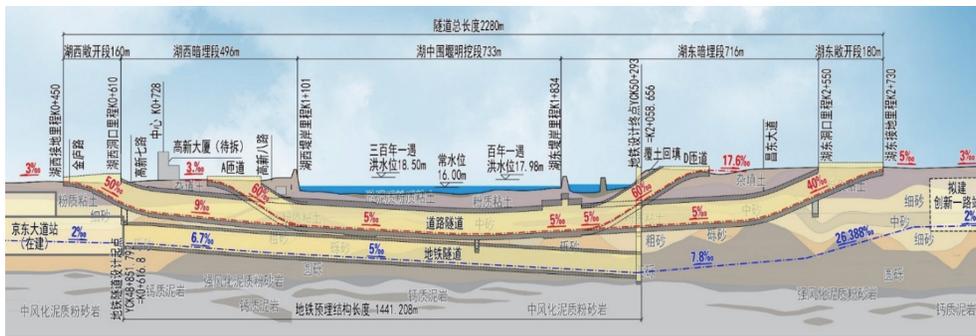


图 1 艾溪湖隧道

1.2 围护结构参数

艾溪湖设计水位取 20 年一遇水位 17.2 m,湖底标高 14.2 m,设计围堰填土宽度 4.5 m,围堰顶部标高 17.7 m,钢管桩长度为 9 m,插入深度 5.5 m,间距 1.32 m。临湖侧选用直径 630 mm、壁厚 10 mm 钢管,钢管之间使用锁扣相互连接,内侧布置防水土工布;临基坑侧选用直径 630 mm、壁厚 8 mm 钢管,利用双拼 25a 槽钢作为钢围檩连接。两排钢管桩之间使用直径 32 mm 的圆钢拉杆相互连接,间距为 1.32 m。(见图 2)

围堰内部基坑分为 2 级开挖(坑中坑),基坑外坑边缘与围堰最小间距为 20 m,外坑宽 30 m,深 10 m,内坑宽 12 m,深 7 m,共设 5 道内支撑,其中外坑 3 道,内坑 2 道。第 1、4 道支撑为混凝土支撑,截面尺寸为 0.8 m×1 m,横向间距 9 m;第 2、3、5 道支撑为钢支撑,为直径 609 mm、壁厚 16 mm 的钢管,横向间距 3 m。中间设一排格构柱。模型尺寸示意图见图 3。

1.3 建立计算模型

整个围堰区域呈长条状,此类长条状工程在进行数值模型计算时可简化为平面应变问题考虑,因此使用 Midas GTS NX 软件建立二维模型对围堰施工及基坑开挖进行模拟。模型尺寸取 40 m×80 m,土体使用平面应变单元模拟,上部软土本构选用 HSS 模型,下部风化岩选用莫尔库仑本构,钢管桩、拉杆、基坑围护结构等使用梁单元模拟,在临湖侧钢管桩、基坑外坑地连墙处使用属性助手设置界面单元防渗。根据类似工程经验,土层参数 E_{50}^{ref} 可取地勘报告中对应的弹性模量或压缩模量; $E_{50}^{ref} : E_{oed}^{ref} : E_{ur}^{ref} = 1 : 1 : 3$; $\gamma_{0.7}$ 取 0.0002;其余参数均依据地勘报告取值。支护结构计算参数见表 1,土层计算参数见表 2。

1.4 施工阶段模拟

施工阶段设置如下:

- (1) 初始渗流场分析;
- (2) 初始应力场分析;
- (3) 施作围堰,围堰临湖侧钢管桩施加止水帷幕;

