



## 码头桩基钢套筒灌浆加固修复技术\*

蔺威威, 谷坤鹏, 刘思楠, 王泉泉, 李明

(中交上海港湾工程设计研究院有限公司, 上海 200032)

**摘要:** 针对服役多年码头桩基混凝土出现的破损裂缝问题, 依托宁波某码头水工大修工程, 对钢套筒、灌浆作业系统及超早强灌浆料等进行设计开发。结合施工工艺形成成套加固修复技术, 开展现场施工并进行质量检测。结果表明: 超早强灌浆料12 h抗压强度可达到20 MPa以上, 其与钢套筒黏结强度可达6 MPa以上, 其他性能参数均符合规范要求; 使用该成套技术在6个月内成功加固修复232根桩基。

**关键词:** 桩基; 加固修复; 钢套筒; 灌浆作业

中图分类号: U 656.1+13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)05-0231-06

### Reinforcement and repair technology of steel sleeve and grouting in wharf pile foundation

LIN Weiwei, GU Kumpeng, LIU Sinan, WANG Quanquan, LI Ming

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

**Abstract:** In response to the problem of damage and cracks in the pile foundation concrete of wharf that is in service for many years, relying on the hydraulic overhaul project of a certain wharf in Ningbo, we carry out the design and development of steel sleeve, grouting operation system, and ultra early strength grouting material. Combining with the construction process, we form a complete set of reinforcement and repair technology, and carry out the on-site construction and quality test. The results show that the compressive strength of the ultra-early strength grouting material can reach over 20 MPa within 12 hours, and its bonding strength with the steel sleeve can reach over 6 MPa. Other performance parameters comply with the requirements of the specification. The developed complete technology is used to successfully reinforce and repair 232 pile foundations within 6 months.

**Keywords:** pile foundation; reinforcement and repair; steel sleeve; grouting operation

受早期设计标准、堆场荷载、自然环境、施工条件等因素的影响, 服役多年的码头相继出现了不同程度的病害情况<sup>[1]</sup>。桩基作为承受上部结构的基础结构形式, 处于水流变动区域, 长期会遭受水流冲刷、地震、恶劣天气等因素影响, 极易造成混凝土表面脱落、开裂, 进而导致内部钢筋外露腐蚀<sup>[2]</sup>, 尤其是浪溅区与潮差区的结构表面频繁干湿交替、含氧量高, 昼夜温差大, 加速了钢筋腐蚀的电化学反应, 导致裂缝破损最为严重<sup>[3]</sup>, 亟需采取加固修复措施。

目前码头桩基加固修复技术措施主要有玻纤套筒法<sup>[4]</sup>、增大截面法<sup>[5]</sup>、复合材料粘贴法<sup>[6]</sup>等, 据相关工程调研结果发现, 玻纤套筒法存在耐冲磨性能较差, 施工不易固定等导致施工质量不佳等劣势; 增大截面法加固周期较长, 需要支模、振捣、浇筑、养护及拆模周转等一系列混凝土施工工序, 繁琐复杂; 复合材料粘贴法对桩基承载力的提升作用较小; 然而港口码头吞吐量, 连续作业强度高, 如何既快又好地加强码头桩基承载力是一项关键技术。

为此, 本文依托宁波某码头水工大修工程,

收稿日期: 2023-09-03

\*基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB3706504)

作者简介: 蔺威威(1996—), 男, 硕士, 工程师, 从事水工、海工结构加固修复。

通过对钢套筒、灌浆作业系统及超早强灌浆料等进行设计开发,结合施工工艺形成成套加固修复技术进行现场施工及质量检测,总结加固效果。

## 1 工程概况

宁波某码头位于大榭岛的西北部,码头总长

度1 500 m,分4个泊位,共17个结构分段,从东至西为1#~4#泊位。建设等级为3个10万吨级集装箱泊位、1个7万吨级集装箱泊位(水工结构均按靠泊15万吨级集装箱船型设计)。码头采用高桩梁板式结构,桩基采用 $\phi 1\ 200$  mm预应力混凝土组合管桩。码头平面布置见图1。

