

# 预应力 CFRP 布加固混凝土梁受弯试验

于玲<sup>1</sup>,王泽鹏<sup>1</sup>,任成明<sup>1,2</sup>,包龙生<sup>1</sup>,王宇<sup>3</sup>

(1. 沈阳建筑大学交通与测绘工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 辽宁省公路勘测设计公司,辽宁 沈阳 110000;  
3. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 研究不同加固方法下预应力碳纤维布加固混凝土梁的受弯性能,解决桥梁加固缺陷的问题。方法 制作了5根试验梁,其中一根为对比梁,不做任何加固处理,其余4根分别采用不同的锚固方式、不同的初始张拉力及不同的加固位置进行加固,通过控制变量,进行加载试验,分析其受弯性能的差异。结果 经加固后的试验梁承载能力与刚度明显增加,与对比梁相比,极限荷载分别提升了25%、22.06%、30.78%及36.76%;各试验梁达到屈服荷载时,经加固的试验梁挠度均小于对比梁产生的挠度,且模腔自锁式锚具锚固的试验梁挠度小于穿孔式自锁锚具锚固的试验梁挠度,相同锚固方法下初始张拉力较大的试验梁挠度要小于初始张拉力较小的试验梁挠度。结论 使用预应力碳纤维布加固混凝土梁能够有效提高混凝土梁的抗弯性能,提升效果与加固位置、锚固方式及初始张拉力大小有关。

**关键词** 预应力碳纤维布;桥梁加固;受弯试验;缠绕自锁式锚具

中图分类号 TU375.1

文献标志码 A

**引用格式:**于玲,王泽鹏,任成明,等. 预应力 CFRP 布加固混凝土梁受弯试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(2):241-249. (YU Ling, WANG Zepeng, REN Chengming, et al. Bending test of concrete beams strengthened with prestressed CFRP sheets[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(2):241-249.)

## Bending Test of Concrete Beams Strengthened with Prestressed CFRP Sheets

YU Ling<sup>1</sup>, WANG Zepeng<sup>1</sup>, REN Chengming<sup>1,2</sup>, BAO Longsheng<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>3</sup>

(1. School of Transportation and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;  
2. Liaoning Province Highway Survey and Design Company, Shenyang, China, 110000; 3. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** Researching the flexural performance of prestressed carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) strengthened concrete beams involves exploring various reinforcement methods to address

收稿日期:2023-01-12

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52078309);沈阳市科技计划项目(23-407-3-19)

作者简介:于玲(1970—),女,教授,主要从事桥梁结构等方面研究。

deficiencies in bridge reinforcement. In the experimental phase, five test beams were created. One of these served as a reference beam without any reinforcement treatment. The remaining four beams underwent reinforcement using different anchoring methods, various initial prestressing forces, and different reinforcement positions. Through meticulous control of variables, loading tests were conducted to scrutinize differences in flexural performance. The results were noteworthy. Post-reinforcement, the test beams demonstrated a significant increase in load-bearing capacity and stiffness. In comparison to the reference beam, ultimate loads increased by 25%, 22.06%, 30.78%, and 36.76%, respectively. When reaching the yield load, deflections of the reinforced test beams were consistently less than those of the reference beam. Furthermore, the deflection of the test beam anchored with the cavity self-locking anchorage system was smaller than that of the test beam anchored with the perforated self-locking anchorage system. Within the same anchoring method, the deflection of the test beam with a larger initial prestressing force was consistently smaller than that of the test beam with a smaller initial prestressing force. In conclusion, the application of prestressed carbon fiber-reinforced polymer for the reinforcement of concrete beams proves effective in enhancing flexural performance. The extent of improvement is intricately linked to factors such as the reinforcement position, anchoring method, and the magnitude of the initial prestressing force.

