

# FRP 约束方钢管混凝土短柱轴压性能研究

张倚天<sup>1</sup>,肖岩<sup>2,3†</sup>

- (1. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082;  
2. 浙江大学-伊利诺伊大学厄巴纳香槟校区联合学院,浙江 海宁 314400;  
3. 教育部建筑安全与节能重点实验室(湖南大学),湖南 长沙 410082)

**摘要:**通过对8个不同FRP材料(碳纤维、玻璃纤维和玄武岩纤维)约束的钢管混凝土方柱的轴压试验研究,揭示此类构件的受力机理与破坏形态,探讨不同FRP约束材料对约束方钢管混凝土的轴向力学性能的影响.试验结果表明,碳纤维约束试件强度和延性提高最为明显.FRP材料的约束强度越大,约束钢管混凝土的轴向承载力越高并且延性越好.在相同约束强度下,玄武岩纤维约束试件的延性优于玻璃纤维约束试件.针对FRP约束钢管混凝土方柱,提出了承载力计算公式.与本试验和其他学者试验结果对比显示,该公式计算结果与试验值吻合良好.

**关键词:**约束钢管混凝土;承载力;FRP;约束;CCFT;方形截面;轴压  
**中图分类号:** TU398.9 **文献标志码:** A

## Study on Behaviors of FRP Confined Stub Concrete Filled Square Steel Tubes under Axial Load

ZHANG Yitian<sup>1</sup>, XIAO Yan<sup>2,3†</sup>

- (1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;  
2. ZJUI Institute, Zhejiang University, Haining 314400, China;  
3. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency(Hunan University) of the Ministry of Education, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Through the axial compression test of eight fiber reinforced polymer (carbon, glass and basalt) confined stub concrete filled square steel tubes (CCFT), this paper reveals the mechanism and the failure model of this kind of composite column. The test results indicate that carbon fiber reinforced CCFT has the highest axial load and best ductility. And the axial load capacity and the ductility increase with the FRP confinement strength. Under the same FRP confinement level, the basalt fiber CCFT has a better ductility than the glass fiber CCFT. A formula for the calculation of bearing capacity of the square CCFT columns is also proposed. The analytically calculated results are shown to be generally in good agreement with the experimental results from this study and other research.

**Key words:** confined concrete filled tubes; bearing capacity; FRP; confinement; CCFT; square sections; axial compression

\* 收稿日期:2019-03-25

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51438010), National Natural Science Foundation of China(51438010); 湖南省自然科学基金青年项目(2019JJ50093), Hunan Provincial Natural Science Foundation of China(2019JJ50093)

作者简介:张倚天(1987—),男,湖北黄冈人,湖南大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: yanxiao@intl.zju.edu.cn

钢管混凝土(CFT)由于其相较于传统钢筋混凝土具有更高的强度和更好的延性,因此在高层建筑、桥梁等基础设施建设中得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。虽然在钢管内填充混凝土可以防止钢管向内屈曲,但是一旦钢管混凝土达到其极限承载力,钢管向外产生局部屈曲将可能导致构件力学性能急剧下降。虽然采用传统加固方法可以缓解此类问题,但是传统方法都有施工周期长或占用空间大等难以克服的缺陷。近年来,纤维增强复合材料(FRP)由于其轻质高强的力学性能而被广泛应用于结构加固增强中。Xiao 等<sup>[3]</sup>最早提出 FRP 约束钢管混凝土组合柱(CCFT)的概念。其原理是利用 FRP 材料对钢管混凝土柱施加横向约束,不仅可阻止或延缓钢管的局部屈曲,而且可提高填充混凝土强度,从两方面提高钢管混凝土柱的力学性能。为了更好地了解约束钢管混凝土柱的基本力学性能,不同的学者开展了一系列研究,Mao 和 Xiao<sup>[4]</sup>采用 FRP 条带加固钢管混凝土柱,试验表明 FRP 条带可显著提高钢管混凝土的抗震性能。Choi 和 Xiao<sup>[5]</sup>提出一种理论模型预测 CCFT 轴压力学行为,并利用有限元软件验证了模型的正确性。Tao 等<sup>[6]</sup>进行了 9 个 CCFT 短柱试验,并提出一个简化承载力计算模型。Hu 等<sup>[7]</sup>进行了 12 个玻璃纤维(GFRP)约束钢管混凝土轴压试验,发现 FRP 布对填充混凝土也存在约束作用。Sundarraja 和 Prabhu<sup>[8]</sup>进行了不同间距的 FRP 条带约束钢管混凝土的轴压试验,发现减小 FRP 条带间距,可推迟钢管的局部屈曲并提高构件的极限承载力。

