

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201703086

持续荷载下 CFRP-混凝土界面黏结性能试验与分析

马 明,徐佰顺,张 方,钱永久,李晓斌

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘 要: 为研究持续荷载对 CFRP(碳纤维增强复合材料)-混凝土界面粘结性能的影响,首先通过 3 组双面剪切试件确定了界面极限剥离荷载 P_u ,然后进行了 4 种荷载水平下持续时间为 5、10、15、30、60、90 d 共 24 组双剪试验.结果表明:经过持续荷载作用,与界面峰值剪应力 τ_{max} 相应的界面滑移 s_0 有所减小,减小幅度与荷载持续时间和荷载大小无明显相关,荷载作用 90 d 后, s_0 降低 50% 左右;当持续荷载大于 $0.5P_u$ 时,靠近加载端 15 mm 范围内的界面峰值剪应力 τ_{max} 随荷载大小和持续时间的增加而降低,此范围以外 τ_{max} 未发生明显改变,基于试验数据,给出了持续荷载作用下界面的粘结滑移本构模型,对试件的破坏试验表明,在粘结长度大于有效粘结长度时,持续荷载的作用对界面的极限剥离荷载没有明显影响,但会降低剥离过程中界面首次出现剥离的荷载 P_{db} ,在 $0.5P_u$ 、 $0.7P_u$ 、 $0.9P_u$ 持续作用 90 d 后, P_{db} 分别降低了 42%、54%、66%.

关键词: CFRP-混凝土界面;粘结滑移关系;持续荷载;峰值剪应力;剥离荷载

中图分类号: U448.22

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2018)03-0128-07

Experiment and performance analysis on bonding behavior of CFRP-concrete interface under sustained load

MA Ming, XU Baishun, ZHANG Fang, QIAN Yongjiu, LI Xiaobin

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To investigate the effects of sustained load on bonding properties of CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer)-concrete interface, the ultimate debonding load of interface P_u was determined by three double shear specimens, and twenty-four double shear tests were performed under four load levels and four duration days of 5, 10, 15, 30, 60 and 90 for each load level. Results indicated that the interfacial slip s_0 corresponding to the peak interfacial shear stress τ_{max} was reduced under sustained load, but reduction magnitude shows an un-notable correlation with the duration and amplitude of load. The slip s_0 reduces by about 50% after the load duration for ninety days. When the load is greater than $0.5P_u$, the peak shear stress τ_{max} closed to loading position ranging of 15 mm decrease with the increase of load level and duration, but exhibit un-notable changes in other position. Finally, the bond slip constitutive model of CFRP-concrete interface under sustained load was proposed based on these test data. The failure test showed that there was no significant effect of sustained load on the ultimate debonding load when the bonding length is greater than the effective bonding length, but the peeling load P_{db} of interface during the first stripping in the debonding process was reduced due to the sustained load. When the loads of $0.5P_u$, $0.7P_u$, $0.9P_u$ last for 90 days, the peeling loads P_{db} reduce by 42%, 54%, 66% respectively.

Keywords: CFRP-concrete interface; bond-slip relationship; sustained load; peak shear stress; debonding load

近年来碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)被广泛的应用于混凝土结构加固中,外贴 CFRP 通过环氧树脂与混凝土表面粘结,其能否有效提高加固后结构的承载力,取决于 CFRP 与混凝土界面能否有效传递应力.大量的实践发现,加固后构件的破坏往往都是源于 CFRP-混凝土界面层的破坏.

目前,国内外学者针对 CFRP-混凝土界面粘结性能及剥离机理进行了大量研究.文献[1-2]等指出线性上升然后线性下降的粘结-滑移曲线可能与实际情况最为接近;文献[3]通过一系列双面剪切试验,指出界面的粘结滑移关系可用三角形模型表示;文献[4-5]等基于 30 个面内剪切试验,通过 FRP 应变分布给出了界面的粘结-滑移本构关系;文献[6]基于 29 个面内剪切试验给出了双曲线形式的界面粘结-滑移本构关系,文献[7]基于精细单元有限元模型分析,提出了简化的双线性粘结滑移本构关系.

从材料组成来看,CFRP-混凝土界面由粘结胶

收稿日期: 2017-03-16

基金项目: 国家自然科学基金(51508474)

作者简介: 马 明(1987—),男,博士研究生;

钱永久(1963—),男,教授,博士生导师;

