

HB-FRP 黏结混凝土界面性能试验研究

魏琦安¹, 高磊^{2,*}, 黄悦¹

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061)

摘要: FRP 与混凝土的界面黏结效果是外贴 FRP 加固技术(EB-FRP)中的关键, FRP 与混凝土黏结界面过早失效会使 FRP 的利用效率大大降低。混合粘贴纤维复合材料加固(HB-FRP)以机械锚固和胶黏结并用的手段, 用以抑制 FRP 的过早剥离。为明确 HB-FRP 对界面黏结性能的影响, 进行了不同锚固形式的单向剪切试验, 对比研究了 EB-FRP 和 HB-FRP 锚固方式的锚固性能, 分析了不同扭矩和钢扣件个数对 HB-FRP 试件的剥离荷载和 FRP 利用率的影响, 基于 HB-FRP 组合界面黏结-滑移统一模型对试验数据进行拟合, 通过试验结果验证 HB-FRP 组合界面剥离荷载计算模型。结果表明, 相较于 EB-FRP, HB-FRP 试件的剥离荷载和 FRP 利用率均有明显提高, 且随着扭矩和扣件个数的增加而提高; 验证了剥离荷载计算模型的有效性, 可用于计算 HB-FRP 组合界面的剥离荷载。

关键词: FRP 加固; 黏结-滑移关系; 单向剪切; 黏结界面; 黏结-滑移模型

中图分类号: TU312 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2024)03-0001-10

Experimental study on the interface properties of HB-FRP bonded concrete

WEI Qi'an¹, GAO Lei^{2,*}, HUANG Yue¹

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Geotechnical and Structural Engineering Research Centre, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The bonding effect of the interface between FRP and concrete is the key to external bonded FRP (EB-FRP), and the premature failure of the interface between FRP and concrete will greatly reduce the utilization efficiency of FRP. Hybrid bonded FRP (HB-FRP) is used to restrain the premature stripping of FRP by mechanical anchorage and cementation. In order to clarify the influence of HB-FRP on the bonding properties of the interface, unidirectional shear tests of different anchoring forms were carried out, and the anchoring properties of EB-FRP and HB-FRP were compared. The influence of different torques and the number of steel fasteners on the stripping load of HB-FRP specimens and on the utilization rate of FRP were analyzed. The experimental data were fitted based on the bond-slip model of HB-FRP composite, and the calculation model of interface stripping load of HB-FRP composite was verified by the test results. The results show that, compared with EB-FRP, the stripping load and the FRP utilization ratio of HB-FRP reinforced specimens are significantly increased, and increase with the increase of torque and the number of fasteners. The validity

收稿日期: 2022-12-21

基金项目: 山东省自然科学基金青年基金资助项目(ZR2021QE216)

作者简介: 魏琦安(1998—)男, 山东德州人。硕士, 研究方向为结构工程。E-mail: 493532127@qq.com。

* 通信作者: 高磊(1989—)男, 山东青岛人。博士, 讲师, 主要从事混凝土与钢筋混凝土结构研究。E-mail: lei.gao@sdu.edu.cn。

of the stripping load calculation model is verified, which can be used to calculate the stripping load at the interface of HB-FRP composite.

Key words: FRP reinforcement; bond-slip relationship; unidirectional shear; bonding interface; bond-slip model

纤维增强材料(Fiber Reinforced Plastic, FRP)因质量轻、抗拉性能出众、无污染等特点,被广泛地应用于梁结构的加固工作中。但 FRP-混凝土界面所用黏结剂的黏结性能和延展性往往不能与 FRP 超高的抗拉强度匹配,FRP 过早的脱粘失效是引发加固失效的原因^[1-5]。

为研究 FRP-混凝土界面的黏结性能,研究人员对 FRP-混凝土界面相关参数进行了多方面试验研究。殷雨时等^[6]以界面粗糙度为变量对 FRP-混凝土界面黏结性能进行研究,发现粗糙度为 0.44 的试件界面黏结性能最好。苏寅博^[7]研究了刻槽特性对 FRP-混凝土界面黏结性能的影响,发现当使用较大比例的凹槽时,极限载荷增大。随着槽深的增加,极限载荷先增大后减小。陈泱^[8]研究了不同槽间距与槽宽比条件对最大承载力的影响,发现对混凝土表面进行刻槽处理后,承载力和对照组试件相比提高了 100% 以上。

在外部增强锚固方面,研究人员发现混合粘贴纤维复合材料加固方法(HB-FRP)能有效抑制 FRP 的剥离,相较于外贴 FRP(EB-FRP)加固法黏结强度高 6~7 倍^[9-11]。张峰等^[12-13]对 HB-FRP 加固技术的界面黏结滑移模型进行理论推导,通过力学平衡得到多参数的黏结滑移模型。LIU^[14]和 WU 等^[15]考虑了不同黏结长度、锚固件的个数以及 FRP 的层数对加固效果的影响,发现界面剪应力是由胶和锚固件两部分承担,推导出三段式的黏结滑移模型。高磊等^[16]基于实测荷载-滑移关系、应变分布、黏结-滑移关系开展了 HB-FRP 界面黏结特性研究,提出组合界面黏结-滑移统一模型和剥离荷载表达式。

本文以加固方式、扣件数量和扭矩 3 个参数为变量,对消除了销栓作用的 HB-FRP 和 EB-FRP 加固试件进行单剪试验,通过试件的破坏模式、剥离荷载、FRP 利用率和黏结-滑移关系对 HB-FRP 加固性能和 FRP-混凝土界面性能进行分析,基于试验结果验证 HB-FRP 黏结混凝土界面剥离荷载计算模型的精度。

