

文章编号:1001-4888(2006)04-0491-06

随机载荷下碳纤维薄板增强 RC 梁试验研究^{*}

黄培彦, 赵 琛^{**}, 陈翠峰

(华南理工大学 交通学院, 广州 510640)

摘要: 桥梁等钢筋混凝土结构在运营期所受活载为随机载荷。研究随机载荷作用下碳纤维薄板 (Carbon Fiber Laminate 简称 CFL) 片材增强钢筋混凝土构件的疲劳性能, 对于采用碳纤维薄板技术加固桥梁等混凝土结构有重要的指导意义。本文通过随机载荷作用下碳纤维薄板增强 RC 梁的三点弯曲疲劳试验, 得到了增强梁的 S-N 曲线和跨中挠度的演化规律, 揭示了随机载荷下增强梁的疲劳破坏机理。随机载荷下碳纤维薄板增强 RC 梁的破坏模式包括钢筋断裂、碳纤维薄板剥离、混凝土压坏等破坏形态, 疲劳破坏过程具有明显的损伤成核、稳定扩展、失稳扩展的三阶段发展规律。

关键词: 纤维薄板; 随机荷载; RC 梁

中图分类号: O346.2 **文献标识码:** A

0 引言

随着碳纤维、芳纶纤维、玻璃纤维等增强复合材料的制造、加工技术的发展, 纤维材料的品种不断翻新、产品质量不断提高、成本下降, 再加上大跨度桥梁、超高层建筑和长大隧道的建设、加固和维修的需要, 纤维增强复合材料由于其比强度高、比模量高、耐腐蚀及与混凝土的粘结性好等特点而受到许多国家研究机构的重视。十几年来, 国内外专家学者对纤维片材加固混凝土构件进行了大量的试验研究与理论分析, 证实了纤维增强复合材料对各种混凝土构件抗弯、抗剪和抗压加固的有效性, 并已逐步在工程中予以推广应用; 同时在力学、材料学、建筑学等专家学者的共同关注下, 纤维片材加固混凝土构件在静载下的损伤和破坏机理研究也取得了丰富的成果。与纤维增强复合材料 (Fiber Reinforced Polymer, 简称 FRP) 增强 RC 构件的静力学性能试验研究和理论分析相比较, 对 FRP 增强 RC 构件疲劳性能的研究则刚刚起步。目前随机疲劳性能的研究多集中在金属^[1-3]、混凝土^[4]、FRP 片材^[5,6]等材料方面, 而 FRP 增强 RC 构件的随机疲劳性能研究未见有成果发表。疲劳损伤导致断裂是结构破坏的重要原因之一, 因此 FRP 增强混凝土构件的耐久性和疲劳破坏问题需要深入研究。另外, 桥梁所受动载主要为车辆荷载, 探讨 FRP 增强混凝土构件的疲劳性能, 能够为准确评估 FRP 加固后混凝土桥梁的疲劳寿命提供依据。

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), 并对碳纤维薄板 (Carbon Fiber Laminate 简称 CFL) 增强混凝土构件的力学性能、破坏模式等进行了研究。通过对常幅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、极限疲劳强度以及跨中挠度、抗弯刚度的演化规律, 揭示了增强梁的疲劳破坏机理, 并定义了增强构件的开裂疲劳寿命、容许疲劳寿命和极限疲劳寿命^[7-9]。在纤维薄板增强

^{*} 收稿日期: 2005-08-24; 修订日期: 2006-07-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (19972020, 10272047); 广东省自然科学基金项目 (990567, 020856)

^{**} 通讯作者: 赵琛 (1969—), 女, 硕士, 副教授。研究方向: 材料的强度、损伤和结构加固。E-mail: zhaozhou@pub. guangzhou. gd. cn

钢筋混凝土结构的等幅疲劳研究的基础上,模拟了纤维薄板增强 RC 梁受随机载荷的疲劳过程,并提出了随机载荷作用下纤维薄板增强 RC 梁的疲劳试验方法^[10]。

本文以 CFL 增强 RC 梁为研究对象,试验通过 CFL 增强 RC 梁的三点弯曲试验,研究常幅循环载荷、随机载荷作用下纤维薄板增强混凝土构件的疲劳性能,探讨增强构件的疲劳破坏机理,分析其疲劳寿命与破坏模式,为纤维薄板加固混凝土结构技术的进一步应用提供试验数据和理论依据。

