

文章编号: 1005—0523(2005)02—0001—05

预应力碳纤维布材加固混凝土梁的受弯性研究

童谷生¹, 李志虎², 朱成九¹, 范毅¹

(1. 华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 上饶市信州区第一建筑公司, 上饶 33400)

摘要:通过预应力碳纤维布加固梁、非预应力碳纤维布加固梁及未加固钢筋混凝土梁试件之间的对比试验, 研究了不同的预应力水平对构件受弯性能的影响和作用. 试验研究表明, 随预应力水平的增加被加固件的开裂荷载、屈服荷载及抗弯刚度相应提高.

关 键 词: 预应力; 碳纤维增强塑料; 加固; 梁构件

中图分类号: TM392.3

文献标识码: A

1 引 言

由于碳纤维增强聚合物(CFRP)的优异性能及便捷的施工工艺, CFRP 在结构加固工程中的应用和研究日趋广泛^[1]. 然而, 从目前大量的理论和试验研究来看, 用 CFRP 布加固混凝土受弯构件存在几个问题: (1)CFRP 布不能被充分利用. 当与钢筋共同工作时, 钢筋完全发挥强度时 CFRP 才发挥出不到 20% 的强度^[2]. (2)使用阶段的加固效果不明显, 对构件开裂荷载和屈服荷载的提高程度不大, 难以抑制裂缝的发展. 无疑, 采取对 CFRP 布先施加预应力技术可有效地解决上述问题. 有关预应力碳纤维布材加固受弯构件的研究报道很少, 仅有: 文献^[3]试验研究了预应力碳纤维布加固钢结构; 文献^[4]探讨了预应力碳纤维布加固梁的弯曲性能的变化及施工工艺; 文献^[5]研究了预应力 CFRP 布加固混凝土梁在不卸载时的受弯性能. 本文侧重于通过试验来研究碳纤维布的预应力水平与被加固梁的开裂荷载、屈服荷载、极限荷载、抗弯刚度等构件工作性能之间的关系.

2 试验方案与试件设计^[6,7]

2.1 试件设计

本次试验设计制作了 13 根试件, 均为矩形截面简支梁, 试件编号为 B1~B13. B1、B2 试件为未加固的钢筋混凝土对比梁, B3~B6 为非预应力碳纤维布加固对比梁, B7~B13 为预应力碳纤维布加固梁. 由于主要研究预应力水平、预应力度等因素对于预应力受弯构件的性能的影响, 故试件的混凝土强度等级和钢筋配置全部相同. 按现行钢筋混凝土设计规范推荐的高跨比, 设计试件. 截面尺寸 $b \times h = 100 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$, 梁长 $l = 1\,200 \text{ mm}$, 净跨 $l_0 = 1\,000 \text{ mm}$. 为防止因试验梁抗剪能力不足而引起的过早破坏, 在梁弯剪区内配置了 $\Phi 6 \text{ mm} @ 100$ 的钢筋作为箍筋, 具体参数见图 1. 表 1 给出了各梁加固措施.

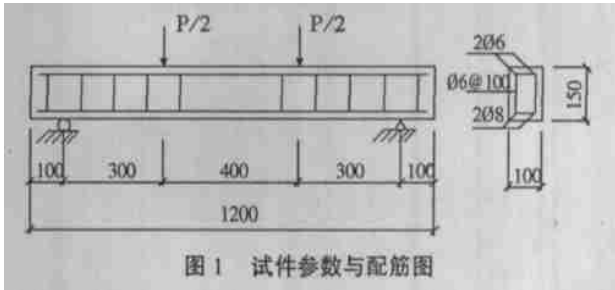


图 1 试件参数与配筋图

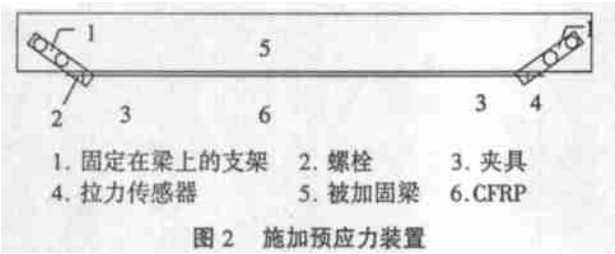
收稿日期: 2004—12—18

作者简介: 童谷生(1962—), 男, 江西石城人, 博士, 教授.

