DOI:10.3969/j.issn.2096-8248.2024.03.007

基于 FLAC3D 软件模拟港池疏浚对高桩码头结构及岸坡的影响*

成小飞[1a],徐辰晗[1b],杨岳峰[2],江　浩[3],白浩然[1a],杨欣昊[1a]

(1.江苏海洋大学 a.土木与港海工程学院;b.海洋工程学院,江苏 连云港　222005;
2.福建省建筑科学研究院有限责任公司,福建 福州　350004;3.福建省交通科研院有限公司,福建 福州　350000)

摘　要:基于内河某码头港池疏浚项目,采用 FLAC3D 软件建立三维模型,对疏浚前后码头各构件以及岸坡的位移与应力变化进行分析研究。结果表明:疏浚工程会对码头部分构件产生重要位移及应力的影响。疏浚完成后,在码头与驳岸接驳位置产生了较大的沉降,为 28 mm 左右;在码头斜桩段位置出现了最大水平位移,为 4 mm 左右;在引桥纵梁正下方,所在区域土层发生了最大水平变形,为 70 mm 左右。随着码头南端与引桥距离的增加,桩基支撑作用逐渐减弱,桥梁的侧向变形逐渐增大,同时在引桥后方桩位置处出现了最大弯矩与最大剪力。

关键词:码头疏浚;FLAC3D 数值模拟;构件变形;应力分析

中图分类号:U656.113　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:2096-8248(2024)03-0053-09

引用格式:成小飞,徐辰晗,杨岳峰,等.基于 FLAC3D 软件模拟港池疏浚对高桩码头结构及岸坡的影响[J].江苏海洋大学学报(自然科学版),2024,33(3):53-61.

Impact of Simulated Harbor Dredging on the Structure and Bank Slope of High-pile Wharf Based on FLAC3D Software

CHENG Xiaofei[1a], XU Chenhan[1b], YANG Yuefeng[2], JIANG Hao[3], BAI Haoran[1a], YANG Xinhao[1a]

(1. a. School of Civil and Ocean Engineering; b. School of Ocean Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China; 2. Fujian Provincial Institute of Building Research Co., Ltd., Fuzhou 350004, China; 3. Fujian Provincial Transportation Research Institute Co., Ltd., Fuzhou 350000, China)

Abstract: Based on the dredging project of a wharf basin in an inland river, this paper uses FLAC3D software to establish a three-dimensional model, analyzes and studies the displacement and stress changes of each wharf component and bank slope before and after dredging. The results show that the dredging project will have an important impact on the displacement and stress of some components of the wharf. After the dredging is completed, a large settlement occurs at the connection position between the wharf and the revetment, which is about 28 mm. The maximum horizontal displacement occurred at the position of the inclined pile section of the wharf, which is about 4 mm. Directly below the longitudinal beam of the approach bridge, the maximum horizontal deformation of the soil layer in the area is about 70 mm. With the increase of the distance between the south end of the wharf and the approach bridge, the supporting effect of the pile foundation gradually weakens, and the lateral deformation of the bridge gradually increases. At the same time, the maximum bending moment and maximum shear force appear at the position of the pile behind the approach bridge.

* **收稿日期**:2024-01-25;**修订日期**:2024-05-09

作者简介:成小飞(1985—),男,江苏南通人,副教授,博士,研究方向为海洋环境与结构物相互作用、水工结构耐久性、工程结构检测与加固技术等,(E-mail)chengxiaofei@jou.edu.cn。

通信作者:杨岳峰(1983—),男,湖南湘阴人,高级工程师,博士,研究方向为岩土与地下工程,(E-mail)66847789@qq.com。

Key words: dredging of the dock; FLAC3D numerical simulation; component deformation; stress analysis

在码头疏浚施工时,开挖淤泥可能会引起较大的侧向应力卸载,易导致码头结构及岸坡的受力和变形状态发生改变,因此研究有关疏浚工程对码头结构及岸坡的影响具有重要意义。

生态环境部于 2014 年发布了《湖泊河流环保疏浚工程技术指南(试行)》,对环境的疏浚范围做了一定的指导。张吕华等[1]利用测量数据建立南京明州码头数值模型,采用与场地匹配的土地参数,分析了不同淤泥高度对码头桩基础的影响。刘聪聪等[2]则对高桩码头疏浚工艺进行了研究,通过现场标识及断面法,能快速确定疏浚量,形成水下地形图,并构建二维潮流泥沙数学模型确定抛泥临界点,保障高桩码头间疏浚施工的工程质量。梁雷[3]运用德尔菲法得到影响码头施工的主要风险因素,结合层次分析法,分别计算出各个因素的权重,建立码头的施工风险评估模型,并与自己调查的结果对比,得出该模型评价结果与码头实际情况相符,证明该模型具有一定的适用性。龚圣勇[4]采用拼装式绞吸船结合自吸泵工作船,通过设置减载沟快速减载,为码头疏浚工程提供了技术参考。董帅帅[5]以科特迪瓦阿比让港口扩建工程为依托,研究分析深基槽施工过程中槽底回淤物厚度监测难点,并提出深基槽槽底回淤厚度超出设计要求时利用绞吸式挖泥船采取吸淤施工工艺来疏浚,从而保障深基槽施工质量。

