

文章编号: 1000-4750(2012)07-0335-06

结构疲劳损伤演化过程的多尺度同步观测与分析

何顶顶, 李兆霞, 黄跃平

(东南大学土木工程学院工程力学系, 南京 210096)

摘 要: 大型土木结构的失效劣化过程是一个跨尺度损伤演化过程, 在相同的时间节点不同的空间尺度下, 通常表现出独特的损伤演化响应特征和力学特性。该文以某大型桥梁纵向加劲钢桁架的缩尺模型为研究对象开展疲劳损伤演化过程多尺度同步观测试验工作, 综合运用电测技术、光测技术和动态测试技术实时监测桁架疲劳损伤演化过程, 据此分析对比桁架在细观和宏观尺度下的损伤演化响应特征和力学特性。在电测技术观测到桁架局部疲劳裂纹萌生之后, 光测和动态测试技术得以继续追踪疲劳裂纹的扩展过程并评价局部损伤演化对构件以及结构整体力学特性的影响, 结果表明: 结构局部细观尺度上的损伤演化不至于影响结构宏观尺度的整体力学特性, 但是局部损伤的累积必将导致结构失效劣化。

关键词: 焊接钢桁架; 疲劳损伤演化过程; 多尺度同步分析; 响应特征分析; 力学特性

中图分类号: O346.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2010.10.0766

SYNCHRONOUS MULTI-SCALE OBSERVATIONS AND ANALYSES OF STRUCTURAL FATIGUE DAMAGE EVOLUTION

HE Ding-ding, LI Zhao-xia, HUANG Yue-ping

(Department of Engineering Mechanics, School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: This paper aims to synchronously explore the fatigue damage evolution process in meso- and macro-scales by experimental studying on a welded truss structural specimen as the scaled model of the longitudinal stiffening truss in long-span bridges. Several testing techniques are used to measure and analyze the damage evolution process so that mechanical properties and characteristic response are respectively compared in different scales. While hot-spot dynamic strains and extension of a plastic zone on the toe of the weld of the tested specimen are recorded by strain measurement technique, the fatigue cracking process is measured by optical technique and the variation of structural dynamic parameters due to the fatigue cracking is finally measured and identified according to dynamic testing technique. The results show that the fatigue damage evolution in meso-scale has few influences on the variation of mechanical properties in macro-scale, but the long-time evolution of damage accumulations in a local structure will certainly lead to the deterioration and failure of a global structure.

Key words: welded steel truss; fatigue damage evolution; synchronous multi-scale observations; analyses of characteristic response; mechanical properties

大型土木工程结构通常构型复杂、体型巨大, 其失效劣化过程具有明显的时间和空间多尺度特征, 并且各尺度下分别具有独特的响应特征和力学

特性, 对结构的损伤识别与分析提出诸多挑战^[1-2]。自从 20 世纪 70 年代人们尝试采用结构振动信息进行海洋平台损伤检测以来, 大量的文献关注损伤识

收稿日期: 2010-10-20; 修改日期: 2010-12-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(11072060)

通讯作者: 李兆霞(1957—), 女, 江苏人, 教授, 博士, 从事结构损伤识别与分析研究(E-mail: zhxli@seu.edu.cn).

作者简介: 何顶顶(1984—), 男, 江苏人, 博士生, 从事结构损伤识别与分析研究(E-mail: xiaohet777777@163.com);

黄跃平(1959—), 男, 安徽人, 工程师, 学士, 从事实验力学电测方法与技术研究(E-mail: hyp@seu.edu.cn).

