

# 混凝土桥梁裂缝检测中表观病害与结构安全关联分析

张 博

湖北交投智能检测股份有限公司 湖北 武汉 430000

**【摘要】**：混凝土桥梁是重要的基础设施，其长期安全性直接影响交通和人民生命财产的安全。表面裂缝等病害是混凝土桥梁常见的问题，这些病害的存在可能导致结构安全隐患。本研究对桥梁表面裂缝等表观病害与结构安全之间的关系进行深入分析，通过精确的裂缝检测和病害评估，提出有效的评估方法和技术。通过对裂缝的数量、位置、形态等特征的分析，结合结构力学模型，能够较为准确地预测桥梁的结构安全性，并为桥梁的养护、修复提供科学依据。结果表明，表面病害不仅是桥梁损害的标志，还是预测桥梁未来使用状况的重要依据。

**【关键词】**：混凝土桥梁；裂缝检测；表观病害；结构安全；评估方法；动态监测；有限元分析

DOI:10.12417/2705-0998.26.01.048

## 引言

桥梁作为关键交通基础设施，其服役状态直接关系到路网畅通与公共安全。截至2026年，我国在役桥梁已超35万座，其中约40%桥龄超过20年，结构老化问题显著。调查显示，桥梁下部结构病害发生率高达62%，而因裂缝导致钢筋锈蚀的病害占比达38%。日益增长的交通荷载加剧了结构劣化，使得裂缝等表观病害尤为突出。准确辨析表观病害与结构安全的内在关联，已成为桥梁健康监测与科学管养的核心课题。通过精细检测与动态评估，能够为桥梁预防性养护与安全决策提供关键支撑，对保障基础设施长效运行具有重要意义。

## 1 混凝土桥梁裂缝的分类与检测技术

混凝土桥梁裂缝是结构老化和损害的重要表现形式，裂缝的类型多样，其成因复杂，主要涉及温湿度变化、荷载作用、混凝土质量以及施工工艺等因素。根据裂缝的形态和成因，可将其分为结构性裂缝与非结构性裂缝。其中，结构性裂缝多由超载、地基沉降等导致构件变形或断裂，其典型判定标准为：宽度 $\geq 0.3\text{mm}$ 、深度 $\geq 1/3$ 截面厚度，或呈贯通性分布（符合GB50292-2015等规范要求），这类裂缝直接影响桥梁的承载力和整体稳定性。而非结构性裂缝则主要由温度变化、干湿交替等环境因素引起，通常宽度 $\leq 0.2\text{mm}$ 、深度 $< 1/5$ 截面厚度，且无明显扩展趋势，虽对结构安全短期影响较小，但若长期存在并伴随水分渗透，仍可能诱发钢筋腐蚀等次生病害，需予以关注和适时处理。

裂缝的检测技术随着科技的发展不断进步，现代的检测方法已经能够在早期阶段发现裂缝并进行准确评估<sup>[1]</sup>。常用方法各具特点：人工检测依赖经验，成本低但易受主观影响，适用于常规巡检；光学成像技术借助高分辨率相机（如像素 $\geq 2000$ 万）捕获裂缝图像，结合图像算法可量化宽度（精度达 $0.01\text{mm}$ ）与形态，适用于表面病害精细记录；激光扫描技术通过高速激光获取毫米级精度点云数据，高效完成大范围三维建模，适于整体病害分布测绘；红外热成像依据温差图谱（灵敏度约

$0.05^\circ\text{C}$ ）识别渗水与隐蔽裂缝，尤适用于夜间或难以触及部位；超声波检测利用声波速变（频率 $50\text{kHz}-200\text{kHz}$ ）判定裂缝深度与走向，对评估结构内部损伤具有重要价值。各类技术互补应用，可提升检测覆盖度与可靠性。

采用这些先进的裂缝检测技术不仅能提高桥梁健康监测的准确性，还能够在早期阶段发现潜在的结构安全隐患，减少因桥梁病害引起的事故风险。随着技术的进步，检测方法的多样性和准确性将为桥梁的维修和养护提供更加可靠的依据，确保桥梁的使用寿命和交通安全。

