

长距离大管径泥水平衡机械顶管技术研究

——以毛家湾干管工程为例

罗 利, 胡中华, 王佳林

(中国五冶集团有限公司, 成都 610063)

摘要:以成都市毛家湾污水处理厂进厂干管工程为背景,对富水地质下长距离大管径泥水平衡机械顶管施工进行分析研究,提出富水地质下长距离大管径泥水平衡顶管施工线型控制方法。通过对大管径机械顶管顶力计算、测量控制、顶进姿态等方面的研究,提出富水地质下长距离大管径泥水平衡顶管施工智能纠偏控制方法。通过项目的成功实施,证实了上述机械顶管控制措施的可行性,可为类似工程提供参考。

关键词:长距离;大管径;泥水平衡;机械顶管;线型控制

中图分类号:TU990.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)06-0198-05

随着城市规模急剧扩张,污水处理厂的规模不断扩大,要求城市排水管网不断升级改善,以适应城市的发展。地下排水管道的管径越来越大,埋设深度也相应增加^[1]。若继续采用传统开挖方式施工排水管道,将增加开挖面,影响周围建、构筑物,破坏环境,特别是在繁华地区进行施工,易造成交通拥堵,影响周围居民生活,且随着开挖深度的增加,工程安全事故风险随之增加^[2]。地下管道铺设中,顶管法施工是最为常用的一种暗挖施工形式,在城市各类市政管网建设中得到了广泛应用^[3]。而机械顶管是非开挖施工方法中最为现代化的一种,该施工技术在地层的适应性、施工周边环境保护、零设施干扰破坏、施工安全、施工质量及施工经济性等方面具有优越性^[4]。但机械顶管施工将作业面移至地下,不可避免地会对周围土体产生扰动,进而引起土体移动,导致地面沉降或隆起^[5]。且在不同环境、地质、水文及施工条件下,选择与之适应的机械顶管工艺、合理的顶管掘进参数及技术线路尤为重要。尹文强等^[6]、葛涛^[7]、李骏杰等^[8]对顶管施工引起的地表沉降及变形进行了研究,并提出了相应的控制措施。王剑锋等^[9]通过数值模拟的方法研究了顶管施工过程中机头支护压力、注浆模量、摩阻力的变异对地层、桩基变形影响的变化规律。智能监控方面,杨赫等^[10]从管道建设工程的角度对管道智

能监控进行探索。本文结合成都市毛家湾污水处理厂进厂干管工程泥水平衡机械顶管施工案例,以富水地质条件大管径长距离机械顶管施工为研究对象,分析工程中所遇到的技术难点,特别针对机械顶管线形控制与纠偏难题提出了解决方法。

1 工程概述

1.1 项目概况

毛家湾污水处理厂进厂干管工程位于成都天府新区锦江西片区,起点位于金子沱,沿滨河路锦江绿带—云龙路—沈阳路—锦江绿带,最终接入毛家湾污水处理厂。干管总长 7 km,管径分别为 1 600、2 000、2 600 mm,管材为钢筋混凝土管。该工程 W1~W4、W4~W4.1 为明挖施工,W4~W72 均为机械顶管施工。顶管段位置、埋深及穿越构筑物情况见表 1。

1.2 工程水文地质情况

该工程地形地貌复杂,有上层滞水、孔隙水、基岩裂隙水等多层地下水,施工场地临近锦江,其地下水受锦江河水影响较大,工程区地下水与锦江河水为互补关系。顶管段主要土层自上而下依次为第四系全新统人工填土层 Q_4^{ml} (杂填土、填筑土、素填土)、第四系全新统冲积层 Q_4^{al} (粉质黏土、细砂、中砂、卵石)、第四系中下更新统冰水沉积层 Q_{1+2}^{gl} (黏土)和白垩系夹关组泥质砂岩 K_{1-2}^j (强风化泥质砂岩、中风化泥质砂岩)。

