

引文格式:高亮,王朋,张鹏.带T形钢翼缘的核心钢管混凝土组合柱轴压比限值研究[J].建筑科学与工程学报,2024,41(3):76-85.
GAO Liang, WANG Peng, ZHANG Peng. Study on axial compression ratio limit of concrete-filled steel tubular composite column with T-shaped steel flange[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(3): 76-85.

DOI:10.19815/j.jace.2022.05049

带 T 形钢翼缘的核心钢管混凝土组合柱轴压比 限值研究

高亮¹, 王朋², 张鹏²

(1. 山东建筑大学 管理工程学院, 山东 济南 250101; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:为了充分发挥带 T 形钢翼缘的核心钢管混凝土组合柱(T-CFST 柱)的变形性能,保证柱在地震作用下能满足延性需求,通过理论推导和数值模拟,对 T-CFST 柱的延性和轴压比限值进行研究。基于大小偏心受压界限破坏建立了 T-CFST 柱的标准轴压比和设计轴压比计算公式,同时基于 ABAQUS 软件建立了 T-CFST 柱的精细化有限元模型,在验证有限元模型准确性的基础上,研究了高轴压比下不同影响因素对组合柱延性的影响,建议了不同含钢率、型钢强度、混凝土强度下组合柱的设计轴压比限值。结果表明:T-CFST 柱延性随混凝土强度降低、截面含钢率降低、型钢强度提高、体积配箍率提高而提高;即使在较大轴压比时,柱的延性依然较好,T-CFST 柱的轴压比限值在计算的基础上有所提高。

关键词:组合柱;延性性能;数值模拟;理论计算;轴压比限值

中图分类号:TU398

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2024)03-0076-10

Study on axial compression ratio limit of concrete-filled steel tubular composite column with T-shaped steel flange

GAO Liang¹, WANG Peng², ZHANG Peng²

(1. School of Management Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, Shandong, China;

2. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: In order to fully utilize the deformation performance of concrete-filled steel tubular composite column with T-shaped steel flanges (T-CFST column) and ensure that the columns can meet the ductility requirements under seismic action, the ductility and axial compression ratio limits of the T-CFST columns were investigated by theoretical derivation and numerical simulation. Based on the critical failure state between large eccentricity failure and small eccentricity failure, the formulas for calculating standard axial compression ratio and design axial compression ratio of T-CFST column was proposed. Based on the ABAQUS software, a refined finite element model of the T-CFST column was established. After verifying the accuracy of the finite element model, the influence of various influencing factors on the ductility of composite columns under high axial compression ratio was studied. The design axial compression ratio limits

of composite columns under various steel ratios, steel strength and concrete strength were suggested. The results show that the ductility of T-CFST column increases with the decrease of concrete strength, the decrease of section steel ratio, the increase of steel strength and the increase of volume hoop ratio. Even at a large axial compression ratio, the ductility of the column is still good, and the limit of the axial compression ratio of the T-CFST column is allowed to be increased on the basis of calculation.

Key words: composite column; ductility performance; numerical simulation; theoretical calculation; axial compression ratio limit

Author resume: GAO Liang(1985-), male, PhD, senior engineer, E-mail: 627341793@qq.com.

0 引言

轴压比对柱的延性有重要影响,为保证框架柱能够满足良好延性的需求,中国《混凝土结构设计规范》^[1]、《组合结构设计规范》^[2]、《钢骨混凝土结构技术规程》^[3]以及《建筑抗震设计规范》^[4]均给出了相应的轴压比限值。钢管混凝土柱(CFST柱)承载力高、延性好,但内侧钢管混凝土与外侧钢筋混凝土力学性能差异较大,协调变形能力差^[5-8],为改善CFST柱钢管外侧混凝土的力学性能,不同学者给出了一些解决方案:徐亚丰等^[9]提出采用外包角钢约束钢管外侧混凝土,对CFST柱进行加固;代岩等^[10]在此基础上,从理论角度提出使用碳纤维(CFRP)和角钢复合加固的形式;杨勇等^[11]使用预应力钢带在CFST柱表面对外围钢筋混凝土加固;Cai等^[12]使用工程水泥基复合材料(ECC)替换钢管外普通混凝土。上述方案均在一定程度上改善了CFST柱的受力性能,但也存在施工复杂、造价高等问题,且部分方案对施工工艺、设备要求较高,不利于在工程中广泛推广使用。

结合钢管混凝土叠合柱和十字形型钢混凝土柱的优点,提出了一种带T形钢翼缘的核心钢管混凝土组合柱(T-CFST柱),即在CFST柱的外侧加入带T形钢翼缘与内部钢管相连,如图1所示,并进行了轴压^[13]和抗震^[14]试验,结果表明:T-CFST柱的延性及耗能能力普遍高于内置十字型组合柱,并且改善了柱的轴压性能。该组合柱不但可以减小钢管内外混凝土的力学差异,又兼具普通型钢混凝土柱和CFST柱的优点,同时翼缘可兼具纵筋,减少钢筋绑扎工作量。

由于T-CFST柱型钢截面形式的影响,构件变形能力得以提升,其允许的限值应有所提高,若沿用规范给出的轴压比限值,将无法充分发挥构件的变形性能,影响T-CFST柱的推广和应用。因此,本

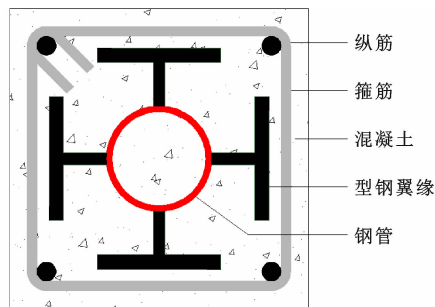


图1 T-CFST柱截面形式

Fig.1 Cross section of T-CFST column

文采用理论推导和数值模拟方式对T-CFST柱的轴压比限值进行研究。

1 理论分析

1.1 轴压比限值的定义

轴压比有3种,即设计轴压比、标准轴压比和试验轴压比,3种轴压比间的关系可通过理论推导得到。基于《组合结构设计规范》^[2]中型钢混凝土柱(SRC柱)轴压比的定义,可得到T-CFST柱的轴压比计算公式。

