

输水管道工程中泥水平衡式顶管施工关键技术及地表变形控制研究

饶和平

葛洲坝集团生态环保有限公司 湖北 宜昌 443000

摘要: 本文围绕输水管道工程,深入探讨泥水平衡式顶管施工关键技术,包括顶管机选型与配置、泥水循环系统设计、顶进力计算与控制、导向与纠偏技术、接口处理与防水技术等。还分析了地质条件、施工参数、周边环境等地表变形影响因素,并提出基于预测模型、施工参数优化、注浆加固技术、监测与预警系统的地表变形控制策略,为相关工程提供参考。

关键词: 输水管道工程;泥水平衡式顶管施工;关键技术;地表变形控制

引言: 输水管道工程是城市基础设施建设的核心部分,泥水平衡式顶管施工凭借对地层扰动小、适应性强等优势,在复杂地质条件下的输水管道铺设中应用广泛。然而,施工过程中易引发地表变形,影响周边环境与工程安全。深入研究该施工关键技术及地表变形控制策略,对保障输水管道工程顺利实施具有重要意义。

1 泥水平衡式顶管施工基本原理与特点

1.1 基本原理

泥水平衡式顶管施工的力学原理,关键在于构建并维持泥水压力与地层压力之间的动态平衡。在施工进程中,借助泥浆泵将调配好的泥水混合物,以特定压力持续注入至顶管机前方的开挖面。这些泥水在开挖面处形成一层泥膜,此泥膜犹如一层坚固的屏障,能有效抵御地层土体的侧向压力,防止开挖面出现坍塌状况。泥水压力平衡机制是施工的核心要点。通过精确调控注入泥水的压力,使其与开挖面处地层土体的压力相互匹配,从而确保开挖面的稳定性。当泥水压力略大于地层压力时,泥膜会适度向地层中渗透,增强泥膜与地层之间的粘结力,进一步提升支撑效果;若泥水压力略小于地层压力,地层土体会有微量变形,但泥膜的存在仍可防止大规模坍塌,且系统会自动调整泥水压力以恢复平衡。顶管机在推进过程中,依靠其强大的顶进系统产生推力,将预制好的管道一节节向前顶进。顶管机前端的刀盘高速旋转,对前方土体进行切削。切削下来的土体与注入的泥水充分混合,形成泥浆。随后泥浆泵将这些泥浆抽出,经过泥水处理系统的过滤、分离等工序后,将处理后的泥水再次注入开挖面,形成循环。

1.2 施工特点

泥水平衡式顶管施工具备诸多显著优势。其对地层

扰动小,由于施工过程中始终维持泥水压力平衡,有效减少了对周围土体的挤压和扰动,极大程度地保护了周边建筑物和地下管线的安全^[1]。该技术适应性强,无论是软土、砂土还是硬岩等地层条件,都能通过调整泥水压力、顶进速度等参数,实现高效施工。然而,泥水平衡式顶管施工也存在一定局限性。施工成本相对较高,主要体现在顶管机等大型设备的购置与维护,以及泥水处理系统的运行等方面。对设备要求严苛,需要顶管机具备高精度、高稳定性的性能,泥水处理系统也要有高效的固液分离和泥浆处理能力。施工过程对操作人员的技术水平要求较高,需专业人员进行精准操控和维护。

2 泥水平衡式顶管施工关键技术

2.1 顶管机选型与配置

在泥水平衡式顶管施工中,不同地质条件决定着顶管机的选型。对于软土地层,因其土体强度低、自稳性差,宜选用刀盘扭矩较小、切削力适中的顶管机。此类顶管机刀盘结构简单,能有效切削软土,且不易因过大扭矩扰动土体。而在砂土地层,由于砂土颗粒间摩擦力大,需选用刀盘扭矩大、耐磨性好的顶管机,以克服砂土阻力,保障切削效率。遇到含有砾石的地层,顶管机刀盘需配备高强度切削刀具,具备破碎砾石能力,刀盘开口率要合理设计,防止砾石堵塞。顶管机的主要配置参数对施工影响重大。刀盘直径决定着顶管管径,需根据工程设计管径精准选择。刀盘转速影响切削效率与土体扰动程度,转速过快易造成土体过度扰动,过慢则切削效率低下。顶进油缸推力决定顶管机推进能力,要依据管道自重、地层摩擦力等因素综合确定,推力不足无法克服阻力,推力过大可能损坏管道。