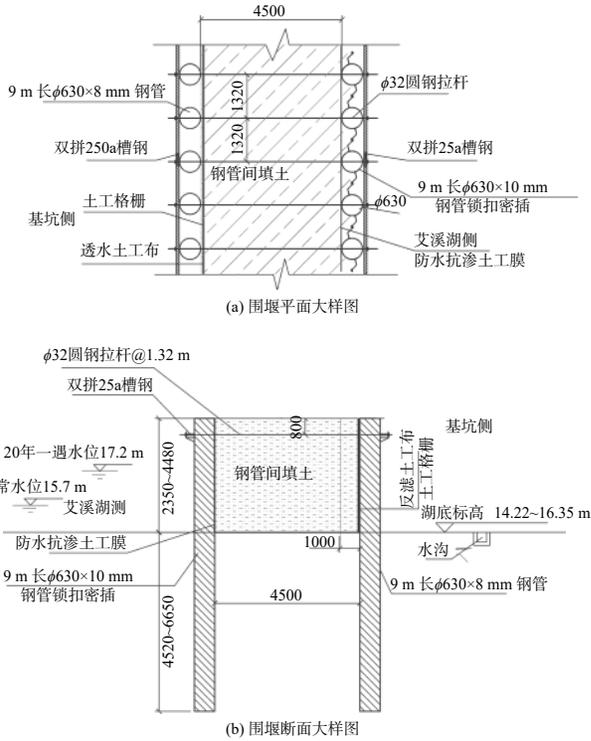


图2 围堰大样图(单位:mm)

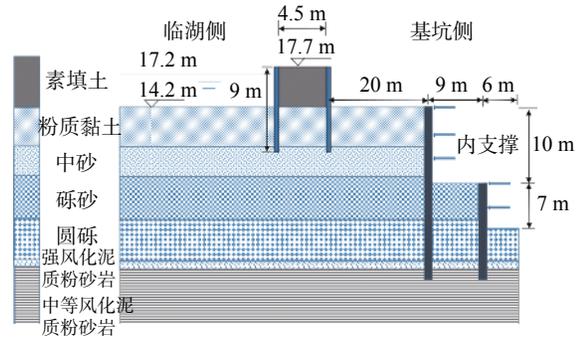


图3 模型尺寸示意图

表1 支护结构计算参数

支护结构	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	E/GPa	ν	截面形式/mm
临湖侧钢管桩	78.5	210	0.3	$\phi 630, t=10$
临基坑侧钢管桩	78.5	210	0.3	$\phi 630, t=8$
拉杆	78.5	210	0.3	$\phi 32$
地下连续墙	24.8	30	0.2	1000
格构柱	78.5	210	0.3	$A=76, t=12$
钢筋混凝土横撑	24.8	30	0.2	800×1000

表2 土层计算参数

地层	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	E/MPa	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$k/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	ν	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	G_0/MPa	$\gamma_{0.7}$	厚度/m
堰芯填土	16.9	10				5	0.3	10	12			
粉质黏土	19		10.5	10.5	31.5	0.05	0.32	49	22	47.25	0.0002	5
中砂	19.1		16	16	48	110	0.3	0	30	72	0.0002	5
砾砂	20		32	32	96	110	0.3	0	35	115.2	0.0002	5
圆砾	20		35	35	105	110	0.3	0	36	157.5	0.0002	5
强风化泥质粉砂岩	20.1	200				0.8	0.3	30	37			0.5
中等风化泥质粉砂岩	20.5	2890				0.1	0.29	200	37			19.5

(4) 围堰内侧降水至-3.5 m, 并在此施工阶段位移清零;

(5) 施作外坑的地下连续墙、内坑排桩及立柱, 外坑地下连续墙施加止水帷幕;

- (6) 施作第一道支撑并开挖至-3 m;
- (7) 降水至-6.5 m;
- (8) 施作第二道支撑并开挖至-6 m;
- (9) 降水至-10.5 m 处;
- (10) 施作第三道支撑并开挖至-10 m;
- (11) 施作外坑坑底混凝土底板内;
- (12) 降水至-13.5 m;
- (13) 施作第四道支撑并开挖至-13 m;
- (14) 降水至-17.5 m;
- (15) 施作第五道支撑并开挖至-17m。

2 结果分析

2.1 计算值与实测值对比

图4为围堰填土宽度为4.5 m时计算结果与艾溪湖隧道K1+480处的实际监测结果对比曲线, 从图中可知, 模拟结果与实际变形十分接近, 且变形趋势相同。围堰临湖侧侧钢管桩计算结果显示, 随着开挖深度不断增加, 围堰逐渐产生朝向基坑侧的水平变形, 最大为4.51 mm, 出现在围堰顶部; 实测变形最大值为4.94 mm, 同样是出现在围堰顶部。模拟计算结果中的基坑地连墙水平位移呈现典型的“弓”字形, 实测与数值模拟均表明最大水平位移出现在-11 m处, 实测数据与数值计算结果中水平位移最大值分别为8.91 mm、8.33 mm, 相差6.5%。模拟计算结果较好地反映了工程实际的变形, 验证了本次数值模型的合理性。

