

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.09.020

CFRP 端部被锚固后加固钢结构的界面粘结行为

李春良,李 凯,张立辉,王 静

(吉林建筑大学 交通科学与工程学院, 长春 130118)

摘 要:为明确 CFRP 锚固端的界面间粘结应力的分布规律,建立 CFRP 端部被锚固、不被锚固等几种边界条件下的 CFRP 加固钢板拉伸构件的界面粘结剪应力模型,考察了端部锚固程度对界面粘结剪应力的影响情况. 结果表明: CFRP 端部不被锚固时其端部处的拉应变为 $0\ \mu\varepsilon$,而被锚固以后其端部处的拉应变能达到中部区域 CFRP 最大拉应变的 50%;界面粘结剪应力也比不锚固时的降低了 50%. CFRP 端部被锚固后有助于 CFRRP 与钢板协调受力,端部粘结剪应力集中现象被缓解. 另外减少 CFRP 层数、增加胶层粘结厚度会降低粘结界面间的剪应力.

关键词: CFRP;端部锚固;钢结构;界面粘结应力;力学模型

中图分类号: TU432 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2016)09-0113-06

Interfacial bond behavior of CFRP reinforced steel structures with end anchorage

LI Chunliang, LI Kai, ZHANG Lihui, WANG Jing

(School of Scientific Transportation and Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China)

Abstract: In order to clarify the distribution of bond stress of CFRP anchorage end, this paper established these mechanical models to study several boundary conditions of the shear behaviors of CFRP reinforced steel structures with end anchorage or not, investigating the effects of end anchorage level on interfacial shear stress. The outcomes indicated that the tensile strain was $0\ \mu\varepsilon$ if the end of CFRP was unanchored. The tensile strain of the end could reach 50% of the maximum if CFRP was anchored; the interfacial shear stress in the case of end anchorage would decrease by 50% than that unanchored. At the same time the end of CFRP could better coordinate with steel plate, and the shear of interfacial bond stress could be decreased effectively, and then the shear concentration could be eased. In addition, decreasing the number of plies and increasing the adhesive thickness would reduce the shear stress between the bonding interfaces.

Keywords: CFRP;end anchorage;steel structure;interfacial bond stress;mechanical model

CFRP 加固钢结构界面间的早期剥离破坏常发生在 CFRP 的粘结端,这种破坏的发生决定了此项加固技术的成败. 工程技术人员对 CFRP 端部采用不同的锚固方式来阻止 CFRP 端部早期剥离破坏. 如文献[1]通过试验研究了 U 型箍锚固量和锚固方式对加固梁承载力的影响. 文献[2-5]通过试验提出了通过机械紧固的方法,但研究机械锚固法存在施工麻烦、易腐蚀和费用较高等缺点. 文献[6]利用角钢和螺栓在 FRP 板端部锚固来阻止了 FRP 板的剥离. 上述研究成果大多都是通过试验研究 CFRP 端部锚固的意义. 但 CFRP 的端部被锚固后,CFRP

端被封盖住,属于隐蔽构造,故很难通过试验手段准确地测量出端部胶层的剪应力和 CFRP 拉应变分布情况.

在理论上,文献[7]根据滑移理论建立了端部压条锚固时的胶层粘结剪应力模型,解释了 CFRP 压条锚固的力学机理. 而很少有人从 CFRP 端部锚固程度的强弱出发,在力学行为上定量解析出 CFRP 端部被锚固后的胶层剪应力规律及端部抗剪强度提高程度. 目前只有部分学者^[8-10]利用数值模拟的手段指出了设置 U 型锚固后加固梁的剥离承载力将得到提高. 文献[10]也对 U 型箍的锚固效果进行了数值模拟,指出了 U 型箍能防止剥离破坏,但会引起受力不均匀. 目前工程中也大量采用 U 型箍锚固方法,但关于不同的 U 型锚固形式对加固梁承载力的影响程度还不清楚. 本文针对上述情况,建立了 CFRP 端部无锚固、完全锚固以及一端锚固

收稿日期: 2015-03-15
基金项目: 国家自然科学基金(51308256);
吉林省教育厅“十二五”科技项目(2015265);
住房和城乡建设部项目(2011K239)
作者简介: 李春良(1978—),男,教授
通信作者: 王 静, wangjing0062@sina.com

