

# NSM-CFRP 混凝土加固界面应力理论解析

童谷生, 胡宗棋, 赖泽坤

(华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

**摘 要** 目的 研究内嵌式碳纤维(NSM-CFRP)加固混凝土粘结界面的脱粘机理, 并且预测界面的剥离强度. 方法 以微元理论为基础, 建立了 NSM-CFRP 与固化环氧树脂胶层及混凝土粘结界面应力的控制方程. 通过设定的粘接应力-滑移关系, 对界面失效全过程进行了分析. CFRP 与固化环氧树脂胶层及混凝土粘结界面的受力破坏过程划分为 3 个阶段: 弹性阶段、弹性软化阶段、软化脱粘阶段. 对 4 组拉剪试验极限承载力的试验值与拟合后的计算值进行比较. 结果 给出了 FRP-混凝土界面剪应力、相对位移(滑移量)表达式以及载荷与相对位移关系. 不同粘结长度得到的极限承载力解析解与拉剪试验得到的试验值进行对比吻合较好, 误差在 10% 以内. 结论 得到了计算剥离强度的表达式, 极限剪应力和极限滑移量与材料的性能以及其几何因素有关, 需要结合试验数据进行拟合.

**关键词** NSM-CFRP; 粘结应力; 滑移; 极限承载力; 理论解

中图分类号 TU375

文献标志码 A

## Theoretical Analysis of Interface Stress in NSM-CFRP Concrete Reinforcement

TONG Gusheng, HU Zongqi, LAI Zekun

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang, China, 330031)

**Abstract:** In order to study near surface-mounted (NSM-CFRP) concrete bonding interface debonding mechanism and prediction of the interfacial peel strength, the control equation of bonding interface stress for CFRP plate and the cured epoxy resin layer and concrete is established based on the theory of infinitesimal. By setting the bond stress-slip relationship, the whole process of the failure of the interface have been analyzed. The failure process of bonding interface for CFRP and cured epoxy resin layer and concrete can be divided into three stages: elastic stage, elastic softening stage, softening debonding stage. Based on the interface control equation, the expressions of the bond slip and shear stress and the corresponding load and displacement (relative slip) of each stage were established through comparison the experimental results of the ultimate bearing capacity of the four group tensile shear tests with the calculated values. The theoretical calculation results are

收稿日期: 2016-07-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(11242006, 11462005)

作者简介: 童谷生(1962—), 男, 教授, 博士, 主要从事结构强度与加固设计理论研究.

in good agreement with the experimental results, and the error is less than 10%. The expression for calculating the peel strength is obtained. Limiting shear stress and ultimate slip amount are related to material properties and the geometrical factors and need to makes the fitting with the experiment data. The results show that, theoretical analysis has good precision.

**Key words:** NSM-CFRP; bonding stress; slip; ultimate bearing capacity; theoretical results

FRP 材料由于其轻质高强且易于加工的特性,在土木加固行业中被广泛采用. 利用 FRP 复合材料加固旧有结构或者直接应用于新建结构中时,常用的方法是 FRP 片(板)材粘贴在待加固部位的表面,也可将 FRP 筋(板材)嵌于加固部位表面附近的混凝土保护层内并用粘结剂密封起来<sup>[1]</sup>,称之为内嵌加固(NSM)<sup>[2]</sup>. 与外贴加固相比,内嵌加固方法由于 FRP 能够被包裹在混凝土保护层内,避免与外界直接接触而产生磨损,并且 FRP 材料被有效保护起来,从而提高了加固构件的耐火性和耐久性<sup>[3]</sup>. 此外内嵌加固法可以增加 FRP 材料与混凝土有效粘结面积,提高了 FRP 利用率. 因此,内嵌式加固方法明显优于外贴加固<sup>[4-9]</sup>. 目前只有少量研究通过推导假设、数值模拟以及试验得到了一些带有经验参数的分析与试验结果<sup>[10-15]</sup>,但能够计算 NSM - CFRP 混凝土界面滑移、剪应力和粘结强度精确解的方法仍然缺乏. 笔者将推导假设、数值模拟以及试验的成果相结合,引入了 YUAN H<sup>[13]</sup> 和 WU Z<sup>[15]</sup> 等人的 EB 数学模型,针对 NSM 的改良版<sup>[12]</sup>,以微元平衡及外贴的粘结 - 滑移的双线性界面本构关系为理论基础,对嵌入式加固模型的荷载加载过程的各个阶段进行了力学分析计算,并对推导作了更加详细的说明,列出了各阶段荷载位移的关系,并引入经验公式,利用图表归纳了极限承载力的一般计算方法,同时将获得的极限承载力计算值与试验值相对比,通过试验结果论证模型的有效性.

