

文章编号: 1000-4750(2009)05-0062-11

GFRP/钢绞线复合筋与混凝土粘结滑移本构关系模型

*郝庆多¹, 王言磊¹, 侯吉林¹, 欧进萍^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 大连理工大学土木水利学院, 大连 116024)

摘 要: GFRP/钢绞线复合筋与混凝土的粘结是二者能够协同工作的基础, 而且 GFRP/钢绞线复合筋与混凝土的粘结-滑移本构关系模型是其粘结性能的综合反映, 因此, 研究 GFRP/钢绞线复合筋与混凝土的粘结-滑移本构关系模型, 对 GFRP/钢绞线复合筋增强混凝土结构的性能分析、设计理论及工程应用等具有重要的理论意义和实用价值。对 180 个试件进行拉拔试验, 系统地研究肋间距、筋直径、埋置长度、混凝土强度、混凝土保护层厚度和混凝土浇注深度等因素对粘结性能的影响, 测定试件的粘结-滑移曲线。通过对 GFRP/钢绞线复合筋粘结破坏特征、粘结-滑移机理及受力全过程的分析, 在已有粘结-滑移本构模型的基础上, 提出一种新的粘结-滑移本构关系模型, 并与试验结果和已有模型进行比较。新构建的粘结-滑移本构关系模型概念清晰、形式简单, 能较好地反映 GFRP/钢绞线复合筋的受力全过程, 与试验结果吻合良好, 并优于已有粘结-滑移模型。

关键词: GFRP/钢绞线复合筋; 拉拔试验; 粘结强度; 加载端滑移; 本构关系模型

中图分类号: TU599; TB332; TU377.9 **文献标识码:** A

BOND-SLIP CONSTITUTIVE MODEL BETWEEN GFRP/STEEL WIRE COMPOSITE REBARS AND CONCRETE

HAO Qing-duo¹, WANG Yan-lei¹, HOU Ji-lin¹, OU Jin-ping^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

2. School of Civil & Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The bond behavior is the basis of collaboration between GFRP/steel wire composite rebar and concrete, and the bond-slip constitutive model is the overall reflection of bond behavior of GFRP/steel wire composite rebar embedded in concrete. Thus, the research on the constitutive model of bond-slip relationship between GFRP/steel wire composite rebar and concrete has theoretical and practical value in the performance analysis, design theory and engineering application of concrete structures reinforced with GFRP/steel wire composite rebars. In this study, 180 pull-out specimens were tested to investigate the effect of rebar rib spacing, rebar diameter, embedded length, concrete compressive strength, concrete cover thickness, and concrete cast depth on bond behavior, and the bond-slip curves were obtained for each specimen. Based on the existing bond-slip constitutive models worldwide, one new bond-slip constitutive model was proposed according to the analysis of bond failure, bond-slip mechanism, and loading process of GFRP/steel wire composite rebar. The newly built bond-slip constitutive model was compared with the test results and existing bond-slip models. It is explicit in physical concept and simple in form, and fits the whole loading process of GFRP ribbed rebar and the test results well.

Key words: GFRP/steel wire composite rebar; pull-out test; bond strength; loaded end slip; constitutive model

收稿日期: 2007-12-24; 修改日期: 2008-09-14

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目(200431882021); 国家杰出青年基金项目(50525823)

作者简介: *郝庆多(1983—), 男, 山东莘县人, 博士生, 从事 FRP 钢筋混凝土结构的研究(E-mail: haoqingduo@163.com);

王言磊(1977—), 男, 山东营南人, 博士后, 从事 FRP 材料的研究(E-mail: chinaren@hit.edu.cn);

侯吉林(1979—), 男, 吉林长春人, 博士生, 从事结构健康监测的研究(E-mail: houjilin@hit.edu.cn);

欧进萍(1959—), 男, 湖南宁远人, 教授, 博士, 博导, 工程院院士, 从事结构振动控制、健康监测等研究(E-mail: oujinpings@hit.edu.cn).

钢筋混凝土结构已经被广泛地应用于各种工程中,但是如何解决钢筋的锈蚀,进而提高钢筋混凝土结构耐久性,是土木工程界急需解决的问题^[1]。GFRP 筋具有高强、轻质、耐腐蚀、抗疲劳、抗磁性、电绝缘性、徐变小、比重小等优于钢筋的特性,可以用来代替混凝土结构中的普通钢筋,从根本上解决由钢筋锈蚀引起的工程失效问题^[2-3]。但是 GFRP 筋为线弹性脆性材料,弹性模量较低,延性较差,势必使 GFRP 筋混凝土结构在服役过程中产生较大的挠度和较宽的裂缝,影响结构的安全性和适用性。鉴于此,利用混杂原理首次研制了高强、耐腐蚀的 GFRP/钢绞线复合筋,其主要目的是将钢绞线的非线性引入 GFRP 筋,提高其使用过程中的安全性,同时提高 GFRP 筋的弹性模量^[4]。

在承载能力和正常使用极限状态下, GFRP/钢绞线复合筋的抗拉强度能否得到充分发挥,取决于它和混凝土粘结的有效程度。GFRP/钢绞线复合筋与混凝土粘结-滑移($\tau-s$)本构关系模型是 GFRP/钢绞线复合筋与混凝土粘结性能的综合反映。有关裂缝宽度、塑性铰转动能力、剪切破坏及非线性有限元等问题的理论分析都与 $\tau-s$ 本构关系有关^[5]。因此, $\tau-s$ 本构关系模型是 GFRP/钢绞线复合筋增强混凝土结构的重要课题,研究 GFRP/钢绞线复合筋与混凝土的 $\tau-s$ 本构关系模型,对 GFRP/钢绞线复合筋增强混凝土结构的性能分析、设计理论及工程应用具有重要的理论意义和实用价值。

目前,国内外已有的 FRP 筋 $\tau-s$ 本构关系模型均或多或少地存在一些问题,仍需大量的试验来补充和验证。国内的一些学者虽经引入这些模型,郑州大学的高丹盈教授更是首次提出了一种连续曲线模型^[5],意义重大;但鉴于 GFRP/钢绞线复合筋和 FRP 筋的区别, GFRP/钢绞线复合筋粘结-滑移关系本构模型的构建需要专门研究。因此,本文在对已有的 $\tau-s$ 本构关系模型进行分析的基础上,利用 180 个拉拔试件系统地研究 GFRP/钢绞线复合筋肋间距、直径、埋置长度、混凝土强度、保护层厚度和混凝土浇注深度等因素对粘结性能的影响^[6-7],并建议了一种新的 $\tau-s$ 本构关系模型,为 GFRP/钢绞线复合筋增强混凝土结构的推广应用和相关规范的编制提供参考和理论依据。

1 研究现状

1.1 Malvar 模型

Malvar^[8]通过大量不同外形的 FRP 筋与混凝土

的粘结试验研究,给出了单一曲线的 $\tau-s$ 模型。这些试验是在相同的混凝土抗拉强度下,施加不同的侧限压力值进行的,可表示为:

$$\frac{\tau}{\tau_m} = \frac{F(s/s_m) + (G-1)(s/s_m)^2}{1 + (F-2)(s/s_m) + G(s/s_m)^2} \quad (1a)$$

$$\frac{\tau_m}{f_t} = A + B(1 - e^{-C\sigma/f_t}) \quad (1b)$$

$$s_m = D + E\sigma \quad (1c)$$

式中: τ_m 为峰值粘结强度; s_m 为峰值粘结强度对应的滑移; f_t 为混凝土抗拉强度; A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 、 G 是根据筋的类型由试验结果确定的常数; σ 为轴对称的侧限径向压力;对于给定的侧限压力 Malvar 给出 τ_m 和 s_m 的估计值。

