



盐田港超大型集装箱码头结构方案比选*

赵敏, 施晓迪, 顾祥奎, 冯浩

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 超大型集装箱船载箱量和船型尺度不断刷新, 对码头结构设计提出更高的要求。以盐田港某超大型集装箱码头结构设计为例, 详细分析设计荷载和工程区域波浪、水流、地质等自然条件, 总结出设计荷载大、地质条件复杂的工程设计重难点。探讨几种常用码头结构和桩基形式的优缺点以及对工程的适用性, 得出设计荷载取值的合理性以及结构对地质条件的适用性是超大型集装箱码头结构的关键, 通过排架间距及上部结构的多方案比较论证, 提出结构最优、造价最省的码头结构方案。

关键词: 超大型集装箱船; 高桩码头; 结构设计; 方案比选

中图分类号: U656.1+13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)03-0175-07

Comparison and selection of structural schemes for super-large container terminal in Yantian Port

ZHAO Min, SHI Xiaodi, GU Xiangkui, FENG Hao

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: The container load capacity and ship scale of super-large container ships are constantly updated, which put forward higher requirements for the design of terminal structure. This paper takes the structural design of a super large container terminal in Yantian Port as an example, analyzes the design load and the natural conditions of the project area such as wave, current and geology in detail, and summarizes the major and difficult points of engineering design with large design load and complex geological conditions. For the major and difficult points of design, the paper analyzes and discusses the advantages and disadvantages of several common structural types and pile foundation types of the terminal, as well as the applicability of the project, and obtains that the rationality of the design load value and the applicability of the structure to the geological conditions are key points of the design of the structure of the super large container terminal. The paper proposes the wharf structure scheme with the optimal structure and the lowest cost through the comparison and demonstration of multiple schemes of the rack distance and superstructure.

Keywords: super-large container ship; pile-supported wharf; structure design; scheme comparison and selection

盐田港区是深圳港到港超大型集装箱船占比最高的港区, 全球载箱量超过 1 万 TEU 的超大型船舶超过 95% 停靠盐田港区。受船舶大型化趋势影响, 近年来, 载箱量 1 万 TEU 以上的超大型集装箱船增长势头强劲, 船舶最大载箱量不断刷新, 目前世界最大集装箱船舶载箱量已达到 2.4 万 TEU^[1-2]。根据德国汉堡 OCEANS ONE Management Consultants 发布的研究报告, 未来集装箱船舶“超级巨无霸”TERRAMAX 型船的船长将达到 454 m, 最大

载箱量高达 3.2 万 TEU^[3]。盐田港东作业区一期码头工程以该船型作为结构最大设计船型, 其船舶荷载及岸桥荷载较现有规范标准显著增加, 且国内外尚无同等级集装箱码头设计先例, 是全球首个按靠泊 3.2 万 TEU 集装箱船舶设计的码头。本文根据水文、地质条件和使用要求对码头结构方案进行对比分析, 总结出超大型集装箱码头结构设计要点, 旨在为类似工程提供借鉴和参考。

收稿日期: 2024-09-27

*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFB2604200)

作者简介: 赵敏 (1987—), 男, 高级工程师, 从事港口工程结构设计。

1 工程概况

1.1 平面布置

盐田港东作业区一期码头工程建设 3 个 20 万吨级集装箱泊位，码头结构按照靠泊 3.2 万 TEU 集装箱船设计，岸线长 1 470 m。码头平面采用满堂式布置，码头面高程为 6.0 m(当地理论最低潮面基面，下同)。码头前沿设计泥面高程为-18.0 m。

1.2 设计船型

工程最大设计船型为 3.2 万 TEU 集装箱船，其总长 454 m，型宽 66.1 m，型深 36.0 m，满载吃水 17.0 m。

1.3 水文条件

极端高水位为 3.50 m，设计高水位为 2.26 m，设计低水位为 0.22 m。工程区域波浪掩护条件较好，100 和 50 a 一遇极端高水位 $H_{1\%}$ 分别为 4.90 和 4.32 m。该水域水流动力较弱，海流最大流速约 0.5 m/s。

