

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.034

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



T形方钢管混凝土组合异形柱偏压性能试验研究

李泉¹,周学军¹,李国强^{1,2},刘哲¹,王振¹,王兴博¹,咸国栋¹

(1. 山东建筑大学 土木工程学院, 济南 250101; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: T形方钢管混凝土组合异形柱具有良好的力学性能,以试件长度、偏心距、偏心方向为试验参数,设计9个不同长细比的试件进行偏心受压试验,观察试件的破坏形态,得到荷载-应变曲线和荷载-挠度曲线,并分析各参数对试件偏心受压性能的影响。试验结果表明:长度为600 mm的试件发生了强度破坏,长度为1 500、1 800 mm的试件发生了弯曲失稳破坏;试件长度越长,弯曲破坏特征越明显;偏心距越大,偏压承载力越低;偏心方向对偏心受压性能的影响相对较小。与相关规范计算结果对比发现,按DBJ/T 13-51—2010计算的结果与试验结果吻合最好。研究结果表明,T形方钢管混凝土组合异形柱延性较好,方钢管之间可以协同工作,偏心受压力学性能良好。

关键词: 方钢管混凝土;组合异形柱;偏心受压;力学性能;试验研究

中图分类号: TU317; TU398 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2021)02-0102-10

Experimental study on the behavior of special T-shaped composite columns with concrete-filled square steel tubulars under eccentric loads

LI Quan¹, ZHOU Xuejun¹, LI Guoqiang^{1,2}, LIU Zhe¹, WANG Zhen¹, WANG Xingbo¹, XIAN Guodong¹

(1. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, P. R. China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: The special T-shaped composite columns with concrete-filled square steel tubulars have good mechanical properties. Taking the length, eccentricity and eccentricity direction of the specimen as the test parameters, nine specimens with different slenderness ratio are designed for eccentric compression test. By observing the failure mode of the specimen, the load-strain curve and load-deflection curve are obtained, and the influence of each parameter on the eccentric compression performance of the specimen is analyzed. The test results show that the strength of 600 mm long specimens is damaged. The specimens with lengths of 1 500, 1 800 mm are broken by bending instability; the longer the specimen length is, the more obvious the bending failure characteristics are; the larger the eccentricity is, the lower the eccentric bearing capacity is; the eccentricity direction has a relatively small impact on the eccentric compression performance. It is found that compared with the calculation results of relevant specifications, the results calculated by DBJ /

收稿日期: 2019-12-20

基金项目: 国家重点研发计划(SQ2020YFF0426523);山东省自然科学基金(ZR202QE264);山东建筑大学博士项目(X19035Z)。

作者简介: 李泉(1992-),男,主要从事钢结构基本理论与空间钢结构研究, E-mail: liquanwdm@163.com。

周学军(通信作者),男,教授,博士生导师, E-mail: xuejunzhou@sdjzu.edu.cn。

Received: 2019-12-20

Foundation items: National Key R & D Program of China (No. SQ2020YFF0426523); Shandong Provincial Natural Science Foundation (No. ZR202QE264); Shandong Jianzhu University PhD Program (No. X19035Z).

Author brief: LI Quan (1992-), main research interests: basic theory of steel structure and space steel structure, E-mail: liquanwdm@163.com.

ZHOU Xuejun (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: xuejunzhou@sdjzu.edu.cn.

T 13-51-2010 are in good agreement with the test results. The ductility of special T-shaped composite columns with concrete-filled square steel tubulars is well, the square steel tubes can work together, and the eccentric compression performance is good.

Keywords: concrete filled square steel tube; composite special-shaped column; eccentric compression; mechanical properties; experimental study

传统住宅建筑结构形式在建筑美观性、室内空间利用率和抗震性能等方面存在不足,异形钢管混凝土柱结合了钢管和混凝土各自良好的力学性能,满足了人们日益增长的对建筑结构更高的多样化需求。然而,普通钢管混凝土异形柱中,钢管对核心混凝土的约束作用较弱,而且截面存在阴角,荷载作用时阴角部位可能出现较大变形和破坏,进而导致钢管混凝土异形柱的承载力下降。为此,提出一种新型组合式方钢管混凝土组合异形柱,包括 L 形、T 形和十字形截面。T 形方钢管混凝土组合异形柱不仅可以改善阴角,增强对混凝土的约束作用,提高承载力,还具有加工制作方便、施工速度快、构件生产成本低和经济效益高等优点,因此,成为研究的热点。

目前,对钢管混凝土异形柱的研究主要集中在其力学性能上。Wang 等^[1]、Ren 等^[2]、Xu 等^[3]、Zhang 等^[4]进行了 44 个异形钢管混凝土柱的轴压试验,研究钢管壁厚和混凝土强度对组合异形柱受力性能的影响及钢管与混凝土之间的相互作用,提出异形多单元钢管混凝土轴压承载力计算公式。左志亮等^[5-8]、蔡健等^[9-11]、龙跃凌等^[12]对 27 个 T 形和 14 个 L 形带约束拉杆的钢管混凝土短柱的轴压和偏压性能进行试验研究,分析约束拉杆间距、偏心率及荷载角对轴压和偏压性能的影响,研究发现,约束拉杆可以延缓钢管局部屈曲,限制截面阴角处的变形,并提高钢管对核心混凝土的约束作用。Yang 等^[13-14]、Liu 等^[15-16]、Liu 等^[17]、Xu 等^[18]对一批 T 形钢管混凝土柱、T 形钢管约束混凝土柱和钢筋加劲 T 形钢管混凝土柱进行了轴压和偏压试验,研究了含钢率、钢材屈服强度、混凝土抗压强度、长细比、截面尺寸、柱肢宽厚比及配筋率等参数对试件承载力的影响,提出异形钢管混凝土柱截面承载力和稳定承载力的设计计算公式。Xiong 等^[19]、Zhou 等^[20-21]、Liu 等^[22]、Zhang 等^[23]、Xu 等^[24]进行了 19 个缀板连接的格构式 L 形钢管混凝土异形柱试件的轴压、单向偏压及双向偏压承载力试验,研究柱的破坏模式、荷载-变形关系、应变分布、延性和强度指标

