

# 钢筋增强钢管混凝土短柱的轴心受压性能\*

阿里甫江·夏木西, 刘晓蕊

(新疆大学 建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

**摘要:** 为了探究混凝土强度对钢筋增强钢管混凝土短柱(R-CFST)轴压性能的影响规律,进行了试验研究. 试验中,将混凝土的强度等级作为主要参数,制备了6种混凝土强度的R-CFST、钢管混凝土和普通钢筋混凝土等54根圆形截面短柱试件. 根据试验结果,分析了混凝土强度对受力性能、破坏模式、延性、套箍效应和峰值荷载的影响. 结果表明:由于钢筋的贡献,R-CFST轴压性能的退化不随混凝土强度的提高而增加,具有较好的塑性性能;钢筋对R-CFST延性、套箍效应和强度的改善随混凝土强度的提高而变得更加明显;混凝土强度的提高不造成破坏模式的改变;高强度混凝土填充时配置适量钢筋可以有效增强R-CFST的受力性能;给出的计算公式能合理计算R-CFST承载力.

**关键词:** 钢筋增强钢管混凝土; 混凝土强度; 受力性能; 延性; 套箍效应; 破坏模式; 承载力

**DOI:** 10.13568/j.cnki.651094.651316.2020.01.18.0002

**中图分类号:** TU398.9; TU317.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2021)01-0091-09

**引文格式:** 阿里甫江·夏木西, 刘晓蕊. 钢筋增强钢管混凝土短柱的轴心受压性能[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2021, 38(1): 91-99.

**英文引文格式:** Alifujiang Xiamuxi, LIU X R. Axial load performance of concrete-filled steel tube stub column strengthened with reinforcing bars[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2021, 38(1): 91-99.

## Axial Load Performance of Concrete-Filled Steel Tube Stub Column Strengthened with Reinforcing Bars

Alifujiang Xiamuxi, LIU Xiaorui

(School of Architecture and Civil Engineering, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830047, China)

**Abstract:** To clarify the effect of concrete on loading performance of concrete-filled steel tube stub column strengthened with reinforcement (R-CFST), compression tests were conducted. Using the concrete strength as parameter, R-CFST, concrete-filled steel tube and reinforced concrete specimens were prepared in 6 concrete strength-grades, and total 54 specimens were tested. Based on the test results, the loading performance, failure mode, ductility, confinement effect and peak load were analyzed. Finally, conclusions were attained as follows: because of interaction of the reinforcement, performance-degradation of R-CFST will not increase as the concrete strength increases, and shows better plastic deformability; improving effect of reinforcement on ductility, confinement effect and strength of R-CFST will increase as the concrete strength increases; increase of concrete strength will not cause significant changes in failure mode; proper reinforcement will bring enhancement of performance of R-CFST filled with high-strength concrete; the proposed equation is applicable to predict the strength of R-CFST.

**Key words:** R-CFST; concrete strength; loading performance; ductility; confinement effect; failure mode; bearing capacity

## 0 引言

目前,高强度混凝土广泛应用于工程结构,尤其是将高强度混凝土填充到钢管内组成钢管高强混凝土(简称CFST)后,高强混凝土的高强特性变得更为显著.在相同的荷载条件下,CFST较普通混凝土和普通钢柱能明显节约混凝土和钢材,并且可以省略浇筑模板,进一步降低造价<sup>[1,2]</sup>.然而,填充高强度混凝土时CFST的强度虽有所提高,但其延性和抗剪性能却降低,进而降低结构的抗震性能<sup>[3,4]</sup>.

\* 收稿日期: 2020-01-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51968068).

作者简介: 阿里甫江·夏木西(1975-),男,博士,教授,从事钢与混凝土组合结构的研究, E-mail: ilikyurt@126.com.

为了改善CFST的上述问题,人们通过在CFST核心混凝土内配置钢筋来增强其受力性能,这种增强的CFST被称为配筋钢管混凝土(简称R-CFST)构件.根据已有的研究成果<sup>[5-8]</sup>,由纵向钢筋和箍筋组成的钢筋骨架可以对内填混凝土产生二次套箍,较好地改善内填混凝土的性能,弥补内填高强度混凝土的缺点.

无论是CFST还是R-CFST,内填充核心混凝土的强度是影响构件力学性能的重要因素之一.因此,本文将混凝土强度作为试验参数,研究R-CFST的轴压性能,旨在探究核心混凝土对R-CFST强度、套箍效应、延性及破坏特性的影响规律,重点阐明配筋对钢管高强度混凝土柱受力性能的影响.

## 1 试验概况

### 1.1 试件制备

试件横截面形状均为圆形,直径 $D=165\text{ mm}$ 、高度 $H=500\text{ mm}$ .将混凝土等级设定为参变量,混凝土立方体强度设定为 $20\text{ MPa}$ 、 $30\text{ MPa}$ 、 $40\text{ MPa}$ 、 $50\text{ MPa}$ 、 $60\text{ MPa}$ 和 $70\text{ MPa}$ 等6组.对应各组混凝土强度等级,准备R-CFST(以RF标识)以及CFST(以CF标识)和RC(以RC标识)等3种类型的试件,对应每一类型制作3根重复试件,6组3类每一类3根,总共准备54根试件;根据已有R-CFST试验<sup>[8]</sup>,R-CFST和RC试件所用的纵向钢筋采用6根直径为 $8\text{ mm}$ 的HRB400带肋钢筋,算得的纵向钢筋配筋率为 $1.49\%$ ;横向钢筋(箍筋)采用直径为 $4\text{ mm}$ 、间距为 $50\text{ mm}$ 的冷拔钢丝;R-CFST和CFST试件所采用钢管为Q235B有缝钢管、壁厚为 $2.3\text{ mm}$ 、径厚比为 $D/t=71.7$ .