1.4 设计重难点

1) 码头设计荷载大，船舶荷载和岸桥荷载已超现有规范标准。3.2 万 TEU 集装箱船型尺度已超 JTS 165—2013《海港总体设计规范》^[4]中现有 20 万吨级集装箱船标准，满载排水量超过 35 万 t。码头结构设计考虑事故撞击工况，按 2 倍船舶撞击力进行结构复核。按满足 3.2 万 TEU 集装箱船装卸作业要求的岸桥荷载也远超现有规范标准，台风工况下单个轮压达到 2.720 MN/轮(每支腿 10 轮)，防风上拔力 10.700 MN/支腿，分别为现有规范最大岸桥的 1.81 和 2.14 倍。

2) 地质条件复杂，基岩埋深浅、起伏大，且软硬岩交错并存。本工程岩面北高南低，岩面以上覆盖层较薄，仅为 20~30 m。岸线北段约 300 m 范围基岩为花岗岩，属硬质岩，南段约 1 170 m 范围基岩为角砾岩，属软质岩。岩面起伏大，局部强风化岩层深厚，最厚近 30 m，未见微风化岩。

2 码头结构设计

2.1 合理确定设计荷载

2.1.1 3.2 万 TEU 集装箱船的满载排水量

1) 根据规范参考值拟合公式估算。JTS 165—

2013《海港总体设计规范》给出的集装箱船型已有载质量与排水量数据，取对数后可拟合出两者线性关系见图 1 和式(1)：

$$\lg M_d = 0.3553 + 0.9554 \lg W_{DT} \quad (1)$$

式中： M_d 为满载排水量，t； W_{DT} 为载质量，t。目前 2.4 万 TEU 集装箱船实船载质量约为 23.0 万 t，估算 3.2 万 TEU 集装箱船载质量为 28.015 万 t，即可按拟合公式估算其满载排水量为 36.286 万 t。

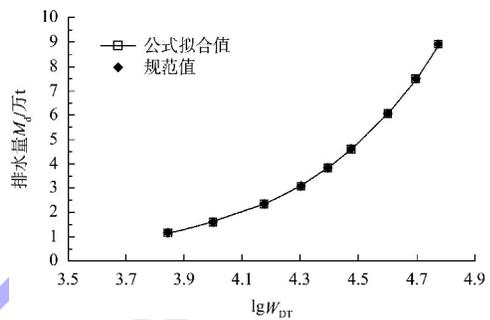


图 1 载质量与满载排水量线性拟合曲线

Fig. 1 Linear fitting curve of loading mass and full-load displacement

2) 根据船舶方形系数 C_b 估算。JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》^[5]给出了油船、散货船的方形系数为 0.825，杂货船为 0.625，未给出集装箱船的方形系数。超大型集装箱船由于其高航速和时效性的特点，方形系数 C_b 小于油船和散货船。超大型集装箱船的方形系数集中在 0.60~0.73^[6-8]。根据现役 2.4 万 TEU 集装箱船实船“HMM ALGECIRAS”和 2.2 万 TEU 实船“OOCL GERMANY”的船型尺度及满载排水量试算，其方形系数分别为 0.728 和 0.672。综上，选取规范不同船型方形系数的平均值 0.725 进行计算，3.2 万 TEU 集装箱船满载排水量为 36.987 万 t。该数值与规范拟合公式计算值相近，取两者大值作为最终设计参数。

2.1.2 岸桥荷载

集装箱码头的岸桥荷载是主要控制荷载，其台风工况荷载与防台设计风速取值密切相关，现行的 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》给出了 55 和 70 m/s 两个防台设计风速标准。本工程选取当地 2007—2022 年这 16 年的逐年日极大风速序列(图 2)，采用极值 I 型分布函数^[9]，计算得到

重现期为 50 a 的最大瞬时(离地面 10 m 高度, 3 s 平均)风速为 45.814 m/s (<55 m/s), 最终确定防台设计风速为 55 m/s。

