

· 港 口 ·



采用X形桩的遮帘式板桩码头结构静力分析*

彭钰皓¹, 张竣豪¹, 张秀芳^{1,2}, 侯利军^{1,3}, 刘泓⁴, 陈达¹

(1. 河海大学, 海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏南京 210098;

2. 大连理工大学 土木工程学院, 辽宁大连 116024;

3. 河海大学, 水利学科专业实验教学中心, 江苏南京 210098;

4. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东广州 510230)

摘要: X形桩是一种反拱曲面异型桩, 相比于同等截面积的矩形桩和圆形桩, X形桩具有更大的截面周长和惯性矩, 受力性能更好。结合京唐港32#泊位遮帘式板桩码头结构, 以X形桩代替传统的矩形桩, 研究其对结构静力的影响。结果表明: 相同桩间中心距时, 以X形桩替代后可减小前墙弯矩; 在同等桩间净距1.75 m下, 两类模型的前墙最大弯矩基本相同。相同荷载作用下, 前墙位移主要受桩间中心距影响, X形桩形状影响效应很小; 锚碇墙水平位移受桩间中心距和遮帘桩形状的影响均很小。桩间中心距、净距与桩间土体土拱效应直接相关, 对前墙弯矩、土压力、遮帘桩弯矩等有显著影响。桩间中心距为4.05 m或桩间净距为1.75 m时, 结构内力改善效果较优, 可采用该间距的X形桩替代矩形桩, 节约工程造价。

关键词: 遮帘式板桩码头; X形桩; 土拱效应; 内力; 位移

中图分类号: U 655.55; U 656.1⁺12

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)04-0030-09

Static analysis of covered sheet pile wharf structure using X-shaped piles

PENG Yu-hao¹, ZHANG Jun-hao¹, ZHANG Xiu-fang^{1,2}, HOU Li-jun^{1,3}, LIU Hong⁴, CHEN Da¹

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Coastal Disaster and Protection, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

3. The Experimental Teaching Center of Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

4.CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: X-shaped pile is a type of heterotypic pile with inverted arch curved surfaces. Compared with rectangular and circular piles with the same area of cross-section, X-shaped pile has a longer perimeter and larger inertia moment of the section, resulting in better mechanical properties. Based on the covered sheet pile wharf structure of 32# berth in Jingtang Port, we apply X-shaped piles to replace original rectangular covered piles and study the influence of X-shaped pile on the static behavior of wharf structures. The results show that at the same central distance between piles, the moment of the front wall reduces when replacing rectangular piles with X-sectional piles, and the maximum moment of front walls is similar for two types of models at the same net distance of 1.75 m between piles. Under the same load, the displacement of the front wall is greatly correlated with the central distance between piles but hardly affected by the shape effect of the X-type pile. In contrast, the displacement of the anchor wall is hardly influenced by these two factors. The soil arching effect is directly correlated with the central and net distance between piles. This effect greatly affects the moment of the front wall,

收稿日期: 2020-07-08

*基金项目: 国家自然科学基金项目(51408186); 江苏省水利科技项目(2017025); 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室开放基金(202002)

作者简介: 彭钰皓(1997—), 男, 硕士研究生, 从事港工结构研究。

通讯作者: 侯利军(1981—), 男, 博士, 副教授, 从事港工结构研究。E-mail: hlj2932@hhu.edu.cn。

the soil press on the front wall, and the moment of covered piles. At a central distance of 4.05 m or a net distance of 1.75 m between piles, a great improvement of internal force is obtained. X-shaped piles at this spacing can be used to replace normal rectangular piles for saving construction costs.

Keywords: covered sheet pile wharf; X-shaped pile; soil arching effect; internal force; displacement

在码头大型化、深水化发展的时代背景下, 遮帘式板桩码头结构作为一种可应用于深水港的新型板桩码头结构形式也得到快速发展。相比于高桩码头和重力式码头, 板桩码头对复杂地基适应性更强。遮帘式板桩结构依靠桩的遮帘作用, 有效减小前板桩的土压力, 加之钢拉杆在前板桩上端提供的约束, 极大改善了其侧向受力情况, 能够适用于水深较大的码头泊位建设。

中交第一航务工程勘察设计院利用半遮帘式板桩码头结构形式成功将原有的 2 万吨级码头泊位升级改造为 5 万吨级泊位, 并采用全遮帘式板桩码头结构, 成功建设了 10 万吨级的京唐港 32# 泊位工程^[1]。由此, 可以发现利用遮帘式板桩码头结构形式修建深水码头泊位工程是一种行之有效的方法。为了提升遮帘效果, 传统的方法是加大圆形桩或方形桩的截面尺寸, 但这将导致工程投资的巨幅提升。

近年来, 为了提高桩基的承载能力、降低工程造价, 逐渐开发了多种形式的异型桩。现浇 X 形混凝土桩(简称 X 形桩)是一种具有反拱曲面的新型横截面异型桩, 其截面尺寸主要由外包圆直径、开弧间距及开弧角 3 个参数控制。相关研究表明, X 形桩比传统圆形桩具有更好的力学性能。雍君等^[2]采用河海大学自主研发的大型桩基模型试验槽进行等截面积 X 形桩和圆形桩抗拔性能对比试验研究, 结果表明二者桩侧摩阻力分布规律基本一致, 但 X 形桩桩侧摩阻力大于圆形桩, 极限抗拔力较圆形桩提高了 16.7%。孔纲强等^[3]结合某地基处理工程开展 X 形桩竖向抗拔力现场试验, 并利用有限元软件 FLAC3D 建立竖向拔出荷载作用下的 X 形桩和圆形桩数值模型, 结果显示 X 形桩极限抗拔力较圆形桩提高了 17.4%。张

