



全装配式高桩码头关键节点连接试验与应用

高山珺, 鲍金虎, 吴 锋

(中交上海港湾工程设计研究院有限公司, 上海 200032)

摘要: 针对全装配式高桩码头预制横梁与桩基之间的关键节点连接问题, 开展灌浆连接方式的节点模型试验, 并与常规现浇节点进行对比分析, 研究不同连接方式的可靠性。依托实际工程, 开展全装配式码头的结构设计, 同时针对现场大体积预制横梁构件的安装问题, 提出采用相应支撑桩设计以满足施工要求。结果表明: 全装配式高桩码头节点设计方案安全可行。在复杂自然条件下, 采用槽钢及波纹管等节点加强措施, 并在施工过程中采用支撑桩的方法, 可确保全装配式码头的整体安全性。

关键词: 全装配式; 高桩码头; 灌浆连接

中图分类号: U656.1+13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)04-0081-07

Experiment and application of key joint connection for fully prefabricated pile-supported wharf

GAO Shanjun, BAO Jintu, WU Feng

(CCCC Shanghai Harbor Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: Aiming at the key joint connection problem between precast beam and pile foundation of fully prefabricated pile-supported wharf, we carry out a joint model test of the grouting connection method, and analyze and compare with the conventional cast-in-place joints to study the reliability of different connection methods. Relying on an actual project, we carry out the structural design of a fully prefabricated wharf, and at the same time, for the installation of large-volume prefabricated beam components on site, we adopt the corresponding design of supporting piles to meet construction requirements. The results show that the joint design scheme of fully prefabricated pile-supported wharf is safe and feasible. Under complex natural conditions, the overall safety of the fully prefabricated wharf can be ensured by adopting joint strengthening measures such as channel steel and corrugated pipe, as well as supporting piles during the construction process.

Keywords: fully prefabricated; pile-supported wharf; grouting connection

全装配式高桩码头是采用全装配技术构建的高桩码头。与传统设计模式相比, 其横梁等现浇部分采用预制方式, 并通过高强灌浆材料连接, 极大减少现浇混凝土作业, 在构件制造与安装中更加强调工厂化与预制化, 从而大幅缩减现场作业量与施工周期^[1-4], 具有施工速度快、节约资源、绿色环保等优点。对于全装配式高桩码头,

构件之间的节点连接性能和连接可靠性是结构设计的关键^[5]。学者们对采用灌浆的方式连接节点进行一系列的研究和试验, 如刘力真等^[6]通过有限元数值分析方法对装配式节点和现浇节点的受力特性进行研究; 钟扬等^[7]通过对3组装配式码头灌浆节点进行压弯试验, 研究不同灌浆条件下的节点承载力和破坏模式; 李向民等^[8]针对12组

收稿日期: 2024-05-22

作者简介: 高山珺 (1994—), 女, 工程师, 从事码头结构设计。

灌浆套筒接头试件进行拉压试验,研究灌浆缺陷对套筒接头受力性能的影响;王彬^[9]对12组预应力高强混凝土(PHC)管桩的钢筋混凝土填芯进行轴拔静载试验,研究管桩与钢筋混凝土填芯之间的界面黏结特性。

本文通过开展不同连接方式的节点模型试验,并与常规现浇节点进行对比分析,论证节点连接技术的可靠性;依托工程实例,开展全装配式高桩码头结构设计,研究现场节点连接方案和施工技术,为进一步推广应用提供经验和参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

装配式码头结构因预制安装模式特殊,节点位置、尺寸、形式、材料及构造与常规码头不同,按照常规模式无法验证其安全性,须通过试验研究全装配式节点与常规现浇节点的性能差异。CECS 28:2012《钢管混凝土结构技术规程》^[10]建议界面黏结强度取值范围为0.40~0.60 MPa,可作为试验黏结强度的参考。节点试验模型概况及基本参数见表1、2。