1 随机疲劳试验

1.1 试验载荷谱

为了模拟 CFL 加固旧危桥梁所受实际活载的统计特性,统计 321 国道某一时段内通过某一刚架拱桥的车流量(图 1),并通过对车流量的大型车等效折算(图 2)、概率分布及其功率谱密度函数等的统计分析后得知^[11],该随机过程是服从 Weibull 分布的非高斯随机过程。然后利用线性同余法产生随机序列,借助“分布转换”这一处理方法来完成“非高斯→高斯”过程的转换,模拟出与实测数据有相同功率谱密度函数的、符合同参数 Weibull 分布的时间序列;最后设定置信区间,去除置信区间以外的与小载荷、大载荷相关的数据,并通过均值等效原则把时间序列转换成疲劳试验用的随机载荷谱(图 3)。

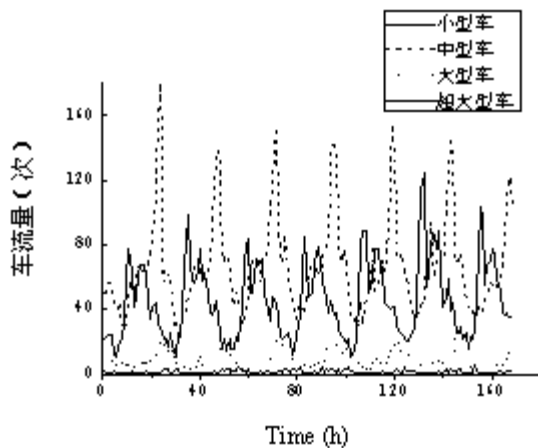


图 1 分类车流量序列

Fig. 1 Sequence of vehicle flux

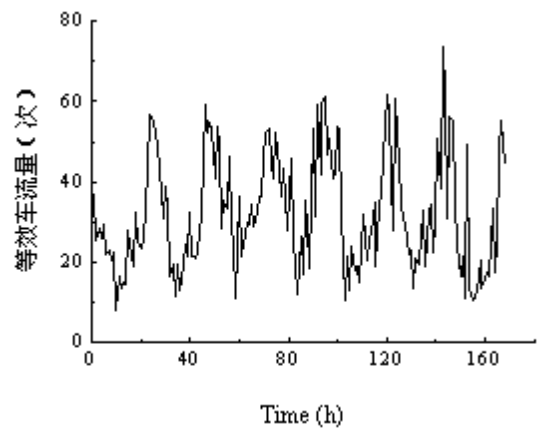


图 2 等效车流量序列

Fig. 2 Sequence of equivalent vehicle flux

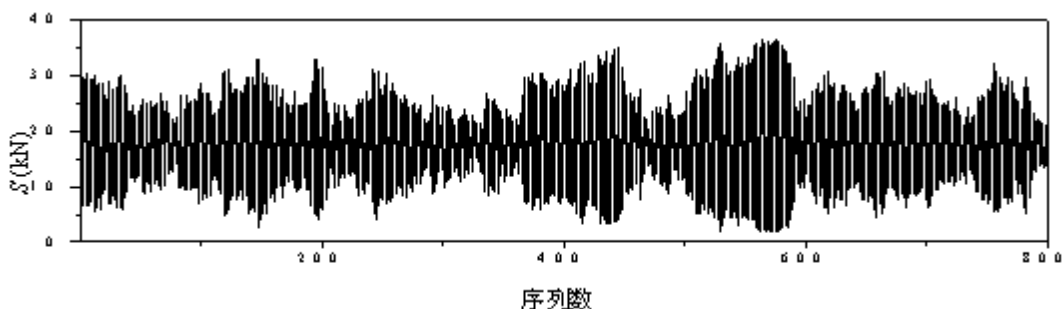


图 3 试验用随机载荷谱(节选)

Fig. 3 Part of random load sequence for experiments

1.2 试验方案

三点弯曲疲劳试验按随机载荷幅值将试件分组,试验梁的配筋图见图 4。弯拉区粘贴计算厚度为 0.222mm 的 CFL。MTS-810 材料试验机加载频率设置为 4Hz。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,在混凝土、CFL 表面粘贴应变片,主筋表面预先粘贴、埋植