本文介绍了 3 种不同 FRP 材料的约束钢管混凝土方柱轴压试验,共 8 个试件。讨论该类型组合柱的轴向力学性能,同时提出约束方钢管混凝土轴向承载力计算公式,以期对约束方钢管混凝土柱设计提供参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试验设计

已有研究表明,外包 FRP 布可显著增强传统钢管混凝土柱(CFT)的力学性能。目前主要研究仍集中在圆形截面上,对于方形截面的研究还不充分。然而钢管局部屈曲在钢管混凝土方柱中更为明显。Park 等<sup>[9]</sup>虽然研究了不同宽厚比的 FRP 约束方钢管

混凝土的轴压性能,但是其尺寸相对较小,且 FRP 包裹材料与形式单一。本文设计了 4 组共计 8 个不同 FRP 材料约束大尺寸的方形截面钢管混凝土构件。纤维布约束材料分别为:碳纤维(CFRP)、玻璃纤维(GFRP)、玄武岩纤维(BFRP)。

FRP 材料的约束效应系数为:

$$\xi_{\text{frp}} = \frac{A_{\text{frp}} f_{\text{frp}}}{A_c f_c} \quad (1)$$

式中: $A_{\text{frp}}$ 和 $f_{\text{frp}}$ 分别表示 FRP 的截面面积与极限强度; $A_c$ 和 $f_c$ 分别表示混凝土的截面面积与抗压强度。

钢管高度统一为 800 mm,截面尺寸统一为 300 mm×300 mm,倒角半径为 15 mm。其中 2 个钢管混凝土试件,6 个不同 FRP 材料约束钢管混凝土试件,具体参数见表 1。

表 1 试验参数及主要试验结果

Tab.1 Parameters and test results of specimens

试件编号	约束材料	层数	$\xi_{\text{frp}}$ /MPa	$\varepsilon_{\text{frp}}$ /μ.ε	$N_p$ /kN	SI/%
CFT-1		0	0	2 252	6 401	
CFT-2		0	0	2 072	6 528	
C-CCFT-1	CFRP	4	1.05	3 277	7 727	18
C-CCFT-2	CFRP	4	1.05	3 846	7 281	
G-CCFT-1	GFRP	4	0.41	2 934	7 264	10
G-CCFT-2	GFRP	4	0.41	3 366	6 812	
B-CCFT-1	BFRP	4	0.39	2 927	7 080	9
B-CCFT-2	BFRP	4	0.39	3 152	6 881	

注: $N_p$ 表示承载力试验值; $\varepsilon_{\text{frp}}$ 表示极限承载力对应的应变;SI 为约束钢管混凝土的强度提高系数。

### 1.2 试件制作及材料特性

钢管混凝土试件中钢管由 2 个厚度为 6 mm 的 C 形钢板焊接而成,钢管两端磨平后分别与 2 块 10 mm 厚的端板焊接,其中一端端板留有直径为 150 mm 的孔洞用于浇筑混凝土。混凝土从预留孔洞浇筑,并用振捣棒使混凝土密实。浇筑完混凝土后,所有试件在室温下养护 28 d。对于约束钢管混凝土试件,在粘贴 FRP 布之前,先清洁钢管表面并刷一层环氧树脂底胶,待底胶完全干透后再采用湿黏法分层粘贴 FRP 布。4 层 FRP 布接口位置分别布置在钢管 4 个面,搭接长度均为 100 mm。最后将包好 FRP 布的试件在室温下静置 14 d,再进行试验。

本次试验采用的混凝土设计强度为 30 MPa. 试验时, 实测标准圆柱体的抗压强度为 33.9 MPa. 实测钢材屈服强度为 433 MPa, 极限强度为 533 MPa, 弹性模量为 2.03 GPa. 试验采用的 FRP 布均为单向布, 材料特性见表 2.

