



# 全装配式高桩码头结构创新设计<sup>\*</sup>

盛佳珺, 陈海峰, 李武, 程泽坤

(中交第三航务工程勘测设计院有限公司, 上海 200032)

**摘要:** 针对传统高桩梁板码头预制构件数量多、运输量大, 施工现场模板、焊接工程众多、施工空窗期少的设计短板, 以连云港港某液体散货泊位为例, 采用一种标准化、大构件、少节点的全装配式码头结构形式。考虑施工期安装工况, 桩基采用三点支撑布置形式, 上部结构根据功能分解为3个标准模块化预制构件, 即预制横梁及前后预制π形板。通过桩基与预制横梁以直代弯新型钢结构桩芯、预制横梁与预制π形板钢筋套筒连接等关键节点连接技术, 实现全装配式码头结构设计, 同步配备附属设施、监测方案等成套设计技术, 为全装配式码头在各类功能泊位中的推广应用提供借鉴。

**关键词:** 全装配式; 高桩码头; 预制横梁; 预制π形板; 节点设计; 钢结构靠船构件

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)05-0059-06

## Innovative design of fully prefabricated high-pile wharf structure

SHENG Jiajun, CHEN Haifeng, LI Wu, CHENG Zekun

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

**Abstract:** The traditional high-pile beam-slab wharf has many design shortcomings, such as a large number of prefabricated members, large transportation volume, a tremendous amount of formwork and welding work on the construction site, and few construction gaps. To overcome them, this study adopts a standardized fully prefabricated wharf structure with large members and few joints, taking a liquid bulk cargo berth in the Port of Lianyungang as an example. Considering the installation conditions during the construction period, it adopts the three-point support layout for pile foundations and divides the superstructure into three standard modular prefabricated members according to their functions, namely, prefabricated beams and front and rear prefabricated π-shaped plates. As a result, it achieves the fully prefabricated wharf structure design by key joint connection technologies such as a new steel-structured pile core at the joint between pile foundations and prefabricated beams and the steel sleeve connection between prefabricated beams and prefabricated π-shaped plates. Additionally, this paper proposes the synchronous equipment of a complete set of design technologies such as ancillary facilities and monitoring schemes, which can provide a reference for the promotion and application of fully prefabricated wharf in various functional berths.

**Keywords:** fully prefabricated; high-pile wharf; prefabricated beam; prefabricated π-shaped plate; joint design; steel-structured berthing members

高桩梁板结构是常用的码头结构形式, 从设计到施工已形成较为成熟的流程模式及施工组织。常规采用等高连接、上下横梁结构为下部桩基与上部结构桩帽或横梁现浇连接, 上部

预制梁板安装后再分别进行节点浇筑连接, 整体性强。但缺点也较为明显, 预制构件数量多, 运输量大, 施工现场模板、焊接工程众多, 大量人力物力海上乘潮赶工, 施工空窗期

收稿日期: 2022-11-15

\*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFB2600700)

作者简介: 盛佳珺 (1983—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事港口航道工程设计。

少导致周期长, 各项因素增加了其建造成本<sup>[1]</sup>。

针对传统高桩梁板结构设计短板, 本文以连云港港徐圩港区六港池 64#~65#液体散货泊位工程为例<sup>[2]</sup>, 介绍一种标准化、大构件、少节点的全装配式码头设计思路, 为类似工程提供参考借鉴。

## 1 工程概况

64#~65#液体散货泊位位于徐圩港区六港池底部(图 1), 建设 1 个 10 万吨级和 1 个 8 万吨级液体散货泊位(水工结构按 10 万吨级船舶设计)。码头总长度 648 m, 码头面高程 7.50 m, 前沿设计泥面高程-16.00 m。布置 1 座 588 m×25 m 平台, 南侧端部设置 2 座系缆墩(图 2)。



