

文章编号:1673-2049(2015)02-0098-06

# 基于梁式试验法的 CFRP 布与钢材界面 动态粘结性能研究

杨 进,霍静思,肖 岩

(湖南大学 建筑安全与节能教育部重点实验室,湖南 长沙 410082)

**摘要:**针对碳纤维增强复合材料(CFRP)加固结构构件常发生界面过早剥离破坏的问题,进行了4个粘贴CFRP布试件的冲击试验和2个静力对比试验,主要研究CFRP与钢材界面动态粘结性能。从界面的破坏形态、CFRP应变分布以及荷载-滑移曲线等方面,对冲击荷载和静力荷载下CFRP与钢材界面动态粘结性能进行了对比分析。在试验的基础上,提出了基于梁式试验法的局部粘结应力-滑移本构关系计算方法。结果表明:冲击荷载下CFRP应变分布曲线与静力荷载下相比更加陡峭;界面极限动态承载力有所提高。

**关键词:**CFRP;梁式试验法;界面;粘结性能;冲击荷载;静力荷载

**中图分类号:**TU392.1

**文献标志码:**A

## Research on Dynamic Bond Behavior of CFRP Sheet-steel Interface Based on Beam Test Method

YANG Jin, HUO Jing-si, XIAO Yan

(Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of China Ministry of Education,  
Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China)

**Abstract:** According to the problem that carbon fiber reinforced polymers (CFRP) prematurely debond from the strengthened structure members, four specimens bonded with CFRP sheet under impact load and two specimens under static load were tested. The dynamic bond behavior of CFRP sheet-steel interface was mainly investigated. The failure modes, the strain distribution of CFRP as well as load-slip curves under impact load were compared with those of static load to study dynamic interfacial bond behavior. Based on the tests, calculation method of bond-slip constitutive relations based on beam test method was proposed. The results show that the strain distribution gradient of CFRP sheet under impact load is sharper than those under static load, and interfacial ultimate bond strength is increased.

**Key words:** CFRP; beam test method; interface; bond behavior; impact load; static load

## 0 引言

碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)是一种高性能新型复合材料,近年

来,作为一种理想的加固材料已经在混凝土结构加固中得到广泛应用<sup>[1]</sup>。鉴于CFRP材料优良的力学性能,CFRP加固钢结构技术的研究和应用得到了广泛关注<sup>[2-7]</sup>。CFRP与钢材之间的界面剥离破坏

收稿日期:2014-09-17

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2012CB026200)

作者简介:杨 进(1989-),男,安徽芜湖人,工学硕士研究生,E-mail:yjinbluesky@163.com。

是 CFRP 加固修复钢结构最常见的破坏模式之一, 由于过早地发生剥离破坏, 使得 CFRP 在较低的应力水平就退出了工作, 因而没能发挥其高强度的优点。CFRP 与钢材界面粘结性能的研究已经成为了 CFRP 加固钢结构技术的热点<sup>[8-13]</sup>。然而, 对 CFRP 与钢材界面粘结性能的研究主要还是针对准静态荷载作用, 对动态界面粘结性能的认识比较缺乏, 仅有 Al-Zubaidy 等<sup>[14-15]</sup>采用落锤冲击试验方法进行了界面剪切和受拉粘结强度试验研究, 但未深入研究界面粘结性能。单面或双面搭接拉剪试验方法很难用来进行冲击试验, 需要额外的冲击力转换装置<sup>[16]</sup>。因此, 本文采用梁式试验方法对 CFRP 布与钢材界面粘结性能进行落锤冲击试验研究, 探讨冲击荷载对界面极限承载力及 CFRP 应变分布的影响, 讨论基于梁式试验方法的界面局部粘结-滑移计算方法。

## 1 试验方案

### 1.1 试验材料

CFRP 布采用 HITEX-C300,其弹性模量、拉伸强度分别为 239.6、3.4 GPa,极限应变为 0.015;钢材为 Q235 钢,其弹性模量、屈服强度、极限强度分别为 189.9 GPa,309.2 MPa,469.6 MPa,屈服应变为 0.018;粘结剂采用 ESA-T 型碳纤维加固专用胶,其弹性模量、拉伸强度、钢-钢拉剪强度、剪切模量分别为 3 200 MPa,65 MPa,20 MPa,1 185 GPa。

