

文章编号:1005-0523(2022)02-0045-08



## 桩距对双排钢管桩围堰的受力变形影响分析

袁聪聪<sup>1</sup>, 詹刚毅<sup>2</sup>, 侯世磊<sup>3</sup>, 江平<sup>4</sup>, 章立辰<sup>4</sup>, 黄展军<sup>5</sup>

(1. 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; 2. 中铁上海设计院集团有限公司, 上海 200070; 3. 中铁十四局集团第四工程有限公司, 江西 南昌 330038; 4. 江西省港航建设投资集团港航运输有限公司, 江西 南昌 330008; 5. 南昌轨道交通集团有限公司, 江西 南昌 330038)

**摘要:** 在水下工程中使用双排钢管桩围堰的情况逐渐增多, 但是关于围堰各项参数对钢管桩受力变形影响分析的研究较少。建立 Plaxis/3D 有限元模型研究桩距对钢管桩受力变形影响, 将计算结果与实测结果进行对比, 验证有限元模型的合理性。通过研究桩间距对钢管桩围堰受力变形的影响, 得出结论: 随着双排桩桩距的同步增加, 钢管桩内力变形会随之增加, 增速先提高后减缓; 内外侧钢管桩分别增加同样幅度的桩距, 增加内侧桩距对围堰变形影响更大; 在桩数一定时, 增加外侧排桩桩距, 比均布钢管桩能更有效控制变形。

**关键词:** 双排钢管桩围堰; Plaxis/3D; 桩距; 受力变形

中图分类号: U655

文献标志码: A

本文引用格式: 袁聪聪, 詹刚毅, 侯世磊, 等. 桩距对双排钢管桩围堰的受力变形影响分析[J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(2): 45-52.

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.20220314.011

## Influence of Pile Distance on Force Deformation of Double-Row Steel Pipe Pile Cofferdam

Yuan Congcong<sup>1</sup>, Zhan Gangyi<sup>2</sup>, Hou Shilei<sup>3</sup>, Jiang Ping<sup>4</sup>, Zhang Lichen<sup>4</sup>, Huang Zhanjun<sup>5</sup>

(1. Jiangxi Key Laboratory of Infrastructure Safety Control in Geotechnical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. China Railway Shanghai Design Institute Group Co., Ltd., Shanghai 200070, China; 3. China Railway 14th Bureau Group 4th Engineering Co., Ltd., Nanchang 330038, China; 4. Jiangxi Port and Shipping Construction Investment Group Port and Shipping Transportation Co., Ltd., Nanchang 330038, China; 5. Nanchang Rail Transit Group Co., Ltd., Nanchang 330038, China)

**Abstract:** The use of double-row steel pipe pile cofferdams in subsea engineering is gradually increasing, but there is less analysis on the influence of cofferdam parameters on the deformation and force of steel pipe piles. The calculated results are compared with the measured results to verify the reasonableness of the finite element model. By studying the influence of pile distance on the force deformation of steel pipe pile cofferdam, it is concluded that with the simultaneous increase of double-row pile distance, the internal force deformation of steel pipe pile increases, and then slow down. The pile distance increases by the same magnitude, and the influence of the outer pile distance on the cofferdam is greater than the increase of the inner pile distance. When the number of piles is certain, increasing the outer row pile distance can control the deformation more effectively than evenly distributed steel pipe piles. This paper may provide reference for the design and construction of similar projects.

收稿日期: 2021-06-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51768020); 江西省交通运输厅重点工程科技项目(2019C0010, 2019C0011)

**Key words:** steel pipe pile cofferdam; Plaxis/3D finite element; pile distance; force deformation

**Citation format:** YUAN C C, ZHAN G Y, HOU S L, et al. Influence of pile distance on force deformation of double-row steel pipe pile cofferdam[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(2): 45-52.