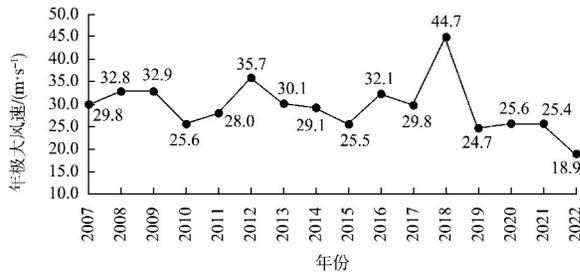


图2 2007—2022年期间年极大风速变化
Fig. 2 Variation of annual maximum wind speed during period from 2007 to 2022

2.2 地质条件的适用性比选

2.2.1 码头结构选型

1) 高桩梁板式结构形式。该类型码头结构适合持力层起伏较大的地质情况, 通过调整桩长使基桩到达同一持力层, 保证结构受力均匀、码头沉降较小; 即使桩入土较浅, 采用桩基嵌岩技术, 也能保证桩基承载力满足要求。该类型码头属于透空式结构, 波浪反射小, 泊稳条件较好^[10]。

2) 重力式结构形式。该类型码头结构具有整体性和耐久性好、主体结构对超载敏感度低等优点, 但本工程码头南段基岩埋深较大, 且岩面起伏变化大。重力式结构基床回填量大, 厚度差别也较大, 易导致上部结构不均匀沉降, 影响码头岸桥的正常运行。另外, 重力式结构墙前波浪反射大、泊稳条件差, 会降低码头的装卸作业效率。

3) 格型钢板桩结构形式。该类型码头结构在周边已建码头中有过应用, 其主体结构是钢板桩格体, 可采用陆上预拼装、水上整体沉放的施工工艺。在向格体内回填砂形成陆域后进行上部结构施工, 施工条件较好^[11]。但基槽和格体内采用中、粗砂回填, 振冲密实, 工程量较大。而本工程基岩起伏大导致的压缩层厚度变化大, 同样易产生不均匀沉降, 影响码头的正常作业。且格体海侧钢板桩距码头前沿线较近, 船舶靠泊时易受撞击, 若出现撞损破坏, 后期修复比较困难。

综合上述分析, 结合本工程的使用要求和场地地质特点, 采用高桩梁板式结构方案可行且经济。

2.2.2 码头桩基选型

港口工程大等级码头常用桩型有高强预应力混凝土管桩、钢管桩^[12]和组合管桩等。高强预应力混凝土管桩轴向承载能力大, 但抗弯能力较差, 不宜应用于水深和水平荷载过大的情况; 钢管桩的抗拉性能与抗压性能接近, 桩身抗弯抗拉能力强, 适用于水平荷载较大的情况, 且钢管桩耐锤击性好, 易于在风化岩内沉桩, 其截断或接桩处理方便, 适宜在岩面起伏大的地质环境中使用; 高强预应力混凝土钢管组合桩的钢管桩段基本位于弹性长桩计算点以下, 其受力特性与高强预应力混凝土管桩更接近, 但上下管节接头位置, 在本工程地质条件变化较大的情况下较难确定。

针对工程船舶等级高, 岸桥荷载大的特点, 钢管桩贯入性能好、承载力高, 更适用于复杂地质环境中使用, 综合比选后采用钢管桩。

2.2.3 桩径及桩距选择

桩基桩径及桩距的确定以充分发挥桩基承载能力为原则。轨道梁下桩基桩径主要由上部岸桥轨道荷载决定, 随着轮压荷载的增加, 桩径也随之加大。本工程区域岩面埋深小、覆盖层较薄, 且下卧基岩多为软岩, 即使桩端嵌岩也很难获得大的单桩承载力, 因此大跨排架结构并不适用。根据码头区域的地质条件和桩基承载力, 结合上部结构设计对桩径和桩距进行结构方案比选, 以选择结构最优、造价最省的码头结构方案。