表 2 FRP 材性参数

Tab.2 Material properties of FRP

FRP 种类	弹性模量 /GPa	抗拉强度 /MPa	极限应变 /‰	名义厚度 /mm
CFRP	239	3 652	1.48	0.17
GFRP	78	1 429	1.84	0.17
BFRP	105	2 131	2.31	0.107

### 1.3 加载及测量装置

如图 1 所示, 本次试验所有试件均在湖南大学 1 000 t 轴向试验机上进行试验, 加载速率为 1 mm/min 直至试件失效. 钢管混凝土的破坏标志为试件下降到峰值荷载的 80% 以下直至荷载稳定; FRP 约束钢管混凝土的破坏标志为 FRP 开始大量断裂直至荷载稳定. 在试件中部安装 2 个线性可变量移传感器(LVDT)以测量试件的轴向变形.

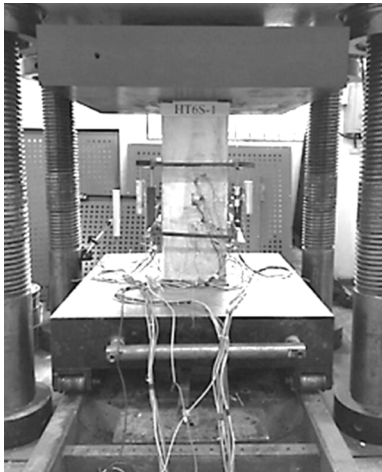


图 1 试验加载装置

Fig.1 Test set-up

在钢管中部各边均布置一组横向和纵向应变片. 基于应变的测量, 在弹性阶段进行预加载测试, 直到单个轴向应变与平均应变之间的最大差异小于 5% 再进行正式加载. 试验通过自动数据采集系统同时记录所有荷载和位移.

## 2 结果与分析

### 2.1 试验现象

试验后所有试件破坏形态如图 2 所示. 在加载初期, 钢管混凝土试件处于弹性阶段, 其形态外观并无显著变化. 随着荷载增大至约 5 000 kN, 钢管混凝土试件进入塑性阶段, 钢管壁开始出现 45° 剪切滑移线, 但钢管没有观察到明显的向外屈曲. 继续加载, 剪切滑移线逐渐增多, 到达极限荷载后, 试件持载能力突然下降, 变形突然增大. 钢管上部以及中部出现环向局部向外局部屈曲, 试件持载能力下降较快, 属于强度破坏.