1 试验

1.1 试件设计

图 1 为单向剪切试件示意图。试验设计 8 个单向剪切试件,1 个 EB-FRP 试件,7 个 HB-FRP 试件,试件尺寸长×宽×高为 500 mm×200 mm×200 mm 的长方体。试件所用纤维增强板,即 CFRP(Carbon Fibre Reinforced Plastics, 简称 CFRP)板,宽度 50 mm,厚度 2 mm,下文统称 FRP。钢扣件宽度 60 mm,长度 120 mm,厚度 8 mm,所用螺栓直径 12 mm,锚固件详细参数如图 2 所示。

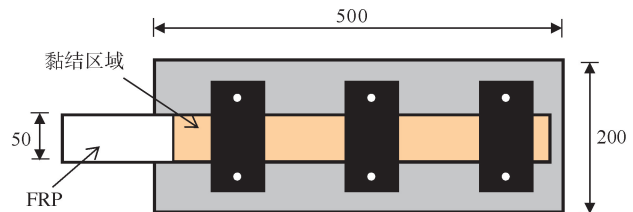


图 1 单向剪切试件示意(单位:mm)

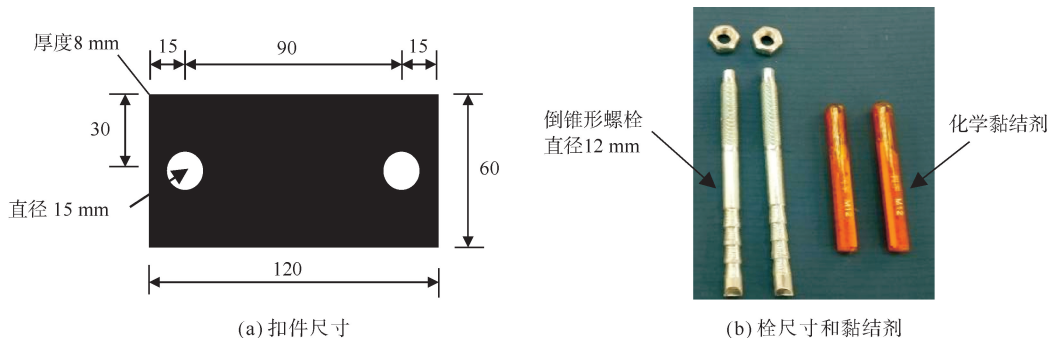


图 2 锚固件示意(单位:mm)

试验参数如表1所示,试件分为A、B、C、D4组,其中A组为EB-FRP试件,B、C、D分别为扣件个数为1、2、3的HB-FRP试件。

试验测得的混凝土立方体抗压强度平均值为35.2 MPa,采用的FRP板抗拉强度和弹性模量分别为2400 MPa和160 GPa,FRP所用黏结剂抗拉强度45 MPa,弹性模量3500 MPa。

1.2 试件制作流程

试件的制作流程如图3所示,各步骤为:

1) 定位、凿毛和植入化学螺栓。在试件上部,沿长边画出正中间50 mm条带状区域作为FRP板粘贴位置。对画出的黏结区域进行凿毛处理,破坏表面水泥层并显露出混凝土,凿毛的深度约2~3 mm。在中线左右30 mm处适宜位置画出化学螺栓固定点,使用冲击钻沿试件表面垂直打入约100 mm,使用气泵将洞中浮尘吹净,放入化学黏结剂,植入螺栓。

2) 粘贴美纹纸。在凿毛区域四周粘贴好美纹纸,防止碳板胶四溢影响试验操作。

3) 准备黏结剂和粘贴FRP板。使用气泵将试件表面尘土吹净,将FRP板切割成需要的长度并用酒精仔细擦拭干净。将混合好的碳板胶均匀涂于碳板与混凝土粘贴的一侧,将涂好胶的碳板粘贴在凿毛处,轻轻按压,安装钢扣件,扭转螺母至明显感受到阻力。撕掉美纹纸,去除多余粘胶。

4) 在FRP板张拉端上下两侧分别粘贴尺寸为100 mm×50 mm的铝板。

5) 约3 h后,用手触摸碳板胶,已经开始硬化且不粘手,为每个螺母施加要求大小的扭矩。养护7 d。

表1 试验参数

试件编号	钢扣件数量	黏结长度/mm	螺栓扭矩/(N·m)
A0	0	400	0
B1	1	60	10
C1	2	290	15
C2	2	290	10
D1	3	450	10
D2	3	450	10
D3	3	450	10
D4	3	450	10



(a) 植入化学螺栓、界面凿毛



(b) 粘贴美纹纸和FRP板



(c) 粘贴铝板



(d) 施加扭矩

图3 试件制作流程示意

1.3 试验加载过程及测点布置

为消除销栓作用的影响,在钢扣件与FRP板接触的一面均匀涂上润滑油,再次安装钢扣件,施加试验要求的扭矩。试验加载装置如图4所示。试验加载过程中以0.5 mm/min速度持续加载,持续记录数据,

直至试件完全损坏。

各试件测点如图5所示。EB-FRP试件的应变片以40 mm等间距布置在黏结区域的FRP表面,位移计布置在距离张拉端最近的应变片旁。HB-FRP试件应变片布置在钢扣件两侧20 mm处的FRP表面,位移计布置在距张拉端最近的应变片处。

