



水上高桩墩台底模板支撑结构优化设计*

牛浩蕴, 雷鸣

(中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040)

摘要: 水上高桩墩台结构在桥梁、码头等结构建设中较为常见, 施工难度较大, 各类措施的成本控制是施工单位优先考虑的因素之一。依托福州港三都澳港区漳湾作业区18[#]~20[#]泊位工程, 对该工程变电所平台的底模板支撑结构原设计方案进行优化并调整施工组织, 在保证支撑结构承载力的同时, 减少支撑钢材用量, 最终在依托工程中成功浇筑变电所平台并通过验收, 节约施工成本81.3万元。

关键词: 水上高桩墩台; 底模板支撑结构; 优化设计; 成本节约

中图分类号: U656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)06-0063-06

Optimized design on bottom formwork support structure of pile-supported piers above water

NIU Haoyun, LEI Ming

(CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China)

Abstract: The structure of pile-supported pier is quite common in the construction of bridges, wharves, and other structures, and its construction is relatively difficult. The cost control of various measures is one of the factors that construction units consider first. On the basis of the project of 18[#] to 20[#] berths in Zhangwan working area of Sandu Bay area of Fuzhou Port, the original design scheme of the bottom formwork supporting structure of the substation platform for this project is optimized, and the construction organization is adjusted. The consumption of supporting steel is reduced when the bearing capacity of the support structure is ensured. Finally, the substation platform is successfully cast in the project and passed the acceptance, saving construction costs of 813,000 yuan.

Keywords: pile-supported pier above water; bottom formwork supporting structure; optimized design; cost saving

水上现浇墩台施工可采用的施工方法包括围堰^[1]、钢套箱^[2]、逆向支撑法^[3]以及底模板支撑结构等。对于规模较小的墩台, 使用围堰的成本较高、工艺流程复杂, 在海底管线附近进行围堰施工时存在安全风险; 钢套箱适用于标准化墩台施工, 但当墩台尺寸和断面不规则时, 其通用性较差; 逆向支撑法需要将整个结构吊装入水, 当模板和钢筋质量较大时, 需要大型水上起重设备, 并且模板在吊装过程中也容易变形^[4]。底模板支

撑结构主要由桩上支座、主梁、分配梁等组成, 常用的支座结构包括钢抱箍和钢牛腿^[5], 钢抱箍在预应力高强度混凝土(PHC)桩应用较为普遍, 对于钢管桩, 钢牛腿和钢抱箍均可选择, 但焊接钢牛腿的连接强度更好, 承载能力更高, 并且能够用于斜桩施工^[6]。支座、主梁和分配梁等结构的布置形式直接影响底模板支撑结构的承载能力和施工成本, 对支撑结构的设计优化能够在一定程度上加快施工进度、降低成本。

收稿日期: 2024-09-05

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB2604204)

作者简介: 牛浩蕴(1993—), 男, 硕士, 工程师, 从事水工工程施工工艺优化和结构设计优化。

1 工程概况

福州港三都澳港区漳湾作业区 18#~20#泊位工程位于福建省宁德市蕉城区三都澳西北部，距宁德市区约 15 km，工程新建 3 个 5 万吨级通用散货泊位及相应的配套设施，水工建筑物由码头平台、变电所平台、引桥、明渠及渠桥组成。码头变电所平台位于 19#泊位码头平台西南侧、44#排架西北侧，平台下部已施工完成的桩基为 $\phi 1\ 200\text{ mm}$ 钢管桩，桩中心最大间距为 7.3 m，上部为墩台结构，顶高程 9.50 m、长 35 m、宽 20 m、厚 2 m，平台底模板支撑结构以下部钢管桩为基础，平台平面和桩位见图 1。

