

· 港口 ·



高桩码头钢管桩桩帽节点受力性能有限元分析*

林红星, 雷鸣, 陈迪郁, 何聪, 黄胜

(中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040)

摘要: 高桩码头桩帽节点是传递码头上部荷载的重要构件, 针对高桩码头单桩桩帽节点和叉桩桩帽节点, 采用有限元分析方法, 对比不同桩端嵌入深度下, 结构变形、应力分布、荷载位移曲线和转角弯矩曲线。数值计算结果表明: 单桩桩帽节点受水平荷载作用时, 加载前期结构转动刚度主要由桩芯锚固钢筋提供, 后期主要由桩芯混凝土与钢管提供; 桩端嵌入深度小于0.50倍桩径时, 节点为半刚性连接。叉桩桩帽节点受水平荷载时, 受拉侧桩端锚固钢筋屈服是结构承载力下降的主要原因, 建议在设计中加强; 叉桩桩帽节点在承受3万吨杂货船标准系缆力时, 桩端嵌入深度对节点的应力和位移影响小于14%, 为高桩码头桩帽节点设计提供科学参考。

关键词: 高桩码头; 桩承台接头; 嵌入深度; 有限元

中图分类号: U655

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)08-0067-11

Finite element analysis of mechanical behavior of steel pipe pile cap joints in high-pile wharf

LIN Hongxing, LEI Ming, CHEN Diyu, HE Cong, HUANG Sheng
(CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China)

Abstract: The pile cap joint of the high-pile wharf is an important component to transfer the upper load of the wharf. For the single pile cap joint and fork pile cap joint of the high-pile wharf, the structural deformation, stress distribution, load displacement curve, and corner bending curve are compared by finite element analysis method under different embedment depth of the pile end. The numerical results show that when the cap joint of a single pile is subjected to horizontal load, the rotational stiffness of the structure in the early stage of loading is mainly provided by anchorage steel bar of the pile core, and in the later stage, it is mainly provided by the pile core concrete and steel pipe. When the embedded depth of the pile end is less than 0.50 times the pile diameter, the joint is a semi-rigid connection. When the cross pile cap joint is subjected to horizontal load, the yield of the anchorage steel bars at the tensile side of the pile is the main reason for the decrease in structural bearing capacity. It is recommended to be strengthened in the design. When the fork pile cap joint is subjected to the standard mooring force of 30,000 t general cargo ship, the influence of pile end embedment depth on the stress and displacement of the joint is less than 14%, providing scientific reference for the design of pile cap joint of high-pile wharf.

Keywords: high-pile wharf; pile cap joint; embedment depth; finite element

随着“一带一路”建设的推进, 我国越来越多参与国际海洋工程建设中, 高桩码头作为重要的

海洋工程结构形式, 其桩帽设计影响着结构的稳定性与安全性, 但现行的规范中对桩帽节点的设计

收稿日期: 2024-11-14

*基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB2603000)

作者简介: 林红星(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水运工程领域科技研发与施工技术管理工作。

计计算尚无成体系的规定。当前对桩帽连接节点的研究多为 PHC 桩结构，对钢管桩结构的研究相对较少，尤其是对叉桩桩帽连接节点的研究不足。本文针对高桩码头桩帽节点，研究单桩桩帽节点、叉桩桩帽节点在承载过程中的一般规律，揭示桩端嵌入深度对桩帽承载性能的影响，旨在为高桩码头桩帽节点设计提供参考建议。

现行 JTS 167—2018《码头结构设计规范》^[1]中认为桩头嵌入深度应超过一倍桩径的桩帽节点为刚性连接。Matlock 等^[2]提出了桩头转动刚度 $k_m = M_l/S_l$ (M_l 为桩头弯矩, S_l 为桩头转角) 表征桩帽节点的刚度。这些对桩帽节点刚度的定义多基于桩芯混凝土与桩身为统一整体的假设, 对桩帽承载过程中的传力机制尚无说明。实际工程项目中, 码头桩帽节点多采用单桩桩帽结构和叉桩桩帽结构。一些学者^[3-5]对海上风电高桩桩帽基础结构在海洋环境荷载作用下的受力及传力机理展开研究, 分析了混凝土桩帽及斜向钢管桩的受力特性, 确定钢管桩顶部与混凝土桩帽接触部位是承接及荷载传递的关键部位, 桩帽混凝土首先发生受拉损伤, 最大应力出现在钢管桩桩头部位, 但并未涉及连接节点结构形式对结构承载力的影响。随着有限元方法的发展, 部分学者采用有限元软件, 研究装配式叉桩桩帽节点的受力特性^[6-10], 对比传统叉桩桩帽结构及装配式叉桩桩帽结构, 在不同荷载下的连接强度及弯矩分布, 结果表明不同桩头结构形式的桩帽节点, 在桩芯锚固结构有效嵌入桩帽时, 具有相近的承载特性。但其中并未涉及桩芯锚固结构嵌入深度的研究。可见对高桩码头钢管桩桩帽节点连接的相关研究还不够详尽、充分, 对高桩码头桩帽连接节点的转动刚度尚未形成系统的研究。

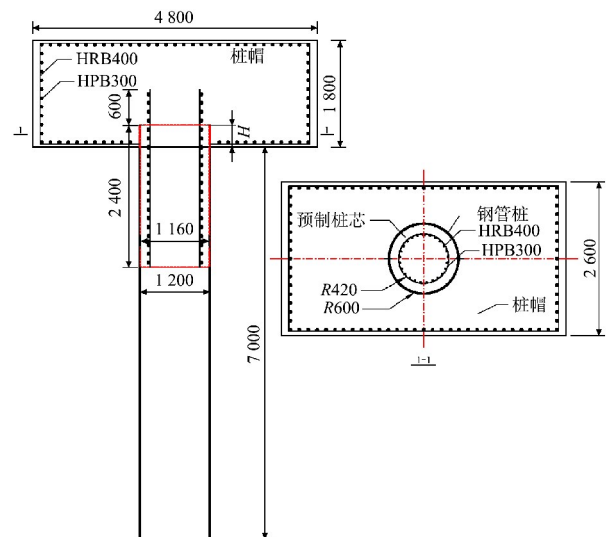
本文对工程应用较为广泛的单桩桩帽节点和叉桩桩帽节点展开研究, 采用有限元分析方法, 对比不同桩端嵌入深度下桩帽连接节点的结构内力、混凝土应力、传力机制及桩头转动刚度的差