别领域：针对大型土木结构多尺度模拟与损伤分析问题，文献[1]比较阐述了材料多尺度和结构多尺度力学问题的研究内容和方法，总结了大型土木结构多尺度模拟分析的策略和亟待解决的问题；文献[3]在构件层次上分析了高频动载下的疲劳损伤破坏过程及其特征；文献[4]针对大型结构提出了用于损伤识别的多种理论和方法。与此同时，随着传感器技术、信号采集与处理、计算机与微处理技术等的发展，多种测试、分析、诊断与评估手段在建筑、土木和交通等领域的损伤识别与分析中得到广泛应用^[5-7]。

上述研究较多关注于结构失效过程中某一尺度或者某种特定状态下的响应特征分析，较少分析整个失效过程；而结构的失效过程通常是一个跨尺度的损伤演化过程，损伤在微观、细观直至宏观尺度下的演化通常具备不同的响应特征并从不同程度上影响结构的力学特性，因此只有通过同步观测与分析结构不同尺度下的损伤演化特征与规律，才

能准确识别与分析结构多个尺度下的损伤状态及其对结构力学性能的影响。本文以某大型桥梁纵向加劲钢桁架的缩尺模型为研究对象，开展钢桁架疲劳损伤演化过程的同步观测试验工作，利用多种测试技术观测疲劳裂纹尖端细观尺度和结构全尺度下的疲劳损伤演化过程，重点关注疲劳裂纹萌生、扩展至表面和表面裂纹扩展三个阶段，从结构细观和宏观尺度同步分析疲劳裂纹萌生和扩展过程中的非线性响应特征。

1 试验准备与过程

本文的研究对象是某大型桥梁纵向加劲桁架的缩尺模型。该桁架由 Q235 钢板焊接装配而成，其中上弦杆、下弦杆为焊接方钢管，腹杆为焊接工字钢。疲劳试验在 Instron8802 液压伺服疲劳试验机上进行，使用正弦疲劳荷载加载，荷载均值-110kN，幅值 30kN，加载频率为 1Hz，桁架结构及加载方式如图 1 所示。

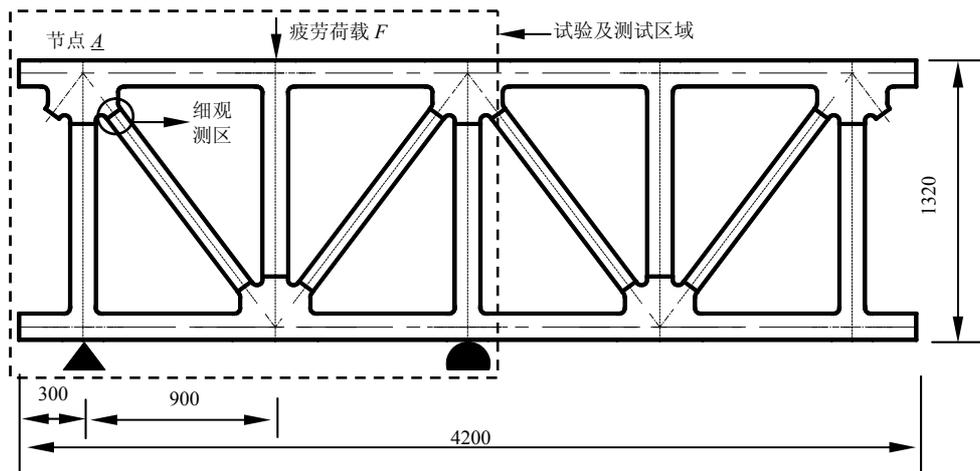


图 1 焊接钢桁架结构示意图及试验加载方式 /mm

Fig.1 Schematic diagram of the welded steel truss and applied loading

试验过程中综合运用了电测技术、光测技术和动态测试技术实时、同步观测与分析桁架疲劳损伤演化过程，其中：电测技术用以监测细观测区局部细节处预制裂纹尖端动应变变化规律和塑性区扩展规律；光测技术配合观测表面疲劳裂纹萌生过程，重点观测疲劳裂纹扩展规律并分析疲劳裂纹尖端细观力学场变量；动态测试技术则用以识别损伤演化过程中桁架整体的损伤状态。

