

文章编号:1672-3961(2026)01-0114-08

DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2024.280

预应力碳纤维布加固 RC 梁设计理论及试验研究

秦宇¹,张泽军²,冉瑶¹,姜凯³,杨嘉城¹,钱远顺¹,管延华^{1*},孙仁娟¹

(1.山东大学齐鲁交通学院,山东 济南 250002; 2.山东高速集团有限公司创新研究院,山东 济南 250014; 3.山东高速菏泽发展有限公司,山东 菏泽 274046)

摘要:为完善预应力碳纤维布加固钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)梁的设计理论并拓展其工程应用,开展系统性理论分析与试验验证研究。基于 RC 梁延性破坏准则及平截面假定,明确不同加固层数下碳纤维布初始张拉应变控制边界;结合梁抗弯承载力提升需求,建立碳纤维布加固层数与初始张拉应变的量化计算方法;根据工程实践适配要求,构建预应力碳纤维布加固 RC 梁的完整设计流程,并通过四点弯曲试验评估加固效果。试验结果表明,加固后 RC 梁呈理想塑性破坏形态,承载能力满足设计要求,证明所提设计方法的科学性和实用性。

关键词:预应力碳纤维布;初始张拉应变;碳纤维布加固层数;加固设计;四点弯曲试验

中图分类号:U446.1

文献标志码:A

引用格式:秦宇,张泽军,冉瑶,等. 预应力碳纤维布加固 RC 梁设计理论及试验研究[J]. 山东大学学报(工学版),2026,56(1):114-121.

QIN Yu, ZHANG Zejun, RAN Yao, et al. Design theory and experimental study of strengthening reinforced concrete beams with prestressed carbon fiber cloth[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2026, 56(1):114-121.

Design theory and experimental study of strengthening reinforced concrete beams with prestressed carbon fiber cloth

QIN Yu¹, ZHANG Zejun², RAN Yao¹, JIANG Kai³, YANG Jiacheng¹, QIAN Yuanshun¹, GUAN Yanhua^{1*}, SUN Renjuan¹

(1. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, Shandong, China; 2. Shandong Expressway Group Co., Ltd., Innovation Research Institute, Jinan 250014, Shandong, China; 3. Shandong Expressway Heze Development Co., Ltd., Heze 274046, Shandong, China)

Abstract: To improve the design theory of reinforced concrete (RC) beams strengthened with prestressed carbon fiber sheets and expand their engineering applications, systematic theoretical analysis and experimental verification studies were conducted. Based on the ductile failure criterion and the plane section assumption of RC beams, the control boundaries of the initial tension strain of carbon fiber sheets under different strengthening layers were clarified. Combined with the requirement for improving the flexural bearing capacity of beams, a quantitative calculation method for the number of carbon fiber sheet strengthening layers and the initial tension strain was established. In accordance with the adaptation requirements of engineering practice, a complete design process for RC beams strengthened with prestressed carbon fiber sheets was constructed, and the strengthening effect was evaluated through four-point bending tests. The experimental results showed that the strengthened RC beams exhibited an ideal plastic failure mode, and their bearing capacity meets the design requirements, which proved the scientificity and practicability of the proposed design method.

Keywords: prestressed carbon fiber cloth; initial tensile strain; number of carbon fiber cloth reinforcement layers; strengthening design; four-point bending test

收稿日期:2024-10-28

基金项目:山东省自然科学基金面上资助项目(ZR2021ME215)

第一作者简介:秦宇(1999—),男,重庆璧山人,硕士研究生,主要研究方向为桥梁结构加固。E-mail:202235460@mail.sdu.edu.cn

* 通信作者简介:管延华(1969—),男,山东青岛人,副教授,硕士生导师,博士,主要研究方向为桥梁结构设计与应用。

E-mail:guanyanhua@sdu.edu.cn

0 引言

碳纤维复合材料 (carbon fiber reinforced polymer, CFRP) 因质量轻、强度高、延性好、费用低等优点,近年来广泛应用于混凝土结构加固^[1-2]。国内外对碳纤维布/板与预应力碳纤维板加固混凝土结构技术做了较为广泛研究^[3-6]。研究表明,预应力碳纤维布加固技术能充分发挥碳纤维布高强度特性,增加构件刚度,限制混凝土裂缝发展,提高构件使用性能^[7-10]。

目前,诸多学者研究了碳纤维布用量和初始张拉应变对加固梁性能的影响^[11-14]。文献[15]对预应力碳纤维布加固钢筋混凝土 T 形梁进行试验研究,发现增加碳纤维布用量和初始张拉应变可有效减小混凝土梁裂缝宽度;文献[16]研究初始张拉应变对构件受弯性能影响,发现随着初始张拉应变值增加,被加固构件屈服荷载增大,挠度减小;文献[17]对碳纤维布初始张拉应变控制范围进行理论分析,提出最佳初始张拉应变应为碳纤维布极限拉应变的 60% 左右。但目前研究尚未提出完整有效的预应力碳纤维布加固混凝土结构设计方法和流程。

