

大直径顶管施工中的关键技术研究

覃庆湖¹, 陈泰成²

(1. 广西云之龙工程检测有限公司, 广西 南宁 530000;

2. 云之龙咨询集团有限公司, 广西 南宁 530000)

摘要 大直径顶管施工技术因其有非开挖的优势, 成为地下建设的重要手段。本文结合梧州市龙圩区龙城路与城南大道交叉口至龙圩区政府交叉口(城南大道与苍海大道交叉口)路段项目, 对大直径顶管施工的关键技术展开研究, 包括地层条件适应性、地下水影响、规划以及施工环境对施工可行性的影响等方面, 并且重点探讨了掘进设备选型、管节拼装、推力系统与摩阻控制以及施工监测技术, 旨在通过剖析不同工况下的施工策略, 提出优化方案, 为提升施工效率与安全性提供参考。

关键词 大直径顶管施工; 掘进设备; 管节拼装; 施工监测

中图分类号: TU990.3

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.16.039

0 引言

随着城市化进程加速推进, 地下管线建设的需求持续增多, 传统的开挖施工方式由于对地表环境会产生较大影响、施工周期偏长以及成本较高等一系列问题, 正逐渐被非开挖技术所替代^[1]。顶管施工技术作为一种有高效特性的地下管道铺设途径, 在减少地面扰动以及降低环境影响等方面具有独有的优势^[2]。本文结合梧州市龙圩区龙城路与城南大道交叉口至龙圩区政府交叉口(城南大道与苍海大道交叉口)路段项目, 阐述大直径顶管施工主要的影响因素, 并分析关键的施工技术, 为工程实践提供指导。

1 工程概况

梧州市龙圩区龙城路与城南大道交叉口至龙圩区政府交叉口(城南大道与苍海大道交叉口)路段, 为城南大道周边区域范围的较低路段, 亦为龙圩区交通主干道节点, 下雨时经常发生内涝, 严重影响交通。该工程新建 d2600 溢流渠主要分流排放城南大道现状 2.5×2.5 m 主干渠未及时通过现状苍海大道至下小河 d2000 分流渠排水放的雨水入苍海湖。新建 d2000 分流渠则排放苍海大道已设计 d1500 管收集的雨水和极端条件下 d2600 溢流渠的壅高水位水入苍海湖。本工程新建 d2600 管道顶管施工 797 m, 明挖施工 30 m。本工程单次顶进最长距离为 120 m, 长距离顶管容易出现的问题是管道偏差大、后座顶力不足。顶管一次顶进达 100 m 以上, 顶进阻力大。采取注浆减阻技术减小摩阻力, 加设中继环技术来克服摩阻力。管道超长工序繁杂, 操作困难, 进度难于控制, 安全施工性要求高, 所以须加强大投入、加强管理, 做足各项安全措施。

2 大直径顶管施工的应用背景

随着工程需求不断增加, 大直径顶管施工成为地下空间开发过程中的一项重要手段, 对施工设备、技术参数以及施工管理等方面提出了更高标准要求。城市化进程不断加快使地下空间利用需求明显提高, 供水、排水、电力、通信等各类管线建设面临着严格的要求。在地表空间有限的情况下, 地下管线施工要同时考虑施工效率、环境保护以及安全可控性等多方面因素, 非开挖技术成为了主要的发展趋向。大直径顶管施工因有占地少、噪声低、对交通影响较小等特性, 成为城市地下基础设施建设的选择。随着大规模市政工程的不断推进, 顶管技术逐渐应用于长距离管道铺设, 在穿越河流、道路、铁路以及建筑密集区域时, 大直径顶管施工降低了对地面设施的干扰, 提高了施工的可行性, 针对不同的地层条件, 施工工艺持续进行优化, 适应砂土层、黏土层以及复合地层等复杂环境。

3 大直径顶管施工的影响因素

地下管道工程在进行施工时, 其过程会受到多种外部因素的限制与约束, 在地层条件、地下水分布状况、线路规划以及周边环境等多个方面, 这些因素都会对施工的进度、结构的稳定性以及成本控制产生直接的作用与影响。

3.1 地层条件对顶管施工的适应性

在掘进过程当中, 地层力学特性对设备选型、施工参数以及支护方式起着决定性作用。软土层容易导致管道出现下沉现象, 采用同步注浆以及加固措施, 砂层地层的透水性相对较高, 有可能引发涌水以及坍塌情况, 需要对开挖面稳定性加以控制; 黏土层虽然

有一定的自稳能力，不过在掘进过程中可能会产生比较大的摩阻，对推进效率造成影响，岩层条件要求刀盘拥有较强的破岩能力，还要关注掘进机的磨损状况，保障施工的稳定性的；在混合地层进行施工时，地层特性发生变化可能会造成掘进不均匀，需要依据不同的土质采取相应的掘进控制策略。在不同的地层条件之下，施工过程中需要全面考虑土体变形、支护方式以及施工速度，保障工程的安全性以及经济性。表 1 展示了不同地层条件对顶管施工的影响以及适应性。

