



# 静压植桩技术在板桩-重力式复合结构码头 加固改造中的应用

龚伟伟<sup>1,2</sup>, 李业富<sup>3</sup>, 陈锋<sup>1,2</sup>, 陈晓凯<sup>4</sup>, 陈进<sup>1,2</sup>, 朱巡幸<sup>1,2</sup>

(1. 中交基础设施养护集团有限公司, 北京 100011; 2. 中交特种工程有限公司, 湖北 武汉 430071;  
3. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100010; 4. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

**摘要:** 针对板桩-重力式复合码头加固改造中存在的复杂地层、既有结构敏感性及狭窄施工空间等难题, 开展了静压植桩技术应用研究。采用压桩力分解分析、设备选型对比和施工工艺优化等方法, 建立了适应“结构保护+复杂地层+空间受限”3重约束条件的钢板桩静压施工体系。结果表明: 在穿越不同构造物及地基条件时, GIKEN SCU-600M 静压机结合螺旋钻杆分阶段钻掘技术, 可有效降低桩端阻力, 将压桩力控制在 150~350 kN 之间, 实现稳定贯入; 该施工体系建立后, 施工效率提升约 31%, 单桩平均施工时间由 3.23 h 缩短至 2.22 h; 定位精度达 $\pm 3$  mm, 垂直度误差控制在 1% 以内。静压植桩技术在复杂条件下可实现低扰动、高精度和高可靠性, 尤其适用于结构保护要求高的港口改造工程。研究成果在港口结构物加固中具备可复制性和推广价值, 为类似工程提供了可量化的参考依据。

**关键词:** 静压植桩; 钢板桩; 码头加固

中图分类号: U655.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)04-0128-07

## Application of static pressure pile planting technology in reinforcement and reconstruction of sheet pile-gravity composite structure wharves

GONG Weiwei<sup>1,2</sup>, LI Yefu<sup>3</sup>, CHEN Feng<sup>1,2</sup>, CHEN Xiaokai<sup>4</sup>, CHEN Jin<sup>1,2</sup>, ZHU Xunxing<sup>1,2</sup>

(1. CCCC Infrastructure Maintenance Group Co., Ltd., Beijing 100011, China;

2. CCCC Special Engineering Technology Co., Ltd., Wuhan 430071, China;

3. China Harbour Engineering Co., Ltd., Beijing 100010, China; 4. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

**Abstract:** This study investigates the application of static pressure pile planting technology to address challenges in the reinforcement and reconstruction of sheet pile-gravity composite wharves, including complex strata, sensitivity of existing structures, and restricted construction space. By adopting methods such as pile-pressing force decomposition analysis, equipment selection comparison, and construction process optimization, a static pressure pile planting system for steel sheet piles is established to adapt to the triple constraints of “structural protection + complex strata + limited space”. Results indicate that when penetrating various structures and complex foundation conditions, the GIKEN SCU-600M static press, combined with staged auger drilling technology using spiral drill pipes, can effectively reduce pile-end resistance, control the pile-pressing force within the range of 150–350 kN, and achieve stable penetration. After the establishment of this construction system, the construction efficiency is improved by approximately 31%, the average single-pile construction time is shortened from 3.23 h to 2.22 h, the positioning accuracy reaches  $\pm 3$  mm, and the verticality error is controlled within 1%. Static pressure pile

收稿日期: 2025-08-01 录用日期: 2025-09-12

作者简介: 龚伟伟(1983—), 男, 工程硕士, 高级工程师, 从事港口海岸工程加固改造施工。

planting technology can achieve low-disturbance, high-precision, and high-reliability construction under complex conditions, making it particularly suitable for port reconstruction projects with strict structural protection requirements. The research outcomes are replicable and have popularization and application value in the reinforcement of port structures, providing a quantifiable technical reference for similar projects.

