

U型锚固对BFRP加固混凝土梁作用效果研究

黄丽华,王文广,陈健

(大连理工大学建设工程学部土木工程学院,辽宁 大连 116024)

摘要 目的 研究端部U型锚固和沿全梁U型锚固对玄武岩纤维布加固钢筋混凝土梁的作用效果。方法 以两种U型锚固方式的BFRP加固钢筋混凝土试验梁为研究对象,采用扩展有限元模拟混凝土裂缝扩展,利用界面粘结单元计算BFRP与混凝土之间的界面应力,分析两种U型锚固形式下BFRP加固混凝土梁的裂缝扩展、界面应力、BFRP应力以及加固梁的失效机理。结果 端部U型锚固下BFRP加固梁的极限承载力高于全梁U型锚固的加固梁,随着荷载的增加,裂缝位置的局部高应力向两侧移动,界面应力和BFRP布的拉应力沿全梁分布更均匀,加固梁易产生界面剥离破坏;而全梁锚固的加固梁U型箍间裂缝位置处的BFRP局部应力增加迅速,易发生局部BFRP布拉断破坏。结论 当BFRP加固混凝土梁只产生剪切裂缝时,全梁U型锚固的加固效果好于端部U型锚固方式,全梁U型锚固下BFRP加固混凝土梁的承载力更高、变形更小。

关键词 U型箍;BFRP加固混凝土梁;混凝土裂缝;扩展有限元

中图分类号 TU528.572

文献标志码 A

Study on Effect of U Anchorages on Concrete Beams Reinforced by BFRP

HUANG Lihua, WANG Wenguang, CHEN Jian

(School of Civil Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China, 116024)

Abstract: In order to study the effect of two types of U-stirrups anchored at the end of the beam and along the whole beam on the reinforced concrete beams strengthened by basalt fiber reinforced plastic (BFRP), two specimens from the experiment are specified as the study objects in this paper. Through applying Extended Finite Element to simulate concrete cracking and Cohesive Zone Element to calculate the bonding stress between BFRP and concrete, the crack propagation, interfacial stress, BFRP stress and failure mechanism of BFRP strengthened concrete beams are analyzed. The results show that the ultimate bearing capacity of the BFRP strengthened beam with

收稿日期:2019-07-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51778113)

作者简介:黄丽华(1967—),女,教授,主要从事工程力学分析及结构加固设计等方面研究。

U-stirrup at two ends is higher than that of the U-stirrup along the whole beam. With the increase of load, the locally high stress at the crack position moves to both sides, and the interfacial stress and the tensile stress of BFRP are more evenly distributed along the whole beam, which can produce debonding failure on the interface. However, the local stress of BFRP increases rapidly at the crack position between two U-stirrups for the whole beam anchorage, which can generate local BFRP rupture. When there are only shear cracks developed in BFRP reinforced concrete beams, the strengthening effect of the whole beam U-anchorage is better than that of the end U-anchorage. In this case, BFRP reinforced concrete beam is of higher loading capacity and smaller deformation.

Key words: U-stirrup; BFRP strengthened concrete beams; concrete crack; extended finite element

由于纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Plastic, FRP)重量轻、抗拉强度高、施工和运输过程简单,目前已成为钢筋混凝土结构修复和加固的主要材料^[1]. FRP与混凝土界面的黏结性能是影响结构修复和加固效果的主要因素之一^[2-5]. FRP与混凝土的界面黏结性能与混凝土保护层强度、胶粘层的粘结强度、施工方法以及混凝土强度等因素有关^[6]. 已有实验研究表明,在规范施工技术条件下,混凝土开裂导致裂缝附近界面应力的骤然增大,是导致FRP与混凝土界面剥离的主要原因^[7-10]. 工程中通常用预应力FRP加固混凝土板或梁,有效控制混凝土开裂,提高FRP材料利用率^[11-13],由于加载设备和施工条件过于复杂,推广使用受到一定局限. 目前防止FRP加固混凝土梁界面剥离的常用方法是在梁端部或沿全梁粘贴FRP-U型箍^[14],通过U型锚固来抑制混凝土裂缝扩展,增加FRP与混凝土间的粘结性能,防止FRP布与混凝土界面过早剥离.

利用数值方法预测混凝土裂缝引起的界面剥离问题,国内外学者开展了大量研究^[15-18]. 陆新征^[19]采用精细有限元模型进行分析,提出了FRP布与混凝土界面的粘结滑移本构关系. Wu Z等^[20]提出了碳纤维布(Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP)加固带缝混凝土梁的解析解,计算了加固梁的极限承载力,通过与试验结果进行比较验证有效性. Chen F等^[21]提出了一种新型界面建模方法,探究了FRP-混凝土界面的整体剥离

过程,得到了不同阶段的FRP粘结滑移、界面剪应力和轴向力的闭合解. Xu R^[22]采用传递矩阵法(Transfer Matrix Method, TMM)分析了纤维布加固带缝混凝土梁,推导了FRP加固梁的传递矩阵,并采用节点耦合矩阵法(Joint Coupling Matrix, JCM)求解了FRP板的应力、位移、界面剪应力和轴向力. 在数值分析软件ABAQUS中,可采用混凝土塑性损伤模型和扩展有限元模型模拟混凝土开裂及裂缝扩展,其中基于混凝土塑性损伤模型(Plastic Damage Model, PDM)的数值计算精度受网格尺寸影响较大,只有通过细化网格才能准确反映裂缝位置及扩展路径,相应的计算量较大. 扩展有限元方法(Extended Finite Element Method, XFEM)通过改进单元形函数,在单元节点上增加自由度来求解裂缝位置处的不连续问题,裂缝扩展不再受单元边界和单元尺寸限制,能够较好地模拟裂缝贯穿单元过程. 该方法需要预设裂缝位置,且计算结果受到材料线性本构模型的影响.