通信作者: 钱永久, yjqian@sina.com

和被胶液渗透的混凝土表层组成,混凝土材料在荷载持续作用下会发生徐变,而粘结胶材料在已有的大量试验中均表现出了与应力和时间相关的黏弹性特征^[8],因此,CFRP-混凝土界面在持续荷载作用下的力学性能必然会发生改变,但目前的相关文献中鲜少见到有关持续荷载对 CFRP-混凝土界面性能影响的研究,文献[9]基于预应力 CFRP 加固梁试验建立了界面的黏弹性本构关系,分析了胶层蠕变对外贴预应力 CFRP 应力分布的影响;文献[10]研究了胶层蠕变对 CFRP 加固梁应变分布的影响;文献[11]通过 18 组双面剪切试验分析了持续荷载对外贴 CFRP 应变分布的影响;文献[12]通过对两个双剪试件长达 1 000 d 的测试,基于有效模量的概念推导了界面应力随时间的变化规律.值得注意的是在文献[9,11]的试验中均出现了试件在持续荷载作用下发生破坏的现象,但他们对于持续荷载下界面的破坏机理均未进行深入研究,已有的界面长期性能研究也都大都针对外贴 CFRP 应变以及界面应力随时间的变化,因此本文进行了 4 个荷载水平下,包含不同加载时间的 27 组双剪试验,以分析荷载水平及持载时间对界面粘结性能的影响.

1 试 验

1.1 试验材料

本试验外贴 CFRP 采用东丽 UT70-30 型碳纤维布,粘结胶采用 Araldite XH180 环氧树脂,混凝土强度等级为 C30,养护 28 d 后进行粘贴 CFRP 等工作.CFRP 抗拉强度、弹性模量、伸长率、厚度分别为 3 920 MPa、 2.37×10^5 MPa、1.71%、0.167 mm.粘结胶抗拉强度、弹性模量、伸长率分别为 47 MPa、2 859 MPa、1.90%.混凝土抗压、抗拉强度、弹性模量分别为 40.8 MPa、3.9 MPa、 2.77×10^4 MPa,加载龄期为 40 d.

1.2 试件设计和试验方案

本文采用的试验形式为面内双剪试验,试件由两个 100 mm×100 mm×200 mm 的混凝土棱柱体构成,在棱柱体相对的两个侧面粘贴一层宽度为 50 mm 的碳纤维布,如图 1 所示,左半部分为锚固区,为防止其破坏,采用满贴的同时在端部用 50 mm 宽碳纤维布进行缠绕粘贴,右半部分测量区粘结长度为 140 mm,加载端预留 25 mm 非粘结段以避免端部混凝土撕裂对界面剥离行为的影响.

试验共计 27 组双剪试件,其中 3 组用于静力破坏以确定界面的极限剥离荷载 P_u ,其余 24 组试件按照 $0.3P_u$ 、 $0.5P_u$ 、 $0.7P_u$ 、 $0.9P_u$ 进行持续荷载试验,试件具体分组见表 1,各试件在达到规定的加载时间

后卸载,随后进行破坏试验以确定极限剥离荷载.应变片按图 2 所示沿粘贴长度进行布置.

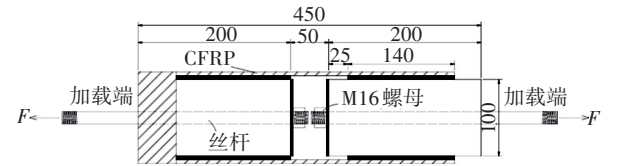


图 1 试件设计 (mm)

Fig.1 Design of specimens (mm)

表 1 双剪试件分组

Tab.1 Arrangement of specimens

编号	持续时间/d	荷载/%	编号	持续时间/d	荷载/%
S3D5	5	30	S7D5	5	70
S3D10	10	30	S7D10	10	70
S3D15	15	30	S7D15	15	70
S3D30	30	30	S7D30	30	70
S3D60	60	30	S7D60	60	70
S3D90	90	30	S7D90	90	70
S5D5	5	50	S9D5	5	90
S5D10	10	50	S9D10	10	90
S5D15	15	50	S9D15	15	90
S5D30	30	50	S9D30	30	90
S5D60	60	50	S9D60	60	90
S5D90	90	50	S9D90	90	90

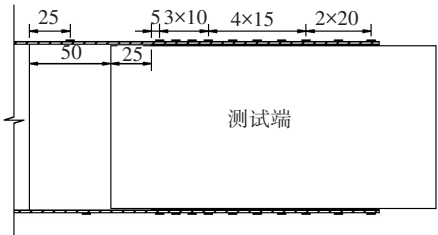


图 2 应变片布置图 (mm)

Fig.2 Layout of strain gage (mm)

2 试验结果及分析

2.1 极限剥离荷载及界面破坏过程

用于确定极限荷载的 3 组试件破坏模式一致,如图 3 所示,均为发生在混凝土层的界面剥离破坏,剥离后的 CFRP 上粘有一层 2~5 mm 厚的混凝土,说明 CFRP 与混凝土粘结质量较好,3 组试件的极限剥离荷载 P_u 分别为 25.4、26.2、24.1 kN.

