



# 长周期波强涌浪海况下 自动化移动平台沉桩技术

陈猛<sup>1</sup>, 胡兴昊<sup>2,3</sup>, 吴浩<sup>1</sup>, 邹为明<sup>1</sup>

(1. 中交四航局第二工程有限公司, 广东 广州 510230; 2. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230;  
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082)

**摘要:** 秘鲁钱凯港工程位于长周期波强涌浪的恶劣海域中, 钢管桩数量较多且需无掩护施工, 利用传统工艺沉桩较为困难。针对区域海况及工程特点, 研发一套装配式自动化移动打桩平台, 平台主体由横、竖向钢箱梁通过螺栓法兰盘拼接组成, 平台移动由轨道梁+自动化液压油缸顶推系统完成; 在平台上安装多个双层抱桩架以稳桩与定位, 并为平台的智能运行开发了一套平台自动化监测与控制系统; 根据该平台的使用特点提出整套钢管桩平台沉桩工艺。实践证明, 该平台及相关工艺解决了恶劣海况下钢管桩沉桩的多重困难, 取得了较好的经济效益, 可为类似项目提供参考。

**关键词:** 长周期波强涌浪; 钢管桩; 移动平台; 自动化

中图分类号: U655

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)11-0246-06

## Pile driving technology of automated mobile platform under long period wave and strong sea swell conditions

CHEN Meng<sup>1</sup>, HU Xinghao<sup>2,3</sup>, WU Hao<sup>1</sup>, ZOU Weiming<sup>1</sup>

(1. The Second Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;  
2. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;  
3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China; )

**Abstract:** Chancay Port project in Peru is located in a harsh sea area with long period waves and strong surging waves. There are a large number of steel pipe piles to be constructed without shielding, making it difficult to use traditional techniques for pile driving. A set of equipped automated mobile pile driving platform is developed based on the sea conditions and engineering characteristics. The main body of the platform is composed of horizontal and vertical steel box beams spliced with bolt flanges. The platform movement is driven by a track beam and an automated hydraulic cylinder pushing system. Multiple double layer pile holding frames are installed on the platform to stabilize and position the piles. A set of automated monitoring and control system is also developed for the intelligent operation of the platform. Based on the usage characteristics of the platform, the steel pipe pile driving technology of platform method is proposed. Practice proves that the platform and related technologies have successfully solved the multiple difficulties of steel pipe pile driving under harsh sea conditions, achieving good economic benefits, which can provide reference for similar projects.

**Keywords:** long period wave and strong sea swell; steel pipe pile; mobile platform; automate

针对近海港口项目中钢管桩等预制桩的施工, 目前主要有利用水上打桩船和搭设钢栈桥施工两

种方法。其中打桩船在诸如长周期波强涌浪等的恶劣海况下, 极易发生大幅度晃动, 使施工安全、

收稿日期: 2024-01-22

作者简介: 陈猛 (1978—), 博士, 正高级工程师, 从事港航、市政等技术研发工作。

质量及工效均大大降低<sup>[1-2]</sup>; 而钢栈桥结构的整体稳定性和安全性仅能适应一般平静海况, 在长周期波强涌浪条件下也会受到很大影响, 且钢栈桥搭设施工难度高, 往往需搭设几百米的临时栈桥, 带来很大的成本和工期压力。

在长周期波等恶劣海况中, 往往尝试采用移动式平台法进行沉桩施工, 如智利圣文森项目<sup>[3]</sup>中的构件倒运式移动平台, 采用吊打与导向架结合的方式沉桩; 以色列阿什杜德港各分项采用的桩顶支撑步履式液压顶推平台<sup>[4-6]</sup>、自升式顶升平台<sup>[7]</sup>和轨道式路上打桩平台<sup>[8]</sup>; 巴勒斯坦某煤码头项目中的桩顶步履式顶推平台<sup>[9-12]</sup>, 利用平台完成钢护筒沉桩、钻孔清孔及混凝土浇筑等钻孔桩一体化施工。通过调研分析可知, 目前各平台存在以下问题: 1) 平台结构过于简单, 在强风浪及地震作用下安全风险偏高; 2) 构件倒运式移动方式较为落后, 常采用的步履式顶推移动风险相对较高; 3) 管桩稳桩定位方式较为传统落后; 4) 缺乏配套的平台沉桩法施工工艺。

