

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.06.008



# 预应力碳纤维板加固钢筋混凝土梁的受弯性能

郭蓉<sup>1</sup>, 杜力峰<sup>1</sup>, 郭娇<sup>1,2</sup>, 赵少伟<sup>1</sup>

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 天津市公路工程总公司, 天津 300250)

**摘要:**为研究预应力碳纤维板加固钢筋混凝土梁的受弯性能,进行 3 根碳纤维板加固钢筋混凝土梁和 1 根对比梁的试验研究。研究预应力以及梁底锚固方式对混凝土梁的受弯承载力、刚度、裂缝发展情况、碳纤维板利用率的影响。试验结果表明:预应力碳纤维板加固可明显提高试件的受弯承载力,提高碳纤维板的利用率,减小裂缝宽度,其延性有所下降,在加固构件设计时需特别关注;两种锚固方式均满足正常使用要求,综合考虑无需开槽的 MJ-2 锚具适用性更强。

**关键词:**预应力;碳纤维板;加固;锚固方式;受弯性能

**中图分类号:**TU378 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)06-0061-07

## Flexural property of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon fiber reinforced polymer plate

Guo Rong<sup>1</sup>, Du Lifeng<sup>1</sup>, Guo Jiao<sup>1,2</sup>, Zhao Shaowei<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China;

2. Tianjin Highway Engineering Corporation, Tianjin 300250, P. R. China)

**Abstract:** Three RC beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) plate and one contrast beam were tested to investigate the flexural property. The effect of prestress and the anchorage on the performance was analyzed in terms of bending capacity, stiffness, development of crack, utilization rate of carbon fiber reinforced polymer plate. The test results showed that the prestressed CFRP plate can significantly improve flexural capacity of the specimens, utilization rate of CFRP plate, and deformation properties, decrease crack width, and the structural ductility was reduced which we should consider when designing reinforcing components. Two types of anchorage could meet the requirement of operational phase, Considering all aspects, the MJ-2 anchorage without slot was more applicable.

**Keywords:** prestressing; CFRP plate; strengthening; anchorage; flexural property

碳纤维板 (Carbon Fiber Reinforced Polymer Plate, 简称 CFRP 板) 加固技术是一项重要的结构加固技术,也是加固工程研究的重要内容。这一方法借助树脂类胶结材料将碳纤维板粘贴在混凝土表

面,进而满足提高结构承载力改善结构受力性能的要求。与传统加固方式相比,CFRP 板加固技术有着明显的优势。但是,碳纤维板的抗拉强度很高,弹性模量甚至略低于钢筋,强度的发挥以碳纤维板的

**收稿日期:**2016-05-18

**基金项目:**河北省自然科学基金(E2014202178);天津市交通运输科技发展计划(2016A-02)

**作者简介:**郭蓉(1974-),女,副教授,博士,主要从事工程改造与加固研究,(E-mail)13834785@qq.com。

**Received:**2016-05-18

**Foundation item:** Natural Science Foundation of Hebei Province(No. E2014202178); Science and Technology Development Plan Project on Transportation of Tianjin(No. 2016A-02)

**Author brief:** Guo Rong(1974-), associate professor, PhD, main research interests: engineering reconstruction and reinforcement, (E-mail)13834785@qq.com.

变形为代价,因此,其高强度难以充分发挥,且在正常使用状态下构件的变形与裂缝也不能很好地控制。预应力碳纤维板加固可以有效解决以上问题,提高承载力的同时也改善了构件的受力性能。Franca 等<sup>[1]</sup>、Yu 等<sup>[2]</sup>、Tsonos<sup>[3]</sup>、Burning 等<sup>[4]</sup>、Tahsiri 等<sup>[5]</sup>、Ai-Saidy 等<sup>[6]</sup>、El-Maaddawy 等<sup>[7]</sup>、Ghafoori 等<sup>[8]</sup>进行了碳纤维布加固混凝土梁的试验研究;Macdougall 等<sup>[9]</sup>进行了碳纤维束对混凝土建筑的加固作用。管延华等<sup>[10]</sup>、许成祥等<sup>[11]</sup>、程东辉等<sup>[12]</sup>研究了碳纤维布加固混凝土结构的受弯、抗震等性能;徐礼华等<sup>[13]</sup>、丁亚红等<sup>[14]</sup>研究了预应力碳纤维筋加固混凝土梁的受力性能;尚守平等<sup>[15]</sup>研究了碳纤维板加固混凝土结构的抗震性能以及粘结性能。但目前对预应力碳纤维板有粘结加固的试验研究还较少,仅有黄金林等<sup>[16]</sup>少数学者进行了一些理论与试验研究。笔者在自行研制的锚具的基础上进行了预应力碳纤维板有粘结加固钢筋混凝土梁的静载试验,研究了加固、预应力对构件受弯性能的增强作用以及锚固方式对构件受弯性能的影响。

