



# 基于钢桩定位抓斗船平台的 水下振冲碎石桩施工技术

李 军<sup>1</sup>, 刘宗苏<sup>1</sup>, 王曦巍<sup>1</sup>, 张亚楠<sup>2</sup>, 杨正军<sup>3</sup>

(1. 中交 (天津) 疏浚工程有限公司, 天津 300450; 2. 中交天津航道局有限公司, 天津 300457;  
3. 天津市疏浚工程技术企业重点实验室, 天津 300457)

**摘要:** 针对波浪条件下传统的平板驳船和履带吊车配合振冲碎石桩施工桩位偏差大、时利率低、安全隐患高等问题, 通过船舶改造、改进振冲设备、优化施工工艺, 结合唐山港某防波堤堤头改造工程, 提出一种钢桩定位抓斗船改装、送料振冲一体水下振冲碎石桩施工技术方案并验证其可行性。结果表明, 该方案满足施工安全性、桩位精度等要求, 在类似工况下具有推广价值。通过模块化的改装, 拓展了船舶应用范围, 提高了成桩质量及波浪条件下的时利率, 节约了工程成本。

**关键词:** 抓斗船; 钢桩定位; 水下振冲碎石桩; 船舶改造

中图分类号: U655.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)08-0204-05

## Construction technology of underwater vibroflotation piles based on grab dredger platform with spud positioning

LI Jun<sup>1</sup>, LIU Zongsu<sup>1</sup>, WANG Xiwei<sup>1</sup>, ZHANG Yanan<sup>2</sup>, YANG Zhengjun<sup>3</sup>

(1. Tianjin International Marine Engineering Co., Ltd., Tianjin 300450, China;  
2. CCCC-Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300457, China;  
3. Dredging Engineering Laboratory, Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300457, China)

**Abstract:** In the construction of vibroflotation piles with traditional flat barges and crawler cranes under wave conditions, there are problems of large pile position deviation, low hourly interest rate, and high potential safety hazards. Therefore, this paper proposes a technical scheme for underwater vibroflotation pile construction featuring grab dredger reconstruction with spud positioning and feed vibroflotation by transforming the dredger, improving vibroflotation equipment, and optimizing construction technology in a breakwater head transformation project in Tangshan Port, and the feasibility of the scheme is verified. The results show that the scheme meets the requirements of construction safety and pile position accuracy, and it is worth popularizing under similar working conditions. Through modular reconstruction, the application scope of the dredge is expanded. The pile quality and hourly interest rate under wave conditions are improved, and the project cost is saved.

**Keywords:** grab dredger; spud positioning; underwater vibroflotation pile; dredger reconstruction

振冲法是为了改善不良地基, 以满足建(构)筑物基础要求的地基加固处理方法<sup>[1]</sup>, 被广泛用于黏性较大的土地基的处理。目前, 振冲法在陆

地工程地基处理的应用较为成熟, 而在水上工程应用的案例较少<sup>[2]</sup>。水上振冲法一般由平板驳船进行布锚定位, 通过收放锚缆和履带吊车甲板行

收稿日期: 2022-10-09

作者简介: 李军 (1985—), 男, 高级工程师, 从事疏浚装备及施工技术工艺研究等工作。

走进行移位打桩,此方法在大多数情况下能有效完成施工。然而,在波浪条件较差时施工效果通常较差。本文结合唐山港某防波堤改造工程中进出港船舶多、波浪条件差的工况,通过对闲置钢桩定位式抓斗船进行适应性改造,使其满足振冲碎石桩施工需求,同时改进送料振冲一体式振冲器,形成一种波浪条件下基于钢桩定位抓斗船平台的顶部进料、底部出料的水下振冲碎石桩施工技术。

## 1 工程概况

### 1.1 基本情况

唐山港某防波堤堤头改造工程对现有防波堤堤头进行地基加固处理,采取水下振冲碎石桩加固地基,施工区距航道底边线最短距离不足30 m,水深范围-14.6~-9.0 m。碎石桩采用等边三角形方式布置;振冲碎石桩桩径为 $\phi 1000$  mm;桩间距1.8 m;根据开挖边坡及结构位置不同,桩体底高程在-19~-17 m不等,断面见图1。