收稿日期:2022-11-02

作者简介:罗利(1978—),男,四川宜宾人,中国五冶集团有限公司,路桥工程分公司科技部长,高级工程师,研究方向为市政与公路工程施工技术;胡中华(1990—),男,四川宜宾人,中国五冶集团有限公司,中级工程师,硕士,研究方向为市政工程 and 岩土工程;王佳林(1993—),男,四川巴中人,中国五冶集团有限公司,中级工程师,硕士,研究方向为市政工程。

表 1 顶管路线概况统计

路线及结构物	井段	埋深/m	具体位置	穿越构筑物
滨江路	W4~W24	7~12.47	位于人行道及绿化带	W24~W25 穿越滨江路
武汉路	W26~W35	10.3~13.23	位于绿化带	W26~W27 穿越大坝沟
云龙路	W35~W54	6.13~17.27	位于绿化带	W35~W36 穿越武汉路
云龙湾大桥(跨越锦江)	W54~W57	9.1~11.69	穿越第一跨(桥台位置)	W56~W57 穿越云龙湾大桥,距离桥台最近 8 m
滨江路	W57~W67	7.81~10.11	位于绿化带	W57~W58 穿越滨江路

2 关键技术难题

现有的机械顶管施工顶进线形控制一般采用激光电经法来定位,然后利用局域网线将数据传输至信号处理系统,操作室根据激光标靶传回的数据确定顶管方向与设计方向的偏差,从而调整顶管方向。这种方法的主要缺点是施工过程中信号线可能被损坏,此外需要人工操作设备来控制顶管机前进方向,操作复杂,对机操手专业水平要求高。

现有的机械顶管触变泥浆管节连接方式为常规卡箍连接,在顶进完一节管道后需断开触变泥浆管,然后延长一节与顶进管道等长的触变泥浆管,在触变泥浆管断开之后,顶管机机头的触变泥浆会回流至断开点,导致泥浆消耗量增加,造成工作井内污染,同时导致机头掌子面泥浆压力下降,引起地表沉降。

3 机械顶管施工工艺

3.1 顶管设备选择

根据土质情况、地下水位、施工要求等,采用泥水机械平衡式掘岩式顶管机施工能克服地下水丰富、顶进中掌子面坍塌、工期长及安全的问题,防止沉降超限等。岩盘破碎式顶管刀盘是目前最适合该地区岩石顶管的顶管机,相比一般的泥水平衡机和土压平衡机具有如下优点:采用复合切削刀盘可适应于普通软质岩和巨卵石层等;可从机内直接更换切削滚刀,有效防止因滚刀磨损、脱落造成的顶进效率降低或无法顶进等情况的发生;刀盘驱动系统采用意大利行星齿轮减速机,动力强劲,质量更可靠;具有强大的二次破碎能力,能将大粒径的岩石复碎至可通过排泥管道输送的大小,不会造成排泥管堵塞;输送弃渣连续,进度快。

综合对比后,选用 PSDT1400 泥水平衡岩卵石破碎顶管机、GMD1650 泥水平衡岩卵石破碎顶管机、YD2000 泥水平衡掘岩式顶管机、YD-2200 泥水平衡掘岩式顶管机。

该工程涉及 4 种设备型号,其中 DN2000 的管道在该工程所占比例最大,数量超过 80%,下面以 YD-2000 泥水平衡掘岩式顶管机为对象开展研究。

3.2 顶管关键施工工艺

3.2.1 安装基坑导轨

D2000 顶管轨道主轨采用 200 国标方钢,间距 120 cm,长 6 m。支轨采用 150 国标方钢,间距 120 cm (图 1)。导轨安放前,先复核管道中心的位置,并在施工中经常检查校核。导轨安装完毕后需在预留洞口内安装副导轨,副导轨的轴线以及高程均要与主导轨保持一致,此副导轨用于防止机头进洞后低头。