表1 节点试验模型概况
Tab.1 Overview of joint test model

模型编号	模型种类	模型特点	试验方案	理论破坏状态(材料破坏强度)
1	现浇	钢管桩进入横梁深度为 D (D 为桩径);桩芯无钢筋笼进入横梁	进行抗拔、抗弯试验,考量光滑钢管桩壁与现浇混凝土之间的黏结强度	钢管桩壁与现浇横梁混凝土之间黏结失效(钢-混凝土理论黏结强度按0.37 MPa考虑)
2	现浇	钢管桩进入横梁50 mm;桩芯长度200 mm;桩芯钢筋进入横梁内部	进行抗拔、抗弯试验,考量外伸钢筋的抗拔能力及桩芯混凝土与钢管桩内壁的黏结强度	钢筋笼强度到塑性区域;钢管桩壁与现浇混凝土桩芯之间黏结失效(钢-混凝土理论黏结强度理论按0.37 MPa考虑)
3	装配式连接	桩顶预留空腔,后灌浆;钢管桩进入横梁50 mm,钢筋笼进入空腔锚固;无波纹管	进行抗拔、抗弯试验,考量后浇带混凝土与预制横梁空腔内壁之间的黏结强度	空腔内后浇带混凝土与预制横梁空腔内壁之间黏结失效(混凝土-混凝土理论黏结强度按0.5 MPa考虑)
4	装配式连接	桩顶预留空腔,后灌浆;钢管桩进入横梁50 mm,钢筋笼进入空腔锚固;有波纹管	进行拉拔、抗弯试验,考量波纹管对节点抗拔加强作用,以及光滑钢管桩壁与现浇混凝土之间的黏结强度	钢管桩壁与现浇混凝土桩芯之间黏结失效(钢-混凝土理论黏结强度按0.37 MPa考虑)

表2 节点物理模型基本参数
Tab.2 Basic parameters of joint physical model

模型编号	模型种类	钢管桩尺寸/mm		桩入横梁深度/mm	桩灌芯长度/mm	上部横梁尺寸/mm			横梁混凝土强度等级	灌浆混凝土强度等级	钢桩材质
		直径	桩长			长	宽	高			
1	现浇	500	1 500	500	750	1 800	1 000	1 000	C40	C40	Q235
2	现浇	500	1 050	50	750	1 800	1 000	1 000	C40	C40	Q235
3	装配式连接	500	2 300	50	2 050	1 800	1 000	1 000	C40	C40	Q235
4	装配式连接	500	2 300	50	2 050	1 800	1 000	1 000	C40	C40	Q235

1.2 试验方案

根据本试验的目的,设计抗拔和抗弯两种加载装置,见图1。抗拔试验装置:试验模型通过螺栓或焊接固定在定制钢平台上,在横梁的下侧设置加载千斤顶。在试验加载过程中,利用两侧1 000 kN千斤顶进行同步加载,实现模型的抗拔

受力模式;抗弯试验装置:试验模型通过反力架进行固定,在钢管桩的上侧设置千斤顶,使用1 000 kN千斤顶进行加载,实现模型的抗弯受力模式。具体的极限加载荷载根据前期模型设计承载力的预估值而定,并在试验过程中根据实际情况进行相应的调整。

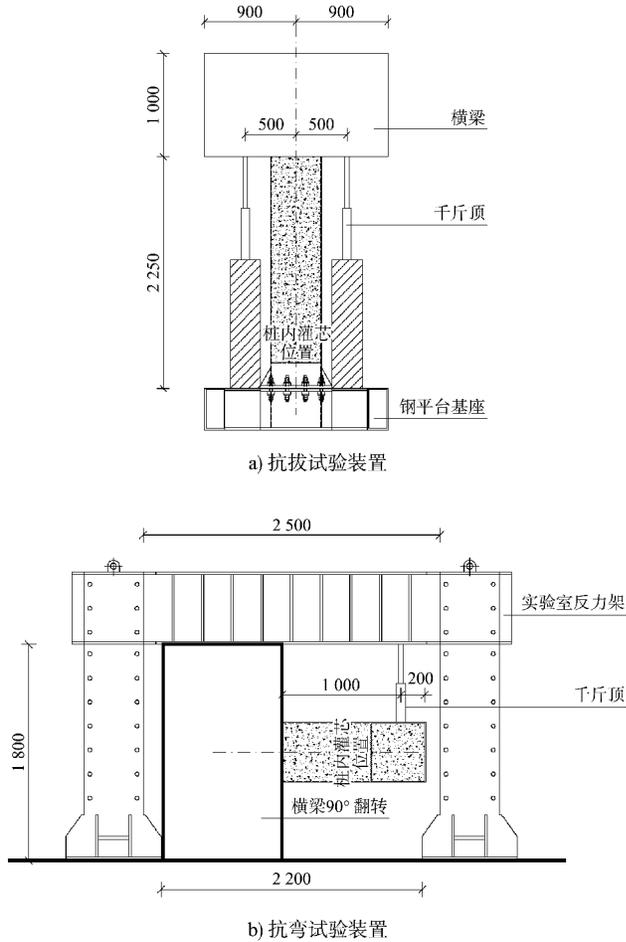


图 1 抗拔和抗弯试验装置 (单位: mm)

