

# 钢板与预应力碳纤维布组合加固 RC梁抗弯承载力分析\*

康俊涛<sup>1</sup>, 马雷<sup>1</sup>, 张亚州<sup>1</sup>, 秦世强<sup>1</sup>, 曹鸿猷<sup>1,2</sup>  
(1. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070;  
2. 新加坡国立大学土木与环境工程系, 新加坡 119077)

**摘要:** 为了解决钢筋混凝土梁抗弯承载力降低的问题, 提出了一种将钢板锚固于钢筋混凝土梁底部, 碳纤维布施加预应力后粘贴于钢板上, 实现对梁进行的组合加固的新方法; 推导出了组合加固梁在适筋破坏范围内的正截面承载力计算公式。并将计算结果与相关文献的试验数据进行了对比, 发现: 1) 理论计算值与相关文献试验值较为接近, 试验中梁的破坏模式与和理论预测的破坏模式基本吻合; 2) 相对于单一粘贴碳纤维布加固梁, 组合加固梁的极限弯矩提高了 37.4% ~ 57.1%, 屈服弯矩提高了 60.4% ~ 95.7%; 3) 相对于单一粘贴钢板加固梁, 组合加固梁的极限弯矩提高了 25.4% ~ 39.7%。因此, 钢板与预应力碳纤维布组合加固技术可有效提高梁的抗弯性能。

**关键词:** 桥梁工程; 预应力碳纤维布; 钢板; 组合加固; 抗弯承载力

**中图分类号:** U445.72 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2018) 02-0094-08

## Analysis of resisting flexural strength of RC beams strengthened with steel plates and prestressed CFRP Sheets

KANG Juntao<sup>1</sup>, MA Lei<sup>1</sup>, ZHANG Yazhou<sup>1</sup>, QIN Shiqiang<sup>1</sup>, CAO Hongyou<sup>1,2</sup>  
(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology,  
Wuhan 430070, China;  
2. Department of Civil & Environmental Engineering, National University of Singapore,  
Singapore 119077, Singapore)

**Abstract:** In order to solve the problem of the decrease of flexural capacity of reinforced concrete (RC) beams, this paper proposes a new approach of steel plate-CFRP composite reinforcement: the steel plates are anchored at the bottom of the reinforced concrete beam, and carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheets are pasted on the steel plates after having been prestressed. The calculation formula for normal section flexural capacity of the composite reinforcement beam in balanced-reinforced failure is derived, and the results got by the calculation formula are compared with the test results in relevant literature. The results show that theoretical value is close to test value of relevant literature, the failure modes of beams in the test are consistent with predicted failure modes. Compared with the prestressed CFRP sheet reinforcement, the values of ultimate moment of RC beams strengthened with prestressed CFRP sheets and steel plates increase 37.4% ~ 57.1%, the values of yield moment increase 60.4% ~ 95.7%; Compared with the steel plate reinforcement, the values of ultimate moment increase 25.4% ~ 39.7%. It shows that

\* 收稿日期: 2017-05-01

基金项目: 国家自然科学基金 (51608408)

作者简介: 康俊涛 (1978年生), 男; 研究方向: 桥梁结构加固理论与工程应用; E-mail: jtkang@163.com

steel plate-CFRP combination reinforcement technology improves flexural behavior of RC beams effectively.

**Key words:** bridge engineering; prestressed CFRP sheets; steel plates; composite reinforcement; resisting flexural strength

随着时间的推移和周围环境的侵蚀,越来越多的钢筋混凝土结构逐渐老化,使得建筑物的加固和改造任务日益繁重。碳纤维材料不仅强度高,质量轻而且耐久性能较好<sup>[1-3]</sup>。Ehsani 和 Saadatmanesh 曾进行了 5 根 RC 梁的加固实验,并指出碳纤维布加固技术具有广阔的发展空间<sup>[4]</sup>。Ganga Rao 通过对 24 根钢筋混凝土梁外包碳纤维布加固,并将之与粘钢加固的混凝土梁进行了比较,讨论了影响提高抗弯承载力的因素<sup>[5]</sup>。李翔等利用碳纤维布加固抗压强度小于 15 MPa 的 RC 梁,给出了一种粘贴碳纤维布的低强度混凝土梁的抗弯承载力计算方法<sup>[6]</sup>。高仲学等提出了预应力碳纤维布加固 RC 梁在考虑预应力损失情况下的抗弯承载力计算方法<sup>[7]</sup>。

近些年来,粘钢加固技术发展迅速,日渐成熟<sup>[8-9]</sup>。Jones 等曾指出钢板可以显著改善梁的受力性能,同时可以减小纵向钢筋的应变量<sup>[10]</sup>。Ziraba 等模拟了随着钢板厚度的增加,失效模式由钢板屈服到剥离破坏的情形<sup>[11]</sup>。高轩能等进行了 33 根 RC 梁粘贴钢板的加固试验,并给出了加固梁挠度的计算方法<sup>[12]</sup>。