等,并提出轴压和偏压承载力计算公式。屠永清等^[25-26]、刘林林等^[27]、马丽娅等^[28]进行了 22 个多室式钢管混凝土 T 形柱的轴压和偏压试验,研究试件破坏形态及截面尺寸、钢板厚度、混凝土强度等参数对力学性能的影响。研究发现,T 形柱能提高混凝土的约束效应,轴压性能受腹板高度、钢板厚度及混凝土强度的影响较大;提出了 L 形中长柱稳定系数的计算公式及轴压稳定承载力计算方法。

然而,目前对方钢管混凝土组合异形柱的受力性能还缺乏研究。为此,笔者通过偏压试验研究试件长度、偏心距和偏心方向对 T 形方钢管混凝土组合异形柱偏压性能的影响,并将规范计算值与试验值进行对比,为 T 形方钢管混凝土组合异形柱在多层钢结构建筑工程中的应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计及制作

组合式方钢管混凝土组合异形柱包括 L 形、T 形和十字形截面,如图 1 所示。T 形方钢管混凝土组合异形柱的方钢管截面尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 4\text{ mm}$,由 4 个方钢管通过 4 条角焊缝组成 T 形截面,角焊缝设计尺寸根据《钢结构设计规范》(GB 50017)焊缝连接构造相关规定:“角焊缝的焊脚尺寸 $h_f(\text{mm})$ 不得小于 $1.5\sqrt{t}$, t 为较厚焊件厚度, mm ; (当采用低氢型碱性焊条施焊时, t 可采用较薄焊件的厚度)。但对埋弧自动焊,最小焊脚尺寸可减小 1 mm ;当焊件厚度等于或小于 4 mm 时,则最小焊脚尺寸应与焊件厚度相同”。方钢管壁厚为 4 mm ,综合以上要求,焊缝尺寸设计为 4 mm 。以 x 轴向右为正向, y 轴向上为正向,角度以 x 轴正向起逆转为正向,如图 2 所示。钢材强度等级为 Q235B,混凝土强度等级为 C30。以试件长度(L)、偏心距(e)和偏心方向(x, y)为 T 形钢管混凝土组合异形柱偏压承载能力的主要试验参数,9 根试件的设计参数如表 1 所示。

试件由钢管混凝土异形柱构件和钢盖板

(400 mm×400 mm×30 mm)组成,如图 3 所示。试件加工时,首先在试件底部焊接下端盖板,然后浇筑

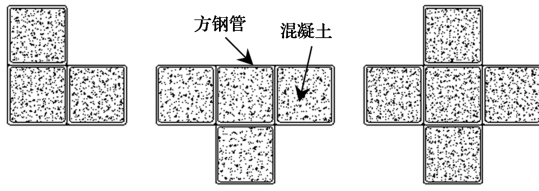


图 1 方钢管混凝土组合异形柱

Fig. 1 Composite columns with concrete-filled square steel tubulars special-shaped columns

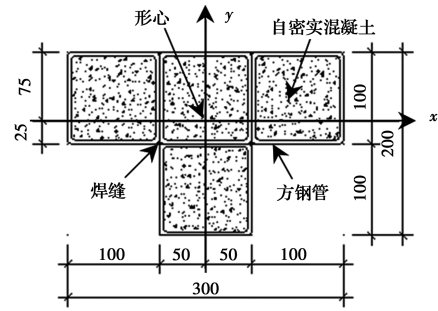


图 2 T形方钢管混凝土组合异形柱截面图

Fig. 2 Section of T-shaped square steel tube concrete composite special-shaped column

表 1 试件设计参数

Table 1 Design parameters of test pieces

试件编号	钢管壁厚 t/mm	长度 L/mm	偏心距 e/mm	偏心方向	长细比 l	试验极限荷载值 N_{ue}/kN
T-1	4	600	20	$x+$	7	3 058.00
T-2	4	600	40	$y+$	10	2 290.90
T-3	4	600	60	$y-$	10	1 898.70
T-4	4	1 500	20	$y+$	25	2 409.70
T-5	4	1 500	40	$y-$	25	1 859.50
T-6	4	1 500	60	$x+$	17	2 036.30
T-7	4	1 800	20	$y-$	29	2 459.50
T-8	4	1 800	40	$x+$	20	2 340.00
T-9	4	1 800	60	$y+$	29	1 534.30

注: $x+$ 表示偏心荷载作用点在 x 轴正向; $y+$ 表示偏心荷载作用点在 y 轴正向; $y-$ 表示偏心荷载作用点在 y 轴负向; l_x 、 l_y 分别为构件绕 x 轴、 y 轴的长细比, $l=L/i$,其中 i 为截面的回转半径, L 为试件的长度, $i=(I_s+I_cE_c/E_s)^{1/2}/(A_s+A_c f_c/f_s)^{1/2}$, I_s 、 I_c 分别为钢材、混凝土的截面惯性矩, E_s 、 E_c 分别为钢材、混凝土的弹性模量, A_s 、 A_c 分别为钢材、混凝土的横截面积, f_s 、 f_c 分别为钢材的屈服强度实测值、混凝土的轴心抗压强度实测值;试件的钢材设计强度等级均为 Q235B,混凝土设计强度等级均为 C30。

