

顶管施工防渗漏技术研究

——以锦江再生水顶管工程为例

胡中华¹, 刘卫华¹, 张勇¹, 罗利¹, 王佳林¹, 韩放²

(1. 中国五冶集团有限公司, 成都 610065; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 311122)

摘要: 为了提高管道防渗能力,从管网的使用场景及自身构造分析了顶管防渗的关键技术难题。引入张开角与张开值参数描述管节接头张开情况,说明了提高管节线形精度对于顶管防渗的作用。介绍了激光测量的线形控制系统工作原理,应用全天候线形监测控制系统提高顶管线形精度,取得了良好的效果,并从顶管精度的角度分析了该系统在顶管防渗中所起的作用。分析了管节接头承载能力与张开长度之间的关系。针对锦江再生水顶进施工法用钢管筒混凝土管管节接头,提出了基于举升装置与密封性测试的管节对接优化方法,并在该项目进行了成功地应用,以上研究说明全天候监控系统与基于举升装置的密封测试方法对顶管防渗是有效的。

关键词: 再生水; 顶管施工; 防渗; 激光测量; 管节对接

中图分类号: TU990.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)10-0212-07

随着城市规模急剧扩张,城市供水排水管网也不断升级改善。受城镇密集建筑物的限制,越来越多的管网建设采用顶管法建设^[1]。顶管法作为最为现代化的一共非开挖方法,对地层具有较好的适应性,环境影响小,施工安全,施工质量好,应用广泛^[2]。管网运营的地方,往往人口密集,各类设施布置复杂,一旦发生水体泄露,往往会造成道路冲毁、地铁漏水、土壤污染、排水设施失效等多种风险^[3-4]。干管接头作为顶管干管中最薄弱但非常重要的位置,容易发生水体渗漏,因此对于顶管干管接头的防渗控制技术研究显得尤为重要。

潘鹏旭等^[5]对比顶管过程中的现场监测、Peck公式预测和数值模拟计算结果发现水体渗漏会加大则地表沉降。许多学者对顶管接头也展开了大量的研究。许有俊和董文秀^[6]、许有俊等^[7]研究了管节接头几何形状、尺寸及材料硬度对防水密封能力的影响,发现鹰嘴橡胶圈接触面间接触压力与材料硬度成正相关,且接触压力随硬度的增加呈指数型增长;接头钢套环厚度和长度、倒角半径、管片厚

度的增加均会提高接头抗剪刚度,其中管片厚度对接头抗剪刚度的影响最大。彭益成等^[8]借助足尺荷载抗弯试压,研究了螺栓、弯矩及轴力对管节接头弯曲刚度和张开量的影响。封坤等^[9]、Feng等^[10]、张力等^[11]结合狮子洋快速铁路隧道工程对高纵向压力条件下管道的接头抵抗弯曲的性能及破坏特征展开了研究,发现在缝面张开度在弯矩到达临界值前后分别呈现按比例及加速增加趋势。Liu等^[12]研究了上海快速交通系统分段隧道衬砌的承载能力,结果表明,正弯矩接头主要发生局部破坏,负弯矩情况下以整体屈服为主。陈建中^[13]建立了偏心受压承的情况下管节承载力与偏心程度之间的关系。康佳旺^[14]系统地研究了矩形顶管隧道的剪切破坏特征和变形机理,在此基础上提出了剪切刚度计算方法以及接头变形控制标准。罗利等^[15]对激光经纬仪提高顶管精度以减少顶管渗漏的技术进行了探索。

本文以成都市锦江再生水工程顶管工程为背景,研究复杂地质区域顶管施工渗漏特性及渗漏原因,分

收稿日期: 2024-01-30

基金项目: 中国中冶重大研发项目(中冶科技[2023]5号);国家自然科学基金青年项目(51809221)