一端不锚固等不同边界条件下的粘结胶层剪应力模型,比较了这几种端部不同锚固条件下及不同锚固程度时端部 CFRP 的受拉和胶层受剪的分布规律,并进行了相应参数的定量分析,为 CFRP 加固钢结构的端部锚固设计提供了借鉴。

1 CFRP 端部不同锚固时的力学模型

1.1 基本假定

为真实研究 CFRP 锚固端的受力,采用以下假定:1)CFRP、钢结构、粘结胶层均为理想的弹性体.2)由于 CFRP 与钢结构粘结界面间胶层厚度较薄,粘结界面间的胶层仅承受剪切力,发生剪切变形.3)当粘贴多层 CFRP 时,各分层 CFRP 间的胶层也仅发生剪切变形,设各分层 CFRP 间胶层的应变传递系数为 α ,最外面第 1 分层 CFRP 应变为 $\varepsilon_f^1(x)$,则第 2 分层 CFRP 应变为 $\varepsilon_f^2(x) = \alpha \cdot \varepsilon_f^1(x)$,第 i 分层 CFRP 应变为 $\varepsilon_f^i(x) = \alpha^{(i-1)} \cdot \varepsilon_f^1(x)$. 层数 $n \geq 1$,此时 x 截面位置处的所有 CFRP 层的平均应变为

$$\varepsilon_f(x) = \frac{\varepsilon_f^1(x) + \varepsilon_f^2(x) + \cdots + \varepsilon_f^n(x)}{n} = \frac{\varepsilon_f^1(x) \cdot [1 + \alpha + \cdots + \alpha^{(n-1)}]}{n}.$$

各分层 CFRP 间胶层的应变传递系数 ($0 < \alpha < 1$) 与胶层的材料参数、厚度等因素有关.4)CFRP 端 L 截面处,CFRP 端拉应变 $\varepsilon_f(L)$ 与该处的钢结构的拉应变 $\varepsilon_s(L)$ 满足: $\varepsilon_f(L) = \beta \cdot \varepsilon_s(L)$,其中 β 为 CFRP 端部锚固程度系数 ($0 \leq \beta < 1$).当 CFRP 端部处未被锚固时,如图 1 所示,CFRP 端部处的应变为 0,此时 $\beta = 0$.当 CFRP 端部被锚固时,如图 2 所示,CFRP 端部处的应变值不为 0,此时根据锚固程度强弱确定 β 值.需要指出 β 不能为 1,如果 β 为 1,表明 CFRP 端部与钢结构完全同步变形,但在实际情况中不会出现这种情况,因此 $\beta \in [0, 1)$, β 值越大,锚固程度越大。

