

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.02.010

某超长隧道病害段衬砌破坏特征及加固措施研究

吴建臻

(福建农业职业技术学院, 福建 福州 350007)

摘要: 为研究病害隧道衬砌结构在运行期间的受力性能,以某一衬砌剥落及渗水病害隧道为工程背景,运用 midas GTS 建立工况 1(正常隧道)与工况 2(病害隧道)隧道有限元模型,系统分析了在渗水压力与车辆荷载耦合作用下,围岩与支护结构的位移及应力变化规律,并针对不同病害提出相应加固措施。结果表明:与正常隧道相比,病害隧道变形显著,拱底与拱顶分别增大约 4.901 mm 与 3.851 mm,左右拱脚横向位移增大约 2.210 mm 与 2.355 mm;病害状态下围岩与初支应力水平普遍上升,围岩应力最大增大了 0.198 MPa,初支压应力最大增加约 1.357 MPa,且初支高应力区发生转移;施工便道下方拱顶区域为围岩最大位移、应力集中区及初支应力峰值区,与实际病害位置相符,说明渗水压力与车辆荷载是引起衬砌破坏的关键因素;提出的衬砌结构加固方案经计算使最不利截面处的安全系数由修复前的 1.324 提升至 3.130,该措施能有效增强结构的刚度,提高隧道结构安全储备。

关键词: 衬砌剥落;渗水病害;水压力;车辆荷载;有限元;衬砌加固

中图分类号: U457.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)02-0069-07

Failure Characteristics and Reinforcement Measures for the Lining of a Disease-affected Section in an Extra-long Tunnel

WU Jianzhen

(Fujian Vocational College of Agriculture, Fuzhou, Fujian 350007, China)

Abstract: In order to analyze the mechanical performance of the lining structure of a diseased tunnel during operation, a tunnel with lining spalling and water seepage was taken as the engineering background. The finite element models of Condition 1 (normal tunnel) and Condition 2 (diseased tunnel) were established using midas GTS. The displacement and stress variation laws of the surrounding rock and supporting structure under the coupling effect of seepage pressure and vehicle load were systematically analyzed, and corresponding reinforcement measures were proposed for different types of defects. The results show that compared with the normal tunnel, the deformation of the diseased tunnel is significant, with increases of approximately 4.901 mm in arch bottom uplift and 3.851 mm in vault settlement, and lateral displacements of the left and right arch feet increased by about 2.210 mm and 2.355 mm, respectively. Under diseased conditions, the stress levels of the surrounding rock and initial support generally increase, with the maximum increase in surrounding rock stress reaching 0.198 MPa and the maximum increase in initial support compressive stress being about 1.357 MPa. Moreover, the high-stress zone of the initial support shifts. The vault area beneath the construction access road is identified as the zone of maximum displacement and stress concentration in the surrounding rock, as well as the peak stress zone in the initial support, consistent with the actual defect locations. This indicates that seepage pressure and vehicle load are key factors causing lining failure. The proposed reinforcement scheme for the lining structure, as calculated, increases the safety factor at the most unfavorable section from 1.324 before repair to 3.130 after repair. This measure effectively enhances structural stiffness and improves the safety reserve of the tunnel structure.

Keywords: lining spalling; water leakage disease; water pressure; vehicle load; finite element method; lining reinforcement

收稿日期:2025-11-16

修稿日期:2025-12-28

基金项目:福建省自然科学基金项目(2024J01356)

作者简介:吴建臻(1989—),男,硕士,讲师,工程师,主要从事工程抗震、工程安全与结构健康监测、工程加固等方面工作。

E-mail:wujianzhen@fjny.edu.cn

隧道衬砌结构作为隧道的重要组成部分,承担着支撑围岩、控制变形、防水防渗以及保证隧道安全和耐久性关键作用,其性能的优劣直接关系到隧道的正常使用和运营安全^[1-2]。

