

碳纤维-箍筋约束倒角矩形混凝土柱的轴压性能

徐 扬, 魏 洋*, 程勋煜, 端茂军

(南京林业大学土木工程学院, 南京 210037)

摘要: 对 24 个碳纤维-箍筋约束倒角矩形混凝土柱进行了轴压试验。试验表明,碳纤维与箍筋对核心混凝土形成双重的约束机制,两者相互补充,有效提高了混凝土柱的承载能力和变形能力,其箍筋保证了 FRP 断裂后的残余承载力及延性;FRP-箍筋约束倒角矩形混凝土柱的轴压性能与纤维层数及试件倒角半径参数紧密相关,倒角半径的增大显著改善了其轴压力学性能,对于相同 FRP 包裹层数,倒角半径越大,力学性能提高效果越好,在倒角半径相同的条件下,增加 FRP 层数可有效提升约束柱的承载能力及变形能力;结合试验结果,在圆柱 FRP-箍筋约束混凝土的极限应力计算模型的基础上,引入单一材料约束混凝土矩形柱的有效约束系数,提出了 FRP-箍筋约束倒角矩形混凝土柱的承载力计算模型。

关键词: 碳纤维; 箍筋; 约束; 混凝土; 柱; 轴压性能

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0999(2019)06-0005-07

1 引 言

由于实际箍筋的存在,纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer,简称“FRP”)约束混凝土柱形成了实际的纤维-箍筋复合约束混凝土柱,其由外层纤维增强材料、内置传统箍筋及混凝土三部分组成。纤维与箍筋的双重约束综合了 FRP 约束及箍筋约束的双重特点,表现出复合约束混凝土的独特性^[1,2]。纤维-箍筋复合约束混凝土的截面形式可能为圆形或矩形。多年来,国内外针对 FRP 或箍筋单一约束混凝土柱已经进行了广泛的研究,而对纤维-箍筋复合约束混凝土柱的研究多集中于圆柱,少数针对矩形截面柱开展,但鲜有考虑截面倒角半径的影响^[1-10]。与圆形截面相比,纤维-箍筋约束矩形截面混凝土所受的侧向约束力沿截面四周分布不均匀,约束突出集中于矩形截面的角部,从而导致混凝土产生不均匀的侧向膨胀变形,使得截面边长中部的侧向变形大,截面角部的变形小,约束矩形截面混凝土柱的受力性能影响较之圆柱更为复杂。约束矩形截面混凝土柱的性能提高效率与约束圆形截面混凝土柱相比,存在一定差距。为了减少约束矩形截面混凝土柱角部应力集中的影响,提高约束效果,对矩形截面角部进行倒角处理是一项有效的技术措施^[11-17]。本文就倒角参数对纤维-箍筋复合约束混凝土柱力学性能的影响开展轴压性能试验研究,变化参数包括

FRP 层数及截面倒角半径,在试验分析的基础上,建立其轴压承载能力计算模型。

2 试验概况

2.1 试验设计

本试验共设计制作了 5 组 C30 混凝土试件,其中,6 个素混凝土对比柱试件,包括 3 个 150 mm×300 mm 的素圆柱体试件(PC-C 组)和 3 个 150 mm×150 mm×300 mm 的素棱柱体(PC-S 组),其余 24 个 150 mm×150 mm×300 mm 的约束倒角混凝土矩形柱试件按试件倒角半径(5 mm、25 mm、40 mm、75 mm(即圆形))分成 4 组(分别为 SR5C、SR25C、SR40C 及 SR75C 组),每组按缠绕 FRP 层数分为 3 种约束工况(0 层、1 层、2 层),每种约束工况又包含 2 个同等试件。试验采用的 FRP 类型为 CFRP,其名义厚度为 0.167 mm;采用的箍筋直径为 8 mm,间距为 20 mm,保护层厚度为 0(未设置保护层厚度),箍筋倒角半径和试件倒角半径分别定义为 r 和 R ,除了试件倒角半径极小的试件组($R=5$ mm),箍筋倒角半径 r 无法弯曲($r=15$ mm)与试件倒角半径 R 一致,其余组试件的箍筋倒角半径 r 与试件倒角半径 R 都一致。具体各试件参数如表 1 所示。此外,为防止试件在端部提前破坏,对试件两端箍筋进行加密处理,并将箍筋端部锚入混凝土内部核心,图 1 为纤维-箍筋约束倒角混凝土矩形柱的截面图。