2.2 泥水循环系统设计

泥水循环系统由泥水仓、泥浆泵、泥浆管道、泥浆处理设备等组成。工作时,泥浆泵将泥水仓内泥水加压送至顶管机前端,在刀盘切削土体过程中,泥水与切削下来的土体混合形成泥浆,再通过排泥泵经泥浆管道输送至地面泥浆处理设备。泥浆处理设备分离泥浆中的土体颗粒,使处理后的泥水重新回到泥水仓循环利用。为提高泥水处理效率与质量,可采取优化设计方法。合理设计泥浆管道管径,管径过小会增大泥浆输送阻力,影响循环效率;管径过大则造成资源浪费。选用高效泥浆处理设备,如采用先进的离心分离技术,能快速分离泥浆中微小颗粒,提高泥水分离效果。设置合理的泥浆循环流量,根据顶管机推进速度、地层特性动态调整流量,确保泥水循环系统稳定运行。

2.3 顶进力计算与控制

顶进力计算模型综合考虑多种因素。管道自重、地层摩擦力、泥水压力、迎面阻力等均影响顶进力大小。地层摩擦力与土壤类型、管道外壁粗糙度等有关;迎面阻力取决于刀盘切削土体面积、土体强度等^[2]。通过建立精确计算模型,可准确预估顶进力。为确保顶管机稳定推进,需采取顶进力控制策略。在施工前,根据计算模型与实际地质条件,设定合理顶进力范围。施工过程中,利用压力传感器实时监测顶进力,当顶进力超出设定范围时,调整顶进速度。若顶进力过大,适当降低顶进速度,防止管道损坏;若顶进力过小,可提高顶进速度,提升施工效率。通过调整泥浆性能,如增加泥浆黏度,减小地层摩擦力,优化顶进力。

2.4 导向与纠偏技术

顶管机导向原理基于测量系统。一般采用激光导向系统,在工作井内设置激光发射装置,发射激光束,顶管机内安装激光接收靶。通过测量激光束在接收靶上的位置,确定顶管机的位置与姿态。常用导向方法有全站仪测量导向、陀螺仪导向等,可根据工程实际情况选择。当顶管机轴线出现偏差时,需采取纠偏措施。若偏差较小,可通过调整顶管机纠偏油缸伸缩量,改变顶管机姿态,实现纠偏。若偏差较大,可在管道内设置纠偏垫块,辅助顶管机纠偏。应加强施工过程监测,及时发现偏差并采取措施,保证顶管轴线偏差在允许范围内。

2.5 接口处理与防水技术

顶管接口类型多样,常见有钢承口接口、企口接口等。钢承口接口密封性好、强度高,但安装工艺复杂;企口接口施工相对简单,密封性也能满足一定要求。不同接口各有特点,需根据工程实际选择。为防止地下水渗漏,接口处理与防水至关重要。安装接口时,确保接

口部位清洁,涂抹密封胶,保证密封效果。在接口外侧包裹止水橡胶圈,增强防水性能。对于重要工程,可在接口处增设防水层,如涂抹防水涂料、粘贴防水卷材等,多重保障,有效防止地下水渗漏,确保顶管施工质量。

3 地表变形影响因素分析

3.1 地质条件

地质条件在地表变形中扮演着关键角色。不同土层性质对地表变形影响显著。软土层因其压缩性高、强度低,在泥水平衡式顶管施工扰动下,易产生较大沉降。施工时,顶管机切削土体、顶进过程都会改变软土层应力状态,土体发生压缩变形,致使地表下沉。与之相比,硬土层如黏性较高的黏土或砂质黏土,具有较好的抗变形能力,受施工影响产生的地表变形相对较小。地下水位也是重要影响因素。当地下水位较高时,土体处于饱水状态,其有效应力降低,稳定性变差。顶管施工过程中,若泥水压力控制不当,泥水易渗漏进入周边土体,改变地下水位分布,进一步软化土体,增加地表沉降风险。相反,地下水位较低时,土体相对干燥,颗粒间摩擦力较大,对施工扰动的抵抗能力较强,地表变形程度相应减小。

3.2 施工参数

顶进速度与地表变形紧密相关。过快的顶进速度会使土体来不及适应施工扰动,导致土体内部应力迅速变化,引发较大地表变形。例如,在软土地层中,顶进速度过快可能造成挖掘面土体瞬间失稳,进而带动地表产生较大沉降^[3]。而适当降低顶进速度,能让土体有时间调整应力,减小地表变形。泥水压力对地表变形影响关键。若泥水压力过大,会使泥水过度挤压周边土体,导致土体向四周扩散,引起地表隆起;泥水压力不足,则无法平衡地层土压力与地下水压力,造成挖掘面土体坍塌,引发地表沉降。精准控制泥水压力,使其与地层压力相匹配,是减小地表变形的重要举措。注浆量同样影响地表变形。合理的注浆量能填充顶管施工后管道与土体间的空隙,有效支撑土体,减小地表沉降。注浆量过少,空隙无法充分填充,土体失去支撑,易产生沉降;注浆量过多,浆液可能向周边土体扩散,导致地表隆起。

