

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201811015



高强冷弯矩形截面钢管混凝土柱 偏压性能试验

黄泳水^{1,2}, 张继承^{1,2}, 饶玉龙^{1,2}, 李勇^{1,2}, 申兴月^{1,2,3}, 吕宇莎⁴

- (1. 长江大学 城市建设学院, 湖北 荆州 434023;
2. 长江大学结构工程与防灾研究所, 湖北 荆州 434023;
3. 武汉建工集团股份有限公司, 湖北 武汉 430000;
4. 河北建研建筑设计有限公司, 河北 石家庄 050000)

摘要: 为研究高强冷弯矩形截面钢管混凝土柱(CFST)在偏心受压荷载作用下的力学性能,对 Q420 型高强冷弯钢设计制作的矩形截面钢管混凝土柱进行偏心受压试验,获得试件在偏压荷载作用下的破坏形态、跨中挠度及应变分布规律,并分析不同参数对试件偏心受压承载能力的影响. 试验结果表明:高强冷弯矩形截面钢管混凝土柱的偏心受压性能受长细比、偏心率和宽厚比等参数影响较为明显,长细比、偏心率和宽厚比越大,高强冷弯矩形截面钢管混凝土柱的偏心受压承载能力越小.

关键词: 高强冷弯钢管; 钢管混凝土柱; 偏压性能; 承载力

中图分类号: TU 392.3; TU 317.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2019)02-0179-07

Experimental Study on Eccentrically-Compressed Performance of High-Strength Cold-Formed Rectangular-Section CFST Columns

HUANG Yongshui^{1,2}, ZHANG Jicheng^{1,2}, RAO Yulong^{1,2},
LI Yong^{1,2}, SHEN Xingyue^{1,2,3}, LÜ Yusha⁴

- (1. School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou 434023, China;
2. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Yangtze University, Jingzhou 434023, China;
3. Wuhan Construction Engineering Company Limited, Wuhan 430000, China;
4. Hebei Institute of Building Architectural Design Limited Company, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: In order to investigate the mechanical performance of high-strength cold-deformed rectangular-section concrete-filled steel tubular (CFST) columns under eccentric compression loading, the specimens were designed and manufactured using Q420 high-strength cold-formed steel, the eccentric compression experiments were conducted to obtain the failure mode, mid-span deflection, strain distribution. The effects of different parameters on the eccentric compressive bearing capacity of the specimens were investigated. The experimental results show that: the eccentrically-compressed performance of high strength cold-formed rectangular-section CFST columns is significantly affected by the slenderness ratio, eccentricity ratio and width-thickness ratio. As the slenderness ratio, eccentricity ratio and width-thickness ratio increase, the eccentric compressive bear-

收稿日期: 2018-11-09

通信作者: 张继承(1976-),男,教授,博士,主要从事钢管混凝土组合结构的研究. E-mail: zhangjc1976@hotmail.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778065);湖北省教育厅科学技术研究项目(D20151304)

ing capacity of high strength cold-formed rectangular section CFST columns decreases.

Keywords: high-strength cold-formed steel; concrete-filled steel tubular column; eccentrically-compressed performance; bearing capacity