作者简介: 胡中华(1990—),男,四川宜宾人,硕士,工程师,研究方向为市政和岩土工程施工技术;刘卫华(1979—),男,湖南邵阳人,博士,正高级工程师,研究方向为公路工程施工技术;张勇(1977—),男,四川南充人,硕士,高级工程师,研究方向为市政工程与公路工程施工技术;通信作者罗利(1978—),男,四川宜宾人,正高级工程师,研究方向为市政工程与公路工程施工技术;王佳林(1993—),男,四川宜宾人,硕士,工程师,研究方向为市政工程施工技术;韩放(1992—),男,四川内江人,硕士,工程师,研究方向为水利水电工程与公路工程施工技术。

析顶管防渗重难点,提出一套基于激光测量线形控制系统及管节密封性测试的防渗漏顶管施工方法。

1 工程背景

1.1 进厂干管概况

锦江再生水项目位于成都市锦江区,该项目拟建设抽水量 70 万 m^3/d 。输水管道由地埋式加压泵站接出(泵站取水于第九再生水厂尾水),由西南向东北方向串联起何家冲排洪渠、红庙子排洪渠、南支三渠、秀水河 4 个主要生态补水点。

工路线长 11 km,主线输水管线直径为 DN2000~DN2800。工程输水管线主体管材为顶进施工法用钢筒混凝土管(jacking cylinder concrete pipe, JCCP 管),线路穿越绕城高速、高铁、地铁等重要节点时采用直径为 DN3200 的钢筋混凝土管顶管施工,再内套直径为 DN2800 的钢管。

1.2 地质条件

勘察期间属枯水期,除局部分布鱼塘外,拟建场地内其余地段无地表水体分布,场地内地下水丰富。枯水期探测结果表明混合地下水水位埋深 1.1~5.3 m,对应高程 477.47~528.00 m。顶管区域覆土厚度为 8~32 m,以泥岩为主,少部分区域存在黏土,顶管两处穿越地铁。

2 关键技术难题

该管网主要用于地下补水,管网运行水压为 0.6 MPa,所在区域人口集中,穿越有地铁、道路等多种市政设施,一旦发生渗漏泄漏事故,对周边市政设施影响极其严重。导致干管接头渗漏的原因多且复杂,并且渗漏通常具有长期性,发现渗透、准确判断渗漏的原因非常困难,控制更加困难。

供水管节渗漏的控制涉及管节端头自身的结构、材料,顶管管节的线形精度控制以及顶管接头对接工艺等多个方面。因此,对管网施工过程及使用过程中的渗漏原因及控制研究是该工程的重点及难点。有必要采用理论分析、现场实践等方法,开展供水干管接头渗漏原因分析。

3 激光测量控制线形的防渗研究

3.1 线形控制对于防渗的作用

顶管施工过程中面临的地质条件十分复杂,往往会穿越多种地层及市政设施,导致管线线形出现偏转,致使管节接头松动,形成污水渗漏通道,最终水体渗漏。选择两个相邻的管节进行分析(图 1),由图 1 可知第一个管节相对理论顶进方向的偏转角满足公式:

$$\sin\alpha = \Delta Y/L \quad (1)$$

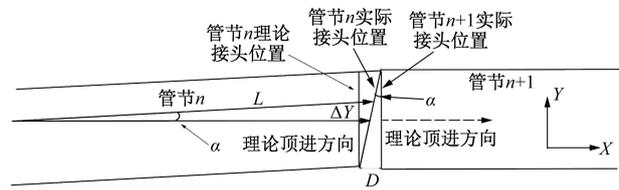


图 1 顶进误差与张开度的关系模型

式中: L 为第 n 管节长度; ΔY 为第一个管节轴向误差。

两个管节之间会形成一个偏转角 α ,两管节接头间会存在一个张开值 D ,其张开值满足如下公式:

$$D = 2R\sin\alpha \approx 2R\Delta Y/L \quad (2)$$

式中: R 为管节半径。

由此可见顶进误差值 ΔY 越大,则张开角 α 越大,张开值 D 越大,反之顶进误差值越小,则张角 α 越小,张开值 D 越小。由此可以看出若提高管节线形精度,则可很好的减小顶进误差,减小管节连接处缝隙,为管节防渗提供保障。

