



一体式预制桩帽构件 在装配式高桩码头中的应用

林学良¹, 王磊², 曹凯平³, 章康³, 程培军³

(1. 福建宁港港口投资发展有限公司, 福建宁德 352107;
2. 宁德港务集团有限公司, 福建宁德 352100; 3. 中交第三航务勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 介绍了一种一体式预制桩帽的特点及设计方法, 通过理论分析、数值模拟对桩帽结构、连接方式等进行研究。结果表明, 为便于一体式预制桩帽的安装, 码头一般采用全直桩, 可通过桩内混凝土灌心提高整体侧向刚度。桩帽的结构设计可参照现行码头结构设计规范进行。桩帽与钢桩采用承插灌浆连接, 灌浆料可采用超高性能混凝土, 灌浆长度可按握裹力计算, 计算方法可参考国外相关规范。对于轴力较大的情况, 可在灌浆区域设置剪力键以增加黏结力。

关键词: 装配式高桩码头; 一体式预制桩帽; 侧向刚度; 灌浆连接

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)05-0017-05

Application of integrated precast pile cap in prefabricated high-pile wharf

LIN Xueliang¹, WANG Lei², CAO Kaiping³, ZHANG Kang³, CHENG Peijun³

(1. Fujian Ninggang Port Investment and Development Co., Ltd., Ningde 352107, China;
2. Ningde Port Group Co., Ltd., Ningde 352100, China;
3. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: This paper introduces the characteristics and design method of an integrated precast pile cap and analyzes its structure and connection mode through theoretical analysis and numerical simulation. According to the conclusions, all-vertical-piled wharfs can generally facilitate the installation of the pile cap, and concrete grouting inside the pile can improve the overall lateral stiffness. The structure design of the pile cap can refer to the current structure design code of wharfs. In addition, socketed grouting can connect the pile cap and steel pile, with ultra-high performance concrete as the grouting material, and relevant overseas codes can guide the calculation of the grouting length according to the grip force. In the case of large axial forces, the setting of shear keys in the grouting area can increase the bonding force.

Keywords: prefabricated high-pile wharf; integrated precast pile cap; lateral rigidity; grouting connection

近年来, 装配式高桩码头开始在水运行业兴起, 其预制构件多, 有利于开展机械化施工, 可大大减小水上现浇混凝土施工, 提高施工速度, 缩短工期。目前, 装配式高桩码头在国外应用较多, 在国内的应用仍处于起步阶段。国内已有一些专家、学者开展了研究, 江义等^[1]总结了装配式高桩码头的国内外应用现状、基本特点, 孟凡

奇^[2]介绍了一种盖帽式的装配式预制桩帽。总体来说, 现有的研究成果尚不够全面, 有必要对装配式高桩码头的结构方案、节点连接等问题开展进一步的研究。

本文依托南方某码头工程开展装配式码头结构方案研究。该项目原设计采用现浇横梁, 当地潮差大, 施工易受潮水影响, 不利于施工质量控

收稿日期: 2022-11-15

作者简介: 林学良 (1982—), 男, 高级工程师, 从事港口航道工程设计、港口发展研究、港口航道工程建设管理等工作。

制，故对码头的一个结构段进行装配式方案优化。设计方案采用一种一体式预制桩帽结构，将桩芯与桩帽结合一次性预制完成，能够有效保证结构质量，同时减少现场安放桩芯钢筋笼、浇筑桩芯桩帽等各项施工工序，提高施工效率。一体式预制桩帽与下部钢桩采用承插灌浆的方式连接，灌浆材料采用超高性能混凝土以保证接头的安全性。本文采用理论分析、数值模拟的方法对码头结构方案、灌浆连接方式等进行计算、分析。

1 码头结构方案

依托项目的主要设计条件：1) 码头设计船型为 5 万吨级散货船；2) 设计水位：极端高水位

9.17 m，设计高水位 7.67 m，设计低水位 0.25 m，极端低水位 -1.06 m；3) 项目区域场地岩土层主要有淤泥、淤泥质黏土、黏土、杂色卵石、强风化花岗岩等。表层软土厚度为 15~20 m。由此可知，项目区域主要特点为水位变化大，设计水位差达 7.43 m，施工受潮水影响较严重；地质条件较为复杂，表层软土厚度较大。

码头优化方案采用装配式结构，桩基采用全直桩以便上部一体式预制桩帽的安装，排架间距 10 m，每榀排架布置 6 根钢桩，前后轨道梁下布置双桩。桩基上方布置一体式预制桩帽，其上方布置预制横梁及预制纵梁，通过现浇节点连接，纵、横梁上方布置预制面板及现浇面层。码头断面见图 1。

