

朔黄重载铁路隧道病害分析与整治

王 风¹, 高 阳²

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 014000;

2. 石家庄铁道大学 安全工程与应急管理学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:朔黄铁路沿线工程条件复杂, 因施工技术水平限制, 隧道建成之初存在衬砌不密实、空洞等病害, 运营过程中病害逐渐加重。针对朔黄铁路隧道情况, 将地质雷达法、三维激光扫描法和人工目视法相结合, 对48座隧道衬砌内部和表观病害进行调研分析, 对不同病害提出整治措施建议。研究表明, 隧道衬砌病害均为B级与C级; 衬砌内部病害拱顶、拱腰两位置病害的数量最大, 占总量70.4%; 表观病害主要为渗漏水 and 宽度5 mm以内裂纹, 占比均在90.0%以上。针对衬砌内部病害, 建议采取套拱加固、W钢带法等措施, 表观病害建议采取波纹板加固、粘贴纤维布等措施。

关键词:朔黄铁路; 隧道衬砌; 病害调研; 成因分析; 整治措施

中图分类号: U25 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2025)01-0008-07

0 引言

朔黄铁路等重载铁路隧道因地质条件复杂、施工技术手段限制等原因在建成之初就存在衬砌不密实、空洞等缺陷, 且重载铁路轴重大、牵引质量大、运输频繁, 隧道在运营过程中产生表观衬砌开裂、渗漏水等多种病害。针对隧道的病害调研、养护设备以及整治措施等研究, 越来越引起国内外学者的重视。目前隧道衬砌检测根据位置的不同分为衬砌内部检测与衬砌表观检测2大类^[1-2]。为应对重载铁路隧道中存在的各种不良地质, 如地下水、隧底空洞等情况, 采用现场试验与数值模拟相结合的方法进行研究, 对病害产生原因进行分析, 提出整治措施^[3-7], 为重载铁路隧道的安全性提供了重要依据^[8-13]。针对隧道衬砌病害的调研方法、分析手段、诱发因素、整治措施等内容, 科研人员已经有了综述性的总结归纳^[14-15]。但针对重载铁路隧道衬砌的调研, 目前尚缺乏深入的病害原因分析及整治技术研究。

通过地质雷达检测和表观检测, 对48座朔黄铁路隧道衬砌内部病害和表观病害进行调研, 分析重载铁路隧道衬砌病害的分布特征, 总结应对衬砌病害的整治措施。研究成果对于研究朔黄重载铁路隧道及其相似工程的病害分布特征和采取针对性的病害整治提供参考依据。

1 隧道衬砌病害调研方法

1.1 衬砌内部病害

地质雷达以其高分辨率、高效率和无损性等优点, 已成为隧道工程的重要检测手段之一。调研内容包括衬砌不密实和衬砌背后空洞2种病害类型。典型衬砌空洞雷达图像如图1所示。本次调研采用美国SIR-3000型地质雷达, 分别布置10条测线进行连续检测。测线分布如图2所示。

收稿日期: 2024-08-06 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxkbzrb.20240199

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2600800); 河北省高等学校科学技术研究项目(JZX2024010); 中央引导地方科技发展资金项目(226Z5405G)

作者简介: 王风(1981—), 男, 高级工程师, 研究方向为土木工程。E-mail: 286879905@qq.com

王风, 高阳. 朔黄重载铁路隧道病害分析与整治[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2025, 38(1): 8-14.

