

# 预应力碳纤维布材加固混凝土梁 受弯性能非线性分析

尚守平 彭 晖 曾令宏

(湖南大学土木工程学院 湖南长沙 410082)

**摘 要:**根据平截面变形假定,考虑材料的非线性性质,用分级加应变的方法计算预应力碳纤维布加固的混凝土梁的荷载-挠度关系,得到的5根预应力碳纤维加固混凝土梁和4根非预应力加固混凝土梁的荷载-挠度曲线与试验结果吻合较好。并在此力学模型的基础上对预应力碳纤维布加固的受弯构件的二次受力性能进行了非线性分析,研究了碳纤维初始应变、截面高度、预应力大小对被加固梁受弯性能的影响。分析结果表明:预应力可有效发挥碳纤维高强性能,二次受力条件下预应力碳纤维布材的加固效果远好于非预应力碳纤维布材加固,可有效解决构件二次受力应力应变滞后问题。

**关键词:**预应力 碳纤维 非线性分析 加固 二次受力

预应力碳纤维布材加固混凝土梁是指在将碳纤维粘贴至混凝土梁受拉区之前对碳纤维施加一定程度(30%~50%碳纤维极限拉伸能力)的预拉力,粘贴至混凝土梁上之后预应力传递至梁构件受拉区,使之预先受压,从而在混凝土梁受荷时抑制其变形及开裂<sup>[1]</sup>。作为一种新的加固技术,预应力碳纤维加固技术可以在构件在承受荷载之前就发挥碳纤维相当的强度,有效的利用碳纤维的高强性能,避免材料浪费,又能抑止构件的变形和裂缝的发展,避免碳纤维强度模量比值过高的矛盾<sup>[2]</sup>;另一方面,构件承受荷载后碳纤维的变形分为初始变形和荷载引起的变形两部分,而对应碳纤维两部分变形的胶粘剂剪切变形又分别分布于构件的两端和跨中区域,使得胶粘剂的剪切变形分布更为均匀,可有效避免粘结破坏<sup>[3]</sup>。由于具有以上优点,预应力碳纤维加固技术成为碳纤维加固技术的重大突破,也成为目前的研究热点。Raafat El-Hacha, M. ASCE 等对预应力碳纤维布加固构件进行了工艺及试验研究<sup>[4]</sup>;并对加固构件在常温与低温下的受弯性能进行了试验研究<sup>[5]</sup>;飞渭,江世永等进行了预应力碳纤维加固受弯构件的静载试验,并对其承载力等性能进行了分析<sup>[6]</sup>;陈丽莹,高日对碳纤维布加固梁在二

次受力条件下的承载力进行了分析,提出了承载力计算公式<sup>[7]</sup>;戚豹,康文梅等对二次受力条件下应用碳纤维布加固的受弯构件的性能进行了研究<sup>[8]</sup>;郑国栋,侯发亮对二次受力对碳纤维加固构件的极限承载力的影响进行了研究,提出了极限承载力计算公式<sup>[9]</sup>。

在试验研究的基础上,笔者试对预应力碳纤维布材加固混凝土梁的受弯性能作一非线性分析,并根据力学模型对预应力碳纤维布材加固混凝土梁的不同参数进行参数分析。

## 1 理论分析

非预应力碳纤维加固的受弯构件截面应变分布满足平截面假定,而试验研究结果证实:预应力碳纤维布加固的受弯构件的截面应变分布在一个较长的标距内仍然符合平截面假定<sup>[4]</sup>。所以,本文试以平截面假定为基础,对预应力碳纤维布加固的受弯试件的弯曲性能作一分析。

在对粘贴碳纤维抗弯加固后的钢筋混凝土梁进行分析计算时,作如下假定:

(1) 截面变形符合平截面假定;

(2) 受力钢筋与混凝土之间以及碳纤维与混凝土之间没有滑移,应力应变连续。对于预应力碳纤维布加固的受弯构件,由于不容易发生粘结破坏,这一假定较非预应力碳纤维布加固的受弯构件要更为准确。

本文获第三届欧维姆优秀预应力论文奖三等奖(原载《工程力学》2006, No. 11)

