

文章编号:1673-2049(2013)02-0015-06

BFRP 筋与混凝土的粘结-滑移本构关系

单 炜,张绍逸

(东北林业大学 土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:为研究玄武岩纤维增强复合材料(BFRP)筋与混凝土的粘结-滑移本构关系,探讨 BFRP 筋与混凝土的受力过程,对 16 组共 96 个不同参数的粘结试件进行拉拔试验,每组选取 1 个试验结果,得到试件的粘结-滑移曲线。将 BFRP 筋与混凝土的粘结-滑移曲线细分为微滑移阶段、滑移阶段、下降阶段和残余应力阶段共 4 个阶段。基于试验结果,在已有的粘结-滑移本构模型基础上进行改进,建立了适用于 BFRP 筋与混凝土粘结-滑移本构关系的理论模型。研究结果表明:微滑移阶段粘结-滑移曲线近似于直线上升,滑移阶段粘结-滑移曲线逐渐偏离直线呈非线性上升,下降阶段粘结-滑移曲线近似于线性下降,残余应力阶段粘结-滑移曲线近似于周期性递减的正弦函数;该模型与试验结果吻合良好,能较好地反映 BFRP 筋与混凝土之间的受力过程,可为今后 BFRP 筋与混凝土锚固性能的理论分析和工程应用提供参考。

关键词:玄武岩纤维筋;粘结-滑移;拉拔试验;本构关系;混凝土;理论模型

中图分类号:TU377.9 **文献标志码:**A

Bond-slip Constitutive Relation Between BFRP Bar and Concrete

SHAN Wei, ZHANG Shao-yi

(School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: In order to investigate the bond-slip constitutive relation between basalt fiber reinforced polymer (BFRP) bar and concrete, as well as to study the loading process, the tests on ninety-six bonding specimens of different parameters in sixteen groups were made. Bond-slip curves of specimens were drawn on the basis of test results selecting one from each group. The bond-slip curves of BFRP bar and concrete were composed of four segments: micro-slippage segment, slippage segment, descending segment and residual segment. Based on the test results, the theoretical model applied to bond-slip constitutive relation between BFRP bar and concrete was made through improving the existing model. The research results show that the micro-slippage segment bond-slip curves are close to a straight line increased change; the slippage segment bond-slip curves increasingly deviate from a straight line to the nonlinear increased change; the descending segment bond-slip curves are similar to linear decrease; the residual segment bond-slip curves are sine function similar to the periodic decline function. The new model coincides well with the test results, which can reflect perfectly the loading process of BFRP bar and concrete. The research can provide reference for theoretical analysis and engineering application on bond-anchorage properties of BFRP bar and concrete in the future.

Key words: basalt fiber reinforced polymer bar; bond-slip; pull-out test; constitutive relation;

收稿日期:2013-02-01

基金项目:国家自然科学基金项目(50878106)

作者简介:单 炜(1965-),男,内蒙古海拉尔人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:shanwei456@163.com。

concrete; theoretical model

0 引言

玄武岩纤维增强复合材料(Basalt Fiber Reinforced Polymer,BFRP)筋由于具有抗拉强度高、耐腐蚀性能好、热膨胀系数与混凝土的相近及自重小等优点,被视为替代钢筋应用于土木建筑结构中的新型材料。BFRP 筋能否代替钢筋应用的一个关键环节就是 BFRP 筋与混凝土之间的粘结锚固性能。BFRP 筋与混凝土的粘结-滑移本构关系是其粘结锚固性能的综合反映。

