

文章编号:1001-4888(2014)05-655-11

表层嵌贴 CFRP 板条-混凝土界面 粘结应力模型的试验与理论研究^{*}

彭晖^{1, 2}, 高勇¹, 陈俊敏^{1, 3}, 蒋鑫⁴

(1.长沙理工大学 土木与建筑学院, 湖南长沙 410114; 2.长沙理工大学 桥梁工程安全控制教育部重点实验室, 湖南长沙 410114;
3.重庆广建装饰股份有限公司,重庆 400025; 4.湖南省交通科学研究院,湖南长沙 410015)

摘要: 基于表层嵌贴 CFRP 板条-混凝土粘结性能试验研究的结果,提出了考虑残余摩擦力的三线性粘结滑移本构模型,建立了嵌贴 CFRP-混凝土界面粘结应力模型;通过求解微分方程得出了解析解的一般形式,进而推导出界面相对滑移、粘结应力和 CFRP 拉伸应力等随荷载的分布函数,并得到了粘结承载力的计算公式。在此基础上,通过试验数据对粘结应力模型进行了验证,理论计算值与试验值吻合较好。研究结果表明,本文提出的表层嵌贴 CFRP 板条-混凝土界面粘结应力模型能够很好地预测嵌贴 FRP-混凝土的粘结承载力,并且能够准确描述界面粘结应力的分布。

关键词: 表层嵌贴; 碳纤维增强聚合物板条; 粘结应力模型; 粘结滑移本构关系; 残余摩擦力

中图分类号: TU378 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-14-155

0 引言

碳纤维增强复合材料(CFRP)加固混凝土结构技术被广泛应用于试验研究和工程实践中,并取得了大量的研究成果^[1,2]。已有研究表明^[3,4],CFRP 加固混凝土结构时 CFRP 与混凝土间的粘结性能对其加固效果有重要影响,在粘结强度有保证的情况下,可以充分发挥 CFRP 的物理力学性能,从而提高加固的可靠性。反之,粘结强度差时可能会导致在 CFRP 性能没有充分发挥之前发生界面剥离破坏,造成材料的浪费并降低加固的可靠性。换言之,CFRP-混凝土间的粘结性能很大程度上决定了加固结构的承载能力、破坏形态以及 CFRP 的材性利用,一直是 CFRP 加固混凝土结构技术的关键科学问题。

国内外学者已对外贴 CFRP 板的粘结性能进行了大量研究,基于外贴 FRP-混凝土面内剪切试验提出了很多界面粘结应力模型,比较经典的有杨勇新模型^[5]、陆新征模型^[6]、GEMERT 模型^[7]、MAEDA 模型^[8]以及 CHEN&TENG 模型^[9]等。表层嵌贴 FRP 加固混凝土是近年来迅速发展的 FRP 加固技术,其原理是将 FRP 嵌入混凝土结构表面的开槽中,通过 FRP 与混凝土三面甚至四面的粘结获得比外贴 FRP 更好的粘结性能,从而提高 FRP 的加固效率。目前针对表层嵌贴 FRP-混凝土的粘结性能已开展了一定研究,但关于考虑剥离界面残余摩擦力的表层嵌贴加固技术的界面粘结应力模型鲜有报道,Hassan 和 Rizkalla^[10]认为外贴 FRP 加固中存在的“有效粘结长度”在表层嵌贴加固中同样存在,当实际粘结长度超过这一长度时,FRP-混凝土的粘结承载力将不再伴随粘结长度增大而提高。但 De

* 收稿日期: 2014-08-12; 修订日期: 2014-09-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2015CB057701),国家自然科学基金项目(51008036),湖南省教育厅科学研究重点项目(14A005),长沙市科技计划项目(K1203038-11)。

通讯作者: 彭晖(1976—),博士,副教授,主要从事桥梁结构耐久性能与先进复合材料的应用研究。E-mail: Huipeng1210@gmail.com

Lorenzis等^[11]认为界面的粘结承载力不仅由应力传递长度内的界面应力提供,而且剥离界面可能存在残余摩擦力,因此粘结承载力随着粘结长度的增加而提高。因此,虽然对表层嵌贴FRP-混凝土的界面粘结性能已有一些研究,但对于一些关键问题,如是否存在有效粘结长度或残余摩擦力仍存在分歧。鉴于此,本文在试验研究基础上,提出了表层嵌贴CFRP板条与混凝土间的粘结滑移本构关系,推导出了界面粘结应力模型,并根据试验结果对粘结应力模型进行了验证。

1 试验研究

作者进行了33个表层嵌贴CFRP混凝土试件的单剪试验,试验装置以及试件设计如图1、图2所示。试件由素混凝土棱柱体和嵌贴的CFRP板条组成,混凝土棱柱分成两种规格:150mm×150mm×300mm和150mm×150mm×500mm,混凝土强度分别为C15、C40和C60,棱柱体表面均设置了深度为30mm的开槽用于嵌贴FRP。试验所用CFRP板条为美国Aslan公司的500型CFRP板条(矩形截面),截面规格分别为16mm×2.0mm和16mm×4.5mm,名义拉伸强度为2068MPa,弹性模量为131GPa,伸长率为1.71%;所用的粘结树脂为瑞士Sika公司生产的Sikadur®-30型树脂,名义拉伸强度为31.9MPa,弹性模量为2.63GPa。



