

文章编号: 1000-5013(2012)06-0676-08

不同规范的 RC 梁抗剪加固式中 CFRP 抗剪贡献的计算方法比较

彭小丽, 徐玉野, 王卫华

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 收集了国内外 76 根碳纤维增强复合材料(CFRP)加固钢筋混凝土梁试件,针对不同的粘贴方式,分别进行美国规范、欧洲规范和中国规范共 3 种规范的计算值与试验值的对比分析.结果表明:对侧面粘贴情况,欧洲规范的设计计算公式的预测结果较好;对 U 形粘贴情况,中国规范的设计计算公式的预测结果较不可靠;对封闭包裹情况,3 种加固规范的计算结果均与实验值吻合较好,而中国规范的精度最高.各规范的计算结果存在差异,不同规范的 CFRP 的有效应变取值不同.

关键词: 碳纤维布; 钢筋混凝土梁; 抗剪承载力; 设计公式; 加固; 粘贴方式

中图分类号: TU 528.57 **文献标志码:** A

国内外对碳纤维增强复合材料(CFRP)片材抗剪加固钢筋混凝土梁已进行了较多的试验研究和理论分析,取得了可喜的进展.目前,CFRP 片材抗剪加固钢筋混凝土梁的粘贴方式^[1]主要有侧面粘贴、U 型粘贴、封闭包裹粘贴 3 种.而破坏模式主要有 CFRP 断裂破坏、CFRP 剥离破坏两种.美国 ACI-440 规范^[2]、欧洲的纤维片材加固混凝土结构设计指南^[3]、中国的混凝土结构加固设计规范^[4]均针对不同的粘贴方式给出了 CFRP 加固钢筋混凝土梁抗剪承载力的设计公式.英国和加拿大的加固设计规范则针对 CFRP 不同的破坏模式给出了其抗剪加固的设计表达式^[5-6].目前,CFRP 片材加固钢筋混凝土梁的抗剪承载力的计算方法,主要是基于试验结果并结合剪切破坏机理综合分析得到.计算表明,不同规范的钢筋混凝土梁抗剪加固设计公式中 CFRP 的抗剪贡献值的计算结果相差较大,因此,比较不同计算方法的精度并探讨其存在的问题是必要的^[1,7-9].实际工程结构在加固的设计阶段通常只能明确 CFRP 片材加固的粘贴方式,无法准确把握 CFRP 抗剪加固时构件达到极限承载状态时可能的破坏形态.因此,本文针对不同的粘贴方式,分类比较了美国规范、欧洲规范和中国规范共 3 种规范建议的 CFRP 抗剪贡献的计算方法.

1 不同规范中 CFRP 加固 RC 梁抗剪设计公式

目前,外贴纤维布加固钢筋混凝土(RC)梁的抗剪承载力 V_u 的设计公式,通常是在普通混凝土构件抗剪设计公式的基础上,依据桁架理论和叠加原理,增加外贴纤维布对抗剪承载能力的贡献项.即

$$V_u = V_{cs} + V_{cf} \tag{1}$$

式(1)中: V_{cs} 为钢筋混凝土对抗剪承载力的贡献,可按普通钢筋混凝土构件抗剪设计公式计算; V_{cf} 为外贴纤维布的抗剪贡献.

对于 V_{cf} 的计算,国外诸多学者建议的公式大多是在假定 CFRP 加固 RC 梁受剪后的斜裂缝发展角

收稿日期: 2011-04-06

通信作者: 徐玉野(1978-),男,副教授,主要从事结构防灾减灾的研究. E-mail: yuyexu@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50908091);福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划项目(11FJRC03);福建省泉州市技术与开发重点项目(2011Z10);华侨大学基本科研业务费专项基金资助(JB-SJ1011)

度的基础上进行计算. 然而, 具体的分项系数及折减系数的回归分析上, 就各国各自试验结果的差异而有所不同. 对于受剪极限状态, 各国学者的认识主要有两种观点: 一种观点认为应以界面剪切强度控制; 另一种观点则认为应以有效碳纤维应变控制. 在设计加固规范中, 各国对 CFRP 受剪贡献值 V_{cf} 的计算建议公式不尽相同.

1.1 美国 ACI-440 建议公式^[2]

美国 ACI-440 规范建议公式为

$$V_f = \Psi_f V_f^0, \quad (2)$$

$$V_f^0 = A_f f_{fe} (\sin \beta + \cos \beta) h_{fe} / s_f. \quad (3)$$

式(2)~(3)中: Ψ_f 是与 CFRP 粘贴方式有关的折减系数, 对于 U 形及侧面粘贴取 0.85, 对于封闭包裹粘贴取 0.95; A_f 为 CFRP 面积, $A_f = 2t_f \omega_f$, 其中, t_f 为 CFRP 总厚度, ω_f 为单条 CFRP 宽度; f_{fe} 为 CFRP 有效发挥应力, $f_{fe} = E_f \epsilon_{fe}$, 其中, E_f 为 CFRP 的弹性模量, ϵ_{fe} 为 CFRP 有效发挥应变, 取值与粘贴方式有关; β 为梁长轴方向与 CFRP 纤维方向的夹角; h_{fe} 为 CFRP 顶端到受拉纵筋中心距离; s_f 为 CFRP 条带中心距.

