

桥梁裂缝检测与处理技术

刘新建

中交中南工程局有限公司 湖南 长沙 410004

摘要: 桥梁裂缝是桥梁结构中普遍存在的病害,成因复杂,类型较多。裂缝检测技术涵盖传统人工检测与智能检测两大类,传统技术成本较低但效率有限、存在检测盲区;智能技术各具优势与应用局限,需结合实际场景综合选型。裂缝处理技术包括传统修复方法与新型修复材料及技术,传统方法技术成熟但存在一定短板,新型技术与材料则展现出良好应用潜力。桥梁裂缝防治需聚焦检测技术升级、修复材料创新及施工工艺优化,通过多维度提升检测效率与可靠性,精准匹配不同裂缝场景的处理需求,从源头减少裂缝诱发因素,保障桥梁结构安全稳定。

关键词: 桥梁裂缝;检测技术;智能监测;修复技术;病害防治

1 桥梁裂缝成因与分类

桥梁裂缝作为桥梁结构最常见的病害之一,其形成原因复杂多元,主要可归纳为四大核心因素:

荷载作用: 当桥梁承受的荷载超出设计承载能力,或长期处于超载运行状态,结构内部应力会突破材料极限,进而在梁体底部受拉区等关键部位引发裂缝。

温度应力: 桥梁结构会随环境温度变化热胀冷缩,若这种变形受到约束,将产生温度应力。以混凝土桥梁为例,夏季高温时膨胀受阻、冬季低温时收缩受限,均易产生裂缝。

材料与施工因素: 混凝土原材料质量不合格、配合比设计不当,或施工过程中振捣不密实、养护措施不到位等,都会降低混凝土的强度与耐久性,为裂缝产生埋下隐患^[1]。

地基承载力不足: 地基承载力不够、地基不均匀沉降造成桥涵混凝土结构物破坏。

从分类来看,按裂缝走向可分为纵向、横向及不规则裂缝;按裂缝深度可分为表面、深层及贯穿裂缝。不同类型的裂缝对桥梁结构安全性、耐久性的影响程度存在差异,精准判定裂缝成因与类型,是制定针对性维修加固方案、保障桥梁安全运行的前提。

2 桥梁裂缝检测技术

2.1 传统检测技术

传统人工检测凭借检测工具简单,操作简便、成本低廉的优势,在桥梁日常巡检、裂缝初步排查中应用广泛。

检测人员通过肉眼观察,借助裂缝宽度、裂缝深度测定仪等工具测量,记录裂缝的位置、走向及发展趋势。裂缝宽度测定仪可直接读取数值,精度达0.01mm;裂缝深度测定仪基于超声波反射原理,通过发射与接收超声波信号,根据传播时间计算裂缝深度。

钻芯法: 钻芯法通过钻取混凝土芯样,直接观察内部裂缝情况并测定强度,检测结果更为精准可靠。

传统检测技术存在局限: 人工检测效率低、劳动强度大,对大跨度桥梁、高耸结构及复杂隐蔽部位的检测存在盲区;检测结果受人员经验与责任心影响较大,难以实现裂缝的实时监测与早期预警。

2.2 智能检测技术

2.2.1 无人机与机器视觉

无人机与机器视觉融合的检测技术,是破解传统人工检测痛点的新型智能手段,在大跨度、复杂结构桥梁检测中优势突出。

该技术通过搭载高清摄像头、红外热像仪等传感器的无人机,按预设航线对桥梁进行全方位航拍,获取结构表面高清图像并传输至后台系统。机器视觉算法对图像进行预处理后,采用灰度阈值分割等技术精准识别裂缝、提取特征参数,排除环境干扰,自动测量裂缝宽度、长度等数据并生成检测报告。红外热像仪还可辅助检测混凝土内部缺陷,为裂缝成因分析提供支撑。

该技术具备检测效率高、覆盖范围广、安全性强的特点,既能实现快速巡检与大面积检测,又能动态监测裂缝发展趋势,为养护决策提供精准数据,但恶劣天气会影响无人机飞行稳定性与图像采集质量。

2.2.2 光纤传感技术

光纤传感技术是基于光纤传输特性的新型智能检测技术,具有灵敏度高、抗干扰能力强、耐久性好的优势,适用于桥梁裂缝长期实时监测。

该技术通过在桥梁混凝土结构中布设光纤传感器,利用光弹效应等原理,将裂缝引发的结构变形转化为光信号变化,再通过解调设备获取裂缝相关参数。可根据需求选择不同类型传感器:分布式传感器能实现全结构

全程监测,精准定位裂缝位置;点式传感器可对关键部位裂缝进行实时监测,测量精度达微米级。

该技术不受电磁干扰等环境因素影响,能在恶劣环境下长期稳定工作,传感器体积小、重量轻。通过构建监测网络,可实现全方位、立体化监测,捕捉裂缝早期发展迹象,但前期设备投入与布设成本较高,施工工艺要求严苛。

