

文章编号: 1001-4888(2014)04-489-10

FRP-混凝土界面粘结行为的参数影响研究^{*}

彭晖^{1,2}, 高勇¹, 谢超¹, 崔潮¹, 张克波^{1,2}

(1. 长沙理工大学 土木与建筑学院, 湖南 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 410114)

摘要: FRP-混凝土界面的粘结性能对 FRP 加固混凝土结构力学行为和破坏模式有着重要影响。本文对表征 FRP-混凝土界面粘结性能的三个重要参数(界面初始刚度、最大剪应力、界面破坏能)开展研究,通过 13 个单剪试件的试验考察了混凝土强度、胶层厚度和粘结长度等因素对界面粘结行为的影响,根据试验结果拟合了界面破坏能、最大剪切应力与胶层剪切刚度、混凝土强度之间的函数关系。在试验研究基础上,构建了外贴 FRP-混凝土界面粘结的有限元模型。通过有限元分析考察了界面破坏能等三个参数不变的前提下,不同的局部粘结滑移本构关系对界面粘结行为的影响;进而研究了其中一个参数变化时引起的界面粘结性能改变。研究表明:界面粘结承载力随着胶层厚度增加而逐渐提高;胶层厚度与界面破坏能成正比,与峰值剪应力成反比;当界面破坏能等三个参数保持不变时,局部粘结滑移本构关系对 FRP-混凝土界面粘结性能的影响较小;三个参数中的一个增大时将延缓界面破坏的过程。

关键词: 纤维增强聚合物; 混凝土; 粘结行为; 粘结滑移本构关系; 界面破坏能

中图分类号: TU378 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-14-066

0 引言

纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)已经被广泛应用到混凝土结构加固领域,众多学者也对 FRP 加固混凝土结构开展了大量研究^[1-3]。其中,FRP-混凝土界面的粘结性能对于 FRP 加固混凝土结构的力学行为和耐久性能起着至关重要的作用。FRP 与混凝土之间通过界面胶层传递界面剪应力,从而与结构共同承担荷载,当剪应力或滑移过大时则可能发生界面剥离破坏,因此良好的界面粘结性能对于充分利用 FRP 加固混凝土结构的效率非常重要。许多研究人员对 FRP-混凝土的界面粘结性能进行了试验与理论研究^[4-7],发现胶层的剪切刚度、混凝土强度等参数对界面粘结性能存在显著影响。另一方面,FRP-混凝土界面的局部粘结滑移本构关系是描述和分析界面粘结性能的重要基础,研究人员根据试验结果提出了多个局部粘结滑移本构关系,包括双线性模型、三线型模型、指数模型等。陆新征^[8]提出的 FEM 精细有限元模型与试验结果吻合较好。T. Ueda 等^[9,10]的模型则考虑了包括胶层厚度在内的多个因素的影响,具有较充分的物理意义。

已有的研究表明,混凝土强度、FRP 粘结长度等参数对 CFRP-混凝土界面的粘结行为有着显著影响,但不同文献所提供的试验结果存在差异,并且已有研究中对胶层厚度参数涉及较少,仅有的研究所得到的结论也存在较大分歧,如 Tamura 等^[11]认为 FRP-混凝土的静粘结承载力随着胶层厚度增大而提高,但界面粘结疲劳寿命随胶层厚度增大而降低;Mazumdar 等^[12]发现当胶层厚度从 0.127mm 变化

^{*} 收稿日期: 2014-04-08; 修订日期: 2014-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51008036),交通部应用基础研究项目(2010318000006),长沙市科技计划项目(K1203038-11)

通讯作者: 张克波(1961—),博士,教授。主要从事桥梁结构耐久性性能分析与承载力评定研究。E-mail: zhangkblyx@vip.sina.com

至 1.651mm 时,0.33mm 的胶层厚度对应着最大的界面粘结承载力;而 Xu 等^[13]则认为粘结界面疲劳裂纹拓展速率随着胶层厚度的增加而逐渐减小。因此本文实施了 13 个 FRP-混凝土单剪试件的试验,研究了不同胶层厚度、混凝土强度、FRP 粘结长度等对界面粘结性能的影响,拟合了与界面破坏能等参数之间的相关性;在此基础上通过有限元分析考察了界面破坏能等三个参数^[14-16]不变的前提下,不同的局部粘结滑移本构关系对界面粘结性能的影响,进而研究了一个参数变化时引起的界面粘结性能改变。

1 FRP-混凝土界面粘结单剪试验

1.1 试验设计

本文采用的试验形式为界面单剪试验。试件为尺寸 150mm×150mm×300mm 的混凝土棱柱体,在混凝土棱柱体一面粘贴了瑞士 Sika 公司生产的 S512 型 CFRP 板,如图 1 所示,试验材料性能如表 1 所示。试验中采用如图 2 所示的加载装置对 CFRP 板施加拉伸荷载。本文试验主要考察以下三个因素:FRP-混凝土界面胶层厚度、混凝土强度、粘结长度对界面粘结性能的影响,试件设计如表 2 所示。

