

Research on Fatigue Deterioration Mechanism and Life Prediction Model of Bridge Concrete Structures

Biao Yang

Zhongcheng Engineering Management Group, Tai'an, Shandong, 271000, China

Abstract

Under the influence of repeated vehicle loads, chloride erosion, temperature and humidity changes and other environmental factors, the structural performance of concrete Bridges gradually declines, and they are prone to diseases such as fatigue crack expansion, steel bar corrosion and reduced bearing capacity, which affect operational safety. Fatigue damage is characterized by its concealment and accumulation. Its formation process is controlled by the microscopic defects of the material, the force characteristics and the coupling effect of the environment, making it difficult to accurately identify through conventional detection methods. The existing fatigue life prediction methods include the S-N curve method, fracture mechanics model and multi-factor damage evolution model. However, there are still deficiencies in parameter acquisition and adaptation to complex service environments. In the future, health monitoring data, machine learning recognition methods and digital twin platforms should be integrated to build a dynamically updatable life prediction system, achieving intelligent assessment and full life cycle management of bridge structures.

Keywords

Concrete bridges; Fatigue deterioration; Damage mechanism; Crack propagation; Life prediction model; health monitoring

桥梁混凝土结构疲劳劣化机理与寿命预测模型研究

杨彪

众成工程管理集团, 中国·山东 泰安 271000

摘要

混凝土桥梁在车辆荷载反复作用及氯盐侵蚀、温湿变化等环境因素影响下, 结构性能逐渐衰减, 容易出现疲劳裂缝扩展、钢筋锈蚀与承载能力下降等病害, 影响运营安全。疲劳损伤具有隐蔽性和累积性, 其形成过程受材料微观缺陷、受力特征及环境耦合作用控制, 难以通过常规检测手段准确识别。现有疲劳寿命预测方法包括 S-N 曲线法、断裂力学模型与多因素损伤演化模型, 但在参数获取与适应复杂服役环境方面仍存在不足。未来应结合健康监测数据、机器学习识别方法与数字孪生平台, 构建可动态更新的寿命预测体系, 实现桥梁结构的智能化评估与全生命周期管理。

关键词

混凝土桥梁; 疲劳劣化; 损伤机理; 裂纹扩展; 寿命预测模型; 健康监测

1 引言

随着交通运输体系的不断扩展, 混凝土桥梁长期承受高频次、多幅值和不规则车辆荷载, 其结构疲劳问题日益突出。大量服役年限较长的桥梁逐渐出现裂缝扩展、钢筋锈蚀、保护层脱落与承载性能衰减等病害, 疲劳损伤已成为危及桥梁运行安全的主要因素。疲劳劣化具有隐蔽性和累积性, 破坏过程通常缓慢发展, 早期症状不易通过常规检查发现, 待损伤显著时往往已接近结构性能下限。因此, 系统研究混凝土疲劳劣化机理并构建科学的寿命预测模型对于实现桥梁的安全评估和延寿维护具有重要意义。混凝土内部存在天然微裂纹, 在交通荷载、温湿循环及氯盐侵蚀共同作用下, 微

裂纹逐步扩展并演化为宏观裂缝, 钢筋锈蚀进一步降低界面粘结与抗力表现, 加速整体刚度退化。目前常用的寿命预测方法包括基于 S-N 曲线的疲劳评估、断裂力学裂纹扩展分析、统计损伤模型及基于健康监测的实时预测模型, 但均存在参数离散性大、环境影响难量化等不足。因此, 有必要从材料、构件与结构系统三个层面建立可应用于实际桥梁的综合寿命评估体系。

2 混凝土桥梁结构疲劳劣化的作用机理

2.1 疲劳损伤的微观累积过程

混凝土作为多相非均质材料, 其内部本身存在微裂纹、孔隙及界面缺陷。在车辆反复荷载作用下, 微裂纹尖端区域应力集中, 促使裂纹不断萌生与扩展, 逐渐形成由分散裂纹向贯通裂缝的演化过程。在荷载循环推进过程中, 骨料与水泥浆体界面 (ITZ) 成为疲劳弱化的主要区域, 界面粘结力

【作者简介】杨彪 (1987-), 男, 中国山东泰安人, 工程师, 从事土木交通研究。

下降、水化产物破碎及微孔结构演变导致材料刚度与抗拉强度持续衰减。在高温度、氯盐渗透及冻融循环环境中，孔隙水相变化和氯离子化学侵蚀加速裂纹扩展，使疲劳损伤表现出明显的环境敏感性。微观疲劳损伤累积会引起混凝土宏观弹性模量降低、能量耗散能力减弱和构件变形增大，最终导致承载性能退化。

2.2 钢筋锈蚀与疲劳协同劣化效应

桥梁服役环境中氯离子侵蚀和碳化作用使混凝土保护层碱性下降，破坏钢筋表面钝化膜，钢筋易发生点蚀与均匀锈蚀。锈蚀产物体积膨胀促使保护层产生径向拉应力，导致混凝土开裂，裂缝又进一步增强水分与氧气向钢筋表面的输送，加速锈蚀循环发展。钢筋截面削弱会使抗拉承载能力下降、屈服平台缩短，而界面粘结性能退化会削弱钢筋与混凝土协同受力性能。^[1]当疲劳荷载作用叠加锈蚀损伤时，钢筋的疲劳强度和延性会显著降低，使裂纹扩展速率加快，结构刚度与抗弯承载能力更快衰减，表现出明显的协同劣化效应。

2.3 荷载频率与温湿耦合作用影响

桥梁在实际运营过程中承受具有不规则性和随机性的交通荷载，其幅值、频率与波形均会影响疲劳损伤速率。当交通流量较大且车辆速度较高时，荷载作用频率提高，裂纹从萌生到扩展的阶段将被显著缩短，加速疲劳退化进程。与此同时，温度变化导致混凝土内部产生热胀冷缩应力；湿度波动使孔隙水含量变化，影响材料微观结构稳定性。温湿循环与氯盐侵蚀共同作用，会使混凝土产生反复体积变形，诱发附加疲劳应力，构成典型的环境—力学耦合损伤模式。该耦合作用可显著加快裂缝贯通与钢筋锈蚀过程，使疲劳退化从局部微裂纹发展为全构件性能衰退。

3 桥梁混凝土结构常见疲劳病害特征

3.1 梁体与伸缩节点裂缝发展规律

混凝土梁体在长期交通荷载影响下，其受拉区会出现疲劳裂缝萌生与扩展现象。主梁跨中下缘为弯拉应力最集中的区域，裂缝通常沿与主拉应力方向一致的路径分布，并在荷载循环的驱动下逐渐贯通和延伸，造成梁体刚度衰减与承载能力下降。此外，伸缩缝处由于结构刚度突变及约束条件复杂，应力集中显著，极易形成局部裂缝带。该区域裂缝的产生不仅影响防水性能，还可能成为氯离子侵入和钢筋锈蚀的关键通道，加速疲劳劣化过程。^[2]

3.2 桥面铺装层剥落与坑槽损伤

桥面铺装层处于外界环境与车辆荷载的直接作用界面，长期受雨水、冰冻融化、轮载摩擦与冲击等因素影响，其与桥面混凝土基层之间的粘结力逐渐弱化。随着疲劳累积，铺装层易发生剥落、坑槽、麻面及松散破碎等病害，导致路面平整度恶化和车辆振动效应增强。车辆动力荷载反复作用下，桥面铺装损伤进一步加剧主梁表层混凝土疲劳磨损，也

为水汽与融雪剂渗入创造通道，诱发钢筋锈蚀与混凝土保护层剥落，形成从表层到内部的连续性退化链条。

3.3 墩台与基础区受力疲劳破坏

墩台及基础区承受上部结构传递的集中压力，同时受到水流冲刷、温度梯度、冻融循环及车辆偏载等多重作用影响，在长期应力波动中易形成疲劳微裂纹。这些微裂纹初期难以察觉，但会逐步在承压面及钢筋保护层附近扩展，导致局部应力重新分布和整体刚度下降。此外，钢筋在氯离子与氧气共同作用下发生电化学腐蚀，使截面削弱及粘结强度衰减，进一步加速墩身承载性能损失。^[3]若基础区冲刷严重，还可能引发承载不均和倾斜风险，严重时影响桥梁整体稳定性与运营安全。

4 混凝土疲劳寿命预测的理论模型

4.1 基于 S-N 曲线的疲劳评估模型

基于 S-N 曲线的疲劳评估模型是桥梁混凝土结构疲劳寿命分析中应用最为广泛的方法之一。该模型通过大量材料疲劳试验，建立应力幅与疲劳寿命之间的函数关系，即 S-N 曲线，用以反映材料在不同荷载水平下的疲劳破坏特性。在工程应用中，可根据构件所承受的实际荷载应力幅，将其带入 S-N 曲线中计算相应疲劳寿命，从而实现对接疲劳剩余寿命的定量预测。然而，混凝土作为多相非均质材料，其疲劳破坏过程受加载频率、加载波形、应力比、构件尺寸和加载方式等多因素影响。车辆荷载的频率与不规则性、环境温度变化、氯离子侵蚀以及温度循环等外部因素都会导致 S-N 曲线参数发生偏移。此外，实际桥梁构件往往处于多轴应力状态，而 S-N 曲线更多基于单轴疲劳试验结果建立，存在一定简化性。因此，基于 S-N 曲线的疲劳评估方法适用于初步寿命估计，但在复杂服役环境下需结合其他模型进行修正和动态更新。^[4]

4.2 断裂力学裂纹扩展模型

断裂力学裂纹扩展模型从裂纹尖端的应力集中与能量释放特性出发，描述疲劳裂纹在荷载循环中的推进规律。该模型以应力强度因子 (SIF) 或裂尖张开位移 (CTOD) 为控制参数，通过疲劳裂纹扩展速率公式 (如 Paris 定律) 建立裂纹长度与加载循环数之间的定量关系。混凝土结构中微裂纹通常在早期难以观测，而在裂纹扩展阶段，裂纹增长速率和路径受骨料分布、界面结合强度、配筋率及约束条件影响较大。断裂力学模型能够较准确地描述裂纹从萌生到失稳破坏的全过程，适用于疲劳损伤已显现的中后期寿命预测，特别适用于抗弯构件、桥面板及受拉区域的耐久性分析。但该模型对裂纹初始尺寸、材料断裂韧性及构件受力边界条件敏感，参数获取依赖现场检测与试验反演。

4.3 多因素耦合损伤演化模型

多因素耦合损伤演化模型基于损伤力学理论，将混凝土疲劳视为材料内部微裂纹增殖、孔隙扩展、界面结合退化

及钢筋腐蚀等多机理共同演化的连续过程。该模型不以单一裂纹尺寸为控制参数，而是采用损伤变量描述材料刚度、强度及变形能力的逐步衰减。其核心思想是将实际交通荷载谱、水文气候条件、氯离子侵蚀速率、温湿耦合变形及构造细部效应纳入统一框架，通过建立疲劳—腐蚀—环境耦合演化方程，描述结构从初始完整状态到功能退化及最终破坏的动态演变路径。随着桥梁健康监测技术的发展，损伤演化模型可通过应变、挠度、模态频率及腐蚀速率等监测参数反演模型内部变量，实现寿命预测的实时更新。该模型能够更接近结构真实疲劳状态，具有较强的工程可操作性和长周期预测能力。未来，多因素耦合模型将与机器学习、贝叶斯更新和数字孪生平台结合，实现桥梁疲劳寿命的智能动态预测，为运营维护提供决策依据。^[5]

5 基于监测数据的桥梁寿命预测与运维策略

5.1 健康监测技术的参数识别

桥梁混凝土结构疲劳劣化过程具有隐蔽性和渐进性，仅依靠人工巡检难以及时发现疲劳损伤的早期迹象。健康监测技术通过在桥梁关键受力部位布设应变计、加速度传感器、位移传感器、钢筋腐蚀监测电极及环境传感单元，能够实现结构受力状态、振动特性、裂缝发展及腐蚀过程的实时记录和动态感知。在车辆荷载通过时，结构应变响应和模态参数的细微变化可用于识别疲劳裂纹萌生及扩展阶段；位移与挠度变化可反映刚度退化趋势；加速度信号中模态频率和阻尼比的变化能够揭示整体结构性能下降。对于存在海水或融雪剂侵蚀环境的桥梁，可通过电化学传感器对氯离子扩散和钢筋腐蚀速率进行监测，获取耐久性衰减进程。通过数据采集系统与远程传输平台，监测数据可以实时上传至管理中心，实现结构状态的长期跟踪和预警分析，为疲劳寿命预测提供可靠数据支撑，为运维决策提供依据。

5.2 寿命预测模型与监测数据融合

桥梁疲劳寿命预测模型若仅依赖理论推导或试验数据，往往难以充分考虑现场荷载特征与环境影响，因此将监测数据与模型计算相融合是提高预测精度的重要途径。在混凝土疲劳裂纹扩展分析中，可将现场实测应变幅值转化为等效应力范围，进一步代入断裂力学裂纹增长模型，动态更新裂纹扩展速率参数；对于基于损伤力学的疲劳寿命模型，可利用

结构模态参数、刚度退化指数和混凝土弹性模量随时间变化情况，反演疲劳损伤演化曲线。有限元模拟能够搭建真实结构应力分布场，监测数据则用于校准边界条件和材料劣化参数，实现寿命预测模型“由静态到动态、由假定到实测”的迭代更新。

5.3 维修加固与延寿管理策略

在疲劳损伤已显现或寿命预测达到预警阈值后，应及时采取针对性的维修与加固措施，以阻止裂缝扩展和性能衰减进一步恶化。对于局部裂缝、剥蚀及保护层破损区域，可采用表层修补、聚合物砂浆回补及涂覆防渗与阻锈材料以恢复耐久性；对于主梁受拉区构件，可采用粘贴碳纤维布（CFRP）或玻纤材料提升抗弯与抗拉性能；对于承载能力下降或跨中挠度增大的构件，可通过外包型钢、加设预应力筋或加载外部钢结构支撑体系进行加固，从而恢复结构整体刚度与承载储备。维修加固措施应与桥梁的运营条件、结构类别及施工干扰程度相匹配，尽量降低对交通的影响。在加固完成后，还需建立长期维护与检测制度，通过定期检测、在线监测及数据智能分析的结合，动态掌握结构性能变化趋势，形成“监测—评估—加固—再监测”的闭环延寿管理机制，从而最大限度提升桥梁服役安全性和使用寿命。

6 结语

混凝土桥梁结构疲劳劣化是一个由微观损伤积累至构件失效的连续演变过程，受荷载、环境、材料与构造多因素影响。寿命预测模型应从损伤机理出发，结合实测监测数据进行动态更新。

参考文献

- [1] 石景熔.盐冻与疲劳作用下预损伤钢筋—混凝土界面粘结性能劣化研究[D].长安大学,2024.
- [2] 武洋洋.微动疲劳和腐蚀共同作用下桥梁缆索损伤演化分析[D].东南大学,2022.
- [3] 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.
- [4] 甘超.环境侵蚀作用下桥梁结构加固模型疲劳试验研究[D].郑州大学,2017.
- [5] 石晓猛.腐蚀与疲劳耦合作用下钢筋混凝土桥梁寿命预测方法研究[D].天津大学,2012.