Fig. 1 Anti-pull and anti-bending test devices (unit: mm)

1.3 试验结果与分析

1.3.1 抗拔试验

通过对试验得出的上拔力平均值与理论值按照比例推算可得出黏结强度试验值, 结果见表 3。

表 3 各模型理论计算与试验值
Tab. 3 Theoretical calculation values and test values for each model

模型	破坏上拔力 理论值/kN	黏结强度 理论值/MPa	试验上拔力 平均值/kN	黏结强度 试验值/MPa
1	145	0.37	150	0.38
2	581	0.37	266	0.17
3	235	0.50	200	0.42
4	581	0.37	291	0.18

模型 1 试验结果显示, 对于现浇横梁等传统节点, 钢管桩伸入现浇混凝土的黏结能力与理论值基本一致; 模型 2 和 4 的结果表明, 当混凝土为桩芯时黏结能力小于理论值; 在加载能力范围

内, 模型 3 由于未设置波纹钢管, 节点被拔出, 模型 4 节点未拔出, 证明波纹钢管对节点抗拔起到良好的提升作用; 模型 3 中, 后浇带混凝土与预制横梁空腔内壁的黏结强度小于理论值。

1.3.2 抗弯试验

在 0~150 kN 加载范围内, 统计不同加载下的挠度(位移)、应变、应力增量, 并测算其梯度, 用于比较不同节点的桩顶约束性能, 结果见表 4。

表 4 模型的挠度、应变及应力增量梯度
Tab. 4 Deflection, strain, and stress increment gradient of each model

模型	模型平均 位移增量/ μm	模型平均 应变增量	钢管桩顶部拉 应力增量/MPa
1	55.2	1.82	0.38
2	58.9	0.75	0.16
3	60.2	0.84	0.17
4	50.7	1.06	0.22

从模型 1 和 2 的位移增量和拉应力增量可以看出, 在同为常规现浇结构的情况下, 桩顶伸入上部结构过短会导致节点约束性能削弱, 弯矩无法在节点内有效传递, 应视为铰接节点。装配式结构的桩顶节点多为桩帽或横梁预留空腔, 桩基进入空腔, 并用桩芯结构向上伸入空腔内后浇筑锚固, 也应视为铰接节点。若弯矩较大, 可能导致节点失效, 此时须进行桩顶以上部分的抗弯计算。

模型 2 和 3 的位移增量和拉应力增量基本一致, 说明在桩基伸入上部结构较短的情况下, 现有横梁节点方案与常规现浇方案的约束性能基本相同, 均应视为铰接节点。

模型 3 和模型 4 的位移增量和拉应力增量表明, 使用波纹钢管内腔能稍微提高装配式桩顶节点的约束性能, 有利于抗弯。

2 工程实例

2.1 工程概况

横沙新洲现代农业产业园配套货运码头工程位于上海市崇明区横沙岛北侧, 紧邻长江口北港水道南侧。此区位风浪条件较差, 可施工的时间相对较短。考虑到建设的紧迫性, 采用装配式高

桩梁板结构，码头长 390 m、宽 30 m、高 7.3 m，码头上部采用预制下横梁、面板与纵梁一体化浇筑、现浇上横梁及现浇铺装层的结构。每榀排架下有 7 根 $\phi 1\ 000$ mm PHC 桩，长 56 m，含 2 根直

桩和 5 根斜率为 4.5:1 的斜桩。考虑到风浪条件，引桥采用同样结构，每排架下有 4 根斜桩。在极端高水位 50 a 一遇波浪作用下，预制下横梁与桩基连接点处的抗拔力较大。码头结构断面见图 2。