## 1 试验方案

### 1.1 试件设计

设计 3 根碳纤维板加固钢筋混凝土梁和 1 根未加固的混凝土梁,试件全长 4.2 m、宽 400 mm、高 300 mm、计算跨度 3.9 m,试件配筋如图 1 所示,设计参数如表 1 所示,其中 B0 为对比梁,CB1 为非预应力 CFRP 板加固构件,PCB1 和 PCB2 为预应力 CFRP 板加固构件。利用自行研制的锚具采用后张法对 CFRP 板施加预应力,具体操作流程如图 2 所示。在张拉过程中根据 CFRP 板的应变控制张拉,施加初始应变为 6 000  $\mu\epsilon$ ,即张拉控制应力为 960 MPa,但在放张后因锚具变形 CFRP 板回缩、混凝土弹性收缩、CFRP 板应力松弛等原因出现一定的预应力损失,试件 PCB1 与 PCB2 的有效预应力分别为 CFRP 板极限抗拉强度的 36%、35%。试验证明,波纹板可以夹住碳板<sup>[17]</sup>,张拉前在梁底涂粘结剂,使碳板与梁底混凝土粘结,保证碳板上的力均匀传给梁体,避免碳板上的力过于集中,张拉过程中粘结剂不发挥作用。

表 1 中预应力加固所用锚具 MJ-1、MJ-2 实物如图 3 所示。其中,MJ-1 需进行开槽处理,MJ-1 重点考虑滑槽的刚度,以便为夹板提供有效的滑道,且在锚具两端不存在弧面,同时,由于滑槽底面是光滑的钢板,而 MJ-2 未开槽,锚固板直接在混凝土表面

滑动。为减小碳纤维板与梁底的距离,需在安装 MJ-1 的试件进行梁底开槽,使滑槽底面与梁底在同一平面上,开槽深度不宜过深,以免破坏梁底保护层。

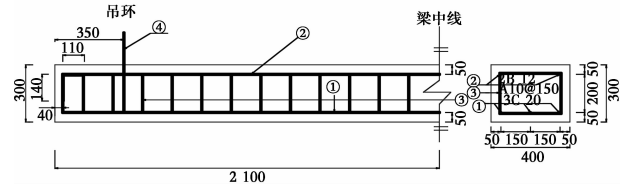


图 1 试件尺寸配筋(单位:mm)

Fig. 1 Dimension and reinforcement of specimen

表 1 试件设计参数

Table 1 Design parameters of specimen

构件编号	加固方式	初始应变 $\mu\epsilon$	锚具种类	开槽
B0	未加固			
CB1	非预应力 CFRP 板加固		MJ-1	是
PCB1	预应力 CFRP 板加固	6 000	MJ-1	是
PCB2	预应力 CFRP 板加固	6 000	MJ-2	否



图 2 预应力施加流程

Fig. 2 The process of applying prestress



图 3 锚具实物图

Fig. 3 The anchor

试验采用三分点加载,在每级荷载持载结束后,观察记录 CFRP 板、钢筋、混凝土的应变值、梁体的变形以及裂缝的发展情况。为记录加载过程中梁体变形情况,在底部跨中、三分点处及支座处架设百分表,用以测量试件的挠度变化。测点布置如图 4 所示。

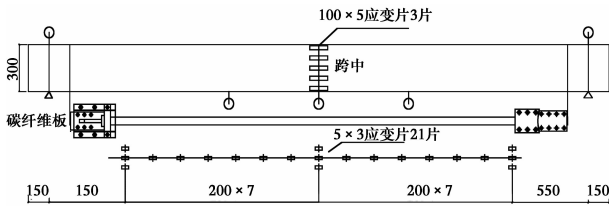


图 4 测点布置(单位:mm)