1 NSM - CFRP 加固混凝土结构  
微元理论解析

FRP - 混凝土界面粘结应力主要为剪应

力<sup>[16]</sup>. 界面受剪性能一直是 FRP - 混凝土界面力学性能研究领域的主要方向,而界面受剪性能一般通过面内剪切试验来表达. 单剪试验由于操作简单便易,受力状态明确,被广泛运用于面内剪切试验中<sup>[17]</sup>. 故笔者采用单剪试件对嵌入式界面进行分析.

图 1 为拉剪试验试件. 在混凝土表面中间开槽,槽宽度为  $w_g$ ,深度为  $d_g$ . 嵌入 CFRP 板条后再灌入环氧树脂胶粘结,板条与混凝土的粘接长度为  $L$ . 假设 CFRP 板沿荷载加载端为  $x$  轴,垂直  $x$  轴沿俯视图指向下方的为  $z$  轴,垂直  $x$  轴沿正视图指向上方的为  $y$  轴.

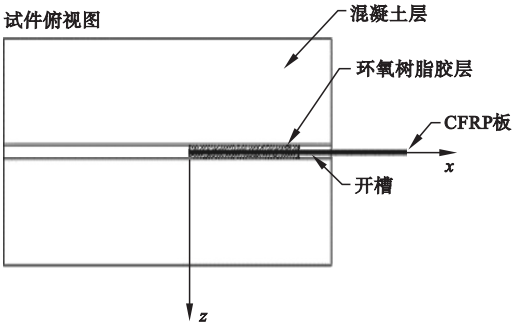


图 1 拉剪试件示意图

Fig. 1 Top view and section map of tensile shear test specimens

理论分析推导假定:①混凝土、FRP、粘结剂均各向同性材料;②混凝土、CFRP、粘结剂沿长度方向宽度、厚度保持不变;③混凝土、CFRP 上,轴应力均匀分布,忽略可能出现的偏心弯矩;④拉剪试验中界面只受剪应力作用且沿粘结长度方向不均匀分布.

根据试件的受力情况选取微元体如图 2 所示. 对混凝土试块的两端用夹具固定,避免加载过程中产生沿 FRP 轴向、水平以及竖向的位移. 使用拉伸试验机对 CFRP 的一端进

行拉拔,缓慢施加荷载直到 CFRP 从混凝土块上完全剥离即测得 CFRP - 混凝土界面的极限荷载值  $P_{IC}$ .

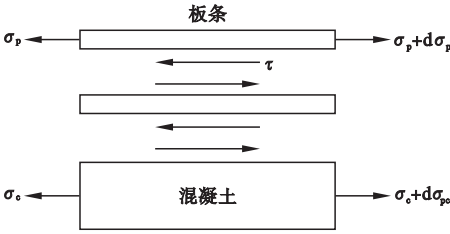


图2 微元体

Fig. 2 Element

基于 YUAN H<sup>[13]</sup> 和 WU Z<sup>[15]</sup> 对外贴式 FRP 加固技术研究得到的成果, NSM - CFRP 混凝土界面的微元体平衡方程:

$$\frac{d\sigma_p}{dx} = \frac{\tau L_{per}}{b_p t_p}, \quad (1)$$

$$\sigma_p b_p t_p + \sigma_c b_c t_c = 0. \quad (2)$$

式中:  $t_p$  为 CFRP 厚度;  $t_c$  为混凝土块厚度;  $b_p$  为 CFRP 宽度;  $b_c$  为混凝土块宽度;  $\sigma_p$  为板条轴向应力;  $\sigma_c$  为混凝土的轴向应力;  $\tau$  为板条与混凝土界面的剪切应力;  $x$  为距离自由端的距离;  $L_{per}$  为失效面边界长度, 在外贴加固试件中失效面边界长度等于板条的宽度  $b_p$ , 在内嵌式加固中  $L_{per} = w_g + 2d_g$ ;  $A_p$  为板条横截面面积;  $A_c$  为混凝土横截面面积 ( $A_p = b_p t_p$ ,  $A_c = b_c t_c$ ).

本构方程表达式为

$$\tau = f(\delta), \quad (3)$$

$$\sigma_p / E_p = du_p / dx, \quad (4)$$

$$\sigma_c / E_c = du_c / dx. \quad (5)$$

式中:  $\delta$  为 CFRP 板与混凝土块的相对滑移;  $u_p$  为板条界面位移;  $u_c$  为混凝土界面位移;  $E_p$  为板条弹性模量;  $E_c$  为混凝土弹性模量.

