



# 预制桩芯桩帽结构承载性能及 安装工艺试验研究\*

冯先导<sup>1,2,3,4</sup>, 刘聪聪<sup>2,4</sup>, 林红星<sup>2,4</sup>

- (1. 中国海洋大学, 山东 青岛 266100; 2. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040;  
3. 中交武汉港湾工程设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430040;  
4. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心, 湖北 武汉 430040)

**摘要:** 高桩码头横、纵梁及面板等构件正逐渐进行装配式结构设计与施工, 而处于水位变动区的桩芯桩帽结构仍以现浇形式为主, 对工程整体工期、质量、安全的影响较大。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。结果表明, 预制桩芯桩帽结构承载性能主要取决于灌浆料与钢管界面的黏结性能, 且新结构的平均黏结强度高于传统现浇混凝土与钢管黏结强度及其相应的规范取值, 具有良好的承载性能; 研发的桩底气囊封堵装置可满足承载、密封性能的要求, 埋入式灌浆过程中浆料流动性较好; 预制桩芯桩帽结构及安装工艺在工程项目中具有良好的应用效果。

**关键词:** 装配式结构; 预制桩芯桩帽; 承载性能; 安装工艺

中图分类号: U656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)11-0215-06

## Experimental study on bearing capacity and installation technology of prefabricated pile core and pile cap structure

FENG Xiandao<sup>1,2,3,4</sup>, LIU Congcong<sup>2,4</sup>, LIN Hongxing<sup>2,4</sup>

- (1. Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China;  
3. CCCC Wuhan Harbour Engineering Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430040, China;  
4. Research and Development Center of Transport Industry of Intelligent Manufacturing Technologies of  
Transport Infrastructure, Wuhan 430040, China)

**Abstract:** The transverse, longitudinal beams and panels of high-pile wharf are gradually being designed and constructed in assembled structure. However, the pile core and pile cap structure in the water level fluctuation area are still mainly cast-in-place, which has a great impact on the overall construction period, quality and safety of the project. The bearing capacity and installation process of the prefabricated integrated pile core cap are studied by model experiment. The results show that the bearing capacity of the prefabricated pile core and cap structure mainly depends on the bonding performance between the grouting material and the steel pipe interface, and the average bonding strength of the new structure is higher than that of the traditional cast-in-place concrete and steel pipe bonding strength and its corresponding standard values, indicating good bearing performance. The developed airbag sealing device at pile bottom can meet the requirements of bearing and sealing performance, and the slurry has good fluidity during the embedded grouting process. The structure and installation process of prefabricated pile core and pile cap have good application effects in engineering projects.

**Keywords:** assembled structure; prefabricated pile core and cap structure; bearing capacity; installation process

收稿日期: 2024-02-02

\*基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB2603000); 山东省重点研发计划项目(2021ZLGX04)

作者简介: 冯先导(1984—), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事港航工程设计与施工技术研究工作。

高桩码头传统现浇施工过程中,钢筋、模板、混凝土频繁遭受潮水侵蚀,水上作业风险高,资源消耗大,工程质量难以把控<sup>[1]</sup>。随着近年来装配式技术的发展,目前已有多种优化设计的探索,例如刘晓辉等<sup>[2]</sup>通过设计一种栈桥墩预制壳体结构、在内部浇注混凝土的方式施工,一定程度减小了现浇施工支、拆模板时间,但主体结构仍需水上现浇;徐俊等<sup>[3]</sup>将横梁、纵梁、桩帽均设计为预制结构,桩帽预留空腔由桩芯外伸的型钢插入,之后灌入混凝土连接,以此减少现浇作业量,但桩芯仍需复杂的现浇作业。哥伦比亚某工程除了采用预制纵、横梁结构外,提出桩芯、桩帽由现浇改成整体式预制结构,将承插式桩帽插入钢管桩中,利用灌浆连接桩芯混凝土与钢管桩,由此实现桩芯、桩帽、横梁、纵梁、面板的码头结构全装配化<sup>[4]</sup>,但针对预制桩帽结构的破坏模式和承载性能等尚缺乏深入研究。

