

Analysis of Tunneling Construction Technology in Municipal Water Supply and Drainage Engineering

Sirui Wang

Fuxin Municipal Engineering Construction., Ltd., Fuxin, Liaoning, 123000, China

Abstract

This paper takes a municipal sewage pipeline project as the empirical object and systematically explores the application effect of long-distance tunneling construction technology in complex ge strata. The study shows that by maintaining the stability of the excavation surface through real-time regulation of earth pressure balance and combining with high-performance thixotropic mud reduction system, it can greatly control the ground subsidence and help to ensure the accuracy of the axis; for sandy gravel and uneven soft and hard strata, the cutter head structure scientifically optimized to effectively reduce the wear rate and improve the digging efficiency; At the same time, based on the jacking force calculation model, the relay space is scientifically arranged, and jacking load is reasonably divided and borne by section, which solves the problem of resistance in long-distance jacking. This technology not only reduces the disturbance to urban traffic but embodies the concept of intensive construction, and provides reliable technical support for the construction of underground pipelines in high-density urban areas.

Keywords

Municipal pipeline; Grouting friction technology; Long-distance tunneling construction; Earth pressure balance.

市政给排水施工中顶管施工技术分析

王思睿

阜新市政工程建设有限公司, 中国 · 辽宁 阜新 123000

摘 要

本文将某市政污水管网工程作为实证对象, 系统探讨长距离顶管施工技术在复杂地层中的应用效果。研究表明, 通过土压平衡实时调控维持开挖面稳定, 结合高性能触变泥浆减摩体系, 可大幅度控制地面沉降, 有助于保障轴线精度; 针对砂卵石、软硬不均地层, 科学优化刀盘结构, 有效降低磨损率, 提高掘进效率; 同时, 依据顶力计算模型, 科学布设中继间, 合理分段承担顶推荷载, 解决超长距离顶进阻力问题。该技术路径不仅减少给城市交通带来的扰动, 还体现了集约化建设理念, 为高密度城区地下管网建设提供可靠技术支持。

关键词

市政管网; 注浆减摩技术; 长距离顶管施工; 土压平衡

1 引言

市政给排水系统作为城市运行的“生命线”, 其建设质量、施工方式直接影响城市可持续发展。传统明挖法由于大面积破路、管线迁改频繁、扰动既有构筑物, 在高密度建成区已经难以达到预期要求, 不仅引发交通拥堵、噪声扬尘污染, 还容易诱发邻近建筑沉降开裂等次生风险。在此背景下, 长距离顶管技术凭借非开挖、低扰动、高精度等优势, 成为复杂城区地下管网敷设的优选方案。该技术通过密闭式掘进机在地下形成连续管道通道, 结合土压或泥水平衡系统, 主动调控掌子面压力, 有效控制地表沉降; 同时利用

触变泥浆减摩、中继间接力顶推及智能导向系统, 可实现千米级曲线顶进。基于此, 本文注重分析设备选型适配性、泥浆配比优化、顶力分布调控等技术环节, 有效提高顶管施工在软土、砂层、复合地层中的适应性, 为高效市政基础设施建设提供工程实践支撑。

2 工程概况

本工程为某城市重点污水管网建设项目, 管道总长度 4120 m, 穿越区域地质条件复杂多变, 涵盖黏性土、淤泥质土、粉砂层、碎石层典型地层, 且各顶进区间长度差异较大, 对于顶管施工的稳定性的提出了严峻挑战。其中, A2-A3 段穿越高含水率、低承载力的淤泥质土, 很可能发生掌子面失稳、地面沉降; A3-A4 段长达 1641 m 的粉砂层, 具有强渗透性、流塑性, 需要严格控制土仓压力, 防止发生涌水涌砂; 而 A4-A5 段碎石层则对于刀盘耐磨性、掘进效率构成

【作者简介】王思睿 (1984—), 男, 中国辽宁阜新, 在职硕士, 助理工程师, 从事市政给排水研究。

严峻考验。工程采用钢筋混凝土沉井作为工作井与接收井，配套新建8座提升泵站及各类检查井，主干管材包括PE100级给水管、HDPE双壁波纹管，对于轴线精度、接口密封性要求较高。面对长距离、多变地层、无地下水至高渗透性环境并存的情况，必须针对性优化顶管机型、刀盘配置、注浆参数、中继间布设策略，才能保障施工安全、控制沉降变形、实现高效贯通，充分体现非开挖技术在复杂城区地下基础设施建设中的工程价值。

3 市政给排水施工中顶管施工技术

3.1 设备选型与技术优化

3.1.1 设备选型

针对本项目穿越粉质黏土为主、局部存在淤泥质土、粉砂层的复合地质条件，且沿线邻近既有建筑，对于地表沉降控制要求较为严格，经过多方案比选，最终选定DK2000型土压平衡顶管机。该机型通过螺旋排土器、土仓压力闭环控制系统，可实时调节掌子面支护压力，有效维持开挖面稳定，大幅度控制软土流变引发的地面沉降；其密闭式掘进模式避免了泥水外溢，符合城市环保要求。虽然部分区间存在粉砂层，但通过优化添加剂注入，可提高渣土塑流性，解决纯土压模式在高渗透地层中的局限。此外，DK2000具备最大顶力达到20 000 kN，配合中继间接力系统，完全满足超千米级顶进需求。

