文章编号:1005-0523(2024)03-0037-08

CFRP布抗剪加固预加载RC梁的力学性能研究

黄志刚[1,2],林 俊[3],黄卫国[3],王海涛[4],吴 琼[4]

(1. 江西省交通工程集团有限公司,江西 南昌 330038; 2. 江西省桥梁智能养护工程技术研究中心,江西 南昌 330038;
3. 江西省公路工程检测中心,江西 南昌 330013; 4. 河海大学土木与交通学院,江苏 南京 210096)

摘要:【目的】为了研究端部锚固方法和预加载对碳纤维复材(CFRP)加固钢筋混凝土(RC)梁抗剪性能的影响,**【方法】**进行了4根矩形RC梁的剪切试验,分析了失效模式、荷载-挠度曲线、特征荷载、箍筋和CFRP应变的发展,最后,采用既有的CFRP加固RC梁抗剪承载力计算方法对文章试件的抗剪承载力进行了预测。**【结果】**试验结果表明,在可靠的端部锚固下,采用U形CFRP条带加固可以显著提升RC梁的抗剪性能;抗剪加固效果受CFRP条带的端部锚固方法影响很大,机械锚固显著优于CFRP布压条锚固,相比于未加固梁,采用机械锚固的加固梁抗剪承载力提高了约60%,而CFRP布压条锚固的抗剪承载力仅提高了9.8%;预加载虽然明显降低了加固梁的开裂荷载,但对抗剪承载力几乎没有影响。**【结论】**研究结果可为CFRP布抗剪加固RC梁的工程应用提供参考。

关键词:CFRP布;抗剪加固;锚固方法;预加载;钢筋混凝土梁

中图分类号:TU375;U416 **文献标志码:**A

本文引用格式:黄志刚,林俊,黄卫国,等. CFRP布抗剪加固预加载RC梁的力学性能研究[J]. 华东交通大学学报,2024,41(3):37-44.

Study on the Mechanical Properties of Preloaded RC Beams Shear-Strengthened with CFRP Sheets

Huang Zhigang[1,2], Lin Jun[3], Huang Weiguo[3], Wang Haitao[4], Wu Qiong[4]

(1. Jiangxi Transportation Engineering Group Co., Ltd., Nanchang 330038, China; 2. Jiangxi Bridge Intelligent Maintenance Engineering Technology Research Center, Nanchang 330038, China; 3. Jiangxi Highway Engineering Testing Center, Nanchang 330013, China; 4. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210096, China)

Abstract:【Objective】The shear tests of four rectangular reinforced concrete (RC) beams were conducted to investigate the effects of the end-anchorage method and preloading on the shear behavior of the carbon fiber reinforced polymer (CFRP)-strengthened RC beams.**【Method】**The failure mode, load-deflection curve, characteristic load, strain developments of the stirrup and CFRP were analyzed. Finally, the shear capacity of the specimens was predicted using the existing calculation methods for the shear capacity of the CFRP-strengthened RC beam.**【Result】**The test results show that the using U-shaped CFRP strengthening can significantly enhance the shear behavior of RC beams under the reliable end-anchorage. The shear strengthening effect is significantly affected by the end-anchorage methods. The mechanical anchorage is obviously superior to the CFRP sheet anchorage. Compared with the unstrengthened beam, the shear capacity of the strengthened beam with the mechanical an-

收稿日期:2023-12-01
基金项目:江西省交通运输厅科技项目(2022H0020)

chorage increases by about 60%, whereas that with the CFRP sheet anchorage only increases by 9.8%. The preloading significantly decreases the cracking load of the strengthened beams, but does not affect the shear capacity.【**Conclusion**】The research results can provide reference for the engineering application of shear strengthening of RC beams with CFRP sheets.

Key words: CFRP sheet; shear strengthening; anchorage method; preloading; reinforced concrete beam

Citation format: HUANG Z G, LIN J, HUANG W G, et al. Study on the mechanical properties of preloaded RC beams shear-strengthened with CFRP sheets[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(3): 37−44.

