

文章编号: 1674-9057(2018)01-0084-06

doi:10.3969/j.issn.1674-9057.2018.01.011

# 基于延性的 CFRP-PCPs 复合筋嵌贴 加固梁的有效预应力计算方法

张鹏, 张友顺, 邓宇, 张祥宁, 曹瑞丹

(广西科技大学 土木建筑工程学院, 广西 柳州 545006)

**摘要:** 设计4根底部开槽并用具有不同张拉控制应力的 CFRP-PCPs 嵌贴加固梁, 进行抗弯承载力试验。结果表明, 加固梁的抗弯承载力明显提高, 加固效果明显。依据平截面假定和材料的应力-应变关系, 并基于梁截面的延性对具有不同张拉控制应力的 CFRP-PCPs 的有效预应力进行推算。将推算结果与试验结果进行对比, 发现推算结果的误差在5%左右, 表明公式的适用性良好, 可以满足工程加固的要求。

**关键词:** CFRP-PCPs; 有效预应力; 延性; 抗弯承载力试验

**中图分类号:** TU532

**文献标志码:** A

CFRP 预应力混凝土棱柱体(carbon fiber reinforced plastics prestressed concrete prisms, CFRP-PCPs)与CFRP筋的不同之处在于碳纤维的四周被高性能活性粉末混凝土包裹, 既能够充分利用CFRP筋的抗拉强度, 又对弹性模量进行了强化, 提高了抗弯抗剪性能。然而, CFRP-PCPs仍是脆性材料, 没有屈服平台, 一旦应力超过碳纤维的极限抗拉强度就会被拉断。故用CFRP-PCPs进行加固时, 需要对延性进行仔细的设计, 保证结构具有足够的变形能力<sup>[1-3]</sup>。在各项材料参数确定的条件下, CFRP-PCPs的使用量或初始应力是截面延性设计的关键<sup>[4-5]</sup>。若CFRP-PCPs加固量已确定, 初始应力过大, 或者初始应力已定, CFRP-PCPs使用量过多或过少, 都可能致使梁的延性不满足设计要求, 从而以脆性破坏告终。针对这一问题, 需要仔细计算CFRP-PCPs加固量与初始应力, 避免梁截面抗拉能力太强或太弱导致梁脆性破坏。

本文依据平截面假定和应力-应变本构关系, 通过确定嵌入式加固CFRP-PCPs钢筋混凝土梁

受拉钢筋屈服时受压区混凝土边缘应变 $\varepsilon_c$ 值, 对梁的曲率延性系数与碳纤维的有效预拉应力进行反算, 该方法可以为工程实际应用提供参考。

## 1 试验设计

### 1.1 CFRP-PCPs 设计

对CFRP筋两端灌浆以制作灌浆式锚具, 然后将CFRP筋固定在张拉台上并置于钢模盒中, 采用一端分级张拉的方法对CFRP筋进行张拉。张拉完成后, 将拌合好的高性能活性粉末混凝土浇筑于模盒内, 养护15天后进行放张。

### 1.2 试验梁的设计

共设计4根梁, 混凝土采用C30, 梁截面尺寸 $b \times h = 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ , 长度为2000 mm, 计算跨度为1800 mm, 受拉纵筋3 $\Phi 14$ , 受压纵筋通长布置2 $\Phi 10$ ; 剪跨段箍筋 $\Phi 8 @ 60$ , 纯弯段 $\Phi 8 @ 150$ , 采用 $\Phi 7$ 的CFRP筋对梁底进行嵌入式加固, 棱柱体尺寸25 mm  $\times$  25 mm, 长2000 mm。待CFRP-PCPs与梁粘结牢固时, 在梁的弯剪段粘贴

收稿日期: 2016-07-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51168006); 广西高校科学技术研究重点项目(ZD2014076); 广西自然科学基金项目(2015GXNSFAA139263); 柳州市科学研究与技术开发计划项目(2014B020204)

作者简介: 张鹏(1967—), 博士, 教授, 研究方向: 结构工程, gxutzd@163.com。

引文格式: 张鹏, 张友顺, 邓宇, 等. 基于延性的CFRP-PCPs复合筋嵌贴加固梁的有效预应力计算方法[J]. 桂林理工大学学报, 2018, 38(1): 84-89.

