

足尺寸 GFRP 筋 HFRC 柱的轴压性能与理论研究

邓宗才, 贾鹏星

(北京工业大学城市与工程防灾减灾省部共建教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: 为了研究玻璃纤维增强聚合物 (glass fiber reinforced polymer, GFRP) 筋混杂纤维混凝土 (hybrid fiber reinforced concrete, HFRC) 柱的轴压性能, 进行了 5 个 GFRP 筋 HFRC 柱和 1 个未配筋 HFRC 柱的轴压试验, 分析了 GFRP 箍筋间距和纵筋配筋率对 GFRP 筋 HFRC 柱轴压性能的影响规律。结果表明: 提高 GFRP 纵筋配筋率可以提高试件的承载力, 箍筋间距小的试件的延性明显高于箍筋间距大的试件。根据试验数据回归出了 GFRP 筋 HFRC 柱峰值应力、峰值应变以及承载力的计算公式。

关键词: GFRP 筋; 混杂纤维混凝土; 轴压性能; 承载力; 变形

中图分类号: TU 375.3

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2016)12-1873-07

doi: 10.11936/bjtxb2016040037

Axial Compression Performance and Theoretical Study of Full-size HFRC Columns Reinforced With GFRP Bars and Spirals

DENG Zongcai, JIA Pengxing

(The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to study the axial compression behaviors of HFRC (hybrid fiber reinforced concrete) columns reinforced with GFRP (glass fiber reinforced polymer) bars and spirals, five HFRC columns reinforced with GFRP bars and spirals and one HFRC column were tested. The influence effects of the stirrup spacing and longitudinal reinforcement ratio were analyzed. The results indicate that the increase of longitudinal reinforcement ratio can enhance the bearing capacity and the ductility of small stirrup spacing specimens was significantly higher than that of large stirrup spacing specimens. According to the experimental data, the calculation formula of the peak stress, peak strain and the bearing capacity of GFRP reinforced HFRC columns are returned.

Key words: glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars and spirals; hybrid fiber reinforced concrete (HFRC); axial compression performance; axial capacity; deformation

柱子在结构中通常起着最关键的作用, 关键部位一个受压构件的失效就会导致整个结构的失效。目前常用的是钢筋混凝土柱。在海洋环境、盐碱地区、桥梁工程和化工厂厂房等承受腐蚀作用的混凝土结构, 钢筋易腐蚀, 严重影响结构安全性和使用寿命。

纤维增强聚合物 (fiber reinforced polymer, FRP) 是替代钢筋、用于腐蚀环境中结构的最理想材料。玻璃纤维增强聚合物 (glass fiber reinforced polymer, GFRP) 筋具有抗拉强度高、密度小、耐腐蚀性能好、抗疲劳性能优良和电磁绝缘性好等优点^[1]。

收稿日期: 2016-04-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51378032, 51578021)

作者简介: 邓宗才 (1961—), 男, 教授, 主要从事新型工程材料及结构方面的研究, E-mail: dengzc@bjut.edu.cn

目前,FRP 筋增强普通混凝土柱以及钢筋增强纤维混凝土柱的轴压性能已有相关研究^[2-7],但关于 GFRP 筋的混杂纤维混凝土(hybrid fiber reinforced concrete, HFRC)柱的轴压特性及理论未见报道.为了弥补 GFRP 筋的线弹性和脆性较大的不足,本文混凝土中掺加了短切高性能聚烯烃纤维(polyolefin, PP)以及聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)纤维,以改善 GFRP 筋混凝土柱的变形能力.粗聚烯烃纤维、PVA 纤维间具有良好的协同效应,优势互补,由于 PVA 纤维较细且表面有亲水羟基,与基体黏结良好,纤维拔出过程会消耗较多的能量;粗聚烯烃纤维较长,表面凹凸不平,增加了它与基体的黏结效果,对提高 HFRC 裂后变形能力有较大贡献,纤维在拔出和拉断的过程中消耗了较多能量^[8].本文进行了 6 根 GFRP 筋 HFRC 柱的轴压试验,分析了 GFRP 筋的箍筋间距和纵筋配筋率对纤维混凝土柱的轴压性能的影响规律,提出了 GFRP 筋纤维混凝土柱的承载力计算公式,为工程应用 FRP 筋混凝土柱提供参考数据.

