



内河重力式码头结构设计优化

全 佗，刘慧芳，禹化强，丁永和，宋振宁

(中交水运规划设计院有限公司，北京 100007)

摘要：重力式码头由于自身重力较大，原状土地基承载力一般不能满足要求。为解决内河码头建设石料短缺、地基承载力不足等问题，提高挖方土资源利用率，结合山东济宁地区跃进沟、梁山码头设计经验，根据施工特点、水文地质条件及使用要求，对不同码头结构方案的特点、适用性进行比较分析，在内河码头结构设计中采用新型的小木桩复合地基方案，并从墙后回填料选用开挖土方、码头结构断面、装船机轨道基础形式等方面提出优化创新思路，在工程建设中得以应用；同时总结小木桩复合地基的受力原理及计算方法、回填料参数选择、施工质量控制等。结果表明，采用现浇素混凝土重力式结构和小木桩复合地基作为码头主体结构形式和地基处理方式、墙后回填料采用疏浚土方，既确保工程质量，又能有效节省投资。

关键词：重力式码头；回填料；装船机轨道基础；小木桩

中图分类号：U 656.1+11

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)10-0173-06

Optimization of structural design for inland river gravity wharf

TONG Tuo, LIU Hui-fang, YU Hua-qiang, DING Yong-he, SONG Zhen-ning

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

Abstract: Because of the heavy weight of the gravity wharf, the foundation of undisturbed soil cannot meet the requirement of bearing capacity. In order to solve the problems such as the shortage of stone materials and the insufficient bearing capacity of the foundation for the construction of inland river wharves, and improve the utilization rate of the excavated earth resources, we combine with the design experience of the Yuejin Ditch and the Liangshan County wharf in Jining area of Shandong Province, compare and analyze the characteristics and applicability of different wharf structural schemes according to the construction features, hydrogeological conditions and operational requirements, adopt a new type of small wooden pile composite foundation scheme in the structural design for inland river wharf, and propose the new ideas for optimization and innovation from the aspects of the selection of excavation earthwork for backfill materials behind walls, the structural cross-section of wharves, the track foundation type of ship loaders, etc. to apply for project construction. At the same time, we summarize the principle and calculation method of small wooden pile composite foundation, selection of backfill parameters, construction quality control etc. The results show that adopting the gravity structure of cast-in-place concrete and the composite foundation of small wooden piles as the main structure form and foundation treatment method of the wharf, and adopting the dredging earthwork as the backfill material behind the wall can ensure the quality of the project and save the investment.

Keywords: gravity wharf; backfill material; track foundation of ship loader; small wooden pile

近年来，我国对内河水运日益重视，内河水运事业发展已上升为国家发展战略。内河港口作

为内河水陆交通枢纽，是区域经济社会发展的重要基础、城镇建设的重要保障、沿河产业发展的

重要依托，促进了内河航道航运功能、沿河文旅产业融合发展、生态环境改善和航道沿线整体发展水平的提高。

目前内河码头主要有重力式、高桩、板桩、浮码头等结构形式，而在平原地区航道中，重力式码头是码头建筑物中分布较广、使用较多的一种结构形式。其工作特点是依靠结构本身及其上面填料的重力保持结构自身的滑移稳定和倾覆稳定，由于自身重力大、地基承受的压力大，故重力式码头适用于较好的地基，它也是具有高耐久性和对超载、工艺变化适应能力最强的一种结构^[1]。

1 工程概况

济宁港是国家内河 28 个主枢纽港口和京杭运河六大港口之一，是区域性综合运输系统的重要组成部分，是鲁西南地区对外物资交流和晋东南煤炭外调的重要口岸和济宁市发展临港工业、运河经济带的重要依托，对于完善区域综合交通体系发挥了重要的支撑保障作用。