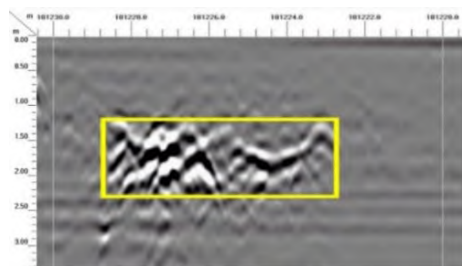


图 1 衬砌空洞雷达图像

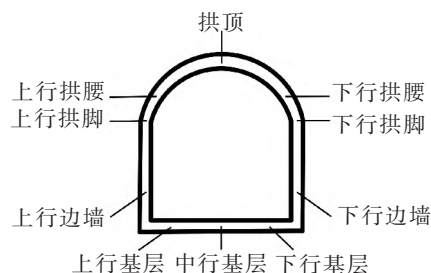


图 2 测线分布图

1.2 衬砌表面病害

表面病害调研采取三维激光扫描与人工目视 2 种方式,以激光扫描法为主要检测手段,人工目视法为辅证手段。人工目视检测方法可以发现隧道衬砌的表面病害,但具有较大主观性,容易出现误判情况,需将激光扫描同人工目视相结合。三维激光扫描检测是一种利用激光技术对隧道衬砌表面进行高精度的检测方法,使用的设备型号为 Z+F5010(STDQJ-97)。隧道衬砌三维激光扫描图像如图 3 所示。

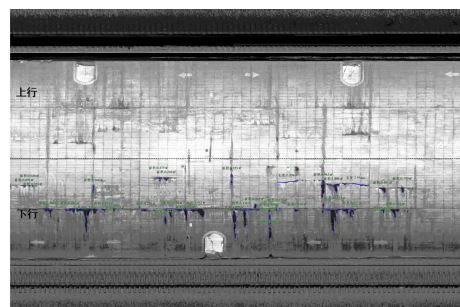


图 3 隧道衬砌三维激光扫描图像

2 隧道衬砌病害分析

2.1 衬砌内部病害分析

2.1.1 衬砌内部病害统计

依据 Q/CR405《铁路桥隧建筑物劣化评定》第 2 部分,将劣化等级分为 A 级(严重)、B 级(较重)、C 级(较轻)。调研衬砌病害以 B、C 级病害为主。重载铁路隧道病害数量统计如表 1 所示。从调研结果可看出,隧道衬砌病害主要以衬砌不密实为主,占总数 98.5%,衬砌空洞病害仅占 1.5%。隧道衬砌病害位置占比情况如图 4 所示。在所统计的病害当中,隧道脱空及不密实缺陷在拱顶部位所占比例最大,其次为拱腰部位,边墙部位基本存在情况较少。病害的长度也存在明显差异,隧道病害长度分布比例如图 5 所示。

表 1 重载铁路隧道病害数量统计表

病害类型	病害等级	
	B 级	C 级
衬砌不密实	376	1 750
衬砌空洞	21	11

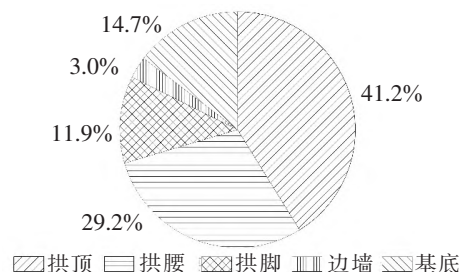
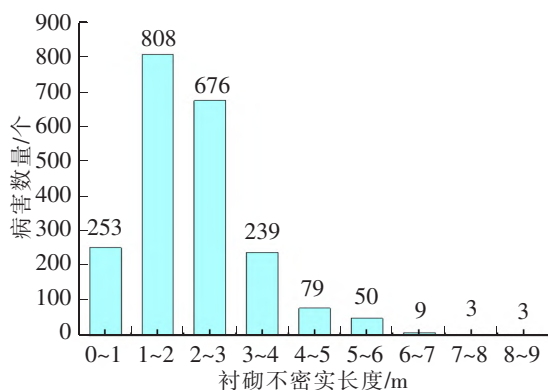
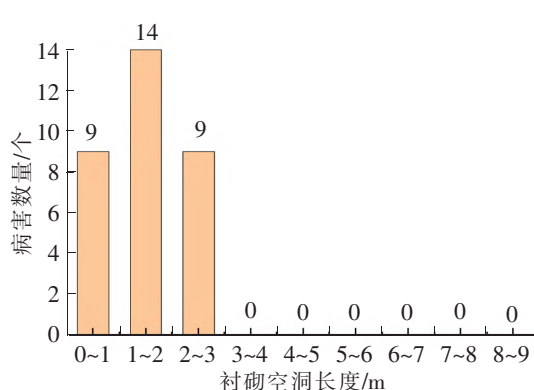


