

# 高桩码头浚深改造有限元研究

何英发<sup>1</sup>, 周 超<sup>2</sup>, 顾 茜<sup>1</sup>

(1. 华设设计集团股份有限公司 港航设计二所, 江苏 南京 210014;

2. 华设设计集团股份有限公司 国土空间及城乡规划研究中心, 江苏 南京 210014)

**摘 要:**通过建立三维有限元模型,分析码头前沿设板桩墙及堆载区设低桩承台两种浚深改造方案的效果。经分析可知,码头浚深改造后桩基弯矩增大,幅度最大的为靠近堆载区的桩基。对于码头前沿设板桩墙改造方案,前沿桩基内力减少,但后方临岸侧桩基改善效果很小。对于堆载区设低桩承台的改造方案,后方临岸侧桩基弯矩减小较明显。若将两种方案结合,无论码头前沿桩基还是后方桩基,改善效果均较好。

**关键词:**高桩码头;浚深改造;低桩承台;板桩墙

**中图分类号:**U656.1

**文献标志码:**A

**文章编号:**2097-0358(2022)2-0037-05

## 0 引言

高桩码头是我国应用最为广泛的码头结构形式,其具有结构轻,减弱波浪效果好,用料省,对挖泥超深适应强,适用于软土地基等优点,然而对地面超载的适用性却较差。码头岸坡在浚深及后方堆载的作用下不仅会产生竖向位移,同时会产生水平向位移,使码头结构产生较大的内力,甚至造成结构的破坏,例如基桩与简支横梁出现较大的偏位,局部压应力过大使得很多桩帽发生了劈裂,基桩顶部开裂等破坏形式<sup>[1-3]</sup>。传统高桩码头计算模型及公式均是假设桩基为主动桩即上部荷载传递至桩基后传递至土体,均无法考虑桩基为被动桩的情况即土体在荷载作用下产生变形,并传递至桩基。<sup>[4]</sup>随着有限元的发展及普及,建立结构-地基复合模型并研究其相互作用成为可能<sup>[5-6]</sup>。祝振宇、廖雄华均建立了有限元模型,分析了高桩码头-岸坡体系的变形规律及结构内力变化规律。<sup>[7-8]</sup>在码头浚深改造之后,随着后方堆载的增加及码头前沿泥面的降低,岸坡土体的平衡状态将再次改变,从而对码头结构的安全产生影响。姚文娟分析了置换加固软弱土层改造方法对改善桩基结构受力的效果。<sup>[9]</sup>廖雄华建立二维有限元模型,分析了浚深对码头-岸坡体系的影响,<sup>[10]</sup>李越松用梁单元模拟桩基及纵、横梁分析了堆场区施工钻孔灌注桩加固方案的效果<sup>[11]</sup>。由于码头-岸坡体系之间的相互作用复杂,二维有限元模型及梁单元不能准确地模拟其相互作用,因此,本文利用有限元软件强大的数值分析能力及方便的后处理能力,建立三维有限元模型,对土体采用应用广泛的弹塑性本构模型 Mohr-Coulomb 模型,对堆载区设低桩承台结构及码头前沿设板桩墙两种改造方案的码头-岸坡体系变形及内力变化进行分析,以期对工程实践提供借鉴。

## 1 加固目的及主要加固方案

高桩码头浚深改造之后,由于泥面的浚深及后方堆载的增加,码头体系整体稳定性降低。码头整体圆弧滑动依照土体强度及岸坡形状不同可分为浅层滑动及深层滑动。<sup>[12]</sup>同时由于码头-岸坡体系原应力状态被改变,土体位移变形发生改变,将增大对码头结构产生的内力。

为解决上述两种问题,高桩码头浚深改造方案主要有三个:(1)码头前沿设前板桩结构法,<sup>[13]</sup>即在已有码头前沿建造板桩墙,采用无锚板桩,施工时把板桩墙桩顶打至泥面处,以保证岸坡稳定及港池疏浚作业的安全;(2)在堆载区设传力结构(如钻孔灌注桩或低桩承台结构),以此将堆货荷载传至地基深处,减小对码头结构的影响;(3)设深基础接岸结构挡土墙,阻断土体变形向码头结构的传递。本文将对码头前沿设前板桩结构方案及堆载区设低桩承台两种方案进行分析。

