

· 地基与基础 ·



## 多排桩式岸壁结构遮帘挡土效应分析\*

王开放<sup>1,2</sup>, 朱艳<sup>1,2</sup>, 周杰鑫<sup>1,2</sup>, 邵云怡<sup>1,2</sup>, 曹宏泰<sup>3</sup>, 叶子尧<sup>1,2</sup>

(1. 中船第九设计研究院工程有限公司, 上海 200090;

2. 上海市海洋工程和船厂水工特种工程技术研究中心, 上海 200090; 3. 中建港航局集团有限公司, 上海 200433)

**摘要:** 多排桩式岸壁结构由多排桩、卸荷板、防汛墙、回填砂等组成, 是一种可兼做工作码头的新型永久结构。遮帘挡土效应在板桩码头中已有较多研究, 但在多排桩式岸壁结构中尚缺乏。本文依托长兴某港池工程, 通过三维有限元软件 PLAXIS 3D 建立多排桩式岸壁结构, 研究有无遮帘桩、前排桩与遮帘桩的排距、后排遮帘桩桩间距、前排桩桩身刚度对多排桩式岸壁结构排桩内力和变形的影响, 得出如下结论: 有后排遮帘桩时, 多排桩式岸壁结构的整体位移较小, 且前排桩的弯矩较小; 前后排桩的排距、遮帘桩桩间距和前排桩的刚度都影响前排桩的内力, 前排桩的内力随着前后排距、遮帘桩间距减少而减少, 随着前排桩的刚度降低而降低; 考虑场地条件及工程造价方面, 评价不同参数对于遮帘挡土效应的敏感性: 前排桩桩身刚度 > 前排桩与遮帘桩的排距 > 后排遮帘桩桩间距; 在此基础上, 提出优化设计方案, 相比原方案前排桩弯矩可降低 50%, 为后续工程应用提供一定的借鉴。

**关键词:** 多排桩式岸壁结构; 遮帘桩; 挡土效应; 三维有限元分析

中图分类号: U65; TV312

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)12-0217-07

### Retaining effect of covered pile on multi-row pile quay wall

WANG Kaifang<sup>1,2</sup>, ZHU Yan<sup>1,2</sup>, ZHOU Jiexin<sup>1,2</sup>, SHAO Yunyi<sup>1,2</sup>, CAO Hongtai<sup>3</sup>, YE Ziyao<sup>1,2</sup>

(1. China Shipbuilding NDRI Engineering Co., Ltd., Shanghai 200090, China;

2. Shanghai Research Center of Ocean&Shipbuilding Engineering, Shanghai 200090, China;

3. China State Construction Harbour Construction Co., Ltd., Shanghai 200433, China)

**Abstract:** The multi-row pile quay wall is a new permanent structure composed of multiple piles, relieving slab, flood control walls, backfill sand, etc., which can also serve as a working wharf. The retaining effect of covered pile has been widely studied in sheet pile wharf, but it is still lacking in multi-row pile quay wall structures. Relying on the Changxing harbor Pool Project, this paper establishes a multi-row pile quay wall structure through the three-dimensional finite element software PLAXIS 3D, and studies the influence of whether there are covered piles, the row spacing between the front pile and the covered pile, the spacing between the covered pile, and the stiffness of the front pile on the internal force and deformation of the multi-row pile quay wall. The following conclusions are drawn when there are covered piles, the overall displacement of the multi-row pile quay wall is small, and the bending moment of the front pile is less. The spacing between the front and rear rows of piles, the distance between the covered piles, and the stiffness of the front piles all affect the internal force of the front piles. The internal force of the front piles decreases as the distance between the front rear rows of piles and the distance between the covered piles decrease, and decreases as the stiffness of the front piles decreases. Considering the site conditions and project cost, the sensitivity of different parameters to the retaining effect of the curtain is evaluated: the stiffness of the front pile > the spacing between the front pile and the covered pile > the spacing between the rear row covered pile. On this basis, an optimized design scheme is proposed, which can reduce the bending moment of the front pile by 50% compared with the original scheme, providing a certain reference for subsequent engineering applications.