综上,目前预应力碳纤维布加固混凝土结构研究多处于试验和理论研究阶段,设计也多凭经验。基于此,本文提出粘贴预应力碳纤维布加固钢筋混凝土 (reinforced concrete, RC) 梁设计理论和流程,并通过试验验证,为该加固方法提供理论和实践依据。

1 预应力碳纤维布加固 RC 梁设计理论

预应力碳纤维布加固 RC 梁应避免脆性破坏^[18],根据加固梁界限破坏模式和变形平截面假定,分析预应力碳纤维布初始张拉应变界限范围,结合承载力需求,提出满足适筋破坏模式的碳纤维布加固用量及初始张拉应变。

1.1 基于破坏形态的碳纤维布张拉应变分析

试验研究表明,RC 梁抗弯破坏表现为超筋、适筋及少筋破坏 3 种形态^[19]。加固梁通常不会发生少筋破坏,但应避免超筋脆性破坏。为使预应力碳纤维布加固 RC 梁发生适筋破坏,需明确两种界限破坏模式:界限破坏 1 为超筋与适筋间的界限模式,界限破坏 2 为适筋与少筋间的界限模式,如图 1

所示。

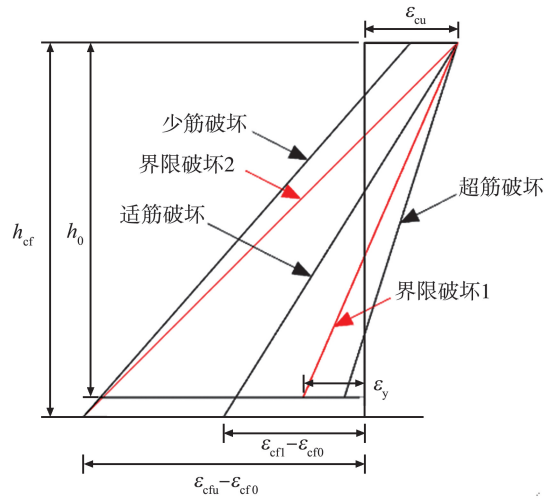


图 1 预应力碳纤维布加固 RC 梁破坏形态分布图
Fig.1 Failure model distribution of prestressed carbon fiber cloth reinforced RC beam

预应力碳纤维布抗弯加固梁的适筋破坏表现为:受拉钢筋屈服、碳纤维布未拉断、受压区混凝土被压碎。此时碳纤维布应变 ϵ_{cf1} 应小于其极限拉应变 ϵ_{cfu} , 钢筋应变 ϵ_s 应大于屈服应变 ϵ_y 且小于极限拉应变 ϵ_{su} , 即

$$\frac{(\epsilon_{cu} + \epsilon_y) h}{h_0} - \epsilon_{cu} < \epsilon_{cf1} - \epsilon_{cf0} < \frac{(\epsilon_{cu} + \epsilon_{su}) h}{h_0} - \epsilon_{cu}, \quad (1)$$

式中: ϵ_{cu} 为正截面的混凝土极限压应变,按文献[20]规定取值; ϵ_y 为受拉钢筋的屈服应变,通过钢筋屈服强度与弹性模量计算而得; h 为截面高度; h_0 为截面有效高度; ϵ_{cf1} 为碳纤维布应变; ϵ_{cf0} 为碳纤维布初始张拉应变; ϵ_{su} 为受拉钢筋的极限拉应变,按文献[20]规定取值为 0.01。

基于预应力碳纤维布加固 RC 梁适筋破坏时的力平衡和截面应变协调条件,如图 2 所示,结合式(1)可计算碳纤维布初始拉应变的边界范围,即

$$\epsilon_{cu} + \frac{\alpha_1 f_c b \beta_1 \epsilon_{cu} h_0}{E_{cf} n b_{cf} h_{cf}} - f_y A_s \frac{(\epsilon_{cu} + \epsilon_{su}) h}{h_0} < \epsilon_{cf0} < \epsilon_{cu} + \frac{\alpha_1 f_c b \beta_1 \epsilon_{cu} h_0}{E_{cf} n b_{cf} h_{cf}} - f_y A_s \frac{(\epsilon_{cu} + \epsilon_y) h}{h_0}, \quad (2)$$

