岩溶地层小断面隧洞顶管法与悬臂掘进机法适应性对比分析

叶生华[1] 高成城[1] 舒 伟[2] 梁冬虎[2]
1. 贵州水投贵阳市水务环境集团有限公司 贵州 贵阳 550081；
2. 贵阳筑水水利产业发展有限公司 贵州 贵阳 550081

摘 要 为提升输水隧洞施工效率与安全性，本文以贵阳市两个小断面输水隧洞工程为研究对象，系统开展了悬臂掘进机法与顶管法的施工进度与安全性对比分析。研究表明：悬臂掘进机在Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ类围岩中月进尺分别为179 m、138 m和79 m，效率随围岩变差而降低；顶管法在相同围岩条件下月进尺达280 m、420 m和560 m，效率随岩体强度降低而提升，在软弱地层中优势明显；顶管法实现全程机械化作业，人员不进入洞内，安全性显著优于悬臂掘进机法，但对地质适应性要求较高。研究成果可为岩溶地区小断面输水隧洞施工方法的选择提供参考。

关键词 岩溶；输水隧洞；顶管法；悬臂掘进机法

Comparative Analysis of Adaptability of Pipe Jacking Method and Cantilever Tunneling Machine Method for Small Cross-Section Tunnels in Karst Strata

Ye Sheng-hua[1], Gao Cheng-cheng[1], Shu Wei[2], Liang Dong-hu[2]
1. Guizhou Water Investment Guiyang Water Environment Group Co., Ltd., Guiyang 550081, Guizhou Province, China;
2. Guiyang Zhushui Water Industry Development Co., Ltd., Guiyang 550081, Guizhou Province, China

Abstract To enhance the construction efficiency and safety of water conveyance tunnels, this paper takes two small cross-section water conveyance tunnel projects in Guiyang City as the research objects, systematically conducting a comparative analysis of construction progress and safety between the cantilever tunneling machine method and the pipe jacking method. The research indicates: The monthly advance rate of the cantilever tunneling machine in Class III, IV, and V surrounding rock is 179 m, 138 m, and 79 m respectively, with efficiency decreasing as the surrounding rock conditions worsen; Under the same surrounding rock conditions, the monthly advance rate of the pipe jacking method reaches 280 m, 420 m, and 560 m respectively, with efficiency increasing as the rock mass strength decreases, showing significant advantages in soft strata; The pipe jacking method achieves fully mechanized construction without personnel entering the tunnel, resulting in significantly better safety than the cantilever tunneling machine method, but it has higher requirements for geological adaptability. The research results can provide a reference for the selection of construction methods for small cross-section water conveyance tunnels in karst areas.

Key words Karst; Water Conveyance Tunnel; Pipe Jacking Method; Cantilever Tunneling Machine Method

随着国家水网建设的全面推进，大量引调水隧洞工程进入密集施工阶段。在这一背景下，选择高效安全的施工方法成为工程成功实施的关键。顶管法作为非开挖技术的重要分支，以其对地表干扰小、环境影响低等优势受到广泛关注，并在实践中积累了丰富的研究成果。杨睿等[1]系统总结了顶管技术在地面交通保护、噪声控制等方面的综合优势；陈智涵等[2]研究了顶进力对施工效率与周边环境的影响机制；李启文等[3]论证了顶管法在速度、安全与环保方面的集成优势。然而，悬臂掘进机法在特定地质条件下同样表现出显著优势，刘万林等[4]在滇中引水工程中构建了适用于Ⅳ～Ⅴ级围岩的机械化方案，证明CTR300S型悬臂掘进机设备在软弱富水地层中仍能保持20～40 m³/h的开挖效率。李志军等[5]的对比试验显示，悬臂掘进机施工的拱顶沉降、收敛及超挖量均优于爆破法，且每循环可节约2.5 h，在Ⅵ级围岩中月进尺达30 m。尽管两种工法各自的研究成果显著，但在岩溶地区小断面输水隧洞中的对比研究仍显不足，制约了工程实践中的科学选型。为此，本文以贵阳

[基金项目] 贵州省水利厅科技专项经费项目，项目名称：硬岩地层大口径DRCP顶管施工管—岩摩擦特性及安全保障关键技术研究，项目编号：KT202437。

市岩溶地区两个小断面输水隧洞为例，从施工进度、安全性能开展对比分析，旨在为同类地质条件下的施工方法选择提供实践参考。

1 工程概况

本研究以贵阳市某输水工程A为依托，其核心构筑物为采用悬臂掘进机施工的小断面隧洞。该隧洞系统总长12 km，开挖断面呈马蹄形，尺寸为4.2 m（高）×4.1 m（宽），经钢筋混凝土衬砌后形成内径3 m的圆形有压隧洞。