该模型便于比较不同种类 FRP 筋与混凝土在相同侧限压力下的粘结性能,但该模型的初始斜率($s=0$ 时的斜率)不是无穷大,与粘结物理现象不吻合,物理意义不很明显,且其形式较为复杂,一般应用较少。

1.2 BPE 模型

Eligehausen 等人得出的广泛应用于变形钢筋与混凝土的 $\tau-s$ 模型,已由 Cosenza 等人和 Rossett 等人应用于 FRP 筋与混凝土^[9-11]。BPE(Eligehausen, Popov and Bertero)模型如图 1 所示。

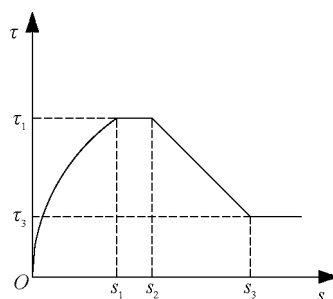


图 1 BPE 模型

Fig.1 BPE model

BPE 模型分为四段:第一段是上升段,第二段是平台段,第三段为线性下降段,第四段是残余段,可分别表示为:

$$\text{上升段} \quad \tau/\tau_1 = (s/s_1)^\alpha, \quad s \leq s_1 \quad (2a)$$

$$\text{平台段} \quad \tau = \tau_1, \quad s_1 < s \leq s_2 \quad (2b)$$

$$\text{下降段} \quad \tau = \tau_1 - \frac{\tau_1 - \tau_3}{s_2 - s_3}(s_2 - s), \quad s_2 < s \leq s_3 \quad (2c)$$

$$\text{残余段} \quad \tau = \tau_3, \quad s > s_3 \quad (2d)$$

式中:参数 s_2 、参数 s_3 、参数 τ_3 由试验确定; τ_1 为峰值粘结强度; s_1 为与 τ_1 对应的滑移; α 为不大于 1 的常数。

由于 BPE 模型是由钢筋与混凝土的 $\tau-s$ 曲线得到的, 与 FRP 筋与混凝土的粘结有些差异, 不少试验结果^[12-13]表明 BPE 模型与试验结果偏差较大。

1.3 修正 BPE 模型

将 BPE 模型与试验曲线比较发现 FRP 筋 $\tau-s$ 试验曲线没有第二段, 即没有 τ_1 的平台段, 因此 Cosenza 等人^[10]建议不考虑 BPE 模型的第二段, 得到修正 BPE 模型, 上升段和残余段与 BPE 模型相同, 下降段的曲线斜率为 $p \cdot \tau_1 / s_1$, 如图 2 所示。

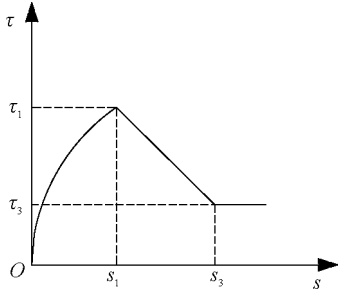


图 2 修正 BPE 模型

Fig. 2 Modified BPE model

上升段 $\tau / \tau_1 = (s / s_1)^\alpha$, $s \leq s_1$ (3a)

下降段 $\tau / \tau_1 = 1 - p(s / s_1 - 1)$, $s_1 < s \leq s_2$ (3b)

残余段 $\tau = \tau_3$, $s > s_3$ (3c)

式中: α 、 p 、 τ_3 为三个参数; τ_3 为摩擦力分量; p 是与下降段有关的参数, 在下降段范围内, 由试验曲线与理论曲线的面积相等得到, α 可由 $\tau-s$ 理论曲线上升段下的面积 A_{τ_1} 等于实际曲线上升段下的面积求得, 即:

$$\alpha = \frac{\tau_m \cdot s_m - 1}{A_{\tau_1}} \quad (3d)$$

修正 BPE 模型形式较为简单, 对大部分 FRP 筋有较好的适用性, 能够很好地解决多种 FRP 筋增强混凝土构件的受力分析问题。

1.4 CMR 模型

由于大多数结构的计算仅考虑使用阶段, 只需 $\tau-s$ 上升段曲线 ($s < s_m$) 较精确就可以了, 因此 Cosenza-Manfredi-Realfonzo(CMR)等人^[14]给出了曲线上升段的一种新的模型, 可表示为:

$$\frac{\tau}{\tau_m} = [1 - \exp(-s / s_r)]^\beta \quad (4)$$

式中: τ_m 为峰值粘结强度; 参数 s_r 、参数 β 由试验确定。

CMR 模型形式较为简单, 且 CMR 模型的初始

斜率是无穷大, 胶着作用明显。但由于不考虑 $\tau-s$ 曲线的下降段和残余段, 对于一些要求进行受力全过程分析的构件不能适用, 因此应用时有一定的局限性。

Tighiouart 等人^[15]在试验的基础上, 得到了 CMR 模型中参数 s_r 和参数 β 的确定值, 对 $\tau-s$ 曲线的上升段提出以下简化模型:

$$\frac{\tau}{\tau_m} = (1 - e^{-4s})^{0.5} \quad (5)$$

式中 s 为与粘结强度 τ 对应的滑移 ($s < s_m$)。

该模型为通过试验得到的 CMR 模型的一个特例, 限制了其广泛应用。

1.5 Zhang 模型

借鉴 CMR 模型的启示, Zhang^[16]等通过 FRP 筋和水泥砂浆的粘结性能的研究, 也给出了 $\tau-s$ 曲线上升段 ($s < s_m$) 的一种新模型, 可表示为:

$$\tau = \tau_m \left[1 - \left(\frac{\delta}{\delta_m} - 1 \right)^2 \right] \quad (6)$$

式中: τ_m 为峰值粘结强度; δ_m 为与 τ_m 相应的滑移。

该模型是通过 FRP 筋和水泥砂浆的粘结试验得到的, 与其试验有密切关系, 应用较少。

1.6 连续曲线模型

高丹盈等人^[5, 17]在总结国内外已有 FRP 筋与混凝土 $\tau-s$ 本构模型的基础上, 发现大部分模型不能同时满足物理概念明确和光滑连续等要求, 因此提出了如图 3 所示的 $\tau-s$ 本构关系的连续曲线模型, 得到 $\tau-s$ 模型为:

$$\text{上升段} \quad \frac{\tau}{\tau_0} = 2 \sqrt{\frac{s}{s_0} - \frac{s}{s_0}} \quad 0 \leq s \leq s_0 \quad (7a)$$

下降段

$$\tau = \tau_0 \frac{(s_u - s)^2 (2s + s_u - 3s_0)}{(s_u - s_0)^3} + \tau_u \frac{(s - s_0)^2 (3s_u - 2s - s_0)}{(s_u - s_0)^3}, \quad s_0 \leq s \leq s_u \quad (7b)$$

