

文章编号: 1000-3851(2010)01-0155-07

# FRP-混凝土界面疲劳性能分析

邓江东<sup>\*1</sup>, 宗周红<sup>1</sup>, 黄培彦<sup>2</sup>

(1. 福州大学 土木工程学院, 福州 350108; 2. 华南理工大学 土木与交通学院, 广州 510640)

**摘要:** 应用红外探测技术跟踪记录了 2 个纤维增强聚合物复合材料(FRP)加固混凝土试件界面的疲劳损伤发展过程, 结合系列疲劳试验分析了界面的疲劳力学性能和疲劳寿命。结果显示 FRP-混凝土界面粘结区和剥离区有明显的温度差异, 应用红外探测技术可以较准确地检测界面的损伤发展状况。界面的疲劳损伤从跨中位置萌生后向一端扩展, 损伤演化可分为萌生、稳定发展和失稳发展 3 个阶段, 稳定发展阶段约占界面疲劳总寿命的 99% 左右。在界面疲劳寿命的主要阶段内界面的疲劳损伤较小, 发展缓慢, FRP 应力也变化平稳, 表明加固的抗疲劳效果较好。最后给出了界面疲劳寿命的预测方法, 界面的疲劳破坏制约了 FRP 材料强度性能的充分利用。

**关键词:** 纤维增强聚合物复合材料; 混凝土结构加固; 界面; 疲劳性能; 红外检测

**中图分类号:** O346.2 **文献标志码:** A

## Analysis of FRP - concrete interfacial fatigue properties

DENG Jiangdong<sup>\*1</sup>, ZONG Zhouhong<sup>1</sup>, HUANG Peiyan<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. College of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The interfacial fatigue damage behaviors of two reinforced concrete (RC) beams strengthened with fiber reinforced plastic (FRP) were recorded with the infrared detecting method, and based on a series of fatigue tests the interfacial fatigue properties and interfacial fatigue lives were studied. It is found that the infrared detecting method can be used to monitor the interfacial debonding effectively because the difference in infrared temperature between the bonding and debonding areas is obvious. The interfacial debonding initiates at the concrete cracks around the mid-span and then expands to one end of the beam, in which the process for the initiation and stable or unstable growth of the interfacial debonding has been observed with the stable phase about 99% of the total interfacial fatigue life. In the main fatigue phase, the interfacial damage is little and increases slowly; in addition FRP stress changes smoothly, showing that the interfacial fatigue properties are stable. The use of FRP high strength is restrained by the interfacial fatigue failure, and at last according to test data a prediction approach for interfacial lives is given.

**Keywords:** fiber reinforced polymer; concrete structure reinforcement; interface; fatigue properties; infrared detecting method

由于纤维增强聚合物复合材料(FRP), 如碳纤维布、碳纤维板等具有高强轻质等优点, 粘贴 FRP 加固钢筋混凝土(RC)构件的方法已在土木工程领域得到了广泛的应用, 国内外许多研究人员对 FRP 加固混凝土结构的静力学和疲劳性能进行了探讨, 得到了许多有益的成果<sup>[1-5]</sup>。以往的研究多针对加固构件整体性能, 而 FRP-混凝土之间粘结界面的性能往往决定了加固工程的成败和实际的使用效

果。目前有关 FRP-混凝土界面力学行为的研究还比较少, 特别是界面疲劳损伤的形成机制、演化过程都非常复杂, 界面的抗疲劳能力是 FRP 加固钢筋混凝土梁的关键力学问题之一, 对此有必要进行进一步的探讨。

本文中结合系列常幅疲劳试验, 应用红外探测技术跟踪受弯加固 RC 梁中 FRP 与混凝土界面的疲劳破坏过程, 对界面疲劳损伤扩展规律和疲劳寿

收稿日期: 2009-02-24; 收修改稿日期: 2009-09-22

基金项目: 国家自然科学基金(10672060); 福建省自然科学基金(2009J05122); 福州大学科研基金(XRC-0841)

通讯作者: 邓江东, 博士, 助理研究员, 从事桥梁加固领域的研究 E-mail: dengjdong@fzu.edu.cn

命等进行分析探讨。

## 1 疲劳试验设计

### 1.1 试件制作

试验用 RC 梁尺寸为  $1850\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 。所用混凝土材料为 C40 中砂碎石混凝土,其质量比为水泥:水:砂:碎石=1.0:0.5:2.06:3.66,弹性模量 30 GPa。配置 2 根直径 10 mm 的 II 级纵向钢筋,配筋率 0.98%,弹性模量 200 GPa,屈服强度 335 MPa,延伸率为 35%;箍筋  $\Phi 8@100\text{ mm}$ 。