收稿日期: 2018-09-18
本文作者还有李国芬。
基金项目: 国家自然科学基金(51778300); 江苏省自然科学基金(BK20151520); 江苏省“333”工程(BRA2016421); “青蓝工程”项目(QL2017); 江苏省六大人才高峰项目(JZ-017); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)
作者简介: 徐扬(1994-),女,硕士研究生,主要从事约束混凝土结构方面的研究。
通讯作者: 魏洋(1978-),男,博士,教授,主要从事约束混凝土结构方面的研究,wy78@njfu.edu.cn。

表 1 试件参数及试验结果

试件编号	R /mm	r /mm	n_f	f_{cc} /MPa	ε_{cc}	f_{cu} /MPa	ε_{cu}
PC-C1	—	—	—	28.62	0.0023	—	—
PC-C2	—	—	—	29.32	0.0021	—	—
PC-C3	—	—	—	28.17	0.0022	—	—
PC-S1	—	—	—	29.89	0.0020	—	—
PC-S2	—	—	—	28.51	0.0017	—	—
PC-S3	—	—	—	29.85	0.0023	—	—
SR5S20CN-1	5	15	0	37.19	0.0054	48.09	0.0500
SR5S20CN-2	5	15	0	33.88	0.0045	42.40	0.0500
SR5S20C1-1	5	15	1	40.88	0.0097	57.97	0.0724
SR5S20C1-2	5	15	1	40.19	0.0100	57.12	0.0695
SR5S20C2-1	5	15	2	43.79	0.0120	70.73	0.0921
SR5S20C2-2	5	15	2	48.51	0.0125	71.80	0.0716
SR25S20CN-1	25	25	0	39.30	0.0064	42.35	0.0500
SR25S20CN-2	25	25	0	40.24	0.0078	43.60	0.0500
SR25S20C1-1	25	25	1	44.85	0.0109	61.48	0.0386
SR25S20C1-2	25	25	1	48.19	0.0105	63.70	0.0350
SR25S20C2-1	25	25	2	49.06	0.0130	74.75	0.0387
SR25S20C2-2	25	25	2	52.44	0.0117	76.54	0.0379
SR40S20CN-1	40	40	0	50.76	0.0081	68.74	0.0500
SR40S20CN-2	40	40	0	51.47	0.0098	64.65	0.0500
SR40S20C1-1	40	40	1	62.03	0.0110	88.31	0.0345
SR40S20C1-2	40	40	1	58.28	0.0113	89.07	0.0340
SR40S20C2-1	40	40	2	68.24	0.0127	100.34	0.0368
SR40S20C2-2	40	40	2	61.91	0.0132	99.51	0.0403
SR75S20CN-1	75	75	0	56.26	0.0107	79.21	0.0500
SR75S20CN-2	75	75	0	53.36	0.0114	72.64	0.0500
SR75S20C1-1	75	75	1	62.57	0.0146	96.54	0.0372
SR75S20C1-2	75	75	1	59.81	0.0126	95.72	0.0356
SR75S20C2-1	75	75	2	70.15	0.0151	123.04	0.0424
SR75S20C2-2	75	75	2	71.41	0.0156	132.48	0.0482

注： R 为试件倒角半径； r 为箍筋倒角半径； n_f 为纤维层数； f_{cc} 、 ε_{cc} 为峰值应力及峰值应变； f_{cu} 、 ε_{cu} 为极限应力及极限应变。

试件的制作流程如下：①矩形螺旋箍筋加工：由钢筋弯曲机械弯曲加工矩形螺旋钢筋，其截面外轮廓尺寸为 150 mm×150 mm，并对螺旋箍筋的角部尺寸进行精确调整，以满足设计的倒角半径，由于箍筋弯曲的限制，箍筋最小倒角半径只能达到 15 mm，故而对于试件倒角半径为 5 mm 组，其箍筋倒角半径设为 15 mm；②倒角试模加工及箍筋入模：将直径为 2 倍倒角半径的 PVC 管沿着直径纵向切割均分为 4 片 1/4 的 PVC 圆弧管，将每一 PVC 圆弧管绑扎粘帖固定于矩形试模的 4 个角部，在固定 PVC 圆弧管的过程中，将螺旋箍筋放置于试模中；③混凝土浇注：分 3 层浇注混凝土，采用振动棒振捣密实，使混凝土表面与试模平齐，拆模后，在标准养护室养护 28 d；④打磨修整：对试件表面打磨清除，对倒角处进一步打磨修整，并用酒精将表面清洗干净；⑤粘帖纤维布：将纤维布浸渍环氧树脂连续地缠绕于混凝土试件表面，纤维布环向搭接长度为 150 mm，每个试件上下端额外粘帖两层宽度为 30 mm 的碳纤维布条，避免破坏发生于试件两端。

