

文章编号:1000-582X(2012)04-052-07

钢骨-钢管混凝土柱偏心受压力学性能试验

刘立平¹,李英民¹,夏洪流¹,胡艳飞²,杨 溥¹,吕 晖¹

(1. 重庆大学 土木工程学院,重庆 400045;2. 机械工业第三设计研究院,重庆 400039)

摘 要:设计了不同偏心率、混凝土强度等级、套箍指标和配骨指标的 6 根钢骨-钢管混凝土短柱试件,详细分析了试件在偏心受压下的破坏过程和破坏特征。试验表明:小偏心钢骨-钢管混凝土柱的初始破坏是从近偏心受压侧的钢管受压屈服开始,最终破坏是由于混凝土膨胀引起了钢管局部的屈曲所致。钢骨-钢管混凝土柱中的钢骨可以有效的阻止混凝土的剪切斜裂缝,从而提高了钢骨-钢管混凝土的延性。在钢管纵向没有达到屈服前,钢骨-钢管混凝土柱横截面应变分布呈线性分布,满足平截面假定。上下端铰接的小偏心钢骨-钢管混凝土柱的侧向挠度曲线接近于正弦曲线,满足标准柱的假定。随混凝土强度的提高,配骨指标和套箍指标的增加,钢骨-钢管混凝土柱的竖向承载力极值均有所提高;但随着偏心距的增加,试件的竖向承载力和延性会显著降低。

关键词:组合结构;试验设计;偏心加载;力学性能;组合柱

中图分类号:TU398

文献标志码:A

Experimental study on the mechanical behavior of eccentrically loaded steel tubular columns filled with structural steel and concrete

LIU Li-ping¹, LI Ying-min¹, XIA Hong-liu¹, HU Yan-fei², YANG Pu¹, LV Hui¹

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. China Three Design Industry Engineering Corporation, Chongqing 400039, P. R. China)

Abstract: Considered strength classes of concrete, ratio of structural steel to concrete, ratio of steel tube to concrete and eccentricity ratio of load, 6 test specimens of steel tubular columns filled with structural and concrete are designed. The damage phenomena of specimens are described in detail and the failure mechanism is analyzed. The results show the initial failure of the specimens are began from the yield of steel tube, the ultimate failure are ended from the buckling of steel tube caused by the expansion of core concrete. Due to the existence of structural steel, the ductility of specimens is superior to steel tubular columns. Before the yield of steel tube, the plane cross-section assumption of specimens can be put into use. The ultimate bearing capacity of specimens is increased with the increase of strength classes of concrete, ratio of structural steel to concrete and ratio of steel tube to concrete. But the ultimate bearing capacity and ductility are decreased with the increase of eccentricity ratio.

Key words: composite structure; design of experiments; eccentric load; mechanical behavior; composite column

收稿日期:2011-12-08

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2006BAJ01B02-01);重庆市自然科学基金计划项目(CSTC2011BB0093)

作者简介:刘立平(1971-),男,重庆大学副教授,博士后,主要从事防灾减灾、桥梁检测等研究,

(Tel)023-65127185;(E-mail) liuliping@cqu.edu.cn.

钢管-钢管混凝土柱是将钢管放入钢管内再浇筑混凝土而形成的组合构件^[1]。与型钢混凝土柱相比,由于钢管对混凝土的连续约束作用,提高了混凝土的强度,改善了柱的延性;与钢管混凝土柱相比,由于钢管的存在,提高了构件的承载力。钢管-钢管混凝土柱结合了钢管混凝土柱和型钢混凝土柱的优点,具有承载力高、延性好的特点,特别适用于高层建筑及桥梁结构的重载柱。

为了改善钢管混凝土柱的力学性能,国外学者提出了在钢管内混凝土中添加短钢筋和碳纤维等增强措施^[1-2],但还未见核心混凝土设置型钢的钢管混凝土的研究报道。国内学者对钢管-钢管混凝土柱开展了一定的研究工作,主要集中在钢管-钢管混凝土柱的轴压性能、受弯性能、延性性能等方面^[3-5],还没有针对钢管-钢管混凝土柱的偏压性能的系统研究。钢管-钢管混凝土柱是为了满足大轴压荷载而提出的,在竖向荷载下其具有高承载力和高延性。但实际结构中的竖向受力构件,轴压情况很少,通常表现为偏压状态。为了提高钢管-钢管混凝土柱的应用,研究钢管-钢管混凝土柱的偏压性能更有意