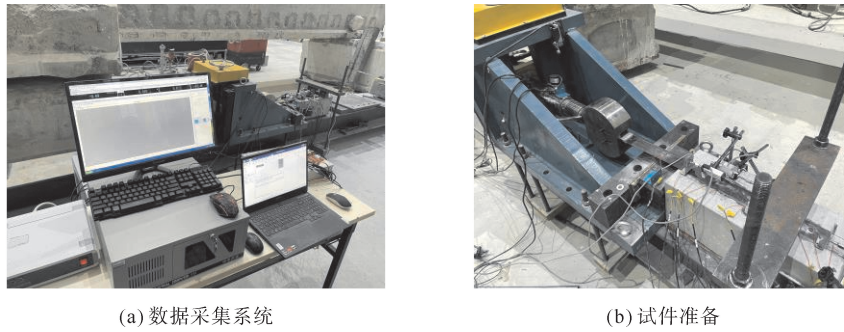


图4 试验加载

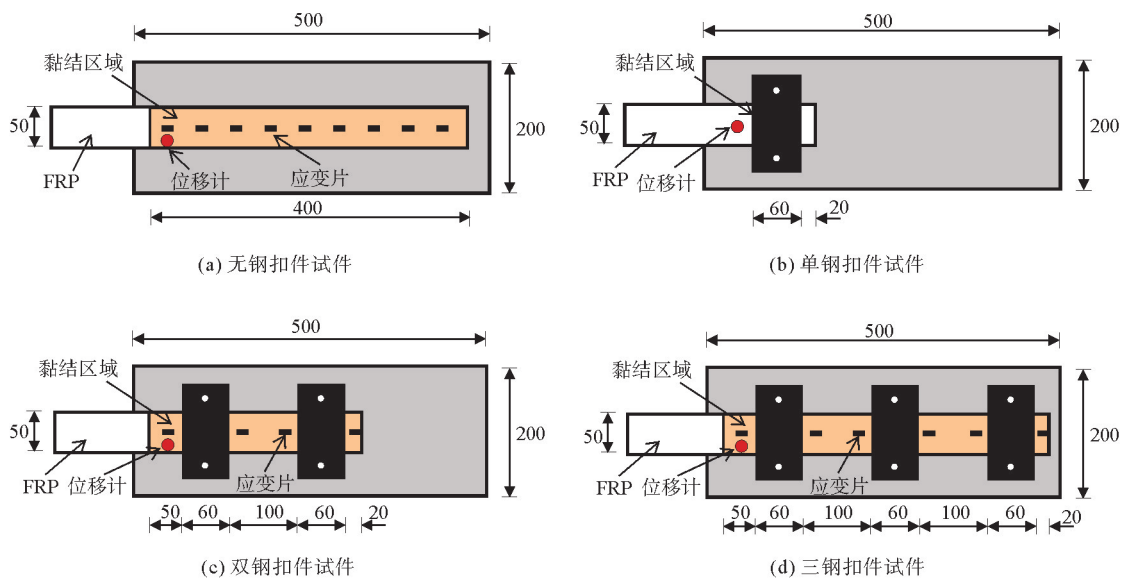


图5 应变和位移测点布置(单位:mm)

2 试验结果与理论分析

2.1 破坏模式

试件的破坏模式和剥离荷载如图6和表2所示,A0试件由于外部原因丢失,故未放置图片。在加载过程中靠近张拉端的FRP最早发生剥离,且随着荷载的增加逐渐向自由端发展。试件A0中FRP较早出现剥离并迅速发展至端部。试件B1虽然存在钢扣件,但由于黏结区域和扣件数量较少,同样较早发生FRP剥离的脆性破坏。试件C1和C2的FRP在剥离时发生FRP脱胶,大部分胶粘层留在混凝土表面,这可能是胶粘层过厚导致的。D组试件明显观察到FRP的剥离被钢扣件有效抑制,随着加至剥离荷载,FRP全部剥离,并在胶粘层上附着一层薄混凝土。剥离荷载后钢扣件位置的FRP仍与混凝土表面存在稳定的摩擦作用,随着FRP滑移量的增加,摩擦作用减弱,直至承载力消失。

