



大水深遮帘式钢板桩码头受力特性分析

陈立文

(广州打捞局, 广东 广州 510610)

摘要: 随着码头建设的大型化, 对钢板桩码头的承载力要求越来越高。常规的钢板桩结构在大水深条件下, 结构受力较大、造价较高, 而遮帘式钢板桩结构形式能够有效分担后方土体主动土压力, 优化前板桩和锚定体系的受力条件, 具有受力合理、变形量小和经济性等优点, 但目前对遮帘式钢板桩结构的受力特性及影响因素的研究尚不够深入, 有待于进一步研究。依托某钢板桩码头工程, 采用模型分析软件建立模型, 对影响遮帘式钢板桩受力特性的因素进行了分析。结果显示: 遮帘式较普通钢板桩结构经济性能提高约17.9%; 遮帘桩间距在2.8 m、桩直径不小于0.8 m时, 能够有效发挥遮帘效应, 土拱效应明显; 遮帘桩距前板桩间距超过7倍遮帘桩桩径时遮帘效应明显下降, 在实际工程中尚应结合上部装卸工艺综合考虑。以期为大水深遮帘式钢板桩码头设计应用提供一定的借鉴和参考。

关键词: 遮帘式钢板桩; 板桩码头; 土拱效应; 弯矩

中图分类号: U656.1+12

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)01-0105-07

Mechanical properties of deepwater curtain-type steel sheet pile wharf

CHEN Liwen

(Guangzhou Salvage Bureau, Guangzhou 510610, China)

Abstract: With the large-scale construction of wharves, increasing demands are being placed on the bearing capacity of steel sheet pile wharves. The conventional steel sheet pile structure is subjected to high stress and high cost under deep water conditions, while the curtain-type steel sheet pile structure can effectively share the active soil pressure of the rear soil, optimize the stress conditions of the front sheet pile and anchoring system, and has the advantages of reasonable load distribution, small deformation, and economic efficiency. However, the current research on the stress characteristics and influencing factors of the curtain type steel sheet pile structure is not deep enough and needs further research. Based on a steel sheet pile wharf project, this paper uses model analysis software to establish a model and analyze the factors that affect the stress characteristics of curtain type steel sheet piles. The results show that the economic performance of the curtain-type steel sheet pile structure is improved by approximately 17.9% relative to the conventional steel sheet pile structure. When the distance between curtain piles is 2.8 m and the pile diameter is at least 0.8 m, the curtain effect can be fully utilized, leading to a pronounced soil arching effect. However, if the distance between the curtain pile and the front sheet pile exceeds 7 times the diameter of the curtain pile, the curtain effect diminishes considerably. In practical engineering applications, it is essential to comprehensively consider the loading and unloading processes in conjunction with the requirements of the upper structure. This study is intended to offer valuable references and guidance for the design and application of deep-water curtain-type steel sheet pile wharves.

Keywords: curtain-type steel sheet pile; sheet pile wharf; soil arching effect; bending moment

收稿日期: 2025-04-25 录用日期: 2025-06-19

作者简介: 陈立文(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 注册港航工程师、一级注册结构工程师、注册岩土工程师。从事港口工程的咨询与设计工作。

钢板桩码头作为码头主要结构形式之一，在码头建设工程中发挥了重大的作用。由于钢板桩具有自身重量轻、抗弯刚度大、施工快速等优点^[1]，各国将钢板桩广泛应用于码头、挡墙及其他围护工程中。起初主要用在水深较小的工程中，但随着码头建设的大型化，船舶吨级不断增加，急需对传统钢板桩结构形式进行优化改良，大水深遮帘式钢板桩码头应运而生^[2]。在10万吨级京唐港32#泊位工程中采用了全遮帘式板桩码头结构^[3]，全遮帘式板桩在码头运行中受力和变形情况良好。