秘鲁钱凯港项目位于长周期波强涌浪海域, 风浪环境恶劣, 且集装箱泊位中超 700 根钢管桩需在无防波堤掩护条件下施工, 传统打桩船及钢

栈桥方式已无法满足沉桩需求, 需创新平台结构形式及应用功能, 同时在平台组装、平台移动、管桩运送、稳桩定位等方面进行革新, 本文研发出结构稳固、功能完善、施工高效、适应性广的自动化移动式平台及配套施工工艺, 以满足现场集装箱泊位沉桩施工需要。

## 1 工程概况

### 1.1 工程简介

秘鲁钱凯多功能港项目是国家“一带一路”上的重要海上枢纽, 地处太平洋西岸, 位于秘鲁首都利马以北约 80 km 处的钱凯镇, 与泛美公路相衔接, 施工内容为综合一体化港区和海事工程。一期工程主要包括 2 个多功能码头泊位、2 个专用集装箱码头泊位和 1 个拖轮泊位, 均采用钢管桩基础, 整个项目共需沉桩 1 100 余根, 沉桩量大且工期紧张。

项目 3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>泊位为集装箱泊位, 全长 860 m, 为高桩梁板式结构, 基础钢管桩数量共 703 根且均为直桩, 桩长 32~42 m, 前后 5 排布置, 桩基分布较为规则。A、E 轴钢管桩直径 1 200 mm, 桩间距 4.5 m; B、C、D 轴钢管桩直径 1 060 mm, 桩间距 9.0 m。桩基典型布置见图 1。

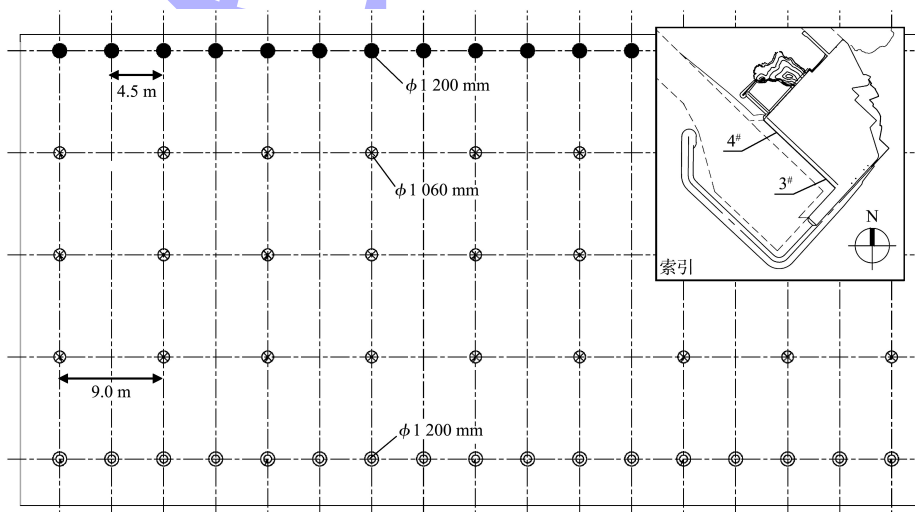


图 1 集装箱泊位桩基平面布置

### 1.2 水文地质条件

项目海域常年遭受长周期波强涌浪的影响, 波浪周期主要集中在 10~18 s, 出现频率高达 94%

(其中 12~16 s 出现的频率占 73%); 极端条件下的波浪周期为 30~100 s, 浪高主要集中在 1.0~1.8 m, 出现频率达 69%, 极端条件下浪高可达

