



灌注桩墙与重力式结构组合体系 在码头升级改造中的应用

刘杰, 巴蕾, 刘宁, 夏陆军

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 在中东某码头升级改造工程中, 推荐采用灌注桩墙与重力式结构组合体系, 能够充分发挥两种结构的受力特点, 有效解决码头前沿线前移、水深加大、码头上部荷载大幅增加、水平位移要求严、减小高基床扰动等技术难题。采用强度折减法和弹塑性分析法对该组合结构统一模型的结构稳定、桩墙内力和码头水平位移等主要技术指标开展 Plaxis 有限元分析, 并对比不同桩墙和拉杆水平刚度下的结构稳定、内力及位移等变化规律。结果表明, 桩墙和拉杆的水平刚度对组合体系的结构稳定性和桩墙内力的影响基本一致, 均是随着二者的水平刚度降低而降低; 拉杆的水平刚度降低引起水平位移的增加, 而桩墙水平刚度的降低则有利于降低一定的水平位移。

关键词: 灌注桩墙; 重力式结构; 组合体系; 码头升级改造; 强度折减法; 弹塑性分析

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)S1-0101-08

Application of composite system of cast-in-place pile wall and gravity structure in wharf upgrading and reforming

LIU Jie, BA Lei, LIU Ning, XIA Lu-jun

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: The composite system of cast-in-place pile wall and gravity structure is recommended for a wharf upgrading project in the Middle East. The system is able to make full use of the performances of the two structures and effectively solves the technical problems such as the forward movement of the berth line, deepening of berth water, significant increase in loading on the superstructure, strict requirements for horizontal displacement and rock foundation's disturbance. The strength reduction method and the elastic-plastic analysis are used to carry out Plaxis finite element analysis of the main technical indicators of the composite structure, including the structural stability, the internal force of the pile wall and the horizontal displacement of the wharf. In addition, this paper compares the developing rules of structural stability, internal force and displacement under different horizontal stiffness of pile wall and tie-rod. The results show that the decreases in horizontal stiffness of pile wall and tie-rod can reduce the structural stability and pile wall's internal force. The decrease in tie-rod's horizontal stiffness causes the increase in the horizontal displacement, while the decrease in pile wall's horizontal stiffness is beneficial to reduce the horizontal displacement to some extent.

Keywords: cast-in-place pile wall; gravity structure; composite system; wharf upgrading and reforming; strength reduction method; elastic-plastic analysis

随着国内外船舶大型化的快速发展, 港口也必然朝着大型化和深水化的方向发展。除了新建码头、港口设施外, 对已建码头进行升级改造是提高泊位等级和靠泊能力的经济且有效的措施,

也符合节约岸线资源的绿色发展要求。近年来国内外完成了一批码头结构的升级改造工程, 以高桩码头和重力式码头通过浚深升级居多。其中高桩码头升级改造的可行性较高、技术难度相对低,

主要是其结构承载力是利用深层地基承载力及桩-土作用，港池表层地基土起到的作用很小；而对重力式码头，码头前沿基床区的挖深将可能使基床形式发生改变，须采用必要的工程措施保证施工期和使用期码头整体稳定，并满足抗滑、抗倾、地基应力和船舶靠泊安全等要求。

根据前沿线是否前移可将重力式码头升级改造分为两类^[1]：1)码头前沿线不变，通常的改造方案是①基床加固改造，如大连矿石专用码头^[2]、深圳妈湾电厂专用卸煤码头^[3]和华能海口电厂配套码头^[4]等通过灌浆稳固浚深后的基床；②基床前增加独立结构，如广东虎门港某重力式码头在码头前沿基础设置一排桩形成挡土结构^[5]；③以附属设施为主的综合改造，如青岛港前湾港区 66[#]~68[#]泊位^[6]和蓬莱巨涛海洋工程重工有限公司码头^[7]等通过改造护舷设置以满足船舶靠泊水深。2)码头前沿线前移，通常采用的改造方案是①胸墙改造为主，如珠海电厂重力式码头推荐采用外伸胸墙+灌浆加固^[8]；②新老结构结合，如烟台地方港务局 1[#]~2[#]泊位^[9]和某重力式方块码头^[10]等采用钢管板桩在前沿形成新结构与原重力式结构组合受力；③新增独立结构，如天津港东突堤北侧 35[#]~40[#]泊位^[11]和东非某重力式码头^[12]等在码头前沿新建高桩前承台结构。