围堰在水域范围内的工程施工中发挥着挡水挡土的作用,为工程施工提供干燥开阔的施工作业面。围堰形式多种多样,各具优缺点,浅水区域多为土石围堰,其施工方便,造价较低<sup>[1]</sup>;桥墩施工多为钢围堰,其占地面积小,材料可重复利用,工艺成熟<sup>[2]</sup>。近年来逐渐出现一种围堰模式——双排钢管桩围堰<sup>[3-6]</sup>,具体结构为两侧插打钢管桩,形成密闭结构,再填充土体,提高稳定性。这种模式结合土围堰与钢围堰的优点,利用土体与钢管桩共同抵抗水土压力,占地面积小且较传统钢围堰稳定性更高。

双排钢管桩围堰利用钢管桩及填土共同抵抗水土压力,受力机理较为复杂,国内外学者对其进行了许多研究。张玉成等<sup>[7]</sup>综述了双排桩围堰的优缺点及计算方法,认为目前的双排桩围堰的设计计算方法对双排桩相互作用及空间效应考虑较少;Xue等<sup>[8]</sup>研究桩墙框架结构的受力特性,认为桩距由 $0.05d$ 变为 $0.2d$ 不会导致结构稳定性大幅降低;Hwang等<sup>[9]</sup>将双排板桩墙进行稳态渗流分析结果、瞬态渗流分析结果与实际对比,认为稳态渗流更符合实际情况;Khan等<sup>[10]</sup>通过离心试验研究了洪水发生时的双排板桩围堰稳定性;彭常青等<sup>[11]</sup>通过对钢管桩受力进行分析,认为拉杆承受了绝大多数的土压力,应当重视拉杆的合理布置;汪洋等<sup>[12]</sup>通过对钢管桩+夹心土围堰的设计计算,指出外侧钢管刚度可小于内侧钢管桩,以减少工程费用;Zhao等<sup>[13]</sup>指出钢管桩插入深度为结构重要参数,当插入深度过小时,板桩结构相当于简支梁;江杰等<sup>[14]</sup>引入冗余度理论,使用Plaxis有限元软件分析不同构件对围堰的影响;Cui等<sup>[15]</sup>利用有限元软件计算了不同水位时的双排钢板桩围堰受力变形特征;侯永茂等<sup>[16]</sup>通过有限元分析指出围堰内侧进行土体加固能有效减小围堰变形。

调研文献发现,目前国内外对双排钢管桩围堰的研究还较少,且未见钢管桩的间距对围堰变形受力影响的相关报道,本文以南昌市艾溪湖隧道围堰

工程为依托,分析双排钢管桩围堰中桩距的影响,为类似工程提供参考。

## 1 工程案例

### 1.1 工程概况

南昌市艾溪湖公轨共建隧道为江西省首条双层合建隧道,上层为公路隧道,连接艾溪湖东西两侧路网,下层为地铁隧道,为南昌轨道交通3号线延伸段,隧道穿湖而过,连接艾溪湖东西两岸。湖中段选用明挖法施工,施作临时围堰,围堰形式为双排钢管桩+夹心土围堰。围堰及基坑工程呈长条状,总长约761 m,宽约80 m。图1为艾溪湖隧道工程现场实拍图。



图1 艾溪湖工程:围堰

Fig.1 Aixihu lake project:cofferdam

### 1.2 围堰概况

围堰设计水位取艾溪湖二十年一遇水位17.2 m,湖底标高14.2 m;围堰填土宽度4.5 m,外侧设置防水土工布;围堰顶部标高18.7 m,钢管桩长9 m,插入深度4.5 m。外侧选用直径630 mm壁厚10 mm钢管,钢管之间使用锁扣和双拼25a槽钢相互连接;内侧选用直径630 mm壁厚8 mm钢管,利用双拼25a槽钢作为钢围檩连接。两排钢管桩之间一一对应,并使用直径32 mm的圆钢拉杆相互连接,钢管桩间距为1.32 m。围堰内侧距基坑地下连续墙20 m。见图2。