Fig. 4 Test point arrangement

## 1.2 材料性能

试件采用的混凝土强度等级为 C50,根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)规定的方法测得的立方体抗压强度为 54.6 MPa,弹性模量为  $3.63 \times 10^4$  MPa,受拉纵筋选用 HRB400 钢筋,根据《金属材料室温拉伸试验方法》(GB/T 228—2010)测得屈服强度为 461 MPa。碳纤维板以及胶粘剂的性能参数由厂家提供。试验选用专用碳纤维板胶粘剂,由甲、乙两种成分组成,常温 48 h 完全固化,测得粘结剂的拉伸强度为 45 MPa,拉伸模量为 4.0 GPa,延伸率为 1.6%。CFRP 板的力学性能如表 2 所示。

表 2 CFRP 的力学性能

Table 2 The mechanics properties of the CFRP plate

规格	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	极限拉应变 $\mu\epsilon$	伸长率/%
1.4 mm × 50 mm	2 400	160	15 000	1.65

## 2 试验现象

如图 5(a)所示,对比试件 B0 呈现出典型的适筋梁破坏形式:受拉钢筋屈服后继续加载,上层混凝土被压碎,当加载至 143 kN 时,梁体挠度达到 50.46 mm。而试件 CB1、PCB1、PCB2 的共同破坏特征为 CFRP 板出现劈裂破坏而混凝土未被压碎,如图 5(b)、(c)所示,梁底出现明显的横向裂缝,贯穿结构胶,CFRP 板发生劈裂破坏且结构胶有剥离现象。因 CFRP 板的加固作用,3 根梁的受弯承载力

都有所提高,其中,PCB1、PCB2 的提高效果更明显。CFRP 板抑制了梁体裂缝的发展,加固试件的裂缝宽度与裂缝间距均小于对比试件 B0。受拉钢筋屈服后,增加荷载主要由 CFRP 板承受,CFRP 板与混凝土之间出现剥离,随着荷载的增加,碳纤维板与混凝土梁发生剥离,并逐渐发展至锚具处,端部一定长度范围内碳纤维板与混凝土的粘结完全失效,锚具完全承担了抵抗碳纤维板拉应力的作用,锚具前端边缘的碳纤维板处于高拉应力状态,承受拉剪复合应力作用,而被拉断,梁体挠度变化明显,最终上层混凝土未压碎。当梁体宣告破坏时,锚具均未发生滑移,表明两种锚具的工作性能良好。

与其他有粘结 CFRP 板加固受弯试件不同,加固试件均在端部设置锚固,所以,非预应力与预应力加固试件的 CFRP 板与混凝土的剥离并未发生于 CFRP 板的端部,而是产生于梁体剪弯区域,并向 CFRP 板端部发展。非预应力加固试件 CB1 的破坏形式为 CFRP 板与混凝土剥离,最大裂缝宽度达到 1.5 mm;预应力试件 PCB1、PCB2 的破坏形式为 CFRP 板与混凝土剥离,CFRP 板在高应力水平下被拉断。

当加固试件的 CFRP 板粘贴量相同时,同非预应力试件 CB1 相比,对 CFRP 板施加预应力的试件 PCB1 和 PCB2 裂缝宽度明显减小,裂缝间距无明显差别,试件受拉区应变得到降低,承载力有明显提高。



