

基于统一强度理论的 FRP-混凝土-钢管组合 圆柱轴压承载力计算

王 朋, 丁耀宗, 史庆轩, 李龙堂

(1. 西安建筑科技大学 西部绿色建筑国家重点实验室, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;
3. 西安建筑科技大学 结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要: 本文基于双剪统一强度理论, 在忽略钢管对外混凝土侧向约束力的情况下, 提出计算简便且同时适用于 FRP-混凝土-钢管空心组合圆柱与实心组合圆柱的轴压承载力计算公式, 将公式计算结果与试验结果对比, 吻合较好。基于公式进一步分析了混凝土强度、FRP 管厚度、钢管厚度和直径比等因素对该类组合柱轴压承载力的影响, 为今后 FRP-混凝土-钢管组合柱的设计与应用提供理论支持。

关键词: 双剪统一强度理论; 组合柱; 轴压承载力; 影响因素分析

中图分类号: TU398.7

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)02-0233-08

Calculation of axial bearing capacity of FRP-concrete-steel tube circular composite column based on the twin shear unified strength theory

WANG Peng, DING Yaozong, SHI Qingxuan, LI Longtang

(1. State Key Laboratory of Green Building in Western China, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;
2. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;
3. Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance of Ministry of Education, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Based on the twin shear unified strength theory and ignoring the lateral restraint effect of steel tube to external concrete, a simple calculation formula for the bearing capacity of the hollow and solid FRP-concrete-steel tube circular composite column is proposed in this paper, and the calculated results were in good agreement with the experimental results. Based on the formula, the influences of concrete strength, FRP tube thickness, steel tube thickness and diameter ratio on the axial bearing capacity of the composite column were analyzed, which provides theoretical support for the future design and applications of FRP-concrete-steel tube composite column.

Key words: the twin shear unified strength theory; composite column; axial bearing capacity; analysis of influence factor

近年来, 纤维复合增强材料(FRP)由于轻质、耐腐蚀、耐久性好等优越性能在结构中得到广泛应用, 其构件形式也多种多样。2006 年滕锦光学者^[1]提出一种新型组合柱形式——FRP-混凝土-钢管空心组合柱(DSTC), 并对其进行了轴压力学性能试验研究。DSTC 由 FRP 外管、钢管内管以及两者之间的填充混凝土组成, 典型截面形式有外圆内圆、外圆内方、外方内圆, 外方内方, 如图 1 所示。DSTC 外侧包裹 FRP, 具有耐腐蚀、耐久性好、延性好的优点, 内部空心有效减轻了自重, 具有延性好、抗震性能好的优点, 同时, 双管可作为浇筑

模板, 施工方便, 当有需要时, 可将空心部分注入混凝土, 成为实心组合柱(DTCC)。

此外, 钱稼茹^[2]对 DSTC 进行了轴压力学性能试验研究, 余涛^[3]和 Omar I. Abdelkarim^[4]进行了循环轴压力学性能试验研究, 余涛^[5]还对具有大裂变的 DSTC 进行了轴压力学性能试验研究, 均得出 DSTC 轴压力学性能较好, 具有较高承载力的研究结果。目前, 虽然针对 DSTC 轴压力学性能开展了较多的研究, 但主要集中于试验研究, 而对轴压承载力理论计算方法鲜有研究。王娟^[6]提出了考虑钢管对外混凝土侧向约束力的轴压承载

收稿日期: 2019-08-13

修改稿日期: 2020-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51608434); 国家重点研发计划项目(2017YFC0703406); 西部绿色建筑国家重点实验室自主研究课题(LSZZ202018)

第一作者: 王 朋(1987—), 男, 工学博士, 主要从事钢-混凝土组合结构与混合结构、工程结构抗震研究。E-mail: wangpeng@xauat.edu.cn

通信作者: 丁耀宗(1996—), 男, 硕士生, 主要从事钢-混凝土组合结构与混合结构研究。E-mail: dingyaozong@126.com

力理论公式,但公式过于复杂,不便使用,且计算结果误差较大.与空心组合柱相比,FRP-混凝土-钢管实心组合柱的研究更少,余涛^[5]将DTCC作为DSTC的对照组进行轴压力学性能试验研究,汪子豪^[7]采用高强钢管进行DTCC轴压及偏压力学性能试验研究,结果均表明:实心组合柱的混凝土受约束较好,构件承载力得到了极大提高,但均未对轴压承载力理论计算方法进行研究.

