

文章编号:1004-4736(2008)02-0065-05

预应力碳纤维布加固二次受力梁抗弯试验研究

庄芸

(武汉工程大学环境与城市建设学院,湖北 武汉 430074)

摘要:通过对7根不卸载的混凝土梁进行预应力CFRP布加固后的荷载试验,研究了不同的初始弯矩对构件受弯性能的影响和作用。试验研究表明,初始弯矩的存在使构件的受弯性能明显降低,并且随着初始应力水平的提高,降低作用更加明显。

关键词:预应力CFRP布;加固;不卸载;抗弯承载力

中图分类号:TU375.1

文献标识码:A

0 引言

工程实践及试验研究表明,利用碳纤维布加固混凝土受弯构件时,碳纤维布高强度的特点仅在梁中主筋屈服后才得以充分发挥,而在主筋屈服前,碳纤维布所起的作用有限。因此,它对提高被加固构件的开裂荷载及屈服荷载作用不是十分明显,对受弯构件在正常使用阶段的性能的改善也有限。为了充分发挥CFRP高强等优势,预先给CFRP布施加预应力后再进行粘贴,这样一方面可使CFRP布较早地参加工作,充分发挥其强度;另一方面预应力产生的反拱可以抵消构件的初始弯矩,提高构件抗裂度、刚度及屈服强度和极限强度等^[1~9]。同时,实际加固工程中,由于很难做到完全卸载,因而加固后的原结构属于二次受力结构。相对一次受力问题而言,二次受力问题的试验对试验经费、时间、人力和试验手段等方面要求更高。按照一次受力试验建立的设计理论可能过高估计了加固混凝土结构的承载能力,如果按照这种试验结果来指导实际工程,很可能导致结构安全性偏低。当所需加固的构件所受的初始弯矩较大时,这种计算方法是偏于不安全的。因此,在结构加固设计计算中,考虑被加固构件的初始弯矩的影响有着重要的意义。国内外预应力CFRP布加固二次受力RC梁的试验极少,且设置的条件与实际工作环境有较大差距,应用于工程实践的则未见报道。为此选择此项目试验并将研究成果应用于加固实践会有很好的经济效益和社会效益。

1 试验的目的与内容

a. 探索实际施工过程中易掌握且较简便的预

加应力的方法、工艺及施工机具的制造和使用,在实验中验证其有效性和可行性;

b. 在CFRP与混凝土界面的粘结强度的理论分析基础上,结合现场实际施工条件,进行锚固端锚固的方法及有效性分析;

c. 定性定量地记录试验过程中CFRP、钢筋、混凝土的应力应变变化以及挠度和裂缝变化情况,通过一次受力预应力对照梁及二次受力预应力加固梁的对比试验,研究初始应力对梁的抗弯刚度、裂缝的开展、钢筋屈服荷载、极限荷载、屈服荷载挠度、极限荷载挠度等性能的影响;

d. 在试验过程中发现问题,为今后进一步研究收集尽可能多的第一手资料。

2 试验方案

2.1 试件设计

本试验采用预应力碳纤维布加固一次、二次受力钢筋混凝土梁作为受弯试验的主要研究对象。试件的设计保证梁先发生受弯破坏。共进行7根梁的试验,图1是试验梁的配筋图。

试验材料:主筋③采用HRB335热轧钢筋;2 Φ 20,实测性能取 $f_y=334\text{ N/mm}^2$ 。保护层厚度为25 mm。混凝土强度等级为C25,实测性能取 $f_c=24.5\text{ N/mm}^2$ 。碳纤维布采用日本东丽公司的UT70 30型碳纤维布,实测材料参数见表1。试验仪表布置如图1。

表1 碳纤维布的材性

Table 1 The material properties of CFRP

理论厚度	名义宽度	卷长	抗拉强度	弹性模量	延伸	密度
/mm	/mm	度/m	$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	率%	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
0.167	250	50	4230	2.33×10^5	1.8	1.78

