

运营隧道防水板切割二衬的危害及整治方案研究

史云飞¹ 龚兴旺² 郁振其³ 龚 伦² 刘泽霖⁴ 崔笑醒^{4,5}

(1. 山西工程科技职业大学, 030619, 晋中; 2. 西南交通大学土木工程学院, 610031, 成都;
3. 国家管网集团建设项目管理分公司, 065000, 廊坊; 4. 南宁市人工智能学会, 530000, 南宁;
5. 中国传媒大学, 100024, 北京)

摘 要 [目的]随着我国隧道建设步伐的加快,运营隧道中各类病害问题日益突显。尽管众多学者已对多种病害进行了深入研究,但针对防水板切割二衬的危害研究仍显不足。因此,有必要深入探究运营隧道中防水板切割二衬危害,并提出有效的整治方案。[方法]基于防水板的防水与受力作用机理,运用数值模拟技术,系统研究了运营隧道中防水板切割二衬的危害。重点分析了环向与纵向不同切割长度下,防水板拱部弯矩、衬砌 Mises 应力及位移等三项关键指标的变化规律。在此基础上,提出了一种新型整治设计方案,并通过对比防水板整治前后衬砌结构拱顶位移的变化,验证了该整治设计方案的合理性与优越性。[结果及结论]研究表明,随着防水板环向与纵向切割长度的增加,防水板拱部弯矩、衬砌应力及位移均呈现显著增长趋势。特别是防水板的纵向切割长度,对衬砌位移等三项指标的影响更为显著。通过综合分析弯矩、应力及位移的突变区域,发现防水板环向与纵向切割长度在 2~3 m 范围内时,对衬砌结构的受力及变形影响最为不利。

关键词 运营隧道; 防水板切割; 环纵向长度; 数值模拟; 整治方案

中图分类号 U537.2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.10.018

Hazards of Waterproof Board Cutting Secondary Lining in Operating Tunnel and Remediation Schemes

SHI Yunfei¹, GONG Xingwang², YU Zhenqi³, GONG Lun², LIU Zelin⁴, CUI Xiaoti^{4,5}

(1. Shanxi Vocational University of Engineering Science and Technology, 030619, Jinzhong, China; 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China; 3. National Pipeline Network Group Construction Project Management Branch, 065000, Langfang, China; 4. Nanning Association for Artificial Intelligence, 530000, Nanning, China; 5. Communication University of China, 100024, Beijing, China)

Abstract [Objective] With the acceleration of tunnel con-

struction in China, various diseases in operating tunnels become increasingly prominent. Despite of many in-depth researches by scholars on various diseases, that on the hazards of waterproof board cutting secondary lining is still insufficient. Therefore, it is necessary to deeply explore the secondary lining cutting hazard in operating tunnels and propose effective remediation schemes. [Method] Based on the waterproofing and force mechanism of waterproof boards, numerical simulation technology is used to systematically study the secondary lining cutting hazard in operating tunnels. Focusing on the waterproof board arch bending moment, the Mises stress and the lining displacement under different circumferential and longitudinal cutting lengths, the changing law of their key indicators are emphatically analyzed. On this basis, a new remediation design scheme is proposed, and the rationality-superiority of the remediation design scheme is verified by comparing the changes in the lining structure vault displacement before and after the waterproof board remediation. [Result & Conclusion] With the increase in the circumferential and longitudinal cutting lengths of the waterproof board, the arch bending moment, the lining stress and displacement all show a significant growth trend. In particular, the longitudinal cutting length of the waterproof board has a more significant impact on the three indicators such as lining displacement. Through comprehensively analyzing the sudden change areas of bending moment, stress and displacement, it is found that when the waterproof board circumferential and longitudinal cutting lengths are in the range of 2~3 m, the impact on stress and deformation of the lining structure is most unfavorable.