式中: α_1, β_1 为系数,按文献[20]规定取值; f_c 为混凝土轴心抗压强度值; b 为截面宽度; f_y 为普通钢筋抗拉强度; A_s 为受拉区纵向普通钢筋的截面面积; E_{cf} 为碳纤维布的弹性模量; n 为碳纤维布层数; b_{cf} 为碳纤维布宽度; h_{cf} 为碳纤维布厚度。

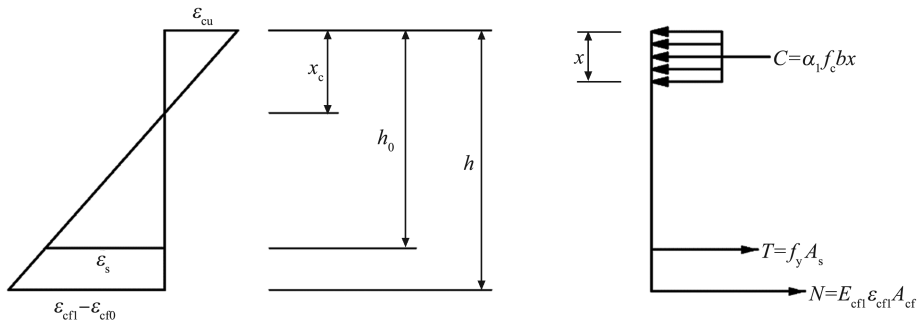


图 2 加固梁正截面应变及受力关系图

Fig.2 Strain and stress relationship of the normal section of reinforced beams

加固 RC 梁时,碳纤维布应变不得超允许值

$[\varepsilon_{cf}]^{[21]}$, 且其初始张拉应变需大于 0, 即

$$0 < \varepsilon_{cf0} < \varepsilon_{cu} + [\varepsilon_{cf}] - \frac{\alpha_1 f_{cb} \beta_1 \varepsilon_{cu} h}{f_y A_s + E_{cf} [\varepsilon_{cf}] n b_{cf} h_{cf}}, \quad (3)$$

式中, $[\varepsilon_{cf}]$ 为碳纤维布允许应变, 按文献 [21] 规定进行取值。

结合式 (2) 和 (3), 可确定不同加固层数下碳纤维布的初始张拉应变范围。

1.2 碳纤维布初始张拉应变及层数确定

基于图 2 所示的加固梁截面应力-应变关系图, 可建立预应力 CFRP 加固梁截面的力矩平衡方程、力平衡方程及应变协调关系, 分别如式 (4)、(5)、(6) 所示。

$$M_s = f_y A_s \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + E_{cf} \varepsilon_{cf1} n b_{cf} h_{cf} \left(h - \frac{x}{2} \right), \quad (4)$$

$$\alpha_1 f_c b x = f_y A_s + E_{cf} \varepsilon_{cf1} n b_{cf} h_{cf}, \quad (5)$$

$$\frac{x}{h} = \frac{\beta_1 \varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{cf1} - \varepsilon_{cf0}}, \quad (6)$$

式中, M_s 为加固钢筋混凝土梁的设计弯曲承载力, x 为受压区高度, n 为碳纤维布加固层数。

联立求解式 (4)、(5)、(6), 可计算出不同加固层数下碳纤维布所需的最小初始张拉应变, 在此应变下, 加固梁能达到其设计抗弯承载力 M_s 。碳纤维布最小初始张拉应变需满足式 (2)、(3) 的限值范围, 据此可确定设计抗弯承载力为 M_s 时的碳纤维布加固层数及初始受拉应变。