式中: τ_0 、 s_0 分别为峰值点的粘结强度和对应的滑移; τ_u 、 s_u 分别为残余粘结强度和对应的滑移。

此 $\tau-s$ 曲线在原点处曲线斜率为无穷大; 在峰值点 ($s = s_0$) 处曲线斜率为零; 在残余粘结强度处 ($s = s_u$) 曲线斜率为零, 该模型从数学和物理意义上进行推导, 以 $\tau-s$ 曲线的三个关键点为基础, 物理概念明确, 光滑连续, 只是下降段的形式稍繁。

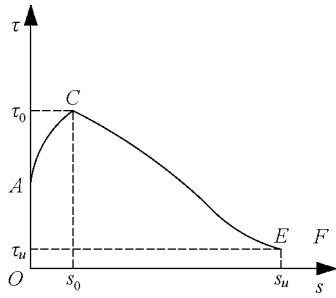


图3 连续曲线模型

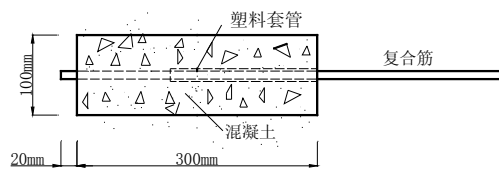
Fig.3 Continuous curved model

2 试验研究

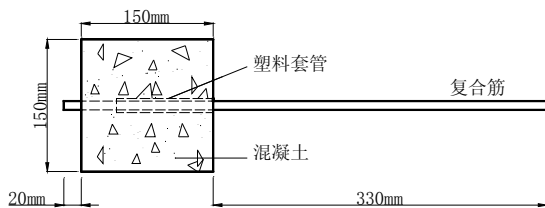
2.1 试验设计

GFRP/钢绞线复合筋的生产采用拉挤成型工艺，在拉挤成型过程中，钢绞线和玻璃纤维经树脂浸渍后，使钢绞线处于玻璃纤维的中心再进入拉挤设备。本次试验采用的GFRP/钢绞线复合筋的直径分别为8mm、10mm、12mm和14mm。为了增强GFRP/钢绞线复合筋与混凝土的粘结，在拉挤成型过程中用受力拉紧的纤维束对GFRP/钢绞线复合筋进行双向螺旋缠绕，然后经加热腔一起加热固化，使纤维束成为筋体表面和筋一体化的横肋。GFRP/钢绞线复合筋性能可参看本次试验其他相关文献。

混凝土的拟配强度等级分别为C20、C30和C40。水平放置GFRP/钢绞线复合筋，垂直浇注混凝土，用振捣棒振捣成型。在浇注同一批试件时，预留3个边长为100mm的立方体试块。24h后拆模，每组试件及试块在相同条件下自然养护28d。达到规定的养护时间后，对标准块进行抗压试验，以测定混凝土的实际抗压强度。



(a) 标准粘结试件



(b) 考查浇注深度试件

图4 拉拔试件

Fig.4 Pull-out specimens

本次试验采用的粘结试件有两种，分别为标准粘结试件和考查浇注深度影响的试件。标准粘结试件的尺寸为100mm×100mm×300mm，其构造如图4(a)所示。标准粘结试件的编号由4部分组成，即A-B-C-D；其中A表示GFRP/钢绞线复合筋的直径，“8”表示筋的直径是8mm、肋间距是直径的1倍，“8@12”表示筋的直径是8mm、肋间距是12mm；B表示混凝土的强度等级；C表示混凝土的保护层厚度，“1”表示保护层厚度为筋直径的1倍，“0”表示筋处于试件的中心；D表示筋的埋置长度，“10”表示埋置长度是筋直径的10倍。

考查浇注深度影响的试件按照Canadian Standards Association (CSA)标准的设计规定^[16]，试件尺寸为150mm×150mm×150mm，其构造如图4(b)所示，顶部和底部试件一起浇注，待成型拆模后从开槽处劈开。该种粘结试件的编号也由4部分组成，即A-B-E-F；其中A表示GFRP/钢绞线复合筋的直径，“10”表示筋直径是10mm、肋间距是直径的1倍；B表示混凝土的强度等级；E表示筋的埋置长度，“5”表示埋置长度是筋直径的5倍；F表示筋的浇注位置；“T”表示顶部筋；“B”表示底部筋。

针对不同的影响因素设计60组试件，每组浇注3个试件。为了避免试件加载端混凝土局部受压，以致与试件中GFRP/钢绞线复合筋端部附近的应力状态差别较大，在靠近加载端用塑料套管把GFRP/钢绞线复合筋和混凝土隔开设置未粘结段，以减小边界处的应力集中对试验结果真实性造成的影响。

2.2 试验数据

假设粘结应力沿GFRP/钢绞线复合筋的埋置长度均匀分布，GFRP/钢绞线复合筋的粘结强度定义为在粘结长度内粘结应力的平均值，即拔出荷载(拉拔力)除以GFRP/钢绞线复合筋埋长部分的表面积。GFRP/钢绞线复合筋与混凝土的粘结强度由公式(8)计算：

$$\tau = \frac{P}{\pi d l_a} \quad (8)$$

式中： τ 为GFRP/钢绞线复合筋与混凝土之间的粘结强度； d 为GFRP/钢绞线复合筋的直径； l_a 为GFRP/钢绞线复合筋的埋置长度； P 为拉拔力。

加载端滑移的量测采用外部量测法，该方法假定混凝土外表面纤维和同一高度GFRP/钢绞线复合筋周围混凝土应变相等，通过量测试件外表面夹持点和同一高度GFRP/钢绞线复合筋的相对位移，即

可得此锚固深度的滑移量。由于混凝土的截面积比 GFRP/钢绞线复合筋的截面积大得多, 在同一拉拔力作用下, 混凝土的变形很小, 可以忽略, 因此可用外围混凝土的应变来代替同一高度 GFRP/钢绞线复合筋周围混凝土的应变。

由于 GFRP/钢绞线复合筋的弹性模量低于钢筋, 未粘结部分的 GFRP/钢绞线复合筋在荷载作用下的弹性变形不可忽略。那么, 加载端滑移 s :

$$s = s_m - \delta_e \quad (9)$$

式中: s_m 是通过对称夹持在与塑料套管同一高度处的仪表架上的位移传感器来量测的 GFRP/钢绞线复合筋的滑移量; δ_e 为在加载端拉拔力 P 作用下, 未粘结段 GFRP/钢绞线复合筋的弹性伸长:

$$\delta_e = \frac{P}{E_f A_f} L \quad (10)$$

式中: E_f 为 GFRP/钢绞线复合筋弹性模量; A_f 为 GFRP/钢绞线复合筋横截面面积; L 为未粘结段 GFRP/钢绞线复合筋长度; P 为拉拔力。