异, 分析总结节点传力特点及连接性质, 为高桩码头桩帽节点设计提供参考依据。

1 单桩结构连接形式受力性能分析

1.1 结构形式及数值模型

单桩桩帽节点在高桩码头中较为常用, 在码头结构设计规范中, 钢管桩与桩帽或横梁之间应为刚接连接, 连接处承受桩顶弯矩、剪力和轴向力。传统钢管桩一般采用桩顶直接伸入桩帽内或桩顶通过锚固钢筋伸入桩帽内的形式。基于江苏盐城大丰港工程的单桩桩帽节点, 其结构见图 1a), 现浇桩帽尺寸 4 800 mm×2 600 mm×1 800 mm; 桩基采用钢管桩, 直径 $D=1\ 200$ mm, 壁厚 20 mm。桩头处现浇桩芯混凝土, 桩芯混凝土钢筋笼由垂向钢筋与箍筋组成, 桩芯混凝土直径 1 160 mm, 与钢管桩的黏结长度为 2 400 mm, 桩芯垂向钢筋总长 3 000 mm, 外伸长度 600 mm, 该部分锚固入桩帽混凝土内。采用 ABAQUS 有限元软件建立单桩桩帽节点模型, 见图 1b)。数值模型材料参数见表 1。桩芯混凝土主筋采用 HRB400, 直径 25 mm, 箍筋采用 HPB300, 直径 12 mm。考虑混凝土与钢管、混凝土与混凝土界面接触行为, 采用面-面接触的方式, 钢管桩与混凝土之间的摩擦系数为 0.60, 混凝土之间摩擦系数为 0.75^[11]。



a) 单桩结构(单位: mm)

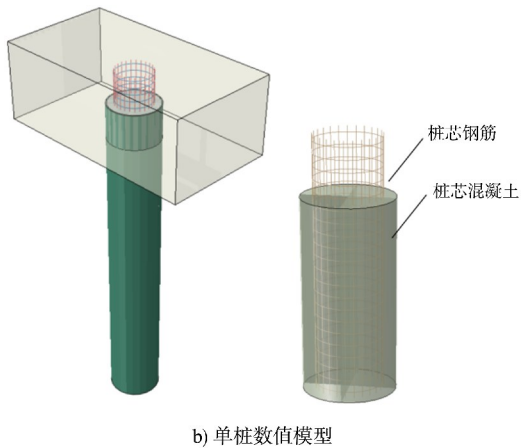


图 1 单桩桩帽有限元模型

Fig. 1 Finite element model of single pile cap

表 1 有限元建模材料参数

Tab. 1 Finite element modeling material parameters

结构	材料类型	弹性模量 E/GPa	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	泊松比 ν	抗压强度 $F_{\text{cuk2}}/\text{MPa}$	屈服强度 σ_r/MPa
桩帽	C40	32	7 850	0.30	47.2	-
桩芯	C40	32	2 500	0.16	47.2	-
钢管桩	Q235	200	7 850	0.30	-	235
钢筋	HRB400	200	7 850	0.30	-	400
钢筋	HPB300	200	7 850	0.30	-	345

为验证有限元模型计算的精确性, 避免计算偶然性, 依照朱海堂等^[12]开展的桩帽连接节点受弯性能试验, 设置模型边界条件, 对单元尺寸和质量进行敏感性验证。不同单元网格尺寸时的模型计算结果见图 2, 当单元网格尺寸为 2.0 mm 时计算的结果稳定, 因此考虑计算精度和计算效率, 模型的单元尺寸设置为 2 mm。此时, 桩帽桩端剪力峰值为 8 916 kN。根据我国现行 JTS 167-4—2012《港口工程桩基规范》^[13]中的规定, 桩帽连接节点受弯承载力满足下式:

$$\frac{6M}{Dl^2} + \frac{4V}{Dl} \leq \alpha f_c \quad (1)$$

式中: α 为桩帽混凝土在局部承压时的强度提高系数, $\alpha=2.7$; f_c 为管桩混凝土抗压强度; M 为管桩重心处的弯矩值; V 为管桩重心处的剪力值;

D 、 l 分别为管桩直径和伸入桩帽内的长度。模型计算结果满足规范要求。

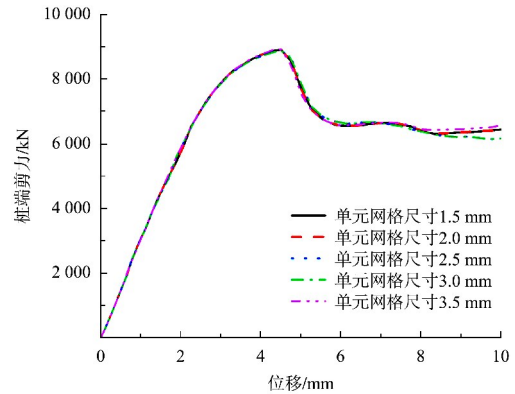


图 2 网格敏感性验证

Fig. 2 Grid sensitivity verification

1.2 边界条件及计算工况

项目地处江苏外海, 具备风大、浪高、流急、大潮差 4 个特点, 受台风侵扰。常年风速影响大, 最大风速可达 32 m/s, 最大波高超过 3 m, 持续时间长。所在海域为强海流区, 涨落水流急, 前沿垂线平均最大流速 2.0 m/s, 最大潮差可达 6.0 m, 船舶全年平均可作业时间不足 15 d/月。

项目设计中, 桩端嵌入深度为 $1.00D$, 根据项目设计报告, 取桩帽以下 7 m 为嵌固点, 此时桩芯混凝土底面距桩底 5 800 mm。为研究桩帽节点连接性能, 计算过程中桩帽顶部固支, 控制桩底位移缓慢加载至 15 mm^[14-15], 加载过程中弯矩集中在桩顶连接位置。通过调整管桩长度和桩端嵌入深度, 保持桩底与桩帽间距不变, 保持桩芯混凝土嵌固深度相同, 不同模型桩芯底部至桩底的距离也有所差异, 计算不同桩端嵌入深度下结构的位移、内力分布、应力状态以及极限承载力, 模型边界条件见图 3, 计算工况见表 2。计算内容包括: 模型结构变形、桩底水平反力、桩帽混凝土应力以及桩端转角弯矩曲线。