笔者采用扩展有限元方法,分析BFRP加固混凝土试验梁在荷载作用下的裂缝扩展,采用界面粘结单元分析由混凝土裂缝引起的界面应力分布. 通过计算端部BFRP-U型锚固和沿全梁BFRP-U型锚固下,BFRP加固混凝土梁的承载力、变形、混凝土裂缝扩展引起的界面应力以及BFRP布应力,研究两种锚固形式对加固梁的强度、变形以及混凝土裂缝扩展的作用效果,进而分析不同锚固形式下加固梁的破坏机理.

1 试 验

笔者从 7 个 BFRP 加固钢筋混凝土试验梁中选取两个代表性试件作为数值计算模型,分别是端部 3 个 U 型箍锚固和全梁两层 U 型箍锚固的加固钢筋混凝土梁,几何尺寸及配筋如图 1 所示. 其中混凝土弹性模量为 33.3 GPa,单轴抗拉强度为 2.71 MPa,单轴

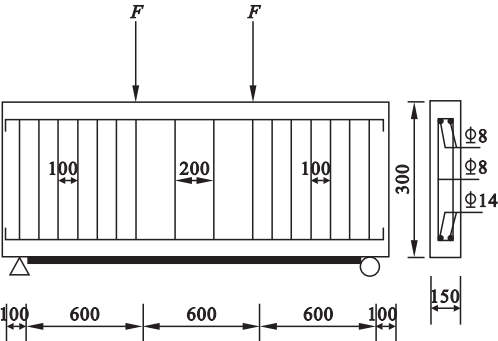


图 1 试验梁参数及加载位置
Fig. 1 Profile of the specimen

抗压强度为 30.5 MPa,泊松比为 0.2;钢筋弹性模量取为 200 GPa,泊松比为 0.3,屈服强度为 500 MPa.

梁底面两支座之间沿纵向粘贴 BFRP 布,宽度和长度分别为 100 mm 和 1 700 mm,材料常数见表 1. BFRP-U 型端部锚固和全梁锚固形式如图 2 所示,其中端部锚固为距纤维布端部 280 mm 范围内均匀布置三个 U 型箍;全梁锚固为顺着梁长度方向布置间距为 50 mm、宽度为 60 mm 的 U 型箍. 试验结果显示,端部锚固的试验梁产生了界面剥离破坏,而沿全梁锚固的试验梁最终产生了 BFRP 布拉断破坏.

表 1 BFRP 的材料常数
Table 1 Mechanical properties of BFRP

材料	抗拉强度 f_f /MPa	弹性模量 E_f /GPa	厚度 t_f /mm	延伸率/%
BFRP	2 000	90	0.107	2

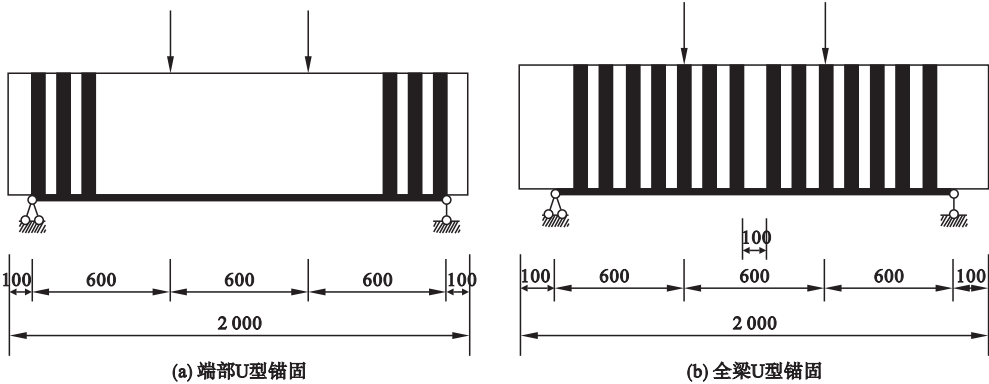


图 2 BFRP-U 形箍布置方式和位置
Fig. 2 Arrangement of BFRP-U stirrups

2 数值计算模型

采用有限元分析软件 ABAQUS 建立数值计算模型如图 3 所示,其中混凝土采用 C3D8R 实体单元,钢筋采用 T3D2 杆单元,BFRP 布采用 S4R 壳单元,忽略钢筋与混凝土间的滑移,裂缝间的混凝土应力值较小,故采用线弹性本构模型,钢筋采用理想弹塑性本构模型,BFRP 布则为线弹性材料.

2.1 混凝土裂缝计算

笔者采用有限元软件 ABAQUS6.12 中的扩展有限元模块开展混凝土裂缝扩展的数值分析,定义内聚力模型参数模拟混凝土从虚拟裂缝到完全开裂过程,采用最大主拉应力破坏准则,即当混凝土单元最大主拉应力达到极限抗拉强度时出现虚拟裂缝,当界面断裂能或裂缝张开位移达到临界值时,混凝土开裂形成自由表面,此时界面应力降为零.