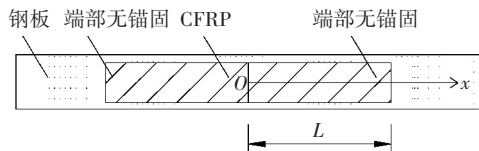


图 1 CFRP 加固钢拉伸构件示意

Fig.1 The diagram of CFRP reinforcing steel tension

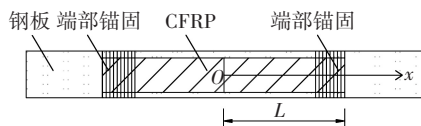


图 2 CFRP 两端均锚固示意图

Fig.2 The diagram of anchoring both ends of CFRP

1.2 CFRP 加固钢拉伸构件端部锚固力学模型

取图 1 中 CFRP 加固钢板拉伸试件为研究对象.由于整个模型是对称的,取试件中心的位置为 O 点.以微段 dx 为研究对象,其受力如图 3 所示。

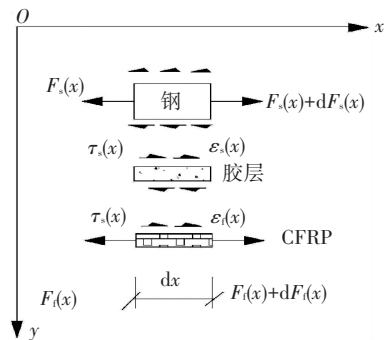


图 3 微段受力状态

Fig.3 The force diagram of micro-segment

图 3 中: F_s 、 F_f 分别为钢板、单侧 CFRP 端部承受的拉力; $F_s(x)$ 、 $F_f(x)$ 分别为钢板、单侧 CFRP x 处截面受的拉力; $\tau_s(x)$ 、 $\varepsilon_s(x)$ 分别为钢板界面 x 处剪应力、拉应变; $\tau_f(x)$ 、 $\varepsilon_f(x)$ 分别为 CFRP 界面 x 处剪应力、应变; $\sigma_f(x)$ 为 x 处 CFRP 拉应力; t_e 、 t_f 、 t_s 分别为胶层、CFRP、钢板厚度; b_f 、 b_s 分别为 CFRP、钢板截面宽度. 粘贴多层 CFRP 时, $\varepsilon_f(x)$ 、 $\sigma_f(x)$ 为 x 截面位置处的全部 CFRP 层的平均值,此时 t_f 为全部 CFRP 层的总厚度。

1.3 平衡方程的建立

根据单元受力图,可建立 CFRP 及胶层平衡方程为

$$\tau_f(x) = \frac{t_f d\sigma_f(x)}{dx}, \quad (1)$$

$$\tau_f(x) = G\gamma_{xy}(x), \quad (2)$$

式中 G 为胶层剪切模量, $\gamma_{xy}(x)$ 为胶层 x 处剪应变。

设在荷载作用下,CFRP 表面点 x 处发生的位移量为 (u, v) ,通过对式(1)、(2)整理得

$$\frac{d^2\sigma_f(x)}{dx^2} = \frac{G}{t_f} \left(\frac{d^2u}{dx dy} + \frac{d^2v}{dx^2} \right). \quad (3)$$

由于胶层厚度很薄,沿其厚度方向的弹性压缩变形很小,可近似将 v 值视为 0,因此式(3)可以简化为

$$\frac{d^2\sigma_f(x)}{dx^2} = \frac{G}{t_f} \frac{d^2u}{dx dy}. \quad (4)$$

由图 2 可知

$$\frac{d^2u}{dx dy} = \frac{\varepsilon_f(x) - \varepsilon_s(x)}{t_e}. \quad (5)$$

则式(4)可以整理为

$$\frac{d^2\sigma_f(x)}{dx^2} = \frac{G}{t_f} \frac{\varepsilon_f(x) - \varepsilon_s(x)}{t_e}. \tag{6}$$

其中: E_s 为钢板弹性模量, E_f 为 CFRP 的弹性模量,

$$\varepsilon_s(x) = \frac{\sigma_s(x)}{E_s}, \varepsilon_f(x) = \frac{\sigma_f(x)}{E_f}.$$

由于

$$F_s(x) = F - 2F_f(x), \tag{7}$$

$$F_s(x) = t_s b_s \sigma_s(x), \tag{8}$$

$$F_f(x) = t_f b_f \sigma_f(x). \tag{9}$$

因此

$$\sigma_s(x) = \frac{F - 2F_f(x)}{t_s b_s} = \frac{F - 2t_f b_f \sigma_f(x)}{t_s b_s}. \tag{10}$$

通过式(7)~(10)可以将式(9)整理为

$$\frac{d^2\sigma_f(x)}{dx^2} - \left(\frac{G}{t_f t_e E_f} + \frac{2G b_f}{t_s t_e b_s E_s} \right) \sigma_f(x) + \frac{FG}{t_f t_e t_s b_s E_s} = 0. \tag{11}$$

1.4 不同端部锚固边界条件下的力学解析解

对式(11)进行求解,得

$$\sigma_f(x) = C_1 e^{\sqrt{A}x} + C_2 e^{-\sqrt{A}x} + \frac{B}{A}, \tag{12}$$

$$\tau_f(x) = (C_1 \sqrt{A} e^{\sqrt{A}x} - C_2 \sqrt{A} e^{-\sqrt{A}x}) t_f, \tag{13}$$

$$\varepsilon_f(x) = \frac{C_1 e^{\sqrt{A}x} + C_2 e^{-\sqrt{A}x} + B/A}{E_f}. \tag{14}$$

其中

$$\begin{cases} A = \frac{G}{t_f t_e E_f} + \frac{2G b_f}{t_s t_e b_s E_s}, \\ B = \frac{FG}{t_f t_s t_e b_s E_s} \end{cases},$$

当粘贴多层 ($n \geq 1$) CFRP 时,则根据基本假设可以推导出第 i 层的 CFRP 应变表达式为

$$\varepsilon_f^i(x) = \frac{\varepsilon_f(x) \cdot n \cdot \alpha^{(i-1)}}{[1 + \alpha + \dots + \alpha^{(n-1)}]}. \tag{15}$$

1.4.1 不同锚固条件下 CFRP 端部截面处拉应力

根据基本假设可知,端部截面处的 CFRP 拉应变与钢板拉应变关系为

$$\varepsilon_f(L) = \beta \varepsilon_s(L). \tag{16}$$

式中 L 为拉伸试件表面中心到 CFRP 端部截面处的长度.