对于全包裹粘贴, 有

$$\epsilon_{fe} = 0.004 \leq 0.75 \epsilon_{fu}, \quad (4)$$

对于 U 形粘贴或侧面粘贴, 有

$$\epsilon_{fe} = \kappa_v \epsilon_{fu} \leq 0.004. \quad (5)$$

式(4)~(5)中: κ_v 为粘贴形式折减系数, $\kappa_v = (k_1 k_2 L_e) / 11\,900 \epsilon_{fu} \leq 0.75$, ϵ_{fu} 为 CFRP 的极限拉应变设计值, L_e 为 CFRP 的有效粘贴长度, $L_e = 23\,300 / (t_f E_f)^{0.58}$, $k_1 = (f'_{co} / 27)^{2/3}$, f'_{co} 为混凝土的抗压强度 (MPa), 对于 U 形粘贴, $k_2 = (h_{fe} - L_e) / h_{fe}$, 对于侧面粘贴, $k_2 = (h_{fe} - 2L_e) / h_{fe}$.

1.2 欧洲 FIB 建议公式^[3]

欧洲 FIB 建议公式为

$$V_f = 0.9 \epsilon_{fd,e} E_f \rho_f b h_{fe} (1 + \cot \beta) \sin \beta. \quad (6)$$

式(6)中: ρ_f 为 CFRP 配箍率, $\rho_f = (2t_f \omega_f / b s_f)$; $\epsilon_{fd,e}$ 为 CFRP 有效应变设计值, $\epsilon_{fd,e} = 0.8 \epsilon_{fe} / \gamma_f$, ϵ_{fe} 为 CFRP 有效发挥应变, γ_f 为 FRP 安全系数, 对于 CFRP, GFRP, 芳纶纤维, 分别取 1.15, 1.25, 1.20.

对于包裹粘贴, 有

$$\epsilon_{fe} = 0.17 (f_c^{2/3} / E_f \rho_f)^{0.3} \epsilon_{fu} \leq 0.006, \quad (7)$$

对于侧面或 U 形粘贴, 有

$$\epsilon_{fe} = \min[0.65 (f_c^{2/3} / E_f \rho_f)^{0.56} \times 10^{-3}, 0.17 (f_c^{2/3} / E_f \rho_f)^{0.3} \epsilon_{fu}]. \quad (8)$$

式(6)~(8)中: f_c 为混凝土抗压强度 (MPa); E_f 为 FRP 弹性模量 (GPa); 其他符号意义同前.

1.3 中国设计规范建议公式^[4]

中国设计规范建议公式为

$$V_{bcf} = \varphi \frac{2n_{cf} \omega_{cf} t_{cf}}{(s_{cf} + \omega_{cf})} \epsilon_{cfv} E_{cf} h_{cf}, \quad (9)$$

$$\epsilon_{cfv} = \frac{2}{3} (0.2 + 0.12 \lambda_b) \epsilon_{cfu}. \quad (10)$$

式(9)~(10)中: φ 是与 CFRP 受剪加固形式有关的系数, 对于侧面、U 形、封闭包裹粘贴分别取 0.70, 0.85, 1.00; n_{cf} 为碳纤维布粘贴层数; ω_{cf} , t_{cf} 和 s_{cf} 分别为 CFRP 条带宽度、厚度和净间距; ϵ_{cfv} 为达到受剪极限状态的碳纤维布应变值; E_{cf} 为 CFRP 材料的弹性模量; h_{cf} 为梁侧 CFRP 粘贴高度; λ_b 为计算截面剪跨比; ϵ_{cfu} 为 CFRP 极限拉应变.

2 计算值与实验值的对比分析

收集国内外 76 根 CFRP 加固钢筋混凝土梁试件对上述公式进行检验分析^[10-22], 这些试验数据覆盖了 1 个较大的模型参数范围. 以此为基础, 与上述 3 个加固设计规范的计算结果进行对比, 分析结果将有较好的代表性. 对文献中斜裂缝角度未给出的试件, 其斜裂缝角度均假定为 45° . 为了更加精确地评

述各加固规范,文中分别对侧面粘贴、U 形粘贴和全包裹粘贴进行讨论分析. m 为所选实验梁计算值偏不安全的个数; r 为计算值和试验值之间的相关系数; C_v 为计算值和试验值比值的变异系数. 鉴于国内普遍使用标准立方体试件,而国外普遍使用标准圆柱体测定混凝土的抗压强度,对于国内外混凝土强度之间的换算关系,近似取 $f'_c=0.79f_{cu}$, f_{cu} 为标准立方体抗压强度.

2.1 侧面粘贴计算值与试验值对比

在目前的研究结果中,共收集 22 根侧面粘贴 CFRP 的试验梁^[10-15],其参数如表 1 所示. 表 1 中: $b\times h$ 为梁的截面尺寸; f'_{co} 为标准混凝土试块抗压强度; λ 为梁的剪跨比; f_{fu} , E_f , ϵ_{fu} 分别为 CFRP 抗拉强度、弹性模量、极限应变; ω_f/S_f 为 CFRP 条带宽和条带中心间距的比值; t_f 为条带厚度;CFRP 粘贴方向与梁水平轴线的夹角 $\beta(^{\circ})$ 为 90/0,表示先竖向粘贴后水平粘贴 CFRP 各一层;加固方案 SS 为侧面条带粘贴,SP 为侧面粘贴 CFRP 布;破坏模式 DC 为混凝土剥离破坏,DF 为 CFRP 剥离破坏,R 为 CFRP 断裂,S 为混凝土剪压. 各规范计算值 V_c 与试验值 V_t 的对比,结果如图 1 所示. 表 2 为统计结果.