Key words operating tunnel; waterproof board cutting; circumferential and longitudinal length; numerical simulation; remediation scheme

随着隧道广泛用于铁路、公路与油气管道工程中,近年来我国新建隧道长度年均增长率高达 20%。然而随着隧道修建速度的迅猛提升,不可避免地带来了诸多新的挑战,其中之一便是隧道防水

板切割二次衬砌(以下简称“二衬”)的问题。这一病害在隧道运营期间逐渐显现并加剧,对隧道的安全与稳定构成了潜在威胁。因此,深入探讨和分析运营隧道中防水板切割二衬的病害现象,具有极其重要的现实意义。

截至目前,我国众多专家与学者已就防水板问题展开了广泛而深入的研究:文献[1]通过构建并验证复合式衬砌渗透计算模型,揭示了环向排水管间距与渗透系数之间的反比关系;文献[2]则提出了一种创新性的防排水系统,并通过试验验证了其优越性能;文献[3]介绍了新型防水板铺挂台车,详细阐述了其系统构成、工作原理及施工工艺,并与传统设备进行了综合对比;文献[4]聚焦于隧道防水板施工工艺,创新性地引入了三焊缝爬焊-电磁焊焊接技术;文献[5]则自主研发了防水板自动铺挂台车,有效提升了施工效率,并解决了隧道渗漏水的常见问题;文献[6]结合现场实践,系统总结了防排水系统的施工工艺与技术要求。文献[7]则针对防水板切割衬砌问题,提出了快速微创整治方案,通过局部结构改造与补强措施,有效改善了隧道衬砌的整体受力状态。

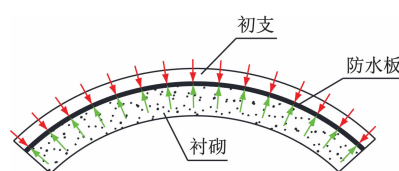
然而,当前研究多聚焦于防水板材料本身及切割后的整治方案,而对防水板切割对衬砌结构的潜在危害关注不足,尤其是切割后衬砌结构的受力与变形情况缺乏深入分析。鉴于此,本文以西南某铁路隧道防水板切割二衬病害为例,基于防水板的防水与受力机理,运用 FLAC^{3D} 软件进行数值模拟分析。通过模拟不同环纵向长度下防水板的切割情况,探究其对防水板自身及衬砌结构的具体影响。在此基础上,本文提出了一种新型的防水板切割二衬整治设计方案,并结合整治前后衬砌拱顶位移的变化情况,验证了该整治设计方案的合理性与有效性。

1 防水板切割二衬机理研究

目前我国隧道衬砌结构类型主要为复合式衬砌,即按初期支护(以下简称“初支”)-防水板-衬砌依次进行施作,而运营隧道经常出现防水板切割二衬这一病害,因此需要对防水板力学机理展开研究。根据文献调研后发现:防水板作为一种高分子聚合物防渗材料,一方面它起着防渗漏的作用,另一方面它会改变力学作用,即改变初期支护与衬砌之间力学传递特性。

防水板的防水作用取决于其自身的材料性能,目前常用的防水板主要采用高分子材料制成,在其外层设置有防水膜,为防止水泥浆渗入防排水系统,或雨季下土壤颗粒造成排水通道堵塞,应先铺土工布或无纺布再铺防水板,以保证排水通道顺畅。

由于防水板及无纺布的铺设,导致初支与衬砌之间存在隔离,即当防水板进行荷载传递时,只传递径向应力,而不传递切向压力。因此,在进行数值模拟时,需要找到具有相似力学特性的单元进行模拟。防水板力学作用机理如图 1 所示,防水板切割二衬力学作用机理示如图 2 所示。