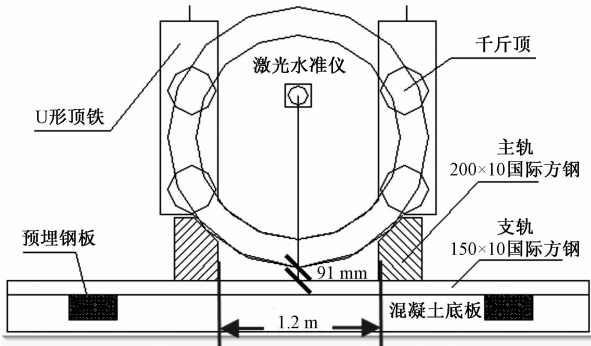


图 1 基坑导轨

3.2.2 安装顶铁

根据顶管施工情况,使用长度大的顶铁,顶铁拼装后锁定,顶铁的允许连接长度根据顶铁的截面尺寸确定。采用截面为 20 cm×30 cm 顶铁时,单行顺向使用的长度不超 1.5 m,双行使用的长度不超 2.5 m,在中间加横向顶铁连接。顶铁与顶管口之间使用缓冲材料衬垫,在顶力接近管节材料的允许抗压强度时,管端增加 U 形或者环形顶铁。

3.2.3 机械顶管顶力计算(以 D2000 管道为例)

顶力计算需要考虑的因素:采用触变泥浆减阻、管壁打蜡;该地区以往相同管径顶进数据^[11]。

3.2.3.1 基本参数设置

管道内径为 2 000 mm,管道壁厚为 200 mm,管道外径为 2 400 mm,管道混凝土等级为 C50,管道混凝土抗压强度设计值为 23.1 N/mm²,顶进管单根长度为 115 m,管顶土体重度平均值为 19 kN/m³,最大覆土厚度为 17.26 m。施工方法:泥水平衡式顶管机,扩孔按 20 mm 计。

采用触变泥浆减阻,管道与土的平均摩阻力按规范中值取,即管道外壁与土的平均阻力

$f_k = 5.0 \text{ kN/m}^2$ 。

3.2.3.2 总顶力估算

根据《给水排水工程顶管技术规程》^[12],顶管机头正面阻力计算公式为

$$N_F = \frac{1}{4} \pi D_g \gamma H \quad (1)$$

式中: N_F 为机头正面阻力; γ 为土的容重,平均取 19 kN/m^3 ; H 为覆土厚度,最大取 17.26 m ; D_g 为顶管机外径, m 。

计算得到 $N_F = 1\,297.994 \text{ kN}$ 。管道总顶力按下式估算:

$$F_0 = \pi D_1 L f_k + N_F \quad (2)$$

式中: F_0 为总顶力标准值, kN ; D_1 为管道的外径,取 2.4 m ; L 为管道设计顶进长度, m ,本次设计 D2000 管道 $L = 115 \text{ m}$; f_k 为管道外壁与土的平均摩阻力, kN/m^2 , $f_k = 5.0 \text{ kN/m}^2$; N_F 为顶管机的正面阻力, kN 。D2000 管道总顶力估算为 $5\,631.194 \text{ kN}$ 。

3.2.3.3 管道允许顶力计算

钢筋混凝土顶管传力面允许最大顶力计算公式为

$$F_{dc} = 0.5 \frac{\varphi_1 \varphi_2 \varphi_3}{\gamma_{Qd} \varphi_5} f_c A_P \quad (3)$$

式中: F_{dc} 为混凝土管道允许顶力设计值, N ; φ_1 为混凝土材料受压强度折减系数,取 $\varphi_1 = 0.90$; φ_2 为偏心受压强度提高系数,取 $\varphi_2 = 1.05$; φ_3 为材料脆性系数,取 $\varphi_3 = 0.85$; φ_5 为混凝土强度标准调整系数,取 $\varphi_5 = 0.79$; f_c 为混凝土受压强度设计值, N/mm^2 ,混凝土强度等级 C50,则 $f_c = 23.1 \text{ N/mm}^2$; A_P 为管道的最小有效传力面积, mm^2 ; γ_{Qd} 为顶力分项系数,取 $\gamma_{Qd} = 1.3$ 。

经计算, D2000 管道允许顶力为 $10\,063.463 \text{ kN}$ 。顶管时,管道受力取传力面允许最大允许顶力的 80% ,即 $10\,063.463 \times 0.8 = 8\,050.77 \text{ kN}$ 。计算结果表明,总顶力远小于顶管时管道最大允许顶力,满足实际需求,可不设置中继间。主顶选用 $6\,400 \text{ kN}$ 满足使用顶进要求。