2 预应力碳纤维布加固 RC 梁设计流程

为避免超筋破坏, 加固后 RC 梁的设计抗弯承载力 M_s 需小于该梁的最大抗弯承载力 $M_{k \max}^{[22]}$, 此评估过程如图 3 所示。

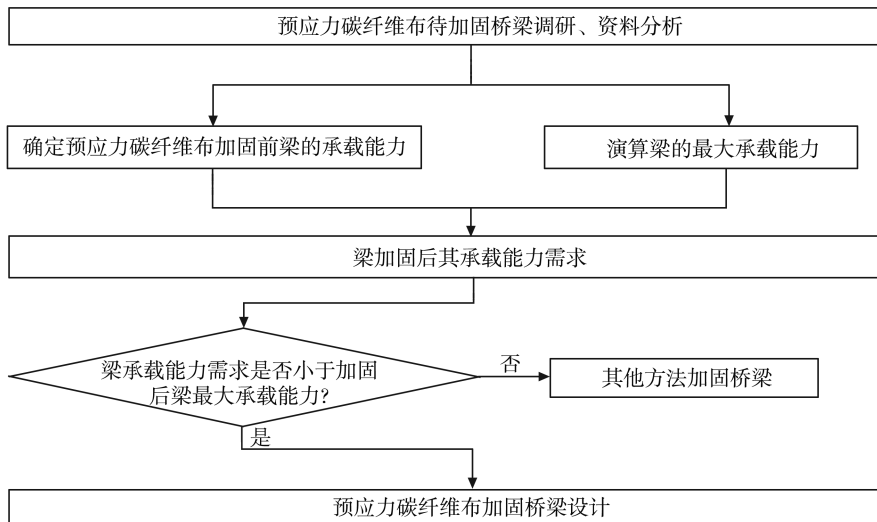


图 3 预应力碳纤维布加固判别流程

Fig.3 Judging process of prestressed carbon fiber cloth

根据预应力碳纤维布加固判别流程, 判断 RC 梁可采用预应力碳纤维布加固后, 按上述预应力碳

纤维布加固 RC 梁设计理论进行加固设计, 如图 4 所示。

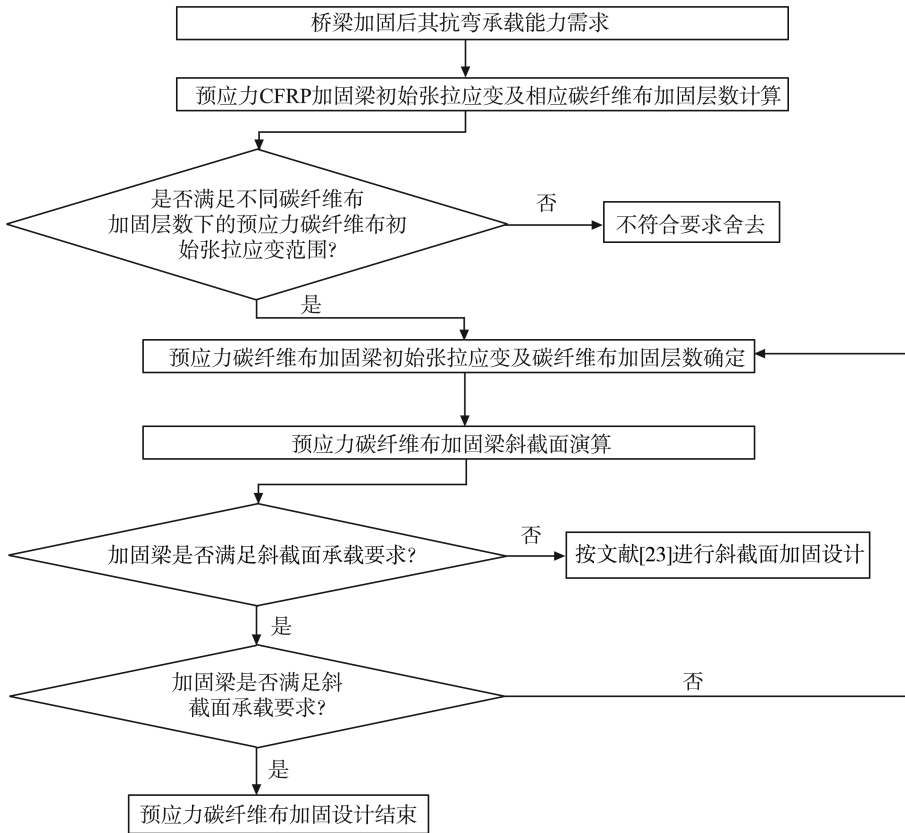


图 4 预应力碳纤维布加固设计流程

Fig.4 The reinforcement design process of prestressed carbon fiber cloth

3 预应力碳纤维布加固 RC 梁试验研究

预制 2 根 RC 试验梁(1 根未加固作参照,1 根用预应力碳纤维布加固),进行四点弯曲试验,测定抗弯承载力、观察破坏形式,以验证加固设计方法准确性。试验梁用 C30 混凝土,受拉钢筋和架立筋为 HRB400 级,直径 12 mm 和 10 mm;箍筋为 HPB300 级,直径 8 mm,净间距 100 mm;保护层厚度 40 mm,尺寸及配筋如图 5 所示。

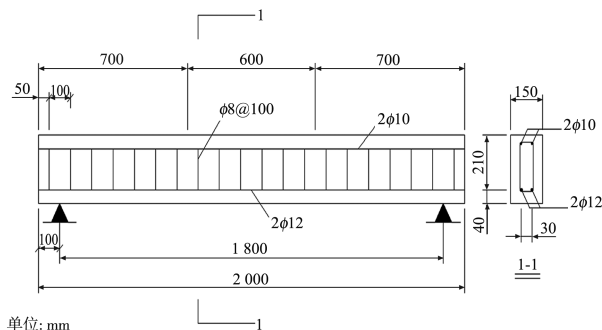


图 5 RC 试验梁

Fig.5 Simply supported test RC beams

浇筑时同步制作 150 mm 标准混凝土立方体试

件,与试验梁同条件养护 28d。选 3 个平整、无缺陷试件测抗压强度,平均 30.33 MPa。钢筋加工时,从受拉钢筋中预留 600 mm 试样测力学性能,结果见表 1。用 UT70-30 型 CFRP 片材加固梁体,单层厚 0.167 mm,弹性模量 240 GPa,极限拉应变 1.9%。待试验梁混凝土达 28 d 龄期后,按设计理论与工艺流程实施抗弯加固。