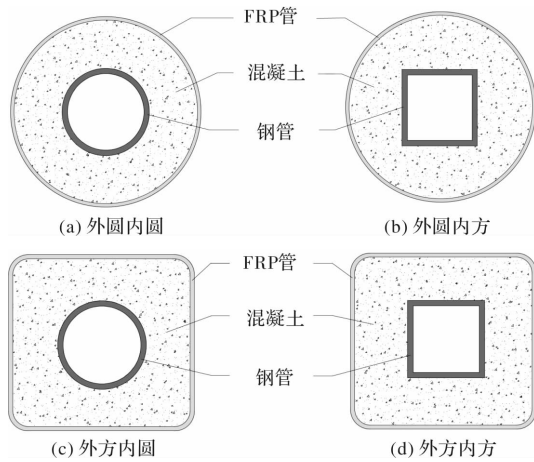


图1 DSTC截面形式

Fig. 1 Cross section of DSTC

为弥补FRP-混凝土-钢管组合柱在理论承载力研究上的不足,本文基于双剪统一强度理论提出了FRP-混凝土-钢管组合圆柱轴压承载力计算公式,公式计算简便且同时适用于空心组合圆柱与实心组合圆柱.基于公式进一步分析了混凝土强度、FRP管厚度、钢管厚度和直径比等因素对该类组合柱轴压承载力的影响,为今后FRP-混凝土-钢管组合柱的设计与应用提供理论支持.本文所分析的组合柱截面形式如图1(a)所示.

1 双剪统一强度理论

1991年,俞茂宏提出双剪统一强度理论^[8],使得各种材料具有统一的力学模型,其主应力表达式为

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

$$\text{式中: } \tau_{13} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3), \sigma_{13} = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3), \tau_{12} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2), \sigma_{12} = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2), \tau_{23} = \frac{1}{2}(\sigma_2 - \sigma_3), \sigma_{23}$$

$= \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3)$; σ_1, σ_2 和 σ_3 分别为3个主应力, $\alpha = \frac{\sigma_t}{\sigma_c}$ 为拉压强度比, b 为反应中间主应力效应的材料参数.对于混凝土材料, α 一般取 $0.07 \sim 0.15$, b 一般取 $1/2 \sim 3/4$, 具体由试验测得.双剪统一强度理论的 π 平面极限线如图2所示.

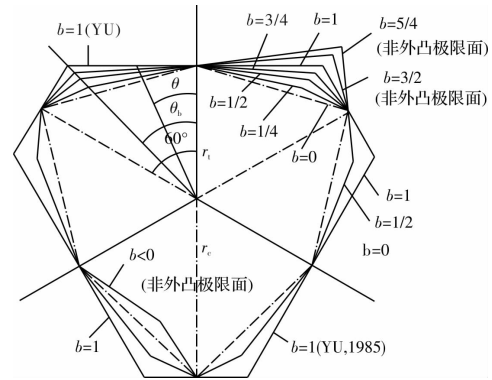


图2 双剪统一强度理论的 π 平面极限线

Fig. 2 Limit loci of the twin shear unified strength theory on the π -plane

双剪统一强度理论的八面体双剪力学模型数学表达式为

$$\begin{cases} F = \tau_{13} + b\tau_{12} + \beta(\sigma_{13} + b\sigma_{12}) \\ = CF \geq F' \\ F' = \tau_{13} + b\tau_{23} + \beta(\sigma_{13} + b\sigma_{23}) \\ = CF \leq F' \end{cases} \quad (2)$$

将式(2a)、(2b)用混凝土的凝聚力 c 和内摩擦角 φ 表示,则式(2a)、(2b)可改写为

$$F = \tau_{13} + b\tau_{12} + \sin\varphi(\sigma_{13} + b\sigma_{12}) \quad (3a)$$

$$= (1+b)c\cos\varphi F \geq F'$$

$$F' = \tau_{13} + b\tau_{23} + \sin\varphi(\sigma_{13} + b\sigma_{23}) \quad (3b)$$

$$= (1+b)c\cos\varphi F \leq F'$$

在FRP约束混凝土中,由于 $0 > \sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$,得

$$\begin{aligned} F' - F &= b(\tau_{23} + \sigma_{23}\sin\varphi - \tau_{12} - \sigma_{12}\sin\varphi) \\ &= \frac{1}{2}b(1 - \sin\varphi)(\sigma_1 - \sigma_3) \geq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

所以,FRP约束混凝土双剪强度应采用式(3b)进行运算,则式(3b)可改写为

$$-\sigma_3 = \frac{2c\cos\varphi}{1 - \sin\varphi} - \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \sigma_1 \quad (5)$$

根据莫尔强度准则 $f_c = \frac{2c\cos\varphi}{1 - \sin\varphi}$,令 $k =$

$\frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}$,此时, σ_3 为约束混凝土轴向压力 $-f_{cc}$, σ_1

为约束混凝土侧向压应力 $-\sigma_{rc}$,则式(5)可改写为

$$f_{cc} = f_c + k\sigma_{rc} \quad (6)$$

2 计算假定

根据已有试验研究, 为简化计算, 作出以下假定:

- (1) FRP 管为线弹性材料, 只考虑环向受拉状态, 不考虑对竖向承载力的贡献。
- (2) FRP 管达到环向抗拉强度断裂时为组合柱极限状态, 此时钢管未发生屈曲。
- (3) 忽略钢管与混凝土之间的滑移, 两者变形协调。
- (4) 不考虑钢管对外混凝土的侧向约束力。