在预制桩芯桩帽结构施工中,桩芯底部灌浆封堵和灌浆方式为关键点。研究发现<sup>[5-6]</sup>,海上风电工程施工中导管架安装同样需进行灌浆封堵,应用较为普遍的是采用特殊的橡胶材料置于空隙内,材料遇水膨胀,与钢管内壁挤压,填补空隙。而结合预制桩芯桩帽灌浆连接施工条件,遇水膨胀橡胶封堵存在诸多缺点,如橡胶材料为一种特殊材料,成本较高;材料遇水膨胀的时间一般需12~24 h,受涨落潮周期影响大,施工效率低下;针对预制桩芯与钢管灌浆连接的新结构,灌浆底部装置除填充空隙外,更主要的是其需承受上部空隙内灌浆料的重力,而仅采用橡胶膨胀封堵难以实现。对于灌浆方式,常用的装配式建筑灌浆方法存在顶部出浆孔区域的浆料不饱满问题,包括灌浆泵嘴拔出前压力不稳定导致缝隙不能灌满,灌浆泵嘴拔出后封堵不及时导致漏浆较多等现象<sup>[7]</sup>,而在港口工程复杂的施工环境下,对于预制桩芯与钢管桩之间的空隙灌浆质量的影响因素更为复杂。

本文通过物理模型试验验证预制桩芯桩帽与钢管桩灌浆连接结构的承载能力,研发桩芯底部封堵装置及灌浆方法,以期提高恶劣海况下装配式码头的施工质量。

## 1 试验概况

### 1.1 结构承载性能试验

图1为预制一体式桩芯桩帽插入钢管桩后灌浆连接形成的结构。依托福建某码头项目,对预制混凝土桩芯桩帽、灌浆料、钢管3种结构连接的模型开展物理模型试验,研究其承载性能。

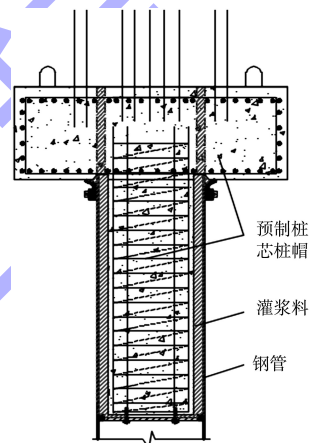


图1 预制桩芯桩帽结构

试验模型及加载见图2。模型采用1:3大比尺设计及制作,因承载性能主要与桩芯、灌浆料、钢管有关,考虑试验的可操作性,在模型中省略桩帽结构。表1为试验工况,桩芯采用C40混凝土预制,桩芯配筋根据截面配筋率相似进行设计,灌浆材料采用超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC),钢管包括Q235材质 $\phi 402$  mm无缝焊接钢管和螺旋焊缝钢管,壁厚8 mm。结合已有的钢管混凝土模型试验研究<sup>[8-9]</sup>,模型设计为推出试验,首先对试件进行预加载,预加载最大值为理论极限承载力的30%。预加载后进行正式加载,加载速率0.3 mm/min,直至试件桩芯顶面的竖向位移达到30 mm为止。荷载值通过试验机内置的传感器获取,位移通过在试件上布设的5个位移传感器获取。

表 1 物理模型试验工况及测试结果

工况	试件编号	钢管类型	直径/mm	灌浆材料	灌浆高度/mm	极限承载力/kN	平均黏结强度/MPa
1	1330-XJ	无缝	402	-	-	962.12	0.60
2	1330-UH-2	无缝	402	UHPC	1 330	1 007.25	0.62
3	1000-UH-1	无缝	402	UHPC	1 000	747.32	0.62
4	1000-UH-2	无缝	402	UHPC	1 000	888.04	0.73
5	800-UH-1	无缝	402	UHPC	800	866.03	0.89
6	800-UH-2	无缝	402	UHPC	800	589.08	0.61
7	500-UH-1	无缝	402	UHPC	500	445.24	0.73
8	500-UH-2	无缝	402	UHPC	500	465.54	0.77
9	LX-1330-UH-1	螺旋焊缝	426	UHPC	1 330	1 604.56	0.94

