

DOI:10.11918/201905011

# 具有荷载作用历史的 CFRP-钢界面粘结性能试验

徐佰顺<sup>1</sup>, 姚亚东<sup>1</sup>, 钱永久<sup>2</sup>, 马 明<sup>3</sup>, 宋 帅<sup>4</sup>

(1. 内蒙古大学 交通学院, 呼和浩特 010070; 2. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031;

3. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 西安 710075; 4. 太原理工大学 建筑与土木工程学院, 太原 030024)

**摘 要:** 为研究荷载作用历史对碳纤维增强复合材料(CFRP)加固钢结构界面粘结性能的影响,开展 4 种界面剪应力水平、6 种持载时间的 CFRP-钢双剪试件长期加载试验,对达到规定加载时间的试件进行静力拉伸破坏.根据 CFRP 轴向应变数据,给出了界面剪应力分布及粘结滑移曲线,考虑到界面蠕变损伤对粘结滑移本构关系的影响,在双线性模型中引入系数 $\beta$ 、 $\eta$ 、 $\gamma$ ,回归分析得到了这 3 个系数的表达式.结果表明:胶黏剂的蠕变变形会引起界面应力重分布,随着时间的增加 CFRP 应变增大,界面剪应力峰值减小;加载 90 d 后,在 12.5 mm 处 B 组、C 组、D 组、E 组试件界面剪应力分别减小了 26.6%、59.2%、73.8%、85.4%;当界面剪应力水平较高时,应考虑界面蠕变损伤对粘结滑移曲线的影响,界面剪应力水平越高持续时间越长,蠕变损伤越显著;当 CFRP 粘贴长度大于有效粘结长度时,界面蠕变损伤对极限承载力没有明显影响.

**关键词:** 钢结构; CFRP-钢界面; 粘结性能; 粘结滑移本构模型; 极限承载力; 蠕变损伤

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2020)09-0167-09

## Experiment on bonding behavior of CFRP-steel interface with load history

XU Baishun<sup>1</sup>, YAO Yadong<sup>1</sup>, QIAN Yongjiu<sup>2</sup>, MA Ming<sup>3</sup>, SONG Shuai<sup>4</sup>

(1. Transportation Institute, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China; 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, China; 4. College of Architecture and Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** To investigate the effects of load history on the bonding properties of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) steel interface, long-term loading tests of CFRP-steel plate double-lap specimens were conducted under four interfacial shear stress levels and six types on loading time, and static tensile tests were carried out on the specimens which reached the specified loading time. Based on the axial strain data of CFRP, the distribution of interfacial shear stress and bond-slip curves were given. In view of the effect of interfacial creep damage on the bond-slip constitutive relations, coefficients  $\beta$ ,  $\eta$ , and  $\gamma$  were introduced into bilinear model, and corresponding expressions were obtained by regression analysis. Results show that the creep deformation of the adhesive caused the redistribution of the interfacial stress. With the increase of time, the peak value of interfacial shear stress decreased and the strain of CFRP increased. After loading for 90 days, the interfacial shear stress of the specimens in groups B, C, D, and E at 12.5 mm decreased by 26.6%, 59.2%, 73.8%, and 85.4%, respectively. When the level of interfacial shear stress was high, the influence of interfacial creep damage on bond-slip curves should be considered, where higher interfacial shear stress and longer duration led to more significant creep damages. When the bonding length of CFRP was longer than the effective bonding length, the interfacial creep damage had no obvious effect on its ultimate bond strength.

**Keywords:** steel structure; CFRP-steel interface; bonding behavior; bond-slip constitutive relations; ultimate bond strength; creep damage

钢结构已广泛应用于交通基础设施工程中,由于设计、施工、运营管理不当,或因超载、锈蚀、疲劳等原因,钢结构会造成一定的损伤.传统的加固方法是将钢板焊接、螺栓连接或粘接到原结构损伤部位,以改善结构的受力,但会产生新的问题,如焊接

残余应力和削弱原截面等.粘贴 CFRP 加固钢结构技术具有高强高效、施工快捷、可操作性、可设计性、不改变结构自重及尺寸等优点,因而适用于多种结构类型和复杂部位的加固.已有研究表明粘贴 CFRP 加固技术能有效提高钢结构的抗弯承载力、整体刚度、抗疲劳能力和耐久性等<sup>[1]</sup>.

CFRP 与钢界面的主要破坏模式之一为界面剥离<sup>[2]</sup>,因此界面的极限承载力和粘结滑移本构关系是国内外学者研究的重点.加固用胶黏剂根据应力-应

收稿日期: 2019-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(51778532);

内蒙古大学高层次人才科研启动金(22200-5175156)

作者简介: 徐佰顺(1986—),男,博士,讲师

通信作者: 宋 帅, songshuai@tyut.edu.cn

变关系的不同,可将其分为线性胶和非线性胶.文献[3-6]均建议采用双线性模型表征线性胶的界面粘结滑移本构关系,但模型中各参数表达式不同,其中峰值滑移量差别最大,文献[3,5]认为峰值滑移量与胶黏剂抗拉强度、剪切模量和胶层厚度有关,而文献[4]则认为其只与胶层厚度有关.文献[7]研究认为可采用三线性模型表征非线性胶的界面粘结滑移本构关系,文献[8]采用三维数字图像技术也得到了相同的结论.文献[9]研究了胶黏剂(线性低强、线性高强、非线性低强、非线性高强)性能对界面粘结性能的影响.文献[10]开展了胶黏剂养护龄期对界面粘结性能的影响.

上述研究是在界面没有任何作用历史情况下进行的.实际上加固结构服役期间是持续受到荷载作用的.胶黏剂作为高分子聚合物,在荷载作用下具有蠕变变形<sup>[11]</sup>,引起的界面蠕变损伤将影响界面的粘结性能.文献[12]给出了持续荷载作用下 CFRP-混凝土界面的粘结滑移本构模型.而目前 CFRP-钢界面还缺乏相关研究,因此,本文开展了 27 个 CFRP-钢双剪试件的长期加载试验,研究了不同荷载作用历史对界面粘结性能的影响,通过试验数据分析,给出了界面粘结滑移本构关系及极限承载力计算公式.