3 FRP-混凝土-钢管组合圆柱承载力计算公式

3.1 空心组合圆柱承载力计算公式

受力初期, 空心组合圆柱处于弹性阶段, 外混凝土与钢管各自承受轴向压力; 随着轴向压力逐渐增大, 外混凝土侧向膨胀逐渐增大, 此时受到 FRP 管与钢管约束的外混凝土处于三向受力状态, 强度得到了提升。空心组合圆柱受力模型如图 3 所示。

设 FRP 管内径为 d_1 , 壁厚为 t_1 , 环向受拉应力为 $\sigma_{\theta f}$, 径向应力为 σ_{rf} (FRP 管对外混凝土提供的侧向约束力); 钢管外径为 d_2 , 壁厚为 t_2 ; 外混凝土所受侧向约束力为 σ_{rc} ; 混凝土轴心抗压强度为 f_c 。

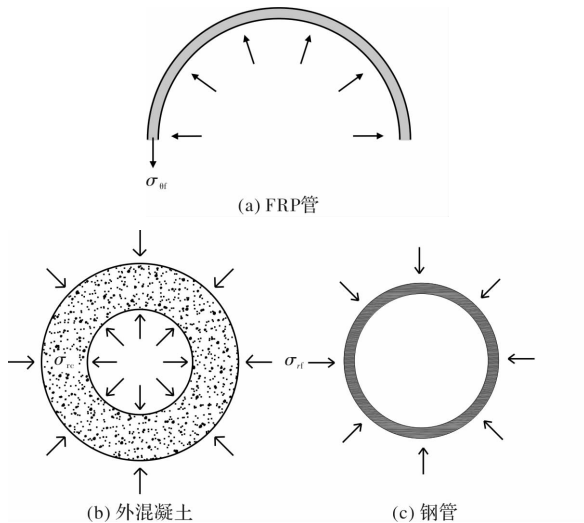


图 3 空心组合圆柱受力模型

Fig. 3 Mechanical model of hollow circular composite column

当组合柱承受轴向压力时, 钢管及外混凝土因竖向受压均产生侧向膨胀变形, 因此, FRP 管所受到的径向应力 σ_{rf} 由钢管和外混凝土侧向膨胀变形共同产生, 考虑到钢管对外混凝土提供的侧

向约束作用较小, 故在进行轴压承载力计算时忽略钢管对外混凝土的侧向约束作用。同时不考虑 FRP 管的竖向承载力贡献。

由 FRP 管受力平衡条件可知:

$$\sigma_{rf} = \frac{2 t_1 \sigma_{\theta f}}{d_1} \quad (7)$$

当 FRP 管达到断裂极限状态时, $\sigma_{\theta f} = \sigma_f$, σ_f 为 FRP 管环向极限抗拉强度, 则式(7)可改写为

$$\sigma_{rf} = \frac{2 t_1 \sigma_f}{d_1} \quad (8)$$

由于不考虑钢管对外混凝土的侧向约束作用, 则外混凝土的侧向约束力全部由 FRP 管提供, 即 $\sigma_{rc} = \sigma_{rf}$, 依据式(6), 外混凝土抗压强度 f_{cc} 可改写为

$$f_{cc} = f_c + k \frac{2 t_1 \sigma_f}{d_1} \quad (9)$$

FRP-混凝土-钢管空心组合圆柱轴压承载力由外混凝土和钢管共同提供, 因此, 其计算公式为

$$\begin{aligned} N &= f_{cc} A_c + \sigma_s A_s \\ &= (f_c + k \frac{2 t_1 \sigma_f}{d_1}) \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_2^2) + \sigma_s \pi t_2 d_2 \end{aligned} \quad (10)$$

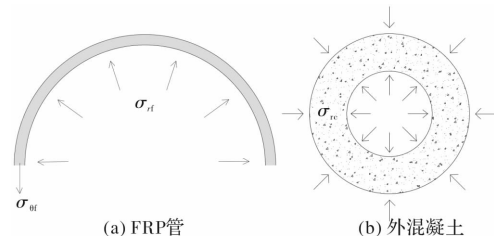
式中: A_c 为外混凝土横截面面积, A_s 为钢管横截面面积。

3.2 实心组合圆柱承载力计算公式

空心组合圆柱承载力不满足使用要求时, 可将空心部分注入混凝土达到要求, 由于内混凝土受到多层约束, 组合圆柱承载力得到大幅度提升。实心组合圆柱不仅拥有承载力高的优点, 在 FRP 管受到不利因素而失去约束作用时, 内部钢管和内混凝土依旧可以提供部分承载力, 保证组合柱不会立刻丧失全部承载力从而避免建筑物快速倒塌, 为居民生命安全提供保障。