**Key words:** prestressed carbon fiber cloth; bridge reinforcement; bending test; winding self-locking anchorage

碳纤维(Carbon Fiber-Reinforced Polymer, CFRP)是一种制造技术成熟、且在多领域广泛使用的高强度材料,其优异的结构性能特别适用于桥梁及建筑的加固工程中<sup>[1-4]</sup>。吴金保<sup>[5]</sup>进行了多点锚固预应力 CFRP 加固梁疲劳性能的研究,发现对三点锚固加固梁而言,其疲劳寿命与预应力水平呈正相关。王文炜等<sup>[6]</sup>通过对 5 根加固梁的试验数据分析,证明了张拉过程中锚具的变形以及碳纤维布和锚具之间的相对滑移会导致预应力损失。F. Bencardino 等<sup>[7]</sup>在预应力碳纤维布加固钢筋混凝土梁试验中,观察到加固系统的最大剪应力出现在碳纤维布的锚固处。

在经过大量技术验证后,预应力碳纤维布加固方法也越来越多的应用到了实际工程建造当中<sup>[8-11]</sup>。然而单层预应力碳纤维布通常加固量不高,碳纤维板加固会对原有结构造成二次伤害。近期有学者提出了基于缠绕式锚具进行碳纤维布材多层加固的施工方案<sup>[12]</sup>,此方案相对于传统碳纤维材料加固方案的优势在于施工中无需开槽,可在保持原有结构完整性的同时达成加固需求。目前国

内对此加固方案尚未进行深入研究,基于此,笔者制作了 5 根试验梁,通过设定不同预应力初始值、锚固方式、加固位置等参数,然后进行加载试验,分析加固后的桥梁受力性能,研究不同因素对碳纤维布加固效果的影响,为桥梁加固方案提供新的设计方法。

## 1 预应力碳纤维布加固技术

### 1.1 基本原理

采用碳纤维布对混凝土梁进行加固后,钢筋、混凝土与碳纤维布将按其本构关系共同承受外荷载,进而提高结构的承载能力<sup>[13-15]</sup>。受力过程:当加载到混凝土开裂后,混凝土将不再承担拉力,此时钢筋与碳纤维布共同承受荷载;钢筋屈服后,其应力不再发生变化,此后仅由碳纤维布承受荷载<sup>[16-17]</sup>。

### 1.2 预应力碳纤维布锚固方法

曼卡特科技有限公司研发出一套基于 CFRP 布的穿孔自锁式锚具(见图 1)。该系统主要是利用 CFRP 布之间的摩擦及 CFRP 布与卷布轴之间的摩擦工作,从而实现自锁。

模腔式自锁锚具是由曼卡特科技有限公司在穿孔自锁式锚具基础上研发优化而得(见图2)。该锚固体系适用于锚固张拉4~10层碳纤维布,同时能够实现自锁固。为了避免对

混凝土构件开槽,锚具的盖板和底板接触面呈一定倾斜角度,使得碳纤维布与混凝土表面贴紧。



图1 穿孔式自锁锚具

Fig. 1 Perforated self-locking anchor system



图2 模腔式自锁锚具

Fig. 2 Mold cavity self-locking anchor system

2 试 验

2.1 试验目的

试验通过控制初始张拉力、锚具形式及CFRP布加固位置等变量,进行加载试验,观察试验梁的破坏形态及裂缝发展情况,测量钢筋应变、梁腹板应变、梁底混凝土应变、碳纤维布应变及梁体挠度等,以此研究不同参数对试验梁加固效果的影响,并判断试验梁加固前后是否符合平截面假定。

2.2 试件设计

笔者制作了5根相同的混凝土梁进行受弯试验,其中一根为对比梁,不做任何加固处理,两根通过穿孔自锁式锚具进行多层预应力碳纤维布加固,两根通过模腔自锁式锚具

进行多层预应力碳纤维布加固。试件编号分别为S1、PS1、PS2、CS1、CS2。混凝土设计强度为C40。受拉钢筋采用HRB400钢筋,架立筋和箍筋采用HPB300钢筋。配筋率为1.23%,高于该截面尺寸的最小配筋率,为适筋梁。试验中各加固梁均采用8层Ⅰ级CFRP布进行加固,每层CFRP布的标准厚度为0.167 mm,宽度为100 mm,加固长度为2 400 mm,具体加固方案见表1。碳纤维布的抗拉强度标准值为3 400 MPa,经计算得极限拉应力为454.24 kN。预应力水平为碳纤维布初始张拉力与极限拉应力的比值,根据已有研究<sup>[10]</sup>,预应力水平应当控制在25%~50%,试验中预应力水平分别取25%和32%。