钢管混凝土结构是一种应用广泛的结构形式,具有承载力高、刚度大、经济性好、施工方便及抗震性能优异等特点,广泛应用于高层、超高层建筑和大跨桥梁等工程,受到研究人员的广泛关注. 高强冷弯钢管混凝土结构除了具有钢管混凝土结构的基本优点外,还具有焊缝少、焊接量小、焊接质量高、施工工期节省等特点,冷弯钢管生产过程中产生较小的残余应力和残余变形,有利于构件的力学性能,具有广阔的应用前景. 目前,大多研究主要集中于普通强度钢管混凝土的力学性能研究^[1-4],对高强钢管混凝土的力学性能研究较少^[5-13]. 对普通冷弯钢管混凝土构件的偏压性能研究主要集中在以薄壁型钢和冷弯型钢为主要组成的钢管混凝土构件. Shanmugam 等^[14]研究在柱顶施加轴力与双向弯矩下,长宽比和宽厚比对冷弯矩形截面型钢制作的钢管混凝土柱承载力的影响,并提出 $M-N$ 曲线. 曹宝珠^[15]对薄壁钢管混凝土柱的力学性能进行试验研究,研究在轴压和偏压荷载作用下宽厚比、长细比、偏心率及混凝土强度等参数对极限承载力的影响. 陈勇^[16]对 42 个短柱和 27 根长柱的冷弯薄壁钢管混凝土柱进行偏心受压试验研究与数值模拟,给出冷弯薄壁钢管混凝土柱极限承载力的计算方法. 陶忠等^[17]通过试验和数值模拟,验证冷弯钢管混凝土柱具有优越的力学性能,提出不同受力方式下该类柱承载力的计算方法. 王静峰等^[18]开展多影响因素下冷弯薄壁方形截面钢管混凝土组合柱的力学性能试验研究和进行非线性分析. 王兰等^[19]利用有限元数值模拟研究带脱空的钢管混凝土短柱的抗剪性能. 申兴月等^[20]对高强冷弯矩形钢管混凝土柱进行偏心受压试验研究和有限元数值分析,论证其具有较好的偏压性能. 鉴于目前国内外对内填高强混凝土的高强冷弯钢管柱偏心受压力学性能的研究较少,本文对 9 根高强冷弯矩形截面钢管混凝土柱进行偏心受压试验.

表 1 试件主要设计参数

Tab. 1 Main design parameters of specimens

试件编号	L/mm	A/mm	B/mm	t/mm	e/mm	B/t	L/i
CFST-Z1	1 300	200	150	4	50	37.5	30.0
CFST-Z2	1 300	200	150	5	50	30.0	30.0
CFST-Z3	1 300	200	150	6	50	25.0	30.0
CFST-Z4	1 300	200	100	5	30	20.0	45.0
CFST-Z5	1 300	200	100	5	50	20.0	45.0
CFST-Z6	1 300	200	100	5	80	20.0	45.0
CFST-Z7	1 300	200	100	5	50	20.0	45.0
CFST-Z8	1 300	200	150	5	50	30.0	30.0
CFST-Z9	1 300	200	200	5	50	40.0	22.5

1 试验概况

1.1 试件设计

试验设计制作 9 根矩形截面的高强冷弯钢管混凝土柱,长度均为 1 300 mm,柱截面长度方向尺寸均为 200 mm,宽度方向尺寸按比例变化. 试件主要设计参数,如表 1 所示. 表 1 中: L, A, B, t 分别为试件柱长,截面长度,截面宽度,截面厚度; e 为偏心距; B/t 为宽厚比; L/i 为长细比.

为保证试件加载过程中柱端受力均匀,在试件顶部和底部分别设置 15 mm 厚矩形端板,依据不同矩形钢管混凝土柱截面尺寸,端板尺寸分别设计为 240 mm×240 mm,240 mm×190 mm,240 mm×140 mm. 在混凝土浇筑前,将一端端板与钢管焊接;在浇筑混凝土时,竖起钢管进行混凝土分段浇灌,浇灌高为 0.5 m. 采用振捣棒将混凝土振捣密实,待混凝土浇灌完成养护 28 d 后,将另一端混凝土打磨平整光滑并将端板与钢管焊接.

表 2 钢材主要材料性能参数

Tab. 2 Main material properties of steel

A/mm	B/mm	t/mm	f_y/MPa	f_u/MPa	E_s/TPa	$\delta/\%$
200	100	5	432	583	0.194	30
200	150	4	365	481	0.182	33
200	150	5	427	578	0.182	29
200	150	6	468	629	0.201	31
200	200	5	481	627	0.189	33

1.2 材料性能

Q420 型高强冷弯钢主要材料性能参数,如表 2 所示. 表 2 中: A, B, t 分别为试件截面长度、截面宽度、截面厚度; f_y 为屈服强度; f_u 为极限强度; E_s 为弹性模量; δ 为伸长率. 核心混凝土采用 C40,通过标准压缩试验,得到标准混凝土立方体的抗压强度平均值 f_{cu} 为 38.9 MPa.