图 4 隧道衬砌病害位置占比情况图



(a)隧道衬砌不密实长度分布比例图



(b)隧道衬砌空洞长度分布比例图

图 5 隧道病害长度分布比例图

隧道病害数据中衬砌不密实病害数量占总数的 98.5%,因此仅将不密实病害的尺寸做统计。所得各位置不密实病害形态特征统计结果如表 2 所示。衬砌不密实病害的尺寸分布形态基本呈正态分布,隧道衬砌不密实病害主要集中在 1~4 m 处,最大值为 9 m。衬砌空洞病害主要集中在 1~3 m 处,最大值为 3 m。

表 2 各位置不密实病害形态特征统计结果表

位置	最大值/m	最小值/m	均值 μ	标准差 σ	变异系数 $\delta/\%$
拱顶	9	0.5	2.84	1.22	42.8
拱腰	8	1.0	2.75	1.18	42.9
拱脚	6	1.0	2.44	1.05	43.2
边墙	6	1.0	2.51	1.13	45.2
基底	9	0.5	2.17	1.02	46.9

2.1.2 病害分布规律分析

病害等级统计表明,病害等级均为 B 级和 C 级。依据 Q/CR405《铁路桥隧建筑物劣化评定》手册,C 级病害要利用天窗期正常维护检修,B 级病害要根据病害特征及时采取适当加固措施。未发现 A 级病害,但要对 B 级病害加强监测力度,避免其发展为 A 级。病害位置统计表明,隧道衬砌拱顶、拱腰两位置出现病害的数量之和占到病害总量的 70.4%,边墙出现病害数量占比仅为 3.0%。由于拱顶空间有限,对高空作业技术要求较高,在拱顶位置易出现施工质量差。病害类型统计表明,隧道病害类型以衬砌不密实为主。目前衬砌发生一定程度劣化,还未出现大范围空洞情况,整体安全情况可控。

2.2 衬砌表观病害分析

2.2.1 衬砌表观病害统计

隧道衬砌表观调研内容包括衬砌表面裂纹和渗漏水 2 种病害。裂纹大多分布在拱顶拱腰位置,边墙处基本无裂纹,故未统计裂纹所在位置分布情况。隧道衬砌裂纹情况如表 3 所示。隧道衬砌的裂纹大多为 5 mm 以下,即较严重及以下等级。裂纹数量占比 99.5%,裂纹长度占比 99.0%。经衬砌渗漏水病害统计,共检测出 612 处衬砌渗水,占比 91.9%,54 处衬砌滴水,占比为 8.1%。隧道衬砌渗漏水分布情况如表 4 所示。

表 3 隧道衬砌裂纹数量与长度分布表

裂缝宽度/mm	数目/处	长度/m
<5	8 014	61 655.5
≥ 5	37	604.2

表 4 隧道衬砌渗漏水情况分布表

病害类型	拱顶	拱腰	拱脚	边墙
渗水	120	270	14	208
滴水	39	12	0	3

衬砌渗水病害位置分布饼状图如图 6 所示,滴水病害的数量占比极少,故未进行衬砌滴水病害位置分布分析。衬砌渗水情况在拱腰位置分布最广,其次为边墙位置,拱脚位置的渗水情况分布最少,仅为 2.3%。