**Keywords:** static pressure pile planting; steel sheet pile; wharf reinforcement

钢板桩作为一种常用的基础支护结构和水工主体结构, 在码头加固、边坡支护及深基坑工程中应用广泛<sup>[1-6]</sup>。钢板桩加固施工面临着结构干扰风险大、地层复杂、施工空间受限等问题。传统的振动打桩和冲击沉桩方式往往会对既有结构造成不良影响, 存在噪音大、扰动强、施工精度难以控制等弊端<sup>[7-8]</sup>, 静压植桩技术可解决上述问题。近年来, 已有研究在钢板桩静压施工技术方面取得了一定进展。例如, 唐栋梁等<sup>[9]</sup>提出套管旋挖钻与止水处理一体化工艺, 用于解决复杂地层中桩体穿透难题; 秦毅<sup>[10]</sup>在城区项目中采用静压植桩技术, 有效降低了施工噪音与对周边建筑的扰动。然而, 静压植桩技术暂无运用在码头结构加固中的案例。

本文针对码头加固中的静压植桩工艺展开研究, 从地基条件出发, 分析桩侧摩阻力、桩端阻力和锁扣阻力的影响, 进行植桩设备的选型, 并提出高精度定位、钻掘引孔、吊装喂桩及压实回填等配套工艺设计, 旨在为复杂条件下的钢板桩施工提供理论支持与工程参考。

## 1 工程概况

非洲某海港码头始建于1928年, 主体结构为重力式与板桩组合式结构码头。历经百年运营后, 海侧钢板桩因长期海洋环境侵蚀出现严重腐蚀, 局部锈蚀脱落, 同时码头胸墙、附属设施老化损坏, 港池回淤影响船舶的靠泊和作业, 急需开展加固改造工作, 码头现状见图1。

由于港池宽度不具备缩短条件, 码头加固改造要求码头前沿线不得前移。修复方案: 1) 原结构拆除。拆除附属设施→拆除混凝土胸墙→拆除旧钢板桩(-8.00~5.65 m)、拆除钢板桩与方块之

间的胶质混凝土, 原结构典型断面见图2; 2) 新建结构。施打新钢板桩→浇筑新钢板桩与方块之前的填充混凝土→安装胸墙预制块→现浇胸墙→安装码头附属设施, 加固改造典型断面见图3。



图1 码头现状

Fig. 1 Current situation of the wharf

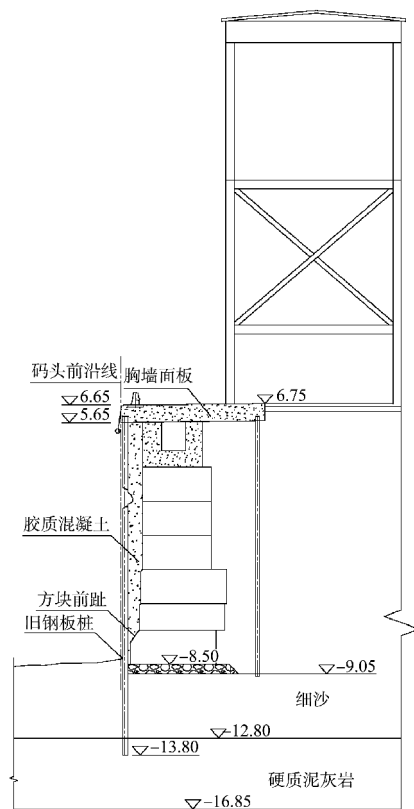


图2 原结构典型断面(单位:m)

Fig. 2 Typical cross-section of the original structure (unit: m)

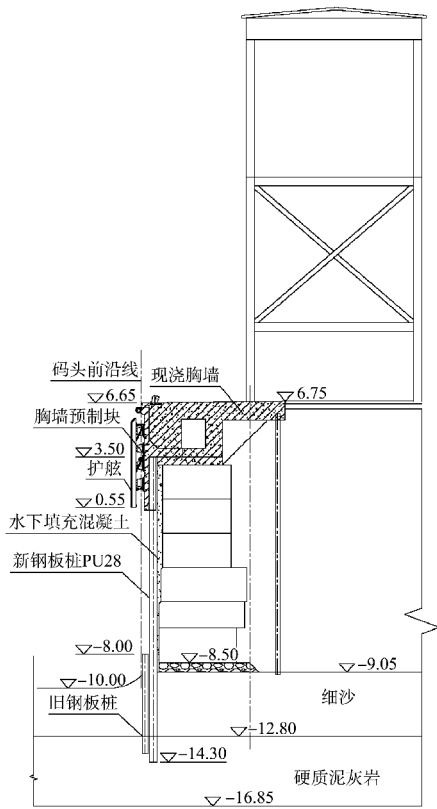


图 3 加固改造后典型断面(单位:m)

Fig. 3 Typical cross-section after reinforcement and renovation(unit:m)

