

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.08.025

HB-FRP 加固 RC 梁的精细有限元分析

张 峰¹,徐向锋^{2,3},李术才¹

(1.山东大学 岩土与结构工程研究中心,250061 济南;2.长沙理工大学 土木与建筑学院,
410076 长沙;3.山东交通学院 土木学院,250023 济南)

摘 要:为研究 EB-FRP(externally bonded FRP)和 HB-FRP(hybrid bonded FRP)加固梁的抗弯性能差异.基于 3 片室内模型梁的试验及精细化有限元数值模拟,选取了合适的材料模型,基于钝带裂缝模型,考虑钢筋与混凝土及 FRP 与混凝土的粘结滑移,对比分析试验数据,验证了数值有限元模型的有效性.结果表明:EB-FRP 加固梁破坏形态为 FRP 端部剥离破坏,HB-FRP 加固梁为剪切破坏;与未加固梁相比,HB-FRP 加固梁承载能力比 EB-FRP 加固梁增加约 20%;HB-FRP 加固梁破坏时,FRP 的强度完全发挥;钢扣件有效提高了 FRP 的抗剥离能力.

关键词: HB-FRP;混凝土;钝带裂缝模型;有限元;抗弯承载力;界面剪应力

中图分类号: TU377.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2015)08-0125-04

Meso-scale finite element analysis of HB-FRP strengthened reinforced concrete beams

ZHANG Feng¹, XU Xiangfeng^{2,3}, LI Shucan¹

(1. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, 250061 Jinan, China;
2. School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science & Technology, 410076 Changsha, China;
3. Department of Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, 250023 Jinan, China)

Abstract: Flexural behavior of EB-FRP (externally bonded FRP) and HB-FRP (hybrid bonded FRP) strengthened RC beams is studied in this paper. Three beams test and finite element analysis was conducted. Basis on appropriate material model, blunt crack model, modelling of steel and FRP and their bond behavior, numerical finite element model is verified by comparing with model test results. The results show that failure mode of EB-FRP strengthened beams is plate end interfacial deboning. Failure mode of HB-FRP strengthened beams is shear failure. Compared with the beams without FRP strengthening, the flexural capacity increased by 20% for HB-FRP than EB-FRP. The FRP stress is about FRP strength for HB-FRP and steel fasteners effectively prevent FRP deboning.

Keywords: HB-FRP; concrete; blunt crack model; finite element method; flexural capacity; interfacial shear stress

2008 年,香港城市大学建筑系提出了一种新的粘贴技术^[1](hybrid bonding FRP,HB-FRP)(图 1),该技术结合了 FRP 外贴法和机械锚固法,前期 HB-FRP 加固梁试验研究显示其界面粘结强度比传统的外贴 FRP 高 7.5 倍.该技术解决了钢筋混凝土结构表面粘贴贴 FRP (externally bonded FRP, EB-FRP)易剥离的缺点.

HB-FRP 加固方法的研究相对较少,且基本为模型试验的相关研究^[2-3],HB-FRP 加固方法的数值模拟研究文献仅有 2 篇.Wu 等^[4]对 HB-FRP 抗

弯加固混凝土梁进行了数值模拟.Zhou 等^[5]基于 ANSYS 软件建立了 HB-FRP 抗弯加固梁的数值模型,由于其网格尺寸较大,并未对 FRP 的应变及 FRP 与混凝土的界面力学性能开展研究.

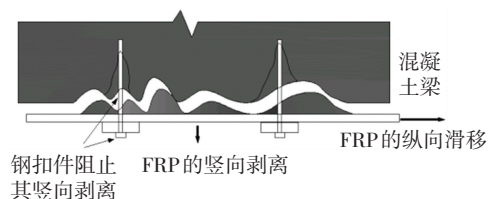


图 1 HB-FRP 加固

依托室内模型试验和精细化数值模拟研究了 HB-FRP 抗弯加固梁的受力性能.

1 模型梁简介

模型试验梁的混凝土标号为 C40,纵向受拉钢筋

收稿日期:2014-09-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51108249).

作者简介:张 峰(1978—),男,副教授,硕士生导师;

李术才(1965—),男,教授,博士生导师.

通信作者:张 峰,zhangfeng2008@sdu.edu.cn.

