

高速公路桥梁病害检测及策略探究

徐义东 张 默

山东省路桥集团有限公司 山东 济南 250000

摘 要：高速公路桥梁长期受自然环境、交通荷载及施工养护因素影响，易产生混凝土开裂、钢筋锈蚀、支座老化等各类病害，严重影响桥梁通行安全与使用寿命。本文系统梳理桥梁主体及附属设施常见病害与成因，对比分析常规人工、智能化无损检测及在线健康监测等技术的应用优劣，剖析当前检测运维存在的问题，从病害修复、预防性养护、智能运维及制度保障多维度，提出针对性的桥梁病害防控优化策略。

关键词：高速公路桥梁；病害检测；策略

引言：高速公路桥梁是交通路网的核心枢纽，其结构稳定性与安全性直接关乎公路通行效率和民生出行安全。在长期重载交通、恶劣自然环境的叠加作用下，桥梁结构易出现各类渐进性病害，若检测不及时、养护不到位，极易引发安全隐患。为有效解决桥梁运维痛点，规范病害检测流程、提升防控养护水平，本文结合桥梁病害实际特征，全面探究科学的检测技术与系统化防控策略，为桥梁长效安全运维提供参考。

1 高速公路桥梁常见病害类型及成因分析

1.1 桥梁主体结构病害

(1) 混凝土病害：主要表现为开裂、剥落、碳化及蜂窝麻面。开裂多因温差应力与荷载反复作用超出抗拉强度所致；剥落与碳化则源于材料老化及空气中二氧化碳的长期化学侵蚀；蜂窝麻面常因施工振捣不密实、模板漏浆等工艺缺陷引起。雨水沿裂缝渗入后，进一步加剧冻胀破坏，降低结构耐久性^[1]。(2) 钢筋病害：以钢筋锈蚀和保护层脱落最为常见。环境湿度大、氯离子（如除冰盐或沿海盐雾）渗透至钢筋表面，破坏其钝化膜，引发电化学锈蚀；同时，混凝土密实度不足或保护层厚度偏薄，加速了侵蚀介质到达钢筋界面的速度。锈蚀产物体积膨胀，导致保护层横向开裂甚至剥落，显著削弱钢筋有效截面积，降低结构承载力。(3) 梁板结构病害：包括梁体变形、挠度超限及铰缝或湿接缝破损。重载车辆长期动荷载冲击作用，使梁板产生累积疲劳损伤；结构应力在支座附近或跨中集中，加之预应力损失或配筋不足，易导致下挠过大。接缝破损则削弱了横向整体性，造成荷载传递不均，加速主梁局部破坏。

1.2 桥梁附属设施病害

(1) 支座病害：橡胶支座老化、开裂、偏移或脱

空，根源在于橡胶材料自然老化及紫外线、臭氧作用，同时支座安装偏位或垫石不平整导致受力偏压，脱空则使支座失效，引起上部结构受力重分布，影响整体稳定性。(2) 伸缩缝病害：伸缩缝常出现堵塞、破损、漏水及变形。杂物嵌入限制其自由伸缩，车辆冲击造成焊点断裂或型钢变形；防水橡胶带老化破损后雨水下渗，既腐蚀缝内构件，又通过缝口侵蚀主梁端部和墩台，丧失缓冲功能后加剧主体结构冲击损伤。(3) 桥面铺装病害：表现为开裂、坑槽、起皮和渗水。车辆反复碾压产生剪切疲劳，加上雨水冲刷及冻融循环作用，使沥青混合料粘结力下降，骨料松散；防水层失效后水分渗入，引发基层软化，进一步恶化铺装层使用性能。

1.3 桥梁病害核心诱因总结

(1) 自然环境因素：雨水长期浸泡、高低温交替、冻融循环及风沙磨蚀，持续弱化材料力学性能，加速裂缝扩展和表面风化。(2) 交通荷载因素：高速公路重载、超载车辆频繁通行，往复荷载产生疲劳应力幅，使结构微裂纹萌生并扩展，病害呈渐进性恶化趋势。(3) 施工与养护因素：施工质量控制不严（如配合比不当、养护不到位），运营期巡检不及时、维修方案针对性不强，加之管理制度执行力度不足，导致病害发现滞后，小病酿成大患。

2 高速公路桥梁病害检测技术体系与应用

2.1 常规人工检测技术

(1) 外观目视检测：由检测人员沿桥面、墩台及梁体表面开展逐项巡查，借助放大镜、裂缝宽度观测仪及卷尺等简易工具，现场记录病害的类型、位置、走向、长度及宽度，绘制病害分布草图，形成初步排查档案。该方法操作门槛低、无需复杂设备，适用于日常巡检及