3.1.2 技术优化

本工程A4-A5顶进区间穿越强透水性碎石层，地层中含大量粒径达到280 mm的卵石，对于顶管机刀盘构成严峻挑战。初期采用标准配置刀盘施工时，由于卵石具有硬度高、棱角尖锐等特征，导致刀具外圈严重磨蚀，最大磨损深度达到80 mm，原设计的螺栓连接式耐磨板在高频冲击下容易松动脱落，不仅降低切削效率，还容易引发顶进阻力骤增、主轴承过载，频繁发生设备故障，严重影响施工连续性。

针对上述问题，工作人员实施刀盘结构、材料同步优化。在具体操作中，先将刀头外缘原有普通合金刀具更换为高铬铸铁、碳化钨复合的优质耐磨合金组件，大幅度加强表面硬度、抗冲击强度；同步淘汰容易失效的螺栓连接，改用全熔透焊接工艺，将耐磨件。刀体刚性固结，消除连接界面应力集中；加密耐磨块布设间距，在刀盘辐条及边缘区域增设梯度分布的辅助耐磨条，形成多级防护体系。改造后刀盘在A4-A5区间实际掘进中表现良好，同等长度下外圈磨损量降低超过70%，顶进推力波动幅度减小，大幅度加强设备运行稳定性。

3.2 设备安装与调试

本工程采用逆作法组装后配套系统，严格控制导轨安装精度，轴线偏差 ≤ 3 mm，顶面高程控制在 $0 \sim +3$ mm，轨距误差 ± 2 mm，控制顶进基准和设计中心线高度重合。主机吊装时预留足够出洞门操作空间，避免结构干涉；刀盘

安装严格遵循“先中间后两边”原则，科学减小装配应力，并通过激光靶、全站仪，实时监测初始轴线姿态，实现毫米级定位。主顶液压系统采用对称布置的千斤顶支架，油路并联设计确保各缸同步行程，防止偏载引发机头偏转；顶铁选用环形、U型组合结构，有效分散集中应力，避免局部压溃。等到安装完成后，全面核查顶管机密封性能、主顶推力系统响应特性、触变泥浆注入压力、后背墙反力支撑状态，确认各子系统联动正常、参数匹配，为后续高精度顶进作业奠定坚实基础。

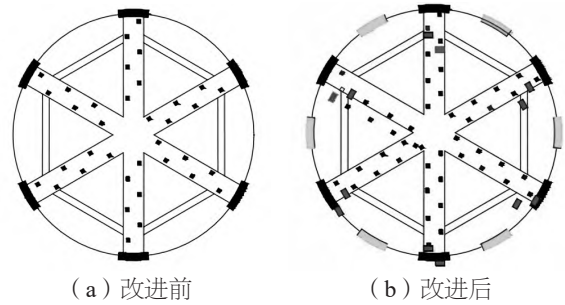


图1 刀盘优化前后对比

3.3 土压平衡管控

本工程依据地层特性差异化设定初始土仓压力。在高灵敏度淤泥质软土层采用150-200 kPa较高支护压力，补偿土体低抗剪强度，防止掌子面失稳、地面沉降；而在渗透性强、内摩擦角大的粉砂层则将土压下降为100-120 kPa，避免超压引发前方土体隆起。同时，施工中通过实时调节刀盘切削速率、螺旋输送机排土量，动态平衡土仓内渣土体积，让支护压力精准匹配开挖面水土合压力；同步利用激光靶、全站仪组成的导向系统，高频监测机头姿态，一旦轴线偏差超出阈值，立即通过分区控制千斤顶行程，联动纠偏油缸施加不对称推力，实现毫米级轨迹调控。

3.4 注浆

工程穿越以粉质黏土为主的地层，采用膨润土基触变泥浆体系，按照1:10的水土质量比配制，利用高速搅拌机充分分散膨润土颗粒，搅拌时间不少于5分钟，保证形成高悬浮性、低滤失量的稳定胶体；泥浆经过沉淀、筛滤后注入储浆罐，有效去除杂质，防止注浆孔堵塞。针对局部砂层，可动态调整配比至1:8，全面提高泥浆黏度、护壁性能，保证在高渗透地层中形成有效润滑膜。注浆系统由工作井内注浆泵、储浆罐、环状管路组成，具备精准流量调节、稳压输出功能。注浆孔沿着顶管机头部、中继间、标准管节环向布设，间距1.5 m，孔径50-100 mm，实现全段连续注浆。其中，机头孔用于初始泥浆套构建，中继间孔维持长距离润滑连续性，管节孔则及时填充顶进后空隙；注浆压力则依据地层特性分级控制，粉质黏土中维持0.1-0.3 MPa，避免超压劈裂土体；砂砾层则增加为0.3-0.5 MPa，有效克服高渗透损失，控制泥浆全面包裹管周。

