

预应力 CFRP 布加固负载混凝土梁受剪性能试验

程东辉¹, 荣 威¹, 周 威²

(1. 东北林业大学 土木工程学院, 150040 哈尔滨, chengdonghui2000@126.com;

2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨)

摘 要: 为研究负载状态下利用预应力碳纤维布加固混凝土梁斜截面受剪性能, 根据配箍率的不同制作 3 组共计 12 根钢筋混凝土梁, 每组选择 1 根混凝土梁进行单点加载受剪试验, 获取极限受剪承载力及裂缝分布等试验数据. 对另 9 根梁预加载至极限受剪承载力的 0.4 倍, 在持荷状态下对试验梁弯剪区段利用预应力碳纤维布加固. 完成这 9 根梁负载加固后的斜截面二次受力受剪承载力试验, 在试验数据基础上分析负载加固梁斜截面受剪破坏机理和影响因素. 结果表明: 采用预应力碳纤维布加固负载混凝土梁斜截面能够抑制斜截面裂缝的产生和发展, 增大混凝土受压区高度, 提高斜截面受剪承载力.

关键词: 预应力 CFRP 布; 加固; 受剪承载力; 二次受力

中图分类号: U491

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)12-0143-06

Experimental research of shear resistance performance on loaded concrete beam reinforced with prestressed CFRP sheet in diagonal section

CHENG Dong-hui¹, RONG Wei¹, ZHOU Wei²

(1. School of Civil Engineering, North East Forest University, 150040 Harbin, China, chengdonghui2000@126.com;

2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

Abstract: To study the shear performance of RC beams strengthened with prestressed CFRP sheets under load, three groups of reinforced concrete beams, total of 12, have been made according to the ratio of reinforcements. In each group, one beam has been chosen to take as contrast beam for single point loading to get experimental data on bearing capacity, as well as fracture distribution. Before the tests, as much as 0.4 times of ultimate shear bearing capacity to the other 9 beams was applied, then the test beams were strengthened at the shear section with prestressed CFRP sheet under load before. Based on the test data, the shear failure mechanism and effect factors of the beams were analyzed. The test result shows that the prestressed CFRP sheets at inclined section could restrain the generation and development of cracks, increase the height of the compression concrete in compression-shear area, as well as improve the shear bearing capacity of inclined section.

Key words: prestressed CFRP sheets; strengthen; shear capacity; second load

碳纤维布 (carbon fiber reinforced polymer sheet, 简称 CFRP 布) 因具有轻质、高强、耐腐蚀和弹性模量高等特点, 可以利用其对混凝土构件进行加固, 延长混凝土结构使用寿命与使用性能. 文

献[1-3]表明: 采用 CFRP 布加固的混凝土构件, 裂缝出现与开展得到抑制、变形受到约束, 从而承载力和刚度得到提高. 但是相关研究也表明^[4-11]: 实际工程中所需加固的混凝土构件通常处于负载状态, 利用 CFRP 布黏贴加固后, 在随后的二次受力过程中, CFRP 布应力始终滞后于构件中的混凝土与受力钢筋的应力, 处于被动受力状态, 需构件产生较大变形才能充分发挥 CFRP 布高强特

收稿日期: 2011-06-20.

基金项目: 中央高校基本科研专项基金项目 (DL09CB04);

黑龙江省自然科学基金资助项目 (E200732).

作者简介: 程东辉 (1971—), 男, 博士, 教授.

点,影响了结构的正常使用.

针对这一问题,有研究者提出对 CFRP 布预先张拉后再对构件进行加固,并开展了预应力 CFRP 布加固混凝土受弯构件的研究^[12-16].文献[14-16]表明:采用预应力 CFRP 布加固的混凝土梁,CFRP 布由被动受力变为主动受力,CFRP 布前期参与受力程度明显提高,能够充分发挥 CFRP 布强度高的特点.当前预应力 CFRP 布加固混凝土构件的研究还主要集中在钢筋混凝土梁正截面加固,对预应力 CFRP 布加固混凝土梁斜截面受剪性能的研究不多,而对负载状态下利用预应力 CFRP 布加固混凝土梁斜截面受剪性能的研究工作尚未开展.本文通过对 9 根负载状态下利用预应力 CFRP 布加固的混凝土梁和 3 根普通混凝土梁斜截面受剪性能的试验,开展预应力 CFRP 布加固负载混凝土梁受剪性能的研究工作.