表 1 试件的加固方案

试件	粘贴碳纤维	预拉力	CFRP 初始应力	CFRP 预应变水平
编号	布层数	/N	σ_{pi}/MPa	$\epsilon_{pi}(\times 10^{-6})$
B1	0	0	0	0
B2	0	0	0	0
B3	1	0	0	0
B4	1	0	0	0
B5	1	0	0	0
B6	1	0	0	0
B6	1	0	0	0
B7	1	4 500	269	1 283
B8	1	6 800	407	1 939
B9	1	6 800	407	1 939
B10	1	9 000	539	2 566
B11	1	9 000	539	2 566
B12	1	12 000	719	3 422
B13	1	14 500	868	4 135

经过反复设计与试验，笔者研制出了专门用于预应力碳纤维布加固受弯构件的施加预应力装置（见图 2）。该装置的工作机理为：利用螺栓将预施加应力的碳纤维布上，将碳纤维布的一端与螺栓相连，另一端与力传感器相连，利用螺栓将碳纤维布收紧从而建立预应力。受弯试件加固的试验结果证明，该施工机具可以有效的对受弯构件碳纤维布施加预应力，完全满足预应力碳纤维布加固技术的要求。



2.2 试验材料

试件的混凝土强度设计为 C30。为方便应变片的粘贴，梁中主筋采用 I 级钢筋。加固材料采用由上海同砼碳纤维布有限公司提供的 CFS2-3.55-220-017 型碳纤维布，宽 100 mm，厚 0.167 mm。表 2 中为制造商给出的碳纤维布材参数，表 3 中为材料性能试验结果。表 4 和表 5 分别给出了试件混凝土和钢筋的实测力学性能。

表 3 中， f_{mfu} 、 $\bar{f}_{mfu}$ 、 ϵ_{mfu} 、 $\bar{\epsilon}_{mfu}$ 、 E_{mfu} 、 $\bar{E}_{mfu}$ 分别是材料试验得到的 CFRP 的拉伸强度、拉伸强度的平均值、拉伸极限应变、拉伸极限应变的平均值、拉伸弹性模量、拉伸弹性模量的平均值。

表 2 碳纤维布材性质

	拉伸强度	拉伸模量	延伸率	重量
名义值	4 031 Mp	225 Gpa	1.78%	300 g·m ⁻²

表 3 CFRP 试验结果

试件	f_{mfu}	$\bar{f}_{mfu}$	ϵ_{mfu}	$\bar{\epsilon}_{mfu}$	E_{mfu}	$\bar{E}_{mfu}$
编号	MPa	MPa	($\times 10^{-6}$)	($\times 10^{-6}$)	N/mm ²	N/mm ²
1	2 862		13 846		2.067×10^5	
2	2 708	2 838	12 883	13 525	2.102×10^5	2.098×10^5
3	2 945		13 846		2.127×10^5	

表 4 混凝土强度指标

立方体抗压强度	轴心抗压强度	抗拉强度
f_{cu}/MPa	f_c/MPa	f_t/MPa
35.24	26.78	3.16

表 5 钢筋材料性能

屈服强度	极限强度	弹性模量	延伸率
/MPa	/MPa	N/mm ² /%	
386.5	471.6	2.1×10^5	34

2.3 加载方案及试验量测内容

本次试验采用反力架装置，支架用地锚螺栓整体锚固于基础槽座。以手动千斤顶为加载设备，通过力分配梁将荷载分传给试件。试验过程中用力传感器测定荷载。

根据研究的目的，试验过程中重点量测以下内容：各级荷载下的钢筋应变，梁侧沿截面混凝土的拉、压应变；碳纤维布的应变；各级荷载下裂缝的宽度及开展情况；跨中位移等。

3 试验结果及分析

3.1 试验过程与破坏形态

试验过程

各试验梁的开裂荷载 p_{cr} 、屈服荷载 p_y 、极限荷载 p_u 、50 kN 时跨中挠度 f_{50} 及破坏形式情况见表 4。

表 4 试验结果

构件	p_{cr}	p_y	p_u	f_{50}	破坏
编号/kN	/kN	/kN	/mm	形式	
B1	10	37	41	—	适筋梁破坏
B2	10	35	40	—	适筋梁破坏
B3	12	50	58	4.24	粘结破坏
B4	11	50	71	3.80	CFRP 拉断
B5	13	50	68	4.03	CFRP 拉断
B6	11	50	74	3.98	CFRP 拉断
B7	18	58	76	3.72	CFRP 拉断
B8	18	60	78	3.55	CFRP 拉断
B9	19	58	84	3.27	CFRP 拉断

