

组合围护形式在软土地区坞口基坑中的应用

杨连佼¹, 许光亮¹, 朱殷航²

(1. 中交第三航务工程局有限公司上海分公司, 上海 200030;

2. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 坞口基坑具有临江的地理特点, 传统方案采用统一的钻孔灌注桩围护形式, 不能很好满足后续拆除以及船舶下水的特殊使用需求。依托上海软土地区某坞口基坑工程, 提出钢板桩+灌注桩组合的围护形式, 临江侧采用钢板桩, 发挥其易于施工和拆除的特点, 其余3侧采用钻孔灌注桩, 保证围护结构的整体刚度, 搭配止水帷幕和支撑体系在施工过程中共同发挥作用。现场实施结果表明, 在钢板桩和灌注桩的组合围护下, 坞口基坑的变形和支撑受力均得到有效控制, 验证了组合围护形式在工程应用中的可行性, 可为船坞基坑工程的设计施工提供参考。

关键词: 组合围护形式; 坞口基坑; 实测受力变形

中图分类号: U652

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)06-0218-06

Application of compound retaining system in dock entrance foundation pit in soft deposit

YANG Lianjiao¹, XU Guangliang¹, ZHU Yinhang²

(1. CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Shanghai Branch, Shanghai 200030, China;

2. School of Naval, Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Dock entrance foundation pit is usually by the water, and the uniform retaining structure like bored pile is often used in conventional engineering, which does not meet the special needs of subsequent dismantling and ship launching. In this paper, a compound retaining system of steel sheet pile and bored pile is proposed based on a rectangular foundation pit of a dock entrance in Shanghai soft deposit. The excavation is retained by steel sheet pile at riverside which is advantageous in construction and dismantling and bored pile at the other 3 sides which is stiff in retaining. The retaining structure, the waterproof curtain and the supporting system play a joint role in the construction process. The field construction shows that the deformation and force of the dock entrance foundation pit retained by a combination of steel sheet pile and bored pile are both effectively controlled, which verifies the feasibility of the compound retaining system in engineering application, and can provide reference for the design and construction of the dock entrance foundation pit.

Keywords: compound retaining system; dock entrance foundation pit; measured forces and deformations

随着我国船舶工程的蓬勃发展, 船舶产业在国民经济中的重要性不断体现^[1], 船舶与海洋工程的发展也是我国建设海洋强国过程中的重要一环。船坞工程作为船舶工程的基础, 尤其是坞口部分处在水陆交接处, 是属于港口工程和岩土工

程两大领域交叉的特种工程, 对设计和施工的要求极高, 特别是在软土地基上, 坞口及其邻近区域的建造方案或围堰方案尤其重要^[2]。

已有坞口基坑工程支护形式中, 多采用排桩搭配止水帷幕作为围护结构, 并采用水平支撑体

收稿日期: 2023-10-18

作者简介: 杨连佼 (1983—), 男, 高级工程师, 从事港口航道海岸工程施工技术。

系, 如: 泰州某船坞坞口基坑最大挖深 16.5 m, 采用 $\phi 1\ 000@1\ 150$ 钻孔灌注桩作为围护形式, 用高压旋喷桩作为止水帷幕^[3]; 张家港某船坞坞口基坑最大挖深 14.4 m, 采用 $\phi 900@1\ 050$ 钻孔灌注桩, 用高压旋喷桩作为止水帷幕^[4]; 上海某坞口基坑采用 $\phi 900$ 钻孔灌注桩搭配 SMW 工法止水帷幕^[5]; 新加坡某船厂船坞采用双排钢板桩围堰形式^[6]。此外, 也有船坞坞墙采用地下连续墙作为围护结构, 可以兼作止水结构^[7]。虽然坞口基坑可选用的围护形式较多, 但目前工程中大多采用单一的围护形式, 少有混合使用的情况, 而坞口基坑实际场地环境复杂, 采用不同形式的围护结构能够发挥各自的优点, 合理使用可产生更高的经济效益。

本文介绍了中船长兴造船基地二期工程 2[#]

