



某格形钢板桩码头升级改造方案 三维有限元数值分析

王馨, 马煜佳, 谢乔木

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东广州 510290)

摘要: 某格形钢板桩码头升级改造工程, 前沿港池疏浚后改变了格形墙体前板桩埋入深度, 影响码头结构稳定性。为了探究改造后格形钢板桩稳定性和破坏形态, 利用有限元软件 MIDAS GTS, 构建适用于格形钢板桩结构稳定性分析的三维有限元数值模型, 通过对最不利工况下格形钢板桩改造前后的变形、受力、整体稳定性对比分析, 提出复合地基和抗滑桩加固相结合的格形钢板桩码头改造方案。结果表明, 码头加固前后的格形钢板桩整体变形、土压力分布、结构内力和地基反力分布基本一致。

关键词: 格形钢板桩; MIDAS GTS 有限元计算; 旋喷桩加固; 抗滑桩

中图分类号: U656.1+12

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)08-0152-08

Three-dimensional finite element numerical analysis of upgrade and renovation scheme of celled steel sheet pile wharf

WANG Xin, MA Yujia, XIE Qiaomu

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: In the upgrading and reconstruction project of a celled steel sheet pile wharf, the depth of the sheet pile in front celled wall is changed after dredging the front basin, which affects the stability of the wharf structure. In order to explore the stability and failure mode of celled steel sheet piles after renovation, we use the finite element software MIDAS GTS to build a three-dimensional finite element numerical model suitable for the structural stability analysis of celled steel sheet piles. By comparing and analyzing the deformation, stress and overall stability of celled steel sheet piles before and after renovation under the most unfavorable working conditions, we propose a celled steel sheet pile wharf renovation scheme combined with composite foundation treatment and anti-slide pile reinforcement. The results show that the overall deformation, soil pressure distribution, structural internal force distribution, and subgrade reaction distribution of celled steel sheet piles before and after wharf reinforcement are basically the same.

Keywords: celled steel sheet pile; MIDAS GTS finite element calculation; rotary jet grouting pile reinforcement; anti-slide pile

某格形钢板桩码头原设计为 5 个 3.5 万吨级码头, 于 20 世纪 90 年代竣工投产, 服务近 30 年, 已不能适应船舶大型化趋势和码头高质量发展需要。为充分发挥码头潜力和高效利用岸线资源、提升码头靠泊能力和港区市场竞争力, 依据交通

运输部等五部委联合印发《关于加快沿海和内河港口现有码头改建扩建工作的通知》^[1]的相关政策, 启动该码头泊位改扩建工程, 将原泊位升级为 7 万吨级泊位(结构按 10 万吨级设计)。

升级改造后, 结构设计水深将从 -12.5 m 浚

收稿日期: 2024-03-20

作者简介: 王馨 (1985—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事港口结构工程设计。

深到-15.4 m, 改变了格形墙体前板桩埋入深度。为了探究改造后格形钢板桩稳定性和破坏形态, 本文利用有限元软件 MIDAS GTS, 构建适用于格形钢板桩结构稳定性分析的三维有限元数值模型, 分析改造前后最不利工况下格形钢板桩变形、受力及整体稳定, 为改造工程方案设计提供依据。

1 工程概况

某格形钢板桩码头为直腹式格形钢板桩结构, 主隔仓直径 21 m、中心距 25 m, 副格仓直径 4 m。码头前沿设计底高程-12.5 m(当地理论最低潮面, 下同), 码头面顶高程 4.4 m, 格形体前板桩尖高程-16.50 m, 后板桩尖高程-14.50 m。格仓基础为换填密实中粗砂, 格仓内和格仓后方回填砂, 码头胸墙为 L 形, 面板为钢筋混凝土大板, 前后轨道梁均为现浇结构, 采用钢拉杆连接。

升级改造后, 结构设计水深将从-12.5 m 浚深至-15.4 m, 格形墙体前板桩的入土深度由原来的 4.0 m 减少为 1.1 m。经过初步计算, 码头前沿疏浚后, 码头后方地基条件维持现状, 格形钢板桩抗剪切稳定性和码头整体稳定性安全系数有所降低; 格形墙体底面处的抗剪切稳定性不满足设计要求。