收稿日期:2007-06-28

作者简介:庄芸(1969-),女,湖北武汉人,讲师,硕士,研究方向:结构工程。

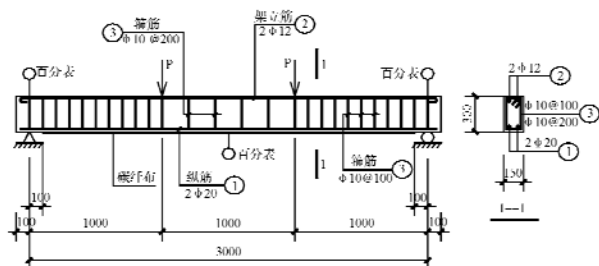


图 1 试件大样及试验仪表布置图

Fig. 1 Layout chart for bulk sample & test meter

2.2 预应力碳纤维布加固方案

本试验使用日本东丽公司的 UT70-30 型碳纤维布,理论厚度 0.167 mm,预应力张拉时先将碳纤维布一端固定在混凝土梁上,再从另一端张拉。本试验预应力梁固定端采用两种锚固方法:

a. 先将锚固端 200 mm 范围内的碳纤维布粘好,并用 100 mm 的一条封闭缠绕纤维布箍锚固,等胶干后再进行预应力张拉。

b. 使用设计的专用锚具进行锚固。

张拉端采用专门设计的张拉装置。

另外,因为张拉时碳纤维布发生翘起,故张拉后采用夹具贯穿全梁布置,待胶干后取下。试验加载示意图见图 2。各梁的加固措施见表 2。其中初始弯矩 M_i 的取值应小于未加固梁的极限弯矩值 M_u ;张拉控制力的取值应考虑在张拉设备能力范围之内,并考虑由于有效预应力水平的不同所导致的破坏形态的差异。

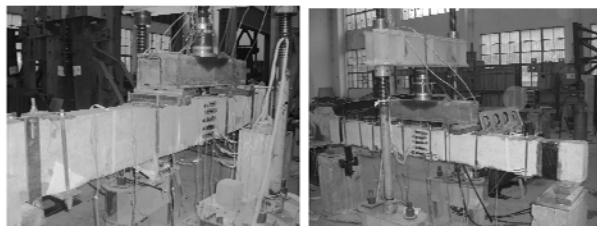


图 2 试验加载示意图

Fig. 2 Loading schematic diagram for test

表 2 试验梁参数表

Table 2 Parameter table of test beam

试件 编号	初始弯矩 M_i /kN·m	$\beta=M_i/M_u$	张拉控制力 /kN	碳纤维布(300 g)用量 /mm×mm
L1	0	0	38	125×2 400
L2	20	0.426	38	125×2 400
L3	28	0.597	38	125×2 400
L4	35	0.746	38	125×2 400
L5	20	0.426	22	125×2 400
L6	28	0.597	22	125×2 400
L7	20	0.426	13	125×2 400

2.3 试验梁的加荷方案

本试验通过 3 t 液压千斤顶(1 MPa=1 t)及分配梁采用三分点两集中力单调静力加载,在试

验构件的荷载从零加载至初值后,张拉碳纤维布并粘贴至梁底后锁定油压阀,维持荷载三至四天,待胶达到强度后,取下锚具,打开油压阀,继续加载至构件破坏,其间不卸载。加载幅度按《混凝土结构试验方法标准(GB50152-92)》执行。

预应力碳纤维布加固钢筋混凝土梁受弯承载力极限状态的标志为下述现象之一:

a. 静态应变仪读数开始下降,荷载值加不上去;b. 碳纤维布与混凝土之间剥离;c. 碳纤维布拉断;d. 受压区混凝土压碎。

2.4 CFRP 布的预应力施加及预应力值的确定

预应力值的控制采用双控制,即通过标定后的扭力扳手控制其加载力以及通过 CFRP 布上粘贴的应变片控制。

2.5 试验量测的内容

根据研究目的,试验的具体测量主要包括以下内容:

a. 各级荷载作用下,挠度的量测。
b. 各级荷载作用下,混凝土、钢筋、CFRP 布三个部分的应变测量。应变片布置见图 3 和图 4。
c. 各级荷载作用下,裂缝宽度及开展情况。