为了考察 FRP-混凝土界面的粘结应力,沿界面粘结长度以 10mm 为间距在 CFRP 板上布设了 5mm×3mm 的电阻应变片。为了记录试件达到极限状态时的 FRP 应变,在 CFRP 板加载端的非粘结区域平行布设了两个应变片。

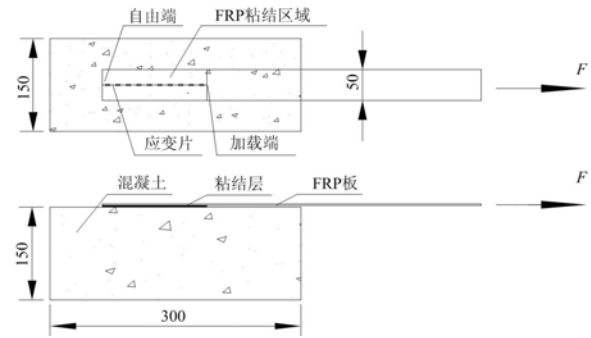


图 1 试件形式及尺寸
Fig. 1 Design of specimens



图 2 试验加载
Fig. 2 Loading devices

表 1 试件材料力学性能
Tab. 1 Mechanical properties of materials

材料	检验项目	检验值
碳纤维板 (Sika-S512)	抗拉强度	2461MPa
	受拉弹性模量	1.65×10^5 MPa
	厚度	1.2mm
	伸长率	1.71%
粘结树脂 (Sika-dur30)	抗拉强度	31.7 MPa
	受拉弹性模量	2627MPa
	伸长率	1.5%

1.2 主要试验结果

各试件具体参数及主要试验结果如表 2 所示。

剥离破坏是 FRP-混凝土试件常见的界面粘结破坏模式。本文试验中所有试件破坏模式均为剥离破坏,但具体破坏形态及破坏界面有所区别,包括树脂-混凝土界面剥离、界面下薄层混凝土剥离(图 3

(a))、FRP-树脂剥离以及混合剥离(图 3(b))。一方面,随着胶层厚度的增加,界面粘结承载力逐渐提高,破坏也由混凝土薄层剥离向树脂-混凝土剥离或混合剥离转变。另一方面,混凝土强度提高也引起粘结承载力的相应增大和破坏界面由薄层混凝土向树脂-混凝土界面的迁移。粘结长度增加也能改变界面剥离的方式。可见,混凝土强度、胶层厚度、粘结长度对界面破坏形态均存在一定的影响。另外,从表 2 中也可看出,粘结长度和胶层厚度的增大均引起了界面粘结承载力的显著提高,但混凝土强度增大引起的粘结承载力变化相对较不显著,S70-100-4 的破坏荷载(20.7kN)甚至小于 S55-100-4(23.4kN),这应是试验的离散性所致。

表 2 试件参数及试验结果
Tab. 2 Specimens parameters and main test results

试件编号	胶层剪切刚度 (GPa/mm)	混凝土立方体 抗压强度(MPa)	粘结长度 (mm)	粘结承载力 (kN)
S30-100-2.2	0.492	31	100	18.6
S30-150-2.2	0.492	32.5	150	23.2
S30-100-2	0.541	37.7	100	18.5
S30-150-1	1.07	37.7	150	20
S30-150-2	0.541	37.7	150	21.5
S30-150-4	0.272	38.3	150	23.9
S30-200-4	0.272	37.9	200	26.3
S40-100-4	0.272	49.2	100	20.1
S55-100-1	1.074	57.8	100	16.8
S55-100-2	0.542	58.9	100	19.3
S55-100-3	0.362	59.2	100	22.7
S55-100-4	0.272	56.4	100	23.4
S70-100-4	0.272	77.3	100	20.7