船坞工程坞口基坑的工程难点和相应设计措施, 并根据工程的实施效果验证组合围护形式的可行性, 旨在为软土地区的船坞工程建设提供参考。

1 工程概况

船坞工程位于上海崇明县长兴岛南岸, 西起长兴岛跃进港、东至横沙小港, 南临长江, 其中坞口基坑位于船坞西侧, 西临长江, 平面尺寸为 144.4 m×32.4 m(长×宽), 开挖面埋深 16.0 m(高程-12.0 m)。基坑四周无重点保护建筑。

拟建场地地形、地貌条件较为复杂, 场地陆域和近岸处属河口、砂岛、砂嘴和潮滩地貌类型, 水域为河床地貌。根据施工勘察结果, 基坑地基土层的工程特性指标参数见表 1。

表 1 基坑场地土层工程特性指标参数

土层	名称	直剪(固快)黏聚力 c/kPa	直剪(固快)内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	压缩系数 a_{1-2}/MPa	压缩模量 E_{s1-2}/MPa
② ₃₋₁	砂质粉土	8	27.0	0.21	9.16
② ₃₋₃	黏质粉土夹淤泥质粉质黏土	10	23.5	0.34	7.56
④	淤泥质黏土	12	11.0	1.01	2.37
⑤ ₁₋₁	黏土	14	13.0	0.83	2.73
⑤ ₁₋₂	粉质黏土	16	16.0	0.66	3.39
⑤ ₃₋₁	粉质黏土夹粉性土	20	20.5	0.45	4.46
⑤ _{3-2a}	粉质黏土夹粉性土	21	22.5	0.41	4.96
⑦ _t	砂质粉土与粉质黏土互层	12	28.5	0.25	9.11

场地地下水有潜水和承压水 2 种类型, 其中潜水埋深 0.70~4.70 m。场地第⑦层与第⑨层含砾粉砂相连, 为本场地的第 1、2 承压含水层。坞口基坑最大开挖底高程-12.0 m, 而第⑦层层面最浅埋深约-51.00 m, 按目前上海区域观测资料(承压水头埋深 3.0 m)考虑, 承压水对本工程基坑施工无影响。

2 工程重难点

2.1 坞口围护设计

坞口基坑作为连接船坞与水域的特殊结构, 其

施工不同于一般基坑, 后续临江侧需要拆除围护结构以连通水陆, 方便船舶下水。因此, 围护结构设计需要充分考虑后续的施工工况和难度, 在此基础上还需要考虑濒海软土地区大型基坑的变形控制。

2.2 坞口止水帷幕设计

基坑面临的另一技术难点则是在濒海地区高地下水位场地的基坑防渗。基坑场地地下水位较高, 潜水位埋深 0.70~4.70 m, 对施工影响较大; 此外基坑西邻长江, 地下水位具有充足的补给。因此, 需要设计合理的止水帷幕以隔绝坑内外地下水, 减小坑外水位对工程的影响。

3 坞口基坑支护方案

3.1 围护结构设计

为了解决以上工程重难点, 坞口基坑选用一种组合围护结构。在基坑临江一侧采用 WRU35A 钢板桩作为挡土结构, 围护深度 36.5 m, 钢板桩的优点是可重复使用, 可用于容易打入的黏土、砂土和砂黏土中挡土和挡水, 同时在后续的拆除工况中施工难度更低。钢板桩施打前需在锁口全长范围内涂塞止水材料, 采用振动锤插桩后柴油锤打桩工艺; 钢板桩施打时设置导架, 采用“先插后打、阶梯形分层打入”的施工工艺, 以保证轴线精度和垂直度。

基坑其余 3 侧采用 $\phi 1\ 100\ \text{mm} @ 1\ 250\ \text{mm}$ 钻孔灌注桩作为挡土结构, 围护深度 38.5 m。钻孔灌注桩适用于中等深度基坑, 优点是刚度大、施工简单, 可插入坚硬土层和岩石中, 无打桩振动和噪声, 且能够有效控制变形。施工中, 钻孔灌注桩混凝土强度等级为 C35 (水下 C40), 水泥等级不低于 42.5 级, 每立方米用量不小于 400 kg。在浇筑水下混凝土时, 严格按照规范施工, 混凝土的充盈系数不小于 1.0。

