

填充轻骨料混凝土的冷成型椭圆形截面钢管短柱轴压性能研究

王 伟^{1,2}, 淮运梅^{2,3}, 陈德明⁴

- (1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092;
3. 上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 上海 200235; 4. 香港理工大学 土木与环境工程学系, 香港 999077)

摘要: 为研究由热轧圆钢管冷拔成型的椭圆钢管短柱的轴压性能, 分别对空腹和填充轻骨料混凝土的椭圆钢管短柱进行试验, 分析椭圆钢管和轻骨料混凝土的材料性能以及短柱试件的承载能力、破坏模式、延性等。结果表明: 与母材热轧圆钢管相比, 冷拔成型椭圆钢管短柱表现出较低的承载力和延性; 填充轻骨料混凝土能够显著提高试件的承载力和延性; 相比于椭圆钢管短柱, 填充混凝土对圆钢管短柱轴压承载力和延性提高程度大, 且壁厚小的试件轴压承载力和延性的提高程度大(约 10%); 通过与国内外相关设计规范计算结果的对比, 现行针对热处理椭圆钢管短柱承载能力计算方法可用于冷成型椭圆钢管短柱承载能力计算, EC4 规范可以较准确的估计圆钢管混凝土试件的承载能力, 我国 CECS 28:2012 钢管混凝土结构技术规程适用于壁厚较小的冷成型椭圆钢管混凝土短柱轴压承载力计算, 壁厚较大的冷成型椭圆钢管混凝土短柱轴压承载力计算方法有待进一步研究。

关键词: 钢管混凝土柱; 冷成型; 椭圆管; 轻骨料混凝土; 静力试验; 轴压性能
中图分类号: TU398.9 TU317.1 **文献标志码:** A

Research on axial compressive behavior of lightweight concrete-filled cold-formed elliptical hollow section steel stub columns

WANG Wei^{1,2}, HUAI Yunmei^{2,3}, CHAN Tak-Ming⁴

- (1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Department of Structural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. Shanghai Tunnel Engineering & Rail Transit Design and Research Institute, Shanghai 200235, China;
4. Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China)

Abstract: To study the axial compression performance of elliptical steel tubular stub column, this paper presents an experimental investigation on lightweight concrete-filled circular and elliptical hollow section steel tubular columns under axial compression at cross-section level. The lightweight aggregate concrete and elliptical tube material properties, bearing capacity, failure mode and ductility of stub column were analyzed. The elliptical hollow section (EHS) was cold-formed from the hot-rolled circular hollow section (CHS). Comparison based on experimental findings in particular between the hot-rolled CHS and cold-formed EHS were made. The results indicate the cold-forming process reduces the load carrying capacity and ductility; being filled with concrete can significantly improve the bearing capacity and ductility of stub column; contribution of filling concrete is larger in the concrete-filled hot-rolled CHS stub columns than that in the concrete-filled cold-formed EHS stub columns; the level of enhancement due to concrete in-filling is more significant for the thinner EHS and CHS tubes (about 10%). Design rules based on Chinese and foreign standards were also assessed: the prediction of cold-formed EHS compressive resistance based on the hot-finished formulations is adequate; design equations based on Eurocode 4 can be adopted for the lightweight concrete-filled hot-rolled circular hollow sections; CECS 28-2012, the code for design of concrete-filled steel tubular structures can be used for the compressive bearing capacity calculation of thinner lightweight concrete-filled EHS, but the compressive bearing capacity calculation method for thicker lightweight concrete-filled EHS needs further study.

Keywords: concrete-filled steel tubular column; cold-formed; elliptical hollow section; lightweight concrete; static test; axial compressive behavior

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51038008)。

作者简介: 王伟(1977—), 男, 江西南昌人, 工学博士, 研究员。E-mail: weiwang@tongji.edu.cn

收稿日期: 2015 年 4 月

0 引言

钢管混凝土已被广泛应用于建筑结构中^[1-2],其中钢管可对核心混凝土形成有效约束,同时核心混凝土也可以防止钢管向内局部屈曲的发生,因而相对于钢管构件,组合构件具有更高的刚度、延性以及承载力。目前,圆形、矩形和方形是较为常见的截面形式,而椭圆形截面钢管也被逐渐用于结构中^[3]。

短柱轴心受压试验是研究钢管及钢管混凝土构件力学性能的基础。目前,大多研究针对热处理椭圆空钢管的轴压^[4]、偏压^[5]等力学性能,并提出了相应的设计建议^[6]。也有学者通过试验和有限元分析,研究了填充普通混凝土的热轧和热处理椭圆钢管混凝土短柱的轴压力学性能^[7-11]。但对于空腹和填充轻骨料混凝土的冷成型椭圆钢管短柱的轴压性能研究有待深入。

本文作者针对由热轧圆钢管冷拔成型的椭圆钢管短柱的轴压性能进行研究,以热轧圆钢管为参照,分别对空腹和填充轻骨料混凝土的椭圆钢管短柱进行轴压试验,分析椭圆钢管和轻骨料混凝土的材料性能以及短柱的承载能力、破坏模式、延性等,并将试验结果与相关规范计算值进行比较,提供可供工程实际参考的设计建议。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验中共设计了24个试件,包括12个空钢管短柱试件和12个钢管混凝土短柱试件,其中圆截面和椭圆截面各6个,以研究截面形式对钢管及钢管混凝土短柱轴压性能的影响。钢管长度取250 mm,以保证试件发生以局部屈曲为主的破坏模式^[1]。圆钢管选取热轧成型的Q345B钢管,椭圆管是由截面面积相等的热轧圆钢管冷拔成型,以对比截面形状改变对其受力性能的影响。试件端部通过精加工处理,保证端部截面与试件中轴精确垂直,混凝土截面与钢管截面等高,混凝土和钢材在加载时同时受压。