1 试 验

1.1 试验材料及试件设计

试验采用钢板为热轧 Q235B,厚度为 6 mm. CFRP 布为东丽 UT70-30 型,厚度为 0.167 mm. 采用 Araldite XH 180 作为胶黏剂,Araldite 胶的环氧树脂与固化剂质量比为 4 : 1. 试验用材料基本力学参数见表 1. 表 1 中 CFRP 布和胶黏剂力学性能符合 JTG/T J22—2008<sup>[13]</sup>中的有关规定.

| 表 1 材料力学性能                               |              |              |       |                   |
|------------------------------------------|--------------|--------------|-------|-------------------|
| Tab.1 Mechanical properties of materials |              |              |       |                   |
| 材料                                       | 抗拉强度/<br>MPa | 弹性模量/<br>GPa | 伸长率/% | 钢-钢拉伸<br>抗剪强度/MPa |
| CFRP                                     | 3 920        | 237          | 1.71  |                   |
| 胶黏剂                                      | 47           | 2.86         | 1.90  | 16                |
| 钢                                        | 309          | 190          |       |                   |

试件采用双面搭接剪切试件,由两片宽度 30 mm 的单层 CFRP 布粘贴在两块 50 mm 宽的钢板上,如图 1 所示. 每块钢板长度为 300 mm. 文献[6, 14]试验表明,CFRP-钢有效粘结长度不超过 200 mm,为充分观察 CFRP 剥离扩展全过程,取 CFRP 粘贴长度取 200 mm. 另外,在一侧钢板上用宽度为 50 mm 的 CFRP 布缠绕锚固,保证界面剥离发生在另一侧. 为增加试验数据,在每个试件每一

面粘贴 12 个应变片,共计 24 个应变片,如图 1 所示. 为方便试验结果表达,将测试面分别定义为 Q 面和 H 面,应变片编号从加载端到固定端依次定义为 Q0#~Q11#及 H0#~H11#. 其中编号 Q0#和 H0#两个应变片位于两块钢板空隙处的 CFRP 布上.

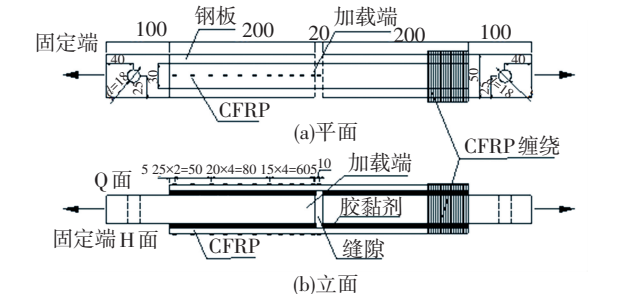


图 1 CFRP-钢板双剪试件及应变片布置 (mm)  
Fig.1 CFRP-steel plate double-lap specimen and layout of strain gauges (mm)

1.2 试件制作及试验方案

将钢板及 CFRP 布按图 1 所示的尺寸加工成型. 采用电砂轮对钢板表面进行打磨,保证钢板表面具有同样的粗糙度,用砂纸磨掉钢板表面毛刺,并用丙酮擦拭,钢板处理完成后需要在 12 h 内进行涂胶粘贴 CFRP 布,加工完成后的试件在实验室条件下养护 7 d.

试验共制作 27 个 CFRP-钢双剪试件,其中 3 个试件进行拉伸破坏试验以确定界面的极限粘结强度,A 组 3 个试件的极限承载力分别为 27.4、28.8、31.6 kN,平均值  $P_u$  为 29.3 kN,标准差为 2.1. CFRP 宽度  $b_c = 30$  mm,CFRP 粘结长度  $l_c = 200$  mm,平均极限剪切强度  $\tau_u = P_u / (2b_c l_c) = 2.44$  MPa. 其他 24 个试件进行持续拉伸试验. 持续施加的界面名义剪应力  $\tau_0$  和持续时间见表 2. B 组、C 组、D 组、E 组界面名义剪应力  $\tau_0$  分别为  $0.22\tau_u$ 、 $0.44\tau_u$ 、 $0.60\tau_u$  和  $0.73\tau_u$ .

| 表 2 试件分组                       |                 |        |        |                 |        |
|--------------------------------|-----------------|--------|--------|-----------------|--------|
| Tab.2 Arrangement of specimens |                 |        |        |                 |        |
| 试件编号                           | $\tau_0/\tau_u$ | 持续时间/d | 试件编号   | $\tau_0/\tau_u$ | 持续时间/d |
| B22D5                          | 0.22            | 5      | D60D5  | 0.60            | 5      |
| B22D10                         | 0.22            | 10     | D60D10 | 0.60            | 10     |
| B22D20                         | 0.22            | 20     | D60D20 | 0.60            | 20     |
| B22D35                         | 0.22            | 35     | D60D35 | 0.60            | 35     |
| B22D60                         | 0.22            | 60     | D60D60 | 0.60            | 60     |
| B22D90                         | 0.22            | 90     | D60D90 | 0.60            | 90     |
| C44D5                          | 0.44            | 5      | E73D5  | 0.73            | 5      |
| C44D10                         | 0.44            | 10     | E73D10 | 0.73            | 10     |
| C44D20                         | 0.44            | 20     | E73D20 | 0.73            | 20     |
| C44D35                         | 0.44            | 35     | E73D35 | 0.73            | 35     |
| C44D60                         | 0.44            | 60     | E73D60 | 0.73            | 60     |
| C44D90                         | 0.44            | 90     | E73D90 | 0.73            | 90     |

长期加载采用自制的加载装置. 待试件规定的加载时间后进行卸载. 卸载后的试件采用 WDW-100 微机电子万能试验机进行拉伸试验, 按位移控制加载, 加载速率为 0.3 mm/min. 采用 TST3826F-L 静态电阻应变仪进行应变采集. 试验加载装置如图 2 所示.



(a)长期加载 (b)双剪试件 (c)静力破坏

图 2 试验装置

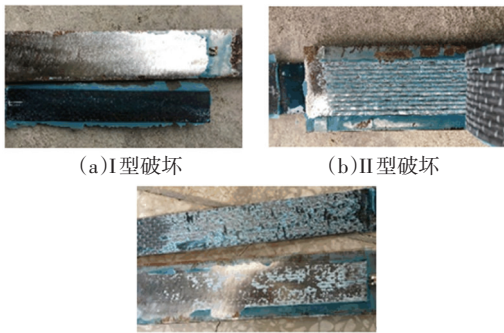
Fig.2 Test setup

2 试验结果及分析

2.1 破坏特征

CFRP-钢界面剥离破坏的模式有 6 种<sup>[15]</sup>: I 型, 钢/胶界面失效; II 型, 胶层内聚破坏; III 型, CFRP/胶界面失效; IV 型, CFRP 层离; V 型, CFRP 断裂; VI 型, 钢板屈服. 双剪试件钢板厚为 6 mm、CFRP 的弹性模量为 237 GPa, 避免了发生 V 型和 VI 型破坏. 胶黏剂能渗透到 CFRP 布, 并与碳纤维丝形成较好地粘结, 故 III 型和 IV 型不易发生.

试验能观察到的破坏模式有 I 型、II 型及两者伴随发生, 如图 3 所示. 所有试件破坏形态中更多的是钢/胶界面失效与胶层内聚破坏伴随发生.