设计轴压比 n :

$$n = \frac{N}{f_c A_c + (k' - 1) f_{ck} A_{c, in} + f_a A_a} \quad (1)$$

标准轴压比 n_k :

$$n_k = \frac{N_k}{f_{ck} A_c + (k' - 1) f_{ck} A_{c, in} + f_{ak} A_a} \quad (2)$$

式中: N 、 N_k 分别为SRC柱轴压力设计值、标准值; f_c 、 f_{ck} 分别为混凝土轴心抗压强度设计值、标准值; f_a 、 f_{ak} 分别为型钢抗压强度设计值、标准值; A_c 为混凝土截面的总面积; $A_{c, in}$ 为型钢约束混凝土截面面积; A_a 为型钢截面总面积; k' 为简化后的型钢约束混凝土系数,其中型钢约束混凝土的抗压强度采用Mander模型计算。

型钢约束混凝土强度提高系数示意图如图2所示。为简化计算,本文取型钢约束混凝土系数 $k' =$

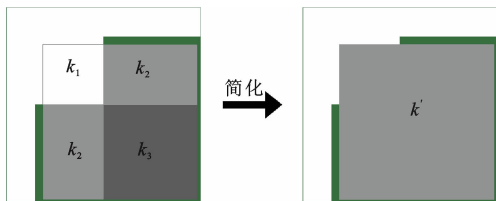


图2 约束混凝土提高系数

Fig. 2 Improvement coefficient of restrained concrete

$\frac{k_1 + 2k_2 + k_3}{4}$, k_1, k_2, k_3 分别为型钢无约束、弱约束、强约束区混凝土强度提高系数,如式(3)~(5)所示。

$$k_1 = 1 \quad (3)$$

$$k_2 = 1 + 0.3 \sqrt{\frac{f_2}{3f_{co}}} \quad (4)$$

$$k_3 = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_1}{f_{co}}} - 2 \frac{f_1}{f_{co}} - 1.254 + [2.554 + 5.55 \frac{f_1}{f_{co}} - 7.5(\frac{f_1}{f_{co}})^2 - 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_1}{f_{co}}} + 2 \frac{f_1}{f_{co}}] \sqrt{\frac{f_2}{f_{co}} - \frac{f_1}{f_{co}}} / (3 - \frac{f_1}{f_{co}}) \quad (5)$$

另有

$$\gamma = f_{ck} / f_c \quad (6)$$

$$\gamma_s = f_{ak} / f_a \quad (7)$$

$$\frac{N}{N_k} = \frac{\gamma_G N_{GK} + \gamma_Q N_{QK}}{N_{GK} + N_{QK}} \approx 1.35 \quad (8)$$

式中: f_1, f_2 为不同方向的有效约束应力; f_{co} 为无约束混凝土的轴心抗压强度^[14]; γ_c, γ_s 分别为混凝土和型钢材料分项系数; γ_G 为永久作用的分项系数, $\gamma_G = 1.3$; γ_Q 为可变作用分项系数, $\gamma_Q = 1.5$; N_{GK} 和 N_{QK} 分别为永久作用和可变作用标准值。

整理得设计轴压比与标准轴压比的关系为

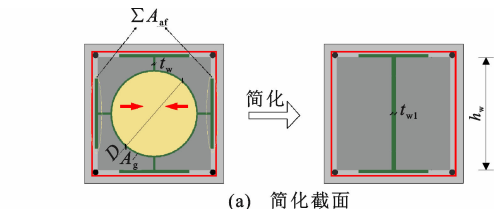
$$\frac{n}{n_k} = \frac{f_{ck} A_c + (k' - 1) f_{ck} A_{c,in} + f_{ak} A_a N}{f_c A_c + (k' - 1) f_c A_{c,in} + f_a A_a N_k} \quad (9)$$

1.2 基本假设

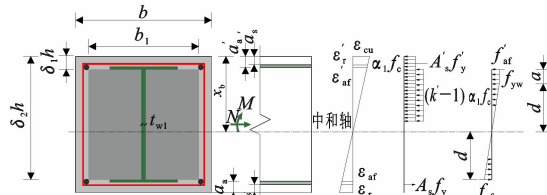
- (1) 型钢和混凝土变形协调,符合平截面假定。
- (2) 不考虑混凝土的抗拉强度。
- (3) 钢材均为理想弹塑性材料。
- (4) 将截面分为混凝土和型钢部分,分别简化为如图3所示的截面形式。

(5) 《组合结构设计规范》^[2] 中对十字形截面偏心受压柱转换为工字形截面的等效腹板厚度公式为

$$t'_w = t_w + \frac{0.5 \sum A_{af}}{h_w}, \text{ 其中 } t'_w \text{ 为型钢十字形截面等}$$



(a) 简化截面



(b) 应力、应变分布状态

图3 轴压比限值计算简图

Fig. 3 Calculation diagram of axial compression ratio limit

效后腹板厚度, t_w 为型钢十字形截面腹板厚度, A_{af} 为型钢侧翼缘面积, h_w 为型钢上下翼缘间腹板高度, 本文将侧翼缘和钢管转化为中间腹板, 则改进规范的转换公式为

$$t_{w1} = \frac{t_w (h_w - D) + 0.5 \sum A_{af} + 0.5 A_g}{h_w} \quad (10)$$

式中: t_{w1} 为 T-CFST 柱截面等效后腹板厚度; t_w 为型钢截面腹板厚度; h_w 为截面等效后型钢上下翼缘间腹板高度; D 为钢管外侧直径; A_{af} 为型钢侧翼缘面积; A_g 为钢管面积。