表1 试验梁加固方案表

Table 1 Specimen beam strengthening scheme

试件编号	锚固方式	初始张拉力/kN	预应力水平/%	加固位置
S1	无加固	—	—	无任何加固
PS1	穿孔式自锁锚具	114	25	沿梁纵轴线加固
PS2	穿孔式自锁锚具	114	25	加固位置与梁纵轴线偏移 50 mm
CS1	模腔式自锁锚具	114	25	沿梁纵轴线加固
CS2	模腔式自锁锚具	145	32	沿梁纵轴线加固

2.3 测点布置

试验中将测量梁的跨中截面应变、梁底混凝土应变、纵向受拉钢筋应变、碳纤维布应变、锚具应变及试验梁挠度,分别在梁的跨中

侧面、梁底、梁内受拉钢筋、碳纤维布表面及锚具处布置应变片,并在计算跨径四分点、梁支座及跨中布置电阻位移计测量挠度,测点布置见图3。

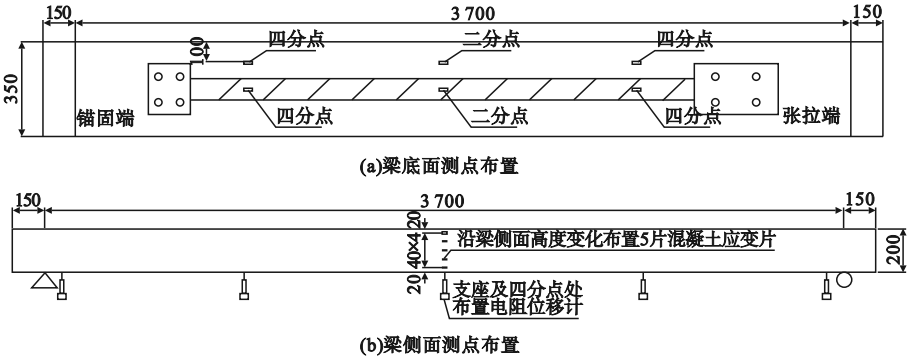


图3 测点布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of measuring point layout

2.4 加载方案

加载试验梁一端支座固定,另一端支座铰接,两支座间距 3 700 mm,采用跨中两点对称加载,两加载点间距 1 200 mm。正式加载开始前,先对构件进行预加载,消除各构件之间的间隙,正式试验时使用千斤顶向橡胶支座施加荷载,再由分配梁将产生的荷载传递到两侧钢垫板,两侧钢垫板向下传递压力(见图4)。

参考类似的加固试验<sup>[18]</sup>及理论计算<sup>[19]</sup>可知,5 根试验梁开裂荷载应小于 50 kN,屈服荷载应大于 80 kN,故正式加载分三个阶段进行:第一阶段,以 5 kN/min 的速率加载到 50 kN 停止,观察裂缝情况;第二阶段,以相同速率加载到 80 kN 停止,观察裂缝情况;第三阶段,以 2 kN/min 的速率加载,直至构件破坏。

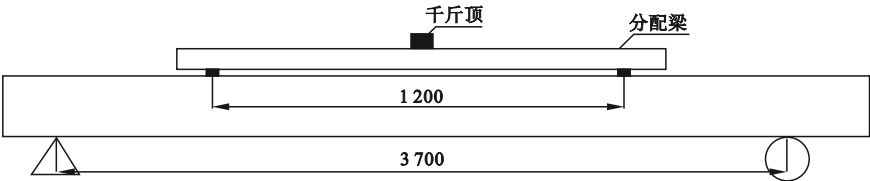


图4 加载示意图

Fig. 4 Load schematic

3 试验结果与分析

3.1 试验现象

3.1.1 试件 S1

加载至 28 kN 时,试验梁 S1 跨中位置开始出现细小裂缝;加载至 106 kN 时,混凝土构件出现第一次轻微响声,表面小块混凝土剥落,钢筋屈服,梁体跨中挠度达到 27.82 mm;加载至 135 kN 时试件破坏,试验终止。试件加载形态见图 5。