### 1.2 材性试验

依据我国现行标准<sup>[9]</sup>制备混凝土立方体试块并测定强度.最终确定各组混凝土立方体抗压强度 $f_{cu}$ 、轴心抗压强度 $f_c$ 和混凝土试件轴心受压承载力 $N_{co}$ ( $N_{co}=f_c A_c$ ,其中 $A_c$ 为横截面面积)等指标,如表1所示.另外,依据我国现行规范<sup>[10]</sup>进行了本试验钢材的材质试验.材质试验测得的材质曲线如图1所示.最终确定钢管材质屈服值 $f_{sy}=308\text{ MPa}$ 、与其对应的屈服应变 $\varepsilon_{sy}=1\ 413\ \mu\text{m/m}$ 、轴心受压承载力 $N_{so}=361.74\text{ kN}$ ( $N_{so}=f_{sy} A_{ss}$ ,其中 $A_{ss}$ 为钢管横截面总面积);纵向钢筋屈服强度 $f_{ry}=487\text{ MPa}$ 、与其对应的屈服应变 $\varepsilon_{ry}=2\ 680\ \mu\text{m/m}$ 、轴心受压承载力 $N_{ro}=147.00\text{ kN}$ ( $N_{ro}=f_{ry} A_{sr}$ ,其中 $A_{sr}$ 为纵筋横截面总面积).

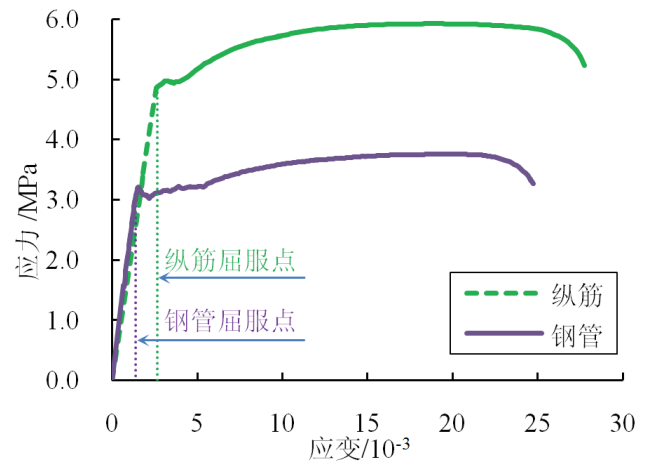


图1 钢管和钢筋材料的试验结果

Fig 1 Results of material test for steel material

表1 各组混凝土强度指标  
Tab 1 Strength of concrete

强度等级	C20	C30	C40	C50	C60	C70
$f_{cu}$ (MPa)	22.2	31.8	45.5	51.0	56.0	64.0
$f_c$ (MPa)	14.8	21.3	29.9	32.9	36.0	40.9
$N_{co}$ (kN)	300.02	429.46	603.47	665.76	728.20	826.55

### 1.3 试验方法

用WEY-5000型微机控制压力计进行试验.加载控制量为:900 kN以下时 $2.0\text{ kN/s}$ 、900 kN至 $1\ 200\text{ kN}$ 之间时 $1.0\text{ kN/s}$ 、 $1\ 200\text{ kN}$ 以上时 $0.5\text{ kN/s}$ .关于测量部位,文献[5]和文献[8]分别在钢管纵向中心处及离中心三分之一处粘贴了应变片,文献[6]和文献[7]则只在纵向中心处粘贴了应变片.分析后发现前两个试验中构件变形首先从纵向中心发展,最终取得最大值,对构件的破坏起支配作用.因此,本试验以文献[6,7]的测点布置方法为参考,采取如图2所示的测点布置.试验试件安装如图3所示.

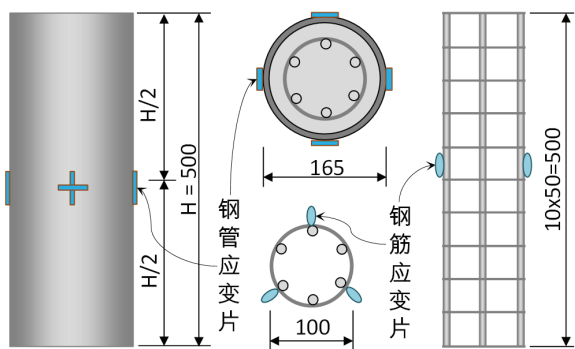


图 2 测点布置示意图

Fig 2 Illustration for measuring points

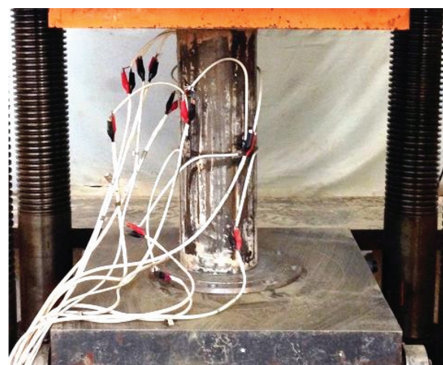


图 3 试验方式图

Fig 3 Photograph of testing method

## 2 试验结果及分析

### 2.1 受力性能分析

(1) 为了分析填充不同强度的混凝土时钢筋对R-CFST构件性能的影响, 对R-CFST和CFST的荷载-位移关系进行比较. 先对荷载进行正则化(荷载值除以峰值荷载), 再绘制正则化荷载对位移的关系曲线, 如图4所示. 可以看出, R-CFST和CFST表现出基本相同的轴压特性, 但随混凝土强度的增加, CFST峰值荷载后的强度下降更显著、幅度更大、下滑趋势更突然. 相比之下, R-CFST显示出较好的强度和塑性变形能力, 而其塑性变形能力不随混凝土强度的提高而降低. 并且在相同的混凝土强度之下, R-CFST的刚度高于CFST.