目前,各国学者对纤维增强复合材料(FRP)筋与混凝土的粘结-滑移关系开展了广泛研究,主要研究成果和建立的模型有:①1995 年 Malvar^[1]通过大量不同表面形状的 FRP 筋与混凝土的粘结试验,首次提出了基于玻璃纤维增强复合材料(GFRP)筋粘结-滑移曲线的 Malvar 模型,但由于计算公式复杂,参数难以确定,且曲线的初始斜率较小,与实际近似无穷大的情况相违背,实际应用较少;②Faoro^[2]和 Rossett 等^[3]做了大量试验,将 1983 年 Eligehausen 等^[4]提出的基于变形钢筋的粘结-滑移曲线的 BPE 模型成功地应用于 FRP 筋与混凝土试验中,但 BPE 模型中所描绘的平台段在实际中并不存在,与实际曲线误差较大;③1997 年 Cosenza 等^[5]对 BPE 模型进行改进,剔除实际不存在的平台段并提出了修正的 BPE 模型,该模型与实际曲线较吻合,分为上升段、下降段和残余应力段,但对上升段和残余应力段的描述略显粗糙,仍需要完善;④1995 年 Cosenza 等^[6]给出了曲线上升段的新模型——CMR 模型,该模型对上升段的描述较好,且计算公式简单,但对于需要全过程受力分析的构件不能适用,略显局限;⑤2002 年高丹盈等^[7]针对于现有模型中上升段与下降段不连续的事实,首次提出了连续曲线模型,该模型对上升段和下降段描绘较好且为连续曲线,更符合实际情况,但是对残余应力段描绘仍有不足。

虽然现有的 FRP 筋的 τ - s 曲线模型较多,但都未对上升段之前的线性阶段进行描绘,都粗略地把残余应力段近似为一条直线,这与实际情况并不相符,并且现有模型都是通过 GFRP 筋和碳纤维增强复合材料(CFRP)筋建立的模型,鉴于 BFRP 筋的力学性能不同于 GFRP 筋和 CFRP 筋,曲线的具体参数会略有不同,需要专门对 BFRP 筋的粘结-滑移本构关系模型进行研究。笔者在 16 组 BFRP 筋混

凝土试件拉拔试验结果中,每组选取 1 个,绘制粘结-滑移曲线,系统研究 BFRP 筋与混凝土的粘结-滑移本构关系。

1 试验设计

采用中心拉拔试验方法,标准粘结试件参考《混凝土结构试验方法标准》(GB 50152—92)中的设计规定。共浇筑 16 组 96 个带 BFRP 筋的混凝土立方体试件。试件尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm。为避免加载端的混凝土应力集中,采用将粘结区设置在试件底端,在加载端设置未粘结段,用塑料套管将 BFRP 筋与混凝土隔离,如图 1 所示,模拟粘结长度通过调整塑料套管位置来实现。在浇筑同一批拉拔试件时,预留 3 个边长为 150 mm 的标准立方体抗压试块,并在相同条件下,同期养护 28 d,用以测试各种配合比混凝土的实际抗压强度和劈裂抗拉强度。试验加载端锚具采用的钢套管里面涂环氧树脂系胶结剂,钢套管长度为 250 mm。

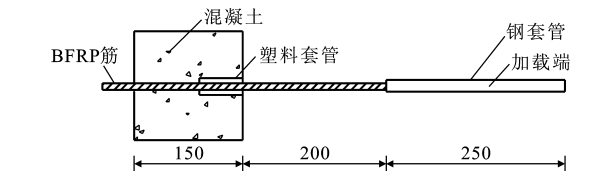


图 1 中心拉拔试件示意(单位:mm)
Fig. 1 Schematic of Center Pull-out Specimen (Unit:mm)

试验用混凝土的拟配强度等级为 C20, C30, C40, C50,均为实验室配合比。采用的 BFRP 筋的直径为 8, 10, 12, 15 mm,表面均为喷砂缠肋处理。试验所需材料的物理力学性能见表 1, 2。

表 1 混凝土的物理力学性能

Tab. 1 Physico-mechanical Properties of Concrete

混凝土强度等级	水灰比	抗压强度/MPa
C20	0.65	26.0
C30	0.43	38.5
C40	0.36	45.8
C50	0.31	55.5

表 2 BFRP 筋的物理力学性能

Tab. 2 Physico-mechanical Properties of BFRP Bar

直径/mm	截面积/mm ²	极限强度/MPa
8	50.27	1 100
10	78.54	1 000
12	113.10	960
15	176.60	900

在加载时,为了防止应力集中,在试件表面上放置 1 个垫块,在平稳压力作用下缓慢施加试验力。人工控制加载速率为 $0.2\text{ kN}\cdot\text{s}^{-1}$,计数时间间隔为 $3\sim 4\text{ s}$;在 BFRP 筋的自由端安装位移计,并记录各级荷载下位移的滑移量,直至滑移量超出百分表量程,完成试验记录。试验采用式(1)计算试件的平均粘结应力,即