本文根据济宁港梁山港区寿张集作业区一、二期工程及济宁港主城区跃进沟作业区物流园区码头一、二期工程的设计实践，针对内河平原地区重力式码头设计的若干技术问题进行分析与探讨，提出了一系列的优化创新方案，可为同类工程的设计提供参考。

2 设计条件

2.1 设计船型

设计代表船型主尺度见表 1。

表 1 设计船型主尺度

船型	总长/m	型宽/m	吃水/m
1 000 t 驳船	65	10.8	1.9~2.2
1 000 t 货船	68	10.8	2.6
2 000 t 驳船	65~75	15.8	2.6~2.9
2 000 t 货船	65~90	15.4	2.7~2.9

2.2 主要荷载

1)堆货荷载：码头前沿线至门式起重机后轨均布荷载 $q=20 \text{ kPa}$ ，门式起重机后轨至码头后沿均布荷载 $q=50 \text{ kPa}$ 。

2)码头前沿主要流动机械荷载：7 t 单斗装载机、40 t 平板车(满载)、8 t 叉车、70 t 汽车式起重机(满载)，20 t 自卸车。

3)船舶荷载：经计算 2 000 DWT 船系缆力标准值为 230 kN，实际选用 250 kN 系船柱；2 000 DWT 船的有效撞击能量为 72 kJ，据此选择 DA-A400H×2000L(标准反力型)橡胶护舷。

2.3 场地岩土物理力学性质

工程所处区域地貌类型为鲁西冲洪积平原，区域土层由第四系全新世、晚更新世地层组成，主要由黏土、粉土、粉质黏土及粉细砂等组成，地基条件较好，具备采用重力式结构的条件。场区各土层物理力学指标见表 2。

表 2 各土层物理力学指标

层号	岩土名称	地基承载力 f/kPa	密度 $\rho/(t\cdot m^{-3})$	快剪		固结快剪	
				黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
①	素填土	110	1.92	24.1	21.3	-	-
① ₁	杂填土	-	2.00	-	-	-	-
②	粉土	120	1.94	6.7	16.0	12.9	20.9
③	黏土	120	1.80	33.8	11.7	41.7	14.9
④	粉土	140	1.95	6.1	16.1	12.9	22.1
④ ₁	黏土	120	1.82	42.9	16.0	41.8	16.6
⑤	黏土	120	1.80	28.3	12.0	41.7	14.5
⑥	粉质黏土	120	1.87	22.4	16.3	35.4	19.0
⑦	粉土	150	1.94	5.5	17.1	15.1	23.4
⑦ ₁	粉土	130	1.95	5.6	15.6	11.8	21.9
⑦ ₂	黏土	110	1.80	52.1	14.2	46.0	15.9
⑦ ₃	黏土	130	1.82	41.8	14.8	43.2	16.1

3 优化创新

3.1 码头主体结构采用素混凝土

传统的岸壁式重力式码头多采用方块、沉箱、扶壁和坐床式圆筒等结构形式, 用钢量较大, 投资相对较高, 且需要预制场地或者现场立模绑扎钢筋, 施工速度慢, 施工技术要求高。随着大体积混凝土应用愈加普遍, 施工技术越发成熟, 根据工程所在区域地形、地质条件及干地施工的特点, 采用素混凝土重力式结构作为码头主体结构。

以济宁港梁山港区寿张集作业区一、二期工

程为例, 码头结构采用现浇 C25 素混凝土重力式结构, 墙身底板宽为 8.0 m, 墙高 6.8 m, 上部为强度等级 C30、抗冻等级 F150 的现浇混凝土胸墙。装卸机械河侧轨道坐落于胸墙上, 岸侧轨道坐落于现浇混凝土轨道梁上, 梁下设直径 800 mm 的 PHC 桩。码头标准结构段长度 15 m, 设 20 mm 宽沉降缝, 采用高压聚乙烯板填充。码头胸墙上设置护轮坎及 250 kN 系船柱等附属设施, 码头岸壁直立面上设置 250 kN 系船环。码头橡胶护舷选用 DA-A400H 标准型橡胶护舷^[2]。码头结构断面见图 1。

