

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221014002

四肢钢管混凝土格构柱试验研究及参数分析*

黄志^{1,2}, 熊陆增^{1,4}, 蒋丽忠^{1,3}, 周旺保³, 湛湘文¹, 戚菁菁¹

(1. 湖南科技大学土木工程学院, 湖南湘潭 411201; 2. 湖南省智慧建造装配式被动房工程技术研究中心, 湖南湘潭 411201; 3. 中南大学土木工程学院, 湖南长沙 410075; 4. 湘潭理工学院, 湖南湘潭 411201)

摘要:为研究四肢钢管混凝土格构柱的受力机理及抗震性能,对4根四肢格构柱进行拟静力试验研究及有限元分析。通过试验得到四肢钢管混凝土格构在低周往复荷载作用下的滞回曲线和骨架曲线,分析了试件破坏过程。研究表明:格构柱的耗能能力及延性都较好;轴压比对试件的影响主要体现在破坏阶段,轴压比越大承载力下降段的斜率越大;长细比对试件受力性能有较大影响,随着长细比增大,试件的屈服位移和极限位移会增大,但水平承载力和破坏段的斜率会降低。建立了数值计算模型,并与试验结果进行对比,验证其正确性。并对不同高宽比、节间距与柱肢外径比等参数对试件弹性刚度和承载力的影响进行分析,结果表明:减小格构柱的高宽比和节间距与柱肢外径比对格构柱的受力性能有很大提升。建议实际工程中格构柱的高宽比不宜大于4.8;节间距与柱肢外径比不宜大于7.0。

关键词:钢管混凝土;格构柱;拟静力试验;参数分析;抗震性能;有限元分析

中图分类号: TU393 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)03-0616-07

Experimental Study and Parameter Analysis of Four-tube Concrete-filled Steel Tube Lattice Columns

HUANG Zhi^{1,2}, XIONG Luzeng^{1,4}, JIANG Lizhong^{1,3}, ZHOU Wangbao³,
CHEN Xiangwen¹, QI Jingjing¹

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Engineering Research Center for Intelligently Prefabricate Passive House, Xiangtan 411201, China;

3. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

4. Xiangtan Institute of Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: To investigate the stress mechanism and seismic performance of the four-tube concrete-filled steel tube (CFST) lattice columns, quasi-static tests and finite element analysis were conducted on four specimens. The hysteresis and skeleton curves of the four-tube CFST lattice columns under low-cycle repeated loads were obtained through experiments, and the failure process of the specimens was analyzed. The results showed that the lattice columns exhibited good energy dissipation capacity and ductility. The axial compression ratio mainly affected the specimens during the failure stage, with a larger axial compression ratio leading to a greater slope in the descending section of the bearing ca-

* 收稿日期:2023-07-01;修回日期:2023-08-16

基金项目:湖南省教育厅科学研究优秀青年项目(20B214)、国家自然科学基金(51808213)、湖南省自然科学基金(2019JJ50185)、湖南省教育厅科学研究项目(20A184)资助

作者简介:黄志(1984—),男,副教授,硕导,博士。主要从事组合结构抗震性能研究。E-mail: huangzhi@hnust.edu.cn

通信作者:蒋丽忠(1971—),男,教授,博导,博士。主要从事工程结构抗震性能研究。E-mail: lzjjiang@csu.edu.cn

capacity. However, the slenderness ratio had a significant effect on the stress performance of the specimens. With the increase in slenderness ratio, the yield and ultimate displacement of the specimens increased, but the horizontal bearing capacity and the slope in the failure section decreased. A numerical calculation model was established and compared with the experimental results to verify its accuracy. The effects of parameters, including different height-to-width ratios and ratios of section spacing to the column outer diameter, on the specimens' elastic stiffness and bearing capacity were analyzed. The results indicated that reducing the height-to-width ratio and the ratio of section spacing to column outer diameter significantly improved the stress performance of CFST lattice columns. It is suggested that in practical engineering, the height-to-width ratio of the columns should not exceed 4.8, and the ratio of spacing between limbs to column outer diameter should not exceed 7.0.

