



港口改扩建工程桩基合格率提升施工技术

沈树茂¹, 张一博²

(1. 上海国际港务(集团)股份有限公司, 上海 200080; 2. 中交三航局第二工程有限公司, 上海 200100)

摘要: 作为国内首个系统化港区更新工程, 上海港罗泾港区集装箱码头改造一期工程坚持绿色、智慧及资源整合, 保留老旧预应力高强度混凝土(PHC)桩基、老桩中沉新桩, 减少海洋地质扰动。针对老旧港区升级工程中沉桩合格率受新老桩基的距离不足 40 cm、水下障碍物测量误差及打桩船性能制约的问题, 进行提升近距离沉桩精度的工艺优化研究, 采用新技术“激光雷达扫描+三维建模”模拟碰撞, 引入振动沉桩施工技术以及全回转打桩船合理规避碰撞难题, 实现工前及早预判碰撞风险, 合理调整桩位从而实现了精准穿插, 并对特殊桩位制定钢管桩替代 PHC 管桩的措施。最终桩基单位工程正位率及合格率均在 95% 以上。该技术体系成功解决了复杂条件下沉桩难题, 为老旧码头绿色智慧升级改造提供了关键技术支持和实践经验。

关键词: 三维建模; 绿色; 激光雷达扫描

中图分类号: U655.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)S1-0247-06

Improve qualification rate of pile foundation in port reconstruction and expansion projects

SHEN Shumao¹, ZHANG Yibo²

(1. Shanghai International Port (Group) Co., Ltd., Shanghai 200080, China;

2. No. 2 Engineering Co., Ltd. of CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Shanghai 200100, China)

Abstract: The phase I container terminal renovation project in Luojing port area of Shanghai Port is the country's first systematic port renovation project. It adheres to green, intelligent, and resource integration principles, retaining old pre-stressed high-strength concrete (PHC) pile foundations and sinking new piles into the old ones to minimize marine geological disturbance. In view of the problems that the qualification rate of the upgraded pile sinking in the old port area is limited by the distance between the new and old pile foundations at least 40 cm, the measurement error of underwater obstacles and the performance of the piling ship, the process optimization research to improve the accuracy of the short-range pile sinking is carried out, and the new technology “LiDAR scanning measurement and 3D modeling” is used to simulate the collision, and the vibrating pile sinking construction technology and the full-rotation piling ship are introduced to reasonably avoid the collision problem, so as to realize the early prediction of the collision risk before construction, and the reasonable adjustment of the pile position to achieve accurate interspersing. Measures to replace PHC pipe piles with steel pipe piles are developed for special pile positions. The final pile foundation unit project alignment rate and pass rate are more than 95%. The technical system successfully solves the problem of pile sinking under complex conditions, and provides key technical support and practical experience for the green and intelligent upgrading and transformation of old terminals.

Keywords: 3D modeling; green; LiDAR scanning measurement

上海港罗泾港区集装箱码头改造一期工程(简称罗泾改造一期工程)实施过程中创新采用了保留

老旧桩基, “老桩中沉新桩”的施工方法。沉桩作业常常面临地质条件复杂、水文环境多变等方面

收稿日期: 2025-05-15

作者简介: 沈树茂(1984—), 男, 高级工程师, 研究方向为港口工程建设管理。

影响,在港口工程施工环节对于基础支撑的要求十分严格^[1],水上沉桩质量直接对整体码头项目的建设进度与结构安全有很大影响^[2]。本文工程围绕“提升改扩建码头沉桩合格率”,引入激光雷达扫描+三维建模的施工技术,结合计划-实施-检查-处理(plan-do-check-act,PDCA)循环的质量提升工具,实现了老桩中精准沉新桩,夯实了桩基质量,包括缩短工期、提高质量可靠性以及降低安全风险等方面的显著成果^[3]。

