

公路隧道结构健康检测及病害处置技术探析

李春荣

云南航天工程物探检测股份有限公司 云南 昆明 650200

【摘要】：本文围绕公路隧道结构健康检测及病害处置技术展开研究，分析衬砌裂缝、变形、渗漏水等病害特征与形成机理，阐述外观排查、无损探测、智能化监测及数据研判等检测方式，重点论述裂缝封闭、渗漏水治理、衬砌补强、围岩加固等处置工艺，并结合云南 G214 线凤凰山隧道开展工程验证。结果表明，分级处置、堵排结合、联合支护等技术可有效控制病害发展，提升结构安全性与耐久性。研究成果可为公路隧道病害防治提供参考。

【关键词】：公路隧道；健康检测；病害处置

DOI:10.12417/2811-0722.26.06.030

引言

公路隧道是山区交通路网的关键组成部分，长期受复杂地质、多雨湿热环境与重载交通作用，易出现衬砌开裂、渗漏水、结构变形等病害，直接影响运营安全与使用寿命。开展结构健康检测与科学处置，对保障隧道稳定运行具有重要意义。本文梳理隧道病害类型与成因，总结健康检测实施方式与病害整治核心工艺，并以云南典型山区隧道为实例验证技术适用性，以为公路隧道病害防治提供可行思路与实践借鉴。

1 公路隧道结构病害特征及形成机理

公路隧道长期运营阶段会受到地质条件、材料老化、行车荷载及外界环境的共同作用，本体结构会产生不同程度破损，各类病害表现形式和生成诱因存在内在联系^[1]。衬砌表层裂缝源自混凝土形变、基底受力失衡与自然风化作用，裂缝形态尺寸存在差异，整体结构受力性能会随之下降。围岩压力变化和车辆反复碾压会造成衬砌形变，温湿度变化与雨水渗透会加快形变发展，隧道内部空间稳定状态遭到破坏。地基基础条件弱化、建材老化及水体侵蚀会引发结构沉降，这类病害会大幅提升隧道运行风险。混凝土浇筑质量缺陷与渗水引发的内部理化环境改变，会形成表层蜂窝麻面问题，这类表层损伤会缓慢加剧整体老化速度。多种破损问题互相作用持续蔓延，隧道整体使用状态不断弱化，也能为现场病害排查和治理工作提供参考(见图 1)。

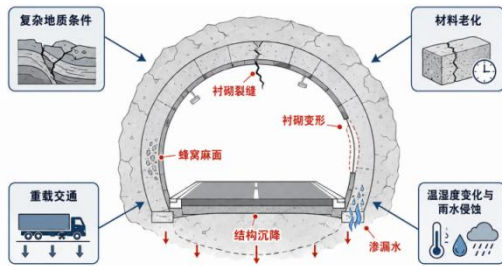


图 1 公路隧道结构病害形成机理图

2 公路隧道结构健康检测实施方式

2.1 常规外观排查作业形式

公路隧道结构健康检测依托常规外观排查开展落地操作，依靠人工实地巡查方式辨别衬砌表层状态，捕捉结构形变与渗水位置的实际表现。现场作业会完整记录衬砌裂缝延展走向、尺寸参数与空间分布，观察表层破损、表层粗糙、钢筋外露等实体缺陷，标注渗水范围与水体流动实际样貌，核对结构沉降幅度与整体线形变动情况。外观排查能够快速梳理病害整体特征，支撑后续检测工作推进，相关判定结果受从业人员实操经验限制，内部损伤无法完成量化统计，只能反馈结构表层实际状况，搭配专项检测方式开展作业，完整覆盖各类病害识别内容，保障隧道整体运营安全。

2.2 无损探测技术应用路径

无损探测支撑隧道结构内部缺陷识别工作开展，依托非接触作业模式获取结构深层隐蔽病害数据。地质雷达借助电磁波反射原理，判别衬砌实际厚度、背部空洞及整体密实状态；激光检测依托高速成像手段完成断面测算、形变观测与病害标定，留存里程相关数据并生成数字化资料；超声波检测结合传感设备传输参数，研判混凝土分层剥离与性能衰减情况；红外成像依托材质导热属性区别，直观呈现构件内部异常区域。不同探测方式相互适配搭配，改善现场作业实际成效，适配山区隧道大范围常态化排查工作开展需求^[2]。

2.3 智能化监测设备运用模式

智能化监测设备能够支撑隧道长期健康状态的持续追踪，自动化传感装置搭配数据采集终端，完成场地环境的不间断在线观测。传感装置作为整套设施的核心载体，捕捉结构应力形变、地层沉降变化、水体渗流特征及周边环境各项指标，减少现场人力操作带来的影响，契合长线隧道与危险路段的日常监测场景。设备依照预设频次完成数据传输，联动后台管理平台完成隐患提示与状态研判，打破传统巡检模式的时段限制，完成隧道运维管控模式的合理转型，为结构安全研判与应急处置落实基础条件，完善隧道整体运维管控的智能应用体系。

