



# 港池浚深对高桩码头结构受力影响的 数值模拟分析\*

王 强<sup>1</sup>, 曹 洋<sup>2</sup>, 赵 硕<sup>2</sup>, 刘延波<sup>2</sup>, 王 璐<sup>3</sup>

(1. 中交上海航道局有限公司, 上海 200003; 2. 哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

3. 交通运输部天津水运工程科学研究院, 天津 300461)

**摘要:** 集装箱船大型化的发展趋势对港口码头的停泊能力提出挑战, 部分既有集装箱码头需要通过浚深港池以满足大型集装箱船的停泊需求。为探究港池浚深对高桩码头结构受力影响, 以天津港某高桩码头改造升级工程为研究背景, 基于 ABAQUS 有限元软件研究码头前水域开挖后整体结构力学性能的变化。通过设置不同的前沿水域开挖深度工况, 分析码头的整体变形、桩基结构在不同荷载条件下的受力变化。结果表明, 随着浚深深度的增加: 1) 前承台结构水平位移最大达到 2.55 cm, 大于后承台结构, 两部件逐渐靠拢, 预留缝隙减小, 两承台存在碰撞的可能; 2) 码头前承台结构上部的位移是底部的 8 倍, 前承台结构整体呈现向陆域倾倒的趋势; 3) 浚深加剧了各桩承受来自上部结构荷载的不均匀程度, 部分桩可能会因受压过大发生局部损伤; 4) 桩基最大弯矩位于入土段附近, 各浚深条件下桩基最大弯矩差异最大的区域在码头结构中前部区域, 该区域的桩可能因受弯过大而损伤。

**关键词:** 高桩码头; 数值模拟; 桩; 有限元法; 开挖

中图分类号: U656.1+13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)12-0037-09

## Numerical simulation analysis of impact of harbor basin dredging depth on stress of high-pile wharf structure

WANG Qiang<sup>1</sup>, CAO Yang<sup>2</sup>, ZHAO Shuo<sup>2</sup>, LIU Yanbo<sup>2</sup>, WANG Lu<sup>3</sup>

(1. CCCC Shanghai Dredging Co., Ltd., Shanghai 200003, China;

2. College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

3. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT, Tianjin 300461, China)

**Abstract:** The development trend of large-scale container ships poses challenges to the berthing capacity of port terminals, and some existing container terminals need to deepen their harbors to meet the berthing requirements of large container ships. To explore the influence of the dredging depth of the harbor basin on the structural stress of the high-pile wharf, the changes of the mechanical properties of the overall structure after the excavation of the waters in front of the wharf are studied based on the ABAQUS finite element software. By setting different excavation depth conditions in the front waters, the overall deformation of the wharf and the force changes of the pile foundation structure under different load conditions are analyzed. The results show that with the increase of dredging depth: 1) The horizontal displacement of the front cushion cap structure reaches a maximum of 2.55 cm, which is larger than that of the rear cushion cap structure, the two parts are gradually brought closer together, the reserved gap is reduced, and there is a possibility of collision between the two cushion caps. 2) The displacement of the upper part of the front cushion cap structure is 8 times that of the bottom, and the front cushion cap structure as a whole shows

收稿日期: 2025-03-18 录用日期: 2025-04-22

\*基金项目: 中交上航局重点研发项目(SHJKJ-2023-047)

作者简介: 王强(1983—), 男, 高级工程师, 研究方向为港口航道与近岸工程。

a tendency to dump to the land. 3) The dredging depth aggravates the unevenness of the load bearing on each pile from the superstructure, and some piles may be locally damaged due to excessive compression. 4) The maximum bending moment of the pile foundation is located near the soil section, and the area with the largest difference in the maximum bending moment of the pile foundation under the condition of each dredging depth is in the middle area of the wharf structure, and the pile in this area may be damaged due to excessive bending.

**Keywords:** high-pile wharf; numerical simulation; pile; finite element method; excavation

随着全球经济一体化、世界贸易量增长以及海运技术进步,集装箱船大型化进程加快。大型集装箱船在带来规模经济效益的同时,也对港口水深、装卸设备、场地设施及集疏运条件等提出更高的要求,对相关基础设施升级换代提出新的挑战。国内码头高速、高等级发展建设期为 2000—2010 年,在此期间大量的码头开始兴建起来,而船舶大型化速度远超当初的设计预期,许多老旧码头已经逐渐不适应当前的航运形式,面临着码头改建扩建的问题。

部分学者对岸坡变化对码头结构影响开展了研究。魏汝龙等<sup>[1]</sup>通过现场观测分别对华东和华南的高桩码头岸坡变形对桩基结构的影响进行了研究;张栋等<sup>[2]</sup>为掌握码头后方岸坡不断淤积情况下高桩码头结构的变形破坏特征,建立高桩码头与岸坡土体的耦合三维数值分析模型,研究岸坡淤积情况下高桩码头桩基及上部结构的变形和应力分布规律;张吕华等<sup>[3]</sup>以南京明州码头工程为例,根据勘察、检测、测量等数据,建立不同淤积泥面线下的码头模型并对计算参数进行修正,分析高桩码头在岸坡冲淤演化作用下基桩的稳定情况。赵驰宇等<sup>[4]</sup>依托天津港某长期服役码头,对码头结构和岸坡土体进行位移监测并开展数值模拟,研究长期服役的高桩码头在岸坡土体蠕变影响下的位移变化规律,分析不同填土厚度对岸坡-结构体系的影响。李荣庆等<sup>[5]</sup>利用有限元分析软件,采用单元生死近似考虑泥沙淤积过程,研究分析泥沙淤积和清淤处理对桩基的影响。

