

文章编号: 1000-8608(2018)02-0147-06

基于两参数的 FRP-混凝土界面黏结滑移本构关系研究

殷雨时^{1,2}, 范颖芳^{*1}, 胡志强³, 武斌^{2,4}

(1. 大连海事大学 土木工程系, 辽宁 大连 116026;
2. 辽宁省交通高等专科学校, 辽宁 沈阳 110122;
3. 大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024;
4. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 为了解决纤维增强复合材料(FRP)-混凝土(以下简称 RC)界面应力-滑移本构关系中参数多,且不利于工程测量的问题,设计一组具有不同混凝土强度(C30、C40、C50)且每一强度有 6 种不同界面粗糙程度的混凝土试件共计 54 个,通过单剪试验,并结合 118 组已有试验数据对界面参数进行精简,选择了更适合工程应用的两参数来表达 RC 界面本构关系。结果表明:采用改进后的两参数(混凝土抗压强度 f_c 、混凝土表面粗糙度 f_i)来反映 C30、C40、C50 的 RC 界面黏结应力-滑移本构关系要优于现有大多数模型, f_c 对本构关系的贡献要大于 f_i 。所提本构关系理论计算值小于实测值,最大误差为 9%,具有一定安全储备,有利于工程实际应用。

关键词: 混凝土; 纤维增强复合材料(FRP); 界面; 黏结滑移曲线; 单剪试验; 黏结应力

中图分类号:TU501

文献标识码:A

doi:10.7511/dllgxb201802006

0 引言

纤维增强复合材料(fiber reinforced polymer, FRP)-混凝土(以下简称 RC)结构加固效果的优劣,重点在于混凝土和纤维片材界面的黏结性能好坏。而 RC 的界面行为中,界面本构关系是重点研究内容。在界面黏结应力-滑移曲线中,局部应力-滑移本构关系,是开展界面其他行为研究的理论基础。

目前,RC 界面本构关系的研究方法主要包括数值分析和试验数据拟合^[1]。前者利用数值分析软件设置类似界面形态的本构单元,通过设置相仿参数,得到应力-滑移关系;后者基于大量试验研究^[2-4],得到 FRP 表面应变发展过程,利用差分和积分运算得到局部剪应力和滑移分布,以获得界面黏结-滑移本构关系。然而,无论是数值分析还是试验数据拟合,都具有相似性,且数据离散情况比比皆是。尤其是基于试验研究建立的本构方程参数繁

杂,至今已累计有 19 种参数^[5-8]。国内外学者关于本构关系的表达中,少则用 1 个参数(混凝土抗压强度),多则如 Brosens 和陆新征各用 12 个参数。对于本构模型来说,Saviao 模型是对 Nakaba 模型的修正而得来的,而同时也基于实测 FRP 应变,因此从曲线形状来说,该本构关系是接近实际情况的,但是由于贴片的位置限制和贴片下面骨料的随机性,测量出来的应变数值具有很大离散性。虽然其界面本构关系表达简单,但是精度偏差。Brosens 和陆新征对于本构关系的表达要比 Nakaba 等其他模型精确得多,但是由于参数众多,累计高达 12 个参数,且个别参数难以量化和测量,计算复杂,不具有工程应用价值。因此建立一个表达清晰简单,参数易于测量,且精度满足工程设计需要的 RC 界面本构关系表达式十分必要。

本文基于 1 组共计 54 个混凝土试件,通过 118 组单剪试验数据分析,得到精简的两参数(混

收稿日期: 2017-10-25; 修回日期: 2018-01-22。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578099); 辽宁省自然科学基金资助项目(20170540493); 辽宁省交通高等专科学校技术应用型项目(Lnccjky201701)。

作者简介: 殷雨时(1982-),男,博士生,副教授,E-mail:yys00080568@163.com; 范颖芳*(1972-),女,教授,博士生导师,E-mail:fanyf72@aliyun.com; 胡志强(1972-),男,副教授,硕士生导师,E-mail:huzhq@dlut.edu.cn; 武斌(1979-),男,博士生,讲师,E-mail:66084537@qq.com。