1.3 理论计算公式

构件发生界限破坏时截面应力分布如图3(b)所示, 其中 x_b 为界限受压区高度, d 为界限破坏时型钢弹性段高度, 其计算公式分别为

$$d = \frac{f_{yw}}{\epsilon_{cu} E_s} x_b \quad (11)$$

$$x_b = \frac{1}{1 + f_{af} / (\epsilon_{cu} E_s)} (h - a_a) \quad (12)$$

由图3(b)可知: 由于截面对称配筋, 所以 $f_y A_s = f'_y A'_s$, $f_{af} A_{af} = f'_{af} A'_{af}$, $a_a = a'_a$, $a_s = a'_s$, 其中 f_y, A_s 分别为受拉钢筋屈服强度和截面面积; f'_y, A'_s 分别为受压钢筋屈服强度和截面面积, f_{af}, A_{af} 分别为受拉区型钢翼缘屈服强度和截面面积, f'_{af}, A'_{af} 分别为受压区型钢翼缘屈服强度和截面面积, a_a, a'_a 分别为受拉、压型钢翼缘中心至截面边缘的距离, a_s, a'_s 分别为受拉、压钢筋中心至截面边缘的距离; ϵ_{cu}, E_s 分别为混凝土极限压应变和钢材弹性模量; b, h 分别为试件截面宽度和高度; b_1 为型钢下翼缘之间的高度; δ_1, δ_2 分别为型钢腹板上边缘、型钢腹板下边缘与截面高度 h 的比值。

受拉区和受压区纵筋和型钢翼缘合力抵消, 则

轴压力 N_k 的表达式为

$$N_k=N_{ck}+N_{ak}\tag{13}$$

式中: N_{ck} 为受压区混凝土承担的轴压力; N_{ak} 为受压区型钢腹板承担的轴压力。

考虑型钢约束作用,则受压区混凝土承担的轴压力 N_{ck} 为

$$N_{ck}=\alpha_1f_cb\beta_1x_b+(k'-1)\alpha_1f_cb_1(\beta_1x_b-\delta_1h)\tag{14}$$

式中: α_1 、 β_1 为系数,按规范^[1]要求取值。

将式(12)代入式(14)可得

$$N_{ck}=\alpha_1f_cb\beta_1\frac{\epsilon_{cu}E_s(h-a_n)}{\epsilon_{cu}E_s+f_{af}}+(k'-1)\alpha_1f_cb_1\left[\beta_1\frac{\epsilon_{cu}E_s(h-a_n)}{\epsilon_{cu}E_s+f_{af}}-\delta_1h\right]\tag{15}$$

由型钢的应力分布情况可知,受压区型钢腹板承担的轴压力 N_{ak} 为

$$N_{ak}=f_{ak}t_{w1}a\tag{16}$$

式中: f_{ak} 为型钢腹板屈服强度; a 为型钢腹板屈服高度, $a=x_b-d$ 。

将式(11)和式(12)代入式(16)可得

$$N_{ak}=f_{ak}t_{w1}\left(1-\frac{f_{yw}}{\epsilon_{cu}E_s}\right)\frac{\epsilon_{cu}E_s(h-a_n)}{\epsilon_{cu}E_s+f_{af}}\tag{17}$$

将式(15)和式(17)代入式(2),可得 T-CFST 柱的轴压比限值标准值为

$$n_k=\{\alpha_1f_cb\beta_1\epsilon_{cu}E_s(h-a_n)/(\epsilon_{cu}E_s+f_{af})+(k'-1)\alpha_1f_cb_1[\beta_1\epsilon_{cu}E_s(h-a_n)/(\epsilon_{cu}E_s+f_{af})-\delta_1h]+f_{ak}t_{w1}[1-f_{yw}/(\epsilon_{cu}E_s)]\epsilon_{cu}E_s(h-a_n)/(\epsilon_{cu}E_s+f_{af})\}/[f_{ck}A_c+(k'-1)f_{ck}A_{c,in}+f_{ak}A_a]\tag{18}$$

表 1 给出了 T-CFST 柱的截面参数,含钢率 α_s 改变时按截面分配比例相应变化,各参数含义如图 4 所示。表 2 给出了 T-CFST 柱含钢率为 4%~10%,截面型钢强度为 235、345 MPa,混凝土强度为 C30~C80 的轴压比限值,可见型钢强度和型钢含

表 1 试件截面参数

Table 1 Section parameters of specimen

序号	$\alpha_s/\%$	B/mm	h/mm	D/mm	t/mm	b_f/mm	t_f/mm	t_w/mm
1	4	400	340	250	2.00	200	5.66	2.00
2	6	400	340	250	3.01	200	8.40	3.69
3	8	400	340	250	4.03	200	11.20	5.33
4	10	400	340	250	5.06	200	14.01	7.26

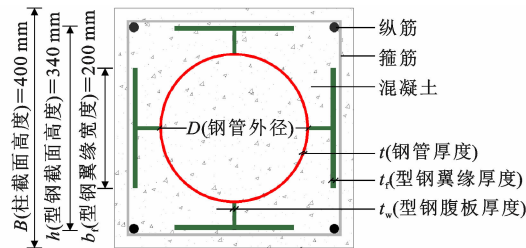


图 4 T-CFST 柱截面

Fig. 4 Cross section of T-CFST column

钢率均对轴压比限值的影响较大。

2 有限元分析

2.1 有限元模型建立

基于 ABAQUS 软件建立 T-CFST 柱有限元模型,如图 5 所示。

(1)材料本构关系

混凝土采用塑性损伤模型模拟,选用 3 种混凝土受压本构,其中钢管内混凝土选用韩林海^[15]所建立的钢管约束混凝土本构模型,钢管外型钢翼缘和箍筋约束的混凝土采用 Zhao 等^[16]提出的基于 Mander 模型修正的钢骨约束混凝土本构模型,保护层混凝土采用规范^[1]中的单轴受压本构模型。混凝土的受拉本构亦采用规范^[1]中的单轴受拉本构模型,混凝土泊松比取 0.2,混凝土弹性模量按规范取值。钢材本构关系采用理想弹塑性模型,钢材的泊松比取 0.3,弹性模量取 206 GPa。

