公路隧道二衬混凝土施工缝渗漏水治理方法研究

吴 磊

重庆市交通工程监理咨询有限责任公司 重庆 开州 405400

【摘 要】：公路隧道二衬混凝土施工阶段常会出现施工缝渗漏水病害，隧道整体结构耐久性能、道路行车保障条件与长期运营使用年限都会受其干扰。结合公路隧道二衬整体施工流程特征，深挖施工缝产生渗漏问题的核心诱因，基面处理工序落实不到位、混凝土浇筑振捣作业不饱满、止水构件安装存在位置偏差、成品养护流程落实不到位以及围岩渗水产生的压力作用等，都是诱发病害的关键诱因。结合隧道现场各类渗漏病害的实际工况，整合封堵堵漏、注浆加固、柔性防水修补、接缝预处理优化等多项现场治理手段，甄别各类技术的适用场景、实操流程与实际治理成效。传统治理模式存在服役周期短、病害反复出现的弊端，围绕这类施工痛点，搭建全程化治理管控模式，完善施工缝防水作业流程，规整现场质量管控准则。本次研究所得结论能够妥善处置隧道二衬施工缝各类渗漏问题，夯实隧道工程防水施工整体质量，可为同类型隧道病害处置与防水施工升级提供可靠的技术参照。

【关键词】：公路隧道；二衬混凝土；施工缝；渗漏水；病害治理；防水施工

DOI:10.12417/2811-0528.26.21.075

引言

山区交通路网的核心组成部分包含公路隧道，构筑物常年坐落于条件复杂的水文地质场地，整体防水能力影响着隧道主体稳定状态与实际使用周期。二衬混凝土施工缝属于隧道防水体系中的薄弱部位，现场施工管控疏漏、围岩水体渗透压力、混凝土成型工艺偏差等各类条件叠加，让该部位频繁出现渗漏水病害。持续渗漏的水体腐蚀衬砌内部钢筋、损耗混凝土主体结构，衬砌表层会出现开裂、脱落等损坏情况，隧道主体的耐久性能随之下降，路面湿滑、机电设施锈蚀等各类安全隐患也会随之产生。工程领域现有渗漏修复方式存在适配范围局限、修复使用周期不足、病害二次出现的缺陷。施工缝渗漏形成机制与现场实际施工状态可作为研究基础，全新长效的修复工艺的摸索与应用，能够健全隧道防水施工体系，隧道长期安全稳定的运营状态也能得到有效保障。

1 公路隧道二衬施工缝渗漏水病害特征及成因分析

1.1 施工缝渗漏水典型病害特征

公路隧道二衬混凝土施工缝渗漏病害具备稳定的发展特征，环向、纵向结构拼接位置最易出现病害问题，属于隧道防水体系中稳定性最弱的关键部位。运营隧道施工缝会呈现缝隙浸润、线状流水、点状涌水三类渗漏形态，干燥时段的接缝仅会出现表层潮湿、返碱发白的现象，雨量充沛、地下水富集的季节就会出现持续性水体渗漏。某山区公路隧道投入运营两年后，边墙与拱部多处施工缝陆续显现渗水痕迹，接缝表层析出大量白色钙质结晶，长期水流冲刷磨损剥离了混凝土表层砂浆层，结构内部骨料完全裸露[1]。病害整体发展进程较为隐蔽且具备渐进演化特征，结构初期不会产生直观破损，渗漏覆盖范围会随运营时长持续扩大，衬砌整体结构完整性受损，隧道固有受力状态发生改变，结构变形、开裂等次生病害会逐步显现并持续发展。

1.2 施工工艺缺陷引发的渗漏隐患

二衬混凝土施工现场存在的各类不规范作业行为，是引发隧道施工缝渗漏水病害的主要人为诱因。隧道二衬普遍采用分段浇筑的施工形式，新旧混凝土对接基面残留的浮浆、杂物与松散结构层，会大幅削弱不同批次混凝土的粘结固化效果，施工缝位置会生成大量可供地下水渗透的固有缝隙。部分市政公路隧道建设施工期间，二衬接缝基面未开展规范的凿毛处理作业，成型后的混凝土接缝整体粘结强度不足，围岩水体持续施压作用后就会形成贯通式渗水通道。混凝土浇筑振捣作业的不规范操作，会让施工缝内部产生蜂窝麻面结构与大量微小孔隙，为地下水的持续渗透提供稳定流通渠道。止水带、止水条等防水构件出现安装偏移、固定不牢、接头搭接不规范等施工问题，都会严重弱化防水构件的防护能力，地下水能够顺着施工缝持续渗入结构内部，隧道接缝区域的整体防水性能会出现明显衰减。