王开放等^[4]通过有限元软件对多排桩式岸壁结构遮帘挡土效应进行研究，对多排桩的挡土效果进行了评价；彭钰皓等^[5]以X形桩代替传统的矩形桩，对遮帘式板桩进行了静力研究；施忠良^[6]运用岩土有限元软件对影响板桩码头受力的参数进行了分析，得出土体参数对结构内力和位移影响显著；张昊等^[7]研究了遮帘式板桩码头和单锚式板桩码头在开挖过程中前板桩土压力和变形的区别；黄伟等^[8]基于土拱效应对板桩码头遮

帘桩间距的确定方法进行了初步探讨。

本文根据某码头项目，对影响遮帘式钢板桩受力特性的因素进行分析，并对遮帘桩的桩径和距前板桩的间距等布置方式进行了分析，得出相应的经验数据，期望对今后相关工程提供一定参考。

1 工程概况

某地拟建设120 000 DWT板桩码头工程，码头分近期和远期进行建设，近期按70 000 DWT开挖，结构设计按120 000 DWT预留。码头面高程为6.2 m，码头前沿设计高程为-15.9 m，在设计高水位下前沿水深达到了20 m。为适应大水深的设计条件，码头采用遮帘式钢板桩结构形式，前板桩采用AZ26-700型钢板桩，钢板桩底高程为-28.0 m，顶部为矩形现浇钢筋混凝土胸墙，混凝土胸墙顶高程6.2 m，底高程1.9 m，钢拉杆分为前拉杆和后拉杆，遮帘桩采用钢管桩，钢管桩底高程为-30.0 m。遮帘式钢板桩码头典型断面见图1。

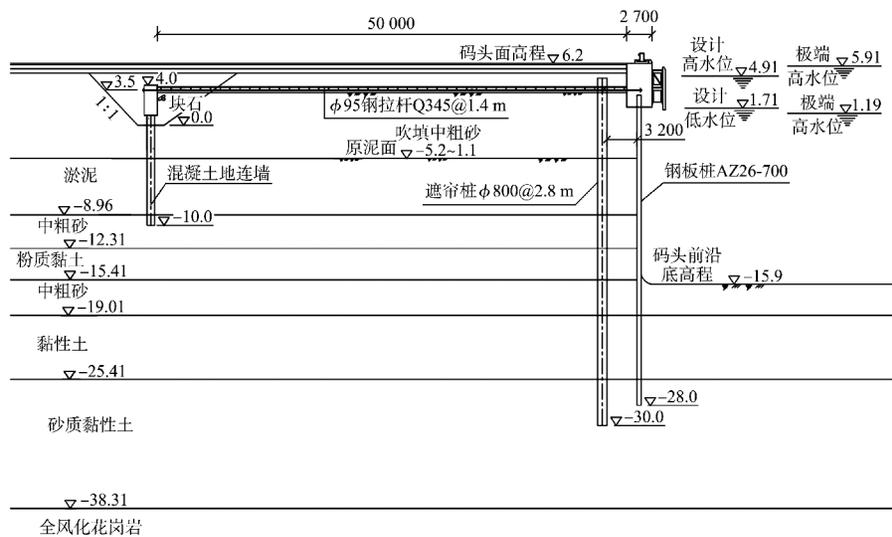


图1 码头典型断面(尺寸:mm;高程:m)

Fig. 1 Typical cross-sectional of the wharf(dimension :mm ;elevation :m)

工程地质条件主要以淤泥、中粗砂、粉质黏土和黏性土为主，基岩为全风化花岗岩，原始泥面高程为-5.2~1.1 m，前期已在原泥面基础上建设围埝并吹填形成陆域，吹填料为工程周边区域

的中粗砂，吹填前在淤泥层打设塑料排水板以减小后期沉降，中粗砂采用强夯法进行了地基加固，各土层物理力学参数见表1。

表 1 土层物理力学参数
Tab. 1 Physical and mechanical parameters of soil layers

土体	分层	土质	天然密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	黏结力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	地基土水平抗力系数的 比例系数/($\text{MN}\cdot\text{m}^{-4}$)
地层	1	淤泥	1.78	5.2	3	1.5
	2	中粗砂①	1.83	0	32	4.0
	3	粉质黏土	1.82	10	15	4.0
	4	中粗砂②	1.86	0	33	4.0
	5	黏性土	1.89	30	18	4.5
	6	砂质黏性土	1.92	28	22	5.0
	7	全风化花岗岩	2.02	0	21	7.0
吹填土	1	中粗砂	1.85	0	33	4.0