【**研究意义**】钢筋混凝土(RC)构件在长期服役过程中,由于环境侵蚀、材料性能劣化及超载等因素,面临着承载能力下降、刚度衰退、开裂等问题。RC梁抗剪能力的不足将会引发斜裂缝不断发展,导致构件产生较大的挠度,直接影响结构的正常使用性能,对结构的耐久性和安全性造成很大危害[1]。

【**研究进展**】碳纤维复材(CFRP)具有轻质、高强、耐腐蚀性能好等优势,外贴CFRP技术已经被广泛应用在混凝土结构的加固修复中,成为一种主流的混凝土结构加固技术[2-5]。采用CFRP对RC梁进行抗剪加固时,CFRP加固形式主要有全包裹加固、U形条带加固和侧面加固[6],其中全包裹和U形条带加固需要将CFRP在RC梁拐角处弯折,所以质地柔软的CFRP布比CFRP板更合适于全包裹和U形条带加固。研究表明,与外贴CFRP抗弯加固相似,CFRP与混凝土的界面剥离失效也是抗剪加固常见的失效模式[7],过早的界面端部剥离会显著降低CFRP的加固效果和强度利用率,因此需要对CFRP实施必要的端部锚固。国内外研究者已经开发了多种端部锚固措施,包括压条锚固、嵌入式锚固、机械锚固、扇形锚固等[8-13],不同锚固方法对加固效果的改善作用相差很大。周朝阳等[11]研发了CFRP条带的自锁锚板并形成了混锚U形CFRP条带抗剪加固方法,发现提出的锚固方法能够有效避免CFRP条带的端部剥离破坏并实现拉断破坏,混锚和纯粘贴方法的抗剪承载力提升幅度分别为89.6%和16.3%。Mhanna等[12]采用CFRP扇形锚对U形条带进行锚固,发现CFRP扇形锚可以推迟U形条带的剥离,抗剪承载力相比未锚固的加固试件提高了20%~50%。另一方面,采用CFRP对RC梁进行抗剪加固时,待加固构件可能在荷载长期作用下已出现了开裂等初始损伤,而目前仅有少数研究考虑了初始损伤的影响。Karzad等[13]研究发现,对于预损伤混凝土梁,先采用环氧树脂胶进行修复再利用CFRP布进行抗剪加固能够使预损伤梁的性能恢复到未损伤梁的水平。Yu等[14]的研究发现,预损伤度影响CFRP布抗剪加固梁的斜裂缝形成机理,斜裂缝发生机理和斜裂缝宽度,而预损伤度较低时,CFRP加固预损伤梁的受力性能与加固的未损伤梁相似。

【**创新特色**】学者们虽然开展了大量U形CFRP条带的端部锚固方法研究,但大多着眼于锚固方法的创新,而一些新型锚固方法存在锚固工艺复杂等问题,不便于在实际工程中应用,因此有必要针对适用于工程实践的锚固方法开展研究;另一方面现有研究中RC梁的配箍率普遍很低,不满足《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)对最小配箍率和最大箍筋间距的要求。因此,为了使试验试件更好地反映实际构件,需要针对CFRP布加固正常配置箍筋的RC梁开展研究。

【**关键问题**】为进一步研究CFRP布加固RC梁的抗剪性能,本文开展了4根矩形RC梁的试验研究,其中2根加固梁通过预加载来考虑正常服役荷载引起的初始损伤;考虑到工程应用的便捷性,试验设计了机械锚固和CFRP压条锚固两种锚固方法。通过分析失效模式、荷载-挠度曲线、特征荷载、箍筋和CFRP布应变的发展,研究了锚固方法和预加载对CFRP布加固RC梁抗剪性能的影响,并根据既有的理论模型对CFRP布加固RC梁的抗剪承载力进行了预测,研究结果可为CFRP布抗剪加固RC梁的工程应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

RC梁长度为3 000 mm,截面尺寸为$b \times h$=

200 mm × 400 mm，保护层厚度为15 mm。梁底部配置了5根直径为25 mm的受拉钢筋，上下两排间隔25 mm，受拉钢筋配筋率为3.61%；梁顶部配置了3根直径为25 mm的受压钢筋。箍筋直径为8 mm，其中弯剪段的箍筋间距取《混凝土结构设计规范》（GB 50010—2010）规定的最大间距，即200 mm，纯弯段内箍筋间距为150 mm。试验梁尺寸及配筋情况如图1所示。

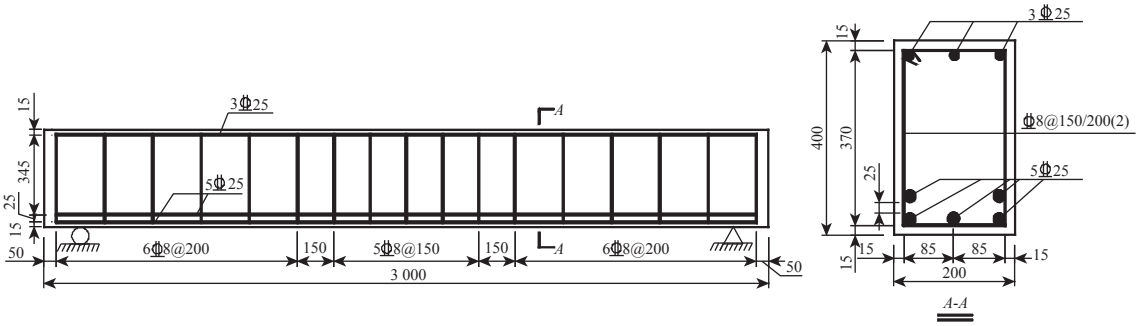


图1　RC梁的几何尺寸及配筋示意图（单位：mm）

Fig. 1　Geometric size and reinforcement diagram of the RC beam(Unit: mm)

