西非滨海工况下超长斜钢管桩专用可调节导向架设计及钓鱼法沉桩关键技术研究

李少刚　朱　敏
中建港航局集团有限公司 上海 200434

【摘　要】：针对西非几内亚滨海高桩码头工程中超长斜钢管桩定位精度难控、抛石地层施工适应性差的工程痛点，依托几内亚铝业二期 3#泊位码头工程，研发一种适配钓鱼法沉桩的可调节专用导向架，形成配套的全过程沉桩控制技术。该导向架采用空间刚架主体结构，底部设置可移动底盘，中部配置间距与倾角双向可调的滚轮导向机构，可满足不同桩径、不同斜率钢管桩的施工约束需求。在此基础上，从桩位放样、导向调校、分阶段沉桩控制到接桩与终沉管控，系统梳理钓鱼法沉桩的关键技术要点。工程实践表明，该技术体系可将斜桩平面偏差控制在 50mm 以内，倾斜度偏差小于 1‰，有效提升了抛石地层下的沉桩质量与施工效率，可为西非及同类滨海地区桩基施工提供工程参考。

【关键词】：超长斜钢管桩；可调节导向架；钓鱼法沉桩；滨海港口工程

DOI:10.12417/2705-0998.26.14.021

引言

高桩梁板式结构是西非沿海港口码头的主流结构形式，大直径斜钢管桩作为基础受力核心，承担着竖向荷载与水平波浪荷载的共同传递，其施工精度直接关系码头整体结构的受力安全与服役寿命[1]。几内亚铝业开发二期氧化铝项目港口工程位于博法省维嘉角，场区紧邻海岸，加上海域季风、潮汐的周期性影响，桩基施工环境复杂。项目码头基础采用大量Φ1000mm超长斜钢管桩，传统固定式导向架存在桩径适配性差、倾斜角度调整困难、转场复用效率低等不足，难以满足西非滨海工况的施工要求。钓鱼法沉桩是水上桩基施工的常用工艺，凭借设备投入少、桩身吊装稳定性好的优势，在沿海码头工程中得到广泛应用。但针对超长斜桩施工，桩身姿态的全程可控是制约沉桩质量的关键，传统导向装置难以兼顾定位精度与施工便捷性。鉴于此，本文结合项目实际工况，设计一种可调节专用导向架，优化钓鱼法沉桩的全过程控制措施，形成适配西非滨海环境的成套施工技术，为同类海外工程提供实践依据。

1 西非滨海工程工况与沉桩技术难点

1.1 工程概况与环境特征

几内亚铝业二期港口工程新建 3.5 万吨级氧化铝出运泊位，码头采用高桩梁板式结构，泊位总长 220m，与北侧 2#泊位呈 L 型布置，间距 15m，码头面设计顶高程+7.0m。码头横向排架间距 8m，每榀排架布置 6 根Φ1000mm、壁厚 20mm 的钢管桩，包含 2 根直桩与 4 根斜桩，总计 191 根工程桩，桩顶设计标高 3.96m。泊位西侧设置接岸平台连接 2#泊位护岸，平台长 63.5m、宽 24m，共布置 30 根Φ1000mm 直桩，桩顶标高 3.6~4.6m，平台高程由码头侧向护岸侧逐段降坡。

施工区域紧邻海堤，表层遍布 300~500kg 的历史遗留抛石，直接沉桩易造成桩端滑移与偏位，给初沉阶段的桩身稳定带来较大挑战。海域常风等级 4~6 级，项目按 6 级风（对应风速 15m/s）设定施工作业阈值，超过风级即停止沉桩作业，有效施工窗口期相对有限。为满足桩基与上部结构施工需求，项目设置临时施工钢平台作为作业与通行通道，平台采用上承式 55b 工字钢结构，总面积约 4295 ㎡，设计通行 350t 履带吊，按周转 6 次设计以适配分段施工的材料复用需求，这也要求沉桩导向装置具备可移动、快拆装的特性。

