



# 预制嵌入式桩帽结构设计及施工技术研究

王千星, 姜利清, 马顺顺

(中建港航局集团有限公司, 上海 200433)

**摘要:** 针对高桩码头桩顶长期淹没情况下, 桩帽采用传统现浇方式施工周期长、质量难控等问题, 依托某工程进行装配式桩帽预制结构及施工技术研究。通过桩帽内预埋工字钢设计, 利用桩身自承重解决了桩帽施工对底模板及临时支撑体系的依赖, 简化施工流程; 通过“钢筋+型钢”的桩芯钢筋笼设计, 实现斜桩顶部桩芯钢筋笼垂直伸入预制桩帽的空腔内, 加强了连接强度; 通过钢抱箍封底兜浆与预留注浆、排水孔设计, 实现水下的高效密封灌浆, 增强了结构整体性。应用结果表明, 该结构及施工技术有效克服了潮汐水位的影响, 显著降低水下施工难度与质量风险, 缩短施工工期约 65%, 节省人力约 25%。

**关键词:** 预制桩帽; 桩身自承重; 密封体系; 水下灌浆; 施工技术

中图分类号: U655.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)03-0212-06

## Design and construction technology of prefabricated embedded pile cap structure

WANG Qianxing, JIANG Liqing, MA Shunshun

(China State Construction Harbour and Channel Engineering Group Co., Ltd., Shanghai 200433, China)

**Abstract:** In response to the long-term submergence of the pile top in a pile supported wharf, the traditional cast-in-place method for pile caps has long construction periods and difficult quality control. On the basis of a certain project, the research on prefabricated structures and construction technologies for prefabricated pile caps is conducted. Through the design of pre-embedded I-beam in the pile cap, the self bearing capacity of the pile body is utilized to solve the dependence of pile cap construction on the bottom formwork and temporary support system, simplifying the construction process. By designing the pile core reinforcement cage with “steel bars + section steel”, the vertical extension of the top pile core reinforcement cage of the inclined pile into the cavity of the prefabricated pile cap is achieved, strengthening the connection strength. By using steel clamps to seal the bottom of the grouting and designing reserved grouting and drainage holes, efficient sealing grouting underwater is achieved, enhancing the overall structural integrity. The application results show that the structure and construction technology effectively overcome the influence of tidal water level, significantly reduce the difficulty and quality risks of underwater construction, shorten the construction period by about 65%, and save about 25% of manpower.

**Keywords:** prefabricated pile cap; self bearing capacity of the pile body; sealing system; underwater grouting; construction technology

在现代码头建设领域, 传统的现浇施工工艺存在一系列问题, 如施工周期长, 受天气、季节等自然因素影响大, 混凝土现场浇筑质量难以保证, 易出现裂缝、蜂窝麻面等缺陷, 而且施工现场湿作业多, 对环境造成较大污染。装配式码头正以其施工速度快、质量可控、环境影响小等优点,

逐步成为极具潜力的一种新型结构。

1950年, 美国著名的核桃路纪念桥(Walnut Lane Memorial Bridge)首次使用预应力预制混凝土, 标志着预应力预制混凝土开始应用于建筑行业<sup>[1]</sup>。发展至今, 其在码头结构方面也有一些研究, 如林岳等<sup>[2]</sup>对装配式预制混凝土U形槽结构、

收稿日期: 2025-06-04 录用日期: 2025-06-26

作者简介: 王千星(1989—), 男, 博士, 高级工程师, 从事港航工程施工技术方面的研究工作。

密排桩式挡浪墙结构等水工结构进行了设计创新并应用,解决了预制结构现浇节点钢筋搭接冲突问题;鲁军等<sup>[3]</sup>对大体积横梁装配式模板及钢筋笼一体化关键施工技术进行研究,提出一种装配化模板及钢筋笼一体化施工技术;李武等<sup>[4]</sup>针对高桩码头装配化率低的问题,首次提出高桩码头横梁装配形式;孟凡奇<sup>[5]</sup>依托盛虹炼化一体化码头工程开展了桩帽装配式施工经济效益研究,并在现场成功进行了实施验证;郭兆珈等<sup>[6]</sup>和徐俊等<sup>[7]</sup>通过大量的理论和试验研究,提出以大构件、高装配率为总体设计理念的全装配式高桩码头,并成功应用于连云港某码头;冯先导等<sup>[8]</sup>和林红星等<sup>[9-10]</sup>针对预制一体化桩芯桩帽结构,通过模型试验研究其结构承载性能和安装工艺;任彧等<sup>[11]</sup>采用基于混凝土损伤塑性模型的弹塑性有限元分析方法,对装配式板柱节点的抗冲切性能展开研究;崔磊等<sup>[12]</sup>针对高桩码头整体预制装配式横梁与桩帽难以采用常规的外伸钢筋连接的问题,依托实际工程,提出一种采用型钢及梁内预留孔洞后灌浆的型钢替代法;林学良等<sup>[13]</sup>采用有限元数值模拟方法对预制桩帽结构及节点力学性能进行研究。

