

# 循环荷载作用下 CFRP-混凝土界面 粘结-滑移关系研究

王富玲<sup>1</sup>, 王玉田<sup>1</sup>, 姜福香<sup>1,2</sup>, 赵莹莹<sup>3</sup>

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 山东省高等学校蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心, 山东 青岛 266033;  
3. 东营市公路勘察设计院有限公司, 山东 东营 257091)

**摘要:** 循环荷载作用下 CFRP-混凝土界面粘结-滑移关系是研究 CFRP 加固混凝土结构疲劳性能的重要基石。通过对 18 个双面剪切试件进行静载及疲劳试验, 分析探讨了循环荷载作用下 CFRP-混凝土界面破坏过程及粘结-滑移关系。结果表明, 随着循环荷载次数及应力水平增大, 界面粘结性能降低, CFRP 片材也更早出现剥离现象, 剥离长度和应力水平呈线性关系; 端部滑移变化表现为两个阶段, 快速增长阶段和稳定增长阶段; 应力水平越高, 对应的粘结-滑移曲线中最大剪应力就越大。

**关键词:** CFRP; 双面剪切试验; 粘结-滑移关系; 循环荷载; 疲劳性能

中图分类号: TU528.572

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)02-0223-06

## Study on the bond-slip relationship of CFRP-concrete interface under cyclic loading

WANG Fuling<sup>1</sup>, WANG Yutian<sup>1</sup>, JIANG Fuxiang<sup>1,2</sup>, ZHAO Yingying<sup>3</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China;  
2. Cooperative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone,  
Qingdao 266033, China;  
3. Dongying Highway Survey and Design Institute Co. Ltd., Dongying 257091, China)

**Abstract:** The bond-slip relationship of CFRP-concrete interface under cyclic loading is an important cornerstone to study the fatigue performance of concrete structures strengthened with CFRP. Based on the static and fatigue tests of 18 double-sided shear specimens, the interface failure process and bond-slip relationship of CFRP-concrete under cyclic loading are analyzed and discussed. The results show that the interfacial bond properties decrease with the increase of cyclic load times and stress level, and the peeling phenomenon of CFRP sheet appears earlier, and there is a linear relationship between peeling length and stress level; the change of end slip can be divided into two stages, rapid growth stage and stable growth stage; the higher the stress level is, the greater the maximum shear stress in the corresponding bond-slip curve is.

**Key words:** CFRP; double shear test; bond-slip relationship; cyclic loading; fatigue performance

碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer, 简称 CFRP)具有轻质高强、良好的耐久性和抗疲劳性等优点, 因此, 在结构加固领域得到了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。CFRP 加固技术是通过界面粘结应力来实现混凝土与 CFRP 之间荷载的传递, 从而提高混凝土结构的承载能力。界面的粘结性能直接影响 CFRP 与混凝土之间应力传递的有效性。

为了描述界面破坏的机理, 各国的研究者基于试验研究、断裂力学及损伤力学和半经验等方法, 提出了静载作用下 CFRP-混凝土界面粘结-滑移本构模型<sup>[3-8]</sup>, 典型的包括单线性模型<sup>[4]</sup>、双曲线模型<sup>[5]</sup>、双线性模型<sup>[6-7]</sup>和 Popovics 模型<sup>[8]</sup>等。但是, 许多实际的 CFRP 加固结构, 如公路和铁路桥梁, 在其服役期间除了承受静载外, 还长期处于循环荷载作用下。加固结构破坏形式通常不

收稿日期: 2020-09-22

修改稿日期: 2021-03-20

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(2019GSF110006)

第一作者: 王富玲(1996—), 女, 硕士生, 研究方向为结构检测加固研究。E-mail: 2293528364@qq.com

通信作者: 王玉田(1972—), 男, 博士, 高级实验师, 主要从事结构评估与加固工程安全控制方面的研究。E-mail: 513960157@qq.com

是 CFRP 片材被拉断,而是沿界面发生剥离破坏,破坏前无明显征兆,且疲劳破坏时的荷载往往低于静载下的极限荷载,属于脆性破坏,难以察觉,具有更大的危害性<sup>[9]</sup>.因此,国内外许多学者对循环荷载下 CFRP-混凝土界面性能开展了研究,主要集中在疲劳寿命<sup>[10-11]</sup>、疲劳裂纹扩展行为<sup>[12-13]</sup>以及疲劳粘结-滑移关系<sup>[14-15]</sup>等方面.循环荷载应力水平的不同对界面粘结-滑移性能的影响显著.但关于应力水平对粘结-滑移曲线影响的研究不多.

