

# CFRP和角钢复合加固混凝土矩形柱轴心受压承载力

赵均海, 代 岩, 张常光

(长安大学建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

**摘要:** 采用统一强度理论, 对碳纤维布(CFRP)和角钢复合加固混凝土矩形柱的轴心受压机理和约束模型进行分析, 考虑碳纤维布和角钢材料的特点及对混凝土的约束作用, 提出了该复合加固混凝土矩形柱的轴心受压承载力计算公式. 将本文计算公式与文献试验结果进行对比, 验证了该理论公式的正确性, 并进行参数分析, 得出参数 $k$ 及倒角半径等因素对承载力的影响规律. 该结果为此类复合加固混凝土矩形柱轴心受压承载力的计算提供了一定的理论依据.

**关键词:** 统一强度理论; 混凝土柱; 碳纤维布; 角钢; 复合加固; 极限承载力

中图分类号: TU 375.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)05-0625-07

## Bearing capacity of rectangular concrete columns strengthened with both CFRP and angel steel under axial compression

ZHAO Junhai, DAI Yan, ZHANG Changguang

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** Using the unified strength theory, the material characteristic of carbon fiber reinforced plastic(CFRP) and angel steel and their confinement to the concrete were taken into consideration, and the performing characteristics and confinement mechanism of the confined columns were studied. Based on the above analysis, the formulae for ultimate bearing capacity of rectangular concrete columns strengthened with both CFRP and angel steel were deduced. The comparisons between the calculation results and experiment results were made out and the results show that the theory formulae are correct and viable. The effects of the parameters  $k$  and corner radius are considered in the theoretic analysis. The results offer the theoretical foundation for the research of the rectangular concrete columns strengthened with both CFRP and angel steel.

**Key words:** unified strength theory; concrete columns; carbon fiber reinforced plastic; angel steel; combination strengthening; ultimate bearing capacity

工程中的混凝土柱常常由于设计不周、施工质量问题, 以及在长期使用中受到自然和人为因素的影响, 导致混凝土柱承载力不足, 严重危害建筑物安全, 常需要对其进行加固处理. 传统的加固方法有增大截面法、外包钢法、外包混凝土法、粘贴FRP法<sup>[1]</sup>等, 其中, 粘贴FRP法和外包钢法是混凝土柱最常用的加固方法. 目前, 国内外对这种采用单一材料加固混凝土柱的方法进行了大量的试验研究和理论分析, 研究成果已在工程实际中得到广泛应用<sup>[2-10]</sup>. 近年来, 国内外学者已开始对多种材料复合加固的情况进行研究<sup>[1,11-12]</sup>. 根据文献[11]的研究可知, 用CFRP材料加固混凝土柱, 对其承载力提高程度有限, 但是对混凝土的横向变形约束显著, 延性得到提高; 用角钢加固混凝土柱, 对其承载力提高显著, 但是对横向变形的约束能力较小. 故可将两种材料结合起来加固混凝土柱, 充分发挥材料各自的优点, 既能提高承载力, 也能很好地改善混凝土

柱的延性, 具有很好的工程应用前景. 于峰<sup>[1]</sup>采用试验数据建立模型, 提出计算加固混凝土柱截面有效约束面积的计算方法. 史健勇等<sup>[12]</sup>通过22根加固混凝土方柱的轴心受压试验, 对CFRP和角钢以及两者复合加固方形混凝土柱的极限承载力、应力-应变曲线关系以及刚度和延性等方面进行研究, 提出加固混凝土柱承载力的简化计算公式. 以上研究大多是从实验研究回归总结或简化计算得到复合加固柱承载力计算公式, 缺乏理论依据, 有的也没有考虑中间主应力的影响, 且试验研究开展得还不充分, 缺少深入、系统的理论分析.