1.3 试验加载与加载制度

试验采用量程为 5 000 kN 的液压伺服压剪试验机对试件进行偏压加载,如图 1 所示. 在柱上下两

端设置柱铰,并调整偏心力的施加位置,利用压剪试验机控制偏心力的加载大小,实现偏压加载.柱铰为 300 mm×145 mm 钢垫块开圆弧槽并与圆柱体芯咬合的装置,柱铰可绕圆柱体芯旋转,保证柱端加载端板受压均匀.

试验前,在试件底部和中部粘贴应变片、受压侧均匀布置 5 个位移传感器,选用 DH3816 型应变采集箱采集钢管表面应变和位移变化情况.试件应变片布置,如图 2 所示.试验加载过程中,当初始试件顶端的柱铰即将接触到加载顶板时,采用位移加载;之后,停止位移加载,采用力控制加载.为确保加载装置和采集系统正常工作,按照 1/10 的预估值为一级,逐级加载,每级加载结束后,静载 2 min.

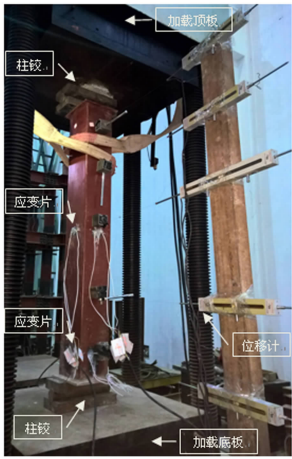


图 1 试件加载装置
Fig. 1 Specimen loading set-up

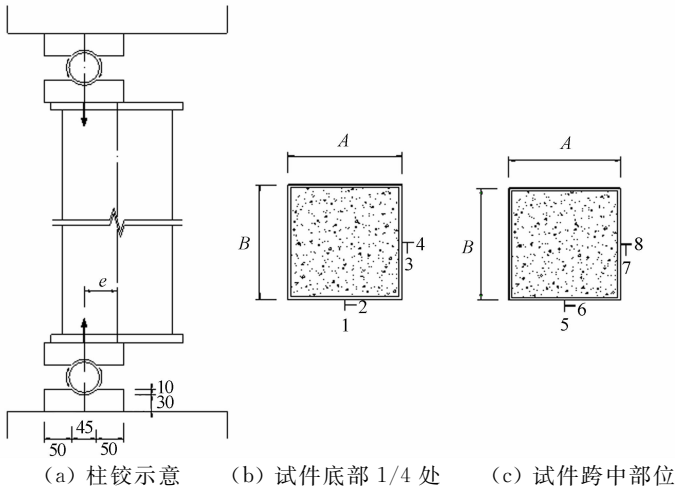


图 2 试件应变片布置(单位: mm)
Fig. 2 Layout of strain gauges (unit: mm)

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

试件的破坏形态,如图 3 所示.在不同偏心率下,试件的荷载-侧向变形曲线,如图 4 所示.图 4 中: ζ 为偏心率; u 为侧向变形.由图 3 可知:试件整体变形为中部弯曲,局部鼓曲,在偏心荷载作用下,试件破坏特征均表现为弯曲破坏.因此,高强冷弯矩形截面钢管混凝土柱与普通矩形截面钢管混凝土柱的偏心受压力学特性类似,破坏形态基本一致.采用 Q420 型高强钢管设计的试件在偏心荷载作用前期试验现象并不明显;在长细比、偏心率和宽厚比的影响下,随着偏心荷载加载至钢管屈服,试件跨中部位弯曲现象显著,鼓曲现象发展迅速,最终试件因丧失承载能力而导致完全破坏.