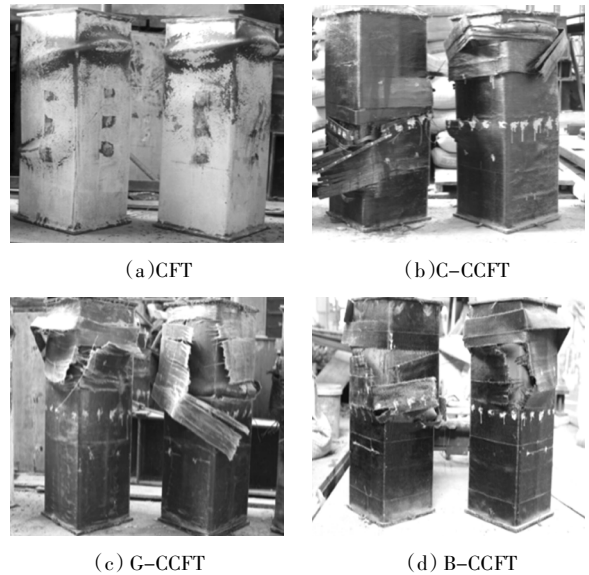


图 2 破坏模式

Fig.2 Failure mode of all specimens

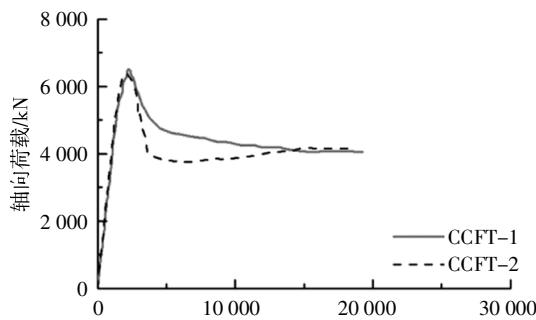
不同 FRP 纤维布约束试件的加载过程和破坏形态类似. 外包 FRP 布能限制钢管的屈曲直到试件达到极限承载力. 随后试件持载能力下降, 此时试件开始连续发出“噼啪”的声音, 钢管开始屈曲. 最终随着钢管屈曲的加大, FRP 布角部被拉断, 试件破坏. 和普通钢管混凝土试件相比, 约束钢管混凝土由于 FRP 布的约束导致其环向屈曲变形更小.

### 2.2 荷载-应变曲线

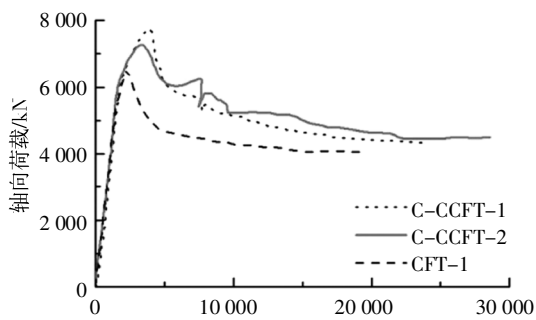
钢管混凝土和约束钢管混凝土试件的荷载-应变曲线如图 3 所示. 在加载初始阶段, 所有曲线呈线性发展, 试件属于弹性阶段. 大约在极限荷载的 80% 时, 试件进入弹塑性阶段, 应变的增长速率开始

大于极限荷载.当荷载达到极限荷载时,由于 FRP 的约束作用,约束钢管混凝土的轴向应变更大.说明外包 FRP 可有效提高钢管混凝土的变形能力.随后,由于约束材料对核心混凝土不能提供足够的约束作用,曲线开始进入急速下降阶段.无约束钢管混凝土承载力急剧下降约 40%后进入稳定阶段.相比之下,约束钢管混凝土的峰值荷载更高,并且曲线下降段更平缓,其荷载最终稳定在峰值荷载的 70%.

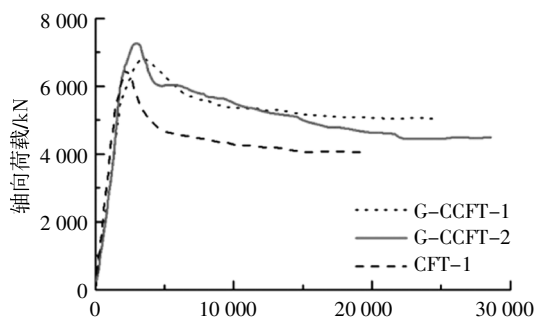
主要试验结果见表 1.试件的极限状态定义为荷载降至峰值荷载的 85%时的状态.从表 1 可看出,钢管混凝土柱的极限承载能力因 FRP 约束而增强,相对于 Xiao 等<sup>[5]</sup>的试验中 FRP 对圆形截面钢管混凝土柱的强度提高,外包 FRP 布对方形 CFT 柱的强度提高影响有限.



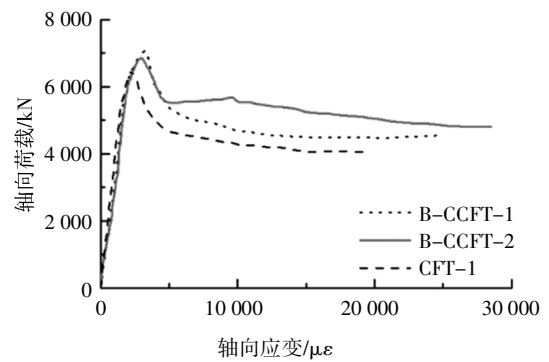
(a)CFT 试件



(b)C-CCFT 试件



(c)G-CCFT 试件



(d)B-CCFT 试件

图 3 试件的荷载-应变曲线

Fig.3 Load-strain curves of specimens

### 2.3 强度提高系数

若定义约束钢管混凝土的强度提高系数为:

$$SI = \frac{(N_{\text{cft}} - N_{\text{cft}})}{N_{\text{cft}}} \quad (2)$$

式中: $N_{\text{cft}}$  为约束钢管混凝土极限承载力; $N_{\text{cft}}$  为钢管混凝土极限承载力.计算所得强度提高系数见表 1.相对于钢管混凝土,CFRP 约束钢管混凝土,GFRP 约束钢管混凝土和 BFRP 约束钢管混凝土的承载力分别提高了 18%、10% 和 9%.说明不同约束强度对极限承载力的提高效果各不相同.FRP 套箍系数对强度提高系数的影响如图 4 所示.套箍系数越大,约束钢管混凝土的强度提高系数越高,两者近似呈线性关系.

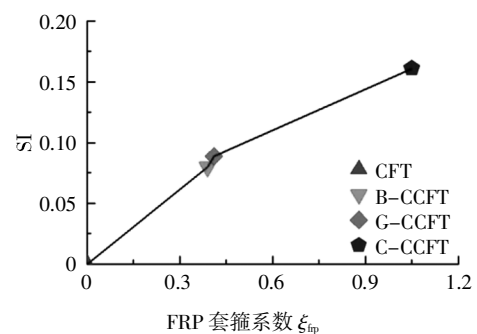


图 4 试件的强度提高系数

Fig.4 Effect of FRP confinement on strength ratio of specimens

### 2.4 延性系数

采用延性系数<sup>[6]</sup>来描述构件的塑性变形能力,定义如下:

$$DI = \frac{\epsilon_{85\%}}{\epsilon_y} \quad (3)$$

式中: $\epsilon_{85\%}$  为荷载下降到极限荷载的 85%时的轴向

应变;  $\epsilon_y = \epsilon_{75\%} / 0.75$ ,  $\epsilon_{75\%}$  为荷载上升到极限荷载的 75% 时的轴向应变. 不同类型试件的平均延性系数计算结果如图 5 所示. 由图可知, 外包 FRP 布可改善方钢管混凝土的延性. 约束效应系数最高的 CFRP 约束构件的延性最好.

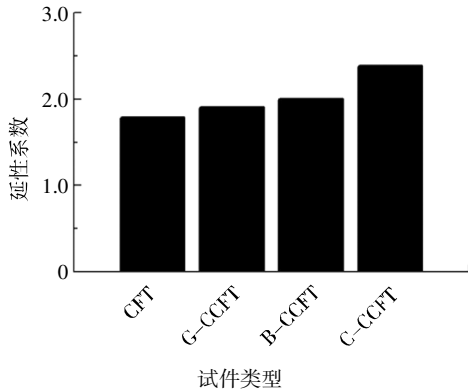


图 5 试件的延性系数

Fig.5 Ductility index of specimens

### 3 承载力计算模型

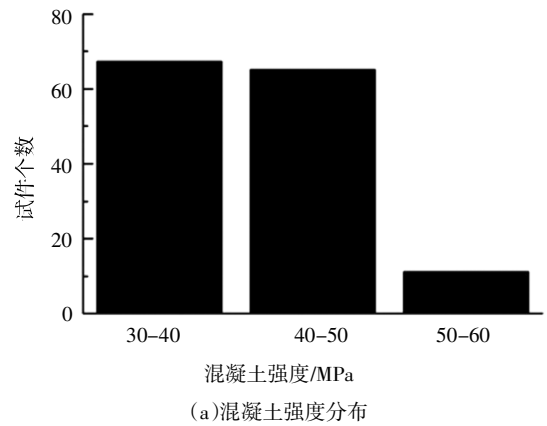
通过文献调查, 本文收集了总共 138 个试件, 其中圆形截面为 129 个, 方形截面为 9 个. 表 3 给出了全部试件的来源信息.