每类试件选取两种不同的钢管壁厚,相同参数的钢管试件3个,以保证试验结果的可靠性。图1给出了钢管截面几何尺寸示意。

表1为圆截面和椭圆截面短柱试件主要实测几何尺寸,其中, d 为圆管外径; t 为钢管壁厚; h 为椭圆管长轴长度; b 为椭圆管短轴长度; d_e 是依据相关研究^[6]基于与圆管开始局部屈曲的位置相同原则计算得到的椭圆管等效直径,其计算式为 $d_e = h^2/b$; A_s 和 A_c 分别为钢管和混凝土面积,对于壁厚5 mm椭圆截面试件,截面面积可认为与冷拔之前相应圆管

表1 各试件实测几何尺寸
Table 1 Measured geometric properties of specimens

试件编号	实测平均尺寸					截面面积		最大缺陷		d/t 或 d_e/t
	h/mm	b/mm	$d(d_e)/mm$	t/mm	L/mm	A_s/mm^2	A_c/mm^2	内凹/mm	外凸/mm	
CH-A-SC1	—	—	95.5	5.3	250	1 502	—	0.19	0.18	18.02
CH-A-SC2	—	—	95.5	5.3	250	1 502	—	0.23	0.15	18.02
CH-A-SC3	—	—	95.5	5.4	250	1 529	—	0.19	0.10	17.69
CH-B-SC1	—	—	95.6	7.5	250	2 076	—	0.18	0.17	12.75
CH-B-SC2	—	—	95.6	7.4	250	2 050	—	0.17	0.14	12.92
CH-B-SC3	—	—	95.6	7.4	250	2 050	—	0.07	0.07	12.92
CF-A-SC1	—	—	95.4	5.8	250	1 633	5 515	0.39	0.35	16.45
CF-A-SC2	—	—	95.3	5.5	250	1 552	5 581	0.27	0.28	17.33
CF-A-SC3	—	—	95.4	5.5	250	1 553	5 595	0.14	0.30	17.35
CF-B-SC1	—	—	95.6	7.2	250	2 000	5 178	0.09	0.12	13.28
CF-B-SC2	—	—	95.6	7.6	250	2 101	5 077	0.20	0.18	12.58
CF-B-SC3	—	—	95.4	7.1	250	1 970	5 178	0.12	0.11	13.44
EH-A-SC1	120.4	60.0	241.60	5.4	250	1 502	—	1.11	0.57	44.74
EH-A-SC2	120.2	59.5	242.82	5.2	250	1 502	—	0.91	0.43	46.70
EH-A-SC3	120.1	59.7	241.61	5.3	250	1 529	—	0.78	0.41	45.59
EH-C-SC1	120.2	58.1	248.68	9.0	250	2 266	—	0.51	0.33	27.63
EH-C-SC2	120.3	57.5	251.69	8.9	250	2 237	—	0.56	0.33	28.28
EH-C-SC3	120.3	57.5	251.69	8.9	250	2 237	—	0.51	0.23	28.28
EF-A-SC1	119.6	59.8	239.20	5.4	250	1 527	5 621	0.91	1.02	44.30
EF-A-SC2	119.5	60.1	237.61	5.4	250	1 552	5 581	0.40	0.80	44.00
EF-A-SC3	119.5	60.8	234.87	5.4	250	1 553	5 595	0.41	1.10	43.49
EF-C-SC1	119.9	57.9	248.29	8.7	250	2 192	3 260	0.22	0.50	28.54
EF-C-SC2	119.8	58.0	247.45	8.9	250	2 237	3 220	0.31	0.80	27.80
EF-C-SC3	119.9	57.9	248.29	8.8	250	2 214	3 238	0.40	0.56	28.21

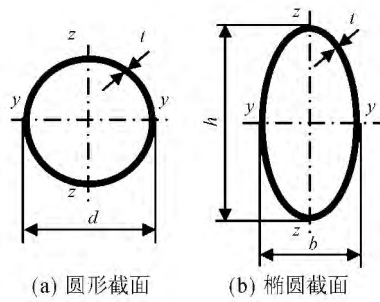


图1 钢管截面几何参数示意

Fig.1 Geometric parameters of steel tube

截面试件相同,而壁厚 8 mm 椭圆截面试件由于无相应冷拔之前的圆管截面实测面积,其截面面积由近似公式计算得到,即 $A_s = (\pi/4) [bh - (b - 2t)(h - 2t)]$, $A_c = (\pi/4)(b - 2t)(h - 2t)$ 。

试件命名由四部分组成,第一部分“CH”表示圆截面空钢管,“CF”表示圆钢管混凝土,“EH”表示椭圆截面空钢管,“EF”表示椭圆钢管混凝土;第二部分表征不同的管壁厚度 A、B 和 C 三类,分别代表标称壁厚为 5、7 mm 和 8 mm;第三部分“SC”表示短柱试件;最后一部分为相同试件的编号。