表 1 主要试验结果

**Tab. 1 Main Test Results**

试件编号	$L_p/\text{mm}$	$b_p/\text{mm}$	$n$	$h_0/\text{mm}$	$F_u/\text{kN}$	$P_u/\text{kN}$	$\dot{\epsilon}/\text{s}^{-1}$	破坏形式
SC-200-50-2a	200	50	2		24.24	25.76		剥离
SC-200-50-2b	200	50	2		24.08	25.59		剥离+撕裂
D1C-200-50-2a	200	50	2	150	25.50	27.09	2.49	剥离
D1C-200-50-2b	200	50	2	150	24.65	26.19	2.46	剥离
D3C-200-50-2a	200	50	2	350	34.33	36.48	5.48	剥离
D3C-200-50-2b	200	50	2	350	37.53	39.88	5.72	剥离

注:试件编号中 S 表示静力试验;D 表示动态试验;1,3 分别表示冲击高度 150,350 mm;C 表示 CFRP;a,b 表示重复试验; $F_u$  为跨中极限荷载; $P_0$  为界面承载力; $\dot{\epsilon}$  为应变速率; $n$  为 CFRP 层数; $h_0$  为冲击高度。

### 1.3 试验测量及加载装置

### 1.3.1 应变片布置

界面是 2 种材料在接触面上形成的一种厚度极薄的界面相或界面层<sup>[17]</sup>, 实际中很难观测到其力学性能, 一般通过在 CFRP 表面上布置应变片来间接研究界面粘结性能。在距跨中 30 mm 处横向布置 3 个应变片, 编号依次为 S1a, S1b, S1c; 从粘结区起点至终点沿中线布置 10 个应变片, 编号依次为 S2, S3, ..., S11。应变片布置位置见图 2。

### 1.2 试件设计与制作

试验所采用的钢梁型号为热轧  $H200 \times 100 \times 5.5 \times 8$  mm, 净跨为 850 mm, 跨中下翼缘及腹板切割成 2~3 mm 的缝隙。靠近下翼缘处钻 2 个螺栓孔, 用连接板拼接好, 防止在试件制作和搬运过程中受弯导致下翼缘表面不平整, 影响碳纤维布的粘贴。为保证 CFRP 与钢材界面有良好的粘结, 事先对钢梁下翼缘表面进行打磨除锈; 为防止 CFRP 分层破坏, 将 CFRP 布浸渍 10 min 左右。在粘结区域前布置一段非粘结区, 通过在跨中缝隙两侧各粘贴宽为 50 mm 的透明胶带分隔粘结剂来实现。试件左侧用 CFRP 布进行横向锚固, 只考察右侧 CFRP 布与钢界面粘结性能。粘贴 CFRP 布后的试件常温下养护 7 d。试件截面尺寸见图 1, 其中,  $L_p$  为 CFRP 布粘贴长度,  $b_p$  为 CFRP 布宽度。共设计了 6 个粘贴 CFRP 布的钢梁, 试验结果见表 1。

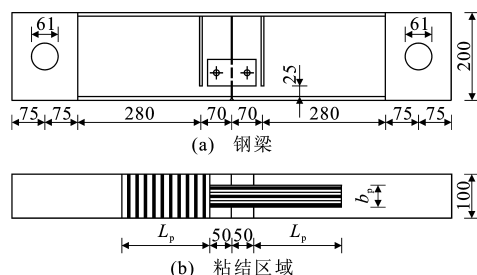


图 1 试件截面尺寸(单位:mm)

**Fig. 1 Sectional Dimensions of Specimen (Unit:mm)**

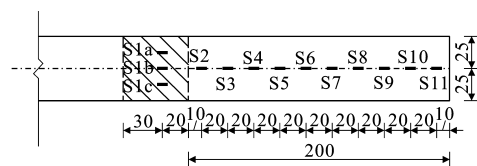


图 2 应变片布置(单位:mm)

**Fig. 2 Layout of Strain Gauges (Unit:mm)**

### 1.3.2 试验装置

静力试验采用三点加载方式,CFRP 应变每隔

0.5 s 通过 DH3815-N 静态应变测试仪自动采集。冲击试验在湖南大学高性能落锤试验机上完成, CFRP 应变通过多通道动态数据采集仪 NI PXIe-1006Q 进行采集, 采样频率为 500 kHz, 见图 3。

