

文章编号:1673-2049(2015)06-0043-07

CFRP 加固钢筋混凝土直剪承载力试验

林 峰,黎艳翔,董 羽

(同济大学 建筑工程系,上海 200092)

摘要:设计 15 个外贴碳纤维增强复合材料(CFRP)的 Z 型试件进行直剪加载试验,试验参数包括直剪面钢筋配筋率(0.46%~1.2%)和 CFRP 加固率(0%~0.3%)。依据试验结果提出加固后钢筋混凝土直剪承载力预测表达式,并基于分量模型分析其加固机理。研究表明:直剪承载力随 CFRP 加固率增大而提高,提高幅度为 6%~50%;相同 CFRP 加固率时,直剪承载力提高幅度随配筋率的增加而降低,承载力提高源于 CFRP 提供了附加的侧向夹紧力;当外贴 CFRP 和内埋直剪钢筋提供相等的侧向夹紧力时,两者对直剪承载力的贡献作用相近;所提出的承载力预测表达式具有较好的适用性。

关键词:碳纤维增强复合材料;钢筋混凝土;直剪;加固;极限承载力;分量模型

中图分类号:TU375

文献标志码:A

Experiment on Shear Transfer Capacity of Reinforced Concrete Strengthened with CFRP

LIN Feng, LI Yan-xiang, DONG Yu

(Department of Structural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Total fifteen typical Z-type specimens strengthened with external carbon fiber reinforced polymer (CFRP) strips were tested to investigate their shear transfer capacities. Test parameters included reinforcing steel bar ratios (0.46%-1.2%) and CFRP reinforcement ratios (0%-0.3%). Expressions were proposed to predict the shear transfer capacities of CFRP strengthened concrete. The reinforcement mechanism of shear transfer was analyzed based on component model. The study results show that the shear transfer capacities improve in a range of 6%-50% with the increasing of CFRP reinforcement ratios. Moreover, for a given CFRP reinforcement ratio, the percentage of improvement decreases with the increasing of reinforcing steel bar ratios. The capacity improvement is believed due to the clapping force from CFRP. An approximate strengthening effect is realized when the external CFRP and the internal reinforcements provide identical clapping force in lateral direction. The proposed expressions to predict the shear transfer capacities have good applicability.

Key words: CFRP; reinforced concrete; shear transfer; strengthening; ultimate bearing capacity; component model

0 引言

直剪(亦称剪摩)破坏是混凝土结构基本破坏形

式之一,破坏特征是剪切面与荷载作用方向基本平行。一般认为,若构件截面的材料或几何不连续且存在较大剪力时,容易发生直剪破坏,比如牛腿根

收稿日期:2015-05-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51578399)

作者简介:林 峰(1971-),男,安徽滁州人,副教授,工学博士,E-mail:lin_feng@tongji.edu.cn。

部、新旧混凝土结合面等^[1]。

直剪承载力不足或发生直剪破坏后,可考虑进行加固。然而,目前各国规范还没有提出针对直剪受力混凝土的具体加固方法和承载力预测方法。应用于直剪加固的方法主要有^[2]:增大截面法、置换混凝土法、外加预应力法、粘贴纤维复合材料法、粘贴钢板法等。由于粘贴纤维复合材料加固法具有轻质高强、施工简便、曲面或转折粘贴方便、价格低廉等优点,近年来得到广泛应用。

采用碳或玻璃纤维增强聚合物(CFRP 或 GFRP)加固混凝土直剪承载力的研究十分有限。文献[3]中考虑 4 种包裹方式、4 种加固率(0.3%~1.2%)和 3 个剪应力与正应力比,采用 36 个非预裂构件研究 CFRP 的加固效果,所有构件均没有配置直剪钢筋。文献[4]中采用近表面内贴 CFRP 条带以及外贴 CFRP 板材的加固方式,考虑 1 个配筋率(0.377%)和 4 种加固率(0.307%~0.614%)下的预裂构件加固效果。Jayaprakash 等^[5]研究了单一加固率下配筋率变化对预裂构件直剪承载力的影响,但是试验中出现 CFRP 剥离和 CFRP 纤维拉断破坏 2 种失效模式,影响承载力分析结果。Lucas 等^[6]对纤维增强复合材料(FRP)筋构件的剪摩机制进行了探索研究,认为弹性模量显著影响直剪承载力。此外,GFRP 作为加固材料也有报道^[7]。这些研究结果表明,无论对于预裂还是未预裂混凝土,加固后直剪承载力在一定程度上得到提高,但研究仍存在不足,如研究参数(加固率和配筋率)范围较为单一,对加固机理的理解有待深入,总体认识呈“碎片化”。