**Keywords:** multi-row pile quay wall; covered pile; retaining effect; 3D finite element analysis

收稿日期: 2022-02-27

\*基金项目: 上海市优秀学术/技术带头人项目(23XD1434800), 中建股份科技研发课题项目(CSCEC-2022-Z-22)

作者简介: 王开放(1994—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事水工结构设计及三维数字化研究。

多排桩岸壁结构由多排桩、卸荷板、防汛墙、回填砂等组成,是一种可以兼做工作码头的新型永久式结构。随着码头不断深水化,传统的岸壁形式难以满足要求,而遮帘桩能很好地降低前排桩桩后土压力,从而使深水岸壁结构成为可能<sup>[1]</sup>。

遮帘桩在板桩中研究较多,中交第一航务工程设计院在2002年研发出一种新型板桩结构形式,即遮帘式板桩码头,且在唐山港京唐港区推广应用,较好地适应深水港区发展<sup>[2]</sup>。研究主要从影响遮帘桩的桩土之间参数、地震力、施工步骤等因素进行。崔冠辰等<sup>[3]</sup>采用有限元模拟京唐港项目,研究出遮帘桩与前墙的距离以及遮帘桩的刚度对码头的承载力的影响;黄伟等<sup>[4]</sup>基于理论及三维有限元软件对京唐港进行计算,得出桩间距理论计算公式和三维模拟较为吻合;惠炜等<sup>[5]</sup>基于平行墙及朗肯土压力理论,得出遮帘桩桩后土压力的表达式,算出遮帘桩合理间距的计算公式;在地震力方面,郁松<sup>[6]</sup>采用有限元软件开展静动力受力分析,分析地震作用下前墙位移、土压力、应力的变化规律;王翠燕等<sup>[7]</sup>采用数值模拟地震作用下京唐港遮帘式码头,得出遮帘桩能较好降低板桩在地震作用下的弯矩及拉力;在施工工序方面,施忠良<sup>[8]</sup>基于PLAXIS 3D模拟土体参数及施工工序对板桩结构的受力分析,得出土体参数、施工工序显著影响构建的内力和位移;在遮帘板桩式接岸结构方面,程烈<sup>[9]</sup>采用二维有限元进行分析接岸结构桩土相互作用,采用三维有限元进行分析桩间距、土性参数对遮帘效应的影响。

现阶段,国内外学者对影响遮帘效果的结构

参数、地震等作用进行分析,取得了很好的进展,但是遮帘桩形成土拱效应及桩土作用机理还不成熟,且在多排桩式岸壁结构中尚缺乏。因此,本文依托中船长兴某港池工程,通过三维有限元软件PLAXIS 3D建立多排桩式岸壁结构,研究施工期有无遮帘桩、前排桩与遮帘桩的排距、后排遮帘桩桩间距、前排桩桩身刚度对多排桩式岸壁结构前排桩内力和变形的影响,考虑场地条件及工程造价等方面,提出优化设计方案,旨在为类似工程提供良好的借鉴。

## 1 工程概况

### 1.1 码头典型断面选取

长兴软土地基某港池工程典型断面为多排桩岸壁结构,码头前沿泥面设计高程-10.0 m,上部结构为现浇的L形钢筋混凝土胸墙。胸墙顶高程为4.80 m,墙顶高程9.50 m,承台底板面高程1.70 m,底高程-0.50~0.50 m,厚1.2~2.2 m。胸墙总宽度13.50 m。前排桩采用 $\phi 1200$  mm钻孔灌注桩,桩间距1.30~1.35 m,桩长43.6 m,桩端高程-43 m,桩端进入 $\textcircled{5}_{3,1}$ 层;前排桩后采用双排 $\phi 800$  mm@0.6 m高压旋喷帷幕止水,止水帷幕底高程为-15 m。后排遮帘桩采用两排灌注桩:在胸墙中间排桩采用 $\phi 1200$  mm钻孔灌注桩,桩间距3.5 m,桩长50.6 m,桩端高程-50 m,桩端进入 $\textcircled{5}_{3,2}$ 层;胸墙后排桩采用 $\phi 1200$  mm钻孔灌注桩,桩间距3.5 m,桩长43.6 m,桩端高程-43 m,桩端进入 $\textcircled{5}_{3,1}$ 层,标准断面和桩基平面见图1、2(吴淞高程),港池土层参数见表1。

表1 土层参数

土层编号	土层名称	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	压缩模量 $E_{s0.1-0.2}/\text{MPa}$	直剪(固快)	
				内聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $(^\circ)$
$\textcircled{1}_{1-1d}$	吹填土	1.91	7.78	4	21.0
$\textcircled{2}_1$	粉质黏土	1.86	4.98	20	21.0
$\textcircled{2}_{3,1}$	砂质粉土	1.87	9.10	9	27.0
$\textcircled{2}_{3,3}$	黏质粉土夹淤泥质粉质黏土	1.84	7.02	11	23.5
$\textcircled{4}$	淤泥质黏土	1.70	2.31	11	11.0
$\textcircled{5}_{1,1}$	黏土	1.74	2.81	14	14.0