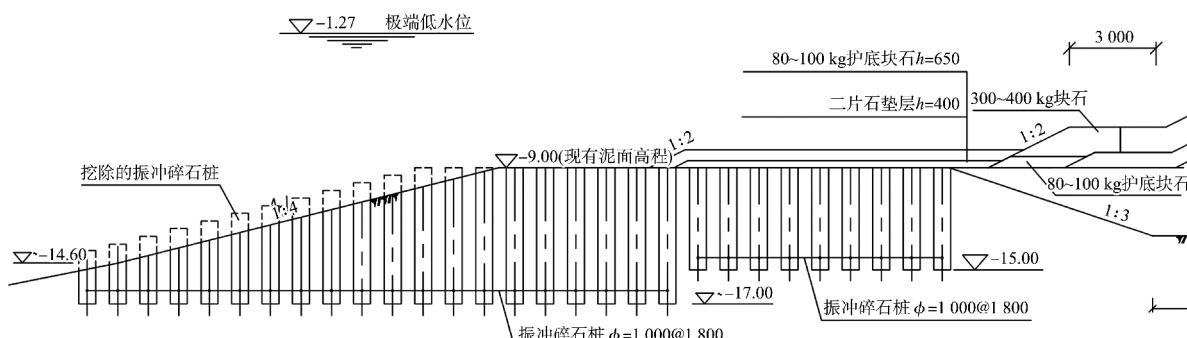


图1 振冲碎石桩断面(高程:m;尺寸:mm)

### 1.2 波浪条件

施工区位于港池的口门处,该区域浪高及潮流较大,潮流为横流,流速最大可达1.4 m/s,最大波高可达1.2 m,且施工区属于运营中航道,进出港大吨位船舶的航行波影响较大,施工区波高情况见图2。

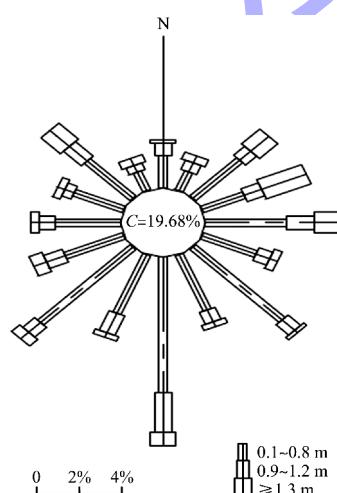


图2 施工区波高玫瑰图

### 1.3 存在问题

施工前期使用传统的平板驳船和履带吊车布

锚定位打桩方法(图3),平板驳船尺寸为45 m×15 m×1.8 m(总长×总宽×型深)。由于履带吊车与船体非一体构造、质心偏高,履带吊车施工负载位于船身侧方。该施工方式受波浪影响较为严重、稳定性较差,桩位偏差达20 cm以上,不满足工程质量要求且安全风险较高。锚缆定位受进出港船舶影响较大,需频繁移船移锚,时利率仅为17%,无法满足工期要求。为此,计划对闲置钢桩定位式抓斗船进行改装作为水下振冲碎石桩施工平台。



图3 驳船布锚定位打桩施工现场

## 2 钢桩定位抓斗船改装打桩平台

### 2.1 抓斗船性能

本工程采用钢桩定位式抓斗船“津航浚 406”进行振冲碎石桩施工，其基本性能参数见表 1。抓斗船最大起重 100 t，振冲设备质量约 30 t，满足施工要求。

表 1 “津航浚 406” 性能参数

总长/m	总宽/m	型深/m	钢桩数量/个	钢桩长度/m	最大起重质量/t	总装机功率/kW	吊臂长度/m
56	22	3.75	3	38	100	2 481	25

