

隧道病害的主要类型和防治措施研究

肖朝升

(四川川交路桥有限责任公司, 四川 广汉 618300)

摘 要 隧道作为交通基础设施的重要组成部分, 广泛应用于公路、铁路等工程建设中, 其服役安全性直接关系到交通通行安全和工程使用寿命。受地质条件复杂、施工工艺不当、运营维护不足、设计适配性欠缺等多重因素影响, 隧道在建设和运营过程中易产生各类病害, 不仅影响隧道结构稳定性, 还可能引发交通安全事故、大幅增加全生命周期维护成本。本文结合隧道工程建设与运营实际, 系统梳理隧道病害的核心类型, 深入分析各类病害的产生机理与关键诱因, 针对性提出全周期、可落地的防治措施, 以期隧道病害的前期预防、精准治理及长效管控提供参考。

关键词 隧道病害; 衬砌结构病害; 渗漏水病害; 围岩及掌子面病害; 地质条件

中图分类号: U457.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.031

0 引言

随着我国交通基础设施建设向山区、复杂地质区域延伸, 隧道工程凭借缩短线路距离、克服地形障碍、保护生态环境等优势, 已成为公路、铁路网络建设的关键组成部分。隧道工程多穿越山岭、河谷等区域, 面临断层破碎带、岩溶发育、高承压水、软弱围岩等复杂地质条件, 建设与运营过程中病害频发^[1]。隧道病害不仅会降低结构使用寿命, 还会直接威胁行车安全, 严重时甚至引发塌方、涌水等重大安全事故。基于此, 本文系统梳理隧道病害的主要类型, 深入剖析病害成因, 构建“前期预防、过程管控、后期治理”的全周期防治体系, 对提升隧道工程建设质量、保障运营安全具有重要的工程实践意义。

1 隧道病害的主要类型

1.1 衬砌结构病害

一是衬砌裂缝。根据裂缝走向可分为纵向裂缝、环向裂缝与斜向裂缝。纵向裂缝多由围岩偏压、结构受力不均引发, 通常沿隧道轴线方向发展; 环向裂缝多与混凝土收缩、不均匀沉降相关, 常出现在洞口段或地质变化处; 斜向裂缝则多由剪切作用引起。裂缝宽度超过 0.2 mm 的规范限值后, 会直接削弱衬砌结构的承载能力, 并为渗漏水提供通道。现场检测数据显示, 裂缝宽度大于 0.5 mm 时, 衬砌受力性能下降约 15%~20%, 宽度超过 1.0 mm 的裂缝需采取结构性补强措施。

二是衬砌背后空洞与混凝土缺陷。受浇筑振捣不密实、超挖回填不到位等因素影响, 衬砌拱顶、边墙

易出现脱空、蜂窝麻面等问题。地质雷达检测数据显示, 约 35% 的运营隧道存在不同程度的拱顶脱空现象, 脱空高度通常在 5 cm~30 cm 之间, 脱空范围超过 2 m² 时, 该区域衬砌受力集中系数可达 2.5~3.0, 极易引发局部破损、掉块。蜂窝麻面深度超过 2 cm、面积大于 0.5 m² 时, 需进行补强处理。

三是衬砌腐蚀与劣化。地下水中含有的硫酸根离子(SO₄²⁻)、氯离子(Cl⁻)等侵蚀性离子, 会逐步腐蚀混凝土与内部钢筋。当 SO₄²⁻ 浓度超过 250 mg/L 时, 混凝土会产生钙矾石膨胀破坏, 腐蚀速率可达 0.1 mm/年~0.3 mm/年; Cl⁻ 浓度超过 500 mg/L 时, 钢筋脱钝锈蚀的临界浓度被突破, 锈蚀膨胀产生的径向压力可达 5 MPa~10 MPa, 导致混凝土保护层开裂、剥落, 严重时保护层脱落厚度可达 5cm 以上。