界面滑移表达式为

$$\delta = u_p - u_c. \quad (6)$$

联立(1)到(6)式整理可得:

$$\frac{d^2 \delta}{dx^2} - \frac{2G_f}{\tau_f^2} \lambda^2 \tau = 0. \quad (7)$$

式中:  $\lambda^2 = \frac{\tau_f^2 L_{per}}{2G_f} \left( \frac{1}{E_p A_p} + \frac{1}{E_p A_p} \right)$ ;  $\tau_f$  为峰值剪

应力;  $G_f$  为界面破坏能.

局部粘结 - 滑移本构关系  $\tau = f(\delta)$  确定时, 只需代入边界条件即可获得方程(7)一般形式的解.

由(2)、(4)、(5)、(6)式可以得:

$$\sigma_p = E_p \left( \frac{d\delta}{dx} - \frac{P}{E_c A_c} \right). \quad (8)$$

式中:  $P$  为沿板条方向外荷载,  $P = \sigma_p A_p$ .

为得到界面各阶段的应力 - 滑移关系, 采用 Monti 等<sup>[18]</sup> 提出的双 1 线性模型来描述界面的粘结本构关系. Monti 给出的解析法表达式为

$$f(\sigma) = \begin{cases} \tau_f (\delta / \delta_1), & 0 \leq \delta \leq \delta_1; \\ \tau_f \left[ \frac{(\delta_f - \delta)}{\delta_f} - \delta_1 \right], & \delta_1 \leq \delta \leq \delta_f; \\ 0, & \delta > \delta_f. \end{cases} \quad (9)$$

式中: 剥离承载力  $\tau(x) = f(\sigma)$ ;  $\delta_f$  为极限滑移量,  $\delta_1 = 2.5 \tau_f (t_a / E_a + 50 / E_c)$ ,  $\delta_1$  为达峰值剪切应力时对应滑移量;  $\tau_f$  为峰值剪切应力.

相应的局部剪切滑移曲线如图 3 所示, 横坐标轴为 FRP 板条与混凝土试块之间的相对滑移量, 纵坐标轴为对应的剪切应力.

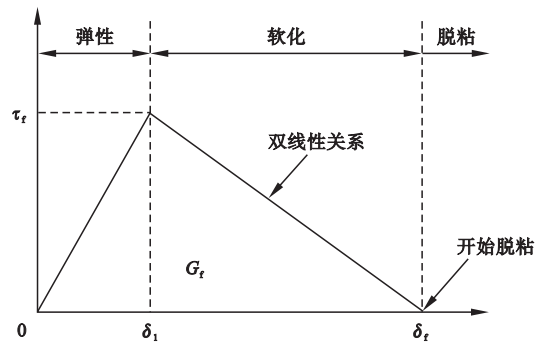


图3 局部剪切滑移曲线

Fig. 3 Local shear slip curve

式(7)中界面破坏能  $G_f$  就是图中曲线围成的面积, 所以有  $G_f = \delta_f \tau_f / 2$ . 整个被定义的曲线分两个阶段: 当  $\delta \in [0, \delta_1]$  时界面处于弹性阶段; 当  $\delta \in [\delta_1, \delta_f]$  时界面处于弹性软化阶段, 当  $\delta > \delta_f$  时界面将发生剥离. 当处于不同的阶段时, 方程(9)就会有不同的形

式的解答.

## 2 界面受力全过程分析

### 2.1 弹性阶段

将 Monti 公式代入式(7)中有:

$$\begin{cases} \frac{d^2\delta}{dx^2} - \lambda_1^2\delta = 0, 0 \leq \delta \leq \delta_1; \\ \frac{d^2\delta}{dx^2} + \lambda_2^2\delta = \lambda_2^2\delta_f, \delta_1 \leq \delta \leq \delta_f. \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{当 } \lambda_1^2 = \frac{2\lambda^2 G_f}{\delta_1 \tau_f}, \lambda_2^2 = \frac{2\lambda^2 G_f}{(\delta_f - \delta_1) \tau_f}. \text{ 当 } 0 \leq$$

$\delta \leq \delta_1$  时即处于弹性阶段,此时  $0 \leq \tau \leq \tau_f$  如图 3 所示. 解式(10)第 1 个方程并代入下列边界条件.

$$\begin{cases} \sigma_p = 0, & x = 0; \\ \sigma_p = \frac{P}{A_p}, & x = L. \end{cases} \quad (11)$$