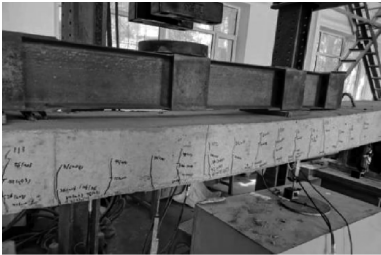


图 5 试件 S1 加载形态

Fig. 5 Loading photo of S1 specimen beam

3.1.2 试件 PS1

试件 PS1 使用穿孔式自锁锚具锚固,初始张拉力为 114 kN。加载至 34 kN 时,在加载点处开始出现裂缝;加载至 135 kN 时,钢筋屈服,此时跨中挠度为 26.58 mm;加载至 170 kN 时,梁底出现数道较宽裂缝,混凝土压碎,碳纤维布大面积剥离,梁体产生较大变形,试件破坏,试验终止。试件加载形态见图 6。



图 6 试件 PS1 加载形态

Fig. 6 Loading photo of PS1 specimen beam

3.1.3 试件 PS2

试件 PS2 使用穿孔式自锁锚具锚固,加固位置相对试验梁 PS1 纵轴线偏移 50 mm,初始张拉力为 114 kN。加载至 34 kN 时,跨

中出现细小裂缝,并不断增长;加载至 127 kN 时,钢筋屈服,此时跨中挠度为 26.52 mm;碳纤维布与混凝土在加载至 166 kN 时发生大面积剥离,混凝土被压碎,试件破坏,试验终止。试件加载形态见图 7。



图 7 试件 PS2 加载形态

Fig. 7 Loading photo of PS2 specimen beam

3.1.4 试件 CS1

试件 CS1 使用模腔式自锁锚具锚固,初始张拉力为 114 kN。加载至 36 kN 时,加载点附近出现第一条裂缝;加载至 141 kN 时,钢筋屈服,此时跨中挠度为 24.54 mm;加载至 178 kN 时,碳纤维布产生大面积剥离,混凝土被压碎,梁出现较大变形,试件破坏,试验终止。试件加载形态见图 8。

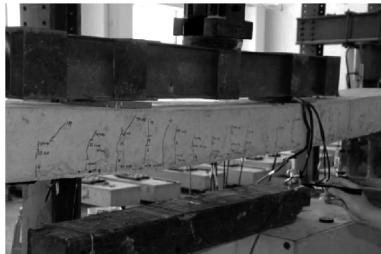


图 8 试件 CS1 加载形态

Fig. 8 Loading photo of CS1 specimen beam

3.1.5 试件 CS2

试件 CS2 使用模腔式自锁锚具锚固,初始张拉力 145 kN。加载至 42 kN 时,加载点附近出现第一条裂缝;加载至 150 kN 时,钢筋屈服,此时跨中挠度为 21.53 mm;加载至 186 kN 时,碳纤维布与混凝土大面积剥离,混凝土压碎,梁体产生巨大变形,试件破坏,试验终止。试件加载形态见图 9。





图9 试件CS2加载形态

Fig.9 Loading photo of CS2 specimen beam

3.2 结果与分析

3.2.1 承载能力

试验测得各试件承载能力结果见表2。  
由表可以得出：

表2 各试验梁承载能力结果

Table 2 The improvement range of the bearing capacity of beams

试件编号	开裂状态		屈服状态		极限状态	
	荷载/kN	提高幅度/%	荷载/kN	提高幅度/%	荷载/kN	提高幅度/%
S1	28	—	106	—	136	—
PS1	34	21.43	135	27.36	170	25.00
PS2	34	21.43	127	19.81	166	22.06
CS1	36	28.57	141	33.02	178	30.88
CS2	42	50.00	150	41.51	186	36.76

