

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.06.002

# CFRP 加固梁 U 型锚固效果的数值分析

黄丽华<sup>a</sup>, 王跃方<sup>b</sup>, 李璐<sup>a</sup>

(大连理工大学 a. 建设工程学部; b. 工程力学系, 辽宁大连 116023)

**摘要:**CFRP 与混凝土层间剥离是纤维加固钢筋混凝土梁中最常见的破坏形式,在 CFRP 端部或沿全梁设置横向 U 型锚固是目前工程中使用最广泛的防止过早剥离破坏的方法。采用数值计算方法,对比了无 U 型锚固,端部设置 U 型锚固以及沿全梁施加 U 型锚固 3 种情况下,加固梁的承载力、变形、粘结层的滑移量以及 CFRP 应变分布,分析研究 U 型锚固在 CFRP 加固钢筋混凝土梁中的作用。由计算分析结果可知,U 型锚固可有效提高加固梁的承载力和刚度,防止过早剥离破坏的发生。在钢筋屈服后,沿全梁设置 U 型锚固比端部设置 U 型锚固能够更有效防止发生剥离破坏,但同时也引起 CFRP 应变分布不均匀,当 CFRP 被拉断破坏时,沿全梁锚固时加固梁的极限承载力低于端部锚固情形。

**关键词:**CFRP 加固钢筋混凝土梁;U 型锚固;有限元分析;界面剥离

**中图分类号:**TU375 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2014)06-0008-06

## Finite Element Analysis of the Effects of U-wrap Anchorages on RC Beams Strengthened with CFRP Sheets

Huang Lihua<sup>a</sup>, Wang Yuefang<sup>b</sup>, Li Lu<sup>a</sup>

(a. Faculty of Infrastructure Engineering; b. Department of Engineering Mechanics,  
Dalian University of Technology, Dalian 116023, Liaoning, P. R. China)

**Abstract:** Premature debonding between CFRP and concrete commonly occurs in RC beams strengthened with CFRP sheets. U-wrap anchorages installed at the ends of CFRP sheets or along the entire beams are currently well accepted for preventing the debonding failure in engineering practice. Three schemes of CFRP strengthening beams without U-wraps, with U-wraps at CFRP ends and along the entire beam are numerically studied. The loading capacities and deflections of the beams, bond-slips in the interfaces and strains of CFRP sheets in the three cases are compared under different loading levels. The result shows that the strength and stiffness of the strengthened beams are effectively improved with the clamping of U-wraps. After the yield of steel reinforcement, U-wrap anchorages along entire beam are more effective for preventing the debonding failure than those at CFRP ends and lead to the uneven strains of CFRP sheets as well. At the ultimate state, CFRP can rupture locally at the places of high strain concentrations leading to decrease in the loading capacity compared to the beam anchored at two ends of CFRP.

**Key words:** RC beams strengthened with CFRP; U-wrap anchorages; finite element analysis; interfacial debonding

收稿日期:2014-08-26

基金项目:辽宁省自然科学基金(2014020008)