四是衬砌变形侵限。在高地应力(最大主应力>20 MPa)、软弱围岩大变形(变形速率>10 mm/d)等工况下, 衬砌结构出现收敛变形。当拱顶沉降超过 50 mm 或周边收敛超过 100 mm 时, 变形可能侵入隧道建筑限界(设计限界富余量通常为 15 cm~20 cm), 直接影响行车安全; 变形量超过 200 mm 时, 衬砌结构承载能力下降 40%~60%, 严重时会引起结构整体失稳^[2]。

1.2 渗漏水病害

渗漏水是隧道工程最普遍的病害, 根据渗漏形式可分为点漏、线漏、面漏与集中涌水四类: 点漏多为衬砌施工缝、变形缝处的滴水、漏水, 单处渗漏速率多在 0.05 L/min~0.5 L/min; 线漏多沿衬砌裂缝形成线状流水, 渗漏速率 0.5 L/min~5 L/min; 面漏表

作者简介: 肖朝升(1991-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 公路工程。

现为衬砌边墙、拱顶大面积渗水,渗水面积占比可达衬砌断面的15%以上;集中涌水多发生在岩溶、断层破碎带等富水地层,单处涌水量可达 $100\text{ m}^3/\text{h}$ 以上、水压超 0.5 MPa ,易引发突水突泥事故。渗漏水病害的危害具有连锁性,一方面,隧道内渗水会导致路面动摩擦系数降至 0.3 以下,冬季结冰后摩擦系数进一步衰减,直接降低行车安全性;另一方面,渗漏水携带的侵蚀性离子会加速衬砌结构腐蚀劣化,寒区隧道中,渗漏水引发的冻融循环会导致衬砌混凝土冻胀开裂、排水系统冻堵,进一步加剧病害发展。

1.3 围岩及掌子面病害

围岩及掌子面病害主要发生在隧道施工阶段,部分失稳隐患会延续至运营阶段,是隧道建设过程中安全风险防控的核心重点。一是掌子面失稳与塌方,在软弱围岩、破碎带地层中,开挖工法不当、支护不及时,易导致掌子面滑塌,不仅会造成工期延误、财产损失,还可能引发人员伤亡事故;二是围岩大变形与基底病害,高地应力软岩地层中,围岩流变特性会导致持续大变形,挤压初期支护与衬砌结构,运营阶段则易出现基底隆起、路面下沉变形,影响线路平顺性;三是涌泥涌水灾害,在岩溶、富水断层破碎带施工中,掌子面揭穿承压水层、岩溶管道时,易发生突发性涌泥涌水,是隧道施工中群死群伤事故的主要诱因之一;四是附属设施病害,围岩变形与渗漏水耦合作用下,易引发接触网基础偏移、消防管道破损、监控线路脱落等问题,直接影响隧道附属功能正常发挥,衍生次生行车安全风险。

2 隧道病害的原因分析

2.1 地质条件因素

地质条件是隧道病害产生的先天基础,属于不可控的客观诱因。隧道穿越地层的复杂性与不确定性,直接决定病害发生概率。线路穿越断层破碎带、岩溶发育区、软弱围岩、膨胀土等不良地质段时,围岩自稳能力差,易诱发塌方、大变形、涌水等病害;高承压水层、富水岩溶管道等水文地质条件,是渗漏水、突水突泥病害的主要来源,地下水中的侵蚀性离子,还会持续造成衬砌结构腐蚀劣化^[3]。

2.2 施工工艺因素

施工工艺不规范、质量管控缺位,是隧道病害产生的最主要人为因素,超六成运营期隧道病害均源于施工阶段的质量缺陷。软弱围岩段盲目选用全断面开挖、开挖进尺过大,会过度扰动围岩,引发塌方、大变形;初期支护施作不及时、锚杆与喷射混凝土参数不达标,无法有效约束围岩变形;衬砌混凝土振捣不密实、拱顶浇筑不饱满,易产生蜂窝、空洞、背后脱空等缺陷,