上述 2 种围护形式均能够有效适配坞口基坑的工程特点。在坞口基坑主体结构施工完成后, 通过水下切割的方式拆除临江侧钢板桩, 连通水陆。

3.2 止水帷幕设计

考虑到坞口基坑较高的止水要求, 同时结合围护结构的特点, 灌注桩不具有挡水能力, 而钢板桩的止水效果有限, 因此在整体围护结构外布置止水帷幕。钢板桩外设置 $\phi 1\ 000\ \text{mm} @ 800\ \text{mm}$ 高压旋喷桩作为止水帷幕, 插入深度 31.0 m。采用新二重管法进行高压旋喷施工, 水泥浆液的压力不小于 35 MPa, 灌浆水泥采用 42.5 级普通硅酸盐水泥, 旋喷桩每立方米土体中的水泥掺入量不小于 600 kg, 每排孔按三序孔跳孔施工并保证桩的连续搭接。

灌注桩外设置具有良好止水效果的 $\phi 1\ 000\ \text{mm} @ 750\ \text{mm}$ SMW 工法桩作为止水帷幕, 插入深度

31.0 m。搅拌桩桩身采用一次搅拌工艺, 水泥和原状土均匀拌和, 下沉及提升均为喷浆搅拌, 在桩底部分重复搅拌注浆; SMW 搅拌桩水泥掺量为 20%, 采用不低于 42.5 级的普通硅酸盐水泥。施工完成后, 采用钻孔取芯法检验搅拌桩质量, 测得高掺量搅拌体 28 d 龄期无侧限抗压强度 q_u 不小于 1.5 MPa。

围护施工完成后、坞口基坑开挖前进行压水试验, 测得止水帷幕抗渗系数小于 $10^{-6}\ \text{cm/s}$, 满足围护抗渗要求。围护结构与止水帷幕见图 1。

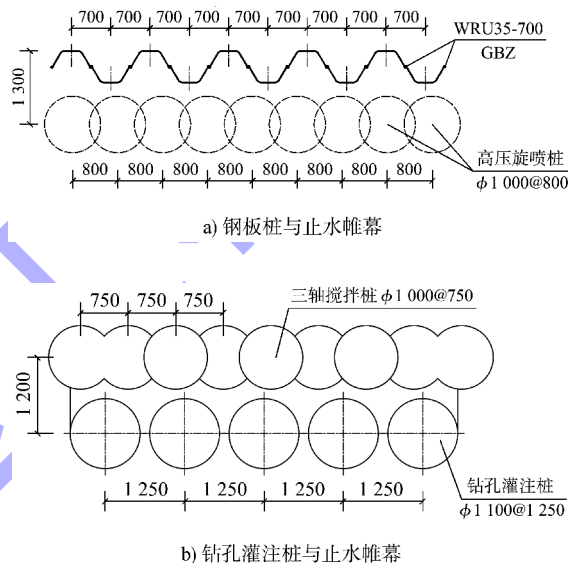


图 1 围护结构与止水帷幕 (尺寸: mm; 高程: m)

3.3 支撑体系设计

基坑内设 5 道支撑围檩体系 (圈梁及第 1、2 道支撑已施工)。第 1 道为混凝土支撑, 埋深 0.5 m, 支撑断面尺寸 800 mm×900 mm (宽 B ×高 H)、连杆尺寸为 600 mm×800 mm; 其余为钢支撑, 围檩采用双拼的 H700×300 型钢, 支撑均采用双拼的 $\phi 609\ \text{mm} \times 14$ 钢管, 连杆和剪刀撑采用 H400×400 型钢或 $\phi 406\ \text{mm} \times 12$ 钢管, 钢支撑埋深分别为 4.7、8.2、11.0 和 13.8 m。钢支撑在施工过程中施加预应力, 其大小为设计计算中的轴力大小, 第 2~5 道支撑施加轴力分别为 2 900、3 400、3 600 和 2 400 kN。以第 1 道支撑为例 (其余支撑布置形式相同), 基坑平面见图 2。坞口基坑整体支护结构剖面见图 3。