应变片,通过 DH5937 动态应变采集系统记录混凝土、CFL、钢筋的应变。试验过程中,当载荷序列达到一定次数时暂停加载,观察试验梁开裂、CFL 剥离等破坏情况。

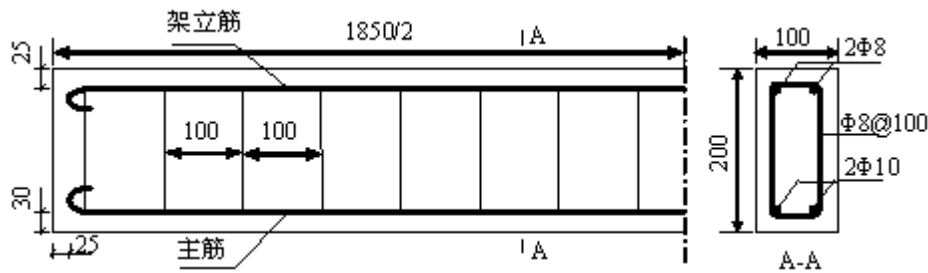


图4 RC梁配筋构造图

Fig. 4 Internal and external reinforcement of concrete beam

2 试验结果及分析

2.1 随机疲劳破坏过程

图5随机载荷 $S_{\max}=35\text{kN}$ 时 CFL 增强梁 A-1 的部分跨中挠度曲线。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;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;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(图6)。因此,随随机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、主筋断裂等模式(图7),与常幅循环载荷下 CFL 增强 RC 梁的破坏过程相类似。

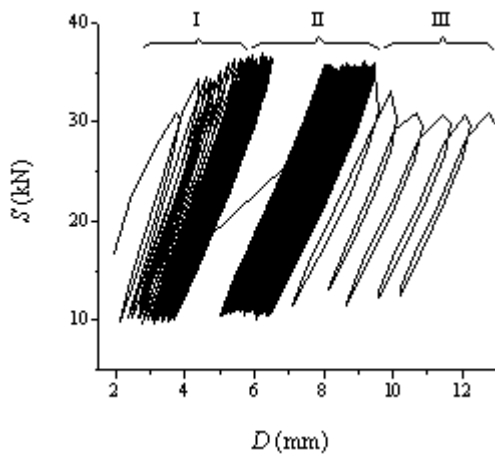


图5 随机载荷下 CFL 增强 RC 梁的跨中挠度历程

Fig. 5 Midspan vertical flexibility of CFL strengthened RC beam

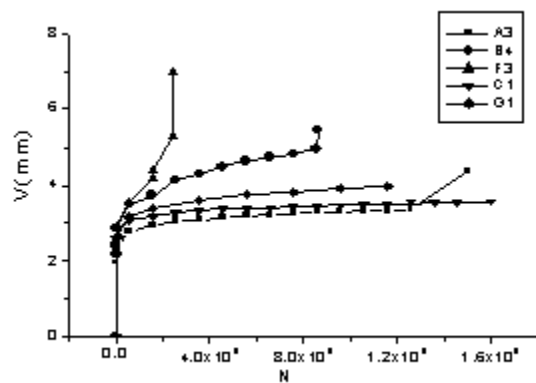


图6 在 18kN 时跨中挠度随次数的变化图

Fig. 6 Midspan vertical flexibility of CFL Varied by Number

3.2 S—N 曲线

CFL 增强 RC 梁的极限疲劳破坏是一种最直观的疲劳破坏判据,此时增强梁丧失了绝大部分的承载能力,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8为 CFL 增强 RC 梁的疲劳寿命的 S—N 曲线,数据拟合得到线性 S—N 方程为:



图 7 随机载荷下 CFL 增强 RC 梁的疲劳裂纹分布图
Fig. 7 Cracks distribution on CFL strengthened RC beams

$$S_{\max} = 80.05 - 7.92 \lg N \tag{1}$$

其相关系数 $r=0.94$ 。

在疲劳试验中,疲劳寿命 N 有很大的离散性。疲劳试验结果存在较大离散性的原因包括有试件在材料、结构、制作工艺、残余应力、试验条件(荷载的偏心、测量精度)以及环境温度、试验机类型等方面的主观或客观差异,任意一点微小的差异都可能导致试件疲劳寿命的差别。很多对材料或构件的静载特性影响很小的因素,在疲劳加载过程中却可以起到显著的作用。这些因素是不能完全避免的,因此通过疲劳试验得到的数据是无法完全避免其离散性的。疲劳试验数据离散性的必然存在,要求进一步对疲劳试验结果进行概率统计分析。