表 1 HRB400 钢筋力学性能测试结果

Table 1 Tensile performance test results of reinforcement

屈服强度/ MPa	极限抗拉 强度/MPa	极限拉 应变/%	弹性模量/ MPa
429.88	594.08	1.00	308 000

3.1 加固设计计算

按预应力碳纤维布加固后参照梁承载力提高 30% 进行加固设计。参照梁跨中正截面抗弯承载力和单筋截面最大抗弯承载力分别为 25.20、47.94 kN·m,加固梁设计抗弯承载力为 32.76 kN·m。根据预应力碳纤维布加固判别要求,试验梁可采用预应力碳纤维布加固提高其抗弯承载力。

根据加固 RC 梁设计抗弯承载力 M_s , 联立式 (4)、(5)、(6) 可计算不同加固层数碳纤维布所需的最小初始张拉应变 ϵ_{c0} , 结合式 (2) 和式 (3) 可求得不同加固层数碳纤维布对应的初始张拉应变范

围,结果如表2所示。

表2 不同加固层数的碳纤维布初始张拉应变与初始张拉应变范围

Table 2 Initial tensile strain and initial tensile strain range of carbon fiber cloth with different reinforcement layers

碳纤维布层数	ϵ_{cf0}	初始张拉应变范围
1	0.011 6	$0 \leq \epsilon_{cf0} < 0.001 1$
2	0.002 0	$0 \leq \epsilon_{cf0} < 0.002 5$
3	-0.001 2	$0 \leq \epsilon_{cf0} < 0.003 6$
4	-0.002 8	$0 \leq \epsilon_{cf0} < 0.004 5$

注:碳纤维布的设计宽度为50 mm;根据文献[18]规定,碳纤维布加固层数不宜超过4层,表中仅计算张拉1~4层碳纤维布对应的初始张拉应变;碳纤维布允许应变按文献[21]规定取值为0.01。

由表2可知,当碳纤维布层数为2,初始张拉应变 ϵ_{cf0} 为0.002时,初始张拉应变满足初始应变范围

的要求,此时预制RC梁加固后承载力达到设计抗弯承载力 M_s ,因此采用2层碳纤维加固RC梁进行试验验证。

3.2 加固梁试验

采用碳纤维布专用张拉设备对碳纤维布进行张拉,加固预制RC梁,如图6所示,张拉粘贴2层碳纤维布,每层碳纤维布初始张拉应变为0.002,初始张拉预应力为4 kN。

为防止碳纤维布预应力损失,采用自主研发的自锁锚固装置锚固碳纤维布,如图7所示。张拉时碳纤维布将自动锁紧,达到初始张拉预应力要求后采用预紧螺栓进行锚固,预紧力设置为15 kN^[24]。RC梁加固完成后常温养护7天进行四点弯曲试验。



图6 碳纤维布专用张拉设备工作图

Fig.6 Working diagram of the special tension device for carbon fiber cloth

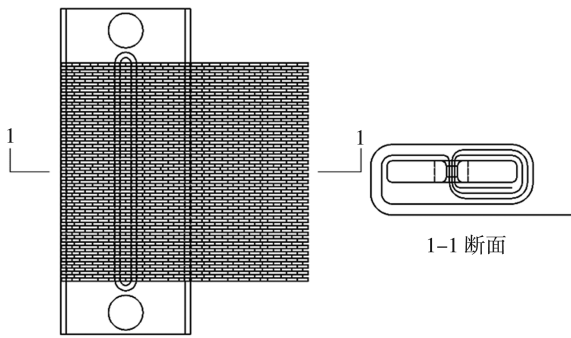
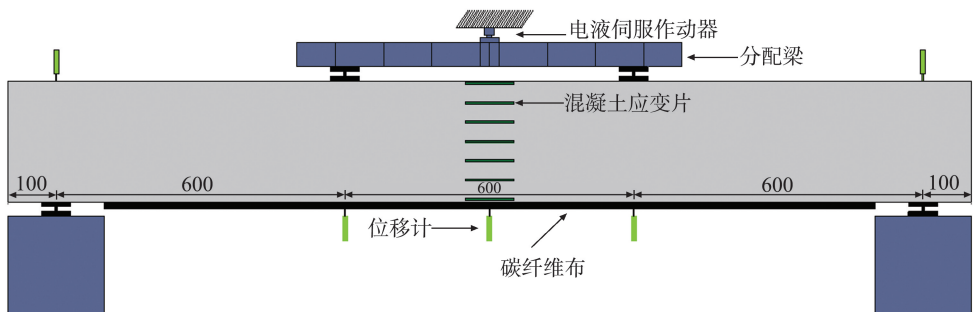


