

高速公路桥梁裂缝病害的无损检测与修复技术研究

牟建勇

山东高速烟台发展有限公司, 中国·山东 烟台 264000

摘要: 高速公路桥梁中, 钢筋混凝土梁桥与刚架桥占主导地位, 其结构安全直接关系路网通行效率与人民生命财产安全。裂缝是此类桥梁最典型、高发的病害, 不仅削弱承载力, 还易成为盐雾、水分等有害物质侵入的通道, 加速钢筋锈蚀与混凝土劣化, 在荷载与环境作用下持续扩展, 最终导致结构刚度衰退、耐久性下降甚至突发破坏。本文聚焦钢筋混凝土桥梁, 系统分析裂缝类型与成因, 重点研究超声波、红外热成像、雷达等无损检测技术的原理、适用场景与精度, 并结合《公路桥涵养护规范》(JTG H11-2020), 探讨不同裂缝的修复材料、工艺及质量控制要点, 提出“精准检测—分类修复—长效管控”的融合应用方案与发展趋势, 为裂缝病害的精细化治理提供技术支撑。

关键词: 高速公路桥梁; 钢筋混凝土结构; 裂缝病害; 无损检测; 修复技术; 结构耐久性

Research on Non-destructive Testing and Repair Technology of Cracks in Highway Bridges

Mou Jianyong

Shandong Expressway Yantai Development Co., Ltd., China Shandong Yantai 264000

Abstract: In highway bridges, reinforced concrete beam bridges and rigid frame bridges dominate, and their structural safety is directly related to the efficiency of the road network and the safety of people's lives and property. Cracks are the most typical and frequently occurring defects in such bridges; they not only weaken load-bearing capacity but also serve as channels for the ingress of harmful substances such as salt spray and moisture, accelerating steel reinforcement corrosion and concrete deterioration. Under the action of loads and environmental factors, cracks continue to expand, eventually leading to a decline in structural stiffness, durability, and even sudden failure. This paper focuses on reinforced concrete bridges, systematically analysing the types and causes of cracks, with a particular emphasis on the principles, applicable scenarios, and precision of non-destructive testing technologies such as ultrasound, infrared thermography, and radar. Combining with the "Highway Bridge and Culvert Maintenance Specification" (JTG H11-2020), it explores repair materials, processes, and quality control points for different cracks, proposing an integrated application scheme and development trend of "precise detection—classified repair—long-term management" to provide technical support for the refined management of crack defects.

Keywords: Highway bridges; Reinforced concrete structures; Crack defects; Non-destructive testing; Repair technology; Structural durability

0 引言

随着我国高速公路网的快速发展和运营时间的延长, 桥梁结构面临荷载累积、环境侵蚀和材料老化等多重挑战。钢筋混凝土桥梁占在役高速公路桥梁的 70% 以上, 其裂缝病害问题突出。据统计, 约 35% 的此类桥梁存在不同程度裂缝, 10% 以上裂缝宽度超过 0.2mm 的有害阈值, 部分关键部位已出现贯穿裂缝, 严重威胁安全。不同桥型裂缝特征各异: 简支梁桥多为弯曲、剪切和锈蚀裂缝; 刚架桥则以节点和斜撑裂缝为主。传统人工检测效率低、精度差, 破坏性检测不可行。无损检测技术凭借非破坏性、高精度和高效率优势, 已成为裂缝检测的核心手段; 科学修复技

术则是遏制裂缝扩展的关键。因此, 开展相关研究对提升桥梁养护水平、延长寿命、降低风险具有重要意义。

1 高速公路钢筋混凝土桥梁裂缝病害的成因与分类

1.1 裂缝病害成因分析

钢筋混凝土桥梁裂缝的产生是结构受力、材料性能、施工质量与外部环境等多因素耦合作用的结果, 结合《公路桥涵养护规范》(JTG H11-2020) 及工程实践, 主要成因可归纳为以下四类:

结构受力失衡因素: 车辆超载、冲击荷载作用导致结构应力超出设计限值, 或设计阶段截面选型不合理、施工

中钢筋布置偏差、混凝土振捣不密实等质量缺陷,引发局部应力集中,当拉应力超过混凝土抗拉强度时形成裂缝。例如简支梁桥主梁跨中受弯产生的竖向裂缝、支座附近主拉应力引发的 45° 斜裂缝,刚架桥弦杆压弯作用下的跨中裂缝均属此类。