2.2 材料性能

混凝土的立方体力学性能指标采用《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2016)规定的方法测得，标准立方体抗压强度平均强度为 36.70 MPa，标准圆柱体(φ 150 mm×300 mm)强度为 28.70 MPa，矩形对比试件强度为 29.42 MPa。箍筋的力学性能指标均按《金属材料拉伸试验》(GB/T 228.1—2010)规定的方法测得，CFRP 的力学性能指标按照《纤维增强塑料拉伸性能试验方法》(GB/T 1447—2005)规定的方法测得，箍筋和 CFRP 的力学性能结果见表 2。

表 2 箍筋和 CFRP 的力学性能

材料类别	屈服强度 f_y /MPa	极限应力 f_u /MPa	屈服应变 ε_y	极限应变 ε_u	弹性模量 E /GPa
箍 筋	325.50	520.24	0.0024	0.1767	201
CFRP	—	4334.64	—	0.0175	248

2.3 加载方案及测点布置

试验加载在 3000 kN 高刚度岩石试验机上完成，试验过程采用位移控制的加载模式，初期加载速率为 0.3 mm/min，当外层 FRP 布断裂后，提升速率至 0.5 mm/min。试件轴向荷载由试验机自身荷载

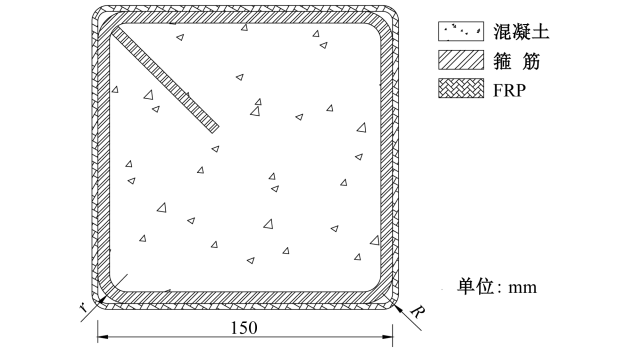
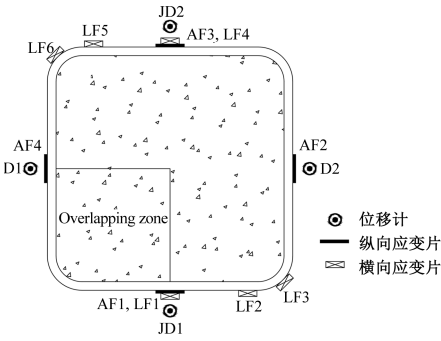
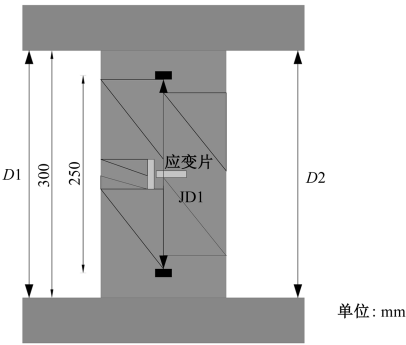


图 1 纤维-箍筋约束倒角混凝土矩形柱的截面图
Fig. 1 Section diagram FRP-stirrup confined rounded rectangular concrete columns

传感器采集测定;试件整体范围内的位移由对称布置的两个普通位移计测定,同时,试件中部 250 mm 范围内的位移由对称布置的两激光位移计测定;混凝土试件横、纵向应变通过粘贴在试件表面的横向应变片(LF)和纵向应变片(AF)测定,典型的 FRP-箍筋约束倒角矩形混凝土试件的应变片粘贴布置见图 2。应变数据的采集由 TDS-530 应变仪完成。



(a) 应变片与位移计布置



(b) 加载测试图

图 2 试件应变片、位移计布置及加载测试图
Fig. 2 Instrumentation configuration and test set up

3 试验结果及其分析

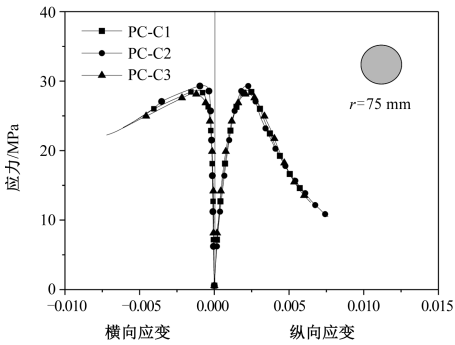
3.1 试验现象

无约束混凝土对比柱试件 PC-C、PC-S 的破坏过程基本一致。随着荷载的增加,混凝土表面出现竖向的细小裂缝,混凝土表面裂缝不断发展贯通为沿柱身方向的竖向裂缝;峰值荷载后,试件中部因侧向膨胀变形向外突出,混凝土碎裂呈块状掉落。对于未包裹 FRP 的箍筋约束倒角矩形混凝土柱试件,随着荷载的增加,混凝土表面出现细小裂缝,倒角处较为明显;接近极限荷载时,外部混凝土碎裂严重,有较多小块混凝土剥落;最终破坏时,试件表面混凝土全部脱落,露出内部螺旋矩形箍筋。