混凝土抗压强度 f_c 、混凝土表面粗糙度 f_i 的 RC 界面双线性本构关系，并给出 f_c 、 f_i 对界面黏结应力-滑移曲线的影响。

1 试验方案

1.1 试件制作

混凝土试件尺寸为 $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ ，考虑混凝土表面粗糙度、强度等级对局部黏结性能的影响。不同粗糙度试件的制作过程为在试模上轻涂一层缓凝剂，试件浇筑 24 h 后脱模，用钢刷制配 6 种粗糙度的界面，见图 1。试验中考虑 3 种混凝土强度等级（C30、C40、C50），每个强度等级混凝土制作 6 种界面粗糙度，每种粗糙度 3 个试件共计 54 个试件。试验采用南京海拓复合材料有限责任公司生产的 HICOMA-HITEX 系列碳纤维布（CFRP），粘贴胶体采用该厂生产的环氧树脂 AB 胶，且按照 2:1 配制黏结树脂。材料性能见表 1、2。



图 1 不同界面粗糙度

Fig. 1 Various interfacial roughness

表 1 混凝土强度配合比

Tab. 1 Mixture ratio of concrete strength

强度等级	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$				
	水泥	粉煤灰	粗骨料	砂	减水剂
C30	336	59	1 045	789	3.95
C40	391	56	1 051	580	3.47
C50	423	47	1 104	660	6.11
					150

表 2 材料物理参数指标

Tab. 2 Material physical parameter

材料	抗压强 度 $f_c /$ MPa	抗拉强 度 $f_t /$ MPa	受拉弹 性模量 E_t / MPa	厚度 t_t / mm	单位面积 质量 $m_t /$ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)
C30	35.0	5.3			
混凝土	C40	46.0	6.4		
	C50	57.5	7.4		
CFRP 布				3.400×10^5	0.167
黏结树脂				38	2.4×10^3
				300	

注: $f_t = (f_c)^{2/3} / 2$ 。

制作了 54 个混凝土单剪试件，并在每个试件上表面 $60 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$ 范围内粘贴一组应变片，来检测单剪试验过程中黏结长度方向上应变的变化。粘贴方式见图 2。为了考察粗糙界面黏结行为，沿界面黏结长度以 20 mm 为间距布设了 $5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的两列电阻应变片，最终取其平均值代表该局部位置处平均 CFRP 布应变。

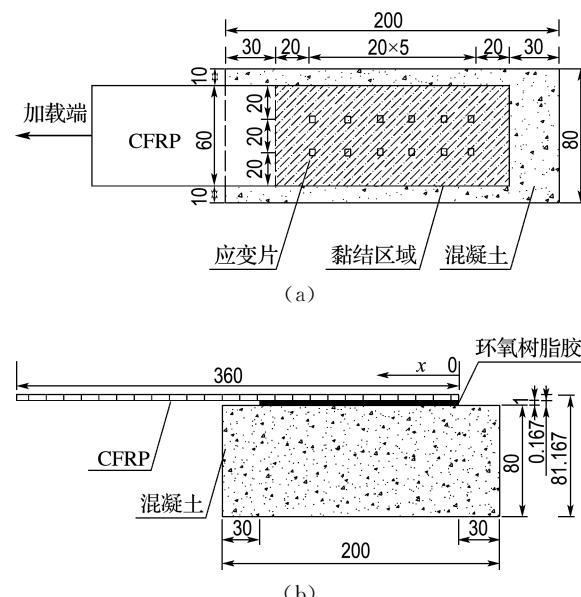


图 2 黏结区间应变片布置(单位: mm)

Fig. 2 Configuration of strain gauge in bonding area
(unit: mm)