以上研究多局限于码头整体装配式施工技术以及桩帽与横梁之间的连接性能,针对桩帽需要依赖底模板及临时支撑体系且水下模板安装精度难以控制的难题研究较少。本文依托某工程实际需求,开展抱箍+预制嵌入式桩帽结构设计及施工技术研究。相关研究结果具有十分重要的工程价值,也可服务于后续装配式桩帽结构设计及施工。

## 1 工程概况

某工程的码头平台,共8个结构段,采用高桩梁板式结构形式,总长度508 m,桩型采用直径1 m的预应力高强度混凝土(pre-stressed high-strength concrete, PHC)桩。码头上部结构中,纵横梁均为钢筋混凝土叠合梁结构,纵横梁通过桩帽与下部桩基相连。单个桩帽横向宽度2.200~5.475 m,纵向宽度2.0 m,厚1.4 m。

工程区域为半日潮,1 d内潮位两起两落,且潮位落差较大,第2~8结构段设计桩帽底高程

0.35 m,根据桩帽施工情况,每天有效工作时间仅4~6 h,第1结构段桩帽底高程为-0.35 m,有效工作时间仅3~4 h,对桩帽和打桩施工影响极大。尤其是内档的1条轴线存在1条汽车坡道,4只桩帽底高程-1.15 m,根据潮汐表,该处桩帽底高程长期低于长江潮汐水位,需要水下施工。

为了实现长期处于潮位以下的高桩码头桩帽顺利施工,降低桩帽施工质量控制难度及底模板依赖性,依托该工程开展预制桩帽结构设计研究。对抱箍+预制嵌入式桩帽的结构形式、施工技术进行研究,以期形成针对内河高桩码头装配式桩帽结构设计和施工的指导性方法。

## 2 预制嵌入式桩帽结构设计

预制嵌入式桩帽基于传统的桩帽结构进行设计,其主体结构配筋与传统现浇桩帽相同,两者的差异性在于桩帽承重体系、桩-桩帽节点设计以及密封体系。抱箍+预制嵌入式桩帽结构形式见图1。

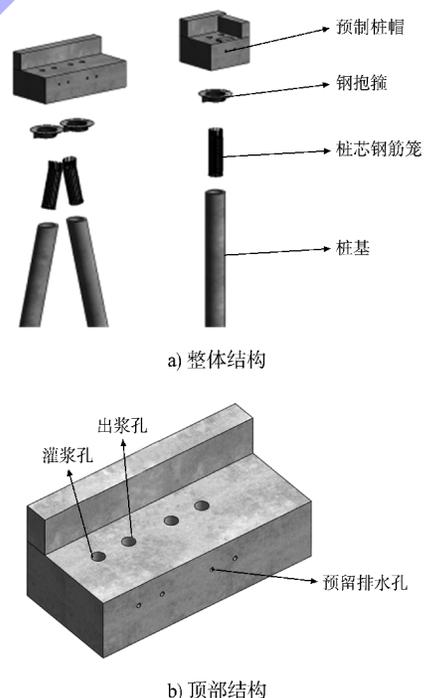


图1 预制嵌入式桩帽模型

Fig. 1 Prefabricated embedded pile cap model

### 2.1 预制嵌入式桩帽承重体系设计

现有预制桩帽安装依赖底模板及临时支撑体系,施工工序繁杂,施工进度缓慢,故采用空腔

内部预理工字钢和底部抱箍的组合作为预制桩帽的承重体系，见图 2。通过预理工字钢将预制桩帽架设在桩顶，发挥桩身自承重的作用，桩帽底部安放的钢抱箍辅助预制桩帽承重体系发挥作用，极大简化了支撑体系。

