

# An Experimental Study on Bond-Slip Constitutive Relationships of the CFRP-Concrete Interface\*

Yanlong Hu<sup>1</sup>, Yunfei Li<sup>1</sup>, Hui Wang<sup>2</sup>, Xiaoyong Wu<sup>1#</sup>

<sup>1</sup>College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Shantou University, Shantou

Email: 21156696@qq.com, #xywu007@gmail.com

Received: Oct. 18<sup>th</sup>, 2013; revised: Oct. 30<sup>th</sup>, 2013; accepted: Nov. 6<sup>th</sup>, 2013

Copyright © 2013 Yanlong Hu et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Abstract:** In view of the light weight, high strength, corrosion resistance and convenient construction of carbon fiber reinforced polymer (CFRP), using CFRP to strengthen structure is becoming more and more widely. However, there is no commonly accepted understanding of the constitutive relationship of the bonding shear stress and slip between concrete and CFRP bonded interface; especially the decline of the constitutive relation is more difficult to measure accurately. The aim of this paper is to improve the experiment to explore bond stress and slip ( $\tau$ - $\delta$ ) constitutive relation of the bonding interface, making sure that the experiment can measure the  $\tau$ - $\delta$  constitutive relation curve of CFRP-concrete interface. Double pull test was adopted with the improved specimen, using the horizontal load, to eliminate additional bending moment influence and improve the experimental accuracy. 17 specimens were tested to measure the  $\tau$ - $\delta$  curves. According to the features of the constitutive relation curves, the mechanical characteristics of the bonding interface were further analyzed.

**Keywords:** Bond-Slip; Constitutive Relationships; CFRP; Concrete; Bidirectional-Pull Specimens

## CFRP-混凝土界面粘结滑移本构关系试验研究\*

胡砚龙<sup>1</sup>, 李云飞<sup>1</sup>, 王辉<sup>2</sup>, 吴小勇<sup>1#</sup>

<sup>1</sup>三峡大学土木与建筑学院, 宜昌

<sup>2</sup>汕头大学工学院, 汕头

Email: 21156696@qq.com, #xywu007@gmail.com

收稿日期: 2013年10月18日; 修回日期: 2013年10月30日; 录用日期: 2013年11月6日

**摘要:** 鉴于碳纤维复合材料(CFRP)的轻质高强、耐腐蚀、施工方便等特点, 使用 CFRP 对结构进行维修加固也越来越广泛。然而, 混凝土与 CFRP 粘结界面的粘结剪应力与滑移之间的本构关系却还没有形成统一的认识, 尤其是本构关系的下降段更是难以准确测量出来。本文在于改进方法下实验探究粘结界面的粘结应力-滑移( $\tau$ - $\delta$ )本构关系, 争取实验测出 CFRP-混凝土界面的  $\tau$ - $\delta$  本构关系全曲线。试验采用改进的双拉试件, 采用水平加载, 排除附加弯矩影响, 提高实验结论准确性。实测 17 个试件的 CFRP 界面  $\tau$ - $\delta$  本构关系曲线, 根据  $\tau$ - $\delta$  本构关系曲线特性, 分析粘结面受力特点。

**关键词:** 粘结滑移; 本构关系; 碳纤维复合材料; 混凝土; 双拉试件

\*资助信息: 三峡大学科学基金项目(KJ2011B031)资助。

#通讯作者。

## 1. 引言

用 CFRP 加固混凝土结构的机理是利用 CFRP 与混凝土界面间的粘结剪应力,从而实现了荷载作用在 CFRP 与混凝土之间的顺利传递,实现了两种性质不同的材料之间的共同工作,即 CFRP 与混凝土形成的界面有良好的粘结力,CFRP 布与混凝土形成整体共同受力变形,保证了良好的加固效果。然而,以前许多的实验研究显示<sup>[1-5]</sup>,CFRP 加固的混凝土构件有可能会因为其界面发生粘结剥离而破坏,这样就达不到预期的加固效果。界面剥离破坏是一种脆性破坏,破坏之前亦没有明显的时间预兆,破坏后的 CFRP 布中的每条纤维的应变仍处在较小的水平上,没有充分发挥其高强度性能的优点,如果这样的话不仅造成了昂贵 CFRP 材料的浪费,更严重的是极大降低了 CFRP 加固的安全可靠性。评测界面剥离破坏的基础就是 CFRP 与混凝土界面的粘结性能。