直接削弱结构承载力;防水板破损、焊缝不牢、止水带安装偏差等问题,会造成防水体系失效,是渗漏水病害的核心诱因。

2.3 运营维护因素

运营期维护管理缺位,是隧道病害持续发展、逐步恶化的关键原因。日常巡检流于形式,对初期微小裂缝、局部渗漏水等病害发现不及时,小隐患易发展为结构性病害;已发现病害处置不及时、治理工艺不当,会导致病害反复复发。同时,部分隧道存在“重建轻养”问题,养护资金投入不足、养护队伍专业能力欠缺,无法满足精细化养护需求。此外,重载、超限车辆长期反复碾压,易造成基底结构疲劳破损,隧道内汽车尾气、潮湿环境,也会加速衬砌结构与附属设施的腐蚀劣化。

2.4 设计因素

前期设计适配性不足,是隧道病害产生的源头性因素。前期地质勘察深度不足,对线路沿线不良地质体的分布、规模预判不准,会导致设计方案与现场地质条件严重不符;围岩等级判定偏低、支护参数安全余量不足,特殊地质段未设置专项超前支护设计,无法有效控制围岩变形;防排水体系设计未遵循“防、排、堵、截相结合”原则,未考虑排水系统长期堵塞风险,富水段防水设计冗余不足;同时,对运营期交通量增长、荷载变化预估不足,结构设计未预留安全余量,长期运营下易出现结构疲劳损伤。

3 隧道病害的优化防治措施

3.1 优化设计方案,筑牢病害防控基础

首先,强化前期综合地质勘察,针对线路沿线的不良地质段,采用钻探、地质雷达、地震波反射法等综合勘察手段,精准查明断层破碎带、岩溶、富水层的分布特征与水文地质条件,避免因地质资料失真导致的设计缺陷;其次,针对性优化结构与支护设计,根据围岩分级结果采用差异化支护参数,软弱围岩、高地应力段采用超前小导管、管棚等超前支护设计,配合强初期支护方案,严控围岩变形,结合工程地质条件优化衬砌结构形式,预留合理的安全余量^[4];再次,完善防排水体系专项设计,严格遵循“防、排、堵、截相结合,因地制宜,综合治理”的原则,优化防水板、止水带的选型与布设,针对富水段、寒区隧道设计抗堵塞、防冻胀的排水系统,确保防排水体系长期有效;最后,针对岩溶、断层破碎带等特殊地质段,编制专项设计与处置方案,从源头降低病害发生概率。

3.2 规范施工工艺,提升施工质量管控水平

施工阶段是防控隧道病害的关键环节,必须以规范施工为核心,实现施工全过程质量闭环管控。一是

严格执行设计与规范要求,根据现场围岩条件动态优化开挖工法,软弱围岩段采用台阶法、CRD 法等分部开挖工法,严控开挖进尺,减少对围岩的扰动,严禁超挖、欠挖;二是严控初期支护施工质量,严格按设计参数控制锚杆的长度、间距与注浆饱满度,确保喷射混凝土的厚度、强度与平整度达标,开挖后及时封闭围岩,杜绝初期支护滞后的违规操作;三是强化衬砌混凝土与防水工程施工管控,严格控制混凝土配合比与浇筑振捣工艺,采用带模注浆工艺解决拱顶脱空问题,衬砌完成后采用地质雷达进行全断面检测,对脱空区域及时注浆回填;防水板铺设前清理基面尖锐物,采用双焊缝焊接工艺,完成后通过充气试验检测焊接质量,施工缝、变形缝处精准固定止水带,确保防水体系闭合无缺陷;四是建立全过程质量管控体系,落实“三控制”,每道工序验收合格后方可进入下一道工序,严禁盲目赶工期省略关键工序,从施工源头消除质量隐患。