1.2 试验过程

所有试验采用 100 t 电液伺服材料试验机进行加载，加载速率为 1 kN/min ，加载装置如图 3 所

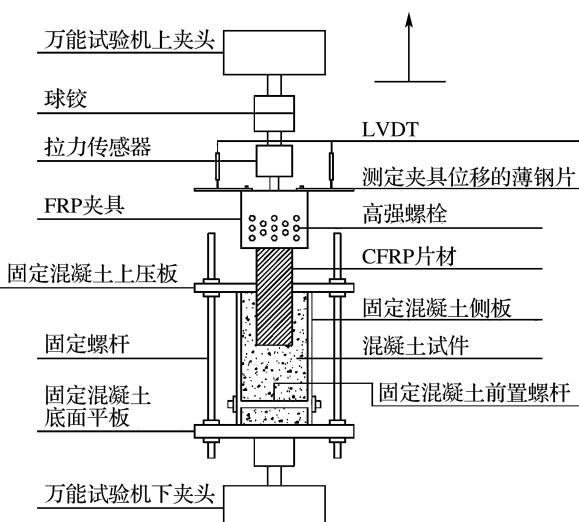


图 3 混凝土单剪试验装置

Fig. 3 Single shear test setup of concrete

示。试验过程中,采用德国 IMC 公司生产的动态采集系统与应变片相连,实时观测应变随着加载力的变化情况,同时在 CFRP 布剥离过程中采集极限荷载、极限位移、最终位移,同时观察试件破坏形态。

2 试验结果分析与讨论

2.1 试验现象与破坏形态

加载过程中荷载与加载端附近 CFRP 布应变基本同步增长,荷载达到极限荷载的 20% 时,CFRP 片材开始发出轻微的撕裂声;荷载继续增加到极限荷载的 40% 时,试件间断发出啪啪响声,CFRP 布加载端附近应变急剧增加;当荷载达到极限荷载的 70%~80%,剥离声音较频繁,这个过程持续时间相对较长,其中部分试件荷载有波动,但变化范围不大;持续至极限荷载时,突然发出巨大啪的一声,CFRP 布从混凝土试件剥离,破坏前无明显征兆,属脆性破坏。试件单剪破坏后,共有 3 种破坏模式,如图 4 所示:第 1 种破坏模式是在胶层与混凝土界面处拉断,如图 4(c)、(d)、(e)、(f)所示;第 2 种是 CFRP 布附带些许表层混凝土剥落破坏,如图 4(a)所示;第 3 种是 CFRP 布撕裂破坏,如图 4(b)所示,这种撕裂破坏是加载时局部 CFRP 布断裂所致,该种破坏形式属于

