

HB-FRP 加固混凝土结构的 粘结滑移统一模型*

张峰¹, 徐向锋², 李术才¹

(1. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061;
2. 山东交通学院 土木工程系, 济南 250023)

摘要: 为了进一步简化 HB-FRP (hybrid bonding FRP) 加固技术的粘结滑移模型, 并基于先期研究的 HB-FRP 粘结滑移分区模型开展研究. 在假定 HB-FRP 加固技术的粘结滑移统一模型表达式的基础上, 推导了钢扣件部位的粘结应力分布系数. 将 HB-FRP 加固作用分为普通 FRP 粘结性能和钢扣件产生的粘结性能两部分, 依据能量方法, 推导了 FRP 张拉力与滑移量的表达式. 基于理论分析和数值求解, 研究了界面滑移量的分布特征. 基于模型试验测试结果, 研究了粘结滑移统一模型中的待定系数表达式. 研究结果表明: 建立的 HB-FRP 加固混凝土结构的粘结滑移统一模型能有效预测加固界面的剥离承载力及有效粘结长度.

关键词: 混凝土; 加固; 粘结滑移统一模型; HB-FRP; 剥离承载力; 有效粘结长度
中图分类号: TU375.02 **文献标志码:** A
doi: 10.3879/j.issn.1000-0887.2015.12.008

引 言

普通 FRP 粘贴技术已有大量的研究, 关于其粘结滑移本构方面已有不少的成果^[1-2]. FRP 加固梁^[3-4] 时容易发生剥离^[5-7]. 对该问题需要重点研究界面的粘结-滑移模型. 2008 年, 香港城市大学建筑系提出了一种新的粘贴技术^[8-10] (hybrid bonding FRP, 简称 HB-FRP, 见图 1), 该技术结合了 FRP 外贴法和机械锚固法. HB-FRP 的作用机理简要描述为: 当 FRP 产生滑移时, 其上等间距的钢扣件在 FRP 条带上作用正压力, 阻止 FRP 滑移, 实质上提高了界面粘结-滑移关系, 推迟了剥离破坏的发生. 关于 HB-FRP 的研究主要有抗弯加固性能^[11-14]、界面粘结性能^[15] 及抗剪性能^[16-17] 等.

Wu 等^[18] 根据室内 4 个模型试验的测试结果, 基于最优化方法, 分别进行了粘结滑移模型中待定参数的反演, 获得了 HB-FRP 的粘结滑移模型. 但是实际工程应用时, 如果每次都进行室内模型的测试, 然后开展参数反演, 则给工程应用带来很多不便. 张峰等^[19] 建立了多参数混凝土楔体剪切滑移模型. 但是所建立的混凝土楔体剪切滑移模型及钢钉销栓模型只能用于数

* 收稿日期: 2015-03-25; 修订日期: 2015-11-13
基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(51108249)
作者简介: 张峰(1978—), 男, 江苏泰州人, 副教授, 博士, 硕士生导师(通讯作者).
E-mail: zhangfeng2008@sdu.edu.cn).

值模拟,无法通过解析解推导 HB-FRP 的界面力学特性表达式.Wu 等^[9]对 HB-FRP 抗弯加固混凝土梁进行了数值模拟,对钢扣件部位的粘结滑移开展了多个接触面的模拟(包含钢扣件与 FRP,FRP 与混凝土等),但是数值模拟中的参数确定依然缺少试验验证.Yun 等^[10]对单个钢扣件作用下的疲劳破坏进行了定性描述.颜俊辉^[11]提出了剥离承载力与钢扣件个数的关系,考虑参数偏少.

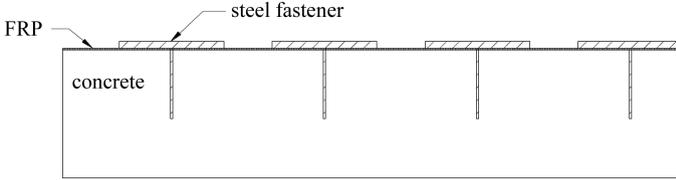


图 1 Hybrid bonding FRP

Fig. 1 Hybrid bonding FRP

综上所述,关于 HB-FRP 加固体系界面的粘结滑移特性研究还很少,且在实际工程中使用,依然有困难.本研究依托已有的分区计算模型^[19],进一步开展已有模型的简化工作,最终建立不分区的 HB-FRP 粘结滑移统一计算模型,达到通过解析解推导 HB-FRP 加固界面力学特性的目的.

1 HB-FRP 的粘结滑移统一计算模型

1.1 计算模型表达式

分区计算模型^[19]中将 HB-FRP 钢扣件部位的界面特性分为 2 部分处理,分别为:钢扣件部位混凝土楔体摩擦及钢扣件的销栓作用.Wu 等^[18]建立了钢扣件部位的三折线粘结滑移模型,得到粘结强度 $\tau_{\max} = 4.4 \text{ MPa}$, 变量 $s_1 = 0.2 \text{ mm}$, 变量 $s_2 = 8 \text{ mm}$, 变量 $s_3 = 30 \text{ mm}$.模型中混凝土的抗压强度 f_{cu} 为 57.6 MPa , 极限应变为 0.018 .FRP 弹性模量为 242 GPa , 条带宽度为 50 mm .钢扣件中钢板尺寸为 $30 \text{ mm} \times 75 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 钢钉直径为 6.35 mm , 长度为 44.45 mm .按照以上的材料参数取值,对比分析分区模型和 WuYF 模型得到粘结应力 τ 和滑移量 s 关系图(图 2).图 2 中, τ_1 表示分区模型钢扣件中钢钉承担的粘结应力; τ_2 表示混凝土楔体承担的粘结应力.