(a)I型破坏 (b)II型破坏

(c)I型和II型伴随

图 3 CFRP/钢界面破坏模式

Fig.3 Failure modes of CFRP-steel interface

2.2 CFRP 应变分布

2.2.1 持续加载阶段 CFRP 应变分布

选取 E73D90 试件 Q 面 CFRP 表面应变分布来说明持续荷载对 CFRP 应变的影响, 如图 4 所示. 总体上 CFRP 应变呈非线性减小, 在加载端端部附近应变数值较大, 距加载端越远应变越小. 同一测点在不同持载时间的应变数值不同, 其应变随着持载时间的增加而增大.

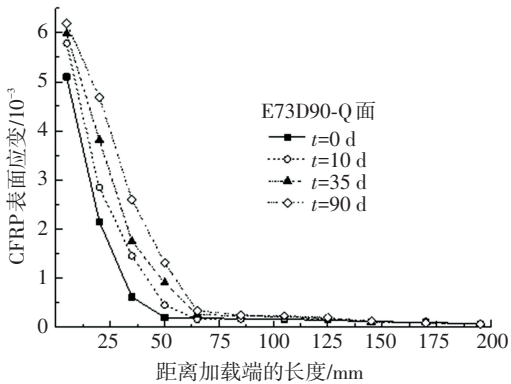
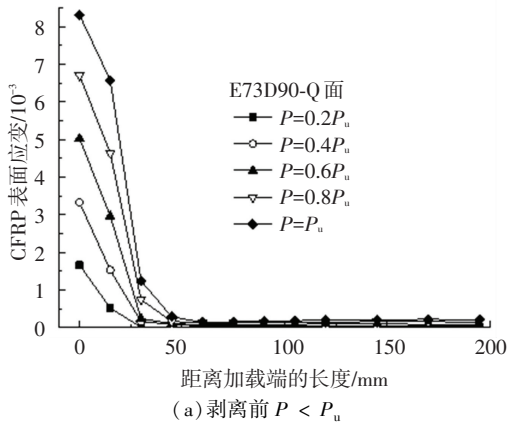


图 4 CFRP 应变分布随时间变化

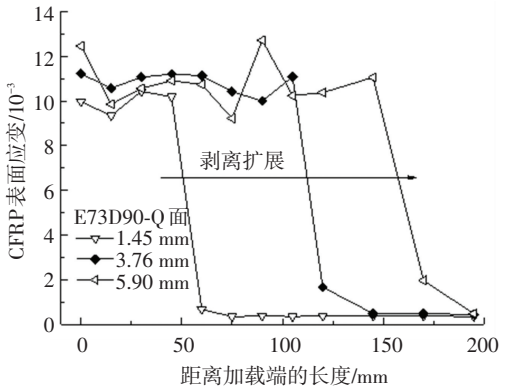
Fig.4 Strain distribution of CFRP varying with time

2.2.2 静力破坏阶段 CFRP 应变分布

图 5 为 E73D90 试件 Q 面 CFRP 应变分布图, 图中 0 mm 处应变由缝隙处 Q0#应变值代替, 其他应变值为 Q1#~Q11#. 当拉伸荷载  $P$  小于极限承载力  $P_u$  时, 界面未发生剥离, CFRP 应变如图 5(a) 所示. 由图可知, 界面剥离前仅在加载端 50 mm 以内 CFRP 应变较大, 随着距离加载端越远应变值越小, 说明只有一部分 CFRP 参与了受力. 另外, 随着  $P/P_u$  比值的增大, 加载端附近 CFRP 应变值逐渐增加. 当  $P$  小于等于  $P_u$  时, CFRP 应变只在加载端一定长度范围内存在, 说明 CFRP 实际参与工作的长度是一定的, 这一长度就是有效粘结长度  $L_e$ , 各组试件的  $L_e$  见表 3.



(a) 剥离前  $P < P_u$



(b) 剥离过程中  $P = P_u$

图 5 CFRP 应变分布

Fig.5 Strain distribution of CFRP

当拉伸荷载  $P$  达到极限承载力  $P_u$  时, 界面开始出现剥离, 已经剥离的 CFRP 布其应变达到最大值且基本保持不变, 该不变的应变长度即为 CFRP 剥离长度. 此后, 虽然两块钢板之间的相对位移不断增大, 但 CFRP 应变分布形状基本不变, 极限荷载基本不变. 随着剥离不断向固定端发展, 直到剩余的 CFRP 粘贴长度小于有效粘结长度, 界面整体剥离.

### 3 CFRP-钢界面粘结性能

#### 3.1 界面剪应力

如图 6 所示, 由静力平衡可得

$$\sigma_c b_c t_c + \tau_c b_c dx = (\sigma_c + d\sigma_c) b_c t_c. \quad (1)$$

式中:  $\sigma_c$  为 CFRP 微段上的拉应力,  $\tau_c$  为 CFRP 微段上界面剪应力,  $t_c$  为 CFRP 的厚度,  $b_c$  为 CFRP 的宽度.

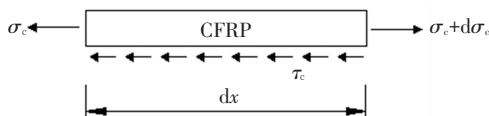


图 6 CFRP 受力图

Fig.6 Force diagram of CFRP

将  $\sigma_c = E_c \varepsilon_c$  代入式(1)中, 并进行整理, 得

$$\tau_c = E_c t_c \frac{d\varepsilon_c}{dx}. \quad (2)$$

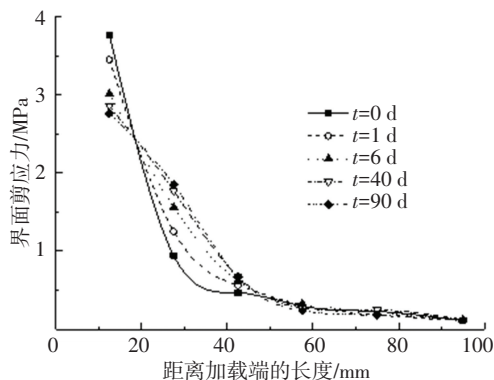
式中:  $E_c$  为 CFRP 弹性模量,  $\varepsilon_c$  为 CFRP 的拉伸应变.

当应变测点布置较多时, 界面剪应力可由差分原理简化求得, 即

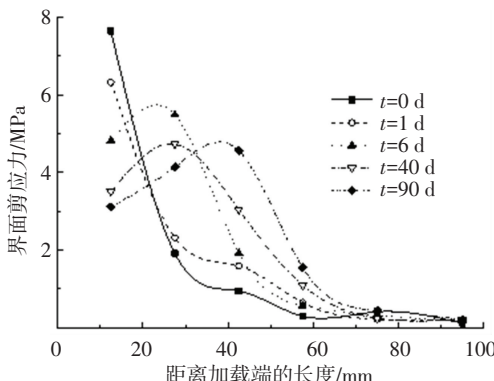
$$\tau_{i \sim i+1} = \left| \frac{E_c t_c (\varepsilon_{c,i+1} - \varepsilon_{c,i})}{L_{i+1} - L_i} \right|. \quad (3)$$

式中:  $\tau_{i \sim i+1}$  为 CFRP 应变测点  $i$  和  $i+1$  中点的剪应力,  $\varepsilon_{c,i+1}$  为 CFRP 应变测点  $i+1$  处的应变值,  $L_{i+1}$  为 CFRP 应变测点  $i+1$  到端部的距离.