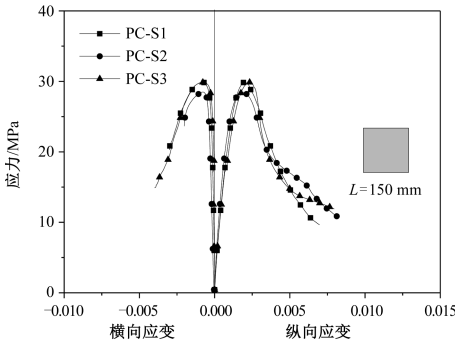
对于 FRP-箍筋约束倒角矩形混凝土柱试件,随着荷载的增大,伴随树脂胶开裂的轻微声响,试件侧面中部区域整体向外鼓出,倒角半径较小的试件突起尤为严重;接近极限荷载时,对于倒角半径较小的试件,其 FRP 断裂发生于矩形柱的倒角处;对于倒角半径较大的试件,倒角和侧面位置 FRP 均可能断裂。FRP 断裂后,试件承载力陡然下降,但由于箍筋的作用,试件仍然保持一定的残余承载能力,并随着 FRP 的持续断裂而缓慢下降,倒角越大,残余承载力越大。

3.2 应力-应变关系曲线

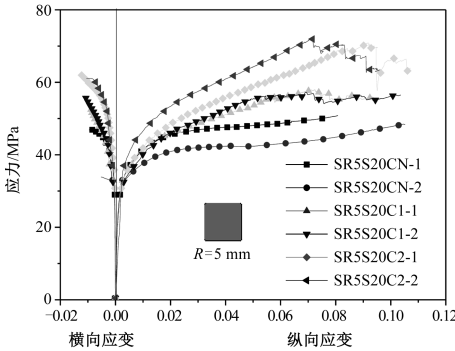
图 3 为各个试件的应力-应变关系曲线。



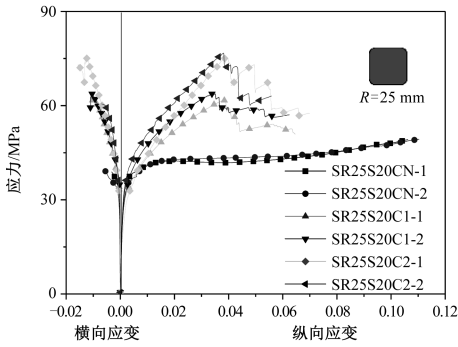
(a) PC-C



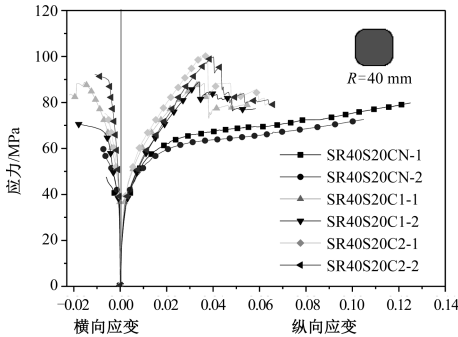
(b) PC-S



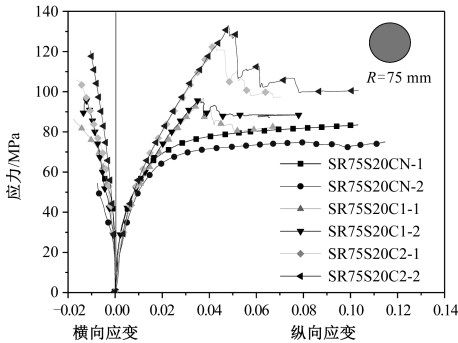
(c) SR5S20C



(d) SR25S20C



(e) SR40S20C



(f) SR75S20C

图3 各试件的应力-应变关系曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of the specimens

其中纵坐标为应力,其为轴向荷载与试件的横截面积的比值;横坐标包括纵向应变和横向应变两个部分,纵向应变由中部激光位移计测得的标距范围内位移与标距 250 mm 的比值得到,并通过纵向应变片的数据对比较正,横向应变由横向应变片直接测得。