在 RC 梁的底部受拉区粘贴 FRP,粘贴方向沿 RC 梁的纵向,粘贴长度 1600 mm。FRP 是采用碳纤维丝 T300-3 K 编制成宽度 100 mm、计算厚度 0.23 mm 的预浸条带,纤维取向沿板长度方向。固化后 FRP 的弹性模量 230 GPa,伸长率 1.5%,其基体材料以及与混凝土间的粘结剂均为环氧树脂胶,胶体铝-铝拉伸抗剪强度 15 MPa。FRP 的粘贴方法和步骤为:(1)对 RC 梁的粘贴表面进行打磨处理使之平整,用压缩空气除去表面的浮尘并采用棉纱和丙酮清洗,确保粘贴面的洁净;(2)将粘结树脂均匀地涂抹在需粘贴 FRP 的 RC 梁表面,胶层的涂抹厚度为 0.1~0.2 mm,要求均匀、无遗漏、无气泡;(3)将 FRP 粘贴于混凝土的表面上,采用刮梳、滚筒等工具把 FRP 压实;(4)检查确保粘贴界面无空洞、无气泡后,用加压工具固定、加压,常温下固化 48~72 h 后去除加压装置。

### 1.2 加载方法

试验采用三点弯曲常幅疲劳加载,加载频率设为 10 Hz,正弦波形,应力比  $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = 0.1$ ,见图 1。

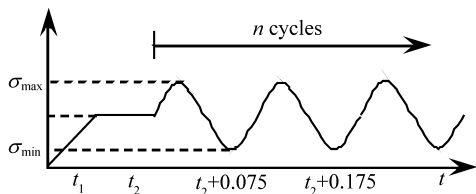


图 1 疲劳加载曲线

Fig. 1 Chart of fatigue loads

参考加固构件的极限承载力,疲劳试验的荷载水平分别取 25.0、27.5、30.0、32.5 和 35.0 kN,所用的加载设备为 MTS 810 型试验机,加载方式见图 2。若循环加载次数达到  $2 \times 10^6$  次,则认为构件在实际设计使用期限内不会破坏,停止加载。

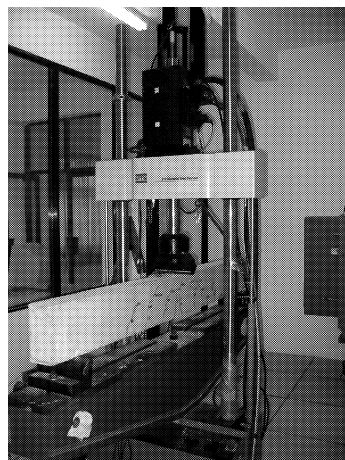


图 2 FRP 增强 RC 梁的三点弯曲试验  
Fig. 2 Three-point bending experiment  
for FRP strengthened RC beam

在 FRP 跨中位置粘贴电阻应变片,并采用 DH 5937 系统采集记录应变数据,荷载和位移数据由 MTS 实时记录。

界面的红外探测试验主要针对 30.0 kN 组中的试件 C-1 和试件 C-2。

### 1.3 界面剥离的探测方法

本次试验中应用红外热像仪摄像机跟踪记录界面剥离的情况,该系统的探测器采用第 3 代非致冷聚焦平面技术,主要性能参数:温度分辨率  $0.07^\circ\text{C}$  (在  $30^\circ\text{C}$  时),响应波段  $8\sim 14\ \mu\text{m}$ ,像素  $320 \times 240$ 。

为了提高对比度,对 FRP (试验中具体采用的是碳纤维薄板) 通以低压电进行加热。混凝土的热导率  $1.51\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ <sup>[11]</sup>,空气的热导率  $0.025\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,FRP 加热后,界面剥离区域由于存在空洞,散热效率较低,温度会比粘结区域高,这个温差可通过红外热像仪摄像机来观测记录。

界面剥离的检测精度主要取决于剥离区和粘结区温度差异的大小。图 3 为 FRP-混凝土界面剥离区和粘结区长度各 100 mm 的试件加热后某一时刻温度场的分布,可以看出温度曲线变化均匀连续,2 个区域之间有明显的温度梯度,界面粘结区和剥离区温差约  $8^\circ\text{C}$ 。