1 试验概况

1.1 试件设计与材料

共设计 6 个圆形截面柱,其中 1 个未配筋 HFRC 柱,5 个 GFRP 筋 HFRC 柱,柱子的直径为 380 mm,高度为 1 300 mm.柱编号和配筋列于表 1,其中“G”后的数字表示 GFRP 纵筋的根数,“-”后

数字表示 GFRP 箍筋间距,如 G6-90 表示纵筋 6 根,箍筋间距为 90 mm;N 为未配筋试件; ρ_f 为纵筋配筋率; d 、 n 分别为纵筋直径和根数; d_v 为箍筋直径; ρ_v 为体积配箍率; s 为箍筋间距.

表 1 试件编号汇总
Table 1 Summary of specimens numbering

试件 编号	纵筋			箍筋		
	$\rho_f / \%$	d / mm	n	$\rho_v / \%$	d_v / mm	s / mm
N						
G6-90	1.06	16	6	1.0	10	90
G6-70	1.06	16	6	1.3	10	70
G6-50	1.06	16	6	1.9	10	50
G8-70	1.42	16	8	1.3	10	70
G10-70	1.77	16	10	1.3	10	70

HFRC 的材料组成和配合比见表 2,其中水泥为 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,砂子为中砂,减水剂采用复配的西卡高效聚羧酸减水剂;粗纤维为上海罗洋材料有限公司提供的波浪形 PP,直径 1 mm,长度 40 mm,抗拉强度 530 MPa,弹性模量 5.6 GPa;PVA 直径 20 μm ,长度 10 mm,抗拉强度 1 600 MPa.

GFRP 筋由南京锋晖复合材料有限公司提供,纵筋的抗拉强度 840 MPa,弹性模量 45 GPa;螺旋箍筋的抗拉强度 336 MPa,弹性模量 45 GPa.

表 2 纤维混凝土组分及配合比
Table 2 Composition and mix proportion of HFRC

水泥	砂子	石子	矿粉	粉煤灰	水	减水剂	PP 粗纤维	PVA 纤维
322	707	1 061	92	46	172	5.45	8	3

1.2 试件制作与养护

将内径 380 mm 的 PVC 管切割成长度为 1 300 mm 的管子,底部用木板封住.用扎带将 GFRP 筋按照设计的箍筋间距和纵筋根数及位置绑扎好,为保证破坏发生在试件中部,试件两端分别设置 250 mm 箍筋加密区,加密区内箍筋间距为 50 mm.将绑扎好的 GFRP 筋放入 PVC 管中,把 GFRP 筋固定在 PVC 管上,使之周围和 PVC 管的距离保持一致.将搅拌均匀的纤维混凝土分批倒入 PVC 管中,倒入的过程中用振动棒振捣密实.7 d 后将 PVC 管切除,自然养护 21 d,开始试验.试件制作过程如图 1 所示.

1.3 试验加载与测试内容

在试件中部的箍筋上等间距贴 4 个应变片,用来测箍筋的应变.每隔 1 根纵筋贴 1 个应变片,用来测纵筋的应变.柱高中部位置混凝土的四周等间距贴 4 个纵向和 4 个横向的应变片,用来测混凝土的纵向和横向应变.同时,在柱子的四周用 4 个位移计测定轴向变形量.用 20 MN 的电液伺服机加载,峰值荷载前用力控制加载速率,加载速率 150 kN/min.峰值荷载后用位移控制加载速率,加载速率 0.12 mm/min.为了消除试件两端不平整对试验的影响,在试件两端铺一层细砂找平.正式加载



(a) GFRP筋的绑扎



(b) 绑扎好的GFRP筋



(c) 将GFRP筋放入PVC管中



(d) 搅拌均匀的HFRC

图 1 试件制作过程

Fig. 1 Manufacturing process of specimens

前预加载至 50 kN, 如果试件四周的应变均在四周应变平均值的 $\pm 5\%$ 范围以内, 表示试件受荷均匀, 否则重新调整对中, 直至满足要求。对中完毕后, 开始加载直到试件破坏。用计算机数据自动采集系统记录试验数据。试验加载装置见图 2。