2 基于电测技术的疲劳裂纹尖端塑性区尺寸特征分析

应变电测法是电测非电量方法之一，广泛应用

于各种结构的应力、应变分析^[5]，本文用以观测疲劳裂纹尖端的动应变变化规律和疲劳裂纹的萌生过程。对于焊接钢结构来说，焊接缺陷处容易产生应力集中，在循环载荷作用下名义应力小于屈服应力时局部已可能进入塑性并由此决定了结构的疲劳强度，因此应力集中部位是结构的疲劳薄弱环节，控制了结构的疲劳寿命^[8-9]。通过初步的应力分析^[10]，确定了图 1 中的细观测区是桁架结构的最不利位置，为实现本文研究目的，将该监测区域斜腹杆处的焊缝表面处理之后，沿焊趾预制初始裂纹(长 4mm，宽 0.2mm)。在预制裂纹尖端以及延长线方向粘贴梯度应变片(栅丝尺寸 0.5mm×0.5mm)，测

试系统及布片方案分别如图 2 和图 3 所示。

在现有加载模式下斜腹杆主要承受弯矩和轴力，预制裂纹处于受拉区且拉应力垂直作用于裂纹表面，故可简化为 I 型裂纹，由弹性分析得到裂纹尖端 σ_y 和塑性区 r_p 的 Westergaard 渐进解^[11]：

$$\begin{cases} \sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + 3 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] \\ r_p = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_{ys}^2} \cos^2 \frac{\theta}{2} \left[1 + 3 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] \end{cases} \quad (1)$$

其中： K_I 为 I 型裂纹应力强度因子； (r, θ) 为裂纹尖端极坐标系； $\sigma_y|_{r=0}$ 的分布如图 3 中曲线 *abc* 所示。对于弹塑性材料，由于材料的塑性流动，裂纹尖端

存在一个长度为 r_0 的小塑性区，在 $0 < x < r_0$ 内弹性应力超过了弹性极限， σ_y 被限制为 σ_{ys} ，应力的剩余部分在更远的地方重新分布，得到考虑弹塑性的塑性区修正解，由曲线 *dbef* 表示。