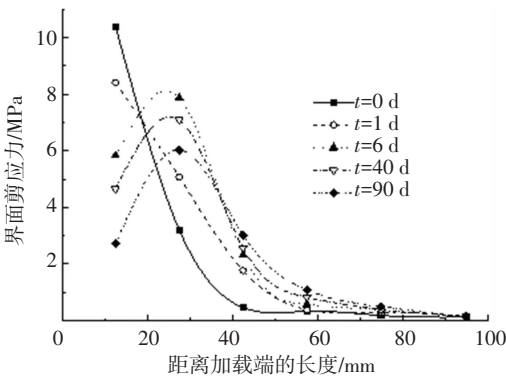
在持续加载阶段, CFRP-钢界面剪应力随加载时间变化如图 7 所示, 由于超过 CFRP 的有效粘结长度后界面剪应力非常小, 因此图中只给出了 100 mm 以内的界面剪应力. 观察图 7 可知, 随着加载时间增加, 界面剪应力发生了应力重分布现象, 峰值剪应力逐渐降低, 原因是界面胶黏剂具有黏弹性特性, 在荷载作用下会发生蠕变变形<sup>[16]</sup>, 胶层蠕变导致应力重分布, 从而端部界面应力集中情况得到缓解. 试件在持续加载 90 d 后, B 组、C 组、D 组和 E 组试件在 12.5 mm 处界面剪应力分别减小了 26.6%、59.2%、73.8%、85.4%, 而其他各点剪应力均有不同程度的增加, 27.5 mm 处剪应力增加最多. 这是因为持续施加的荷载大小不变, 所以不同时刻剪应力曲线与坐标轴所围成的面积应保持不变.



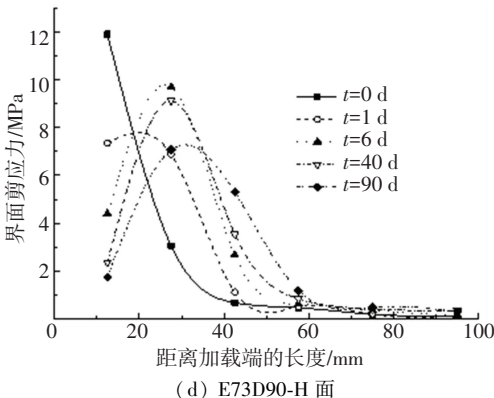
(a) B22D90-Q 面



(b) C44D90-Q 面



(c) D60D90-Q 面



(d) E73D90-H 面

图 7 界面剪应力随时间变化

Fig.7 Interfacial shear stress varying with time

#### 3.2 粘结滑移曲线

CFRP 应变测点  $i$  的局部滑移量  $s_i$  可由积分求得, 即

$$s_i = \int \varepsilon_c dx. \tag{4}$$

改写成数值积分形式:

$$s_i = \sum_{j=0}^{i-1} \frac{(\varepsilon_{c,j+1} + \varepsilon_{c,j})}{2} (L_{j+1} - L_j). \tag{5}$$

则测点  $i$  和  $i + 1$  中点的滑移量为

$$s(x) = \frac{s_i + s_{i+1}}{2}. \tag{6}$$

根据上述公式, 即可计算相邻两个应变片中点的剪应力  $\tau$  和滑移量  $s$ . 图 8 中给出了典型试件 Q 面和 H 面的粘结滑移曲线. 图例中 12.5 mm 表示该点离加载端长度为 12.5 mm.

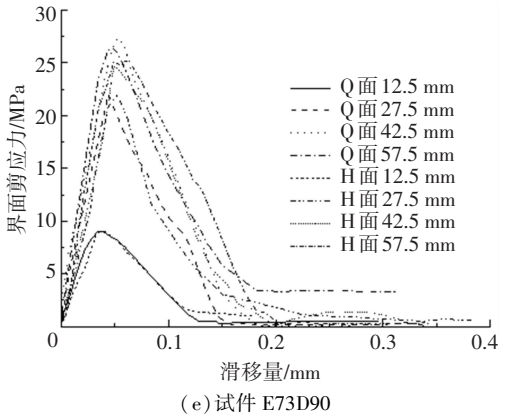
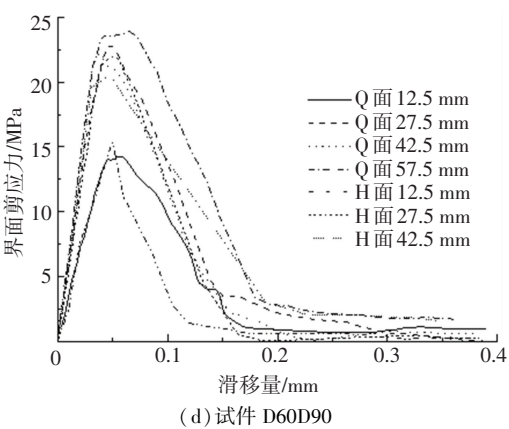


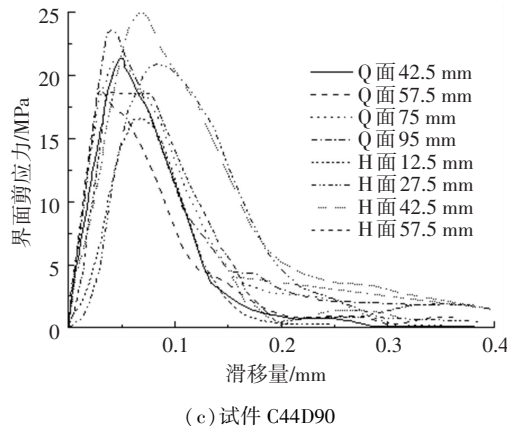
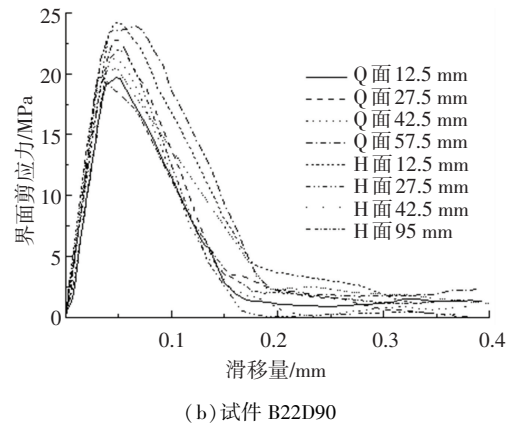
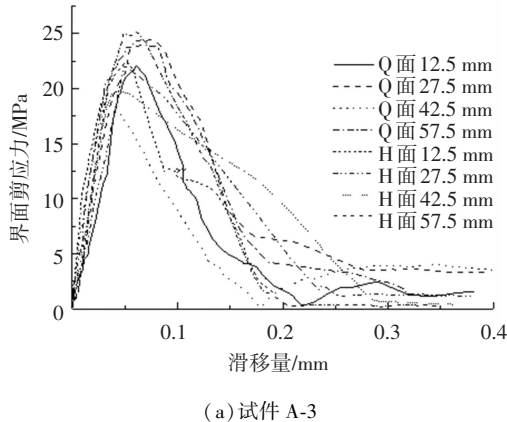
图 8 界面粘结滑移曲线