3.2.2 挠度

不同荷载下,各试件跨中挠度曲线如图10所示。

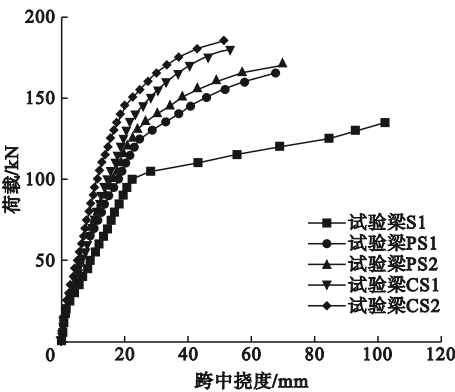


图10 各试件跨中荷载-挠度曲线

Fig.10 Load-deflection curves at mid-span of each specimen beam

从图中可以看出,曲线大致分为三个阶段:

(1)受拉区混凝土开裂前,试件处于弹

(1)使用预应力碳纤维布加固钢筋混凝土梁能够有效提高其承载能力,加固后试验梁屈服荷载提升了19.81%~41.51%;

(2)正常加固的试验梁比加固位置偏移的试验梁承载能力高,说明加固位置偏移会降低预应力碳纤维布的加固效果;

(3)模腔自锁式锚具锚固的试验梁承载能力高于穿孔式自锁锚具锚固的试验梁;

(4)初始张拉力较大的试验梁相比普通试验梁承载能力更强,其中开裂荷载提升效果最为显著。

性工作阶段,挠度值呈线性增长,速率较小,此阶段未加固的试件与加固试件变形相近;

(2)梁体开裂后至钢筋屈服前,受拉区混凝土失效,试件挠度增长速率变大,加固后的试件挠度增长幅度小于未加固的试件;

(3)钢筋屈服后,未加固的试件变形极速增长直至上部混凝土压碎,而加固后的试件由于碳纤维布发挥作用,虽然跨中挠度变化相比屈服前加快,但曲线斜率变化程度明显小于未加固的试验梁,承载力依然稳定增加,直至梁体破坏。

由试验结果可知:

(1)相同荷载下,预应力碳纤维布加固后的试件跨中挠度明显小于未加固的试件;

(2)加固位置偏移的试件跨中挠度相比沿梁纵轴线加固的试件略大;

(3)模腔自锁式锚具锚固的试件跨中挠度小于穿孔式自锁锚具锚固的试件;

(4)初始张拉力较大的试件相比普通试件跨中挠度小;

(5)在钢筋屈服前后,加固后的试件承载力变化明显小于未加固的试件。

3.2.3 碳纤维布应变

通过试验测得,各试件碳纤维布在开裂荷载时应变  $\varepsilon_{\text{fcr}}$ 、屈服荷载时应变  $\varepsilon_{\text{fy}}$  及破坏时的应变  $\varepsilon_{\text{f}}$ ,结果见表3。其中, $\varepsilon_{\text{fu}}$ 为碳纤维

布的极限拉应变, $\varepsilon_{\text{fu}} = 1.48 \times 10^{-2}$ 。分析表中数据可以得出:

(1)穿孔自锁式锚具锚固的试件 CFRP 布的利用率低于模腔自锁式锚具锚固的试件;

(2)加固位置偏移的试件 CFRP 布利用率相比沿梁纵轴线加固的试件小;