根据格形墙体受力分析, 格形墙体后方吹填

砂进行加固处理后, 可以有效降低格仓墙体后填砂的主动土压力, 达到改善墙体整体抗剪切稳定性的目的。本工程拟加固场地有码头铺面, 地质为回填砂。因此, 在格形钢板桩后方, 拟采用 $\phi 1\ 000\ \text{mm}$ 高压旋喷桩加固土体, 通过钻孔穿透上部路面层, 对下部回填砂层进行加固, 从而提高土体强度、减小主动土压力, 提高墙体抗剪切稳定性。

为提高改造后码头整体稳定性, 考虑有 2 种加固思路: 格形体加深加强和复合地基联合桩基加固^[2]。鉴于码头目前处于正常运营状态, 码头面布置有皮带机廊道、装卸桥轨道等附属设备和设施, 改善或调整码头主体结构自身承载能力涉及面较广、难度较大, 且将会直接影响码头生产甚至需要阶段性停产。综合考虑下, 优先选择在码头前沿进行复合地基联合桩基加固的方案。

考虑地质条件和水上施工的可行性, 因此在码头前沿选择对原码头结构影响小、施工速度快的静压钢管桩进行加固, 拟采用直径 $\phi 1\ 200\ \text{mm}$ 钢管桩, 间距 1.3 m, 持力层进入风化岩; 钢管桩前被动土压力采用 $\phi 800\ \text{mm}$ 高压旋喷桩加固, 以增强前沿地基土强度, 与钢管桩共同发挥作用。码头断面见图 1, 格形体平面尺寸见图 2。

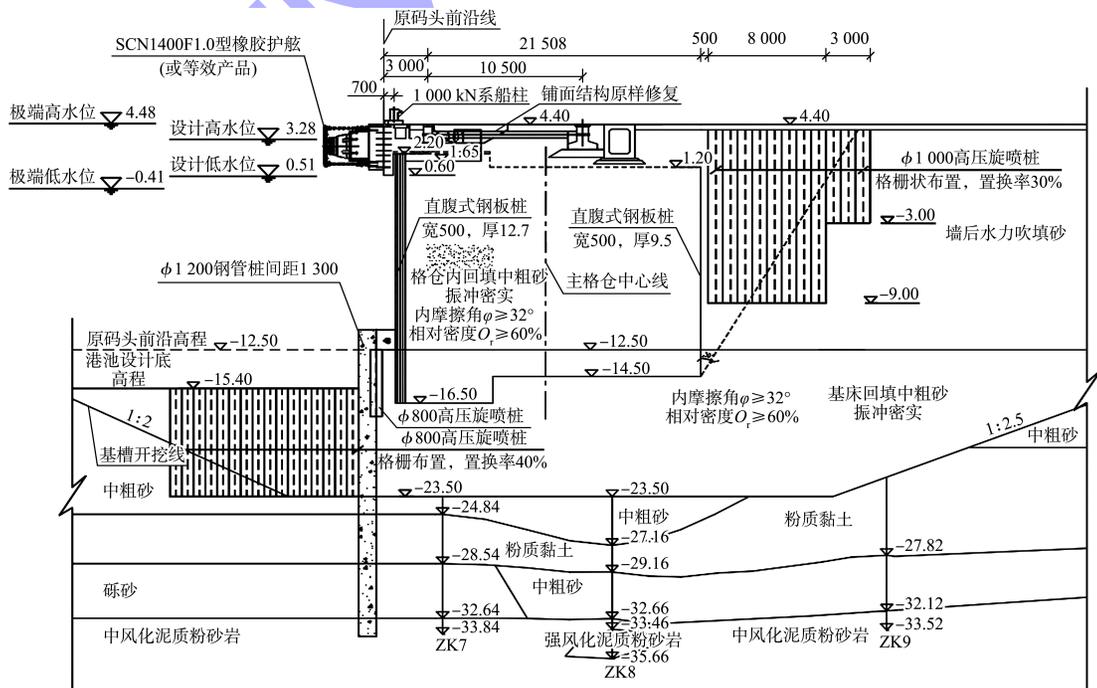


图 1 加固改造方案断面 (尺寸: mm; 高程: m)

