

文章编号: 1001-4888(2005)03-0349-05

循环载荷下碳纤维薄板增强 RC 梁 的疲劳性能试验研究^{*}

姚国文^{1,2}, 黄培彦¹, 牛鹏志¹, 郑小红¹

(1. 华南理工大学 交通学院, 广东 广州 510640; 2. 重庆交通学院 土木建筑学院, 重庆 400074)

摘要: 以碳纤维薄板(CFL)增强 RC 梁为研究对象, 通过对循环载荷作用下增强梁的三点弯曲疲劳试验研究, 得到了增强梁的线性对数疲劳寿命曲线和跨中挠度的演化规律, 外推得到了极限疲劳强度和抗弯刚度的演化规律, 揭示了增强梁的疲劳破坏机理。循环载荷下 CFL 增强 RC 梁的破坏模式包括混凝土开裂、碳纤维薄板与混凝土界面剥离、主筋屈服等模式, 疲劳破坏过程具有明显的损伤成核、稳定扩展、失稳扩展三阶段发展规律。与普通 RC 梁相比较, CFL 增强 RC 梁的裂缝分布较均匀、密集, 粘贴 CFL 对增强梁的初始抗弯刚度提高幅度较小, 对疲劳损伤阶段的抗弯刚度则提高了约一倍。根据 CFL 增强 RC 梁的疲劳寿命曲线得到其极限疲劳强度为 25.42 kN, 为三点弯曲静载下极限承载力的 58.5%。

关键词: 纤维薄板; 增强 RC 梁; 循环载荷; 疲劳寿命; 抗弯刚度

中图分类号: O346.2 **文献标识码:** A

1 引言

为了满足大跨度桥梁、高层建筑和长大隧道的加固、补强之需要, 纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, 简称 FRP)片材由于其比强度高、比模量大、防腐蚀、与混凝土的粘结性好以及结构可设计等诸多优点而受到重视, 迄今已证实了粘贴 FRP 片材对各种混凝土构件抗弯、抗剪和抗压加固的有效性^[1-3]。FRP 片材主要包括纤维布(Fiber sheet)和纤维板(Fiber plate)两种类型, 粘贴纤维布一般需要 2~3 层甚至更多, 导致增强构件的界面增多, 强度相对下降, 施工周期和成本也相应增加; 而粘贴纤维板的施工性较差, 成本高。本课题组研究开发出了一种介于纤维布和纤维板之间、同时兼具两者优点的新型 FRP 片材——纤维薄板(Fiber laminate), 并对纤维薄板增强混凝土构件的力学性能、破坏模式等进行了研究^[2,4,5], 部分成果已经推广应用于公路旧危桥的加固工程中^[6]。

桥梁所受动载主要为车辆荷载, FRP 片材增强混凝土构件的耐久性和疲劳破坏问题已经引起重视, 因此需要对 FRP 片材增强混凝土构件的疲劳性能进行研究, 以便准确评估 FRP 片材加固后钢筋混凝土桥梁的疲劳寿命。本文以碳纤维薄板(CFL)增强 RC 梁为研究对象, 进行循环载荷作用下的三点弯曲疲劳试验研究, 通过与普通 RC 梁相比较, 分析增强梁的破坏模式、疲劳强度及疲劳寿命。

2 CFL 增强 RC 梁的疲劳试验

RC 梁试件(图 1)尺寸为 1850×100×200 mm, 计算尺寸为 1600×100×200 mm, 所用混凝土材料

^{*} 收稿日期: 2004-10-29; 修订日期: 2005-04-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(10272047)、广东省自然科学基金项目(020856)资助

通讯作者: 姚国文(1974-), 男, 助理研究员, 在站博士后。主要研究领域: 疲劳与断裂力学、FRP 片材加固技术。E-mail: yaoguowen@sina.com