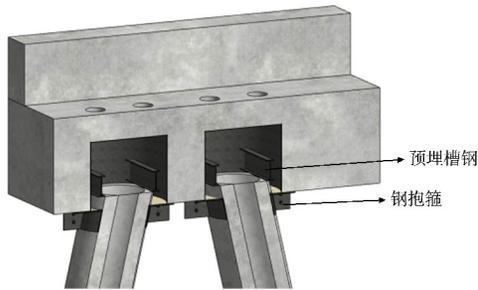


图 2 预制桩帽承重体系  
Fig. 2 Prefabricated pile cap bearing system

### 2.2 预制嵌入式桩帽节点设计

从提高桩帽水上安装精度和灌浆质量的角度出发，嵌入式桩帽内部采用空腔设计，见图 3。桩帽预制时根据实际沉桩的桩位偏差在内部预留钢套筒柱体空腔，桩基伸入桩帽内一定长度。贯穿空腔两侧的预理工字钢作为桩帽安装搁置支点，搁置在切割齐平的桩基顶部，其外伸段嵌入桩帽混凝土内部。空腔顶部预留 2 个直径 0.25 m 灌浆口和出浆口，预制桩帽侧面预留 2 个排水孔将空腔与外部贯通，用于灌浆时排出空腔内部积水。

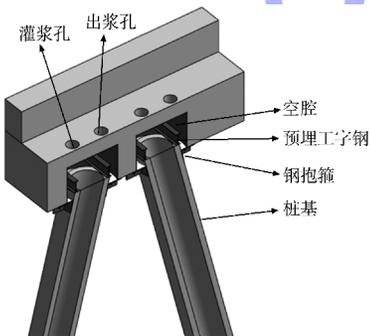


图 3 预制嵌入式桩帽节点构造  
Fig. 3 Structure of prefabricated embedded pile cap nodes

### 2.3 桩芯钢筋笼加强设计

由于空腔设置为竖直方向，无法与部分桩基的斜度扭角相匹配，因此设计弯折的 4 根 [32a 加强槽钢组替代钢筋伸入空腔内部<sup>[14]</sup>，伸入空腔的内部型

钢增加环形加强钢筋，桩芯钢筋笼构造见图 4。

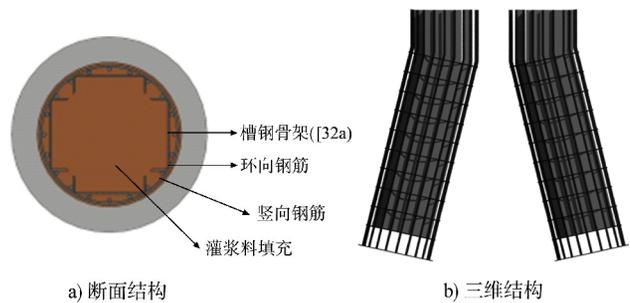


图 4 桩芯槽钢加强结构  
Fig. 4 Reinforcement structure of pile core channel steel

### 2.4 密封体系设计

桩帽安装就位后，空腔内部采用 C80 灌浆料进行灌浆，采用新型钢抱箍结构进行灌浆料的封底，主要发挥其封堵止浆作用，封底抱箍安装于桩帽底高程位置。钢抱箍采用厚 0.003 m 薄钢板加工而成，高度为 0.3 m，抱箍顶部环形封堵板采用厚 0.005 m 钢板，环形宽度 0.35 m，沿环形内圈将封堵板与抱箍焊接连接，并在抱箍侧壁焊接三角形加肋板加强连接强度。抱箍焊接完成后，在抱箍内壁对称焊接 4 个厚 0.005 m 连接板，抱箍安装前沿封堵板外环粘贴厚 0.05 m 泡沫止浆条，见图 5。

