

引文格式:阿里甫江·夏木西,王宗宝,陈华磊,等. 配筋对钢管超高强混凝土短柱受力性能影响的研究[J]. 太原理工大学学报, 2026, 57(4): 784-792.

ALIFUJIANG·Xiamuxi, WANG Zongbao, CHEN Hualei, et al. Influence of reinforcement on the mechanical performance of ultra-high strength concrete-filled steel tube short columns[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2026, 57(4): 784-792.

配筋对钢管超高强混凝土短柱受力性能影响的研究

阿里甫江·夏木西^{1,2}, 王宗宝¹, 陈华磊¹, 许英磊¹

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

摘要:【目的】为探究纵筋配筋率的提高对钢管超高强混凝土(CuFST)短柱力学性能的影响规律,开展了3组不同配筋率的配筋钢管超高强混凝土(R-CuFST)短柱和1组CuFST短柱的轴心受压实验。【方法】通过分析各组试件的破坏模式、承载力、延性和约束效应等指标,明确轴压作用下,纵筋对CuFST短柱力学性能的提升作用。【结果】结果表明:配筋可以提高钢管内混凝土的完整性,改善了超高强混凝土高脆性对轴压短柱受力性能的不利影响;但随着纵筋配筋率的提高,单位配筋率对短柱力学性能的提升效果存在先增后减的情况,所以推荐纵筋配筋率不宜超过3.42%;与配筋钢管混凝土(R-CFST)短柱和配筋钢管再生混凝土(R-RACFST)短柱相比,适当增大配筋率对R-CuFST单位配筋率的承载力提升效果影响最明显。

关键词:配筋钢管超高强混凝土;短柱;承载力;延性;配筋率

中图分类号:TU398.9 **文献标识码:**A

DOI: 10.16355/j.tyut.1007-9432.20240011

文章编号:1007-9432(2026)04-0784-09

Influence of Reinforcement on the Mechanical Performance of Ultra-High Strength Concrete-Filled Steel Tube Short Columns

ALIFUJIANG·Xiamuxi^{1,2}, WANG Zongbao¹, CHEN Hualei¹, XU Yinglei¹

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

Abstract:【Purposes】To investigate the effect of increasing longitudinal reinforcement ratio on the mechanical performance of ultra-high strength concrete-filled steel tube short columns, three groups of reinforced ultra-high strength concrete-filled steel tube (R-CuFST) short columns with different reinforcement ratios and one group of CuFST short columns are subjected to axial compression tests. 【Methods】By analyzing the failure modes, bearing capacity, ductility, and confinement effects of specimens, the enhancement effect of longitudinal reinforcement on the mechanical performance of CuFST short columns with axial compression was clarified. 【Results】The results indicate that reinforcement can enhance the integrity of concrete inside the steel tube, improving the adverse effects of high brittleness of ultra-high strength concrete on the load-bearing performance of short columns with axial compression. However, with the increase in longitudinal reinforcement ratio, the improvement

收稿日期:2024-01-04;修回日期:2024-04-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51968068)

通信作者:阿里甫江·夏木西,博士,教授,主要从事钢与混凝土组合结构相关研究, (E-mail)ilikyurt@xju.edu.cn

effect of unit reinforcement ratio on the mechanical performance of short columns shows a trend of first increasing and then decreasing. Therefore, it is recommended that the longitudinal reinforcement ratio should not exceed 3.42%. Compared with reinforced concrete filled steel tube short columns and reinforced recycled aggregate concrete filled steel tube short columns, increasing the amount of reinforcement appropriately has the most significant effect on the load-bearing capacity of unit reinforcement ratio of R-CuFST.

Keywords: reinforced ultra-high strength concrete-filled steel tube; short column; loading capacity; ductility; reinforcement ratio

钢管超高强混凝土(Ultra-High Strength Concrete-Filled Steel Tube,简称 CuFST)短柱具有超高的抗压强度和较大的能量吸收能力,因而适用于桥梁工程、重工业厂房和高层民用建筑的结构设计^[1-4]。

早期关于钢管超高强混凝土的研究主要集中于将超高强混凝土灌入钢管内,与无约束超高强混凝土柱对比,实验变量多为混凝土抗压强度、钢材屈服强度与套箍系数等^[5-7]。如吴炎海等学者^[6]通过改变钢材与核心混凝土的强度进行轴压实验研究,虽然得出试件轴压承载力随材料强度的提升而增加的结论,但也发现与普通混凝土相比,钢管对超高强混凝土的约束效果较差,且随着混凝土强度的提高,试件延性性能变差,脆性破坏特征愈发明显^[8]。目前,超高强材料组合柱的力学性能研究侧重于超高强混凝土与高强或超高强钢管的合理匹配机制^[9-12]。如陈博文和李幅昌等学者^[11]发现钢管屈服强度与混凝土抗压强度同时提升不仅可以提高短柱的承载力,还可以提高短柱的刚度和延性等性能。但我国现行《钢筋混凝土结构设计规范》(GB 50936—2014)中钢材的适用范围为 Q235~Q420^[13],因此,高强钢材的推广还需进一步的探索,且陈宝春学者整理相关试件的研究后,发现普通钢管与超高强混凝土组合柱的轴压实验数据最为丰富^[14]。

然而,从材料强度匹配的角度思考,普通钢管屈服强度与超高强混凝土轴心抗压强度之比低于 3,这与已建成的高层建筑中该比值常处于 5.9~11.8 的范围相驳^[15]。因此,为满足套箍指标的要求,需增加钢管壁厚,但钢管壁厚的增加不仅会降低经济效益,也会给梁柱节点的焊接作业带来困难。