温度应力作用因素:环境温度骤升骤降、日照辐射导致结构表面与内部温差显著,或箱梁、刚架等复杂截面各部位热胀冷缩不均,产生约束温度应力,当应力释放受阻时形成裂缝。这类裂缝多分布于桥面铺装、箱梁腹板、刚架桥实腹段等部位,形态不规则,常呈现横向或网状分布特征。

材料劣化与收缩因素:混凝土浇筑后水化热释放不均、硬化过程中干燥收缩及长期徐变效应,易产生表面网状裂缝或纵向微裂缝;钢筋在水分、氧气作用下发生电化学锈蚀,体积膨胀(膨胀率可达 2-3 倍)会挤压周围混凝土,引发沿钢筋走向的纵向裂缝,严重时导致混凝土剥落。此外,刚架桥节点焊接残余应力也可能诱发局部裂缝。

环境侵蚀与沉降因素:在雨雪、冰冻、盐雾、工业废气等恶劣环境中,氯离子、二氧化碳等有害物质侵入结构内部,加速混凝土碳化与钢筋锈蚀,降低材料抗裂性能;软土地基或压密地基上的桥梁,若墩台出现不均匀沉降,会导致结构产生强迫变形,引发梁端、拱脚等薄弱部位的沉降裂缝,刚架桥斜撑根部的环形裂缝多由此产生。

1.2 裂缝病害分类

根据裂缝的结构影响、形态特征及工程管控需求,结合行业标准与实践经验,常用分类方式如下:

按结构部位分类:可分为桥面铺装裂缝、主梁裂缝、支座裂缝、桥墩裂缝、盖梁裂缝、刚架节点裂缝及斜撑裂缝等。其中主梁受弯裂缝、刚架桥弦杆与节点裂缝、桥墩纵向裂缝对结构安全影响最为严重,易引发承载能力下降;桥面裂缝虽初期影响较小,但易导致雨水下渗,诱发内部钢筋锈蚀。

按成因性质分类:分为荷载裂缝与非荷载裂缝两大类。荷载裂缝由外部荷载直接引发,包括弯曲裂缝、剪切裂缝、扭曲裂缝,具有明确的受力关联性,裂缝形态与受力方向一致;非荷载裂缝由温度变化、材料收缩、钢筋锈蚀、地基沉降等因素引发,如网状收缩裂缝、沿筋锈蚀裂缝、温度裂缝等,分布范围较广且无明显受力规律。

按形态与走向分类:包括横向裂缝(垂直于结构轴线,常见于梁桥跨中、刚架桥弦杆)、纵向裂缝(平行于结构轴线,多出现于箱梁腹板、桥墩侧面、钢筋锈蚀区

域)、斜向裂缝(呈 45° 左右,集中在支座附近、刚架节点)及网状裂缝(多由材料收缩或环境侵蚀引发,分布于桥面、构件表面)。

按宽度与深度分类:按宽度可分为微裂缝($< 0.05\text{mm}$,无有害影响)、一般裂缝($0.05-0.2\text{mm}$,需监测)、有害裂缝($> 0.2\text{mm}$,需及时修复);按深度可分为表面裂缝($\leq 20\text{mm}$,主要影响耐久性)、深层裂缝($20\text{mm}-$ 保护层厚度,影响结构刚度)、贯穿裂缝($\geq$ 保护层厚度,破坏结构整体性,严重威胁安全)。

2 高速公路钢筋混凝土桥梁裂缝病害的无损检测技术

无损检测技术(NDT)是在不损伤结构材料、不影响使用性能的前提下,利用材料声学、光学、电磁学等物理特性,通过专业仪器实现裂缝参数定量检测的核心手段。结合《公路桥梁无损检测技术规程》(JTG/T H25-2019),针对钢筋混凝土桥梁裂缝的检测技术主要包括以下几种:

2.1 超声波检测技术

超声波检测技术是应用最广泛的裂缝检测手段,核心原理是利用超声波在混凝土中的传播特性,当遇到裂缝时发生反射、折射或衰减,通过分析信号的传播时间、幅值变化,实现裂缝深度与长度的精准测量。该技术适用于深层裂缝(深度 $> 20\text{mm}$)与隐蔽裂缝检测,尤其对梁桥主梁、刚架桥节点等关键部位的裂缝识别效果显著。检测时需在裂缝两侧对称布置探头,通过跨缝法或平测法完成参数采集,深度测量误差可控制在 3% 以内。其优势在于精度高、设备便携、操作便捷,可现场实时检测;局限性在于对检测表面平整度要求较高,需涂抹耦合剂,且难以识别网状裂缝等复杂形态裂缝。

2.2 红外热成像检测技术

基于物体热辐射特性,利用红外热像仪捕捉结构表面温度场分布。当钢筋混凝土内部存在裂缝时,裂缝区域(空气填充)与完好区域(混凝土)的热传导效率差异显著,导致表面出现温度异常,通过分析热像图可识别裂缝位置与范围。该技术为非接触式检测,效率高、范围广,适用于桥面铺装裂缝、构件表面裂缝的快速筛查,尤其在夜间或低环境温度下,温度对比度更高,检测效果更佳。其优势在于操作简单、无接触损伤,可直观呈现裂缝分布;不足之处在于对裂缝深度检测精度较低(误差 $\geq 10\%$),易受日照、风速等环境因素干扰,对深层裂缝识别能力有限。

2.3 雷达检测技术

雷达检测技术（GPR）利用高频电磁波（1GHz-2GHz）在混凝土内部的传播与反射特性，当电磁波遇到裂缝、空洞等缺陷时产生反射信号，通过分析信号参数实现裂缝位置与深度检测。该技术穿透力强（最大检测深度可达1m），适用于隐蔽裂缝检测，尤其对桥面铺装层下裂缝、箱梁内部裂缝、刚架桥弦杆内部裂缝具有独特优势。检测时通过移动雷达天线实现连续扫描，检测结果可视化程度高。其优势在于检测速度快、可连续作业；局限性在于易受钢筋、钢绞线等金属构件干扰，导致裂缝识别精度下降，对检测人员操作水平要求较高。

2.4 声发射检测技术

声发射检测技术是动态检测方法，原理是当桥梁在荷载作用下裂缝扩展时，会释放弹性波（声发射信号），通过传感器捕捉信号并分析其幅值、频率等参数，判断裂缝的扩展状态与活性。该技术适用于在役桥梁的实时监测与疲劳裂缝检测，尤其对梁桥主梁、刚架桥节点等受交变荷载部位的活性裂缝，能有效识别其扩展趋势，为安全预警提供数据支持。其优势在于可动态监测、实时预警，对活性裂缝敏感性高；局限性在于无法检测静止裂缝，易受环境噪声干扰，检测结果需结合其他技术验证。

2.5 无损检测技术的对比与选择

不同检测技术的适用场景与精度存在差异，工程实践中需结合裂缝类型、结构部位及检测环境合理选择：表面裂缝优先采用红外热成像技术快速筛查；深层裂缝与隐蔽裂缝选用超声波检测精准量化；桥面铺装层下及内部裂缝采用雷达检测；活性裂缝与疲劳裂缝则通过声发射技术动态监测。通过组合运用各类技术，可实现裂缝病害的全面、精准检测，为修复方案制定提供科学依据。具体对比见表1。

3 高速公路桥梁裂缝病害的修复技术

裂缝修复的核心目标是遏制扩展、恢复结构整体性与耐久性，需根据裂缝类型、尺寸及结构受力特点，结合《公路桥涵养护规范》（JTG H11-2020）选择针对性技术。

3.1 表面修补技术

适用于表面裂缝（深度≤20mm）与宽度<0.2mm的微裂缝，原理是通过涂抹修复材料封闭裂缝通道，防止有害物质侵入。常用材料包括聚合物水泥浆、环氧树脂砂浆、丙烯酸酯涂料等。施工工艺为：裂缝清理→基层打磨处理→材料均匀涂抹（厚度2-5mm）→常温养护（3-7天）。优势是施工简单、成本低、工期短，适用于大面积分散性裂缝；局限性是仅能封闭表面，无法提升结构承载力。