“U”型 CFRP 布，以避免 CFRP-PCPs 与混凝土梁剥离。而试验结果表明，CFRP-PCPs 与混凝土粘结牢固，“U”型套箍没有起作用。试验具体材料参数见表 1、2，加固梁的制作、加载、破坏过程和梁的具体截面尺寸分别如图 1~5 所示。

## 2 基本假设与定义

### 2.1 基本假定

为便于计算，作如下假定<sup>[6-8]</sup>：①梁截面变形符合平截面假定；②不考虑受压区钢筋保护层，认为受压筋应变与受压区混凝土边缘应变相等；③受拉筋应变等于 CFRP-PCPs 中的 CFRP 筋应变；④不考虑张拉后 CFRP-PCPs 的弯曲，即认为 CFRP-PCPs 在张拉完成后保持平直；⑤钢筋与混凝土之间以及 CFRP-PCPs 与混凝土之间无滑移，变形连续；⑥钢筋、混凝土应力应变关系按规范选取，CFRP 应变为线弹性。

### 2.2 混凝土受压区合力

依据上述基本假定，混凝土压力合力通过对受压区  $x_c$  高度内混凝土应力积分求得，具体为

$\varepsilon_c < \varepsilon_0$  时，

$$F_c = \int_0^{x_c} \sigma \cdot b \cdot dx = b \cdot \sigma_0 \cdot \left( \frac{\varepsilon_c \cdot x_c}{\varepsilon_0} - \frac{\varepsilon_c^2 \cdot x_c}{3\varepsilon_0^2} \right); \quad (1)$$



图 2 MTS 电液伺服加载系统

Fig. 2 MTS electro-hydraulic servo loading system

表 1 混凝土和环氧树脂各项指标

Table 1 Index of concrete and epoxy resin

材料名称	弹性模量 /GPa	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa
C30 混凝土	30.0	34.9	2.0
高性能活性粉末混凝土	43.5	154.0	17.4

表 2 材料力学性能

Table 2 Material mechanics properties

材料名称	弹性模量/GPa	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 /%
Φ14 纵筋	200	365	540	30.5
Φ10 纵筋	210	290	435	31.4
Φ8 箍筋	210	290	440	32.5
Φ7 CFRP 筋	160	-	2 200	-

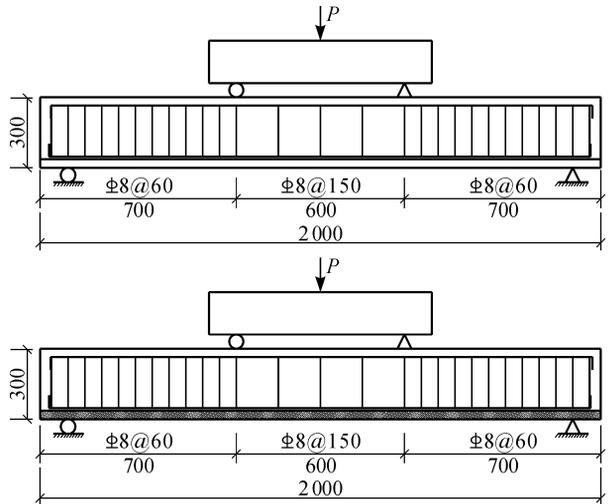


图 3 梁加载示意图

Fig. 3 Loading diagrams of the tested beams



图 1 加固梁的制作过程

Fig. 1 Production process of the reinforced beam



图4 梁的破坏图  
Fig. 4 Failure of beams

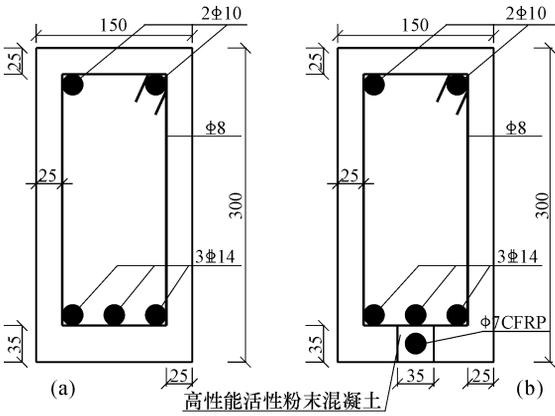


图5 对比梁(a)和加固梁(b)截面示意图

Fig. 5 Section of contrast beam (a) and reinforcement beam (b)