2 试验结果与分析

2.1 试验现象和破坏形态

未配筋试件加载初期处于弹性阶段, 其轴向应变和环向应变均较小; 当加载至峰值荷载的 85% 左右时, 试件中部出现微裂缝, 位移增加的速率逐渐加



图 2 加载装置

Fig. 2 Loading installation

快, 并伴有纤维拔出和断裂的“噼啪”声; 随着荷载的增加, 微裂缝逐渐增多且向试件两端延伸, 当加载至峰值荷载时, 裂缝开裂明显; 随后荷载迅速减小, 裂缝逐渐变宽, 但由于纤维的桥联作用试件完整性较好。

配筋试件加载初期和未配筋试件类似, 其轴向应变和环向应变均较小, 箍筋尚未发挥作用; 当加载至峰值荷载的 80% ~ 90% 时, 试件中部出现微裂缝; 随着荷载的增加伴有纤维拔出和断裂的“噼啪”声, 到达峰值荷载时, 裂缝开裂明显, 此时箍筋作用较小; 随后试件轴向和环向应变增长较快, 箍筋的约束作用逐渐增大, 荷载较未约束试件下降缓慢; 当荷载下降到峰值荷载的 85% 左右时箍筋断裂, 有较大的响声, 随后荷载迅速下降。试件在轴压过程中并未发生保护层脱落现象, 这与文献 [1] 中描述的 GFRP 筋增强普通混凝土柱明显不同, 文献 [1] 中保护层脱落现象很严重。待加载完毕后用锤子凿开裂缝处的保护层, 观察到箍筋和纵筋都已断裂, 如图 3 (d) 所示。试件破坏过程如图 3 所示。

2.2 试验数据与分析

试验结果列于表 3。表中 $P_{\max}$ 为柱子承载力实测值, f_{cc} 和 ε_{cc} 分别为约束 HFRC 的峰值应力、峰值应变, f_{co} 和 ε_{co} 分别为非约束 HFRC 的峰值应力、峰值应变, P_b 为柱子峰值荷载时纵筋的总荷载, ε_s 和 ε_b 分别为柱子峰值荷载时箍筋和纵筋的应变实测值。混凝土的延性系数用比值 $\varepsilon_{85}/\varepsilon_1$ 表示, ε_{85} 是轴向荷载下降到峰值荷载的 85% 时所对应的轴向应变, ε_1 是上升段弹性极限所对应的应变^[9], 见图 4。

由表 3 可见, GFRP 筋 HFRC 柱的承载力 $P_{\max}$ 的范围为 5 124 ~ 5 680 kN, 此时纵筋的轴向应变 ε_b 的范围为 $3.524 \times 10^{-3} \sim 5.256 \times 10^{-3}$, 远小于其极限应变 (1.860×10^{-3}); 峰值荷载时箍筋的应变范围



图3 试件在不同加载阶段的开裂现象(G6-50)

Fig. 3 Cracking appearance of test specimens at different loading stages(G6-50)

为 $1.524 \times 10^{-3} \sim 2.428 \times 10^{-3}$,远大于文献[1]中 GFRP 筋普通混凝土柱的 305×10^{-6} ,这表明峰值荷

表3 试验结果

Table 3 Summary of test results

试件编号	$P_{\max}/\text{kN}$	$f_{cc}(f_{co})/$ MPa	f_{cc}/f_{co}	$\varepsilon_{cc}(\varepsilon_{co})/$ $\mu\varepsilon$	ε_b	ε_s	P_b/kN	$(P_b/P_{\max})/$ %	延性系数
N	4 420	(39.0)		(2936)					
G6-90	5 124	43.5	1.115	3 561	3 524	1 524	191	3.73	1.63
G6-70	5 352	45.2	1.159	4 210	4 160	1 872	226	4.22	2.53
G6-50	5 680	47.6	1.221	5 203	5 256	2 428	285	5.02	3.50
G8-70	5 432	45.3	1.162	4 105	4 123	1 878	298	5.49	2.51
G10-70	5 509	45.4	1.164	4 010	3 993	1 880	361	6.55	1.56

