



高桩梁板与板桩复合结构对板桩码头 原位升级改造思路

何元塘

(广东省航运规划设计院有限公司, 广东 广州 510050)

摘要: 以东莞虎门港某 1 000 吨级码头原位升级改造为 5 万吨级码头的工程实例, 通过对工程现状及存在问题的分析, 提出采用高桩梁板与板桩的复合结构, 将板桩墙和高桩梁板结构连成一体, 形成整体卸荷式结构, 有效减少作用于板桩墙的土压力, 使板桩结构能满足大吨位深水码头的建造要求。论述了改造方案选型并进行结构分析计算, 根据弹性理论建立有限元三维数值模型, 计算结果满足工程要求。该复合结构基于特定条件下提出, 结构特点鲜明, 可作为类似码头升级改造工程借鉴。

关键词: 板桩码头升级; 复合结构; 整体卸荷式; 三维数值模型

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)06-0074-07

Thoughts of in situ upgrading of sheet-pile wharf with high-pile beam-plate and sheet-pile composite structures

HE Yuantang

(Guangdong Province Planning & Design Institute for Navigation Co., Ltd., Guangzhou 510050, China)

Abstract: Based on the project example of upgrading a 1,000-ton wharf in Humen Port, Dongguan into a 50,000-ton wharf in situ, the composite structure of high-pile beam and sheet-pile is proposed through the analysis of the project status and existing problems. The composite structures of sheet-pile wall and high-pile beam-plate are integrated to form a whole unloading structure, which can effectively reduce the earth pressure on sheet-pile wall. The sheet pile structure can meet the construction requirements of deep water wharf with large tonnage. In this paper, the selection of renovation scheme is discussed and the structural analysis and calculation are carried out. According to the elastic theory, the finite element three-dimensional numerical model is established, and the calculation results meet the engineering requirements. The composite structure is proposed based on specific conditions, and has distinct structural characteristics, which can be used as reference for similar wharf upgrading projects.

Keywords: sheet-pile wharf upgrade; composite structure; integral unloading type; three dimensional numerical model

1 码头升级改造背景

从 20 世纪 80 年代开始, 我国船舶大型化发展已经开始起步。船舶大型化是全球低碳经济发展的一种趋势, 主要为了降低运输成本、提高航

运市场的竞争力。船舶吨位越大, 对泊位水深的要求越高, 受自然条件和结构自身安全度的限制, 泊位水深条件达不到要求的港口被排除在大型船舶的停靠选择之外。为适应大型化船舶靠泊需要、

收稿日期: 2022-08-25

作者简介: 何元塘 (1972—), 男, 高级工程师, 从事港口航道工程规划、设计、咨询、管理工作。

确保竞争优势、谋求和确定各自在港口网络中的地位，港口码头特别是较早建成的一些泊位等级低、安全性低的码头泊位需不同程度地提高自己的靠泊能力。为维持码头泊位安全正常营运、满足船舶大型化靠泊需要、促进可持续发展，一些老旧码头泊位进行升级改造势在必行，如此某些早期港口在船舶大型化发展中才能抢占有利位置。

2 拟改造码头结构概况

拟改造码头建于 20 世纪 90 年代中期，结构等级为 1 000 吨级，码头结构形式为前板桩+后承台桩的无锚结构，板桩墙采用 $\phi 1\ 000\text{ mm}$ 灌注桩密排布置，距板桩墙中心 3 000 mm 处设有一排 $\phi 1\ 000\text{ mm}$ 灌注桩，纵向间距 2 250 mm 布置。两排灌注桩顶部通过混凝土底板连成一体(图 1)。