3.2 基于激光测量的线形控制系统介绍

由前文可以看出,管节线形精度的控制对于顶管防渗具有十分重要的意义。为了提高顶管精度,采用一种兼顾信号稳定并且能够实现 24 h 全天候自动纠偏的顶管机操作系统控制线形,该系统利用激光打靶技术定位,采用无线信号传输器进行与控制室相连的信号传输系统及自动纠偏控制系统。该系统的组成如图 2 所示,主要包含激光发射装置、激光靶、模数转换器、无线信号交换器、护壁、混凝土管、后背墙、钢轨、主顶油缸、顶铁、顶管机机头、操作平台(操作系统)等设备。

工作时,激光发射器按照设定的方向发射激光,由激光靶感应激光位置并通过光电转换器将激光位置转换成模拟信号,信号通过层层转换最终形成数字信号,并上传至云端,自动控制系统通过无线信号交换器下载云端上的激光信号数据,并判定顶进线形,线形偏差自动调整油缸顶力,直至顶管方向与设计保持一致,从而实现顶管机的顶进方向的调整,该系统可实现 24 h 全天候自动运行。

3.3 顶管线形控制过程及防渗效果分析

利用动态导线测量技术原理及物联网技术构建长距离顶管施工自动导向测量系统,通过内嵌数据采集及解算程序,实现精准、快速、自动化、可视化导向测量,及时测量出方位角、俯仰角和转动角,实时获取顶进方向及姿态。