图 4 给出了不同荷载作用下应变沿 CFRP 的分布情况.由图 4 可知,在加载初期,靠近加载端附近的 CFRP 应变有明显增长,随着距离增加,CFRP 应变迅速减小,当荷载在一定范围内(对本试验为 20 kN 左右),随着荷载的增加,有效粘结长度范围内应变不断增大,在此区域以外,应变几乎保持不变,直

至接近极限荷载时,伴随着界面剥离向自由端发展,此部分 CFRP 才开始承受荷载。

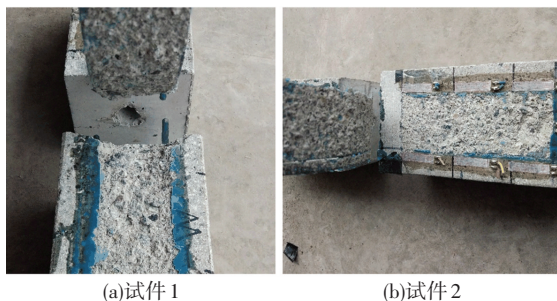


图 3 界面剥离破坏

Fig.3 Delaminating damage of interface

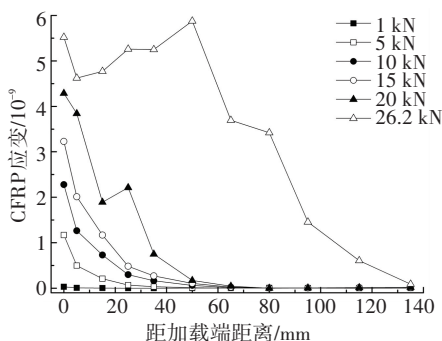


图 4 各级荷载下 CFRP 应变分布

Fig.4 Strain distribution of CFRP under different load

2.2 界面粘结滑移参数的获取

对外贴 CFRP 取一微段,受力情况如图 5 所示。

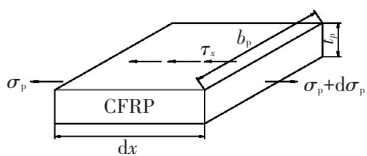


图 5 外贴 CFRP 力学机理

Fig.5 Mechanical mechanism of CFRP

图中 σ_p 为外贴 CFRP 中轴向拉应力, dx 为微段长度, b_p 和 t_p 为 CFRP 宽度和厚度, τ_x 为界面剪应力,根据平衡条件可得

$$\sigma_p b_p t_p + \tau_x b_p dx = (\sigma_p + d\sigma_p) b_p t_p, \quad (1)$$

$$\sigma_p = E_p \varepsilon_p, \quad (2)$$

$$\tau_x = E_p t_p \frac{d\varepsilon_p}{dx}. \quad (3)$$

式中 ε_p 为 CFRP 应变,当应变片布置足够密集时,可近似认为该点的剪应力与相邻两个应变片之间的平均剪应力相等,所以式(3)可改写为差分形式,即

$$\tau_x = E_p t_p \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}}{\Delta x_i}. \quad (4)$$

式中: E_p 为 CFRP 弹性模量, Δx_i 为应变片之间距离, ε_i 为第 i 个应变片的应变值.第 i 个应变片位置处的滑移量 s_i 可以通过对 CFRP 应变从自由端开始按

下式的积分得出

$$s = \int \varepsilon_p dx. \quad (5)$$

改写成差分形式为

$$s_i = \frac{(\varepsilon_0 \Delta x_0 + \varepsilon_i \Delta x_i)}{2} + \sum_{j=1}^{i-1} \varepsilon_j \Delta x_j. \quad (6)$$

式中: ε_0 为 CFRP 自由端应变值,按照式(4)和式(6)对试验结果进行处理,得到的界面粘结滑移结果如图 6 所示.由于 CFRP-混凝土界面剥离属于脆性破坏,一般来说只有靠近加载端的高应力区域能够得到完整的粘结滑移曲线,且由于混凝土材料的非均匀性,所得到的峰值粘结剪应力 $\tau_{\max}$ 以及界面的滑移量 s 会有一定差异,为了能够较好的对比各组试件结果,图 6 中数据均经过标准化处理。

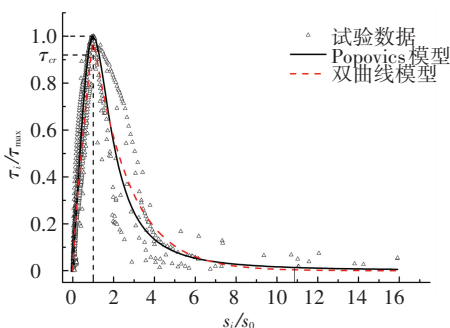


图 6 粘结滑移曲线

Fig.6 Bond-slip curve of specimens

从图 6 可以看出,CFRP-混凝土界面的粘结-滑移关系曲线可以分为如下 4 个阶段:1) 上升段,在此阶段界面整体呈线弹性,界面刚度较大,剪应力随滑移迅速增加;2) 软化段,当界面剪应力达到 τ_{cr} 时,界面开裂并出现局部滑移,界面刚度下降,对应上节中裂缝发展阶段的起点;3) 下降段,剪应力达到峰值 $\tau_{\max}$ 后,界面开始剥离并随着滑移的继续增加,剥离逐渐向自由端延伸,已剥离的区域剪应力随着滑移的增加而减小;4) 当滑移增大到极限滑移量 s_u 时,界面完全剥离,此时的界面上的荷载全部由混凝土骨料之间的摩擦和机械咬合作用承担.图 6 试验结果中的上升段数据都很接近,但在下降段和破坏阶段呈现出一定差异,这是由于界面材料的不均匀性造成的。