设钢管环向受拉应力为 $\sigma_{\theta s}$, 径向应力为 σ_{rs} (钢管对内混凝土提供的侧向约束力), 内混凝土所受侧向约束力为 σ'_{rc} , 其他符号同前。实心组合圆柱受力模型如图 4 所示。

实心组合圆柱的 FRP 管、外混凝土的受力状态与空心组合圆柱的 FRP 管、外混凝土的受力状态相同, 实心组合圆柱与空心组合圆柱的区别在



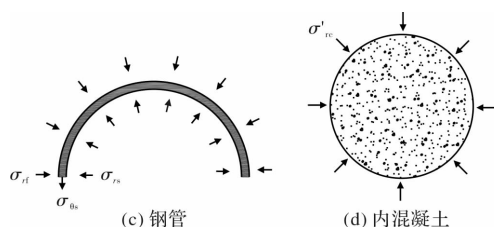


图4 实心组合圆柱受力模型

Fig. 4 Mechanical model of solid circular composite column

于有内混凝土,内混凝土同样是约束混凝土,其抗压强度仍可采用式(6)进行计算.内混凝土受FRP管和钢管双层约束,外混凝土将FRP管的侧向约束力传递给钢管,再与钢管的侧向约束力一同施加给内混凝土,因此,内混凝土所受侧向约束力为

$$\sigma'_{rc} = \sigma_{rf} + \sigma_{rs} \quad (11)$$

由钢管受力平衡条件可知:

$$\sigma_{rs} = \frac{2 t_2 \sigma_{fs}}{d_2} \quad (12)$$

当钢管达到屈服极限状态时, \$\sigma_{fs} = \sigma_s\$, \$\sigma_s\$ 为钢管屈服强度,式(12)可改写为

$$\sigma_{rs} = \frac{2 t_2 \sigma_s}{d_2} \quad (13)$$

则,FRP管断裂极限状态下内混凝土所受侧向约束力为

$$\sigma'_{rc} = \frac{2 t_1 \sigma_f}{d_1} + \frac{2 t_2 \sigma_s}{d_2} \quad (14)$$

将上式代入式(6),得内混凝土抗压强度 \$f'_{cc}\$ 如下.

$$f'_{cc} = f_c + k \left(\frac{2 t_1 \sigma_f}{d_1} + \frac{2 t_2 \sigma_s}{d_2} \right) \quad (15)$$

FRP-混凝土-钢管实心组合圆柱轴压承载力由外混凝土、钢管和内混凝土共同提供,其中,外混凝土和钢管的承载力计算同空心组合圆柱,因此,其实心组合圆柱轴压承载力计算公式为

$$\begin{aligned} N &= f_{cc} A_c + \sigma_s A_s + f'_{cc} A'_c \\ &= (f_c + k \frac{2 t_1 \sigma_f}{d_1}) \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_2^2) + \sigma_s \pi t_2 d_2 \\ &\quad + [f_c + k (\frac{2 t_1 \sigma_f}{d_1} + \frac{2 t_2 \sigma_s}{d_2})] \frac{\pi}{4} (d_2 - 2 t_2)^2 \end{aligned} \quad (16)$$

式中, \$A'_c\$ 为内混凝土横截面积.

式(16)即为FRP-混凝土-钢管组合圆柱的轴压承载力计算公式,FRP-混凝土-钢管组合圆柱若为空心柱时,轴压承载力为前两项之和,忽略第三项;若为实心柱时,轴压承载力则为三项之和.

3.3 公式验证

取 \$k=2.26^{[9]}\$ 代入式(16),组合柱计算结果如

表1所示,同时为更直观的对比,图5给出了空心组合圆柱和实心组合圆柱计算值与试验值的对比情况,经计算可知,计算值与试验值比值的平均值为1.003,方差为0.102.同时,针对空心组合圆柱,分别采用本文和王娟所提公式计算得出空心组合圆柱轴压承载力的计算值,并分别与试验值作对比,如图6所示,经计算可知:本文所提公式的轴压承载力计算值与试验值比值的平均值和方差分别为1.028和0.106,而王娟所提公式的平均值和方差分别为1.102和0.135.综上表明:本文所提轴压承载力公式计算精度较高,且公式未考虑钢管对外混凝土的侧向约束作用,极大的简化了计算公式.因此,本文所提的FRP-混凝土-钢管组合圆柱轴压承载力计算公式可以为设计与应用提供理论支持.