表 1 CFRP 侧面粘贴加固梁试验参数
Tab.1 Test parameters of side-bonded CFRP-strengthened RC beams

编号	$b\times h$ / mm \times mm	f'_{co} / MPa	λ	f_{fu} / MPa	E_f / GPa	ϵ_{fu} / ‰	(ω_f/S_f) / mm	t_f / mm	加固 方案	$\beta(^{\circ})$	V_t /kN	破坏 模式
TRC30C2 ^[10]	150 \times 300	27.5	3.0	3 550	233.6	1.50	1.00	0.165	SP	90	45.3	DF+R
TRC30C4	150 \times 300	27.5	3.0	3 550	233.6	1.50	1.00	0.495	SP	90	65.5	DF+R
TRC30D20	150 \times 300	31.4	3.0	3 550	233.6	1.50	1.00	0.495	SP	90	86.0	DC
TRC30D40	150 \times 300	31.4	3.0	3 550	233.6	1.50	1.00	0.330	SP	90	50.5	DC
RS90-1 ^[11]	150 \times 250	35.0	1.8	2 400	150.0	1.60	0.50	1.000	SS	90	68.5	DF
RS135-1	150 \times 250	35.0	2.6	2 400	150.0	1.60	0.33	1.000	SS	45	81.5	DF
BT3 ^[12]	150 \times 405	35.0	2.9	3 790	228.0	1.66	1.00	0.330	SP	90/0	67.5	DF
BT5	150 \times 405	35.0	2.9	3 790	228.0	1.66	0.40	0.165	SS	90	31.5	DF
CI ^[13]	180 \times 500	67.4	2.8	4 500	234.0	1.92	1.00	0.070	SP	45	195.9	DF
C2	180 \times 500	71.4	2.8	4 500	234.0	1.92	1.00	0.110	SP	45	214.9	S
B-3 ^[14]	150 \times 200	33.5	3.0	3 400	230.0	1.50	1.00	0.334	SP	0	24.4	R+S
B-5	150 \times 200	31.0	3.0	3 400	230.0	1.50	1.00	0.334	SP	90/0	21.1	DF+S
B-6	150 \times 200	33.7	3.0	3 400	230.0	1.50	1.00	0.334	SP	90/0	41.6	S
S1a ^[15]	70 \times 110	30.0	3.2	3 300	235.0	1.40	0.67	0.110	SS	90	27.1	DF+S
S1b	70 \times 110	30.0	3.2	3 300	235.0	1.40	0.67	0.110	SS	90	22.5	DF+S
S1-45	70 \times 110	30.0	3.2	3 300	235.0	1.40	0.47	0.110	SS	45	28.1	DF+S
S2a	70 \times 110	30.0	3.2	3 300	235.0	1.40	1.00	0.110	SP	90	31.7	DF+S
S2b	70 \times 110	30.0	3.2	3 300	235.0	1.40	1.00	0.110	SP	90	25.8	DF+S
S2-45	70 \times 110	30.0	3.2	3 300	235.0	1.40	0.71	0.110	SS	45	30.9	DF+S
S3a	70 \times 110	30.0	3.2	3 300	235.0	1.40	1.00	0.147	SP	90	26.4	DF+S
S3b	70 \times 110	30.0	3.2	3 300	235.0	1.40	1.00	0.147	SP	90	21.1	DF+S
S3-45	70 \times 110	30.0	3.2	3 300	235.0	1.40	0.71	0.147	SS	45	24.3	DF+S

从图 1 和表 2 中可看出:在这 3 种规范中,中国规范的计算结果偏不安全梁数量高达 50%, V_c/V_t 的平均值(η_{av})为 1.47,计算结果相关系数仅为 0.38,可靠性较低. 对比结果表明,中国规范对于以剥离破坏为主的侧面粘贴计算误差较大. 但是,可以观察到,对于 CFRP 连续粘贴且粘贴层数在 2 及 2 层以上的情况,计算值均偏大,且 V_c/V_t 的最大值高达 3.5^[10,12,14]. 这也在某种程度上说明,对于这种情况,CFRP 的有效应变预估值过高,导致计算结果偏不安全.

