

中小跨径梁桥裂缝检测与预防性养护对策研究

刘雅璐

阿拉善盟交通运输事业发展中心宗别立公路养护工 内蒙古 阿拉善盟 750306

摘要：中小跨径梁桥是公路交通路网的核心基础构件，长期服役下易产生各类裂缝病害，影响桥梁安全与耐久性。本文系统梳理梁桥裂缝病害类型与成因，对比分析传统与智能检测技术的适配性，构建标准化检测流程。同时建立裂缝分级评估体系，制定轻、中、重度病害差异化预防性养护对策，搭建常态化养护管理机制。结合工程实例验证，该体系可精准处置病害、降低养护成本，为同类桥梁养护运维提供参考。

关键词：中小跨径梁桥；裂缝检测；预防性养护对策

引言：中小跨径梁桥广泛分布于国省道及县乡道路，是区域交通通行的关键载体。此类桥梁结构刚度偏小、服役环境复杂，叠加重载车流、自然侵蚀及养护不足等问题，裂缝病害高发且逐年加剧，易引发结构承载力下降等安全隐患。当前桥梁检测技术适配性不足、养护对策同质化问题突出，难以实现精准运维。基于此，本文聚焦裂缝病害治理，优化检测技术、构建分级养护体系，助力桥梁病害常态化、科学化处置。

1 中小跨径梁桥裂缝病害类型及成因分析

1.1 中小跨径梁桥结构与服役特征

(1) 桥梁界定与结构形式：按行业标准，小桥跨径为 8~30m，中桥为 30~100m，中小跨径梁桥多指跨径 8~50m 的梁式桥，广泛分布于县乡公路和普通国省道。国内主流形式包括简支梁桥、连续梁桥、空心板梁桥和 T 梁桥。简支梁桥构造简单、受力明确，以跨中正弯矩和支座附近剪力为主；连续梁桥通过墩顶负弯矩减小跨中挠度，行车平顺；空心板梁桥自重轻、建筑高度小，适用于低等级道路；T 梁桥跨越能力较强，常用于中跨径。其受力基础均为梁体受弯、受剪及支座传力^[1]。(2) 服役与结构短板特征：相较于大跨桥梁，中小跨径梁桥刚度偏小、构件单薄，多分布于普通公路、乡村道路，服役环境复杂，长期承受低速重载、反复车流荷载，且基层运维关注度低、养护资源有限，是裂缝病害高发的核心结构与环境诱因。

1.2 梁桥裂缝病害分类及分布特征

(1) 结构性裂缝：主要包括抗弯裂缝、抗剪裂缝和支座裂缝。抗弯裂缝多出现在跨中受拉区，垂直于主筋向上扩展；抗剪裂缝常见于支座附近腹板，呈斜向发展；支座裂缝多沿支座边缘或局部承压区分布。此类

裂缝随荷载循环持续扩展，削弱截面有效高度和抗剪能力，降低承载力与整体稳定性。(2) 非结构性裂缝：主要包括温度裂缝、干湿收缩裂缝、混凝土碳化裂缝和表层剥落裂缝。温度裂缝多为表面网状或纵向裂缝，收缩裂缝呈龟裂状，碳化裂缝沿保护层发展，表层剥落裂缝表现为混凝土起皮脱落。其短期危害小于结构性裂缝，但会加速水分、氯离子侵入，诱发钢筋锈蚀，显著影响耐久性。

1.3 裂缝病害多维度成因分析

(1) 力学荷载因素：车辆常规往复荷载、超限超载车辆碾压、车辆冲击荷载等动态荷载作用，导致桥梁构件受力不均、局部应力集中，长期累积引发结构性裂缝萌生与扩展。(2) 自然环境因素：温度昼夜与季节交替、雨水渗透冲刷、紫外线老化、大气酸碱腐蚀、冻融循环等自然作用，破坏混凝土结构完整性，诱发表层及深层裂缝病害。(3) 施工与养护因素：桥梁施工阶段材料配比不达标、浇筑工艺缺陷、养护龄期不足等质量问题；运营阶段巡检不及时、病害处置滞后、养护方式不当，加速裂缝病害发展与恶化。

2 中小跨径梁桥裂缝检测技术优化与应用

2.1 传统裂缝检测技术及适配性评价

(1) 人工目视检测法：基层养护常用。人员携带望远镜、照明、卷尺和裂缝对比卡，近距离观察梁体、墩台、支座及桥面系，记录裂缝位置、走向、长度和宽度。优点是成本低、操作简单、无需复杂设备，适合日常巡查和初排。但精度低，宽度多靠肉眼或对比卡判断，主观性强，人员差异大；高墩、桥下受限、跨河跨沟等危险区域检测难、风险高；效率低，难满足中小跨径梁桥数量多、分布散的批量检测需求。(2) 常规仪器