本次试验的 60 组拉拔试件的试验结果见表 1。

表 1 拉拔试件试验结果

Table 1 Test results of pull-out specimens

试件编号	f'_c	T_u	τ_u	s_u	破坏模式
8@8-30-0-5	27.40	19.9	19.79	0.97	P
8@12-30-0-5	27.40	17.88	17.79	1.48	P
8@16-30-0-5	27.40	14.34	14.26	1.84	P
8-20-0-5	19.85	17.35	17.26	1.74	P
8-20-0-10	19.85	28.79	14.32	2.61	P
8-20-0-15	19.85	37.32	12.37	2.05	R
8-20-0-20	19.85	38.83	9.66	1.65	R
8-20-0-25	19.85	36.10	7.18	1.72	R
8-20-0-30	19.85	38.74	6.42	1.41	R
10-20-0-5	19.85	18.55	11.81	3.19	P
10-20-0-10	19.85	32.80	10.44	3.85	P
10-20-0-15	19.85	46.07	9.78	0.52	R
10-20-0-20	19.85	47.39	7.54	0.46	R
10-20-0-25	19.85	47.19	6.01	0.67	R
10-30-0-5	26.05	21.84	13.90	2.65	P
10-30-0-10	26.05	38.45	12.24	3.33	P
10-30-0-15	26.05	43.75	9.28	0.45	R
10-30-0-20	26.05	51.06	8.13	0.63	R
10-30-0-25	26.05	48.4	6.16	0.52	R
10-40-0-5	35.43	26.21	16.69	1.78	P
10-40-0-10	35.43	44.96	14.31	2.88	P
10-40-0-15	35.43	48.94	10.39	0.38	R
10-40-0-20	35.43	44.66	7.11	0.42	R
10-40-0-25	35.43	45.80	5.83	0.91	R
12-30-0-5	26.05	29.72	13.14	3.59	P
12-30-0-10	26.05	52.10	11.52	1.10	R
12-30-0-15	26.05	61.68	9.09	0.94	R
12-30-0-20	26.05	56.38	6.23	0.65	R
14-40-0-5	35.43	37.54	12.19	0.82	S

续表

试件编号	f'_c	T_u	τ_u	s_u	破坏模式
14-40-0-5	35.43	37.54	12.19	0.82	S
14-40-0-10	35.43	66.59	10.81	0.70	R
14-40-0-15	35.43	74.33	8.05	0.76	R
8-20-1-5	19.85	13.21	13.14	0.76	S
8-20-2-5	19.85	15.98	15.90	0.76	S
8-20-3-5	19.85	16.29	16.20	1.16	S
10-20-1-5	19.85	14.33	9.12	0.41	S
10-20-2-5	19.85	16.91	10.77	0.64	S
10-20-3-5	19.85	17.92	11.41	0.95	S
10-30-1-5	26.05	17.76	11.31	0.51	S
10-30-2-5	26.05	18.80	11.97	0.46	S
10-30-3-5	26.05	20.58	13.10	0.53	S
10-40-1-5	35.43	13.79	8.78	0.49	S
10-40-2-5	35.43	22.00	14.01	0.63	S
10-40-3-5	35.43	23.29	14.83	1.25	S
12-30-1-5	26.05	17.92	7.92	0.43	S
12-30-2-5	26.05	21.71	9.60	0.42	S
12-30-3-5	26.05	28.07	12.41	0.74	S
14-40-1-5	35.43	23.15	7.52	0.67	S
14-40-2-5	35.43	33.67	10.94	0.49	S
8-20-5-T	19.85	12.56	12.49	1.61	P
8-20-5-B	19.85	19.34	19.24	0.96	P
10-20-5-T	19.85	14.87	9.47	2.17	P
10-20-5-B	19.85	21.30	13.56	1.34	P
10-30-5-T	26.05	19.12	12.17	2.81	P
10-30-5-B	26.05	25.27	16.09	1.02	P
10-40-5-T	35.43	17.23	10.97	2.96	P
10-40-5-B	35.43	27.38	17.43	1.31	P
12-30-5-T	26.05	22.10	9.77	2.71	P
12-30-5-B	26.05	33.74	14.92	1.50	P
14-40-5-T	35.43	29.00	9.42	3.48	P
14-40-5-B	35.43	43.57	14.15	2.57	P

注: f'_c /MPa 为混凝土抗压强度; T_u /kN 为试件极限承载力; τ_u /MPa 为极限粘结强度; s_u /mm 为峰值粘结滑移。

3 τ - s 本构关系模型

3.1 粘结破坏特征

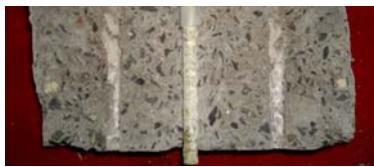
本次试验粘结试件共有 3 种不同的破坏模式, 当保护层厚度为 GFRP/钢绞线复合筋直径的 1 倍—3 倍时, 破坏模式是混凝土的劈裂破坏(S); 当 GFRP/钢绞线复合筋处于试件的中心时, 破坏模式为 GFRP/钢绞线复合筋的拔出破坏(P)或受拉断裂破坏(R)。各组试件的破坏形式见表 1。

本次试验的典型粘结破坏特征如图 5 所示。由图 5(a)可见随着保护层厚度的增大, 混凝土的裂缝分布区域逐渐加大。当保护层厚度为 GFRP/钢绞线复合筋直径的 1 倍时, 混凝土裂缝主要分布在保护层范围内; 当保护层厚度为 GFRP/钢绞线复合筋直径的 2 倍时, 混凝土裂缝的分布区域逐渐扩展到试件横截面中间部分; 当保护层厚度为 GFRP/钢绞线

复合筋直径的 3 倍时,混凝土裂缝继续扩展,甚至贯通了整个试件横截面;当 GFRP/钢绞线复合筋处于试件的中心时保护层厚度为 GFRP/钢绞线复合筋直径的 4 倍左右,发生 GFRP/钢绞线复合筋的拔出破坏或受拉断裂破坏。



(a) 试件的破坏形式



(b) GFRP/钢绞线复合筋的破坏形式

图 5 典型粘结破坏特征

Fig.5 Typical failure characteristics of specimens

由图 5(b)可见 GFRP/钢绞线复合筋的破坏形式为横肋被部分磨损,并使部分肋间混凝土被剪碎带出;混凝土的保护层厚度越大,则横肋被磨损的程度越严重。在粘结长度范围内的 GFRP/钢绞线复合筋表面,可以看到被剪碎混凝土的粉末;在剖开的两半混凝土块上,可以清楚地看到肋间混凝土被剪碎的痕迹,还可以看到横肋表面被磨损后留下的白色粉末。

3.2 粘结滑移机理

与钢筋混凝土结构相似, GFRP/钢绞线复合筋与混凝土之间的粘结强度也由三个部分组成: 1) GFRP/钢绞线复合筋和混凝土水泥胶体之间的化学粘结,即化学胶着力;化学胶着力取决于水泥的性质及筋表面的粗糙程度,一旦 GFRP/钢绞线复合筋和混凝土发生相对滑移,化学胶着力即丧失且不可恢复; 2) 温度变化或干湿循环引起的混凝土收缩或 GFRP/钢绞线复合筋体积膨胀而产生的握裹作用,即接触面上的摩擦力;摩擦力与混凝土的收缩率、弹性模量及接触面的粗糙程度有关; 3) GFRP/钢绞线复合筋的横肋与混凝土产生的机械作用,即机械咬合力;机械咬合力是通过横肋与肋间混凝土产生的楔块效应实现的,受混凝土强度的影响较大。

由图 5 中的破坏特征可见, GFRP/钢绞线复合筋与混凝土的粘结强度主要取决于横肋与周围混凝土的机械咬合作用,在受力过程中机械咬合作用会产生斜向作用力,该斜向力会在 GFRP/钢绞线复