1 试 验

1.1 研究思路

首先从 3 组试件中各选一根试验梁作为对比梁开展斜截面受剪性能试验,获得 3 根对比梁斜截面受剪承载力、裂缝分布、挠度等试验数据.在此基础上,结合工程实际情况,对各组其余 9 根试验梁分别加载至对比梁极限受剪承载力的 0.4 倍,持荷状态下在加载点与近端支座间设置两道预应力 CFRP 布进行加固,待环氧树脂胶固化后对试验梁二次加载直至破坏.

1.2 试验梁设计

试验拟采用单点加载,根据加载点与近端支座间配筋率 $\rho_{sv}(\rho_{sv}=nA_{sv1}/(bs))$,其中 A_{sv1} 为单肢箍筋截面积, n 为同一截面箍筋肢数, b 、 s 分别为梁截面宽度和箍筋间距)的不同,设计制作了 3 组、每组各 4 根钢筋混凝土简支梁.试验梁截面尺寸均为 150 mm×280 mm,试验梁跨度及配筋如图 1 所示.各试验梁底部均配置 4 ϕ 20 纵向受力钢筋,箍筋强度等级为 HPB235,混凝土强度等级为 C20.

1.3 试验梁的负载加固方案

为解决 CFRP 布张拉及黏贴难题,试验过程中研制了一种预应力 CFRP 布张拉机具,如图 2 (a)所示.张拉时将承压装置④放置在梁顶,依据《混凝土结构加固设计规范》(GB50367—2006)(简称“加固规范”)中的相关规定在 CFRP 布表面及所需加固处的混凝土梁底及梁侧涂刷环氧树脂胶,利用预压螺母②提升钢辊将 CFRP 布张拉至设计值.待环氧树脂胶固化后拆除张拉机具,通

过预应力 CFRP 布的回缩实现对混凝土的预压. CFRP 布张拉力的大小可以通过放置在预压螺母与承压装置间的压力传感器进行监测.

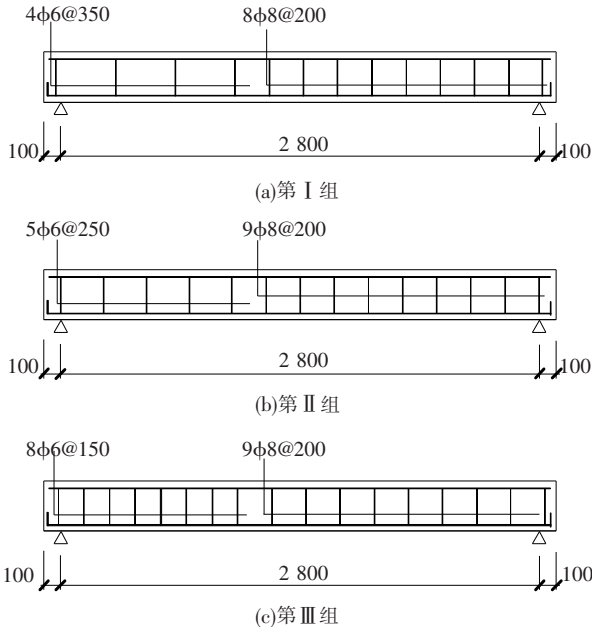
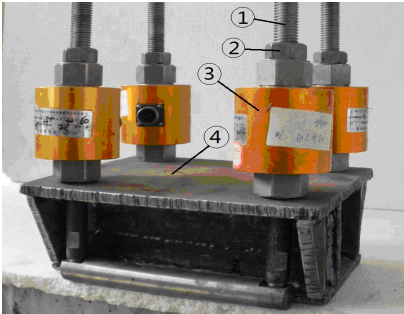


图 1 试验梁尺寸及配筋图



(a)张拉机具实物图



(b)碳纤维布张拉实图

①钢辊;②预压螺母;③力传感器;④承压装置.