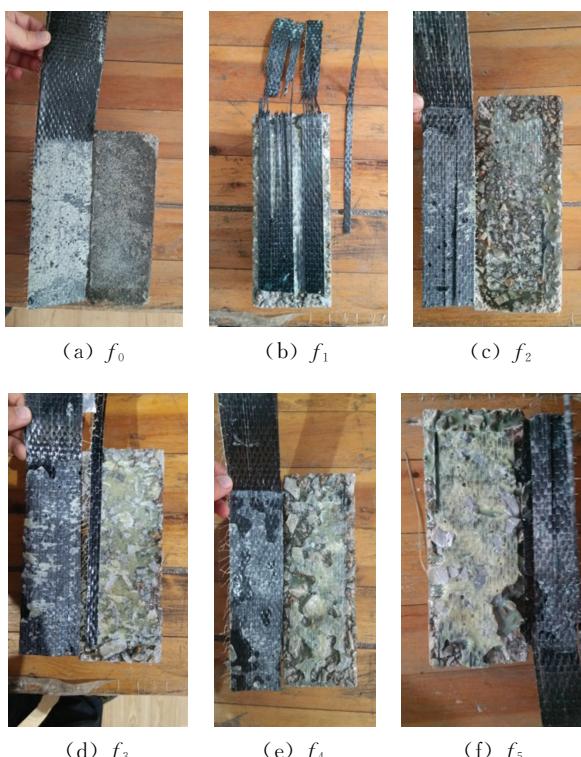


图 4 RC 界面破坏形态

Fig. 4 RC interfacial failure pattern

因施工原因或万能试验机夹头夹持 CFRP 布自由端过程中导致的非理想破坏,因此本文不予讨论。

2.2 试验中界面黏结重要参数

对不同混凝土强度等级,分别以粗糙度为 $f_0 \sim f_5$ 的混凝土试件做单剪试验,得到界面荷载-滑移曲线关键参数如表 3 所示。

表 3 单剪试件的试验结果

Tab. 3 Experimental results of single shear specimens

强度 等级	粗糙度	极限荷载/ kN	$\tau_m /$ MPa	$s_\tau /$ mm	$s_f /$ mm
C30	f_0	7.06	4.41	0.014	0.154
	f_1	15.03	20.92	0.011	0.147
	f_2	17.77	32.32	0.009	0.133
	f_3	12.23	13.94	0.014	0.146
	f_4	6.77	3.73	0.019	0.167
	f_5	2.56	0.47	0.024	0.188
C40	f_0	10.34	4.44	0.021	0.156
	f_1	15.78	11.12	0.021	0.145
	f_2	19.24	18.17	0.018	0.132
	f_3	13.55	7.98	0.018	0.149
	f_4	5.76	1.28	0.038	0.168
	f_5	2.44	0.22	0.041	0.171
C50	f_0	18.80	4.44	0.029	0.161
	f_1	19.77	5.41	0.026	0.146
	f_2	21.23	6.90	0.021	0.132
	f_3	17.56	4.13	0.028	0.151
	f_4	5.77	0.39	0.031	0.170
	f_5	2.56	0.07	0.039	0.189

3 粗糙度的量化评定

根据我国传统灌砂法的操作进行粗糙度量化采集,粗糙度的量化评定按下式计算确定^[9]:

$$f_i = h/\delta \quad (1)$$

式中: f_i 为界面粗糙度,为 0~1 的量纲一的数; h 为灌砂平均深度,mm; δ 为黏结面凹凸最大深度值,mm。界面粗糙度具体数值见表 4。

表 4 界面粗糙度量化值

Tab. 4 Quantitative interfacial roughness values

f_0	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
0.25	0.34	0.44	0.56	0.68	0.88

4 简化的 RC 界面黏结应力-滑移本构关系

4.1 单参数模型的建立

如前文所述,黏结应力-滑移曲线中包括最大黏结应力 τ_m 、对应于最大黏结应力的滑移量 s_τ 、

当界面黏结应力为零时对应的界面最大滑移量 s_f 等 3 个关键参数。首先试图构建一个用参数 f_c 来表示的双线性 RC 界面黏结应力-滑移曲线关系式, 在满足精度的基础上更适于工程应用。

基于文献[10-12]的 118 组试验数据, 可以得到:

$$\tau_m = 0.1679f_c - 0.112 \quad (2)$$

$$s_r = -0.001f_c + 0.11845 \quad (3)$$

$$s_f = -0.00205f_c + 0.30284 \quad (4)$$

由图 5~7 可以看出: 单参数与 f_c 之间拟合关系并不是很好。这也直接证明了单单用混凝土抗压强度 f_c 来构建本构关系与客观精度有显著差异。对 f_c 单因素拟合 R^2 较小, 分析原因如下: 一方面, 当样本数为 41 时, 对 τ_m 拟合得到 $R^2 = 0.05749$, 当样本数为 80 时, $R^2 = 0.18745$, 当样本数为 118 时, $R^2 = 0.35277$, 可见, 随着样本数

