

冻结法施工联络通道渗漏水病害的原因及治理方法

赵江涛^{1,2} 王笑欢² 程 敏¹ 牛晓凯² 姚旭飞¹

(1. 北京市建设工程质量第三检测所有限责任公司, 100037, 北京;

2. 北京市市政工程研究院, 100037, 北京//第一作者, 高级工程师)

摘 要 目的:为了解决冻结法施工联络通道存在的渗漏部位多、渗水量大、治理难度高等问题,需分析冻结法施工联络通道的渗漏原因,并提出治理方法。方法:通过总结渗漏部位的分布情况,从地层冻胀融沉效应出发,结合相关案例对融沉注浆不到位的情况下的联络通道及附近管片最大沉降量进行分析,判断出联络通道与主隧道连接部位容易产生差异沉降。分析联络通道施工过程中的受力体系转换过程,并对主隧道钢管片的工作状态、洞门位置细部构造的施工质量及冻结管封堵措施的落实情况进行调查研究。结果及结论:研究发现,地层冻胀融沉效应引起的结构附加沉降、施工过程中频繁的受力体系转换造成的连接部位应力集中、钢管片服役初期处于亚健康工作状态、洞门位置细部构造施工质量缺陷及冻结管封堵措施不佳等都是造成联络通道渗漏的原因。对此,制定了“检测先行、科学评价、内外结合、综合治理”的联络通道渗漏水病害治理原则,并提出了以监测检测结果为基础的涵盖管片背后注浆、管片格腔渗漏水病害治理、管片接缝渗漏水病害治理、冻结管口渗漏水病害治理、洞门顶部混凝土缺陷治理、洞门侧墙与底板施工缝渗漏水病害治理等一系列方法。

关键词 地铁; 渗漏水病害治理; 冻结法施工; 联络通道

中图分类号 U457⁺.2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.08.013

Causes and Treatment Measures of Water Seepage and Leakage Diseases in Freezing Construction Link Passage

ZHAO Jiangtao, WANG Xiaohuan, CHENG Min, NIU Xiaokai, YAO Xufei

Abstract Objective: In order to solve the problems of multiple WSL (water seepage and leakage) points, large water seepage amount and high treatment difficulty in freezing construction link passage, it is necessary to analyze the causes for WSL in freezing construction link passage, and propose treatment measures. Method: By summarizing the distribution of WSL locations, starting from ground freezing and thawing settlement effect, combined with analysis of link passage and adjacent segment maximum settlement in case of insufficient tha-

wing settlement grouting based on relevant cases, it is derived that the joint part of link passage and main tunnel is prone to differential settlement. The stress system transformation process during link passage construction is analyzed, investigation and research is conducted on the working state of main tunnel steel lining segments, the construction quality of tunnel portal position structural details, and the implementation condition of blocking measures for freezing pipes. Result & Conclusion: It is found that the structure additional settlement caused by ground freezing and thawing settlement effect, the stress concentration at the joint part caused by frequent stress system transformation during construction, the sub-healthy working state of steel lining segments at the initial service stage, the construction quality defects of tunnel portal position structural details, and the poor blocking measure performance for freezing pipes are all causes of WSL in link passages. Therefore, the principle of 'inspection first, scientific evaluation, internal-external combination, comprehensive treatment' for the treatment of link passage WSL diseases is formulated, and a series of measures are proposed, including grouting behind the lining segment based on monitoring and detection results, WSL disease treatment of lining segment grid cavity, WSL disease treatment of lining segment joint, WSL disease treatment of freeze pipe mouth, defect treatment of tunnel face top concrete mass, and WSL disease treatment of the construction joints between tunnel entrance side walls and bottom plate.