虽然新老结构结合的改造方案结构受力比较复杂，但其在浚深较大情况下能获得更好的经济

优势，且随着有限元分析技术的发展，对于组合结构体系的受力分析已不是技术难题，工程应用前景广阔。本文结合中东某码头现状和升级改造要求等，推荐采用灌注桩墙与重力式结构的组合体系，能够有效解决工程实施中遇到的技术难题，如前沿线前移、水深加大、上部荷载大幅增加、减小对基床的扰动等，同时结合对水平位移的特殊要求，对比不同桩墙和拉杆水平刚度下的结构稳定、内力及位移等变化规律，为进一步的结构方案优化设计提供依据，也为国内外类似重力式码头改造的工程设计提供参考。

1 码头改造条件

1.1 码头现状

某重力式码头位于中东沙特红海东岸，工程海域潮差和潮流小，港池掩护条件较好；码头区域土层从上至下分别为中密砂、密实砂和石灰石基岩等，475 a 重现期地面峰值加速度 PGA 为 0.125g。码头顶高程 3.6 m(基于最低天文潮位)，采用空心方块结构，从上至下共 12 块，现浇胸墙高 2.6 m；码头前沿底高程 -15.35 m，最大停靠 10 万吨级集装箱船；方块基础采用 10~100 kg 块石明基床，厚度约 6 m，基床底部软基处理采用换填密实砂；码头后方抛填 10~100 kg 块石棱体，棱体后方回填砂。该方块码头结构断面见图 1。

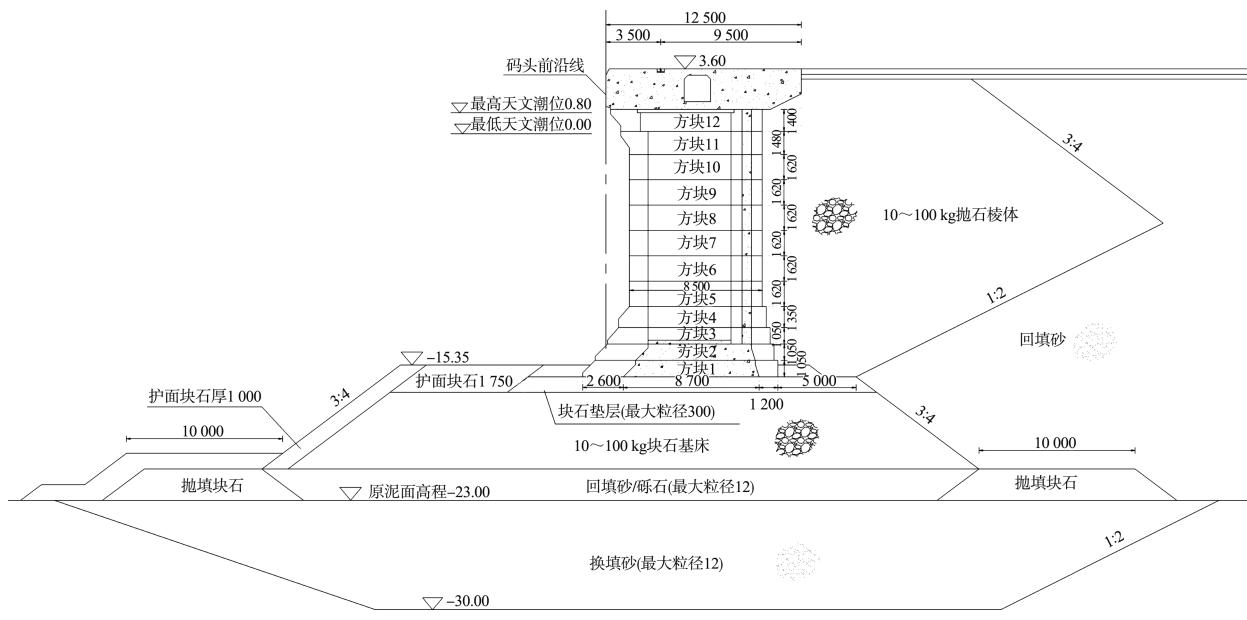


图 1 方块码头现状断面 (高程: m; 尺寸: mm)

1.2 主要改造要求

1) 根据升级改造后平面及工艺布置, 码头面高程维持在 3.6 m, 码头前沿线须前移且不超过 7 m, 新的前轨中心线与前沿线距离不小于 5 m。

2) 改造后码头最大停靠 22 万 DWT 集装箱船, 满载吃水 16.8 m, 码头前沿底高程须浚深至 -18 m。

3) 码头面均匀布荷载, 前轨往海侧由 20 kPa 增大至 30 kPa, 前轨往陆侧由 40 kPa 增大至 50 kPa; 岸桥的前轨轮压由原来的 520 kN/m 增大到 1 080 kN/m, 前后轨距 35 m。

