

市政道路桥梁裂缝微创注浆快速修补工艺

叶立山

(莱州市恒通园林绿化工程有限公司, 山东 烟台 261400)

摘要 本文围绕市政道路桥梁裂缝这一高频病害, 构建微创注浆快速修补工艺体系。立足于裂缝类型、空间分布和劣化链条, 指出传统填缝、挖补创伤大、封闭时间长且难触及深部隐患。提出以小孔径定向钻孔为载体的微创注浆路径, 将高流动浆材引入裂缝及板底脱空区, 恢复受力连续性, 并形成“病害识别—分级处治—精细布孔—过程管控—效果追踪”的工艺框架。青岛 S310 躬崔线大修实践表明, 环氧树脂液注浆配合裂缝封闭和层次化翻修, 在 77 d 内完成通车, 在耐久性能、工期控制和交通组织之间取得较为稳健的平衡, 验证该工艺在国省干线及城市桥梁上的工程适用性。

关键词 市政道路桥梁; 裂缝; 微创注浆; 快速修补

中图分类号: U418; U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.031

0 引言

市政道路桥梁工程的正常使用在城市交通中发挥着至关重要的作用, 但是其常见病害的出现对城市的交通带来诸多不便。市政道路桥梁工程的常见病害主要包括桥面路面不均匀沉降、桥梁道路出现裂缝、桥梁道路内部钢筋腐蚀以及桥面路面剥蚀等^[1]。在诸多病害之中, 裂缝既是最常见的表层缺陷, 又是内部劣化的主要通道, 传统填缝挖补难以阻断劣化链条, 亟需构建以微创注浆为核心、兼顾快速封闭与结构加固的修补工艺体系。

1 市政道路桥梁裂缝病害特征与修补需求分析

1.1 裂缝类型与空间分布特征

市政道路桥梁裂缝在构件层次和空间分布上呈现复合特征。桥面铺装多见纵向、横向、网状及块状裂缝, 常沿行车轨迹和轮迹带集中, 反映面层与基层受力不协同。主梁腹板、横隔板及支座附近易出现斜裂缝和贯通裂缝, 顺应主拉应力方向扩展, 对承载性能影响更直接。城市桥梁处于高频启停环境, 伸缩缝附近、梁端和桥头搭接处裂缝密集, 这些部位共同构成若干易损带, 需要在工艺设计阶段单独识别并实行分区治理。

1.2 裂缝发展机理与服役工况耦合作用

裂缝演化受材料内在缺陷与服役工况叠加驱动。早期干缩和温度收缩在混凝土内部形成微裂隙, 后续车轮反复荷载使这些弱点逐渐贯通, 疲劳主裂缝由此形成。地基差异沉降、支座错动以及施工阶段遗留的

空鼓和离缝改变局部内力路径, 使一些次要裂缝在高周荷载下加剧开展^[2]。城市桥梁长期暴露在雨水、融雪剂和尾气环境中, 裂缝一旦产生, 渗水穿透保护层引发钢筋锈胀, 化学侵蚀和力学损伤交织, 使表层病害升级为整体耐久隐患^[3]。

1.3 传统修补方式适用边界与局限性

常用裂缝处置多采用填缝、贴缝、开槽灌缝以及小范围挖补等工艺, 适合宽度较小、深度有限或位移较稳定的裂缝, 在一定时期内能够改善行车舒适性并强化表面防水。对存在板底脱空、钢筋锈蚀和内部空洞的构件, 这类方式难以触及病害根部, 表层观感恢复之后, 裂缝附近依然残留应力集中区, 后期极易在原缝位置或邻近区域再次开裂^[4]。挖补和开槽作业占道面积较大, 施工噪声明显, 还会削弱原有结构整体性, 维护周期偏短、交通影响偏重的矛盾始终难以缓解。