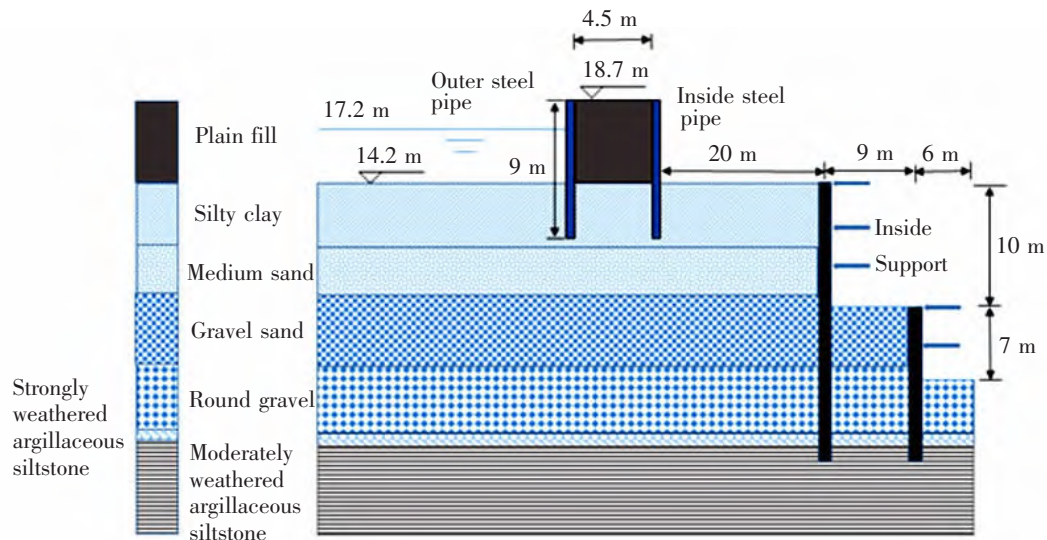


图2 围堰-基坑示意图

Fig.2 Schematic diagram of cofferdam-pit

### 1.3 基坑概况

该工程为公轨共建隧道,2条隧道断面尺寸不同,围堰内部基坑为坑中坑形式。基坑外坑宽30 m深10 m,内坑宽12 m深7 m,内坑位于基坑中部,坑底距地面17 m。外坑为内支撑+地连墙支护体系,内坑为内支撑+钻孔灌注桩支护体系,内坑不设置止水措施。基坑共设2道围护结构,5道内支撑;外坑围护结构为地连墙,厚1 m、深24 m,内坑围护结构为排桩,桩径0.8 m,桩间距1.3 m,桩长14 m;内支撑距地面深度分别为0,3,6,10,13 m。其中外坑3道,内坑两道,第1、第4道支撑为混凝土支撑,分别为外坑与内坑顶部支撑,尺寸均为0.8 m×1 m,间距9 m;第2、第3、第5道支撑为钢支撑,为直径609 mm壁厚16 mm的钢管,间距3 m。

### 1.4 施工阶段模拟

围堰和基坑的施工通过Plaxis的激活/停用来实现,模型施工步骤尽量做到和实际工程一致,以尽可能准确计算各单元的内力变形情况,具体施工阶段如下(下文以围堰内地表为0 m):

- Step1 初始渗流场与初始应力场分析;
- Step2 激活围堰;
- Step3 围堰内部降水至0 m;
- Step4 激活外坑的地下连续墙内坑排桩;
- Step5 降水至-3.5 m;
- Step6 激活第1道混凝土支撑并开挖至-3 m;

- Step7 降水至-6.5 m;
- Step8 激活第2道钢支撑并开挖至-6 m;
- Step9 降水至-10.5 m处;
- Step10 激活第3道钢支撑并开挖至-10 m;
- Step11 激活外坑坑底混凝土底板;
- Step12 降水至-13.5 m;
- Step13 激活第4道支撑并开挖至-13 m;
- Step14 降水至-17.5 m;
- Step15 激活第5道支撑并开挖至-17 m。

## 2 有限元模型

### 2.1 模型尺寸

根据工程情况,建立有限元模型,因该工程为长条状,可选取典型段进行计算。结合工程特点及本课题组之前的研究成果<sup>[7]</sup>,为节省计算成本根据对称原理,取一半进行建模。考虑到边界效应,围堰外侧土体保留40 m宽,模型深度取基坑坑底以下23 m深,综上所述,模型大小取40 m(高)×60 m(长)×80 m(宽)。