### 2.2 吊臂加长验算

“津航浚 406”原船吊臂长度 25 m，起重机臂满足振冲施工要求最小 26 m 净吊高。拟在原船吊臂两节之间安装 1 节 12 m 加长模块，使吊臂加长至 37 m，吊臂顶端距主甲板的净高度约 34 m，以满足振冲器吊高要求。同时拆除原抓斗，制作连接装置将振冲设备与起重机钢丝绳连接。加装 1 道带滑轮的横梁，并利用原连接抓斗的外侧 2 道钢丝绳与振冲器连接。模块化吊臂加长设计便于拆卸，可在疏浚和打桩模式间快速切换。

参照《船舶与海上设施起重设备规范》<sup>[3]</sup>，吊臂所用材料为 CCSA 钢。材料屈服强度  $\sigma_s = 235 \text{ MPa}$ ；极限剪应力  $\tau_s = 0.7\sigma_s$ ，为  $164.5 \text{ MPa}$ 。对吊臂起吊角度为  $55^\circ$  和  $70^\circ$  的 2 种工况分别进行受力分析，计算出起吊力，加载至模型进行计算。CCSA 钢正应力、剪应力、相当应力的安全许用应力分别为相应应力与安全系数  $n$  的比值。三者的安全系数分别为 1.50、1.50、1.33，计算得出正应力、剪应力、相当应力的安全许用应力分别为 156、109、176 MPa。

如图 4a) 所示，吊臂起吊角度  $\beta=55^\circ$  时，在吊臂旋转点施加约束，代入模型计算，得出最大受力点在吊臂底座耳轴附近，最大相当应力值为 138 MPa，最大正应力值为 127 MPa，最大剪应力值为 64 MPa。如图 4b) 所示， $\beta=70^\circ$  时，在吊臂旋转点施加约束，最大受力点在吊臂底座耳轴附近，最大相当应力值为 81 MPa，最大正应力值为 75 MPa，最大剪应力值为 38 MPa。

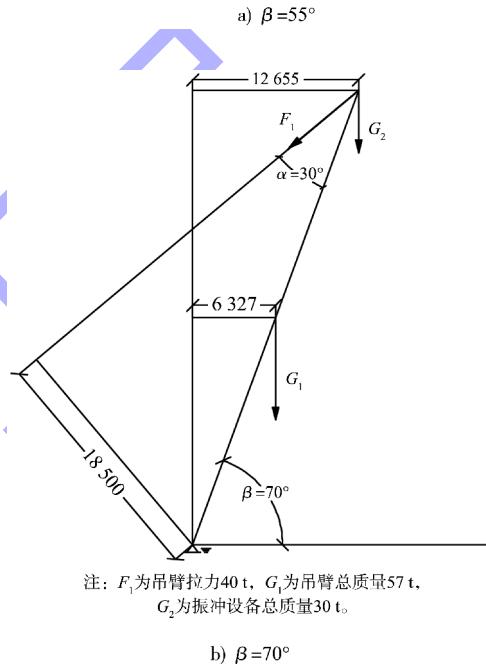
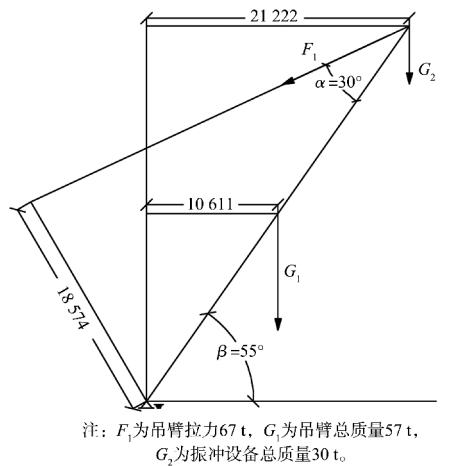


图 4 吊臂受力分析 (单位: mm)

如表 2 所示，改造后计算应力值小于材料的许用应力值，吊臂强度满足要求。图 5 为加长后的抓斗船吊臂，吊臂质量为 7 t，原船质量为 1 493 t，改造后增加质量为原船的 0.5%。按照 SOLAS 公约 II-1 章第 5 条的规定，空船质量偏差不超过 2%，则稳定性满足要求，不需要做倾斜试验。