图 1 64#~65#液体散货泊位位置

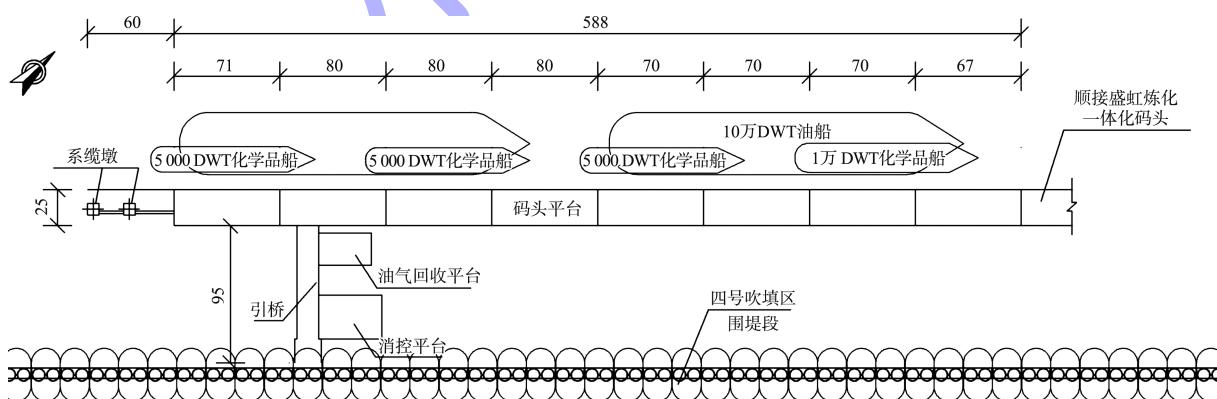


图 2 码头平面 (单位: m)

## 2 总体设计

全装配式高桩码头设计以高装配率、高标准化、高适配度为首要标准, 与传统码头现浇横梁、现浇桩帽设计不同, 采用整体预制构件工艺, 利

用关键连接节点加强连接设计。施工能力是建造成本的主要控制因素, 应当综合考虑现有预制出运能力及现场构件运输、吊装设备设计。根据徐圩港区现状确定本工程单个构件的最大质量控制

在 200 t 左右较为经济合理。同时, 为更好地减少构件数量, 匹配构件尺度、质量, 提高工效, 提出模块化构件理念。

本工程码头宽度 25 m、排架跨度 10 m, 上部结构分解为 3 个标准模块化预制构件, 其中一根横梁为整根通长预制<sup>[3]</sup>, 纵向整合多个纵梁、面

板、侧板形成前后两块预制  $\pi$  形板, 再通过连接节点和铺装层完成面层结构(图 3), 预制构件总数量减少 80%左右。根据环保要求, 预制  $\pi$  形板安装后纵向通长浇筑排水沟, 基桩采用  $\phi 1200$  mm 大管桩(图 4)。