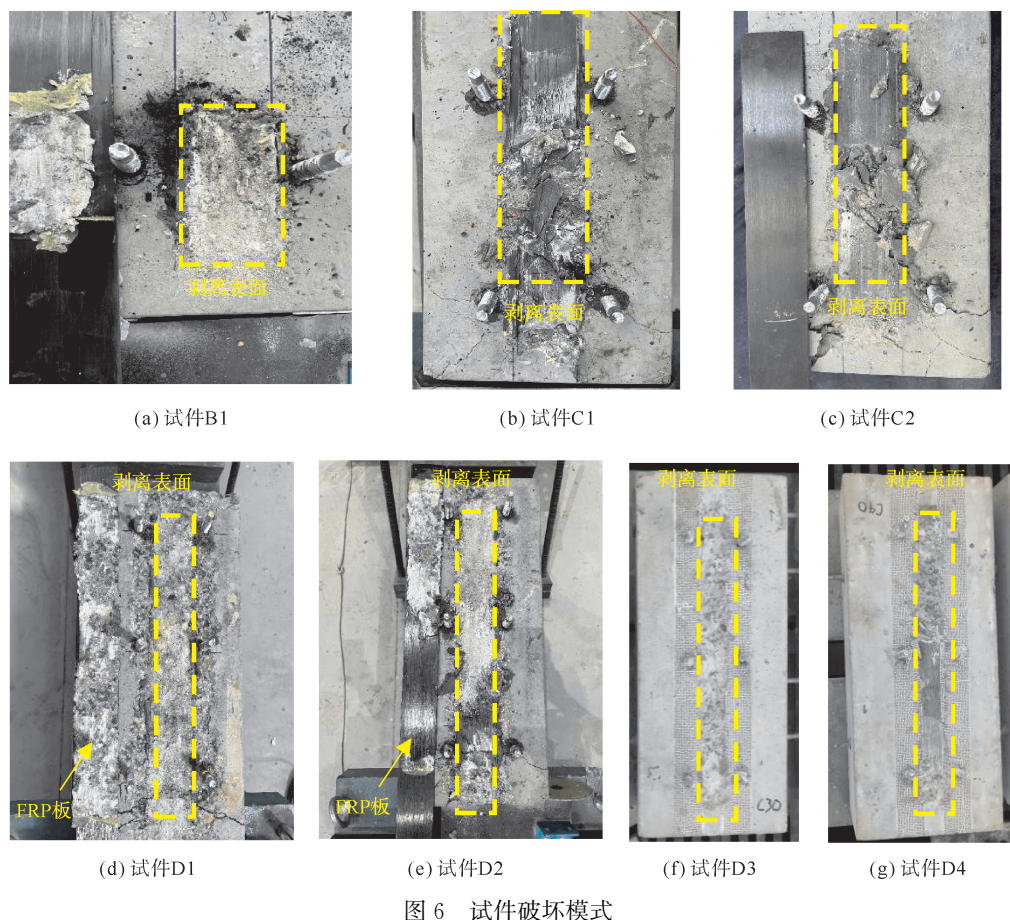


图 6 试件破坏模式

2.2 荷载-滑移关系

试验得到的张拉端荷载-滑移关系如图 7 所示。由图 7 可知,在 FRP 剥离之前所有试件的 FRP 滑移与所施加的荷载成正比。试件 B1 由于 FRP 的脆性脱粘导致拉伸荷载突然下降至残余荷载,平稳的残余荷载表明在脱粘表面存在稳定的残余摩擦应力。由 C 组试件可以看出,试件的剥离荷载随着施加扭矩的增加而提高,但由于 FRP 脱胶导致剥离荷载后没有残余荷载。D 组试件由于不同钢扣件处的 FRP 脱粘状态不同,残余荷载存在较大差异。除去试件 B1,HB-FRP 加固试件的剥离荷载相较于 EB-FRP 提高了 89.4%~164.1%。由 B、C、D 组试件的曲线可知,剥离荷载和残余荷载随着扣件个数的增加而提高,扭矩的增加同样提高了试件的剥离荷载,由于 C 组试件不存在残余荷载数据,无法得出扭矩对残余荷载的影响规律。

2.3 FRP 应变分布

不同荷载等级下试件的 FRP 应变分布如图 8 所示。由图 8 可知,随着荷载的增加,试件 A0 端部 FRP 的应变增长迅速,当荷载达到 40 kN 时,应变达到极限值,FRP 迅速剥离至端部,承载力消失。对于 C、D 组试件,由于扣件提供了额外的摩擦作用,当荷载达到 40 kN 时,扣件限制了 FRP 的剥离,FRP 的应变继续增大,直至达到剥离荷载。由试验结果可知,由于施加了更高的扭矩,试件 C1 扣件两侧的应变差大于 C2 以及 D 组试件。以图 8(f)为例,在 FRP 与混凝土界面剥离后,荷载下降,钢扣件两侧应变差减小,扣件处的摩擦作用继续提供承载力。HB-FRP 加固试件的 FRP 利用率相较于 EB-FRP 提高了 61.6%~139.4%,且 FRP 的利用率随扭矩和扣件个数的增加而增加。

表 2 试件剥离荷载及破坏模式

试件编号	剥离荷载/kN	破坏模式
A0	39.3	FRP 剥离
B1	29.9	FRP 剥离
C1	103.4	FRP 脱胶
C2	79.9	FRP 脱胶
D1	76.5	FRP 剥离
D2	70.2	FRP 剥离
D3	86.8	FRP 剥离
D4	82.6	FRP 剥离