3 码头结构方案比选

3.1 方案1: 现浇纵横梁方案

方案1上部为平面正交结构, 由面板、纵梁、轨道梁、横梁等构件组成, 其中面板为钢筋混凝土叠合板, 纵横梁、轨道梁为现浇钢筋混凝土构件。

桩基排架间距 6.4 m, 每榀排架布置 6 根钢管桩, 均布置在纵梁位置, 同时在两榀排架间的前后轨道梁下各布置 1 根单斜钢管桩, 使沿轨道梁方向的基桩间距缩小到 3.2 m。轨道下的桩基直径为 1 400 mm, 其余为 1 000 mm, 见图 3。

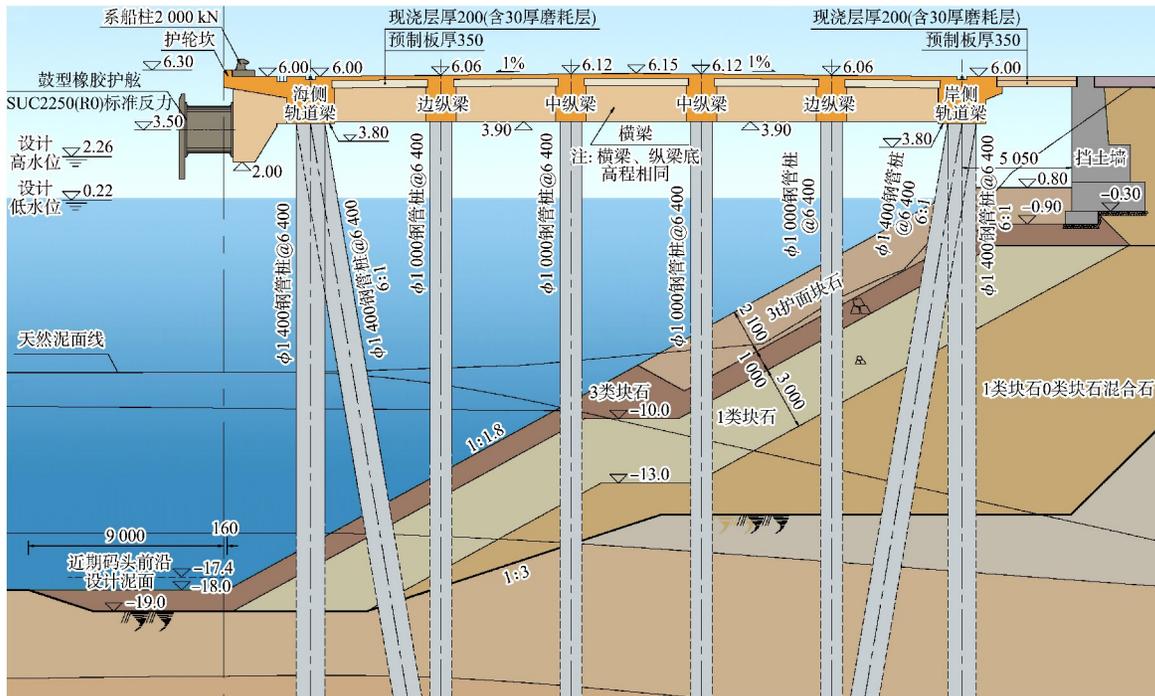


图3 方案1断面 (尺寸: mm; 高程: m)

Fig. 3 Section of scheme one (dimension: mm; elevation: m)

3.2 方案2: 预制纵横梁+现浇桩帽节点方案

方案2上部结构由面板、纵梁、轨道梁、横梁、桩帽节点等构件组成, 面板采用钢筋混凝土叠合板, 纵横梁、轨道梁为预制预应力钢筋混凝土构件, 通过现浇桩帽节点连接。

桩基排架间距9 m, 每榀排架布置5个桩帽节点和9根钢管桩, 其中前后轨道梁桩帽节点下各布置3根 $\phi 1\ 300\text{ mm}$ 钢管桩, 中间3个桩帽节点下各布置1根 $\phi 1\ 200\text{ mm}$ 钢管桩, 见图4。