说明:试件编号中,“S”表示单剪试验,“S”后第一组数字代表设计混凝土强度,第二组数字表示粘结长度(mm),第三组数字表示胶层厚度(mm)。

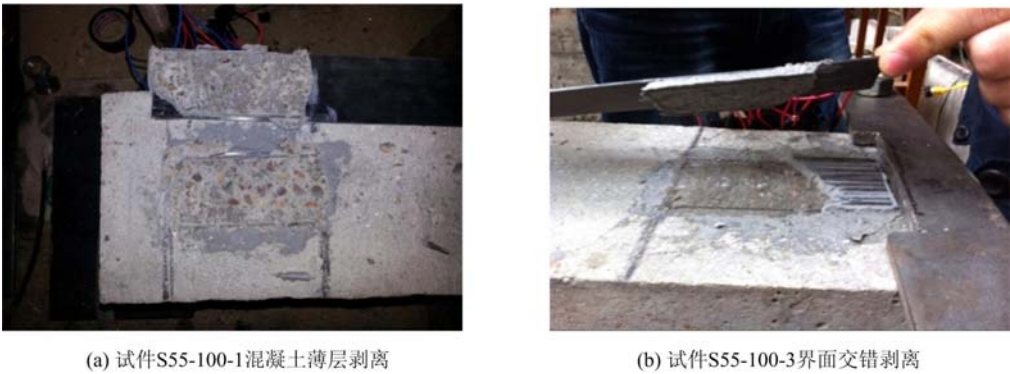


图 3 界面破坏形态
Fig. 3 Failure mode of interface

2 界面粘结性能的参数影响分析

2.1 CFRP-混凝土界面粘结滑移本构关系

FRP 与混凝土粘结界面的局部粘结滑移关系是决定 FRP-混凝土间粘结性能的本构属性。混凝土强度、胶层厚度等因素的影响也反映为界面粘结滑移本构关系的改变。通过面内剪切试验可以测量得到沿粘结长度的 FRP 连续应变分布,当各应变测点间距离足够小时,基于 FRP 应变分布可得到具有一

定精度的界面粘结应力和相对滑移分布,进而获得粘结界面不同位置的粘结-滑移本构关系。本文基于单剪试验得到的 FRP 应变分布数据,通过以下差分计算式(1)、(2)^[17]得到了本文试件的粘结剪应力和对应的滑移量关系。

第 i 个应变片位置局部粘结应力 τ_i 为:

$$\tau_i = \frac{E_f t_f (\epsilon_i - \epsilon_{i-1})}{\Delta x} \quad (1)$$

设应变片间距为 Δx ,则第 i 个应变片位置的滑移值为:

$$s_i = \frac{\Delta x}{2} (\epsilon_0 + 2 \sum_{j=1}^{i-1} \epsilon_j + \epsilon_i) \quad (2)$$

式中, ϵ_0 为粘结区自由端的应变片值; $\epsilon_j (j=1, \dots, i)$ 为沿 CFRP 板长方向第 j 个应变片值; E_f 和 t_f 分别为 CFRP 板的弹性模量和厚度; τ_i 为第 i 个应变片位置处的 CFRP 板与混凝土之间的粘结应力; s_i 为第 i 个应变片位置处的 CFRP 板与混凝土之间的局部滑移量。

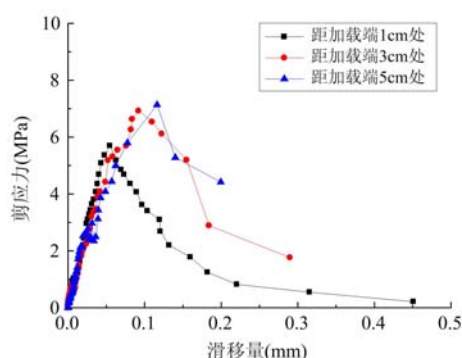


图 4 试件 S55-100-3 不同位置处粘结滑移曲线

Fig. 4 Curves of bond-slip relationship at different position of specimen S55-100-3

图 4 为试件 S55-100-3 试件根据式(1)、(2)计算得到的局部粘结滑移曲线。从图 4 可看出,加载端附近的界面粘结峰值剪应力小于更靠近自由端位置的峰值剪应力,这应是因为加载端附近粘结区域约束小于其他粘结区域所致。对试验结果的分析表明当粘结区域距加载端超过 5cm 后,粘结滑移曲线的峰值剪应力趋于稳定。

2.2 粘结滑移本构关系重要参数

粘结滑移本构关系主要包括三个参数:初始界面刚度 k_0 、最大(峰值)剪应力 $\tau_{\max}$ 和界面破坏能 G_f ($\tau-s$ 曲线与 x 轴包含的面积)。其中初始界面刚度 k_0 可由 $\tau-s$ 曲线的斜率计算得到;界面破坏能 G_f 通常由 $\tau-s$ 曲线所包含的面积得到。根据本文试验结果,表 3 列出了各试件粘结滑移本构关系中的 k_0 、 $\tau_{\max}$ 和 G_f 三个重要参数值。

表 3 粘结滑移本构关系重要参数试验值

Tab. 3 Test results of parameters of the bond-slip relationship

试件编号	初始剪切刚度 (GPa/mm)	最大剪切应力 (MPa)	界面破坏能
S30-100-2.2	0.28	4.63	0.693
S30-150-2.2	0.3	4.76	0.717
S30-100-2	0.33	5.23	0.708
S30-150-1	0.46	5.87	0.55
S30-150-2	0.26	5.32	0.701
S30-150-4	0.169	6.1	0.708
S30-200-4	0.129	6.25	0.808
S40-100-4	0.108	6.43	0.728
S55-100-1	0.377	9.1	0.65
S55-100-2	0.243	7.8	0.715
S55-100-3	0.122	5.6	0.745
S55-100-4	0.086	5.4	0.792
S70-100-4	0.088	6.6	0.88

从表中数据可以看出,随着混凝土强度增大,FRP-混凝土界面的峰值剪应力和界面破坏能均有所增大;而随着胶层厚度增加,界面初始刚度持续减小,峰值剪应力也有所降低,但界面破坏能持续增大,这是因为胶层厚度增加导致了界面极限滑移值增大。