(a) 混凝土被压碎 (b) 梁底横向裂缝 (c) CFRP 板劈裂

图 5 试件破坏图

Fig. 5 The destruction of specimens

## 3 试验结果分析

### 3.1 跨中截面应变分布

以试件 CB1 为例,各级荷载作用下梁跨中控制截面的应变分布如图 6 所示。

由图 6 可知,在试件纯弯段范围内,混凝土应变基本呈直线趋势,混凝土截面应变基本符合平截面假定。

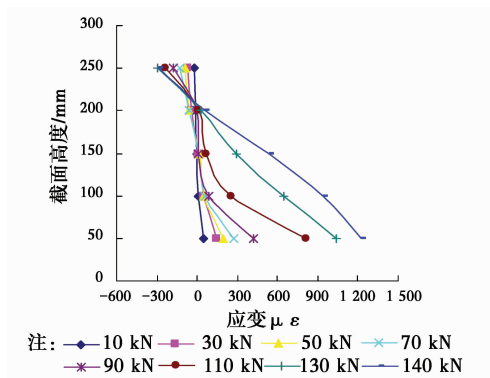


图 6 混凝土应变图

Fig. 6 Strain diagram of concrete

### 3.2 试件承载性能分析

表 3 为各个试件的开裂荷载、屈服荷载及极限荷载。

表 3 试验梁的荷载  
Table 3 The load of the specimens

试件编号	开裂荷载/kN	屈服荷载/kN	极限荷载/kN
B0	21	122	143
CB1	22	129	152
PCB1	30	163	199
PCB2	29	158	193

从表 3 中可以看出,加固、预应力、锚固方式对试件的受弯承载力均产生一定的影响。

1) 加固的影响:与试件 B0 相比,试件 CB1 的开裂荷载、屈服荷载、极限荷载分别提高了 5%、6%、6%。由于在 CFRP 板与混凝土剥离之前,CFRP 板

与钢筋可以协同工作,因此,开裂荷载提高程度与屈服荷载提高程度相近,表明非预应力加固对试件的受弯承载力有一定程度的提高。

2) 预应力的影响:同非预应力试件 CB1 相比,试件 PCB1 的开裂荷载、屈服荷载、极限荷载分别提高 36%、26%、31%,试件 PCB2 的开裂荷载、屈服荷载、极限荷载分别提高 32%、22%、27%。这是由于 CFRP 施加预应力能够更好地发挥 CFRP 板的高强性能,预应力 CFRP 板协助混凝土梁承受荷载,表明预应力 CFRP 板加固混凝土梁能够显著提高试件的受弯承载力,且在提高受弯构件的抗裂性能方面也有很大的优势;屈服荷载提高程度明显小于开裂荷载提高程度,考虑到梁体开裂后刚度有所下降,这一结果可信。

3) 锚固方式的影响:使用不同锚具的试件 PCB1、PCB2 的荷载提高系数接近,锚具均未出现滑移现象,工作性能良好。MJ-2 锚具无需开槽,施工简单,易于操作,综合考虑,MJ-2 锚具适用性更强。

### 3.3 CFRP 板强度利用率

CFRP 板是高强材料,其抗拉强度是 HRB400 钢筋抗拉强度的 4.5 倍。但同时,CFRP 板也是脆性材料,在利用 CFRP 板进行结构加固时,CFRP 板拉应变过高就容易发生脆断,如果 CFRP 板的应变过低,其高强性能则得不到充分利用。预应力碳纤维板加固工程中最重要的问题之一为 CFRP 板的利用率,试件在开裂状态、屈服状态、极限状态下的 CFRP 板应变以及利用率如表 4 所示。

表 4 CFRP 板的利用率对比

Table 4 Comparison of the utilization rate of CFRP plate

试件编号	初始状态		开裂状态		屈服状态		极限状态	
	应变 $\mu\epsilon$	利用率/%	应变 $\mu\epsilon$	利用率/%	应变 $\mu\epsilon$	利用率/%	应变 $\mu\epsilon$	利用率/%
CB1	0	0	226	1.5	1 866	12.4	4 140	27.6
PCB1	5 463	36.4	5 463+543	40.0	5 463+2 385	53.3	5 463+4787	68.3
PCB2	5 329	35.5	5 329+549	39.2	5 329+2 360	51.3	5 329+4715	67.0

注:加号之前为初始应变,加号之后为新增应变。

从表 4 中数据可以看出,试件 CB1 的非预应力 CFRP 板在开裂状态、屈服状态、极限状态下的利用率分别为 1.5%、12.4%、27.6%,随荷载的增加,利用率有所增长,但增长幅度较小,试件破坏时 CFRP 板仅达到 27.6%,即 CFRP 板仅发挥其强度的 27.6%。试件 CB1 的 CFRP 板极限利用率甚至小于试件 PCB1、PCB2 中 CFRP 板的初始利用率,而试件 PCB1、PCB2 的预应力 CFRP 板的初始利用率