综上,众多学者都针对码头疏浚工艺做了研究,但却没有结合数值模拟计算出疏浚时造成码头各构件变形及应力变化的具体数值。而在实际疏浚工程中,侧向应力的卸载,不仅会影响码头桩,而且对于码头驳岸以及其他构件也有着不可忽视的影响,这些变化都决定着疏浚后码头的安全状态。因此有必要针对疏浚工程施工过程中对码头结构及岸坡位移的不利影响进行深入研究,并评估码头结构及岸坡的安全状态。本文运用 FLAC3D(fast lagrangian analysis of continual in 3 dimensions)数值模拟软件,基于数值模拟结果,对其进行优化设计分析,旨在为以后疏浚工程的开展提供借鉴与参考。

1 工程概况

某内河码头地处陆域向水域的过渡地带,地势呈西高东低、北高南低走向,且从陆域向水域缓倾,其工程项目总平面图见图 1。通过码头水域尺寸结合港池淤积情况可选定疏浚范围,再根据水域平面尺度及水域高程复核,结合港池淤积现状,可知疏浚区域主要集中在该渔业码头前沿停泊水域,即图 1 码头前沿的黄色区域,疏浚总工程量约 16.04 万 m^3。本次疏浚工程具体分为两个区域,其主要疏浚区域分布如图 2 所示,码头港池水域指标如表 1 所示。根据本次勘察野外钻探取芯肉眼鉴别,结合现场原位测试与室内试验成果,按行业标准《水运工程岩土勘察规范》(JTS 133—2013)[6]进行综合整理。

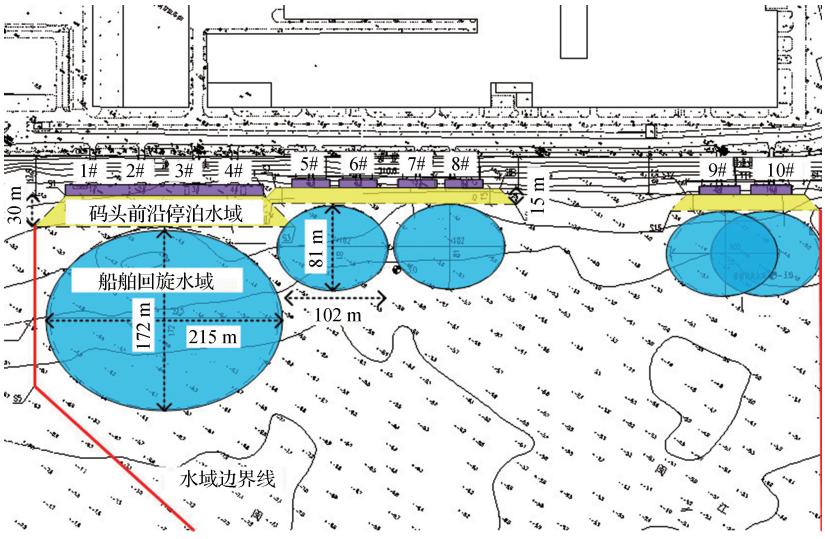


图 1 工程项目总平面图

Fig. 1 General plan of the project

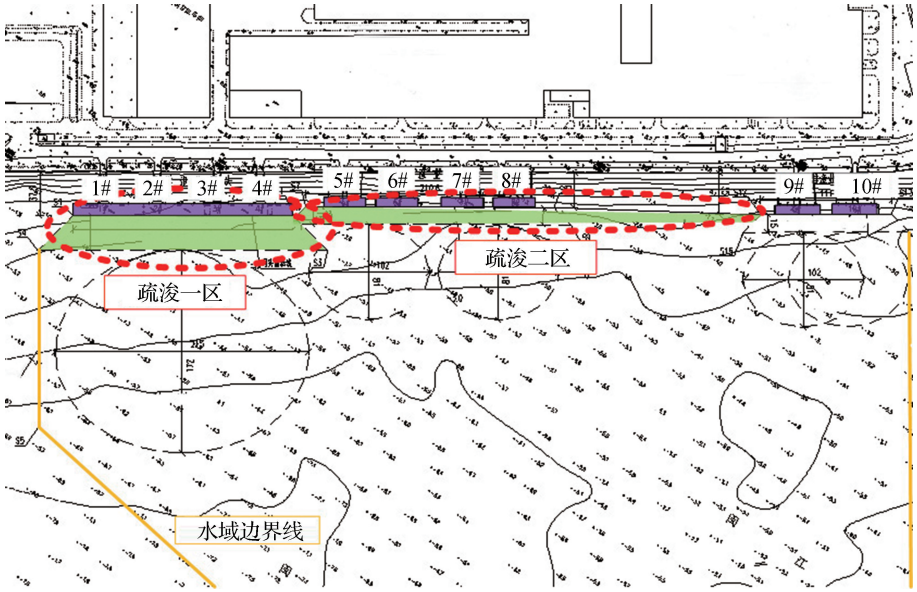


图 2　码头主要疏浚区位置示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the location of the main dredging area of the wharf

表 1　码头港池水域指标

Table 1　Indicators of the water area of the wharf basin

指标	泊位编号	
	1#～4#	5#～10#
停泊水域原设计底高程/m	−5.5	−3.0
停泊水域原底标高/m	−1.5～−4.0	−2.5～−4.0
停泊水域现底标高/m	−3.0	−3.0
回旋水域现底标高/m	−3.5～−5.8	−4.0～−6.5
开挖面积/m^2	6 483	2 651
平均挖深/m	3	0.7