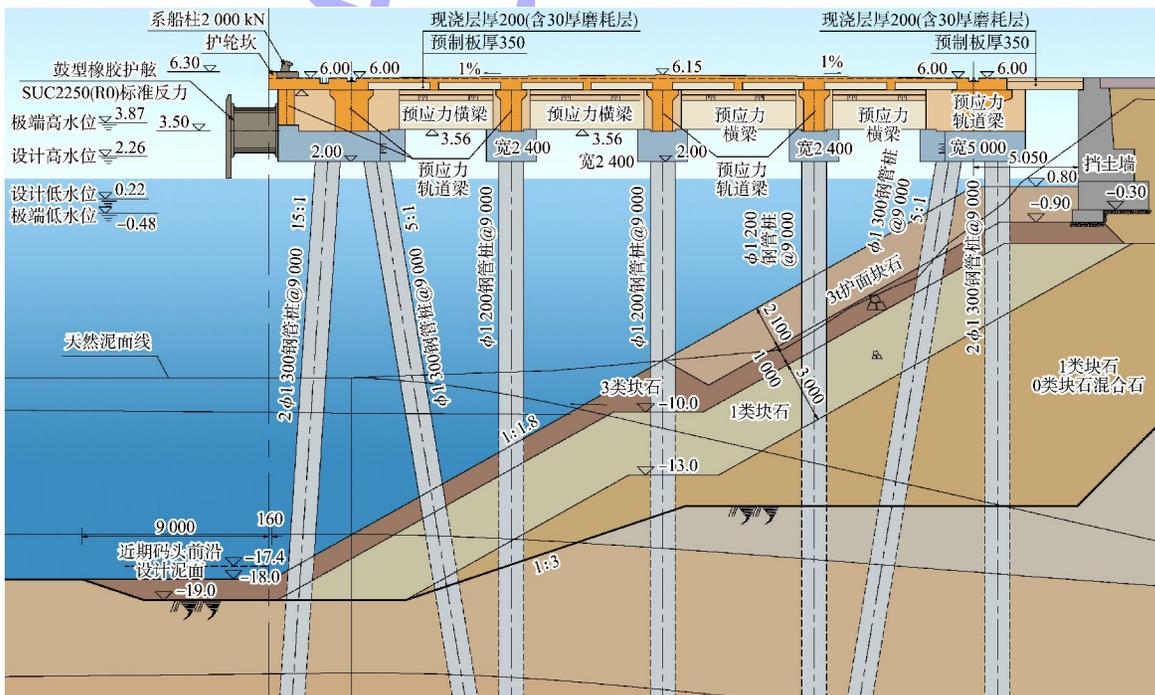


图4 方案2断面 (尺寸: mm; 高程: m)

Fig. 4 Section of scheme two (dimension: mm; elevation: m)

3.3 方案3:预制轨道梁+现浇横梁方案

方案3上部结构同样由面板、前边梁、轨道梁、横梁、桩帽节点等构件组成,取消一般纵梁,面板采用预应力钢筋混凝土叠合板,轨道梁为预制预应力钢筋混凝土构件,通过现浇桩帽节点连

接。前后轨道梁桩帽节点之间采用现浇横梁连接。

桩基排架间距同样为9 m,每榀排架设前后轨道梁桩帽节点,每个节点下各布置3根 $\phi 1\ 300\text{ mm}$ 钢管桩,前后轨道梁桩帽节点之间现浇横梁下设4根 $\phi 1\ 000\text{ mm}$ 钢管桩,见图5。