表 1 随机疲劳试验结果
Tab. 1 Record of random experiments

试件 编号	荷载 均值 (KN)	最大 荷载 (KN)	疲劳寿命(周)	平均疲劳寿 命	疲劳 寿命 对数值	平均寿 命对数 值
F-2	23	39.5	88447	245310	4.95	5.34
F-3			244649		5.39	
F-4			271896		5.43	
F-5			376248		5.58	
B-3	22	38	1052200	636203	6.02	5.74
B-4			377985		5.58	
B-5			677985		5.83	
B-6			839887		5.92	
B-7			232958		5.36	
G-1	21	36.5	1211044	999628	6.08	5.96
G-2			1659468		6.22	
G3			622519		5.8	
G-4			468470		5.67	
G-5			1036639		6.02	
A-1	20	35	652258	1534658	5.81	6.19
A-2			2000000		6.30	
A-3			1498980		6.18	
A-4			1884141		6.28	
A-5			1637912		6.21	
C-1	19	33	1666725	1666725	6.22	6.22
D-1	18	32	$>2 \times 10^6$	2000000	6.30	6.30

2.3 裂缝宽度(COD)分析

疲劳裂缝是疲劳损伤累积的结果,各试件疲劳裂缝的分布情况反映了 CFL 增强 RC 构件的抗疲劳损伤性能。本试验中,在忽略了各试件在设计 and 制作上的差异后,疲劳裂缝的分布情况主要受到疲劳荷载特征的影响。

从图 9 试验梁的裂缝宽度增长也呈现 3 个阶段,第一阶段,裂缝宽度增长很快。到了第二阶段,进

入缓慢增长阶段,在这阶段,裂缝的数目基本上趋于稳定,裂缝的宽度增长不明显。到了破坏阶段,裂缝随着梁的破坏而急剧增长。当疲劳荷载小于其疲劳极限时,随着疲劳荷载的增加,其裂缝数目会随之增加。有很多裂缝都是随着疲劳荷载的增加,新增出来的。当进入第二阶段后,增强试件疲劳裂缝的数目会趋于稳定,在一个较小的范围内波动(本试验中,裂缝数目在 9 条到 12 条之间波动),而受荷载幅值的影响不明显。

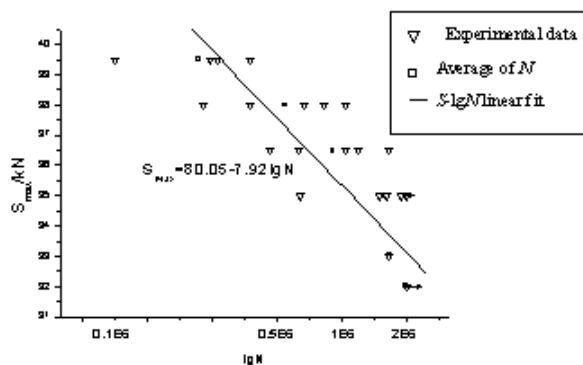


图 8 CFL 增强 RC 梁的 S—N 曲线

Fig. 8 S—N curve of CFL strengthened RC beams

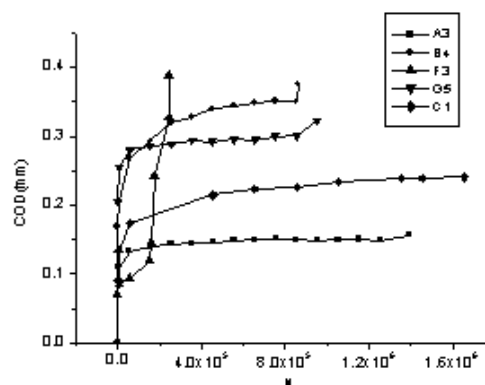


图 9 裂缝宽度随循环次数变化图

Fig. 9 Width of main crack varied by cycle's number

3 结论

通过随机载荷作用下 CFL 增强 RC 梁的三点弯曲疲劳试验,得到了增强梁 S—N 曲线、裂缝宽度和跨中挠度的演化规律,揭示了随机载荷下增强梁的疲劳破坏机理。随机载荷下 CFL 增强 RC 梁的破坏模式包括主筋断裂、混凝土开裂、CFL 与混凝土界面剥离等破坏形态,疲劳破坏过程具有明显的损伤成核、稳定扩展、失稳扩展的三阶段发展规律。