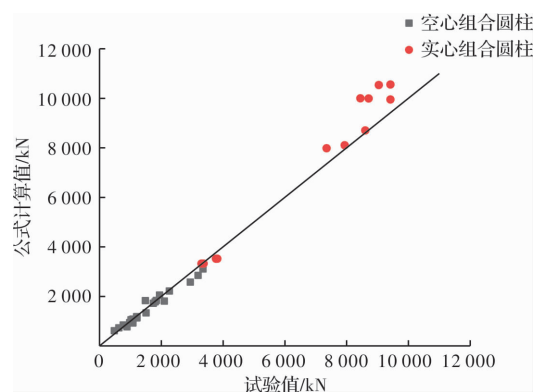


图5 组合柱计算值与试验值对比

Fig. 5 Comparison of calculated results with test results from composite columns

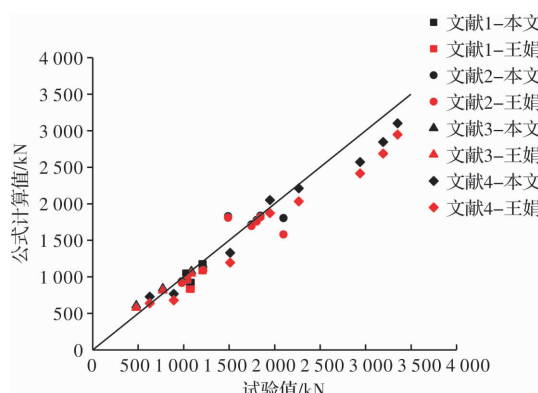


图6 空心组合圆柱计算值与试验值对比

Fig. 6 Comparison of calculated results with test results from hollow composite columns

4 轴心受压承载力影响因素分析

为进一步研究FRP-混凝土-钢管组合圆柱各设计参数对轴压承载力的影响,取混凝土强度等级为C40,FRP管内径为200 mm、厚度为1.5 mm、

环向抗拉强度为 550 MPa, 钢管外径为 120 mm、厚度为 3 mm、屈服强度为 345 MPa 的轴压组合圆柱为例, 基于公式改变其各设计参数来分析空心柱和实心柱轴压承载力的变化。

4.1 混凝土强度

当混凝土强度等级分别为 C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60、C65、C70, 其余条件相同时, 不同混凝土强度条件下 FRP-混凝土-钢管组合圆柱承载力的变化曲线如图 7 所示, 由图可知, 随着混凝土强度提高, 空心柱和实心柱的承载力均提高且实心柱的提高斜率大于空心柱。主要由于空心柱与实心柱的外混凝土受到

FRP 管约束的同时, 实心柱的内混凝土受到 FRP 管和钢管的双层约束, 内混凝土强度得到更多的提高, 实心柱的承载力亦随之提高更多。实心柱较空心柱的承载力提高效果如图 7 所示, 当采用 C20 混凝土时, 空心柱承载力为 1 034.5 kN, 实心柱承载力为 1 759.5 kN, 实心柱承载力较空心柱承载力提高了 70.08%, 当采用 C70 混凝土时, 空心柱承载力为 1 659.8 kN, 实心柱承载力为 2 702.2 kN, 实心柱承载力较空心柱承载力提高了 62.8%, 可知, 随着混凝土强度提高, 实心柱较空心柱的承载力提高效果在下降, 但下降幅度较小。

表 1 FRP-混凝土-钢管组合圆柱承载力计算结果比较

Tab. 1 Comparison of calculated results of the bearing capacity of FRP-concrete-steel tube circular composite column

组号	试件 编号	f_c /MPa	d_1 /mm	t_1 /mm	d_2 /mm	t_2 /mm	σ_f /MPa	σ_s /MPa	N_{exp} /kN	N_u /kN	N_w /kN	N_{exp} / N_u	N_{exp} / N_w
1	DS1A	38.48	152.5	0.17	76.1	3.2	1 825.5	352.67	1 083.0	923.8	831.8	1.172	1.302
	DS1B	38.48	152.5	0.17	76.1	3.2	1 825.5	352.67	1 063.6	923.8	831.8	1.151	1.279
	DS2A	38.48	152.5	0.34	76.1	3.2	1 825.5	352.67	1 044.2	1 050.0	957.9	0.995	1.090
	DS2B	38.48	152.5	0.34	76.1	3.2	1 825.5	352.67	1 024.8	1 050.0	957.9	0.976	1.070
	DS3A	38.48	152.5	0.51	76.1	3.2	1 825.5	352.67	1 214.0	1 176.1	1084.1	1.032	1.120
	DS3B	38.48	152.5	0.51	76.1	3.2	1 825.5	352.67	1 201.9	1 176.1	1084.1	1.022	1.109
2	SC21	32.49	190	2.28	140	2.67	213	313	981.3	938.3	917.7	1.046	1.069
	SC21	32.49	190	2.28	114	2.5	213	363	1 216.1	1 124.2	1 087.8	1.082	1.118
	SC23	29.84	190	2.28	140	8.16	213	353	2 097.6	1 803.3	1 580.3	1.163	1.327
	SC31	29.25	190	2.67	140	2.67	1 314	313	1 489.3	1 828.2	1 807.6	0.815	0.824
	SC32	29.84	190	2.67	140	2.67	1314	313	1 844.4	1 835.8	1 815.2	1.005	1.016
	SC41	27.73	190	3.19	140	2.67	1006	313	1 745.9	1 716.2	1 695.6	1.017	1.030
3	SC42	32.49	190	3.19	140	2.67	1 006	313	1801.6	1 777.9	1 757.3	1.013	1.025
	HCCSC 1-a	36.02	114	0.167	49.8	1.8	4 280	274.64	480.0	608.9	578.3	0.788	0.830
	HCCSC 2-a	36.02	114	0.334	49.8	1.8	4 280	274.64	770.0	842.9	812.4	0.913	0.948
	HCCSC 3-a	36.02	114	0.501	49.8	1.8	4280	274.64	1 084.0	1 077.0	1 046.4	1.006	1.036
	I-4.1	27.2	95.9	4.1	50	4	430	235	626.0	727.8	638.4	0.860	0.981
	I-4.5	27.2	145.5	4.5	77	5	430	235	1 511.0	1 329.4	1 196.3	1.137	1.263
4	I-4.8	27.2	195.2	4.8	106	6	430	235	1 948.0	2 052.0	1 873.2	0.949	1.040
	I-4	27.2	246	4	120	5	430	235	2 940.0	2 572.7	2 414.9	1.143	1.217
	II-4.1	34.74	95.9	4.1	50	4	430	235	892.0	767.4	678.0	1.162	1.316
	II-4.8	34.74	195.2	4.8	106	6	430	235	2 265.0	2 211.1	2 032.3	1.024	1.114
	II-4	34.74	246	4	120	5	430	235	3 193.0	2 845.8	2 688.0	1.122	1.188
	II-6	27.2	244	6	120	5	430	235	3 351.0	3 101.4	2 946.6	1.080	1.137