Keywords: concrete-filled steel tube; lattice columns; quasi-static test; parameter analysis; seismic performance; finite element analysis

0 引言

钢管混凝土柱中,钢管对混凝土有套箍作用,提高了核心混凝土的承载力;内置混凝土可阻止钢管薄壁向内屈曲,提高了整体的稳定性,充分展示了两者的组合作用。因此该类结构被广泛应用于建筑当中^[1-4]。但应用于大跨度、超高度的工程结构中,单肢钢管混凝土柱却因长细比和偏心率过大而无法将其良好的受压性能充分发挥。与同承载力的单肢钢管混凝土柱相比钢管混凝土格构柱具有自重小、截面刚度大、纵向稳定性更好等优点,更适宜用在大跨结构和高层建筑中^[5-7]。

近年来很多学者对格构柱结构展开研究,黄志等^[8]在 Kunnath 损伤模型的基础上提出了适用于钢管混凝土格构柱损伤计算的修正模型,并以轴压比、长细比、套箍系数为参数拟合了新的耗能因子公式;杨有福等^[9]研究发现现有规范中有关四肢钢管混凝土格构柱承载力的计算值偏低,于是基于有限元模型确定了新的计算公式;邹昀等^[10]研究发现传统的钢骨混凝土柱存在抗弯性能不能被充分发挥、角钢易被腐蚀、外包混凝土过早开裂等缺点,提出了新型的格构式钢骨混凝土柱并建立了对应的承载力计算公式;韩重庆等^[11]以受火时间和填实加固为参数,对 5 根钢筋混凝土格构柱进行了偏心受压试验,并分别提出了钢筋混凝土格构柱受火后未加固和加固后的承载力计算公式;欧智菁等^[12-13]以缀管形式和柱肢倾斜度为参数分析了四肢变截面格构柱在拟静力试验下的抗震性能,利用有限元模型对该类结构进行了参数分析并推导了恢复力模

型的计算公式;赵东拂等^[14]提出了一款主要用于抵抗水平侧向力的钢筋缀件格构柱结构,并对其抗震性能进行了试验和数值模拟,以期该类结构体系能应用于民间建筑;袁辉辉等^[15]通过试验和建立有限元模型的方法分析了混凝土强度、柱肢及缀管间距对等截面平缀管钢管混凝土格构柱滞回性能的影响;Z.Huang 等^[16]研究了不同节点连接方式的格构柱-组合箱梁节点在低周反复荷载下的受力性能,并提出了此类试件的恢复力模型计算公式;罗瑶^[17]对四肢格构柱进行了试验和数值模拟,研究了轴压比、长细比、混凝土强度、钢材强度等参数对试件滞回性能的影响。

综上所述,目前对格构柱的研究主要集中在承载力、抗侧向力的计算和轴压比、长细比、混凝土强度等相互独立的基本参数对构件性能影响等方面,对此类构件进行损伤评估也有相关研究,但是对由基本参数衍生组合的衍生参数的研究却鲜有报道。因此,对 4 根四肢钢管混凝土格构柱开展了拟静力试验和数值模拟,分析了衍生参数高宽比和节间距与柱肢外径比对格构柱的影响。

1 拟静力试验

1.1 试件及参数

本次试验共有 4 组四肢钢管混凝土格构柱试件。格构柱的柱肢和缀管均采用 Q235 钢,柱肢管径 86 mm,壁厚 1.5 mm。缀管管径 48 mm,壁厚 2.5 mm。试件的构造及加载如图 1 所示,几何参数见表 1。