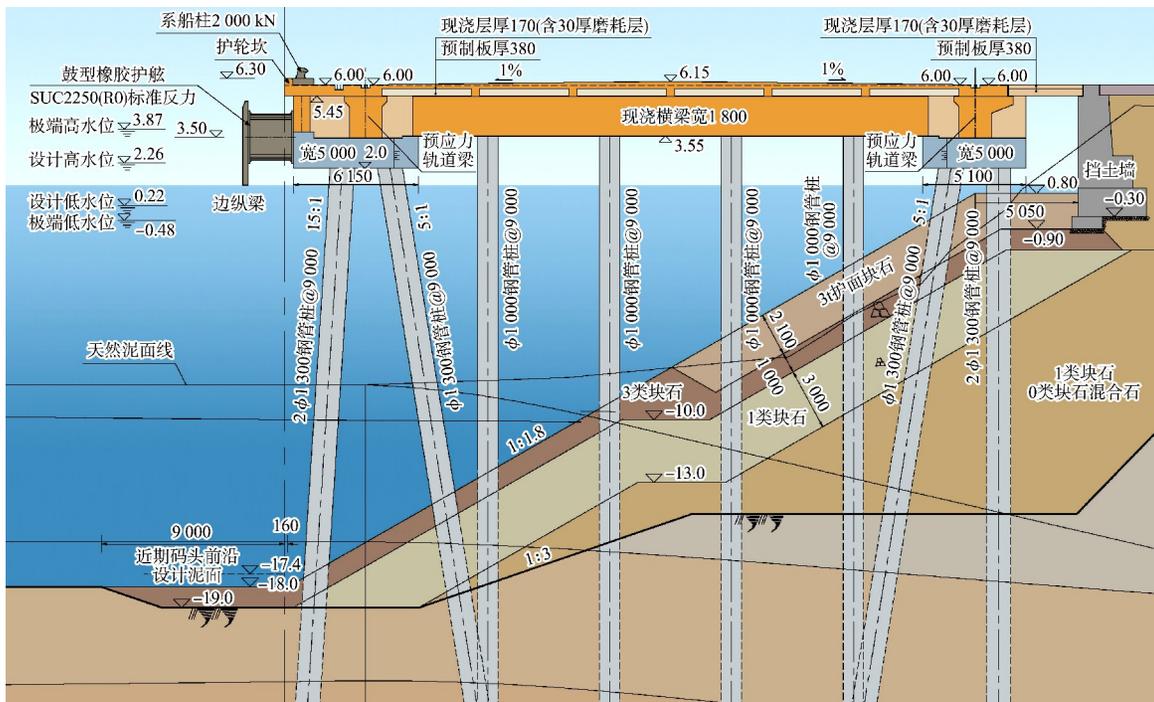


图5 方案3断面(尺寸: mm; 高程: m)

Fig. 5 Section of scheme three (dimension: mm; elevation: m)

3.4 方案比选

3个码头结构方案的主要区别在上部结构、排架间距和桩径,其各有特点。

1) 方案1的码头整体性好;梁系布置灵活;结构高度较低,受长周期涌浪影响较小,且上部结构均在施工水位以上,施工受潮位影响小;结构整体现浇,钢筋只需要搭接或用套筒连接,不需要焊接,连接质量容易控制;预制面板构件质量轻,施工方便。缺点是现浇混凝土工程量多、现场工作量大,且相对于方案2桩基数量较多,施工速度较慢。

2) 方案2的预制装配化程度高,桩基数量少,施工速度较快。缺点是结构高度较高,现浇桩帽节点施工受潮位影响大;预制构件质量较大,起重设备等施工能力要求较高;预制梁之间需要焊接,保证焊接质量有一定难度。

3) 方案3结合了方案1、2的优点,取消了一般纵梁,现浇混凝土工程量相对较少,桩基数量较少,施工速度较快。缺点是现浇桩帽节点施工受潮位影响较大,预制构件质量较大,起重设备等施工能力要求较高。

3个方案主要工程量对比见表1。

6.4 m排架方案(方案1)的桩力比9 m排架方案(方案2、3)小,桩基承载力容易得到保证,桩长更适应岩面起伏变化,调整余地大,沉桩质量易于控制,虽然基桩数量和用钢量比9 m排架多,但9 m排架由于跨度较大,纵梁系统内力增大,梁的断面尺寸比6.4 m排架梁大,同时还增加了桩帽的混凝土用量,9 m排架方案混凝土总用量比6.4 m排架方案大幅增加,投资更大。经过技术经济综合比较,最终推荐结构方案1,即码头采用现浇纵横梁方案。