Key words metro; water seepage and leakage disease treatment; freezing construction; link passage

First-author's address Beijing Construction Engineering Quality Third Inspection Institute Co., Ltd., 100037, Beijing, China

冻结法因不干扰地面交通、无噪声污染、土体加固强度高、止水性能好等优点,在富水软土、砂土环境下的联络通道施工中得到了广泛的应用。随着地铁运营时间的增长,冻结法施工联络通道的渗漏水病害正在逐渐显现并且愈发严重^[1-2]。目前,

冻结法施工联络通道的渗漏水病害治理基本处于“渗漏-治理-渗漏”的恶性循环中,耗损了大量的人力、物力却效果不佳。因此,有必要深入分析冻结法施工联络通道的渗漏水病害发生原因及治理方法,从而为该类问题的解决提供借鉴和参考。

目前,国内外对于联络通道渗漏水病害机理及治理方法的研究尚处于起步阶段,可供参考的文献较少。文献[3]对联络通道冻结施工完成后的渗漏水病害发生原因进行了深入分析,提出了联络通道渗漏水病害前期预防及后期处置措施。文献[4]针对上海轨道交通2号线某区间联络通道已有加固体系失效的情况,提出了壁后化学注浆、环纵缝处理、原钢环表面喷涂防腐材料、钢环与管片间隙压注环氧树脂等二次补强及防水治理工艺。文献[5]针对南京地铁某冻结法施工联络通道运营期持续下沉的情况,提出采用“多点、均匀、少量、多次”的劈裂-挤密注浆方法对联络通道周围地层加固,并验证了该方法的有效性。

本文将针对冻结法施工工艺特点,结合结构的细部构造特点及施工质量缺陷等,对基于冻结法施工联络通道(主隧道采用半钢管片)的渗漏水病害原因及治理方法进行研究,以彻底有效地解决地铁联络通道运营期渗漏水病害问题。

1 冻结法联络通道的主要渗漏部位

通过对上海、南京、苏州及宁波等城市的地铁隧道调研发现,冻结法施工联络通道的主要渗漏部位分布如下:

- 1) 拱腰位置钢管片格腔内部发生渗漏,主要表现为混凝土与肋板接缝线状渗水、或混凝土填充不密实而出现局部涌水。
- 2) 钢管片与混凝土管片接缝位置发生渗漏。
- 3) 结孔等穿墙孔位置发生渗漏。
- 4) 联络通道洞门位置发生渗漏,主要表现在洞门顶部混凝土开裂渗水、侧墙及地板连接位置施工缝渗水等。

2 渗漏水病害原因及发生机理

2.1 地层的冻胀融沉效应

地层冻结施工过程中,会发生原位冻结与分凝冻结。分凝冻结会造成土体中水分的迁移和成冰,是造成地层冻胀的直接原因。地层冻胀后土体体积通常能增大一倍。而冻结施工完成后,土体中的

冰晶融化成水,并在土体中形成孔隙;水经过孔隙排出后,土体体积会逐渐缩小,并在在自重的作用下发生持续的固结沉降,形成持续性的融沉效应。在地层冻结施工过程中,地层的冻胀与融沉过程并非完全互逆。在冻胀融沉过程中,会发生土体结构破坏^[6]及土体排水固结等,且通常土体的融沉量会大于冻胀量。在现有冻结法施工工艺体系中,大多采取充填注浆或融沉补偿注浆的方式来弥补地层的下沉。这些弥补方式存在以下问题:

1) 地层土性不同使得浆液可注性存在较大差异;施工过程中对注浆参数采用较粗放的经验化控制,难以保证每次注浆的效果。

2) 融沉注浆一般按照底板→侧墙→拱顶的顺序。不同部位注浆的阶段性目标并不明确,且实际注浆效果难以评估。

3) 对于饱和软土而言,地层融沉是一个漫长的过程,故融沉注浆必须长期持续监测,持续注浆。然而这在工期紧迫的情况下根本无法实现。

根据现有文献的工程案例^[5,7-8],在融沉注浆不到位的情况下,联络通道及附近管片最大沉降能够达到28.5~41.8 mm。这说明联络通道与主隧道连接部位容易产生差异沉降,造成该部位混凝土受拉或受剪破坏,从而形成渗流通道。

2.2 连接部位受力系统转换频繁、应力集中现象明显

在冻结施工过程中,联络通道的受力体系频繁转换:管片开孔后,管片整体受力性能受损,预设的钢支撑会弥补管片承载能力的不足,作用在管片上的部分水土压力转为由钢支撑负荷;随着联络通道的持续开挖,地层应力释放产生的附加应力会不断施加到管片上,并传递给钢支撑,造成管片局部应力集中及钢支撑受力不断增大;联络通道施工完成后,钢支撑的拆除使得主隧道的应力集中会逐渐向联络通道传递和转移。由于联络通道与盾构管片结构的刚度差异大,应力传递路径更为复杂,洞门连接部位应力集中情况也愈发明显。