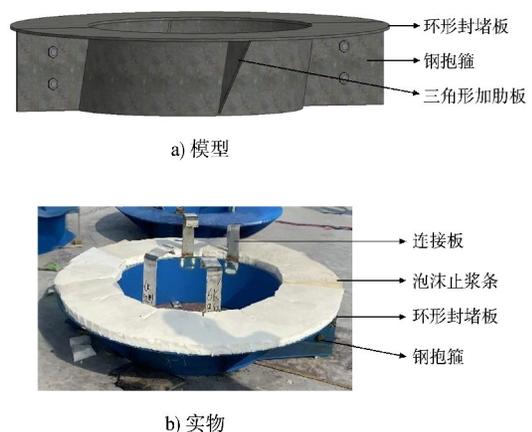


图 5 封底抱箍模型与实物  
Fig. 5 Model and physical object of bottom clamp

## 3 预制嵌入式桩帽施工技术

### 3.1 施工工艺流程

传统码头现浇桩帽施工工艺采用架设围檩结构、绑扎钢筋、安装模板、现浇混凝土、拆模、拆

除底部围檩等工序, 而预制嵌入式桩帽施工工艺主要包括管桩桩头环切、钢筋笼安装、桩芯混凝土导

管法浇筑、钢抱箍安装、桩帽安装与调整、灌浆等, 见图 6。施工工序得到很大程度的简化。

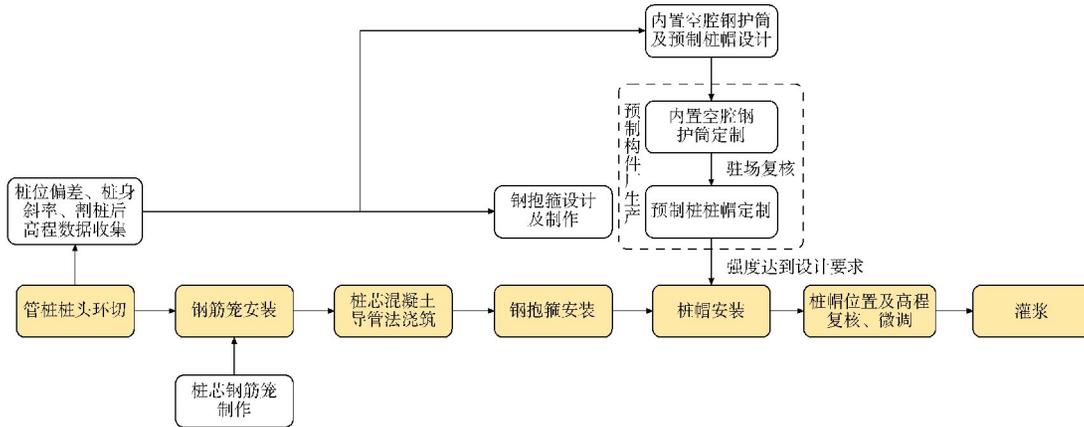


图 6 预制嵌入式桩帽施工工艺流程

Fig. 6 Construction process of prefabricated embedded pile cap

### 3.2 施工顺序

#### 3.2.1 施工前数据精测

预制桩帽安装施工的关键在于安装精度的控制。为了确保安装完成后各搁置平面贴合、空腔钢套筒轴线与管桩顶部桩芯钢筋笼轴线重合、预制桩帽平面尺寸误差符合设计及规范要求, 需要实际采集桩基实际位置、桩顶高程以及桩身斜率等数据, 量身定制每一个桩帽。

#### 3.2.2 管桩水下精准切割

桩顶设计高程低于最低潮位。为保证割桩平面的平整度采用水下绳锯切割, 由潜水员水下安装绳锯切割导向架, 见图 7。



图 7 水下切割导轨安装

Fig. 7 Installation of underwater cutting guide rail

#### 3.2.3 桩芯钢筋笼安装

桩基根据设计要求伸入承台, 钢筋笼伸入空腔内部型钢增加环向加强筋, 钢筋笼采用小型吊机船进行吊装。

#### 3.2.4 桩芯混凝土浇筑

混凝土泵车以已建引桥部分作为施工平台, 与该结构段的直线距离约 120 m, 普通混凝土泵车无法正常浇筑, 故浇筑时采用浮吊船作为中转站, 配合桩芯混凝土浇筑。

#### 3.2.5 钢抱箍安装

钢抱箍主要与灌浆料起到封堵止浆作用, 辅助预制桩帽承重体系发挥承载作用。钢抱箍采用小型起重船协助潜水员进行水下安装, 见图 8, 并确保安装后封堵板上厚 0.05 m 泡沫止浆条处于压缩状态。



图 8 钢抱箍及水下安装

Fig. 8 Steel hoop and underwater installation

### 3.2.6 装配式桩帽预制及安装

装配式桩帽在构件预制厂生产，预制加工包括钢套筒及工字钢焊接制作、预制桩帽结构施工及吊运安装。

1) 空腔钢套筒及工字钢制作。内部预埋与现场实测数据相吻合的定制钢套筒空腔，空腔直径大于管桩直径，空腔直径为 1.44 m、高度 1 m，采用厚 0.012 m 花纹钢板定制。空腔两侧各被 1 根 I20 工字钢贯穿，贯穿处工字钢与空腔钢板采用满焊连接，见图 9。空腔内部的工字钢即安装时装配式桩帽在桩顶的搁置点，空腔外部的工字钢预埋进桩帽混凝土内，增强混凝土和空腔钢板的整体连接。