根据边界条件求出待定系数,可得到如下滑移  $\delta$ 、界面剪切应力  $\tau$ 、及板条内的轴向应力  $\sigma_p$  的形式:

$$\delta(x) = \frac{P\beta_0}{A_p\lambda_1} \frac{\cosh(\lambda_1 x)}{\sinh(\lambda_1 L)}, \quad (12)$$

$$\tau(x) = \frac{\tau_f}{\delta_1} \frac{P\beta_0}{A_p\lambda_1} \frac{\cosh(\lambda_1 x)}{\sinh(\lambda_1 L)}. \quad (13)$$

$$\text{式中: } \beta_0 = A_p \left( \frac{1}{E_p A_p} + \frac{1}{E_c A_c} \right).$$

根据式(8)及式(11)得:

$$\sigma_p = \frac{P}{A_p} \frac{\sinh(\lambda_1 x)}{\sinh(\lambda_1 L)} + \frac{PE_p}{E_c A_c} \times \left[ \frac{\sinh(\lambda_1 x)}{\sinh(\lambda_1 L)} - 1 \right]. \quad (14)$$

将  $x=L$  代入式(12)可得加载端载荷位移关系:

$$\Delta_L = \delta(L) = \frac{P\beta_0}{A_p\lambda_1} \coth(\lambda_1 L). \quad (15)$$

当  $\Delta_L = \delta_1$  时弹性阶段结束.

### 2.2 弹性软化阶段

当  $\delta_1 \leq \delta \leq \delta_f$  时,界面粘结处开始软化进入弹性软化阶段,剪应力达到峰值后开始逐渐下降,见图 3 的  $\delta_1 \leq \delta \leq \delta_f$  段<sup>[12]</sup>. 在  $\delta_1$  附近,式

(10)第 2 个方程解可分为两部分:当  $\delta < \delta_1$ , 设  $\alpha$  为软化区界面长度,此时弹性粘结长度为  $(L - a)$ , 因此滑移  $\delta$  与界面剪切应力  $\tau$  以及板条内轴向应力的形式如下:

$$\delta(x) = \frac{P\beta_0}{A_p\lambda_1} \frac{\cosh(\lambda_1 x)}{\sinh[\lambda_1(L - \alpha)]}, \quad (16)$$

$$\delta(x) = \frac{\tau_f}{\delta_1} \frac{P\beta_0}{A_p\lambda_1} \frac{\cosh(\lambda_1 x)}{\sinh[\lambda_1(L - \alpha)]}. \quad (17)$$

当  $\delta \geq \delta_1$ , 根据如下边界条件:

$$\begin{cases} \sigma_p = 0, & x = 0; \\ \delta = \delta_1, \tau = \tau_f, & x = L - \alpha; \\ \sigma_p = P/A_p, & x = L. \end{cases} \quad (18)$$

解式(10)第二个方程,根据边界条件求出未知系数,由此可得:

$$\delta(x) = \frac{\delta_f - \delta_1}{\lambda_1} \{ \lambda_2 \tanh[\lambda_1(L - \alpha)] \times \sin[\lambda_2(x - L + \alpha)] - \lambda_1 \cos[\lambda_2(x - L + a)] \} + \delta_f, \quad (19)$$

$$\tau(x) = \tau_f \lambda_1 \{ \lambda_2 \tanh[\lambda_1(L - \alpha)] \times \sin[\lambda_2(x - L + \alpha)] - \lambda_1 \cos[\lambda_2(x - L + a)] \}, \quad (20)$$

$$\sigma_p(x) = \frac{\tau_f \beta_1}{\lambda_1 \lambda_2} \{ \tanh[\lambda_1(L - \alpha)] \times \cos[\lambda_2(x - L + a)] - \lambda_1 \sin[\lambda_2(x - L + a)] \}. \quad (21)$$

由  $P = \sigma_p|_{x=L} A_p$  可得:

$$P = \frac{\tau_f \beta_1 A_p}{\lambda_1 \lambda_2} \{ \lambda_2 \tanh[\lambda_1(L - \alpha)] \times \cos(\lambda_2 \alpha) + \lambda_1 \sin(\lambda_2 \alpha) \}. \quad (22)$$

其中  $\beta_1 = L_{\text{per}}/A_p$ , 上式对  $a$  求导等于 0 时,  $P$  达到最大值  $P_{IC}$ . 因此,

$$\lambda_1 \tanh[\lambda_1(L - \alpha)] - \lambda_2 \tan(\lambda_2 \alpha) = 0. \quad (23)$$

当  $x=L$  时,可得到加载端的位移:

$$\delta = \frac{\delta_f - \delta_1}{\lambda_1} \{ \lambda_2 \tanh[\lambda_1(L - \alpha)] \sin(\lambda_2 \alpha) - \lambda_1 \cos(\lambda_2 \alpha) \} + \delta_f. \quad (24)$$

加载端的载荷位移关系即为式(22)~式(24).