根据图 3,有

$$F = 2\varepsilon_f(L) t_f b_f E_f + \varepsilon_s(L) t_s b_s E_s. \tag{17}$$

因此可以求得 CFRP 端部截面处的拉应力为

$$\sigma_f(L) = \frac{F - \frac{FE_s t_s b_s}{2t_f b_f E_f \beta + t_s b_s E_s}}{2t_f b_f}. \tag{18}$$

观察式(18)中可以发现:当 $\beta = 0$ 时, $\sigma_f(L) =$

0, 此时 CFRP 端部截面没被锚固;当 $\sigma_f(L) \neq 0$ 时, CFRP 端部被锚固, $\sigma_f(L)$ 值的大小由锚固程度系数决定.

1.4.2 CFRP 两端均不锚固边界条件

当 CFRP 两端均不锚固时,取锚固系数 $\beta = 0$, 根据图 1 能建立如下边界条件:

$$\begin{cases} x = 0, \tau_f(0) = 0; \\ x = L, \sigma_f(L) = 0. \end{cases}$$

则可求得系数 C_1, C_2 为

$$C_1 = C_2 = \frac{-\frac{B}{A}}{e^{\sqrt{A}L} + e^{-\sqrt{A}L}}.$$

1.4.3 CFRP 两端均锚固边界条件

CFRP 两端均锚固时,根据锚固程度强弱来确定锚固系数和图 2,能建立如下边界条件:

$$\begin{cases} x = 0, \tau_f(0) = 0; \\ x = L, \sigma_f(L) = \frac{\left(F - \frac{E_s t_s b_s F}{2A_f E_f \beta + t_s b_s E_s} \right)}{2A_f}. \end{cases}$$

则可求得系数 C_1, C_2 为

$$C_1 = C_2 = \frac{\left(\frac{F - \frac{E_s t_s b_s F}{2A_f E_f \beta + t_s b_s E_s}}{2A_f} \right) - \frac{B}{A}}{e^{\sqrt{A}L} + e^{-\sqrt{A}L}}.$$

1.4.4 CFRP 一端锚固、一端未锚固边界条件

当 CFRP 一端锚固、一端未锚固时,未锚固端的 CFRP 锚固系数 $\beta = 0$; 锚固端根据锚固程度强弱来确定锚固系数 β 值. 根据图 4 能建立如下边界条件:

$$\begin{cases} x = L, \sigma_f(L) = \frac{\left(F - \frac{E_s t_s b_s F}{2A_f E_f \beta + t_s b_s E_s} \right)}{2A_f}; \\ x = -L, \sigma_f(-L) = 0. \end{cases}$$

则可求得系数 C_1 与 C_2 为

$$\begin{cases} C_1 = \frac{\frac{B}{A} e^{-2\sqrt{A}L} + \left(\frac{F - \frac{E_s t_s b_s F}{2A_f E_f \beta + t_s b_s E_s}}{2A_f} \right) - \frac{B}{A}}{e^{\sqrt{A}L} - e^{-3\sqrt{A}L}}; \\ C_2 = \frac{\frac{B}{A} e^{-2\sqrt{A}L} - \left(\frac{F - \frac{E_s t_s b_s F}{2A_f E_f \beta + t_s b_s E_s}}{2A_f} \right) e^{-2\sqrt{A}L} - \frac{B}{A}}{e^{\sqrt{A}L} - e^{-3\sqrt{A}L}}. \end{cases}$$

2 理论模型验证

为验证所建立的理论模型的正确性,根据试验方案^[11]进行对比计算. 试验钢板选用 Q235 钢,

CFRP 厚度为 0.167 mm. 试验对 CFRP 一端采用横向缠绕式锚固,另一端 CFRP 未锚固,加固试件尺寸如图 4 所示.

