

圆形和方形截面钢管再生混凝土中配筋的效率研究

阿里甫江·夏木西^{1,2*}, 郑甜甜¹, 乔玲玲¹

(1. 新疆大学 建筑工程学院, 乌鲁木齐 830047;
2. 新疆大学 新疆建筑结构与抗震重点实验室, 乌鲁木齐 830047)

摘要: 为了明确100%再生粗骨料取代率下圆形和方形截面钢管再生混凝土(RACFST)中配置钢筋对其力学性能的改善效率,以10种纵筋配筋率为变化参数,对28根短柱试件进行了轴压试验。基于试验结果,分析了试件的破坏模式,并以刚度、屈强比、单位配筋率强度、延性、组合效应和钢筋的约束效率等关键指标作为评价标准,探索了配筋对构件力学性能的改善效率。结果表明:在较低配筋率下,配筋对方形截面RACFST力学性能的影响较为显著;配筋会使方形截面RACFST的内部破坏模式和力学性能发生显著改变;纵筋配筋率在1.15%~2.85%时,配筋对圆形截面RACFST力学性能的提升效率较好;钢筋对两种截面RACFST的外部破坏形态不产生显著影响;并不是配置的钢筋越多构件的力学性能越好,当配筋率超过一定值后,配筋对RACFST力学性能的提升效率反而会降低。通过综合考虑诸多指标,最终推荐圆形和方形截面RACFST合理的配筋率取值范围分别为1.49%~3.36%和0.80%~3.36%。

关键词: 钢管再生混凝土; 100%再生骨料取代率; 纵筋配筋率; 轴压试验; 承载力; 钢筋的约束效率

中图分类号: TU398+.9

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)12-0089-12

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240712001

Efficiency of Reinforcement in Recycled Aggregate Concrete-Filled Circular and Square Steel Tubes

ALIFUJIANG Xiamuxi^{1,2*}, ZHENG Tiantian¹, QIAO Lingling¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Building Structure and Seismic Resistance, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

*Corresponding author: ilikyurt@xju.edu.cn

Abstract: To assess the improvement efficiency of reinforcement for the mechanical performance of recycled aggregate concrete-filled steel tube (RACFST) with a 100% replacement rate of recycled coarse aggregate (RCA), axial compression tests were conducted on 28 short column specimens by varying the longitudinal reinforcement ratio with 10 different configurations. Based on experimental results, the efficiency of reinforcement on the mechanical performance was explored using key indicators such as failure mode, stiffness, yield-to-strength ratio, strength per unit reinforcement ratio, ductility, composite effects, and the confinement efficiency of reinforcement as evaluation criteria. The results show that the influence of reinforcement on the mechanical properties of square section RACFSTs, at lower reinforcement ratios, is more significant; reinforcement significantly affects the internal failure mode and mechanical properties of a square section RACFST; when the ratio is between 1.15% and 2.85%, the longitudinal reinforcement has a better improvement efficiency for a circular section RACFST; reinforcement does not significantly affect the

收稿日期: 2024-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(51968068)

作者简介:

阿里甫江·夏木西(1975—),男,博士,教授,主要从事钢与混凝土组合结构方面的研究。E-mail: ilikyurt@xju.edu.cn。(通信作者)

郑甜甜(1999—),女,硕士研究生,主要从事钢与混凝土组合结构方面的研究。

external failure modes of the two sections; increasing the amount of reinforcement does not necessarily improve the mechanical performance of the component, as the efficiency of reinforcement will decrease after a certain reinforcement ratio is exceeded. After a comprehensive consideration of various indicators, the recommended range of reinforcement ratios for circular and square section RACFSTs are 1.49% to 3.36% and 0.80% to 3.36% respectively.

Keywords: recycled aggregate concrete-filled steel tube; 100% replacement rate; longitudinal reinforcement ratio; axial compression test; bearing capacity; confinement efficiency of reinforcement

为了响应绿色发展的号召并解决建筑固废的处理问题,再生混凝土(Recycled Aggregate Concrete,简称RAC)应运而生^[1]。随着研究的深入,RAC自身的固有缺陷也逐渐显露^[2-3]。为了弥补RAC在结构应用中的诸多缺陷,KONNO等^[4]提出钢管再生混凝土(Recycled Aggregate Concrete-Filled Steel Tube,简称RACFST)的概念,以便推进废弃混凝土的有效利用。然而,相比钢管混凝土(Concrete-Filled Steel Tube,简称CFST),RACFST存在承载力低、脆性大等缺点,尤其是随着再生骨料替代率增加这些缺点更为明显^[5-7]。与此同时,肖建庄等^[8-9]发现随再生粗骨料替代率的增加,RACFST的极限承载力呈下降趋势。因此,我国《钢管再生混凝土结构技术规程》(T/CECS 625—2019)^[10]限制了RAC的最高替代率为70%。

为了解决RACFST强度低、脆性大等问题,现有研究中采取在核心混凝土中放置型钢^[11]、钢管^[12],以及在钢管内壁焊接加劲肋^[13]等措施。根据周济等^[14]的研究,发现方形截面CFST存在约束拱效应缺陷,方钢管不能均匀约束核心混凝土,导致其性能不如圆形截面CFST。ALATSHAN等^[15]指出,方形截面CFST的约束效果类似于方形箍筋的约束效果,具有有效约束区和无效约束区,同时,裴万吉等^[16]也发现了类似的问题。此外,张素梅等^[17]研究发现,在方钢管混凝土外设置圆钢管可以解决方钢管约束不均匀的问题。NIU等^[18]的试验结果表明,在核心混凝土中设置钢筋骨架可以增强对核心混凝土的约束。因此,通过在核心混凝土中加入钢筋笼,构成配筋钢管再生混凝土结构(Reinforced and Recycled Aggregate Concrete-Filled Steel Tube,简称R-RACFST)^[19],以增加二重约束,减轻RAC固有缺陷带来的影响和减少钢管约束不均匀的情况发生,提高承载能力和延性,充分发挥再生混凝土的经济价值。

综上,配置钢筋笼对RACFST的力学性能存在影响,但目前国内外对100%取代率的R-RACFST主要采用基于数值模拟的轴压承载力研究方法。因此,在100%再生粗骨料取代率下,为了研究配置钢筋对圆形和方形截面R-RACFST的力学性能的改善效率,以纵筋配筋率为变化参数,对R-RACFST短柱进行了轴压试验。基于试验结果,重点关注破坏模式、刚度、屈强比、单位配筋率强度、延性、组合效应和钢筋的约束效率等方面,探讨了配筋对不同截面构件力学性能的改善效率,并提出了强度预测方法。

1 试验概况

1.1 试件及参数

根据相关规范和规程^[10,20]进行试验设计,圆形截面试件直径 $D=165$ mm、方形截面试件边长 $L=150$ mm,试件高度 $H=500$ mm。试件分为三组:CFST组(圆形截面表示为yCF,方形截面表示为fCF)、RACFST组(圆形截面表示为yRF,方形截面表示为fRF)和R-RACFST组(圆形截面表示为yRRF,方形截面表示为fRRF)。R-RACFST组采用5种不同的纵筋直径,直径 d_t 分别为6、8、12、14、16 mm,每个试件的纵筋数量为6根。针对这5种纵筋直径,计算出相应的圆形和方形截面R-RACFST的配筋率 ρ_t (纵筋面积与核心混凝土面积的比值),分别为0.84%、1.49%、3.36%、4.57%、5.97%和0.80%、1.43%、3.21%、4.37%、5.71%。每个类别均有2根重复试件,总共设计了28根试件,各组试件的编号和参数可见表1。试件编号规则为“各类别代称加钢筋直径的数值”,例如yRRF6表示纵筋直径为6 mm的圆形截面R-RACFST、yCF表示无配筋的圆形截面CFST、fRRF12表示钢筋直径为12 mm的方形截面R-RACFST等。

