

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.10.002

超大断面原水管极硬岩顶管工程监测关键技术

张博¹, 杨绍战¹, 左旭¹, 胡林¹, 黄胜², 郑朝文²

(1. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075; 2. 中山大学 土木工程学院, 广东 珠海 519082)

摘要: 随着国家地下空间开发战略的推进,顶管法凭借其非开挖优势,在极硬岩地层工程中的应用日益广泛。然而,施工过程中频发卡管与偏离设计轴线等事故,这导致顶管的施工安全与效率高度依赖精准的监测技术。通过聚焦极硬岩钢制顶管施工中的监测关键技术,系统分析了软硬不均、全断面硬岩等复杂地层条件对传感器性能的挑战,包括高频振动干扰、岩屑污染及密封失效等问题。结合理论分析与工程案例,提出了传感器优化设计与布设策略,并在实际工程中验证了振弦式应变计、土压力计及孔隙水压力计在多参数协同监测中的有效性。结果表明,实时监测数据可动态优化顶进参数,提高顶进效率,显著降低管节损伤风险及对地层的扰动。本文验证了极硬岩顶管施工中监测系统的重要作用,为顶管工程的安全顺利实施与理论发展提供了保障。

关键词: 顶管; 监测技术; 极硬岩; 传感器

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)10-0009-06

Critical Monitoring Technologies for Large-diameter Raw Water Pipe Jacking in Extremely Hard Rock

ZHANG Bo¹, YANG Shaozhan¹, ZUO Xu¹, HU Lin¹, HUANG Sheng²,
ZHENG Chaowen²

(1. CCCC First Highway Consultants Co. Ltd., Xi'an 710075, China; 2. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China)

Abstract: With the advancement of national strategies for underground space development, the pipe jacking method is increasingly applied in extremely hard rock formations due to its trenchless advantages. However, incidents such as pipe jamming and deviation from the design axis frequently occur during construction. The safety and efficiency of pipe jacking critically rely on precise monitoring technologies. This paper focuses on key monitoring technologies for steel pipe jacking in extremely hard rock. It systematically analyzes the challenges posed by complex geological conditions, such as interbedded hard and soft layers and full-face hard rock, to sensor performance. These challenges include high-frequency vibration interference, rock cutting contamination, and sealing failures. Combining theoretical analysis with engineering case studies, the paper proposes optimized sensor design and deployment strategies. The effectiveness of vibrating wire strain gauges, earth pressure cells, and pore water pressure transducers in multi-parameter collaborative monitoring is validated through actual

基金项目: 广东省“珠江人才计划”引进创新创业团队项目(2021ZT09G087); 中交第一公路勘察设计研究院有限公司
科技创新基金项目(KCJJ2024-22)

通信作者: 郑朝文 E-mail: zhengchw5@mail2.sysu.edu.cn

projects. The research results demonstrate that real-time monitoring data enables the dynamic optimization of jacking parameters, improving jacking efficiency while significantly reducing the risk of pipe segment damage and disturbance to the surrounding strata. This paper verifies the crucial role of monitoring systems in pipe jacking construction within extremely hard rock, providing an important safeguard for the safe and smooth implementation of pipe jacking projects and the advancement of relevant theories.

Keywords: pipe jacking; monitoring technologies; extremely hard rock; sensor

随着京津冀协同发展等国家战略的推进,我国地下空间开发进入高速发展期^[1]。顶管法作为一种非开挖管道敷设技术,具有少扰交通、效率高、成本低等优势,广泛应用于市政管网等工程^[2]。岩石顶管技术虽起步较晚,但已突破长距离、大断面及极硬岩等技术壁垒。然而,其理论研究相对滞后于施工实践和经验积累,过度依赖经验在一定程度上限制了该技术的进一步推广^[3]。

顶管工程的安全性与高效性,尤其是管节的性能及其在顶进过程中的受力和变形特性,始终是工程关注的焦点。现场监测面临复杂地层条件、传感器选型与布设及设备损耗等挑战,传统监测技术难以满足全面、准确评估的需求^[4]。因此,开展极硬岩地层顶管施工监测技术与难点突破的研究具有重要的现实意义。这不仅有助于提升监测精度与效率,为施工提供管节的实时状态以保障安全,还能推动顶管工程的可持续发展。