1 工程概况

罗泾改造一期工程是国内首个系统化港区功能更新项目,位于上海市宝山区。该工程将原煤炭作业区转型升级为超大型集装箱集散区,建成后利于提升上海国际航运中心能级,增加长三角港口群运输规模。其内容主要包括:拆除工程、水上沉桩、预制构件安装、面层浇筑及相应配套附属工程建设。由于改造工程沉桩要面临老码头拆除后新旧桩碰桩问题,沉桩异常的发生概率相较于新建码头更高,并且工期紧张。因此,高质量、高效率完成改造区域沉桩,不仅要排除沉桩过程可预见的问题,还要及时合理解决现场突发状况。

工程将 10 万吨级码头原煤炭一期卸船码头上部结构全部拆除,预应力方桩在设计港池底及岸坡下 2 m 以上全部截除。原始基础上存留近 900 根老桩,拆除原码头结构后新建码头共 8 个结构段,

每个结构段排架间距 6.5 m,每个排架下设置 10 根桩,前轨道梁下方打设 1 对直径 1 000 mm 钢管桩叉桩,后轨道梁下方打设 1 对直径 1 000 mm 的预应力高强度混凝土(pre-stressed high-strength concrete,PHC)桩叉桩,中间纵梁下方设置 3 对直径 800 mm 的 PHC 桩叉桩。新老桩位交错布置,为后续施工造成了许多不确定因素。上游 10 万吨级大码头桩基工程量见表 1。

表 1 上游 10 万吨级大码头桩基工程量
Tab. 1 Engineering quantity of pile foundation engineering for 100,000-ton class large wharf in upstream

桩型	桩径/mm	桩长/m	数量/根
钢管桩	1 000	59.0	54
	1 000	58.5	90
PHC 桩	800	56.0	93
	800	57.0	180
	800	58.0	162
	1 000	55.0	30
	1 000	56.0	58
	1 000	57.0	54

2 现状调查

在上游 10 万吨级大码头沉桩 60 根后,调查其过程中遇到的问题,统计后汇总发现有 9 根异常桩,异常桩发生率为 15%。

对异常桩发生的情况进行具体分析,见表 2。异常现象包括偏位超差、桩顶高程超高、扭角超差、斜率超差、桩顶碎裂等,异常桩发生率与建设单位要求的 5%存在差距。沉桩过程发生异常现象的桩占比见图 1。

表 2 沉桩过程异常现象频率
Tab. 2 Frequency of abnormal phenomena in pile sinking process

异常现象	出现频次									频次 合计	频率/ %	累计 频率/%
	A2 桩	A5 桩	A20 桩	B10 桩	C4 桩	C20 桩	D11 桩	D18 桩	D30 桩			
偏位超差	1	1	1	0	0	1	1	0	1	6	40	40
桩顶高程超高	0	1	1	1	0	0	1	1	0	5	33	73
桩顶碎裂	0	0	0	0	0	0	1	1	0	2	13	86
扭角超差	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	7	93
斜率超差	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	7	100
总计	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	-	-

注: A2 桩与 C20 桩为钢管桩,其余均为 PHC 桩。

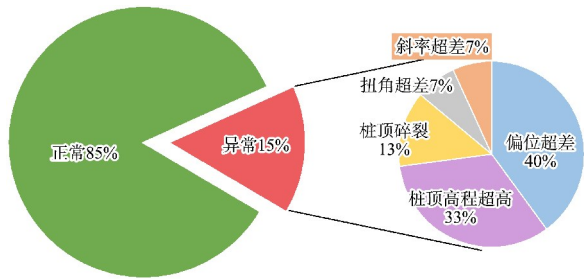


图 1 沉桩过程发生异常现象的桩占比

Fig. 1 Proportion of piles with abnormal phenomena in sinking process

3 目标设定

根据建设单位要求，桩基承载力必须满足设计要求；桩检资料必须齐全；I类桩应达到90%以上，无Ⅲ、Ⅳ类桩；桩的平面位置准位率应达到90%以上；异常桩的处理数不得大于总桩数的5%。