目前,关于隧道衬砌的研究多集中于其结构受力性能、病害分析与加固方面。吴建良等^[3]通过建立施工隧道有限元模型,研究了无中导洞连拱隧道施工过程中先行洞衬砌开裂问题。易杰等^[4]以某在役衬砌裂损的铁路隧道为工程背景,通过建立隧道有限元模型,研究隧道脱空区域的衬砌结构受力特性与裂损机理。结果表明,衬砌壁后脱空的环向角度对结构受力状态影响显著。张志恩等^[5]以某实际隧道工程为研究背景,通过推导隧道衬砌外水压力计算公式,分析排水盲管的排水能力、注浆圈厚度和注浆圈抗渗性等因素对衬砌外水压力的影响。陈相^[6]、刘德军等^[7]对隧道衬砌结构内部的三维损伤演化规律与整体失效机制进行了探讨总结。赵东平等^[8]以某隧道的无仰拱衬砌为例,研究了此类衬砌的内力计算。王翔^[9]利用 ABAQUS 建立了 5 种不同工况的隧道衬砌脱空数值模型,研究衬砌脱空作用范围及隧道受力情况。在隧道衬砌病害研究方面,姚湘静等^[10]通过收集大量的隧道二次衬砌裂缝病害案例,得出可靠性较高的隧道衬砌裂缝病害成因排序。侯斐斐等^[11]针对探地雷达(GPR)实测数据采集不便、目标识别困难等难题,提出一种基于深度的神经网络小样本学习算法,对脱空、不密实、空洞三种隧道衬砌病害的 GPR 图像进行分类,为隧道病害检测提供一种高效准确的智能识别与诊断方法。在衬砌结构加固方法研究方面,周勇等^[12]采用试验与 ABAQUS 数值模拟结合的方法,对比分析聚合物基修补材料与玻璃/碳纤维布对钢筋混凝土拱衬砌裂缝修复加固效果。文竞舟等^[13]使用荷载-结构法建立衬砌数值模型,分析衬砌厚度不足、混凝土劣化与背后空洞多病害耦合作用下衬砌截面安全系数的变化规律,并探讨采用不同厚度钢带加固后衬砌的安全性能。

上述研究大多集中在隧道衬砌基础病害产生机理、检测与分析方面,针对隧道衬砌剥落及渗水状态下的运营工况及内力分析的相关研究较少。本文以实际工程为背景,运用 midas GTS 建立正常隧道与病害隧道三维有限元模型,通过对比围岩与支护结构的位移及应力变化规律,系统揭示衬砌结构的破坏特性,并针对不同病害类型提出了合理的加固措施。研究结果可为类似病害隧道的安全评估与修复

加固提供理论依据和工程参考。

1 工程概况

1.1 项目背景

某一双向四车道高速公路隧道,全长 816 m,设计速度为 100 km/h。隧道洞门采用端墙式设计,纵坡为人字坡,最大坡度 2.8%,如图 1 所示。隧道地层由上而下依次为:全风化、微风化、未风化流纹质晶屑凝灰熔岩,最大埋深约 140 m,土层构造复杂,容易发生渗水病害。隧道进口洞上方有一施工便道,重载车辆行走震动对隧道受力均有一定影响。



图 1 隧道洞口

1.2 隧道现状

对隧道进行现场巡查时发现隧道出口附近出现衬砌剥落、裂缝及渗水等病害,如图 2 所示,病害区段集中在 BK2084 + 380—BK2084 + 400 桩号范围内,总长达 20 m,前 10 m 的明洞段为厚度 100 cm 的钢筋混凝土 E 型衬砌结构,后 10 m 为素混凝土的 C 型衬砌结构,围岩等级为 IV 级,具体构造如图 3 所示。主要病害分析结果如下:

(1) 隧道二衬混凝土出现纵向裂缝 2 条,总长 14 m;横向裂缝 2 条,总长 7 m;斜裂缝 3 条,总长 7 m;二衬混凝土出现浸渗 4 处,总面积为 6.55 m²;混凝土剥落 2 处,总面积 34.5 m²,具体如图 4 所示。

(2) 隧道剥落区域内的衬砌混凝土芯样推定强度为 20.5 MPa,小于设计强度 25 MPa,且衬砌混凝土与隧道支护脱空严重。

(3) 隧道剥落区域内的衬砌混凝土损伤较深,边墙损伤厚度为 40.63 mm,拱顶损伤厚度为 75 mm。



图 2 隧道渗水、衬砌剥落缺陷近照

数汇总如表 3 所示。

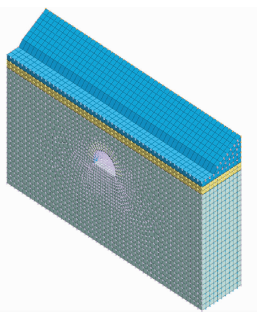


图 7 模型施加粘弹性边界

表 3 粘弹性边界参数

单位面积阻尼常数/($\text{MN} \cdot \text{m}^{-3}$)		单位面积刚度系数/($\text{MN} \cdot \text{m}^{-3}$)							
		左边界		右边界		下边界		前后边界	
法向	切向	法向	切向	法向	切向	法向	切向	法向	切向
8.8	5.4	237.5	119.6	182.5	91.9	534.4	269.2	748.1	376.9