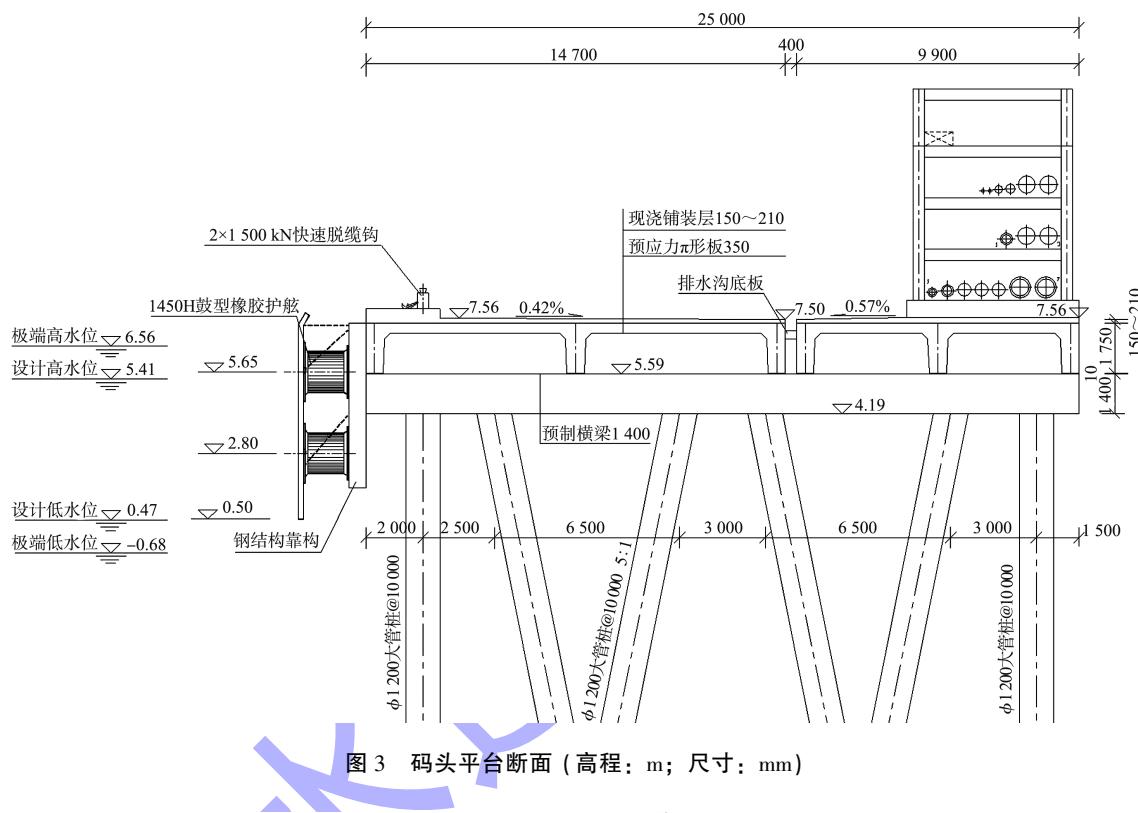


图 3 码头平台断面(高程: m; 尺寸: mm)

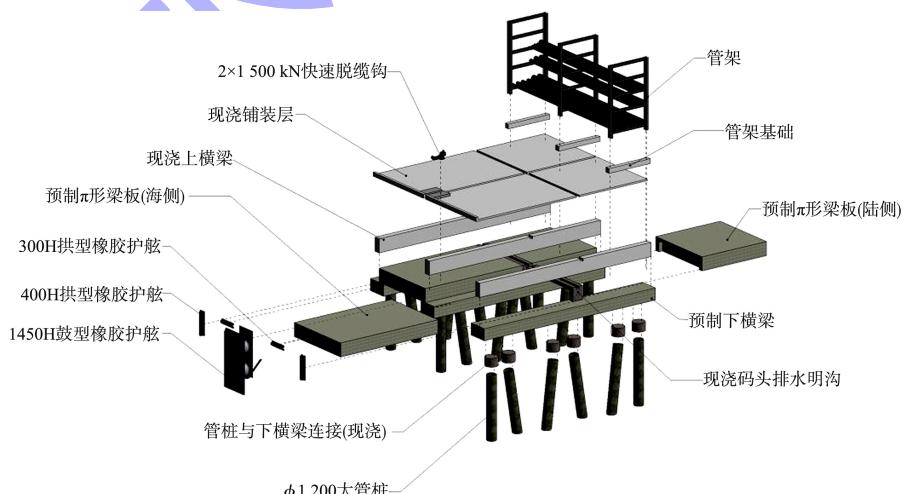


图 4 构件分解

### 3 构件设计

#### 3.1 桩基设计

码头每榀排架设 6 根桩, 码头海侧、陆侧各布

置“一直一斜”两根桩, 排架中部布置一对叉桩, 斜度均为 5:1, 直桩桩顶直接伸入横梁内 900 mm, 斜桩桩顶伸入横梁内 100 mm, 桩芯型钢结构伸入

横梁内 900 mm, 按铰接考虑。

传统现浇横梁采用钢抱箍、槽钢、底模系统等反吊于排架各个基桩, 桩基设计无需考虑上部结构施工期的工况, 但在全装配式码头设计中, 预制横梁为一次性吊运、安装, 支撑点直接利用下部桩基, 安装完成后进行连接节点浇筑, 不再另设钢抱箍围护系统。码头桩基设计除考虑受力、斜度、角度因素, 桩位排布应尽可能使桩力、弯矩、应力等均匀分布以满足使用要求。因此, 对桩基施工偏位控制要求更高, 尤其纵向偏位要求高于横向偏位。

本工程利用两侧端部各一根直桩顶部搁置面作为第1、2安装点, 考虑到前后直桩净距为 21.5 m, 为避免整根预制横梁安放过程中产生过大跨中弯矩, 采用中间一组对叉桩桩芯混凝土结构顶面作为第3安装点, 形成三点支撑(图5)。