为填补现有认识的不足,本文研究进行 CFRP 加固混凝土直剪承载力试验,提出相应的承载力预测表达式,分析其加固机理,力图给出此种加固方法相对完整的认识。

1 试验概况

1.1 试件设计

设计 15 个传统 Z 型直剪试件,研究参数包括配筋率(直剪钢筋截面面积比直剪截面面积)和加固率(直剪截面处 CFRP 面积比直剪截面面积)。直剪试件参数见表 1,设置了 5 种配筋率(0.46%,0.60%,0.92%,1.06%和 1.20%)和 3 种加固率(0%,0.224%和 0.298%)。试件编号的 Z 字母后第 1 和第 2 个数字分别表示配筋率和加固率。

图 1 给出了试件 Z09 系列的尺寸、配筋、加固方

表 1 直剪试件参数

Tab. 1 Shear Transfer Specimen Parameters

试件编号	配筋	配筋率/%	加固率/%
Z04-00	2C14	0.46	0.000
Z04-22	2C14		0.224
Z04-30	2C14		0.298
Z06-00	2C16	0.60	0.000
Z06-22	2C16		0.224
Z06-30	2C16		0.298
Z09-00	4C14	0.92	0.000
Z09-22	4C14		0.224
Z09-30	4C14		0.298
Z11-00	2C14+2C16	1.06	0.000
Z11-22	2C14+2C16		0.224
Z11-30	2C14+2C16		0.298
Z12-00	4C16	1.20	0.000
Z12-22	4C16		0.224
Z12-30	4C16		0.298

式和应变片位置。试件外轮廓尺寸为 390 mm×700 mm×240 mm。为引导直剪面规则形成,在试件前后表面沿直剪面位置处各埋入 15 mm 深的薄木片,故直剪面实际尺寸为 320 mm×170 mm。配置不同数量和直径的 HRB400 钢筋,以实现直剪钢筋不同配筋率。在试件上下端配置足够多受弯钢筋并附加 2 片钢筋网,且在试件中部接近直剪面两侧配置足够多的平行于直剪面的侧向钢筋,这些构造防止受弯、局压等破坏形式较早发生。受弯钢筋和直剪钢筋保护层厚度分别为 25 mm 和 20 mm。CFRP 采用市场某品牌产品,质量为 300 g,厚度为 0.167 mm。视加固率不同粘贴 1~3 层于试件前后表面,其纤维方向与直剪面垂直。这样布置使得试件受力发生侧向膨胀后,CFRP 受拉并提供侧向夹紧力。CFRP 锚固长度取 195 mm,经计算该长度已足够^[8]。按照规范^[2]粘贴 CFRP,施工步骤包括表面打磨、配置树脂、裁剪和敷设 CFRP、养护等。

商品混凝土的配合比见表 2,强度等级 C30。试验得到混凝土轴心抗压强度为 24.7 MPa,直径 14 mm 和 16 mm 的直剪钢筋弹性模量均为 2×10⁵ MPa,屈服强度分别为 497 MPa 和 542 MPa,极限强度分别为 594 MPa 和 652 MPa,CFRP 弹性模量为 2.47×10⁵ MPa,拉伸强度为 4 501 MPa。

1.2 加载制度与量测内容

试验在同济大学耐久性实验室进行。采用 3 000 kN 微机控制电液伺服岩石试验机进行加载,见图 2。在试件上下侧放置钢垫板和滚轴,以防止局压破坏并实现集中力加载。