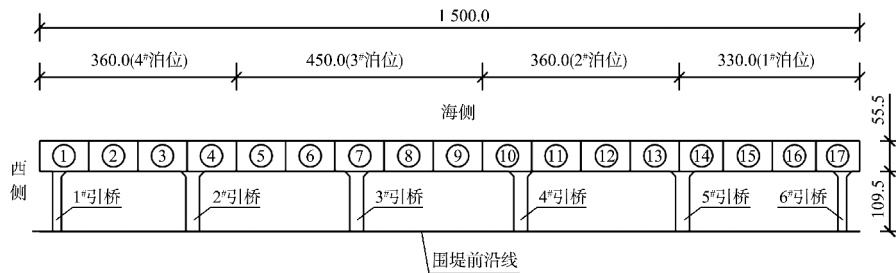


图1 码头平面布置(单位:m)

经过对码头1 691根预应力混凝土组合管桩的全面检测,发现码头有232根桩基在水位变动区出现裂缝及破损的情况,其裂缝长度在1.4~2.2 m,裂缝宽度在0.42~2.49 mm,超声波法检测裂缝深度在58~143 mm,139K号桩基裂缝破损情况见图2。经过对施工条件、社会经济效益等方面综合分析,对加固修复方案进行比选,决定采用钢套筒灌浆料加固修复技术。



图2 码头桩基裂缝破损

## 2 钢套筒灌浆加固修复技术

### 2.1 结构设计

参照JTS 167-15—2019《水运工程预制高强混

凝土薄壁钢管桩设计与施工规程》<sup>[7]</sup>的薄壁钢管离心混凝土管桩(TSC桩)结构设计,该设计原理为受损桩基外侧安装固定钢套筒,其与受损桩基之间形成密闭空间,通过钢套筒上设计的灌浆口在密闭空间内灌入高性能灌浆料,利用自下而上的方式填充可以有效提高密闭空间灌浆料的密实度,待灌浆料养护成型后,可以将钢套筒、受损桩基与自身黏结成整体,形成新的基础结构形式;同时,钢套筒内壁等间距设计剪切键以增强黏结强度。

本工程钢套筒灌浆加固结构设计见图3,钢套筒包覆长度原则上超过裂缝位置不小于500 mm。加固前的预应力混凝土管桩直径为1 200 mm、壁厚为150 mm;加固后的结构直径为1 320 mm(除去钢套筒壁厚),钢套筒壁厚设计为12 mm,灌浆厚度设计为60 mm。参考JGJ/T 406—2017《预应力混凝土管桩技术标准》<sup>[8]</sup>的表A.0.5-3,并参考TSC桩设计计算公式,进行对比计算分析,结果见表1。可以看出,钢套筒灌浆加固修复技术对原始桩基的轴心受压承载力、轴心受拉承载力及受弯承载力设计值可分别提升6.4%、13.6%、13.6%以上。

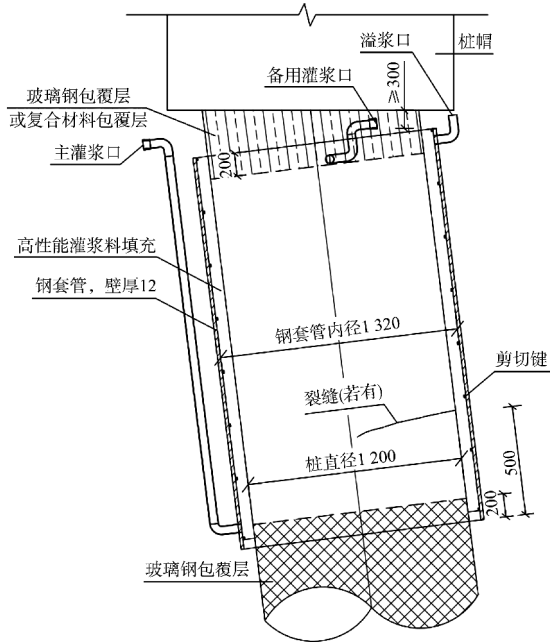


图 3 钢套筒灌浆加固结构设计 (单位: mm)

表 1 钢套筒灌浆加固提升结果

状态	桩身轴心 受压承载力 设计值/kN	桩身轴心 受拉承载力 设计值/kN	桩身受弯 承载力设计值/ (kN·m)
加固前桩基	12 343	5 891	2 854
加固后桩基	≥13 137	≥6 690	≥3 216