图 5 桩基排布及安装支撑设置

### 3.2 预制横梁设计

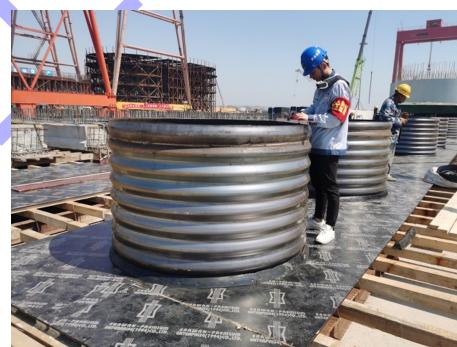
横梁单根通长预制, 矩形截面长 25.00 m、宽 2.60 m、高 1.40 m。对应单榀排架 6 根  $\phi 1200$  mm 大管桩位置, 底部开设 6 个预留空腔作为桩基连接节点。考虑沉桩偏位及安装偏差, 按管桩四周预留 200 mm 控制, 高度方向考虑桩芯连接型钢锚固长度, 确定空腔孔径为 1 600 mm, 孔深根据桩芯钢结构伸入长度确定为 1 000 mm。预制横梁结构钢筋遇预留孔上弯, 预留孔为结构薄弱位置, 需加强配筋。

空腔位于横梁底部, 考虑到在空腔孔内侧壁做拉毛处理较为困难, 故空腔周边预埋波纹钢板, 强度高, 施工方便灵活, 既解决了横梁内置空腔模板支立拆除的难题, 又避免了后期大量的凿毛工作, 加强预制横梁与灌浆料连接性的同时也大大提高了横梁预制施工工效。横梁预制时, 预留

进浆孔与溢浆孔, 进浆孔从横梁顶部预埋至底部, 使灌浆料从上而下注入, 再由开孔底部充填至整个开孔区域, 更易保证其密实性; 溢浆孔设置于开孔上部, 待溢浆孔出浆则可判定充填完毕。另外, 预制横梁通过波纹管灌浆与桩基连接成为一体, 无需专门架设下横梁的模板及水上现浇工作(图 6)。



a) 预制横梁结构



b) 底部空腔波纹钢板

图 6 预制横梁与底部空腔内模

### 3.3 预制 $\pi$ 形板设计

预制  $\pi$  形板为整体框架结构, 替代常规高桩码头的纵梁和面板结构, 由顶部面板、纵向肋梁、横向端板组成(图 7)。本工程预制  $\pi$  形板采用两种规格, 以后浇排水沟为界, 宽度分为海侧 14.70 m 和岸侧 9.90 m, 长 9.20 m, 总高 1.75 m。顶部面板高 0.35 m, 两种  $\pi$  形板均布置 3 根纵向预应力肋梁, 宽 0.60 m, 为避免面板与肋梁相交位置的应力集中, 该位置采用  $0.20 \text{ m} \times 0.20 \text{ m}$  倒角设计。同时考虑到内部脱模的便捷性, 肋梁断面呈上宽下窄形状, 上部比底部宽 50 mm。横向端板结构既加强预制框架结构的整体性, 又作为后序现浇