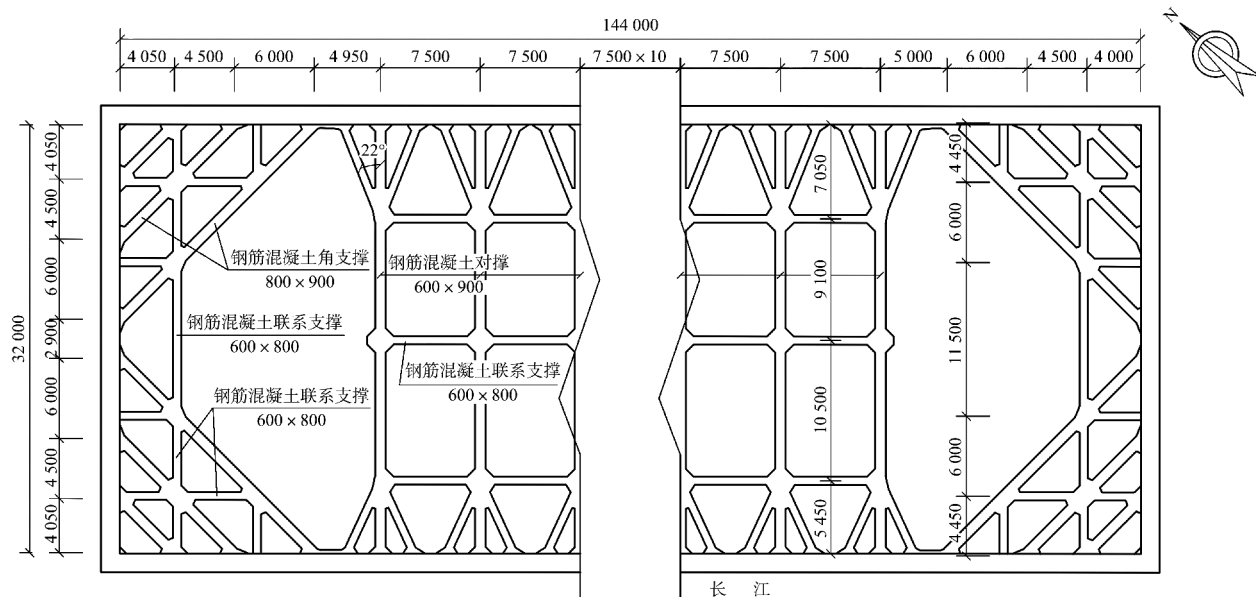


图2 坞口基坑平面 (尺寸: mm)