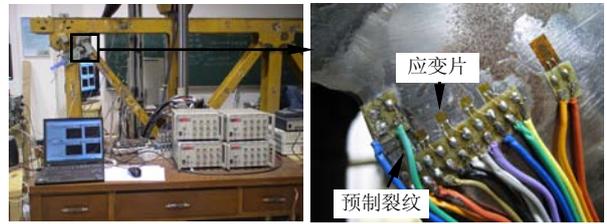


图 2 应变电测系统及应变监测区域

Fig.2 Strain measuring system and monitoring region

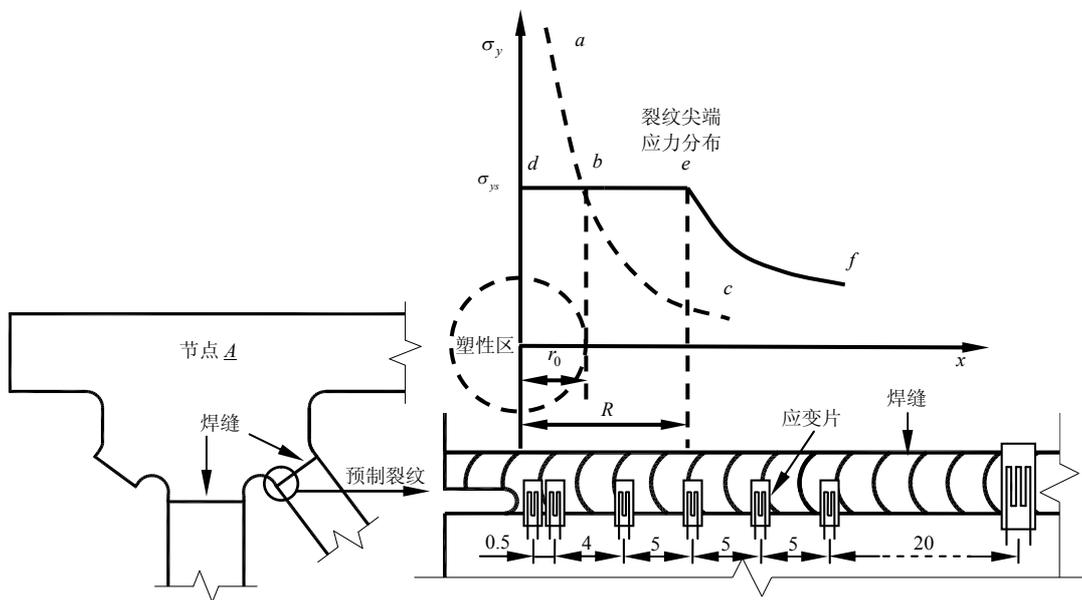


图 3 I 型裂纹尖端塑性区理论解与测试方法示意图 /mm

Fig.3 Schematic diagram of theoretical and testing plastic zone on the toe of type I crack

试验过程中，依据各应变测点的位置及其应变响应信息得到细观测区预制裂纹尖端的应变分布规律，参考塑性区理论解及桁架金属材料的屈服特性即可得到预制裂纹尖端塑性区尺寸及其增长规律，如图 4 所示：疲劳裂纹萌生之前，塑性区尺寸基本保持不变；疲劳裂纹在翼缘内部萌生之后，塑性区尺寸缓慢增长并最终在疲劳裂纹扩展至构件表面时趋于一个定值，即为疲劳裂纹尖端塑性区尺寸，此时裂纹尖端的应变片失效并退出工作。试验结果表明，借助电测技术较高的测试精度和优选的测量方法，本文在细观尺度成功的监测到疲劳裂纹从翼缘内部萌生并逐渐扩展至表面的过程，并以裂纹尖端的塑性区尺寸作为特征参数描述了该过程。在疲劳裂纹扩展至翼缘表面之后，塑性区尺寸趋于

稳定在 0.8mm 左右。

3 基于光测技术的疲劳裂纹尖端细观变形特征分析

光测技术是光电技术与机械测量相结合的测试技术，随着多种高新技术的引入，光测技术对测量环境的要求相对降低，实现了测试的自动化并提高了测试精度和效率，因而应用范围越来越广泛^[12]。在疲劳裂纹萌生之后，本文选择 CCD 图像传感器作为图像采集设备(如图 5 所示)，并将其固定在试验桁架上以保持视场的相对稳定，再配合显微镜可在疲劳试验正常进行的条件下实时观测疲劳裂纹扩展情况，如图 4 所示。此外，运用图像处理、输出设备得到一个加载周期内疲劳裂纹尖端