本文在文献[11-12]的基础上, 考虑截面形状和CFRP有效应变对CFRP环向应力的影响, 将其约束效应等效为对核心混凝土的有效环向应力, 采用统一强度理论分析核心混凝土有效约束区和非有效约束区, 并引入混凝土强度折减系数<sup>[13]</sup>考虑侧向约束减弱的影响, 推导出CFRP和角钢复合加固混凝土矩

形柱轴心受压承载力计算公式,与文献试验数据进行比较验证,得出各参数对极限承载力的影响特性。

## 1 统一强度理论

统一强度理论是俞茂宏在1991年基于双剪强度理论,建立的一种考虑中间主应力的影响,并能适用于各种不同特性材料的双剪统一强度理论<sup>[14]</sup>,其表达式为

$$F = \sigma_1 - \frac{\alpha}{1+b}(b\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_t \quad \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \quad (1a)$$

$$F' = \frac{1}{1+b}(\sigma_1 + b\sigma_2) - \alpha\sigma_3 = \sigma_c \quad \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \quad (1b)$$

式中:  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 和 $\sigma_3$ 分别为三个主应力,并以拉应力为正;  $\alpha = \sigma_t / \sigma_c$ , 是材料的拉压强度比,  $\sigma_t$ 和 $\sigma_c$ 分别为材料的拉伸强度和压缩强度;  $b$ 是一个反映中间主应力效应的材料参数,也是反映不同强度理论的参数。

## 2 轴心受压破坏机理

在轴向荷载作用下,CFRP和角钢复合加固的钢筋混凝土柱的角钢、纵筋和核心混凝土直接承担荷载,而外层的CFRP仅起环向紧箍作用。试验研究表明<sup>[12]</sup>:在初始加载阶段,角钢和碳纤维布的横向约束作用较小,角钢和混凝土各自单独工作,承载力主要由角钢和混凝土承担。随着加载的不断进行,混凝土的横向变形加大,碳纤维布和角钢与混凝土之间产生径向压力,碳纤维布开始受到环向拉应力,此时碳纤维布处于环拉和径向受压的二向应力状态,核心混凝土处于三向受压应力状态。在加载后期,直到碳纤维布某个部位由于达到极限抗拉强度被拉断,角钢发生屈曲,向外鼓出,内部混凝土被压碎,此时素混凝土柱达到极限承载力并破坏。对于钢筋混凝土加固柱,其破坏特征还有混凝土保护层脱落,纵筋外凸,此时角钢、纵筋和核心混凝土所承担的纵向压力之和达到最大值,CFRP和角钢复合加固钢筋混凝土矩形柱破坏,试件破坏形态参见文献[11-12]。因此,对于CFRP和角钢复合加固的钢筋混凝土柱,在试件破坏前,角钢发生屈曲并向外鼓出,有明显的破坏征兆,属于延性破坏。

## 3 极限承载力分析

### 3.1 基本假定

根据文献[12, 15]试验结果,在分析计算中作如下假定:

(1) 平截面假定。

(2) 钢筋和混凝土、角钢和混凝土之间粘结性能可靠,变形协调。

(3) 忽略粘结胶的强度,CFRP纤维方向为环向,只考虑其沿纤维方向的拉应力,不考虑其对竖向承载力的贡献,并设断裂之前为线弹性。

### 3.2 CFRP受力分析

由文献[2]可知,在轴压荷载作用下,碳纤维布加固的正方形柱,其核心混凝土产生的横向膨胀使碳纤维布的水平段产生水平弯曲。在正方形截面的角部,碳纤维布受两个方向相互垂直的拉力作用,其合力在核心混凝土对角线方向形成强约束,故核心混凝土承受的约束力是沿对角线的集中挤压力和沿边长分布的很小的横向力,故碳纤维布对核心混凝土的约束可分为有效约束区和非有效约束区。

由文献[16]可知,碳纤维布的约束效应取决于两个重要因素:一个是截面形状系数 $k_s$ ,取决于约束混凝土部分的截面几何尺寸;另一个是有效应变系数 $k_e$ ,反映在材料试验与加固试验中材料特性的差异。本文采用考虑截面形状系数 $k_s$ 和有效应变系数 $k_e$ 的等效约束 $f_{re}$ 简化计算,如图1所示,其原理是使简化后的均匀约束分布与原来的非均匀约束具有相同的约束效果,其中 $\sigma_r$ 为核心混凝土所受约束应力。