作者简介:黄丽华(1967-),女,副教授,主要从事结构加固分析及计算研究,(E-mail)lhhang@dlut.edu.cn。

碳纤维增强复合材料(简称 CFRP)在钢筋混凝土结构加固、修复中已有广泛应用。大量的实践和实验结果表明粘贴纤维片材进行受弯加固时,最常见的破坏形式是在钢筋屈服后,混凝土梁达到极限承载力之前,碳纤维片材与混凝土之间发生剥离<sup>[1]</sup>。常见的 CFRP 与混凝土间剥离形式包括:1)CFRP 片材端部切应力过大将其位置附近混凝土保护层剥落;2)在混凝土梁的弯剪区内,由剪切裂缝引起 CFRP 剥离;3)弯曲裂缝附近过大的切应力引起 CFRP 与混凝土剥离;4)混凝土梁端部最后一个裂缝引起 CFRP 锚固从混凝土上剥离<sup>[2-3]</sup>。FRP 与混凝土界面应力理论研究表明,在 FRP 端部界面正应力和切应力最大,剥离首先发生在该位置<sup>[4-5]</sup>。杨勇新等<sup>[6]</sup>推导出粘结正应力和粘结切应力作用下发生剥离破坏的数学判据,从而建立剥离承载力的计算方法。目前已有许多 CFRP 与混凝土间剥离破坏的实验及数值计算研究成果,对引起 CFRP 和混凝土间发生剥离的认识也基本一致,但相应的防止剥离破坏的措施相当有限。目前最常见的方法是延长粘结延伸长度、设置横向 U 型 FRP 锚固条或采用机械式锚固方法。延长粘结延伸长度对防止界面滑移的必要性已被大量试验所证实,其中瑞士联邦材料测试与研究实验室(EMPA)的实验研究成果给出<sup>[7]</sup>:在弹性范围内,当锚固长度为 220 mm 时,随着作用在 CFRP 上拉力增大,参与工作的 CFRP 长度逐渐增加,剥离时 CFRP 的应变值约为 0.002 3,此时 CFRP 与基底间的最大滑移量为 0.2 mm,粘结层最大切应力发生在距 CFRP 端部 100 mm 位置,大小约为 5 MPa。由此可见,CFRP 开始剥离的应力值在 500 MPa 左右,即 CFRP 的高抗拉强度利用率较低,限制了 CFRP 材料抗拉性能的发挥,影响了 CFRP 材料的使用效率和混凝土结构加固后的可靠性,造成实际结构加固中 CFRP 材料强度利用率普遍低于 20%。工程中通常将加固层延伸至支座处,以延长粘结延伸长度,减小粘结层上过早剥离。在 CFRP 端部用横向 FRP 条进行锚固的方式最早由 Brena 提出<sup>[8]</sup>,之后大量的研究证明了该方法对控制 CFRP 端部剥离和剪切裂缝引起的 CFRP 剥离的有效性,在实际工程中已有广泛应用。叶列平等<sup>[9]</sup>通过实验研究提出在梁底碳纤维布的粘结延伸长度范围内采用附加碳纤维布 U 型箍能够提高梁底碳纤维布的抗剥离能力,谭壮等<sup>[10]</sup>通过实验研究了 U 型箍对受剪加固混凝土梁剥离承载力的作用。在大量实验研究成果基础上,数值计算分析方法也越来

越成熟。Toutanji 等<sup>[11]</sup>证明了建立在断裂力学理论上的剥离模型的准确性,Choi 等<sup>[12]</sup>提出了以梁弯曲变形为基础的数值分析模型,将 FRP 与混凝土之间用弹簧单元连接的常规有限元计算分析模型也给出了较好的分析结果<sup>[13-14]</sup>。张子潇等<sup>[15]</sup>利用 ANSYS 分析了 U 型锚固对加固效果的影响,得到的结论是设置 U 型锚固后加固梁的剥离承载力得到提高。工程中也大量采用 U 型箍锚固方法,但不同的 U 型锚固形式对加固梁承载力的影响并不确定。在 CFRP 端部或沿全梁实行机械式锚固或嵌入式(Near Surface Mounted,简称 NSM)锚固方法目前都只局限于研究范围,由于施工过程复杂,且对实际构件造成一定损坏,在实际工程中应用较少。采取有效措施防止 CFRP 与混凝土间剥离,提高 CFRP 材料利用率,确保 CFRP 加固后混凝土结构的可靠性,是进一步推广 CFRP 在结构加固中的广泛应用急需解决的问题。

本文针对目前工程中最常用的防止剥离破坏的锚固方法,以碳纤维布(CFRP)加固钢筋混凝土简支梁为例,参考文献中给出的实验结果,利用商用数值计算分析软件 ANSYS,分析对比加固梁在无 U 型锚固,端部采用 U 型锚固以及沿全梁实施 U 型锚固三种加固模式下,梁的强度、刚度、粘结层上碳纤维布与混凝土间相对滑移量以及 CFRP 应变分布情况,分析 U 型箍的使用在防止加固梁产生剥离破坏中的作用,证明使用 U 型锚固对控制 CFRP 与混凝土间发生剥离的有效性,同时也指出了 CFRP 端部锚固与沿全梁锚固在防止 CFRP 剥离破坏及拉断破坏两种破坏形式下的不同作用效果,为 CFRP 加固钢筋混凝土梁的设计提供参考。