表 2 吊臂应力计算结果

力名称	计算值/MPa		强度核准值/MPa
	$\beta=55^\circ$	$\beta=70^\circ$	
正应力	127	75	156
剪应力	64	38	109
相当应力	138	81	176



图 5 加长后的抓斗船吊臂

### 2.3 电路系统改造

振冲设备施工过程需 380 V 电源为其提供 180 kW 的额定功率。“津航浚 406”船主发电机额定功率为 400 kW, 改造前正常施工时功率约 100 kW, 移船时启动液压设备额定功率为 160 kW, 振冲设备额定功率 180 kW, 超出发电机额定功率, 不符合

施工需要, 需保证 3 项电路系统不能同时运转。故拟对电力系统改造, 增设振冲器配电箱以满足振冲设备电源的分闸、合闸功能, 在振冲设备配电系统增加可与液压设备转换的开关以实现互锁功能, 防止振冲与液压设备同时启动导致发电机超负荷现象发生。经测试, 电路改装满足振冲施工需要。

## 3 送料、振冲的一体化施工

### 3.1 施工工艺流程

如图 6 所示, 优化振冲碎石桩施工流程基于顶部填料底部出料的一体化振冲设备, 采用高压冲水及气压辅助, 可一次成孔, 下料连续, 无需反复扩孔。由振冲器顶部的进料口填料, 振冲器提升 0.5 m, 在下料管内气压和填料重力的作用下贯入孔内, 填充提升振冲器所形成的空腔, 当达到规定的加密电流和留振时间后, 将振冲器匀速上提, 继续进行下一个加密段。

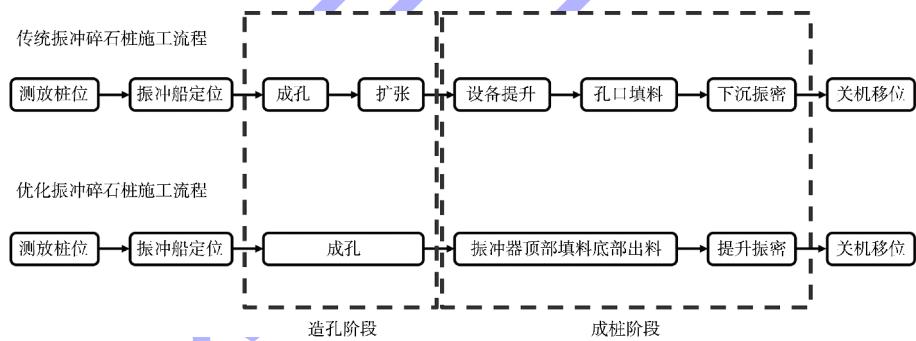


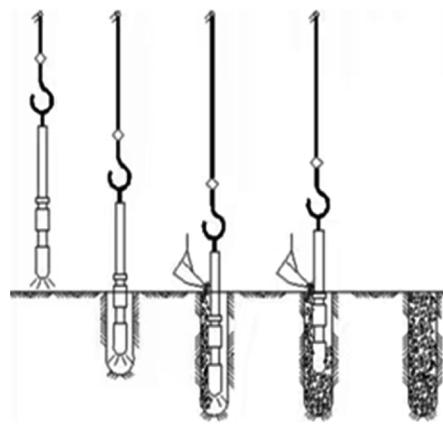
图 6 传统与优化振冲碎石桩施工流程对比

### 3.2 新型送料装置

如图 7a) 所示, 传统的送料方式由碎石运输船运输至孔口, 再下放溜槽将碎石倒入孔内, 振密后提升振冲器再送料, 如此反复施工直至成桩<sup>[4-5]</sup>。受施工区堤头处水下暗流、进出口船舶航行波及定位偏差等因素影响, 传统送料方式导致碎石料的损失较严重, 降低施工效率。

如图 7b) 所示, 新型送料装置由振冲器顶部进料口填料, 在下料管内气压和填料重力的作用下贯入孔内, 填充提升振冲器所形成的空腔, 振密后振冲器匀速上提, 继续进行下一个加密段。大幅简化了振冲碎石桩施工工序, 既提高了施工