图 3 典型试件的破坏形态
Fig. 3 Failure modes of typical specimens

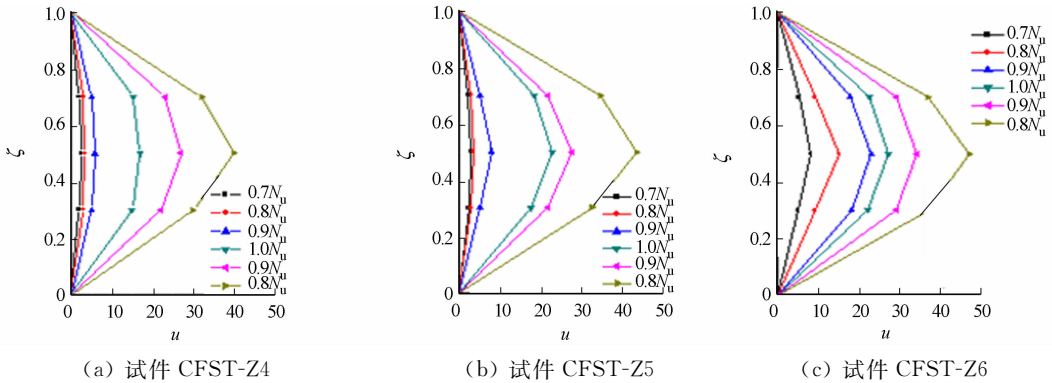


图 4 试件荷载-侧向变形曲线
Fig. 4 Load-lateral deformation curve of specimens

由图 4 可知:在极限承载力范围内,偏心荷载越大,试件的侧向变形曲线的曲率越大,表明偏心率对该类偏压柱侧向位移影响显著;偏心距越大,对侧向变形影响越明显,破坏荷载则越小。

2.2 破坏特征

试件在不同偏心率下的荷载-跨中挠度曲线和不同参数下的荷载-竖向位移曲线,分别如图 5,6 所示。图 5,6 中: F 为荷载; s 为挠度。试件破坏过程经历了 3 个阶段:弹性阶段、弹塑性阶段、破坏阶段。

- 1) 弹性阶段. 加载初期,当荷载逐渐增加至极限荷载的 60% 时,试件无明显现象. 力与变形呈直线上升,力增速较快,应力与变形均较小. 钢管套箍作用可忽略,跨中钢管表面油漆出现褶皱,核心混凝土有被压密实的微小噼啪声。
- 2) 弹塑性阶段. 当荷载增加至极限荷载的 70% 时,试件变形速率大于力增加速率. 跨中轻微弯曲并出现油漆剥落,试件上、下端部油漆轻微褶皱,应力和挠度明显增加. 荷载-位移曲线出现拐点,由直线段到达弯曲段,钢管局部屈曲,跨中截面前后侧钢管出现鼓曲。
- 3) 破坏阶段. 随着荷载继续增加,试件跨中挠度增速加快,钢管套箍效应明显. 核心混凝土被压碎并伴有轻微破碎炸裂声,跨中截面前后侧钢管严重鼓曲,左右侧出现鼓曲,鼓曲位置逐渐由中部向角部扩展. 此时,受位移引起的二阶弯矩作用影响,二阶效应明显,试件加速弯曲,鼓曲显著,荷载增加速率小于变形速率,加载后期试件迅速达到了极限承载力. 当超过峰值荷载后,承载力快速下降,试件急剧变形,跨中部位严重鼓曲,最终弯曲破坏。