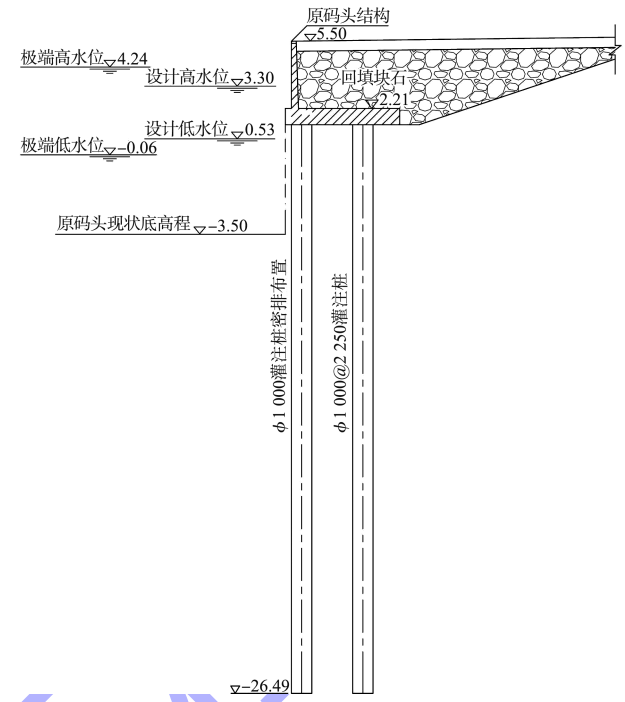


图 1 原码头结构断面 (高程: m; 尺寸: mm)

3 设计条件

3.1 自然条件

- 1)设计水位。设计高水位 3.30 m(高潮 10%);设计低水位 0.53 m(低潮 90%);极端高水位 4.24 m(50 a 一遇);极端低水位-0.06 m(50 a 一遇)。
- 2)工程地质。工程区域上覆土层为人工填土、第四系珠江三角洲海陆交互相沉积层和第四系珠江三角洲冲积层，主要为淤泥类土和砂类土，下伏基岩为白垩系泥质粉砂岩(图 2)。土层主要指标见表 1、2。

表 1 土体物理力学参数

土层名称	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	水平抗力系数的比例系数 $m/(\text{MN}\cdot\text{m}^{-4})$
素填土	1.70	5.0	11.0	2.0
淤泥	1.60	8.1	8.2	2.5
淤泥质粉质黏土	1.66	18.4	14.0	3.5
中粗砂	1.80	0	32.0	8.0
粗砾砂	1.80	0	34.0	10.0
强风化泥质粉砂岩	1.75	7.5	25.0	30.0
中风化泥质粉砂岩	1.82	13.5	25.0	45.0

表 2 各岩土层地基承载力及桩基参数建议值

层号	土层名称	状态	土(岩)层地基承载力标准值 f_{ka}/kPa	打入桩		灌注桩	
				单位面积极限桩端阻力标准值 q_R/kPa	单位面积极限侧摩阻力标准值 q_l/kPa	单桩极限端阻力标准值 q_R/kPa	桩周土的极限侧摩阻力标准值 q_R/kPa
① ₁	素填土	松散	90	—	—	—	—
① ₂	填石	—	—	—	—	—	—
②	淤泥	流塑-软塑	50	—	—	—	—
③	粉细砂	松散-稍密	110	—	25	—	20
④ ₁	淤泥质粉质黏土	软塑-可塑	70	—	14	—	10
④ ₂	中粗砂	松散-稍密	220	—	60	—	55
⑤ ₁	中粗砂	中密-密实	250	—	70	—	65
⑤ ₂	粉细砂	松散-稍密	170	—	50	—	45
⑥	淤泥质粉质黏土	软塑-可塑	90	—	18	—	15
⑦ ₁	粗砾砂	中密-密实	300	—	85	—	80
⑦ ₂	细中砂	中密-密实	260	—	70	—	65
⑧ ₂	强风化泥质粉砂岩	—	500	—	120	1 400	—
⑧ ₃	中风化泥质粉砂岩	—	900	3 000	—	2 200	—