注:图中箭头表示力的方向。

图 1 防水板力学作用机理图

Fig. 1 Mechanical mechanism diagram of the waterproof board

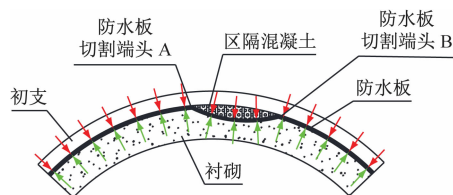


图 2 防水板切割二衬力学作用机理图

Fig. 2 Mechanical mechanism of the waterproof board cutting secondary lining

防水板铺设完好时,其受力及传递形式如图 1 所示。由图 1 和图 2 可知:防水板会受到初支和二衬的径向应力,应力的大小相等,方向相反。但在运营隧道中,针对防水板切割二衬造成的防水板力学机理变化,以及衬砌结构受力影响尚未给出明确结论;本研究认为当防水板切割拱部衬砌时,会在防水板切割部位的端头处造成应力集中,导致衬砌结构承受非均布力。因防水板切割二衬造成切割部位应力状态发生改变,切割部位上部除原有径向应力外,还应考虑区隔混凝土自重,此时防水板切割部位上、下径向应力大小变为上部径向应力大于下部。伴随着衬砌拱部混凝土劣化及列车振动荷载等因素影响,导致衬砌拱部具有掉块风险,同时会对隧道整体结构的安全性及耐久性造成严重影响。

2 工程概况

某西南运营铁路隧道为单线隧道,设计速度为 160 km/h。隧道采用复合式衬砌,按新奥法施工,初支厚度为 20 cm,混凝土强度等级为 C25;衬砌设计厚度为 45 cm,钢筋混凝土强度等级为 C40。隧道净宽为 8.25 m,净高为 10.67 m,隧道埋深为 25.64 m,上覆土从上往下分别是:素填土、砂岩、砂质泥岩,隧道穿越岩层为砂岩。

经现场排查验证后发现:隧道缺陷数量高达几十处,其中主要以防水板二衬切割为主,不同洞身标处切割衬砌范围不一致,但缺陷发生位置仍以拱部居多,故此次主要以防水板切割拱部衬砌作为研究对象,取现场排查段为 K1143—K1145 段,该段防水板二衬切割环纵向长度均达到 2 m,现场病害图及防水板二衬切割结构示意图如图 3、图 4 所示。



图 3 现场排查病害实景图

Fig. 3 Real scene picture of on-site disease inspection

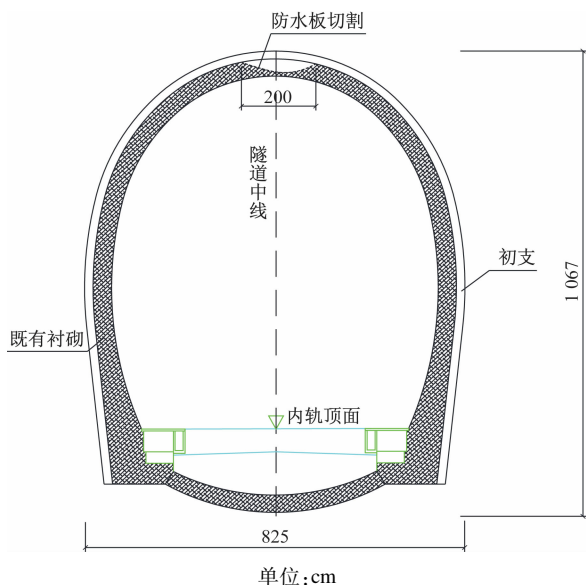


图 4 防水板二衬切割结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the waterproof board cutting secondary lining structure

3 数值模拟及整治设计方案

3.1 模型参数

本次计算采用 FLAC^{3D} 软件进行数值模拟。模型边界尺寸一般取 3~5 倍洞径,而本次计算模型尺寸为:40 m(长)×50 m(高)×40 m(宽)。模型前、后、左、右边界的法向方向被约束,底边界则进行了固端约束。在建模过程中,初支、衬砌和地层均采用了实体单元进行模拟,其中初支与衬砌选用了弹性本构模型,地层则选用了摩尔-库伦本构模型。防水板则利用 FLAC^{3D} 自带的壳单元进行模拟,通过赋予薄膜材料参数,使该结构单元与网格交互时表现出的剪切特性本质上体现为黏结和摩擦,这完全符合防水板的力学特性要求。