图5为混凝土的轴向应力-应变曲线,试验结果表明,在加载初期试件处于弹性变形阶段,箍筋尚未发挥约束作用,应力-应变曲线几乎是直线.随着荷载增加,应力-应变曲线逐渐变弯,应变的增长速率快于应力增长.随着荷载进一步增加,应力-应变曲线斜率急剧减小,随后应力-应变曲线到达峰值点.峰值点后 GFRP 箍筋能够继续发挥约束,应力-

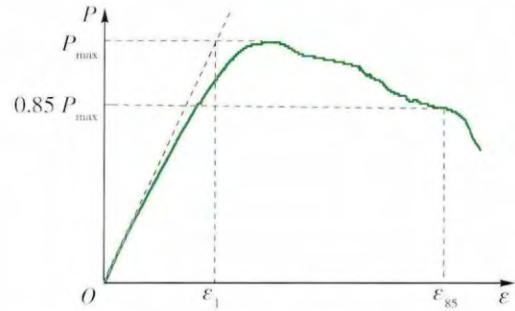


图4 柱子延性的计算方法

Fig. 4 Calculation method of ductility of columns

载时 GFRP 筋 HFRC 柱的箍筋应力比 GFRP 筋普通混凝土的大很多,约束作用不能忽略. HFRC 的峰值应变 ε_{cc} 的范围为 $3.561 \times 10^{-3} \sim 5.203 \times 10^{-3}$,比文献[1]中 GFRP 筋普通混凝土柱的峰值应变 ε_{cc} ($1.746 \times 10^{-3} \sim 2.740 \times 10^{-3}$) 大 1 倍左右,这表明 GFRP 筋 HFRC 混凝土在达到承载力之前的变形性能更好.

2.3 应力-应变曲线

由于试件加载过程中,混凝土保护层并未脱落,所以认为纵筋和混凝土之间没有发生滑移,其应变相等,故混凝土的应力计算公式为

$$\sigma_c = \frac{P - E_f \varepsilon_c A_f}{A(1 - \rho_f)} \quad (1)$$

式中: P 为荷载实测值; E_f 为 GFRP 纵筋的弹性模量; ε_c 为混凝土的纵向应变; A_f 为 GFRP 纵筋总截面面积.

应变曲线下降较为平缓,延性较好,一直持续到应力下降到 85% 峰值应力后 GFRP 筋才会破坏.最后,因 GFRP 箍筋断裂核心混凝土承载力迅速下降,试件破坏.观察文献[1]中 GFRP 筋普通混凝土柱的荷载-应变曲线可知柱子破坏时轴向应变为 $3 \times 10^{-3} \sim 6 \times 10^{-3}$,而本文中柱子破坏时轴向应变在 8×10^{-3} 以上,因此, GFRP 筋 HFRC 柱的变形能力

更强.

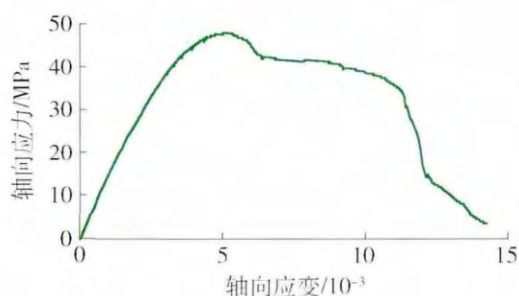


图 5 混凝土的实测轴向应力-应变曲线(G6-50)

Fig. 5 Measured axial stress-strain curve of concrete(G6-50)