为改变因钢材强度不足需增大壁厚的不经济做法,借鉴配筋钢管混凝土(Reinforced Concrete-filled Steel Tube,简称 R-CFST)柱中钢筋笼的约束作用提升钢管混凝土短柱(Concrete-filled Steel Tube,简称 CFST)力学性能的经验^[16],考虑在

CuFST 核心混凝土中放置钢筋笼,形成配筋钢管超高强混凝土柱(Reinforced Ultra-High Strength Concrete-Filled Steel Tube,简称 R-CuFST)。

增配钢筋笼的做法既满足了套箍指标的要求,又可以利用钢筋笼对超高强混凝土的约束增强作用,改善超高强混凝土高脆性对短柱力学性能的不利影响。因而,可用于承载力需求较高的结构设计中,如图书馆书库、高层建筑地下停车场、储藏室等场所。所以,设计了 3 组不同配筋率的配筋钢管超高强混凝土短柱和 1 组钢管超高强混凝土短柱进行轴心受压实验研究,初步明确纵筋配筋率的增大对 CuFST 短柱力学性能的提升效果。

1 实验概况

1.1 试件制作

依据《钢筋混凝土结构设计规范》(GB 50936—2014)^[13]和《特殊钢管混凝土构件设计规程》(CECS408D:2015)^[17]进行实验试件设计。为使截面设计参数满足表 1 的要求,柱体采用圆截面薄壁钢管,钢管截面外径 D 为 165 mm、高度 H 为 500 mm、壁厚 t 为 3.0 mm;通过改变纵筋直径得到不同配筋率作为研究变量,所以选用直径 d 分别为 8、10 和 14 mm 的纵向钢筋,对应试件的配筋率 ρ (纵筋横截面面积与混凝土面积之比)分别为 1.52%、2.37% 和 3.42%;箍筋外径为 100 mm,竖向间距为 50 mm,各 R-CuFST 试件设计如图 1 所示。

表 1 圆截面钢管物理参数要求
Table 1 Physical parameter requirements for section steel

物理量	参数指标	设计参数
径厚比	$D/t \leq 177 \times 235 \text{ MPa} / f_{ys} = 117$	$D/t = 55$
长细比	$H/D \leq 4$	$H/D = 3.03$

注: f_{ys} 为钢管屈服强度,MPa。

为避免试验过程的偶然误差和实验结果的离散性,制备 2 根重复试件用于对照,共计准备 8 根短柱试件。为便于分析,对各类短柱试件命名编号。

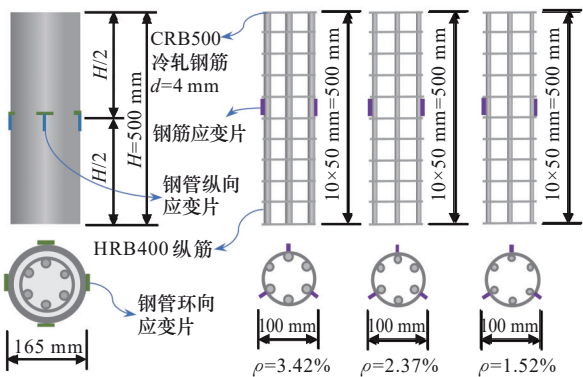


图 1 R-CuFST 试件设计示意图
Fig. 1 Design diagram of R-CuFST

CuFST 命名规则为试件种类+钢管壁厚的整数部分,R-CuFST 命名规则为试件种类+纵筋直径,如 R-CuFST8 表示内配 8 mm 直径钢筋的配筋钢管超 高强混凝土短柱,试件设计概况如表 2 所示。

表 2 短柱设计参数			
Table 2 Design parameters of short columns			
试件类型	试件编号	纵筋	配筋率/%
CuFST	CuFST3		0
	R-CuFST8	6Φ8	1.52
R-CuFST	R-CuFST10	6Φ10	2.37
	R-CuFST14	6Φ14	3.42

1.2 材性试验

依据本地钢材市场的供应情况,选用 Q355B 薄 壁有缝(焊接)钢管、HRB400 带肋钢筋和 CRB550 钢筋作为实验用材。依据《金属材料 拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[18]确定 钢材材质参数如表 3 所示,钢材应力-应变发展过程 绘制于图 2。

表 3 钢材的材质参数				
Table 3 Parameters of steels				
钢材类型	t 或 d / mm	f_y /MPa	$\epsilon_y/10^{-6}$	E_s /GPa
Q355B	3.0	362.55	2 149.06	210.10
	8	437.35	2 172.55	205.29
HRB400	10	439.47	2 233.07	206.86
	14	445.40	2 288.62	207.17
	平均值	440.74	2 231.41	206.44
CRB550	4	1 098.20	7 394.00	203.73

注: f_y 为钢材屈服强度, ϵ_y 为屈服应变, E_s 为钢材的弹性模量。

超高强混凝土采用上海可慧新材料公司生产的 超高强混凝土混合料制备,依据《混凝土物理力学性 能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[19]进行混凝 土抗压强度测试,测得边长 100 mm 立方体试块抗压 强度为 103.4 MPa,经尺寸转换后可得 $f_{cu}=98.2$ MPa。

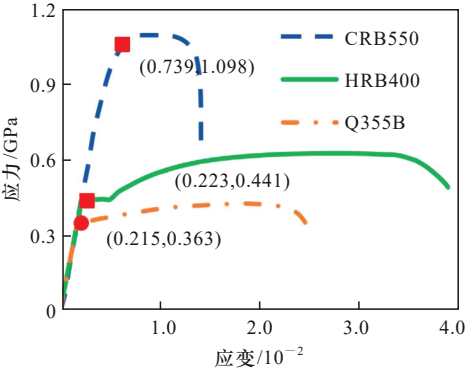


图 2 钢材的材性试验结果
Fig. 2 Stress-strain curves of steels

1.3 测点布置及加载方案

在钢管中心环向线的四等分处粘贴纵向和环 向应变片,在钢筋竖向中心处间隔粘贴纵向应变 片,由外接应变箱采集受压过程中钢材的应变发展 情况,测点的布置概况如图 1 所示。采用 YJW10000 微机控制液压伺服压力机施加竖向载 荷,加载速率为 4 mm/min,加载极限为 30 mm,加 载过程如图 3 所示。