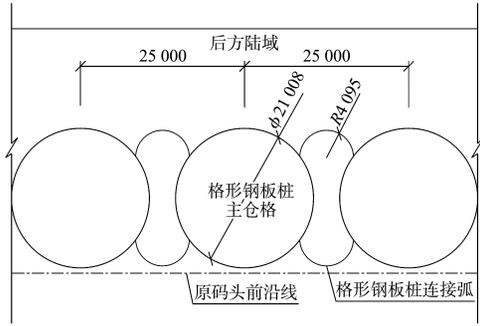


图2 格形体平面尺寸 (单位: mm)

为了探究格形钢板桩加固改造前后稳定性和破坏形态模式,通过建立原设计、疏浚后、地基加固后的三维模型,对比分析升级改造前后格形钢板桩位移变化、土压力分布、结构应力特点以及整体稳定性。

2 三维有限元分析

2.1 模型建立

由于格形钢板桩结构为对称性,本文选取1个筒体主格和副格的1/2进行有限元模拟。采用MIDAS GTS有限元软件建立结构与土相互作用的三维弹塑性模型,见图3。模型中格形钢板桩采用弹性模型,土体本构模型采用Mohr-Coulomb本构模型。结构与土体接触的区域引入界面单元,界面法向和切向弹簧刚度采用软件自带的界面助手计算添加^[3-4]。

为了更好地模拟出格形钢板桩结构稳定,通过还原施工顺序,分步模拟生成地基土体的初始应力场。分步过程为:原始地形→格形钢板桩沉

桩→墙后回填→码头前沿疏浚至-12.5 m。在此基础上进行前沿疏浚和地基加固,形成以下模型:

- 1) 模型1,码头现状模型,码头前沿水深-12.5 m;
- 2) 模型2,码头前沿疏浚至-15.4 m;
- 3) 模型3,码头后方土体(高程-7 m以上范围)采用高压旋喷桩处理,再疏浚至-15.4 m;
- 4) 模型4,码头后方土体(高程-7 m以上范围)采用高压旋喷桩处理,同时前沿采用高压旋喷桩处理,并密排布置抗滑桩基,再疏浚至-15.4 m。

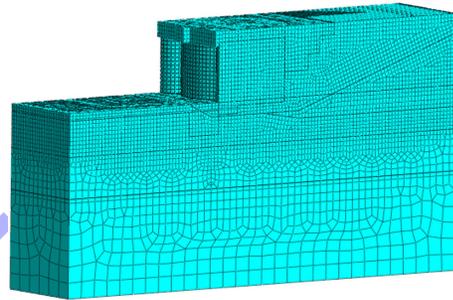


图3 格形钢板桩码头三维弹塑性模型

复合地基设计方案为:码头前沿采用φ800 mm高压旋喷桩地基加固,格栅布置,双管法工艺,42.5级以上普通硅酸盐水泥掺入量不低于350 kg/m;码头后方采用φ1 000 mm高压旋喷桩地基加固,格栅布置,三管法工艺,42.5级以上普通硅酸盐水泥掺入量不低于500 kg/m。28 d龄期单轴抗压强度应达到1.5 MPa以上,90 d龄期单轴抗压强度应达到2 MPa以上。

地基加固前后,模型中采用的土层指标参数见表1。

表1 模型中采用的土层指标参数

名称	弹性模量/MPa	泊松比	天然密度/(t·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa
② ₂ 中粗砂	35	0.30	1.90	0	31.0	35
② ₃ 中粗砂	45	0.30	1.90	0	32.0	45
③ ₁ 粉质黏土	27	0.30	2.03	23	20.0	27
强风化岩	80	0.30	2.10	50	35.0	100
筒内回填砂	40	0.28	1.90	0	32.0	40
后方吹填砂	35	0.28	1.90	0	28.0	35
基床、地基砂	60	0.28	2.05	0	32.0	60
前沿复合加固地基	69	0.28	1.95	60	15.5	50
墙后复合加固地基	61	0.28	1.95	45	13.4	55

2.2 荷载施加

本码头升级改造工程须对码头附属设施进行升级,系缆力由原来的 650 kN 提高到 1 000 kN,而工艺设备维持原设计。为了更好地进行对比分析,本文计算中,码头加固前后荷载均采用升级后的条件,即:1) 系缆力为 1 000 kN。2) 工艺荷载包括堆载和轨道荷载,其中堆载为前沿 30 m 范围内均布堆载 20 kN/m²,30 m 以后区域 60 kN/m²;轨道荷载参数为轨距 16 m,基距 15 m,共 4 个支腿,每个腿 7 个轮,轮压为 350 kN/个。3) 剩余