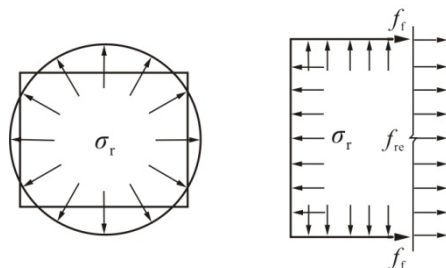


图1 CFRP约束的简化计算简图  
Fig.1 Sketch for CFRP constraint

矩形截面混凝土柱在纵向力作用下,横截面向圆形方向发展,取横截面的一半进行内力分析,根据图1分离体的平衡方程可得等效约束应力 $f_{re}$ 的计算公式如下:

$$f_{re} = k_e k_s \bar{f}_{re} \quad (2)$$

$$\bar{f}_{re} = \frac{2t_f f_f}{D} \quad (3)$$

式中:  $\bar{f}_{re}$ 为平均约束应力;  $t_f$ 为CFRP的厚度;  $f_f$ 为CFRP材料的极限抗拉强度;  $D$ 为矩形混凝土柱等效的圆柱直径,取 $D = \sqrt{b'^2 + h^2}$ ,  $b'$ 和 $h$ 为混凝土

柱矩形截面的宽和长.

图2为碳纤维布对核心混凝土的约束可分为有效约束区和非有效约束区的示意图,其中1为非有效约束区,2为碳纤维布环向围束,3为有效约束区.截面形状系数 $k_e$ 采用文献[10]和Mander等<sup>[17]</sup>提出的计算方法,取为有效约束面积 $A_e$ 与CFRP包裹的混凝土总面积 $A_c$ 之比,即:

$$k_e = \frac{A_e}{A_c} = \left\{ 1 - \left[ \frac{(b' - 2r)^2 + (h - 2r)^2}{3A_c} \right] - \rho_s \right\} / (1 - \rho_s) \quad (4)$$

式中:  $r$  为矩形截面的倒角半径;  $\rho_s$  为纵筋的配筋率;  $A_c$  为带倒角的柱截面混凝土总面积,由下式确定:

$$A_c = b'h - (4 - \pi)r^2 \quad (5)$$

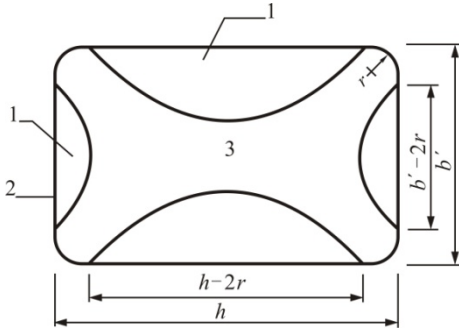


图2 矩形截面柱有效约束面积

Fig.2 Effective confinement area of rectangular column

对于有效应变系数 $k_e$ ,由文献[18]可知,在加固试验中,CFRP材料断裂时,其极限应变值小于材料试验测得应变值,文献[16, 19, 20]提出用有效应变系数 $k_e$ 来解决该问题, $k_e$ 可表达为:

$$k_e = k_{e1}k_{e2} \quad (6)$$

式中:  $k_{e1}$  为加固试验测得的环向应变平均值与最大应变之比,  $k_{e2}$  为加固试验测得的最大应变与材料试验测得的极限应变之比.

文献[21]指出有效应变系数与倒角半径有关,倒角半径 $r$ 与矩形截面的短边长 $b'$ 的比值取值范围为0~0.5,随着倒角半径的增大,矩形混凝土柱角部碳纤维布的应力集中现象得到减缓,有效应变系数也随之增大.文献[22-23]指出CFRP的约束效应与倒角有关,随着倒角半径的增加,CFRP的约束效应增大,这也与文献[21]的研究结果是一致的.文献[21]试验测得在不同倒角半径下碳纤维布的有效应变系数,本文将试验数据进行拟合,得到有效应变系数 $k_e$ 与倒角 $r$ 之间的关系为

$$k_e = 0.371 \ 94r^{0.15134} \quad (7)$$

### 3.3 核心混凝土的轴压强度

由文献[24]知,由于碳纤维布对核心混凝土的约束,使得核心混凝土处于三向受压的应力状态,  $0 > \sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ , 满足式(1b)的条件,代入得:

$$\sigma_1 - \alpha\sigma_3 = f_t \quad (8)$$

式中:  $f_t$  为混凝土抗拉强度,  $f_t = 2c \cos \varphi / (1 + \sin \varphi)$ ,  $\varphi$  为混凝土的内摩擦角,  $c$  为混凝土的粘聚力,  $f_c = 2c \cos \varphi / (1 - \sin \varphi)$ ; 本文采用棱柱体抗压强度,与其立方体抗压强度 $f_{cu,k}$ 的比值为0.67.