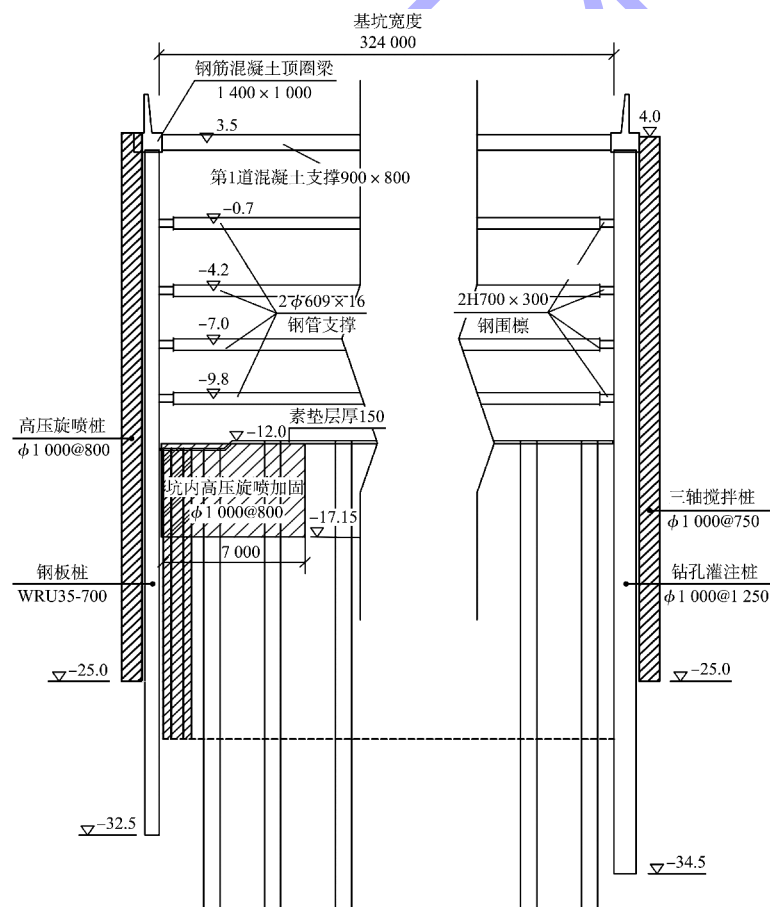


图3 坞口基坑支护结构剖面 (尺寸: mm; 高程: m)

对于坞口基坑坑底敏感位置(江侧围护墙内)的坑内土体进行局部加固,加固范围深5 m、宽7 m,加固方式为高压旋喷桩,与坞口底板下永久止水

帷幕结合施工,以提高基坑的整体稳定性,保障临江侧围护结构的隔水效果。坑底加固形式如图4所示。

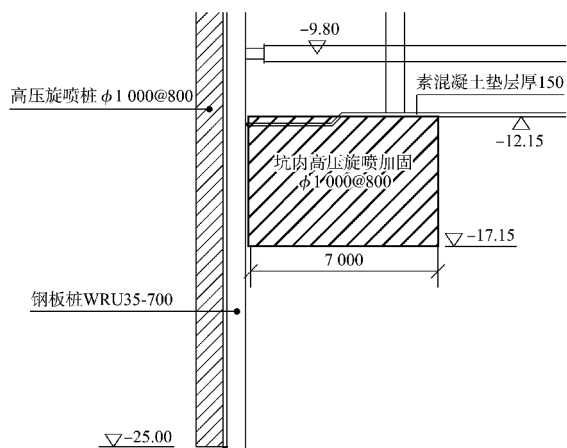
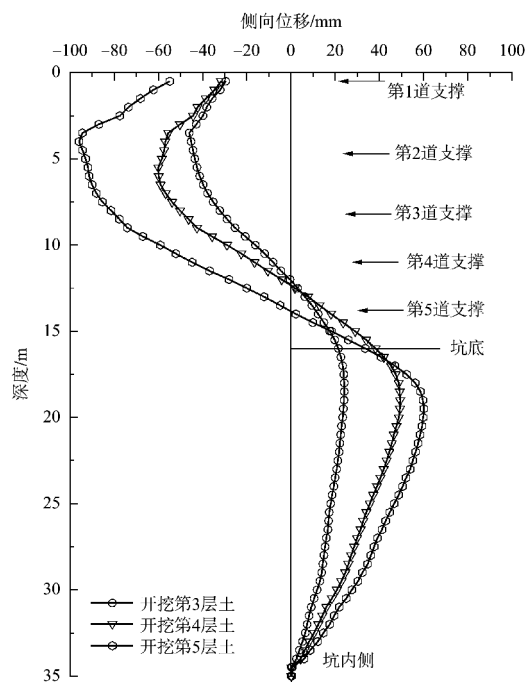


图4 坞口基坑坑底加固形式 (尺寸: mm; 高程: m)