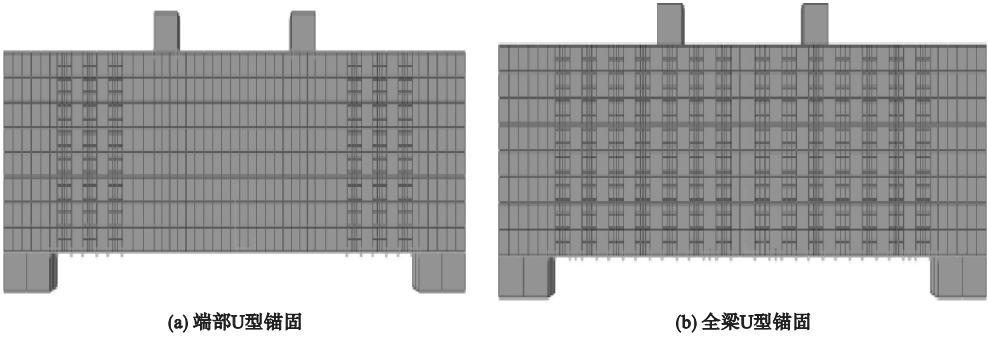


图3 有限元模型

Fig.3 Finite element models

笔者采用 H. E. Reihardt 等^[23]提出的指数型内聚力模型,表达式为

$$\begin{cases} f(\delta) = E_c \delta, & \delta \leq \delta_0; \\ f(\delta) = f_t \left[1 - \frac{e^{-\alpha \left(\frac{\delta - \delta_0}{\delta_f - \delta_0} \right)}}{1 - e^{-\alpha}} \right], & \delta_0 < \delta \leq \delta_f. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $f(\delta)$ 为混凝土内聚力; δ 为裂缝张开量; E_c 为混凝土材料的弹性模量; f_t 为混凝土材料的抗拉强度; α 为线型控制系数; δ_0 为混凝土内聚力达到抗拉强度时对应的裂缝张开量.当混凝土完全开裂,内聚力减小到零时,裂缝张开量 δ_f 取 0.16 mm. 由试算得到线型控制系数 α 取 10 时,加固梁在不同荷载等级下的裂缝高度与实验结果接近.

2.2 界面应力分析

采用零厚度的界面单元 COH3D8 模拟 BFRP 与混凝土之间的粘结滑移性能,BFRP 布与混凝土界面的本构关系采用陆新征^[24]提出的双线性模型(见图4),表达式见式(2)~式(5).

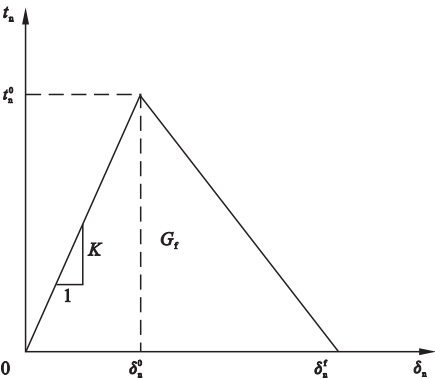


图4 双线性张力位移法则

Fig.4 Bilinear traction-separation law

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2.25 - b_f/b_c}{1.25 + b_f/b_c}}. \quad (2)$$

$$\tau_u = 1.5 \beta_w f_t. \quad (3)$$

$$s_0 = 0.0195 \beta_w f_t. \quad (4)$$

$$G_f = 0.308 \beta_w^2 \sqrt{f_t}. \quad (5)$$

式中: β_w 为宽度系数; b_f 为 BFRP 布的宽度; b_c 为混凝土梁的宽度; τ_u 为界面粘结强度; s_0 为峰值应力对应的滑移量; G_f 为界面断裂能.

将试验梁参数代入以上各式,计算得出界面粘结强度为 3.69 MPa,断裂能为 0.461 N/m.

3 数值计算结果分析

3.1 混凝土裂缝扩展计算

试验梁在端部锚固及沿全梁锚固下,裂缝分布及扩展情况如图5所示.为验证基于扩展有限元的数值计算结果,在端部锚固的试验梁上取 A、B、C 三条裂缝(见图5(a)),在全梁锚固的试验梁上取裂缝 D(见图5(b)),根据试验梁上标注的不同荷载等级下的裂缝高度,分别选取 55.4 kN、70.4 kN、105.3 kN、147.2 kN 荷载下各条裂缝高度与数值计算结果对比.

在混凝土裂缝扩展的数值分析中,依据试验梁主裂缝的分布位置,设置初始裂缝位置,建立扩展有限元模型.端部锚固梁的裂缝扩展如图6所示,图中数值表示试件开裂状态.从图中可以看出,随着荷载的增大,弯曲段裂缝垂直向上扩展,弯剪裂缝沿垂直于主拉应力方向扩展,裂缝形态与试验梁基本一致.