义。文中通过6根钢管-钢管混凝土柱的偏心受压试验,研究了其破坏过程、破坏特征、侧向位移曲线特征、荷载—应变关系等,全面分析了该类组合柱在偏心荷载作用下的力学性能,研究成果可促进钢管-钢管混凝土柱的应用,为有关工程实践提供参考。

1 试验设计

1.1 试件设计

钢管-钢管混凝土柱偏心受压力学性能主要受偏心率、混凝土强度、套箍指标和配骨指标的影响,参考文献[1-6],考虑以上因素设计了6个试件。为减小偶然偏心影响,试件设计为长细比 l_0/d 小于4的短柱。试件主要参数见表1。试件编号中的NS、HS分别表示普通混凝土与高强混凝土,A、B分别表示3 mm与5 mm壁厚的圆形钢管。套箍指标 $\theta=(A_t f_{yt})/(A_c f_c)$,配骨指标 $\rho=(A_s f_{ys})/(A_c f_c)$,式中 A_c, f_c 分别为核心混凝土的截面面积和轴心抗压强度; A_t, f_{yt} 分别为钢管的截面积和屈服强度; A_s, f_{ys} 分别为钢管的截面面积和屈服强度。

表1 试件的特征参数

试件编号	试件长度 L/mm	混凝土 强度等级	钢管 型号	钢管外径 D/mm	钢管壁厚 t/mm	偏心距 e/mm	套箍指 标 θ	配骨指 标 ρ
HS-A1	800	C60	I10	219	3	30	0.355	0.499
HS-A2	800	C60	I12	219	3	30	0.364	0.647
NS-A3	800	C40	I12	219	3	30	0.577	1.027
HS-B1	800	C60	I10	219	5	30	0.611	0.420
NS-B2	800	C30	I12	219	5	30	1.407	1.516
HS-B3	800	C60	I12	219	5	50	0.626	0.675

试件中钢管采用直缝焊接钢管,钢管由工字钢焊接而成如表2所示。根据《金属拉伸试验试样》^[7]和《金属拉伸试验方法》^[8],制作工字钢和钢管的材

表2 钢材实测材料参数

钢材型号	初始弹性 模量/MPa	屈服强度 /MPa	极限强度 /MPa	屈服应变 $\mu\epsilon$
D219×3	188 341.7	288.2	383.8	1 800
D219×5	198 850.6	325.1	404.2	2 000
I10	182 748.0	296.9	388.0	2 100
I12	182 842.0	290.2	412.1	2 000

料性能的标准试件并进行拉伸试验,测得钢材力学性能。混凝土强度由混凝土标准试块测定,表1中6根试件对应的实测的混凝土强度(单位:MPa)分别为53.2,52.0,40.0,52.0,33.0,49.3。

1.2 试件制作与测点布置

根据试件长度截取钢管,在车床上对钢管进行精加工,包括钢管调直、调圆、两端车平等,保证端面平整并与钢管中心轴线垂直。每个试件的钢管由2根相同型号的I字型钢焊接而成。试件上下端设置盖板,盖板尺寸为300 mm×300 mm×20 mm。为保证试件质量,首先将钢管垂直焊接于一块盖板上,校正后,使钢管和钢管的几何中心重合后再将钢管

焊接在盖板上,形成如图 1 所示的钢骨架。浇注混凝土进行养护。试验前,将柱上端打磨平整后再焊接上盖板。



图 1 焊接的试件钢骨架

试验时,测试试件在不同荷载下的柱的竖向变形、侧向挠度,钢管和钢骨的应变。试件的竖向偏心荷载和竖向变形由压力机的力传感器和位移传感器直接获取;试件的侧向挠度通过表架上的 3 个百分表监测,侧向受拉侧的变形通过布置于柱高中部的百分表监测(见图 2)。钢管和钢骨的应变片和应变花布置在柱的高度方向的 3 个截面上(见图 3),粘贴在钢管表面的纵向和法向、钢骨的翼缘及腹板上。采用 DH3816 静态应变测量系统进行试验数据采集。