1 主要监测内容与难点

1.1 主要监测内容

1.1.1 顶进参数监测

在顶管工程中,实时监测顶进力、顶进距离、注浆压力及轴线偏差是保障施工安全与质量的核心^[5]。顶进力监测可防止设备超载并预警地层变化,判断管节在顶进过程中是否发生卡管等事故;顶进距离监测用于指导施工进度与中继间布局;注浆压力监测用于维持减摩与地层稳定之间的平衡;轴线偏差监测用于确保管线精度及周边安全^[6]。多参数协同分析可动态优化工艺、预警风险,结合规范要求与数字化手段,实现高效、精准的工程管控^[7]。

1.1.2 管土相互作用监测

无论采用何种材质的顶管,其受力特性始终是施工关注的重点。顶管的受力主要来自顶进力、管

节自重、管内介质自重、管节与管内介质的相互作用(如流体力学作用)、管节与周围岩土介质的相互作用、迎面掘进阻力以及上覆自由面的其他附加荷载等。其中,顶管与周围岩土介质的相互力学作用一直备受关注。对顶管与周围岩土介质相互作用的监测,有助于判断管节在超挖间隙中的状态,为注浆和清理岩屑等工作提供指导,并支撑岩石顶管接触力学模型的建立。

1.1.3 管道变形监测

顶管施工过程中,管道在顶进力、围岩压力、地下水作用及周边环境的共同影响下,受力状态复杂且存在动态变化,可能导致管节承受不均匀荷载,进而引发管体应力集中(如管节接口处弯矩超限),造成混凝土管开裂、钢管局部屈曲或接头渗漏,直接影响管道的结构安全与使用寿命。因此,通过监测管道的受力和变形,分析其在顶进过程中的变形规律,对顶管施工设计具有重要意义。

1.2 监测难点

1.2.1 地层条件复杂

随着顶管工程面临的地层条件日趋复杂,施工中可能存在断层、节理裂隙、软硬夹层及孤石等非均质地层结构。若传感器采样频率较低,采集的数据波动较大,将难以准确反映真实工况。如当刀盘从硬岩突然进入软岩或土层时,推进力与扭矩可能瞬间下降50%以上,若传感器采样频率过低,则无法捕捉此类瞬态变化,导致监测信息滞后。

在岩石地层中顶进时,机头刀盘切削岩层产生的岩屑会进入超挖间隙。安装在管道外侧的土压传感器、水压传感器等因与地层及岩屑直接接触,可能被过度挤压而失效。当顶管机遇到高硬度岩石(如花岗岩等)时,刀盘剧烈振动,靠近机头的传感器易受高频冲击干扰,导致信号失真。在富水地层中顶进时,地下水压较大,若管道外侧传感器密

封破坏,可能引发监测点漏水及传感器失效。此外,为降低管侧摩阻力,施工过程中会向超挖间隙注入触变泥浆以润滑并抬升管节。当地层土体黏性较高或泥浆浓度较大时,孔隙水压力计可能被淤泥包裹,无法有效测量管外泥浆压力。

1.2.2 传感器安装与寿命

目前,顶管管材以钢筋混凝土管为主,钢管次之。前者为刚性管道,后者为柔性管道。柔性管道在顶进力及周围岩土等共同作用下可产生变形,适用于一定曲率半径下的曲线顶管或工作压力较高的工况。在特殊地段或要求较高的工程条件下,钢管因其具有易于获取、制作和运输等优点,常成为首选管材。然而,与混凝土管相比,钢管属于薄壁结构,稳定性较差,在顶进过程中易发生屈曲失稳。

目前,常采用土压力计监测管节与地层之间的接触压力,使用孔隙水压力计测量管道外侧的水压。为保证传感器采集数据的准确性,需将传感器的工作面朝向地层。因此,在混凝土管顶管工程中,需将相应传感器及基座浇筑于管节内;在钢顶管项目中,则需在监测点位开孔,并将传感器及基座焊接于钢管上。为监测管节状态,通常在同一断面布设多个监测点位。部分项目中,因管道尺寸较小、壁厚较薄,故还需考虑开孔及浇筑传感器对管节结构的影响,避免在特殊工况下监测断面发生较大变形和破坏。