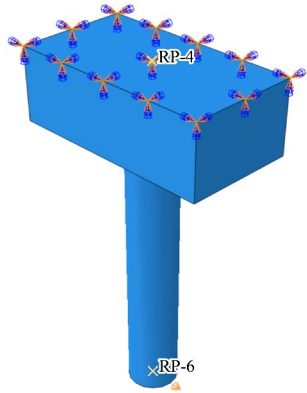


图 3 单桩桩帽节点边界条件

Fig. 3 boundary condition of single pile cap joint

表 2 单桩节点有限元计算工况

Tab. 2 Finite element calculation conditions of single pile joint

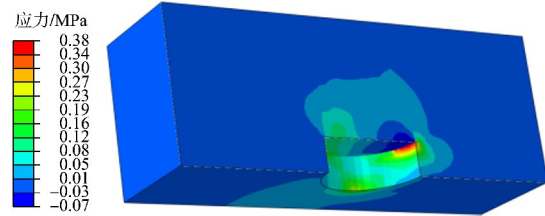
工况	桩端嵌入深度/mm	嵌入深度	位移幅值/mm	桩芯底面至桩底距离/mm
1	0	0	15	7 000
2	150	0.13D	15	6 850
3	400	0.33D	15	6 600
4	600	0.50D	15	6 400
5	800	0.66D	15	6 200
6	1 200	1.00D	15	5 800
7	1 320	1.10D	15	5 680
8	1 440	1.20D	15	5 560
9	1 800	1.50D	15	5 200

1.3 结果分析

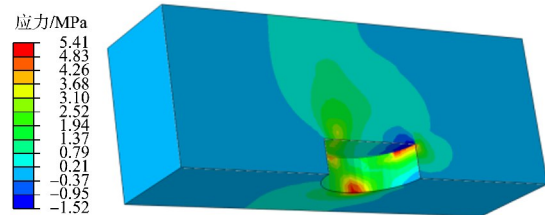
1.3.1 连接机制分析

9 种工况下, 结构连接机制呈现一定的规律性。不同位移情况下, 埋深 400 mm 桩帽最大正应力云图见图 4, 在加载初期, 桩头外侧锚固钢筋最先发挥作用, 应力主要集中在锚固钢筋区域, 桩头与桩帽接触面贡献较小, 结构刚度主要来自于锚固钢筋。位移继续上升, 桩头转动角度较小时, 桩头外侧与桩帽的接触面应力增大, 桩端侧壁混凝土开始发挥作用, 锚固钢筋区域应力继续上升, 部分锚固钢筋接近屈服。当位移进一步增大, 桩头发生较大转动角度时, 桩头侧壁接触面局部产生较大压应力, 部分锚固钢筋已发生屈服。因此,

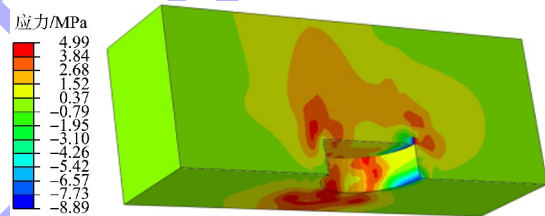
单桩结构受弯转动过程中, 前期桩芯锚固钢筋发挥主要作用, 后期嵌入部分钢管桩发挥主要作用。



a) 位移0.12 mm



b) 位移3.14 mm



c) 位移15.00 mm

图 4 单桩节点桩帽混凝土应力

Fig. 4 Concrete stress of single pile joint pile cap

桩端位移 10 mm 时 3 种桩端嵌入深度的单桩桩帽节点的应力云图见图 5, 此时桩帽节点的锚固钢筋均已发生屈服, 不同的是随着嵌入深度的加深, 锚固钢筋屈服位移增大。同时, 嵌入深度较低的结构, 在锚固钢筋发生屈服后, 钢管桩侧壁应力保持在较低水平, 结构承载力不再上升, 嵌入深度超过 0.50D 的结构在锚固钢筋屈服后, 钢管桩产生较大应力, 钢管桩与桩帽混凝土之间的接触提高了桩帽节点的转动刚度, 桩帽节点承载力进一步上升。因此, 提高单桩桩帽节点的嵌入深度, 能够使钢管桩更早发挥作用, 从而提高桩帽节点的转动刚度。

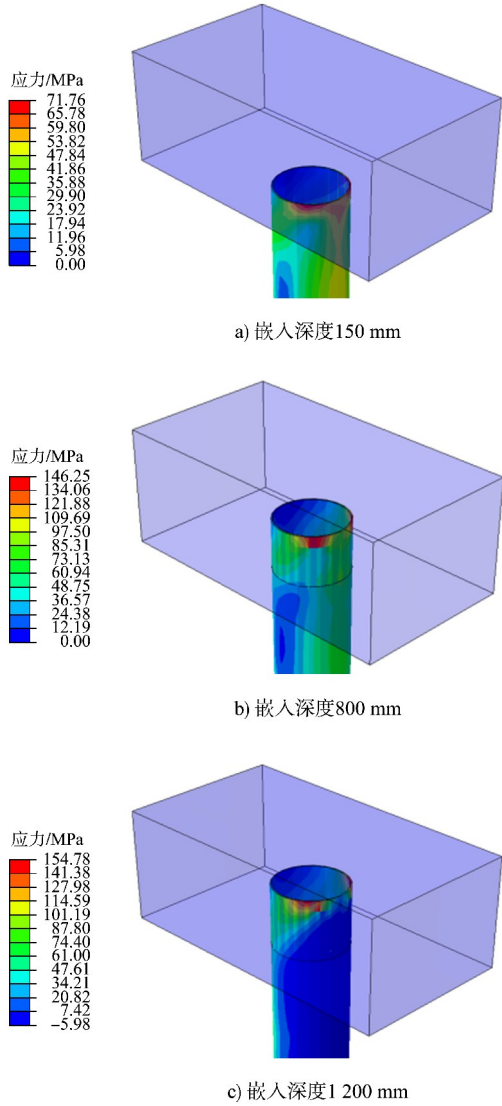


图 5 单桩节点桩端应力云图

Fig. 5 Stress cloud map at the pile end of single pile joint

1.3.2 荷载位移曲线、转动刚度-转角曲线

不同桩端埋深情况下, 单桩桩帽的荷载位移曲线见图 6。在加载位移较小时, 桩端埋深越深, 结构整体初始刚度越小, 主要由于模型的桩芯底面到桩底的距离不同, 随着桩端埋深的增加, 桩帽以下桩基部分的刚度更低, 导致加载初期单桩桩帽的整体刚度下降。当加载位移继续增大时, 随着桩头嵌入深度的增加, 桩帽节点承载性能升高。在加载后期埋深约 $0.50D$ 的桩帽节点极限承载力相近。当节点埋深超过 $0.50D$, 桩端嵌入深度越大, 节点的承载性能越好。

