

桥梁设计中抗疲劳性能分析与加固对策研究

孙旦旦

中南勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430074

[摘要] 桥梁结构在漫长使用期内受到重复车辆载荷以及周边环境共同作用导致的疲劳损伤积累以及裂纹萌生扩大成为制约桥梁使用寿命的主要因素。文章对桥梁疲劳损伤的发生机理进行了系统的解析, 主要介绍了应力集中、焊接残余应力、多疲劳裂纹相互叠加等对于疲劳寿命的影响途径, 在此基础上基于名义应力法与局部应力-应变法归纳了抗疲劳性能分析的方法论基础以及具体的应用情况; 然后结合无损检测及监测技术、剩余疲劳寿命估计和安全等级评定等建立了疲劳损伤评估的技术体系。最后, 基于安全性、经济性和耐久性的指导思想, 对传统加固技术和新材料加固技术各自的优缺点及适用场合进行了分析研究, 研究了加固措施的选择和设计的关键问题。

[关键词] 桥梁工程; 疲劳损伤; 疲劳寿命预测

DOI: 10.33142/ect.v4i4.19528

中图分类号: U445.2+8

文献标识码: A

Research on Anti-fatigue Performance Analysis and Reinforcement Countermeasures in Bridge Design

SUN Dandan

Zhongnan Engineering Corporation Limited, Wuhan, Hubei, 430074, China

Abstract: The accumulation of fatigue damage and crack initiation and expansion caused by repeated vehicle loads and the combined effects of surrounding environment during the long service life of bridge structures have become the main factors restricting the service life of bridges. The article provides a systematic analysis of the mechanism of fatigue damage in bridges, mainly introducing the ways in which stress concentration, welding residual stress, and the superposition of multiple fatigue cracks affect fatigue life; On this basis, the methodological basis and specific application of fatigue performance analysis were summarized based on the nominal stress method and local stress-strain method; Then, a technical system for fatigue damage assessment was established by combining non-destructive testing and monitoring techniques, residual fatigue life estimation, and safety level assessment. Finally, based on the guiding principles of safety, economy, and durability, the advantages, disadvantages, and applicable scenarios of traditional reinforcement techniques and new material reinforcement techniques were analyzed and studied, and the key issues in the selection and design of reinforcement measures were investigated.

Keywords: bridge engineering; fatigue damage; fatigue life prediction

引言

正交异性钢桥面板是大跨径桥梁常用的一种主要结构类型, 其上的顶板焊接接头在行车荷载长期反复作用下极易发生疲劳裂纹的发生和发展, 对现有桥梁的安全使用构成了极大的威胁。桥梁疲劳问题涉及损伤机制、测试手段、评价方法、维修方案等一系列内容, 应该进行综合考虑^[1]。近年来由于分析方法的进步、检测手段的发展以及新型材料的应用使得抗疲劳研究朝着跨领域的方向发展。

1 桥梁疲劳损伤机理

桥梁疲劳损伤来自应力集中、焊接残余应力、多裂纹

相互作用的影响。结构的应力集中区往往是疲劳破坏发生的地方, 焊缝连接处、孔口附近存在一些几何突变, 这些部位外力加载会带来很大的局部应力放大效果, 焊接残余应力成为焊缝应力集中的裂纹产生的主要原因, 在车辆动载多次循环的作用下逐渐释放, 焊趾处剩余拉应力可达到材料屈服强度的 80%, 而裂纹扩展阶段由于钢桥面焊接后的焊接缺陷处微小裂纹数量庞大, 触发了近源裂纹间的相互连接及复合的现象, 多裂纹相互作用和复合现象使疲劳寿命大大下降, 初始尺寸为 4mm 的双裂纹相比单裂纹疲劳寿命降低了 31.6%^[2]。残留应力导致裂纹深度上的扩

展速度小于表面,疲劳裂纹形态逐渐由尖锐型发展成为扁长型,在疲劳断裂时易在顶板上产生长条形裂纹,以上各因素相互作用下形成了桥梁结构的疲劳性能劣化过程。

2 抗疲劳性能分析方法

2.1 名义应力法

名义应力法以结构件名义应力幅作为控制参数,利用 S-N 曲线及 Miner 线性累计损伤假定估算疲劳寿命,是最常用的最基本的分析手段。其分析步骤明了方便实用,特别适合用于设计方案对比选择中,其疲劳寿命计算过程简便直观、工程实用性较强。名义应力法计算钢结构桥疲劳寿命的重点是对焊缝根部应力集中系数的正确选取,需要采用有限单元法对其进行细化研究。但是因实际运行中的各种动载都会造成应力重分布以及残余应力的存在会带来一定的影响,导致传统的名义应力疲劳寿命计算结果产生约 20%~40% 的误差。当有健康的检测手段的情况下,通过名义应力法及其监测系统采集的数据来实现对大跨度桥梁正交异性钢桥面板疲劳寿命精确度高的估算。