3.3 周边环境

周边建筑物对地表变形较为敏感。尤其是年代久远、基础较浅的建筑物,在地表变形作用下,易出现墙体开裂、地基下沉等问题。建筑物的自重也会改变土体应力分布,增加施工时地表变形的复杂性。例如,大型建筑物附近施工时,由于其对土体的附加压力,施工扰动更易引发较大地表变形。地下管线同样受地表变形影

响。供水、排水、燃气等地下管线，在地表变形时可能发生扭曲、破裂等情况。刚性管线如钢管，对变形的适应能力较差，较小的地表变形就可能导致其损坏；而柔性管线如聚乙烯管，虽有一定变形适应能力，但变形过大也会影响其正常使用。地下管线的存在也会改变土体的力学性质，影响施工时的地表变形规律。在有地下管线区域施工，需充分考虑管线与土体的相互作用，采取有效措施控制地表变形，保障管线安全。

4 地表变形控制策略

4.1 预测模型建立

为有效控制地表变形，需借助先进技术建立精准的预测模型。有限元分析与数值模拟等方法在此过程中发挥关键作用。有限元分析将复杂的地质体和施工过程离散为有限个单元，通过对每个单元进行力学分析，模拟顶管施工时土体的应力应变状态，进而预测地表变形情况。数值模拟则利用数学模型描述施工过程中土体的力学行为，结合边界条件和初始条件，计算得出不同施工阶段的地表变形数据。模型建立后，验证其准确性与可靠性至关重要。可将模型预测结果与实际工程监测数据对比，若两者偏差在合理范围内，说明模型能够较好反映实际情况；若偏差较大，则需对模型参数进行调整，重新模拟计算，直至模型预测与实际监测结果相符，确保模型可用于指导施工。

4.2 施工参数优化

依据准确的预测模型，可对顶进速度、泥水压力等关键施工参数进行优化。在不同地质条件下，合理的顶进速度能有效减少对土体的扰动。例如在软土地层，适当降低顶进速度，让土体有足够时间适应施工变化，避免因速度过快导致土体应力突变，引发过大地表变形。泥水压力的精准控制同样重要^[4]。通过模型分析，确定与地层土压力和地下水压力相平衡的泥水压力值，施工时严格维持该压力。压力过大易使泥水挤压周边土体，造成地表隆起；压力不足则无法支撑挖掘面，导致地表沉降。采用动态调整策略，实时监测地表变形情况，并将监测数据及时反馈用于调整施工参数。利用高精度监测设备，实时获取地表变形数据，一旦发现变形超出允许范围，立即对顶进速度、泥水压力等参数进行调整，确保施工过程中地表变形始终处于可控状态。

4.3 注浆加固技术

注浆材料的性能与选择对注浆加固效果影响显著。

注浆材料需具备良好的流动性，以便能在土体孔隙中充分扩散；同时要有较高的强度和粘结性，填充管道与土体间空隙后，能有效支撑土体，提高地层稳定性。常见注浆材料如水泥浆、水泥砂浆、化学浆液等，各有优缺点，应根据地质条件、施工要求等合理选择。针对具体工程，制定科学的注浆加固方案。确定注浆孔的位置、间距、深度以及注浆量等参数。在顶管施工过程中，及时进行同步注浆，填充管道与土体间的环形间隙，减少土体因失去支撑而产生的变形。对于变形较大区域，可采用二次注浆进行加固，进一步提高地层稳定性，有效减少地表变形。

4.4 监测与预警系统

设计全面的地表变形监测方案，运用自动化监测设备提高监测效率与精度。在施工区域及周边布置多个监测点，采用全站仪、水准仪、位移计等设备，实时监测地表沉降、水平位移等参数。自动化监测设备可实现数据的自动采集、传输与分析，节省人力且能及时发现变形异常情况。建立完善的预警机制，根据工程实际情况设定预警阈值。当监测数据达到预警阈值时，系统立即发出警报，提醒施工人员。应制定相应应急措施，一旦预警触发，迅速采取如调整施工参数、进行局部注浆加固等措施，防止地表变形进一步扩大，保障工程安全与周边环境稳定。

结束语

泥水平衡式顶管施工在输水管道工程中具有显著优势，但地表变形控制仍是关键问题。通过深入研究施工关键技术及地表变形影响因素，采取有效的控制策略，可显著降低地表变形风险，保障工程安全与周边环境稳定。未来，随着技术的不断进步，泥水平衡式顶管施工将在更多领域得到广泛应用。

参考文献

- [1]张金刚.泥水平衡法顶管施工工艺关键技术解析[J].河南水利与南水北调,2022,49(10):57-58.
- [2]陈云强.浅谈泥水平衡式顶管施工技术[J].门窗,2021(01):80-81.
- [3]王进先.淤泥地层泥水平衡顶管施工关键技术研究[J].科技创新,2021(33):84-85.
- [4]曾清河.泥水平衡顶管施工在污水管网中的应用[J].安徽建筑,2021,28(04):86-87.