

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201601064

无粘结预应力 U 形 CFRP 加固混凝土梁抗剪试验

周朝阳¹,赵波涌¹,刘 君¹,韩殿牧原^{1,2}

(1.中南大学 土木工程学院,长沙 410075;2.广州地铁设计研究院有限公司,广州 510010)

摘 要:针对外贴纤维布抗剪加固钢筋混凝土梁极易发生纤维剥离破坏、纤维利用率低且被动受力等问题,开发了一套 U 形纤维带预应力系统,包括侧面端部自锁锚固装置、角钢和底部连接及张拉装置.为验证该系统的可行性及探讨碳纤维带预应力大小对抗剪加固效果的影响,完成了 5 个较大截面矩形梁段试件的单点加载抗剪试验,其中 1 个未加固,4 个采用无粘结预应力 U 形碳纤维带进行抗剪加固.试验结果表明:该系统能给 U 形纤维带提供可靠预应力,并把常见的纤维剥离破坏转变为拉断破坏,大大提高纤维利用率;施加预应力的纤维带对梁裂缝的产生与发展及开裂后梁刚度的退化均有明显的抑制作用;预应力大小对主斜裂缝倾角及直接参与抗剪的纤维带数量影响较大,但对这些纤维带的有效应变影响不大;并非预应力越大,抗剪加固效果越好,本试验中,仅将纤维带预应变张拉至 0.001 就能大幅度提高梁的抗剪承载力.基于试验结果分析,从考虑竖向平均预应力对主斜裂缝倾角的影响入手,提出了无粘结预应力 U 形碳纤维带加固混凝土梁抗剪承载力公式,其计算值与试验值符合良好.

关键词:钢筋混凝土梁;碳纤维带;预应力;自锁锚固;无粘结;抗剪加固

中图分类号: TU378.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2017)06-0015-06

Shear tests of RC beams strengthened with unbounded prestressed U-straps of CFRP

ZHOU Chaoyang¹, ZHAO Boyong¹, LIU Jun¹, HAN Dianmuyuan^{1,2}

(1.School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

2.Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010, China)

Abstract: A novel set of prestressing system for U-straps of FRP was developed for shear strengthening of RC beam to restrain debonding failure, realize active reinforcement and achieve efficient utilization of FRP. It included self-locking anchorage, angle steel and device for connecting and tensioning. The single point loading tests of 5 RC beams with full-sized rectangular section were carried out, among which one remained unstrengthened, and the other four were strengthened in shear using unbonded prestressed U-straps of CFRP. The feasibility of the technique was verified and the influence of prestress on the behavior of RC beams shear-strengthened with unbounded prestressed CFRP U-straps was discussed. The experiments show that the system can provide reliable prestress for U-straps of FRP and transform the conventional debonding failure of FRP to the tensile failure. Prestressing can obviously inhibit the occurrence and development of main diagonal crack and the stiffness degradation after cracking. The level of prestress has a significant influence on the inclination angle of the main diagonal crack and the number of U-straps of FRP directly involved in shear resistance, but it has a little effect on the effective strain of these fibers. But the shear-strengthening effect cannot keep becoming better with the increase of the prestress. In this experiment, the maximum shear capacity of the strengthened beams is reached with a prestrain of 0.001. Based on the test data, a new expression was proposed for shear capacity of the strengthened beams using unbounded prestressed U-straps of CFRP, in which the influence of the vertical average prestress on the inclination of the main diagonal crack was considered. The predicted capacities are in accordance with the test results.

Keywords: RC beam; strap of CFRP; prestress; self-locking; unbonded; shear-strengthening

目前,外贴纤维增强复合材料(FRP)在钢筋混凝土梁抗剪加固中的应用越来越广泛.然而,大部分传统粘贴加固梁的破坏是由 FRP 的过早剥离所引

起^[1-6],不仅破坏具有明显脆性,而且 FRP 强度利用率极低.另外,传统加固方式中,FRP 只有在梁变形足够大的情况下才能发挥作用^[7-8],属于被动受力.