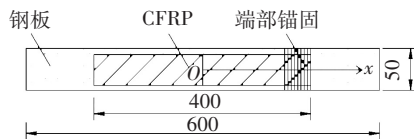


图 4 试件尺寸图(mm)

Fig.4 The chart of specimen size (mm)

2.1 理论结果与试验结果对比

图 5 为拉伸荷载为 90 kN 时,界面间胶层的粘结剪应力曲线. 观察发现,由于图 4 中左端 CFRP 端部未锚固,故计算时取左端的锚固系数 $\beta = 0$,此时计算得到在试验第 1 测点处(虚线位置处)的未锚固端处胶层的粘结剪应力为 12.68 MPa,而通过试验得到的粘结剪应力为 8.1 MPa,二者仅相差 0.91 MPa,计算精度达到了 91%,并且理论曲线与试验曲线的其他部位也吻合得很好. 同时图 6 中所示的 CFRP 端部拉应变曲线也吻合得很好,表明文中所建立的粘结胶层剪应力公式和 CFRP 拉应变计算公式是正确的,可用来研究 CFRP 端部锚固后的粘结剪应力问题.

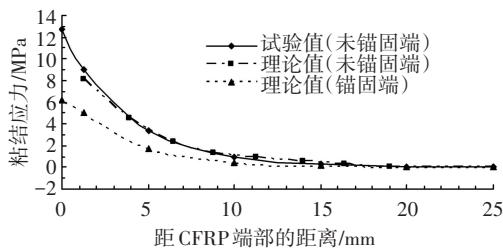


图 5 界面间胶层剪应力曲线

Fig.5 The shear stress curve of interface between rubber

另外图 4 中 CFRP 右端部采用了缠绕式锚固,由于锚固端粘贴方式复杂,很难通过试验准确地测到锚固端区域胶层的剪应力和 CFRP 拉应变分布情况. 但利用文中建立的计算公式能够得到锚固区域胶层剪应力和 CFRP 的拉应变分布情况. 如图 5、6 中的理论值(锚固端)曲线. 观察发现,对 CFRP 端部锚固后,端部区域胶层中的粘结剪应力值下降到 6.20 MPa,下降达到了 50%,同时锚固端部 CFRP 的拉应变为 $679 \mu\epsilon$,达到了中间区域最大拉应变的 50%.

可见对 CFRP 端部锚固后,CFRP 端部处胶层的剪应力降低,缓解了端部胶层中剪应力集中现象,CFRP 端部的早期剥离破坏也能有效避免. 同时端部的 CFRP 能更好地与钢板协调受力,端部区域 CFRP 的利用效率也得到了提高.

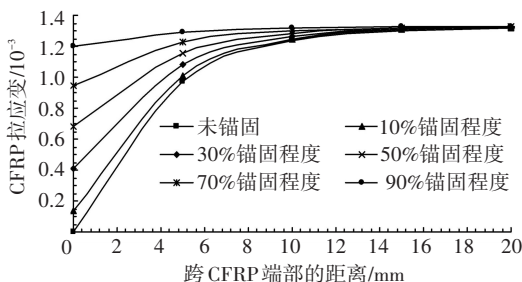


图 6 CFRP 拉应变曲线

Fig.6 The tensile strain curve of CFRP

2.2 CFRP 端部不同锚固程度时的对比

为了研究 CFRP 端部锚固程度的强弱对 CFRP 端部胶层粘结剪应力及端部 CFRP 受拉的影响情况,分别研究了锚固程度系数为 0、10%、30%、50%、70%、90%时的胶层粘结剪应力和 CFRP 拉应变分布情况. 如图 7、8 所示. 观察图 7 发现,采用不同锚固系数时的胶层粘结剪应力依次为 12.68、11.36、8.76、6.20、3.69、1.21 MPa. 粘结剪应力值依次降低的比例依次为 10.4%、30.9%、51.1%、70.9%、90.5%. 可见,粘结剪应力降低的大小与锚固程度提高的比例值相同. 即:CFRP 端部锚固程度越高,CFRP 端部处的胶层受剪程度越低,越不容易发生破坏;同时端部处 CFRP 的受拉程度也越大. 因此在实际工程中,应该对 CFRP 端部进行高强度的锚固.