目前,很多研究结果表明,在粘贴加固总量相同的情况下,采用连续满贴的粘贴方式纤维条的有效发挥应变较小,而粘贴层数较多的粘贴方式纤维条也得不到充分地发挥,而中国规范的公式计算值随粘贴层数的增加呈线性增长. 这显然是不合理的,会导致 η_{av} 偏大. 从式(10)可以看出,中国规范认为有效应变主要取决于剪跨比的大小. 这过分强调了剪跨比与有效应变的关系,忽略了破坏模式与有效应变的关系,导致计算结果偏不安全. 除此之外,文献[9]基于桁架机理分析结构表明,对于穿过斜裂缝的纤维布面积相同的情况,粘贴方向越接近垂直,梁的整体性能越好,这也表明在斜裂缝形成后,越是接近 90°

的粘贴对斜裂缝抑制作用越显著, 而中国规范的建议公式仅考虑了竖向粘贴 CFRP 的情况, 对其他角度情况下的加固效果并未考虑, 这也是我国规范计算结果偏不安全的主要原因之一。

ACI 规范 V_c/V_t 的平均值 (η_{av}) 仅为 0.48, 相关系数为 0.91, 但变异系数为 1.41. 这表明虽然在大多数情况下, 其计算值是偏于保守的, 但计算结果的离散性较大. 计算过程中发现 ACI 建议公式对文献[15]计算得到的 ϵ_{fe} 小于零, 因此 V_f 也小于零, 这显然不合理. 文献[14]也指出了对于侧面粘贴这种情况, ACI 采用基于纤维布的有效宽度的计算方法是不可靠的. 因为, 当 CFRP 粘结长度小于 L_e 时, 仍可承受拉力并提供抗剪贡献. 而 ACI 公式认为, 采用侧面粘贴时, 斜裂缝两端粘结长度小于 L_e 的范围, CFRP 未能提供抗剪贡献, 有效加固区仅有 $d_{fe}-2L_e$. 同理, 对于 U 型粘贴的有效加固区仅有 $d_{fe}-L_e$. 即当锚固长度小于有效锚固长度时, 这部分 CFRP 的抗剪贡献为零. 加拿大和英国的公式也采用了类似的应力分布模型^[5-6]. 由目前的试验结果及搜集到的资料分析可知, 这种基于有效粘贴长度的规范建议公式有必要进行修正。

由图 1 可以看出: 欧洲规范公式计算值和试验值吻合地较好, 而表 2 的统计结果显示, 该规范中 η_{av} 为 0.83, 计算值与试验值之间的相关系数为 0.95, 变异系数为 0.26. 经分析比较可知, 在上述 3 种规范中, 欧洲规范较适合用于侧面粘贴的设计计算. 这可能是由于欧洲规范公式中有效应变的计算模型是由 Triantafillou 等学者在 75 个实验数据的基础上建立的^[14], 因此, 欧洲规范的设计公式与试验结果吻合较好些。

2.2 U 形粘贴计算值与试验值对比

从现有文献中, 收集了 26 根外贴 U 型箍加固的试件^[12,14,16-20], 具体参数如表 3 所示. 表 3 中: 上标 a 为立方体抗压强度换算为圆柱体抗压强度; 加固方案 UP 为 U 形 CFRP 布, US 为 U 形条带粘贴; 其他符号意义同表 1. 各规范的计算值 V_c 与试验值 V_t 的对比结果, 如图 2 所示, 统计结果如表 4 所示。

表 3 CFRP 的 U 形粘贴加固梁试验数据表

Tab. 3 Test parameters of U-jackets CFRP-strengthened RC beams

编号	$b \times h /$ mm \times mm	$f'_{co} /$ MPa	λ	$f_{tu} /$ MPa	$E_f /$ GPa	$\epsilon_{fu} /$ ‰	$(\omega_f / S_f) /$ mm	$t_f /$ mm	加固 方案	$\beta / (^{\circ})$	V_t / kN	破坏 模式
BT2 ^[12]	150 \times 405	35.00	2.85	3 790	228	1.66	1.00	0.165	UP	90	65.0	DF
BT4	150 \times 405	35.00	2.85	3 790	228	1.66	0.40	0.165	US	90	72.0	DF
B-7 ^[14]	150 \times 200	34.40	3.00	3 400	230	1.50	1.00	0.167	UP	90	29.3	DF+S
B-8	150 \times 200	35.40	3.00	3 400	230	1.50	1.00	0.167	UP	90	46.6	S
SL9 ^[16]	150 \times 300	24.80 ^a	2.20	3 550	235	1.50	0.39	0.111	US	90	35.5	R
SL13	150 \times 300	24.80 ^a	2.20	3 550	235	1.50	0.39	0.111	US	90	39.5	R
SL19	150 \times 300	24.80 ^a	3.10	3 550	235	1.50	0.39	0.111	US	90	38.5	R
L2 ^[17]	115 \times 190	31.41 ^a	2.50	1 800	235	0.76	0.40	0.167	US	90	20.0	DF
L3	115 \times 190	31.41 ^a	2.50	1 800	235	0.76	0.40	0.334	US	90	30.0	DF
L5	115 \times 190	31.41 ^a	2.50	1 800	235	0.76	0.60	0.167	US	90	28.0	DF
L6	115 \times 190	33.88 ^a	2.50	1 800	235	0.76	0.40	0.167	US	90	50.0	DF
L7	115 \times 190	31.41 ^a	3.13	1 800	235	0.76	0.40	0.167	US	90	36.0	DC
B2	150 \times 250	24.20 ^a	1.86	3 635	249	1.46	0.37	0.167	US	90	68.0	DF
B2	150 \times 250	24.20 ^a	1.86	3 635	249	1.46	0.37	0.167	US	90	68.0	DF