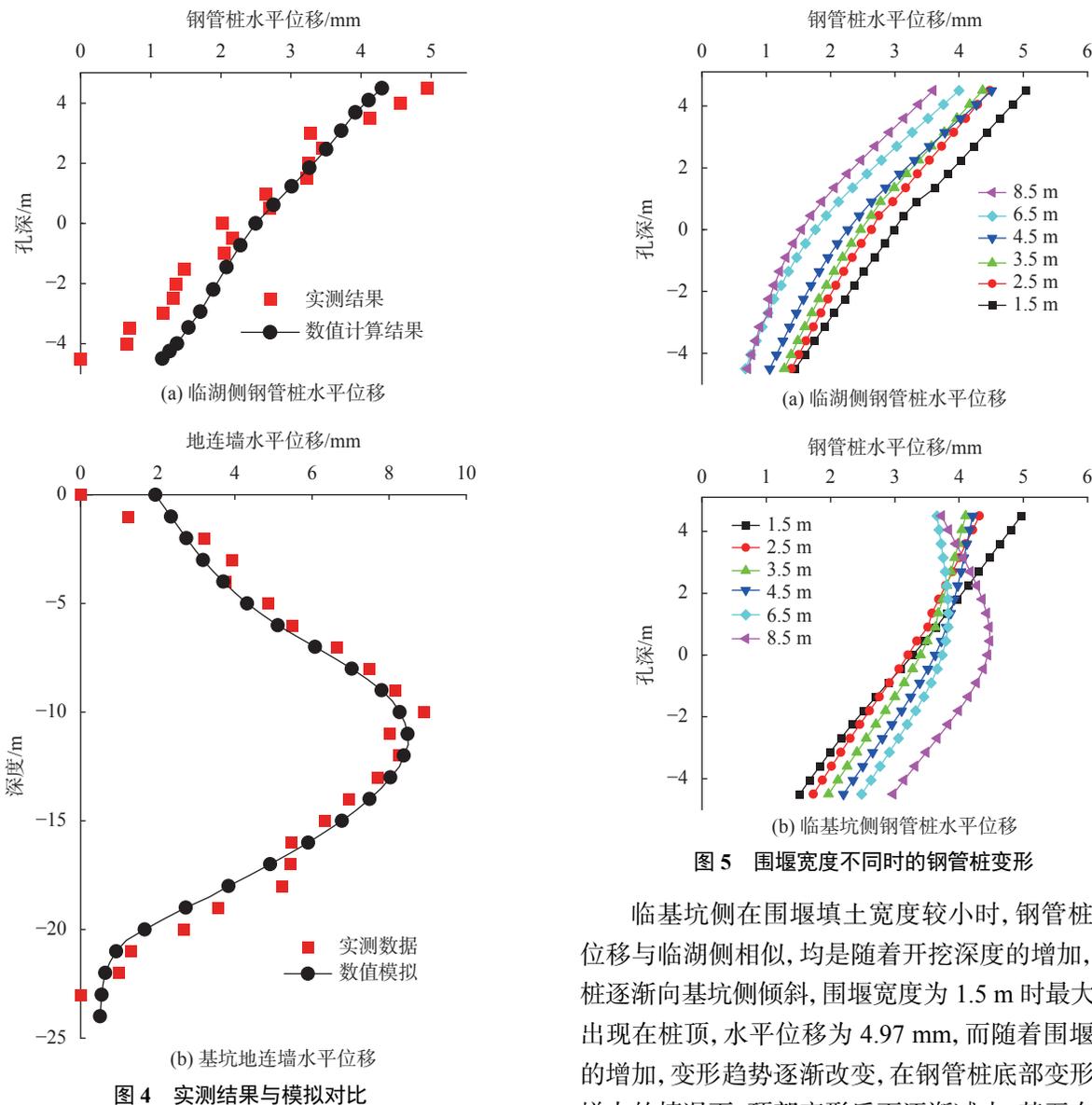


图4 实测结果与模拟对比

2.2 围堰宽度对双排钢管桩水平位移的影响

通过分析不同围堰宽度情况下围堰及基坑的变形受力情况,研究双排钢管桩夹心土围堰的受力机理。分别设置围堰宽度为 1.5 m、2.5 m、3.5 m、4.5 m、6.5 m 和 8.5 m 六种工况的有限元数值模型,研究不同围堰宽度时基坑开挖对围堰及基坑变形、受力的影响。