## 1 有限元计算模型

以图 1 所示的 CFRP 加固钢筋混凝土梁为例,建立有限元计算模型(图 2)。图中取 1/2 梁建模,钢筋混凝土采用分离式模型,不考虑钢筋与混凝土之间的粘结滑移,混凝土采用 SOLID65 单元,William-Warnke 五参数破坏准则,分布式裂缝形式,其中张开裂缝的剪切传递系数取 0.5,闭合裂缝的剪切传递系数取 1.0,屈服准则采用多线性随动强化模型(KINH)。钢筋采用 link 单元,经典的双线性随动强化模型(BKIN)。CFRP 采用 shell 单元,线弹性应力应变关系。由于 CFRP 与混凝土界面滑移是引起 CFRP 沿界面剥离破坏的主要因素,故忽略界面间法向位移的计算,在 CFRP 与混凝土之间采用

切向的 combine39 弹簧单元模拟界面粘结滑移,单元节点分别与混凝土节点和纤维布节点耦合,单元长度为零,弹簧单元只承受拉力作用,材料本构关系采用文献[16]给出的结果,如图 3 所示。数值计算中 CFRP 布厚度取 0.334 mm,混凝土、钢筋以及 CFRP 的抗拉强度  $f_t$ 、抗压强度  $f_c$ 、弹性模量  $E$  以及泊松比  $\nu$  的取值见表 1。

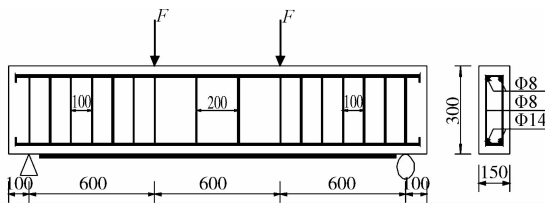


图 1 CFRP 加固钢筋混凝土梁

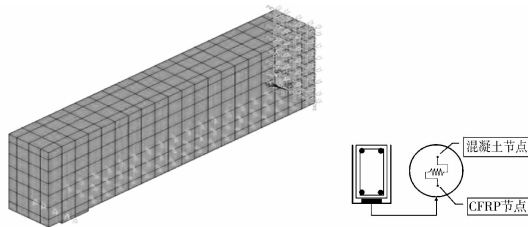


图 2 加固梁有限元计算模型

表 1 各种材料的力学性能指标

材料	$f_c$ /MPa	$f_t$ /MPa	$E$ /GPa	$\nu$
混凝土	26.8	2.39	32.5	0.2
钢筋	335	335	200	0.3
CFRP		3400	230	0.3

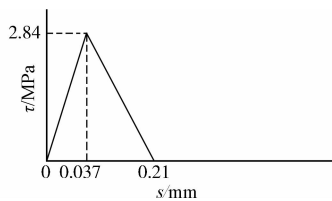


图 3 滑移量  $s$ -粘结切应力  $\tau$  本构模型

## 2 数值计算结果分析

采用数值计算方法,分析 CFRP 加固梁在无 U 型锚固(梁 B1),CFRP 端部施加 U 型锚固(梁 B2)以及沿全梁施加 U 型锚固(梁 B3)3 种加固形式下(图 4),不同荷载等级时混凝土与 CFRP 节点间的相对位移、CFRP 应变分布以及钢筋应力和混凝土梁的变形,进而得出 U 型锚固对加固梁整体的作用效果。

### 2.1 U 型锚固对承载力和变形的影响

由计算结果可知,当加固梁上无 U 型锚固,荷

载增至 40 kN 时,钢筋应力达到 335 MPa,钢筋开始屈服,如图 5 所示;而当梁上设置 U 型锚固时, B2、B3 梁在 40 kN 荷载下钢筋最大应力值为 300 MPa,当荷载增至 70 kN 时,钢筋应力为 335 MPa,即加固梁屈服。由此可见,加固梁上施加 U 型锚固后,提高了加固梁的承载力,其中 CFRP 端部锚固和沿全梁锚固对加固梁承载力影响差别不大。

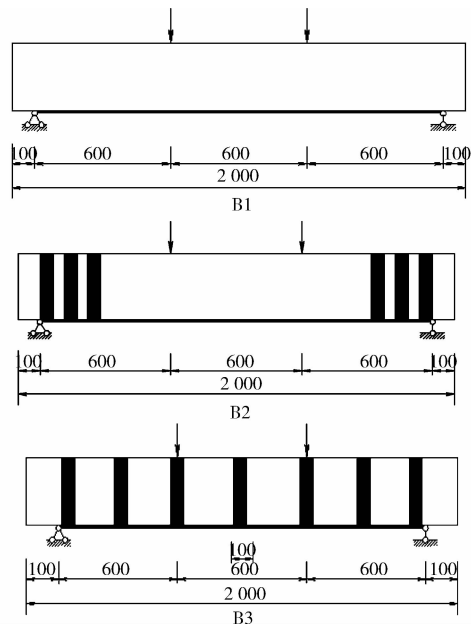
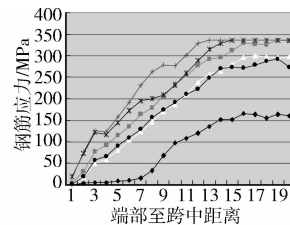