另外,Ueda^[18]、Holzenkampfer^[19]、Niedermeier^[20]、陆新征^[8]等分别提出了粘结承载力和界面破坏能的计算公式,如式(3)~(6)所示。

Holzenkampfer 模型:

$$P_u = b_f \sqrt{G_f E_f t_f}, G_f = c_f f_t, c_f = 0.204 \text{mm} \quad (3)$$

Ueda 模型:

$$P_{\max} = (b_f + 2\Delta b_f) \sqrt{2E_f t_f G_f}, G_f = 0.446 f_w^{0.236} (G_a/t_a)^{-0.352} (E_f t_f)^{0.023} \quad (4)$$

Niedermeier 模型:

$$P_u = \begin{cases} 0.78 b_f \sqrt{G_f E_f t_f}, & \text{当 } L \geq L_e \\ 0.78 b_f \sqrt{G_f E_f t_f} \frac{L}{L_e} (2 - \frac{L}{L_e}), & \text{当 } L < L_e \end{cases}, G_f = c_f k_w^2 f_t, k_w = \sqrt{1.125 \frac{2 - b_f/b_c}{1 + b_f/400}} \quad (5)$$

陆新征模型:

$$P_u = \begin{cases} b_f \sqrt{2G_f E_f t_f}, & \text{当 } L \geq L_e \\ b_f \sqrt{2G_f E_f t_f} \frac{L}{L_e} (2 - \frac{L}{L_e}), & \text{当 } L < L_e \end{cases}, G_f = 0.308 k_w^2 \sqrt{f_t}, k_w = \sqrt{\frac{2.25 - b_f/b_c}{1.25 + b_f/b_c}} \quad (6)$$

式中, G_f 为界面破坏能; E_f 为碳板弹性模量; t_f 为碳板厚度; b_f 为 CFRP 板的宽度; Δb_f 为 CFRP 板剥离时候依附的混凝土层; L 为粘结长度; L_e 为有效粘结长度; c_f 为修正系数; f_t 为混凝土抗拉强度; k_w 为 CFRP 板与混凝土的宽度修正系数。

根据这些公式和粘结承载力试验结果,可算出各试件对应的界面破坏能。本文基于试验结果,列出了根据不同模型计算得到的界面破坏能,如表 4 所示,其中 Δb_f 取 3.7mm。

表 4 不同模型界面破坏能计算结果比较

Tab. 4 Calculation results of interfacial fracture energy from different models

试件编号	试验值	Holzenkampfer 模型	Niedermeier 模型	Ueda 模型	陆新征 模型
S30-150-4	0.708	0.29172	0.8151	1.88	0.45
S30-200-4	0.808	0.29172	0.8151	1.87	0.45
S40-100-4	0.728	0.34884	0.9747	1.998	0.49
S55-100-1	0.65	0.39984	1.1172	1.28	0.52
S55-100-2	0.715	0.39984	1.1172	1.64	0.52
S55-100-3	0.745	0.39984	1.1172	1.89	0.52
S55-100-4	0.792	0.39984	1.1172	2.06	0.52
S70-100-4	0.88	0.43656	1.2198	2.22	0.55

由表 4 可知,上述模型的界面破坏能反算结果与试验结果均存在一定的差异,其中陆新征模型部分计算值与试验结果较为接近,但该模型没有考虑胶层厚度对界面破坏能影响;Ueda^[18]模型虽然考虑了胶层厚度对界面破坏能影响,但是结果表明其计算值偏大。故而有必要建立符合本文试验结果的界面破坏能与加固材料属性的本构关系。

2.3 影响因素作用分析

如前试验现象所述,混凝土强度、胶层厚度等因素对 FRP-混凝土界面粘结性能有着显著影响。在试验基础上,本文考察了混凝土强度和胶层厚度等因素对界面破坏能 G_f 等界面粘结滑移本构关系重要参数的影响。图 5~8 分别为胶层厚度和混凝土强度与 G_f 和 $\tau_{\max}$ 的相关性拟合曲线,其中胶层厚度