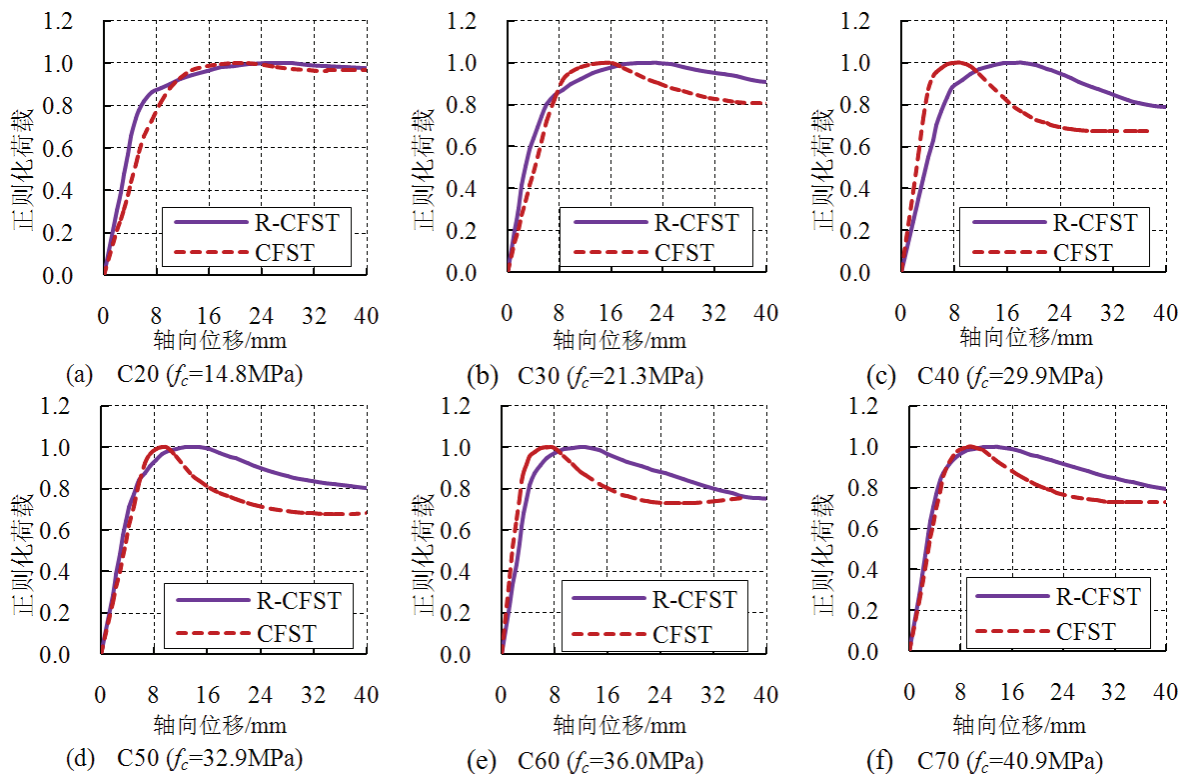


图 4 R-CFST和CFST荷载-位移曲线的比较

Fig 4 Comparisons between load-displacement curves of R-CFST and CFST

(2) 图5为部分CFST试件(编号分别为CF40-3、CF50-2、CF60-2、CF70-2)的荷载-位移关系曲线. 可以看出这些试件在较小荷载(分别为1 126.52 kN、1 257.66 kN、1 187.6 kN、606.14 kN)时就出现承载力突然急速下滑

的现象,表现出典型的脆性破坏现象. CFST出现脆性破坏是由高强度混凝土脆性性质和混凝土填充时的不均匀性造成的<sup>[4]</sup>.

## 2.2 破坏形态分析

作为R-CFST和CFST的代表性情况,将RF70和CF70的破坏形态列出如图6所示.根据已有研究成果<sup>[11]</sup>,CFST轴心受压短柱的破坏模式有剪切破坏和多折腰鼓形破坏两种.很明显,本次试验R-CFST和CFST各试件的破坏为“剪切破坏模式”,即外观均为剪切局部失稳形态,而且两者破坏无本质差别,混凝土未改变外部破坏形式.

R-CFST和CFST各试件的内部破坏形态各自相同,即混凝土强度的变化没有造成构件内部破坏形态的改变.根据图6(b)和6(d),钢管切除后R-CFST的核心混凝土仍能保持整体且有一定的强度,为典型的延性破坏形式.相反地,CFST的内部混凝土被完全分为两半,不能保持整体,是典型的脆性破坏形式.