隧道结构中水压力是以体积力的方式作用于地下水水位以下的整个空间,包括围岩和衬砌^[15],本模型未考虑渗流-应力耦合效应,这意味着无法精确模拟渗流导致的局部孔隙水压力变化及其对围岩有效应力的影响,这种简化使模型在局部精细化分析上存在不足。根据《公路路基设计规范》^[16](JTG D30—2015),对渗水影响范围内的围岩力学参数取 0.8 的折减系数。模型施加水压力如图 8(a)所示。根据现场车辆调研,为模拟隧道上方施工便道多辆重载车通行产生的不利振动效应,鉴于其荷载特性与列车荷载相似,参照《铁路列车荷载图式》^[17](TB/T 3466—2016),计算车辆震动荷载,模型施加车辆震动荷载如图 8(b)所示。重载系数取 1.20,车荷载节点间距取 2 m,汽车时速取 20 km/h,计算时长为 3.6 s,时间增量为 0.072 s,计算步长为 50 步。荷载时程曲线如图 9 所示。

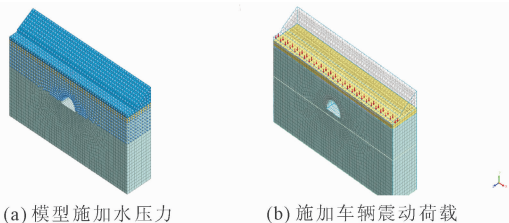


图 8 模型荷载施加

3 衬砌破坏特征分析

3.1 围岩位移结果对比

两种工况下围岩 Y 向(竖向)位移云图对比如

图 10(A)所示,二者位移最大值都发生在拱顶及拱底部位,工况 1 围岩拱顶下沉 0.281 mm,拱底上抬 0.322 mm;工况 2 围岩拱顶下沉 4.132 mm,拱底上抬 5.223 mm。围岩 X 向(横向)位移云图对比如图 10(B)所示,位移最大值发生于左、右拱脚部位,工况 1 位移最大值分别为 -0.054 mm、0.050 mm;工况 2 位移最大值分别为 -2.264 mm、2.405 mm。

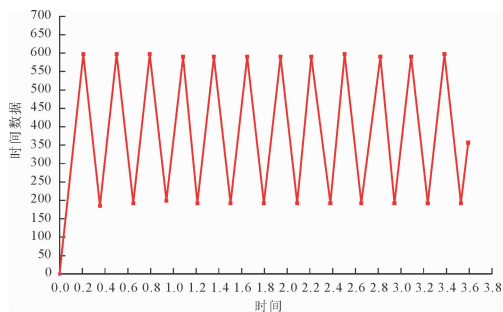


图 9 荷载时程曲线

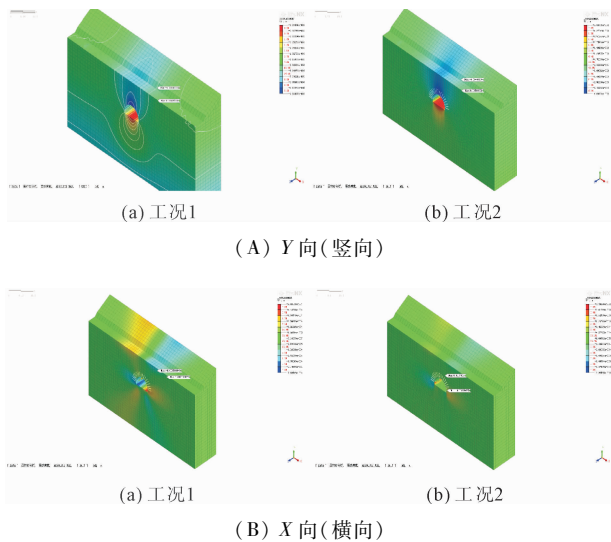


图 10 围岩位移云图对比

两种工况围岩位移计算结果对比表明,病害隧道围岩的竖向与横向位移较正常隧道均显著增大。其中,拱底上抬位移增大了 4.901 mm,拱顶下沉位移增大了 3.851 mm;横向位移方面,左、右拱脚位移分别增大了 2.210 mm 与 2.355 mm,且位移最大值区域与实际病害隧道混凝土浸渗区域相吻合。