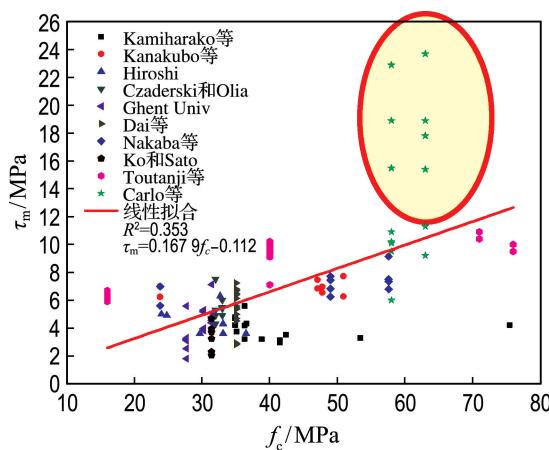


图 5 τ_m 和 f_c 之间的关系

Fig. 5 Relationship between τ_m and f_c

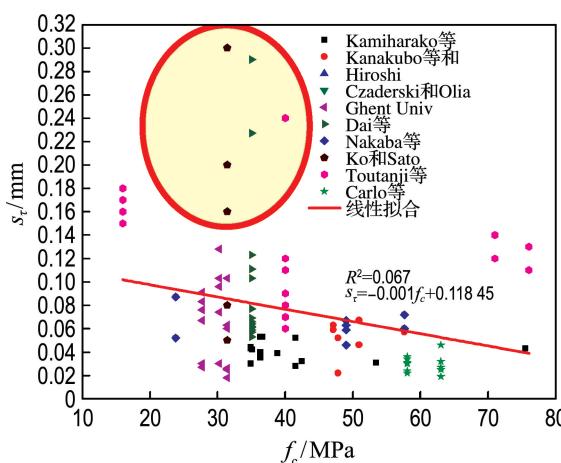


图 6 s_r 和 f_c 之间的关系

Fig. 6 Relationship between s_r and f_c

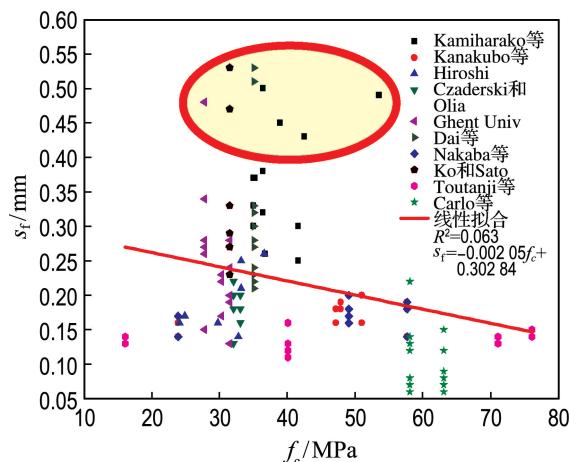


图 7 s_f 和 f_c 之间的关系

Fig. 7 Relationship between s_f and f_c

增加拟合度不断增加。可以设想: 如果样本足够多, 拟合曲线与试验数据的吻合程度将显著改进。另一方面, 观察散点图可以看出: 相当一部分数据离散性很大(如圈中所示), 而拟合分析中未做处理, 严重影响了 R^2 。

4.2 基于单参数模型的修正——两参数本构关系的建立

针对文献给出的 118 组试验数据, 删除离散性较大的数据, 选取其中 66 组有效数据, 采用 1stOpt 数学软件的多项式函数对 f_c 、 f_i 与 τ_m 、 s_r 、 s_f 进行回归分析, 得到如下方程:

$$\tau_m = 0.428 + 0.163f_c - 0.016f_i; \quad R^2 = 0.875$$

$$s_r = 0.069 + 0.001f_i; \quad R^2 = 0.855 \quad (5)$$

$$s_f = 0.270 - 0.002f_c + 0.001f_i; \quad R^2 = 0.913$$

由图 8 可以看出: 两参数回归方程极大提高了数据分析的拟合度, 且具有较好稳定性。对于双线性本构模型, 改进本构关系及参数如下:

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_m(s/s_r); & 0 \leq s \leq s_r \\ \tau &= \tau_m(1 - (s - s_r)/(s_f - s_r)); & s_r < s \leq s_f \end{aligned} \quad (6)$$

其中

$$\tau_m = 0.428 + 0.163f_c - 0.016f_i; \quad R^2 = 0.875$$

$$s_r = 0.069 + 0.001f_i; \quad R^2 = 0.855$$

$$s_f = 0.270 - 0.002f_c + 0.001f_i; \quad R^2 = 0.913$$

4.3 与现有模型比较

现有模型能够较好地反映界面黏结应力-滑移关系, 但参数取值差异很大, 不同参数取值直接反映了模型的优劣。为了比较模型优劣, 以粗糙度为 f_0 的试件为例, 结合工程实际, 取用 $f_0 = 0.25$, 用改进的两参数本构关系和现有大部分界面模型计算结果进行对比分析, 结果如表 5 所示。