### 2.2 模型参数选取

围护结构均使用结构单元模拟,排桩通过抗弯刚度等效公式<sup>[8]</sup>等效为板单元,内支撑使用固定端锚杆模拟,混凝土与钢结构均采用弹性本构,围护结构计算参数见表1。

HSS(小应变硬化土)土体本构模型<sup>[9]</sup>由摩尔库伦本构演变而来,该土体本构能够较好的描述土体

表1 支护结构计算参数  
Tab.1 Sample parameters list

Support structure	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	$E/(\text{kN}\cdot\text{m}^3)$	$EA/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$\nu$
Outer steel pipe	78.5	$1.97\times 10^5$	-	0.25
Inside steel pipe	78.5	$1.59\times 10^5$	-	0.25
Row piles	24.8	$1.28\times 10^6$	-	0.20
Underground diaphragm wall	24.8	$0.93\times 10^6$	-	0.20
Concrete brace	24.8	-	$24\times 10^6$	0.20
Steel shotcrete	78.5	-	$6.26\times 10^6$	0.25

表2 土层计算参数  
Tab.2 Calculation parameters of soil layer

Stratum	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	$E/\text{Mpa}$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$K/(\text{m}/\text{d})$	$\nu$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$	$G_0^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$\gamma_{0.7}$	Thick-ness/m
Plain fill	16.9	10	-	-	-	5	0.3	10	12	-	-	3.5
Silty clay	19	-	10.5	10.5	31.5	0.05	0.32	49	22	47.25	$2e^{-4}$	5
Medium sand	19.1	-	16	16	48	110	0.3	0	30	72	$2e^{-4}$	5.2
Gravel sand	20	-	32	32	96	110	0.3	0	35	144	$2e^{-4}$	4.8
Round gravel	20	-	35	35	105	110	0.3	0	36	157.5	$2e^{-4}$	5
Strongly weathered argillaceous siltstone	20.1	200	-	-	-	0.8	0.3	30	37	-	-	0.5
Moderately weathered argillaceous siltstone	20.5	2 890	-	-	-	0.1	0.29	200	37	-	-	19.5

### 3 结果分析

#### 3.1 模型可靠性验证

在工程施工时,需对其进行监测,防止变形过大出现坍塌等工程事故。湖中段基坑每隔 20 m 设置一处地连墙深层水平位移监测点,围堰每隔 50 m 设置一处深层水平位移监测点。

有限元模型参数取自艾溪湖湖中段,因此将数值计算结果与艾溪湖工程湖中段 K1+480 处断面监测数据对比,因围堰监测自围堰降水后基坑开挖前开始,因此将计算结果中围堰钢管桩水平位移减去基坑开挖之前的变形,再与监测数据进行对比。

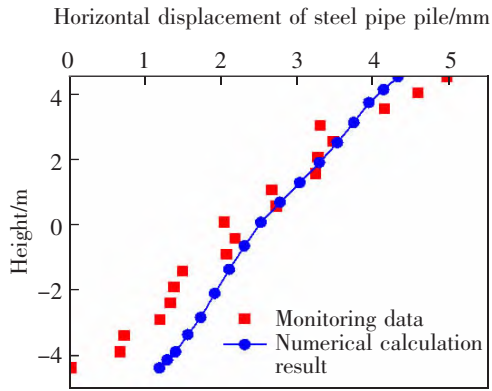
从图 3 可知,与实测结果相比,数值计算围堰

在卸载回弹情况下的应力应变关系,因此在基坑开挖模拟中得到广泛应用。土层参数依据室内试验结果及经验取值。周恩平<sup>[20]</sup>研究显示  $E_s:E_{50}^{\text{ref}}:E_{\text{oed}}^{\text{ref}}:E_{\text{ur}}^{\text{ref}}=1:1:1:3$ ,  $G_0^{\text{ref}}$  为参考初始围压下的初始剪切模量,一般取  $(1\sim 2)E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ , 本文取  $1.5E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ ,  $\gamma_{0.7}$  为 70% 初始剪切模量所对应的剪应变,按 Plaxis 参考手册<sup>[21]</sup>建议取  $2\times 10^{-4}$ 。具体参数见表 2。