表1 试件参数

Table 1 Parameters of specimens

截面类型	试件编号	$D(L)/$ mm	$t/$ mm	$d_t/$ mm	$\rho_t/$ %	$d_h/$ mm	$a_t/$ mm	$s/$ mm
圆形	yCF	165	2.3	—	—	—	—	—
	yRF	165	2.3	—	—	—	—	—
	yRRF6	165	2.3	6	0.84	4	120	50
	yRRF8	165	2.3	8	1.49	4	120	50
	yRRF12	165	2.3	12	3.36	4	120	50
	yRRF14	165	2.3	14	4.57	4	120	50
方形	yRRF16	165	2.3	16	5.97	4	120	50
	fCF	150	2.3	—	—	—	—	—
	fRF	150	2.3	—	—	—	—	—
	fRRF6	150	2.3	6	0.80	4	120	50
	fRRF8	150	2.3	8	1.43	4	120	50
	fRRF12	150	2.3	12	3.21	4	120	50
fRRF14	150	2.3	14	4.37	4	120	50	
fRRF16	150	2.3	16	5.71	4	120	50	

注:表中 t 为钢管壁厚; d_h 为箍筋直径; a_t 为箍筋外径; s 为箍筋间距; ρ_t 为配筋率。

1.2 材性试验

根据当地钢材供应情况,圆钢管和方钢管分别选用Q355B钢和Q235B钢,壁厚为 $t=2.3$ mm;纵筋全部采用HRB400带肋钢筋,箍筋采用304不锈钢。箍筋直径 $d_h=4$ mm,环外径 $a_r=120$ mm,间距 $s=50$ mm。按照现行国家标准^[21]进行钢管切片和钢筋的拉伸试验。测得钢管和钢筋的屈服强度、屈服应变和弹性模量等基本力学指标。试验结果如表2所示。

表2 试件材性试验结果

Table 2 Results of specimen material test

钢材类型	t 或 d / mm	f_y / MPa	ϵ_y / $\mu\epsilon$	A_s / mm ²	N_o / kN
方钢管	2.3	271.06	1 424.25	1 401.16	379.80
圆钢管	2.3	332.47	1 728.99	1 175.62	390.85
	6	443.02	2 311.47	169.62	77.01
	8	423.98	2 172.55	301.62	127.88
纵筋	12	443.47	2 233.07	678.60	300.94
	14	437.40	2 288.62	923.40	403.89
	16	438.88	2 384.66	1 206.60	529.55

注: f_y 为钢材屈服强度, ϵ_y 为屈服强度对应的屈服应变, A_s 为截面面积, N_o 为承载力。

再生混凝土和普通混凝土的目标强度统一为40 MPa,再生粗骨料取代率为100%。混凝土的配合比为:水泥:水:细骨料:粗骨料(或再生粗骨料):减水剂=1:0.44:1.3:2.4:0.004。在浇筑混凝土时,每搅拌浇筑一组试件,同批次浇筑三个立方体试块和圆柱体试块以供材性试验使用。测得普通和再生混凝土28 d立方体抗压强度和轴心抗压强度如表3所示。

表3 混凝土材性试验结果

Table 3 Results of concrete material test

混凝土类型	f_{cu} / MPa	f_c / MPa
普通混凝土	42.51	28.20
再生混凝土	41.01	27.30

1.3 测量及加载方式

钢管在柱中位置绕周长等距设置4个横向应变片,与横向应变片垂直的方向设置一个相应的竖向应变片,总共8个应变片。纵向钢筋每间隔一根钢筋在纵向中心位置设置一个竖向应变片,钢管和纵筋的应变数据由外接应变箱采集。应变片布置如图1所示。试验在如图2所示的YJW10000微机控制液伺压力机上进行。采用位移控制加载方式,圆形截面试件加载位移速度为

$4.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,根据试件的破坏状态最终确定极限位移为32.0 mm;方形截面试件加载位移速度为 $2.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,极限位移为18.0 mm。

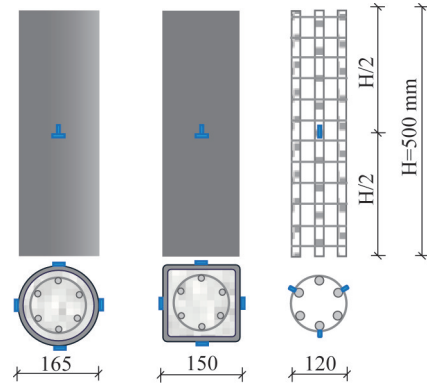


图1 试件构造及测点布置(单位:mm)

Fig. 1 Construction of specimens and arrangement of measuring points (unit: mm)

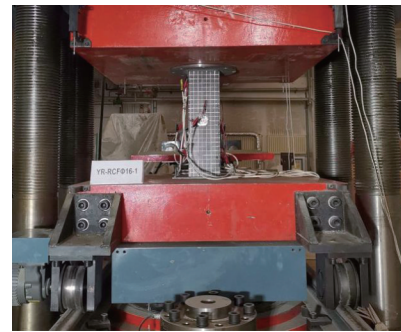


图2 试验加载照片

Fig. 2 Photo of loading

2 试验结果及分析

2.1 破坏模式分析

各试件的内外破坏模式如图3和图4所示。总体而言,随着配筋率的变化,各类截面构件的外部破坏形态基本相似。圆形截面试件主要表现为剪切破坏,而方形截面试件则表现为局部屈曲破坏。这表明,配置钢筋对试件的外部破坏形态无显著影响。此外,在最终破坏形态中,相比较圆形截面钢管,方形截面钢管的外部钢管呈现出更多的鼓曲现象。

将钢管切开后发现,方形和圆形截面CFST与RACFST的核心混凝土出现了粉碎性破坏,丧失了承载能力。与CFST和RACFST相比,配筋的圆形R-RACFST呈现出显著区别,其内部RAC仅在钢管鼓曲位置部分脱落,且即使没有钢管支撑也能保持完整。进一步表明,配置钢筋的R-RACFST能够改善内部混凝土的破坏形态,从而提高了试件的完整性和强度。

