

· 地基与基础 ·



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*

林红星^{1,2,3,4}, 刘聪聪^{1,2,3,4}, 冯先导^{1,2,3,4}, 何聪^{1,2,3,4}

- (1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040; 2. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430040;
3. 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;
4. 中交公路长大桥梁建设国家工程研究中心有限公司, 湖北 武汉 430040)

摘要: 高桩码头的桩芯、桩帽为桩顶连接关键结构, 而传统水上现浇施工通常面临作业难、施工质量影响因素多等问题。预制承插式桩芯桩帽结构由水上现浇转变为工厂预制, 通过超高性能混凝土灌浆料与钢管桩形成桩顶结构, 避免了水文条件对其施工的影响。通过物模试验开展预制桩芯-桩帽结构的破坏模式及灌浆料配比研究, 结果表明: 竖向荷载下桩顶结构的灌浆料与预制桩芯界面黏结不动, 仅灌浆料与钢管之间产生相对滑移, 灌浆料与钢管内壁的界面黏结性能相对薄弱; 灌浆料与钢管的黏结强度随钢纤维掺入而减小, 随膨胀剂掺入而增大; 塑性膨胀剂掺量 0.08%、中后期国标 II 型膨胀剂掺量 12% 组合为最优配比, 其界面黏结强度在 28 d 内呈增长趋势, 28 d 后趋于稳定。

关键词: 预制桩芯-桩帽结构; 破坏模式; 超高性能混凝土灌浆料; 黏结性能

中图分类号: U656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)11-0176-06

Experimental study on influence of grouting material on bond behavior between prefabricated pile core and steel pipe

LIN Hongxing^{1,2,3,4}, LIU Congcong^{1,2,3,4}, FENG Xiandao^{1,2,3,4}, HE Cong^{1,2,3,4}

- (1. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China;
2. Key Laboratory of Large-span Bridge Construction Technology, Wuhan 430040, China;
3. Research and Development Center of Transport Industry of Intelligent Manufacturing Technologies of
Transport Infrastructure, Wuhan 430040, China;
4. CCCC Highway Bridge National Engineering Research Centre Co., Ltd., Wuhan 430040, China)

Abstract: The pile core and cap of high pile wharf are the key structures of pile top connection, and the traditional cast-in-place construction on water usually faces operational difficulties and construction quality problems. The prefabricated pile core and cap structure is changed from cast-in-place to prefabricated in factory, and the pile top structure is formed by grouting material and steel pipe piles, which avoids the influence of hydrological conditions on its construction. In this paper, the failure mode and grouting material ratio of precast pile core and cap structure are studied by physical experimental. The results show that the interface between grouting material and precast pile core of pile top structure is immobile under vertical load, only the relative displacement between grouting material and steel pipe is generated, and the interface bond behavior between grouting material and inner wall of steel pipe is relatively weak. The bond strength between UHPC grouting material and steel pipe decreases with the incorporation of steel fiber and increases with the incorporation of expansion agent. The combination of

收稿日期: 2024-01-23

*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: 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。

0.08% plastic expansion agent and 12% national standard II expansion agent is the optimal ratio. The interfacial bond strength shows an increasing trend within 28 days and tends to be stable after 28 days.

Keywords: prefabricated pile core and cap structure; failure mode; ultra-high performance concrete(UHPC) grout; bond behavior

随着装配式技术的不断发展,高桩码头桩基、梁、板等结构已逐渐采用预制形式,但桩芯桩帽仍以现浇施工为主,而桩芯、桩帽通常处于水位变动区,采用混凝土水上现浇施工方式,钢筋、模板、混凝土易受海水侵蚀,施工质量难以保障^[1-2]。有学者研究将桩帽、梁板等现浇结构改成预制结构,例如徐俊等^[3]研究将桩帽采用工厂预制方式,在桩帽底部的桩基位置预留空腔,桩芯设置型钢插入桩帽,空腔内通过桩帽顶部预留孔浇筑细石混凝土;连云港港徐圩港区码头项目将横梁整体预制,采用类似方式与桩基连接^[4]。以上方法均通过结构预制减少了水上现浇作业量,提高了施工工效,但需搭设较为复杂的支撑体系,且桩芯仍为现浇作业。预制一体化桩芯桩帽结构则将两种现浇结构改为整体预制,现场装配,插入钢管桩内灌浆连接,可避免施工过程中水文条件的影响,但针对该结构的力学性能、灌浆料的材料性能研究较少。