对于 FRP-箍筋约束倒角矩形混凝土柱试件,其应力-应变关系曲线大致可分为四个阶段:试验初期,约束柱的应力-应变关系曲线与素混凝土试件的应力-应变关系曲线基本保持一致,FRP 的应变较小

且增长缓慢,此时试件处于弹性变形阶段;当轴向应力达到素混凝土柱的峰值应力之后,试件横向变形不断变大,外层 FRP 与内置箍筋开始发挥作用,对核心混凝土提供侧向约束力,曲线处于过渡阶段;随着轴向应力的增加,箍筋对核心混凝土的侧向约束力基本恒定,FRP 的应变持续增加,其提供持续增长的侧向约束力,曲线进入强化阶段,FRP 断裂时,荷载达到最大值,随后荷载急剧下降;当 FRP 断裂后,曲线进入残余阶段,荷载保持稳定,该阶段 FRP 对混凝土的侧向约束力失效,只剩箍筋仍保持约束工作状态,保证了试件的延性。

对于未包裹 FRP 的箍筋约束倒角矩形混凝土柱试件,其侧向约束力仅由箍筋提供,由于箍筋间距较密,提供约束力较大,约束比较大,使得混凝土获得了极大的延性,在经历过渡阶段的转折点之后,继续加载,试件承载应力能够保持稳定,甚至表现出轻微的上升趋势,展现出极大的变形能力,最终,试验由于纵向变形过大而终止。

3.3 对比分析

试验结果如表 1 所示,各个试件的力学性能对比如图 4 所示,其中,横坐标为截面的倒角半径,纵坐标为实测峰值应力、峰值应变及极限应力、极限应变相对于素混凝土对比柱的相应力学特性比值,图中数值为每组 2 个试件的均值,结果表明,FRP-箍筋约束倒角矩形混凝土柱的轴压性能与纤维层数及试件倒角半径参数紧密相关。未包裹 FRP 的箍筋约束倒角矩形混凝土柱的峰值应力为 33.88 MPa~56.26 MPa,提高比为 1.15~1.91;峰值应变为 0.0045~0.0114,提高比为 2.25~5.70;极限应力为 42.35 MPa~79.21 MPa,提高比为 1.44~2.69。对比可见,随着倒角半径的增大,峰值应力、峰值应变及极限应力的提高效果明显增大。由于未包裹 FRP 的箍筋约束倒角矩形混凝土柱都表现出了极大的变形能力,其应力-应变曲线无明确极限断裂点,取应变 0.05 为其极限应变,该极限应变不具有对比意义。

FRP-箍筋约束倒角矩形混凝土柱的力学性能也表现出相似的规律,倒角半径的增大显著带来轴压力学性能的改善。对于相同 FRP 包裹层数,倒角半径越大,力学性能的提高效果越好,如倒角半径分别

为 5 mm、25 mm、40 mm、75 mm 的 2 层 CFRP 包裹的 FRP-箍筋约束柱 SR5S20C2、SR25S20C2、SR40S20C2、SR75S20C2 与素混凝土对比柱相比,峰值应力分别提高了 1.57 倍、1.73 倍、2.21 倍、2.41 倍,峰值应变分别提高了 6.13 倍、6.18 倍、6.48 倍、7.68 倍,极限应力分别提高了 2.42 倍、2.57 倍、3.40 倍、4.34 倍,极限应变分别提高了 40.93 倍、19.15 倍、19.28 倍、22.65 倍,在倒角半径极小时(5 mm),FRP 包裹的约束效果最差,应力-应变关系曲线强化阶段的斜率很小,FRP 的约束作用小,反而使得 FRP 不容易断裂,试件受压极限应变反而最大。截面倒角的设置有效减缓了约束矩形截面混凝土角部的应力集中现象,且倒角半径越大,截面越趋近于圆形截面,混凝土的侧向膨胀变形越均匀,FRP 提供的侧向约束越有效。总体来说,FRP 包裹对 FRP-箍筋约束柱力学性能的提高与倒角半径呈正向关系,且倒角半径的影响显著。另外,对比可见,在试件倒角半径相同的条件下,增加 FRP 层数可有效提升约束柱的承载能力及变形能力,且 FRP 层数越多,其力学性能越优。