根据上节试验结果,界面的剥离破坏一般发生在紧邻胶层的混凝土层中,通过增强系数 α 考虑粘结胶对混凝土抗拉强度的增强作用,根据试验结果,峰值粘结应力 $\tau_{\max}$ 可以写为

$$\tau_{\max} = \alpha \beta_w f_t = 2.595 \beta_w f_t. \quad (7)$$

式中: f_t 为混凝土抗拉强度, β_w 为外贴 CFRP 和混凝土构件宽度比影响系数, β_w 表达式采用文献[13]研

究成果, $\beta_w = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_p}{b_c}}{1 + \frac{b_p}{b_c}}}$, 与峰值剪应力对应的滑移

取试验结果的平均值 $s_0 = 0.061 \text{ mm}$.

2.3 静力荷载下界面的粘结-滑移本构关系

Popovics 模型^[14]是根据试验提出用来描述混凝土应力应变关系的模型, 该模型的曲线形状与界面的粘结滑移曲线具有相似的特征, 因此采用此模型对本文试验结果进行拟合, 结果见式 (8) 及图 6 所示, $R^2 = 0.919$.

$$\frac{\tau}{\tau_{\max}} = \frac{s}{s_0} \frac{3.295 \ 9}{2.295 \ 9 + \left(\frac{s}{s_0}\right)^{3.295 \ 9}} \quad (8)$$

文献[6-7, 15]等基于双曲线形式给出过界面的粘结滑移本构模型, 通过对本试验曲线的上升段和下降段分别进行回归, 得到的双曲线模型为

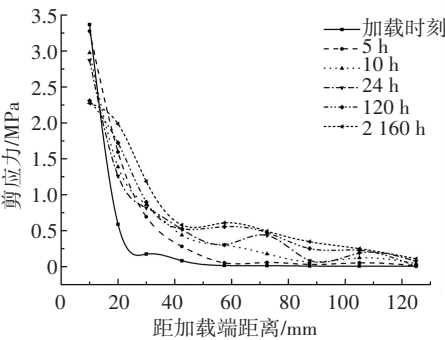
$$\begin{cases} \frac{\tau}{\tau_{\max}} = \left(\frac{s}{s_0}\right)^{0.771 \ 35}, & s \leq s_0; \\ \frac{\tau}{\tau_{\max}} = e^{-0.562 \ 88\left(\frac{s}{s_0}-1\right)}, & s > s_0. \end{cases} \quad (9)$$

$R^2 = 0.897$, 同样将拟合结果绘制于图 6 中, 对比两种模型, 可以发现上升段相差不大, 下降段双曲线模型预测的界面刚度略大于 Popovics 模型, 曲线的下降趋势更为平缓, 但是在 $s = s_0$ 时, 双曲线模型在此位置形成一个尖角, 无法模拟出塑性软化段, 与试验结果存在一定误差, 综合来看, Popovics 模型对界面的粘结滑移关系模拟结果更优.

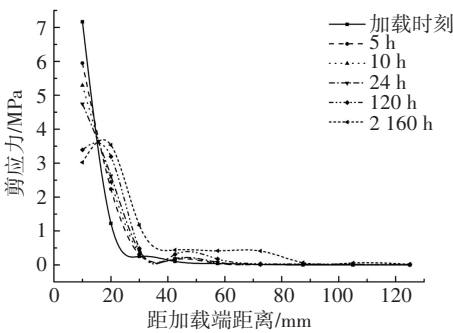
3 持续荷载对界面粘结性能的影响

3.1 界面剪应力

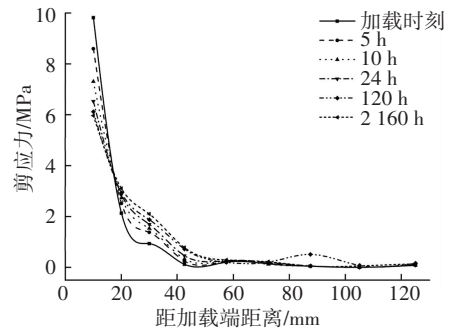
根据第 2 节中获得的极限剥离荷载, 取均值为 25.2 kN, 按照表 1 中对应的荷载水平和持载时间对各试件进行加载, 界面的剪应力变化如图 7 所示.