预制一体化桩芯桩帽结构与钢管桩灌浆连接,其竖向承载性能主要受灌浆料与钢管内壁、灌浆料与桩芯混凝土 2 个界面的黏结性能影响,因此灌浆材料尤为关键。相关研究主要集中在钢管混凝土的黏结性能方面,例如郑亮等^[5]通过试验发现在混凝土中掺入膨胀剂对钢管与混凝土之间的黏结强度具有较大影响,丁庆军等^[6]通过钢管混凝土试件的推出试验得出掺入钢纤维导致黏结性能降低,建议其体积掺量不宜超过 0.75%。刘永健等^[7]通过试验发现界面黏结强度随混凝土养护龄期的增大而略有增大。而对于预制桩芯桩帽与钢管桩灌浆连接结构,在钢管约束下 2 个界面黏结性能强弱及灌浆材料对黏结性能的影响缺乏深入研究。

本文采用超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)灌浆料将预制桩芯桩帽与钢管连接,针对该新型桩顶结构开展模型试验,分析结构

在竖向荷载条件下的破坏模式,研究 UHPC 灌浆材料对比对结构承载性能的影响,以此确定最优配比,以期从灌浆材料方面提高桩顶结构承载能力。

1 试验概况

1.1 模型原理与设计

结合实际工程开展大比尺试验研究,分析预制承插式桩芯-桩帽结构的破坏模式,开展灌浆材料对结构承载性能影响研究,优化灌浆材料配比,提高界面的黏结强度。考虑结构承载性能主要与桩芯、钢管桩有关,试件制作中省略桩帽结构。

依托福建某码头项目,按照 1:3 比尺设计试验模型。如图 1 所示,桩芯采用 C40 混凝土预制,桩芯配筋根据截面配筋率相似设计,钢管为 Q235 材质 $\phi 402$ mm 无缝焊接,钢管桩内无剪力键、加强肋,壁厚 8 mm。桩芯预制完成后插入钢管内,使用灌浆泵对环向空隙进行灌浆,最后养护形成试件。

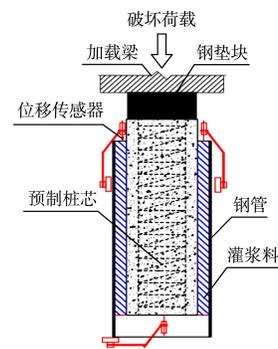


图 1 桩芯与钢管灌浆料模型结构

试验加载布置如图 2 所示,使用 WAW-J5000J 多通道电液伺服系统进行推出试验,桩顶加载的荷载通过试验机内置的传感器直接读取并保存,通过在试件上布设的 5 个位移传感器测量桩芯顶部相对于钢管的竖向位移(对称布设 2 个)、灌浆料相对于钢管的竖向位移(对称布设 2 个)、桩芯底部相对于大地的竖向位移(中心布设 1 个)。



图2 桩芯与钢管灌浆料模型加载装置

接着进行灌浆材料对承载性能影响试验研究，模型如图3所示，将灌浆料直接灌入钢管形成试件。钢管为Q235材质 $\phi 102$ mm无缝焊接钢管，钢管内无剪力键、加强肋，壁厚5 mm，灌浆高度为250 mm，底部预留空隙。使用类似设备进行推出试验，加载端的荷载和相对位移均可通过试验机内置的传感器直接获取，见图4。

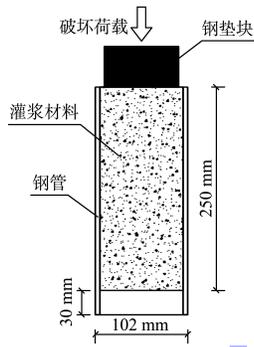


图3 灌浆材料模型结构



图4 灌浆材料模型加载装置

1.2 试验工况

1.2.1 预制桩芯与钢管灌浆连接结构破坏试验

考虑传统现浇桩芯长度及试验设备尺寸，共设计3种不同灌浆高度(500、800、1300 mm)的试件开展推出试验。灌浆料采用的常规UHPC由最紧密堆积石英砂、高标号水泥、高性能外加剂、高活性掺合料等组成，无粗骨料。

1.2.2 灌浆材料试验

根据相关文献研究，针对UHPC材料配比，膨胀剂、钢纤维、养护龄期等因素均对灌浆料的黏结性能有所影响^[8-9]，因此本文共设计28组工况，分别开展试验研究，见表1。