B10	24	64	84	2.85	CFRP 拉断
B11	22	63	76	2.80	CFRP 拉断
B12	26	67	82	2.58	CFRP 拉断
B13	30	68	77	2.36	CFRP 拉断

B1、B2 是没有加固的钢筋混凝土对比梁,其破坏形式为典型的适筋梁正截面受弯破坏.当荷载 P 增加到 10 kN 时,梁的侧面几乎同时出现三道裂缝,梁的曲率和挠度均较开裂前有较快的增长.随着荷载的增加,裂缝越来越宽,但没有新的裂缝出现.当荷载 P 增加道 37 kN 时,梁的变形骤然增大,并发出持续的响声,梁发生正截面的受弯破坏.此时在两加载点之间的裂缝最大宽度达到 1.6 mm.

B3~B6 均为非预应力 CFRP 加固的梁,受力过程也基本类似适筋梁三阶段受力特征,其荷载与挠度关系曲线出现第一次转折时的值比相应的钢筋混凝土对比梁略高,表明用 CFRP 加固后梁的开裂荷载有提高但不明显.B3 梁继续加载至表中的极限荷载时,观测到碳纤维布的末端保护层混凝土与碳纤维布之间出现裂缝,说明此时 CFRP 即将剥离,故停止试验.为防止剥离破坏,B4~B13 在弯剪段均增设 2 道 10cm 宽的 U 形箍.B4~B13 梁皆为 CFRP 断裂破坏,说明 U 形箍的设置对防止碳纤维的剥离破坏有明显作用.

B7~B13 梁为预应力碳纤维布加固梁,从试验过程来看,其与对比梁相比,有明显的不同.现以 B10 梁为代表,描述其受力过程.当加载到 24 kN 时,荷载—挠度关系曲线才出现第一次转折,开裂荷载比对比梁有较大幅度提高.到 27 kN 跨中附近才出现可见裂缝,裂缝很细,需借放大镜才能观察,其宽度无法精确读出.随着荷载继续增加,裂缝的数量不断增加,约到 38 kN 时,裂缝基本出齐,有八条之多.但在这个过程中,裂缝宽度增加并不明显,38 kN 时,裂缝的宽度仅为 0.02 mm.当加载到 60 kN 时,荷载—挠度关系曲线出现第二个转折,钢筋屈服.继续加载,这时加载伴随出现微小的脆响声,开始较小,后来声音逐渐明显.试验试件加载到最后几级荷载时靠近试件侧面边缘的小条碳纤维先断裂,然后随着荷载的增大而纤维逐渐分条被拉断而破坏.由于破坏时碳纤维已经达到很大的应力应变水平,被拉断时伴随着一声很大的暴响,巨大的应变能急剧释放出来,碳纤维断裂处的混凝土被扯碎形成一个较大的缺口,暴露出受拉钢筋.试件的变形在瞬间急剧增长,同时发生卸载.

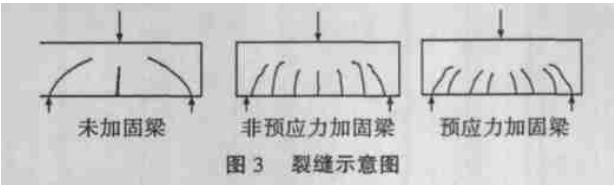


图 3 裂缝示意图

碳纤维布加固的试件与未加固钢筋混凝土梁相比,一个显著的特点是裂缝的间距小,数量多,裂缝的宽度小.无论是施加预应力还是未施加预应力碳纤维布加固试件破坏时裂缝有 7 至 8 道之多,是未加固梁的一倍多,而最大裂缝宽度仅为 0.2 mm 左右,见图 3.