为解决上述问题,开发高效的锚固措施并与预应力技术相结合已成为业内研究的热点.国外直接利用预应力片材进行抗剪加固的研究报道出自文献[9-11].近年来,他们采用了一种热塑性碳纤维(CFRP)条带,加固矩形截面梁的做法是先在截面

收稿日期: 2016-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(51378507);

湖南省自然科学基金重点项目(2013JJ2005);

中南大学教师研究基金(2013JSJ019)

作者简介: 周朝阳(1964—),男,教授,博士生导师

通信作者: 赵波涌, zhaoboyong24@foxmail.com

上下各置一钢制垫块,将纤维条带绕梁数圈后,其最外圈末端与次外圈相应位置通过加热熔焊起来,让条带形成封闭环以取得可靠锚固效果;若需施加预应力,则对一钢制垫块进行顶压以使封闭条带受拉。对于 T 形截面梁,翼缘靠近腹板边缘处需开槽让封闭条带穿过。这种熔焊封闭条带的抗剪加固效果不错,但现场开槽作业并不容易,特别是当梁上有楼板或墙时,他们用穿孔的方式形成熔焊封闭条带,这不但很难实施,还会给梁造成较大的内部损伤。实际上,采用 U 形条带可避开形成封闭条带的实际困难及其衍生的问题。彭刚等^[12]较早尝试采用预应力 U 形 FRP 对混凝土矩形梁进行抗剪加固,但其施工方法除了预应力施加难度较大、装置占用高度过大等问题外,更无可靠的条带锚固措施,这可能是其最终加固效果不明显的主要原因。

为此,本文开发了一套抗剪加固用 U 形 FRP 带预应力系统,它既可提供有效端锚,又可轻松对纤维带施加可靠预应力。利用此系统,采用无粘结预应力 U 形 CFRP 对足尺混凝土矩形梁进行抗剪加固,探讨了预应力大小对抗剪加固效果的影响,提出了承载力计算公式。

1 系统简介

U 形纤维带预应力系统由固定端、角钢、张拉端 3 个部件组成,见图 1。固定端由开缝板^[13-14]和植筋螺杆组成。开缝板巧妙利用摩擦原理,仅需将 FRP 端部以特定方式缠绕在板上,即可通过摩擦使 FRP 达到自锁锚固状态^[15]。实际应用中,一般在 FRP 端

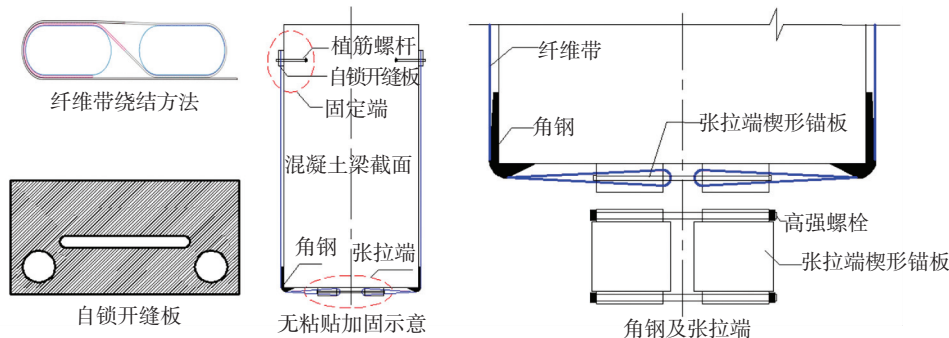


图 1 预应力 U 形纤维带自锁锚固系统及加固方法

Fig.1 Self-locking anchorage system and strengthening methods of prestressed U-straps of FRP

2 试验设计

本试验共有 5 个试件,其中 1 个为对比试件,另外 4 个为加固试件,均为混凝土矩形梁段,截面尺寸为 250 mm×500 mm。梁的具体几何尺寸及配筋详情见图 2,鉴于本试验的目的是考察抗剪能力,在配筋设计时,明显增加了抗弯纵筋的用量,同时抗剪箍筋的用量偏少。纵筋采用 HRB400 级钢筋,箍筋采用过

部涂抹浸渍胶再进行缠绕,待胶固化后可获得更加可靠的锚固。绕结完成后,将自锁开缝板安置在预先植入梁内的螺杆上并拧紧螺帽固定。

角钢利用圆钢加工而成,通过结构胶粘于梁角,其主要目的是实现 U 形 FRP 侧面和底面之间的光滑过渡,缓解 FRP 转角处的应力集中和摩擦损失,同时与其余两个部件共同保证 FRP 与梁表面留有适当宽度的空隙,实现无粘结加固。另外,为保证转角区域混凝土不被角钢压坏,将角钢的两肢延伸一定长度,以增加受压接触面积,减少转角处混凝土的应力。