目前,国内外针对单种材料(碳纤维布或者钢板)的加固技术很多,而利用两种材料共同加固的研究较少。张坦贤和吕西林提出了使用玻璃纤维和钢板的结构加固法,结果表明:采用两者共同加固的结构抗延性和经济效益明显优于 CFRP 加固<sup>[13]</sup>。卢亦焱和周婷利用普通碳纤维布与钢板复合加固 RC 梁,并探讨了影响复合加固效果的主要因素。他们指出:相比于单种材料加固梁,复合加固梁的抗弯性能有较好的改善<sup>[14]</sup>。翟爱良等提出了混凝土梁上部粘钢、下部粘贴碳纤维布的复合加固形式,并通过试验分析了该复合加固梁的受力特点<sup>[15]</sup>。钢板加固可以有效提升结构的抗弯能力和刚度<sup>[16]</sup>,但是,其受力方式为二次受力,只有在梁再次承受荷载时钢板才能提供承载力,导致承载能力的提高有限。预应力碳纤维布加固是一个主动受力的过程,能够在加固完成后即对梁起作用,对裂缝也有很好的闭合作用,且材料的利用率高。但碳纤维布需使用环氧胶粘结在混凝土上,而混凝土的材质制约了粘结的质量,粘结剂的破坏容易导致

加固失效<sup>[17-18]</sup>。基于以上分析,本文提出了一种钢板-预应力碳纤维布组合加固 RC 梁的新方法,推导了该组合法的抗弯承载力计算公式,并与相关文献的试验结果进行对比,结果表明:钢板-预应力碳纤维布组合加固技术可有效提高梁的极限强度和屈服强度,改善梁的抗弯性能。

## 1 钢板-预应力碳纤维布组合加固 RC 梁的抗弯承载分析

### 1.1 基本假定

将钢板粘贴于混凝土梁底部,并采用 U 形钢板箍锚固,然后在钢板的锚固端和张拉端分别设置波形齿板,用以约束碳纤维布,并在预应力碳纤维布的张拉端设置反力块、固定块等装置;接着,采用千斤顶施加预应力,张拉碳纤维布并锚固;最后,将碳纤维布粘贴于钢板上,完成对混凝土梁的抗弯加固。假定钢板、碳纤维布与混凝土结合紧密,在同一截面内不发生相对位移,组合加固梁的应变分布在变形前后均满足平截面假定。且,混凝土的应力应变关系,如式(1)所示<sup>[19]</sup>:

$$\sigma_c = \begin{cases} f_c (\varepsilon_0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}) \\ f_c \left[ 2 \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \frac{\varepsilon_c^2}{\varepsilon_0^2} \right] (\varepsilon_c \leq \varepsilon_0) \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\sigma_c$  为混凝土应力值,单位 MPa;  $\varepsilon_c$  为混凝土应变值;  $f_c$  为混凝土的轴心抗压强度,单位 MPa;

$\varepsilon_{cu}$  为混凝土的极限压应变,取 0.003 3。  $\varepsilon_0$  为混凝土压应力刚好达到  $f_c$  时的混凝土压应变,取为 0.002。而:

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s (\varepsilon_s \leq \varepsilon_y) \\ f_y (\varepsilon_s > \varepsilon_y) \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $\sigma_s$  为钢筋应力值,单位 MPa;  $\varepsilon_s$  为钢筋应变值;  $f_y$  为钢筋的屈服强度,单位 MPa;  $\varepsilon_y$  为钢筋的屈服应变;  $E_s$  为钢筋的弹性模量,单位 MPa; 钢板的应力应变曲线与钢筋类似,为:

$$\sigma_a = \begin{cases} E_a \varepsilon_a (\varepsilon_a \leq \varepsilon_{ay}) \\ f_{ay} (\varepsilon_a > \varepsilon_{ay}) \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $\sigma_a$  为钢板应力值,单位 MPa;  $\varepsilon_a$  为钢板应变值;  $f_{ay}$  为钢板的屈服强度,单位 MPa;  $\varepsilon_{ay}$  为钢板的屈服应变;  $E_a$  为钢板的弹性模量,单位 MPa。碳纤

维布的应力应变关系为:

$$\sigma_{cf} = E_{cf}\varepsilon_{cf} (\varepsilon_{cf} \leq \varepsilon_{cf,u}) \quad (4)$$

其中,  $\sigma_{cf}$  为碳纤维布应力值, 单位 MPa;  $\varepsilon_{cf}$  为碳纤维布应变值;  $\varepsilon_{cf,u}$  为碳纤维布的极限拉应变;  $E_{cf}$  为钢板的弹性模量, 单位 MPa。

