

文章编号: 1001-4888(2016)01-0009-07

温度—随机载荷下 CFL 加固 RC 梁 疲劳性能的实验研究^{*}

林彬, 郭馨艳, 郑小红, 林嘉祥, 黄培彦

(华南理工大学 土木与交通学院, 广州 510640)

摘要: 考虑亚热带地区公路桥梁的服役环境温度与车辆载荷的作用效应, 本文以碳纤维薄板 (CFL) 加固钢筋混凝土 (RC) 桥梁结构为研究对象, 利用本课题组构建的实验平台, 提出了温度与车辆随机载荷耦合作用下 CFL 加固 RC 梁的疲劳实验方法。在 3 个温度和 3 个载荷水平下实施了温度—随机载荷耦合作用下的三点弯曲疲劳实验, 初步探讨了温度—随机载荷作用下加固梁的疲劳破坏机理, 并提出了温度—随机载荷耦合下加固梁疲劳寿命的半经验公式。

关键词: 随机载荷; 碳纤维薄板 (CFL); 温度; 疲劳性能; 钢筋混凝土 (RC) 梁

中图分类号: U446.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-15-173

0 引言

随着纤维增强复合材料 (fiber reinforced polymer, FRP) 加固混凝土结构技术的推广应用, FRP 加固混凝土结构件的疲劳性能也得到了极大的关注^[1-3]。对于 FRP 加固钢筋混凝土 (RC) 桥梁结构, 一方面, 该类结构在自然环境下服役, 结构的年温差、日照温差较其他建筑更为显著。温度的变化会使 FRP 加固 RC 桥梁结构产生温度应力, 从而影响该类结构的承载能力及其抗疲劳性能^[4-8]。另一方面, 对于公路桥梁结构, 服役过程中所承受的车辆荷载在时间、空间、大小、间距上都存在着很大的随机性。因此, 桥梁结构的抗疲劳设计应考虑上述两方面的因素。然而, 在目前的抗疲劳设计中没有考虑这样复杂的随机过程, 而把它假设成恒幅载荷, 这对结构件的疲劳寿命预测会造成较大的偏差^[9]。另外, 目前国内外虽有一些有关车辆载荷谱的研究成果^[10, 11], 但考虑服役环境与车辆载荷耦合作用下的 RC 桥梁结构件的疲劳性能/耐久性的研究成果还未见报道。

为了探明在实际服役条件下 FRP 加固 RC 桥梁结构的疲劳性能及耐久性, 开展服役环境与车辆随机载荷耦合作用下的 FRP 加固 RC 桥梁结构疲劳性能研究是不可或缺的。为此, 作为初步研究, 本文拟针对亚热带地区桥梁的服役环境, 对温度与车辆随机载荷耦合作用下 FRP 加固 RC 桥梁结构件的疲劳性能开展实验研究。

1 温度—随机载荷耦合下 CFL 加固 RC 梁疲劳实验

1.1 实验材料及试件

本次疲劳实验用试件是三点弯曲碳纤维薄板 (CFL) 加固 RC 梁^[12], 其尺寸为 1850mm 长×100mm

^{*} 收稿日期: 2015-09-24; 修回日期: 2015-12-24

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (11132004) 资助

通讯作者: 黄培彦 (1952—), 男, 博士, 教授, 博导。主要研究领域: 疲劳与断裂、实验力学、桥梁结构耐久性。Email: pyhuang@scut.edu.cn

宽×200mm 高,跨距 L 为 1600mm,共制作了 24 根 RC 梁。CFL 加固 RC 梁由混凝土、钢筋和 CFL 三部分组成。混凝土中的水泥是广州市嘉华水泥厂生产、标号为 P. O. 42. 5R 的普通硅酸盐水泥。集料是细河沙和粒径在 5~20mm 的连续级配花岗岩碎石。为了保证试件强度的稳定性,所选用的水泥从出厂到使用的时间不超过 20 天。所用集料中的碎石和细沙在实验前进行人工筛分和清水冲洗,以保证集料性能的稳定性。混凝土拌合用水为洁净的自来水,其级配为:水泥:水:砂:石=1:0. 5:2. 06:3. 66,并依据国家标准《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002),在 YE-5000A 型液压式压力机上进行基本力学性能实验,测试结果如表 1 所示。