3.5 中继间设置

中继间作为长距离顶管施工中分段承担顶推荷载的重要装置,其结构由前、后高强度钢制顶板、环向布置的多组液压缸组成,精准匹配顶板外形和管道外轮廓,控制力流均匀传递;板面集成注浆孔、导向组件,前者用于注入触变泥浆形成润滑套,有效降低摩擦阻,后者辅助维持顶进轴线精度^[1]。液压缸数量及规格依据地层阻力特性、单段顶力需求确定,保证在接力过程中不发生局部失稳。中继间数量和位置要利用力学模型科学计算。首先,总顶进阻力 F_p 由式(1)确定:

$$F_p = \pi D_0 L f_k + N_f \quad (1)$$

其中: D_0 为管道外径(mm), L 表示顶进长度(m), f_k 为管道外壁和土体间的单位面积平均摩擦阻力(kN/m²), N_f 代表顶管机迎面阻力(kN)。在本工程黏性土层中,实测 $f_k = 2.5\text{kN/m}^2$, 显著低于砂砾层,表明摩擦阻较小。为此,中继间数量 n 按照式(2)估算:

$$n = \left\lceil \frac{F_p}{f_0} - 1 \right\rceil \quad (2)$$

式中: f_0 为单个中继间允许承担的最大顶力(kN), 计算结果取整。结合 4120 m 顶程、DN2000 管径、地层分布,经过综合比选,最终布设 7 个中继间,避开软硬交界面,优先置于地质均匀、阻力稳定区段,在满足顶力分担需求的基础上,有助于保障施工连续性^[2]。

4 技术应用效果

为了验证长距离顶管施工技术的控制效果,选取 A1-A2 区间开展地表沉降实测,监测数据如图2所示。结果显示,随着顶进距离不断推进,地表沉降呈现先负后正的波动趋势,最大沉降值为 +1.0 mm(25 m 处),最小值为 -2.7 mm(5 m 处),全程累计变形始终控制在 ± 5 mm 范围内,并未出现显著沉降累积。该结果表明,通过土压平衡系统动态调控开挖面支护压力,有效维持了掌子面稳定性,控制了土体失稳引发的过量地层损失;同时,触变泥浆注浆体系,形成连续润滑套,降低管周摩擦阻力,减少对周边土体的挤压扰动。相较于传统顶管易产生“前拱后陷”式沉降模式,本技术路径实现了应力场均衡释放、位移响应的可控性。当前城市地

下工程地表形变限值通常为 ± 10 mm,本次施工各监测点均满足规范要求,部分区段接近 ± 3 mm,充分体现了非开挖技术在高精度、低扰动施工中的应用性能,为复杂城区管网建设提供了可靠的技术保障^[3]。

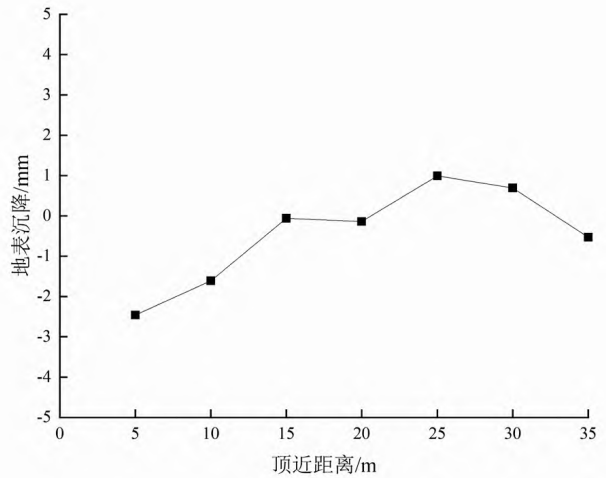


图2 顶进过程中地表沉降趋势

5 结语

本研究通过工程实践验证,长距离顶管施工技术在复杂地层中具备良好的应用优势。针对地质特性,合理优化顶管机型、刀盘结构,可大幅度提升刀具耐磨性;科学配制触变泥浆有效降低管周摩擦阻,保障顶进连续性。利用土压动态平衡、精准注浆控制,实现开挖面稳定,地表沉降全程控制在 5 mm 以内,远优于规范限值。该技术路径具有高精度、低影响、高效率特征,为城市密集区市政给排水工程建设提供了安全可靠、生态友好的实施模式,具有广阔推广应用前景。

参考文献

- [1] 郑积剑. 市政污水顶管施工技术研究[J]. 城市开发,2025(18):175-177.
- [2] 胡中华,刘卫华,张勇,等. 顶管施工防渗漏技术研究——以锦江再生水顶管工程为例[J]. 科技和产业,2024,24(10):212-218.
- [3] 冯朝,张健,王亚超,等. 泥水平衡顶管施工技术研究——以西安曲江新区植物园地下停车场项目为例[J]. 江苏建筑,2024(3):76-80.