水头:低水位考虑 1.1 m。

最不利工况为设计低水位工况,其荷载为:自身重力+墙后填料产生土压力+(剩余水压力)+船舶系缆力+由使用荷载作用产生的土压力,土压力为主导作用。

3 模型分析

3.1 加固前后位移变化

位移是评价格形钢板桩码头稳定性的重要指标之一。各模型下前、后板桩位移对比变化见图 4。

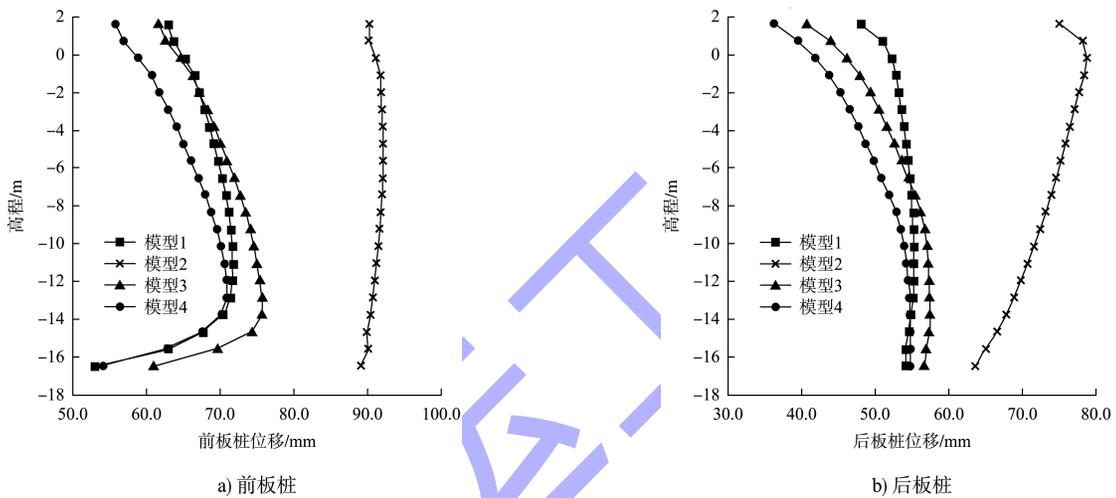


图 4 各模型下前、后板桩位移变化

由图 4 可看出:

1) 码头现状模型(模型 1)墙后回填后,前板桩顶部向海侧位移约 62 mm,底部位移约 52 mm,前板桩位移整体呈现从顶到底先增大后减小的趋势,在-14 m 高程左右位移达到最大约 70 mm。这与新沙港区格形钢板桩码头位移沉降观测的变形趋势和实测值基本一致,即“码头墙后回填开始,至上部结构开始施工的这一段时间内,格体向港池一侧位移,实测值一般为 30~70 mm”^[5-6]。

2) 码头前沿直接疏浚后(模型 2),格形钢板桩向港池一侧位移扩大至 90 mm,位移沿深度方向变化呈现为从顶部到底部均匀分布。模型 2 出现了整体较大位移。

3) 码头后方高压旋喷桩处理后,再疏浚(模型 3),格形钢板桩整体位移趋势同模型 1;但位移数值相比较,模型 3 前板桩位移大于模型 1;

模型 3 后板桩位移在高程-7 m 以上小于模型 1,-7 m 以下大于模型 1。这反映码头后方土体强度对结构整体变形影响较大,且码头后方复合地基处理对后板桩变形改善效果明显。

4) 码头前后高压旋喷桩处理,并布置密排抗滑桩之后,再疏浚(模型 4),格形钢板桩整体位移趋势同模型 1,且前、后板桩位移值均小于模型 1。这说明码头前沿复合地基加固,有利于格形钢板桩的踢脚稳定,有利于减少疏浚对结构变形的影响。

3.2 加固前后土压力分布变化

选取格形钢板桩的 3 个关键节点处(后板取 a 点、侧板取 b 点、副板取 c 点),位置见图 5,沿高程方向提取最不利工况下的土压应力值,对疏浚前后的变化进行比较^[7]。最不利工况下,码头面以下各节点土压力曲线见图 6。