敏霞等^[4]利用大型桩基模型试验槽开展了同截面积的 X 形桩和圆形桩的竖向承载力足尺模型试验, 结果表明 X 形桩的竖向承载力较圆形桩提高了 24%。王智强等^[5]利用大型桩基模型试验槽开展水平荷载作用下等截面面积的 X 形桩和圆形桩的足尺模型对比试验, 认为 X 形桩水平承载力较圆形桩明显提高。

目前有关 X 形桩的研究主要集中在 X 形桩的承载特性, 而在结构应用研究方面仍然较少。本文旨在研究以 X 形桩作为遮帘桩的板桩结构静力性能。结合京唐港原型结构, 以 X 形桩代替结构方案中的传统矩形桩, 应用 ABAQUS 软件建立有限元数值模型, 对比分析 X 形桩对遮帘式板桩结构静力行为的影响。

1 模型建立

1.1 遮帘式板桩码头结构原型

依据京唐港 32# 泊位 10 万吨级专业化煤码头, 对原型遮帘式板桩码头结构和土层适当简化, 建立有限元模型, 模型的剖面如图 1 所示。码头前墙厚度为 1.0 m, 底高程-28.5 m, 顶高程 0.0 m; 胸墙顶高程为 4.5 m; 前墙后布置一排遮帘桩, 与前墙净距 3.0 m, 遮帘桩断面尺寸为 2.0 m×1.0 m(长×宽), 遮帘桩中心距 2.75 m, 桩顶高程 2.5 m, 桩底高程-32.0 m; 码头后方设置锚碇墙, 其与前墙净距 40.0 m, 锚碇墙采用厚度为 1.2 m 的地下连续墙, 墙顶高程为 3.0 m, 墙底高程-15.5 m; 前墙和遮帘桩之间采用直径为 75 mm 的 Q345 钢拉杆, 遮帘桩和锚碇墙之间采用直径为 95 mm 的 Q345 钢拉杆, 拉杆高程为 0.5 m, 拉杆间距为 2.75 m; 模型码头的设计高水位为 2.02 m, 设计低水位 0.27 m, 极端低水位-1.53 m; 码头前沿浚深至高程-16.0 m。

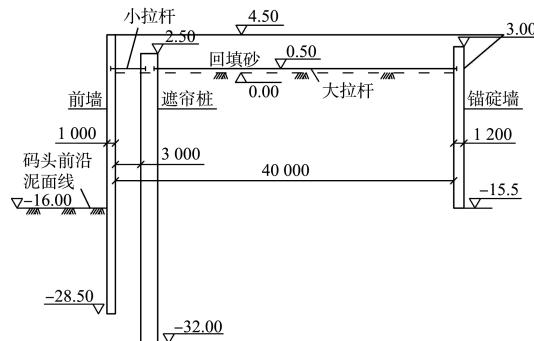


图 1 遮帘式板桩码头结构剖面 (高程: m; 尺寸: mm)

1.2 模型建立

1.2.1 结构模型及参数

本文参考京唐港原型矩形桩设置 3 组共 6 个模型进行对比分析。目前, X 形桩在实际工程中应用相对较少, 可见的应用是在道路地基处理工程中, 例如江苏省南京长江第四大桥工程中利用 X 形桩进行地基加固处理^[6]。将南京长江第四大桥工程中的 X 形桩等比例放大至截面面积为 2.0 m^2 , 作为本文模型的 X 形桩截面, 如图 2 所示, X 形桩的截面参数为外包圆直径 $D = 2.3 \text{ m}$ 、开弧间距 $B = 0.45 \text{ m}$ 以及开弧角 $\theta = 130^\circ$ 。本文模型中的 X 形桩, 截面面积与矩形桩相同, 以保证混凝土用量相同。

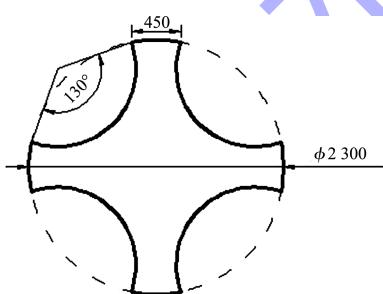


图 2 X 形桩断面形状 (单位: mm)

矩形桩和 X 形桩的布置形式如图 3 所示。模型参数包括遮帘桩桩形和桩间中心距。桩形包括矩形桩 (JXZ) 和 X 形桩 (X); 桩间中心距包括 2.75、4.05 和 5.35 m。“JXZ-2.75”表示采用矩形遮帘桩且桩间中心距为 2.75 m 的遮帘式板桩码头, 其为京唐港 32#泊位工程遮帘式板桩码头原

型。各模型结构参数见表 1。可以看出, 由于矩形桩和 X 形桩的截面尺寸差异, 两组模型 JXZ-2.75 与 X-4.05 以及 JXZ-4.05 与 X-5.35 具有相同的桩间净距 1.75 和 3.05 m。

