

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.141



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 纤维编织网复合嵌入式预应力碳纤维筋 加固 RC 梁的抗弯性能

罗资清<sup>1</sup>, 骆俊晖<sup>1</sup>, 宁杰钧<sup>1</sup>, 尹世平<sup>2a,2b</sup>, 刘子瑞<sup>2a</sup>

(1. 广西北投交通养护科技集团有限公司, 南宁 530201; 2. 中国矿业大学 a. 江苏省土木工程灾变与智能防控高校重点实验室; b. 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 江苏 徐州 221116)

**摘要:**为研究纤维编织网增强水泥基材料(textile reinforced concrete, TRC)复合嵌入式预应力碳纤维增强聚合物筋(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)加固钢筋混凝土梁(reinforced concrete, RC)的受弯性能,对1根普通钢筋混凝土梁和5根 TRC 复合嵌入式预应力 CFRP 筋加固梁进行四点弯曲加载,分析开槽尺寸和 CFRP 筋直径对复合加固梁承载力、破坏形态和裂缝分布等受弯性能的影响。结果表明:复合加固梁各阶段荷载均较未加固梁提升明显;加固梁极限荷载随开槽尺寸的增加提升较小,随 CFRP 筋直径的增加提升较大;复合加固梁抗弯刚度明显高于未加固梁;开槽尺寸和 CFRP 筋直径的增加与梁刚度的增加不成正比;复合加固梁裂缝呈细而密的分布特点,裂缝数量明显多于普通钢筋混凝土梁,并随开槽尺寸的增加有所增多,但受 CFRP 筋直径影响较小;未加固梁的延性明显高于加固梁,随着 CFRP 筋直径的增大,复合加固梁延性下降,开槽尺寸的增大对梁延性的提升效果不明显;基于单一加固钢筋混凝土梁的开裂荷载计算模型提出复合加固梁的开裂荷载计算公式,计算值与试验值误差在 6.5% 以内,表明该开裂荷载计算公式的适用性较好。

**关键词:**钢筋混凝土梁;抗弯性能;纤维编织网增强混凝土;碳纤维增强聚合物筋;复合加固

**中图分类号:** TU375.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)01-0164-10

## Flexural performance of RC beams reinforced with textile reinforced concrete composite embedded prestressed CFRP bars

LUO Ziqing<sup>1</sup>, LUO Junhui<sup>1</sup>, NING Jiejun<sup>1</sup>, YIN Shiping<sup>2a,2b</sup>, LIU Zirui<sup>2a</sup>

(1. Guangxi Beitou Transportation Maintenance Technology Group Co., Ltd., Nanning 530201, P. R. China; 2a. Jiangsu Key Laboratory of Disaster Impact and Intelligent Prevention in Civil Engineering; 2b. State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, P. R. China)

**Abstract:** The present study investigates the flexural performance of reinforced concrete beams reinforced with

**收稿日期:** 2023-09-03

**基金项目:** 2021 年度广西交通运输行业重点科技项目;广西科技基地和人才专项(桂科 AD23026026)

**作者简介:** 罗资清(1982-),男,高级工程师,主要从事公路工程养护研究, E-mail: luozq@bgigc.com。

尹世平(通信作者),男,教授,博士生导师, E-mail: ysp2010@cumt.edu.cn。

**Received:** 2023-09-03

**Foundation items:** 2021 Guangxi Transportation Industry Key Science and Technology Project; Guangxi Science and Technology Base and Talent Project (Guike AD23026026)

**Author brief:** LUO Ziqing (1982-), senior engineer, main research interest: highway engineering maintenance, E-mail: luozq@bgigc.com.

YIN Shiping (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: ysp2010@cumt.edu.cn.

TRC composite embedded prestressed CFRP bars. To this end, a four-point flexural load test was carried out on one ordinary reinforced concrete beam and five beams reinforced with TRC composite embedded prestressed CFRP bars. The effects of slot size and diameter of CFRP bars on the flexural performance of the composite reinforced beams, including bearing capacity, failure mode and crack distribution, were analyzed. The test results show that the load increase of the composite reinforced beam is more obvious in each stage than that of the unreinforced beam. The ultimate load of the reinforced beam increases slightly with an increase of slot size and greatly with the increase of CFRP bar diameter. The flexural stiffness of the composite reinforced beam is obviously higher than that of the unreinforced beam. The increase of slot size and diameter of CFRP bars is not proportional to the increase of beam stiffness. The number of cracks in composite reinforced beams is obviously more than that of ordinary reinforced concrete beams, and the cracks show a fine and dense distribution characteristic, and it increases with the increase of slot size, but the diameter of CFRP bars has little effect. The ductility of the unreinforced beam is obviously higher than that of the reinforced beam on it. The ductility of the composite reinforced beam decreases with the increase of the diameter of the CFRP bar, and the increase of the slot size has no obvious effect on the ductility of the beam. Based on the calculation model of the cracking load of a single reinforced concrete beam proposed in the literature, a formula for calculating the cracking load of a composite reinforced concrete beam is proposed. The discrepancy between the calculated value and the test value is less than 6.5%, which indicates that the formula has adequate applicability.

**Keywords:** reinforced concrete beam; flexural performance; textile reinforced concrete; CFRP bar; composite reinforcement

纤维编织网增强水泥基材料(textile reinforced concrete, TRC)具有良好的力学性能以及抗碳化、抗渗性和抗冻融性<sup>[1-5]</sup>,将其与纤维(Fiber reinforced polymer, FRP)筋相结合,充分利用其轻质高强、耐腐蚀性能<sup>[6]</sup>,不仅能解决现役钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)梁桥裂缝与变形较大以及承载力不足的问题,更重要的是能综合提升现役 RC 梁桥的耐久性能,延长其服役寿命,充分契合了交通运输部对公路桥梁的安全耐久性要求。TRC 加固后的 RC 梁裂缝发展得到较好改善,承载力提升明显,在一定范围内,随着 TRC 层数的增加,加固梁的抗弯性能改善程度进一步提高,但当 TRC 达到一定层数后,TRC 层与原混凝土之间会发生脱粘<sup>[7]</sup>。预应力 TRC 加固 RC 梁的破坏形式均为纤维拉断破坏,能改善试验梁的力学性能,提高纤维编织网强度的利用效率<sup>[8]</sup>,对于持载混凝土梁,预应力碳纤维增强混凝土(carbon textile reinforced concrete, CTRC)板能明显提高加固梁正常使用的极限状态荷载和极限承载力,但加固梁的延性降低<sup>[9]</sup>。Yin 等<sup>[10]</sup>对 TRC 加固梁的抗氯盐侵蚀性能进行研究发现,较高浓度的氯离子会加速加固梁裂缝的发展和挠度的变化,从而降低梁的承载力。徐世焯等<sup>[11-14]</sup>研究了 TRC 加固 RC 梁的受弯性能,对纤维编织网联合钢筋增强混凝土受弯构件的计算理论进行了研究。