影响码头改造工程异常沉桩发生率的两大症结为桩顶高程超高和偏位超差。经共同讨论后判

断，桩顶高程超高、偏位超差的解决程度在85%，扭角超差和斜率超差两个问题可以解决的程度在70%，计算得出改造码头异常桩发生率为4%。

根据以往工程经验，外高桥二期项目类似拆除及改建工程过程中异常桩基发生率为5%。结合以上方面，经商议决定将目标预设“改造工程异常沉桩发生率小于4%”。

4 原因分析

针对“降低码头改造工程异常沉桩发生率”施工问题的症结，对沉桩异常的原因进行逐项分析，见图2。

5 制定降低异常桩发生率的对策措施

鉴于上述原因分析，为确保目标的实现，制定了相应的对策措施见表3。

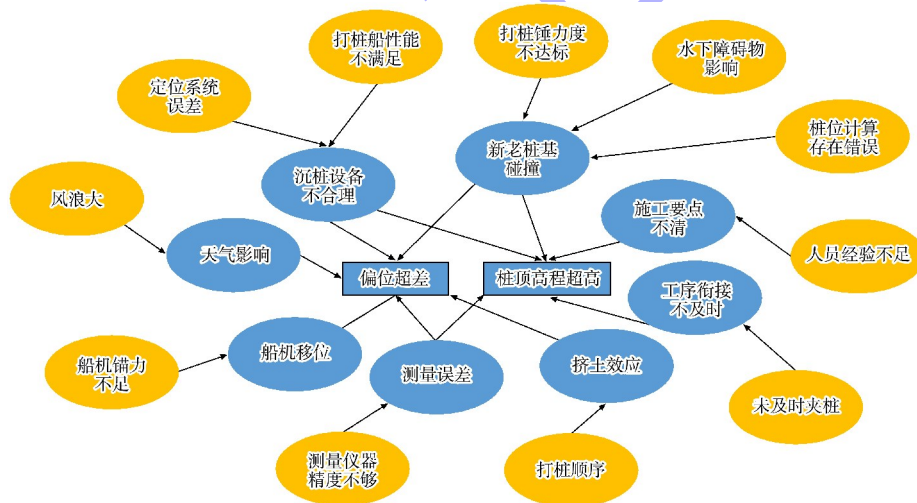


图 2 原因分析关联图

Fig. 2 Correlation diagram of cause analysis

表 3 对策措施

Tab. 3 Countermeasures and measures

要因	对策	目标	措施
水下障碍物测量精度有误差	实施水下三维扫测	桩位偏差不得超过±20 cm	采用三维扫测手段,对现场水域进行扫侧,排查不明障碍物; 结合前期激光扫描数据,使用建筑信息模型(building information modeling, BIM)技术计算老桩准确坐标; 高应变检测满足承载力要求则对高桩进行截桩
打桩船性能不满足	更换为回转打桩船	直桩偏位,定位精度达到6 cm	传统打桩船更换为回转打桩船,适应多种打桩位置角度; 增加经验丰富的船员进行抛锚,增加船机稳定性

6 关键技术实施

6.1 针对水下障碍物测量精度有误差的技术措施

6.1.1 措施 1

采用三维扫测手段，对土层的性质、分布等相关指标进行全面的分析^[4]。对现场水域进行扫测，排查不明障碍物。

2023 年 3 月 8 日，对沉桩区域水下进行激光扫测，摸查水下老桩基及障碍物情况。对水下情况有更清晰的了解后，商定沉桩注意事项后再次交底。水下扫测图见图 3。