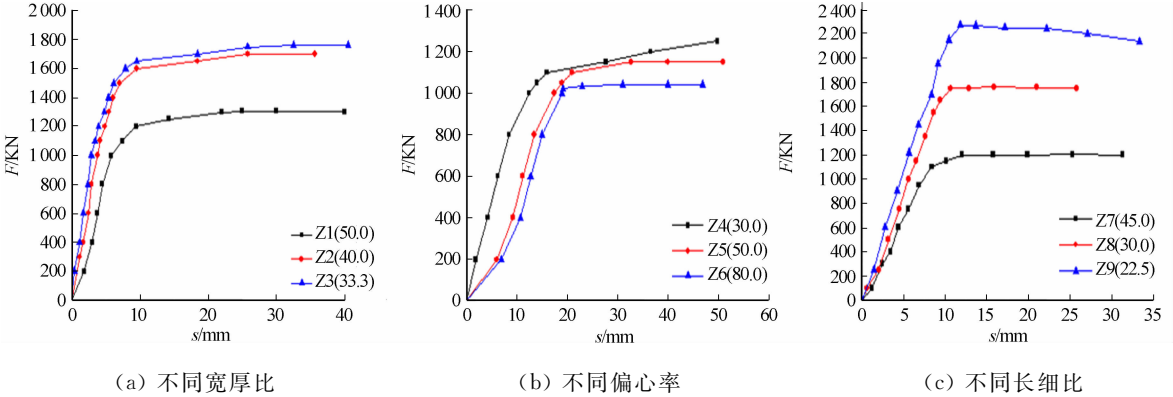


图 5 试件跨中挠度曲线
Fig. 5 Midspan deflection curve of specimens

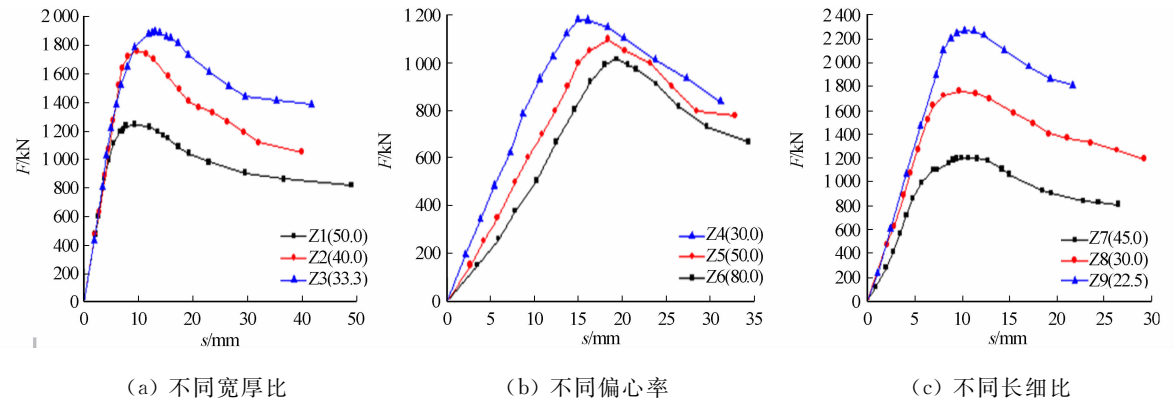


图 6 试件荷载-位移曲线
Fig. 6 Load-displacement curve of specimens

由图 5 可知:试件挠曲变形在弹性阶段时呈线性变化,变形缓慢;弹塑性阶段时呈非线性变化,变形加快;破坏阶段时,变形迅速,出现塑性破坏. 由图 5(a)可知:宽厚比越小,极限承载力越大. 由图 5(b)可知:偏心率对挠曲变形影响明显,弹性阶段变形速率较快,偏心率越大,承载能力越小. 由图 5(c)可知:长细比越大,极限承载力越小,越易屈曲破坏。

由图 6 可知:试件在偏心荷载作用下,钢管的套箍效应显著,一定程度提高试件的整体承载能力. 加载过程中,核心混凝土横向变形明显;加载初期,核心混凝土泊松比由加载初期小于钢管的泊松比,逐渐

增加变为大于钢管的泊松比. 由图 6(a)可知:宽厚比对试件的偏心受压性能影响明显,随着宽厚比的增大,偏心受压承载能力缓慢减小. 由图 6(b)可知:偏心率对试件偏心受压承载力的影响显著,偏心率越大,偏心受压承载力越小,变化迅速. 由图 6(c)可知:长细比越大,承载力越小,长细比对偏心受压性能影响较大.

2.3 荷载-竖向应变

根据竖向应变片采集的应变数据得到不同参数下试件的荷载-竖向应变曲线,如图 7 所示. 图 7 中: ϵ 为应变. 由图 7 可知:与宽厚比、偏心率相比,长细比对竖向应变影响最大,曲线分散,极限承载力差别较大. 因此,长细比越大,竖向位移变化越迅速,钢管混凝土柱越容易弯曲破坏. 在偏心受压荷载作用下,在试件的跨中截面位置处,远离荷载作用点一侧受拉,试件的应变值为正值;临近荷载作用点一侧受压,试件的应变值为负值. 跨中截面受压区的应变远大于受拉区的应变,偏心荷载越大,应变值越大. 当钢管屈服后,试件应变增加迅速,大于荷载增速. 在受拉区和受压区的应变均有一定的流幅阶段,但并不明显. 加载完成后,试件拉、压区的应变均达到屈服应变.

