

港池开挖对高桩梁板码头影响的数值分析

周臻臻¹, 郑永来¹, 施洪景², 陈 赟², 崔 坤¹, 庞绍正¹

¹同济大学土木工程学院水利工程系, 上海

²中建港航局集团有限公司, 上海

收稿日期: 2024年3月18日; 录用日期: 2024年4月8日; 发布日期: 2024年4月17日

摘 要

通过高桩梁板码头结构数值模拟与分析, 探讨了开挖过程中土体卸荷对高桩码头群桩的影响。使用 PLAXIS-3D 有限元软件构建了三维模型, 考虑了地基土层、开挖工况、桩基布置方式的影响并通过模拟分析了不同阶段的桩基结构弯矩、位移等关键参数。研究表明: 发现随着开挖深度增加, 桩身水平位移和沉降量增加, 并与开挖深度呈线性关系。同时, 开挖过程会导致码头桩基产生明显弯矩, 呈现“弓”字形变化。

关键词

高桩码头, 港池开挖, 被动桩, 数值模拟, 结构与土相互作用

Numerical Analysis of the Impact of Harbor Basin Excavation of High-Piled Beam Plate Wharf

Zhenzhen Zhou¹, Yonglai Zheng¹, Hongjing Shi², Yun Chen², Kun Cui¹, Shaozheng Pang¹

¹Department of Hydraulic Engineering, College of Civil Engineering of Tongji University, Shanghai

²China Construction Port and Shipping Bureau Group Co., Ltd., Shanghai

Received: Mar. 18th, 2024; accepted: Apr. 8th, 2024; published: Apr. 17th, 2024

Abstract

Through numerical simulation and analysis of high-piled wharf structures, the influence of soil unloading during excavation on the piles of high-piled wharves was investigated. A three-dimensional model was constructed using PLAXIS-3D finite element software, considering the effects of foun-

dation soil layers, excavation processes, and pile layout methods. Key parameters such as bending moment and displacement of pile foundations at different stages were analyzed through simulation. The study revealed that with increasing excavation depth, horizontal displacement and settlement of the piles increased linearly. Additionally, excavation processes led to significant bending moments in the wharf piles, exhibiting a “bow” shaped variation.

Keywords

High-Piled Wharf, Harbor Basin Excavation, Passive Piles, Numerical Simulation, Interaction of Structure and Soil

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高桩码头作为一种在国内外港口海岸工程中广泛采用的结构形式[1], 因其结构构件受力合理、抗裂性能良好、承载能力充分发挥等特点而备受青睐。高桩梁板式码头通常用于需要承受大型载荷和具有复杂结构布置的大型海港码头。为了施工方便, 通常采用先施工码头结构, 后进行港池疏浚的施工流程。然而, 港池疏浚过程中土体将产生卸荷回弹, 通过桩土界面以荷载及协调变形的形式传递到码头桩基, 这势必对码头结构产生不可忽视的影响。

目前已有大量的学者对土体开挖的环境效应进行了相关研究。Poulos 等人[2]通过有限元与边界元相结合的方法, 分析了基坑开挖引起临近桩基受力变形的影响因素; 黄茂松等人[3]研究了抗拔桩不同埋置深度、不同开挖深度与宽度对抗拔桩极限承载力的影响; 卫凌云等人[4]研究了不同开挖深度、桩土相对刚度及下卧层相对刚度对桩基回弹位移及遮帘效应的影响。

本研究结合上海某高桩梁板式码头建设工程, 建立三维有限元数值模型, 研究在港池开挖过程中, 土体卸荷对码头结构受力状况的影响, 为后续施工及结构设计优化提供依据。

2. 工程概况

码头结构布置情况如下: 1) 港池东西开宽度约为 720 m, 南北宽度 240 m, 港池开挖至泥面设计标高-10 m。2) 港池开挖施工前先进行后平台及护岸结构的施工, 后平台采用高桩梁板式结构, 护岸采用高桩承台式结构。待后平台及护岸结构施工完成后, 港池开挖至-6 m, 随后施工码头结构, 待码头结构施工完成, 港池开挖疏浚至-10 m。码头结构采用高桩梁板式结构, 沿长度方向分为 12 个分段, 每个分段均为 60 m, 桩基采用 $\Phi 800$ PHC 预应力混凝土管桩, 码头每个标准排架下设 2 根直桩及 2 对斜度为 4.5:1 的叉桩。码头结构剖面布置如图 1 所示。