图 2 张拉机具

为考察 CFRP 布加固方式对受剪承载力的影响,在第 3 组试件中设置两种 CFRP 布加固方式:加固 I 型和加固 II 型.加固 I 型是将张拉后的 CFRP 布在梁底与梁两侧黏贴加固,拆除张拉机具后在其末端留长度为 50 mm 非预应力 CFRP 布,并将这段 CFRP 布黏贴于梁顶,如图 3 (a)所示;加固 II 型是将 CFRP 布张拉后在梁顶处截断,

按《加固规范》的有关要求在端部设置 800 mm×50 mm 宽的普通 CFRP 布横向压条,如图 3(b)所示。

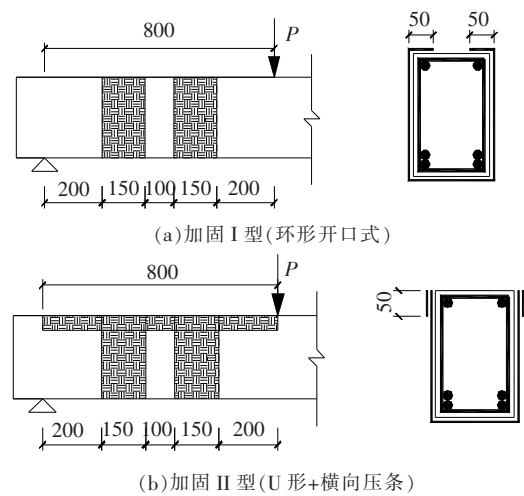


图 3 试验梁加固区段详图

试验用 CFRP 布采用日本东丽公司产品;极限拉应力 3 700 MPa,弹性模量 246 GPa,厚度 0.111 mm.各试验梁加载点至近端支座间的配箍率、CFRP 布黏贴加固方式、预加载值及 CFRP 布预拉应力如表 1 所示。

表 1 试验梁参数

编号	加固方式	配箍率 ρ_{sv} %	预拉应力 MPa	预加载值 kN
DBL1	-	0.107	-	0
YJGL1-a	I 型	0.107	400	15
YJGL1-b	I 型	0.107	600	15
YJGL1-c	I 型	0.107	800	15
DBL2	-	0.151	-	0
YJGL2-a	I 型	0.151	400	20
YJGL2-b	I 型	0.151	600	20
YJGL2-c	I 型	0.151	800	20
DBL3	-	0.251	-	0
YJGL3-a	I 型	0.251	400	30
YJGL3-b	I 型	0.251	600	30
YJGL3-c	II 型	0.251	800	30

1.3 加载及测试方案

试验梁采用单点分级加载,加载点距近端支座 800 mm,以每级 5 kN 加载至试验梁破坏。

试验梁采用下列装置进行数据采集:在每片 CFRP 布上布置若干应变片,用以监测试验过程中 CFRP 布应力变化;在加载点与近端支座连线处的各肢箍筋表面黏贴应变片,用以监测箍筋应力变化;试验梁加载点、跨中及两端支座分别设置位移传感器用以监测试验梁的变形。试验梁加载

及测量装置如图 4 所示。

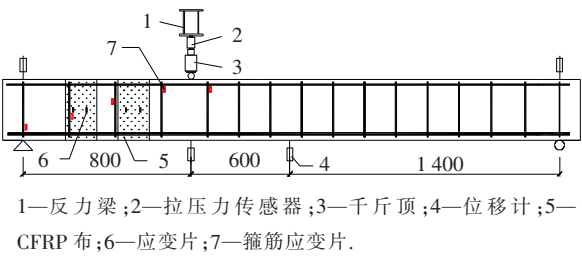


图 4 加载及测量方案

2 现象与结果

2.1 试验现象

1) 预加载阶段试验梁在加载点截面处混凝土因受弯而首先出现裂缝,随着荷载不断加大梁腹部有斜裂缝出现,但是裂缝宽度及高度均不大。加载至设定值后持荷,利用预应力 CFRP 布对试验梁斜截面进行加固,经观察加固过程对已有裂缝宽度、裂缝高度、箍筋应力及测点挠度没有显著影响。