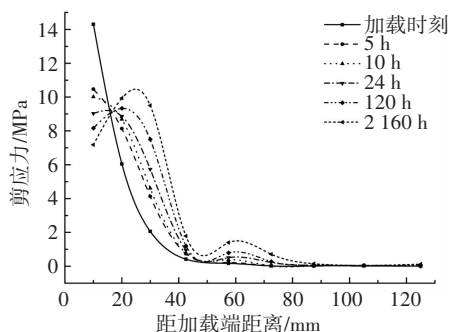
(a) S3D90 试件



(b) S5D90 试件



(c) S7D90 试件



(d) S9D90 试件

图 7 界面剪应力变化

Fig.7 Changes of interfacial shear stress

由图 7 可知, 随着荷载持续时间的增加, 靠近加载端的第一个测点处界面剪应力逐渐减小, 其余测点处剪应力逐渐增大, 增大幅度沿粘贴长度逐渐减小, 剪应力的改变在前期发展较快, 随后变化速率逐渐降低. 对于本试验 $0.3P_u$ 、 $0.5P_u$ 、 $0.7P_u$ 和 $0.9P_u$ 情况下, 第一个测点处在加载 2 160 h 后剪应力分别降低了 1.10、3.14、3.85、7.12 MPa, 说明界面的蠕变可以有效地降低剪应力峰值, 减缓界面的应力集中现象, 使剪应力沿粘结长度分布更加均匀.

3.2 界面粘结-滑移本构关系

表 1 中各试件分别在达到规定加载时间后进行静力破坏试验, 所得各试件在持载 90 d 后的界面粘结-滑移曲线如图 8 所示, 图中 10 mm - A/B 表示测试点位于 A/B 面 (A/B 面分别为双剪试件粘贴 CFRP 的两个测试面) 距加载端距离为 10 mm 的测点结果.

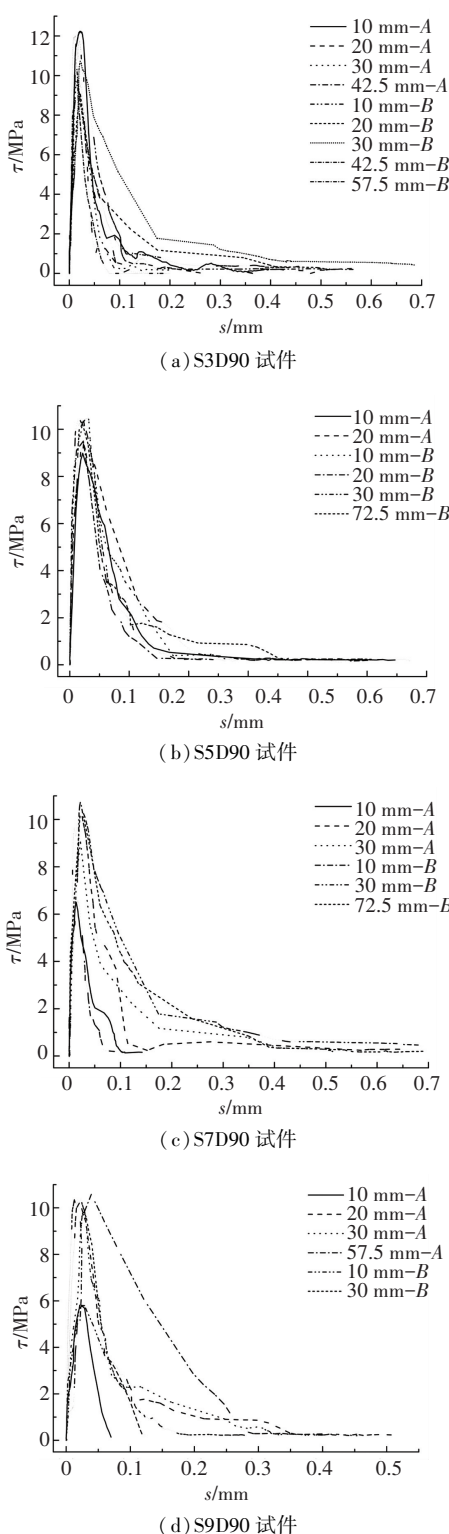


图 8 界面粘结滑移关系变化

Fig.8 Changes of interfacial bond-slip curve

由图 8 可知,对于 S3D90,各测点的粘结滑移曲线形状较为接近;对于 S5D90,靠近加载端测点的粘结-滑移曲线与其他测点相比峰值应力 $\tau_{\max}$ 有所降低,界面的初始刚度也有所下降,这一现象在 S7D90 和 S9D90 中更为明显,且粘结滑移曲线下降段发展更为迅速,界面破坏的延性与其他测点相比有所下降,粘结滑移曲线更接近于双线性结构,除加载端第一