张拉端由楔形锚板和高强螺栓组成。在梁底对称布置一对楔形锚板,在锚板两侧各设一根高强螺栓,使一对锚板建立联系,通过螺栓给纤维带施加预应力,预应力的的大小通过 FRP 带侧面粘贴的应变片来控制。

自锁开缝板、角钢和楔形锚板的材料及尺寸设计均应以相关规范为基础,通过有限元分析进行强度复核及调整优化,以适应不同强度、宽度和层数纤维布的抗剪加固方案。植筋螺杆和高强螺栓的截面面积要求则可根据下式进行验算:

$$A_B = \frac{nw_t t_f f_t}{2\tau_B}, \quad (1)$$

$$A_s = \frac{nw_t t_f f_t}{2f_s}. \quad (2)$$

式中: A_B 为植筋螺杆截面面积, A_s 为高强螺栓截面面积, n 为 FRP 条带层数, w_t 为 FRP 条带宽度, t_f 为单层 FRP 厚度, f_t 为 FRP 抗拉强度, τ_B 为植筋螺栓抗剪强度, f_s 为高强螺栓抗拉强度。

去常用的 HPB235 级钢筋,加固用纤维带采用英国 Sigmalex 品牌的 CFRP 布。各梁混凝土强度相同,混凝土立方体抗压强度实测值为 39.67 MPa;CFRP 及各型号钢筋材性测试结果见表 1。

为尽量避免混凝土强度离散性的影响,以及解决常规三分点加载中数据量过大的问题,试验采用“一梁二用”的方案,即梁两端均为试验区段,中间为箍筋加密区段,首次试验时,梁支承在端部和一个

三分点处,跨度为 2 m,在另一个三分点处(即跨中)单点加载,剪跨为 1 m,见图 3。二次试验时,支点和加载点位置整体向右平移 1 m。

加固试件的纤维带布置方案见图 3。CFRP 带预应力大小作为唯一的试验变量考虑(表 2),各试件其他参数均相同,其中,CFRP 带均为 2 层,厚 0.167 mm,宽度取为 50 mm,便于采用小规格尺寸锚具对条带施加沿宽度分布较为均匀的预应力。

试验中 CFRP 带与梁表面均无粘结,每根条带同一水平截面布置 2~3 个应变片,以测试各 CFRP 带的平均应变。支座和跨中处分别布置千分表和百

分表,以测试梁的竖向位移,得到跨中挠度。在加载过程中,观察主斜裂缝的产生与发展,并测量主斜裂缝的宽度。

表 1 钢筋及 CFRP 材料性能

Tab.1 Material properties of reinforcement and CFRP sheets

材料	直径(厚度)/ mm	弹性模量/ GPa	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa
箍筋	6.500	210	372.2	509.5
	10.000	210	505.1	606.1
纵筋	25.000	200	464.5	606.6
	28.000	200	475.8	654.9
CFRP	0.167	230	—	3 319.0

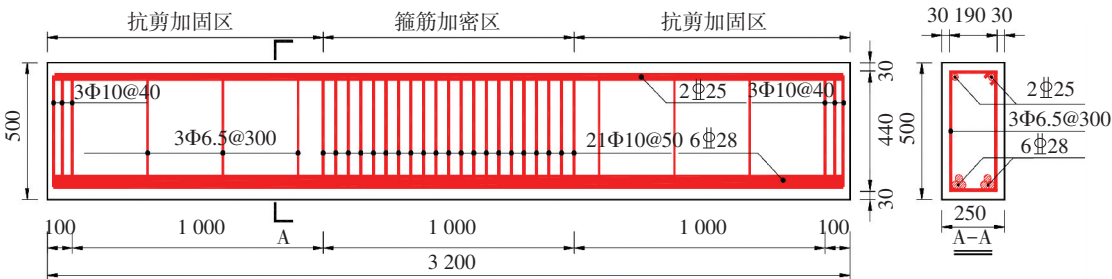


图 2 试验梁尺寸及配筋图(mm)
Fig.2 Dimensions and reinforcement of test beam (mm)

