

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.02.006



内置 FRP 约束混凝土的方钢管 混凝土轴压承载力

陶毅¹, 张海镇¹, 史庆轩¹, 陈建飞²

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055;

2. 英国贝尔法斯特女王大学 规划、建筑及土木工程学院, 贝尔法斯特 BT9 5AG)

摘要: 钢管-混凝土-FRP-混凝土(SCFC)组合柱是新近提出的一种新型组合柱形式。提出考虑外钢管与 FRP 的双重约束效果, 采用双剪统一理论分析了 SCFC 组合柱外钢管、外层混凝土、FRP 管以及内层混凝土的应力状态, 根据静力平衡条件得到了 SCFC 组合柱的轴压承载力计算公式, 其与试验结果能够较好吻合。分析了含钢率、FRP 与钢的相对配置率、FRP 径厚比以及 FRP 管直径对轴压承载力提高系数的影响, 结果表明: 随着含钢率的增加、FRP 与钢的相对配置率的提高以及 FRP 径厚比的减小, SCFC 组合柱轴压承载力提高系数都有一定程度提高; 内 FRP 管直径与外钢管边长之比在 0.65~0.75 之间时, 轴压承载力增益效果较好。

关键词: 组合柱; 双剪统一强度理论; 承载力; 应力

中图分类号: TU398.9 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2017)02-0043-07

Bearing capacity of steel tube-concrete-FRP-concrete composite columns

Tao Yi¹, Zhang Haizhen¹, Shi Qingxuan¹, Chen Jianfei²

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China;

2. School of Planning, Architecture and Civil Engineering, Queen's University Belfast, Belfast BT9 5AG, U. K.)

Abstract: The sectional form of steel-concrete-FRP-concrete (SCFC) column, as a novel composite column, has a steel tube as the outer layer and a circular FRP tube as the inner layer, and concrete filled between these two layers and within the FRP tube. Considering the confinements from both outer steel and inner FRP layers, the twin shear unified strength theory and force equilibrium condition are utilized to develop an analytical model of bearing capacity of SCFC column. The accuracy of the proposed model is evidenced through being compared with experimental data. The parametrical study is conducted in order to evaluate the confinements affected by the sectional steel proportion, ratio of FRP to steel, ratio of diameter to thickness of FRP and FRP diameter itself. The results indicate that the greater sectional steel proportion, the larger ratio of FRP to steel, and smaller ratio of diameter to thickness of FRP have positive

收稿日期: 2016-07-11

基金项目: 国家自然科学基金(51408478); 陕西省自然科学基金(2014JQ2-5024); 陕西省教育厅专项科研计划(14KJ1437)

作者简介: 陶毅(1982-), 男, 副教授, 博士, 主要从事高性能建筑材料研究, (E-mail) xataoyi@foxmail.com.

Received: 2016-07-11

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51408478); Science Foundation of Shaanxi (No. 2014JQ2-5024); Science Foundation of Shaanxi Department of Education (No. 14KJ1437)

Author brief: Tao Yi (1982-), associate professor, PhD, main research interests: application of high performance structural materials, (E-mail) xataoyi@foxmail.com.

contributions on the confinements of SCFC. The ratio of FRP diameter to steel side length locates between 0.65-0.75 can lead to a better confinement.

Keywords: composite column; twin shear unified strength theory; bearing capacity; stress