自密实混凝土,待混凝土养护完毕后,将试件上端端部用打磨机打磨平整,并焊接试件上端盖板,最后将柱铰固定件焊接在钢盖板上相应位置并固定柱铰。

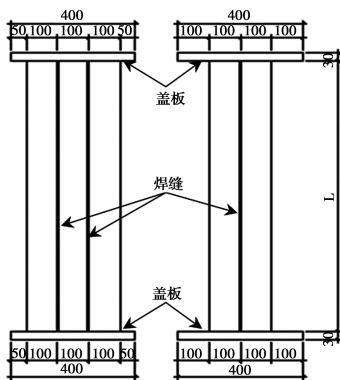


图 3 试件设计图

Fig. 3 Design drawing of test piece

1.2 材料力学性能试验

1.2.1 钢材力学性能试验 钢材力学性能试验结

果如表 2 所示,实测钢材的屈服强度平均值为 344.34 MPa,极限强度平均值为 424.22 MPa。

1.2.2 混凝土力学性能试验 试验采用 C30 混凝土一次浇筑完成,混凝土试样与钢管内的核心混凝土取自同一批次,并在自然条件下养护 28 d 以上。在浇注试件的同时,浇注 2 组(6 个/组)边长为 150 mm 的混凝土立方体试块,与试件在同等条件下养护。材性试验结果如表 3 所示,实测混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 平均值为 44.78 MPa,换算混凝土轴心抗压强度 f_c 平均值为 33.76 MPa,换算弹性模量 E_c 平均值为 33 734.77 MPa;混凝土轴心抗压强度 f_c 与弹性模量 E_c 的换算方法采用 Ding 等^[29] 给出的不同强度等级的钢管混凝土在单轴受压状态下修正的应力-应变关系计算式,其中, $f_c=0.4f_{cu}^{7/6}$, $E_c=9 500f_{cu}^{1/3}$ 。

表 2 钢材材性试验结果

Table 2 Steel material property test results

试样编号	厚度/mm	宽度/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	伸长率/%	屈强比
S1	4	20	335.38	423.77	18.26	0.791
S2	4	20	349.63	421.13	20.87	0.830
S3	4	20	348.00	427.75	19.13	0.814

表 3 混凝土材性试验结果

Table 3 Test results of concrete properties

组别	试块数量	试块尺寸	f_{cd} /MPa	f_{cu} /MPa	f_c /MPa	E_c /MPa
1	6	150 mm×150 mm×150 mm	30	44.23	33.27	33 596.65
2	6	150 mm×150 mm×150 mm	30	45.33	34.24	33 872.88

注： f_{cd} 为混凝土抗压强度设计值； f_{cu} 为实测混凝土立方体抗压强度值； f_c 为换算混凝土轴心抗压强度值； E_c 为换算混凝土弹性模量值。

1.3 加载方案

试验加载采用位移控制加载，初始加载速度为 1 mm/min，每级位移为计算极限位移的 1/10，持荷时间 2 min；当荷载达到计算极限荷载的 80%，加载速度为 0.5 mm/min，每级位移为计算极限位移的 1/20，持荷时间 2 min；在荷载降低至极限荷载的 75%或者试件变形过大不宜继续加载时停止试验，试验装置如图 4 所示，加载制度如图 5 所示。

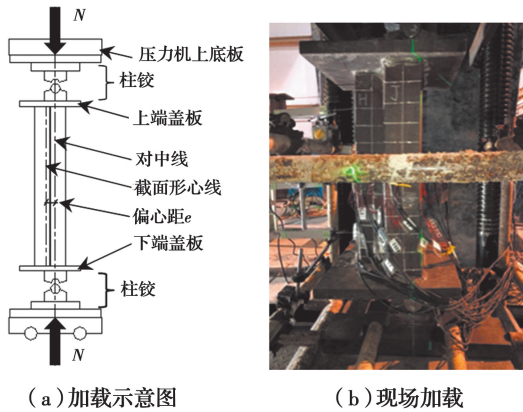


图 4 试验装置图
Fig. 4 Test device

1.4 测点布置

试件轴向位移、试件侧向位移以及钢管的纵向和横向应变为试验的主要测量内容，所有位移和应变数据均通过全自动静态采集仪和与之配套的数据采集系统采集。在试件的上部、下部各设置 2 个位移计，以测量试件的轴向位移；沿柱高在试件四分点处设置 3 个位移计，以测量试件侧向挠曲位移；在 1/2 柱高处的钢管角部设置 2 个位移计，测量试件的扭转位移。在试件 1/2 高度处沿钢管四周布置

10 片三轴 45°应变花测量试件的纵向和横向应变，布置情况如图 6 所示。

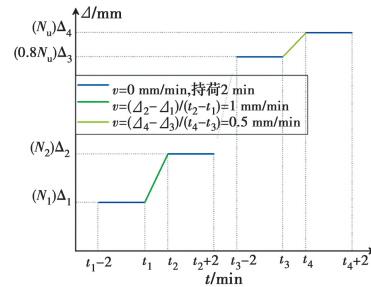


图 5 加载制度
Fig. 5 Loading system

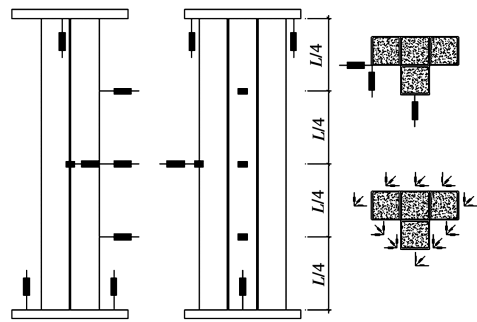


图 6 位移计及应变片布置示意图
Fig. 6 Layout of displacement meters and strain gauges

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

3 个短柱试件破坏过程基本相似，大致可分为 4 个阶段：1)从加载初期到 90%极限荷载前，试件外观无明显变化，跨中挠度变化很小，挠度增长与荷载增长基本呈线性关系；2)荷载接近 95%极限荷载时，受压区钢管表面出现轻微鼓曲，同时，试件出现