(3)初始张拉力较大的试件相比普通试件,CFRP 布的利用率大。

表3 碳纤维布应变  
Table 3 Strain comparison of carbon fiber cloth

试件编号	$\varepsilon_{\text{fcr}}/10^{-6}$	$\left(\frac{\varepsilon_{\text{fcr}}}{\varepsilon_{\text{fu}}}\right)/\%$	$\varepsilon_{\text{fy}}/10^{-6}$	$\left(\frac{\varepsilon_{\text{fy}}}{\varepsilon_{\text{fu}}}\right)/\%$	$\varepsilon_{\text{f}}/10^{-6}$	$\left(\frac{\varepsilon_{\text{f}}}{\varepsilon_{\text{fu}}}\right)/\%$
PS1	4 076	27.54	6 202	41.91	7 067	47.75
PS2	4 099	27.70	6 381	43.11	7 343	49.61
CS1	4 126	27.88	6 593	44.55	7 873	53.20
CS2	5 226	35.31	7 899	53.37	9 227	62.34

3.2.4 裂缝特征

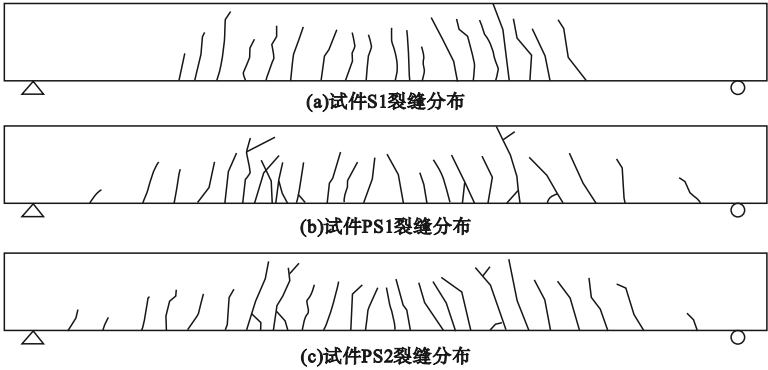
试验中使用裂缝宽度对比尺测量各试件在加载到 50 kN 与 80 kN 时的裂缝宽度及破坏后超过 0.08 mm 的裂缝数量,结果见表4,各试验梁的裂缝特征见图 11。

对表4 数据分析可知,加载初期,加固后的试件裂缝相比于未加固的试件裂缝根部较窄、上部较宽。当加载进入后期,加固后的试件在加载点主裂缝附近出现根状的伴生裂缝,在支座附近也产生了剪切裂缝。加固后的试件与未加固的试件相比,裂缝分布更加密集,间距与箍筋间距也比较接近。后期加

载至相同荷载时,加固后的试件相比未加固的试件裂缝数量要少很多。

表4 试件裂缝特征  
Table 4 Comparison of cracks in various concrete beams

试件编号	开裂荷载/kN	50 kN 时裂缝宽度/mm	80 kN 时裂缝宽度/mm	破坏后裂缝数量/条
S1	26	0.15	0.25	19
PS1	33	0.06	0.15	23
PS2	33	0.04	0.15	24
CS1	35	0.04	0.15	26
CS2	40	0.03	0.10	27



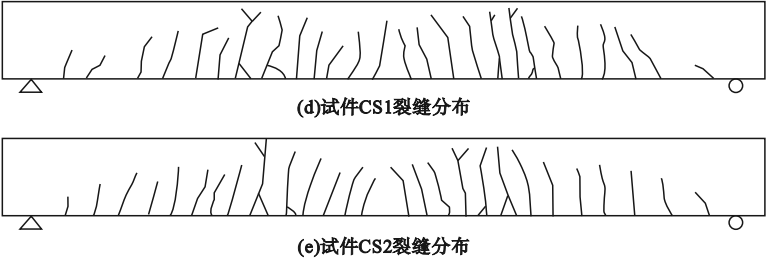


图 11 试件裂缝分布

Fig. 11 The distributions of crack in the beams of each specimen

3.2.5 平截面假定验证

试件 S1 和试件 PS1 在不同荷载下混凝土微应变随截面高度变化曲线如图 12 所示。从图中可看出,两根试验梁的截面中性轴均在上部位置,加载过程中,试件大部分混凝土受到拉应力,小部分混凝土受到压应力。加固前后的试件混凝土应变与对应截面高度,在荷载较小时基本呈线性关系,仅在试验梁