由上述分析可知:一方面,受力系统的频繁转换造成了管片的附加变形,使得钢管片发生翘曲或管片接缝错动,从而使接缝止水装置失效而发生渗漏;另一方面,受力系统的频繁转换造成了联络通道与盾构管片连接部位的应力集中,尤其是在地层发生融沉时,极可能增大连接部位受拉开裂的风险,从而诱发渗漏水病害的发生。

2.3 钢管片处于亚健康工作状态

拱腰部位的钢管片格腔由于处于仰角位置,混凝土难以填充饱满,部分格腔混凝土厚度不足格腔深度的 1/3,导致格腔混凝土背后存在天然储水空间,钢管片处于亚健康工作状态。一旦外界水源进入格腔内部,极易形成渗流、喷涌。

拱腰部位的钢管片部分会预留冻结施工所需的孔口管。孔口管与肋板接缝也极易发生弯剪破坏或张拉破坏,同样使钢管片处于亚健康工作状态,进而形成渗流通道。

2.4 洞门位置细部构造存在施工质量缺陷

在联络通道与盾构钢管片连接的拱顶腋角部位,由于施工空间狭小,初期支护喷射混凝土及二次衬砌模筑混凝土时极易形成三角形空洞区域。如图 1 所示,汇集到三角形空洞区域的地下水一般有 3 种渗流路径:路径 1 为积水通过孔口管与背板的弯拉开裂位置向格腔内部渗漏,该路径的渗流会形成格腔积水,并逐渐发生格腔渗水,甚至喷涌;路径 2 为积水沿着管片接缝向外渗漏,该路径的渗流会逐渐发展成管片接缝渗漏水;路径 3 为积水沿着二次衬砌混凝土内部微小裂隙或缺陷位置向外渗透,该路径的渗流会形成洞门顶部混凝土的局部渗漏,并逐步引发钢筋锈蚀、混凝土剥落等病害。

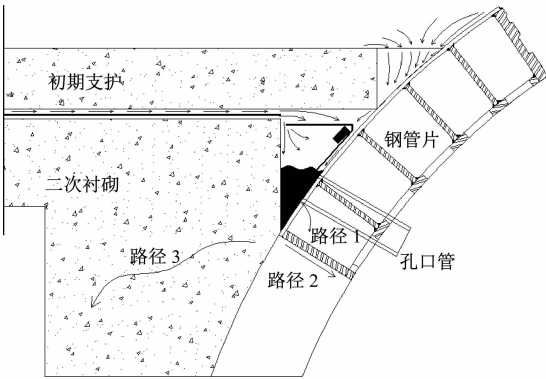


图 1 汇集到三角形空洞区域的地下水渗流路径

Fig. 1 Groundwater seepage path gathered in triangular void area

2.5 冻结管封堵措施不佳

冻结施工过程中,一般会打设大量冻结管,而这些冻结管的后期封堵质量难以保证,主要表现在:① 对于拱腰位置的冻结管,由于为仰角打设,砂浆及水泥等封堵材料难以完全填充管道;② 通过对大量冻结法施工的联络通道的实地调研发现,冻结管表面“锚栓+钢板”的封堵工序大多未施作,使得

3 道封堵工序(内部充填聚合物防水砂浆,中间封堵微膨胀水泥,表面锚栓锚固钢板)并未完全实施,从而使得该部位成为防水薄弱环节。

3 联络通道渗漏水病害的综合治理

针对渗漏水病害原因,本文结合多个工程实例经验,提出了“检测先行,科学评价,内外结合,综合治理”的冻结联络通道渗漏水病害治理思路。联络通道渗漏水病害综合治理方法的主要流程见图 2。