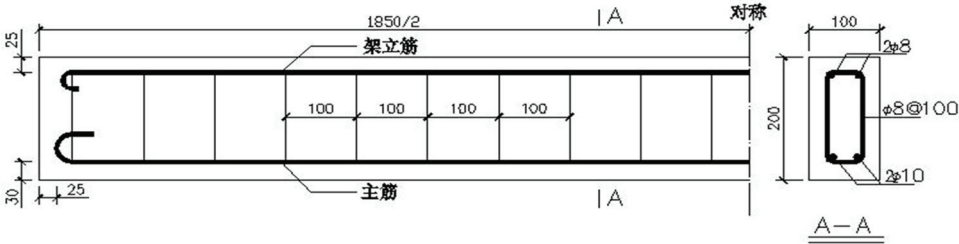


图 1 RC 梁尺寸及配筋
Fig. 1 Sizes and steel bar of RC beam

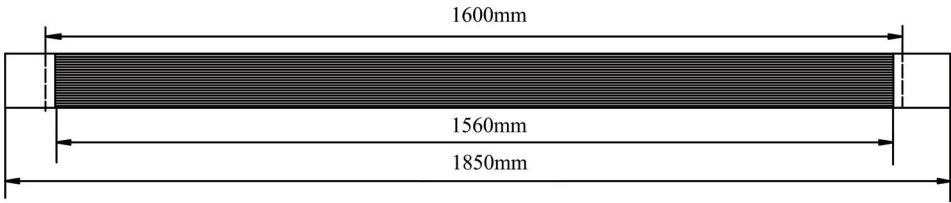


图 2 试验梁底部粘贴 CFL 示意图
Fig. 2 Sketch of bonded CFL in the bottom of specimen

混凝土中的主筋为 $\Phi 10$ II 级钢筋,架立筋与箍筋均为 $\Phi 8$ I 级钢筋,配筋率为 0. 981%,如图 1 所示。CFL 采用日本东丽公司生产的 T700-12k 碳纤维丝,由本课题组配制环氧树脂预浸料、编织而成的 TB25 型碳纤维薄板^[12],尺寸为 1560mm 长×100mm 宽×0. 23mm 厚(计算厚度)。用于混凝土与 CFL 之间的粘结剂为神力铃牌环氧树脂粘结剂(A,B 胶),粘结胶厚度约为 0. 1mm,而且其大部分渗入混凝土表层。CFL 外贴于 RC 梁的底部,如图 2 和图 3 所示。AB 胶的剪切强度为 14MPa,工作温度为-30~+100℃。钢筋和 CFL 的物理力学性能如表 1 和表 2 所示。



图 3 粘贴 CFL 的试验梁底部(照片)
Fig. 3 A photo of specimen bottom bonded with CFL

表 1 混凝土的基本力学性能
Tab. 1 Mechanical properties of concrete

抗压强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	抗拉强度 (MPa)	泊松比
47. 7	34	4. 45	0. 193

表 2 主筋的力学性能
Tab. 2 Mechanical properties of main steel bar

直径	屈服强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	延伸率 (%)
$\phi 10$	307	452	206	31. 0

为了实时测量试件的主筋、CFL 和混凝土的变形情况,试件制作时在加固梁跨中部位的主筋、试件制作完成后在 CFL 和混凝土的两侧面粘贴了不同类型的应变片。所有试件的制作都在室温下完成。