混凝土在不同阶段会产生不同程度的收缩，通常使用塑性膨胀剂和中后期膨胀剂在早期、中后期发挥膨胀效应，补偿收缩。研究表明，塑性膨胀剂铝矾土化合物类在水泥水化初期发生分解不断产生氨气，逐渐膨胀以补偿塑性阶段的收缩^[10]。由此设计工况3~7的塑性膨胀剂掺量为0.04%~0.12%，无中后期膨胀剂，以此分析塑性膨胀剂对UHPC灌浆材料与钢管的竖向承载力影响。

针对中后期膨胀剂的影响，研究表明其中的钙镁化合物在后期水化过程中同水化产物反应生成具有膨胀性的钙矾石、氢氧化钙和水镁石等，从而产生体积膨胀^[11-12]，试验选用中后期膨胀剂应用较广泛的国标I型、国标II型。塑性膨胀剂掺量分别为0.06%、0.07%、0.08%，国标I型中后期膨胀剂掺量8%、10%、12%以及塑性膨胀剂0.08%，国标II型中后期膨胀剂掺量10%、12%，以此探究中后期膨胀剂对灌浆料与钢管黏结强度的影响，见工况8~18。

根据7 d承载性能结果确定最优配比，再制作10根钢管试件(工况19~28)，养护龄期7、14、28、56、112 d，各设2组，分析养护龄期对材料黏结强度的影响。

表 1 灌浆材料膨胀剂试验工况

工况	编号	UHPC 灌浆材料/t	外加剂/kg	水/kg	塑性膨胀剂/%	中后期膨胀剂/%	7 d 承载力/kN	7 d 黏接强度/MPa
1	GXW-1.0	2.1	26	165	0.04	0	34.51	0.48
2	GXW-1.5	2.1	26	175	0.04	0	31.22	0.43
3	SX-04	2.1	34	193	0.04	0	73.98	1.02
4	SX-06	2.1	34	190	0.06	0	75.37	1.04
5	SX-08	2.1	34	190	0.08	0	75.02	1.04
6	SX-10	2.1	34	193	0.10	0	82.49	1.14
7	SX-12	2.1	34	195	0.12	0	121.38	1.68
8	SX06-ZH8- I	2.1	34	190	0.06	8(国标 I 型)	126.24	1.75
9	SX06-ZH10- I	2.1	34	190	0.06	10(国标 I 型)	165.91	2.30
10	SX06-ZH12- I	2.1	34	190	0.06	12(国标 I 型)	163.37	2.26
11	SX07-ZH8- I	2.1	34	190	0.07	8(国标 I 型)	135.62	1.88
12	SX07-ZH10- I	2.1	34	190	0.07	10(国标 I 型)	156.54	2.17
13	SX07-ZH12- I	2.1	34	190	0.07	12(国标 I 型)	205.59	2.85
14	SX08-ZH8- I	2.1	34	190	0.08	8(国标 I 型)	226.23	3.13
15	SX08-ZH10- I	2.1	34	190	0.08	10(国标 I 型)	224.79	3.11
16	SX08-ZH12- I	2.1	34	200	0.08	12(国标 I 型)	230.63	3.19
17	SX08-ZH10- II	2.1	34	190	0.08	10(国标 II 型)	254.68	3.52
18	SX08-ZH12- II	2.1	34	200	0.08	12(国标 II 型)	261.12	3.61
19~28	-	2.1	34	200	0.08	12(国标 II 型)	-	-

注: 工况 1、2 试件编号 GXW-1.0、GXW-1.5 分别代表钢纤维掺量 1.0%、1.5%; 工况 3 为钢纤维对比组。

2 试验结果与分析

2.1 预制桩芯与钢管灌浆连接的破坏模式

如图 3 所示, 加载试验中, 3 种不同灌浆高度 (500、800、1 300 mm) 的试件破坏模式一致, 加载初期灌浆料与钢管发生较小的相对位移, 随着荷载增加, 灌浆料与钢管相对滑移增大, 随之达到极限荷载直至破坏。最终灌浆料与钢管发生较大相对位移, 而灌浆料与混凝土预制桩芯在试验全过程保持黏结状态, 未产生相对位移, 见图 5。



图 5 预制桩芯与钢管灌浆连接测试

为此, 针对同一试件测试灌浆料与钢管黏结强度、灌浆料与混凝土预制桩芯的黏结强度。图 6 为灌浆高度 500 mm 试件的灌浆料与预制桩芯加载情

况, 在预制桩芯与钢管滑移测试后, 制作高 30 mm 的铁环放置在试件底部, 环的内、外径尺寸与灌浆料的界面尺寸一致, 以此保持灌浆料固定不动, 中间预留出桩芯向下滑移的空间。桩芯上部设备采用横梁固定, 通过底座抬升进行试件加载。