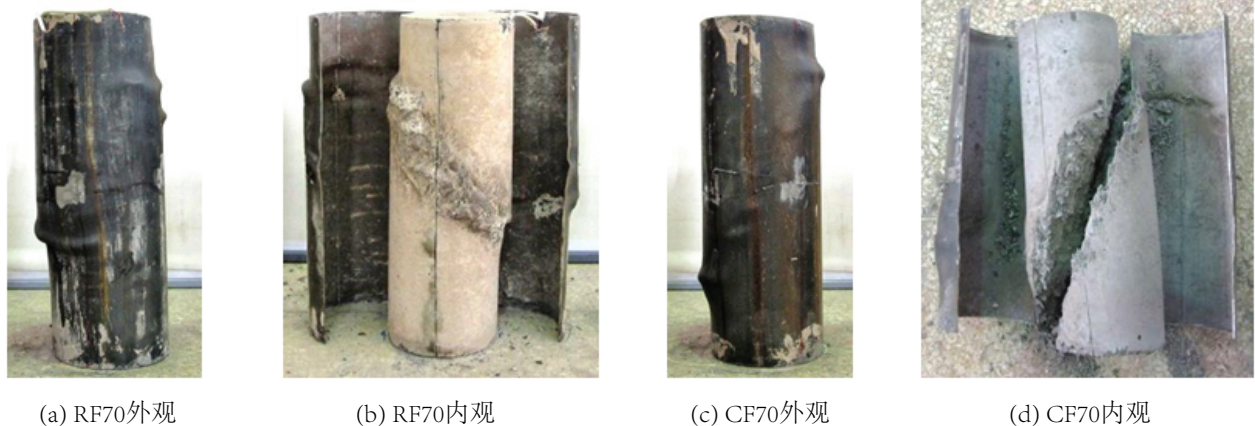


图6 R-CFST和CFST的典型破坏形态

Fig 6 Representative views of failure for R-CFST and CFST

根据已有研究<sup>[12]</sup>,CFST发生破坏的主要成因是混凝土的剪切破坏.加载初期当应变为 $820 \mu\text{m}/\text{m}$ 时核心混凝土就开始出现微裂缝,但由于此时钢管尚未屈服,其紧固作用限制了核心混凝土微裂缝的发展.随着荷载的增大,钢管与核心混凝土之间的轴力分配比例不断变化,核心混凝土的裂缝不断扩展、变宽,并开始膨胀,而钢管的横向约束应力也随之增大并抑制裂缝的开展.随着荷载不断增大,在钢管的横向挤压下核心混凝土开始出现剪切变形,钢管也随之开始屈服,最终核心混凝土发生剪切破坏,使外包钢管出现沿着剪切面的局部失稳,整个构件发生破坏.可见,核心混凝土的性能对构件整体性能至关重要,如果核心混凝土振捣不实容易造成不均匀性,将促使构件脆性破坏.R-CFST中配置的钢筋可以较好地降低核心混凝土的不均匀性造成的不利影响,提高构件受力性能.

## 2.3 延性性能分析

柱子轴心受压延性可用文献<sup>[13]</sup>提出的延性率系数来衡量,即延性率系数 $\mu$ 为峰值荷载位移或应变对构件屈服荷载位移或应变的比值.文献<sup>[14]</sup>和文献<sup>[15]</sup>取对应于 $2000 \mu\text{m}/\text{m}$ 的位移作为屈服位移.由于钢材的理想弹塑性材质,具有相同的受压和受拉特性.以此做参考,在本试验中我们采用钢管的材料试验获得的屈服应变 $1413 \mu\text{m}/\text{m}$ 作为屈服参考点,通过将此值和钢管的纵向中心处测得的四个纵向应变的平均值相对应来确定整体屈服荷载,再根据构件的荷载位移关系确定屈服位移.确定的各试件延性率系数和相关参数见表2,延性与混凝土强度之间的关系如图7所示.