表 3 CFL 的材料参数

Tab. 3 Parameters of CFL

型号	计算厚度 (mm)	碳纤维丝		弹性模量 (GPa)	抗拉强度 (MPa)	延伸率 (%)
		型号	面密度(g/m ²)			
TB25	0.230	T700-12k	404	230	4750	1.50

表 4 温度—随机载荷耦合疲劳实验条件及实验结果

Tab. 4 Fatigue testing conditions and results at different temperature and random loads coupling

试件编号	温度(℃)	最大载荷平均值(kN)	疲劳寿命(cycles)	平均疲劳寿命(cycles)
A1	10℃	30	338223	350261
A2			317982	
A3			394579	
A4		27.5	645752	738672
A5			1001415	
A6			568848	
A7		25	1210596	1233013
A8			1427657	
A9			1060785	
B1	25℃ (室温)	30	292044	220379
B2			148713	
B3		27.5	552914	483551
B4			414187	
B5		25	752914	875372
B6			997829	
C1	60℃	30	107064	105450
C2			51478	
C3			157808	
C4		27.5	382238	292968
C5			167528	
C6			329137	
C7		25	522777	494962
C8			741726	
C9			220382	

1.2 实验方法及装置

(1) 环境温度的设定与实现

本次实验的环境温度是根据广东地区桥梁的实测工作温度变化情况^[13],并考虑能够代表高、中、低温等特定温度,分别设定为 10℃、25℃(室温)和 60℃。试件的分组及具体的实验条件如表 4 所示。各设定的环境温度由本课题组设计和定制的环境模拟与控制系统(图 4)^[13]实现,系统能够实现的温度范

围为: $-40^{\circ}\text{C} \sim +100^{\circ}\text{C}$, 温度波动度、均匀度均为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 随机车辆载荷谱及加载

对于不同类型的道路, 其车辆载荷谱是不同的。不同载荷谱下桥梁结构件的疲劳性能也会有差异。为了获得疲劳实验用的载荷谱(简称为“实验谱”), 本课题组在前期研究中, 采用现场人工调查、监控系统监测、收费站核实的方法采集国道, 以及治理超载前后高速公路的车流及轴重等第一手数据; 通过统计分析, 分别得到相应道路的车辆荷载序列的概率分布函数, 以及自相关函数或功率谱密度函数; 再采用“分布转换方法”, 对呈现非高斯过程特征的公路车辆随机载荷谱进行模拟; 然后, 考虑典型的公路桥梁结构和试件的力学模型, 通过弯矩等效原则, 生成作用于试件的载荷谱; 最后, 根据试件承载能力情况, 去除载荷谱中的极大和极小载荷, 采用雨流法计数, 完成实验谱的编制, 得到相应的可用于疲劳实验的车辆载荷谱^[9,11]。



图 4 智能环境疲劳实验系统

Fig. 4 Intelligent environment fatigue test system

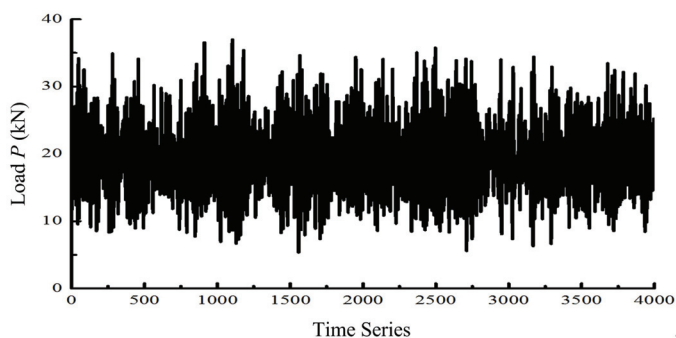


图 5 车辆随机载荷实验谱(例)

Fig. 5 Random load testing series for vehicles (example)