虽然已经有很多研究人员对 CFRP 与混凝土界面的粘结能力进行了大量的试验和理论研究工作,但至今仍然没有一种规范的试验方案,各种试验方案得出的结论相差较大。到现在为止,人们提出了粘结强度模型与粘结应力与滑移模型。其中,粘结强度模型只能得出极限剥离承载力;而粘结应力与滑移模型应能表示出 CFRP 与混凝土界面的整个剥离过程。粘结应力与滑移关系曲线中,最大粘结剪应力  $\tau_f$  及与其对应的相对滑移量  $\delta_f$  和最大相对滑移量  $\delta_u$  是三个主要控制参数。以往的试验研究表明,  $\tau_f = 4\sim 6$  MPa,  $\delta_f = 0.02\sim 0.05$  mm,但由于以往试验方案的不足,粘结应力与滑移应变  $\tau$ - $\delta$  关系曲线的下降段却没有准确测到,不能建立包括下降段在内的完整  $\tau$ - $\delta$  关系曲线,也得不到准确的  $\delta_u$  值。许多学者采取理论方法预测完整的关系曲线的下降段和  $\delta_u$  值,但不同学者的模型相差较大,如图 1 所示。

以往的试验<sup>[6-8]</sup>、理论探究尚未得到较准确的粘结应力与滑移本构关系曲线的下降段。为此汕头大学熊光晶教授及其研究生为提出了一种“双拉试件”<sup>[1-5]</sup>,使得实测( $\tau$ - $\delta$ )本构关系的下降段具有了一定的可行性。本文借鉴以往实验方法,并利用 MTS 加载设备条件,改进既有的双拉试件,并验证此新型双拉试件的适用性,改进双向受拉水平加载方案。用一组电阻应变片实测出每个试件的粘结界面上 CFRP 布应变的

大小及其分布规律,通过对实测的应变进行积分,计算粘结界面的滑移值,从而得到  $\tau$ - $\delta$  关系全曲线。

## 2. 试验概况

实验采用的混凝土材料配合比为:水泥:水:砂:石子质量比 = 1:0.39:1.29:1.88,共浇筑了 18 个混凝土试块(表 1);同时,用标准试块模具制作 20 个(三批)100 mm × 100 mm × 100 mm 立方体标准试块。所有试件

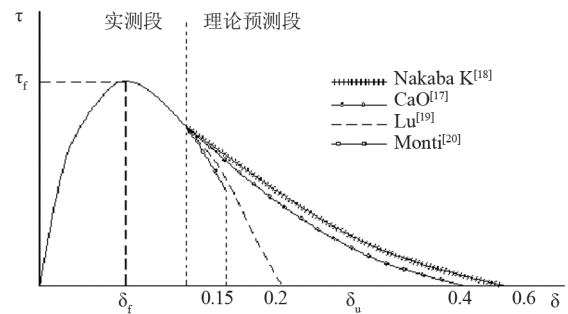


Figure 1. Several typical  $\tau$ - $\delta$  relation curves  
图 1. 既有几种典型的  $\tau$ - $\delta$  关系曲线

Table 1. Results of all specimens  
表 1. 各试件的试验结果

试件编号	$\tau_f$ /MPa	$\delta_f$ /mm	$\delta_u$ /mm
S1	5.19	0.081	0.141
S2	2.10	0.083	0.143
S3	3.73	0.142	0.178
S4	6.07	0.093	0.157
S5	4.12	0.153	0.179
S6	2.22	0.102	0.148
S7	3.50	0.122	0.163
S8	6.10	0.148	0.181
S9	2.80	0.179	0.232
S10	3.62	0.122	0.162
S11	3.22	0.090	0.158
S12	4.34	0.153	0.188
S13	3.21	0.102	0.159
S14	5.62	0.084	0.149
S15	5.78	0.127	0.168
S16	6.55	0.148	0.172
S17	4.10	0.139	0.163
S18			用于作补偿片