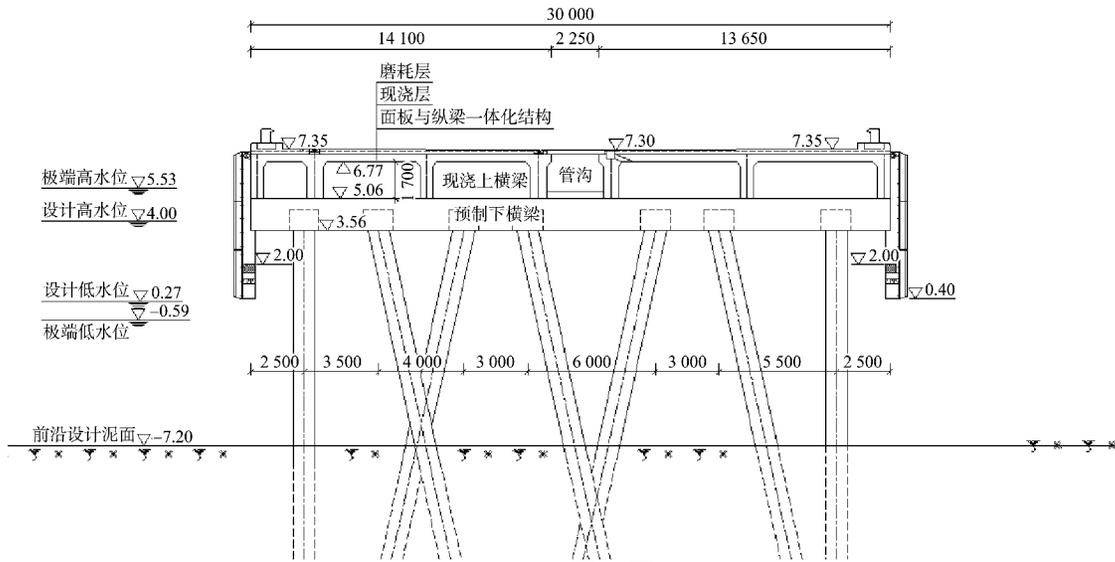


图 2 高桩码头结构断面 (尺寸: mm; 高程: m)

Fig. 2 Structural section of pile-supported wharf (dimension: mm; elevation: m)

2.2 横梁与桩基连接节点的受力情况

该水域 50 a 一遇极端高水位波浪要素为：波高 5.75 m，周期 8.8 s，波长 89.4 m。在波浪作用下，横梁与桩基连接节点会产生 -2 621 kN 上拔力。

取 1.0； S_d 为作用组合的效应设计值，取 2 621 kN； R_d 为抗力，本文取界面黏结力。横梁与桩基连接节点计算结果见表 5。

2.3 横梁与桩基连接节点的设计

2.3.1 节点设计

横梁空腔与桩基之间采用槽钢和 C80 灌浆料进行连接。通过桩芯灌浆料与槽钢、管桩之间的黏结力，以及空腔灌浆料与槽钢、空腔内壁之间的黏结力提供抗力，以抵抗上拔力。

表 5 横梁与桩基连接节点计算结果

Tab. 5 Calculation results of connection joints between cross-beams and pile foundations

连接界面	黏结强度/ MPa	抗力/ kN	上拔力/ kN	是否满足要求
桩芯灌浆料-槽钢	0.6	4 285	2 621	是
桩芯灌浆料-管桩	0.6	2 756	2 621	是
空腔灌浆料-槽钢	0.6	2 753	2 621	是
空腔灌浆料-空腔内壁	0.6	2 778	2 621	是

李峰等^[11]通过对多组 PHC 抗拔管桩进行混凝土填芯轴拉室内足尺试验，得出不同长度、不同管桩内壁界面处理方式的管桩及混凝土黏结强度试验值介于 0.603 ~ 0.774 MPa。根据 CECS 28: 2012《钢管混凝土结构技术规程》，此值取 0.6 MPa。黏结强度取小值，可确保计算的可靠性。

2.3.2 节点连接的加强

空腔内壁强化采用波纹钢管，通过钢筋锚固在预制横梁上。波纹钢管能有效提高节点强度，节点模型试验也证实了其有效性。同时，喇叭口形状可形成榫卯结构，通过材料自身的抗压和抗拉能力抵抗上拔力。此外，在槽钢骨架周围焊接钢筋笼，相较于光滑的槽钢，焊接后的钢筋与灌浆料之间的接触面可提供更大的黏结力，具体做法见图 3。

