

内嵌碳纤维增强复合材料加固梁的延性提升方法

余江滔^{1,2}, 詹凯利¹, 陈 竟³

(1. 同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092; 2. 上海市工程结构安全重点实验室, 上海 200032;
3. 中衡设计集团股份有限公司, 江苏 苏州 215123)

摘要: 提出一种新的内嵌碳纤维增强复合材料(CFRP)延性加固的方法,使CFRP在极限状态下发生稳定、有限度的滑移,在充分利用CFRP强度的同时,避免CFRP断裂,从而提高加固构件的延性.介绍了内嵌CFRP延性加固的设计方法,并通过CFRP嵌条的黏结-滑移试验和内嵌CFRP加固钢筋混凝土梁的弯曲试验验证了加固方法及设计方法的有效性.

关键词: 内嵌; 碳纤维增强复合材料; 加固; 试验; 延性
中图分类号: TU311.4, TU375.1 **文献标志码:** A

A Method to Improve the Ductility of Near Surface Mounted Carbon Fiber Reinforced Polymers Strengthened Reinforced Concrete Beam

YU Jiangtao^{1,2}, ZHAN KaiLi¹, CHEN Jing³

(1. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Engineering Structure Safety, Shanghai 200032, China; 3. ARTS Group Co., Ltd., Suzhou 215123, China)

Abstract: A novel method was proposed to enhance the ductility of the near surface mounted (NSM) carbon fiber reinforced polymers (CFRP) strengthening system. The principle of the proposed method is to enable stable and controlled slip of CFRP reinforcements in ultimate state, so as to significantly improve the bending ductility and simultaneously fully use the tensile strength of CFRP without rupture. The related design algorithm was introduced, and the bond-slip tests on NSM-CFRP system and the bending tests on NSM-CFRP strengthened reinforced concrete (RC) beams were conducted to verify the effectiveness of the proposed method and the accuracy of the design algorithm.

Key words: near surface mounted; carbon fiber reinforced polymers; strengthening; test; ductility

近20年,碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymers, CFRP)被广泛应用于钢筋混凝土结构加固工程,主要形式有两种:外贴法与内嵌法.国内外大量研究^[1-10]表明,外贴CFRP加固受弯构件的破坏多为脆性破坏,破坏前几乎没有征兆.CFRP加固缺乏延性的原因如下:①CFRP为高强度的线弹性材料,超过极限强度后,纤维会发生脆性断裂;②CFRP布与混凝土的黏结-滑移关系缺乏延性^[11-17].超过黏结力的峰值后,CFRP与基材之间的黏结力失效,导致纤维布的剥离.

由于破坏缺乏足够的延性,规范对CFRP加固体系提出了更高的要求,给出了0.55~0.65的大幅的折减系数.事实上,对于CFRP在钢筋混凝土加固中的限制远不止如此.ACI 440.2R^[18]把CFRP的加固效果限制在原有承载力的40%以下.事实上,大量试验证明,CFRP加固可以将构件的抗弯承载力提高90%以上^[19].CFRP的应变水平也成为控制的指标之一,如《混凝土结构设计规范》^[20]将CFRP的拉应变设计值限制在0.7%~1.0%之间,明显低于纤维断裂的应变值1.7%^[21].这些措施都是为预防脆性破坏而预留的冗余度.

众所周知,结构设计的基本理念中,延性是最重要的力学指标之一,其重要性不亚于承载力.CFRP加固的受弯构件的破坏形式普遍缺乏延性,使其可靠度远低于普通的钢筋混凝土构件.因此,提高延性对于这种加固体系的意义更加重大.

1 设计方法的提出

本文提出一种新的内嵌加固的设计方法,在保证CFRP加固梁加固效果的同时,大幅度提高加固

收稿日期: 2015-05-25

基金项目: 国家自然科学基金(51478362);上海市工程结构安全重点实验室开放课题(2016-KF08)

第一作者: 余江滔(1975—),男,副教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为混凝土结构抗火及加固.