图 4 不同 U 型锚固梁示意图



注:  $\rightarrow$  B1-20 kN  $\rightarrow$  B1-40 kN  $\rightarrow$  B2-40 kN  $\rightarrow$  B2-70 kN  $\rightarrow$  B3-40 kN  $\rightarrow$  B3-40 kN

图 5 不同荷载等级和 U 型锚固下的钢筋应力

3 种锚固形式的加固梁在不同荷载等级下的最大位移见表 2。其中在弹性阶段和钢筋屈服阶段梁 B1 跨中位移均超出梁 B2 和梁 B3,梁 B3 在屈服荷载下变形最小,说明 U 型箍的使用有效提高了加固梁的抗弯刚度,沿全梁施加 U 型箍时,降低了加固梁的挠度。当加固梁达到极限状态时,梁 B3 的变形超出了梁 B2 的变形,原因在于钢筋屈服后,随着加固梁挠度的增大,U 型箍的作用使梁 B3 底部 CFRP 应变分布越发不均匀,引起局部 CFRP 应变过大,影响了梁 B3 的刚度和极限承载力,导致梁 B3 的刚度和极限承载力与梁 B2 相比并无提高,这与文献[17]中得到的实验结论一致。

表 2 不同荷载等级下梁的最大位移 mm

荷载/kN	B1	B2	B3
20	1.598	1.463	1.462
40	3.873	3.381	3.292
60		9.874	7.893
70		11.607	12.347

## 2.2 CFRP 与混凝土界面滑移计算分析

CFRP 与混凝土界面滑移计算结果如图 6 所示,在无 U 型锚固的梁 B1 上 CFRP 端部滑移量最大,20 kN 荷载下界面滑移量就超过 0.2 mm,40 kN 荷载下 CFRP 的滑移量已达 1.22 mm,此时 CFRP 与混凝土间早已发生了剥离。当 CFRP 端部施加 U 型锚固后,钢筋屈服前 CFRP 与混凝土界面滑移量非常小,40 kN 荷载下的滑移量小于 0.1 mm,钢筋屈服后,当荷载增至 60 kN 时,最大滑移量发生在弯剪过渡区内,大小为 1.13 mm,极限状态的滑移量达 2.38 mm,此时 CFRP 与混凝土间已发生剥离。沿全梁施加横向 U 型锚固后,钢筋屈服前与端部锚固效果相似,CFRP 与混凝土间滑移量小于 0.2 mm,说明粘结层上无相对滑移。当荷载增至 60 kN 时,弯剪区附近的最大滑移量为 0.475 mm,与端部锚固相比降低 58%,极限状态下的最大滑移量为 0.99 mm,也降低了 58%。由此可见,加固梁上施加 U 型锚固后可以大大降低碳纤维布与混凝土间的剥离(如图 7 所示),避免 CFRP 加固梁发生过早剥离破坏。加固梁屈服后如图 8 所示,不同 U 型锚固形式对防止碳纤维布剥离所起到的作用不同。沿全梁施加 U 型锚固能更有效防止沿全梁发生剥离破坏。在 70 kN 荷载下梁 B3 的滑移量远小于梁 B2 在 60 kN 荷载下的滑移量。即沿全梁设置 U 型锚固对防止加固梁发生剥离破坏的作用效果是非常明显的。

如表 3 所示,通过对比加固梁在不同荷载等级下 CFRP 与混凝土粘结层间的最大滑移量可知,梁上无 U 型锚固时,加固梁在屈服前 CFRP 与混凝土之间已发生剥离,当设置 U 型锚固后,粘结层内两种材料间无相对位移。在加固梁屈服后,沿全梁粘贴 U 型箍可以有效降低 CFRP 与混凝土间的相对滑移,防止加固梁剥离破坏的发生。