3.2.4 长距离顶管测量控制

3.2.4.1 全站仪的动态设站定向

由于顶管机在顶进过程中管环是随着机头一起向前移动,在管环内无法设置常规静态控制点,无法通过常规手段精准定向。因此,采用自动导向测量系统,并根据顶进长度(每 300 m)及曲线段位置增设移动测站(图 2),可通过自动测量导向软件快速解算得出 1# 全站仪和后视棱镜的坐标,从而实现全站仪的动态设站定向。



图2 管壁移动测站

3.2.4.2 顶管姿态测量

顶管机在掘进过程中,完成 1# 全站仪的设站定向后,利用 1# 全站仪测量激光靶,根据激光靶数据可以快速解算出当前顶管机的方位角、俯仰角和转动角,进而获得顶管机头部和尾部的坐标,最终根据坐标计算出顶管机的当前姿态,并同步反馈至地面可视化操作系统(图 3)。

3.2.5 长距离顶管智能纠偏控制

顶进过程中,通过设置在后背墙及盾尾的激光装置结合光电转换器及数模转换器将顶进实时情况转换成数字信号,随即无线信号交换器将信号传输至云端,紧接着自动控制系统通过无线信号交换器下载云端数据,并根据信号数据判定顶进线形,如有偏差,操作系统则将自动调整油缸顶力,以控制顶管机的顶进方向。

通过将长距离顶管智能纠偏与顶管测量控制相结合,确保顶管轴向及环向的误差在允许范围之内,同时通过同一智能控制软件相集成,实现导向与纠偏自动化,提高施工效率,减少人、材、机投入,规避现场施工安全隐患。

3.2.6 减阻施工分析

3.2.6.1 管节打蜡减阻

为减少顶管顶进管周边摩擦阻力,采用颗粒状工业石蜡对管道外侧通体打 0.5 mm 厚的石蜡,以减少阻力,增加顶进距离。管节打蜡施工步骤如下:将石蜡倒入电热熔蜡锅→加热熔化并加热至沸腾→用毛刷清理管节的表面→晾干→用煤气喷加热石蜡,使管节表面石蜡均匀光滑→晾干→存放→下井运输→管节安装。

3.2.6.2 触变泥浆加注

顶管施工时需要采用合理的触变泥浆加注方式,以提高加注效率,减少浆液渗漏。为此,设计出可防浆液回流及可快速连接的注浆管节(图 4),在一个顶进循环开始时,需要增加混凝土管,同时增加触变泥