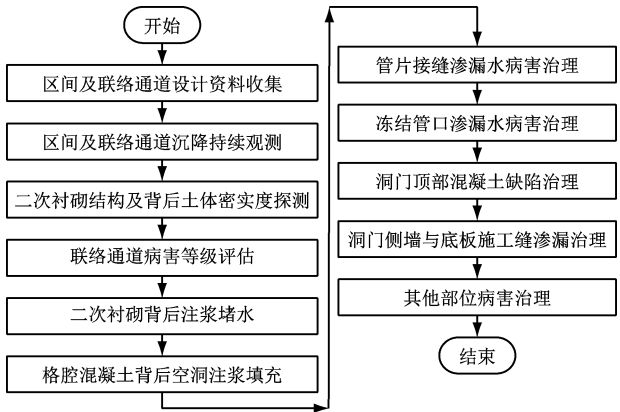


图 2 联络通道渗漏水病害综合治理方法的主要流程
Fig. 2 Main process of link passage water seepage and leakage disease comprehensive treatment method

3.1 区间及联络通道设计资料收集

主要收集地质水文、区间隧道横纵断面设计、盾构管片结构形式、联络通道结构形式及防水构造等资料,重点收集联络通道与区间隧道连接位置的结构设计及细部构造资料。

3.2 二次衬砌结构及其背后土体密实度检测

对二次衬砌及其背后的土体密实度进行雷达检测,重点检测二次衬砌结构及背后土体密实情况及富水情况,为二次衬砌背后注浆施工提供依据。

3.3 联络通道病害等级评估

根据二次衬砌结构及背后土体密实度检测结果,对联络通道渗漏水病害进行评估分级。当存在下述情况之一时判定为严重,否则判定为轻微:① 二次衬砌背后存在明显空洞或富水体;② 管片接缝间存在持续的线状流水;③ 钢管片严重锈蚀,且格腔内部存在持续出水或涌水;④ 洞门位置二次衬砌混凝土严重劣化,且存在明显渗漏水病害。

当联络通道渗漏水病害等级被判定为严重时,应综合采用二次衬砌背后注浆、二次衬砌渗漏处补强及在二次衬砌表面喷涂封堵材料等措施,对联络

通道位置由外向内进行综合治理。

当联络通道渗漏水病害等级被判定为轻微时,应根据结构病害状况开展专项专治,治理措施根据结构特点及受力特征坚持刚柔相济的原则,因地制宜,综合治理。

3.4 二次衬砌背后注浆

二次衬砌背后注浆首选利用管片吊装孔或预留注浆孔进行施工。注浆前应配备合适的注浆头及球阀,确保丝扣吻合、连接牢固。当须在联络通道二次衬砌位置打设注浆孔时,应采取稳固的防喷涌措施。由于打设注浆孔会破坏防水层的完整性,因此必须在空洞内填塞能较好黏附防水板、初期支护及二次衬砌的柔性填充型防水材料,以确保注浆处的局部密封性。

通常情况下,发生渗漏水病害的二次衬砌背后富水严重,浆泥混杂。因此,注浆前应综合考虑地质水文情况及渗漏情况,调配合适的水泥基灌浆料。灌浆料应具备耐久性好、凝固时间可控及水中不易分散等特性。注浆前须提前试验浆液配比,以确保注浆加固效果。注浆过程中应密切注意注浆压力变化情况:出现压力骤增或骤降的情况,说明注浆管路可能出现堵塞或泄漏,应关闭球阀并及时采取措施;注浆结束标准为注浆压力达到 0.5 MPa;若稳压一段时间后无明显降压,则认为浆液饱满。

3.5 格腔混凝土背后空洞注浆填充

注浆孔与泄压孔应在格腔内对角打设,其中注浆孔位于下部,泄压孔位于上部。首先,钻孔至背板表面;然后,注入超流态(初始流动度 ≥ 290 mm)、微膨胀(3 h 竖向膨胀率 $\geq 1.0\%$)、初凝快(初凝时间 ≤ 3 h)的水泥基灌浆料,充填格腔混凝土背后空洞。

打注浆孔时,若发现该格腔存在持续、高压的地下水喷涌,则说明表面该格腔混凝土背后空洞与外界水源存在连通现象。此时,为保证病害治理效果,应先实施二次衬砌背后注浆作业,再实施格腔混凝土背后空洞注浆填充。

3.6 管片接缝处的渗漏水病害治理

受地铁列车的持续振动影响,管片接缝处的渗漏水病害具有界面特征明显、易复发等特点。对此应选择固化体断裂伸长率大、且同混凝土和钢材基面均具有较强黏附性的柔性防水材料进行治理。