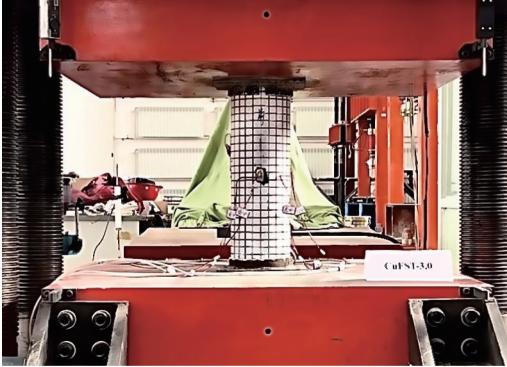


图 3 试验加载照片
Fig. 3 Photograph of loading test

2 实验结果与讨论

2.1 外部的破坏形态

图 4 为受压后各组重复试件的外部破坏形态, 用红线示意出剪切面的发展趋势。比较可知: CuFST 为剪切破坏,随着纵筋配筋率的增加,R- CuFST 钢管上剪切角度数和剪切面长度都逐渐减 小,且纵筋配筋率越大,短柱受压端钢管产生的横 向变形越不明显。

其中,R-CuFST14 的钢管变形主要集中于短 柱中部,钢管表面的剪切破坏特征已经不明显,这 说明纵筋配筋率的增加有效改善了试件的外部破 坏形态。Alifujiang 等学者^[20]发现随钢管壁厚的增 加,钢管混凝土试件外表面的剪切破坏特征趋于减

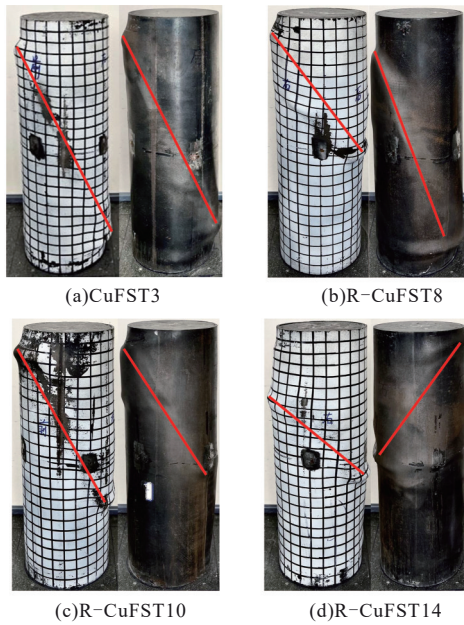


图4 各试件的外部破坏形态

Fig. 4 External failure patterns of specimens

弱。因此,配置钢筋笼的做法与增大钢管壁厚的做法在改善试件外部破坏形态方面发挥着相近的作用。但等含钢率条件下,钢管的造价高于钢筋,且大壁厚钢管在焊接操作方面具有难度,因此,钢筋笼置入核心混凝土的做法具有优越性。

2.2 内部的破坏形态

各短柱内部混凝土的破坏模式如图5所示,所有试件的混凝土均表现出明显的剪切破坏形态,且未配筋试件的混凝土还存在劈裂破坏特征,但配筋试件的混凝土保持很好的整体性。说明仅依靠外部钢管的约束,无法从根本上改善超高强混凝土的高脆性特质,但配置钢筋后,混凝土受压后依旧完整,高脆性问题得到较好的解决。配筋试件中,随着配筋率的增加,剪切面的长度逐渐变短,斜裂缝的数量逐渐减少且更向试件中部集中,这说明纵筋配筋率的增加可以进一步控制超高强混凝土的损伤。

此外,为了观察R-CuFST试件内部钢筋的破坏情况,凿开钢筋外混凝土,各配筋率试件的钢筋变形情况如图6所示。配筋率为1.52%试件的钢筋变形最为严重,呈现“S”型弯曲变形,但当纵筋配筋率增大时,钢筋变形形态转变为“Z”型弯曲,继续增大纵筋配筋率,钢筋呈现“V”型弯曲变形,这反映了不同配筋率下,钢筋笼对核心混凝土横向变形能力的约束作用。由于8 mm纵筋组成的钢筋笼提供的约束力不足以限制混凝土的横向发展,所以纵筋在混凝土的带动下发生明显的“S”型弯曲变形;当纵筋配筋率增大时,钢筋笼对混凝土的横向约束作

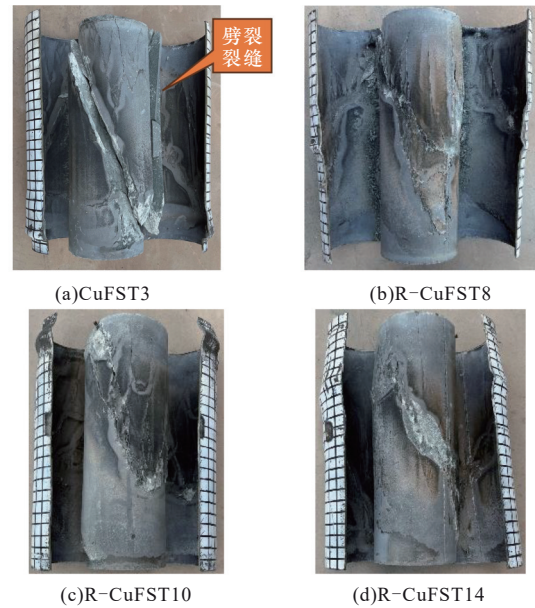


图5 各试件的内部破坏形态

Fig. 5 Internal failure patterns of specimens

用就会增强,虽然外力的提升也加剧了混凝土的横向变形,但纵筋配筋率增大对钢筋笼抵抗变形能力的提升作用快于轴向压力对混凝土横向变形能力的增强作用。因此,增大纵筋配筋率可以有效限制超高强混凝土的横向发展趋势,保证核心混凝土的完整性,进而控制受压短柱的横向变形。