为了便于对比分析, 本次疲劳实验使用的实验谱是从广东地区典型国道上采集, 并按上述方法模拟和编制而成的车辆随机载荷实验谱, 如图 5 所示。同时, 为了得到温度—车辆随机载荷下 CFL 加固 RC 梁的完整的疲劳寿命实验曲线(S—N 曲线), 参考本课题组的前期研究成果^[8,9,13], 将上述实验谱的平均峰值设定为 3 个水平, 即 $P_{\max}$ 为 25kN、27.5kN、30kN, 并取名义应力比 $R=0.1$ 。

温度—车辆随机载荷耦合下疲劳实验的加载, 是利用改进后的智能环境疲劳实验系统(图 4)实现的。车辆随机载荷的实验谱可通过与 MTS810 控制系统相连的微机实时模拟、编谱、传输与控制, 也可以先在其他计算机上模拟和编谱, 再将编谱后的数据输入到 MTS810 的控制系统中, 由 MTS810 系统实现对试件的随机加载。本次随机疲劳实验采用三点弯曲加载方式、力控制模式, 加载(平均)频率设定为 2Hz。

(3) 数据采集与测试

按照设定的环境温度, 启动智能环境模拟与控制系统, 待工作室内的温度达到设定温度后, 保温 2 小时, 再启动 MTS 系统, 对 CFL 加固 RC 梁施加车辆随机载荷以完成温度与车辆随机载荷耦合下的疲劳实验。

疲劳实验中, 试件所受最大、最小载荷、跨中位移, 以及钢筋、CFL 和混凝土的应变等数据都需要测试和记录。其中, MTS 系统自动记录荷载、试件跨中位移等数据, 每个载荷循环记录 8~10 组数据。钢筋的应变借助预先埋入的应变片、CFL 和混凝土的应变借助粘贴于其表面的应变片, 由动态应变仪(Wavebook 516E)采集。应变采集系统自动记录钢筋、CFL 和混凝土的应变数据, 采集频率为 100Hz。

随机载荷的循环数 N , 采用雨流法计数, 由编制的专用程序进行分析和计数。

2 随机疲劳寿命分析

2.1 温度的影响

对 24 根 CFL 加固 RC 梁按照上述实验方法实施了温度与车辆随机载荷耦合下的三点弯曲疲劳实

验,实验结果如表 4 所示。由表 4 可知,在本文设定的温度范围内,随机载荷作用下 CFL 加固 RC 梁的疲劳性能受温度的影响显著。在相同的荷载水平下,CFL 加固 RC 梁的疲劳寿命随温度的升高而降低,而且随着荷载水平的增加,其降低幅度增大。

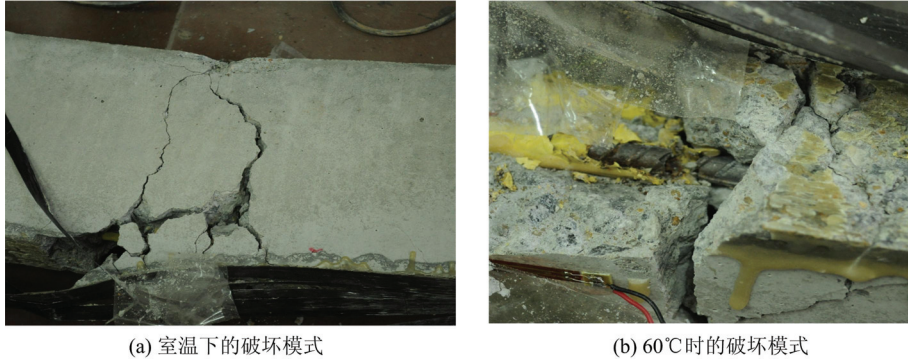


图 6 加固梁的破坏模式

Fig. 6 Failure modes of strengthened beams

温度对 CFL 加固 RC 梁疲劳性能的影响也体现在其破坏模式上。由图 6 可知,温度—随机载荷下 CFL 加固 RC 梁的疲劳破坏模式与室温—常幅疲劳载荷下的^[7,8]相似,均表现为在混凝土开裂截面处,某一受拉钢筋首先发生疲劳屈服,然后引起 CFL 与混凝土界面的裂纹失稳扩展,CFL 与混凝土的剥离,并导致受拉钢筋断裂,受压区混凝土压碎,构件完全破坏。而且,随着环境温度的升高,CFL 与混凝土界面的裂纹扩展速率更快,进入失稳扩展的时间更短。