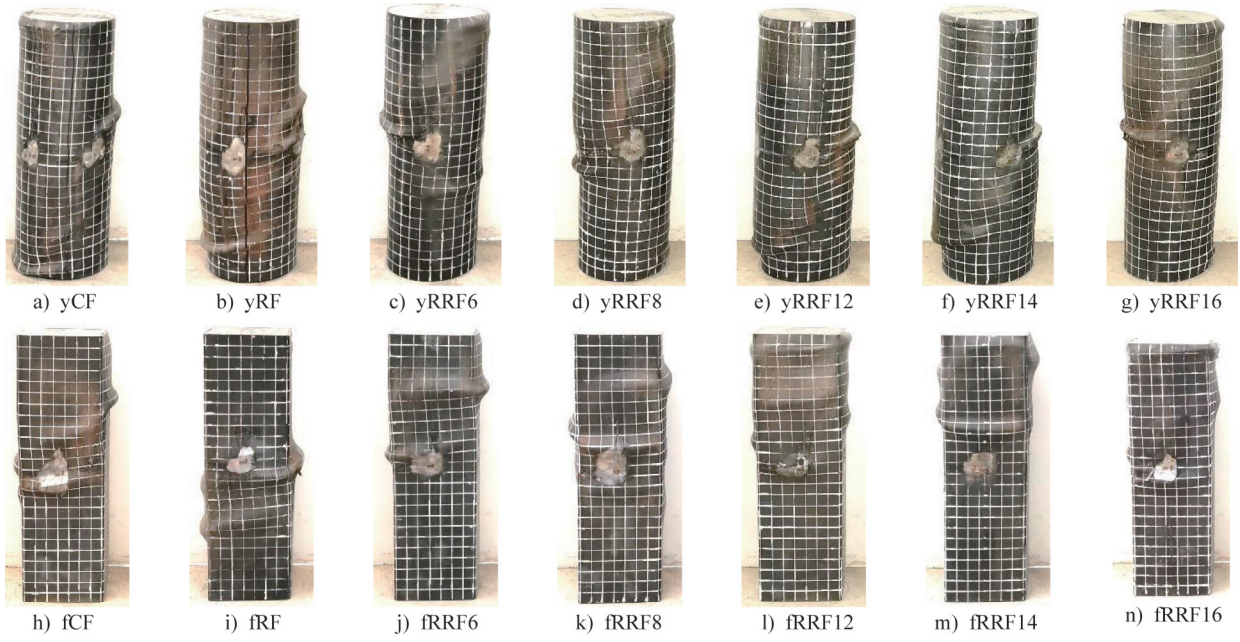


图3 各试件外部破坏形态
Fig. 3 External failure modes of specimens



图4 各试件内部破坏形态
Fig. 4 Internal failure modes of specimens

方形截面钢管内核心混凝土的破坏程度相较于圆形截面钢管内核心混凝土的破坏程度更为严重。具体而言,相对于圆形截面 RACFST,方形截面 RACFST 的核心混凝土脱落面积更大,通缝更宽且最终直接断裂。然而,一旦在方形截面 RACFST 核心混凝土中加入钢筋笼,内部混凝土的破坏模式发生了根本性的变化,展现出良好的整体性。

敲碎圆形和方形截面 R-RACFST 的核心混凝土后发现,纵筋的弯曲方向与钢管发生屈曲的方向一致,且箍筋断裂的位置也与钢管发生屈曲的位置吻合。这表明,纵筋与钢管之间能够实现良好的协同作用。

2.2 受力性能分析

2.2.1 荷载-位移曲线

荷载-轴向位移关系曲线如图 5 所示,其中各试件曲线的数值为各类型两个试件的算数平均值。在配置钢筋的试件中,随着配筋率的增加,荷载-位移曲线弹性阶段的斜率和峰值荷载逐渐提高,且在峰值荷载后,下降段的曲线更加平缓,配筋改善了构件的弹塑性性能。然而,当配筋率超过一定范围时,对 RACFST 整体性能的提升效果逐渐减弱。

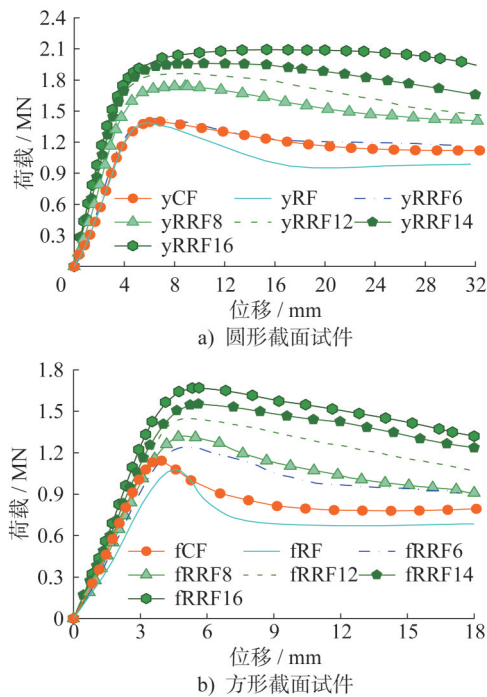


图 5 试件荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of specimens

对于圆形截面试件,CFST 和 RACFST 荷载-位移曲线在弹性阶段几乎重合,表现出相近的弹性刚度和承载力。然而,在峰值荷载之后的塑性变形阶段,RACFST 的塑性表现明显不如 CFST,这可能是由于

RAC 本身固有的缺陷所致。

对于方形截面试件,RACFST 的弹性刚度和承载力明显低于 CFST 的弹性刚度和承载力。随着配筋率的增加,R-RACFST 的弹性刚度接近甚至高于 CFST,同时 R-RACFST 的峰值荷载也高于 CFST 的峰值荷载。此外,R-RACFST 在峰值荷载后的塑性能也优于 CFST 的塑性能。

2.2.2 刚度退化

为研究配筋率对刚度的影响,通过实测的荷载-位移曲线转换得到应力-应变曲线,并以割线模量作为刚度退化的指标,如图 6 所示。可见,R-RACFST 与 RACFST 表现出相似的刚度退化趋势。随着配筋率的增加,R-RACFST 的弹性刚度逐渐增强,但当配筋率超过一定值(例如,对于直径为 12 mm 的纵筋,方形和圆形截面试件对应的配筋率分别为 3.21% 和 3.36%)时,其对刚度的改善效果减弱。

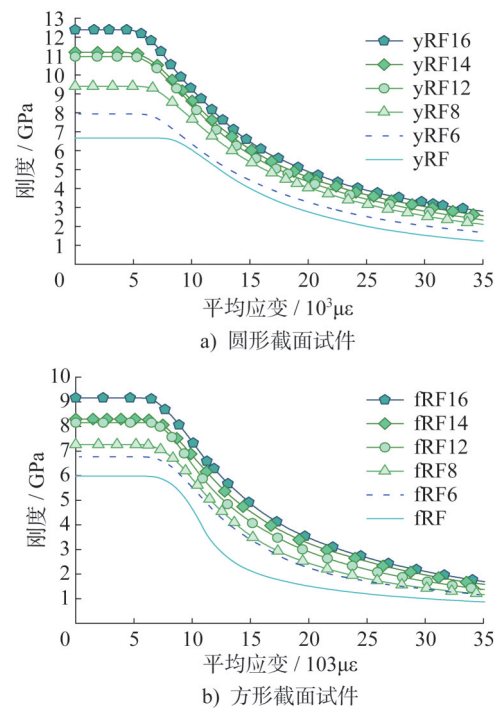


图 6 配筋率对试件刚度的影响

Fig. 6 Effect of reinforcement ratios on stiffness of specimens

在方形截面试件中,当 R-RACFST 的配筋率为 0.80% 时,其在塑性变形阶段的刚度退化速率明显低于 RACFST 的刚度退化速率。此外,对于圆形截面试件,当配筋率介于 0.84% 和 1.49% 之间时,R-RACFST 的刚度退化速率同样显著降低。然而,随着配筋率的增加,方形和圆形截面 RACFST 的刚度退化速率在塑性变形阶段并未显著减缓。这表明,尽管配筋有效地减缓了