微小弯曲变形,柱中侧向挠度逐渐增大;由于受压区钢材达到材料的屈服强度发生局部屈曲失稳,试件达到极限承载力;3)达到极限荷载后,受压区钢管表面鼓曲变形快速发展并逐渐形成鼓曲带,承载力开始下降,柱中侧向挠度继续增长;4)降至 75% 极限荷载时,试件弯曲变形严重,因局部屈曲失稳出现过鼓曲变形,最终丧失承载力。

短柱试件出现先鼓曲后弯曲的破坏形态,表现出强度破坏的特征;整个加载过程中短柱试件未发生扭转变形;短柱试件中焊缝未出现可见的破坏现象,4 根方钢管之间的焊缝均未发生开裂,方钢管与端板之间的焊缝亦未发生开裂,所有焊缝均未出现可见的损伤现象;表明 4 个方钢管可以很好地协同工作,共同受力。部分短柱试件的破坏过程如图 7 所示。



图 7 短柱试件 T-1 破坏过程

Fig. 7 Failure process of short column T-1

6 个长柱试件破坏过程大体相近,也大致分为 4 个阶段:1)从加载初期到 80% 极限荷载前,试件外观无明显变化,柱中挠度变形较短柱试件明显,挠度增长与荷载增长基本成正比;2)大约临近 85% 极限荷载时,试件弯曲变形明显,柱中截面侧向挠度增长加快,由于轴向力引起的 $P-\delta$ 二阶效应,轴向压力与水平变位的关系呈非线性,随着构件截面边缘开始进入塑性,截面内弹性区不断减小,截面上拉应力合力与压应力合力的力臂减小,内弯矩增量减小,而外弯矩增量随轴向压力呈非线性增长,使轴向压力与水平变位间的非线性更加明显,当截面上的抵抗弯矩增速低于二阶弯矩增速,试件达到稳定极限状态,稳定平衡打破,试件达到极限承载力;3)达到极限荷载后,承载力开始下降,试件弯曲变形严重,柱中侧向挠度迅速增大,受压区钢管表面出现局部鼓曲变形;4)最终弯曲变形过大,试件无法继续承载,弯曲变形基本符合半波正弦曲线。

长柱试件出现先弯曲后鼓曲的破坏形态,表现出弯曲失稳破坏的特征;整个加载过程中长柱试件没有出现扭转现象;长柱试件中焊缝亦未出现可见

的破坏现象,4 根方钢管之间的焊缝均未开裂,方钢管与端板之间的焊缝也未发生开裂,所有焊缝均未出现可见的损伤现象,表明 4 个方钢管之间协同工作性能良好,部分长柱试件破坏过程如图 8 所示,图 9 为全部试件的破坏结果。

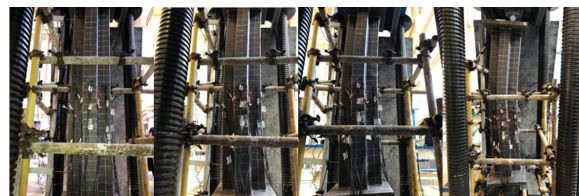


图 8 长柱试件 T-6 破坏过程

Fig. 8 Failure process of long column T-6

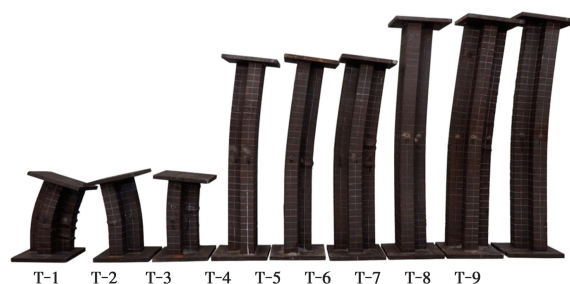


图 9 1 号至 9 号试件破坏结果

Fig. 9 Failure results of test pieces 1 to 9

2.2 试件极限承载力

表 1 中列出了 9 个试件的偏心受压试验参数及极限承载力试验值 N_{uc} ,从表 1 可以看出:长细比相同的试件,极限承载力随偏心距增大而减小;偏心距相同的试件,偏心方向位于截面非对称轴(x 轴)上时,试件极限承载力相对较高。

2.3 荷载-应变曲线

图 10 为 9 个试件加载过程中柱高 1/2 处截面受压区和受拉区边缘钢材应变 ϵ 随荷载 N 的变化关系曲线,通过在柱 1/2 高度处粘贴应变花测得钢材应变,绘制 $N-\epsilon$ 关系曲线。从曲线中可以看出:1)加载初期,受压区和受拉区边缘纤维的纵向应变随荷载增加基本呈线性增长,接近极限荷载时,应变增长加快,且压应变增长较拉应变更快;2)从开始加载到临近极限荷载前,1 号、3 号、4 号、5 号、7 号和 9 号试件均存在一段受压区和受拉区应变全为负值的时间范围,说明在此时段内试件全截面受压,当受压区钢材达到屈服应变,钢管壁表面出现鼓曲变形,此后,受拉区出现拉应变,试件逐渐到达极限承载力;3)当试件达到极限承载力时,试件受拉区和受压区钢材应力同时达到峰值,证明试件的协同工作性能