分析图 2 可以看出:WuYF 的 HB-FRP 模型的峰值稍小,其中间有较长一段平台,且粘结力的软化过程很长.分区模型的峰值稍大,且后期的粘结基本由钢扣件中栓钉的销栓作用承担.HB-FRP 加固时,钢扣件粘结强度 2.67 MPa ,比混凝土楔体粘结强度 10.45 MPa 小很多,证明钢钉的销栓作用不大^[20-21].参考 Zhou 等^[22]提出的 EB-FRP(externally bonded FRP:普通 FRP 粘贴技术)的粘结滑移模型,且重点关注 HB-FRP 加固体系中钢扣件位置混凝土楔体的粘结强度 τ_{\max} 的影响,得到钢扣件部位的粘结应力 τ_{G} 表达式为

$$\tau_{\text{G}} = \tau_{\max} \frac{\alpha_{\text{H}}}{\beta_{\text{H}}^2} e^{-s/\alpha_{\text{H}}} (1 - e^{-s/\alpha_{\text{H}}}), \quad (1)$$

式中, α_{H} , β_{H} 为待定系数; τ_{\max} 的表达式为^[19] $\tau_{\max} = 0.181 f_{\text{cu}} + 0.03$.

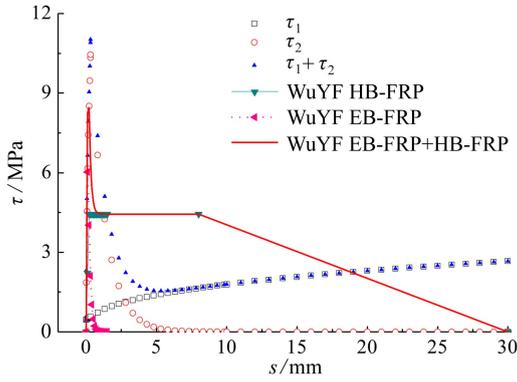
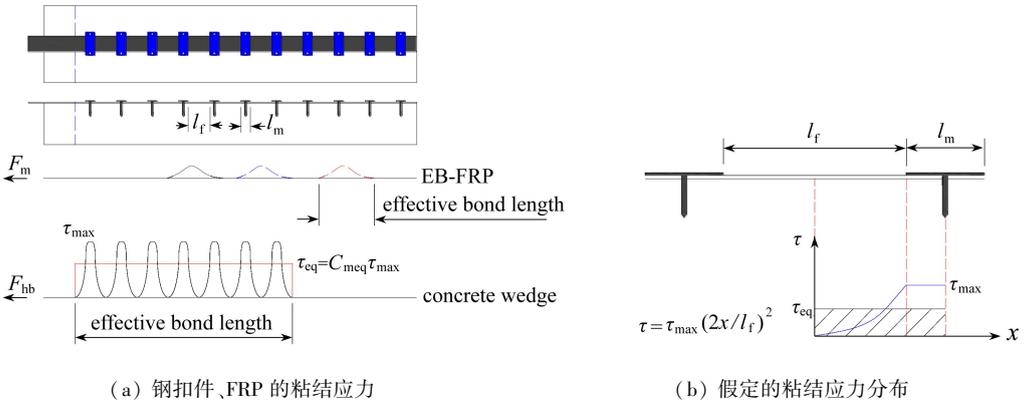


图2 分区模型与 WuYF 模型比较

Fig. 2 Comparison between the partition model and the WuYF model

1.2 粘结应力分布系数

假定 HB-FRP 加固体系的粘结力由 2 部分叠加组成,第 1 部分为 EB-FRP 沿梁长方向的粘结力 F_m ,第 2 部分为钢扣件部位沿梁长方向的粘结力 F_{hb} ,具体参见图 3(a).图 3(a)中 l_f 为钢扣件间距, l_m 为钢扣件宽度, τ_{eq} 表示钢扣件产生的平均粘结应力.采用 HB-FRP 进行结构加固时,钢扣件按照固定间距进行均匀布置,假定一个粘结应力分布系数 C_{meq} 为后续分析提供便利.假定钢扣件之间的粘结应力服从二次函数分布^[18],具体分布规律参见图 3(b).