2.2.2 病害分布规律分析

衬砌表观病害统计表明,裂纹病害以宽度 5 mm 以内的占据了绝大部分,占比 99.0% 左右,衬砌渗漏水病害以程度较轻的渗水为主,占比 90.0% 以上。拱腰和边墙的渗水病害分布最多。由于拱顶位置的渗漏水会在冬季形成挂冰,若触及供电接触网的带电设备,将严重影响供电和行车安全。因此拱顶位置的渗漏水病害会及时治理,消除安全隐患。故调研中渗漏水病害的数量在拱顶位置少于拱腰和边墙位置。

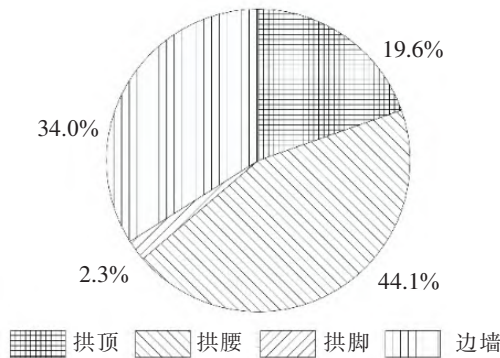


图 6 衬砌渗水病害位置分布图

3 病害成因及其整治措施

3.1 病害成因

3.1.1 衬砌不密实成因

(1)施工质量。在使用输送泵时,可能发生拱顶混凝土输送过程中把部分空气留在狭小空间内未排出,造成衬砌结合面不密实。喷射混凝土时表面平整度超标,导致表面凹凸不平现象,铺挂防水板时保留空间过大,与混凝土表面无法紧密贴合,导致初支二衬之间存在空隙。因拱顶位置施工难度较高,故更易出现较多衬砌不密实和空洞病害现象,而喷射混凝土在凝固过程中会产生流动,致使拱顶位置更容易出现衬砌厚度不足和空洞不密实病害,所以病害调研中拱顶位置病害远多于其他位置。

(2)地质原因。在运营期地下水位的上升或下降以及围岩的层间运动等地质原因会对隧道衬砌产生影响,导致原本紧密的衬砌结构松动或产生空隙。

3.1.2 隧道衬砌背后空洞成因

(1)施工质量。在施工期衬砌浇筑工艺不正确,导致混凝土不饱满;初支平整度差、防水层紧绷致使松弛度过小,导致防水层后形成空洞;混凝土配合比不符合要求,导致混凝土干缩造成二次衬砌与初支间有空隙。

(2)地下水侵蚀。当隧道周围地层存在地下水时,地下水通过孔隙或裂缝渗入衬砌,如果地下水中含有溶解性物质,随着水分的深入和蒸发,这些物质会在衬砌背后形成空洞。

3.1.3 衬砌裂缝成因

(1)施工质量。施工工艺和质量没有得到严格把控,很容易引起混凝土衬砌开裂。比如混凝土浇筑不均匀、浇筑后养护环境过于干燥、养护时间不够过早承压等原因。

(2)荷载作用。在列车荷载和结构自重共同影响下,衬砌受弯凹起,使内缘拉应力超过了混凝土的极限抗拉强度,从而出现张开型裂缝。

(3)围岩分布不均。由于隧道两侧衬砌的外部围岩分布情况不均匀,使两侧衬砌受到较大的水平推力,造成偏压情况,导致隧道两侧衬砌因承受剪切力而出现滑开型裂缝;局部存在松动围岩或软弱围岩的情况下,围岩发生变形,导致隧道衬砌某一侧变形突出,造成错台时易发生撕开型裂缝。衬砌裂缝病害现场如图7所示。



图7 衬砌裂缝病害现场图

3.1.4 衬砌渗漏水成因

(1)施工质量。在施工期间,发生注浆加固不当、排水条件较差、施工缝处理不当或止水带外露等问题时,都会导致隧道衬砌发生渗漏水情况。

(2)地质条件。当隧道穿过地层含水层或含水层上方的不透水地层时,地下水可能渗透进入隧道,导致衬砌渗漏水。

(3)既有裂缝和缝隙。衬砌中存在裂缝和缝隙可能会导致渗漏水病害,水可以通过这些裂缝进入衬砌渗透到隧道内部,最终从衬砌表面渗出。病害调研中裂缝宽度绝大部分在5 mm以内,故调研发现大多为渗水病害,很少发生滴水情况。衬砌渗水病害现场如图8所示。