1.3 地质环境与结构受力诱发的渗漏问题

围岩地质条件的复杂程度与隧道长期运营过程中的结构

作者简介：吴磊（1996-04），男，云南曲靖人，汉族，本科学历，中级职称，研究方向：公路工程。

受力变化，是诱发施工缝渗漏病害的核心客观因素。多数山区公路隧道穿越破碎围岩带与富水地层区域，岩体遍布发育裂隙且地下水储量充沛，长期作用于二衬结构表面的静态水压与动态水流冲击，会不断冲刷结构薄弱的施工缝位置并逐步侵入结构内部。山区高速隧道场地普遍存在岩溶发育特征，地层地下水分布无序且渗透路径复杂，原本完整密实的施工缝结构会在水体长期侵蚀作用下逐步发育出贯通性渗水通道。隧道正式开放交通后，行车荷载带来的往复振动、围岩残余应力的缓慢释放、地层轻微沉降等多种现场工况变化，都会诱发二衬结构产生微量位移与形变，施工缝接触面随之产生开裂、脱空等结构性缺陷。结构形变衍生的细微裂隙会贯通原有接缝空隙，渗水通道的延展范围持续扩张，结构表层形成稳定渗漏通路，隧道整套防水体系的实际服役时长会出现大幅缩减。

2 二衬施工缝渗漏水差异化治理技术与施工管控措施

2.1 轻微浸润型渗漏表面封闭治理技术

施工缝表层潮湿、界面浸润、无明显流水痕迹的轻微渗漏病害，可采用表面封闭工艺开展治理作业，适配结构浅层细微渗水通道的封堵施工。特制防水修补材料能够填充接缝表层空隙，阻断地下水向内渗透的通路，多数干燥时段仅存在返碱潮湿病害的隧道施工缝均可适配该类工艺。县域公路隧道普遍存在施工缝大面积浸润的现场问题，工程施工多采用环氧树脂防水砂浆对渗漏接缝表层做整体封闭处理，施工前期彻底清理接缝表层附着的钙质结晶、浮尘与松散物料，平整打磨结构基面后，修补材料能够和原始衬砌混凝土形成紧密粘结。防水砂浆采取分层涂刷压实的施工方式，材料可充分渗入表层细微裂隙，固化成型后能够形成致密稳固的防水防护层。该类施工方式无需大面积破除原有衬砌结构，施工操作简便且不会损伤隧道主体结构，可有效封堵各类浅层渗水通道，快速处置结构轻微渗漏病害，稳定隧道日常运营过程中的整体防水性能。

2.2 中度线状渗漏注浆加固治理技术

施工缝产生线状流水、缝隙贯通的中度渗漏病害，可采用高压注浆加固工艺开展专项处置工作，同步实现结构深层渗水通道封堵与衬砌结构整体补强的双重施工效果。高分子注浆材料通过专用高压注浆设备均匀注入施工缝内部裂隙当中，材料接触水体后快速产生膨胀固化反应，充分填充结构贯通缝隙以阻断地下水渗透通路，衬砌新旧混凝土之间的结合紧密程度与整体粘结性能也能得到有效提升。山区公路隧道环向施工缝运营阶段易产生多处线状漏水问题，衬砌结构局部稳定状态会持续受到此类病害的不利影响，现场施工沿施工缝走向规整布设注浆孔位，彻底清理孔内杂物杂质后采用低压慢注、稳压补注的科学施工模式，让注浆材料充分填满结构内部各类空腔与细微裂隙。完全固化后的注浆材料可彻底封堵结构深层渗水通道，有效消除接缝线状渗漏缺陷，弥补混凝土浇筑阶段振捣不到位、粘结不密实的施工短板。富水地层环境下的隧道中度渗漏病害均可良好适配该施工工艺，施工治理深度完全符合工程标准，防水防渗效果留存时效更长，能够有效降低渗漏病害二次复发的概率。

2.3 渗漏治理全过程施工质量管控措施

完整的全流程质量管控模式，能够稳定施工缝渗漏治理成效，从根源上控制病害反复出现。隧道地质环境、渗漏病害种类、结构破损实际情况都可作为施工前期勘查依据，工作人员可定位渗水通道分布区域，掌握结构裂隙发育状态，选用适配的治理工艺，规避无序施工造成的治理失效问题。高速隧道渗漏整治工作中，前期勘查工作可区分不同程度的渗漏病害，各类病害得到针对性处理，施工整体质量得到有效提升。基面处理标准、材料调配比例、现场操作流程、成品养护环节都属于施工核心管控内容，防水构件布设、注浆作业、表层封闭等施工内容均需遵从统一作业规范，规避操作偏差带来的结构次生损伤。施工收尾后的常态化现场排查工作，可检查接缝防水保护层完整状态与封堵结构稳定性，及时消除各类微小隐患，整套勘查落实、现场施工、后期巡检的闭环管理模式，能够稳定施工缝渗漏治理品质，让隧道防水结构长期保持良好工作状态。