根据 JTS 167—2018《码头结构设计规范》^[12]，承载能力极限状态结构设计应满足下列要求：

$$\gamma_0 S_d \leq R_d \quad (1)$$

式中： γ_0 为不同结构安全等级的重要性系数，

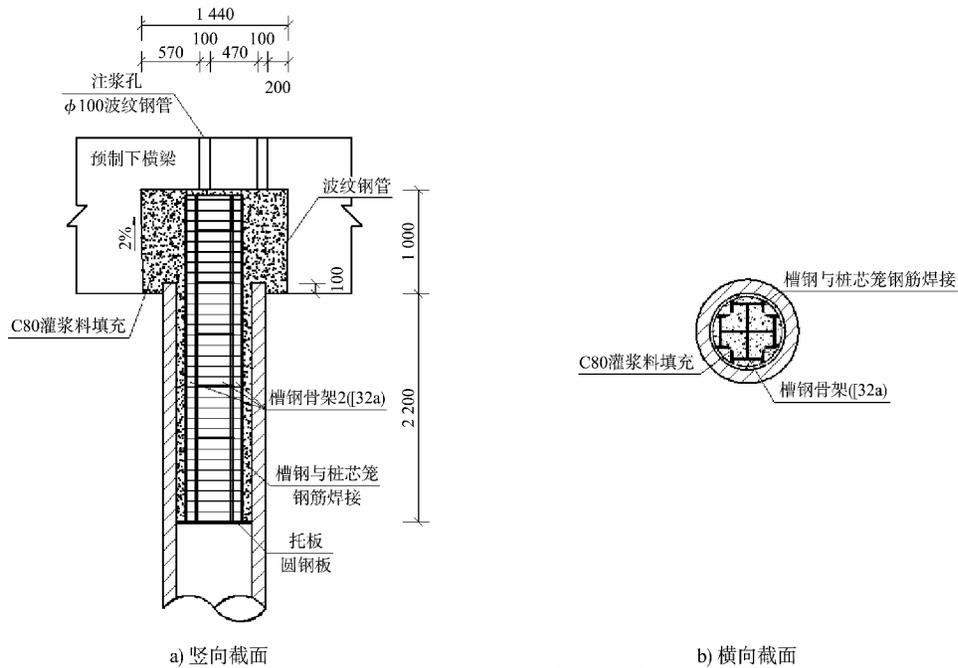


图 3 节点加强设计 (单位: mm)

Fig. 3 Joint strengthening design (unit: mm)

2.3.3 支撑桩设计

在常规码头施工中, 通常使用槽钢支撑横梁模板, 但在装配式结构中, 横梁在预制厂制造后运至现场进行安装; 在安装时, 须将横梁置于设计高度并支撑, 然后灌浆。由于预制横梁自身重力较大, 使用槽钢支撑风险大, 故采用桩基支撑。

1) 码头支撑桩设计。码头前后 2 根桩采用直

桩, 将直桩伸入横梁至空腔顶部, 达到支撑横梁的目的, 在施工过程中须在斜桩上设置槽钢作为辅助支撑。直桩深入横梁后, 其与灌浆料的黏结力提供抗拔力。为提高整体性, 可将与槽钢焊接的钢筋外伸至空腔内, 并用箍筋连接。