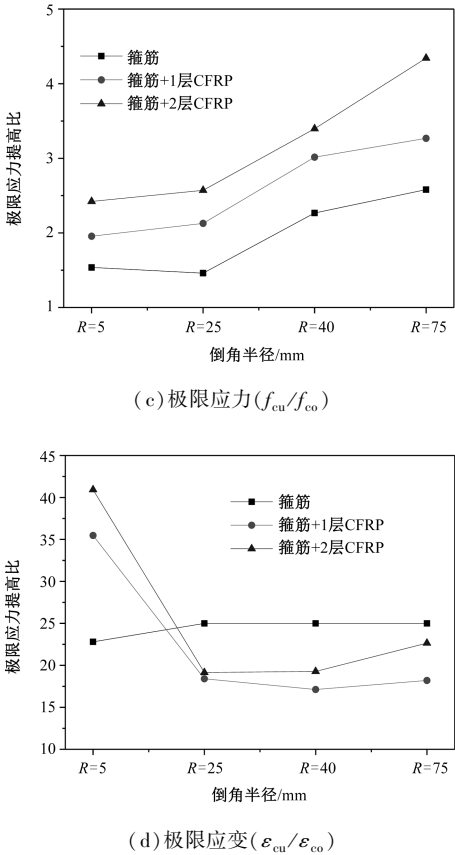
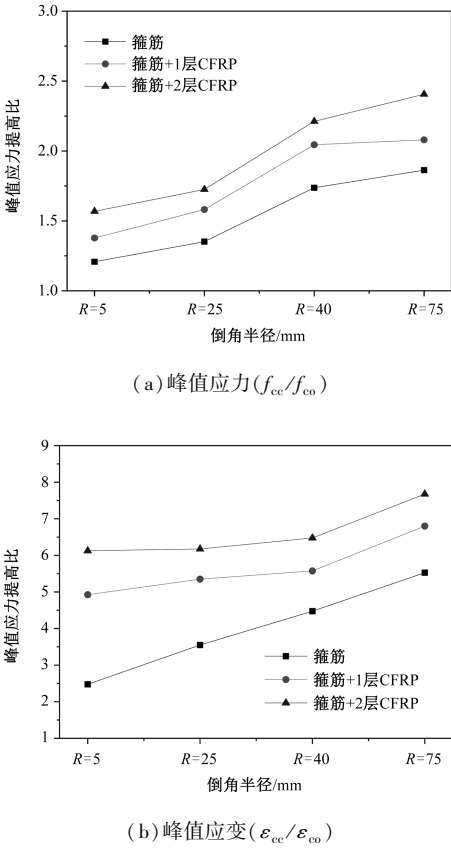


图 4 FRP-箍筋约束倒角矩形混凝土柱的力学性能对比
Fig. 4 Comparison of the performance of FRP-stirrup confined rounded rectangular concrete columns

3.4 承载能力计算

在 FRP-箍筋约束倒角矩形混凝土柱结构中, FRP 和箍筋同时对内部混凝土具有约束贡献。因此,其外部约束对核心混凝土承载力的提高可分为 FRP 和箍筋两部分。正如前文所述,对于圆形 FRP-箍筋约束混凝土柱,其外部侧向约束对核心混凝土的约束力沿着截面四周分布均匀,在试验与广泛收集试验数据的基础上,Wei 等^[1]建立了适用于圆柱 FRP-箍筋约束混凝土的极限应力计算模型公式:

$$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = 0.75 + 3.27 \left(\frac{f_1}{f_{co}} \right)^{0.9} + 5.35 \frac{f_1'^{0.86}}{f_{co}} \cdot \frac{A_{cc}}{A_g} \quad (1)$$

式中: f_{co} 为未约束混凝土的强度; f_1 为 FRP 对混凝土柱的侧向约束力; f_1' 为箍筋对混凝土柱的侧向约束力; A_{cc} 为核心混凝土面积; A_g 为试件截面总面积。

对于 FRP-箍筋约束矩形混凝土柱,其约束力沿着截面四周分布不均匀,在截面的角部较大,在试件边长的中间约束较弱。如何考虑不均匀约束力的影响是 FRP-箍筋约束矩形混凝土柱计算分析中的难点,针对单一材料的箍筋约束混凝土或 FRP 约束混

混凝土,已有研究广泛地采用了有效侧向约束力的概念。

Mander 等^[3]在试验的基础上,考虑到矩形截面特征对核心约束混凝土的影响,引入截面的箍筋有效约束系数 k_e ,计算矩形箍筋对核心混凝土的有效侧向约束力 f_{ls} :

$$f_{ls} = k_e f'_l \quad (2)$$

$$k_e = \frac{\left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{(w_i)^2}{6b_c d_c}\right) \left(1 - \frac{s'}{2b_c}\right) \left(1 - \frac{s'}{2d_c}\right)}{(1 - \rho_{cc})} \quad (3)$$

$$f'_l = \frac{A_s}{s d_c} f_y \text{ 或 } f'_l = \frac{A_s}{s b_c} f_y \quad (4)$$