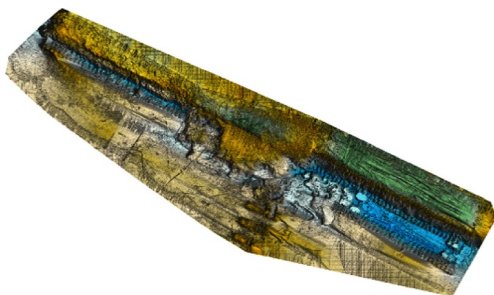


图 3 水下扫测图
Fig. 3 Underwater scanning map

6.1.2 措施 2

结合前期激光扫描数据，使用 BIM 技术计算老桩准确坐标。三维建模界面见图 4。通过对图纸初设计的桩建模，发现存在 400 多根桩间距小于 40 cm。

经过调整桩的扭角、斜率，降低了异常桩的占比，降低了异常桩的发生率。

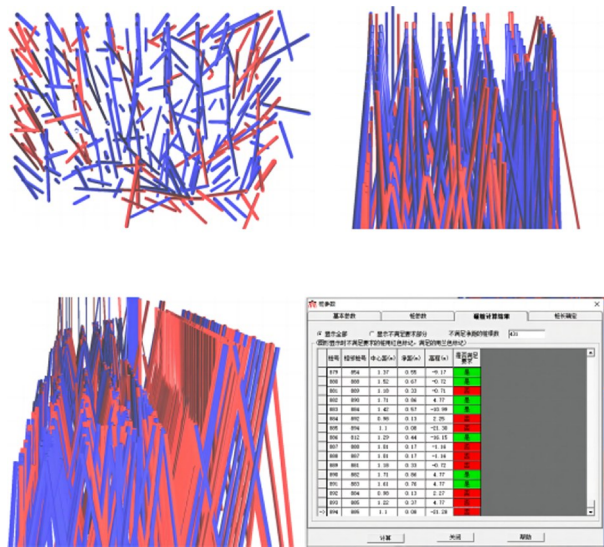


图 4 三维建模界面
Fig. 4 3D modeling interface

6.1.3 措施 3

对高桩实施高应变检测，若满足设计承载力要求则进行截桩。

本文工程的沉桩过程记录、高应变检测以及轴向抗压、静荷载试验结果^[5]满足设计承载力要求，见表 4。

表 4 高应变检测结果
Tab. 4 High strain detection results

桩号	桩型	最大锤击力/kN	最大压应力/MPa	传递能量/kJ	极限承载力/kN	完整性系数/%
40-G	直径 800 mmPHC 桩	7 574	31.8	88.5	6 284	100
48-C	直径 800 mmPHC 桩	6 376	26.7	56.1	7 632	100
34-C	直径 800 mmPHC 桩	6 685	28.0	83.8	7 667	100
32-C	直径 800 mmPHC 桩	6 671	28.0	83.3	7 611	100
48-G	直径 800 mmPHC 桩	6 955	29.2	88.0	8 017	100
18-G	直径 800 mmPHC 桩	7 112	29.8	85.5	7 987	100
21-D	直径 800 mmPHC 桩	7 189	30.1	84.7	7 450	100
14-D	直径 800 mmPHC 桩	7 724	32.4	85.3	7 772	100
2-E	直径 800 mmPHC 桩	7 068	29.6	90.5	7 503	100
3-E	直径 800 mmPHC 桩	6 930	29.1	75.4	7 514	100
12-E	直径 800 mmPHC 桩	6 833	28.7	70.6	7 518	100
13-E	直径 800 mmPHC 桩	7 160	30.0	81.3	7 466	100

6.1.4 效果验证

经过组织实施，水下激光扫测的结果让 QC 小组对水下情况了解更加清晰，BIM 技术计算出新

老桩基距离，通过调整桩基参数，减少了碰桩概率，降低桩顶高程超高的情况。通过分析桩基承载力核算结果，对高桩也予以截除。效果达到了

预期目标。

6.2 针对打桩船性能不满足的技术措施

6.2.1 措施 1

传统打桩船更换为全回转打桩船进行施工，并有 1 艘运桩驳和 1 艘拖轮配合施工^[6]。

发挥全回转打桩船龙口可以 360°旋转的优势，可以适应更复杂、更受限的水域条件。

全回转打桩船拥有的 7 个 10 t 海军锚及 4 根液压锚锭桩，稳定性好，可以应对大风大浪恶劣施工条件，吊桩能力达到 1 000 kN。吊杠可 360°回旋，船舶固定在一个位置就可以把相近几个位置的桩都打完，不需要频繁挪动船体，工作效率高。船舶装有先进的定位系统，提供三维坐标，打桩定位可精确到 6 cm 以内。