变形图,如图6所示;借助散斑相干分析技术,建立两张图片的位移对应关系可以得到一个循环加

载周期疲劳裂纹尖端的位移场,进而可以进行应力、应变场分析,结果分别如图7、图8所示。

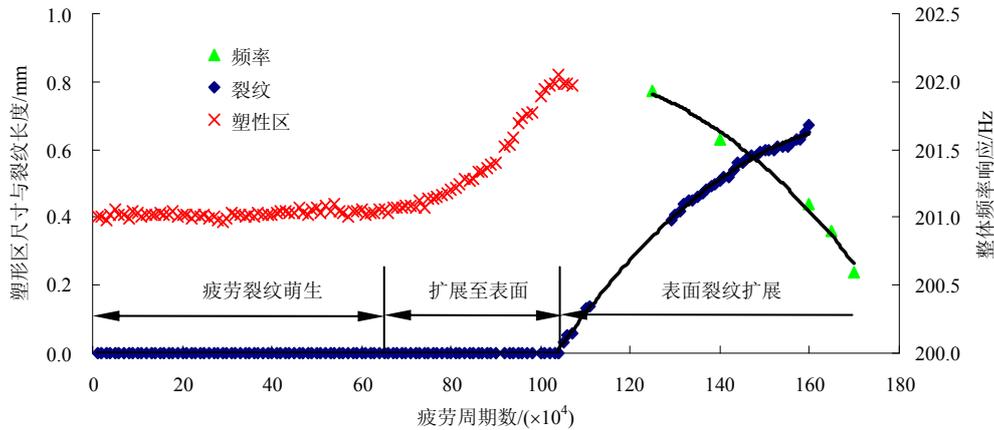


图4 疲劳裂纹萌生与初步扩展过程分析

Fig.4 Analyses of evolution and propagation process of fatigue crack

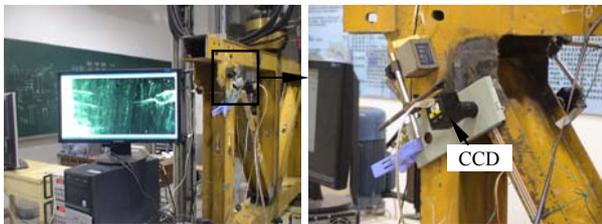


图5 光测系统及裂纹观测

Fig.5 Optical measuring system and crack monitoring

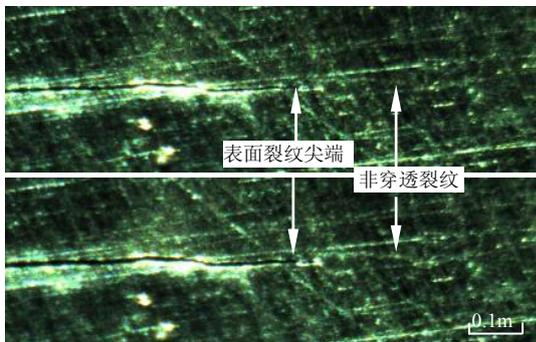


图6 疲劳裂纹尖端细观变形图

Fig.6 Deformation of fatigue crack tip in meso-scale

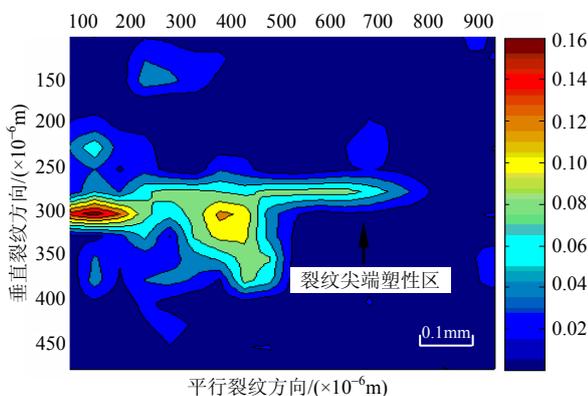


图7 疲劳裂纹尖端主应变梯度图(ε)

Fig.7 Strain gradient on fatigue crack tip (ε)

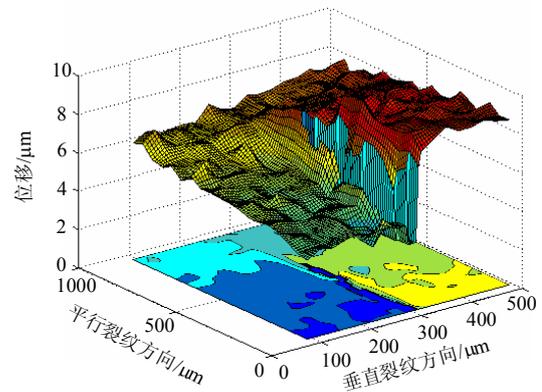


图8 疲劳裂纹尖端垂直裂纹方向细观位移场 (等高线图和云图)

Fig.8 Vertical displacement of fatigue crack tip in meso-scale (contour map and cloud map)