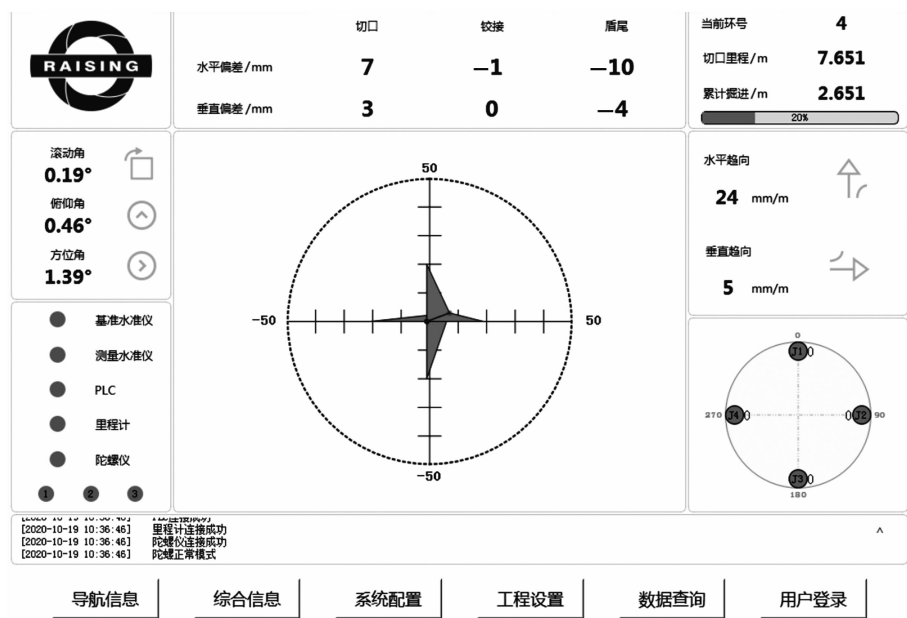
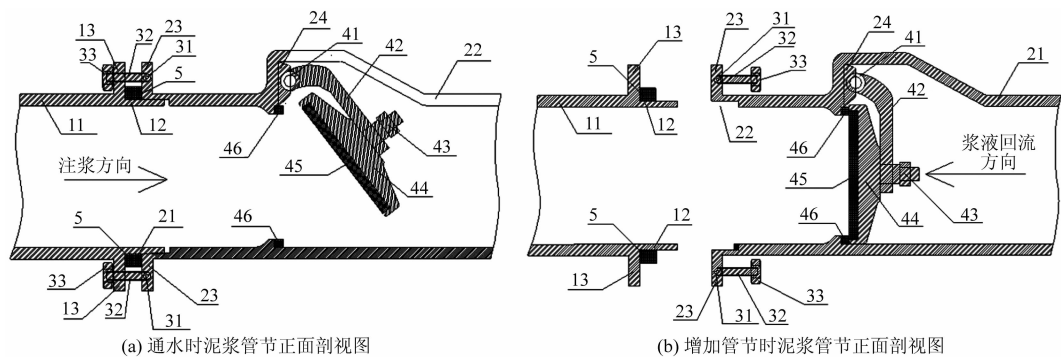


图 3 顶管姿态控制界面示意图



5 为橡胶垫;11 为左管节管身;12 为左管节突出部;13 为左管节连接部;21 为右管节管身;22 为右管节凹槽部;23 为右管节连接部;
24 为右侧管节止回阀连接部;31 为连接轴;32 为螺杆;33 为螺杆手柄;41 为止回阀连接轴;42 为止回阀手柄;43 为螺丝系统;
44 为花瓣;45 为花瓣垫圈;46 为橡胶圈

图 4 防止回管泥浆管节示意图

浆管节。此时,可通过两个管节的卡扣结构快速连接。该过程中,橡胶圈受到左固定端与右固定端的挤压作用,使得管道在之间空隙被橡胶圈封堵死,以有效防止管道漏浆。当下一循环开启泥浆泵时,泥浆向右流动,靠泥浆压力冲开止回阀,并顺利地向右流入到注浆孔中。当一个循环结束,停止加压时。受回流浆液压力的作用,止回阀往注浆的反方向摆动,封闭泥浆回流通道,可以防止浆液回流。此时,可以接入新的泥浆管节,进入新的注浆循环。

3.3 监测监控措施

3.3.1 监测点布设

工作(接收)井位移、沉降监测点每隔 2 m 布设一个,在有建筑物路段加密布置。基坑周边建筑物设置水平及沉降观测点,且每侧 5 个测点。工作(接收)井位移、沉降监测点布设在竖井壁中间位置,每个竖井对称设两组监测点(图 5)。

顶管沿线每 10 m 一个监测点,在顶进过程中安排专人沿线路巡视,主要监测内容为地面隆起、沉降及地面开裂。

3.3.2 监测方法

利用数显位移、沉降计量测两测点间距离,根据距离变化判断竖井位移、沉降情况;利用全站仪、水准仪测量周边建筑及地面沉降和位移情况。监测频率视施工现场情况,依据工程进度和沉降变化程度增减观测频率。

通过对机械顶进施工中沉降观测点的数据统计与分析,其地面沉降可分为 3 个阶段:机械顶管前部变形阶段、施工期间沉降阶段、土体固结后沉降阶段。为此,需要根据实际施工工况设置合理注浆量、注浆顺序来有效控制地面沉降。

4 结语

通过对长距离泥水平衡机械顶管受力及关键技