3.0~3.5 m, 波向主要为 SW 和 SSW 向。对于波高小于 1.8 m 且波浪周期小于 16 s 的窗口期, 在每年 3—10 月, 平均每月约 10 d; 在每年 11 月—次年 2 月, 平均每月约 20 d。此外, 项目地质主要由极密砾石-砂互层组成, 疏浚和沉桩作业需达到的地层标贯击数普遍在 40 击以上, 最高甚至超过 100 击。

### 1.3 沉桩难点

1) 码头位于长周期强涌浪海域, 且集装箱泊位在沉桩施工时无防波堤掩护, 受波浪影响, 传统工艺的沉桩质量和进度难以保障; 2) 码头地质主要以密实砂土和碎石土为主, 在该地质条件下钢管桩沉桩较为困难, 需要进行引孔辅助沉桩; 3) 码头桩基精度要求高, 钢管桩中心偏差不大于 75 mm, 钢管桩轴线垂直度不大于 1/100; 4) 工期紧, 根据总体施工进度要求, 每月沉桩数不应小于 70 根。

## 2 平台设计

### 2.1 设计思路

为适应海外远距离集装箱运输, 平台采用装配式结构; 借助已完成的工程桩作为平台基础, 在其上搭建装配式移动平台, 变水上施工为陆上施工; 平台上空间需满足沉桩、引孔等设备摆放及操作的需要, 且具备多根钢管桩同时定位及稳桩功能; 平台各构件尺寸、连接方式及强度应满足不同工况荷载并考虑现场风浪、地震等因素影响; 完成当排钢管桩沉桩后即在桩顶铺设轨道, 利用液压油缸推动平台前进至下一排沉桩桩位, 可连续施工, 不受外部海洋环境干扰。

### 2.2 平台主体结构

平台的主体结构设计为箱梁框架结构, 主体受力钢构件为 2 条轨道梁、4 条横向连续梁及 6 条纵向连续梁。2 条轨道梁平行铺设在已施工的钢管桩上, 形成 2 道平台移动轨道; 横梁通过滚动轮组放置在轨道梁上, 作为受力主梁; 纵梁通过螺栓法兰盘与横梁连接, 共同形成整体。履带吊、桩锤、气举反循环等沉桩及引孔设备均放置在纵横梁上。纵横梁中空部位铺设承重格栅网, 使之