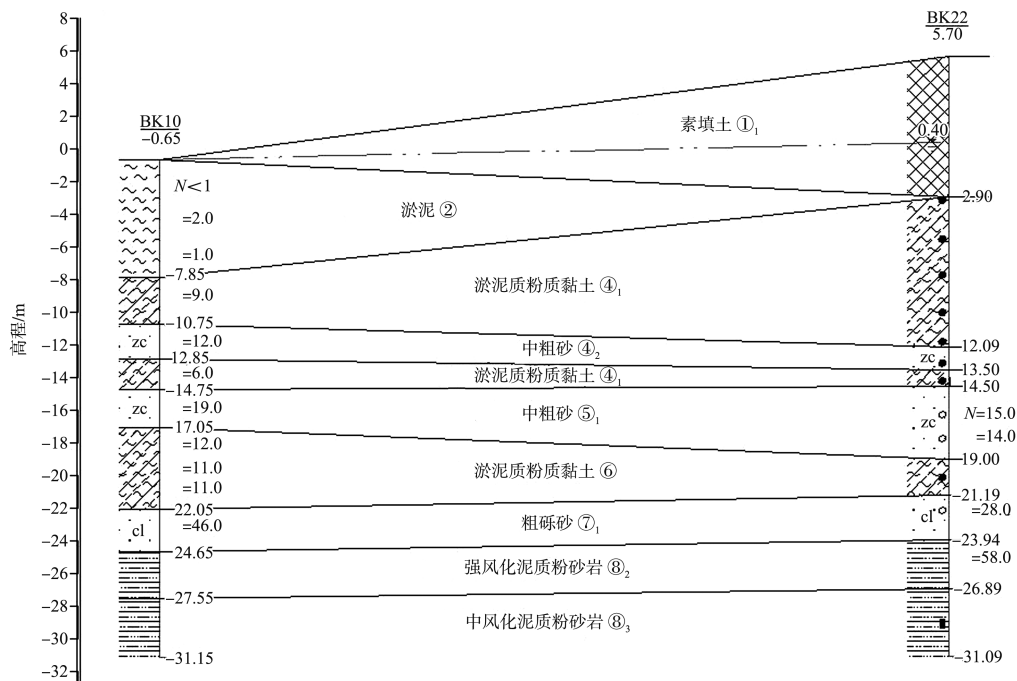


图2 地质剖面

3.2 荷载条件

1)堆货荷载。码头平台堆货荷载：前沿4 m， $q_1 = 10 \text{ kPa}$ ；4 m至后方， $q_2 = 30 \text{ kPa}$ 。

2)起重运输机械荷载。①41 t-38.5 m集装箱岸桥：轨距18.0 m，基距15 m，共4个支腿，每腿10个轮，工作时最大轮压400 kN，轮距1.5 m，总轮数40个；工作幅度：最大/最小为38.5 m/17.5 m。②MQ1640门座起重机：轨距10.5 m，基距10.5 m，共4个支腿，每腿8个轮，工作时最大轮压250 kN，轮距0.85 m，总轮数32个；工作幅度：最大/最小为40 m/10 m。③其他流动机械荷载：40 t集装箱牵引车和半挂车。

3)船舶荷载。系缆力565 kN，撞击能量382 kJ，挤靠力150 kN。

4 改造方案

4.1 总体思路

原码头结构为前板桩+后承台桩的无锚结构，二者通过现浇底板相连。原靠泊等级为1 000吨级，码头前沿停泊水域水深浅，结构变形有限，

满足使用要求。现需升级改造为5万吨级泊位，码头前沿停泊水域需大幅浚深，随着板桩墙前水深加大，原板桩墙弯矩急剧增大、水平位移增大，最终将导致板桩墙损坏及踢脚失稳破坏。将原码头结构直接作为5万吨级码头受力主体明显不合适。

从工程造价、工程量等方面综合考虑，本次改造的总体思路是在充分利用原结构的基础上新建5万吨级码头主体结构。

升级改造需解决以下两个基本问题：1)确定新建5万吨级码头前沿线，充分利用已有构筑物，减少工程投资和避免浪费。2)采取合理、经济的措施减少作用于板桩墙上的土压力。

4.2 方案选型

在遮帘式及半遮帘式板桩、卸荷式板桩结构发展之前，板桩结构仅适用于中小型码头，不如重力式和高桩式结构适用范围广，主要是由于水深过大时前板桩墙弯矩急剧加大。21世纪初期，京唐港区开始尝试将板桩码头推向深水泊位开发和试验，通过采用遮帘或半遮帘等