效率, 又减少了碎石料损耗, 满足环保要求。



a) 传统送料方式

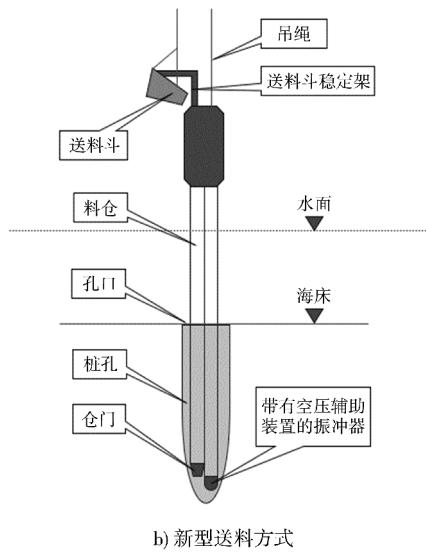


图 7 两种送料方式对比

### 3.3 施工工艺参数

根据表 3 统计的施工参数确定, 加料密实电流均值控制在 101.6 A 左右, 充盈系数控制在 1.20~1.45, 可满足软土地基置换要求。

表 3 碎石桩施工参数

充盈系数	加料电流均值/A
<1.20	98.2
1.20~<1.35	101.1
1.35~<1.45	102.0
1.45~<1.55	101.4
1.55~<1.65	102.2

### 4 施工效果

平板驳船和履带吊车配合施工打桩, 桩位最大偏差 23 cm, 合格率为 85%。而抓斗船吊机和船体为一体, 且抓斗船具有钢桩定位系统, 船舶稳定性增加, 桩位偏差可控制在 10 cm 以内, 合格率为 100%, 符合设计要求的 20 cm 桩位偏差, 施工精度明显提升。

图 8 为“津航浚 406”施工现场, 采用抓斗船施工, 船舶尺寸和吃水增加, 抗风浪能力提升, 时利率明显提高, 吊臂长度增加, 回旋半径增大, 每次移船后打桩根数增加 20% 以上。与传统工艺相比, 节约工期 265 d, 改进前后参数对比见表 4。

表 4 改进前后参数对比

时段	时利率/%	生产率/(延米·d <sup>-1</sup> )	工期/d
改造前	16.67	130	378
改造后	75.05	173	114
提升幅度/%	58.38	24.86	69.92



图 8 “津航浚 406”施工现场

### 5 结论

1) 研发基于钢桩定位型抓斗挖泥船的碎石振冲打桩装备平台, 拓展了抓斗挖泥船的使用功能, 研发水上碎石桩施工用上料装置, 形成一种顶部送料底部出料的水上振冲碎石桩施工工艺, 实现抓斗船平台振冲碎石桩施工要求, 减少了由传统振冲器多次拔插带出的淤泥和顶部填料导致的石料散落, 避免水体浑浊。

2) 对比传统的平板驳船布锚定位、履带吊车甲板移位打桩, 抓斗船平台钢桩定位精度更高, 桩位偏差由原来的 20 cm 以上缩小至 10 cm 以内, 施工效果更好。改装后的钢桩定位抓斗船尺寸和吃水增加, 稳定性和抗风浪能力提升, 时利率由 17% 提升至 75%。

3) 模块化改装设计可在抓斗船疏浚和打桩施工间灵活切换, 提升了船舶的适用性。

### 参考文献:

- [1] 曾甜甜. 公路特殊路基处理中振冲法的应用 [J]. 交通世界(下旬刊), 2022(Z1): 187-188.
- [2] 陈一林. 论述水工建筑物设计中地基处理振冲加固技术 [J]. 百科论坛电子杂志, 2022(1): 166-168.
- [3] 中国船级社. 船舶与海上设施起重设备规范: GB/T 3811—2008 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [4] 刘瑞鹏. 振冲碎石桩工艺试验 [J]. 山西水利科技, 2021(2): 61-63, 67.
- [5] 王燕. 淤泥质土地基振冲碎石桩处理施工工艺分析 [J]. 建筑工程技术与设计, 2021(13): 2893.

(本文编辑 王传瑜)