表 2 T-CFST 柱的轴压比限值设计值

Table 2 Design value of axial compression ratio limit of T-CFST column

$\alpha_s/\%$	f_y/MPa	不同混凝土强度等级下的轴压比限值设计值										
		C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
4	235	0.711	0.741	0.768	0.786	0.802	0.801	0.795	0.788	0.781	0.773	0.760
	345	0.540	0.570	0.598	0.617	0.634	0.637	0.637	0.634	0.631	0.627	0.620
6	235	0.631	0.664	0.694	0.715	0.734	0.737	0.736	0.732	0.729	0.724	0.715
	345	0.462	0.492	0.521	0.541	0.560	0.567	0.570	0.571	0.571	0.570	0.566
8	235	0.573	0.606	0.637	0.659	0.679	0.685	0.687	0.687	0.686	0.683	0.677
	345	0.409	0.438	0.466	0.486	0.505	0.514	0.519	0.522	0.524	0.525	0.522
10	235	0.530	0.562	0.593	0.615	0.636	0.644	0.647	0.649	0.650	0.649	0.645
	345	0.370	0.398	0.425	0.445	0.463	0.472	0.478	0.483	0.486	0.488	0.487

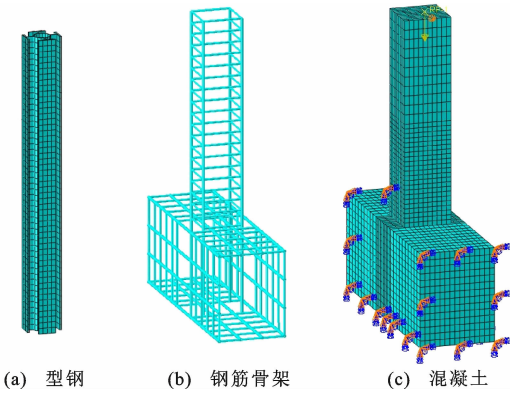


图 5 有限元模型及网格划分

Fig. 5 Finite element model and meshing

(2)单元类型及边界条件

型钢采用壳单元、混凝土采用实体单元、钢筋采用桁架单元模拟。钢筋、型钢同混凝土连接采用嵌入式。模型及网格划分如图 5 所示,根据实际约束边界条件,将底梁固定,并在柱顶加载点处第 1、2 个分析步中分别施加竖向荷载、水平方向往复荷载,水平荷载采用位移控制模式,为简化计算,每级荷载加载一圈。

2.2 数值模拟结果验证

为验证上述模型的有效性,对本课题组已进行的新型型钢混凝土组合柱低周反复荷载试验进行模拟,其截面形式及试件尺寸如图 6、7 所示,截面信息如表 3 所示,钢筋、钢板及钢管的实测强度如表 4 所示^[14]。柱截面尺寸为 250 mm×250 mm,采用 C40

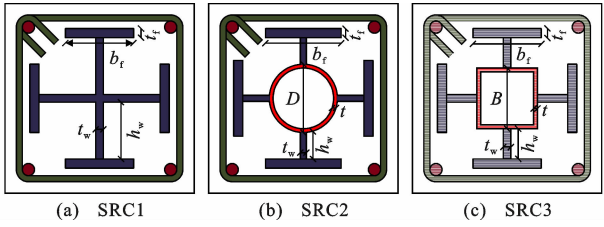


图 6 SRC 柱截面形式

Fig. 6 Cross section of SRC column

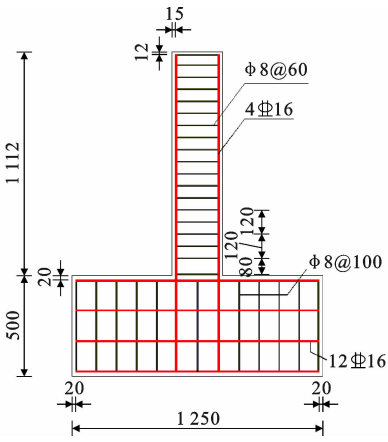


图 7 试件尺寸 (单位:mm)

Fig. 7 Specimen dimensions (unit:mm)

商品混凝土浇筑,其立方体抗压强度平均值对应的轴心抗压强度为 42.42 MPa。

数值模拟和试验滞回曲线及骨架曲线对比如图 8、9 所示,两者的峰值荷载、极限荷载与位移基本一致。分析两者存在差别的原因主要为:①组合柱模

表 3 试件参数

Table 3 Specimen parameters

编号	h_c /mm	D /mm	t /mm	B /mm	b_t /mm	t_t /mm	h_w /mm	t_w /mm	ρ_n /%	n	n_t
SRC1	250				90	12	75	10	11.87	0.6	0.357
SRC2-2	250	90	5		90	12	35	12	11.74	0.6	0.357
SRC2-3	250	90	5		100	12	35	8	11.61	0.6	0.357
SRC2-5	250	90	5		90	12	40	10	11.61	0.6	0.357
SRC3	250		5	80	90	12	40	10	11.87	0.6	0.357