部分顶管工程在开挖过程中地层涌水量较大,水压可达0.5~1.0 MPa,对孔隙水压力计的量程与密封性提出了较高要求。此外,由于注浆不充分、岩屑堆积或卡管等问题,部分钢顶管工程可能出现局部管节屈曲变形,因此需重视应变监测传感器的固定方式及量程选取。

1.2.3 传感器供电与信号传输

在岩石顶管工程中,管道常穿越较深地层,其设计多位于地下水位以下。若施工过程中未做好止水防水措施,管道底部易产生积水,对传感器的防水性能和使用寿命构成一定挑战。在钢顶管施工中,管节常采用焊接方式连接。焊管阶段顶管机停止工作,且井下通常断电以降低成本并保护作业人员安全,传感器亦随之断电。若监测设备未配备蓄电池或断电时间过长,传感器将无法工作,导致顶停阶段的数据丢失。

此外,岩石顶管工程常具有顶进距离长、埋深

大的特点。在大埋深、长距离条件下,管道内部无线信号衰减严重。因此,近端采用有线传输,远端则采用低功耗远距离无线中继进行信号传输。在施工过程中,有线传输易受施工活动干扰,如当施工人员进行刀具更换、设备维修等作业时,需由管道内部进入机头,传感器可能在此过程中受到人为损坏。特别是在管径较小的工程中,管内空间较为狭窄,部分安装在管道内部的传感器可能被来往的工作车辆或作业人员撞击,从而造成数据失真或设备损坏。

2 案例工程概况与监测方案设计分析

2.1 项目概况

按照“生态优先、保护为主、水质为重”的原则,深圳市宝安区拟实施铁岗-石岩水库水源水质保障工程,以进一步提高水库水质及河道防洪标准。其中,铁岗-石岩水库水质保障三期工程(石岩南线)计划铺设一段下穿羊台山森林公园的原水管。该原水管顶管段长689.66 m,采用DN4 000钢管,钢材选用Q355C,壁厚36 mm,单节管长4.5 m,采用单V型坡口焊接连接,属于超大管径顶管工程。顶管自2#工作井向3#工作井顶进,顶进纵坡为0.401%,管顶覆土最浅处2.5 m,最深103.0 m。顶管沿线地层条件复杂,其中邻近2#工作井端的残积土、全风化及强风化花岗岩段长约51.0 m,弱风化花岗岩段长约31.0 m,其余微风化花岗岩段长约608.0 m。

该顶管段主要顶进地层及物理参数见表1。

表1 主要顶进地层及物理参数

Tab.1 Primary jacking strata and physical parameters

地层名称	重度/ (kN/m ³)	孔隙比	内摩擦 角/(°)	黏聚 力/kPa	抗压强 度/MPa
素填土	18.4	0.838	10	10	
残积土(孤石)	18.1	0.920	20	20	
全风化花岗岩(孤石)	18.5	0.823	22	22	
强风化花岗岩	18.6	0.805	34	50	
弱风化花岗岩	25.7		37	300	50~90
微风化花岗岩	26.0		40	1 200	90~120

由表1可知,顶管地层主要涉及土层和花岗岩层。在1#~3#顶进段内,顶管机入土后,预计先顶进土层,随后进入花岗岩层。花岗岩层中,部分岩样的饱和单轴抗压强度达102.7 MPa,岩石基本质量等级为Ⅲ类,强度较高。

2.2 监测方案设计

2.2.1 监测项目

该顶管段穿越地层复杂,管节与地层之间受力条件多变,设计监测管节外侧土压力和环向变形;顶管出口段下穿塘坑水及景观湖,地下水资源丰富,为指导膨润土注浆,设计监测管节外侧水压力;穿越岩层段岩层强度较高,顶进力较大,设计监测管节轴向受力变形;顶管穿越区域为市内森林公园,无下穿道路或其他构筑物,且平均埋深较大,地层稳定性较好,故不开地表沉降监测。综上,主要监测项目如下:管节轴向应变采用振弦式应变计监测,布设24个监测点;管土接触压力采用土压力计监测,管外孔隙水压力由孔隙水压力计监测,各布设8个监测点;管节环向应变采用振弦式应变计监测,布设8个监测点。以上指标的监测频率均为1次/10 min。