较好,之后,随着应变增长,试件承载力下降段平缓,说明试件具有较好的延性性能;4)加载过程中,受压区应变大于受拉区应变,表明试件受压区先于受拉区屈服,试件破坏始于受压区开始退出工作;5)1号和4号试件 $N-\epsilon$ 曲线出现突然下降点,这是由于受压区钢材屈服,钢管壁局部屈曲失稳,出现鼓曲变形,导致承载力出现下降;6)相同长度的试件,随着偏心距的增加,试件的极限承载力降低。

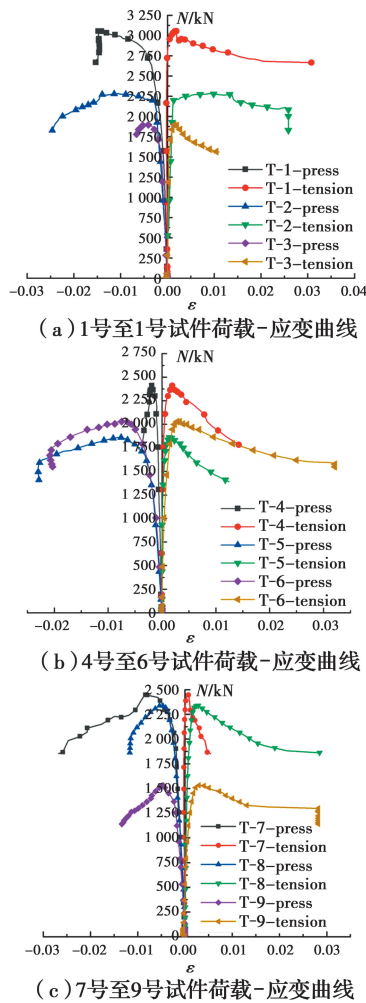


图 10 1号至9号试件荷载-应变曲线

Fig. 10 Load strain curves of No. 1 to No. 9 test pieces

2.4 荷载-挠度曲线

在柱高 $1/2$ 截面处放置位移计以测量其水平挠度 w ,为便于安装试件及位移测量仪器,而将1号试件与3号试件柱子中部位移测量仪器安装在试件弯曲面凸出一侧,得到负值位移;其他试件均安装在试件弯曲面凹进一侧,测量值为正值;为了更加直观地观察和分析9个试件的荷载与水平挠度曲线的特点,对测量的试验数据进行处理和分析后将数据都放置于坐标轴同侧,得到荷载 N 与柱高 $1/2$ 处水平

挠度 w 的关系曲线。图 11 为 1 号~9 号试件的 $N-w$ 关系曲线,从图 11 可以看出:1)在加载初期,挠度与荷载呈线性相关关系,随着荷载的增加,柱中截面水平挠度线性增大;2)达到极限承载力前柱中截面水平挠度值较小,接近极限荷载时,挠度增长加快,说明试件出现明显的弯曲变形;3)1号~3号短柱试件达到极限荷载时柱中截面水平挠度比长柱试件较小,随着试件长度的增加,试件达到极限荷载时,柱中截面水平挠度值呈现增大的趋势;4)1号试件水平挠度在达到极限荷载前出现反向挠度,与达到极限荷载后方向相反,这是因为在加载过程中压力机上端加载板通过万向球铰与压力机相连,由于对中误差的影响,竖向力不与万向球铰中心线重合,使上端加载板发生了微小的转动位移,不能保持为水平,试件受到水平分力的影响而出现附加的水平挠度,达到极限承载力后,试件出现较大的弯曲变形,正向挠度将反向挠度抵消,水平挠度逐渐正向增大。

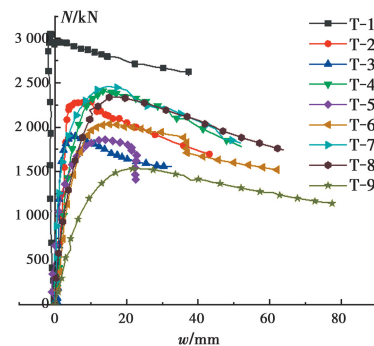


图 11 荷载-挠度曲线

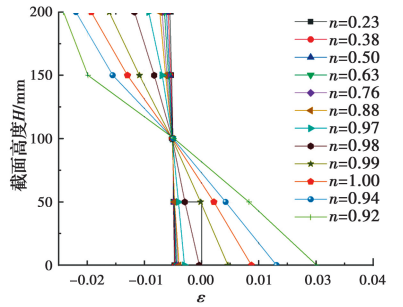
Fig. 11 Load deflection curves

2.5 柱中截面应变分布

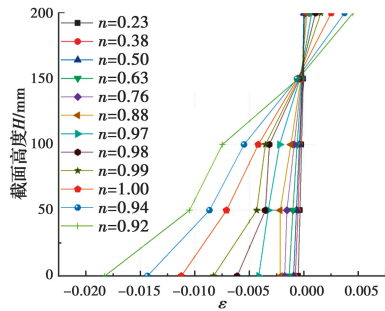
图 12 为试件 T-2、T-5 和 T-7 在不同受力阶段柱中截面上应变沿高度分布的关系曲线,从图 12 可以看出:1)达到极限承载力之前,试件弯曲变形过程中柱中截面上沿高度分布的应变变化基本符合平截面假定,保持平截面变形;2)试件达到极限承载力后,柱中截面受拉区仍保持平截面变形,但受压区截面变形不再符合平截面假定;3)随着偏心距增大,受二阶效应的影响,中和轴向形心方向偏移;4)试件达到极限承载力后,由于受压区破坏并退出工作,中和轴逐渐向形心方向偏移。