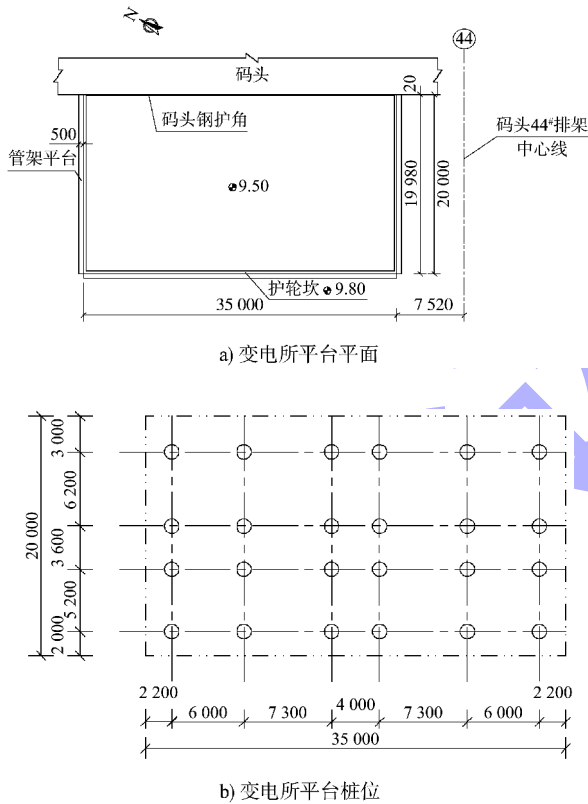


图 1 变电所平台 (尺寸: mm; 高程: m)

Fig.1 Substation platform (dimension: mm; elevation: m)

2 底模板支撑结构优化设计

2.1 原设计方案

本工程变电所平台体积较大，为保证底模板支撑结构的承载力，需要进行专项设计。传统的底模板支撑结构由纵横布置的工字钢构成，随着平台体积的增大，支撑结构用钢需求直线上升。考虑到工程经济性，传统的底模板支撑结构设计

有待改进。

变电所平台底模板支撑结构采用牛腿法进行施工。牛腿采用双拼工 56a 型钢，焊接采用双面焊缝，焊高不小于 10 mm。牛腿以上依次布置工 56a 主梁、双拼工 20a 分配梁和截面边长为 10 cm 长方体木条作为平台底模板支撑结构。第 1 阶段进行平台下层厚 1 m 区域的钢筋模板混凝土施工，钢筋和模板一次安装完成，混凝土一次浇筑完成后不拆侧模，养护至混凝土强度满足上层作业要求后，进行第 2 阶段即上层混凝土浇筑，直至平台顶部。

主梁根据每跨长度不同，间距分别为 0.7、1.0 和 0.8 m，分配梁间距 0.3 m，其上满铺间距 0.1 m 的长方体木条，材料用量见表 1。变电所平台两侧及海侧均设有宽 1m 镂空钢构施工通道作为工人作业平台。变电所平台底模及作业平台总长度 37 m、总宽度 20.98 m，两侧及海侧设高 1.2 m 脚手架护栏。

表 1 原设计方案变电所平台底模板支撑结构材料用量
 Tab.1 Supporting structure material consumption for substation platform bottom template of original design scheme

材料名称	材料类型	规格	用量/m
牛腿	Q235B 钢	双拼工 56a	85.2
主梁	Q235B 钢	工 56a	960.0
分配梁	Q235B 钢	双拼工 20a	1 779.4
长方体木条	松木	截面边长 10 cm	7 400.0

2.2 优化设计方案

原变电所平台底模板支撑结构用钢量较大，经济性较差。经反复比选研讨，调整施工组织后，提出优化后的底模板支撑结构设计方案。

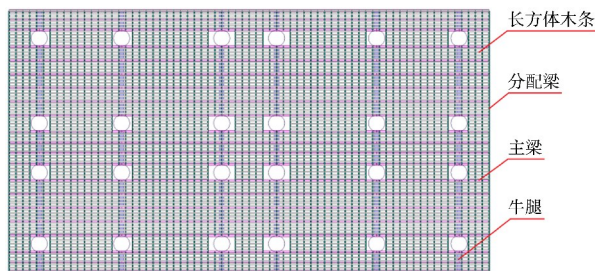
调整后的变电所平台分 3 个阶段施工完成：第 1 阶段进行底层厚 0.5 m 平台的钢筋绑扎、模板安装和混凝土浇筑施工，混凝土浇筑完成后不拆侧模；养护至混凝土强度满足上一层作业要求后，进行第 2 阶段即中层厚 0.8 m 混凝土施工；最后进行第 3 阶段即顶层厚 0.7 m 混凝土施工，直至完成全部变电所平台施工^[7]。相比原设计方案，本方案增加浇筑 1 层混凝土，减少了初次浇筑的混凝土荷载，并且钢筋和模板也采取分层施工，能够在一定程度上减少返工现象，提升施工经