本文对 6 组(18 个)双剪试件进行了静载及不同应力水平下的疲劳试验,研究界面的应变和端部滑移变化规律,以及不同应力水平对粘结-滑移

关系曲线的影响.

1 双剪试验方案

1.1 材料

(1)混凝土原材料及配合比

试验采用混凝土的配合比见表 1,试验结果显示混凝土 28 d 立方体抗压强度为 55.09 MPa,满足所需混凝土强度等级的要求.

(2)CFRP 材料和浸渍胶及其性能指标

表 2 给出了 CFRP 材料和浸渍胶的主要性能指标.

表 1 混凝土配合比

Tab. 1 Proportions of concrete mix

kg/m<sup>3</sup>

水胶比 W/B	胶凝材料	水泥	粉煤灰	砂子	石子	水	减水剂/%
0.33	470	376	94	710	1 065	155	1.0

表 2 CFRP 性能指标

Tab. 2 CFRP properties

材料	型号	抗拉强度/MPa	弹性模量 $E_f$ /MPa	延伸率/%	厚度 $t_f$ /mm
CFRP	YC-190-300g	$\geq 3\ 000$	$\geq 2.1 \times 10^5$	$\geq 1.5$	0.167
浸渍胶	YC-189-A	$\geq 40$	$\geq 2\ 500$	$\geq 1.5$	—

1.2 试件设计

混凝土试件尺寸为 200 mm×100 mm×100 mm,在混凝土试块两侧粘贴 CFRP 片材如图 1 所示,CFRP 尺寸为 50 mm×660 mm×0.167 mm,粘贴层数为一层,CFRP 片材的粘贴范围为 150 mm×50 mm,加载端留有 30 mm 的非粘结长度,以避免试件边缘破坏.

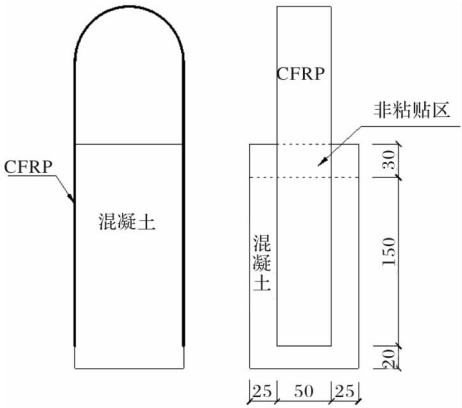


图 1 双面剪切试件(单位 mm)

Fig. 1 Details of double shear specimen (units in mm)

为了研究 CFRP-混凝土界面粘结-滑移关系,在 CFRP 片材表面沿中心方向粘贴电阻应变片,

测点( $\epsilon_1 \sim \epsilon_6$ )布置如图 2 所示.

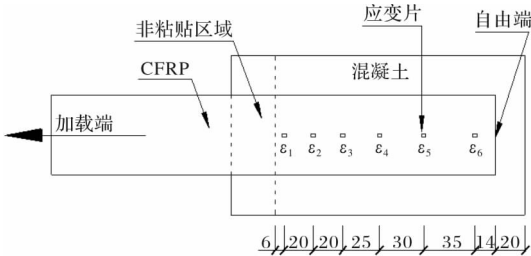


图 2 应变片布置图(单位: mm)

Fig. 2 The distribution of strain gauges(Units: mm)

1.3 试验设置及加载装置

CFRP-混凝土界面粘结静力试验及疲劳试验均在图 3 所示的 MTS 电液伺服试验系统上进行,采用量程为 50 kN 的作动器进行加载.静力试验加载的前 10 kN 采用 1 kN/min 的力控制,10 kN 以后采用 0.3 mm/min 的位移控制;疲劳加载过程采用力控制模式,等幅循环加载,采用 10 Hz 的加载频率,应力比( $P_{max}/P_{min}$ )取 0.1.