3 公路隧道病害整治处理工艺

3.1 裂缝封闭与注浆修复措施

公路隧道长期运营阶段常会出现衬砌裂缝这类结构损伤,裂缝持续延展会破坏整体构造形态,弱化岩体承载性能,结合裂缝实际宽度划分处置方式更贴合现场修护需求^[3]。细微非结构性裂缝宽度不足 0.3mm 时,涂刷低黏度双组分环氧树脂完成表层封闭,搭配低压灌缝工艺,控制现场注浆区间在 0.2-0.5MPa,浆液顺着缝隙隙隙逐层渗透,稳固表层衔接状态,阻隔外界水体渗入。0.3 至 5mm 区间的结构性裂缝适配压力注浆工艺,调配比例 1:1 水泥浆液搭配 35° Bé 水玻璃原料,维持 0.5-1.0MPa 施工压力,静置养护满七天,恢复围岩结构密实状态。裂缝宽度超出 5mm 或形成贯通破损,结合现场受力条件判定破损诱因,依托波纹钢套衬、型钢支护、混凝土加固等工艺完成整体补强。衬砌表层出现脱落破损时清理松动建材,小范围浅度破损区域凿毛基面后,以 0.4-0.6MPa 压力喷涂 C30 混凝土,加厚表层防护厚度,修护表层破损并稳定隧道整体构造。

3.2 渗漏水封堵防排改造手段

渗漏水是云南山区公路隧道最典型、发生率最高的病害,治理遵循“以排为主、堵排结合、源头控制、综合治理”的原则,根据渗漏位置、水量大小与结构状态实施精准处置。对于施工缝、墙脚集中渗水及大面积积水段,在衬砌墙脚两侧布设 $\phi 42$ - $\phi 110$ 泄水孔,泄水孔以 3% 仰坡深入围岩,孔内安装打孔 PVC 管,外部设置接水盒固定引排,快速降低衬砌背后水压力。裂缝渗漏采用聚氨酯或丙烯酸盐灌浆料进行压力注浆,实现出水点密封封堵。在地下水压力较大且结构承载力充足区段,开展围岩注浆堵水,注浆孔间距 1.5-2.0m,孔深穿透衬砌进入围岩 50cm,采用粒径小于 $3\mu\text{m}$ 的超细水泥浆,注浆压力 1.0-1.5MPa,可显著提升围岩堵水效果。路面冒水段落需完善排水系统,增设宽 30cm、深 40cm 的路侧边沟,每 50m 设置沉沙池,并采用 $\phi 100$ - $\phi 160$ HDPE 横向排水管将路面积水引入中央排水沟,实现排水系统通畅高效,从根本上控制渗漏水复发。

3.3 破损衬砌结构补强方法

破损衬砌结构整治遵循缺陷清理、界面处置、分层修补、结构补强的实施流程,凿除表层松散劣化及钢筋外露区域至坚实基层,处理锈蚀钢筋表层并做好防护措施,依托高强修补物料复原结构原有工作状态^[4]。衬砌背部空洞会改变结构受力状态,小范围空洞选用水泥浆灌注填充,调配比例控制在 0.8:1,灌注压力维持 0.3-0.8MPa,孔洞设置在空洞中心位置保障浆液完整填满空隙。大范围空洞安装工字钢构件搭建临时支护,构件与衬砌表层浇筑混凝土填充压实,控制浇筑厚度在 20cm 以内,支护结构成型稳定后灌注微膨胀水泥完成密闭处理。表层

剥落超 5cm 或钢筋裸露位置植入全新钢筋加固,选用 HRB400 级 16 至 20mm 钢筋构件,衔接原有衬砌构件提升整体联结性。大范围表层损坏或承载能力弱化区域更换衬砌构件,施工边界向外拓展 50cm,现浇混凝土标号达到 C35 标准,持续洒水养护两周,维系衬砌整体承载能力、耐久性能及运行稳定状态。

3.4 破碎围岩防护加固措施

破碎围岩会引发云南山区隧道出现结构变形、沉降及失稳问题,现场支护处置围绕岩体完整状态维系,约束洞身形变发展,保障岩体各部分协同承载开展施工。现场搭配锚杆、钢筋网、喷射混凝土及注浆工艺组成复合支护结构完成加固作业。施工现场选用 $\phi 25$ mm 螺纹钢加工锚杆,杆体长度区间维持 3.0-6.0m,布设间距控制在 $1.5\text{m}\times 1.5\text{m}$ 至 $2.0\text{m}\times 2.0\text{m}$,依托锚固作用稳固周边围岩。 $\phi 6$ mm 钢材加工而成的钢筋网铺设完成并与锚杆紧密贴合,表层浇筑厚度 8-10cm 的 C20 混凝土,加固围岩表层结构,抵御外界风化侵蚀作用。针对围岩松动圈范围布设径向注浆孔,灌注水泥-水玻璃双液浆,依靠浆液固化粘合松散岩体,改善岩体密实程度与承载强度。隧道形变异常的危险区段加装 I18-I22 型钢拱架,构件排布间距 0.8-1.2m,有效缓解拱顶下沉与侧向挤压现象。施工全程跟进现场监测工作,结合围岩实际状态调整支护参数,让初期支护与二次衬砌形成整体承载结构,减少隧道衬砌开裂、局部坍塌等病害发生,保障山区隧道长期运行状态平稳^[5]。