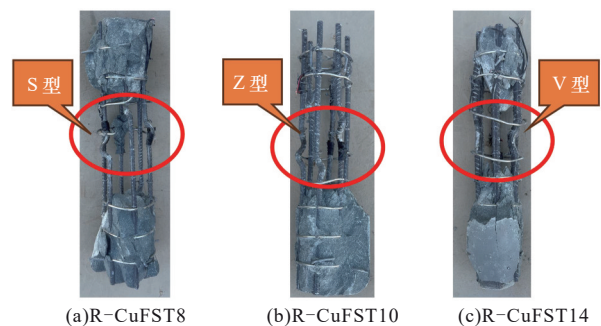


图6 R-CuFST试件内部钢筋的破坏形态

Fig. 6 Failure modes of internal reinforcements of R-CuFST

2.3 试件的整体受力性能

为消除偶然因素的影响,取两重复试件结果的平均值作为各类试件的实验结果,得到各试件的荷载-位移曲线如图7所示。

荷载-位移曲线达到峰值荷载前,随着纵筋配筋率的增加,试件的刚度逐渐增大;达到曲线最高点时,受压短柱的峰值荷载与峰值位移均随纵筋配筋率的增大而增大;峰值荷载后,由于超高强混凝土横向变形小,外部约束作用不明显,所以各试件承载力明显降低;随着混凝土横向变形的增加,外部约束作用逐渐增大,荷载-位移曲线逐渐平稳,但与不配筋试件相比,配筋后短柱荷载-位移曲线的

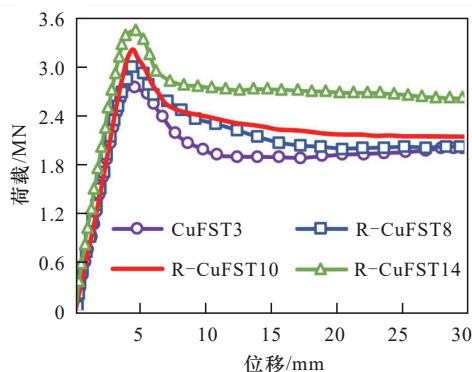


图7 试验荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves of specimens

下降幅度减小,且R-CuFST14短柱的承载力下降到2 650 kN后基本不再降低,这表明配筋改善了受压试件全塑性阶段的变形能力,且配筋率越大,短柱的剩余承载力越大。

2.4 钢材的受力特征

各类短柱受压过程中钢管的荷载-应变曲线如图8所示,曲线非线性变化转折点的计算过程如表4所示。可以发现:受压过程中,CuFST和R-CuFST钢管的纵横向应变发展保持同步,且纵向应变快于横向应变的发展;0.65倍峰值荷载之前,各曲线的上升段均保持线性增长趋势,这表示钢管处于弹性变形状态;荷载值超过0.65倍峰值荷载后,CuFST钢管的应变不再保持线性增长,进入弹塑性变形阶段;与CuFST相比,R-CuFST在0.76倍峰值荷载后开始步入弹塑性变形阶段,且随着纵筋配筋率的增加,该比例也逐渐增大,这表明配筋可以延长钢管变形的弹性阶段。

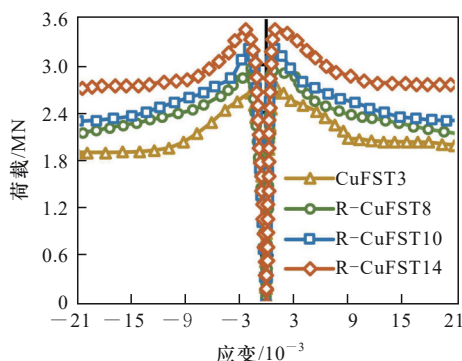


图8 钢管的荷载-应变曲线

Fig. 8 Load-strain curves of steel tubes

三类配筋试件钢筋的荷载-应变曲线如图9所示。发现:配筋率的大小基本不影响纵筋的发展趋势,仅在纵筋应变量超过 5.160×10^{-3} 时,R-CuFST8试件出现了荷载明显下降的情况,但降低幅度不大,这主要得益于钢筋骨架与钢管协同工作的优越性。

表4 荷载-应变曲线非线性变化转折点的计算

Table 4 Calculations of turning points for nonlinear changes in load-strain curves

$\rho/\%$	N_1/kN	$N_{\max}/\text{kN}$	$N_1/N_{\max}$
0	1 868	2 857	0.65
1.52	2 274	2 992	0.76
2.37	2 485	3 208	0.77
3.42	2 752	3 441	0.80