学界也取得了许多关于后方堆载对码头结构稳定性影响的研究进展。魏汝龙等<sup>[6]</sup>采用邓肯-张非线性弹性模型和相应的加、卸荷准则来模拟土体的应力应变性状,分析了高桩码头中的桩土相互

作用;王元战等<sup>[7]</sup>就某突堤的现场勘察资料和土体参数,运用 ABAQUS 有限元软件建立了高桩码头与岸坡相互作用的二维平面应变问题和三维空间问题的弹塑性有限元模型,分析了桩基-岸坡体系的变形机理;刘乔雄<sup>[8]</sup>针对地面堆载作用下桩基的形态特性进行研究,采用有限差分法建立邻近堆载被动桩基 FLAC 数值模型,分别从堆载、桩身以及土体性质 3 个方面分析了这些因素对被动桩性状的影响;丁琼<sup>[9]</sup>以天津港高桩码头为例,建立码头岸坡-排架桩基相互作用模型,利用 ABAQUS 有限元分析软件,研究后方堆场荷载作用下岸坡土体侧向变形对排架结构的影响。

高桩码头力学性质的相关研究已取得许多进展,然而对于码头升级改造方面特别是码头港池拓深后对码头结构影响的研究,目前还比较少。因此,探究基于数值模拟的港池疏浚对码头结构影响研究至关重要。

## 1 有限元模型建立

### 1.1 模型概况

以天津港某典型高桩码头为例<sup>[10]</sup>,进行高桩码头前沿水域浚深有限元分析。码头前、后承台排架间距为 7 m。码头前方承台为连续梁板式高桩承台结构,后方承台为简支梁板式高桩承台结构。选取码头某一区段进行建模,其总尺寸为 150 m×76 m×76 m(长×宽×高)。参考码头地勘报告对土体进行简化。上部结构分为承台面、横梁及纵梁 3 大部分,为方便建模与计算,将其简化为一个整体。码头承台面尺寸为 57.2 m×41.05 m×0.5 m,其中前后承台分别宽 14.0、27.0 m,两者中间预留 5 cm 空隙;桩帽厚 1.05 m;桩基为钢筋混凝土空心桩,外方内圆,桩长 27 m,断面尺寸为 0.55 m×

0.55 m, 空心区域直径 0.3 m。模型断面及几何模型见图 1。

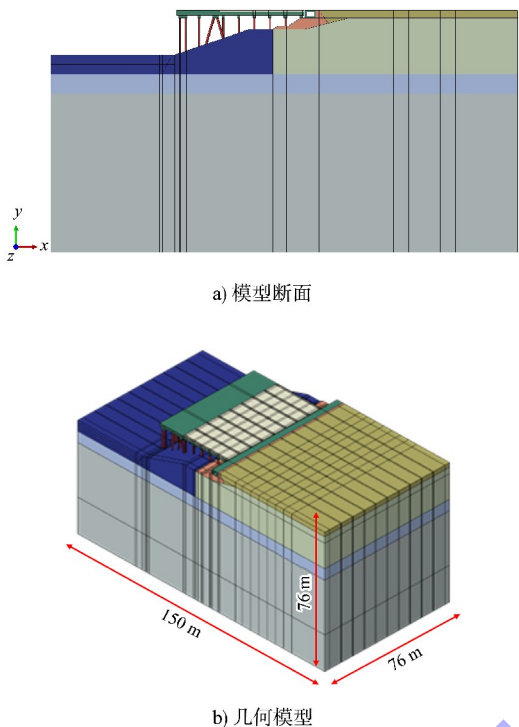


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

模型土体 4 个侧面约束相应的法向位移, 底面约束  $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个方向的位移, 对整个模型施加  $1g$  的重力加速度。码头前沿水域对码头产生的影响用静水压强荷载  $p$  代替:

$$p=\rho gh \tag{1}$$

式中:  $\rho$  为码头区域水的密度, 取  $1.05\text{ g/cm}^3$ ;  $g$  为重力加速度, 取  $9.8\text{ m/s}^2$ ;  $h$  为水深。

当开挖时, 调整土体表面静水压力荷载的大小为  $p=\rho g(h+H)$  ( $H$  为浚深深度)。桩与土之间会存在相对滑动和分离, 设置桩与土接触的摩擦惩罚因子为 0.2, 桩与后承台的摩擦惩罚因子为 0.3, 同时选择硬接触算法<sup>[11]</sup>。

对于涉及开挖、填充的动态岩土工程问题, 初始应力场是正确模拟其施工过程的先决条件。初始应力的加载必须满足地应力平衡, 即为了使数值模拟获得一个存在初始应力而无初始应变的状态。当考虑自重场是产生地应力场的主要因素时, 显然重力是外力, 初始应力场是内力, 因此