常态化初步筛查,能够快速发现明显表观缺陷^[2]。(2)仪器辅助检测:配备回弹仪测定混凝土表面硬度并推算强度值,利用超声波检测仪发射声波穿透混凝土,依据波速变化和波形衰减判断内部空洞及密实度,采用钢筋扫描仪探测保护层厚度、钢筋间距及直径。三者结合,可获取结构浅层物理力学参数,弥补肉眼观察的局限。(3)常规检测优缺点:优点在于操作简便、设备便携、单次检测费用较低,且检测结果直观易读;缺点同样明显——人工逐点布测效率偏低,大面积桥梁需耗费较长时间,检测结果受人员经验与主观判断影响较大,且无法精准识别深层裂缝、钢筋初始锈蚀等隐蔽性病害,容易造成早期隐患漏判。

2.2 无损智能化检测技术

(1)超声波无损检测:通过在混凝土表面布置发射与接收换能器,利用声波在缺陷界面发生反射、折射及绕射的原理,精准反演内部裂缝深度、空洞范围及不密实区域。该技术不破坏原结构,对浅层至中层内部质量检测效果良好,尤其适用于关键受力部位的加密普查。(2)红外热成像检测:基于不同材料热传导差异,利用红外热像仪采集桥面或结构表面温度场分布图像,当天晴或人工加热条件下,脱空区、渗水层因热传导异常而呈现明显温差色斑。检测覆盖范围广、单次扫描面积大,可快速筛查大范围桥面铺装和墩台表面的隐伏缺陷。(3)无人机航拍智能检测:搭载高清变焦相机与红外热成像模块,通过预设航线自动巡航,结合图像拼接和目标识别算法,对高墩、斜拉桥、悬索桥等高危或大跨度桥梁进行全覆盖外观病害拍摄,实时回传影像并自动标注裂缝、锈斑等异常区域,大幅提升高风险场景下的检测效率和人员安全性^[3]。

2.3 桥梁结构荷载试验与健康监测

(1)静力荷载试验:在桥面指定位置分级施加标准车辆荷载或堆载,通过布置于梁底和墩顶的位移计、应变传感器测量挠度及应力应变响应,将实测值与理论计算值对比,评定结构实际承载能力及安全储备,为限载或加固决策提供直接依据。(2)动力荷载试验:利用环境激励(如风、地脉动)或跑车、跳车等激振方式,采集结构振动响应信号,经频域分析获得自振频率、阻尼比和振型等模态参数,根据频率下降程度和阻尼异常变化,判断结构整体刚度退化及内部损伤累积状况。(3)长期在线健康监测:在关键截面永久安装应变计、倾角仪、加速度计、温度计及索力计等传感器,通过数据采集站与无线传输模块,将实时受力、变形、温度和振动数据汇入云平台,结合自动预警算法进行趋势分析和异

常报警,实现从定期“体检”向实时“监护”的转变。

2.4 检测技术应用问题分析

(1)检测技术适配性不足,部分项目片面追求高端设备应用,未充分考虑桥梁结构类型、环境条件和实际病害特征,导致投入产出比失衡,甚至因设备参数设置不当获取无效数据。(2)检测数据整合度低,各类人工巡查、无损检测及荷载试验数据分散存储于不同格式报表或设备终端中,缺乏统一的数字化档案管理平台,无法有效关联历史数据与空间位置,难以支撑病害发展规律分析和预测性养护决策。(3)智能化检测技术落地不足,基层一线人员对超声波、红外热像及无人机等新设备的原理和操作流程掌握不扎实,数据分析与判读经验欠缺,同时配套标准和验收规范尚不完善,导致新技术推广应用进展缓慢,实际效果未充分发挥。

3 高速公路桥梁病害防控优化策略

3.1 针对性病害治理修复策略

(1)混凝土结构病害修复:针对表面裂缝宽度小于0.15mm的微细裂缝,采用低压注浆或表面封闭法填充环氧树脂胶液,恢复结构整体性;对于剥落和蜂窝麻面,先清除松散层并作界面处理,再采用聚合物砂浆或细石混凝土分层填补压实;针对碳化深度超过保护层厚度的区域,涂刷渗透型阻锈剂或硅烷浸渍防腐层,同时对碳化区进行钝化处理,切断二氧化碳进一步侵入路径,延缓混凝土中性化进程。(2)钢筋与支座病害整治:对已锈蚀钢筋,首先凿除松散保护层并彻底除锈至金属本色,涂刷阻锈转换剂或环氧涂层后,采用高强度聚合物砂浆修复保护层,必要时增设补强钢筋网片;对于老化开裂、严重偏压或脱空的板式橡胶支座和盆式支座,采用千斤顶同步顶升梁体后予以更换,同时调整支座垫石标高与水平位置,保证支座均匀受力,恢复上部结构的自由伸缩和转动功能^[4]。(3)桥面与附属设施养护修复:定期清理伸缩缝内泥沙杂物并更换老化橡胶止水带,对变形型钢进行校正或局部更换,重做过渡区混凝土并保证与桥面平顺衔接;针对桥面坑槽和裂缝,采用热拌修补料或冷补材料分层填筑压实,对贯穿性裂缝进行灌缝封闭;重新铺设桥面防水层,选用高黏结力防水涂料或防水卷材,加强泄水孔周围密封处理,防止雨水下渗侵蚀铺装层和主梁结构。