通过静载试验(3 个静力加载试件),得到界面粘结极限承载力( $P_u$ )为 19.19 kN,那么,对应最大应力水平  $R(P_{max}/P_u)$  为 0.45、0.55、0.65、

0.75 和 0.85 的 5 组(每组 3 个试件)循环荷载试验的荷载最大值分别为 8.55 kN、10.45 kN、12.35 kN、14.25 kN 和 16.15 kN。

在疲劳试验过程中, 如果试件破坏时的循环次数低于 200 万次, 则相应地加大数据采集密度。对经过 200 万次循环荷载作用后尚未破坏的试件, 分级施加静力荷载直至破坏, 以获得界面剩余粘结承载力。

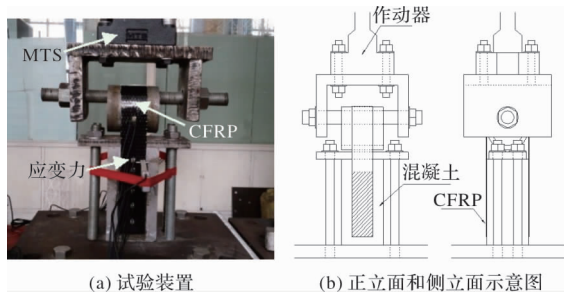


图3 加载试验装置

Fig.3 Schematic of the test setup

## 2 试验结果及分析

### 2.1 界面破坏过程

#### 2.1.1 CFRP 应变变化规律

图4给出 CFRP 应变值  $\epsilon_i$  在不同应力水平下随循环次数的变化规律:

(1)  $\epsilon_1$  处的应变在不同应力水平下初始加载过程中均快速增长达到峰值, 说明此时加载端界面微裂纹开始萌生, 直至出现裂缝, 界面发生完全脱粘;

(2)  $\epsilon_2$  处应变峰值在不同应力水平下随循环次数的增加而增大,  $R$  分别为 0.45、0.55、0.65、0.75 和 0.85, 应变峰值分别达到 1 170  $\mu\epsilon$ 、2 099  $\mu\epsilon$ 、2 450  $\mu\epsilon$ 、722  $\mu\epsilon$  和 3 272  $\mu\epsilon$ (图中可看出  $R$  为 0.65 和 0.75 时, 此处的应变片在经历 20 万次循环次数后破坏失效), 不同应力水平下的  $\epsilon_2$  处均处于完全脱粘区域;

(3)  $\epsilon_3$  处应变在  $R=0.45$  时, 无明显起伏, 说明应力传递区域到  $\epsilon_3$  处结束, 而  $R$  为 0.55、0.65 和 0.75 时的  $\epsilon_3$  有随荷载循环次数的增加而上升的趋势, 结合表3的剥离长度可以说明  $\epsilon_3$  处在  $R=0.55$  时处于应力传递区域,  $R$  为 0.65 和 0.75 时  $\epsilon_3$  处于完全脱粘区域,  $R=0.85$  时应变值一直维持在 3 600  $\mu\epsilon$  左右, 处于一个平台, 说明此时界面已经脱粘, 应变值已经达到峰值, 不随循环次数增长而变化;