对于管片接缝处的渗漏水病害治理,建议至少实施 2 层防水。第 1 层防水为在管片接缝内垂直打

设注浆孔及终止孔。其中终止孔采用堵漏灵等速凝防水材料填充形成防水边界,注浆孔注入丙烯酸灌浆料进行内部封堵。注浆孔及终止孔的打设位置如图 3 所示。第 2 层防水为在接缝表面填补聚硫密封胶等柔性材料进行二次封堵,形成防水储备。

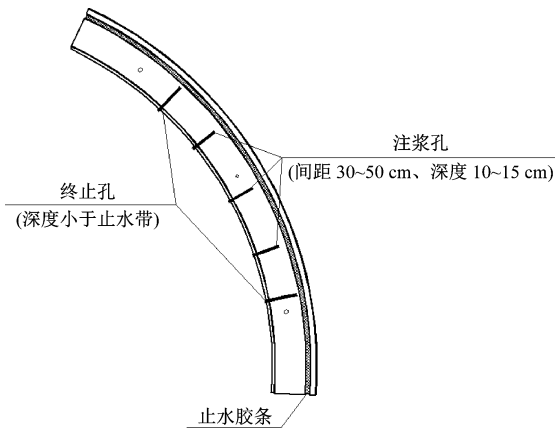


图 3 注浆孔及终止孔的打设位置示意图

Fig. 3 Diagram of drilling positions for grouting holes and termination holes

3.7 冻结管口的渗漏水病害治理

冻结管口的渗漏水病害治理采用剔槽埋管治理法。首先,在管道周边剔凿环形深槽,露出管道与混凝土连接部位基面,仔细寻找并确定主渗漏水点;然后,在主渗水点位置埋设引水软管,将渗漏水从引水管流出后,按图 4 方法对开凿的混凝土凹槽进行封堵;最后,待凹槽内封堵的水泥基灌浆料固化后,拔出引水管,插入注浆喷嘴,使用高压灌浆机连接喷嘴向孔内灌注聚氨酯等有机灌浆料,渗漏部

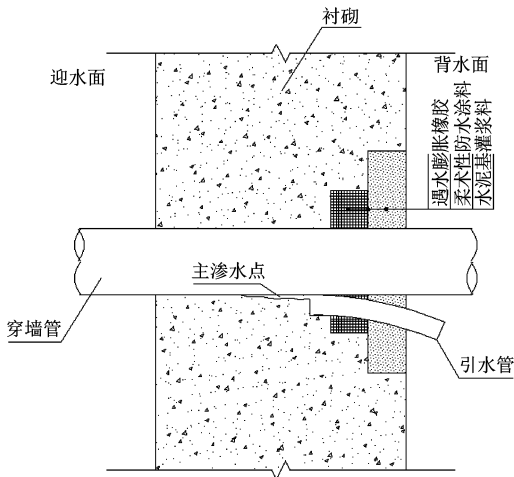


图 4 渗漏水病害治理剖面图

Fig. 4 Profile drawing of water seepage and leakage disease treatment

位被完全封堵后,便可拆除喷嘴,遗留孔洞采用高强度速干止水材料填充处理。

3.8 洞门顶部的混凝土缺陷治理

根据洞门顶部的混凝土缺陷严重程度,应采取不同的治理措施。若洞门顶部的混凝土强度严重不足,或存在严重的混凝土碳化与剥落,则判定为混凝土缺陷严重,可采用局部凿除、支模及二次浇筑的方法来治理。若洞门顶部的混凝土只存在局部开裂或渗漏水的情况,则判定为混凝土缺陷轻微,可采用钻斜孔注浆方法对结构裂缝进行治理。斜孔倾角宜为 $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$,注浆材料一般选用环氧树脂及丙烯酸等,封缝材料一般选用聚合物水泥防水砂浆。

3.9 洞门侧墙与底板的施工缝渗漏治理

洞门侧墙与底板的施工缝渗漏可采用刻槽灌浆的方法进行治理。首先,在渗水点表面沿裂隙剔凿U形或倒梯形槽,开槽长度须沿裂缝两端向两侧各延伸一定距离;然后,打孔安装注浆基座,并采用高强度速干止水材料封堵U形或倒梯形槽;最后,利用埋设的注浆基座进行灌浆以堵渗漏缝隙。注浆过程中注浆压力最大不超过 0.5 MPa ,注浆完毕后,应稳压不少于 5 min 再封管。