具备承受一定载荷的能力。另外, 在平台正前方及左右两侧根据工程桩数量与位置安装多个钢桁架与双层抱桩器, 以发挥沉桩定位与稳桩作用。平台结构见图 2。

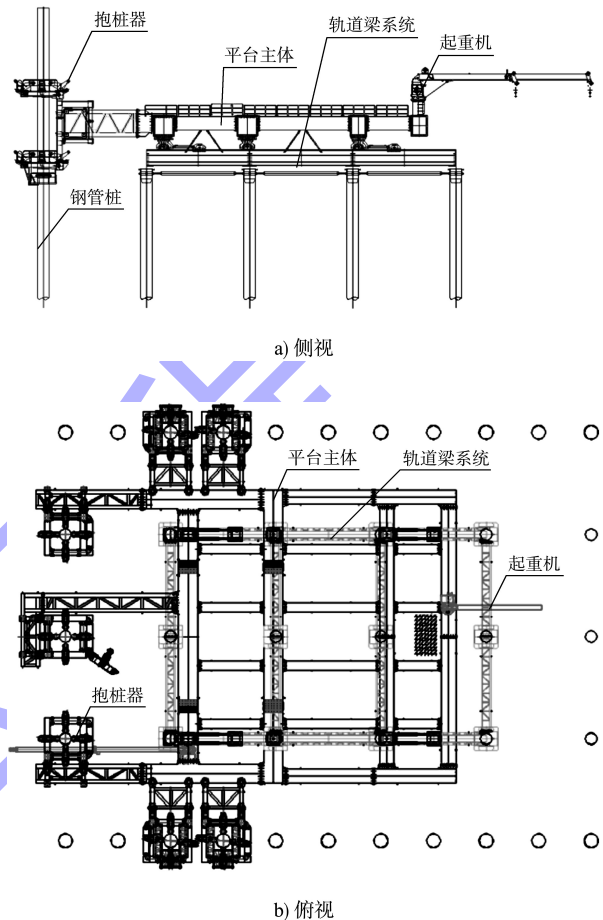


图 2 平台结构

### 2.3 平台驱动装置

平台驱动一般采用步履式顶推法, 但其移动时需多个设备协同工作, 移动过程较为复杂, 若平台被顶起时设备出现故障可能会产生严重后果。本平台采用新型的自动化液压油缸顶推系统, 由分布于 2 条轨道梁上的 4 套液压驱动轮组、2 套从动轮组, 4 条驱动油缸、4 个步履机构和 1 个液压泵站组成。其中驱动轮组布置在平台前进方向的第 1、3 条横向箱梁底部; 从动轮组安装在第 2 条横向梁底部, 共同支撑平台并带动平台沿轨道梁滚动; 液压泵站为所有驱动油缸提供液动力, 推动平台前进; 步履机构用于为平台提供移动反力。

轮组与纵横梁及轨道梁连接方式见图 3。为平台移动而专门研发的平台液压泵站及其配套的自动化液压系统主要用于为平台所有液压设备提供动力源; 通过在驱动轮组上安装位移传感器和同步马达, 协调 4 个驱动油缸的顶推作业, 以对平台驱动装置进行同步移动控制; 系统还能与平台 GPS 系统(global positioning system, GPS) 的定位功能配合, 实时掌握平台位置并根据平台位置控制泵站的启停, 以实现所有轮组装置移动过程的同步、精确和安全。

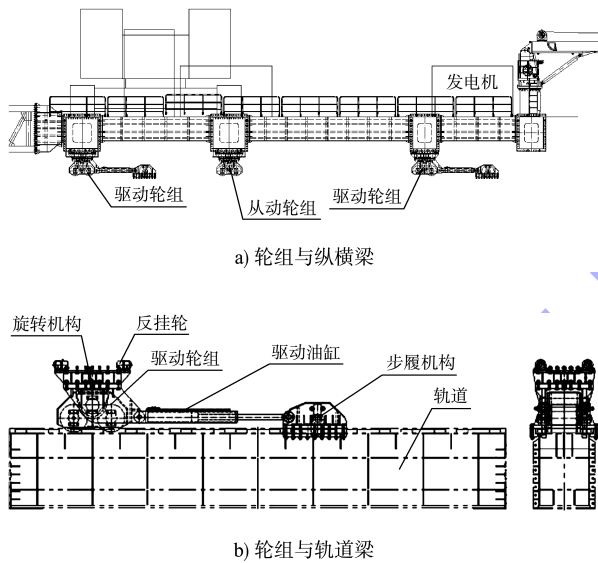


图 3 轮组与纵横梁及轨道梁连接方式

### 2.4 平台自动化监控

为顺应智慧工地的发展趋势, 实现平台沉桩施工全过程的信息化与自动化, 在关注平台主体及驱动系统的同时, 还对装配式平台的自动化监测与控制系统进行研发, 以确保平台沉桩工作更智能、高效与安全。平台自动化监控系统涵盖机械、电气、液压、应力、软件等技术领域, 包括平台安全运行监测(平台结构安全监测和平台设备工作状态的监测)、平台液压系统同步控制(驱动系统与抱桩器调位系统)、桩基 GPS 系统与测距仪精确定位、沉桩过程可视化监测、沉桩实时动态偏位显示、钢管桩沉桩信息采集、平台远程监控等功能, 系统架构见图 4。