工况 2 隧道车辆震动荷载作用下拱顶及右边墙(混凝土浸渗区域)围岩位移随时间变化曲线如图 11 所示,围岩位移随着车辆荷载的循环加载发生波动变化,在约 0.90 s 时位移发生最大值,拱顶最大位移为 -3.228 mm,右边墙最大位移为 -1.031 mm,位移最大值位置在实际病害隧道拱顶裂缝位置附近。

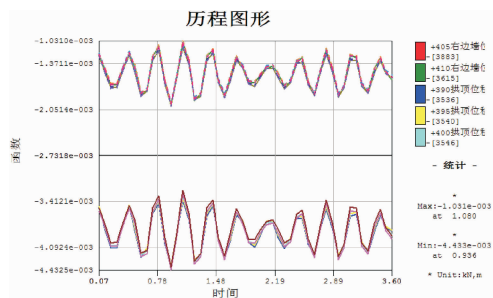


图 11 工况 2 隧道拱顶及右边墙竖向位移随时间变化曲线

3.2 围岩应力结果对比

两种工况的围岩第一主应力对比如图 12(A) 所示, 工况 1 最大值为 0.104 MPa, 最小值为 -0.409 MPa; 工况 2 最大值为 0.146 MPa, 最小值为 -0.501 MPa; 围岩第二主应力云图对比如图 12(B) 所示, 工况 1 最大值为 -0.013 MPa, 最小值为 -1.980 MPa; 工况 2 最大值为 0.131 MPa, 最小值为 -1.782 MPa; 隧道围岩第三主应力云图对比如图 12(C) 所示, 工况 1 最大值为 0.023 3 MPa, 最小值为 -0.582 MPa; 工况 2 最大值为 0.140 MPa, 最小值为 -0.850 MPa。

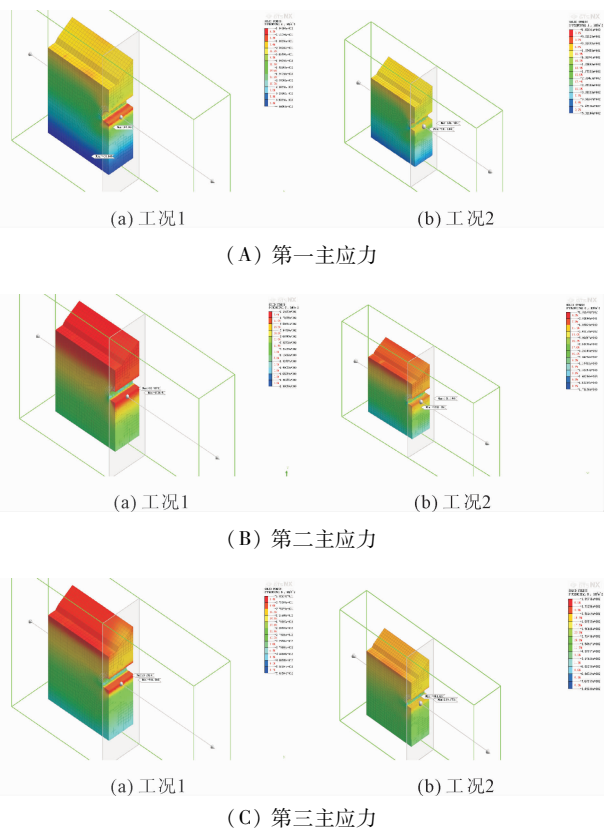


图 12 围岩主应力云图对比

综合分析, 病害隧道围岩应力状态发生显著改变。与正常隧道相比, 病害隧道围岩各主应力极值

均呈现增大趋势: 第一主应力最大增大了 0.092 MPa; 第二主应力最大增大了 0.198 MPa; 第三主应力最大增大了 0.268 MPa。

3.3 支护应力结果对比

隧道初支板单元初支最大主应力对比如图 13(A) 所示。工况 1 最大值为 -0.037 2 MPa, 最小值为 -0.736 MPa; 工况 2 最大值为 -0.018 6 MPa, 最小值为 -0.981 MPa。隧道初支板单元初支最小主应力对比如图 13(B) 所示。工况 1 最大值为 -0.988 MPa, 最小值为 -3.790 MPa; 工况 2 最大值为 -1.366 MPa, 最小值为 -5.147 MPa。