和试块养护期为 28 天，立方体 28 天抗压强度为 47.2 MPa。试件两侧测点从外到内分别为 A~H 和 A'~H'，试件如图 2、3 所示。

### 3. CFRP 上的应变大小及分布

以 S4 和 S14 试件为例，在各级荷载作用下 CFRP 上的应变  $\varepsilon_f$  分布如图 4 所示。加载初期，只有 A 点应变有一定增长；随着荷载的增加，A(A')点应变快速增长；紧接着 B(B')点、C(C')点应变也以类似(A')点应变的变化方式增长；随着荷载的增加，D(D')点、E(E')点、F(F')点、G(G')点的应变开始增加。直到最中间的 H(H')点的应变开始增加，且增至最大。在 CFRP 布拉断前一刻，除 C 点(2000 $\varepsilon$ )和 C'点(3300 $\varepsilon$ )；E 点(5000 $\varepsilon$ )和 E'点(4100 $\varepsilon$ )处的应变存在差别外，其他相对称位置

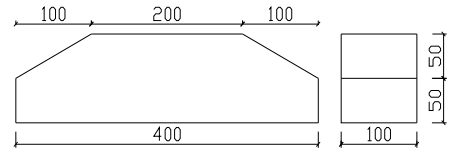


Figure 2. Vertical section and side section  
图 2. 试件纵截面和侧截面图

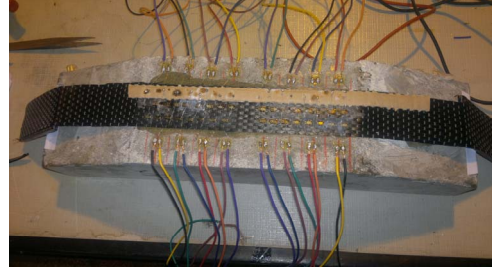


Figure 3. Photograph  
图 3. 试件照片

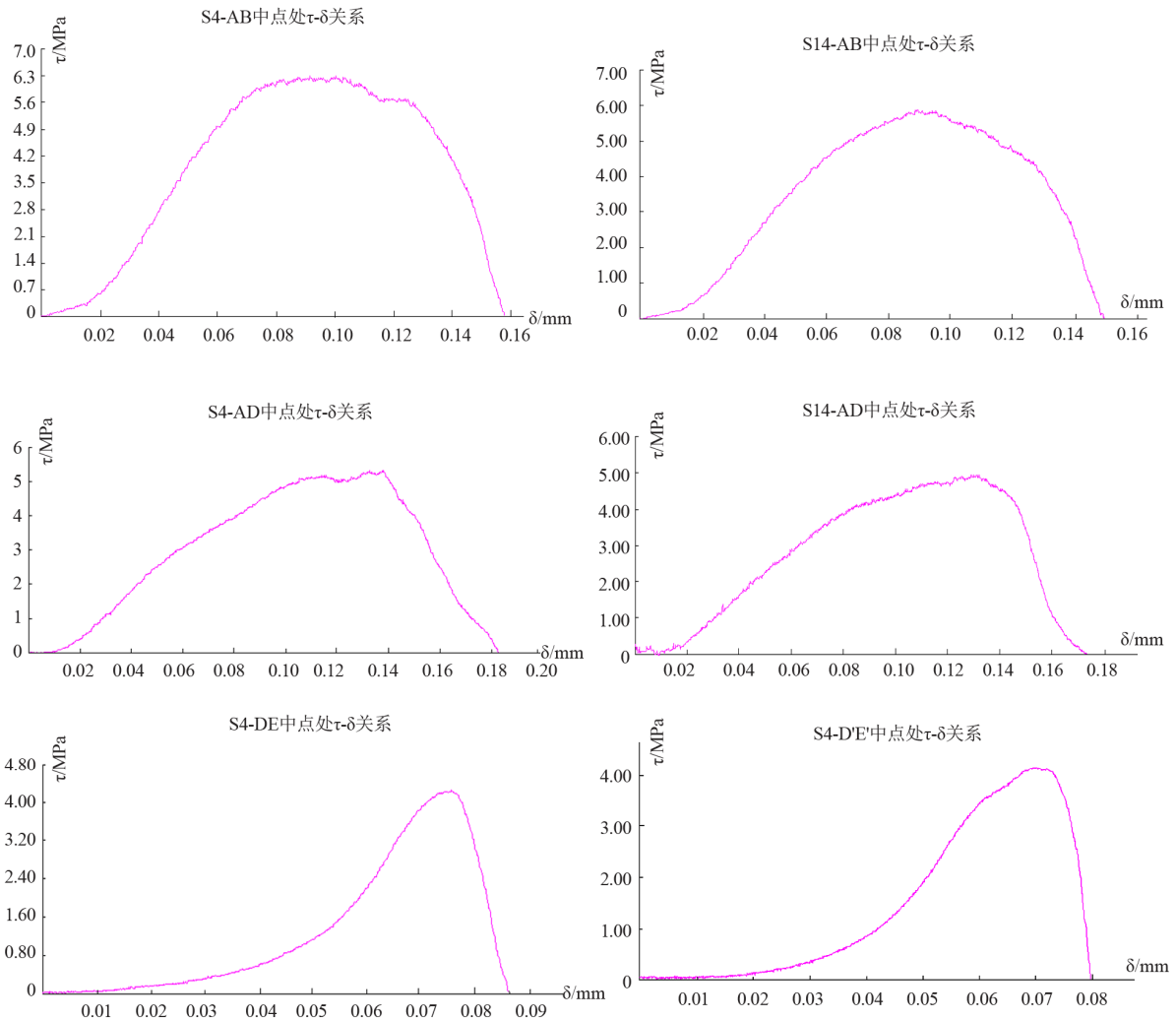


Figure 4. The  $\tau$ - $\delta$  relation of each point  
图 4. 各点处的  $\tau$ - $\delta$  本构关系

的应变基本都近似。

#### 4. 实测 $\tau$ - $\delta$ 本构关系全曲线

将实验所得到的粘结应变代入下列(1)和(2)式,就可以算得所需点的粘结应力  $\tau$  和滑移量  $\delta$ , 从而可得  $\tau$ - $\delta$  本构关系曲线。