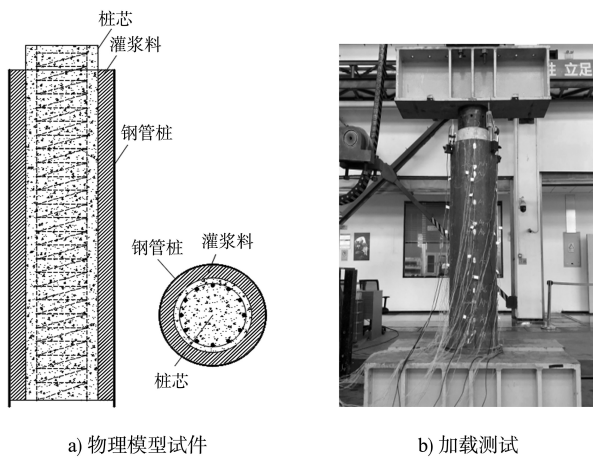


图 2 物理模型及加载测试

1.2 预制桩芯水下封堵试验

针对预制一体式桩芯桩帽结构安装工艺, 首先在桩芯底部安装气囊封堵装置, 然后整体吊装插入钢管, 后进行气囊充气以实现底部密封。气囊封堵装置需解决的是预制桩芯与桩基之间的灌浆自身重力和灌浆产生的冲击作用以及密封性问题。

图 3a) 为研发的桩芯底部气囊封堵装置结构, 该装置钢护板垂直向上的灌浆料主要由钢护板及螺杆锚固桩芯的结构承担, 钢护板与桩基内壁较小空隙内的灌浆料由气囊与桩基摩擦作用及底部钢护板结构共同承担, 由此减小灌浆料直接对气囊的作用力。同时气囊表面密封层为复合土工布和防滑涂料, 增加其摩擦力和密闭性。

气囊封堵效果通过试验验证。如图 3b)、c) 所示, 模型由内径 1 164 mm 的钢管(与实际工程一致)、气囊、上下钢护板组成, 顶部设有进气口, 采用 5 mm 管进气管, 气囊高度为 200 mm; 上下钢护板采用螺栓连接, 可进行高度调整, 适应不同高度的气囊安装。模型试验设计 2 种工况, 工况 1 设计气囊偏位, 竖向荷载为设计荷载的 2.1 倍, 以此判断承载性能; 工况 2 在工况 1 基础上, 在桩芯与钢管空隙内灌注灌浆料, 以此判断封堵性能。

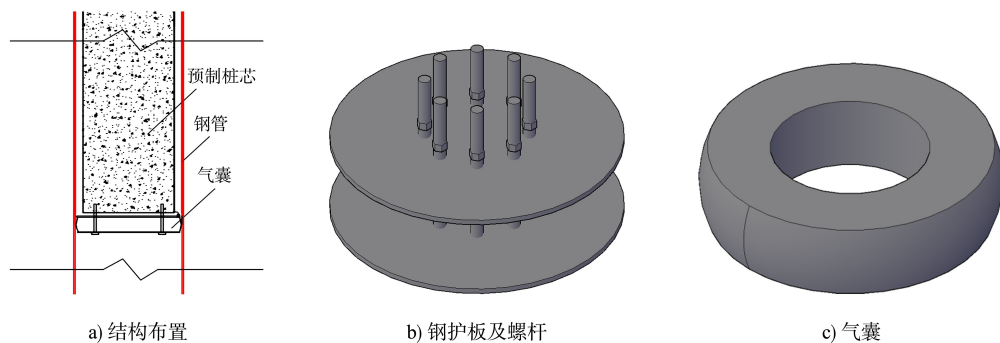


图 3 气囊封堵装置

### 1.3 灌浆试验

灌浆封堵完成后，通过灌浆设备将导管插入桩芯与钢管之间的空隙内进行灌浆。图4为灌浆试验布置，模型根据实际情况分内圈和外圈，内圈为PVC管，直径315 mm、壁厚4 mm；外圈为亚克力透明管，直径420 mm、壁厚8 mm；灌浆缝隙44.5 mm；底模为竹胶板。结合钻孔埋入式后压浆管桩工艺<sup>[10]</sup>，测试预制桩芯与钢管的埋入式灌浆方法效果，即导管始终保持液面以下灌浆。