勘探区表部分布发育流塑状淤泥②、松散-稍密状中砂③、粉砂③-1、细砂④-2 层,具高压缩性、高含水量、高孔隙比等特性,且厚度变化大,工程地质性质较差,在荷载作用下会产生过量沉降,并可能产生滑移等现象,故不宜以上述土层为持力层,需进行加固处理。场地水域地形较平缓,在勘察施工期间,勘探点孔口地面高程变化在−4.02～6.10 m 之间。本工程航道孔底标高控制在−8.50 m(罗零高程),依据设计标高要求,需要进行疏浚的岩土层主要为流塑状淤泥②、松散-稍密状中砂③、粉砂③-1、细砂④-2 层等。各岩层的分层及特征如表 2 所示,岩层剖面图如图 3 所示。根据行业标准《航道工程地质勘察规范》(JTS 133-3—2010)[7] 附录 D.0.22,对航道区域内揭露的地层及水下疏浚岩土施工进行分级。根据行业标准《疏浚工程技术规范》(JTJ 319—99)[8] 对其可挖性、用于管道输送性和用于填土的适宜性进行评价。拟建场区现有岸坡基本稳定,海底地形相对较为平缓,松软土层分布的区域在疏浚挖槽时,应注意松软土层形成软弱滑动面的可能性,届时设计人员应根据具体的边界条件进行稳定性验算。

表 2　码头主要土层物理力学特性参数

Table 2　Physical and mechanical characteristics of the main soil layer of the wharf

土层序号及名称	天然重度/($kN \cdot cm^{-3}$)	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	压缩模量 $E_{s0.1\sim0.2}$/MPa	校正后标准贯入击数 N	地基承载力特征值/kPa
抛石①	21.0	/	/	/	/	130
填砂①-1	17.0	14.0	2.0	4.0	5.0～7.0	90
淤泥②	16.3	/	/	1.7	/	40
中砂③	18.5	16.0	2.0	4.0	4.5～13.4	150
粉砂③-1	17.5	15.0	2.0	4.0	5.0～12.9	140
中砂④	18.5	16.0	2.0	5.0	9.0～29.4	190
粉砂④-1	17.5	15.0	2.0	5.0	7.5～23.9	170
细砂④-2	18.0	16.0	2.0	5.0	13.0～21.3	190
卵石⑤	20.0	20.0	3.0	8.0	/	300

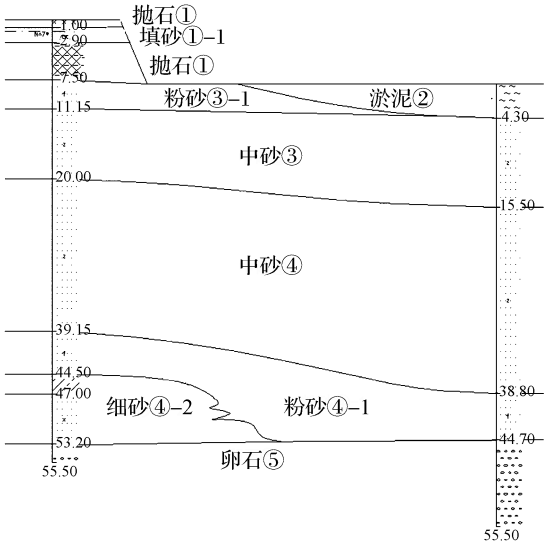


图 3 码头工程地质剖面

Fig. 3 Engineering geological section of the wharf

2 三维数值模型建立

出于经济上的考量与施工上的便捷,要获得完整的现场码头各构件的变形及内力的变化非常困难,因此本次采用美国 Itasca Consulting Group Inc 开发的三维显示有限差分法程序 FLAC3D 进行数值模拟计算研究。该程序是一个地质材料力学模拟软件,可以用来分析破坏和塑性流动等现象。它以三维力学行为为基础,可以模拟材料达到强度或屈服极限时的状态,因此对于分析渐进破坏、失稳和大变形问题特别有用[9]。

本次计算模型选取码头的疏浚一区区域(如图 2 所示),模型土层划分严格参照表 2(根据码头及引桥结构特征,分析结果同样适用于其他区域),该区域的疏浚断面图如图 4 所示,疏浚工程水域指标严格参照表 1。桥台、面板、梁等结构单元通过实体单元模拟,桩通过桩单元进行模拟。根据疏浚地区与紧邻码头及岸坡的三维空间关系以及疏浚工程施工特点,建立三维整体网格模型,如图 5、图 6 所示。其中,土体为各向同性的连续介质弹塑性模型,土层结构为 pH 硬化土模型,土层相关参数依据《福州市远洋渔业码头 1～10 号泊位及名成码头疏浚工程岩土工程勘察报告》取值。