根据地质条件特点，全风化花岗岩埋深在 40 m 以上，且水深较大特点，采用常规的拉杆式钢板桩结构，会使钢板桩截面过大、深度较长^[9]，不利于结构受力和节省投资，因此考虑采用遮帘桩分担前板桩所承受的主动土压力，减小钢板桩入土深度和截面尺寸，同时对减小拉杆拉力及后方锚定墙的受力条件均有利^[10]。该工程钢板桩进入砂质黏性土中 2 m 以上，遮帘桩需较前板桩长以满足遮帘桩效果，桩底高程-30.0 m。

2 模型建立

2.1 结构受力计算模式

采用平面杆系有限单元法进行结构分析，钢板桩及钢管桩入土部分采用弹性地基梁模式，并考虑板桩与遮帘桩之间用土连杆连接的结构模式。土压力计算考虑遮帘的作用，遮帘桩上承受遮帘面上传来的土压力，板桩承受板桩与遮帘桩之间土的土压力^[11]。受力计算模式见图 2。

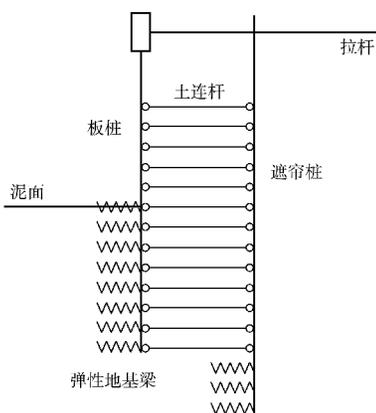


图 2 遮帘式板桩码头结构受力计算模式

Fig. 2 Calculation mode of stress on curtain-type sheet pile wharf structure

2.2 遮帘式板桩模型

遮帘式板桩的作用效应标准值计算采用有限元法，将钢板桩与遮帘桩之间的土体简化为土连杆受压体系，土连杆的弹性系数按下式计算：

$$K_s = E_i \left(\frac{A}{b} \right) \quad (1)$$

式中： K_s 为土连杆的弹性系数，受拉时取 0 kN/m； E_i 为土体弹性模量， kN/m^2 ； A 为土连杆的竖向间距乘两倍桩径， m^2 ； b 为前板桩与遮帘桩净距， m 。

钢板桩入土部分采用弹性地基梁单元，设置弹簧单元模拟钢板桩前方的土体被动土压力。遮帘桩位于钢板桩底部的部分同样设置弹簧单元，模拟遮帘桩底部的被动土压力。钢板桩的弹性系数采用 m 法确定。后方锚碇结构根据实际情况设置弹簧结构。对钢板桩及锚碇板弹簧模拟取 1 m 宽度，对遮帘桩弹簧模拟取桩的换算宽度， d 为桩径，计算见下式：

$$b_0 = \begin{cases} 0.9(d+1) & (d \geq 1.0 \text{ m}) \\ 0.9(1.5d+0.5) & (d < 1.0 \text{ m}) \end{cases} \quad (2)$$

各构件前方的土体弹簧单元参数取值见表 2。

钢板桩上部胸墙为混凝土现浇结构，将其设置为线弹性材料，钢板桩顶端与现浇胸墙固结成整体。钢拉杆设置为锚杆单元，因为拉杆只承受轴向拉力，不承受压力及弯矩。

表 2 土体弹簧参数取值
Tab. 2 Soil spring parameters

构件	分层	土质	地基土水平抗力系数的比例系数/(MN·m ⁻⁴)	弹簧刚度/(kN·m ⁻¹)
钢板桩	1	中粗砂②	4.0	6 220
	2	黏性土	4.5	28 000
	3	砂质黏性土	5.0	54 000
遮帘桩	-	砂质黏性土	5.0	9 000(<i>d</i> =0.8 m)
锚碇板	1	吹填中粗砂	4.0	10 000
	2	淤泥(固结)	1.5	6 750
	3	中粗砂①	4.0	38 000