## 2 表面病害对桥梁结构安全性的影响分析

表面病害尤其是裂缝的出现，通常是桥梁结构老化的直接信号，直接影响其承载能力和长期安全性。裂缝会破坏混凝土保护层，使钢筋暴露于外界环境，加速腐蚀进程。研究表明，当钢筋锈蚀面积达10%时，构件承载力下降约8%-12%；锈蚀面积超过20%时，承载力下降幅度可达25%以上，显著威胁结构安全。同时，环境因素与裂缝存在显著耦合效应：在寒冷地区，裂缝内水分冻融循环可使裂缝扩展速率加快3-5倍；在跨海或高盐环境中，氯离子经裂缝渗入会令钢筋锈蚀速率提升约2倍。裂缝的尺寸、数量及分布直接影响结构稳定性，若持续扩展，可能导致构件承载力局部丧失甚至整体贯通，严重破坏结构完整性。

裂缝不仅会降低桥梁结构强度，还会显著削弱其耐久性和抗疲劳性能。水分通过裂缝渗入是加速混凝土劣化的关键因素，它会加剧钢筋锈蚀，提升养护修复难度<sup>[2]</sup>。当裂缝宽度从 $0.1\text{mm}$ 扩展至 $0.3\text{mm}$ 时，桥梁构件的疲劳寿命可能缩短40%-50%，显著影响结构长期使用的安全可靠。在寒冷地区，渗入裂缝的水分在冻融循环作用下，会进一步加剧裂缝扩展，扩大病害范围，显著增加维护成本和结构风险。此外，裂缝内部易积聚腐蚀产物，在膨胀效应作用下会促使混凝土保护层剥落与剥离，进一步削弱结构的整体耐久性。

不同类型的表面病害对桥梁安全性的影响程度有所不同。

裂缝、表面剥落、碳化等病害组合对桥梁健康的威胁更大。通过定期检查这些病害的变化趋势和扩展速率，能够为桥梁的安全评估提供重要依据。结合桥梁的使用环境、荷载情况及裂缝的分布特征，能更精确地评估表面病害对结构的影响，为后续的维修和加固提供有效指导。在这些表面病害的影响下，桥梁的整体安全性往往出现隐患，必须通过科学的监测与评估手段，及时发现并解决潜在问题。

### 3 裂缝与结构安全性之间的关联模型构建

裂缝与桥梁结构安全性之间的关联模型构建，是一个涉及裂缝特征、环境作用与结构响应的多层次复杂过程。裂缝作为结构在疲劳、超载及环境因素作用下的早期病害表现，其宽度、深度、分布等几何参数直接影响结构的承载能力、稳定性与耐久性。为量化裂缝对安全性的影响，需建立基于关键输入参数的力学模型，主要包括：裂缝宽度  $w$ （单位：m）、深度  $d$ （单位：m）、年均扩展速率  $v$ （单位：m/年）、环境腐蚀系数  $k$ （依据温湿度、氯离子浓度等确定），以及构件受力等级  $F$ （单位：kN）。通过整合这些参数，模型能够更准确地评估裂缝在不同荷载与环境耦合作用下的演变趋势及其对结构整体性能的影响，为桥梁安全状态预测与维护决策提供定量依据。

在裂缝与结构安全性关联分析中，常借助力学模型将裂缝影响量化纳入结构计算。通过构建裂缝损伤模型，结合桥梁实际受力状态，可系统评估裂缝对整体性能的折减程度<sup>[3]</sup>。有限元分析可精确模拟裂缝导致的应力重分布与变形，评估其对结构稳定性、强度与疲劳寿命的影响。以箱梁腹板斜裂缝为例，ABAQUS 模型分析表明：当裂缝倾角  $45^\circ$ 、宽度  $0.3\text{mm}$  时，腹板剪应力集中系数达  $1.8$ ，需采用粘贴钢板等措施进行加固。该结果为此类裂缝的危害评估与修复提供了可靠依据。