方式减少作用于板桩墙的主动土压力以减少板桩墙的弯矩，通过理论分析、离心模拟试验证明设计合理，京唐港区大型深水板桩码头建成投入使用至今，经济效果显著，使用状况良好^[1]。该案例证明如采取有效措施减少作用于板桩墙上的主动土压力，板桩码头也可适用于深水泊位。同时，板桩结构具有材料用量少、开挖量少的天然优势，用于已有岸壁式码头的改造也较为合适。因此，为减少岸坡开挖量及对原结构的破坏，本工程新建 5 万吨级码头采用板桩结构。

本工程采用整体卸荷式的高桩梁板和板桩复合结构，将板桩墙和高桩梁板结构连成一体，码头结构宽度较大，卸荷范围广，卸荷临界点深，且在板桩墙后开挖一定深度卸载，进一步减少作用于板桩墙的土压力。根据前人的研究成果^[2-3]，类似结构在国内已有工程实例。

新建 5 万吨级码头前沿线距原码头前沿线越近，越有利于减少墙后回填量、原结构拆除量及墙后主动土压力，但是需预留桩基施工空间及原码头桩基满足遮帘桩与前墙距离要求。因此，确

定新建 5 万吨级码头前沿线在原码头前沿线外侧 3.5 m 处。

现有码头后方回填块石，采用灌注桩不受地质限制，且与 PHC 桩相比抗弯能力更强。原结构所用 $\phi 1\,000\text{ mm}$ 灌注桩桩基完整性仍较好，无明显破损，本次改造将原码头桩基与新建结构连成一体，加强结构刚度及提高抗力。

整体卸荷式的高桩梁板和板桩复合结构方案：码头泊位长度 328 m，共分成 9 个结构段，码头主体结构由灌注桩、底板、横梁、轨道梁、纵梁、叠合板组成。码头施工时，需对现有码头上部结构拆除，保留并利用结构下部 2 排 $\phi 1\,000\text{ mm}$ 的灌注桩，在新建码头前沿线上设置 $\phi 1\,500\text{ mm}$ 、间距 1 750 mm 的密排灌注桩，码头横梁和后排基桩组成的排架间距为 5.25 m。每个排架设置 5 根 $\phi 1\,200\text{ mm}$ 灌注桩（未包括前排的密排灌注桩），前排密排灌注桩和第 2 排支承桩基上部设置现浇底板，将原码头灌注桩连成整体，第 2~6 排支承桩上部直接与横梁相接。其中底板、横梁、轨道梁均为现浇梁板构件，纵梁、面板均为预制+现浇的叠合构件（图 3、4）。