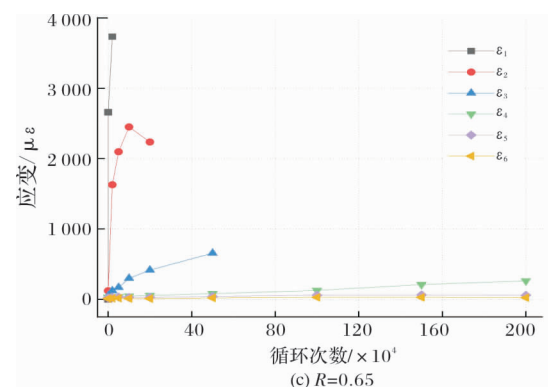
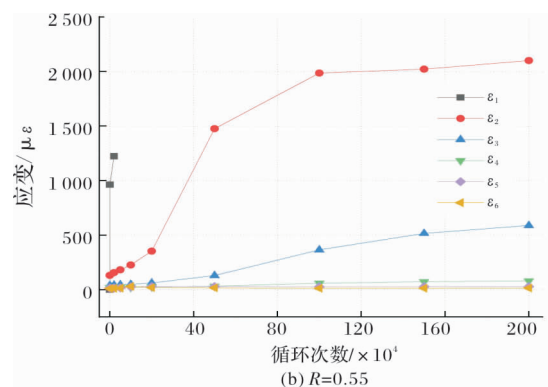
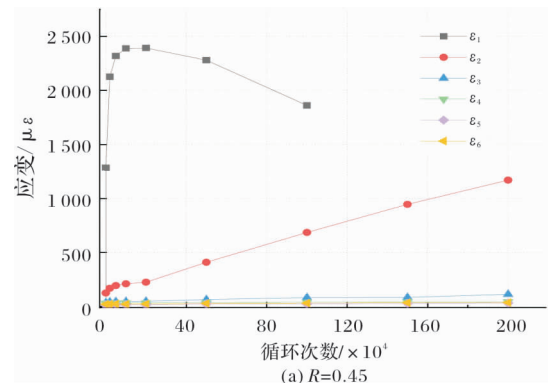
(4)  $\epsilon_4$  处应变在  $R$  为 0.45 与 0.55 时没有明显

波动, 说明在这 2 个应力水平下  $\epsilon_4$  处于无应力区域,  $R=0.65$  时  $\epsilon_4$  处于应力传递区域,  $R$  为 0.75 和 0.85 时  $\epsilon_4$  处于完全脱粘区域;

(5)  $\epsilon_5$  处应变在  $R$  为 0.45、0.55 和 0.65 时没有起伏, 说明在这三个应力水平下,  $\epsilon_5$  处于无应力区域,  $R=0.75$  时有明显起伏, 说明  $\epsilon_5$  处于应力传递区域,  $R=0.85$  时应变增长到一个平台, 说明  $\epsilon_5$  处于完全脱粘区域;

(6)  $\epsilon_6$  处应变在前四个应力水平下均无明显变化, 处于无应力区域, 只有在  $R=0.85$  时应变会有增长, 说明此时应力传递区域已经趋近于自由端。

对比图4(a)~(e)可以看出,  $R$  为 0.45、0.55、0.65、0.75 和 0.85 时, 应力分别传递到  $\epsilon_3$ 、 $\epsilon_4$ 、 $\epsilon_5$ 、 $\epsilon_6$  和自由端处, 应力水平的提高, 导致应力传递区域结束端点越靠近自由端。



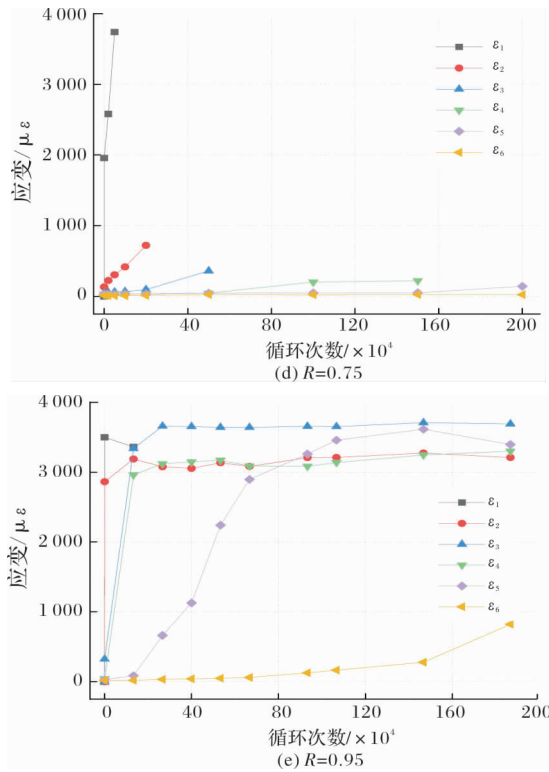


图 4 循环荷载下 CFRP 应变变化

Fig. 4 Strain propagation of CFRP under cyclic loading

表 3 给出 200 万次循环荷载作用后的界面剥离长度, 其随着应力水平的提高呈线性增长, 通过拟合得到界面剥离长度  $l$  与应力水平  $R$  之间的关系如式(1)所示, 相关系数为 0.992 8.

