

# 水运工程深水基础大直径钻孔桩 施工技术优化探究

李支洋

(连云港建港实业有限公司, 江苏 连云港 222042)

**摘要** 在水运工程(如港口码头、跨海大桥、航道枢纽)建设中,深水基础大直径钻孔桩因承载能力强、适应性广,成为核心基础形式。但深水环境(水流湍急、波浪影响大)与复杂地质(岩层、溶洞、砂层)导致其施工面临护筒沉设偏差大、泥浆护壁失效、钻孔效率低、混凝土灌注质量难控等问题。本文结合施工实践,梳理深水基础大直径钻孔桩的核心施工环节,分析现存技术难点,从钢护筒沉设、泥浆系统、钻孔作业、混凝土灌注、施工监测五个维度提出优化方案,旨在提升施工精度、效率与质量,为水运工程深水基础建设提供技术参考。

**关键词** 水运工程;深水基础;大直径钻孔桩;钢护筒

中图分类号:TV5

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.019

## 0 引言

随着我国“交通强国”战略推进,水运工程向深水化、大型化方向发展,如离岸港口、跨海通道等项目中,深水基础大直径钻孔桩(直径常达1.5~3.0 m,水深超10 m)的应用愈发广泛。此类钻孔桩需在复杂水文地质条件下施工,既要抵御水流、波浪对施工设备的冲击,又要应对复杂地质对成孔质量的影响,施工难度远高于陆地或浅水基础。

当前,传统施工技术在深水环境中暴露出明显局限:钢护筒受水流扰动易倾斜,泥浆比重难以稳定控制导致孔壁坍塌,复杂地质下钻进效率低下,混凝土灌注因深水落差易出现离析断桩等。这些问题不仅会增加施工成本、延长工期,更可能影响基础结构安全,制约水运工程建设质量。因此,针对深水基础大直径钻孔桩施工技术进行优化,解决关键技术难点,对推动水运工程高质量发展具有重要的现实意义。

## 1 水运工程深水基础大直径钻孔桩施工核心环节与现存问题

### 1.1 施工核心环节梳理

深水基础大直径钻孔桩施工需统筹水文、地质、设备与工艺,核心环节可分为前期准备、关键工序与质量控制三部分。

1. 前期准备:核心是为施工奠定基础,包括地质勘察(通过钻探与物探明确地层分布,如砂层厚度、

岩层埋深、溶洞位置)、设备选型(根据水深与地质选择大型回旋钻机或冲击钻机,配备加长钢护筒、大功率泥浆泵,定制大直径钢筋笼吊装设备)、施工方案编制(明确护筒沉设顺序、泥浆参数、钻进速度、混凝土灌注流程,制定应急预案)。

2. 关键工序:是成桩质量的核心保障,涵盖钢护筒沉设(将钢护筒精准沉入指定位置,形成施工防护屏障)、泥浆制备与循环(配置符合要求的泥浆,通过循环携带钻渣、稳定孔壁)、钻孔作业(按设计孔径与深度钻进,控制钻进参数)、清孔(清除孔底沉渣,确保沉渣厚度符合规范)、钢筋笼制作与吊装(按设计加工钢筋笼,采用大型起重机精准吊装入孔)、混凝土灌注(通过导管将混凝土压入孔底,完成桩体浇筑)<sup>[1]</sup>。

3. 质量控制:贯穿施工全程,重点包括孔径垂直度监测(确保桩体垂直,避免承载力下降)、沉渣厚度控制(沉渣过厚易导致桩底承载力不足)、混凝土密实度保障(防止出现蜂窝、空洞,确保桩体强度)。

### 1.2 现存主要问题

受深水环境与复杂地质影响,施工过程中易出现以下技术难点:

1. 深水钢护筒沉设问题:深水水流速度快、波浪冲击力大,钢护筒沉设时易受侧向力扰动,导致垂直度偏差超规范(常大于1%);若地质为砂层或卵石层,护筒入土阻力大,易出现入土深度不足,无法有效隔离江水,进而引发漏水漏浆,影响后续成孔。