当粘结长度达到某一值后继续增加其极限荷载值  $P_{IC}$  几乎不再改变,该粘结长度值即

称为有效粘结长度  $L_e$ <sup>[19]</sup>. 在粘结长度达到这一量值时, 剪应力提供的承载荷载值至少达到无限粘结长度对应的承载荷载值的 97%<sup>[15]</sup>. 由式(23)可以得:

$$L_e = \alpha + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{\lambda_1 + \lambda_2 \tan(\lambda_2 a)}{\lambda_1 - \lambda_2 \tan(\lambda_2 a)}. \quad (25)$$

其中  $\alpha$  根据文献[12]确定.

$$\alpha = \frac{1}{\lambda_2} \arcsin \left( 0.97 \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right). \quad (26)$$

2.3 脱粘阶段始端

软化区域充分发展, 脱粘由一处传播到整个界面, 并伴随着宏观裂纹产生. 此时:  $\delta = \delta_f, x = L$ . 将其代入位移表达式式(19)得:

$$\alpha = \frac{1}{\lambda_2} \arctan \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right). \quad (27)$$

此时软化区界面长度等于脱粘开始阶段软化区域完全发展所需的板条长度  $\alpha_d$ , 所以,  $\alpha = \alpha_d$ . 软化区域完全发展时, 界面破坏能达到最大, 将式(27)代入式(21), 由于  $P_{IC} = \sigma_p A_p$ , 得到极限荷载值为

$$P_{IC} = \frac{\lambda_1 \tau_f \delta_f L_{per}}{\lambda_2^2 (\delta_f - \delta_1)} \tanh[\lambda_1 (L - \alpha)] \times \cos(\lambda_2 \alpha). \quad (28)$$

设已发生剥离的长度值为  $d$ , 那么相应的粘结长度为  $(L - d)$ , 式(19)到式(22)的解答仍然适用<sup>[20]</sup>. 在  $x = L - d$  处, 界面的剪切应力为零, 因此由式(20)可得:

$$\lambda_2 \tanh[\lambda_1 (L - d - a)] = \lambda_1 \cot(\lambda_2 \alpha). \quad (29)$$

将式(29)代入(22)式(将  $L$  替换成  $L - d$ )得:

$$P = \frac{\tau_f \beta_1 A_p}{\lambda_2 \sin(\lambda_2 \alpha)}. \quad (30)$$

2.4 软化脱粘阶段

在此阶段  $\delta > \delta_f$ , 沿界面粘结长度的剪应力峰值沿着板条轴向移动, 峰值经过处板条发生脱粘. 当脱粘开始时, 外荷载的做功大部分转化成界面的断裂能, 即使试验机依然持

续施加荷载但 FRP 板的内力不升反降. 此阶段的解分两部分:

(1)  $0 < x < a_u$ , 界面处在软化阶段, 界面应力 - 应变关系为非弹性.  $\alpha_u$  为软化部分的最大长度. 根据式(27)可以得到软化部分的最大长度  $\alpha_u = \pi/2\lambda_2$ . 相应的位移、剪应力表达式<sup>[2]</sup>:

$$\delta(x) = \delta_f - (\delta_f - \delta_1) \cos(\lambda_2 x), \quad (31)$$

$$\tau(x) = -\tau_f \cos(\lambda_2 x). \quad (32)$$

(2) 当  $x > a_u$ , 界面进入脱粘区

$$\delta(x) = (\delta_f - \delta_1) \lambda_2 (x - \alpha_u) + \delta_f, \quad (33)$$

$$\tau(x) = 0. \quad (34)$$

3 试验验证分析

通过理论分析推导得到了粘结界面剪应力、滑移计算式以及极限承载力计算式, 为验证所选取模型的准确性, 笔者选取了文献[11]部分试验的极限承载力数据, 此外通过类似文献[11]的 NSM 加固试件剪切试验得到额外的 3 组数据, 采用极限承载力计算式(28)将所得计算值与相应的试验值作对比. 文献[11]的试验所采用的拉剪试件各部分材料性能和几何参数如表 1 所示.