4) 拆除现有胸墙, 新建胸墙和后轨道梁结构。

5) 严格限制正常工况水平位移不超过 50 mm。

2 码头改造方案

2.1 改造断面方案

结合升级改造后的码头浚深和前沿线前移布

置等要求, 推荐采用新老结构结合的组合结构改造方案。为避免对高基床的扰动而引起原码头施工期发生位移的不利影响, 在原码头前沿实施一排直径 1.2 m 的灌注桩墙, 并与方块前趾预留一定的安全距离和施工空间; 桩墙与方块之间不回填, 桩墙前在浚深后采用块石护底以防止码头前沿的冲刷。拆除已有胸墙、浇筑新胸墙, 将桩墙和方块码头连成整体, 前沿线前移约 5.0 m。同时, 系船柱升级为 2 MN, 单个最大间距 20 m; 为满足船舶撞击吸能要求, 护舷升级为 H1600 型一鼓一板锥形护舷。后轨处新建轨道梁, 由直径 1.2 m 灌注桩支撑, 间距 4.0 m。考虑到升级改造后对水平位移的严格限制(不超过 50 mm), 发挥后轨道梁结构及其基础在土体中的锚固作用, 通过 $\phi 90$ mm 钢拉杆将胸墙和后轨道梁建立横向连接, 这样也能降低前后轨的相对位移。码头升级改造标准断面见图 2。

