



装配式双桩桩帽节点受力有限元分析*

崔磊¹, 陈海峰¹, 乔成²

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032; 2. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 在约束条件及受力特性上, 装配式双桩桩帽与桩基的连接特点与传统现浇桩帽不同。采用有限元数值分析方法, 通过对比装配式双桩桩帽节点与传统现浇双桩桩帽节点, 分析二者在结构内力、混凝土应力、结构变形、传力分配等方面的差异, 总结出一般规律。结果表明: 桩基与装配式双桩桩帽之间的连接可视为固接连接; 装配式双桩桩帽节点内的混凝土一般不会先于桩基本身发生破坏; 装配式双桩桩帽节点内桩身本体以上弯矩大于传统现浇桩帽节点方案, 应进行桩顶以上部分的抗弯计算。

关键词: 高桩码头; 装配式; 双桩桩帽; 有限元

中图分类号: U 656.1+13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)05-0033-06

Finite element analysis of force on prefabricated double-pile cap joints

CUI Lei¹, CHEN Haifeng¹, QIAO Cheng²

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

2. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: In terms of constraint conditions and force characteristics, the connection characteristics of prefabricated double-pile caps and pile foundations are different from those of traditional cast-in-situ pile caps. This paper adopts finite element analysis to compare prefabricated double-pile cap joints and traditional cast-in-situ double-pile cap joints. It also analyzes their differences in structural internal force, concrete stress, structural deformation, and force distribution and summarizes general rules. The results show that the connection between the pile foundation and the prefabricated double-pile cap can be regarded as a solid joint; the concrete in the prefabricated double-pile cap joint will not be destroyed before the pile foundation. The bending moment above the pile body of the prefabricated double-pile cap joint is larger than that of the traditional cast-in-situ pile cap joint, so the bending resistance above the pile top should be calculated.

Keywords: high-piled wharf; prefabricated structure; double-pile cap; finite element

装配式高桩码头结构区别于传统结构的差异性和重难点集中在节点设计, 现行的水运行业规范对节点连接的设计计算尚无成体系的规定, 一般采用经验性的构造措施予以加强。装配式高桩码头涉及的装配式构件之间的连接节点形状、受力状态各不相同, 常规的平面杆系、板系计算软

件无法有效模拟节点本身的真实形态。目前通常采用的有限元分析方法也大多局限于结构整体性计算或独立构件计算。郝芹^[1]针对现行的高桩梁板式码头平面设计方法的不足, 提出利用 ANSYS 有限元软件对梁板式高桩码头进行三维有限元计算与分析, 得出的码头各部分的位移、应力、应

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: 崔磊 (1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口与航道工程设计。

变、剪力及弯矩更符合工程实际；王婷婷等^[2]通过建立多种有限元模型，采用同荷载、同组合的对比方法，研究各种模型的适用条件并提出了相关建议；黄涛等^[3]结合南通港如皋港区通用码头工程，分别采用交通运输部易工水运工程设计和 ANSYS 空间有限元分析软件进行结构计算，介绍有限元计算思路及前、后处理方法。可见，行业内装配式构件连接节点的受力特性方面的研究还不够详尽、充分，对节点内钢筋、钢构件、混凝土之间的传力机制研究尚不明确，对装配式构件之间的连接节点与传统技术方案之间的差异性尚未形成系统的比较分析，对节点的加强措施无统一的规定。

桩基桩帽节点作为码头结构上下传力的重要组成，是码头结构整体安全的核心。本文采用有限元数值分析方法，通过对比装配式双桩桩帽节点与传统现浇双桩桩帽节点，分析二者在结构内力、混凝土应力、结构变形、传力分配等方面的差异，梳理和总结出一般规律，为装配式双桩桩帽节点设计过程中的结构选型、结构计算、构造设计等方面提供一定的参考。

1 结构形式及数值模型

1.1 结构形式

双桩节点多数设置为 1 对叉桩抵抗水平力。传统的双桩节点内，桩基一般伸入桩帽 $0.75D$ （以混凝土管桩为例， D 为桩径），桩帽本体的主筋遇桩上弯并设置环向加强筋及桩帽底部加强筋。装配式桩帽为实体带空腔结构，在桩位上方的桩帽实体内预留空腔，但由于预制条件的限制，空腔一般只能设置为竖直方向，而无法与桩基的斜度扭角相匹配，故桩基伸入桩帽的长度一般只取 100 mm，桩芯钢筋笼采用加强型组钢替代，在斜桩桩顶处折弯后垂直伸入桩帽预留空腔内灌浆锚固。两种类型的桩帽桩基节点结构如图 1、2 所示。