注: 加固后桩基按照钢套筒高度为 1.5 m 计算, 实际钢套筒加工高度大于或等于 1.5 m。

## 2.2 钢套筒的加工与制作

为实现受力和灌浆双重作用, 设计的钢套筒见图 4, 其中包括 2 片 U 形筒体结构、灌浆结构、连接结构等, 各构件统一在钢构厂加工制作, 钢构件采取 Q345 和 Q235 材质, 连接结构中采用 8.8 级高强螺栓, 施工过程通过高强螺栓将 2 片 U 形筒体进行合抱拼接。钢套筒的设计使用年限按照 40 年考虑, 防腐措施为预留防腐蚀余量加防腐涂层。防腐涂层采用环氧富锌底漆配套环氧类面漆涂层, 防腐涂层年限按照 20 年设计, 设计厚度为 1 mm, 根据本工程桩基裂缝破损检测结果, 钢套筒加工长度共分为 5 种规格, 即 1.5、2.0、2.5、3.5 和 4.0 m。



a) 钢构厂加工制作



b) 防腐涂装

图 4 钢套筒加工与制作

## 2.3 灌浆作业系统的开发

为保障良好连续的灌浆作业, 开发的灌浆作业系统见图 5, 主要由 2 个操作平台、2 台自动搅拌机、1 台主泵、1 台备用泵、灌浆软管和水箱等组成, 系统尺寸为 6.3 m×4.0 m×4.5 m(长×宽×高), 总质量约 15 t, 灌浆作业能力可达到 3~4 m<sup>3</sup>/h, 具有良好的自动化、模块化及专业化等特点。其中自动搅拌机功率为 22 kW/台, 搅拌机的转速和拌和能力分别与灌浆料类型及灌浆泵排浆量相适应, 并保证均匀、连续拌制浆料; 灌浆泵功率为 50 kW/台, 灌浆设备摆放必须留出足够的空间, 以便能够快速的更换备用泵(30 min 内); 灌浆软管直径为 50 mm, 每段长 10 m, 可通过快速接头相互连接, 可承受 1.5 倍的最大灌浆压力, 进水系统选用可容纳 5 t 淡水的水箱。



图5 灌浆作业系统开发

## 2.4 超早强灌浆料的配制

码头运营强度高、连续作业，且受到潮汐变化影响，可供施工的周期短。为降低上部荷载和船舶横向荷载对灌浆料养护成型的扰动影响，须保障施工周期内灌浆料实现硬化早强等特点，通过大量试验配制超早强灌浆料，采用的灌浆料原材料主要包括：P·O 52.5 普通硅酸盐水泥、52.5 级硫铝酸盐水泥、石英砂、复合矿物超细粉、外加剂及水，其中复合矿物超细粉包括微硅粉、I 级粉煤灰、S105 级矿粉，外加剂包括聚羧酸系高性能减水剂、聚合物乳胶粉、PCS-2 型速凝早强剂等。配制的超早强灌浆料经过室内性能试验检测，其性能参数指标见表 2。同时，研制的超早强灌浆料具有良好的抗水分散性能，与湿表面混凝土正拉黏结强度  $\geq 2.5$  MPa，具备水下浇注的可行性。

表 2 超早强灌浆料性能参数指标

抗压强度/MPa		流动度/mm		28 d 弹性模量/GPa		
12 h	1 d	3 d	28 d		30 min	60 min
$\geq 20$	$\geq 50$	$\geq 80$	$\geq 100$	$\geq 290$	$\geq 260$	$\geq 45$

## 3 施工工艺

### 3.1 施工准备

钢套筒灌浆加固修复工艺的主要工序为：施工准备→玻璃钢的剥除→钢套筒安装→环形空间灌浆→养护。

施工准备工作为：确保灌浆料足够，用油布覆盖在材料上，以保持材料的质量；检查预制灌浆管路是否完好无损、安全有效，并对灌浆管线

进行连接和固定；现场进行施工凿毛、清缝、润湿、坐浆、安装锚栓上部的热缩套管等，这些工序的工具、设备、材料等应提前准备。

### 3.2 玻璃钢的剥除

按照玻璃钢剥除范围要求，确定上、下高程，做出明确标记，确保剥除作业范围无误；采用电动砂轮机对需要剥除部分进行切缝处理，将待剥除区域分割为若干个小的区域，随后人工进行剥除处理。对局部特别难以剥除的，应人工配合角磨机进行剥除处理；受潮位及水位影响，玻璃钢剥除作业的施工人员应与潜水员全程配合作业。