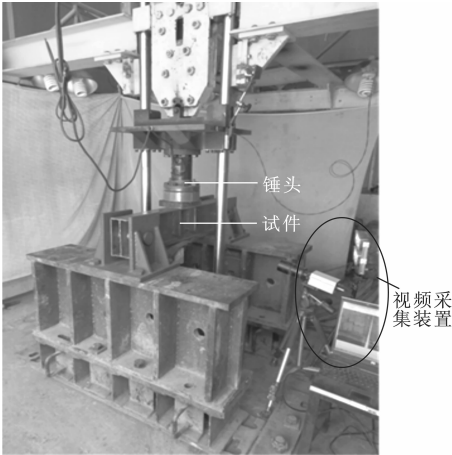


图 3 冲击试验装置  
Fig. 3 Impact Test Set-up

2 试验结果

2.1 破坏形态

试件最终发生 CFRP 剥离破坏或纵向错位撕裂, 见图 4。纵向撕裂是由于 CFRP 条带纵向错位导致受力不均匀引起的。试验结束后, 从剥离后的钢材表面上发现仅有少量粘结剂晶体, 粘结层有明显的横向裂纹, 浅蓝色粘结层变为玻璃损伤状, 但主要表现为粘结剂与钢材之间的剥离破坏。

2.2 CFRP 应变分布规律

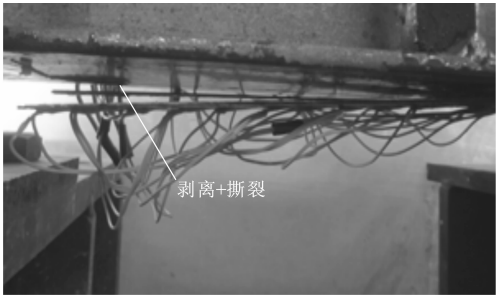
图 5 为 CFRP 沿着粘贴长度方向的应变分布, 零点位置处应变为非粘结区 3 个应变片测得应变的平均值。从图 5(a)可以看出, 当荷载达到极限荷载前, CFRP 传力区域比较小, 只有靠近粘结区起点 50~70 mm 区域内 CFRP 有应变发展, 超出该范围外应变几乎为 0。从图 5(b)可以看出, 冲击荷载下 CFRP 应变分布与静力荷载下具有相似的特点, 但是在达到极限荷载前, 应变梯度明显大于静力荷载下的。