随着建筑结构高度与跨度的不断增加,普通钢筋混凝土难以达到结构所需的强度和刚度要求,钢、纤维增强复合材料(FRP)与混凝土的组合应用理念应运而生。目前,应用较为广泛的组合柱类型为:钢管约束混凝土柱(CFST)^[1-2]、FRP约束混凝土柱(CFFT)^[3-5]、复合钢管混凝土柱^[6-7]以及钢管-FRP-混凝土组合柱等。内置FRP约束混凝土的钢管混凝土组合柱(Steel-Concrete-FRP-Concrete Column,简称SCFC Column)是新近提出的一种钢管-FRP-混凝土组合柱形式,即钢管混凝土柱内填充FRP约束混凝土。李岷昌等^[8-10]、冯鹏等^[11]、Cheng等^[12]较早地对这一组合柱进行了研究。这些学者设计的组合柱截面形式为:外管选择方钢管,内管选择FRP圆管,两管间及FRP内管填充混凝土。SCFC组合柱的制作方式有两种:一是先制作并布置好内外两管,最后浇筑内外层混凝土;二是先制作内层混凝土柱,再缠绕FRP以施加约束,将约束混凝土柱置于钢管中,最后浇筑夹层混凝土。内外层混凝土宜采用细石混凝土或自密实混凝土,并采用振动棒贴壁和插入振捣,以保证浇筑质量。此外,FRP管表面的凹凸和粗糙可不作处理,以保证FRP与内外层混凝土的粘结性能。传统的方钢管混凝土组合柱通常由于混凝土侧向变形导致钢管发生屈曲变形,从而削弱了方钢管对混凝土的约束作用^[13],SCFC中FRP圆管对核心混凝土提供有效环向约束,降低了核心混凝土的横向变形,由此降低了对方钢管的侧压力,减缓了应力集中现象,从而提高了约束效果,使得构件的承载能力有效提高。文献^[8]基于统一理论提出了SCFC的轴压承载力公式,研究了试件的含钢率及CFRP圆管与方钢管的相对配置率对构件轴压承载力的影响。但目前对于SCFC受力机理的研究还比较少,笔者基于双剪统一强度理论,考虑外钢管与内FRP管对混凝土的双重约束作用,对SCFC的轴压承载力进行研究,根据极限平衡原理得出轴压承载力计算公式,并且将计算结果与实验数据进行对比,验证了轴压承载力计算公式的准确性。

1 双剪统一强度理论

俞茂宏在双剪强度理论的基础上,考虑作用于

双剪单元体上的两个较大剪切应力及其面上的正应力,建立了一种全新的考虑中主应力影响的适用于各种不同材料的双剪统一强度理论,其数学表达式为

$$\sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + a\sigma_3}{1+a},$$

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

$$\sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + a\sigma_3}{1+a},$$

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

式中: σ_1 、 σ_2 和 σ_3 分别为3个主应力; $a = \sigma_t / \sigma_c$ 为材料的拉压强度比; σ_t 和 σ_c 分别为材料的拉伸强度和压缩强度; b 为反应中间主应力效应的材料参数,也是反应不同强度理论的参数。

约束混凝土轴压承载力提高的原因在于混凝土在受压时产生侧向变形,随着荷载的不断增大,核心混凝土及夹层混凝土的侧向变形开始增大,而FRP及钢管限制了混凝土的膨胀,由于变形协调而产生了相互作用^[8]。李岷昌等^[8]及Feng等^[11]的试验研究都表明,对于SCFC组合柱而言,当构件进入弹塑性阶段时,混凝土的侧向变形因为微裂缝发展而增大,FRP管处于环拉和径向受压的两向应力状态,外钢管处于轴压、环拉和径向受压的三向应力状态,内外的混凝土处于三向受压的应力状态。FRP环向拉力逐渐增大至FRP断裂强度而退出工作,此时,构件达到极限承载力,在此过程中,FRP有效约束了内层混凝土的变形。此后,钢管与混凝土发生应力重分布,钢管由主要承担竖向力转为承担环向力。同时,由于钢管、混凝土、FRP管之间的相互作用,导致随着含钢率的增加(即钢管厚度的增加),钢管的套箍作用增强,试件的承载力得到明显提升,也证明了内层混凝土的约束作用来自于FRP管及外钢管两部分。因此,对于SCFC而言:夹层混凝土受到外钢管的约束力 p_o ,而内层混凝土的约束力由两部分组成:一部分是FRP管对其的约束力 p_i 和外钢管传递过来的约束力 p'_o 。其受力模型如图1所示。