试验考虑了U形CFRP条带端部锚固方法和预加载对CFRP布加固RC梁抗剪性能的影响，试件设计见表1。试件B1为未加固对比试件，试件B2，B3和B4为粘贴U形CFRP条带的加固试件，其中试件B2和B3采用机械锚固，试件B4采用CFRP布压条锚固，图2为两种锚固方法的加固示意图。所有加固试件均采用对称的8条U形CFRP条带进行加固，CFRP条带编号从左向右依次为U1~U8。对于机械锚固，先将CFRP布端部采用粘结剂浸渍并在钢锚板上缠绕3圈，然后通过化学锚栓将钢锚板固定在RC梁两侧。钢锚板的长度、宽度和厚度分别为164，38 mm和14 mm，在钢锚板两侧设置了直径为20 mm的圆孔，在钢锚板与CFRP布接触的拐角进行了倒角处理，倒角半径为3 mm。对于CFRP布压条锚固，在CFRP条带顶部纵向粘贴2层100 mm宽、1 450 mm长的CFRP布。为了反映加固前正常使用荷载对RC梁造成的初始损伤，并参考既有研究[10]，对试件B3和B4在加固前首先进行了预加载处理，预加荷载值为未加固试件极限荷载的40%，即165 kN，卸载后再对RC梁进行抗剪加固。预加载试验发现，预加载导致试件出现了弯曲裂缝和斜裂缝。

表1　试件设计详情

Tab.1　Design details of specimens

Specimen	Strengthening method	End-anchorage method	Preloading
B1	Unstrengthening	/	No
B2	Strengthening	Mechanical anchorage	No
B3	Strengthening	Mechanical anchorage	Yes
B4	Strengthening	CFRP sheet anchorage	Yes

1.2　材料性能

试件采用强度等级为C40的商品混凝土进行浇筑，在室外自然条件下养护28 d后，实测的立方体抗压强度平均值为42.3 MPa。试验所用的钢筋等级均为HRB 400级，实测的主要力学指标如表2所示。CFRP布的宽度为100 mm，单层CFRP布的名义厚度为0.167 mm，粘结剂为两组份环氧结构胶，厂家提供的CFRP布与粘结剂的力学性能见表2。