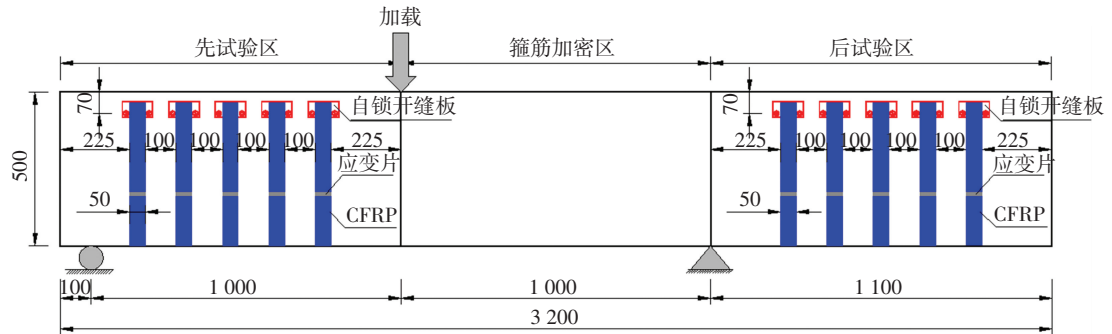


图 3 试验梁加固及加载方案(mm)
Fig.3 Strengthening and loading schemes of test beam (mm)

3 试验结果及分析

3.1 试验现象

对比梁的破坏特征属于典型的剪压破坏,在此不再赘述。加固梁的破坏过程大致如下:

- 1)当加载至 210 kN 左右时,各试件均在加载点截面底部附近出现竖向受弯裂缝。
- 2)随着荷载的增加,梁腹部有较短斜裂缝出现,但发展缓慢;此过程中 CFRP 带应变几乎不增长。
- 3)当荷载增至某值时,梁腹部斜裂缝迅速向支座和加载点两端延伸,形成一条主斜裂缝,但各试件的主斜裂缝倾角有所不同,详见表 2;与此同时,CFRP 带应变突增。
- 4)随着荷载的进一步增大,新的斜裂缝鲜有出现;主斜裂缝宽度逐渐增大,但其两端几乎不再延

伸;CFRP 带应变逐步增加,且由于局部浸渍胶被拉裂,CFRP 带间或发出轻微响声。

5)当梁临近破坏时,加载点附近出现横向裂缝,并伴有混凝土剥落;主斜裂缝宽度及加固梁 CFRP 带应变增长加速。

破坏时,除 Y₁ 外,其他试件均发生以剪压区压坏为标志的剪压破坏,而 Y₁ 因最终承载力高达 995kN,纵筋拉应力过大而导致锚固不足,发生了锚固破坏;CFRP 带中,未被主斜裂缝穿过的最终保持完好,而被主斜裂缝穿过的全部被拉断,且拉断与混凝土梁的破坏几乎同时发生;尽管 CFRP 带被拉断,但预应力锚固装置未见任何损伤。试验梁破坏形态见图 4。

这批加固试件极限承载力较对比试件均有大幅度提高,Y₁ 的提高幅度最大,达 96%。

表 2 试验结果
Tab.2 The test results

试件号	预应变 $\varepsilon_p/10^{-4}$	主斜裂缝 荷载/kN	主斜裂缝荷载 提高百分比/%	极限 荷载/kN	极限荷载提高 百分比/%	主斜裂缝 倾角 $\theta/(^{\circ})$	破坏模式
C	—	332	—	508	—	31	S
Y_0	0	363	9	840	65	30~33	S/R
Y_1	10	456	37	995	96	28~30	A/R
Y_2	20	466	40	795	56	38	S/R
Y_3	35	435	31	746	47	39~42	S/R

注:试件编号中,C-对比试件,Y-加固试件;S—剪压破坏;A—锚固破坏(纵筋锚固不良,支座附近钢筋拉应力增大和粘结长度缩短而发生的粘结破坏);R—FRP 拉断破坏;破坏模式 S/R 表示 S、R 几乎同时发生,余类推。