检测法：借助裂缝宽度仪、深度检测仪、超声波探伤仪等定量或半定量检测。宽度仪通过光学或电子放大测量表面裂缝宽度，精度可达 0.01mm，适用于表层裂缝；深度仪多用超声或冲击回波估算深度；超声波探伤仪利用声速、波幅和波形变化判断内部缺陷和裂缝。其精度较高，但操作复杂，需专业培训，并受现场环境、耦合条件、钢筋分布等影响，结果仍需经验综合判断^[2]。（3）传统技术适配性分析：结合中小跨径梁桥数量多、分布散、经费有限的特点，人工目视适用于日常巡查和初步筛查，常规仪器适用于重点病害复核和专项检测。但传统技术在精细化、常态化检测中局限明显：一是难以大面积快速覆盖，效率与桥梁数量不匹配；二是高危区域和隐蔽部位盲区多；三是数据多为纸质或简单电子表格，难形成可追溯、可对比的病害数据库，不利于裂缝发展趋势分析和养护决策。

2.2 新型智能检测技术应用研究

（1）无人机航拍检测技术：利用多旋翼或固定翼无人机搭载高清相机、云台和定位模块，对桥梁进行大范围、非接触快速扫描。作业前根据桥梁跨度、高度和周边环境调试飞行高度、航线重叠率、相机焦距、曝光时间和分辨率等参数；飞行中按预设航线采集梁体侧面、底面、桥墩和支座图像；后期通过图像拼接、畸变校正和裂缝识别算法，提取裂缝位置、长度和宽度。该技术机动灵活、覆盖广、效率高，适合中小跨径梁桥批量快速普查，可减少高处作业风险^[3]。（2）机器视觉无损检测技术：基于高分辨率图像或视频，采用边缘检测、阈值分割、深度学习等算法，对裂缝自动识别、尺寸量化和病害标记。通过训练大量裂缝样本，使模型学习纹理、灰度和几何特征，在复杂背景中定位裂缝并计算像素尺寸，再结合标定系数换算实际尺寸。该技术精度高、重复性好，可精准检测表层裂缝并长期对比；实操需注意光照均匀、拍摄角度、标定精度和样本丰富度，避免误检漏检。（3）隐性病害检测技术：针对桥梁内部隐性裂缝和深层损伤，可采用红外热成像和光纤传感检测技术。红外热成像利用混凝土表面温度场差异，识别内部空鼓、脱粘和裂缝区域；光纤传感则通过埋设或粘贴光纤，感知结构应变、温度和裂缝开展引起的信号变化，实现分布式、长距离监测。此类技术能够弥补表层检测技术的短板，对内部病害进行早期排查和预警，但设备成本较高，数据处理复杂，目前多用于重点桥梁或病害严重桥梁的专项检测。

2.3 检测技术优选与标准化流程构建

（1）分场景检测技术优选：根据桥梁病害严重程

度、运营等级和检测场景，匹配最优技术组合。日常普查以人工目视和无人机航拍为主，突出效率和覆盖面；专项检测采用无人机、机器视觉与常规仪器结合，提高精度和量化能力；病害复核和内部隐性病害排查则引入红外热成像、光纤传感和超声波检测，实现由表及里、由浅入深的综合诊断。通过技术组合，实现检测精度与成本平衡。（2）标准化检测流程搭建：制定涵盖前期桥梁资料踏勘、现场分区检测、数据采集整理、病害统计评估、检测报告输出的全流程标准化作业体系。前期收集设计图纸、竣工资料和养护记录，明确检测重点；现场按桥跨、构件和病害类型分区检测，统一编号和记录格式；数据采集后进行分类整理、趋势分析和等级评定；最终形成包含病害分布图、成因初判和养护建议的检测报告^[4]。（3）检测精度质量控制：梳理检测过程中易出现的误差因素，如设备未校准、光照变化、拍摄角度偏差、人工判读差异等。制定设备定期校准、多点复核、数据修正等精度控制措施，对关键裂缝进行重复测量和交叉验证，建立数据审核机制，保障检测数据的真实性、准确性和可比性，为中小跨径梁桥裂缝病害的科学处治提供可靠依据。

3 中小跨径梁桥裂缝预防性养护对策与工程验证

3.1 裂缝病害分级评估体系构建

（1）病害分级评定标准：结合裂缝宽度、深度、分布密度、扩展速度、病害位置五项核心指标，划分轻微、中度、重度三个病害等级。轻微裂缝宽度小于 0.2mm，深度浅、分布稀疏、扩展缓慢且位于非关键受力区；中度裂缝宽度 0.2~0.5mm，深度较深、局部密集、有一定扩展趋势或位于一般受力部位；重度裂缝宽度大于 0.5mm，深度贯穿、分布密集、扩展迅速或位于跨中、支座等关键受力区。通过量化评分，实现病害等级客观判定。（2）桥梁安全风险评估：基于裂缝病害等级，判定桥梁结构安全隐患等级。轻微病害对应低风险，可纳入日常观察；中度病害对应中风险，需尽快安排养护处治；重度病害对应高风险，应立即采取限载、加固等应急措施。据此明确不同病害的养护优先级，为差异化养护决策提供依据，确保有限养护资源优先用于高风险桥梁。