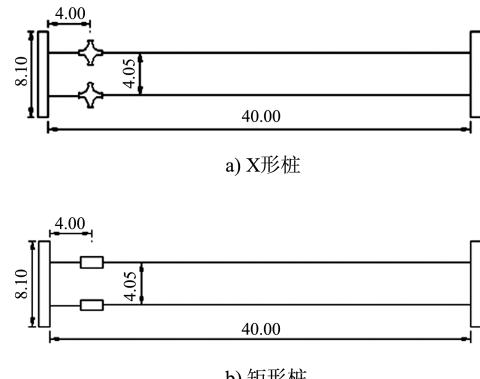


图 3 桩间中心距为 4.05 m 模型 (单位: m)

表 1 模型结构参数

模型	遮帘桩形式	桩间中心距/m	桩间净距/m
X-2.75	X 形桩	2.75	0.45
JXZ-2.75	矩形桩	2.75	1.75
X-4.05	X 形桩	4.05	1.75
JXZ-4.05	矩形桩	4.05	3.05
X-5.35	X 形桩	5.35	3.05
JXZ-5.35	矩形桩	4.05	4.35

1.2.2 材料参数

考虑到结构变形较小, 一般均在弹性范围内, 本文的拉杆和混凝土材料均采用线弹性模型, 材料参数包括密度 ρ 、弹性模量 E 、泊松比 ν 和抗拉强度。其中, 混凝土强度等级为 C30, 参数取值为: $\rho = 2.5 \text{ t/m}^3$, $E = 30 \text{ GPa}$, $\nu = 0.2$, 混凝土的抗拉强度设计值 1.43 MPa ^[7]; 拉杆采用 Q345 钢, 参数取值为: $\rho' = 7.85 \text{ t/m}^3$, $E' = 206 \text{ GPa}$, $\nu' = 0.3$, 根据 GB 50017—2017《钢结构设计规范》, 对于直径为 $50 \sim 100 \text{ mm}$ 的 Q345 钢拉杆, 其抗拉强度设计值为 250 MPa ^[8]。

本文各模型的地质条件保持一致, 模型中土体材料采用 Mohr-Coulomb 理想弹塑性本构模型, 结合场地的工程地质勘察资料^[9], 确定土体相关参数, 见表 2。

表 2 原始土层参数

土层	土层厚度/m	天然密度 $\rho_s/(t \cdot m^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν
回填砂	4.5	1.80	5	30.0	14.75	0.30
粉细砂	5.0	1.93	4	35.0	10.44	0.30
粉质黏土	7.0	1.83	26	13.0	8.20	0.35
细砂	15.0	1.99	10	36.0	11.00	0.35
粉质黏土	60.0	1.96	34	25.6	7.32	0.35

1.2.3 相互作用

本文采用硬接触模拟接触面间的法向行为;采用库仑摩擦模拟接触面的切向行为,通过设定摩擦系数 μ 来表征接触面之间的摩擦行为,其中摩擦系数 μ 由土体和结构的表面光滑程度决定,通常可以按经验取 $\mu = \tan(0.75\varphi)$ ^[10]。选取刚度相对较大的结构表面作为主面,与结构接触的土体表面作为从面。考虑到接触面的相对滑动规律,本文采用“有限滑移”模式来模拟相对滑动。而对于前墙、遮帘桩和锚碇墙与拉杆之间的接触采用 Tie 接触,使位移保持一致。

1.2.4 网格划分及单元类型

在本文建立的三维有限元模型中,码头结构(前墙、遮帘桩和锚碇墙)以及各层土体均采用 C3D8R 单元(八节点六面体缩减积分单元)模拟。由于拉杆只能承受轴力不能承受弯矩,因此选用 T3D2 单元(二节点线性三维桁架单元)模拟。

本文在保证精度的前提下,采用渐变种子布置方式,并在重点研究部位进行局部加密,以保证计算的精度要求,同时又不至于过多加大计算成本。网格划分技术优先采用结构划分技术,在局部异型地方采用扫略网格划分技术。模型的网格划分见图 4。以模型 X-4.05 为例,其中土体包含 119 842 个单元;码头结构包含 6 414 个单元,拉杆包含 152 个单元。

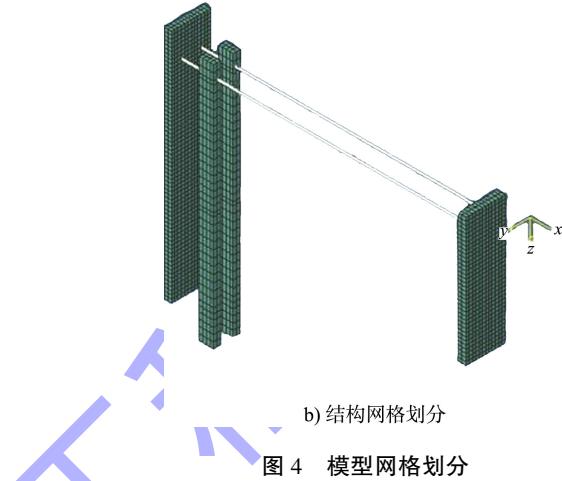


图 4 模型网格划分

1.2.5 荷载及边界条件

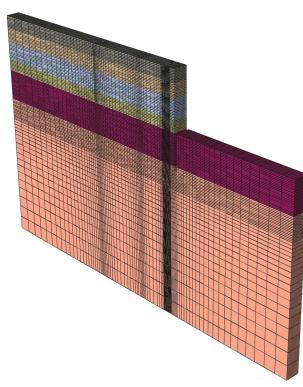
本文选用设计荷载为运营期的堆载水平,即码头前沿 18 m 范围内均布荷载为 20 kPa,码头前沿 18 m 以外至锚碇墙前沿范围内均布荷载为 80 kPa,锚碇墙以后的陆域范围考虑 5 kPa 的道路荷载。