单桩结构桩头处的弯矩-转角曲线和转动刚度-转角曲线见图 7, 从转角弯矩曲线上看, 桩端嵌入

深度越大的单桩节点具有更高的初始刚度。桩端嵌入深度小于 $0.50D$ 的节点属于半刚性连接, 当嵌入深度增大, 节点逐渐接近于刚性连接。从转动刚度-转角曲线上看, 在转角较小时, 节点的转动刚度最大, 随着转动角度的增大, 结构转动刚度逐渐下降并趋于稳定。

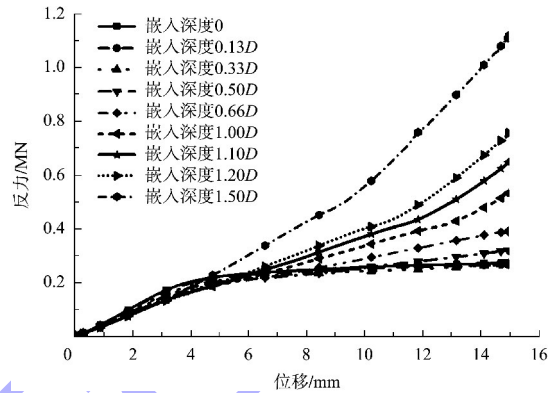
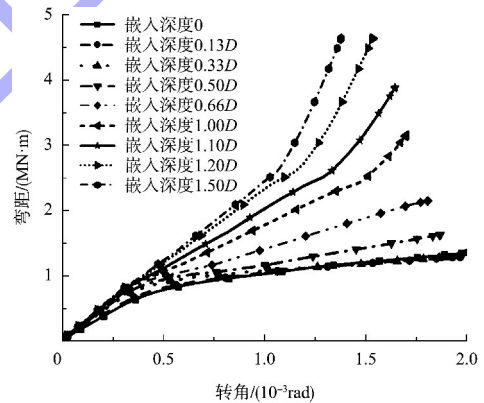
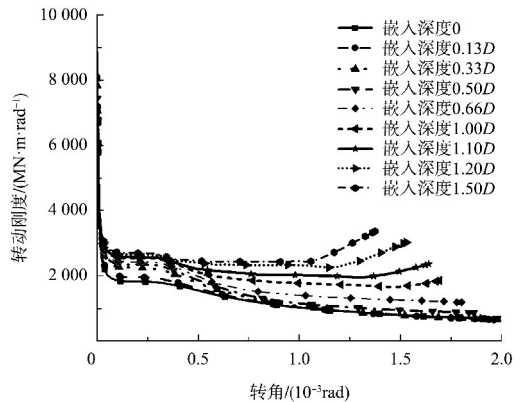


图 6 单桩节点荷载位移曲线

Fig. 6 Load displacement curve of single pile joint



a) 弯矩-转角曲线/ 10^{-3} rad



b) 转动刚度-转角曲线

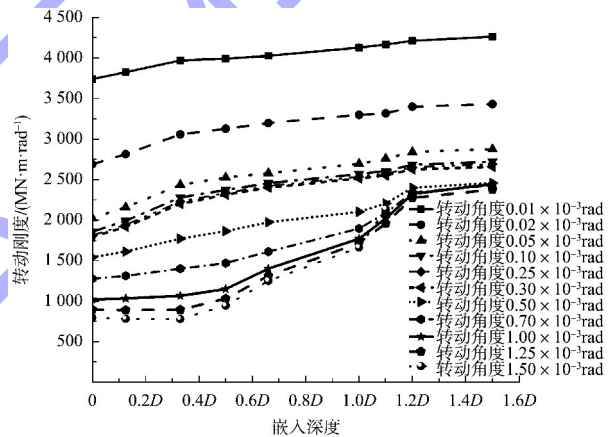
图 7 单桩节点桩顶弯矩-转角曲线及转动刚度-转角曲线
Fig. 7 Bending moment-angle curve and rotation stiffness-angle curve of single pile joint pile top

不同转动角度下，不同桩端嵌入深度的桩帽节点的转动刚度 k_i ， i 为模型桩端嵌入深度与桩径的比值见表 3。在同一转动角度下，桩端嵌入深度越大，桩帽节点的转动刚度越大。当转动角度增大，嵌入深度小于 $0.50D$ 的桩帽节点的转动刚度差异减小，约为嵌入深度 $1.00D$ 的桩帽节点的 50%。当桩端嵌入深度超过 $1.20D$ 时，桩头转动刚度差异减小，此时桩帽节点接近刚性连接。因此，提高桩端嵌入深度能够有效提高桩帽节点的转动刚度，当桩端嵌入深度小于 $0.50D$ 时，单桩桩帽节点具有相近的转动刚度，当嵌入深度增加，桩头转动刚度上升，当嵌入深度大于 $1.20D$ 时，结构的转动刚度上升趋势不明显。

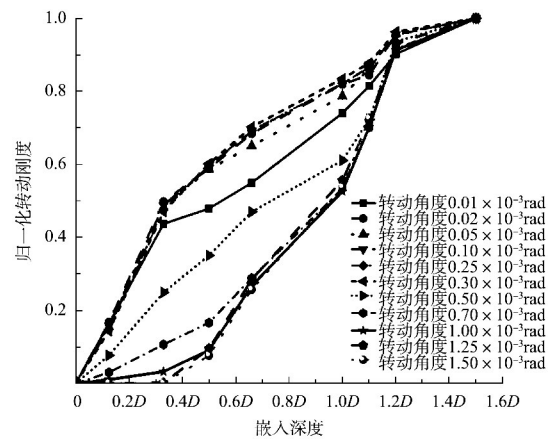
表 3 单转节点不同桩端埋深的转动刚度对比
Tab. 3 Comparison of rotation stiffness with different pile end embedment depths for single turning joints