直桩伸至空腔顶部时, 可在桩头设 2 个对称的连通槽, 可一次性完成节点灌浆。具体做法见图 4。

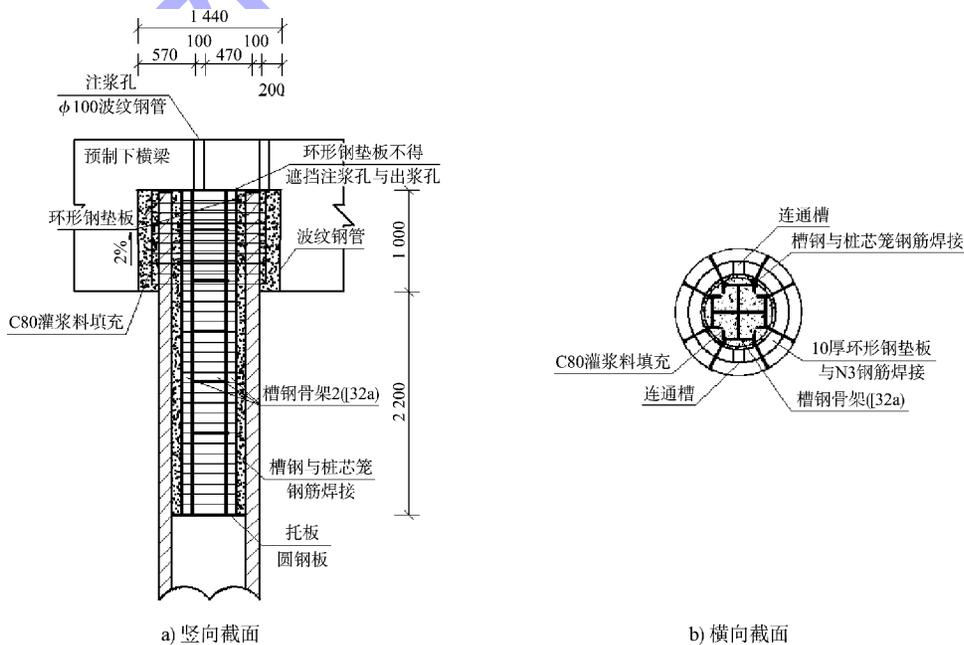


图 4 码头支撑桩设计 (单位: mm)

Fig. 4 Design of wharf support piles (unit: mm)

2) 引桥斜桩支撑桩设计。由于波浪力较大,引桥每榀排架下方的 4 根桩基设为斜桩抵抗波浪力,其支撑由槽钢骨架与桩基共同形成。槽钢骨架上设有支撑槽钢,并通过钢垫板均匀受力。斜桩头

需要处理成水平界面,便于搁置槽钢骨架。在引桥横梁搁置在槽钢骨架上后,支撑槽钢的剪应力为 118 MPa,而 32 a 槽钢的抗剪强度为 175 N/mm²,满足安全搁置需求。具体做法见图 5。

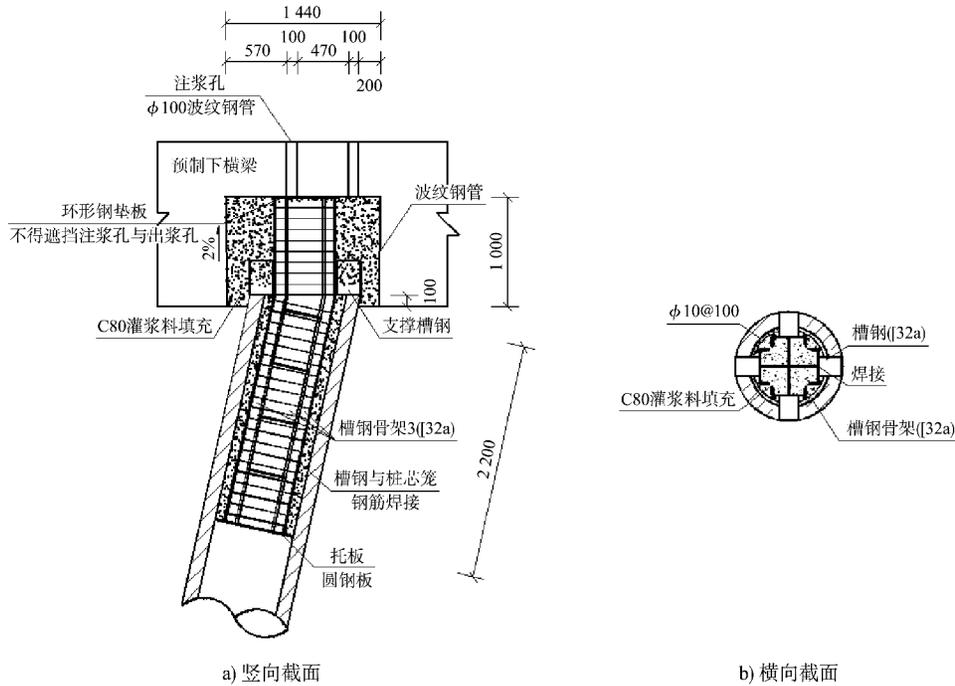


图 5 引桥支撑桩设计 (单位: mm)

Fig. 5 Design of approach bridge support pile (unit: mm)

3 结论

1) 试验结果表明,钢管桩侧壁与现浇桩芯混凝土、后浇混凝土与预制横梁空腔内壁间的灌浆节点黏结强度均满足规范要求,全装配式高桩码头节点设计方案可行。

2) 在复杂自然条件下,可采用槽钢及波纹管等措施对节点进行加强,保证全装配式码头结构的整体安全性。

3) 施工过程中预制横梁安装阶段,优先选用直桩支撑;无直桩时,需要对槽钢骨架做可靠的支撑,避免在安装过程中破坏槽钢骨架。

参考文献:

[1] 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. Innovation design of fully prefabricated high pile wharf structure [J]. Port & waterway engineering, 2023(5): 59-64, 93.