1.2 超长斜钢管桩沉桩的核心难点

本工程斜钢管桩长度大、设计斜率固定，叠加地层与环境限制，施工面临多重技术瓶颈。斜桩姿态控制难度首当其冲，超长桩身吊装与沉桩过程中易产生水平偏移与扭转，传统固定式导向架无法动态调整约束位置，难以满足倾斜度偏差不大于 1‰的精度要求，且单一导向结构无法同时适配直桩与斜桩施工，设备利用率偏低。抛石地层带来的沉桩稳定性问题同样突出，表层抛石分布不均，桩端初沉时阻力差异大，易出现侧向滑移，若导向约束不足，极易出现桩位超标、桩身变形等质量问题，后续纠偏难度极大。

海外施工资源的局限性也对工艺选择提出了更高要求。西非当地加工能力不足，专用设备进场周期长、物流成本高，要求导向装置结构简单，可依托现场通用钢材加工制作，同时满足多次周转使用的强度要求，在保证施工质量的前提下，尽可能压缩成本与工期。

2 超长斜钢管桩可调节导向架设计

2.1 总体设计思路

结合钓鱼法沉桩的工艺特点，导向架设计以“定位精准、调节便捷、刚度充足、可周转复用”为核心原则，重点解决斜桩沉桩过程中的姿态约束问题。导向架整体放置于临时施工钢平台上，通过底部行走机构实现沿栈桥纵向移动，适配不同排

架桩位的施工转场；中部设置可调节导向机构，对钢管桩形成双侧柔性约束，既限制桩身的水平位移与倾斜偏差，又保证桩身在锤击作用下可顺畅下沉；顶部设置操作平台与爬梯，满足施工人员调校与接桩作业的空间需求。

作业时，先根据设计桩位将导向架移动至指定位置并临时固定，调整导向机构的间距与倾斜角度，使其匹配钢管桩的设计参数；履带吊采用钓鱼法将钢管桩竖直起吊后，缓慢下放至导向架的约束区间内，初步校正桩位与倾角；启动沉桩设备进行锤击沉桩，过程中导向机构持续限制桩身水平位移，引导桩身沿设计斜率下沉，直至达到设计标高。

2.2 主体结构体系

导向架主体采用钢管与型钢组合焊接的空间刚架结构，主要由底部承重底盘、立柱支撑体系与顶部操作平台三部分组成。底部底盘采用双拼 H 型钢焊接成框格结构，作为整体承重基础，底盘尺寸结合桩位调整范围与设备荷载确定，表面铺设花纹钢板增大摩擦力，同时预留螺栓孔与焊接节点，用于与施工平台临时固定。底盘下方设置行走滚轮，可沿平台顶面的预设轨道移动，不同桩位间转场无需拆解主体结构，大幅提升转场效率。

立柱支撑体系包含 4 根主立柱与多道斜向撑杆，主立柱采用大直径无缝钢管，材质选用 Q345B，具备较高的抗弯与抗侧移刚度；斜撑采用槽钢与钢管搭配布置，在立柱间形成空间桁架体系，有效提升导向架的整体抗扭与抗倾覆性能，抵御沉桩过程中的水平冲击荷载。立柱高度结合钢管桩接桩作业高度确定，满足两节桩对接时的操作空间要求。顶部操作平台采用型钢骨架加钢板铺面，四周设置防护栏杆，平台一侧设置直爬梯并加装护笼，保障高空作业安全。

2.3 可调导向核心构造

可调节导向机构是导向架的核心功能部件，布置于导向架中部的桩身关键受力高度，主要由弧形支座、耐磨导向滚轮与调节丝杆组成。弧形支座采用钢板加工成型，弧度与钢管桩外壁相匹配，支座上对称安装 3 组尼龙导向滚轮，滚轮采用高强度耐磨尼龙材质，既能减小沉桩过程中的摩擦阻力，又可避免划伤桩身防腐涂层，适配滨海工程的防腐要求。