有研究发现,嵌入式(near-surface mounted, NSM)FRP 筋材对梁极限荷载提升较多,加固后的

梁具有较高的延性,由于加固梁裂缝的开展受 FRP 筋限制,裂缝的间距、宽度、高度减小,数量增多<sup>[15]</sup>,但存在一定响应滞后,而当用预应力(40%和 60%)NSM-CFRP 加强 RC 梁时,响应得到了显著改善<sup>[16]</sup>。锚固措施能改变加固梁的破坏模式、提高承载力<sup>[17]</sup>。与非预应力梁相比,施加 40% 预应力的梁表现出更高的开裂荷载和屈服荷载<sup>[18]</sup>。Jahani 等<sup>[19]</sup>研究发现,温度对试件刚度的影响不显著。嵌入式预应力 FRP 筋加固后的梁疲劳响应较加固前明显改善<sup>[20]</sup>。

综上所述,TRC 加固和嵌入式 FRP 加固对梁承载力都有不同程度的提升,但嵌入式加固受梁底尺寸和保护层厚度等条件影响,加固量受到限制<sup>[21]</sup>;此外,FRP 筋较低的弹性模量使得其对裂缝的控制力不足,长期作用下梁跨中挠度偏大<sup>[22]</sup>,TRC 优秀的裂缝控制能力<sup>[23]</sup>可以较好地弥补这一缺陷;且 TRC 加固对梁的耐久性有较大提升<sup>[24]</sup>,而嵌入式 FRP 加固对梁抗疲劳性有较好的改善,因此,复合加固还可以充分发挥不同材料间的优势,在提升梁耐久性的同时改善梁的抗疲劳性能。目前对复合加固桥墩已有部分研究<sup>[25]</sup>,但关于复合加固对梁抗弯性能的影响还鲜有研究成果。制作 6 个试件,以探究不同开槽尺寸和 CFRP 筋直径对梁抗弯力学性能的影响,并基于文献中单一加固梁的开裂荷载计算公式,综合考虑复合加固中多种材料对截面应力的影响,提出 TRC 复合预应力 CFRP 筋加固钢筋混凝土梁开裂荷载的计算模型,将试验值与计算值进行比

较,验证计算模型的适用性,为开展 TRC 复合嵌入式 CFRP 筋加固钢筋混凝土的梁研究提供基础。

## 1 试验

### 1.1 试验材料

试验使用的材料有纤维编织网、钢筋、混凝土、CFRP 筋、结构胶、细粒混凝土等。RC 梁所用混凝土强度等级为 C40,边长 150 mm 的混凝土立方体试块标准条件下养护 28 d 后测得的平均强度为 46.34 MPa。下部受拉筋采用直径为 10 mm 的 HRB400 钢筋。根据《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021),实测其屈服强度为 546 MPa,极限抗拉强度为 639 MPa。

纤维编织网的网格间距为 10 mm,如图 1 所示,厂家提供的碳纤维束力学性能见表 1。细粒混凝土的配合比参考文献[26],如表 2 所示。28 d 标准养护后细粒混凝土试块的实测强度为 52.7 MPa。CFRP 筋由海宁安捷复合材料公司生产,如图 2 所示,其材料力学性能如表 3 所示。结构胶由瑞弗斯公司生产,其力学性能如表 4 所示。

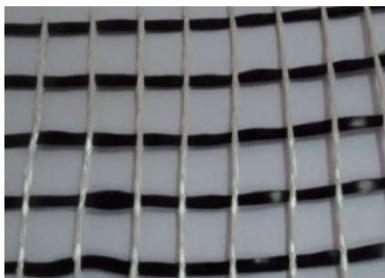


图 1 纤维编织网示意图

Fig. 1 Schematic diagram of textile mesh

表 1 纤维编织网参数

Table 1 Parameters of textile mesh

| 纤维类型    | 每束纤维根数 | 单丝纤维断裂伸长率/% | 单丝纤维弹性模量/GPa | 单丝纤维抗拉强度/MPa |
|---------|--------|-------------|--------------|--------------|
| T700S   | 12 000 | 2.0         | 231          | 4 660        |
| E-glass | 4 000  | 4.5         | 65           | 3 200        |

注:网格有效截面积为 0.45 mm<sup>2</sup>。

表 2 细粒混凝土的配合比

Table 2 Mix ratio of fine-grained concrete

| 水泥  | 细砂  | 粗砂  | 硅灰 | 粉煤灰 | 减水剂 | 水   |
|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|
| 475 | 460 | 920 | 35 | 168 | 9.1 | 262 |

表 3 CFRP 筋材料性能

Table 3 Material properties of CFRP bars

| 拉伸强度/MPa | 拉伸模量/GPa | 伸长量/% |
|----------|----------|-------|
| 2 015.9  | 121      | 1.7   |

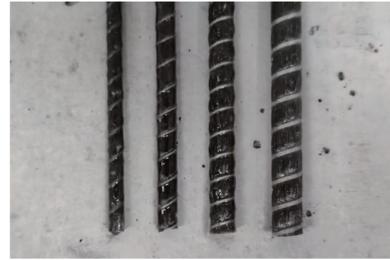


图 2 CFRP 筋示意图

Fig. 2 Schematic diagram of CFRP bars

表 4 结构胶材料性能

Table 4 Material properties of structural adhesive

| 拉伸强度/MPa | 抗压强度/MPa | 抗弯强度/MPa | 抗剪强度/MPa |
|----------|----------|----------|----------|
| 9.74     | 84.6     | 75.9     | 16.9     |

### 1.2 试件设计与制作

试验梁截面尺寸为 150 mm×300 mm,混凝土保护层厚度为 20 mm,长度为 1 800 mm,有效跨度为 1 600 mm,纯弯段为 500 mm。架立筋为 2 根 6 mm 的 HPB300 钢筋,受拉筋为 2 根 10 mm 的 HRB400 钢筋,箍筋采用 8 mm 的双肢箍 HPB300 钢筋。剪跨段箍筋间距为 80 mm,为减少约束效应对受弯性能的影响,纯弯段箍筋间距为 200 mm,试件尺寸和配筋构造如图 3 所示,试件分组如表 5 所示,其中预应力中“20×2”表示在梁底植入的 CFRP 筋数量为 2,单根筋预应力张拉值为 20 kN。