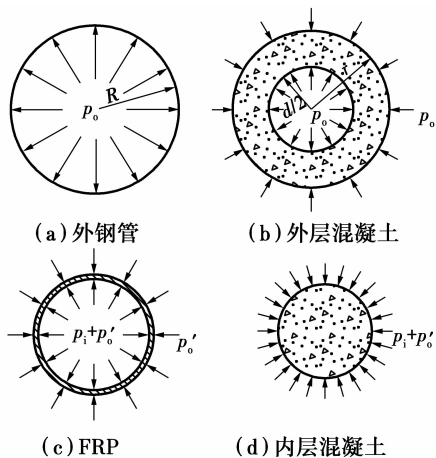


图 1 SCFC 受力模型

Fig.1 SCFC mechanical analysis model

2 轴压承载力计算

2.1 外钢管约束作用分析

李小伟等^[14]、李天华等^[15]建议使用等面积法,将方形钢管及夹层混凝土截面转化为圆形钢管与环形混凝土截面,转化式为

$$\pi R^2 = D^2 \quad (2)$$

$$\pi r^2 = (D - 2t)^2 \quad (3)$$

式中: D 为方钢管边长; t 为钢管厚度; R 为等效后圆钢管外半径; r 为等效圆钢管内半径。

Cheng 等^[12]建议使用等周长法,将方形钢管及夹层混凝土截面转化为圆形钢管与环形混凝土截面,转化公式为

$$2\pi R = 4D \quad (4)$$

等效后的圆钢管受力状况如图 2 所示,由图可知等效圆钢管给予混凝土的约束力为

$$\sigma_r = \frac{2t_s \sigma_0}{2r} \quad (5)$$

式中: t_s 为钢管厚度; σ_0 为钢管环向应力。

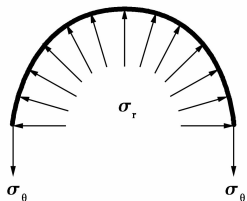


图 2 等效圆钢管受力图

Fig.2 Stress acting on equivalent circular steel tube

由于方钢管对混凝土的不均匀约束,引入考虑厚边比影响的等效约束折减系数 ζ ,将等效圆钢管

对混凝土的均匀约束进行折减^[14]。令厚边比 $v = t/D$,则其表达式为

$$\zeta = 66.4747v^2 + 0.9919v + 0.4618 \quad (6)$$

对应于 SCFC 受力模型(图 1)中,方钢管给予混凝土的侧向约束力作用为

$$p_o = \zeta \sigma_r \quad (7)$$

外钢管的约束作用通过外层混凝土传递作用于内层混凝土,其对内层混凝土约束力 p_o' ,由 p_o' 和 p_o 的关系可知

$$p_o \pi 2R = p_o' \pi d \quad (8)$$

即为

$$p_o' = \begin{cases} \sigma_r \frac{2R}{d}, & \text{外圆钢管} \\ p_o \frac{2R}{d}, & \text{外方钢管} \end{cases} \quad (9)$$

式中: R 为等效后圆钢管的内半径; d 为 FRP 管外直径。

2.2 FRP 管约束作用分析

由于 FRP 基本不承担轴向应力,因此,计算承载力时不考虑 FRP 材料的纵向承载力,只考虑其对混凝土的环向约束作用。如图 3 中 FRP 受力图所示,FRP 的约束力 σ_{fr} 为

$$\sigma_{fr} = \frac{2t_f \sigma_{f0}}{d} \quad (10)$$

式中: t_f 为 FRP 的厚度; σ_{f0} 为 FRP 的环向应力; d 为 FRP 的直径。对应于 SCFC 受力模型(图 1)中,FRP 的约束力 σ_{fr} 即为 p_i 。

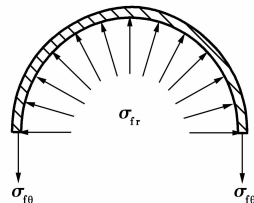


图 3 FRP 受力图

Fig.3 Stress acting on FRP

2.3 混凝土应力分析

由于钢管和 FRP 的约束作用使得核心混凝土处于三向受压状态,而此时三向受压混凝土的强度相比于无约束混凝土的强度有明显的提高,因此,受钢管和 FRP 约束的混凝土的轴压承载力大大高于核心混凝土和钢管以及 FRP 各自的轴压承载力之和。在 SCFC 结构中,钢管和 FRP 的贡献主要体现