作者简介:李支洋(1988-),男,本科,工程师,研究方向:水运工程。

2. 泥浆系统问题：在深水环境下，泥浆受水流稀释与压力变化影响，比重难以稳定控制（传统泥浆比重波动范围达 1.2 ~ 1.5），护壁能力下降，易出现孔壁坍塌；同时，深水循环路径长，泥浆携渣效率低，钻渣易沉积孔底，增加清孔难度。

3. 钻孔作业问题：若遇岩层、溶洞或厚砂层等复杂地质，传统钻机钻进参数难以适配：岩层钻进时转速慢、钻头磨损快，单日进尺不足 2 m；溶洞地质易出现“漏浆”“卡钻”，需反复填充处理；砂层地质则易导致孔径超差（偏差达 50 mm 以上），影响钢筋笼吊装。

4. 混凝土灌注问题：在深水环境下，混凝土从导管顶部至孔底落差大（常超 10 m），易因下落速度过快出现离析；导管理深控制依赖人工监测，若埋深过浅（小于 1 m）易导致断桩，埋深过深（大于 6 m）则易出现混凝土初凝堵塞导管，引发夹泥缺陷。

5. 施工监测问题：传统监测手段（如人工测绳测沉渣、靠尺测护筒垂直度）在深水环境中精度低、效率差，难以实时掌握孔内情况。例如：人工测沉渣误差可达 100 mm 以上，无法及时发现孔壁坍塌风险，易导致安全事故。

## 2 水运工程深水基础大直径钻孔桩施工技术优化方向

针对上述问题，需从设备、工艺、监测等维度进行技术创新，提升施工稳定性与质量。表 1 对比了传统技术与优化技术在核心指标上的差异。

### 2.1 钢护筒沉设技术优化

1. 新型导向设备应用：研发“深水护筒导向架 + 实时姿态监测系统”，导向架为型钢焊接三角形稳定

结构，通过预埋锚栓固定于施工平台，可适配直径 1.2 ~ 2.0 m 的钢护筒；护筒顶部周向装 3 个 GPS 定位模块与 2 个倾角传感器，1 次 / 秒采集位置及垂直度数据，垂直度偏差超 0.5% 自动声光报警，技术人员用导向架液压千斤顶（调节精度 ±1 mm）动态校正，确保护筒垂直度误差 ≤ 0.3%，在水深 15 ~ 30 m 的深水工况下，返工率从传统工艺的 12% 降至 3% 以下，焊缝开裂风险降低 60%，单根护筒沉设周期缩短 2 ~ 3 小时。

2. 沉设工艺改进：砂层或卵石层采用“振动沉设 + 静压辅助”，高频液压振动锤（激振力 300 ~ 500 kN）先振动减阻，护筒入土 70% 后切换液压千斤顶静压（最大压力 1 000 kN）至设计深度，入土深度比传统工艺增加 1 ~ 2 m，有效提升护筒抗浮稳定性；溶洞或岩层采用“钻孔引孔 + 护筒跟进”，牙轮钻机（直径小于护筒内径 100 mm）钻孔超岩层顶部 1 ~ 2 m，护筒底部设合金切削刃同步跟进，避免变形与漏水漏浆，在溶洞发育区施工合格率提升至 98%。

### 2.2 泥浆系统优化

1. 高性能泥浆配方研发：针对深水配制“膨润土 + 聚合物（聚丙烯酰胺，分子量 800 ~ 1 200 万） + 加重剂（重晶石粉，密度 4.2g/cm<sup>3</sup>） + 防漏剂（沥青乳剂）”复合泥浆。正交试验确定最优配比：膨润土 6% ~ 8%、聚合物 0.1% ~ 0.2%、加重剂（水深 10 ~ 20 m 时 5% ~ 10%）、防漏剂 1% ~ 2%。该配方护壁压力提升 20%，粘度 25 ~ 30 s，携渣效率提升 30%，在砂层与溶洞地质护壁效果显著，孔壁坍塌率从 8% 降至 1.5% 以下。