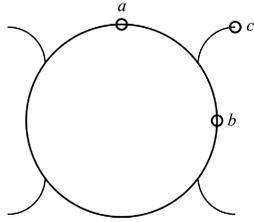


图5 格形钢板桩关键节点位置

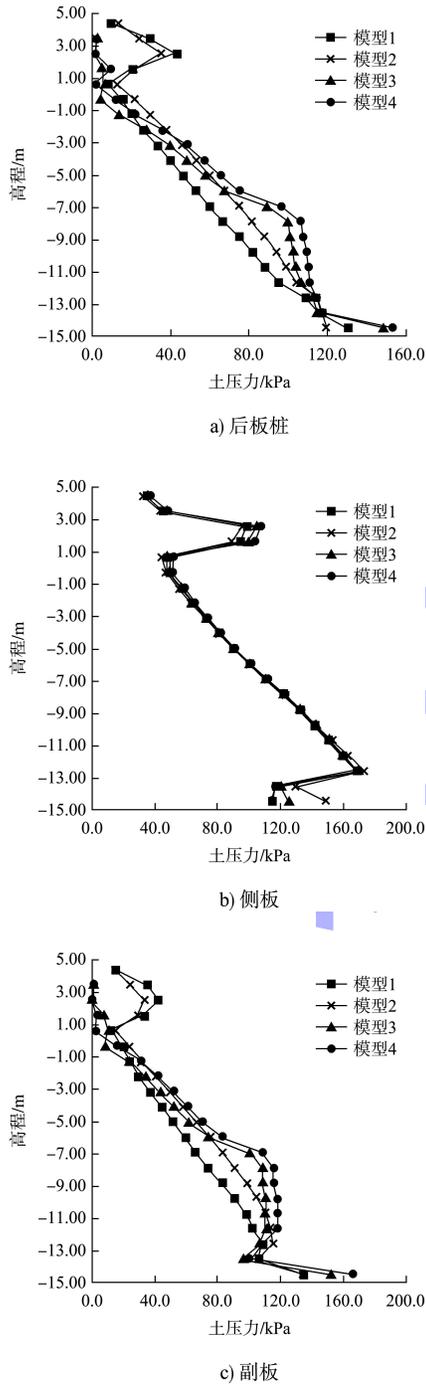


图6 各模型下格形钢板桩土压力分布

由图6可看出：

1) 后板桩和副板受土压力状态相似，从板桩顶部沿高程呈线性增长，在前沿底高程附近出现拐点，在格形钢板桩底部急剧增大。土压力最大值出现在板底角处。

2) 侧板桩与后板桩土压力分布趋势基本一致，但前者土压力明显大于后者。侧板桩的土压力最大值出现在前沿底高程附近。

3) 疏浚前后，后板桩和副板受土压力作用变化明显，疏浚后土压力值显著增加；而疏浚不影响侧板受土压力作用。

4) 通过模型3、4与2相比较，高程-7 m以上的土压力显著减少，这与墙后高压旋喷桩处理范围相吻合。

5) 模型3、4，墙后土体复合地基加固，减少了墙后土压力，墙底倾覆力矩随之减小，经验算，改造后格形墙板桩抗剪稳定性满足 JTS 167—2018《码头结构设计规范》^[8] 要求，计算结果见表2。

表2 改造前后格形墙板桩抗剪稳定性

验算水位	改造前	改造后	抵抗力矩 设计值/ (kN·m·m ⁻¹)
	倾覆力矩 设计值/ (kN·m·m ⁻¹)	墙底倾覆力矩 标准值/ (kN·m·m ⁻¹)	
设计低水位	8 442	6 309	7 557

3.3 加固前后结构应力变化

在格形钢板桩码头设计中，锁扣的胀裂稳定性，往往通过格形钢板桩环向应力分布规律和数值大小进行分析、验算。本工程钢板桩之间的锁扣连接紧密，未出现开裂、松动等缺陷，原设计锁扣强度为4 000 kN/m。