图1 试验装置

Fig. 1 Experiment equipments

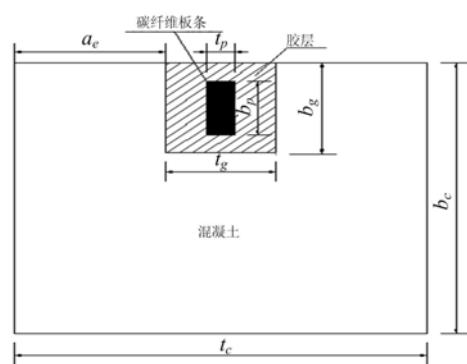


图2 试件横截面图

Fig. 2 Cross-section of specimens

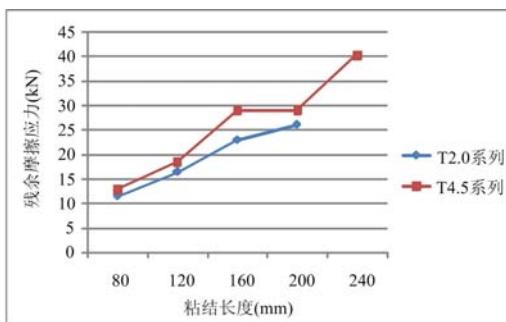


图3 试件残余摩擦力-粘结长度曲线

Fig. 3 Curves of residual friction versus bond length

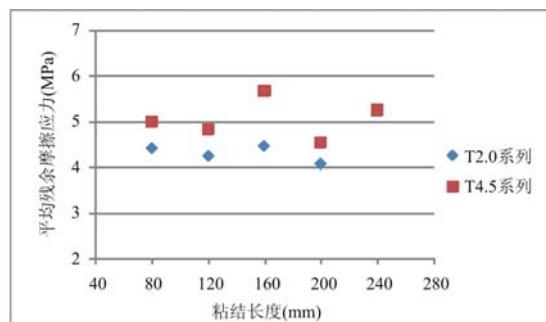


图4 试件残余摩擦应力-粘结长度曲线

Fig. 4 Curves of residual frictionstress versus bond length

试验中部分试件发生了FRP-树脂粘结界面的剥离破坏,但所有发生界面粘结破坏的试件其界面剥离后还存在一定的残余承载力,并且随着粘结长度的增加,试件的承载力始终增大。这应是由于剥离界面存在残余摩擦力所致。图3描绘了表层嵌贴FRP-混凝土界面的残余摩擦力与粘结长度的对应关系,图4给出了表层嵌贴FRP-混凝土界面的平均残余摩擦应力(残余摩擦力/粘结面积)与粘结长度的对应关系。从图中可以看到,界面残余摩擦力随粘结长度增加而近似线性增大,而界面残余摩擦应力则跟粘结长度无关,嵌贴2mm厚CFRP板条的试件其平均残余摩擦应力为4.06~4.45MPa,嵌贴4.5mm厚

CFRP 板条的试件其平均残余摩擦应力分布在 4.54~5.66 MPa 区间。这一现象说明:在表层嵌贴 FRP 试件界面剥离之后,由于存在三个甚至四个方向的约束,仍然在剥离界面上保持一定的摩擦应力。外贴 FRP-混凝土的粘结-滑移本构关系中,界面剥离后粘结应力下降为零。但作者前述的试验研究表明,表层嵌贴 FRP 与混凝土间的粘结-滑移本构关系与外贴 FRP 存在很大差异:粘结剥离后界面仍然存在残余摩擦力,这与相当多学者^[10,12]的观点存在分歧。已有的外贴 FRP-混凝土粘结应力模型不能用于描述和预测表层嵌贴 FRP-混凝土的粘结行为,有必要根据表层嵌贴 FRP-混凝土的粘结-滑移本构关系,建立适用于这种新 FRP 加固技术的粘结行为分析模型。

2 理论分析

2.1 界面粘结滑移本构模型

已有关于外贴 FRP-混凝土粘结行为的研究中,双线型粘结滑移本构模型得到了广泛认可^[13]。研究结果表明^[14,15],当 CFRP 板条厚度较小时,双线性模型也可以用来表征表层嵌贴 CFRP 板条-混凝土界面的粘结性能。根据前述试验研究结果,本文将双线性模型修正为考虑界面剥离后存在残余摩擦力的三线性模型,如图 5 所示。在此基础上,基于 Wu 等^[16]和 Yuan 等^[17]提出的外贴 FRP-混凝土界面粘结行为假设与分析方法,构建考虑残余摩擦力的表层嵌贴 FRP 加固结构的界面粘结应力模型。粘结滑移本构关系模型如下:

$$\tau(\delta) = \begin{cases} \frac{\tau_f}{\delta_1} \delta & 0 \leq \delta \leq \delta_1 \\ \frac{\tau_f - \tau_r}{\delta_f - \delta_1} (\delta_f - \delta) + \tau_r & \delta_1 \leq \delta \leq \delta_f \\ \tau_r & \delta \geq \delta_f \end{cases} \quad (1)$$

式中, τ_f 为最大粘结剪应力; τ_r 为残余摩擦应力; δ_1 为最大粘结剪应力对应的粘结滑移值; δ_f 为最大粘结滑移值。

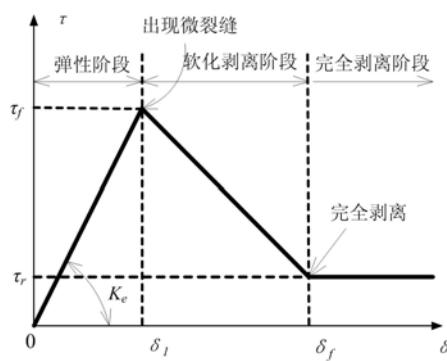


图 5 表层嵌贴 FRP 系统的粘结滑移本构模型

Fig. 5 Bond-slip mode of the NSM FRP system

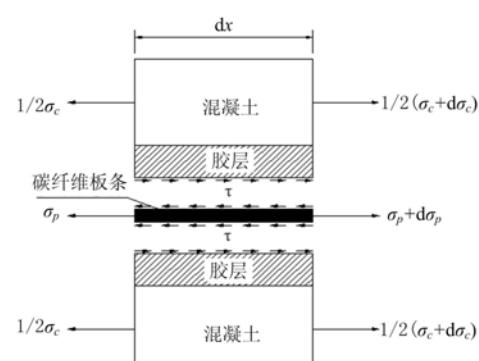


图 6 微元段内各部分受力状态

Fig. 6 Tensile stress and bond stress distribution in element

2.2 界面微分方程

取微元段 dx 如图 6 所示,由混凝土和 CFRP 受力平衡可以得出^[16, 17]:

