公路隧道衬砌裂缝成因分析与注浆修复技术研究

程　航

湖北交投建设集团有限公司桥隧分公司 湖北 武汉 430050

【摘　要】：针对公路隧道衬砌裂缝病害威胁隧道运营安全的问题，以衬砌裂缝成因及注浆修复技术为研究对象，开展衬砌裂缝现场调查与诱因识别，剖析裂缝产生内在机理。围绕裂缝病害开展注浆修复技术构建，完成注浆材料选型、工艺参数标定与标准化施工流程设计，采用多手段检测、内力监测的评价体系对注浆修复效果开展评判。结合模型试验结论关注注浆引发衬砌附加内力变化，明确拱顶、拱肩为重点监测部位。研究形成的成套分析与修复技术可为公路隧道衬砌裂缝病害治理提供技术借鉴。

【关键词】：公路隧道；衬砌裂缝；注浆修复；效果评价

DOI:10.12417/2811-0536.26.10.008

我国公路隧道建设规模持续扩张，大量投入运营的隧道受围岩条件、施工工艺及服役环境多重因素影响，衬砌裂缝病害频发。裂缝持续发展会诱发渗漏水、混凝土剥落等次生病害，削弱衬砌整体承载能力，对行车运营埋下安全隐患。现有治理手段中注浆修复应用广泛，但材料适配、参数选取及效果评判仍缺少系统完整的技术体系。为提升裂缝病害处置水平，本文从病害成因角度入手，探究注浆修复关键技术，建立对应的修复效果评价方式，相关研究成果可为同类公路隧道病害处置提供理论与工程参考。

1 公路隧道衬砌裂缝病害成因剖析

（1）衬砌裂缝现场病害调查：衬砌裂缝现场病害调查依托隧道无损检测技术体系开展实施，采用激光断面仪、混凝土裂缝宽度检测仪完成全域扫描作业，精准采集衬砌表面裂缝的走向、长度、宽度、分布密度等基础参数。结合隧道通车年限、围岩等级、施工工况等基础资料，完成病害区域分区归类统计。系统化的病害数据采集与整理工作，能够精准锁定病害高发区段，为后续裂缝机理分析、病害诱因甄别提供真实可靠的数据支撑，可为同类隧道病害普查工作提供标准化参考依据。

（2）衬砌裂缝受力影响分析：衬砌裂缝受力影响分析依托有限元数值模拟手段展开精细化运算，还原隧道衬砌混凝土服役状态下的应力场与位移场分布规律[1]。精准测算衬砌结构在围岩压力、行车荷载、温度应力耦合作用下的内力变化特征，定位衬砌结构应力集中薄弱区域。量化分析裂缝产生后衬砌截面受力衰减、结构刚度下降的变化规律，明确裂缝病害对隧道整体承载体系的负面影响。该量化分析模式能够精准揭示结构受力与裂缝发育的内在关联，具备较高的工程借鉴与学术研究价值。

（3）衬砌裂缝诱发因素识别：衬砌裂缝诱发因素识别围绕隧道施工与运营全周期展开系统性研判，梳理混凝土配比偏差、浇筑振捣不密实、养护工艺不规范等施工阶段结构性隐患。同时甄别围岩流变变形、地下水渗流侵蚀、环境温湿度循环变化等运营阶段外部诱因。区分结构性裂缝与非结构性裂缝的诱发机理，明确各类因素对衬砌开裂的影响权重。精细化的诱因分类识别体系，可精准定位病害核心根源，为隧道衬砌裂缝靶向修复、病害预防性治理提供核心理论依据与技术参考。

2 公路隧道衬砌裂缝注浆修复技术构建

（1）注浆材料选型研究：注浆材料选型研究依托室内力学试验完成多组浆液性能对比测试，采集不同配比浆液的初凝时间、抗压强度、粘结强度与渗透系数指标，评估材料在含水裂缝环境下的稳定性。结合衬砌裂缝开度与渗流状态筛选适配浆液体系，兼顾浆液流动填充能力与硬化后抗渗抗裂性能，规避材料收缩变形引发的二次开裂现象。材料性能量化测试形成的选型判定标准，能够匹配不同病害等级的衬砌裂缝修复需求，为隧道注浆修复材料选用提供试验支撑与技术参照。

（2）注浆工艺参数确定：注浆工艺参数确定开展多工况模拟试验，探究注浆压力、注浆速率、浆液水灰比之间的耦合作用关系，记录浆液在衬砌裂缝内部扩散范围与填充饱满程度，同步观测不同参数组合下浆液的泌水、离析现象，规避浆液过早固结造成裂缝通道堵塞。划定压力阈值区间，控制浆液溢出与衬砌结构扰动风险，依据裂缝深度、张开度调整单孔注浆量，区分细微发丝裂缝与宽张裂缝的参数适配逻辑。参数标定形成的量化控制指标，能够降低现场施工的随意性，保障裂缝内部空腔得到充分充填，减少局部充填不实的工程隐患，研究得到的参数取值方法可为