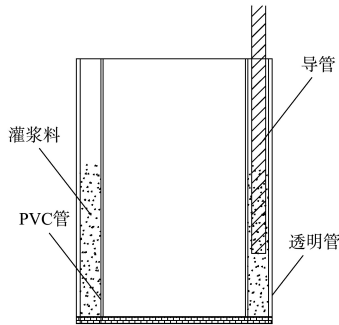


图4 灌浆试验布置

## 2 试验结果及应用

### 2.1 预制桩芯桩帽结构承载性能

图5为试件推出试验完成后的情况，由图可知，桩芯承担竖向荷载时，预制桩芯与钢管灌浆连接结构的破坏集中在灌浆料与钢管之间。整个加载过程中，混凝土桩芯与灌浆料始终保持黏结状态，仅灌浆料与钢管之间产生相对滑移，且随着荷载增加位移增大，由此可知该结构的相对薄弱界面在于灌浆料与钢管内壁之间。



图5 试件加载后

根据钢管混凝土黏结性能相关研究，试件平均黏结强度 $\tau_u$ 为<sup>[11-12]</sup>：

$$\tau_u = \frac{P_u}{\pi D_0 l} \quad (1)$$

式中： $P_u$ 为黏结破坏荷载，通常根据荷载与位移关系曲线取其第1个拐点，kN； $D_0$ 为钢管内径，mm； $l$ 为灌浆长度，mm。

根据图6的试件荷载-位移关系曲线及计算公式，可求得各工况的试件平均黏结强度，见表1。1330-XJ试件作为对照组，其桩芯混凝土与传统工艺相同(现浇施工)，测得混凝土和钢管的平均黏结强度为0.60 MPa。其他工况采用预制桩芯桩帽新结构的施工方法，工况2~8的平均黏结强度为0.62~0.89 MPa。而GB/T 51446—2021《钢管混凝土结构技术规程》针对C40~C80强度等级的混凝土与圆钢管的黏结强度设计取值为0.43~0.60 MPa，欧洲和英国、澳大利亚规范分别建议取值0.55、0.40 MPa<sup>[13-14]</sup>，可知预制桩芯桩帽结构黏结强度大于现浇结构和规范取值。此外，工况9采用工程常用的螺旋焊缝钢管，与实际更为接近，测得极限荷载为设计荷载的1.88倍，因此预制桩芯桩帽结构具有良好的竖向承载性能。

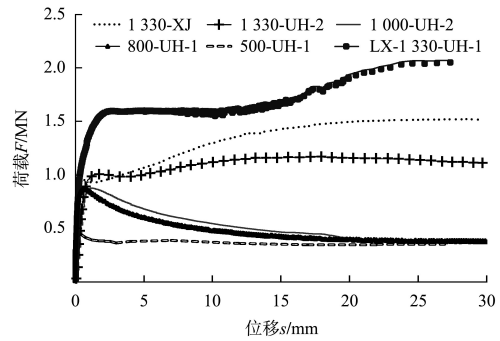


图6 荷载-位移曲线

### 2.2 预制桩芯桩帽结构承插式安装工艺

预制桩芯封堵模型试验结果表明(图7)，气囊表面包含的橡胶层、土工布以及防滑涂料在保证摩擦系数情况下，同时可避免桩基桩孔内壁的不平整导致无法密封的情况；气囊可围绕螺杆平面移动，膨胀后自动居中，可解决预制桩芯安装