(a) Bond stress of the steel fasteners and FRP

(b) The assumed bond stress distribution

图3 HB-FRP 加固体系粘结示意图

Fig. 3 Bond stress distribution of HB-FRP

根据图 3(b)所示,则可求解得到粘结应力分布系数 C_{meq} :

$$C_{meq} = \frac{\tau_{max} b_f \left[\int_0^{l_f/2} \left(\frac{x}{l_f/2} \right)^2 dx + \int_{l_f/2}^{l_f/2+l_m/2} dx \right]}{\tau_{max} b_f (l_f + l_m) / 2} = \frac{l_f/6 + l_m/2}{l_f/2 + l_m/2} \quad (2)$$

修正式(1),考虑粘结力分布不均匀的粘结滑移模型归纳为

$$\tau_G = C_{meq} \tau_{max} \frac{\alpha_H}{\beta_H^2} e^{-s/\alpha_H} (1 - e^{-s/\alpha_H}) \quad (3)$$

EB-FRP 的粘结滑移模型选取以下模型开展计算:

$$\tau_e = E_f t_f \frac{\alpha_m}{\beta_m^2} e^{-s/\alpha_m} (1 - e^{-s/\alpha_m}), \quad (4)$$

式中, τ_e 为 FRP 与混凝土的粘结应力; E_f 为 FRP 的弹性模量; t_f 为 FRP 的厚度; Wu 等^[18] 建议 α_m 取值为 0.128 2, β_m 取值为 38.665.

对式(3)和(4)求和,可得到 HB-FRP 的粘结应力 τ_{HB} 为 $\tau_{HB} = \tau_e + \tau_G$.

1.3 张拉力滑移关系

HB-FRP 加固体系上作用张拉力 F 后, HB-FRP 加固体系与混凝土界面上的滑移、粘结应力及加固体系纵向应变分布规律可参见图 4. 图 4 中 s_f 为自由端滑移, s_l 为加载端滑移, ε 为 FRP 条带应变, b_f 为 FRP 条带宽度.

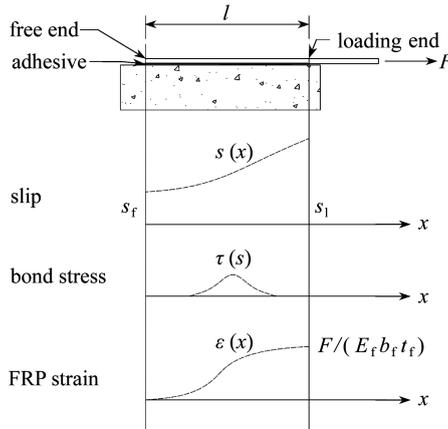


图 4 滑移、粘结应力及 FRP 应变分布

Fig. 4 Distributions of slip, bond stress and FRP strain

外荷载在 FRP 条带上所做的功 V 可表示为

$$V = \int_0^x \left[\int_{s_f}^{s(x)} \tau_{HB}(s) b_f ds \right] dx. \quad (5)$$

令 $M(x) = \int_{s_f}^{s(x)} \tau_{HB}(s) ds$, 则有

$$M(x) = \int_{s_f}^{s(x)} (\tau_e + \tau_G) ds = \frac{1}{2} E_f t_f \frac{\alpha_m^2}{\beta_m^2} (1 - e^{-s/\alpha_m})^2 \Big|_{s_f}^{s(x)} + \frac{1}{2} C_{meq} \tau_{max} \frac{\alpha_H^2}{\beta_H^2} (1 - e^{-s/\alpha_H})^2 \Big|_{s_f}^{s(x)}. \quad (6)$$

FRP 条带的应变能 U 为

$$U = \int_0^x \left[\int_0^{\varepsilon(x)} \sigma_f b_f t_f d\varepsilon \right] dx = \int_0^x \left[\frac{1}{2E_f} b_f t_f \sigma_f^2 \right] dx. \quad (7)$$

根据功能互等原理, $V = U$, 推导得到

$$M(x) = \frac{1}{2E_f} t_f \sigma_f(x)^2 = \frac{1}{2E_f b_f^2 t_f} F(x)^2, \quad (8)$$

式中, $F(x)$ 为坐标 x 部位的 FRP 条带张力, 其值为 $t_f b_f \sigma_f(x)$; $\sigma_f(x)$ 为 FRP 条带坐标 x 处的应力.

式(8)中 $x=l, F(l)$ 为加载端 $x=l$ 部位的 FRP 条带张力, 定义为 F 即可. 当 $x=l$ 时式(6)与式(8)相等, 得张拉力 F 与滑移量的表达式为

$$F = \left\{ E_f b_f^2 t_f \left\{ E_f t_f \frac{\alpha_m^2}{\beta_m} [(1 - e^{-s/\alpha_m})^2 - (1 - e^{-s_f/\alpha_m})^2] + C_{\text{meq}} \tau_{\text{max}} \frac{\alpha_H^2}{\beta_H} [(1 - e^{-s/\alpha_H})^2 - (1 - e^{-s_f/\alpha_H})^2] \right\} \right\}^{1/2}. \quad (9)$$

参考了文献[23]中粘结应力与滑移量的二阶导数表达式, 则可推导得到 HB-FRP 加固体系滑移量 s 的一阶导数:

$$s' = \left\{ \frac{\alpha_m^2}{\beta_m^2} [(1 - e^{-s/\alpha_m})^2 - (1 - e^{-s_f/\alpha_m})^2] + \frac{C_{\text{meq}} \tau_{\text{max}}}{E_f t_f} \frac{\alpha_H^2}{\beta_H} [(1 - e^{-s/\alpha_H})^2 - (1 - e^{-s_f/\alpha_H})^2] \right\}^{1/2}. \quad (10)$$

式(10)给定的边界条件还有

$$s|_{x=0} = s_f, \quad s|_{x=l} = s_l, \quad s'|_{x=l} = F/(E_f b_f t_f).$$

1.4 待定系数确定

为了进一步确定式(1)中的 α_H 和 β_H 两个参数, 计算统一模型的破坏能 G :

$$G = \int_0^\infty \tau_G ds = \tau_{\text{max}} (\alpha_H/\beta_H)^2 / 2. \quad (11)$$

根据分区计算模型^[19]可得到不同混凝土强度时加固体系的粘结滑移破坏能 G . 根据分区模型和统一模型的破坏能相等原则, 可得到不同混凝土强度时的 $(\alpha_H/\beta_H)^2$ (表 1).