需要平衡掉重力所产生的位移。由于叉桩的存在, 模型有大量四面体单元, 因此本文在数值分析前采用 ODB 导入法来平衡初始地应力。

### 1.2 材料参数

在码头桩土相互作用的有限元模拟中: 桩采用线弹性模型; 土体采用摩尔-库仑本构模型, 该模型适用性广, 能够模拟多种类型的土体, 包括黏性土、砂土等, 能较好地描述土体的非线性行为。相较于其他的非线性土体本构模型, 该模型参数少、易获取, 能够大幅降低模型建立的难度, 提高计算效率和模型计算收敛的概率。材料性质见表 1。

表 1 模型材料参数  
Tab. 1 Model material parameters

名称	密度 $\rho/(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\mu$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	黏聚力 $c/\text{MPa}$
粉质黏土	2.00	58	0.250	22	20.9
淤泥质黏土	1.70	15	0.300	17	22.0
杂填土	1.80	25	0.250	22	26.0
抛石块体	2.00	150	0.200	—	—
C40 混凝土	2.45	3250	0.167	—	—

### 1.3 工况设置

为了便于分析, 采用码头第 3 排桩进行分析, 从左到右编号为 A~K。本文就前沿水域浚深深度影响因素展开研究, 共设置 5 种工况, 浚深深度分别为 0.0、1.5、3.0、4.5、6.0 m, 见图 2。

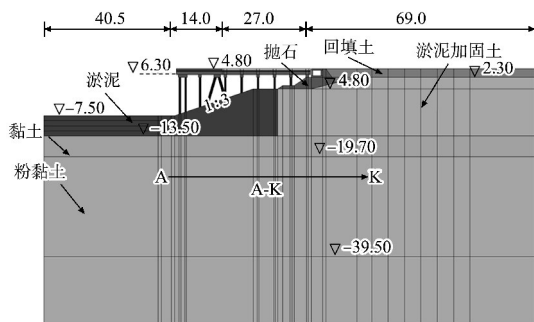


图 2 码头断面 (单位: m)

Fig. 2 Cross section of the wharf (unit: m)

## 2 模拟结果分析

### 2.1 正负方向定义

水平方向的位移及轴力以向海域为负、向陆域为正; 垂直方向的位移及轴力以向上为正, 向

下为负；桩基础弯矩以靠海侧压缩、靠陆侧拉伸为正，以靠海侧拉伸、靠陆侧压缩为负。

## 2.2 模型整体变化

### 2.2.1 竖向位移变化

在浚深深度为 3.0、6.0 m 条件下，模型竖向位移云图见图 3。可以看出，在前沿水域浚深的影响下，码头岸坡挖深区域下方和右侧少部分土体出现回弹现象，最大回弹出现在土体表面位置，且随着挖深程度的增加，该区域的回弹不断增大；后方堆场下方及左侧区域土体发生沉降，最大沉降集中在与后承台桩相接触的土体区域，且随着挖深程度的增加不断增加，增幅相比于前沿水域的回弹较小。受土体位移的影响，码头结构部分 A、B 桩位移为正，其后桩位移为负。模型整体位移趋势为逆时针运动，且越靠近左侧位移变化越大。

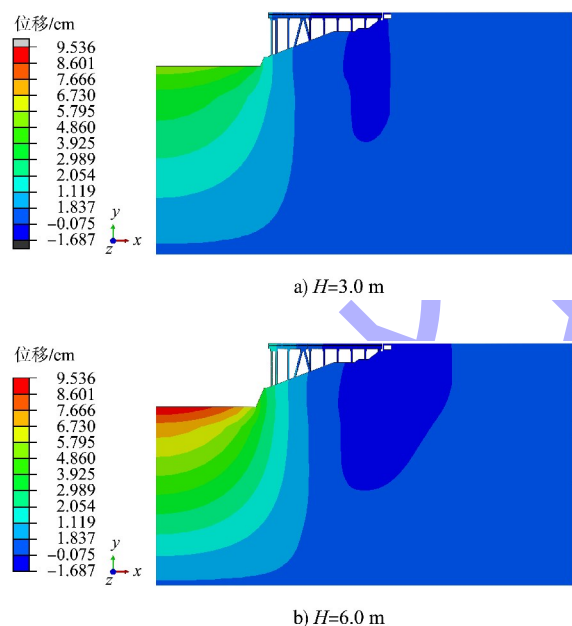


图 3 码头整体竖向位移

Fig. 3 Overall vertical displacement of the wharf

### 2.2.2 水平位移变化

码头前沿水域挖深后，由于土体竖向变形较大，引起土体侧向变形，对周围桩基施加挤压作用，码头结构产生水平位移，见图 4，模型水平位移存在 3 个不同的区域。区域①，靠近开挖区域的土体，该部分包括开挖区域下方 6 m 左右区域、码头前承台及其下方桩基础、与前承台桩接触的土体，该区域整体向陆域移动；区域②，模型土

体截面对角线及其附近区域，该区域包括后承台及其下方桩基和后方堆场，整体向海域移动；区域③，模型右下角区域，该区域整体向陆域移动。随着前沿水域挖深的增加，土体向陆域移动的趋势越发明显，最大横向位移出现在码头前承台，当挖深为 6 m 时，前承台的水平位移最大达到 2.546 cm。区域②、③随挖深深度的增加而位移增加，但增幅相较于区域①很小。前承台结构向陆域位移大于后承台结构，两者之间的预留缝隙减小，两承台存在碰撞的可能。