过程中偏位导致的气囊与桩基桩孔侧壁接触不均匀问题, 从而提高底部封堵效果。最终依据试验数据, 在大于 2 倍设计荷载条件下, 气囊充气压力 75 kPa, 2 种工况下气囊未发生滑移, 底部未发生漏浆, 满足封堵性能要求。

图 8 为埋入式灌浆试验效果, 底部浆料堆积至一定高度后, 缓慢向四周环向流动, 直至汇合, 整个过程中浆料缓慢匀速流动, 堆积处、汇合处均无气泡。表明采用埋入式灌浆方法灌浆料流动性较好, 无明显气泡产生, 密实性较好。



a) 气囊安装

b) 承载及密封测试

图 7 气囊封堵试验

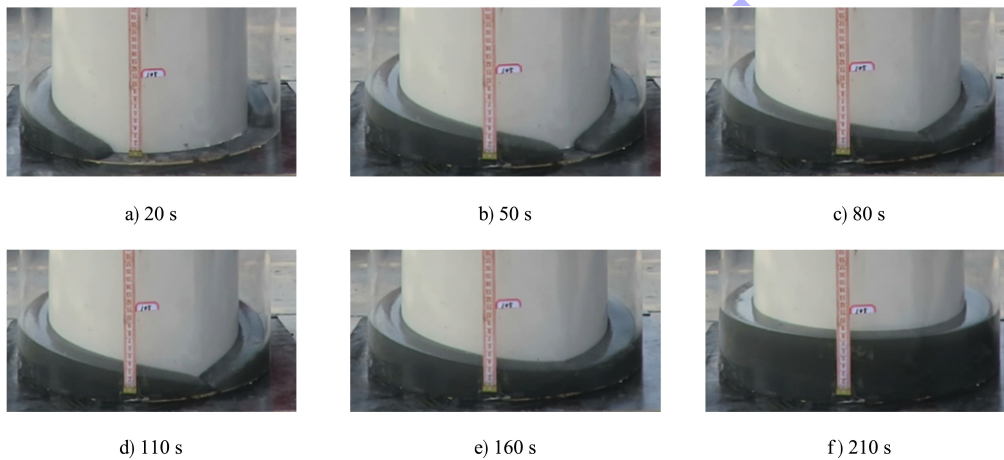
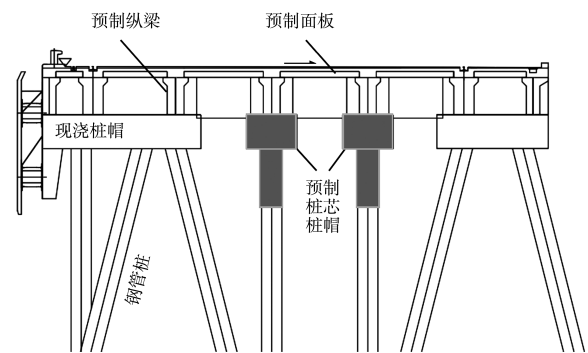


图 8 灌浆工艺试验

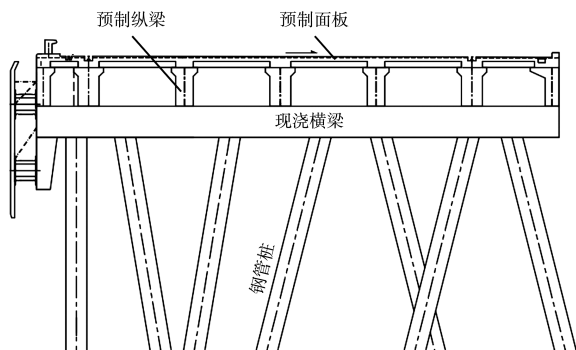
### 2.3 工程应用

福州某项目进行装配式结构设计变更, 如图 9 所示, 原码头结构主要由桩基、现浇横梁、预制纵梁、预制面板及面层组成, 后将其现浇桩芯桩帽、现浇横梁改成预制一体式桩芯桩帽结构、预制横梁组合, 桩基由斜桩变更为直桩。构件装配率由 58% 提高至 78%, 施工过程中减小了一次性现浇混凝土工程量以及潮水对现浇混凝土施工的影响, 缩短了施工工期。