$$\sigma_p t_p b_p + \sigma_c t_c b_c = 0 \quad (2)$$

式中, t_p, b_p 分别为 CFRP 板的厚度和宽度; t_c, b_c 分别为混凝土棱柱体的厚度和宽度。

单独考虑 CFRP 板条受力,由 CFRP 板条轴向受力平衡有:

$$\frac{d\sigma_p}{dx} = \frac{\tau L_{per}}{t_p b_p} \quad (3)$$

式中, L_{per} 为破坏界面的周长。当试件破坏在胶层与混凝土界面时,有 $L_{per}=2b_g+t_g$; 试件破坏在胶层与 CFRP 板条界面时,有 $L_{per}=2b_p+2t_p$; CFRP 板条的厚度相对较小,在这里取 $L_{per} \approx 2b_p$ 。

由 $\delta = u_p - u_c$, 关于 x 二阶微分可得到下列方程:

$$\frac{d^2 \delta}{dx^2} = \frac{d^2 u_p}{dx^2} - \frac{d^2 u_c}{dx^2} \quad (4)$$

结合式(3)和 $\sigma_p = E_p \frac{du_p}{dx}$, 有:

$$\frac{d^2 u_p}{dx^2} = -\frac{\tau L_{per}}{E_p t_p b_p} \quad (5)$$

结合式(2)和 $\sigma_c = E_c \frac{du_c}{dx}$, 有:

$$\frac{d^2 u_c}{dx^2} = -\frac{\tau L_{per}}{E_c t_c b_c} \quad (6)$$

联立式(4)、(5)和(6), 有:

$$\frac{d^2 \delta}{dx^2} - \lambda \tau = 0 \quad (7)$$

式中, $\lambda = \frac{L_{per}}{E_p t_p b_p} + \frac{L_{per}}{E_c t_c b_c} = \frac{L_{per}}{t_p b_p} \left(\frac{1}{E_p} + \frac{t_p b_p}{E_c t_c b_c} \right)$, 令 $\beta_0 = \left(\frac{1}{E_p} + \frac{t_p b_p}{E_c t_c b_c} \right)$, $\beta_1 = \frac{L_{per}}{t_p b_p}$, 则 $\lambda = \beta_0 \beta_1$, 其中 E_c, E_p 分别为混凝土和 CFRP 板条的弹性模量。当不考虑边距影响时, $\frac{t_p b_p}{E_c t_c b_c}$ 很小可以忽略不计, 如果 CFRP 板条厚度又较小, 可得到 $\lambda = \frac{2}{E_p t_p}$ 。

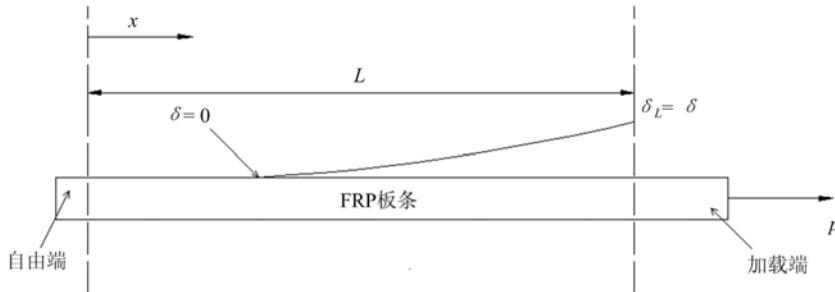


图 7 弹性阶段

Fig. 7 State of elastic

2.3 界面弹性受力阶段

在此阶段, $0 \leq \delta \leq \delta_1$, $0 \leq \tau \leq \tau_f$, CFRP 板条、混凝土和胶层之间协调变形, 如图 7 所示。边界条件有 $\delta(L) = \delta$, $\delta(0) = 0$, $\tau(0) = 0$, $\sigma_p(L) = \frac{P}{t_p b_p}$, P 为作用在板条上的力。联立式(1)、(7)可解得:

$$\begin{cases} \delta(x) = \frac{P \beta_0}{t_p b_p \lambda_1} \frac{\cosh(\lambda_1 x)}{\sinh(\lambda_1 L)} \\ \tau(x) = \frac{\tau_f}{\delta_1} \frac{P \lambda_1}{t_p b_p \lambda_1} \frac{\cosh(\lambda_1 x)}{\sinh(\lambda_1 L)} \\ \sigma_p(x) = \frac{P}{t_p b_p} \frac{\sinh(\lambda_1 x)}{\sinh(\lambda_1 L)} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\lambda_1 = \sqrt{\frac{\lambda \tau_f}{\delta_1}}$ 。

当 $\tau(L) = \tau_f$ 时, 加载端荷载 P 达到弹性阶段最大值, 结合式(8)可以得到:

$$P_{max} = \frac{\tau_f b_p}{\lambda_1} \tanh(\lambda_1 L) \quad (9)$$

当实际粘结长度覆盖整个弹性阶段所需的粘结长度时, P_{max} 达到最大值。定义弹性阶段所需的有效粘结长度为 P_{max} 达到 97% 的最大值所对应的粘结长度, 则根据 $\tanh(2) \approx 0.97$, 可得到弹性阶段的有效粘结长度为:

$$l_{e,e} = \frac{2}{\lambda_1} \quad (10)$$

2.4 软化剥离阶段

在此阶段, 粘结树脂进入塑性阶段, 并出现微裂缝, 随后碳纤维板条与环氧树脂胶界面开始剥离, 界面粘结剪应力开始下降。如图 8 所示, 靠近加载端粘结界面一小段 a 附近, 相对滑移值在区间 $[\delta_1, \delta_f]$ 内, 而 $(L-a)$ 段仍处于弹性阶段, 其内各点的相对滑移在 $[0, \delta_1]$ 之间。