表 5 试验分组

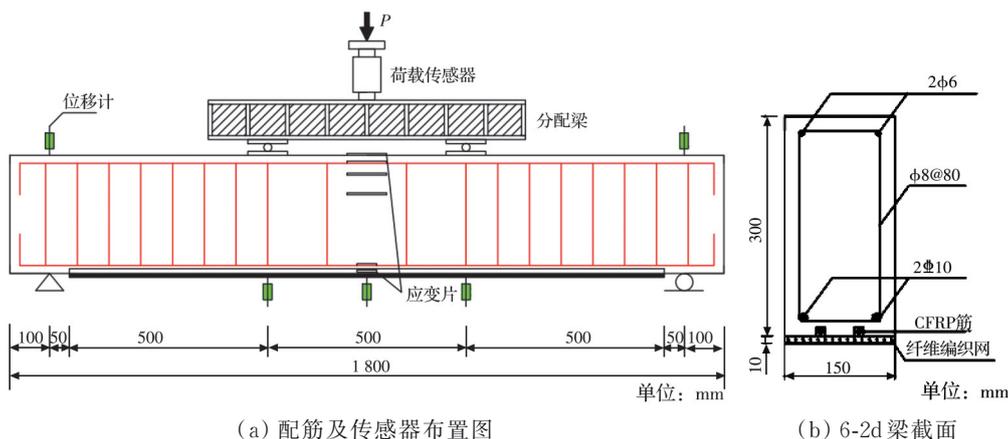
Table 5 Test grouping

| 编号     | 开槽尺寸      | CFRP 直径/mm | 纤维编织网层数 | 预应力/kN | 开裂荷载/预估值/kN |
|--------|-----------|------------|---------|--------|-------------|
| US     |           |            |         |        |             |
| 6-2d   | 2d×2d     | 6          | 1       | 20×2   | 65.42       |
| 6-1.5d | 1.5d×1.5d | 6          | 1       | 20×2   | 65.42       |
| 6-2.5d | 2.5d×2.5d | 6          | 1       | 20×2   | 65.42       |
| 8-2d   | 2d×2d     | 8          | 1       | 20×2   | 65.67       |
| 10-2d  | 2d×2d     | 10         | 1       | 20×2   | 65.82       |

注:d 为 CFRP 筋直径。

为便于比较各梁之间钢筋及 CFRP 筋在同一位置的应力变化,钢筋及 CFRP 筋测点布置于跨中;由于梁开裂后中性轴下部混凝土应变片会迅速失效,因此,混凝土应变片应在梁顶以及沿梁高方向距梁顶 20、50、100 mm 处布置,用于检验平截面假定和测量梁顶部混凝土应变。试验采用 DH3816 静态应变测试分析系统,测量挠度所用位移计为量程 50 mm 的 YHD-50 型位移计,荷载由量程为 50 t 的力传感器测得,在试验过程中进行连续采集。测点布置如图 3 所示。

加固过程包含以下步骤:开槽机沿梁底顺直开槽,保证开槽深度和宽度一致;用除尘设备清除槽



(a) 配筋及传感器布置图

(b) 6-2d 梁截面

图 3 试验梁配筋及截面图

Fig. 3 Reinforcement and section diagram of test beam

中颗粒粉尘,避免影响黏结效果;向槽内注入一半植筋胶;将 CFRP 筋放入槽正中心并穿过空心千斤顶,在筋材固定端和张拉端用锚具进行锚固,手动缓慢按压千斤顶并时刻观察仪表数,待张拉到设计值后用锚具将筋材两端固定在张拉架上;完成张拉后在室温 26 °C 环境下养护 72 h,待植筋胶达到要求强度后放张。植筋完成后静置一定时间,待植筋胶硬化后再在梁底面进行 TRC 加固;对梁底部进行凿毛,凿毛深度以混凝土上的石子有 1/3~1/2 裸露为准;将细粒混凝土均匀涂抹在凿毛处,之后将一张纤维编织网平铺在细粒混凝土上,并保证纤维顺直,最后再涂抹一定厚度的细粒混凝土;把外表面抹至光滑平整;在室温下养护 28 d。

### 1.3 试验加载方案

以开槽尺寸和 CFRP 筋直径作为试验因子,研究在不同因子组合情况下加固梁的破坏特征、承载力变化、裂缝开展情况以及梁的延性等特征,命名方法为“CFRP 筋直径-开槽尺寸”。例如“6-2d”表示将直径 6 mm 的预应力 CFRP 筋植入边长为 2 倍筋材直径的槽中。

图 4 为试验装置图。采用 50 t 的千斤顶作为加载装置,为精确测量加载过程中的荷载,在分配梁与千斤顶加载头之间安装标定好的量程为 50 t 的压力传感器。首先进行预加载,以达到消除试验梁与支座间空隙的目的。预加载方法为:将荷载加载到 5 kN,并保持 100 s,然后将力缓慢降至零。预加载结束后开始对梁进行分级加载,每级加载后持载 3~5 min。对照组由于承载力较低,每级按 2 kN 进行加载,复合加固梁每级按 5 kN 进行加载,当接近预估的开裂荷载、钢筋屈服和梁即将破坏时,减小每级的加载值,以得到较精确的开裂荷载和破坏荷载。其中开裂荷载预估值根据 GB 50608—2020 中 10.3.13 节公式计算,破坏阶段可根据实时的荷载

位移曲线判断,当荷载增加较慢且位移增加加快时,判定为梁即将进入破坏阶段。屈服荷载的具体数值则根据图像数据计算得出。每级加载完成后,需待采集仪数值稳定后进行读数,在静载试验进行中,荷载从零开始增加,持载时用裂缝观察仪观察裂缝,并记录该荷载对应的裂缝宽度。为防止梁破坏时变形较大而对仪器产生损坏,在破坏前迅速撤离位移计等仪器,待卸载后再对梁的破坏形态进行观察。