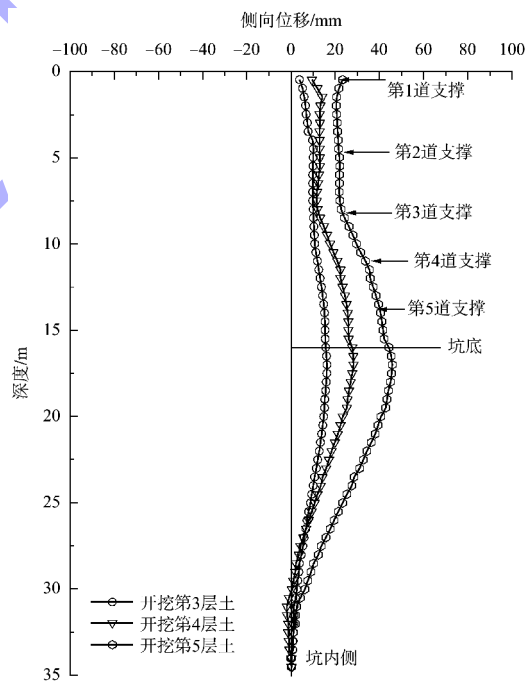
4 实施效果

坞口基坑使用组合围护形式。临江侧采用钢板桩作为围护结构, 搭配高压旋喷桩作止水帷幕; 其余3侧采用钻孔灌注桩, 搭配SMW工法桩作止水帷幕; 基坑底采用高压旋喷进行坑底加固, 提升了基坑整体止水性能; 同时合理设计安装水平支撑体系, 既保证了坞口基坑的止水效果, 又有效控制了坞口基坑的变形。

施工过程中对坞口基坑的围护结构变形和支撑受力进行监测。以基坑长边钢板桩和灌注桩(图2中基坑西侧和东侧)的侧向位移为例, 如图5所示, 两边典型测点的侧向位移监测数据显示, 坞口基坑围护结构的侧向位移随着基坑开挖的进行不断增大, 由于上部支撑施加了较大的预应力, 围护结构整体变形形态并未呈现典型的纺锤形, 采用钢板桩的部分测点表现为显著的S形。在开挖至基底时, 钢板桩的最大向内位移为60.1 mm, 最大变形 δ_{lm} 为 $0.38\%H_e$ (H_e 为基坑开挖深度), 基于统计规律^[8]的上海地区采用板桩墙基坑的最大位移范围是 $0.3\%H_e \sim 3.2\%H_e$, 平均值为 $1.5\%H_e$; 向坑外的最大位移为95.8 mm, 可能与该侧临江、地质环境复杂及地下水影响较大有关。在最后一个工况下, 灌注桩的最大位移为45.5 mm, 最大变形 δ_{lm} 为 $0.28\%H_e$, 均小于平均值, 说明该基坑的水平变形得到了有效控制。



a) 钢板桩



b) 灌注桩

图5 坞口基坑围护结构侧向位移

如图6轴力监测数据显示, 支撑施工完成后, 在其下方最近一皮土方开挖过程中, 轴力迅速增长; 而在之后的土方开挖工况中, 支撑轴力基本趋于平稳状态, 在小范围内波动, 这也符合支撑轴力变化规律。在开挖过程中, 钢支撑的轴力报