2) 在加固后的二次加载过程中,试验梁表面由于预加载时产生的裂缝在二次加载过程中的宽度和高度均发展缓慢,且新增裂缝数量不多。

3) 荷载加至一定程度时,CFRP 布出现轻微响声,这是环氧树脂胶逐渐开裂造成的;同时在试验梁加固区段有一条主斜裂缝从支座附近指向加载点,该裂缝高度及宽度明显大于其他各条斜裂缝;与此同时梁底混凝土不断出现因受弯而产生的裂缝。

4) 临近破坏时,主裂缝高度增加较快,而裂缝宽度变化不大;此外预应力 CFRP 布表面测点的实测数据表明,CFRP 布中各纤维束应力增量不均匀。

5) 破坏时试验梁出现以下几种破坏形态:

① 3 根对比梁的破坏为典型的剪压破坏,即由于临界斜裂缝的发展,压区混凝土面积减小,最后在荷载作用下箍筋受拉屈服,混凝土被压碎;

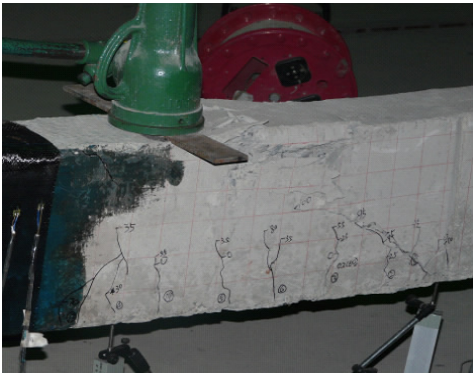
② 采用加固 I 型的第 1 组和第 2 组加固试验梁破坏时加固区段箍筋受拉屈服、混凝土被压碎,导致加固试验梁斜截面丧失承载力,如图 5(a) 所示;而第 3 组加固试验梁中 YJGL3-a 和 YJGL3-b 的加固区段混凝土未破坏,另一侧未加固区段混凝土被压碎导致试件破坏,如图 5(b) 所示。

③ 采用 II 型方式加固的试验梁 YJGL3-c,梁侧混凝土在荷载与预应力 CFRP 布共同作用下处于复合受力状态,随着荷载增加 CFRP 布横向压条的锚固作用很快消失,预应力 CFRP 布向外侧

裂开,梁侧混凝土由于粘结力的作用而剥落,削弱了试验梁受剪截面,反而降低构件受剪承载力,试验梁破坏时的状态如图 6 所示。



(a) YJGL2-b



(b) YJGL3-a

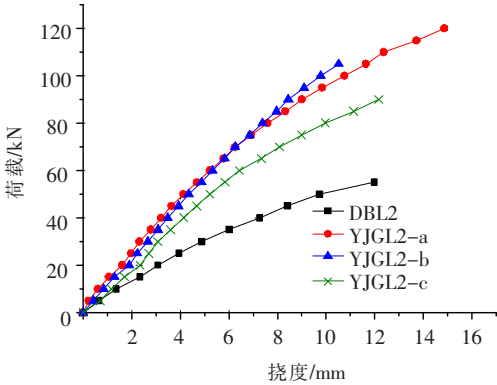
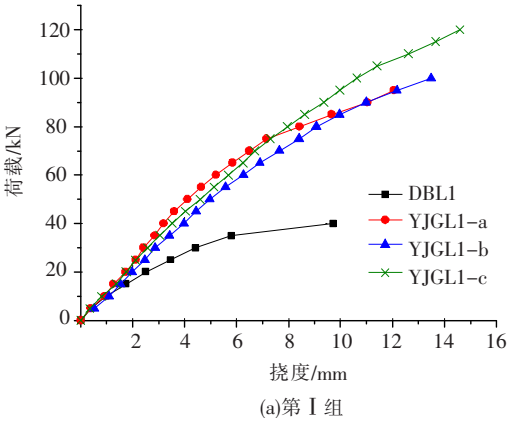
图 5 加固 I 型试验梁破坏形态