$\epsilon_c > \epsilon_0$  时,采用分段积分法(图6),具体为

$$F_c = \int_0^{x_0} \sigma \cdot b \cdot dx + \int_{x_0}^x \sigma \cdot b \cdot dx$$

$$= b \cdot \sigma_0 \cdot x_c \cdot \left(1 - \frac{\epsilon_0}{3\epsilon_c}\right), \quad (2)$$

式中:  $b$ —梁宽;  $\sigma_0$ —混凝土最大压应力;  $\epsilon_0$ 、 $\epsilon_c$ —混凝土最大压应力对应的压应变以及混凝土

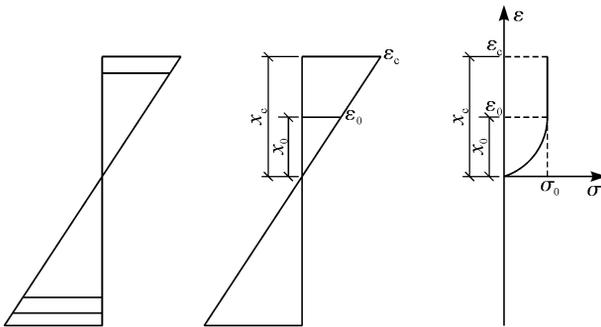


图6  $\epsilon_c > \epsilon_0$  时的示意图

Fig. 6 Schematic diagrams of  $\epsilon_c > \epsilon_0$

的压应变;  $x_0$ 、 $x_c$ —混凝土达到最大压应变时对应的受压区高度以及混凝土受压区高度。

### 2.3 有效预应力

锚具变形、混凝土的收缩徐变以及温度变化等都会引起预应力损失。现用  $\epsilon_{ge}$ 、 $\epsilon_{fe}$  分别表示高强活性粉末混凝土以及碳纤维在预应力损失发生后的有效应变,根据力学原理,两者有如下关系<sup>[8]</sup>:

$$\epsilon_{fe} \cdot E_f \cdot A_f = \epsilon_{ge} \cdot E_g \cdot (A_g - A_f), \quad (3)$$

式中,  $E_f$ 、 $E_g$ —CFRP 筋和高性能活性粉末混凝土的弹性模量;  $A_f$ 、 $A_g$ —CFRP 筋和高性能活性粉末混凝土的截面积。

## 3 延性设计方法

### 3.1 受拉区钢筋屈服时截面曲率计算

如图7所示,受拉钢筋屈服时的曲率为

$$\varphi_y = \frac{f_y/E_s}{h_s - x_c} \quad (4)$$

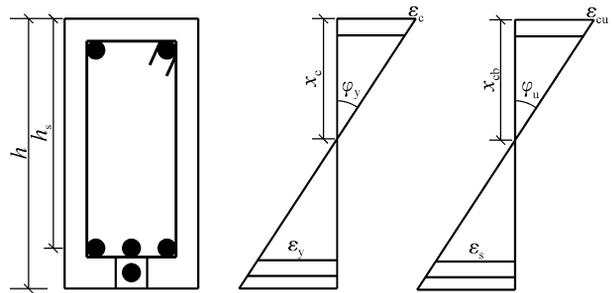


图7 梁在屈服和极限状态下的应变图

Fig. 7 Strain diagrams of beams in yield and ultimate state

混凝土梁开始受载时,下部的 CFRP - PCPs 受拉,碳纤维与周围的高性能活性粉末混凝土变形相同。弯矩增大到一定程度后,高性能活性粉末混凝土棱柱体被拉断,CFRP - PCPs 中只有 CFRP 筋继续承担拉力。设受拉钢筋屈服后,CFRP 的应变增量为  $\epsilon_{fi}$ ,根据基本假定,有