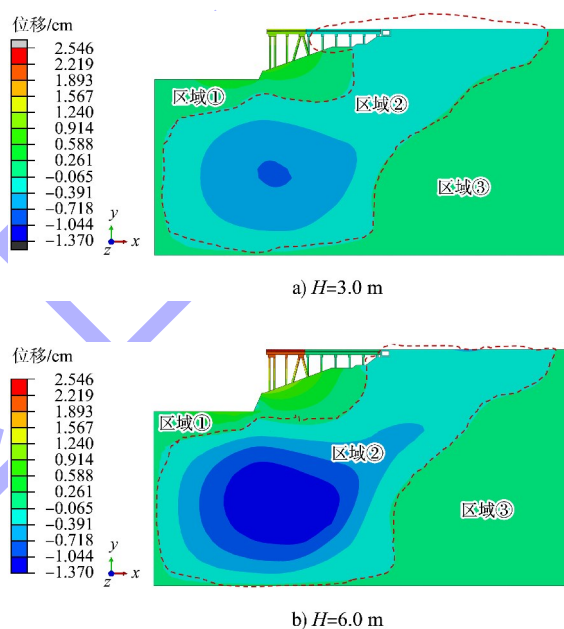


图 4 码头整体水平位移

Fig. 4 Overall horizontal displacement of the wharf

### 2.2.3 岸坡滑移分析

根据滑移土体厚度与桩基埋置深度的相对关系，岸坡滑移可分为浅层滑移和深层滑移。浅层滑移通常指滑动土体厚度远小于桩基埋置深度的滑移，该类滑移会造成下滑段桩周土体缺失和阻滑段桩周土体堆积，导致桩基偏位、桩身出现剪切破坏等。深度滑移通常指滑动土体厚度与桩基埋置深度相比不可忽略，或滑动面位于桩基底面以下的滑移，该类滑移会造成桩基整体移动，严重影响高桩码头结构稳定性及安全性。

浚深会改变岸坡的应力分布，码头岸坡存在浅层滑移的可能。岸坡水平位移见图 5，当港池疏浚深度为 1.5 m 时，在坡脚区域和底部土体表面区域



的土体水平位移较大, 最大水平位移为 5.542 mm, 浚深对后承台土体区域的影响较小。该浚深下土体滑移可能发生在前承台桩区域, 对码头结构的影响主要集中于 A、B 桩。随着浚深的增加, 土体位移响应较大的区域面积不断增加, 土体各区域水平位移也不断增大, 当浚深为 6.0 m 时最大水平位移位于坡脚区域, 为 11.280 mm, 后承台区域岸坡水平位移为 5.036 mm, 接近 1.5 m 浚深下的最大水平位移。前承台区域与部分后承台区域的岸坡土体可能会出现滑移, 码头 A~I 桩会受到较大影响, 该趋势下码头会出现整体后倾的趋势, 导致结构稳定性下降。

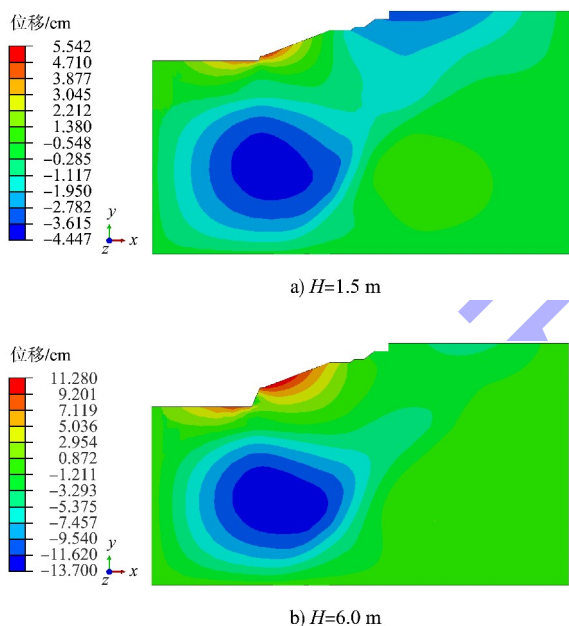


图 5 岸坡整体水平位移

Fig. 5 Overall horizontal displacement of bank slope

研究表明, 滑移面位置会影响桩基的力学分布特征。当滑移面较浅时, 可塑状态的不稳定土体绕过桩流动, 桩身的最大弯矩位置出现在滑动面以下, 土体位移量大于桩基位移量。当滑移面位于桩基中部时, 滑移面以上的不稳定土层与滑移面以下的稳定土层强度均可充分发挥, 桩身的最大弯矩位置可能出现在滑移面上方, 也可能出现在滑移面下方, 且土体位移小于桩顶位移。当滑移面较深且桩基处于稳定层的长度较短时, 桩基在滑动土体的推动下会有更多桩身进入到稳定土层, 最大弯矩位置在滑移面以上, 土体和桩基