采用 PU28 型新型钢板桩, 宽 600 mm, 壁厚 15.2 mm, 截面尺寸见图 4。典型断面桩身长 17.8 m, 桩顶高程 3.5 m, 桩底高程 -14.3 m, 钢板桩入土深度为 5.25 m, 桩长根据单桩竖向抗压承载力特征值 150 kN 计算确定, 以满足承载力要求。

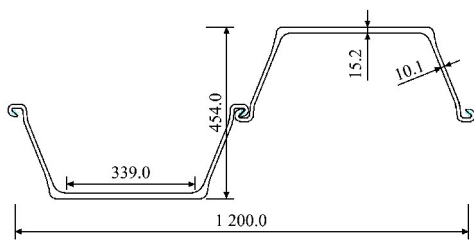


图 4 钢板桩断面(单位:mm)

Fig. 4 Cross-section of steel sheet piles(unit:mm)

## 2 各构造物及地层对植桩的影响分析

1) 混凝土方块前趾。旧方块前趾厚度约为 2 m, 由于无法对其直接进行勘察钻孔, 前趾是否配筋未知。通过码头方块钻孔取芯, 类比推断了前趾混凝土的物理力学指标: 密度 2.08~2.40 g/cm<sup>3</sup>, 孔

隙率 14.3%~26.5%, 单轴抗压强度 6.6~36.5 MPa。由于混凝土浇筑年代久远, 且当年施工质量差异大, 导致其孔隙率与单轴抗压强度指标存在显著偏差<sup>[11]</sup>。该前趾层既是最先突破层, 也是阻力最大的层, 对破碎均匀性与破除方法要求极高。

2) 块石基层。厚度约为 1 m。块石基层作为原始持力层, 必须予以保护, 需要控制扰动。施工扰动若过大, 可能破坏承载结构、引发局部变形或不均匀沉降。

3) 砂层。厚度约为 3.75 m, 密度 2.33 g/cm<sup>3</sup>, 属于中等密实砂体。摩擦阻力较低, 但震动扰动可能引起孔隙变化、液化或侧向位移, 需控制压桩速度。

4) 硬质泥灰岩。厚度约为 1.5 m, 单轴抗压强度 15~20 MPa。该层作为新钢板桩的持力层, 施工时需施加足够的压桩力以克服桩端阻力, 确保桩体贯入至设计深度; 同时应避免因过度振动或钻杆卡钻。

## 3 压桩力分析

静压植桩过程中, 压桩力主要由桩侧摩阻力、桩端阻力和锁扣阻力 3 部分组成: 1) 桩侧摩阻力随压入深度增加, 主要受地层类型和桩体表面条件影响; 2) 桩端阻力在坚硬地层或构造物时显著增加, 需依靠辅助钻掘降低贯入难度; 3) 锁扣阻力来自桩与桩之间的连接摩阻, 尤其在深层压入过程中易逐步累积并增加。

此外, 实际压桩力还受到前趾混凝土破除程度、块石扰动、砂层孔隙变化、桩体垂直度等现场因素影响, 具有较强的不确定性。

## 4 植桩设备选型

工程施工环境复杂, 受既有结构老化敏感、地层多样、作业空间受限等因素影响, 对植桩设备的扰动控制、施工精度及设备体积提出了更高标准。

工程植桩设备需满足以下关键要求: 压桩力充足, 可穿透破碎后的混凝土前趾及硬质岩层; 扰动影响小, 避免对旧方块及块石基层造成破坏;

控制精度高, 实现桩体垂直、轴线精确控制; 配套螺旋钻杆装置, 具备预掘能力, 能够适应高阻力地层并减小初始贯入阻力; 空间布置灵活, 适用于码头区域上方存在构筑物的受限作业条件; 具备实时监控功能, 支持施工质量过程管控与承载性能验证。

为验证植桩设备选型合理性, 将常见植桩设

备进行比较, 分析对比结果见表 1。可见, GIKEN SCU-600M 静压植桩机在压桩能力、控制精度与地层适应性方面优势显著, 特别适合工程中“结构保护+复杂地层+空间受限”3 重约束下的施工需求。其配套螺旋钻杆系统可实现分层预掘与同步喂桩, 降低桩端阻力并提升入土稳定性; 数据监测功能可为后续承载力验证提供关键技术支撑。

