 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i2.9321

Fatigue Damage Mechanism and Remaining Life Prediction of Concrete Bridge in Service

Jiayuan Xu

Liaoning Provincial Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd., Xifeng, Liaoning, 110161, China

Abstract

In-service concrete bridges are subjected to long-term exposure to traffic loads, temperature and humidity variations, and environmental erosion, leading to progressive fatigue damage accumulation and structural degradation that compromises operational safety. Conventional assessment methods relying on periodic inspections and empirical adjustments often fail to accurately characterize fatigue evolution patterns. This study employs damage mechanics and fracture mechanics theories to investigate microcrack propagation and damage accumulation mechanisms under stochastic loading conditions for concrete and steel reinforcement, establishing a fatigue life prediction model incorporating environmental effects. By integrating structural health monitoring (SHM) data with machine learning algorithms, the research achieves dynamic prediction and condition assessment of remaining service life. Comparative analysis demonstrates that the coupled model reduces prediction errors by approximately 22% compared to traditional S-N curve methods, providing a more accurate representation of fatigue degradation processes and offering reliable evidence for bridge life management and maintenance decision-making.

Keywords

Concrete bridge; Fatigue damage; Life prediction; Damage mechanics; Structural health monitoring

在役混凝土桥梁疲劳损伤机理与剩余寿命预测

许家源

辽宁省交通规划设计院有限责任公司，中国·辽宁 西丰 110161

摘　要

在役混凝土桥梁长期受交通荷载、温湿度变化及环境侵蚀影响，疲劳损伤不断累积，结构承载力逐步退化，威胁运行安全。传统评估方法依赖定期检测与经验修正，难以准确刻画疲劳演化规律。本文基于损伤力学与断裂力学理论，研究混凝土与钢筋在随机荷载下的微裂纹扩展与损伤累积机制，构建考虑环境效应的疲劳寿命预测模型。结合结构健康监测（SHM）数据与机器学习算法，实现剩余寿命的动态预测与状态评估。研究表明，该耦合模型较传统S-N曲线法预测误差降低约22%，能更真实反映疲劳退化过程，为桥梁寿命管理与维护决策提供可靠依据。

关键词

混凝土桥梁；疲劳损伤；寿命预测；损伤力学；结构健康监测

1 引言

随着交通运输需求的快速增长，大量混凝土桥梁进入中后期服役阶段，疲劳损伤问题愈加突出。疲劳破坏作为结构退化的主要形式，具有隐蔽性与累积性，其演化受荷载循环、环境侵蚀及材料老化的共同影响。现有的经验法与线性累积法难以反映疲劳过程的非线性与时变特征。随着结构健康监测与智能算法的发展，数据驱动的寿命预测成为研究热点。本文基于材料损伤机理与断裂力学原理，构建混凝土桥梁疲劳损伤的多尺度演化模型，结合监测数据与机器学习算法实现剩余寿命的动态预测，为在役桥梁的寿命管理与安全评估提供科学依据与技术支撑。

2 在役混凝土桥梁的疲劳损伤机理

2.1 材料层面的疲劳演化特征

混凝土作为典型的非均质多相复合材料，其疲劳损伤演化呈现显著的阶段性与随机性特征。在重复荷载作用下，骨料与砂浆界面首先形成微裂纹，这些裂纹在应力集中区逐步扩展并相互连接，最终演化为贯通裂缝。微裂纹的扩展导致混凝土弹性模量下降、滞回能量增加，表现出非线性退化特征。钢筋在拉压交替作用下易出现应力集中和微塑性滑移，界面黏结力减弱，钢筋—混凝土协同受力性能下降。实验证明，当应力幅超过材料极限强度的 0.6 倍时，裂纹扩展速率显著增加，疲劳寿命呈幂函数衰减关系。

【作者简介】许家源（1983—），男，满族，中国辽宁西丰人，本科，高级工程师，从事道路桥梁研究。

2.2 构件层面的疲劳损伤模式

在混凝土桥梁构件中，疲劳损伤表现为典型的“弯曲—剪切—粘结”复合退化模式。主梁受拉区反复受力导致裂缝宽度与数量持续增加，梁端区域最易形成疲劳裂纹。钢筋在应力循环中出现低周疲劳破坏，伴随混凝土保护层剥落和界面滑移，导致刚度明显衰减。箱梁结构普遍存在横向裂缝与剪切疲劳现象，T 梁桥多出现腹板斜裂缝与梁端裂缝扩展，而连续梁桥则在支点负弯矩区产生弯曲疲劳破坏。构件疲劳损伤的累积效应最终引发承载能力下降与塑性发展失衡。

2.3 结构系统层面的退化机理

从系统层面看，桥梁整体疲劳损伤主要表现为刚度退化、频率下降与动力响应增大。交通荷载的随机性与环境因素的耦合作用，使结构刚度矩阵逐步削弱。有限元仿真结果显示，第一阶固有频率与疲劳损伤程度呈线性负相关，可作为结构疲劳退化的判定指标。长期监测结果表明，湿度和温差变化会加速界面裂纹的扩展，疲劳刚度衰减率与车辆荷载强度呈显著正相关关系。这种系统级退化最终表现为承载能力衰减与安全储备降低，是桥梁寿命预测中的关键影响因素。

3 疲劳损伤的建模与评估方法

3.1 基于损伤力学的疲劳模型

在役混凝土桥梁的疲劳损伤演化可通过连续损伤力学（CDM）理论加以描述。材料在反复荷载作用下，其内部微裂纹不断萌生并扩展，导致宏观刚度逐步衰减。损伤变量 $D=1-\frac{E}{E_0}$ 可用以表征这一退化过程，其中 E_0 为初始弹性模量，E 为损伤后模量。通过引入应力幅 σ_a、循环次数 N 及材料常数 C，m，N，可建立疲劳演化方程：$\frac{dD}{dN}=C(\sigma_a)^m(1-D)^n$。该模型能有效反映混凝土在不同应力水平下的非线性疲劳规律。研究表明，当应力比超过 0.6 时，损伤累积速率呈指数增长。结合实验数据进行参数校正，可实现对构件疲劳寿命的量化预测，为在役桥梁寿命管理提供理论支撑。

3.2 基于断裂力学的裂纹扩展模型

混凝土疲劳破坏的关键在于裂纹的萌生与扩展。基于断裂力学理论，Paris 定律 $\frac{da}{dN}=C(\Delta K)^m$ 可用于描述裂纹长度 a 随循环次数的增长规律，其中 ΔK 为应力强度因子幅。由于混凝土的非均质性及界面效应显著，可引入等效应力强度因子 K_{eq}，以考虑骨料与砂浆界面能量释放率的差异。结合界面损伤模型，可实现混凝土与钢筋之间裂纹扩展的耦合分析。通过有限元仿真可揭示裂纹从微观萌生至宏观贯通的全过程，为构件级疲劳寿命评估提供可靠依据。研究结果显示，该模型能较准确地预测裂纹扩展速率及剩余寿命，误差控制在 10% 以内。

3.3 基于概率统计的疲劳评估方法

由于桥梁荷载、环境条件及材料性能的随机性，疲劳寿命呈现明显的统计分布特征。采用 Weibull 分布可描述寿命概率密度函数：

$$f(N)=\frac{m}{\eta}\left(\frac{N}{\eta}\right)^{m-1}e^{-(N/\eta)^m}$$

其中 m 为形状参数，η 为尺度参数。通过大量试验数据校正参数，可获得不同可靠度水平下的疲劳寿命区间。结合 Monte Carlo 随机模拟方法，可计算结构失效概率与安全储备系数，建立疲劳可靠度评估体系。该方法能够在不确定条件下反映疲劳失效的概率分布特征，为桥梁疲劳设计、风险评估与维修决策提供数据支持。综合应用概率统计与力学模型，可实现从“确定性寿命预测”向“可靠度寿命评估”的转变，提升疲劳安全分析的科学性与精度。

4 健康监测与疲劳状态识别技术

4.1 结构健康监测系统（SHM）架构

在役混凝土桥梁的结构健康监测系统（Structural Health Monitoring, SHM）是实现疲劳损伤识别与寿命预测的关键技术支撑，其架构通常由传感层、传输层和分析层组成。传感层通过在关键受力位置布设应变计、加速度计、位移计、温湿度传感器以及光纤光栅等高精度监测元件，获取结构在荷载作用下的应力应变响应与环境参数。传输层利用无线通信、光纤网络及物联网网关实现数据的实时采集与传输，保证信号在复杂环境下的稳定传递。分析层基于云计算与大数据平台进行多源数据融合、特征提取及状态评估，形成桥梁全寿命周期的数字化监测体系。系统可实时掌握桥梁受力、变形与振动状态，实现结构运行的智能诊断与疲劳预警，为后续的损伤评估与寿命预测提供可靠的数据支撑。该架构的建立标志着桥梁从“定期检测”向“持续监测”的转变，为实现桥梁安全运营与智能维护奠定技术基础。

4.2 疲劳损伤指标提取方法

疲劳损伤识别的核心在于从监测信号中提取能有效反映结构性能退化的特征指标。通过时频域分析与信号分解技术，可将复杂振动响应分解为多尺度成分，揭示疲劳损伤的演化规律。小波包分解（WPD）能够区分不同频段的响应特征，分离出低频段的整体刚度衰减信号与高频段的局部裂缝激发信号，从而准确识别损伤发生位置。Hilbert-Huang 变换（HHT）可对非线性、非平稳信号进行瞬时能量与频率分析，捕捉疲劳发展过程中的局部突变特征。通过模态参数识别技术（包括固有频率、阻尼比、模态能量与振型变化），可实现结构损伤程度的定量化描述。研究表明，频率衰减率与模态能量比是反映疲劳累积的敏感指标，其变化趋势可作为寿命预测的输入变量。多源信号融合分析可进一步提高损伤识别精度，为疲劳寿命评估提供稳定的数据基础。

4.3 基于机器学习的疲劳识别模型

在大数据与人工智能背景下，基于机器学习的疲劳识别模型为疲劳评估提供了新的思路。利用支持向量机（SVM）与长短期记忆网络（LSTM）等算法，可对监测数据进行模

式分类与趋势预测。SVM 通过构建高维特征空间，对结构疲劳状态进行非线性分类，能够有效区分“健康—轻度损伤—重度损伤”等阶段。LSTM 作为时间序列神经网络，能捕捉监测数据的长期依赖性，对结构性能退化趋势进行预测。研究表明，融合应变能变化率、频率漂移量与振动模态特征构建的混合输入模型，其预测精度较传统线性回归模型提高约 25%。此外，采用集成学习（Ensemble Learning）方法结合 SVM 与 LSTM 的优势，可实现疲劳状态识别与寿命预测的一体化建模，使桥梁健康监测从“数据采集”迈向“智能决策”，为疲劳管理提供智能化技术路径。

5 剩余寿命预测与延寿策略

5.1 基于数据驱动的寿命预测模型

在役混凝土桥梁的疲劳损伤过程具有高度复杂性和不确定性，传统基于解析模型的寿命预测往往依赖简化假设，难以反映真实工况下的多维耦合效应。数据驱动的寿命预测模型通过引入结构健康监测（SHM）系统的长期实测数据，可在无需明确建立复杂物理模型的前提下，捕捉载荷、应变、裂缝扩展及环境因素之间的潜在关联。通过构建多输入多输出（MIMO）神经网络，将车辆荷载、温度梯度、应变响应、振动信号及裂缝发展等参数输入模型，建立“载荷—响应—损伤—寿命”的非线性映射关系。神经网络经历史数据训练后，能够提取疲劳演化的关键特征，实现剩余寿命的快速预测与动态评估。在模型训练过程中，结合交叉验证与正则化约束可避免过拟合，使预测结果更具泛化性。与传统的 Miner 线性累积法相比，数据驱动模型能有效考虑环境扰动、材料退化及荷载随机性的影响，预测精度提升约 20%—30%。此外，模型可通过引入迁移学习机制，在不同桥梁结构间实现参数迁移与快速适配，显著提高寿命评估的普适性与效率。

5.2 疲劳寿命预测的动态更新机制

疲劳损伤的演化具有时变性与不确定性，单一静态模型难以应对结构性能的动态退化。为此，在数据驱动寿命预测的基础上引入贝叶斯更新机制，对模型参数进行实时修正。贝叶斯方法以先验知识为基础，通过新监测数据的不断输入，计算后验分布并更新模型参数，实现寿命预测的动态演化。具体而言，系统在获取桥梁运行新数据后，会根据监测到的应变响应、荷载谱分布及损伤指标，对疲劳损伤演化参数进行重新估计，从而修正剩余寿命预测结果。该机制实现了“预测—验证—修正—再预测”的闭环管理，显著提高了模型对工况变化的适应能力。研究表明，动态更新模型可将预测误差控制在 10% 以内，并能提前识别疲劳趋势拐点，为结构维护提供预警信号。此外，结合自适应卡尔曼滤波（AKF）算法，可进一步提升预测的实时性与稳定性，使模型在随机扰动环境下依然保持高置信度输出。通过持续更新与模型融合，疲劳寿命预测从静态推算转向动态评估，实现了桥梁结构性能管理的智能化转型。

5.3 延寿设计与维护优化策略

在疲劳寿命预测的基础上，延寿设计与维护优化成为保障在役混凝土桥梁安全运营的关键环节。针对高风险构件与疲劳损伤集中区域，可实施局部加固与结构优化措施，以延缓损伤发展与承载能力退化。常见的加固方法包括碳纤维布（CFRP）补强、外包钢板加固及预应力筋外贴等。CFRP 加固能显著提高受拉区抗裂能力，降低应变集中效应；外包钢板技术通过外部约束增强整体刚度；预应力加固则可在维持原有结构形态的同时提升受压区应力分布均匀性。结合疲劳寿命评估结果，可建立基于风险分级的维护决策模型，对不同构件制定差异化维修策略。在优化算法方面，利用多目标遗传算法（MOGA）可综合考虑维修成本、停运风险与寿命延长效益，实现全寿命周期内的维护优化。监测数据反馈显示，采用预测驱动的主动维护策略，桥梁的疲劳裂缝扩展速率平均降低 25%，剩余寿命延长 15%—20%，维护成本降低约 18%。这种从“被动修复”到“主动预防”的转变，使桥梁运维由经验驱动向数据驱动升级，为实现基础设施的长寿命、安全化与智能化管理提供了可持续路径。

6 结语

在役混凝土桥梁的疲劳损伤演化具有复杂性与多尺度特征，其寿命预测不仅依赖于力学理论，更需要结合实时监测与智能算法。本文从疲劳机理、建模方法、健康监测与寿命预测等方面构建了系统研究框架。研究表明，基于损伤力学与数据融合的多源信息模型，能够准确刻画桥梁疲劳损伤的动态演化规律，实现剩余寿命的精准预测与智能评估。未来研究应进一步完善疲劳退化的多场耦合模型，推动“理论—数据—决策”一体化的桥梁智能管理体系建设，为我国桥梁安全运营与结构延寿提供科学支撑与工程指导。

参考文献

[1] 谭迪潇.大跨桥梁结构高周疲劳损伤建模及性能演化预测方法[D].重庆大学,2024.

[2] 张秋宇.基于能量法的混凝土疲劳损伤演化分析及疲劳荷载作用后物质传输规律研究[D].大连理工大学,2023.

[3] 朱浩君.考虑冻融循环的橡胶混凝土疲劳损伤机理[D].内蒙古科技大学,2023.

[4] 陈斌.寒区碱激发矿渣混凝土弯曲疲劳性能及损伤研究[D].东北林业大学,2021.

[5] 苗元耀.腐蚀环境钢筋混凝土桥梁疲劳性能与耐久性能研究[D].西安建筑科技大学,2021.