(3) 考虑到剪弯段剪切变形的影响, 梁的刚度在整个跨度上相等。

(4) 纯弯段任一截面混凝土和钢筋的应变相等, 即截面曲率在纯弯段不变。

(5) 碳纤维的应力应变关系为:

$\sigma_{\text{碳纤维}} = E_{\text{碳纤维}} \cdot \varepsilon_{\text{碳纤维}} \quad (\varepsilon_{\text{碳纤维}} \leq \varepsilon_{\text{碳纤维极限}})$  (1)  
式中:

碳纤维拉伸弹性模量  $E_{\text{碳纤维}} = 2.00 \times 10^5 \text{ MPa}$

碳纤维拉伸极限应变  $\varepsilon_{\text{碳纤维极限}} = 15000 \mu \varepsilon$

(6) 钢筋按理想弹塑性材料不考虑其强化部分提高的强度, 则其应力应变关系为:

$\sigma_s = E_s \cdot \varepsilon_s, \quad (\varepsilon_s \leq \varepsilon_y)$  (2)

$\sigma_s = \sigma_y, \quad (\varepsilon_s > \varepsilon_y)$  (3)

式中:  $\sigma_s$  为钢筋应力;  $E_s$  为钢筋弹性模量;  $\varepsilon_s$  为钢筋应变;  $\sigma_y$  为钢筋屈服强度;

(7) 混凝土采用上升段-水平段两端曲线, 其应力应变关系为:

$\sigma_c = \left[ 2 \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right) - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \cdot \sigma_0, \quad (0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_0)$  (4)

$\sigma_c = \sigma_0, \quad (\varepsilon_0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu})$  (5)

式中:  $\sigma_c$  为混凝土应力;  $\varepsilon_c$  为混凝土受压应变;  $\sigma_0$  为混凝土峰值应力。

对应峰值应力的混凝土受压应变  $\varepsilon_0 = 0.002$ ;

混凝土受压极限应变  $\varepsilon_{cu} = 0.0033$ 。

计算采用分级加应变法, 以截面受压区边缘混凝土的压应变  $\varepsilon_c$  为已知量, 以截面的受压区高度  $h_c$  和受拉纵筋的应变  $\varepsilon_s$  为未知量。根据式

(4)、式(5)在截面受压区范围对  $\sigma_c$  进行积分, 可以得到:

$$F_C = \int_0^{h_c} \sigma_c b \cdot dx$$

$$= b \sigma_0 \left( \frac{\varepsilon_c h_c}{\varepsilon_0} - \frac{\varepsilon_c^2 h_c}{3\varepsilon_0^2} \right) \quad (0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_0) \quad (6)$$

$$F_C = \int_0^{h_c} \sigma_c b \cdot dx$$

$$= b \sigma_0 h_c - b \sigma_0 \frac{\varepsilon_0 h_c}{3\varepsilon_c} \quad (\varepsilon_0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}) \quad (7)$$

式中:  $F_C$  为构件截面受压区混凝土所受的合压力。

由截面的内力平衡可以得到如下等式:

$$\sum N = 0 \Rightarrow F_C = F_s \Rightarrow F_C$$

$$= \varepsilon_s E_s A_s + \varepsilon_s E_{\text{碳纤维}} A_{\text{碳纤维}} + F_{\text{预应力}} \quad (8)$$

式中:  $F_s$  为纵向钢筋与碳纤维的合拉力;  $A_s$  为受拉钢筋总截面积;  $A_{\text{碳纤维}}$  为碳纤维增强塑料总截面积;  $F_{\text{预应力}}$  为施加于碳纤维增强塑料的初始拉力。

将式(6)、式(7)代入式(8)即可得到  $h_c$  与  $\varepsilon_s$  两个未知量的一个相关等式。

由平截面假定可以得到如下等式:

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_s} = \frac{h_c}{h_0 - h_c} \Rightarrow \varepsilon_s = \frac{h_0 - h_c}{h_c} \varepsilon_c \quad (9)$$