以参数 G_a/t_a 来反映。

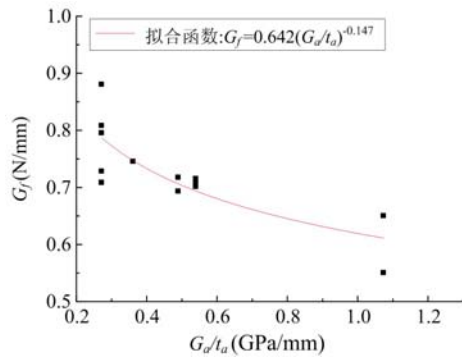


图 5 G_a/t_a 对 G_f 的影响

Fig. 5 Influence of G_a/t_a on G_f

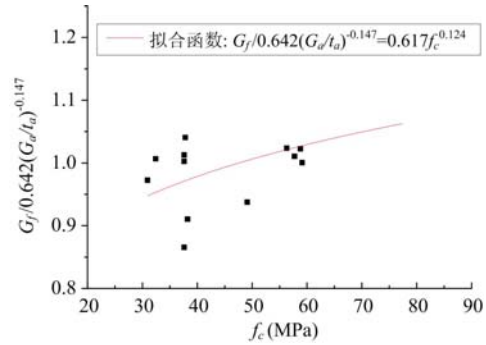


图 6 f_c 对 G_f 的影响

Fig. 6 Influence of f_c on G_f

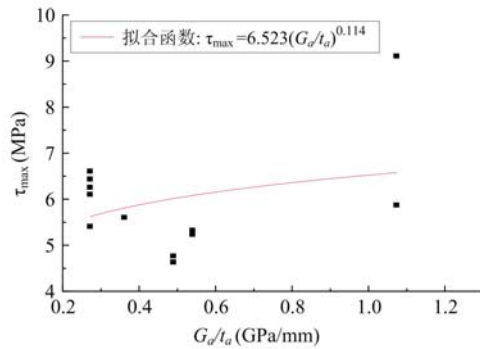


图 7 G_a/t_a 对 $\tau_{\max}$ 的影响

Fig. 7 Influence of G_a/t_a on $\tau_{\max}$

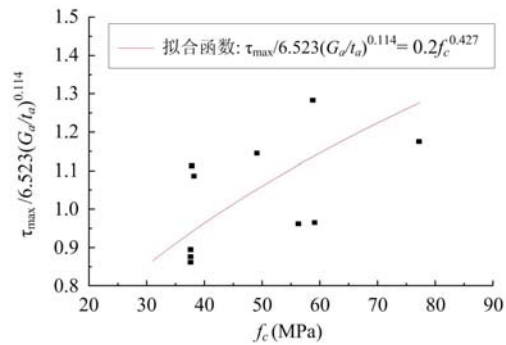


图 8 f_c 对 $\tau_{\max}$ 的影响

Fig. 8 Influence of f_c on $\tau_{\max}$

从图 5~8 可以看出,胶层厚度和混凝土强度增大时,界面破坏能随之提高;胶层厚度增大时,峰值剪应力相应减小;混凝土强度提高时,峰值剪应力增大。相应的 G_f 和 G_a/t_a 、 f_c 之间的关系式拟合为:

$$G_f = 0.396(G_a/t_a)^{-0.147} f_c^{0.124} \quad (7)$$

相应的 $\tau_{\max}$ 和 G_a/t_a 、 f_c 之间的关系式拟合为:

$$\tau_{\max} = 1.3(G_a/t_a)^{0.114} f_c^{0.427} \quad (8)$$

3 参数影响的有限元分析

3.1 有限元模型

在试验研究基础上,本文基于通用有限元分析软件 Ansys 建立了外贴 FRP-混凝土粘结试件的有限元模型,模型采用 CFRP 板与混凝土共节点,同时在共用节点之间置入弹簧单元来模拟界面的粘结滑移关系^[21-23]。弹簧单元可以模拟界面沿板长横向和纵向粘结滑移关系,通过在弹簧单元的本构关系中输入试验获得的界面粘结滑移本构关系数据,即可让有限元分析软件严格按照输入的粘结滑移本构关系曲线进行计算。在有限元分析中,混凝土单元采用 solid65 号单元,CFRP 板采用 shell63 单元来模拟,弹簧单元采用 combine39 单元模拟。具体的有限元模型如图 9 所示,有限元结果与试验结果对比如图 10 所示。

3.2 不同粘结滑移曲线影响

目前研究得到的粘结滑移曲线形状主要包括四种,分别是典型模型、双线性模型、三线性模型、指数函数模型。不同曲线形状如图 11 所示。

为了考察曲线形状对 FRP-混凝土界面粘结性能的影响,在有限元模型中考虑不同形状粘结滑移曲

线作为本构关系,但保持 k_0 、 $\tau_{\max}$ 和 G_f 三个重要参数不变。图 12 描绘了保持 G_f 等三个参数不变的前提下,四种不同形状粘结滑移关系曲线对应的 15kN 荷载下的 FRP 应变分布。