## 1.2 抗弯承载力分析

施加预应力后, 根据碳纤维布的应变得到应力大小为:

$$\sigma_{cf,0} = E_{cf,0}\varepsilon_{cf,0} \quad (5)$$

其中,  $\varepsilon_{cf,0}$  为预应力下碳纤维布的应变;  $\sigma_{cf,0}$  为预应力下碳纤维布的应力, 单位 MPa;  $E_{cf,0}$  为碳纤维布的弹性模量, 单位 MPa。

1.2.1 梁底混凝土的应力应变 在预应力作用下, RC 梁与钢板组成的组合截面处于偏心受压状态, 承受一个沿中性轴的压力和一个偏心弯距<sup>[20]</sup>, 如图 1 所示。

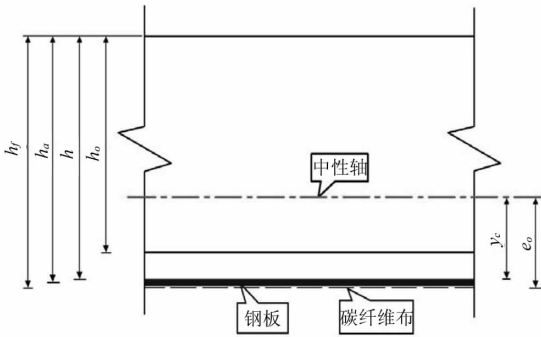


图 1 组合加固梁的受力示意图

Fig. 1 Force diagram of composite reinforcement beam

梁底部混凝土压应力  $\sigma_{c,0}$  为:

$$\sigma_{c,0} = \frac{N_{cf,0}}{A_0} + \frac{(N_{cf,0} - M_0)y_c}{I_0} \quad (6)$$

其中,  $M_0$  为梁体与钢板自重对梁造成的弯矩, 单位  $\text{KN} \cdot \text{m}$ ;  $N_{cf,0}$  为 CFRP (碳纤维布) 预应力值, 单位  $\text{KN}$ 。且:

$$N_{cf,0} = \sigma_{cf,0}A_{cf} \quad (7)$$

其中,  $A_{cf}$  为 CFRP 截面积, 单位  $\text{m}^2$ 。即:

$$A_{cf} = t_{cf}b_{cf} \quad (8)$$

其中,  $t_{cf}$  为 CFRP 厚度, 单位  $\text{m}$ ;  $b_{cf}$  为 CFRP 宽度, 单位  $\text{m}$ ;  $A_0$  为钢板与 RC 梁按混凝土材料换算后的面积和, 单位  $\text{m}^2$ 。且

$$A_0 = bh - A_s + \frac{E_s}{E_c}A_s + \frac{E_s}{E_c}A_a \quad (9)$$

其中,  $b, h$  分别为混凝土梁的宽度和高度, 单位  $\text{m}$ ;  $E_c$  为混凝土的弹性模量, 单位 MPa;  $A_s, A_a$  为钢

筋、钢板的面积, 单位  $\text{m}^2$ ;  $e_0$  为碳纤维布至中性轴的距离, 单位  $\text{m}$ 。

$$e_0 = \frac{1}{A_0} \left[ \frac{E_a A_a t_a + A_s \left( \frac{E_s}{E_c} - 1 \right)}{(h_f - h_0) + bh \left( \frac{h}{2} + t_a \right)} \right] \quad (10)$$

式中,  $h_f$  为碳纤维布至梁顶端的距离, 单位  $\text{m}$ ;  $h_0$  为钢板至梁顶端的距离, 单位  $\text{m}$ ;  $t_a$  为钢板厚度, 单位  $\text{m}$ ;  $y_c$  为 RC 梁底端至中性轴的距离, 单位  $\text{m}$ 。且

$$y_c = e_0 - t_a \quad (11)$$

式 (6) 中,  $I_0$  为钢板与 RC 梁组合截面的惯性矩, 单位  $\text{m}^4$ 。且

$$I_0 = \frac{1}{12}bh^3 + A_s \left( \frac{E_s}{E_c} - 1 \right) [y_c - (h - h_0)]^2 + bh \left( \frac{1}{2}h - y_c \right)^2 + A_a \frac{E_s}{E_c} \left( \frac{1}{2}t_a + y_c \right)^2 \quad (12)$$

而, 梁底混凝土的压应变为:

$$\varepsilon_{c,0} = \frac{\sigma_{c,0}}{E_c} \quad (13)$$

1.2.2 钢筋屈服 随着荷载的增加, 梁底混凝土由受压逐渐转为受拉。当梁底混凝土应力为零时, 组合加固梁处于消压状态<sup>[7]</sup>。图 2 为钢筋刚开始屈服时的受力示意图。