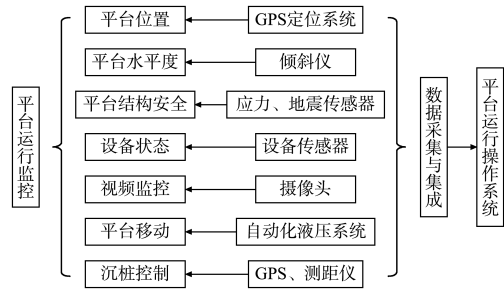


图 4 监控系统架构

## 3 平台沉桩工艺

### 3.1 平台沉桩工艺流程

装配化移动式打桩平台利用已完成沉桩的结构桩作为支撑, 在结构桩上安装标准化轨道梁用于移动平台的行走, 平台上布置履带吊、桩锤和发电机等沉桩所需设备, 平台前方和两侧共有 7 组悬臂抱桩器用于辅助稳桩定位。当完成一跨沉桩后, 拆除一节平台后方轨道梁将其安装于前方, 然后通过液压系统移动平台前移一跨, 重复沉桩施工。整个施工采用边打桩边移动平台的作业方式, 循环作业。

移动式打桩平台沉桩工艺流程分为 3 部分: 平台始发、平台移动和沉桩施工, 平台沉桩工艺流程见图 5。

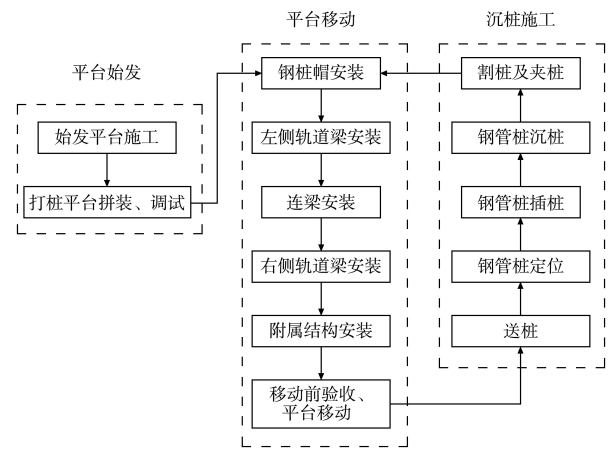


图 5 平台沉桩工艺流程

### 3.2 始发平台施工及平台组装

在开始沉桩前, 为了满足施工平台的拼装和始发需求, 需在首排结构桩位靠岸侧用辅助桩搭设始发平台。始发平台由堆填形成的陆域和施打的辅助桩构成, 尺寸由打桩平台尺寸确定, 一般为 60m×65m(长×宽)。首先进行陆域堆填和辅助

钢管桩(用于支撑打桩平台轨道梁)施工,其数量和桩间距与结构桩一致;沉桩采用履带吊吊打施工,先使用振动锤进行插桩,确保沉桩精度满足后再使用冲击锤沉桩至设计高程,待辅助桩沉桩结束后再割桩至工程桩桩顶高程。

在始发平台陆域及钢管桩施工完成后,即可拼装移动打桩平台,步骤为:安装钢桩帽及轨道梁→安装平台横梁及其下方的驱动组件→安装平台纵梁、形成平台主体→安装抱桩架→安装平台上施工设备→安装调试平台操作及监控系统。

### 3.3 平台移动

平台移动前,在已施工的B、C、D轴钢管桩上安装钢桩帽,钢桩帽由外径970 mm、高1 200 mm的圆形钢管与其顶部2 000 mm×2 000 mm的方形钢板封闭制作而成。钢桩帽安装时,先在切割好的桩头顶垫橡胶垫,然后将桩帽直接套入钢管桩中,最后锁紧钢桩帽四周的固定螺栓,将钢桩帽固定。在安装好的钢桩帽上方标点画线,拆除平台后方轨道梁,将连梁依次吊装至平台前方并用法兰连接固定,轨道梁铺设过程中需严格控制安装精度。钢桩帽及轨道梁安装见图6。