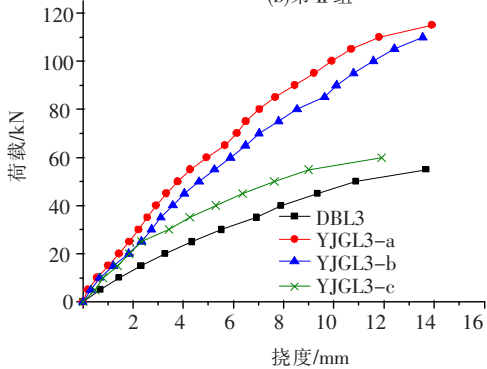
图 6 加固 II 型试验梁破坏形态

2.2 试验梁的变形

由图7给出的3组试验梁荷载-跨中挠度曲



(b)第 II 组



(c)第 III 组

图 7 荷载-跨中挠度曲线

线可以看出:各加固试验梁在预加载阶段的跨中变形与未加固试验梁相应加载阶段的变形曲线一致.利用预应力 CFRP 布对斜截面加固后,加固试验梁在二次受力过程中,挠度曲线的斜率增大,说明加固试验梁正截面刚度有所增加。

2.3 试验结果

表 2 给出了各试验梁正截面开裂荷载、斜裂缝出现荷载、极限荷载等主要试验结果。

表 2 试验结果

梁号	$\frac{P_{cr}}{kN}$	$\frac{P_{v,cr}}{kN}$	$\frac{P_u}{kN}$	$\frac{\beta}{\%}$
DBL1	15	25	40	—
YJGL1-a	20	35	95	138
YJGL1-b	30	30	100	150
YJGL1-c	20	55	120	200
DBL2	15	30	55	—
YJGL2-a	30	40	120	118
YJGL2-b	35	40	105	91
YJGL2-c	30	50	90	64
DBL3	15	25	60	—
YJGL3-a	35	35	115	92
YJGL3-b	35	45	110	83
YJGL3-c	35	45	55	-8

注: P_{cr} 为正截面开裂荷载; $P_{v,cr}$ 为斜裂缝出现荷载; P_u 为斜截面极限受剪承载力; β 为极限受剪承载力提高幅度,即加固试验梁与未加固试验梁极限受剪承载力差值与未加固试验梁极限受剪承载力比值。

3 试验分析

3.1 裂缝开展

图 8 以第 I 组试验梁为例给出了裂缝分布状

况.可以看出:对比梁达到受剪承载力极限状态时,在支座与加载点间形成了贯通的主斜裂缝,而其余斜裂缝高度不大.对比梁是由于主斜裂缝不断发展导致压区混凝土受压面积减小、最终达到极限抗压强度而破坏.而 3 根加固试验梁虽然在预加载过程中已经产生斜裂缝,但是由于预应力 CFRP 布的约束作用,限制了已有裂缝的发展,制约了新裂缝的出现,增大了混凝土受压区面积,进而提高了加固试验梁二次受力后斜截面受剪承载力.加固试验梁的破坏是由于荷载的不断加大导致压区混凝土达到极限强度从而丧失承载力.