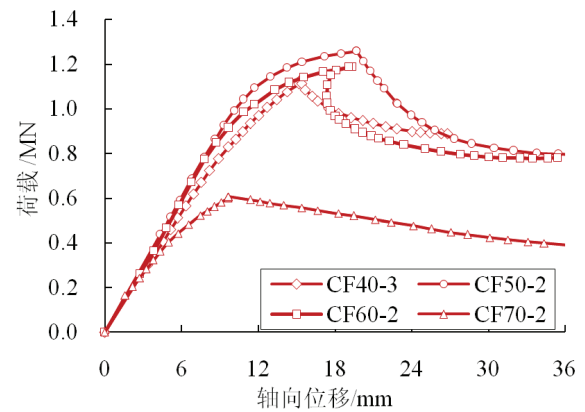


图5 发生脆性破坏的CFST试件

Fig 5 CFST which experienced brittle failure

表 2 试验结果  
Tab 2 Test results

混凝土	类别	编号	峰值荷载	$N_{ut}$ 平均值	$N_{ut}$ 对应位移	$\delta_{ut}$ 平均值	屈服位移	$\delta_{yt}$ 平均值	延性率	套箍系数	
			$N_{ut} / \text{kN}$	$N_{ua} / \text{kN}$	$\delta_{ut} / \text{mm}$	$\delta_{ua} / \text{mm}$	$\delta_{yt} / \text{mm}$	$\delta_{ya} / \text{mm}$	$\mu$	$\theta$	
C20	R-CFST	RF20-1	1 275.56			25.98		5.04			
		RF20-2	1 383.90	1 332.69		26.32	26.68	4.08	5.41	4.93	2.98
		RF20-3	1 338.62			27.74		7.12			
	CFST	CF20-1	1 110.00			23.88		8.79			
		CF20-2	1 119.26	1 114.30		20.66	22.74	7.43	8.97	2.53	2.16
		CF20-3	1 113.64			23.67		10.70			
	RC	RC20-1	366.02			9.50					
		RC20-2	328.18	362.19		8.64	9.57				
		RC20-3	392.38			10.55					
	C30	R-CFST	RF30-1	1 478.26			23.50		4.89		
RF30-2			1 449.74	1 452.03		21.62	22.48	7.50	5.58	4.03	2.02
RF30-3			1 428.08			22.32		4.35			
CFST		CF30-1	1 253.22			14.20		5.81			
		CF30-2	1 225.08	1 228.59		15.60	14.40	6.37	5.94	2.43	1.41
		CF30-3	1 207.46			13.41		5.63			
RC		RC30-1	418.80			9.69					
		RC30-2	419.06	411.43		10.75	9.95				
		RC30-3	396.44			9.40					
C40		R-CFST	RF40-1	1 686.48			18.79		5.33		
	RF40-2		1 634.40	1 626.19		19.26	19.17	5.35	5.27	3.63	1.37
	RF40-3		1 557.70			19.44		5.15			
	CFST	CF40-1	1 317.84			8.55		4.42			
		CF40-2	1 453.42	1 385.63		9.46	9.01	3.92	4.17	2.16	0.90
		CF40-3	*1 126.52			*		*			
	RC	RC40-1	487.04			10.81					
		RC40-2	426.60	465.53		9.30	9.42				
		RC40-3	482.94			8.17					
	C50	R-CFST	RF50-1	1 663.48			14.99		4.29		
RF50-2			1 759.14	1 701.29		16.81	16.58	4.36	5.11	3.24	1.24
RF50-3			1 681.26			17.95		6.68			
CFST		CF50-1	1 453.26			9.38		5.84			
		CF50-2	*1 257.66	1 435.63		*	9.40	*	5.73	1.64	0.77
		CF50-3	1 418.00			9.42		5.62			
RC		RC50-1	498.70			8.18					
		RC50-2	497.00	489.91		9.26	8.84				
		RC50-3	474.04			9.08					
C60		R-CFST	RF60-1	1 757.12			14.53		4.82		
	RF60-2		1 726.06	1 744.15		13.06	14.00	4.75	5.19	2.70	1.07
	RF60-3		1 749.28			14.41		5.99			
	CFST	CF60-1	1 452.22			7.25		8.05			
		CF60-2	*1 187.6	1 457.62		*	10.54	*	8.04	1.31	0.63
		CF60-3	1 463.02			13.84		8.03			
	RC	RC60-1	461.16			7.30					
		RC60-2	503.76	499.99		7.55	6.96				
		RC60-3	535.04			6.02					
	C70	R-CFST	RF70-1	1 753.68			12.57		5.41		
RF70-2			1 768.60	1 761.75		13.79	13.62	5.02	5.66	2.41	0.79
RF70-3			1 762.96			14.50		6.54			
CFST		CF70-1	1 345.40			9.49		7.48			
		CF70-2	*606.14	1 381.59		*	9.95	*	8.55	1.13	0.32
		CF70-3	1 417.78			10.42		9.63			
RC		RC70-1	576.04			4.21					
		RC70-2	547.44	552.21		5.05	4.57				
		RC70-3	533.16			4.44					

注: 标有\*为发生脆性破坏的CFST试件.

可以看出,两者的延性均随着混凝土强度等级的提高而降低, R-CFST的延性明显优于CFST. 对应各强度等级的混凝土,可以算出R-CFST比CFST的延性率分别高出94%、66%、68%、98%、106%和107%. 可见, R-CFST和CFST延性率之间的差别随着混凝土强度的提高而增加,混凝土为C50、C60和C70时, R-CFST的延性率比CFST高出2倍. 表明配筋能有效提高延性,而混凝土强度越高,提高效果越明显.

#### 2.4 套箍效应分析

我国CECS28-2012<sup>[16]</sup>规程和GB50936-2014<sup>[17]</sup>规范给出了基于套箍指标和极限平衡理论的圆形截面CFST短柱的承载力计算公式:

$$N_u = 0.9A_{cc}f_c(1+k\theta), \theta \leq 1/(k-1)^2 \quad (1)$$

$$N_u = 0.9A_{cc}f_c(1+\sqrt{\theta}+\theta), \theta > 1/(k-1)^2 \quad (2)$$

式中:  $A_{cc}$ 为核心混凝土的面积;  $\theta$ 为CFST的套箍指标;  $k$ 为与混凝土强度等级相关的系数,当混凝土为C55~C80时取 $k=1.8$ ,其他情况取 $k=2.0$ .

为了定量分析套箍效应对R-CFST的影响规律,由式(1)和式(2)导出套箍指标的表达式:

$$\theta = -\frac{C}{k}, \theta \leq 1/(k-1)^2 \quad (3)$$

$$\theta = \left( \frac{-1 + \sqrt{1^2 - 4C}}{2} \right)^2, \theta > 1/(k-1)^2 \quad (4)$$

其中

$$C = 1 - \frac{N_u}{0.9A_{cc}f_c} \quad (5)$$

利用式(3)和式(4)可以算出R-CFST和CFST各试件的套箍系数并列于表2中,并将套箍系数与混凝土强度之间的关系绘制成曲线,如图8所示.可以看出,在钢管壁厚不变的情况下, R-CFST和CFST各试件的套箍效应均随着混凝土强度等级的提高而降低, R-CFST的套箍效应明显优于CFST. 对应各强度等级的混凝土,可以算出R-CFST比CFST的套箍系数分别高出38%、43%、52%、60%、71%和145%. 可见, R-CFST和CFST套箍系数之间的差别随着混凝土强度的提高而增加. 说明在CFST内配置适当的钢筋可使构件的套箍效应得以显著提高,从而提高构件的各项性能,而混凝土的强度越高,提高就越明显. 另外,值得注意的是, C70时CFST的套箍系数为0.32,而现行规范<sup>[17]</sup>规定的CFST套箍系数的取值范围为0.5~2.0,即本次试验C70混凝土填充CFST的套箍系数超出规范规定的下限,进一步观察后发现,套箍系数超限后构件的延性和强度也发生显著下降,并表现为脆性破坏,而R-CFST(C70时的套箍系数为0.79)在同等条件下不受此限值的约束,并显示出较好的延性和强度.