### 3.3 钢套筒安装

钢套筒安装的主要工序为：上部钢抱箍安装→钢套筒筒体安装→连接固定。

1) 上部钢抱箍安装：利用吊机将钢套筒上部的 2 片钢抱箍运送至施工平台上，由施工平台将其运送至待修复的桩基处，将钢抱箍吊至桩上指定高程处，将其拼接安装。

2) 钢套筒筒体安装：由施工平台将半片套筒筒体运送至已安装完上部钢抱箍的桩基处，潜水人员配合施工平台上的施工人员将半片套筒慢慢吊装至指定标高并固定安装，接着重复上一步工序完成另外半片套筒的固定安装。

3) 连接固定：当 2 片套筒均与钢抱箍固定完成后，将 2 片套筒的拼接螺母自上而下进行紧固处理。

### 3.4 环形空间灌浆

环形空间灌浆的主要工序为：润管→搅拌→泵送→停止→设备清洗。

1) 润管：搅拌好的润管料主要用于润滑灌浆泵和灌浆管，润管程序后泵送灌浆料，软管出口泵出正常灌浆料后将软管与预制灌浆管线连接。

2) 搅拌：将灌浆料全部倒入搅拌机，并根据材料使用说明确定用水量和搅拌时间，再加水搅拌制作灌浆料浆体，在灌浆平台搅拌机取样测试材料性能，经确认指标满足要求后方可将搅拌好的灌浆料放入泵车中。

3) 泵送: 正式泵送前, 确认管路上所有的阀门均处于打开状态, 经确认后, 进行泵送, 在开始阶段采用较大流量持续泵送。

4) 停止: 钢套筒的溢浆口发生溢浆时, 应先静置一段时间, 使浆料中的气泡充分溢出, 随后再次进行压力屏浆, 灌浆施工作业结束。

5) 设备清洗: 灌浆结束后, 把海绵球塞入软管并冲洗连接的灌浆软管, 灌浆泵的料斗内装满水, 加压推动管内的海绵球和残存的灌浆料通过管道完成清洗。

3.5 养护

灌浆日平均温度不应低于 5℃, 养护时间不得少于 1 d。

4 现场检测及应用效果

4.1 灌浆料与钢套筒的黏结性能检测

采用钢套筒灌浆加固修复技术结合施工工艺在宁波某码头桩基修复工程中进行现场实施, 并对钢套筒灌浆施工过程的质量进行检测控制, 总结应用效果。

模拟水下施工环境, 开展灌浆料与钢套筒的黏结性能试验。经检测, 灌浆料与钢套筒的黏结强度可达 6 MPa 以上, 表明硬化后的灌浆料与钢套

筒实现了高强结合, 有效提升灌浆加固后桩基结构的整体性, 将钢套筒割除剥开, 硬化后的灌浆料表面见图 6。可以看出, 硬化后的灌浆料表面光滑平整, 无气泡、夹渣, 表明灌浆料已完全填充于钢套筒和受损桩基间的环形空间, 且剪切键周围位置硬化浆体未出现裂缝。



图 6 钢套筒剥开灌浆料的外观

4.2 灌浆料施工质量控制性能参数检测

灌浆料在施工质量控制中重要的检测指标有温度、流动度、抗压强度等, 现场测试结果见表 3。可以看出, 温度指标和流动度指标符合 GB/T 50448—2015《水泥基灌浆材料应用技术规范》<sup>[9]</sup> 要求, 抗压强度远高于规范要求, 具有超早强、超高强的性能特点。

表 3 灌浆料施工质量控制性能参数检测

类型	温度/℃					流动度/mm			抗压强度/MPa			
	拌和水	设备	管线	干粉料	灌浆料入模	初始	30 min	12 h	1 d	3 d	28 d	
规范要求	≤25	≤35	≤30	≤30	≤30	≥290	≥260	-	≥20	≥40	≥60	
实测结果	15~25	30~32	25~30	26~30	25~30	295~310	268~290	20~24	50~56	80~88	100~106	

