

文章编号:1007-6492(2002)01-0001-05

纤维聚合物筋混凝土粘结性能的基本问题

高丹盈, 谢晶晶, 李趁趁

( 郑州大学环境与水利学院, 河南 郑州 450002)

**摘 要:** 纤维聚合物筋与钢筋性能的差异, 使纤维聚合物筋混凝土的粘结性能与钢筋混凝土的粘结性能存在明显不同. 根据纤维聚合物筋与混凝土之间的传力机理, 讨论了粘结应力、纤维聚合物筋应力以及锚固长度之间的关系, 建立了纤维聚合物筋混凝土粘结计算的基本公式. 在总结国内外已有的纤维聚合物筋与混凝土粘结滑移本构模型的基础上, 提出了粘结滑移的连续曲线本构模型. 该模型以粘结滑移曲线的三个关键点为基础, 物理概念明确、光滑连续. 最后, 讨论了锚固长度的计算问题, 建议了锚固长度的计算方法.

**关键词:** 纤维聚合物筋; 混凝土; 粘结; 滑移

**中图分类号:** TU 528.58      **文献标识码:** A

酸碱及其它侵蚀性介质的作用使混凝土中的钢筋腐蚀, 每年都要花费大量资金去修补或替换因钢筋腐蚀造成的耐久性不足的钢筋混凝土结构或构件. 用纤维聚合物筋(Fibre Reinforced Polymer Rebar 简称FRP 筋) 代替钢筋, 已成为一种全新而有效的解决钢筋腐蚀的方法, 并在工程中得到了初步应用. 与传统钢筋相比, 纤维聚合物筋有许多显著特点, 如: 高抗腐蚀性、高抗拉强度、高比强度、高绝缘性、易于切割处理等, 这些特点使其具有广阔的应用前景. 由于纤维聚合物筋与钢筋的材料性能以及表面形态的不同, 使纤维聚合物筋混凝土的粘结性能与钢筋混凝土的粘结性能等主要的物理力学性能存在较大差异.

在承载能力和正常使用极限状态下, 纤维聚合物筋的性能能否得到合理的发挥取决于其与混凝土粘结的有效程度. 因此, 在工程实践中, 纤维聚合物筋的锚固和搭接需要一定的长度, 否则在地震等荷载作用下, 纤维聚合筋混凝土粘结退化使构件刚度降低, 甚至发生粘结锚固破坏; 在理论分析中, 诸如裂缝宽度、塑性铰转动能力、剪切破坏以及非线性有限元分析等问题的解决都要求对粘结性能进行深入的试验研究和理论分析, 以便了解粘结应力沿锚固长度上的分布规律, 建立纤维聚合物筋混凝土的粘结应力(  $\tau$  ) 与相对滑移(  $s$  )

本构关系模型, 提出锚固长度的计算方法. 本文对纤维聚合物筋混凝土粘结性能的基本问题进行了初步探讨, 在总结国内外纤维聚合物筋与混凝土粘结滑移本构模型的基础上, 提出了粘结滑移的连续曲线本构关系模型.

1 纤维聚合物筋与混凝土粘结计算的基本公式

纤维聚合物筋与混凝土接触面上的粘结应力( 剪应力) 是纤维聚合物筋与混凝土共同工作的前提. 通过粘结应力, 纤维聚合物筋与混凝土之间能进行应力传递并协调变形. 因此, 可用粘结试验方法( 如拉拔试验、简支梁式试验和悬臂梁式试验) 通过检测纤维聚合物筋的应力得到粘结应力. 实际应用中一般通过测量拔出荷载得到平均粘结强度.