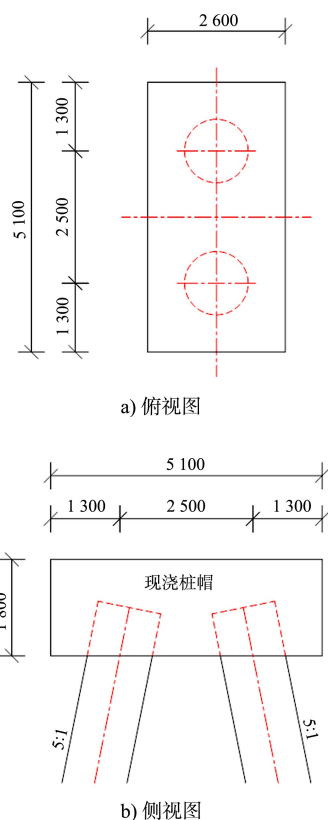


图 1 传统桩基桩帽节点（单位：mm）

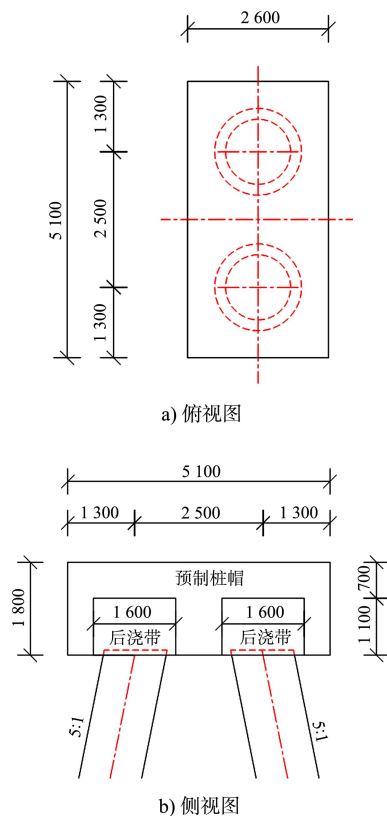


图 2 装配式桩基桩帽节点（单位：mm）

1.2 传统结构模型

基于上述两种典型节点，采用 ABAQUS 有限元软件建立双桩桩帽节点模型：现浇桩帽尺寸为 $5\,100\text{ mm}\times 2\,600\text{ mm}\times 1\,800\text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高)，桩基采用 $\phi 1\,200\text{ mm}$ 大管桩 (桩型为 D1200B32-2)，桩基进入桩帽 $0.75D$ 即 900 mm ，并将桩芯钢筋笼伸入桩帽内部，桩底采用刚节点与地基锚固。本模型为传统的桩基桩帽连接模型，一般认为该节点为刚性连接。结构配筋参数见表 1。钢筋类型为 HRB400，混凝土强度等级为 C40，传统结构模型见图 3。

表 1 传统结构模型配筋参数

结构	钢筋种类	钢筋直径/mm	数量/根	形式
桩帽	桩帽主筋	25	49	六面环箍
桩顶桩芯	锚固钢筋	25	16	从桩顶向上伸入桩帽内锚固

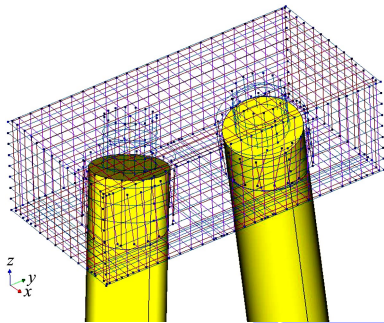


图 3 传统结构模型

1.3 装配式结构模型

采用 ABAQUS 有限元软件建立双桩桩帽节点模型。采用预制装配式方案，预制桩帽尺寸、桩基均与传统结构模型相同。桩帽预制时，在桩位上方的桩帽实体内预留 $\phi 1\,600\text{ mm}$ 空腔，高度 $1\,100\text{ mm}$ ，桩基伸入桩帽的长度为 100 mm ，桩底