表 3 不同荷载下粘结层上的最大滑移量 mm

荷载/kN	B1	B2	B3
20	0.493	0.082	0.058
40	1.222	0.153	0.162
60		1.133	0.475
70		2.383	0.990

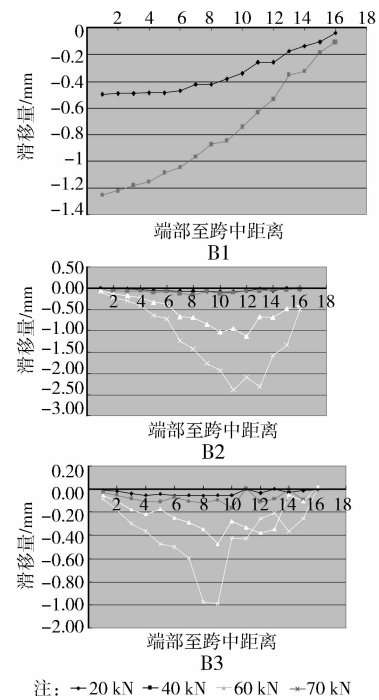


图 6 不同荷载等级下的界面滑移量

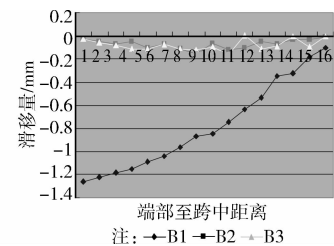


图 7 40 kN 荷载下粘结层滑移量对比

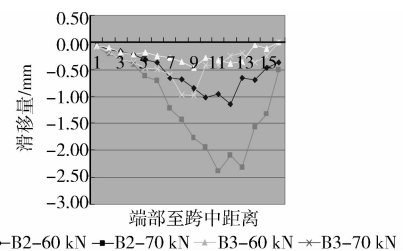


图 8 极限状态下梁 B2 和梁 B3 滑移量对比

## 2.3 U 型锚固对 CFRP 应变分布的影响

如图 9 所示,在各荷载等级下,不同 U 型锚固形式的加固梁上 CFRP 应变分布不同。当荷载水平低于 40 kN 时,即钢筋屈服之前,CFRP 应变分布均匀。无 U 型锚固梁 B1 上的 CFRP 应变值较小,最大值为  $0.312 \times 10^{-4}$ ,由于 CFRP 与混凝土粘结层间的滑移量较大,梁底层上的拉应力不能有效传递到 CFRP 上,导致 CFRP 拉应力较小。相比两端加 U 型锚固的梁 B2,在 40 kN 荷载下 CFRP 最大应变为  $1.47 \times 10^{-3}$ 。CFRP 应变的显著提高说明了 U

型箍可有效提高界面粘结性能。梁 B2 和梁 B3 在不同荷载等级下 CFRP 应变图反映出加固梁在屈服之前,端部施加 U 型锚固和沿全梁施加 U 行锚固对 CFRP 应变影响不大,应变值均小于  $2.0 \times 10^{-3}$ 。在钢筋屈服后,随着荷载的增加 CFRP 应变显著增大。对比梁 B1、B2 和 B3 在屈服荷载和极限荷载下 CFRP 应变可知(图 10),加固梁屈服时,梁 B1 上 CFRP 应变远小于梁 B2 和梁 B3,此时梁 B2 和梁 B3 内 CFRP 应变基本无差异;在钢筋屈服后到极限状态时,加固梁 B2 和梁 B3 上的最大 CFRP 应变值为  $8.0 \times 10^{-3}$ ,已达到 CFRP 的剥离应变<sup>[18]</sup>,此时梁 B2 和梁 B3 的应变分布明显不同,梁 B2 上从距端部 300 mm 处至跨中 CFRP 已全部剥离,应变比较均匀,而梁 B3 由于 U 型箍的约束作用,应变分布不均匀,只在跨中小范围内局部应变较大,并发生局部剥离破坏。