格形钢板桩主体在4种模型中最不利工况下的环向应力分布见图7，其中正值为拉应力，负值为压应力。各模型下格形钢板桩分区域环向应力分布见图8。

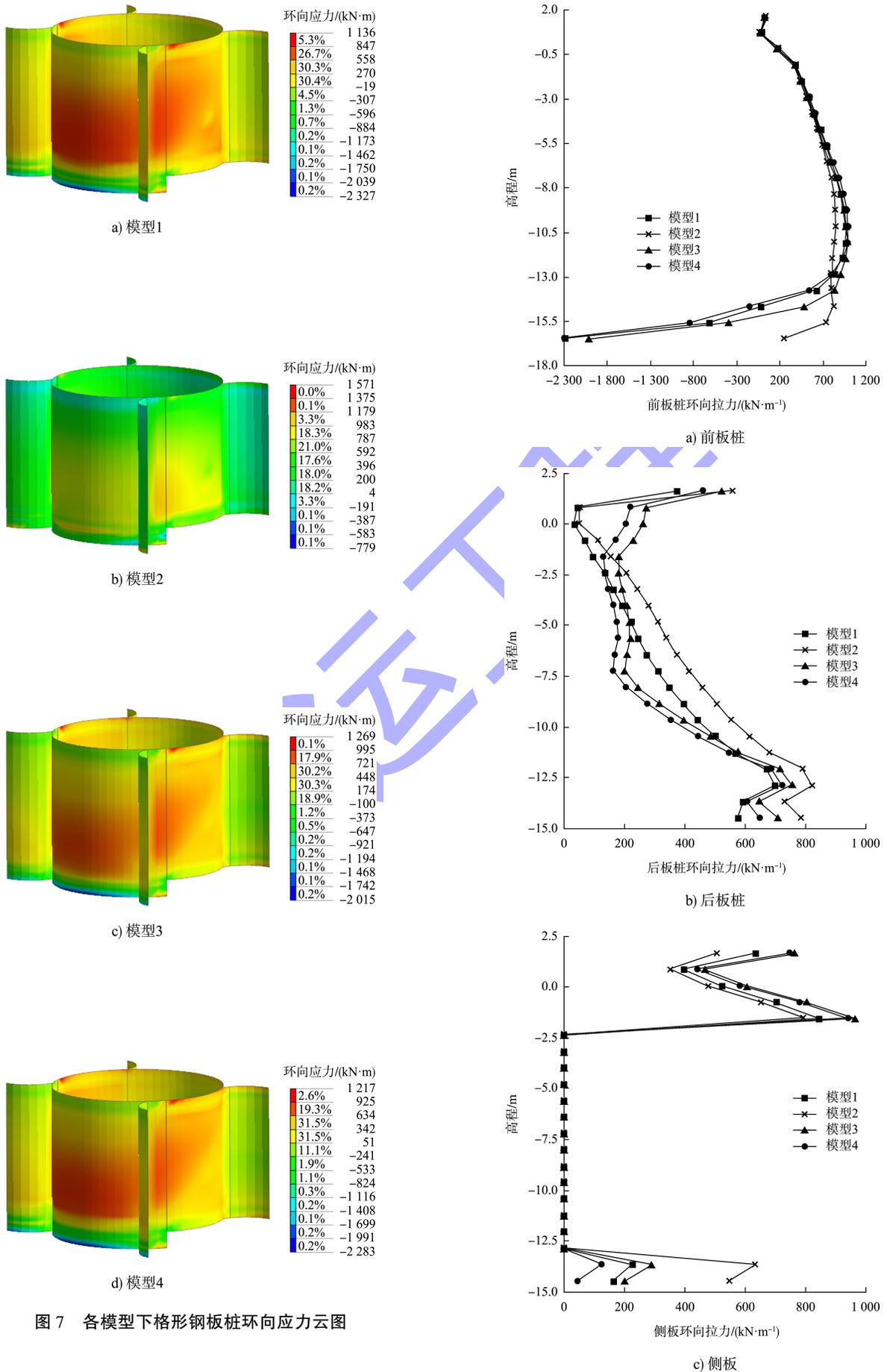


图 7 各模型下格形钢板桩环向应力云图

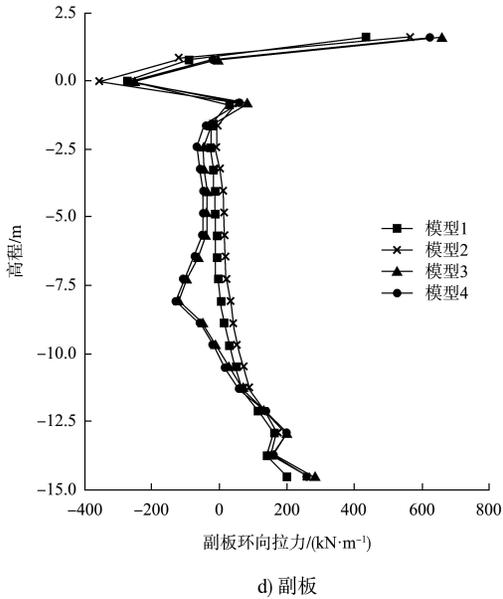


图8 各模型下格形钢板桩分区域环向拉力分布

由图7可看出，模型1、3、4的格形钢板桩主格体环向应力以拉应力为主，最大应力出现在筒体中部；前板桩底部迎水侧出现环向压应力。这反映了主格体总体趋势为向外胀开，并出现前倾。而模型2环向拉应力变小，且底部未出现压应力。结合前节位移分析，此工况下格形钢板桩前沿底部约束未发挥作用，发生了整体滑动。由图8可看出，模型1、3、4相比较，前板桩环向应力变化不大；模型3、4中后板桩环向应力略小于模型1，并且在码头后方复合地基加固范围内环向应力较模型1小，在板桩底部较模型1大。模型1、3、4中副板桩在筒体中上部出现压应力，在底部出现拉应力，这可能是由于主格体膨胀对副板挤压形成的。

经验算，改造后环向拉力设计值最大为1058 kN/m，满足JTS 167—2018《码头结构设计规范》对锁口强度的要求。

3.4 加固前后地基反力分布变化