码头设计船型为 120 000 DWT 吨级散杂货船, 近期按 70 000 DWT 开挖, 结构设计按 120 000 DWT 预留。板桩码头施加荷载情况为: 码头面堆货荷载为 40 kPa; 船舶系缆力 1 200 kN, 系船缆的水平投影与码头前沿线所成夹角 30°, 与水平面夹角 15°, 系船柱受力分布不均匀系数 1.3; 护舷间距为 15 m, 靠船构件反力 1 650 kN。

系船柱受力分布不均匀系数 1.3; 护舷间距为 15 m, 靠船构件反力 1 650 kN。

利用模型分析软件, 对板桩结构简化为每延米结构, 整体结构按照有限元计算, 并考虑拉杆的不均匀系数及综合效应系数。码头三维模型见图 3。

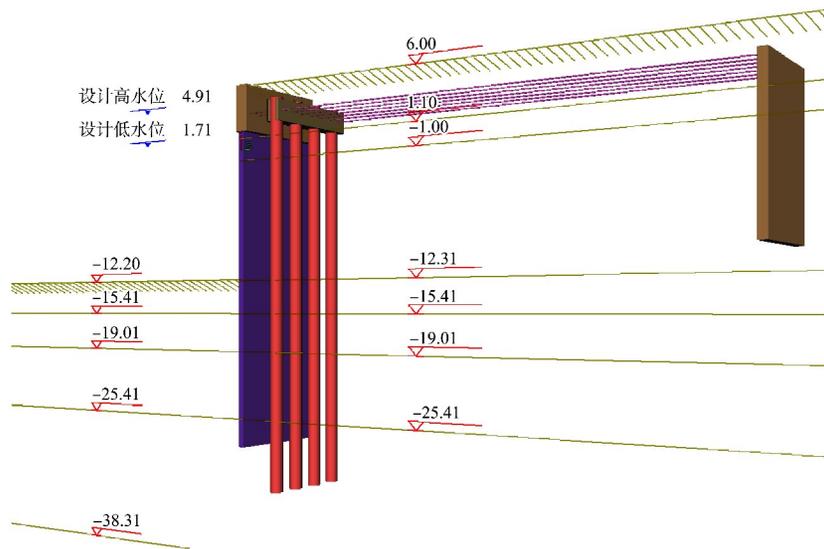


图 3 遮帘式板桩码头模型(单位:m)

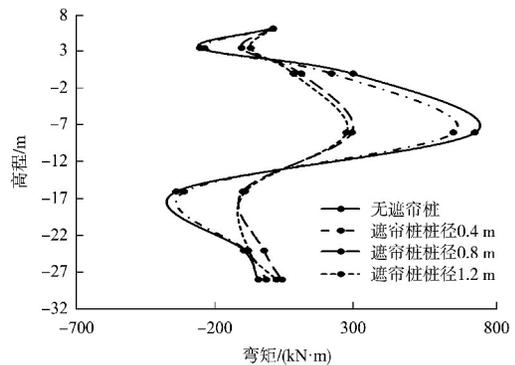
Fig. 3 Model of curved-type sheet pile wharf (unit:m)

3 计算结果分析

3.1 遮帘桩桩径影响分析

遮帘桩桩径大小直接影响遮帘效应, 桩径过小会使桩间距减小从而增加遮帘桩数量, 同时也会使土拱作用得不到有效发挥, 桩径过大会造成浪费, 并造成经济损失。为探究桩径对遮帘效应的影响, 将桩间距固定为 2.8 m, 选取桩径分别为 0.4、0.8、1.2 m 这 3 种工况进行分析, 同时考虑桩径为 0 m (即无遮帘桩工况)。不同桩径下前板桩弯矩分布曲线见图 4a), 遮帘桩弯矩分布