$$\epsilon_{fi} = \epsilon_s = f_y/E_s; \quad (5)$$

根据屈服截面力的平衡关系,有

$$F_c + \sigma_s' \cdot A_s' = f_y \cdot A_s + \sigma_f \cdot A_f \quad (6)$$

将式(1)代入式(6)得

$$b \cdot \sigma_0 \cdot \left(\frac{\epsilon_c \cdot x_c}{\epsilon_0} - \frac{\epsilon_c^2 \cdot x_c}{3\epsilon_0^2}\right) + \epsilon_c \cdot E_s \cdot A_s'$$

$$= f_y \cdot A_s + (\epsilon_{fi} + \epsilon_{fe}) \cdot E_f \cdot A_f \quad (7)$$

依据平截面假定,得

$$x_c = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + f_y/E_s} \cdot h_s \quad (8)$$

将式(5)代入式(7),整理得到

$$A_f = \frac{b \cdot \sigma_0 \cdot \left( \frac{\varepsilon_c \cdot x_c}{\varepsilon_0} - \frac{\varepsilon_c^2 \cdot x_c}{3\varepsilon_0^2} \right) + \varepsilon_c \cdot E_s \cdot A_s' - f_y \cdot A_s}{(f_y/E_s + \varepsilon_{fe}) \cdot E_f} \quad (9)$$

### 3.2 极限状态时截面曲率计算

CFRP 预应力混凝土棱柱体加固钢筋混凝土梁的破坏模式大致可以分为两种: ① 受压区混凝土被压碎, CFRP 未达到屈服强度; ② CFRP 达到屈服强度, 受压区混凝土未被压碎。第②种情况多发生于 CFRP-PCFs 配置量太少且梁的配筋率很小, 属于脆性破坏, 延性很小, 在实际应用中应尽量予以避免。第①种破坏形态是受拉钢筋屈服后受压区混凝土被压碎而 CFRP 未屈服, 设计时应以此种情况为依据<sup>[9-11]</sup>。

破坏时的截面曲率为

$$\varphi_u = \varepsilon_{cu}/x_{cb}, \quad (10)$$

式中:  $\varepsilon_{cu}$ —混凝土极限压应变;  $x_{cb}$ —混凝土压碎时受压区高度。

根据内力平衡,有

$$F_c + f_y' \cdot A_s' = f_y \cdot A_s + \sigma_f \cdot A_f \quad (11)$$

破坏时混凝土受压区边缘应变大于  $\varepsilon_0$ , 此时受压钢筋也已屈服, 将式(2)代入式(11), 得

$$b \cdot \sigma_0 \cdot \left( 1 - \frac{\varepsilon_0}{3\varepsilon_{cu}} \right) \cdot x_{cb} + f_y' \cdot A_s' = f_y \cdot A_s + \left( \frac{h_s - x_{cb}}{x_{cb}} \cdot \varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fe} \right) \cdot E_f \cdot A_f \quad (12)$$

对式(12)进行整理, 得到关于  $x_{cb}$  的方程:

$$b \cdot \sigma_0 \cdot \left( 1 - \frac{\varepsilon_0}{3\varepsilon_{cu}} \right) \cdot x_{cb}^2 + (f_y' \cdot A_s' + \varepsilon_{cu} \cdot E_f \cdot A_f - f_y \cdot A_s - \varepsilon_{fe} \cdot E_f \cdot A_f) \cdot x_{cb} - \varepsilon_{cu} \cdot h_s \cdot E_f \cdot A_f = 0,$$

解方程, 得到

$$x_{cb} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}, \quad (13)$$

其中,  $A = b \cdot \sigma_0 \cdot \left( 1 - \frac{\varepsilon_0}{3\varepsilon_{cu}} \right)$ ;  $B = f_y' \cdot A_s' + \varepsilon_{cu} \cdot E_f \cdot A_f - f_y \cdot A_s - \varepsilon_{fe} \cdot E_f \cdot A_f$ ;  $C = -\varepsilon_{cu} \cdot h_s \cdot E_f \cdot A_f$ 。故

$$\varphi_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{x_{cb}} = \frac{2A\varepsilon_{cu}}{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}} \quad (14)$$