对比结果表明, 病害隧道的初支结构的应力状态变化显著。最大主应力的变化幅值最大为 0.245 MPa; 最小主应力的变化幅值最大为 1.357 MPa, 且高应力区位置发生转移, 左右拱脚应力增大。

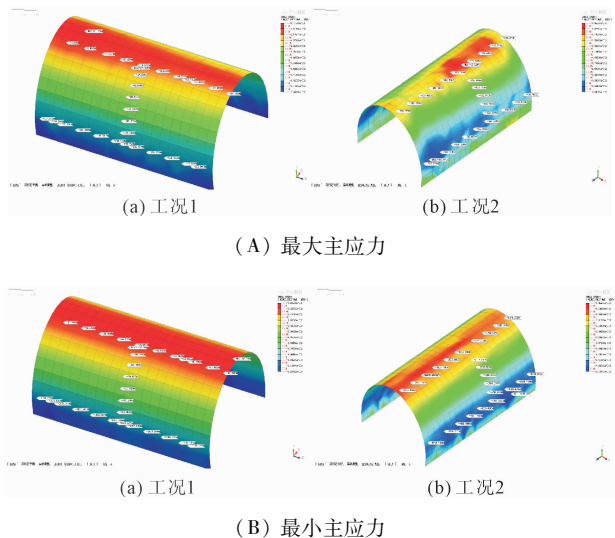


图 13 初支板单元初支最大最小主应力云图对比

工况 2 衬支板单元不同位置最大主应力随时间变化曲线如图 14 所示, 可知初支应力随着车辆荷载的循环加载发生波动变化, 最大值为 -1.148 MPa, 在施工便道下方的拱顶位置。

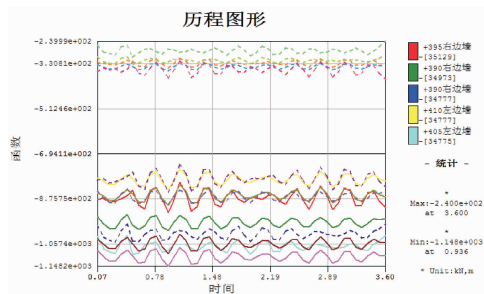


图 14 工况 2 初支不同位置最大主应力随时间变化曲线

4 衬砌修复与施工方法

4.1 衬砌修复方法分析

综合分析,根据规范《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》^[14](JTG 3370.1—2018)对两个隧道的衬砌安全系数 K 进行计算:

$$KN \leq \varphi a R_a b d \quad (1)$$

$$KN \leq \varphi \frac{1.75 R_1 b d}{\frac{6e_0}{d} - 1} \quad (2)$$

式中: K 为安全系数; N 为轴向力,kN; φ 为构件纵向弯曲系数,对于隧道衬砌,可取 $\varphi = 1$; a 为轴力偏心影响系数; R_a 为混凝土或砌体的抗压极限强度,MPa; R_1 为混凝土的抗拉极限强度,MPa; b 为截面宽度,m; d 为截面厚度,m; e_0 为轴向力偏心距, $e_0 = M/N$, M 为弯矩。

轴力偏心影响系数 a 计算式为:

$$a = 1.000 + 0.648 \left(\frac{e_0}{d} \right) - 12.569 \left(\frac{e_0}{d} \right)^2 + 15.444 \left(\frac{e_0}{d} \right)^3 \quad (3)$$

当偏心距 $e_0 < 0.2d$ 时,按式(1)计算;反之按式(2)计算。

工况 1 的衬砌安全系数为 3.330,工况 2 的衬砌安全系数为 1.324,小于设计要求值 2.0,为保证隧道的安全运营及结构安全性,需对衬砌进行加固处理。针对不同病害拟采用不同的修复方式,包括套拱加固、封闭裂缝和开槽引流等修复措施,具体病害处置方案如表 4 所示。