以 AB 段为例:

$$\tau_{AB} = \frac{(\varepsilon_A - \varepsilon_B) \times E_{CFRP} \times t}{l_{AB}} \quad (1)$$

$\delta_{AB} =$

$$\begin{aligned} & \frac{(\varepsilon_A + \varepsilon_B) \times l_{AB}}{2} + \frac{(\varepsilon_B + \varepsilon_C) \times l_{BC}}{2} + \frac{(\varepsilon_C + \varepsilon_D) \times l_{CD}}{2} \\ & + \frac{(\varepsilon_D + \varepsilon_E) \times l_{DE}}{2} + \frac{(\varepsilon_E + \varepsilon_F) \times l_{EF}}{2} + \frac{(\varepsilon_F + \varepsilon_G) \times l_{FG}}{2} \\ & + \frac{(\varepsilon_G + \varepsilon_H) \times l_{GH}}{2} \end{aligned} \quad (1)$$

其中  $E_{CFRP}$  为 CFRP 的弹性模量, 为 211 GPa,  $t$  为 CFRP 的名义厚度, 单层厚度为 0.11 mm。  $l_{AB} \sim l_{GH}$  是各应变片之间的间距(下标为应变片编号)。可得出各测点处的  $\tau$ - $\delta$  实测本构关系全曲线。图 4 是 S4 和 S14 部分典型测点处的  $\tau$ - $\delta$  本构关系。