采用刚节点与地基锚固。桩芯钢筋笼采用加强型钢替代，采用 4 组 32C 槽钢，在桩顶处折弯后伸入桩帽预留空腔内灌浆 (C40 细石混凝土) 锚固。结构配筋参数见表 2。钢筋类型为 HRB400，槽钢类型为 Q355B，混凝土强度等级为 C40，结构模型如图 4 所示。

表 2 装配式结构模型配筋参数

结构	钢筋种类	钢筋直径/mm	型钢	数量/根	形式
桩帽	桩帽主筋	25	-	49	六面环箍
桩顶桩芯	锚固钢材	-	32C 槽钢	4	从桩顶向上伸入桩帽预留孔内锚固

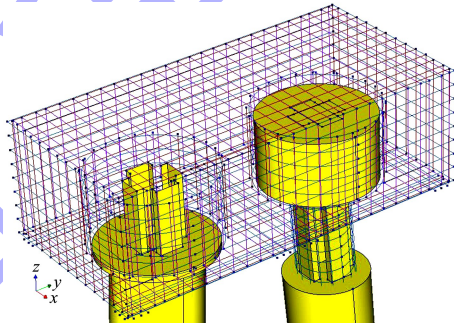


图 4 装配式结构模型

2 计算工况

2.1 计算荷载

荷载采用单位力或弯矩，考虑竖直力 (荷载 1)、水平力 (荷载 2) 及外弯矩 (荷载 3) 3 种受力情况见表 3，荷载见图 5。

表 3 桩帽顶部正中荷载情况

荷载 1 竖直力 p_v/kN	荷载 2 水平力 p_h/kN	荷载 3 外弯矩 $M/(\text{kN}\cdot\text{m})$
1 000	1 000	1 000

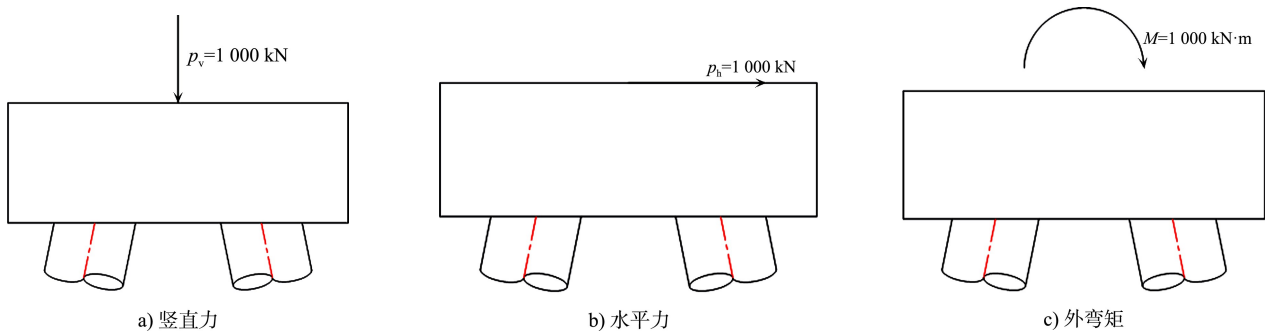


图 5 荷载

2.2 计算假定及内容

两种模型的差别主要在于桩帽制作及桩基与桩帽的连接性质不同,即相互约束的状态不同。从而导致在相同的受力状态下,二者的位移、内力分布、应力状态、节点极限承载能力不同。计算假定桩底为嵌固状态,嵌固点位于桩帽底部 20 m 处。计算内容包

括:1) 模型结构变形;2) 模型桩顶弯矩值及轴力值;3) 模型桩帽与桩结合面处的混凝土应力。

3 数值计算结果分析

3.1 数值计算结果

将各模型、各荷载工况下计算结果见表 4。

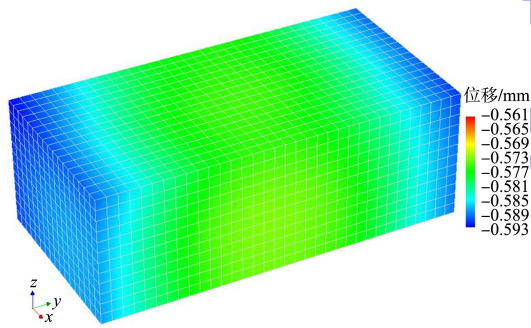
表 4 双桩节点模型计算结果对比

荷载	模型	位移/mm	桩顶轴力/kN	桩顶弯矩(桩与桩帽底部结合处)/(kN·m)	结合面切应力/MPa
1	传统模型	0.59(竖直向下)	496(压桩力)	129	0.47
	装配式模型	0.38(竖直向下)	447(压桩力)	108	0.09
2	传统模型	25.61(水平)	1 440(拉/压桩力)	528	1.61
	装配式模型	18.42(水平)	1 230(拉/压桩力)	859	1.35
3	传统模型	3.13(整体,含扭转)	113(拉/压桩力)	240	1.30
	装配式模型	2.98(整体,含扭转)	239(拉/压桩力)	175	0.28