$$\tau=\frac{P}{\pi dl_a}\tag{1}$$

式中: τ 为平均粘结应力; P 为拉拔力; d 为 BFRP 筋直径; l_a 为粘结长度。

2 试验结果及分析

2.1 试验结果

选取温度、BFRP 筋的直径、粘结长度和混凝土强度 4 个变量,分别在不同的条件下进行试验,用以更好地归纳总结 BFRP 筋与混凝土的粘结-滑移本构关系。在 16 组试件中,每组选取 1 个具有代表性的粘结-滑移曲线作为研究对象,试件表示方法为 A-B,A 表示组号,B 表示试件编号,如 2-4 表示第 2

组中的第 4 个试件。极限粘结应力指试件平均粘结应力的最大值。本次试验中的 16 组拉拔试件的试验结果见表 3。

2.2 粘结-滑移曲线

试验得出 BFRP 筋与混凝土的粘结失效形式有 3 种,即拔出破坏、断筋破坏及混凝土劈裂破坏。其中 BFRP 断筋破坏和混凝土劈裂破坏,分别是由于 BFRP 筋的极限抗拉能力和混凝土抗拉能力单方面不足而造成的破坏形式,在实际受力分析中是应该避免的。理想的破坏形式应为拔出破坏,该破坏形式能够反映 BFRP 筋与混凝土粘结-滑移的全过程,因此,用发生拔出破坏的试验数据构建 BFRP 筋与混凝土的粘结-滑移本构关系模型是合理的。本次试验中所得到的 BFRP 筋与混凝土粘结-滑移的典型曲线如图 2 所示。

2.3 极限粘结应力

由图 2 可知,曲线的峰值即试件的极限粘结应力,其随试验条件的不同而发生变化。

考虑温度环境的改变对极限粘结应力的影响,

表 3 拉拔试件的试验结果

Tab. 3 Test Results of Pull-out Specimens

试件编号	温度/℃	BFRP 筋直径/mm	粘结长度	混凝土强度等级	破坏形式	极限荷载/kN	极限粘结应力/MPa	滑移量/mm
1-1	20	8	2.5 <i>d</i>	C20	筋拔出	9.8	19.50	1.12
2-4	20	10	5.0 <i>d</i>	C30	筋拔出	12.3	7.83	0.91
3-5	20	12	7.5 <i>d</i>	C40	筋拔出	55.8	16.45	1.90
4-1	20	15	10.0 <i>d</i>	C50	混凝土劈裂	90.1	12.75	2.23
5-4	0	8	5.0 <i>d</i>	C40	筋拔出	24.0	23.87	1.59
6-2	0	10	2.5 <i>d</i>	C50	筋拔出	11.0	14.01	0.42
7-6	0	12	10.0 <i>d</i>	C20	筋拔出	53.4	11.80	1.95
8-3	0	15	7.5 <i>d</i>	C30	筋拔出	62.8	11.85	1.83
9-1	−20	8	7.5 <i>d</i>	C50	有拔出筋断	48.0	31.83	0.47
10-3	−20	10	10.0 <i>d</i>	C40	筋拔出	31.9	10.15	1.18
11-6	−20	12	2.5 <i>d</i>	C30	筋拔出	22.5	19.89	1.32
12-2	−20	15	5.0 <i>d</i>	C20	筋拔出	43.6	12.34	1.95
13-1	−40	8	10.0 <i>d</i>	C30	无拔出筋断	51.0	25.37	0.34
14-6	−40	10	7.5 <i>d</i>	C20	筋拔出	30.1	12.77	0.69
15-1	−40	12	5.0 <i>d</i>	C50	筋拔出	72.7	32.14	1.16
16-1	−40	15	2.5 <i>d</i>	C40	筋拔出	30.0	16.98	1.32