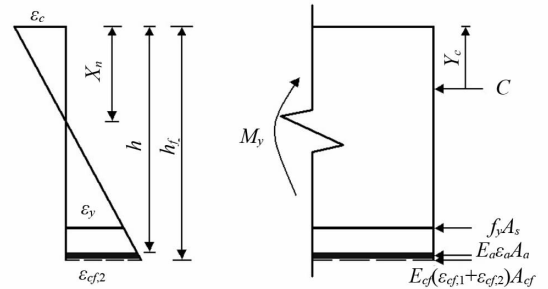


图 2 钢筋屈服时的受力示意图

Fig. 2 Force diagram when steel yields

此时, 碳纤维布的应变为:

$$\varepsilon_{cf,1} = \varepsilon_{cf,0} + \varepsilon_{c,0} \quad (14)$$

对式 (1) 积分, 得受压区合力  $C$ :

$$C = f_c b x_n \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \frac{1}{3} \frac{\varepsilon_c^2}{\varepsilon_0^2} \right) \quad (15)$$

$$Y_c = 1 - \frac{\varepsilon_c}{4\varepsilon_0} - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \times x_n \quad (16)$$

$x_n$  为混凝土梁上部受压区高度, 单位  $\text{m}$ ;  $Y_c$  为合压力  $C$  作用点离受压区混凝土边缘的距离, 单

位 m。

由力的平衡关系得：

$$f_c b x_n \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \frac{1}{3} \frac{\varepsilon_c^2}{\varepsilon_0^2} \right) = f_y A_s + E_{cf} A_{cf} (\varepsilon_{cf,1} + \varepsilon_{cf,2}) + A_a E_a \varepsilon_a \quad (17)$$

式中， $\varepsilon_c$  为梁顶部混凝土压应变。且

$$\varepsilon_c = \varepsilon_y \frac{x_n}{h_0 - x_n} \quad (18)$$

式 (17) 中  $\varepsilon_{cf,2}$  为消压状态到钢筋屈服 CFRP 的应变增量。而，

$$\varepsilon_{cf,2} = \varepsilon_y \frac{h_f - x_n}{h_0 - x_n} \quad (19)$$

式 (17) 中  $\varepsilon_a$  为钢板的应变值。当  $\varepsilon_a > \varepsilon_{ay}$  时，取  $\varepsilon_a = \varepsilon_{ay}$ 。

$$\varepsilon_a = \varepsilon_y \frac{h_a - x_n}{h_0 - x_n} \quad (20)$$

由式 (16) - (20)，容易求出  $\varepsilon_c$ 、 $x_n$  和  $Y_c$ 。因此，屈服弯矩  $M_y$  为：

$$M_y = E_{cf} A_{cf} (\varepsilon_{cf,1} + \varepsilon_{cf,2}) (h_f - Y_c) + f_y A_s (h_0 - Y_c) + A_a E_a \varepsilon_a (h_a - Y_c) \quad (21)$$

1.2.3 极限承载力计算 按照式 (22)，初步估算混凝土等效矩形受压区高度  $x_0$ ：

$$\alpha_1 f_c b x_0 = f_y A_s + f_{ay} A_a + E_{cf} A_{cf} \varepsilon_{cf,u} \quad (22)$$

式中， $\alpha_1$  为混凝土梁矩形压应力图的应力与受压区混凝土最大应力的比值，取 1.0；b 为混凝土梁的宽度，单位 m。计算相对界限受压区高度  $\xi_b$ ：

$$\xi_b = \frac{\beta_1 \varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \Delta \varepsilon_{cf}} \quad (23)$$

式中， $\beta_1$  为混凝土梁矩形压应力图的高度与按平截面假定中轴高度的比值，取 0.8。 $\Delta \varepsilon_{cf}$  为消压状态到极限应变 CFRP 的应变增量。

$$\Delta \varepsilon_{cf} = \varepsilon_{cf,u} - \varepsilon_{cf,1} \quad (24)$$

极限状态下，钢板和受拉钢筋均已屈服。下面分两种情况，计算组合加固梁的抗弯承载力<sup>[21-22]</sup>。

第一种情况： $x_0 < \xi_b h_f$ ，梁的破坏形式为 CFRP 被拉断，如图 3 所示：

① 当  $\varepsilon_c \leq \varepsilon_0$  时， $M_u$  的计算方法与  $M_y$  类似，受压区合力  $C$  和  $Y_c$  按照式 (15) - (16) 计算。由力的平衡关系得：

$$f_c b x_n \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \frac{1}{3} \frac{\varepsilon_c^2}{\varepsilon_0^2} \right) = f_y A_s + f_{ay} A_a + E_{cf} A_{cf} \varepsilon_{cf,u} \quad (25)$$