疲劳裂纹萌生之后,本文利用光测技术非接触、可进行全场、大动态范围测量的特点观测疲劳裂纹沿翼缘表面的扩展情况^[13]。在疲劳裂纹扩展初期,疲劳短裂纹的增长特性略区别于长裂纹,表现出一定的反常特性^[14],例如如图4中所示疲劳短裂纹扩展过程中的“减速现象”以及图7中裂纹尖端扁长形塑性区。此外,在复杂受力状态下,疲劳裂纹的张开-闭合现象呈现明显的“转动”特征(如图8所示),即裂纹的上下表面同时存在相对平动和转动。

4 基于动态测试技术的结构全尺度上的损伤状态与响应特征分析

动态测试技术的原理在于结构动态参数(包括模态频率、模态振型、阻尼比等)是结构物理参数(质

量、刚度等)的函数^[15], 损伤使结构的物理参数发生改变, 进而引起结构动态特性的变化, 而这些变化可通过动态测试手段测得, 因此结构的动态信息能用来识别结构全尺度上的损伤^[16]。在使用光测技术同步观测疲劳裂纹扩展情况的同时, 本文采用动态测试手段监测不同疲劳周期下节点 A 斜腹杆的频率信息(如图 9 所示), 图 4 显示疲劳裂纹扩展之后, 斜腹杆的第 1 阶固有频率值随着疲劳试验的进行而逐渐降低。



图 9 动态测试系统及整体损伤监测

Fig.9 Dynamic measuring system and global damage monitoring

与前两种试验测试技术手段相比, 动态测试技术反映的是疲劳裂纹扩展(损伤)对结构整体动态特性的影响, 因此, 在疲劳裂纹萌生与扩展初期、损伤较小的前提下, 结构固有频率对损伤的灵敏度不高, 但是随着裂纹的扩展和损伤程度的增加, 该灵敏度会有较大提高, 可据此分析结构构件以及整体尺度下的损伤状态和特征。

5 非穿透疲劳裂纹与损伤分析

在图 4 中, 裂纹尖端塑性区尺寸的扩展过程对应于疲劳裂纹在翼缘内部萌生并逐渐扩展到翼缘表面形成穿透裂纹的过程, 但是该过程发生在构件内部, 难以观测与描述。在预试验中, 本文采用相同的材料以及加工工艺制作了一批对接焊紧凑拉伸试样并施加疲劳载荷, 在不同的疲劳裂纹扩展程度下停止加载, 借助断口分析以及图像处理技术得到如图 10 和图 11 所示的试样疲劳断口, 两张图片分别显示了试样内部疲劳裂纹萌生和裂纹扩展至试样表面两个阶段, 在每个阶段中预制裂纹、疲劳裂纹和塑性区都有明显的界线, 由此建立试样表面塑性区尺寸和内部疲劳裂纹长度之间的关系, 并应用到本文中以定义损伤变量 D :

$$D = 1 - \frac{A^*}{A}$$

其中: A 为构件横截面积; A^* 为有效承载面积。考虑疲劳裂纹萌生和初步扩展两个阶段, 得到损伤演

化过程如图 12 所示。此外, 对比图 4 和图 12 可以发现, 在相同的疲劳周期下, 结构局部损伤接近 4% 并已经发现宏观疲劳裂纹的情况下, 1 号杆的频率仅下降了 1% 左右, 仅接近动态测试技术的频率分辨率。考虑测试现场条件噪声以及其他环境因素的影响, 该测试结果说明局部材料尺度上的损伤并没有导致结构整体动态参数发生显著的变化; 但是, 在疲劳荷载下, 损伤在结构中跨尺度演化是一个持久并逐步加速的过程^[17], 局部损伤的积累必将引起结构整体性能的劣化, 并最终导致结构失效。