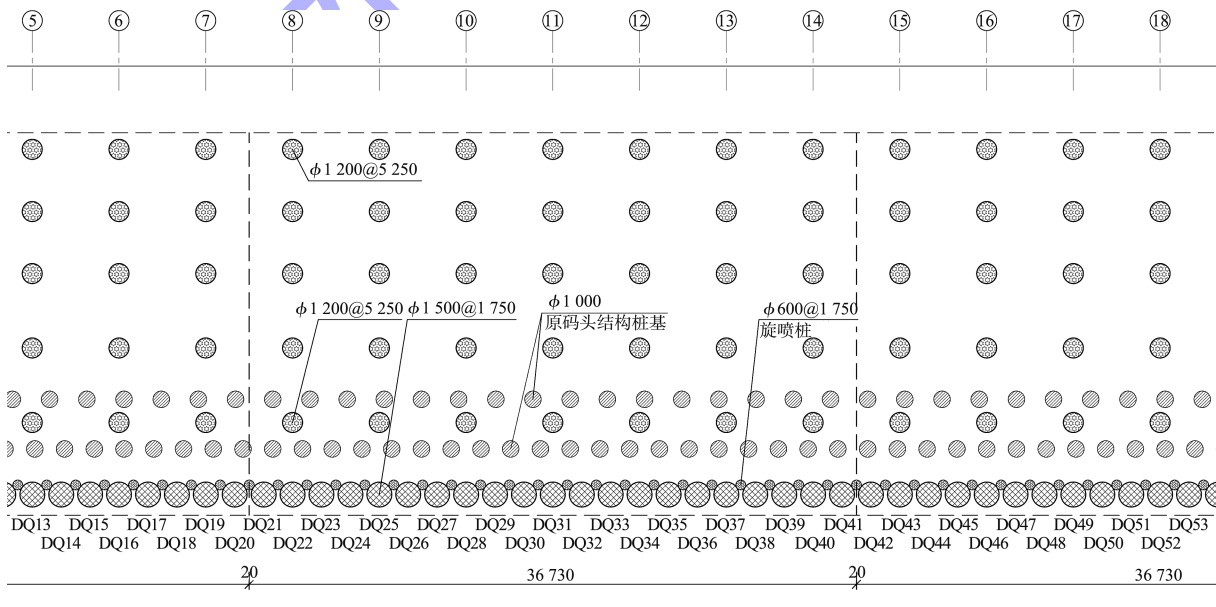


图 3 局部桩位布置（单位：mm）

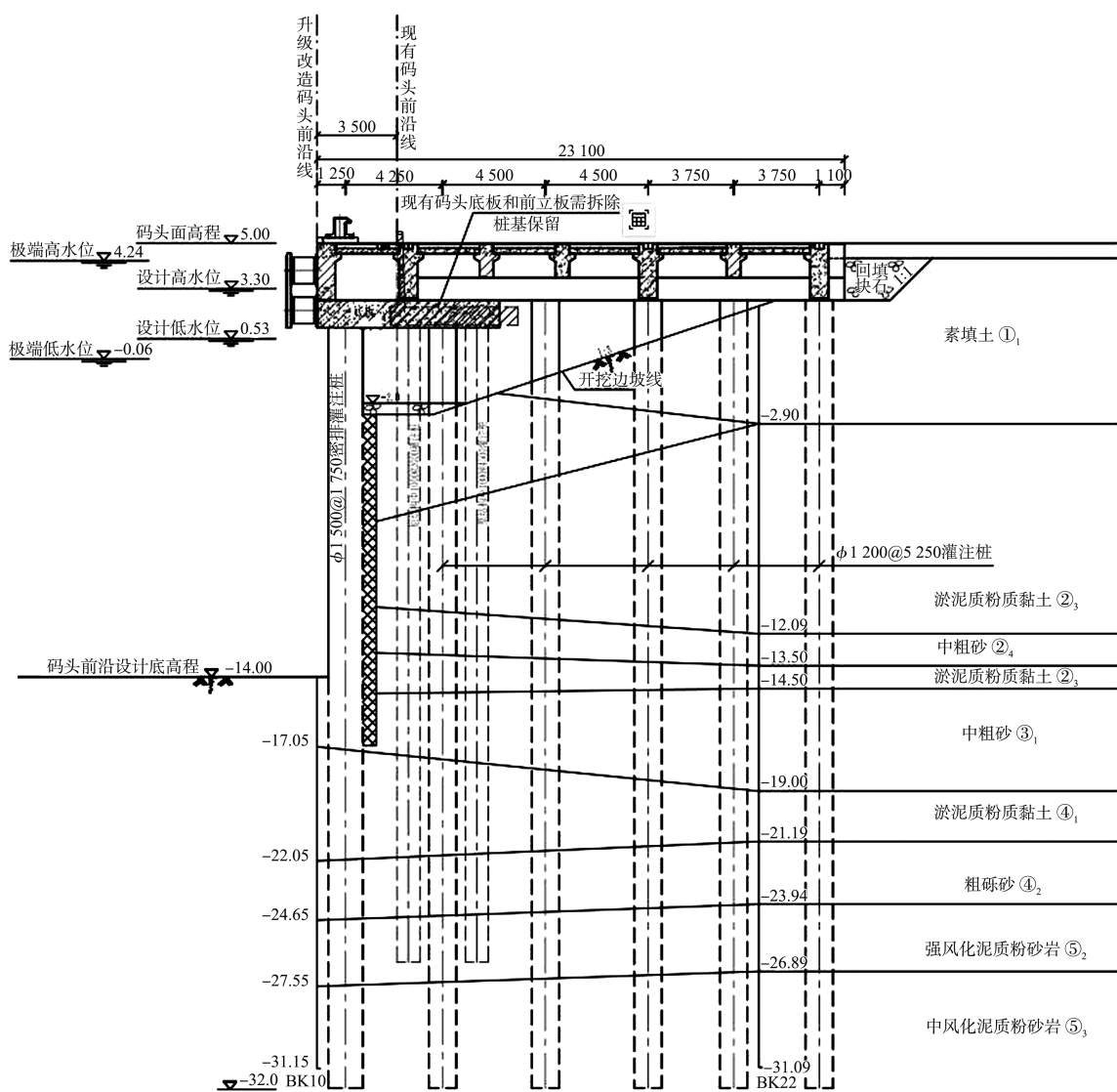


图4 码头结构断面 (高程: m; 尺寸: mm)

4.3 分析计算

整体卸荷式的板桩码头结构可以按单锚板桩结构计算前墙土压力。整体卸荷式的高桩梁板和板桩复合结构与原码头桩基浇筑连成一体, 结构整体受力, 桩顶部与底部、横梁均全部固接, 为超静定平面刚架结构。由于支承桩纵向中心距较大, 不满足遮帘桩要求, 原码头桩基纵向中心距较小, 可形成一定的遮帘作用, 但桩身刚度较前排板桩墙刚度小, 不能形成有效的遮帘面, 完全按照遮帘桩进行理论计算不合理。

为简化计算, 做以下基本假设: 1) 为确保结构安全, 结构计算时不考虑原码头桩基的部分遮帘作用, 土压力全部作用在前排板桩墙上^[4]; 2) 忽略土体的塑性变形影响, 按弹性嵌固于地基中的平面刚架计算, 桩土作用采用 m 法模拟, 桩基按照竖向弹性地基梁考虑, 水平地基抗力系数随深度变化。基于以上假设, 采用通用有限元软件 Midas-civil 建立有限元模型, 桩基、梁系均采用杆系单元模拟, 面板采用壳单元模拟, 现浇底板按刚性连接考虑, 桩土作用采用节点弹性支承(图5)。后方排桩考虑