然后顶管机根据操作系统所提供的参数对顶进方向进行调整,如图 3 所示。通过在入口及出口

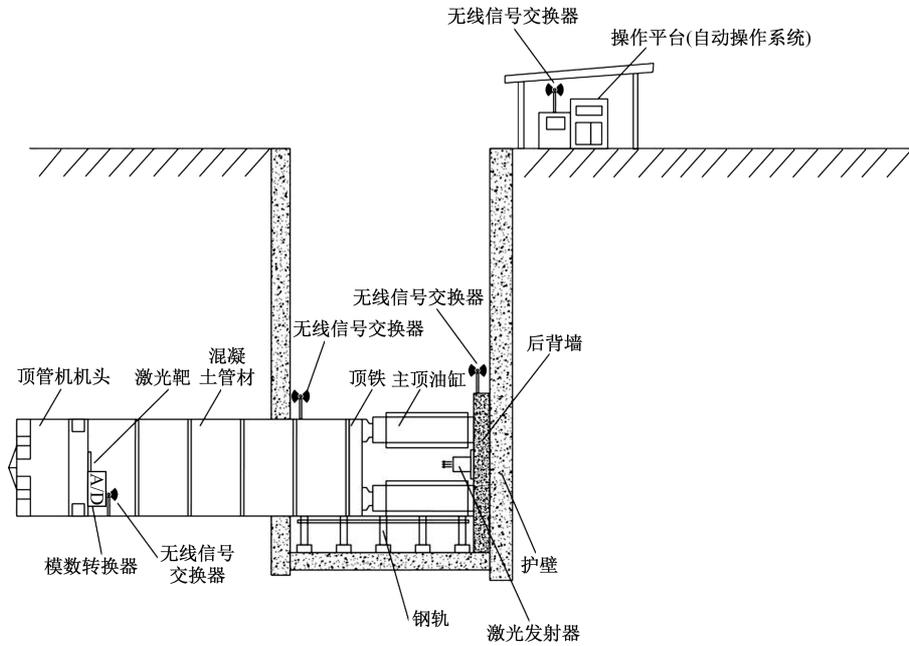


图 2 顶管顶进线形控制系统

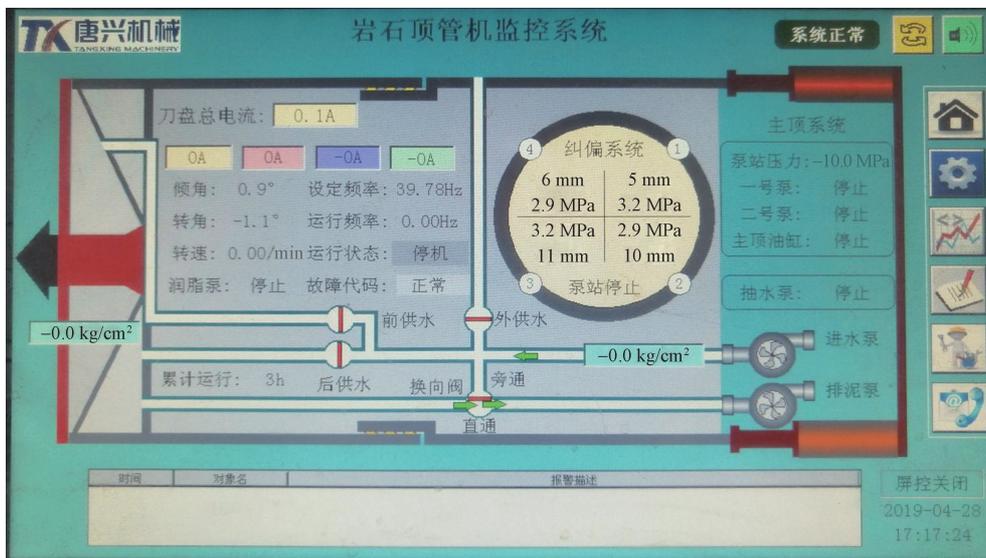


图 3 顶管姿态控制界面

测量顶管成型之后的位置相对设计的位置,最终通过激光经纬测量确认顶管偏差位置控制在 10 mm 范围内,代入式 (2) 中所提供的参数,可得张开度为 12 mm。考虑到管节之间一般采用厚度大约为 20 mm 的橡胶圈填充,并且管节之间本身具有一定的相容性,可保证管节无渗漏。现场顶进施工监测数据显示采用基于激光测量的顶管线形控制,有效地控制了管节间的位置偏差。

4 管节接头防渗控制研究

4.1 管节接头承载能力分析

理想状况下的管节之间的相互作用如图 4 所

示,端部荷载形式如图 5 所示一样均匀分布。

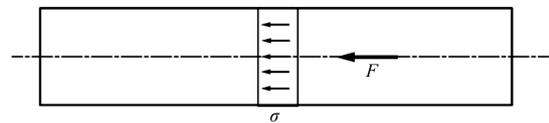


图 4 轴心受压模型

接头承载能力可按下式计算:

$$F = \sigma_{\max} \pi (R^2 - r^2) \quad (3)$$

式中: F 为管节接头承载能力; R 为接头外半径; r 为内半径; σ_{\max} 为抗压强度。

按照接头张开程度,偏心受压时分为 $0 < H \leq$

$R-r; R-H < R+r; R+r < H < 2R$ 三种情况,如图 6 所示。由于管节接头变形相容,可以假定端头应力符合线型分布。当 $0 < H \leq R-r$ [图 6(a)],有

$$F = \frac{\sigma_{\max} [(R-H)^2 \sqrt{R^2 - (R-H)^2} + 2R^2 \sqrt{R^2 - (R-H)^2}]}{3(2R-H)} + \frac{\sigma_{\max} [3(R-H)\pi(R^2 - r^2) - 3(R-H)R^2 \cos^{-1}(\frac{R-H}{R})]}{3(2R-H)} \quad (4)$$