图 4 试验装置

Fig. 4 Test devices

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 破坏形态分析

图 5 为试验梁破坏后的外观样貌图。由图 5 可知,对照梁下部受拉钢筋屈服,上部受压区混凝土压碎,为典型的适筋梁破坏形态。加载初期,梁 6-2d、梁 6-2.5d 纯弯段出现细小裂缝,并伴随结构胶开裂声;钢筋屈服后,碳纤维丝拉断发出声响,TRC 与梁底部界面处出现横向裂纹;继续加载,裂缝数量增长较小,裂缝宽度逐渐增加,随后纤维编织网和 CFRP 筋全部拉断并发出巨响,同时梁下部植筋高度处出现横向裂缝,上部混凝土压碎。出现该破坏形态可能是因为 CFRP 筋与混凝土槽间的结构胶层较厚,能充分传递筋材和混凝土间应力,最大程度发挥筋材的抗拉作用,最终筋材拉断。而筋材与

混凝土整体性较好,破坏时筋材周边混凝土与上部混凝土应变不同导致横向裂缝的出现。梁 6-1.5d 加载初期现象与上述相似,后期纤维编制网拉断后发生 CFRP 筋剥离,上部混凝土未压碎。原因可能是较薄的结构胶层强度较低,当筋材与混凝土间传递的应力达到胶层强度极限时,胶层发生破坏,失去了对筋材的锚固作用,最终导致筋材的剥离。与前述梁的试验现象相比,在加载初期梁 8-2d 和 10-2d 裂缝发展更缓慢,钢筋屈服更晚,最终两根梁破坏形态都为纤维编制网断裂,CFRP 筋剥离,上部混凝土压碎。这是因为较粗的筋材刚度较大,对裂缝和梁变形的限制效果更好,而筋材较大的截面积使筋材的抗拉强度高于筋材与结构胶界面的强度,导致剥离破坏的发生先于拉断破坏。

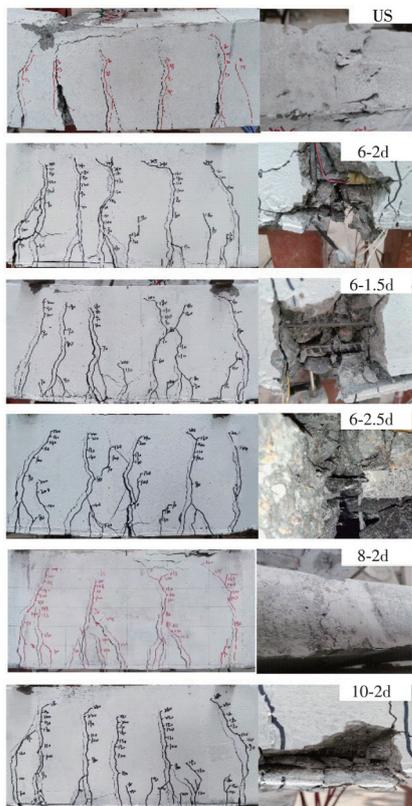


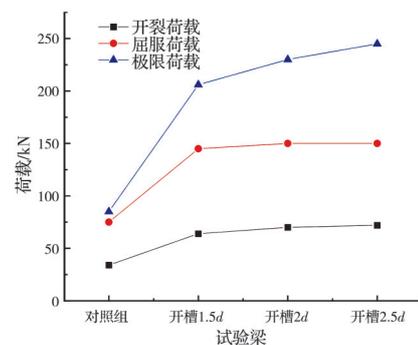
图 5 试验梁破坏后外观样貌

Fig. 5 Appearance of the test beams after damage

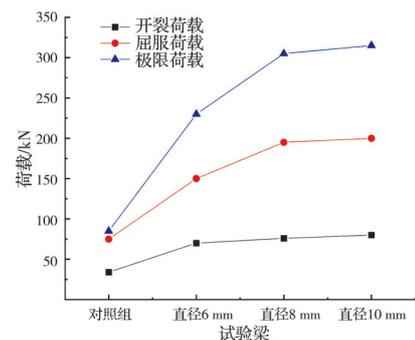
## 2.2 承载力分析

开裂荷载为梁跨中出现第一条裂缝时对应的荷载值;屈服荷载值通过加载图像数据计算得到;极限荷载为梁破坏前的最大荷载值。不同开槽尺寸的试验梁在加载过程中各阶段的荷载如图 6(a) 所示。从图中可以看出,相比开槽 2d 的梁,开槽 1.5d 的梁在开裂、屈服和极限荷载上各降低了 8.5%、3%、10%,开槽 2.5d 的梁各提高了 2.8%、0%、7%。开槽尺寸对开裂荷载影响较大,原因可

能是开槽尺寸较小时,碳纤维筋外包裹的结构胶层较薄,在预应力放张时应力松弛现象较其他试验梁更明显,从而降低了梁的开裂荷载。加载后期,由于较薄的结构胶层对筋材的约束作用较弱,最终梁发生了剥离破坏,碳纤维筋未被拉断,碳纤维筋较高的抗拉强度没有得到充分利用,导致梁的承载力较低。不同直径 CFRP 筋的试验梁在加载过程中各阶段的荷载如图 6(b) 所示。从图中可以看出,相比 CFRP 筋直径为 6 mm 的梁,CFRP 筋直径为 8 mm 的梁开裂、屈服、极限荷载各提高了 8.5%、30%、33%,CFRP 筋直径为 10 mm 的梁各提高了 14.2%、33%、37%。从图中可以看出,CFRP 筋直径对梁的屈服荷载和极限荷载均提升明显,但随着 CFRP 筋直径的增加,屈服荷载和极限荷载提升的幅度减小。可能是因为 CFRP 筋直径的增加相当于增加了梁底部的配筋率,明显提升了梁底部的抗拉强度和刚度。较粗的碳纤维筋有效抑制了梁裂缝的发展,限制了梁的变形,钢筋更不容易屈服,导致屈服荷载提升明显,同时在加载过程中限制了中和轴的上移,增大了混凝土受压区的面积,从而进一步增大了梁的极限承载力。当 CFRP 筋直径增大到一定程度,相当于梁底部配筋率超过了适筋梁的最大配筋率,最终破坏形态都表现为梁顶部混凝土压碎破坏,所以对承载力的提升效果不明显。