表 1 材料与几何参数

Table 1 Material and geometric parameters

材料	编号	宽度/ mm	厚度/ mm	弹性模 量/GPa	抗压强 度/MPa
混凝土	1	300	180	31.52	30
	2	300	180	35.72	53
	3	300	180	34.7	33.4
FRP 板	1	10	1.22	161	—
	2	10	1.25	161	—
	3	15	1.26	161	—
胶层	1	—	10	1	—

注: “—”表示该材料的此项参数不计入考虑.

制作 FRP - 混凝土试件时, 在混凝土侧面中间开槽, 再嵌入 CFRP 板条, 进行密封处理后灌入环氧树脂胶粘结至完全固化, 完全制作好的拉剪试块如图 4 所示.



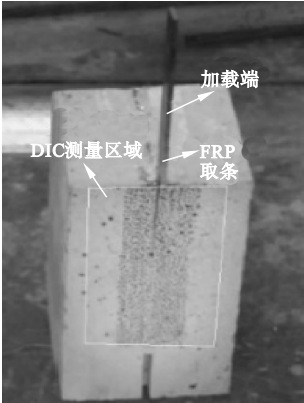


图 4 拉剪试块

Fig. 4 Tension shear block

双曲线模型中的极限剪应力和最大滑移量采用的表达式<sup>[11]</sup>为

$$\tau_f = 0.54 \sqrt{f_c} b_p^{0.4} t_p^{0.3}, \tag{35}$$

$$\delta_f = 0.78 (f_c^{0.27} / d_g^{0.3}). \tag{36}$$

中间参数、各阶段承载力及对应滑移量的计算过程如图 5 所示。

表 2 参数计算结果

Table 2 Parameter calculation result

$L_{per}/\text{mm}$	$\delta_2/\text{mm}$	$\delta_1/\text{mm}$	$\tau_f/\text{MPa}$	$\beta_0$	$\beta_1$	$\lambda_1$	$\lambda_2$
0.012 9	31	0.23	0.979	7.89	$6.19 \times 10^{-6}$	2.54	0.023 3

保持其他参数变量固定,以界面粘结长度  $L$  变量,按图 5 的求解方法获得到脱粘阶段末板条加载端的滑移和极限承载力(见表 3)。

图 6 为 FRP 板条粘结长度与拉拔试件的极限承载力的关系。含脱粘阶段末端加载滑移。

从图 6 可以看出,随着粘结长度的增加,极限承载力增加,在一段线性增加之后再呈增加衰减之势,逐渐趋向于  $P_{peak} = 23.8 \text{ kN}$ ,取载荷达到  $0.97P_{peak}$  时所对应的粘结长度值,即为有效粘结长度。此外,脱粘阶段末加载端的滑移会随着粘结长度的增加而增加,而极限荷载呈衰减增加趋势。

选取文献[11]中的试验得到的极限承载力数据(分为第Ⅰ组、第Ⅱ组、第Ⅲ组)和本文的 3 种试件(第Ⅳ组)的拉剪试验数据。

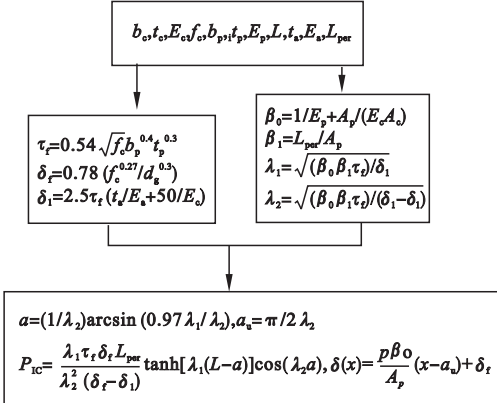


图 5 中间参数、各阶段承载力及对应滑移量的计算过程

Fig. 5 The calculation process of the intermediate parameters, the bearing capacity and the corresponding slip

选取表 1 中编号为 1 的混凝土和 FRP 板,将图 4 中涉及的材料参数代入到对应的表达式中并按照图中的步骤分部计算,得到的中间参数结果见表 2。

表 3 脱粘阶段末加载端滑移和极限承载力  
Table 3 The ultimate bearing capacity and the end loading slip at the end of the debonding stage

$L/\text{mm}$	$\delta(x)/\text{mm}$	$P_{IC}/\text{kN}$
100	0.780	12.59
110	0.877	16.12
120	0.973	18.69
130	1.069	20.45
140	1.165	21.63
150	1.260	22.39
160	1.357	22.88
170	1.454	23.19
180	1.549	23.38
190	1.646	23.50
200	1.740	23.58
210	1.838	23.64
220	1.922	23.68
230	2.020	23.70
240	2.116	23.72
250	2.212	23.73