## 2 界面疲劳破坏过程

本次试验中红外检测的 FRP 加固 RC 梁 2 个试件界面的失效过程相似,可简述如下。

从红外图像上可以看出在加载前 FRP 上就存在一些较高温度区(图 4(a)、4(e)),这些区域是由于粘结施工质量不佳造成的界面空洞或未粘结处,

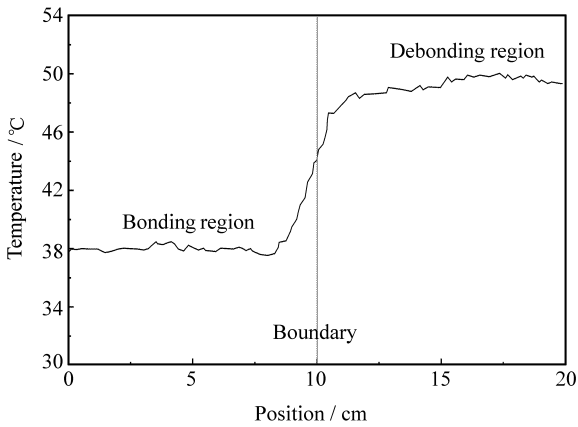


图3 FRP表面沿长度方向的温度分布

Fig. 3 Temperature distribution along length

属于界面初始损伤。混凝土是一种裂纹敏感性材料,在疲劳加载的数个到数十个加载循环内,就会在RC梁底部产生大量的弯曲或弯剪裂缝,这些裂缝主要集中在梁跨中附近并向梁上部持续扩展。混凝土裂缝的产生及其快速扩展会在裂缝根部的界面上产生应力集中,导致FRP与混凝土的局部剥离。

接下来的界面剥离稳定扩展阶段是一个长期的过程,界面裂纹在跨中附近混凝土裂缝根部萌生后缓慢向梁端扩展,红外图像见图4(b)、4(f)。

粘结树脂和混凝土之间存在一个软弱过渡层,通常比其它两相组成要弱<sup>[12]</sup>,疲劳荷载下,FRP不断反复承受拉力,界面软弱层由于传递剪力而逐渐产生微裂纹。界面软弱层的微裂纹不断分叉、扩展

和产生新的微裂纹,当遇到石子等大粒径粗集料时会沿着石子表面发展,并有一些微裂纹逐渐连通,疲劳损伤持续累积,导致粘结面的抗剪力软化,FRP与混凝土间产生相对滑动。在界面剥离稳定发展过程中,构件的刚度和变形未出现显著变化,在界面快速剥离阶段前没有明显的破坏征兆。

整体来看这个阶段是界面软弱层微裂纹的产生、发展、相互作用以及最后形成一个界面宏观剥离裂纹的过程,但此时界面裂纹非常细小,界面剥离发展缓慢,FRP表面的红外温度场只有局部的变化,主要发生在跨中附近和有初始损伤的区域。当界面微裂纹逐渐贯通连接在一起时,就进入下一个界面剥离快速发展的阶段。

在界面剥离快速发展阶段,在循环荷载作用下,跨中部位FRP温度首先明显升高,高温条带向梁一端发展,见图4(c)、4(g),界面的有效承载面积不断减小,界面持续剥离,FRP与混凝土梁界面发生明显的相对错动,最后当FRP的粘结长度小于必需的最小锚固长度(约6 cm)时,界面发生突然的脆性断裂,粘结面从梁一端完全分离,导致整个构件失效。从红外图像(图4(d)、4(h))的变化可以看出,最终FRP剥离的部分和界面初始损伤较严重的部位并不完全一致,FRP剥离的扩展更多受到混凝土梁斜剪裂缝的位置和倾斜方向的影响,见图5。试验过程中可以观察到混凝土斜裂缝相对于梁下表面明显的上下错动,这会在界面上产生很大的正应力<sup>[13]</sup>,从而加速界面的破坏。