令  $k = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi) = f_c / f_t = 1/\alpha$ , 并按习惯一般取压为正,拉为负得:

$$\sigma_3 = f_c + k\sigma_1 \quad (9)$$

式中:  $\sigma_3$  为核心混凝土的轴向压应力;  $\sigma_1$  为碳纤维布对混凝土的有效约束应力,  $\sigma_1 = f_{re}$ . 式(9)与统一强度理论参数 $b$ 值无关,这是由于中间主应力与最大主应力相等.对于CFRP约束混凝土,借鉴钢管混凝土计算理论,取  $k = 1.5 \sim 3.0$ ,具体值由试验确定<sup>[25]</sup>.

本文采用文献[10]和Mander等<sup>[17]</sup>提出的有效约束区与非有效约束区面积计算方法,即有效约束区面积  $A_e = k_e A_c$ , 非有效约束区  $A_1 = (1 - k_e) A_c$ , 由于考虑混凝土的有效约束与非有效约束很困难,采用混凝土的强度折减系数<sup>[13]</sup>  $\gamma_u = 1.67 D_c^{-0.112}$ , 来考虑侧向约束的减弱,其中  $D_c$  取矩形截面柱的圆柱等效直径 $D$ .

由试验分析可知<sup>[11]</sup>: 钢筋混凝土能使加固材料更好地发挥横向约束作用,钢筋混凝土柱的加固效果要好于素混凝土柱.这是因为,在钢筋混凝土柱中,纵筋和箍筋所组成的钢筋骨架对核心混凝土也有一定的约束作用,同时能够延缓裂缝的扩展速度与程度,有利于角钢和碳纤维布的约束作用得到充分的发挥.对于核心混凝土轴压强度,有效约束区为 $f_{ce}$ ,非有效约束区为 $f_{cl}$ ,有:

$$f_{ce} = f_{cl} = f_c + \gamma_u k f_{re} \quad (10)$$

对于素混凝土柱承载力计算时,有效约束区混凝土强度仍采用混凝土的强度折减系数,非有效约束区混凝土强度则不再考虑约束作用对其的提高,而直接采用混凝土的棱柱体抗压强度值 $f_c$ ,则有:

$$f_{cl} = f_c \quad (11)$$

### 3.4 轴心受压承载力

基于碳纤维布约束素混凝土柱理论来建立CFRP和角钢复合加固混凝土矩形柱的轴心受压承载力计算公式,因此复合加固钢筋混凝土矩形柱轴心受压承载力 $N$ 包括三部分,其一为碳纤维布约束素混凝土所提供的承载力 $N_c$ ,其二为纵向钢筋提供的承载力 $N_s$ ,其三为角钢所提供的承载力 $N_j$ .其中:

$$N_c = f_{ce} A_e + f_{cl} A_l \quad (12)$$

$$N_s = f_y A_s \quad (13)$$

$$N_j = f_{jy} A_j \quad (14)$$

由文献[11]知,考虑角钢对核心混凝土所提供的约束效应,在碳纤维布约束钢筋混凝土柱所提供的承载力的基础上,乘以一个提高系数 $\lambda$ ,根据加固情况分别取1.1~1.2,考虑角钢强度不能充分发挥,引入强度折减系数 $\alpha'$ ,并引入加固柱的稳定系数 $\eta$ .则钢筋混凝土矩形柱加固后的轴心受压承载力计算公式为:

$$N = \eta [\lambda (f_{ce} A_e + f_{cl} A_l) + f_y A_s + \alpha' f_{jy} A_j] \quad (15)$$

对于素混凝土矩形柱,其复合加固后的承载力 $N$ 包括两个部分:其一为碳纤维布约束混凝土所提供的承载力 $N_c$ ,其二为角钢所提供的承载力 $N_j$ ,故加固后的轴心受压承载力计算公式为:

$$N = \eta [\lambda (f_{ce} A_e + f_{cl} A_l) + \alpha' f_{jy} A_j] \quad (16)$$

式中: $\eta$ 为加固柱的稳定系数,依据文献[11]取为:

$$\eta = 1.019\,49 + 0.004\,811\,2(l/D) - 0.000\,153\,6(l/D)^2 \quad (17)$$

式中: $f_y$ 和 $A_s$ 为纵筋的抗压强度和面积; $f_{jy}$ 和 $A_j$ 为角钢的抗压强度和面积; $\alpha'$ 为考虑角钢强度不能得到充分发挥的承载力折减系数<sup>[12]</sup>,与柱加固情况相关,只有角钢加固时取为0.45,复合加固时取为0.78.将以上分析的各参数代入上述承载力计算式化简可得:CFRP和角钢复合加固钢筋混凝土矩形柱轴心受压承载力计算公式为

$$N = \eta [\lambda (f_c + \gamma_u k k_e \frac{2t_f f_f}{\sqrt{b'^2 + h^2}}) (b'h - (4-\pi)r^2) + f_y A_s + \alpha' f_{jy} A_j] \quad (18)$$