济性和安全性, 优化后的支撑系统搭设更为快捷高效, 一定程度上能够节省变电所平台施工的工期。

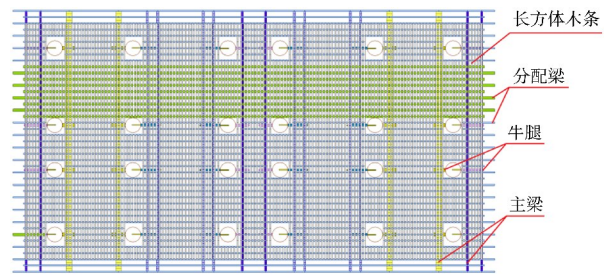
优化后的变电所平台底模板支撑结构仍然采用牛腿法进行施工, 由下至上依次布置槽 18a 斜撑, 工 56a、单拼及双拼工 40a 牛腿, 工 56a、单拼及三拼工 40a 主梁, 单拼及双拼工 20a 分配梁, 截面边长 10 cm 长方体木条^[8]。其中跨度 6 m 的 16 根牛腿采用双拼工 40a 型钢, 跨度 7.3 m 的 16 根牛腿采用工 56a 型钢, 其余 16 根牛腿采用工 40a 型钢。牛腿焊接采用双面焊缝, 焊高不小于 10 mm^[9]。对于主梁, 跨度 6 m 的 4 排主梁采用三拼工 40a 型钢, 跨度 7.3 m 的 8 排主梁采用工 56a 型钢, 其余 6 排主梁采用工 40a 型钢。分配梁间距 0.5 m, 其上满铺间距 0.25 m 的长方体木条^[10], 材料用量见表 2。变电所平台底模板支撑结构原设计与优化设计对比见图 2。

表 2 优化设计方案底模板支撑结构材料计划
Tab. 2 Bottom template supporting structure material plan of optimized design scheme

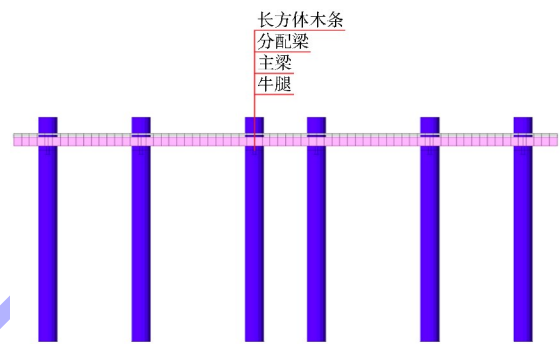
材料名称	材料类型	规格	数量/m
牛腿	Q235B 钢	工 56a	24
	Q235B 钢	双拼工 40a	16
	Q235B 钢	工 40a	22
主梁	Q235B 钢	工 56a	168
	Q235B 钢	工 40a	126
	Q235B 钢	三拼工 40a	84
分配梁	Q235B 钢	工 20a	1 232. 4
	Q235B 钢	双拼工 20a	325
斜撑	Q235B 钢	槽 18a	71. 28
长方体木条	松木	截面边长 10 cm	2 679