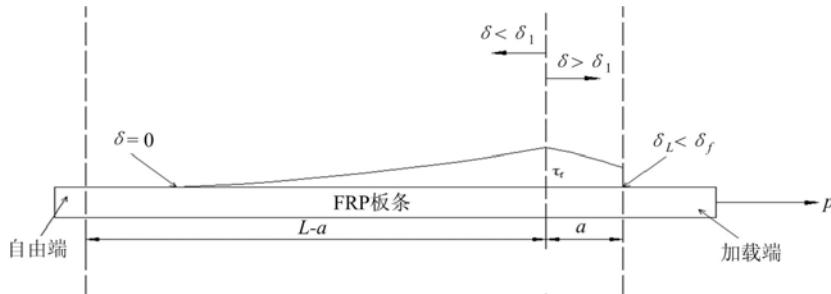


图 8 软化阶段

Fig. 8 Stage of propagation of softening

在 $(L-a)$ 段, $\delta(0)=0$, $\tau(0)=0$, $\delta(L-a)=\delta_1$, $\tau(L-a)=\tau_f$ 。联立式(1)与式(7)有:

$$\begin{cases} \delta(x) = \delta_1 \frac{\cosh(\lambda_1 x)}{\cosh(\lambda_1(L-a))} \\ \tau(x) = \tau_f \frac{\cosh(\lambda_1 x)}{\cosh(\lambda_1(L-a))} \\ \sigma_p(x) = \frac{\tau_f \beta_1}{\lambda_1} \frac{\sinh(\lambda_1 x)}{\cosh(\lambda_1(L-a))} \end{cases} \quad (11)$$

在 a 段, $\delta(L-a)=\delta_1$, $\tau(L-a)=\tau_f$ 。联立式(1)与式(7)可得出其特解:

$$\begin{cases} \delta(x) = \frac{\tau_f(\delta_f - \delta_1)}{\tau_f - \tau_r} \left\{ \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \tanh[\lambda_1(L-a)] \cdot \sin[\lambda_2(x-L+a)] - \cos[\lambda_2(x-L+a)] \right\} + \frac{\tau_f \delta_f - \tau_r \delta_1}{\tau_f - \tau_r} \\ \tau(x) = -\tau_r \left\{ \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \tanh[\lambda_1(L-a)] \cdot \sin[\lambda_2(x-L+a)] - \cos[\lambda_2(x-L+a)] \right\} \\ \sigma_p(x) = \frac{\beta_1 \tau_f}{\lambda_2} \left\{ \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \tanh[\lambda_1(L-a)] \cdot \cos[\lambda_2(x-L+a)] + \sin[\lambda_2(x-L+a)] \right\} \end{cases} \quad (12)$$

式中, $\lambda_2 = \sqrt{\frac{\lambda \tau_f}{\delta_f - \delta_1}}$ 。

此时, 加载端 $x=L$ 处的荷载为:

$$P = \sigma_p(L) t_p b_p = \frac{\beta_1 \tau_f t_p b_p}{\lambda_2} \left\{ \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \tanh[\lambda_1(L-a)] \cdot \cos[\lambda_2 a] + \sin[\lambda_2 a] \right\} \quad (13)$$

一旦软化区域完全发展后, 界面开始出现剥离, 如图 9 所示。

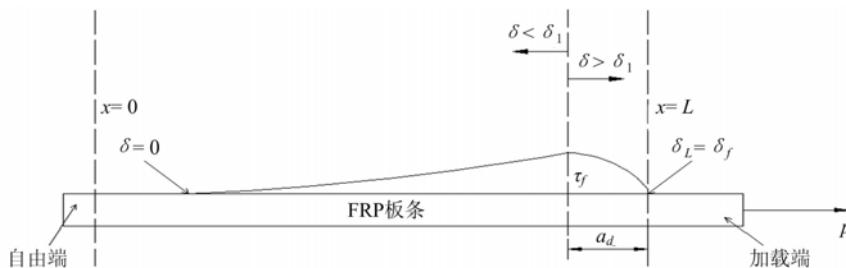


图 9 开始剥离阶段

Fig. 9 Stage of start of debonding

此时 $\tau(L)=\tau_r$, 软化段长度 a 达到最大值, 界面即将开始剥离, 结合式(12)可得到:

$$\frac{\tau_r}{\tau_f} + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \tanh(\lambda_1(L-a)) \sin(\lambda_2 a) = \cos(\lambda_2 a) \quad (14)$$

对于无限长的粘结长度,式(14)可简化为:

$$\frac{\tau_r}{\tau_f} + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \sin(\lambda_2 a) = \cos(\lambda_2 a) \quad (15)$$

由式(15)可得到即将剥离时的软化段长度:

$$a_d = \frac{1}{\lambda_2} \arcsin\left(\frac{-\frac{\tau_r}{\tau_f} \frac{\lambda_2}{\lambda_1} + \sqrt{1 + (\frac{\lambda_2}{\lambda_1})^2 - (\frac{\tau_r}{\tau_f})^2}}{1 + (\frac{\lambda_2}{\lambda_1})^2}\right) \quad (16)$$

将式(16)代入式(12)便可计算出剥离开始时的 $\delta(x)$ 、 $\tau(x)$ 和 $\sigma_p(x)$, 另外, 界面剥离之后随应力传递长度增加, 加载端荷载 P 的增大速率会急剧减小, 因此可近似认为 $\tanh[\lambda_1(L-a)] = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \tan(\lambda_2 a)$, 结合式(13)可得到:

$$P = \lambda_3 \sin(\lambda_2 a) \quad (17)$$

式中, $\lambda_3 = \frac{L_{per}(\tau_f \delta_f - \tau_r \delta_1)}{\lambda_2(\delta_f - \delta_1)}$ 。