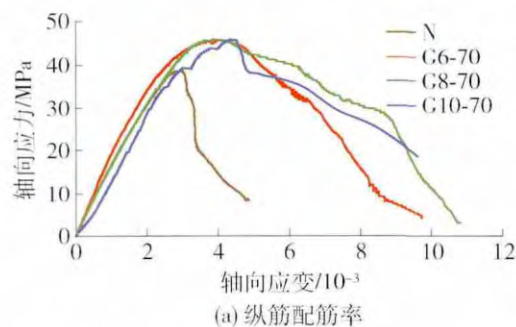
2.4 影响承载力、变形的因素

2.4.1 GFRP 纵筋配筋率

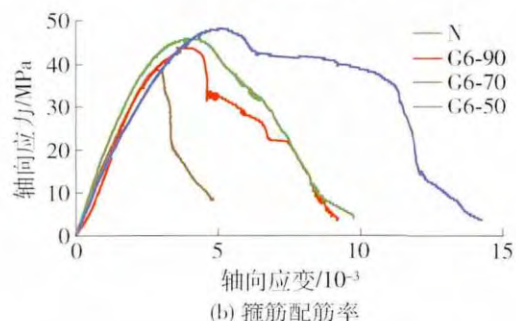
图 6(a) 为其他条件相同但纵筋配筋率不同的 3 个试件和未配筋试件的应力-应变曲线. 由图 6(a) 可知, 纵筋配筋率对 HFRC 的应力-应变曲线的影响很小. 由表 3 可知, 随着纵筋配筋率的提高(1.06%、1.42%、1.77%), 试件 G6-70、G8-70、G10-70 的峰值荷载相对于未配筋试件 N 分别提高 21.1%、22.9%、24.6%; HFRC 峰值应力分别提高 15.9%、16.1%、16.4%; HFRC 峰值应变分别提高 43.4%、39.8%、36.6%. 这表明随着纵筋配筋率的提高, 纵筋分担的荷载增加, 柱子承载力有所提高; 而配筋率对 HFRC 峰值应力、应变的影响很小. 此外, 当纵筋配筋率从 1.06% 增加到 1.77%, 峰值荷载时纵筋承担的荷载所占的比重 P_b/P_{max} 从 4.22% 增加到 6.55%, 延性系数从 2.53 降低到 1.56. 这表明随着纵筋配筋率的提高, 纵筋承担的荷载比重增加, 但也增加了柱子的脆性.

2.4.2 GFRP 箍筋间距

图 6(b) 为其他条件相同但箍筋间距不同的三个试件和未配筋试件的应力-应变曲线. 由图 6(b) 可知, 箍筋间距越小, HFRC 峰值应力和峰值应变越大, 下降段越平缓. 由表 3 可知, 随着箍筋间距的减小, 试件 G6-90、G6-70、G6-50 的峰值荷载相对于未配筋试件 N 分别提高 15.9%、21.1%、28.5%; HFRC 峰值应力分别提高 11.5%、15.9%、22.1%; HFRC 峰值应变分别提高 21.3%、43.4%、77.2%. 这表明箍筋间距越小, 试件的承载力以及 HFRC 的峰值应力和峰值应变越大. 此外, 当箍筋间距从 90 mm 降低到 50 mm, 峰值荷载时纵筋承担的荷载所占的比重 P_b/P_{max} 从 3.73% 增加到 5.02%, 延性系数从 1.63 增加到 3.50. 因此, 较小的箍筋间距具有较好的约束效果.



(a) 纵筋配筋率



(b) 箍筋配筋率

图 6 纵筋配筋率和箍筋间距对 HFRC 轴向应力-应变曲线的影响

Fig. 6 Effect of longitudinal reinforcement ratio and stirrup spacing on axial stress-strain curve of HFRC

3 GFRP 筋 HFRC 柱的理论分析

3.1 箍筋对 HFRC 的有效约束应力

在轴压荷载的作用下, 混凝土的侧向膨胀使得箍筋产生应力. 箍筋的约束应力沿柱高分布不均匀, 产生拱效应. 如图 7 所示, 纵向方向上相邻箍筋的中间高度截面上的有效约束区面积 A_e 为最小, 它与混凝土核心面积 A_{cc} 之比被定义为有效约束系数 k_e [10]. 圆柱的有效约束系数计算公式为

$$k_e = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2d_s}\right)^2}{1 - \rho_f} \quad (2)$$