即将破坏时呈现非线性关系,这是由于钢筋屈服后,仅由混凝土和预应力碳纤维布承受荷载,混凝土挠度变大,因此混凝土应变增长速度加快。经预应力碳纤维布加固前后的试件沿梁高方向跨中截面的应变大致呈现线性变化,故可认为加固前后的试验梁均符合平截面假定。

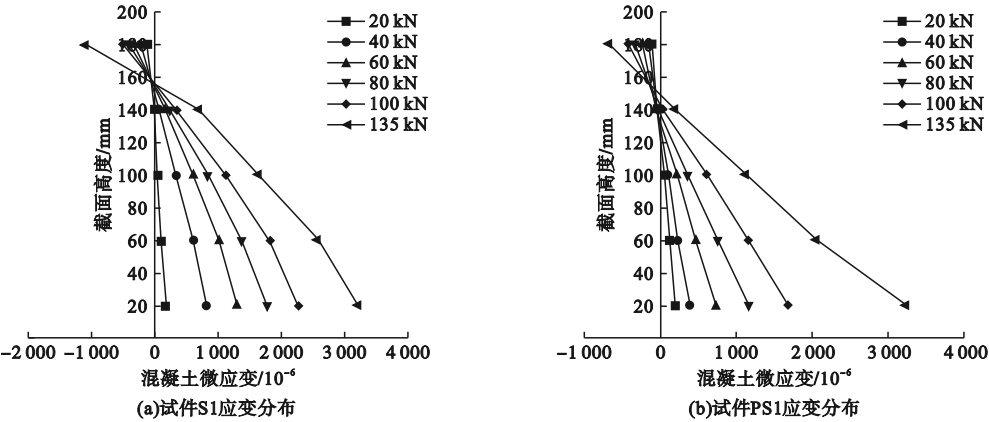


图 12 跨中截面应变分布

Fig. 12 Distributions of strain in mid-span section along beam height

4 结 论

- (1)使用预应力碳纤维布加固钢筋混凝土梁能够有效地提高其承载能力,加固后屈服荷载提高了 19.81% ~ 41.51%。
- (2)沿梁纵轴线加固、采用模腔式自锁锚具加固、在一定程度内提高 CFRP 布的初始张力均可有效提高预应力碳纤维布的加固效果和 CFRP 布的利用率。

- (3)预应力碳纤维布加固能够有效控制混凝土梁加载时的裂缝宽度。提高预应力水平能够有效延缓构件加载初期裂缝的发展;后期加载至相同荷载时,加固后的试验梁产生较多细小裂缝,斜向裂缝更多,间距较小,但超过 0.08 mm 的裂缝数量比未加固的试验梁少很多。
- (4)经预应力碳纤维布加固后的混凝土梁符合平截面假定。