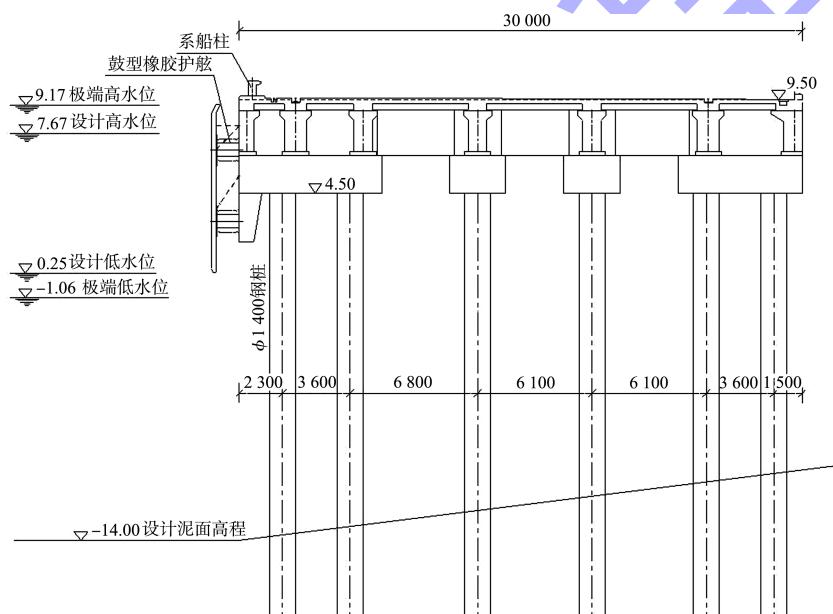


图 1 码头断面 (高程: m; 尺寸: mm)

全直桩码头结构的侧向刚度主要依靠桩身刚度。设计泥面较深、表层软土层厚度偏大时，桩基嵌固点较深、自由长度大、整体侧向刚度较弱，会导致码头使用期的位移偏大。为增强码头侧向刚度，需要提高桩截面的抗弯模量，设计方案考虑对桩基进行加强。首先对桩内进行清泥至嵌固点下方，然后在桩内灌注混凝土形成钢桩混凝土组合结构，从而提高整体结构的侧向刚度。根据 GB/T 51446—2021《钢管混凝土混合结构技术标准》^[3]，钢桩混凝土组合截面的抗弯刚度 $E_p I_p$ 可按式(1)计算：

$$E_p I_p = E_s I_s + E_c I_c \quad (1)$$

式中： E_p 为钢桩混凝土组合截面的弹性模量， N/mm^2 ； I_p 为钢桩混凝土的截面惯性矩， mm^4 ； E_s 为钢桩的弹性模量， N/mm^2 ； I_s 为钢桩的截面惯性矩， mm^4 ； E_c 为钢桩内混凝土的弹性模量， N/mm^2 ； I_c 为钢桩内混凝土的截面惯性矩， mm^4 。计算可得原单钢桩抗弯模量为 3 700 MPa。灌心后钢桩得到混凝土加强，单桩的截面抗弯模量可提高至 9 200 MPa。码头结构的侧向刚度大大提升。