式中: ρ_{cc} 为纵筋体积率; w_i 为相邻纵筋间距; n 为纵筋数量; b_c 和 d_c 分别为核心混凝土的长和宽($d_c \geq b_c$); s 为相邻箍筋间距; s' 为相邻箍筋之间混凝土的垂直距离; A_s 为箍筋截面积。

滕锦光等^[4,5]定义了 FRP 约束倒角混凝土矩形柱的截面形状系数 k_s ,计算 FRP 约束倒角矩形混凝土核心的有效侧向约束力 f_{lf} :

$$f_{lf} = k_s f'_l = k_s \frac{2E_{frp} \varepsilon_{frp} t}{D} \quad (5)$$

$$k_s = \left(\frac{b}{d}\right)^2 \frac{1 - [(b/d)(d-2R)^2 + (d/b)(b-2R)^2]}{(1 - \rho_{cc})(3A_g - \rho_{cc})} \quad (6)$$

$$D = \frac{2bd}{b+d} \quad (7)$$

$$A_g = bd - (4 - \pi)R^2 \quad (8)$$

式中: E_{frp} 为 FRP 的弹性模量; ε_{frp} 为 FRP 的极限拉伸应变; t 为 FRP 的厚度; D 为等效圆柱直径; b 、 d 为矩形截面的长度和宽度($d \geq b$)。

基于以上分析,本文将箍筋有效约束系数 k_e 和截面形状系数 k_s 引入倒角矩形截面核心约束混凝土的有效侧向约束力的计算中,并代入圆柱 FRP-箍筋约束混凝土的极限应力计算模型,且进一步考虑倒角半径较小对核心混凝土约束效果的降低,建议 FRP-箍筋约束倒角矩形混凝土柱的承载力计算模型如下:

$$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = 0.75 + 3.27 \left[\left(1 - \alpha\right) \frac{2R}{b} + \alpha \right] \left(\frac{f_{lf}}{f_{co}} \right)^{0.9} + 5.35 \left[\left(1 - \alpha\right) \frac{2r}{b_c} + \alpha \right] \frac{(f_{ls})^{0.86}}{f_{co}} \cdot \frac{A_{cc}}{A_g} \quad (9)$$

式中 α 为截面倒角半径的影响系数,建议取 0.76。

该模型充分考虑了试件倒角的影响,计算结果与试验结果对比如图 5 所示,计算结果与试验结果

吻合较好,尤其是倒角半径较小,试件也吻合很好,其计算值/试验值平均值(AV)为 0.98,标准差(SD)为 0.12,误差绝对值平均(AAE)为 10%。

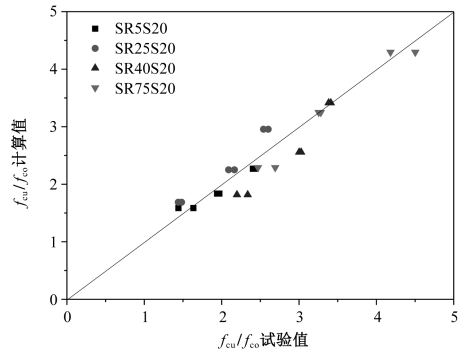


图5 FRP-箍筋复合约束倒角混凝土矩形柱承载力模型计算与试验结果对比

Fig. 5 Comparison between predicted and experimental strengths of the rounded rectangular concrete columns confined with FRP and stirrups

4 结论

通过 FRP-箍筋约束倒角矩形混凝土柱的轴压试验,研究了 FRP 的层数、截面倒角半径、箍筋倒角半径等参数对其轴压性能的影响,可以得出如下结论:

(1)对于倒角半径较小的 FRP-箍筋约束倒角矩形混凝土柱,其 FRP 断裂发生于矩形柱的倒角处;对于倒角半径较大的试件,倒角和侧面位置 FRP 均可能发生断裂;

(2)FRP-箍筋复合约束倒角混凝土矩形柱的应力-应变关系曲线可分为弹性阶段、过渡阶段、强化阶段和残余阶段四个阶段,FRP 断裂时,荷载达到最大值,在 FRP 断裂后,曲线进入残余阶段,仍然保持一定的残余承载能力,倒角半径越大,残余承载力越大,其箍筋保证了 FRP 断裂后的延性;

(3)FRP-箍筋约束倒角矩形混凝土柱的轴压性能与纤维层数及试件倒角半径参数紧密相关,倒角半径的增大显著带来了轴压力学性能的改善,对于相同 FRP 包裹层数,倒角半径越大,力学性能提高效果越好,在倒角半径相同的条件下,增加 FRP 层数可有效提升约束柱的承载能力及变形能力;

(4)引入单一材料约束混凝土矩形柱的有效约束系数,在圆柱 FRP-箍筋约束混凝土的极限应力计算模型的基础上,进一步考虑倒角半径较小对核心混凝土约束效果的降低,提出了 FRP-箍筋约束倒角矩形混凝土柱的承载力计算模型,计算结果与试验结果吻合较好。

参考文献

[1] Wei Y, Zhang X, Wu G, et al. Behaviour of concrete confined by both steel spirals and fiber-reinforced polymer under axial load[J]. Composite Structures, 2018, 192(5): 577-591.