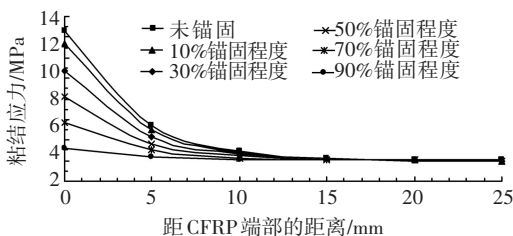


图 7 不同锚固程度时剪应力曲线

Fig.7 The shear stress curve under different anchoring degree

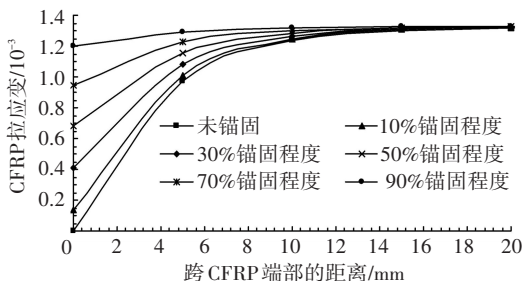


图 8 不同锚固程度时 CFRP 拉应变曲线

Fig.8 The strain curve of CFRP under different anchoring degree

2.3 CFRP 端部被锚固后的相关参数分析

2.3.1 不同层数 CFRP 对胶层粘结剪应力的影响

图 9、10 分别为在相同荷载作用时,端部锚固、端部不锚固情况下分别粘贴 1 层、2 层、3 层 CFRP 时胶

层中粘结剪应力曲线. 可以看出:CFRP 端部锚固后, 粘贴 1 层、2 层、3 层 CFRP 时胶层中的粘结剪应力分别为 6.20、8.40、9.88 MPa; 在 CFRP 端部不锚固条件下的胶层中的粘结剪应力分别为 12.68、17.56、21.07 MPa. 根据以上结果发现, 拉伸条件下: 1) 随着 CFRP 层数的增加, CFRP 端部胶层中的粘结剪应力会逐渐增大; 2) CFRP 端部被锚固后, 胶层粘结剪应力要比端部不被锚固后的粘结剪应力降低.

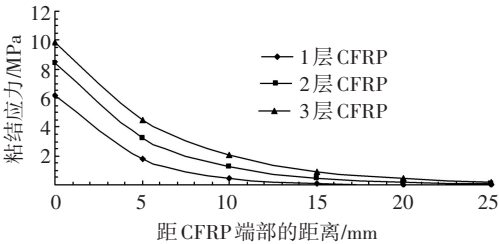


图 9 端部锚固的粘结剪应力曲线

Fig.9 The bonding shear stress curve without end anchorage

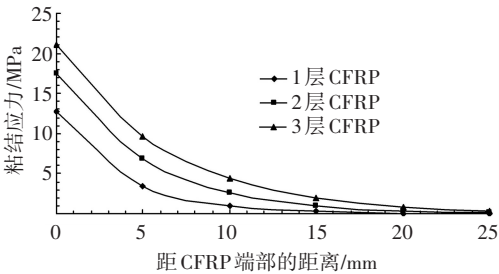


图 10 端部不锚固的粘结剪应力曲线

Fig.10 The bonding shear stress curve without end anchored

2.3.2 不同胶层厚度对胶层粘结剪应力的影响

图 11、12 分别为在相同荷载作用时, 端部锚固、端部不锚固情况下胶层粘结厚度分别为 0.5、1.0、1.5、2.0 mm 时的胶层粘结剪应力曲线. 可以看出: CFRP 端部锚固条件下, 胶层粘结厚度分别为 0.5、1.0、1.5、2.0 mm 时胶层粘结剪应力分别为 6.20、4.38、3.58、3.10 MPa; 在 CFRP 端部不锚固条件下的粘结剪应力分别为 12.68、8.96、7.32、6.34 MPa. 可见如果胶层厚度较薄, 并且端部不进行锚固时, CFRP 端部的早期剥离破坏必然会发生.