E-mail: yujiangtao@tongji.edu.cn

通讯作者: 詹凯利(1992—),女,硕士生,主要研究方向为混凝土结构抗火及加固. E-mail: kailizhanxmu@163.com

的延性,使其达到钢筋混凝土适筋梁的水平。

首先,内嵌 CFRP 法具有延性加固的潜质。在内嵌加固体系中,CFRP 筋嵌入混凝土内部,通过黏结剂与基材相连。因此,内嵌 CFRP 的黏结-滑移关系与外贴法有很大差别。在受力的初始阶段,CFRP 筋与基材之间的化学黏结力抵抗拉力,随着拉力的增大,可能会出现 CFRP 拉断、与混凝土保护层分离或者 CFRP 剥离或滑移的现象。对于外贴法加固,化学黏结力失效后,CFRP 会被突然剥离,导致加固的失效;内嵌 CFRP 则不同,化学黏结力失效后,CFRP 相对基材发生滑移。这一过程中,摩擦力将会抵抗拉力,从而保证 CFRP 不会被突然拔出。Lorenzis^[22]进行了一系列 CFRP 嵌入法加固试验,破坏形式之一为环氧树脂-混凝土界面黏结破坏,并给出了相应的黏结-滑移曲线方程,由上升阶段与下降阶段的公式组成。香港理工大学李荣等^[23]对内嵌 CFRP 嵌条(NSM)的混凝土试件进行拉拔试验,测量了在黏结长度范围内 CFRP 嵌条上各测量点的应变,理论推导了界面黏结-滑移关系曲线,分析得到局部 $\tau-s$ (应力-滑移)关系曲线。该曲线呈现三段式:近似三角形的上升段、下降段以及第三段水平直线段(代表残余摩擦剪应力的存在)。Focacci 等^[24]将 BPE 模型(Bertero, Popov 和 Eligehausen 提出的变形钢筋与混凝土的黏结-滑移本构关系模型)与大量的试验曲线比较,提出了改进 BPE 模型,改进 BPE 模型中显示了稳定的摩擦应力段。

内嵌 CFRP 筋在混凝土梁内的黏结-滑移行为与普通钢筋差别较大。如图 1 所示,按混凝土的裂缝性质划分,简支梁可以分为纯弯段、弯剪段以及自由端裂缝区段^[25]。在开裂的初始阶段,弯剪裂缝区段的 CFRP 与混凝土之间的滑移量较小,CFRP 与混凝土之间的关系与钢筋类似,只发生局部滑移。随着荷载的增加,CFRP 的拉力不断增大,裂缝两端的拉力差 $F_1 - F_2$ 相应增大,部分黏结力的方向会发生逆转,并最终发生整体滑移。相比而言,钢筋的屈服强度较低,进入屈服强度后,钢筋的强化速率将会大大降低, $F_1 - F_2$ 的差值不会明显增加,因此,裂缝区段内,钢筋难以发生整体滑移。自由端裂缝区段的滑移变化与弯剪段不同。由于 $F_2 = 0$,黏结力的方向一致,不会发生逆转,随着 F_1 的增大,滑移量不断增大,黏结力全面进入水平段。纯弯段裂缝区段的弯矩恒定,CFRP 提供的拉力也恒定,即 $F_1 = F_2$ 。这种情况下,CFRP 与钢筋一样,只会发生局部滑移,不会发生整体滑移。

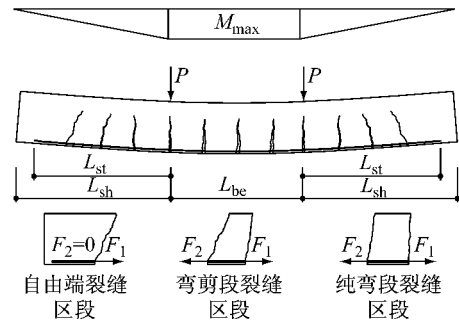


图 1 裂缝区段的分类示意^[25]

Fig. 1 Cracking region

基于以上的认识,本文提出一种新的内嵌 CFRP 加固的理念,其策略为让 CFRP 在极限状态下发生整体的滑移,实现在充分利用 CFRP 强度的同时,避免 CFRP 的断裂,提高加固构件的延性。

本文建立了 6 条基本假设,在此基础上提出截面的设计方法。基本假设具体如下:

(1)平截面假定:弯曲前的平截面在弯曲后仍为平面,即截面各点的混凝土和钢筋纵向应变沿截面的高度方向呈线性变化。

(2)混凝土最大可用压应变为 0.003,应力分布近似为矩形。

(3)忽略混凝土受拉贡献。

(4)屈服前,其应力为钢筋的应变乘以弹性模量;屈服后,钢筋的应力保持在屈服强度水平。

(5)CFRP 材料在局部滑移阶段和整体滑移阶段都保持线弹性。

(6)CFRP 嵌条发生整体滑移时,拉力等于 CFRP 与基体之间的摩擦剪应力与接触面积的乘积;并且滑移量不大时,残余摩擦剪应力保持恒定。

事实上,合理地设计就能保证第 6 条假设的实现。整体滑移时,CFRP 的应力、应变都不会发生明显的变化,拉力保持恒定,就可以避免 CFRP 拉断现象的发生。发生整体滑移前,CFRP 提供弹性拉力,与钢筋屈服前的力学性能相似。整体滑移后,CFRP 的恒定拉力类似于钢筋的屈服。因此,可以参考普通钢筋混凝土梁的算法对 CFRP 嵌入法加固梁的极限承载力进行简化计算。将 CFRP 等效为钢筋,将 CFRP 的整体滑移强度转换为等效钢筋的屈服强度,就可以参考普通钢筋混凝土设计中已知受压钢筋面积设计受拉钢筋的工况,求出 CFRP 整体滑移时提供的拉力(只需要钢筋与混凝土满足平截面假定,不需要 CFRP 与混凝土满足平截面假定)。然后进行 CFRP 筋的几何参数的设计,步骤如下:

(1)确定 CFRP 的材料强度利用率。

(2)基于 CFRP 筋的拉力需求和 CFRP 与基体的黏结性能(即摩擦剪应力),确定 CFRP 筋总的黏结面积,保证摩擦力之和达到 CFRP 的拉力需求。

(3)设计 CFRP 筋的数量、单根 CFRP 筋的截面尺寸和锚固长度,使单根 CFRP 满足强度利用率,从而避免 CFRP 的断裂破坏。

在已知摩擦剪应力情况下,CFRP 筋的总拉力贡献、CFRP 的数量、锚固长度和截面尺寸的关系可以通过公式(1), (2)表达。

$$F_f = \phi n b_f h_f f_{fu} \quad (1)$$

$$L_f = F_f / [2n \tau_{slip} (b_f + h_f)] \quad (2)$$

式(1), (2)中: F_f 为 CFRP 筋的总拉力贡献; ϕ 为 CFRP 筋的强度利用率,数值上小于 1; n 为 CFRP 筋数量; b_f 为 CFRP 嵌条的截面宽度; h_f 为 CFRP 嵌条的截面高度; f_{fu} 为 CFRP 筋极限抗拉强度; L_f 为弯剪裂缝区段与自由端裂缝区段长度之和; τ_{slip} 为 CFRP 与基体间的摩擦剪应力。

因此,对于同一加固目标,可以得到多种设计组合。对于给定截面尺寸的 CFRP 筋,设计结果只有一种。

2 试验验证工作

本文提出的方法是通过合理的设计来提高被加固构件的延性。这个加固设计理念需要试验的验证。首先是通过 CFRP 嵌条的黏结-滑移关系试验,对本文提出的假定 6 进行验证;其次是根据提出的理论,设计并完成 CFRP 加固四点弯曲梁的力学试验,并分析试验结果,对设计方法进行验证。

2.1 CFRP 嵌条的黏结-滑移试验

试验浇筑了 12 个 $150 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$ 的 U 型混凝土试块。形状及详细尺寸如图 2 所示。U 型试块的截面中心处为嵌条预设凹槽,以确保拉拔过程中不会出现偏心拉力。试验养护 28 d 后,嵌入 CFRP 嵌条。CFRP 嵌条的截面尺寸为 $2 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,弹性模量 $1.51 \times 10^5 \text{ MPa}$,抗拉极限强度 $2\ 230 \text{ MPa}$,伸长率 1.65% 。为了考虑黏结性能对黏结关系的影响,试验选择了两种黏结剂,分别为环氧树脂(有机胶黏剂,后文简称 EP)和氯氧镁水泥(无机胶黏剂,后文简称 MOC)。试验考虑了两种黏结长度,分别为 30 和 300 mm。共 4 个工况,每个工况 3 个试件。

试验设计的加载钢夹具如图 3 所示,钢夹具下端与钢棒相连。试验机夹持钢棒作为固定端,使用

502 胶水将铝片粘贴在 CFRP 嵌条上,使嵌条在加载的过程中受力均匀。铝片与嵌条同宽,厚度为 2 mm,长度为 100 mm。试验时,试验机的加载端夹住铝片,施加拉力。试验中,CFRP 嵌条的破坏模式均为 CFRP 嵌条和黏结剂界面破坏。试验曲线如图 4 所示。图中 EP-30-1 表示黏结剂为 EP、嵌条长度为 30 mm 的试件 1,以此类推。试验所得平均摩擦剪应力如表 1 所示。

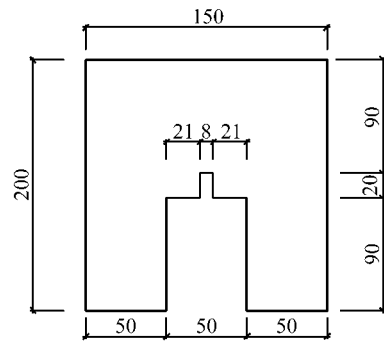


图 2 U 型混凝土试块尺寸(单位:mm)

Fig.2 U shaped concrete specimen(unit: mm)