与室温下 CFL 加固 RC 梁的破坏模式相比^[7,8],当环境温度为 60℃时,CFL 加固 RC 梁的疲劳裂纹条数更少,裂纹间距更大。

2.2 温度—随机疲劳方程

将表 4 所示在 10℃、25℃(室温)和 60℃下 A~C 组试件的温度—随机疲劳实验数据,分别绘制成平均载荷峰值与载荷循环数($P_{\max} - N$)的关系曲线,如图 7 所示。

采用最小二乘法对图 7 所示疲劳实验数据进行拟合,可得到在各个环境温度与车辆随机载荷耦合作用下 CFL 加固 RC 梁的疲劳方程分别为:

$$10^{\circ}\text{C}: P_{\max} = 75.6 - 8.25 \lg N \quad (1)$$

$$25^{\circ}\text{C}: P_{\max} = 65.6 - 6.73 \lg N \quad (2)$$

$$60^{\circ}\text{C}: P_{\max} = 53.2 - 4.80 \lg N \quad (3)$$

由图 7 可知,在本文研究的温度范围内,CFL 加固 RC 梁的随机疲劳性能随着环境温度升高而有规律地降低。为了能够定量地探讨环境温度对加固梁随机疲劳寿命的影响,参考本课题组的前期研究成果^[8],假定温度与车辆随机载荷耦合作用下 CFL 加固 RC 梁的疲劳方程可以描述为:

$$P_{\max} = [C_1 + C_2 f(T)] + [C_3 + C_4 f(T)] f(N) \quad (4)$$

式中,温度影响函数为:

$$f(T) = e^{C_5 T} \quad (5)$$

寿命函数为:

$$f(N) = \lg N \quad (6)$$

式(4)和式(5)中, $C_1 \sim C_5$ 为常系数,由疲劳实验数据推定。

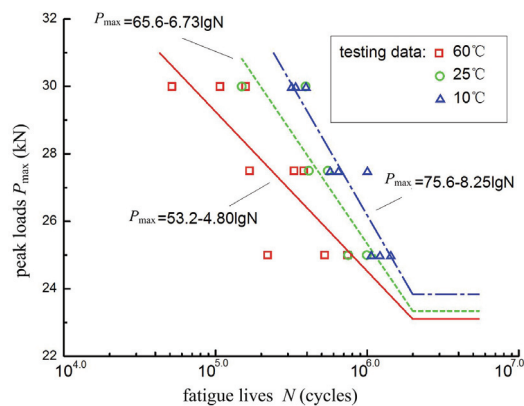
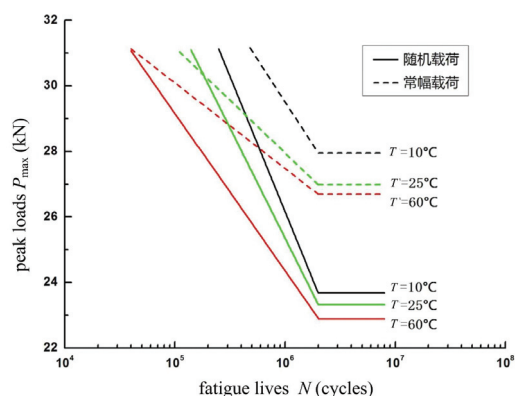


图 7 不同温度—随机载荷下的 $P_{\max} - N$ 曲线

Fig. 7 $P_{\max} - N$ curves at different temperature and random load coupling

图 8 不同温度下的 $P_{\max} - N$ 计算曲线Fig. 8 $P_{\max} - N$ computing curves at different temperature