群桩效应，沿受力方向的水平地基抗力系数根据桩距进行折减，折算系数按规范取 0.25^[5]。

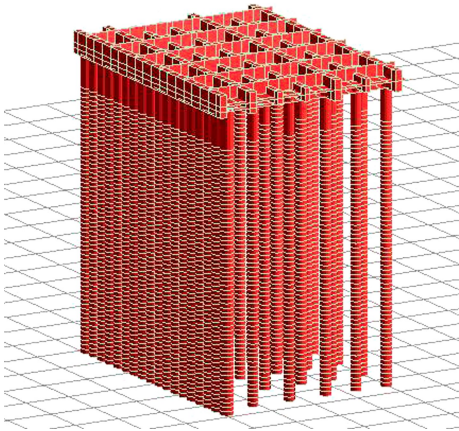


图 5 有限元模型

1) 板桩前踢脚稳定性计算结果见表 3。

表 3 板桩前踢脚稳定性计算结果

工况	最大倾覆力矩/ (MN·m·m ⁻¹)	对应抗倾覆力矩/ (MN·m·m ⁻¹)
持久组合	84.82	187.58
地震组合	68.39	154.46

2) 桩力计算结果见表 4。

3) 主要梁板内力计算结果见表 5，弯矩计算结果见图 6。

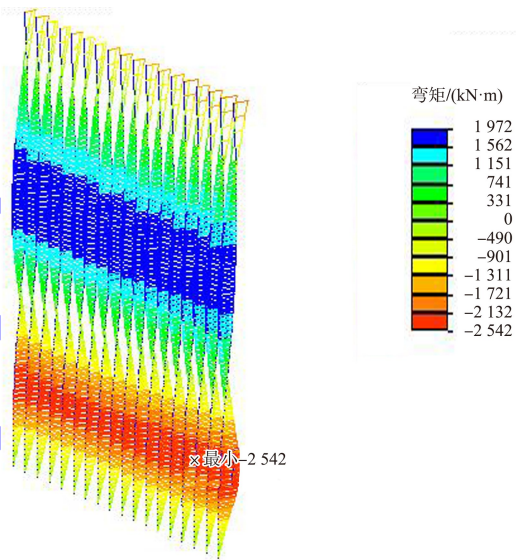
表 4 桩力计算结果

灌注桩 桩型/mm	压桩力/抗压承 载力设计值/MN	拉桩力/抗拉承 载力设计值/MN	单桩承载力极限 弯矩/(MN·m)
φ1 500	2.630/4.841	0/2.180	2.542
φ1 200	3.853/4.134	0/2.569	2.321

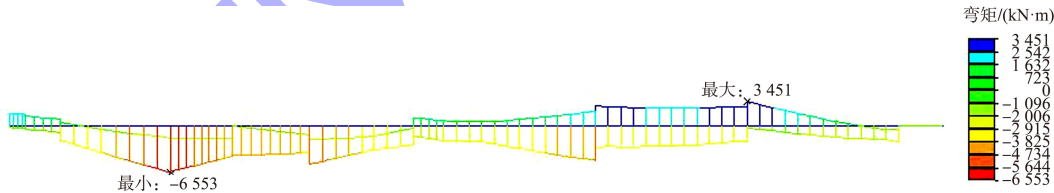
注：桩基入岩，桩距大于规范规定的单桩最小间距要求，轴向承载力不考虑群桩系数折减。

表 5 主要梁板内力计算结果

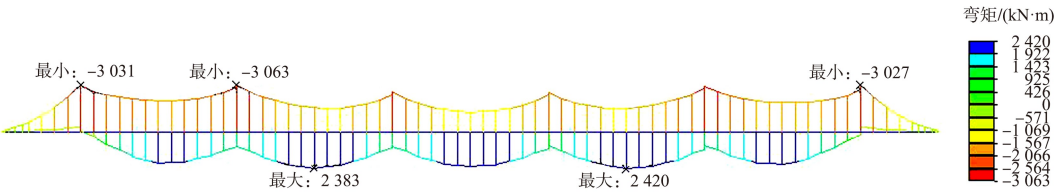
构件	跨中弯矩/(MN·m)	支座弯矩/(MN·m)	剪力/MN
横梁	6.553	3.456	2.141
轨道梁	2.420	3.063	2.347
纵梁	0.609	0.234	0.333



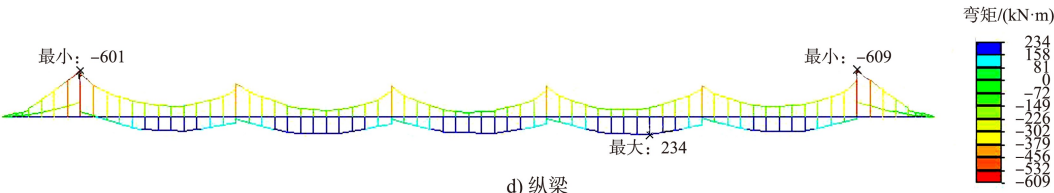
a) 板桩墙(密排桩)