续表 1

土层编号	土层名称	密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	压缩模量 $E_{s0.1-0.2} / \text{MPa}$	直剪(固快)	
				内聚力 $c / \text{kPa}$	内摩擦角 $(^\circ)$
⑤ <sub>1-2</sub>	黏土	1.83	3.55	17	17.0
⑤ <sub>3-1</sub>	粉质黏土夹粉性土	1.86	4.81	19	50.0
⑤ <sub>3-2a</sub>	粉质黏土与砂质粉土互层	-	6.55	19	22.5
⑤ <sub>3-2b</sub>	砂质粉土夹黏性土	-	7.70	15	26.5
⑦ <sub>1</sub>	砂质粉土与粉质黏土互层	-	8.21	23	21.5
⑦	粉砂	-	13.27	3	34.5
⑨	含砾粉砂	-	15.56	1	36.5

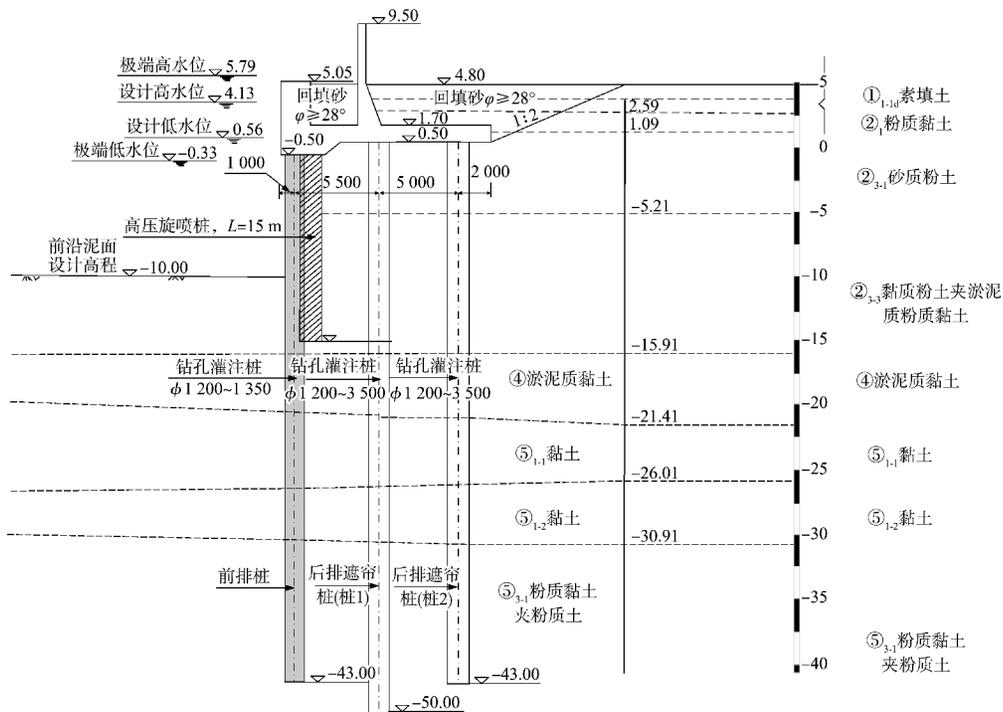


图 1 多排桩岸壁结构典型断面 (尺寸: mm; 高程: m)

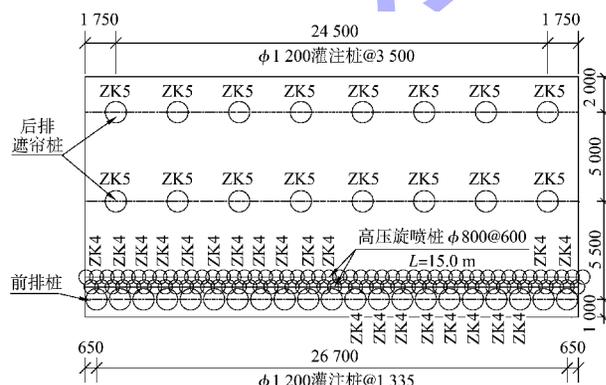


图 2 多排桩岸壁结构桩基平面布置 (单位: mm)