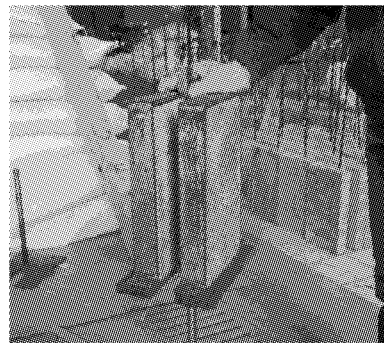


图 3 夹具固定方式

Fig.3 Steel support to fix the specimen

如图 4a, 4b 所示,锚固长度为 30 mm 的试件的曲线包括 3 段,分别为上升段,软化段和水平段。在上升段,CFRP 与黏结剂的化学黏结力起主要作用;在拉力达到峰值强度后,化学黏结力失效。由于后续的摩擦剪应力小于化学黏结力,承载力进入了软化段。相比 MOC 胶黏剂,EP 胶黏剂的黏结强度要大得多,因此降幅更大。随着滑移量的增大,摩擦力开始抵抗拉力,并在很长一段距离内保持恒定。

为了研究 CFRP 嵌条在化学黏结力逐渐失效的过程中的力学表现,进行了锚固长度为 300 mm 的拉拔试验,其结果如图 4c, 4d 所示。相比锚固长度为 30 mm 的试验结果,锚固长度为 300 mm 的试件的降幅轻微得多。这一现象可作如下解释:在较长的锚固长度上,CFRP 嵌条的化学黏结力是逐渐失效。在

化学黏结力失效的前端向 CFRP 的自由端移动的同时,已经失效的部分与黏结剂之间产生了摩擦力,平

缓了化学黏结力失效带来的陡降。

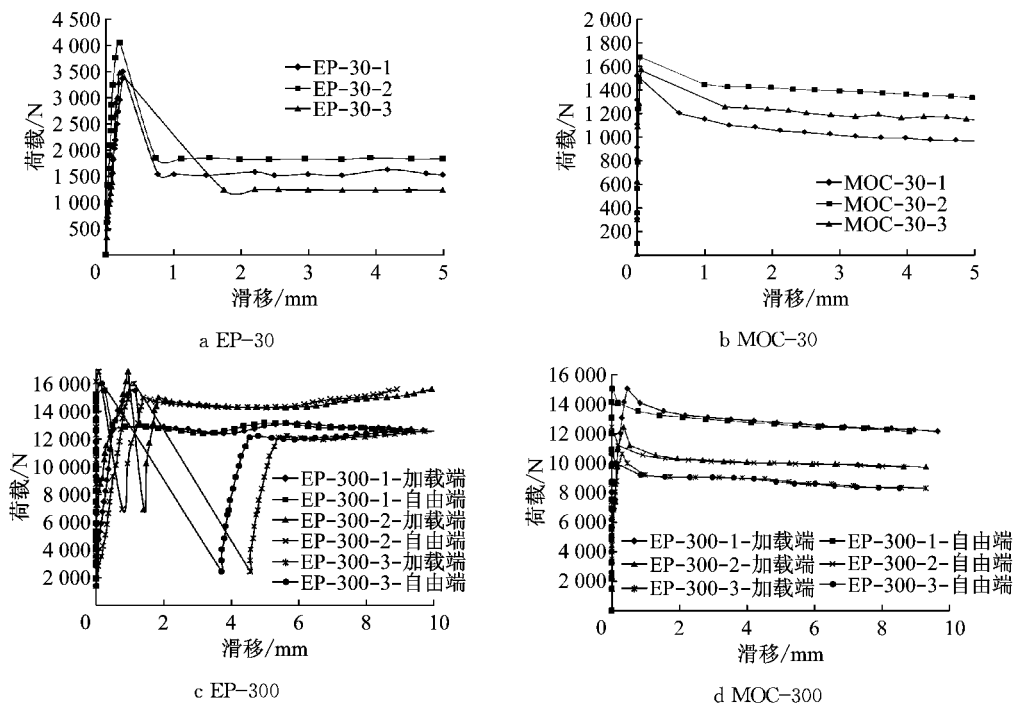


图 4 黏结-滑移关系曲线
Fig.4 Bond-slip versus CFRP strip

表 1 残余摩擦剪应力平均值

胶黏剂	嵌贴长度/mm	试件平均残余拉力/N	平均残余摩擦剪应力/MPa
EP	30	1 529	2.19
	300	13 585	
MOC	30	1 222	1.71
	300	10 399	

表 2 试验梁加固情况

试件编号	试件名称	加固方法	胶黏剂
1	L0	无	无
2	LA1	内嵌 CFRP	EP
3	LA2	内嵌 CFRP	MOC
4	LB1	外贴 CFRP	EP
5	LB2	外贴 CFRP	MOC

试验中,锚固长度为 30 mm 和 300 mm 的 CFRP 嵌条均发生了整体滑移.由图 4 可知,锚固长度为 300 mm 的 CFRP,其残余摩擦应力大约是锚固长度为 30 mm 的 10 倍,这说明 CFRP 筋发生整体滑移时,拉力等于 CFRP 与基体之间的摩擦剪应力与接触面积的乘积.由图 4 可知,整体滑移过程中 CFRP 的拉力稳定,说明本文提出的假定 6 成立.