3.2 地下水对顶管掘进与稳定性的影响

在施工过程当中，地下水的分布状况以及水压条件会对掘进的稳定性以及施工的安全性产生影响。当水位处于较高水平时，开挖面会受到水压力的作用，可能导致管道出现浮动现象或者掘进失去稳定，需要采取降水或者止水的措施来降低风险。在渗透系数比较大的地层当中，地下水容易沿着掘进通道渗透进来，造成施工困难，在砂层和砾石层的环境下，水土流失有可能引发地表沉降，对周边的建筑以及道路造成影响。在掘进过程中，水压发生变化也可能会对泥水平衡系统的稳定性产生影响，如果控制不当的话，可能会导致超挖或者管道发生偏移。针对不同的地下水条件，可以通过设置止水帷幕、注浆加固以及调整掘进参数等方式来减少水给施工带来的不利影响，合理的排水设计以及施工方案优化可有效提升施工的稳定性的，降低施工风险以及对环境的影响^[3]。

3.3 顶管线路规划对施工可行性的影响

合理的路线设计可使施工难度降低，对周边环境的影响减少，并且还可以提高工程的经济性。线路走向要依据地质条件、水文环境以及地面建筑布局展开综合分析，保证掘进过程可稳定且可控。在地层变化较大的区域，线路选择应当避免出现急转弯，减少掘进过程中管道姿态调整所面临的难度。在地下水丰富的地段，线路规划需要对止水措施的布设加以考虑，减少施工期间的渗透风险。在地下管线密集的区域，线路需要避开关键管道或者采用特殊保护措施，防止

相互之间产生干扰。在高密度建筑群区域，线路设计应当尽量降低施工影响，选择较深的埋设方式或者调整掘进路径，保证地面沉降可控制在合理范围之内。线路长度以及坡度设置会对施工的可行性造成影响，过长的线路有可能增加摩阻力，此时需要对推力系统进行优化，而坡度过大则会对掘进姿态的控制产生影响，规划时需要依据设备能力合理进行调整。

3.4 施工环境与周边建筑对顶管施工的限制

高层建筑基础深度较大，在顶管掘进过程中有可能影响地基稳定性，施工之前要开展地质勘察，分析建筑基础的受力状况，并且采取恰当的支护加固措施。在城市道路、铁路以及地铁线路下方施工，需评估管道埋深对交通设施的影响，保证掘进过程不会对地表结构产生不良影响，同时要结合施工监测系统适时调整掘进参数。在历史建筑和文物保护区附近施工，要关注地面沉降控制，合理调节掘进速度和压力分布，防止地层扰动致使建筑损坏。在居民区或商业区施工，噪声控制以及施工时间安排需符合环境要求，采用低噪音设备和隔音降噪措施可降低对周边环境的影响。地表开挖和管道运输过程可能影响现有交通系统，合理的施工组织以及交通疏导方案可减少城市运行的干扰，提升施工的协调性与安全性^[4]。

4 大直径顶管施工中的关键技术

鉴于不同的地质环境、施工深度以及线路规划要求，要采用有针对性的技术手段，以此来降低施工风险，提升工程稳定性。

4.1 大直径顶管掘进设备的选型与适配

掘进设备的选择会对大直径顶管施工的安全性、稳定性以及推进效率产生直接影响，地层条件复杂性，要求设备有针对性的适应能力。不同类型的掘进机在施工过程中呈现出不一样的特点，泥水平衡顶管机适合应用于高水压、富水的地层，它借助泥水循环系统维持开挖面的稳定性，减少对周围地层的扰动。土压平衡顶管机适用于软土地层，依靠舱内土体的支撑作用平衡外部土压力，防止在掘进过程中出现坍塌和渗

表 1 不同地层条件对顶管施工的适应性

地层类型	主要特点	施工影响	应对措施
软土层	土质松散，沉降大	管道易下沉	采用同步注浆，提高地层稳定性
砂层	透水性强，流动性大	易产生涌水、坍塌	控制开挖面压力，采用止水措施
黏土层	粘性高，自稳性强	推进阻力大	采用合理的润滑措施，降低摩阻
岩层	强度高，破碎性大	刀盘磨损快	选用适配刀盘，提高耐磨性
混合地层	土质变化大	掘进稳定性差	调整推进参数，优化土压控制

漏问题。岩石顶管机配备高强度刀盘系统以及破岩装置,在硬岩地层可有效提升掘进效率,减少设备磨损,并且降低施工风险。复合式顶管机结合了泥水和土压平衡技术,可适应地层变化较大的复杂地质环境,凭借切换不同模式匹配不同地层特性,提高施工的连续性和稳定性。在进行设备选型时需要考虑施工直径、推进距离、地层软硬程度、地下水丰富程度等因素,同时要匹配适宜的推进系统和土体改良技术,优化施工过程。