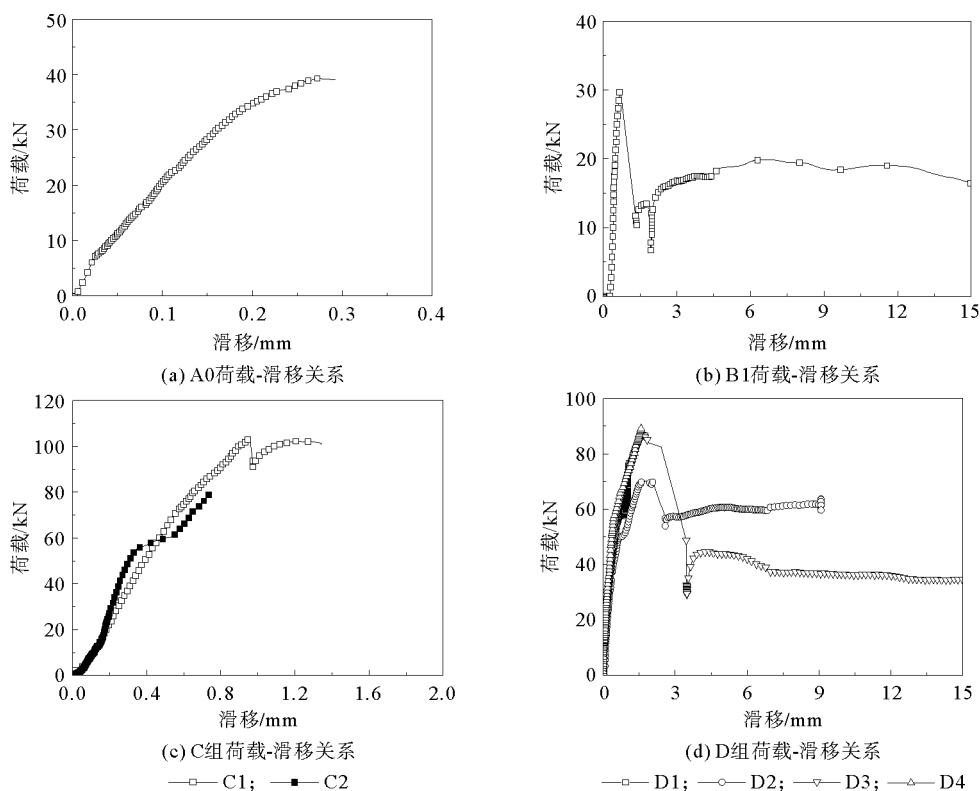
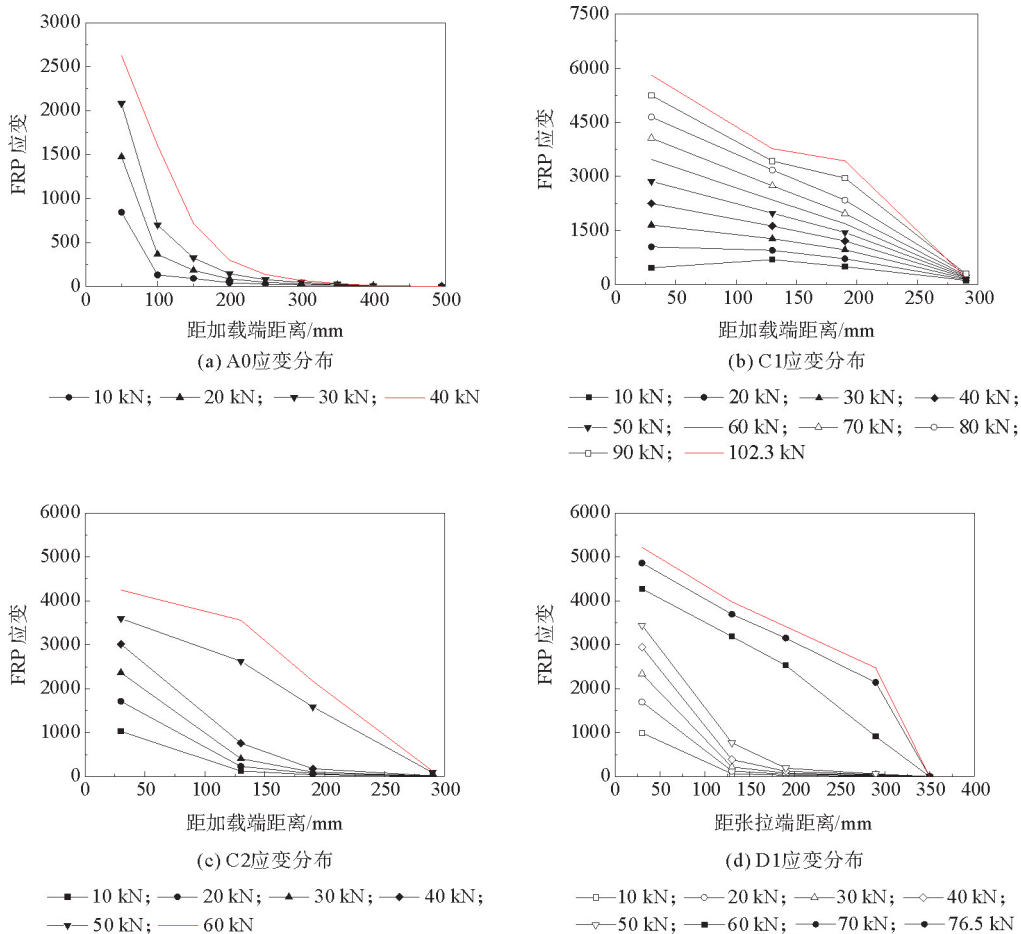