(a) 开槽尺寸对荷载的影响



(b) CFRP 筋直径对荷载的影响

图 6 荷载对比图

Fig. 6 Load comparison diagram

### 2.3 荷载-挠度分析

基于梁跨中位移计数据,并结合其他部位位移计数据进行修正后,可得试验梁的荷载-挠度曲线,如图 7 所示。从图中可以看出,开槽尺寸为 1.5 倍筋材直径试验梁的挠度大于开槽尺寸为 2 倍和 2.5 倍筋材直径的试验梁,而开槽尺寸为 2 倍和 2.5 倍筋材直径的试验梁跨中挠度较为接近。说明开槽尺寸对复合加固梁的刚度有影响,当开槽尺寸大于某一数值时,对复合加固梁刚度影响不大,当开槽尺寸较小时,开槽尺寸将对复合加固梁刚度产生影响。这是因为开槽尺寸较小时,槽中的结构胶较少,对筋材的约束作用较弱,容易产生滑移和剥离等现象,影响筋材与混凝土之间的应力传递,碳纤维筋对裂缝抑制效果减弱,裂缝宽度进一步增大,挠度变化加快,最终加速了梁的破坏,因此,复合加固梁的截面刚度受开槽尺寸的影响。碳纤维直径对梁开裂后刚度和挠度有显著影响。碳纤维直径较大的复合加固梁在开裂后刚度提升明显,但随着碳纤维直径的增加,刚度的提升效果逐渐减小,这一结果表明,碳纤维筋直径的增加与梁刚度的增加不成正比,碳纤维筋直径应该有一个最佳值。超过这个最佳值时,加固梁的刚度和承载力不会有明显的提高。这是因为相同荷载下,直径更大的碳纤维筋变形更小、刚度更大,对裂缝控制能力更强,对裂缝宽度的限制减缓了梁的变形,从而挠度变化较小,因此,在一定范围内,随着碳纤维直径的增加,复合加固梁截面刚度提高明显。

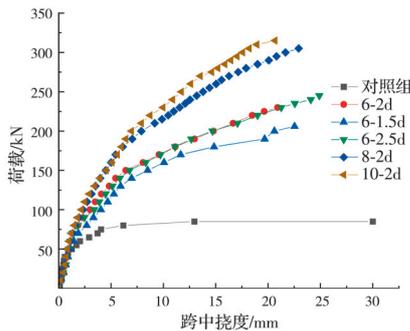


图 7 荷载-挠度图

Fig. 7 Load-deflection diagram

### 2.4 荷载-应变分析

图 8 为试验梁在各级荷载作用下的钢筋应变曲线。从图 8 可以看出,加载前期开槽尺寸对于钢筋应变的影响较小,加载后期,由于开槽尺寸较大,CFRP 筋与混凝土间的黏结更好,对钢筋应力的分担效果更好,所以相同荷载下较大开槽尺寸对应的钢筋应变比较小开槽尺寸对应的钢筋应变小。试验梁的钢筋应变随着 CFRP 筋直径的增加而减小,

表明 CFRP 筋能有效分担钢筋中的应力,并且在 CFRP 筋直径较大的加固梁中,其分担的应力更多,但随着 CFRP 筋直径的增加,其应力的分担效果逐渐减小,这一结果表明,碳纤维筋直径的增加与 CFRP 筋分担应力的增加不成正比,碳纤维筋直径应该有一个最佳值。超过这个最佳值时 CFRP 筋分担应力的能力不会有明显提高。

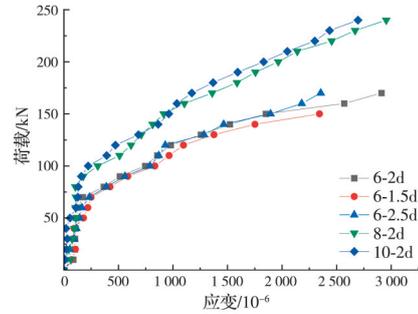


图 8 钢筋应变曲线

Fig. 8 Strain curves of reinforcement

图 9 为试件的 CFRP 应变曲线。从图中可以看出,开槽尺寸对钢筋应变的影响较小,图中 6-1.5d 破坏时 CFRP 应变较小,表明 CFRP 筋未得到充分利用。这是由于较小的开槽尺寸使 CFRP 与混凝土间的结构胶层较小,较为薄弱,导致 6-1.5d 最终发生剥离破坏,CFRP 筋未拉断。相同荷载下,试验梁的 CFRP 应变随着 CFRP 筋直径的增加而减小,原因可能是不同直径的 CFRP 在提供相同的力时,较粗的 CFRP 由于较大的截面面积,产生的应变比较细的 CFRP 小。

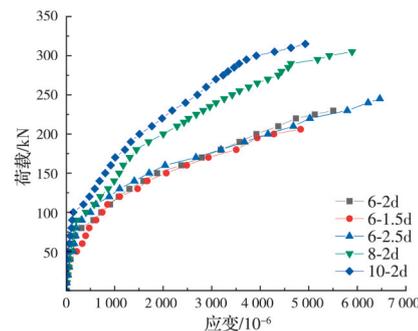


图 9 CFRP 筋应变曲线

Fig. 9 Strain curves of CFRP bar

### 2.5 裂缝分析

图 10 为试件破坏时的裂缝分布图。从图 10 可以看出,复合加固梁纯弯段的裂缝数量较未加固梁明显增多,裂缝间距在 30 mm 左右,开槽尺寸较大的试验梁裂缝数量较多,可见裂缝数量会随开槽尺寸的增加而增多。不同 CFRP 筋直径间的裂缝分布相差不大,图 11 为最大裂缝宽度图。由图 11 可知,在相同荷载水平下,增大开槽尺寸能减小裂缝宽

度。这是因为增大开槽尺寸相当于增厚了CFRP筋外的结构胶层,较厚的结构胶层强度更高,能更好地将CFRP筋的拉力传递至梁下部混凝土,且增大开槽尺寸也进一步增大了结构胶与混凝土之间的黏结面积,使结构胶与混凝土间更好地黏结,也对应力的传递起到积极作用,从而使CFRP筋限制裂缝发展的作用更充分地发挥,减小了裂缝宽度。在相同荷载水平下,增大CFRP筋直径可以显著减小裂缝宽度。与直径6 mm的CFRP筋加固梁相比,直径8、10 mm的CFRP筋加固梁在 $0.3M_u$  ( $M_u$ 为梁的极限弯矩)下的最大裂缝宽度分别减小了13.95%和24.41%。这是因为增大CFRP筋直径相当于增加了配筋率,随着配筋率的增加,梁的整体刚度增大,同时FRP筋与结构胶、结构胶与混凝土的黏结面积和黏结强度增大,从而延缓了裂缝的发展。