$$l = 286R - 114.7 \quad (1)$$

表 3 应力传递段及剥离长度

Tab. 3 The stress transfer section and debond length of specimen

应力水平 $R$	0.45	0.55	0.65	0.75	0.85
剥离长度 $l/\text{mm}$	19	39	65	103	130
应力传递区域结束端点	$\epsilon_3$	$\epsilon_4$	$\epsilon_5$	$\epsilon_6$	自由端

依据表 3 绘制不同应力水平下 CFRP 长度方向上的应变分布示意图如图 5. 可以看出, 在 CFRP 长度方向上的应变分布, 分为三个区域: ①完全脱粘区域、②应力传递区域、③无应力区域. 随着循环荷载应力水平的提高, 完全脱粘区域变长, 且应力传递区域逐渐靠近自由端, 说明应力水平越高, 界面损伤退化越明显.

### 2.1.2 界面端部滑移变化规律

由于前 4 个应力水平下的试件经过 200 万次循环荷载作用后未破坏, 而  $R=0.85$  试件的疲劳寿命远远短于 200 万次, 考虑到疲劳寿命差距过大不利于滑移演化规律的比较, 故将  $R=0.85$  试件的端部滑移量单独画出. 图 6 给出了不同应力水平下的端部滑移量随加载次数的变化规律. 由图 6 可

知, CFRP-混凝土界面的端部滑移量随着循环次数增加呈上升趋势, 并且变化过程可以明显分为两个阶段<sup>[16]</sup>:

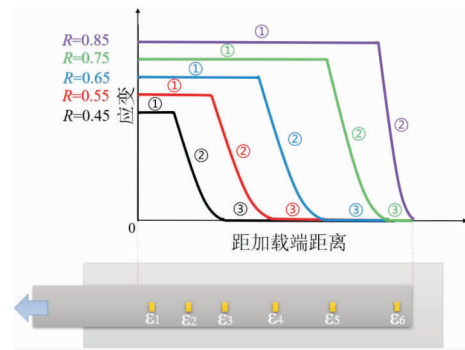


图 5 CFRP 长度方向上应变分布示意图

Fig. 5 Strain profile along the CFRP

(1)端部滑移量在初期加载过程中显著增加, 为滑移的快速增长阶段, 界面层中最薄弱的“软弱区”微裂纹或微孔隙逐渐开始失稳扩张, 界面的粘结剪应力逐渐减小, 界面裂纹开始萌生.

(2)随后是稳定增长阶段, 端部滑移量缓慢增长并逐渐达到稳定, 界面裂纹逐渐由加载端向自由端扩展, 界面裂纹稳定发展.

可以看出, 两个阶段的曲线斜率均随应力水平的提高而增大, 这是因为应力水平越高, 界面疲劳损伤越快, 滑移量增长速率也随之逐渐增大, 说明提高应力水平会加快界面剥离速率, 降低界面疲劳寿命.