粘结性能研究中, 纤维聚合物筋与混凝土之间的传力机理可用图 1 所示的一段长度为  $dx$  的纤维聚合物筋的受力状态来描述. 由图 1 中力的平衡条件得到粘结应力与沿长度为  $dx$  的纤维聚合物筋应力变化的关系式为

$$\tau(\pi d_b dx) = A_f(f_f + df_f) - A_f f_f \quad (1)$$

根据式( 1) , 当纤维聚合物筋沿纵向的应力变化已知时, 粘结应力可由下式计算:

收稿日期:2001-09-02; 修订日期:2001-10-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目( 59978046, 50079028) ; 1999 年度河南省杰出青年基金资助项目

作者简介: 高丹盈( 1962- ) , 男, 河南省三门峡市人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事新型建筑复合材料及其结构性能方面的研究

$$\tau=\frac{A_f}{\pi d_b}\cdot\frac{df_f}{dx} \tag{2}$$

当粘结应力  $\tau$  的分布已知时,纤维聚合物筋沿纵向由位置  $x_1$  到位置  $x_2$  之间的应力变化值为

$$\Delta f_f=\frac{\pi d_b}{A_f}\int_{x_1}^{x_2}\tau dx \tag{3}$$

对于拉拔试验,由式(3)得加载端纤维聚合物筋的应力和拔出力为

$$f_{fl}=\frac{\pi d_b}{A_f}\int_0^{l_d}\tau dx; \tag{4a}$$

$$F_{fl}=\pi d_b\int_0^{l_d}\tau dx \tag{4b}$$

式(1)~(4)中, $A_f$ 为纤维聚合物筋的截面面积, $\text{mm}^2$ ; $d_b$ 为纤维聚合物筋的直径, $\text{mm}$ ; $f_f$ 为纤维聚合物筋的应力, $\text{MPa}$ ; $l_d$ 为纤维聚合物筋的埋长, $\text{mm}$ .

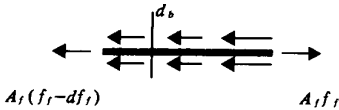


图1 力的传递

Fig. 1 Force transfer

由式(4b)可见,把纤维聚合物筋拔出混凝土所需要的力随着纤维聚合物筋在混凝土中埋长的增大而增加.当埋长足够大时,纤维聚合物筋会在被拔出混凝土之前发生受拉破坏;否则,纤维聚合物筋被拔出混凝土时不会达到其极限强度.最佳锚固长度(即临界锚固长度或基本锚固长度)定义为达到纤维聚合物筋的极限强度所需要的最小埋入长度.

根据基本锚固长度的定义,用平均粘结应力的极限值(即粘结强度) $\tau_u$ 和纤维聚合物筋的极限强度 $f_{fu}$ 分别代替式(4a)中的 $\tau$ 和 $f_{fl}$ ,则基本锚固长度 $l_{db}$ 可由下式计算<sup>[1]</sup>:

$$l_{db}=\frac{A_f}{\pi d_b}\cdot\frac{f_{fu}}{\tau_u} \tag{5}$$

式中: $l_{db}$ 是基本锚固长度, $\text{mm}$ ; $f_{fu}$ 是纤维聚合物筋的极限拉伸强度, $\text{MPa}$ .

## 2 纤维聚合物筋与混凝土粘结滑移本构关系模型

影响纤维聚合物筋与混凝土间粘结性能的主要因素为<sup>[1]</sup>:化学胶结力、由于纤维聚合物筋表面粗糙度而引起的摩擦力、纤维聚合物筋与混凝土间的机械咬合力等.通常用纤维聚合物筋与混凝土间粘结滑移本构关系综合反映粘结性能.根据

纤维聚合物筋与混凝土间粘结滑移本构关系,由式(3)通过滑移得到纤维聚合物筋应力的变化.另外,非线性有限元分析中的粘结单元,计算纤维聚合物筋的锚固或搭接长度,确定混凝土开裂后的受拉刚化效应,计算抗震构件和节点处纤维聚合物筋滑移变形量等均需要纤维聚合物筋与混凝土间粘结滑移本构关系.