CFRP和角钢复合加固素混凝土矩形柱轴心受压承

载力计算公式为:

$$N = \eta \left[ \lambda \left( f_c + \gamma_u k k_e \frac{2t_f f_f}{\sqrt{b'^2 + h^2}} \right) (b'h - (4-\pi)r^2) + \alpha' f_{jy} A_j \right] \quad (19)$$

## 4 算例分析

### 4.1 计算公式的验证

CFRP和角钢复合加固钢筋混凝土矩形柱轴心受压承载力采用式(18)计算,CFRP和角钢复合加固素混凝土矩形柱轴心受压承载力采用式(19)计算,对于复合加固、CFRP加固、角钢加固等不同的加固方式柱的轴心受压承载力,采用不同的参数取值分别代入上述两式进行计算.取 $k=2.5$ ,将其代入计算公式进行计算,所计算出的承载力 $N$ 与文献[1]中公式的计算值及文献[12]、[15]、[26]试件试验值进行比较,将比较结果列于表1,其中文献[12]中试件采用复合加固、CFRP加固、角钢加固等不同的加固方式,其长细比为4,文献[15]、[26]中试件长细比为8.

从表1中可以看出,本文所提出公式的计算值与实测试验数值之比的平均值为1.01,与文献[1]的计算值相比,且更接近于实测试验值.可见本文的计算公式所得结果比较符合试验,验证了本文公式的正确性.从文献[12]试验数据和本文计算公式所得计算结果可知,CFRP和角钢复合加固混凝土柱承载力高于CFRP和角钢单独加固混凝土柱,复合加固柱具有更加优良的力学性能.

### 4.2 影响因素

由公式(18)知,当 $f_c$ 、 $f_y$ 、 $f_{jy}$ 及截面尺寸确定时,复合加固钢筋混凝土矩形柱轴心受压承载力与系数 $k$ 、倒角半径 $r$ 有关,为研究其影响,取文献[12]中试件rc5-1的试验参数进行计算,分别研究其在不同的系数 $k$ 、倒角半径 $r$ 下,复合加固钢筋混凝土矩形柱轴心受压承载力的变化情况.

当系数 $k$ 从1.5~3.0变化时,对应承载力的变化如图3所示.由图3可以看出,当其他参数一定时,随着系数 $k$ 的提高,复合加固钢筋混凝土矩形柱轴心受压承载力 $N$ 随之呈线性增加,与试件rc5-1实测试验值的比值在0.92~0.99之间.系数 $k$ 的增大表明核心混凝土强度的内摩擦角 $\varphi$ 的增大,混凝土的抗拉强度增大.

表1 计算结果与试验结果对比  
Tab.1 Contrast between calculating results and test results

编号	倒角	$b'$ /mm	$h$ /mm	$f_{cu,k}$ /MPa	$f_y$ /MPa	$f_{jy}$ /MPa	$N$ /kN	$N_e$ /kN	$N_w$ /kN	$N/N_e$	$N_w/N_e$	数据来源
rc2-1	10	150	150	34.7	441	-	871.63	925	778	0.94	0.84	文献[12]
rc2-2	10	150	150	34.7	441	-	871.63	885	778	0.98	0.88	
rc3-1	10	150	150	34.7	-	275.3	934.38	975	947	0.96	0.97	
rc3-2	10	150	150	34.7	-	275.3	934.38	886	947	1.05	1.07	
rc4-1	10	150	150	34.7	441	-	999.86	975	977	1.03	1.00	
rc4-2	10	150	150	34.7	441	-	999.86	950	977	1.05	1.03	
rc5-1	10	150	150	34.7	441	275.3	1 159.92	1 175	1 058	0.99	0.90	
rc5-2	10	150	150	34.7	441	275.3	1 159.92	1 225	1 058	0.95	0.86	
pc2-1	10	150	150	34.7	-	-	602.84	630	579	0.96	0.92	
pc2-2	10	150	150	34.7	-	-	602.84	600	579	1.00	0.97	
pc3-1	10	150	150	34.7	-	-	667.97	700	748	0.95	1.07	
pc3-2	10	150	150	34.7	-	-	667.97	690	748	0.97	1.08	
pc4-1	10	150	150	34.7	-	275.3	674.92	590	634	1.14	1.07	
pc4-2	10	150	150	34.7	-	275.3	674.92	625	634	1.08	1.01	
pc5-1	10	150	150	34.7	-	275.3	757.95	691	690	1.10	1.00	
pc5-2	10	150	150	34.7	-	275.3	757.95	680	690	1.11	1.01	
pc6-1	10	150	150	34.7	-	275.3	823.07	890	833	0.92	0.94	
pc6-2	10	150	150	34.7	-	275.3	823.07	791	833	1.04	1.05	
rc-3	20	200	250	25.2	292.7	298.1	1 465.20	1 570	-	0.93	-	文献[15]
rc-1c	10	200	250	25.2	292.7	298.1	1 516.54	1 570	-	0.97	-	文献[26]
平均值										1.01	0.98	
最大值										1.14	1.08	
最小值										0.92	0.84	