在对混凝土的约束上,约束后的混凝土强度是影响钢管混凝土轴压承载力的决定性因素。

2.3.1 外层混凝土应力分析 方钢管通过面积等效原则简化为圆钢管,其对核心混凝土产生约束作用,使其处于三向受力状态。对于夹层混凝土而言,除了钢管的约束作用,还受到内侧 FRP 的紧箍作用。假设外层混凝土受到内外均匀的约束力作用,取钢管和 FRP 约束中的较小值,此时,外层混凝土的应力状态为 $0 > \sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$,取 $\sigma_1 = p_o$,混凝土处于三向受压状态,应用双剪统一强度理论,并用混凝土凝聚力 c 和内摩擦角 φ 表示为

$$F = \tau_{13} + b\tau_{12} + \sin \varphi(\sigma_{13} + b\sigma_{12}) = (1+b)c\sin \varphi \quad F \geq F' \quad (11a)$$

$$F' = \tau_{13} + b\tau_{23} + \sin \varphi(\sigma_{13} + b\sigma_{23}) = (1+b)c\sin \varphi \quad F \leq F' \quad (11b)$$

两式相减可得

$$F - F' = b(\tau_{12} - \tau_{23} + \sin \varphi\sigma_{12} - \sin \varphi\sigma_{23}) \quad (12)$$

将 $\tau_{12} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$ 、 $\tau_{23} = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}$ 、 $\sigma_{12} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}$ 、 $\sigma_{23} = \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2}$ 带入式(12),可得

$$F' - F = b(1 - \sin \varphi)(\sigma_1 - \sigma_3) \geq 0 \quad (13)$$

应用式(11b),并用主应力形式表达,最终可以简化为

$$-\sigma_3 = \frac{2c\sin \varphi}{1 - \sin \varphi} - \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_1 \quad (14)$$

由混凝土单轴受压可知 $\frac{2c\sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = f_c$, f_c 为混凝土单轴抗压强度。令 $k_c = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$,对于混凝土而言取受压为正、受拉为负,因此,可得

$$\sigma_3 = f_c + k_c \sigma_1 \quad (15)$$

外层混凝土受到方钢管的约束作用,由于方钢管对混凝土的约束分为有效约束区和非有效约束区,等效为圆钢管后可采用混凝土强度折减系数 $\gamma_c = 1.67 \times (2R)^{-0.112}$,用以考虑非有效约束区的约束效果减弱的影响^[14]。因此,钢管约束的外层混凝土的强度为

$$\sigma_3 = \gamma_c(f_c + k_c \sigma_1) \quad (16)$$

式中: σ_3 为钢管约束的外层混凝土抗压强度; γ_c 为外层混凝土单轴抗压强度; k_c 为侧压系数, $k_c =$

$\frac{(1 + \sin \varphi)}{(1 - \sin \varphi)}$; φ 为混凝土内摩擦角,其具体取值可由试验获得。

2.3.2 内层混凝土应力分析 内层混凝土受到 FRP 的直接约束作用 p_i 和外层钢管的间接约束作用 p'_o 。此时,内层混凝土应力状态为 $0 > \sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$, $\sigma_1 = \sigma_2 = -p_i - p'_o$ 。根据双剪统一强度理论,应用式(11b)同理可得

$$\sigma_3 = f_c + k_c(p_i + p'_o) \quad (17)$$

2.4 轴压承载力公式

对于内置 FRP 圆管的方钢管混凝土试件,达到极限承载力之前,试件的外观并没有明显地变化,在达到极限状态时,可听到 FRP 管的断裂声响,达到极限承载力之后,随着承载力下降,外钢管出现显著鼓曲变形,试件最终破坏,试件表现出很好的延性^[9]。在极限状态时,FRP 管断裂,外钢管出现屈服,因此,SCFC 组合柱的轴压极限承载力即为钢管承载力与约束后抗压强度提高的内外层混凝土承载力之和,即

$$N = f_y A_s + (f_c + k_{co} \sigma_r) A_{co} + (f_c + k_{ci}(p_i + p'_o)) A_{ci} \quad (18)$$

$$N = f_y A_s + \gamma_c(f_c + k_{co} p_o) A_{co} + (f_c + k_{ci}(p_i + p'_o)) A_{ci} \quad (19)$$