3. 工程地质条件

工程地基土层分布如下: 1) 4.80~2.59 m 素填土; 2) 粉质粘土 2.59~0.84 m; 3) 0.84~-4.80 m 灰色砂质粉土; 4) -4.80~-15.37 m 粘质粉土夹淤泥质粉土; 5) -15.37~-21.66 m 淤泥质粘土; 6) -21.66~-26.53 粘土; 7) -26.53~-30.15 粉质粘土; 8) -30.15~-46.38 粉质粘土夹粉性土; 9) -46.38~-49.25 m 砂质粉土夹粘性土; 10) -49.25~-53.98 m 粉砂; 11) -53.98~-64.22 m 含砾粉砂, 表 1 总结了地基各土层物理力学指标。

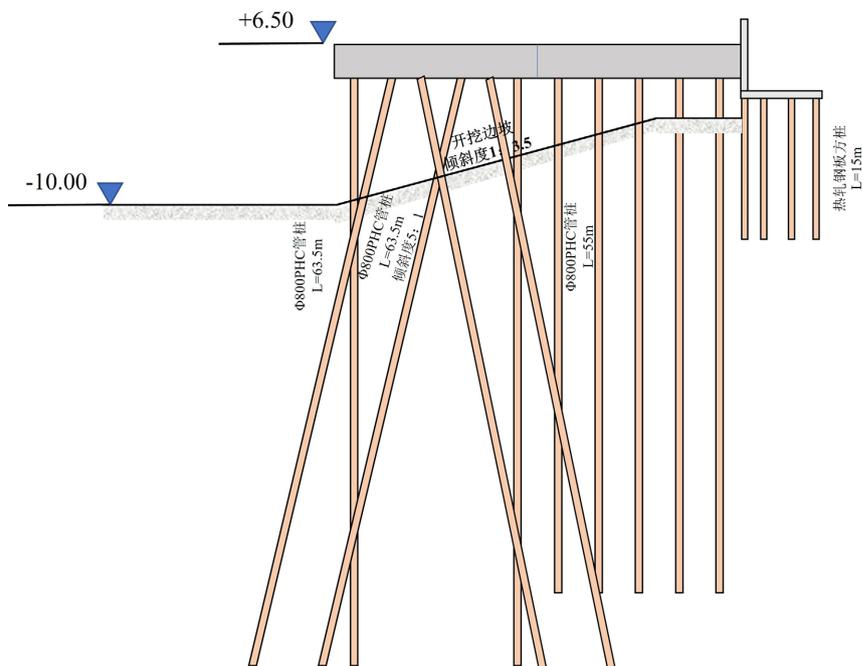


Figure 1. Layout diagram of dock structure profile
图 1. 码头结构剖面布置图

Table 1. Physical and mechanical properties of subsoil layers

表 1. 地基土层物理力学指标

编号	重度/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	弹性模量/MPa	内聚力/kPa	内摩擦角/ $^{\circ}$
1	19.1	23.34	3	20
2	18.1	14.94	20	21
3	18.7	27	9	27
4	16.9	21.06	11	23.5
5	17.5	6.93	11	11
6	18	8.43	14	14
7	18.5	10.65	17	17
8	19	14.43	19	21.5
9	20.5	23.1	23	21.5
10	21	24.6	3	34.5
11	22.5	46.68	1	36.5

4. 三维数值模型的建立

本文采用 PLAXIS 3D 计算软件建立三维有限元模型，模拟了码头前沿港池开挖施工过程。为了简化计算，根据对称性原则对港池进行了简化，选取了码头模型的一侧的两个排架进行模拟。模型的边界条件主要考虑了桩基的长度和港池开挖的影响范围。具体的几何模型尺寸见图 1。土体采用 10 节点四面体

单元进行模拟，桩单元采用 3 节点线单元进行模拟，桩土界面采用 12 节点的界面单元来模拟结构与土体的相互作用。

港池开挖过程按照码头结构的施工顺序进行模拟计算，共涉及 8 个工况：

- 1) 后平台桩及护岸桩基施工；
- 2) 护岸墙及后平台上部结构施工；
- 3) 开挖至-2 m；
- 4) 开挖至-4 m；
- 5) 开挖至-6 m；
- 6) 码头桩基施工，码头上部结构施工；
- 7) 开挖至-8 m；
- 8) 开挖至-10 m。

在每个工况下，都进行了相应的计算模拟，包括初始网络的生成、初始计算模型的建立，并通过迭代计算使系统达到初始地应力平衡。施工工况如下图所示。

5. 港池开挖数值模拟结果及分析

5.1. 开挖过程中桩身位移分析

图 2 展示了码头 1 号桩基在港池开挖过程中水平位移及桩身沉降沿桩身分布的规律。在未开挖时，桩身的初始水平位移随着距离桩顶的增加而增加，在距离桩顶 20 米处达到最大值，之后水平位移逐渐减少，桩底处水平位移接近于零。随着码头施工完成后，由于自重作用产生了初始沉降，上覆土层的刚度相对较低，导致桩身上部的沉降逐渐增大。随着桩身埋入土层部分的增加，桩周侧摩阻力增大，导致桩身竖直方向的应力逐渐减小，相应的沉降量也逐渐减小。