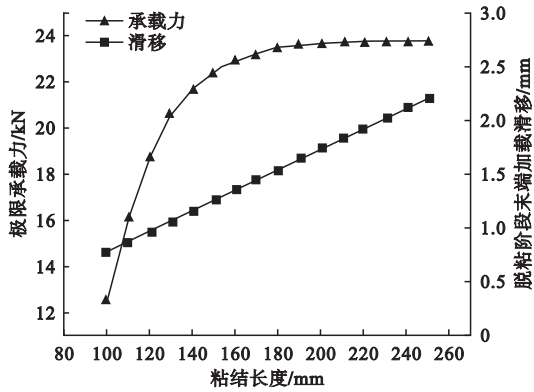


图6 粘结长度-极限承载力曲线

Fig. 6 Bond length-ultimate bearing capacity curve

图7为极限承载力计算值与试验值对比。图中编号30MPa-10C表示混凝土强度 $f_c=30.0$  MPa、板条宽度为10 mm的不同粘接长度下极限承载力的计算值,30MPa-10E为试验值,其他以此类推。

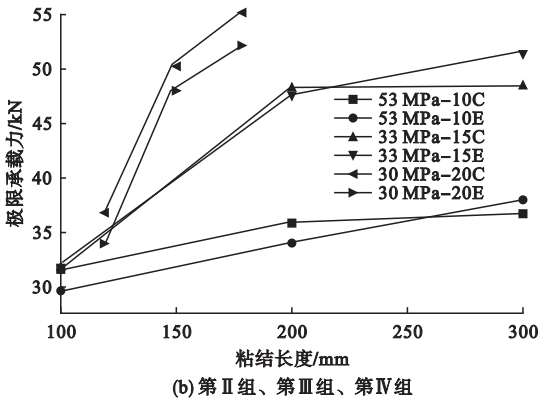
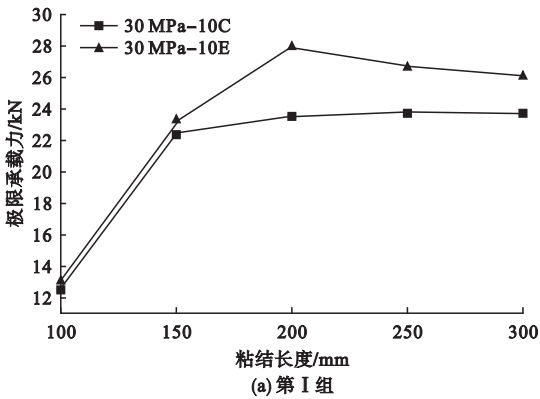


图7 极限承载力计算值与试验值对比图

Fig. 7 Comparison of calculated and experimental values of ultimate bearing capacity

比较第I组5个试件的极限荷载值,由图7(a)看出理论计算值比试验值偏小,可以得知计算值在此条件下是偏于安全的;由图7(b)最下方和最上方的两组曲线易知,第II组和第IV组的计算值比试验值略微偏大;对比图7(b)中间的两条曲线,可知第III组计算值略微偏小,且通过计算得到第II组、第III组的相差系数在7%以内,计算值与试验结果比较吻合。

## 4 结 论

(1)给出了FRP-混凝土界面剪应力、相对位移(滑移量)表达式以及载荷与相对位移关系。不同粘结长度得到的极限承载力解析解与拉剪试验得到的试验值进行对比吻合较好,误差在10%以内。

(2)得到了计算剥离强度的表达式,发现作为剥离强度公式中间参数的极限剪应力、极限滑移量与材料的性能和几何因素有关,其函数关系需要结合试验数据进行拟合。

## 参考文献

[1] 刘新. 表面内嵌FRP筋加固混凝土T形梁受弯性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2015.  
(LIU Xin. The surface of the embedded FRP reinforcement concrete T shape of beams[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2015.)

[2] 王勃, 李纪坤, 周柏成, 等. FRP内嵌式加固技术的研究进展[J]. 低温建筑技术, 2017, 39(2): 31-32.  
(WANG Bo, LI Jikun, ZHOU Bocheng, et al. The strengthening with near-surface mounted (NSM) FRP reinforcement[J]. Low temperature architecture technology, 2017, 39(2): 31-32.)

[3] 何禄源. 不同受力形式的表面内嵌FRP筋与混凝土界面粘结滑移性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2015.  
(HE Luyuan. Study on interfacial slip behavior of FRP steel bars and concrete interfaces under different stress forms[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2015.)

[4] 王兴国, 岳军辉. RC结构表层嵌入FRP加固技术研究概述[J]. 玻璃钢/复合材料, 2012(4): 124-128.