已达到 36.4%、35.5%,在试件破坏时,利用率达到 68.3%、67.0%,逐渐接近 CFRP 板的极限拉应变。在试件开裂之后继续加载,预应力加固试件与非预应力加固试件的 CFRP 板应变增长量相近,而混凝土开裂时,预应力加固试件的 CFRP 板应变增长约为非预应力 CFRP 板的 2 倍,因预应力使梁体受拉边缘产生压应变,所以,预应力加固试件的混凝土开裂应变应大于非预应力加固试件。结果表明,预应

力碳纤维板更好地发挥了CFRP板高强度的这一特性,提高CFRP板的利用率,同时,也为加固梁留有足够的储备强度。通过表中数据分析可知,施加CFRP板40%的预应力是较为合理的选择。

试件PCB1、PCB2在加载各个阶段的CFRP板应变增长相近,表明锚具MJ-1、MJ-2锚固性能良好,综合考虑,无需开槽的MJ-2更有优势。

### 3.4 荷载-挠度曲线

试件的荷载-挠度曲线如图7所示。

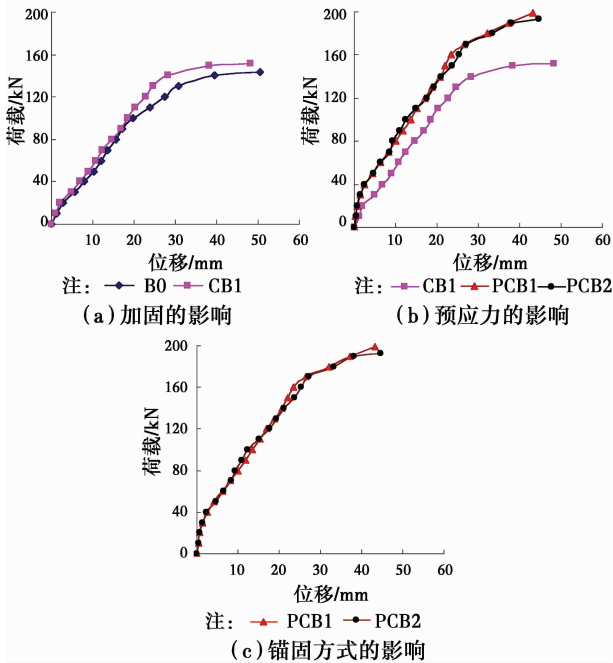


图7 荷载-挠度曲线

Fig. 7 Load-deflection curve

从图7中各曲线可以看出,预应力CFRP板加固钢筋混凝土梁的受力过程同普通预应力钢筋混凝土梁的受力过程相同。加载初期,4根试件的曲线斜率普遍较大,继续加载至开裂,曲线出现第1个转折点,斜率有所下降,表明试件开裂后,刚度减小。继续加载至钢筋屈服,曲线出现第2个转折点,斜率再次降低,表明各个试件的刚度再次减小。在试件开裂前,同对比试件B0相比,非预应力试件CB1的刚度相近,而预应力试件PCB1、PCB2的刚度较大。从图7(a)可以看出,在加载前期,加固试件CB1的刚度同对比试件B0的刚度相近,加载后期,因CFRP板应变逐渐增加,混凝土梁受拉钢筋应变增长较缓,加固试件刚度退化较为缓慢。从图7(b)可以看出,同非预应力试件CB1相比,预应力试件PCB1、PCB2的刚度退化过程较缓慢,且加载后期更明显。从图7(c)可以看出,预应力试件PCB1、PCB2

的刚度退化曲线基本平行。由此可见,非预应力CFRP板加固、预应力CFRP板加固都可以提高钢筋混凝土梁的刚度,减缓试件的刚度退化,施加预应力的提高效果更明显;锚固方式对试件的刚度影响不大。

从图7可以看出,加固、预应力、锚固方式对试件的正截面受弯承载力和变形性能有不同程度的影响。

1)加固的影响。从图7(a)可以看出,与对比试件B0相比,非预应力试件CB1的正截面受弯承载力得到一定程度的提高,跨中挠度减小。这表明对混凝土试件进行非预应力CFRP板加固可以提高正截面受弯承载力和刚度,变形性能下降。