分析图表可知，桩身位移主要由桩身沉降所引起。随着开挖深度的增加，水平位移和沉降量均呈现增加趋势。水平位移的增加量与开挖深度呈线性关系。在本研究中，最大水平位移为 0.02 米，桩身的最大沉降为 0.105 米。

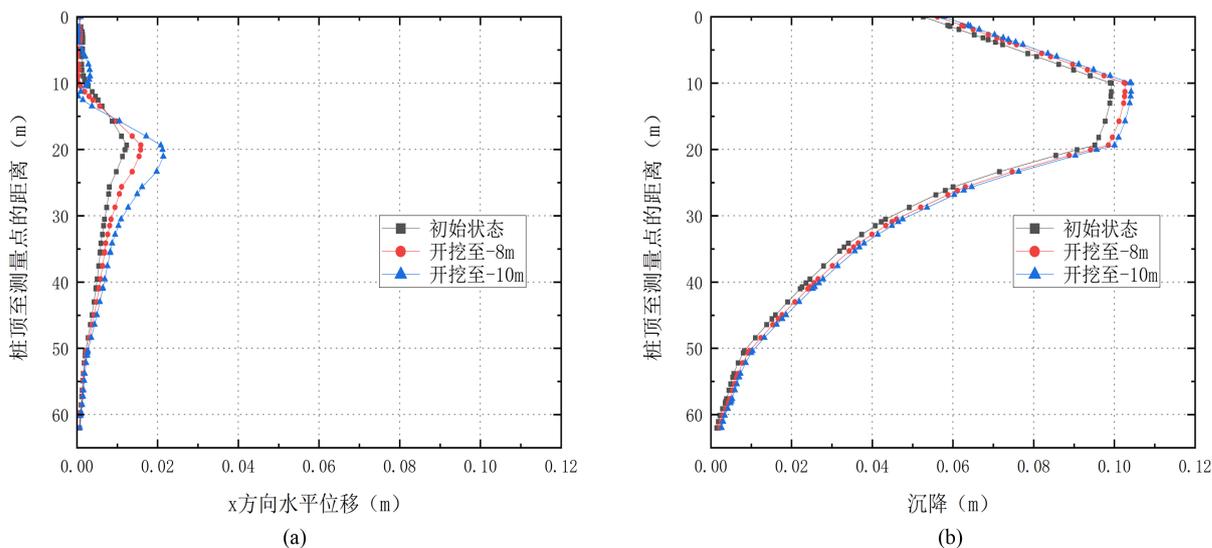


Figure 2. (a) Horizontal displacement variation of piles; (b) Settlement amount of piles

图 2. (a) 桩身水平位移变化图；(b) 桩身沉降量

5.2. 桩身内力分析

图 3 分别展示了码头 1~6 号桩基在港池开挖过程中弯矩沿桩身的分布规律。研究发现, 在港池开挖时, 码头桩身产生了明显的弯矩。1~6 号桩桩顶的初弯矩明显增加。在港池开挖的影响下, 码头桩基桩身弯矩呈“弓”字形变化, 这是由于上部土体的开挖卸荷导致下部土体位移变形, 桩周土体因为变形协调导致桩产生弯矩。