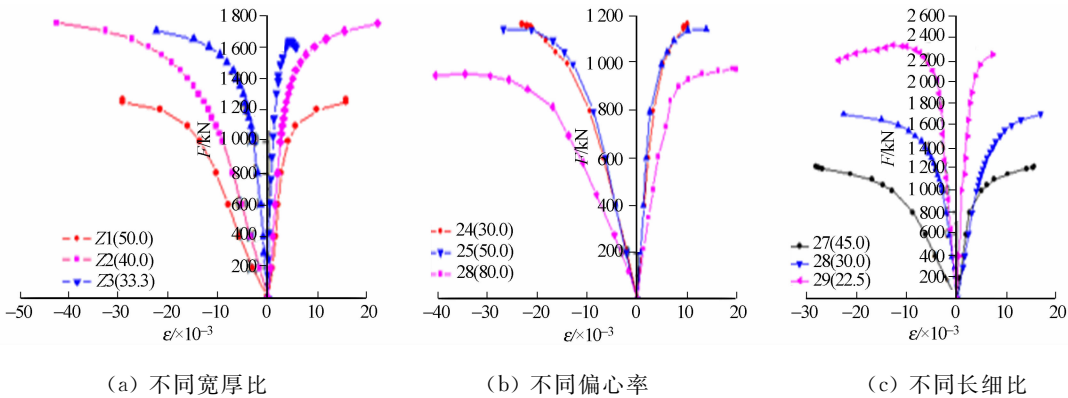


图 7 试件跨中荷载-竖向应变曲线

Fig. 7 Midspan load-vertical strain curve of specimens

2.4 跨中截面应变

试件在不同长细比(λ)下跨中截面沿高度方向等分点应变的分布曲线,如图 8 所示. 图 8 中: H 为截面高度. 由图 8 可知:沿截面高度应力分布变化趋势相同;加载前期,试件截面平均应变表现为线性变化趋势,处于弹性阶段,加载后期,试件的截面应变表现为非线性变化趋势,表明钢管局部屈曲,钢管壁与核心混凝土剥离;长细比越大,试件受二阶弯矩影响越大越容易破坏.

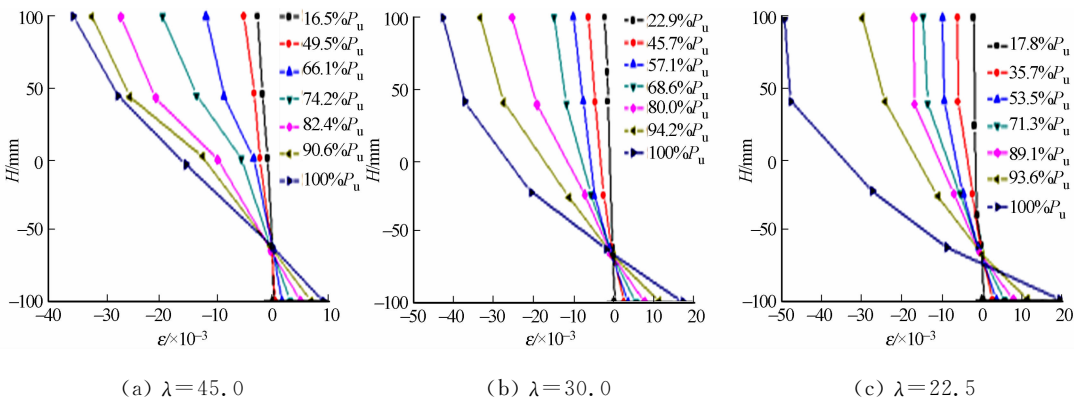


图 8 试件跨中沿高度方向应变分布

Fig. 8 Midspan strain distribution along height direction

3 承载力计算

根据 CECS 28: 2012《钢管混凝土结构技术规程》^[21], GB 50936—2014《钢管混凝土结构技术规范》^[22], 基于极限平衡理论, 考虑长细比和偏心率对承载力的影响, 得到矩形截面钢管混凝土柱偏压承

载力计算公式为

$$N_u = \varphi_l \varphi_e N_0. \tag{1}$$
$$N_0 = \begin{cases} 0.9A_c f_c (1 + \alpha \xi), & 0.5 < \xi \leq [\xi], \\ 0.9A_c f_c (1 + \sqrt{\xi} + \xi), & [\xi] < \xi \leq 2.5. \end{cases} \tag{2}$$
$$\xi = A_a f_a / A_c f_c. \tag{3}$$
$$\varphi_e = \begin{cases} 1/(1 + 1.85e_0/\gamma_c), & e_0/\gamma_c \leq 1.55, \\ 0.4/(e_0/\gamma_c), & e_0/\gamma_c > 1.55. \end{cases} \tag{4}$$
$$\varphi_l = \begin{cases} 1, & L_e/D \leq 4, \\ 1 - 0.115 \sqrt{L_e/D - 4}, & L_e/D > 4. \end{cases} \tag{5}$$
$$L_e = \mu k L. \tag{6}$$