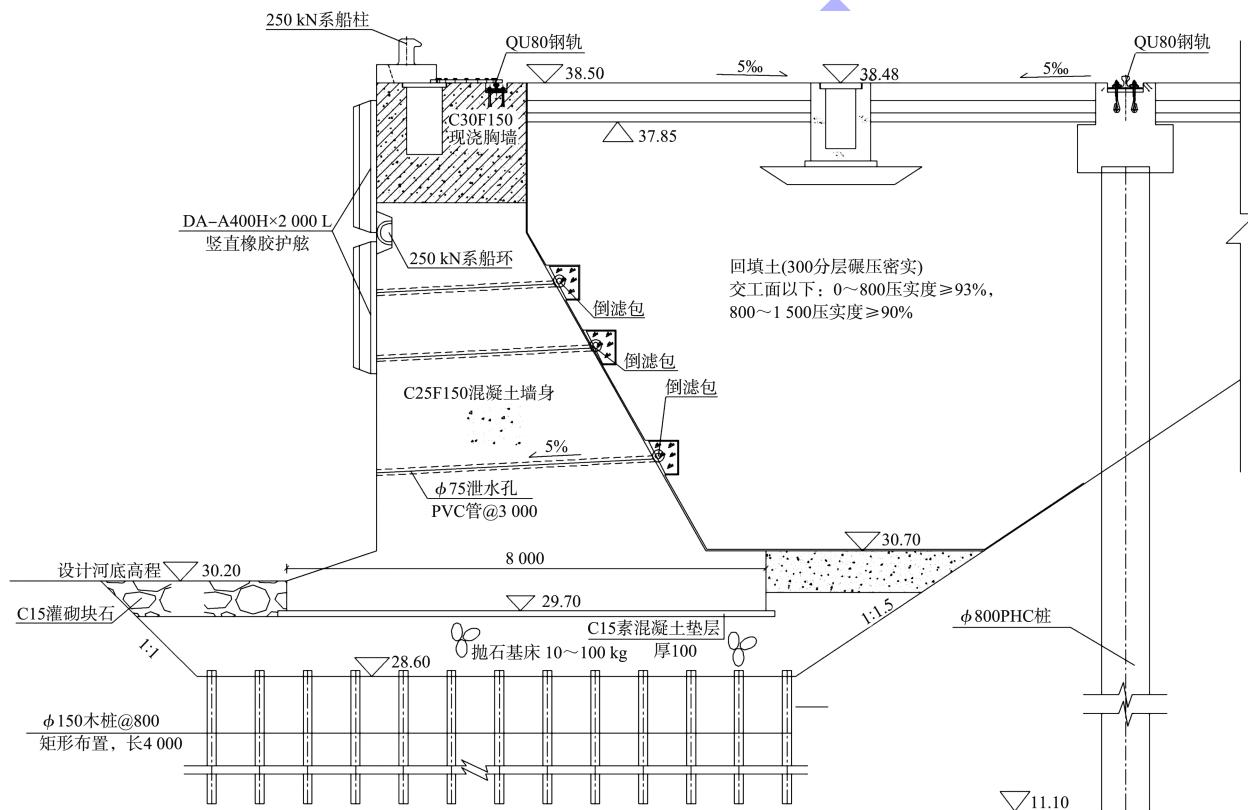


图 1 结构断面 (高程: m; 尺寸: mm)

3.2 新型小木桩复合地基方案

3.2.1 小木桩复合地基方案

根据重力式码头的结构计算结果, 原地基承载力不能满足结构受力要求。结合地质情况及施工条件, 在济宁港重力式码头的设计中采用质量有保证的杉木或松木桩复合地基方案, 木桩小头梢径不小