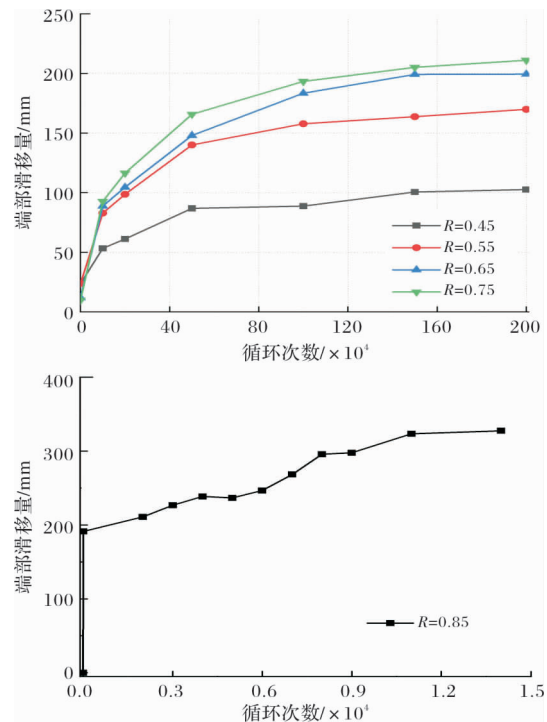


图 6 端部滑移随加载次数的变化

Fig. 6 Evolvement of specimen's relative displacement under fatigue load

## 2.2 界面粘结退化

### 2.2.1 界面粘结承载力

前4个应力水平下的试件经过200万次循环荷载作用后未破坏, 故对试件又继续施加静力荷载直至剥离破坏, 以研究疲劳后界面的剩余承载力. 表4可以看到  $R$  为0.65和0.75的试件在经过200万次循环荷载作用后极限承载力分别下降了20.32%和35.49%, 这表示循环荷载使得界面裂纹向自由端延伸, 剩余粘结长度变短, 导致剩余界面粘结承载力降低, 并且应力水平越高, 界面剩余粘结长度就越短, 界面疲劳损伤越严重, 承载力下降幅度也越大. 而  $R$  为0.45和0.55的试件的剩余承载力与静载下的极限承载力相差无几, 是由于应力水平较低, 疲劳后剩余粘结长度依然大于试件的有效粘结长度, 而疲劳后的剩余承载力略大于静载下极限承载力是由于离散性导致.

表4 试件剩余粘结长度及承载力

Tab. 4 The ultimate static load and bond length of specimen

应力水平 $R$	0.45	0.55	0.65	0.75	静载
剩余承载力 $P_u/\text{kN}$	19.31	19.28	15.29	12.38	19.19
下降百分比/%	-0.63	-0.47	20.32	35.49	—

### 2.2.2 界面粘结-滑移

通过分析不同应力水平下 CFRP-混凝土界面粘结滑移关系曲线, 可以进一步分析应力水平对界面的剥离破坏的影响规律.

利用公式(2)对 CFRP 应变值进行差分计算, 得到相邻两个应变片之间区域界面平均粘结剪应力  $\tau_i$ , 利用公式(3)对 CFRP 片材从自由端到某点 ( $x_i$ ) 的应变值进行积分计算得到滑移值  $s_i$ , 这样计算得到的结果可以看作是二个应变片中点处界面粘结剪应力和滑移值的近似值<sup>[17]</sup>.

$$\tau_i = t_f \frac{d\sigma_f}{dx} = E_f t_f \frac{d\varepsilon_f}{dx} \quad (2)$$

$$s_i = \int_0^{x_i} \varepsilon_f dx \quad (3)$$

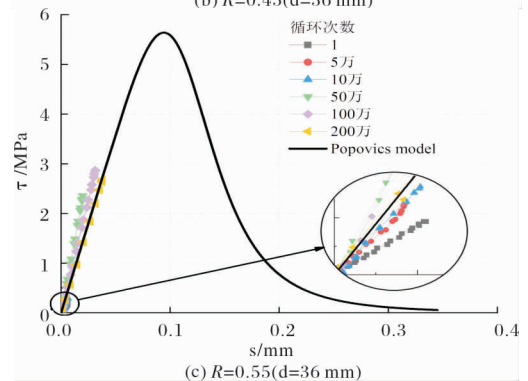
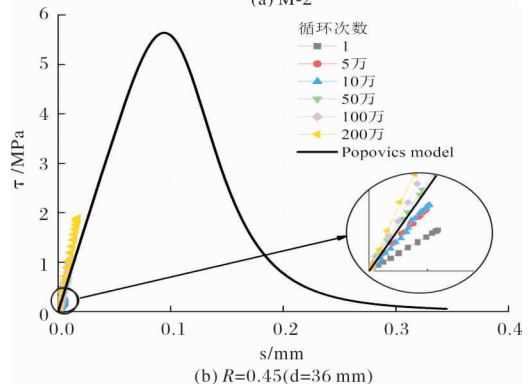
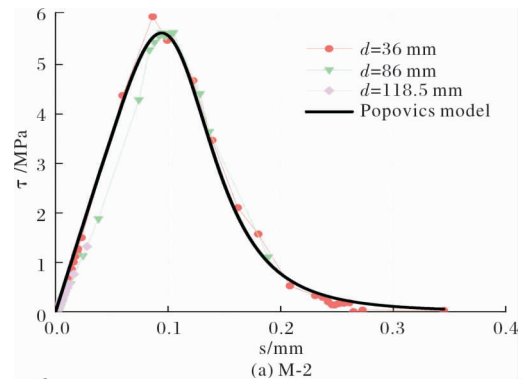
式中,  $\tau_i$  为某点粘结剪应力;  $t_f$ 、 $\sigma_f$  和  $E_f$  分别为 CFRP 片材厚度、横截面应力和弹性模量;  $\varepsilon_f$  为 CFRP 片材上某点应变,  $s_i$  为某点的滑移量.