PLAXIS 3D, 建立如图 3 所示三维有限元分析模型。

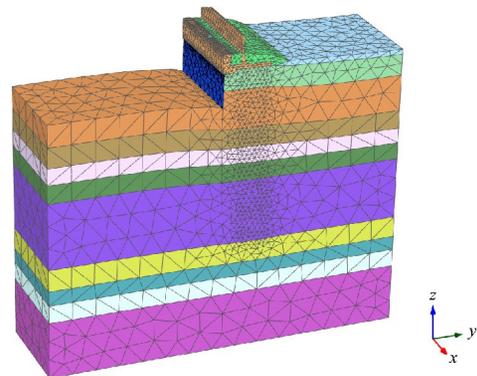


图 3 三维有限元模型

## 2 有限元模型

### 2.1 模型建立

选取多排桩岸壁结构如图 1 的典型断面, 长 28 m (码头分段面板长度), 采用有限元软件

采用摩尔库仑本构方程, 土层按设计图 1 分层创建, 参数按表 1 选取; 前排桩和后排桩均采用钻孔灌注桩, 由于前排桩桩间距较小, 故前排

桩采用连续板单元模拟,而后排桩采用散体板单元模拟,桩基材料性质如表2所示。为了避免边界效应对多排桩岸壁结构模型的影响,选取Y方向的土体为10倍的港池开挖深度,取100 m, X为28 m(码头分段面板长度),深度选取到地质勘察最深地层;采用不排水条件的土体参数;采用10节点4面体进行自由剖分网格划分,胸墙、桩基及桩基嵌入到胸墙的部分进行局部网格加密,模型土体的侧边约束采用水平位移,底部进行水平和竖向位移的全部约束。

表2 结构参数

结构名称	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比
胸墙 C40	2.500	32.5	0.2
灌注桩 C35	2.550	31.5	0.2

考虑到最不利施工水位,选取极端低水位:-0.33 m(50 a一遇)进行数值模拟,拟建场地有影响的地下水属潜水类型,主要受大气降水及地表水体(江、河、沟)的补给。本次野外勘察施工期间测得的陆域各钻孔地下水埋深约0.80~6.39 m(相应绝对高程为0.46~5.34 m)。根据上海市工程建设规范DGJ 08-37—2012《岩土工程勘察规范》,拟建场地陆域地下水高水位埋深可按场地整平后0.5 m进行计算,开挖时水位随着开挖深度以下0.5 m进行变化。

针对北护岸典型断面施工期均布荷载,防汛墙前5 kPa,防汛墙后20 m范围20 kPa。

## 2.2 施工工况模拟

采用有限元模拟施工多排桩岸壁结构典型的施工顺序为:1)地应力平衡阶段;2)激活前排钻孔灌注桩和后排遮帘桩;3)港池开挖-2 m;4)浇筑胸墙承台和回填砂;5)港池放水,水下开挖至设计泥面高程;6)施加荷载。

## 3 计算结果分析

### 3.1 参数反演及模型合理性

施工期间,浇筑完多排桩式岸壁结构,分3个阶段进行开挖,首先港池开挖-2、-6和-10 m。根据现场的航拍资料,在开挖-2 m时,开始在多

排桩式岸壁结构布置测斜监测点。本文以开挖-2 m为数据起始点,前排桩顶点(高程-0.5 m)为深度0点,计算前排桩随后开挖深度的水平位移变化值,与监测值对比,进行参数反演,见图4。

基于设计经验,计算模量取实测压缩模量的3倍,得出曲线2,曲线2(经验值)和曲线1(实测值)的多排桩式岸壁结构水平位移随深度先小幅增加,后逐渐减小,趋势一致,变形最大处的误差为18.62%,且2条曲线在桩底位置处误差最大。

基于曲线2的基础上,将⑤<sub>3,1</sub>的土层计算模量取实测压缩模量的5倍,得到曲线3,曲线3(反演值)和曲线1(实测值)较为接近,且变形最大处的误差为1.68%,因此本文基于反演参数进行后续数值模拟。