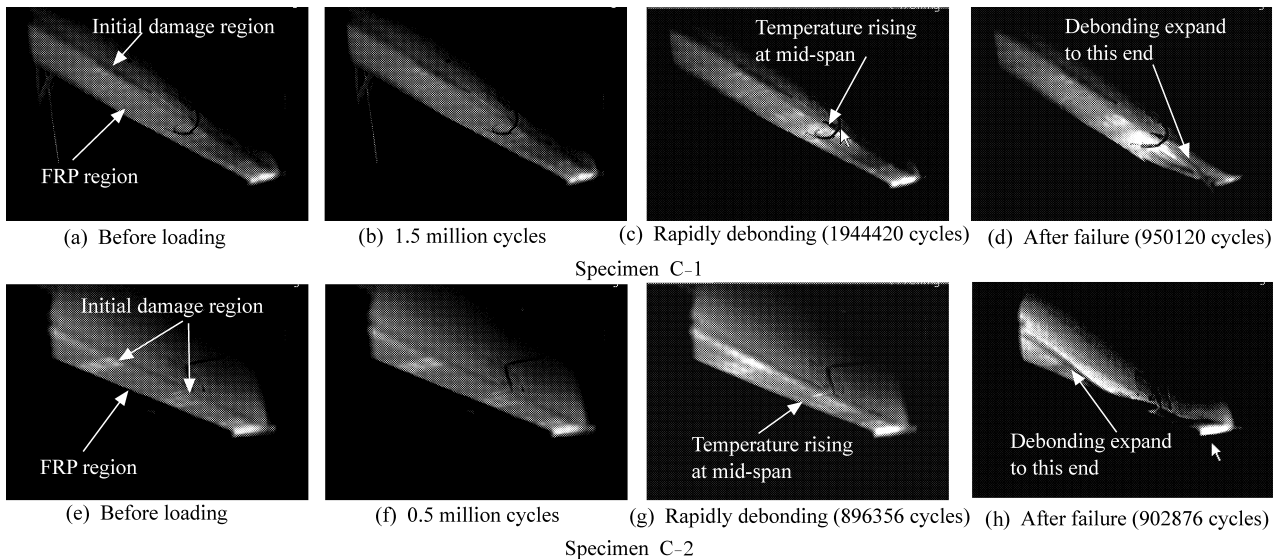
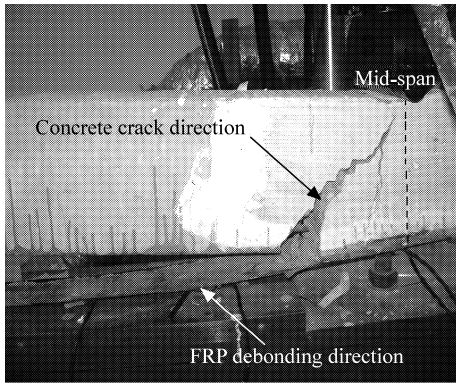
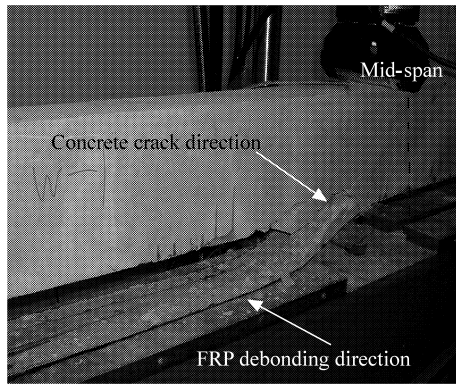


图4 不同加载阶段红外图像

Fig. 4 Infrared thermograms at different loading phases



(a) Specimen C-1



(b) Specimen C-2

图5 混凝土疲劳裂缝与FRP剥离方向

Fig.5 Concrete shear crack and FRP debonding direction

这个阶段伴随着界面剥离的噼啪声音，是一个快速完成的过程。一般情况下，FRP剥离后承拉钢筋受力急剧增大，一般会导致屈服破坏的发生。界面剥离发生在粘结剂与混凝土间的软弱层，剥离的FRP会附着一层混凝土，相较于静载，疲劳破坏面更加光滑平整，结合面上混凝土粗骨料显露但一般没有剥落的现象，如图6所示。

### 3 界面疲劳损伤的演化规律

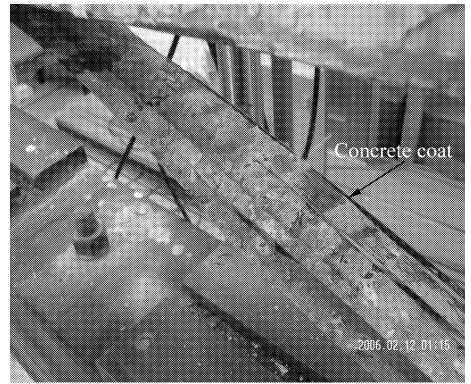
本文中定义界面剥离面积与界面总面积的比值为损伤因子，包括界面宏观裂纹阶段，是一个广义上的损伤，即