Fig. 8 Interfacial bond-slip curves

由图 8 可知, 各试件粘结滑移曲线虽有一定差别, 但总体上曲线由上升段和下降段组成, 并具有较高的一致性. 将界面剪应力增量与滑移量增量定义为的界面粘结刚度, 该值的大小直接反映了直线上上升段的斜率. 粘结滑移曲线大致由 4 个阶段组成: 1) 上升段, 滑移量较小而界面粘结刚度较大, 界面呈弹性变形; 2) 软化段, 当滑移量达到一定数值后, 粘结刚度呈现逐渐减小趋势, 即剪应力增大速率降低; 3) 下降段, 一旦界面剪应力超过最大值, 界面随即发生剥离并逐渐扩展, 随着滑移量增加而剪应力降低; 4) 下降段末期, 剪应力由两种材料之间的摩擦力和机械咬合力承担.

对比图 8 中各图的粘结滑移曲线特征点可知, 试件 A-3 和 B22D90 的各点峰值滑移量  $s_0$  和峰值剪应力  $\tau_{\max}$  较为接近, 试件 C44D90 的 H 面 12.5 mm 处的峰值滑移量  $s_0$  和峰值剪应力  $\tau_{\max}$  较其他各点的数值小, 其中  $\tau_{\max}$  表现的最为突出, 这种现象在试件 D60D90 和 E73D90 中更为明显.

根据试验结果整理的各试件峰值滑移量  $s_0$  和峰值剪应力  $\tau_{\max}$  见表 3. 表 3 中  $Q_{1-2}$  表示 Q 面 1#和2#测点之间即离加载端 12.5 mm 处的平均值,  $H_{1-2}$  表示 H 面 1#和2#测点之间的平均值. 分析表中数据: 当持续施加的界面名义剪应力  $\tau_0$  为  $0.22\tau_u$  (B 组)



时,峰值滑移量 $s_0$ 和峰值剪应力 $\tau_{\max}$ 没有明显变化;而当界面名义剪应力 $\tau_0 \geq 0.44\tau_u$  (C组、D组、E组)时,荷载持续作用的时间越长, $s_0$ 和 $\tau_{\max}$ 均越小,且 $\tau_0$ 越大,对应的 $s_0$ 和 $\tau_{\max}$ 均越小.这是因为加固用的环氧树脂胶黏剂为黏弹性材料,在持续的界面剪应力 $\tau_0$ 作用下,界面会造成蠕变损伤,当界面剪应力水平较低(如: $\tau_0/\tau_u = 0.22$ )时,界面蠕变损伤不大,其对 $s_0$ 和 $\tau_{\max}$ 几乎没有影响;当界面剪应力水平较

高(如: $\tau_0/\tau_u \geq 0.44$ )时,界面蠕变损伤对粘结滑移曲线影响显著,且当剪应力越大持续时间越长,界面损伤越多,导致粘结滑移曲线 $s_0$ 和 $\tau_{\max}$ 越小.另外,由图7可知,界面剪应力仅在加载端部分范围内存在,故该区域界面蠕变损伤严重,其粘结滑移曲线的 $s_0$ 和 $\tau_{\max}$ 低于其他位置,而加载端以外各点的 $s_0$ 和 $\tau_{\max}$ 未受到影响,这一点可从图8(c)~8(e)得到证明.

表 3 试验结果  
Tab.3 Test results

| 试件编号   | $s_0/\text{mm}$ |           | $\tau_{\max}/\text{MPa}$ |           | $P_u/\text{kN}$ | $P_{\text{pre}}/\text{kN}$ | $P_{\text{pre}}/P_u$ | $L_e$ | 破坏模式   |
|--------|-----------------|-----------|--------------------------|-----------|-----------------|----------------------------|----------------------|-------|--------|
|        | $Q_{1-2}$       | $H_{1-2}$ | $Q_{1-2}$                | $H_{1-2}$ |                 |                            |                      |       |        |
| A-1    | 0.049           | 0.047     | 23.884                   | 22.956    | 27.42           | 24.19                      | 0.88                 | 70    | I型     |
| A-2    | 0.050           | 0.048     | 23.213                   | 22.287    | 28.85           | 23.24                      | 0.81                 | 80    | I型/II型 |
| A-3    | 0.048           | 0.046     | 24.017                   | 23.143    | 31.61           | 23.86                      | 0.75                 | 75    | I型/II型 |
| B22D5  | 0.048           | 0.048     | 22.877                   | 22.603    | 30.46           | 21.92                      | 0.72                 | 70    | I型/II型 |
| B22D10 | 0.048           | 0.046     | 21.843                   | 21.797    | 24.95           | 25.66                      | 1.03                 | 65    | II型    |
| B22D20 | 0.045           | 0.043     | 25.325                   | 24.895    | 29.73           | 25.37                      | 0.85                 | 70    | I型     |
| B22D35 | 0.046           | 0.046     | 22.492                   | 22.368    | 26.58           | 26.44                      | 0.99                 | 70    | II型    |
| B22D60 | 0.049           | 0.047     | 22.245                   | 21.695    | 26.18           | 25.98                      | 0.99                 | 75    | I型/II型 |
| B22D90 | 0.041           | 0.043     | 20.989                   | 20.571    | 32.07           | 30.28                      | 0.94                 | 75    | I型/II型 |
| C44D5  | 0.045           | 0.043     | 23.675                   | 22.685    | 32.13           | 25.63                      | 0.80                 | 80    | I型/II型 |
| C44D10 | 0.041           | 0.041     | 21.827                   | 21.473    | 29.18           | 26.31                      | 0.90                 | 80    | I型     |
| C44D20 | 0.042           | 0.042     | 20.443                   | 20.417    | 28.85           | 29.74                      | 1.03                 | 80    | I型/II型 |
| C44D35 | 0.041           | 0.039     | 18.322                   | 17.858    | 25.15           | 24.54                      | 0.98                 | 70    | I型/II型 |
| C44D60 | 0.040           | 0.038     | 16.653                   | 15.987    | 28.12           | 25.82                      | 0.92                 | 70    | I型/II型 |
| C44D90 | 0.041           | 0.039     | 16.806                   | 16.354    | 29.65           | 26.46                      | 0.89                 | 65    | I型     |
| D60D5  | 0.046           | 0.044     | 22.982                   | 22.758    | 29.65           | 25.34                      | 0.85                 | 75    | I型/II型 |
| D60D10 | 0.041           | 0.043     | 18.787                   | 18.073    | 28.23           | 25.01                      | 0.89                 | 75    | II型    |
| D60D20 | 0.037           | 0.037     | 16.152                   | 15.428    | 24.54           | 24.68                      | 1.01                 | 70    | I型/II型 |
| D60D35 | 0.038           | 0.040     | 15.600                   | 15.300    | 26.87           | 25.21                      | 0.94                 | 85    | I型/II型 |
| D60D60 | 0.036           | 0.038     | 14.582                   | 14.398    | 27.18           | 24.84                      | 0.91                 | 75    | I型/II型 |
| D60D90 | 0.039           | 0.037     | 14.400                   | 15.120    | 27.16           | 24.81                      | 0.91                 | 75    | II型    |
| E73D5  | 0.044           | 0.044     | 21.186                   | 20.894    | 25.42           | 24.82                      | 0.98                 | 70    | I型/II型 |
| E73D10 | 0.040           | 0.040     | 16.362                   | 16.318    | 28.58           | 24.69                      | 0.86                 | 80    | I型/II型 |
| E73D20 | 0.038           | 0.040     | 13.890                   | 13.170    | 27.42           | 26.16                      | 0.95                 | 75    | II型    |
| E73D35 | 0.035           | 0.037     | 11.918                   | 11.722    | 33.21           | 27.21                      | 0.82                 | 80    | I型/II型 |
| E73D60 | 0.038           | 0.036     | 9.766                    | 9.174     | 28.32           | 26.32                      | 0.93                 | 80    | I型     |
| E73D90 | 0.036           | 0.038     | 8.898                    | 8.722     | 26.22           | 25.75                      | 0.98                 | 70    | I型/II型 |