注: h_c 为柱横截面边长; n_t 为试验轴压比。

表 4 钢材的力学性能

Table 4 Mechanical properties of steel

钢材	强度等级	厚度/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
钢筋	HPB300	8	477.3	572.3
钢筋	HPB400	16	464.4	658.3
钢板	Q235	8	310.0	449.8
钢板	Q235	10	257.0	371.8
钢板	Q235	12	298.2	428.9
圆钢管	Q235	5	363.0	480.6
方钢管	Q235	5	398.0	446.7

型的加载情况与边界条件无法和试验完全保持一致;②试验正方向加载时试件受拉侧混凝土产生了一定的损伤,使推拉方向滞回环未完全对称。总体而言,模拟与试验曲线吻合较好,说明所建立模型可以有效模拟组合柱的抗震性能。

2.3 组合柱延性影响因素分析

为分析水平往复荷载下不同因素对 T-CFST 柱延性的影响,建立有限元模型,基础截面参数如表 1 所示。对比试件的参数为:混凝土强度等级 C50,

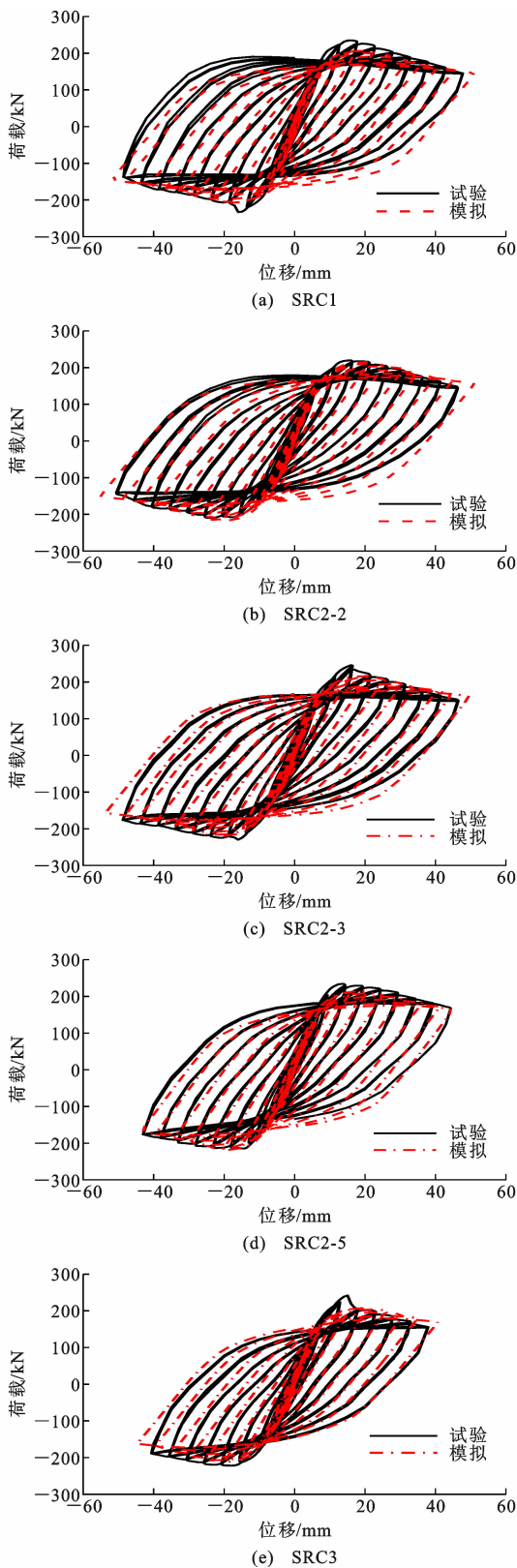


图 8 试件滞回曲线

Fig. 8 Hysteresis curves of specimens

型钢强度 $f_y=345\text{ MPa}$, 体积配箍率 $\rho_{sv}=0.5\%$, 纵筋配筋率 $\alpha_1=0.5\%$, 纵筋屈服强度 $f_{y1}=335\text{ MPa}$, 含钢率 $\alpha_s=6\%$, 柱有效长度 l_0 取 $1\,200\text{ mm}$ (即剪