为方便试验过程中施加荷载,制作了一个钢筋

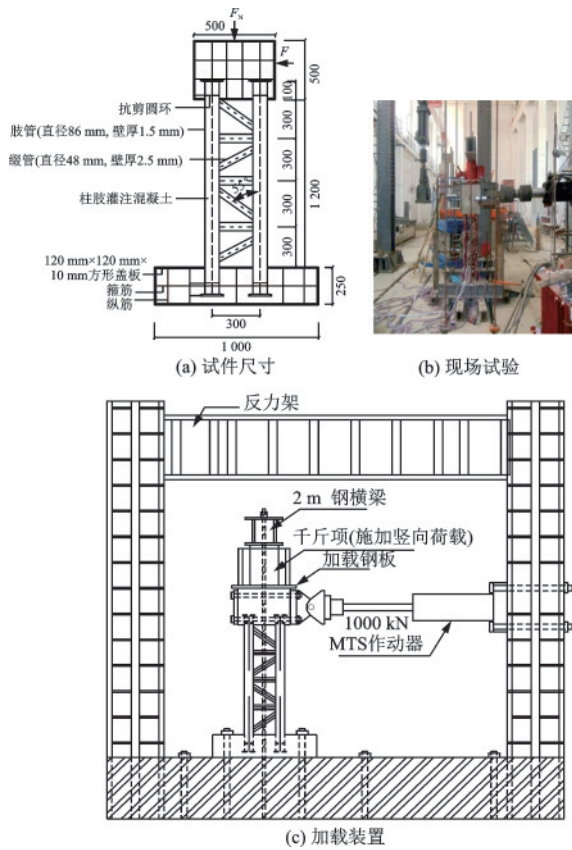


图1 试件构造及加载

Fig. 1 Specimen structure and loading

表1 试件参数

Table 1 Parameters for specimens

试件编号	试件长度/mm	轴压比	长细比
SCC1	1 200	0.2	10.8
SCC2	1 200	0.3	10.8
SCC3	2 100	0.2	18.4
SCC4	3 000	0.2	27.9

混凝土柱帽,与格构柱顶现浇在一起。为避免柱帽局部破坏,在柱帽顶部放置一块加载板以承担千斤顶施加的竖向荷载。柱帽侧面预留4个孔方便与施加横向反复荷载的MTS作动器连接。制作了一个尺寸为600 mm×1 000 mm×250 mm的钢筋混凝土试块作为柱底座,格构柱与底座现浇在一起,嵌入深度为180 mm。底座上留有两个螺栓孔,便于高强度螺栓从孔中穿过连接地槽,使得整个格构柱试件固定,以模拟格构柱上端自由,下端固定的边界形式。装置校准完毕后,根据试验设计的轴压比控制100 t液压千斤顶施加轴力,并保持轴力恒定。轴力施加完毕后,维持2~3 min,然后开始施加横向反复荷载。试验采用位移加载的方式完成,试件屈

服前每次位移荷载增量为0.5倍屈服位移;屈服后每次位移荷载增量为一个屈服位移。加载过程中发生以下情况的一种即视为试件破坏,停止试验:①荷载小于峰值荷载的85%;②加载位移大于试件高度的1/200;③试件出现明显的破坏特征,如:柱脚鼓曲,出现裂缝;缀管与柱肢连接处撕裂等。

1.2 数据采集

轴力、位移—荷载等数据可通过柱顶的传感器和连接在柱帽侧面的MTS作动器数据采集系统得到。在柱顶、柱中、柱脚等位置对称安装位移计,取平均值作为该位置的水平挠度。在柱中、柱肢1/4截面、柱脚布置了双向应变片,以测量纵向与横向应变。每级加载持续2~3 min,待仪表稳定后记录各测点数据,观察试件损伤情况。

1.3 试验现象

试件SCC1和SCC2的破坏情况相似。加载初期试件无明显损伤特征,加载至4倍屈服位移左右时受压一侧柱脚处开始出现轻微鼓曲,但是反向加载时鼓曲基本能恢复。加载至6倍屈服位移左右时,柱脚处鼓曲范围扩大,逐步向环向发展,且反向加载时鼓曲不能恢复。加载至7倍屈服位移左右时,受压侧柱脚处出现裂缝,柱底混凝土被压碎并从裂缝中掉落。加载至9倍屈服位移左右时,柱脚位置的肢管和缀管连接处出现撕裂,此时承载力较峰值承载力相比下降过多,整个格构柱弯曲变形明显,表明试件已损坏。

试件SCC3加载至1~2倍屈服位移时,受力情况良好,表面无明显变形。加载至3倍屈服位移左右时,柱脚处出现可恢复的鼓曲。加载至4倍屈服位移时鼓曲进一步增大且不能恢复。加载至5倍屈服位移时,柱脚处因变形过大而出现水平裂缝,承载力出现大幅下降。