本次试验的加固梁除 B3 梁为粘结破坏,其余均为 CFRP 被拉断构件丧失承载力破坏,此时混凝土尚未破坏.究其原因主要是混凝土的设计强度较高且碳纤维布的加固量较少之故.

3.2 承载力分析

表 5、表 6、表 7 分别给出试件开裂荷载、屈服荷载和极限荷载比较情况.

HT5”H表 5 试件开裂荷载比较

试件号	σ_{pi}/MPa	P_{cr}/kN	与对比试件的比值
B3~B6 平均值	0	11.75	100%
B7	269	18	153%
B8	407	19	162%
B9	407	18	153%
B10	539	24	204%
B11	539	22	187%
B12	719	26	221%
B13	868	30	255%

表 6 试件屈服荷载比较

试件号	σ_{pi}/MPa	P_y/kN	与对比试件的比值
B3~B6 平均值	0	50	100%
B7	269	58	116%
B8	407	60	120%
B9	407	58	116%
B10	539	64	128%
B11	539	63	126%
B12	719	67	134%
B13	868	68	136%

表 7 试件极限荷载比较

试件号	σ_{pi}/MPa	P_u/kN	与对比试件的比值
B4~B6 平均值	0	71	100%
B7	269	76	107%
B8	407	78	110%
B9	407	84	118%
B10	539	84	118%

B11	539	76	107%
B12	719	82	115%
B13	868	77	108%

从表 4 可清楚地看出,非预应力碳纤维布加固对构件的开裂荷载影响很小,平均仅提高 17.5%。这主要是结构组成材料的特点决定的。混凝土材料的抗拉强度很小,在应变不大时即告开裂,碳纤维的强度虽然可达到钢材的十几倍,但弹性模量与钢材相差无几,也就是说在应变不大时碳纤维发挥的作用很有限。但通过预应力碳纤维增强塑料加固的受弯构件开裂荷载显著提高,并且与试件的预应力水平一致,见表 5。这是因为由于预应力的存在,碳纤维布在梁开始受力以前已经有较大的应变。同时,由于试验梁在加载以前,梁底混凝土受压,外加荷载需要首先抵消混凝土的压应力。因此,用预应力碳纤维布加固的梁在混凝土开裂前,碳纤维布的应变比较大,从而使梁的开裂荷载大幅度提高。表 6 显示,预应力加固受弯构件的屈服荷载与对比试件相比有所增加,但提高的幅度不如开裂荷载显著。屈服荷载的变化趋势与预应力水平变化趋势一致。表 7 表明,通过预应力碳纤维增强塑料加固的受弯构件的极限荷载稍大于对比试件,增幅与预应力水平无明显的关系。分析原因有两点:一、预应力试件在制作时 CFRP 经过了较长时间的张拉,在其内部发

生了较充分的应力重分布,应力分布较为均匀;二、预应力试件中 CFRP 的应变增长小于非预应力试件,相应的胶层发生的剪切变形也较小,从而不易发生粘结破坏,使得 CFRP 极限应力有所提高。

3.3 抗弯刚度分析

预应力通过提高开裂荷载与屈服荷载可提高受弯构件的抗弯刚度。从表 8 中的数据可以看出,随着预应力水平提高,挠度相应地减小,即构件在使用阶段的抗弯刚度相应增大,充分体现了预应力技术在刚度加固方面的优势。本文通过比较在对比试件的屈服荷载(试件纵筋屈服时的荷载)下预应力和非预应力两种试件的跨中挠度曲线变形来反映预应力对试件抗弯刚度的影响。从图 4 的试件荷载—挠度曲线来看,预应力试件挠曲变形的减小是通过开裂荷载与屈服荷载的提高实现的。

表 8 试件跨中挠曲变形比较

试件号	σ_{pi}/MPa	f_{50}/mm	与对比试件的比值
B3~B6 平均值	0	4.01	100%
B7	269	3.72	93%
B8	407	3.55	89%
B9	407	3.27	82%
B10	539	2.85	71%
B11	539	2.80	70%
B12	719	2.58	64%
B13	868	2.36	59%