地层及结构的具体计算参数见表 1,防水板材料的计算参数见表 2,地层及防水板切割示意图见图 5。

表 1 地层及结构参数表

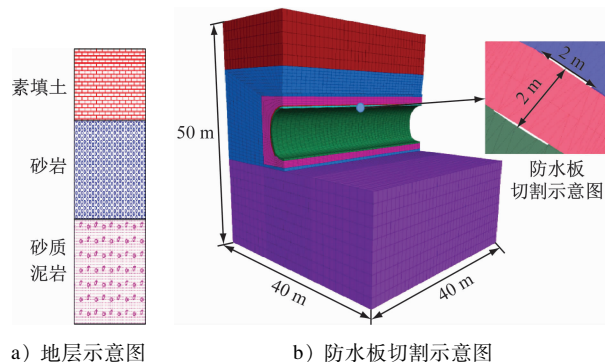
Tab. 1 Table of strata and structural parameters

类别	重度/ (kN/m ³)	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
素填土	21.0	5.0	0.15	0	28.0
砂岩	24.9	1.8×10^3	0.25	974.0	41.8
砂质泥岩	25.6	1.7×10^3	0.22	750.0	36.5
初支	25.0	2.8×10^4	0.20		
二衬	25.0	3.3×10^4	0.20		

表 2 防水板力学参数表

Tab. 2 Table of waterproof board mechanical parameters

弹性模量/ MPa	泊松比	黏结强度/ MPa	摩擦角/ (°)	黏结刚度/ (MPa/mm)	厚度/ m
21.6	0.36	0.928	26	1.37	0.02



a) 地层示意图

b) 防水板切割示意图

图 5 地层及防水板切割示意图

Fig. 5 Schematic diagram of strata and waterproof board cutting

3.2 计算工况

研究不同环纵向切割长度下衬砌结构的应力及位移,并对切割部位防水板的弯矩进行模拟计算,同时对切割部位整治前后衬砌结构的拱顶位移进行对比分析,验证整治设计方案的合理性。不同纵向切割长度的计算工况如表 3 所示,不同环向切割长度的计算工况如表 4 所示。

表 3 不同纵向切割长度下计算工况表

Tab.3 Table of calculated working conditions for different longitudinal cutting lengths

工况	纵向长度/ mm	环向长度/ mm	工况	纵向长度/ mm	环向长度/ mm
A	0	2	D	3	2
B	1	2	E	4	2
C	2	2	F	5	2

表 4 不同环向切割长度下计算工况表

Tab.4 Table of calculated working conditions for different circumferential cutting lengths

工况	环向长度/ mm	纵向长度/ mm	工况	环向长度/ mm	纵向长度/ mm
A'	0	1	D'	3	1
B'	1	1	E'	4	1
C'	2	1	F'	5	1

3.3 整治设计方案

整治缺陷范围:环向长度 $\leq 2\text{ m}$,总面积 $\leq 6\text{ m}^2$,区隔混凝土品质合格厚度小于基本衬砌厚度或区隔处衬砌或初支脱空。采用拆除防水板下部区隔混凝土(视情况将防水板割除后修补使其密贴初支),并在其内预留注浆系统;再重置防水板,对衬砌实际钢筋进行定位;最后在切割凿除范围内分层网喷后进行锚杆、钢筋束、植筋、钢筋网及喷纤维混凝土加固。衬砌整治设计图如图 6 所示。

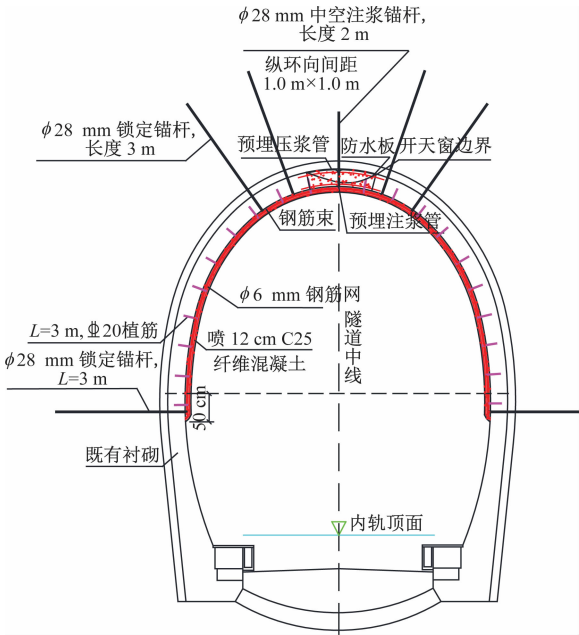
结合铁路天窗时间短的运营特点,在确保安全的前提下,在施工时,需尽量减少对铁路运营的影响,施工中必须严格遵循“在封闭双线并断开线路供电时,施作拱部锚网喷”的原则。