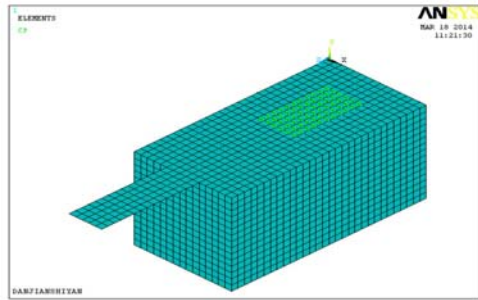


图9 有限元模型

Fig. 9 FE model

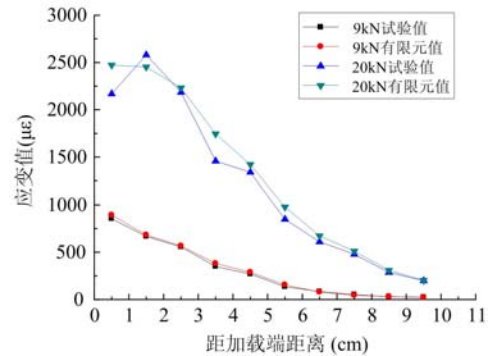


图10 试件 S55-100-3 试验结果与有限元分析对比

Fig. 10 Comparison of test results and FE analysis of specimen S55-100-3

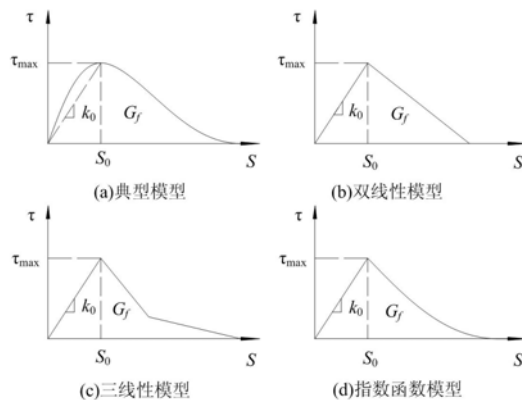


图11 不同粘结滑移曲线形状

Fig. 11 Different curves of bond-slip relationships

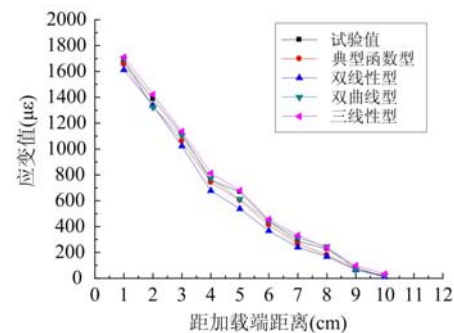


图12 15kN 时不同形状粘结滑移曲线对应 FRP 应变

Fig. 12 FRP strain distribution corresponding to different bond-slip relationships under 15kN

从图 12 可看出,对于不同形状的粘结滑移曲线模型,只要保持 k_0 、 G_f 、 $\tau_{\max}$ 三个参数不变,那么界面的应力及应变变化值均较小,而且极限承载力与试验值均很接近,从而说明了只要界面的三个重要性能参数相同,粘结滑移本构模型的曲线形状对 FRP-混凝土的界面粘结性能没有显著影响。

3.3 粘结滑移曲线三个关键参数的影响分析

为了分析三个重要参数(k_0 、 G_f 、 $\tau_{\max}$)对界面粘结性能的影响,在前述建立的有限元模型基础上,以双线性粘结滑移曲线关系作为基本的界面参数本构关系,考察在有限元分析模型中变化三个参数中的一个时对界面粘结性能所产生的影响。有限元模型取实际的 CFRP 板和试件 S55-100-3 的混凝土材料属性为模型参数。

(1) G_f 、 $\tau_{\max}$ 不变, k_0 变化。以双线性模型为基础,考察不同 k_0 变化对界面粘结性能的影响。

从图 13 中可以看出,界面的初始刚度 k_0 越大,相同位置处的碳板应变越小,说明 k_0 越大,应力传递长度越小。数值模拟结果表明, k_0 增大会引起界面粘结承载力逐渐增大,但是当 k_0 超过 0.05 后,界面承载力变化趋缓。由于 G_f 和 $\tau_{\max}$ 保持不变,当 k_0 较小时,双线性粘结滑移曲线上段斜率较小,应力传递速率较小,当界面剪应力超过粘结滑移曲线峰值时,粘结滑移曲线斜率绝对值较大,这就使得碳板受力不能较好地传递到混凝土界面而加速了界面的破坏过程,故而极限承载力较小。

(2) $t_{\max}$ 、 k_0 不变,考察不同 G_f 变化对界面粘结性能影响。

分析 G_f 变化时的数值模拟结果发现,在加载 10kN 时,所有有限元模型的应力应变均相同,说明 10kN 荷载下界面最大粘结应力尚小于峰值剪应力 $\tau_{\max}$,处在粘结滑移曲线的上升阶段。当 $\tau_{\max}$ 、 k_0 保

持不变,所有粘结滑移曲线的上升段相同,因此不同 G_f 下的界面粘结应力分布相同。但当界面最大粘结应力超过峰值剪应力, G_f 的不同会导致粘结滑移曲线的下降段有差异,因而界面粘结应力分布发生变化。图 14 是 15kN 下试验以及有限元模型的应变关系,说明了保持 $\tau_{\max}$ 、 k_0 相同时, G_f 越小,界面应力传递速率越大。数值模拟结果表明,随着破坏能 G_f 增大,粘结承载力先增大后保持不变, G_f 变化引起的承载力提高不太显著。在其他条件相同时, G_f 增大更多的是降低了界面应力传递速率。