### 2.1 BPE 模型<sup>[2,3]</sup>

Eligehausen et al (1983)得出的广泛应用于变形钢筋与混凝土的粘结滑移本构关系模型,如图2(a),已由Faoro (1992),Alunno Rossetti (1995)和Cosenza et al (1995)成功地应用于纤维聚合物筋混凝土.这种粘结滑移本构关系模型可表达为

$$\begin{cases} \text{上升段} & \tau/\tau_1=(s/s_1)^\alpha \quad (s\leq s_1); \\ \text{水平段} & \tau=\tau_1 \quad (s_1\leq s\leq s_2); \\ \text{下降段} & \tau=\tau_1-\frac{\tau_1-\tau_3}{s_2-s_3}(s_2-s) \quad (s_2\leq s\leq s_3); \\ \text{残余应力段} & \tau=\tau_3 \quad (s>s_3), \end{cases} \tag{6}$$

式中: $s_2, s_3, \tau_3$ 由试验确定; $\tau_1$ 为最大粘结强度, $\tau_1=\tau_m$ ; $s_1$ 为与 $\tau_1$ 相应的滑移, $s_1=s_m$ ; $\alpha$ 是不大于1的常数.

### 2.2 改进的BPE 模型<sup>[3]</sup>

对于纤维聚合物筋混凝土,将BPE模型与试验曲线比较可见,试验曲线没有第二段,即没有 $\tau=\tau_1$ 的水平段,因此Cosenza et al (1996)建议不考虑BPE模型中的第二段,得到的改进BPE模型见图2(b),上升段与原BPE模型相同,软化段( $s_1$ ,  $\tau_1$ )到 $(s_3, \tau_3)$ 的斜率为 $p\cdot\tau_1/s_1$ ,纤维聚合物筋与混凝土粘结滑移本构关系模型可表达为

$$\begin{cases} \text{上升段} & \tau/\tau_1=(s/s_1)^\alpha \quad (s\leq s_1); \\ \text{软化段} & \tau/\tau_1=1-p(s/s_1-1) \quad (s_1\leq s\leq s_3); \\ \text{残余应力段} & \tau=\tau_3 \quad (s>s_3), \end{cases} \tag{7}$$

式中: $\tau_3$ 为摩擦分量.

在改进的BPE模型中,有3个参数: $\alpha, p, \tau_3$ .参数 $\alpha$ 可由 $\tau-s$ 模型曲线上升段下的面积 $A_{\tau 1}$ 等于实际曲线上上升段下的面积得到

$$A_{\tau 1}=\int_0^{s_1}\tau(s)ds=\int_0^{s_1}\tau_1\cdot\left(\frac{s}{s_1}\right)^\alpha ds=\frac{\tau_1\cdot s_1}{1+\alpha}, \tag{8}$$

由式(8)得

$$\alpha=\frac{\tau_m\cdot s_m}{A_{\tau 1}}-1. \tag{9}$$

参数 $p$ 是在软化段范围内,由试验曲线下的面积与模型曲线下的面积相等得到.

### 2.3 Malvar 模型<sup>[4]</sup>

Malvar (1994)通过大量不同外形的纤维聚合

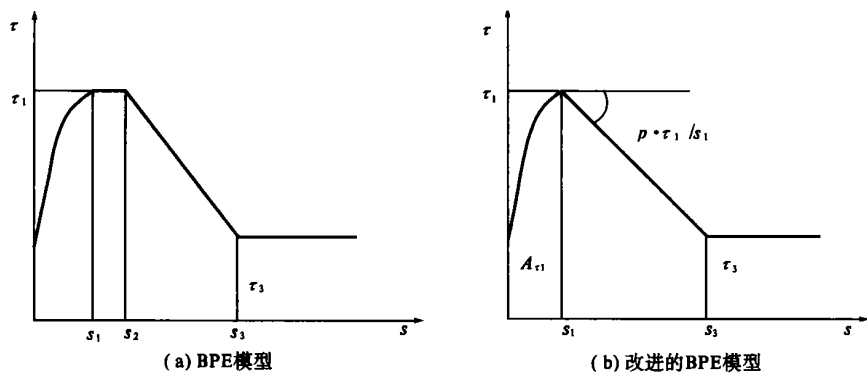


图 2 BPE 和改进的 BPE 粘结滑移本构关系模型

Fig. 2 The BPE and improved BPE constitutive relation model for bond and slip

物筋与混凝土的粘结试验研究,给出了单一曲线的  $\tau$ — $s$  本构关系模型.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.根据试验结果,Malvar 得出的  $\tau$ — $s$  本构关系模型表达为