当 $R-r < H < R+r$ [图 6(b)],有

$$F = \frac{\sigma_{\max} [-2(R-H)^2 \sqrt{r^2 - (R-H)^2} - 4r^2 \sqrt{r^2 - (R-H)^2}]}{6(2R-H)} - \frac{\sigma_{\max} [3(R-H)r^2(\pi + 2\sin^{-1}(\frac{R-H}{r})) + 3HR^2[\pi + 2\sin^{-1}(\frac{H}{R})]]}{6(2R-H)} + \frac{\sigma_{\max} [2(R-H)^2 \sqrt{R^2 - (R-H)^2} + 4R^2 \sqrt{R^2 - (R-H)^2}]}{6(2R-H)} \quad (5)$$

当 $R+r \leq H \leq 2R$ [图 6(c)],有

$$F = \frac{\sigma_{\max} (3(R-H) [\pi R^2 + (R-H)^2 \sqrt{R^2 - (R-H)^2} - R^2 \cos^{-1} \frac{R-H}{R}])}{3(2R-H)} + \frac{\sigma_{\max} (2[R^2 - (R-H)^2]^{3/2})}{3(2R-H)} \quad (6)$$

式中: H 为接头张开长度。

对于规格确定的管材,屈服强度、接头内外径一定,因此极限承载能力 F_0 取决于接头张开长度 H ,如式(4)~式(6)所示^[6]。

以管端最小厚度为 200 mm,管端轴向极限压缩强度为 40 MP 的混凝土钢承口 D2000 管为例。根据上式可得轴心受压时的极限承载能力为: $F = \sigma_{\max} \pi(R^2 - r^2) = 252 \text{ t}$ 。图 7 为管道接头极限承载能力与接头张开长度 H 的关系,由图可知在张开度临界值(1 500 mm)以内时,承载能力随张开长度呈直线下降;超过临界值之后,承载能力加速下降。