3.10 治理效果实例验证

苏州地铁某联络通道渗漏水病害严重。采用上述综合治理方法后,该联络通道基本无渗漏水病害,验证了上述综合治理方法的良好效果。苏州地铁某联络通道渗漏水病害治理效果实景图如图5所示。

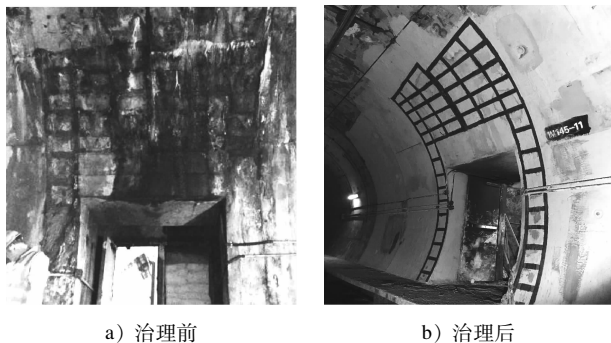


图5 苏州地铁某联络通道渗漏水病害治理效果实景图

Fig.5 Picture of water seepage and leakage disease treatment result in a link passage of Suzhou Metro

4 结语

1) 冻结法施工联络通道在服役 $5 \sim 8$ 年后,常

发生较严重的渗漏水病害,面临渗漏部位多、渗水量大及治理难度高等问题,甚至存在局部涌水现象,极大地影响了列车的正常运营。其主要渗漏部位为拱腰位置钢管片格腔、管片接缝、冻结管口及洞门位置等。

2) 引发渗漏水病害的原因主要为:地层冻胀融沉效应造成结构附加沉降,施工过程中受力体系频繁转换导致连接部位应力集中,钢管片服役初期处于亚健康工作状态,洞门位置细部构造存在施工质量缺陷,冻结管封堵措施不佳等。

3) 基于渗漏水病害发生机理,结合多个工程的实例经验,本文提出了“检测先行、科学评价、内外结合、综合治理”的治理思路,并提出了以监测及检测结果为基础的联络渗漏水病害综合治理方法。该综合治理方法具有一定的创新性,可为类似工程提供一定的借鉴。

参考文献

- [1] 刘军,贺美德,宋早云. 联络通道施工盾构管片力学行为研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊2): 271.
LIU Jun, HE Meide, SONG Hanyun. Mechanical behaviors of shield tunnel segments due to construction of connecting passages [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 271.
- [2] 詹涛,樊祥喜. 复合地层盾构隧道联络通道涌水处置方案研究[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(12): 68.
ZHAN Tao, FAN Xiangxi. Study on disposal of water inflow in connected aisle of shield tunnel in complex strata [J]. Railway Standard Design, 2015, 59(12): 68.
- [3] 赵干,丁顺良. 冻结法施工地铁联络通道后期渗漏水分析及处置研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(5): 128.
ZHAO Gan, DING Shunliang. Analysis and disposal of cross passage leakage at the late stage built by freezing method [J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(5): 128.
- [4] 李迅. 对联络通道附近既有加固体系的二次补强及防水治理技术[J]. 中国建筑防水, 2016(14): 22.
LI Xun. Secondary reinforcement and waterproofing treatment technology for existing strengthening system near connecting passage [J]. China Building Waterproofing, 2016(14): 22.
- [5] 李增理,王伟. 运营期地铁联络通道融沉注浆治理技术[J]. 隧道建设, 2017, 37(8): 1032.
LI Zengli, WANG Wei. Grouting technology for thaw settlement of metro cross passage during operation period [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(8): 1032.
- [6] 丁智,张孟雅,魏新江,等. 地铁循环荷载下冻融软土孔压发展及微观结构研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(11): 2328.