为 C40 中砂碎石混凝土, $m_{\text{水泥}}:m_{\text{砂}}:m_{\text{石}}:m_{\text{水}}$ 的配比为 1.0:0.5:2.06:3.66; 架立筋和箍筋采用 $\Phi 8$ 的 I 级钢筋, 主筋采用 $\Phi 10$ 的 II 级光圆钢筋, 配筋率为 0.981%, 其弹性模量为 204 GPa, 屈服强度为 333 MPa, 延伸率为 35%。在 RC 梁的底部受弯拉区 $L=1580$ mm 粘贴 CFL, 纤维取向沿梁长度方向。CFL 是采用日本东丽公司生产的碳纤维丝 T300-3k 编制成宽度为 100 mm、计算厚度为 0.23 mm 的预浸带, 固化后 CFL 弹性模量为 230 GPa, 抗拉强度为 3.08 GPa, 其基体材料为环氧树脂, 与混凝土之间的粘结剂采用神力铃牌环氧树脂胶。

三点弯曲疲劳试验(图 2)按循环载荷幅值将试件分为 5 组, 每组 5 条 CFL 增强 RC 梁。为了比较 CFL 对 RC 梁疲劳强度和疲劳寿命的增强效果, 对一组 3 条普通 RC 梁进行了三点弯曲疲劳试验。MTS-810 型材料试验机加载频率设置为 10 Hz, 循环载荷(图 3)最小、最大值之比 $R=S_{\min}/S_{\max}=0.2$, $S_{\max}$ 分别取 25.0 kN, 27.5 kN, 30.0 kN, 32.5 kN, 35.0 kN。另外在探索循环载荷加载水平时, 还进行了 $S_{\max}$ 分别为 21.0 kN, 17.0 kN 的 2 条 CFL 增强 RC 梁的疲劳试验。梁中主筋、混凝土及 CFL 应变由电阻应变片测量, 由 DH5937 动态应变系统采集应变数据, CFL 增强 RC 梁的跨中挠度历程及其对应的跨中载荷历程由材料试验机加载系统跟踪记录。试验过程中, 当载荷循环次数为 1000, 5000, 1 万, 5 万, 10 万, 50 万, 100 万, 150 万及 200 万时, 暂停循环加载, 观察试验梁开裂、CFL 剥离等破坏情况; 当循环次数达到 2×10^6 时, 若 CFL 增强 RC 梁仍未断裂, 认为其极限疲劳寿命 $N=2 \times 10^6$, 停止加载。