3.2 构建常态化预防性养护体系

(1)建立分级养护机制:按照桥梁技术状况评定等级、跨径规模及日均交通量,将管辖桥梁划分为特别重要(I级)、重要(II级)和一般(III级)三个养护等

级,分别规定 I 级桥梁每月一次综合巡检、II 级每季度一次、III 级每半年一次,并对应制定差异化的维修响应时限和资金配置比例,实现养护资源的精确投放和动态调整。(2) 落实定期检测巡查制度:严格执行月度经常性检查、季度定期检查和年度特殊检查的三级周期计划,日常巡查以目视结合无人机快速普查,定期检查则综合运用超声波、红外热像及回弹仪等设备进行量化测定;所有检查结果当录入病害台账,按照“巡查—记录—上报—审核—派单一处治—复核”七步闭环流程流转,确保各类病害从发现到处治完成的周期严格可控,真正确保早发现、早预警、早处置^[5]。(3) 强化重载交通管控:协同公安交警及路政执法部门,在桥梁两端设置固定式动态称重和车牌识别系统,对超载超限车辆实施全时段监控与依法处罚,并定期统计重载车通行流量与轴载谱,当累计等效轴载作用次数超过设计阈值时及时发布限载或分流通告,切实降低车辆荷载引起的结构疲劳损伤幅度,从源头控制病害萌发速率。

3.3 智能化检测与运维管理优化

(1) 搭建桥梁数字化管理平台:以 BIM+GIS 技术为底座,集成桥梁设计竣工资料、历次检测报告、养护维修记录、环境气象数据及交通流量信息,建立“一桥一档”全生命周期电子健康档案,实现病害空间位置的三维可视化标注、历史数据的自动对比分析和养护计划智能生成,为科学决策提供完整、可追溯的数据支撑。(2) 推广智能检测技术融合应用:将超声波断面扫描、红外热成像面域筛查、无人机低空航拍与 AI 图像识别算法有机结合,构建从“面—体—内”多维检测体系,通过数据交叉印证提升判读准确率,同时利用深度学习模型对裂缝扩展趋势、支座变形量等关键指标进行动态预测,提前识别高风险隐患,有效降低漏检率和误报率。(3) 加强检测养护人员专业培训:围绕超声波波形判读、热像图温差分析、无人机航线规划与避障操作、监测预警信号评估等关键技术,制定初、中、高三级技能培训大纲和年度轮训计划,采取“理论授课+现场实操+考核认证”模式,着力提升基层人员对新装备、新软件、新方法的综合驾驭能力,保障智能化运维体系有效运转。

3.4 病害防控保障措施

(1) 制度保障:健全桥梁养护管理责任清单,明确桥梁养护师、检测组长、施工负责人及各监管岗位的具体职责与工作标准,配套建立月度绩效考核和责任倒查机制,以制度化闭环规范巡查、检测、修复各环节作业行为,确保管理无死角、执行不走样。(2) 技术保障:设立专项技术研发基金,重点支持高韧性自修复混凝土、长效防腐涂层、便携式内部缺陷扫描仪等新材料新装备的引进消化和国产化改进,通过试点验证成熟后制定应用指南,建立技术推广项目储备库,持续推动检测修复技术迭代升级。(3) 资金保障:按年度桥梁养护总需求测算经费并纳入财政预算,设立专户实行独立核算和专款专用,建立与养护绩效考核结果挂钩的拨付调节机制,同时积极争取中央车购税补助和地方政府专项债券支持,拓宽资金来源渠道,确保检测设备采购、病害处治施工及日常保养等各项经费足额到位,为养护工作常态化高质量运行提供持续稳定的经济基础。

结束语

本文全面分析了高速公路桥梁各类病害的形成诱因,梳理了各类检测技术的应用现状与现存短板,构建了集病害修复、预防养护、智能运维于一体的综合防控体系。桥梁病害治理是长期性、系统性工程,后续需持续推广智能化检测技术,完善数字化管理平台,强化人员技术能力与制度资金保障。通过精细化、智能化养护运维,有效遏制病害发展,全面提升高速公路桥梁结构安全性与耐久稳定性。

参考文献

- [1] 王博,李建辉,张磊.高速公路桥梁常见病害成因及精细化养护对策研究[J].公路交通科技,2023,40(8):92-98.
- [2] 邵耀峰,李旭燕.公路桥梁结构检测技术及病害处置策略研究[J].工程技术与管,2024,8(6):162-165.
- [3] 张远,李智,黄鑫.无人机航拍结合深度学习的高速公路桥梁病害快速检测技术[J].中外公路,2024,44(3):88-93.
- [4] 刘浩,杨峰,王凯.重载交通下高速公路桥梁病害演化规律及养护优化策略[J].公路,2022,67(11):156-161.
- [5] 李洪强,赵阳,孙明远.高速公路桥梁耐久性病害成因分析及修复加固技术[J].交通科技,2023,15(4):76-80.