续表 1

组号	试件 编号	f_c /MPa	d_1 /mm	t_1 /mm	d_2 /mm	t_2 /mm	σ_f /MPa	σ_s /MPa	N_{exp} /kN	N_u /kN	N_w /kN	N_{exp} / N_u	N_{exp} / N_w
5	A3-I	27.3	208	2.457	139.7	3.5	823.9	325	3 371.0	3 323.8	-	1.014	-
	A3-II	27.3	208	2.457	139.7	3.5	823.9	325	3 301.0	3 323.8	-	0.993	-
	B3-I	27.3	208	2.457	139.7	5.4	823.9	270	3 770.0	3 515.4	-	1.072	-
	B3-II	27.3	208	2.457	139.7	5.4	823.9	270	3 817.0	3 515.4	-	1.086	-
6	D30d26F4-1	34.9	300	1.93	260	6	562.65	665	8 713.7	9 987.7	-	0.872	-
	D30d26F4-2	34.9	300	1.94	260	6	562.65	665	8 445.1	9 993.3	-	0.845	-
	D30d26F6-1	36.1	300	2.77	260	6	562.65	665	9 041.6	10 536.0	-	0.858	-
	D30d26F6-2	36.1	300	2.8	260	6	562.65	665	9 420.8	10 553.0	-	0.893	-
	D30d21F6-1	25.2	300	3	210	6	562.65	670	8 603.1	8 700.5	-	0.989	-
	D30d26F6-3	25.2	300	3	260	6	562.65	665	9 420.8	9 946.3	-	0.947	-
	D25d21F4-1	33	250	2.54	210	6	562.65	670	7 354.9	7 978.3	-	0.922	-
	D25d21F6-1	33	250	2.81	210	6	562.65	670	7 939.5	8 102.6	-	0.980	-

注：1~6 组试验数据分别来自文献[1]、[2]、[10]、[11]、[5]、[7]，1~4 组为空心组合圆柱，5~6 组为实心组合圆柱； N_{exp} 为试验实测值， N_u 为本文所提公式计算值， N_w 为王娟所提公式计算值。

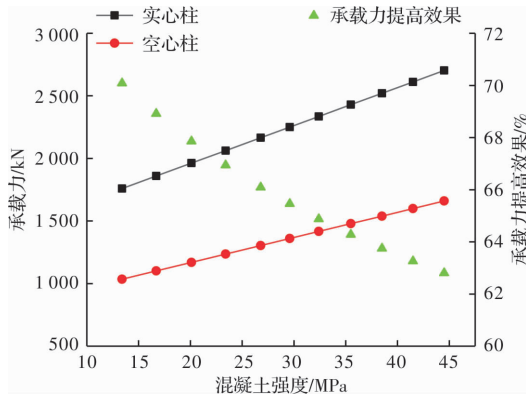


图 7 混凝土强度对承载力的影响

Fig. 7 Influence of concrete strength on bearing capacity

4.2 FRP 管厚度

由式(16)可知，FRP 管厚度与 FRP 管环向抗拉强度处于相同的变量位置，因此 FRP 管环向抗拉强度变化对承载力的影响规律与 FRP 管厚度一致。

当 FRP 管厚度分别为 0.3 mm、0.6 mm、0.9 mm、1.2 mm、1.5 mm、1.8 mm、2.1 mm、2.4 mm、2.7 mm、3 mm，其余条件相同时，不同 FRP 管厚度条件下 FRP-混凝土-钢管组合圆柱承载力的变化曲线如图 8 所示，由图可知，随着 FRP 管厚度增加，空心柱和实心柱的承载力均提高且实心柱的提高斜率大于空心柱。主要由于随着 FRP 管厚度增加，FRP 管被拉断需要更大的侧