由几何关系得：

$$\varepsilon_c = \Delta \varepsilon_{cf} \frac{x_n}{h_f - x_n} \quad (26)$$

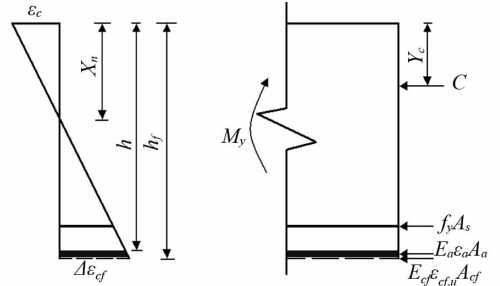


图 3 破坏形式为 CFRP 拉断时的受力示意图  
Fig. 3 Force diagram when the beams fail by CFRP sheets fracture

根据式 (16) 和 (25) - (26)，利用 MATLAB 求出  $\varepsilon_c$ 、 $x_n$  和  $Y_c$ ，得极限弯矩承载力：

$$M_u = f_y A_s (h_0 - Y_c) + E_{cf} \varepsilon_{cf,u} A_{cf} (h_f - Y_c) + f_{ay} A_a (h_a - Y_c) \quad (27)$$

② 当  $\varepsilon_0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}$  时，对式 (1) 积分，得到受压区合力  $C$  和  $Y_c$ ：

$$C = f_c b x_n - \frac{f_c b x_n}{3} \left( \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_c} \right) \quad (28)$$

$$Y_c = \frac{\frac{1}{2} - \frac{\varepsilon_0}{3\varepsilon_c} + \frac{1}{12} \left( \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_c} \right)^2}{1 - \frac{\varepsilon_0}{3\varepsilon_c}} \times x_n \quad (29)$$

由力的平衡关系得：

$$f_c b x_n \left( 1 - \frac{1}{3} \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_c} \right) = f_y A_s + f_{ay} A_a + E_{cf} A_{cf} \varepsilon_{cf,u} \quad (30)$$

结合式 (26) 和 (29) - (30)，求出  $\varepsilon_c$ 、 $x_n$  和  $Y_c$ 。将  $Y_c$  代入式 (27) 即可求得  $M_u$ 。

第二种情况： $x_0 > \xi_b h_f$ ，梁的破坏形式为受压区混凝土压碎，如图 4 所示：

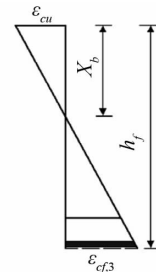


图 4 破坏形式为混凝土压碎时的受力示意图  
Fig. 4 Force diagram when the beams fail by concrete crushing

且，极限弯矩承载力为：

$$M_u = \alpha_1 f_c b x \left( h_f - \frac{x}{2} \right) - f_y A_s (h_f - h_0) \quad (31)$$

式中,  $x$  为混凝土矩形压应力图的高度, 按下面方程组计算:

$$\begin{cases} \alpha_1 f_c b x = f_y A_s + f_{ay} A_a + E_{cf} A_{cf} (\varepsilon_{cf,1} + \varepsilon_{cf,3}) \\ \frac{\varepsilon_{cf,3} + \varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu}} = \frac{\beta_1 h_f}{x} \end{cases} \quad (32)$$

式中,  $\varepsilon_{cf,3}$  为消压状态到该极限状态过程中 CFRP 应变增量。

## 2 计算与试验结果的对比分析

本文提出一种新的组合加固方法, 依次选取文献 [6]、[7]、[12] 和 [14] 的试验数据与本文的计算结果进行对比分析。文献 [6] 采用普通碳纤维布加固 RC 梁, 没有涉及钢板, 相当于本文中钢板厚度为零, 碳纤维布预应力为零时的情况。与文献 [6] 的对比结果见表 1。

表 1 理论值与文献 [6] 的试验数据的对比<sup>1)</sup>

Table 1 The Contrast of Theoretical Value and Test Value of Literature

试验梁	项目	$S$	$L$	$L_1$	$\frac{L}{S}$	$\frac{L_1}{S}$	试验	预测
M1	极限弯矩	29.16	23.76	26.5	0.81	0.91	碳纤维布拉断	梁顶压碎
M2	极限弯矩	35.56	33.92	34.3	0.95	0.96	梁顶压碎	梁顶压碎
M3	极限弯矩	27.84	25.60	25.4	0.92	0.91	梁顶压碎	梁顶压碎
M4	极限弯矩	24.48	23.16	26.8	0.95	1.09	局部剥离	梁顶压碎
M5	极限弯矩	44.64	29.20	28.0	0.65	0.63	压碎拉断	梁顶压碎
M6	极限弯矩	35.48	33.24	31.9	0.94	0.90	梁顶压碎	梁顶压碎

1)  $S$ 、 $L$  分别为文献 [6] 中的试验值和理论值;  $L_1$  为本文的理论计算值。

从表 1 可以看出, 本文的理论值  $L_1$  与文献试验值  $S$ 、文献理论值  $L$  均吻合良好。文献 [7] 只有预应力碳纤维布, 不粘贴钢板, 相当于本文中钢