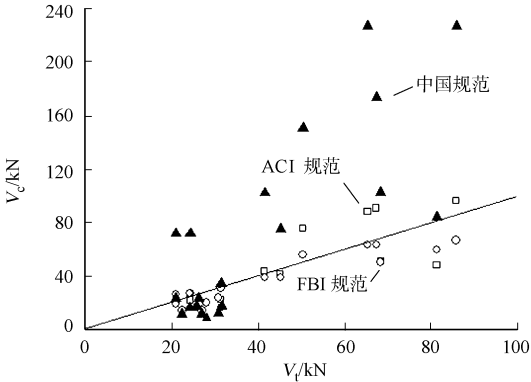


图 1 侧面粘贴的计算值与试验值的比较

Fig. 1 Test and computing results comparison of side-bonded

表 2 侧面粘贴各规范公式计算值与试验值对比

Tab. 2 Comparison between calculation results and experimental results of side-bonded CFRP

规范	η_{av}	r	C_v	m
ACI 规范	0.48	0.91	1.41	5
FIB 规范	0.83	0.95	0.26	4
中国规范	1.47	0.38	0.75	11

续表

Continue table

编号	$b \times h /$ mm \times mm	$f'_{co} /$ MPa	λ	$f_{fu} /$ MPa	$E_t /$ GPa	$\epsilon_{fu} /$ %	$(\omega_t / S_t) /$ mm	$t_t /$ mm	加固 方案	$\beta / (^{\circ})$	V_t / kN	破坏 模式
A2 ^[18]	150 \times 250	24.20 ^a	1.86	3 635	249	1.46	0.37	0.167	US	90	72.0	DF
L8	115 \times 190	31.41 ^a	2.50	1 800	235	0.76	1.00	0.167	UP	90	35.0	DF
A3	150 \times 250	24.20 ^a	1.86	3 635	249	1.46	0.23	0.167	US	90	42.0	DF
A7	150 \times 250	24.20 ^a	2.79	3 635	249	1.46	0.37	0.167	US	90	90.0	DC
A8	150 \times 250	24.20 ^a	2.79	3 635	249	1.46	0.23	0.167	US	90	62.0	DF
B5	150 \times 250	24.20 ^a	2.79	3 635	249	1.46	0.17	0.167	US	90	38.0	DF
SO3-2 ^[19]	150 \times 305	27.50	3.00	3 790	228	1.66	0.40	0.165	US	90	54.0	DF
SO3-3	150 \times 305	27.50	3.00	3 790	228	1.66	0.60	0.165	US	90	56.0	DF
SO3-4	150 \times 305	27.50	3.00	3 790	228	1.66	1.00	0.165	UP	90	67.5	DF
SO3-5	150 \times 305	27.50	3.00	3 790	228	1.66	1.00	0.330	UP	90/0	185.0	DF
shr1-U1 ^[20]	300 \times 720	19.75 ^a	2.70	4 200	235	1.78	0.33	0.440	US	90	25.4	DF
shr2-U2	150 \times 360	19.75 ^a	2.70	4 200	235	1.78	0.33	0.220	US	90	9.9	DF
shr3-U2	75 \times 180	19.75 ^a	2.90	4 200	235	1.78	0.33	0.110	US	90	18.2	DF

从统计结果可看出:相对侧面粘贴,U形粘贴各规范计算结果偏不安全梁数量的比例均有所减少,各规范计算可靠性有所提高.中国规范具有变异系数大、 V_c/V_t 的平均值(η_{av})偏大且偏不安全梁数量较多的特点.这可能是由于文献[20]的部分计算结果远大于实验值, V_c/V_t 的值(η)接近 10.0,这直接导致了 η_{av} 偏大.这一方面是受到尺寸效应的影响,由文献[15,20,23]可知,对于小构件梁 CFRP 有效应变的发挥程度相对较高,其抗剪贡献值也相对较高.相应地,对于文献[20]这样的大尺寸梁,CFRP 对抗剪承载力的提高较少.另一方面,对于文献[20]这种多层粘贴 CFRP 情况,有效应变得不到充分发挥,更不会呈倍数增长,这又一次表明我国规范 CFRP 贡献值与 CFRP 粘贴层数呈线性增长的关系有待于修正.否则,可能会给实际工程带来较大的安全隐患.

由图 2 可知:欧洲规范对于 U 形粘贴的计算值相对较准确,只有文献[20]中有两个试件的计算结果偏不安全,其主要原因仍是尺寸效应的影响.另外,从欧洲规范的设计公式可看出,欧洲建议公式对于侧面、U 形和包裹粘贴均采用 $(f_c^{2/3}/E_{t\rho_t})$ 来考虑加固量对 CFRP 有效应变的影响.该公式最大的缺点就是未考虑粘贴方式的影响,而这种影响有时也会带来安全隐患.计算过程中也发现,对于 U 形粘贴有附加压条的实验梁^[16,18],各规范计算结果均偏于保守.文献[9]指出,附加压条或搭接对 CFRP 参与受力的程度提高显著.这是因为在外力作用下对于锚固长度较短的情况,CFRP 将会产生一定的粘结滑移,导致 CFRP 的应变水平降低,而采取适当的附加锚固措施后,裂缝两侧 CFRP 的粘结滑移量将大大减小,相应地,CFRP 参与受力的程度也大大提高.