合筋表面会产生切向分力和径向分力,径向分力使 GFRP/钢绞线复合筋周围混凝土处于环向受拉状态。随着荷载的增大, GFRP/钢绞线复合筋周围的混凝土会因环向拉应力的增加而产生内裂缝。

本次试验采用的中心拉拔试件的混凝土保护层厚度较大(GFRP/钢绞线复合筋直径的 4 倍左右),使混凝土径向裂缝的开裂受到限制,在达到极限粘结强度的情况下不致发生混凝土劈裂破坏;但荷载的增加使 GFRP/钢绞线复合筋的加载端滑移大幅增加,肋间混凝土随着滑移的增大而被剪碎,并且横肋也被严重磨损,最终发生 GFRP/钢绞线复合筋的拔出破坏或受拉断裂破坏。

对于混凝土保护层厚度较小的粘结试件(GFRP/钢绞线复合筋直径的 1 倍—3 倍),由于混凝土无法对 GFRP/钢绞线复合筋提供足够的约束,径向裂缝的开展使试件产生沿筋的纵向裂缝,最终发生混凝土的劈裂破坏;由于发生破坏时横肋还未与肋间混凝土发生充分的机械咬合作用,楔块效应较弱,所以加载端滑移较小,粘结强度较低,横肋的磨损程度较轻。

如图 6 所示,为 GFRP/钢绞线复合筋与混凝土粘结破坏示意图。粘结破坏界面出现在横肋表面或者表面稍偏下的位置(图 6 中虚线)。横肋间的混凝土被剪碎带出,而且 GFRP/钢绞线复合筋的横肋被磨损,这是因为一些横肋的表面有一层树脂富裕层,该层中没有纤维;又因为树脂的抗剪强度较低,在拉拔过程中,树脂富裕层很易被混凝土剪碎,从而在此形成粘结破坏界面。不过 GFRP/钢绞线复合筋的横肋被磨损的程度不尽相同,保护层较厚的磨损最严重,保护层厚度较小的(如为筋直径的 1 倍)则几乎没有被磨损。

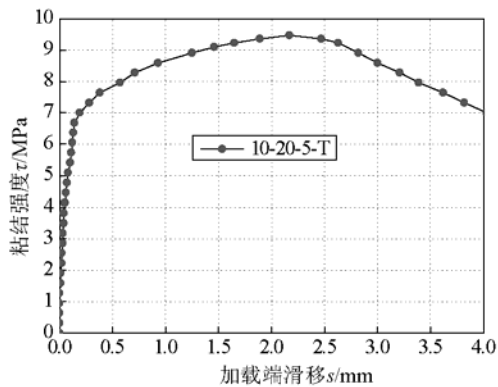


图 6 GFRP/钢绞线复合筋与混凝土粘结破坏示意图

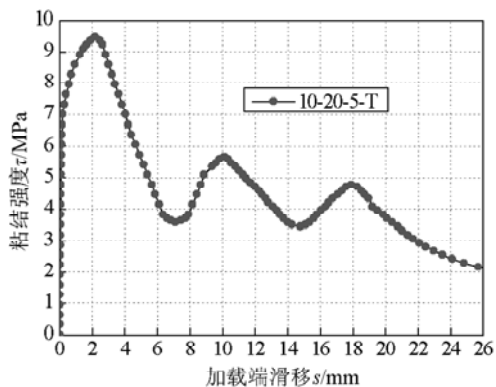
Fig.6 Sketch of bond failure between GFRP/steel wire composite rebar and concrete

3.3 受力过程分析

本次试验所得 GFRP/钢绞线复合筋与混凝土的典型 $\tau-s$ 曲线如图 7 所示。根据 $\tau-s$ 试验曲线可以把 GFRP/钢绞线复合筋的受力过程归纳为 4 个阶段:微滑移阶段、滑移段、下降段和残余段。



(a) 上升段曲线



(b) 全过程曲线

图7 GFRP/钢绞线复合筋的典型 $\tau-s$ 试验曲线Fig.7 Typical $\tau-s$ curve of GFRP/steel wire composite rebar

1) 微滑移段。加载初期, 加载端无滑移或有微小滑移, 自由端未发生滑移, $\tau-s$ 曲线处于线性上升阶段。此过程中 GFRP/钢绞线复合筋与混凝土的胶结力起主要作用, 但未渗透到自由端。

2) 滑移段。GFRP/钢绞线复合筋与混凝土接触面靠近加载端附近的胶结力开始丧失, 自由端开始产生滑移。待胶结力损失殆尽, 粘结力全部转由摩擦力和机械咬合力承担, $\tau-s$ 曲线进入非线性阶段。横肋与周围混凝土的机械咬合力产生的楔块效应使 GFRP/钢绞线复合筋与混凝土的粘结强度显著提高。此后, 在粘结强度接近极限粘结强度的过程中, 滑移增长加快, $\tau-s$ 曲线趋于平缓。

3) 下降段。过极限粘结强度以后, $\tau-s$ 曲线进入下降段。由于 GFRP/钢绞线复合筋的横肋被混凝土磨损, 所以横肋与周围混凝土的机械咬合力急剧减小, 同时混凝土对 GFRP/钢绞线复合筋的握裹力降低, GFRP/钢绞线复合筋与混凝土的摩擦力也减小, 所以粘结强度随滑移的增加迅速下降, $\tau-s$ 曲线近似于线性下降。

4) 残余段。下降段结束以后, $\tau-s$ 曲线进入残余段, 粘结强度主要由 GFRP/钢绞线复合筋与混凝土的摩擦力组成。粘结强度随着滑移的增加出现循环衰减过程, 每个循环的峰值最高点和最低点都比上一个循环有所减小; 最后荷载降低较慢, 滑移增加较快, 衰减过程趋于平缓。

3.4 粘结滑移本构关系模型

GFRP/钢绞线复合筋与混凝土的粘结滑移本构关系是 GFRP/钢绞线复合筋与混凝土粘结性能的综合反映。在 GFRP/钢绞线复合筋增强混凝土结构的设计和分析过程中, 例如非线性有限元分析中的粘结单元、计算 GFRP/钢绞线复合筋的锚固或搭接长度、确定构件混凝土开裂后的受拉刚化效应、计算抗震构件和节点处 GFRP/钢绞线复合筋的滑移变形量等, 都要应用 GFRP/钢绞线复合筋和混凝土的粘结滑移本构关系模型^[19-20]。因此, 构建二者的粘结滑移本构关系模型, 对研究 GFRP/钢绞线复合筋增强混凝土结构的允许裂缝宽度、塑性铰转动能力、剪切破坏及非线性有限元等问题具有重要意义。

在粘结失效模式中, 混凝土的劈裂破坏和 GFRP/钢绞线复合筋的受拉断裂破坏是应该避免的破坏形式。GFRP/钢绞线复合筋的受拉断裂会使结构的承载力剧降为零, 以致造成恶劣事故; 混凝土劈裂产生的裂缝会加剧混凝土的碳化、筋的腐蚀, 破坏构件的受力形式, 使构件的承载力降低, 甚至会造成局部混凝土的脱落, 影响结构的安全性和使用性; 可见拔出破坏是理想的破坏形式, 也能够反映 GFRP/钢绞线复合筋与混凝土粘结-滑移的全过程。因此, 粘结滑移本构关系模型的构建主要基于发生拔出破坏的试验数据。