表 1 植桩设备对比分析

Tab. 1 Comparison and analysis of pile planting equipment

类别	最大压桩力	适用地层	对原结构的扰动性	控制精度	配套功能	适用场景	总体评价
GIKEN SCU-600M 静压植桩机	800 kN	各类地层	极低	高(自动夹持+导向系统)	螺旋钻杆支持预掘与回填	建筑密集区等	精度高, 扰动小, 适应性强
振动锤打桩机	可适配	软-中硬地层	中等, 易影响旧结构	中(吊装控制依赖人工)	-	一般基坑、临时支护	成本低, 精度一般, 扰动大
冲击锤打桩机	可适配	中硬-坚硬地层	高, 冲击可能引发裂缝	低(冲击不可控)	可选钻孔装置, 施工复杂	桥梁基础等	动力足, 干扰强, 风险较高

## 5 静压植桩施工工艺设计

### 5.1 钢板桩精准定位与锚固系统

针对传统导向架施工过程中轴线累积误差较大的问题, 结合现场施工实践, 进行工艺优化。

1) 轴线放样与定位基准确立。将钢板桩设计轴线内移 2 m, 用全站仪在码头方块上精准放样基准线, 该轴线作为后续钢板桩定位及锚固安装的全周期控制基准, 见图 5。

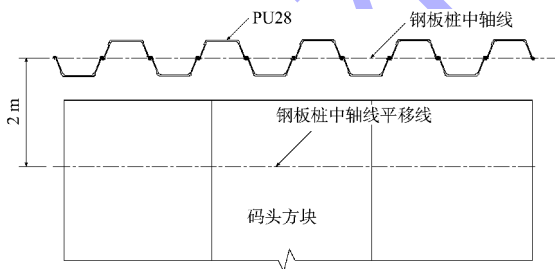


图 5 轴线控制  
Fig. 5 Axis control

2) 导向锚固系统安装。摒弃传统导向架, 改用植筋锚固钢结构形成导向体系。具体方法为: 沿钢板桩轴线偏移线, 在码头方块内植入  $\phi 32$  mm HRB400 级钢筋(植入深度 1 m, 间距 1.2 m); 钢筋顶部设槽钢纵梁, 采用高强螺母紧固连接; 再安装槽钢横梁, 整体调平后与纵梁焊接, 形成刚

性导向框架结构, 见图 6。通过该方法可将安装精度控制在  $\pm 3$  mm 以内, 确保钢板桩导向精度及系统稳定性。

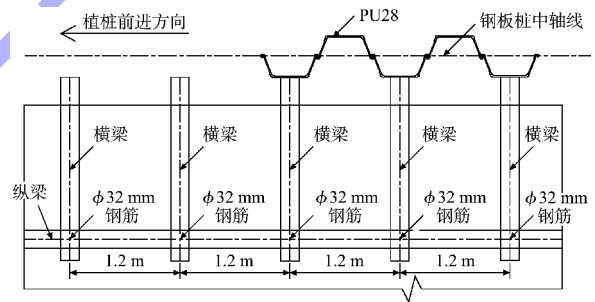


图 6 锚固系统  
Fig. 6 Anchoring system

3) 轴锚固结与整体性能提升。钢板桩压入完成后, 将其与导向横梁焊接, 使钢板桩与锚固系统形成一体化结构, 钢板桩与方块间的混凝土浇筑前即构建形成永久锚固体系, 大幅提升结构整体性和抗拔稳定性。

### 5.2 初始植桩与自行走技术

静压植桩利用“预掘及除芯理论”, 在钢板桩压入的同时, 通过螺旋钻钻掘降低贯入阻力, 从而实现压入作业<sup>[12]</sup>。施工流程: 首先将静压植桩机基座固定, 并利用配重完成首批 3 根桩的压入; 随后切割桩顶至设计高程, 将静压植桩机移至初

植桩上方，开启反力夹具，夹持桩体实现设备自行走功能，进入批量植桩作业阶段。该技术大幅提高了作业连续性及作业效率。

### 5.3 引孔分阶段钻掘-同步植入工艺

针对既有结构物及复杂地层，采用分阶钻掘-同步植入工艺：采用带  $\phi 680$  mm 钻头的螺旋钻杆装置正转钻进，破碎混凝土碎渣并旋送至钻杆套筒内；穿透前趾层后，采用静压植桩机将螺