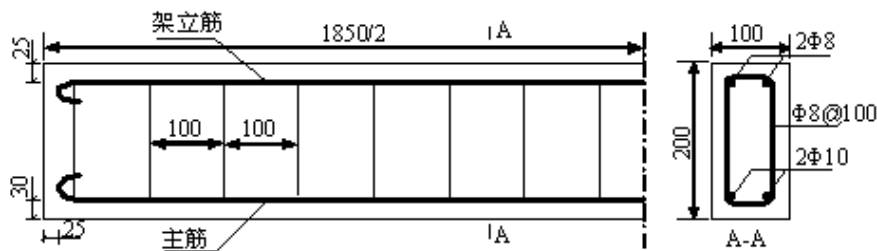


图 1 RC 梁配筋构造图

Fig. 1 Internal and external reinforcement of concrete beam

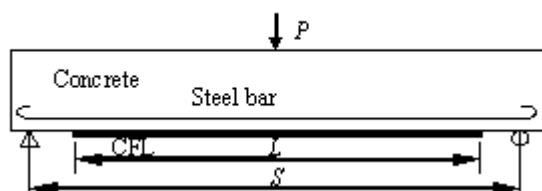


图 2 CFL 增强 RC 梁的三点弯曲试验

Fig. 2 Three point bending test on CFL strengthened RC beam

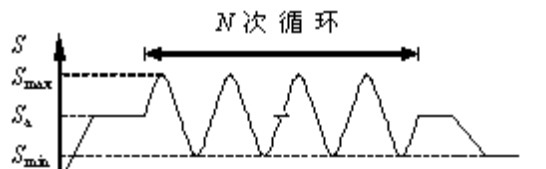


图 3 循环载荷

Fig. 3 Cycle loading

3 CFL 增强 RC 梁的疲劳破坏过程

首先对循环载荷下 CFL 增强 RC 梁与普通 RC 梁的破坏模式进行比较分析。图 4 显示了普通 RC 梁 D-5、CFL 增强 RC 梁 E-3、J-1 在循环载荷作用下的疲劳裂纹分布规律。普通 RC 梁 D-5 所受三点弯曲载荷 $S_{\max}=22.5$ kN, 经历 200 万次循环后未断裂, 混凝土裂缝主要集中在中间 1/2 处, 多数间距 15~20 cm, 跨中主裂纹扩展至梁上部, 已接近破坏状态。CFL 增强 RC 梁 E-3 所加载荷为 $S_{\max}=17.0$ kN, 经历 200 万次循环后未断裂, 混凝土裂缝主要集中在中间 2/3 处, 多数间距 5~10 cm, 跨中主裂纹不明显。CFL 增强 RC 梁 J-1 所加载荷为 $S_{\max}=30.0$ kN, 经历 77.2 万次循环后断裂, 混凝土裂缝主要集中在中间 2/3 处, 多数间距 5~10 cm, 跨中主裂纹扩展至梁的上部。可见粘贴 CFL 后增强 RC 梁的裂纹分布更加均匀、密集, 提高了增强梁的延性。

图 5 为疲劳载荷最大值 $S_{\max}=35.0$ kN 时 CFL 增强梁 RC 的跨中挠度曲线。增强梁跨中处弯矩和

弯拉区应力最大,由于混凝土抗拉强度极低,而 CFL 的高强度性能只能在 RC 梁充分变形后才得以充分发挥,因此混凝土首先开裂,增强梁跨中挠度迅速增加,阶段 I 结束时的载荷循环次数与 CFL 增强 RC 梁的开裂疲劳寿命相对应;随载荷循环次数的增加,CFL 的高强度优点得到充分发挥,裂纹稳定扩展,梁的挠度相对稳定增加,增强梁的抗弯刚度退化缓慢,阶段 II 结束时的载荷循环次数与 CFL 增强 RC 梁的容许疲劳寿命相对应;在阶段 III,裂缝处的位移间断导致 CFL 与混凝土粘结层的剪应力高度奇异,引起 CFL 从跨中主裂纹处向端部持续剥离,最终增强梁的跨中挠度迅速增加,抗弯刚度急剧降低,随之主筋断裂,增强 RC 梁完全破坏,此时的载荷循环次数即增强梁的极限疲劳寿命。因此,随载荷循环次数的增加,CFL 增强 RC 梁的疲劳破坏过程经历混凝土开裂、CFL 与混凝土剥离、主筋屈服等模式。

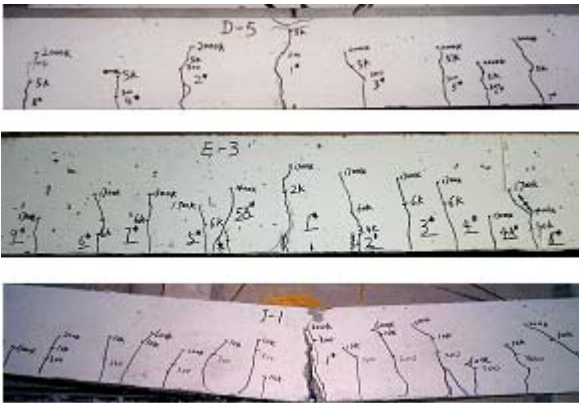


图 4 循环载荷下 CFL 增强 RC 梁的疲劳分布图
Fig. 4 Cracks distribution on CFL strengthened RC beams under cycle loading