2.3 界面承载力计算

CFRP 与钢材界面承载力是评价界面粘结性能的重要指标。钢梁上翼缘厚度仅为 8 mm, 可以假定为铰接, 则界面承载力  $P_u$  可按下式计算

$$P_u = \frac{F_u L}{4H} \tag{1}$$

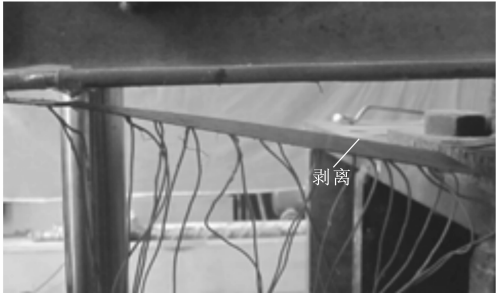
式中:  $L$  为梁的净跨, 取 850 mm;  $H$  为梁的截面高



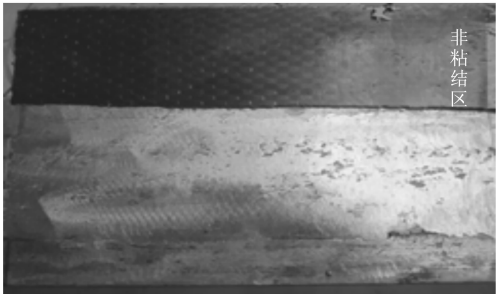
(a) 试件SC-200-50-2aCFRP剥离



(b) 试件SC-200-50-2a界面



(c) 试件D3C-200-50-2bCFRP剥离



(d) 试件D3C-200-50-2b界面

图 4 CFRP-钢界面典型的破坏形态

Fig. 4 Failure Modes of CFRP-to-steel Interface

度, 取 200 mm。  
 $P_u$  计算结果见表 1, 界面动态承载力随着冲击高度的增加而有明显的增加。

2.4 荷载-滑移曲线

图 6 为试验所得的静态和动态荷载作用下荷载-滑移 ( $P$ - $S$ ) 曲线。从图 6 可以看出: 当界面滑移量达到 0.1 mm 时, 荷载达到极限值; 随着滑移量的进一步增加, CFRP 开始从钢梁上剥离, 但界面承载力基本保持不变。随着冲击高度的增加, 极限滑移量有着明显的增加。

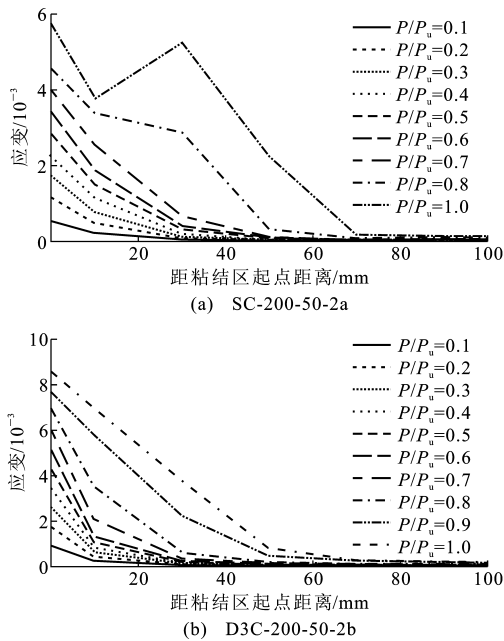


图5 CFRP应变分布

Fig. 5 Strain Distributions of CFRP

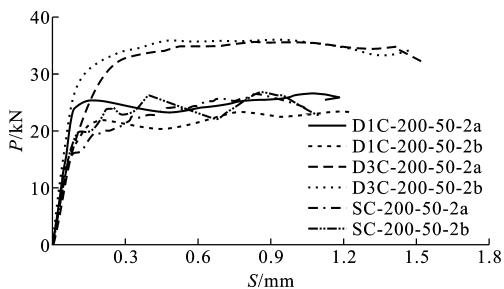


图6 荷载-滑移曲线

Fig. 6 Load-slip Curves

### 3 CFRP与钢材界面局部粘结-滑移关系曲线

#### 3.1 界面粘结应力计算

CFRP厚度方向尺寸远小于平面内尺寸,其抗弯刚度基本可以忽略,因此可以假定CFRP与钢材界面之间仅传递剪应力。粘结剪应力按式(2)计算

$$\tau_{i \sim i+1} = \frac{E_p t_p (\epsilon_{p,i} - \epsilon_{p,i+1})}{(L_{i+1} - L_i)} \quad (2)$$

式中: $\tau_{i \sim i+1}$ 为第*i*个应变片与第*i+1*个应变片之间的粘结剪应力, $i=1 \sim 11$ ;  $E_p$ 为CFRP弹性模量; $t_p$ 为CFRP粘贴厚度; $\epsilon_{p,i}$ 为第*i*个应变片测得的应变值, $\epsilon_{p,12}=0$ ;  $L_i$ 为第*i*个应变片到粘结区域起点的距离, $L_{12}=200$  mm。

根据文献[18]研究结果,可以认为本文应变率范围内CFRP弹性模量没有提高。因此,仍按式(2)计算冲击荷载下CFRP与钢材界面的粘结剪应力。

#### 3.2 局部滑移量计算

梁式试验模型如图7所示,其中, $F, F'$ 为跨中集中荷载, $P, P'$ 为界面荷载。假定CFRP粘结区终点与钢梁的相对滑移为0。由于破坏发生在粘结剂与钢材之间的界面处,则截面*x*位置处的滑移 $\delta$ 可按式(3)计算

$$\left. \begin{aligned} \delta &= S_p - S_t - S_a \\ S_p &= \int dS_p = \int \epsilon_p dx \\ S_t &= \int dS_t = \int \epsilon_t dx \\ S_a &= \int dS_a = \int_0^{t_a} \gamma dt = \int_0^{t_a} \frac{\tau}{G} dt = t_a \frac{\tau}{G} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $S_p$ 为截面*x*处CFRP拉伸变形; $S_t$ 为截面*x*处钢梁下翼缘弯曲变形; $S_a$ 为胶层上下层剪切变形; $\epsilon_p$ 为CFRP应变; $\epsilon_t$ 为钢材应变; $\gamma$ 为胶层剪切应变; $t_a$ 为胶层的厚度; $\tau$ 为截面*x*处界面粘结剪应力; $G$ 为胶层剪切模量。