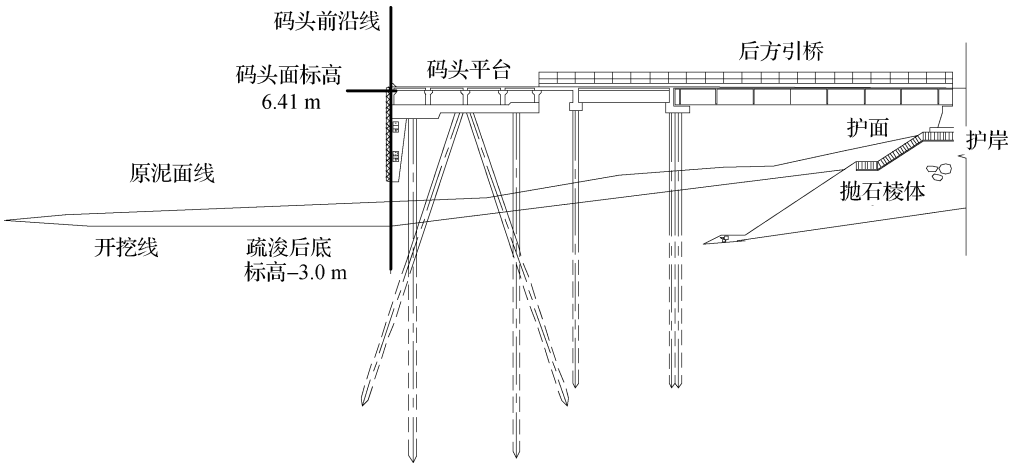


图 4 疏浚一区断面图

Fig. 4 Cross-sectional view of the dredging area 1

3 疏浚工程施工对码头结构及岸坡位移的影响

3.1 数值模拟结果

图 7 为疏浚后码头疏浚一区区域整体竖向变形云图。从图 7 中可以看出,该区域的码头整体均产生了竖向变形,即整体产生了沉降。码头江侧沉降较小,为 3 mm 左右,而引桥与驳岸接驳位置产生了较大沉降,为 28 mm 左右。从图 8 中可以明显看出,该区域的码头整体均产生了沿着疏浚区方向的变形,即整体水平移动。码头主体结构水平位移较小,为 2 mm 左右,引桥纵梁位置产生较大位移,为 5 mm 左右。