表 1 $(\alpha_H/\beta_H)^2$ 与混凝土立方体强度的关系

Table 1 Relationship between $(\alpha_H/\beta_H)^2$ and the concrete cubic strength

f_{cu} /MPa	G / (MPa·mm)	τ_{max} /MPa	$(\alpha_H/\beta_H)^2$
10	27.687 5	1.84	30.095 11
20	38.327 2	3.65	21.001 21
30	47.271 4	5.46	17.315 53
40	55.493 5	7.27	15.266 44
50	66.332 4	9.08	14.610 66
60	70.946 7	10.89	13.029 70
70	78.424 0	12.7	12.350 24
80	85.816 8	14.51	11.828 64

为确定 α_H 和 β_H , 依托文献[18]的 BIIIb, BIIIc2 及 BIII d2 模型开展分析, 模型构造参见图 5. 混凝土强度 $f_{cu} = 57.6$ MPa, FRP 粘贴长度 $L = 600$ mm, $l_f = 35$ mm, $l_m = 15$ mm, $\alpha_m = 0.128 2$, $\beta_m = 38.665$.

式(10)无法推导滑移量 s 的解析解, 采用四阶 Runge-Kutta 方法^[24]对其进行求解. 对式(10)输入不同的 FRP 条带粘贴长度, 求解得到自由端的滑移量 $s_f = 0$ 时加载端的滑移量 s_l 并将其代入式(9)可得到 FRP 条带加载端张拉力 F . 比较张拉力-滑移曲线理论值和试验测试数据^[18]并对参数 α_H 进行参数分析, 通过计算, 当 $\alpha_H = 20$ 时理论分析数据和试验数据结果较为吻合(图 6).

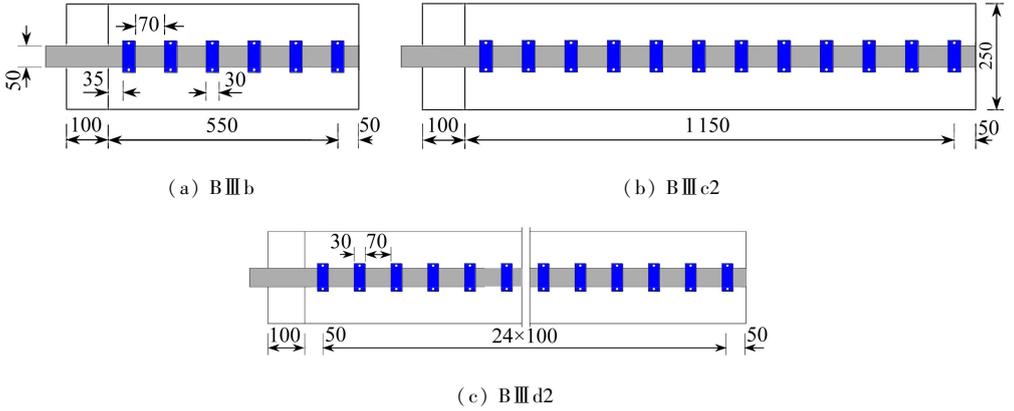


图 5 B III b, B III c2 及 B III d2 的模型构造^[18] (单位: mm)

Fig. 5 Test specimens B III b, B III c2 and B III d2^[18] (unit: mm)

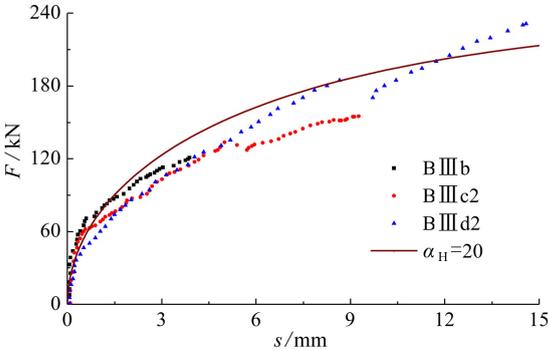


图 6 张拉力-滑移曲线理论值和试验值对比

Fig. 6 The theoretical load-slip relationship compared with the experimental data