收稿日期:2022-01-19

作者简介:何英发(1988—),男,河北沧州人,华设设计集团股份有限公司港航设计二所工程师,硕士。

## 2 工程案例

### 2.1 基本参数

根据国内某钢厂专用高桩码头建立有限元模型,码头示意图如图 1 所示。前桩台宽 18 m,由 4 根直桩及 2 根叉桩支撑,直桩为截面为  $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m}$  的混凝土方桩,桩长 26 m,叉桩为  $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m}$  的混凝土方桩,斜度为 1:3。后桩台宽 19 m,由 4 根截面为  $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m}$  的混凝土方桩组成,桩长 24 m。后方堆载为 35 kPa。原港池高程为  $\nabla -7\text{ m}$ ,现将其浚深至  $\nabla -10\text{ m}$ 。后方堆载增至 60 kPa。选取码头一榀横向排架,土体纵向选取 6 m 宽度建立有限元模型。码头结构、板桩墙及后方低桩承台均采用线弹性本构模型,土体采用 Mohr-Coulomb 本构模型,各材料参数如表 1 所示。

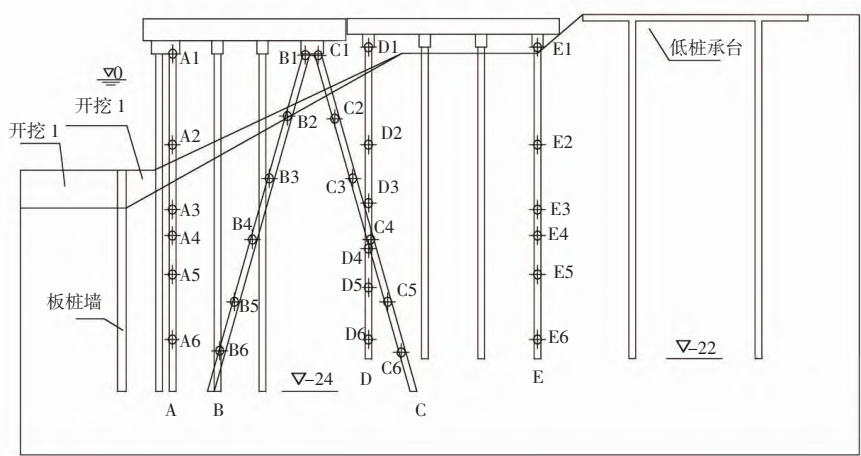


图 1 改造方案示意图

表 1 各材料参数

	高程/m	$E/\text{kPa}$	$\nu$	$\varphi$	$c/\text{kPa}$	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
混凝土		$2.8\text{e}7$	0.18			25.0
工程砂	5~0	15 000	0.29	32	0	19.0
淤泥质黏土	0~-15	3 600	0.30	19	25	19.0
粉质黏土	-15~-22	4 500	0.30	22	20	19.1
细砂	-22~	13 000	0.29	31	0	19.1

### 2.2 改造方案

本文模拟 4 种改造方案。方案 1:不经改造直接将图 1 所示的“开挖 1”及“开挖 2”两部分挖除,后方堆载由 35 kPa 变为 60 kPa。方案 2:在堆载区域设低桩承台,将图 1 所示的“开挖 1”及“开挖 2”去除,后方堆载由 35 kPa 变为 60 kPa。方案 3:在前方承台前沿打入板桩墙,墙顶打至泥面处,将图 1 所示“开挖 1”部分去除,后方堆载由 35 kPa 变为 60 kPa。方案 4:在前方承台前沿打入板桩墙,墙顶打至泥面处,在堆载区域设低桩承台,将图 1 所示的“开挖 1”部分去除,后方堆载由 35 kPa 变为 60 kPa。

### 2.3 模型建立

由于本文主要研究浚深改造后岸坡变形引起的结构体系的变化,因此,只考虑体系在自重及后方堆载作用下的状态,土体在水位以上采用湿重度,水位以下采用浮重度。为模拟真实的码头-岸坡体系,各改造方案均首先计算原岸坡在自重作用下的应力状态,进行地应力平衡<sup>[14]174-176</sup>,再计算排架在自重、后方堆载 35 kPa 作用下及浚深改造后的应力变形。土体及结构均采用实体单元,二者之间设接触模拟其受力状态。