可以将正交试验结果做极差分析,结果见图 3。试验结果表明,温度降低有利于试件极限粘结应力的提高,并且在 0℃以下,试件的极限粘结应力明显提高。究其原因,试件的粘结应力由 3 个部分组成:化学胶着力、摩擦力和机械咬合力^[8],温度的降低增加了二者之间的摩擦力和机械咬合力,而负温下混凝土中的自由水结冰,混凝土抗拉强度明显提高^[9],这

也间接地增强了负温下试件的极限粘结应力。

2.4 受力过程

从图 2 还可以看出,曲线的走势即 BFRP 筋的受力过程,不论试验条件如何改变,都可以将其归纳为 4 个阶段^[10-11]:微滑移阶段、滑移阶段、下降阶段和残余应力阶段。

(1)微滑移阶段:加载初期,粘结-滑移关系接近

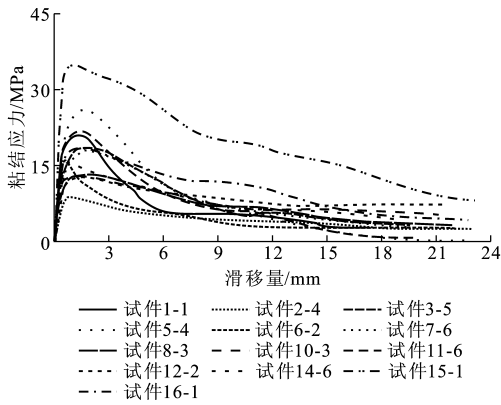


图2 各试件 BFRP 筋与混凝土粘结-滑移曲线

Fig. 2 BFRP Bar and Concrete Bond-slip Curves of Specimens

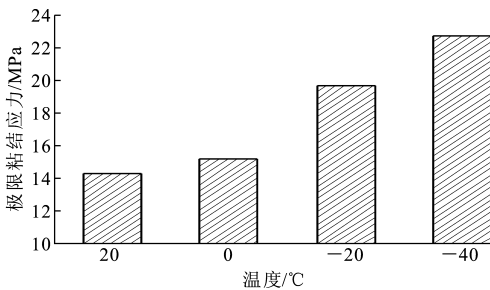


图3 极限粘结应力与温度的关系

Fig. 3 Relations of Ultimate Bond Stress and Temperature

直线变化,试件处于线弹性工作阶段。BFRP 筋与混凝土的粘结应力由化学胶着力承担,滑移量较小,粘结应力增长较快,初始斜率较大。

(2)滑移阶段:随着拔出力的增大,粘结-滑移关系越来越偏离直线,试件处于弹塑性工作阶段。BFRP 筋与混凝土靠近加载端附近的胶结被破坏,粘结应力由 BFRP 筋肋与混凝土的摩擦力和机械咬合力共同承担,曲线处于非线性上升阶段。此后,在平均粘结应力到达极限粘结应力的过程中,滑移量增长较快,曲线趋于平缓。

(3)下降阶段:粘结应力达到峰值点后,试件极限粘结应力并没有完全消失,随着滑移量的增加,粘结应力逐渐减小,曲线进入下降阶段,BFRP 筋肋由于摩擦力而破损严重,机械咬合力随之减小,此外,摩擦力也逐渐削弱,导致滑移量迅速增加。此阶段平均粘结应力迅速减小,滑移量也随着迅速发展。

(4)残余应力阶段:在反弯点之后,粘结应力下降速度减慢,曲线进入残余应力阶段,此时粘结应力仍由摩擦力和部分机械咬合力组成。此阶段 BFRP 筋的滑移明显,平均粘结应力在反复波动中减小,波动曲线近似于周期递减的正弦函数曲线。

