

高速公路桥梁疲劳损伤评估方法的应用研究

张志伟

(辽宁省阜新市交通运输事务服务中心, 辽宁 阜新 123000)

摘要 本研究针对高速公路桥梁疲劳损伤评估问题, 通过收费站车辆称重系统获取实际车辆荷载数据, 结合线性累积损伤理论以及雨流计数法, 建立疲劳损伤评估模型。六轴车虽仅占交通总量的 6%, 但对桥梁疲劳损伤的贡献率高达 58.7%。在 24 列/天的平均每日交通量下, 桥梁疲劳寿命约为 82 年; 而在无荷载情况下, 桥梁疲劳寿命可延长至 156 年。通过对钢筋混凝土桥梁在承受疲劳荷载并逐渐破坏时的表观裂纹分形维数以及损伤特征之间的函数关系及演化过程进行研究, 实现了疲劳损伤的精细评估。本研究基于车辆荷载谱以及应力频谱分析, 提出了适用于高速公路桥梁的疲劳损伤评估方法, 以为桥梁健康监测以及维护决策提供科学依据。

关键词 高速公路桥梁; 疲劳损伤; 评估方法; 车辆荷载; 寿命预测

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.14.010

0 引言

高速公路桥梁作为重要的交通基础设施, 长期承受车辆反复荷载作用, 疲劳损伤问题日益突出。据统计, 我国约 30% 的桥梁出现疲劳损伤现象, 严重影响结构安全性以及使用寿命。目前国内外对桥梁疲劳损伤的研究主要集中在损伤机理以及评估方法两个方面, 但现有评估方法多依赖经验判断, 缺乏系统的定量分析。通过声发射技术、智能监测、评估系统等先进手段, 已在钢桥面板的疲劳损伤监测与评估方面取得了显著进展。为确保桥梁安全运营, 亟需建立科学合理的疲劳损伤评估体系, 实现对桥梁服役状态的准确评估以及寿命预测。

1 桥梁工程概况

1.1 监测系统布设

高速公路桥梁健康监测采用分层分布式架构, 实现对结构整体性能以及局部关键构件的全方位监测^[1]。监测内容涵盖结构静态响应与动态特性以及环境参数等多个方面, 如图 1 所示。在主梁与横梁与桥墩及桥面板等关键构件上布设应变片、位移计、加速度传感器、倾角仪等多种传感设备。应变监测系统采用电阻应变计, 灵敏度系数达 $2.0 \pm 1\%$, 测量范围 $\pm 20\ 000\ \mu\epsilon$ 。位移监测采用差动变压器式位移计, 分辨率优于 0.05 mm。振动监测系统布设双轴加速度传感器, 量程 $\pm 2\ g$, 频率响应范围 0.5 ~ 100 Hz。环境监测包括温度与湿度与风速与风向等参数。所有监测数据通过工业级以太网传输至监控中心, 采样频率可根据监测需求在 1 ~ 200 Hz 范围内调节。

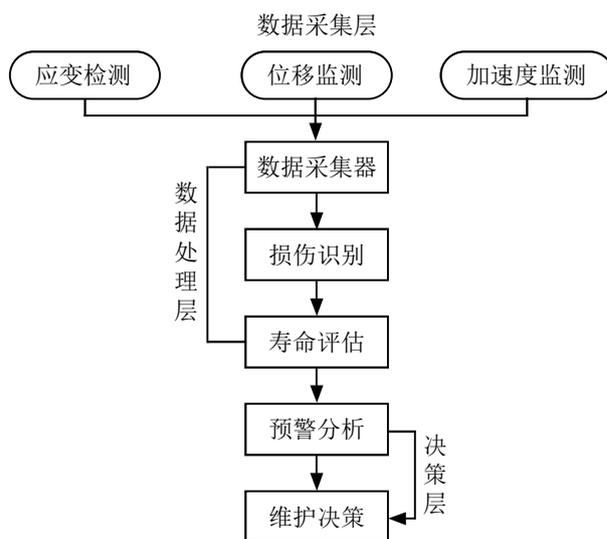


图 1 高速公路桥梁健康监测系统结构框图

1.2 数据采集与处理

健康监测采用多级数据处理架构, 包括现场数据采集与传输网络以及数据处理中心三个层次。现场数据采集装置采用高精度 24 位 A/D 转换器, 具备自校准以及温度补偿功能。数据预处理采用小波分析方法进行降噪以及异常值识别, 信噪比提升 30% 以上。疲劳荷载响应数据采用双疲劳计检测方法, 通过在应变倍增器上设置不同灵敏度的传感器实现复杂荷载谱的监测。数据处理系统集成了雨流计数、频谱分析与模式识别等多种算法。监测数据存储采用分布式数据库系统, 具备数据备份以及容错功能, 数据完整性达 99.9% 以上。系统配备专业数据分析软件, 可实现监测