个测点外,其他测点之间的粘结滑移曲线并无明显差异.表 2 给出了各组试件距加载端 10 mm 处测点的 $\tau_{\max}$ 及 s_0 试验结果,从表中数据可以看出,当荷载水平较低时($0.3P_u$),随着荷载持续时间的增加,峰值剪应力 $\tau_{\max}$ 没有明显改变,而当荷载水平较高时($\geq 0.5P_u$),随着荷载持续时间的增加, $\tau_{\max}$ 逐渐减小,且荷载水平越高,对应的 $\tau_{\max}$ 越小,对 s_0 来说,随着荷载水平和持载时间的增长, s_0 没有明显变化,但与未经持续荷载作用的试件相比, s_0 有所减小.这些试验结果说明:在外荷载超过一定荷载水平后,荷载的持续作用会对 CFRP-混凝土界面造成一定损伤,使得界面的峰值应力 $\tau_{\max}$ 及其所对应的界面滑移 s_0 有所减小, $\tau_{\max}$ 和 s_0 的减小程度与外荷载大小和持续时间相关,损伤界面的粘结滑移关系曲线与未损伤的相比下降段更短,界面延性降低,曲线形状更接近于双线性,但界面的损伤局限于局部范围内,产生这一现象的原因主要是界面剪应力沿粘结长度减小较快,而较小的剪应力并不会引起峰值应力 $\tau_{\max}$ 的降低.从本试验结果来看损伤范围大致处于从加载端开始的 15 mm 之内.

表 2 峰值剪应力及对应滑移

Tab.2 Peak shear stress and corresponding slip

试件编号	$\tau_{\max} / \text{MPa}$		s_0 / mm	
	A - 1	B - 1	A - 1	B - 1
S3D5	10.23	11.32	0.021	0.019
S3D10	10.32	10.83	0.015	0.013
S3D15	10.83	9.52	0.013	0.020
S3D30	10.48	10.76	0.021	0.023
S3D60	10.75	10.72	0.020	0.022
S3D90	10.23	11.75	0.021	0.020
S5D5	10.55	10.58	0.028	0.039
S5D10	9.89	9.74	0.021	0.021
S5D15	8.82	—	0.021	—
S5D30	10.30	9.79	0.018	0.022
S5D60	9.17	9.91	0.014	0.024
S5D90	8.99	10.47	0.022	0.031
S7D5	8.11	7.97	0.021	0.020
S7D10	7.52	7.39	0.014	0.021
S7D15	7.09	7.16	0.013	0.014
S7D30	6.89	6.79	0.011	0.020
S7D60	—	—	—	—
S7D90	6.49	6.58	0.014	0.017
S9D5	7.59	7.62	0.021	0.015
S9D10	6.91	6.99	0.026	0.019
S9D15	6.48	6.53	0.022	0.021
S9D30	6.18	6.22	0.015	0.012
S9D60	6.02	6.08	0.010	0.019
S9D90	5.76	5.82	0.026	0.021

注:表中测点 A - 1 和 B - 1 分别表示试件 A、B 面距加载端 10 mm 位置处测点,“—”表示该测点处未获取到完整的粘结滑移数据,其中 S7D60 试件没有数据的原因是加载过程操作失误而造成试件损毁.

与未经持续荷载作用的试件相比, 经持续荷载作用后, 所有测点的界面滑移量 s_0 均有所降低, 两种情况下 s_0 的对比如图 9 所示。

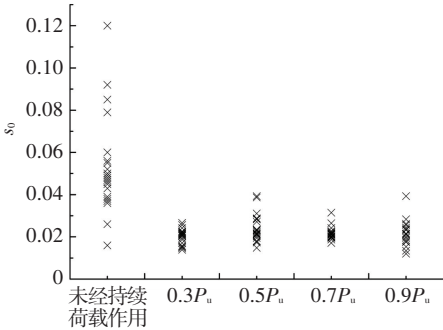


图 9 峰值剪应力对应滑移对比

Fig.9 Comparison between slip corresponding and peak shear stress

由图 9 可知, s_0 的减小量与荷载大小和持续时间无明显相关, s_0 可以表示为峰值应力与界面刚度之比

$$s_0 = \tau_{\max} / \beta K_i. \tag{10}$$

式中 β 为与界面刚度相关的系数, 可根据试验结果回归求出, K_i 为界面刚度, 由于界面是由混凝土和胶层共同组成, 因此 K_i 应为胶层剪切刚度和混凝土层剪切刚度串联而成, 可以表示为 $K_i = K_a K_c / (K_a + K_c)$, 其中 K_a 为胶层剪切刚度, K_c 为混凝土层剪切刚度, 分别写为 $K_a = G_a / t_a$, $K_c = G_c / t_c$, t_a 、 t_c 分别为胶层厚度和混凝土层参与剪切变形的厚度, t_a 根据试验测量结果取为 0.53 mm, 根据试件破坏结果, 界面剥离后 CFRP 上粘贴的混凝土层厚度约为 2~5 mm, 并参考文献[16]的有限元分析结果, t_c 取值为 5 mm, 根据试验结果拟合可得

$$s_0 = \begin{cases} \tau_{\max} / 0.143 \, 1 K_i, & \text{短期荷载作用;} \\ \tau_{\max} / 0.327 \, 7 K_i, & \text{持续荷载作用.} \end{cases} \tag{11}$$