2 一体式预制桩帽结构

本方案码头上部结构见图2。桩芯及桩帽部分采用一体式预制桩帽结构。一体式预制桩帽一般

由桩芯及桩帽组成。本项目一体式预制桩帽可分为单桩芯与双桩芯桩帽, 海侧的一体式预制桩帽可进一步与靠船构件结合。

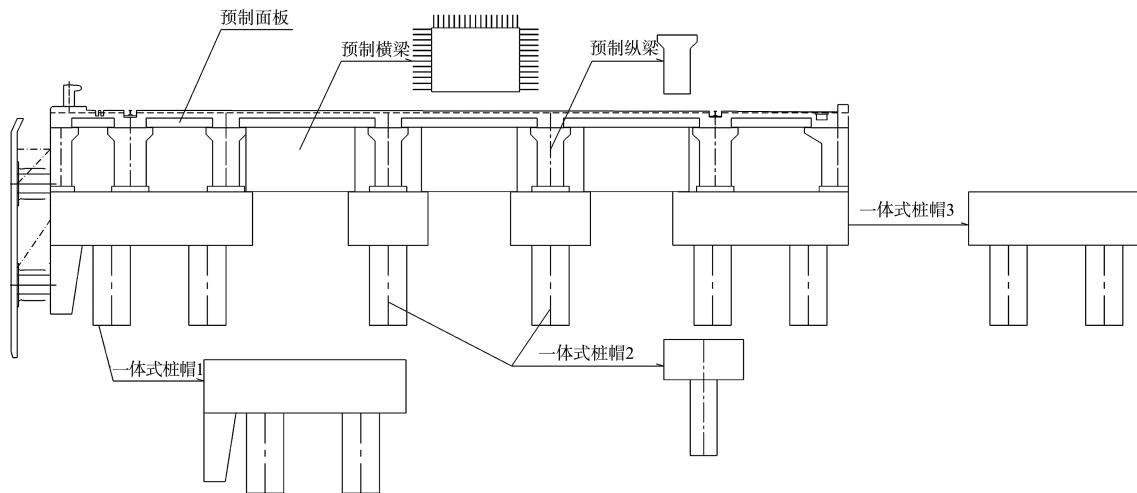


图2 码头上部结构

一体式预制桩帽结构将桩帽与桩芯结合一次性预制完成。现场安装时可直接将桩芯部分插入桩内，并通过压力注浆将桩芯部分与钢桩间空隙进行密实，一次性完成桩芯及桩帽的施工，能够有效减少现场安装桩芯钢筋笼及浇筑桩芯混凝土等工序，提高施工质量及效率。为了保证一体式预制桩帽的耐久性与施工便利性，设计中考虑以下措施：1) 桩帽底部与钢桩交接处设钢垫片，避免钢桩对桩帽底部产生局部破坏；2) 桩帽底部设槽口，待插入钢桩后，可将槽口采用灌浆密封，确保钢桩头部的耐久性；3) 预制桩帽与上节点连接的预留外伸钢筋设在桩帽四角，在四周形成固接，避免预留钢筋从中部外伸对预制纵、横梁的安放产生影响。一体式预制桩帽结构见图3。

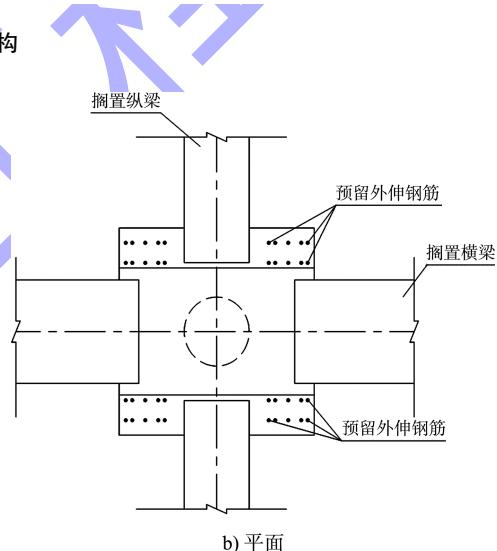


图3 一体式预制桩帽结构

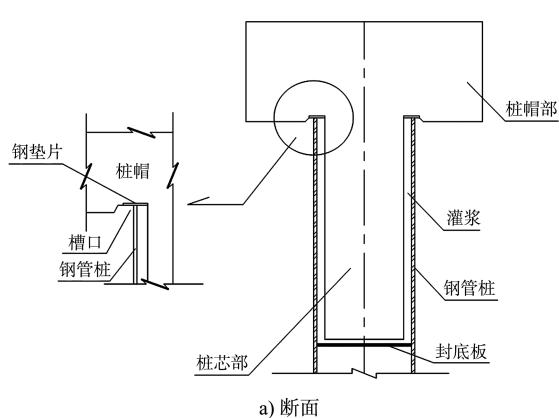
预制桩帽结构可根据 JTS 167—2018《码头结构设计规范》^[4]进行设计，桩帽受弯承载力可按式(2)(3)计算：

$$Fa \leq M_u \quad (2)$$

$$M_u = 0.85 A_a f_y h_0 \quad (3)$$

式中： F 为桩帽顶面一侧荷载合理的设计值，N； a 为外力臂，mm； M_u 为桩帽受弯承载力设计值，N·mm； A_a 为受拉钢筋截面面积， mm^2 ； f_y 为钢筋受拉强度设计值，MPa； h_0 为截面有效高度，mm。