2.2 CFRP 加固简支梁设计与试验

本次试验共设计 5 根简支试验梁.1 根未加固梁作为参考试件,2 根 CFRP 内嵌法加固梁及 2 根外贴法加固梁,具体加固方式见表 2.试验梁跨度为 2 600 mm,考虑到加载点的长度,实际跨度 2 400 mm,梁截面尺寸 $b \times h = 200 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$.梁采用配筋形式,梁底及顶部纵筋均为 $2\phi 12$,设计配筋率为 0.38%.为了防止剪切破坏,箍筋设计为 $\phi 10 @ 100$.试件尺寸及配筋布置如图 5 所示.

采用同批次混凝土浇筑试件.养护 28 d 后,混凝土立方体的轴向抗压强度为 43 MPa,弹性模量 $1.7 \times 10^4 \text{ MPa}$.纵筋的屈服强度 414 MPa,极限强度 560 MPa,弹性模量 $2.23 \times 10^5 \text{ MPa}$,箍筋屈服强度 400 MPa,极限强度 513 MPa,弹性模量 $2.41 \times 10^5 \text{ MPa}$.选择在梁底嵌入两根截面为 $2 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的 CFRP 嵌条. CFRP 嵌条的弹性模量 $1.51 \times 10^5 \text{ MPa}$,极限抗拉强度 2 230 MPa,伸长率 1.65%.

按照本文提出的方法进行加固设计.首先计算未加固梁的抗弯强度和界限抗弯强度.根据规范提供的计算方法和钢筋与混凝土的实测力学指标,未加固试件 L0 的截面的抗弯强度为 $23.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$,对应的四点弯曲梁的集中荷载为 67.0 kN.截面的超筋界限抗弯强度是 $170.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$,对应的四点弯曲梁的集中荷载为 486.3 kN.假定 CFRP 嵌入加固梁 LA1 与 LA2 的抗弯承载力分别提高 70%,50%,分

别达到 45.6, 40.2 kN·m, 对应的四点弯曲梁的集中荷载 P 为 113.9 kN 和 100.5 kN. 计算得出 CFRP 整体滑移时需要的总拉力分别为 55.2, 40.6 kN. 已知 CFRP 嵌条的弹性模量为 1.51×10^5 MPa. 假设 LA1, LA2 中 CFRP 的利用率分别为 70% 和 60%, 则嵌条截面积分别为 35.4, 30.0 mm². 因此,

梁截面加固采用两根截面为 2 mm×10 mm 的 CFRP 嵌条, 如图 6a 所示. CFRP 嵌条与混凝土之间的平均摩擦剪应力按表 1 取值, 根据公式(1), (2) 计算出 LA1, LA2 试样的 L_t , 分别为 733.3, 733.2 mm, 均取 750 mm. 加上纯弯段的长度, CFRP 嵌条总长度 L 为 2 500 mm.

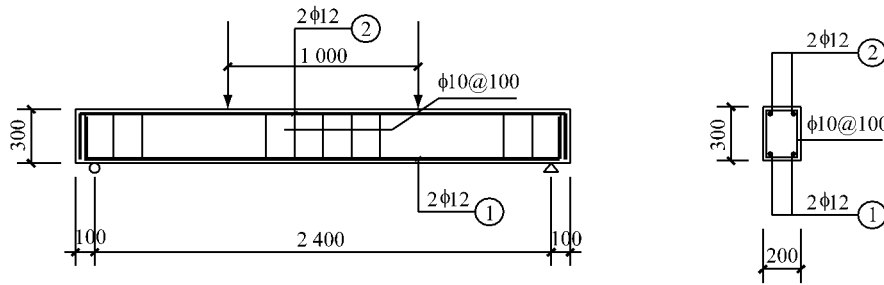


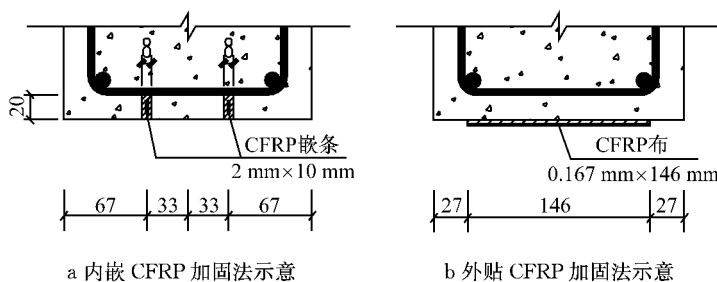
图 5 试件尺寸及配筋布置(单位:mm)

Fig.5 Specimen size and reinforcement(unit: mm)