对于 $0.5P_u$ 及其以上荷载情况, 可将损伤部位的应力峰值写为与荷载水平和持载时间相关的函数, 首先根据试验结果以持载时间作为变量对界面峰值应力进行回归分析, 如图 10 所示。

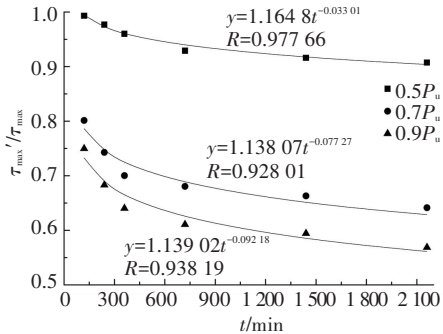
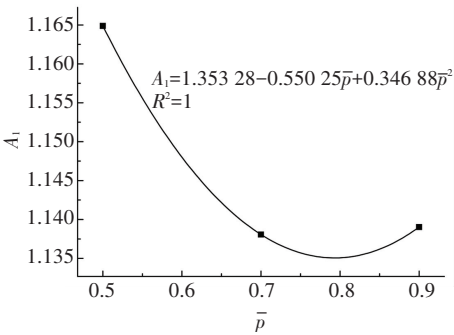


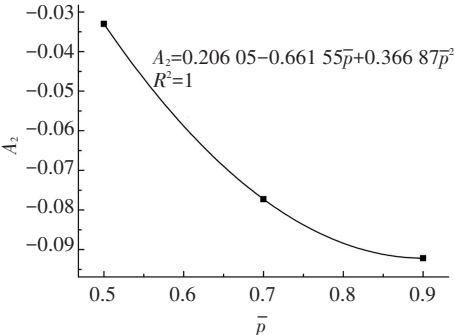
图 10 剪应力峰值与时间回归分析

Fig.10 Regression analysis between peak shear stress and time

由图 10 可知, 应力峰值与时间的关系在不同荷载水平下均可以写为相同的函数形式, 因此将回归方程中的两个系数分别作为荷载水平的函数并进行回归分析, 结果如图 11 所示。



(a) 参数 A_1 回归分析



(b) 参数 A_2 回归分析

图 11 应力峰值与荷载水平回归分析

Fig.11 Regression analysis between peak shear stress and load level

由图 11 可知, 持续荷载下靠近加载端的局部界面应力峰值可写为

$$\begin{cases} \tau'_{\max}(\bar{p}, t) = A_1(\bar{p}) t^{A_2(\bar{p})} \tau_{\max}, \\ A_1(\bar{p}) = 1.353 \, 28 - 0.550 \, 25 \bar{p} + 0.346 \, 88 \bar{p}^2, \\ A_2(\bar{p}) = 0.206 \, 05 - 0.661 \, 55 \bar{p} + 0.366 \, 87 \bar{p}^2. \end{cases} \tag{12}$$

式中 $\bar{p} = P/P_u$, P 为施加在试件上的恒定荷载, P_u 为界面的极限剥离荷载, $\tau_{\max}$ 按照式(7) 进行计算. 综上所述, CFRP-混凝土界面的粘结滑移本构关系可以概括如下。

1) 对于短期荷载作用下, 采用基于 Popovics 的模型对界面粘结滑移关系为

$$\begin{cases} \frac{\tau}{\tau_{\max}} = \frac{s}{s_0} \frac{3.295 \, 9}{2.295 \, 9 + \left(\frac{s}{s_0}\right)^{3.295 \, 9}}, \\ \tau_{\max} = 2.595 \beta_w f_t, \\ s_0 = \tau_{\max} / 0.143 \, 1 K_i, \\ K_i = K_a K_c / (K_a + K_c). \end{cases} \tag{13}$$

2) 在持续荷载作用下, 考虑材料蠕变影响后,

界面的粘结滑移本构关系,当 $\bar{p} < 0.5$ 时,界面的粘结滑移关系仍可采用基于 Popovics 模型的表达形式,参数 n 根据试验结果拟合为2.513 5,拟合结果见图 12 所示.

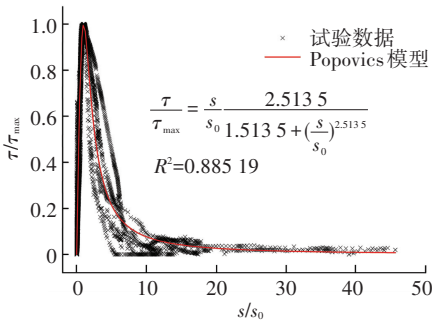


图 12 本构模型与试验数据对比

Fig.12 Comparison between constitutive model and test data

$$\begin{cases} \frac{\tau}{\tau_{\max}} = \frac{s}{s_0} \frac{2.513\ 5}{1.513\ 5 + \left(\frac{s}{s_0}\right)^{2.513\ 5}}, \\ s_0 = \tau_{\max} / 0.327\ 7K_i. \end{cases} \quad (14)$$

式中 $\tau_{\max}$ 及 K_i 按照式(13) 计算.