图 5 试验梁的裂缝分布及扩展

Fig. 5 Crack propagation of the specimens

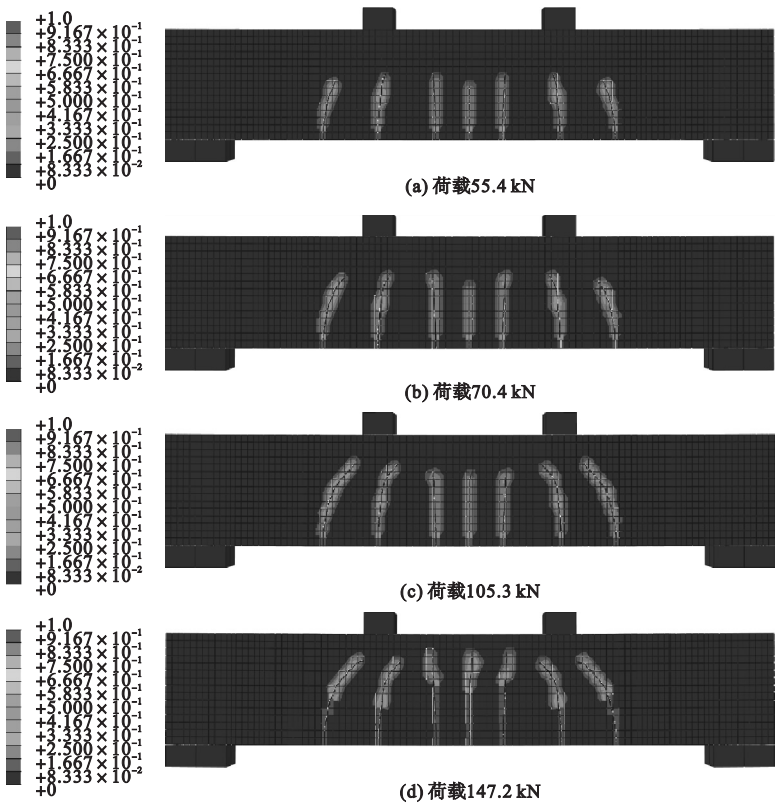


图 6 不同荷载等级下裂缝扩展云图

Fig. 6 Crack progress contour under different loads BFRP

BFRP 加固混凝土梁在不同荷载等级下,裂缝 A、B、C、D 高度的计算值与试验值对比结果如图 7 所示.从图中可以看出,荷载水平低于 105 kN,裂缝高度计算值与实验结果吻合较好.随着荷载的增加,计算误差不断增大,最大误差为 19.73%.产生误差的原因在于:①由于混凝土开裂后受拉区应力水平较低,在扩展有限元分析中采用了线弹性材料模型,与真实材料本

构模型存在差异;②试验梁混凝土材料不均匀,对裂缝扩展影响较大,而在数值分析中材料假设是均匀且各向同性;③采用扩展有限元计算混凝土裂缝时,随着荷载的增大裂缝将不断向前扩展,混凝土承载面积逐渐减少,此时裂缝尖端拉应力值较小,影响计算精度;④基于扩展有限元计算的裂缝高度是网格尺寸的倍数,与实际试件的裂缝扩展速度存在差异.

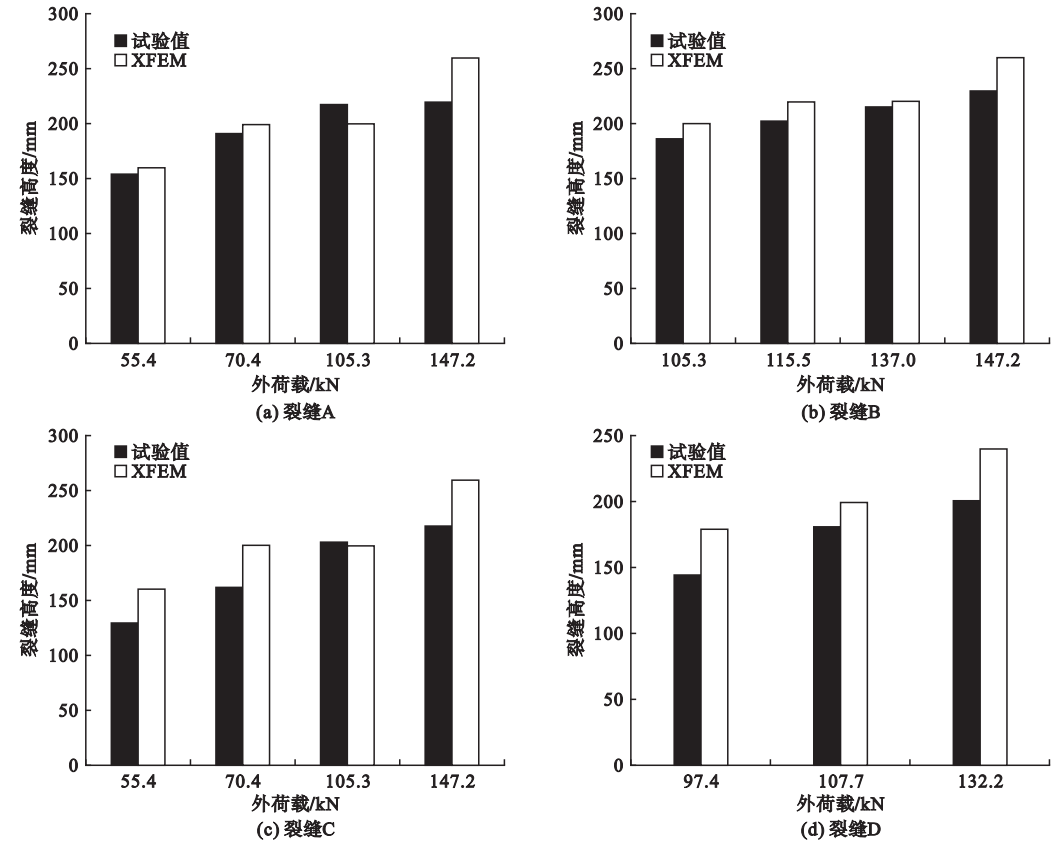


图 7 裂缝高度计算值与试验值对比

Fig. 7 Comparison of crack heights from XFEM and test

基于扩展有限元模型的 BFRP 加固梁荷载-位移曲线计算结果与试验结果对比如图 8 所示,端部锚固和全梁锚固的 BFRP 加固梁的屈服荷载计算值分别为 144 kN 和 128 kN,极限荷载计算值分别为 175 kN 和 169 kN.