各模型下格形钢板桩地基反力见图9。可以看出，各模型下格形钢板桩地基反力呈现两端大、中间均布的特点。疏浚前后，地基反力变化不大，均值在400 kPa以下。在码头前沿由于格形钢板桩的前倾，前板桩出现局部压应力集中，从而地基反力也相应陡增；码头后端，地基反力

增大，可能是由于模型中墙后土体沉降和变形造成的。

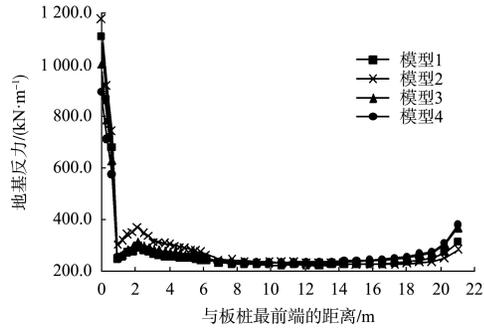
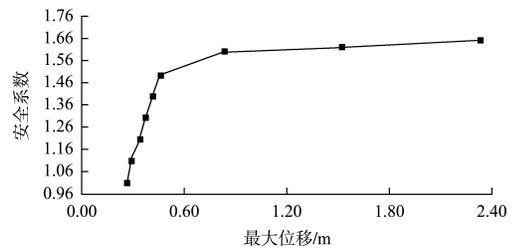


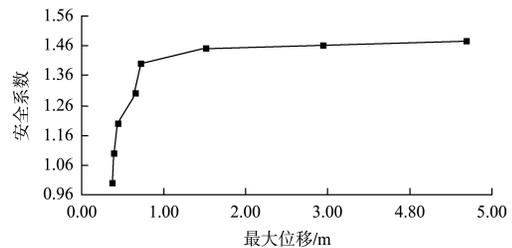
图9 各模型下格形钢板桩地基反力变化

3.5 加固前后安全系数

为探究改造前后结构整体稳定性，采用强度折减法进行安全性分析求解，安全系数不宜低于1.5。根据以往改造工程经验，对于加固改造码头，受各种因素影响，安全系数宜不低于现状码头安全系数。以此为原则，通过模型分析安全系数，结果见图10。可看出：模型1、2对比可看出，疏浚前后，码头整体稳定性安全系数从1.66减小至1.47，开挖后安全系数不满足设计要求；模型3码头后方复合地基加固后，码头安全系数提高到1.60，但仍小于码头现状安全系数；模型4码头前方复合地基加固并布置密排抗滑桩后，安全系数有效提高到1.79，满足本工程设计原则和要求。