RACFST的刚度退化,但单纯增加配筋率并不一定会导致更好的改善效果。

2.2.3 峰值荷载改善系数

表4列出了各试件的峰值荷载。在方形和圆形截面

RACFST中加入钢筋笼后,其峰值荷载均增加,且峰值荷载随配筋率的增加而增加。因此,为定量分析这一现象,引入峰值荷载改善系数 γ ,其表达式如下:

$$\gamma = \frac{N_n - N_{n-1}}{N_n} \quad (1)$$

表4 试验结果
Table 4 Test results

截面	试件编号	N_{un}/kN	N_n/kN	N_y/kN	ρ_t	γ	p_t/kN	C_t	η_t	Δ_u/mm	Δ_y/mm	μ	D_t	$\chi/\times 10^6 \text{J}\cdot\text{m}^{-3}$	ω_t	
圆形	yCF-1	1 413.9	1 405.2	1 206.1	—	—	0.00	1.46	0.00	6.87	4.04	1.70	0.86	1.90	0.00	
	yCF-2	1 396.5														
	yRF-1	1 405.7	1 396.1	1 272.0	—	0.00	0.00	1.48	0.00	5.80	4.35	1.33	0.91	1.76	0.00	
	yRF-2	1 386.5														
	yRRF-6-1	1 479.3	1 497.6	1 231.6	0.84%	0.07	120.44	1.47	1.35	6.39	4.01	1.59	0.82	1.95	0.23	
	yRRF-6-2	1 515.8														
	yRRF8-1	1 747.0	1 742.3	1 390.5	1.49%	0.14	231.90	1.62	2.71	8.86	3.75	2.36	0.80	2.48	0.81	
	yRRF8-2	1 737.5														
	yRRF12-1	1 843.0	1 864.8	1 484.1	3.36%	0.07	139.20	1.50	1.56	8.62	3.25	2.65	0.80	2.72	0.13	
	yRRF12-2	1 886.5														
	yRRF14-1	1 970.0	1 966.5	1 624.8	4.57%	0.05	124.71	1.46	1.41	10.35	3.69	2.81	0.83	2.87	0.12	
	yRRF14-2	1 963.0														
	yRRF16-1	2 083.0	2 086.8	1 859.4	5.97%	0.06	115.56	1.42	1.30	15.36	4.74	3.24	0.89	3.04	0.12	
	yRRF16-2	2 090.5														
	方形	fCF1	1 200.5	1 151.3	1 094.0	—	—	0.00	1.19	0.00	3.95	3.34	1.18	0.95	1.24	0.00
		fCF2	1 102.1													
fRF1		1 061.6	1 079.6	1 033.4	—	0.00	0.00	1.14	0.00	4.53	4.03	1.12	0.96	1.06	0.00	
fRF2		1 097.5														
fRRF6-1		1 240.0	1 248.3	1 157.2	0.80%	0.14	224.93	1.22	2.24	5.07	3.99	1.27	0.93	1.40	0.45	
fRRF6-2		1 256.5														
fRRF8-1		1 328.5	1 322.0	1 212.3	1.43%	0.06	180.90	1.23	1.90	4.98	3.90	1.28	0.92	1.58	0.31	
fRRF8-2		1 315.5														
fRRF12-1		1 475.8	1 451.2	1 290.3	3.21%	0.09	123.05	1.16	1.23	5.12	3.81	1.35	0.89	1.75	0.10	
fRRF12-2		1 426.5														
fRRF14-1		1 528.0	1 553.8	1 443.4	4.37%	0.07	115.65	1.15	1.17	5.61	4.23	1.33	0.93	1.93	0.16	
fRRF14-2		1 579.5														
fRRF16-1		1 683.0	1 671.0	1 576.6	5.71%	0.07	110.34	1.13	1.12	5.64	4.19	1.34	0.94	2.06	0.11	
fRRF16-2		2 090.5														

注:表中 N_{un} 为峰值荷载; N_n 为两个重复试件的峰值荷载平均值。

式中: N_n 为两个重复试件的峰值荷载平均值; n 表示配筋率从小到大的序号。以圆形截面为例,其配筋率为0、0.84%、1.49%、3.36%、4.57%和5.97%所对应的 n 值依次为1、2、3、4、5和6。对于方形截面, n 的定义方式与此类似。

计算的 γ 值如表4所示,其与配筋率的关系曲线绘制于图7。由图可见,配筋率对圆形和方形截面的 γ 值产生

显著影响。在较低的配筋率下,方形截面RACFST在配置纵向钢筋后,峰值荷载显著增加,而对于采用较高钢管强度的圆形截面RACFST,配置纵向钢筋对其峰值荷载的增加程度降低。对于配筋率在1.04%~2.85%范围内,圆形截面R-RACFST的 γ 值明显高于方形截面R-RACFST的 γ 值。这表明在该配筋范围内,圆形截面R-RACFST配置纵向钢筋时峰值荷载改善效果更加显

著。然而,当配筋率超过2.85%,方形截面R-RACFST配置纵向钢筋时峰值荷载改善效果更加显著,同时峰值荷载的改善效果趋于一致。

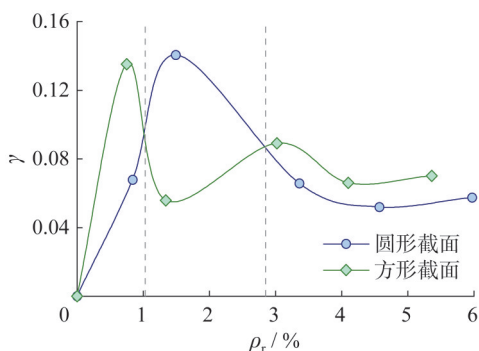


图7 峰值荷载改善系数

Fig. 7 Peak load improvement factor

2.2.4 单位配筋率强度指标

为进一步明确配筋率对R-RACFST强度的提升效果,引入单位配筋率强度指标 p_r ,其表达式如下:

$$p_r = \frac{N_a - N_{co} - N_s - N_{sr}}{\rho_r} \quad (2)$$

式中: N_a 是两个重复试件的峰值承载力平均值; N_{co} 是核心混凝土的承载力,即混凝土面积 A_c 和再生混凝土轴心抗压强度 f_{rc} 的乘积; N_s 是钢管的承载力,即钢管面积 A_s 和钢管屈服强度 f_{ys} 的乘积; N_{sr} 是RACFST峰值承载力减去核心混凝土与钢管的承载力。

计算的 p_r 值如表4所示,其与配筋率的关系曲线绘制于图8。由图可见,随着配筋率的增加, p_r 值并未呈线性增长。配筋率超过0.8%时,方形截面R-RACFST的 p_r 值开始下降,而圆形截面R-RACFST的 p_r 值在配筋率达到1.49%时也开始下降。此外,在配筋率低于1.15%时,方形截面R-RACFST的 p_r 值高于圆形截面R-RACFST的 p_r 值;而当R-RACFST配筋率超过1.15%后,圆形截面R-RACFST的 p_r 值则高于方形截面R-RACFST的 p_r 值。这一现象表明,配筋率与 p_r 值之间不成正比关系,当配筋率达到一定值后 p_r 值存在下降趋势。这意味着,并非配筋率越高,峰值荷载的改善效果就越好,相反,在过高的配筋率下,峰值荷载的提升效率可能降低。当配筋率超过3.36%时,R-RACFST的单位配筋率强度趋于平缓,且圆形与方形截面R-RACFST的 p_r 值趋于一致。这些结果表明,配筋率的合理选择对不同截面构件峰值荷载的提升具有重要意义。