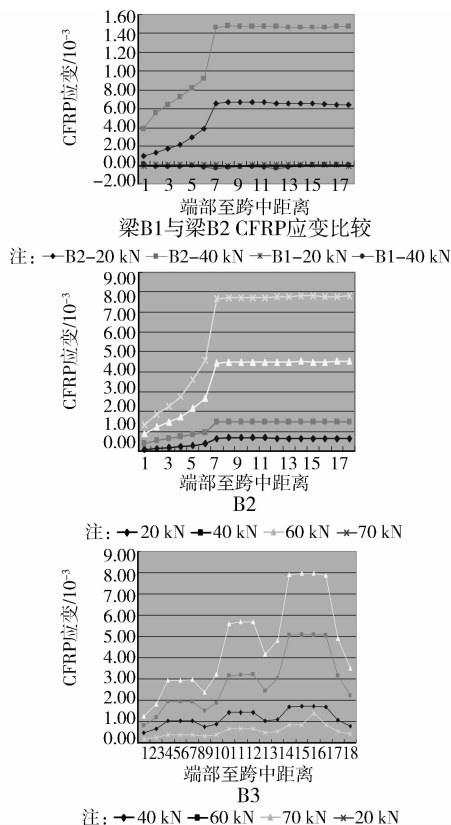


图 9 不同荷载等级下 CFRP 应变分布

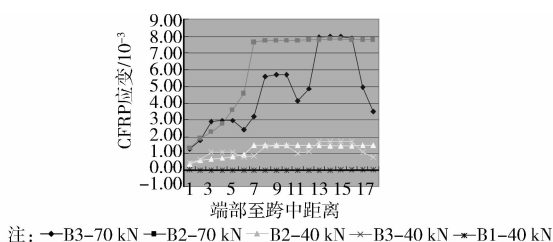


图 10 3 种形式梁上的 CFRP 应变比较

表 4 中列出不同荷载等级下 CFRP 最大应变值,其中有 U 型锚固下的 CFRP 应变明显高于无 U 型锚固情况,加固梁的承载力明显提高,CFRP 材料的抗拉性能得到发挥,提高了 CFRP 材料的利用率。与梁 B2 端部锚固相比,沿全梁设置 U 型锚固梁 B3 减小了剥离长度,但同时增大了 CFRP 的局部应变,当加固梁上发生 CFRP 拉断破坏时,加固梁 B3 的极限承载将低于加固梁 B2。

表 4 不同荷载等级下 CFRP 最大应变 kN

荷载	B1	B2	B3
20	$0.703 \times 10^{-5}$	$0.670 \times 10^{-3}$	$0.170 \times 10^{-2}$
40	$0.312 \times 10^{-4}$	$0.148 \times 10^{-2}$	$0.170 \times 10^{-2}$
60		$0.452 \times 10^{-2}$	$0.511 \times 10^{-2}$
70		$0.800 \times 10^{-2}$	$0.818 \times 10^{-2}$

### 3 结论

目前 CFRP 已广泛用于钢筋混凝土梁的加固中,其中 CFRP 与混凝土间的过早剥离是加固梁上最常见的破坏形式。工程中最广泛使用的防止剥离破坏的方法即在 CFRP 端部或沿全梁施加 U 型锚固。本文利用有限元数值计算方法,分析对比了无 U 型锚固、CFRP 端部设置 U 型锚固以及沿全梁设置 U 型锚固 3 种常用锚固形式下,加固梁的强度、刚度,粘结层上的相对滑移以及其对 CFRP 应变分布的影响,得到结论如下。

1) CFRP 加固钢筋混凝土梁上施加 U 型锚固后,可有效提高加固梁的屈服荷载和极限荷载,减小梁的变形,CFRP 端部锚固和沿全梁锚固对加固梁承载力影响差别不大,而在极限状态下沿全梁采用 U 型锚固时加固梁的变形大于端部锚固情况。

2) 无 U 型锚固时,CFRP 端部与混凝土间过大的相对滑移将引起 CFRP 端部过早剥离。当 CFRP 端部及沿全梁施加 U 型锚固后,钢筋屈服前 CFRP 与混凝土界面间无剥离,即 U 型锚固可以有效防止 CFRP 与混凝土之间发生过早剥离破坏。钢筋屈服后界面内最大滑移发生在弯剪过渡区,粘结层的剥离从跨中向端部延伸,极限状态下沿全梁设置 U 型锚固后粘结层内的滑移量远小于只在端部锚固情况。

3) U 型锚固的施加使 CFRP 的抗拉性能得以充分利用。无 U 型锚固时,CFRP 过早剥离限制了其抗拉性能的发挥。设置 U 型锚固后,在钢筋屈服前两种 U 型锚固下 CFRP 应变分布基本一致。钢筋屈服后,U 型锚固的不同设置则 CFRP 应变差别较大;当达到极限状态时,端部锚固下 CFRP 应变分布