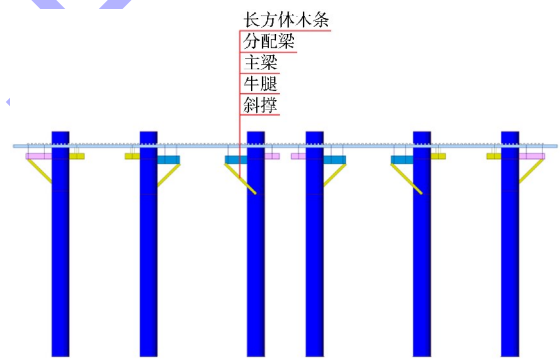
a) 原设计底模支撑结构平面



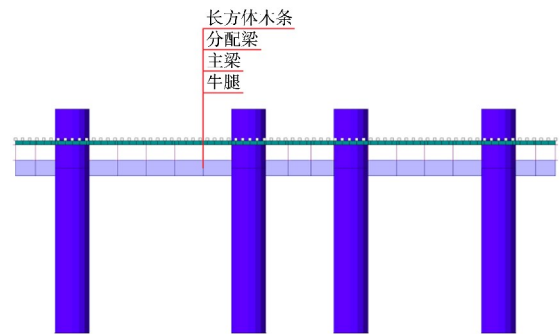
b) 优化设计底模支撑结构平面



c) 原设计底模支撑结构立面



d) 优化设计底模支撑结构立面



e) 原设计底模支撑结构断面

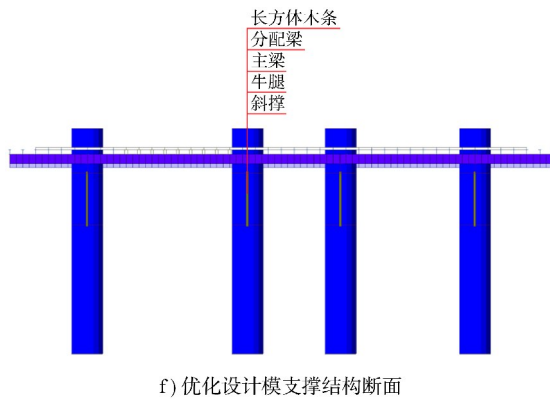


图2 底模支撑结构优化前后对比

Fig. 2 Comparison of bottom template supporting structure before and after optimization

3 结构验算

3.1 荷载取值

采用有限元计算方法，通过 Midas Civil 软件，建立优化设计方案底模板支撑结构三维模型，计算混凝土荷载、模板荷载、施工荷载以及振动荷载作用下支撑结构的应力和位移峰值，验算结构强度。

首次浇筑平台下层混凝土时，支撑结构受力最大，因此以下层混凝土浇筑为计算工况，将荷载转化为线荷载，具体荷载计算见表3。

表3 优化设计方案底模板支撑结构强度验算荷载取值
Tab. 3 Strength check load value for bottom template supporting structure of optimized design scheme

荷载类型	荷载工况	荷载取值/(kN·m ⁻¹)
混凝土荷载	长方体木条间距 0.25 m, 混凝土重力密度 25 kN/m ³ , 浇筑厚度 0.5 m	3.13
模板荷载	侧模板重力 322.59 kN, 底模板重力 56.2 kN, 拉杆重力 12.06 kN	0.15
施工荷载	施工荷载取 2.5 kPa	0.63
振动荷载	振动荷载取 2 kPa	0.50

强度验算时，支撑结构重力、混凝土荷载和模板荷载组合系数取 1.35，施工荷载和振动荷载组合系数取 1.5；刚度验算时，各系数均取 1。

3.2 强度验算

经计算，牛腿最大弯应力为 118.84 MPa，主梁最大弯应力为 124.42 MPa，分配梁最大弯应力为 100.68 MPa，斜撑最大弯应力为 85.29 MPa，均小于抗弯设计值 215 MPa；牛腿最大剪应力为 67.98 MPa，主梁最大剪应力为 41.42 MPa，分配

梁最大剪应力为 25.05 MPa，斜撑最大剪应力为 0.84 MPa，均小于抗剪设计值 125 MPa。长方体木条的最大弯应力为 4.19 MPa，小于松木抗弯设计值 11 MPa，长方体木条最大剪应力为 0.56 MPa，小于松木抗剪设计值 1.1 MPa。从强度计算结果上看，支撑结构的强度均小于设计值，满足 GB 50017—2017《钢结构设计规范》^[11]的要求。牛腿和主梁强度计算结果见图3。