节点工序的模板。横向端板带有直径 700 mm 的人孔, 方便施工人员进入  $\pi$  形板内侧进行防腐涂层等作业。



图 7 预制  $\pi$  形板结构

#### 4 关键节点设计

##### 4.1 桩基与预制横梁节点

桩基与预制横梁节点为装配式码头结构的关键节点, 采用组合型钢结构锚固入预制横梁底部空腔, 灌浆后形成可靠节点。型钢结构桩芯采用以直代弯的设计取代传统顺桩向的桩芯混凝土结构(图 8)。从整体预制结构与传统现浇结构的连接受力机理分析, 由传统固接转变为铰接连接, 其连接面抗拉强度、抗剪强度应按等刚度设计, 若采用传统桩芯混凝土设计, 由于沉桩平面、扭角、斜度均会产生偏差, 桩身伸入桩帽 0.9 m, 横梁预留孔洞较大, 影响横梁结构设计。传统桩芯钢筋连接强度无法满足铰接连接面强度要求及铰接状态下码头整体位移的控制要求, 故每根基桩连接钢结构桩芯保留自桩顶以下 2.5 m 范围内桩芯钢筋结构, 中间选用 4 根 [32c] 槽钢, 分别均匀电焊固定于桩芯内侧主筋, 伸入桩内不小于 1.8 m, 伸入开孔不小于 1.0 m, 且相对两块 [32c] 槽钢间采用两块 [8] 槽钢对焊, 同一截面内两个 [8] 槽钢也焊接固定, 增加桩芯连接钢结构的刚度及抗剪强度。

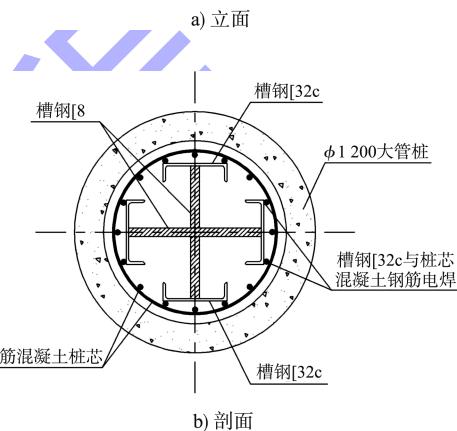
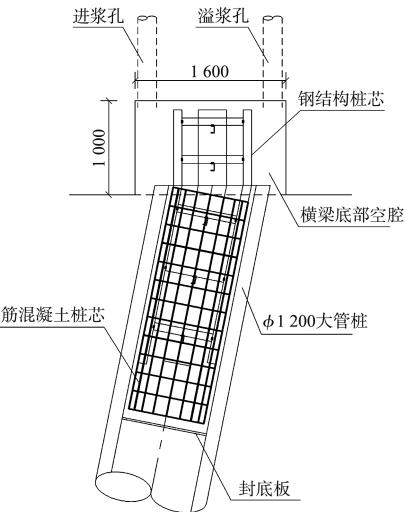


图 8 桩基与预制横梁节点 (单位: mm)

##### 4.2 预制横梁与 $\pi$ 形板的连接

码头排架底部为预制横梁, 其顶部两侧搁置预制  $\pi$  形板, 中间通过宽 800 mm 的连接节点使预制  $\pi$  形板与横梁连接成整体。横梁作为节点底模,  $\pi$  形板的横向端板可作为节点侧模。预制构件强度大、稳定性好, 可充分承载混凝土浇筑荷载。预制横梁在节点位置预留矩形封闭箍筋至节点顶部, 同时  $\pi$  形板两侧顶部面板、纵向肋梁均有外伸 350 mm 的钢筋, 交错进行钢筋连接。节点施工空间有限, 下半部分进行套筒连接(图 9), 上部及顶部可进行钢筋绑扎, 最后浇筑成型<sup>[4-6]</sup>。

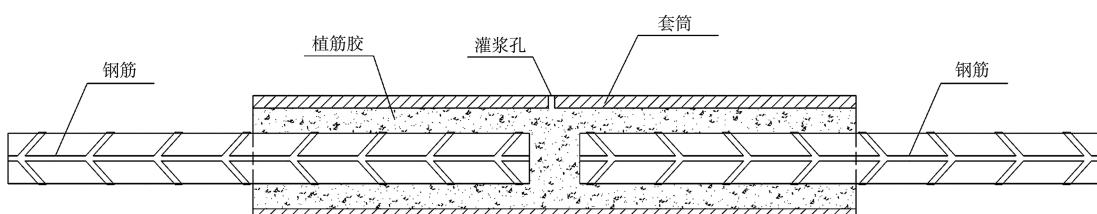


图 9 套筒连接

## 5 附属设施设计

### 5.1 钢结构靠船构件设计

常规码头前沿一般设置钢筋混凝土靠船构件，确保与码头主体结构连接的可靠性及耐久性。在装配式码头设计中，如仍采用传统混凝土靠船构件，前沿有鼓型橡胶护舷的横梁预制时需保留前端部分，待预制靠船构件安装后浇筑节点，从而使得预制横梁种类增加，不利于标准化施工。施工时要增加靠船构件预制、支撑钢结构体系安装、靠船构件安装、现浇节点等工序，不利于装配式高桩码头结构的推进。本次设计提出一种钢质靠