板厚度为零时的情况。与文献 [7] 的对比结果见表 2。

表 2 理论值与文献 [7] 的试验数据的对比<sup>1)</sup>

Table 2 The Contrast of Theoretical Value and Test Value of Literature

试验梁	项目	$S$	$L$	$L_1$	$\frac{L}{S}$	$\frac{L_1}{S}$	试验	预测	$L_1^*$	$\frac{L_1^* - L_1}{L_1}$
BC	屈服弯矩	26.5		27.6		1.04	C, R	R	54.0	
	极限弯矩	46.7		48.6		1.04				
BPC-30-1	屈服弯矩	34.9		33.6		0.96	R	R	60.1	
	极限弯矩	48.4	47.2	48.3	0.98	1.00				
BPC-40-1	屈服弯矩	35.1		34.2		0.97	R	R	60.8	
	极限弯矩	49.1	47.2	48.5	0.96	0.99				
BPC-50-1	屈服弯矩	34.9		33.6		1.00	R	R	60.1	
	极限弯矩	48.4	47.3	48.3	0.93	0.94				
BPC-60-1	屈服弯矩	35.1		34.2		1.01	R	R	60.8	
	极限弯矩	49.1	47.3	48.5	0.92	0.94				
BPC-30-2	屈服弯矩	44.8		42.4		0.95	C, R	R	68.7	
	极限弯矩	69.0	70.2	70.9	1.02	1.03				
BPC-30-2a	屈服弯矩	43.3		43.7		1.01	C, R	R	70.1	
	极限弯矩	69.6	70.3	70.7	1.01	1.02				

1)  $S$ 、 $L$  分别为文献 [7] 中的试验值和理论值;  $L_1$  为本文的理论计算值; C 表示混凝土压碎破坏; R 表示 CFRP 布断裂;  $L_1^*$  表示在文献 [7] 的试验中梁底增加设置一层钢板后本文的理论计算值, 其中钢板厚 2 mm, 宽 150 mm。

表 2 中理论值  $L_1$  与试验值  $S$  比值在 0.94 ~ 1.04 之间；对比理论值  $L_1$  与  $L_1^*$ ，可以看出：相比于碳纤维布单一加固，预应力碳纤维布与钢板组合加固屈服弯矩提高了 60.4% ~ 95.7%，极限弯矩

提高了 37.4% ~ 57.1%，加固效果显著。文献 [12] 仅粘贴钢板，相当于本文中碳纤维布厚度为零时的情况。与文献 [12] 的对比结果见表 3。

表 3 理论值与文献 [12] 的试验数据的对比<sup>1)</sup>

Table 3 The Contrast of Theoretical Value and Test Value of Literature

试验梁	项目	$S$	$L$	$L_1$	$\frac{L}{S}$	$\frac{L_1}{S}$	试验	预测	$L_1^*$	$\frac{L_1^* - L_1}{L_1}$
LA-4	极限弯矩	27.50	33.39	26.0	1.21	0.95	C	G, C	32.6	25.4%
La-1	极限弯矩	20.55	23.12	18.4	1.13	0.90	G	G	25.7	39.7%
La-3	极限弯矩	22.35	24.98	19.7	1.12	0.88	G	G	25.4	28.9%
BL-1	极限弯矩	12.90	14.40	11.7	1.12	0.91	G	G	15.0	28.2%
BL-2	极限弯矩	13.26	14.99	12.3	1.13	0.93	G	G	15.7	27.6%
BL-3	极限弯矩	12.84	14.78	12.1	1.15	0.94	G	G	15.4	27.3%

1)  $S$ 、 $L$  分别为文献 [12] 中的试验值和理论值； $L_1$  为本文的理论计算值；C 表示混凝土压碎破坏；G 表示钢板屈服； $L_1^*$  表示在文献 [12] 的试验中梁底增加设置一层碳纤维布后本文的理论计算值，其中碳纤维布厚度为 0.167 mm，宽度与钢板宽度相同。

表 3 显示本文的理论值  $L_1$  较试验值  $S$  略小，二者比值在 0.88 ~ 0.95 之间，有一定的安全储备。对比理论值  $L_1$  与  $L_1^*$ ，可以看出：相比于钢板单一加固，预应力碳纤维布与钢板组合加固极限弯矩提高了 25.4% ~ 39.7%，加固效果较好，其中碳纤维布的预应变依次为其极限应变的 21.2%、

21.2%、21.2%、27.1%、27.2% 和 7.2%。文献 [14] 中采用在梁底粘贴普通 CFRP 层，然后将钢板粘贴于 CFRP 层上的方法<sup>[21]</sup>，相当于本文中 CFRP 预应力为零时的情况。与文献 [14] 的对比结果见表 4。