2.2.3 三维激光扫描

三维激光扫描技术是高精度立体检测技术,通过获取桥梁三维点云数据,实现裂缝精准检测与结构变形分析,在桥梁病害检测与评估中应用广泛。

该技术利用三维激光扫描仪发射激光束,对桥梁进行全方位扫描,通过测量激光传播时间与角度计算目标点三维坐标,形成密集点云模型。经去噪、拼接等处理后生成三维可视化模型,再通过专业软件分析,精准识别裂缝参数,同时检测结构变形与沉降情况^[2]。

该技术具备检测精度高、速度快、非接触式的特点,能快速获取桥梁结构详细信息;通过对比不同时期数据,可精准掌握裂缝扩展与结构变形趋势,但扫描易受遮挡影响,对内部及隐蔽部位检测存在局限,且点云数据处理需专业软件与技术人员支撑。

2.2.4 物联网(IoT)集成

物联网(IoT)集成检测技术是多技术融合的智能监测方案,通过整合感知设备、通信网络与数据平台,实现桥梁裂缝的全面感知、实时传输与智能分析。

该技术在桥梁关键部位布设多种感知设备,同步采集裂缝参数、环境因素(温度、湿度)及结构受力状态等多维度数据;通过无线通信模块将数据实时传输至云端平台;平台利用大数据与人工智能算法处理数据,实现裂缝自动识别、风险等级评估,并在出现异常时自动报警。

该技术实现了数据采集与传输的自动化,减少人工干预,提升检测效率与数据可靠性;多维度数据融合分析可深入探究裂缝成因,为防治工作提供科学依据。支持远程监控与移动端访问,实现桥梁智能化管理,但系统结构复杂,前期投入成本高,对数据安全与平台维护要求严格。

2.3 检测技术对比与选型建议

不同检测技术在精度、效率、成本及适用场景上差异显著,需结合桥梁类型、规模、服役年限及检测需求综合选型:

传统检测技术:检测精度受人工经验影响较大,效率偏低,但成本低、操作简便,适用于中小跨度桥梁日常巡检、临时检测及裂缝初步排查。

无人机与机器视觉:检测效率高、覆盖范围广,精

度能满足常规检测需求,适用于大跨度、复杂结构桥梁的快速巡检与大面积裂缝排查,尤其适合高空、高部位检测,恶劣天气下适用性受限。

光纤传感技术:精度高、耐久性好,支持长期实时监测,适用于重要桥梁关键部位的裂缝早期预警与长期跟踪,但成本高、布设复杂,不适用于临时检测或大面积排查。

三维激光扫描技术:精度极高,可同步检测裂缝与结构变形,适用于桥梁病害详细检测、结构安全评估及改扩建前期勘察,数据处理难度大,易受遮挡影响。

物联网集成技术:支持多参数同步监测与智能分析,适用于大型桥梁、重要交通枢纽桥梁的全生命周期监测,系统复杂、成本高。

选型原则:日常巡检优先选用传统技术或无人机技术;关键部位长期监测首选光纤传感技术;病害详细检测与结构评估采用三维激光扫描技术;大型桥梁全生命周期管理可采用物联网集成技术。

3 桥梁裂缝处理技术

3.1 传统修复方法

传统修复方法技术成熟、应用广泛,需根据裂缝宽度、深度及危害程度选择适配方案:

表面封闭法:适用于宽度小于0.2mm的表面微裂缝。通过清除裂缝表面杂物、灰尘,涂抹环氧树脂砂浆、密封胶等材料形成封闭层,阻止水分与有害物质渗入。仅能处理浅层裂缝,无法解决结构内部隐患^[3]。

压力注浆法:针对宽度0.2mm以上的中深层裂缝。利用注浆泵将环氧树脂、水泥浆等浆液高压注入裂缝内部,浆液凝固后与混凝土形成整体,恢复结构整体性与承载能力。

加固补强法:适用于裂缝严重、结构承载力下降的场景。通过粘贴钢板、粘贴碳纤维布、增设钢筋网、外包混凝土等方式,增强结构受力性能,补强效果显著,但施工周期长、工艺要求高,对桥梁正常通行影响较大。

3.2 新型修复材料与技术

3.2.1 自修复混凝土

自修复混凝土是具备自主修复裂缝能力的新型材料,通过在混凝土中掺入特定功能组分,裂缝产生时可自动触发修复机制,填充裂缝并恢复结构性能,为裂缝防治提供了新思路。

该材料主要分为两类:微生物自修复混凝土在制备时掺入含产酸菌及营养物质的载体,裂缝出现后,水分与氧气渗入激活微生物代谢,产生碳酸钙等矿物质填充裂缝,实现裂缝自主修复。

自修复混凝土修复及时、耐久性好,能在裂缝早期自主修复,避免病害扩展,减少人工养护成本。但修复剂封装工艺、修复效率仍需进一步优化,对宽裂缝的修复效果有待提升。

3.2.2 形状记忆合金(SMA)