2.2.2 监测仪器与监测点布设

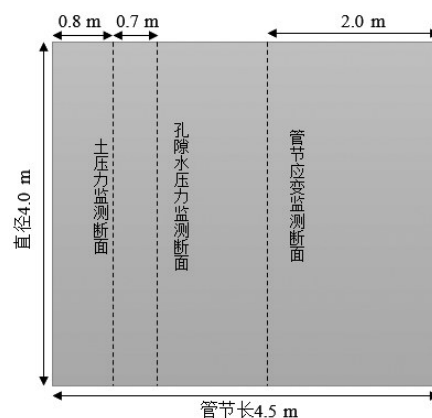
该实验设置了3个实验管节和5个监测断面,其分布如图1所示。其中,主监测管节共设置3个监测断面,各断面设置及传感器环向位置见图2。次监测管节Ⅱ、Ⅲ各设置1个轴向应变监测断面,传感器布设与主监测管节轴向应变监测断面一致。为保证监测所得管节变形数据具有代表性,将应变监测断面设于管节中部。土压力监测断面及孔隙水压力监测断面因需开孔,故两监测断面应尽量远离,以避免开孔过近导致管节受力不均等问题。



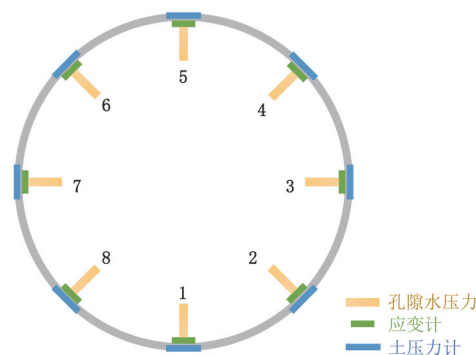
图1 项目监测方案示意

Fig.1 Schematic of project monitoring scheme

注浆口在横截面上等距布设,孔径60 mm。土压力计尺寸相对较大,直径80 mm,厚度25 mm;孔隙水压力计直径35 mm,高度50 mm。传感器现场布置效果见图3。此外,本项目采用泥水平衡工艺,前端泥浆压力需达到0.4 MPa方可满足平衡条件,故选用量程为1.0 MPa的孔隙水压力计。整体数据采用分布式自动采集系统进行采集。



a. 监测断面设置



b. 传感器环向位置

图2 主监测管节断面设置及传感器环向位置示意

Fig.2 Schematics of monitoring sections layout and circumferential sensor positions for the main monitoring pipe segment



图3 传感器现场布置效果

Fig.3 Field rendering of sensor layout

2.3 监测结果分析

2.3.1 顶进参数监测结果分析

该实验主要针对钢管在岩层中的顶进过程,记录了顶管机顶进90~220 m期间的平均顶进速度和主顶力。平均顶进速度约为0.2 m/h,顶进力则从90 m处的13 870 kN逐渐增至19 000 kN左右。该阶段顶管机顶进地层以青灰色微风化花岗岩为主,较

为稳定。随着管节逐步进入山体,岩体埋深增大,顶进岩石的强度亦随之增加,机头刀盘破岩所需的顶进力及管节持续进入岩层产生的摩阻力,共同导致主顶力不断攀升。当管节顶进至 170 m 后,平均顶进速度提高至 0.3 m/h 左右,而主顶力保持相对稳定。该阶段顶管机主要顶进肉红色微风化花岗岩,管节埋深减小,岩体变软,且触变泥浆正常注入,使主顶力维持在稳定水平。整个施工段监测到的最大主顶力为 20 630 kN,小于根据《给水排水工程顶管技术规程》(CECS 246:2008)计算得到的钢管顶进力传力面允许设计最大顶进力(22 089 kN),实际施工过程中亦未发现明显管节变形。

2.3.2 管土相互作用监测结果分析

图 4 为主监测管节在顶管施工中段和后段的土压力变化情况,其中包含正常顶进施工、停工检修及暂停焊管等不同阶段的土压力数据。可知,在注浆压力稳定且处于硬岩地层下,主监测管节管周的管岩接触压力并未因施工或停工而呈现周期性变化,也未随管节埋深的增加而上升。