式(1)~(6)中: N_0 为钢管混凝土柱的轴心受压强度承载力设计值,N; ξ 为钢管混凝土的套箍系数; α 为核心混凝土强度等级相关的系数; r_c 为钢管内核心混凝土横截面的半径,mm; e_0 为柱端轴向压力偏心距较大者,mm; φ_e, φ_l 分别为偏心率和长细比影响系数,且 $\varphi_e \varphi_l \leq \varphi_0$; D 为钢管的外直径,mm; L_e 为钢管混凝土柱的等效计算长度,mm; L 为钢管混凝土柱的实际长度,mm.

依据现有规范法计算结果和试验数据结果,基于多参数影响因素,考虑宽厚比对承载力的影响,引入宽厚比影响系数 φ_k . 假定水平坐标为宽厚比 B/t ,竖向坐标为试验值与规范值的比值, φ_k 表达式为

$$\varphi_k = \begin{cases} 1 + 0.000\ 93B/t, & B/t \geq 20, \\ 1, & B/t < 20. \end{cases} \tag{7}$$

适于长细比、偏心率和宽厚比等多参数影响的偏心受压承载力计算公式为

$$N_u = \varphi_l \varphi_e \varphi_k N_0. \tag{8}$$

不同参数影响下,试件的极限承载力对比结果,如表 3 所示. 由表 3 可知:试验值与计算值相近,吻合度较好;试件的极限承载力随偏心距、宽厚比和长细比的增大而减小,其中,长细比影响显著,偏心率次之;在长细比和偏心率的共同影响下,试件产生较大的二阶效应.

表 3 不同参数影响下极限承载力

Tab. 3 Ultimate bearing capacity for different parameters

截面尺寸/mm×mm×mm	e/mm	λ/mm	B/t	极限承载力/kN		
				规范值	试验值	修正值
200×100×5	30	45.0	20.0	1 379	1 250	1 448
200×100×5	50	45.0	20.0	1 202	1 150	1 246
200×100×5	80	45.0	20.0	1 008	1 041	1 045
200×150×4	50	30.0	37.5	1 198	1 245	1 242
200×150×5	50	30.0	30.0	1 531	1 761	1 589
200×150×6	50	30.0	25.0	1 817	1 898	1 884
200×100×5	50	45.0	20.0	1 202	1 200	1 202
200×150×5	50	30.0	30.0	1 531	1 762	1 588
200×200×5	50	22.5	40.0	1 962	2 273	2 035

4 结论

1) 在偏心受压荷载作用下,试件破坏形式表现为弯曲破坏. 当试件达到极限承载力时,钢管呈现为屈服状态、局部钢管出现屈曲并形成塑性铰. 随后,受压区混凝土被压碎. 最终试件变形严重直至完全丧失承载能力而破坏.

2) 试件破坏过程经历了弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段. 破坏过程稳定,无异常变形或位移变化情况,表现出良好的延性和偏压性能,钢管与核心混凝土具有较好的协同能力.

3) 试件偏心受压破坏过程中,宽厚比 B/t 越大,钢管混凝土柱的极限承载力 f_u 越小;长细比 λ 越大,钢管混凝土柱的极限承载力 f_u 越小;偏心率 e 越大,钢管混凝土柱的极限承载力 f_u 越小.