式中:  $h_c$  为构件截面受压区高度;  $h_0$  为构件截面有效高度。

此式为  $h_c$  与  $\varepsilon_s$  两个未知量的另一相关方程, 对式(8)与式(9)联立求解即可得到  $h_c$  与  $\varepsilon_s$  在各个阶段的解析表达式:

$$\begin{cases} h_c = \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4AC}}{2A} & (\varepsilon_c \leq \varepsilon_0, \varepsilon_s \leq \frac{f_y}{E_s}) \\ \varepsilon_s = \frac{2Ah_0 + B - \sqrt{B^2 + 4AC}}{-B + \sqrt{B^2 + 4AC}} \varepsilon_c \end{cases} \quad (10)$$

$$A = b \sigma_0 \left( \frac{3\varepsilon_c \varepsilon_0 - \varepsilon_c^2}{3\varepsilon_0^2} \right)$$

$$B = \varepsilon_c (E_s A_s + E_{\text{碳纤维}} A_{\text{碳纤维}}) - F_{\text{预应力}}$$

$$C = \varepsilon_c h_0 (E_s A_s + E_{\text{碳纤维}} A_{\text{碳纤维}})$$

$$\begin{cases} h_c = \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4AC}}{2A} & (\varepsilon_0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}, \varepsilon_s \leq \frac{f_y}{E_s}) \\ \varepsilon_s = \frac{2Ah_0 + B - \sqrt{B^2 + 4AC}}{-B + \sqrt{B^2 + 4AC}} \varepsilon_c \end{cases} \quad (11)$$

$$A = b \sigma_0 \left( \frac{3\varepsilon_c - \varepsilon_0}{3\varepsilon_c} \right)$$

$$B = \varepsilon_c (E_s A_s + E_{\text{碳纤维}} A_{\text{碳纤维}}) - F_{\text{预应力}}$$

$$C = \varepsilon_c h_0 (E_s A_s + E_{\text{碳纤维}} A_{\text{碳纤维}})$$

$$\begin{cases} h_c = \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4AC}}{2A} & (\varepsilon_c < \varepsilon_0, \varepsilon_s > \frac{f_y}{E_s}) \\ \varepsilon_s = \frac{2Ah_0 + B - \sqrt{B^2 + 4AC}}{-B + \sqrt{B^2 + 4AC}} \varepsilon_c \end{cases} \quad (12)$$

$$A = b \sigma_0 \left( \frac{3\varepsilon_c \varepsilon_0 - \varepsilon_c^2}{3\varepsilon_0^2} \right)$$

$$B = \varepsilon_c E_{\text{碳纤维}} A_{\text{碳纤维}} - f_y A_s - F_{\text{预应力}}$$

$$C = \varepsilon_c h_0 E_{\text{碳纤维}} A_{\text{碳纤维}}$$

$$\begin{cases} h_c = \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4AC}}{2A} & (\varepsilon_0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}, \varepsilon_s > \frac{f_y}{E_s}) \\ \varepsilon_s = \frac{2Ah_0 + B - \sqrt{B^2 + 4AC}}{-B + \sqrt{B^2 + 4AC}} \varepsilon_c \end{cases} \quad (13)$$

$$A = b\sigma_0 \left( \frac{3\varepsilon_c - \varepsilon_0}{3\varepsilon_c} \right)$$

$$B = \varepsilon_c E_{\text{碳纤维}} A_{\text{碳纤维}} - f_y A_s - F_{\text{预应力}}$$

$$C = \varepsilon_c h_0 E_{\text{碳纤维}} A_{\text{碳纤维}}$$

由上述解析表达式即可求得对应每一级  $\varepsilon_c$  的  $h_c$  及  $\varepsilon_s$ ，从而得到相应的受弯构件的截面应力应变分布以及荷载-挠度对应关系。