2)预应力的影响。图7(b)为预应力试件PCB1、PCB2同非预应力试件CB1的荷载-挠度曲线对比,从图中可以清晰地观察到预应力这一因素对试件受弯承载力和变形性能的影响。这表明,预应力CFRP板用于混凝土梁加固能显著提高受弯承载力,变形性能下降。

3)锚固方式的影响。从图7(c)可以看出,在加载过程中,试件PCB1和试件PCB2的荷载-挠度曲线几乎重合,表明锚固方式对试件受弯承载力和变形的影响不大。

### 3.5 延性分析

CFRP板为脆性材料,没有屈服平台,当应力达到其极限拉伸强度时,CFRP板则被拉断。另外,CFRP板加固构件在加载过程中往往因CFRP板与混凝土出现剥离,导致试件中CFRP板并未达到其极限拉应变已破坏。因此,采用CFRP板进行加固时,要对构件进行延性设计,以确保其变形能力满足使用要求。表5中为各个试件的延性对比分析。

表5 试件延性对比

Table 5 Comparison of ductility of specimen

试件编号	屈服挠度/mm	破坏挠度/mm	破坏挠度(破坏挠度/跨度)/%	延性系数	破坏挠度/对比试件破坏挠度
B0	22.51	50.46	1.29	2.24	1.00
CB1	23.19	48.23	1.24	2.08	0.96
PCB1	27.64	43.17	1.11	1.56	0.86
PCB2	26.79	44.60	1.14	1.66	0.86

注:延性系数为破坏挠度与屈服挠度之比。

从表5中可以看出,CFRP板加固试件的受弯承载力有所提高,而延性有不同程度的降低。非预应力加固试件CB1的破坏挠度为对比试件B0破坏

挠度的 96%，延性变化不大；而预应力加固试件 PCB1、PCB2 的破坏挠度为试件 B0 破坏挠度的 86%、86%，延性降低，非预应力试件 CB1 的延性略好于预应力试件 PCB1、PCB2，这是因为非预应力试件与预应力试件的端部锚固性能良好，且非预应力试件因 CFRP 板无初始变形，变形余量大，故其延性高于预应力试件。对比试件 PCB1、PCB2 的屈服挠度、破坏挠度以及破坏挠度与对比试件破坏挠度的比值可以看出，两者的延性接近，结果表明，在端部锚固满足试验要求的前提下，锚固方式对试件的延性影响不大。

从以上内容可知，加固梁的延性有所降低，延性系数处于 1.5~2.5 之间，延性较低，因此，应特别注意加固试件的延性。在加固构件设计时可通过合理设计 CFRP 板面积、控制 CFRP 板预应力等措施来保证预应力 CFRP 板加固钢筋混凝土梁的延性满足规范要求。

## 4 结论

1) 预应力 CFRP 板加固钢筋混凝土梁同普通预应力混凝土梁相同，混凝土梁截面应变基本符合平截面假定。

2) 非预应力 CFRP 板加固能够一定程度上提高试件的受弯承载力、CFRP 板的强度利用率以及试件刚度，减小变形性能，对试件延性影响不大。

3) 预应力 CFRP 板加固可以明显提高试件的受弯承载力，提高程度达到 30%；试件 PCB1、PCB2 破坏时，CFRP 板的应变分别达到极限应变的 68.3%、67.0%，CFRP 板的强度利用率显著提高，仍有一定的安全储备；提高试件的刚度，减缓试件的刚度退化过程；变形性能有所下降；加固构件延性有所下降。

4) 锚具 MJ-1、MJ-2 在试验过程中均未出现滑移，满足正常使用要求。锚固方式对试件的承载力、CFRP 板利用率、刚度、变形能力、延性的影响无明显差别。MJ-2 锚具无需开槽，施工简单，易于操作，综合考虑，MJ-2 锚具适用性更强。

## 参考文献：

[1] FRANCA P, COSTA A, APPLETON J. Prestressed CFRP laminates for flexural strengthening of reinforced concrete beams [J]. *Structural Concrete*, 2007, 8(4): 175-185.

[2] YU P Y, SILVA P F, NANNI A. Flexural performance of RC beams strengthened with

prestressed CFRP sheets [C] // International SAMPE Symposium and Exhibition, Long Beach, CA, United States, 2004:2759-2768.