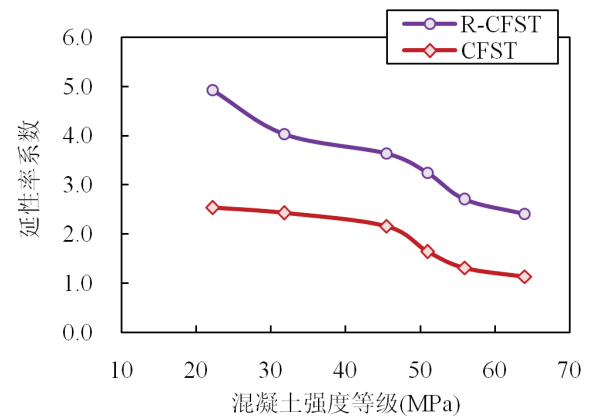


图7 延性与混凝土强度关系图

Fig 7 Relations of ductility versus concrete strength

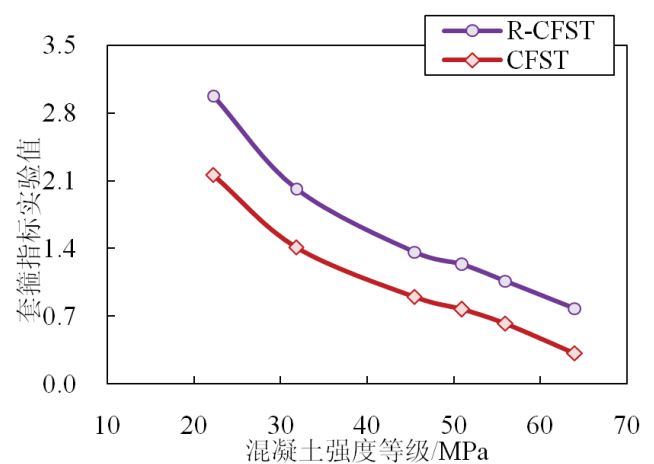


图8 套箍效应与混凝土强度的关系

Fig 8 Relations of confinement effect versus concrete strength

## 2.5 峰值荷载分析

试验中直接获得的各试件峰值荷载及其平均值见表2,同时将构件峰值荷载与混凝土强度之间的关系绘制成曲线,如图9所示。

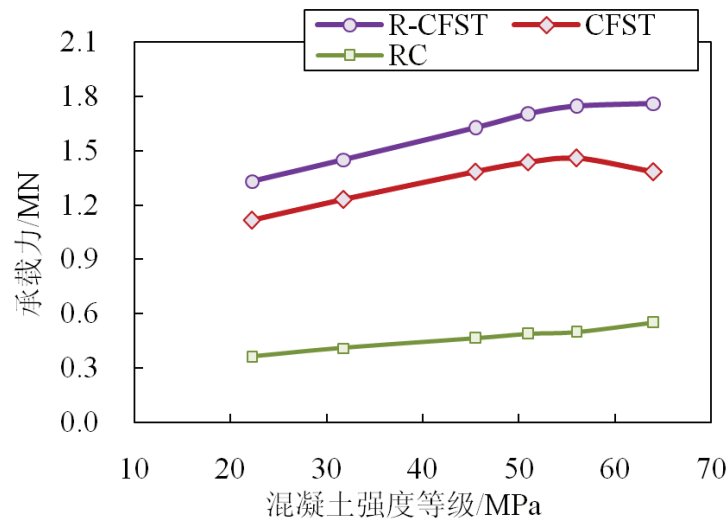


图9 峰值荷载与混凝土强度的关系

Fig 9 Relations of peak load versus concrete strength

(1)从图9可以清楚地看到,当C60及以下时,R-CFST和CFST的峰值荷载随混凝土强度等级的提高而增加.当C70时,与C60相比,R-CFST的峰值荷载保持不变(略显上升趋势,即 $N_{ua}^{RF60}=1\ 744.15\ \text{kN}$ 、 $N_{ua}^{RF70}=1\ 761.75\ \text{kN}$ ),而CFST的峰值荷载则明显下降(呈下滑趋势,即 $N_{ua}^{CF60}=1\ 457.62\ \text{kN}$ 、 $N_{ua}^{CF70}=1\ 381.59\ \text{kN}$ ).无论混凝土强度的高低,R-CFST的峰值荷载明显高于CFST.