注:  $N$  为本文公式计算值;  $N_e$  为实测试验值;  $N_w$  为文献[1]公式计算值; rc系列试件代表钢筋混凝土加固柱; pc系列试件代表素混凝土加固柱.

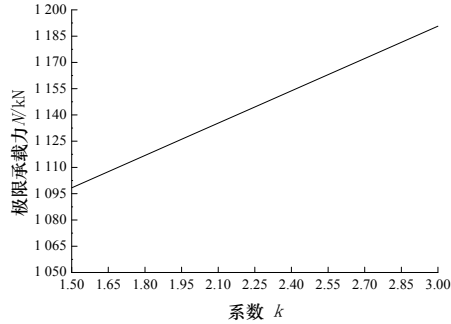


图3  $N$  与  $k$  的关系

Fig.3 Relations between  $N$  and  $k$

由公式(18)及碳纤维布约束素混凝土所提供的承载力  $N_c$  来定义复合加固混凝土柱的抗压强度为:

$$\begin{aligned} f_{cc} &= \frac{\lambda N_c}{A_c} = \frac{\lambda (f_{ce} A_e + f_{cl} A_l)}{A_c} \\ &= \lambda \left( f_c + \gamma_u k k_e k_\varepsilon \frac{2 t_f f_f}{\sqrt{b'^2 + h^2}} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

考虑当倒角半径从5~75 mm变化时, 对应承载力的变化如图4所示, 对应抗压强度的变化如图5所示, 对应带倒角的柱截面混凝土总面积的变化如图6所示.

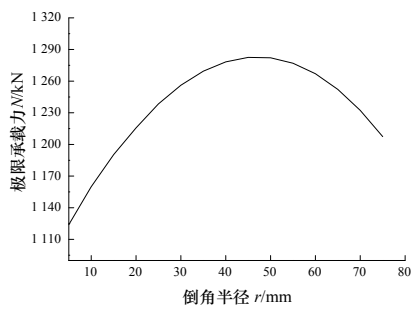


图4  $N$  与  $r$  的关系

Fig.4 Relations between  $N$  and  $r$

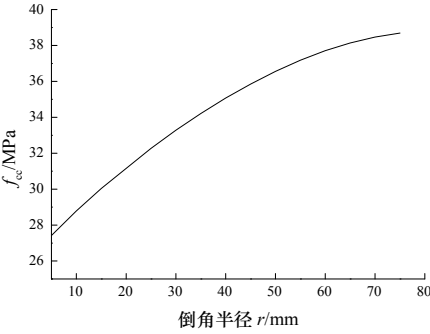
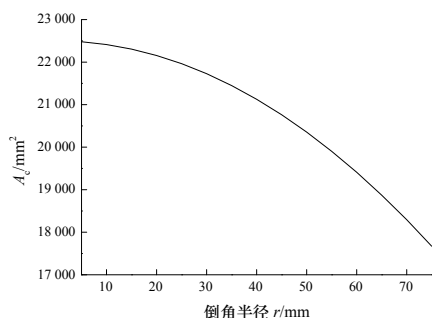


