

水利管道穿越复杂地质段的顶管施工关键技术

岳 涛

河南省水利第二工程局集团有限公司 河南 郑州 450000

摘要:我国水利建设中,长距离、大口径输水管道工程增多,线路常穿越复杂地质区域。传统明挖法施工在此类区域面临征地拆迁难、环境扰动大、安全风险高等问题。顶管法作为非开挖技术,因对地表干扰小、环境影响低、施工精度高,成为水利管道穿越复杂地质段的首选。但复杂地质条件,如软弱土层等,给顶管施工带来巨大挑战,易引发顶力超限等工程问题。本文系统阐述顶管施工核心技术体系,重点深入探讨顶管机选型与适应性等关键技术,总结出适用于不同复杂地质条件的施工技术策略,并对未来智能化、绿色化发展趋势进行展望,为类似水利工程安全、高效、精准实施提供理论与实践参考。

关键词:水利管道;复杂地质;顶管施工;顶管机选型;触变泥浆;中继间

引言

水资源是经济社会发展的命脉,国家持续推进南水北调等重大跨流域调水工程。这些工程输水距离长、管径大、埋深大,管线路径常穿越复杂区域,安全高效环保地完成管道穿越施工是关键。传统明挖敷设方法穿越敏感区域,需大规模征地拆迁,社会成本和经济负担大,还会严重干扰既有交通、生态和居民生活。且在高地下水位等不良地层大断面开挖,易引发安全事故,风险极高。顶管法作为非开挖地下管道铺设技术,通过工作井内液压千斤顶将预制管节顶入土层,由顶管机切削掘进,能规避地表障碍,减少对周边环境的影响,适用于城市密集区等管道穿越工程。但水利管道工程常要求大管径、长距离和高密封性,顶管施工面对复杂地质条件时,技术难度大增。如在淤泥质软土中易轴线失控,在富水砂层等中掌子面易坍塌、摩阻力大,在硬岩等中刀盘磨损严重。所以,深入研究掌握穿越复杂地质段的顶管施工关键技术,对重大水利工程实施、提升非开挖技术水平、保障公共安全与生态环境意义重大。

1 复杂地质条件下顶管施工的主要挑战

水利管道穿越的复杂地质段通常指那些物理力学性质差异大、稳定性差、施工风险高的地层组合。这些地质条件对顶管施工构成了多方面的严峻挑战。

1.1 软弱土层与流塑性地层

软弱土层主要包括淤泥、淤泥质黏土、饱和粉土等,其特点是含水量高、孔隙比大、强度低、压缩性高、流变性强。在此类地层中进行顶管施工,主要面临两大风险:一是顶管机姿态难以控制。由于地层承载力不足,顶管机前端在自重和顶推力作用下容易发生下沉,即“栽头”现象;反之,在局部硬夹层上方又可能

发生上抬。这种姿态偏差若不及时纠正,将导致管道轴线严重偏离设计轨迹^[1]。二是地面沉降风险高。顶管掘进会扰动周围土体,形成卸荷区。在软弱土层中,土体自稳能力差,卸荷后极易发生固结沉降和蠕变沉降,对上方的道路、管线和建筑物构成威胁。

1.2 富水砂层与卵砾石地层

富水砂层和卵砾石地层渗透性强,地下水丰富。在此类地层中施工,最大的挑战是掌子面(开挖面)的稳定性控制。一旦顶管机的平衡压力控制不当,地下水会携带细颗粒涌入机舱,形成“流沙”或“涌水涌砂”,轻则导致机头被埋,重则引发地面塌陷。此外,卵砾石地层中的大粒径石块会对顶管机刀盘造成剧烈冲击和严重磨损,大大降低掘进效率,增加设备维护成本。同时,粗糙的卵砾石表面与管壁之间的摩擦系数极大,导致顶进总阻力远超常规土层,对主顶系统和中继间的顶推能力提出极高要求。

1.3 硬岩与破碎岩层

硬岩地层(如花岗岩、石灰岩)单轴抗压强度高,常规顶管机刀盘难以有效切削。而破碎岩层虽然整体强度不高,但裂隙发育、块体松散,同样存在掌子面失稳的风险。在硬岩中顶进,需要配备高强度滚刀的岩石顶管机,但滚刀的破岩效率受岩石完整性影响很大。在破碎带,顶管机推进过程中可能遭遇突发性的岩块掉落或空洞,导致机头突然下沉或卡滞。此外,硬岩与软土的交界面(上软下硬或上硬下软)是顶管施工的“死亡地带”,极易因受力不均导致机头发生不可控的偏转。

1.4 孤石与地下障碍物

在冲积平原或古河道区域,常埋藏有体量不一的孤石或其他人工障碍物(如废弃桩基、混凝土块)。这些障碍

物的存在具有极大的不确定性,常规地质勘察手段难以完全探明。一旦顶管机在掘进过程中正面撞击孤石,轻则刀盘受损、掘进停滞,重则导致机头结构破坏,整个工程陷入困境。处理此类障碍物往往需要采用辅助工法,如地面钻孔破碎、冻结加固或开挖竖井清除,不仅耗时费力,还会大幅增加工程成本和工期风险。