图7 荷载-滑移曲线



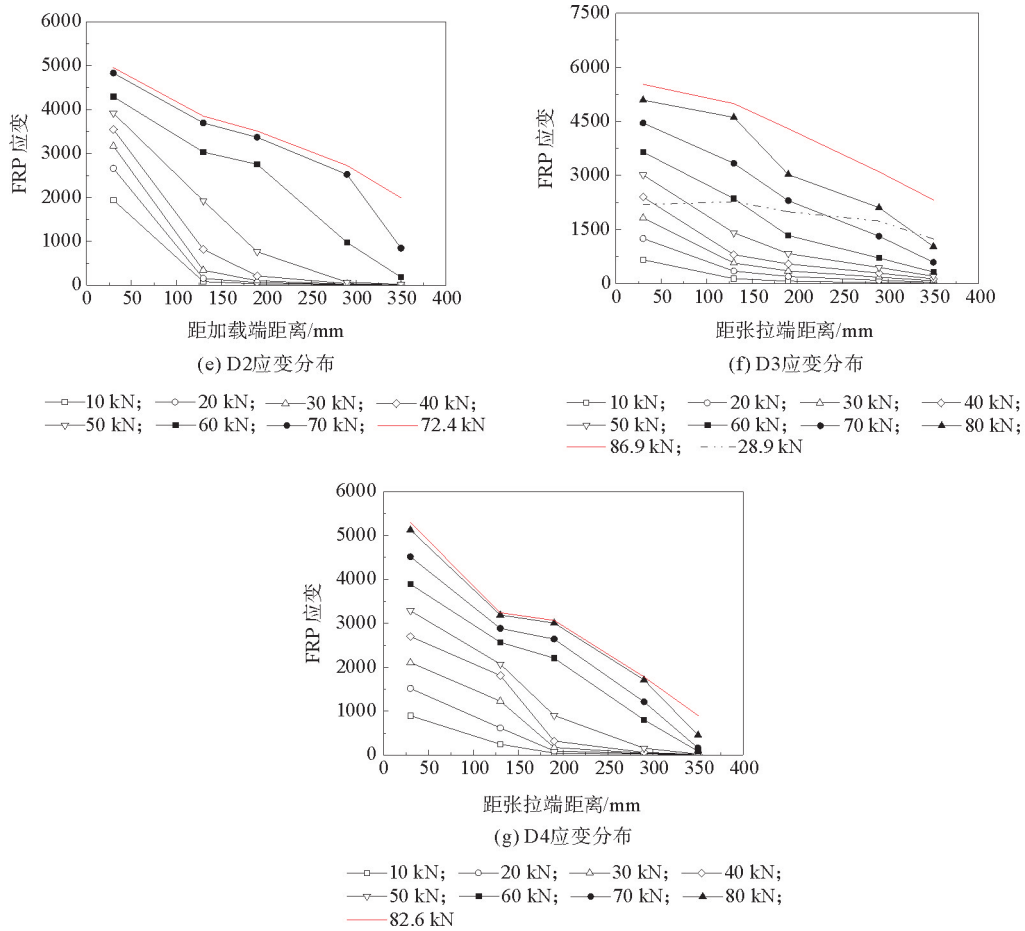


图 8 FRP 应变分布

2.4 HB-FRP 黏结界面黏结应力-滑移关系

本研究使用文献[14]给出的公式计算外贴 FRP 和扣件位置 FRP 的滑移量和黏结应力,测点布置如图 9 所示。

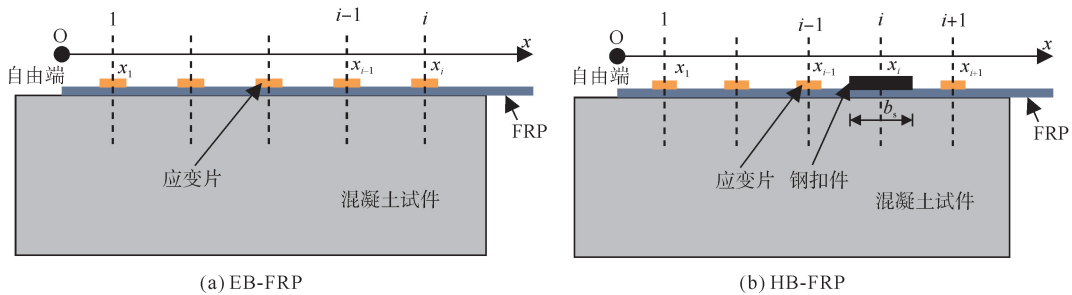


图 9 测点计算示意

EB-FRP 和 HB-FRP 中无钢扣件区域的 FRP 滑移 $S_{a,i}$ 用式(1)计算:

$$S_{a,i} = S_{a,i-1} + \frac{(\epsilon_i + \epsilon_{i-1})}{2} (x_i - x_{i-1}) \quad (i=1, \dots, n) \tag{1}$$

式中: ϵ_i 为 FRP 在 i 区的应变; x_i 为 i 区域距离自由端的位置; n 为应变片数值的编号。

黏结应力 $\tau_{a,i}$ 用式(2)计算:

$$\tau_{a,i} = \frac{(\epsilon_i - \epsilon_{i-1}) \times E_f \times t_f}{(x_i - x_{i-1})} \quad (i=1, \dots, n) \tag{2}$$

式中: E_f 为 FRP 板的弹性模量; t_f 为 FRP 板的厚度。

钢扣件位置的 FRP 滑移 $S_{m,i}$ 用式(3)计算:

$$S_{m,i} = S_{m,i-1} + \frac{(\epsilon_i + \epsilon_{i-1})}{2} (x_i - x_{i-1}) \quad (i=2, \dots, n_m) \quad (3)$$

式中: n_m 为自由端起最后一个钢扣件的编号; ϵ_i 由线性插值计算获得。

钢扣件位置的黏结应力 $\tau_{m,i}$ 用式(4)计算:

$$\tau_{m,i} = \frac{(\epsilon_{i+1} - \epsilon_{i-1}) \times E_f \times t_f}{b_s} \quad (i=m, \dots, n_m) \quad (4)$$

式中: b_s 为钢扣件的宽度。

试验得到的钢扣件下 FRP 黏结-滑移关系如图 10 所示。由图 10 可知,在加载初始,FRP 的黏结应力与滑移量成正比,随着 FRP 的剥离,FRP 滑移量逐渐增大。加至剥离荷载时,FRP 完全剥离,黏结应力降低,滑移量增长迅速,由于钢扣件的存在,D 组试件黏结应力降至稳定的残余应力。试件 A0 的黏结应力最小,在 FRP 剥离后持续降低。试件 C2 由于 FRP 脱胶导致剥离荷载后无残余应力。