注: N_1 为荷载-应变曲线发生非线性变化转折点的荷载值, $N_{\max}$ 为荷载-应变曲线最高点的荷载值。

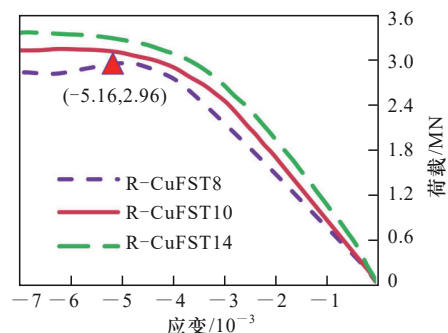


图9 钢筋的荷载-应变曲线

Fig. 9 Load-strain curves of reinforced bars

2.5 延性指标计算

轴压短柱的延性多采用延性系数 μ 衡量, μ 的计算通常采用位移法或屈服能量法^[20,21]。

位移法:荷载-位移曲线上,受压短柱峰值位移与其屈服位移的比值。

$$\mu_{\delta y} = \frac{\delta_a}{\delta_y} \quad (1)$$

式中, $\mu_{\delta y}$ 为位移法计算的延性系数, δ_a 为受压短柱峰值点处的位移, δ_y 为受压短柱屈服点处的位移。

屈服能量法:受压短柱在荷载-位移曲线峰值点和屈服点对应的能量值之比。

$$\mu_{ey} = \frac{E_a}{E_y} \quad (2)$$

式中, μ_{ey} 为屈服能量法计算的延性系数, E_a 为 δ_a 对应的能量值, E_y 为 δ_y 对应的能量值,能量值可由荷载-位移曲线上对应点的包络面积求得。

所以,延性系数的计算关键在于确定屈服位移和屈服荷载。由图8可知,钢管在短柱受压过程中处于复杂的平面应力状态,这有异于材料拉伸实验时钢材的单轴受拉状态。因此,应依据适用于复杂应力计算的Mises屈服准则式(3)确定钢管的实际屈服状态。

$$\sqrt{\sigma_{sh}^2 - \sigma_{sh}\sigma_{sv} + \sigma_{sv}^2} = f_c \quad (3)$$

式中, σ_{sh} 为钢管的横向应力, σ_{sv} 为钢管的纵向应力; f_c 为有效应力。

若钢管屈服前始终处于线弹性工作状态,依据胡克定律可得:

$$\begin{cases} \sigma_{sh} = \epsilon_{sh} E_s, \\ \sigma_{sv} = \epsilon_{sv} E_s. \end{cases} \quad (4)$$

式中, ϵ_{sh} 为 σ_{sh} 对应的实测应变值, ϵ_{sv} 为 σ_{sv} 对应的实

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

式中, ν_s 为钢材的泊松比,可取 0.3; ϵ_e 为 f_e 对应的有效应变值。

将图 8 上每个数据点的 ϵ_{sh} 和 ϵ_{sv} 代入式(6)便可计算出每个数据点对应的有效应变值 ϵ_e , 将 ϵ_e 与拉伸实验所得的屈服应变 ϵ_y 进行校准,便可得到对应

测应变值。

依据弹性本构方程,式(4)可以表示为:

$$\begin{cases} \sigma_{sh} \\ \sigma_{sv} \end{cases} = \frac{E_s}{1 - \nu_s^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu_s \\ \nu_s & 1 \end{bmatrix} \begin{cases} \epsilon_{sh} \\ \epsilon_{sv} \end{cases}. \quad (5)$$

将式(5)代入式(3)可得:

的钢管屈服荷载 N_y , 由 N_y 在荷载-位移曲线上获得 δ_y 。

计算延性所需的各关键参数如表 5 所示。两种计算方法所得延性系数随纵筋配筋率的变化趋势分别绘制于图 10 和图 11 中。

表 5 试件延性性能计算的关键参数

Table 5 Parameters for ductility performance calculating of specimens

试件类型	δ_y/mm	δ_a/mm	N_y/kN	E_a/J	E_y/J	$\mu_{\delta y}$	μ_{ey}
CuFST3	3.68	3.98	2 725	5 348	5 164	1.08	1.04
R-CuFST8	3.79	4.29	2 793	6 014	5 675	1.13	1.06
R-CuFST10	3.69	4.43	2 904	6 227	5 251	1.20	1.19
R-CuFST14	3.32	4.63	3 112	7 178	5 448	1.39	1.32

注: N_y 为各类试件的屈服荷载。

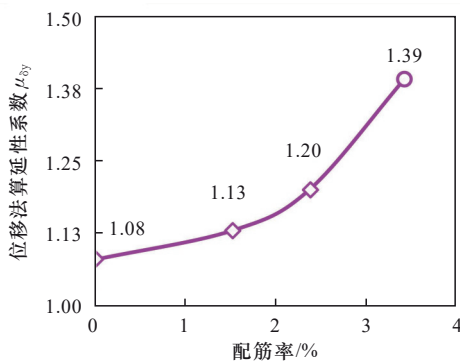


图 10 位移法计算延性系数

Fig. 10 Calculation of ductility index by displacement method

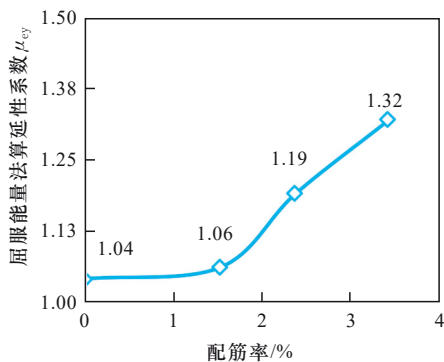


图 11 屈服能量法计算延性系数

Fig. 11 Calculation of ductility index by yield energy method

依据图 10 和 11 可知:位移法和屈服能量法计算的延性系数均随配筋率的增加而变大。与 CuFST3 试件相比,纵筋配筋率为 1.52%、2.37%

和 3.42% 的 R-CuFST 试件的位移延性系数分别增长了 4.63%、11.11% 和 28.70%; 各配筋试件的能量法延性系数按配筋率的增加分别增长了 1.92%、14.42% 和 26.92%。因此,配筋对短柱轴压作用下延性的改善作用随着配筋率的增加而增强。