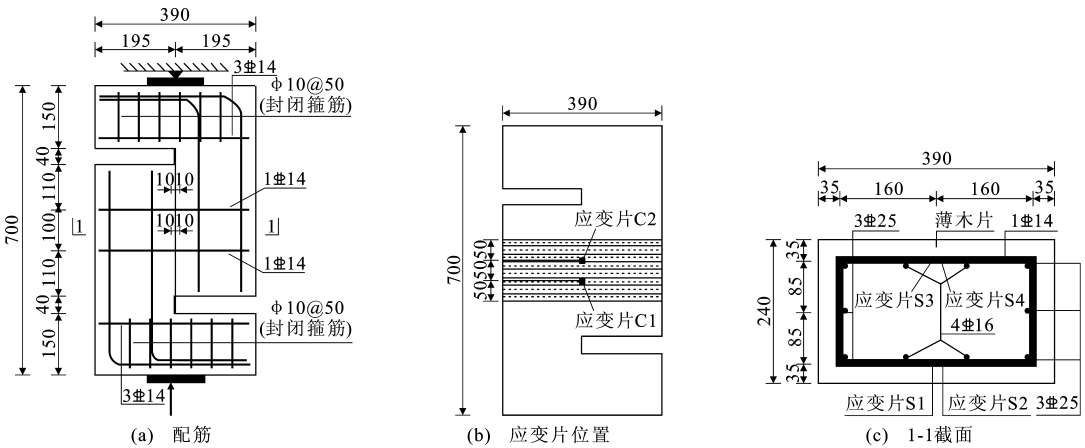


图 1 试件 Z09 系列尺寸、配筋、加固方式和应变片位置 (单位:mm)

Fig. 1 Dimensions, Reinforcement, Reinforced Mode and Strain Gauge Positions for Specimen Series Z09 (Unit:mm)

表 2 混凝土配合比

Tab. 2 Mix Proportions of Concrete

原材料	水	水泥	砂 1	砂 2	石	粉煤灰	外加剂	矿粉
规格	自来水	P. O 42. 5	中砂	中砂	粒径 5~16 mm	2 级	ZK904-3	S95
用量/(kg·m ⁻³)	134	248	294	546	1 010	65	5. 35	69

试验采用单调分级加载。前期采用力控制方式,速度为 8 kN·min⁻¹,级距为 50 kN。观察到直剪面裂缝贯通后,切换至位移控制加载,速度为 0. 1 mm·min⁻¹,对于未加固试件保持此速度至极限荷载。对于加固试件,当观察到 CFRP 发生剥离现象后,速度增大为 1 mm·min⁻¹。所有试件加载至



图 2 加载装置
Fig. 2 Loading Setup

承载力显著下降后,认为试件破坏,停止加载。

试验中量测加载力、钢筋应变和 CFRP 应变。加载力由试验机自动记录。应变片的栅长和栅宽分别为 2 mm 和 1 mm,应变片位置见图 1(b)。在直剪钢筋每肢上布置 2 个应变片,位于直剪面两侧 10 mm 处。在试件前后表面 CFRP 上各粘贴 2 个应变片,共 4 片,位于直剪面上 CFRP 条带宽度范围内三分点位置,应变片方向与 CFRP 的纤维方向一致。因其他研究需要,试验还量测了直剪面沿竖向相对位移和侧向相对位移,不在本文介绍。

2 试验结果与分析

2.1 试验现象与破坏形态

全部试件发生直剪破坏。试件典型破坏形态见图 3。当力控制加载至 163~278 kN 时(每个试件各异),在试件前表面或后表面可发现 1 条细密的直

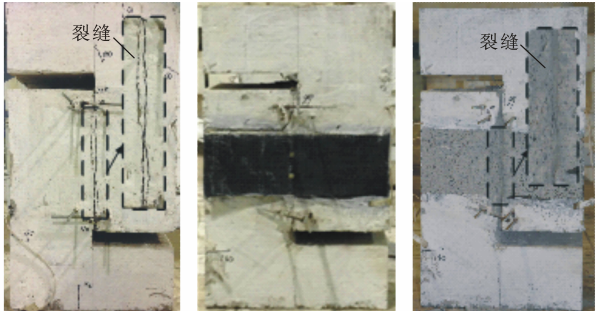


图 3 试件典型破坏形态

Fig. 3 Typical Failure Modes of Specimens

剪裂缝,此时加载方式切换为位移加载,随后裂缝不断发展变宽。对于未加固试件,因混凝土开裂可听到“噼啪”声,逐步加载达到峰值后承载力急剧下降。对于加固试件,接近极限荷载时可听到稀疏的“噼啪”声,加载达到极限值时,试件前表面或后表面 CFRP 剥离并发出“嘭”的巨响,随之荷载急剧下降。不久另一表面 CFRP 也剥离并发出巨响,荷载进一步下降。可见,破坏均呈脆性特点,破坏前没有明显先兆。比较而言,加固后试件的破坏更突然。