曲线见图 4b)。



a) 前板桩弯矩

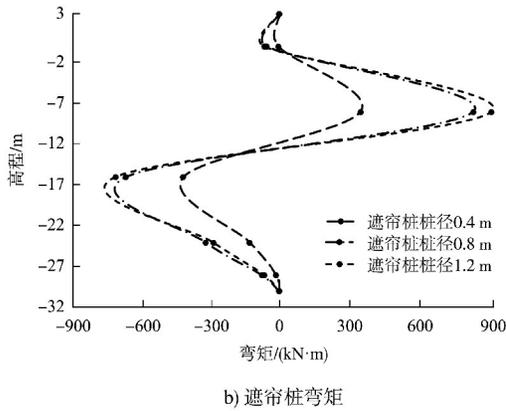


图 4 不同桩径下弯矩分布

Fig. 4 Bending moment distribution under various pile diameters

由图 4a)可知，当不设置遮帘桩时，钢板桩弯矩最大值 720 kN·m，最小值-345 kN·m；当遮帘

桩间距 2.8 m，距前板桩 3.2 m 工况下，桩径 0.4 m 时前板桩弯矩最大值 655 kN·m，最小值-315 kN·m，桩径 0.8 m 时前板桩弯矩最大值 307 kN·m，最小值-108 kN·m，桩径 1.2 m 时前板桩弯矩最大值 295 kN·m，最小值-99 kN·m。分析可得，桩径 0.4 m 遮帘效应不大，前板桩弯矩仅减小 8.69%~9.02%，桩径 0.8 m 遮帘效应较好；前板桩弯矩减小 57.36%~68.69%，桩径 1.2 m 遮帘效应与桩径 0.8 m 差别较小；前板桩弯矩减小 59.02%~71.3%。从工程经济性考虑，采用桩基直径 0.8 m 能够发挥遮帘效应，土拱效应明显。由图 4b)可知，遮帘桩弯矩在桩径 0.8 m 时较桩径 0.4 m 有较大提高。对比数据见表 2。

表 2 不同桩径下前板桩、遮帘桩弯矩对比

Tab. 2 Comparison of bending moments between front sheet piles and curtain piles under various pile diameters

桩径	前板桩			遮帘桩	
	最大弯矩/(kN·m)	最小弯矩/(kN·m)	减小率/%	最大弯矩/(kN·m)	最小弯矩/(kN·m)
无遮帘桩	720	-345	-	-	-
遮帘桩桩径 0.4 m	655	-315	8.69~9.02	352	-420
遮帘桩桩径 0.8 m	307	-108	57.36~68.69	842	-668
遮帘桩桩径 1.2 m	295	-99	59.02~71.30	921	-715

3.2 遮帘桩与前板桩间距影响分析

遮帘桩与前板桩的间距对遮帘效应有一定影响，间距不宜过大，否则会影响遮帘效应，同时应考虑胸墙结构形式和码头门机轨道梁的布置。遮帘桩在桩径 0.8 m，桩基间距 2.8 m 工况下，选取遮帘桩与前板桩间距分别为 2.0、3.2、4.4、5.6 m 这 4 种方案，进行对比分析。遮帘桩与前板桩不同间距下前板桩、遮帘桩弯矩分布曲线见图 5。

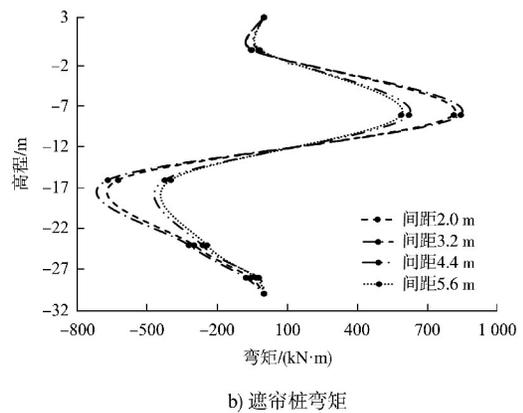
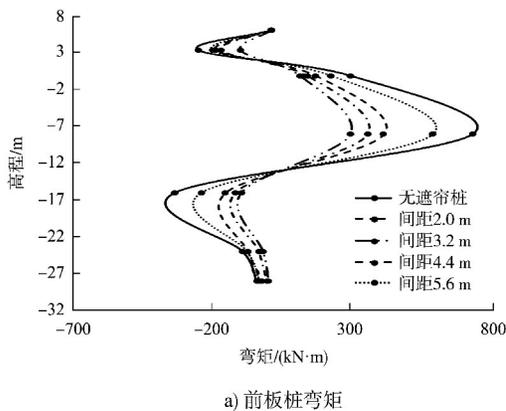