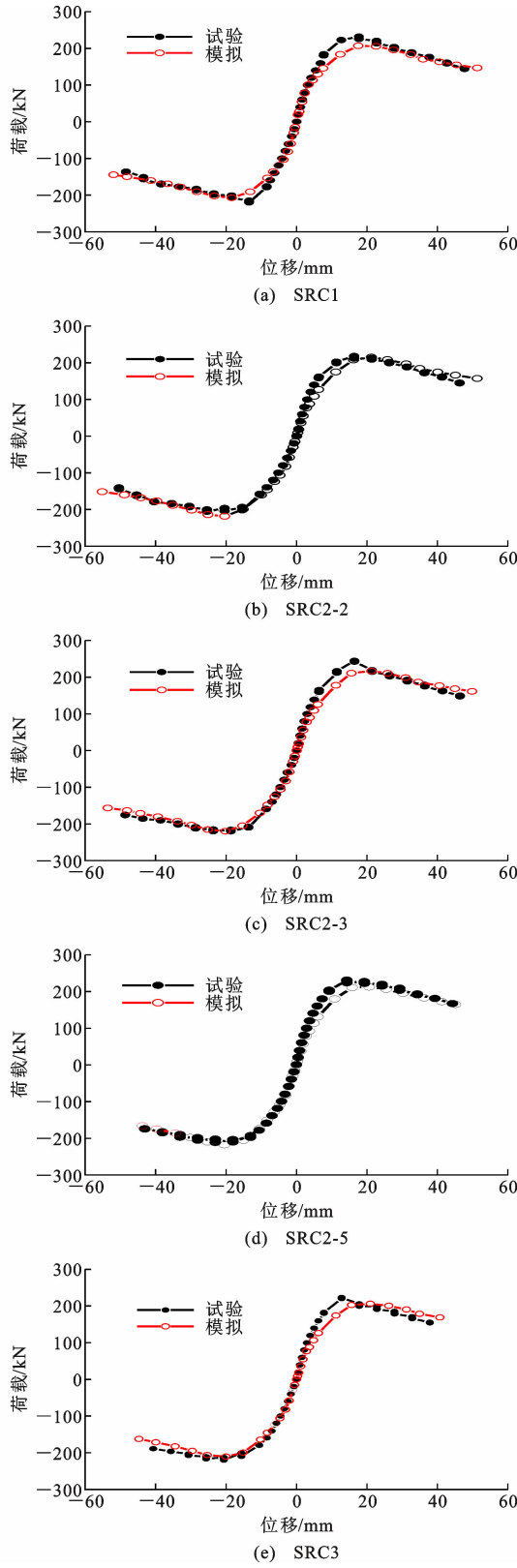


图 9 试件骨架曲线

Fig. 9 Skeleton curves of specimens

跨比 $\lambda=3$)。本次分析的主要参数包括: 混凝土强度等级 (C30~C70)、型钢强度 (235~420 MPa)、含钢率 (4%~10%) 和体积配箍率 (0.5%~1.5%)。

2.3.1 混凝土强度等级

不同混凝土强度等级 T-CFST 柱的骨架曲线及延性系数分别如图 10(a)、(e)所示。由图 10(a)、(e)可知,随混凝土强度等级的提高,峰值荷载后 T-CFST 柱骨架曲线下落越快,延性系数越小,其原因在于,混凝土强度越高,脆性越大。由图 10(e)可知,其他条件相同时,T-CFST 柱的延性系数随轴压比 n 的增大而降低。混凝土强度等级 C30、C50 在轴压比 0.8~0.9 时降低幅度较大,混凝土强度等级 C70 延性系数在轴压比 0.9~1.0 时降低幅度较大,说明不同混凝土强度等级下,均存在一个临界轴力,当组合柱承受的轴力超过其值时,延性会迅速降低。

2.3.2 型钢强度

不同型钢屈服强度的 T-CFST 柱骨架曲线及延性系数分别如图 10(b)、(f)所示。由图 10(b)可知,随型钢屈服强度提高,T-CFST 柱承载力增大。由图 10(f)可知,延性系数在轴压比为 0.6、0.7 和 1.0 时比轴压比为 0.8、0.9 时变化大,说明在部分轴压比下,型钢强度对 T-CFST 柱延性影响不大,相比较而言,在较高轴压比和较低轴压比时,型钢强度对 T-CFST 柱的延性影响更大。

2.3.3 含钢率

不同含钢率 T-CFST 柱的骨架曲线及延性系数分别如图 10(c)、(g)所示。由图 10(c)可知,随 α_s 的增大,T-CFST 柱的水平承载力增大,变形能力减小。由图 10(g)可知,含钢率为 4% 和 6% 的 T-CFST 柱延性系数接近,含钢率为 8% 和 10% 的 T-CFST 柱延性系数接近。相比含钢率从 4% 提高到 6% 时柱的延性系数变化而言,含钢率从 6% 提高到 8% 时,柱总体的延性系数降低幅度更大。

2.3.4 体积配箍率

不同体积配箍率下 T-CFST 柱的骨架曲线及延性系数分别如图 10(d)、(h)所示。由图 10 可以看出,在其他因素相同的条件下,T-CFST 柱的 μ 随 ρ_{sv} 的增大而增大,但 μ 随 ρ_{sv} 并非线性增大,体积配箍率由 0.5% 增大到 1.0% 时,柱的延性系数仅增大 0.05 左右,继续增大到 1.5% 时,柱的延性系数平均增大 20%。体积配箍率对 T-CFST 柱延性的影响主要是由于箍筋的存在,限制了受压区混凝土的横向变形,使柱的延性系数得以提高。