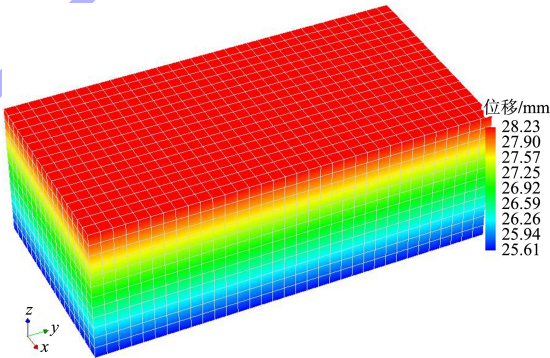
3.2 连接性质分析

两种模型的位移见图 6。可以看出,无论在竖向荷载、水平荷载或外弯矩作用下,装配式双桩桩帽节点的变形均小于传统现浇桩帽节点。主要原因

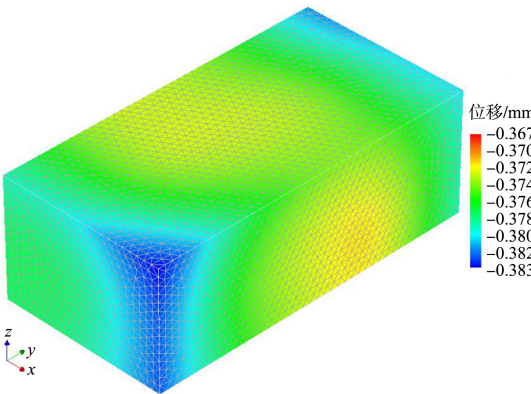
向刚度及水平刚度均大于一般的钢筋笼外伸钢筋,对结构变形起到较大的限制作用。因此可以判定:在桩芯锚固结构有效进入桩帽的前提下,桩基对装配式桩帽也具有较