式中: s' 是箍筋的净间距; d_s 是柱子截面直径上箍筋

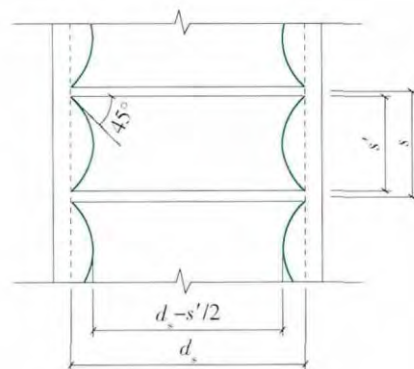


图 7 约束混凝土中的拱作用

Fig. 7 Arching action in confined concrete

中轴线之间的距离.

文献[10]用有效侧向约束应力 f_{le} 来计算混凝土达到峰值应力时圆形箍筋对混凝土的约束应力的大小.

$$f_{le} = 0.5k_e\rho_v f_h \quad (3)$$

式中: ρ_v 表示体积配箍率; f_h 表示混凝土峰值应力时箍筋应力.

3.2 HFRC 峰值应力时箍筋应力

图 8 为试件 G6-50 实测箍筋应变-柱子轴向荷载曲线,由图 8 可知当 HFRC 达到峰值应力时 GFRP 筋并未达到极限状态,所以,计算 HFRC 峰值应力所对应的箍筋应力时不可以直接用箍筋的抗拉强度.试验表明,若箍筋间距较大(90 mm),HFRC 峰值应力时横向膨胀较小,所对应的箍筋应变很小(1.524×10^{-3}),远远达不到箍筋的抗拉强度,当箍筋间距较小时(50 mm),HFRC 峰值应力所对应的箍筋应变相应增大(2.428×10^{-3}),箍筋的约束作用较强.

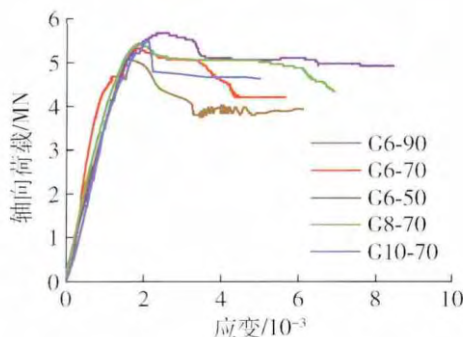


图 8 箍筋应变-柱子轴向荷载曲线

Fig. 8 Stirrup stress-axial load curve

文献[11]假定混凝土到达峰值应力时所对应的箍筋应力是配箍率、箍筋形状、混凝土强度和截面尺寸的函数,回归出了混凝土峰值应力对应的箍筋应力的计算公式,根据本文试验数据回归出混凝土峰值应力对应的箍筋应力的计算公式为

$$f_h = 0.2586E_v \left(\frac{k_e\rho_v}{f_{co}} \right)^{0.6028} \quad (R^2 = 0.96) \quad (4)$$

式中: E_v 为箍筋的弹性模量; f_{co} 为未约束混凝土强度.

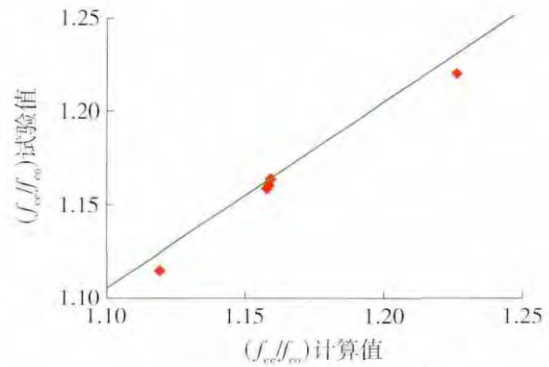
3.3 HFRC 的峰值应力和峰值应变

由试验结果回归出纤维混凝土的峰值应力和峰值应变分别为

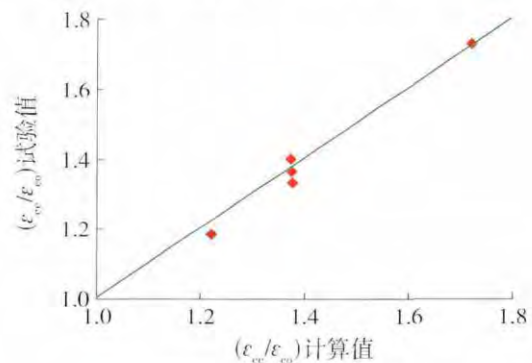
$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 1.745 \left(\frac{f_{le}}{f_{co}} \right)^{0.5427} \quad (R^2 = 0.98) \quad (5)$$