于 150 mm, 桩长根据地质条件分别采用 6 或 4 m, 小木桩间距 0.8 或 1.0 m; 小木桩施沉前保留桩顶以上 300 mm 土层, 并根据选择的施沉机械对作业面进行适当处理以保证有足够的承载力。小木桩施沉后及时对桩顶进行清除, 严禁对基底土层进行扰动而降低桩间土承载力。木桩平面布置见图 2。

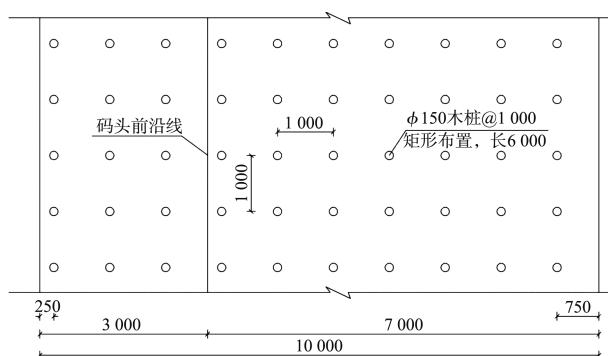


图 2 木桩平面布置 (单位: mm)

3.2.2 小木桩复合地基受力原理

小木桩复合地基属于刚性桩复合地基,由两种刚度(或模量)不同的材料(木桩和桩间土)所组成并共同承担荷载。有别于一般的柔性桩复合地基,小木桩沉桩过程中对周围土体存在挤密效应,可有效提高桩间土力学性能;小木桩相对刚度较大,可进入良好土层并将桩体承受的荷载传递到较深土层,桩土应力分配合理,减少桩间土的荷载,因此复合地基的承载能力更大、沉降更小。

由于木桩与桩间土刚度相差较大,因此在上部荷载作用下桩端容易形成应力集中。因此,小木桩复合地基的关键在于桩顶柔性褥垫层的合理设置,可有效提高桩间土接触应力,调整桩土应力分担比,避免桩端应力集中和地基不均匀沉降,实现桩土共同分担上部荷载并协调变形。同时,与预制混凝土小方桩、预应力管桩等传统的刚性桩相比,在一定的桩长范围内,木桩具有经济上的优势,但根据木材的生长特点,桩长与价格并非成单纯线性关系。根据现场调研,当桩长超过6 m时,小木桩对于混凝土桩将不具有经济上的优势,且由于木材的自身特性,当超过一定长度时,沉桩相对困难;因此小木桩的选用规格宜在6 m以内。

3.2.3 复合地基承载力验算

参考《码头结构设计规范》^[3]和《建筑地基处理技术规范》^[4],本工程木桩复合地基承载力特征值计算公式为:

$$f_{spk} = \lambda m Q_k / A + \beta (1-m) f_{sk} \quad (1)$$

$$Q_k = U \sum_{i=1}^n q_{fi} l_i + q_R A \quad (2)$$

式中: λ 为单桩承载力发挥系数,可按地区经验取值; m 为桩土面积置换率; Q_k 为单桩竖向承载力标准值(kN); A 为桩的截面积(m^2); β 为桩间土承载力折减系数,宜按地区经验取值; f_{sk} 为天然地基承载力特征值(kPa); U 为桩身截面周长(m); q_{fi} 为单周第*i*层土的单位面积极限桩侧摩阻力标准值(kPa); l_i 为桩身穿过第*i*层土的长度(m); q_R 为单桩单位面积极限桩端阻力标准值(kPa)。

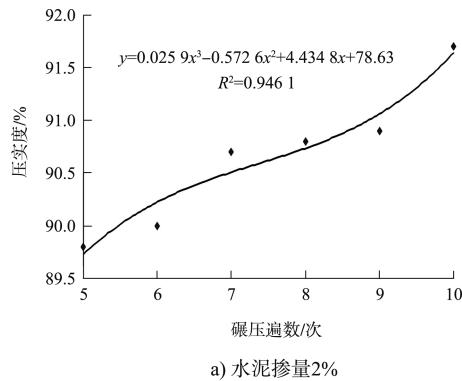
通过计算,某工程复合地基承载力特征值 $f_{spk} = 175.4$ kPa(≥ 171.3 kPa),故复合地基承载力满足要求。