式中:侧压系数 $k_c = \frac{(1 + \sin \varphi)}{(1 - \sin \varphi)}$, φ 为混凝土内摩擦角。

k_c 代表了约束混凝土的钢管或 FRP 等外部约束与混凝土的几何特性和物理特性参数对其承载力的影响,其取值直接关系到承载力公式的精确度, k_{co} 为外层混凝土侧压系数, k_{ci} 为内层混凝土侧压系数。采用文献[16]中约束混凝土内摩擦角公式推导侧压系数。内摩擦角计算式为

$$\varphi = 8.6 + \exp\left[-1.863 \cdot \left(\frac{f_1}{f_c}\right)^{0.8}\right] + 27 \quad (20)$$

式中: f_1 为核心混凝土的侧向约束力,对于外层混凝土而言为 p_o ,对于内层混凝土而言为 $p_i + p'_o$; f_c 为核心混凝土单轴抗压强度。将式(20)带入侧压系数公式中即得到外层混凝土侧压系数 k_{co} ,内层混凝土侧压系数 k_{ci} 。

3 公式验证与影响因素分析

3.1 承载力公式验证

采用文献[10]的试验数据,将相关数据带入式

(19)中得到计算结果,将计算结果与试验数据进行比较,列于表 1 中。其中 N 表示计算结果, N_u 表示试验结果。 f_y 为钢管的屈服强度; f_c 为混凝土单轴抗压强度; f_{ty} 为 FRP 管的环向抗拉强度。从表 1 的结果对比分析可以看出,基于统一强度理论推导的 SCFC 组合柱的轴压承载力公式所得结果与试验值

吻合较好,说明将统一强度理论运用于 SCFC 组合柱轴压承载力计算是可行的。此外,使用等面积法或者等周长法将方钢管和夹层混凝土转化为圆形的计算结果都具有较高的精度,其中等面积法的精度略高于等周长法,因此,在接下来的影响因素分析中采用等面积法转换方钢管和夹层混凝土。

表 1 计算结果与试验结果的比较

Table 1 Comparison of calculation results and test results

试件 编号	D/mm	d/mm	t/mm	t_t/mm	f_y/MPa	f_c/MPa	f_{ty}/MPa	N_u/kN	等面积法		等周长法	
									N/kN	N/N_u	N/kN	N/N_u
SC41	150	90	4	0.167	295	50.2	1 500	2 220	2 112.8	0.952	2 363.9	1.065
SC41'	150	90	4	0.167	295	50.2	1 500	2 210	2 112.8	0.956	2 363.9	1.070
SC42	150	90	4	0.334	295	50.2	1 500	2 280	2 212.8	0.971	2 468.0	1.082
SC42'	150	90	4	0.334	295	50.2	1 500	2 270	2 212.8	0.975	2 468.0	1.087
SC51	150	90	5	0.167	315	50.2	1 500	2 500	2 437.8	0.975	2 644.3	1.058
SC51'	150	90	5	0.167	315	50.2	1 500	2 470	2 437.8	0.987	2 644.3	1.071
SC52	150	90	5	0.334	315	50.2	1 500	2 580	2 535.7	0.983	2 746.9	1.065
SC52'	150	90	5	0.334	315	50.2	1 500	2 590	2 535.7	0.979	2 746.9	1.061
SC61	150	90	6	0.167	335	50.2	1 500	2 700	2 807.4	1.040	2 959.8	1.096
SC61'	150	90	6	0.167	335	50.2	1 500	2 720	2 807.4	1.032	2 959.8	1.088
SC62	150	90	6	0.334	335	50.2	1 500	2 780	2 903.2	1.044	3 060.8	1.101
SC62'	150	90	6	0.334	335	50.2	1 500	2 770	2 903.2	1.048	3 060.8	1.105
ZY4-1	200	130	4	0.167	313	65.1	1 500	4 218	4 020.5	0.920	2 363.9	1.065
					最大值						1.048	1.105
					最小值						0.913	1.058
					平均值						0.984	1.078