2.2 局部应力应变法

局部应力应变速率法直接用缺口根部或裂纹尖端附近的局部分布的应力应变速率作为疲劳寿命的判断标准,更为准确地表征了局部应力最高点的实际工作情况,对于大跨径桥梁在车辆荷载下的主要结构焊缝处的局部高温点应力计算以及疲劳损坏累积的研究则是对其疲劳损伤累积的程度做出精确估计的前提条件。分析步骤主要有以下几步:构建总体模型得到整体受载、利用子模型方法精细模拟局部细节、运用 Basquin 和 Manson-Coffin 公式求得疲劳寿命与局部应变速率之间的关系、利用累积损伤法则结合循环周次来估算寿命等等。大跨度结构基于局域途径的疲劳分析本质上是一个多尺度的问题,必须借助高性能计算技术才可以解决问题^[3]。名义应力法和局域应力应变法相辅相成,如下表 1 所示,在基本参数、数据来源、适用范围以及不足之处等方面两者之间有很大的区别。

表 1 名义应力法与局部应力应变法对比分析

对比维度	名义应力法	局部应力应变法
核心参量	名义应力幅、S-N 曲线	局部应力-应变历程、循环 σ - ϵ 曲线
数据基础	构件分类表、整体荷载效应分析	缺口细节的弹塑性有限元分析或实测
适用尺度	宏观构件级评估、初步设计与筛选	局部细节级评估、焊接节点与缺口根部
局限性	未考虑局部塑性变形,对复杂应力状态偏差大	计算成本高,多尺度模型精度依赖性强

3 桥梁疲劳损伤评估

3.1 检测与监测技术

检测与监测是桥梁疲劳损伤评价的基础数据来源,在役正交异性钢桥面板疲劳开裂后剩余使用寿命评估中,使用无损检测技术获取每条裂口的实际尺寸是整个工作流程中的第一步。传统检测方法主要包括肉眼观察以及无损检测两大类,肉眼观察能发现表面裂纹、涂层脱落等宏观损伤现象,而无损检测可以探测到内部缺陷以及亚表面裂纹等情况。

近年来,结构健康监测技术应用于桥梁疲劳检测方面越来越成熟。光纤传感器可以准确地监测到混凝土结构的疲劳应变的发展变化,提供了一种对预应力混凝土结构疲劳损伤进行监测的方法。通过深度学习算法来建立大跨度桥梁健康监测模型,结合传感器的实测信息以及计算模拟得到的结果综合分析,可以发现桥梁的空间刚度变化情况,从而得出由于疲劳引起的刚度降低的现象,而且利用车辆响应法的桥梁间接探测监测手段也因为其经济实惠的特点被广泛应用。多种来源的数据联合起来进行分析为进行桥梁疲劳损伤的早期发现和持续监控奠定了坚实的基础。

3.2 剩余疲劳寿命预测

剩余疲劳寿命估算也是对桥梁疲劳损伤评定中最关键的一步,它决定了桥梁维修养护措施的选择以及是否需要加固或者拆除等问题的判断。目前对于现役钢结构桥梁的剩余疲劳寿命估计依然还是一项很难解决的问题,现行的设计标准主要是为了新建结构而设计的,其计算的结果偏于保守。

剩余疲劳寿命预测主要是利用两种技术途径来实现的。一种是建立在累积损伤理论基础上进行预测的方法,它是利用试验或者计算得到的疲劳细节的应力历程数据,用 Miner 线性累积损伤法则求得已经用掉的疲劳寿命,从而得出剩余的寿命。通过实际测量腐蚀数据以及在更加真实的行车荷载情况下对公路桥梁剩余疲劳寿命进行评定可以得到较为可信的结果。另一种则是运用到断裂力学下的裂纹扩展分析,它采用的是以裂纹根端应力强度因子为指标参数,用 Paris 公式表示出裂纹扩展速度。车辆的荷载作用点对于顶板焊根和焊趾的应力有着很大的影响,焊趾的最大应力强度因子比焊根提高了大约 14.3%。在裂纹扩展中,车载下裂尖应力强度因子幅越来越大,并且越来越大于没有考虑残余应力时的应力强度因子幅。