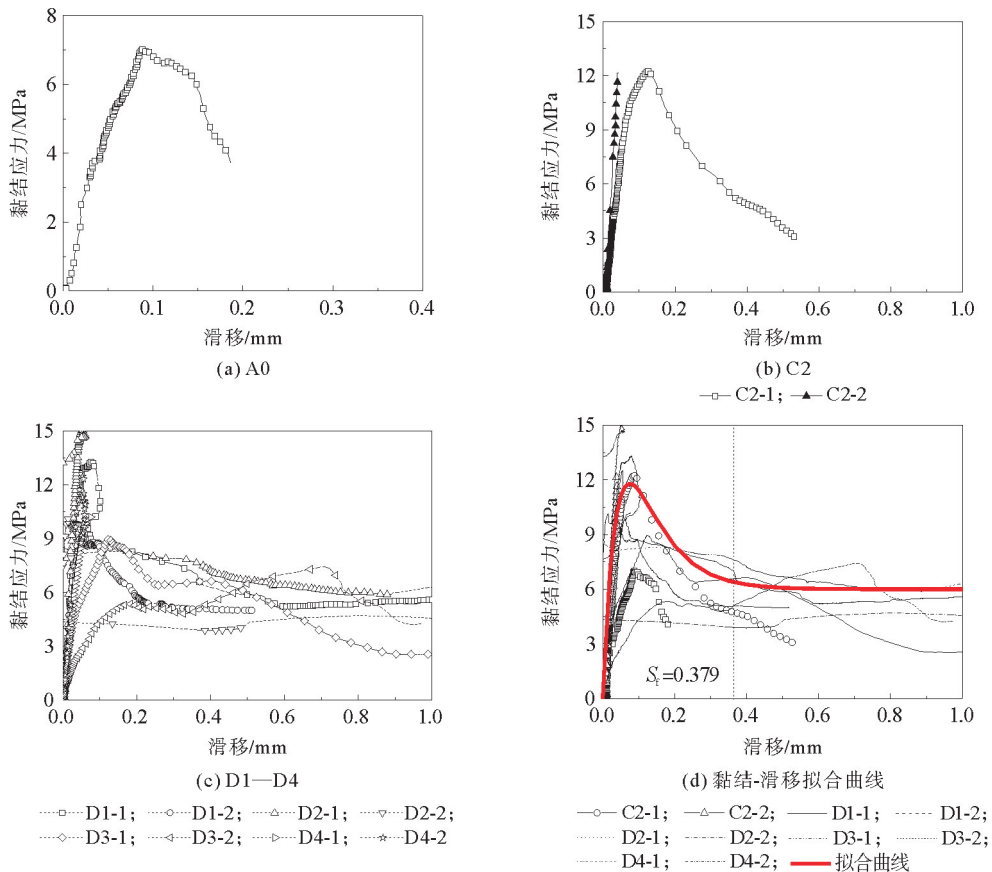


图 10 黏结-滑移曲线

本试验不考虑销栓作用的影响,基于高磊等^[16]提出的无销栓作用的 HB-FRP 加固混凝土结构组合界面黏结-滑移统一模型进行验证:

$$\tau_s = E_f t_f \frac{\alpha}{\beta^2} \left(e^{-\frac{s}{\alpha}} - e^{-\frac{2s}{\alpha}} \right) + \tau_{res} \left(1 - e^{-\frac{s}{\alpha}} \right) \quad (5)$$

式中: τ_s 为界面黏结强度; E_f 、 t_f 分别为 FRP 的弹性模量和厚度; α 和 β 为影响曲线形状的相关系数; τ_{res} 为界面摩擦应力; s 为 FRP 的滑移量。

式(5)的前半部分与已有 FRP 黏结混凝土形式一致,后半部分采用以摩擦应力为系数的指数函数。

在加载过程中,由于FRP的变形过大会导致应变数据失效,使部分试件无法测得破坏后的黏结应力。将试件C2、D1、D2、D3和D4的曲线数据进行拟合,拟合曲线如图10(d)所示,其中 S_f 表示黏结作用完全消失时FRP的滑移量。进而得到控制参数 α 和 β 的值0.085和28.296。

2.5 HB-FRP黏结界面剥离荷载计算

HB-FRP黏结界面的剥离荷载 P 可由下式计算:

$$P = \beta_f b_f \sqrt{2E_f t_f B_f} \quad (6)$$

$$\beta_f = \sqrt{\frac{2 - b_f/b_c}{1 + b_f/b_c}} \quad (7)$$

$$B_f = \int_0^s \tau(s) ds \quad (8)$$

式中: β_f 为FRP板宽度系数; b_f 、 b_c 分别为FRP板和混凝土的宽度; B_f 为界面剥离破坏能,该值由式(5)带入求得; s 为扣件加载端的FRP滑移量(方向为加载端至自由端),可通过式(1)和式(3)计算得到。

当扣件位置的FRP滑移量 s 高于 S_f 时,该位置的FRP完全剥离,界面剥离强度直接通过界面摩擦应力计算。将试件各扣件处的剥离荷载 P_i 叠加即可得到试件的总剥离荷载 P 。计算结果如表3和图11所示。由计算结果可知,剥离荷载试验值和计算值的相关性系数为0.911,结果较为吻合,式(6)可用于计算HB-FRP组合界面的剥离荷载。进一步验证了黏结-滑移统一模型具有良好的可靠性。

表3 剥离荷载试验值和计算值对比

试件编号	S_1/mm	S_2/mm	S_3/mm	P_1/kN	P_2/kN	P_3/kN	剥离荷载 P/kN	
							试验值	计算值
A0	—	—	—	—	—	—	39.3	39.9
B1	0.62	—	—	18.4	—	—	29.9	18.4
C2	0.72	0.34	—	18.4	46	—	79.9	64.4
D1	1.43	0.62	0.16	18.4	18.4	38.6	76.5	75.4
D2	1.52	0.54	0.15	18.4	18.4	37.4	70.2	74.2
D3	1.54	0.56	0.19	18.4	18.4	41.8	86.8	78.6
D4	1.51	0.61	0.17	18.4	18.4	39.7	82.6	76.5