通过公式(2)、(3)分别将静载和疲劳试件界面粘结-滑移( $\tau$ - $s$ )曲线与式(4)的 Popovics 模型<sup>[8]</sup>进行绘制, 见图7(d表示该点到加载端的距离).

$$\tau = \tau_{\max} \left[ \frac{s}{s_0} \cdot \frac{a}{(a+1) + \left(\frac{s}{s_0}\right)^a} \right] \quad (4)$$

式中,  $\tau_{\max}$  为最大剪应力;  $s_0$  为最大剪应力对应的滑移量;  $a$  为曲线特征常数.

从图7(a)可以看到不同位置的粘结-滑移曲线相似, 并且试验结果与现有的 Popovics 粘结滑-移模型吻合较好, 这说明利用 CFRP 片材测得的应变进一步计算得到的粘结-滑移曲线是可靠的. 图7(b)中0.45应力水平循环加载的试件, 观察到加载曲线的刚度随循环次数增加而增大, 说明此时在  $d=36\text{ mm}$  处的界面仍处在弹性阶段, 没有发生损伤, 界面剪应力随着循环次数的增加而增大, 没有达到峰值; 而图7(c)显示出  $R=0.55$  时, 曲线刚度先上升, 此时界面处于弹性阶段, 而后在50万次后刚度下降, 对应此时界面出现脱粘现象; 在应力水平为0.65和0.75的循环荷载作用下, 粘结-滑移曲线的刚度有逐渐减小的趋势, 刚度的下降表示界面开始有损伤, 并且损伤所耗散的能量将无法恢复; 图7(f)在经历1000次循环以后, 剪应力就出现了负值, 这是因为在0.85应力水平下, 此处的界面出现剥离, 最大应变出现在未剥离的下一个测点处. 对比5个应力水平的结果可以看出, 应力水平的增加导致界面最大剪应力显著增大.