图 9 为疏浚后桩的水平变形云图。从图 9 中可以看出,疏浚工程完成后,最大水平位移出现在引桥桩部位,为 4 mm 左右。

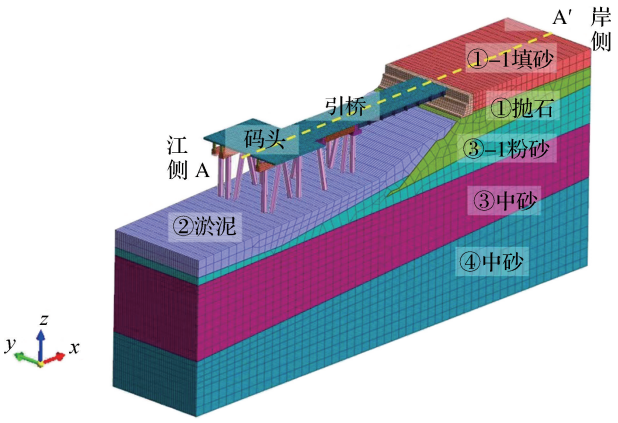


图 5　三维整体网格模型图

Fig. 5　3D monolithic mesh model

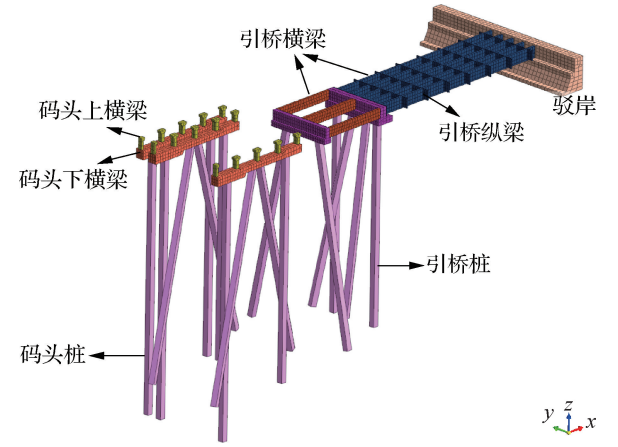


图 6　码头结构网格图

Fig. 6　Grid diagram of the wharf structure

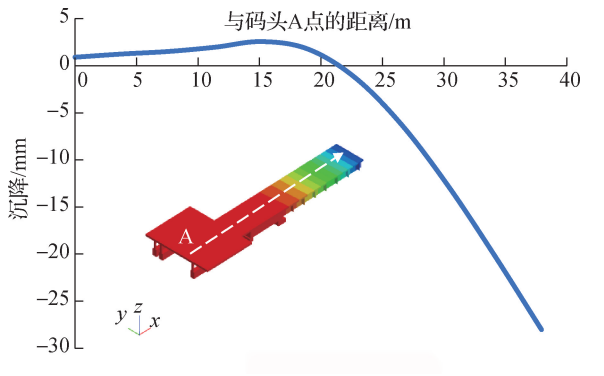


图 7　码头竖向变形云图

Fig. 7　Vertical deformation contour of the wharf

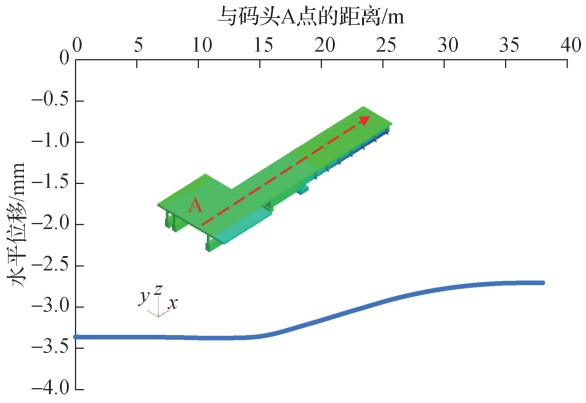


图 8　码头横向变形云图

Fig. 8　Lateral deformation contour of the wharf

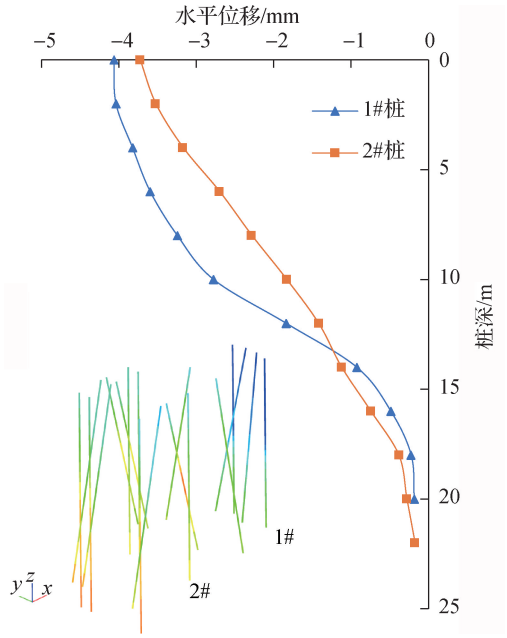


图 9　疏浚后桩的水平变形云图

Fig. 9　Deformation contour of the pile after dredging

图 10 与图 11 分别为疏浚后土层竖向变形云图与疏浚后土层水平变形云图。从图 10 可以明显看出,土层的最大竖向变形出现在引桥正下方,其变形量值为 31 mm;而从图 11 可以看出,土层最大水平变形出现在引桥纵梁正下方,其变形量值为 70 mm。

图 12 为 A—A′剖面沉降曲线图,其中横轴代表 A—A′剖面上与 A 点的水平距离,纵轴代表桥梁沉降变形(负值代表沉降,正值代表隆起)。从图 12 可以看出,在驳岸变形的挤压下,桥面表现为隆起,最大隆起值为 2 mm。图 13 为 A—A′剖面侧向位移曲线图,其中横轴代表 A—A′剖面上与 A 点的水平距离,纵轴代表桥梁侧向变形(负值代表向临空面