3.3 墙后回填料选用开挖土方

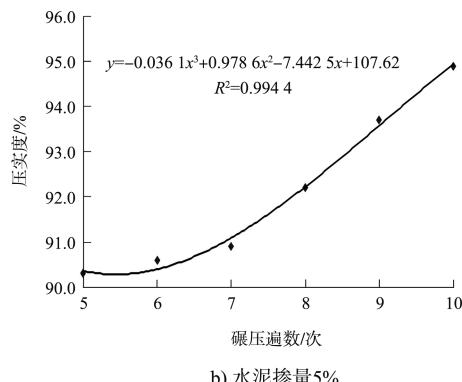
重力式结构墙后回填料采用港池疏浚土方进行回填,可充分利用开挖土方,有利于土方平衡,节省工程投资。但疏浚土方性质相对较差,且回填后物理力学指标较难把握,须对墙身回填土进行击实试验确定回填土力学指标并提出压实度要求,根据工程实践,回填土压实度通常采用90%~95%,此时回填土力学指标可满足工程需要。

对于土料性质较差,经过压实仍不能满足工程需求时,考虑利用开挖土料掺水泥进行水泥改性土换填,水泥改性土换填施工前须开展碾压试验,以验证设计参数的合理性和施工的适应性,以求最优的施工参数,根据现场实际情况以及施工安排分别采用2%、5%、8%水泥掺量的改性土进行碾压填筑试验,试验采用的水泥为P·O 42.5普通硅酸盐水泥,其各项指标符合《通用硅酸盐水泥》^[5]的技术要求,其中铝酸三钙含量不应大于10%。通过试验达到以下目的:检测不同水泥掺量和压实度下水泥土的抗剪强度指标,以确定最经济合理的水泥土配比;选定经济合理的施工参数,如:铺土方式、水泥土含水量、碾

压方式、压实遍数。根据碾压试验报告, 本工程不同水泥掺量回填土的碾压遍数与压实度关系见图 3。



a) 水泥掺量2%



b) 水泥掺量5%

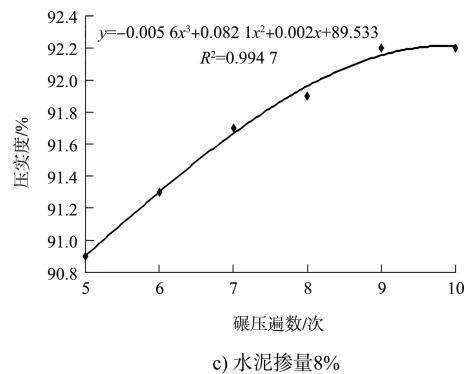
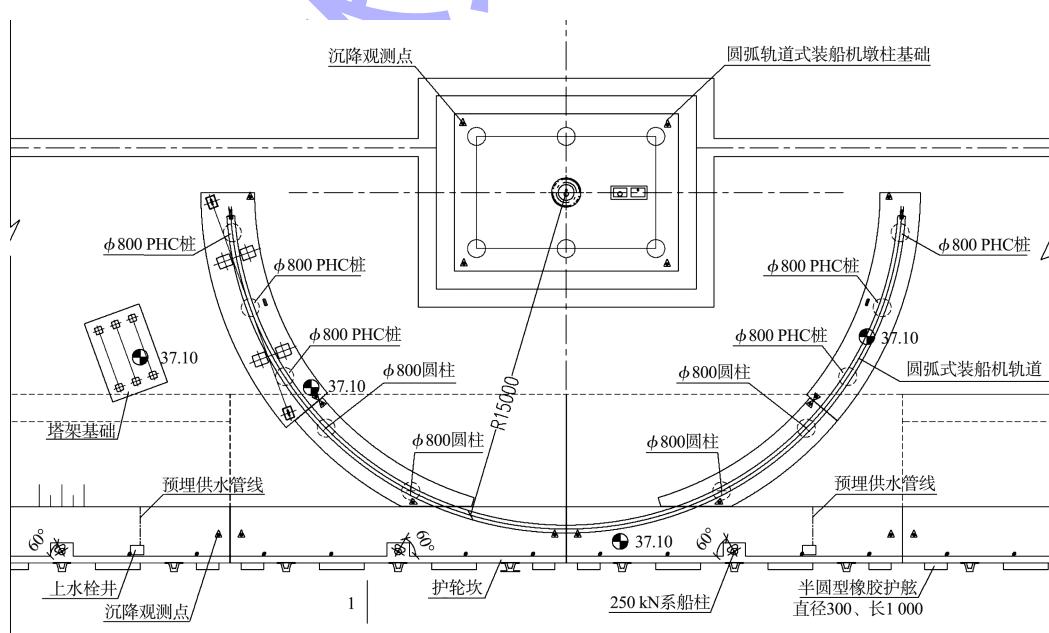