2.2.5 复合效应

进一步分析发现,各试件的峰值荷载都大于其组成部分承载力之和,这表明钢管、混凝土与纵筋之间的相互

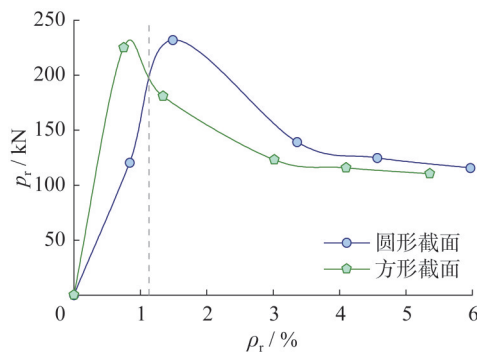


图8 单位配筋率强度指标

Fig. 8 Strength index of unit reinforcement ratio

作用提高了试件的整体性能。为了定量描述这种作用,引入复合效应指标来量化,其表达式如下:

$$C_1 = \frac{N_a}{N_{co} + N_s + N_r} \quad (3)$$

式中: N_r 是纵向钢筋的承载力,即总的纵向钢筋面积 A_r 和钢筋屈服强度 f_{yr} 的乘积。

计算的 C_1 值如表4所示,其与配筋率的关系曲线绘制于图9。由图可见,所有试件的 C_1 值均大于1,且圆形截面试件的复合效应指标始终高于方形截面试件的复合效应指标。产生这一现象的原因主要有两点:一是方形截面试件存在约束拱效应缺陷,钢管不能均匀约束核心混凝土,导致其性能不如圆形截面试件^[14];二是圆形截面试件所用的钢管强度高于方形截面试件的钢管强度。此外,圆形和方形截面R-RACFST在配筋率分别为1.49%和1.43%时, C_1 值达到最大,之后随着配筋率的增加, C_1 值呈现下降趋势,复合效应逐渐减弱。这表明,配筋率增加并不一定会带来更好的复合效应。

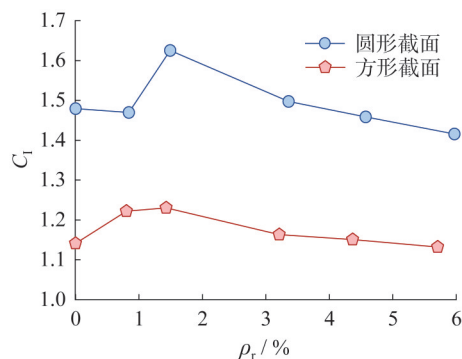


图9 复合效应指标

Fig. 9 Composite effect index

同样,对比RACFST与R-RACFST的峰值荷载发现,R-RACFST的峰值荷载高于RACFST与钢筋承载力 N_r 的叠加(即 $N_a^{R-RACFST} > N_a^{RACFST} + N_r$)。

引入钢筋约束效率 η_r 来定量描述这一现象,其表达

式如下：

$$\eta_r = \frac{N_a^R - N_a^{RACFST}}{N_r} \quad (4)$$

式中： N_r 为纵筋的承载力。

计算的 η_r 值如表4所示,其与配筋率的关系曲线绘制于图10。由图可见,圆形与方形截面试件的 η_r 值随配筋率的增加呈现先增后减的趋势。这表明,在R-RACFST中,随着配筋率的增加,并不一定会导致钢筋对试件的约束效率提高。此外,在较低的配筋率下(如1.10%),方形截面R-RACFST的纵筋表现出较好的约束效率,甚至优于圆形截面R-RACFST。并且,当配筋率超过一定值(如3.21%)时,纵筋的约束效应表现出明显的平稳性。同时,方形与圆形截面R-RACFST的 η_r 值趋于接近,这表明不同截面形式的R-RACFST在配筋率超过一定值后,其复合效应的差异逐渐减小。

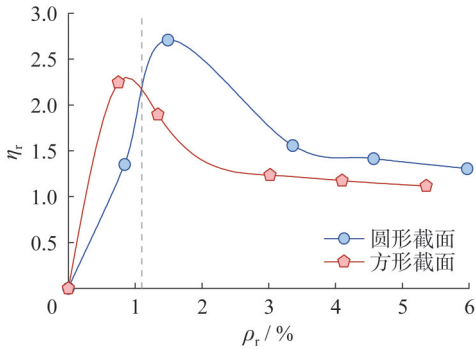


图10 钢筋约束效率

Fig. 10 Confinement efficiency of reinforcement

2.3 延性

构件的延性可以用延性系数 μ 来量化。本文采用位移法计算,其表达式如下：

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (5)$$

式中： δ_u 与 δ_y 分别为试件峰值荷载和屈服荷载所对应的位移。

式(5)的关键是确定 δ_y ,本文采用以下方法确定 δ_y ：

(1) 各试件钢管的应变实测值与荷载之间的关系曲线如图11所示,其中钢管的纵向和横向应变取四个测点的算术平均值。从图中可以观察到,试件荷载-应变曲线与荷载-位移曲线的发展趋势相似,各试件纵向受拉应变的变化与纵向受压应变的变化保持同步。与此同时,CFST、RACFST和R-RACFST的圆钢管纵向和横向应变在屈服前呈现出相同的发展规律,表明屈服前配筋率对圆钢管变形能力的影响较小;方钢管的纵向和横向应变在屈服前也表现出相似的发展规律,随着配筋率的增加,屈服前曲线的斜率增大。

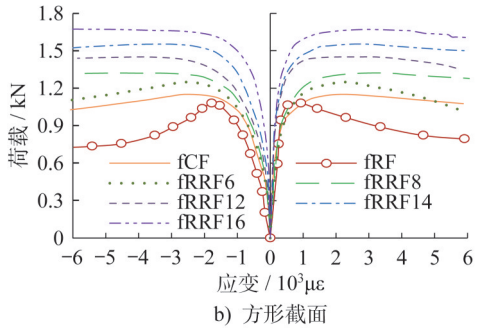
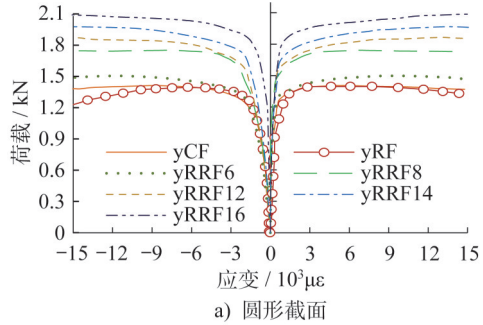


图11 钢管荷载-应变曲线

Fig. 11 Load-strain curves of steel tube

(2) 从上述现象可以看出,与单轴拉伸试验不同,CFST、RACFST和R-RACFST的钢管处于复杂的平面应力状态,因此钢管的实际屈服强度应根据复杂应力状态的屈服准则来确定。

根据 von Mises 屈服准则和弹性阶段复杂应力下的广义胡克定律得到如下表达式：

$$\epsilon_e = f_e / E_s = \frac{\sqrt{(1 - \nu_s + \nu_s^2)(\epsilon_{sh}^2 + \epsilon_{sv}^2) - (1 - 4\nu_s + \nu_s^2)\epsilon_{sh}\epsilon_{sv}}}{1 - \nu_s^2} \quad (6)$$

式中： ν_s 是钢材的泊松比,取值为0.3; f_e 为等效应力或有效应力; ϵ_e 是对应于 f_e 的等效应变或有效应变; ϵ_{sv} 和 ϵ_{sh} 分别为钢管的纵向和横向应变。

将每一数据点的 ϵ_{sv} 和 ϵ_{sh} 的实测值代入式(6),即可计算出每个数据点对应的 ϵ_e 值,然后用 ϵ_e 与材性试验所得的屈服应变值 ϵ_y 进行校准,即得到相应的钢管屈服荷载 N_y ,再将 N_y 在图5所示的曲线上映射得到对应的屈服位移 δ_y 。