### 3.3 根据延性系数 $\mu_\varphi$ 计算碳纤维的截面积 $A_f$ 及有效预拉应变 $\varepsilon_{fe}$

$$\mu_\varphi = \frac{\varphi_u}{\varphi_y} = \frac{\frac{2A\varepsilon_{cu}}{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}}{\frac{f_y/E_s}{h_s - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + f_y/E_s} \cdot h_s}} = \frac{2A\varepsilon_{cu}E_s h_s \left( 1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + f_y/E_s} \right)}{f_y (-B + \sqrt{B^2 - 4AC})} \quad (15)$$

3.3.1 计算碳纤维截面积  $A_f$  当碳纤维的预拉应变  $\varepsilon_{fe}$  已知时, 取定  $\mu_\varphi$  的值, 将式(9)、(15) 联立求解, 得  $A_f$ 。需要注意的是, 求出  $A_f$  的设计值后要验证 CFRP 棱柱体是否在受拉钢筋屈服时就已经断裂, 以保证上述推演过程的正确性。

3.3.2 计算碳纤维有效预拉应变  $\varepsilon_{fe}$  当已知  $A_f$  时 (注意验证棱柱体是否会发生断裂), 由式(7) 得

$$\varepsilon_{fe} = \left[ b \cdot \sigma_0 \cdot \left( \frac{\varepsilon_c \cdot x_c}{\varepsilon_0} - \frac{\varepsilon_c^2 \cdot x_c}{3\varepsilon_0^2} \right) + \varepsilon_c \cdot E_s \cdot A_s' - f_y \cdot A_s \right] \div (E_f \cdot A_f) - \varepsilon_{fi}, \quad (16)$$

将式(5)、(8)代入式(16), 得

$$\varepsilon_{fe} = \left[ b \cdot \sigma_0 \cdot \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \frac{\varepsilon_c^2}{3\varepsilon_0^2} \right) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + f_y/E_s} \cdot h_s + \varepsilon_c \cdot E_s \cdot A_s' - f_y \cdot A_s \right] \div (E_f \cdot A_f) - f_y/E_s \quad (17)$$

将  $\varepsilon_{fe}$ 、 $A_f$  代入式(15) 并取定  $\mu_\varphi$ , 可求得受拉钢筋屈服时混凝土受压区边缘应变  $\varepsilon_c$ 。将求得的  $\varepsilon_c$  代入式(17) 就可以得到 CFRP 有效预拉应变  $\varepsilon_{fe}$ 。

3.3.3 校核 CFRP 预应力混凝土棱柱体的应变 求出混凝土受压区边缘应变  $\varepsilon_c$  后, 需要对 CFRP-PCFs 的应变进行验算, 若其应变超过 CFRP 的极限拉应变, 表明 CFRP 已被拉断, 需对  $\varepsilon_{cu}$  和  $x_{cb}$  重新计算, 根据力的平衡关系, 有

$$b \cdot \sigma_0 \cdot \left( 1 - \frac{\varepsilon_0}{3\varepsilon_{cu}} \right) \cdot x_{cb} + f_y' \cdot A_s' = f_y \cdot A_s + f_u \cdot A_f, \quad (18)$$

根据应变协调关系, 有

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{x_{cb}} = \frac{\varepsilon_{fu} - \varepsilon_{fe}}{h_s - x_{cb}}, \quad (19)$$

式中:  $f_u$ 、 $\varepsilon_{fu}$  分别为 CFRP 的极限拉伸强度和应变。

将式(19)代入式(18), 得

$$\varepsilon_{cu} = \left[ b \cdot \sigma_0 \cdot h_s \cdot \varepsilon_0 + 3(f_y \cdot A_s + f_u \cdot A_f - f_y' \cdot A_s') \cdot (\varepsilon_{fu} - \varepsilon_{fe}) \right] \div \left[ 3(b \cdot \sigma_0 \cdot h_s + f_y' \cdot A_s' - f_y \cdot A_s - f_u \cdot A_f) \right] \quad (20)$$