$$D = A_{deb} / A_{tot} \quad (1)$$

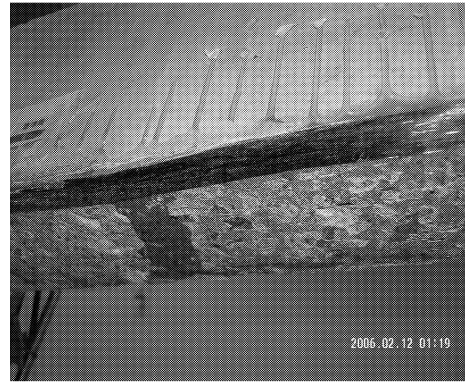
式中： $D$ 表示界面的损伤； $A_{deb}$ 表示界面的失效面积； $A_{tot}$ 表示界面总面积。

根据试件C-1和试件C-2的红外试验数据，得到界面损伤与循环加载次数的关系，见图7。

FRP-混凝土界面的疲劳损伤演化具有较好的规律性，可分为3个阶段：第I阶段，当 $0 \leq n/N < 0.005$ 时， $n$ 表示加载次数， $N$ 表示实测的加固构



(a) Specimen C-1



(b) Specimen C-2

图6 疲劳破坏后FRP表面细节

Fig.6 FRP interfacial details after fatigue failure

件疲劳寿命，界面的疲劳损伤萌生，此时界面损伤（初始损伤）较小，2个试件初始损伤值均小于0.05；第II阶段，当 $0.005 \leq n/N < 0.995$ 时，界面的疲劳损伤平稳缓慢增长，变化幅度较小；第III阶段，当 $0.995 \leq n/N \leq 1$ 时，界面的损伤快速增长至临界值，并导致加固梁的破坏。

在本试验条件下，一般在几十次循环加载内混凝土裂缝就会产生，界面剥离萌生；界面快速剥离阶段也一般在6000次左右的加载循环内完成。因此，对于实际加固构件的力学性能分析，通常可忽略第I和第III阶段，第II阶段是界面疲劳寿命的主要阶段。

对于第II阶段，界面损伤发展规律为

$$\text{试件 C-1} \quad D = 0.0213n/N + 0.1094 \quad (2)$$

$$\text{试件 C-2} \quad D = 0.0356n/N + 0.0165 \quad (3)$$

本试验条件下(具体见1.2节)，2个试件界面损伤扩展速率 $dD/dn$ 分别为 $0.0213/N$ 、 $0.0356/N$ ，平均为 $0.0285/N$ ；这个值与荷载水平和加载频率等参数有关，本文中只讨论了荷载水平30.0kN、加载频率10Hz情况下的界面损伤发展现象，更多

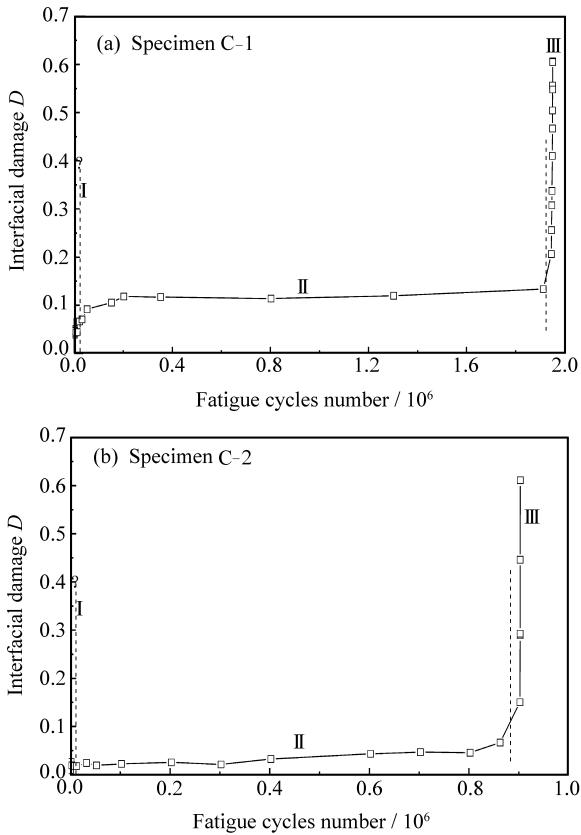


图 7 界面损伤随加载次数的变化

Fig. 7 Interfacial damage versus loading cycles

的试验和更详细的分析是非常有必要的。由于界面剥离一般仅从跨中向梁的一端发展, 另一端则没有发生剥离, 见图 5, 破坏时界面损伤值约 0.62。

#### 4 界面的疲劳传力效果

界面起着传递荷载的作用, FRP 应力的疲劳加载历程直接显示了界面疲劳力学性能的变化。本次实验中, 跨中截面 FRP 应力  $\sigma_{max}$  的变化规律如图 8 所示。由于疲劳加载过程中应变片失效, 有些试件只测到部分数据。