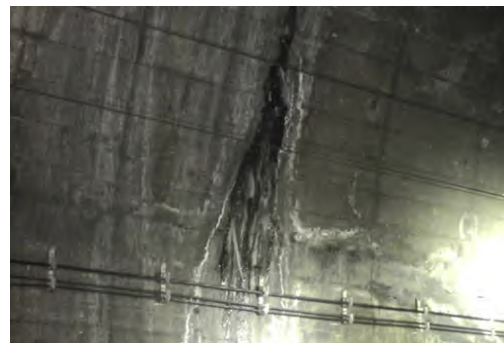


图8 衬砌渗水病害现场图

3.2 病害整治措施

本文仅针对朔黄铁路调研中存在的病害情况,结合实际环境条件,提出一部分较为适用的整治建议。

(1)钻孔注浆法。针对不太严重的衬砌背后空洞或不

密实情况以及存在软弱围岩时,可采取钻孔注浆法。采用强度高、耐久性好、黏结性好的材料。注浆施工工艺主要包括工前准备、钻孔施工、注浆施工 3 个关键步骤。在注浆过程中必须随时检查浆液情况,控制好浆液水灰比、注浆压力、注浆量等关键内容。钻孔注浆法现场如图 9 所示。

(2)灌注填充法。对衬砌表面存在裂缝的位置进行修复工作。修复方法一般采取灌注高渗透性环氧浆材或填充砂浆等方式。根据衬砌病害的具体情况,选择合适的修复材料,以确保衬砌结构安全性。

(3)套拱加固法。衬砌套拱的加固方式分为很多种,主要包括叠合式套拱加固、复合式套拱加固、钢筋混凝土套箍封闭主拱圈加固、双曲拱桥复合套拱加固、喷射混凝土套拱加固等,这些加固方式各有特点,可以根据具体隧道衬砌内部病害情况和工程条件进行选择。套拱加固对衬砌不密实或空洞病害的整治非常有效,且施工质量容易控制。但套拱结构因其结构面较大,可能会对隧道净空产生影响,在使用时要注意。

(4)钢拱架加固法。钢拱架加固法因成本低、施工便利、安全性和适应性强等特点,在隧道结构的加固中得到广泛应用。通过合理的设计和施工可以有效通过增加结构刚度和承载力来提高其安全性,适用于多种类型的隧道结构,但后期需要更多的维护工作以保持其加固效果。钢拱架加固法现场如图 10 所示。

(5)波纹板加固法。波纹板强度高、整体性好,主要用于解决隧道衬砌裂纹和渗漏水病害,可达到较好整治效果。施工过程主要包括定位放线、施作基础、安装固定导向架、拼装波纹板、螺母紧固、衬砌连接、注浆等。但波纹板具有运输困难,且施工流程复杂、进度缓慢、造价较高等缺点,必须根据病害演化情况考虑是否使用。波纹板加固法现场如图 11 所示,其整治效果显著,可维护性好,结构美观。

(6)W 钢带加固法。当隧道衬砌存在不密实、空洞病害时,可以采用 W 钢带法对隧道衬砌结构进行加固和补强。隧道衬砌裂纹病害情况较复杂和严重时,也可采用此法加固处理,以提高隧道衬砌整体结构的强度,避免因裂纹而导致衬砌承载力下降。W 钢带加固法在隧道衬砌结构加固中应用广泛,能提高隧道衬砌结构整体的承载能力,保证衬砌结构安全储备。其主要施工过程包括施工准备、拉槽、定位钻孔及安设锚钉、安装 W 钢带、挂网及喷射微纤维混凝土几个主要步骤。W 钢带加固法现场如图 12 所示。