贵阳市某输水工程B的小断面隧洞段采用顶管法施工，全线设8座顶管工作井，顶管单次顶进长度305 m，顶管工程总长约1 500 m。

2 隧洞悬臂掘进机施工技术

2.1 悬臂掘进机及参数

在输水工程A中，所采用的XTR260型悬臂掘进机的核心子系统主要包括切割机构、装载单元、行走装置、液压回路、电气控制模块及主机机架，主要技术参数如表1所示。

表1 XTR260悬臂掘进机技术参数

编号	名称	技术参数
1	整机质量	92 t
2	整机长度	13 500 mm
3	铲板宽度	3 600 mm
4	机身宽度	2 600 mm
5	裁割头水平放置最高点高度	3 380 mm
6	机身高度	2 380 mm
7	定位切割范围高度	6 200 mm
8	卧底深度	200 mm
9	地隙	270 mm
10	龙门高度	300 mm
11	行走速度	6 m/min
12	切割电机功率	260 kW
13	泵站电机功率	132 kW
14	供电电压	AC 1 140 V
15	供电频率	50 Hz
16	装载能力	4.3 m^3/min
17	喷雾水压	≥2 MPa

2.2 悬臂掘进机开挖施工工艺

根据隧洞围岩条件与断面尺寸特征，本工程采用全断面开挖方法，并遵循“边开挖、边支护”的循环作业原则。悬臂掘进机采用独立双变压器供电方案：其中一台容量为630 kVA、输出电压为1 140 V的变压器专用于掘进机主机供电，另一台输出电压为380 V的变压器则为其他配套设备提供电力。供电电缆依据隧洞总长度进行合理选型，并通过液控电缆卷筒实现电缆的同步收放控制。当洞外变压器至掘进机之间的供电距离超过1.2 km时，为补偿线路压降、确保设备正常工作电压，需在系统中配置升压装置。

悬臂掘进机就位于掌子面后，其配备的36个截齿的切割头自岩面下部起始，首先沿水平方向开凿初始沟槽。随后，切割头依照预设的Z形或S形轨迹，以左右交替、自下而上的方式对掌子面围岩进行分层破碎。每个作业循环的进尺控制在2 m以内，相当于不超过两榀钢拱架的安装间距，相应开挖方量约为32 m^3。完成掌子面中部核心区域的开挖后，随即进行周边轮廓的修整作业，以确保隧洞断面尺寸符合设计要求。

3 隧洞顶管法施工技术

输水工程B采用的岩石顶管机，主要分为刀盘、前筒体与后筒体三部分，前后筒体之间由4组纠偏油缸相连接。其正面刀盘配备了滚刀、刮刀及保径刀等刀具组合，具体技术参数详见表2。工作原理基于机械破碎与流体输送相结合的方式。其前端刀盘上的滚刀在千斤顶顶推力作用下挤压岩体，使岩石内部产生龟裂并扩展形成破碎区，随后由刮刀完成对裂隙岩层的切削。与此同时，加压水流通过送水管路持续注入刀盘与掌子面之间的区域，在机械搅动作用下，被切削下来的岩块随水流进入二次破碎仓。当岩块粒径经破碎后小于定锥体上的进渣孔孔径时，即可随泥浆混合物流入泥水舱，最终由排泥管道输送至地表。

表2 岩石顶管机技术参数

编号	名称	技术参数
1	整机质量	51 t
2	管径内径 ϕ（mm）	2 400
3	尺寸（OD×mm）	2 920×5 600
4	动力（kW×QTY）	30×6
5	额定扭矩（kN·m）	477
6	转速（r/min）	3.6
7	纠偏推力（T×QTY）	120×8
8	进排泥管径（mm）	150

4 顶管法与悬臂掘进机法对比分析

4.1 施工进度对比分析

悬臂掘进机法的施工进度分析，如图1所示，在剔除错车道开挖支护、涌水封堵及极端地质处理等特殊工况的耗时后，其月均进尺于Ⅲ类、Ⅳ类及Ⅴ类围岩中分别为179 m、138 m与79 m。可见，随着围岩条件逐步变差，月进尺呈明显下降趋势。这一现象主要归因于围岩稳定性降低导致单个掘进循环中辅助工序耗时显著增加，具体包括：开挖前后的测量复核与断面放线检查、设备进退场与调配，如喷浆机转移、风管接驳、支护材料的运输与架设、钢拱架安装、锚杆及钢筋网施作、混凝土喷射，以及支架拆装、超前地质预报与钻探验证等一系列

作业。上述工序时耗的累积效应，直接制约了不良地质区段的掘进效率。

顶管法的施工效率分析表明（图2），在排除涌水封堵与极端地质处理等特殊工况的条件下，其月进尺与围岩强度呈现负相关关系：极硬岩中为140 m，而在Ⅲ类、Ⅳ类及Ⅴ类围岩中分别达到280 m、420 m和560 m。造成这一趋势的主要原因是，在强度较低的围岩中，顶管机掘进阻力减小，破岩速度显著提升。更重要的是，顶管工艺实现了掘进与支护的同步作业，随着顶管机向前推进，预制管节在后端同步完成洞壁支护，从而省去了传统矿山法中所需的单独支护、多次测量放线等中间工序，极大提升了软弱岩层中的施工连续性及总体进度。