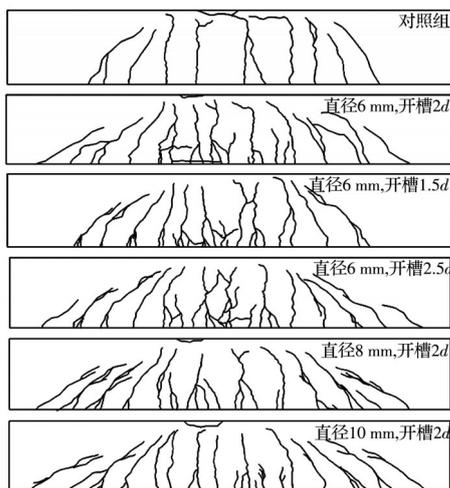


图10 试件破坏时的裂缝分布

Fig. 10 Crack distribution of the specimens at failure

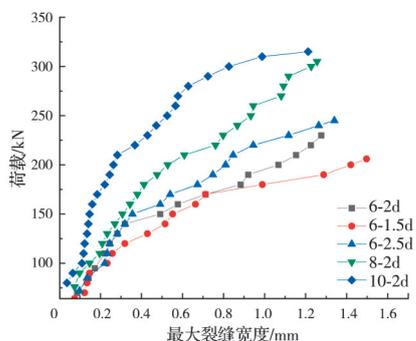


图11 荷载-最大裂缝宽度图

Fig. 11 Load-maximum crack width diagram

## 2.6 延性分析

位移延性系数 $\mu$ 能反映试件的宏观延性,其值可通过式(1)计算得出,其中 $\delta_m$ 为试件的极限位移,取极限荷载所对应的位移值, $\delta_y$ 为试件的屈服位移,取计算出的屈服荷载所对应的位移值,反映试件在

加载后期的变形能力。延性系数小,说明试件延性差,吸收能量的能力和后期的变形能力弱,在达到极限荷载时更容易脆性破坏。为了避免复合加固梁发生脆性破坏,有必要对复合加固梁延性进行定量评价。

位移延性系数计算公式<sup>[27-28]</sup>为

$$\mu = \frac{\delta_m}{\delta_y} \quad (1)$$

试验梁的屈服位移、极限位移及延性系数如表6所示。由表中数据可知,对照梁的延性系数最高,复合加固梁的延性系数相比对照梁有所降低。对于开槽尺寸不同的复合加固梁,随着开槽尺寸的增大,延性系数有小幅度增加。随着CFRP筋直径的增加,梁的延性系数减小较明显,说明CFRP筋直径对梁的延性影响较大。

表6 延性系数

Table 6 Ductility coefficients

| 试件     | 屈服位移 $\delta_m$ /mm | 极限位移 $\delta_y$ /mm | 延性系数 $\mu$ |
|--------|---------------------|---------------------|------------|
| US     | 6.18                | 30.32               | 4.91       |
| 6-2d   | 6.42                | 20.91               | 3.26       |
| 6-1.5d | 6.97                | 22.52               | 3.23       |
| 6-2.5d | 6.77                | 22.90               | 3.38       |
| 8-2d   | 7.03                | 21.93               | 3.12       |
| 10-2d  | 6.96                | 20.66               | 2.97       |

## 3 TRC复合嵌入式CFRP加固钢筋混凝土梁开裂荷载计算

### 3.1 开裂荷载计算公式

预应力CFRP筋加固受弯构件的开裂荷载可以看成是由消压荷载和相同配筋下非预应力受弯构件开裂荷载两部分组成,因此,分别计算这两部分弯矩值后再相加,便是梁的开裂荷载。基于文献<sup>[29-30]</sup>的研究结果,提出一种关于TRC复合预应力CFRP筋加固RC梁开裂荷载的计算方法。

当梁跨中截面承受弯矩等于消压弯矩时,下边缘截面的应力为零,全截面都处于受压状态,而全截面合压力大小等于预应力碳纤维所受压力,由内力平衡可知,此时预应力碳纤维筋的内力等于预张拉力,则有

$$F_c = F_{CFRP} \quad (2)$$

式中: $F_c$ 为全截面合压力; $F_{CFRP}$ 为碳纤维筋的预张拉力。

此时,截面上压应力为近似三角形分布,因此,合压力作用点的位置在距受压区边缘 $h/3$  ( $h$ 为原RC梁截面全高)处<sup>[29]</sup>,合压力与碳纤维筋预拉应力的距离为 $2h/3$ 。消压弯矩 $M_k$ 可按式(3)计算。

$$M_k = \frac{2}{3} h F_{CFRP} \quad (3)$$

认为在 CFRP 和 TRC 层发生剥离之前各材料之间黏结良好,根据应变协调原理可用一种均质材料组成的截面换算替代混凝土、钢筋、CFRP 和 TRC 四种材料组成的截面,如图 12 所示。从梁出现开裂至下部受拉钢筋屈服前,混凝土受压区应力可近似看作直线分布,即受压区的混凝土平均应变与压应力成正比<sup>[30]</sup>。

受拉纵筋截面积为  $A_s$ , 换算后  $A_{sc} = \alpha_s A_s$ , 其中  $\alpha_s = E_s/E_c$ , 为钢筋与混凝土的弹性模量比,除钢筋所在原位置的面积外,截面同一高度处需增设附加截面积  $(\alpha_s - 1)A_s$ ; 同理可得碳纤维筋的换算截面积  $A_{fc} = \alpha_f A_f$  ( $\alpha_f = E_f/E_c$ ), 附加截面积为  $(\alpha_f - 1)A_f$ , 其中  $A_f$  为碳纤维筋的截面积; TRC 换算截面积  $A_{tc} = \alpha_t A_t$ ,  $\alpha_t = E_t/E_c$ , 附加截面积为  $(\alpha_t - 1)A_t$ , 其中  $A_t$  为纤维编织网纵向纤维束截面积。

换算后的总面积为

$$\frac{1}{2} b x_c^2 = \frac{1}{2} b (h + t - x_c)^2 + (\alpha_s - 1) A_s (h_0 - x_c) + (\alpha_f - 1) A_f (h - c - x_c) + (\alpha_t - 1) A_t \left( h + \frac{t}{2} - x_c \right) \quad (5)$$

由此可得

$$x_c = \frac{\frac{1}{2} b (h + t)^2 + (\alpha_s - 1) A_s h_0 + (\alpha_f - 1) A_f (h - c) + (\alpha_t - 1) A_t \left( h + \frac{t}{2} \right)}{(h + t) b + (\alpha_s - 1) A_s + (\alpha_f - 1) A_f + (\alpha_t - 1) A_t} \quad (6)$$

换算截面的惯性矩为

$$I_0 = \frac{b}{3} [x_c^3 + (h + t - x_c)^3] + (\alpha_s - 1) A_s (h_0 - x_c)^2 + (\alpha_f - 1) A_f (h - c - x_c)^2 + (\alpha_t - 1) A_t \left( h + \frac{t}{2} - x_c \right)^2 \quad (7)$$