为验证力学模型，本文引用了笔者试验研究的结论，试验结果如下<sup>[10]</sup>：

表1 主要试验结果

试件号	碳纤维初始预应变/ $10^{-6}$	开裂荷载/kN	屈服荷载/kN	极限承载力/kN	最大跨中挠度/mm	碳纤维极限应变/ $10^{-6}$
B <sub>1</sub>	0	-	13.0	21.0	25.52	7158
B <sub>2</sub>	0	-	14.0	26.0	27.51	11820
B <sub>3</sub>	0	3	10.0	19.0	29.37	9559
B <sub>4</sub>	0	4	12.0	22.5	28.71	11931
B <sub>5</sub>	6000	-	16.0	18.0	8.94	8168
B <sub>6</sub>	6000	9	17.0	28.0	28.84	15556
B <sub>7</sub>	6000	8	20.0	26.0	23.11	13023
B <sub>8</sub>	3300	3	14.0	21.5	24.28	12501
B <sub>9</sub>	8400	11	20.0	25.0	16.27	15950

图1~图4为构件试验数据与上述力学模型分析结果的对比，图中实线为试验结果，虚线为模型分析结果。从图中可以看出试验曲线与理论分析曲线较为接近，理论分析结果与试验结果吻合的较好，表明以传统的内力平衡与平截面假定为基础的力学模型可以较好的预测经过预应力碳纤维加固的受弯构件的工作性能。

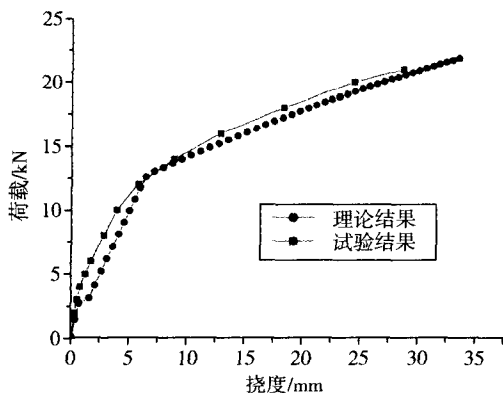


图1 B<sub>7</sub>试验结果与理论分析结果

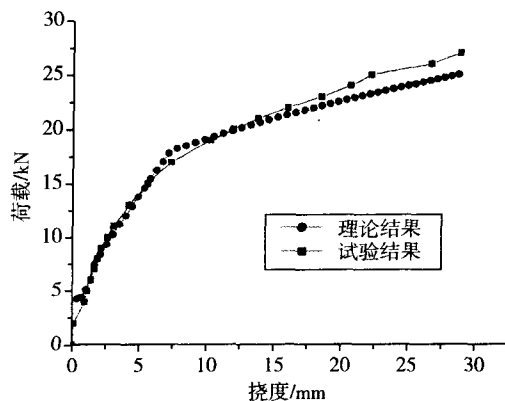


图2 B<sub>6</sub>试验结果与理论分析结果

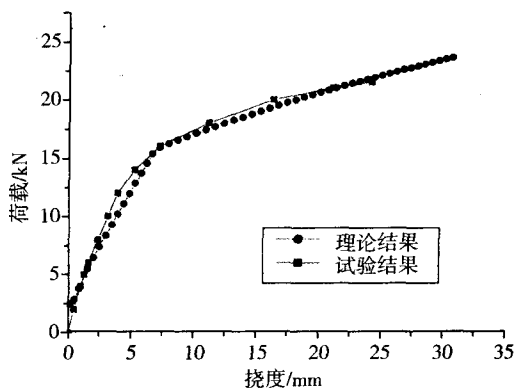


图3 B<sub>8</sub>试验结果与理论分析结果

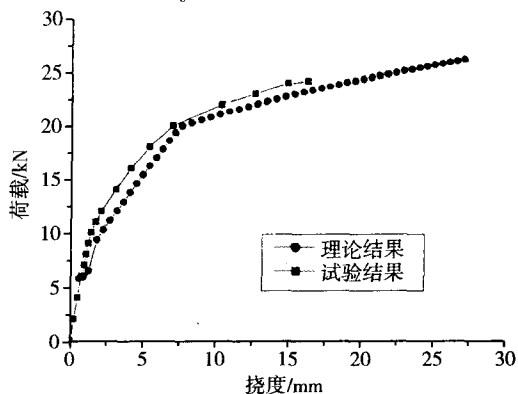


图4 B<sub>9</sub>试验结果与理论分析结果

## 2 参数分析

为了能对预应力碳纤维加固受弯构件的加固设计提供建议，笔者利用上述力学模型对试件做了部分理论上的参数分析，参数包括混凝土强度、构件截面高度、碳纤维初始应变，如图5所示。