图 3 不同水泥掺量回填土的碾压遍数与压实度关系

3.4 装船机轨道基础形式

济宁港主城区跃进沟作业区物流园区码头一、二期工程设有圆弧形轨道装船机, 轨道半径 15 m, 河侧轨距码头前沿最近距离为 1.5 m, 其轨道坐落于胸墙及现浇混凝土轨道梁上, 轨道梁高 1.5 m, 梁下设 $\phi 800$ mm PHC 桩及 $\phi 800$ mm 圆柱。轨道采用 QU80 钢轨。圆弧轨道位置处码头结构墙身陆侧为阶梯式布置^[6]。由于柱基和 PHC 桩底部不在同一土层, 轨道梁存在不均匀沉降的可能, 因此在轨道梁上设有永久性沉降位移观测点, 工程竣工后应加强沉降观测。典型码头结构平面和断面见图 4。



a) 平面

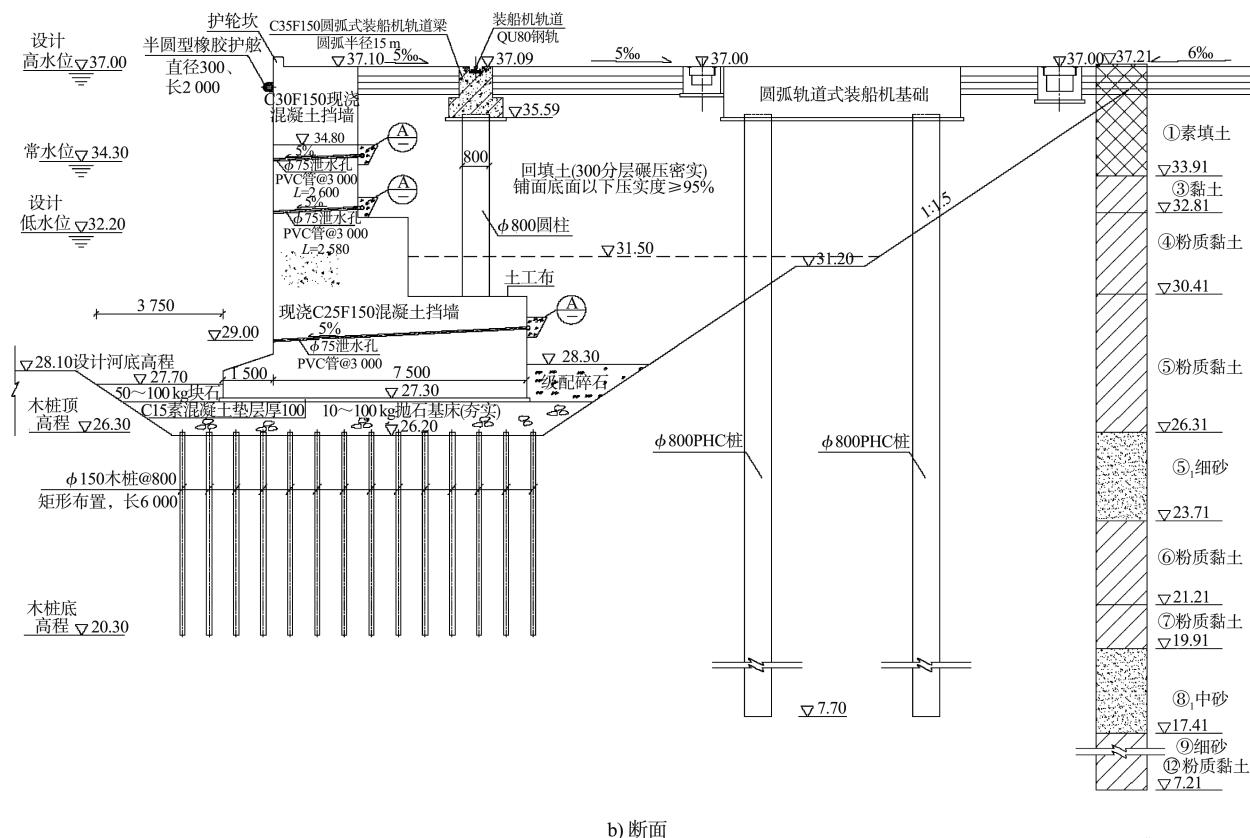


图 4 典型码头结构平面和断面 (高程: m; 尺寸: mm)

采用 STAAD Pro V8i 软件进行建模计算, 得到圆弧形轨道装船机下方 $\phi 800 \text{ mm}$ PHC 桩最大桩力设计值为 1 441 kN, 单桩垂向抗压承载力设计值为 2 237 kN, 满足规范及使用要求。 $\phi 800 \text{ mm}$ 柱最大轴力设计值为 1 954 kN, 最大弯矩设计值为 403 $\text{kN}\cdot\text{m}$, 按柱进行配筋计算, 满足规范及使用要求。