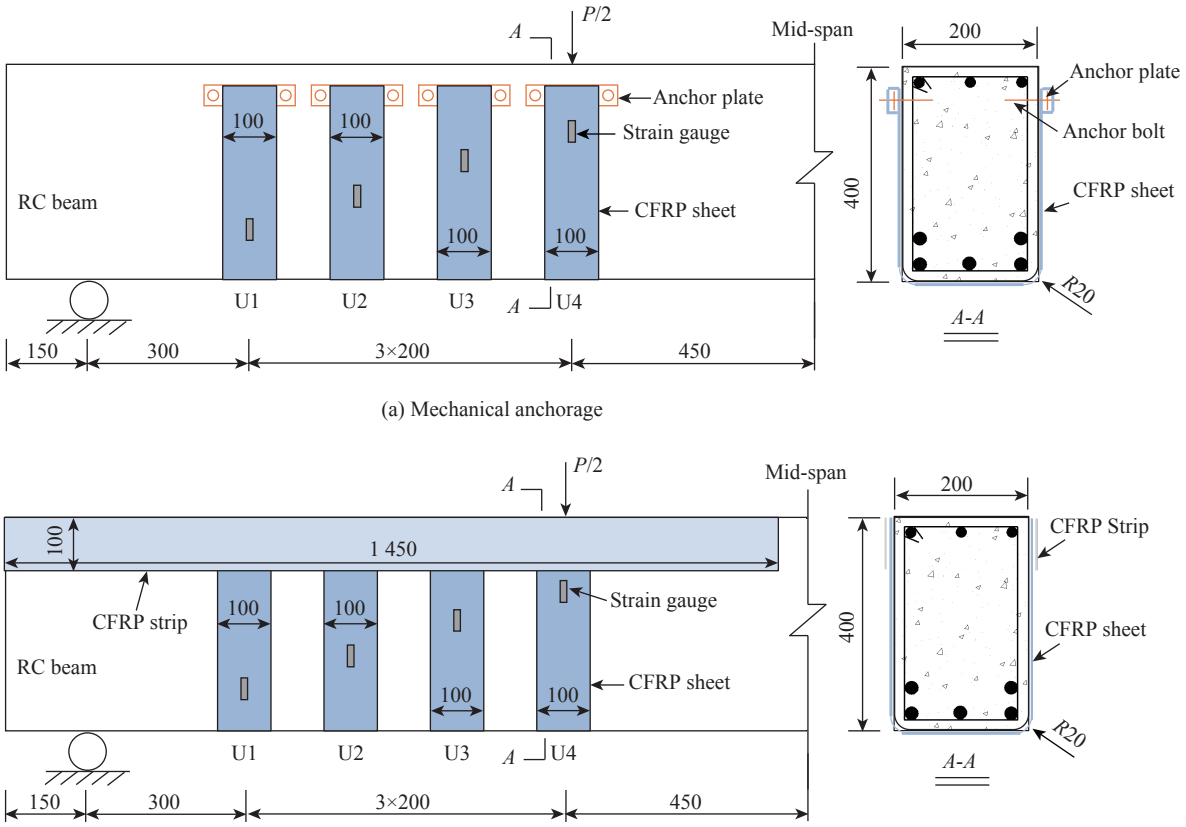
1.3　加载及测量方案

使用量程为1 000 kN的电液伺服试验机进行四点弯曲加载，试件的纯弯段为900 mm，支撑方式为简支支撑，净跨为2 700 mm，剪跨比为2.61。采用分级加载制度和位移控制模式，箍筋屈服前加载速率为0.4 mm/min，每级荷载为40 kN，箍筋屈服后以0.8 mm/min的速率加载至破坏。为了测量试件挠度随荷载的变化，分别在跨中、加载点和支座位置布置了5个位移计。在箍筋和CFRP条带上分别粘贴了8个应变片，粘贴位置为支座-加载点连线（其近似为主斜裂缝延伸方向）与箍筋或CFRP条带的交点。

2　试验结果及分析

2.1　试验现象及破坏模式

试验观察到两种破坏模式，分别为剪压破坏和



(a) Mechanical anchorage

(b) CFRP sheet anchorage

图2 加固方案及锚固方式(单位:mm)

Fig. 2 Reinforcement schemes and anchoring methods (Unit: mm)

表2 材料的主要力学性能

Tab.2 Main mechanical properties of materials

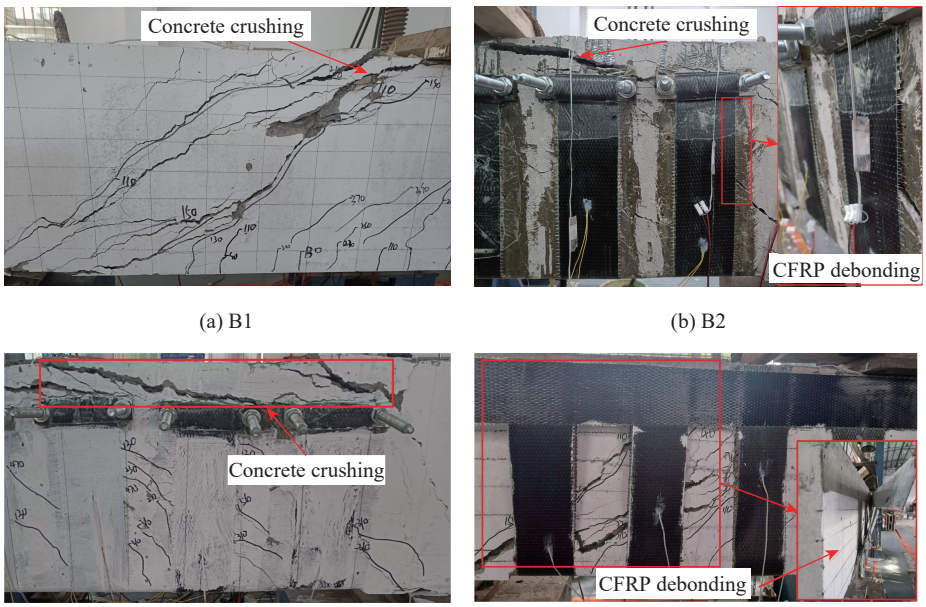
Material	Yield strength/MPa	Tensile strength/MPa	Elastic modulus/GPa	Elongation/%
Stirrup (d=8 mm)	538.4	717.1	196.0	–
Longitudinal steel bar (d=25 mm)	449.0	664.0	191.9	–
CFRP sheet	–	3 512.7	240.0	1.7
Adhesive	–	60.1	2.9	3.4

Note: d is the nominal diameter of the steel bar.