图5为混凝土强度的参数分析，分析对象的混凝土强度等级从C25变化至C55，初始应变水平为0.008，其余参数与实际的试件完全相同。由荷载-挠度曲线可以看出，混凝土强度对受弯

构件弯曲性能的影响不大，随着混凝土强度等级的提高，构件的抗弯刚度略有增大。破坏形式均为碳纤维被拉断，但破坏时受压区边缘的混凝土应变随强度等级增大而降低。

图6为截面高度的参数分析，分析对象的截面高度从150mm变化至270mm，初始应变水平为0.008，其余参数与实际试件完全相同。由分析结果可以得知：截面高度对构件的性能影响较大，构件的开裂荷载、屈服荷载以及极限荷载都随截面高度的增大而增大，与之相应的是构件的变形能力显著下降。所有分析对象的破坏形式均为碳纤维被拉断，随着截面高度的增加，由于预应力产生的受压区边缘混凝土的初始拉应变逐渐增大。

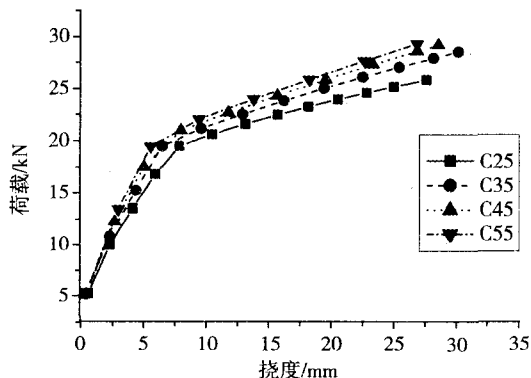


图5 混凝土强度参数分析

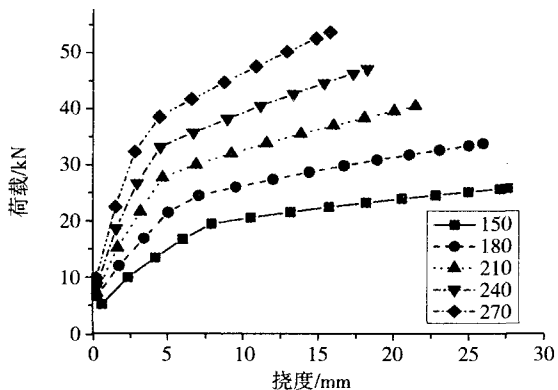


图6 截面高度参数分析

图7为初始应变水平的参数分析，分析对象的初始应变水平从0变化至0.008，也即是由非预应力构件逐渐过渡到预应力构件，其余参数同实际试件。如同预计的一样，构件的开裂荷载，屈服荷载都有了明显的提高，相应的构件的变形能力也在逐渐下降，并且破坏时受压区边缘的混凝土应变随碳纤维初始应变增大而降低。

图8为碳纤维的使用效率理论比较，其中一条曲线对应的构件碳纤维初始应变为0.008，其余参数同实际构件，另外四条曲线对应的构件上粘贴的碳纤维均为非预应力的，而截面面积分别为预应力碳纤维的2倍~5倍。可以看出，由于在承受荷载之前就发挥了相当的强度，预应力碳纤维在强度使用效率方面远远高于非预应力碳纤维。粘贴初始应变为0.008的碳纤维的构件开裂荷载高于其它构件，而屈服荷载与粘贴了5倍面积非预应力碳纤维的构件相当，高于其它三根构件，且钢筋屈服时预应力碳纤维加固的构件挠度与5倍非预应力碳纤维加固的构件也相当。虽然截面的抗弯刚度小于其它构件，但由于开裂荷载的提高，使得粘贴预应力碳纤维的构件在钢筋屈服前挠度小于其它粘贴非预应力碳纤维的构件。也就是说，在使用荷载内，初始应变为0.008的预应力碳纤维构件的弯曲性能要好于粘贴了5倍非预应力碳纤维的构件。由此可以看出预应力碳纤维加固受弯构件在利用碳纤维的高强性能方面的巨大优势。