3.3 安全评估标准

疲劳评价标准是桥梁疲劳使用寿命估算的基础和准则。各国以及地区之间桥梁疲劳鉴定标准的不同,在荷载

选取、疲劳强度曲线以及累积损伤准则上都不尽相同。在进行承载重载交通的桥梁疲劳寿命分析时,建议采用 AASHTO LRFD 标准;对于桥宽较大的桥梁,使用欧洲标准 Eurocode 3;对于桥梁截面较小的桥梁应使用日本标准;对于中国的标准则适合所有上述情况。对于钢桥面板与纵向肋条间扣环连接的等幅疲劳强度, AASHTO LRFD 标准确定的结果相比日本和欧洲标准分别小了 19.0%、22.2%^[4]。欧洲钢结构协会技术委员会编写的钢桥剩余疲劳寿命评估指南,在桥梁管理系统中加入疲劳评估过程,是已有钢结构桥梁状态评定的重要手段之一。

3.4 评估流程与要点

桥梁疲劳损伤评价要按科学的程序来进行,在此可概括为以下几个重要环节:进行结构状况调查,了解结构几何尺寸、材料性质、当前存在的损伤情况等;构造结构分析模型,明确疲劳部位以及其所受的相关载荷作用;采集检测、监测信息得到疲劳应力幅值或者裂纹相关参数,最后采用累积损伤法或断裂力学法求得剩余疲劳寿命,结合相关评定规范得出结论。要注意焊接残留内应力、多条裂纹相互影响以及外界介质腐蚀等对疲劳寿命起着重要作用的因素,保证评价结论的准确性可信度。

4 抗疲劳加固对策

4.1 加固原则与目标

桥梁抗疲劳加固应坚持“安全第一、适度经济、可靠耐久”的基本准则。加固的重点是降低易疲劳区的应力大小、阻止裂纹发展、恢复或者增强结构的疲劳强度储备等。加固设计应当结合原结构受力特点、损伤状况、服役条件以及以后使用要求等因素,以保证最合理的技术经济指标为目标来进行最优化设计。

4.2 传统加固技术

传统的加固方法主要有止裂孔法、焊接修补法以及钢垫板加固法等。止裂孔法是在裂缝尖端打孔消除应力集中现象,可以有效的阻止裂缝的发展,操作简单,成本低,但是只适合于裂缝宽度较小、应力水平较低的情况;焊接修补法是通过焊接的方式填充裂缝,可以使结构截面完整无损,但在焊接的过程中产生的焊接应力和热影响区的软化可能会导致疲劳问题的发生;钢垫板加固法则是用高强度螺栓或者用结构胶粘结的方法把补强钢板连接到裂缝的位置,在提高截面刚度的基础上来承担部分应力,加固的效果比较稳定。采用结构化制冷固化的环氧树脂或者是聚氨酯胶黏剂来粘接钢板加固的方式,由于其施工方便、经济实惠,成为德国家用电器研发项目的最初选择方案。

4.3 新型加固材料与技术

纤维增强复合材料(FRP)用于桥梁抗疲劳加固是这一方向的重大技术创新。碳纤维增强复合材料(CFRP)具备高强度、高弹性模量以及良好的耐腐蚀、施工方便的特点,在修复损伤的钢桥上表现出良好的效果,CFRP 材料的特点有:增强的刚度、强度、轻量化、优良的韧性与耐久性。通过试验得出结论用超高模量碳纤维增强复合材料(UHM-CFRP)对开裂钢梁进行修补,疲劳寿命提升了8倍;使用10%预应力的UHM-CFRP板与未加预应力的CFRP板相比寿命延长了一倍而且还能减少疲劳裂纹扩展过程中的残余挠度等优点。针对服役期较长的正交异性钢桥面板横向隔板弧形缺口区域疲劳裂纹问题,提出了碳纤维增强复合材料带粘贴止裂孔的方法以及基于启动形状记忆合金(SMA)施加预拉力的SMA/CFRP复合板条粘贴止裂孔的方法都取得了较好的强化作用。