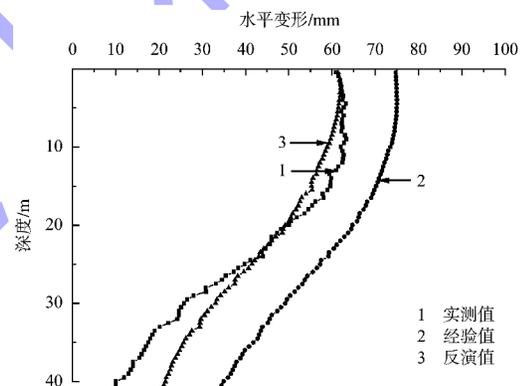


图4 实测值、经验值与反演值数据对比

### 3.2 有无遮帘桩对多排桩式岸壁结构的影响

为了研究有无后排遮帘桩对多排桩式岸壁结构整体位移和前排桩弯矩的影响,进行2组三维数值模拟:1)有遮帘桩(设计方案,遮帘桩平面布置见图2);2)无遮帘桩(在设计方案中,去掉后2排遮帘桩),研究的结果如下:

图5a)和b)为无遮帘桩和有遮帘桩时y方向(港池开挖的方向)的位移云图,从图中可以看出,整个多排桩式岸壁结构的变形从240 mm降低到200 mm,说明有后排遮帘桩的存在,增大了上部结构的整体刚度,从而降低了开挖时港池的整体位移。

在有无遮帘桩时,多排桩式岸壁结构最大位移都发生在港池开挖的下一个土层,即为④淤泥

质黏土层, 主要原因从表 1 可知, 第④淤泥质黏土层弹性模量较低, 是一个软弱下卧层, 且离港池开挖的深度很近, 因此最大位移发生在此处。

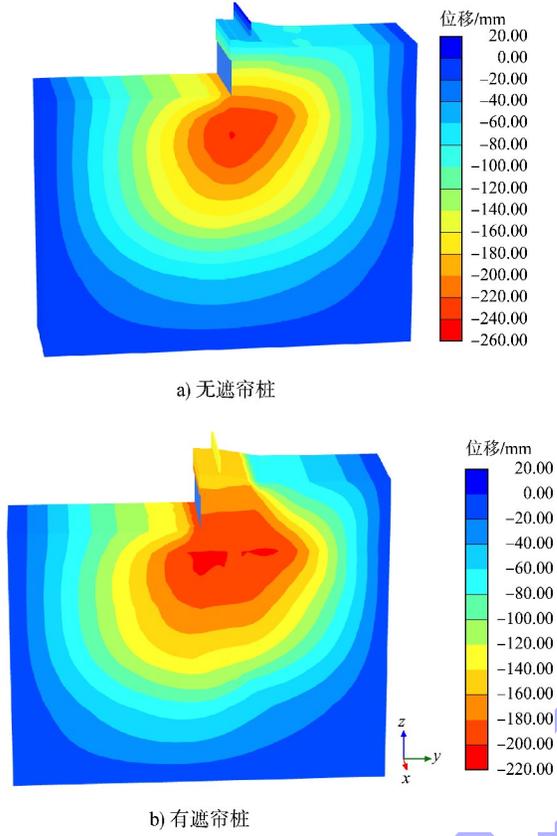


图 5 y 方向的位移云图

图 6 为有无遮帘式的多排桩式岸壁结构前排桩弯矩。由图可知, 在无遮帘桩时, 前排桩的最大弯矩为 3 519 kN·m, 在设置遮帘桩之后, 弯矩减小到 1 755 kN·m, 降低 50%, 说明遮帘桩的存在可很好地降低前排桩的内力, 主要是遮帘桩降低前排桩后面的土压力。