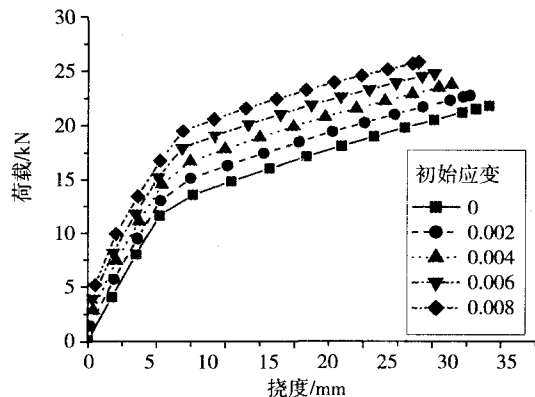


图7 初始应变水平参数分析

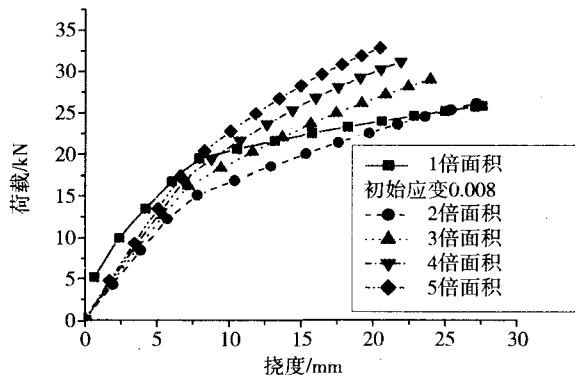


图8 碳纤维使用效率分析

### 3 二次受力分析

需要加固的构件往往已经投入使用,承受了使用荷载。在不卸载的情况进行加固,构件受拉钢筋及受压混凝土都存在由使用荷载引起的初始应力应变,因此粘贴至构件的碳纤维布材存在应力应变滞后,从而影响碳纤维的强度利用,降低加固效率。另外,由于不卸载时构件已经发生挠曲变形,因此使用碳纤维加固时一方面要控制构件的承载力满足使用要求,另一方面要控制构件的变形满足规范要求。预应力技术的优点在于控制构件变形,提高构件屈服荷载,因此笔者针对受弯构件在二次受力情况下非预应力与预应力的加固效果作一非线性分析,以观察预应力碳纤维布材对二次受力受弯构件加固效果。

二次受力加固与一次受力加固主要的区别在于二次受力加固时构件内部已经产生了应力应变,也即构件受拉区钢筋及混凝土已产生拉应变,而加固用碳纤维增强塑料粘贴后应力应变为零,因此碳纤维与受力钢筋之间存在应力滞后,当钢筋的初始应力应变较大时,应力滞后也较大,从而钢筋屈服时碳纤维发挥的强度仍然很有限,影响碳纤维加固效果。构件被加固后二次受力时,构件截面内力平衡等式仍然适用,因此笔者对前述式(8)、式(9)作如下修改:

$$\left. \begin{aligned} \sum N = 0 \Rightarrow F_c = F_s \Rightarrow F_c \\ = \varepsilon_s E_s A_s + (\varepsilon_s - \varepsilon_i) E_{\text{碳纤维}} A_{\text{碳纤维}} + F_{\text{预应力}} \end{aligned} \right\} (14)$$

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_s} = \frac{h_c}{h_0 - h_c} \Rightarrow \varepsilon_s = \frac{h_0 - h_c}{h_c} \varepsilon_c$$

式中:  $\varepsilon_i$  为钢筋初始应变(其它符号与式(8)、式(9)同)。

只要求得在初始荷载作用下钢筋的初始应变,将其作为参数代入式(14)中,就可以对构件加固后二次受力的行为进行分析。分析结果如下:

为了比较预应力碳纤维加固梁与原梁及非预应力碳纤维加固梁的受弯性能,图9列出了在50%对比梁极限荷载作用下6种梁挠度-荷载曲线对比。方点曲线为对比梁(未加固)一次受力挠度-荷载曲线,圆点曲线为在50%初始荷载作用下非预应力碳纤维加固梁的挠度-荷载曲线,上、下三角及菱形点曲线分别为在50%极限荷载作用下