## 3 结果分析

### 3.1 位移结构分析

图 2、3、4 分别为按照方案 1、方案 2、方案 3 改造后相较改造前岸坡土体位移增量矢量图。由图 2 可以

得出浚深后及堆载增加后,后方堆载区域产生较大的向下竖向位移增量,由于码头前沿港池疏浚相当于卸荷作用,港池处主要为向上的位移增量,同时由于泥面开挖,临空面增加及堆载区土体的推挤作用,前、后桩台下方土体有较大的水平向位移增量。由图 3 可以得出,设置地桩承台后,后方堆载区域竖向位移增量大幅降低,港池侧向上位移增量与图 2 基本一致。由于后方堆载区域的推挤作用变小,前后桩台下方土体水平向位移增量较图 2 由 4.8 cm 减少至 3.0 cm。由图 4 可以得出,设置前板桩墙后,后方堆载区域竖向位移增量与图 2 基本一致,由于前板桩的阻隔作用,前后桩台下方土体受疏浚卸荷的影响较少,位移方向由朝港池侧倾斜向上变为朝港池侧水平位移,同时位移数值与图 2 相差较小。对比图 2、图 3 中前后桩台的位移,方案 1 前后桩台的位移为朝港池侧倾斜向上,方案 2 为竖直向上的位移,方案 3 为水平位移增量,与土体的位移变化趋势一致。由此可得,港池疏浚主要引起前后桩台下方土体向上的位移增量,而后方堆载增加主要引起前后桩台下方土体水平向位移增量。

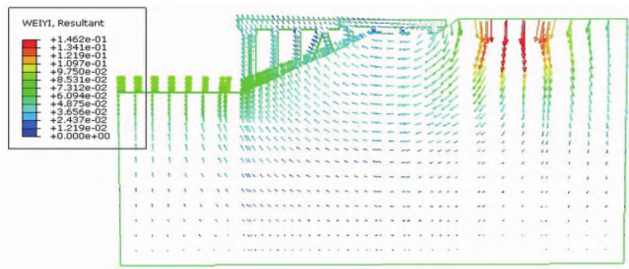


图 2 方案 1 位移增量矢量图

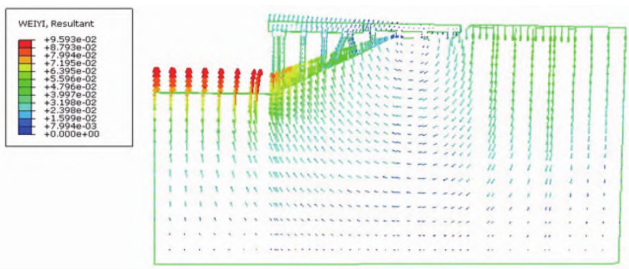


图 3 方案 2 位移增量矢量图

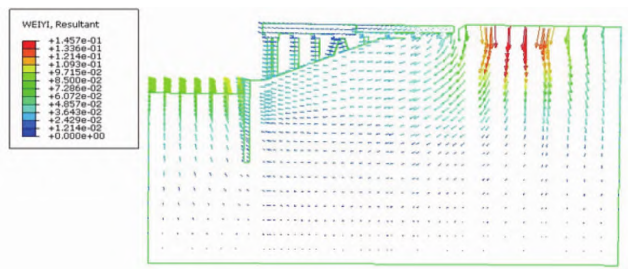


图 4 方案 3 位移增量矢量图

3.2 桩基竖向轴力分析

提取图 1 所示的桩 A、B、C、D、E 的轴力值,如表 2 所示。对表 2 进行对比得出,由于土体的位移变化对桩产生摩擦,从而对码头桩基轴力产生影响,方案 1 和方案 2 中,相较改造前,桩 A、C、D 轴力减小,而桩 B、E 轴力增大。方案 3 和方案 4 中,桩 D 轴力相较未改造前相差不大,桩 A、B、E 轴力增大,而桩 C 轴力减小,与承台倾斜变化一致。

	表 2 桩基最大轴力值					单位:kN
	桩 A	桩 B	桩 C	桩 D	桩 E	
方案 1	285	582	224	231	920	
方案 2	284	475	264	243	807	
方案 3	381	689	199	344	916	
方案 4	381	567	160	357	797	
改造前	340	476	328	353	721	

3.3 桩基弯矩分析

图 5 为各桩弯矩值。由图可得,桩 A 改造前最大弯矩为桩顶弯矩,方案 1 较改造前桩顶弯矩增大,方案 2 由于低桩承台的作用,土体水平向位移增量减小,弯矩值相较方案 1 减小。方案 3 桩 A 顶点弯矩减小,在桩