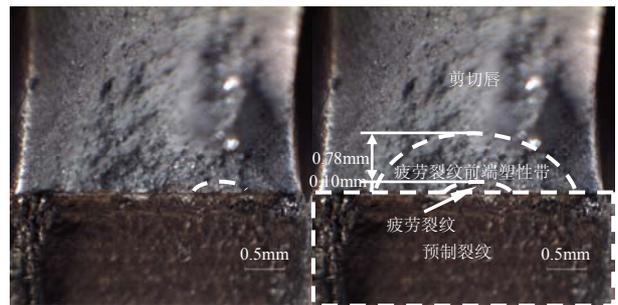


图 10 疲劳试验断口-1

Fig.10 Fracture surface morphology of fatigue testing-1

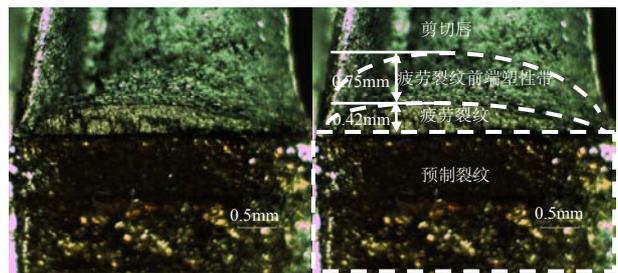


图 11 疲劳试验断口-2

Fig.11 Fracture surface morphology of fatigue testing-2

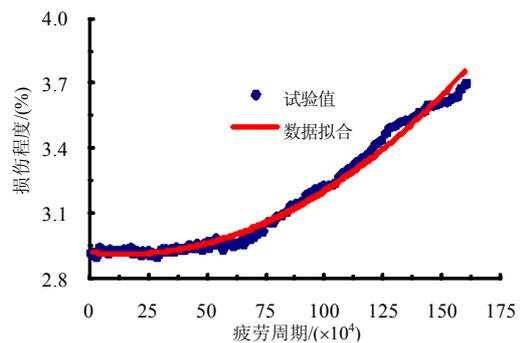


图 12 焊缝疲劳损伤演化过程

Fig.12 Fatigue damage evolution process of welding line

6 结论

本文以某大型桥梁纵向加劲桁架的缩尺模型为研究对象, 在桁架细观与宏观尺度上同步开展疲劳损伤演化过程的观测以及响应特征的分析工作, 研究结果表明:

(1) 电测技术在细观尺度上观测到疲劳裂纹从翼缘内部萌生并逐步扩展至翼缘表面的过程,并在裂纹尖端弹塑性理论分析的基础上,以预制裂纹尖端的塑性区尺寸为特征参数准确描述这一过程。

(2) 在疲劳裂纹萌生之后,光测技术继续观测表面疲劳裂纹扩展过程,配合计算机技术和图像处理方法,本文采用数字图像相干技术具体分析了裂纹尖端局部位移和应变场,得到疲劳裂纹尖端细观变形特征。

(3) 随着疲劳裂纹的扩展,结构物理参数将发生变化,依据动态测试技术进行宏观尺度上的结构整体动力特性分析,据此分析了结构全尺度上的损伤状态和特征。

总体而言,在三种试验测试技术的配合使用下,可以取长补短,同步、完整监测损伤演化过程中的多尺度响应特征,结果表明,结构局部材料尺度上的损伤不至于影响结构尺度的整体力学性能,但是结构的损伤演化是一个逐步积累并加速的过程,局部损伤的积累必将引起结构整体性能的劣化,并最终导致结构失效。

参考文献:

- [1] 吴佰建,李兆霞,汤可可.大型土木结构多尺度模拟与损伤分析——从材料多尺度力学到结构多尺度力学[J].力学进展,2007,37(3):321—336.
Wu Baijian, Li Zhaoxia, Tang Keke. Multi-scale modeling and damage analyses of large civil structure——multi-scale mechanics from material to structure[J]. Advances in Mechanics, 2007, 37(3): 321—336. (in Chinese)
- [2] Feng Rong, Wang Haiying, Xia Mengfen, et al. Catastrophic rupture induced damage coalescence in heterogeneous brittle media [J]. Pure and Applied Geophysics, 2006, 163: 1847—1865.
- [3] 李兆霞,郭力,徐玉兵.桥梁焊接构件疲劳损伤检测与分析[J].东南大学学报(自然科学版),2005,35(3):415—420.
Li Zhaoxia, Guo Li, Xu Yubing. Measurement and analysis on fatigue damage of bridge welded components [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2005, 35(3): 415—420. (in Chinese)
- [4] 李宏男,李东升.土木工程结构安全性评估、健康监测及诊断评述[J].地震工程与工程振动,2002,22(3):82—90.
Li Hongnan, Li Dongsheng. Safety assessment, health monitoring and damage diagnosis for structures in civil engineering [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(3): 82—90. (in Chinese)
- [5] 沈观林.应变电测与传感器技术的发展及其在工程结构中的应用[C].第十三届全国结构工程学术会议论文集,2004:164—179.
Shen Guanlin. The development of strain gauge and transducer technology and its application for engineering structures [C]. Proceedings of the 13th National Conference on Structural Engineering, 2004: 164—179. (in Chinese)
- [6] 张敬芬,赵德有.工程结构裂纹损伤振动诊断的发展现状和展望[J].振动与冲击,2002,21(4):22—27.
Zhang Jingfen, Zhao Deyou. Summary review of vibration-based crack diagnosis technique for engineering structures [J]. Journal of Vibration and Shock, 2002, 21(4): 22—27. (in Chinese)
- [7] Carroll J, Efstathiou C, Lambros J, et al. Investigation of fatigue crack closure using multi-scale image correlation experiments [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76: 2384—2398.
- [8] 姚卫星.结构疲劳寿命分析[M].北京:国防工业出版社,2003:5—25.
Yao Weixing. Fatigue life prediction of structures [M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2003: 5—25. (in Chinese)
- [9] Gurney T R. Fatigue of welded structures [M]. London: Cambridge University Press, 1979: 48—53.
- [10] 刘宇.含焊接细节的钢结构损伤演化测试及其非线性规律分析[D].南京:东南大学,2009.
Liu Yu. Experimental study and nonlinear analyses on damage evolution in steel structure with typical welded details [D]. Nanjing: Southeast University, 2009. (in Chinese)
- [11] Lemaitre J, Chaboche J-L. 固体材料力学[M].余天庆,吴玉树,译.北京:国防工业出版社,1997:430—450.
Lemaitre J, Chaboche J-L. Solid mechanics of materials [M]. Translated by Yu Tianqing, Wu Yushu. Beijing: National Defence Industrial Press, 1997: 430—450. (in Chinese)
- [12] 计欣华,邓宗白,鲁阳,等.工程实验力学[M].北京:机械工业出版社,2005:269—270.
Ji Xinhua, Deng Zongbai, Lu Yang, et al. Engineering experimental mechanics [M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 269—270. (in Chinese)
- [13] 金观昌.计算机辅助光学测量[M].第2版.北京:清华大学出版社,2007:1—23.
Jin Guanchang. Computer-aided optical metrology [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 1—23. (in Chinese)
- [14] McDowell D L. An engineering model for propagation of small cracks in fatigue [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1997, 56(3): 357—377.
- [15] Doebling S W, Farrar C R, Prime M B. A summary review of vibration-based damage identification methods [J]. The Shock and Vibration Digest, 1998, 30(2): 91—105.
- [16] 闫桂荣,段忠东,欧进萍.基于结构振动信息的损伤识别研究综述[J].地震工程与工程振动,2007,27(3):95—103.
Yan Guirong, Duan Zhongdong, Ou Jinping. Review on structural damage detection based on vibration data [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(3): 95—103. (in Chinese)
- [17] Li Zhaoxia, Zhou Taiquan, Chan T H T, Yu Yang. Multi-scale numerical analysis on dynamic response and local damage in long-span bridges [J]. Engineering Structures, 2007, 29: 1507—1524.