向力，因此混凝土约束效应得到提升进而提高了混凝土强度，组合柱的承载力亦随之提高；与混凝土强度因素相同，实心柱的提高斜率大于空心柱是由于内混凝土受到更多约束造成的。实心柱较空心柱的承载力提高效果如图 8 所示，当 FRP 管厚度为 0.3 mm 时，空心柱承载力为 1 004 kN，实心柱承载力为 1 713.5 kN，实心柱承载力较空心柱承载力提高了 70.67%，当 FRP 管厚度为 3 mm 时，空心柱承载力为 1 678.8 kN，实心柱承载力为 2 730.9 kN，实心柱承载力较空心柱承载力提高了 62.62%，可知，随着 FRP 管厚度增加，实心柱较空心柱的承载力提高效果在下降，但下降幅度较小。

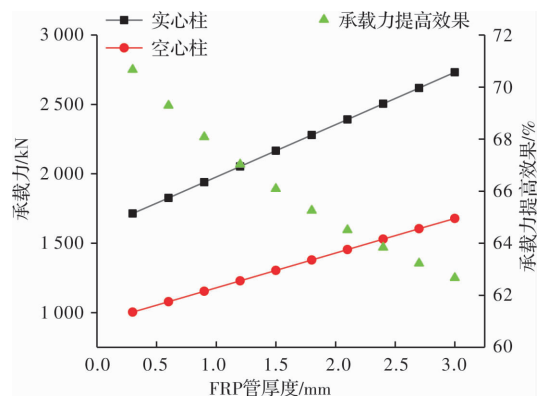


图 8 FRP 管厚度对承载力的影响

Fig. 8 Influence of FRP tube thickness on bearing capacity

4.3 钢管厚度

当钢管厚度分别为 1.5 mm、2 mm、2.5 mm、3 mm、3.5 mm、4 mm、4.5 mm、5 mm、5.5 mm、6 mm, 其余条件相同时, 不同钢管厚度条件下 FRP-混凝土-钢管组合圆柱承载力的变化曲线如图 9 所示, 由图可知, 随着钢管厚度增加, 空心柱和实心柱的承载力均提高且实心柱的提高斜率大于空心柱。由于钢管厚度的增加使钢管轴向受压面积增加, 因此钢管的轴压承载力随之提高; 钢管厚度的增加也为实心柱的内混凝土提供更大的侧向约束力, 进而提高内混凝土强度来提高实心柱承载力; 与混凝土强度因素相同, 实心柱的提高斜率大于空心柱是由于内混凝土受到更多约束造成的。实心柱较空心柱的承载力提高效果如图 9 所示, 当钢管厚度为 1.5 mm 时, 空心柱承载力为 1 303.9 kN, 实心柱承载力为 2 165.7 kN, 实心柱承载力较空心柱承载力提高了 66.09%, 当 FRP 管厚度为 6 mm 时, 空心柱承载力为 2 428.5 kN, 实心柱承载力为 3 861.2 kN, 实心柱承载力较空心柱承载力提高了 58.99%, 可知, 随着钢管厚度增加, 实心柱较空心柱的承载力提高效果在下降, 但下降幅度较小。

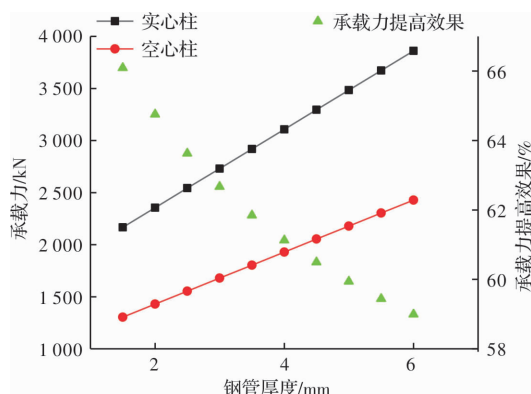


图 9 钢管厚度对承载力的影响

Fig. 9 Influence of steel tube thickness on bearing capacity

4.4 直径比

为方便描述, 引入直径比 ϕ 公式:

$$\phi = \frac{d_2}{d_1} \quad (17)$$

式中, d_1 为 FRP 管内径, d_2 为钢管外径。

当直径比分别为 0.3、0.35、0.4、0.45、0.5、0.55、0.6、0.65、0.7、0.75, 其余条件相同时, 不同直径比条件下 FRP-混凝土-钢管组合圆柱承载力的变化曲线如图 10 所示, 由图可知, 空心柱和实心柱表现出不同的变化规律, 随着直径比增加, 空心柱的承载力逐渐降低, 而实心柱的