采用 $\phi 12\text{HRB335}$ 级钢筋,架立筋和箍筋采用 $\phi 10\text{HRB335}$ 级钢筋,碳纤维布抗拉强度为 3 500 MPa,弹性模量为 230 GPa.CFRP 单层厚度为 0.167 mm,粘贴 2 层 FRP,粘贴长度为 2 300 mm,粘贴宽度为 60 mm.

EB-FRP 加固梁的应变片沿 FRP 条带纵向以 100 mm 的间距粘贴.HB-FRP 加固梁(图 2)在相邻 2 个钢扣件的中间位置粘贴应变片(图 3).梁的加载位置在纯弯段的端部,即不配箍筋区域的端部对称加载.

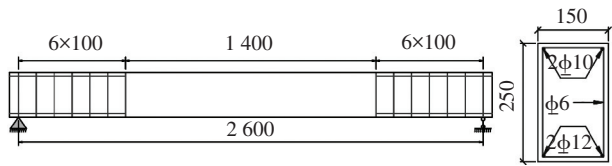


图 2 矩形梁截面尺寸及配筋图 (mm)

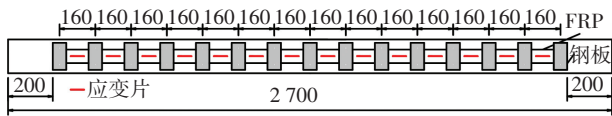


图 3 应变片布置 (mm)

钢扣件(图 4)的钢板尺寸为:长 120 mm,宽 60 mm,厚 5 mm,35 号高强螺栓长度 50 mm,直径 10 mm.

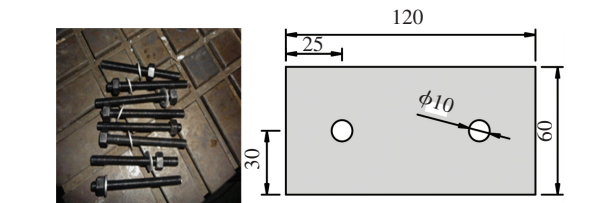


图 4 锚固件尺寸 (mm)

共设计 3 根梁,梁的编号及加固方式见表 1.

表 1 HB-FRP 加固梁的试验参数

梁号	加固方式	钢扣件间距/mm
NB1	不加固	
EB2	EB-FRP	
HB3	HB-FRP	160

2 数值模型

2.1 单元模型

FRP-混凝土的界面剥离深度仅有几毫米^[6].FRP 单元和混凝土单元可共用节点,但要求网格非常精细.本文中钢筋与混凝土界面及 FRP 与混凝土界面均考虑粘结滑移特性,通过粘结单元 COH2D4 单元模拟^[7].基于 traction-separation 模型考虑粘结单元的刚度.采用 MAXS 损伤准则考虑粘结滑移的退化关系.

HB-FRP 加固体系中 FRP 部位的粘结滑移处理方法与 EB-FRP 一致.钢扣件部位的钢板直接与 FRP 通过“tie”绑定约束,钢扣件的钢钉直接内嵌入混凝土单元中.

梁体混凝土单元 (CPS4)、钢筋单元 (T2D2)、

FRP 单元 (T2D2) 及钢扣件单元 (B21) 的尺寸均设置为 5 mm.以 HB3 梁的建模为例,图 5 表示了本文考虑的粘结滑移方式.

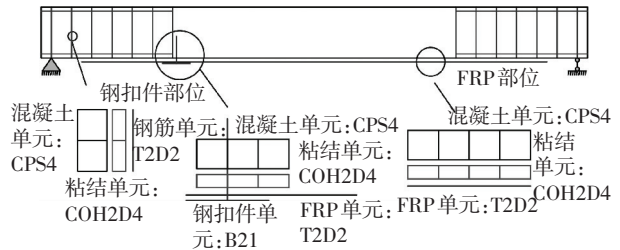


图 5 单元模型

钢筋和混凝土粘结滑移采用 CEB-FIP 规范推荐表达式^[7],混凝土与 FRP 布的粘结滑移关系采用 Lu XZ 模型^[8].