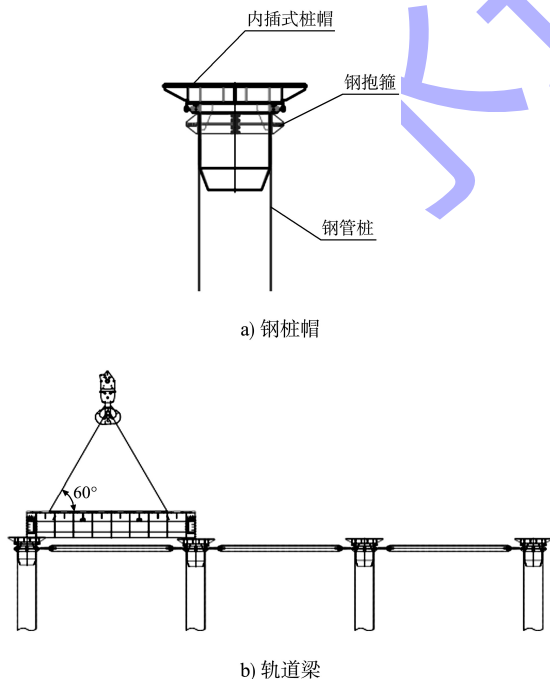


图6 钢桩帽及轨道梁安装

平台移动时,先解除驱动轮组上的夹轨器,再将后方步履机构与轨道梁用插销固定,打开平

台液压泵站推动平台前移,直至油缸行程走完。此时用夹轨器固定驱动轮组,再将后方步履机构中的插销收回油缸,如此循环往复,完成平台整垮前移。移动过程中4个驱动装置由自动化液压系统统一控制,保证平台整体协同移动。通过GPS定位系统实时了解平台位置,实现平台精确起止定位,平台移动见图7。



图7 平台移动

### 3.4 钢管桩送桩

集装箱码头沉桩区域距离陆域较远,如采用沿码头后方堆填便道方式送桩需耗费大量石料和设备,且用于便道堆填的石料容易被波浪淘刷破坏。经研究比选,采用在桩顶铺设钢轨、利用2台可在钢轨上行走的电动运桩车进行送桩的工艺。

首先在已完成沉桩的D、E轴钢管桩顶搭设由25 a工字钢双拼焊接而成的横梁,在横梁上的E轴桩顶位置铺设P50钢轨并用限位板固定,并在钢轨靠海侧布设800 mm宽的人行通道供作业人员上下平台使用,随后在钢轨上安装2台电动运桩车(图8)。送桩时使用陆域上的履带吊将钢管桩的首尾端吊至电动运桩车上并固定,通过遥控装置将钢管桩运送至沉桩位置,再使用移动打桩平台上的吊机直接取桩。



图8 送桩小车

### 3.5 钢管桩智能定位

移动打桩平台钢管桩沉桩定位采用自主研发的智能沉桩测量定位系统, 该系统主要由 4 台 GPS、8 台高精度红外线测距仪、集成电脑及相关软件组成。GPS 卫星天线立于平台四角固定, 用于平台及钢管桩定位; 测距仪分别安装在平台前方两端的专用仪器箱内, 用于钢管桩精准定位与调节垂直度; 集成电脑安装在操作室内, 可在软件中提前输入所有工程桩坐标, 可实时接收 GPS 和测距仪的数据用于计算钢管桩实际坐标, 将之与设计坐标对比, 指导钢管桩定位与垂直度调整。

沉桩前, 先将打桩平台铺轨平移到指定位置, 将钢管桩起吊插入抱桩器内, 在软件中选择沉桩编号, 根据钢管桩设计坐标与实际位置的差异(图 9), 通过微调吊臂与调节上下抱桩器伸缩滚筒调整钢管桩位置和垂直度。沉桩完成后, 系统自动保存沉桩后的桩身坐标值与垂直度偏差值, 可单根桩或者批量导出参数信息, 作为沉桩完成后报验的重要依据。