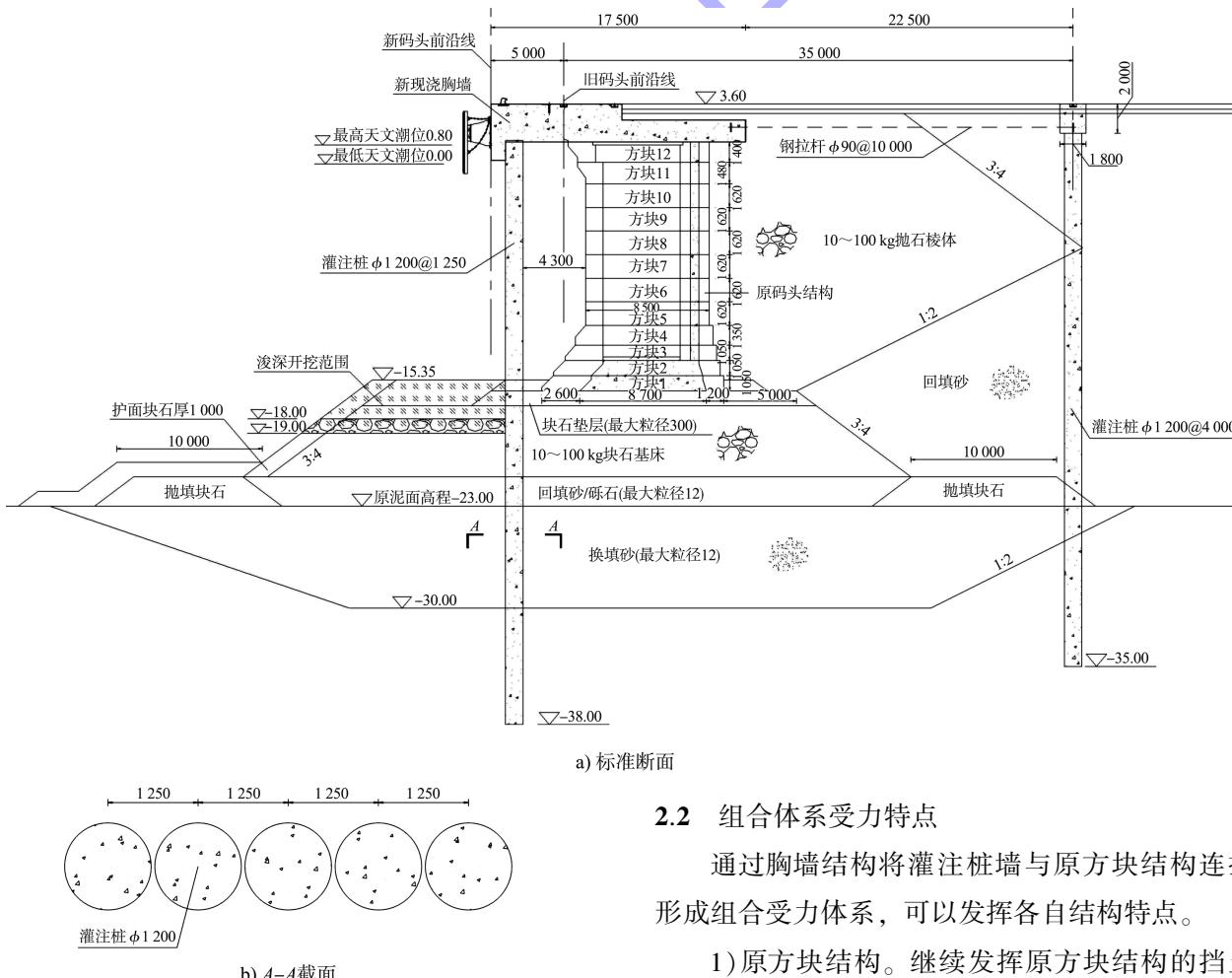


图 2 码头升级改造标准断面 (高程: m, 尺寸: mm)

2.2 组合体系受力特点

通过胸墙结构将灌注桩墙与原方块结构连接形成组合受力体系, 可以发挥各自结构特点。

1) 原方块结构。继续发挥原方块结构的挡土作用, 抵挡土体对桩墙上部的土压力; 但随着使

用荷载(轮压和均布荷载)的增加和分布的变化,方块结构受力将重新分布,同时将承受桩墙通过胸墙传递过来的一部分外力作用,如船舶撞击力和系缆力、波浪力等。因此,方块结构的抗倾、抗滑和基床应力等需要验算。

2)新建灌注桩墙。为前沿浚深提供直立挡土结构,保证船舶靠泊安全,并为前沿线前移提供支撑,承受胸墙自身重力、码头面竖向均布荷载和前轨道轮压;桩墙利用胸墙与方块之间的有利摩擦提高了水平承载力,但在方块前趾底面以下的桩墙将承受土体传递的土压力和上部荷载侧压力。随着前沿挖深、荷载增大以及结构和土体受力重新分布,需要对组合结构的桩墙结构、整体稳定和水平位移等进行验算。

与常规的独立结构受力不同,二者形成的组合结构是相互作用和相互支撑的,应通过建立统一的组合结构模型才能真实模拟相互之间的作用传递和协调。

3 组合体系结构建模与分析

3.1 Plaxis 结构建模

结合灌注桩墙与方块结构组合体系复杂的

结构受力特点,并考虑到深水码头对位移的控制更为关键,采用 Plaxis 2D CE V20 软件进行结构的统一建模和分析,并通过高级有限元法分析获得准确、合理的结构位移、内力和稳定系数等。

前墙灌注桩和后轨道梁桩基础采用 Plaxis 中的嵌土桩(embedded pile)单元模拟,新旧混凝土结构材料本构均选用线弹性模型,拉杆采用点对点弹性锚杆模型(node-to-node anchor)。为了更好地模拟由于浚深、开挖和回填引起土体的加载和卸载,土层单元采用硬化土模型(hardening soil)。结构与土体之间的相互作用通过界面单元模拟。

码头前沿考虑 0.5 m 的超挖,即计算模型中码头前沿底高程为-18.5 m。结合设计参数和地质勘查结果,Plaxis 模型中结构单元和土层单元的主要材料力学参数分别见表 1、2,改造方案的 Plaxis 分析模型见图 3。由于掩护条件较好,荷载作用主要考虑结构自身重力、土压力、码头面均布荷载、岸桥轮压、系缆力和地震惯性力等。基于 BS 6349-2^[13],分别进行静力工况和地震工况的荷载组合和结构分析。

表 1 结构单元主要材料参数

结构单元	材料类型与等级	Plaxis 模型	属性
混凝土结构	C40 混凝土	线弹性单元	$E = 32.5 \text{ GPa}$
直径 1.2 m 灌注桩	C40 混凝土	嵌土桩	$EA = 3.6.75 \text{ GN}, EI = 3.31 \text{ GN} \cdot \text{m}^2$
直径 90 mm 钢拉杆	S 级(屈服强度 500 MPa)	点对点弹性锚杆	$EA = 1.27 \text{ GN}$

注: E 为材料弹性模量; A 为截面面积; I 为截面惯性矩。

表 2 Plaxis 土层主要力学参数

土层	天然密度 $\rho / (\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	黏聚力 c / kPa	割线刚度 模量/MPa	切线刚度 模量/MPa	卸载刚度 模量/MPa	幂指数 m
回填块石	1.7	45	0	100	100	350	0.5
回填密实砂	1.8	35	0	50	50	200	0.5
回填中密砂	1.8	33	0	35	35	105	0.5
原状密实砂	1.8	33	0	40	40	120	0.5
原状中密砂	1.8	30	0	30	30	90	0.5