的变形)。从图 13 可以看出,随着与引桥距离的增加,最大水平变形为 37 mm。

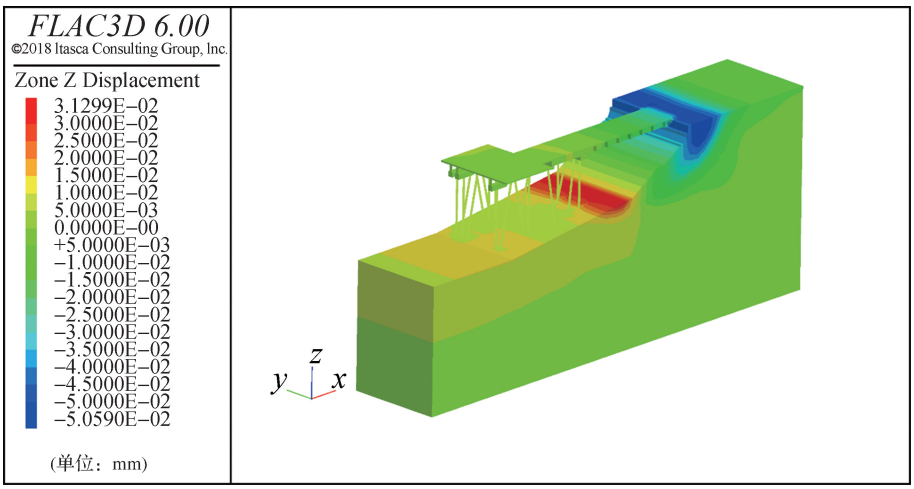


图 10 疏浚后土层竖向变形云图

Fig. 10 Vertical deformation contour of soil layer after dredging

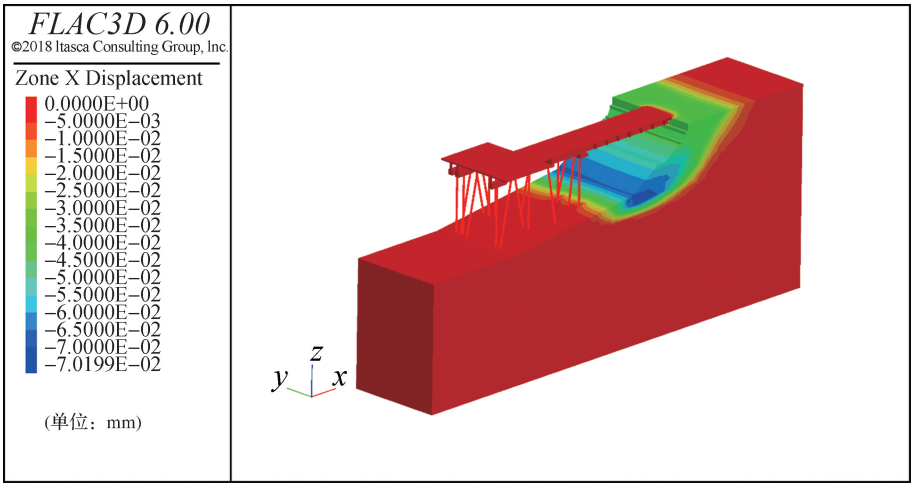


图 11 疏浚后土层水平变形云图

Fig. 11 Deformation contour of soil layer after dredging

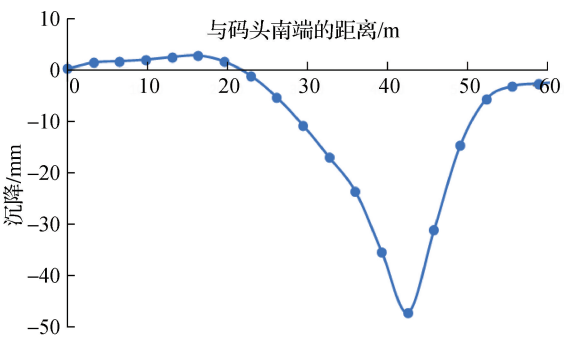


图 12 A—A′剖面沉降曲线图

Fig. 12 A—A′ profile settlement curve

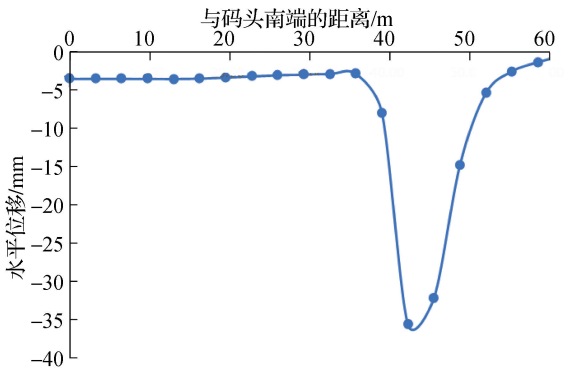


图 13 A—A′剖面侧向位移曲线图

Fig. 13 A—A′ profile lateral displacement curve

3.2　模拟结果分析

疏浚过程是一个土方卸载过程,会引起周边土层的受力状态发生改变,从而发生相应位移变形;在土层的作用下,桩也会发生协同变形,进而造成整个码头发生位移变形。由于码头由桩支撑受力,且桩长较长,引桥段主要通过驳岸与桩上架设引桥纵梁来承重,在疏浚完成后,驳岸部分会发生较大位移,因此导致码头的最大位移变形小于引桥。疏浚后,驳岸被动区土压力减小,而土层性质相对较差,疏浚引起的土体变形相对较大。

距 A 点 0～20 m 为驳岸和引桥所在的区域,由于桩基抗力较大,抵抗变形能力强,因此该段变形较小,仅为 2 mm;驳岸和引桥所在的区域由于桩基影响变形较小,与引桥接触的驳岸受到引桥的支撑作用,变形较小,但随着与引桥距离的增加,这种支撑作用逐渐减弱,在距码头南端 43 m 处,最大水平变形为 37 mm。

4　疏浚工程施工对码头结构的应力影响

4.1　数值模拟结果

图 14 与图 15 分别为梁的最小主应力云图与最大主应力云图。由图 14 得出,梁的最小主应力介于 −12 MPa～86 kPa 之间,引桥段梁与梁之间的接驳区以及梁底部分的最小主应力绝对值较大,梁上部分的最小主应力绝对值较小。由图 15 得出,梁的最大主应力介于 −1.6～2.7 MPa 之间,引桥段梁与梁之间的接驳区以及梁上部分的最大主应力绝对值较大,梁底部分的最小主应力绝对值较小。图 16 为疏浚后码头梁的最大剪应力云图,可以看出梁的最大剪应力介于 9 kPa～5.8 MPa 之间,最大值出现位置主要集中于引桥段梁与梁之间的接驳区。