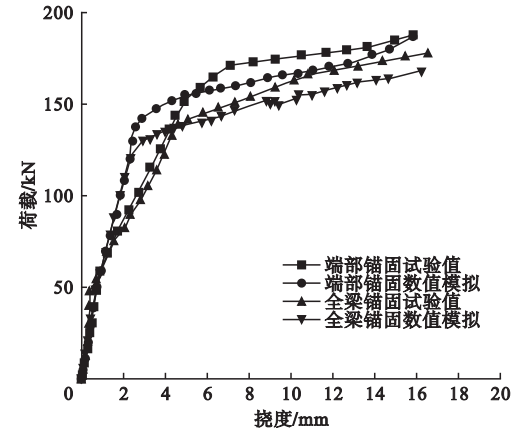


图 8 荷载-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curves from XFEM and experiment

图中试验梁的荷载位移曲线出现两次拐点,分别对应试验梁的开裂荷载和屈服荷载,而计算模型中材料采用线弹性本构关系,结果呈现明显的线弹性特征. 计算结果表明端部锚固下加固梁的强度高于全梁锚固情况,与试验结果一致.

3.2 界面应力分析

通过研究不同荷载等级下 BFRP 与混凝土界面的黏结单元应力,可分析不同锚固形式下加固梁的裂缝扩展对界面粘结应力的影响. 图 9 分别为两端锚固和全梁锚固形式下界面应力随荷载的变化曲线. 从图中可以看出,在混凝土开裂荷载 28 kN 左右,界面应力近似为零;当荷载增加到 143.4 kN 时,端部 U 型锚固梁钢筋尚未屈服,界面应力分布均匀且较小,最大值为 0.95 MPa,而全梁 U 型锚固下加固梁钢筋此时已屈服,跨中裂缝处的界面应力局部骤增,最大值达 3.58 MPa.

当荷载增加到 156 kN 时,端部锚固梁钢筋开始屈服,跨中界面应力增大到最大值 3.69 MPa,此时全梁锚固的加固梁裂缝位置处界面应力下降,裂缝位置局部界面剥离,但由于 U 型箍的存在,界面应力并未在纵向传播.随着外部荷载继续增加到 172 kN,端部

锚固梁跨中混凝土裂缝处出现界面剥离,且随着荷载的增加最大界面粘结应力向梁端移动,而全梁 U 型锚固限制了界面应力的移动,在每条裂缝位置处局部界面应力均较大,但没达到剥离应力,说明沿全梁 U 型锚固可抑制 BFRP 沿纵向与混凝土间发生界面剥离破坏.

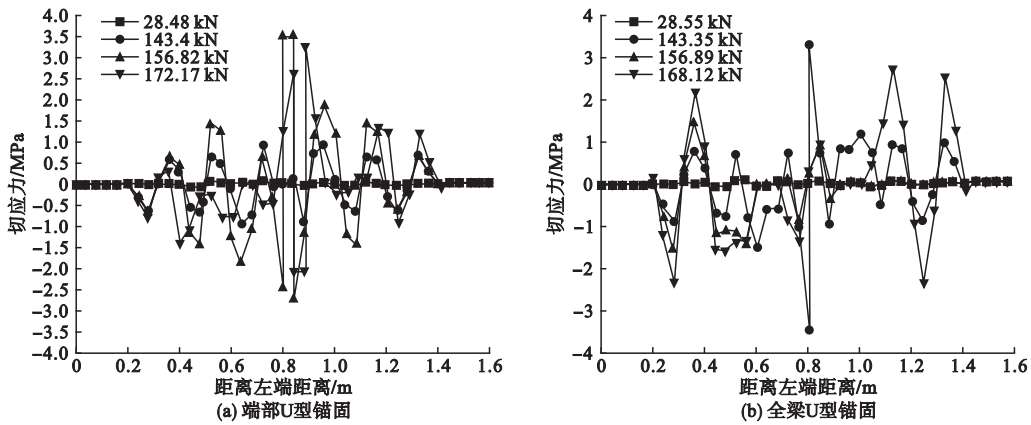


图 9 不同荷载等级下界面黏结应力

Fig. 9 Interfacial cohesive stresses under different load levels

3.3 BFRP 布应力分布

不同锚固形式下加固梁裂缝扩展过程中 BFRP 布应力变化如图 10 所示. 由计算结果可知,在混凝土开裂荷载 28 kN 左右,BFRP 布应力均接近于零. 当荷载增大到 143.4 kN 时,端部锚固梁 BFRP 布应力较低,最大为 272.95 MPa,此时钢筋尚未屈服,梁变形较小,BFRP 布发挥作用较小. 全梁锚固形式下,此时跨中钢筋已屈服,BFRP 布应力最大

值已达到 842.61 MPa. 随着荷载的增加,端部锚固梁钢筋屈服,BFRP 布拉应力不断增大且向两端移动,最大拉应力由屈服时的 654.59 MPa 增大到 1 136.09 MPa;而在相同荷载等级下,全梁锚固的 BFRP 布最大拉应力由 1 400 MPa 增大到 1 706.8 MPa,跨中两个 U 型箍之间的 BFRP 布局部拉应力明显增大. 由 BFRP 应力分布可见,全梁锚固下的 BFRP 加固梁易在 U 型箍之间出现 BFRP 布拉断破坏.