CFRP条带端部剥离破坏。未加固试件B1表现出典型的剪压破坏特征,弯剪段出现斜裂缝后,随着持续加载,斜裂缝朝加载点快速发展,裂缝宽度发展迅速,随后剪压区混凝土被压碎,试件发生剪压破坏,如图3(a)所示。加固试件B2和B3均使用机械锚固,其具有相似的试验现象,在斜裂缝出现后,随着荷载的增加,CFRP条带出现了局部剥离,但是由于机械锚固的存在,CFRP布并未完全从试件表面分离,依然可以继续发挥加固作用,直至剪压区混凝土被压碎,如图3(b)和图3(c)所示。试件B4采用CFRP布压条锚固,随着斜裂缝的不断发展,U2条带首先出现局部剥离,随着荷载的继续增加,U1和U2条带以及CFRP压条完全剥离,导致CFRP条带基本丧失抗剪加固作用,斜裂缝宽度急剧增加,荷载持续下降,失效照片如图3(d)所示。试验结果表明,端部锚固方法对CFRP布抗剪加固RC梁的失效模式有显著影响,在本文研究条件下,机械锚固比CFRP布压条具有更可靠的锚固效果,有效避免了CFRP条带端部剥离破坏的发生,使得CFRP条带的抗剪加固作用能够得到有效发挥。

2.2 荷载-跨中挠度曲线

图4显示了试件的荷载-跨中挠度曲线,其中纵坐标的荷载值为试验机记录的荷载,即两个加载点的荷载之和。整体上看,所有试件的荷载-挠度曲线呈现出两个发展阶段,即上升段和下降段。首先,荷载随着跨中挠度的增加逐渐增大,在斜裂缝



(a) B1　(b) B2　(c) B3　(d) B4

图3　试件的失效照片

Fig. 3　Failure photos of the specimens

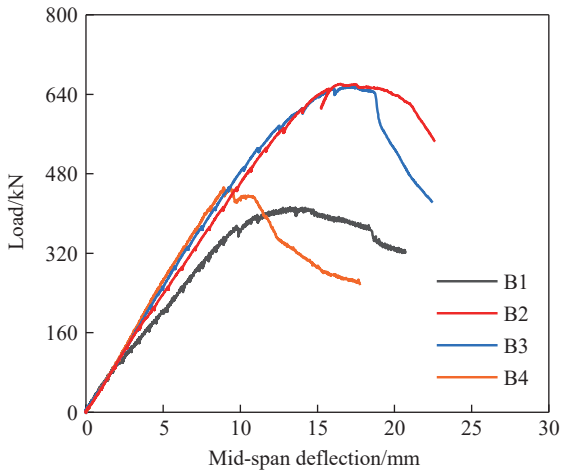


图4　荷载-跨中挠度曲线

Fig. 4　Load-midspan deflection curves

出现之前，所有试件的荷载-挠度曲线的斜率基本相同，说明CFRP条带对RC梁的初始刚度基本没有影响；随着荷载的增加，斜裂缝不断发展，与未加固试件B1相比，各加固试件的刚度均得到提高。当荷载达到最大值后，荷载-挠度曲线进入下降段，荷载随挠度的增加逐渐降低。从图4可以明显看出，试件B4由于CFRP布发生过早的端部剥离失效，其极限荷载及变形均明显低于采用机械锚固的试件，说明相比于CFRP压条锚固，机械锚固由于避免了CFRP的端部剥离破坏，能够更有效地提高RC梁的抗剪承载力和变形能力。

2.3　特征荷载

表3列出了主要试验结果，其中 P_{cr} 表示开裂荷载，对于未损伤试件定义为弯剪段观察到第一条斜裂缝时的荷载，对于损伤试件定义为正式加载过程中弯剪段观察到新斜裂缝时的荷载；P_u 表示极限荷载，取为试验机记录的最大荷载值；α_{cr} 和 α_u 分别表示开裂荷载和极限荷载较未加固试件B1的提升率。需要说明的是，未加固试件B1虽然未进行预加载，但可以理解为试件B1在经历了165 kN的预加载后，如果不加固，那么其能承受的极限荷载为412.5 kN；而对于预加载试件B3和B4，可以理解为他们在经历了165 kN的预加载后，采用CFRP加固能够使其极限荷载分别提高到656.3 kN和452.9 kN。因此在后续分析中，试件B3和B4的开裂荷载和极限荷载提升率仍以试件B1为基准。

2.3.1　预加载的影响

试件B2和B3采用相同的锚固方法，表3的结果表明，试件B2的开裂荷载和极限荷载比试件B1分别提升了65.3%和60.2%；而试件B3开裂荷载和极限荷载的提升率分别为18.8%和59.1%，即试件B3开裂荷载的提升率比试件B2降低了71.2%，而极限荷载提升率降低很小，这说明在本文试验条件下，预加载会明显降低CFRP布加固试件的开裂荷