结合施工工序在 Plaxis 中按照如下顺序分阶段模拟升级改造过程,每阶段均开展弹塑性分析:1)建立原方块码头结构及土体单元;2)加载原设计

荷载;3)方块结构稳定后移除原设计荷载;4)灌注桩前墙和后轨道梁及桩基础的施工;5)旧胸墙后方土方开挖、拆除旧胸墙,现浇新胸墙;6)安装新胸

墙与后轨道梁之间的拉杆, 并回填至设计高程;

7) 码头前沿开挖至-19.5 m, 并安放护底块石至

-18.5 m; 8) 在正常运营的静力工况下加载新的设计荷载; 9) 地震工况下加载相应的设计荷载。

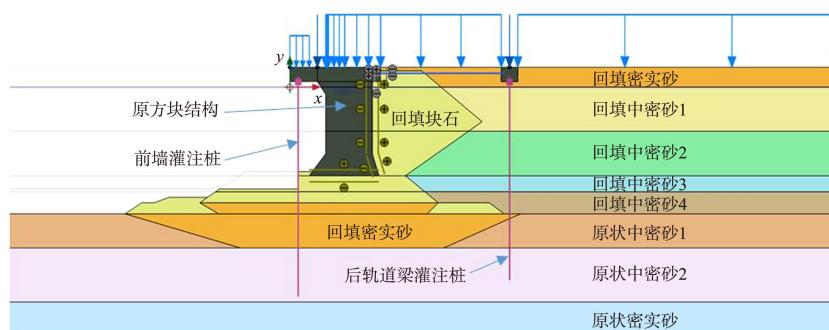


图 3 改造方案的 Plaxis 分析模型

3.2 结构计算与分析

在 Plaxis 模型分析中, 采用弹塑性法和强度折减法分别对构件内力和结构稳定性进行计算, 汇总后的计算结果见表 3。其中强度折减法是通过同时折减土体中有效强度指标 c 和 φ 直至结构或基础失稳, 包含码头整体失稳、结构倾覆和滑动、承载力不足引起的地基破坏等, 此时确定为最小安全系数。静力工况下改造的组合结构水平位移云图见图 4, 最大水平位移 49.99 mm 出现在码头前沿处; 灌注桩前墙弯矩见图 5, 与常规板桩结

构不同, 其前墙最大弯矩出现在浚深后新的码头前沿底面附近。

表 3 组合结构的 Plaxis 分析结果

工况	灌注桩最大弯矩/(kN·m)	灌注桩压桩力/kN	码头水平位移/mm	拉杆拉力/kN	最小安全系数
LC1(静力)	304.63	2 003.75	49.99	682.05	1.47
LC2(地震)	627.88	1 757.50	116.30	610.00	1.32

注: LC1 为结构自身重力、土压力、均布载荷、轮压和系缆力的静力组合, LC2 为结构自身重力、土压力、均布载荷、轮压和地震惯性力的地震组合; Plaxis 强度折减法静力和地震工况的最小安全系数的最低限值分别为 1.25 和 1.05。

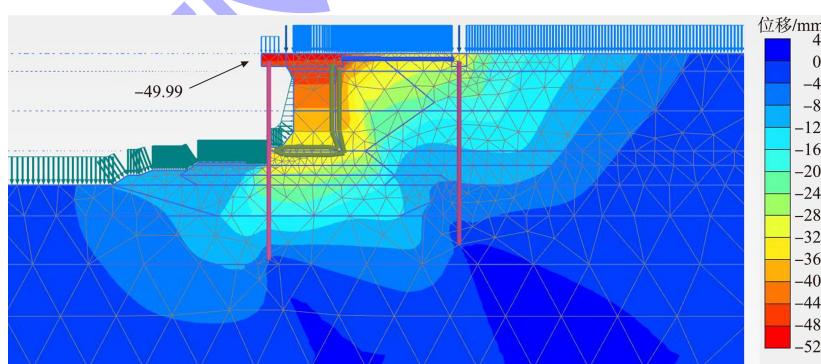
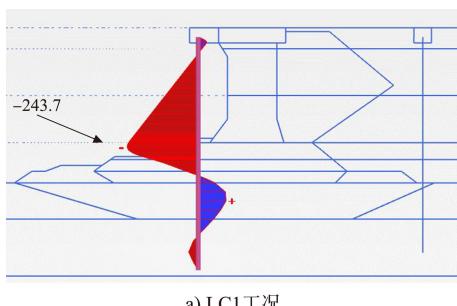
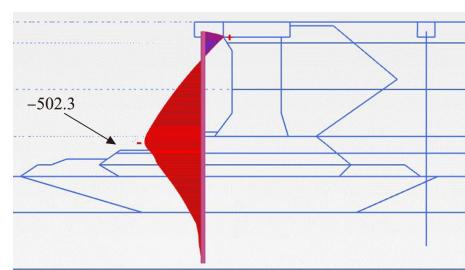