滚轮通过轴承安装在弧形支座上，支座与调节丝杆传动连接，转动丝杆可带动弧形支座水平移动，进而调整两侧滚轮的间距，可适配 Φ630mm~Φ1000mm 不同桩径的钢管桩施工。同时，弧形支座底部设置转轴结构，可调整导向角度，匹配不同斜率的斜桩导向需求，调整完成后通过锁紧螺栓固定，保证导向角度的稳定性。该构造实现了导向间距与角度的双向可调，一套装置可覆盖项目所有桩型的施工需求，解决了传统导向架适配性单一的问题。

2.4 结构验算与材料选型

结合工程实际荷载条件，对导向架进行强度与稳定性验算。荷载取值参考临时施工平台设计标准，沉桩时的水平荷载按锤击激振力与桩身摩擦力的水平分量计算，经有限元分析结构基频为 4.5Hz，冲击系数取 0.25，荷载基本组合采用 1.3 倍自重+1.5 倍活载进行强度验算，标准组合用于刚度验算。主要受力构件采用 Q345B 钢材，抗拉强度设计值 305MPa，抗剪强度设计值 175MPa；底盘与次要构件采用 Q235B 钢材，抗拉强度设计值 215MPa，钢材弹性模量统一取 2.06×10^5MPa。

经验算，导向架立柱最大弯曲应力小于钢材强度设计值，整体抗倾覆稳定系数大于 1.5，导向滚轮的接触应力满足尼龙材料的许用值要求，最不利沉桩工况下结构安全可靠。考虑到项目为临时结构，使用周期约 2 个月，焊缝等级按三级控制，在保证受力安全的前提下降低加工难度，契合海外项目现场加工的条件限制。

3 钓鱼法沉桩施工关键控制技术

3.1 施工工艺流程

本工程采用 85t 履带吊配合 60kW 振动锤进行钓鱼法沉桩作业，整体施工流程分为准备、沉桩与转场三个阶段。准备阶段首先清理施工区域表层抛石，平整临时平台并铺设导向架行走轨道，采用全站仪放样桩位并标注方向控制线；随后吊装导向架就位，调整导向滚轮的间距与角度，完成导向架固定与调校。沉桩阶段先在地面完成钢管桩的水平对接接长，预留 2m 余量以应对沉桩深度偏差；采用钓鱼法将桩身竖直起吊，缓慢移入导向架内，初步对中桩位并校正倾斜度；确认姿态符合要求后，启动振动锤进行初沉，待桩身入土稳定后持续锤击，至桩顶接近导向架顶部时进行第二节桩接长；焊接完成并自然冷却后，继续沉桩直至达到设计标高。转场阶段松开导向约束与底盘固定，将导向架沿轨道移动至下一桩位，进入下一个施工循环。

3.2 沉桩前定位与导向调校

桩位放样采用全站仪极坐标法，在岸边稳定控制点架设仪器，逐根测放桩位中心与方向控制线，放样误差控制在 10mm 以内。导向架就位时，以桩位控制线为基准调整底盘位置，使导向机构中心与桩位中心重合，随后将底盘与施工平台焊接固定，防止沉桩过程中导向架受振动移位。

导向调校是斜桩沉桩的关键环节，先根据设计斜率计算导向滚轮的倾斜角度，通过角度尺校准弧形支座的倾角并锁紧；再根据桩径调整两侧滚轮间距，使滚轮与桩身间隙控制在 5~10mm，既保证桩身可自由下沉，又能有效限制水平偏移。对于斜桩，需同时校准横向与纵向两个方向的导向角度，确保桩身在设计倾斜平面内下沉，避免出现扭转偏差。调校完成后进行试插桩验证，确认桩身可顺畅通过导向区间且姿态符合要

求，方可正式沉桩。

3.3 沉桩过程分阶段控制

沉桩过程分为初沉、稳沉与终沉三个阶段，各阶段采用差异化的控制策略[2]。初沉阶段桩端未进入稳定土层，易受抛石影响产生偏位，此时采用低锤轻击模式，控制振动锤的激振力，同时全程采用经纬仪观测桩身倾斜度，若偏差超过 5‰立即停锤，通过导向机构微调后再继续施工，严禁强行纠偏造成桩身变形。稳沉阶段桩身入土深度较大，地层侧向约束增强，可逐步提高锤击能量，加快沉桩速度，过程中每下沉 2m 复核一次桩位与倾斜度，确保偏差始终处于允许范围内。