图 5 遮帘桩与前板桩不同间距下弯矩分布对比

Fig. 5 Comparison of bending moment distribution between curtain piles and front sheet piles at different distances

由图 5 可知，与前板桩间距 2.0~4.4 m 时，遮帘效果较好，前板桩弯矩可减小约 43.90%~68.69%；在间距 2.0 m 时，由于间距较小，遮帘桩后方大部分土压力将集中在遮帘桩上，造成遮帘桩向海侧位移偏大，土连杆传导至前板桩土压



a) 前板桩弯矩

力也相应偏大,且间距偏小会造成工程量增大,造价提高;当间距超过 5.6 m 时遮帘效果有所下降,前板桩弯矩减小约 19.45%~27.21%,这是由

于土拱效应范围离前板桩较远,遮帘桩前沿的土体仍能对前板桩造成较大的土压力。距前板桩 2.0~3.2 m 时,遮帘桩弯矩较大。对比数据见表 3。

表 3 遮帘桩与前板桩不同间距下的弯矩对比

Tab. 3 Comparison of bending moment between curtain piles and front sheet piles at different distances

间距	前板桩		减小率/%	遮帘桩	
	最大弯矩/(kN·m)	最小弯矩/(kN·m)		最大弯矩/(kN·m)	最小弯矩/(kN·m)
无遮帘桩	720	-345	-	-	-
间距 2.0 m	347	-129	51.82~62.45	812	-624
间距 3.2 m	307	-108	57.36~68.69	842	-668
间距 4.4 m	403	-164	43.90~52.47	622	-424
间距 5.6 m	578	-251	19.45~27.21	589	-402

由分析可知,遮帘桩与前板桩间距应保持在一定范围以内,超过一定间距时遮帘效应急剧下降,以该工程为例,超过 7 倍遮帘桩桩径时遮帘效应已明显下降。在实际工程中,应综合考虑上部装卸工艺,当设置门机轨道梁时,可将遮帘桩设置于门机前轨道梁周线下方或前轨道梁轴线附近。

3.3 有无遮帘桩对工程量影响分析

为分析遮帘桩板桩码头与普通拉杆式板桩码头在工程原材料的区别,以相同的荷载条件和地基条件进行断面验算,得到满足规范要求的最小拉杆式板桩码头,不设置遮帘桩,调整前板桩型号及拉杆、锚定墙参数,并统计每延米板桩墙所需钢材工程量,对比分析两者每延米钢材工程量。经计算,当不设置遮帘桩时,需要将原 AZ26-700 型号的钢板桩更改为结合墙-管桩结合墙形式的组合钢板桩,型号为 $\phi 1\ 300\delta 18 + AZ28-700$,入土深度-30 m,以抵抗后方土压力,拉杆直径不变,拉杆间距由 1.4 m 变为 1.0 m。每延米钢材工程量对比见表 4。

表 4 有无遮帘桩工程量对比

Tab. 4 Comparison of quantities of work with and without curtain piles

遮帘桩设置	钢材用量/(t·m ⁻¹)			总计
	前钢板桩	遮帘桩	拉杆	
无	10.111	-	2.781	12.892
有	5.024	3.568	1.986	10.578

由表 4 可知,设置遮帘桩后,钢板桩断面受力得到优化,不考虑锚定结构的变化下,码头前板桩和拉杆所用钢材量可有效减少,一方面由于遮帘桩的遮帘效应和土拱效应的有效发挥,减小前板桩和拉杆受力,从而减少前板桩及拉杆用钢量;另一方面由于前板桩受力更小,板桩入土深度可适当减小,以满足踢脚稳定性。经过计算,每延米钢材用量可减少约 17.92%,达到了结构受力更合理、工程投资减少的目的。