通过上述过程确定的相关指标值如表4所示,将延性系数与配筋率的关系曲线绘制于图12。可以看出,R-RACFST的延性系数大于RACFST的延性系数,并且各试件的延性系数随配筋率的增加基本呈上升趋势,方形截面试件延性系数的上升趋势比圆形截面试件延性系数的上升趋势更为平缓。

2.4 屈强比

屈服荷载与峰值荷载之间的差距可作为构件的安全

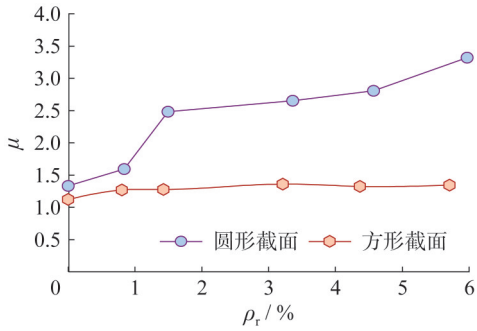


图 12 延性系数
Fig. 12 Ductility factor

储备, 差距越小则构件发生脆性破坏的可能性就越高。为分析配筋率对安全储备的影响, 计算各试件的屈强比 D_1 , 其表达式如下:

$$D_1 = \frac{N_y}{N_a} \quad (7)$$

将 D_1 值列于表 4, 其与配筋率的关系曲线绘制于图 13。从图中可以看出, 在 RACFST 中配置钢筋后, D_1 值普遍降低, 这表明内部钢筋的存在抑制了核心 RAC 的脆性破坏, 提高了安全储备。然而, 当配筋率超过一定值 (如 5.97% 和 5.71%) 时, R-RACFST 的 D_1 值却接近于 RACFST 的 D_1 值。这也说明了, 不是配筋率越高, 试件的安全储备越好。另外, 方形截面试件的 D_1 值总体上高于圆形截面试件的 D_1 值。

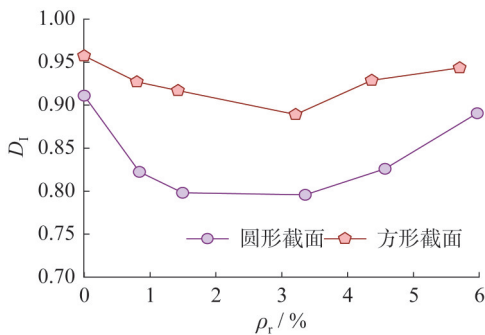


图 13 屈强比
Fig. 13 Yielding-to-tensile ratio

2.5 断裂韧性

断裂韧性 χ 通常用于评价构件抵抗开裂和脆性断裂的能力, 可以用构件单位体积所吸收的能量来量化。根据材性试验和加载试验, 为便于方形和圆形试件进行对比, 最终确定其荷载-位移曲线的极限位移值为 18.0 mm。计算的 χ 值在表 4 中给出, 并将其与配筋率的关系曲线绘制于图 14。从图中可以看出, 圆形截面试件的 χ 值总体大于方形截面试件的 χ 值。超过一定配筋率后, 圆形与方形截面 R-RACFST 随配筋率的增加大体呈线性

增加。

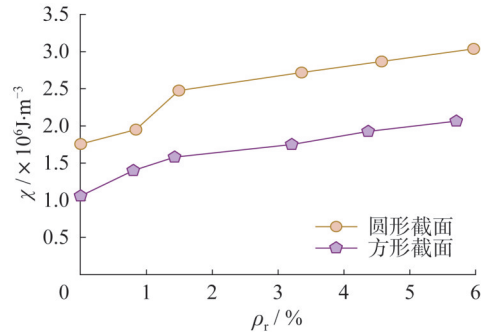


图 14 断裂韧性
Fig. 14 Fracture toughness

为评估配筋率对断裂韧性的贡献, 引入断裂韧性指数 ω_r 来定量分析, 其表达式如下:

$$\omega_r = \frac{\chi_n - \chi_{n-1}}{\rho_n - \rho_{n-1}} \quad (8)$$

式中: χ 为 R-RACFST 的断裂韧性。

计算的 ω_r 值列于表 4, 其与配筋率的关系曲线绘制于图 15。从图中可以看出, 在配筋率较低 (小于 1.03%) 的情况下, 方形截面 R-RACFST 的 ω_r 值比圆形截面 R-RACFST 的 ω_r 值大; 然而, 当配筋率介于 1.03% 至 3.36% 之间时, 方形截面 R-RACFST 的 ω_r 值明显小于圆形截面 R-RACFST 的 ω_r 值。此外, 当 R-RACFST 的配筋率超过 3.36% 后, 圆形和方形截面试件的 ω_r 值趋于稳定且相近。

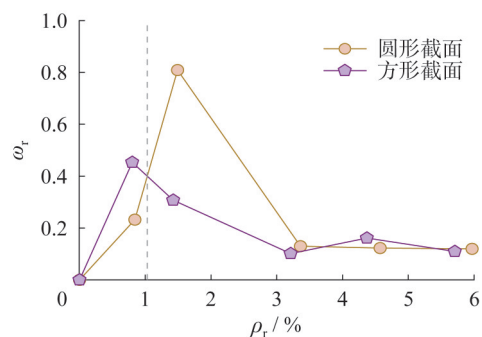


图 15 断裂韧性指数
Fig. 15 Index of fracture toughness

综上, 在 RACFST 内配置钢筋笼有助于减小 RAC 的自身缺陷对构件整体性能的不利影响。在方形截面 RACFST 中配置钢筋可以显著减少方钢管约束不均匀的现象发生, 尤其是在配筋率较低的情况下, 纵向钢筋对力学性能的提升效果优于圆形截面试件。随着配筋率的增加, 配置钢筋对圆形和方形截面 RACFST 力学性能的提升效率出现先增加后降低的趋势。因此, 推荐圆形和

方形截面 R-RACFST 合理的配筋率范围分别为 1.49%~3.36% 和 0.80%~3.36%, 使得纵筋能充分发挥其强度并且能够与钢管和再生混凝土协同作用来提高构件的整体性能。

3 R-RACFST 承载力计算公式

对于 RACFST, 我国现行规范 T/CECS 625—2019^[10] 提供了基于统一理论的强度预测公式:

$$N_{RF} = f_{sc} A_{sc} \quad (9)$$

式中: N_{RF} 为 RACFST 的承载力; A_{sc} 为构件截面面积;

f_{sc} 为 RACFST 组合轴压强度, 圆形截面和方形截面 f_{sc} 分别为 $(1.14 + 1.02\xi)f_c$ 和 $(1.18 + 0.85\xi)f_c$, f_c 为混凝土轴心抗压强度; ξ 为套箍系数, $\xi = \frac{A_s f_{ys}}{A_c f_c}$; f_{ys} 为钢管屈服强度; A_s 为钢管截面面积; A_c 为混凝土截面面积。

将本文试验试件数据和文献 [19, 22] 收集到的 R-RACFST 试件数据根据式 (9) 进行承载力预测, 并将预测结果列于表 5, 将试验值与计算值的比值 Δ_T 绘制于图 16。从图中可以看出, Δ_T 最小值为 1.19, 最大值达到 2.06, 平均值为 1.51, 变异系数为 0.16。