美国规范中 η_{av} 值为 0.69,通过计算值与试验值的对比可发现,其计算结果偏于保守.与其他规范对比分析可知,美国规范对于 U 形粘贴计算值的可靠性介于中国规范与欧洲设计规范之间,较适合用于该粘贴方式的设计计算.

2.3 全包裹粘贴计算值与试验值对比

对于包裹粘贴,共收集了 28 根实验梁对上述规范公式进行了检验^[16-18,21-25],具体参数如表 5 所示.

表 4 U 形粘贴各规范公式计算值与试验值对比

Tab. 4 Comparison between calculation results and experimental results of U-jackets

规范	η_{av}	r	C_v	m
ACI 规范	0.69	0.53	0.95	3
FIB 规范	0.75	0.42	0.91	2
中国规范	1.29	0.46	1.60	8

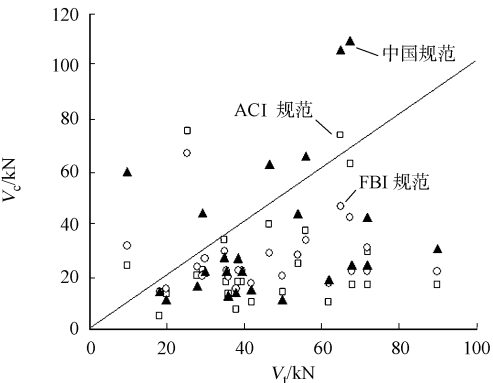


图 2 U 形粘贴的计算值与试验值的对比

Fig. 2 Test and computing results comparison of U-jackets

表 5 中:加固方案 WS 为条带全包,WP 为 CFRP 全包;其他符号意义同表 1. 从所收集到的试验梁也可看出包裹粘贴大部分发生 CFRP 断裂破坏. 各规范的计算值 V_c 与试验值 V_t 的对比结果,如图 3 所示,统计结果如表 6 所示.

对于包裹粘贴,各规范 V_c/V_t 的平均值(η_{av})均偏小. 由图 3 可知,各规范计算值均偏于保守,其中,中国规范与试验值吻合最好. 各规范相关系数均大于 0.7,变异系数均不超过 0.5,偏不安全梁数量较少,相比其他粘贴方式,各规范对于该粘贴方式的计算值最为可靠. 这也在某种程度上表明,这些规范模型基本上可以把握包裹粘贴的内在作用机理.

由这些对比结果可知,计算结果的合理性与 CFRP 的有效发挥应变 ϵ_{fe} 取值密切相关. 根据不同规范建议的公式可知,各规范中 ϵ_{fe} 的计算方法和限值均有所差异,且主要取决于 CFRP 的粘贴方式及破坏模式. 通常情况下,包裹粘贴的破坏模式以断裂破坏为主,CFRP 的应变发挥得比较充分,这也是各规范对于包裹粘贴计算值更加可靠的主要原因.

表 5 CFRP 全包裹粘贴加固梁试验数据表

Tab. 5 Test parameters of fully wrapped CFRP-strengthened RC beams

编号	$b \times h /$ mm \times mm	$f'_{co} /$ MPa	λ	$f_{tu} /$ MPa	$E_t /$ GPa	$\epsilon_{fu} /$ ‰	$(\omega_f / S_f) /$ mm	$t_f /$ mm	加固 方案	$\beta / (^{\circ})$	V_t / kN	破坏 模式
BV I -3 ^[21]	150 \times 250	20.1 ^a	2.27	1 800	220	0.82	0.25	0.121	WS	90	25.0	R+S
BV I -4	150 \times 250	20.1 ^a	2.27	1 800	220	0.82	0.30	0.121	WS	90	30.0	R
BV I -6	150 \times 250	20.1 ^a	2.27	1 800	220	0.82	0.38	0.121	WS	90	35.0	DF+R
BV II -2	150 \times 250	13.8 ^a	2.27	1 800	220	0.82	0.30	0.121	WS	90	15.0	DF+R
BV II -3	150 \times 250	13.8 ^a	2.27	1 800	220	0.82	0.25	0.242	WS	90	25.0	DF+R
BV II -4	150 \times 250	13.8 ^a	2.27	1 800	220	0.82	0.50	0.121	WS	90	35.0	DF+R
BV II -6	150 \times 250	13.8 ^a	3.64	1 800	220	0.82	0.50	0.121	WS	90	35.0	S
SL12 ^[16]	150 \times 300	24.8 ^a	2.20	3 550	235	1.50	0.39	0.111	WS	90	50.5	R
LA1 ^[22]	150 \times 400	48.3 ^a	1.43	3 550	237	1.50	0.33	0.167	WS	90	73.3	R
LA3	150 \times 400	46.5 ^a	2.57	3 550	237	1.50	0.33	0.167	WS	90	60.9	R
LA5	150 \times 400	50.0 ^a	3.00	3 550	237	1.50	0.33	0.167	WS	90	89.9	R
LA6	150 \times 400	50.0 ^a	3.00	3 550	237	1.50	0.50	0.167	WS	90	107.1	R
LA10	150 \times 400	49.3 ^a	3.00	3 550	237	1.50	0.33	0.167	WS	90	100.6	R
LA7	150 \times 400	48.9 ^a	2.00	3 550	237	1.50	0.33	0.167	WS	90	60.3	R
LA8	150 \times 400	48.9 ^a	2.00	3 550	237	1.50	1.00	0.167	WP	90	104.7	R
LA9	150 \times 400	48.9 ^a	2.00	3 550	237	1.50	0.33	0.334	WS	90	95.8	R
LA19	150 \times 400	45.4 ^a	2.00	3 550	237	1.50	0.33	0.501	WS	90	133.8	R
LA11	150 \times 400	44.2 ^a	2.00	3 550	237	1.50	0.50	0.167	WS	90	96.4	R
LA16	150 \times 400	41.8 ^a	2.00	3 550	237	1.50	0.67	0.167	WS	90	68.0	R
LB1	150 \times 400	48.9 ^a	2.00	3 550	237	1.50	0.33	0.167	WS	90	71.2	R
LC1	150 \times 400	40.9 ^a	2.00	3 550	237	1.50	0.33	0.167	WS	90	84.1	R
A4 ^[18]	150 \times 250	24.2 ^a	1.86	3 635	249	1.46	0.38	0.167	WS	90	68.0	S
A5	150 \times 250	24.2 ^a	1.86	3 635	249	1.46	0.23	0.167	WS	90	88.0	R
A9	150 \times 250	24.2 ^a	2.79	3 635	249	1.46	0.17	0.167	WS	90	72.0	R
A10	150 \times 250	24.2 ^a	2.79	3 635	249	1.46	0.23	0.167	WS	90	88.0	R
B3	150 \times 250	24.2 ^a	1.86	3 635	249	1.46	0.38	0.167	WS	90	42.0	S
B4	150 \times 250	24.2 ^a	2.79	3 635	249	1.46	0.17	0.167	WS	90	56.0	R
L4 ^[17]	115 \times 190	31.4 ^a	2.50	1 800	235	0.76	0.40	0.167	WS	90	46.0	DF