形状记忆合金(SMA)修复技术利用其独特的形状记忆效应与超弹性特性,实现桥梁裂缝的修复与加固,修复效果好、耐久性强,适用于桥梁关键部位裂缝处理。

该技术通过将形状记忆合金丝、板等构件嵌入或粘贴在裂缝区域,裂缝产生时,通过加热或利用结构自身应力变化触发合金的形状恢复效应,使构件产生收缩力,对裂缝两侧混凝土施加压力,促使裂缝闭合;同时,合金的超弹性可吸收结构振动与温度变化产生的应力,抑制裂缝再次扩展。

4 桥梁裂缝防治的优化方向

4.1 检测技术升级

桥梁裂缝检测技术需向智能化、精准化、实时化方向升级,通过多技术融合与设备创新,提升检测效率与可靠性,实现裂缝早期预警与动态监测。

推动智能检测设备向小型化、集成化升级:优化无人传感器性能,提升恶劣天气下的图像采集质量;结合深度学习算法,提高裂缝识别准确率与参数测量自动化程度,实现检测数据实时分析;研发便携式高精度光纤传感设备,降低部署成本,扩大监测覆盖范围。

构建多源数据融合监测体系:整合无人机、光纤传感、三维激光扫描等技术的检测数据,结合桥梁结构参数、运营荷载数据,利用大数据分析平台深度挖掘裂缝成因,精准预测发展趋势。

引入数字孪生技术:构建桥梁数字孪生模型,同步实时检测数据,实现裂缝发展的可视化模拟与提前预警,为养护决策提供直观、科学的依据;推动检测技术标准建设,制定统一的操作规范与数据标准,确保检测数据可比、可追溯。

4.2 修复材料创新

修复材料创新是提升裂缝防治效果的核心,需聚焦高耐久性、多功能性与绿色环保性,开发适配不同裂缝场景的新型材料,同时完善材料性能评价体系。

优化自修复材料性能:提升微生物自修复混凝土中微生物的活性与载体稳定性,延长微生物存活时间,提高对宽裂缝的修复效率;研发复合型胶囊自修复材料,实现裂缝的多阶段、深层次修复。

推动纳米改性材料应用:将纳米技术与传统修复材料结合,开发纳米硅烷改性环氧树脂、纳米碳酸钙增强

水泥浆等材料,提升材料的粘结强度、抗腐蚀能力与渗透性能,增强与混凝土基体的结合力,延长修复寿命。

研发专用环保材料:选用、开发环保型修复材料,减少对环境的影响;针对氯盐腐蚀、冻融循环等特殊环境,开发专用修复材料,提升裂缝修复后的环境适应性。

建立综合性能评价体系:从强度、耐久性、环保性等多维度对修复材料进行综合评估,为不同场景下的材料选型提供科学依据,推动创新材料的工程化应用。

4.3 施工工艺优化

施工工艺优化需贯穿桥梁设计、施工及运营养护全过程,通过标准化、精细化施工,减少裂缝源头诱发因素,提升结构抗裂能力与修复效果。

设计阶段:结合桥梁所处地质条件、环境特征与交通荷载,优化结构设计方案,增强结构整体刚度与抗裂性能;利用BIM等信息化手段模拟施工过程,预判裂缝风险,提前制定针对性改进措施。

施工阶段:推广精细化施工技术,采用自动化搅拌设备精准控制混凝土配合比,确保拌合物和易性稳定;应用智能振捣设备,根据混凝土坍落度调整振捣频率与时长,避免过振或漏振;推行模块化施工,减少现场作业量,提升施工质量稳定性。

养护阶段:加强施工期养护监测,利用无线传感技术实时监测混凝土温度与应变变化,及时调整养护方案;采用智能养护设备(如自动喷淋系统)实现养护过程的自动化控制,减少早期收缩裂缝。

修复施工优化:开发便捷化、高效化的修复施工设备,提升修复施工的精准度与效率;制定修复施工质量验收标准,加强施工过程质量管控,确保修复效果达标。

结束语:桥梁裂缝检测与处理技术是桥梁结构安全运行的保障,直接关系到桥梁的使用寿命与通行安全。当前,裂缝检测技术呈现传统与智能互补发展的态势,修复技术则在传统方法基础上向新型材料、新技术方向革新。未来,需持续推动检测技术的智能化升级、高性能修复材料的创新与施工工艺的精细化优化,通过多技术融合、多维度管控,实现裂缝的精准检测、高效修复与源头防控,为桥梁工程的高质量发展提供坚实保障。

参考文献

- [1]杨国俊,齐亚辉,石秀名.基于数字图像技术的桥梁裂缝检测综述[J].吉林大学学报(工学版),2024,54(2):313-332.
- [2]吴昊天.公路桥梁裂缝检测与养护加固技术研究[J].科技与创新,2025(16):147-150.
- [3]刘京峰,丁洋,王赞.桥梁结构裂缝病害识别检测技术研究[J].云南民族大学学报(自然科学版),2025,34(3):356-362.