## 参考文献

- [1] DEURING M. Post-strengthening of concrete structures with pre-tensioned advanced composites [J]. EMPA research report, 1993, 224:247-313.
- [2] GARDEN H N, HOLLOWAY L C. An experimental study of the failure modes of reinforced concrete beams strengthened with pre-stressed carbon composite plates [J]. Composites, part B, 1998, 29(4):411-424.
- [3] MOHEE F M, Al-MAYAH A. Effect of barrel, wedge material and thick ness on composite plate anchor performance through analytical, finite element, experimental and 3D prototype investigations [J]. Engineering structures, 2018, 175:138-154.
- [4] HE J, LIU Y, CHEN A, et al. Experimental investigation of movable hybrid GFRP and concrete bridge deck [J]. Construction and building materials, 2012, 26(1):49-64.
- [5] 吴金保. 多点锚固预应力 CFRP 加固混凝土梁疲劳性能模拟分析[D]. 重庆:重庆大学, 2014.  
(WU Jinbao. Simulation analysis of fatigue performance of concrete beams reinforced by prestressed CFRP with multi-point anchoring [D]. Chongqing:Chongqing University, 2014.)
- [6] 王文伟, 戴建国, 张磊. 后张预应力碳纤维布加固钢筋混凝土梁预应力损失试验及计算方法研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(11):89-94.  
(WANG Wenwei, DAI Jianguo, ZHANG Lei. Experimental study and analytical modeling of prestress losses of reinforced concrete beams strengthened with post-tensioned CFRP sheets [J]. Journal of civil engineering, 2012, 45(11):89-94.)
- [7] BENCARDINO F, SPADEA G, SWAMY R N. The problem of shear in RC beams strengthened with CFRP laminates [J]. Construction and building materials, 2007, 21:1997-2006.
- [8] 刘彦. 后张法锚具变形预应力损失的简化计算[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2012, 28(4):645-649.  
(LIU Yan. Pre-stress loss of post-tensioning pre-stressed concrete caused by anchorage device deformation [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2012, 28(4):645-649.)
- [9] TAFSIROJ J T, FAWZIA S, THAM B D. Investigation on the behaviour of CFRP strengthened CHS members under monotonic loading through finite element modelling [J]. Structures, 2020, 28:297-308.
- [10] 黄侨, 万世成, 关键, 等. 装配式预应力 CFRP 板锚具有限元分析与施工技术[J]. 中外公路, 2019, 39(2):98-102.  
(HUANG Qiao, WAN Shicheng, GUAN Jian, et al. Finite element analysis and construction technology of prefabricated prestressed CFRP plate anchor [J]. China and foreign highway, 2019, 39(2):98-102.)
- [11] MOHEE F M, Al-MAYAH A, PLUMTREE A. Development of a novel prestressing anchor for CFRP plates: experimental investigations [J]. Composite structures, 2017, 176:20-32.
- [12] 陈华, 周红梅, 王鹏凯, 等. 一种用于钢筋混凝土梁板的碳纤维钢筋加固装置及加固方法: CN108386002A[P]. 2018-08-10.  
(CHEN Hua, ZHOU Hongmei, WANG Pengkai, et al. A kind of carbon fiber reinforcement device and reinforcement method for reinforced concrete beam and slab: CN108386002A[P]. 2018-08-10.)
- [13] MOHEE F, Al-MAYAH A, MOHEE F, et al. Effect of modulus of elasticity and thick ness of the CFRP plate on the Performance of a novel anchor for structural retrofitting and rehabilitation applications [J]. Engineering structures, 2017, 186:22-36.
- [14] 蒋渭. 现役桥梁增大截面加固法研究[D]. 西安:长安大学, 2011.  
(JIANG Wei. Active bridge section consolidation method increases [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.)
- [15] 刘松平. 钢筋混凝土桥梁裂缝成因分析与加固措施研究[D]. 杭州:浙江大学, 2012.  
(LIU Songping. The research on analysis and reinforcement measures of crack of reinforce concrete bridges [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.)
- [16] CHENG X S, LI X S, KANG T F, et al. Seismic response of a box bridge after reinforcement with prestressed CFRP textile [J]. Australian journal of civil engineering, 2019(3):1-17.
- [17] 赵少伟, 吕冉, 郭蓉, 等. 高温后 CFRP-MOC-混凝土界面粘结特性研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2023, 39(4):642-650.  
(ZHAO Shaowei, Lü Ran, GUO Rong, et al. Research on bonding characteristics of CFRP-MOC-concrete interface after high temperature [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2023, 39(4):642-650.)
- [18] 邓朗妮, 燕柳斌, 陈华, 等. 预应力 CFRP 板夹片式锚具的研制与试验研究[J]. 建筑技术, 2009, 40(11):1043-1045.  
(DENG Langni, YAN Liubin, CHEN Hua, et al. Development and experimental investigation of wedge-type anchorage for prestressed CFRP plates [J]. Architecture technology, 2009, 40(11):1043-1045.)
- [19] 石亦平. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京:机械工业出版社, 2017.  
(SHI Yiping. Detailed analysis of ABAQUS finite element analysis [M]. Beijing: China Machine Press, 2017.)  
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)