(2)从表2可以看出,各RCFST试件的峰值荷载均比对应CFST峰值荷载与钢筋强度的叠加值(比如 $N_{ua}^{CF20}+N_{ro}=1\ 261.30\ \text{kN}$ 、 $N_{ua}^{CF30}+N_{ro}=1\ 375.59\ \text{kN}$ 、 $N_{ua}^{CF40}+N_{ro}=1\ 532.63\ \text{kN}$ 、 $N_{ua}^{CF50}+N_{ro}=1\ 582.63\ \text{kN}$ 、 $N_{ua}^{CF60}+N_{ro}=1\ 604.62\ \text{kN}$ 、 $N_{ua}^{CF70}+N_{ro}=1\ 528.59\ \text{kN}$ ,对应的R-CFST峰值荷载增加了5.66%、5.56%、6.10%、7.50%、8.70%、15.25%)高,说明RCFST中的钢管、混凝土和钢筋相互取长补短而产生组合效应,使得构件的整体强度比叠加强度提高,而且这种提高随混凝土强度的增大而增加.

## 2.6 R-CFST轴心受压构件的承载力计算公式

从上述分析中可以看出,R-CFST的基本受力特性与CFST类似,只是R-CFST具有比CFST更好的延性、套箍效应和强度.因此,考虑到计算的简便性和通用性,可以在CFST现行承载力计算方法<sup>[7]</sup>的基础上提出适用于圆形截面R-CFST轴心受压构件的承载力计算公式.由上述承载力分析可以看出,钢筋的效果类似于钢管,对承载力的提高作用几乎等同于钢管.由此引入R-CFST的套箍系数:

$$\theta_r = \frac{A_{ss}f_{sy} + A_{sr}f_{ry}}{A_{cc}f_c} \quad (6)$$

则圆形截面R-CFST短柱的轴心受压承载力公式为:

$$N_u^{R-CFST} = 0.9A_{cc}f_c(1 + k\theta_r), \theta_r \leq 1/(k-1)^2 \quad (7)$$

$$N_u^{R-CFST} = 0.9A_{cc}f_c(1 + \sqrt{\theta_r + \theta_r}), \theta_r > 1/(k-1)^2 \quad (8)$$

用式(7)和式(8)对16个CFST和RCFST试验数据进行计算,结果见表3.可以看出,《规范》的CFST公式给出较小的计算值,均偏安全.本文提出的R-CFST承载力计算公式(7)和(8)的结果也同样偏于保守,并表现出与CFST几乎相同的计算误差.

表 3 试验值对公式评估值的比较  
Tab 3 Comparisons of experimental values against predicted values

数据来源	混凝土		钢管	钢筋	配筋率	套箍系数		CFST承载力			R-CFST承载力			
	标号	$f_c/\text{MPa}$	$f_{sy}/\text{MPa}$	$f_{ry}/\text{MPa}$	%	$\theta$	$\theta_r$	$N_t/\text{kN}$	$N_u/\text{kN}$	$N_t/N_u$	$N_t/\text{kN}$	$N_u/\text{kN}$	$N_t/N_u$	
本次试验	RF20	C20	14.8	307.7	487.4	1.49	1.21	1.70	1 114.3	819.7	1.25	1 332.7	1 135.4	1.23
	RF30	C30	21.3	307.7	487.4	1.49	0.84	1.18	1 228.6	981.4	1.18	1 452.0	1 251.9	1.12
	RF40	C40	29.9	307.7	487.4	1.49	0.60	0.84	1 385.6	1 201.7	1.16	1 626.2	1 411.4	1.11
	RF50	C50	32.9	307.7	487.4	1.49	0.54	0.76	1 435.6	1 281.0	1.21	1 701.3	1 468.9	1.20
	RF60	C60	36.0	307.7	487.4	1.49	0.50	0.70	1 457.6	1 360.5	1.17	1 744.2	1 526.6	1.18
	RF70	C70	40.9	307.7	487.4	1.49	0.44	0.62	1 381.6	1 485.9	1.04	1 761.7	1 632.9	1.12
	B40-1	C40	23.5	235.0	335.0	1.59	1.06	1.28	3 900.0	2 538.6	1.40	4 240.0	2 932.3	1.38
文献[6]	B30-1	C30	18.9	235.0	335.0	1.59	1.31	1.60	3 950.0	2 285.1	1.57	4 090.0	2 729.0	1.46
	B20-1	C20	13.0	235.0	335.0	1.59	1.91	2.32	3 360.0	1 969.6	1.57	3 700.0	2 477.9	1.53
	C40-1	C40	23.5	235.0	335.0	1.67	0.61	0.85	3 610.0	2 580.4	1.39	3 760.0	3 116.1	1.19
	C30-1	C30	18.9	235.0	335.0	1.67	0.76	1.06	3 730.0	2 257.9	1.58	3 831.0	2 862.0	1.31
	C20-1	C20	13.0	235.0	335.0	1.67	1.11	1.54	2 910.0	1 848.4	1.43	3 210.0	2 540.1	1.32
	C30-2	C30	18.9	235.0	335.0	2.77	0.76	1.25	3 730.0	2 257.9	1.58	4 071.0	3 256.9	1.24
	B30-2	C30	18.9	235.0	335.0	2.83	1.31	1.82	3 900.0	2 285.1	1.55	4 297.0	3 074.4	1.42
	C40-3	C40	23.5	235.0	335.0	3.05	0.61	1.05	3 610.0	2 580.4	1.39	4 600.0	3 555.5	1.27
	B40-3	C40	23.5	235.0	335.0	4.42	1.06	1.69	3 990.0	2 538.6	1.43	4 550.0	3 632.4	1.27

注:  $N_t$ 为试验值;  $N_u$ 为计算值.