6.2.2 措施 2

增加经验丰富的船员进行抛锚，从而增加船机稳定性。

对全回转打桩船的船员进行技术交底，选择经验丰富的船员、操作人员进行施工。

6.2.3 效果验证

I/J 行、46~51 排架桩基的沉桩偏位结果见表 5。规范^[7-9]要求直桩偏位<10 cm，斜桩偏位<15 cm，沉桩效果达到了目标。

表 5 桩基偏位结果						
Tab. 5 Results of pile foundation offset						
行号	排架号	规格	平面 斜度	桩基偏位/mm 扭角/ (°)	x y	
					方向	方向
I	46	1 000PHC×56 000	5:1	15	47	57
	47	1 000PHC×56 000	5:1	15	45	82
	48	1 000PHC×56 000	5:1	15	26	22
	49	1 000PHC×56 000	5:1	15	46	13
	50	1 000PHC×56 000	5:1	15	22	-18
	51	1 000PHC×56 000	-	-	49	8
J	46	1 000PHC×56 000	8:1	20	56	69
	47	1 000PHC×56 000	8:1	20	37	-28
	48	1 000PHC×56 000	8:1	20	-58	29
	49	1 000PHC×56 000	-	-	31	-30
	50	1 000PHC×56 000	8:1	20	-80	-88
	51	1 000PHC×56 000	8:1	20	59	72

7 技术成果验证

在采取对应的措施后，对 2023 年 4 月 1—9 日之间的沉桩过程异常现象发生情况进行统计。检查 60 根桩的沉桩记录，异常桩为 2 根，其中 1 根为偏位超差，1 根为桩顶高程超高，异常桩发生率为 3.3%。采取对应的措施后沉桩过程异常现象频率见表 6，采取对应的措施后沉桩过程发生异常现象的桩占比见图 5。

表 6 采取对应的措施后沉桩过程异常现象频率
Tab. 6 Frequency of abnormal phenomena in pile sinking process after taking corresponding measures

异常现象	出现频次		频次 合计	频率/ %	累计 频率/%
	A2 桩	A5 桩			
偏位超差	1	0	1	50	50
桩顶高程超高	0	1	1	50	100
总计	-	-	2	-	-

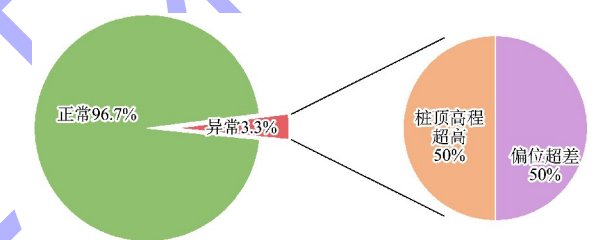


图 5 采取对应的措施后沉桩过程发生异常现象的桩占比
Fig. 5 Proportion of piles with abnormal phenomena in sinking process after taking corresponding measures

8 结语

1) 全回转打桩船在狭窄水域、老桩中沉新桩以及码头改造工程中沉桩敏捷性及精度控制上较传统打桩船有优势。

2) 工前需要对水下障碍物进行扫描与设计图纸老桩的桩位进行核对，掌握精准数据并应用三维建模施工技术可提高一次沉桩合格率。

3) 针对高桩合格与否的问题，需要综合对比地质条件、贯入度以及高应变检测，三者复核后达到承载力后正常截桩即可。

4) 本文通过系统研究成功保障老旧桩基间精准沉桩，减少现场的异常桩数量，达到了预期的效果。该技术为老旧码头绿色智慧升级改造提供了关键技术支撑和实践经验。

参考文献:

- [1] 周长友. 沿海港口工程高桩码头 PHC 桩沉桩施工技术应用[J]. 珠江水运, 2024(10): 138-141.
ZHOU C Y. Application of PHC pile sinking construction technology for high-pile wharf in coastal port engineering[J]. Pearl River water transport, 2024(10): 138-141.
- [2] 孙永亮, 单海波. 高桩码头 PHC 沉桩施工质量控制要点[J]. 珠江水运, 2021(3): 73-74.
SUN Y L, SHAN H B. Key points of quality control of PHC pile sinking construction at high pile wharf[J]. Pearl River water transport, 2021(3): 73-74.
- [3] 王晖, 吴嘉昱. 大直径 PHC 管桩在独山港高桩梁板式码头施工中的应用[J]. 珠江水运, 2024(8): 115-117.
WANG H, WU J Y. Application of large-diameter PHC pipe pile in construction of high pile beam plate wharf in Dushan Port[J]. Pearl River water transport, 2024(8): 115-117.
- [4] 董平. 高桩码头工程施工方案优化[J]. 工程建设与设计, 2019(18): 176-177.
DONG P. Optimization of construction scheme of high pile wharf[J]. Construction & design for project, 2019(18): 176-177.
- [5] 林福裕, 李夫仲, 杨梅. 内河高桩码头大直径 PHC 管桩沉桩现场试验及参数优化[J]. 水运工程, 2024(4):

74-81, 87.

LIN F Y, LI F Z, YANG M. Field test and parameter optimization of large-diameter PHC pipe pile sinking at inland high pile wharf[J]. Port & waterway engineering, 2024(4): 74-81, 87.

- [6] 张镇. 大直径 PHC 管桩在码头施工中的应用[J]. 中国水运, 2023, 23(20): 83-85.

ZHANG Z. Application of large-diameter PHC pipe pile in wharf construction [J]. China water transport, 2023, 23(20): 83-85.

- [7] 水运工程质量检验标准: JTS 257—2008[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.

Standard for quality inspection of port and waterway engineering construction: JTS 257-2008 [S]. Beijing: China Communications Press, 2008.

- [8] 港口工程桩基规范: JTS 167-4—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.

Code for pile foundation of harbor engineering: JTS 167-4-2012[S]. Beijing: China Communications Press, 2012.

- [9] 高桩码头设计与施工规范: JTS 167-1—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.

Design and construction code for open type wharf on piles: JTS 167-1-2010[S]. Beijing: China Communications Press, 2010.

(本文编辑 王璁)

(上接第 228 页)

- [8] 袁峰. 土工格栅加筋碎石垫层在公路软土地基中的应用[J]. 工程机械与维修, 2024(10): 158-160.
YUAN F. Application of geogrid-reinforced crushed stone cushion in highway soft soil foundations[J]. Construction machinery & maintenance, 2024(10): 158-160.
- [9] 刘家才, 张斌. 集装箱堆场设备-轨道-基础的协同设计[J]. 水运工程, 2022(8): 167-171.
LIU J C, ZHANG B. Collaborative design of equipment-rail-foundation of container yard [J]. Port & waterway engineering, 2022(8): 167-171.
- [10] 肖熠, 姜雄. 自动化集装箱堆场中复杂应力历史地基的工后沉降预测[J]. 水运工程, 2025(3): 139-144.
XIAO Y, JIANG X. Post-construction settlement prediction

of ground with complex stress history in automated container yard[J]. Port & waterway engineering, 2025(3): 139-144.

- [11] 王贤珠. 浅析钢塑格栅与级配碎石砂垫层在高填方路堤上的应用[J]. 福建交通科技, 2017(2): 19-22.

WANG X Z. Brief analysis on application of steel-plastic geogrid and graded crushed stone-sand cushion in high-fill embankments [J]. Fujian traffic science and technology, 2017(2): 19-22.

- [12] MA B, WEI S, LI N, et al. Loading capacity strengthening to cement-stabilized crushed gravel using reinforced wire mesh[J]. Road materials and pavement design, 2014, 15(3): 733-745.

(本文编辑 王璁)