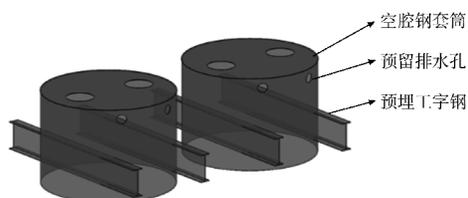


图 9 预制桩帽空腔钢套筒及工字钢  
Fig. 9 Prefabricated pile cap cavity steel sleeve and I-beam

2) 预制桩帽结构施工。装配式桩帽制作顺序主要包含底胎制作、侧面模板加工、钢筋加工、钢筋绑扎、支立模板以及混凝土浇筑养护。

3) 装配式桩帽吊装安装。经计算，预制桩帽最大质量为 38.64 t，采用现场已有的 250 t 全回转起重船进行吊装。

吊装采用预埋件四点起吊。安装时，起重船从驳船上起吊预制桩帽，调整船位及起重船臂杆将构件吊至指定位置上方，缓缓落钩，待构件降低至距安装顶面 0.45 m 时停止落钩，人工进行构件纵横向平面位置和倾斜度调整，使构件达到精确定位后落钩，直至构件平稳地落于支撑面上。

### 3.2.7 装配式桩帽灌浆施工

灌浆施工主要对桩-桩帽节点空腔钢套筒内进行灌浆，使得预制桩帽与桩连接成整体。为了更好地适应水下施工环境，灌浆施工采用专门抗分散的 CGM 型水下水泥基灌浆料。灌浆施工前，潜水员下水检查封底钢抱箍是否全部贴合封住空腔；采用导管法进行灌浆，灌浆时空腔内的积水及空气由侧面预留的排水孔排出，当排水孔有灌浆料流出时对排水孔进行封堵，当顶部出浆孔有灌浆料排出时则

判定空腔内部灌浆料灌注完成，对灌浆孔进行封堵。

### 3.3 工效对比

对现浇单个桩帽和预制单个桩帽的施工工序及周期进行对比，见表 1。可以得出，现浇单个桩帽的所需人员约 20 人，施工周期约为 5.74 d；预制桩帽现场施工主要进行前期割桩、桩芯施工、数据测量采集以及构件进场后的安装和灌浆施工，且可忽视潮汐水位变化的影响，所需人员约 15 人，施工周期约为 2 d。采用预制桩帽施工，其人力节省约 25%，施工工期缩短约 65%。

表 1 现浇桩帽和预制桩帽工效对比  
Tab. 1 Comparison of efficiency between cast-in-place pile caps and prefabricated pile caps

形式	工序	人员配置/ 人	施工时间/d
现浇 单个 桩帽	水上割桩头	2	1.00
	桩芯施工	3	0.25
	承重体系围檩安装	4	0.50
	底模安装	2	0.50
	钢筋加工及安装	3	1.00
	侧模安装	3	0.50
	混凝土浇筑	3	0.50
	合计		20
预制 单个 桩帽	水下割桩头	2	0.25
	桩芯施工	3	0.25
	测量数据采集	2	0.50
	预制桩帽	2	0(数据采集后可预制,不计施工时间)
	钢抱箍安装	2	0.25
	桩帽安装及灌浆	4	0.75
合计		15	2.00

注：现浇单个桩帽考虑受潮汐影响的系数为 1.35。

## 4 结论

1) 针对长期处于潮位以下的高桩码头桩帽施工技术难题，本文设计出一种无需底模板、支撑体系完全依托桩身自承重的预制嵌入式桩帽结构及其配套施工技术。

2) 预制嵌入式桩帽结构以及相配套的施工技术可以适应水下施工环境，降低了水下施工和质量控制难度。经实践验证具有施工可行性，对类似工程具有一定的参考价值。

3) 预制嵌入式桩帽空腔结构设计、适用直/斜桩的桩芯钢筋笼结构、钢板箍封堵密封兼支撑

双功能结构的设计可确保桩-桩帽整体连接的强度及稳定性,可在水上施工环境较差的高桩梁板码头结构中进行应用和推广。

4) 针对混凝土泵车离既有施工平台距离较远无法正常浇筑的问题,本文提出一种以浮吊船作为中转站,采用漏斗加长导管的形式配合混凝土泵车进行桩芯混凝土浇筑的方法,经实践验证具有施工可行性。