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1 + 30.991 \frac{f_{le}}{f_{co}} \quad (R^2 = 0.97) \quad (6)$$

f_{cc}/f_{co} 和 $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$ 计算值和试验值吻合良好,见图 9.



(a) f_{cc}/f_{co} 计算值和试验值对比



(b) $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$ 计算值和试验值对比

◆ 代表试验值与理论值的比值
— 代表试验值与理论值的比值为1的45°线

图 9 f_{cc}/f_{co} 和 $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$ 计算值和试验值对比

Fig. 9 Calculation value and test value comparison of f_{cc}/f_{co} and $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$

3.4 GFRP 筋 HFRC 柱的承载力

由于 FRP 筋增强普通混凝土柱在峰值荷载时箍筋的约束作用很小,现有研究^[15]中柱子承载力的计算公式都未考虑箍筋的贡献.文献[1]中 FRP 筋增强普通混凝土柱的承载力公式为

$$P_0 = 0.85f'_c(A - A_f) + 0.35f_f A_f \quad (7)$$

式中: A 表示柱子的截面面积; f'_c 表示标准圆柱体试件的抗压强度; f_f 表示纵筋的抗拉强度; A_f 表示 GFRP 纵筋的总截面面积.

文献[5]中 FRP 筋增强普通混凝土柱的承载力公式为

$$P_0 = \varphi_f(f_c A_c + \lambda_f E_f \varepsilon_f A_f) \quad (8)$$

式中: φ_f 表示长柱稳定系数; f_c 表示混凝土轴心抗压强度; λ_f 表示承载力折减系数,建议取 $\lambda_f = 0.7$; ε_f 表示纵筋压应变,建议取 $\varepsilon_f = 0.0025$; A_c 、 A_f 分别表示混凝土和纵筋截面面积.

本文试验结果表明,箍筋和纵筋对承载力都有贡献.柱子承载力公式由 2 个部分组成:约束混凝土的承载力和纵筋的承载力,其公式为

$$P_0 = f_{cc} (A - A_f) + E_f \varepsilon_{cc} A_f \quad (9)$$

式中: P_0 表示柱子的承载力; A 表示柱子的截面面积; A_f 表示 GFRP 纵筋的总截面面积; f_{cc} 用式(5)计算 ε_{cc} 用式(6)计算。

将本文和文献[15]的承载力计算值与本文试验值对比,见图10。由图可知,试验值与式(7)的计算值之比 $P_{\max}/P_0$ 在 1.118 ~ 1.239,试验值与式(8)的计算值之比 $P_{\max}/P_0$ 在 1.202 ~ 1.245,而试验值与式(9)的计算值之比 $P_{\max}/P_0$ 在 1.007 ~ 1.020。因此,式(7)和式(8)的承载力计算公式偏保守,这是由于 FRP 筋普通混凝土柱在峰值荷载时箍筋的约束作用很小,被忽略掉了,而 GFRP 筋 HFRC 柱在峰值荷载时箍筋的约束作用较大。本文提出的公式能够较好地预测 GFRP 筋 HFRC 柱的承载力。

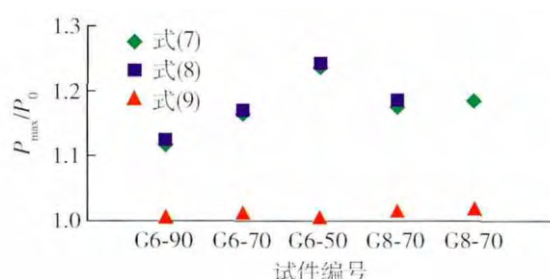


图10 承载力试验值与不同计算公式的对比

Fig. 10 Comparison between test values of bearing capacity and different formulas