从试验数据可以看出, 在疲劳加载的初期(约初始 0.05 倍的疲劳寿命期内, 和界面损伤的第 I 阶段对应), 由于 RC 梁跨中主裂缝的产生和构件刚度的降低导致 FRP 应力快速上升; 随后的稳定发展阶段对应界面损伤的第 II 阶段, 在这个阶段 FRP 应力缓慢地下降。最终构件的破坏阶段是迅速完成的, FRP 应变快速上升, 表现为脆性的界面破坏, 如 30.0 kN 组的试件 C-3 所示; 由于 FRP 上的应变片往往在最终破坏前已损坏, 其它的试件

测得的 FRP 应力没有体现出这个阶段。

FRP 应力和归一化疲劳寿命拟合直线斜率在  $-0.042$  到  $0.030$  之间, 平均斜率  $-0.034\sigma_{max}/N$ 。整体来看, FRP 应力在疲劳寿命的主要阶段内变化幅度微小, 变化历程平稳, 表明界面的疲劳力学性能是稳定的。

#### 5 界面疲劳寿命

应力-疲劳寿命常用函数表达形式:

$$\sigma_{max}^\beta N = C \tag{4}$$

该式表示在给定应力比  $R$  或者平均应力  $\sigma_m$  的条件下应力幅  $\sigma_{max}$  与寿命  $N$  之间的幂函数关系。 $\beta$  和  $C$  是 2 个常数, 与材料性质、试件结构和加载方式等有关, 由试验确定。将式(4)两边取对数, 有

$$\lg N = \lg C - \beta \sigma_{max} \tag{5}$$

对于三点弯曲荷载作用下的 FRP 加固 RC 梁界面疲劳寿命,  $S-N$  曲线的横坐标可用 FRP 应力表示, 纵坐标为加固梁的容许疲劳寿命。根据疲劳试验数据, 可得到 FRP 加固梁容许疲劳寿命的变化曲线。

由于变化幅度很小, 在分析中取 FRP 应力为其均值, 将相应实验数据代入上式, 根据最小二乘法求得公式(5)中的常数:  $\beta = 2.342 \times 10^{-3}$ ,  $\lg C = 7.5633$ 。则在本文的试验条件下, 由 FRP 应力所决定的界面疲劳寿命的公式为

$$\lg N = 7.5633 - 2.342 \times 10^{-3} \sigma_{max} \tag{6}$$

图 9 表明  $\sigma_{max}$  与  $\lg N$  基本成线性关系, 理论预测曲线与实验值基本一致。根据式(6), 测定 FRP 上的应力, 就可方便地预测 FRP 加固 RC 梁界面的疲劳寿命。

根据本课题组 FRP 加固 RC 梁静载试验, FRP、主筋和混凝土的应力随静载加载的典型变化规律如图 10 所示, 在钢筋屈服时, FRP 的应力为 576 MPa, 钢筋断裂以后 FRP 应力快速增长。和静载的试验结果对比可以发现, 疲劳荷载水平为 25~35 kN 时, 钢筋已经达到屈服强度, 试验中构件的受力情况与工程中应用承载力极限状态理论设计的 RC 梁构件一致。

根据式(6), 当疲劳寿命达到  $2 \times 10^6$  次时(相当于桥梁服役 20 年), FRP 的最大循环应力为 539 MPa, 接近静载钢筋屈服时 FRP 的强度。显然, 此时远未达到 FRP 的极限强度 3500 MPa, 也小于静载条件下界面破坏时 FRP 的应力