4) 试件偏压破坏过程受二阶效应影响较大,加载前期,试件的中和轴偏移较缓慢;加载后期,试件鼓曲程度迅速、跨中弯曲增幅明显。

5) 提出的偏心受压承载力计算方法,可用于高强冷弯矩形截面钢管混凝土柱的计算,可为方形、圆形等截面形式的高强冷弯钢管混凝土柱偏压承载力计算提供参考。

参考文献:

- [1] NEOGI P K, SEN H K, CHAPMAN J C. Concrete-filled tubular steel columns under eccentric loading[J]. The Structural Engineer, 1969, 47(1): 187-195.
- [2] 蔡绍怀, 邸小坛. 钢管混凝土偏压柱的性能和强度计算[J]. 建筑结构学报, 1985, 6(4): 32-41. DOI: 10. 14006/j. jzjgxb. 1985. 04. 004.
- [3] RANGAN B V, JOYCE M. Strength of eccentrically loaded slender steel tubular columns filled with high-strength concrete[J]. ACI Structural Journal, 1992, 89(6): 676-681.
- [4] YANG Youfu, HAN Linhai. Behavior of concrete filled steel tubular (CFST) stub columns under eccentric partial compression[J]. Thin-Walled Structures, 2011, 49(2): 379-395. DOI: 10. 1016/j. tws. 2010. 09. 024.
- [5] ANDREW E, KILPATRICK, RANGAN B V. Tests on high-strength concrete-filled steel tubular columns[J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(2): 268-274. DOI: 10. 14359/618.
- [6] 顾维平, 蔡绍怀. 钢管高强混凝土偏压柱性能和承载能力的研究[J]. 建筑科学, 1993, 9(3): 8-12. DOI: 10. 13614/j. cnki. 11-1962/tu. 1993. 03. 002.
- [7] WANG Wei. Ultimate capacity analysis of concrete-filled steel tubular structure under eccentric compression[C]// Second International Conference on Transportation Engineering. Chengdu: American Society of Civil Engineers, 2009: 1481-1486. DOI: 10. 1061/41039(345)245.
- [8] 戴苗. 偏压钢管混凝土柱性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- [9] 李斌, 高春彦, 王斌, 等. 方钢管混凝土偏压柱受力性能分析[J]. 建筑结构, 2010, 40: 398-400. DOI: 10. 19701/j. jzjg. 2010. s2. 118.
- [10] 潘鑫, 史艳莉, 王文达. 圆钢管混凝土偏压柱全寿命周期力学性能研究[J]. 钢结构, 2018, 33(4): 38-39. DOI: 10. 13206 /j. gjg201804007.
- [11] 关萍, 陈兰响, 刘晴晴. 钢管混凝土偏压柱非线性分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2015, 36(3): 332-337. DOI: 10. 11830/issn. 1000-5013. 2015. 03. 0332.
- [12] 郭雪源, 张明聚, 刘义, 等. 矩形钢管混凝土柱偏压极限荷载半解析计算方法[J]. 工业建筑, 2018, 48(8): 190-196. DOI: 10. 13204/j. gyjz201808032.
- [13] 杜闯, 魏少武, 杨小明, 等. 钢管混凝土柱偏压承载力新公式[J]. 沈阳工业大学学报, 2014, 36(2): 235-240. DOI: 10. 7688 /j. issn. 1000-1646. 2014. 02. 21.
- [14] SHANMUGAM N E, RICHARD L J Y, LEE S L. Thin-walled steel box columns under biaxial loading[J]. Journal of structural engineering, 1989, 115(11): 2706-2727. DOI: 10. 1061/ (ASCE)0733-9445(1989)115:12(2076)
- [15] 曹宝珠. 薄壁钢-混凝土组合构件静力性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004.
- [16] 陈勇. 新型薄壁钢管混凝土柱静力性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004.
- [17] 陶忠, 王志滨, 韩林海. 矩形冷弯型钢钢管混凝土柱的力学性能研究[J]. 工程力学, 2006, 23(3): 147-155.
- [18] 王静峰, 郭水平, 陈莉萍, 等. 冷弯薄壁方钢管混凝土柱的非线性有限元分析[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2008, 25: 88-91. DOI: 10. 3969/j. issn. 2095-0985. 2008. 04. 024.
- [19] 王兰, 叶勇, 郭子雄, 等. 带脱空的钢管混凝土短柱受剪性能有限元分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2018, 39(2): 179-185. DOI: 10. 11830/issn. 1000-5013. 201710013.
- [20] 申兴月. 高强冷弯矩形钢管混凝土柱偏压试验研究[D]. 荆州: 长江大学, 2017.
- [21] 哈尔滨工业大学, 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.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 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.