两种分析方法得出的结果相近,均能反应配筋率对试件延性的影响规律,但屈服能量法计算延性系数时涉及到不规则图形的积分求解,所以,更推荐计算简单的位移法求解延性系数。

2.6 配筋对承载力提升量的影响

为明确增大配筋率对承载力提升效果的影响,在此定义参数 ϕ , 表示与不配筋试件相比,配筋试件单位配筋率对承载力提升量的贡献值。同时定义 $\phi(n)$, 明确配筋率的提升量对承载力提升效果的影响,计算方法如下:

$$\phi = \frac{N_{\max(n)} - N_{\max(0)}}{\rho_{(n)}}. \quad (7)$$

$$\phi(n) = \frac{N_{\max(n+1)} - N_{\max(n)}}{\rho_{(n+1)} - \rho_{(n)}}. \quad (8)$$

式中, $N_{\max(n)}$ 中的 n 取值 0~3, 分别代表 CuFST3、R-CuFST8、R-CuFST10 和 R-CuFST14 的最大承载力, $\rho_{(n)}$ 代表与 $N_{\max(n)}$ 对应的纵筋配筋率。

计算所得 ϕ 和 $\phi(n)$ 值记录于表 6, 其对应各 R-CuFST 试件的分布如图 12 所示。发现: ϕ 值随配筋

率的增加持续增大,表明与不配筋试件相比,配筋率越大,单位配筋率对R-CuFST承载力提升量的贡献越大。但 $\psi(n)$ 呈现出“先增后减”的变化趋势,R-CuFST14试件相比于R-CuFST10试件单位配筋率的承载力提升量(221 kN)低于R-CuFST10试件相比于R-CuFST8试件单位配筋率的承载力提升量(254 kN)。这是因为在配筋率较小时($\rho=1.52\%$),钢材所提供的约束效果不能完全限制混凝土的横向发展,造成约束作用“供不应求”的现象;因此,增大配筋率后($\rho=2.37\%$),混凝土受到的约束作用增强,短柱承载力提高,试件单位配筋率的承载力贡献量就增大;继续增大配筋率后($\rho=3.42\%$),钢材对混凝土的约束作用超过了限制混凝土变形的需求,产生约束作用“供大于求”的结果,所以单位配筋率对承载力提升量的贡献“不升反降”,这表明较高配筋率下,钢筋未完全发挥作用。因此,配筋的效果虽然随着配筋率的增加而增加,但结构设计时若要充分发挥纵筋的作用,则建议纵筋配筋率不宜超过3.42%。

2.7 套箍增强作用

由于钢管混凝土短柱普遍存在承载力高于各组成部分名义强度之和(1+1>2)的效应,为此,定义强度指标系数 I_s 衡量此增强效果,计算方法如式(9)所示:

$$I_s = \frac{N_{\max}}{A_{st}f_{ys} + A_c f_c + A_{sb} f_{yb}} \quad (9)$$

表 6 配筋对承载力提升效果计算的关键参数

Table 6 Parameters for effect calculating of reinforcement on improving bearing capacity

试件类型	$N_{\max}/\text{kN}$	A_{st}/mm^2	A_c/mm^2	A_{sb}/mm^2	ψ/kN	$\psi(n)/\text{kN}$	I_s
CuFST3	2 857	1 527	19 856	0	—	—	1.59
R-CuFST8	2 992	1 527	19 554	302	89	89	1.57
R-CuFST10	3 208	1 527	19 385	471	148	254	1.63
R-CuFST14	3 441	1 527	18 932	924	171	221	1.60

注: $N_{\max}$ 为各试件的最大承载力, ψ 为单位配筋率对试件承载力的提升量, $\psi(n)$ 为相邻配筋率试件的单位配筋率对承载力的提升量, I_s 为强度指标系数。

2.8 配筋对不同类型混凝土受力性能的影响

为使配筋对R-CuFST短柱轴压承载力的显著提升效果可视化,将本试验结果与配筋率对R-CFST短柱和配筋钢管再生混凝土短柱(Reinforced and Recycled Aggregate Concrete Filled Steel Tube,简称R-RACFST)承载力的影响结果做对比。

选取相近或相同含钢率的R-RACFST和R-CFST试件^[22-23],将各类试件的承载力、承载力提高量、配筋率及单位配筋率对承载力提高量的影响结

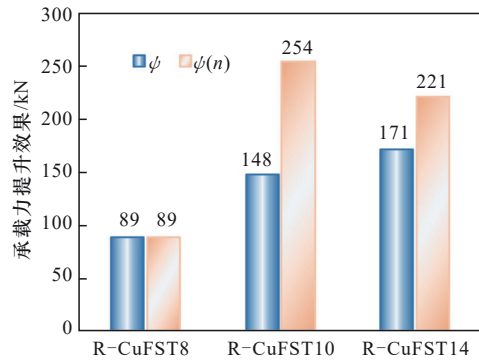


图 12 配筋对承载力的提升效果

Fig. 12 Effects of reinforcement on improving bearing capacity

式中, f_{ys} 和 f_{yb} 分别为钢管和纵筋的屈服强度; A_{st} 、 A_c 、 A_{sb} 分别为钢管、混凝土和纵筋的截面面积, f_c 为混凝土的轴心抗压强度,参考相近实验的轴心抗压强度数据,取64 MPa^[11]。

各试件的 I_s 值如表6所示,并绘制于图13中。由图13可知:与CuFST3试件相比,R-CuFST8试件的强度指标“不升反降”,这可能是纵筋的约束作用不足引起的,与图9中8 mm纵筋荷载-位移曲线的降低现象相呼应,且纵筋的加入影响了内部混凝土的均质分布,所以增强效果反而减小了;增大纵筋配筋率后,钢筋笼对核心混凝土的约束作用得到加强,进而提高了短柱的轴压承载力,因而计算的约束效应系数显著提高;继续增大钢筋直径,由于材料的性能不能完全发挥,所以约束效应系数有所减小。