图 4 LC1 组合结构水平位移云图



a) LC1工况



b) LC2工况

图 5 灌注桩前墙弯矩 (单位: kN·m/m)

依据规范对主要分析结果进行结构验算, 桩墙、拉杆等构件均满足结构安全要求, 组合体系也满足结构稳定要求。基于 Plaxis 的结构分析, 可以看出升级改造的组合体系中虽然拉杆和锚碇结构刚度相比常规的板桩结构弱, 但由于充分发挥了原方块结构稳固的挡土作用和新建桩墙的支撑作用, 有效控制正常工况下码头水平位移不超过 50 mm, 且前墙灌注桩在结构强度和轴向承载力方面均有一定的富余。地震工况下水平位移偏大, 但也满足 PIANC 港工结构抗震指南^[14]中的 $1.5\%H$ (H 为码头结构高度) 的规定。

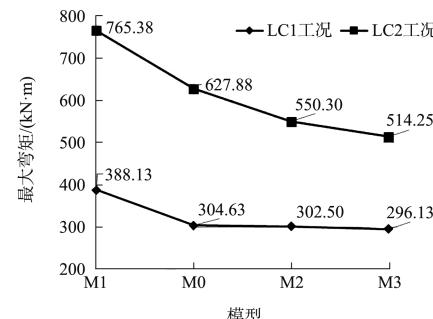
4 桩墙和拉杆刚度对结构体系的影响分析

组合结构中新建部分主要结构有灌注桩前墙、现浇胸墙、拉杆和后轨道梁及桩基础, 其中后轨道梁及桩基础由专项设计确定, 兼作组合体系的锚碇结构, 影响组合体系内部作用协调和整体性能主要是桩墙和拉杆的刚度。从便于实施的角度出发, 对桩墙和拉杆刚度参数(如截面尺寸、间距等)进行调整, 对比分析和总结变化规律, 为类似设计优化提供依据。

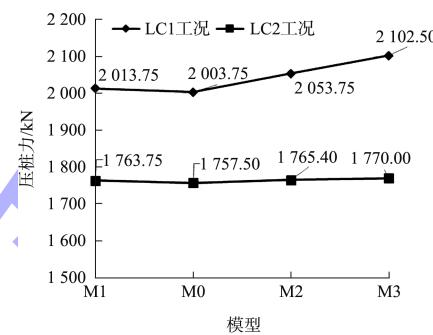
将升级改造方案的 Plaxis 结构模型定义为 M0, 基于 M0 调整的对比模型编号依次为 M1~M5, 其设计参数调整说明见表 4。各模型的分析结果对比分别见图 6、7。

表 4 对比模型的设计参数

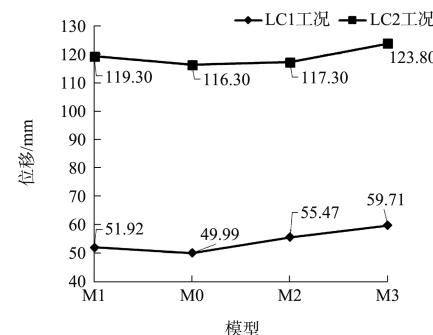
模型编号	拉杆参数	桩墙参数
M0	拉杆直径 90 mm、间距 10 m	灌注桩直径 1.2 m、间距 1.25 m
M1	拉杆直径 90 mm、间距 5 m	灌注桩直径 1.2 m、间距 1.25 m
M2	拉杆直径 90 mm、间距 20 m	灌注桩直径 1.2 m、间距 1.25 m
M3	取消拉杆	灌注桩直径 1.2 m、间距 1.25 m
M4	拉杆直径 90 mm、间距 10 m	灌注桩直径 1.0 m、间距 1.05 m
M5	拉杆直径 90 mm、间距 10 m	灌注桩直径 1.4 m、间距 1.45 m