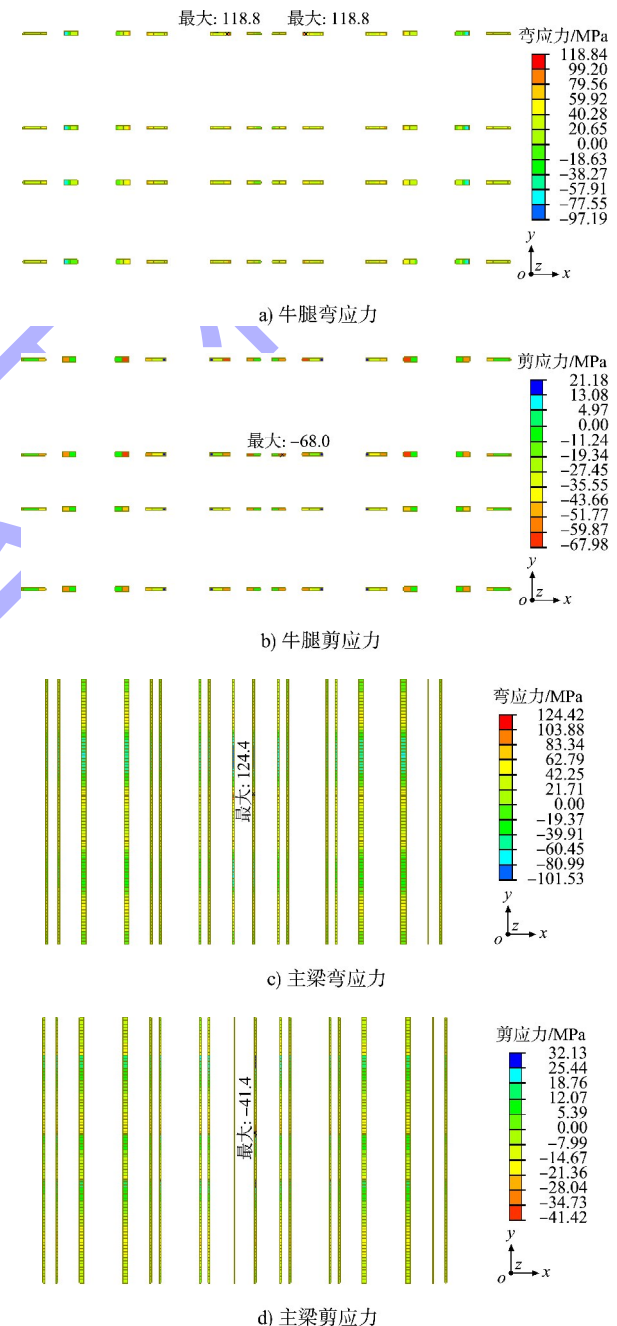


图3 牛腿和主梁强度计算结果
Fig. 3 Strength calculation results of bracket and main beam

3.3 刚度验算

经计算,悬臂牛腿最大位移 $f_{\max} = 6.07$ mm(小于最大允许值 7.5 mm),主梁最大位移 $f_{\max} = 7.44$ mm(小于最大允许值 15.5 mm),分配梁最大位移 $f_{\max} = 8.63$ mm(小于最大允许值 8.75 mm),斜撑最大位移 $f_{\max} = 6.07$ mm(小于最大允许值 7.42 mm),满足 GB 50017—2017《钢结构设计规范》的要求。牛腿和主梁最大位移见图 4。