果依次列于表7和表8中,R-CuFST试件的上述参数列于表9中。

表 7 配筋对R-RACFST承载力的提升量

Table 7 Improvements of reinforcement on bearing capacity of R-RACFST

试件名称	$N_{\max}/\text{kN}$	$\Delta N_{\max}/\text{kN}$	$\rho/\%$	ψ/kN
R-RCF30	1 715	—	0	—
R-RCF30-8	1 966	251	1.52	165
R-RCF30-10	2 152	437	2.37	184
R-RCF30-14	2 405	690	3.42	202

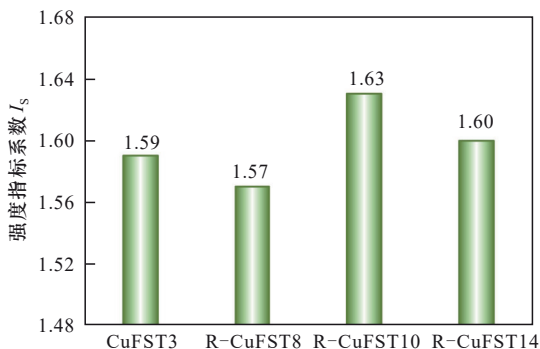


图 13 配筋对约束效应的影响

Fig. 13 Influence of reinforcement on constraint effect

表 8 配筋对 R-CFST 承载力的提升量

Table 8 Improvements of reinforcement on bearing capacity of R-CFST

试件名称	N_{max}/kN	$\Delta N_{max}/kN$	$\rho/\%$	ψ/kN
CF30	2 200	—	0	—
RF30-15	2 529	329	1.5	219
RF30-25	2 762	562	2.5	225
RF30-35	2 943	743	3.5	212

表 9 配筋对 R-CuFST 承载力的提升量

Table 9 Improvements of reinforcement on bearing capacity of R-CuFST

试件名称	N_{max}/kN	$\Delta N_{max}/kN$	$\rho/\%$	ψ/kN
CuFST3	2 857	—	0	—
R-CuFST8	2 992	135	1.52	89
R-CuFST10	3 208	351	2.37	148
R-CuFST14	3 441	383	3.42	171

图 14 为各类试件单位配筋率的承载力提高量随纵筋配筋率的变化,相比于 R-RACFST 和 R-CFST 短柱,R-CuFST 短柱的 $\psi(n)$ 最大,说明配筋率的增大对 R-CuFST 短柱单位配筋率的承载力提升效果影响最明显。由于 $\psi(n)$ 和 $\Delta\rho$ 不成正比,且曲线斜率逐渐减小,所以为充分发挥钢材的作用,应规定配筋率的上限值,结合上文分析,可确定配筋率不宜超过 3.42%。

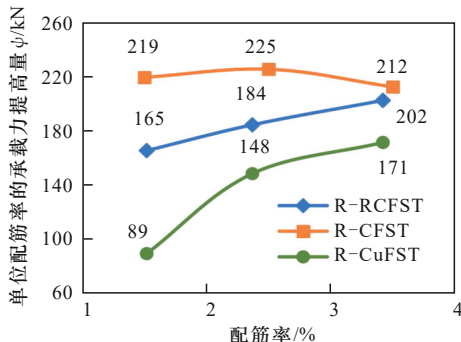


图 14 配筋率与混凝土类型对承载力的耦合影响

Fig. 14 Coupling effects of reinforcement ratio and concrete type on bearing capacity

3 承载力预测模型

由 2.1 节讨论可知,配筋等同于增加钢管壁厚,可以增强对核心混凝土的约束作用。因此,可以将纵筋等效为内置于核心超高强混凝土中的虚拟钢管,修正适用于 CFST 的套箍系数^[13,16],得到适用于 R-CuFST 的套箍系数 θ :

$$\theta = \frac{A_{st}f_{ys} + A_{sb}f_{yb}}{A_c f_c} \quad (10)$$

陈博文等学者^[11]提出高强材料组合构件的应力-应变计算公式:

$$\sigma_{sc} = f_{sc}^y \{ [1 - \beta_\theta + \beta_\theta \exp[(\epsilon - \epsilon_{sc}^y)/m]] \} \quad (11)$$

式中, f_{sc}^y 为组合屈服强度, β_θ 为与套箍系数有关的计算值, ϵ 为任意点的应变值, ϵ_{sc}^y 为峰值点处的应变值, m 为与混凝土强度和套箍系数相关的计算值。

在最大承载力处: $\epsilon = \epsilon_{sc}^y$, 所以式(11)可简化为:

$$\sigma_{sc} = f_{sc}^y \{ [1 - \beta_\theta] \} \quad (12)$$

其中,组合屈服强度为:

$$f_{sc}^y = (1.212 + B\theta + C\theta^2)f_c \quad (13)$$

式中,

$$B = 0.152 \, 1 f_{ys}/f_{y,235} + 0.842 \, 1, \\ C = 0.091 \, 5 f_c/f_{c,C30} + 0.027 \, 2 \quad (14)$$

式中, $f_{y,235}$ 为 Q235 钢材的屈服强度, 235 MPa, $f_{c,C30}$ 为 C30 混凝土的轴心抗压强度, 20.318 MPa。