表 1 方案主要工程量对比
Tab. 1 Comparison of main quantities of three schemes

结构 方案	桩基				桩基 总数/根	桩材用 钢量/t	上部结构			投资 估算/ 万元
	φ1 400 mm 钢管桩/根	φ1 300 mm 钢管桩/根	φ1 200 mm 钢管桩/根	φ1 000 mm 钢管桩/根			预制 混凝土/m ³	现浇 混凝土/m ³	混凝土 总量/m ³	
1	920	-	-	964	1 884	35 133	10 772	63 550	74 322	103 751
2	-	1 026	513	-	1 539	30 635	35 715	59 518	95 233	114 091
3	-	1 026	-	684	1 710	31 546	20 959	60 273	81 232	110 995

4 结论

1) 超大型集装箱船的满载排水量可通过规范参考值的拟合公式进行估算, 或通过经验方形系数 0.725 进行估算。

2) 本工程岩面起伏大, 若采用重力式结构或格型钢板桩结构, 回填量大, 且回填厚度不均, 后期容易产生不均匀沉降; 且实体结构码头前沿波浪反射大、泊稳条件差, 会影响集装箱码头的装卸作业效率。本工程码头适合采用高桩梁板式结构。

3) 本工程设计使用荷载大, 承载力要求高, 混凝土管桩或组合管桩均难以满足要求。钢管桩贯入性能好, 在风化岩地区沉桩优越性大于混凝土管桩和组合桩, 因此采用钢管桩。

4) 对码头排架间距及上部结构进行了多方案对比, 结果表明 6.4 m 排架间距的现浇纵横梁方案, 上部结构梁尺寸较小, 混凝土用量少, 投资最省。同时排架间距小, 桩力相对也小, 嵌岩桩数量少, 方便施工, 节约工期。

参考文献:

- [1] 段超. 集装箱船舶大型化发展趋势研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
DUANC. Development trend of large container ships[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2013.
- [2] 石智藩, 张继军. 集装箱船舶大型化带来的影响[J]. 甘肃科技, 2021, 37(1): 53-55.
SHI Z P, ZHANG J J. Impact of container ship upsizing[J]. Gansu science and technology, 2021, 37(1): 53-55.
- [3] 港口圈. 32 000 TEU 的集装箱船? 港口准备好了吗? [EB/OL]. (2021-06-15) [2024-08-02]. https://mp.weixin.qq.com/s/BDcAkY93vU4DKv3eS_07Mw.

weixin. qq. com/s/BDcAkY93vU4DKv3eS_07Mw. Port Circle. 32 000 TEU container ship? Is the port ready? [EB/OL]. (2021-06-15) [2024-08-02]. https://mp.weixin.qq.com/s/BDcAkY93vU4DKv3eS_07Mw.

- [4] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 港口工程荷载规范: JTS144-1—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd., CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd. Load code for harbour engineering: JTS144-1-2010 [S]. Beijing: China Communications Press, 2010.
- [5] 中交水运规划设计院有限公司. 海港总体设计规范: JTS 165—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd. Design code of general layout for sea ports: JTS 165-2013 [S]. Beijing: China Communications Press, 2014.
- [6] 王志超, 包岩, 王涛. 合理选择 18 000 TEU 级超大型集装箱船的方形系数[J]. 船海工程, 2015, 44(6): 65-68.
WANG Z C, BAO Y, WANG T. Research on rational selection of block coefficient of 18 000 TEU ultra large container vessels [J]. Ship & ocean engineering, 2015, 44(6): 65-68.
- [7] 谷宇, 包岩, 邓强. 超大型集装箱船方形系数及载箱量优选研究[J]. 船舶工程, 2017, 39(8): 21-24, 68.
GU Y, BAO Y, DENG Q. Optimum seeking method study of block coefficient and container capacity of VLCS[J]. Ship engineering, 2017, 39(8): 21-24, 68.
- [8] 刘英良. 超大型集装箱船多工况点的最佳方形系数范围探索[J]. 船舶, 2014, 25(1): 21-24.
LIU Y L. On optimized block coefficient range for ultra large container vessels under multiple operating points[J]. Ship & boat, 2014, 25(1): 21-24.
- [9] 朱薇薇, 郭龙光, 泽仁罗布, 等. 基于三种不同分布函数