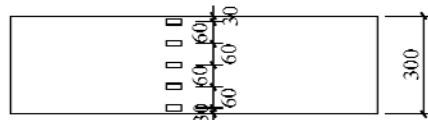


图 3 混凝土应变片布置图

Fig. 3 Layout chart for strain gage of concrete

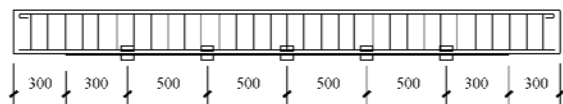


图 4 钢筋及碳纤维布应变片布置图

Fig. 4 Layout chart for strain gage of carbon fiber cloth & reinforcing steel

3 试验结果及分析

3.1 试验梁的破坏现象

7 根梁的主要试验结果见表 3。

加固构件的破坏形式主要有 3 种:a. 碳纤维布达到其允许拉应变 $[\epsilon_{cf}]$ 后被拉断,此时受压区边缘的混凝土应变尚未达到极限压应变 3 300 $\mu\epsilon$;b. 受压区边缘混凝土应变达到极限压应变 3 300 $\mu\epsilon$,但此时碳纤维布尚未达到其允许拉应变 $[\epsilon_{cf}]$;c. 碳纤维布发生剥离破坏。三种破坏形式在本次试验中或其它试验资料中往往都表现为布拉断,但在拉断前碳纤维布强度的利用率会有较大差别,承载能力也会因碳纤维布强度的利用程度依次降低。

表 3 主要试验结果
Table 3 Main test result

试件编号	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
初始弯矩 $M_i/\text{kN}\cdot\text{m}$	0	20	28	35	20	28	20
张拉控制力/kN	38	38	38	38	22	22	13
屈服弯矩 $M_y/\text{kN}\cdot\text{m}$	56.5	55.8	54.2	52.9	52.9	52.0	51
极限弯矩 $M_u/\text{kN}\cdot\text{m}$	59.8	59.0	60.2	59.4	56.2	55.7	54.5
极限挠度/mm	11.35	13.82	15.09	15.79	18.99	19.76	21.30
破坏形式	CFRP 布拉断	CFRP 布拉断	CFRP 布拉断	CFRP 布拉断	混凝土压碎	混凝土压碎	混凝土压碎

注:为安全起见,本次试验所监测的极限挠度为破坏前一级荷载所对应的挠度。

在不施加预应力或施加的预应力水平很低时往往因胶层的剪切变形过大而发生剥离破坏,拉断现象为剥离后的拉断.这也是不施加预应力或施加的预应力水平很低试件在试验后期即使设置了很强的锚固仍然会发生局部粘结破坏的原因之一.在良好施工情况下,在发生明显剥离之前,碳纤维布的拉应变可达到规范的建议取值,即达到允许拉应变 $[\epsilon_{cf}]$,这时 $[\epsilon_{cf}]=\min\{k_m\epsilon_{cfu},\frac{2\epsilon_{cfu}}{3},0.01\}$,大约为 60% 极限拉应变(式中符号含义详见规范).

在本次试验中,可观察到预应力对 CFRP 布与混凝土之间界面的粘结产生了显著的影响.无论为何种破坏形式,所有经过预应力碳纤维布加固的试件加载直至破坏均未出现明显粘结破坏的迹象.分析其原因主要是在有一定预应力试件中 CFRP 布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及传递的也较小,从而不易发生粘结破坏,并且预应力水平越高,CFRP 布的强度的利用率越大.例如,L1~L4,其破坏形式为第 a 种,虽然破坏荷载并未达到按平截面假定并且 CFRP 布的强度被充分利用(应变达到材性试验的极限应变)时的荷载值(这可能是因为 CFRP 布应变沿布宽度不均匀或破坏前胶层因剪切变形发生不很明显的滑移),但根据破坏荷载按平截面假定反算所得的 CFRP 布的强度的利用率和试验实测的破坏前一刻 CFRP 布的应变(约为 12 000~13 000 $\mu\epsilon$)已大于非预应力碳布的值(10 000 $\mu\epsilon$).从这一现象可得出在预应力试件中用于承载力计算的 CFRP 布的允许拉应变值可随预应力水平的提高而提高取值,具体关系可在以后的相关的试验中继续研究.