(下转第88页)

- Nanjing Metro line: a section from Xinzhuang Station to Jimingsi Station[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(6): 117.
- [3] 郭信君, 闵凡路, 钟小春, 等. 南京长江隧道工程难点分析及关键技术总结[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 2154.
- GUO Xinjun, MIN Fanlu, ZHONG Xiaochun, et al. Summaries of key technologies and difficulties in Nanjing Yangtze River tunnel project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 2154.
- [4] 李波, 包纂. 武汉轨道交通 7 号线三阳路越江隧道施工关键技术[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(5): 820.
- LI Bo, BAO Zhen. Key techniques for construction of Sanyang Road cross-river tunnel of Wuhan Rail Transit Line 7[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(5): 820.
- [5] 竺维彬, 王晖, 鞠世健. 复合地层中盾构滚刀磨损原因分析及对策[J]. 现代隧道技术, 2006, 43(4): 72.
- ZHU Weibin, WANG Hui, JU Shijian. Analysis of the abrasion of disc cutters of shields in composite ground and countermeasures[J]. Modern Tunnelling Technology, 2006, 43(4): 72.
- [6] 张明富, 袁大军, 黄清飞, 等. 砂卵石地层盾构刀具动态磨损分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 397.
- ZHANG Mingfu, YUAN Dajun, HUANG Qingfei, et al. Analysis of dynamic abrasion of shield cutters in sandy cobble stratum[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 397.
- [7] 陈焱, 王宇皓, 方勇, 等. 砂性地层土压平衡盾构切刀磨损室内试验研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(5): 159.
- CHEN Yan, WANG Yuhao, FANG Yong, et al. Laboratory experimental study on the wear of EPB shield cutting tools in sandy stratum[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(5): 159.
- [8] 江华, 张晋勋, 李继东, 等. 砂卵石地层撕裂刀布置对刮刀磨损的影响研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(1): 103.
- JIANG Hua, ZHANG Jinxun, LI Jidong, et al. Research on the influence of the tearing knife layout on the scraper wear in sandy gravel stratum[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(1): 103.
- [9] 郭家庆. 砂卵石地层盾构掘进的刀具磨损和改善措施[J]. 城市轨道交通研究, 2010, 13(8): 87.
- GUO Jiaqing. Cutting tool wear and improvement measures in sand and gravel strata shield tunneling[J]. Urban Mass Transit, 2010, 13(8): 87.
- [10] 赵峻. 全断面砂性地层泥水平衡盾构刀具磨损理论分析[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(3): 124.
- ZHAO Jun. Theoretical analysis of the cutter wear of a slurry shield driving in full-face sandy strata[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(3): 124.
- [11] 吴俊, 袁大军, 李兴高, 等. 盾构刀具磨损机理及预测分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(8): 109.
- WU Jun, YUAN Dajun, LI Xinggao, et al. Analysis on wear mechanism and prediction of shield cutter[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(8): 109.
- [12] 张斌. 全断面岩石掘进机刀具磨损研究及刀具布局优化[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- ZHANG Bin. Research on tool wear and tool layout optimization of full-face rock roadheader[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [13] 管会生, 高波. 盾构切削刀具寿命的计算[J]. 工程机械, 2006, 37(1): 161.
- GUAN Huisheng, GAO Bo. Calculation for service life of cutting tools of shields[J]. Construction Machinery and Equipment, 2006, 37(1): 161.
- [14] YU H G, TAO J F, HUANG S, et al. A field parameters-based method for real-time wear estimation of disc cutter on TBM cutterhead[J]. Automation in Construction, 2021, 124: 103603.
- [15] 张凤祥, 朱合华, 傅德明. 盾构隧道[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 827.
- ZHANG Fengxiang, ZHU Hehua, FU Deming. Shield tunnelling method[M]. Beijing: China Communications Press, 2004: 827.
- (收稿日期: 2022-11-09)
- (上接第 81 页)
- DING Zhi, ZHANG Mengya, WEI Xinjiang, et al. Study on pore pressure and microstructure of frozen and thawed soft soil under subway cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(11): 2328.
- [7] 胡雷鸣. 某地铁联络通道沉降治理案例分析[J]. 山西建筑, 2015, 41(7): 70.
- HU Leiming. A metro connected aisle settlement management case analysis[J]. Shanxi Architecture, 2015, 41(7): 70.
- [8] 何山. 盾构区间联络通道融沉注浆施工对管片沉降的影响[J]. 城市道桥与防洪, 2016(9): 192.
- HE Shan. Influence of melting and grouting construction on segment settlement in shield tunnel[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2016(9): 192.
- (收稿日期: 2020-12-15)