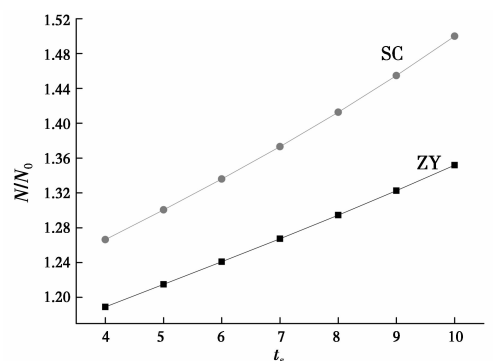
3.2 影响因素分析

为了更好地表征 SCFC 组合柱中钢管与 FRP 约束对承载力增益效果,定义轴压承载力提高系数 $\eta = N/N_0$, 式中 N 为通过式(18)和(19)计算而得的承载力值, N_0 为不考虑钢管和 FRP 约束作用时钢管与混凝土承载力之和。

3.2.1 材料配置参数的影响 试验研究表明,影响 SCFC 组合柱承载力的主要因素为:含钢率 A_s/A_c 、FRP 与钢管的相对配置率 $\beta = A_f/A_s$ 和 FRP 管的径厚比 d/t_f 。对文献[10]中构件在截面尺寸不变的情况下,变化材料参数,研究各参数变化对于承载力提高系数的影响。

1) 含钢率 A_s/A_c , 即钢管截面面积与混凝土截面面积之比。在 SCFC 组合柱截面大小与内部配置的 FRP 大小一定时,组合柱承载力提高系数随着含

钢率的变化如图 4 所示。随着钢管厚度增大,构件含钢率变大,承载力提高系数变大,说明含钢率越大,钢管对内部混凝土的约束作用越明显,且截面宽度较小时含钢率的变大导致承载力的增益效果更明显,这与文献[10-11]的试验结论是一致的。

图 4 钢管厚度与 η 的关系Fig. 4 Relationship of steel tube's thickness and η

2) FRP 与钢管的相对配置率 $\beta = A_f/A_s$, FRP 截面面积与钢管截面面积比。在含钢率不变的情况下, 组合柱承载力提高系数随相对配置率的变化如图 5 所示, 对于含钢率相同的构件, 相对配置率越大, FRP 所占比重越大, 相应的承载力提高越多, 这是由于在构件轴心受压时, FRP 对核心混凝土的约束作用会随着 FRP 层数的增加, 即 A_f/A_s 的增加而增加。

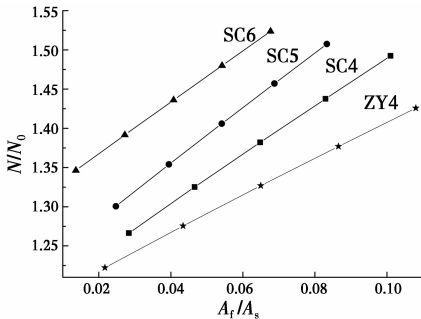


图 5 FRP 与钢管的相对配置率与 η 的关系

Fig. 5 Relationship of ratio of FRP to steel tubes and η

3) FRP 管的径厚比 d/t_f , 即 FRP 管直径与厚度的比值。在含钢率不变的情况下, 组合柱承载力提高系数随 FRP 管径厚比的变化如图 6 所示, 随着径厚比的增大, 承载力提高系数降低。径厚比的增大可以表现为 FRP 厚度相同时, 其直径增大。由式 (5) 可知, 直径增大将导致约束效果降低, 从而导致承载力增益效果下降。