在进行试验之前,对试件的初始缺陷进行测量。表 1 的最后两列分别为每个试件内凹和外凸的最大缺陷值。圆截面空钢管试件的最大初始缺陷为 0.23 mm ($t/23$),而填充混凝土的圆钢管试件,最大初始缺陷为 0.39 mm ($t/15$),所有圆截面试件的最大初始缺陷较小且分布位置呈现一定的随机性。对于椭圆截面空钢管试件,最大初始缺陷为 1.11 mm ($t/4.8$),而对于填充混凝土的椭圆钢管试件,最大初始缺陷为 1.10 mm ($t/4.9$),位置靠近试件的长度中点,较大的初始缺陷由冷拔成型及后期加工造成。

为了评估试件的局部稳定性,将试件截面类型划分为边缘纤维屈服先于局部屈曲的厚实(Stocky)截面和局部屈曲先于边缘纤维屈服的薄柔(Slender)截面。依据欧洲规范 EC3^[12]的划分标准,热轧圆钢管主要分类参数是钢管截面径厚比 d/t ,当 $d/t \leq 90\varepsilon^2$ 时,属于厚实截面,其中 $\varepsilon = (235/f_y)^{0.5}$, f_y 取管材屈服强度实测值。对于椭圆钢管,采用 d_e/t 进行分类,分类标准与圆钢管相同。

1.2 材料特性

钢材的材性通过单调拉伸试验获得,圆钢管沿

截面不同位置截取 2 根试样,椭圆钢管截取 3 根试样。表 2 给出了钢材屈服强度 f_y ,抗拉强度 f_u ,屈服应变 ε_y ,极限应变 ε_u ,弹性模量 E_s ,断后伸长率 δ_c 等指标的测试结果。由于冷拔成型椭圆钢管没有明显的屈服点,其屈服强度 f_y 和屈服应变 ε_y 为 0.2% 残余应变所对应的应力、应变值。相比于热轧圆钢管母材,冷成型椭圆钢管材料表现出与预期相同的较高强度和较低延性。

试验所采用的轻骨料混凝土为陶粒混凝土,通过反复的配合比选取试验,确定了和易性和抗压强度(C30)均满足预期的陶粒混凝土。共设计了 7 组边长为 100 mm 的立方体试块和 3 组边长为 100 mm × 100 mm × 300 mm 的棱柱体试块,在进行钢管混凝土试验的同时,测定了轻骨料混凝土的密度 $\rho = 1900 \text{ kg/m}^3$,立方体抗压强度 $f_c = 39 \text{ MPa}$ 以及弹性模量 $E_c = 2.5 \times 10^4 \text{ MPa}$ 。

1.3 试验加载与测试

试验在同济大学建筑结构实验室 SANS200T 试验机上进行。图 2 为试验装置现场,试件上下两端分别安置截面平整光滑且强度高于试件的端板,在试件上端板的上表面施加轴向荷载,以 1 mm/min 的恒定速度进行位移加载,当荷载达到屈服荷载(对于钢管短柱试件 $N_y = f_y A_s$,对于钢管混凝土短柱试件 $N_y = f_y A_s + f_{ck} A_c$,其中 $f_{ck} = 0.8 f_c$)时,持荷 3 min,继续加载至荷载降至极限荷载的 50% 以下或出现严重变形时,加载结束。

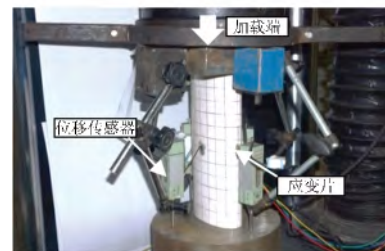


图2 试验加载装置现场

Fig.2 Test setup

图 3 以圆截面试件为例给出了试件测点布置示意。每个试件四周对称布置 4 个纵向位移计(D1 ~ D4),用来测定试件两端板之间相对位移的变化,即试件的轴向变形,分析时取其平均值;对于空钢管试件,在试件长度中点处沿中截面间隔 90° 对称布置 4

表2 钢管的主要材性指标

Table 2 Measured material properties for steel tube

试样编号	钢管类型	E_s / MPa	f_y / MPa	f_u / MPa	f_u / f_y	$\varepsilon_y / \%$	$\varepsilon_u / \%$	$\varepsilon_u / \varepsilon_y$	$\delta_c / \%$
CH-A-AVG	热轧	208 406	476	616	1.30	0.34	7.28	23.38	23
CH-B-AVG	热轧	206 374	418	574	1.38	0.21	12.49	59.25	26
EH-A-AVG	冷拔成型	208 975	599	682	1.14	0.49	5.21	10.66	19
EH-C-AVG	冷拔成型	199 059	578	647	1.12	0.48	4.68	9.74	17

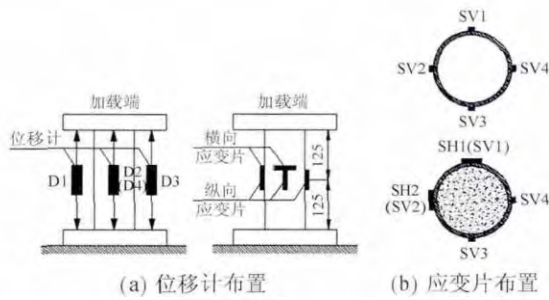


图3 位移计和应变测点布置

Fig. 3 Location of strain gauge and displacement transducer

个应变片 (SV1 ~ SV4),用以监测钢管轴向应变的发展;对于钢管混凝土试件,除了上述测点,在长度中点以外对称的纵向应变片位置上方增加了2个横向应变片 (SH1 ~ SH2) 以测定填充混凝土对钢管横向变形系数的影响。