2.5 持续剥离阶段

在此阶段, 界面剥离从加载端向自由端发展, 假设已经发生剥离的长度为 s , 界面剥离段 s 处的残余摩擦力为 τ_r , 如图 10 所示。

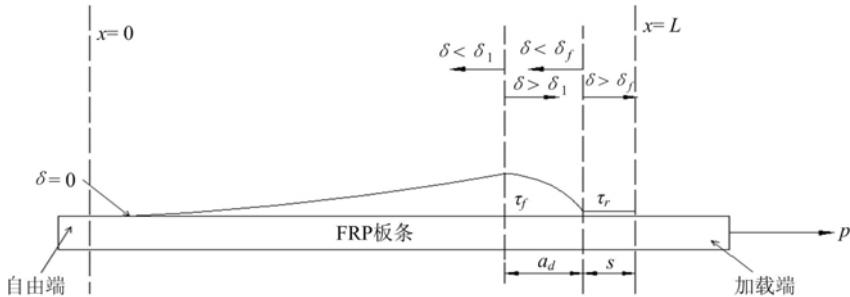


图 10 持续剥离阶段

Fig. 10 Stage of propagation of debonding

显然剥离长度 s 是由加载端荷载 P 决定的, 由 $\delta(0)=0$, $\tau(0)=0$, $\tau(L-s-a)=\tau_f$, $\delta(L-s-a)=\delta_1$, $\tau(L-s)=\tau_r$, $\delta(L-s)=\delta_f$, 可以得出:

$x \in [0, L-s-a]$ 时有:

$$\begin{cases} \delta(x) = \delta_1 \frac{\cosh(\lambda_1 x)}{\cosh(\lambda_1(L-a-s))} \\ \tau(x) = \tau_f \frac{\cosh(\lambda_1 x)}{\cosh(\lambda_1(L-a-s))} \\ \sigma_p(x) = \frac{\tau_f \beta_1}{\lambda_1} \frac{\sinh(\lambda_1 x)}{\cosh(\lambda_1(L-a-s))} \end{cases} \quad (18)$$

$x \in [L-s-a, L-s]$ 时有:

$$\begin{cases} \delta(x) = \frac{\tau_f(\delta_f - \delta_1)}{\tau_f - \tau_r} \left\{ \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \tanh[\lambda_1(L-a-s)] \cdot \sin[\lambda_2(x-L+a+s)] - \cos[\lambda_2(x-L+a+s)] \right\} + \frac{\tau_f \delta_f - \tau_r \delta_1}{\tau_f - \tau_r} \\ \tau(x) = -\tau_f \left\{ \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \tanh[\lambda_1(L-a-s)] \cdot \sin[\lambda_2(x-L+a+s)] - \cos[\lambda_2(x-L+a+s)] \right\} \\ \sigma_p(x) = \frac{\beta_1 \tau_f}{\lambda_2} \left\{ \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \tanh[\lambda_1(L-a-s)] \cdot \cos[\lambda_2(x-L+a+s)] + \sin[\lambda_2(x-L+a+s)] \right\} \end{cases} \quad (19)$$

$x \in [L-s, L]$ 时有:

$$\begin{cases} \delta(x) = \frac{\lambda\tau_r(x-L+s)^2}{2} + \delta_f \\ \tau(x) = \tau_r \\ \sigma_p(x) = \frac{P - \tau_r L_{per}(L-x)}{t_p b_p} \end{cases} \quad (20)$$

式中, $s = \frac{P-P'}{\tau_r L_{per}}$, 其中界面临界剥离荷载 $P' = \lambda_3 \sin \left[\arcsin \frac{-\frac{\tau_r \lambda_2}{\tau_f \lambda_1} + \sqrt{1 + (\frac{\lambda_2}{\lambda_1})^2 - (\frac{\tau_r}{\tau_f})^2}}{1 + (\frac{\lambda_2}{\lambda_1})^2} \right]$ 。

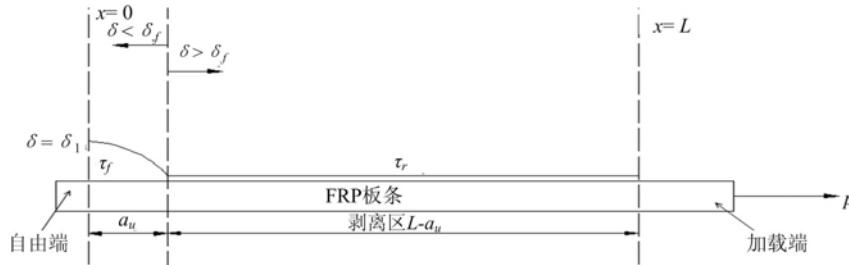


图 11 持续剥离最后阶段

Fig. 11 Stage of end of debonding

持续剥离的最后阶段,如图 11 所示。在此阶段, $a_u = a$, $\delta(0) = \delta_1$, $\tau(0) = \tau(f)$, $\tau(L-a) = \tau_r$, $\delta(L-a) = \delta_f$, 有:

$x \in [0, a]$ 时,

$$\begin{cases} \delta(x) = \frac{\tau_f(\delta_f - \delta_1)}{\tau_f - \tau_r} \cos(\lambda_2 x) + \frac{\tau_f \delta_f - \tau_r \delta_1}{\tau_f - \tau_r} \\ \tau(x) = \tau_r \cos(\lambda_2 x) \\ \sigma_p(x) = \frac{\tau_f L_{per}}{t_p b_p \lambda_2} \sin(\lambda_2 x) \end{cases} \quad (21)$$