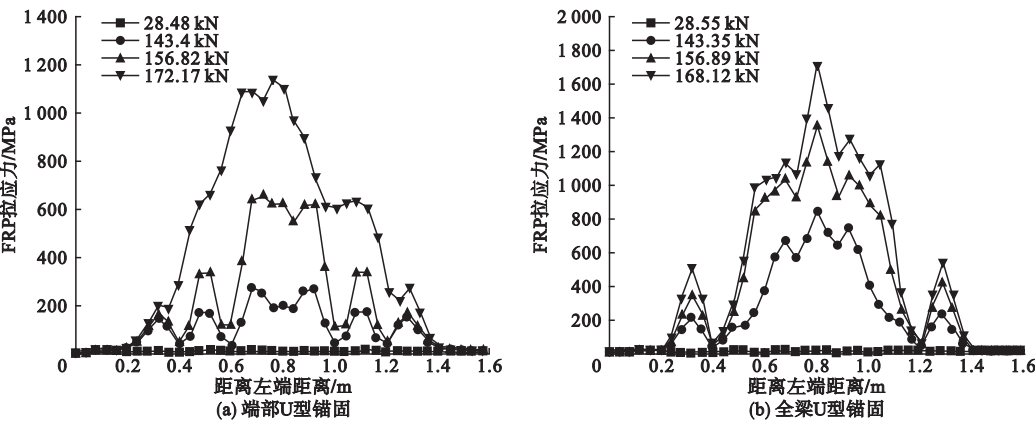


图 10 不同荷载等级下 BFRP 布应力

Fig. 10 Stresses of BFRP under different load levels

4 锚固形式对弯剪裂缝的作用分析

4.1 两种锚固方式对弯曲裂缝的作用

由弯曲裂缝引起的 BFRP 与混凝土界面剥离失效的加固梁,端部锚固和全梁锚固下裂缝扩展云图及荷载-位移曲线如图 11、图 12 所示。对比结果显示,端部锚固梁的屈服荷载为 144 kN,极限荷载为 175 kN;全梁锚固梁的屈服荷载为 128 kN,极限荷载为 169 kN。进一步提取界面应力和 BFRP 布拉应力分析表明:跨中三条裂缝周围界面应力最大,端部锚固形式下,外荷载为 143.4 kN

时,跨中裂缝处的界面应力达到峰值 3.69 MPa,BFRP 布应力为 205.84 MPa;此时全梁锚固的加固梁界面应力达到峰值后下降至 3.24 MPa,对应的 BFRP 布的应力值为 325.25 MPa。随着荷载增加到 166 kN,两种锚固形式的加固梁 BFRP 布应力均接近 1 000 MPa。

分析结果表明,全梁锚固的加固梁承载力比端部锚固梁略低,说明全梁锚固对钢筋混凝土加固梁的抗弯作用效果不如端部锚固形式,结果与 3.1 小节中弯剪裂缝下的计算结果一致,表明实验梁的承载力主要由弯曲裂缝控制。

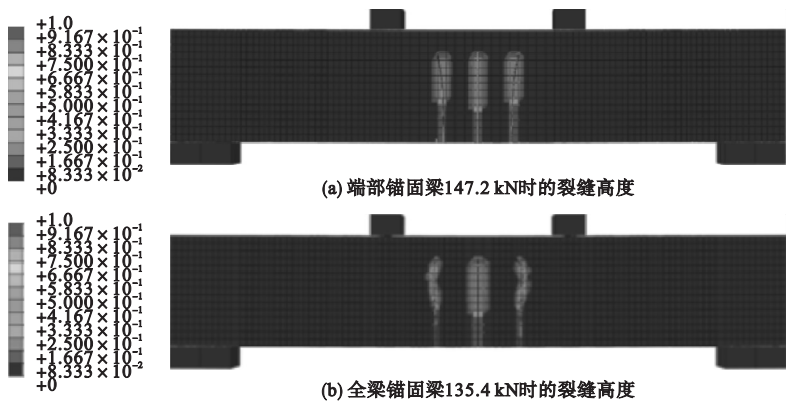


图 11 两种锚固方式下加固梁上弯曲裂缝扩展

Fig. 11 Crack progress contours under two U-stirrups

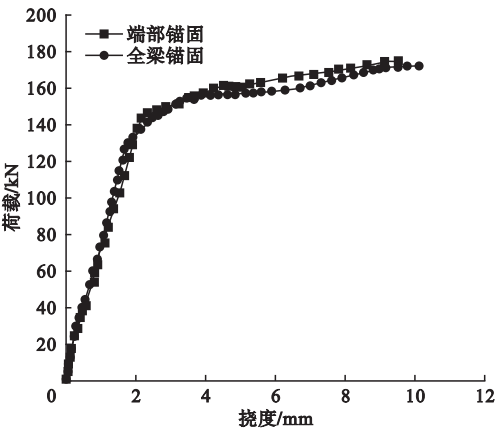


图 12 两种锚固方式下的荷载-位移曲线

Fig. 12 Load-displacement curves under two U-stirrups

4.2 两种锚固方式对剪切裂缝的作用

为进一步揭示不同锚固方式对剪切裂缝

引起加固梁失效的作用效果,笔者建立了只包含剪切裂缝的有限元模型,对比分析两种 U 型锚固方式下的剪切裂缝扩展、界面应力分布、BFRP 应力变化以及加固梁的荷载-位移曲线。