4.2 大直径顶管施工中的管节拼装与密封技术

合理的拼装工艺可降低施工时出现的误差,提升管道整体的密封性能以及结构强度,管节对接时要严格把控轴线偏差,运用高精度激光测量技术以及自动纠偏系统保证管道拼装的连续性与稳定性。管节在掘进过程中会承受推力、摩擦力以及地层压力的作用,合理的拼装顺序以及推进力分布可减少接头处的应力集中现象,提升管道整体的承载能力。密封技术是保证管道防水性能的关键部分,常见的密封方式有橡胶圈密封、膨胀密封垫密封以及注浆密封。其中橡胶圈密封依靠弹性变形来填充管节接缝,防止地下水渗透;膨胀密封垫密封依靠吸水膨胀形成密封层,提高密封效果;注浆密封采用高性能防水浆液填充接缝,提高整体防水能力。为了提高拼装精度以及密封效果,管节制造过程中要严格控制加工误差,保证管节尺寸、接口形状以及表面质量符合设计要求。拼装过程中,采用液压顶紧装置以及精确定位系统,可减少拼装错位以及接缝开裂问题,提升管道的整体性能^[5]。

4.3 推力系统与摩阻控制技术

合理的推力分配可以有效地降低掘进时遇到的阻力,提升施工效率,还可以减少管道结构受力不均的问题。液压推力系统是目前大直径顶管施工主要采用的推进方式,借助多级液压千斤顶作用于管节后端,把管道逐步推进到设计的位置。在不同的地层条件下,推力系统的设置需要做出合理的调整,以此来适应不同的摩擦阻力以及地层变形特性。摩阻力是影响顶管施工效率的一个关键因素,润滑系统借助往管节外壁注入膨润土浆液、聚合物溶液等润滑材料,可有效地降低管道与周围土体之间的摩擦,提高推进效率。在软弱地层中,润滑材料可防止土体对管节产生过度的挤压力,避免在掘进过程中出现推进险阻或者管节受损的状况。在砂性土和硬岩地层,润滑浆液的选择以及注入方式需要进行优化,保证润滑效果的稳定性与持续性。在长距离顶管施工中,摩阻力的累积效应可能会导致推进力不足,合理设置中继间可以分阶段释

放推力,提升整体推进的可控程度。在施工过程中,实时监测推力的变化,结合地层反馈来调整推进力分布,可降低因单点受力过大而导致的管节损伤风险,提高施工的稳定性的。

4.4 施工监测与姿态控制技术

精确的数据采集以及实时的调整可保证管道掘进精度,降低地层扰动,提升施工安全性,姿态控制技术借助测量掘进方向、坡度、深度等参数,保障管道依照设计轴线前行,防止因偏差导致结构受力出现异常状况。将惯性导航系统与激光导向技术相结合,可提供高精度位置信息,帮助施工人员及时对掘进参数进行调整,提升管道定位精度。地表沉降监测借助在地面设置沉降监测点,可获取地表位移数据,分析施工对周边环境所产生的影响。当沉降超出预警阈值时,可采用调整掘进速度、优化土体加固措施等措施进行补救,减少对地表建筑物以及地下管线的影响,管道内部应力监测可分析管节的受力状态,避免因局部过载造成结构损坏。在掘进过程中,实时监测推力、刀盘扭矩、掘进速度等关键参数,结合大数据分析对施工策略优化,提高施工效率^[6]。

5 结束语

大直径顶管施工属于城市地下管线建设的重要技术,其施工效果会受到地层状况、地下水情况、线路规划以及施工环境等诸多因素的作用。面对不同的地质条件,合理选择掘进设备、优化管节拼装技术、把控推力系统以及摩阻,可切实提升施工的稳定性和效率。另外,通过施工监测以及姿态控制技术,可保障掘进精度,减少地层受到的扰动,降低施工过程中存在的风险。

参考文献:

- [1] 王乐天,宁小亮,黄鹏辉.大直径深埋顶管施工对地表沉降的影响[J].地质科技通报,2022,41(06):323-330.
- [2] 鹿森刚.大直径超长距离顶管在软土中顶进关键技术研究[J].山西建筑,2024,50(06):105-110,114.
- [3] 朱庆波.长距离大直径平行双管曲线顶管的技术研究与工程应用[J].科学技术创新,2023(02):144-148.
- [4] 丁东强.大直径长距离曲线顶管施工测量关键技术及应用[J].山西建筑,2025,51(02):107-111.
- [5] 黄伟山.大直径顶管机接收关键技术[J].云南水力发电,2024,40(05):107-109.
- [6] 李永波,马青青,王丽敏,等.顶管施工对既有地铁结构变形和内力的影响分析[J].天津建设科技,2024,34(05):26-31.