由 GFRP/钢绞线复合筋与混凝土在粘结-滑移中的受力过程分析可得, 已有 $\tau-s$ 本构模型和 $\tau-s$ 试验曲线相比, 仍存在两方面的不足: 一方面, 已有 $\tau-s$ 本构模型对曲线上升段的描述过于粗糙, 一味地为了满足物理意义而没能准确反映 GFRP/钢绞线复合筋的加载初期受力过程, 即没有体现出加载初期的线性微滑移段; 另一方面, 已有 $\tau-s$ 本构模型没能精确地描述 GFRP/钢绞线复合筋的受力全过程, 即没有精确地反映残余段的变化, 试验证明残余段不是一条直线, 也即在残余段粘结强度不是恒定值, 而是随着滑移的增加循环衰减。因此, 在对粘结滑移机理和 $\tau-s$ 试验曲线进行分析的基础上, 得到了能描述粘结-滑移的全过程、形式比较简单的

粘结滑移本构关系模型。

如图 8 所示, $\tau-s$ 曲线的 OA 段表示微滑移段, 此阶段内 $\tau-s$ 曲线线形上升; AB 段表示滑移段, 此阶段内 $\tau-s$ 曲线进入非线性; BC 段表示下降段, 此阶段内 $\tau-s$ 曲线近似于线性下降; CD 段表示残余段, 是一个逐步循环衰减过程; A 点、 B 点、 C 点分别为不同受力阶段的分界点。

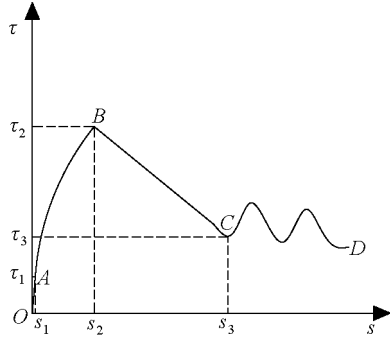


图 8 GFRP/钢绞线复合筋粘结-滑移本构关系模型

Fig.8 Bond-slip constitutive model of GFRP/steel wire composite rebar

GFRP/钢绞线复合筋与混凝土的粘结滑移本构关系模型的表达式为:

$$\text{微滑移段 } \tau = \tau_1(s/s_1), \quad 0 < s \leq s_1 \quad (11a)$$

滑移段

$$\tau = (\tau_2 - \tau_1)[(s - s_1)/(s_2 - s_1)]^\alpha + \tau_1, \quad s_1 < s \leq s_2 \quad (11b)$$

$$\text{下降段 } \tau = \tau_2[1 - \beta(s/s_2 - 1)], \quad s_2 < s \leq s_3 \quad (11c)$$

残余段

$$\tau = \tau_3 - \gamma[e^{-\xi\omega(s-s_3)} \cos \omega(s-s_3) - 1] + \rho(e^{-\xi\omega(s-s_3)} - 1), \quad s > s_3 \quad (11d)$$

式中: τ_1 、 τ_2 、 τ_3 分别为图 8 中点 A 、点 B 、点 C 对应的粘结强度; s_1 、 s_2 、 s_3 分别为 τ_1 、 τ_2 、 τ_3 对应的加载端滑移值; α 、 β 、 γ 、 ξ 、 ω 、 ρ 分别为由试验结果确定的参数。

4 模型验证

4.1 试验验证

分界点 A 、分界点 B 、分界点 C 处的试验数据以及模型中各参数的拟合值见表 2。将表 2 中的数据代入式(11)中即可得到相应试件的粘结-滑移拟合曲线。典型 $\tau-s$ 试验曲线与相应模型拟合曲线的比较见图 9(代入本构模型中的参数分别是该试件的参数拟合值)。从图 9 可以看出, $\tau-s$ 试验曲线与模型拟合曲线吻合良好, 所以式(11)表示的粘结滑移本构关系模型与试验数据吻合较好, 能够较好地描述 GFRP/钢绞线复合筋在拉拔中的受力全过程。

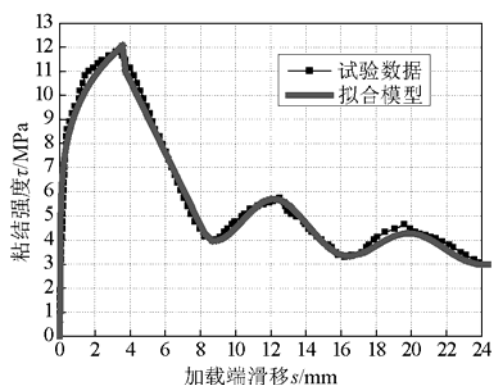
表 2 试验数据及参数拟合值

Table 2 Test value and fitting value of parameters

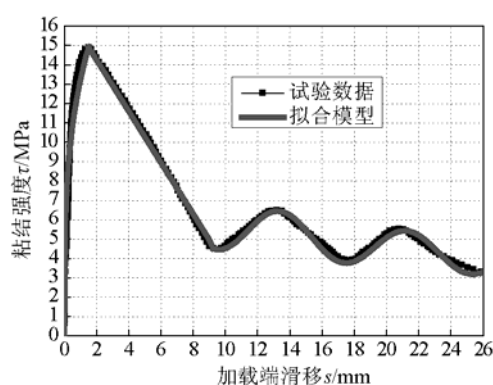
试件编号	试验数据						参数拟合值					
	A点		B点		C点		α	β	γ	ξ	ω	ρ
	τ_1 /MPa	s_1 /mm	τ_2 /MPa	s_2 /mm	τ_3 /MPa	s_3 /mm						
8@8-30-0-5	9.95	0.02	19.79	0.97	9.57	3.88	0.2568	0.1939	3.9665	0.0813	0.6742	9.0155
8@12-30-0-5	8.08	0.03	17.79	1.48	5.22	15.10	0.2974	0.0830	5.9603	0.4137	0.4787	7.2468
8-20-0-5	3.48	0.04	17.26	1.74	6.86	7.95	0.2648	0.1699	2.3289	0.0779	1.0003	5.5082
8-20-0-10	0.99	0.03	14.32	2.61	4.77	10.27	0.3650	0.2164	0.9735	0.0353	0.6479	7.8684
10-20-0-5	1.91	0.03	11.81	3.19	3.98	8.67	0.2271	0.4033	1.3574	0.0936	0.8181	2.7970
10-20-0-10	1.11	0.05	10.44	3.85	4.17	12.47	0.4815	0.2776	0.8153	0.0196	0.7139	5.3624
10-30-0-5	2.55	0.08	13.9	2.65	4.46	9.33	0.2578	0.2820	1.0047	0.0328	0.7843	5.2724
10-30-0-10	0.72	0.04	12.24	3.33	4.10	9.83	0.4086	0.3796	0.9208	0.0550	0.7879	3.5099
10-40-0-5	2.23	0.06	16.69	1.78	8.40	7.24	0.3727	0.1812	1.5036	0.1267	0.7297	4.6235
10-40-0-10	0.64	0.06	14.31	2.88	6.30	8.29	0.2298	0.3150	1.2040	0.0745	0.5795	4.1251
12-30-0-5	1.45	0.06	13.14	3.59	5.22	9.64	0.1980	0.3517	1.4057	0.0613	0.7602	3.8570
8-20-5-T	3.98	0.04	12.49	1.61	4.58	5.36	0.3958	0.3285	1.6489	0.0322	0.6876	8.1092
8-20-5-B	6.96	0.04	19.24	0.96	6.57	4.72	0.2271	0.1742	2.1759	0.0413	0.5867	9.5451
10-20-5-T	3.82	0.04	9.47	2.17	3.57	7.11	0.2271	0.3004	1.5388	0.0789	0.8517	2.9014
10-20-5-B	6.37	0.04	13.56	1.34	4.90	8.00	0.1765	0.1318	1.4279	0.0451	0.8785	4.8185
10-30-5-T	2.86	0.05	12.17	2.81	3.88	7.79	0.2646	0.4065	1.0042	0.0196	0.9046	7.5317
10-30-5-B	3.82	0.04	16.09	1.02	5.73	8.43	0.1102	0.0914	2.2119	0.0800	0.7729	4.9030