1.4 微创、快速、耐久一体化修补需求的提出

在上述矛盾背景下, 道路桥梁裂缝处置逐渐转向对微创、快速、耐久一体化方案的期待。微创注浆技术依托小孔径定向钻孔, 把高性能浆材送入裂缝深部及板底脱空区, 一次作业同步完成裂缝封闭、脱空填充和局部刚度恢复, 桥面外观保持连续完整。高早强、湿粘结性能优良的材料配合夜间封闭, 可在短时间内恢复开放通行, 将交通干扰压缩在可控窗口。重载改扩建工程的经验表明, 此类注浆工艺在成本节约、施工效率和使用寿命延长方面表现突出, 为市政桥梁裂缝微创注浆快速修补工艺的系统应用提供了现实基础。

作者简介: 叶立山 (1971-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 市政工程。

2 裂缝微创注浆快速修补工艺的理论基础与技术内核

2.1 微创注浆对结构性能的作用机理

微创注浆依托小孔径定向钻孔,将高流动浆体引入裂缝及板底脱空区,在硬化阶段形成与原结构密贴的“补强结石体”,重建损伤部位的受力连续性。板底接触状态改善后,弯沉曲线趋于平缓,轮载引起的拉应力峰值降低,疲劳损伤累积速率随之减小,桥面铺装和主梁局部刚度得到实质恢复^[5]。相关高聚物注浆技术实践表明,经注浆加固的路面或路基在动刚度、沉降控制方面表现出较好的稳定性,为市政道路桥梁裂缝微创修补提供了明确的力学支撑路径。

2.2 注浆材料性能需求与配比思路

面向桥梁裂缝微创注浆,浆材既承担填充和粘结角色,又参与长期受力,性能要求远高于一般堵漏材料。低黏度和适度渗透性有利于进入细小裂隙和板底缝隙,早期强度形成速度需契合夜间封闭时长,体积稳定性与柔韧性决定修补区后续开裂风险,耐水和耐介质侵蚀性能关系到耐久水平。聚氨酯、高性能水泥基、地聚合物浆材在配比上可围绕“流动性—膨胀度—强度形成速率”三组参数进行权衡,通过调节多元醇、异氰酸酯或碱激发体系组分比例,实现适用于市政道路桥梁裂缝修补的综合性能组合。

2.3 微创注浆与传统注浆工艺的区别

传统注浆更偏向结构加固或地基处理,孔径较大、孔数较多,注入体积和压力水平较高,施工扰动明显,难以在城市高密度路网中频繁采用。微创注浆强调“小孔、小量、定向”,依托雷达等无损检测结果布孔,注重对裂缝及其背后脱空区的精准覆盖,尽量保持桥面铺装和构件外观完整。采用高聚物或地聚合物材质后,注浆孔直径可控制在厘米级,固化时间缩短,施工队伍以移动作业点的方式推进,道路封闭范围和时长大幅压缩,在功能上更贴近“外科手术式”病害治理。

2.4 “快速修补”的时间尺度与控制要点

市政道路桥梁多采用夜间短时封闭,微创注浆要真正称得上“快速”,关键在于把握时间尺度和控制指标,而不是简单强调固化速度。实践表明,高聚物注浆材料在30~90 min内可形成可观承载能力,但开放交通前仍需核查弯沉、挠度和板底充填度等指标,将早期刚度恢复到安全阈值以上。在施工组织方面,检测、钻孔、注浆、封孔和验收需编排成紧凑工序链,避免等待时间相互叠加;材料配方则应针对当地气温和构件厚度进行微调,使凝结与强度增长曲线贴合交