受拉边缘截面抵抗矩为

$$W_0 = \frac{I_0}{h + t - x_c} \quad (8)$$

复合加固梁的开裂弯矩为

$$M_{cr} = M_k + \gamma_m W_0 f_{tk} \quad (9)$$

式中:  $M_{cr}$  为开裂弯矩;  $M_k$  为消压弯矩;  $\gamma_m$  为截面抵抗矩塑性系数;  $f_{tk}$  为混凝土抗拉强度标准值。

### 3.2 开裂荷载试验值与计算值比较

表 7 为加固梁开裂荷载的试验值与计算值。由表 7 可知,复合加固梁开裂荷载的试验值与计算值

表 7 开裂荷载试验值与计算值比较

Table 7 Comparison between the test values and the calculated values of cracking load

| 试件     | 试验值/kN | 计算值/kN | 试验值/预测值 |
|--------|--------|--------|---------|
| 6-2d   | 70     | 68.391 | 1.023   |
| 6-1.5d | 64     | 68.398 | 0.935   |
| 6-2.5d | 72     | 68.384 | 1.053   |
| 8-2d   | 72     | 68.666 | 1.049   |
| 10-2d  | 74     | 69.002 | 1.043   |

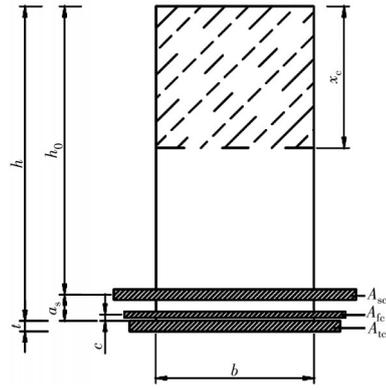


图 12 换算截面示意图

Fig. 12 Schematic diagram of converted section

$$A_0 = b(h + t) + (\alpha_s - 1)A_s + (\alpha_f - 1)A_f + (\alpha_t - 1)A_t \quad (4)$$

式中:  $t$  为 TRC 加固层厚度。

由截面受压和受拉区对中和轴的面积矩相等可得受压区高度  $x_c$  为

误差在 6.5% 以内。可见基于文献[29-30]提出的 TRC 复合预应力 CFRP 筋加固 RC 梁开裂荷载计算公式的适用性较好。

## 4 结论

1) 复合加固梁开裂、屈服和极限荷载均较未加固梁提升明显。加固梁极限荷载受开槽尺寸影响较小,受 CFRP 筋直径影响较大。

2) 复合加固梁的抗弯刚度明显高于未加固梁;梁刚度随开槽尺寸和 CFRP 筋直径的增加非线性增长。

3) 复合加固梁裂缝呈细而密的分布特点,裂缝数量明显多于普通 RC 梁,并随开槽尺寸的增加有所增加,受 CFRP 筋直径影响较小。

4) 加固梁延性明显低于未加固梁,随着 CFRP 筋直径的增加,试验梁延性下降,开槽尺寸的增大能小幅提升梁延性,但提升效果不明显。

5) 提出一种复合加固梁开裂荷载计算模型,计

算值与试验值误差在 6.5% 以内,计算模型的适用性较好。

### 参考文献

- [1] 尹世平,王璐晨,王聪聪,等.不同尺寸对 TRC 永久性模板叠合钢筋混凝土梁弯曲性能影响研究[J].建筑结构学报,2021,42(增刊1):291-301.  
YIN S P, WANG L C, WANG C C, et al. Study on the influence of different sizes on the bending behavior of reinforced concrete beams laminated with TRC permanent formwork [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(Sup 1): 291-301. (in Chinese)
- [2] MOTT R, BRAMESHUBER W. Subsequently applied waterproof basements made of textile reinforced concrete using the spraying method [R]. Farmington Hills: American Spraying Concrete Institute, SP-251, 2008: 59-72.
- [3] 郭嘉欢,王伯昕,张添奇,等.纤维编织网增强混凝土抗渗性能研究[J].东北大学学报(自然科学版),2022,43(9):1354-1360.  
GUO J H, WANG B X, ZHANG T Q, et al. Study on impermeability of textile reinforced concrete [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2022, 43(9): 1354-1360. (in Chinese)
- [4] CALABRESE A S, D'ANTINO T, COLOMBI P, et al. Low- and high-cycle fatigue behavior of FRCM composites [J]. Materials, 2021, 14(18): 5412.
- [5] 李赫,徐世焯.纤维编织网增强混凝土薄板力学性能的研究[J].建筑结构学报,2007,28(4):117-122.  
LI H, XU S L. A study on thin concrete plate reinforced with textile [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(4): 117-122. (in Chinese)
- [6] 陈辉,杨彦克,王传波.纤维增强聚合物筋混凝土的研究与应用[J].混凝土,2007(1):42-45.  
CHEN H, YANG Y K, WANG C B. Research and application of the fiber reinforced polymer bars in concrete [J]. Concrete, 2007(1): 42-45. (in Chinese)
- [7] 荀勇,支正东,张勤.织物增强混凝土薄板加固钢筋混凝土梁受弯性能试验研究[J].建筑结构学报,2010,31(3):70-76.  
XUN Y, ZHI Z D, ZHANG Q. Experimental research on flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with textile reinforced concrete sheets [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(3): 70-76. (in Chinese)
- [8] 任伟,刘贺,李平,等.预应力 TRM 加固 RC 梁正截面承载能力试验[J].广西大学学报(自然科学版),2020,45(1):113-120.  
REN W, LIU H, LI P, et al. Experimental study on normal section bearing capacity of RC beams strengthened with prestressed TRM [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2020, 45(1): 113-120. (in Chinese)
- [9] 杜运兴,邵喜诚,周芬.预应力 CTRC 板加固持载混凝土梁的抗弯性能研究[J].铁道科学与工程学报,2020,17(1):189-197.  
DU Y X, SHAO X C, ZHOU F. Flexural behavior of RC beams repaired with prestressed CTRC plates under sustaining loads [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(1): 189-197. (in Chinese)
- [10] YIN S P, HUA Y T, YU Y L. Flexural durability and chloride diffusion equation of TRC-strengthened beams under a chloride environment [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(6): 1868-1880.
- [11] 徐世焯,尹世平,蔡新华.纤维编织网增强混凝土加固钢筋混凝土受弯梁的抗裂性能研究[J].水利学报,2010,41(7):833-840.  
XU S L, YIN S P, CAI X H. Investigation on crack resistance of flexural RC beam strengthened with textile-reinforced concrete [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(7): 833-840. (in Chinese)
- [12] 徐世焯,尹世平,蔡新华.纤维编织网增强混凝土加固钢筋混凝土梁受弯性能研究[J].土木工程学报,2011,44(4):23-34.  
XU S L, YIN S P, CAI X H. Investigation on the flexural behavior of reinforced concrete beam strengthened with textile-reinforced concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(4): 23-34. (in Chinese)
- [13] 徐世焯,沈玲华,王激扬,等.纤维编织网增强混凝土薄板的高温力学性能与微观界面粘结破坏分析[C]//第22届全国结构工程学术会议论文集第II册.乌鲁木齐,2013:165-172.  
XU S L, SHEN L H, WANG X Y, et al. Analysis of high temperature mechanical Properties and micro-interface bond failure of concrete sheet reinforced with fiber braided mesh [C]//Proceedings of the 22nd National Structural Engineering Conference Vol. II. 2013: 165-172. (in Chinese)
- [14] 尹世平,盛杰,徐世焯.疲劳荷载下纤维编织网增强混凝土加固 RC 梁的弯曲性能[J].水利学报,2014,45(12):1481-1486.  
YIN S P, SHENG J, XU S L. Experimental research on flexural performance of RC beams strengthened with TRC under fatigue load [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(12): 1481-1486. (in Chinese)
- [15] 郝永超.内嵌 FRP 筋材加固混凝土连续梁抗弯性能研究[D].河南焦作:河南理工大学,2010.  
HAO Y C. Study on flexural behavior of concrete continuous beams strengthened with embedded FRP bars [D]. Jiaozuo, Henan: Henan Polytechnic University, 2010. (in Chinese)