注: S_i 为对应扣件滑移量; P_i 为对应扣件位置的剥离荷载。

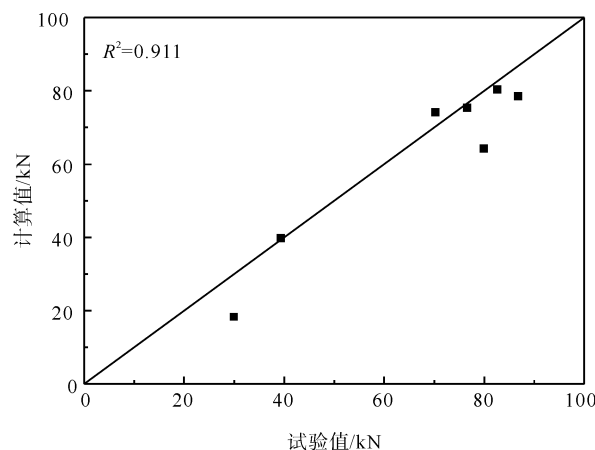


图11 剥离荷载试验值和计算值的相关性

3 结论

本研究进行了EB-FRP和HB-FRP加固试件的单向剪切试验,对试验结果和试验数据进行分析,得出以下结论:

1) HB-FRP 试件的剥离荷载相较于 EB-FRP 提高了 89.4%~164.1%,FRP 利用率提高了 61.6%~139.4%,有效地抑制了 FRP 的过早剥离;HB-FRP 试件的剥离荷载和 FRP 利用率均随着扣件个数和扭矩的增加而提高。

2) FRP 黏结层过厚会导致加载过程中 FRP 脱胶,造成 FRP 与混凝土之间的摩擦消失,进而丧失残余承载能力。

3) HB-FRP 黏结界面剥离荷载计算表达式的计算结果与试验结果具有较好的一致性。

参考文献(References):

- [1] BAKIS C E, BANK L C, BROWN V L, et al. Fiber-reinforced polymer composites for construction-state-of-the-art review[J]. Journal of Composites for Construction, 2002, 6(2): 73-87.
- [2] BANK L C. Composites for construction; Structural design with FRP materials[M]. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2006.
- [3] TENG J G, SMITH S T, YAO J, et al. Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs[J]. Construction and Building Materials, 2003, 17(6/7): 447-462.
- [4] MOHAMMADI T, WAN B, HARRIES K A, et al. Bond behavior of FRP-concrete in presence of intermediate crack debonding failure[J]. Journal of Composites for Construction, 2017, 21(5): 04017018.
- [5] ROSENBOOM O, RIZKALLA S H. Experimental study of intermediate crack debonding in fiber-reinforced polymer strengthened beams[J]. ACI Structural Journal, 2008, 105(1): 41.
- [6] 殷雨时, 范颖芳, 徐义洪. 粗糙度对 CFRP-混凝土界面剪切黏结性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(2): 202-207.
YIN Yushi, FAN Yingfang, XU Yihong. Roughness effects on the shear bonding properties of interface between CFRP and concrete[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(2): 202-207.
- [7] 苏寅博. 混凝土表面处理对 CFRP-混凝土界面黏结性能影响的试验研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2012.
SU Yinbo. Experimental study on the effect of concrete surface treatment on the bond property of CFRP-concrete interface[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2012.
- [8] 陈泱. FRP-混凝土界面黏结性能提升技术的增强机理与试验研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2015.
CHEN Yang. Experimental study on the mechanism of the promoting technique of the bonding performance of the FRP to concrete surface[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2015.
- [9] WU Y F, HUANG Y. Hybrid bonding of FRP to reinforced concrete structures[J]. Journal of Composites for Construction ASCE, 2008, 12(3): 266-273.
- [10] WU Z M, HU C H, WU Y F, et al. Application of improved hybrid bonded FRP technique to FRP debonding prevention[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(6): 2898-2905.
- [11] ZHOU Y, GOU M, ZHANG F, et al. Reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer by friction hybrid bond technique; Experimental investigation[J]. Materials & Design, 2013, 50: 130-139.
- [12] 张峰, 徐向锋, 李术才. HB-FRP 加固混凝土结构的黏结滑移模型[J]. 中国公路学报, 2015, 28(1): 38-44.
ZHANG Feng, XU Xiangfeng, LI Shucai. Bond-slip model for HB-FRP systems bonded to concrete[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(1): 38-44.
- [13] 张峰, 徐向锋, 李术才. HB-FRP 加固混凝土结构的黏结滑移统一模型[J]. 应用数学和力学, 2015, 36(12): 1294-1305.
ZHANG Feng, XU Xiangfeng, LI Shucai. A unified bond-slip model for HB-FRP strengthened concrete structures[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2015, 36(12): 1294-1305.
- [14] LIU K. Computational and experimental studies on shear dominant composite structures[D]. Hong Kong: City University of Hong Kong, 2011.
- [15] WU Y F, LIU K. Characterization of mechanically enhanced FRP bonding system[J]. Journal of Composites for Construction, 2013, 17(1): 34-49.
- [16] 高磊, 张峰. HB-FRP 加固混凝土结构组合界面黏结特性[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(6): 969-976.
GAO Lei, ZHANG Feng. Composite interfacial bonding characteristics of HB-FRP to concrete structures[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(6): 969-976.

(责任编辑 张晓靖; 英文校审 程文华)