表 4 病害分类及处治方案

序号	病害描述	处治设计
1	涉及结构安全的衬砌剥落区域及裂缝密集段落	套拱修复
	拱顶裂缝 $W \geq 0.5 \text{ mm}$	开槽埋管灌浆
2	不影响结构安全的裂缝	斜向 45°埋管注浆
	边墙裂缝 $W \geq 0.5 \text{ mm}$	
	$0.2 \text{ mm} < W < 0.5 \text{ mm}$	恒压灌浆法
	$W \leq 0.2 \text{ mm}$	封闭胶
3	无其他缺陷叠加的渗水缺陷	开槽埋管引水

4.2 套拱修复

针对涉及结构安全的衬砌剥落区域和裂缝密集段落,采用套拱加固修复方案能够大大提高结构的安全储备,有效减缓混凝土劣化,如图 15 所示,主要

施工步骤如下:

(1) 施工准备与基面处理:核查隧道断面净空,拆除影响施工的机电设施并保护预埋件,清除二衬表面附着物。凿除拱脚区域衬砌及边沟侧墙,重新模筑边沟结构。

(2) 界面处理与植筋增强:采用自动凿毛机对原二衬表面进行凿毛处理,确保接触面凹凸差不低于 0.6 mm。随后在衬砌表面钻孔,植入深度 20 cm 的除锈 $\varphi 16$ 螺纹钢筋,增强新旧混凝土粘结性能。

(3) 钢支撑系统安装:架设 I16 钢拱架,并在拱架间布设连接钢筋网,形成整体受力骨架。

(4) 高强砂浆喷射施工:自拱脚向上单侧分段喷射厚度约 20 cm 的高强砂浆。待该侧砂浆达到设计强度后,转换交通封闭区间,完成另一侧作业。

(5) 拱顶封闭与最终成型:对拱顶范围 2 m 宽区段实施临时交通封闭,完成该区域砂浆喷射,最终形成整体复合衬砌结构。

对套拱加固段落外的小范围衬砌剥落区采取凿除表面损伤剥落区,再喷射高强砂浆的修复方式,具体措施如图 16 所示。

套拱加固前后隧道结构关键指标对比分析如表 5 所示,数值模拟结果表明,加固后隧道各项关键指标都有所改善,最不利截面处(施工便道下方)的安全系数由修复前的 1.324 提升至 3.130,表明衬砌加固方案能够有效增强结构的刚度,提高隧道安全储备,针对病害有较好的效果。

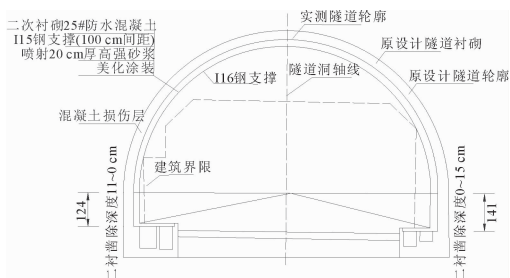


图 15 喷射高强砂浆套拱加固图示(单位:cm)

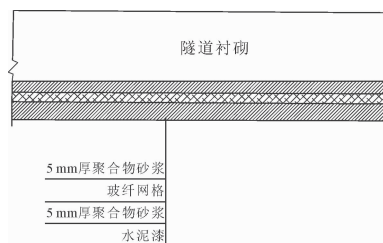


图 16 小范围衬砌剥落区加固方式

表 5 套拱加固前后关键指标对比

关键指标	加固前	加固后	效果
拱顶最大竖向位移/mm	-4.132(下沉)	-1.25	减少 69.7%
拱脚最大水平位移/mm	2.405(向内)	0.85	减少 64.7%
初支最大压应力/MPa	-5.15(拱脚处)	-2.80	降低 45.6%
最不利截面安全系数	1.324	3.130	提升 136%

4.3 裂缝和渗水修复

对隧道裂缝处的修复大致根据不同缝宽采用不同方法:

(1) 裂缝宽度 $W \leq 0.2 \text{ mm}$ 采用表面密封胶封闭处理。先去除表面抹灰层,并用机械方法打磨平整。在底胶干后,使用改性环氧砂浆修补混凝土表面缺损。最后使用水泥漆进行外观美化处理。

(2) 裂缝宽度 $0.2 \text{ mm} < W < 0.5 \text{ mm}$ 采用恒压灌浆法处理后再采用表层涂抹密封胶进行处理。先剔除混凝土表面抹灰层,并用机械方法打磨平整。根据裂缝形态与长度按骑缝布置注浆嘴,待面层封堵后注入胶液。