利用式(4)~(6),以及 10℃、25℃和 60℃下 A~C 组试件的温度—随机疲劳实验数据,采用最小二乘法可推定常系数 $C_1 \sim C_5$,并最终得到环境温度与车辆随机载荷耦合作用下 CFL 加固 RC 梁的疲劳方程为:

$$P_{\max} = [44.7 + 40.1 e^{-T/38.7}] - [3.51 + 6.14 e^{-T/38.7}] \lg N \quad (7)$$

利用式(7),可方便地推定在不同温度与车辆随机载荷耦合作用下 CFL 加固 RC 梁的疲劳寿命及疲劳极限。

为了进一步探讨温度与随机载荷的耦合作用对 CFL 加固 RC 梁疲劳性能的影响,将由温度—恒幅载荷下的疲劳方程(文献[8])与式(7)所得 S—N 计算曲线示于图 8。由该图可知,在相同的温度、最大载荷及应力比的情况下,随机载荷下 CFL 加固 RC 梁的抗疲

劳性能明显下降,在 3 个温度水平下,其疲劳极限都比恒幅载荷下的降低 14% 左右。而且,载荷水平越高,其疲劳寿命下降幅度越大。究其原因,可认为是随机载荷谱中的极大载荷造成加固梁的疲劳损伤更为严重之故。

3 结论

本文考虑桥梁结构在服役过程中环境温度及车辆荷载对 FRP 加固 RC 构件疲劳性能的耦合作用效应,探讨了温度与车辆随机载荷耦合作用下 FRP 加固 RC 构件的疲劳实验方法,并通过疲劳实验研究,探讨了碳纤维薄板(CFL)加固 RC 梁在环境温度与随机载荷耦合作用下的疲劳性能,得到了如下主要结论:

(1) 基于本课题组构建的智能环境疲劳实验平台,以及公路车辆荷载谱的模拟等前期研究成果,提出了温度与车辆随机载荷耦合作用下 CFL 加固 RC 梁的疲劳实验方法,并成功地实施了 3 个温度与 3 个载荷水平的温度—随机载荷耦合下的疲劳实验。

(2) CFL 加固 RC 梁的随机疲劳性能受环境温度的影响显著,在相同随机载荷水平下,加固梁的疲劳寿命随着环境温度的升高而降低,而且随着载荷水平的增加,其疲劳寿命降低幅度增大。

(3) 通过理论分析和对实验数据的统计分析,提出了温度—车辆随机载荷耦合作用下 CFL 加固 RC 梁疲劳寿命的半经验公式。利用该公式,可方便地预测不同环境温度与车辆随机载荷耦合作用下 CFL 加固 RC 梁的疲劳寿命,并可以指导桥梁加固结构的抗疲劳/耐久性设计。然而,该公式的有效性还需要通过更多的实验研究或数值和理论分析进行验证。

参考文献:

- [1] Shahawy M, Beitelman T E. Static and fatigue performance of RC beams strengthened with CERP laminates [J]. Journal of Structural Engineering-ASCE, 1999, 125(6):613—621.
- [2] Gheorghiu C, Labossiere P, Raiche A. Environmental fatigue and static behavior of RC beams strengthened with carbon-fiber-reinforced polymer [J]. Journal of Composite for Construction, 2004, 8(3):211—218.
- [3] Aidoo J, Harries K A, Petrou M F. Fatigue behavior of carbon fiber reinforced polymer-strengthened reinforced concrete bridge girders [J]. J. Compos. for Constr., 2004, 8(6):501—509.
- [4] 殷惠光, 赵启林, 王景全 等. 碳纤维增强混凝土结构的温度应力分析[J]. 工业建筑, 2003, 11:73—75 (YIN Huiguang, ZHAO Qilin, WANG Jingquan, et al. Thermal stress analysis of CFRP reinforced concrete structures [J]. Industrial Buildings, 2003, 11:73—75 (in Chinese))
- [5] Gentry T R, Husain M. Thermal compatibility of concrete and composite reinforcement [J]. Compos Constr, Am. Soc. Civil Eng., 1999, 3(2):82—96.