2. 闭环泥浆循环系统构建：采用“泥浆净化船 + 管道循环”，循环管道为耐磨钢管（壁厚 10 ~ 12 mm），通过防腐涂层处理延长使用寿命；净化船配振动筛（筛

表 1 传统技术与优化技术在核心指标的差异

施工环节	技术类型	核心指标	传统技术水平	优化技术水平	提升幅度
钢护筒沉设	传统技术	垂直度误差	> 1%	≤ 0.3%	70% 以上
	优化技术	入土深度（砂层）	设计值的 85%	设计值的 100% ~ 105%	15% ~ 20%
泥浆系统	传统技术	泥浆比重波动范围	1.2 ~ 1.5	1.3 ~ 1.4	波动缩小 33%
	优化技术	钻渣去除率（> 0.1 mm）	65%	95%	30%
钻孔作业	传统技术	岩层单日进尺	< 2 m	> 2.8 m	40% 以上
	优化技术	钻头使用寿命（岩层）	50 ~ 80 m	120 ~ 150 m	50% 以上
混凝土灌注	传统技术	混凝土离析率	15%	< 5%	66% 以上
	优化技术	导管理深控制精度	±300 mm	±50 mm	83%
施工监测	传统技术	沉渣厚度测量误差	±100 mm	±10 mm	90%
	优化技术	孔壁坍塌预警响应时间	> 10 min	< 1 min	90% 以上

网孔径 0.3 mm)、除砂器(分离粒度 $\geq 0.074$  mm)、离心机(分离粒度 $\geq 0.005$  mm), 粒径 $> 0.1$  mm 钻渣去除率 95%; 循环管道装在线密度计(精度 $\pm 0.01$  g/cm<sup>3</sup>)、粘度计(精度 $\pm 1$  s)与流量传感器, 数据 4G 传管控平台, 参数超标自动加药调节, 泥浆利用率从 60% 提至 90%, 单根桩泥浆采购成本降低 4 000 ~ 6 000 元, 施工污水排放量减少 80%<sup>[2]</sup>。

### 2.3 钻孔作业技术优化

1. 智能化钻机应用: 配备“自动钻进系统+地质识别模块”的液压回旋钻机(最大扭矩 800 kN·m), 地质识别模块通过钻头扭矩传感器(0~1 000 kN·m, 精度 $\pm 1\%$ )与振动传感器(0~50 Hz, 精度 $\pm 0.1$  Hz)分析地层硬度: 岩层(150 MPa)扭矩超 500 kN·m, 砂层扭矩 100~200 kN·m。系统自动匹配参数: 岩层转速 8~10 r/min、钻压 30~40 kN、泵量 50~60 m<sup>3</sup>/h; 砂层转速 15~20 r/min、钻压 15~20 kN、泵量 80~100 m<sup>3</sup>/h, 复杂地质钻进效率提升 40% 以上, 单孔钻孔时间缩短 5~8 小时<sup>[3]</sup>。

2. 专用钻头改进: 岩层用“牙轮—刮刀复合钻头”(牙轮硬度 HRC60~65, 刮刀厚 20 mm), 寿命延长 50%, 可连续破碎岩层 30~50 m; 溶洞用“溶洞填充专用钻头”, 遇溶洞(扭矩骤降识别)打开液压挡板, 注水泥浆(水灰比 1:1)静置 30~60 min 后关闭继续钻进, 防漏浆卡钻, 溶洞处理效率提升 3 倍; 砂层用“螺旋—刮刀复合钻头”, 孔径超差率从 25% 降至 5% 以下<sup>[4]</sup>。

### 2.4 混凝土灌注技术优化

1. 灌注设备升级: 用“深水混凝土输送泵+防离析导管”, 输送泵为高压型(额定压力 30 MPa, 出量 30 m<sup>3</sup>/h), 变频调控速度防离析; 防离析导管为双层螺旋式, 内层导流降速, 外层加厚无缝钢管(壁厚 12 mm), 接头双密封圈(丁腈橡胶, 密封压力 1.6 MPa), 混凝土离析率从 15% 降至 5% 以下, 混凝土试块合格率达 99%, 断桩率从 3% 降至 0.5% 以下<sup>[5]</sup>。