3.2 分级差异化预防性养护技术对策

（1）轻微裂缝养护对策：采用混凝土表面封闭、涂膜防护、表层修补等低成本预防性技术。先清理裂缝表面浮浆和灰尘，再涂刷环氧树脂、聚合物水泥基防水涂料或专用封闭胶，形成防护层，阻断水分、氯离子和有害气体侵入，防止裂缝进一步萌生扩展。该技术

施工简便、造价低,适配日常常态化防护,可有效延缓表层裂缝恶化。(2)中度裂缝养护对策:运用压力注浆、裂缝填充、局部加固等技术。对较深裂缝采用高压注浆机将环氧树脂或聚氨酯浆液注入裂缝内部,填充空隙并恢复混凝土整体性;对局部破损区域进行剔凿、清理后填充高强修补砂浆;必要时粘贴碳纤维布或钢板进行局部加固,遏制裂缝持续扩展,恢复结构局部受力性能^[5]。(3)重度裂缝养护对策:采用构件补强、粘贴加固、局部置换、结构修复等专项技术。对承载力不足的梁体,可粘贴碳纤维板、增大截面或体外预应力加固;对严重破损的构件进行局部置换;对整体结构进行修复和加强,彻底处置严重病害,恢复桥梁整体承载力与结构稳定性,消除安全隐患。施工需结合交通管制和专项设计,确保处治效果。

3.3 常态化养护管理体系建设

(1)动态巡检监测机制:建立月度常态化普查、季度专项检测、年度全面评估的监测制度。月度普查以人工目视和无人机快速扫描为主,季度专项检测采用仪器和机器视觉技术,年度评估进行系统分析和等级评定。实现裂缝病害动态跟踪、早发现、早处置,防止病害由轻转重。(2)基层养护管理制度完善:明确桥梁养护责任主体、作业流程、考核标准,规范中小跨径梁桥养护作业标准。建立县、乡、村三级养护责任体系,落实巡查、记录、上报、处治闭环管理,解决基层养护不规范、责任不清晰问题,提升养护工作的制度化和规范化水平。(3)养护信息化管理:搭建桥梁病害电子台账,记录桥梁基本信息、病害数据、养护记录、检测报告和处治效果。利用信息化平台实现病害溯源、养护效果追踪和趋势分析,推动养护工作精准化、数字化,为科学决策和资源调配提供数据支撑。

3.4 工程案例应用与效果分析

(1)工程概况:选取某县乡公路上的一座典型中小跨径预应力混凝土空心板梁桥作为工程实例。该桥跨径 $3\times 16\text{m}$,服役年限15年,长期承受重载车辆通行。现场检测发现跨中横向裂缝、支座附近斜裂缝及桥面纵向裂缝,部分裂缝宽度超过 0.3mm ,存在渗水和轻微剥落,基层养护资金有限,病害处治滞后。(2)方案实施:将

本文优化的检测技术与分级养护对策应用于实际工程。首先采用无人机航拍和机器视觉进行快速普查,结合裂缝宽度仪和超声波检测复核,完成病害检测与等级评定。据此制定分级养护方案:轻微裂缝采用表面封闭,中度裂缝采用压力注浆和局部修补,重度裂缝采用粘贴碳纤维布加固。施工过程严格按标准化流程作业,并建立电子台账记录。(3)应用效果评价:从结构安全性、服役耐久性、养护经济性三个维度对比养护前后桥梁状态。养护后裂缝扩展得到有效遏制,结构承载力满足设计要求,耐久性明显提升;养护成本较传统大修降低约30%,且施工周期短、对交通影响小。验证了本文检测技术与分级养护体系的可行性、实用性和经济性,可为同类中小跨径梁桥裂缝处治提供参考。

结束语

本文围绕中小跨径梁桥裂缝病害问题,完成病害成因剖析、检测技术优化、分级养护体系构建及工程验证,形成一套完整的病害检测与预防性养护方案。研究明确了不同检测技术的适用场景,细化了分级养护对策,有效解决基层桥梁养护精准度低、资源浪费等问题。后续可深化智能检测算法研究,完善信息化养护平台,持续提升中小跨径梁桥长效运维水平。

参考文献

- [1] 曹传彩,胡睿,倪艳春. 预制中小跨径箱梁湿接缝裂缝病害及预防性养护技术[J]. 结构工程师,2025,41(04):142-148.
- [2] 王孔杰,王新泉,李泉. 公路中小跨径空心板梁桥裂缝病害成因及处治技术研究[J]. 工程技术,2025,13(02):52-56.
- [3] 朱勇强,肖柯旭. 基于改进YOLOv8模型的中小跨径梁桥裂缝智能检测方法[J]. 计算机技术与发展,2024,34(09):187-192.
- [4] 李晓娅,王旭燚,曹素功. 中小跨径简支梁桥裂缝损伤监测与预防性养护时机研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2023,42(06):36-42.
- [5] 王俊峰,袁阳光,杨千. 多尺度特征融合的PC中小梁桥裂缝损伤评估与养护决策[J]. 交通科学与工程,2024,40(03):78-85.