- [6] Elbadry M, Abdalla H, Ghali A. Effects of temperature on the behaviors of fiber reinforced polymer reinforced concrete members: experimental studies [J]. *Civil Eng.*, 2000, 27(5):999—1004.
- [7] ZHOU Zhilin, HUANG Peiyan, DENG Jun. Fatigue behavior of carbon fiber laminates strengthened RC beams in elevated temperature [J]. *J. of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2008, 9(4): 351—356.
- [8] HUANG P Y, ZHOU H, WANG H Y, et al. Fatigue lives of RC beams strengthened with CFRP at different temperatures under cyclic bending loads [J]. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2011, 34(9):708—716.
- [9] Rongwei Lin, Peiyan Huang, Chen Zhou, et al. Prediction of fatigue lives of RC beams strengthened with CFL under random loading[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2008, 21(4):359—363.
- [10] 王荣辉, 池春, 陈庆中 等. 广州市高架桥疲劳荷载车辆模型研究[J]. 华南理工大学学报, 2004, 32(12):94—96 (WANG Ronghui, CHI Chun, CHEN Qingzhong, et al. Study on vehicle model of fatigue load on Guangzhou viaduct [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2004, 32(12):94—96 (in Chinese))
- [11] 王海洋, 黄培彦, 李政伟 等. 基于车辆动态测重系统监测数据的公路桥梁随机载荷谱[J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2014, 42(4):70—76 (WANG Haiyang, HUANG Peiyan, LI Zhengwei, et al. Study on random vehicle loading series for highway bridges based on the monitoring data of weigh-in-motion system [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 42(4):70—76 (in Chinese))
- [12] 黄培彦, 曾竞成. 纤维薄板及其应用[P]. 中国发明专利, 专利号:ZL200410026742.8, 2004 (HUANG Peiyan, ZENG Jingcheng. Carbon fiber laminate and its application [P]. Chinese Patent No. ZL200410026742.8, China Patent Administration, 2004(in Chinese))
- [13] 黄培彦, 周昊, 郑小红 等. 湿热环境下 FRP 加固 RC 构件耐久性实验方法研究[J]. 实验力学, 2011, 26(5):603—610 (HUANG Peiyan, ZHOU Hao, ZHENG Xiaohong, et al. Study on experimental methods for durability of RC members strengthened with FRP under hot-wet environments [J]. *Experimental Mechanics*, 2011, 26(5): 603—610 (in Chinese))

Experimental Study of Fatigue Performance of RC Beam Strengthened by CFL and Subjected to Coupled Action of Temperature and Random Load

LIN Bing, GUO Xin-yan, ZHENG Xiao-hong, LIN Jia-xiang, HUANG Pei-yan

(School of Civil and Communications, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Taking into account the coupled action of temperature and vehicle load on the highway bridges in service in subtropical environment, taking the bridge composed of RC beams strengthened by CFL as study object, using the experimental platform constructed by authors, in this paper, a fatigue experimental method is proposed for RC beam strengthened by CFL and subjected to coupled action of temperature and vehicle random load. Three-point bending fatigue experiment was carried out for specimens at 3 different temperatures and 3 different loading levels under coupled action of temperature and random load. The fatigue failure mechanism of reinforced beam subjected to coupled action of temperature and random load was preliminarily discussed, and a semi-empirical formula for fatigue life of RC beam strengthened by CFL and subjected to coupled action of environment temperature and random load was proposed.

Keywords: random load; Carbon fiber laminate (CFL); temperature; fatigue performance; reinforced concrete (RC) beam