2.2 极限承载力

试件的极限承载力见表 3。由表 3 可见,极限承载力随 CFRP 加固率的增加而增大,提高范围为 6%~50%。此外,当 CFRP 加固率相同时,承载力提高幅度随着配筋率的增加而降低。如当加固率为 0. 298%时,低配筋率下极限承载力提高 50%,而高

表 3 试件极限承载力

Tab. 3 Ultimate Bearing Capacity of Specimens

试件编号	试验结果		预测结果	
	承载力/kN	提高幅度/%	承载力/kN	相对误差/%
Z4-00	272	0.0	279	2.4
Z4-22	392	44.1	338	-14.0
Z4-30	409	50.4	356	-13.0
Z6-00	323	0.0	333	2.9
Z6-22	364	12.7	381	4.7
Z6-30	415	28.5	396	-4.6
Z9-00	408	0.0	394	-3.3
Z9-22	477	16.9	430	-9.8
Z9-30	488	19.6	442	-9.4
Z11-00	427	0.0	433	1.3
Z11-22	490	14.8	464	-5.4
Z11-30	505	18.3	474	-6.1
Z12-00	441	0.0	470	6.7
Z12-22	469	6.3	497	5.9
Z12-30	471	6.8	506	7.3

配筋率下极限承载力仅提高 6%左右。

2.3 荷载-钢筋应变

试验得到了所有试件荷载-钢筋应变关系,图 4 为典型的荷载-钢筋应变曲线。对于未加固试件,以图 4(a),(b)中 Z12-00 为例说明。在未观察到直剪裂缝前,钢筋应变增长缓慢。荷载达到约 170 kN 时第 1 条直剪裂缝出现,随后钢筋应变增长速度显著加快。达到荷载峰值 441 kN 附近时,钢筋应变逐步增长直至接近屈服应变。对于加固后试件,以图 4(c),(d)中 Z12-30 为例说明。在未观察到直剪裂缝前,钢筋应变增长缓慢。当荷载达到约 218 kN 时第 1 条直剪裂缝出现,随后钢筋应变增长速度显著加快。达到荷载峰值 471 kN 附近时,应变逐步增长直至接近钢筋屈服应变,荷载峰值时纤维布发生剥离,钢筋应变瞬间增大,承载力平缓下降。

所采用的钢筋屈服应变为 $2\ 485\times10^{-6}\sim2\ 710\times10^{-6}$ 。从图 4 中可以看出,并非所有测得的钢筋应变在极限荷载时都达到了这一数值。这是因为,一方面应变片位置偏离直剪面 10 mm,不一定能反映直剪面处的钢筋应变。另一方面,直剪面裂缝发展位置有随机性,不一定正好穿过应变片位置。因而,所测应变一般不是直剪钢筋最大应变。基于上述认识,以往研究者大多认为^[7,9]试件达到极限承载力时直剪钢筋处于屈服状态。