图5  $f_{cc}$  与  $r$  的关系

Fig.5 Relations between  $f_{cc}$  and  $r$



图6  $A_c$  与  $r$  的关系Fig.6 Relations between  $A_c$  and  $r$ 

由图4可以看出,当其他参数一定时,复合加固钢筋混凝土矩形柱轴心受压承载力 $N$ 随倒角半径 $r$ 的提高而增加,因此实际工程中宜将矩形柱截面改抹成椭圆形柱截面,至少也应将截面直角砍成圆角.这与文献[27]研究结论一致:混凝土柱截面形状对纤维包裹加固效果的影响十分明显,圆形与椭圆形截面柱能较好地利用纤维材料的抗拉能力,获得良好的加固效果.另外,文献[21-23]指出:加固混凝土柱的抗压强度随着倒角半径的增加而增大,但当倒角半径达到45 mm以上时,加固柱的极限应变能力的提高程度将放缓,图5中曲线的变化趋势是加固混凝土柱的抗压强度随着倒角半径的增大,当倒角半径大于50 mm时增速变缓,这与文献[21-23]的研究结论一致.此外,从图4中也可以看出,随着倒角半径的增大,承载力在增加,在倒角半径达到45 mm时,承载力达到最大值,再增大倒角半径,承载力反而稍微有所下降,笔者认为从图6可以看出倒角半径的增加,使混凝土柱的截面削弱过大,因而影响混凝土柱的承载力.因此在工程实际中,合适的倒角半径对加固效果具有重要意义.

## 5 结论

(1) 采用统一强度理论推导出CFRP和角钢复合加固混凝土矩形柱轴心受压承载力的计算公式,并将理论计算结果与相关文献的试验结果做比较,验证了该公式的正确性.

(2) 随着 $k$ 值的增大,即随着核心混凝土内摩擦角 $\varphi$ 的增大,承载力增大.

(3) 混凝土柱的倒角半径 $r$ 对承载力有一定的影响,随着倒角半径 $r$ 的增大,承载力先增大再减小,存在一个合适的倒角半径 $r$ 使承载力达到最大值.

(4) 混凝土柱的倒角半径 $r$ 对混凝土受到的约束作用有重要影响,复合加固混凝土柱的抗压强度 $f_{cc}$ 随混凝土柱的倒角半径 $r$ 的增大而增大.

## 参考文献 References

- [1] 于峰, 贺拴海. 碳纤维和角钢复合加固混凝土柱承载力研究[J]. 工业建筑, 2010, 40(12): 107-109.  
YU Feng, HE Shuanhai. Study on bearing capacity of concrete column reinforced by CFRP and angel steel[J]. Industrial Construction, 2010, 40(12): 107-109.
- [2] 卢亦焱, 史健勇, 赵国藩. 碳纤维布约束轴心受压混凝土方形柱承载力计算研究[J]. 工程力学, 2004, 21(4): 22-27.  
LU Yiyang, SHI Jianyong, ZHAO Guofan. Study of axial bearing capacity of square concrete columns confined with carbon fiber reinforced plastic[J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(4): 22-27.
- [3] 于峰, 牛荻涛. 基于双剪统一强度理论的FRP约束混凝土的承载力[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(12): 186-189.  
YU Feng, NIU Ditao. Bearing capacity of FRP-confined concrete based on twin shear unified strength theory[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(12): 186-189.
- [4] OZBAKKALOGLU T, JIAN C L. Axial compressive behavior of FRP-confined concrete: Experimental test database and a new design-oriented model[J]. Composites Part B Engineering, 2013, 55(12): 607-634.
- [5] 林友勤, 龚光, 宗周红. 外包钢加固短柱轴心抗压实验研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2002, 30(2): 221-224.  
LIN Youqin, GONG Guang, ZONG Zhouhong. Test research on concentric axial compression of concrete short columns reinforced outside by steel plank[J]. Journal of Fuzhou University(Natural Science), 2002, 30(2): 221-224.
- [6] 卢亦焱, 史健勇, 黄银燊. 外包角钢加固钢筋混凝土柱轴心受压承载力计算方法研究[J]. 应用力学学报, 2008, 25(4): 719-723.  
LU Yiyang, SHI Jianyong, HUANG Yinshen. Bearing capacity calculation method for axially compressed RC columns strengthened with angle steel[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2008, 25(4): 719-723.
- [7] 张文福, 计静, 鲁华伟, 等. 角钢约束混凝土轴压短柱力学性能研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(4): 121-127.  
ZHANG Wenfu, JI Jing, LU Huawei, et al. Behavior of angle reinforced concrete stub column under axial compression[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(4): 121-127.
- [8] CAMPIONE G. Load carrying capacity of RC compressed columns strengthened with steel angles and strips[J]. Engineering Structures, 2012, 40(7): 457-465.
- [9] CAMPIONE G. RC Columns Strengthened with Steel Angles and Battens: Experimental Results and Design Procedure[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2013, 18(1): 1-11.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构加固设计规范: GB 50367-2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of People's Republic of China. Code for design of strengthening concrete structure: GB 50367-2013[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2013.
- [11] 卢亦焱, 史健勇, 赵国藩. 碳纤维布和角钢复合加固轴