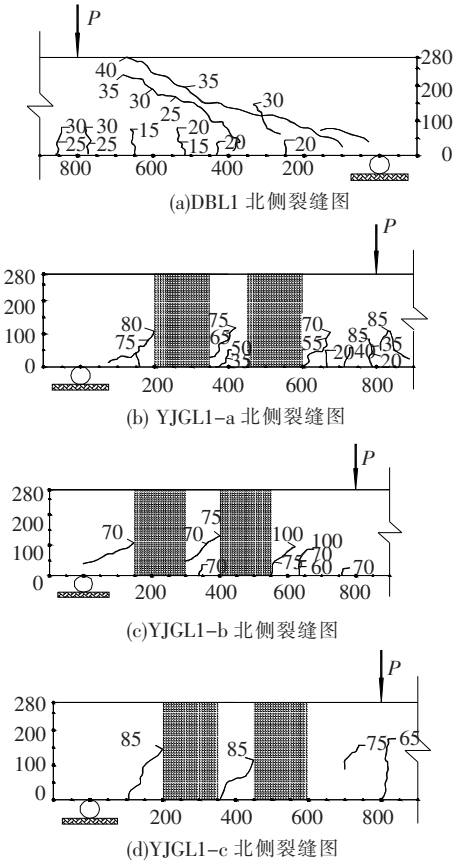


图 8 第 I 组试验梁加固区段裂缝图

3.2 箍筋与预应力 CFRP 布的协同受力

图 9 给出了在预应力 CFRP 布张拉应力相同、配箍率不同的情况下 3 根加固试验梁加载过程中箍筋与 CFRP 布应力增量变化曲线.可以看出:加固试验梁在加固前的预加载过程中,箍筋应力增加不大,而在加固后二次受力过程中,初始阶段箍筋能够与预应力 CFRP 布协同受力,后期随着预应力 CFRP 布对裂缝发展限制作用的增大,CFRP 布的应力增量明显大于箍筋的应力增量(图 9(a)、(b)),说明这一阶段预应力 CFRP 布承担了二次加载过程中的大部分剪力;另一方面,对于预加载值比较大的 YJGL1-c 试验梁,预加载阶段箍筋应力较大,试验梁二次受力过程后,预应

力 CFRP 布应力增长较快,分担了箍筋应力,使试验梁破坏时箍筋应力未达到屈服强度,如图 9(c)所示.

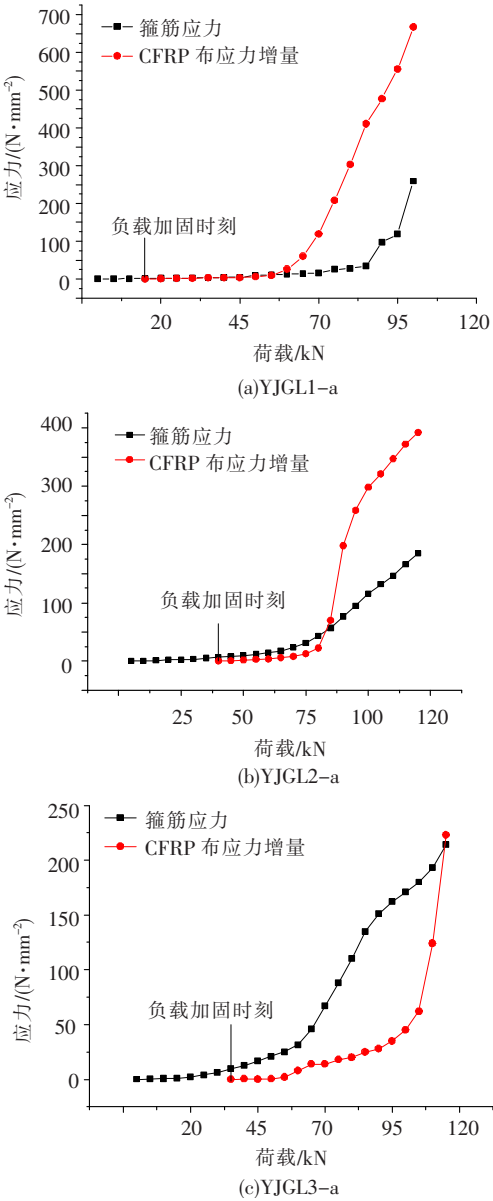


图 9 箍筋应力与 CFRP 布应力增量关系

3.3 预应力 CFRP 布加固形式对承载力的影响

第 3 组试验梁设置了两种 CFRP 布张拉黏贴方式:加固 I 型和加固 II 型.试验结果表明:加固 I 型中 CFRP 布末端非预应力黏贴段起到了良好的锚固作用,加载过程使预应力 CFRP 布能够保持良好的工作状态,直至加固试验梁破坏时 CFRP 布仍未与混凝土剥离.而加固 II 型虽有横向压条存在,但对预应力 CFRP 布的锚固作用不大,梁侧混凝土在荷载和预应力 CFRP 布的作用下很快剥落,削弱了试验梁受剪截面,降低了受剪承载力.