3.3 考虑界面损伤的粘结滑移本构

根据3.2节分析,采用双线性模型表征界面的粘结滑移本构关系,如图9所示.模型中引入3个系数 $\beta$ 、 $\eta$ 和 $\gamma$ ,分别考虑界面蠕变损伤对粘结滑移本构关系中峰值剪应力 $\tau_{\max}$ 、峰值滑移量 $s_0$ 和最大滑移量 $s_f$ 的影响,3个系数均与界面应力水平 $\kappa(\kappa = \tau_0/\tau_u)$ 及时间 $t$ 有关

图9中考虑损伤的双线性模型可写成:

$$\tau = \begin{cases} \beta\tau_{\max} \frac{s}{\eta s_0}, s \leq \eta s_0; \\ \beta\tau_{\max} \frac{\gamma s_f - s}{\gamma s_f - \eta s_0}, \eta s_0 < s \leq \gamma s_f; \\ 0, s > \gamma s_f. \end{cases} \quad (7)$$

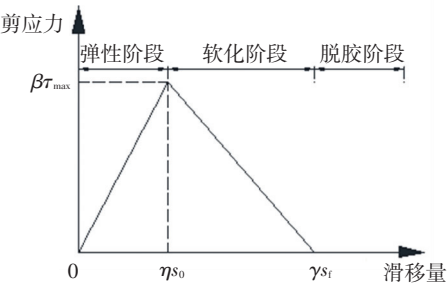


图 9 考虑损伤的双线性粘结滑移本构

Fig. 9 Bilinear bond-slip constitutive relation considering damage

根据 3.2 节分析以及试验结果,对于 C 组、D 组、E 组试件加载端以外区域以及 A 组、B 组试件均不考虑界面发生蠕变损伤,参照已有研究成果以及本文试验数据,可得符合本试验得粘结滑移曲线特征参数。

1)峰值滑移量  $s_0$ 。参考文献[5]的研究成果并结合试验数据,峰值滑移量  $s_0$ 可采用下式计算:

$$s_0 = 0.162 \left( t_a / G_a \right)^{0.65} f_{t,a}. \tag{8}$$

式中:  $f_{t,a}$  为胶黏剂的抗拉强度, MPa;  $G_a$  为胶黏剂的剪切强度, MPa;  $t_a$  为胶黏剂胶层厚度 mm。

图 10 为  $s_0$  的计算结果与试验对比。由图 10 可知,式(8)计算出的  $s_0$  与本文试验结果的吻合程度要优于与其他学者的计算结果,相关系数  $R^2 = 0.790$ 。

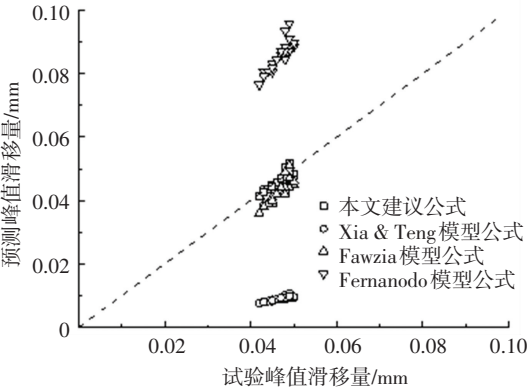


图 10 峰值滑移量的预测结果和试验结果

Fig.10 Prediction and test results of peak slip

2)峰值剪应力  $\tau_{max}$ 。文献[3-5]通过研究一致认为  $\tau_{max}$  只与胶黏剂的抗拉强度  $f_{t,a}$  有关,而与其他因素无关。根据试验结果,峰值剪应力  $\tau_{max}$  可采用下式计算:

$$\tau_{max} = 0.485 f_{t,a}. \tag{9}$$

表 1 中胶黏剂的  $f_{t,a} = 47$  MPa,由式(9)计算的  $\tau_{max} = 22.80$  MPa,这与表 3 中的试验结果吻合较好。