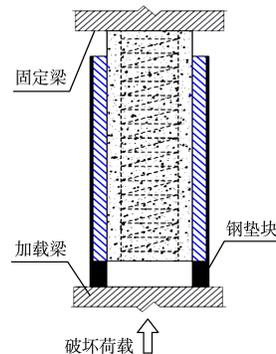


图 6 预制桩芯与灌浆料测试

试验过程中, 灌浆料和钢管由于底部铁环的限制保持不动, 预制桩芯向下滑移, 随着荷载增加而增大, 直至桩顶的混凝土压碎。图 7 为荷载与相对滑移关系曲线, 测得灌浆料与预制桩芯结构的极限荷载为 3 214.67 kN, 对应黏结强度为 7.06 MPa。而灌浆料与钢管极限荷载为 445.52 kN, 对应黏结

强度为 0.73 MPa, 灌浆料与预制桩芯的黏结强度为灌浆料与钢管的 9.67 倍。由此可知, 制承插式桩芯桩帽结构中灌浆料与预制桩芯的黏结强度远大于灌浆料与钢管之间的黏结强度, 灌浆料和钢管之间的界面为相对薄弱界面。

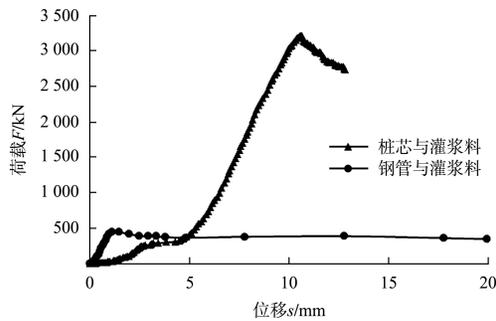


图7 荷载-位移曲线

2.2 灌浆材料对结构黏结强度的影响规律

预制承插式桩芯桩帽结构承载性能主要取决于薄弱界面(灌浆料和钢管之间)的黏结强度, 因此根据灌浆材料与钢管的黏结强度确定最优材料配比。黏结强度 τ_u 参照式(1)计算^[13]。考虑码头结构现场施工通常在浇筑 7 d 龄期后安装梁板或桩顶行走设备等, 需承担一定的荷载, 主要对比分析不同工况下 7 d 黏结强度影响规律。

$$\tau_u = \frac{F_N}{\pi DL} \quad (1)$$

式中: F_N 为黏结破坏荷载, kN, 依据荷载位移曲线取其第 1 个拐点; D 为钢管内径, mm; L 为灌浆高度, mm。

如表 1 各工况下的黏结强度, 对比工况 1~3 可知, 加入钢纤维 1.0%、1.5% 后, 结强度分别降低 52.94%、57.84%, 主要由于钢纤维增加导致流动度降低, 灌浆料孔隙率增大, 且钢纤维抑制膨胀变形, 导致灌浆料对钢管的法向应力减弱, 黏结强度降低^[14]。

对比工况 3~7 可知, 随着塑性膨胀剂掺量增大, 灌浆料膨胀程度增加, 促使灌浆料与钢管径向作用更强, 导致黏结强度提高, 由 1.02 MPa 增长至 1.68 MPa。而当塑性膨胀剂掺量较多(大于 0.08%)时, 体积膨胀率过大, 表面呈现“面包头”, 试件内部形成较大缺陷(图 8), 水泥石致密

性降低, 后期具有开裂风险。因此塑性膨胀剂在灌浆材料中的最佳掺量范围为 0.06%~0.08%。



a) 掺量12%试件表面膨胀



b) 表面打磨后内部缺陷

图8 塑性膨胀剂对灌浆材料内部结构影响

结合塑性膨胀的最大掺量范围, 加入中后期膨胀剂(常用范围 8%~12%)进一步增加膨胀应力。对比工况 8~16 可知, 两种膨胀剂组合加入后, 塑性膨胀剂仍然对黏结强度具有显著作用。例如中后期膨胀剂(国标 I 型)8%条件下, 塑性膨胀剂掺量由 0.06% 增至 0.08% 时, 黏结强度提高 178.91%; 同时, 塑性膨胀剂掺量相同条件下, 黏结强度随中后期膨胀剂掺量增加而增加, 塑性膨胀剂 0.06%~0.08% 掺量时, 掺入中后期膨胀剂 8%、10%、12%, 对应的最大黏结强度分别为 2.30、2.85、3.19 MPa。因此综合分析得出塑性膨胀剂 0.08%、中后期膨胀剂 12% 为最优配比。