3.4 CFRP 布预拉应力对受剪承载力的影响

由表 2 的试验结果可以看出:对于配箍率较低的第 1 组试验梁,利用预应力 CFRP 布对负载

试验梁斜截面加固后,极限受剪承载力的提高幅度 β 随 CFRP 布预拉应力的增加而增大;而对配箍率相对较高的第 2 组试验梁,利用预应力 CFRP 布对负载试验梁斜截面加固后, β 随 CFRP 布预拉应力的增加反而降低.说明在低配箍率情况下利用预应力 CFRP 布对混凝土梁斜截面进行加固效果较好.

4 结 论

1)负载状态下对混凝土梁斜截面利用预应力 CFRP 布加固后,在混凝土梁二次受力过程中,预应力 CFRP 布能够显著提高混凝土梁斜截面极限受剪承载力,延缓裂缝发展.

2)利用预应力 CFRP 布加固负载混凝土梁,在二次受力过程中改变了以往 CFRP 布加固后的被动受力状态,充分发挥了 CFRP 布强度高的特点.

3)预应力 CFRP 布加固负载混凝土梁斜截面极限受剪承载力与 CFRP 布张拉应力有关;配箍率较低时,斜截面受剪极限承载力提高幅度随 CFRP 布预拉应力的提高而增大,反之则减小.

参考文献:

[1] 张玉成.碳纤维布加固钢筋混凝土梁抗剪性能研究[D].武汉:武汉大学,2005.

[2] 李翔,顾祥林,张越芳.碳纤维布加固低强度混凝土梁的抗剪性能[J].建筑结构,2008,38(7):46-49.

[3] 吴刚,安琳,吕志涛.碳纤维布用于钢筋混凝土梁抗剪加固的试验研究[J].建筑结构,2000,30(7):16-20.

[4] WIGHT R G, GREEN M F, ERKI M A. Post-strengthening concrete beams with prestressed FRP sheets[C]// Proceedings of the Second International RILEM Symposium (FRPRCS-2), RILEM Proceedings 29 Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. Gh-

ent Belgium: Taerwe L, 1995: 568-575.

- [5] 张伟.预应力碳纤维布加固混凝土梁的理论分析与数值模拟[D].大连:大连理工大学,2010.
- [6] PENLLEGRINO C, MODENA C. Fiber reinforced polymer shear strengthening of reinforced concrete beams with transverse steel reinforcement [J]. Journal of Composites for Construction, 2002, 5(3): 104-111.
- [7] KHALIFA A, NANNI A. Rehabilitation of rectangular simply supported RC beams with shear deficiencies using CFRP [J]. Construction and Building Materials, 2002, 16(3): 135-146.
- [8] 曹双寅,潘建伍,邱洪兴.外贴纤维加固梁抗剪承载力计算方法分析[J].东南大学学报:自然科学版,2002,32(5):766-770.
- [9] 任海东,黄承逵,赵国藩,等.玻璃纤维布加固二次受力钢筋混凝土梁抗剪试验研究[J].大连理工大学学报,2004,44(3):425-430.
- [10] 谭壮,叶列平.纤维复合材料布加固混凝土梁受剪性能的试验研究[J].土木工程学报,2003,36(11):12-18.
- [11] 郝震.外贴碳纤维(CFRP)加固梁斜截面受力性能的实验研究[D].南京:东南大学,2004.
- [12] 匡志平,张健,王皓波.无腹筋梁的碳纤维抗剪加固分析[J].同济大学学报,2003,31(7):778-782.
- [13] 赵彤,谢剑,戴自强.碳纤维布提高钢筋混凝土梁受剪承载力试验研究[J].建筑结构,2000,30(7):21-25.
- [14] 陈华.预应力 CFRP 板加固钢筋混凝土梁抗弯性能的试验研究[D].西安:西安建筑科技大学,2003.
- [15] 庄江波.预应力 CFRP 布加固钢筋混凝土梁的试验研究与分析[D].北京:清华大学,2005.
- [16] 姜新佩.预应力碳纤维布加固混凝土梁的试验研究[J].西北工业大学学报,2007,25(4):492-496.

(编辑 刘 彤)