4 结论

1) GFRP 筋 HFRC 柱的轴压过程中并未发生混凝土保护层剥落的现象,因此认为纵筋和混凝土变形协调。

2) 箍筋直径相同时,较小的箍筋间距具有较好的约束效果。随着箍筋间距的减小,配箍率逐渐增大, HFRC 的应力-应变曲线下降段更加平缓,柱子的延性更好。

3) 随着纵筋配筋率的提高,试件的承载力有一定的提高,但 HFRC 峰值应变有所降低。

4) GFRP 筋普通混凝土柱峰值荷载时箍筋的约束作用很小,承载力计算可不考虑箍筋的约束作用,而 GFRP 筋 HFRC 柱峰值荷载时箍筋的约束作用不可忽略。本文提出的承载力公式由 2 个部分组成:约束 HFRC 的承载力和 GFRP 纵筋的承载力,能够较好地预测 GFRP 筋 HFRC 柱的承载力。

参考文献:

[1] MOHAMMAD Z A, HAMDY M, BRAHIM B. Axial

capacity of circular concrete columns reinforced with GFRP bars and spirals [J]. Journal of Composites Construction, 2014, 18(1): 538-565.

[2] CHRIS P P, MICHAEL E G, LAWRENCE D R. Axial load behavior of concrete columns confined with GFRP spirals [J]. Journal of Composites Construction, 2013, 17(3): 305-313.

[3] MOHAMMAD Z A, HAMDY M M, OMAR C, et al. Confinement model for concrete columns internally confined with carbon FRP spirals and hoops [J]. Journal of Composites Construction, 2015, 141(9): 1-11.

[4] ANTONIO D L, FABIO M, ANTONIO N. Behavior of full-scale glass fiber-reinforced polymer reinforced concrete columns under axial load [J]. Structural Journal, 2010, 107(5): 589-596.

[5] 张继文, 龚永智. CFRP 筋增强混凝土柱受力性能的研究 [C] // 第五届全国 FRP 学术交流会论文集. 北京: 土木工程学报, 2007: 495-504.

ZHANG J W, GONG Y Z. Study on the behavior of reinforced concrete columns reinforced with CFRP tendons [C] // Proceedings of the Fifth National Conference on FRP academic exchange. Beijing: China Civil Engineering Journal, 2007: 495-504. (in Chinese)

[6] 寇佳亮, 孙方辉, 梁兴文, 等. 箍筋约束纤维增强混凝土轴心受压性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2015, 36(7): 124-131.

KOU J L, SUN F H, LIANG X W, et al. Experimental investigation on axial compression performance of fiber reinforced concrete confined with stirrups [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(7): 124-131. (in Chinese)

[7] 俞家欢, 吴琼, 赵同峰. 钢筋增强 PP ECC 长柱试验 [J]. 沈阳建筑大学学报, 2012, 28(4): 619-625.

YU J H, WU Q, ZHAO T F. Experimental research on steel reinforced PP ECC long columns [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University, 2012, 28(4): 619-625. (in Chinese)

[8] 邓宗才, 冯琦. 混杂纤维活性粉末混凝土的断裂性能 [J]. 建筑材料学报, 2016, 19(1): 14-21.

DENG Z C, FENG Q. Fracture properties of hybrid fibers reinforced reactive powder concrete [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(1): 14-21. (in Chinese)

[9] PESSIKI S, PIERONI A. Axial load behavior of large-scale spirally-reinforced high-strength concrete columns [J]. Structural Journal, 1997, 94(3): 304-313.

[10] 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.

[11] 史庆轩, 王南, 田园, 等. 高强箍筋约束高强混凝土轴心受压应力-应变全曲线研究 [J]. 建筑结构学报, 2013, 34(4): 144-151.

SHI Q X, WANG N, TIAN Y, et al. Study on stress-strain relationship of high-strength concrete confined with high-strength stirrups under axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(4): 144-151. (in Chinese)

(责任编辑 郑筱梅)