参考文献:

- [1] Agerskov H. Fatigue in steel structures under random loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2000, 53:283~305.
- [2] Colombi P, Dolinski K. Fatigue lifetime of welded joints under random loading: rainflow cycle vs. cycle sequence method[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2001, 16:61~71.
- [3] 倪侃,高镇同. 变幅加载下疲劳可靠性分析[J]. 航空动力学报, 1997, 12(3):230~234 (Nin kan, Gao Zhentong. Fatigue Reliability Analysis Under Reliable Amplitude. Journal of Aerospace Power, 1997, 12(3):230~234 (in Chinese))
- [4] Zhao Shang-Chuan, Zhao Guo-Fan, Gong Jin-Xin. Analysis of fatigue life of existing reinforced concrete structures based on reliability theory[J]. Engineering Mechanics, 2002 19(4):7~11.
- [5] Sarkani S, Michaelov G, Kihl D P, Beach J E. Stochastic fatigue damage accumulation of FRP laminates and joints [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(12):1423~1431.
- [6] Chen Jianqiao, Wang Xiangyang, Luo Cheng. Reliability analysis of FRP laminated plates with initial imperfection [J]. American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division, PVP, 2002, 443(2):1~8.
- [7] 姚国文,黄培彦,牛鹏志等. 常幅循环载荷下纤维薄板增强钢筋混凝土梁的损伤行为研究[J]. 机械强度, 2004, 26(S): 25~27 (Yao Guowen, Huang Peiyan, Niu Pengzhi, et al. Fatigue Damage Evolvement of Reinforced Concrete Beam Strengthened with Fiber Laminate under Constant Amplitude Load. Journal of Mechanical Strength, 2004, 26 (S):25~27 (in Chinese))
- [8] 姚国文,黄培彦等. 循环载荷下碳纤维薄板增强 RC 梁的疲劳性能试验研究[J]. 实验力学, 2005, 20(3):349~353 (Yao Guowen, Huang Peiyan, et al. Experimental Research on Reinforced Concrete Beam Strengthened with Fiber

- Laminate under Constant Amplitude Load. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(3): 349 ~ 353 (in Chinese))
- [9] Huang Pei-yan, Niu Peng-zhi, Yao Guo-wen, et al. Fatigue strength of reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber sheet under bending loads[C]. Proceedings of the Fourth International Conference on Concrete under Severe Conditions, Seoul, Korea, 2004: 848~855.
- [10] Huang Pei-yan, Zhao Chen, Huang Long-tian, et al. Fatigue testing method for RC beams strengthened with fiber reinforced sheet under random load[C]. Proceedings of the Fourth International Conference on Concrete under Severe Conditions, Seoul, Korea, 2004: 856~863.
- [11] 赵琛, 黄培彦, 黄龙田. 桥梁随机载荷数据采集及统计分析[J]. 中南公路工程, 2004, 29(1): 12~15 (ZHAO Chen, HUANG Peiyan, HUANG Longtian. Acquisition and Statistic Analysis of Random Load Data for Bridge. Central South Highway Engineering, 2004, 29(1): 12~15 (in Chinese))

Research on RC Beams Strengthened with Carbon Fiber Laminate under Random Load

ZHAO Chen, HUANG Pei-yan, CHEN Cui-feng

(College of Traffic & Communications, South China Univ. of Tech., Guangzhou 510640, China)

Abstract: The live load is random in RC structure such as bridge. Study on the fatigue character in RC beams strengthened with Carbon Fiber Laminate(CFL) can be the very important guides in the use of carbon fiber laminate technology to strengthen RC structure as bridges. Three-point bending experiments of carbon fiber laminate strengthened RC beams under random loads were performed. The S—N curve is obtained and history of midspan flexibility of strengthened beams was recorded. Then fatigue failure mechanism of CFL strengthened RC beams was studied. The failure modes of strengthened beams under cycle loads include steel bars fracture, carbon fiber laminate debonding from concrete and concrete cracking. And their fatigue failure process shows evident three stages of damage nucleation, steady expansion and failure.

Key words: CFL; random load; RC beam