位移量大致相等<sup>[12]</sup>。

## 2.3 桩基力学响应

### 2.3.1 桩基位移变化

前承台部分各桩基础的位移变化趋势基本一致, 选用 A3 桩的水平位移进行分析, 见图 6a)。桩最大水平位移位于桩顶部区域, 方向为向陆域移动, 且随着浚深深度的增加, 桩顶部区域位移不断增大, 最大可达 20.8 mm; 随着桩基深度的增加, 桩身向陆域位移不断减小, 直至在 20 m 左右深度的位移最终为 0, 当超过 20 m 时, 桩身略微向海域移动, 在桩底向海域移动的位移到达最大, 为 2.5 mm, 仅为桩顶位移量的 12.5%。同时, 桩基础在 10.3 m 深度的曲线出现略微偏折。分析产生该现象的原因可能是前沿水域土体浚深后, 岸坡土体出现滑移, 桩基受到土体挤压力和结构自重力的平衡被打破, 底部桩基础受到土的挤压, 出现向陆域的倾斜, 间接带动上部桩身向陆域倾斜。而上部桩身裸露, 周围没有土体的挤压作用, 桩顶区域又与承台相连, 因此其随着桩身深度增加的位移变化量要稍小于入土段的桩。

后承台区域桩的位移相对前承台区域桩的位移较小, 选取 K3 桩进行分析, 见图 6b)。后承台区域桩的最大位移为 4 mm, 远小于前承台桩。图中 5 条曲线存在 1 个明显的交点, 位于 13 m 深度左右。在该深度以上, 随着开挖程度的增大桩身不断向陆域移动; 在该深度以下, 随着开挖深度的增大桩身不断向海域移动。同时可以看出, 越远离该位置, 桩身位移随着开挖程度的变化越大。分析产生该种现象的原因可能是由于该桩 13 m 深度以上处于区域①, 13 m 深度以下的桩处于区域②, 区域①的土体向陆域移动, 区域②的土体向海域移动, 挤压区域内的桩部位使其移动, 导致桩上部不断向陆域移动, 下部不断向海域移动; 且两个区域随浚深程度的增加其交界线几乎不发生变化, 因此各浚深工况曲线存在 1 个明显的交点。

前承台结构上部位移明显大于其他位置, 随着桩身深度的增加, 其位移逐渐减小, 桩底区域位移几乎可以忽略, 码头前承台结构整体呈现向

陆域倾倒的趋势。这主要由于港池开挖后码头前沿岸坡较陡,其存在滑移趋势,带动码头结构移动。可采取打入抗滑桩、增设插桩等加固工程,减少土体变形,增强码头结构抗倾覆能力。

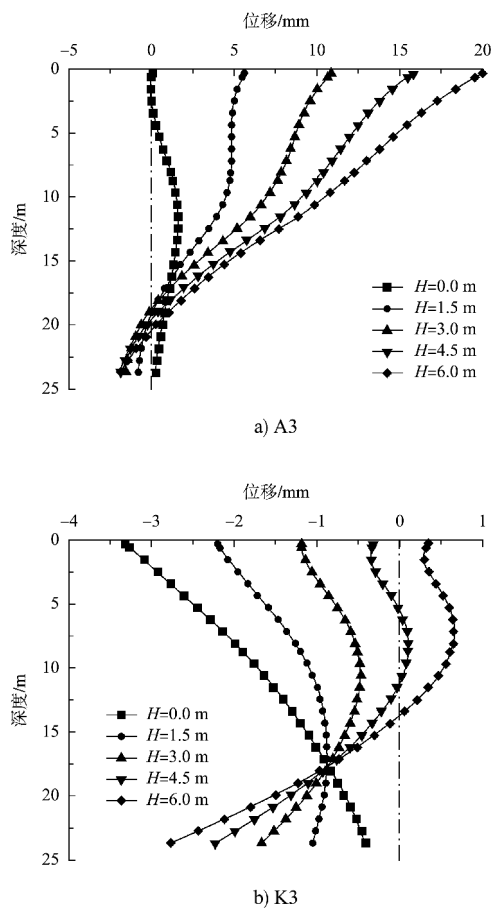


图6 桩基水平位移分布

Fig. 6 Distribution of horizontal displacement of pile foundation

### 2.3.2 桩基轴力变化

选取 A3、C3 桩作为典型桩,对其轴力分布情况进行分析,见图 7。图 7a) 中,在 0.0~10.3 m 深度,轴力随着桩身深度的增加而增加,呈线性变化。当超过 10.3 m 时,出现一小段轴力随着桩身深度的增加而下降的区域,该区域以下的区域,轴力随着桩身深度的增加而继续增大,在 20 m 附近继续出现下降趋势并直到桩底,这两段区域的轴力分布呈现 S 形。在 C3 桩中同样能在 6.8、20.3 m 深度附近观察到类似现象。A3 桩中,10.3 m 深度为桩入土段与非入土段的交界面深度,20 m 深度为淤泥土与黏土交界面深度。C3 桩入土段与非入