当 $\bar{p} \geq 0.5$ 时,距离加载端一定距离以外的位置处,界面的粘结滑移模型仍采用式(14) 进行模拟,但对于距离加载端 15 mm 以内时,界面的粘结滑移模型以双线性形式给出,即

$$\begin{cases} \frac{\tau}{\tau_{\max}} = \frac{s}{s_0}, & s \leq s_0; \\ \frac{\tau}{\tau_{\max}} = \frac{s_u - s}{s_u - s_0}, & s_0 < s \leq s_u; \\ \tau = 0, & s_u < s. \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\tau_{\max}'$ 按照式(12) 进行计算, s_0 按式(14) 计算, s_u 为根据试验结果拟合为 $s_u = 0.174 - 2.117s_0$.

3.3 界面剥离荷载

各试件经持续荷载作用后,界面的极限剥离荷载 P_u 及破坏过程中首次出现界面剥离时的荷载 P_{db} 见表 3 所示.

根据试验结果,持续荷载作用并未对界面的极限剥离荷载产生明显影响,产生这一现象的主要原因主要为外荷载小于 $0.5P_u$ 时,界面的峰值剪应力并未随时间改变,对于更高的荷载水平,持续荷载作用仅造成靠近加载端局部界面的 $\tau_{\max}$ 及 s_0 降低,但对于整个界面来说,粘贴长度大于有效粘结长度,因此局部界面由于荷载持续作用产生的损伤并不会对界面最终的剥离承载力造成影响.但表中数据显示持续荷载作用会使界面首次出现剥离的荷载 P_{db} 有所降低,且 P_{db} 的降低与界面剪应力峰值的降低规律相同,对于 $0.3P_u$ 荷载持续作用下, P_{db} 未发生明显改

变,而对于 $0.5P_u$ 、 $0.7P_u$ 、 $0.9P_u$ 持续作用 90 d 后, P_{db} 分别降低了 42%、54%、66%.

表 3 CFRP-混凝土界面剥离承载力

Tab.3 Debonding strength of CFRP-concrete interface					
试件编号	P_u /kN	P_{db} /kN	试件编号	P_u /kN	P_{db} /kN
S3D5	22.1	19.4	S7D5	25.7	11.2
S3D10	24.1	20.7	S7D10	27.8	10.5
S3D15	21.2	18.5	S7D15	28.2	10.7
S3D30	25.7	22.1	S7D30	27.0	9.6
S3D60	27.6	23.2	S7D60	27.6	9.3
S3D90	23.9	19.5	S7D90	23.9	9.3
S5D5	26.1	13.2	S9D5	24.6	10.2
S5D10	26.4	13.0	S9D10	26.4	8.9
S5D15	24.8	12.5	S9D15	27.1	8.7
S5D30	23.1	12.1	S9D30	24.5	7.5
S5D60	23.8	12.4	S9D60	28.1	7.5
S5D90	28.5	11.8	S9D90	23.9	6.8
M1	25.4	20.4	M2	26.2	21.2
M3	24.1	19.8			

注:M1~M3 试件为未经持续荷载作用的试件.

4 结 论

1)持续荷载作用下,界面的剪应力峰值随时间逐渐减小,且减小幅度随外荷载水平的增加而增大.

2)经持续荷载作用后,靠近加载端 15 mm 范围内的 $\tau_{\max}$ 有所降低,降低程度与荷载水平和荷载持续时间相关,在此范围外,与未经持续荷载作用的试件相比, $\tau_{\max}$ 并无明显变化.与 $\tau_{\max}$ 对应的界面滑移 s_0 在荷载持续作用后降低了约 50%,且 s_0 的降低与荷载水平和荷载持续时间无明显相关.

3)在保证粘结长度大于有效粘结长度的情况下,持续荷载造成的局部界面损伤并不会引起界面极限剥离荷载的降低,仅会对界面首次出现剥离的荷载 P_{db} 产生影响,对于 $0.5P_u$ 、 $0.7P_u$ 、 $0.9P_u$ 持续作用 2 160 h 后, P_{db} 分别降低了 42%、54%、66%.

参考文献

[1] YUAN H. WU Zhishen. Interfacial fracture theory in structures strengthened with composite of continuous fiber [C]// Proceedings of Symposium of China and Japan. Tokyo: Science and Technology of 21st Century, 1999: 142-155.

[2] TALJSTEN B. Strengthening of existing concrete structures with epoxy bonded plates of steel or fiber reinforced plastics [D].Sweden: Lulea University of Technology, 2012.

[3] 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.