2.2 裂缝模型

裂缝模型通常有 2 种:离散裂缝模型^[9]及弥散裂缝模型^[10].本文采用钝带裂缝模型进行计算,钝带裂缝模型发展了传统的弥散裂缝模型,减小了单元尺寸的影响.裂缝宽度 w_i 定义为

$$w_i = \epsilon_{cr} L_{cr}.$$
 (1)

式中: ϵ_{cr} 为混凝土开裂应变; L_{cr} 为裂缝带宽可采用 $\sqrt{A}$ 计算, A 为单元面积.

混凝土单轴受压应力-应变曲线采用 Saenz 公式^[7],单轴受拉全应力-裂缝宽度曲线采用 Hordijk 公式^[7].混凝土采用塑性损伤模型,其混凝土强度准则及损伤计算公式可参考 ABAQUS 理论手册.

FRP 片材采用弹塑性模型.钢扣件的钢板由于刚度较大采用弹性材料模拟,钢钉由于尺寸较小,其刚度不大,采用弹塑性本构进行模拟.

3 钢筋混凝土梁加固后的抗弯性能

3.1 NB1 梁

对 NB1 进行数值模拟,数值分析结果与试验值吻合(图 6),试验测试的极限破坏荷载为 96.43 kN,数值模拟结果为 83.5 kN.

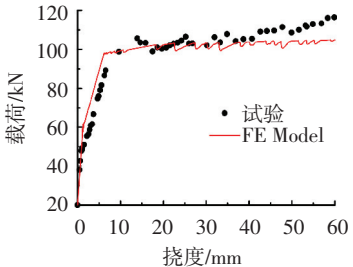


图 6 NB1 梁的跨中荷载挠度曲线

图 7 中 u 表示为加载点位置的竖向位移,单位为 mm,本文后续描述都按照此规定.分析图 7 可看出,梁体破坏形态为典型的弯曲破坏.

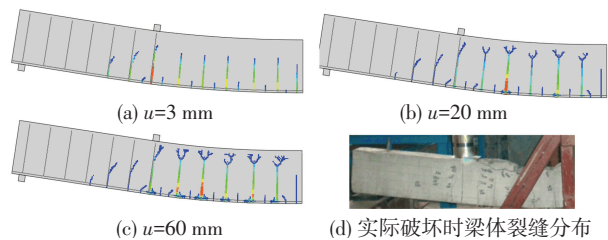


图 7 NB1 梁的数值模型及实测裂缝

3.2 EB2 梁

对 EB2 进行数值模拟,荷载挠度的曲线整体与试验值基本吻合(图 8),整体呈现为三折线特征,荷载挠度曲线的第三段与未加固梁有所差别:未加固梁出现了屈服平台,而 EB-FRP 加固梁在受拉钢筋屈服后,由于 FRP 抑制了裂缝的扩展,所以梁体还有残余刚度存在.试验测试的极限破坏荷载为 122.97 kN,数值模拟结果为 114.56 kN.

分析数值模拟结果(图 9)可以发现:FRP 端部出现较大的塑形区域,FRP 发生剥离.梁体裂缝表现为剪切破坏.

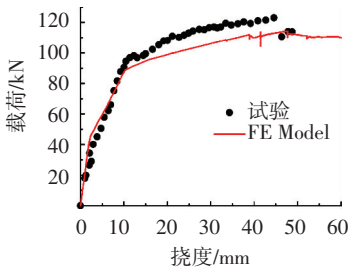


图 8 EB2 梁的跨中荷载挠度曲线

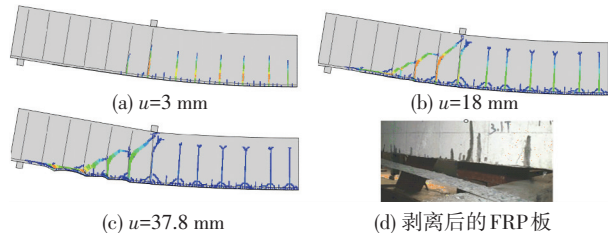


图 9 EB2 梁的数值模型及实测裂缝

3.3 HB3 梁

荷载挠度的曲线整体与试验值吻合(图 10),整体呈现为三折线特征.与 EB-FRP 加固梁相比,受拉钢筋屈服后的梁体残余刚度要大.试验测试的极限破坏荷载为 140.47 kN,数值模拟结果为 140.93 kN.