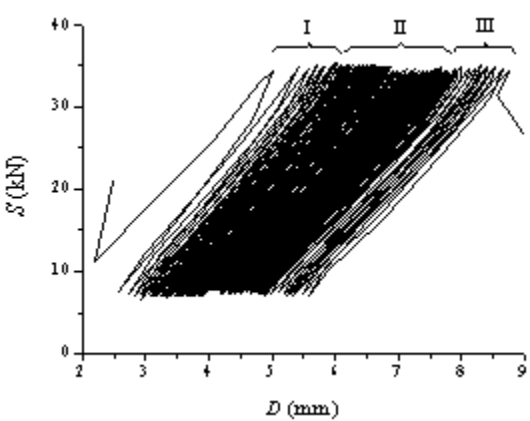


图 5 循环载荷下 CFL 增强梁 RC 的跨中挠度历程
Fig. 5 Midspan vertical flexibility of RC beam strengthened with CFL under cycle loading

4 CFL 增强 RC 梁的抗弯刚度演化规律

CFL 增强 RC 梁拉、压区混凝土在重复载荷作用下,混凝土内部损伤积累,变形随载荷循环次数增加而增大,尤其是拉应力区混凝土很快会破坏,钢筋与混凝土、CFL 与混凝土之间的粘结力在疲劳载荷作用下退化,钢筋与混凝土、CFL 与混凝土之间的滑移不断增加,钢筋和混凝土的残余变形不断增加,从而引起 CFL 增强 RC 梁的整体抗弯刚度随载荷循环次数的增加而退化。根据材料试验机记录的 CFL 增强 RC 梁跨中挠度历程及其对应的跨中循环载荷历程,由简支梁跨中挠度 D 与集中载荷 P 关系:

$$D = \frac{PS^3}{48EI} \quad (1)$$

可以得到增强梁抗弯刚度 $B=EI$ 的演化规律(图 6)。可以看出,循环载荷作用的初期和后期,增强梁的抗弯刚度退化速度明显高于中期,具有明显的疲劳损伤三阶段发展规律,所以把 CFL 增强 RC 梁的疲劳损伤演化过程划分为:损伤成核、损伤稳定扩展、损伤失稳扩展三个阶段,分别与图 5 中的 I、II、III 部分相对应。表 1 列出了部分 CFL 增强 RC 梁、普通 RC 梁在不同损伤阶段的疲劳寿命。另外,随疲劳载荷水平的提高,CFL 增强 RC 梁抗弯刚度的退化速度加快。

表 1 CFL 增强 RC 梁损伤阶段的疲劳寿命

Tab. 1 Fatigue lives of CFL strengthened RC beams at damage stage

试验	最大载荷 S_{max} (kN)	开裂疲劳寿命	容许疲劳寿命	极限疲劳寿命
A-1	25.0	10,001	1,991,000	2,039,223
C-4	30.0	5,001	1,196,000	1,208,000
E-2	35.0	2,001	314,300	320,938
D-4	20.0	17,500	>2,000,000	>2,000,000

与普通 RC 梁 D-4 相比较,CFL 增强 RC 梁 A-1、C-4、E-2 的初始抗弯刚度提高幅度较小,而在损伤阶段的抗弯刚度提高了一倍左右。因此,外部粘贴 CFL 显著提高了增强混凝土构件在带裂缝服役期间的抗弯曲变形能力。

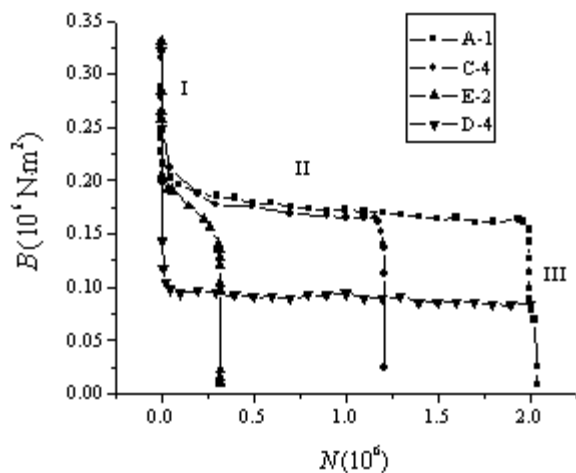


图 6 循环载荷下 CFL 增强 RC 梁的抗弯刚度演化规律

Fig. 6 Bending rigidity histories of CFL strengthened RC beams under cycle loading