同类隧道注浆工程提供参数设计依据。

（3）注浆施工流程设计：注浆施工流程设计围绕衬砌裂缝病害区域布设钻孔点位，确定钻孔倾角、孔径与孔深，避开衬砌内部钢筋分布位置，完成孔位清理与裂缝表面封堵作业，阻断浆液沿衬砌表面外溢的通道[2]。按照既定次序实施分段注浆作业，实时监测孔口压力变化，把控浆液注入节奏，达到终止注浆条件后停止送浆，对注浆孔进行封孔处理。流程设置配套现场质量核验环节，对上一道工序完成状态确认后再进入下一工序，管控各工序衔接质量，减少施工扰动对原有衬砌结构的损伤。整套标准化作业流程可规范现场施工操作，规避工序疏漏引发的修复缺陷，为公路隧道衬砌裂缝注浆修复工程提供可落地的施工组织方案。见图 1。

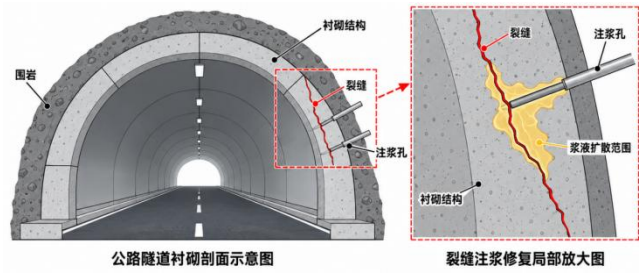

图 1 公路隧道衬砌裂缝注浆修复示意图

3 公路隧道衬砌裂缝注浆修复效果评价

（1）修复质量检测方案：修复质量检测方案采用多手段组合检测模式完成注浆完成后的衬砌裂缝实体检测，采用超声波探伤设备探测裂缝内部浆液充填密实程度，配合钻孔取芯方式获取局部芯样，核查浆液在裂缝深部的浸润与固结状态。借助裂缝宽度观测仪复核衬砌表面裂缝闭合情况，同步使用地质雷达扫描衬砌背部区域，识别注浆后是否留存未充填空腔。多维度检测手段形成成套的质量判别依据，规避单一检测手段带来的结果误判，形成的检测流程可为同类隧道注浆修复质量核验提供标准化技术参照。

（2）衬砌结构性能监测：衬砌结构性能监测布设环向应变采集元件捕捉衬砌截面应变变化，参照模型试验的内力换算方法，依托采集得到的内外侧应变数值完成衬砌弯矩与轴力的换算计算，获取注浆作业完成之后衬砌断面真实内力水平。已有模型试验结果表明，注浆扰动下拱顶、拱肩位置衬砌弯矩增长幅度显著高于其余断面，二次衬砌内力增幅可达到初期支护的 3-4 倍，监测点位针对上述区段做加密布置，把控注浆附加内力维持在结构允许范围[3]。这套力学监测手段实现修复效果由表观形态向内部受力状态延伸，为衬砌修复后的结构安全评判提供试验层面的数据支撑。

（3）修复工程效益分析：修复工程效益分析从结构耐久、施工投入、隧道运营三个维度开展量化梳理，统计注浆材料消耗量、钻孔施工工时、现场设备投入等实际施工指标，核算病害治理阶段直接工程成本。跟踪注浆修复完成之后衬砌裂缝再次开展扩展的频次，统计隧道后期病害返修作业的投入规模，对比传统凿除重做工艺的全周期资源消耗。量化得到的效益分析指标能够为公路隧道同类病害治理方案比选提供数据参考，助力隧道病害修复实现技术性能与工程投入之间的平衡把控。

4 结语

公路隧道衬砌裂缝的治理需要兼顾病害机理研判、修复工艺管控与修复后性能评估。衬砌开裂受施工缺陷与外部环境多因素耦合作用，病害表现形式复杂，盲目开展注浆处置易引入附加内力，进一步损伤衬砌结构。注浆材料性能、工艺参数取值直接决定裂缝充填质量，拱顶、拱肩等关键断面的受力状态应当作为修复后重点关注对象。多手段联合检测与结构内力监测相结合的评价方式，能够规避仅依靠表观现象判定修复成效带来的偏差。相关技术思路可为在役公路隧道衬砌裂缝的病害整治提供实操层面的技术支撑，对降低隧道后期运维成本具备实际意义。

参考文献：

[1] 邵珠山,席慧慧,乔汝佳,等.运营隧道衬砌裂损与治理修复措施研究综述[J].现代隧道技术,2022,59(4):29-39.

[2] 宋京,万利,张长安,等.在役隧道裂损衬砌局部套拱加固技术研究与应用[J].现代隧道技术,2025,62(1):267-274.

[3] 李福海,李瑞,姜怡林,等.隧道二次衬砌脱空带模注浆对衬砌结构受力影响的试验研究[J].现代隧道技术,2021,58(5):147-158.