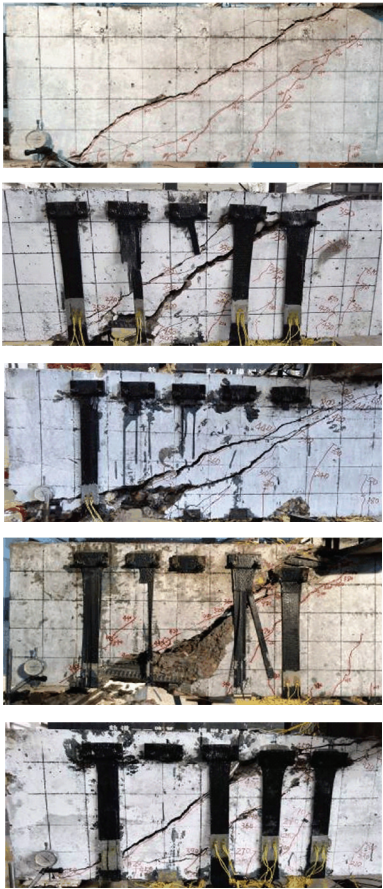


图 4 试验梁破坏形态

Fig.4 Failure modes of test beams

3.2 挠度

图 5 为各试件荷载-挠度曲线。从加载初期到主斜裂缝出现之前,各试件荷载-挠度曲线基本重合,以相同的斜率线性增长,这说明加固与否及给 CFRP 带施加多大预应力对混凝土梁弹性刚度无明显影响。主斜裂缝出现后,各试件荷载-挠度曲线开始偏离原有线性轨迹,斜率逐渐减小,即梁的刚度逐渐退化。但相较于对比试件,加固试件刚度退化较为缓慢,其中施加预应力的试件减缓程度更甚,这间接说明施加预应力的 CFRP 带更能抑制主斜裂缝的发展,从而延缓主斜裂缝出现后加固梁整体刚度的退化。

3.3 主斜裂缝

3.3.1 主斜裂缝荷载

无论加固与否,混凝土梁主斜裂缝的产生均具有

很大的突然性。但相对未加固试件而言,加固试件产生主斜裂缝的荷载均有所提高,未施加预应力的 Y_0 提高幅度仅为 9%,但施加预应力的 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 均有 30% 以上的大幅提高,详见表 2。这充分说明预应力对于抑制主斜裂缝的产生具有显著的作用,在一定程度上改善了纤维带因被动受力而参与抗剪滞后的问题。

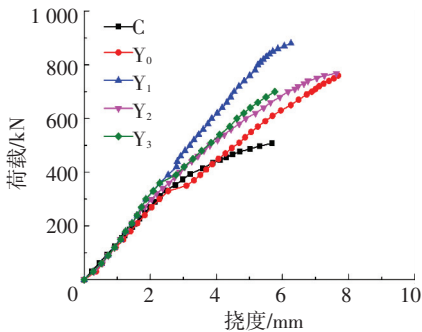


图 5 荷载-跨中挠度曲线

Fig.5 Load-midspan deflection curve

3.3.2 主斜裂缝倾角

试验中未施加预应力的 Y_0 主斜裂缝倾角与对比梁相近,施加较小预应力的 Y_1 主斜裂缝倾角略小于对比梁,而施加较大预应力的 Y_2 、 Y_3 主斜裂缝倾角明显大于对比梁,见表 2 及图 4。显然,主斜裂缝倾角的变化与加固区段竖向 CFRP 带的预应力大小密切相关,这是因为给竖向 CFRP 带施加预应力相当于通过预应力自锁锚固系统在梁上作用了多个竖向压力,从而影响了梁内部的应力状态,进而改变了主斜裂缝倾角。

为了描述这种关系,本文定义了一个新的物理量:竖向平均预应力 σ_p ,用来衡量加固区段竖向纤维带预应力大小,其表达式为

$$\sigma_p = \frac{2E_f\varepsilon_p n t_f w_f}{b s_f} = E_f \varepsilon_p \rho_f \tag{3}$$

式中: σ_p 为竖向平均预应力,MPa; E_f 为 FRP 弹性模量; b 为梁截面宽度; s_f 为 FRP 条带中心间距; ρ_f 为 FRP 条带配纤率。