变形在钢管桩底部偏大,在钢管桩顶部偏小,结果偏差在 0.5 mm 以内;地下连续墙水平位移呈现经典的抛物线型变形,实测与数值计算结果中最大水平位移均出现在 -11 m 处,数值计算结果与实测略有偏差,监测与数值计算变形最大值分别为 7.05, 8.33 mm, 相差 15.4%。从数值计算结果与监测数据对比中可以看出,数值计算结果与监测数据相差不大,变形趋势相同,本数值模型可反映工程实际情况。

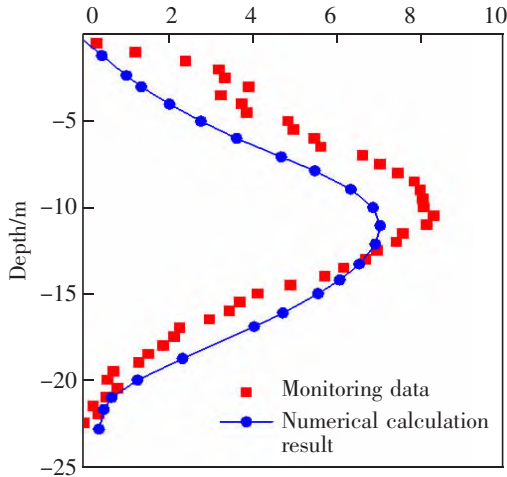
#### 3.2 双排桩桩距对双排钢管桩受力变形的影响

以该有限元模型为基础,靠近基坑侧钢管桩为内侧(如图 3),建立双排桩桩距不同的工况进行计算,分析不同桩距对钢管桩变形受力影响。具体桩距见表 3。



(a) Deformation of lateral steel pipe pile

Horizontal displacement of underground diaphragm wall/mm



(b) Deformation of foundation pitwall

图 3 实测结果与模拟对比

Fig.3 Comparison of measured and simulated results

表 3 各工况桩距

Tab.3 Pile distance for each working condition

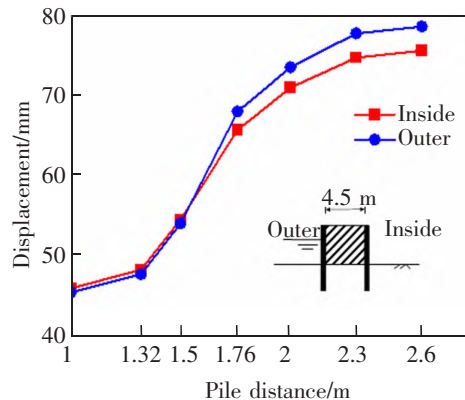
Working conditions	Outer pile distance/m	Inside pile distance/m
1	1.00	1.00
2	1.32	1.32
3	1.50	1.50
4	1.76	1.76
5	2.00	2.00
6	2.30	2.30
7	2.64	2.64
8	1.32	2.64
9	2.64	1.32

以向内侧为正方向,将工况 1~工况 7 的钢管桩在基坑开挖完成后的最终变形绘制成图 4。由图 4 可知,在双排桩桩距增加时,钢管桩底部水平位移无明显变化,钢管桩上部水平位移随桩距增加而增大,水平位移最大点出现在桩顶。表 3 为各工况桩顶水平位移。钢管桩水平随着桩距增大而增大,且变化速率与桩距大小有关,呈现先增大后减小的趋势,外侧钢管桩变形增加速率较内侧要大。这是因为在本工程中,桩距小于 1.32 m 时,土拱效应较为明显,增加桩距不会导致变形大幅增长;在桩距为 1.32~2.0 m 时,土拱效应减弱,导致钢管桩变形增长速率增大;而在桩距大于 2.0 m 时,围堰变形较大,土体逐渐由静止土压力变为被动土压力,填土抵抗水压力作用增加,钢管桩桩距增加导致刚度减小,但是由于填土抵抗水压力的能力增强,围堰整体刚度减小幅度不大,钢管桩变形增长速率较小。