表 4 理论值与文献 [14] 试验值对比<sup>1)</sup>

Table 4 The Contrast of Theoretical Value and Test Value of Literature

试验梁	项目	$S$	$L$	$L_1$	$\frac{L}{S}$	$\frac{L_1}{S}$	试验	预测
LB1	极限弯矩	24.15	20.13	24.2	0.83	1.00	钢板剥离	钢板屈服
LC1	极限弯矩	21.00	16.46	21.4	0.78	1.02	碳纤维布断裂	碳纤维布拉断
LD1	极限弯矩	33.95	30.37	34.4	0.89	1.01	碳纤维布断裂	碳纤维布拉断
LD2	极限弯矩	31.15	31.31	34.3	1.01	1.10	跨中组合层剥离	碳纤维布拉断
LE1	极限弯矩	29.40	30.37	34.4	1.03	1.17	端部组合层剥离	碳纤维布拉断
LE2	极限弯矩	29.10	30.37	32.9	1.04	1.13	碳纤维布断裂	混凝土压碎
LE3	极限弯矩	47.60	48.04	50.0	1.01	1.05	混凝土压碎	混凝土压碎

1)  $S$ 、 $L$  分别为文献 [14] 中的试验值和理论值； $L_1$  为本文的理论计算值。

表 4 中理论值  $L_1$  与试验值  $S$  比值在 1.00 ~ 1.17 之间，理论值  $L_1$  与  $L$  比值在 1.04 ~ 1.30 之间。综合以上试验结果，组合加固梁法的破坏形式主要有下面几种：1) 适筋破坏。组合加固梁纵向受拉钢筋先发生屈服，然后受压区混凝土压碎或者碳纤维布被拉断而破坏<sup>[23]</sup>。2) 超筋破坏。纵向钢筋未屈服，受压区混凝土已经被压碎或者碳纤维布已经被拉断，加固失效。这种破坏形态延性很差，

破坏呈明显脆性，一般发生很突然，因此该种破坏形式在工程中必须避免。3) 剥离破坏。施加预应力过程中，钢板发生屈曲，与混凝土面剥离；或者加载时，钢板撕扯梁底混凝土，发生剥离破坏；或者碳纤维布与钢板间产生粘结破坏。混凝土表面打磨不够、锚固措施不充分、胶的性能达不到要求及砂浆层未清理干净均有可能引起剥离破坏。

### 3 结 论

本文针对钢板-预应力碳纤维布组合加固 RC 梁的抗弯性能进行了研究, 推导出组合加固梁在适筋破坏范围内的极限承载力计算方法。钢板-预应力碳纤维布组合加固将钢板加固和预应力碳纤维布加固两种方法进行了有效的结合, 加固效果明显提高。经与文献 [6]、[7]、[12] 和 [14] 的试验结果的对比, 验证了所推导的公式具有较高的可信度, 可用于指导工程实践。最后, 探讨了组合加固梁在弯矩作用下的 3 种破坏形式。在加固设计中, 主要考虑适筋破坏形式, 其他两种应避免出现。下一步的工作应有针对性地设计试验方案, 详细论证所推出的加固理论。