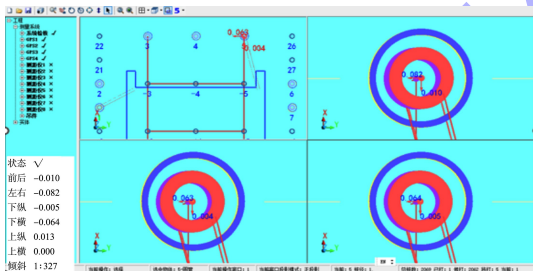


图 9 智能沉桩测量定位系统主界面

## 4 结论

1) 采用自行研发的装配式自动化移动打桩平台沉桩及配套施工工艺, 完成了集装箱泊位全部 703 根钢管桩沉桩。实践表明, 平台整体结构稳定, 采用的液压顶推行走、智能定位、轨道送桩、安全监控等新技术效果明显, 沉桩施工智能、高效且安全, 为项目抢工期、保质量、促安全提供了保障, 创造了巨大的经济效益和社会效益。

2) 平台结构稳定, 在长达半年多的非窗口期甚至当浪高超过 2.5 m 时, 移动平台仍能以正常

的沉桩效率工作, 且抗地震能力突出。

3) 平台液压顶推行走方式先进且安全系数高, 施工阶段共完成近 200 次行走。

4) 平台移动及沉桩过程流水化施工及自动化程度高, 各工序衔接紧密, 总工期由 704 d 缩短至 306 d, 平均工效 2.3 根/d, 日常作业工人由原计划的 15 人缩减至 7 人。

5) 平台采用的智能定位系统先进准确, 在桩基定位偏差要求严格的前提下, 总体偏位合格率达 97%。

### 参考文献:

- [1] 宋伟华, 谷文强, 周惊慧. 长周期波浪对船舶系泊稳定性的影响[J]. 水运工程, 2019(5): 21-26.
- [2] 冯海暴, 王翔, 鞠鹏, 等. 长周期波海域对桩基施工的影响分析及防治措施[J]. 水道港口, 2018, 39(4): 508-513.
- [3] 鞠鹏, 王翔, 冯甲鑫. 中长周期波作用下桩顶移动平台打桩技术[J]. 中国港湾建设, 2016, 36(9): 42-45.
- [4] 陶然, 段昶. 强浪条件下的桩基施工装备研发与创新[J]. 水运工程, 2017(5): 185-190.
- [5] 薛志武, 文定旭. 桩顶支撑步履式沉桩技术[J]. 中国水运(下半月), 2018, 18(3): 209-210, 212.
- [6] 梁胜光, 孙琦, 杨帅, 等. 步履式顶推平台在强涌浪海域钢管桩沉桩中的应用[J]. 水运工程, 2017(4): 181-184.
- [7] 于洋, 梁胜光, 段蛟, 等. 强涌浪海域坚硬黏土层钢管桩沉桩施工技术[J]. 中国港湾建设, 2016, 36(1): 56-58.
- [8] 吴睿, 薛帆. 轨道式陆上打桩平台施工技术[J]. 水运工程, 2021(11): 212-217.
- [9] 林树奎, 江群龙, 刘修成. 涌浪海域浅覆盖地层离岸码头桩基施工技术[J]. 港工技术, 2021, 58(3): 73-76.
- [10] 薛志武. 无覆盖层条件下码头钻孔桩一体化施工技术[J]. 水运工程, 2020(11): 199-204.
- [11] 岳新兴, 江群龙. 长周期波浅覆盖层无掩护海域离岸码头施工关键技术[J]. 中国港湾建设, 2023, 43(1): 61-65.
- [12] 李志成, 华勇, 江群龙, 等. 长周期波涌浪裸岩海域钻孔桩施工技术[J]. 中国港湾建设, 2020, 40(5): 55-59.

(本文编辑 王传瑜)