裂缝的变化与结构安全性的关系并非静态的，而是随着时间、荷载及环境条件的变化而动态演变。动态模型在裂缝与结构安全性分析中具有重要地位。通过结合裂缝扩展的动态方程，可以模拟裂缝随着时间和负荷的变化不断扩展的过程，并据此评估桥梁结构的实际安全性。通过引入概率分析方法，可以对裂缝对结构安全性的影响进行量化评估，进一步完善结构的安全预测。该模型不仅能评估裂缝对当前结构安全性的影响，还能预测其在未来使用过程中可能引发的风险，为桥梁的生命周期管理提供可靠的数据支持。

通过上述方法构建的裂缝与结构安全性之间的关联模型，不仅能帮助工程师了解裂缝如何影响桥梁的承载力和耐久性，还能够为桥梁的维修、养护和加固提供科学依据。随着检测技术的不断进步，这些模型将不断优化，能够更准确地反映裂缝对结构安全性的影响，进而提升桥梁的健康管理水平。

### 4 裂缝检测与结构安全性评估的综合方法

裂缝检测与结构安全性评估的综合方法是现代桥梁健康

监测体系的关键环节，融合了多源检测技术与跨学科分析模型，旨在实现对桥梁裂缝的精准识别与对结构安全状态的系统评估。作为混凝土桥梁最常见的老化与损伤征兆，裂缝不仅直接导致局部承载力下降，还会加速钢筋锈蚀，诱发更广泛的结构退化，最终威胁桥梁的整体服役安全。为全面评估其影响，需构建从检测到评估的多层次技术体系<sup>[4]</sup>。

在检测层面，现代技术已形成多手段协同的解决方案。传统人工检测虽成本较低，但难以满足复杂结构与大范围检测对精度与效率的要求。目前，高精度光学成像与激光扫描已成为裂缝检测的主流技术：光学成像通过高分辨率图像（如  $5000$  万像素）捕捉裂缝形态，经图像处理可量化宽度（精度达  $0.02\text{mm}$ ）与分布；激光扫描则通过毫米级点云数据实现桥梁表面三维重建，全面记录裂缝的空间展布。针对大跨度桥梁等复杂场景，可采用“无人机红外热成像（初步快速筛查）+激光扫描（精细三维建模）+超声波检测（裂缝深度定量）”的组合方案。实践表明，该组合方案可使检测效率提升约  $3$  倍，整体成本降低  $20\%$ ，同时保证数据的系统性与可靠性。此外，红外热成像（温度灵敏度  $0.05^\circ\text{C}$ ）适用于识别渗水区域与隐蔽缺陷，超声波检测（频率  $50\text{--}200\text{kHz}$ ）则能有效测定裂缝深度与内部损伤，为非接触、多维度检测提供了丰富选择。通过集成裂缝检测数据，可构建以裂缝几何特征、材料劣化及环境因子为核心的评估模型，通过有限元与疲劳分析量化其对结构性能的影响，为养护与加固提供依据。

结合裂缝的检测结果，结构安全性评估模型的构建显得尤为重要。在综合方法中，有限元分析作为一种强有力的工具，被广泛应用于裂缝的影响分析。通过建立以裂缝为核心的力学模型，模拟裂缝对桥梁整体结构的影响，可以计算出裂缝对桥梁的承载力、刚度及稳定性等关键性能指标的具体影响。通过这种模拟分析，能够准确预测裂缝在不同荷载作用下的扩展趋势，评估结构是否达到或超过其安全临界值。动态监测与评估方法可以根据实时数据对桥梁的健康状况进行定期评估，结合环境条件和荷载变化，生成更为精准的安全评估报告。

裂缝的持续监测及其对结构安全性的综合评估，为桥梁的养护、加固和维修决策提供了科学依据。通过将裂缝的动态变化、环境因素与结构力学特性结合，可以为桥梁的生命周期管理提供长远的规划方案。在现代化的桥梁管理中，综合应用这些技术手段能够提高裂缝检测和结构安全评估的精度，确保桥梁的长期稳定运行，并有效延长桥梁的使用寿命。