3 本构关系模型

3.1 理论模型曲线

由 BFRP 筋与混凝土的粘结-滑移曲线分析可知,用现有的本构关系模型对其进行描述仍有以下不足:①上升阶段的描述略显粗糙,对加载初期的线弹性阶段即微滑移阶段没有描述;②残余应力阶段的描述并不符合实际情况,通过试验测定残余应力阶段内的平均粘结应力不是一个恒定量,而是一个周期性递减函数。因此,本文中基于试验结果将修正的 BPE 模型的上升阶段细分为加载初期线弹性阶段和上升阶段以更符合实际情况,并对残余应力阶段进行完善,提出了 BFRP 筋与混凝土粘结-滑移本构关系的理论模型,见图 4。图 4 中: s 为滑移量, τ_1, τ_2, τ_3 分别为 A, B, C 点对应的粘结应力, s_1, s_2, s_3 分别为 τ_1, τ_2, τ_3 对应的滑移量;OA 为微滑移阶段,曲线线弹性上升;AB 为滑移阶段,曲线非线性上升;BC 为下降阶段,曲线近似于线性下降;CD 为残余应力阶段,曲线为近似于正弦函数的周期性递减函数曲线^[12]。

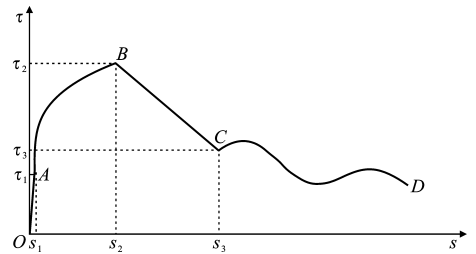


图4 BFRP 筋与混凝土粘结-滑移本构关系理论模型

Fig. 4 Theoretical Model of BFRP Bar and Concrete Bond-slip Constitutive Relation

BFRP 筋与混凝土粘结-滑移本构关系理论模型的表达式为:

微滑移阶段

$$\tau = \tau_1 (s/s_1) \quad s \leq s_1 \quad (2)$$

滑移阶段

$$\tau = (\tau_2 - \tau_1) [(s - s_1)/(s_2 - s_1)]^\alpha + \tau_1 \quad s_1 < s \leq s_2 \quad (3)$$

下降阶段

$$\tau = \tau_2 [1 - p(s/s_2 - 1)] \quad s_2 < s \leq s_3 \quad (4)$$

残余应力阶段

$$\tau = \lambda e^{-\beta s} [\tau_3 + \frac{A'}{2} \sin(\frac{s - s_3}{T} 2\pi)] \quad s > s_3 \quad (5)$$

式中: α, p 均为由试验确定的参数; λ, β 均为残余应力阶段指数回归中的参数; A', T 分别为正弦函数的振幅及周期参数。

3.2 试验参数求解

将 A, B, C 三点处的试验值代入式(2)~(5)中,可以反推出 $\alpha, p, \lambda, \beta, A', T$ 各参数值,其中, α 可由 τ - s 理论曲线上升阶段下的面积等于实际曲线上上升阶段下的面积求得,具体试验参数拟合值见表 4。

3.3 粘结-滑移本构关系

结合图 4 和表 4 中的试验拟合数据,可以给出

此次试验的 BFRP 筋与混凝土的粘结-滑移本构关系式为:

微滑移阶段

$$\tau=\tau_1(s/s_1) \quad s\leqslant s_1 \tag{6}$$

滑移阶段

$$\tau=(\tau_2-\tau_1)[(s-s_1)/(s_2-s_1)]^{0.237\,2}+\tau_1 \quad s_1< s\leqslant s_2 \tag{7}$$