2 水利管道顶管施工关键技术体系

为应对上述复杂地质挑战,一套系统、协同的关键技术体系是确保顶管工程成功的核心。该体系涵盖了从前期准备到施工全过程的各个环节。

2.1 顶管机选型与适应性设计

顶管机是整个施工系统的核心装备,其选型直接决定了工程的成败。针对水利管道穿越复杂地质的需求,目前主流的顶管机类型主要有土压平衡式(EPB)和泥水平衡式(SLM)两大类。

2.1.1 土压平衡顶管机(EPB)

其工作原理是利用刀盘切削下来的渣土充满土舱,通过调节螺旋输送机的转速来控制土舱内的土压力,使之与开挖面的水土压力相平衡,从而维持掌子面稳定。EPB机适用于地下水位不高、渗透性较差的黏性土地层。其优点是设备相对简单、出渣效率高、对地表沉降控制较好。但在富水砂层或卵砾石地层中,渣土难以形成有效的“土塞”,平衡效果差,且螺旋机易被大块卵石卡死。

2.1.2 泥水平衡顶管机(SLM)

SLM机通过向开挖面注入具有一定压力的膨润土泥浆,利用泥浆压力来平衡水土压力。切削下来的渣土与泥浆混合形成泥浆,通过排泥管泵送至地面泥水处理站,分离后的泥浆可循环利用。SLM机的最大优势在于其广泛的地层适应性,尤其擅长处理高水压、高渗透性的砂层、砾石层乃至软硬不均的复合地层。通过调整泥浆的密度、黏度和失水量,可以有效稳定各种复杂的掌子面^[2]。对于含有孤石或硬岩的地段,可在SLM机基础上集成滚刀或偏心破碎装置,形成复合式岩石顶管机。

2.1.3 选型原则

对于水利管道穿越复杂地质段,尤其是涉及高水压、砂层、破碎岩等地层时,泥水平衡顶管机通常是首选。其强大的地层适应性和稳定的掌子面控制能力,能最大程度地保障施工安全。选型时还需综合考虑管径、顶进长度、曲线半径、工期要求及经济成本等因素,必要时可对标准机型进行定制化改造,如加大刀盘开口率、增强刀具耐磨性、优化泥浆循环系统等。

2.2 顶进阻力计算与中继间优化设置

长距离顶管施工中,随着顶进长度的增加,管节外

壁与周围土体之间的摩擦阻力(简称摩阻力)会线性累积,最终可能远超主顶千斤顶的最大顶推力。此时,必须设置中继间(又称中继环)来分段接力顶进。

2.2.1 顶进阻力计算

总顶进阻力 F 主要由两部分组成:

$$F = F_0 + F_f$$

其中, F_0 为迎面阻力,即顶管机切削土体所需的力; F_f 为管周摩阻力。

摩阻力 F_f 的计算公式为:

$$F_f = \pi D L f$$

式中, D 为管节外径(m), L 为顶进长度(m), f 为单位面积摩阻力(kN/m²)。 f 值的确定是计算的关键,它受地层性质、管材、注浆效果等多种因素影响。在未采取减阻措施的情况下, f 值可高达8~15kN/m²。通过有效的触变泥浆减阻, f 值可降至0.5~3kN/m²。因此,准确评估减阻后的 f 值,是合理设置中继间的前提。

2.2.2 中继间设置原则

中继间的设置并非均匀分布,而是根据地质条件、顶力计算结果和施工经验进行优化。基本原则如下:(1)分段控制:将整个顶进区间划分为若干个子区间,每个子区间的顶力均不超过该段中继间的额定顶力,并留有20%~30%的安全储备。(2)地质优先:应避开地质突变区(如软硬交界面、断层破碎带)设置中继间,以免在薄弱环节施加集中荷载^[3]。(3)位置合理:中继间应设置在两个管节的接口之间,便于安装和后期处理。首个中继间通常设置在机头后方30~50米处,以保护机头不受过大反力影响。通过精细化的顶力模拟和动态调整,可以实现中继间的最优布置,既能保证施工安全,又能最大限度地节约成本。

2.3 触变泥浆减阻与稳定技术

触变泥浆技术是长距离顶管施工的生命线,兼具减阻和稳定双重功能。

2.3.1 减阻机理

触变泥浆是一种具有特殊流变性能的悬浮液。其核心特性是“触变性”:在静止状态下,泥浆中的膨润土颗粒形成网状结构,呈现凝胶状,具有较高的黏度和屈服应力,能有效支撑管周土体,防止塌陷;在受到管节顶进产生的剪切力作用时,网状结构瞬间破坏,泥浆变为流动性良好的溶胶状态,从而在管壁与土体之间形成一层润滑膜,将固体间的滑动摩擦转变为固液间的黏滞阻力,使摩阻力大幅降低。