通过回归分析,给出了主斜裂缝倾角 θ 和 σ_p 的关系式为

$$\cot \theta = -2.40\sigma_p^2 + 0.76\sigma_p + 1.66. \tag{4}$$

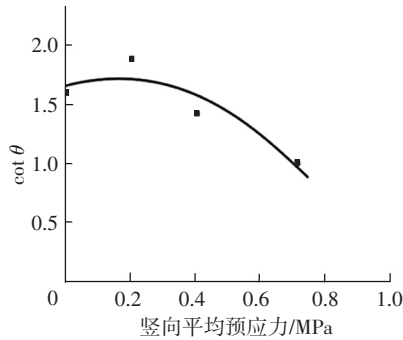


图 6 cot θ 随竖向平均预应力的变化

Fig.6 Variation of cot θ with average vertical prestress

值得注意的是,主斜裂缝的倾角决定了主斜裂缝穿过 CFRP 带的数量,一般而言,只有被主斜裂缝穿过的条带才有可能发挥比较大的作用.如图 4 所示,试验梁主斜裂缝倾角较大时裂缝往往绕过了第五根条带,甚至包括第四根条带,致使其发挥的作用极其有限.因此,在设计中,为使主斜裂缝尽可能多穿过条带,应通过施加适当大小的预应力、控制配纤率使竖向平均预应力处于不至于过大影响主斜裂缝倾角的合理区间;此外,采取一些构造措施,例如尽量提升锚固高度(即减小固定端到梁顶的距离),对此也有一定帮助.

3.3.3 主斜裂缝宽度

图 7 给出了各试件的荷载-裂缝宽度曲线.由图可见,加固(尤其是施加预应力的)能够显著抑制裂缝宽度的发展.在各施加预应力的试件中, Y_2 、 Y_3 裂缝宽度发展相近, Y_1 裂缝宽度发展最缓,这是由于 Y_1 主斜裂缝倾角较小,穿过了所有条带,所有条带均参与抑制裂缝宽度的发展,而 Y_2 、 Y_3 主斜裂缝相对较陡,绕过了部分条带,致使这些条带发挥约束裂缝加宽的作用非常小.将 Y_2 、 Y_3 进行对比发现,虽然二者主斜裂缝倾角相差明显, Y_2 主斜裂缝仅绕过了第五根条带,而 Y_3 主斜裂缝绕过了第四、第五两根条带,但二者对裂缝宽度发展的约束作用却极其相近,这说明高预应力一定程度上弥补了裂缝倾角过大对抑制裂缝宽度发展的负面作用.

综上所述,给纤维带施加预应力对于抑制主斜裂缝的产生和发展均有明显的作用.但并不是预应力越大,约束作用越理想,设计使用时需综合考虑其他多个加固参数,如配纤率以及锚固高度等.

3.4 纤维带有效应变

FRP 抗剪加固中,有效应变取主斜裂缝所穿过的各条带最终应变的平均值.图 8 给出了本次试验 FRP 有效应变随竖向平均预应力的变化情况,随着竖向平均预应力的递增,FRP 有效应变基本稳定在 0.005 5 左右,这表明给 FRP 施加预应力对于 FRP 有效应变的影响并不大,其原因分析如下:竖向平均预应力主要影响主斜裂缝倾角,导致主斜裂缝绕过

某些边缘条带,但在计算 FRP 有效应变时,只需考虑被主斜裂缝穿过条带的应变.已有研究表明,对于被主斜裂缝穿过的条带,发生拉断破坏时,其应变近似地与主斜裂缝宽度成正比^[3].本文虽已证明施加预应力的纤维带更能抑制加载过程中裂缝宽度的发展,但因各试件最终承载力不同,当试件发生破坏时,裂缝宽度的差别并不大(见图 7),这使得不同预应力加固试件的 FRP 有效应变相差也不大.