图7 碳纤维布缠绕连接示意图

Fig.6 Schematic diagram of winding and connecting carbon fiber cloth

首先进行预加载,消除各部分间的缝隙并测定设备的工作性能,正式加载时采用荷载和位移控制方法,先按照受力情况进行分级加载,梁底开裂前每级2 kN,梁底开裂后每级5 kN,每级荷载保持5 min,当荷载达到50 kN后改用位移控制方法,以1 mm/min的速率缓慢加载,当试验梁顶部混凝土被压溃时认为试验梁破坏,停止加载。加载试验装置如图8所示。



单位: mm

图8 加载试验装置

Fig.8 Loading test device

3.3 试验结果分析

试验加载过程中加固梁跨中截面沿梁高的应变变化规律如图 9 所示。

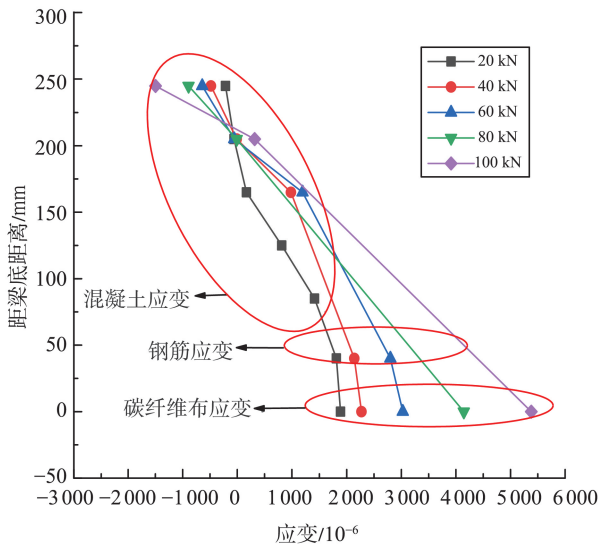


图 9 加固梁跨中截面应变分布

Fig.9 Strain distribution of the mid-span section of the reinforced beam

由图 9 可以看出,加固梁跨中截面混凝土、受拉纵筋和碳纤维布的应变基本符合平截面假定。同

时,碳纤维布与 RC 梁粘接良好,两者协调变形,未出现相对滑移。荷载作用下加固梁达到极限荷载时碳纤维布的应变为 0.005 4,考虑碳纤维布初始张拉应变,其产生的总应变为 0.007 4,小于允许张拉应变 0.01,满足设计要求。