2 试验结果及分析

2.1 空钢管短柱试验结果

2.1.1 试验现象

圆钢管以及壁厚较大的EH-C系列短柱试件在轴压力下的变形发展模式基本相同,在达到其极限荷载之前钢管无明显变化,达到极限荷载后,在试件两端出现屈曲环或在管壁上不规则地膨出,随着加载继续,试件所能承受的荷载急剧下降,试件一端的屈曲环迅速膨大,最终形成“象足”形破坏,如图4a,4c所示。壁厚较小的EH-A系列椭圆钢管短柱试件在轴压力下没有明显的屈服段,随轴向位移的增大,达到极限荷载后,在试件上靠近一侧端部的位置屈曲,进而屈曲迅速发展,其所能承受的荷载急剧下降,最终因两侧管壁向内收缩至相互接触而破坏,如图4b所示。

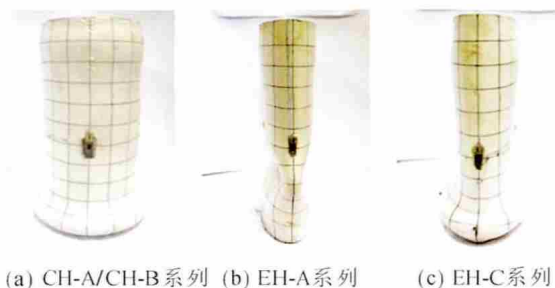


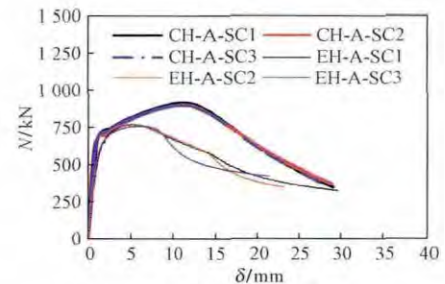
图4 空钢管短柱轴心受压破坏形态

Fig. 4 Typical failure modes of hollow stub columns

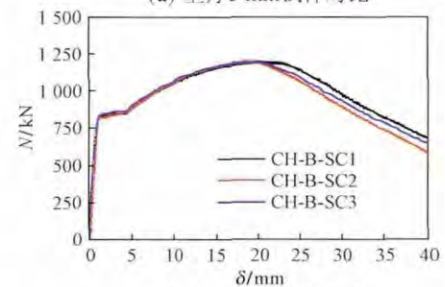
2.1.2 荷载-位移关系曲线

图5给出了钢管短柱试件的荷载-位移 ($N-\delta$) 关系曲线。由图可见,与单调拉伸试验结果相似,在弹性阶段时,圆钢管试件承受的荷载-位移呈线性增长,随后出现明显的屈服平台,之后进入非线性强化阶

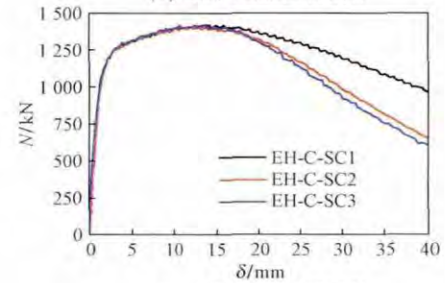
段;而椭圆钢管试件荷载-位移曲线表现出了明显的非线性。壁厚较小的EH-A系列短柱试件与冷拔前的CH-A系列短柱试件相比,承载能力和延性均较低,见图5a。这表明,截面几何形态的改变将导致钢管试件轴压承载力和延性的损失,分别降低了15%和52%。



(a) 壁厚5 mm试件对比



(b) 壁厚7 mm圆管试件



(c) 壁厚8 mm椭圆试件

图5 空钢管短柱试件荷载-位移关系曲线

Fig. 5 Load-displacement curves for hollow stub columns

2.1.3 轴向应力-应变关系曲线

图6为壁厚较小的椭圆形和圆形截面空钢管试件的平均轴向应力-应变 $\sigma-\varepsilon_v$ 的关系曲线,同时给出了相应管材单调拉伸试样的纵向应力-应变曲线 (C/E-A-TC)。由图可见,热轧圆钢管短柱试件在轴压力下的平均应力-应变关系与相应的拉伸试验结果基本一致,可认为在轴向力作用下热轧圆钢管试件能够全截面进入塑性工作状态。对于壁厚较小的EH-A系列冷成型椭圆钢管试件,其应力-应变关系曲线与拉伸曲线有较大差别,表明试件的局部屈曲先于全截面塑性发生。