采用该整治设计方案对缺陷整治加固时,可按以下流程进行模拟:凿除缺陷部位混凝土→重构防水板系统→再次喷射纤维混凝土。

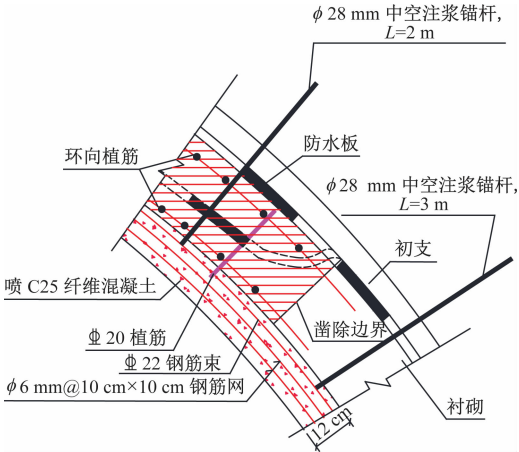
3.4 计算结果分析

3.4.1 防水板弯矩分析

对切割衬砌后防水板的弯矩进行分析,最大弯



a) 整治整体断面图



b) 整治细部图

图 6 衬砌整治设计图

Fig.6 Lining remediation design drawing

矩发生在防水板拱部,且防水板拱部会出现应力集中。防水板纵向切割长度为 2 m 时,防水板拱部弯矩如图 7 所示,各工况下防水板拱部弯矩如图 8 所示。

由图 8 可知:防水板未切割衬砌时,防水板拱部的弯矩为 560 Nm;当纵向切割长度为 1 m 时,防水板拱部弯矩为 758 Nm,变化很小,增长率仅为 1.25%;但随着环纵向切割长度达到 2 m 时,防水板拱部弯矩快速增长,此时弯矩分别为 1 067 Nm、1 122 Nm,即相比于防水板构件完好时,顶部弯矩增长近两倍;当防水板环纵向切割长度达到 3 m 后,随着环纵向切割长度继续增大,防水板弯矩增