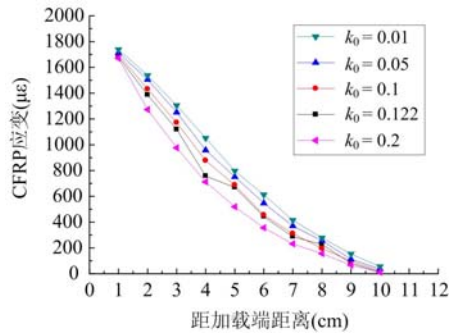


图 13 不同 k_0 时的 CFRP 板应变分布

Fig. 13 CFRP strain distribution for different k_0

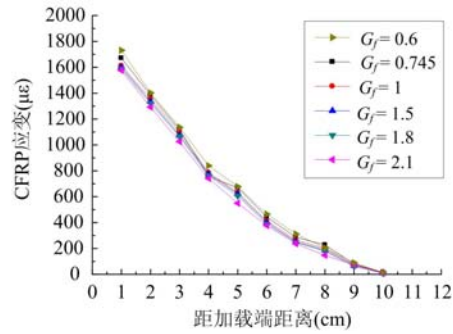


图 14 不同 G_f 时的 CFRP 板应变分布

Fig. 14 CFRP strain distribution for different G_f

(3) G_f 、 k_0 不变,考察不同 $\tau_{\max}$ 变化对界面粘结性能影响。

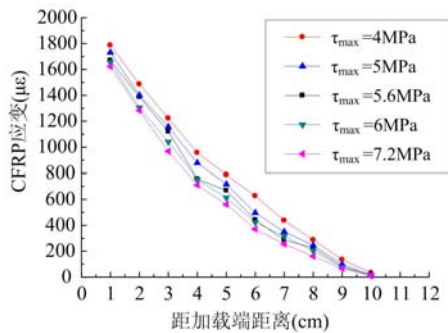


图 15 不同 $\tau_{\max}$ 时的 CFRP 板应变分布

Fig. 15 CFRP strain distribution for different $\tau_{\max}$

从图 15 可知,随着 $\tau_{\max}$ 增大,同一位置处应变值减小,可见 G_f 、 k_0 不变, $\tau_{\max}$ 越大对界面应力传递越有利,提高了界面应力传递速率,因而增大了 FRP-混凝土界面的粘结承载力。

4 结语

根据本文试验和分析结果,可得出以下结论:

(1) 胶层厚度、混凝土强度等因素对界面粘结性能存在显著影响:界面粘结承载力随着胶层厚度增加而逐渐提高,破坏也由混凝土薄层剥离向树脂-混凝土剥离或混合剥离转变;另一方面,混凝土强度提高也引起粘结承载力的相应增大和破坏界面由薄层混凝土向树脂-混凝土界面的迁移。

(2) 胶层厚度和混凝土强度增大时,界面破坏能随之提高;胶层厚度增大时,峰值剪应力相应减小;混凝土强度提高时,峰值剪应力增大。

(3) 当界面破坏能、峰值剪应力和初始剪切刚度等参数不变时,不同的 FRP-混凝土界面粘结滑移曲线形状对界面粘结性能没有显著影响。

(4) 有限元数值模拟表明,三个参数的其中一个改变均能影响界面粘结应力分布和极限承载力,单一参数的增大提高了界面粘结性能,但这种提高呈逐渐减缓趋势。

参考文献:

- [1] 姚谏, 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): 10-17 (YAO Jian, TENG Jinguang. Experimental study on bond strength between FRP and concrete[J]. Journal Building Structures, 2003, 24(5): 10-17(in Chinese))
- [2] 彭晖, 尚守平, 张建仁 等. 预应力碳纤维板加固 T 梁的试验与理论研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(10): 59-65 (PENG Hui, SHANG Shouping, ZHANG Jianren, et al. Test and theoretical research of T-beam strengthened with prestressed CFRP plate[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(10): 59-65 (in Chinese))