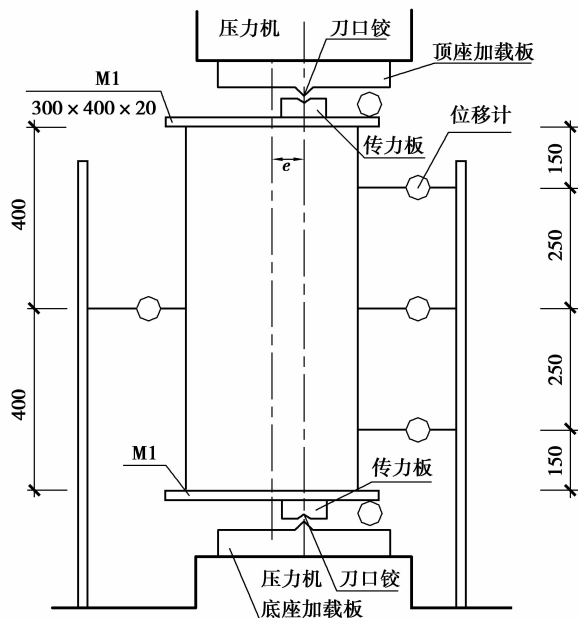


图 2 试验装置与百分表布置图

1.3 试验的加载方案及加载制度

试验的加载装置如图 2 所示。偏心加载通过试件上下端偏心设置的刀口铰实现。试验采用单调分级加载制度。试验不同阶段加载增幅不同,试验初

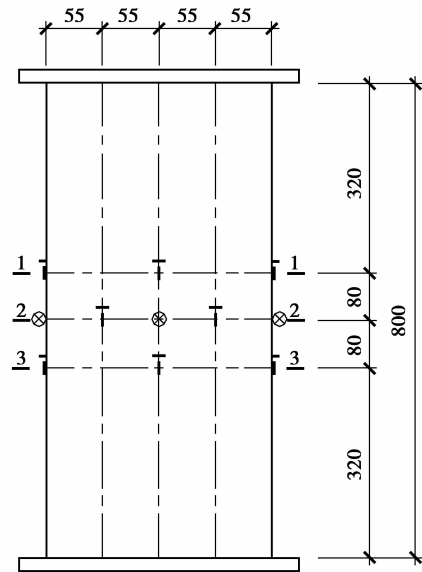


图 3 测点的应变片或应变花布置

期的加载增幅取 30 kN 或 40 kN;受压区钢管纵向屈服后每级加载增幅为 20 kN;当钢管环向屈服后每级加载增幅为 10 kN;当接近极限承载力时每级加载增幅为 1~2 kN;达到极限承载力后“连续”记录荷载值和测点数据,直至试验破坏。在达到极限承载力之前,每级加载后采集数据,并稳定荷载 1~2 min 后再进行下一级加载。所有试验均在重庆大学结构实验室的 NYL-500T 液压试验机上完成。

2 试件的破坏过程和破坏特征

根据试件各部分屈服的先后顺序将试件的破坏过程分为 4 个屈服状态,各屈服特征见表 3 所述。所有试件的第一屈服特征均表现为近偏心荷载侧(简称为受压侧)的钢管纵向受压屈服,说明偏心受压时该类构件的破坏是从受压侧钢管纵向屈服开始的。当竖向荷载的偏心较小时,试件的第二屈服特征主要表现为远偏心荷载侧(简称为受拉侧)钢管环向受拉屈服,部分表现为受拉侧钢管的纵向受拉屈服,这主要钢管内混凝土膨胀与拉应力共同作用的结果;试件的第三和第四屈服特征表现为受拉侧钢管屈服或受压侧钢骨屈服,其出现的先后顺序与混凝土强度等级、套箍指标和配骨指标相关。当竖向荷载的偏心较大时(试件 HS-B3),试件的第二屈服特征则表现为受压侧钢骨屈服,其第三和第四屈服特征表现为受拉侧钢管的环向受拉屈服和纵向受拉屈服。试件在受压侧和受拉侧的钢管与钢骨都发生了屈服,受压区钢管发生局部屈曲后导致试件最终