下面以 AB 中点位置为例, AB 中点位置如图 4 所示。列出三个关键控制参数的实验实测值。如下表 1 所示。

同样用 AB 中点, 由各试件的 AB 中点处  $\tau$ - $\delta$  本构关系曲线, 如下图 5 所示。

#### 5. 讨论与总结

虽然 17 个试件的实验结果有较大离散性, 但整体的  $\tau$ - $\delta$  本构关系曲线趋势比较明显。都分为了明显

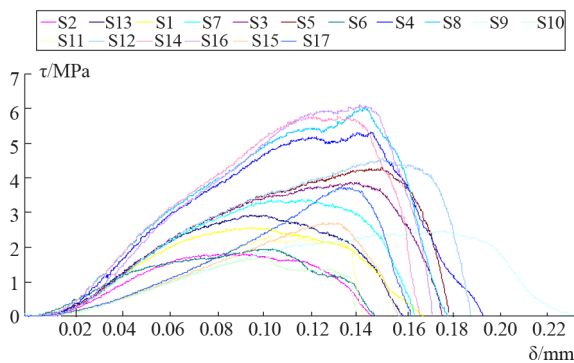


Figure 5.  $\tau$ - $\delta$  curves of all specimens  
图 5. 所有试件  $\tau$ - $\delta$  曲线

的几个阶段。下面以 S4 试件 A'B'段中点的  $\tau$ - $\delta$  关系实测结果(说明所得曲线特点:  $\tau$ - $\delta$  关系曲线由上升段 OC 和下降段 CE 组成。从实测曲线中可以看到, 在 A 点以前, 由于加载刚开始, 应力处于调整期, 滑移量相对较大。AB 段剪应力与滑移量基本成比例增长; 过 B 点以后, BC 之间, 滑移量较剪应力增长为快; 过 C 点以后, 滑移量继续增加, 但粘结剪应力值开始下降, 开始时 CD 段剪应力下降较快, 过 D 点以后剪应力下降减慢, 直到 E 点, 剪应力值基本降为零。

本试验较既有试验方法有较大突破, 实测出了全部 17 个试件  $\tau$ - $\delta$  关系曲线的下降段, 得到了  $\tau$ - $\delta$  关系全曲线。但从图 4、图 5 可以看出, 各曲线形态有一定的差别, 这可能是受到混凝土机材性、环氧树脂材料以及胶缝质量不均匀性的影响。

本试验所测得的  $\tau$ - $\delta$  关系曲线三大关键控制参数: 峰值剪应力在 2.1 MPa~6.1 MPa 之间, 峰值剪应力对应的滑移量在 0.081 mm~0.179 mm 之间, 最大相对滑移量在 0.141 mm~0.232 mm 之间。所测得最大相对滑移量与既有试验测试结果(= 0.31~0.52 mm)相差较大, 其原因待深入研究。同时应注意, 碳纤维是良导体, 粘贴应变片的时候, 一定要注意应变片的连接线不能碰触到碳纤维上。必要的时候, 可以在连接线下边垫上绝缘薄板。本文实测出了所有试件的  $\tau$ - $\delta$  关系曲线的下降段, 水平加载方案克服了竖向加载产生的附加弯矩影响, 使试验数据更加准确。实验得最大相对滑移量分布于 0.141 mm~0.232 mm 区间。

#### 参考文献 (References)

- [1] 韩强 (2010) CFRP-混凝土界面粘结滑移机理研究. 博士论文, 华南理工大学, 广州.
- [2] 方恩权, 李进舜, 张雷顺 (2007) CFRP-混凝土界面粘结行为解析分析. *工业建筑*, **37**, 66-69.
- [3] 方恩权, 刘桂凤, 张雷顺 (2007) CFRP-混凝土界面粘结性能试验研究. *建筑材料学报*, **10**, 32-36.
- [4] 朱晓玲 (2008) CFRP-混凝土界面粘结性能试验研究. 硕士论文, 中南大学, 长沙.
- [5] 杨勇新, 岳清瑞, 胡云昌 (2001) 碳纤维布与混凝土粘结性能的试验研究. *建筑结构学报*, **22**, 36-42.
- [6] Wang, J., Cai, X.J. and Tian, S.Z. (2009) Numerical simulation on seismic behavior of CFRP retrofitted RC short column based on OpenSees. *World Earthquake Engineering*, **25**, 108-111.
- [7] Zhu, Y.R. and Guo, Z.X. (2010) Numerical simulation of SRC column under low-cyclic loading based on OpenSees. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, **35**, 555-559.
- [8] Hamutçuoğlu, O.M. and Scott, M.H. (2009) Finite element reliability analysis of bridge girders considering moment-shear interaction. *Structural Safety*, **31**, 356-362.