作为对比试件, LB1 和 LB2 为 CFRP 外贴法加固. CFRP 布的弹性模量 2.48×10^5 MPa, 抗拉极限强度 2 283 MPa, 伸长率 1.71%. 为使试验具有可比性, 加固中采用的 CFRP 布和 CFRP 嵌条的碳纤维含量相当. 发生相同应变时, CFRP 布和 CFRP 嵌条能够提供相等的拉力, 保证 $E_{st} \times S_{st} = E_{sh} \times S_{sh}$ (E_{st} 为 CFRP 嵌条的弹性模量, S_{st} 为 CFRP 嵌条的截面积, E_{sh} 为 CFRP 布的弹性模量, S_{sh} 为 CFRP 布的截面积). 试验采用 CFRP 嵌条截面尺寸为 2 mm×10 mm, CFRP 布的厚度为 0.167 mm, 宽度为 150 mm, 2 根嵌条对应的 $E_{st} \times S_{st}$ 为 6.04×10^6 N, CFRP 布对应的 $E_{sh} \times S_{sh}$ 为 6.21×10^6 N. 外贴法的 CFRP 量略高于内嵌法. 外贴 CFRP 加固布置如图

6b 所示. 胶黏剂仍采用有机环胶 EP 和无机胶 MOC. CFRP 总长度 L 同样取 2 500 mm.

本次梁试验加载装置如图 7 所示. 采用量程为 200 kN 的油压千斤顶, 通过分配梁来实现两点加载, 纯弯段长度为 1 000 mm. 试验过程中均采用手动控制千斤顶分级加载, 每级加载 3 kN(2 min 内完成)直至试件破坏. 试验过程中实时观察梁的裂缝出现、开展情况, 记录开裂荷载, 直接标示裂缝位置以及荷载级别. 在梁端设置位移计 LVDT, 测量加载过程中嵌条纵向的滑移量. 此外还对梁的跨中、支座处位移、梁跨中位置钢筋及 CFRP 嵌条的应变、跨中梁顶混凝土应变等进行了测量.



a 内嵌 CFRP 加固法示意 b 外贴 CFRP 加固法示意

图 6 CFRP 加固钢筋混凝土梁示意图(单位:mm)

Fig.6 Layout of CFRP strengthened RC beam(unit: mm)

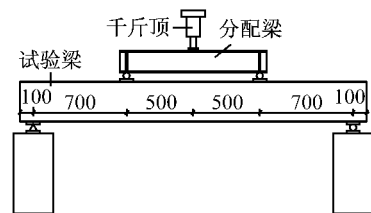


图 7 试验加载装置(单位:mm)

Fig.7 Loading device of beam (unit: mm)

2.3 试验结果分析

图 8 给出了未加固梁 L0, CFRP 的内嵌加固梁 LA1, LA2 及 CFRP 外贴加固梁 LB1, LB2 的荷载-挠度曲线. 外贴加固试件 LB1 的 CFRP 布在挠度 23.75 mm 时断裂, 承载力急骤下降, 约为 74 kN, 相当于未加固梁 L0 的水平. LB2 的 CFRP 断裂挠度为

29.83 mm. LB2 的断裂更为突然, 承载力的急坠导致了试验机保护机制启动, 加载过程被迫停止, 未能取得后续数据. 相比而言, 内嵌法加固试件 LA1 和 LA2 的挠度均达到或超过了 50 mm. 此后, 考虑到挠跨比接近钢筋混凝土构件破坏准则的 1/50, 试验终止. 相比 L0, 加固梁 LA1, LA2, LB1, LB2 的承载力

均有提高. 表 3 给出了试件的开裂荷载和极限承载力. 从表 3 可以看出, 内嵌法加固梁的加固效果与外贴法加固梁接近. 采用本文提出的设计方法, L0, LA1 和 LA2 的计算承载力分别为 67. 0, 113. 9, 100. 5 kN. 对比表 3 可知, 预测值与试验值接近, 说明了本文计算方法的准确性.