#### 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.  
JIANG Y, CHENG Z K, WU Z L, et al. Current situation and prospect of design and build of assembled piled wharf [J]. Port & waterway engineering, 2018 (6): 103-109.
- [2] 林岳,张海荣,刘功鑫,等.菲律宾ATI驳船码头水工结构设计创新[J].水运工程,2023(9):56-59.  
LIN Y, ZHANG H R, LIU G X, et al. Design innovation of marine structure of ATI Barge Terminal in Philippines [J]. Port & waterway engineering, 2023(9): 56-59.
- [3] 鲁军,陆敏.高桩码头横梁装配式一体化施工技术[J].水运工程,2023(5):133-136,142.  
LU J, LU M. Integrated construction technology of prefabricated high-piled wharf beam [J]. Port & waterway engineering, 2023(5): 133-136, 142.
- [4] 李武,朱琳.高桩码头横梁装配应用技术[J].中国港湾建设,2022,42(6):7-10.  
LI W, ZHU L. Application technology of beam assembly for high pile wharf [J]. China harbour engineering, 2022, 42 (6): 7-10.
- [5] 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.  
MENG F Q. Technical and economic analysis on prefabricated pile cap construction of high pile wharf [J]. Pearl River water transport, 2022(11): 114-116.
- [6] 郭兆珈,盛佳珺,杭建忠,等.某全装配式高桩码头平面布置及工程应用[J].水运工程,2023(5):65-70.  
GUO Z J, SHENG J J, HANG J Z, et al. General layout and engineering application of fully prefabricated high-piled wharf [J]. Port & waterway engineering, 2023 (5): 65-70.
- [7] 徐俊,唐洲.装配式技术在连云港徐圩港区码头工程中的应用[J].水运工程,2023(5):11-16.  
XU J, TANG Z. Application of technology of prefabricated wharf project in Xuwei Port Area of Lianyungang Port [J]. Port & waterway engineering, 2023(5): 11-16.
- [8] 冯先导,刘聪聪,林红星.预制桩芯桩帽结构承载性能及安装工艺试验研究[J].水运工程,2024(11):215-220.  
FENG X D, LIU C C, LIN H X. Experimental study on bearing capacity and installation technology of prefabricated pile core and pile cap structure [J]. Port & waterway engineering, 2024(11): 215-220.
- [9] 林红星,何聪,冯先导,等.高桩码头承插式T形桩帽安装灌浆工艺[J].水运工程,2024(10):225-230.  
LIN H X, HE C, FENG X D, et al. Installation of socketed T-pile cap and grouting process for high pile wharf [J]. Port & waterway engineering, 2024 (10): 225-230.
- [10] 林红星,刘聪聪,冯先导,等.灌浆料对预制承插式桩芯与钢管桩黏结性能影响试验研究[J].水运工程,2024(11):176-181.  
LIN H X, LIU C C, FENG X D, et al. Experimental study on influence of grouting material on bond behavior between prefabricated pile core and steel pipe [J]. Port & waterway engineering, 2024(11): 176-181.
- [11] 任彧,徐沛韬.预制装配式桩帽的冲切破坏有限元研究[J].福建建筑,2022(4):22-28.  
REN Y, XU P T. Finite element research about punching shear behaviour of prefabricated pile cap [J]. Fujian architecture, 2022(4): 22-28.
- [12] 崔磊,吴辉,乔成.桩帽与整体预制装配式横梁的连接技术应用[J].水运工程,2023(5):122-127,132.  
CUI L, WU H, QIAO C. Application of technology connecting integral prefabricated beam and pile cap [J]. Port & waterway engineering, 2023(5): 122-127, 132.
- [13] 林学良,王磊,曹凯平,等.一体式预制桩帽构件在装配式高桩码头中的应用[J].水运工程,2023(5):17-21,54.  
LIN X L, WANG L, CAO K P, et al. Application of integrated precast pile cap in prefabricated high-pile wharf [J]. Port & waterway engineering, 2023 (5): 17-21, 54.
- [14] 盛佳珺,陈海峰,李武,等.全装配式高桩码头结构创新设计[J].水运工程,2023(5):59-64,93.  
SHENG J J, CHEN H F, LI W, et al. Innovative design of fully prefabricated high-pile wharf structure [J]. Port & waterway engineering, 2023(5): 59-64, 93.