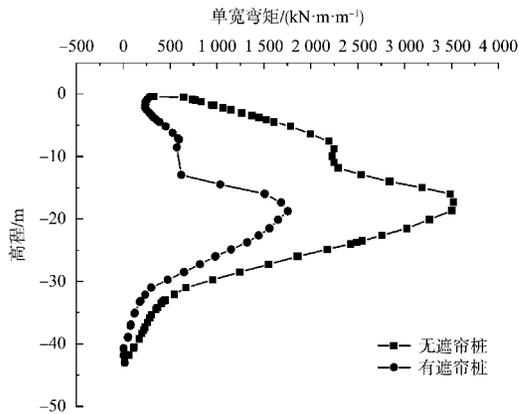
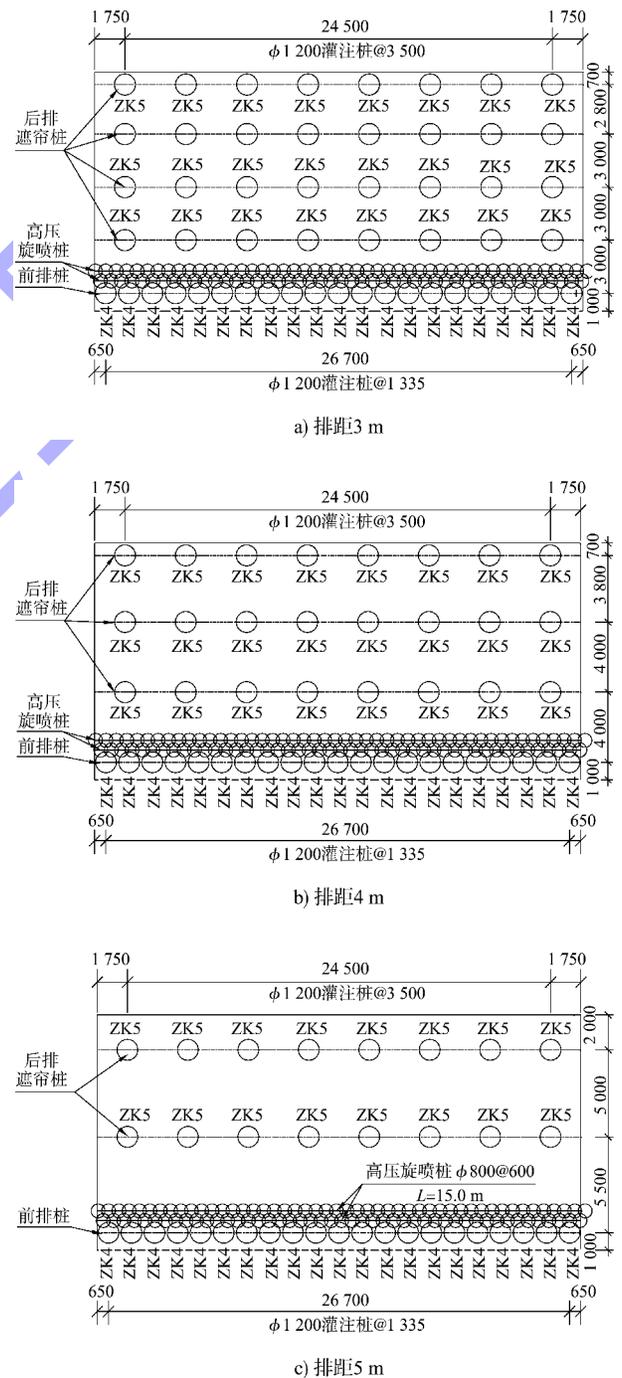


图 6 有无遮帘桩时前排桩弯矩

### 3.3 前排桩与遮帘桩的排距对前排桩的影响

后排遮帘桩主要布置在胸墙的底部, 可布置范围约为 13 m, 因此研究前排桩与遮帘桩的排距对遮帘挡土效应的影响, 设计 4 个方案: 1) 遮帘桩与前排桩间距为 3 m, 布置 4 排桩; 2) 遮帘桩与前排桩间距为 4 m, 布置 3 排桩; 3) 遮帘桩与前排桩间距为 5 m, 布置 2 排桩 (原设计方案); 4) 遮帘桩与前排桩间距为 6.5 m, 布置 1 排桩, 平面布置见图 7。



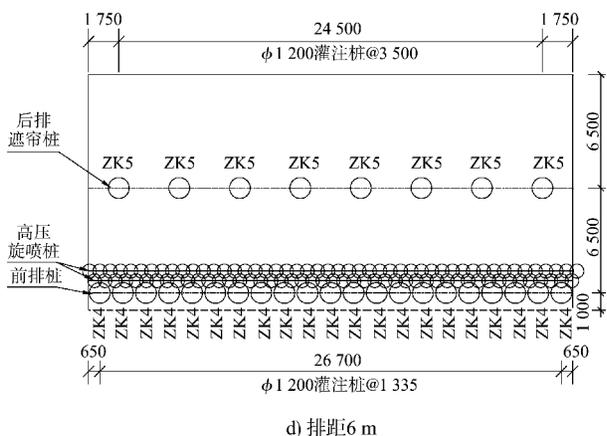


图7 前排桩与遮帘桩的排距平面布置 (单位: mm)

图8为前后排桩不同距离下多排桩式岸壁结构的前排桩弯矩。由图可知,随着排桩距离的减少,前排桩的弯矩也减少,且在前后排桩间距为3 m时,前排桩的弯矩减少到1 207 kN·m,对比原方案(排桩间距为5 m)1 755 kN·m,弯矩减少了31%,后排桩对前排桩挡土遮帘效果较好。在实际工程中前排桩后面有两排高压旋喷桩且胸墙前部分有坡度,考虑施工因素和工程造价,可布置间距为4 m的后排灌注桩,弯矩降低也较为明显。