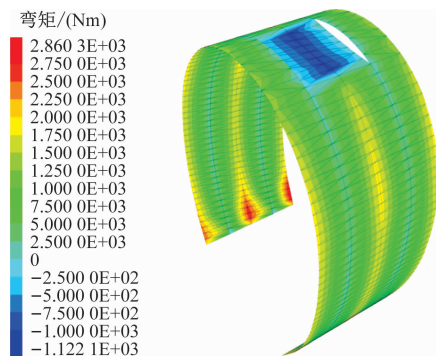


图7 工况C防水板弯矩云图

Fig.7 Bending moment nephogram of the waterproof plate under working condition C

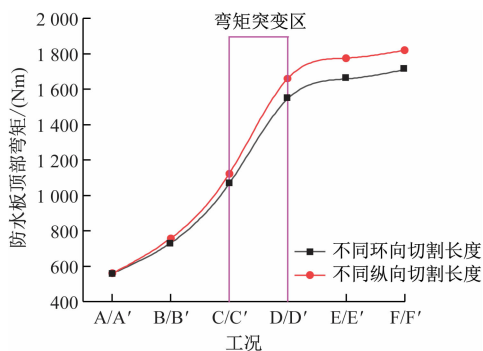


图8 防水板拱部弯矩值

Fig.8 Bending moment value of waterproof plate arch

长趋势在逐渐减小。

3.4.2 衬砌 Mises 应力分析

各工况下衬砌结构拱顶 Mises 应力,如图9所示。

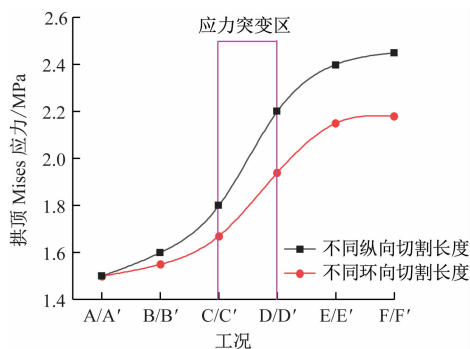


图9 衬砌拱顶 Mises 应力值

Fig.9 Mises stress value of lining vault

由图9可知:随着防水板切割二衬的纵向及环向长度不断增大,衬砌结构的 Mises 应力也在不断增加。根据应力增长趋势可发现:纵向切割长度对衬砌拱顶 Mises 应力的影响更大;防水板未切割衬砌时,衬砌结构拱顶的 Mises 应力为 1.5 MPa;环、纵向切割长度为 1 m 时,衬砌结构拱顶的 Mises 应

力分别增加至 1.55 MPa、1.60 MPa;当环、纵向切割长度为 2 m 时,拱顶的 Mises 应力分别为 1.63 MPa、1.80 MPa。

3.4.3 衬砌位移分析

取衬砌结构拱顶沉降最大值,分析各工况衬砌结构拱顶位移,如图10所示。

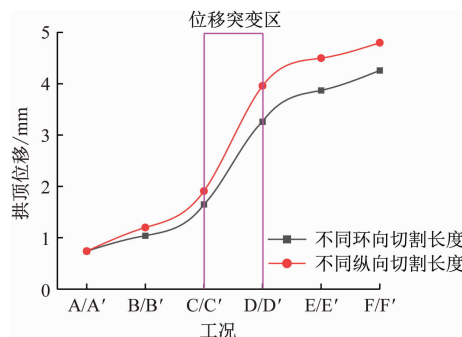


图10 衬砌拱顶位移值

Fig.10 Displacement value of lining vault

由图10可知:随着环纵向切割长度的增大,衬砌结构的拱顶位移也在急剧增加。当环纵向切割长度达到 2 m 时,拱顶位移开始突变,随着切割长度继续增大至 3 m,此时衬砌结构的拱顶位移分别为 3.2 mm、4.0 mm。与未发生切割时衬砌拱顶位移 0.75 mm 相比,拱顶位移分别增大了约 4 倍和 5 倍。当环纵向切割长度继续增大,拱顶位移虽仍在增加,但增长趋势缓慢。因此,可认为当环纵向切割长度达到 2~3 m 时,衬砌结构的拱顶位移会趋于不利状态,易发生掉块等潜在风险。

3.4.4 整治前后衬砌位移对比分析

针对整治前后衬砌拱顶位移展开研究:在对病害进行整治后发现,衬砌拱顶位移有不同程度的减小,注意到工况 D 的衬砌拱顶位移由原先的 4 mm 降低到 1 mm,说明该整治设计方案能发挥一定作用。整治前后衬砌拱顶位移值如图11所示。

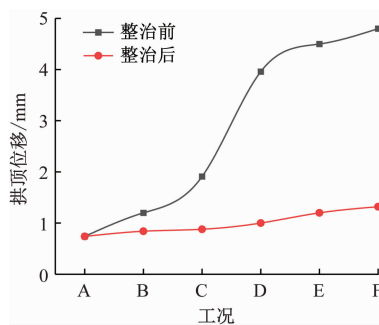
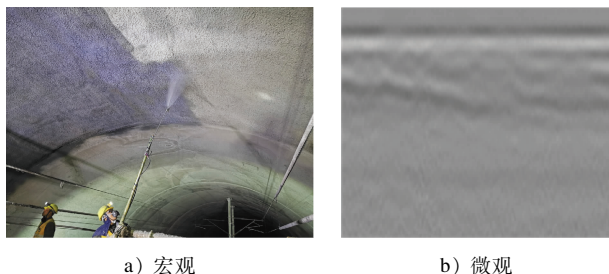