通放行节点,形成“诊断—修补—通行”一气呵成的节奏。

3 市政道路桥梁裂缝微创注浆快速修补工艺体系构建

3.1 病害识别与分级处治决策框架

微创注浆要真正发挥结构修复作用,前提是将裂缝从“表象损伤”还原为“结构病灶”。近年来,沥青路面裂缝注浆处置多采用三维探地雷达、弯沉检测、取芯等组合手段,建立“表层开裂—基层脱空—路基软弱”多层次画像,进而判断裂缝是否伴随脱空、唧浆、渗水等隐患。在此基础上,可构建以受力性质和病害深度为主线的分级框架:表层疲劳微裂缝以表面封闭与薄层罩面为主;反射裂缝与温度裂缝中,若无明显脱空,可采用开槽灌缝配合封层;一旦探测结果显示半刚性基层或混凝土构件存在空洞、界面剥离,则划入“结构型裂缝”,列入微创注浆处治清单,优先安排在交通量大、结构安全储备偏低路段。

青岛市S310躬崔线龙青高速至莱西平度界段大修工程体现了这种分级思路。该项目全长12.765 km,在常规铣刨、基层重构基础上,针对不同病害设置“水稳基层开V型槽灌缝147 m、热沥青灌缝202 m、混凝土裂缝环氧树脂封闭350.4 m²、环氧树脂液注浆139.9 m³”等差异化工序,将适宜表层整饰的裂缝与需要注浆加固的混凝土裂缝区分处理,既避免“大拆大建”,又给注浆工艺留出明确边界,最终实现大修工程77天完工、交工质量评定合格。决策链条从“识别—分级—匹配工法”一气呵成,为微创注浆嵌入国省干线路网养护提供了可复制的决策模板。

3.2 布孔策略与注浆路径设计原则

微创注浆强调“少扰动、深嵌合”,布孔策略决定浆液能否精准抵达目标缺陷区域。近年来工程实践中,将“微孔”注浆界定为在直径约2 cm的小孔内实施自下而上的注浆作业,以减小对既有结构和行车安全的影响。在裂缝处治场景下,布孔宜遵循三条主线:一是孔位随裂缝走向布设,优先覆盖裂缝交汇点和弯折处;二是孔深匹配结构层次,对沥青面层一半刚性基层—混凝土构件等不同组合设置分层目标深度,避免浆液在上部过早扩散;三是结合雷达和弯沉检测结果,对脱空集中区、桥头搭接区、伸缩缝附近适度加密,以形成连续的注浆“骨架通道”。

从S310躬崔线大修工程的工程量配置可以看出,注浆主要服务于“点状+线状”混凝土裂缝集中区:工程量清单中环氧树脂液注浆仅为139.9 m³,却配套

350.4 m² 裂缝封闭与大规模面层、基层重构,说明注浆区段高度聚焦,优先投向对整体耐久性影响较大的关键构造部位。在该类项目中,设计和施工单位普遍采用“裂缝定位—结构判别—局部加密”的布孔思路,由现场病害详查确定注浆段起终点,再依照构件几何形态和钢筋布置情况,细化孔距和孔深;这种以“少孔精准”替代“密孔铺排”的策略,降低钻孔干扰,压缩封闭时间,同时为后续封层、罩面等工序预留连续作业面,符合城市通行压力下的现场组织需求。

3.3 施工过程关键控制环节

微创注浆修补虽带有“微创”二字,但对施工组织和细节控制提出了更高要求。从工艺链条看,关键环节至少包括裂缝及构件表面处理、钻孔与清孔、注浆压力与流量控制、封孔整饰四个阶段。裂缝处治类工程中,清除松散材料和水分是注浆前的首要任务;高聚物注浆工程常采用钢钎自重贯入法检验孔内残渣清理程度,以能在约 1 s 内自由贯通孔深为合格标准,确保浆液在预定通道内扩散。注浆阶段需要兼顾“充盈度”和“控升量”,一方面根据实时压力变化判断空腔填充情况,另一方面严格控制抬升量,避免桥面板、盖板沟等轻薄构件产生翘曲。高聚物类材料常见凝固时间约 5 min、30 min 左右可承受行车荷载,为夜间封闭、白天放行提供条件。