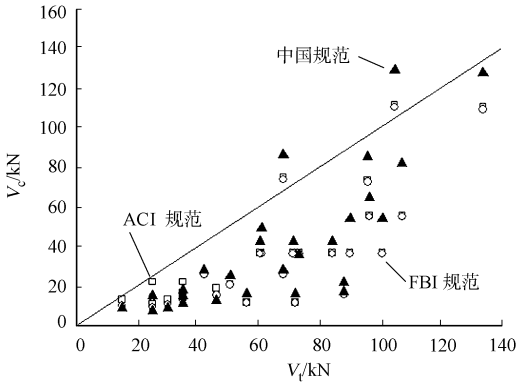


图 3 包裹粘贴的计算值与试验值的对比
Fig. 3 Test and computing results comparison of U-jackets

对于封闭包裹粘贴,ACI 规范公式中,CFRP 的有效应变 ϵ_{fe} 均取 0.004,这在便于计算的同时也取得了较理想的统计结果.文献[22]中,对于 ω_f/S_f 较大的情况,即 CFRP 配布率较大、带宽、间距相对较小的情况,出现 $\eta>1.0$ 的情况,这可能是由于 CFRP 有效应变发挥不充分所导致的,此时, ϵ_{fe} 取 0.004 可能过大.这在一定程度上说明,CFRP 有效应变取值与 CFRP 配布率有关.文献[9,16]指出,当 CFRP 粘贴加固总量相同时,采用窄条分散布置的粘贴方式 CFRP 参与受力的能力要大一些,有效应变可得到更充分地发挥,在正常使用状态下加固梁的整体刚度可得到更好地改善.

从文献[9,21]可知,钢筋混凝土梁配箍率的大小对各受力阶段斜裂缝的发展情况产生了直接的影响,对 CFRP 参与受力的能力也存在一定的影响.当配箍率较高时,CFRP 的抗剪贡献值相对较小;当配箍率较低时,加固效果较显著.因为当配箍率较小时,对于斜向开裂的情况箍筋约束作用更小,裂缝发展的速度就更大,加固后 CFRP 参与受力的能力反而更高.而各规范对于这种情况计算值都偏小,且 $\eta<0.5$.这也从某种程度上说明,对于配箍率较小的情况各规范的有效应变计算值偏小导致计算结果偏于保守.

3 结 论

- 1) 对于侧面粘贴:欧洲规范计算结果与实验结果吻合较好,中国规范计算值偏不安全;建议对 CFRP 粘贴层数较多,及连续满贴的方式,采用一定的折减系数计算 CFRP 的抗剪贡献值,考虑尺寸效应的影响,美国公式基于有效粘结长度的应力分布模型有待于进一步修正.
- 2) 对于 U 形粘贴:欧洲与美国规范预估值较为接近,而美国规范计算结果更偏于保守;中国规范计算结果的可靠性相对较低;对于 U 形加压条的粘贴形式,各规范计算结果均偏于保守.
- 3) 对于全包裹粘贴:各加固规范预测结果均较合理,相关系数为 0.71~0.80,变异系数为 0.42~0.49,但可靠性仍存在一定差异.其中,中国规范计算值与实验值更为吻合.
- 4) 从美国、欧洲、中国这 3 种 CFRP 抗剪加固 RC 梁的建议公式可看出,各规范计算结果存在差异,主要是由于各规范对 CFRP 的有效应变取值不同,除此之外,各规范考虑 CFRP 有效应变发挥程度的依据也有所差异.因此,各规范有必要综合考虑 CFRP 对 RC 梁抗剪加固效果的影响因素,对建议公式做进一步修正.此外,本文的对比分析结果是基于有限的试验数据得到的,还有待于更多的试验验证.