旋钻杆装置全部拔出，拔出过程螺旋钻杆逆转实现钻杆套筒内碎渣回填；将  $\phi 680$  mm 钻头更换为  $\phi 580$  mm 钻头，再用该压入钻头的螺旋钻杆带动钢板桩植入至设计深度；钻至设计高程以上 50 cm 时，停止使用钻头，通过静压缓慢植入钢板桩，压入完成后，螺旋钻杆逆转进行碎渣回填，见图 7。钢板桩与  $\phi 580$  mm 钻头的几何关系见图 8。

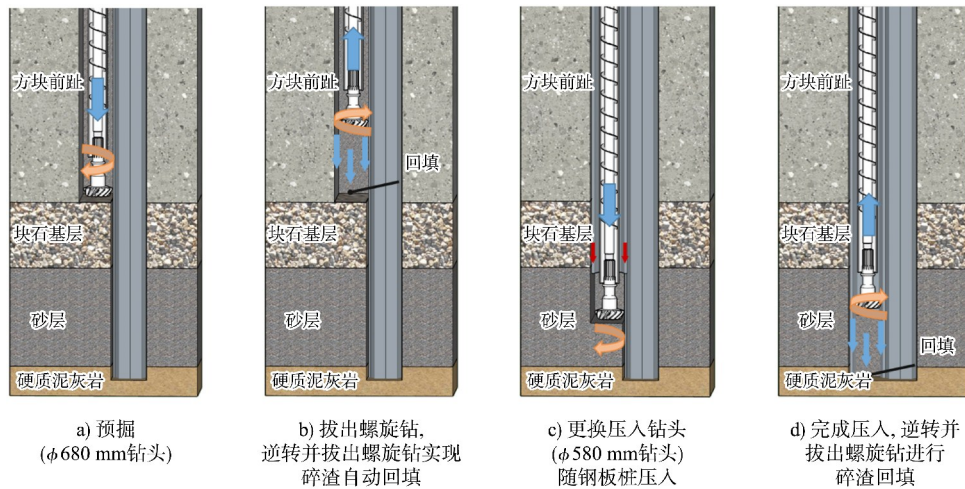


图 7 引孔分阶段植桩  
Fig. 7 Staged pile planting with pilot holes

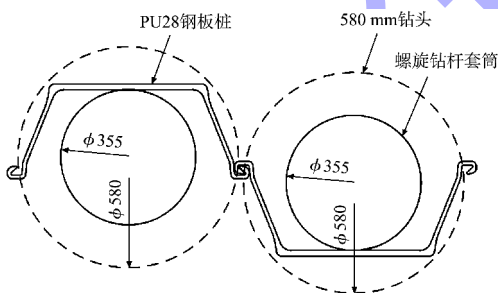


图 8 钢板桩与  $\phi 580$  mm 钻头的几何关系(单位:mm)  
Fig. 8 Geometric relationship between steel sheet pile and  $\phi 580$  mm drill bit (unit:mm)

### 5.4 喂桩与吊装技术改进

静压植桩过程中喂桩与钻杆吊装频繁，传统双机协同操作在空间受限的码头场地存在明显局限(码头面板上方设有传送带)，故对相关工艺进行优化。

1) 双钩吊装系统配置。浮吊配置主、副钩双吊装系统，主钩额定载荷 120 t，用于吊装螺旋钻杆装置；副钩额定载荷 10 t，用于吊装钢板桩。

2) 螺旋钻杆预掘稳定技术。在预掘作业阶段，采用主钩吊挂 29.2 m 长的螺旋钻杆装置，并施加 50~100 kN 的竖向预紧力，形成有效的竖向支撑与抗偏控制力，确保钻杆作业过程中始终维持垂直轴向稳定，避免因钻杆惯性或不均匀地层导致晃动与偏钻，降低钻进过程中对原结构的扰动风险。

3) 任务快速切换。当螺旋钻杆预掘到位后，通过液压系统快速释放主钩连接，浮吊转体利用副钩进行钢板桩吊装作业。

4) 螺旋钻杆与钢板桩二合一(喂桩)。在钢板桩定位就位后，主钩重新与钻杆连接，形成“螺旋钻杆+钢板桩”一体化组件，整体喂入至静压植桩机夹具，见图 9。该“二合一”技术核心在于：利用钻杆引导刚度对钢板桩进行引导对中，避免传统分段插入易产生的偏位、卡桩等问题，减少人工干预环节，提升喂桩效率与垂直度控制精度。