警阈值为 1 800 kN, 根据监测结果, 基坑开挖过程中的支撑轴力能够有效控制在预警范围内, 说

明采用组合围护结构搭配水平支撑体系能够有效控制支撑的受力。

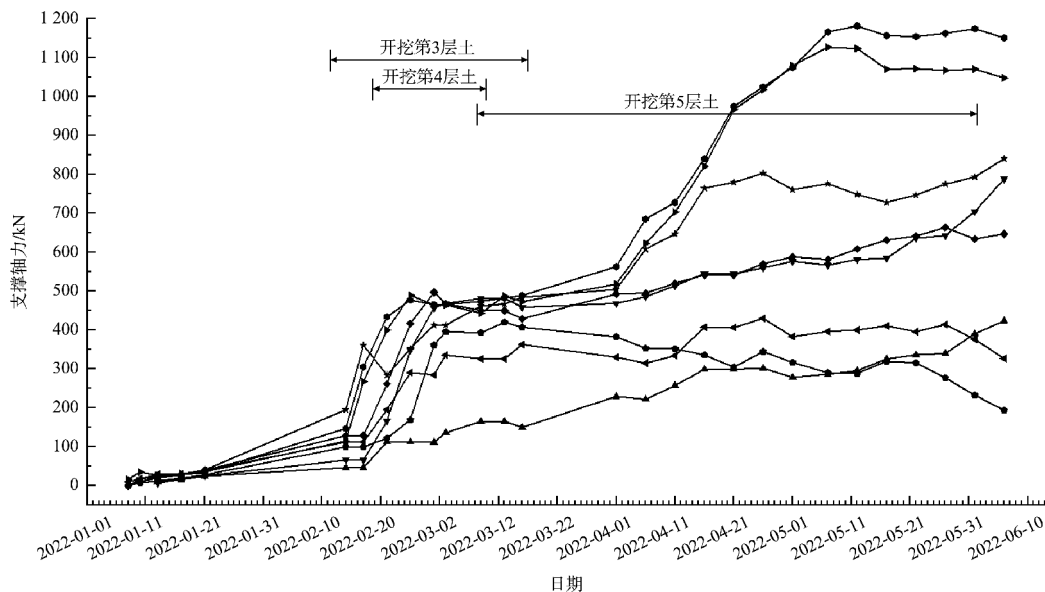


图6 第4道支撑东西向对撑轴力变化曲线

综合坞口基坑第2~5道钢支撑的预应力施加情况和支撑轴力变化趋势可以看出, 支撑施加的预应力大于最大轴力; 此外, 由于基坑采用非对称的围护形式, 所用钢板桩的刚度小于钻孔灌注桩, 因此预应力的施加对钢板桩变形的影响大于灌注桩, 如图5所示, 钢板桩的上部变形向坑外发展, 整体变形呈S形, 而灌注桩的变形则呈纺锤形。

5 结论

1) 本文以中船长兴造船基地二期工程2#船坞工程的坞口基坑为工程背景, 根据工程设计中的重难点问题, 针对性地应用了一种新颖的组合围护形式, 根据其在工程中的实施效果, 该组合围护形式能够有效控制开挖过程中结构的受力变形。

2) 在基坑临江侧采用钢板桩作围护, 搭配坑外高压旋喷桩作止水帷幕; 基坑其余3侧采用钻孔灌注桩作围护, 搭配坑外SMW工法桩作止水帷幕; 坑内设置5道水平支撑体系, 第2~5道钢支撑施加预应力控制变形; 坑底敏感区采用高压旋喷进行坑底加固。以上支护体系的设计既能满足坞口基坑特殊的连接水陆的功能需要, 又能够应对濒海地区高地下水位的防渗需求。

3) 开挖过程中, 对坞口基坑的围护结构侧移和支撑轴力进行了施工监测, 典型位移测点反映

了高预应力水平下坞口基坑钢板桩特别的变形特性, 总体而言, 采用该组合围护形式的坞口基坑的变形和受力均得到了有效控制。

参考文献:

- [1] 顾倩燕. 船坞工程结构设计技术创新与实践[J]. 水运工程, 2011(1): 75-86.
- [2] 李小军, 陈映华, 宣庐峻. 采用水上深基坑围护法建造特大型船坞坞口的创新设计[J]. 岩土工程学报, 2006(S1): 1560-1564.
- [3] 夏国春, 程永华, 张宏. 船坞工程坞口段深基坑支护施工技术[J]. 水利建设与管理, 2012, 32(6): 16-19, 9.
- [4] 陆静东, 封新华. 船坞坞口基坑施工要点浅析[J]. 科协论坛(下半月), 2011(2): 9-10.
- [5] 黄振瑜. SMW工法止水帷幕在船坞工程中的应用[J]. 水运工程, 2015(4): 205-208.
- [6] 朱艳, 石振明, 卢耀如, 等. 海岸带特殊地质条件下双排钢板桩适用性案例分析[J]. 工程地质学报, 2021, 29(6): 1849-1861.
- [7] 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.
- [8] WANG J H, XU Z H, WANG W D. Wall and ground movements due to deep excavations in Shanghai soft soils[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2010, 136(7): 985-994. (本文编辑 王传瑜)