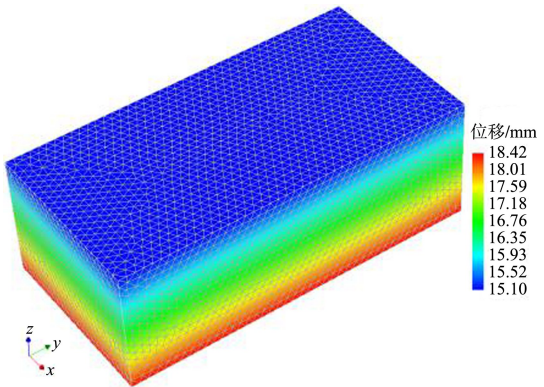
a) 荷载1作用下传统结构



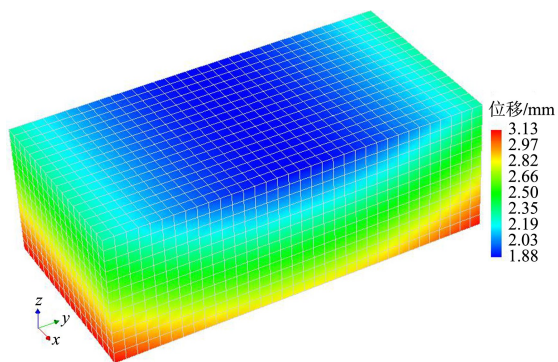
c) 荷载2作用下传统结构



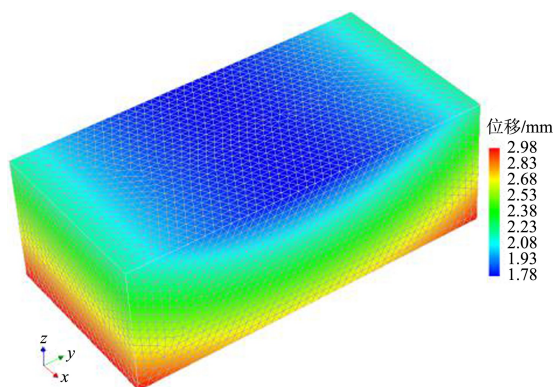
b) 荷载1作用下装传统结构



d) 荷载2作用下装配式结构



e) 荷载3作用下传统结构



f) 荷载3作用下装配式结构

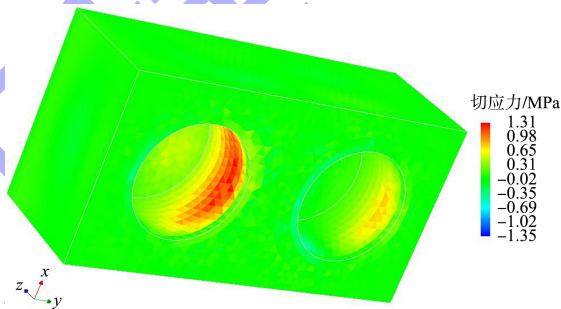
图6 结构位移

3.3 连接强度分析

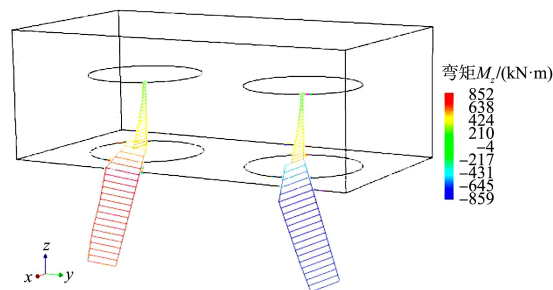
当桩帽受到水平力或外弯矩时,节点破坏主要以桩基与桩帽或后浇带与桩帽预留孔搭接面的剪切破坏为主。混凝土抗剪强度指标较为复杂,一般认为与其受压及受拉状态有关,多位学者也曾通过试验测定的方式推导混凝土抗剪强度与抗压、抗拉强度的数据关系。对于C40混凝土可采用抗拉强度设计值1.71 MPa作为结合面混凝土的抗剪强度,是偏安全的^[4-6]。与传统现浇结构相比,装配式桩帽与桩基连接的薄弱面在于后浇带混凝土与预制桩帽预留孔的素混凝土搭接面上。

荷载2作用下装配式结构的结合面切应力及桩顶弯矩见图7。可以看出,其结合面切应力为1.35 MPa,对应桩顶弯矩为859 kN·m。由此可推断,当结合面切应力达到1.71 MPa时,其桩顶弯

矩为1 088 kN·m。荷载3作用下装配式结构的结合面切应力及桩顶弯矩见图8。可以看出,其结合面切应力为0.28 MPa,对应桩顶弯矩为175 kN·m。由此可推断,当结合面切应力达到1.71 MPa时,其桩顶弯矩为1 069 kN·m。根据D1200B32-2型大管桩力学性能,其抗裂弯矩设计值为1 130 kN·m,说明当结合面切应力值达到抗剪强度时,桩基弯矩已接近或超过其抗裂弯矩。即说明,在桩基未发生明显开裂破坏的情况下,结合面切应力基本不会达到其抗剪强度,装配式桩帽与桩基的连接节点不会先于桩基发生破坏,节点是可靠安全的。