破坏。试验后试件的破坏状态如图 4 所示(试件 HS-B3 见图 5(a))。



图 4 试件的破坏状态

表 3 试件的主要屈服特征

试件编号	第一屈服特征	第二屈服特征	第三屈服特征	第四屈服特征
HS-A1	受压侧的 钢管纵向 受压屈服	受拉侧的 钢管环向 受拉屈服	受拉侧的 钢管纵向 受拉屈服	受压侧的 钢管纵向 受压屈服
HS-A2	受压侧的 钢管纵向 受压屈服	受拉侧的 钢管纵向 受拉屈服	受拉侧的 钢管环向 受拉屈服	受压侧的 钢管纵向 受压屈服
NS-A3	受压侧的 钢管纵向 受压屈服	受拉侧的 钢管环向 受拉屈服	受压侧的 钢管纵向 受压屈服	受拉侧的 钢管纵向 受拉屈服
HS-B1	受压侧的 钢管纵向 受压屈服	受拉侧的 钢管环向 受拉屈服	受拉侧的 钢管纵向 受拉屈服	受压侧的 钢管纵向 受压屈服
NS-B2	受压侧的 钢管纵向 受压屈服	受拉侧的 钢管环向 受拉屈服	受压侧的 钢管纵向 受压屈服	受拉侧的 钢管纵向 受拉屈服
HS-B3	受压侧的 钢管纵向 受压屈服	受压侧的 钢管纵向 受压屈服	受拉侧的 钢管环向 受拉屈服	受拉侧的 钢管纵向 受拉屈服

为了对试件内部的钢管与混凝土的破坏状态有进一步的认识,试验结束后对 HS-B3 试件进行了解剖,HS-B3 的混凝土和钢管的破坏分别如图 5(b)和图 5(c)。由图可见,混凝土受压侧出现了局部压碎而受拉侧出现了水平弯曲裂缝;钢管则表现为整体弯曲破坏。这与钢管混凝土柱因混凝土剪切斜裂缝导致构件的破坏^[9]不同。由于钢管的存在,阻止了混凝土中剪切斜裂缝的产生,钢管的约束效应能够充分的发挥;使得偏压作用下钢管-钢管混凝土柱的破坏为钢管局部屈曲下的整体弯曲破坏。

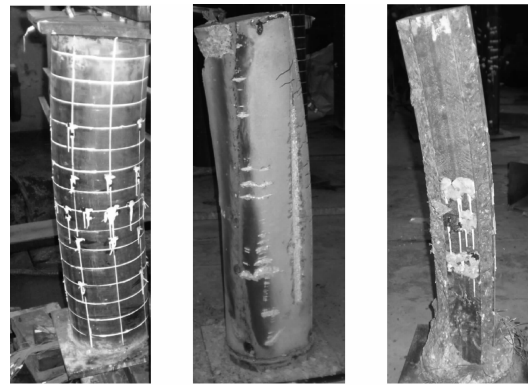


图 5 试件 HS-B3 的破坏特征

3 试验数据分析

根据试验数据,从偏心竖向荷载与竖向变形关系、偏心竖向荷载与柱中部侧向变形关系、偏心竖向荷载作用下的侧向挠度曲线、钢管和钢管的纵向应变变化特征、柱截面应变分布规律等方面全面考查钢管-钢管混凝土柱偏心受压性能。

3.1 偏心竖向荷载与竖向变形关系

荷载与变形间的全过程曲线反映构件的受力特性和破坏过程。试件的偏心竖向荷载 N 与作用点竖向变形 Δ 间的关系如图 6 所示。荷载较小时,关系曲线近似于直线,为弹性工作阶段。由于钢管的约束效应,试件的弹性工作段较长,普通混凝土与高强混凝土组合柱构件的弹性极限分别约为极限承载力的 60% 和 70%。当外载增加后,受压侧钢管发生屈服,曲线表现为非线性,但试件的承载力仍继续增加。当外载进一步增加后,受拉侧的钢管屈服或受压侧的钢管屈服,受拉侧的核心混凝土出现弯曲水平微裂缝,试件达到极限承载力。其后,试件的承载力下降,变形增加,至受压侧的核心混凝土局部压碎、钢管局部屈曲后试件发生破坏。由于钢管的作用,试件达到极限承载力后仍具有较强的变形能力,表现出很好的延性。