在模型中,将模型的前后两侧(y 轴方向)的边界条件设置为 y 向位移 $U_2=0$;将模型的左右两侧(x 轴方向)的边界条件设置为 x 向位移 $U_1=0$;将模型的底部的边界条件设置为 x 、 y 、 z 向位移 U_1 、 U_2 、 U_3 均为 0。

2 计算结果分析与讨论

2.1 结构弯矩

各模型的前墙单宽弯矩随前墙高程的变化曲线见图 5。可以看出,各模型的前墙弯矩分布均呈典型的 S 形分布。各模型前墙的最大正、负弯矩见表 3。可以看出,随着桩间中心距从 2.75 m 增加至 5.35 m, X 形桩模型和矩形桩模型的最大正、负弯矩均逐渐增大。这主要是由于随着桩间距的增大,桩间的土拱效应逐渐减弱,对前墙弯矩的削减效应逐渐降低。



a) 土体网格划分

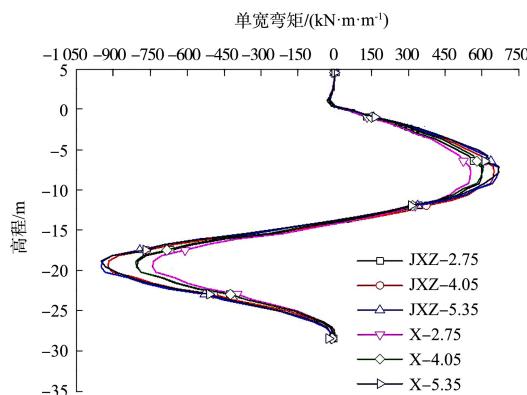


图 5 前墙弯矩变化曲线

表 3 各模型前墙弯矩

桩间中心距/m	最大正弯矩/ (kN·m·m⁻¹)		最大负弯矩/ (kN·m·m⁻¹)		相对变化率/%	
	矩形桩	X形桩	矩形桩	X形桩	正弯矩	负弯矩
2.75	600	553	-808	-742	-7.8	-8.2
4.05	648	601	-899	-807	-7.3	-10.2
5.35	666	668	-950	-933	0.3	-1.8

由表 3 可知, X 形桩模型的前墙最大弯矩基本均小于矩形桩模型的弯矩, 但降幅呈显著非线性关系。当桩间中心距从 2.75 m 增加到 4.05 m, 最大正弯矩降幅基本不变, 最大负弯矩降幅增大 2%, 达到最大值 10.2%。然而, 随着中心距从 4.05 m 增大至 5.35 m, 最大负弯矩降幅急剧减小至 1.8%, 而 X 形桩模型的最大正弯矩甚至略微增大。这主要归因于两个方面: 1) 相比于同等面积的矩形桩, X 形桩外包圆直径为 2.3 m, 远高于矩形桩宽度 1 m, 有效宽度更大, 同等桩间中心距下遮帘效果或土拱效应更加显著, 同时 X 形桩 4 个方向的肋也有利于维持桩间土拱拱脚稳定性; 2) 当桩间中心距较大时, X 形桩和矩形桩模型的桩间土拱效应均显著降低, X 形桩的遮帘优势也不复存在。

考虑矩形桩与 X 形桩截面尺寸的差异, 由表 3 可见, 在同等桩间净距 1.75 m 下, 模型 JXZ-2.75 与 X-4.05 的前墙最大弯矩基本相同。在同等桩间净距 3.05 m 下, 模型 X-5.35 的前墙最大弯矩要高于 JXZ-4.05 模型的值, 而与桩间净距为 4.35 m 的 JXZ-5.35 的最大弯矩相差不大。可见, 桩间净距是土拱效应的另一重要因素。对于 X 形桩, 桩间净距小于 1.75 m 时, 由于净距较小导致其对

前墙的遮帘效应减弱; 在桩间净距大于 1.75 m 时, 相比于同等净距的矩形桩, X 形桩的形状效应逐渐减弱。这也表明桩间净距 1.75 m 可以作为 X 形桩的合理桩间净距。

各模型的遮帘桩弯矩随高程的变化曲线见图 6。可以看出, 随着桩间中心距的增大, 遮帘桩桩身最大正弯矩逐渐减小而最大负弯矩逐渐增大。遮帘桩在上部承受大拉杆和小栏杆的拉力, 随着桩间中心距的增大所受合力的方向从向陆侧逐渐转变为向海侧(图 7), 合力产生的桩身弯矩也逐渐由正弯矩转变为负弯矩, 从而桩身负弯矩随着桩间中心距的增大而增大。