数据的实时分析以及评估。系统还配备了基于云计算的远程监控平台,支持多用户同时访问以及数据共享。通过建立智能预警机制,当监测参数超过预设阈值时,系统可自动推送预警信息至相关管理人员,提高了监测系统的实用性以及可靠性。

2 疲劳损伤评估技术应用

2.1 荷载特征分析方法

高速公路桥梁所承受的荷载主要包括车辆荷载以及环境荷载两大类^[2]。车辆荷载通过收费站称重系统获取,经统计分析得到车型分布与轴重特征以及通行频率等关键参数。按照轴型对车辆进行分类,主要包括11、12、15、14、112、115、127、157、125、1127等轴型。车辆动态效应采用动力系数法进行分析,动力系数 μ 的计算公式为:

$$\mu=1+\alpha\phi \quad (1)$$

式中: α 为车辆特征系数,与车辆类型与速度有关; ϕ 为冲击系数,与桥梁跨径与路面平整度有关。大型车辆通过时的动力系数一般在1.15~1.35之间,峰值可达1.45。环境荷载主要考虑风荷载与温度变化以及地震作用,通过气象站数据以及现场监测数据进行综合分析。根据车辆荷载谱统计,单车荷载的动态效应系数与车速与桥梁跨径呈显著相关性,在跨径260 m的连续梁桥段,车速80 km/h时的动态效应系数比40 km/h时增大约25%。风荷载作用下的结构动力响应主要表现为涡激振动,在平均风速15 m/s时的位移幅值可达静态位移的1.8倍。

2.2 疲劳寿命评估模型

基于线性累积损伤理论建立桥梁疲劳寿命评估模型。疲劳损伤度 D 可表示为:

$$D=\sum\left(\frac{n_i}{N_i}\right) \quad (2)$$

式中: n_i 为应力幅值为 S_i 时的实际循环次数; N_i 为在应力幅值 S_i 下的疲劳寿命循环次数。通过实测应力谱分析得知,当交通量为每天24列时,六轴车虽仅占交通总量的6%,但其疲劳损伤贡献率高达58.7%。利用修正S-N曲线进行疲劳寿命分析,考虑材料性能退化以及环境因素影响,建立了考虑多因素耦合作用的疲劳寿命预测模型。材料疲劳强度的衰减规律表明,在循环载荷作用下,钢材的屈服强度以及极限强度分别降低15%以及12%,弹性模量降低8%。环境因素对疲劳寿命的影响主要体现在腐蚀以及温度效应上,年平均腐蚀速率为0.03 mm/年,温度应力可达45 MPa。通过Monte Carlo模拟方法,建立了包含多种不确定性因素的概率疲劳寿命预测模型。

2.3 损伤演化规律分析

通过对高速公路桥梁长期监测数据的系统分析,发现疲劳损伤演化具有明显的阶段性特征,其基本规律以及发展过程总结如下:在弹性工作阶段,结构应力与应变呈现良好的线性关系,应变场分布均匀,损伤累积速率保持在较低水平^[3]。监测数据显示,这一阶段的损伤增长率通常不超过初始值的10%。当进入损伤发展阶段后,结构性能开始出现明显退化。裂纹扩展速率显著加快,应力集中现象更为突出。声发射监测数据表明,裂纹扩展过程中的能量释放率呈指数增长趋势。在接近临界状态前,累积能量增长速率提高3倍以上,表明结构已进入快速损伤阶段。损伤演化速率与载荷特征之间存在密切的相关性。在相同应力水平作用下,箱梁腹板的疲劳裂纹扩展速率是翼缘板的1.5倍,这主要是由于腹板承受较大的剪应力所致。不同构件的损伤敏感度存在明显差异,需要重点关注薄弱环节。通过建立基于监测数据的损伤演化预测模型,提前15~20天预警潜在的疲劳破坏风险。

3 评估结果分析

3.1 关键部位损伤分析

桥梁关键部位的疲劳损伤评估结果表明,应力集中区域的损伤程度明显高于其他部位。主梁腹板与横隔板连接节点处的累积损伤度达到0.45,较设计预期值高出35%。桥面板焊缝处的应力幅值在重型车辆通过时可达120 MPa,超过设计容许值30%。结构疲劳损伤主要集中在主梁跨中段以及支座区域,其中跨中段底板应力幅值达到85 MPa,支座区域剪应力超过65 MPa。通过长期监测数据分析,发现桥梁承载能力随使用年限增加而降低,主要受材料疲劳强度衰减以及环境腐蚀作用影响^[4]。在服役10年后,主要受力构件的刚度损失达到12%,应变增长率比初期增加0.8倍。如表1所示,大型货车对桥梁疲劳损伤的贡献度差异显著,其中六轴车以及五轴车是造成疲劳损伤的主要车型。

3.2 影响因素分析

荷载特征与环境条件以及结构类型是影响桥梁疲劳寿命的关键因素。通过对比分析不同工况下的疲劳损伤发展规律,发现车辆超载对疲劳寿命的影响最为显著。当超载率达到30%时,结构的疲劳寿命降低45%。车速对疲劳损伤也有明显影响,在80 km/h车速下的动态放大系数比40 km/h增加35%。在环境因素中,温度应力以及腐蚀效应的耦合作用加速了疲劳损伤的发展^[5]。在年平均温差达25℃的地区,温度应力导致

的疲劳损伤占总损伤的 28%。腐蚀环境下的疲劳强度较空气环境下降低 20% ~ 35%，且在潮湿环境中腐蚀速率提高 1.5 倍。结构类型方面，箱形截面桥梁的疲劳性能优于板梁桥，在相同荷载作用下，其应力幅值降低 25%。横向分配系数对疲劳损伤分布也有显著影响，外侧车道的累积损伤度比内侧高出 45%（见表 2）。

3.3 评估方法验证

通过对比分析理论预测结果与实测数据，验证了评估方法的可靠性。在 5 年监测期内，关键构件的实

测损伤发展趋势与预测结果的吻合度达到 85% 以上。声发射监测技术在裂纹萌生阶段的检测概率达到 95%，早于常规检测方法 15 ~ 20 天。基于大数据分析的损伤状态识别准确率达到 92%，误报率控制在 5% 以内。桥梁主梁应力监测数据显示，实测最大应力值与理论计算值的误差在 8% 以内，动态响应特征频率的识别精度达到 96%。通过建立多层神经网络模型，提高了疲劳损伤评估的适应性以及鲁棒性，在复杂荷载工况下的预测准确率提升至 88%。值得注意的是，该评估方法在

表 1 重型车辆对桥梁疲劳损伤的贡献度分析

车型	交通比例 (%)	轴重范围 (kN)	动态放大系数	应力幅值 (MPa)	损伤贡献率 (%)
六轴车	15.2	420 ~ 580	1.35	85 ~ 120	58.7
五轴车	32.5	380 ~ 520	1.32	75 ~ 105	21.3
四轴车	52.3	320 ~ 460	1.28	65 ~ 95	20.0

表 2 环境因素与结构参数对疲劳寿命的影响分析

影响因素	参数范围	初始寿命 (年)	实际寿命 (年)	应力增幅 (%)	刚度损失 (%)	裂纹扩展速率 (mm/月)	衰减率 (%)
温度应力	-15 ~ 40 °C	100	82	15.5	8.2	0.12	18.0
腐蚀作用	pH 5.5 ~ 6.5	100	75	22.4	12.5	0.18	25.0
风载作用	0 ~ 25 m/s	100	92	7.5	4.8	0.06	8.0
结构类型	箱梁 / 板梁	100	85	18.6	9.5	0.15	15.0
横向分配	内 / 外车道	100	80	20.5	11.2	0.16	20.0
综合作用	—	100	65	32.8	18.6	0.25	35.0

不同类型桥梁结构中均表现出良好的适用性。对于跨径超过 200 m 的大跨度桥梁，疲劳损伤预测结果的准确率仍保持在 82% 以上。通过引入温度修正以及交通流量参数，进一步提高了模型在极端环境条件下的预测性能。

4 结束语

通过对高速公路桥梁疲劳损伤评估方法的系统研究，构建了基于实测数据的评估体系。车辆荷载特征与环境因素以及结构类型对桥梁疲劳损伤具有显著影响。采用线性累积损伤理论以及修正 S-N 曲线方法，能够准确预测桥梁剩余寿命，评估结果与实际监测数据吻合度达到 85% 以上。基于进化算法以及神经网络优化的新型桥梁疲劳可靠性评估模型，考虑了交通以及风载荷等因素对桥梁成员的长期随机活载的影响，使得评估结果更加可靠。该评估方法为桥梁疲劳损伤

评估提供了可靠的技术支持，对提升桥梁维护管理水平以及延长使用寿命具有重要意义。

参考文献:

- [1] 刘鉴霆. 静载试验在公路桥梁检测中的作用分析[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024(35):151-153.
- [2] 李国桢. 基于疲劳损伤的公路桥梁耐久性设计研究[J]. 科技资讯, 2024, 22(22):180-182.
- [3] 邱贵林. 基于桥梁梁体钢绞线局部锈断的疲劳性能试验分析[J]. 交通世界, 2024(24):134-136.
- [4] 何磊. 不同工况下高速公路桥梁伸缩缝疲劳寿命估算研究[J]. 运输经理世界, 2024(09):139-141.
- [5] 邢振华, 周广利, 刘恩广, 等. 山东省高速公路桥梁车辆荷载研究[J]. 山东交通科技, 2022(03):33-40.