3.2 压力注浆技术

针对深层裂缝（20mm<深度<50mm）与贯穿裂缝，原理是通过高压注浆设备将流动性浆料注入裂缝内部，填充空隙并与混凝土形成整体。常用材料有环氧树脂注浆液（干燥环境）、水泥基注浆液（潮湿环境）、聚氨酯注浆液（动态裂缝）。施工流程为：裂缝预处理（开槽、清理）→埋设注浆嘴→封闭裂缝→压水试验→压力注浆（0.5-1.0MPa）→养护（7-14天）。优势是能深入修复裂缝，恢复结构整体性；局限性是工艺复杂、对施工技术要求高。

3.3 粘贴加固技术

适用于宽度>0.5mm、结构承载力下降明显的裂缝，原理是粘贴高性能材料分担荷载、抑制裂缝扩展。常用材料为碳纤维布（CFRP）和钢板：碳纤维布重量轻、强度高（抗拉强度≥3000MPa），适用于主梁、刚架节点加固；钢板刚度大，适用于对加固刚度要求高的场景，但需防腐处理。施工工艺为：基层处理（裂缝预处理、打磨）→涂刷底胶→粘贴加固材料（碳纤维布/钢板）→压实排气→涂刷面胶→养护（7天以上）。优势是加固效果显著、对结构外形影响小；局限性是对基层平整度要求严格，粘结质量直接影响加固效果。

3.4 修复技术的质量控制

材料控制：进场时核查合格证与检验报告，抽样复检粘结强度、抗压强度等指标，严禁使用不合格材料。

过程控制：规范关键工序，重点把控裂缝清理、注浆压力、粘贴平整度等环节，做好施工记录。

后期检测：修复后采用超声波、拉拔试验等检测效果

表1 主流无损检测技术对比

检测技术	适用裂缝类型	检测精度	优势	局限性
超声波检测	深层裂缝、隐蔽裂缝	高（深度误差≤3%）	精度高、设备便携、操作便捷	对表面平整度要求高、受耦合影响
红外热成像检测	表面裂缝、大面积裂缝	中（定位误差≤5cm）	非接触、效率高、范围广	深度检测精度低、受环境干扰
雷达检测	隐蔽裂缝、铺装层下裂缝	中（深度误差≤5%）	穿透力强、速度快、可视化	受金属构件干扰、操作要求高
声发射检测	活性裂缝、疲劳裂缝	高（扩展趋势识别准确）	动态监测、实时预警	无法检测静止裂缝、受噪声干扰

(如注浆密实度 $\geq 95\%$ 、粘结强度 $\geq 2.5\text{MPa}$)，并定期跟踪观测(6个月、1年、3年)，确保修复效果稳定。

4 结语

高速公路钢筋混凝土桥梁裂缝病害的无损检测与修复是保障结构安全、延长服役寿命的核心环节。本文系统分析了裂缝的成因(受力失衡、温度应力、材料劣化、环境侵蚀与沉降)与分类特征，明确了不同桥型(简支梁桥、刚架桥)的裂缝差异。研究表明，超声波、红外热成像、雷达及声发射等无损检测技术各有优劣，需根据裂缝类型、部位及环境合理组合使用，以实现精准检测。针对不同裂缝，表面修补、压力注浆和粘贴加固技术需科学选型，并通过严格的材料、过程及后期质量控制确保修复效果。未来，应推动“精准检测—分类修复—长效管控”一体化应

用，结合智能化技术与高性能材料，提升桥梁裂缝病害的精细化治理水平，为高速公路基础设施的安全稳定运行提供有力保障。

参考文献：

- [1] 丁博. 高速公路桥梁常见病害及预防性养护技术[J]. 四川建材, 2021(07).
- [2] 王海宏. 高速公路混凝土桥梁预防性养护加固措施研究[J]. 智能城市, 2021(10).
- [3] 张文晋. 桥梁预防性养护在高速公路养护中的应用[J]. 四川建材, 2020(08).

作者简介：牟建勇（1970.06—），男，汉族，山东烟台人，本科，山东高速烟台发展有限公司，交通工程高级工程师，研究方向：高速公路养护施工安全管理。