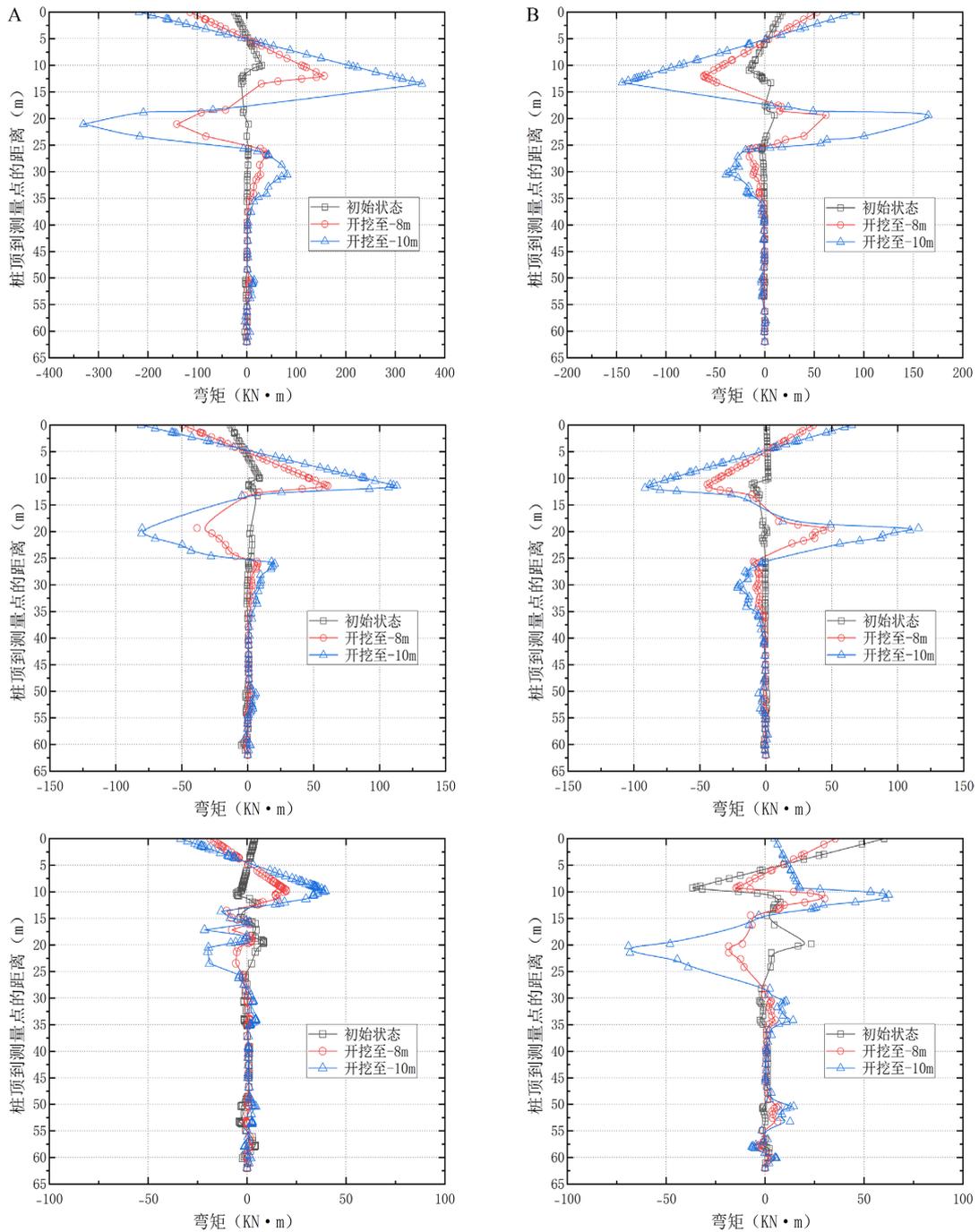


Figure 3. Bending moment of dock piles
图 3. 码头桩桩身弯矩图

由于群桩的遮帘效应, 后排桩桩顶弯矩和桩中最大正负弯矩较前排桩均明显减少。后排桩由于桩土界面的上移, 最大正负弯矩出现位置也随之上移。当开挖深度达到-10 m 时, 最大正负弯矩均出现在 1 号码头桩。码头桩最大正弯矩为 353.95 KN·m, 最大负弯矩为-330.52 KN·m。最大正弯矩距桩顶距离为 13.47 m。

6. 结论及建议

1) 在港池开挖过程中, 桩身的水平位移主要受到桩身沉降的影响。随着港池开挖深度的增加, 桩身的水平位移和沉降量均呈现增加的趋势, 且水平位移的增加量与开挖深度呈线性关系。

2) 港池开挖会导致码头桩基产生明显的弯矩。桩身的初弯矩随着开挖深度的增加而增加, 而桩基桩身弯矩呈现出“弓”字形变化。此变化是由于上部土体的开挖卸荷导致下部土体位移变形, 从而引起桩周土体的变形协调, 导致桩产生弯矩。

3) 由于群桩的遮帘效应, 后排桩的桩顶弯矩和桩中的最大正负弯矩较前排桩明显减少。随着开挖深度的增加, 最大正负弯矩的出现位置也随之上移。当开挖深度达到一定程度时, 最大正负弯矩均出现在 1 号码头桩处。

参考文献

- [1] 张忠苗. 桩基工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [2] Poulos, H.G. and Chen, L.T. (1997) Pile Response Due to Excavation-Induced Lateral Soil Movement. *Journal of Geotechnical and Geo-Environmental Engineering*, **123**, 94-99. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1997\)123:2\(94\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:2(94))
- [3] 黄茂松, 任青, 王卫东, 等. 深层开挖条件下抗拔桩极限承载力分析[J]. 岩土工程学报, 2007(11): 1689-1695.
- [4] 卫凌云, 秦胜伍, 陈慧娥. 基坑开挖对单桩及群桩回弹位移的影响分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(2): 584-590. <https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.201402202>