本次试验 L1~L4 的预应力水平较高,有效预应力水平 ϵ_{pecf} 在 7 000 $\mu\epsilon$ 左右(碳纤维的应力沿宽度和长度分布不均匀),破坏形态为:受拉钢筋先屈服,然后碳纤维布达到其允许拉应变 $[\epsilon_{cf}]$ (约为 12 000~13 000 $\mu\epsilon$,高于非预应力碳布 10 000 $\mu\epsilon$),拉断后,最后受压区混凝土压坏.L2 的破坏情

况见图 5.



图 5 L2 破坏时碳纤维布的状态

Fig. 5 Status of carbon fiber cloth when L2 is destructed

L5~L7 的预应力水平较低(L5~L6 有效预应力水平 ϵ_{pecf} 在 4 000 $\mu\epsilon$ 左右,L7 有效预应力水平 ϵ_{pecf} 在 2 400 $\mu\epsilon$ 左右),破坏形态为:受拉钢筋先屈服,然后受压区混凝土压碎(达到其极限变形 $\epsilon_{pecf}=3\,300\,\mu\epsilon$),此时碳纤维布未达到其允许拉应变 $[\epsilon_{cf}]$ (10 000 $\mu\epsilon$),但此时变形较大,胶层产生滑移,碳纤维布发生轻微剥离(即不再满足平截面假定),随即拉断.拉断时未见混凝土受压区有明显压碎痕迹,但内部裂缝已有较大程度的发展.L7 的破坏情况见图 6.

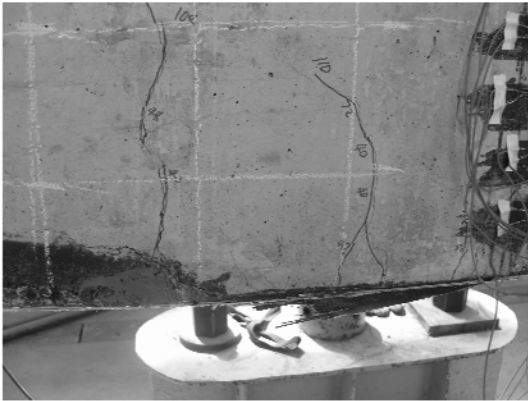


图 6 L7 破坏时碳纤维布的状态

Fig. 6 Status of carbon fiber cloth when L7 is destructed

3.2 试验梁的应变分析

a. 侧面混凝土应变沿高度分布近似符合截平面假定.^[10]

b. 受拉钢筋的荷载应变曲线有两个明显的转折点。^[10]

c. 碳纤布的荷载应变曲线分为明显的两阶段^[10]。

3.3 预应力水平对屈服荷载、极限荷载、裂缝发展、构件刚度及延性的影响

从试验结果对比可得出以下结论:

a. 碳纤布的荷载应变曲线图^[10]分为明显的两阶段。在钢筋屈服前,碳纤维的应变增长值相对较小,当钢筋屈服后,碳纤维布才开始充分发挥其作用,碳纤维布的应变迅速增加,曲线趋向平坦。由于预应力加固梁碳纤维布在加载前已经受拉,其强度在构件的使用阶段就得到了充分的发挥。各根试件在钢筋屈服(屈服荷载)时的碳纤维的应变见表 4。从表中数据可以看出,钢筋屈服时,碳纤维布已发挥了相当大的强度,并且预应力水平越高,碳纤维的早期应变越大,解决了非预应力碳纤维布加固试件在受荷早期碳纤维布作用不明显的弱点,使碳纤维材料的高性能得到进一步体现。