土段的交界面深度为 6.8 m,而 20 m 同样为该桩所处区域淤泥土与黏土交界面深度。

码头结构各桩基随着浚深程度的增加,其桩身轴力分布有 3 种变化情况:1) 桩的桩身轴力随着浚深程度的增加而增大;2) 桩身轴力随着浚深程度的增加而减小;3) 桩身轴力既有增大又有减小的区域。以图 7 中 A3 和 C3 桩的轴力分布为例,A3 桩整体桩身轴力均随着浚深增加而增大,上半段区域平均每 1.5 m 浚深深度的桩身轴力增加 12 kN;下半段各区域受土体影响轴力增量差异较大。C3 桩上半段随着浚深深度的增加略微增大,当浚深深度到达 3.0 m 时,随着浚深深度的增加,轴力几乎无变化;下半段区域,随着浚深深度的增加,桩身轴力反而不断下降。

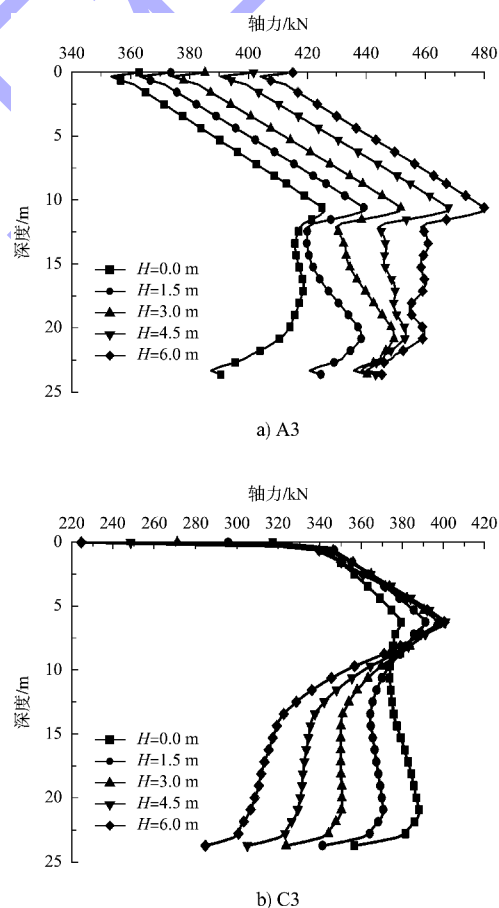


图7 部分桩基轴力变化

Fig. 7 Changes in axial force of partial pile foundation

分析该现象产生的原因,应该是前沿水域开挖后岸坡形态改变,土体变形而挤压码头结构,从而导致承台面产生扭曲变形与不同程度的倾斜,

桩的原有承重机制发生改变, 而结构的整体自重不变, 最终使得部分区域桩身轴力增加, 另一部分区域桩身轴力下降。轴力变化从桩顶部向底部传递, 受结构自重影响, 在桩基的非入土段区域, 轴力近乎呈直线增长; 受土体影响, 在桩基入土段区域, 轴力呈非线性变化。

因此, 浚深加剧了各桩承受的来自上部结构的荷载不均匀程度, 部分桩荷载可能会超出其设计范围, 从而因受压过大发生局部损伤。针对该现象, 可以在受压较大的桩基外包钢套管, 套管内灌注混凝土, 以提高其承载能力; 或在轴力较大的区域旋转缠绕预应力碳纤维板, 施加径向预应力, 减小轴力。

### 2.3.3 桩基弯矩变化

前承台的桩基础弯矩随桩身深度的分布曲线, A~C 桩分布规律相似, D、E 桩分布规律相似, 选择 C、E 桩进行分析, 见图 8。

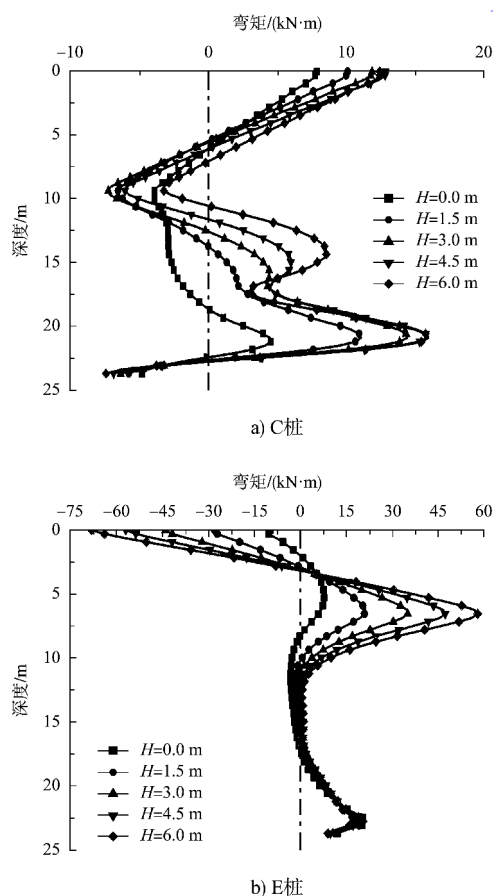


图 8 码头前承台桩基弯矩响应

Fig. 8 Bending moment response of foundation pile of front pier

浚深前后, C 桩的上半段 0~12.5 m 处弯矩分布趋势大体呈线性变化, 弯矩值随深度的分布由正到负, 随着浚深程度的增大, 上半段各处弯矩值也增大, 浚深后 A 桩上半段整体弯矩最大, 为 30 kN·m。E 桩弯矩随深度分布由负到正, 与 C 桩相反, 随着浚深程度的增加, E 桩各段弯矩也随之增大, 且 E 桩增幅趋势为前承台桩中最大, 远超其他桩, 其最大弯矩为 72 kN·m, 相较于该处未浚深时的 15 kN·m, 增加了 4 倍。C、E 桩弯矩分布曲线上半段的第 1 个极大值点分别位于 8.9 及 7.4 m 深度处, 即桩基入土段附近。