表 3 收集的试验数据

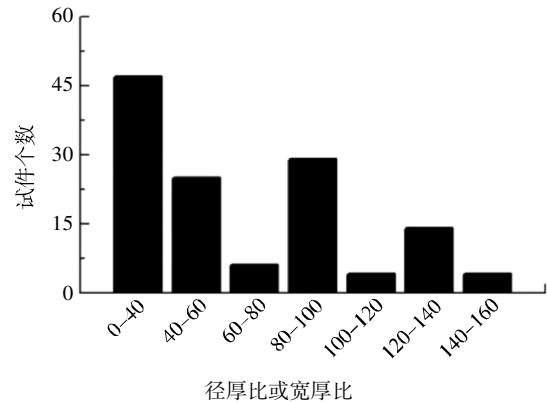
Tab.3 Collected test data

编号	试件个数	数据来源	编号	试件个数	数据来源
1	5	Xiao 等 <sup>[3]</sup>	7	20	Liu 等 <sup>[12]</sup>
2	9	Tao 等 <sup>[6]</sup>	8	16	Ding 等 <sup>[13]</sup>
3	12	Hu 等 <sup>[7]</sup>	9	15	Che 等 <sup>[14]</sup>
4	9	Park 等 <sup>[9]</sup>	10	22	Wei 等 <sup>[15]</sup>
5	11	Lu 等 <sup>[10]</sup>	11	10	Park 等 <sup>[16]</sup>
6	12	Gu 等 <sup>[11]</sup>			

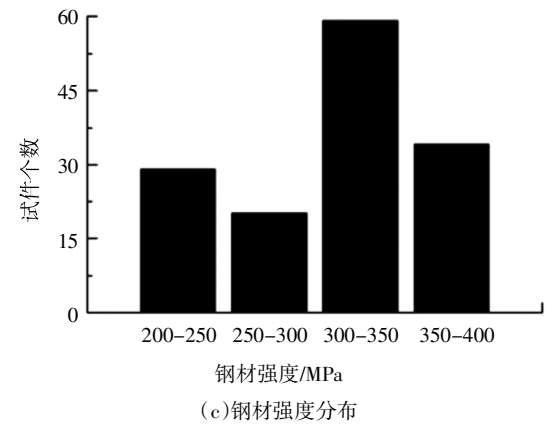
对已有试验数据进行几何和材料力学性能分类, 结果如图 6 所示. 从图中可知, 混凝土强度从 31 MPa 到 52 MPa; 钢材强度从 226 MPa 到 365 MPa; 径厚比从 18 到 135. 现有数据多集中在常用范围, 随着工程材料不断发展, 高强度混凝土与高强钢材应用越来越多. 这方面的研究有待深入.



(a) 混凝土强度分布



(b) 径厚比分布



(c) 钢材强度分布

图 6 材料与几何参数统计

Fig.6 Statistics of geometrical and material parameters

定义约束钢管混凝土的套箍系数为:

$$\xi_{\text{conf}} = \frac{A_{\text{frp}} f_{\text{frp}} + A_s f_y}{A_c f'_c} \quad (4)$$

式中:  $A_{\text{frp}}$  和  $f_{\text{frp}}$  分别表示 FRP 的截面面积与极限强度;  $A_c$  和  $f'_c$  分别表示混凝土的截面面积与抗压强度.  $A_s$  和  $f_y$  分别表示钢管的截面面积与屈服强度.

钢管混凝土柱的材料叠加强度等于钢管和核心混凝土承载力之和, 具体表达式如下:

$$N_u = A_s f_y + A_c f'_c \quad (5)$$

式中:  $A_s$  和  $A_c$  分别是钢管和填充混凝土的截面面积;  $f_y$  为钢材的屈服强度;  $f_c$  为填充混凝土抗压强度.

图 7 表示不同套箍系数(式(4))下,约束钢管混凝土承载力试验值与钢管和混凝土材料叠加强度的关系. 如图所示,约束钢管混凝土能发挥不同材料之间的组合作用. 套箍系数越大,强度提高越多.