试件SCC4加载至4倍屈服位移左右时,格构柱达到最大承载力,柱脚处出现微小鼓曲。加载至5~6倍屈服位移时,因钢管和混凝土泊松比不同的原因,钢管受到混凝土的挤压,鼓曲呈环向发展,柱脚处的漆皮开始脱落。加载至7倍屈服位移时,格构柱出现明显弯曲,承载力已有轻微下降。此时因作动器位移已至极限,试验停止。图2为试件损伤细部图。

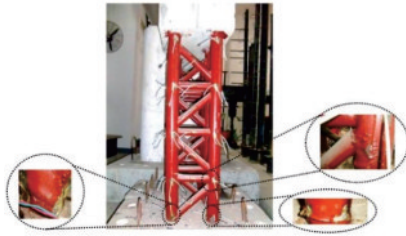


图2 试件破坏细部图

Fig. 2 Details of specimen failure

1.4 滞回曲线分析

四肢格构柱的水平荷载一位移滞回曲线如图3所示。滞回曲线均较为饱满,说明钢管混凝土格构柱有较强的耗能能力。承载力下降段平缓,证明试件的延性较好。试件 SCC1 和试件 SCC2 在弹性阶段的受力情况类似,试件 SCC1 的水平承载力略大于试件 SCC2,但是在破坏阶段,试件 SCC2 破坏段的斜率大于试件 SCC1。试件 SCC3 的滞回曲线是

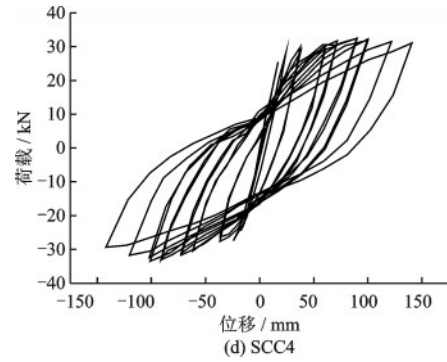
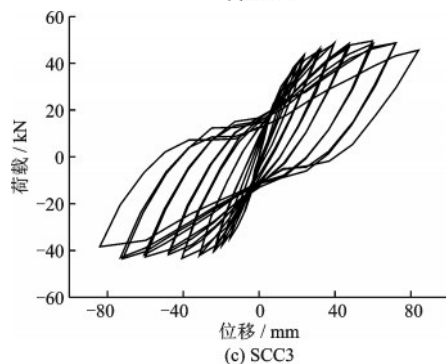
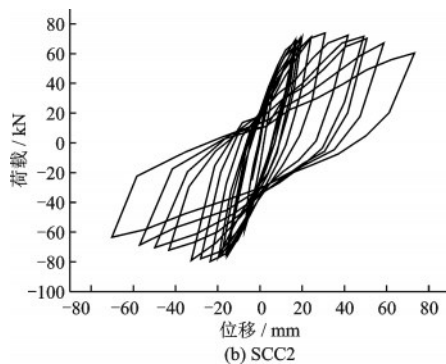
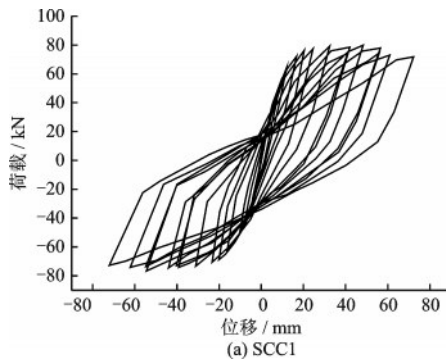