承载力逐渐提高。空心柱的承载力逐渐降低主要是由于直径比的增加使空心柱的外混凝土面积逐渐减小, 则外混凝土所产生的承载力也相应减小, 因此空心柱的承载力逐渐降低, 且由于外混凝土面积为二次方减小从而使空心柱线型变化为曲线; 实心柱的承载力逐渐提高主要由于直径比的增加虽然使实心柱的外混凝土面积逐渐减小, 但同时也使内混凝土的面积逐渐增加, 内混凝土比外混凝土受到更多的约束使强度得到更多提高, 进而提供更大的承载力, 因此实心柱的承载力逐渐提高。

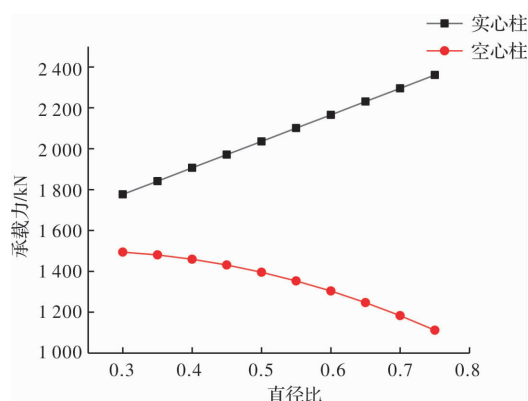


图 10 直径比对承载力的影响

Fig. 10 Influence of hollow ratio on bearing capacity

5 结论

(1) 本文基于双剪统一强度理论, 在忽略钢管对外混凝土侧向约束力的情况下, 提出计算简便且同时适用于 FRP-混凝土-钢管空心组合圆柱与实心组合圆柱的轴压承载力计算公式, 将公式计算结果与试验结果对比, 吻合较好。

(2) 随着混凝土强度提高, FRP 管厚度增加和钢管厚度增加, FRP-混凝土-钢管组合圆柱中的空心柱和实心柱承载力均不断提高, 且实心柱提高更多, 但实心柱较空心柱的承载力提高效果略有减小; 随着直径比增加, 空心柱的承载力逐渐降低, 实心柱的承载力逐渐提高。

参考文献 References

- [1] 滕锦光, 余涛, 黄玉龙, 等. FRP 管-混凝土-钢管组合柱力学性能的试验研究和理论分析[J]. 建筑钢结构进展, 2006, 8(5): 1-7.
- TENG Jinguang, YU Tao, WONG Yulong, et al. Behavior of hybrid FRP-concrete-steel tubular columns: experimental and theoretical studies[J]. Progress in Steel Building Structures, 2006, 8(5): 1-7.

- [2] 钱稼茹,刘明学. FRP管-混凝土-钢双壁空心管短柱轴心抗压试验研究[J]. 建筑结构学报,2008,29(2): 104-113.
- QIAN Jiaru, LIU Mingxue. Experimental investigation of FRP-concrete-steel double-skin tubular stubs under axial compressive loading [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(2): 104-113.
- [3] YU T, ZHANG B, CAO Y B, et al. Behavior of hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular columns subjected to cyclic axial compression[J]. Thin-Walled Structures, 2012, 61:196-203.
- [4] ABDELKARIM O I, ELGAWADYM A. Behavior of hollow FRP-concrete-steel columns under static cyclic axial compressive loading[J]. Engineering Structures, 2016, 123: 77-88.
- [5] YU T, ZHANG S S, HUANG L. Compressive behavior of hybrid double-skin tubular columns with a large rupture strain FRP tube[J]. Composite Structures, 2017, 171: 10-18.
- [6] 王娟,赵均海,李楠,等. FRP-混凝土-钢双壁空心管轴压短柱力学性能分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2013,45(5):633-639,646.
- WANG Juan, ZHAO Junhai, LI Nan, et al. Analysis of mechanics properties on FRP-concrete-steel double-skin tubular short columns [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech (Natural Science Edition), 2013, 45 (5): 633-639, 646.
- [7] 汪子豪. FRP管-混凝土-高强度实心双管柱的试验研究与理论分析[D]. 杭州:浙江大学,2017.
- WANG Zihao. Experimental and analytical study of double-tube concrete columns with an FRP external tube and a high-strength steel internal tube[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017
- [8] YU M H. Unified strength theory and its applications [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2004.
- [9] 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.
- [10] 刘敏甲. FRP管-混凝土-钢管短柱轴压力学性能研究[J]. 工业建筑,2016(S1):346-348.
- LIU Minjia. Experimental study on capacity of FRP-concrete-steel double-skin tubular columns. [J]. Industrial Construction, 2016(S1): 346-348.
- [11] 那昱. 中空GFRP管-混凝土-钢管组合柱轴压尺寸效应研究[D]. 大庆:东北石油大学,2016.
- NA Yu. Research on size effect of GFRP-concrete-steel Double skin tubular columns under axial compression [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2016.

(编辑 桂智刚)