图 9 钻孔注浆法现场图



图 10 钢拱架加固法现场图



图 11 波纹板加固法现场图



图 12 W 钢带加固法现场图

(7) 粘贴纤维布法。粘贴纤维布法主要用于整治隧道衬砌渗漏水情况,且可以对衬砌局部进行补强。在使用时,首先要确定衬砌渗漏水的位置和程度,然后根据病害特点选择合适的纤维材料,就可以进行工前准备,对衬砌表面进行清洁,随后均匀涂抹黏结剂,粘贴纤维布,最后进行固化和养护,以达到整治效果,施工完成后,还要定期进行检查和维护,使其保持修复效果。

将以上整治措施进行归纳,根据其不同的适用性、作用、特点等,形成病害整治措施汇总如表 5 所示。

表 5 病害整治措施汇总表

整治措施	适用病害	作用或特点	优点	缺点
钻孔注浆法	不密实,空洞	通过在隧道衬砌中钻孔并注入浆液,利用浆液填充,以达到加固和改善围岩的目的	加固效果显著,经济效益好	施工质量难以控制
灌注填充法	裂缝	有效填充隧道衬砌背后的空洞和表面的裂缝,提高隧道的整体稳定性和安全性	适用性强,施工灵活,经济效益好	施工质量难以控制
套拱加固法	不密实,空洞	套拱加固的方式多样,根据具体病害情况和工程条件选择合适方式	施工质量容易控制	结构面较大
钢拱架加固法	裂缝,衬砌掉块	提高隧道衬砌的承载能力和稳定性。通过与衬砌共同受力,显著减少衬砌变形量	施工便捷,显著提高承载能力	占用隧道净空,需长期维护
波纹板加固法	裂缝,渗漏水	能有效解决衬砌的开裂、渗漏水、剥落等复杂病害,提高隧道结构安全性和稳定性	效果显著,可维护性好,结构美观	运输困难,施工流程复杂,造价较高
W 钢带加固法	不密实,空洞,裂缝	在隧道衬砌加固中应用广泛,提高隧道结构整体承载能力,保证衬砌结构安全储备	施工简便,经济实用,加固效果明显	无法应对复杂的地质条件或结构问题
粘贴纤维布法	渗漏水	用于需要快速修复和局部补强的场合,但需要考虑到成本和工程条件的适用性	抗拉性能优异,施工便捷,轻质高强	成本较高,延展性不足

4 结论

通过地质雷达和表观检测 2 种方式,对 48 座朔黄铁路隧道衬砌内部和表观病害进行了调研分析。针对朔黄铁路隧道衬砌病害分布特征,结合实际工程条件,总结了适用的整治措施,主要结论有以下几点:

(1) 衬砌内部存在较轻程度劣化,未出现大范围空洞情况。病害等级均为 B 级和 C 级,无 A 级病害,各级病害应按照规定手册采取对应维护措施。衬砌不密实和空洞病害在拱顶和拱腰位置存在最多,占到病害总量的 70.4%,边墙出现病害数量最少,占比约为 3.0%。这是由于隧道建设期施工技术水平偏低造成的。

(2) 衬砌表观病害主要为较轻的渗水和宽度 5 mm 以内裂纹,占比均在 90.0% 以上,表明衬砌表面发生劣化程度不高,后续仍需加强隧道检测工作。裂纹病害大部分出现在拱顶和拱腰位置。渗漏水病害出现在拱腰和边墙的位置最多,占总渗漏水统计病害比值达到 78.1%,这与两处位置复杂的地质情况相关。

(3) 衬砌内部病害(衬砌不密实和空洞病害)与施工期质量不高、地质条件、地下水等问题有关。整治措施建议采用钻孔注浆、套拱加固、W 钢带加固法等。衬砌表观病害(裂纹和渗漏水病害)与施工期质量不高、列车荷载、地质条件等原因有关。整治措施建议采用灌注填充、波纹板加固、粘贴纤维布法等。

参 考 文 献

[1]HUANG Z, ZHANGG C, FU H, et al. Machine inspection equipment for tunnels: A review[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition), 2021, 15(2): 40-53.