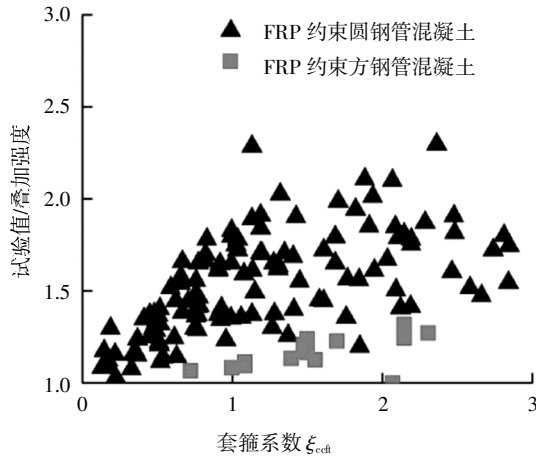


图 7 套箍系数对强度的影响

Fig.7 Effect of confinement factors on strength of CCFT

假设 FRP 布不承担任何竖向荷载,当约束钢管混凝土受压时,内部混凝土向外扩张,此时 FRP 和钢管开始出现环向变形,核心混凝土受到了 FRP 材料以及钢管的双重约束. 约束应力按式(6)计算.

$$f_i = \frac{2f_{fp}t_{fp} + 2f_yt_s}{b - 2t_s} \quad (6)$$

式中:  $b$  为柱截面宽度;  $f_{fp}$  为 FRP 的抗拉强度;  $t_{fp}$  为 FRP 布的名义厚度;  $f_y$  为钢材的屈服强度;  $t_s$  为钢管厚度.

对于 FRP 约束混凝土方柱, Youssef 等<sup>[17]</sup>提出按照式(7)计算其极限承载力:

$$\frac{f_{cc}}{f_c} = 0.5 + 1.225 \left( \frac{f_i}{f_c} \right)^{0.6} \quad (7)$$

式中:  $f_{cc}$  和  $f_c$  分别表示约束混凝土强度和混凝土圆柱体强度;  $f_i$  表示约束应力.

根据式(6)和(7),可以得出约束钢管混凝土方柱的轴向承载力计算公式:

$$N_{cft} = A_s f_y + A_c f_{cc} \quad (8)$$

式(8)计算结果与试验结果的对比见表 4,需要指出的是,文献[9]中 R4N 试件的试验值明显小于其材料强度叠加值(14 80 kN),试验误差过大,导致该系列计算值与试验值的比对误差超过 30%. 剔除该

系列数据后,计算承载力( $N_{cal}$ )与试验承载力( $N_p$ )的比值的均值(AVE)为 1.06,变异系数(COV)为 0.04. 可见该式与试验值吻合良好.

表 4 计算结果与试验结果对比

Tab.4 Comparison of Park's test results

试件来源	试件编号	$N_p$ /kN	$N_{cal}$ /kN	$N_{cal}/N_p$
Park 等 <sup>[9]</sup>	R3N	1 286	1 319	1.03
	R3F-1	1 309	1 415	1.08
	R3F-3	1 357	1 581	1.16
	R4N	13 729	1 738	1.27
	R4F-1	14 099	1 817	1.29
	R4F-3	1 474	1 959	1.33
	R6N	1 727	1 816	1.05
	R6F-1	1 866	1 889	1.01
	R6F-3	1 936	2 022	1.04
	本研究	CFT-1	6 401	6 817
CFT-2		6 528	6 817	1.04
CFRP-CCFT-1		7 727	7 973	1.03
CFRP-CCFT-2		7 281	7 973	1.09
GFRP-CCFT-1		7 264	7 306	1.01
GFRP-CCFT-2		6 812	7 306	1.07
BFRP-CCFT-1		7 080	7 283	1.03
BFRP-CCFT-2		6 881	7 283	1.06

## 4 结 论

本文通过试验研究了不同 FRP 材料约束方钢管混凝土短柱的轴压性能. 在本文的研究范围内,可得出以下结论:

1)FRP 约束钢管混凝土方柱的破坏模式为角部 FRP 布断裂. 外包 FRP 布可提高钢管混凝土短柱的极限承载力,并且可提高峰值应变.

2)在本文的试验范围内,约束钢管混凝土柱的承载能力随着约束强度的增加而增加. 即使改变 FRP 材料类型,这种趋势仍然是相同的.