[2] 魏洋, 周永峰, 张希, 等. 玄武岩纤维-箍筋复合约束混凝土柱的轴压试验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(4): 5-11.

[3] 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.

[4] Lam L, Teng J G. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete[J]. Construction & Building Materials, 2003, 17(6-7): 471-489.

[5] Jiang T, Teng J G. Analysis-oriented stress-strain models for FRP-confined concrete [J]. Engineering Structures, 2007, 29(11): 2968-2986.

[6] Harajli M H. Axial stress-strain relationship for FRP confined circular and rectangular concrete columns[J]. Cement and concrete composites, 2006, 28(10): 938-948.

[7] Pellegrino C, Modena C. Analytical model for FRP confinement of concrete columns with and without internal steel reinforcement[J]. Journal of Composites for Construction, 2010, 14(6): 693-705.

[8] Faustino P, Chastre C, Paula R. Design model for square RC columns under compression confined with CFRP[J]. Composites Part B, 2014, 57(57): 187-198.

[9] 魏洋, 吴定燕, 李国芬, 等. 圆形玄武岩纤维-钢复合管混凝土短柱轴心受压力学性能[J]. 工业建筑, 2015, 45(3): 169-173.

[10] 郭莹, 刘界鹏, 苗亚军, 等. 圆 CFRP-钢复合管约束混凝土短柱轴压试验研究[J]. 工程力学, 2017, 34(6): 41-50.

[11] 魏洋, 李国芬, 端茂军. 矩形 FRP-钢复合管混凝土短柱的轴压试验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(12): 47-51.

[12] 魏洋, 柴继乐, 张希, 等. 倒角半径对矩形 FRP-钢复合管混凝土轴压性能的影响规律[J]. 南京工业大学学报, 2017, 39(5): 33-38.

[13] Wu Y F, Wei Y. General stress-strain model for steel- and FRP-confined concrete[J]. Journal of Composites for Construction, 2015, 19(4): 040140691-0401406914.

[14] Wu Y F, Wang L M. Unified strength model for square and circular concrete columns confined by external jacket[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(3): 253-261.

[15] Fattah A A E. New axial stress-strain model of square concrete columns confined with lateral steel and FRP[J]. Composite Structures, 2018, 202: 731-751.

[16] Ilki A, Peker O, Karamuk E, et al. FRP retrofit of low and medium strength circular and rectangular reinforced concrete columns[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2008, 20(2): 169-188.

[17] Ozbakkaloglu T. Behavior of square and rectangular ultra high-strength concrete-filled FRP tubes under axial compression [J]. Composites Part B Engineering, 2013, 54(1): 97-111.

AXIAL COMPRESSIVE BEHAVIOR OF CFRP- STIRRUP CONFINED
ROUNDED RECTANGULAR CONCRETE COLUMNS

XU Yang, WEI Yang*, CHENG Xun-yu, DUAN Mao-jun

(College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: Axial compression tests were carried out on 24 carbon fiber polymer-stirrup confined rectangular concrete columns with chamfering. The test shows that CFRP and stirrups form a dual constraint system for the core concrete, which complements each other. It effectively improves the bearing capacity and deformability of the concrete column in which stirrups ensure the residual bearing capacity and ductility after the fracture of FRP. The axial compression performance of FRP-stirrup rectangular concrete columns with chamfering is closely related to the number of FRP layers and the chamfering radius of specimens. Increasing the chamfering radius can improve the properties of the concrete column significantly. With the same layers of FRP, the bigger the chamfering radius is, the better the performance will be. Besides, increasing the number of FRP layers can effectively improve the bearing capacity and deformation capacity of the confined concrete column with identical chamfering radius. Combined with the test results, the bearing capacity calculation model of CFRP-stirrup confined rectangular concrete columns with chamfering is proposed by considering the effective constraint coefficient of the rectangular concrete column, and on the basis of the ultimate stress calculation model of confined circular concrete columns.

Key words: CFRP; stirrups; confinement; concrete; column; axial compressive behavior