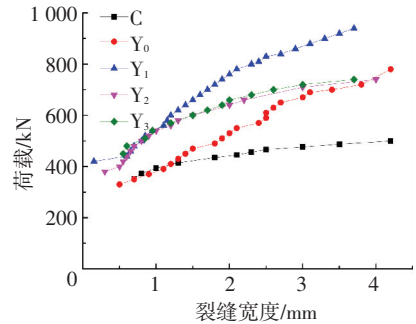


图 7 荷载-斜裂缝宽度曲线

Fig.7 Curves of load versus diagonal crack width

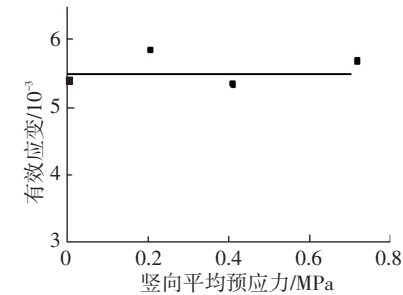


图 8 有效应变与竖向平均预应力的关系

Fig.8 Relation between effective strain and average vertical prestress

然而,现有研究对于端锚无粘结 U 形 CFRP 抗剪加固鲜有涉及,其有效应变取值可供参考的文献很少,因此,本文后续计算中,将 CFRP 有效应变暂定为 0.005 5.

4 极限承载力计算

预应力 CFRP 带对抗剪承载力的贡献包括直接贡献和间接贡献.直接贡献指 CFRP 带承担了一部分的剪力,可由 CFRP 带的有效应变反映.间接贡献为预应力 CFRP 对混凝土梁抗剪承载力的影响,包括以下两个方面:预应力 CFRP 带对裂缝发展的抑制作用提高了混凝土梁的骨料咬合力,并且增大了梁的剪压区面积;但是裂缝宽度相对减小以及裂缝倾角的增大一定程度上减小了直接参与抗剪的纤维带和箍筋的数量.

FRP 加固混凝土梁的抗剪承载力 V_u 可表示为

$$V_u = V_c + V_s + V_f \tag{5}$$

式中: V_u 为加固后梁的抗剪承载力, V_c 为混凝土的抗剪承载力, V_s 为箍筋的贡献, V_f 为 FRP 的贡献.

为安全起见, V_c 仍采用 GB50010—2010《混凝土结构设计规范》抗剪承载力公式; 因预应力对主斜裂缝倾角有较大的影响, V_s 、 V_f 均采用着重考虑了裂缝倾角的桁架模型. 可得最终承载力公式为

$$V_u = \frac{1.75}{\lambda + 1.0} f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \cot \theta + \alpha \frac{A_f E_f \varepsilon_{fe} d_f}{s_f} \cot \theta.$$

(6)

式中: λ 为剪跨比; f_t 为混凝土轴心抗拉强度; h_0 为梁的有效高度; f_{yv} 为箍筋抗拉强度; A_{sv} 为同一截面内箍筋各肢的全部截面面积; s 为箍筋间距; α 为加固系数^[2], 考虑 CFRP 加固施工质量可能产生的不利影响, 取值为 0.8; A_f 为同一截面内纤维总截面面积; ε_{fe} 为纤维有效应变; d_f 为纤维有效高度, 可取截面高度减去植筋螺杆到梁顶的距离.

由式(6)可以看出, 无粘结预应力 U 形 FRP 抗剪加固中, 主斜裂缝倾角对极限承载力的影响很大, 由此可以解释加固梁中 Y_1 的极限承载力最大主要得益于其主斜裂缝倾角最小.

将式(4)代入式(6), 可得本试验的计算结果, 见表 3. 计算值与试验值比较接近.

表 3 试件承载力计算

Tab.3 Calculated results of shear capacity

试件号	试验值/kN	V_c / kN	V_s / kN	V_f / kN	V_u / kN	相对误差/%
Y_0	420	181	61	201	443	5.5
Y_1	498	181	63	208	452	-9.2
Y_2	398	181	57	190	428	7.5
Y_3	373	181	35	117	333	-10.7

5 结 论

1) 本文开发的无粘结预应力 U 形纤维带系统既可对纤维带端部进行可靠锚固, 实现了纤维带的拉断破坏, 又可对纤维带施加可靠预应力, 改善了纤维带的被动受力.

2) 无粘结预应力 U 形碳纤维带对加固梁主斜裂缝的产生与发展以及梁开裂后刚度的退化有明显的抑制作用.

3) 采用无粘结预应力 U 形碳纤维带加固能大幅提高混凝土梁的抗剪承载力, 本次试验最大提高幅度几近翻倍.

4) 竖向平均预应力对加固梁主斜裂缝倾角有很大影响.

5) 无粘结预应力 U 形 FRP 抗剪加固中, 给 FRP 施加预应力对于 FRP 有效应变的影响并不大.