4.3 总体应用效果

本加固修复工程于 2019 年 6 月开始施工, 11 月结束, 共修复 232 根桩基, 典型桩基修复效果见图 7。经过验收质量检查, 各项性能参数均符合设计和规范要求, 至今未出现质量问题。



图 7 典型桩基修复效果

## 5 结论

1) 依托宁波某码头水工大修工程, 针对解决桩基混凝土裂缝破损问题, 开展了钢套筒、灌浆作业系统、超早强灌浆料的设计开发, 形成了码头桩基成套加固修复技术。

2) 钢套筒灌浆加固修复工艺的主要工序为: 施工准备→玻璃钢的剥除→钢套筒安装→环形空间灌浆→养护。

3) 经现场检测发现, 灌浆料与钢套筒的黏结强度可达 6 MPa 以上; 灌浆料的施工质量控制参数均满足要求, 其中 12 h 的抗压强度可以达到 20 MPa 以上, 可实现快速修复。

4) 采用钢套筒灌浆加固修复法在 6 个月内成功修复 232 根桩基, 竣工验收加固修复总体质量好, 至今未出现质量问题。

### 参考文献:

- [1] 王飞朋, 郑娟, 吴浩杭, 等. 老码头混凝土方桩修复加固方案及技术要点[J]. 水运工程, 2022(1): 87-94, 130.
- [2] 韩路, 顾祥奎. 高桩码头混凝土桩基修复加固技术[J].

中国港湾建设, 2020, 40(8): 58-62, 73.

- [3] 孙红尧, 傅宇方, 陆采荣, 等. 海港工程浪溅区和水位变动区结构的防腐蚀技术回顾[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(9): 716-720.
- [4] 魏明晖, 严锋. 玻纤套筒加固技术在高桩码头维修工程中的应用[J]. 水运工程, 2017(9): 202-205, 213.
- [5] 张瑞玉. 高桩码头桩基修复改造方法[J]. 中国水运(下半月), 2022, 22(2): 78-80.
- [6] 刘亚威, 王丽娟, 周云亮, 等. 碳纤维布在高桩码头加固中的应用[J]. 水运工程, 2023(S2): 118-122.
- [7] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中交上海三航科学研究所有限公司, 国鼎(南通)管桩有限公司. 水运工程预制高强混凝土薄壁钢管桩设计与施工规程: JTS 167-15—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
- [8] 建华建材投资有限公司, 中国建筑科学研究院. 预应力混凝土管桩技术标准: JGJ/T 406—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [9] 中冶建筑研究总院有限公司, 鲲鹏建设集团有限公司. 水泥基灌浆材料应用技术规范: GB/T 50448—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.

(本文编辑 王璁)

(上接第 225 页)

### 参考文献:

- [1] 王建平, 邢方亮, 陈奕芬, 等. 山秀船闸扩能工程上游引航道口门区方案优化研究[J]. 水道港口, 2020, 41(4): 448-453.
- [2] 寇晓东, 周维垣, 杨若琼. FLAC-3D 进行三峡船闸高边坡稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 6-10.
- [3] 徐力泽. 水利工程中高边坡开挖与支护工程的施工要点分析[J]. 黑龙江水利科技, 2022, 50(10): 73-75.
- [4] 李颂章. 涿天河水库扩建工程坝区两岸高边坡开挖与支护技术[J]. 珠江水运, 2022, 13: 43-45.
- [5] 文维. 某水库高边坡开挖施工技术[J]. 河南水利与南

水北调, 2023, 52(4): 63-64.

- [6] 黄锋, 马希磊, 于孙相, 等. 福州某公路岩质高边坡逐级开挖及支护稳定性分析[J]. 工程技术研究, 2023, 8(1): 14-17.
- [7] 江文强. 水库高边坡爆破开挖施工方案研究[J]. 水利科技与经济, 2021, 27(12): 112-116.
- [8] 郑鹏飞. 高边坡路堑控制爆破施工技术研究[J]. 智慧城市, 2020, 6(18): 144-145.
- [9] 刘乾. 浅谈控制爆破在复杂环境下的应用[J]. 硅谷, 2011(5): 161.
- [10] 郭冬生. 三峡船闸高边坡锚固施工技术[J]. 人民长江, 2008, 39(7): 6-7, 82.

(本文编辑 王传瑜)