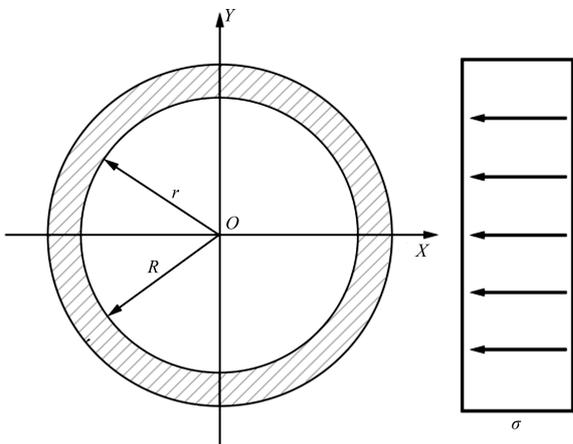


图 5 轴心受压接头处受力

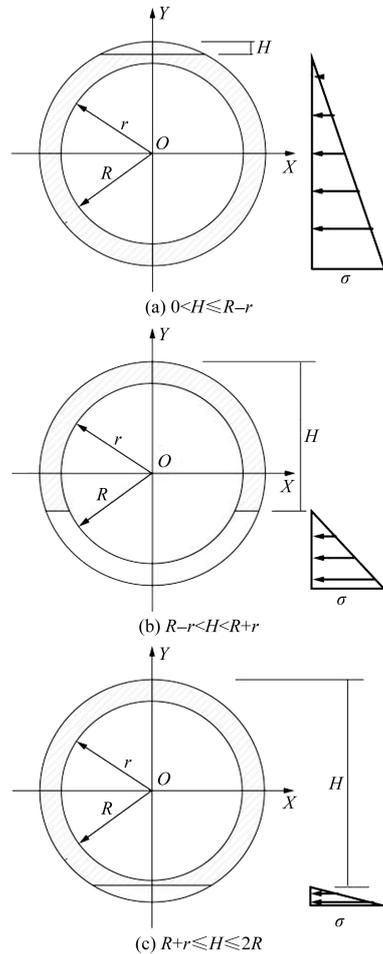


图 6 不同张开度情况下端部应力示意图

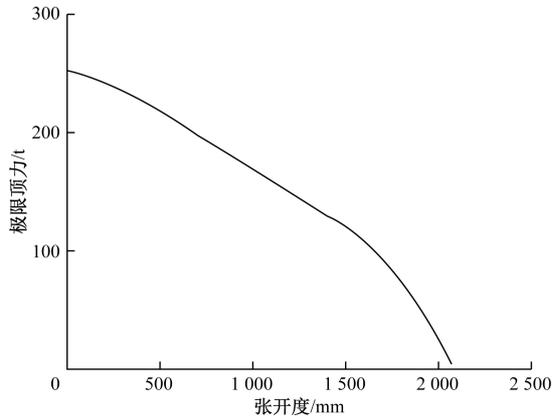


图 7 承载力—张开度曲线

4.2 基于密封性测试的管节对接优化

根据上文分析,管节张开度越大,防渗效果越差。对于刚性填充的管节接头,由于不具备变形相容性,往往无法消除线形偏差所引起的张开度,而管节线形偏差往往会加重这种破碎现象,导致顶管总推力较小的情况下管节接头即出现挤压破碎现象,并且接头容易张开,从而导致管节渗漏。根据管节极限承载能力分析结果,可以采用两种方法提高管节承载能力,一是利用基于激光测量的顶管线形控制提高顶进精度,降低张开度值;二是通过提高管节接头对接初始精度以降低张开度值,从而提高管节防渗性能。

对于 JCCP 管节,可以通过双圈试压技术进行管节对接及对接密封性测试,从而提高管节对接精度,以减少张开度。JCCP 管节管径范围为 DN800 mm~DN4 000 mm;工作压力为 0.1~1.0 MPa;钢制柔性承插口接头,采用滑动双胶圈密封,其构造及实物如图 8 所示,该类管节加设接口木垫圈,降低了管节接头张开值 D 及张开长度 H ,减少应力集中,避免管节接头损伤。

该技术需要使用接口试压举升装置,试压装置及其应用场景如图 9 所示。该设备主要包含包括底板、举升装置、顶升板和固定组件,其中,底板作为基础结构,为其他结构提供安装工位,举升装置用于驱动顶升板上升或下降,以调节顶升板的高度。在上述基础上,在顶升板的上端面增设固定组件,固定组件形成固定工位,将管道放置在固定工位内,固定工位用于对管道提供加持力,以使其固定在固定工位上。固定组件可以是一对固定板的结构,以保证结构的简单化,避免结构过于复杂对顶升板造成载荷压力。当举升装置带动顶升板上升或下降时,同步带动管道的高度进行调整和改变,进而使得管道调整到最

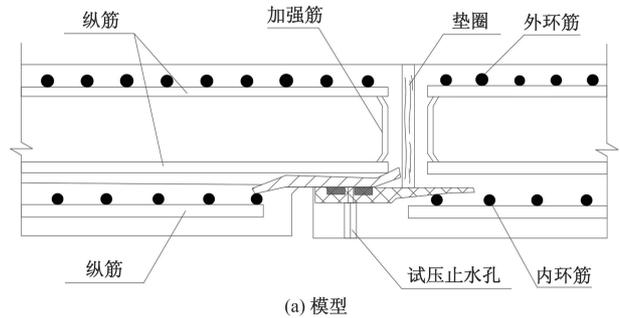


图 8 再生水管道构造及实物

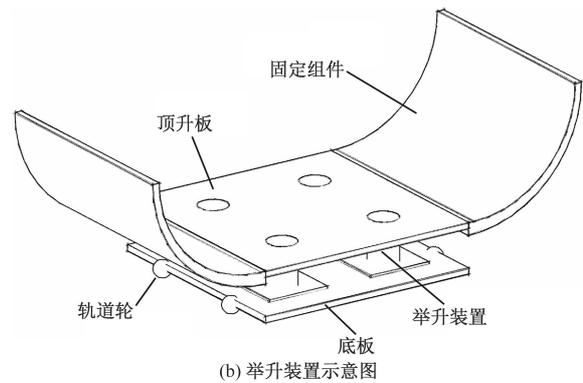
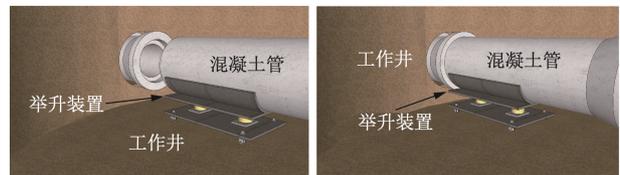