转动角度/ (10^{-3} rad)	嵌入 深度	转动刚度 k_i / ($MN \cdot m \cdot rad^{-1}$)	K_i/k_1
0.5	0	1 545	0.73
	0.13D	1 599	0.76
	0.33D	1 773	0.84
	0.50D	1 866	0.88
	0.66D	1 975	0.93
	1.00D	2 104	1.00
	1.10D	2 207	1.04
	1.20D	2 402	1.14
	1.50D	2 460	1.15
1.0	0	1 022	0.57
	0.13D	1 037	0.58
	0.33D	1 068	0.60
	0.50D	1 152	0.65
	0.66D	1 403	0.79
	1.00D	1 772	1.00
	1.10D	2 022	1.14
	1.20D	2 324	1.31
1.50D	2 447	1.38	
1.5	0	799	0.47
	0.13D	784	0.47
	0.33D	782	0.46
	0.50D	947	0.56
	0.66D	1 253	0.75
1.00D	1 665	1.00	
1.10D	2 138	1.28	
1.20D	2 948	1.77	
1.50D	-	-	

单桩桩帽节点发生不同转动角度时，转动刚度随嵌入深度的变化趋势见图 8a)，转动刚度归一化后的结果见图 8b)，可以更清晰地看出不同转动阶段桩端嵌入深度对节点转动刚度的影响。随着桩头嵌入深度的增大，桩头转动刚度整体呈上升趋势。桩头转动角度越大，结构转动刚度越低，这是由节点钢筋屈服和混凝土破坏导致的。当单桩节点桩头转动角度约小于 0.3×10^{-3} rad 时，转动刚度随嵌入深度的变化幅值较小，桩头嵌入深度对转动刚度的影响较小。同时从归一化结果来看，转动刚度受桩头嵌入深度的影响趋势相近，这说明在转动角度较小的阶段，桩头的受力模式相同，因此在桩头转动角度约小于 0.3×10^{-3} rad 时，转动刚度主要由桩芯锚固钢筋提供。



a) 转动刚度曲线



b) 归一化转动刚度曲线

图 8 单桩节点桩端埋深与转动刚度曲线

Fig. 8 Embedment depth and rotation stiffness curve of single pile joint pile end

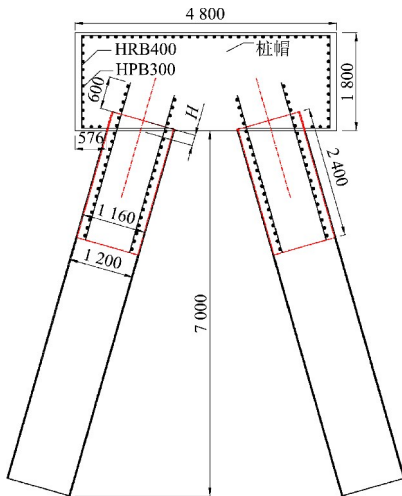
当桩头嵌入深度超过 $1.00D$ 时, 不同转动阶段节点转动刚度提升较大, 当埋深深度超过 $1.20D$ 时, 节点的转动刚度提升不明显, 因此埋深深度超过 $1.00D$ 时, 桩头钢管起主导作用, 当埋深超过 $1.20D$ 时, 桩端埋深对节点转动刚度影响较小。

2 叉桩结构连接形式受力性能分析

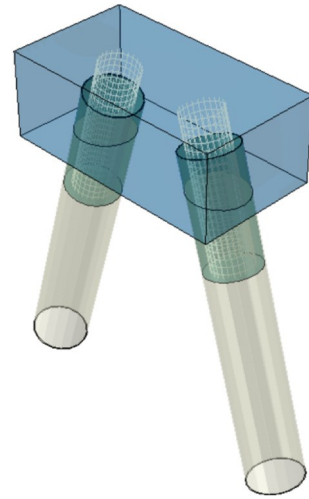
2.1 结构形式及数值模型

叉桩结构也是高桩码头常用的结构形式, 在加载过程中, 两根桩协同受力。基于江苏盐城大丰港码头叉桩结构项目, 建立叉桩数值计算模型, 研究桩端嵌入深度对叉桩结构承载性能的影响。

江苏盐城大丰港叉桩结构设计见图 9a), 叉桩结构采用钢管桩, 桩直径为 $1\ 200\ \text{mm}$, 内置预制桩芯。上部结构包括横纵梁及上部面板, 横纵梁通过现浇节点与桩帽连接, 现浇节点厚度为 $2\ 100\ \text{mm}$ 。建立的数值计算模型见图 9b), 码头上部结构作为集中质量施加在桩帽上。叉桩桩顶埋入桩帽内部, 桩芯预制钢筋伸入桩帽 $600\ \text{mm}$ 。模型材料设置与单桩桩帽相同。数值计算中, 桩芯混凝土与钢管桩、钢管桩与桩帽之间通过定义面与面接触的方式, 模拟界面行为, 参数设置与 1.1 节相同。



a) 叉桩结构



b) 叉桩数值模型

图 9 叉桩桩帽节点有限元模型 (单位: mm)
Fig. 9 Finite element model of fork pile cap joint (unit: mm)

2.2 边界条件及计算工况

数值计算中在桩帽上耦合参考点作为加载点, 假定桩帽底部 $7\ \text{m}$ 处为嵌固点, 控制桩帽顶部位移缓慢加载至 $15\ \text{mm}$, 研究叉桩结构承载性能及受力机制。通过在参考点施加恒定的系缆力 $F=1\ \text{MN}$ (3 万吨杂货船系缆力标准值), 研究不同桩端埋深叉桩桩帽节点的位移及应力分布, 叉桩结构数值模型边界条件见图 10。主要计算内容包括: 1) 在水平位移作用下, 不同桩端嵌入深度节点的荷载位移曲线、桩帽混凝土应力、桩端应力; 2) 水平力作用下, 不同桩端嵌入深度节点的整体位移分布、应力分布、桩端应力分布。