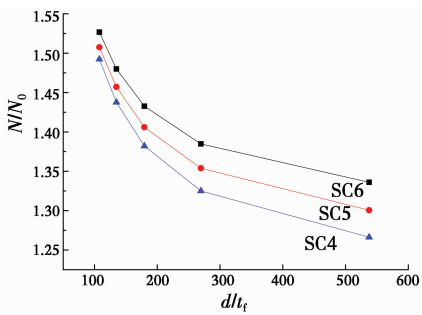


图 6 含钢率不变时 FRP 径厚比与 η 的关系

Fig. 6 Relationship of ratio of FRP diameter to thickness and η under constant steel ratio

3.2.4 内 FRP 管参数的影响 在含钢率与 β 不变的情况下, 通过变化参数, 得到了承载力提高系数与内 FRP 径厚比、内外管直径边长比 d/D 的关系, 如图 7 和图 8 所示。由图 7 可以看出, 含钢率不变的情况下, 随着 FRP 径厚比的变大, 承载力提高系数先增加后减小, 存在最优值。此外, 由图 8 可知, 内 FRP 直径 d 为 $0.65D \sim 0.75D$, 轴压承载力增益效

果较好。

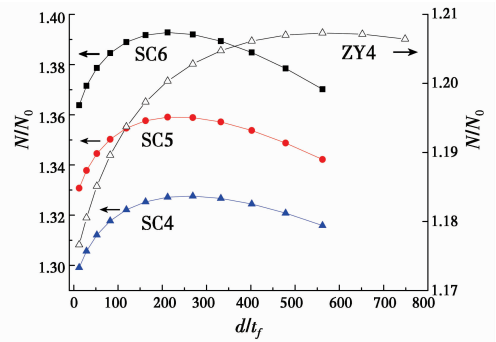


图 7 含钢率与不变时 FRP 径厚比与 η 的关系
Fig. 7 Relationship of ratio of FRP diameter to thickness and under constant steel ratio and η

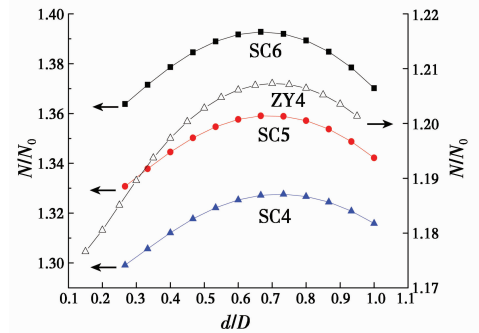


图 8 内外管直径边长比与 η 的关系

Fig. 8 Relationship of ratio of inner diameter to outer edge length and η

4 结论

1) 将内置 FRP 约束混凝土的方钢管混凝土组合柱 (SCFC) 分为外钢管、外层混凝土、FRP 管以及内层混凝土 4 个部分, 考虑外钢管与 FRP 的双重约束效果, 采用双剪统一理论分析了构件的应力状态, 得到了轴压承载力计算公式, 对比了文献中的试验数据, 具有较好的精度。

2) 含钢率 A_s/A_c 、FRP 与钢管的相对配置率 $\beta = A_f/A_s$ 和 FRP 管的径厚比 d/t_f 都对 SCFC 轴压承载力提高系数的具有一定的影响, 随着含钢率的增加、 β 的提高以及径厚比的减小, SCFC 轴压承载力提高系数都有一定程度提高。

3) 内 FRP 直径 d 为 $0.65D \sim 0.75D$ 时, 轴压承载力增益效果较好。

参考文献:

- [1] ELLOBODY E, YOUNG B, LAM D. Behaviour of normal and high strength concrete-filled compact steel