$$\frac{\tau}{\tau_m} = \frac{F(s/s_m) + (G-1)(s/s_m)^2}{1 + (F-2)(s/s_m) + G(s/s_m)^2}. \quad (10)$$

式中:  $\tau_m, s_m$  为峰值粘结应力及相应的滑移;  $F, G$  是拟合试验  $\tau$ — $s$  曲线得出的常数.

对于给定的侧限压力  $\sigma$ , Malvar 给出了  $\tau_m, s_m$  的估计值,由下式计算:

$$\begin{cases} \tau_m = A + B(1 - \exp\{-C\sigma/f_t\}); \\ f_t = D + E\sigma. \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\sigma$  是轴对称的侧限径向压力;  $f_t$  是混凝土抗拉强度;  $A, B, C, D, E$  分别是常量,根据筋的类型由试验确定.

2.4 CMR 模型<sup>[3]</sup>

由于大多数结构计算问题仅考虑使用阶段,只需  $\tau$ — $s$  上升段曲线( $s \leq s_m$ )较精确的模型就可以了,因此 Cosenza et al<sup>[3]</sup>(1995)给出了曲线上上升段的一种新模型,表示为

$$\tau/\tau_m = (1 - \exp\{-s/s_r\})^\beta, \quad (12)$$

式中:  $\tau_m$  是峰值粘结应力;  $s_r, \beta$  是根据试验曲线拟合得到的参数.

2.5 连续曲线模型

观察式(6)、式(7)、式(10)、式(12)可见,BPE 模型、改进的 BPE 模型和 CMR 模型的初始斜率( $s=0$ 时的斜率)为无穷大,这与粘结的物理现象相吻合,但 BPE 模型和改进的 BPE 模型在峰值点不是光滑连续,CMR 模型还没有下降段. Malvar 模型虽然光滑连续,但初始斜率等于  $F \cdot \tau_m/s_m$ ,而不是无穷大.因此,上述这些模型均不能同时满足物理概念明确、光滑连续等要求.本文把纤维聚合

物筋混凝土的粘结滑移关系简化为图 3 所示的数学模型.该模型有三个关键点  $O, C$  和  $E$ , 模型曲线必须包含这些点的物理参数,即:

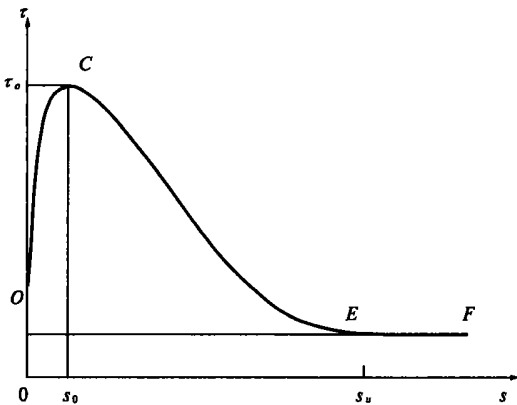


图 3 粘结滑移的连续曲线模型

Fig. 3 The sequent curve model for bond and slip

(1) 在  $s=0$  处,有  $\tau=0$  和  $\frac{d\tau}{ds}=\infty$ ;

(2) 在  $s=s_0$  处,有  $\tau=\tau_0$  和  $\frac{d\tau}{ds}=0$ ;

(3) 在  $s=s_u$  处,有  $\tau=\tau_u$  和  $\frac{d\tau}{ds}=0$ .