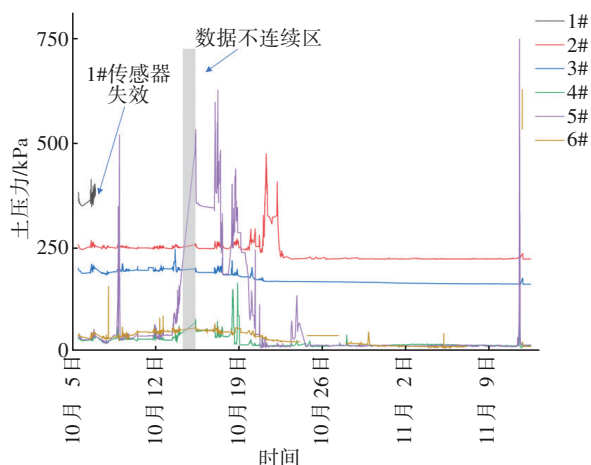


图 4 主监测管节土压力随时间变化曲线

Fig.4 Curves of earth pressure variation with time for the main monitoring pipe segment

其中,10月6日、10月13日—20日和11月11日,5#监测点的接触压力突增,推测在此期间主监测管节可能因管底岩屑堆积等发生抬升,管节顶部直接与围岩接触,进而引起顶部接触压力增大。10月21日—23日,2#监测点的管岩接触压力突增,结合现场施工记录判断,该时段内管道向左纠偏,致使管节右下角与围岩直接接触。除此之外,主监测管节正常坐落于超挖间隙的岩屑床上,监测断面各

监测点位的接触压力保持稳定。管-岩接触状态如图 5 所示。

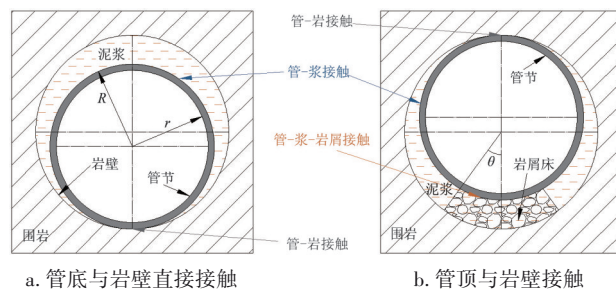


图 5 管-岩接触示意

Fig.5 Schematics of pipe-rock contact

2.3.3 管道受力状态监测结果分析

图 6 为顶管过程中,通电至监测元件拆除期间主监测管节轴向变形随时间的变化曲线。

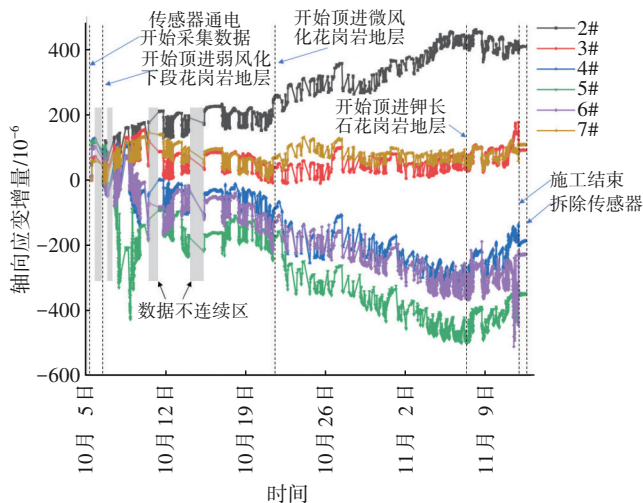


图 6 主监测管节轴向变形随时间变化曲线

Fig.6 Curves of axial deformation variation with time for the main monitoring pipe segment

由于钢管焊接和设备维修等原因,监测系统蓄电池电力耗尽,部分时段数据采集不连续。此外,管道底部的 1#和 8#传感器因工作环境恶劣较早失效,因此图 6 中仅展示断面中部及上半圆系列测点的数据。以监测系统采集的第 1 组数据为初始应变值,进行后续分析。

岩石顶管工程中,当顶进地层岩性不变时,管道所受侧摩阻力是顶进力的控制性因素。监测断面最大轴向变形值为 2.25 mm,远小于根据 CECS 246:2008 计算得到的管节设计轴向最大变形值(81.44 mm)。整个施工过程中,实验管节变形均控制在设计许可范围内。根据地质条件和顶进状态,