2.4 荷载-CFRP 应变

试验得到了所有加固试件荷载-CFRP 应变关系,图 5 为典型的荷载-CFRP 应变曲线。由图 5 可

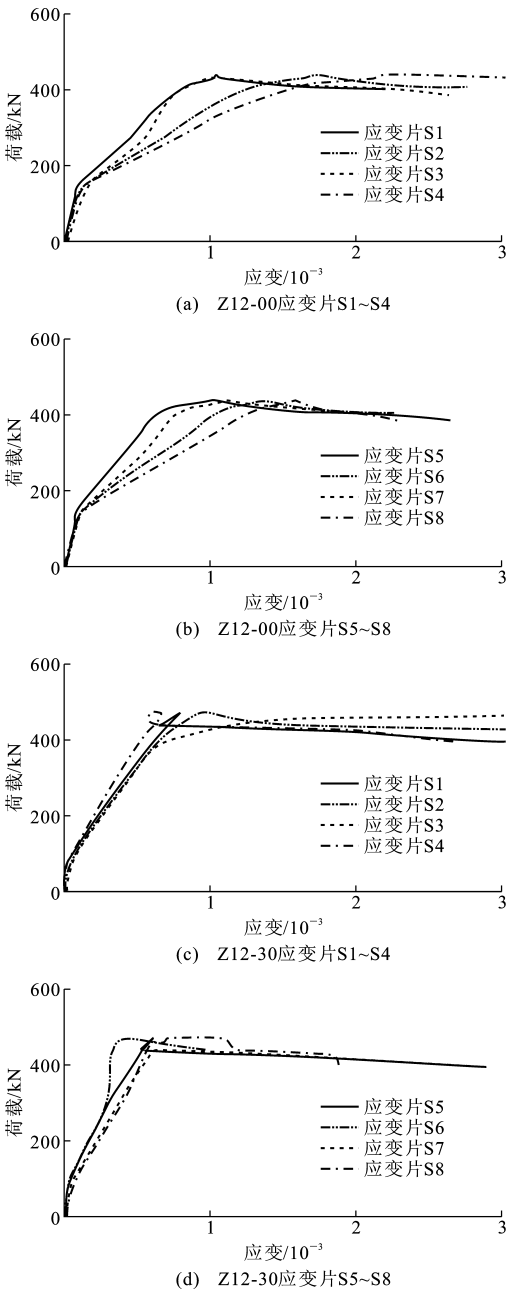


图 4 典型的荷载-钢筋应变曲线

Fig. 4 Typical Load-steel Bar Strain Curves

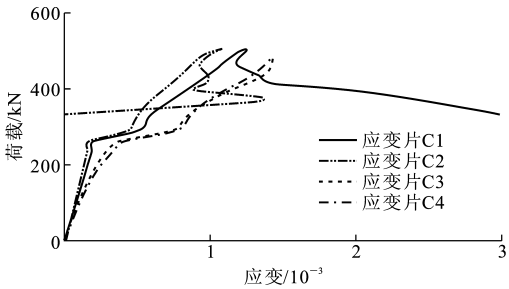


图 5 典型的荷载-CFRP 应变曲线

Fig. 5 Typical Load-CFRP Strain Curves

知,加载至约 273 kN 即第 1 条直剪裂缝出现前,

CFRP 应变呈线性缓慢增长。裂缝出现后 CFRP 应变突然增加,但随后增长速度变缓。达到极限荷载 505 kN 附近时,一侧纤维布剥离,此侧 CFRP 应变量测终止。

CFRP 对直剪面侧向夹紧作用可通过 CFRP 有效应变表征,即将荷载峰值时测量得到的 4 个 CFRP 应变进行平均,结果见表 4。总体上,随配筋率增大,有效应变呈减小趋势。此外,达到极限承载力时,CFRP 有效应变均小于钢筋屈服应变,这可能与两者材料(CFRP 和钢筋)的弹性模量和各自与混凝土的粘结行为不同有关。

表 4 CFRP 有效应变

Tab. 4 Effective Strains of CFRP

试件编号	应变/ 10^{-3}
Z4-22	1.683
Z4-30	2.325
Z6-22	1.722
Z6-30	1.664
Z9-22	1.512
Z9-30	2.056
Z11-22	1.427
Z11-30	1.295
Z12-22	1.410
Z12-30	1.323

2.5 承载力预测

常见的钢筋混凝土直剪承载力预测可表示为混凝土项和钢筋项之和^[10]。按照这个思路,采用纤维增强聚合物加固钢筋混凝土的直剪承载力 V 可用增加纤维增强聚合物的贡献项^[3-5]表示,即

$$V=\alpha A_{cv}f_c+\beta A_{vf}f_y+\gamma A_p\sigma_p \tag{1}$$

式中: α,β,γ 分别为混凝土项、钢筋项和 CFRP 项的系数,将本文研究的试验数据通过最小二乘法拟合,得到其值分别为 0.097,0.752 和 0.957; A_{cv},A_{vf},A_p 分别为直剪面处混凝土、钢筋和 CFRP 的截面面积; f_c 为混凝土抗压强度; f_y 为钢筋屈服强度; σ_p 为 CFRP 有效应力, $\sigma_p=E_p\epsilon_p$, E_p 为 CFRP 弹性模量, ϵ_p 为 CFRP 有效应变。