9kN~22kN预拉力的预应力碳纤维加固梁的挠度-荷载曲线,左三角点曲线为非预应力碳纤维加固梁的一次受力挠度荷载曲线,各梁参数与前述实际试件完全相同。由图中可以看出,50%极限荷载的初始荷载作用下,原梁受拉区边缘应变为0.0008左右,因此应力应变滞后体现为二次受力的非预应力加固梁的屈服荷载小于一次受力的非预应力加固梁,挠度变形则大于一次受力加固梁;预应力加固梁在预应力碳纤维布材粘贴上去后出现了挠度减小,这是由于预应力抵消了一部分外荷载;值得注意的是二次受力的预应力加固梁的屈服荷载远远高于各非预应力加固梁,包括一次受力的非预应力加固梁,并且屈服荷载随着预应力水平的提高而增大。

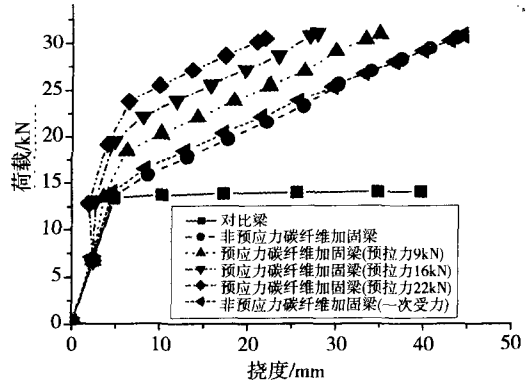


图9 50%对比梁极限荷载二次受力加固分析

图10为在70%对比梁极限荷载作用下与上述图参数相同的各梁挠度-荷载曲线比较。由于70%极限荷载作用下原梁受拉区边缘拉应变为0.0011左右,因此非预应力碳纤维加固的一次受力梁与二次受力梁受弯性能差别进一步拉大。而随着钢筋初始应变的不断增大,钢筋的屈服点的剩余变形越来越小,各梁的屈服荷载也不断减小,但二次受力预应力碳纤维加固梁的屈服荷载与二次受力非预应力梁的屈服荷载之差基本不变,在预应力碳纤维布材粘贴至梁件上后,梁构件也出现了明显的挠度减小现象。在70%极限荷载这一较大初始荷载作用下,虽然一次受力非预应力碳纤维加固梁屈服荷载已明显高于二次受力非预应力碳纤维加固梁,但二次受力预应力碳纤维加固梁的屈服荷载仍远高于一次受力非预应力碳纤维加固梁,挠曲变形也较一次受力非预应力

加固梁小。综上所述,预应力碳纤维布材在加固二次受力梁构件方面具有非常突出的性能,其加固效果不仅好于非预应力碳纤维布材,也好于一次受力的非预应力碳纤维布材加固。应用预应力碳纤维布材加固,可有效消除受弯构件内部初始应变,控制构件变形,提高其屈服强度,对于以往各种加固技术应用时存在的二次受力应力应变滞后弱化加固效果的缺点可予以较好的解决。在受弯构件已经承受了较大初始荷载情况下,预应力碳纤维布材也可对其有效进行加固,其加固效果好于一次受力的非预应力碳纤维布材加固。

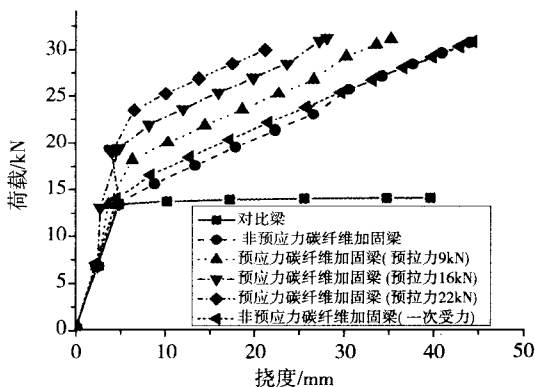


图10 70%对比梁极限荷载二次受力加固分析

#### 4 结论

根据本文的非线性分析工作,笔者得出如下结论:

(1) 预应力碳纤维加固混凝土受弯构件的受弯性能可通过传统力学模型进行非线性分析较好的预测;