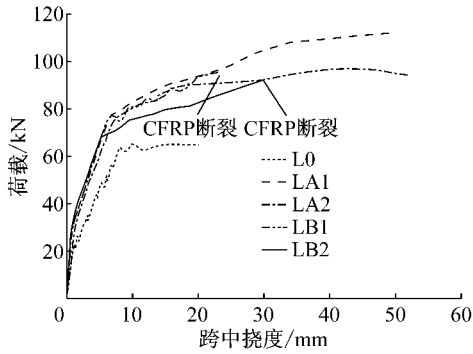


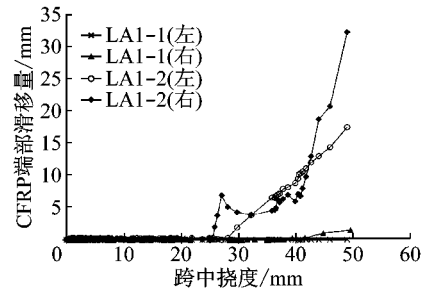
图 8 荷载-挠度曲线
Fig.8 Load-deflection

表 3 试件开裂荷载和极限承载力比较
Tab.3 Cracking load and ultimate capability of test beams

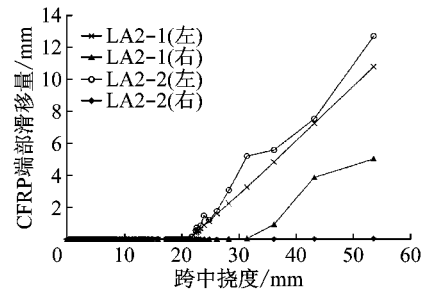
编号	开裂荷载/kN	极限承载力/kN	增强效果/%	
			开裂	破坏
L0	24	65		
LA1	33	108	37.50	66.20
LA2	33	97	37.50	49.20
LB1	33	95	37.50	46.15
LB2	33	93	37.50	43.10

LVDT 测量 CFRP 嵌条的滑移结果如图 9 所示. 初始阶段, LVDT 没有监测到明显的位移, 说明 CFRP 嵌条处于局部滑移阶段. 挠度超过 20 mm 后, LA1, LA2 的某一自由端逐渐出现滑移. 由于材料和施工上的差异, 嵌条的滑移量的离散性较大, LA1 和 LA2 试件各有一嵌条的某一端部从始至终没有发生滑移. 总的来说, 嵌条整体滑移的现象很明显. 综合观察图 8 和图 9 可知, 在 CFRP 整体滑移前, LA1, LA2 的抗弯刚度与 LB1, LB2 接近, 较 L0 有较明显的提高. 挠度超过 20 mm 后, 外贴加固的试件 LB1 和 LB2 发生脆性破坏, 而 LA1, LA2 体现出了良好的延性.

图 10, 11 分别给出了 CFRP 的挠度-应变曲线和混凝土的挠度-应变曲线. 如图 10 所示, 随着加载的进行, 挠度的增加, CFRP 的应变与挠度的关系从线性变成非线性, 增幅变得平缓. CFRP 为线弹性材料, 应变与应力呈线性关系. 应变的增幅变缓只能解释为整体滑移的发生, 这也证实了前文的观点, 从局部滑移过渡到整体滑移的过程中, CFRP 的拉力对



a LA1



b LA2

图 9 CFRP 嵌条端部滑移-挠度曲线
Fig.9 Slippage-deflection of CFRP strip ends

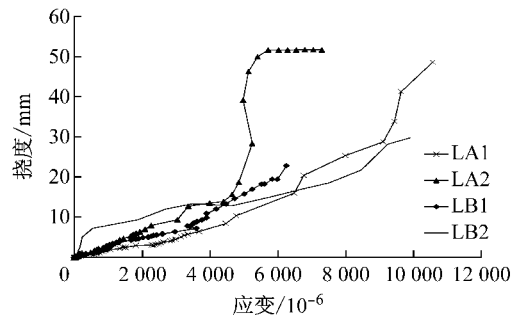


图 10 CFRP 挠度-应变曲线
Fig.10 Deflection-strain of CFRP curve

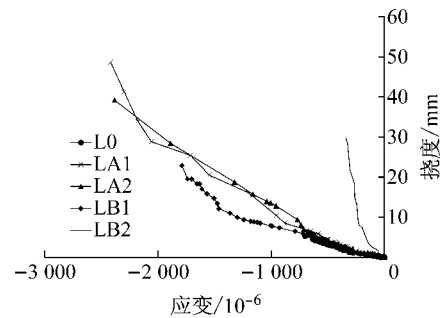


图 11 混凝土挠度-应变曲线
Fig.11 Deflection-strain of concrete

于截面抗弯承载力的贡献类似于钢筋发生屈服造成的效果. CFRP 的整体滑移平缓了裂缝处的应变集中, 使得裂缝间 CFRP 筋的应变波动较小. 试验结果表明: LA1, LA2 的最大平均应变分别为 $10\ 570 \times 10^{-6}$ 和 $7\ 305 \times 10^{-6}$, 其对应的竖向位移分别为

51.67 mm 和 48.60 mm. LA1 和 LA2 的目标强度利用率分别为极限强度的 70% 和 60%, 将其换算成应变, 分别为 $10\ 573 \times 10^{-6}$, $9\ 064 \times 10^{-6}$, 相比实测值, 预测值略微偏大. 图 10 中同时给出了外贴 CFRP 布的应变值. LB1, LB2 的应变增幅与 LA1, LA2 接近, 但由于 CFRP 的断裂, 应变片过早失效.