桩帽顶面局部受压承载力可按式(4)~(7)计算：



$$F_{lu} = \frac{1}{\gamma_d} (\beta f_c + 2\rho_v \beta_{cor} f_y) A_1 \xi \omega \quad (4)$$

$$\beta = \sqrt{A_b/A_1} \quad (5)$$

$$\beta_{cor} = \sqrt{A_{cor}/A_1} \quad (6)$$

$$\xi = 1.205 \frac{h}{B_e} - 0.168 \quad (7)$$

式中: F_{lu} 为桩帽局部受压承载力设计值, N; γ_d 为结构系数; β 为混凝土局部承压强度提高系数; f_c 为混凝土轴心受压强度设计值, MPa; ρ_v 为间接钢筋的体积配筋率, A_{cor} 范围内单位混凝土体积中所包含的间接钢筋体积; β_{cor} 为配置间接

钢筋对局部承压强度的提高系数; f_y 为钢筋受拉强度设计值, MPa; A_1 为混凝土局部承压面积, mm^2 ; ξ 为桩帽的高宽比系数; ω 为局部受压应力不均匀系数; A_b 为局部承压计算底面积, mm^2 ; A_{cor} 为钢筋网或箍筋范围以内混凝土核心面积, 不大于 A_b , 且其重心应与 A_1 的重心重合, mm^2 ; h 为桩帽的高度, mm; B_e 为桩帽的宽度, mm。

桩帽裂缝宽度验算应符合现行行业标准 JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》^[5]的相关规定。按上述要求对一体式预制桩帽结构进行验算, 计算结果见表 1, 桩帽结构满足承载能力及正常使用要求。

表 1 承载能力极限状态验算

受弯荷载效应 (承载能力极限状态)/(kN·m)	承载能力/(kN·m)	局部受压荷载效应 (承载能力极限状态)/kN	承载能力/kN	裂缝(正常使用 极限状态)/mm	允许值/ mm
2 588	4 729	4 875	9 270	0.16	0.20

3 灌浆连接

3.1 灌浆材料

一体式预制桩帽与钢桩采用的承插式灌浆连接是本结构的重要部分, 为确保结构安全可靠, 灌浆材料考虑采用超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC)。国内对于 UHPC 已有不少应用, 欧阳伟^[6]介绍了 UHPC 的性能。UHPC 主要是由水泥、细骨料与石英砂、石英粉、硅灰等细颗粒、减水剂以及钢纤维按一定配比形成的新型水泥基工程材料, 具有超高的力学性能以及优异的耐久性。UHPC 与普通混凝土的主要性能对比见表 2。

表 2 UHPC 与普通混凝土的主要性能对比

材料	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa	弹性模量/GPa
UHPC	100~180	≥12	≥40
普通混凝土	30~60	2~5	30~40

通过 UHPC 灌浆, 连接部可形成由钢桩、UHPC 灌浆料、桩芯部组成的组合结构, 见图 4。截面上的材料强度及刚度由内向外梯次加强, 符合受力规律。

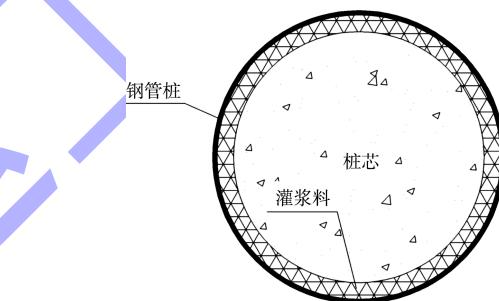


图 4 连接部分断面

3.2 灌浆长度

目前, 港工规范对于承插式灌浆连接的设计方法尚无明确规定。根据最新的外海固定钢结构规范 ISO 19902^[7], 灌浆长度可通过满足握裹力要求确定, 握裹力可按式(8)~(12)计算。

$$V = \tau_d u l \quad (8)$$

$$\tau_d = \frac{\tau_0}{\gamma_{R,g}} \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_0 = \left[\left(1.4 + \frac{600}{D_p} \right) + 140 C_p \left(\frac{h}{s} \right)^{0.8} \right] K^{0.6} f_{cu}^{0.3} \\ \tau_0 = \left(0.75 - 1.4 \frac{h}{s} \right) f_{cu}^{0.5} \end{array} \right. \quad (10)$$

$$\begin{cases} C_p = \left(\frac{D_p}{1000}\right)^2 - \left(\frac{D_p}{500}\right)^2 + 2 & (D_p > 1000 \text{ mm}) \\ C_p = 1.0 & (D_p \leq 1000 \text{ mm}) \end{cases} \quad (11)$$

$$K = \left[\left(\frac{D_p}{t_p} \right) + \left(\frac{D_s}{t_s} \right) \right]^{-1} + \frac{1}{m} \left(\frac{D_g}{t_g} \right)^{-1} \quad (12)$$