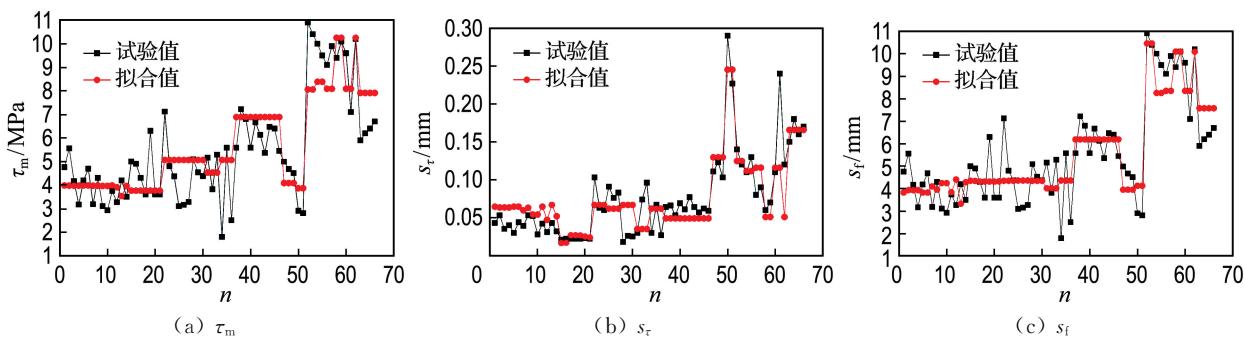
图 8 τ_m 、 s_r 、 s_f 的拟合值和试验值Fig. 8 The fitting and experimental values of τ_m , s_r , s_f

表 5 改进的两参数本构关系关键参数与现有模型预测值对比

Tab. 5 The key parameters determined in the improved two parameter constitutive relation compared with prediction values of existing models

强度 等级	本文拟合值			Neubauer 等模型(线性)			Nakaba 等模型(线性)		
	τ_m /MPa	s_r /mm	s_f /mm	τ_m /MPa	s_r /mm	s_f /mm	τ_m /MPa	s_r /mm	s_f /mm
C30	5.314	0.069	0.210	1.684	0.094	0.094	—	0.065	—
C40	6.944	0.069	0.190	2.001	0.094	0.094	—	0.065	—
C50	8.574	0.069	0.170	2.211	0.094	0.094	7.583	0.065	—

强度 等级	Savioa 模型(线性)			Monti 模型(双线性)			Dai 等模型(应力软化)		
	τ_m /MPa	s_r /mm	s_f /mm	τ_m /MPa	s_r /mm	s_f /mm	τ_m /MPa	s_r /mm	s_f /mm
C30	5.375	0.051	0.051	3.133	0.013	0.285	2.011	0.045	—
C40	7.244	0.051	0.051	3.726	0.014	0.285	6.100	0.101	—
C50	7.560	0.051	0.051	4.115	0.015	0.285	6.550	0.121	—

由表 5 可以看出,以 C30 混凝土为例,简化本构关系中的重要参数 τ_m 较 Neubauer 等模型偏差过大,误差可达 2 倍,较 Monti 和 Dai 模型偏差分别达 69% 和 164%,而与 Savioa 模型吻合较好; s_r 与 Nakaba、Savioa 等模型吻合度较好,误差分别为 6%、35%,与其他模型吻合度较差;所有模型中除 Dai 等模型外, s_r 与混凝土抗压强度相关性较差,也间接证明了 s_r 拟合公式的合理性; s_f 随混凝土强度增加,总体呈降低趋势,这与其他模型为一定值的结果是不同的,而从 s_f 均值来看,优化模型与 Monti 模型计算结果较为接近,较其他模型偏大。然而,Neubauer、Savioa 等线性模型,计算离散性较大,与工程实际不符。本文提出两参数模型能较好模拟界面本构关系,计算值和实测值吻合较好,且具有一定安全储备。

5 结 论

(1) 并不是界面越粗糙,界面黏结强度和极限位移均越大,而是在一定范围内符合这个趋势。6 种界面下,粗糙度为 0.44 的界面黏结性能最好。

(2) 单参数模型计算 CFRP-混凝土界面本构关系中参数离散性和误差较大,与试验结果不能

很好地吻合;本文提出的两参数本构关系优于目前大多数模型,最大偏差仅为 9%,由于参数简化,便于工程应用。

(3) 通过待加固混凝土抗压强度及表面粗糙度,就可以求解界面最大黏结应力、最大黏结位移和最终滑移量的封闭解,为界面计算提供了一种新算法,因理论值小于实测值,具有一定的安全储备。

参 考 文 献 :

- [1] TENG J G, CHEN J F, SMITH S T, et al. FRP-strengthened RC Structures [M]. London: John Wiley & Sons, 2001.
- [2] TOUTANJI H, HAN M, GHORBEL E. Interfacial bond strength characteristics of FRP and RC substrate [J]. Journal of Composites for Construction, 2012, 16(1):35-46.
- [3] BANK L C. Composites for Constructions: Structural Design with FRP Materials [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [4] 王苏岩, 刘贵, 周英武. GFRP-高强混凝土界面黏结-滑移关系研究 [J]. 土木工程学报, 2009, 42(6):8-13.
- WANG Suyan, LIU Gui, ZHOU Yingwu. Experimental study on the bond-slip behavior