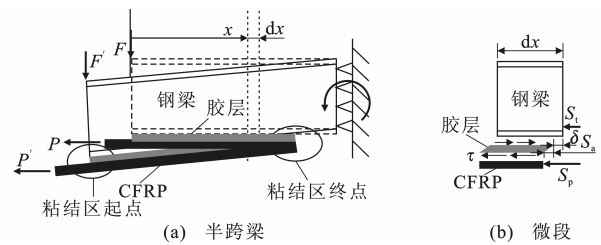


图7 梁式试验界面滑移模型

Fig. 7 Interface Slip Model of Beam Test

下面分别对这3种变形进行计算:

##### (1) CFRP变形

CFRP变形包括受弯产生的拉伸变形和剪应力产生的剪切变形,而剪切变形是非常微小的,可以忽略不计。CFRP拉伸变形可以通过应变片测得,因此其变形按式(4)计算

$$S_{p,i} = \frac{\epsilon_{p,i} + \epsilon_{p,i+1}}{2} (L_{i+1} - L_i) + S_{p,i+1} \quad i=1 \sim 11 \quad (4)$$

式中: $S_{p,i}$ 为第*i*个应变片位置处CFRP的拉伸变形; $S_{p,12}=0$ 。

##### (2) 钢梁下翼缘变形

钢梁下翼缘的变形包括受弯产生的弯曲变形和剪应力产生的剪切变形,同样剪切变形也是可以忽略不计的。

假定受弯构件保持平截面,CFRP为线弹性材料,即拉应力等于CFRP的弹性模量与其应变的乘积。任一截面应变分布见图8,则截面内力平衡方程为

$$\left. \begin{aligned}
 & E_p \epsilon_p A_p + \frac{1}{2} E_s \epsilon_t b (H-h) - \frac{1}{2} E_s \epsilon_{t,1} (b-t_w) \cdot \\
 & (H-t_f-h) = \frac{1}{2} E_s \epsilon_c b h - \frac{1}{2} E_s \epsilon_{c,1} (b-t_w) \cdot \\
 & (h-t_f) \\
 & M = E_p \epsilon_p A_p (H-h+t_a+\frac{t_p}{2}) + \frac{1}{3} E_s \epsilon_t b \cdot \\
 & (H-h)^2 - \frac{1}{3} E_s \epsilon_{t,1} (b-t_w) (H-t_f-h)^2 + \\
 & \frac{1}{3} E_s \epsilon_c b h^2 - \frac{1}{3} E_s \epsilon_{c,1} (b-t_w) (h-t_f)^2
 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中:  $A_p$  为 CFRP 布横截面面积,  $A_p = b_p t_p$ ;  $b$  为梁翼缘宽度;  $t_f$  为梁翼缘厚度;  $t_w$  为梁腹板厚度;  $E_s$  为钢材的弹性模量;  $h$  为受压区高度;  $\epsilon_t$  为下翼缘下表面应变;  $\epsilon_{t,1}$  为下翼缘上表面应变;  $\epsilon_c$  为上翼缘上表面应变;  $\epsilon_{c,1}$  为上翼缘下表面应变;  $M$  为截面弯矩,  $M = F \Delta L / 2$ ,  $\Delta L$  为截面距支座的距离。