3)最大滑移量  $s_t$ 。采用文献[5]建议的  $s_t$  计算公式:

$$s_t = 2 G_t / \tau_{max}. \tag{10}$$

式中  $G_t$  为 CFRP-钢界面断裂能,即界面粘结-滑移曲线所包围的面积。

$G_t$  采用文献[3]建议的计算公式。根据本次试验结果得到  $G_t$  的表达式为

$$G_t = 17 \left( \frac{f_{t,a}}{G_a} \right)^{0.56} t_a^{0.27}. \tag{11}$$

由式(11)计算的  $G_t$  和试验计算的  $G_t$ ,如图 11 所示。由图 11 可知式(11)  $G_t$  的计算结果与试验结果符合较好。

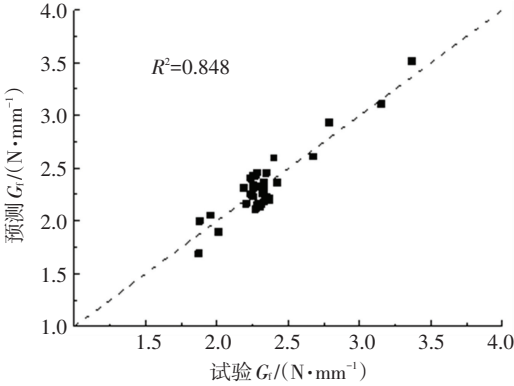


图 11 界面断裂能的预测结果和试验结果

Fig.11 Prediction and test results of interfacial fracture energy

当界面剪应力水平  $\tau_0/\tau_u \geq 0.44$  时,根据 3.2 节分析以及试验结果,C 组、D 组、E 组试件在加载端附近区域(距离加载端 12.5 mm 处)应考虑胶黏剂蠕变引起的界面损伤对粘结滑移曲线的影响。3 个系数  $\beta$ 、 $\eta$ 、 $\gamma$  都是界面应力水平  $\kappa$  及时间  $t$  的函数。以系数  $\beta$  为例,界面损伤区峰值剪应力  $\tau'_{max} = \beta \tau_{max}$ ,其中  $\tau_{max}$  为界面非损伤区峰值剪应力,则系数  $\beta = \tau'_{max} / \tau_{max}$ ,根据试验结果回归分析可得到  $\beta$  与持载时间  $t$  的关系式,如图 12 所示(图中峰值剪应力为  $Q_{1-2}$  和  $H_{1-2}$  的平均值)。

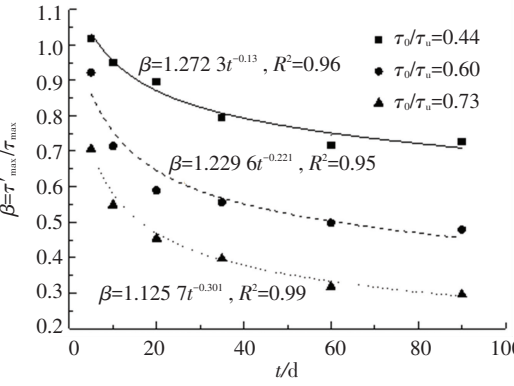


图 12 参数  $\beta$  与时间  $t$  关系

Fig.12 Relation between parameters  $\beta$  and  $t$

参考图 12 中各回归方程的形式,可将  $\beta$  统一写成如下形式:

$$\beta = \tau'_{max} / \tau_{max} = f_{\beta}(\kappa) t^{g_{\beta}(\kappa)}, \tag{12}$$

式中参数  $f_{\beta}(\kappa)$  和  $g_{\beta}(\kappa)$  均为与剪应力水平  $\kappa$  有关

的系数. 通过回归分析可得到参数  $f_{\beta}(\kappa)$  和  $g_{\beta}(\kappa)$  的表达式, 分别为

$$f_{\beta}(\kappa) = -1.36\kappa^2 + 1.14\kappa + 1.03, \quad (13)$$

$$g_{\beta}(\kappa) = -0.57\kappa + 0.125. \quad (14)$$

采用与系数  $\beta$  一样的推导方法, 可得到系数  $\eta$ 、 $\gamma$  分别为

$$\begin{cases} \eta = f_{\eta}(\kappa) t^{g_{\eta}(\kappa)}, \\ f_{\eta}(\kappa) = (-3.06\kappa^2 + 3.83\kappa + 0.88) \times 10^{-3}, \\ g_{\eta}(\kappa) = 0.5\kappa^2 - 0.69\kappa + 0.17; \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \gamma = f_{\gamma}(\kappa) t^{g_{\gamma}(\kappa)}, \\ f_{\gamma}(\kappa) = -0.012\kappa^2 + 0.015\kappa + 0.004, \\ g_{\gamma}(\kappa) = 0.48\kappa^2 - 0.53\kappa + 0.26. \end{cases} \quad (16)$$

在求得系数  $\beta$ 、 $\eta$ 、 $\gamma$  后, 通过式(7) 可得到考虑界面损伤的双线性粘结滑移本构模型, 分为以下两种情况考虑:

1) 当界面没有荷载作用历史或者虽有持续荷载作用, 但界面剪应力水平  $\kappa \leq 0.22$ , 此时不考虑荷载作用历史对界面的损伤影响, 令  $\beta = \eta = \gamma = 1$ , 根据式(8) ~ (10) 分别计算  $s_0$ 、 $\tau_{\max}$ 、 $s_f$ .

2) 当界面上有持续荷载作用且  $0.44 \leq \kappa \leq 0.73$  时, 应考虑界面损伤对粘结滑移本构的影响, 利用式(12)、(15)、(16) 分别计算系数  $\beta$ 、 $\eta$ 、 $\gamma$  后, 并代入式(7) 中得到不同剪应力水平  $\kappa$  及不同加载时间  $t$  的界面粘结滑移本构关系.

值得注意的是, 当  $0.22 < \kappa < 0.44$  或  $\kappa > 0.73$  时, 本文试验未涉及, 因此界面蠕变损伤对粘结滑移本构关系的影响还需要进一步研究.

为验证粘结滑移本构模型的预测准确性, 以试件 E60D90 为例, 将式(7) 计算得到的粘结滑移曲线与试验结果对比, 如图 13 所示. 由图 13 可看出, 在上升段两者较为接近, 下降段两者差距较大, 这是由于界面损伤退化不均匀所致.

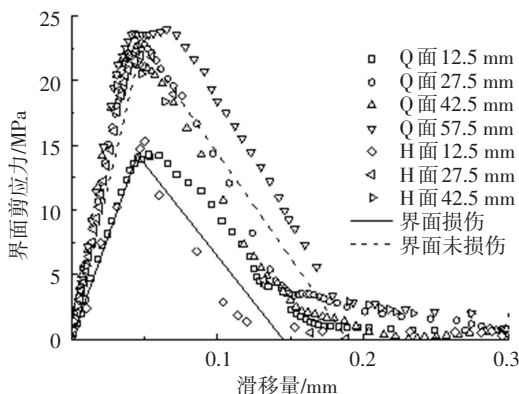


图 13 本构模型与试验数据对比

Fig.13 Comparison between constitutive model and test results

### 3.4 极限承载力

CFRP-钢界面极限承载力  $P_u$  试验结果见表 3. 表 3 中极限承载力  $P_u$  试验值的平均值为 28.3 kN, 标准差为 2.3 kN. 界面极限承载力采用文献[17] 对 CFRP-混凝土界面剥离提出的计算公式, 该公式已广泛应用于 CFRP-钢界面承载力计算<sup>[3,5-6,9,14]</sup>, 即

$$P_{pre} = b_c \sqrt{2G_f E_c t_c}, \quad (17)$$

式中:  $G_f$  为界面断裂能,  $E_c$  为 CFRP 弹性模量.