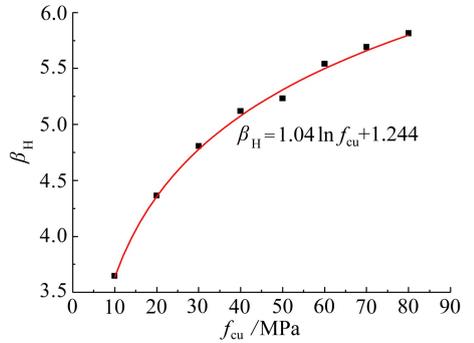


图 7 β_H 与混凝土强度的关系

Fig. 7 Relationship between β_H and the concrete cubic strength

当 $\alpha_H = 20$ 时, 根据表 1 得到不同混凝土强度时 β_H 的数值, 通过拟合, 得到 β_H 与混凝土强度的关系式 (图 7)。

总结本研究提出的 HB-FRP 粘结滑移统一计算模型为

$$\begin{cases} \tau_G = C_{meq} \tau_{max} \frac{\alpha_H}{\beta_H^2} e^{-s/\alpha_H} (1 - e^{-s/\alpha_H}), \tau_{max} = 0.181f_{cu} + 0.03, \alpha_H = 20, \\ \beta_H = 1.04 \ln f_{cu} + 1.244, C_{meq} = \frac{l_f/6 + l_m/2}{l_f/2 + l_m/2}. \end{cases} \quad (12)$$

2 剥离承载力及有效粘结长度

2.1 剥离承载力

当 FRP 条带自由端位移趋向于 0, 而加载端位移趋向于无穷大时, 对式 (9) 求极限, 则 HB-FRP 加固体系的剥离承载能力 P_u 为

$$P_u = \lim_{\substack{s_l \rightarrow \infty \\ s_f \rightarrow 0}} \left\{ E_f b_f^2 t_f \left\{ E_f t_f \frac{\alpha_m^2}{\beta_m^2} \left[(1 - e^{-s_l/\alpha_m})^2 - (1 - e^{-s_f/\alpha_m})^2 \right] + \right. \right.$$

$$C_{\text{meq}} \tau_{\text{max}} \frac{\alpha_{\text{H}}^2}{\beta_{\text{H}}^2} \left[(1 - e^{-s_1/\alpha_{\text{H}}})^2 - (1 - e^{-s_2/\alpha_{\text{H}}})^2 \right] \Bigg\}^{1/2} = \sqrt{E_{\text{f}} b_{\text{f}}^2 t_{\text{f}} \left(E_{\text{f}} t_{\text{f}} \frac{\alpha_{\text{m}}^2}{\beta_{\text{m}}^2} + C_{\text{meq}} \tau_{\text{max}} \frac{\alpha_{\text{H}}^2}{\beta_{\text{H}}^2} \right)} \quad (13)$$

Liu^[23] 推导得到 HB-FRP 加固体系的剥离承载力计算表达式为

$$P_{\text{u}} = \sqrt{2E_{\text{f}} b_{\text{f}}^2 t_{\text{f}} \left(\frac{1}{2} E_{\text{f}} t_{\text{f}} \frac{\alpha_{\text{m}}^2}{\beta_{\text{m}}^2} + C_{\text{meq}} \tau_{\text{max}} (s_2 - s_1 + s_3) / 2 \right)} \quad (14)$$

分别采用式(13)和(14)求解 HB-FRP 加固体系的剥离破坏荷载.材料参数取值为:混凝土强度 $f_{\text{cu}} = 57.6 \text{ MPa}$, $l_{\text{f}} = 35 \text{ mm}$, $l_{\text{m}} = 15 \text{ mm}$, FRP 弹性模量 $E_{\text{f}} = 242 \text{ GPa}$, $b_{\text{f}} = 50 \text{ mm}$, $t_{\text{f}} = 0.167 \text{ mm} \times 7 = 1.169 \text{ mm}$.本模型的求解结果为 246.48 kN ; WuYF 模型的求解结果为 262 kN ; B III d2 试验模型得到试验剥离承载能力为 230 kN .本文模型计算结果与试验结果更为接近.

2.2 有效粘结长度

基于统一计算模型,依据以下流程可求解得到不同粘结长度下的 HB-FRP 加固体系的剥离承载力.

1) 输入钢扣件的尺寸布置,求得粘结应力分布系数 C_{meq} ;依据混凝土立方体抗压强度求得粘结强度 τ_{max} ;输入 FRP 的弹性模量 E_{f} 和 FRP 的厚度 t_{f} ; α_{m} 取值为 0.1282 , β_{m} 取值为 38.665 ; α_{H} 取值为 20 ,依据混凝土立方体抗压强度求得参数 β_{H} .

2) 基于 MATLAB 软件^[24] 建立式(10)的数学模型,令 $s_{\text{f}} = 0$,输入不同的粘结长度 L_{e} ,采用四阶 Runge-Kutta 方法进行求解,得到滑移量的分布特征曲线.

3) 根据式(9)求解加载端张力 F ,绘制张力 F 与粘结长度 L_{e} 的关系曲线.

4) 通过张力 F 与粘结长度 L_{e} 的关系曲线可获得有效粘结长度,有效粘结长度对应的剥离力取值为 0.96 倍的剥离承载能力^[5].

以上流程用图 8 表示.