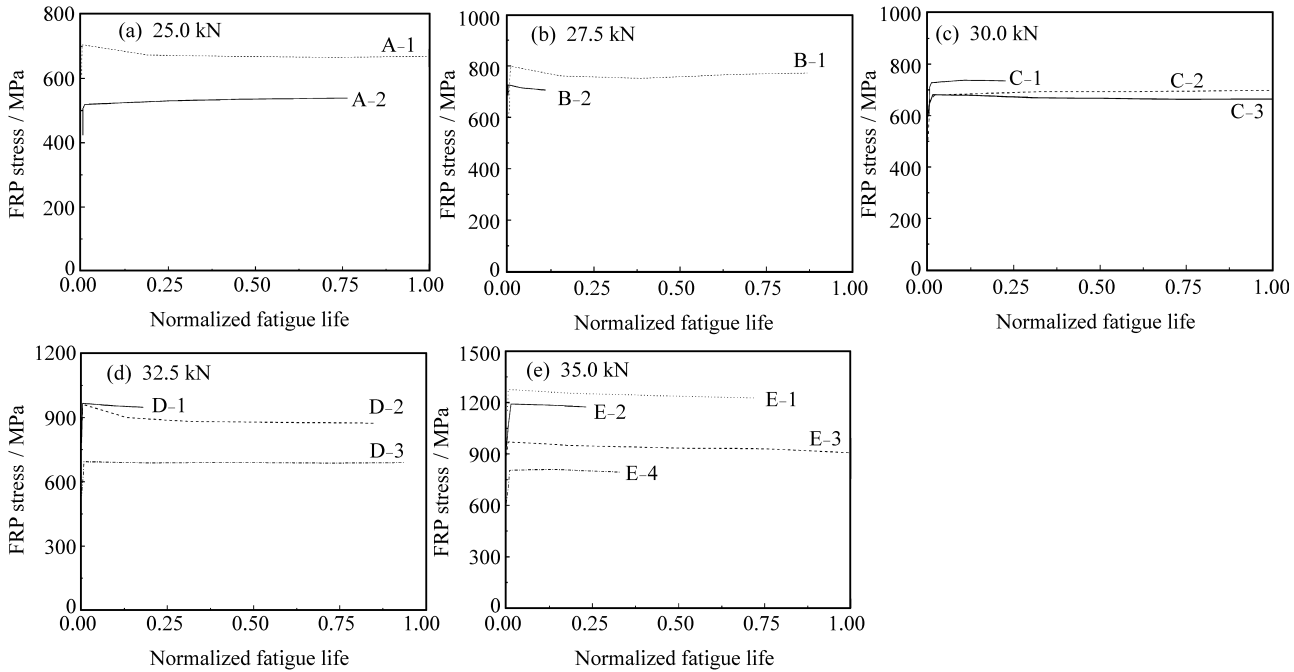


图 8 不同荷载水平下跨中 FRP 应力变化规律  
 Fig. 8 Change of FRP stress under different loading levels

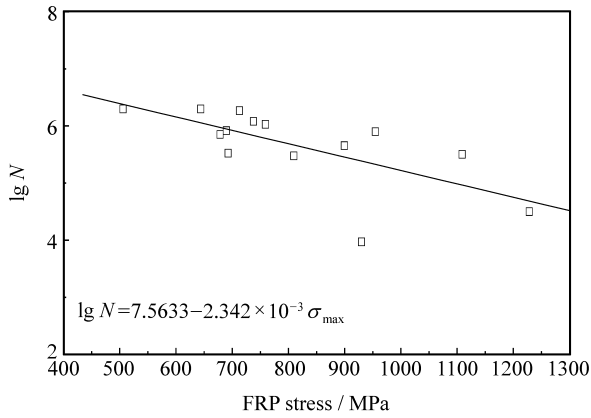


图 9 界面疲劳寿命的预测  
 Fig. 9 Prediction of interfacial fatigue lives

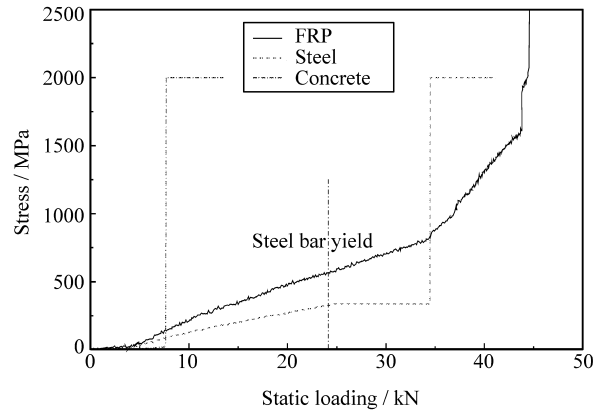


图 10 应力随静载加载的变化  
 Fig. 10 Stress versus static loading

1650 MPa, 界面的疲劳破坏会显著地制约材料高强性能的充分利用。

## 6 结论

(1) 通电加热可以在 FRP 中形成稳定的温度场, FRP-混凝土界面粘结区和剥离区有明显的温度差异, 在本次试验中平均温差约 8℃, 可以用红外探测仪器准确地分辨记录。