4 结论

1) 根据工程实践表明, 采用现浇素混凝土重力式结构作为码头主体结构形式施工速度快且施工质量易于控制, 结构整体性及受力条件均较好, 维护量小, 结构每延米造价较低, 既确保了工程质量, 又能有效节省投资。

2) 重力式码头自身重力大, 地基承载力往往不能满足要求, 传统的海港码头中重力式结构多采用抛石基床。而平原地区内河航道地基多为土质, 基坑开挖较深, 施工特点也与海港不同, 采

用小木桩复合地基, 既解决了地基承载力不足的问题, 又有效节省投资, 在类似工程中具有一定的借鉴意义。

3) 传统重力式码头墙后多设置抛石棱体或回填中粗砂等以减少墙后土压力, 而工程开挖土方往往需要寻找弃土区, 既增加工程费用, 又造成一定的污染, 不利于环保要求。本次设计将疏浚土方作为墙后回填料, 在必要时对开挖土料掺水泥进行改性处理并结合碾压试验选定经济合理的施工参数。工程实践表明, 疏浚土方直接作为墙后回填料有利于土方平衡, 节省工程投资并符合绿色港口的发展要求, 达到较好的工程效果。

4) 对设有圆弧形轨道装船机的重力式码头, 其轨道坐落于胸墙及现浇混凝土轨道梁上, 圆弧轨道位置处码头结构墙身创新性地采用阶梯式布置作为轨道梁立柱基础, 轨道梁下圆柱直接浇筑于结构墙身上, 使轨道梁与码头主体结构形成有机整体, 可有效节省工程投资。 (下转第 183 页)