当双排钢管桩间填土宽度改变时,钢管桩的变形及受力也会随着改变,可以此研究双排钢管桩夹心土围堰受力机理。图5为围堰钢管桩在不同围堰宽度时基坑开挖引起钢管桩围堰的水平位移。可见随着围堰宽度的增加,临湖侧钢管桩的水平位移不断减小,且越在靠近顶部,变形减小的速率越大,最大水平位移从宽度为 1.5 m 时的 5.03 mm 减小到宽度为 8.5 m 时的 3.60 mm,减小了 28.43%。

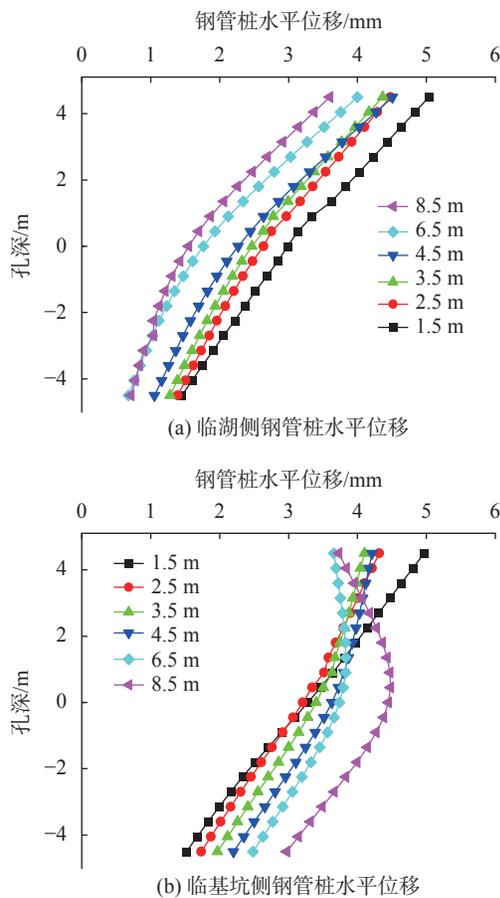


图5 围堰宽度不同时的钢管桩变形

临基坑侧在围堰填土宽度较小时,钢管桩水平位移与临湖侧相似,均是随着开挖深度的增加,钢管桩逐渐向基坑侧倾斜,围堰宽度为 1.5 m 时最大变形出现在桩顶,水平位移为 4.97 mm,而随着围堰宽度的增加,变形趋势逐渐改变,在钢管桩底部变形逐渐增大的情况下,顶部变形反而逐渐减小,甚至在围堰宽度 6.5 m、8.5 m 时呈现出类似抛物线型的变形趋势。当围堰宽度较小时,围堰间的填土为有限土体,此时,围堰内的土体作用到钢管桩上的土压力较小,双排钢管桩由于拉杆和腰梁的作用而相当于一个整体的围护结构,前后排钢管桩协同变形。而随着钢管桩排间距的增加,作用在前后排钢围堰上的土压力增大,由此导致临湖侧钢管桩的变形随围堰宽度的增加而呈现一定程度减小,临坑侧钢管桩的变形随围堰宽度的增加而呈现一定程度的增加。围堰宽度为 6.5 m 和 8.5 m 时,临坑侧钢管桩水平位移呈现抛物线型是由于顶部拉杆抑制钢管桩的变形,而土压力又增加了钢管桩的变形,由此导致钢管桩中间段的位移增加。

2.3 围堰宽度对基坑变形的影响

围堰的主要作用就是保障围堰内部工程的顺利进行,因此有必要分析不同围堰宽度下,基坑开挖时

围护结构的变形。图6为基坑地下连续墙水平位移,可以发现,不同围堰宽度情况下地下连续墙水平位移变化不大,变形曲线近乎重合。图7为基坑外地表沉降曲线,可以发现,围堰宽度从1.5 m增加到8.5 m的时,地表沉降最大值从5.27 mm减小至4.73 mm,但是在靠近围堰处沉降有小幅度的增加但影响范围在2 m以内,可以认为对基坑变形影响较小。原因在于,虽然围堰宽度逐渐增加,但围堰与基坑距离仍较远(≥ 20 m),因此围堰宽度对基坑围护结构的变形影响较小。