由式(17) 计算的界面极限承载力  $P_{pre}$  见表 3, 计算结果  $P_{pre}$  与试验结果  $P_u$  比值的平均值为 0.91, 标准差为 0.08, 可见两者符合较好.

由表 3 中可知, 当 CFRP 粘贴长度大于有效粘结长度时, 荷载作用历史对界面极限承载力  $P_u$  影响不显著. 式(17) 中  $G_f$  是粘结滑移曲线所包围的面积, 当  $\kappa \leq 0.22$  时, 粘结滑移曲线中  $s_0$  和  $\tau_{\max}$  几乎不变, 蠕变损伤未引起  $G_f$  变化; 当  $0.44 \leq \kappa \leq 0.73$  时, 蠕变损伤仅造成加载端附近的  $s_0$  和  $\tau_{\max}$  减小, 其他位置未受蠕变损伤影响, 界面剥离时刻  $G_f$  由 CFRP 末端局部粘结滑移曲线性质决定, 因此, 界面局部损伤不会对最终界面  $P_u$  造成影响. 这一结论与文献[12] 中胶黏剂层蠕变损伤未导致 CFRP-混凝土界面极限承载力受损相一致. 表 3 中各试件极限承载力  $P_u$  不同, 主要是试件制作或加载过程中可能存在的偏心以及试验测量误差引起的. 应该指出, 当 CFRP 粘结长度小于有效粘结长度时, 界面损伤对极限承载力的影响需要开展进一步的研究工作.

## 4 结 论

1) 当 CFRP-钢双剪试件有持续荷载作用时, CFRP 应变在加载端端部最大, 随着距加载端越远 CFRP 应变越小, 且其随着加载时间的增加而增大.

2) 持续荷载作用下胶黏剂发生蠕变变形导致界面剪应力发生应力重分布, 剪应力峰值随加载时间逐渐降低. B 组、C 组、D 组、E 组试件加载 90 d 后, 在 12.5 mm 处界面剪应力分别减小了 26.6%、59.2%、73.8%、85.4%, 缓解了端部界面剪应力集中现象.

3) 当持续施加的界面剪应力水平  $\kappa$  较低 ( $\kappa \leq 0.22$ ) 时, 界面没有蠕变损伤或蠕变损伤很小, 对峰值滑移量  $s_0$  和峰值剪应力  $\tau_{\max}$  没有明显影响; 当界面剪应力水平  $\kappa$  较高 ( $0.44 \leq \kappa \leq 0.73$ ) 时, 加载端 12.5 mm 内界面蠕变损伤对粘结滑移曲线影响显著, 且当  $\kappa$  越高加载时间  $t$  越长, 界面损伤越大,  $s_0$  和  $\tau_{\max}$  越小, 在此范围以外, 界面损伤对粘结性能基本没有影响.

4) 当 CFRP 粘贴长度大于有效粘结长度时, 界

面极限承载力不受界面蠕变损伤影响.

参考文献

[1] 郑云, 叶列平, 岳清瑞. FRP 加固钢结构的研究进展[J]. 工业建筑, 2005, 35(8): 20  
ZHENG Yun, YE Lieping, YUE Qingrui. Progress in research on steel structures strengthened with FRP[J]. Industrial Construction, 2005, 35(8): 20. DOI: 10.3321/j.issn:1000-8993.2005.08.005

[2] 李春良, 李凯, 张立辉, 等. CFRP 端部被锚固后加固钢结构的界面粘结行为[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(9): 113  
LI Chunliang, LI Kai, ZHANG Lihui, et al. Interfacial bond behavior of CFRP reinforced steel structures with end anchorage[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(9): 113. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.09.020

[3] XIA S, TENG J. Behaviour of FRP-to-steel bonded joints [C]// Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS 2005). Hong Kong: International Institute for FRP in Construction, 2005: 419

[4] 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. DOI: 10.1016/j.compstruct.2009.09.042

[5] FERNANDO N D. Bond behaviour and debonding failures in CFRP-strengthened steel members[D]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2010

[6] LI C, LU K, HE J, et al. Effects of mechanical properties of adhesive and CFRP on the bond behavior in CFRP-strengthened steel structures[J]. Composite Structures, 2019, 211: 163. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.12.020

[7] FERNANDO D, YU T, TENG J G. Behavior of CFRP laminates bonded to a steel substrate using a ductile adhesive[J]. Journal of Composites for Construction, 2014, 18(2): 04013040. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000439

[8] WANG H T, WU G, DAI Y T, et al. Experimental study on bond behavior between CFRP plates and steel substrates using digital image correlation[J]. Journal of Composites for Construction, 2016, 20(6): 04016054. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000701

[9] 何俊. 胶粘剂性能对 CFRP-钢界面粘结破坏行为的影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017

HE Jun. Research on the effects of adhesive properties on the failure behaviours of CFRP-to-steel interface[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017

[10] 薛耀, 张龙, 曹双寅, 等. 低龄期下 CFRP-钢界面黏结性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2015, 45(2): 360  
XUE Yao, ZHANG Long, CAO Shuangyin, et al. Experimental study on bonding behavior of CFRP-to-steel interface under early curing age[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2015, 45(2): 360. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2015.02.028

[11] HOUHOU N, BENZARTI K, QUIERTANT M, et al. Analysis of the nonlinear creep behavior of concrete/FRP-bonded assemblies [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2014, 28(14/15): 1345. DOI: 10.1080/01694243.2012.697387

[12] 马明, 徐佰顺, 张方, 等. 持续荷载下 CFRP-混凝土界面黏结性能试验与分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(3): 128  
MA Ming, XU Baishun, ZHANG Fang, et al. Experiment and performance analysis on bonding behavior of CFRP-concrete interface under sustained load[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(3): 128. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201703086

[13] 公路桥梁加固设计规范: JTG/T J22—2008[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008  
Specifications for strengthening design of highway bridges: JTG/T J22—2008[S]. Beijing: China Communications Press, 2008

[14] 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. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.01.024

[15] ZHAO X L, ZHANG L. State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures[J]. Engineering Structures, 2007, 29(8): 1808. DOI: 10.1016/j.engstruct.2006.10.006

[16] 徐佰顺, 钱永久, 唐继舜, 等. 基于黏弹性本构的 CFRP-钢界面应力参数敏感性分析[J]. 公路交通科技, 2017, 34(11): 57  
XU Baishun, QIAN Yongjiu, TANG Jishun, et al. Analysis on CFRP-to-steel interfacial stress parameter sensitivity based on viscoelastic constitution[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(11): 57

[17] YUAN H, TENG J G, SERACINO R, et al. Full-range behavior of FRP-to-concrete bonded joints[J]. Engineering Structures, 2004, 26(5): 553. DOI: 10.1016/j.engstruct.2003.11.006

(编辑 魏希柱)