极限荷载下两种锚固方式加固梁上的剪切裂缝如图 13 所示,荷载-位移曲线如图 14 所示。结果表明:当剪切裂缝穿过 U 型箍时,荷载位移曲线上出现不光滑点。端部锚固梁的极限荷载为 223 MPa,跨中挠度为 4.36 mm;全梁锚固梁的极限荷载为 234 MPa,跨中挠度为 3.81 mm。当荷载为 55 kN 时,界面应力几乎为零。当荷载增加至 177.09 kN 时,端部锚固梁裂缝处的界面应力开始减小并向跨中逐渐延伸,端部 BFRP

应力逐渐增大至 577.11 MPa,而全梁锚固梁上的 BFRP 应力为 536.21 kN.当荷载增加至 192.70 kN 时,端部锚固梁裂缝处 BFRP 应

力峰值保持在 600 MPa 左右,全梁锚固梁 BFRP 应力峰值达到 821.08 kN,且裂缝处的界面应力达到峰值 3.60 MPa.

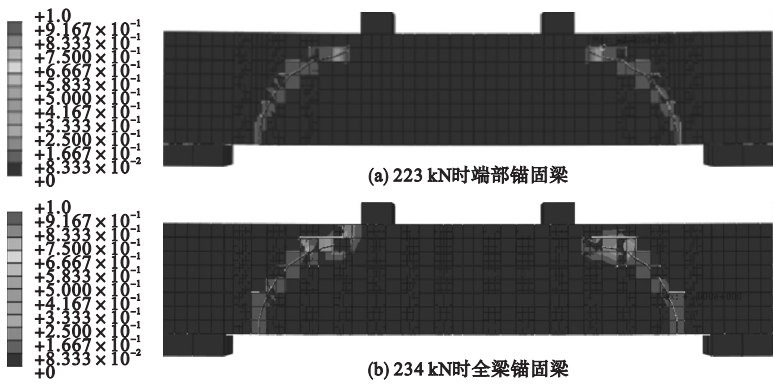


图 13 两种锚固方式下加固梁上斜裂缝扩展

Fig. 13 Crack progress contours under two U-stirrups

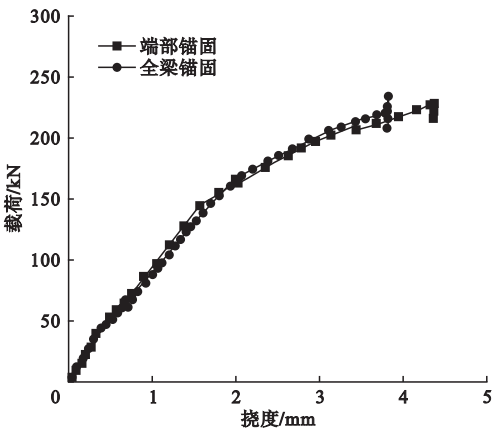


图 14 两种锚固方式下荷载-位移曲线

Fig. 14 Load-displacement curves under two U-stirrups

由计算分析结果可知,在只有剪切裂缝情况下,全梁锚固的加固梁变形较小,承载力高于端部锚固梁,说明全梁锚固对提高由剪切裂缝引起的加固梁的失效作用效果好于端部锚固情况.随着荷载的增加,端部锚固梁的界面应力和 BFRP 应力由裂缝处向梁跨中移动,而全梁锚固下裂缝处的应力峰值保持在一个较高的水平,不能向跨中方向移动,裂缝位置处的 BFRP 局部应力水平迅速增大.

5 结 论

(1)扩展有限元法能够较好地模拟不同

U型锚固形式下BFRP加固钢筋混凝土梁的裂缝扩展,端部U型锚固和沿全梁U型锚固的BFRP加固混凝土梁的裂缝扩展速度基本相同,U型箍之间的混凝土裂缝扩展引起BFRP布局部应力增长迅速,导致全梁U型锚固的加固梁的承载力低于端部U型锚固梁.

(2)随着荷载增大及混凝土裂缝扩展,BFRP与混凝土界面应力在裂缝附近远高于其他位置,端部U型锚固梁的界面应力由跨中裂缝位置向两端沿纵向移动,易发生由跨中混凝土开裂引起的界面剥离破坏,而全梁U型锚固可有效限制BFRP与混凝土界面发生剥离破坏.

(3)钢筋屈服后BFRP布拉应力增长迅速,混凝土裂缝处的BFRP布应力明显高于其他位置.全梁U型锚固下,包含裂缝的两个U型箍之间的BFRP局部应力远高于端部U型锚固的加固梁,说明沿全梁锚固的加固梁更容易发生BFRP局部拉断破坏.

(4)只有弯曲裂缝的两种U型锚固方式加固梁的计算结果与实验梁一致,说明实验梁的失效主要由弯曲裂缝扩展所致,此时端部U型锚固的作用效果优于全梁U型锚固形式.当BFRP加固梁的失效由剪切裂缝扩展引起时,全梁U型锚固梁比端部U型锚固