[3] TSONOS A G. Effectiveness of CFRP-jackets and RC-jackets in post-earthquake and pre-earthquake retrofitting of beam-column subassemblages [J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(3):777-793.

[4] BURNING C A, PANTELIDES C P, REAVELEY L D. Repair of reinforced concrete deep beams using post-tensioned CFRP rods [J]. *Composite Structures*, 2015, 125: 256-265.

[5] TAHSIRI H, SEDEHI O, KHALOO A, et al. Experimental study of RC jacketed and CFRP strengthened RC beams [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 95: 476-485.

[6] AI-SAIDY A H, AL-JABRI K S. Effect of damaged concrete cover on the behavior of corroded concrete beams repaired with CFRP sheets [J]. *Composite Structures*, 2011, 93(7): 1775-1786.

[7] EL-MAADDAWY T, EL-ARISS B. Behavior of concrete beams with short shear span and web opening strengthening in shear with CFRP composites [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2012, 16(1): 47-59.

[8] GHAFOORI E, MOTACALLI M. Flexural and interfacial behavior of metallic beams strengthened by prestressed bonded plates [J]. *Composite Structures*, 2013, 101(15): 22-34.

[9] MACDOUGALL C, GREEN M, AMATO L. CFRP tendons for the repair of post-tensioned unbonded concrete buildings [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2010, 25(3): 149-157.

[10] 管延华, 钱远顺, 岳红亚, 等. 预应力 CFRP 布及预紧螺栓加固 RC 梁试验研究 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2016, 38(2): 1-10.

GUAN Y H, QIAN Y S, YUE H Y, et al. Experimental analysis on RC beams strengthened with the pre-stressed carbon fiber sheets and pre-screwed bolts [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2016, 38(2): 1-10. (in Chinese)

[11] 许成祥, 彭威, 许凯龙, 等. 碳纤维布加固震损方钢管混凝土框架边节点抗震性能试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(11): 69-76.

XU C X, PENG W, XU K L, et al. Experimental research on seismic behavior of CFRP-strengthened seismic-damaged exterior joints in composite frame consisting of GFSST columns and steel beams [J].

- Journal of Building Structures, 2014, 35(11): 69-76.  
(in Chinese)
- [12] 程东辉,叶旭,张力滨. 预应力 CFRP 布加固荷载混凝土梁力学性能分析[J]. 土木工程学报, 2013, 46(Sup1):319-328.  
CHENG D H, YE X, ZHANG L B. Research of mechanical properties on loaded concrete beam reinforced with prestressed CFRP sheet [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(Sup1): 319-328. (in Chinese)
- [13] 徐礼华,许锋,曾浩,等. CFRP 筋体外加固铁路预应力混凝土简支梁桥设计及试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(2): 89-95.  
XU L H, XU F, ZENG H, et al. The design and test study on prestressed railway concret beam bridge strengthened by externally draped CFRP tendons [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30 (2): 89-95. (in Chinese)
- [14] 丁亚红,马艳洁. 内嵌预应力碳纤维筋加固混凝土梁受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(2): 128-134.  
DING Y H, MA Y J. Experimental research on flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with prestressed near surface mounted tendons [J]. Journal of Building Structures, 2012 , 33(2): 128-134. (in Chinese)
- [15] 尚守平,李知兵,彭晖. 碳纤维板-混凝土界面黏结性能的试验研究与有限元分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2014,41(6):43-51.  
SHANG S P, LI Z B, PENG H. Experimental research and finite element analysis of the interfacial bonding behavior of CFRP-concrete interface [J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2014, 41(6): 43-51. (in Chinese)
- [16] 黄金林,黄培彦,郑小红. 预应力碳纤维板加固钢筋混凝土梁预应力损失试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(1): 85-91.  
HUANG J L, HUANG P Y, ZHENG X H. Experimental study of prestress losses of RC beams strengthened with prestress FRP [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(1): 85-91. (in Chinese)
- [17] 卓静. 高强度复合材料 FRP 片材波形齿夹具锚固系统及应用研究[D]. 重庆:重庆大学,2005.  
ZHUO J. Anchorage systems of high strength fiber reinforced polymer and the applications in strengthened structure [D]. Chongqing: Chongqing University, 2005. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)