#### 参考文献:

- [1] KAI Xiang, GUO Huiwang. Calculation of flexural strengthening of fire-damaged reinforced concrete beams with CFRP sheets[J]. *Procedia Engineering*, 2013, 52: 446-452.
- [2] 尚守平, 张宝静, 吕新飞. 预应力 CFRP 板加固钢筋混凝土梁间接刚度试验[J]. *中国公路学报*, 2016, 29(11): 74-81.  
SHANG Shouping, ZHANG Baojing, LU Xinfei. Experiment on indirect stiffness of rc beams strengthened with prestressed CFRP plate[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2016, 29(11): 74-81.
- [3] YUNGON K, WASSIM M G, JAMES O J. Shear behavior of full-scale reinforced concrete T-beams strengthened with CFRP strips and anchors[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 94(30): 1-9.
- [4] MOHAMMAD R E, HAMID S. Fiber composite plate for strengthening bridge beam [J]. *Composite Structure*, 1990, 15(4): 343-355.
- [5] HOTA V S, GANGA R, VIJAY P V. Bending behavior of concrete beams wrapped with carbon fabric[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1998, 124(1): 3-10.
- [6] 李翔, 顾祥林. 碳纤维布加固低强度混凝土梁的抗弯承载力[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(1): 23-29.  
LI Xiang, GU Xianglin. Bending bearing capacity of low strength reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber composite sheets[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(1): 23-29.
- [7] 高仲学, 王文炜, 黄辉. 预应力碳纤维布加固钢筋混凝土梁抗弯承载力计算[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2013, 43(1): 195-202.  
GAO Zhongxue, WANG Wenwei, HUANG Hui. Calculation of flexural capacity of RC beams strengthened with prestressed CFRP sheets [J]. *Journal of Southeast University ( Natural Science Edition)*, 2013, 43(1): 195-202.
- [8] 王建民, 王国亮, 聂建国, 等. 考虑界面剥离的粘钢钢板加固 RC 梁非线性有限元分析[J]. *公路交通科技*, 2009, 26(8): 57-62.  
WANG Jianmin, WANG Guoliang, NIE Jianguo, et al. Non-linear finite element analysis model for steel-plate strengthened RC beams considering debonding of plate-concrete interface[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2009, 26(8): 57-62.
- [9] 张建仁, 唐皇, 彭建新, 等. 钢板加固锈蚀 RC 梁短期挠度计算方法和试验[J]. *中国公路学报*, 2015, 28(10): 41-50.  
ZHANG Jianren, TANG Huang, PENG Jianxin, et al. Calculating method and test research of short-term deflection of corroded RC beam strengthened by steel plate[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(10): 41-50.
- [10] JONES R, SWAMY R N, ANG T H. Under and over-reinforced concrete beams with glued steel plates [J]. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 1982, 4(1): 19-32.
- [11] ZIRABA Y N, BALUCH M H. Computational model for reinforced concrete beams strengthened by epoxy bonded steel plates[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 1995, 20(4): 253-271.
- [12] 高轩能, 周期源, 陈明华. 粘钢加固 RC 梁承载性能的理论 and 试验研究[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(8): 38-44.  
GAO Xuanneng, ZHOU Qiyuan, CHEN Minghua. Theoretical and experimental research on bearing behavior of RC beams strengthened by bonded steel plates[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(8): 38-44.
- [13] 张坦贤, 吕西林. 玻璃纤维与钢板加固钢筋混凝土梁抗弯性能的研究与应用[J]. *四川建筑科学研究*, 2005, 31(1): 54-57.  
ZHANG Tanxian, LU Xilin. The analysis and application of strengthening reinforced concrete beam with GFRP and steel plate [J]. *Building Science Research of Sichuan*, 2005, 31(1): 54-57.
- [14] 卢亦焱, 周婷. 碳纤维布与钢板复合加固钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. *铁道学报*, 2006, 28(1): 80-87.  
LU Yiyan, ZHOU Ting. Experimental research on flexural performance of reinforced concrete beams combination strengthened with bonded carbon fiber reinforced

- polymer and steel plates[J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(1):80-87.
- [15] 翟爱良,刘春伟,王东海. 预应力碳纤维布与钢板复合加固混凝土受弯构件[J]. 水利水运工程学报, 2009, 14(3):14-20.  
ZHAI Ailiang, LIU Chunwei, WANG Donghai. Concrete flexural members combination strengthened with bonded carbon fiber reinforced polymer and steel plates [J]. Hydro-Science and Engineering, 2009, 14(3):14-20.
- [16] 单成林. 粘贴钢板或碳纤维加固受弯构件效果对比试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(1):36-43.  
SHAN Chenglin. Contrast experimental effect between flexural member strengthened with bonding steel plate or CFRP[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2011, 19(1):36-43.
- [17] 钟正强,喻奕,刘波. 胶层厚度对预应力 CFRP 加固混凝土梁粘结应力的影响试验[J]. 中国公路学报, 2014, 27(11):55-62.  
ZHONG Zhengqiang, YU Yi, LIU Bo. Experiment on indirect stiffness of RC beams strengthened with prestressed CFRP plate[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(11):55-62.
- [18] YANG D S, SUN-KYU PANK S K, NEALE K W. Flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon composites[J]. Composite Structures, 2009, 88(4):497-508.
- [19] GB 50010-2010. 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.  
GB 50010-2010. Design code for strengthening concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2010.
- [20] 单成林. 旧桥加固设计原理及计算实例[M]. 北京:人民交通出版社,2007.  
SHAN Chenglin. The old bridge reinforcement design principle and calculating examples [M]. Beijing: People's Communications Press, 2007.
- [21] 卢亦焱,周婷,赵国藩. 碳纤维布与钢板复合加固钢筋混凝土梁抗弯承载力的计算分析[J]. 水力发电学报, 2006, 25(3):77-83.  
LU Yiyan, ZHOU Ting, ZHAO Guofan. Calculation analysis of resisting flexural strength of RC beams strengthened by combination of CFRP and steel plate [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(3):77-83.
- [22] 胡孔国,陈小兵,岳清瑞,等. 考虑二次受力碳纤维布加固混凝土构件正截面承载力计算[J]. 建筑结构, 2001, 31(7):63-65.  
HU Kongguo, CHEN Xiaobing, YUE Qingrui, et al. Calculation of flexural capacity of RC beams strengthened with prestressed CFRP sheets considering the secondary load state[J]. Building Structure,2001, 31(7):63-65.
- [23] 周爱军,黄承逵. CFRP 布加固钢筋混凝土梁抗弯承载力设计计算方法[J]. 公路交通科技, 2007, 24(8):78-82.  
ZHOU Aijun, HUANG Chengkui. Calculation method of flexural capacity of reinforced concrete beams with externally bonded CFRP sheets[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(8):78-82.