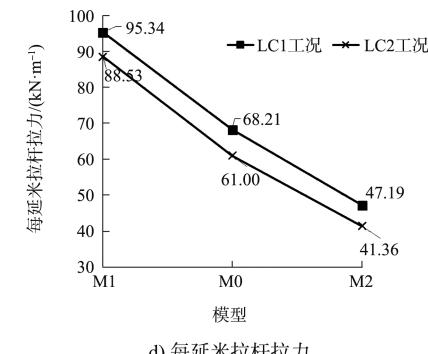
a) 前墙灌注桩最大弯矩



b) 前墙灌注桩压桩力



c) 码头水平位移



d) 每延米拉杆拉力

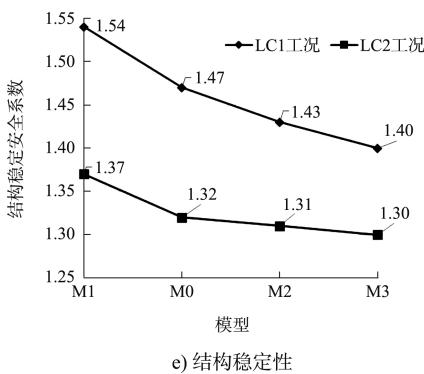
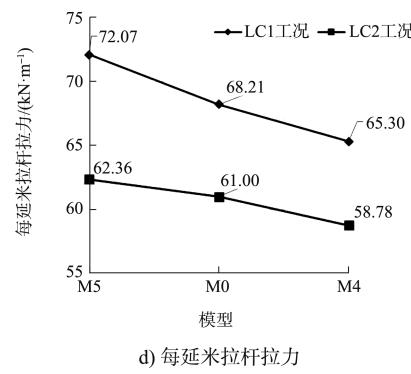
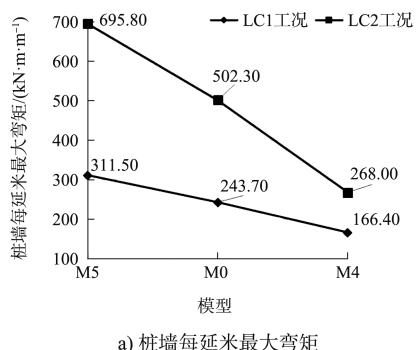


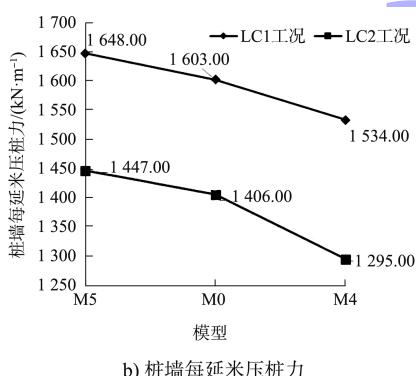
图 6 模型 M0~M3 分析结果对比



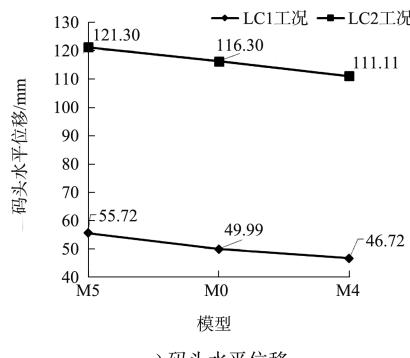
e) 结构稳定性



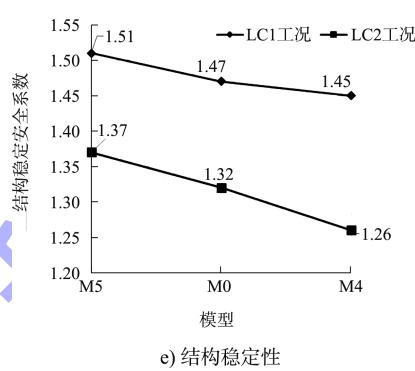
a) 桩墙每延米最大弯矩



b) 桩墙每延米压桩力



c) 码头水平位移



e) 结构稳定性

图 7 模型 M5、M0 和 M4 分析结果对比

根据对比结果可以看出, 对于灌注桩墙和重力式结构的组合体系的结构稳定、内力和位移, 桩墙和拉杆的水平刚度是主要的控制因素。1) 随着拉杆间距加大, 其拉杆水平作用降低, 对于现浇胸墙和前桩墙的约束减小, 码头水平位移进一步发展; 同时通过结构位移协调释放了一部分前墙灌注桩弯矩, 而随着组合结构整体受力重心向海侧移动, 施加到灌注桩的压桩力将增加; 同时, 由于原方块结构起到较好的挡土作用, 拉杆发挥的前后联系作用可以削弱, 即使取消拉杆也不会对组合结构产生较大的影响。2) 随着前墙灌注桩桩径的减小, 前墙水平和竖向刚度降低, 组合结构整体受力重心向陆侧移动, 前墙承担的水平和竖向的荷载也相应减小, 前桩墙每延米弯矩和压桩力相应减小, 此时原方块结构承担了更大的荷载, 码头位移和拉杆力随之减小, 该结论与采用加大前墙灌注桩间距的变化规律基本一致。3) 桩墙和拉杆水平刚度对结构整体稳定性影响基本一致, 结构稳定性均是随着二者的刚度降低而降低。

