

浅谈市政排水工程沉井顶管施工技术

王 斌

无锡惠山开发建设有限公司 江苏 无锡 214000

摘要: 本文以无锡市金惠路改造工程为例,探讨市政排水工程沉井顶管施工技术。项目采用“沉井工作井+沉井接收井+泥水平衡顶管”方案,针对软土地质、周边环境复杂等难点,优化沉井设计,采用分节制作工艺、可控下沉与智能监测技术保障沉井施工质量;选用适配顶管机,做好前期准备与精准推进控制;融合BIM、物联网与大数据分析等智能建造技术,实现施工全过程的优化管理与风险预警,有效保障了工程质量与周边环境安全,为类似工程提供参考。

关键词: 市政排水;沉井施工;顶管施工;泥水平衡;智能监测;软土地质

引言:市政排水工程是城市基础设施的关键构成,对保障城市正常运转与居民生活质量意义重大。在排水系统优化升级中,沉井顶管施工技术凭借其非开挖、对周边环境影响小等优势,得到广泛应用。然而,实际工程常面临地质条件复杂、周边敏感设施密集等挑战,对施工技术精准性与可控性提出极高要求。本文结合无锡市金惠路改造工程,深入剖析沉井顶管施工核心技术、管控要点及智能建造技术融合应用,为提升市政排水工程施工质量与效率提供实践参考。

1 工程概况与施工背景

1.1 项目基本概况

无锡市金惠路(惠景路-迎新路)改造工程是惠山区排水系统优化重点项目,核心是局部迁改现状d800~d1000污水管道,适配路网升级与排水提升需求。迁改关键区段在无畏桥南侧,要下穿无畏河布设2道DN800球墨铸铁污水管道,单道顶管长46.9m,合计93.8m。为减少对河道生态等影响,采用“沉井工作井+沉井接收井+泥水平衡顶管”非开挖方案,布设两座矩形沉井。项目工期紧、技术要求高,要在保障既有排水系统运行下施工,组织难度大。

1.2 地质与水文条件

施工区域土层自上而下:①素填土,厚2.3-3.5m,承载力低;②粉质黏土,厚3.1-4.2m,可塑,性能一般;③-2层软塑粉质黏土夹粉土,厚2.8-3.6m,易不均匀沉降;⑤层软塑粉质黏土,厚5.2-6.8m,顶管主要穿越此层,易缩颈坍塌。沉井基础坐落⑤层,需控下沉均匀性。地下水为孔隙潜水,水位埋深1.2-1.8m,与河水连通强,施工要控泥水压力防渗漏污染。

1.3 周边环境与施工难点

施工区域环境复杂,难点有三:一是周边敏感设施

密集,沉井与顶管施工区紧邻驳岸、道路和在建宿舍楼,最近不足10m,易引发构筑物沉降变形;二是软土地质稳定性差,③-2层和⑤层土导致沉井易偏斜突沉,顶管易轴线偏移与地表沉降;三是施工约束多,要保障无畏河通航,防泥浆废弃物污染河道,协调保护市政管线,施工空间受限。这对施工技术精准、可控要求极高。

2 沉井施工核心技术与管控要点

2.1 沉井设计优化

结合工程地质与施工需求,P2工作井与P3接收井均采用矩形沉井结构,内径8m×6m,壁厚0.8m,总下沉深度约14m。考虑到沉井深度大、软土地质承载力不足,设计采用“分节制作、分次下沉”方案,将沉井分为3节施工,首节高度4.7m,第二节高度4.7m,第三节高度4.6m,节间采用企口连接,增设止水钢板确保防水性能。沉井刃脚采用梯形结构,刃脚高度1.2m,刃脚踏面宽度0.2m,采用C35钢筋混凝土浇筑,内置双层钢筋网,增强刃脚切削土体与承受反力的能力。为提升沉井整体稳定性,在井壁外侧设置预留孔,用于下沉过程中水力辅助纠偏;井内设置4组集水井,用于抽排地下水与施工废水^[1]。同时,结合BIM技术进行结构受力模拟,优化钢筋布置方案,重点强化沉井转角与节间连接部位的配筋,确保沉井在制作、下沉及封底阶段的结构安全。

2.2 沉井分节制作工艺

沉井制作质量直接决定下沉稳定性,施工严格遵循“平整场地-铺垫层-绑扎钢筋-支模板-浇筑混凝土-养护-拆模板”的流程,核心控制要点如下:一是场地预处理,清除地表杂物后铺设30cm厚级配砂石垫层,采用压路机分层压实,承载力需达到120kPa以上,防止沉井制作过程中发生不均匀沉降;二是钢筋与模板施工,钢筋绑扎严格按设计图纸执行,主筋间距偏差≤10mm,

箍筋间距偏差 $\leq 20\text{mm}$ ，模板采用钢模板，安装前涂刷脱模剂，模板垂直度偏差控制在 3mm/m 以内，采用对拉螺栓与斜撑固定，防止浇筑过程中变形；三是混凝土施工，采用商品混凝土，坍落度控制在 $160\sim 180\text{mm}$ ，采用插入式振捣器分层振捣，振捣间距 $\leq 50\text{cm}$ ，避免漏振与过振，混凝土浇筑完成后及时覆盖土工布洒水养护，养护时间不少于14天，确保混凝土强度达到设计强度的70%以上方可进行下一节制作。