将式(20)代入式(19), 求得  $x_{cb}$ ; 将  $\varepsilon_{cu}$ 、 $x_{cb}$  代

入式(10)可得 $\varphi_u$ ; 取定 $\mu_\varphi$ 的值并将 $\varphi_u$ 代入式(15),得到 $\varphi_y$ ; 将 $\varphi_y$ 代入式(4)可得 $x_c$ ; 将 $x_c$ 代入式(7)可得 $\varepsilon_c$ ; 将 $\varepsilon_c$ 代入式(17)可得 $\varepsilon_{fe}$ ; 将求得的 $\varepsilon_c$ 、 $\varepsilon_{fe}$ 代入式(9),可以求得碳纤维的截面积 $A_f$ 。

## 4 算例分析

CFRP-PCPs 以及混凝土加固梁的设计参数如前所述,试验结果见表3、4。值得注意的是,公式推演过程中虽作了简化,但推演出来的结果仍然很复杂。为了进一步简化计算,本文在验算过程中认为受拉筋屈服时混凝土受压区边缘应变 $\varepsilon_c$ 是已知量,即根据试验结果取定受拉钢筋屈服时的混凝土边缘应变 $\varepsilon_c$ 的值,进而对截面曲率 $\varphi_u$ 以及CFRP的有效预拉应变 $\varepsilon_{fe}$ 进行求解。依据现有的试验资料,当有效预拉应变为(25%~50%) $\varepsilon_{fu}$ ( $\varepsilon_{fu}$ 是CFRP的最大拉应变)时比较合适<sup>[12]</sup>,本文选取PC1、PC2进行验算。基于以上理论,根据试验现象以及图8、图9的混凝土受压区边缘应变与受拉钢筋应变的曲线取定 $\varepsilon_c$ 的值,具体计算结果见表5。

计算结果分析:依据试验现象和图8、图9对混凝土受压区边缘应变以及钢筋的拉应变进行分析,可以比较准确地确定受拉钢筋屈服时受压区边缘应变 $\varepsilon_c$ 的值。PC1、PC2的 $\varepsilon_c$ 值分别为 $1.55 \times$

表3 PC1、PC2的各项预应力损失值

梁编号	$\sigma_{11}$	$\sigma_{12}$	$\sigma_{13}$	$\sigma_{11} + \sigma_{12} + \sigma_{13}$
PC1	80.63	7.86	26.71	114.69
PC2	79.34	8.57	27.42	115.33

表4 嵌入式CFRP-PCPs加固钢筋混凝土主要试验结果

Table 4 Main experimental results of reinforced concrete by embedded CFRP-PCPs

梁编号	加固方式	CFRP张拉控制应力/MPa	开裂荷载/kN	提高率/%	屈服荷载/kN	提高率/%	极限荷载/kN	提高率/%	破坏形式
JBL	未加固	0	27	-	143	-	163	-	少筋破坏
FY	不施加预应力	0	35	29.62	149	4.20	176	7.98	受拉钢筋屈服
PC1	施加预应力	$40\%f_{pk}$	41	51.85	159	11.19	177	8.60	受拉钢筋屈服
PC2	施加预应力	$60\%f_{pk}$	41	51.85	187	30.77	196	20.25	受拉钢筋屈服

注:为保证碳纤维在使用过程中始终保持线弹性状态, $f_{pk}$ 取碳纤维的名义屈服强度,取85%的极限强度,即1870 MPa。

表5 计算值与PC1、PC2的对比结果

Table 5 Comparison results between PC1, PC2 and the calculated values

梁编号	取定的 $\varepsilon_c$ 值	将 $\varepsilon_c$ 、 $A_f$ 代入式(17)得到 $\varepsilon_{fe}$	将 $\varepsilon_c$ 、 $A_f$ 、 $\varepsilon_{fe}$ 代入式(15)得到 $\mu_\varphi$	CFRP的张拉控制应力/MPa	预应力损失值/MPa	张拉控制应力值/MPa	CFRP的有效张拉应力误差/%
PC1	$1.55 \times 10^{-3}$	$3.6 \times 10^{-3}$	2.57	576	114.69	748	7.7
PC2	$1.65 \times 10^{-3}$	$6.0 \times 10^{-3}$	2.34	961	115.33	1122	4.1