2.6 试验参数分析

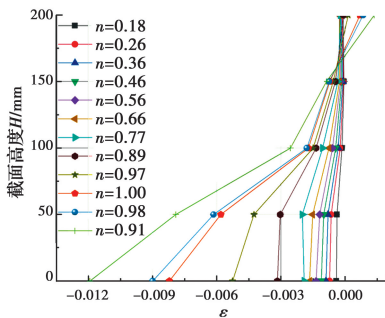
表 4~表 6 是对试验参数的正交分析结果,通过正交分析可知:1)试验结果直观分析显示,对 T 形方钢管混凝土异形柱偏压承载能力影响程度为 B



(a) 2号试件(e=40 mm)柱中截面应变分布



(b) 5号试件(e=40 mm)柱中截面应变分布



(c) 7号试件(e=20 mm)柱中截面应变分布

图 12 试件柱中截面应变分布

Fig. 12 Strain distribution of the middle section of pieces

(偏心距) $>$ C(偏心方向) $>$ A(长度); 2)极差分析结果说明,偏心距是对偏心受压力学性能影响最大的因素,其次为偏心方向,试件长度的影响程度相对较小; 3)方差分析结果表明,相关系数 $R-sq$ 和 $R-sq$ (调整)都接近于 1,一般线性模型拟合很好,方差分析结果可靠,3 个试验参数中 B(偏心距)和 C(偏心方向)的 P 值均小于 0.06,说明这两个参数对试验的影响程度比较高,表明对试验有显著影响的试验参数为偏心距和偏心方向。

表 4 试验结果分析

Table 4 Analysis of test results

水平	因素			试验结果
	长度	偏心距	偏心方向	
1	1	1	1	3 058.0
2	1	2	2	2 290.9
3	1	3	3	1 898.7

续表 4

水平	因素			试验结果
	长度	偏心距	偏心方向	
4	2	1	2	2 409.7
5	2	2	3	1 859.5
6	2	3	1	2 036.3
7	3	1	3	2 459.5
8	3	2	1	2 340.0
9	3	3	2	1 534.3
K_1	2 415.867	2 642.400	2 478.100	
K_2	2 101.833	2 163.467	2 078.300	
K_3	2 111.267	1 823.100	2 072.567	
极差 R	314.033 3	819.3	405.533 3	
排序	3	1	2	4

注: K_1 、 K_2 、 K_3 分别为各因素在 1、2、3 水平下试验结果的平均值。

表 5 试验结果均值响应分析

Table 5 Mean response analysis of test results

水平	因素			空列
	长度	偏心距	偏心方向	
1	2 416	2 642	2 478	2 151
2	2 102	2 163	2 078	2 262
3	2 111	1 823	2 073	2 216
极差	314	819	406	112
排序	3	1	2	4

表 6 试验结果方差分析

Table 6 Variance analysis of test results

变异来源	自由度	AdjSS	AdjMS	F 值	P 值
长度	2	191 487	95 744	10.14	0.090
偏心距	2	1 016 479	508 240	53.83	0.018
偏心方向	2	324 330	162 165	17.18	0.055
误差	2	18 882	9 441		
合计	8	1 551 178			

$S=97.1644$ $R-sq=98.78\%$ $R-sq(\text{调整})=95.13\%$

注: AdjSS 为校正平方和; AdjMS 为校正均方; F 为水平间方差与水平内方差之比; P 为显著性水平; S 为数据值与拟合值的差距; $R-sq$ 为拟合优度,是回归平方和占总离差平方和的比率; $R-sq$ (调整)为修正的拟合优度。

图 13 为各因素指标对 T 形方钢管混凝土组合异形柱偏心受压承载力影响的变化趋势图。从图 13 可以看出:偏心受压承载力随偏心距的增加而显著降低,而随着试件长度的增大和偏心方向的改变,偏心受压承载力变化程度相近;偏心距对偏压力学

性能影响最大,其次为偏心方向,最后是试件长度。因此,在实际工程中,对 T 形方钢管混凝土组合异形柱偏心受压设计时,要着重考虑偏心距的限值范围,以保证结构安全性。

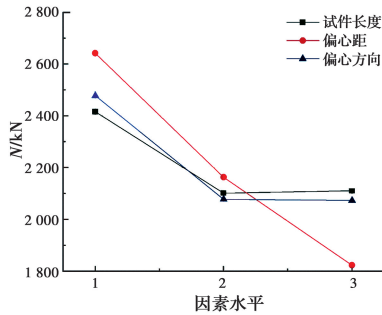


图 13 试验参数影响趋势图

Fig. 13 Influence trend of test parameters

3 承载力计算

当前已实施的有关钢管混凝土的规范和规程中对于钢管混凝土异形柱尚未有统一的设计计算方法。参考美国钢结构协会 AISC-LRFD(1999)^[30]规

范、英国标准协会 BS 5400 (1979)^[31]规范、欧洲标准协会 Eurocode 4 (1994)^[32]规范、日本建筑学会 AIJ(1997)^[33]规范以及中国《钢管混凝土结构设计与施工规程》(CECS 28:90)^[34]与福建省工程建设标准 DBJ/T13-51-2010^[35]等关于钢管混凝土组合柱承载力的计算公式对 9 个试件进行验算,得出的计算值 N_u 与试验值 N_{uc} 的比值结果如表 7 所示。通过各规范、规程的计算结果对比可以发现:DBJ/T 13-51—2010 和 AIJ 所得计算值与试验值最吻合,但 AIJ 计算结果的离散度高于 DBJ/T 13-51—2010 计算结果;Eurocode 4 计算值与试验值吻合良好,但较 DBJ/T 13-51—2010 和 AIJ 稍差;BS 5400 再次之;CECS 计算值与试验值吻合程度一般,计算结果偏于不安全;AISC 规范所得的计算值与试验值吻合程度最低,计算结果过于安全。