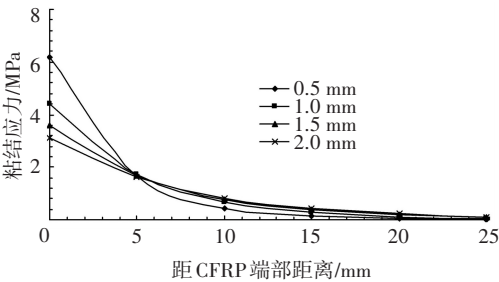


图 11 端部锚固时的粘结剪应力曲线

Fig.11 The bonding shear stress curve under end anchorage

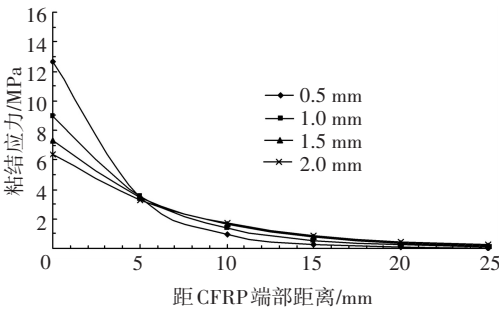


图 12 端部不锚固时的粘结剪应力曲线

Fig.12 The bonding shear stress curve without end anchored

2.4 端部锚固时粘贴多层 CFRP 时各层 CFRP 应变分布

图 13、14 分别为端部锚固条件下粘贴 3 层 CFRP 时, 胶层的应变传递系数不同时的各分层 CFRP 的应变分布曲线 (胶层递系数分别取 0.95、0.6). 观察发现, 第 1 分层 (最外层) CFRP 受拉程度最大, 第 3 分层 (最内层) CFRP 受拉程度最小, 而第 2 分层 (中间层) 居中, 第 2 分层的拉应变值也是最接近所有 CFRP 层的平均受拉程度. 另外, 当 CFRP 层间胶层的应变传递系数越大时, 各分层 CFRP 受拉程度越接近, 各分层 CFRP 能很好地实现共同受力; 当 CFRP 分层间胶层的应变传递系数越小时, 各分层 CFRP 的受拉程度则相差较大, 各分层 CFRP 几乎不能共同受力, 并且最里层的 CFRP 承担很小的拉力. 可见, 当粘贴多层 CFRP 时, 要选择各分层 CFRP 间的胶层传递系数大的粘结剂, 这样能保证多层 CFRP 共同、均匀受力, 使多层 CFRP 的加固效果最佳, 此时各分层的 CFRP 利用效率最高.

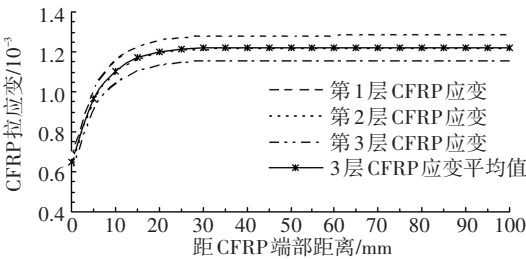


图 13 各分层 CFRP 应变曲线 ($\alpha=0.95$)

Fig.13 The CFRP strain curve of every layer ($\alpha = 0.95$)

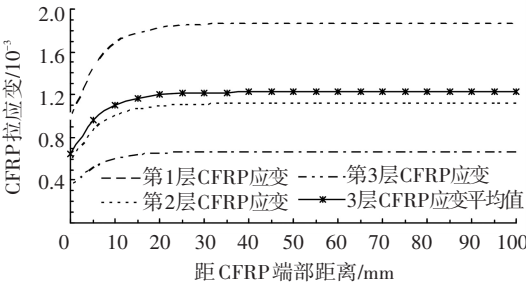


图 14 各分层 CFRP 应变曲线 ($\alpha=0.6$)

Fig.14 The CFRP strain curve of every layer ($\alpha = 0.6$)

3 结 论

1)建立了 CFRP 端部锚固、不锚固等几种边界条件下的 CFRP 加固钢板拉伸构件的界面应力模型,定量地分析了端部锚固程度强弱对端部胶层受剪和 CFRP 受拉的影响规律,并对各参数变化后所导致的界面粘结剪应力的影响规律进行了分析。

2)相比端部不锚固的情况,CFRP 端部被锚固处的胶层中的剪应力降低,CFRP 的拉应力增大。并且锚固程度越高,CFRP 端部处胶层的受剪程度越低,其剪应力降低的大小与端部锚固程度提高的值相同。因此在实际工程中,应该对 CFRP 端部进行高强度的锚固。