根据表 1 和图 6 可以发现,随混凝土强度的提

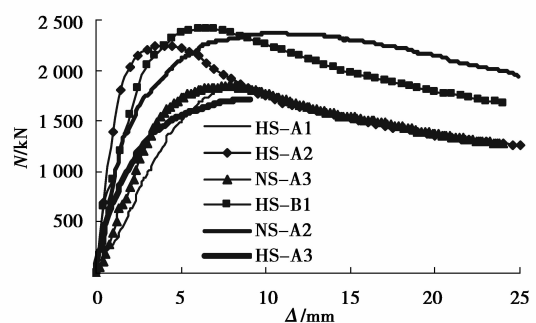


图 6 试件的竖向荷载与竖向变形曲线

高、配骨指标和套箍指标的增加,试件竖向承载力极值均有所提高;偏心受压的钢管-钢管混凝土的延性性能较好;但随着偏心距的增加,试件的竖向承载力和延性会显著降低。

3.2 偏心竖向荷载与柱中部侧向变形关系

竖向荷载与侧向变形关系在一定程度上反映了构件的弯曲性能。将试件的偏心竖向荷载 N 与试件中部的侧向变形 f 间的关系绘于图 7 中,图中侧向变形值为试件受压变形后偏离柱初始中线位置的变形。在加载初期,试件均有初始的无害侧移发生,这主要是由于铰接试件与压力机逐渐接触引起的。随后构件的侧移以直线变化,与图 6 相比,侧移的增幅明显小于竖向变形的增幅。表明在弹性状态下,偏心受压下构件以竖向变形为主,而侧向变形很小;偏心竖向荷载超过构件极限承载力后,构件发生破坏,构件竖向承载力降低而侧向变形急剧增加,与图 6 相比,侧向变形增幅明显快于竖向变形的增幅。表明破坏以后,偏心受压下构件以侧向变形为主。

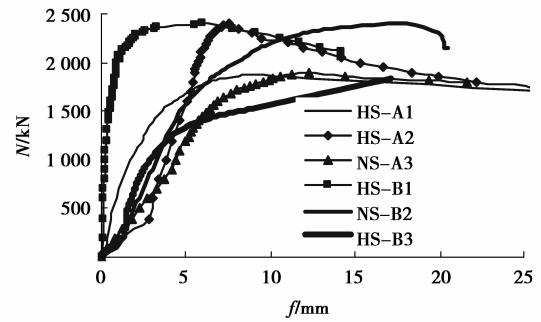


图 7 试件的竖向荷载与柱中部侧向变形曲线

3.3 偏心竖向荷载下的侧向挠度

竖向荷载作用下的标准柱的挠度曲线通常假定为正弦曲线。下面分析该假定能否适用于偏心受压下钢管-钢管混凝土柱的侧向挠度。图 8 为 6 个试件在偏心竖向荷载作用变化下的侧向挠度曲线,各曲线均近似呈正弦形状,说明侧向变形满足标准柱的假定。同时发现,在外载较小时侧向挠度增量与荷载增量呈线性变化,当外载较大时侧向挠度增量与荷载增量则表现出明显的非线性。