2.1.4 轴压承载力

根据欧洲规范 EC3 对圆管和椭圆管截面的分类,所测试的圆钢管试件和壁厚较大的EH-C系列椭圆钢管试件均属于厚实截面,而壁厚较小的EH-A系

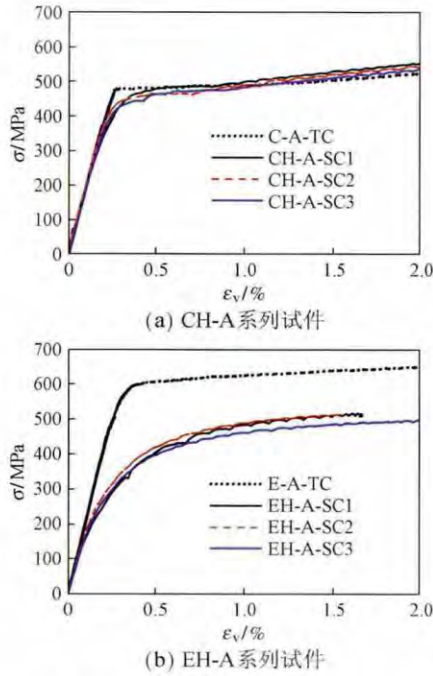


图6 空钢管短柱试件轴向应力-应变 ($\sigma-\varepsilon_v$) 关系曲线

Fig. 6 Longitudinal stress-strain relationship for hollow stub columns

列椭圆钢管试件属于更易发生局部屈曲的薄柔截面,这一判断也在应力-应变关系曲线中得到反映。

表3给出了各试件的极限荷载 $N_{u,h}$, 极限荷载对应的位移 Δ_u , 降低至极限荷载的85%时对应的位移 $\Delta_{u,85\%}$ 和延性系数 μ (因EH-A和EF-A系列试件发生弹性屈曲,为统一起见,定义 $\mu = \Delta_{u,85\%} / \Delta_u$) 以及依据EC3计算的试件轴压承载力。对于厚实截面,其承载力计算值 N_{EC3} 等于截面面积 A_s 与钢材屈服强度 f_y 的乘积;对于薄柔截面,通过采用有效截面面积 A_{eff} 代替全截面面积 A_s 的方法考虑局部屈曲对承载力的影响。通过大量试验和有限元分析^[4], 椭

表3 钢管短柱试件的承载能力及延性
Table 3 Bearing capacity and ductility for hollow stub column specimens

试件编号	截面分类	$N_{u,h} /$ kN	$N_{EC3} /$ kN	$N_{u,h} /$ N_{EC3}	$\Delta_u /$ mm	$\Delta_{u,85\%} /$ mm	μ
CH-A-SC1	厚实	917	715	1.28	11.3	16.0	1.41
CH-A-SC2	厚实	903	715	1.26	11.3	16.1	1.42
CH-A-SC3	厚实	897	728	1.23	10.9	16.2	1.49
CH-B-SC1	厚实	1 200	868	1.38	20.4	28.4	1.39
CH-B-SC2	厚实	1 203	857	1.40	18.4	25.9	1.41
CH-B-SC3	厚实	1 204	857	1.40	19.0	26.8	1.41
EH-A-SC1	薄柔	775	799	0.97	5.50	10.6	1.95
EH-A-SC2	薄柔	772	782	0.99	4.80	11.2	2.33
EH-A-SC3	薄柔	761	806	0.94	5.90	9.5	1.61
EH-C-SC1	厚实	1 415	1 310	1.08	14.4	29.6	2.05
EH-C-SC2	厚实	1 405	1 293	1.09	12.3	24.0	1.95
EH-C-SC3	厚实	1 420	1 293	1.10	13.5	22.7	1.69

圆截面有效截面面积 A_{eff} 的计算公式^[6]为 $A_{eff} = A_s [(90t/d_e)(235/f_y)]^{0.5}$ 。

如表3所示,EC3对圆钢管试件承载力的计算值相对保守,而采用针对热处理椭圆钢管短柱承载力计算方法进行冷成型椭圆钢管短柱承载力计算,试验值与计算值吻合较好。

2.2 钢管混凝土短柱试验结果

2.2.1 试验现象

壁厚较小的钢管混凝土短柱轴心受压试件与空钢管管壁失稳破坏不同,表现出明显的剪切破坏形态,如图7a、7b所示,虚线为可能的混凝土剪切面所在的位置;壁厚较大的圆钢管混凝土试件,由于混凝土对钢管管壁屈曲的约束作用,试件呈现两边鼓曲中间膨出的“鼓”形破坏形态,如图7c所示;对于壁厚较大的椭圆钢管混凝土试件,其变形发展与椭圆空钢管试件类似,混凝土约束作用不明显,试件呈现“象足”形破坏,如图7d所示。

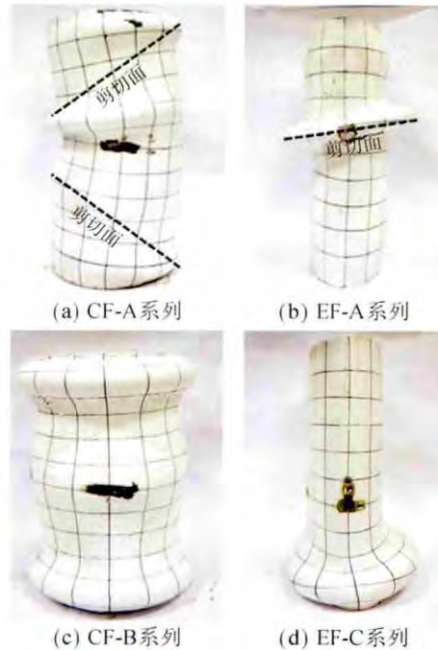


图7 钢管混凝土短柱试件轴心受压破坏形态

Fig. 7 Failure modes of concrete-filled stub columns

2.2.2 荷载-位移关系曲线

图8给出了钢管混凝土短柱试件的荷载-位移 ($N-\delta$) 关系曲线。与图5对比发现:相比于空钢管短柱试件,填充轻骨料混凝土的短柱试件表现出更高的承载力和延性,这是由于钢管的约束作用有效提高了核心混凝土的强度和延性,延缓了混凝土剪切破坏的发生,而混凝土的填充又阻碍了钢管管壁屈曲的发展。