$x \in [a, L]$ 时,

$$\begin{cases} \delta(x) = \frac{\lambda \tau_r (x-a)^2}{2} + \delta_f \\ \tau(x) = \tau_r \\ \sigma_p(x) = \frac{P' + \tau_r L_{per}(x-a)}{t_p b_p} \end{cases} \quad (22)$$

此时,试件的承载力达到峰值,即有:

$$P_{max} = P' + \tau_r L_{per}(L-l_e - a) \quad (23)$$

式(23)中, $P' = \lambda_3 \sin \left[\arcsin \left(\frac{-\frac{\tau_r \lambda_2}{\tau_f \lambda_1} + \sqrt{1 + (\frac{\lambda_2}{\lambda_1})^2 - (\frac{\tau_r}{\tau_f})^2}}{1 + (\frac{\lambda_2}{\lambda_1})^2} \right) \right]$

完全剥离阶段,如图 12 所示。在此阶段,胶层与板条界面完全剥离,界面上存在一定的残余摩擦力, $\delta(0) = \delta_f$, 则有:

$$\begin{cases} \delta(x) = \frac{\lambda \tau_r x^2}{2} + \delta_f \\ \tau(x) = \tau_r \\ \sigma_p(x) = \frac{\tau_r L_{per} x}{t_p b_p} \end{cases} \quad (24)$$

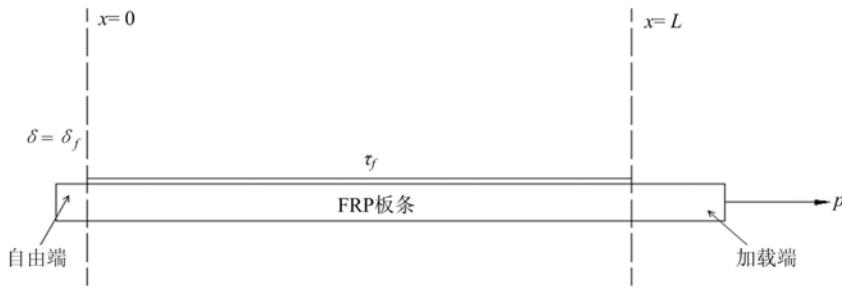


图 12 完全剥离阶段

Fig. 12 Stage of full debonding

3 试验与分析结果的对比

3.1 粘结承载力

本文试验研究中试件 T2.0-BL320 的参数为:碳纤维板条厚度 $t_p=2.0\text{mm}$, 宽度 $b_p=16\text{mm}$, 弹性模量 $E_p=131000\text{MPa}$; 混凝土的立方体试块宽度 $t_c=150\text{mm}$, 厚度 $b_c=150\text{mm}$, 轴心抗压强度 $f_{cu}=40.96\text{MPa}$, 弹性模量 $E_c=33400\text{MPa}$; 试件槽宽 $t_g=15\text{mm}$, 槽深 $b_g=30\text{mm}$, 粘结长度 $L=320\text{mm}$ 。

由 CFRP 板条尺寸可算出板条截面周长 $L_{per}=2b_p+2t_p=2\times16+2\times2=36\text{mm}$ 。

根据试验测得的应变值和滑移值,由文献[18]中的方法得出粘结界面各点的粘结滑移本构关系,取各段曲线特征点的平均值,计算出 $\tau_f=13.5\text{MPa}$, $\delta_1=0.1\text{mm}$, $\tau_r=4\text{MPa}$, $\delta_f=1\text{mm}$ 。

根据前述计算结果,可分别计算出系数 λ 、 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 a 和 $l_{e,e}$:

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{L_{per}}{t_p b_p} \left(\frac{1}{E_p} + \frac{t_p b_p}{E_c t_c b_c} \right) = 8.57 \times 10^{-6}, \quad \lambda_1 = \sqrt{\frac{\lambda \tau_f}{\delta_1}} = 0.03401, \\ \lambda_2 &= \sqrt{\frac{\lambda(\tau_f - \tau_r)}{\delta_f - \delta_1}} = 0.00955, \quad \lambda_3 = \frac{L_{per}(\tau_f \delta_f - \tau_r \delta_1)}{\lambda_2 (\delta_f - \delta_1)} = 54.87\text{kN}, \\ l_{e,e} &= \frac{2}{\lambda_1} = 58.81\text{mm}, \quad a = \frac{1}{\lambda_2} \arcsin \left(\frac{-\frac{\tau_r}{\tau_f} \frac{\lambda_2}{\lambda_1} + \sqrt{1 + (\frac{\lambda_2}{\lambda_1})^2 - (\frac{\tau_r}{\tau_f})^2}}{1 + (\frac{\lambda_2}{\lambda_1})^2} \right) = 105.65\text{mm}.\end{aligned}$$

当 $l_{e,e}+a>L$ 时,试件在软件阶段后期就破坏了,这时取 $\delta(L)=\delta_1$,极限承载力由式(17)算出;当 $a\leq L$ 时,极限承载力可由式(23)算出。此时的 $L=320.0\text{mm}\geq a=105.65\text{mm}$,有:

$$P' = \lambda_3 \sin \left[\arcsin \frac{-\frac{\tau_r}{\tau_f} \frac{\lambda_2}{\lambda_1} + \sqrt{1 + (\frac{\lambda_2}{\lambda_1})^2 - (\frac{\tau_r}{\tau_f})^2}}{1 + (\frac{\lambda_2}{\lambda_1})^2} \right] = 46.44\text{kN}$$

$$P_{max} = P' + \tau_r L_{per} (L - l_{e,e} - a) = 68.77\text{kN}$$

本次试验中测得试件 C2.0-BL320 的最大极限荷载 P'_{max} 为 63.00kN , 试验值与理论值的比值 $\frac{P'_{max}}{P_{max}} = \left| \frac{63.00}{68.77} \right| = 0.916$, 误差为 8.39% , 表明该模型可较好预测嵌贴 FRP-混凝土的粘结承载力。