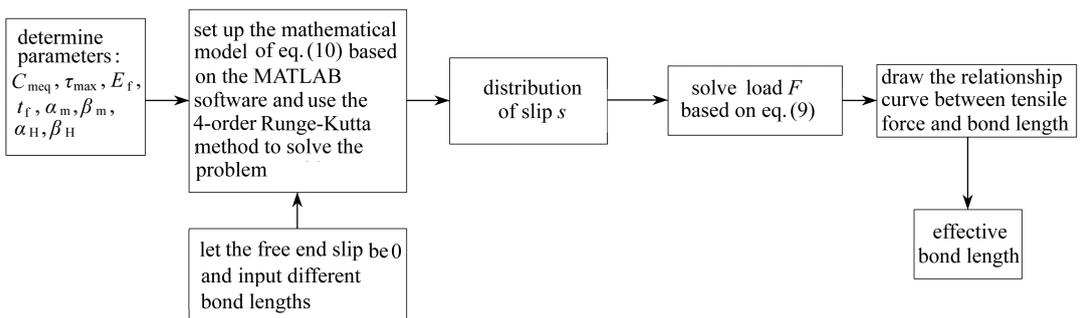


图 8 有效粘结长度的计算方法

Fig. 8 The computation method of the effective bond length

依据图 8 计算得到的 HB-FRP 加固体系有效粘结长度 L_{e} 为 2010 mm (图 9).Liu^[23] 计算得到的 HB-FRP 加固体系有效粘结长度 2000 mm ,两者基本相同.

3 试验验证

依据图 8 同时可确定不同粘结长度对应的加载值,对文献[11]开展的模型试验测试结果进行验证,其中的 HB6、HB7 及 HB8 号梁均为加固体系的剥离破坏,HB6 梁的钢扣件间距为

200 mm, HB7 及 HB8 梁的钢扣件间距为 100 mm, 使用的钢扣件尺寸相同, HB6 及 HB7 为对称加载, HB8 为跨中加载. 依据不同的钢扣件间距计算不同的粘结应力分布系数. 依据不同加载方式, 跨中加载时, 计算粘结长度取计算跨径的一半; 对称加载时, 取支座相距加载点的距离. 具体计算结果参见表 2.

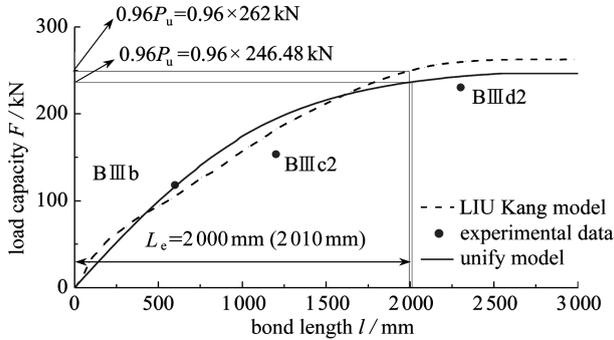


图 9 有效粘结长度

Fig. 9 The computed effective bond lengths

表 2 文献[11]的试验验证

Table 2 Experimental verification^[11]

specimen No.	FRP strain $10^{-6} \epsilon$		
	test ^[11]	theory ^[11]	unified model
HB6	9 323	9 423	10 900
HB7	12 382	12 174	12 300
HB8	17 056	15 842	15 200

进一步开展了相关的室内验证试验, 设计并浇筑了 2 片梁, 混凝土标号: C40. 纵向受拉钢筋、架立筋和箍筋为 HRB335 级钢筋. 碳纤维布的品牌为日本东丽碳纤维布 UT70-30 (300 g/m^2), CFRP 参数: 2 层, 粘结长度为 2 300 mm, 粘贴宽度为 60 mm, 每层 FRP 布的厚度为 0.167 mm. 试验采用的胶粘剂为美国上纬(上海)精细化工有限公司出品的 Swancor 纤维粘结剂, 该粘结剂由底层胶、找平胶、浸渍胶配套组成. 钢扣件采用 Q235 材质的高耐候性钢板, 45 号材质的高强螺栓. 在跨中底部切缝. 矩形梁构造参见图 10.

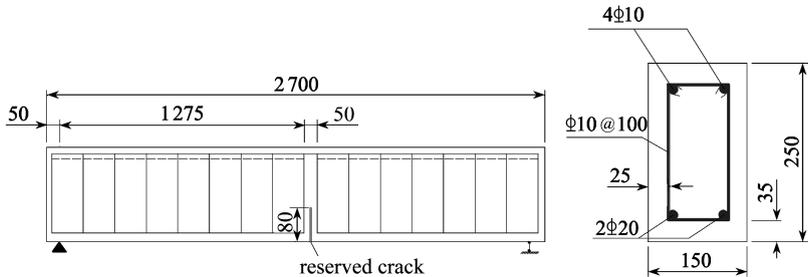


图 10 矩形梁尺寸及 HB-FRP 构造(单位: mm)

Fig. 10 Dimensions of the rectangular beams and HB-FRP (unit: mm)

采用手动千斤顶加载, 通过压力传感器控制加载的大小, 采用跨中加载方式(图 11(a))加载, 应变片布置参见图 11(b). 1 号梁的研究段长度为 150 mm, 2 号梁的研究长度为 300 mm, 钢扣件的锚固间距均为 150 mm. 试验加载照片参见图 12.