b) 横梁



c) 轨道梁



d) 纵梁

图 6 主要结构弯矩计算结果

4) 码头桩台位移见图 7, 最大位移为 33.5 mm。

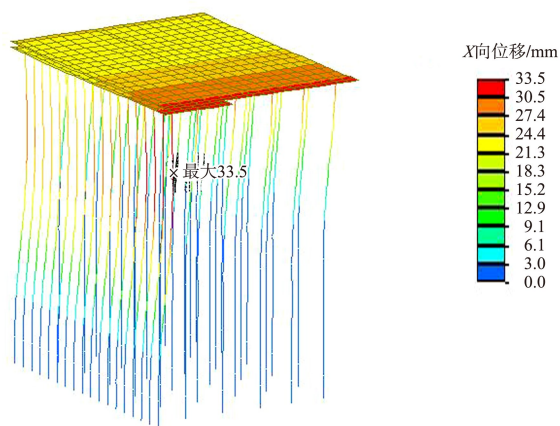


图 7 桩台最大位移及位移等值线

5 结论

1) 基于小型板桩码头原位升级改造项目, 提出采用整体卸荷式的高桩梁板和板桩复合结构方案, 可有效减少板桩墙的主动土压力和弯矩, 且能适应早期建设的前方作业地带较窄的码头升级改造。此结构方案可为低等级码头升级改造造成大型深水泊位提供借鉴。

2) 整体卸荷式的高桩梁板和板桩复合结构主要由板桩墙 (密排灌注桩) 和高桩梁板结构的卸荷平台组成, 板桩墙和卸荷平台通过横梁及面板浇筑形成整体, 结构整体受力, 协调变形, 结构受力形式可按照前墙顶部与卸荷平台固接的单锚板桩结构考虑。

3) 整体卸荷式的高桩梁板和板桩复合结构受力明确, 卸载平台作为码头结构使用, 减少墙后开

挖和回填量; 卸荷后板桩墙弯矩较小, 满足深水泊位建造要求。

4) 整体卸荷式的高桩梁板和板桩复合结构属于超静定的刚架结构, 需控制水平位移和不均匀沉降以减少结构自身内力。基桩与上部结构应全部采用加强固接, 板桩和支承桩宜沉入同一良好持力层。

5) 为简化计算, 复合结构分析忽略土体的塑性变形, 按弹性理论采用有限元软件 Midas-civil 建模分析, 基本满足工程要求。建议进一步对整体卸荷式的高桩梁板和板桩复合结构采用三维数值分析法进行计算验证或者进行离心模型试验验证其受力特性, 便于后续推广和使用。

参考文献:

- [1] 刘永绣. 板桩码头向深水化发展的方案构思和实践: 遮帘式板桩码头新结构的开发[J]. 港工技术, 2005 (S1): 12-15.
- [2] 金泰赛. 密排桩承台结构在码头工程直立式护岸中的应用[J]. 珠江水运, 2022(12): 43-46.
- [3] 蒋国栋, 张颖, 罗天一. 前板桩后低桩承台结构在板桩码头改造中的应用[J]. 水运工程, 2016(7): 46-50, 53.
- [4] 任增金, 只红茹. 前板桩高桩码头结构形式的应用[J]. 水运工程, 2014(3): 107-110.
- [5] 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 王传瑜)

(上接第 67 页)

参考文献:

- [1] 张锦文. 上海市内河港区布局规划的思考[J]. 上海城市规划, 2017 (4): 70-74.
- [2] 中交水运规划设计院有限公司. 港口工程基本术语标准: GB/T 50186—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [3] 邓丰昌, 郑静. 上海市内河跨航道桥梁布跨方式[J]. 水运工程, 2017 (11): 120-123, 128.
- [4] 长江航道局. 内河通航标准: GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [5] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 内河航道工程设计标准: DG/TJ 08-2116—2020[S]. 上海: 同济大学出版社, 2021.
- [6] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 河港总体设计规范: JTS 166—2020[S]. 北京: 人民交通出版社有限公司, 2020.

(本文编辑 王传瑜)