续表

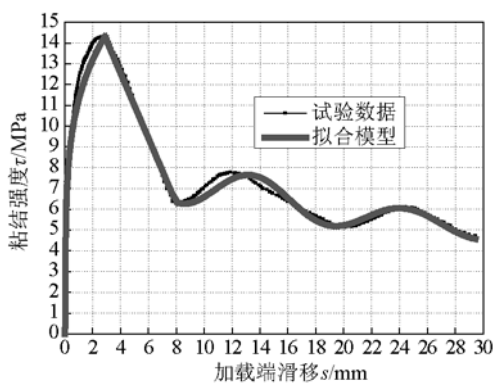
试件编号	试验数据						参数拟合值					
	A点		B点		C点		α	β	γ	ξ	ω	ρ
	τ_1 /MPa	s_1 /mm	τ_2 /MPa	s_2 /mm	τ_3 /MPa	s_3 /mm						
10-40-5-T	3.82	0.02	10.97	2.96	3.63	7.58	0.4520	0.4560	0.9163	0.0178	0.8352	6.0744
10-40-5-B	5.09	0.02	17.43	1.31	5.16	8.33	0.1349	0.1440	2.0957	0.0720	0.7155	4.5542
12-30-5-T	2.23	0.09	9.77	2.71	3.63	8.67	0.3054	0.2975	0.7566	0.0147	0.8217	7.5931
12-30-5-B	3.54	0.05	14.92	1.50	4.47	9.49	0.3828	0.1335	1.2724	0.0285	0.7966	5.5262
14-40-5-T	1.90	0.03	9.42	3.48	3.48	9.19	0.3542	0.3904	0.8774	0.0428	0.7561	4.7986
14-40-5-B	2.11	0.03	14.15	2.57	6.20	9.52	0.2909	0.2096	1.0307	0.0913	0.8159	4.4746
参数拟合值的平均值							0.3002	0.2573	1.6695	0.0711	0.7564	5.6529



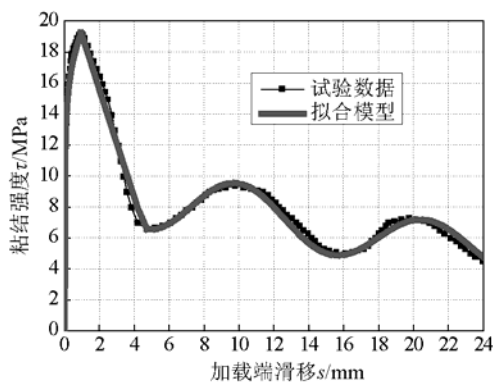
(a) 10-20-0-5



(d) 12-30-5-B



(b) 10-40-0-10



(c) 8-20-5-B

图9 τ - s 试验曲线与模型拟合曲线比较Fig.9 Comparison between τ - s test curves and model fitting curves

4.2 粘结滑移本构关系

图9表明:本文建议模型与试验结果吻合较好,且对 τ - s 试验曲线的描述精度高于其他已有模型。因此,结合图8和表2中的拟合数据,可以给出GFRP/钢绞线复合筋与混凝土的粘结滑移本构关系式为:

$$\text{微滑移段 } \tau = \tau_1(s/s_1), \quad 0 < s \leq s_1 \quad (12a)$$

$$\text{滑移段 } \tau = (\tau_2 - \tau_1)[(s - s_1)/(s_2 - s_1)]^{0.3002} + \tau_1, \quad s_1 < s \leq s_2 \quad (12b)$$

$$\text{下降段 } \tau = \tau_2[1 - 0.2573(s/s_2 - 1)], \quad s_2 < s \leq s_3 \quad (12c)$$

$$\text{残余段 } \tau = \tau_3 - 1.6695[e^{-0.0538(s-s_3)} \cos 0.7564(s-s_3) - 1] + 5.6529(e^{-0.0538(s-s_3)} - 1), \quad s > s_3 \quad (12d)$$

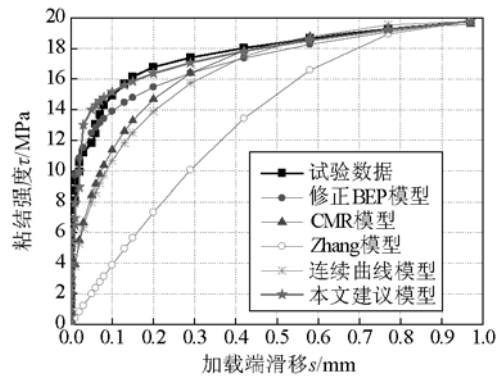
式中,各参数意义同式(11)。

4.3 模型比较

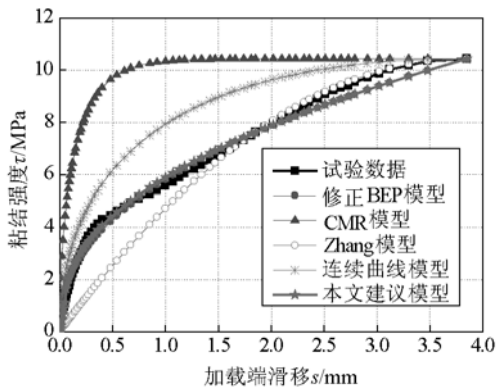
本文的建议模型与已有模型(修正BEP模型、CMR模型、Zhang模型和连续曲线模型)的比较见图10。由于本文试验条件没有对试件施加侧向约束

力,与 Malvar 模型的适用条件不符,因此在此不与 Malvar 模型进行比较;同时由于建议模型和已有模型都把下降段近似看做线性下降,而且已有模型对残余段的描述过于简单,因此不再比较下降段和残余段,主要比较不同模型对 τ - s 曲线上升段描述的精确程度。

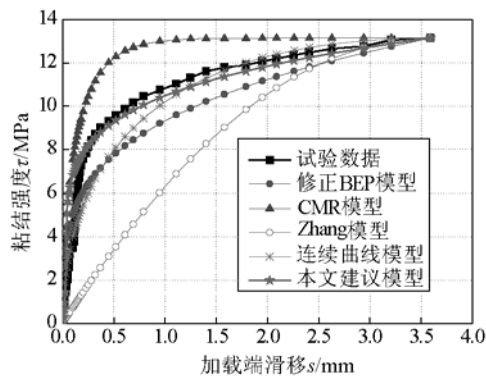
从图 10 可见,与分析的各模型的优缺点相似,CMR 模型、Zhang 模型和连续曲线模型对 τ - s 曲线的描述与试验数据偏差较大,精确程度较低;修正 BEP 模型和本文建议模型则能较好地描述 τ - s 曲线的上升段,与试验结果吻合良好。在图 10(a)和图