(3) 裂缝宽度 $W \geq 0.5 \text{ mm}$ 采用开槽埋管注浆法进行处理。根据裂缝形态刻槽后采用环氧砂浆或聚合物砂浆填充并埋深钢管注浆嘴,带填充材料形成强度后注入胶液。

对于隧道衬砌存在的多处渗水缺陷,采取开槽埋管排水的处理措施,大致流程为:根据渗水位置及水量选取不同管径的 PVC 管作为排水通道,沿缺陷低点刻槽埋设排水半管排出衬砌。

5 结 论

(1) 渗水压力与上方施工便道车辆振动荷载的耦合作用是衬砌破坏的主因。其效应导致拱顶与拱脚是位移与应力的集中区域,拱底上抬增大 4.901 mm,拱顶沉降增大 3.851 mm,左右拱脚横向位移分别增大 2.210 mm 与 2.355 mm,与现场病害位置高度吻合。

(2) 病害状态下,围岩与初期支护应力水平显著上升,其中围岩主应力最大增加 0.198 MPa,初支压应力最大增加 1.357 MPa,且高应力区发生转移。

(3) 提出的衬砌结构修复方案经计算使最不利截面处的安全系数由修复前的 1.324 提升至 3.130,加固方案针对病害有较好的修复效果,该方法可为同类型隧道的病害防治与加固设计提供参考。

参考文献:

- [1] 杨朝帅,崔 臻,牛富生,等.隧道衬砌病害对结构安全性影响机理研究[J].水利与建筑工程学报,2023,21(4):180-186.
- [2] 樊浩博,王 吉,陈宏文,等.富水山岭隧道衬砌结构失效特征研究[J].中国铁道科学,2025,46(4):121-132.
- [3] 吴建良,姜成业,毕钦俊,等.无中导洞连拱隧道衬砌开裂分析及加固研究[J].水利与建筑工程学报,2025,23(3):151-157,164.
- [4] 易 杰,赵乙丁,卞 雯,等.拱部脱空单线铁路隧道衬砌裂损机理研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(6):1038-1046.
- [5] 张志恩,周宗青,李利平,等.高水压岩溶隧道衬砌外水压力折减规律理论研究[J].地下空间与工程学报,2025,21(4):1313-1319.
- [6] 陈 相.隧道衬砌裂损三维演化机制与结构性能评估方法[D].重庆:重庆交通大学,2025.
- [7] 刘德军,黄宏伟,岳清瑞,等.隧道衬砌张拉裂缝开裂机制及快速修复方法初探[J].土木工程学报,2015,48(S1):236-243.
- [8] 赵东平,和 琦,唐伟超,等.隧道衬砌内力的力法解算及抗力范围对计算结果的影响研究[J].现代隧道技术,2024,61(S1):109-120.
- [9] 王 翔,项一恒.隧道拱顶衬砌脱空长度对结构安全性影响研究[J].天津建设科,2025,35(4):25-28,36.
- [10] 姚湘静,彭张涛,艾 青.隧道二次衬砌裂缝病害成因重要性多元统计分析评价[J].隧道与轨道交通,2025(2):6-13,72.
- [11] 侯斐斐,吴柄啸,罗享寰,等.基于小样本学习的探地雷达隧道衬砌病害分类数学模型和计算方法[J].铁道学报,2025,47(10):204-211.
- [12] 周 勇,曹文皓,孙雪伟,等.聚合物-纤维布修复加固隧道衬砌裂缝性能研究[J].交通科技,2025(5):82-87.
- [13] 文竞舟,李友河,杨新泽,等.多病害耦合作用下钢带加固隧道衬砌的安全性评价[J].现代隧道技术,2025,62(4):291-300.
- [14] JTG 3370.1—2018 公路隧道设计规范 第一册 土建工程[S].北京:人民交通出版社,2018.
- [15] Zhang Junwei, Zeng Xutao, Tan Yang. Analytical solution for deep pressure tunnels using composite stratum under a groundwater table[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2020,12(2):1419-1434.
- [16] JTG D30—2015 公路路基设计规范[S].北京:人民交通出版社,2015.
- [17] TB/T 3466—2016 铁路列车荷载图式[S].北京:中国铁道出版社,2016.