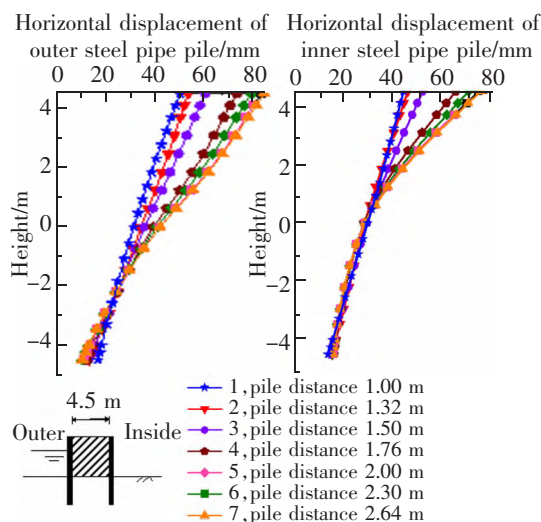
表 4 桩距不同时的钢管桩桩顶水平位移

Tab.4 Horizontal displacement of steel pipe pile tops with different pile distance

Working condition	Pile distance /m	Horizontal displacement of outer steel pipe pile top /mm	Horizontal displacement of inner steel pipe pile top /mm
1	1.0	45.28	45.74
2	1.32	47.44	48.02
3	1.5	53.57	54.05
4	1.76	67.11	64.87
5	2.0	72.43	69.96
6	2.3	76.53	73.59
7	2.64	77.36	74.46



(a) Horizontal displacement of steel pipe top



(b) Horizontal displacement of steel pipe pile

图4 双排桩桩距不同时的钢管桩水平位移

Fig.4 Horizontal displacement of steel pipe piles with different pile distances of double-row piles

图5为工况1~工况7的钢管桩在基坑开挖完成时的弯矩。由图5可知,内侧钢管桩弯矩与传统悬臂式基坑围护结构的弯矩相似,在地面附近会出现反弯点;外侧钢管桩弯矩随着桩间距的增加不断增加,弯矩大小也在增长,和变形量增长规律相似;内侧钢管桩上部弯矩随着桩距增大逐渐减小,下部结构弯矩随着桩距增加而增大。

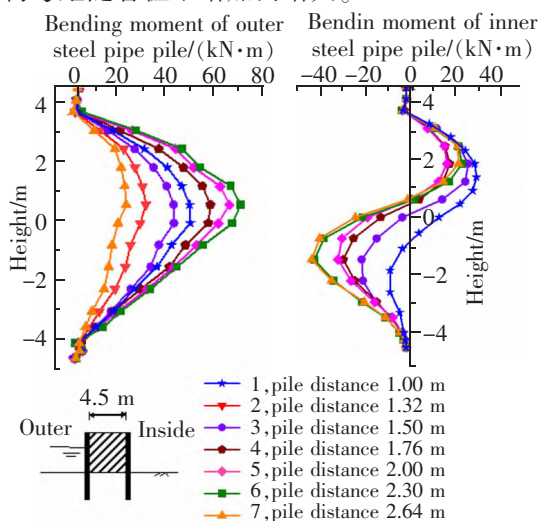


图5 双排桩桩距不同时的钢管桩弯矩

Fig.5 Bending moment of steel pipe piles with different pile distances of double-row piles