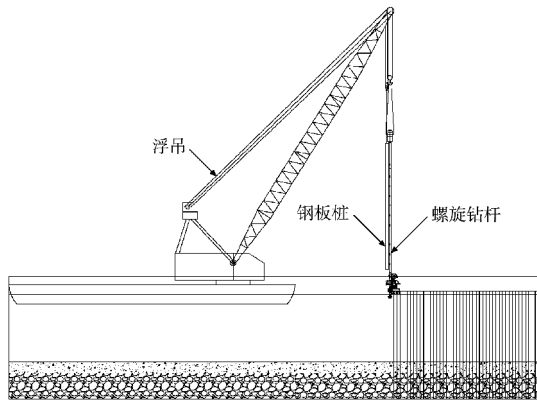


图9 单台吊装设备布置

Fig. 9 Layout of single hoisting equipment

### 5.5 压桩参数与控制

针对不同地层对静压参数响应差异明显的问题, 通过现场数据监测与分析, 提出分层压桩参数优化策略, 见表2。

表2 不同地层条件下压桩参数  
Tab. 2 Pile pressing parameters under different stratum conditions

介质类型	压桩速度/ ( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )	压桩力/ kN	备注
方块前趾	0.2~0.3	150~300	坚硬层, 需缓慢压入并增加压力
块石基层	0.3~0.4	180~200	块石可能阻碍压桩, 需适当调整参数
砂层	0.4~0.6	200~300	软弱地质, 快速压入但避免过度扰动
硬质泥灰岩	0.2~0.4	300~350	质地坚硬, 需较大压力保证压入

### 5.6 回填压实

钢板桩压入完成、拔出螺旋钻杆后, 向钢板桩两侧抛填中粗砂, 利用螺旋钻杆自重压实, 以实现填充密实及桩土接触面的加固。

### 5.7 静压植桩机持力性能验证

为验证钢板桩植入后的承载性能是否满足设计要求, 工程充分利用静压植桩机自身具备的压桩力和拔桩力实时监测功能, 开展原位反拔验证试验。通过对植入后的桩体施加竖向反向拔力, 记录极限拔桩力, 结果显示多数钢板桩的压桩力与反拔力均达300~450 kN, 远高于150 kN的设计单桩承载力特征值, 验证了结构嵌固效果与桩

土咬合的稳定性。根据试验结果, 桩基承载安全系数可达2.0~3.0, 满足工程使用要求且具备良好的冗余度。

## 6 实施效果

静压植桩工艺实施后, 现场施工表现出良好的效率与控制精度。效率提升方面: 单桩平均植入时间由原始的3.23 h缩短至2.22 h, 施工效率提升约31%; 制精度方面: 轴线偏差稳定控制在 $\pm 30$  mm以内, 垂直度误差控制在1%以下; 系统协同性: 喂桩—压桩—吊装环节衔接顺畅, 施工组织效率显著提升; 结构可靠性验证: 抽拔试验结果表明桩体嵌固效果优良, 承载能力具有显著冗余。