超高性能混凝土(UHPC)加固法是近年来新兴的一种加固方法,在正交异性钢桥面板的顶板-U肋焊接节点部位,车辆荷载的作用容易出现疲劳破坏,使用UHPC加固可以减少钢桥面板的疲劳破坏的可能性。数值仿真发现,在正交异性钢桥面板上铺设50mm厚的UHPC铺装层可以增加整体结构整体性,减小正交异性钢桥面板中裂纹尖端区域应力集中程度,当铺设层厚度达到50mm时,初始裂纹尖端的应力强度因子能够下降大约89%。对于普通钢梁桥横截面节点板腹板间错位疲劳裂纹,超高性能纤维增强水泥基复合材料(UHPFRC)加固法是可行的加固新技术,UHPFRC厚度由50mm增至70mm时,裂纹尖端等效应变幅度下降了13%,在损坏的PPC斜拉桥主梁灌缝加固之后,抗裂性能和刚性得到改善,给损坏梁桥修复提供了一种新的思路。

4.4 加固方案选择与设计要点

加固方案应根据损伤性质、应力水平、构件的重要性以及实际工程情况等多种条件来确定。针对应力集中比较厉害还没有发生裂缝的地方,应该选择表面修补或者局部加强等提前性加固的方式;已经出现细微开裂的地方,则可以通过设置止裂缝口+CFRP胶黏贴的方式得到较好的加固效果。而对于裂隙发展比较剧烈的部分,则推荐使用预应力型CFRP或者是UHPC进行加固。设计方案的过程中一定要注意对加固材料与原有混凝土结构之间交接面之间的黏接力以及双方共同工作的机制问题的关注,保证加固体系在承受重复加载的情况下能够长久有效的工作下去。UHPFRC复合材料加固界面在循环荷载条件下

的损伤发展特征研究指出,界面损伤起始于组合界面边缘部位,然后随着循环加载次数的增多逐渐扩散到加固界面中心区域,细小裂缝会加大该位置处组合加固界面损伤发展速度^[5]。所以进行加固设计的时候要充分考虑到界面损伤的发展特征,合理设置界面的加固大小、施工质量要求等。

5 结束语

桥梁抗疲劳性能分析与加固是一项涉及疲劳损伤机理理解、分析手段改进、评定准则建立及加固技术发展的综合科学课题。在役桥梁老化严重以及交通荷载强度提高背景下,疲劳对于桥梁结构安全性的影响越来越大。本文立足疲劳损伤机理视角概述了名义应力法与局部应力应变法两大主要分析方法的基础理论及应用特征,搭建了由检测监测至寿命预测及安全评价的技术路线,并全面归纳了常规加固技术和新材料加固技术研发进展及其使用范围等情况。目前对疲劳分析的方法越来越细,多尺度数值模拟及断裂力学相结合使得对裂纹扩展过程的研究更准确,结构健康监测智能化的发展使疲劳损伤可以进行实时监测并且进行动态追踪,在此背景下对于 UHPC 以及 CFRP 等新材料的使用使得疲劳损伤修复的技术手段得

到了极大的拓宽。今后将疲劳分析、监测预警以及主动加固三者有机结合起来,形成桥梁整个生命周期的抗疲劳性能保障体系将是这一方向上的一个重要的发展趋势。

【参考文献】

- [1]王春生,翟慕赛,王雨竹.钢桥疲劳研究进展[J].交通运输工程学报,2024,24(1):9-42.
- [2]刘鹏展.新型材料在钢桥梁设计中的应用与性能分析[J].中华建设,2025(5):74-76.
- [3]赵骏铭,陈鹏,卫星,等.斜拉桥锚拉板式索梁锚固区疲劳试验[J].铁道建筑,2026,66(2):28-33.
- [4]李克璋,周强,刘晖,等.桥梁耐候钢 Q370qENH 抗疲劳性能研究[J].武汉理工大学学报,2024,46(12):55-61.
- [5]陈钦庭,陈佳铮,郑志上.桥梁用纤维高性能混凝土的耐久性能试验研究[J].合成材料老化与应用,2023,52(4):76-78.

作者简介:孙旦旦(1993.04—),女,汉族,吉林省长春市九台区,现职称中级工程师,2015年7月毕业于吉林大学,土木工程(路桥)专业,最高学历本科,现主要从事桥梁设计。