3.3 强化运营维护,建立长效管控机制

运营阶段的长效管控,是遏制病害发展、保障隧道长期服役安全的核心保障。

(1) 建立常态化巡检检测体系,采用“日常巡检+定期检测+专项检测”相结合的模式,日常巡检重点排查渗漏水、衬砌掉块、路面破损等显性病害,定期采用地质雷达、超声波检测、自动化监测等技术,开展结构内部缺陷、变形等专项检测,全面掌握隧道技术状况;(2) 落实病害分级处置机制,根据病害类型、严重程度进行分级分类,建立病害动态管理台账,对轻微裂缝、局部渗水等早期病害及时处置,防止病害持续扩大,对结构性重大病害,组织专家论证专项治理方案,确保治理效果;(3) 完善养护管理制度与保障体系,摒弃“重建轻养”的理念,保障隧道养护资金投入,组建专业养护队伍,定期开展养护人员技能培训,提升病害处置的专业性;(4) 强化运营环境管控,联合交通执法部门严控超限超载车辆,减少结构疲劳损伤,建立隧道健康自动化监测系统,对特殊地质、高风险段布设监测设备,实时监测结构变形、渗流等数据,实现病害风险提前预警、及时处置;(5) 创新技术应用,提升防治智能化水平。积极推动隧道养护数字化、智能化升级,搭建隧道全生命周期数字孪生管控平台,融合物联网感知、AI 图像识别、大数据分析技术,实现病害数据自动采集、智能识别与发展趋势精准研判。

3.4 完善病害治理技术,提升应急处置能力

针对渗漏水病害,按渗漏形态分级施策:点状渗漏采用针孔注浆堵漏,选用单组分聚氨酯注浆浆液,注浆压力控制在 0.5 MPa ~ 1.0 MPa;线状渗漏沿裂缝

开凿宽 10 cm ~ 15 cm、深 5 cm ~ 10 cm 的梯形凹槽,完成引排水、埋管注浆后,用防水砂浆分层封闭找平;大面积面漏或集中涌水段,先重做结构防水层、增设环向排水盲管疏导水流,富水断层、岩溶地层同步实施帷幕注浆完成源头堵水。

针对其余病害同步匹配精准处置工艺:衬砌背后脱空采用水泥-水玻璃双液浆注浆回填,注浆压力控制在 0.8 MPa ~ 1.2 MPa,通过雷达检测验证回填密实度;围岩失稳段采用超前管棚注浆+型钢支架支护,强化围岩自稳能力;路面破损病害精准切割破损区域,清理松散基层后采用快硬混凝土回填修复,缩短交通管制时间。同时,完善重大病害应急处置预案,配套专项应急物资与专业处置队伍,提升突发病害的快速响应与处置能力。

针对隧道塌方、突水突泥等重大突发事件,编制专项应急预案,配备专业应急抢险队伍与物资设备,定期开展应急演练,提升突发事件的快速响应与处置能力^[5]。建立病害治理后效果评估机制,对完成治理的病害段开展持续跟踪监测,验证治理效果,总结治理经验,形成病害治理技术案例库,持续优化隧道病害防治技术体系。

4 结束语

隧道病害的产生是地质、设计、施工、运营等多因素共同作用的结果,具有类型多样、成因复杂、危害连锁性强的特点,其防治工作必须坚持“预防为主、防治结合、全周期管控”的核心原则,打破传统“重治理、轻预防”的固有模式。在隧道工程建设与运营实践中,需持续深化对病害产生机理的研究,不断推广智能化勘察、数字化施工、自动化监测等新技术的应用,构建全生命周期的隧道病害防控体系,从根本上减少病害发生,保障隧道的结构安全与长期稳定服役,为我国交通基础设施高质量发展提供坚实的支撑。

参考文献:

- [1] 杨华清,高刚刚,朱小明,等.公路隧道渗漏水病害处治对策研究[J].山西建筑,2025,51(22):148-151.
- [2] 覃志涛.公路隧道渗漏水病害检测及评价研究[J].现代工程科技,2025,04(19):89-92.
- [3] 李剑雄,李海.隧道衬砌带模注浆工艺的创新与实践[J].工程机械,2025,56(10):82-85,132.
- [4] 刘瀚璠,余昌,李彬,等.隧道基底病害对货运列车振动响应影响的测试分析[J].铁道标准设计,2025,69(10):347-356.
- [5] 李宇星,胡籍,何国旗,等.高速公路隧道裂缝渗漏水病害处治措施研究[J].现代工程科技,2025,04(17):69-72.