4 公路隧道病害治理工程实践研究

4.1 区域隧道工程基础概况

G214 线西宁至澜沧公路凤凰山隧道位于云南省大理州南涧县境内,为单洞双向通行国道隧道,全长 2663m,2008 年建成通车,承担滇西区域干线交通功能。隧址区属云南典型山区地貌,地形起伏大、降雨集中、地下水发育,长期受湿热环境与重载交通耦合作用,结构老化问题突出。2022 年定期检测评定结果显示,隧道土建结构为 3 类、机电设施为 4 类,被认定为危隧,主要病害包括衬砌渗漏水、电缆沟长期积水、路面破损开裂、结构耐久性下降等,已严重影响运营安全与通行质量,亟需开展系统性病害整治与功能提升改造。

4.2 现场专项检测工作开展

本次专项检测严格按照公路隧道养护技术规范执行,采用常规外观排查+无损探测+数据研判综合模式。外观排查全面记录衬砌渗漏点位、裂缝分布、路面破损范围及附属设施缺损状态,标记集中渗漏区域与结构薄弱段落。无损检测以地质雷达为主,探测衬砌厚度、背后密实状态及脱空区域,结合激光断面仪测量结构线形与变形参数,精准判定病害程度与影响范围。检测过程同步采集环境湿度、地下水分布及交通荷载数据,建立病害台账与量化指标,明确渗漏水、结构破损、排水不畅三大核心问题,为制定针对性治理方案提供数据支撑。

4.3 针对性治理工艺实际运用

结合云南山区隧道水文地质特点,采用源头治水、结构补强、排水重构、功能提升综合治理思路。渗漏水处置创新应用凿槽引排+泄水孔接水盒组合工艺,在衬砌墙脚布设 $\phi 42$ - $\phi 110$ 泄水孔,以3%仰坡深入围岩,配合接水盒与密封胶固定,实现明水有序引排,降低衬砌外水压力。全面重构排水系统,整体浇筑加高电缆沟,增设横向排水管疏通原有管路,消除积水隐患。衬砌裂缝按宽度分级处置,小于0.3mm裂缝采用环氧树脂封闭,0.3-5mm裂缝实施压力注浆,注浆压力控制在0.2-1.0MPa,保障结构整体性恢复。路面采用钢渣沥青混凝土铺筑,提升抗滑与耐久性能,同步改造洞内装饰与智慧照明系统,构建全方位治理体系。

4.4 工程实施成效综合总结

凤凰山隧道病害治理工程完工后经权威检测验收,各项指标均达到规范要求,治理成效显著。结构安全方面,衬砌渗漏水问题缓解,背后空洞与破损部位全部修复,结构承载力恢复

至设计标准,土建状态评定提升至1类,机电设施恢复正常功能。运营性能方面,路面平整度与抗滑能力大幅提升,排水系统畅通无阻,智慧照明实现动态调光,月均用电量由4.5万度降至2.9万度。实践表明,该套治理工艺适配云南山区隧道地质气候特征,可有效解决渗漏水、结构劣化等典型病害,为云南省乃至西南地区运营公路隧道病害整治提供了可复制、可推广的工程范例。

5 结语

本文系统研究公路隧道结构病害特征、健康检测方法与处置工艺,并结合云南凤凰山隧道完成工程应用验证。结果表明,采用分级整治、堵排结合、结构补强与联合支护等技术,可有效解决隧道渗漏、开裂、围岩破碎等突出问题,显著提升结构安全与运营品质。工程实践证明,相关工艺适配云南山区隧道地质气候条件,具备良好推广价值。未来可进一步结合智能化监测技术,构建隧道全生命周期健康管控体系,持续提升养护水平。

参考文献:

- [1] 王司帆.公路隧道复合式衬砌结构力学及变形特性分析[J].江西建材,2025,(12):172-174.
- [2] 乔亚东.高速公路隧道衬砌结构质量检测与控制[J].运输经理世界,2025,(12):95-97.
- [3] 施德,葛厚海.隧道衬砌结构病害原因与养护智能决策系统分析[J].科技资讯,2025,23(13):221-223.
- [4] 张浩楠,刘禹阳,田威,等.公路隧道排水系统结构病害分类及适用性检测分析[J].现代隧道技术,2024,61(05):243-251.
- [5] 彭传甫.公路隧道健康状态综合检测技术的分析[J].工程与建设,2020,34(04):679-680.