2.2.3 泊松比-荷载关系曲线

通过布置在钢管中部截面的4个纵向应变片和2个横向应变片,监测在轴压力下钢管混凝土试件的

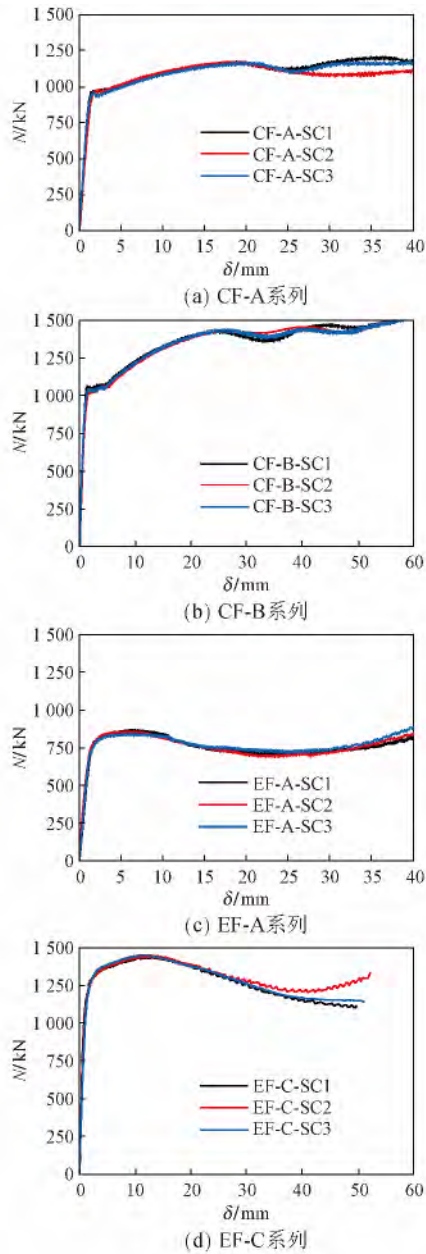


图8 钢管混凝土短柱试件荷载-位移 ($N-\delta$) 关系曲线
Fig. 8 Load-displacement curves for concrete-filled stub column specimens

轴向和横向应变,从而得到各试件中部截面钢材的泊松比 ($\nu = \varepsilon_h / \varepsilon_v$) 与试件荷载比 ($N/N_{u,f}$) 的关系曲线,其中 $N_{u,f}$ 为相应试件的极限荷载,作为对比,给出了Q345钢材的泊松比,如图9所示。

由图9可见,在加载初期,大部分试件泊松比 ν 介于0.2~0.3之间,并随着荷载增加,当钢管混凝土短柱试件的轴向荷载达至极限荷载的70%~90%时,试件的泊松比 ν 突然大幅上升。这是由于在加载初期,未开裂混凝土的泊松比(约0.2)低于钢材泊松比(约0.3),钢管与混凝土之间的相互作用并不明显,而当荷载进一步增加时,由于混凝土泊松比的变化,混凝土的横向变形逐渐大于钢管,在钢管内壁与

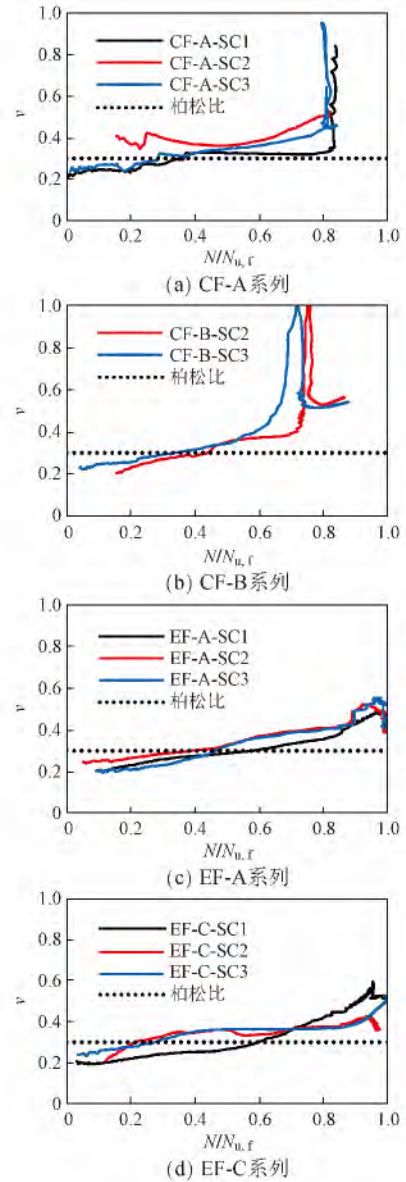


图9 钢管混凝土短柱试件泊松比-荷载变化 ($\nu-N/N_{u,f}$) 关系曲线

Fig. 9 Poisson's ratio-load relationships for concrete-filled stub column specimens

混凝土之间产生了垂直于管壁的径向压力作用。此后,核心轻骨料混凝土处于三向受压状态,从而使试件的承载力和延性大幅提高。

2.2.4 轴压承载力

填充轻骨料混凝土的钢管混凝土试件的承载力和延性较空钢管均有很大程度的提高,为了评价钢管混凝土试件承载力,分析截面形状改变对短柱试件承载力的影响,表4给出了钢管混凝土试件的轴压承载力 $N_{u,f}$ 、延性系数 μ 及主要评价指标。其中为了研究钢管对混凝土的约束作用,定义了套箍系数 $\theta = A_s f_y / (A_c f_{ck})$;为了量化填充混凝土对承载力提高的贡献,定义了钢管混凝土强度提高因子 $I_c =$

$N_{u,f}/N_{u,h}$; 为了分析钢管混凝土试件承载力与各组件承载力之和的相互关系, 定义了钢管混凝土强度增强指数 $I_s = N_{u,f}/(A_s f_y + A_c f_{ck})$ [8]。采用上述公式进行壁厚 5 mm 系列试件计算时, 均采用有效截面积 A_{eff} 代替 A_s 。