式中: V 为握裹力, kN; τ_d 为黏结力设计值, MPa; u 为接触面周长, m; l 为灌浆长度, m; $\gamma_{R,g}$ 为材料抗力系数, 取 2.0; τ_0 为黏结力标准值, MPa, 取式(10)计算结果的较小值; D_p 为桩芯外径, mm; C_p 为比例因子, 按式(11)计算; h 为剪力键高度, mm; s 为剪力键间距, mm; K 为刚度系数; f_{cu} 为灌浆料的立方体抗压强度, MPa; D_s 为钢桩外径, mm; t_s 为钢桩壁厚, mm; D_g 为灌浆体外径, mm; t_p 为桩芯壁厚, mm; t_g 为灌浆体厚度, mm; m 为钢材与灌浆体的刚度比。

按上述公式计算黏结力, 结果见表 3。GB/T 51446—2021《钢管混凝土结构技术规程》^[8](简称“规程”)中给出了灌浆材料与钢管之间黏结力 τ_0 的推荐值, 见表 3。

表 3 黏结力 τ_0 取值

规范	不同混凝土强度等级的 τ_0 /MPa					备注
	C40	C50	C60	C70	C80	
ISO 19902	0.62	0.66	0.70	0.73	0.76	无剪力键
	2.2	2.4	2.5	2.6	2.7	剪力键($s=1000 \text{ mm}$, $h=15 \text{ mm}$)
国内规范	0.43	0.45	0.60	0.55	0.60	无剪力键

根据上述结果可知, ISO 19902 及规程均考虑了灌浆料强度对黏结力的影响。ISO 19902 除考虑灌浆料强度外, 还考虑了承插构件的尺度对黏结力计算结果的影响。此外, 在灌浆区域设置剪力键能够大幅提升黏结力。

UHPC 的抗压强度可达 100 MPa 以上, 大于常用的灌浆料, 目前尚缺乏 UHPC 作为灌浆料的模型试验数据。建议国内项目现阶段可参考规程中的有关参数, 国外项目参考 ISO 19902 进行设计。对于轴力较大且灌浆长度受限导致黏结力无法满足

设计需要的情况, 可以考虑在灌浆区域设置剪力键, 能够大大提升黏结力, 但会增加现场施工工序, 同时对桩帽安装施工精度的要求更高。

本项目桩顶最大轴力为 6 719 kN。按 ISO 19902 及规程分别计算灌浆长度, 计算结果见表 4。根据计算结果, 综合考虑耐久性等因素, 本方案一体式预制桩帽的灌浆长度取 4.0 m, 同时设置间距 1 m, $h=15 \text{ mm}$ 的剪力键, 以保证安全性。

表 4 预制桩帽桩芯部分长度

规范	τ_0 /MPa	τ_d /MPa	l /m
ISO 19902(不含剪力键)	0.76	0.38	4.0
ISO 19902(含剪力键)	2.70	1.35	1.2
规程	0.60	0.30	5.0

4 结语

1) 一体式预制桩帽将桩芯与桩帽结合一次性预制完成, 可减少现场安装桩芯钢筋笼及浇筑桩芯混凝土等工序, 提高施工质量及效率。为便于一体式预制桩帽的安装, 码头一般采用全直桩, 对于前沿设计泥面较深、表层软土厚度较大的情况, 可采用桩内混凝土灌心的措施提高结构的整体侧向刚度。

2) 一体式预制桩帽的结构设计可参照现行码头结构设计规范进行, 本方案考虑了多项构造措施以保证桩帽结构的耐久性及施工便利性。

3) 一体式预制桩帽与钢桩采用承插灌浆连接, 为确保结构安全, 灌浆料可采用性能优良的 UHPC, 灌浆长度可按握裹力计算, 计算方法可参考 ISO 19902 进行, 对于轴力较大的情况, 可在灌浆区域设置剪力键, 能够大大增加黏结力。

参考文献:

- [1] 江义, 程泽坤, 吴志良, 等. 装配式桩基码头设计建造应用现状与展望[J]. 水运工程, 2018(6): 103-109.
- [2] 孟凡奇. 高桩码头预制桩帽装配式施工技术经济分析[J]. 珠江水运, 2022(11): 114-116.
- [3] 清华大学. 钢管混凝土混合结构技术标准: GB/T 51446—2021[S]. 北京: 中国建筑出版传媒有限公司. 2021.

(下转第 54 页)