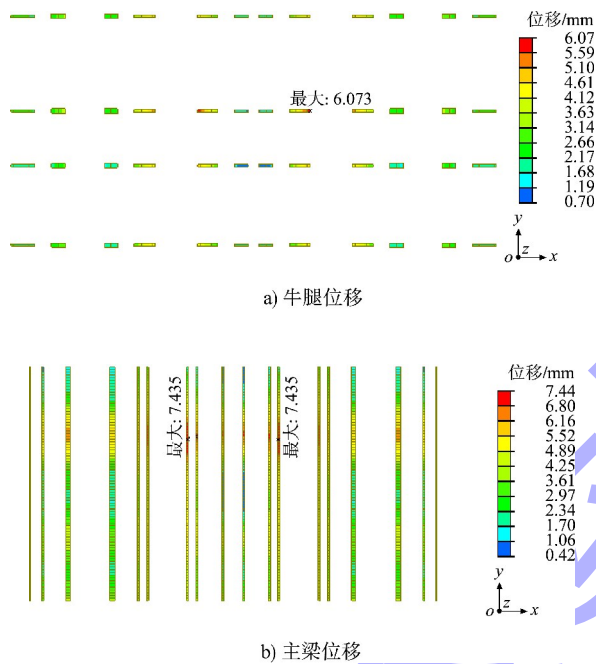


图 4 牛腿和主梁位移计算结果

Fig. 4 Calculation results of bracket and main beam displacement

3.4 牛腿焊缝强度验算

牛腿与钢管桩焊接连接的焊缝按直角焊缝计算,焊脚尺寸为 10 mm,根据 JTS 152—2012《水运工程钢结构设计规范》^[12]的规定,直角角焊缝在通过焊缝形心的拉力、压力或剪力单独作用下,作用力垂直于焊缝长度方向时,强度应满足式(1)的要求;当作用力平行于焊缝长度方向时,强度应满足式(2)的要求;按焊缝有效截面计算的直角焊缝在垂直于焊缝长度方向正应力和沿焊缝长度方向剪应力的共同作用下,强度应满足式(3)要求。

$$\sigma_f = \frac{N}{h_e l_w} \leq \beta_f f_{f, \omega} \quad (1)$$

$$\tau_f = \frac{N}{h_e l_w} \leq f_{f, \omega} \quad (2)$$

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_f}{\beta_f}\right)^2 + \tau_f^2} \leq f_{f, \omega} \quad (3)$$

式中: σ_f 为垂直于焊缝长度方向的正应力,MPa; N 为轴向拉力或轴向压力设计值,N; h_e 为角焊缝的计算厚度,mm,对直角焊缝取 $0.7h_f$,其中 h_f 为焊脚尺寸,取 10 mm; l_w 为角焊缝的计算长度,mm,对每条焊缝取其实际长度减去 $2h_f$; β_f 为正面角焊缝的强度设计值增大系数,对直接承受动荷载的结构取 1.0,对承受静力荷载和间接承受动荷载的结构取 1.22; $f_{f, \omega}$ 为角焊缝的强度设计值,MPa,取 160 MPa; τ_f 为沿焊缝长度方向的剪应力,MPa。

经有限元模拟计算,双拼工 40a 牛腿最大剪力为 445.53 kN,单拼工 56a 牛腿最大剪力为 372.10 kN,单拼工 40a 牛腿最大剪力为 247.55 kN。代入式(1)~(3)分别计算,三者垂直于焊缝长度方向的正应力分别为 86.95、97.72、78.94 MPa,均小于 $\beta_f f_{f, \omega}$ 的值 195.2 MPa,故满足要求;三者沿焊缝长度方向的剪应力分别为 91.71、53.37、50.96 MPa,均小于 160 MPa,故满足要求;三者折算应力分别为 116.15、138.26、82.36 MPa,均小于 160 MPa,故所有牛腿焊缝强度均满足 JTS 152—2012《水运工程钢结构设计规范》要求。

4 成本分析

原设计与优化设计方案的材料费用见表 4。可以看出,优化设计方案节省材料费用 74.9 万元。此外,原设计方案搭设底模支撑结构需要 20 d,优化设计方案只需 10 d,在人工费以及材料租赁费用方面共计节约 6.4 万元。综上所述,变电所平台优化设计后节约成本 81.3 万元。

表4 变电所平台优化设计前后材料费用
Tab.4 Material costs before and after optimization design of substation platform