参照梁与加固梁的试验荷载-挠度曲线如图 10 所示。试验结果见表 3。

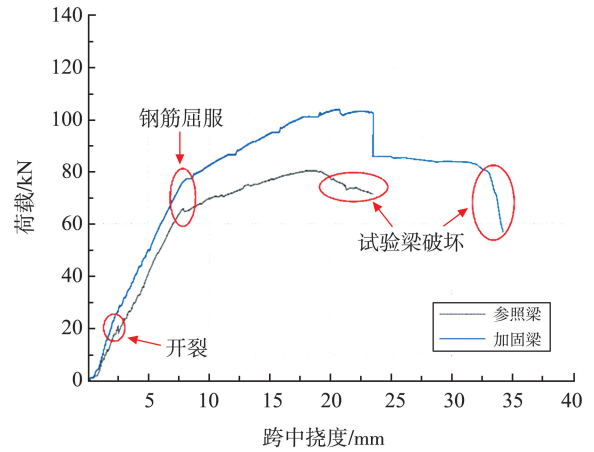


图 10 参照梁和加固梁荷载-挠度曲线

Fig.10 Load-deflection curves of the reference beam and the reinforced beam

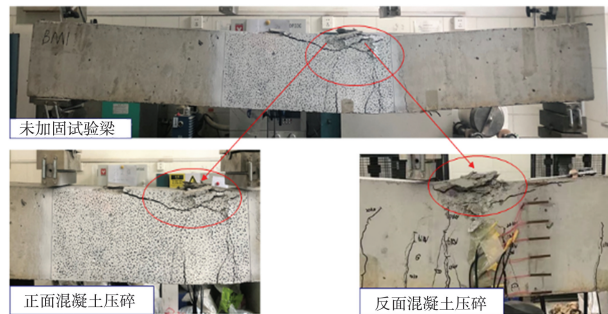
表 3 参照梁与加固梁试验结果

Table 3 Test results of the reference beam and the reinforced beam

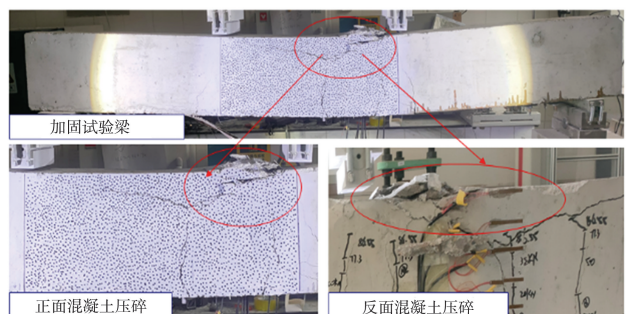
试验梁类型	开裂荷载/ kN	屈服荷载/ kN	极限荷载/ kN	跨中正截面承载力 计算值/(kN·m)	跨中正截面承载力 实际值/(kN·m)	破坏形式
参照梁	20	65.96	80.60	25.20	24.18	适筋破坏
加固梁	21	77.04	104.03	32.76	31.21	适筋破坏

由图 10 可知,试验梁在加载过程中历经四个阶段^[25]:第一阶段为弹性工作阶段。从开始加载直至混凝土受拉区开裂;第二阶段为带裂缝工作阶段。从混凝土受拉区开裂直至受拉钢筋屈服,此阶段荷载-挠度曲线斜率略低于混凝土开裂前,试验梁刚度有所减小;第三阶段为屈服阶段。从

受拉钢筋屈服直至荷载呈明显下降趋势,受拉钢筋屈服后,试验梁刚度迅速下降,荷载缓慢增大,挠度急剧增加;第四阶段为破坏阶段,从荷载下降直至试验梁混凝土受压区被压碎,如图 11 所示。加载时试验梁呈明显塑性破坏,破坏形态属典型适筋破坏。



(a) 参照梁



(b) 加固梁

图 11 参照梁和加固梁破坏

Fig.11 Failures of the reference beam and the reinforced beam

试验参照梁跨中正截面承载力为 $25.2 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 按承载力提高 30% 要求, 加固梁跨中正截面设计抗弯承载力为 $32.76 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。实际测试中, 加固梁跨中正截面承载力达 $31.21 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 较参照梁跨中正截面承载力实际值 $24.18 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 提高 29.1%, 试验结果与设计值相近, 验证了设计理论准确性。

4 结论

对预应力碳纤维布加固 RC 梁进行设计理论分析与试验研究, 得出以下设计计算方法及结论。

(1) 基于 RC 梁适筋破坏要求, 明确初始预应力应变控制范围; 结合设计抗弯承载力需求, 建立碳纤维布用量与初始张拉应变的计算方法。

(2) 预应力碳纤维布加固可显著提升 RC 梁的开裂荷载、屈服荷载及极限荷载, 极限荷载提升约 29%; 加固后试验梁呈理想适筋破坏形态, 实测抗弯承载力为 $31.21 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 与设计值 $32.76 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 相近, 验证所提设计理论科学可靠。

参考文献:

- [1] 王文炜, 李果. 纤维增强塑料(FRP)在混凝土结构中的研究与应用[J]. 混凝土, 2001(10): 37-39.
WANG Wenwei, LI Guo. Research and application of FRP for RC structures[J]. Concrete, 2001(10): 37-39.
- [2] 刘赛, 朱德举, 李安令. 织物增强混凝土的研究与应用进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(5): 134-146.
LIU Sai, ZHU Deju, LI Anling. Research and application progress of textile reinforced concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(5): 134-146.
- [3] SMITH S T, TENG J G. FRP-strengthened RC beams. I: review of debonding strength models [J]. Engineering Structures, 2002, 24(4): 385-395.
- [4] MUGAHED AMRAN Y H, ALYUSEF R, RASHID R S M, et al. Properties and applications of FRP in strengthening RC structures: a review [J]. Structures, 2018, 16: 208-238.
- [5] 卢亦焱, 黄银桑, 张号军, 等. FRP 加固技术研究新进展[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(3): 34-42.
LU Yiyang, HUANG Yinshan, ZHANG Haojun, et al. New progress in the study of the technology of reinforcement with fiber reinforced plastics [J]. China Railway Science, 2006, 27(3): 34-42.
- [6] 王文炜, 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): 88-94.
WANG Wenwei, DAI Jianguo, ZHANG Lei. Experimental study on prestress loss of reinforced concrete beams strengthened with post-tensioned prestressed carbon fiber sheets and its calculation method [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(11): 88-94.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] LU Z, BOOTHBY T E, BAKIS C E, et al. Transfer and development lengths of FRP prestressing tendons [J]. PCI Journal, 2000, 45(2): 84-95.
- [10] 张国伟, 宋佳晔, 薛红京, 等. 预应力碳纤维织物增强混凝土板加固 RC 梁抗弯性能研究[J]. 工程力学, 2025, 42(10): 90-99.
ZHANG Guowei, SONG Jiaye, XUE Hongjing, et al. Study on flexural performance of reinforced rc beams strengthened with prestressed carbon textile reinforced concrete plates [J]. Engineering Mechanics, 2025, 42(10): 90-99.
- [11] 赵彤, 谢剑, 戴自强. 碳纤维布加固钢筋混凝土梁的受弯承载力试验研究[J]. 建筑结构, 2000, 30(7): 11-15.
ZHAO Tong, XIE Jian, DAI Ziqiang. Experimental study on flexural strength of RC beams strengthened with continuous carbon fiber sheet [J]. Building Structure, 2000, 30(7): 11-15.
- [12] 陈爱玖, 韩小燕, 杨粉, 等. 预应力碳纤维布加固钢筋混凝土梁受弯承载力研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(11): 104-112.
CHEN Aijiu, HAN Xiaoyan, YANG Fen, et al. Study on flexural capacity of reinforced recycled concrete beams strengthened with prestressed CFRP sheets [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(11):