2.3 可控下沉技术与智能监测

针对软土地质沉井易偏斜、突沉的问题，本工程引入“可控下沉法”，结合BIM技术与智能监测系统，实现下沉过程的精准管控。

2.3.1 下沉前准备与模拟预判

下沉前利用BIM技术建立沉井-土体相互作用三维模型，输入地质勘察数据、沉井结构参数，模拟不同下沉阶段的应力分布、变形趋势及可能出现的风险点。根据模拟结果，划定“慢沉区”（穿越③-2层软弱夹层区段）与“纠偏区”（沉井四角及刃脚关键部位），制定针对性控制预案，设定垂直度偏差 $> 1/500$ 、四角高差 $> 50\text{mm}$ 为预警阈值。同时，在沉井井壁四角、周边驳岸、道路及在建宿舍楼布设沉降、位移监测点，安装自动化监测设备，实现数据实时采集与传输。

2.3.2 分次下沉施工流程

沉井分三次下沉，具体流程为：首节制作养护完成→拆除垫层→采用“排水开挖下沉”法开挖刃脚周边土体→沉井下沉至设计标高→第二节制作养护→继续下沉→第三节制作养护→最终下沉至设计标高→清基→封底及底板施工。下沉过程中，采用人工配合挖掘机开挖，刃脚处土体预留 $10\sim 20\text{cm}$ 保护层，避免超挖导致突沉；井内积水通过集水井抽排，保持井内水位低于地下水位 50cm ，防止地下水浮力影响沉井稳定性。

2.3.3 动态调控与纠偏措施

下沉过程中严格执行“分层开挖、均匀下沉”原则，每下沉 1m 采集一次监测数据，包括沉井垂直度、四角高差、刃脚土压力及周边地表沉降。当监测数据显示沉井出现偏斜趋势时，采用“动态配重调整+水力辅助纠偏”组合方案：在沉井偏高一侧顶部施加临时配重（采用沙袋，重量根据偏斜程度计算），同时通过井壁预留孔向偏低一侧刃脚土体冲水软化，促使沉井缓慢回正。穿越③-2层软弱夹层时，采用“慢沉-观测-微调”策略，将单次下沉量控制在 20cm 以内，延长沉降稳定观测时间（不少于4小时），有效避免突沉事故^[2]。

2.3.4 下沉效果验证

通过上述精细化管控，两座沉井最终下沉至设计标高，垂直度偏差分别为 $1/580$ 、 $1/620$ ，均优于规范要求的 $1/200$ ；四角最大高差 32mm ，满足设计限值；周边地表沉降量最大为 2.8mm ，驳岸与在建宿舍楼沉降量均 $\leq 3\text{mm}$ ，未出现裂缝、变形等异常情况，沉井下沉施工质量优良。

2.4 沉井封底与底板施工

沉井下沉至设计标高后，立即进行清基处理，采用高压水枪冲洗刃脚周边土体，清除浮泥与杂物，确保封底基面平整。封底采用“导管法水下混凝土浇筑”工艺，分两次实施：首次浇筑C25水下混凝土至刃脚顶面以上 50cm ，形成临时封底层，待混凝土强度达到设计强度的80%后，抽排井内积水，进行二次封底，浇筑C30混凝土至底板设计标高。封底混凝土浇筑过程中，采用多根导管对称布料，导管埋深控制在 $2\sim 6\text{m}$ ，避免出现浇筑冷缝。底板施工时，严格处理底板与井壁连接部位，凿毛井壁混凝土表面，铺设水泥浆结合层，确保底板与井壁紧密连接，形成整体受力结构。

3 泥水平衡顶管施工技术体系

3.1 顶管机选型与适配性分析

顶管机选型对顶进质量与效率至关重要。本工程顶管穿越⑤层软塑粉质黏土，易缩颈坍塌且邻近河道需严格控沉，经多方案比选，选用GDDT800-00型泥水平衡顶管机。该机型有双重平衡机制，土压平衡靠刀盘切削土体在泥土仓形成塑性土体平衡土压力；泥水压力平衡通过调节泥水仓压力，在开挖面形成泥膜封水稳土。其配套系统完备，泥水循环系统用4寸进排泥水管与泥浆分离器；液压推进系统由8台千斤顶组成；控制系统集成多种功能。刀盘配备特殊刀具，采用偏心转动与多棱体泥土仓结构，能高效切削土体、轧碎障碍物，适配复杂地层。

3.2 顶管施工前期准备

顶管施工前期准备关键在于工作井与接收井清理、导轨安装、顶管机调试及泥浆配制。工作井清理后铺钢筋混凝土导轨，用型钢制作，严格控制安装标高与轴线偏差，按管材尺寸调整间距。顶管机就位后全面调试，确保各系统正常。泥浆配制结合地质优化配比，以膨润土为主剂，添加纯碱调节pH值，添加CMC提升性能。经试验，泥浆密度控制在 $1.05\sim 1.10\text{g/cm}^3$ ，黏度 $20\sim 25\text{s}$ ，可形成稳定泥浆套，减少阻力、排出废渣^[1]。