- 心受压混凝土柱的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(5): 18-23.
- LU Yihan, SHI Jianyong, ZHAO Guofan. Experimental research on concrete columns strengthened with the combination of CFRP and angel steel[J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(5): 18-23.
- [12] 史健勇. 碳纤维布加固混凝土梁柱承载力研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2001.
- SHI Jianyong. Research on bearing capacity of concrete beams and columns strengthened with carbon fiber reinforced plastic[D]. Wuhan: Wuhan University, 2001.
- [13] SAKINO K, NAKAHARA H, MORINO S, et al. Behavior of centrally loaded concrete-filled steel-tube short columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2): 180-188.
- [14] 俞茂宏. 混凝土强度理论及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- YU Maohong. Concrete strength theory and its application[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [15] 薛鹏娜. 钢筋混凝土轴心受压构件复合加固的试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- XUE Pengna. Experimental research on uniaxial compressing structure member with composite strengthening[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [16] PESSIKI S, HARRIES K A, KESTNER J T, et al. Axial behavior of reinforced concrete columns confined with FRP jackets[J]. Journal of Composites for Construction, 2014, 5(4): 237-245.
- [17] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1804-1826.
- [18] 刘涛, 冯伟, 张智梅, 等. 碳纤维布约束混凝土矩形柱的抗压性能研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(12): 41-47.
- LIU Tao, FENG Wei, ZHANG Zhimei, et al. A study on the compressive performance of rectangular concrete columns confined with CFRP sheets[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(12): 41-47.
- [19] LAM L, TENG J G. Ultimate condition of fiber reinforced polymer-confined concrete[J]. Journal of Composites for Construction, 2004, 8(6): 539-548.
- [20] MATTHYS S, TOUTANJI H, AUDENAERT K, et al. Axial load behavior of large-scale columns confined with fiber-reinforced polymer composites[J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(2): 258-267.
- [21] 刘涛. 碳纤维(CFRP)布加固混凝土矩形柱的性能研究[D]. 上海: 上海大学, 2006.
- LIU Tao. Research on the behavior of rectangular concrete columns strengthened with CFRP sheets[D]. Shanghai: Shanghai University, 2006.
- [22] WANG L M, WU Y F. Effect of corner radius on the performance of CFRP-confined square concrete columns: Test[J]. Engineering Structures, 2008, 30(2): 493-505.
- [23] OZBAKKALOGLU T, OEHLERS D J. Concrete-filled square and rectangular FRP tubes under axial compression[J]. Journal of Composites for Construction, 2008, 12(4): 469-477.
- [24] 赵均海. 强度理论及其工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- ZHAO Junhai. Unified strength theory and its engineering application[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [25] 王娟, 赵均海, 朱倩, 等. 纤维增强复合材料-混凝土-钢双壁空心短柱的轴压承载力[J]. 工业建筑, 2011, 41(11): 130-133.
- WANG Juan, ZHAO Junhai, ZHU Qian, et al. Axial bearing capacity of FRP-concrete-steel double-skin tubular short columns[J]. Industrial Construction, 2011, 41(11): 130-133.
- [26] 郭敏. 加固方式对有初始荷载作用时柱承载力的影响[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- GUO Min. The influence of strengthening measure on bearing capacity of RC columns with initial load[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [27] 潘景龙, 王雨光, 来文汇. 混凝土柱截面形状对纤维包裹加固效果的影响[J]. 工业建筑, 2001, 31(6): 17-19.
- PAN Jinglong, WANG Yuguang, LAI Wenhui. Effect of sectional shape of concrete column on the bearing capacity of short columns wrapped with FRP[J]. Industrial Construction, 2001, 31(6): 17-19.

(编辑 桂智刚)