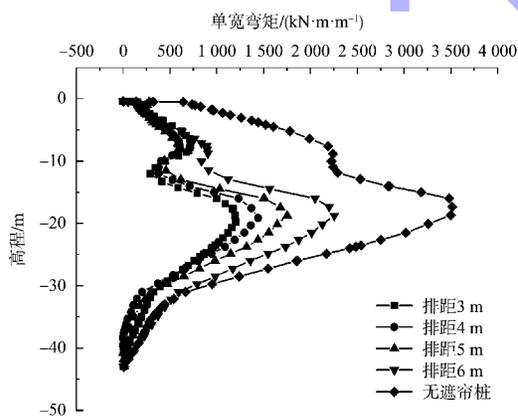


图8 不同排桩距下前排桩弯矩

### 3.4 遮帘桩间距对前排桩的影响

为了研究遮帘桩间距对前排桩的影响,通过原设计方案基础上,保持前后排桩间距不变,增加2个方案:1) 后排遮帘桩间距为2 m; 2) 后排遮帘桩间距为7 m,建立三维有限元模型进行分析。

图9为不同桩间距下多排桩式岸壁结构的前

排桩弯矩。由图可知,随着桩间距的减少,前排桩的弯矩也随之减少,且在后排桩间距为2 m时,前排桩的弯矩减少到1 517 kN·m,相比原方案(桩间距为3.5 m)1 755 kN·m,弯矩减少了13%,后排桩对前排桩挡土遮帘有一定的效果。

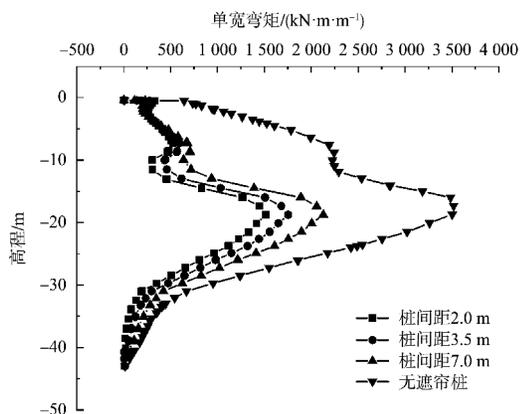


图9 不同桩间距下前排桩弯矩

### 3.5 前排桩桩身刚度对遮帘效应的影响

为了研究前排桩桩身刚度对遮帘效应的影响,在原设计方案中前排桩采用直径为φ1 200 mm,桩间距1.30~1.35 m钻孔灌注桩的基础上,增加2组不同前墙直径的钻孔灌注桩:1) 直径为φ1 000 mm,桩间距1.10~1.15 m; 2) 直径为φ1 400 mm,桩间距1.50~1.55 m。不同前排桩桩身刚度的多排桩式岸壁结构的前排桩弯矩见图10。

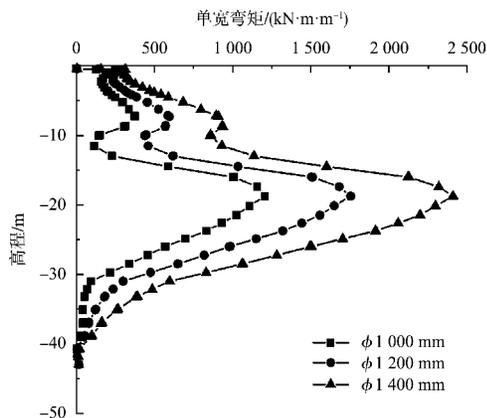


图10 不同桩身刚度下前排桩弯矩

由图10可知,原设计方案φ1 200 mm前排灌注桩时,前排桩弯矩1 755 kN·m;当增加前排桩直径为φ1 400 mm,此时弯矩增加到2 411 kN·m,增加了37%;当减少前板桩直径为φ1 000 mm,

弯矩减少到 1 206 kN·m, 减少了 31%。数值模拟结果可以得出: 随着前排桩直径的减小, 后排遮帘桩效应较为明显。因此, 在优化设计方案中, 结合工程场地条件, 可以将前排桩的直径降低为  $\phi 1\ 000\text{ mm}$ , 桩间距取 1.10~1.15 m。