考虑到表 4 中 CFRP 有效应变主要与配筋率相关,本文研究中 A_{vf} 介于 307.9~804.3 mm² 之间,故采用最小二乘法回归得到 ϵ_p 为

$$\epsilon_p=-1.2A_{vf}+2\,299 \tag{2}$$

CFRP 加固混凝土直剪承载力 V 可表示为

$$V=0.097A_{cv}f_c+0.752A_{vf}f_y+0.957A_p\sigma_p \tag{3}$$

建议式(3)计算值不大于 0.28 $A_{cv}f_c$ 。采用式(3)预测本文试验中加固试件,与试验值相比的平均

相对误差为-5.67%,方差为 0.007 6,吻合较好。

3 加固机理

CFRP 加固混凝土提高直剪承载力的机理可以借助分量模型解释。以往研究者认为混凝土直剪承载力由不同的分量提供,主要有以下几种:摩擦和骨料咬合作用^[9];骨料咬合作用和钢筋销栓作用^[11-12];砂浆-骨料粘结作用、骨料咬合作用和钢筋销栓作用^[13];对素混凝土而言,粘结作用、骨料咬合作用和剪胀作用^[14]。

直剪钢筋的主要作用不在于提供相对较小的销栓抗力,而在于因混凝土侧向膨胀,钢筋受拉并提供侧向夹紧力。夹紧力使得粘结作用增强,并进一步提高骨料咬合力和剪胀力的贡献。以往研究表明,直剪承载力随直剪钢筋配筋率的增大而提高,但至较高的配筋率后,提高作用不再明显^[15]。考虑此特点,美国规范^[1]采用上限值对直剪承载力予以限定。基于以上理解,对于 CFRP 加固的钢筋混凝土,直剪承载力的提高原因是由于 CFRP 提供了与钢筋类似的侧向夹紧力。进一步的分析见文献^[16]。

4 加固效果比较

4.1 与文献中结果的比较

采用本文研究提出的式(3)预测文献^{[3],[4],[7]}中的试验结果,见表 5。可见,本文提出的表达式可以较好预测 FRP 加固混凝土的直剪承载力。预测值稍小于试验值,可能与以下因素有关:①CFRP 板材弹性模量(1.62×10^5 MPa)稍低于 CFRP 卷材弹性模量(2.47×10^5 MPa);②GFRP 材料弹性模量远低于 CFRP 卷材弹性模量,采用式(3)可能低估了 GFRP 材料的有效应变。

4.2 讨论

4.2.1 CFRP 与钢筋对承载力的贡献

承载力表达式(3)中,钢筋项系数为 0.752,CFRP 项系数为 0.957,后者大于前者。这表明 CFRP 对直剪承载力的“贡献效率”要稍大于钢筋。这可能与本文研究采用的 CFRP 弹性模量 2.47×10^5 MPa 稍大于钢筋弹性模量 2.0×10^5 MPa 有关。综合考虑,若 CFRP 和钢筋面积相同,可认为它们对直剪承载力的贡献大致相近。

为进一步说明,按照侧向夹紧力相同的原则,将本文研究中试件的 $A_p\sigma_p$ 项换算为等量的 $A_{vf}f_y$,即 $A_p\sigma_p=A_{vf}f_y$,并与文献中配筋未预裂构件直剪承载力作对比,见图 6,其中, b 为直剪面宽度, h 为直剪

表 5 式(3)预测结果与文献试验结果对比
Tab. 5 Comparison of Predicted Results Using
Expression (3) with Test Results in Literature