### 5 基于裂缝数据的桥梁养护与修复决策

基于裂缝数据的桥梁养护与修复决策，高度依赖于精准的监测与评估结果。裂缝的类型、分布、尺寸及扩展趋势等数据，直接反映了桥梁的健康状态与劣化进程。为系统采集这些信息，需根据裂缝风险等级制定差异化的监测频率： $I$ 级裂缝（宽

度  $w \leq 0.1\text{mm}$  ) 建议每 6 个月监测一次; II 级裂缝 ( $0.1\text{mm} < w \leq 0.3\text{mm}$  ) 每 3 个月一次; III 级裂缝 ( $0.3\text{mm} < w \leq 0.5\text{mm}$  ) 每月一次; IV 级裂缝 ( $w > 0.5\text{mm}$  ) 则需每周一次进行跟踪。现代检测技术如激光扫描、红外热成像与三维成像,能够高效获取裂缝的宽度、深度、长度及扩展速率等关键参数,并通过高频次监测捕捉其动态变化,从而为识别安全隐患、制定养护优先级及预测长期性能提供及时、可靠的数据支撑。

一旦收集到裂缝数据,接下来便是对数据进行深入分析,结合桥梁的受力情况、使用年限和环境因素,构建针对性的评估模型。有限元分析、疲劳分析和动态响应分析等技术在此过程中发挥着重要作用<sup>[5]</sup>。基于这些分析,可以识别哪些裂缝对桥梁的结构安全性构成较大威胁,确定裂缝修复的优先级,并预测裂缝扩展对桥梁性能的长期影响。如果裂缝位于承重较大的构件或桥梁的关键部位,则优先进行修复;若裂缝在桥梁的非承重部分,则可适当延后修复时间。这种基于数据驱动的决策方式使得桥梁养护更加精准,并避免了过度修复或忽视潜在问题。

结合裂缝数据,还可以进行桥梁养护周期的优化规划。通

通过对裂缝发展趋势的长期监控,能够预测裂缝扩展的速度及其可能对桥梁产生的影响,进而合理安排养护和修复工作的时机与频次<sup>[6]</sup>。为了提高养护工作的经济性和效率,现代桥梁养护策略通常采用周期性养护与应急修复相结合的模式,裂缝数据的精准预测能有效平衡修复成本与安全保障之间的关系。合理的修复决策不仅能延长桥梁的使用寿命,还能有效降低长期维护成本。基于裂缝数据的桥梁养护与修复决策,不仅仅依赖于单一的技术或方法,而是将多种检测手段与分析技术结合,通过数据的综合应用,制定出最合理的养护和修复计划。

## 6 结语

裂缝检测与结构安全性评估是保障桥梁长期安全稳定运行的关键。基于精准的裂缝数据分析与综合评估,可为桥梁养护修复提供科学依据,显著提升维护效率与经济性。随着技术进步,裂缝数据驱动的决策体系正日趋精细化、智能化。未来研究将重点结合物联网技术,构建“裂缝实时监测-数据自动分析-修复方案智能推送”的全流程闭环管理系统。同时,新型纳米修复材料等主动修复技术的应用探索,也将为裂缝的耐久性治理提供新的解决方案,推动桥梁健康管理向更智能、系统化的方向发展。

## 参考文献:

- [1] 张凯.现行《公路桥梁技术状况评定标准》中若干问题研究及建议[J].上海建设科技,2024,(03):91-94.
- [2] 张劲泉,晋杰,汪云峰,等.公路桥梁智能检测技术与装备研究进展[J].公路交通科技,2023,40(1):1-27.
- [3] 李进斌.混凝土桥梁早期裂缝成因与检测方法研究[J].交通世界,2022,(16):43-45.
- [4] 周勇军,罗楠,孙延晨,等.混凝土桥梁整体表现多缺陷图像精细分割方法[J].哈尔滨工业大学学报,2025,57(6):103-115.
- [5] 马东群,李宝林,王秋月,等.一种基于桥梁横向裂缝的病害识别方法[J].计算机与现代化,2021,(1):43-49.
- [6] JTG/T H21-2011 公路桥梁技术状况评定标准[S].人民交通出版社,2011.