中部弯矩最大,但依然比方案 1 的最大弯矩小 20%。由于前桩台倾斜度增大,方案 1 及方案 2 较改造前,桩 B 的桩顶负弯矩及桩基最大正弯矩同时增大。方案 3 改造后,桩 B、C 的桩顶弯矩及桩最大正弯矩均较方案 1 和方案 2 减小,比改造前有所增大,但增大幅度较小。方案 1 与改造前相比,桩基内力变化较大的为后桩台的桩基,桩 D、E 均有明显的增加,由于堆载区土体变形对后桩台桩基的推挤作用,相较改造前桩基弯矩变幅最大的为桩 E,最大正弯矩增大近一倍,桩顶负弯矩增大近 60%。由于方案 2 低桩承台减小了堆载区土体对桩基的推挤,桩 E 的桩顶最大负弯矩相较方案 1 有明显减少,与改造前相当,最大正弯矩比方案 1 减少近 40%,比改造前仅增大 150 kN·m。方案 3 对于后桩台桩基内力的改善效果并不明显,与方案 1 弯矩值相差不多,而方案 4 则对于各桩的弯矩均有明显的改善。

通过对比各方案各桩弯矩变化,对设置前板桩方案可以减少由于港池疏浚引起的前排桩基弯矩增大,但对减少由于堆载增大引起的后排桩弯矩增大的作用较小。对堆场设置低桩承台等处理措施的方案可有效减少由于堆载增大引起的后排桩基弯矩增大,但对减少由于疏浚引起的前排桩弯矩增大的作用较小。