[2]王勇,安哲立,马伟斌,等. 中日韩运营铁路隧道检测技术现状及发展趋势[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(7): 1135-1145.

- [3]李玉玺. 铁路隧道衬砌背后脱空及厚度不足整治方案探究[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(增刊1): 122-127.
- [4]赵鹏. 基于钢垫梁临时架空结构的铁路隧道基底托换整治技术及应用[J]. 铁道建筑, 2024, 64(4): 79-84.
- [5]胡晓. 地质雷达法与冲击回波法在铁路隧道衬砌质量检测中的综合运用[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(增刊1): 187-191.
- [6]张智慧, 宗志刚, 张宏荀. 提高电气化铁路运营隧道衬砌质量无损检测结果有效性的方法[J]. 铁道建筑, 2023, 63(6): 99-103.
- [7]王少瑜, 宋国华, 冯乾宽, 等. 铁路隧道衬砌表面裂缝快速检测技术[J]. 铁道建筑, 2023, 63(1): 92-95.
- [8]张金存, 刘乃康, 林棋文. 下伏煤层对既有重载铁路隧道安全性的影响[J]. 铁道建筑, 2024, 64(5): 108-113.
- [9]WANG D, LUO J, LI F, et al. Research on dynamic response and fatigue life of tunnel bottom structure under coupled action of train load and groundwater[J/OL]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 161: 107405 [2024-08-06]. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107405>.
- [10]刘聪, 龚志彪, 沙珉, 等. 基底空洞条件下重载铁路硬岩隧道铺底结构动力响应[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(12): 4667-4677.
- [11]刘迎春, 覃晖. 隧道壁后空洞检测的探地雷达试验[J]. 实验室研究与探索, 2022, 41(1): 53-56.
- [12]张敬雷. 钻芯法和回弹法检测隧道衬砌混凝土强度的相关性[J]. 铁道建筑, 2022, 62(9): 108-110.
- [13]暴学志. 隧道衬砌背后空洞自动敲击检测装置的研发[J]. 铁道建筑, 2022, 62(11): 99-102.
- [14]刘德军, 仲飞, 黄宏伟, 等. 运营隧道衬砌病害诊治的现状与发展[J]. 中国公路学报, 2021, 34(11): 178-199.
- [15]黄俊, 张顶立, 梁文灏, 等. 服役期隧道结构安全控制技术研究综述[J]. 铁道标准设计, 2024, 68(4): 1-19.

Analysis and Remediation of Tunnel Diseases of Shuohuang Heavy Haul Railway

WANG Feng¹, GAO Yang²

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 014000, China;

2. School of Safety Engineering and Emergency Management,

Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The engineering conditions along the Shuohuang Railway are complex. Due to the limitation of construction technology, there are defects such as uncompacted lining and voids at the beginning of tunnel construction, and the defects gradually worsen during operation. In response to the situation of the Shuohuang railway tunnel, the geological radar method, three-dimensional laser scanning method and artificial visual method were combined to investigate and analyze the internal and apparent defects of the linings of 48 tunnels, and suggestions for remediation measures were put forward for different defects. The research shows that the tunnel lining defects are grade B and grade C; The number of defects in the vault and haunch of the lining is the largest, accounting for 70.4% of the total; The apparent defects are mainly water leakage and cracks within 5 mm width, accounting for over 90.0%. For the internal defects of the lining, it is recommended to take measures such as arch reinforcement and the W steel strip method. The apparent defects are recommended to take measures such as corrugated plate reinforcement and pasting fiber cloth.

Key words: Shuohuang Railway; lining of the tunnel; defect research; cause analysis; remediation measures