图3 荷载一位移滞回曲线

Fig. 3 Load-displacement hysteresis curves

4个试件中捏缩效应最明显的,这是由于试件 SCC3 相对来说较长,长柱的施工质量难以保证,钢管和混凝土之间存在滑移,特别是在加载后期混凝土被压碎,滑移现象更为明显。这造成了滞回曲线的捏缩,对试件的耗能能力有一定影响。试件 SCC4 的剪跨比很大,整体表现出压弯破坏,所以滞回曲线最为饱满。纵观4组滞回曲线可以得出加载初期轴压比对试件的承载力影响不大。这主要由于轴压比的变化会导致核心混凝土受压面积会随之变化,从而使试件的抗弯刚度发生变化。但是在钢管混凝土格构柱中混凝土的抗弯刚度只占总抗弯刚度的一小部分,导致试件的抗弯刚度变化很小,所以不同轴压比下试件承载力变化很小。长细比对试件受力性能有较大影响,随着长细比增大,试件的屈服位移和极限位移会增大,但水平承载力和破坏段的斜率会降低。



2 有限元模型建立

2.1 模型材料属性及相互接触

采用 ABAQUS 有限元分析软件对格构柱进行建模计算。肢管、缀管采用 S4R 壳单元建模;钢管内混凝土、柱帽、底座采用 C3D8R 实体单元建模。肢管与混凝土的接触方式为面-面接触;肢管与柱帽、底座采用壳-实体耦合的约束方式;混凝土与柱帽、底座采用绑定的约束方式;肢管和缀管之间也采用绑定的约束方式。为兼顾计算精度和速度,网格划分采用结构化划分的形式。考虑到包辛格效应,钢材的塑性应力-应变模型宜采用组合硬化模型^[18]。经综合对比,采用文献[19]中的混凝土本构模型,本构模型中受压、受拉应力-应变关系分别如式1、式2所示:

$$y = \begin{cases} \frac{A_1 x + (B_1 - 1)x^2}{1 + (A_1 - 2)x + B_1 x^2} & x \leq 1 \\ \frac{x}{\alpha_1(x-1)^2 + x} & x > 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $y = \sigma/f_c$; $x = \epsilon/\epsilon_c$; $A_1 = 9.1f_{cu}^{-4/9}$; $B_1 = 1.6(A_1 - 1)^2$; $\alpha_1 = 2.5f_{cu}^3 \times 10^5$

$$y = \begin{cases} \frac{A_2 x + (B_2 - 1)x^2}{1 + (A_2 - 2)x + B_2 x^2} & x \leq 1 \\ \frac{x}{\alpha_2(x-1)^2 + x} & x > 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $y = \sigma/f_t$; $x = \epsilon/\epsilon_t$; $f_t = 0.24f_{cu}^{2/3}$; $\epsilon_t = 33f_{cu}^{1/3} \times$

10^{-6} ; $A_2 = 1.306$; $B_2 = 5(A_2 - 1)^2/3$; $\alpha_2 = 0.8$ 。

2.2 有限元模型验证

有限元数值模拟和试验所得格构柱荷载—位移骨架曲线对比如图4所示, 试件 SCC1、SCC2 模拟结果较为准确, 试件 SCC3 正向加载屈服后的模拟结果及试件 SCC4 弹性阶段的模拟结果与试验结果相比有些偏差。这是由于试件 SCC3、SCC4 柱体较长, 施工质量难以保证, 而数值模拟未考虑试件的初始缺陷和残余应力的影响。总体来说有限元数值模拟和试验结果吻合程度较好。