数据来源	试件编号	承载力试验值/kN	承载力预测值/kN	相对误差/%	平均相对误差/%
文献[3]	C1A	2.9	3.6	23.00	-20.0
	C1B	2.8	3.6	28.00	
	F13A	6.3	4.7	-25.00	
	F13B	6.0	4.6	-23.00	
	F16A	8.4	5.5	-35.00	
	F16B	7.8	5.3	-32.00	
	F19A	9.2	5.7	-38.00	
	F19B	8.0	6.3	-22.00	
	F112A	9.4	5.5	-42.00	
	F112B	10.0	7.0	-30.00	
文献[4]	CDC3	4.5	4.7	4.80	-6.0
	CDC4	5.5	5.0	-8.40	
	CDC5	6.0	5.2	-13.00	
文献[7]	UP	4.0	3.3	-17.00	7.9
	USI	4.5	4.1	-8.80	
	USM	4.8	4.8	0.60	
	USH	5.6	6.4	15.00	
	RLP	6.7	5.8	-13.00	
	RLSI	7.0	6.2	-12.00	
	RLSM	7.2	6.5	-10.00	
	RLSH	7.5	6.9	-8.10	
	RMP	7.5	6.7	-11.00	
	RMSI	7.8	7.1	-9.10	
	RMSM	7.9	7.3	-7.40	
	RMSH	8.2	7.7	-5.80	
	RHP	8.5	7.5	-12.00	
	RHSI	8.8	7.9	-10.00	
	RHSM	9.0	8.1	-10.00	
	RHSH	9.2	8.4	-8.60	

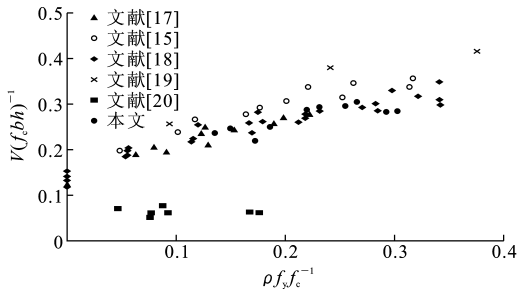


图 6 CFRP 等效为钢筋后预测的承载力与文献数据的比较
Fig. 6 Comparison of Capacity Between Predicted Results
and Assumption to Test Results in Literature After
CFRP Equivalent to Steel Bar

面高度。可见,图 6 中实心圆点标记的点基本位于数据点中游位置,即认为“钢筋和 CFRP 对直剪承

载力的贡献相近”,得到的结果与以往试验结果较为一致。

4. 2. 2 CFRP 加固率上限

直剪承载力随直剪钢筋配筋率的增大而提高,但存在承载力上限^[15]。若进一步增加配筋率,承载力提高不明显。由式(3)可以看出,对于仅配置直剪钢筋的混凝土,直剪承载力的建议值可转化为参数 $\rho_y f_y / f_c$ 的最大建议值(ρ_y 为直剪钢筋配筋率)。Mattock 等^[21]认为该值在 0.2~0.26 之间,美国 ACI 318-11 规范^[1]保守地取 0.20。若本文取该值为 0.24,可得

$$\frac{\rho_y f_y}{f_c} + \frac{\rho_p f_p}{f_c} \leq 0.24 \tag{4}$$

变换式(4)可得 CFRP 加固率 ρ_p 的上限为

$$\rho_p \leq \frac{0.24 f_c - \rho_y f_y}{f_p} \tag{5}$$

5 结 语

(1)直剪承载力随 CFRP 加固率增大而提高,在直剪面钢筋配筋率 0.46%~1.2%和 CFRP 加固率 0%~0.298%的情况下,提高幅度为 6%~50%。

(2)直剪承载力提高的机理源于 CFRP 提供的附加侧向夹紧力。

(3)当外贴 CFRP 和内埋直剪钢筋提供相等的侧向夹紧力时,两者对直剪承载力的贡献相近。

(4)为满足工程应用的需要,对较高配筋率(大于 1.2%)和加固率(大于 0.298%)的混凝土采用 CFRP 加固的效果应进行进一步试验研究。

参考文献:

References:

[1] ACI 318-11, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary[S].
[2] GB 50367—2006, 混凝土结构加固设计规范[S].
GB 50367—2006, Design Code for Strengthening Concrete Structures[S].
[3] SAENZ N, PANTELIDES C P. Shear Friction Capacity of Concrete with External Carbon FRP Strips[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131 (12): 1911-1919.
[4] MOHAMED ALI M S, OEHLERS D J, GRIFFITH M C. Shear Transfer Across Cracks in FRP Strengthened RC Members [J]. Journal of Composites for Construction, 2008, 12(4): 416-424.
[5] JAYAPRAKASH J, SAMAD A A A, ABBASVOCH A A. Experimental Investigation on Shear Capacity of