2.3.2 泥浆配制与注浆工艺

优质的触变泥浆是成功的关键。其基本配方以钠基

膨润土为主要原料,辅以纯碱(Na_2CO_3)作为离子交换剂以提高膨润土的造浆率,羧甲基纤维素(CMC)作为增黏剂和失水控制剂,有时还需加入聚合物(如PAM)以增强泥浆的携渣能力和稳定性。注浆工艺至关重要,需遵循“先注后顶、随顶随注、匀速连续”的原则。注浆孔通常沿管节圆周均匀布置,并分段设置。注浆压力应略高于该深度处的地下水压力,以确保泥浆能有效渗入管周土体,形成完整的泥浆套。同时,需建立泥浆质量检测制度,对泥浆的比重、黏度、失水量、pH值等相关指标进行实时监控,确保其性能始终满足施工要求。

2.4 施工全过程智能监测与动态纠偏

顶管施工是一个动态、隐蔽的过程,必须依靠精密的测量和监控系统来确保管道按设计轴线精准贯通。

2.4.1 激光导向系统

这是最核心的姿态控制手段。在工作井后座上安装激光经纬仪,发射一束与设计轴线平行的激光束,投射到顶管机内的光靶上^[4]。光靶上的光电传感器能实时捕捉激光点的位置,并将数据传输至地面控制室的计算机。通过分析激光点的偏移量,即可精确计算出顶管机当前的水平和垂直偏差。

2.4.2 动态纠偏技术

一旦发现偏差,需立即启动纠偏程序。现代顶管机通常配备多组独立控制的纠偏油缸(一般为4~8组)。通过不对称地伸缩这些油缸,可以对机头施加一个偏心力矩,使其产生微小的转向,逐步回归设计轴线。纠偏操作必须遵循“勤测微纠”的原则,每次纠偏量不宜过大,以免在管节接头处产生过大的附加应力,导致接口损坏或渗漏。

2.4.3 综合监控平台

除了导向系统,还需对顶进速度、总顶力、中继间压力、泥浆参数、地面沉降等关键指标进行全方位、实时监控。通过构建智能监控平台,可将所有数据集成分析,实现对施工状态的全面感知和风险预警,为决策者提供科学依据,真正实现信息化、智能化施工。

3 未来发展趋势

3.1 装备智能化与无人化

未来的顶管机将深度融合人工智能、大数据和机器人技术,向高度智能化、无人化方向发展。通过搭载更多类型的传感器(如地质雷达、红外热像仪),顶管机将具备自主感知、自主决策和自主执行的能力,能够根

据前方地质的实时变化自动调整掘进模式、泥浆参数和纠偏策略,实现真正的“无人驾驶”式顶进。

3.2 材料与工艺绿色化

环保要求日益严格,推动顶管施工向绿色化转型。研发可生物降解、无污染的新型环保泥浆材料,替代传统的化学添加剂;优化泥水分离系统,实现泥浆的零排放和渣土的资源化利用;推广使用低碳、可回收的管材,都是未来的重要发展方向。

3.3 全生命周期数字孪生管理

基于BIM(建筑信息模型)和GIS(地理信息系统)技术,构建顶管工程的数字孪生体。从规划设计、施工建造到后期运维,所有数据都将被完整记录和动态更新。这个虚拟模型不仅能用于施工过程的模拟优化和风险预演,还能为管道未来的健康监测、维护决策提供数据支持,实现工程全生命周期的精细化管理。

4 结语

水利管道穿越复杂地质段的顶管施工是系统性、高风险工程。本文论述了该领域面临的主要地质挑战,深入剖析顶管机选型、顶力控制、泥浆减阻和智能监测四大核心技术。指出针对不同复杂地质,要采取“因地制宜、系统协同”策略:泥水平衡顶管机地层适应性强,是高水压等地层首选装备;精准顶力计算与优化中继间设置,是长距离顶进成功的保障;高性能触变泥浆应用,可实现低摩阻、稳掌子面;全过程智能监测与动态纠偏,确保管道精准贯通。未来,智能化、绿色化和数字化技术深度融合,顶管施工技术将迈向更高水平,为重大水利基础设施建设提供强劲技术支撑。

参考文献

- [1]王亚兵.论水利供水管道顶管施工技术及其质控措施[J].全面腐蚀控制,2025,39(06):81-83.
- [2]张瑞.水利管道工程中的顶管施工技术分析[J].智能城市,2021,7(20):155-156.
- [3]薛成健.水利工程建设中顶管施工技术的应用探讨[C]//《中国招标》期刊有限公司.新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛——绿色智造·采购革新专题(第三册).青岛水投黄水东调投资运营有限公司,2025:3-7.
- [4]黄丽婷.水利工程中的顶管技术应用与优化策略[J].水上安全,2024,(24):163-165.