- 104-112.
- [13] GARDEN H N, HOLLAWAY L C. An experimental study of the failure modes of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon composite plates [J]. *Composites Part B: Engineering*, 1998, 29(4): 411-424.
- [14] 宁宝宽, 胡海涛, 徐永泽, 等. 预应力碳纤维布加固钢筋混凝土梁力学性能试验[J]. *建筑结构*, 2020, 50(6): 90-94.
- NING Baokuan, HU Haitao, XU Yongze, et al. Experimental study on mechanical behavior of reinforced concrete beam strengthened with prestressed CFRP sheets [J]. *Building Structure*, 2020, 50(6): 90-94.
- [15] 叶列平, 庄江波, 曾攀, 等. 预应力碳纤维布加固钢筋混凝土 T 形梁的试验研究[J]. *工业建筑*, 2005, 35(8): 7-12.
- YE Lieping, ZHUANG Jiangbo, ZENG Pan, et al. Experimental study on reinforced concrete T-beams strengthened with prestressed cfrp sheets [J]. *Industrial Construction*, 2005, 35(8): 7-12.
- [16] 童谷生, 李志虎, 朱成九, 等. 预应力碳纤维布材加固混凝土梁的受弯性能研究[J]. *华东交通大学学报*, 2005, 22(2): 1-5.
- TONG Gusheng, LI Zhihu, ZHU Chengjiu, et al. The experimental study of strengthening reinforced concrete beam using prestressed carbon fiber sheet [J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2005, 22(2): 1-5.
- [17] 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.
- ZHUANG Yun. Determination of the best prestressed level to reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon fiber reinforced polymer [J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 2008, 30(4): 15-19.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构加固设计规范: GB 50367—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [19] 尚守平, 彭晖, 童桦, 等. 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, et al. Study of strengthening reinforced concrete beam using prestressed carbon fiber sheet [J]. *Journal of Building Structures*, 2003, 24(5): 24-30.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计标准: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024.
- [21] 中国工程建设标准化协会. 碳纤维片材加固混凝土结构技术规程(2007年版): CECS 146—2003[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007.
- [22] 叶见曙. 结构设计原理[M]. 4版. 北京: 人民交通出版社, 2018: 68-69.
- [23] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁加固设计规范: JTG/T J22—2008[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [24] 管延华, 苗海涛, 宋修广. FRP-螺栓联合加固技术锚固参数的研究 [J]. *山东大学学报(工学版)*, 2010, 40(3): 128-132.
- GUAN Yanhua, MIAO Haitao, SONG Xiuguang. Study of the anchoring parameter for the hybrid bonding of FRP [J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2010, 40(3): 128-132.
- [25] 刘长源. 预应力 BFRP 板外贴加固 RC 梁抗弯性能研究 [D]. 南京: 东南大学, 2020.
- LIU Changyuan. Study on the Bending Performance of Steel Reinforced concrete beams strengthened by Prestressed and Externally Bonded BFRP Plates [D]. Nanjing: Southeast University, 2020.

(编辑:管昕昉)

(上接第 113 页)

- [19] FRETTLÖHR B, REINECK K H, REINHARDT H W. Size and shape effect of UHPFRC prisms tested under axial tension and bending [M]//*High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2012: 365-372.
- [20] TIAN X, FANG Z, ZHOU T, et al. Behavior and constitutive model of ultra-high-performance concrete under monotonic and cyclic tensile loading [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 389: 131634.

(编辑:管昕昉)