a) 模型1



b) 模型2

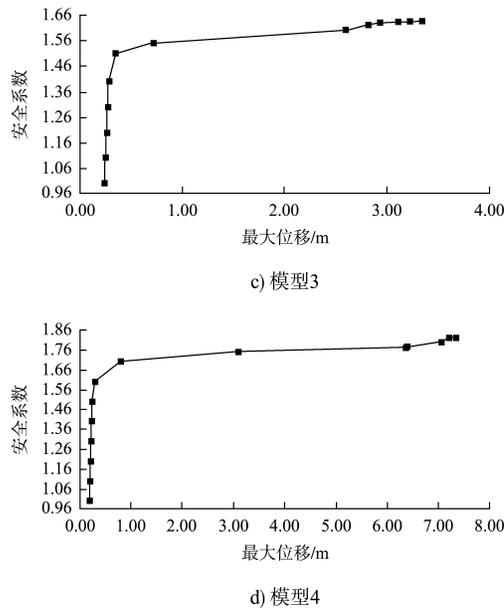


图 10 各模型下格形钢板桩安全系数

4 结语

1) 码头前沿疏浚, 格形钢板桩入土深度减小, 若不采取加固措施直接疏浚, 格形钢板桩会出现较大的整体位移, 格形墙板桩抗剪稳定性、整体稳定性不能满足设计要求。

2) 采用复合地基加固和抗滑桩相结合的改造方案后, 码头加固前后, 格形钢板桩整体变形、土压力分布、结构内力和地基反力分布基本一致。

3) 墙后复合地基加固, 可提高土体强度, 减少墙后土压力, 改善格形钢板桩受力状态, 保证

格形墙板桩抗剪稳定性; 码头前沿复合地基和密排抗滑桩加固, 增强前板桩踢脚约束, 减少板桩变形, 提高格形钢板桩整体稳定性和结构安全性。

参考文献:

- [1] 交通运输部, 国家发展改革委, 自然资源部, 等. 关于加快沿海和内河港口现有码头改建扩建工作的通知[A]. 北京: 交通运输部, 2023.
- [2] 冯海波, 曾建辉. 格形钢板桩码头结构加固改造方案研究: 广州港南沙港区#2, #3 泊位码头前沿水域浚深方案设计[J]. 水运工程, 2010(6): 68-72.
- [3] 王元战, 王举睿. 格形钢板桩结构稳定性的有限元数值分析[J]. 港工技术, 2012, 49(2): 30-34.
- [4] 王元战, 焉振. 格形钢板桩结构数值建模方法研究[J]. 海洋工程, 2014, 32(5): 1-8, 49.
- [5] 左明福. 广州港南沙港区格形钢板桩码头位移沉降观测[J]. 水运工程, 1993(4): 7-12.
- [6] 李德镛. 格形钢板桩结构在港口工程中的应用[J]. 港工技术, 1997(1): 28-34.
- [7] 朱嘉敏. 钢板桩格形围堰三维有限元数值分析及施工方法探究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- [8] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中交第四航务工程局有限公司. 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

(本文编辑 王璁)

(上接第 80 页)

- [3] 王红尧, 连石水. 邮轮码头设计关键平面尺度研究[J]. 港工技术, 2018, 55(2): 17-19.
- [4] 王万茂. 三亚凤凰岛邮轮码头登船桥使用及改造[J]. 港口科技, 2020(4): 42-46.
- [5] 哈显鹏, 陈贤毅, 袁泽军, 等. 新型邮轮访问港登船桥研发设计[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(11): 134-136.
- [6] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司. 广州南沙国际邮轮码头工程初步设计[R]. 广州: 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 2017.
- [7] 谢岗. 现代化邮轮码头登船桥技术及工艺特点分析[J]. 水运工程, 2011(5): 99-102.
- [8] 余建夫. 浅析青岛港老港区邮轮码头工程装卸工艺设计[J]. 港工技术, 2013, 50(6): 12-14.
- [9] 黄国庆, 陈庆为, 李春. 邮轮旅客行李装卸工艺及设备研究[J]. 港口装卸, 2013(6): 19-21.
- [10] 哈显鹏, 王永红. 旋转伸缩式登船桥无线遥控控制方式应用[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(12): 84-85.

(本文编辑 赵娟)