- tube circular stub columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(7): 706-715.
- [2] CHEN J, JIN W L. Experimental investigation of thin-walled complex section concrete-filled steel stub columns [J]. Thin-Walled Structures, 2010, 48(9): 718-724.
- [3] HEECHEUL K, HUN L K, HAK L Y, et al. Axial behavior of concrete-filled carbon fiber-reinforced polymer composite columns [J]. Structural Design of Tall & Special Buildings, 2012, 21(3): 178-193.
- [4] WU Y F, JIANG C. Effect of load eccentricity on the stress-strain relationship of FRP-confined concrete columns [J]. Composite Structures, 2013, 98(3): 228-241.
- [5] LAM L, TENG J G. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete [J]. Construction & Building Materials, 2003, 17(6): 471-489.
- [6] HASSANEIN M F, KHAROOB O F, LIANG Q Q. Circular concrete-filled double skin tubular short columns with external stainless steel tubes under axial compression [J]. Thin-Walled Structures, 2013, 73(4): 252-263.
- [7] 钱稼茹, 张扬, 纪晓东, 等. 复合钢管高强混凝土短柱轴心受压性能试验与分析[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(12): 162-169.
- QIAN J R, ZHANG Y, JI X D, et al. Test and analysis of axial compressive behavior of short composite-sectioned high strength concrete filled steel tubular columns [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(12): 162-169. (in Chinese)
- [8] 李峒昌, 麻丽, 杨景利, 等. 内置 CFRP 圆管的方钢管高强混凝土轴压短柱承载力计算初探[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2008, 24(1): 62-66.
- LI G C, MA L, YANG J L, et al. Bearing capacity of short columns of high-strength concrete filled square steel tubular with inner CFRP circular tubular under axially compressive load [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2008, 24(1): 62-66. (in Chinese)
- [9] 李峒昌, 侯东序, 李宁. 内置 CFRP 圆管的方钢管高强混凝土偏压短柱试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2009, 25(5): 871-876.
- LI G C, HOU D X, LI N. research on high-strength concrete filled square steel tubular short columns with inner CFRP circular tube under eccentric load [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2009, 25(5): 871-876. (in Chinese)
- [10] 李峒昌, 邢娜, 邢忠华. 内置 CFRP 圆管的方钢管高强混凝土轴压短柱试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2009, 25(5): 244-249.
- LI G C, XING N, XING Z H. experimental study on short columns of high strength concrete filled square steel tube with inner CFRP circular tube under axial compressive load [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2009, 25(5): 244-249. (in Chinese)
- [11] FENG P, CHENG S, BAI Y, et al. Mechanical behavior of concrete-filled square steel tube with FRP-confined concrete core subjected to axial compression [J]. Composite Structures, 2015, 123: 312-324.
- [12] CHENG S, FENG P, BAI Y, et al. Load-strain model for steel-concrete-FRP-concrete columns in axial compression [J]. Journal of Composites for Construction, 2016, 20(5): 0401617.
- [13] 韩林海, 陶忠. 方钢管混凝土轴压力学性能的理论分析与试验研究[J]. 土木工程学报, 2001, 34(2): 17-25.
- HAN L H, TAO Z. Study on behavior of concrete filled square steel tubes under axial load [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(2): 17-25. (in Chinese)
- [14] 李小伟, 赵均海, 朱铁栋, 等. 方钢管混凝土轴压短柱的力学性能[J]. 中国公路学报, 2006, 19(4): 77-81.
- LI X W, ZHAO J H, ZHU T D, et al. Mechanics behavior of axially loaded short columns with concrete-filled square steel tube [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 77-81. (in Chinese)
- [15] 李天华, 魏雪英, 赵均海, 等. 内置 CFRP 圆管的方钢管混凝土短柱力学性能研究[J]. 建筑结构学报, 2009 (Sup2): 249-254.
- LI T H, WEI X Y, ZHAO J H, et al. Mechanical behavior of concrete filled square steel tube short columns with inner CFRP circular tube [J]. Journal of Building Structures, 2009 (Sup2): 249-254. (in Chinese)
- [16] 江佳斐, 吴宇飞, 李奔奔. 约束混凝土内摩擦角的特性研究[C]// 第 23 届全国结构工程学术会议论文集(第 II 册), 2014: 47-51.