可见,采用钟善桐^[36]提出的统一理论的 DBJ/T 13-51—2010 规范对 T 形方钢管混凝土组合异形柱偏心受压承载力的计算与试验结果符合最好。

表 7 试件偏压承载力各规范计算值与试验值比较

Table 7 Comparison between the calculated value and the test value of each code for bearing capacity of the test pieces

试件编号	t/mm	L/mm	e/mm	λ	AISC η	DBJ η	BS5400 η	EC4 η	AIJ η	CECS η
T-1	4	600	20	7	0.718	1.018	0.821	0.904	0.948	1.149
T-2	4	600	40	10	0.764	1.043	0.916	1.050	1.006	1.208
T-3	4	600	60	10	0.760	1.035	0.956	0.844	1.011	1.202
T-4	4	1 500	20	25	0.922	1.033	0.976	1.096	1.059	1.190
T-5	4	1 500	40	25	0.941	0.974	1.042	1.165	1.109	1.270
T-6	4	1 500	60	17	0.693	0.994	0.838	0.786	0.861	1.014
T-7	4	1 800	20	29	0.903	0.999	0.935	1.057	0.985	1.105
T-8	4	1 800	40	20	0.734	1.035	0.846	1.040	0.880	0.957
T-9	4	1 800	60	29	0.941	0.921	1.043	0.946	1.084	1.269
μ					0.820	1.006	0.930	0.987	0.994	1.151
σ					0.098	0.037	0.079	0.118	0.081	0.102

注: t 为钢管壁厚; L 为试件长度; e 为偏心距; λ 为长细比; μ 为均值, σ 为标准差; η 为计算值 N_u 与试验值 N_{uc} 的比值, $\eta = N_u/N_{uc}$ 。

4 结论

设计了 9 根 T 形方钢管混凝土组合异形柱试件进行偏压试验,主要结论如下:

1)短柱试件的破坏形态主要为截面强度破坏,长柱试件主要为弯曲失稳破坏;试件在接近极限承载力时才出现较为明显的变形,试件弯曲变形近似正弦半波曲线,未出现扭转变形。

2)短柱试件达到极限荷载时,柱中截面水平挠度小于长柱试件。随着试件长度的增加,达到极限荷载时柱中挠度逐渐增大;随着偏心距的增加,其极限承载力随之减小。

3)试件受力过程中,柱中截面应变分布符合平截面假定,受压区先于受拉区屈服,拉、压区变形协调,试件各部分协同工作性能较好,试件具有较好的延性性能。

4)偏心距对试件偏压力学性能影响最大,其次为偏心方向,最后是试件长度,偏心距和偏心方向对偏压力学性能的影响较试件长度更为显著。

5)对比 6 种规范的计算结果以及试验结果发现,规范 DBJ/T 13-51—2010 和 AIJ 建议的钢管混凝土承载力计算公式所得计算值与试验值吻合最好,但 DBJ/T 13-51—2010 计算结果离散性更小。

参考文献:

- [1] WANG F C, HAN L H. Analytical behavior of special-shaped CFST stub columns under axial compression [J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 129: 404-417.
- [2] REN Q X, HAN L H, LAM D, et al. Experiments on special-shaped CFST stub columns under axial compression [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2014, 98: 123-133.
- [3] XU W, HAN L H, LI W. Performance of hexagonal CFST members under axial compression and bending [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 123: 162-175.
- [4] ZHANG Y B, HAN L H, ZHOU K, et al. Mechanical performance of hexagonal multi-cell concrete-filled steel tubular (CFST) stub columns under axial compression [J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 134: 71-83.
- [5] ZUO Z L, CAI J, CHEN Q J, et al. Performance of T-shaped CFST stub columns with binding bars under axial compression [J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 129: 183-196.
- [6] 左志亮, 蔡健, 刘明峰, 等. 带约束拉杆 T 形钢管混凝土短柱偏压试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2011, 32(8): 79-89.
ZUO Z L, CAI J, LIU M F, et al. Experimental study of T-shaped CFT stub columns with binding bars subjected to eccentric load [J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(8): 79-89. (in Chinese)
- [7] ZUO Z L, CAI J, YANG C, et al. Eccentric load behavior of L-shaped CFT stub columns with binding bars [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2012, 72: 105-118.
- [8] 左志亮, 蔡健, 钱泉, 等. 带约束拉杆 T 形钢管混凝土短柱轴压性能的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2011, 44(11): 43-51.
ZUO Z L, CAI J, QIAN Q, et al. Experimental study on T-shaped CFT stub columns with binding bars subjected to axial compression [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(11): 43-51. (in Chinese)
- [9] 蔡健, 左志亮, 谢小东, 等. 带约束拉杆异形截面钢管内核心混凝土等效单轴本构关系[J]. *建筑结构学报*, 2011, 32(12): 186-194.
CAI J, ZUO Z L, XIE X D, et al. Equivalent uniaxial constitutive relationship for core concrete of specially-shaped steel tubular column with binding bars [J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(12): 186-194. (in Chinese)
- [10] 蔡健, 左志亮, 赵小芹, 等. 带约束拉杆 L 形钢管混凝土短柱偏压试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2011, 32(2): 83-90.
CAI J, ZUO Z L, ZHAO X Q, et al. Experimental research on eccentrically loaded L-shaped concrete-filled steel tubular stub columns with binding bars [J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(2): 83-90. (in Chinese)
- [11] 蔡健, 孙刚. 轴压下带约束拉杆 L 形钢管混凝土短柱的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2008, 41(9): 14-20.
CAI J, SUN G. Experimental investigation on L-shaped concrete-filled steel tube stub columns with binding bars under axial load [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008, 41(9): 14-20. (in Chinese)
- [12] 龙跃凌, 蔡健. 带约束拉杆 L 形钢管混凝土短柱轴压性能的试验研究[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(11): 87-92.
LONG Y L, CAI J. Experimental investigation into axial compressive behavior of L-shaped concrete-filled steel tubular stub columns with binding bars [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2006, 34(11): 87-92. (in Chinese)
- [13] YANG Y L, WANG Y Y, FU F, et al. Static behavior of T-shaped concrete-filled steel tubular columns subjected to concentric and eccentric compressive loads [J]. *Thin-Walled Structures*, 2015, 95: 374-388.
- [14] YANG Y L, YANG H, ZHANG S M. Compressive behavior of T-shaped concrete filled steel tubular columns [J]. *International Journal of Steel Structures*, 2010, 10(4): 419-430.
- [15] LIU J P, SONG H, YANG Y L. Research on mechanical behavior of L-shaped multi-cell concrete-filled steel tubular stub columns under axial compression [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2019, 22(2): 427-443.
- [16] LIU J P, YANG Y L, SONG H, et al. Numerical analysis on seismic behaviors of T-shaped concrete-filled steel tubular columns with reinforcement stiffeners [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2018, 21(9): 1273-1287.