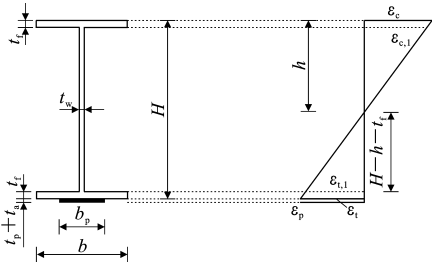


图 8 任一截面应变分布

Fig. 8 Arbitrary Section Strain Distribution

根据平截面假定, 截面任一高度的应变均可以根据式(6)计算

$$\left. \begin{aligned}
 \epsilon_c &= \frac{h}{H-h} \epsilon_t \\
 \epsilon_{c,1} &= \frac{h-t_f}{H-h} \epsilon_t \\
 \epsilon_{t,1} &= \frac{H-h-t_f}{H-h} \epsilon_t
 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5), 可以计算出钢梁下翼缘与 CFRP 应变片位置相对应的应变  $\epsilon_t$ , 则钢梁下翼缘弯曲变形量可以按照式(7)计算

$$S_{t,i} = \frac{\epsilon_{t,i} + \epsilon_{t,i+1}}{2} (L_{i+1} - L_i) + S_{t,i+1} \quad i=1 \sim 11 \quad (7)$$

式中:  $S_{t,i}$  为第  $i$  个应变片相对应位置处钢梁的弯曲变形量;  $S_{t,12} = 0$ 。

### (3) 粘结剂变形

采用湿粘结方式粘贴 CFRP 布, 实际胶层厚度很难控制, 因此, 这里采用一种近似的方式处理, 胶层厚度可按式(8)计算

$$t_a = \frac{T}{n} - t_{sp} \quad (8)$$

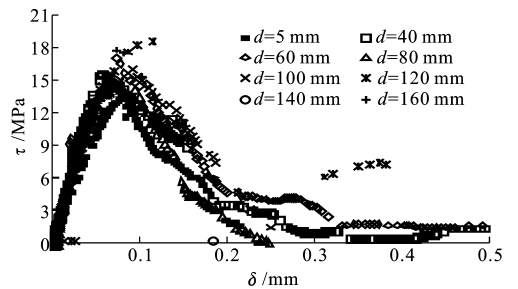
式中:  $T$  为 CFRP 与粘结剂厚度总和;  $t_{sp}$  为单层 CFRP 厚度。

粘结剂厚度约为 0.6 mm, 当剪应力达到峰值时, 胶层的最大变形量  $S_a = 0.008$  mm, 胶层的变形量基本可以忽略。因此, 某点处 CFRP 与钢梁的相对滑移量  $\delta_i$  可以按照式(9)计算

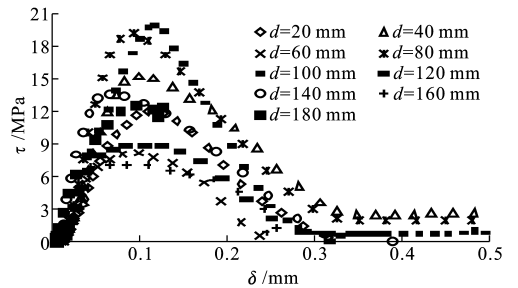
$$\delta_i = S_{p,i} - S_{t,i} \quad i=1 \sim 11 \quad (9)$$

### 3.3 局部粘结-滑移曲线

采用式(1)和式(9)可分别计算不同荷载水平下各点界面局部粘结应力和滑移, 局部粘结应力-滑移关系曲线可将两者组合起来得到, 见图 9。从图 9 可以看出, 试验获得的局部粘结-滑移曲线基本呈双线性形式。