中后期膨胀剂国标 I 型属氧化钙类膨胀剂, 是石灰石煅烧后加入适量的石膏与水淬矿渣而制

成, 遇水主要生成氢氧化钙膨胀物质, 限制膨胀率一般为 0.025%; 国标 II 型属硫铝酸钙类膨胀剂, 一般由氧化钙、三氧化二铝、硫酸钙以及石膏在高温下生成, 分为高硫型、低硫型水化硫铝酸钙, 遇水主要生成硫铝酸钙膨胀物质, 限制膨胀率为 0.05%^[15]。由工况 15~18 可知, 膨胀剂掺量相同条件下, 塑性膨胀剂 0.08%、中后期膨胀剂 10% 组合以及塑性膨胀剂 0.08%、中后期膨胀剂 12% 组合的两种情况, 使用国标 II 型膨胀剂的试件黏结强度分别提高 113.20%、113.22%, 最高达 3.61 MPa, 表明硫铝酸钙的膨胀应力高于氢氧化钙膨胀应力, 从而促使采用国标 II 型的试件黏结强度高于国标 I 型。该配比相对工况 3 黏结强度提高 354.29%, 且高于钢管混凝土结构对应的规范取值 0.23~0.55 MPa。

此外, 材料性能随养护龄期增长而发生变化, 如图 9 所示, 7、14、28 d 的黏结强度呈增长趋势, 28 d 后黏结强度波动较小, 总体趋势较为稳定。

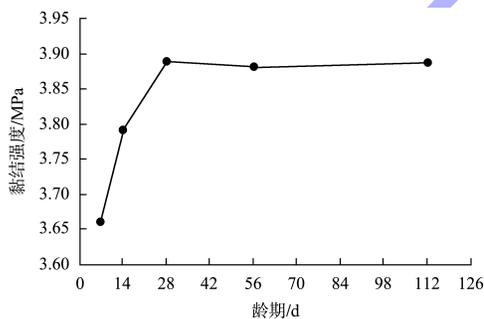


图 9 黏结强度随养护龄期变化

3 结论

1) 在竖向承载下, 预制桩芯与钢管灌浆连接结构灌浆料与预制桩芯黏结不动, 仅灌浆料与钢管之间产生相对滑移, 表明灌浆料与钢管的界面黏结强度弱于灌浆料, 测得灌浆高度 500 mm 试件的灌浆料与预制桩芯的黏结强度为灌浆料与钢管的 9.67 倍。

2) 新结构承载性能与灌浆材料配比直接相关, 掺入钢纤维对其黏结强度有减小作用, 掺入塑性膨胀剂、中后期膨胀剂均有提高黏结强度作用, 最大提高 354.29%。采用塑性膨胀剂掺量 0.08%、中后期国标 II 型膨胀剂掺量 12% 组合为

最优配比。该材料在龄期 28 d 内的黏结强度呈增长趋势, 28 d 后趋于稳定。

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.
- [2] 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.
- [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] 周厚亚, 刘鹏, 吴辉. 新型全装配式高桩码头施工技术[J]. 水运工程, 2023(5): 137-142.
- [5] 郑亮, 张大鹏, 郭宏, 等. 高应力下圆钢管混凝土柱界面粘结性能研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2018, 39(1): 18-23.
- [6] 丁庆军, 周孝军, 牟廷敏, 等. 钢纤维增韧微膨胀钢管混凝土界面粘结性能研究[J]. 功能材料, 2013, 44(6): 809-813.
- [7] 刘永健, 刘君平, 池建军. 钢管混凝土界面抗剪粘结滑移力学性能试验[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2010, 35(1): 17-23, 29.
- [8] 韩帅. 钢管微膨胀轻骨料混凝土短柱基本力学性能研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2016.
- [9] 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.
- [10] 贾璐璐. 钢筋连接用高性能套筒灌浆料性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [11] 于超, 马海峰, 张亚梅. 高性能预应力孔道灌浆料的试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2014(5): 1-7.
- [12] 史艳娜. CSA 膨胀剂在压浆料中的应用及作用机理分析[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(11): 134-137.
- [13] 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.
- [14] LU Y Y, LIU Z Z, LI S, et al. Bond behavior of steel-fiber-reinforced self-stressing and self-compacting concrete filled steel tube columns for a period of 2.5 years [J]. Construction and building materials, 2018, 167: 33-43.
- [15] 王德民, 任伟, 陆军, 等. 高性能膨胀剂在 TOP 未来城工程中的应用研究[J]. 建筑技术, 2016, 47(1): 21-24.