[2] 王世坚,陆晶晶.装配式桩基码头构件制造与加工数字化技术[J].水运工程,2023(5):182-186.
WANG S J, LU J J. Digital technology of manufacturing and processing of prefabricated pile foundation wharf components[J]. Port & waterway engineering, 2023(5): 182-186.

[3] 徐俊,唐洲.装配式技术在连云港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.

[4] 江义,刘亚男.高桩码头装配式节点结合面抗剪设计方法比较[J].水运工程,2019(7):66-72.
JIANG Y, LIU Y N. Comparisons of shear design approach for contact surface of piled wharves prefabricated joint [J]. Port & waterway engineering, 2019(7): 66-72.

[5] 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.
- [6] 刘力真,俞小彤,常西栋,等.全装配式高桩码头桩节点力学特性有限元分析[C]//中国土木工程学会港口工程分会.工程排水与加固技术及港口工程理论与实践:第十二届全国工程排水与加固技术研讨会暨港口工程技术交流大会论文集.北京:中国水利水电出版社,2023:358-367.
- LIU L Z, YU X T, CHANG X D, et al. Finite element analysis of mechanical properties of fully assembled high pile wharf pile nodes [C]//Port Engineering Branch of the Chinese Society of Civil Engineering. *Engineering Drainage and Reinforcement Technology and Port Engineering Theory and Practice: Proceedings of the 12th National Symposium on Engineering Drainage and Reinforcement Technology and Port Engineering Technology Exchange Conference*. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2023: 358-367.
- [7] 钟扬,邱松,吴锋,等.装配式码头灌浆连接节点压弯性能试验研究[J].*水运工程*,2020(8):53-58.
- ZHONG Y, QIU S, WU F, et al. Experimental study on compression-bending performance of grouting connection joint of prefabricated wharf [J]. *Port & waterway engineering*, 2020(8): 53-58.
- [8] 李向民,高润东,张富文,等.灌浆缺陷对接头高应力反复拉压和大变形反复拉压性能影响的试验研究[J].*建筑结构*,2023,53(14):54-57.
- LI X M, GAO R D, ZHANG F W, et al. Experimental study on influence of grouting defects on high tensile-compressive stress reversed and high tensile-compressive deformation reversed properties of joints [J]. *Building structure*, 2023, 53(14): 54-57.
- [9] 王彬. PHC管桩钢筋混凝土填芯轴拔性能室内足尺静载试验研究[D].太原:太原理工大学,2023.
- WANG B. Pull-out performance of reinforced concrete core of PHC pile indoor full-scale static load test research[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2023.
- [10] 钢管混凝土结构技术规程:CECS28:2012[S].北京:中国计划出版社,2021.
- Technical specification for concrete-filled steel tubular structures: CECS28:2012[S]. Beijing: China Planning Publishing House, 2021.
- [11] 李峰,郭昭胜,安增军,等.预应力高强混凝土管桩填芯轴拉性能试验研究[J].*工业建筑*,2022,52(6):1-6,39.
- LI F, GUO Z S, AN Z J, et al. Experimental research on mechanical properties of PHC pipe pile filled with core concrete under axial tension[J]. *Industrial construction*, 2022, 52(6): 1-6, 39.
- [12] 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.

(本文编辑 王璁)

~~~~~

(上接第38页)

- [19] DONG G H, ZHENG Z J, MA X Z, et al. Characteristic of low-frequency oscillations in the Hambantota Port during the southwest monsoon [J]. *Ocean engineering*, 2020, 208: 107408.
- [20] CAMUS P, MENDEZ F J, MEDINA R, et al. Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate [J]. *Coastal engineering*, 2011, 58(6): 453-462.
- [21] PORTILLA J, OCAMPO-TORRES F J, MONBALIU J. Spectral partitioning and identification of wind sea and swell [J]. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 2009, 26(1): 107-122.
- [22] WEI G, KIRBY J T, SINHA A. Generation of waves in Boussinesq models using a source function method [J]. *Coastal engineering*, 1999, 36(4): 271-299.

(本文编辑 赵娟)