- Reinforced Concrete Precracked Push-off Specimens with Externally Bonded Bi-directional Carbon Fibre Reinforced Polymer Fabrics[J]. *Modern Applied Science*, 2009, 3(7): 86-98.
- [6] LUCAS W, OEHLERS D J, MOHAMED ALI M S, et al. The FRP Reinforced Shear-friction Mechanism [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2012, 15(4): 615-624.
- [7] NASERIAN R, HOSSEINI A, MAREFAT M S. Assessment of Shear Transfer Capacity of Non-cracked Concrete Strengthened with External GFRP Strips [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 45: 224-232.
- [8] CHEN J F, TENG J G. Anchorage Strength Models for FRP and Steel Plates Bonded to Concrete [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2001, 127(7): 784-791.
- [9] BIRKELAND P W, BIRKELAND H W. Connections in Precast Concrete Construction [J]. *Journal of the American Concrete Institute*, 1966, 63(3): 345-368.
- [10] SANTO P M D, EDUARDO N B S. A State-of-the-art Review on Shear-friction [J]. *Engineering Structures*, 2012, 45(12): 435-448.
- [11] MILLARD S G, JOHNSON R P. Shear Transfer Across Cracks in Reinforced Concrete Due to Aggregate Interlock and to Dowel Action [J]. *Magazine of Concrete Research*, 1984, 36(5): 9-21.
- [12] WALRAVEN J, FRENAY J, PRUIJSERS A. Influence of Concrete Strength and Load History on the Shear Friction Capacity of Concrete Members [J]. *Journal of the Prestressed Concrete Institute*, 1987(1): 66-84.
- [13] ZILCH K, REINECKE R. Capacity of Shear Joints Between High-strength Precast Elements and Normal-strength Cast-in-place Decks [C]//JOHAL L S. *FIB International Symposium on High Performance Concrete*. Orlando: Precast/Prestressed Concrete Institute, 2000: 551-560.
- [14] WONG R C K, MA S K Y, WONG R H C, et al. Shear Strength Components of Concrete Under Direct Shearing [J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(8): 1248-1256.
- [15] HOFBECK J A, IBRAHIM I O, MATTOCKA H. Shear Transfer in Reinforced Concrete [J]. *ACI Structural Journal*, 1969, 66(2): 119-128.
- [16] 董 羽. CFRP加固钢筋混凝土构件直剪性能研究 [D]. 上海: 同济大学, 2015.
DONG Yu. Direct Shear Capacity of Reinforced Concrete Strengthening with CFRP [D]. Shanghai: Tongji University, 2015.
- [17] 卢海霞. 静力荷载作用下钢筋混凝土构件的直剪性能研究 [D]. 上海: 同济大学, 2013.
LU Hai-xia. Direct Shear Performance of Reinforced Concrete Specimens Under Static Forces [D]. Shanghai: Tongji University, 2013.
- [18] MATTOCK A H, LI W K, WANG T C. Shear Transfer in Lightweight Reinforced Concrete [J]. *Precast/Prestressed Concrete Institute Journal*, 1976, 21(1): 20-39.
- [19] 张 申, 车 轶, 谢庆红, 等. 钢筋混凝土开裂面剪力传递性能试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2011, 32(2): 48-53.
ZHANG Shen, CHE Yi, XIE Qing-hong, et al. Experimental Research on Shear Transfer Behavior in Cracked Reinforced Concrete [J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(2): 48-53.
- [20] HARRIES K A, ZENO G, SHAHROOZ B. Toward an Improved Understanding of Shear-friction Behavior [J]. *ACI Structural Journal*, 2012, 109(6): 835-844.
- [21] MATTOCK A H, HAWKINS N M. Shear Transfer in Reinforced Concrete — Recent Research [J]. *Journal of the Prestressed Concrete Institute*, 1972, 17(2): 55-75.