2.4 基于数值模拟的轴压比限值

通过数值模拟逐个改变轴压比,得到恰好满足

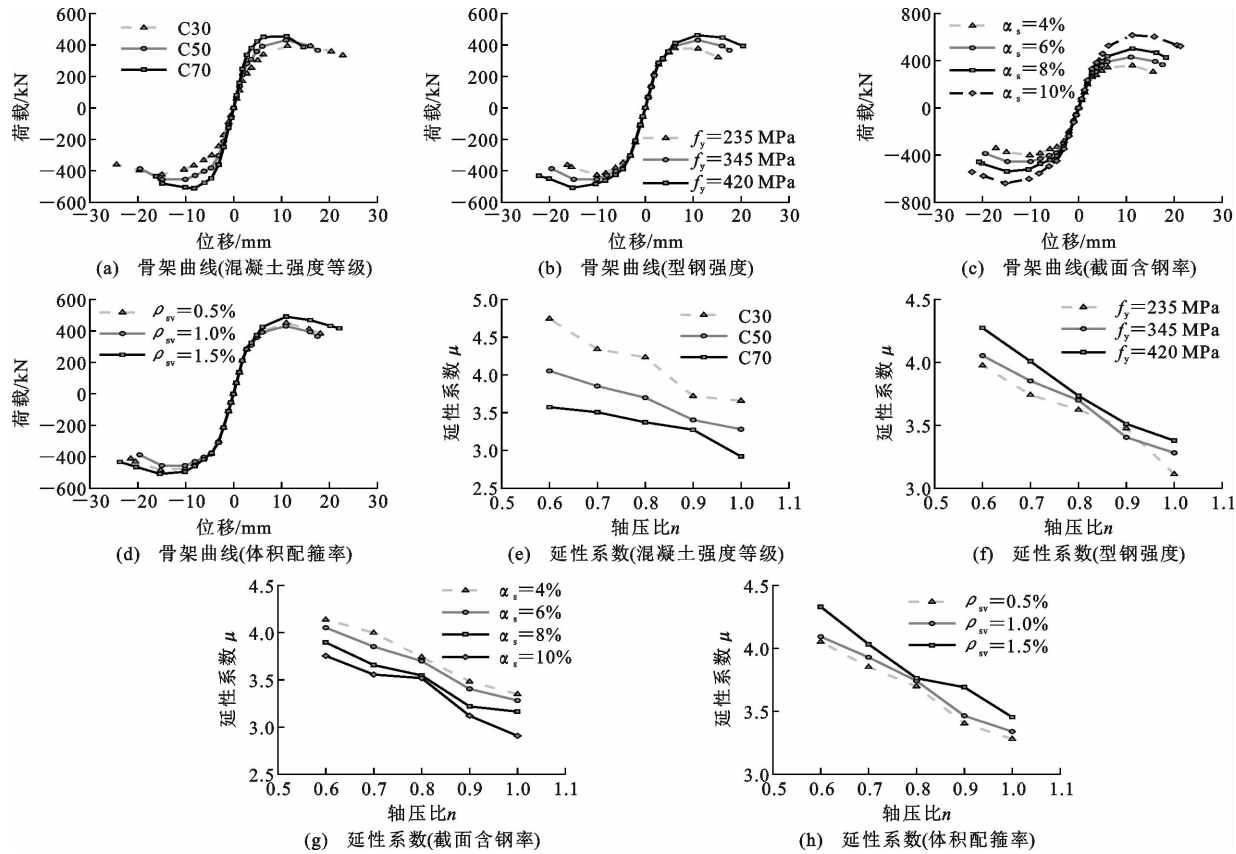


图 10 各影响因素下的骨架曲线及延性系数

Fig. 10 Skeleton curve and ductility coefficient under various influencing factors

抗震变形要求的位移延性系数所对应的轴压比,将其作为轴压比限值。分析不同参数(剪跨比 1.5~3、体积配箍率 0.5%~1.5%、混凝土强度 C50~C70)下 T-CFST 柱的轴压比限值,另对 121 个 T-CFST 柱进行模拟计算,型钢屈服强度 $f_y=235$ MPa,各因素变化时不同轴压比 T-CFST 柱的位移

延性系数如表 5 所示。

由表 1 和表 5 可知,基于理论计算的轴压比限值尚存在一些问题:①由于 T-CFST 柱截面型钢形式的影响,即使在较大轴压比时,柱的延性依然较好;②单一使用计算方法难以准确反映出型钢强度、体积配箍率等因素对轴压比限值的影响。

表 5 T-CFST 柱的位移延性系数

Table 5 Displacement ductility coefficient of T-CFST column

λ	$\rho_{sv}/\%$	混凝土强度	不同轴压比时的位移延性系数								
			0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95
1.5	0.5	C50					4.172	3.766	3.459	3.324	3.041
		C60			3.543	3.510	3.329	3.337	2.900		
		C70	3.519	3.509	3.363	3.218	3.015				
	1.0	C50						3.967	3.783	3.152	3.312
		C60			3.725	3.667	3.502	3.365	3.091		
		C70	3.553	3.534	3.502	3.409	3.137				
	1.5	C50						4.570	4.242	3.701	3.579
		C60			4.270	3.941	3.783	3.562	3.381		
		C70	3.907	3.799	3.624	3.521	3.351				
2.0	0.5	C50						4.097	3.683	3.275	3.077
		C60			3.680	3.972	3.396	3.092	2.991		
		C70	3.555	3.515	3.423	3.266	3.119				
	1.0	C50						4.265	3.770	3.551	3.186
		C60			4.104	3.873	3.787	3.347	3.014		
		C70	3.633	3.586	3.527	3.323	3.030				
	1.5	C50						4.560	4.477	4.353	3.385
		C60			4.593	4.197	3.933	3.943	3.585		
		C70	4.038	3.608	3.718	3.656	3.195				
2.0	0.5	C50						3.623	3.543	3.475	3.220
		C60				3.527	3.514	3.352	3.276		
		C70		3.535	3.522	3.504	3.139				
	1.0	C50						3.777	3.663	3.522	3.312
		C60				3.597	3.545	3.429	3.321		
		C70		3.643	3.551	3.501	3.443				
	1.5	C50						3.804	3.766	3.544	3.400
		C60				3.688	3.595	3.496	3.290		
		C70		3.743	3.523	3.546	3.398				

为充分发挥 T-CFST 柱的延性性能,T-CFST 柱的轴压比限值应有所提高。确定轴压比限值的原则为:保证 T-CFST 柱满足一定延性的基础上,可提供较大的水平抵抗力,文献[17]~[19]将普通 SRC 柱满足延性要求的位移延性系数取 3.0,考虑到 T-CFST 柱的延性较好,且本文模拟的数值在考虑一定理想状态导致的误差后,确定 T-CFST 柱满足抗震要求的位移延性系数 μ 取为 3.5。

含钢率对 T-CFST 柱轴压比限值有较大影响,目前规范中一般建议取 4%~10%,本文建议取

6%,原因主要为:①由前述分析可知,当考虑承担荷载及变形能力时,柱含钢率为 6%相较于 4%能承担更大的荷载;②若含钢率过大,用钢量增加,造价增高。对表 5 综合分析,将满足延性要求的延性系数取为 3.5,建议不同剪跨比及体积配箍率下,T-CFST 柱的轴压比限值可按表 6 取值。