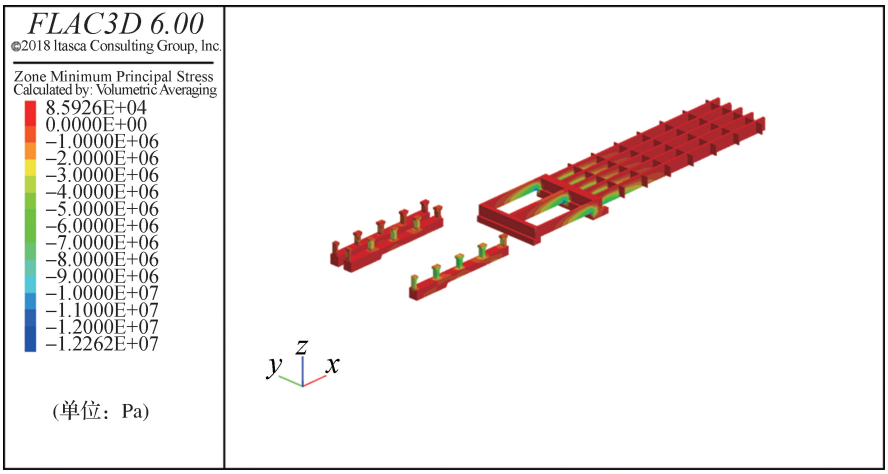


图 14　疏浚后码头梁最小主应力云图

Fig. 14　Contour of the minimum principal stress of the wharf beam after dredging

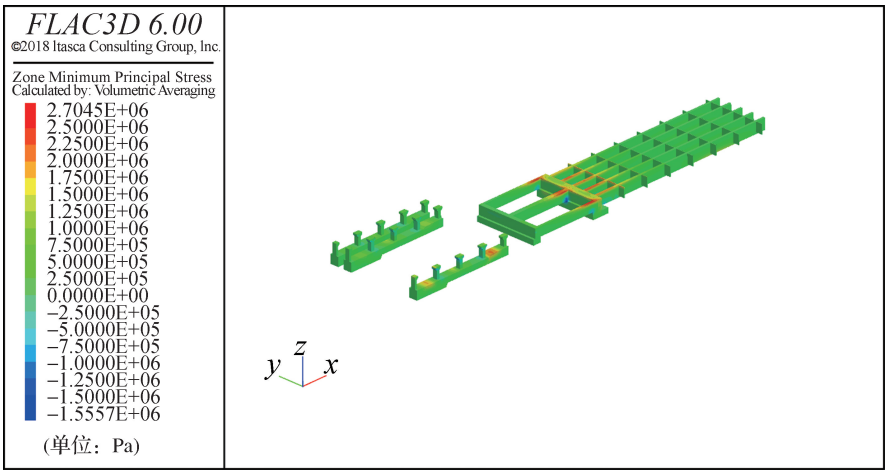


图 15　疏浚后码头梁最大主应力云图

Fig. 15　Contour of the maximum principal stress of the wharf beam after dredging

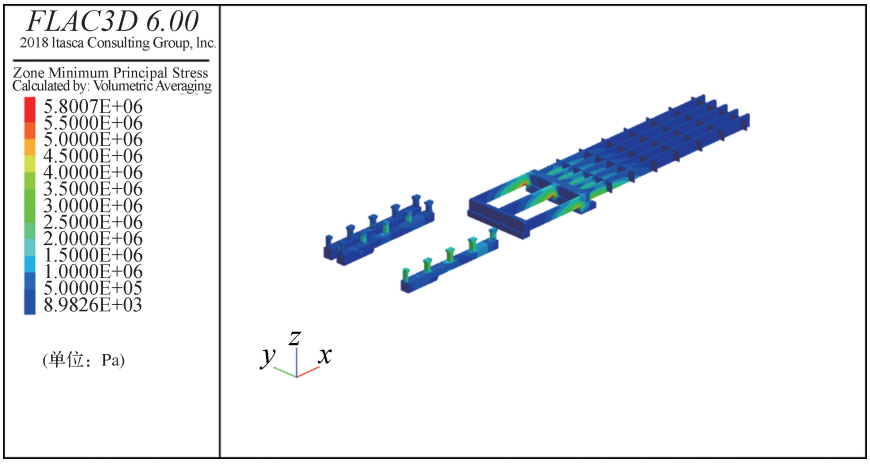


图 16　疏浚后码头梁的最大剪应力云图

Fig. 16　Maximum shear stress contour of the wharf beam after dredging

图 17 为疏浚后码头桩的轴力云图。其中码头各桩轴力介于 0～930 kN 之间，最大轴力出现于码头后方桩，其最大轴力达到了 930 kN。图 18 与图 19 分别为疏浚后码头桩的弯矩云图及疏浚后码头桩的剪力云图。码头各桩弯矩介于－47～44 kN·m 之间，各桩剪力介于－11～34 kN 之间，最大弯矩及剪力都出现于引桥后方桩。