(2) 红外检测结果显示界面疲劳损伤的发展过程可分为萌生、稳定发展和失稳发展 3 个阶段, 其

中损伤萌生和失稳阶段在数百到数千次左右的循环加载内完成, 稳定扩展阶段是界面疲劳寿命的主要部分, 约占总寿命的 99%。

(3) 在界面疲劳寿命的主要阶段内界面的疲劳损伤较小, 发展缓慢, FRP 应力也变化平稳, 表明加固的力学效果是稳定的。

(4) 界面的疲劳寿命主要取决于 FRP 应力, 在本次试验条件下, 当疲劳寿命达到  $2 \times 10^6$  次时, FRP 的最大循环应力为 539 MPa。界面的疲劳破坏会显著地制约 FRP 材料强度性能的充分利用。

## 参考文献:

- [1] Meshgin Pania, Choi Kyoung-Kyu, Reda Taha Mahmoud M. Experimental and analytical investigations of creep of epoxy adhesive at the concrete - FRP interfaces [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2009, 29(1): 56-66.
- [2] Oehlers D J, Griffith M C, Mohamed Ali M S. Ductility components and limits of FRP - plated RC structures [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(4): 1538 - 1543.
- [3] 王利民, 卢俊杰, 刘灿昌, 等. 碳纤维强化板及其加固混凝土梁的力学性能[J]. *复合材料学报*, 2008, 25(3): 160-167.  
Wang Limin, Lu Junjie, Liu Canchang, et al. Mechanical properties of CFRP and its reinforced concrete beams [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2008, 25(3): 160-167.
- [4] Aidoo John, Harries Kent A, Petrou Michael F. Full-scale experimental investigation of repair of reinforced concrete interstate bridge using CFRP materials [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2006, 11(3): 350-359.
- [5] Bizindaviyi L, Neale K W, Erki M A. Experimental investigation of bonded fiber reinforced polymer - concrete joints under cyclic loading [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2003, 7(2): 127-134.
- [6] 中国工程建设标准化协会. 碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规程(CECS 146)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.  
China Association for Engineering Construction Standardization. Technical specification for strengthening concrete structures with carbon fiber reinforced polymer laminate (CECS 146) [S]. Beijing: China Plan Press, 2003.
- [7] Rami Haj-Ali, Wei Bo-Siou, Shane Johnson, Rani El-Hajjar. Thermoelastic and infrared-thermography methods for surface strains in cracked orthotropic composite materials [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, 75(1): 58-75.
- [8] Choi Choul-Jun, Kim Jae-Yeol, Yang Dong-Jo, Song Kyung-Seok, Ahn Yeon-Shik. A study on the application infrared thermography camera for the 7FA gas turbine blade covering crack detecting [J]. *Key Engineering Materials*, 2007, 340/341: 483-488.
- [9] 李友竹, 王建勋. 混凝土结构物与植物叶片之红外热像侦测研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2007, 26(3): 182-186.  
Li Yu-chu, Wang Jianxun. Infrared thermography target detection between concrete structure and plant leaf [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, 26(3): 182-186.
- [10] 余曼丽, 潘伟, 朱若寒. 红外成像检测技术在工程中的应用及其发展[J]. *国外建材科技*, 2007, 28(3): 51-54.  
Yu Manli, Pan Wei, Zhu Ruohan. Application of IR thermograph and its development in engineering [J]. *Science and Technology of Overseas Building Materials*, 2007, 28(3): 51-54.
- [11] GB 50176-93. 民用建筑热工设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1993.  
GB 50176-93. Thermal design code for civil building [S]. Beijing: China Plan Press, 1993.
- [12] 王振领. 新老混凝土粘结理论与试验及在桥梁加固工程中的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.  
Wang Zhenling. Study on bond theory and test of new and old concrete and its application in bridge strengthening engineering [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [13] Deng Jiandong, Huang Peiyan, Guo Xinyan, Deng Jun. Analysis of interfacial debonding of RC beams strengthened with FRP [J]. *Advanced Materials Research*, 2008, 33-37: 47-54.