针对西非滨海风况，施工中安排专人实时监测风速，当风速达到 15m/s 时立即停止沉桩作业，并将桩身与导向架临时固定，防止风荷载导致桩身偏斜。此外，避免长时间连续锤击，防止焊缝因振动疲劳产生开裂，每锤击 15min 暂停 2min，检查导向装置与桩身连接情况，发现异常及时处理。

3.4 接桩与终沉质量管控

钢管桩接长采用等强环形焊接，对接前先将桩端加工成 45° 坡口，清除坡口两侧 30mm 范围内的铁锈、油污与水气，焊材提前烘干备用[3]。对接时采用连接片辅助定位，控制桩身轴线偏差不大于 5‰，错边量不大于 3mm；焊接采用多层焊，每层焊缝完成后及时清除焊渣，层间接头错开布置，焊缝余高不小于 2mm。对于错边量较大的接口，采用 4 块外包加强板进行补强，确保接桩强度满足锤击受力要求。焊接完成后自然冷却不少于 30min，方可继续沉桩作业，避免高温焊缝受振动冲击产生裂纹。

终沉控制采用“桩长控制为主，贯入度校核为辅”的原则，设计要求桩端进入土层深度不超过 5m，最后 3min 的累计贯入量控制在 23mm 以内。当贯入度达到设计值且桩长满足要求时，即可停锤；若桩长已达设计值但贯入度仍偏大，则及时反馈设计单位，结合地质资料研判是否继续加深，确保桩基承载力满足设计要求。

4 工程应用效果

该可调节导向架与钓鱼法沉桩技术在几内亚 3#泊位码头工程中全面应用，累计完成 221 根钢管桩的施工。施工过程中，导向架单桩位调校时间不超过 30min，转场移动耗时约 1h，相比传统固定式导向架，施工效率提升约 40%。针对表层抛石地层，通过导向架的精准约束，有效解决了初沉阶段桩端滑移问题，施工全程未出现桩身严重偏位或变形的情况。

施工完成后对所有钢管桩进行质量检测，低应变法检测结果显示，Ⅰ类桩占比 98%，无Ⅲ、Ⅳ类桩，桩身焊接质量与结构完整性良好。桩位与倾斜度检测表明，斜桩平面最大偏差为 42mm，小于规范允许的 50mm；倾斜度最大偏差为 0.8‰，远低于 1%的控制标准，各项指标均满足设计与规范要求。同时，导向架全程周转使用 6 次，材料复用率达到 90%以上，大幅降低了海外工程的设备投入与物流成本，取得了良好的技术经济效益。

5 结语

针对西非滨海抛石地层超长斜钢管桩的施工难题，本文设计的可调节专用导向架，通过空间刚架主体与双向可调导向机构的组合，有效解决了传统导向架适配性差、转场效率低的问题，结构受力可靠，可满足不同桩径、不同斜率钢管桩的施工需求。配套形成的钓鱼法沉桩关键技术，通过沉桩前精准调校、过程分阶段控制、接桩与终沉严格管控，实现了超长斜桩沉桩的全过程质量可控，桩位与倾斜度精度均优于规范要求。该技术体系在几内亚铝业二期港口工程中应用效果良好，兼顾了施工质量、效率与成本，可为西非及同类滨海地区的高桩码头桩基施工提供参考与借鉴。

参考文献：

[1] 康琛源.码头工程建设中的超长钢管桩沉桩施工工艺[J].中国高新科技,2024,(5):83-84+154.

[2] 刘智超,董海伟,赵国超,等.钢板桩围堰钓鱼法沉桩施工质量控制要点分析[J].海河水利,2024,(6):50-52+63.

[3] 姜源.码头工程建设中的超长钢管桩沉桩施工技术研究[J].科学技术创新,2026,(6):137-140.