- [16] BADAWI M, SOUDKI K. Flexural strengthening of RC beams with prestressed NSM CFRP rods-Experimental and analytical investigation [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(10): 3292-3300.
- [17] 余舒宇. 表层嵌贴预应力CFRP板条加固RC梁抗弯性能影响因素研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012.  
YU S Y. Study on influencing factors of flexural performance of RC beams strengthened with prestressed CFRP slats embedded in the surface [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2012. (in Chinese)
- [18] WU G, DONG Z Q, WU Z S, et al. Performance and parametric analysis of flexural strengthening for RC beams with NSM-CFRP bars [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2014, 18(4): 4013051.1-4013051.10.
- [19] JAHANI Y, BAENA M, GÓMEZ J, et al. Flexural performance of NSM CFRP strengthened concrete beams under temperature [C]//ILKI A, ISPIR M, INCI P. *International Conference on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering*. Cham: Springer, 2022: 836-847.
- [20] TOUTANJI H, ELJUFOUT T. Effect of under-stressing on the fatigue strength of RC beams rehabilitated with NSM CFRP reinforcement [C]//ILKI A, ISPIR M, INCI P. *International Conference on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering*. Cham: Springer, 2022: 342-350.
- [21] 卞任远. 多种方法组合加固钢筋混凝土梁抗弯性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.  
BIAN R Y. Study on flexural performance of reinforced concrete beams strengthened by various methods [D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)
- [22] 于雯, 黄悦, 黄谦, 等. FRP筋预应力混凝土梁长期性能研究进展[J]. *复合材料科学与工程*, 2022(4): 111-119.  
YU W, HUANG Y, HUANG Q, et al. Long-term behavior of FRP prestressed concrete beams-A review [J]. *Composites Science and Engineering*, 2022(4): 111-119. (in Chinese)
- [23] 尹世平, 余玉琳, 那明望. 氯盐侵蚀下TRC加固承载RC受弯梁抗裂性能[J]. *水利学报*, 2018, 49(7): 886-891.  
YIN S P, YU Y L, NA M W. Crack resistance of loaded flexural TRC-strengthened beams under chloride erosion [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(7): 886-891. (in Chinese)
- [24] 盛杰. 海洋大气环境下TRC加固RC梁受弯时变性能[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(增刊1): 284-290.
- SHENG J. Time-varying behavior of RC beams strengthened by TRC in marine atmospheric environment [J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(Sup 1): 284-290. (in Chinese)
- [25] 许成祥, 吴永昂, 罗恒, 等. CFRP及外包钢复合加固震损双层高架桥框架墩地震易损性分析[J]. *铁道科学与工程学报*, 2022, 19(3): 733-742.  
XU C X, WU Y A, LUO H, et al. Seismic fragility analysis of seismic-damaged double-deck viaducts' frame piers strengthened with CFRP and enveloped steel [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2022, 19(3): 733-742. (in Chinese)
- [26] 尹世平. TRC基本力学性能及其增强钢筋混凝土梁受弯性能研究[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2010.  
YIN S P. Study on basic mechanical properties of TRC and flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened by TRC [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [27] 刘曙光, 王玉清, 王猛, 等. 碳纤维布改善混凝土梁抗弯性能的试验研究[J]. *内蒙古工业大学学报(自然科学版)*, 2004, 23(4): 314-319.  
LIU S G, WANG Y Q, WANG M, et al. A research on flexural behavior of RC-beams with CFRPS bonded on the tensile sides [J]. *Journal of Inner Mongolia Polytechnic University (Natural Science)*, 2004, 23(4): 314-319. (in Chinese)
- [28] 王玉清, 刘曙光, 王猛. 碳纤维布提高钢筋混凝土梁刚度的试验研究与计算[J]. *内蒙古工业大学学报(自然科学版)*, 2006, 25(1): 61-65.  
WANG Y Q, LIU S G, WANG M. An experimental research on stiffness of RC-beams with CFRPS bonded to the underside [J]. *Journal of Inner Mongolia University of Technology (Natural Science)*, 2006, 25(1): 61-65. (in Chinese)
- [29] 蒋鑫. 表层嵌入式预应力CFRP板条加固RC梁抗弯能力试验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2011.  
JIANG X. Experimental study on flexural capacity of RC beams strengthened with embedded prestressed CFRP slats on the surface [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2011. (in Chinese)
- [30] 张勤. 织物增强混凝土(TRC)加固RC梁正截面抗弯性能试验研究[D]. 江苏 镇江: 江苏大学, 2009.  
ZHANG Q. Experimental study on flexural behavior of RC beams strengthened with fabric reinforced concrete (TRC) [D]. Zhenjiang, Jiangsu: Jiangsu University, 2009. (in Chinese)