(a) SC-200-50-2a



(b) D3C-200-50-2a

图 9 局部粘结-滑移曲线

Fig. 9 Local Bond-slip Curves

## 4 结 语

(1) 粘结剂与钢材界面是整个 CFRP-钢体系最为薄弱的部位, 无论是静力荷载还是冲击荷载下, 剥离破坏均发生于此, 试件的破坏形态没有发生变化。

(2) 冲击荷载作用下, CFRP 沿着粘贴长度方向的应变分布梯度要明显大于静力荷载作用下的, 说明粘结应力较之静力荷载下的要大。

(3) 梁式试验法是研究冲击荷载作用下界面粘结性能较好的方法, 本文通过梁式试验法获得了界面粘结本构关系。

(4) 本文仅进行了 2 种不同冲击高度的试验研究, 关于 CFRP 与钢材界面动态粘结性能的试验成

果仍较少,今后需要开展大量的试验研究工作。

## 参考文献:

## References:

- [1] 滕锦光,陈建飞,史密斯 S T,等. FRP 加固混凝土结构[M]. 李荣,滕锦光,顾磊,译. 北京:中国建筑工业出版社,2004.  
TENG Jin-guang, CHEN Jian-fei, SMITH S T, et al. FRP Strengthened RC Structures[M]. Translated by LI Rong, TENG Jin-guang, GU Lei. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.
- [2] SHAAT A, SCHNERCH D, FAM A, et al. Retrofit of Steel Structures Using Fiber-reinforced Polymers (FRP): State-of-the-art [C]//TRB. Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting. Washington DC: TRB, 2004: 1-17.
- [3] ZHAO X L, ZHANG L. State-of-the-art Review on FRP Strengthened Steel Structures[J]. Engineering Structures, 2007, 29(8): 1808-1823.
- [4] SEN R, LIBY L, MULLINS G. Strengthening Steel Bridge Sections Using CFRP Laminates[J]. Composites Part B: Engineering, 2001, 32(4): 309-322.
- [5] LIU X, SILVA P F, NANNI A. Rehabilitation of Steel Bridge Members with FRP Composite Materials [C]//ICCC. Proceedings of the First International Conference of Composites in Construction. Porto: ICC, 2001: 613-617.
- [6] 邓军,黄培彦. CFRP 板与钢梁粘结剥离破坏的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(5): 124-129.  
DENG Jun, HUANG Pei-yan. Experimental Study on Debonding Failure of Steel Beams Strengthened with a CFRP Plate[J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(5): 124-129.
- [7] 邓军,黄培彦. CFRP 板加固钢梁界面应力的理论与试验研究[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2007, 35(7): 10-14.  
DENG Jun, HUANG Pei-yan. Theoretical and Experimental Study on Interfacial Stresses of Steel Beam Strengthened with CFRP Plates[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2007, 35(7): 10-14.
- [8] LINGHOFF D, AL-EMRANI M. Performance of Steel Beams Strengthened with CFRP Laminate — Part 1: Laboratory Tests[J]. Composites Part B: Engineering, 2010, 41(7): 509-515.
- [9] XIA S H, TENG J G. Behaviour of FRP-to-steel Bonded Joints[C]//CHEN J F, TENG J G. Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS 2005). Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2005: 411-418.
- [10] YU T, FERNANDO D, TENG J G, et al. Experimental Study on CFRP-to-steel Bonded Interfaces [J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(5): 2279-2289.
- [11] FAWZIA S, AL-MAHAIDI R, ZHAO X L. Experimental and Finite Element Analysis of a Double Strap Joint Between Steel Plates and Normal Modulus CFRP[J]. Composite Structures, 2006, 75(1/2/3/4): 156-162.
- [12] FAWZIA S, ZHAO X L, AL-MAHAIDI R. Bond-slip Models for Double Strap Joints Strengthened by CFRP[J]. Composite Structures, 2010, 92(9): 2137-2145.
- [13] YANG J Q, SMITH S T, FENG P. Effect of FRP-to-metal Bonded Joint Configuration on Interfacial Stresses: Finite Element Investigation [J]. Thin-walled Structures, 2013, 62: 215-228.
- [14] AL-ZUBAIDY H A, ZHAO X L, AL-MAHAIDI R. Dynamic Bond Strength Between CFRP Sheet and Steel[J]. Composite Structures, 2012, 94(11): 3258-3270.
- [15] AL-ZUBAIDY H A, ZHAO X L, AL-MAHAIDI R. Experimental Evaluation of the Dynamic Bond Strength Between CFRP Sheets and Steel Under Direct Tensile Loads[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013, 40: 89-102.
- [16] CHEN J F, LI X Q, MAY I M, et al. A New Test Method for FRP-to-concrete Bond Behavior Under Impact Loading [C]//ISSE. Proceedings of the 12th International Symposium on Structure Engineering. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2012: 53-60.
- [17] 许金泉. 界面力学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.  
XU Jin-quan. The Mechanics of Interface[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [18] AL-ZUBAIDY H A, ZHAO X L, AL-MAHAIDI R. Mechanical Characterization of the Dynamic Tensile Properties of CFRP Sheet and Adhesive at Medium Strain Rates[J]. Composite Structures, 2013, 96(2): 153-164.