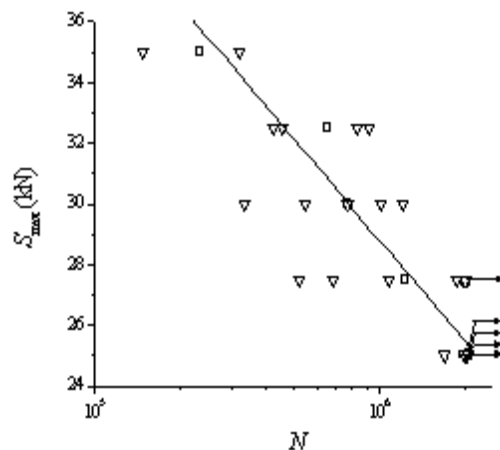


图 7 CFL 增强 RC 梁的疲劳 S—N 曲线

Fig. 7 S—N curve of RC beams strengthened with CFL under cycle loading

5 CFL 增强 RC 梁的疲劳强度与疲劳寿命分析

循环载荷作用下 CFL 增强 RC 梁的疲劳断裂是一种最直观的疲劳破坏判据,此时增强梁丧失了承载能力,已经不再拥有作为一个完整的混凝土构件所应该具备的基本功能。根据这种疲劳破坏判据进行疲劳性能分析得出的疲劳强度可以称之为疲劳断裂强度或者极限疲劳强度。虽然对于混凝土构件这是一种偏于危险的疲劳强度,但仍是目前取得研究成果最多的一种。图 7 为 CFL 增强 RC 梁的极限疲劳寿命的 S—N 曲线,数据拟合得到线性 S—lg N 方程为:

$$S = 95.42 - 11.11 \lg N \quad (2)$$

其相关系数 $R^2 = 0.9385$ 。上式中 N 代入 2×10^6 ,可以得到 CFL 增强 RC 梁的极限疲劳强度为 25.42 kN。三点弯曲静载试验表明^[7],同一批次的 CFL 增强 RC 梁在静载作用下的极限承载力为 43.5 kN,为循环载荷下作用的极限疲劳强度的 1.71 倍。

6 结论

近年来,外部粘贴 FRP 片材技术在桥梁、高层建筑等梁、板、柱等混凝土构件的抗弯、抗剪、抗压加固中逐步推广应用,桥梁结构所受活载主要是车辆载荷,本文在纤维薄板增强混凝土构件的力学性能、破坏模式研究基础上,进行了循环载荷下 CFL 增强 RC 梁的三点弯曲疲劳试验,发现增强梁的破坏过程经历混凝土开裂、CFL 与混凝土剥离、主筋屈服和断裂等模式;与普通 RC 梁相比较,CFL 增强 RC 梁裂缝分布较密集。

CFL 增强 RC 梁的极限疲劳寿命曲线符合线性 S—lg N 规律,极限疲劳强度为 25.42 kN,为静载条件下极限抗弯强度的 58.4%。通过对增强梁跨中挠度和抗弯刚度的分析可以看出,构件破坏过程具有明显的疲劳损伤三阶段发展规律,把 CFL 增强 RC 梁的疲劳损伤演化过程划分为:损伤成核、损伤稳定扩展、损伤失稳扩展三个阶段。与普通 RC 梁相比较,CFL 增强 RC 梁的初始抗弯刚度提高幅度较小,而在损伤阶段的抗弯刚度提高了一倍左右。外部粘贴 CFL 显著提高了增强混凝土构件在带裂缝服役期间的抗弯曲变形能力。