表 4 钢筋屈服时碳纤维的应变

Table 4 Strain of carbon fiber cloth when reinforcing steel yields

试件编号	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
碳纤维的应变($\mu\epsilon$)	9 281	8 611	8 242	7 963	5 507	5 158	3 805

b. 碳纤布的荷载应变曲线图^[10]可以看出预应力碳纤维布加固的受弯构件,开裂荷载、屈服荷载、极限荷载与抗弯刚度随预应力水平的提高而提高。其中对极限荷载的提高是通过提高破坏时碳纤维布的极限拉应变(准确地说是允许拉应变)的值而实现的。具体分析见前述。

c. 随预应力水平的提高,裂缝数量增多、间距变小、宽度减小(L1~L4 破坏前最大裂缝宽度均不超过 0.2 mm, L5~L7 破坏前最大裂缝宽度均不超过 0.3 mm)使得构件在使用阶段及最终破坏时裂缝和挠度都有明显改善。

d. 在不同预应力水平下粘贴碳纤维布加固时,预应力水平高时,加固梁从钢筋屈服到构件破坏这一过程变形较小;预应力水平低时,加固梁从钢筋屈服到构件破坏这一过程变形较大。例如从图 7 的 L2 的荷载挠度曲线可看出从钢筋屈服(即曲线的第二转折点)到构件破坏(即曲线的终点)这一过程挠度增加较小,曲线较短;而图 8 的 L7 这一过程挠度增加较大,曲线较长。因此,可以看出,预应力水平的不同对加固梁的延性有较大的影响。设计时,应适当控制预应力水平,使预应力 CFRP 构件具有良好的延性性质。

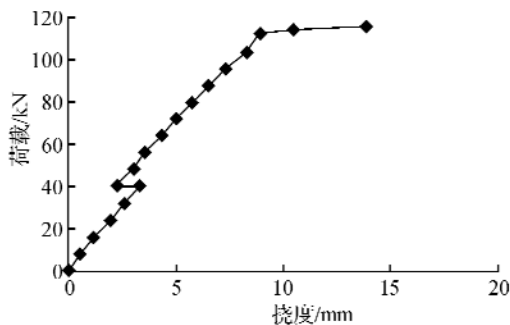


图 7 L2 的荷载挠度曲线

Fig. 7 Load deflection curve for L2

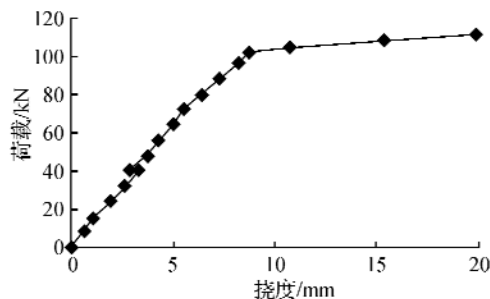


图 8 L7 的荷载挠度曲线

Fig. 8 Load deflection curve for L7

3.4 加固前初始弯矩对屈服荷载、极限荷载、裂缝发展、构件刚度及延性的影响

从表 3 可以看出,加固前初始弯矩越大,加固后梁的屈服弯矩就越小。这主要是因为,加固前受拉区混凝土和受拉钢筋本身已有一定的初始应变,在达到各自的屈服应变的整个过程中,初始应变越大,应变增量越小,根据应变协调原理,CFRP 布提供的拉力就越小,因而构件屈服弯矩就会降低。

而对于极限弯矩,梁 L1~L4 基本一致(60 kN 左右)。也就是说,当加固梁最终破坏形式为 CFRP 布拉断时,在相同的预应力水平下,初始弯矩是否存在对极限承载力影响不大。而构件 L5~L6 的最终破坏形式为受压区混凝土压碎,加固前构件受压区混凝土已有一部分初始应变,对于初始应变较大的构件,达到破坏时的极限压应变的整个过程中,应变增量相对要小,根据应变协调原理,混凝土压碎时 CFRP 布的应变增量也较小,因而提供的拉力就偏小,而此时钢筋都已屈服,其提供的拉力是一定的,所以,最终截面提供的总拉力偏小。

由试验数据分析可知,构件加固前初始弯矩的存在对二次受力时的挠度有较大的影响,在相同的预应力水平下,初始弯矩较小的构件比初始弯矩较大构件在各个阶段的跨中挠度要小,在受拉钢筋屈服前不够明显,钢筋屈服后,在相同的荷载大小作用下,两者的挠度差别明显增大,初始应力水平越高,挠度越大。同时预应力对裂缝开展的抑制程度也随加固前初始弯矩的提高而减弱。