通过对悬臂掘进机法与顶管法施工月进度的对比分析发现，两者的进度趋势与围岩条件呈现出截然相反的相关性：悬臂掘进机法随围岩等级降低，月进尺逐渐减慢；而顶管法则在同等条件下，月进尺反而显著加快，具体对比关系如图3所示。

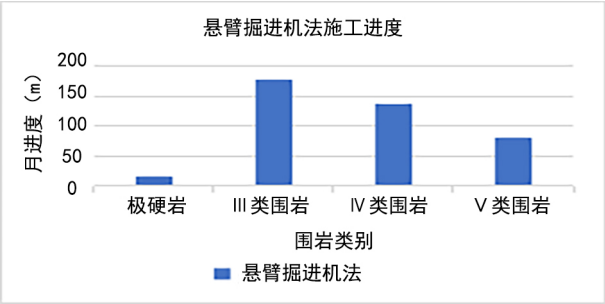


图1 悬臂掘进机法施工月进度图

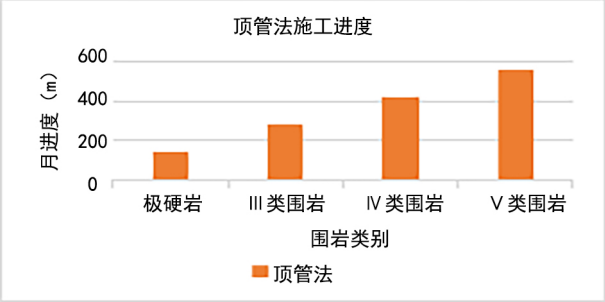


图2 顶管法施工月进度图

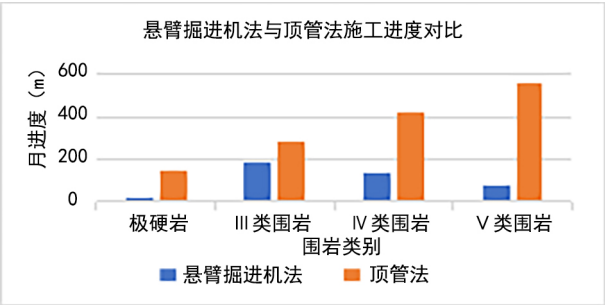


图3 悬臂掘进机法与顶管法施工月进度对比图

4.2 施工安全性对比分析

在围岩稳定性控制方面，悬臂掘进机施工过程中对围岩的振动影响较小，有利于维持围岩自承能力，施工后可及时实施支护，有效降低隧洞塌方风险，从而保障掌子面的稳定与安全。顶管法施工同样具有振动轻微的特点，其管节在顶进过程中可实现同步支护，但由于管节与围岩间存在一定间隙，对围岩自稳能力要求较高，在软弱或破碎地层中仍存在局部垮塌的潜在风险。在岩溶强发育地区，悬臂掘进机开挖过程中可能遭遇突泥、涌水等地质灾害，施工人员需直面掌子面作业，面临较高的安全风险。而顶管法施工为机械化密闭作业，人员无须进入隧洞内部，从而显著降低了因地质灾害导致的作业人员安全风险。

5 结束语

在隧道施工中，悬臂掘进机法能够依据开挖揭露的围岩条件动态调整支护措施，在Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ类围岩中月进尺分别可达179 m、138 m与79 m，但随着围岩质量变差其掘进效率显著下降，尤其在极硬岩（单轴抗压强度≥80 MPa）条件下掘进阻力剧增，截齿磨损严重，导致施工进度极为缓慢；相比之下，顶管法同样可根据围岩强度动态调节顶进参数，在极硬岩、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ类围岩中的月进尺分别为140 m、280 m、420 m与560 m，围岩强度越高则顶进速度越低，尽管顶管法在中等至软弱围岩中的施工效率优于悬臂掘进机法，但其单次顶进长度受设备与工艺限制，通常不及悬臂掘进机灵活。在施工安全方面，顶管法实现了全机械化的无人洞内作业，人员风险显著低于悬臂掘进机法，但该工法对地质条件较为敏感，尤其在岩溶强发育区段，需提前对不良地质体进行处理，以规避突泥、涌水等潜在工程风险。

参考文献

[1]杨睿,曾德星,崔旭辉.大直径穿湖顶管回退施工关键技术研究[J].中国给水排水,2024,40(6):126-131.

[2]陈智涵,陈晓龙,刘锴鑫,等.大直径钢筋混凝土顶管穿越河道顶进力研究[J].安全与环境工程,2022,29(4):181-186.

[3]李启文,任联玺,梁宁慧,等.山地城市超长供水隧洞快速施工工法比选[J].地下空间与工程学报,2021,17(S1):261-268.

[4]刘万林,尚明明,王全胜,等.小断面隧洞悬臂掘进机施工方案比选研究[J].现代隧道技术,2023,60(3):266-273.

[5]李志军,刘广志,周毅,等.高原铁路某隧道松散堆积体中悬臂掘进机法的应用[J].隧道建设(中英文),2022,42(S2):363-371.

（本文编辑 曹 阳）