满足条件(1)、(2)的上升段  $OC(0 \leq s \leq s_0)$  取为

$$\frac{\tau}{\tau_1} = 2 \sqrt{\frac{s}{s_0} - \frac{s}{s_0}}; \quad (13a)$$

满足条件(2)、(3)的下降段  $CE(s_0 \leq s \leq s_u)$  取为

$$\tau = \tau_0 \frac{(s_u - s)^2 (2s + s_u - 3s_0)}{(s_u - s_0)^3} + \tau_u \frac{(s - s_0)^2 (3s_u - 2s - s_0)}{(s_u - s_0)^3}. \quad (13b)$$

式(13)物理概念明确,形式简单实用,仅包含 4 个参数  $s_0, \tau_0, s_u, \tau_u$ . 由式(13b)得曲线下降段的二阶导数为

$$\frac{d^2\tau}{ds^2} = \frac{6(\tau_u - \tau_0)}{(s_u - s_0)^3} [(s_u - s) - (s - s_0)], \quad (14)$$

令 $\frac{d^2\tau}{ds^2}=0$ , 得到反弯点的滑移 $s_d=\frac{1}{2}(s_0-s_u)$ . 将 $s_d$ 代入式(13b), 即得到反弯点的剪应力 $\tau_u=\frac{1}{2}\cdot(\tau_0-\tau_u)$ . 因有

$$s_u=2s_d-s_0, \quad \tau_u=2\tau_d-\tau_0. \quad (15)$$

### 3 纤维聚合物筋锚固长度的计算公式

纤维聚合物筋与混凝土间的粘结应力, 按其作用性质可以分为两类: 一是锚固粘结应力. 如纤维聚合物筋伸入支座, 或纤维聚合物筋在跨中切断, 均必须延伸一定长度. 通过这段长度上粘结应力的积累, 才能在纤维聚合物筋中建立起所需的拉力, 否则在纤维聚合物筋未达到抗拉强度之前发生锚固破坏. 粘结性能越好, 所需的锚固长度越短. 二是裂缝间的局部粘结应力. 裂缝间粘结应力的大小反映受拉混凝土参与工作的程度, 对构件的刚度及裂缝有较大的影响.

试验研究表明<sup>[1,3]</sup>, 影响纤维聚合物筋与混凝土粘结性能的因素包括破坏形式、混凝土强度、锚固长度、纤维聚合物筋直径、混凝土浇筑深度和方向、环境条件等. 由于影响因素的复杂性, 到目前为止已提出的锚固长度的计算公式难以统一, 还需要进一步完善.

据文献[2]报道, Peimann 在 1987 年和 1991 年用 2 号筋进行了 4 次拔出试验, 3 号筋进行了 19 次、4 号筋进行了 21 次试验. 对玻璃纤维聚合物筋, 建议锚固长度可偏安全地由下式计算:

$$l_d=0.024\frac{f_uA_b}{\sqrt{f_c}}; \quad (16a)$$

对于 kevlar 49 纤维聚合物筋有

$$l_d=0.026\frac{f_uA_b}{\sqrt{f_c}}. \quad (16b)$$

式中:  $l_d$  是锚固长度, mm;  $f_u$  是纤维聚合物筋的极限强度, MPa;  $A_b$  是纤维聚合物筋的截面面积, mm<sup>2</sup>;  $f_c$  是混凝土的抗压强度, MPa.

Fasa 和 Gangkiao 通过悬臂梁和拔出试件的粘结试验, 研究了纤维聚合物筋的粘结性能. 结果表明纤维聚合筋的基本锚固长度可用下式计算<sup>[9]</sup>:

$$l_{db}=0.028\frac{Af_y}{\sqrt{f_c}}. \quad (17)$$

式中:  $l_{db}$  是基本锚固长度, mm;  $f_y$  是纤维聚合物筋有效的屈服强度, MPa, 其值取为纤维聚合物筋极限强度的 80%;  $f_c$  是混凝土的抗压强度, 不超过 69 MPa.