b) 装配式结构

图 9 福州某项目码头结构



a) 传统结构

预制桩芯桩帽在项目实施过程中, 首先由工厂整体预制, 运输至现场后安装气囊封堵装置, 采用施工装备进行安装, 将预制桩芯桩帽插入钢管桩, 对气囊装置充气后, 由下至上进行埋入式压力灌浆, 待灌浆料形成强度后再安装预制梁板, 见图 10, 整体安装工艺经过工程实践, 项目已完成主体施工, 工程质量满足相关要求。



a) 结构预制



b) 承插式安装



c) 吊装施工

图10 一体式桩芯桩帽预制接结构及吊装施工

### 3 结论

1) 预制桩芯桩帽结构的相对薄弱界面为灌浆料与钢管内壁之间, 通过试验测得其平均黏结强度为 $0.62\sim 0.89\text{ MPa}$ , 高于采用传统现浇方式的试件平均黏结强度 $0.60\text{ MPa}$ , 同时高于规范要求值; 另外工程常用的螺旋焊缝钢管的极限荷载为设计荷载的 $1.88$ 倍, 表明预制桩芯桩帽结构具有良好的承载性能。

2) 本一体化桩芯桩帽结构安装工艺在工厂一体化预制, 后安装气囊封堵装置, 再整体吊装插入

钢管, 气囊充气进行底部密封, 最后采用埋入式方法灌浆。通过试验测试, 验证了气囊封堵装置的承载性能和密闭性能, 证明灌浆过程中灌浆料流动性较好, 浆料表明无明显气泡产生, 密实性好。

### 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.
- [2] 刘晓辉, 孔令臣, 武万国, 等. 某 LNG 码头栈桥墩预制壳体结构设计[J]. 中国港湾建设, 2022, 42(10): 46-49.
- [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.
- [4] SIRCAR J, CARLOS E O, KUMAR V K. Seismic design and construction of pile-supported concrete wharves for container and bulk-handling terminals [C]//PIANC-World Congress Panama City, Panama: [s. n.], 2018: 1-17.
- [5] 孙烜, 王强, 李孟超, 等. 大连海上风电单桩抗冰锥结构灌浆施工研究[J]. 南方能源建设, 2021, 8(1): 37-44.
- [6] 李存义, 韩毅平, 张晗, 等. 海上风电机组植入式单桩基础灌浆施工工艺及质量检测技术研究[J]. 能源科技, 2020, 18(10): 49-54.
- [7] 关永强, 陈海珊, 黄胜明, 等. 基于响应面法的装配式桥梁套筒灌浆密实度控制[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(30): 13121-13127.
- [8] 康希良. 钢管混凝土组合力学性能及粘结滑移性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
- [9] 贾恒瑞, 陈宗平, 陈俊睿. 高温后圆钢管再生混凝土界面黏结滑移性能及本构方程研究[J]. 工程力学, 2021, 38(10): 119-133.
- [10] 吕布. 钻孔埋入式后压浆管桩竖向承载性能研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
- [11] 王秋维, 刘乐, 史庆轩, 等. 钢管活性粉末混凝土界面粘结强度计算方法研究[J]. 工程力学, 2020, 37(4): 41-50.
- [12] 王秋维, 史庆轩, 徐赵东, 等. 圆钢管活性粉末混凝土界面黏结性能[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(12): 210-218.
- [13] 王秋维, 王程伟, 刘乐, 等. 钢管混凝土界面粘结性能研究现状与分析进展[J]. 建筑结构, 2021, 51(12): 91-97.
- [14] LU Y Y, LIU Z Z, LI S, et al. Bond behavior of steel fibers reinforced self-stressing and self-compacting concrete filled steel tube columns[J]. Construction and building materials, 2018, 158: 894-909.

(本文编辑 王传瑜)