表 5 承载力预测结果

Table 5 Prediction results of bearing capacity

数据来源	试件编号	材料强度			钢管尺寸		纵筋		N_a/kN	本文推荐			T/CECS625		
		f_{ys}/MPa	f_{yr}/MPa	f_c/MPa	D/m	t/mm	d/mm	n		ξ_r	N_i/N	Δ_T	ξ	N_T/N	Δ_T
本文	yRRF6-1	332.5	443.0	27.3	165	2.3	6	6	1 479	0.84	1 169	1.26	0.71	1 088	1.36
	yRRF6-2	332.5	443.0	27.3	165	2.3	6	6	1 516	0.84	1 169	1.30	0.71	1 088	1.39
	yRRF8-1	332.5	424.0	27.3	165	2.3	8	6	1 747	0.94	1 226	1.42	0.71	1 088	1.61
	yRRF8-2	332.5	424.0	27.3	165	2.3	8	6	1 738	0.94	1 226	1.42	0.71	1 088	1.60
	yRRF12-1	332.5	443.5	27.3	165	2.3	12	6	1 843	1.25	1 413	1.30	0.71	1 088	1.69
	yRRF12-2	332.5	443.5	27.3	165	2.3	12	6	1 887	1.25	1 413	1.33	0.71	1 088	1.73
	yRRF14-1	332.5	437.4	27.3	165	2.3	14	6	1 970	1.44	1 524	1.29	0.71	1 088	1.81
	yRRF14-2	332.5	437.4	27.3	165	2.3	14	6	1 963	1.44	1 524	1.29	0.71	1 088	1.80
	yRRF16-1	332.5	438.9	27.3	165	2.3	16	6	2 083	1.67	1 660	1.25	0.71	1 088	1.91
	yRRF16-2	332.5	438.9	27.3	165	2.3	16	6	2 091	1.67	1 660	1.26	0.71	1 088	1.92
	fRRF6-1	235.0	443.0	27.3	150	2.3	6	6	1 240	0.68	1 083	1.15	0.55	1 015	1.22
	fRRF6-2	235.0	443.0	27.3	150	2.3	6	6	1 257	0.68	1 083	1.16	0.55	1 015	1.24
	fRRF8-1	235.0	424.0	27.3	150	2.3	8	6	1 329	0.77	1 130	1.18	0.55	1 015	1.31
	fRRF8-2	235.0	424.0	27.3	150	2.3	8	6	1 316	0.77	1 130	1.16	0.55	1 015	1.30
	fRRF12-1	235.0	443.5	27.3	150	2.3	12	6	1 476	1.07	1 287	1.15	0.55	1 015	1.45
	fRRF12-2	235.0	443.5	27.3	150	2.3	12	6	1 427	1.07	1 287	1.11	0.55	1 015	1.41
	fRRF14-1	235.0	437.4	27.3	150	2.3	14	6	1 528	1.25	1 380	1.11	0.55	1 015	1.51
	fRRF14-2	235.0	437.4	27.3	150	2.3	14	6	1 580	1.25	1 380	1.14	0.55	1 015	1.56
fRRF16-1	235.0	438.9	27.3	150	2.3	16	6	1 683	1.47	1 494	1.13	0.55	1 015	1.66	
fRRF16-2	235.0	438.9	27.3	150	2.3	16	6	2 091	1.47	1 494	1.40	0.55	1 015	2.06	
文献 [19]	A35	342.7	295.0	25.6	88	2.5	6	6	579	2.02	502	1.13	1.66	445	1.27
	A36	342.7	295.0	25.6	88	2.5	6	6	544	2.02	502	1.06	1.66	445	1.19
	A37	342.7	295.0	25.6	88	2.5	6	6	547	2.02	502	1.09	1.66	445	1.23
	A38	342.7	295.0	25.6	88	2.5	6	6	580	2.02	502	1.15	1.66	445	1.30
	A39	342.7	295.0	25.6	88	2.5	6	6	580	2.02	502	1.19	1.66	445	1.34
文献 [22]	RRC-T4-S40-100	293.0	412.0	27.2	200	4.0	6	4	2 425	0.44	1 687	1.44	0.39	1 650	1.47
	HRC-T4-S20-100	293.0	618.0	27.2	200	4.0	6	4	2 605	0.47	1 715	1.52	0.41	1 650	1.58
	HRC-T4-S40-100	293.0	618.0	27.2	200	4.0	6	4	2 330	0.47	1 715	1.36	0.39	1 650	1.41

另外, 还发现纵筋配筋率越大 Δ_T 的值越大。根据此现象以及前述分析, 足以说明 R-RACFST 中纵筋的作用不可忽视, 因而 R-RACFST 的套箍系数 ξ_r 可定

义为:

$$\xi_r = \frac{A_s f_{ys} + A_r f_{yr}}{A_c f_c} \quad (10)$$

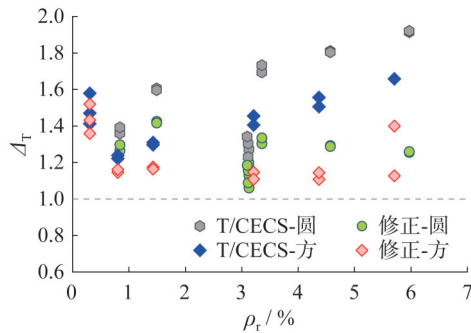


图16 预测结果对比

Fig. 16 Comparison of predicted results

式中： A_r 和 f_{yr} 分别为纵筋的横截面面积和屈服强度。

将 ξ_r 代入规范T/CECS 625—2019^[10]中的RACFST组合强度表达式，得出R-RACFST基于规范T/CECS 625—2019^[10]的圆形截面和方形截面组合强度表达式分别为 $(1.14+1.02\xi_r)f_c$ 和 $(1.18+0.85\xi_r)f_c$ 。

最终，R-RACFST截面轴心受压承载力为

$$N_T = f_{scr} A_{sc} \quad (11)$$

基于R-RACFST试验试件与文献[19, 22]中试件数据根据式(11)进行承载力预测，并将结果列于表5，比值 Δ_T 绘制于图16中。从图中可以发现， Δ_T 最小值为1.06，最大值为1.52，平均值为1.24，变异系数为0.10。

从图16可以看出，公式(11)的预测结果 Δ_T 值随配筋率的增加变化较为平缓，而基于规范T/CECS 625—2019^[10]预测结果得到的 Δ_T 值大体呈上升走势，且离散性较大。此外，规范T/CECS 625—2019^[10]中对RACFST的预测公式忽略了钢筋的作用，因此不太适合用于R-RACFST短柱承载力的预测。相比之下，本文给出的修正公式可以提供一种更加稳定可靠的计算方法。

4 结论

本文通过圆形和方形截面短柱的轴心受压试验，研究了RACFST配置钢筋时对其破坏模式、荷载-位移曲线以及力学指标(延性、组合效应、刚度退化和屈强比)的影响，可以得出以下结论：

(1) 在RACFST中配置钢筋，即使配筋率很小，也可以有效减少因再生骨料取代率超过70%后由于再生骨料自身的缺陷导致构件的峰值荷载、延性和刚度等急剧下降的情况发生。说明，在RACFST中放置钢筋笼后，100%再生骨料替代率是可行的。

(2) 配筋率的改变对圆形和方形截面R-RACFST试件的整体破坏模式没有影响，但改变了核心再生混凝土的破坏模式，使得再生混凝土保持完整性并且具有一定的承载力。

(3) 通过对R-RACFST试件的延性、刚度退化、组

合效应和屈强比等关键指标进行分析后发现，R-RACFST的上述力学指标并不完全与配筋率成正比关系。

(4) 并不是配置越多的纵筋对RACFST性能的提升就越好。当圆形截面RACFST的配筋率范围在1.49%~3.36%、方形截面RACFST的配筋率范围在0.80%~3.36%时，在RACFST内配置的纵筋可以充分发挥其性能，并且可使构件的综合力学性能表现更好。