- [17] LIU X G, XU C Z, LIU J P, et al. Research on special-shaped concrete-filled steel tubular columns under axial compression [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 147: 203-223.
- [18] XU C Z, YANG Y L, TANG X, et al. Experimental research on static behavior of stiffened T-shaped concrete-filled steel tubular stubs subjected to concentric axial loading [J]. International Journal of Steel Structures, 2019, 19(2): 591-602.
- [19] XIONG Q Q, CHEN Z H, ZHANG W, et al. Compressive behaviour and design of L-shaped columns fabricated using concrete-filled steel tubes [J]. Engineering Structures, 2017, 152: 758-770.
- [20] ZHOU T, REN Z Y, JIANG B Q, et al. Calculating method study and parameter analysis of slender LCFST columns under axial loading [J]. International Journal of Steel Structures, 2019, 19(5): 1645-1661.
- [21] ZHOU T, XU M Y, CHEN Z H, et al. Eccentric loading behavior of L-shaped columns composed of concrete-filled steel tubes [J]. Journal of Advanced Steel Construction, 2016, 12(3): 227-244.
- [22] LIU J, ZHOU T, LEI Z Y, et al. Eccentric compression performance of slender L-shaped column composed of concrete-filled steel tubes connected by steel linking plates [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 162: 105675.
- [23] ZHANG W, CHEN Z H, XIONG Q Q. Performance of L-shaped columns comprising concrete-filled steel tubes under axial compression [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 145: 573-590.
- [24] XU M Y, ZHOU T, CHEN Z H, et al. Experimental study of slender LCFST columns connected by steel linking plates [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 127: 231-241.
- [25] 屠永清, 刘林林, 叶英华. 多室式钢管混凝土 T 形中长柱轴压性能研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(9): 27-35.
TU Y Q, LIU L L, YE Y H. Study on the properties of multi-cell T-shaped concrete-filled steel tubular intermediate long columns under axial load [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(9): 27-35. (in Chinese)
- [26] 屠永清, 文千山. L 形钢管混凝土柱轴压承载力计算 [J]. 建筑结构学报, 2013, 34(Sup1): 314-320.
TU Y Q, WEN Q S. Bearing capacity calculation of L-shaped concrete filled steel tubular columns subjected to axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(Sup1): 314-320. (in Chinese)
- [27] 刘林林, 屠永清, 叶英华. 多室式钢管混凝土 T 形短柱轴压性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(10): 9-16.
LIU L L, TU Y Q, YE Y H. Experimental study of the properties of axially loaded multi-cell T-shaped concrete-filled steel tubular stub columns [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(10): 9-16. (in Chinese)
- [28] 马丽娅, 屠永清. 多室式钢管混凝土组合 L 形柱轴压性能有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(Sup1): 306-313.
MA L Y, TU Y Q. Finite element analysis on behavior of multi-cell composite L-shaped concrete filled steel tubular columns under axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(Sup1): 306-313. (in Chinese)
- [29] DING F X, YING X Y, ZHOU L C, et al. Unified calculation method and its application in determining the uniaxial mechanical properties of concrete [J]. Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China, 2011, 5(3): 381-393.
- [30] AISI. Specification for structural steel buildings [S]. Chicago: American Institute of Steel Construction Inc, 1999.
- [31] Steel, concrete and composite bridges, Part5: Code of practice for design of composite bridges: BS 5400-5 [S]. British Standards Institutions, 1979.
- [32] Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1. 1: General rules and rules for buildings : DD ENV 1994-1-1 [S]. European Committee for Standardization, 1994.
- [33] AIJ. Recommendations for design and construction of concrete filled steel tubular structures [S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 1997.
- [34] 钢管混凝土结构设计与施工规程: CECS 28:90 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1990.
Specification for design and construction of concrete-filled steel tubular structures: CECS 28: 90 [S]. Beijing: China Planning Press, 2010. (in Chinese)
- [35] 钢管混凝土结构技术规程: DBJ/T 13-51—2010 [S]. 福州: 福建省住房和城乡建设厅, 2010.
Technical specification for concrete filled steel tube structure: DBJ/T13-51—2010 [S]. Fuzhou: Fujian housing and urban rural development department, 2010. (in Chinese)
- [36] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2003.
ZHONG S T. The concrete-filled steel tubular structures [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese)