

# 桥梁钢筋混凝土疲劳性能分析研究

黎建华

湖北省交通规划设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430051

**[摘要]**桥梁钢筋混凝土在服役期间不断受到车辆、环境等因素的反复荷载的影响, 疲劳性能对整个桥梁结构的安全性和耐久度有着重要的影响, 文章主要研究了桥梁钢筋混凝土疲劳性能的影响要素主要有材料参数、荷载类型、环境状况还有构造特点四个方面。对疲劳损伤发展过程进行了剖析, 归纳出依据应力-寿命 (S-N)、断裂力学以及损伤力学建立起来的桥梁疲劳寿命预测模型, 综述了目前常用的疲劳性能测试办法及其评定方式。主要包括试验规范、加载方案、损伤识别技术以及剩余寿命估算方法等。最后提出全方位的提高桥梁混凝土结构的疲劳性能并进行维护的思想体系, 即从原材料的选择开始一直到后期的加固修理、智能监控这一系列工作都需要考虑进去。

**[关键词]**钢筋混凝土桥梁; 疲劳性能; 损伤机理; 寿命预测

DOI: 10.33142/ec.v9i5.19658

中图分类号: U448.34

文献标识码: A

## Research on Fatigue Performance Analysis of Reinforced Concrete in Bridges

LI Jianhua

Hubei Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430051, China

**Abstract:** During service, reinforced concrete in bridges is constantly affected by repeated loads from vehicles, environment, and other factors. Fatigue performance has an important impact on the safety and durability of the entire bridge structure. This article mainly studies the factors that affect the fatigue performance of reinforced concrete in bridges, including material parameters, load types, environmental conditions, and structural characteristics. The development process of fatigue damage was analyzed, and a bridge fatigue life prediction model based on stress life (S-N), fracture mechanics, and damage mechanics was summarized. The commonly used fatigue performance testing methods and their evaluation methods were also reviewed. It mainly includes test specifications, loading schemes, damage identification techniques, and residual life estimation methods. Finally, a comprehensive idea system for improving the fatigue performance and maintenance of bridge concrete structures is proposed, which needs to be considered from the selection of raw materials to the later stages of reinforcement, repair, and intelligent monitoring.

**Keywords:** reinforced concrete bridge; fatigue performance; damage mechanism; life prediction

### 引言

钢筋混凝土桥梁在服役期间不断受到车辆荷载、温度变化等反复循环应力的影响, 在应力远远小于其静力强度的情况下, 仍可能造成微裂缝产生、发展从而发生疲劳破坏。疲劳破坏的发生往往具有突发性以及隐秘性, 会对桥梁的安全稳定造成极大的危害。伴随着交通流量的增长以及重车比率的提高以及桥梁老化的问题越来越突出, 对于钢筋混凝土桥梁进行疲劳特性方面的研究也越来越迫切需要。本文主要从疲劳特性的影响因素、破坏机制、检测评定方法以及改进维护等方面进行了全面探讨, 希望能够对今后的研究工作起到借鉴作用。

### 1 疲劳性能影响因素分析

钢筋混凝土结构的耐久性受到多种因素相互作用的影响, 可以总结为四个主要方面: 材料性质、荷载性质、环境情况和构造特点等四类因素。其中材料性质是影响整个结构耐久性的根本原因, 钢筋疲劳强度与化学组成, 冶炼工艺以及表面状况相关, 高强度钢筋疲劳强度并不一定高于普通钢筋, 对应力集中比较敏感; 混凝土疲劳强度一般为抗压强度的 0.5~0.6 左右。钢筋及混凝土之间的粘结性能, 在反复加载过程中会出现逐渐降低的趋势, 从而影响了构件的疲劳过程; 荷载特性主要是指应力幅值大小、循环次数以及加载方式等几个方面, 而实际桥梁所经受的

汽车荷载都是随机且具有变化范围内的波动。变幅荷载疲劳破坏积累并不是简单的相加关系。环境因素极大程度上影响疲劳耐久性, 腐蚀环境中钢筋受锈蚀产生锈坑, 成为严重应力集中区, 在某些实验中锈蚀钢筋疲劳寿命较未锈蚀钢筋可降低 70% 以上; 构造细节确定着应力集中程度, 如钢筋搭接处、焊接接头和弯折处等处都是疲劳断裂发生的位置, 美国 AASHTO 规范提出构造细节疲劳抵抗能力等级对钢筋混凝土桥有参考价值。

## 2 疲劳损伤机理与模型

### 2.1 疲劳损伤演化过程

对于钢筋混凝土构件在循环荷载作用下的疲劳损伤发展而言, 是一个由细到粗, 从小范围到大范围的发展演化进程, 该进程一般分为三个阶段。第一阶段是微裂纹产生阶段, 在循环荷载初期混凝土内部原有的初始微裂缝及钢筋表面上的小缺陷开始发生应力集中, 达到局部应力超过材料屈服强度就产生了微裂纹。该过程占疲劳寿命的比例大小与材料本身的质量级别以及所受荷载等因素有关, 一般来说高应力的情况下所占比重较小, 低应力的情况下所占比例较大。第二阶段是裂纹稳定的扩展阶段, 在经过一定的循环之后, 混凝土中的微裂纹沿着最大剪切应力方向延伸并互相连接, 从而形成了肉眼可见的裂缝。钢筋疲劳裂纹在这个时期处于稳定的扩展状态, 其扩展速度同应力强度因子幅度之间满足巴黎公式的幂次规律, 在此期间, 钢筋和混凝土粘结表面逐步拉开, 二者间共同工作的能力不断削弱, 造成裂缝的发展变宽、结构刚性减弱, 在这个阶段, 占用了疲劳寿命的主要部分, 是损伤累积的主要阶段。第三阶段是失稳破坏期。当裂缝发展至极限尺寸的时候, 剩下截面不能够支撑外力的作用了, 钢筋猛然断裂或者混凝土压坏, 梁体产生脆性的破坏, 在这个阶段持续的时间很短, 在破坏之前一般也没有什么征兆可寻。对于钢筋混凝土梁之类的受弯构件来说, 常见的疲劳破坏方式是这样的: 首先是受拉区的混凝土开裂; 紧接着裂缝区的筋体受主要拉力作用, 其应力集中现象加强, 在反复加载的过程中, 钢筋疲劳裂纹扩展开来达到一定程度之后便产生破裂而致使梁破坏掉。

### 2.2 疲劳寿命预测模型

以应力-寿命曲线模型使用最多, 运用恒幅疲劳试验获得应力幅-疲劳寿命经验表达式。我国《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362-2018) 规定了钢筋疲劳应力上限值, 就是 S-N 曲线方法的应用简化版。基于断裂力学模型用 Paris 公式表示裂隙扩展, 更能科学地反映原始缺陷对疲劳寿命的作用, 与无损探测方法

组合可以估计残余寿命。基于损伤力学模型利用连续损伤参数, 构造损伤增长函数。一些研究人员建立了钢筋混凝土疲劳损伤本构模型, 有效的再现了梁件受重复荷载作用时的刚度降低及寿命缩短过程。

## 3 疲劳性能试验与评估方法

### 3.1 试验方法与标准

疲劳试验是得到材料或者部件疲劳特性参数的主要方法。依据研究对象不同可以分为材料试验、零件试验和构件试验。加载形式主要有恒幅加载、变幅加载和随机加载等。恒幅加载得到基本的 S-N 曲线, 而变幅、随机加载更加符合实际的载荷情况。目前国际通用的疲劳试验规范有美国 ASTM E466、英国 BS 3518 及国际标准化组织的 ISO 12108 等。关于钢筋混凝土结构, 《金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法》(GB/T 3075-2021)、《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152-2012) 给出了相应的参考意见, 在进行试验时需要特别注意加载速率的选择问题, 混凝土疲劳试验一般选择在 3~5Hz 左右频率范围内进行, 以便避免发生共振现象以及降低应变率的影响; 而对于钢筋而言其疲劳试验可以选择更高的频率来增加试验的速度。

### 3.2 应力谱与荷载模拟

精确再现桥梁实际受到的车辆活载对疲劳研究分析至关重要。应力功率谱描述的是结构某一位置处的应力随着时间变化的过程, 一般而言, 它是这样建立起来的: 先是使用动测秤系统 (WIM) 收集实际通车流量的数据信息即各车轮子的重量、间距间隔以及速度等相关数据; 然后应用影响线或者有限单元法来求解桥梁重要节点的应力响应; 最后通过雨流计数法等手段把随机应力-时间过程转换成一系列应变周期同对应的峰值和平均值构成应力功率谱。基于实测 WIM 信息的车辆荷载谱更能真实地体现桥梁的实际受力情况, 克服了利用标准疲劳车辆模型所导致的过分保守或是失真的问题。而对于无实测数据的桥梁, 则可以参照规范所提出的疲劳荷载模型, 比如中国的《公路桥梁荷载试验规程》提出的疲劳试验车模型或者欧洲 Eurocode 中提出的疲劳荷载模型 FLM3、FLM4 等。在数值模拟过程中可以采用有限元瞬态分析或者模态叠加法来进行长时程下的应力过程求解, 同时结合多尺度的方法注重对疲劳敏感部分局部应力的变化特征研究。

### 3.3 损伤检测技术

疲劳损伤检测是对结构早期损坏进行判别、预报危险性的重要方式。现有技术研发正朝着多样性、智能化方向发展。传统的非破坏性检测主要有: 外观检查用以观察出肉眼可见的裂缝、锈蚀等较大缺陷; 超声检测基于超声波

在介质中的传导特点来发现混凝土内部缺陷如空洞、裂缝和钢筋面积损失的情况；X射线检测能清晰地看到内部缺陷，适用于对混凝土结构内部缺陷的查看；磁粉检测与渗透检测主要是针对表面或者接近表面的裂纹的精确定位。声发射技术可以实时记录下疲劳裂纹扩展时所产生的弹性波，从而达到对损伤进行跟踪定位的目的，在疲劳实验和寿命评估上有着重要的作用。新型检测技术正在不断被开发出来并得到应用。数字图像相关方法通过对结构表面散斑场的形变跟踪，可以实现对疲劳裂纹产生到扩展的非接触、全场动态观测。光纤布里渊光栅传感器有耐电磁干扰以及易于实现分步布置的优势，可以在长时间内监测钢筋应力和裂缝宽度的变化情况。利用无人机加可视化的检测方式搭配图像处理识别算法，能够对超大的桥梁出现的病害进行有效的巡视检查。

### 3.4 剩余寿命评估

剩余使用寿命分析是对现有桥梁安全性检查的主要工作，以现有的损坏状况和预期未来的荷载来推算出结构可以再安全使用的期限。评估方式可以分为精确方法以及随机化方法。

可靠性评价以“累计损伤定律”为基础，一般使用的是 Miner 线性累加损伤模型，其假设各个应力循环造成的损伤相互独立、彼此之间能够进行线性叠加，当累加损伤达到一个临界值之后便会失效。虽然 Miner 准则忽视了加载顺序的影响并且物理背景比较浅显，但是由于它的表示简洁明快而且变量容易取得的缘故所以在工程中被最频繁地运用，评价时要结合实际应力谱以及材料的 S-N 曲线得出已用掉的损伤系数从而推算出剩余时间长度；而随机性评价则考虑材料特性和载荷还有损伤检测结果都有一定的不确定性，因此采用概率论及数理统计的方法得到剩余寿命在某一个可靠程度下的范围。在贝叶斯理论的基础上采用迭代方式，把无损检测的结果当作是初始信息，逐步调整剩余寿命概率分布，使得评定结果更加接近实际结构状态；近年来结合结构健康监测信息与动态贝叶斯网络评价手段的研究，为实时、动态的桥梁疲劳寿命评价提供了一种新思路。

## 4 疲劳性能提升与维护策略

### 4.1 材料与构造优化

从根本上提高钢筋混凝土桥梁的疲劳强度，是最优的方法。在材料方面，使用高韧性和低水化热的混凝土来减小早期微裂缝；添加了钢纤维或者合成纤维能够有效地抑制混凝土的裂缝扩展，从而提高它的疲劳能力。在钢筋方面，采用微合金化、细化晶粒的手段可以提升疲劳极限；

环氧涂层钢筋或者不锈钢钢筋都能明显地增强它的防腐疲劳性能。在施工方面，设计上要遵守“力流平顺”的原则，防止断面突变，增大钢筋弯曲半径；改进焊接方法，取消传统的搭接焊而采用机械连接；在应力集中的地方增加附加钢筋或者局部加强等手段。研究发现，在结构中合理设置抗裂受力筋以及加密箍筋等手段可以有效的减缓疲劳裂缝的发生时间，使结构的疲劳寿命延长了 2~3 倍左右。

### 4.2 疲劳敏感部位加固

对于已有桥梁而言，对疲劳敏感部分局部加固则是恢复或者提高桥梁抗疲劳能力的一种办法。加固的方法有：粘贴钢板以及纤维增强复合材料（如 FRP），能够很好地分散钢筋应力，减小裂缝处钢筋的应力幅，达到减少疲劳开裂的目的；外部粘贴预应力 FRP 或者钢板还具有主动约束效果，改善了结构的受力情况，大大延长了疲劳寿命；对于钢筋锈蚀造成的疲劳病害可以采取局部补焊或者增加附加钢筋或者更换受损部件等方式处理；利用超高韧性水泥基复合材料（ECC）替代或者修补疲劳损伤的位置，由于它优异的应变硬化及控制裂缝的能力，使得它有广泛的应用前景。

### 4.3 荷载管理与监测

荷载管理是减轻疲劳损伤累积的有效补充方式之一，针对重负载车辆比例较高的桥梁可以借助交通管理的方法来减少车辆荷载的最大值，在桥梁健康管理系统中实时获取到应变、加速度、裂缝宽度等重要信息，从而可以作为疲劳损伤程度分析的基础，通过健康管理系统收集到的荷载谱对结构的累积损伤进行实时统计，能够达到对桥梁结构的疲劳状况实时报警的效果，若将监测的数据同交通信息管理系统集成起来就可以更加有效的实施荷载管理方法，比如当遇到极值荷载的情况下能立刻做出对应的评定并告知桥梁剩余使用寿命的损耗情况，为接下来的维修安排提供参考等等。

### 4.4 维护与修复技术

合理的养护及必要的加固是保障桥梁能够长时间安全使用的最后一步。养护方法应该由传统的“被动修缮”，转变为“主动养护”。对混凝土裂缝，依据裂缝宽度的不同可以采取表面封闭或者是压力灌浆的方式，避免水分以及侵蚀性的物质进入裂缝内；对于钢筋锈蚀在除锈之后采用牺牲阳极或者外加电流阴极方式进行防护，避免再次氧化；对于已经产生疲劳断裂的钢筋，采用高强度螺栓板式或者是粘贴钢板的方法来进行连接，防止裂纹进一步扩大；构建一个基于风险分析的全生命周期最经济的养护方案模型，结合养护费用、结构损坏风险、交通影响等变量，

可以得到最佳的养护时间点及方式。伴随着数字孪生技术的进步发展,建立桥梁数字镜像,结合物理建模及传感器数据,可以对疲劳损伤演化进行预测以及对维修方案进行虚拟验证,使桥梁维护方案的选择更加合理有效。

## 5 结束语

桥梁钢筋混凝土疲劳性能涉及复杂的影响因素,多层次破坏作用以及全寿命期维修管理。材料属性、荷载性质、环境条件和结构细节都决定了抗疲劳的能力大小,而应力集中和腐蚀环境是主要的影响因素之一。疲劳破坏过程可以用 S-N 图的方法、断裂力学模型和损伤力学模型来进行预测。现有的评价方式基于试验标准、实际受力情况以及先进检测手段的基础上正在由定性转向定量。提高和保养工作也需要贯穿整个生命周期中,在材料选择、构造设计、修复养护及智能监控等方面都要做好。而在未来,随着新材料的研发以及传感器技术和数字孪生平台的应用,桥梁钢混结构疲劳分析会越来越精确、智能。加强恶劣环

境下的疲劳损伤机理研究,推动综合数据及物理模型的数字孪生技术的发展,构建以风险为导向的智能运维决策平台是发展方向之一。

## [参考文献]

- [1]李卫国.体外预应力加固预应力混凝土梁的疲劳损伤机理研究[J].山西交通科技,2025(6):81-86.
  - [2]张炜杰,刘均利,陈凡,等.截面形式与通风孔设置对混凝土试件收缩的影响[J].洛阳理工学院学报(自然科学版),2026,36(1):26-31.
  - [3]杨建喜,左书华,曹磊,等.高墩预应力混凝土连续刚构桥0号块应力分析[J].公路工程,2025,50(6):85-94.
  - [4]陈定市,李周,郭文华,等.重载铁路钢筋混凝土梁桥氯盐侵蚀-疲劳寿命评估[J].铁道科学与工程学报,2026(3):31.
- 作者简介:黎建华(1991—),男,湖北监利人,工程师。武汉理工大学道路与铁道工程专业硕士毕业,现主要从事桥梁设计工作。