- between GFRP and high strength concrete [J]. **China Civil Engineering Journal**, 2009, **42**(6):8-13. (in Chinese)
- [5] 郭樟根,孙伟民,曹双寅. FRP 与混凝土界面黏结-滑移本构关系的试验研究 [J]. 土木工程学报, 2007, **40**(3):1-5.
- GUO Zhanggen, SUN Weimin, CAO Shuangyin. Experimental study on bond-slip behavior between FRP and concrete [J]. **China Civil Engineering Journal**, 2007, **40**(3):1-5. (in Chinese)
- [6] CHEN J F, TENG J G. Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete [J]. **Journal of Structural Engineering**, 2001, **127**(7): 784-791.
- [7] 陆新征,叶列平,滕锦光,等. FRP-混凝土界面黏结滑移本构模型[J]. 建筑结构学报, 2005, **26**(4):10-18.
- LU Xinzhen, YE Lieping, TENG Jingguang, et al. Bond-slip model for FRP-concrete interface [J]. **Journal of Building Structures**, 2005, **26**(4):10-18. (in Chinese)
- [8] LIU Kang, WU Yufei. Analytical identification of bond-slip relationship of EB-FRP joints [J]. **Composites Part B: Engineering**, 2012, **43**(4):1955-1963.
- [9] 赵志方,赵国藩. 采用高压水射法处理新老混凝土黏结面的试验研究[J]. 大连理工大学学报, 1999, **39**(4):558-561.
- ZHAO Zhifang, ZHAO Guofan. Experimental research on treating interface of young on old concrete with high-pressure water jet method [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 1999, **39**(4):558-561. (in Chinese)
- [10] 尚守平,余德军,张瑞文. 被加固混凝土构件表面粗糙度评定[J]. 建筑结构学报, 2010, **31**(10):120-124.
- SHANG Shouping, YU Dejun, ZHANG Ruiwen. Evaluation of surface roughness on strengthened RC structure [J]. **Journal of Building Structures**, 2010, **31**(10):120-124. (in Chinese)
- [11] UEDA T, DAI J G, SATO Y. A nonlinear bond stress-slip relationship for FRP sheet-concrete interface [C] // **Proceedings of International Symposium on Latest Achievement of Technology and Research on Retrofitting Concrete Structures**. Kyoto: [s n], 2003:113-120.
- [12] NAKABA K, KANAKUBO T, FURUTA T, et al. Bond behavior between fiber-reinforced polymer laminates and concrete [J]. **ACI Structural Journal**, 2001, **98**(3):359-367.

Research on interfacial bond-slip constitutive relation between FRP and concrete based on two parameters

YIN Yushi^{1,2}, FAN Yingfang^{*1}, HU Zhiqiang³, WU Bin^{2,4}

- (1. Department of Civil Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;
 2. Liaoning Provincial College of Communications, Shenyang 110122, China;
 3. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
 4. Institute of Civil and Environmental Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problem that there are too many parameters in interfacial stress-slip constitutive relation between fiber reinforced polymer (FRP) and concrete (be short for RC) which are hard to measure for engineering, a total of fifty-four concrete pieces with a set of different strengths of concrete (C30, C40, C50) and six different interfacial roughness in each set are designed. Combining with 118 groups of existing experimental data to simplify the interfacial parameters, and adopting single shear test, the two parameter constitutive relation is established which is more suitable for engineering practical. Results show that the improved two parameters (concrete compressive strength f_c , concrete surface roughness f_i) can better reflect the RC interfacial bond stress-slip constitutive relation of C30, C40, C50 concrete than the most existing models, and the parameter f_c is more significant in this constitutive relation than f_i . The theoretical calculation value of the proposed constitutive relation is less than the measured value, the maximum error is 9%. The certain security reserve shows that it is helpful to engineering application.

Key words: concrete; fiber reinforced polymer (FRP); interface; bond-slip curve; single shear test; bond stress