Chaallal 和 Benmokrane<sup>[9]</sup> 进行了拔出试验, 评估玻璃纤维聚合物筋与混凝土的粘结性能、以及玻璃纤维聚合物筋在普通强度混凝土(NSC) 和高强度混凝土(HSC) 中的埋长. 对于 NSC 和 HSC, 他们的结论是锚固长度可以近似取为纤维聚合物筋直径的 20 倍.

Dani<sup>[7]</sup> 通过 30 根混凝土梁的试验, 研究纤维聚合物筋与混凝土的粘结强度. 结果表明 203 mm 的锚固长度对达到 4 号筋的极限强度是足够的. 假如沿着试件全长范围内配置剪切箍筋, 大于 475 mm 的锚固长度可以使 6 号筋达到极限强度.

Ehsani et al<sup>[7]</sup> 制作并进行了 102 个试件在单静力荷载下的试验. 包括 48 根梁试件、18 根拉拔试件和 36 根带弯钩的纤维聚合物筋试件. 研究中包括的变量有混凝土抗压强度、埋长、混凝土保护层厚度、玻璃纤维聚合物(GFRP) 筋直径、混凝土浇筑深度、曲率半径和尾长. 基于试验分析, 他们给出的 GFRP 筋基本锚固长度的表达式如下:

对于直筋  $l_{db}=0.022 Af_y/\sqrt{f_c}$ ; (18a)

$$l_{db}=0.0508df_y, \quad (18b)$$

对于带弯钩筋  $l_{hb}=152 d_b/\sqrt{f_c}$ . (18c)

式中:  $l_{db}$  是直筋的基本锚固长度, mm;  $A_b$  是 GFRP 筋的名义截面面积, mm<sup>2</sup>;  $f_y$  是 GFRP 筋的抗拉强度, MPa;  $f_c$  是混凝土的圆柱体抗压强度, MPa;  $d_b$  是 GFRP 筋的直径, mm.

锚固长度 $l_d$  是基本锚固长度 $l_{db}$  和考虑不同影响因素(如: 顶部筋修正系数、保护层修正系数)的一系列系数的乘积. 对于直筋, 锚固长度 $l_d$  由式(18a) 计算得到的顶部 GFRP 筋基本锚固长度 $l_{db}$  乘以顶部筋修正系数 1.3; 对混凝土保护层厚度小于等于一倍筋直径, 还须乘以修正系数 1.5, 且其值不应小于式(18b) 得到的结果, 其最小锚固长度为 381 mm.

对于 GFRP 弯筋, 当屈服强度高于 517 MPa, 锚固长度应由式(18c) 乘以系数 $f_y/517$ , 而对于混凝土保护层厚度较大的情况下, 锚固长度应由式(18c) 乘以系数 0.7, 最后结果还不应小于 8 倍的 GFRP 弯筋直径.

上述锚固长度的计算式中, 在纤维聚合物筋的抗拉强度以及有关系数的取值等方面还未形成统一的看法, 有必要对纤维聚合物筋的埋长进行系统的研究. 因此, 作者曾对纤维聚合物筋与混凝土粘结性能的试验结果进行了综合分析<sup>[9]</sup>, 比较了纤维聚合物筋混凝土与钢筋混凝土的粘结性能, 分析了纤维聚合物筋与混凝土之间的应力传

递机理,提出的可用于指导设计的计算纤维聚合物筋基本锚固长度的公式为

$$l_{db}=K_1\frac{A_f f_{fu}}{\sqrt{f_c}};$$

( 1a)

$$l_{db}=K_2 d_f f_{fu}.$$

( 1b)

式中: $l_{db}$  是基本锚固长度,mm; $A_f$  是纤维聚合物筋的截面面积,mm<sup>2</sup>; $d_b$  是纤维聚合物筋的直径,mm; $f_{fu}$  是纤维聚合物筋的极限拉伸强度,MPa; $f_c$  是混凝土的抗压强度,MPa; $K_1$  和  $K_2$  是反映纤维聚合物筋的类型和表面形状对粘结性能影响的系数,它们应根据不同的纤维聚合物筋与混凝土的粘结试验确定. $K_1$  可以按照纤维聚合物筋的类型取为 0.002~0.006,或偏保守和安全地取为 0.006, $K_2=0.015$ .