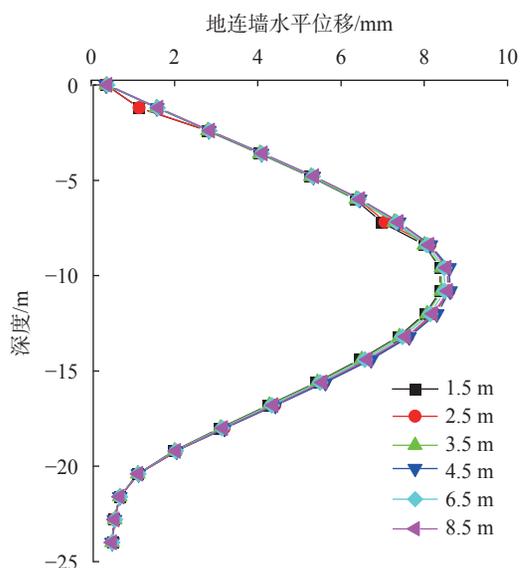


图6 地下连续墙水平位移

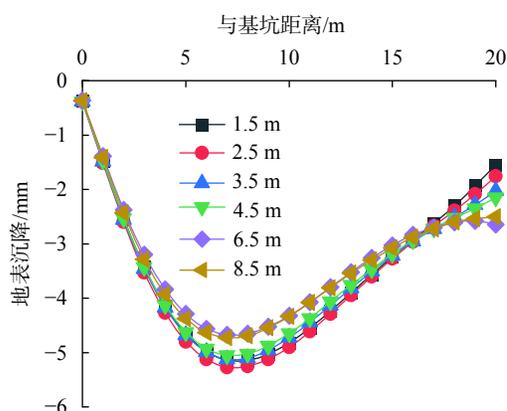


图7 坑边地表沉降

经对各种围堰宽度工况下的围堰钢管桩和支护结构的变形特性综合分析,结果表明,当围堰宽度为3.5~4.5 m时,两排钢管桩的变形都较小,且此区间基坑侧钢管桩的变形比较均匀,未出现抛物线形变形。

2.4 拉杆高度对围堰的影响

在两排钢管桩之间设置拉杆是为了连接两排钢管桩,抵抗围堰填土的土压力,协调两侧钢管桩受力,

使其变形不至于过大。由于临湖侧钢管桩同时承受湖水侧压力和围堰填土侧压力作用(作用方向相反),而临坑侧钢管桩只承受围堰填土侧压力,二者沿深度方向上的荷载分布不同步,因此,如何确定拉杆设置位置以协调两侧钢管桩受力,使之不产生过大变形,需要进行综合分析。分别建立拉杆高度与围堰顶部距离为0 m、0.4 m、0.8 m、1.2 m、2.0 m的五个模型,并与不设置拉杆的变形情况进行对比,以此对拉杆对围堰变形的影响进行研究。图8为对应不同拉杆位置的拉杆轴力曲线,图9为对应不同拉杆位置的钢管桩变形曲线。从图中可知,随着拉杆位置的下降,拉杆轴力在不断增大,从5.89 kN增加至18.32 kN。但是由于拉杆设置位置不同,拉杆对钢管桩变形的影响并没有线性增加,对于临湖侧钢管桩,在没有拉杆时上部变形较小,随着拉杆向下移动,钢管桩上部变形逐渐增大,下部位移逐渐减小;对于临基坑侧钢管桩,钢管桩上部在拉杆位于围堰顶部以下0.8 m处变形最小,下部在没有拉杆时变形最小,在无拉杆时钢管桩顶部变形最大,约为4.28 mm。

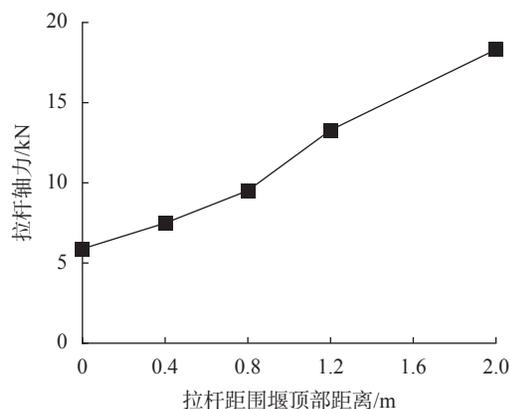


图8 拉杆位置不同的轴力

综合两侧钢管桩变形来看,将拉杆设置在围堰顶部以下0.8 m处时,两侧钢管桩的变形均较小。

3 结论

通过对依托工程建模分析,比较不同围堰宽度及拉杆位置下的围堰钢管桩和基坑围护结构变形,得到以下结论:

(1)在本工程中,当堰芯填土宽度为3.5~4.5 m时围堰两侧钢管桩的变形相对较小,相应地围堰宽高比约为1~1.3。

(2)在保证围堰安全的情况下,在1.5~8.5 m的范围内改变围堰宽度对基坑围护结构的变形影响较小,水平位移最大值变化量在0.2 mm以内。

(3)围堰宽度增加会导致两侧钢管桩产生外凸于围堰的变形,且在上部拉杆作用下,临基坑侧钢管桩

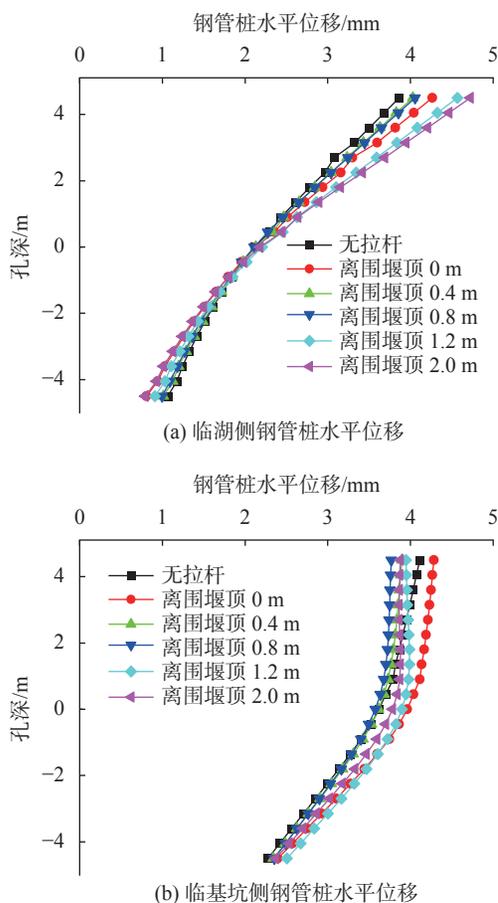


图9 拉杆位置不同的钢管桩变形

水平位移会呈现抛物线型。

(4)设置拉杆能协调围堰两侧钢管桩的受力与变形,对于本工程,当拉杆位于围堰顶部以下0.8m处时,围堰两侧钢管桩总体变形较小。

参 考 文 献

[1] 许明博. 水中双排钢管桩夹心土围堰施工技术[J]. 建筑工程技术与设计, 2019, (1): 1209.

- [2] 吴留伟, 郑国兵, 吴 蕾, 等. 双排钢板桩围堰在超深厚软土地基中的应用[J]. 水运工程, 2018, (3): 143-148.
- [3] 许 亮. 深厚淤泥层地质条件下双排钢板桩围堰有限元分析[J]. 水利规划与设计, 2019, (12): 131-134.
- [4] 江 杰, 顾倩燕, 胡 何, 等. 双排钢板桩围堰的冗余度分析[J]. 岩土力学, 2015, (S1): 518-522.
- [5] 杨 熠. 双排钢板桩围堰结构受力变形及稳定性分析[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
- [6] 黄 建. 钢板桩围堰体系静、动受力变形特性数值分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [7] HWANG W K, KIM H E, CHOI H, et al. Proper regulation of the cutoff system in offshore landfill built on clay ground with double walls[J]. Journal of the Korean Geotechnical Society, 2019, 35(8): 5-15.
- [8] 付 猛, 于 洋, 丁德亮, 等. 东湖通道工程钢板桩围堰抽水过程数值模拟分析[J]. 施工技术, 2014, 43(S2): 197-200.
- [9] ZHAO T C, DING W Q, WEI L X, et al. The behavior analysis of a cofferdam constructed by double sheet pile wall above muck [C]// Geoshanghai International Conference Springer, Singapore, 2018.
- [10] GUI M W, HAN K K. An investigation on a failed double-wall cofferdam during construction[J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(1): 421-432.
- [11] MOHAMMOD R A K, JIRO T, HIROKI F, et al. Behavior of double sheet pile wall cofferdam on sand observed in centrifuge tests[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2001, 1(4): 1-16.
- [12] 陈香月, 徐光黎, 田华通, 等. 砂卵石地层中单、双排钢板桩围堰现场水平载荷试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(1): 91-96, 103.

收稿日期: 2022-06-18