初始应力水平为零的构件,碳纤维布在其刚开始受力时就对承载力、裂缝开展、挠度变形发挥作用,而二次受力构件中碳纤维布的作用发挥较晚,因而对使用阶段受力性能提高有限,但初始弯矩的这种负面影响可以通过预应力的作用得到消除。

4 结 语

本文对预应力碳纤维布加固二次受力梁抗弯性能进行了试验研究和理论分析,其主要结论如下:

a. 预应力加固梁由于碳纤维布在加载前已经受拉,其强度得到了充分的发挥,使碳纤维材料的高性能得到进一步体现。

b. 预应力碳纤维布加固的受弯构件,其开裂荷载、屈服荷载、极限荷载与抗弯刚度随预应力水平的提高而提高。其中对极限荷载的提高是通过提高破坏时的极限拉应变(准确地说是允许拉应变)的值而实现的。

c. 随预应力水平的提高,裂缝数量增多、间距变小、宽度减小,使得构件在使用阶段及最终破坏时裂缝和挠度都有明显改善。

d. 预应力水平的不同对加固梁的延性有较大的影响。设计时,应适当控制预应力水平,使预应力 CFRP 构件具有良好的变形能力。

e. 对二次受力加固梁,构件加固前初始弯矩的大小对构件极限弯矩随着最终破坏形态的不同而不同。

f. 在相同的预应力水平下,初始弯矩较小的构件比初始弯矩较大构件在各个阶段的跨中挠度要小,同时预应力对裂缝开展的抑制程度也随加固

前初始弯矩的提高而减弱。

参考文献:

- [1] Zhen Lu, Thomas E Boothby, CE-Nannies, et al. Transfer and Development Lengths of FRP Prestressing Tendons[J]. PCI Journal, 2000, 45(2): 84-95.
- [2] Joseph M Tripi, Charles E Bakis, Thomas E Boothby, et al. Deformation in Concrete with External CFRP Sheet Reinforcement[J]. Journal of Composites for Construction 2000, 4(5): 85-94.
- [3] 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, 24(5): 24-30.
- [4] 飞 渭, 江世永, 彭飞飞, 等. 预应力碳纤维布加固混凝土受弯构件试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2003, 29(2): 56-60.
- [5] 飞 渭, 江世永, 彭飞飞, 等. 预应力碳纤维布加固混凝土受弯构件正截面承载力分析[J]. 四川建筑科学研究, 2003, 29(3): 42-45.
- [6] 陈志立, 肖 燕. 预应力碳纤维布加固混凝土受弯构件分析[J]. 国外建材科技, 2004, 25(3): 60-61, 67.
- [7] 彭飞飞, 江世永, 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, 29(2): 39-42.
- [8] 张坦贤, 吕西林. 预应力碳纤维布加固一次二次受力梁抗弯试验研究[J]. 结构工程师, 2005, (1): 34-40.
- [9] 童谷生, 李志虎, 朱成九, 等. 预应力碳纤维布材加固混凝土梁的受弯性研究[J]. 华东交通大学学报, 2005, (4): 1-5.
- [10] 庄 芸. 预应力碳纤维布加固二次受力梁抗弯性能研究[D]. 武汉: 武汉大学土木建筑工程学院, 2006, 5.

Experimental research on flexural performance of reinforced concrete twice loading beams strengthened with prestressed carbon fiber reinforced polymer

ZHUANG Yun

(School of Environmental and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Load experiments of seven concrete beams strengthened with prestress CFRP sheets when load is not removed have been carried out. This paper researches mainly that different initial moment has the influence and action on the character in bending of member. The experiments show that the existing of initial moment weakens clearly the character in bending, and with the increasing of initial stress, the effect is more notable.

Key words: prestressed CFRP sheets; strengthening; no uninstalling load; capacity of resisting bend

本文编辑: 萧 宁