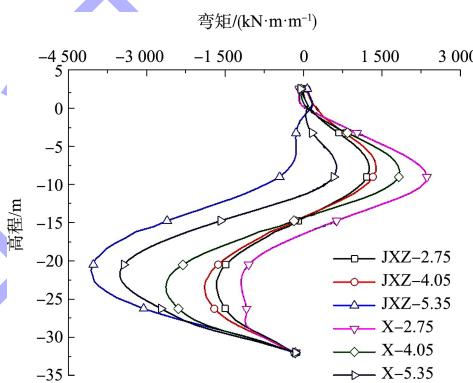
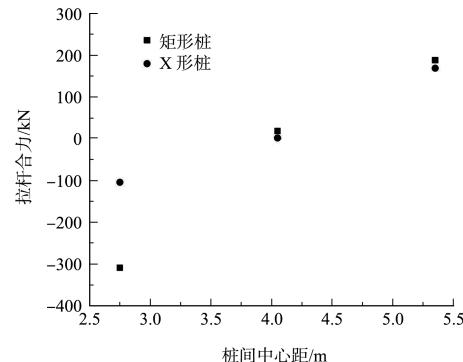


图 6 遮帘桩弯矩变化曲线



注: 负值为向陆侧, 正值为向海侧。

图 7 遮帘桩所受拉杆合力随桩间距的变化

另外由图 6 可知, 在相同桩间中心距下, X 形桩的弯矩随桩深度的变化梯度较大。弯矩变化梯度主要取决于桩周土压力作用的大小。由于 X 形桩的宽度和表面积大, 所受桩周土的作用更大, 导致 X 形桩有更为显著的弯矩变化梯度。同时, 在同等桩间净距下, X 形桩沿桩深度的弯矩变化梯度也同样高于矩形桩的梯度。

实际工程中, 遮帘桩常为对称配筋, 遮帘桩的最大正负弯矩比值决定遮帘桩的受力是否合理, 配筋是否最优。定义弯矩不平衡系数 λ 为:

$$\lambda = \frac{\max(|\max(M^+)|, |\min(M^-)|)}{\min(|\max(M^+)|, |\min(M^-)|)} \quad (1)$$

式中: M^+ 为正弯矩; M^- 为负弯矩。弯矩不平衡系数越小, 遮帘桩受力越合理。如图6所示, 对比两类遮帘桩的正负弯矩可以发现, 对于矩形桩而言, 桩间中心距为2.75~4.05 m时, 该系数为1.20~1.25; 而当间距增大至5.35 m时, 该系数急剧增大至16.03, 正负弯矩极不平衡。相比之下, 对于X形桩, 弯矩不平衡系数呈现先减小后增加的趋势, 间距为4.05 m时较优, 约为1.34, 该间距较为合理。

2.2 遮帘桩轴力

各模型的遮帘桩轴力随高程的变化曲线见图8。各组模型中, 遮帘桩的轴力均呈现出由上至下先逐渐增加, 在桩身中下部达到最大, 而后逐渐减小的趋势。这主要是由于上部的土体受到码头面荷载的作用, 周围土体的竖向位移比遮帘桩本身的沉降大, 导致土体发生相对遮帘桩向下运动的趋势, 从而上部桩周土体对桩侧产生沿桩长向下的负摩阻力, 故桩身轴力自上而下逐渐增加。相比之下, 下部土体竖向位移较小, 而桩身由于上部荷载的作用使得其竖向位移较大, 从而下部桩周土体对桩侧产生沿桩长向上的摩阻力, 故桩身轴力自上而下逐渐减小。尽管负摩阻力增大了桩的轴力, 但均在桩的允许承载范围内。

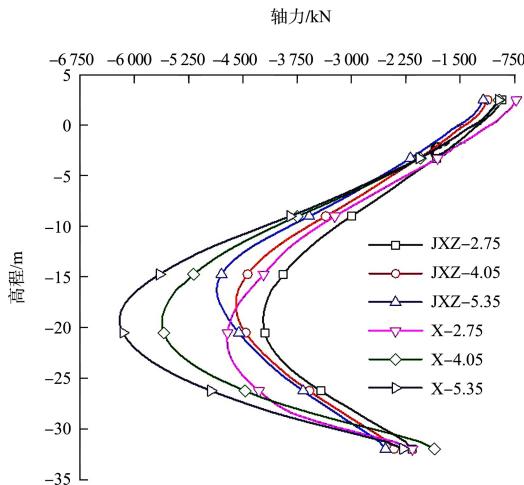


图8 遮帘桩轴力沿高程的变化曲线

由图8可知, 在同等桩间中心距或同等桩间净距下, X形桩的轴力皆高于矩形桩。此外, 随着桩间中心距由2.75 m增大为5.35 m, 矩形桩模型的最大轴力增加了15.3%, 而X形桩模型增加了31.4%, 同时轴力随深度的变化梯度逐渐增大。这可归因于两个方面: 1) X形桩与周围土的接触面积大, 所承受的桩周土的摩阻力更大, 桩身轴力及变化梯度也较大; 2) 桩间中心距越小, 群桩效应愈加显著, 桩身摩阻力愈加低于单桩情况, 桩身所受轴力也逐渐减小。

2.3 遮帘桩摩阻力

遮帘桩相邻两截面的轴力差来源于截面间的摩阻力。将相邻截面的轴力差除以截面间桩侧表面积, 即为两截面间的桩身摩阻力^[11], 表示为:

$$q_{i+1/2} = (N_i - N_{i+1}) / A_{i+1/2} \quad (2)$$

式中: $q_{i+1/2}$ 为*i*截面与*i*+1截面之间桩身摩阻力; N_i 为*i*截面轴力; N_{i+1} 为*i*+1截面轴力; $A_{i+1/2}$ 为*i*到*i*+1截面间的桩侧表面积。