3.3 自动纠偏系统与精准推进控制

3.3.1 系统构成：系统由监测设备、控制单元与执行机构三部分组成。监测设备包括激光导向仪（精度

$\pm 0.5\text{mm}$)与倾角传感器,分别用于监测顶管机轴线偏差与姿态变化;控制单元采用PLC控制器,集成AI算法,可实时分析监测数据并计算纠偏量;执行机构为分区液压千斤顶系统,可根据控制指令调整各区域千斤顶油压,实现顶管机姿态矫正。

3.3.2 施工控制流程:准备阶段,精确安装监测设备(安装误差 $\leq 1\text{mm}$),输入顶管设计轴线参数、地质数据,设定轴线允许偏差范围为 $\pm 10\text{mm}$ 。顶进过程中,系统每顶进 0.5m 自动采集一次数据,实时传输至控制单元;当监测数据显示偏差超出预警值时,AI算法立即计算纠偏量,发出调控指令,调整对应区域千斤顶油压(液压响应时间 $\leq 0.5\text{s}$),实现姿态实时矫正。为确保系统可靠性,每班次辅以人工测量校验(采用全站仪测量),对比自动化监测数据,及时校准设备偏差。

3.3.3 推进过程其他控制要点:顶进速度根据地层条件与监测数据动态调整,穿越⑤层软塑粉质黏土时,顶进速度控制在 $5\sim 10\text{cm/min}$,避免速度过快导致土体扰动过大;泥水压力实时根据地下水压、地表沉降数据微调,确保开挖面稳定;顶管管材接口采用柔性连接,安装前检查密封圈完好性,接口间隙填充密封膏,防止泥浆渗漏。

3.3.4 顶进效果:本工程2道DN800顶管均顺利完成推进,经实测,顶管水平轴线偏差最大为 $+5.8\text{mm}$,垂直轴线偏差最大为 -4.7mm ,均控制在 $\pm 10\text{mm}$ 设计允许值以内;顶管施工引起的地表最大沉降量为 2.9mm ,远低于规范 5mm 的要求,有效保障了周边道路、驳岸及构筑物的安全。

4 智能建造技术融合应用

4.1 BIM技术全过程应用

本工程将BIM技术深度融合于施工全过程,实现设计优化、施工模拟与协同管理。设计阶段,利用BIM软件建立沉井、顶管及周边环境(河道、道路、管线)的三维一体化模型,开展碰撞检测,提前发现设计图纸中沉井与现状电力管线的位置冲突,优化沉井布设位置,避免施工返工;施工阶段,基于BIM模型进行4D施工模拟,可视化展示沉井分节制作、下沉及顶管推进的施工进度

与工艺衔接,优化施工组织方案,缩短工期15天;管理阶段,搭建BIM数据集成平台,整合设计图纸、地质勘察报告、施工监测数据、进度计划等信息,实现各参建单位(施工、监理、设计)的协同管理,提升决策效率^[4]。

4.2 物联网与大数据分析应用

为实现施工过程的智能化管控,本工程布设物联网传感器网络,实时采集关键施工参数与环境数据,包括沉井垂直度、四角高差、刃脚土压力、顶管轴线偏差、泥水压力、地表沉降及河道水质等。传感器数据通过5G网络实时传输至大数据分析平台,平台基于预设算法对数据进行分析处理,实现三大功能:一是风险预警,当监测数据接近预警阈值时,平台自动向管理人员手机终端推送预警信息,为应急处置争取时间;二是决策支持,通过分析历史监测数据与施工参数的相关性,优化沉井下沉速度、顶管泥水压力等参数,提升施工质量;三是质量追溯,全程记录施工数据,形成完整的质量追溯档案,便于后期工程验收与维护。

结束语

无锡市金惠路改造工程通过科学合理的沉井顶管施工技术应用,成功攻克软土地质、周边环境复杂等难题,保障了工程质量与周边设施安全。其中,沉井设计优化、分节制作工艺、可控下沉与智能监测技术,以及泥水平衡顶管施工体系的构建,为复杂地质条件下的市政排水工程施工提供了宝贵经验。同时,BIM、物联网与大数据分析等智能建造技术的融合应用,实现了施工过程的精细化管理与风险预警,推动了市政排水工程施工技术的智能化发展,值得在类似工程中推广借鉴。

参考文献

- [1]李明山,张帆.智能化技术在市政给排水工程中的应用研究[J].新城建科技,2025,34(03):34-36.
- [2]王浩.复杂环境下沉井施工技术控制要点分析[J].施工技术,2020,49(S1):312-315.
- [3]刘志强,王晓东.智能建造在市政工程中的应用与发展趋势[J].建筑科学与工程学报,2022,39(3):45-52.
- [4]刘欣.顶管技术在市政给排水施工中的有效应用[J].建筑·建材·装饰,2022(13):187-189.