图11 整治前后衬砌拱顶位移值

Fig.11 Displacement value of lining vault before and after remediation

4 隧道整治效果验证

根据整治设计方案:先在凿除边界外沿径向打设锁定锚杆;然后,拆除区隔混凝土,再重构局部排水系统;最后,分层网喷后进行锚杆、钢筋束、植筋、钢筋网及喷纤维混凝土进行加固,并在喷射混凝土表面喷涂一层高渗透性、耐久性环氧树脂。整治后效果如图 12 所示。



a) 宏观

b) 微观

图 12 整治后效果实景图

Fig. 12 Real scene picture of the effect after remediation

由图 12 b) 可见:通过对整治后衬砌结构进行地质雷达无损检测,发现采用上述整治设计方案对隧道衬砌结构整治后,结构能达到整体承载能力,且衬砌混凝土内部不再出现缺陷。经该案例分析可知:该整治设计方案,在处理防水板切割二衬时具有安全保障、操作简便、经济合理及对列车运营影响小等显著优点。

5 结论

1) 相比于环向切割,防水板纵向切割对衬砌应力及位移影响较大。随着防水板环向切割长度的增大,防水板自身顶部弯矩、衬砌应力及位移均会急剧增加。

2) 结合 3 项指标突变区,发现防水板环向切割长度为 2~3 m 为衬砌结构受力及变形的最不利长度阈值范围。

3) 衬砌结构拱顶的 Mises 应力与位移和防水板环向切割长度均呈现出非线性正相关性。即随着环向切割长度的增大,衬砌结构拱顶的 Mises 应力及位移均会急剧增加。

4) 结合铁路天窗时间短的运营特点,新型整治方案具备可操作性和适用性,可用于后续类似隧道病害整治设计。

参考文献

[1] 李晓军,刘荆辉. 防排水系统对复合式衬砌渗透特性的影响

及表征方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(7): 995.

LI Xiaojun, LIU Jinghui. Effect of waterproof and drainage system on seepage properties of composite characterization method[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(7): 995.

[2] 鲍彤. 隧道复合式防排水系统的设计、试验及工程应用[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.

BAO Tong. Design, test and engineering application of tunnel composite waterproof and drainage system[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2021.

[3] 袁荣涛,翟人锋,陈海涛. 一种新型防水板铺挂台车在北台子隧道中的应用[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(3): 206.

YUAN Rongtao, ZHAI Renfeng, CHEN Haitao. Application of innovative waterproof board laying trolley in the Beitaizi tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(3): 206.

[4] 薛燕飞,冯爱. 三焊缝爬焊-电磁焊接隧道防水板工艺研究[J]. 铁道建筑技术, 2019(11): 97.

XUE Yanfei, FENG Ai. Study of welding technology for tunnel waterproof board with three lines welding-electromagnetic welding method[J]. Railway Construction Technology, 2019(11): 97.

[5] 李善英. 隧道宽幅防水板全断面自动铺挂施工技术[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(3): 227.

LI Shanying. Construction technology of full-section automatic laying and hanging of wide waterproof panels in tunnels[J]. Highway Traffic Science and Technology (Applied Technology Edition), 2020, 16(3): 227.

[6] 王建斌. 沪昆客专尖山隧道防排水系统设计与施工[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(1): 192.

WANG Jianbin. Design and construction of the waterproofing and drainage system for the Jianshan tunnel on the Shanghai-Kunming PDL[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(1): 192.

[7] 樊永杰. 高铁隧道拱部防水板切割衬砌缺陷整治技术[J]. 工程建设与设计, 2020(14): 91.

FAN Yongjie. Research on defect treatment technology of cutting lining by arch waterproof board of high-speed railway tunnel[J]. Construction & Design for Engineering, 2020(14): 91.

[8] 刘浩,李清. 公路隧道“防水板切割二衬”检测技术探讨[J]. 广东公路交通, 2019, 45(4): 217.

LIU Hao, LI Qing. Discussion on detection techniques for “secondary lining cut by waterproof plates” of highway tunnels[J]. Guangdong Highway Communications, 2019, 45(4): 217.

· 收稿日期:2022-09-02 修回日期:2022-12-20 出版日期:2024-10-10

Received:2022-09-02 Revised:2022-12-20 Published:2024-10-10

· 第一作者:史云飞,讲师,syunfei1987@163.com

通信作者:龚 伦,副教授,gonglun33@126.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license