各模型遮帘桩桩身摩阻力随高程的变化曲线见图9。可以看出, 遮帘桩桩身摩阻力基本呈S形分布, 在桩身上部分为负摩阻力, 桩身下部分为正摩阻力。随着桩间中心距的增加, 两类桩的桩身最大负摩阻力均逐渐增加, 而矩形桩和X形桩各自的最大正摩阻力基本相当。在相同桩间中心距下, X形桩的桩身负摩阻力均比矩形桩小, 而正摩阻力比矩形桩大。随着桩间中心距由2.75 m增加至5.35 m, 应用X形桩的最大负摩阻力降幅从12.0%逐渐下降至0.3%, 而最大正摩阻力增幅均达到80%以上。

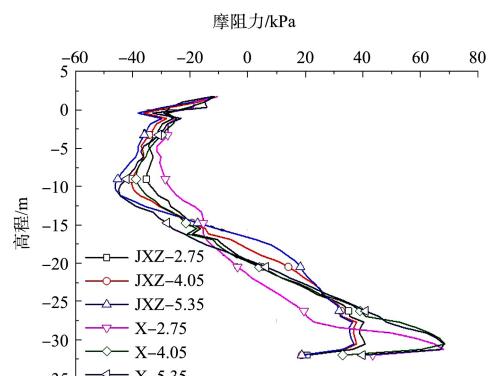


图9 遮帘桩摩阻力沿高程的变化曲线

中性点深度 L_n 是反映负摩阻力的一个重要参数, 指桩土相对位移为 0 的位置, 即桩侧摩阻力在此处为 0。由图 9 可知, 随着桩间中心距的增加, 中性点深度逐渐提高, 其中矩形桩的中性点深度为 18.5~21.5 m, 其相对深度 L_n/L_0 (L_0 为桩周沉降土层的下限深度) 为 0.53~0.62; 而 X 形桩的中性点深度为 21.5~23.5 m, 其相对深度 L_n/L_0 为 0.62~0.67。可见, X 形桩的中性点深度较矩形桩更大, 负摩阻力的影响更大。

2.4 遮帘桩最大截面拉应力

遮帘桩在压弯作用下, 部分截面可能会处于受拉状态, 截面最大应力可通过式(3)计算:

$$\sigma = \left| \frac{Mh}{I} \right| - \left| \frac{F}{A} \right| \quad (3)$$

式中: M 为截面弯矩; h 为截面上距离中心轴最远距离; I 为截面惯性矩; F 为截面轴力; A 为截面面积。

遮帘桩截面最大应力见图 10。桩间中心距为 2.75 和 4.05 m 时, 矩形桩模型遮帘桩呈全截面受压状态, 其余模型遮帘桩截面均产生受拉应力。其中, X-2.75 和 X-5.35 的拉应力最大, 基本达到甚至超过 C30 混凝土的抗拉强度设计值 1.43 MPa。相比之下, X-4.05 模型在最大正弯矩和最大负弯矩处的拉应力基本相同, 约为 0.73 MPa, 低于 C30 混凝土抗拉强度, 桩身不会开裂。可见, 桩间中心距为 4.05 m 可以作为 X 形遮帘桩的合理间距。

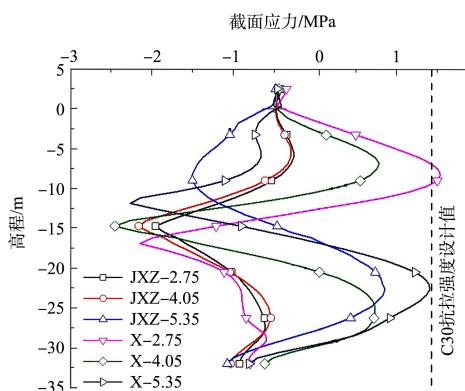


图 10 遮帘桩截面最大应力对比曲线

2.5 前墙陆侧土压力

各模型的前墙陆侧土压力随高程的变化曲线见图 11。从曲线形式上看, 土压力沿高程的分布基本呈 R 形分布, 基本符合前墙陆侧土压力的典型分布形式。桩间中心距以及桩身截面形式对高程-5 m 至泥面线区域的土压力影响较大, 而对其他区域影响较小。在该影响区域, 随着桩间中心距的增加, 前墙陆侧土压力基本呈增加趋势。在相同桩间中心距下, X 形桩模型的前墙陆侧土压力均较矩形桩模型的小。这主要是由于同等间距下, X 形桩的土拱效应更为显著, 但随着桩间距增大土拱效应逐渐弱化, 对前墙土压力削减效应也相应减小。