综合评估结果表明, 该静压植桩系统在复杂环境下具有良好的适应性、工艺先进性与可靠性, 具备在类似港口结构物改扩建工程中推广应用的價值。静压植桩施工照片见图10。

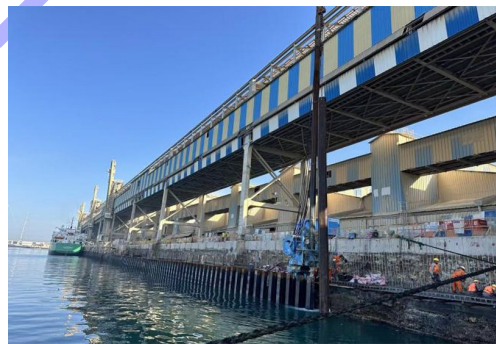


图10 静压植入钢板桩施工

Fig. 10 Construction of static pressure pile planting for steel sheet piles

## 7 结语

1) 静压植桩技术在复合地层条件下表现出良好的适应性。现场监测表明, 压桩力稳定在150~350 kN之间, 可满足不同介质层的贯入需求。

2) 工艺优化大幅提升施工效率与精度。单桩施工时间缩短约31%, 轴线偏差控制在 $\pm 30$  mm内, 垂直度误差小于1%, 实现钢板桩高精度植入。

3) 静压植桩技术体系具备工程推广价值。在保障既有结构安全、适配施工空间受限工况的前提下, 该方法兼具低扰动、高可靠性的技术特点

与工程化应用优势,为港口工程加固改造提供了可复制的技术方案。

#### 参考文献:

- [1] 王馨,马煜佳,谢乔木.某格形钢板桩码头升级改造方案三维有限元数值分析[J].水运工程,2024(8):152-159.  
WANG X, MA Y J, XIE Q M. Three-dimensional finite element numerical analysis of upgrade and renovation scheme of celled steel sheet pile wharf [J]. Port & waterway engineering, 2024(8): 152-159.
- [2] 刘强.跨流溪河特大桥水中墩钢板桩围堰及承台施工工艺研究[J].铁道建筑技术,2024(2):125-128.  
LIU Q. Research on construction technology of steel plate pile cofferdam and bearing platform for water piers of the extra-large bridge crossing Liuxi River [J]. Railway construction technology, 2024(2): 125-128.
- [3] 母旭彪,郑春雨,李红,等.大直径卵石和致密砂岩地质下深水钢板桩围堰施工技术研究[J].公路,2021,66(10):204-209.  
MU X B, ZHENG C Y, LI H, et al. Research on construction technology of deep-water steel sheet pile cofferdams in large-diameter pebble and dense sandstone formations [J]. Highway, 2021, 66(10): 204-209.
- [4] 左皓,农力,唐光暹,等.新型静压钢板桩结合钢筋混凝土内支撑深基坑支护施工技术[J].建筑施工,2021,43(7):1190-1192,1195.  
ZUO H, NONG L, TANG G X, et al. Construction technology of new static pressure steel sheet pile combined with reinforced concrete internal bracing for deep foundation pit support [J]. Building construction, 2021, 43(7): 1190-1192, 1195.
- [5] 刘坤,祝阿龙,李云超,等.深中通道东人工岛内高速桥墩基础保护钢板桩施工研究[J].交通世界,2023(19):89-92.  
LIU K, ZHU A L, LI Y C, et al. Research on steel sheet pile construction for foundation protection of high-speed bridge piers in the east artificial island of the Shenzhen-Zhongshan Corridor [J]. TranspoWorld, 2023(19): 89-92.
- [6] 董腾.PHC预应力高强混凝土管桩静压植桩施工技术研究[J].北方建筑,2025,10(1):90-93.  
DONG T. Study on construction technology of PHC prestressed high-strength concrete pipe pile by static pressure [J]. Northern architecture, 2025, 10(1): 90-93.
- [7] 孙洪春,范御华,胡雪华,等.复杂土层HZM/AZ型组合钢板桩施工技术[J].水运工程,2022(1):209-214.  
SUN H C, FAN Y H, HU X H, et al. Construction technology of HZM/AZ combined steel sheet pile driving in complicated geologic condition [J]. Port & waterway engineering, 2022(1): 209-214.
- [8] 吕鑫.新建堤坝上构建永久防渗体系的施工技术[J].水运工程,2022(S2):80-83,112.  
LYU X. Construction techniques of building permanent anti-seepage system on new dam [J]. Port & waterway engineering, 2022(S2): 80-83, 112.
- [9] 唐栋梁,阮泽莲,曹鑫林.砂卵石填充条件下类喀斯特地貌河床埋置承台围堰施工关键技术[J].施工技术(中英文),2025,54(7):118-122.  
TANG D L, RUAN Z L, CAO X L. Key construction technology of buried pile-cap cofferdam under karst-like landform riverbed filled with sand and gravel [J]. Construction technology, 2025, 54(7): 118-122.
- [10] 秦毅.邻近老旧房屋静压植桩施工技术[J].工程质量,2024,42(8):27-31.  
QIN Y. Construction technology of static pressure planting pile near old buildings [J]. Construction quality, 2024, 42(8): 27-31.
- [11] 张丽珍,刘海欣,张文龙.非洲某近百年历史的旧码头混凝土性能分析[J].水运工程,2024(12):76-81,87.  
ZHANG L Z, LIU H X, ZHANG W L. Concrete performance of an old wharf with history of nearly a century in Africa [J]. Port & waterway engineering, 2024(12): 76-81, 87.
- [12] 邵新怀,谷景涛,赵世龙,等.坚硬地质条件下钢板桩静压植桩施工技术[J].中国港湾建设,2015,35(5):52-55.  
SHAO X H, GU J T, ZHAO S L, et al. Construction technique for static pressure pile steel sheet pile in the hard geology [J]. China harbour engineering, 2015, 35(5): 52-55.