载，而对极限荷载基本没影响。

2.3.2 锚固方法的影响

对比试件B3和B4的结果发现，机械锚固的加固效果明显优于CFRP布压条锚固，比如试件B3的极限荷载较试件B1提高了59.1%，而试件B4由于采用的压条锚固使得CFRP条带较早出现了端部剥离破坏，导致其极限荷载较试件B1仅提高了9.8%。可见，可靠的端部锚固是确保CFRP抗剪加固效果的关键，与CFRP布压条锚固相比，本文采用的机械锚固方法不仅锚固方便，而且可以大幅提高CFRP布加固RC梁的抗剪承载力。

2.4 材料的应变发展

以试件B2为例分析加载过程中CFRP条带和箍筋的应变发展。图5(a)显示了典型荷载下CFRP条带的应变分布。由图可知，在加载初期(斜裂缝未出现)，所有U形条带的CFRP应变很小并且几乎没有差别，这主要是由于此时剪力主要由混凝土承担，CFRP条带发挥的作用很小。当斜裂缝出现后，各CFRP条带上的应变开始出现明显不同，主斜裂缝穿过的CFRP条带应变大幅增加，而且由于主斜裂缝从支座附近向加载点附近扩展，使得U1和U2条带的应变明显大于U3和U4条带的应变，说明越靠近跨中位置的CFRP条带发挥的加固作用越小，而由于本试验中主斜裂缝并未穿过U4条带，导致U4条带的CFRP应变在整个加载阶段均很小。图5(b)为U1条带及其对应位置处箍筋的荷载-应变曲线。可以看出，CFRP和箍筋的荷载-应变曲线均可分为3个不同的发展阶段，包括近似垂直段、上升段和近似水平段。在斜裂缝出现前，剪力主要由混凝土承载，此时箍筋与CFRP布发挥的作用很小，其应变变化很小，导致荷载-应变曲线几乎为垂直段。在斜裂缝出现后，荷载-应变曲线进入第1个发展阶段，斜裂缝穿过区域的CFRP条带与箍筋的应变随着荷载增加而迅速增长，而且CFRP条带的应变稍滞后于箍筋的应变。在箍筋屈服后，荷载-应变曲线进入第3个发展阶段，此阶段由于箍筋不能提供更大的承载力，增加的荷载仅由CFRP条带承担，因此荷载上升缓慢而应变急剧增加，荷载-应变曲线近似为水平段。

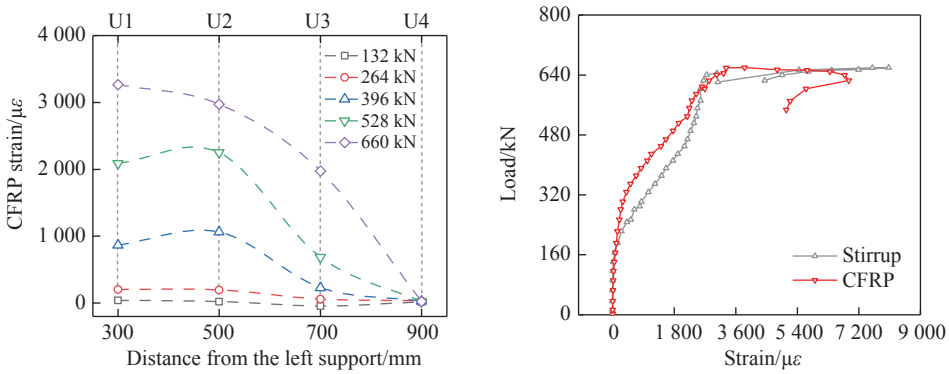
3 抗剪承载力计算

CFRP布加固RC梁的抗剪承载力主要由混凝土与钢筋提供的抗剪承载力V_{cs}和CFRP布提供的抗剪承载力V_f组成，其中V_{cs}可根据《混凝土结构设

表3 主要试验结果

Tab.3 Main test results

Specimen	P_{cr} /kN	α_{cr} /%	P_u /kN	α_u /%	Failure mode
B1	104.0	–	412.5	–	Shear-compression failure
B2	171.9	65.3	660.7	60.2	Shear-compression failure
B3	123.5	18.8	656.3	59.1	Shear-compression failure
B4	110.3	6.1	452.9	9.8	End debonding failure