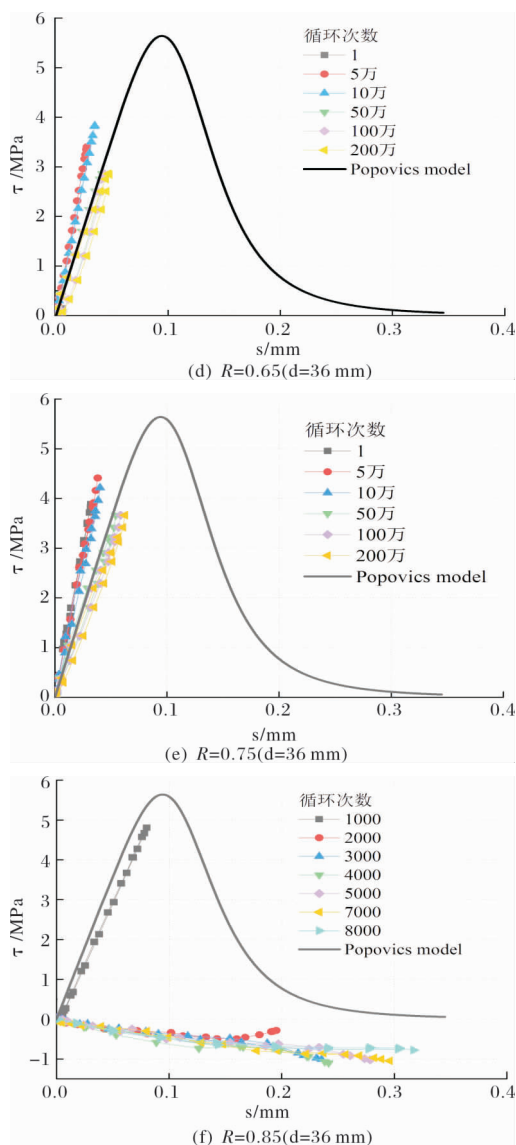


图7 静载和疲劳试件的粘结-滑移曲线的对比

Fig.7 The comparisons of the bond-slip relationship between static load and fatigue load specimens

### 3 结论

基于双面剪切试验,研究了循环荷载下CFRP-混凝土界面粘结-滑移关系,分析得出以下结论:

(1)CFRP-混凝土界面粘结-滑移疲劳退化的主要影响因素有循环加载次数和循环荷载的应力水平,两者增大均会导致界面粘结退化,且粘结退化在卸载后也不可恢复;

(2)循环荷载的应力水平越高,界面剥离长度就越长,应力传递区域就越靠近自由端,界面损伤就越严重,当 $R$ 分别为0.65和0.75时,界面剩余粘结长度小于有效粘结长度,经受200万次循环荷载作用后的界面剩余承载力较静载下的界面极限承载力分别下降20.32%和35.49%;

(3)循环荷载作用下端部滑移的变化过程分为两个阶段即滑移量快速增长阶段和滑移量稳定增长阶段,两个阶段的斜率均随应力水平的增加而增加;

(4)随着循环荷载应力水平的增加,界面粘结-滑移曲线的最大剪应力也有所增大。

### 参考文献 References

- [1] KHORASANI A M, ESFAHANI M R, SABZI J. The effect of transverse and flexural reinforcement on deflection and cracking of GFRP bar reinforced concrete beams[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 161: 530-546.
- [2] REZAZADEH M. Innovative methodologies for the enhancement of the flexural strengthening performance of NSM CFRP technique for RC beams[D]. Braga: University of Minho, 2015.
- [3] DAI J G, GAO W Y, TENG J G, et al. Bond-slip model for FRP laminates externally bonded to concrete at elevated temperature[J]. Journal of Composites for Construction, 2013, 17(2): 217-228.
- [4] NEUBAUER U, ROSTASY F S. Bond failure of concrete fiber reinforced polymer plates at inclined cracks—experiments and fracture mechanics model [J]. Special Publication, 1999, 188:369-382.
- [5] DAI J G, UEDA T. Local bond stress slip relations for CFRP sheets concrete interfaces[C]// Fiber-reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures-the Sixth International Symposium on Frp Reinforcement for Concrete Structures. (FRPRCS-6). Singapore: Kiang Hwee Tan (National University of Singapore, Singapore), 2003:143-152.
- [6] MONTI G, RENZELLI M, LUCIANI P. FRP adhesion in uncracked and cracked concrete zones[C]// Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures-The Sixth International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-6). Singapore: Kiang Hwee Tan (National University of Singapore, Singapore), 2003:183-192.
- [7] 陆新征,叶列平,滕锦光,等. FRP-混凝土界面粘结滑移本构模型[J]. 建筑结构学报, 2005(4): 10-18.  
LU Xinzhen, YE Lieping, TENG Jinguang, et al. Bond-slip model for FRP-to-concrete interface[J]. Journal of Building Structures, 2005(4):10-18.
- [8] POPOVICS S. A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete[J]. Cement & Concrete Research, 1973, 3(5):583-599.
- [9] YUN Y, WU Y F, TANG W C. Performance of FRP bonding systems under fatigue loading[J]. Engineering Structures, 2008, 30(11):3129-3140.

(下转第253页)