桩下半段区域, 即 12.5~23.7 m 处, 各桩浚深前后弯矩分布曲线发生较大变化。C 桩浚深后的弯矩分布曲线出现两个峰值, 且第 2 个峰值点弯矩值大于第 1 个; 曲线存在明显的峰谷, 深度处于 17.5 m 附近, 即淤泥土与黏土的交界面处。E 桩则仅存在 1 个峰值、无谷值, 在不同浚深条件下, 其弯矩分布变化不大。

码头前承台结构中, A~C 桩为直桩, 主要承受轴向力; D、E 桩为叉桩, 用于平衡码头水平作用力。前沿水域浚深后, 码头前沿土体减少, 靠海侧土对码头的支持效果减弱, 码头向海域倾斜。E 桩弯矩变化最大, 水平方向的土反力主要由 E 桩承受。

码头桩基顶部通过桩帽与承台面相连, 其弯曲变形会受到承台面的影响。码头桩基础表面接触存在 3 种状况, 即无接触、与淤泥接触和与黏土接触。土体在一定程度上遏制桩的弯曲变形, 当桩与土体接触时, 由于变形受限而导致其弯矩值减少, 桩基会在与土接触面的上方出现第 1 个嵌固点。由于存在分层土体, 桩底部受力存在两个明显不同的区域, 受此影响, 桩基会在黏土层出现第 2 个嵌固点, 且由于岸坡倾斜, 不同桩基嵌固点分布位置会有所差异。港池浚深后, 岸坡出现滑坡, 土体越靠近开挖区域、越靠近岸坡表

层,其所受影响越大,因此 C 桩弯矩变化的最大区域靠近桩底, E 桩弯矩变化的最大区域接近入土段。

后承台中, F~I 桩分布规律相似, J~K 桩分布规律相似,选择 F、K 桩作为典型进行分析,见图 9。F 桩曲线峰值仍位于桩入土段处,且最大弯矩值为负值,最大弯矩值由 F~I 逐渐减小。F 桩最大峰值为  $82 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ,已经超过前承台 E 桩的最大弯矩, G 桩为  $55 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ,也接近 E 桩,这说明浚深条件对码头后承台桩弯矩的影响集中于承台前侧区域,通过弯矩判定码头稳定性变化应重点分析 F 桩的弯矩变化趋势。F 桩下半段弯矩曲线接近 1 条平行于 Y 轴的曲线,且随着浚深程度的增大,其下半段变化很小。K 桩弯矩分布与 F 桩相反,最大弯矩为正值且不大于  $30 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。弯矩随浚深的变化主要集中在  $0\sim 5 \text{ m}$  范围内,且整体变化相较于 F 桩很小,在  $5\sim 25 \text{ m}$  范围内 K 桩桩身弯矩随浚深的增加基本不变。

桩基最大弯矩位于入土段附近,各浚深条件下码头结构中部桩基的最大弯矩差异最大,该区域的桩可能因受弯过大而损坏。针对桩顶弯矩较大的桩基,可以在其桩帽下方安装钢桁架,将集中弯矩转化为轴力,分配至相邻桩基。对于入土段弯矩较大的桩基,可以在泥面线附近安装套管,在其内灌注混凝土,或用预应力钢丝绳缠绕入土段,提高其抗弯刚度。

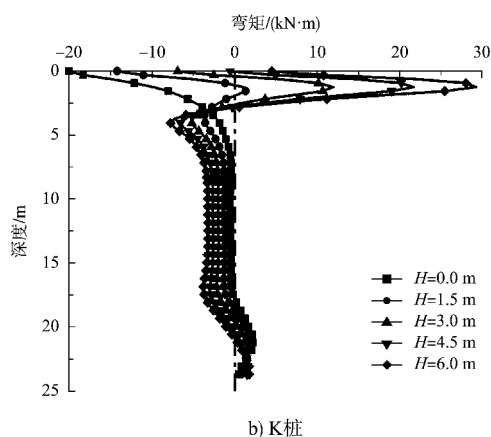
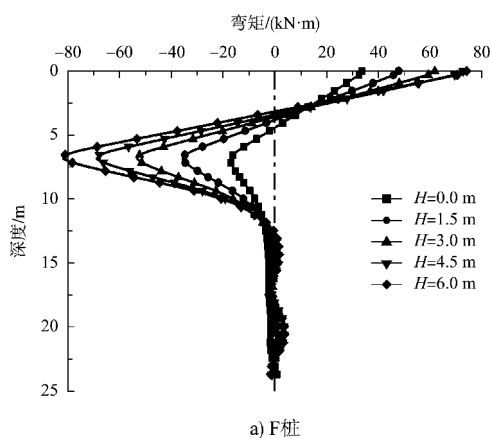