图 11 为混凝土的挠度与应变曲线, 是单个试件两个混凝土测点的平均值. 挠度与压应变基本呈线性关系, 混凝土受压应变不大于 $-2\ 500 \times 10^{-6}$, 说明测试过程中, 混凝土基本处于弹性状态. LA1 和 LA2 的加载过程较长, 加载后期, 受压区混凝土应变片失效, 未能记录到最终阶段的压应变. 考虑到受弯构件挠度的增加必然伴随截面中和轴的不断上升, 受压区混凝土进入塑性的可能性非常大.

综上所述, 采用本文提出的加固方法, 内嵌 CFRP 加固的钢筋混凝土梁实现了抗弯延性的大幅度提升, 同时保证了加固效果, 体现出外贴 CFRP 加固无法比拟的延性优势.

3 结论

本文提出一种提高内嵌 CFRP 加固体系延性的新思路. 通过设计 CFRP 嵌条与混凝土基体的黏结性能, 使 CFRP 筋在受力过程中发生稳定的、有限度的端部滑移, 在提高被加固构件的承载力的同时, 避免 CFRP 被拉断或混凝土压溃等脆性破坏的发生, 从而大幅度地提升了加固构件的延性. 基于本文提出的设计方法, 通过试验的验证, 可以得到如下结论:

(1) 与外贴 CFRP 加固不同, 嵌入式的 CFRP 筋与基体之间具有良好的黏结-滑移关系. 通过适当的设计, CFRP 筋可以在滑移时保持稳定且相当高的应力状态.

(2) 基于本文提出的设计方法, 新的加固体系有效地提高了钢筋混凝土受弯构件的抗弯承载力和刚度, 其效果与相同加固量的外贴 CFRP 相近.

(3) 改进后的 CFRP 加固体系明显地提高了构件的延性, 克服了传统 CFRP 体系容易发生脆性破坏的缺点, 提高了加固构件的可靠度.

(4) 通过简化计算, 可以有效地预测改进后内嵌加固体系的极限承载力. 该方法与传统的梁截面的弯曲承载力算法非常接近, 适合工程应用.

参考文献:

[1] Thomsen H, Spacone E, Limkatanyu S, *et al.* Failure mode

- analyses of reinforced concrete beams strengthened in flexure with externally bonded fiber-reinforced polymers [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2004, 8(2):123.
- [2] Bonacci J F, Maalej M. Behavioral trends of RC beams strengthened with externally bonded FRP [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2001, 5(2): 102.
- [3] Fanning P J, Kelly O. Ultimate response of RC beams strengthened with CFRP plates [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2001, 5(2):122.
- [4] Mayo R, Nanni A, Watkins S, *et al.* Strengthening of bridge G-270 with externally bonded CFRP sheets [R]. Rolla: University of Missouri, 2000.
- [5] Sebastian W M. Significance of midspan debonding failure in FRP-plated concrete beams [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2001, 127(7): 792.
- [6] Seim W, Hörman M, Karbhari V, *et al.* External FRP post strengthening of scaled concrete slabs [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2001, 5(2): 67.
- [7] Tumalian G, Serra P, Nanni A, *et al.* Concrete cover delamination in RC beams strengthened with CFRP sheets [C]// *Proceedings of 4th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*. Detroit: American Concrete Institute, 1999: 725-736.
- [8] Zarnic R, Gostic S, Bosiljkov V, *et al.* Improvement of bending load-bearing capacity by externally bonded plates [C]// *Proceedings of Creating with Concrete*. London: Thomas Telford, 1999: 433-442.
- [9] Arduini M, Tommaso A D, Nanni A. Brittle failure in FRP plate and sheet bonded beams [J]. *ACI Structural Journal*, 1997, 94(4): 363.
- [10] Smith S T, Teng J G. CFRP-strengthened RC beams. I: review of debonding strength models [J]. *Engineering Structures*, 2002, 24(4): 385.
- [11] Neubauer U, Rostasy F S. Bond failure of concrete fiber reinforced polymer plates at inclined cracks-experiments and fracture mechanics model [C]// *Proceedings of 4th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*. Farmington Hills: American Concrete Institute, 1999: 369-381.
- [12] Monti M, Renzelli M, Luciani P. FRP adhesion in uncracked and cracked concrete zones [C]// *Proceedings of 6th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*. Singapore: World Scientific Publications, 2003: 183-192.
- [13] Savioa M, Farracuti B, Mazzotti D. Non-linear bond-slip law for FRP-concrete interface [C]// *Proceedings of 6th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*. Singapore: World Scientific Publications, 2003: 163-172.
- [14] Spadea G, Bencardino F, Swamy R N. Structural behavior of composite RC beams with externally bonded CFRP [J]. *Journal of Composites for Construction*, 1998, 2(3): 132.
- [15] Dai J G, Ueda T. Local bond stress slip relations for FRP sheets-concrete interfaces [C]// *Proceedings of 6th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*. Singapore: World Scientific Publications, 2003: 143-152.