(5) 对现行RACFST规程给出的RACFST短柱承载力计算公式进行修正后，提出了适合预估R-RACFST短柱轴心受压承载力的预测公式，并通过与试验结果对比进行了验证。验证结果表明，本文提出的预测公式较为可靠。

参考文献：

- [1] 肖建庄, 李佳彬, 兰阳. 再生混凝土技术研究最新进展与评述[J]. 混凝土, 2003(10): 17-20, 57.
XIAO Jianzhuang, LI Jiabin, LAN Yang. Research on recycled aggregate concrete—a review[J]. Concrete, 2003(10): 17-20, 57. (in Chinese)
- [2] 霍洪媛, 范程程, 陈爱玖, 等. 不同强度等级的再生骨料对再生混凝土基本力学性能影响[J]. 混凝土, 2017(2): 60-62, 65.
HUO Hongyuan, FAN Chengcheng, CHEN Aijiu, et al. Influence of the recycled aggregate with different strength on recycled concrete [J]. Concrete, 2017(2): 60-62, 65. (in Chinese)
- [3] TAM V W Y, WANG Z B, TAO Z. Behaviour of recycled aggregate concrete filled stainless steel stub columns [J]. Materials and Structures, 2014, 47(1): 293-310. DOI: 10.1617/s11527-013-0061-1.
- [4] KONNO K, SATO Y, KAKUTA Y, et al. The property of recycled concrete column encased by steel tube subjected to axial compression [J]. Transactions of the Japan Concrete Institute, 1997, 19: 231-238.
- [5] WANG Y Y, CHEN J, GENG Y. Testing and analysis of axially loaded normal-strength recycled aggregate concrete filled steel tubular stub columns [J]. Engineering Structures, 2015, 86: 192-212. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.01.007.
- [6] DE AZEVEDO V D S, DE LIMA L R O, VELLASCO P C S, et al. Experimental investigation on recycled aggregate concrete filled steel tubular stub columns under axial compression [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 187: 106930. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.106930.
- [7] XIAO J Z, HUANG Y J, YANG J, et al. Mechanical properties of confined recycled aggregate concrete under axial compression [J]. Construction and Building Materials, 2012, 26(1): 591-603. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.062.
- [8] 肖建庄, 杨洁, 黄一杰, 等. 钢管约束再生混凝土轴压试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6): 92-98. DOI: 10.14006/j.

- jzjgxb.2011.06.001.
- XIAO Jianzhuang, YANG Jie, HUANG Yijie, et al. Experimental study on recycled concrete confined by steel tube under axial compression [J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(6): 92-98. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2011.06.001. (in Chinese)
- [9] 肖建庄, 刘胜, TRESSERRAS Joan. 钢管/GFRP管约束再生混凝土柱偏心受压试验[J]. *建筑科学与工程学报*, 2015, 32(2): 21-26.
- XIAO Jianzhuang, LIU Sheng, TRESSERRAS J. Eccentric loading test on recycled aggregate concrete columns confined by steel tube/GFRP tube [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2015, 32(2): 21-26. (in Chinese)
- [10] 中国工程建设标准化协会标准. 钢管再生混凝土结构技术规范: T/CECS 625—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019. China Association for Engineering Construction Standardization. Technical Specification for Recycled Aggregate Concrete-filled Steel Tubular Structures: T/CECS 625—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [11] 刘坚, 张鹏程, 刘长江, 等. 内配型钢的方钢管再生混凝土短柱轴压承载力分析[J]. *混凝土*, 2021(10): 1-5.
- LIU Jian, ZHANG Pengcheng, LIU Changjiang, et al. Axial bearing capacity analysis of RAC-filled square steel tubular stub columns with encased profiled steel under axial compression[J]. *Concrete*, 2021(10): 1-5. (in Chinese)
- [12] 沈金生, 彭宁宁, 安新正, 等. 钢管再生混凝土短柱承载力有限元分析[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2021, 38(4): 1-6, 74.
- SHEN Jinsheng, PENG Ningning, AN Xinzheng, et al. Finite element analysis of mechanical properties of recycled concrete filled square steel tubular stub columns [J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2021, 38(4): 1-6, 74. (in Chinese)
- [13] 曹万林, 郭瑞洁, 秦嘉, 等. 不同腔体构造方钢管高强再生混凝土轴压性能[J]. *结构工程师*, 2023, 39(4): 104-115. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2023.04.020.
- CAO Wanlin, GUO Ruijie, QIN Jia, et al. Research on axial compressive performance of square high-strength RACFST with different cell details [J]. *Structural Engineers*, 2023, 39(4): 104-115. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2023.04.020. (in Chinese)
- [14] 周济, 陈宗平, 周春恒, 等. 钢-混凝土组合方形截面柱内置螺旋筋约束增强机理及承载力计算[J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(11): 235-246, 265. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2021.0281.
- ZHOU Ji, CHEN Zongping, ZHOU Chunheng, et al. Restraint mechanism and bearing capacity calculation of steel-concrete composite square columns with internal spiral bars [J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(11): 235-246, 265. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2021.0281. (in Chinese)
- [15] ALATSHAN F, OSMAN S A, HAMID R, et al. Stiffened concrete-filled steel tubes: A systematic review [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 148: 106590. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106590.
- [16] 裴万吉, 赵均海, 魏雪英. 钢管混凝土的截面形式及其承载力分析[J]. *建筑科学与工程学报*, 2006, 23(1): 49-53.
- PEI Wanji, ZHAO Junhai, WEI Xueying. Analysis of section types of concrete-filled steel tube and its load capacity [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2006, 23(1): 49-53. (in Chinese)
- [17] 张素梅, 李孝忠, 陈雄图, 等. 圆钢管约束加强的方钢管混凝土短柱轴压性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(增刊2): 170-179. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2021.S2.0020.
- ZHANG Sumei, LI Xiaozhong, CHEN Xionggu, et al. Axial compression behavior of square CFST short columns reinforced by circular steel tube [J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42 (Suppl. 2): 170-179. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2021.S2.0020. (in Chinese)
- [18] NIU H C, CAO W L. Full-scale testing of high-strength RACFST columns subjected to axial compression [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2015, 67(5): 257-270. DOI: 10.1680/macr.14.00198.
- [19] 刘坚, 田勇, 刘长江, 等. 圆钢管钢筋再生混凝土短柱轴压承载力[J]. *建筑科学与工程学报*, 2020, 37(5): 97-105. DOI: 10.19815/j.jace.2019.12036.
- LIU Jian, TIAN Yong, LIU Changjiang, et al. Axial compression carrying capacity of reinforced recycled aggregate concrete-filled circular steel tubular stub columns [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2020, 37(5): 97-105. DOI: 10.19815/j.jace.2019.12036. (in Chinese)
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢管混凝土结构技术规范: GB 50936—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Concrete Filled Steel Tubular Structures: GB 50936—2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [21] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 金属材料拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021. State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Metallic Materials—Tensile Testing—Part 1: Method of Test at Room Temperature: GB/T 228.1—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [22] YUAN F, LI H R, LI H H. Mechanical behavior of the sustainable square spiral stirrup-confined recycled aggregate concrete filled steel tubular columns under compression [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 426: 139099. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139099.