3)外包 FRP 能改善方钢管混凝土的延性. 在相同约束强度下,BFRP 由于有更高的极限应变,使得

BFRP 约束试件的延性优于 GFRP 约束试件。

4) 基于试验结果, 本文提出了针对 FPR 约束混凝土方柱极限承载力计算公式, 通过与试验数据对比, 表明计算结果与试验结果吻合良好。

## 参考文献

- [1] HAN L H, YAO G H, ZHAO X L. Tests and calculations for hollow structural steel (HSS) stub columns filled with self-consolidating concrete (SCC) [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2005, 61(9): 1241—1269.
- [2] 刘劲, 丁发兴, 龚永智, 等. 圆钢管混凝土短柱局压力学性能研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2015, 42(11): 33—40.  
LIU J, DING F X, GONG Y Z, *et al.* Mechanical behavior of concrete-filled steel tubes stub columns with circular section under local compression [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2015, 42(11): 33—40. (In Chinese)
- [3] XIAO Y, HE W H, CHOI K K. Confined concrete-filled tubular columns [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2005, 131(3): 488—497.
- [4] MAO X Y, XIAO Y. Seismic behavior of confined square CFT columns[J]. *Engineering Structures*, 2006, 28(10): 1378—1386.
- [5] CHOI K K, XIAO Y. Analytical studies of concrete-filled circular steel tubes under axial compression[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2010, 136(5): 565—573.
- [6] TAO Z, HAN L H, ZHUANG J P. Axial loading behavior of CFRP strengthened concrete-filled steel tubular stub columns [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2007, 10(1): 37—46.
- [7] HU Y M, YU T, TENG J G. FRP-confined circular concrete-filled thin steel tubes under axial compression[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2010, 15(5): 850—860.
- [8] SUNDARRAJA M C, PRABHU G G. Experimental study on CFST members strengthened by CFRP composites under compression[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2012, 72: 75—83.
- [9] PARK J W, HONG Y K, CHOI S M. Behaviors of concrete filled square steel tubes confined by carbon fiber sheets (CFS) under compression and cyclic loads [J]. *Steel and Composite Structures*, 2010, 10(2): 187—205.
- [10] LU Y, LI N, LI S. Behavior of FRP-confined concrete-filled steel tube columns[J]. *Polymers*, 2014, 6(5): 1333—1349.
- [11] 顾威, 关崇伟, 赵颖华, 等. 圆 CFRP 钢复合管混凝土轴压短柱试验研究[J]. *沈阳建筑工程学院学报(自然科学版)*, 2004, 20(2): 118—120.  
GU W, GUAN C W, ZHAO Y H, *et al.* Experimental study on concentrically-compressed circular concrete filled CFRP-steel composite tubular short columns[J]. *Journal of Shenyang Architectural and Civil Engineering Institute*, 2004, 20(2): 118—120. (In Chinese)
- [12] LIU J, XU T, WANG Y, *et al.* Axial behaviour of circular steel tubed concrete stub columns confined by CFRP materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 168: 221—231.
- [13] DING F X, LU D R, BAI Y, *et al.* Behaviour of CFRP-confined concrete-filled circular steel tube stub columns under axial loading [J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 125: 107—118.
- [14] CHE Y, WANG Q L, SHAO Y B. Compressive performances of the concrete filled circular CFRP-steel tube (C-CFRP-CFST)[J]. *Advanced Steel Construction*, 2012, 8(4): 331—358.
- [15] WEI Y, WU G, LI G. Performance of circular concrete-filled fiber-reinforced polymer-steel composite tube columns under axial compression [J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2014, 33(20): 1911—1928.
- [16] PARK J W, HONG Y K, HONG G S, *et al.* Design formulas of concrete filled circular steel tubes reinforced by carbon fiber reinforced plastic sheets[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 14: 2916—2922.
- [17] YOUSSEF M N, FENG M Q, MOSALLAM A S. Stress-strain model for concrete confined by FRP composites [J]. *Composites Part B-Engineering*, 2007, 38(5/6): 614—628.