参考文献:

[1] 陆新征,叶列平,庄江波.外贴 FRP 抗剪加固剥离破坏设计公式综述[J].工业建筑,2004,34(增刊 1):30-36.

[2] ACI COMMITTEE 440. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures[S]. Detroit: American Concrete Institute,2002.

[3] THANASIS T,STIJN M,KATRIEN A,et al. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures[S]. Switzerland: Federal Institute of Technology Lausanne,2001.

[4] 中国建设标准化协会标准.碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规范[S].北京:中国计划出版社,2003.

[5] BRITISH CONCRETE SOCIETY. Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials[S]. London: Concrete Society Committee,2000.

[6] CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. Strengthening reinforced concrete structureswith externally-bonded fiber reinforced polymers[S]. Manitoba: ISIS Canada,2001.

[7] 吴毅彬,郭子雄.不同加固规范的 CFRP 加固 RC 柱抗剪强度计算方法比较[J].四川建筑科学研究,2008,34(2):108-111.

[8] 周英武,王苏岩. FRP 加固钢筋混凝土梁抗剪计算公式的对比分析[J].铁道科学与工程学报,2005,2(3):22-28.

[9] 李松辉.碳纤维布加固桥梁的设计理论研究[D].大连:大连理工大学,2003.

[10] PELLEGRINO C,MODENA C. Fiber reinforced polymer shear strengthening of reinforced concrete beams with transverse steel reinforcement[J]. Journal of Composites for Construction,2002,6(2):104-111.

[11] CHAALLAL O,NOLLET M J,PERRATON D. Shear strengthening of RC beams by externally bonded side CFRP

strips[J]. Journal of Composites for Construction,1998,2(2):111-113.

[12] KHALIFA A,NANNI A. Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites[J]. Cement and Concrete Composites,2000,22(3):165-174.

[13] TALJSTEN B. Strengthening concrete beams for shear with CFRP sheets[J]. Construction and Building Materials, 2003,17(1):15-26.

[14] BIMAL B,HIROSHI M. Behavior of concrete beams strengthened in shear with carbon-fiber sheets[J]. Journal of Composites for Construction,2004,8(3):258-264.

[15] TRIANTAFILLOU T C. Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy-bonded FRP composites [J]. ACI Structural Journal,1998,95(2):107-115.

[16] 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.

[17] 李扬,高日,安广明,等. 碳纤维对混凝土梁抗剪加固的实验及理论研究[J]. 北方交通大学学报,2003,27(4):57-61.

[18] 郝震,曹双寅,翟瑞兴,等. 外贴 CFRP 加固梁斜截面受力性能的分析 and 计算[J]. 工业建筑,2004,34(2):82-84.

[19] KHALIFA A,NANNI A. Rehabilitation of rectangular simply supported RC beams with shear deficiencies using CFRP composites[J]. Construction and Building Materials,2002,16(3):135-146.

[20] 周毅雷,陈忠范. 外包 U 形碳纤维布加固钢筋砼梁的受剪承载力的研究[J]. 特种结构,2003,20(3):69-73.

[21] 赵彤,谢剑. 碳纤维补强加固混凝土结构新技术[M]. 天津:天津大学出版社,2001.

[22] 周英武,王苏岩,李宏男. CFRP 加固高强钢筋混凝土梁抗剪承载力计算[J]. 大连理工大学学报,2009,49(2):239-245.

[23] GODAT A,QU Z,LU X Z,et al. Size effects for reinforced concrete beams strengthened in shear with CFRP strips [J]. Journal of Composites for Construction,2010,14(3):260-271.

[24] KHALIFA A,WILLIAM J G,NANNI A,et al. Contribution of externally bonded FRP to shear capacity of RC flexural members[J]. Journal of Composites for Construction,1998,2(11):195-202.

[25] 罗漪,王全凤,杨勇新,等. 华东自然环境下 CFRP 片材的耐久性能[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2009,30(5):572-574.

Comparative Study on the Shear Capacities of RC Beams with Externally Bonded CFRP for Different Design Codes

PENG Xiao-li, XU Yu-ye, WANG Wei-hua

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The experimental results of 76 beams reinforced with externally bonded CFRP of three different wrapped models were collected. The comparison between the calculation results by American, European and Chinese codes, and experimental results, show that: for side-bonded CFRP, the prediction of European design standard is accurate; for U-jackets, the prediction of Chinese design code is less reliable; for the fully wrapped CFRP, the predictions of these three models, especially Chinese model, are in good agreement with the experimental values. The different predictions are mainly due to the different methods to calculate the CFRP effective strain values in different codes.

Keywords: carbon fiber reinforced plastic; reinforced concrete beam; shear capacity; design model; strengthening; wrapped model

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)