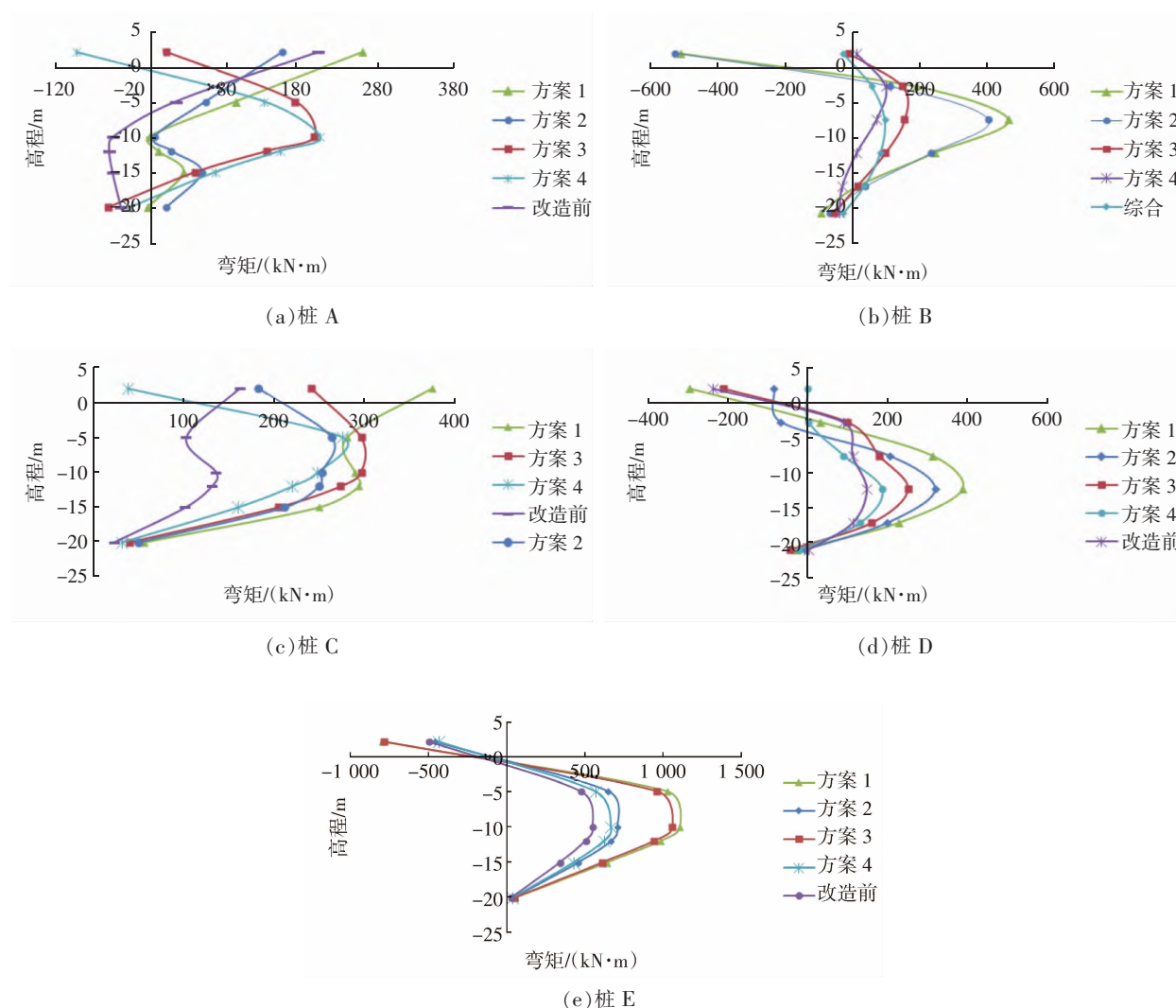


图 5 桩弯矩

#### 4 结束语

码头浚深及后方堆载增加后,由于岸坡原平衡状态被破坏,对码头结构安全将产生不利影响,带来桩基弯矩增大、桩台倾斜度增大等问题。港池疏浚主要引起桩台下方土体竖直向上的位移增量,而后方堆载则增加主要引起桩台下方土体水平向位移增量。对设置前板桩方案可以减少由于港池疏浚引起的前排桩基弯矩

增大,但对减少由于堆载增大引起的后排桩弯矩增大的作用较小。对堆场设置低桩承台等处理措施的方案可有效减少由于堆载增大引起的后排桩基弯矩增大,但对减少由于疏浚引起的前排桩弯矩增大的作用较小。码头升级改造过程中,应根据不同的因素选择相应的改造措施。

#### 参考文献:

- [1]张强,刘现鹏,刘娜.岸坡土体变形对天津港高桩码头的危害[J].水道港口,2005(4):241-243.
- [2]田双珠,张勇,李越松.天津港高桩码头岸坡变形规律研究[J].水道港口,2006(3):180-184.
- [3]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.
- [4]徐卫军,尹政兴,向广文,等.高桩码头水平位移原因分析及控制措施研究[J].人民长江,2018(21):68-71.
- [5]王元战,刘少增,李青美,等.CDM法加固高桩码头软土岸坡的有限元分析[J].水道港口,2017(4):387-391.
- [6]尹永欣,张京京,李晓慧,等.土体卸载对高桩结构影响分析[J].中国港湾建设,2018(6):17-21.
- [7]祝振宇,王元战,李越松,等.高桩码头-岸坡相互作用有限元数值模拟[J].中国港湾建设,2006(2):1-4.
- [8]廖雄华,张克绪.天津港高桩码头桩基-岸坡土体相互作用的数值分析[J].水利学报,2002(4):81-87.
- [9]姚文娟,高敏,程泽坤,等.边载作用下高桩码头桩基承载力性能及加固研究[J].水运工程,2010(11):66-70.
- [10]廖雄华,张克绪,王占生.岸坡开挖扰动对天津港高桩码头结构安全性影响的数值分析[J].中国港湾建设,2002(2):33-38.
- [11]李越松,张强,祝振宇.天津港高桩码头岸坡变形整治加固技术研究[J].水道港口,2008(6):438-442.
- [12]余神光,别社安,李伟,等.高桩码头岸坡滑弧模式研究与变形稳定性分析[J].岩土力学,2013(1):227-234.
- [13]张永金,王启茂.高桩码头承台结构扩建改造工程[J].中国港湾建设,2004(6):25-27.
- [14]费康,张建伟.Abaqus在岩土工程中的应用[M].北京:中国水利水电出版社,2010.

(责任编辑:张利)

## Finite Element Study on Dredging and Reconstruction of High-piled Wharf

HE Ying-fa<sup>1</sup>, ZHOU Chao<sup>2</sup>, GU Qian<sup>1</sup>

- (1. The Second Institute of Port and Shipping Design, Huashe Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China;
2. Center for Territorial Space and Urban-rural Planning, Huashe Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China)

**Abstract:** By establishing a three-dimensional finite element model, the effects of two dredging reconstruction schemes of setting sheet pile walls at the front of the wharf and setting low pile caps in the stacking area are analyzed. The analysis shows that the bending moment of the pile foundation increases after the dredging and reconstruction of the wharf, and the largest magnitude is located in the pile foundation near the stacking area. For the reconstruction plan of the sheet pile wall at the front of the wharf, the internal force of the front pile foundation is reduced, but the improvement of the rear side pile foundation is small. For the reconstruction plan with low pile caps in the stacking area, the bending moment of the pile foundation on the rear bank side is significantly reduced. If the two schemes are combined, no matter the pile foundation at the front of the wharf or that at the rear, the improved effect is better.

**Key words:** high-pile wharf; dredging reconstruction; low-pile cap; sheet pile wall