6) 综合考虑竖向平均预应力对箍筋和碳纤维带抗剪贡献的影响, 给出了无粘结预应力 U 形碳纤维带加固混凝土梁抗剪承载力公式, 其计算值与试验值吻合较好.

参考文献

[1] 陆新征. FRP-混凝土界面行为研究[D]. 北京: 清华大学, 2005. LU Xinzheng. Studies on FRP-Concrete Interface[D]. Beijing: Tsinghai university, 2005.

[2] 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. TAN Zhuang, YE Lieping. Experimental research on shear capacity of RC beam strengthened with externally bonded FRP sheets[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(11): 12-18.

[3] 滕锦光, 陈建飞, S T 史密斯, 等. FRP 加固混凝土结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005. TENG Jinguang, CHEN Jianfei, SMITH S T, et al. FRP strengthened RC structure[M]. Beijing: China Architecture&Building Press, 2005.

[4] ISLAM M R, MANSUR M A, MAALEJ M. Shear strengthening of RC deep beams using externally bonded FRP systems[J]. Cement&Concrete Composites, 2005, 27: 416-417.

[5] 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. REN Haidong, HUANG Chengkui, ZHAO Guofan, et al. Experimental research on shear strengthening of preloaded RC beams with externally bonded GFRP sheets[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2004, 44(3): 425-430.

[6] 曹双寅, 滕锦光, 陈建飞, 等. 外贴纤维加固斜截面纤维应变分布的试验研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(11): 6-11. CAO Shuangyin, TENG Jinguang, CHEN Jianfei, et al. Experimental study on strain distribution in externally bonded FRP for shear strengthening of RC beams[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(11): 6-11.

[7] 张自荣, 张素梅, 石柱梅. 纤维加固钢筋混凝土梁抗剪性能试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(3): 366-369. ZHANG Zirong, ZHANG Sumei, SHI Guimei. Shear behavior of RC beams strengthened by fiber reinforced plastic[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004, 36(3): 366-369.

[8] 贺拴海, 任伟, 赵小星. 碳纤维布对具有初应力的钢筋混凝土梁抗剪加固试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2004, 24(1): 34-39. HE Shuanhai, REN Wei, ZHAO Xiaoxing. Experiments of shear capacity of RC beam bridges rehabilitated with CFRP under loading case[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2004, 24(1): 34-39.

[9] KESSE G, LEES J M. Experimental behavior of reinforced concrete beams strengthened with prestressed CFRP shear straps[J]. J. Composite for Construction, 2007, 11(4): 373-383.

[10] HOULT N, LEES J M. Efficient CFRP straps configurations for the shear strengthening of reinforced concrete T-beams[J]. J. Composite for Construction, 2009, 13(1): 45-52.

[11] DIRAR S, LEES J M, MORLEY C T. Precracked reinforced concrete beams repaired in shear with prestressed carbon fiber-reinforced polymer straps[J]. ACI Structural Journal, 2013, 110(5): 855-865.

[12] 彭刚, 刘立新, 李险峰. 预应力碳纤维布加固钢筋混凝土梁受剪性能试验研究[J]. 河南科学, 2005, 23(3): 407-410. PENG Gang, LIU Lixin, LI Xianfeng. A study on shear properties of RC beams strengthened with prestressed carbon fiber sheet[J]. Henan Science, 2005, 23(3): 407-410.

[13] 周朝阳, 周奥利, 周欣涛. 柔性片状材料绕杆自锁的方法: ZL201010269384 [P]. 2012-11-21. ZHOU Chaoyang, ZHOU Aoli, ZHOU Xintao. Method for self-locking flexible tape by winding around bar: ZL201010269384 [P]. 2012-11-21.

[14] 周朝阳, 周奥利, 周欣涛. 柔性片状材料平行杆式锚固装置及方法: ZL2010105166838 [P]. 2012-01-25. ZHOU Chaoyang, ZHOU Aoli, ZHOU Xintao. Device and method for self-locking flexible tape by twin-bars in parallel: ZL2010105166838 [P]. 2012-01-25.

[15] 谢龙. 预应力碳纤维带自锁式张拉锚固系统开发[D]. 长沙: 中南大学, 2014. XIE Long. Development of tensioning and self-locking system for prestressed straps of CFRP [D]. Changsha: Central South University, 2014.

(编辑 赵丽莹)