4 结论

1) 遮帘式钢板桩结构充分利用遮帘效应和土拱作用,受力明确合理,相较普通拉杆式钢板桩结构,其前板桩等主要受力构件工程量节省约 17.9%。

2) 遮帘桩间距为 2.8 m 时, 桩基直径大于或等于 0.8 m 能够有效发挥遮帘效应。项目遮帘桩的距径比为 3.5, 在工程条件下, 土拱效应明显, 起遮帘作用的钢管桩承担了一部分侧向土压力, 有效地减小了前板桩受力, 从而减少前板桩和拉杆的钢材用量。

3) 遮帘桩距前板桩间距超过 7 倍遮帘桩桩径时, 遮帘效应明显下降。在实际工程中应结合上部装卸工艺, 综合考虑门机前轨道梁结构形式, 选取合理的桩距。

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.
LIU Y X. Design conception and practice of building sheet pile wharfs in deep waters: development of a new structure of covered type of sheet pile wharf [J]. Port engineering technology, 2005(S1): 12-15.
- [2] 刘永绣, 吴荔丹, 徐光明, 等. 遮帘式板桩码头工作机制[J]. 水利水运工程学报, 2006(2): 8-12.
LIU Y X, WU L D, XU G M, et al. Working mechanism of sheet pile wharf with barrier piles [J]. Hydro-science and engineering, 2006(2): 8-12.
- [3] 蔡正银, 侯伟, 关云飞. 遮帘式板桩码头的工作机理[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(10): 1745-1750.
CAI Z Y, HOU W, GUAN Y F. Mechanism of sheet-pile wharf with barrier piles [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2015, 37(10): 1745-1750.
- [4] 王开放, 朱艳, 周杰鑫, 等. 多排桩式岸壁结构遮帘挡土效应分析[J]. 水运工程, 2024(12): 217-223.
WANG K F, ZHU Y, ZHOU J X, et al. Retaining effect of covered pile on multi-row pile quay wall [J]. Port & waterway engineering, 2024(12): 217-223.
- [5] 彭钰皓, 张竣豪, 张秀芳, 等. 采用 X 形桩的遮帘式板桩码头结构静力分析[J]. 水运工程, 2021(4): 30-38, 123.
PENG Y H, ZHANG J H, ZHANG X F, et al. Static analysis of covered sheet pile wharf structure using X-shaped piles [J]. Port & waterway engineering, 2021(4): 30-38, 123.
- [6] 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.
SHI Z L. Mechanical properties analysis of covered type of sheet pile wharf [J]. Port & waterway engineering, 2019(7): 86-92.
- [7] 张昊, 邓永锋, 刘夫江, 等. 遮帘式板桩码头结构土压力特性模型试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2015, 45(6): 1175-1179.
ZHANG H, DENG Y F, LIU F J, et al. Model experiment study on soil pressure characteristics of sheet-pile barrier wharf structure [J]. Journal of southeast university (natural science edition), 2015, 45(6): 1175-1179.
- [8] 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.
HUANG W, PAN H, WANG Y Y. Determination on rational spacing of barrier pile for all-covered type of sheet pile wharf [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2012, 8(1): 129-134, 147.
- [9] 李士林, 徐光明. 单锚板桩结构码头离心模型试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2008(1): 67-72.
LI S L, XU G M. Centrifuge modeling tests for sheet-pile bulkhead anchored by single layer of tie-rods [J]. Hydro-science and engineering, 2008(1): 67-72.
- [10] 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.
WANG C Y, WU X H. Influence of covered pile on seismic response of sheet-piled wharf [J]. Port & waterway engineering, 2022(3): 55-60.
- [11] 李景林, 王剑平, 蔡正银, 等. 遮帘桩方案改造板桩码头离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 978-982.
LI J L, WANG J P, CAI Z Y, et al. Centrifuge model tests on sheet-piled wharf renovated by barrier pile project [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2006, 28(8): 978-982.