- [3] 彭晖, 尚守平, 金勇俊 等. 预应力碳纤维板加固受弯构件的试验研究[J]. 工程力学, 2008, 25(5):142—150 (PENG Hui, SHANG Shouping, JIN Yongjun, et al. Experimental study of reinforced concrete beam with prestressed CFRP plate[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(5):142—150(in Chinese))
- [4] Abdel Baky H, Ebead U, Neale K W. Nonlinear micromechanics-based bond-slip model for FRP/concrete interfaces[J]. Engineering Structures, 2012, 39:11—23.
- [5] Guo Z G, Cao S Y, Sun W M, et al. Experimental study on bond stress-slip behavior between FRP sheets and concrete[C]. Int. Symp. on Bond Behavior of FRP in Structures, BBFS-2005, International Institute for FRP in Construction (IIFC), Hong Kong, 2005:77—83.
- [6] 曹双寅, 潘建伍, 陈建飞 等. 外贴纤维与混凝土结合面的粘结滑移关系[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(1):99—105 (CAO Shuangyan, PAN Jianwu, CHEN Jianfei, et al. The bond-slip relationship of externally bonded FRP and concrete[J]. Journal Building Structures, 2006, 27(1):99—105(in Chinese))
- [7] Nakaba K, Toshiyuki K, Tomoki F, et al. Bond behavior between fiber-reinforced polymer laminates and concrete [J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(3):359—367.
- [8] Lu X Z, Teng J G, Ye L P, et al. Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete[J]. Engineering Structures, 2005, 27(6):920—937.
- [9] Ueda T, Dai J G, Sato Y. A nonlinear bond stress-slip relationship for FRP sheet-concrete interface [C]. Int. Symp. on Latest Achievement of Technology and Research on Retrofitting Concrete Structures, Kyoto, Japan, 2003:113—120.
- [10] Dai J G, Ueda T. Local bond stress slip relations for FRP sheets concrete interfaces[C]. Proc. 6th Int. Symp. on FRP Reinforcement for Concrete Structures, World Scientific Publications, Singapore, 2003:143—152.
- [11] Hiroya Tamura, Ueda T, Furuuchi Hitoshi, et al. Effect of adhesive thickness on bond behavior of carbon fiber sheet under static and fatigue loading[C]. The Second Official International Conference of International Institute for FRP in Construction for Asia-Pacific Region, 2009, 12:241—246.
- [12] Mazumdar S K, Mallick P K. Static and fatigue behavior of adhesive joints in SMC-SMC composites[J]. Polymer Composites, 1998, 2(19):139—146.
- [13] Xu X X, Crocombe A D, Smith P A. Fatigue crack growth rates in adhesive joints tested at different frequencies [J]. Adhesion, 1996, 58:205—226.
- [14] Yasmeen Taleb Obaidat, Susanne Heyden. Evaluation of parameters of bond action between FRP and concrete[J]. Journal of Composites for Construction, 2013, 17:626—635.
- [15] Wu Y F. Quantification of bond-slip relationship for externally bonded frp-to-concrete joints[J]. Journal of Composites for Construction, 2013, 17:673—686.
- [16] Julio C, López-González. Effect of Adhesive Thickness and Concrete Strength on FRP-Concrete Bonds[J]. Journal of Composites for Construction, 2012, 16:705—711.
- [17] 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]. Journal of Composites for Construction, 2005, 9(1):52—62.
- [18] Ueda T, Dai J G, Sato Y. A nonlinear bond stress-slip relationship for FRP sheet-concrete interface[C]. Japan Concrete Institute, July 2003.
- [19] Holzenkämpfer P. Ingenieur modelle des verbundes geklebter bewehrung für betonbauteile[D]. Ph. D. Thesis, TU Braunschweig, Germany, 1994.
- [20] Niedermeier R. Envelope line of tensile forces while using externally bonded reinforcement[D]. Ph. D. Thesis, TU München, Germany, 2000.
- [21] Ahmed Godat, Pierre Labossière, Kenneth W, et al. Behavior of RC members strengthened in shear with EB FRP: Assessment of models and FE simulation approaches[J]. Computers and Structures, 2012(92-93):269—282.
- [22] 叶锋, 姚谏. 板宽对 FRP-混凝土粘结界面应力影响的三维有限元分析[J]. 科技通报, 2008, 24(6):853—859 (YE Feng, Yao Jian. A 3D finite element study on the effect of FRP plate width on interfacial stress between FRP and concrete[J]. Bulletin of Science and Technology, 2008, 24(6):853—859(in Chinese))

- [23] 陆新征, 谭壮, 叶列平. FRP 布-混凝土界面粘结性能的有限元分析[J]. 工程力学, 2004, 21(6): 46—50 (LU Xinzhen, TAN Zhuang, YE Lieping. Finite element analysis of bonded FRP sheet-concrete joint[J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(6):46—50(in Chinese))

On the Influence of Parameters on Bonding Behavior of FRP-Concrete Interface

PENG Hui^{1,2}, GAO Yong¹, XIE Chao¹, CUI Chao¹, ZHANG Ke-bo^{1,2}

(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)

Abstract: Bonding properties of FRP-concrete interface have an important impact on structural mechanics behavior and failure mode of FRP reinforced concrete. Study on three important parameters (the interface initial stiffness, the maximum shear stress, and the interface fracture energy) which characterize FRP-concrete interface bonding properties was carried out. A total of 13 specimens were manufactured, and single shear pulling tests were conducted to investigate the influence of concrete strength, adhesive layer thickness and bond length on the interfacial bonding behavior. Based on experimental results, functions relating the interface fracture energy, the maximum shear stress with the shear stiffness of adhesive layer and the concrete strength were fitted. On the basis of experimental study, a finite element model was established for externally bonded FRP-concrete bonding interface. Through FE analysis, the influence of different local bond-slip constitutive relation on bond performance was studied, when above-mentioned three parameters remain constant. Furthermore, the variation of interface bonding property induced by only one of the above parameter was also studied. Results show that the bond capacity increases gradually with the adhesive thickness increase; adhesive layer thickness is proportional to interface fracture energy and is inversely proportional to the shear stress peak. There is no significant influence of bond-slip constitutive relationship on interface bonding behavior, when above-mentioned three parameters keep unchanged. The increase of one of above three parameters will delay interface failure process.

Keywords: Fiber Reinforced Polymer (FRP); concrete; bonding behavior; bond-slip constitutive relationship; interfacial fracture energy