4) 码头水平位移受地震作用的影响最为明显, 远大于正常静力状态下的水平位移值。

5 结论

1) 灌注桩墙与重力式结构的组合体系适用于厚基床码头的升级改造, 可以充分发挥两种结构的受力特点和综合性能, 有效解决码头前沿线前移、前沿水域加深、上部荷载增大、水平限位严、基床扰动小等技术难题。

2) Plaxis 用于分析组合体系复杂的结构受力分析是可行的, 采用弹塑性法能较为真实地模拟新建桩墙与已有重力式结构之间作用传递和协调, 并分析得到较为准确的结构内力和位移; 同时, 采用强度折减法能分析结构和基础稳定的最小安全系数。

3) 灌注桩墙和拉杆的水平刚度是影响组合体系中结构稳定、内力分布、位移发展等的主要控制因素。拉杆刚度降低, 使组合结构整体受力重心向海侧移动, 增大水平位移、释放前墙部分弯矩、增加前墙竖向荷载; 前墙刚度降低, 组合结构整体受力重心向陆侧移动, 原方块结构将承担更多内部协调的作用, 前墙结构内力和码头水平位移减小。

4) 对水平位移限制相对宽松的类似升级改造工程中, 建议适当优化拉杆水平刚度, 可加大拉杆间距或取消拉杆, 以节省工程投资、减小对后方堆场运营的影响。

5) 在灌注桩墙与重力式结构的组合体系中, 已有重力式结构的性能对于组合结构的性能发挥和结构耐久性等方面均有较大的影响, 建议在升级改造前应对现状重力式结构性能进行详尽调查, 并在改造方案中合理考虑。

参考文献:

- [1] 胡家顺, 任增金, 吴哲丰. 海港码头结构升级改造技术[J]. 水运工程, 2016(10): 90-94, 105.
- [2] 中交水运规划设计院有限公司. 大连港矿石专用码头结构加固改造方案[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2011.
- [3] 李华强, 蔡苏荣, 陈照乾. 妈湾电厂重力式码头升级改造技术与应用[J]. 水运工程, 2014(2): 121-125.
- [4] 林华杰. 水下基床灌浆在重力式码头加固升级中的应用[J]. 中国水运(下半月), 2020, 20(12): 83-85, 87.
- [5] 王广贤, 卢生军, 杨晓婷. 新型重力式码头改造技术[J]. 水运工程, 2016(2): 87-91.
- [6] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 青岛港前湾一期工程 65#~68#泊位码头结构加固改造工程方案[R]. 天津: 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 2013.
- [7] 郭杰, 焦磊. 可拆卸式靠船装置在海工重力式码头升级改造中的应用[J]. 武汉勘察设计, 2017(1): 43-45.
- [8] 杨璧榕, 丘小标. 珠海电厂重力式码头结构升级改造[J]. 水运管理, 2020, 42(6): 31-34.
- [9] 孙淑娟, 陈长贵. 烟台地方港务局 1-3 号泊位码头改造工程设计简介[J]. 海岸工程, 1998(3): 47-52.
- [10] 龙素华, 杜飞飞. 板桩-重力式码头组合结构的计算[J]. 中国港湾建设, 2015, 35(8): 24-28.
- [11] 王笑难, 杨丽琴, 岳建文, 等. 已建码头升级改造工程的几种实用类型[J]. 水道港口, 2005(2): 122-125.
- [12] 陆治周, 许应杰. 东非某重力式码头升级改造设计与施工[J]. 水运工程, 2020(10): 182-186, 193.
- [13] British Standard Institution. Maritime works-part 2: code of practice for the design of quay walls, jetties and dolphins: BS 6349-2: 2019[S]. London: BSI, 2016.
- [14] International Navigation Association(PIANC). Seismic design guidelines for port structures[M]. Lisse: Swets&Zeitlinger B.V., 2001.

(本文编辑 王璁)

欢 迎 投 稿

欢 迎 订 阅