图 9 码头后承台桩基弯矩响应

Fig. 9 Bending moment response of pile foundation of rear pier

### 3 结论

1) 前沿水域浚深后,模型整体竖向位移趋势为逆时针运动,且越靠近海域位移变化越大。前承台结构水平位移大于后承台结构,两部件逐渐靠拢,预留缝隙减小,两承台存在碰撞的可能。

2) 桩基础的最大水平位移位于 A 桩桩顶区域,方向指向陆域,且随着浚深程度的增大而不断增大,当浚深深度为  $6.0 \text{ m}$  时,最大水平位移为  $20.8 \text{ mm}$ 。前承台结构上部位移明显大于其他位置,随着桩身深度的增加,其位移逐渐减小,桩底区域位移几乎可以忽略,码头前承台结构整体呈现向陆域倾倒的趋势。

3) 浚深对桩轴力分布的影响主要是通过使顶部承台结构变形从而导致部分桩上半段整体承力线性增加或减少,而下半段受到土体反力的影响,出现非线性的变化。浚深加剧了各桩承受来自上部结构的荷载不均匀程度,部分桩承载可能会超出其设计范围,从而因受压过大发生局部损伤。

4) F 桩弯矩值变化最大,当浚深深度为  $6.0 \text{ m}$  时,其弯矩值为  $82 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。各浚深条件下码头结构中部桩基的最大弯矩差异最大,该区域的桩可能因受弯过大而损伤。



## 参考文献:

- [1] 陈永战,魏汝龙. 桩基码头岸坡与桩基相互作用的试验研究[J]. 水利水运科学研究, 1993(3): 257-266.  
CHEN Y Z, WEI R L. Experimental study on interaction between pile-supported pier and bank slope [J]. Hydro-science and engineering, 1993(3): 257-266.
- [2] 张栋,蔡伟成,郭牧林. 岸坡淤积下高桩码头结构力学响应研究[C]//中国水利学会 2018 学术年会论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2018: 94-98.  
ZHANG D, CAI W C, GUO M L. Study on mechanical response of high-pile wharf structure under bank slope siltation [C]//Proceedings of the 2018 Academic Annual Conference of the Chinese Hydraulic Engineering Society. Beijing: China Water & Power Press, 2018: 94-98.
- [3] 张吕华,李凯,夏剑,等. 码头后方冲淤演化对桩基础影响分析与研究[J]. 中国水运(下半月), 2022(18): 105-107.  
ZHANG L H, LI K, XIA J, et al. Analysis and research on the influence of scouring and silting evolution behind wharf on pile foundation [J]. China water transport (the second half of the month), 2022(18): 105-107.
- [4] 赵驰宇,李雨润,戴启权,等. 长期服役高桩码头岸坡-结构体系侧向变形实测与数值模拟[J]. 水运工程, 2024(6): 63-70.  
ZHAO C Y, LI Y R, DAI Q Q, et al. Lateral deformation measurement and numerical simulation of slope-structure system of high pile wharf in long-term service [J]. Port & waterway engineering, 2024(6): 63-70.
- [5] 李荣庆,侯永为. 考虑泥沙淤积影响的高桩码头三维有限元分析[J]. 水运工程, 2016(10): 95-99.  
LI R Q, HOU Y W. Three-dimensional finite element analysis of pile-supported wharf considering sediment deposition [J]. Port & waterway engineering, 2016(10): 95-99.
- [6] 魏汝龙,王年香,杨守华. 桩基码头与岸坡的相互作用[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(6): 38-49.  
WEI R L, WANG N X, YANG S H. Interaction between pile-supported pier and bank slope [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 1992, 14(6): 38-49.
- [7] 王元战,祝振宇,张宝华,等. 高桩码头岸坡稳定有限元分析[J]. 海洋工程, 2006, 24(4): 27-31.  
WANG Y Z, ZHU Z Y, ZHANG B H, et al. Finite elements analysis on slope stability of piled wharf [J]. The ocean engineering, 2006, 24(4): 27-31.
- [8] 刘乔雄. 地面堆载下水水平桩作用机理研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.  
LIU Q X. Study on interaction mechanism of lateral pile subjected to surcharge load [D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [9] 丁琼. 后方堆载作用下高桩码头变形研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.  
DING Q. Analysis of the deformation of high-pile wharf under the effect of rear yard load [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [10] 汪振,戴启权,张宇亭,等. 堆载引起岸坡土体与高桩码头相互作用机制试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(S1): 254-258.  
WANG Z, DAI Q Q, ZHANG Y T, et al. Experimental study on interaction mechanism between slope soil and piles-upported wharf subjected to yard loads [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2024, 46(S1): 254-258.
- [11] 张健,杨立功,张宇亭,等. 钢板桩加固岸坡变形与桩土相互作用机理研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(S1): 202-206.  
ZHANG J, YANG L G, ZHANG Y T, et al. Study on deformation of bank slope reinforced by steel sheet pile and interaction mechanism between pile and soil [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2024, 46(S1): 202-206.
- [12] POULOS H,牛怀俊. 增加边坡稳定性的加强桩的设计[J]. 路基工程, 1996(5): 74-79.  
POULOS H, NIU H J. Design of reinforcing pile to increase slope stability [J]. Subgrade engineering, 1996(5): 74-79.

(本文编辑 王传瑜)