S310 躬崔线大修工程的时间表凸显了施工组织的紧凑性。项目合同价约 5.11 亿元,施工段长 12.765 km,实际工期仅 77 天,需同时完成大规模铣刨、基层重建、沥青面层摊铺和桥涵构造物修复等多专业交叉作业。在这种条件下,环氧树脂液注浆工序通常被安排在交通封闭窗口期靠前位置,先完成钻孔和注浆,再依次推进裂缝封闭、混凝土修补和面层铺筑,以避免交叉工序污染孔口或破坏注浆体。现场经验表明,能够把控好“窗口长度—材料凝固时间—工序衔接”三者之间的平衡,是微创注浆从技术方案转化为工程实绩的关键;一旦注浆固化时间与铣刨、摊铺节奏匹配不佳,就容易形成工点窝工或反复返修,弱化该工艺在“快速修补”上的优势^[6]。

3.4 质量评价与效果追踪机制

微创注浆修补强调“结构性修复”,质量评价不能停留在视觉效果层面,而需形成从施工过程控制到服役期监测的闭环。现行实践中,施工期质量评价一般分为两类指标:一类为过程性指标,关注注浆量、压力曲线、孔内残渣清理程度、施工温湿度等记录;另一类为实体性指标,依托弯沉测试、钻芯检测、雷

达成像等手段评判结构恢复情况。高聚物裂缝注浆工程的试验资料显示,注浆后裂缝处弯沉可降低约 20%,两侧弯沉差明显收敛,三维探地雷达图像中内部灰度均匀、振幅无异常增强,说明浆液在裂缝及脱空区形成连续“浆脉”,结构整体刚度得到恢复。

青岛地区的道路养护管理将这种实体评价纳入路网绩效考核。青岛公路事业发展中心提出国省道 MQI 和 PQI 优良路率保持在 99% 以上,同时在“路面裂缝处治、桥梁结构加固、拌合料管理”三大主题治理中,把裂缝处治质量视作长寿命路面的关键支点。S310 躬崔线大修工程交工验收结论为“合格”,在常规技术状况考核基础上,还叠加了对混凝土裂缝封闭面积和环氧树脂注浆长度的计量与外观检查,确保注浆部位无渗漏、无二次开裂。后续养护阶段,结合省级科技成果中提出的“病害识别—靶向注浆—结构修复”一体化工艺,可围绕注浆区段布设重点观测点,定期复测弯沉、裂缝宽度和路面技术状况指数,将微创注浆的短期补强效果转化为可量化的中长期性能曲线,为后续优化材料配比、注浆压力和施工窗口提供反馈,形成“修补—评价—再优化”的闭环机制。

4 结束语

综合裂缝劣化机理、浆材性能需求和施工组织条件来看,微创注浆为市政道路桥梁裂缝处置提供了一条兼顾效率与耐久的修补路径。青岛 S310 躬崔线大修工程显示,当病害识别、分级处治、布孔策略以及质量追踪形成闭环时,该工艺能够在有限时间窗内实现结构补强与交通恢复的统一。未来仍需围绕浆材长期性能、现场快速检测和标准体系完善持续深挖潜力,使市政道路桥梁裂缝微创注浆快速修补在更多城市场景中形成可复制、可评价的常规做法。

参考文献:

- [1] 胡延涛,李元庆.市政道路桥梁工程的常见病害与施工处理技术探究[J].居业,2021(10):54-55.
- [2] 陈丽萍.高架交通荷载对下穿轨道交通沉降影响研究[J].城市轨道交通研究,2025,28(05):312-314.
- [3] 岳鹏威.市政工程桥梁设计与施工中的裂缝成因及预防措施[J].工程抗震与加固改造,2024,46(06):200.
- [4] 黄正明.关于灌浆法在市政道路桥梁隧道施工中的应用[J].中国科技投资,2021(06):118-119.
- [5] 张霄雷.探析市政道路桥梁加固设计的方法[J].林业科技情报,2021,53(01):99-100,103.
- [6] 郝明.市政道路桥梁混凝土裂缝成因分析及处理措施[J].中国高新科技,2025(09):116-118.