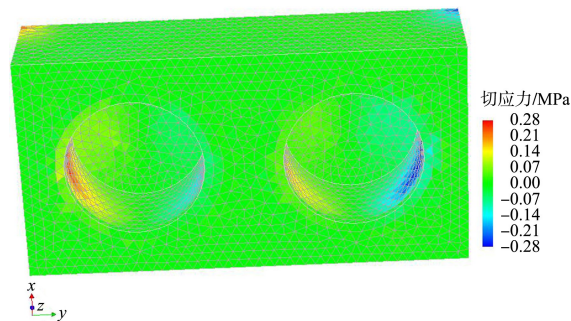


a) 结合面切应力



b) 桩顶弯矩

图7 荷载2作用下装配式结构的结合面切应力及桩顶弯矩



a) 结合面切应力

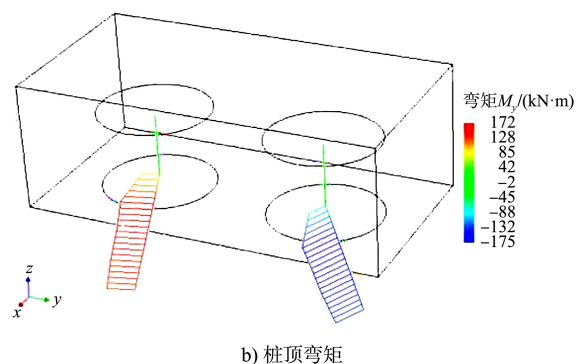


图8 荷载3作用下装配式结构的结合面切应力及桩顶弯矩

3.4 桩顶弯矩分析

在水平力荷载条件下, 预制装配式双桩桩帽节点内, 在桩基本体以上部分的桩顶弯矩分布与传统现浇桩帽节点存在一定的差异。预制装配式双桩桩帽节点模型在桩身本体以上部分仍然存在较大弯矩, 对比如图9所示。

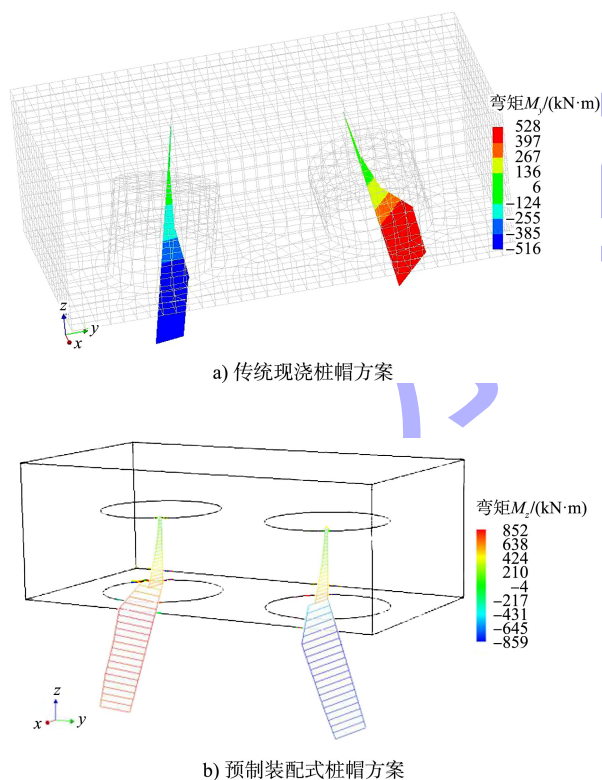


图9 桩顶弯矩分布对比

传统方案在桩基本体顶面以上部分的弯矩值仅为 $9.93 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 该弯矩可视为由桩芯外伸钢筋笼形成的几何柱体承担, 承载力显然能满足要求。而装配式方案在桩基本体顶面以上部分的弯矩值为 $638 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 该弯矩可视为由桩顶外伸型钢组承担, 在型钢选型及设计时须进行复核计算。

4 结论

- 1) 在桩芯锚固结构有效进入桩帽的前提下, 桩基对装配式桩帽也具有较强的约束作用, 计算上部桩帽或梁板结构时可定性为固接连接。
- 2) 装配式双桩桩帽节点内的混凝土一般不会先于桩基本身发生破坏, 该节点技术方案是安全可靠的。
- 3) 装配式双桩桩帽节点内的桩身本体以上弯矩大于传统现浇桩帽节点方案, 应进行桩顶以上部分的抗弯计算。

参考文献:

- [1] 郝芹. 梁板式高桩码头三维数值计算分析[J]. 水运工程, 2008(11): 112-115.
- [2] 王婷婷, 陈振民, 何文钦. 高桩梁板码头结构设计中的空间有限元分析[J]. 水运工程, 2009(7): 118-123.
- [3] 黄涛, 周杰鑫, 马平. 空间有限元模型和平面模型在高桩码头结构计算中的比较分析[J]. 中国水运, 2013(1): 60-61.
- [4] 万后林. 混凝土材料剪切强度的试验分析[J]. 四川水泥, 2021(3): 38-39.
- [5] 陈宇良, 姜锐, 陈宗平, 等. 直剪状态下再生混凝土的变形性能及损伤分析[J]. 材料导报, 2021, 35(19): 19015-19021.
- [6] 梅卫锋, 黎浩. 压剪作用下混凝土抗剪强度的试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2020, 46(4): 82-88.

(本文编辑 王璁)