表 4 叉桩有限元计算工况

Tab. 4 Finite element calculation conditions of fork pile

加载方式	工况	桩端嵌入深度/mm	嵌入深度	桩芯底面至桩底距离/mm
位移加载	1	150	$0.13D$	6 850
	2	400	$0.33D$	6 600
	3	800	$0.66D$	6 200
	4	1 200	$1.00D$	5 800
水平力加载	5	150	$0.13D$	6 850
	6	400	$0.33D$	6 600
	7	800	$0.66D$	6 200
	8	1 200	$1.00D$	5 800

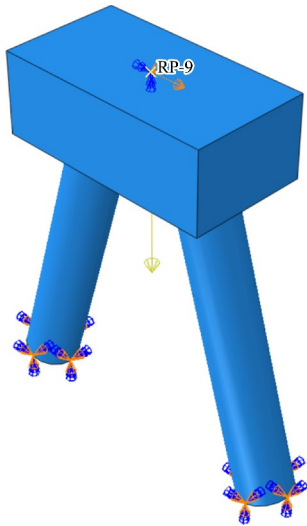


图 10 叉桩有限元模型边界条件
Fig. 10 Boundary conditions for finite element model of fork pile

2.3 结果分析

2.3.1 叉桩桩帽节点传力机制

叉桩桩帽节点的荷载位移曲线见图 11，其荷载位移曲线对应的特征点见表 5。由图 11 可知，不同桩帽埋深的叉桩桩帽节点承载力曲线趋势相同。加载初期，结构承载力随着加载位移的增大呈线性上升；随着承载力达到峰值，结构承载力迅速下降一段；继续加载，承载力下降速度放缓。对比不同桩端嵌入深度荷载位移曲线，在位移较小时，结构的初始刚度相近，在桩帽发生较大位移时，结构的刚度和承载力出现差异，随着桩端嵌入深度的增加，结构初始刚度和极限承载力上升。因此，在桩帽位移幅值较小时，不同桩端嵌入深度的叉桩结构承载力差异较小，在桩帽位移较大的情况下，可通过增加锚固钢筋深度、提高桩端嵌入深度的方式，提高叉桩承载力。

不同位移荷载条件下，桩端嵌入深度 800 mm 的桩帽节点应力云图见图 12。在结构达到屈服位移时，前侧钢管桩受拉，后侧钢管桩受压，受拉侧钢管桩桩芯锚固钢筋局部发生屈服，钢筋区域混凝土发生少许受拉损伤，钢管桩表面及底部应

力均处于较低水平。当位移达到峰值位移时，受拉侧钢管桩桩芯锚固钢筋全部发生屈服，锚固钢筋区域受拉损伤加剧，受压侧钢管桩钢筋未发生屈服，受压侧节点混凝土未发生损伤。此时结构发生较大位移，在重力作用下，桩基底部产生较大弯矩，钢管桩底部应力上升。当位移超过峰值荷载后，受拉侧桩头区域混凝土大面积受拉破坏，钢管桩底部发生屈服，结构失效。因此，在水平荷载作用下，叉桩桩帽节点受拉侧锚固钢筋是影响叉桩桩帽结构的关键因素。

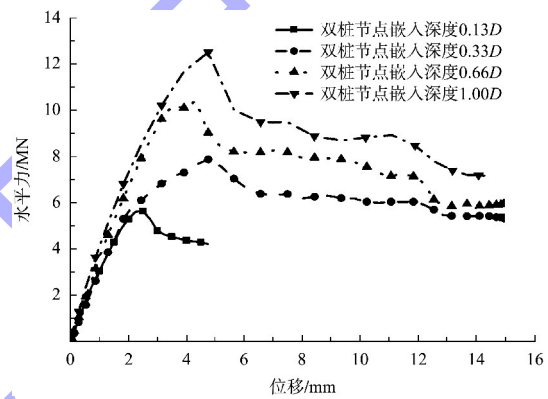
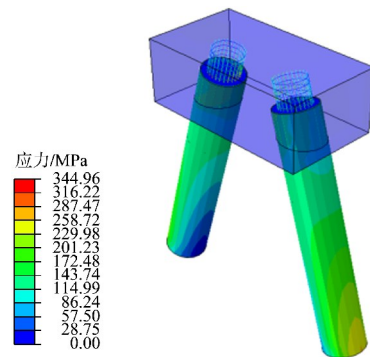


图 11 叉桩桩帽节点荷载位移曲线
Fig. 11 Load displacement curve of fork pile cap joint

表 5 叉桩荷载位移曲线特征参数
Tab. 5 Characteristic parameters of load displacement curve of fork pile

序号	桩端嵌入深度	峰值荷载/ MN	峰值位移/ mm	屈服荷载/ MN	屈服位移/ mm
1	0.13D	5.640	2.50	4.512	1.59
2	0.33D	7.870	4.76	6.296	2.62
3	0.66D	10.400	4.33	8.320	2.60
4	1.00D	12.500	4.76	1.000	3.06