与套箍系数相关的 β_θ 计算方法如下:

$$\beta_\theta = -0.038 \, 6 \ln \theta - 0.042 \, 4 \quad (15)$$

代入修正后的套箍系数 θ , 采用上述计算公式可得适用于计算 R-CuFST 短柱轴压承载力的公式如下:

$$N = A \sigma_{sc} \quad (16)$$

式中, A 为截面总面积。

通过式(16)计算得到的理论值结果如表 10 所示。发现,预测承载力均低于实际承载力,所以修正后的公式对钢管超高强混凝土短柱轴压承载力的预测结果偏保守。

4 结论

本文共设计 8 根实验试件,包括 3 组不同配筋率的 R-CuFST 短柱和 1 组 CuFST 短柱,通过比较各类试件的破坏模式、单位配筋率对承载力提升量的贡献、延性性能和约束效应等力学分析指标,得出如下结论:

1) 随着纵筋配筋率的提升,短柱受压时钢管表面剪切破坏特征逐渐不明显,内部核心混凝土的完整性逐渐增大,短柱的剩余承载力也逐渐变高,这

表 10 实验值与理论值计算结果对比
Table 10 Comparison of experimental and theoretical calculation results

试件名称	θ	β_θ	f_{sc}^y/MPa	σ_{sc}/MPa	$N_{\max}/\text{kN}$	N_t/kN	$N_{\max}/N_t$
CuFST3	0.435 8	−0.010 34	103.998	105.073	2 857	2 247	1.27
R-CuFST8	0.549 6	−0.019 30	109.746	111.864	2 992	2 392	1.25
R-CuFST10	0.616 7	−0.023 74	112.913	115.594	3 208	2 472	1.30
R-CuFST14	0.800 3	−0.033 80	120.724	124.805	3 441	2 669	1.29

注： N_t 为采用公式(16)计算的理论值。

说明纵筋的加入显著改善了超高强混凝土脆性大的问题,等同于增大钢管壁厚以增强对核心区混凝土的约束作用。因此,配置钢筋笼可以替代增大壁厚的做法,解决了厚壁钢管生产加工困难的问题。

2)相邻配筋率试件单位配筋率的提升量对承载力提升量的贡献以及配筋对核心混凝土的约束作用均随着配筋率的增大呈现“先增后减”的变化趋势,这说明配筋的效果并不完全随着配筋率的增

加而增大,结合实验现象和力学性能的分析,推荐配筋率的取值不宜超过3.42%。

3)与配筋钢管混凝土短柱和配筋钢管再生混凝土短柱相比,增大配筋率对配筋钢管超高强混凝土短柱力学性能的提升效果最显著。

4)考虑钢筋的作用,修正了超高强材料组合短柱承载力计算模型,对实验短柱承载力进行了预测,通过对比理论值与实验值,发现计算结果偏保守。

参考文献:

[1] Wei J G, Han J P, Luo X, et al. Axial compression performance of ultra-high-strength concrete filled steel tubular lattice short columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 108:571.

[2] Hirata N, Huang X C, Obara T, et al. Axial behavior of square steel-tubed ultra-high-strength reinforced concrete columns[J]. Engineering Structures, 2023, 294: 116762.

[3] Li L, Lai Z C, Chen B C. Ultra-high strength concrete filled steel tube members: Classification, experimental database, and design[J]. Engineering Structures, 2024, 300: 117210.

[4] 武麒阳, 杜红秀, 王聪聪. 自密实混凝土钢管柱超声检测内部缺陷研究[J]. 太原理工大学学报, 2023, 54(6): 1144-1152

[5] Kim C S, Park H G, Chung K S, et al. Eccentric axial load capacity of high-strength steel-concrete composite columns of various sectional shapes[J]. Journal of Structural Engineering, 2014, 140(4): 4013091.

[6] 吴炎海, 林震宇. 钢管活性粉末混凝土轴压短柱受力性能试验研究[J]. 中国公路学报, 2005(1): 61-66.

[7] 林震宇, 吴炎海, 沈祖炎. 圆钢管活性粉末混凝土轴压力学性能研究[J]. 建筑结构学报, 2005(4): 52-57.

[8] 曾志伟, 黄永辉, 陈碧静, 等. 高强钢管高强混凝土短柱轴压承载能力试验研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(18): 72-77.

[9] Shi G, Zhu X, Ban H Y. Material properties and partial factors for resistance of high-strength steels in China[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 121: 65-79.

[10] Thai H T, Thai S, Ngo T, et al. Reliability considerations of modern design codes for CFST columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 177: 106482

[11] 陈博文, 李幅昌, 杨志坚, 等. 高强方钢管高强混凝土短柱轴压性能[J]. 工业建筑, 2017, 47(3): 151-156.

[12] 邱增美, 李幅昌, 杨志坚. 高强方钢管高强混凝土柱的抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(S2): 295-303.

[13] GB 50936—2014 钢管混凝土结构技术规范[S].

[14] 陈宝春, 李莉, 罗霞, 等. 超高强钢管混凝土研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(5): 21.

[15] 蒲心诚, 王勇威, 蒲怀京, 等. 千米承压材料与制取途径[J]. 土木工程学报, 2004(7): 35-40, 58.

[16] Alifurjiang X, Wang Z B, Yang B. Optimum reinforcement ratio of axially loaded reinforced concrete-filled square steel tube column[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2023, 203: 107805.

[17] CECS408D:2015 特殊钢管混凝土构件设计规程[S].

[18] GB/T 228.1—2021 金属材料拉伸试验第1部分: 室温试验方法[S].

[19] GB/T 50081—2019 混凝土物理力学性能试验方法标准[S].

[20] Alifurjiang X, Liu X R, Akira H. Study of the concrete in reinforced concrete-filled steel tube column under axial loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 170: 106111.

[21] 王洋. 钢管混凝土短柱轴压性能研究[J]. 建筑机械, 2023(12): 136-141.

[22] 阿依德尼古丽·都曼. 基于试验和数值模拟的配筋钢管再生混凝土短柱纵筋的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2022.

[23] 吐迪买买提·巴克. 混凝土强度对配筋钢管混凝土柱受力性能的影响机理[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2021.