表 4 试验参数拟合值

Tab. 4 Fitting Values of Test Parameters

试件编号	试验数据						参数拟合值					
	A 点		B 点		C 点		α	p	λ	β	A'	T
	τ_1/MPa	s_1/mm	τ_2/MPa	s_2/mm	τ_3/MPa	s_3/mm						
1-1	7.96	0.06	19.50	1.12	5.57	6.40	0.244 4	0.151 5	1.525 7	0.066 0	1.6	15.5
2-4	2.55	0.07	7.83	0.91	5.09	4.58	0.382 8	0.086 8	1.243 6	0.047 6	0.6	6.0
3-5	7.37	0.18	16.45	1.90	5.81	10.40	0.240 7	0.144 6	2.328 7	0.081 3	1.4	16.3
5-4	6.96	0.16	23.87	1.59	9.95	6.38	0.286 7	0.193 6	4.529 9	0.236 8	6.0	24.0
6-2	3.18	0.03	14.01	0.42	6.62	3.83	0.378 8	0.065 0	1.430 6	0.093 5	2.0	10.9
7-6	5.53	0.18	11.80	1.95	6.33	8.70	0.188 3	0.133 9	1.663 0	0.058 5	1.0	13.0
8-3	3.77	0.10	11.85	1.83	4.82	10.97	0.228 5	0.118 8	1.712 8	0.049 1	0.6	7.3
10-3	5.09	0.09	10.15	1.18	4.92	12.98	0.139 7	0.051 5	1.318 0	0.021 3	1.0	16.0
11-6	8.84	0.12	19.89	1.32	5.88	8.63	0.181 8	0.127 2	5.138 6	0.189 7	4.0	11.0
12-2	9.90	0.36	12.34	1.95	6.87	14.50	0.126 3	0.068 9	0.982 2	0.001 2	1.0	20.0
14-6	5.52	0.12	13.11	0.83	5.52	11.20	0.285 2	0.046 3	1.594 2	0.041 6	1.8	25.0
15-1	21.22	0.25	32.14	1.16	19.54	8.00	0.214 2	0.066 5	1.651 2	0.062 7	1.0	20.0
16-1	10.19	0.19	16.98	1.32	10.86	7.65	0.186 5	0.075 2	1.672 8	0.067 3	3.4	15.0
平均值							0.237 2	0.102 3	2.060 9	0.078 2	2.0	15.4

下降阶段

$$\tau=\tau_2[1-0.102\,3(s/s_2-1)] \quad s_2< s\leqslant s_3 \tag{8}$$

残余应力阶段

$$\tau=2.060\,9\text{e}^{-0.078\,2s}[\tau_3+\sin(\frac{s-s_3}{15.4}2\pi)] \quad s> s_3 \tag{9}$$

3.4 模型验证

将表 4 中的数据代入式(2)~(5)中,可得到相应试件的 τ - s 曲线的拟合值。 τ - s 曲线的拟合值与试验值的对比见图 5。

从图 5 可以看出, τ - s 曲线的拟合值与试验值吻合良好,可见式(2)~(5)表示的粘结-滑移本构关系模型能够较好地描述 BFRP 筋的受力过程。

4 结 语

(1)将 BFRP 筋拉拔过程中的受力形式归纳为微滑移阶段、滑移阶段、下降阶段和残余应力阶段共 4 个阶段更符合试验的结果。

(2)BFRP 筋与混凝土的粘结-滑移曲线在残余应力阶段内平均粘结应力并不是一个恒定量,而是呈现周期性衰减的过程。

(3)提出了 BFRP 筋与混凝土的粘结-滑移本构关系模型,该模型计算公式简单,物理意义清晰,经验证与试验结果吻合良好,能较好地反映 BFRP 筋与混凝土之间的受力过程,可为 BFRP 筋与混凝土结构的设计和施工提供参考。

参考文献:

References:

[1] MALVAR L J. Tensile and Bond Properties of GFRP Reinforcing Bars[J]. ACI Materials Journal,1995,92 (3):276-285.

[2] FAORO M. Bearing and Deformation Behaviour of Structural Components with Reinforcements Comprising Resin Bonded Glass Fiber Bars and Conventional Ribbed Steel Bars[C]//CEB. Proceedings of International Conference on Bond in Concrete from Research to Practic. Riga:CEB,1992:8-17.

[3] ROSSETT V A, GALEOTA D, GIAMMATEO M M. Local Bond Stress-slip Relationships of Glass Fiber Reinforced Plastic Bars Embed in Concrete[J]. Materials and Structures,1995,28(6):340-344.