如上所述,锚固长度 $l_d$  是基本锚固长度 $l_{db}$  和考虑不同影响因素的一系列系数的乘积.因此,建议由式( 1a) 计算得到的纤维聚合物筋的基本锚固长度 $l_{db}$  乘以顶部筋修正系数 1.3 和混凝土保护层厚度小于等于一倍直径时的修正系数 1.5,其计算值必须与式( 1b) 得到的结果比较,取其中的较大值.此外,考虑到纤维聚合物筋与混凝土的粘结强度较小,建议最小锚固长度选择 20 $d_b$  和 381 mm 中的较大值.

4 结论

( 1) 纤维聚合物筋与混凝土的连续曲线型粘结滑移本构模型综合了其它模型的特点,物理概念清楚、形式简单.

( 2) 纤维聚合物筋与混凝土的粘结强度和钢筋与混凝土的粘结强度相似,一般由化学胶结力、摩擦力、机械咬合力等几部分组成,其锚固长度是基本锚固长度和考虑不同影响因素的一系列系数的乘积.

参考文献:

[ 1] 高丹盈. 纤维聚合物筋混凝土的粘结机理及锚固长度的计算方法[J] .水利学报,2000,( 11) :70—78.

[ 2] COSENZA E, MANFREDI G, REALFONZO R .Behavior and modeling of bond of FRP rebars to concrete[J] .Journal of Composites for Construction ,1997 ;40—51.

[ 3] ALUNNO ROSSETT V, GALEOTA D .GLAMMATTED M M .Local bond stress —slip relationships of glass fibre reinforced plastic bars embedded in concrete[J] . Materials and Structures ,1995,( 28) :340—344.

[ 4] MALVAR J .Tensile and pond properties of GFRP reinforcing bars[J] .ACI Materials Journal ,1995,92( 3) :54—59.

[ 5] LEES J M .BURGOYNE C J .Transfer bond stresses generated between FRP tendons and concrete[J] . Magazine of Concrete Research ,1999,51( 4) :229—239.

[ 6] CHAALLAL O .BENMOKRANE .Pullout and bond of glass —fibre rods embedded in concrete and cement grout[J] . Materials and Structures ,1993,( 26) :167—175.

[ 7] EHSANI M R, SAADATMANESH H .TAO S .Design recommendations for bond of GFRP rebars to concrete[J] . Journal of Structural Engineering ,1996;247—254.

[ 8] ABRISHAM H .MITCHELL denis .Analysis of bond stress distributions in pullout specimens[J] .Journal of Structural Engineering ,1996;255—261.

Fundamental Problems on Bond Behavior between Fiber Reinforced Polymer (FRP) Rebar and Concrete

GAO Dan ying , XIE Jing jing , LI Chen chen

( College of Environmental & Hydraulic Engineering ,Zhengzhou University , Zhengzhou 450002,China )

**Abstract :** The difference between the behavior of fiber reinforced polymer bar (FRP) and steel reinforcement makes the obvious difference between of the bond behavior the concrete reinforced with FRP and the concrete reinforced with steel reinforcement .According to the mechanism of force transference between FRP bars and concrete ,this paper discusses the relationship among bond stress ,the stress of FRP bar and embedment length .The basic equations for the bond calculation of FRP reinforced concrete are established .Based on the summary of the existent constitutive models for bond slip relation between FRP and concrete at home and abroad ,the smooth curve model for bond and slip relation is presented .The model based on the three key points on the bond —slip curve is obvious in physical idea and smoothly sequent . Finally ,the calculations of bond length are discussed .

**Key words :** fiber reinforced polymer (FRP) rebar ; concrete ; bond ; slip