$10^{-3}$ 、 $1.65 \times 10^{-3}$ 。需要注意的是,由于计算过程中一些简化的假定、计算过程中的取值误差、试验误差都会对验算结果造成影响。PC1、PC2的验算结果表明,误差较小,公式的适用性比较好。

## 5 结论及建议

(1)从PC1、PC2的验算结果来看,利用平面截面假定和材料应力应变关系推演得到的公式与试验结果吻合较好,说明公式的适用性较好。

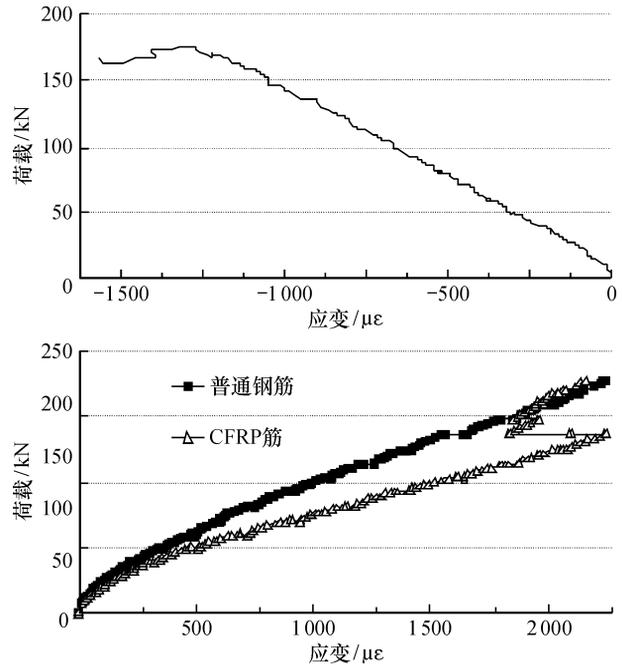


图8 PC1预应力加固混凝土梁受压区边缘应变和筋的应变

Fig. 8 Strain of the compression zone flange of the PC1 reinforced concrete beam and the strain of tendons

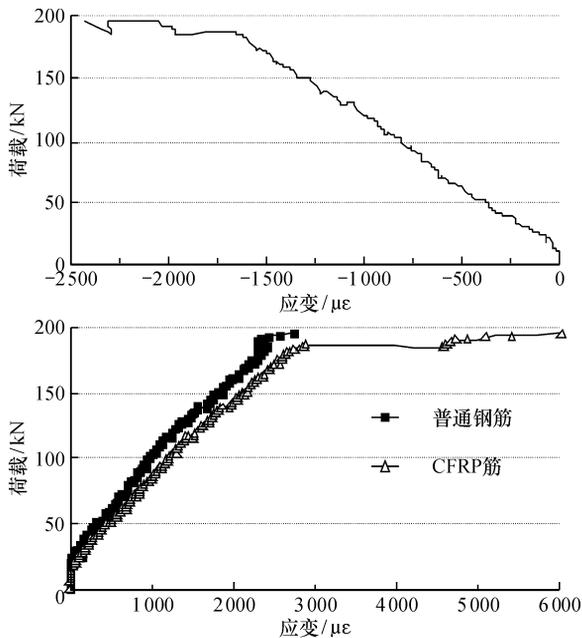


图 9 PC2 预应力加固混凝土梁受压区边缘应变和筋的应变  
Fig. 9 Strain of the compression zone flange of the PC2 reinforced concrete beam and the strain of tendons