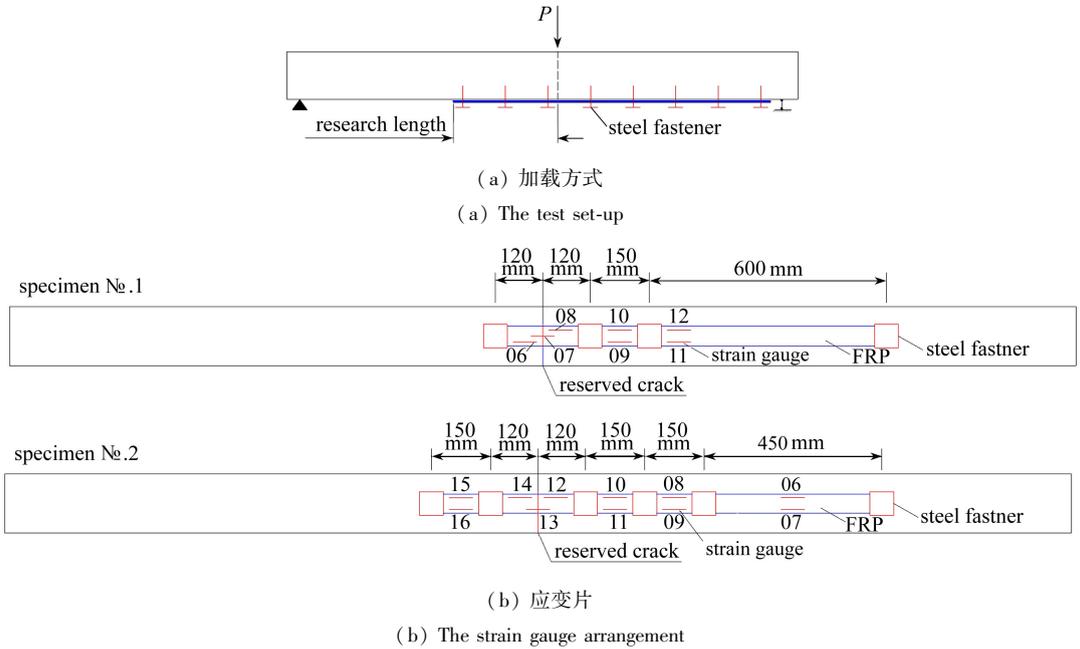


图 11 加载及测试方案

Fig. 11 The scheme of loading and testing



图 12 试验照片

Fig. 12 The photo of testing

对 2 片梁进行剥离承载能力的验证,理论分析和试验测试结果参见表 3.

表 3 室内模型试验验证

Table 3 Comparison between the model predictions and the test results about debonding

specimen No.	c_{meq}	force of FRP F /kN		error E /%
		test	unified model	
1	0.43	21.45	22.12	3.12
2	0.6	65.02	69.38	6.71

分析表 2 和表 3 可以看出:粘结滑移统一模型能有效评估加固梁剥离破坏时 FRP 条带的受力性能.

4 结 语

1) 推导了钢扣件部位的粘结应力分布系数.将 HB-FRP 加固作用分为普通 FRP 粘结性能和钢扣件部位混凝土楔体粘结性能两部分并进行叠加.依据功能互等原理,推导了 FRP 张拉力与滑移量的表达式.

2) 基于模型试验测试结果,研究了粘结滑移统一模型中的待定系数表达式。

3) HB-FRP 加固体系的有效粘结长度达到 2 000 mm 左右,而 EB-FRP 的有效粘结长度仅为 200~300 mm。

4) 试验验证表明:HB-FRP 的粘结滑移统一模型能有效预测加固界面的剥离承载力和有效粘结长度。

参考文献(References):

- [1] Chen J F, Teng J G. Shear capacity of FRP strengthened RC beams: FRP debonding[J]. *Construction & Building Materials*, 2003, **17**(1): 27-41.
- [2] Chen J F, Teng J G. Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete [J]. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 2001, **127**(7): 784-791.
- [3] Teng J G, Smith S T, Yao J, Chen J F. Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs[J]. *Construction & Building Materials*, 2003, **17**(6/7): 447-462.
- [4] 王文炜, 李果. FRP 加固钢筋混凝土梁抗剪承载力计算方法研究[J]. 公路交通科技, 2006, **23**(2): 106-110.(WANG Wen-wei, LI Guo. Study on calculated method of shear capacity of RC beams strengthened with FRP[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2006, **23**(2): 106-110.(in Chinese))
- [5] LU Xin-zheng, YE Lie-ping, TENG Jing-guang, JIANG Jian-jing. Meso-scale finite element model for FRP sheets/plates bonded to concrete[J]. *Engineering Structures*, 2005, **27**(4): 564-575.
- [6] YUAN Hong, WU Zhi-sheng, Yoshizawa H. Theoretical solutions on interfacial stress transfer of externally bonded steel/composite laminates[J]. *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, 2001, **675**: 27-39.
- [7] Carloni C, Subramaniam K V, Savoia M, Mazzotti C. Experimental determination of FRP-concrete cohesive interface properties under fatigue loading[J]. *Composite Structures*, 2012, **94**(4): 1288-1296.
- [8] WU Yu-fei, HUANG Yue. Hybrid bonding of FRP to reinforced concrete structures[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2014, **12**(3): 266-273.
- [9] WU Yu-fei, WANG Zheng-yu, LIU Kang, HE Wei, WANG Zhen-yu. Numerical analysis of hybrid-bonded FRP strengthened concrete beams[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2009, **24**(5): 371-384.
- [10] YUN Yan-chun, WU Yu-fei, TANG Wai-ching. Performance of FRP bonding systems under fatigue loading[J]. *Engineering Structures*, 2008, **30**(11): 3129-3140.
- [11] 颜俊辉. FRP 混合粘贴技术加固混凝土梁的试验研究[D]. 硕士学位论文. 长沙: 湖南大学, 2009.(YAN Jun-hui. Experimental investigation on hybrid bonded FRP for strengthening reinforced concrete beams[D]. Master Thesis. Changsha: Hunan University, 2009.(in Chinese))
- [12] WU Zhi-min, HU Cheng-he, WU Yu-fei, ZHENG Jian-jun. Application of improved hybrid bonded FRP technique to FRP debonding prevention[J]. *Construction and Building Materials*, 2011, **25**(6): 2898-2905.
- [13] 胡程鹤. 改进的复合粘结 FRP 技术的试验研究[D]. 博士学位论文. 大连: 大连理工大学, 2011.(HU Cheng-he. Experimental study on improved hybrid bonded FRP technology[D]. PhD Thesis. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.(in Chinese))
- [14] ZHOU Yin-zhi, GOU Ming-kang, ZHANG Feng-yu, ZHANG Shou-jun, WANG Dan. Reinforced

- concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer by friction hybrid bond technique: experimental investigation[J]. *Material and Design*, 2013, **50**(17): 130-139.
- [15] 张峰, 牛平霞, 李树忱, 孙秋彦. FRP-螺栓联合加固 RC 梁粘结性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, **32**(6): 7-13. (ZHANG Feng, NIU Ping-xia, LI Shu-chen, SUN Qiu-yan. Experimental research on bonding behaviour of hybrid-bonding of FRP[J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2011, **32**(6): 7-13. (in Chinese))
- [16] 管延华, 苗海涛, 宋修广. FRP-螺栓联合加固技术锚固参数的研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2010, **40**(3): 128-132. (GUAN Yan-hua, MIAO Hai-tao, SONG Xiu-guang. Study of anchoring parameter for hybrid bonding of FRP[J]. *Journal of Shandong University(Engineering Science)*, 2010, **40**(3): 128-132. (in Chinese))
- [17] 管延华, 蒋斌松, 宋修广, 杨勇. FRP-螺栓联合加固 RC 梁受剪承载能力试验研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2010, **40**(2): 82-86. (GUAN Yan-hua, JIANG Bing-song, SONG Xiu-guang, YANG Yong. Experimental study on RC beams strengthened in shear with hybrid bonding of FRP[J]. *Journal of Shandong University(Engineering Science)*, 2010, **40**(2): 82-86. (in Chinese))
- [18] WU Yu-fei, LIU Kang. Characterization of mechanically enhanced FRP bonding system[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2013, **17**(1): 34-49.
- [19] 张峰, 徐向锋, 李术才. HB-FRP 加固混凝土结构的粘结滑移模型[J]. 中国公路学报, 2015, **28**(1): 38-44. (ZHANG Feng, XU Xiang-feng, LI Shu-cai. Bond-slip model for HB-FRP systems bonded to concrete[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, **28**(1): 38-44. (in Chinese))
- [20] Lamanna A J, Bank L C, Borowicz D T. Mechanically fastened FRP strengthening of large scale RC bridge T beams[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2004, **7**(6): 525-538.
- [21] WU Yu-fei, Yan J H, Zhou Y W, Xiao Y. Ultimate strength of reinforced concrete beams retrofitted with hybrid bonded fiber reinforced polymer[J]. *ACI Structural Journal*, 2010, **107**(4): 451-460.
- [22] ZHOU Yin-wu, WU Yu-fei, YUN Yan-chuan. Analytical modeling of the bond-slip relationship at FRP-concrete interfaces for adhesively-bonded joints[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2010, **41**(6): 423-433.
- [23] LIU Kang. Computational modeling, experimental and theoretical study on bond behaviors of hybrid-bonded FRP strengthened concrete structures[D]. PhD Thesis. Hong Kong: City University of Hong Kong, 2011.
- [24] 薛定宇, 陈阳泉. 高等应用数学问题的 MATLAB 求解[M]. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2008. (XUE Ding-yu, CHEN Yang-quan. *Advanced Applied Mathematical Problem Solutions With MATLAB*[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua Univeristy Press, 2008. (in Chinese))

A Unified Bond-Slip Model for HB-FRP Strengthened Concrete Structures

ZHANG Feng¹, XU Xiang-feng², LI Shu-cai¹

(1. *Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Ji'nan 250061, P.R.China;*

2. *Department of Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Ji'nan 250023, P.R.China*)

Abstract: In order to simplify the bond-slip models for the HB-FRP strengthening technology, the expression of a unified bond-slip model for HB-FRP strengthened concrete structures was assumed based on a previously built partition bond-slip model. The distribution of bond stress was deduced. The bond force of the HB-FRP was divided into 2 parts: one from the EB-FRP and the other from the steel fasteners. The relationship between load on FRP and slip was derived based on the energy method. The interfacial slip was investigated with the theoretical and numerical methods. The undetermined coefficients in the bond-slip model were formulated based on the model test results. The research results show that, the unified bond-slip model for HB-FRP strengthened concrete structures can effectively predict the bond strength and effective bond length of HB-FRP.

Key words: concrete; strengthen; unified bond-slip model; HB-FRP; bond strength; effective bond length

Foundation item: The National Science Fund for Young Scholars of China(51108249)