本次顶管施工监测大致分为以下5个阶段:

① 10月5日—6日,监测管节进洞初期,顶管机主要穿越强风化花岗岩等较软地层。各监测点轴向应变稳定且处于受压状态,迎面阻力主要来自机头破岩,管节受力稳定。

② 10月6日—21日,机头开始顶进弱风化花岗岩。监测断面呈顶部压应变增大、底部由压变拉的受力状态,表明管节呈单边顶进姿态,底部岩屑堆积导致顶部与围岩接触。5#监测点因顶部遇孤石出现应力突增。

③ 10月21日—11月7日,机头顶进青灰色微风化花岗岩(以石英、云母为主,坚硬耐磨)。迎面阻力及累积侧摩阻力显著增大,导致管节整体轴向变形加剧,但各监测点拉压状态未发生变化,仍保持“顶压底拉”的受力特征。

④ 11月7日—11日,机头顶进肉红色钾长石花岗岩(微风化)。加强润滑注浆可有效冲刷底部岩屑、减少管岩接触,泥浆浮力使管节略有上浮,侧摩阻力降低。总体轴向应力和各监测点轴向应变略有减少,“顶压底拉”的受力状态保持不变。

⑤ 11月11日—12日,顶管机停止工作。各监测点轴向应变趋于稳定但未归零,表明管节外侧仍受残余围岩侧摩阻力作用。

3 结语

在顶管施工过程中,对管道不同位置的接触压力及应力进行实时监测,能够记录顶进过程中的管道受力状况,对受力大小进行分析,掌握顶进工况和受力规律。根据管道受力特性,可为施工班组提供技术指导,判断管道与岩壁之间的接触状态,从而及时调整顶进力大小,防止管道因超载而发生损坏。同时,对管道外侧的孔隙水压力进行监测,可大致了解泥浆在管道与地层之间的分布情况,为注浆压力及注浆量的确定提供依据,并进行针对性补浆,确保顶进过程中充分注浆,尽可能减小顶进阻力。此外,该研究还可为顶管纠偏提供参考,保障管道沿设定路线顺利顶进。

参考文献:

- [1] 马鹏, 岛田英树, 马保松, 等. 矩形顶管关键技术研究现状及发展趋势探讨[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(10): 1677-1692.

MA P, SHIMADA H, MA B S, et al. Research status and development trend of key technologies for rectangular pipe jacking [J]. Tunnel Construction, 2022, 42(10): 1677-1692 (in Chinese).

- [2] 马保松. 非开挖工程学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.

MA B S. Trenchless Engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2008 (in Chinese).

- [3] 赵文彬. 岩石地层中钢顶管顶力计算方法与管道受力特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2022: 20-25.

ZHAO W B. Calculation Method of Jacking Force and Mechanical Characteristics of Steel Pipe Jacking in Rock Stratum [D]. Changsha: Central South University, 2022: 20-25 (in Chinese).

- [4] 张鹏, 马保松, 曾聪, 等. 基于管土接触特性的顶进力计算模型分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(2): 244-249.

ZHANG P, MA B S, ZENG C, et al. Analysis of jacking force calculation model based on pipe-soil interaction characteristics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(2): 244-249 (in Chinese).

- [5] BERGESON W. Review of long drive microtunneling technology for use on large scale projects [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 39: 66-72.

- [6] 牛国伦, 马保松, 张鹏, 等. 大直径顶管施工管土相互作用实测分析: 以佛山市电力隧道顶管工程为例[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(8): 1353-1360.

NIU G L, MA B S, ZHANG P, et al. Field measurement analysis of pipe-soil interaction in large-diameter pipe jacking construction: case study of Foshan power tunnel project [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(8): 1353-1360 (in Chinese).

- [7] PELLET-BEAUCOUR A L, KASTNER R. Experimental and analytical study of friction forces during microtunneling operations[J]. Tunneling & Underground Space Technology, 2002, 17(1): 83-97.

作者简介: 张博(1981—), 男, 陕西西安人, 硕士, 正高级工程师, 研究方向为公路建设、环境保护及地下工程。

E-mail: 11016865@qq.com

收稿日期: 2025-08-01

修回日期: 2025-10-27

(编辑: 沈靖怡)