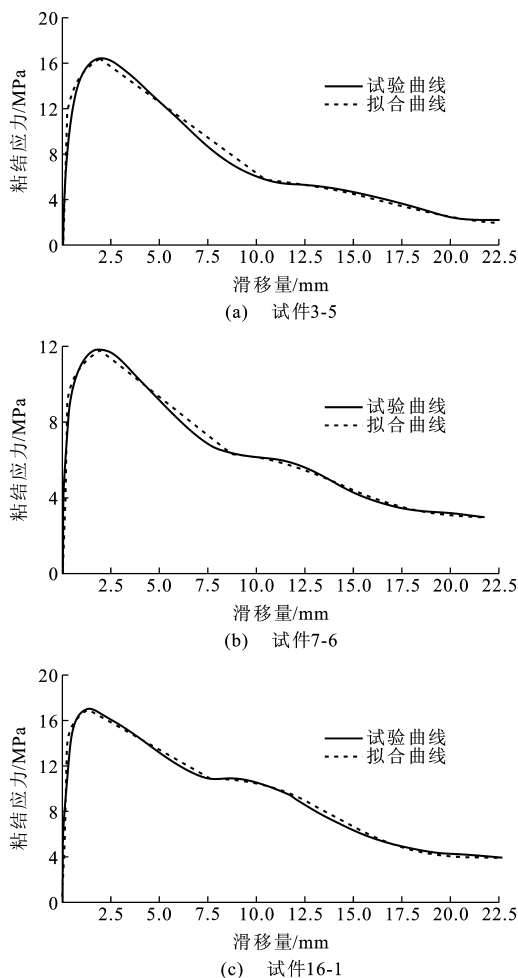


图5 τ - s 试验曲线与模型拟合曲线比较

Fig. 5 Comparisons of τ - s Test Curves and Model Fitting Curves

- [4] ELIGEHAUSEN R, POPOV E P, BERTERO V V. Local Bond Stress-slip Relationships of Deformed Bars Under Generalized Excitations[R]. Berkeley: University of California Berkeley, 1983.
- [5] COSENZA E, MANFREDI G, REALFONZO R. Behavior and Modeling of Bond of FRP Rebars to Concrete[J]. Journal of Composites for Construction, 1997, 1(2): 40-51.
- [6] COSENZA E, MANFREDI G, REALFONZO R. Analytical Modeling of Bond Between FRP Reinforcing Bars and Concrete[C]//TAERWE L. Proceedings of

the Second International RILEM Symposium, Ghent; CRC Press, 1995: 40-51.

- [7] 高丹盈, 谢晶晶, 李趁趁. 纤维聚合物钢筋混凝土粘结性能的基本问题[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2002, 23(1): 1-5.
- GAO Dan-ying, XIE Jing-jing, LI Chen-chen. Fundamental Problems on Bond Behavior Between Fiber Reinforced Polymer (FRP) Rebar and Concrete[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2002, 23(1): 1-5.
- [8] 郑乔文, 薛伟辰. 粘砂变形 GFRP 筋的粘结滑移本构关系[J]. 工程力学, 2008, 25(9): 162-169.
- ZHENG Qiao-wen, XUE Wei-chen. Constitutive Relationship of Bond-slip Behavior of Sand-coated Deformed GFRP Rebars[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(9): 162-169.
- [9] 黄达海, 辜熠. 低温下混凝土中钢筋锚固性能的试验研究[J]. 建筑科学, 2007, 23(9): 51-54.
- HUANG Da-hai, GU Yi. Experimental Study on Bond-slip Behavior of Reinforcement in Concrete Under Low Temperatures[J]. Building Science, 2007, 23(9): 51-54.
- [10] 郑乔文. FRP 筋混凝土梁设计理论研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- ZHENG Qiao-wen. Studies on Design Theory for Concrete Beams Reinforced with FRP Rebars[D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [11] 郝庆多. GFRP/钢绞线复合钢筋混凝土梁力学性能及设计方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- HAO Qing-duo. Performance and Design Methods of Concrete Beams Reinforced with GFRP/Steel Wire Composite Rebars[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [12] 郝庆多, 王言磊, 侯吉林, 等. GFRP/钢绞线复合筋与混凝土粘结滑移本构关系模型[J]. 工程力学, 2009, 26(5): 62-72.
- HAO Qing-duo, WANG Yan-lei, HOU Ji-lin, et al. Bond-slip Constitutive Model Between GFRP/Steel Wire Composite Rebars and Concrete[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(5): 62-72.