图 9 双胶圈水管试压举升工具

佳的对接高度。当新增管节与既有管节对接之后,进行现场打压试验,如图 10(a)所示,打压至 1 MPa 后关闭加压机,若 1 min 内压力未下降,即达到如图 10(b)的效果,则认为压力稳定,管节接头密封性良好;反之,密封性较差,此时利用举升装置调整新增管节与既有管节关系,重新对接管节,进行试压,直至两个管节之间连接良好。

该装置可以有效提高新增管节与既有管节对接的严密性,进一步减小管节张开值 D 及张开长度 H ,进而降低顶管试用期间的渗漏风险。

图 11 为传统方法成形的管网情况及利用该技

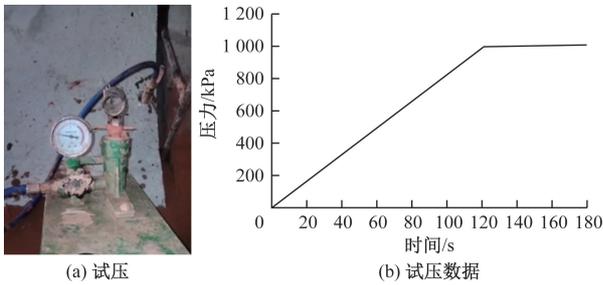


图 10 (a)试压及(b)试压数据

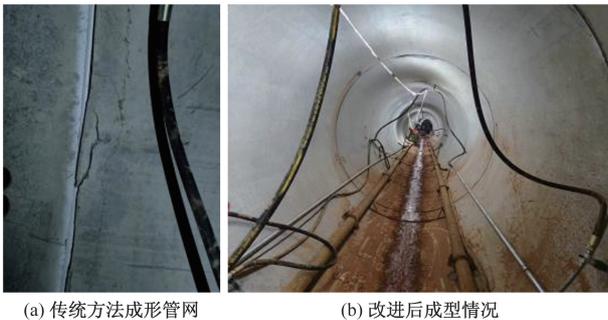


图 11 传统方法及改进后管节成型情况

术进行顶管的效果图,二者对比可以看出传统方法顶管施工完毕后管节接口处出现了裂缝;采用基于激光测量的顶管线形控制技术及双胶圈试压工具试压施工形成的再生水管道接头未出现裂缝,在后期使用过程中也无渗漏情况,防渗效果远远好于传统的方法,充分说明该技术可以有效地防止管节后

5 结论

本文以锦江再生水为研究对象,提出了基于激光测量及管节接头密封性测试的管节对接优化的综合防渗方法,提高了顶管线形精度,提高了管节对接精度,减少了管网渗漏风险,主要结论如下:

(1)对管道进行渗漏分析,发现管道渗漏主要受管节接头构造、质量,顶管线形及管节接口对接工艺影响,其中顶管线型及管节接口对接工艺对顶管尤为重要。

(2)引入顶进张开角与张开值描述管节接头对接状态,分析发现张开值与张开角呈正比关系,提高管节线形精度,可很好地减小顶进误差,减小管节连接处缝隙,为管节防渗提供保障。

引入基于激光测量的线形控制系统,实现了顶管机的顶进方向的全天候监测及调整,最终将顶管位置偏差、张开度分别控制在 10 mm、12 mm 内。

(3)针对 JCCP 管节接头的渗漏问题,结合管节举升装置及双圈试压装置提高了接头对接精度,显著地减少了管节渗漏通道,后期使用过程中无渗漏情况,防渗效果明显好于传统方法。