表 4 钢管混凝土柱试件的承载力及延性
Table 4 Bearing capacity and ductility for concrete-filled stub column specimens

试件编号	$N_{u,f} /$ kN	θ	I_c	I_s	$\Delta_u /$ mm	$\Delta_{u,85\%} /$ mm	μ
CF-A-SC1	1 174	4.14	1.28	1.30	19.2	>74	>3.9
CF-A-SC2	1 174	4.24	1.30	1.29	18.2	>45	>2.5
CF-A-SC3	1 168	4.24	1.30	1.28	20.5	>49	>2.4
CF-B-SC1	1 428	5.17	1.19	1.43	24.7	>79	>3.2
CF-B-SC2	1 393	5.54	1.16	1.34	20.9	>79	>3.8
CF-B-SC3	1 435	5.10	1.19	1.46	24.3	>80	>3.3
EF-A-SC1	864	4.66	1.11	0.87	6.1	16.2	2.7
EF-A-SC2	857	4.78	1.11	0.85	6.3	17.3	2.7
EF-A-SC3	843	4.80	1.11	0.83	5.8	24.0	4.2
EF-C-SC1	1 445	12.46	1.02	1.06	12.8	31.2	2.4
EF-C-SC2	1 450	12.87	1.03	1.04	11.9	34.2	2.9
EF-C-SC3	1 448	12.67	1.02	1.05	11.9	32.2	2.7

由表 4 可知, 强度提高因子 I_c 随套箍系数 θ 的增加而降低, 说明套箍系数 θ 越大, 填充混凝土对提高承载力的贡献越低; 对比各试件强度提高因子 I_c 可见, 钢管壁厚较小的 CF-A 和 EF-A 系列试件轴压承载力和延性提高程度分别比 CF-B 和 EF-B 系列大 (约 10%); 强度增强指数 I_s 随套箍系数 θ 的增加而增加, 说明套箍系数 θ 越大, 钢管与混凝土之间的相互约束作用越明显; 套箍系数 θ 接近的圆钢管混凝土试件的承载力提高程度大于椭圆钢管混凝土试件; 钢管壁厚较小的 EF-A 系列椭圆钢管混凝土试件的极限荷载低于钢管和混凝土强度的叠加 ($I_s < 1.00$)。这是因其钢管的局部屈曲先于截面屈服发生。对比表 3

和表 4 可以发现, 填充混凝土对椭圆钢管短柱延性的提高幅度远小于圆钢管短柱。

3 相关规范轴压承载力比较

目前, 相关设计规范中并没有明确的椭圆钢管混凝土柱承载力计算公式, 我国 CECS 28: 2012《钢管混凝土结构技术规程》也仅提出了适用于套箍系数 θ 较小 (0.5 ~ 2.0) 的椭圆钢管混凝土的计算公式, 因此, 本文中利用已有的圆钢管混凝土和矩形钢管混凝土承载力计算公式进行计算, 以寻求适用于椭圆钢管混凝土的承载力计算公式。

EC4 规范 [13] 中给出了钢管混凝土短柱承载力简化计算式 (1) 和适用于圆钢管混凝土短柱的计算式 (2)。

$$N_{EC4,S} = A_s f_y + A_c f_{ck} \quad (1)$$

$$N_{EC4,CHS} = \eta_s A_s f_y + [1 + \eta_c (t/d)] (f_y / f_{ck}) A_c f_{ck} \quad (2)$$

其中, η_s 、 η_c 为考虑钢管和混凝土之间相互作用的参数。

美国 AISC 规范 [14] 分别给出了圆钢管混凝土短柱和矩形钢管混凝土短柱的计算式:

$$N_{AISC,CHS} = A_s f_y + 0.95 A_c f_{ck} \quad (3)$$

$$N_{AISC,RHS} = A_s f_y + 0.85 A_c f_{ck} \quad (4)$$

我国 CECS 28: 2012 分别给出了圆钢管混凝土短柱和椭圆钢管混凝土短柱的计算式:

$$N_{CECS,CHS} = (A_s + A_c) (1.212 + B_1 \theta + C_1 \theta^2) f_{ck} \quad (5)$$

$$N_{CECS,EHS} = (A_s + A_c) (1.212 + B_2 \theta + C_2 \theta^2) f_{ck} \quad (6)$$