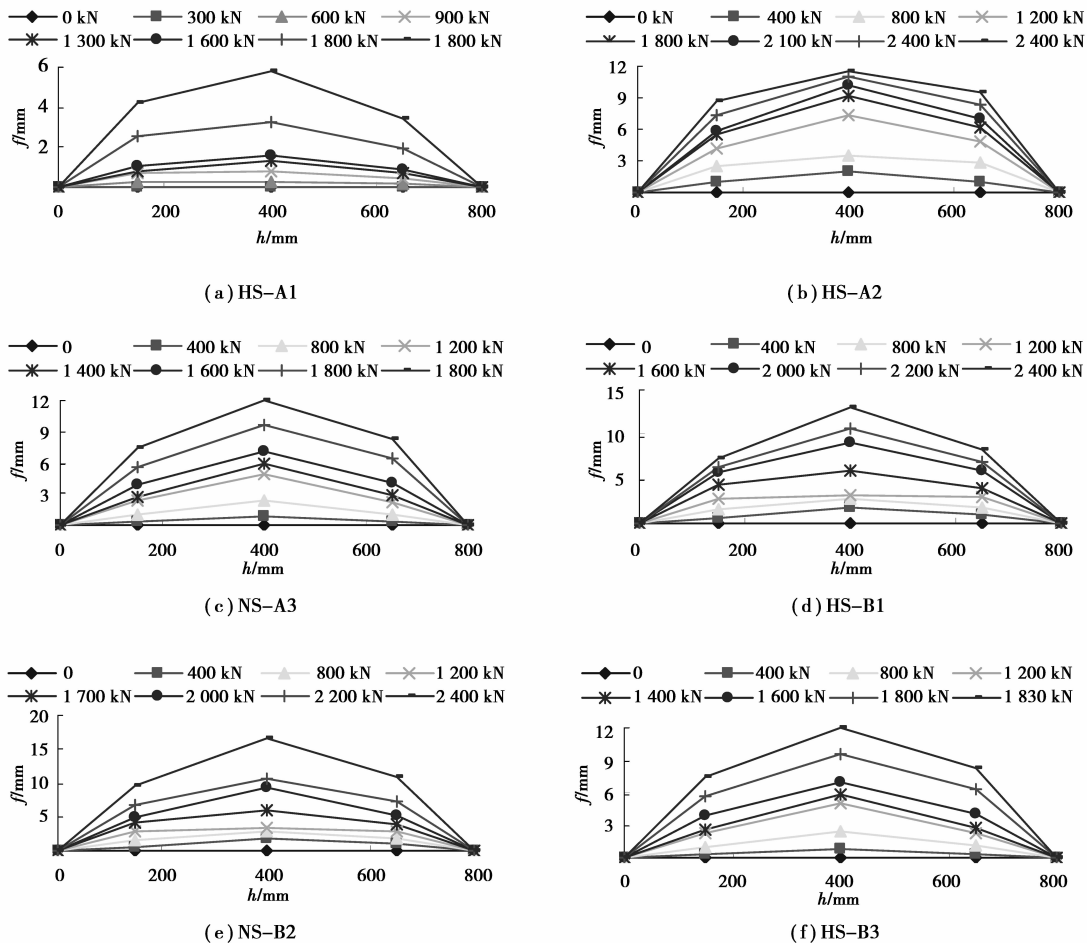


图 8 试件在各级竖向荷载下的侧向挠度曲线

3.4 钢管和钢骨的纵向应变分析

选取每根试件的 2-2 截面上对应于近偏心荷载侧和远偏心荷载侧的钢管和钢骨纵向应变测点数据分别绘于图 9 和图 10 中,标注中 *C* 表示近偏心荷载侧, *T* 表示远偏心荷载侧。从图中发现,无论是钢管还是钢骨,近偏心荷载侧的压应变均远大于远偏心荷载侧的拉应变,而钢管的应变大于钢骨的应变,这是由于偏心荷载作用引起的。构件测点处的钢管和钢骨的压应变由弹性进入弹塑性状态所对应的竖向荷载均小于拉应变由弹性进入弹塑性状态所对应的竖向荷载,说明试件破坏均是由近偏心荷载侧钢管受压屈服开始的。钢骨的远偏心荷载侧大多处于压应变状态,结合试件破坏始于钢管受压破坏,说明试件主要属于小偏心受压构件。