3 结 语

(1)考虑型钢混凝土的约束作用并简化钢管截面,采用大小偏心受压界限破坏理论推导了发生弯

表 6 T-CFST 柱的轴压比限值

Table 6 Axial compression ratio limits for T-CFST columns

剪跨比 λ	体积配箍率 ρ_{sv}	不同抗震等级的轴压比限值		
		一级	二级	三级
$1.5 \leq \lambda < 2$	$0.5\% \leq \rho_{sv} < 1.0\%$	0.70	0.80	0.90
	$1.0\% \leq \rho_{sv} < 1.5\%$	0.75	0.85	0.95
	$\rho_{sv} \geq 1.5\%$	0.80	0.90	1.00
$\lambda \geq 2$	$0.5\% \leq \rho_{sv} < 1.0\%$	0.75	0.85	0.95
	$1.0\% \leq \rho_{sv} < 1.5\%$	0.80	0.90	1.00
	$\rho_{sv} \geq 1.5\%$	0.80	0.90	1.00

注：本表仅适用于混凝土强度等级不高于 C50 的情况，混凝土强度等级每增加 5，表中数值降低 0.05。

曲破坏的 T-CFST 柱轴压比限值计算公式。

(2) T-CFST 柱的变形能力随混凝土强度降低、含钢率降低、型钢强度提高、体积配箍率提高而提高，即使在较大轴压比下，T-CFST 柱亦均具有良好的抗震性能。

(3) T-CFST 柱在不同混凝土强度等级下，均存在一个临界轴力，当承受的轴力超过其值时，延性会迅速降低。在较高和较低轴压比时，型钢强度对 T-CFST 柱的延性影响更大。

(4) 建议了满足位移延性要求的 T-CFST 柱轴压比限值，可为工程设计提供参考。

参考文献：

References:

[1] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
Code for design of concrete structures;GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2011.

[2] 组合结构设计规范:JGJ 138—2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
Code for design of composite structures;JGJ 138—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2016.

[3] 钢骨混凝土结构技术规程:YB 9082—2006[S]. 北京:冶金工业出版社,2007.
Technical specification of steel-reinforced concrete structures;YB 9082—2006[S]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2007.

[4] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2001[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.
Code for seismic design of buildings;GB 50011—2001 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.

[5] ZHANG Y, QIAN J R, JI X D, et al. Tests and nu-

merical simulation on short composite-sectioned concrete filled steel tubular columns subjected to axial compressive loading [J]. Advanced Materials Research,2011,374-377;2265-2270.

[6] JI X D, KANG H Z, CHEN X C, et al. Seismic behavior and strength capacity of steel tube-reinforced concrete composite columns[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics,2014,43(4):487-505.

[7] QIAN W W, LI W, HAN L H, et al. Analytical behavior of concrete-encased CFST columns under cyclic lateral loading[J]. Journal of Constructional Steel Research,2016,120:206-220.

[8] CAI J M, PAN J L, TAN J W, et al. Behavior of ECC-encased CFST columns under eccentric loading [J]. Journal of Building Engineering,2020,30:101188.

[9] 徐亚丰,姜桂兰,向常艳,等. 轴心受压下钢管-钢管混凝土组合短柱承载力研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2005,21(6):640-643.
XU Yafeng, JIANG Guilan, XIANG Changyan, et al. Capacity study under axial load of circular steel tube compile short column filled with steel reinforced concrete [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science),2005,21(6):640-643.

[10] 代岩,赵均海,张常光. CFRP 和角钢复合加固钢管混凝土叠合柱轴心受压承载力分析[J]. 建筑结构,2018,48(17):96-103.
DAI Yan, ZHAO Junhai, ZHANG Changguang. Analysis of axial compression bearing capacity of CFRP and angle steel composite reinforced concrete-filled steel tubular columns[J]. Building Structure, 2018, 48(17):96-103.

[11] 杨勇,于云龙,王欣林,等. 预应力钢带约束钢管混凝土叠合柱抗震性能试验研究[J]. 工业建筑,2015,45(3):11-15.
YANG Yong, YU Yunlong, WANG Xinlin, et al. Experimental study of seismic performance of composite columns with core steel tube and confined by prestressed steel strips[J]. Industrial Construction,2015, 45(3):11-15.

[12] CAI J M, PAN J L, LU C. Mechanical behavior of ECC-encased CFST columns subjected to eccentric loading[J]. Engineering Structures,2018,162:22-28.

[13] 王朋,李龙堂,史庆轩,等. 带 T 形钢的内置钢管混凝土组合柱轴压性能研究[J]. 建筑结构学报,2023,44(2):37-49.
WANG Peng, LI Longtang, SHI Qingxuan, et al. Research on axial compression performance of steel tube with T-shaped steel reinforced concrete column[J].

Journal of Building Structures,2023,44(2):37-49.

[14] 丁耀宗. 新型型钢-混凝土组合柱抗震性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2021.

DING Yaozong. Study on seismic performance of new type steel reinforced concrete columns [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021.

[15] 韩林海. 钢管混凝土结构:理论与实践[M]. 3 版. 北京:科学出版社,2016.

HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures: theory and practice [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press,2016.

[16] ZHAO X Z,WEN F P,CHAN T M,et al. Theoretical stress-strain model for concrete in steel-reinforced concrete columns[J]. Journal of Structural Engineering,2019,145(4):04019009.

[17] 贾金青,孙洪梅,李大永. 钢管高强混凝土短柱轴压力系数限值[J]. 大连理工大学学报,2002,42(2):218-222.

JIA Jinqing,SUN Hongmei,LI Dayong. Limited values on axial compression ratio of steel reinforced high-strength concrete short columns[J]. Journal of Dalian University of Technology,2002,42(2):218-222.

[18] Seismic evaluation and retrofit of existing buildings: ASCE/SEI 41-23 [S]. Reston: American Society of Civil Engineers,2023.

[19] 张树琛,杨 勇,薛亦聪,等. 部分预制装配型钢混凝土短柱抗震性能试验研究[J]. 工程力学,2020,37(10):179-191.

ZHANG Shuchen,YANG Yong,XUE Yicong,et al. Research on seismic performance of partially precast steel reinforced concrete short columns[J]. Engineering Mechanics,2020,37(10):179-191.