(2) 受弯构件混凝土强度的变化对预应力加固构件的受弯性能影响较小;

(3) 构件的截面高度对加固构件挠曲变形及构件延性影响较大;

(4) 初始应力(应变)提高使得构件反拱增大,开裂荷载与钢筋屈服荷载也随之增大,但构件延性降低,变形能力下降;

(5) 施加预应力可充分发挥碳纤维的高强性能,在本文给定参数下初始应变为0.008的预应力碳纤维布加固梁其开裂荷载高于粘贴5倍截面面积非预应力碳纤维的加固梁,其钢筋屈服荷载与粘贴5倍截面面积非预应力碳纤维的加固梁相当;

(6) 二次受力条件下预应力碳纤维布材的

加固效果远好于非预应力碳纤维布材加固,在本文给定参数下其加固梁的受弯性能甚至好于一次受力非预应力碳纤维加固梁;预应力对构件屈服荷载的提高与构件配筋率无关;对于二次受力加固存在的应力应变滞后问题可予以较好解决。

#### 参考文献

- [1] Thanasis C, Triantafillou, Nikola Deskovic. Innovative prestressing with FRP sheets: Mechanics of short-term behavior [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1991,117(7): 1652~1672.
- [2] Wight R G, Green M F, Erki M A. Prestressed frp sheets for poststrengthening reinforced concrete beams [J]. Journal Of Composites For Construction ASCE, 2001, 11:214~220.
- [3] 彭晖, 尚守平, 王海东, 曾令宏. 用预应力CFRP对RC梁的加固工艺研究[J]. 建筑技术开发, 2003, 30(5):21~23,11. Peng Hui, Shang Shouping, Wang Haidong, Zeng Linghong. Study of strengthening reinforced concrete beam using prestressed carbon fiber sheet [J]. Building Technique Development, 2003, 30(5): 21~23, 11. (in Chinese)
- [4] El-Hacha R, Wight R G, Green M F. Innovative system for prestressing FRP sheets [J]. ACI Structural Journal, 2003, 100(3): 305~313.
- [5] Raafat El-Hacha, M.ASCE. Prestressed carbon fiber reinforced polymer sheets for strengthening concrete beams at room and low temperatures [J]. Journal of Composites For Construction, ASCE, 2004, (1): 3~13.
- [6] 飞渭, 江世永, 彭飞飞. 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, 3: 42~45. Fei Wei, Jiang Shiyong, Peng Feifei. Analysis and calculation of flexural strength of RC members strengthened with prestressed CFRP sheets [J]. Sichuan Building Science, 2003, 3: 42~45. (in Chinese)
- [7] 陈丽莹, 高日. 二次受力下CFRP加固混凝土结构抗弯承载力计算方法[J]. 北方交通大学学报, 2003, 27(1):80~83. Chen Liying, Gao Ri. Research on bending capacity of cfrp reinforced concrete structure at twice loading [J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2003, 27(1):80~83. (in Chinese)
- [8] 戚豹, 康文梅, 陈年和. 碳纤维加固梁二次受力性能的研究[J]. 河北理工学院学报, 2004, 26(1): 144~149. Qi Bao, Kang Wenmei, Chen Nianhe. The research of the second performance of beams strengthened by carbon fiber [J]. Journal of Hebei Institute of Technology, 2004,26(1): 144~149. (in Chinese)
- [9] 郑国栋, 侯发亮. 二次受力对CFRP加固混凝土梁正截面极限承载力计算结果的影响[J]. 工业建筑, 2004,34(5): 73~75. Zheng Guodong, Hou Faliang. Effect of secondary loading on calculation results of normal section's ultimate bearing capacity of RC beams strengthened with CFRP [J]. Industrial Construction, 2004, 34(5): 73~75. (in Chinese)
- [10] 尚守平, 彭晖, 董梓, 韦东辉, 曾令宏. 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. Shang Shouping, Peng Hui, Tong Hua, Wei Donghui, Zeng Linghong. Study of strengthening reinforced concrete beam using prestressed carbon fiber sheet [J]. Journal Building Structures, 2003, 24(5): 24~30. (in Chinese)