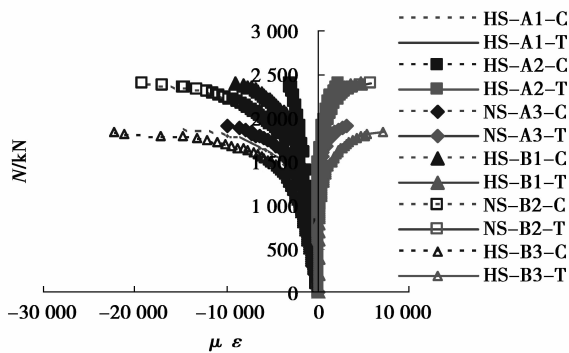


图 9 偏心竖向荷载与柱中部钢管纵向应变关系

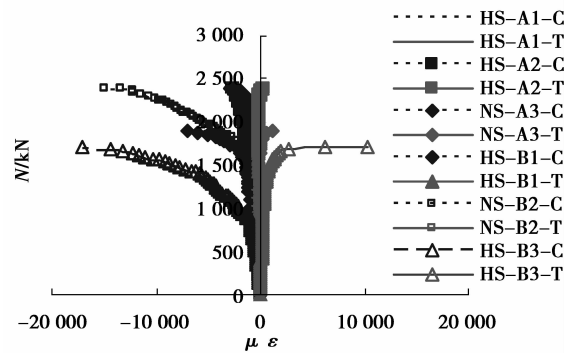
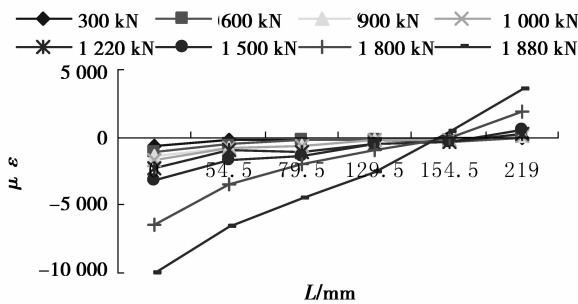


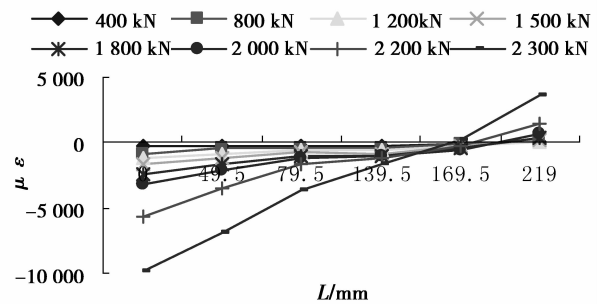
图 10 偏心竖向荷载与柱中部钢骨纵向应变关系

3.5 截面应变分布规律

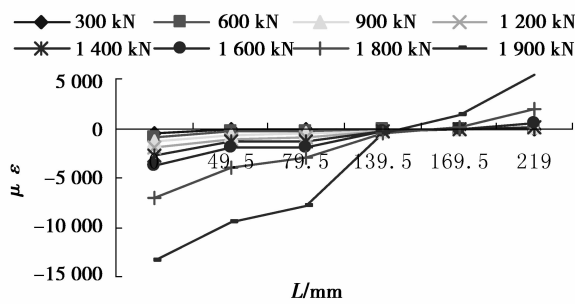
为了验证钢管-钢管混凝土柱正截面是否满足平截面假定,取 2-2 截面钢管和钢骨上沿柱直径方向的测点,将各测点在不同荷载加载等级下的应变沿直径长度分布规律绘于图 11 中。由图可见,不同荷载加载等级下各试件的中性轴保持不变;在弹性状态下各试件截面应变分布呈直线分布,即满足平截面假定,但随着荷载的增加,试件进入弹塑性状态后各试件截面应变分布不再是直线分布,即平截面假定不再成立;各试件的受压区远大于受拉区,各试件为小偏心受压构件。



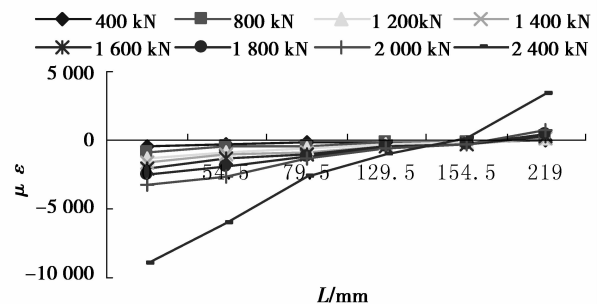
(a) HS-A1



(b) HS-A2



(c) NS-A3



(d) HS-B1

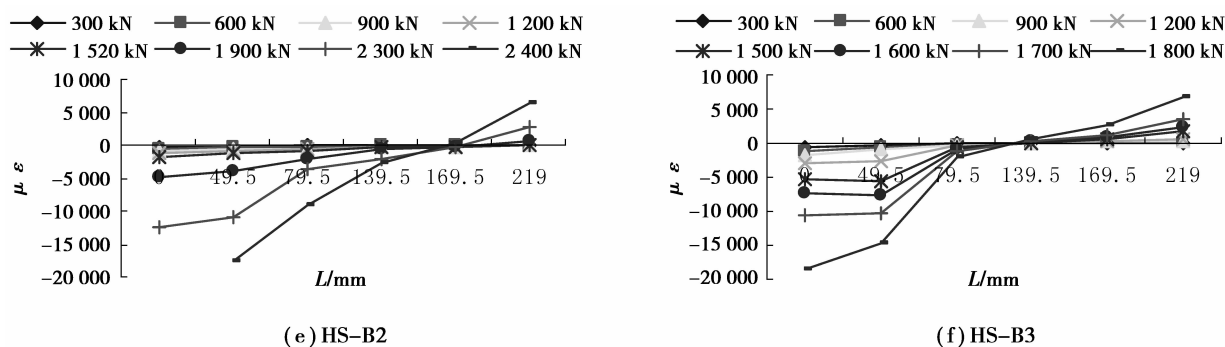


图 11 试件 2-2 截面的应变分布图

4 结 论

通过 6 个钢骨-钢管混凝土柱的偏心受压试验,在试验现象和试验数据分析的基础上,得出如下结论:

1) 小偏心钢骨-钢管混凝土柱的初始破坏从受压侧钢管的受压屈服开始,最终破坏是由于混凝土膨胀引起了钢管局部屈曲所致。因此防止钢管受压区局部屈曲将有利于提高此类构件偏心受压承载力。

2) 钢骨-钢管混凝土柱中钢骨能有效阻止混凝土的剪切斜裂缝的产生,能充分发挥钢管对混凝土的约束效应。因此此类构件表现出很好的延性。

3) 在钢管受压区纵向达到屈服前,钢骨-钢管混凝土柱横截面应变分布呈线性分布,满足平截面假定。两端铰结的小偏心钢骨-钢管混凝土柱的侧向挠度曲线均接近于正弦曲线,满足标准柱的假定。

4) 随混凝土强度的提高、配骨指标和套箍指标的增加,钢骨-钢管混凝土柱的竖向承载力极值均有所提高;但随着偏心距的增加,试件的竖向承载力和延性会显著降低。

参考文献:

[1] TOKGOZ S, DUNDAR C. Experimental study on steel tubular columns in-filled with plain and steel fiber reinforced concrete[J]. *Thin-Walled Structures*, 2010, 48(6): 414-422.

[2] MOHANRAJ E K, KANDASAMY S, MALATHY R. Behaviour of steel tubular columns in-filled with fibre reinforced concrete[J]. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 2010, 3(4): 828-836.

[3] 王清湘, 赵大洲, 关萍. 钢骨-钢管高强混凝土轴压组合柱受力性能的试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2003, 24(6): 44-49.

WANG QING-XIANG, ZHAO DA-ZHOU, GUAN PING. Study on the mechanical properties of axially

loaded steel tubular columns filled with steel-reinforced high-strength concrete [J]. *Journal of Building Structures*, 2003, 24(6): 44-49.

[4] 关萍, 王清湘, 赵大洲. 钢骨-钢管混凝土受弯组合柱受力性能的试验研究[J]. *地震工程与工程震动*, 2003, 23(2): 57-60.

GUAN PING, WANG QING-XIANG, ZHAO DA-ZHOU. Experimental research on mechanical behavior of bending circular steel tube columns filled with steel-reinforced concrete [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2003, 23(2): 57-60.

[5] 关萍, 王清湘, 赵大洲. 钢骨-钢管混凝土组合柱延性的试验研究[J]. *地震工程与工程震动*, 2003, 23(1): 84-89.

GUAN PING, WANG QING-XIANG, ZHAO DA-ZHOU. Experimental study on ductility of circular steel tubular columns filled with steel-reinforced concrete [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2003, 23(1): 84-89.

[6] 孙飞飞, 戴成华, 李国强. 大宽厚比开缝组合钢板墙低周反复荷载试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2009, 30(5): 72-81.

SUN FEI-FEI, DAI CHENG-HUA, LI GUO-QIANG. Cyclic test on large flakiness ratio composite steel plate walls with slits [J]. *Journal of Building Structures*, 2009, 30(5): 72-81.

[7] 中华人民共和国国家标准局. GB/T 6397-86 金属拉伸试验试样[S]. 北京: 中国标准出版社, 1986.

[8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 228-2002 金属材料室温拉伸试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

[9] 谭克锋, 蒲心诚, 蔡绍怀. 钢管超高强混凝土的性能与极限承载力的研究[J]. *建筑结构学报*, 1999, 20(1): 10-15.

TAN KE-FENG, PU XIN-CHENG, CAI SHAO-HUAL. Study on the mechanical properties of steel extra-high strength concrete encased in steel tubes [J]. *Journal of Building Structures*, 1999, 20(1): 10-15.

(编辑 陈移峰)