船构件系统解决上述问题。钢质靠船构件由面板、背板和纵横筋板组成整个密封结构，制作时进行水压密封试验，布置有贯穿面板和背板的预埋螺母套筒，靠船构件锚固螺栓和护舷橡胶鼓安装锚固螺栓均位于面板上，因此靠船构件锚固螺栓位置受到护舷安装螺栓位置和加强板分布的影响，固定螺栓布置成 3 行，每行 4 根，每行均匀分布在板宽范围内。预制  $\pi$  形板上设有护舷橡胶鼓安装锚固螺栓和拉环。钢质靠船构件的密封可有效减缓钢材腐蚀速度，构件热镀锌后涂抹环氧漆，确保耐久性(图 10)。

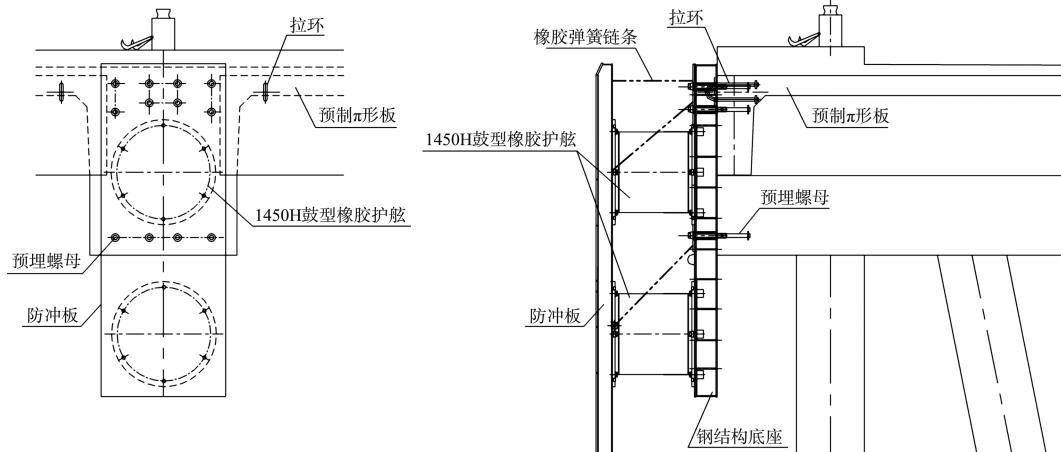


图 10 钢结构靠船构件

### 5.2 伸缩缝设计

装配式码头伸缩缝间距为 60~70 m，一般采用齿坎状现浇混凝土悬臂或双侧短跨简支设计。本次全装配式码头结构取消分段悬臂结构，统一标准化跨度，在分段间进行结构分缝设计。在分段位置的预制  $\pi$  形板内预埋剪力栓，露头部分采用防腐涂层处理。安装完毕进行现浇节点施工，剪力栓与现浇节点一并浇筑，剪力栓承担分段处的横向荷载作用，预制  $\pi$  形板与现浇节点间放置塑料泡沫板，两个刚性块体间填充柔性材料形成缓冲带，避免纵向位移产生碰擦破坏。伸缩缝位置两侧顶面设置护边角钢，确保码头面车辆通行期间分缝表面完整。

## 6 结构监测设计

为科学验证全装配式码头结构的安全可靠性，

在施工和运营期需采取合理的监测方案，掌握预制构件在吊装及主体运营期间结构的受力和变形数据。

工程选取靠泊位置、作业区等代表性排架，在预制构件、节点、桩芯钢结构及钢结构靠船构件等关键位置埋设联网传感器、应力片等，定量读取模块化构件制作与安装、后浇带节点的连接、码头整体运营期等时期的各项数值，将采集到的数据传输到数据终端，并对监测数据进行处理和分析，给出结构使用状态，数据异常时进行预警提醒。

## 7 结论

1) 主体构件实现全预制模式，大幅提升现场施工装配化程度，体积装配率达 80%，在同类水运码头工程中装配率全国领先。

(下转第 93 页)