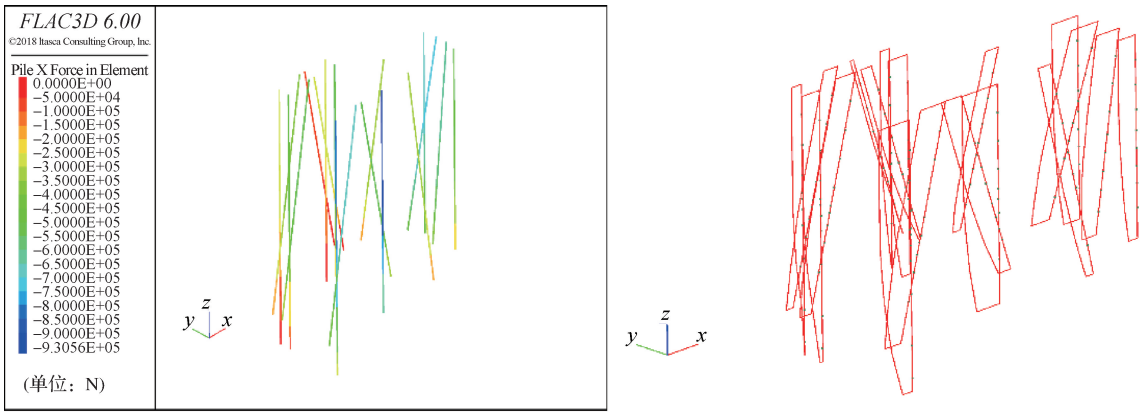


图 17　疏浚后码头桩的轴力云图

Fig. 17　Axial force contour of the wharf pile after dredging

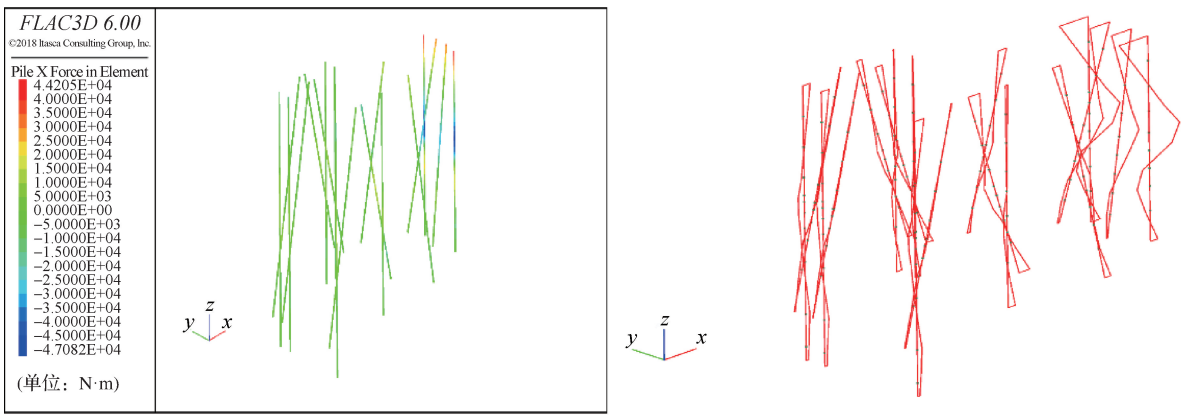


图 18　疏浚后码头桩的弯矩云图

Fig. 18　Bending moment contour of the wharf pile after dredging

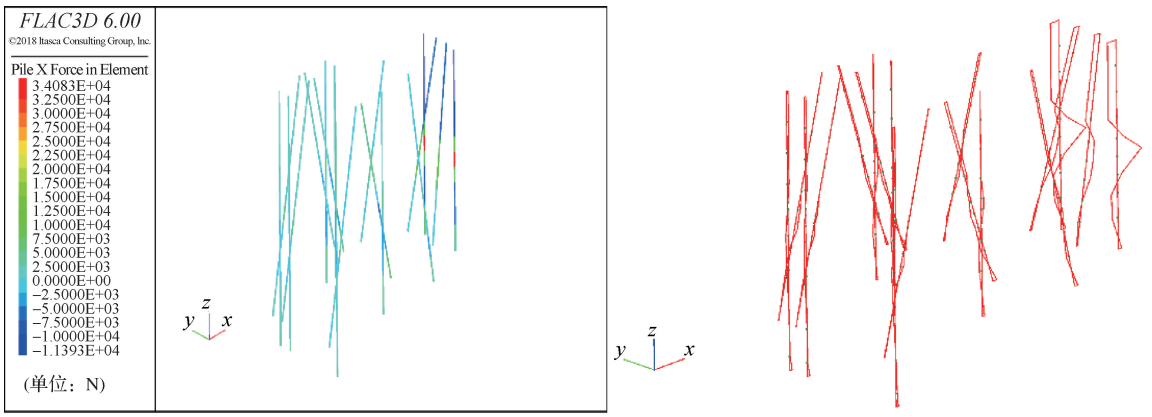


图 19　疏浚后码头桩的剪力云图

Fig. 19　Shear force contour of the wharf pile after dredging

4.2　模拟结果分析

从图 14～图 16 可看出，梁与梁间的接驳区应力变化较大，是容易出现破坏的部位；引桥后方桩所处位置疏浚层较厚，受驳岸变形影响水平向变形和沉降较大，且此处相对码头桩数较少，变形和内力主要由少数桩承担。故该位置出现了最大弯矩与最大剪力。

5　结论及建议

5.1　结论

（1）疏浚工程完成后，码头整体产生了竖向沉降与水平位移，江侧沉降较小，仅在引桥与驳岸接驳位置产生了 28 mm 沉降。码头整体水平位移较小，在引桥纵梁位置产生较大位移，为 5 mm。在距码头南端 0～20 m 区域内，由于桩基抗力较大，抵抗变形能力强，因此该段变形较小，随着码头南端与引桥距离的增加，桩基支撑逐渐减弱，最大水平变形为 37 mm。

（2）疏浚后引桥正下方土层产生最大竖向变形，为 31 mm，引桥纵梁正下方土层产生最大水平变形，为 70 mm；桩基最大水平位移出现在引桥桩部位，为 4 mm。

（3）梁最大剪应力主要集中于引桥段两梁间的接驳区，介于 9 kPa～5.8 MPa 之间，由此可见，梁与梁间的接驳区剪力变化较大，是容易出现破坏的部位；桩基最大轴力、最大弯矩及最大剪力同时出现于码头后方桩位置，是由于所处位置清淤层较厚，受驳岸变形影响较大，且此处相对码头桩数较少，变形和内力主要由少数桩承担，故该处桩基所受应力较大。

5.2　建议

（1）在疏浚施工前，首先对驳岸区域进行加固，以增强抗变形能力。可以通过加固驳岸结构、加大支护力度或者加设防护措施等来实现。同时，还应对码头、引桥、桥台等相关结构进行一段时间的监测和检测工作，确保这些结构的安全性能。

（2）在施工过程中，需要加强对驳岸及桥头区域的监测和巡视工作。一旦监测数据显示变形速率和累计值超过了事先设定的警戒值，就应立即停止施工，并及时通知相关方采取加固措施。

（3）需要特别注意的是，疏浚施工时应对施工区域的桩基进行保护，以避免施工机械损坏桩基，进而影响结构的稳定性和安全性。

参考文献：

[1]　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，2022，22(9)：105-107.
[2]　刘聪聪，刘卫，邹丰，等. 高桩码头受限空间疏浚工艺[J]. 水运工程，2022(7)：107-111.
[3]　梁雷. 沿海高桩码头施工风险评估及安全控制研究[D]. 重庆：重庆交通大学，2013.
[4]　龚圣勇. 沿海集装箱码头下方及后方疏浚技术探究[J]. 中国水运，2017(4)：68-69.
[5]　董帅帅. 浅析重力式码头深基槽回淤监测措施及清淤方法[J]. 中国水运，2023(9)：34-36.
[6]　中交第二航务工程勘察设计院有限公司，长江航道规划设计研究院. 水运工程岩土勘察规范：JTS 133—2013[S]. 北京：人民交通出版社，2013.
[7]　长江航道规划设计研究院. 航道工程地质勘察规范：JTS 133-3—2010[S]. 北京：人民交通出版社，2010.
[8]　天津航道局. 疏浚工程技术规范：JTJ 319—99[S]. 北京：人民交通出版社，1999.
[9]　李长冬. 抗滑桩与滑坡体相互作用机理及其优化研究[D]. 武汉：中国地质大学，2009.

（责任编辑：褚金红　实习编辑：张昌保）