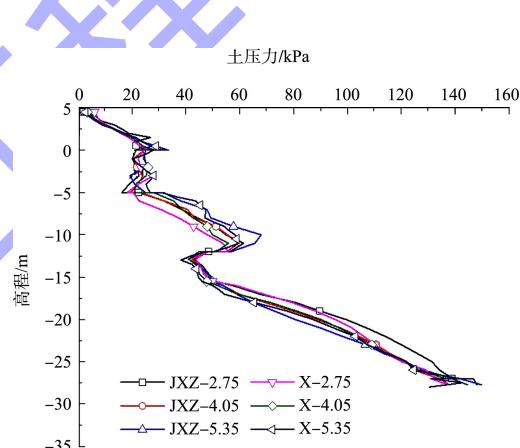


图 11 前墙陆侧土压力对比

对前墙泥面以上的区域进行积分, 可得泥面线以上前墙陆侧土压力合力。不同模型前墙土压力合力随桩间中心距的变化关系见图 12。在同等桩间中心距下, X 形桩模型的前墙土压力合力均低于矩形桩模型的值, 间距 4.05 m 时降幅最大, 约 7.7%。随着桩间中心距从 2.75 m 增大至 5.35 m, 两类模型的前墙土压力合力逐渐增大, 增幅 8.3%~9.2%, 较为接近。这些现象同样可归因于 X 形桩相对较好的土拱效应以及间距增大导致逐渐弱化的土拱效应。此外, 在同等桩间净距下, X 形桩前墙土压力合力比矩形桩小, 说明 X 形桩表现出更佳的土拱效应。

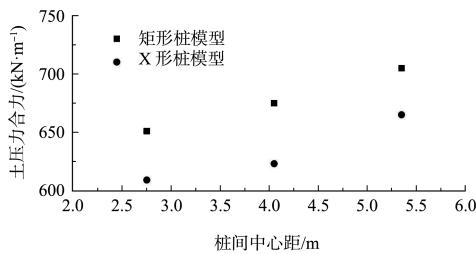
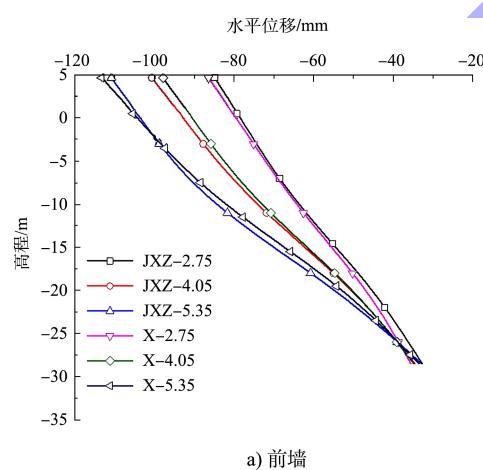


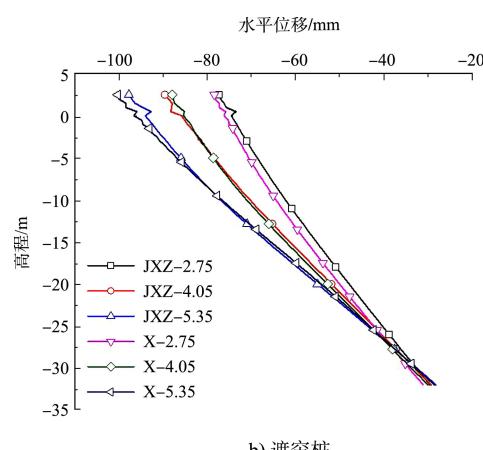
图 12 前墙土压力合力随桩间中心距的变化

2.6 结构水平位移

结构构件沿深度的水平位移变化曲线见图 13。由图可见, 前墙和遮帘桩均是整体向海侧位移, 且前者的水平位移大于后者, 随着深度的增大水平位移均逐渐减小。在锚碇点处, 前墙的水平位移一般均大于遮帘桩, 两者的位移差即为锚杆的拉伸变形。随着桩间中心距的增大, 前墙和遮帘桩的水平位移显著增大。这主要是由于桩间土拱效应随桩间中心距增大而减弱, 前墙水平土压力相应增大, 从而前墙位移也逐渐增大。



a) 前墙



b) 遮帘桩

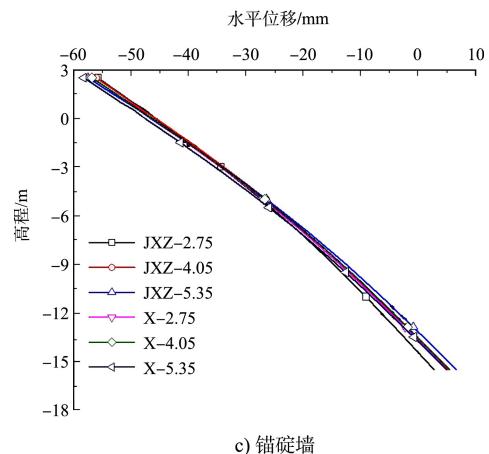


图 13 各模型结构构件水平位移对比

由图 13 可知, 相同桩间中心距下, X 形桩和矩形桩模型的前墙水平位移相差不大。也就是说, 前墙水平位移主要受桩间中心距影响, 而 X 形桩的形状效应及引起的净距变化影响基本可忽略。

此外, 由图 13c) 可见, 不论遮帘桩类型和桩间中心距, 锚碇墙的位移基本保持不变, 锚碇点处位移均小于 50 mm, 满足码头结构设计规范要求^[12]。这主要归因于两个方面: 1) 桩间中心距的增大仅是一定程度改变了锚碇墙的拉杆数量和间距, 并未改变其受力状态, 仍然可以考虑为竖向弹性支撑连续梁; 2) 遮帘桩与锚碇墙的距离足够大, 在遮帘桩附近引起的土拱效应基本不会影响锚碇墙附近的土压力状态。