分析 HB-FRP 加固梁的裂缝扩展过程(图 11)可以看出:与 EB-FRP 加固梁相比,纯弯段钢扣件附近主弯曲裂缝附近出现了一些约 0.25 倍梁高的附加弯曲裂缝.表明采用 HB-FRP 加固梁体后,梁体中的最大应力区域不再发生在 FRP-混凝土界面及其附近位置,应力最大位置发生上移,钢扣件有明显的锚固作用,FRP 基底混凝土抗剥离能力增强.

HB-FRP 加固梁破坏时出现了典型的斜裂缝,表现为剪切破坏,其承载能力要较 FRP 剥离破坏的梁大.

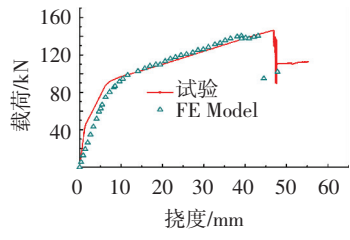


图 10 HB3 梁的跨中荷载挠度曲线

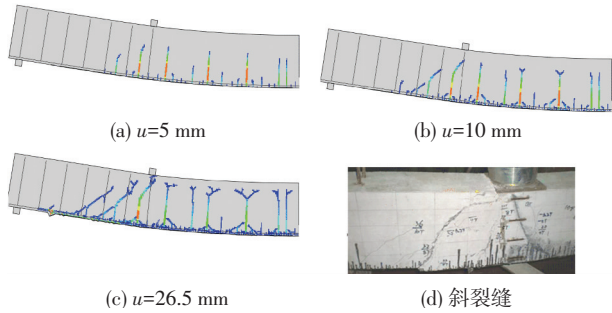


图 11 HB3 梁的数值模型及实测裂缝

3.4 FRP-混凝土剪应力分析

对比分析 FRP 应变的测试和数值分析结果(图 12).为了与数值模拟数据一致,图 12 中实测数据取两侧对称位置的平均值,取一半 FRP 长度进行对比分析.

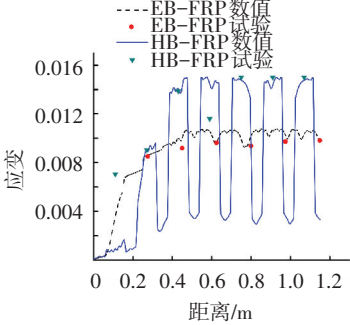


图 12 实测应变和数值模拟结果对比

EB-FRP 加固梁最终破坏时,FRP 的最大拉应变为 0.010 7,其强度约发挥 60%左右.HB-FRP 加固梁最终破坏时,FRP 的最大拉应变为 0.014 9,FRP 应变提高 39.95%.FRP 条带沿纵向的应变值在钢扣件位置有剧烈突变.

对 FRP 应变进行差分计算,可得到 FRP 与混凝土的界面剪应力分布^[8].分析 EB-FRP 加固梁与 HB-FRP 加固梁破坏阶段 FRP-混凝土界面剪力分布特性(图 13).由于模型试验测点过少,该方面的分析完全采用数值模拟计算结果.

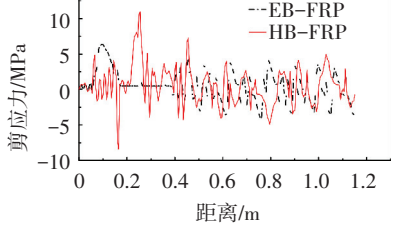


图 13 界面剪应力分布

EB-FRP 加固梁发生 FRP 端部剥离时,FRP-

混凝土界面剪应力发展至 6.02 MPa.由于跨中纯弯段存在多条弯曲主裂缝,FRP-混凝土的界面剪应力分布较为复杂,出现正负号交错的现象.HB-FRP 加固梁破坏时,斜裂缝位置的 FRP 界面剪应力发展至 10.94 MPa.钢扣件位置处的剪应力要较 FRP 其余位置大,表明钢扣件有效提高了 FRP 的抗剥离能力.