3.2 界面粘结应力分布

图 13 给出了试件 T2.0-BL320 的界面粘结应力分布试验结果。图 14~16 分别给出了 T2.0-BL320 在 $P=15\text{kN}$ (弹性阶段)、 $P=48\text{kN}$ (软化剥离阶段)和 $P=54\text{kN}$ (持续剥离阶段)作用下界面粘结应力分布的理论和试验曲线对比。

图 14 为 $P=15\text{kN}$ 作用下粘结应力沿粘结长度分布的理论计算曲线与试验曲线的比较,此时靠近加载端处的粘结应力还没有达到峰值点,整个界面的受力都处于弹性阶段,从图中可以看出理论曲线与试验曲线基本吻合良好。图 15 为软化剥离阶段($P=48\text{kN}$ 时)粘结应力分布的理论计算曲线与试验曲

线的比较,此时在 $x=L$ 处的粘结应力接近于残余摩擦力,软化区域完全发展,界面开始剥离并且沿自由端发展,理论曲线与试验曲线符合得比较好。图 16 为粘结界面大约剥离 52mm 时的粘结应力沿粘结长度的理论计算曲线与试验曲线的比较,此时 $P=54\text{kN}$,残余摩擦力接近 4MPa,从图中可以看出理论计算结果与试验结果基本吻合。由前述计算可知,用理论公式计算出来的软化段长度 $a=105.65\text{mm}$,这与图 13、图 15、图 16 中试验曲线中的软化段长度吻合较好。从图 14~16 可以看出:界面粘结应力沿粘结长度的分析结果和试验结果吻合较好,表明前面建立的界面粘结应力模型可良好地预测表层嵌贴 CFRP-混凝土的界面粘结行为。

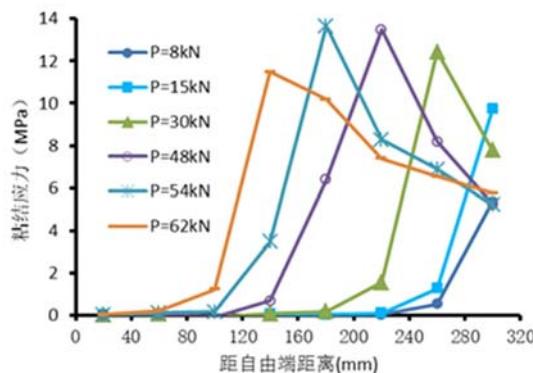


图 13 试件 T2.0-BL320 不同荷载作用下的粘结应力分布

Fig. 13 Distribution of bond stress
at different load of T2.0-BL320

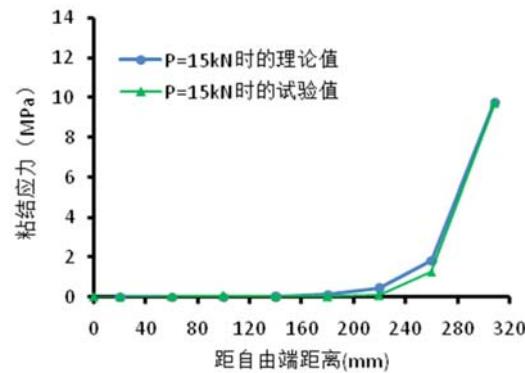


图 14 $P=15\text{kN}$ 时(弹性阶段)的粘结应力分布

Fig. 14 Distribution of bond stress at 15kN

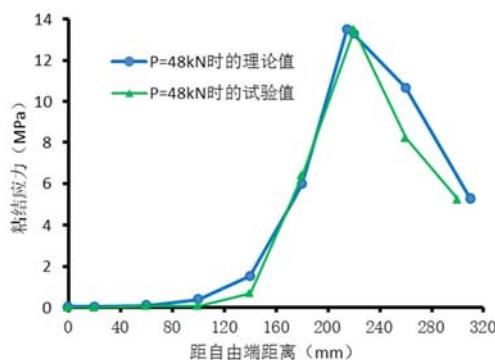


图 15 $P=48\text{kN}$ 时(软化剥离阶段)的粘结应力分布

Fig. 15 Distribution of bond stress at 48kN

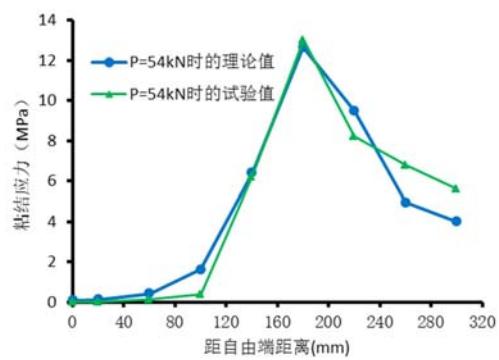


图 16 $P=54\text{kN}$ 时(持续剥离阶段)的粘结应力分布

Fig. 16 Distribution of bond stress at 54kN

4 结论

本文在表层嵌贴 CFRP 板条-混凝土单剪试验研究基础上,提出了考虑界面剥离后存在残余摩擦的三线性粘结滑移本构关系;建立了表层嵌贴 CFRP 板条-混凝土界面粘结应力模型,推导出了界面粘结应力、相对滑移和 CFRP 拉伸应力等性能的分布函数,并由此得到了粘结承载力的计算公式;可以计算出试件在弹性阶段、软化剥离阶段、持续剥离阶段以及完全剥离阶段破坏时的最大荷载和粘结应力分布。与试验结果的对比显示,理论分析结果与试验结果吻合良好,表明本文提出的粘结应力模型能够较好地预测试件的极限承载力,并且能够描述粘结长度范围内的粘结应力分布,为进一步的试验研究及完善表层嵌贴 FRP 加固混凝土结构设计理论提供了参考。需要指出的是,本文所采用的粘结应力-滑移本构关系是通过文中试验得出,这一本构关系与混凝土强度、粘结树脂性能和开槽尺寸等存在相关性,有必要针对这些因素对粘结-滑移关系的影响开展研究。

参考文献:

- [1] Hassan T, Rizkalla S. Investigation of bond in concrete structures strengthened with near surface mounted carbon fiber reinforced polymer strips[J]. Journal of Composites for Construction, 2003, 7(3):248—356.
- [2] Seracino R, Jones N M, Ali M S M, et al. Bond strength of near-surface mounted FRP-to-concrete joints[J]. Journal of Composites for Construction (ASCE), 2007, 11(4):401—409.
- [3] 姚谦, 滕锦光. FRP复合材料与混凝土的粘结强度试验研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(5):10—23 (Yao Jian, Teng Jiguang. Experiment study on bond strength between FRP and concrete[J]. Journal of Building Structure, 2003, 24(5):10—17(in Chinese))
- [4] 吴以莉, 姚谦, 朱晓旭. 内嵌 CFRP 加固混凝土梁粘结性能试验分析[J]. 建筑技术, 2010, 41(5):454—456 (Wu Yili, Yao Jian, Zhu Xiaoxu. Analysis on bonding performance test of mounted CFRP strengthened concrete beam[J]. Architecture Technology, 2010, 41(5):454—456 (in Chinese))
- [5] 杨勇新, 岳清瑞, 胡云昌. 碳纤维布与混凝土粘结性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(3):36—42 (Yang Yongxin, Yue Qingrui, Hu Yunchang. Experiment study on bond performance between carbon fiber sheets and concrete[J]. Journal of Building Structure, 2001, 22(3):36—42(in Chinese))
- [6] 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, 26(4):10—18 (Lu Xinzheng, Ye Lieping, Teng Jiguang, et al. Bond-slip model for FRP-to-concreteinterface[J]. Journal of Building Structure, 2005, 26(4):10—18(in Chinese))
- [7] Brosens K, van Gemert D. Anchoring stresses between concrete and carbon fiber reinforcedlaminates[C]. Proc. 3rd Int. Symp. Nonmetallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. Japan Concrete Institute, Sapporo, 1997(1):271—278.
- [8] Maeda T, Asano Y, Sato Y, et al. A study on bond mechanism of carbon fiber sheet[C]. Proc. 3rd Int. Symp. Nonmetallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structure. Japan Concrete Institute, Sapporo, 1997(1):279—285.
- [9] Teng J G, Chen J F, Smith S T, et al. FRP-Strengthened RC Structures[M]. UK: John Wiley and Sons, 2002.
- [10] Hassan T, Rizkalla S. Investigation of bond in concrete structures strengthened with near surface mounted carbon fiber reinforced polymer strips[J]. ASCE J. Compos Construction, 2003, 7(3): 248—257.
- [11] José Manuel de Sena Cruz, Joaquim António Oliveira de Barros. Bond between near-surface mounted carbon- fiber-reinforced polymer laminate strips and concrete[J]. Journal of Composites for Construction, 2004, 8(6):519—527.
- [12] De lorenzis L, Teng J G. Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures[J]. Composites Part B: Engineering, 2007, 38(2):119—143.
- [13] Teng J G, Chen J F, Smith S T, et al. FRP strengthened RC structures[M]. London (England): Wiley, 2002.
- [14] Mohamed Alia M S, Oehlersa D J, Griffitha M C, et al. Interfacial stress transfer of near surface-mounted FRP-to-concrete joints[J]. Engineering Structures, 2008, 30:1861—1868.
- [15] Francesca Ceroni, Marisa Pecce, Antonio Bilotta, et al. Bond behavior of FRP NSM systems in concrete elements [J]. Composites: PartB, 2012, 43:99—109.
- [16] Wu Z, Yuan H, Niu H. Stress transfer and fracture in different kinds of adhesive joints [J]. Journal of Engineering Mechanics(ASCE), 2002, 128(5):562—573.
- [17] Yuan H, Teng J G, Seracino R, et al. Full-range behavior of FRP-to-concrete bonded joints[J]. Engineering Structures, 2004, 26:553—565.
- [18] Dai J G, Ueda T, Sato Y. Development of the nonlinear bond stress-slip model of fiber reinforced plastics sheet-concrete interfaces with a simple method[J]. J. Compos. Constr., 2005, 9(1):52—62.

Experimental and Theoretical Study on Model of Interfacial Bond Stress between Near-Surface Mounted CFRP Strips and Concrete

PENG Hui^{1,2}, GAO Yong¹, CHEN Jun-min^{1,3}, JIANG Xin⁴

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China;
2. Ministry of Education Key Laboratory of Safety Control of Bridge Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China; 3. Chongqing Guangjian Decoration Co. Ltd, Chongqing 400025, China; 4. Hunan Communications Research Institute, Changsha 410015, Hunan, China)

Abstract: By taking into account the residual friction, a tri-linear bond-slip constitutive model is proposed in this paper based on bonding property experimental results of near-surface mounted (NSM) carbon fiber reinforced polymer (CFRP) strips with concrete. Furthermore, the bond stress model between NSM CFRP strips and concrete is established. The general form of analytical solution for the model was obtained through solving the differential equations, and then distribution variation of the interfacial slip, the bond stress and CFRP tensile stress along with loading was derived, the calculation formula of bond capacity was also obtained. Based on above results, the bond stress model was validated by comparing with experimental data, and theoretical calculation results are in good agreement with experimental data. This proves that the bond stress model proposed in this paper can well predict the bond capacity of the NSM FRP-to-concrete interface and correctly describe the distribution of interfacial bond stress.

Keywords: near-surface mounted (NSM); carbon fiber reinforced polymer (CFRP) strips; bond stress model; bond-slip constitutive model; residual friction