- (WANG Xingguo, YUE Junhui. Review of RC members strengthened with NSM FRP material [J]. Glass fiber reinforced plastics/composite, 2012(4):124-128.)
- [5] 丁亚红, 郝慧敏. 内嵌碳纤维筋加固钢筋混凝土梁可靠性研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(11):140-144.  
(DING Yahong, HAO Huimin. Reliability analysis of RC concrete beams strengthened with NSM CFRP tendons [J]. Industrial construction, 2012, 42(11):140-144.)
- [6] 王小伟, 朱冠霖, 朱虹. FRP 嵌入式加固混凝土结构研究进展[J]. 淮海工学院学报(自然科学版), 2015, 24(增刊1):294-298.  
(WANG Xiaowei, ZHU Guanlin, ZHU Hong. Research progress of concrete structure using FRP-NSM strengthening method [J]. Journal of Huaihai institute of technology (natural science edition), 2015, 24(S1):294-298.)
- [7] 罗志. 碳纤维板“嵌入式”加固钢筋混凝土少筋梁受弯性能试验研究[D]. 南昌:华东交通大学, 2012.  
(LUO Zhi. Experimental study on the bending performance of fews steels of reinforced concrete beams strengthened with near-surface mounted CFRP sheets [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2012.)
- [8] 梁玉国, 宋丽娟, 任水娜. 内嵌 CFRP 板加固钢筋混凝土梁试验研究[J]. 华北地震科学, 2013, 31(增刊):79-82.  
(LIANG Yuguo, SONG Lijuan, REN Shuina. Experimental study on reinforced concrete beams strengthened with NSM-CFRP plates [J]. North China earthquake sciences, 2013, 31(S):79-82.)
- [9] 王圣夫. FRP 嵌入式加固混凝土结构可靠度分析[D]. 长春:吉林建筑大学, 2015.  
(WANG Shengfu. Reliability analysis of FRP beam strengthened with NSM plate [D]. Changchun: Jilin Jianzhu University, 2015.)
- [10] CERONI F, PECCE M, BILOTTA A, et al. Bond behavior of FRP NSM systems in concrete elements[J]. Composites part b, 2012, 43(2):99-109.
- [11] SERACINO R, JONES N M, ALI M S M, et al. Bond strength of near-surface mounted FRP strip-to-concrete joints[J]. Journal of composites for construction, 2007, 11(4):401-409.
- [12] ALI M S M, OEHLERS D J, GRIFFITH M C, et al. Interfacial stress transfer of near surface-mounted FRP-to-concrete joints[J]. Engineering structures, 2008, 30(7):1861-1868.
- [13] YUAN H, TENG J G, SERACINO R, et al. Full-range behavior of FRP-to-concrete bonded joints[J]. Engineering structures, 2004, 26(5):553-565.
- [14] SERACINO R, RAIZALSAIFULNAZ M R, OEHLERS D J. Generic debonding resistance of EB and NSM plate-to-concrete joints[J]. Journal of composites for construction, 2007, 11(1):62-70.
- [15] WU Z S, YUAN H, NIU H D. Stress transfer and fracture in different kinds of adhesive joints [J]. Journal of engineering mechanics (ASCE) 2002, 128(5):562-73.
- [16] 彭晖, 高勇, 谢超, 等. FRP-混凝土界面粘结行为的参数影响研究[J]. 实验力学, 2014, 29(4):489-498.  
(PENG Hui, GAO Yong, XIE Chao, et al. On the influence of parameters on bonding behavior of FRP-concrete interface [J]. Journal of experimental mechanics, 2014, 29(4):489-498.)
- [17] 艾博雯. CFRP-混凝土界面特性试验研究[D]. 南昌:华东交通大学, 2016.  
(AI Bowen. Experimental study on interface characteristics between CFRP and concrete [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2016.)
- [18] MONTI G, RENZELI M, LUCIANI P. FRP adhesion in uncracked and cracked concrete zones [J]. Fibrevreinforced polymer reinforcement for concrete structures (FRPRCS-6), 2003, 1:183-192.
- [19] HOSSEINI A, MSTOFINEJAD D. Effective bond length of FRP-to-concrete adhesively-bonded joints; experimental evaluation of existing models [J]. International journal of adhesion & adhesives, 2014, 48:150-158.
- [20] 刘三星. FRP 加固混凝土界面问题研究[D]. 广州:暨南大学, 2013.  
(LIU Sanxing. Study on interface problems of FRP reinforced concrete structures [D]. Guangzhou: Jinan University, 2013.)