其中: $B_1 = 0.1795 f_y / 235 + 0.974$; $C_1 = -0.1038 f_y / 20.1 +$

表 5 钢管混凝土短柱试件承载力计算值对比

Table 5 Predicted capacity of concrete-filled stub column specimens

试件编号	$N_{EC4,S} /$ kN	$N_{EC4,CHS} /$ kN	$N_{AISC,CHS} /$ kN	$N_{AISC,RHS} /$ kN	$N_{CECS,CHS} /$ kN	$N_{CECS,EHS} /$ kN	$N_{u,f} /$ $N_{EC4,S}$	$N_{u,f} /$ $N_{EC4,CHS}$	$N_{u,f} /$ $N_{AISC,CHS}$	$N_{u,f} /$ $N_{AISC,RHS}$	$N_{u,f} /$ $N_{CECS,CHS}$	$N_{u,f} /$ $N_{CECS,EHS}$
CF-A-SC1	902	1 268	893	—	1 001	—	1.30	0.93	1.31	—	1.17	—
CF-A-SC2	913	1 282	904	—	1 004	—	1.29	0.92	1.30	—	1.17	—
CF-A-SC3	914	1 284	905	—	1 006	—	1.28	0.91	1.29	—	1.16	—
CF-B-SC1	997	1 388	989	—	982	—	1.43	1.03	1.44	—	1.45	—
CF-B-SC2	1 037	1 438	1 029	—	973	—	1.34	0.97	1.35	—	1.43	—
CF-B-SC3	985	1 372	977	961	979	—	1.46	1.05	1.47	—	1.47	—
EF-A-SC1	992	1 319	983	966	—	937	0.87	0.65	0.88	0.89	—	0.92
EF-A-SC2	1 007	1 327	998	981	—	861	0.85	0.65	0.86	0.87	—	0.99
EF-A-SC3	1 013	1 335	1 004	987	—	864	0.83	0.63	0.84	0.85	—	0.98
EF-C-SC1	1 369	1 553	1 364	1 353	—	—	1.06	0.93	1.06	1.07	—	—
EF-C-SC2	1 393	1 578	1 388	1 378	—	—	1.04	0.92	1.04	1.05	—	—
EF-C-SC3	1 381	1 565	1 376	1 366	—	—	1.05	0.93	1.05	1.06	—	—

$0.0309; B_2 = (0.1795f_y/235 + 0.974)(b/h)^{0.3}; C_2 = (-0.1038f_y/20.1 + 0.0309)(b/h)^{0.3}$ 。

表5给出了计算值与试验值的对比结果。由表5可见,对于圆钢管混凝土短柱,采用EC4规范中给出的通用简单算法($N_{EC4,S}$),美国AISC规范($N_{AISC,CHS}$)以及我国相关规程($N_{CECS,CHS}$)的计算结果均偏于保守,而EC4规范中给出的圆钢管混凝土计算方法($N_{EC4,CHS}$)较准确地估计了试件的承载力。

对于钢管壁厚较小的椭圆钢管混凝土EF-A系列试件,采用圆截面和矩形截面钢管混凝土短柱承载力计算公式进行计算的结果均偏于不安全,而CECS 28:2012相对准确地预测了试件的承载能力。对于EF-C系列试件,除采用EC4圆钢管混凝土短柱承载力公式计算偏于不安全外,其余计算式均偏于保守地估计了试件的承载能力。

4 结论

1) 与母材热轧圆钢管相比,冷拔成型椭圆钢管短柱表现出较低的承载力和延性,现有的热处理椭圆钢管截面的分类规则适用于冷拔成型椭圆钢管。

2) 填充轻骨料混凝土能够显著提高试件的承载能力和延性。相比于椭圆截面试件,填充混凝土对圆钢管试件的轴压承载力和延性提高程度更大。截面形态相同的试件,钢管壁厚较小的CF-A和EF-A系列试件轴压承载力和延性提高程度分别比CF-B和EF-C系列大(约提高10%)。

3) EC4规范可以较准确地估计圆钢管混凝土试件的承载能力,CECS 28:2012《钢管混凝土结构技术规程》可以较准确地估计套箍系数小的椭圆钢管混凝土短柱的承载力,而对于套箍系数较大的椭圆钢管混凝土的承载力计算方法有待进一步研究。

参 考 文 献

[1] Wardenier J. Hollow sections in structural applications [M]. Netherlands: Comité International pour le Développement de l'Etude de la Construction Tubulaire, 2011.

[2] Han L H, Li W, Bjorhovde R. Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: members [J]. Journal of

Constructional Steel Research, 2014, 100(9): 211-228.

[3] Viñuela-Rueda L, Martínez-Salcedo J. Steel structure and prestressed facade of the new terminal building [J]. HormigonAcero, 2006, 239(1): 71-84.

[4] Chan T M, Gardner L. Compressive resistance of hot-rolled elliptical hollow sections [J]. Engineering Structures, 2008, 30(2): 522-532.

[5] Sheehan T, Dai X H, Chan T M, Lam D. Structural response of concrete-filled elliptical steel hollow sections under eccentric compression [J]. Engineering Structures, 2012, 45(2): 314-323.

[6] Gardner L, Chan T M. Cross-section classification of elliptical hollow sections [J]. Steel and Composite Structures, 2007, 7(3): 185-200.

[7] Bradford M A, Roufegarinejad A. Elastic local buckling of thin-walled elliptical tubes containing elastic infill material [J]. Interaction and Multiscale Mechanics, 2007, 1(1): 143-156.

[8] Yang H, Lam D, Gardner L. Testing and analysis of concrete-filled elliptical hollow sections [J]. Engineering Structures, 2008, 30(12): 3771-3781.

[9] Zhao X L, Packer J A. Tests and design of concrete-filled elliptical hollow section stub columns [J]. Thin-Walled Structures, 2009, 47(6): 617-628.

[10] Dai X, Lam D. Numerical modelling of the axial compressive behaviour of short concrete-filled elliptical steel columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(7): 931-942.

[11] Uenaka K. Experimental study on concrete filled elliptical/oval steel tubular stub columns under compression [J]. Thin-Walled Structures, 2014, 78(1): 131-137.

[12] BS EN 1993-1-1 Eurocode 3: design of steel structures: part 1-1: general rules and rules for buildings [S]. Milton Keynes: BSI, 2005.

[13] BS EN 1994-1-1 Eurocode 4: design of composite steel and concrete structures: part 1-1: general rules and rules for buildings [S]. Milton Keynes: BSI, 2004.

[14] AISC 360-10 Specification for structural steel buildings [S]. Chicago, IL: American Institute of Steel Construction, 2010.