### 3.3 单排桩桩距对双排钢管桩受力变形的影响

改变单排桩桩距,将单排桩桩距由1.32 m增加至2.64 m,分析单侧桩桩距对双排钢管围堰变形受

力的影响,同时与双排桩桩距为1.76 m的工况进行对比,分析在桩数相同的情况下不同钢管桩分配情况的围护效果。

图6为不同工况情况下的钢管桩水平位移。由图6可知,随着桩距增加,钢管桩变形均出现不同程度的增长,各工况外侧钢管桩变形最大值分别为47.44,67.11,70.10,57.91 mm,与工况1相比,工况8,工况9水平位移最大值分别增加了47.77%,22.07%;与桩数量相同的工况3相比,工况8变形最大值要偏大4.46%,而工况9变形要小14.71%。显然,在控制总桩数的情况下,适当增大外侧桩距并且减小内侧桩距比两侧相同桩数更能有效控制围堰变形。其原因有两个:一是两排钢管桩荷载模式不同,内侧钢管桩受力与悬臂桩类似,仅受到填土的土压力,外侧钢管桩同时受到两侧的填土的土压力与湖水的水压力,使得外侧钢管桩所受压力要小于内侧钢管桩;二是由于围堰会将一部分水压力传导至围堰底部,在增加外侧钢管桩桩距后,导致围堰所受水压力增大,传导至围堰底部的压力也随之增大,由钢管桩承受的压力就随之减小,因此钢管桩变形增长较小。

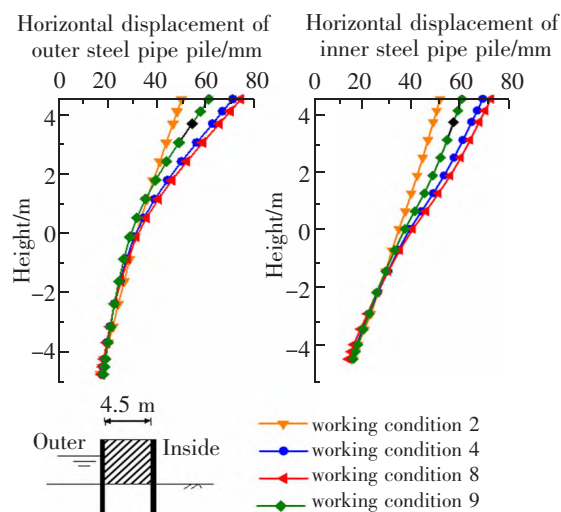


图6 不同工况时的钢管桩水平位移

Fig.6 Horizontal displacement of steel pipe piles under different working conditions

## 4 结论

以艾溪湖工程为依托,建立数值模型,根据现场监测结果对模型参数进行对比,获得与本工程相符的系列参数。以此进一步研究钢管桩桩距双排钢管桩围堰的影响,得出以下结论。

1) 内外侧桩距同步增大会导致钢管桩水平位移、弯矩增加,随着桩距增幅提高,钢管桩变形增速先提高后减缓。

2) 内外侧桩距单独增大,对围堰影响不同,相同增长幅度下,外侧桩距变化对围堰影响明显大于内侧桩距变化。本工程算例结果为:外侧桩距由1.32 m增长为2.64 m时,围堰变形量增加47.77%;而内侧桩距同等变化时,围堰变形量增加22.07%。