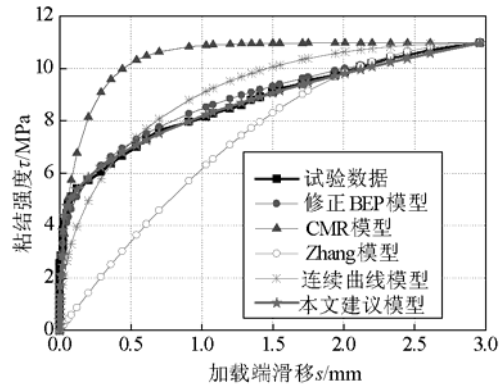
(a) 8@8-30-0-5



(b) 10-20-0-10



(c) 12-30-0-5



(d) 10-40-5-T

图 10 建议 τ - s 模型与已有模型比较

Fig.10 Comparison between proposed τ - s model and existed models

10(c)中,本文建议模型优于修正 BEP 模型;在图 10(b)和图 10(d)中,本文建议模型和修正 BEP 模型的精确程度相当。

5 结论

考虑肋间距、直径、埋置长度、混凝土强度、保护层厚度和混凝土浇注深度等因素,对 GFRP/钢绞线复合筋与混凝土的粘结-滑移本构性能进行试验研究和理论分析,可以得到以下主要结论:

(1) 粘结试件的破坏模式共有三种,分别为混凝土的劈裂破坏、GFRP/钢绞线复合筋的拔出破坏和 GFRP/钢绞线复合筋的受拉断裂破坏。

(2) 在拔出破坏中,粘结破坏特征为 GFRP/钢绞线复合筋的横肋被部分磨损,并使部分肋间混凝土被剪碎带出,粘结破坏界面出现在横肋表面或者表面稍偏下的位置。

(3) 保护层厚度对 GFRP/钢绞线复合筋横肋的磨损程度影响较大,横肋的磨损程度随混凝土保护层厚度的增加而加剧。

(4) GFRP/钢绞线复合筋在拉拔中的受力过程可分为 4 个阶段,分别为微滑移阶段、滑移段、下降段和残余段。在残余段内粘结强度并非恒定不变,而是呈现循环衰减过程,且随滑移的增大衰减过程趋于平缓。

(5) 本文建议的粘结-滑移本构关系模型与试验结果吻合良好,且明显优于其他模型,可为 GFRP/钢绞线复合筋增强混凝土结构的性能分析、设计理论及工程应用提供理论依据,也可为相关规范的编制和完善提供参考。

参考文献:

- [1] ACI 440 Committee. Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars [R]. Detroit, Michigan, USA: American Concrete Institute, 2001.
- [2] 郝庆多, 王勃, 欧进萍. FRP 筋与混凝土的粘结性能[J]. 建筑技术, 2007, 38(1): 55—57.
Hao Qingduo, Wang Bo, Ou Jinping. Bond behavior between frp rebar and concrete [J]. Architecture Technology, 2007, 38(1): 55—57. (in Chinese)
- [3] 薛伟辰, 刘华杰, 王小辉. 新型 FRP 筋粘结性能研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(2): 104—110.
Xue Weichen, Liu Huajia, Wang Xiaohui. Studies on bond properties of new-type FRP bars [J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(2): 104—110. (in Chinese)
- [4] 卢槐阳. FRP-钢绞线复合筋研制性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
Lu Huaiyang. Research on behaviour of FRO/steel wire composite rebar [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. (in Chinese)
- [5] 高丹盈, 朱海棠, 谢晶晶. 纤维增强塑料筋混凝土粘结滑移本构模型[J]. 工业建筑, 2003, 33(7): 41—44.
Gao Danying, Zhu Haitang, Xie Jingjing. The constitutive models for bond slip relation between FRP rebars and concrete [J]. Industrial Construction, 2003, 33 (7): 41—44. (in Chinese)
- [6] 郝庆多, 王言磊, 欧进萍. GFRP/钢绞线复合筋与混凝土粘结性能[J]. 沈阳建筑大学学报, 2008, 24(2): 177—182.
Hao Qingduo, Wang Yanlei, Ou Jinping. Bond behavior between GFRP/steel wire composite rebar and concrete, [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University, 2008, 24(2): 177—182. (in Chinese)
- [7] 郝庆多, 王言磊, 欧进萍. GFRP/钢绞线复合筋粘结锚固试验研究及设计建议[J]. 土木工程学报, 2008, 41(4): 40—48.
Hao Qingduo, Wang Yanlei, Ou Jinping. Experimental study and design recommendations on bond between GFRP/steel wire composite rebars and concrete [J]. China Journal of Civil Engineering, 2008, 41(4): 40—48. (in Chinese)
- [8] Malvar L J. Tensile and bond properties of GFRP reinforcing bars [J]. ACI Materials Journal. 1995, 92(3): 276—285.
- [9] Eligehausen R, Popov E P, Bertero V V. Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations [J]. Report no. 83/23, EERC, University of California, Berkeley, 1983: 162—169.
- [10] 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.
- [11] Rossett V A, Galeota D, Giammattè M M. Local bond Stress-Slip relationships of glass fiber reinforced plastic bars embed in concrete [J]. Material and Structure, 1995, 28: 340—344.
- [12] Brown V L, Bartholomew C L. FRP reinforced bars in reinforced concrete pavements [J]. ACI SP-138, 1993: 813—829.
- [13] Ehsani M R, Saadatmanesh H, Tao S. Design recommendations for bond of GFRP rebars to Concrete [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1996, 122(3): 247—257.
- [14] Cosenza E, Manfredi G, Realfonzo R. Analytical modeling of bond between FRP reinforcing bars and concrete [C]//Taerwe L. Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete: Proceedings of the 2nd International RILEM Symposium (FRPRCS-2), Ghent, London, England, 1995: 164—179.
- [15] Tighiouart B, Benmokrane B, Gao D. Investigation of bond in concrete member with fibre reinforced polymer (FRP) bars [J]. Construction and Building Materials, 1998, 12(8): 453—462.
- [16] Zhang B, Benmokrane B. Pullout bond properties of Fiber-reinforced polymer tendons to grout [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002, 5: 399—408.
- [17] 高丹盈, 谢晶晶, 李趁趁. 纤维聚合物筋混凝土粘结性能的基本问题[J]. 郑州大学学报, 2002, 23(1): 1—5.
Gao Danying, Xie Jingjing, Li Chenchen. Fundamental problems on bond behavior between FRP rebar and concrete [J]. Journal of Zhengzhou University, 2002, 23(1): 1—5. (in Chinese)
- [18] Canadian Standard Association. CSA S806 02, Design and construction of building components with fibre reinforced polymers [S]. Toronto, Canada: Canadian Standards Association International, 2002.
- [19] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
Guo Zhenhai. Reinforced concrete [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001. (in Chinese)
- [20] 王传志, 腾智明. 钢筋混凝土结构原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985.
Wang Chuanzhi, Teng Zhiming. Reinforced Concrete Structures [M]. Beijing: China Building Industry Press, 1985. (in Chinese)