均匀,除端部附近区域外CFRP已达到剥离应变,而当全梁设置U型锚固后,只有跨中局部区域达到剥离应变,防止了加固梁剥离破坏的发生,但降低了CFRP拉断破坏形式下的极限承载力。

#### 参考文献:

- [1] Saxena P, Toutanji H. Failure analysis of FRP-strengthened RC beams [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2008, 12(1):2-14.
- [2] Buyukozturk O, Gunes O, Karaca E. Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites [J]. *Construction and Building Materials*, 2004, 18(03):9-19.
- [3] Teng J G, Chen J F. Mechanics of debonding in FRP-plated RC beams [J]. *Structures and Buildings*, 2009, 162(5):335-345.
- [4] Edalati M, Irani F. Interfacial stresses in RC beams strengthened by externally bonded FRP/steel plates with effects of shear deformations [J]. *Journal of Composite for Construction*, 2012, 16(1):60-73.
- [5] Yang J, Teng J G, Chen J F. Interfacial stresses in soffit-plated reinforced concrete beams [J]. *Structures & Buildings*, 2004, 157(1):77-89.
- [6] 杨勇新,岳清瑞,叶列平. 碳纤维布加固钢筋混凝土梁受弯剥离承载力计算[J]. *土木工程学报*, 2004, 37(2):23-27.  
Yang Y X, Yue Q R, Ye L P. Calculation for flexural debonding bearing capacity of RC beams strengthened with carbon fiber sheets [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2004, 37(2):23-27.
- [7] EMPA, Internal Test Report 148/181/1. Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, Zurich, Switzerland, 1994b.
- [8] Brena S F, Bramblett R M, Wood S L, et al. Increasing flexural capacity of reinforced concrete beams using carbon fibre-reinforced polymer composites [J]. *ACI Structure Journal*, 2003, 100(1):36-46.
- [9] 叶列平,方团卿,杨勇新,等. 碳纤维布在混凝土梁受弯加固中抗剥离性能的实验研究[J]. *建筑结构*, 2003, 33(2):61-65.  
Ye L P, Fang T Q, Yang Y X, et al. Experimental study on the resistance of debonding of the RC beams strengthened with CFRP sheets [J]. *Building Structure*, 2003, 33(2):61-65.
- [10] 谭壮,叶列平. 纤维复合材料布加固混凝土梁受剪性能的实验研究[J]. *土木工程学报*, 2003, 36(11):12-18.  
Tan Z, Ye L P. Experimental research on shear capacity of RC beam strengthened with externally bonded FRP sheets [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2003, 36(11):12-18.
- [11] Toutanji H, Han M, Ghorbel E. Interfacial bond strength characteristics of FRP and RC substrate [J]. *Journal of Composite for Construction*, 2012, 16(1):35-46.
- [12] Choi H T, West J S, Soudki K A. Analysis of the flexure behaviour of partially bonded FRP strengthened concrete beams [J]. *Journal of Composite for Construction*, 2008, 12(4):375-386.
- [13] Baky H A, Ebead U A, Neale K W. Flexural and international behaviour of FRP-strengthened reinforced concrete beams [J]. *J of Composite for Construction*, 2007, 11(6):629-639.
- [14] Godat A, Neale K W, Labossiere P. Numerical modeling of FRP shear-strengthened reinforced concrete beams [J]. *Journal of Composite for Construction*, 2007, 11(6):640-649.
- [15] 张子潇,叶列平,陆新征. U型FRP加固钢筋混凝土梁受剪剥离性能的有限元分析[J]. *工程力学*, 2005, 22(4):155-162.  
Zhang Z X, Ye L P, Lu X Z. Finite element analysis of shear behavior of RC beams strengthened with U-shaped FRP sheets [J]. *Engineering Mechanics*, 2005, 22(4):155-162.
- [16] 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, 27:902-937.
- [17] 黄丽华,李宇婧,张耀焯,等. 不同种类FRP加固混凝土梁的加固效果试验研究[J]. *大连理工大学学报*, 2013, 53(1):102-107  
Huang L H, Li Y J, Zhang Y Y, et al. Test research on strengthening effects of various FRP on RC beams [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2013, 53(1):102-107
- [18] International Federation for Structural Concrete (fib) Externally bonded FRP reinforcement for RC structures [R]. Lausanne, Switzerland; International Federation for Structural Concrete Technical Report, 2001.