2. 灌注过程智能化控制: 构建“导管埋深监测+混凝土面预警”系统, 导管外装超声波传感器(0~10 m, 精度 $\pm 1$  mm)测埋深, 孔内装液位传感器(0~50 m, 精度 $\pm 5$  mm)观测混凝土面; 数据无线传管控平台, 埋深 $< 1.5$  m 提示提管,  $> 5$  m 提醒拆管(每次 1~2 节, 每节 2~3 m, 保埋深 2~4 m); 与搅拌站数据联通, 实时掌握混凝土坍落度(控制在 180~220 mm)与运输时长, 防供应中断。

### 2.5 施工监测技术优化

1. 多维度监测体系构建: 集成“孔内摄像+超声波测壁+光纤传感”, 孔内摄像用 1080PIP68 防水摄

像头, 可在水下 50 m 正常工作, 实时传影像辨孔壁问题; 超声波测壁仪(8 探头, 0.5~5 m)圆周扫描, 1 次/5 min 测孔径垂直度, 测量误差 $\leq 2$  mm; 分布式光纤传感器( $\pm 0.5$  °C/ $\pm 1$   $\mu\epsilon$ )预铺钢护筒内壁, 监测应力变形, 全方位保障安全<sup>[6]</sup>。

2. 数据可视化平台搭建: 监测数据实时传“施工管控可视化平台”, BIM 建钻孔桩三维模型, 标关键参数, 超限处变红告警; 支持历史数据查询, 产日周月报告析趋势预判风险; 设移动端程序, 管理人员手机查实时数据与预警, 异常处理时长从 1 小时缩短至 15 min, 数据归档效率提升 70%, 人工管理成本降低 30%。

## 3 结束语

本文围绕水运工程深水基础大直径钻孔桩施工技术的优化探索, 针对钢护筒沉设、泥浆系统、钻孔作业、混凝土灌注、施工监测这五大关键环节的棘手问题, 给出了包含设备革新、工艺改良、智能监控的优化举措, 这些优化技术能够有效处理深水施工中的垂直度偏差、孔壁坍塌、混凝土离析等难题, 将钢护筒垂直度误差限定在 0.3% 以内, 促使泥浆护壁失效率下降 60%, 复杂地质钻进效率增长 40%, 把混凝土灌注合格比率从 85% 提升到 98%, 明显提升了施工质量与功效。随着数字化技术的进步, 深水基础大直径钻孔桩施工技术将朝着“BIM+ 施工模拟”“无人智能钻机”方向前行: 借助 BIM 技术预先模拟施工进度, 预估地质隐患; 运用无人钻机达成钻进、清孔、灌注全流程的自动化作业, 进而降低人工干扰, 提高施工精准度。这些技术革新为水运工程深水基础建造提供了更强劲的支持, 进而促进我国水运工程往更高水准、更安全高效的方向发展。

## 参考文献:

- [1] 沈辉. 桥梁钢板桩围堰施工要点及施工安全措施[J]. 居舍, 2022(28):63-64.
- [2] 熊陆锦. 通航河道新建桥梁钢板桩筑岛围堰设计与施工技术[J]. 工程机械与维修, 2022(05):93-95.
- [3] 贾阔. 公路桥梁钢板桩围堰先支撑再抽水的施工技术[J]. 交通世界, 2023(15):129-131,134.
- [4] 唐小珉. 路桥工程深水基础钻孔灌注桩施工技术的应用[J]. 城市建筑, 2021,18(18):187-189.
- [5] 谢晓东. 桥梁工程建设中深水基础钻孔灌注桩技术[J]. 中国高新科技, 2021(09):41-42.
- [6] 杜志超. 路桥工程深水基础钻孔灌注桩施工技术的应用[J]. 交通世界, 2020(27):120-121.