3) 通过优化管桩布置,在保证围堰的承载能力同时,可以减少管桩用量。本工程中,内侧桩距不变,外侧桩距适当增大,其围堰变形增长较小。

### 参考文献:

- [1] 羊炜. 软土地基上模袋围堰稳定分析方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.  
YANG W. Research on the stability of the cofferdams with geotextile bags filled with sand on soft soil foundation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [2] 胡梦妮. 钢板桩围堰施工优化设计研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2015.  
HU M N. The research on optimizing design of steel sheer pile cofferdam construction[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2015.
- [3] 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路桥工程, 2019(1): 1209.  
XU M B. Construction technology of double row steel pipe pile sandwich soil cofferdam in water[J]. Construction engineering technology and design road and bridge engineering, 2019(1): 1209.
- [4] 鲍优绒, 钱超. 双排钢管桩围堰在沿海软土地基施工中的应用[J]. 水利建设与管理, 2016, 36(9): 21-23.  
BAO Y R, QIAN C. Application of double-row steel pipe pile cofferdam in coastal soft soil foundation construction[J]. Water Conservancy Construction and Management, 2016, 36(9): 21-23.
- [5] 李芸, 袁海东. 双排钢管桩围堰施工设计——以太湖西山岛出入通道1号桥为例[J]. 工程建设与设计, 2017, 2020(3): 151-154.  
LI Y, YUAN H D. Construction design of double row steel pipe pile cofferdam——taking Taihu Lake Xishan Island No. 1 bridge as an example[J]. Construction & Design for Engineering, 2017, 2020(3): 151-154.
- [6] 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.
- [7] 张玉成, 杨光华, 姜燕, 等. 软土地区双排钢板桩围堰支护结构的应用及探讨[J]. 岩土工程学报, 2012(S1): 659-665.  
ZHANG Y C, YANG G H, JANG Y, et al. Application of retaining structure of steel sheet pile cofferdam in soft soil area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012(S1): 659-665.
- [8] XUE R, BIE S, GUO L, et al. Stability analysis for cofferdams of pile wall frame structures[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(9): 1-12.
- [9] HWANG W, KIM H E, HOSEONG C, 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.
- [10] KHAN M, TAKEMURA J, KUSAKABE O. Centrifuge model tests on behavior of double sheet pile wall cofferdam on clay[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2006, 6(3): 1-23.
- [11] 彭常青, 贺金仁, 林日练. 软土地基上钢管桩围堰的基础理论研究[J]. 水运工程, 2015(6): 152-155.  
PENG C Q, HE J R, LIN R L. Basic theory of steel pile cofferdam on soft clay foundation[J]. Port & Waterway Engineering, 2015(6): 152-155.
- [12] 汪洋, 翁杨, 韦能. 双排钢管桩填土围堰结构设计与计算[J]. 施工技术, 2017, 46(S1): 911-913.  
WANG Y, WENG Y, WEI N. Design and calculation of double-row steel pipe pile backfill soil cofferdam[J]. Construction Technology, 2017, 46(S1): 911-913.
- [13] ZHAO T, DING W, WEI L, et al. The behavior analysis of a cofferdam constructed by double sheet pile wall above muck[C]//China Civil Engineering Society. Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Tunnelling and Underground Construction. Singapore: Springer, 2018.
- [14] 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.  
JIANG J, GU Q Y, HU H, et al. Study of redundancy of double-row steel sheet piles cofferdam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015(S1): 518-522.
- [15] CUI C Y, HUANG J, LUAN M T, et al. Nonlinear numerical study on performance of cofferdam with double-walled steel sheet piles[C]//State key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering Dalian University of Technology Dalian. The Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference. Beijing: OnePetro, 2010: ISOPE-1-10-206.
- [16] 侯永茂, 王建华, 顾倩燕. 大跨度双排钢板桩围堰的变形特性分析[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(10): 1577-1580.

- HOU Y M, WANG J H, GU Q Y. Deformation performance of double steel sheet piles cofferdam[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009, 43(10): 1577-1580.
- [17] 万先逵, 袁聪聪, 黄展军, 等. 某深厚软土地层基坑支护方案优化研究[J]. 华东交通大学学报, 2020, 37(5): 47-52.
- WAN X K, YUAN C C, HUANG Z J, et al. Study on optimization of foundation pit support scheme in deep soft soil [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 37(5): 47-52.
- [18] 贺斯进, 赵一行, 张慧鹏, 等. 基于某桩锚式围护结构大变形加固方案[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2020, 2(4): 59-64.
- HE S J, ZHAO Y X, ZHANG H P, et al. Reinforcement scheme based on large deformation of a pile-anchored enclosure structure[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering. 2020, 2(4): 59-64.
- [19] VERMEER P A, SCHANZ T, BONNIER P G. The hardening soil model: formulation and verification [J]. Beyond 2000 in computational geotechnics-10 years of PLAXIS, 1999: 281-297.
- [20] 周恩平. 考虑小应变的硬化土本构模型在基坑变形分析中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- ZHOU E P. Application of hardening soil model with sm allstrain in deformation analysis for foundation pit[D].

Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.

- [21] PANAGOULIAS S, BRINKGREVE R B J, ZAMPICH L. Plaxis MoDeTo Manual[M]. Delft: PLAXIS BV, 2018.



第一作者: 袁聪聪(1997—), 男, 硕士研究生, 2019年本科毕业于华东交通大学, 研究方向为围堰工程。E-mail: ycc134@foxmail.com。

通信作者: 詹刚毅(1984—), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为大跨度组合结构桥梁设计与施工控制。E-mail: 827858500@qq.com。

(责任编辑: 李 根 姜红贵)