### 3.6 优化设计方案

设计方案中, 前排桩采用直径为  $\phi 1\ 200\text{ mm}$ , 桩间距 1.30~1.35 m 钻孔灌注桩, 前后排桩间距约为 5 m, 相对无遮帘桩, 弯矩可以减低 50%。不同结构因素最优遮帘挡土效应见表 3。

通过改变前后排桩距、桩间距、前排桩桩身刚度, 考虑施工水平, 确定前后排距 4 m、遮帘桩间距 2 m, 前墙灌注桩  $\phi 1\ 000\text{ mm}$ , 此时遮帘挡土效应较好, 考虑场地条件及工程造价, 评价不同参数对于遮帘挡土效应的敏感性。前后排桩距、桩间距、前排桩桩身刚度的改变均会引起灌注桩数量的增加, 因此, 增加单根灌注桩对前排桩弯矩降低的幅度得出后排桩遮帘挡土效应为: 前排桩桩身刚度>桩排距>桩间距。

表 3 不同结构因素最优遮帘挡土效应

相比于原设计 参数改变	比原方案弯矩 降低幅度/%	灌注桩增加量/ (根·m <sup>-1</sup> )
排距 5 m 减小至 4 m	18	0.29
桩间距 3.5 m 减小至 2.0 m	13	0.35
前排桩 $\phi 1\ 200\text{ mm}$ 减小至 1.0 m	31	0.18

本文将原设计方案优化为前排桩直径为 1.0 m, 前后排距为 4 m, 桩间距为 2.0 m, 采用有限元模型验证优化方案的结果见图 11。

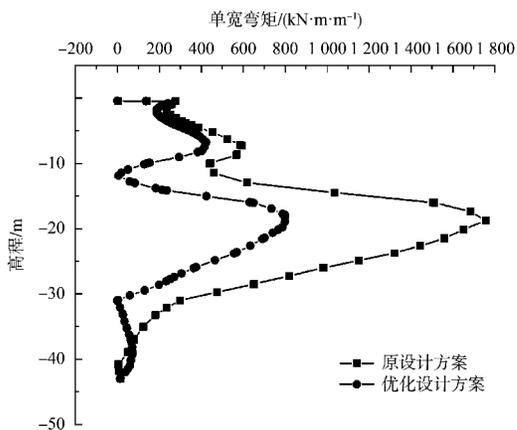


图 11 优化设计方案

由图 11 可以看出, 优化方案之后的前排桩弯矩为 799 kN·m, 相较原设计方案 1 755 kN·m, 前排桩弯矩减少 53%, 说明优化方案后排桩起到很好的遮帘挡土作用, 工程量增加 0.82 根/m, 考虑结构稳定性和工程造价因素, 可以选取合理的桩基布置方式。

## 4 结论

1) 后排遮帘桩可增加整体上部结构的刚度, 有效减少多排桩式岸壁结构整体位移, 减少前排桩的弯矩。

2) 前后排桩的排距、遮帘桩桩间距和前排桩的刚度均影响前排桩的内力, 前排桩的内力随前后排距、桩间距减小而减小; 随前排桩的刚度降低, 后排遮帘挡土效应更明显。

3) 考虑场地条件及工程造价, 评价不同参数对于遮帘挡土效应的敏感性: 前排桩桩身刚度>前排桩与遮帘桩的排距>后排遮帘桩桩间距; 在此基础上, 提出优化设计方案, 相比原方案前排桩弯矩可降低 50%。

## 参考文献:

- [1] 宣庐峻, 周杰鑫. 格型地连墙在超深船坞坞墙结构中的应用[J]. 水运工程, 2022(3): 177-184.
- [2] 蔡正银. 板桩结构土压力理论的创新发展[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(2): 201-220.
- [3] 崔冠辰, 蔡正银, 李小梅, 等. 遮帘式板桩码头工作机理初探[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 762-766.
- [4] 黄伟, 潘泓, 王燕燕. 全遮帘式板桩码头结构遮帘桩合理桩间距确定[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(1): 129-134, 147.
- [5] 惠炜, 吴跃东, 赵颖慧. 基于土拱效应的遮帘桩合理桩间距分析[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(12): 67-71, 86.
- [6] 郁松. 遮帘式板桩码头结构数值模拟分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [7] 王翠燕, 吴相豪. 遮帘桩对板桩码头地震响应的影响[J]. 水运工程, 2022(3): 55-60.
- [8] 施忠良. 遮帘式板桩码头力学性能分析[J]. 水运工程, 2019(7): 86-92.
- [9] 程烈. 遮帘式板桩接岸结构承载特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.