(2) 将梁 FY、PC1、PC2 与 JBL 进行对比, JBL、FY、PC1、PC2 的配筋量相同, CFRP-PCPs 的张拉控制应力不同, JBL 是少筋破坏, FY、PC1、PC2 的破坏模式均为受拉钢筋屈服后受压区混凝土被压碎, 表明 CFRP-PCPs 的嵌入可以明显改善梁的破坏形式, 即可以增大梁的抗弯承载力, 这一点也可以从表 4 梁加固后的屈服荷载与极限荷载的提高率看出, 加固的效果是很明显的, 进一步了解有效预应力就显得更加重要。

(3) 在公式的推演过程中虽然进行了一些简化, 但推演出的结果仍然比较复杂, 计算公式的进

一步简化还有待于研究。为方便计算, 建议使用本文公式时利用 MATLAB 进行编程。

### 参考文献:

- [1] 邓朗妮, 张鹏, 燕柳斌, 等. 基于延性的预应力碳纤维板加固混凝土梁设计方法 [J]. 建筑结构, 2009, 39 (7): 104-107.
- [2] Lee T K, Pan A D E, Ma M J L. Ductile design of reinforced concrete beams retrofitted with fiber reinforced polymer plates [J]. Journal of Composites for Construction, 2004, 8 (6): 489-500.
- [3] 张鹏, 吴兵, 邓宇. 局部配 CFRP-PCPs 复合筋混凝土梁受力性能试验 [J]. 桂林理工大学学报, 2016, 36 (4): 713-720.
- [4] 彭晖. 预应力碳纤维片材加固钢筋混凝土受弯构件的性能研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
- [5] 张鹏. FRP 筋混凝土梁受力性能的试验研究及理论分析 [D]. 南宁: 广西大学, 2006.
- [6] 韦永乐. CFRP 筋后张无粘结预应力混凝土梁受弯性能试验研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2007.
- [7] 王作虎, 詹界东, 杜修力. 无粘结预应力 CFRP 筋混凝土梁抗弯试验 [J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31 (2): 84-89.
- [8] Kim Y J, Shi C, Green M F. Ductility and cracking behavior of prestressed concrete beams strengthened with prestressed CFRP sheets [J]. Journal of Composites for Construction, 2008, 12 (3): 274-283.
- [9] 周朝阳, 王兴国. 端锚有粘结预应力纤维片材加固混凝土梁的受弯承载力 [J]. 中国铁道科学, 2006, 27(4): 45-50.
- [10] 邓朗妮, 陈华, 张鹏. 预应力 CFRP 板加固混凝土梁正截面受弯承载力的计算方法研究 [J]. 建筑科学, 2009, 25 (3): 74-77.
- [11] 刘锋涛, 张华侨. 嵌入式 CFRP-PCPs 复合筋加固混凝土梁抗弯性能试验研究 [J]. 建筑结构, 2015, 45 (9): 90-93.
- [12] 张俊, 赵泽俊, 邓朗妮, 等. 预应力碳纤维板加固混凝土梁抗弯承载力设计计算方法 [J]. 桂林理工大学学报, 2011, 31 (1): 73-76.
- [13] 庄芸. 预应力碳纤维布加固梁最佳预应力水平的确定 [J]. 武汉工程大学学报, 2008, 30 (4): 15-19.

## Effective prestress calculation method

### based on the ductility of CFRP-PCPs embedded reinforcement beam

ZHANG Peng, ZHANG You-shun, DENG Yu, ZHANG Xiang-ning, CAO Rui-dan

(School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China)

**Abstract:** Four beams with opened grooves at the bottom were designed and CFRP-PCPs with different tension control stress were embedded in reinforcement beams. Test results show that the reinforced beam flexural capacity increase obviously. The strengthening effect is obvious. If the CFRP-PCPs will be used for reinforcement of practical engineering, it is necessary to apply the prestress to meet the needs of the project. Thus according to the plane section assumption, the stress strain relationship of the material and the ductility of the beam section, the effective prestress of CFRP-PCPs with different tension control stress were calculated. Compared the calculated results with the experimental results, it is found that the error of the calculation is about 5%, and the formula is of good applicability and can meet the requirements of engineering reinforcement.

**Key words:** CFRP-PCPs; effective prestress; ductility; flexural capacity test