3)粘贴多层 CFRP 时,应选择各分层 CFRP 间的胶层传递系数大的粘结剂,这样能保证多层 CFRP 共同、均匀受力。另外,CFRP 端部锚固后,减少 CFRP 层数、增加胶层厚度,胶层中的剪应力会降低。

4)端部锚固程度系数的选取对 CFRP 端部胶层中的剪应力分布至关重要,文中的端部锚固系数是按照一定比例关系选取的。在后续研究中,将根据文中的理论公式,并开展 U 型箍锚固、钢板压条锚固、机械锚固等不同锚固方式的端部锚固系数的试验研究,给出各种锚固方式下的端部锚固系数值。

参考文献

- [1] 李伟文,严志亮,曹征良,等.混凝土粗糙度对 CFRP 与混凝土粘结性的影响[J].深圳大学学报,2007,24(1):13-17. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2618.2007.01.003.
LI Weiwen, YAN Zhiliang, CAO Zhengliang, et al. Effect of concrete roughness on the adhesion of CFRP and concrete[J]. Journal of Shenzhen University, 2007, 24(1): 13-17. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2618.2007.01.003.
- [2] WU Yufei, HUANG Yue. Hybrid bonding of FRP to reinforced concrete structures[J]. Journal of Composites for Constructions, 2008, 12(3): 266-273. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:3266.
- [3] PELLEGRINO C, MODENA C. Flexural strengthening of real scale RC and PRC beams with end anchored pretensioned FRP laminates[J]. ACI Structural Journal, 2009, 6(16): 319-328.

- [4] 阎卫国,张宇峰,吴宇飞.FRP 粘贴锚固系统性能研究[J].公路, 2010(12):26-31.
YAN Weiguo, ZHANG Yufeng, WU Yufei. Study on the performance of FRP bond anchorage system[J]. Highway, 2010(12): 26-31.
- [5] 崔熙光,刘智,刘项,等.碳纤维加固混凝土构件端部锚固试验研究[J].工业建筑,2011,41(7):125-128. DOI: 10.13204/j.gybz2011.07.027.
CUI Xiguang, LIU Zhi, LIU Xiang, et al. Experimental study on the end anchorage of the concrete members strengthened with CFRP[J]. Industrial Construction, 2011, 41(7): 125-128. DOI: 10.13204/j.gybz2011.07.027.
- [6] GALAL K, MOFIDI A. Strengthening RC beams in flexure using new hybrid FRP sheet ductile anchor system[J]. Journal of Composites for Construction, 2009, 13(3): 217-225.
- [7] 张子潇,叶列平,陆新征.U 型 FRP 加固钢筋混凝土梁受剪剥离性能的有限元分析[J].工程力学,2005,22(4):155-162.
ZHANG Zixiao, YE Lieping, LU Xinzhen. Finite element analysis of shear behavior of RC beams strengthened with U shaped FRP sheets[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(4): 155-162.
- [8] 周朝阳,谭磊,程小念.FRP 抗剪加固钢筋混凝土梁研究综述[J].建筑科学与工程学报,2011,28(2):1-7.
ZHOU Chaoyang, TAN Lei, CHENG Xiaonian. Review of research on reinforced concrete beams strengthened with FRP for shear[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, 28(2): 1-7.
- [9] 李保中.锚固压条对 CFRP-混凝土截面性能的影响及作用机理研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
LI Baozhong. Study on bonding behaviors and mechanism of the interface between CFRP concrete ending anchored with CFRP strip[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [10] 黄丽华,王跃方,李璐.CFRP 加固梁 U 型锚固效果的数值分析[J].土木建筑与环境工程,2014,36(6):8-13. DOI: 10.11835/j.issn.1674-4764.2014.06.002.
HUANG Lihua, WANG Yuefang, LI Lu. Finite element analysis of the effects of U wrap anchorages on RC beams strengthened with CFRP sheets[J]. Journal of Civil Construction and Environmental Engineering, 2014, 36(6): 8-13. DOI: 10.11835/j.issn.1674-4764.2014.06.002.
- [11] 彭福明.纤维增强复合材料加固修复金属结构界面性能研究[D].西安:西安建筑科技大学,2005.
PENG Fuming. Research on the interfacial performance of metallic structures strengthened with fibre reinforced polymers[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2005.

(编辑 魏希柱)