材料	费用/万元	
	原设计方案	优化设计方案
牛腿	10.5	3.5
主梁	59.2	24.9
分配梁	54.6	28.9
长方体木条	13.3	4.8
斜撑	-	0.6
合计	137.6	62.7

5 结语

1) 底模板支撑结构牛腿建议沿墩台长度方向设置, 采用短牛腿, 而非桩间连续长牛腿, 必要时牛腿下方设置斜撑。

2) 根据不同跨度荷载情况不同, 可采用不同截面型钢作为牛腿、主梁和分配梁, 从而在满足承载力要求的同时, 有效减少用钢量。

参考文献:

- [1] 熊饶林, 黄谦. 深水基础锁扣式钢管围堰施工与现场安全监控技术[J]. 交通世界, 2022(26): 141-143.
XIONG R L, HUANG Q. Construction and site safety monitoring technology of locked steel pipe cofferdam in deep water foundation [J]. Transport world, 2022 (26): 141-143.
- [2] 潘立泉, 陶盛强. 宁波舟山港主通道北通航孔桥主墩承台封底关键技术[J]. 世界桥梁, 2021, 49(1): 14-19.
PAN L Q, TAO S Q. Key pile cap base sealing techniques for main piers of north navigational channel bridge of Ningbo-Zhoushan Port main link [J]. World bridges, 2021, 49(1): 14-19.
- [3] 郭生昌, 刘冰. 逆向支撑底模反吊在水中防撞墩台施工中的应用[J]. 水运工程, 2017(11): 205-208.
GUO S C, LIU B. Application of reverse supporting system for bottom formwork used in the underwater pier construction[J]. Port & waterway engineering, 2017(11): 205-208.
- [4] 覃俊锋, 林云, 许建武. 水位变动区桩-墩结构反吊底模技术应用研究[J]. 中国港湾建设, 2024, 44(1): 79-84.
QIN J F, LIN Y, XU J W. Research on application of reverse lifting base mould technology for pile-pier structure in water level fluctuation zone[J]. China harbour engineering, 2024, 44(1): 79-84.
- [5] 张兵, 张宇. 高桩码头墩台结构施工技术研究[J]. 珠江水运, 2021(15): 106-107.
ZHANG B, ZHANG Y. Research on construction technology of pier and platform structure of high pile pier [J]. Pearl River water transport, 2021(15): 106-107.
- [6] 王敖. 外海高桩码头墩台混凝土施工技术研究[J]. 珠江水运, 2024(5): 117-119.
WANG A. Research on concrete construction technology of high pile pier in offshore [J]. Pearl River water transport, 2024(5): 117-119.
- [7] 杨敏龙. 水上大型高桩墩台在游艇码头中的施工技术[J]. 福建交通科技, 2021(9): 92-94, 105.
YANG M L. Construction technology of large high pile pier on water in marina [J]. Fujian transportation science and technology, 2021(9): 92-94, 105.
- [8] 蔡福旺, 林旺孙. 滚装船变坡道大墩台模板设计[J]. 水运工程, 2005(7): 70-73.
CAI F W, LIN W S. Variable ramp large abutment pier formwork design for ro/ro vessels [J]. Port & waterway engineering, 2005(7): 70-73.
- [9] 周英, 张晓光, 陈花美. 大体积混凝土高桩墩台的施工设计[J]. 中国港湾建设, 2007(3): 52-54.
ZHOU Y, ZHANG X G, CHEN H M. Construction design for mass concrete for platform on steel tubular piles [J]. China harbour engineering, 2007(3): 52-54.
- [10] 胡山松. 码头施工项目中大体积混凝土高桩墩台的施工设计[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(1): 157-158.
HU S S. Construction design of large volume concrete high pile pier in wharf construction project [J]. China water transport (the second half of the month), 2019, 19(1): 157-158.
- [11] 钢结构设计规范: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Standard for design of steel structures: GB 50017-2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [12] 水运工程钢结构设计规范: JTS 152—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
Code for design of steel structures in port and waterway engineering: JTS 152-2012[S]. Beijing: China Communications Press, 2012.

(本文编辑 王聰)