3.5 不同梁的力学特性比较

- 1)破坏形态方面:NB1 梁为弯曲破坏;EB2 梁为 FRP 剥离破坏;HB3 梁为剪切破坏.
- 2)承载能力方面:与 NB1 梁(96.43 kN)相比,EB2 梁承载能力(122.97 kN)提高 27.52%.HB3 梁(140.47 kN)提高 45.67%.
- 3)FRP 应变方面:与 EB2 梁相比,HB3 梁体破坏时 FRP 应变提高 39.95%.
- 4)界面剪应力方面:EB2 梁为 6.02 MPa,HB3 梁为 10.94 MPa,提高 81.73%.

4 HB-FRP 加固体系的构造布置

HB-FRP 加固方法依然为一种“微损”加固方法,需要在梁体表面钻孔后安装钢扣件.实际工程应用时应采取以下原则:在满足加固效果的前提下,钢扣件的布置间距及钢扣件的栓钉长度应该尽量小,避免对梁体本身产生损伤.

选取 HB3 模型开展研究,以下栓钉长度分别取 30、40、50 mm 开展计算分析,得到栓钉长度对承载能力的影响,见表 2.栓钉长度越长,HB-FRP 加固体系的锚固性能越好.但是栓钉长度达到 40 mm 后,其对承载能力的影响已不大.考虑到实际工程加固时,栓钉的长度超过混凝土保护层厚度(一般为 50 mm)时,可能会对钢筋产生损伤,建议栓钉长度可设定为 50 mm.

表 2 栓钉长度对承载能力的影响

栓钉长度/mm	承载能力/kN
30	128.970
40	137.395
50	140.930

进一步分析钢扣件间距对承载能力的影响,选取 HB3 模型开展研究,分别选取钢扣件间距为 160、240、320 mm 进行参数分析(表 3).

表 3 钢扣件间距对承载能力的影响

钢扣件间距/mm	承载能力/kN
160	140.93
240	141.08
320	141.30

分析表 3 可看出:钢扣件间距对梁体的抗弯承载能力影响很小,建议实际工程加固时,钢扣件间距取 300 mm 即可.

5 结 论

- 1)基于钝带裂缝模型,选取合适的混凝土本构模型,建立了精细化的数值模型,有效模拟了梁体的全过程破坏.
- 2)与未加固梁相比,EB-FRP 加固梁承载能力提高了 27.52%,HB-FRP 加固梁抗弯承载能力提高了 45.67%,比 EB2 梁增加 20%左右.
- 3)HB-FRP 加固梁破坏时,FRP 应变比 EB-FRP 加固梁提高 39.95%.
- 4)给出了 HB-FRP 加固体系的构造布置原则及规定.

参考文献

[1] WU Yufei, HUANG Yue. Hybrid bonding of FRP to reinforced concrete structures [J]. Journal of Composites for Construction, 2008,12(3):266-273.

[2] 张峰,牛平霞,李树忱,等.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,2010,32(6):7-13.

[3] WU Zhimin, HU Chenghe, WU Yufei,et al. Application of improved hybrid bonded FRP technique to FRP debonding prevention [J]. Construction and Building Materials, 2011,25(6):2898-2905.

[4] WU Yufei, WANG Zhenyu, LIU Kang, et al. Numerical analysis of hybrid-bonded FRP strengthened concrete beams [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2009,24:371-384.

[5] ZHOU Yinzhi, GOU Mingkan, ZHANG Fengyu, et al. Reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer by friction hybrid bond technique: Experimental investigation [J]. Material and Design, 2013,50:130-139.

[6] 陆新征.FRP-混凝土界面行为研究[D].北京:清华大学,2005.

[7] CHEN Guangming, CHEN Jianfei, TENG Jinguang.On the finite element modeling of RC beams shear-strengthened with FRP [J]. Construction and Building Materials, 2012, 32:13-26.

[8] LU X Z, TENG J G, YE L P, et al. Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete [J]. Engineering Structures, 2005,27(6):920-937.

[9] YANG Zhenjun, CHEN Jianfei, PROVERBS D. Finite element modelling of concrete cover separation failure in FRP plated RC beams [J]. Construction and Building Material, 2003,17(1):3-13.

[10] NEALE K W, EBEAD U A, BAKY H M, et al. Analysis of the load-deformation behaviour and debonding for FRP-strengthened concrete structures [J]. Advances in Structural Engineering, 2006,9(6):751-763.