2.7 建议

就桩型而言, 同等桩间中心距条件下, X 形桩模型的前墙内力和土压力基本均小于矩形桩模型, 两类模型的水平位移相近, X 桩模型的遮帘桩轴力和截面应力较大, 但均在允许范围内, 总体来看 X 形桩替代矩形桩有一定优势。就 X 形桩桩间距而言, 中心距 4.05 m 或净距 1.75 m 的模型表现出较小的前墙弯矩、遮帘桩弯矩及正负弯矩比例系数, 适中的桩身轴力, 较小的桩身截面拉应力, 较小的前墙土压力以及满足要求的水平位移, 可见该间距可作为 X 形遮帘桩的合理桩间距。

另一方面, 如前所述, 尽管 X-4.05 和 JXZ-2.75 的前墙最大弯矩基本相当, 但由图 13 发现, 两类

模型前墙的位移仍有一定差距，桩间中心距仍对前墙水平位移起控制作用。但是 X-4.05 仍满足水平位移允许限值，因此原设计方案中中心距为 2.75 m 矩形遮帘桩，可由中心距为 4.05 m 的 X 形桩替代。

我国港工码头结构的地基条件常为沿海或沿江软土地基，X 形桩可采用现浇灌注施工方式。针对 X 形异型桩在软基工况下的现浇施工，刘汉龙教授科研团队研发了包括现浇 X 形混凝土桩沉模装置^[13]、活瓣桩尖^[14]和施工方法^[15]的 X 形桩沉管灌注桩施工技术，并应用于南京长江第四大桥工程地基加固处理，为 X 形桩的工程应用解决了技术难题。对比 X 形桩与矩形桩的沉管灌注桩施工技术，X 形桩采用专用的异型桩模具和桩尖，其余施工工艺均与常规的沉管灌注桩施工相似。另外，本文设计 X 形桩与矩形桩的截面面积相同，单桩混凝土用量相同，则 X 形桩与矩形桩的单桩材料成本接近。然而，遮帘桩采用中心距为 4.05 m 的 X 形桩替代原矩形桩后，桩数可减少约 1/3，极大节约了遮帘桩总的材料用量和沉桩数量。尽管 X 形桩的模具和桩尖制作费用要高于普通矩形桩，但综合考虑材料费用、沉管灌注桩施工费用等，预计采用 X 形桩作为遮帘桩仍可有效节约工程造价。

3 结论

1) 在同等桩间中心距条件下，X 形桩模型的土拱效应更为显著。相比于矩形桩模型，X 形桩模型表现出较小的前墙弯矩、较小的前墙土压力，相近的前墙与遮帘桩水平位移。可见，采用 X 形桩替代矩形桩有一定优势。

2) 在研究的桩间中心距范围内，X 形遮帘桩比矩形桩表现出更高的桩身轴力、桩身弯矩和桩身截面拉应力，但均满足桩身强度要求。

3) 随着桩间中心距从 2.75 m 增大至 5.35 m，前墙弯矩逐渐增大，但采用 X 形桩的前墙弯矩降幅呈先小幅变化后显著下降的趋势；遮帘桩桩身负弯矩逐渐增大，桩身轴力逐渐增大，X 形桩桩

身截面拉应力呈先减小后增大的趋势；前墙土压力合力逐渐增大，采用 X 形桩桩后土压力合力降幅呈先增大后减小趋势。

4) X 形桩和矩形桩模型的前墙最大弯矩关系与桩间净距相关。在 1.75 m 桩间净距下，两类模型的前墙最大弯矩基本相同；而在 3.05 m 净距下，采用 X 形桩的模型的最大弯矩较高，X 形桩的形状效应下降；在同等桩间净距下，X 形桩模型的前墙土压力合力均小于矩形桩模型。

5) 码头前墙与遮帘桩的水平位移主要与桩间中心距相关，而与 X 形桩形状相关性很小；锚碇墙水平位移受桩间中心距和遮帘桩形状的影响均很小。

6) 结合内力和变形比较分析，建议采用桩间中心距为 4.05 m 或桩间净距为 1.75 m 的 X 形遮帘桩结构方案。同时，对于原设计方案，建议可采用该中心距的 X 形桩替代原间距为 2.75 m 的矩形桩，能较大程度节约工程造价。

参考文献：

- [1] 刘永绣.板桩码头向深水化发展的方案构思和实践:遮帘式板桩码头新结构的开发[J].港工技术,2005(S1):12-15.
- [2] 雍君,陆晓敏,刘汉龙.X 形混凝土桩抗拔特性试验研究[J].岩土力学,2010,31(11):3430-3434.
- [3] 孔纲强,丁选明,陈育民,等.现浇 X 形群桩竖向抗拔特性及影响因素分析[J].建筑科学与工程学报,2012,29(3):49-54.
- [4] 张敏霞,刘汉龙,丁选明,等.现浇 X 形混凝土桩与圆形桩承载性状对比试验研究[J].岩土工程学报,2011,33(9):1469-1476.
- [5] 王智强,刘汉龙,张敏霞,等.现浇 X 形桩竖向承载特性足尺模型试验研究[J].岩土工程学报,2010,32(6):903-907.
- [6] 於慧,丁选明,孔纲强,等.高速公路拓宽工程现浇 X 形桩与圆形桩变形特性数值模拟对比分析[J].岩土工程学报,2013,35(S2):170-176.
- [7] 中交水运规划设计院有限公司.水运工程混凝土结构设计规范:JTS 151—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.

(下转第 123 页)