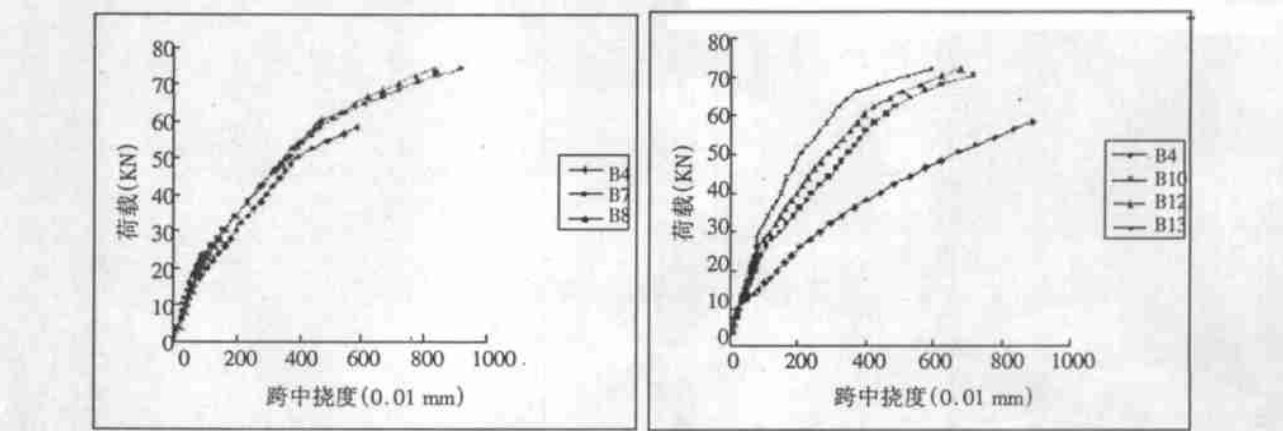


图 4 跨中挠度—荷载曲线对比

4 结 语

根据本次试验结果可得到以下结论:1)预应力碳纤维布加固混凝土受弯构件能显著提高被加固构件的开裂荷载,且提高幅度与预应力水平保持一致;2)预应力能提高被加固件的屈服荷载,并随预

应力水平提高,屈服荷载的增幅加大;3)预应力能略微增加被加固件的极限荷载,增幅在 10%左右,但增幅与预应力水平之间无明显的相关性,具体的原因有待进一步分析;4)预应力可明显提高构件的抗弯刚度。施加的预应力越大,被加固件的挠度越小。

参考文献:

[1] 周仕刚,高永飞. CFRP 加固初始受载钢筋砼梁弯曲性能的试验研究. 玻璃钢/复合材料[J]. 2003(1).

[2] Thanasis C, Triantafillou, Deskovic Nilola. Innovative pre-stressing with FRP sheets; mechanics of short-term behavior [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1991, 117(7): 1652-1672.

[3] 江克斌,许特,赵启林. 采用预应力碳纤维技术提高钢结构承载力的分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2003(4).

[4] 尚守平,彭 晖,童 桦,等. 预应力碳纤维布材加固混凝土受弯构件的抗弯性能研究[J]. 建筑结构学报, 2003(5).

[5] 彭飞飞,江世永,谢 孝,飞 渭,等. 预应力 CFRP 布加固混凝土梁不卸载时的受弯性能试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2003(2).

[6] 飞渭,江世永,彭飞飞,陈正平,李庆枫,陈龙. 预应力碳纤维布加固混凝土受弯构件研究[J]. 四川建筑科学研究, 2003(2).

[7] 吴刚,安琳,吕志涛. 碳纤维布用于钢筋混凝土梁抗弯加固的试验研究与分析[J]. 建筑结构, 2000, 30(7): 3~6.

The Experimental Study of Strengthening Reinforced Concrete Beam
Using Prestressed Carbon Fiber Sheet

TONG Gu-sheng¹, LI Zhi-hu², ZHU Cheng-jiu¹, FAN Yi¹

(1.School of Civil Eng. and Arc., East China Jiaotong Univ., Nanchang 330013;The 1st construction company of Xinzhou block, Shangrao 334000, China)

Abstract:Through contrastive experiments of the strengthened beams using prestressed carbon fiber sheet, strengthened beams using non-prestressed carbon fiber sheet and reinforced beams, the effect of different prestressed levels on beam's flexural properties is studied in detail. The experiments shows that the cracking loads, yield loads and flexural stiffness of strengthened beams is increased with improvement of prestress levels.

Key words:prestressed CFRP; strengthening; beam