通过锦江再生水工程的应用,达到了良好的顶管施工防渗效果。

参考文献

- [1] 王素伟. 特大管径长距离机械顶管施工技术应用研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
- [2] 孙博. 复杂地质条件下大管径长距离顶管工程综合研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
- [3] 童康益, 付栋. 城市地下空间建设引发的地质灾害问题及对应防治对策——以上海某电力隧道和管线工程为例[J]. 科技和产业, 2021, 21(10): 367-374.
- [4] 房军. 浅埋顶管群下穿运营高铁施工地表变形研究[J]. 科技和产业, 2023, 23(19): 177-181.
- [5] 潘鹏旭, 陈伟, 郑京承. 富水强风化砂岩地层顶管隧道下穿既有铁路施工技术[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(29): 12714-12720.
- [6] 许有俊, 董文秀. 材料硬度对矩形顶管防水密封能力的影响研究[J]. 内蒙古科技大学学报, 2022, 41(3): 301-306.
- [7] 许有俊, 董文秀, 裴学军. 矩形顶管 F 型承插接头抗剪刚度及影响因素研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(S2): 84-91.
- [8] 彭益成, 闫治国, 丁文其, 等. 输水隧道单层衬砌管片接头抗弯力学特性研究[J]. 地下工程与空间学报, 2013, 9(5): 1065-1069.
- [9] 封坤, 何川, 肖明清. 高轴压作用下盾构隧道复杂接缝面管片接头抗弯试验[J]. 土木工程学报, 2016, 49(8): 99-110.
- [10] FENG K, HE C, QIU Y, et al. Full-scale tests on bending behavior of segmental joints for large underwater shield tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 75(5): 100-116.
- [11] 张力, 封坤, 方若全, 等. 盾构隧道原型管片接头抗弯性能试验[J]. 土木工程学报, 2017, 50(S2): 220-230.
- [12] LIU X, ZHANG C, ZHANG C G, et al. Ultimate load-carrying capacity of the longitudinal joints in segmental tunnel linings [J]. Steel and Composite Structures, 2017, 24(4): 481-497.
- [13] 陈建中. 玻璃纤维增强塑料顶管接头受力分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [14] 康佳旺. 矩形顶管隧道 F 型承插接头剪切变形机理与控制标准研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古科技大学, 2022.
- [15] 罗利, 胡中华, 王佳林. 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[J]. 科技和产业, 2023, 23(6): 198-202.

Research on Anti-seepage Technology of Pipe: Taking Jinjiang Reclaimed Water Pipe Project as an Example

HU Zhonghua¹, LIU Weihua¹, ZHANG Yong¹, LUO Li¹, WANG Jialin¹, HAN Fang²

(1. China MCC5 Group Co. Ltd., Chengdu 610063, China; 2 East China Investigation and Design Institute, China Hydropower Engineering Consulting Group Co. Ltd., Hangzhou 311122, China)

Abstract: To improve the impermeability of the pipeline, the key problem of impermeability during pipe-jacking was studied in respect of its use scenario and own structure. Then, opening angle and opening value was introduced to describe the opening state and explain the effect of improving the linear accuracy of the pipe line for anti-seepage of pipe jacking. The all-weather linear control system based on laser measurement system was introduced and applied successfully. Its effect in improving linear accuracy and inducing leakage passage was demonstrated. The relationship between opening length and bearing capacity was established. For JCCP pipe of Jinjiang reclaims water pipe project, the water pipe joint is optimized aimed based on lifting device and airproof testing. The successful implementation of the project confirms the feasibility of the above anti-seepage technology of mechanical pipe jacking. The above study demonstrate that all-weather linear control system and airproof testing based on lifting device is effective for anti-seepage.

Keywords: reclaimed water; jacking pipe; anti-seepage; laser measurement; union joint