参考文献:

- [1] Garden H N, Quantrill R J, Hollaway L C, *et al.* An experimental study of the anchorage length of carbon fibre composite plates used to strengthen reinforced concrete beams [J]. *Construction and Building Materials*, 1998, 12 (4):203~219
- [2] Huang P Y, Jin M, Luo L F, *et al.* Effect of length of carbon fiber-sheet on the stress field of the reinforced concrete 3-point bending specimen with a V-notch [A]. *Proc. SPIE*, 2001, 4537:111~114
- [3] Chen J F, Teng J G. Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding [J]. *Construction and Building Materials*, 2003, 17(1):27~41
- [4] Huang P Y, Long Z Q, Luo Y. Experimental study on load carrying of carbon fiber-sheet reinforced concrete 3-point bending specimen with a V-notch [A]. *ICEM3*, Beijing, 2001, 23~26
- [5] 黄培彦,黄龙田,罗毅等. 纤维板增强钢筋砼缺口梁承载力试验研究 [J]. *实验力学*, 2003, 18(2):171~176 (HUANG Peiyan, HUANG Longtian, LUO Yi, *et al.* An experimental study on the load-carrying capacity of fiber-sheet-reinforced RC beam with a V-notch. *Journal of Experimental Mechanics*, 2003, 18(2):171~176(in Chinese))
- [6] 姚国文,黄培彦,郑小红等. 纤维薄板技术在旧桥加固工程中的应用 [A]. *土木工程结构鉴定、加固与改造技术的新进展* [C],重庆出版社,第七届全国建筑物鉴定与加固改造学术会议,重庆,2004,970~974 (Yao Guowen, Huang Peiyan, Zheng Xiaohong, *et al.* Application of fiber laminate technique to strengthening engineering for old bridge. *New Development of Appraisal, Reinforcement and Reconstruction Techniques for Civil Engineering Structures*. Chongqing Press., 7th National Conference of Appraisal, Reinforcement and Reconstruction for Construction. Chongqing, 2004, 970! 974(in Chinese))
- [7] 姚国文,黄培彦,郑小红等. 纤维薄板厚度对增强 RC 梁承载能力的影响 [J]. *暨南大学学报*, 2005, 26(1):120~122 (YAO Guowe, HUANG Peiyan, ZHENG Xiaohong, *et al.* Effect of thickness of carbon fiber laminate on load carrying capacity of strenthened RC beams. *Journal of Jinan University*, 2005, 26(1):120~122(in Chinese))

Experimental Study on Fatigue Behavior of RC Beam Strengthened with Carbon Fiber Laminate under Cycle Loading

YAO Guo-wen^{1,2}, HUANG Pei-yan¹, NIU Peng-zhi¹, ZHENG Xiao-hong¹

(1. College of Traffic and Communications, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Three point bending experiments of carbon fiber laminate (CFL) strengthened RC beams under cycle loading were performed. The linear logarithmic fatigue life curve was obtained and the histories of midspan flexibility of strengthened beams were recorded and the ultimate fatigue strength and bending rigidity of the beams were deduced further. Then fatigue failure mechanism of CFL strengthened RC beams was studied. The failure modes of the beams under cycle loading include concrete cracking, carbon fiber laminate debonding from concrete and steel bars yielding. And their fatigue failure process shows evident three stages of damage nucleation, steady expansion and failure at last. Compared with the normal RC beams under cycle loading, CFL strengthened RC beams scatter more symmetrical and denser cracks. And external bonded CFL increases the original bending rigidity of strengthened beam a little, but doubles its bending rigidity at fatigue damage stage. The ultimate fatigue strength is 25.42 kN obtained from fatigue life curve of CFL strengthened RC beams, which is about 58.5 percent of the ultimate loading under static loading.

Key words: fiber laminate; strengthened RC beam; cycle loading; fatigue life; bending rigidity