梁的承载力高、变形小,说明全梁 U 型锚固具有更好的抗剪效果。

参考文献

- [1] 滕锦光. FRP 加固混凝土结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
(TENG Jinguang. Strengthened RC structures [M]. Beijing: China Architecture & Building, 2005.)
- [2] ZHOU Y, FAN Z, JIA D, et al. Bond behavior of FRP-to-concrete interface under sulfate attack: an experimental study and modeling of bond degradation[J]. Construction & building materials, 2015, 85: 9–21.
- [3] 薛伟辰, 郑乔文, 杨雨. 黏砂变形 GFRP 筋黏结性能研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(12): 59–68.
(XUE Weichen, ZHENG Qiaowen, YANG Yu. A study on the bond behavior of sand-coated and deformed GFRP rebars [J]. China civil engineering journal, 2007, 40(12): 59–68.)
- [4] HUANG Lihua, LI Yujing, WANG Yuefang. Strengthening effects of BFRP on reinforced concrete beams [J]. Journal of Southeast university (english edition) 2013, 29(2): 182–186.
- [5] 郑乔文, 薛伟辰. 粘砂变形 GFRP 筋的粘结滑移本构关系[J]. 工程力学, 2008(9): 162–169.
(ZHENG Qiaowen, XUE Weichen. Constitutive relationship of bond-slip behavior of sand-coated deformed GFRP rebars [J]. Engineering mechanics, 2008, 25(9): 162–169.)
- [6] YAO J, TENG J G, CHEN J F. Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints [J]. Composites part B engineering, 2005, 36(2): 67–72.
- [7] 陆新征, 滕锦光, 叶列平, 等. FRP 加固混凝土梁受弯剥离破坏的有限元分析[J]. 工程力学, 2006(6): 85–93.
(LU Xinzhen, TENG Jinguang, YE Lieping, et al. Finite element analysis of intermediate crack-induced deboning in FRP strengthened RC beams [J]. Engineering mechanics, 2006(6): 85–93.)
- [8] 尚守平, 王海东, 童桦, 等. 钢筋混凝土约束梁斜向贴 CFRP 抗剪加固研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2002, 29(3): 84–90.
(SHANG Shouping, WANG Haidong, TONG Hua, et al. The research on shear strength of restrained beams with inclined external CFRP [J]. Journal of Hu'nan university (natural sciences edition), 2002, 29(3): 84–90.)
- [9] 欧阳煜, 王鹏, 李翔. 玄武岩纤维布加固钢筋混凝土梁受弯试验研究[J]. 建筑结构, 2008, 38(11): 74–84.
(OUYANG Yu, WANG Peng, LI Xiang. Experimental study on flexural RC beams strengthened with BFRP sheets [J]. Building structure, 2008, 38(11): 74–84.)
- [10] 张广泰, 刘清, 王克新. 碳纤维布加固钢筋混凝土梁的抗弯试验和数值分析[J]. 工业建筑, 2009, 39(8): 80–83.
(ZHANG Guangtai, LIU Qing, WANG Kexin. Bending tests and numerical analysis of CFRP strengthened RC beams [J]. Industrial construction, 2009, 39(8): 80–83.)
- [11] PELLEGRINO C, MODENA C. Flexural strengthening of real-scale RC and PRC beams with end-anchored pretensioned FRP laminates [J]. ACI structural journal, 2009, 106(3): 23–31.
- [12] OKELLO R, YUAN R L. Bond strength of fiber reinforced polymer rebars in normal strength concrete [J]. Journal of composites for construction, 2005, 9(3): 203–213.
- [13] LEE Y H, KIM M S, KIM H, LEE J, KIM D J. Experimental study on bond strength of fiber reinforced polymer rebars in normal strength concrete [J]. Journal of adhesion science and technology, 2013, 27(5–6): 508–522.
- [14] SATO Y, NAGANUMA K. Discrete-like crack simulation by smeared crack-based FEM for reinforced concrete [J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2010, 36(14): 2137–2152.
- [15] KACHLAKEV D, MCCURRY D. Testing of full-size reinforced concrete beams strengthened with FRP composites: experimental results and design methods verification (appendices) [R]. American: Department of transportation federal highway administration, 2000.
- [16] BOUSSELHAM A, CHAALLAL O. Behavior of reinforced concrete T-beams strengthened in shear with carbon fiber-reinforced polymer-an experimental study [J]. ACI structural journal, 2006, 103(3): 339.
- [17] MALVAR L J, WARREN G E, INABA C. Rehabilitation of navy pier beams with composite sheets [C]. Chapman & Hall; Rilem Proceedings, 1995.
- [18] BELYTSCHKO T, BLACK T. Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing [J]. International journal for numerical methods in engineering, 2015, 45(5): 601–620.
- [19] 陆新征. FRP-混凝土界面行为研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.
(LU Xinzhen. Studies on FRP-concrete interface [D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.)
- [20] WU Z, SHUTONG Y, HU X, et al. Analytical solution for fracture analysis of CFRP sheet-strengthened cracked concrete beams [J]. Journal of engineering mechanics, 2010, 136(10): 1202–1219.
- [21] CHEN F, QIAO P. Deboning analysis of FRP-concrete interface between two balanced adjacent flexural cracks in plated beams [J]. International journal of solids & structures, 2009, 46(13): 2618–2628.
- [22] XU R, LIU C. CZM-based deboning simulation of cracked beams strengthened by FRP sheets [J]. Journal of engineering mechanics, 2011, 138(2): 210–220.
- [23] REINHARDT H W. Tensile tests and failure analysis of concrete [J]. Journal of structural engineering, 1986, 112(11): 2462–2477.
- [24] 陆新征, 叶列平, 滕锦光, 等. FRP-混凝土界面粘结滑移本构模型 [J]. 建筑结构学报, 2005, 26(4): 10–18.
(LU Xinzhen, YE Lieping, TENG Jinguang, et al. Bond-slip model for FRP-to-concrete interface [J]. Journal of building structures, 2005, 26(4): 10–18.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)