a) 屈服位移时钢管应力

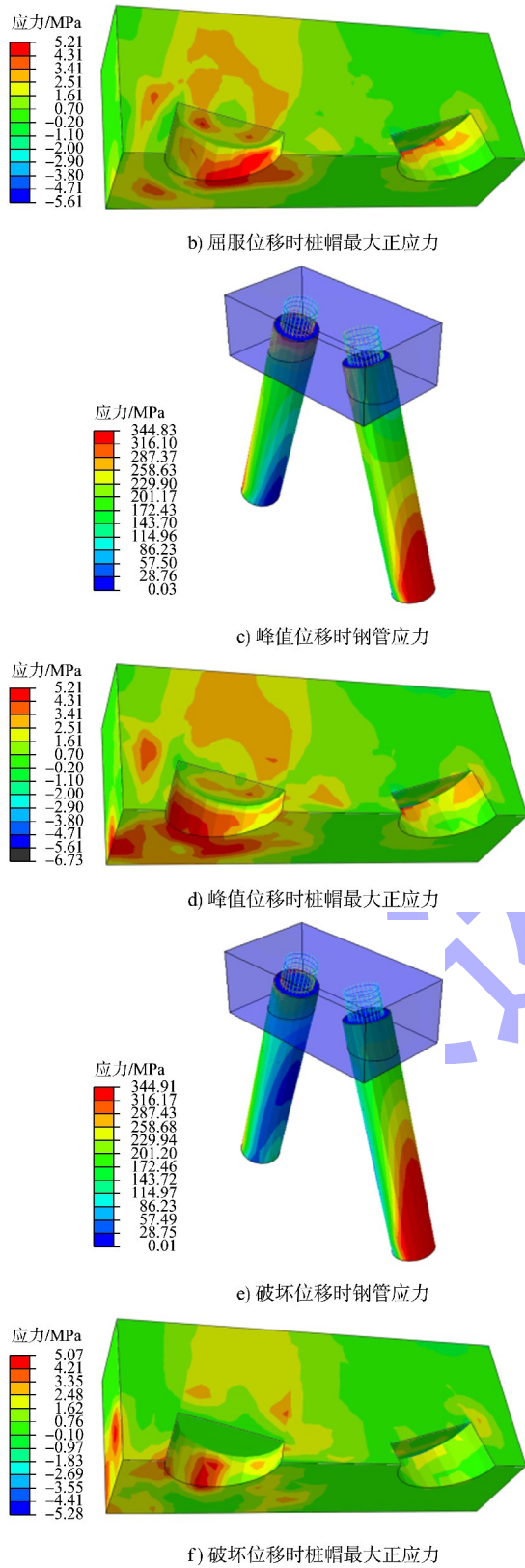


图 12 不同位移条件下叉桩结构应力云图
Fig. 12 Stress cloud map of fork pile structure under different displacement conditions

2.3.2 叉桩桩帽节点位移及应力分析

结构的位移云图和桩基最大正应力云图分别见

图 13、14。在水平力作用下, 最大位移幅值呈下降趋势, 桩帽埋深 1 200 mm 的结构位移峰值与埋深 150 mm 的结构位移峰值差值仅为 0.04 mm。随着桩端埋深的增加, 叉桩桩帽节点桩基应力增大, 桩帽埋深 1 200 mm 的结构最大正应力峰值比埋深 150 mm 的结构高 2.76 MPa。因此, 叉桩结构桩端嵌入深度对结构的位移和应力影响较小。

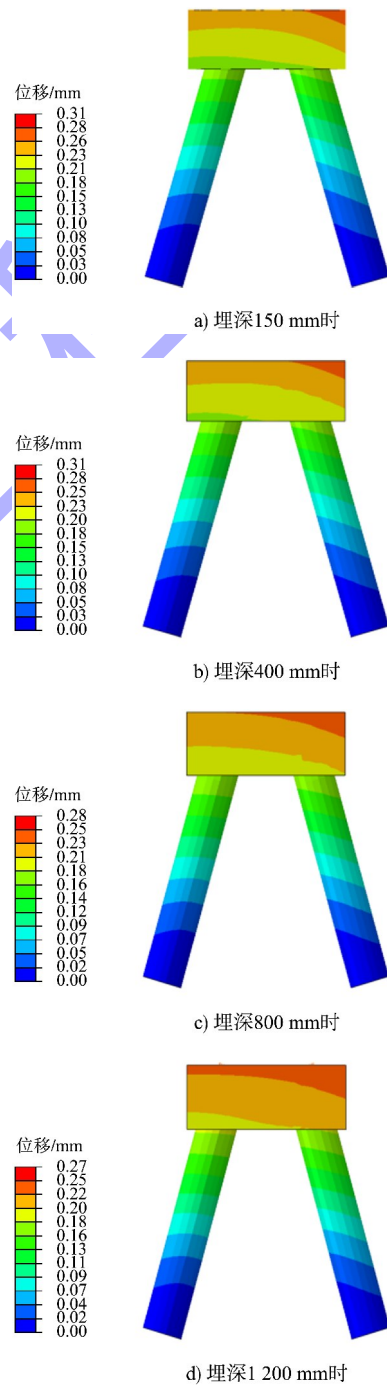


图 13 不同嵌入深度结构位移对比
Fig. 13 Comparison of structural displacement with different embedment depth