(a) Strain distribution of CFRP strip

(b) Load-strain curves of CFRP and stirrup

图5 试件B2中CFRP和箍筋的应变发展

Fig. 5 Strain development of the CFRP and stirrup in the specimen B2

计规范》(GB 50010—2010)规定的RC梁抗剪承载力计算方法计算，V_f 可采用《纤维增强复合材料工程应用技术标准》(GB 50608—2020)给出的公式进行计算。上述试验研究表明，本文设置的预加载对CFRP布加固RC梁的抗剪承载力基本没有影响，因此在对试件进行抗剪承载力计算时，没有考虑预加载的影响。

《纤维增强复合材料工程应用技术标准》(GB 50608—2020)针对CFRP粘贴方式和锚固方式分2种情况给出了 V_f 的计算方法。当采用封闭粘贴或有可靠锚固措施的U形CFRP条带加固时，V_f 计算式为

$$V_f = \eta\psi_v \frac{2w_f t_f h_{f,e}}{s_f + w_f/\sin\alpha}\sigma_{f,vd}(\sin\alpha + \cos\alpha) \quad (1)$$

$$\sigma_{f,vd} = \min\left(0.4f_{f,d}, \frac{0.006E_f}{\gamma_f\gamma_e}\right) \quad (2)$$

$$h_{f,e} = h_f - (h - 0.9h_0) \quad (3)$$

式中：η 为U形粘贴端锚区系数，本试验中U形粘贴开口位于截面受压区，η 取1；ψ_v 为二次受力影响系数，本文试验取1.0；w_f 为CFRP垂直纤维方向的宽度；t_f 为单侧CFRP的厚度；$h_{f,e}$ 为CFRP的有效粘贴高度；s_f 为CFRP沿梁轴向净间距；$\sigma_{f,vd}$ 为CFRP的有效拉应力设计值；$f_{f,d}$ 为CFRP的抗拉强度设计值；E_f 为CFRP的弹性模量；γ_f 为材料分项系数，CFRP布取1.4；γ_e 为环境影响系数，取1.0；α 为CFRP纤维方向与水平线的夹角；h_f 为CFRP的实际粘贴高度；h 和 h_0 分别为RC梁的界面高度和有效高度。

当采用U形及侧面粘贴加固时，V_f 计算式为

$$V_f = K_f\tau_b w_f \frac{h_{f,e}^2}{s_f + w_f/\sin\beta}(\sin\beta + \cos\beta) \quad (4)$$

$$K_f = \phi\frac{\sin\beta\sqrt{E_f t_f}}{\sin\beta\sqrt{E_f t_f} + 0.3h_{f,e}f_t} \quad (5)$$

$$\tau_b = 1.2\beta_w f_t \quad (6)$$

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2.25 - w_f/(s_f + w_f)}{1.25 + w_f/(s_f + w_f)}} \quad (7)$$

式中：K_f 为U形及侧面粘贴受剪加固时受剪剥离系数；τ_b 为CFRP布与混凝土的粘结强度设计值；β 为CFRP条带与水平线的夹角；ϕ 为受剪加固形式系数，取1.3；β_w 为CFRP宽度影响系数；f_t 为混凝土抗拉强度设计值。

采用上式对本文试件进行抗剪承载力计算时，材料强度均取为实测强度值。计算结果与试验结果的对比如表4所示，表中 V_{cal} 和 V_{exp} 分别表示CFRP布加固试件的抗剪承载力计算值和试验值，其中试件B2和B3基于式(1)~式(3)计算，试件B4基于式(4)~式(7)计算，V_{exp} 取表3中极限荷载 P_u(试验机记录的最大荷载，即两个加载点最大荷载之和)的一半。整体上看，采用《纤维增强复合材料工程应用技术标准》(GB 50608—2020)公式可以较好地预测本文试件的抗剪承载力，计算值与试验值的相对误差在10%左右，对于采用机械锚固的试件，预测结果偏于保守，这主要是由于公式中没有考虑斜裂缝角度的影响；而对于发生端部剥离的试件，计算结果高估了试验结果，主要是因为本文试验中CFRP条带在箍筋屈服前即发生了端部剥离破坏。

表4　抗剪承载力的计算结果与试验结果比较

Tab.4　Comparison of calculation results and test results of the shear capacity

Specimen	V_{cs} /kN	V_f /kN	V_{cal} /kN	V_{exp} /kN	V_{cal} / V_{exp}
B2	184.2	112.7	296.9	330.4	0.90
B3	184.2	112.7	296.9	328.2	0.90
B4	184.2	72.4	256.6	226.5	1.13

4　结论

1）基于两种CFRP条带端部锚固方法，试验观察到剪压破坏和CFRP条带端部剥离破坏两种破坏模式，采用的机械锚固方法可以有效避免CFRP布的端部剥离破坏，其试件均发生了剪压破坏模式，而CFRP压条锚固不足以提供有效的端部锚固，导致试件过早发生了端部剥离破坏。