### 3 结论

本文以混凝土为参数,对钢筋增强CFST柱开展了试验研究,根据试验结果得出如下结论:

(1) R-CFST具有与CFST相同的受力特性.当高强度混凝土填充时,虽然两者都出现峰值荷载后受力性能退化,但是由于钢筋的影响,R-CFST性能的退化趋势不随混凝土强度等级的提高而明显增加,具有比CFST更好的承载力和塑性变形能力.另外,随着混凝土强度等级的提高,R-CFST和CFST的构件整体屈强比增加或构件的安全储备降低,但在相同的混凝土强度等级的情况下,R-CFST具有比CFST更小的整体屈强比或更多的承载力储备.

(2) R-CFST和CFST的延性性能和套箍效应随着混凝土强度的提高而降低.然而,由于钢筋的影响,R-CFST具有比CFST更好的延性率和套箍效应,而且钢筋对延性和套箍效应的提高作用随着混凝土强度的增加而更明显,同时钢筋对延性的提高作用比对套箍效应的提高作用更明显.

(3) R-CFST总是具有比CFST更大的承载力.R-CFST中的钢管、混凝土和钢筋相互取长补短产生的组合效应使得构件的整体强度得到明显提高,而且R-CFST承载力的提高随混凝土强度等级的提高呈现上升趋势.

(4) R-CFST具有与CFST相同的破坏模式,而随混凝土强度的提高其破坏模式不发生改变.

(5) 本文给出的适用于R-CFST的承载力计算方法与现行CFST承载力计算方式相同、形式简便、计算精度与CFST保持一致,具有一定的参考应用价值.

### 参考文献:

- [1] 韩林海. 钢管高强混凝土轴压力学性能的理论分析与试验研究[J]. 工业建筑, 1997, 27(11): 39-45.  
HAN L H. Theoretical analyses and experimental researches for the behaviors of high strength concrete filled steel tubes subjected to axial compression[J]. Industrial Construction, 1997, 27(11): 39-45. (In Chinese)
- [2] 祝雯. 钢管混凝土结构的研究现状及发展趋势[J]. 广州建筑, 2011, 36(1): 38.  
ZHU W. Research status and development trend of the concrete-filled steel tube[J]. Guangzhou Architecture, 2011, 36(1): 38. (In Chinese)
- [3] 康洪震. 钢管高强度混凝土组合柱受力性能及设计方法[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 45.  
KANG H Z. Mechanical performance and design method of high strength concrete-filled composite column[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2014: 45. (In Chinese)

- [4] FUJIMO T, MUKAII A. Axial compression performance of concrete filled steel tubular columns using high strength materials[J]. Journal of Structure and Construction Engineering, 1999, 498: 160-167.
- [5] 侯宇颖. 轴心受压配筋钢管混凝土短柱的试验研究[J]. 低温建筑技术, 2011, 33(12): 62-64.  
HOU Y Y. Experimental studies of bar-reinforced concrete filled steel tubular stub columns under axial loads[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2011, 33(12): 62-64. (In Chinese)
- [6] 舒赣平, 刘小萤, 缪巍. 配筋圆钢管混凝土轴心受压短柱试验研究与承载力分析[J]. 工业建筑, 2010, 40(4): 100-106.  
SHU G P, LIU X Y, MIAO W. Experimental research and bearing capacity analysis of axially compressive reinforced concrete filled steel tube short column[J]. Industrial Construction, 2010, 40(4): 100-106. (In Chinese)
- [7] 缪巍. 配筋钢管混凝土短柱轴心承载力试验研究[J]. 山西建筑, 2010, 36(5): 79-81.  
MIAO W. Experimental research and bearing capacity analysis of axially compressive reinforced concrete-filled steel tube short column[J]. Shanxi Architecture, 2010, 36(5): 79-81. (In Chinese)
- [8] WEI H, WANG H J, HASEGAWA A, et al. Study on strength of reinforced concrete filled circular steel tubular columns[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2005, 19(6): 653-677.
- [9] 中华人民共和国建设部. 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081-2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003: 411.  
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081-2002[S]. Beijing: ChinaStandards Press, 2003: 411. (In Chinese)
- [10] 中国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. 1-2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011: 78.  
China National Standardization Administration. Metallic materials-tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228. 1-2010[S]. Beijing: ChinaStandards Press, 2010. (In Chinese)
- [11] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 25-30.  
ZHONG S T. Concrete-filled steel tube[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 25-30. (In Chinese)
- [12] 苗若愚. 钢管混凝土短柱轴压变形机理及破坏荷载定义的探讨——钢管混凝土轴压短柱试验研究之一[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1984(2): 13-24.  
MIAO R Y. Discussion on axial compression deformation mechanism and failure load definition of CFST short columns——Experimental research on CFST short columns under axial compression[J]. Journal of Harbin Institute of Civil Engineering and Architecture, 1984(2): 13-24. (In Chinese)
- [13] USAMI T, GE HB. Ductility of concrete-filled steel box columns under cyclic loading[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1994, 120(7): 2021-2040.
- [14] SRINIVASAN C N, SCHNEIDER SP. Axially loaded concrete-filled steel tubes[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1999, 125(10): 1202-1206.
- [15] LUE D M, LIU L J, YEN T. Experimental study on rectangular CFT columns with high-strength concrete[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63: 37-44.
- [16] 哈尔滨工业大学和中国建筑科学研究院. 钢管混凝土结构技术规程: CECS 28: 2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012: 19-20.  
Harbin Institute of Technology and China Academy of building Research. Technical specification for concrete-filled steel tubular structures: CECS 28: 2012[S]. Beijing: China Planning Press, 2012: 19-20. (In Chinese)
- [17] 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: 34-35.  
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 and Building Press, 2014: 34-35. (In Chinese)

责任编辑: 赵新科