3 治理方案工程应用效果与防水质量优化路径

3.1 差异化治理方案工程应用成效

轻度表面封闭与中度注浆加固的分层治理工艺投入隧道渗漏整治现场，能够适配各类复杂施工缝渗漏工况条件，高效完成现场针对性病害处置工作。山区公路隧道二衬施工缝常并存表层潮湿浸润、贯通线状流水等多种复合型病害，现场施工可按照既定病害等级标准合理划分作业区域，防水砂浆封闭工艺用于处理表层轻微浸润接缝，高压注浆加固工艺专门处置贯通线状渗漏接缝，不同程度的结构渗水问题均可得到有效解决[2]。治理作业完成后，工程区段历经雨季高地下水水压的极端工况检验，治理区域未出现任何病害复发情况，施工缝表层始终保持干燥状态，不存在潮湿、流水痕迹，接缝混凝土结构整体保持完整稳定。传统单一封堵工艺存在明显作业适配性局限，施工中易出现施工冗余或治理不到位的情况，分层差异化治理模式贴合现场病害实际特征，隧道施工缝渗漏整治的整体效果得到显著提升，能够广泛应用于不同地质环境的隧道渗漏整治工程项目中。

3.2 施工缝防水施工工艺优化路径

各类隧道渗漏治理工程的落地实践，能够为二衬施工缝防水工艺的全流程优化提供参考，减少施工阶段渗漏病害的产生概率。隧道二衬混凝土浇筑作业期间，接缝基面处理方式可进一步改良，机械凿毛搭配人工清理的组合作业模式，能够清除基面附着的浮浆与松散结构，让不同批次混凝土实现紧密结合。新建公路隧道通过改良基面处理方式与混凝土振捣作业模式，消除了施工缝内部空隙、蜂窝等常见结构缺陷。止水带与止水条的现场安装作业可建立标准化流程，把控构件搭接尺寸与铺设平整程度，规避防水构件错位、结构破损等施工问题。混凝土原料配比与后期养护方案可结合隧道现场温湿度条件动态调整，适配性养护周期能够缓解混凝土收缩变形带来的裂隙问题，提升施工缝混凝土的密实程度与防水能力，从施工本源杜绝渗水通道的生成。

3.3 隧道长效防水质量管控提升策略

隧道渗漏整治实践与施工工艺改良积累的经验，可用于搭建全生命周期防水质量管控体系，维持隧道施工缝防水结构的长期稳定状态。防水施工标准化验收规范可落实至现场施工环节，施工缝基面修整、防水构件布设、混凝土浇筑振捣等关键作业环节都需落实专项核验，不达标的施工工序不得进入后续作业流程，施工阶段的防水施工质量可得到有效把控[3]。隧道投入运营后可落实常态化病害筛查工作，定期检测施工缝及各类防水薄弱区域，尽早处理初期产生的轻微渗漏隐患，控制病害的扩散与加剧。投入运营的公路隧道依托日常巡检与前期隐患处置手段，有效抑制施工缝渗漏病害的大范围滋生。不同地质与水文环境下积累的防水施工经验，能够完善富水地层、破碎围岩区域的施工缝防水专项施工方案，持续升级隧道二衬整体防水结构，支撑隧道长期安全平稳运营。

4 结语

公路隧道二衬混凝土施工缝渗漏病害的整体特征与对应治理手段可通过系统梳理与技术探究得到完整归纳，施工操作不规范、场地水文地质复杂、结构受力产生形变都是病害滋生的主要诱因，渗漏问题的等级特征与发展演变规律可得到清晰总结。现场各类渗漏实际工况可匹配表面封闭、高压注浆加固的针对性处理方式，整套施工管控措施的落地能够妥善处置施工缝位置的轻度与中度渗漏问题。各类现场工程案例证明，分级处理模式贴合不同程度的渗漏病害特征，病害二次出现的情况可以得到有效控制，隧道衬砌结构的整体防水稳固程度得到提升。现场治理积累的实操经验可用于改良施工缝防水作业工艺，隧道全周期质量管控模式的搭建，能够降低施工阶段渗漏病害的产生几率。各类病害处置方式与工艺改良手段，能够持续健全公路隧道二衬防水施工技术框架，可为复杂地质场地的隧道渗漏处置与防水施工品质升级提供扎实的技术依据与工程借鉴。

参考文献：

[1] 赵一轩.公路隧道二衬施工质量控制研究[J].交通科技与管理,2024,5(14):173-175.

[2] 谯峰.高速公路隧道二衬混凝土掉块病害处治技术研究[J].运输经理世界,2024,(7):125-127.

[3] 滕文刚,李鹏程,任成飞.公路隧道二衬钢波纹板混凝土复合结构力学性能分析[J].公路,2023,68(7):16-22.