2）采用机械锚固的CFRP条带加固可以显著提高RC梁的抗剪性能，其开裂荷载和极限荷载相比未加固试件最大分别提升了65.3%和60.2%。在本文研究条件下，预加载会降低开裂荷载的提升效果，但对抗剪极限承载力基本没有影响，开裂荷载的提升率降低了71.2%。锚固方法对抗剪加固效果有重大影响，采用CFRP压条锚固由于发生了过早的端部剥离破坏，导致加固效果大幅降低。

3）采用《纤维增强复合材料工程应用技术标准》(GB 50608—2020)中相关公式对本文加固试件进行了抗剪承载力计算，发现计算值与试验值符合较好，相对误差约为10%。

参考文献：

[1] 彭晖, 郭恒良, 钟正强, 等. 预应力NSM CFRP抗剪加固钢筋混凝土T梁试验[J]. 中国公路学报, 2022, 35(2): 159-168.
PENG H, GUO H L, ZHONG Z Q, et al. Experimental study on T-section RC beams shear-strengthened with prestressed NSM CFRP[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(2): 159-168.

[2] WANG H T, LIU S S, ZHU C Y, et al. Experimental study on the flexural behavior of large-scale reinforced concrete beams strengthened with prestressed CFRP plates [J]. Journal of Composites for Construction, 2022, 26(6): 04022076.

[3] 王海涛, 卞致宁, 熊浩, 等. 粘结层和预应力对CFRP板加固损伤钢梁抗弯性能的影响[J]. 复合材料学报, 2023, 40(3): 1718-1728.
WANG H T, BIAN Z N, XIONG H, et al. Effects of the adhesive layer and prestress on the flexural behavior of damaged steel beams strengthened with CFRP plates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(3): 1718-1728.

[4] 王海涛, 朱长玉, 熊浩, 等. 锚固方法和预应力水平对CFRP板加固RC梁抗弯性能的影响研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(5): 104-110.
WANG H T, ZHU C Y, XIONG H, et al. Study on the effects of anchorage method and prestressing level on flexural behavior of RC beams strengthened with CFRP plates[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(5): 104-110.

[5] WANG H T, BIAN Z N, XU G W, et al. Flexural strengthening of large-scale RC beams with nonprestressed and prestressed CFRP using different anchorages[J]. Polymers, 2022, 14: 5498.

[6] FOSTER R M, BRINDLEY M, LEES J M, et al. Experimental investigation of reinforced concrete T-beams strengthened in shear with externally bonded CFRP sheets[J]. Journal of Composites for Construction, 2017, 21(2): 4016086.

[7] KOTYNIA R, OLLER E, MARI A, et al. Efficiency of shear strengthening of RC beams with externally bonded FRP materials-state-of-the-art in the experimental tests [J]. Composite Structures, 2021, 267: 113891.

[8] OLLER E, PUJOL M, MARI A. Contribution of externally bonded FRP shear reinforcement to the shear strength of RC beams[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 164: 235-248.

[9] YU F, FANG Y, GUO S, et al. A simple model for maximum diagonal crack width estimation of shear-strengthened pre-damaged beams with CFRP strips[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 41(15): 102716.

[10] GUO S S, HE H F, LIU C, et al. Theoretical and experimental study on shearing capacity of concrete beams reinforced with carbon fiber truss[J]. Composite Structures, 2021, 258: 113382.

[11] 周朝阳, 刘君, 许芃. U形CFRP条带混锚加固混凝土梁抗剪试验[J]. 复合材料学报, 2018, 35(3): 714-721.
ZHOU C Y, LIU J, XU P. Shear tests on RC beams strengthened with hybrid anchored CFRP U-sheets[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(3): 714-721.

[12] MHANNA H H, HAWILEH R A, ABDALLA J A, et al. Shear strengthening of reinforced concrete T-beams with anchored CFRP laminates[J]. Journal of Composites for Construction, 2021, 25(4): 04021030.

[13] KARZAD A S, LEBLOUBA M, ALTOUBAT S, et al. Repair and strengthening of shear-deficient reinforced concrete beams using carbon fiber reinforced polymer[J]. Composite Structures, 2019, 223: 110963.

[14] YU F, GUO S Q, WANG S L. Experimental study on high pre-cracked RC beams shear-strengthened with CFRP strips [J]. Composite Structures, 2019, 225: 111163.

第一作者：黄志刚（1984—），男，正高级工程师，硕士，研究方向为桥梁健康监测，安全评估与桥梁施工控制。E-mail：383613037@qq.com。

通信作者：王海涛（1987—），男，副教授，博士，研究方向为FRP在土木工程中的应用。E-mail：cewht@hhu.edu.cn。

（责任编辑:吴海燕）