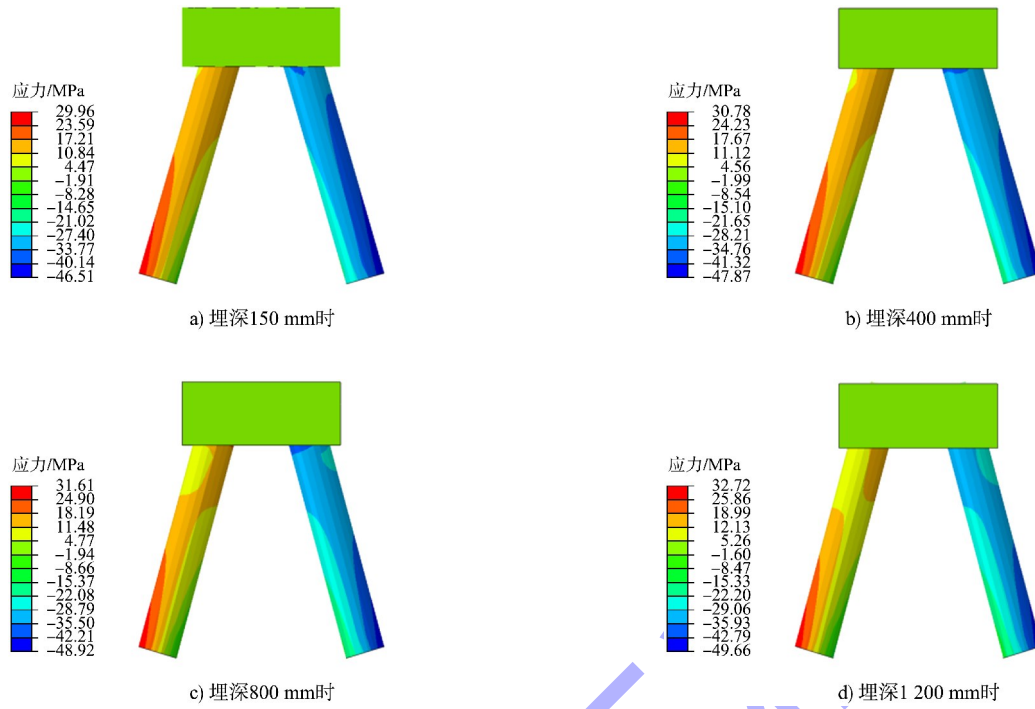


图 14 不同嵌入深度结构应力对比

Fig. 14 Comparison of structural stress with different embedment depth

1 MN 水平作用力下，不同嵌入深度钢管桩与桩帽底部交界面处接触点应力对比见表 6。在水平作用力下，结构的前侧管桩受压，后侧管桩受拉。受拉侧桩基拉应力与桩端嵌入深度呈负相关，受压侧桩基压应力与桩端嵌入深度呈正相关。因此，

在水平力作用下，叉桩桩帽节点桩基分别承受拉应力和压应力，增加桩端嵌入深度能够降低桩端拉应力，提高节点桩端压应力，从而提高节点连接的承载性能。

表 6 桩-桩帽交界应力对比

Tab. 6 Stress comparison at the point where pile and pile cap meet

序号	嵌入深度	受拉侧接触面应力/MPa				受压侧接触面应力/MPa			
		桩前端	与 1.00D 时 应力的比值	桩后端	与 1.00D 时 应力的比值	桩前端	与 1.00D 时 应力的比值	桩后端	与 1.00D 时 应力的比值
1	0.12D	16.86	3.78	20.73	1.13	-31.03	0.65	-31.64	0.71
2	0.33D	10.28	2.31	20.49	1.12	-42.71	0.91	-33.47	0.74
3	0.66D	6.98	1.56	19.94	1.09	-43.09	0.92	-38.89	0.86
4	1.00D	4.45	1.00	18.28	1.00	-47.91	1.00	-44.72	1.00

3 结语

1) 单桩桩帽节点在荷载作用下发生转动时，桩头转动角度约在 0.3×10^{-3} rad 之前，结构转动刚度主要由桩芯锚固钢筋提供，之后主要由桩芯混凝土与钢管提供。当桩端嵌入深度小于 0.50D 时，单桩桩帽节点为半刚性连接。

2) 单桩桩帽节点桩端嵌入深度超过 1.00D 时，节点转动刚度有较大提升，桩头钢管起主导

作用，钢管嵌入部分起主导作用。当桩端嵌入深度大于约 1.20D 时，继续加深桩端嵌入深度对结构的转动刚度影响不大。建议在工程施工中，对弯矩较大的节点，桩端嵌入深度设置为 1.00D，不要超过 1.20D。

3) 叉桩桩帽节点随着桩端嵌入深度的增加，初始刚度和极限承载力升高，节点承载过程中两侧桩基分别承受拉应力和压应力，受拉侧桩端锚

固钢筋屈服是结构承载力下降的主要影响因素,受压侧桩端锚固钢筋未达到屈服阶段,桩端混凝土也未发生破坏。建议在设计过程中,考虑高桩码头实际受力特点,加强受拉侧桩端锚固钢筋。

4) 叉桩桩帽节点在承受较小弯矩荷载时,桩端嵌入深度对节点的应力和位移影响较小,建议在实际工程中受力荷载较低的叉桩桩帽节点,可适当减小桩端嵌入深度,提升施工便捷性。

参考文献:

- [1] 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
Design code for wharf structures: JTS 167-2018 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018.
- [2] MATLOCK H, REESE L C. Foundation analysis of offshore pile supported structures[C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Paris: Dunod, 1961.
- [3] 马彬, 祝周杰, 詹懿德, 等. 海上风电高桩承台基础关键部位受力特性研究[J]. 海洋技术学报, 2024, 43(1): 63-73.
MA B, ZHU Z J, ZHAN Y D, et al. Research on stress characteristics of key parts of offshore wind power pile cap foundation[J]. Journal of ocean technology, 2024, 43(1): 63-73.
- [4] 王淼, 武东宽, 李近元, 等. 海上风电场高桩承台群桩基础平台的设计研究[J]. 海洋科学, 2020, 44(10): 114-120.
WANG M, WU D K, LI J Y, et al. Research for the design of the basis with pile group and high bearing platform of offshore wind farm[J]. Marine science, 2020, 44(10): 114-120.
- [5] LI C Y, CHI Y, SUN X Q, et al. Construction technology of high-rise pile cap foundation of offshore wind power in Taiwan Strait [J]. IOP conference series: earth and environmental science, 2017, 93: 012037.
- [6] 崔磊, 陈海峰, 乔成. 装配式双桩桩帽节点受力有限元分析[J]. 水运工程, 2023(5): 33-38.
CUI L, CHEN H F, QIAO C. Finite element analysis of force on prefabricated double-pile cap joints[J]. Port & waterway engineering, 2023(5): 33-38.
- [7] 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.
- [8] 李文贵. 高桩码头整浇装配式叉桩节点有限元分析及设计方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
LI W G. Finite element analysis and design method study of the integral casting and fabricated batter pile joint on pile-wharf structures [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.
- [9] HAMADA J, SUGANO T, UWABE T, et al. Shaking table tests for dynamic response of a wharf with coupled batter piles [J]. Doboku gakkai ronbunshu, 2001 (682): 101-113.
- [10] 刘瑞峰. 不同构造形式 PHC 管桩与桩帽连接节点抗弯及转动性能分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2023.
LIU R F. Analysis of flexural and rotational performance of PHC pipe pile to pile cap connections with different construction [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2023.
- [11] 冯佳佳, 何仕强, 姚璐. 基于 ABAQUS 的斜桩-重力式结构靠泊撞击力[J]. 水运工程, 2018(5): 72-77, 108.
FENG J J, HE S Q, YAO L. Berthing impact force applied to inclined pile-gravity structure by ABAQUS[J]. Port & waterway engineering, 2018(5): 72-77, 108.
- [12] 朱海堂, 张启明, 李春跃. 桩与桩帽连接节点受弯承载力计算[J]. 郑州工业大学学报, 1998, 19(4): 51-54.
ZHU H T, ZHANG Q M, LI C Y. The calculation of flexural capacity of the connections between pile and pile caps[J]. Journal of Zhengzhou University of Technology, 1998, 19(4): 51-54.
- [13] 港口工程桩基规范: JTS 167-4—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
Code for pile foundation of harbor engineering: JTS 167-4-2012[S]. Beijing: China Communications Press, 2012.
- [14] XIAO Y, CHEN L. Behavior of model steel H-pile-to-pile-cap connections [J]. Journal of constructional steel research, 2013, 80(1): 153-162.
- [15] 戴江山, 吴辉. 钢管板桩结构位移分析[J]. 水运工程, 2018(6): 257-263, 267.
DAI J S, WU H. Analysis of displacement of steel tubular-sheet pile structure [J]. Port & waterway engineering, 2018(6): 257-263, 267.