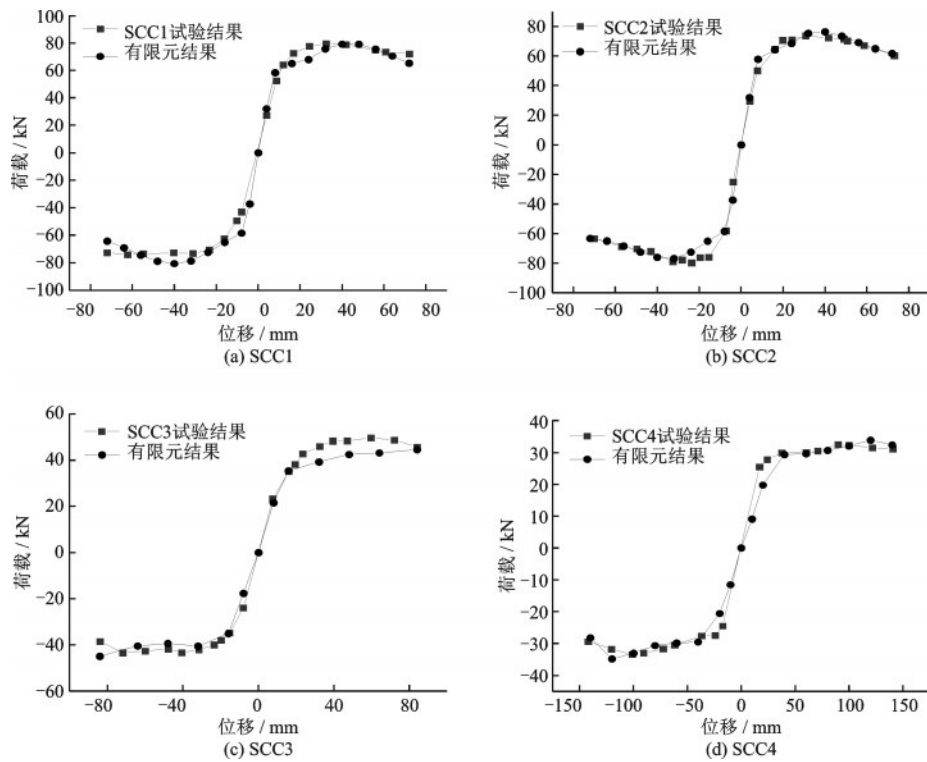


图4 荷载—位移骨架曲线对比

Fig. 4 Comparison diagrams of load-displacement skeleton curves

3 有限元参数分析

为更全面分析格构柱在反复荷载下的受力情况, 对不同高宽比和节间距与柱肢外径比的模型进行计算。考虑到缀管的分布情况, 高宽比的取值范围为 4~8, 节间距与柱肢外径比的取值范围为 3.5~17.4。

图5展示了不同高宽比下试件骨架曲线的走势, 表2列出了图5中各个骨架曲线弹性刚度、屈服荷载、峰值荷载等的具体数值。

结合图5和表2可知, 随着高宽比减小, 试件的弹性刚度、屈服荷载、峰值荷载都会增大。当高宽比从8减小到6时, 试件的弹性刚度增加了15.1%, 屈服荷载增加了16.3%, 峰值荷载增加了28.8%; 高宽比从6减小到4.8时, 试件的弹性刚度增加了65.8%, 屈服荷载增加了64.5%, 峰值荷载增加了43.7%; 高宽比从4.8减小到4, 弹性刚度增加了15.9%, 屈服荷载增加了15.4%, 峰值荷载增加了12.9%。通过以上数据可得高宽比对试件受力性能影响较大, 高宽比为4.8时试件的受力性能远优于高宽比为6.0或者8.0时, 且高宽比从6.0减小到4.8

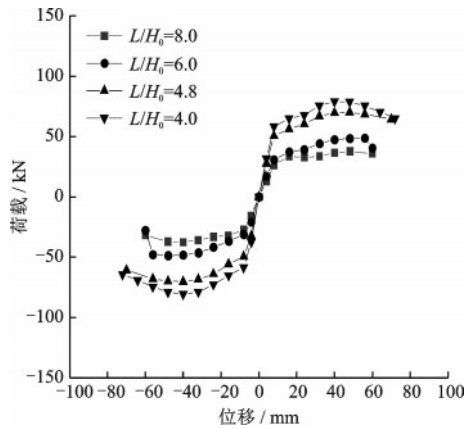


图5 不同高宽比骨架曲线对比

Fig. 5 Comparison of skeleton curves at different height-width ratios

表2 不同高宽比下各骨架曲线特征值
Table 2 Characteristic values of skeleton curves at different height-width ratios

骨架曲线编号	弹性刚度/ (kN·mm ⁻¹)	屈服荷载/ kN	峰值荷载/ kN
$L/H_0=8.0$	3.3	26.4	37.8
$L/H_0=6.0$	3.8	30.7	48.7
$L/H_0=4.8$	6.3	50.5	70.0
$L/H_0=4.0$	7.3	58.3	79.0

试件承载力增加的幅值远大于高宽比从8.0减小到6.0试件承载力增加的幅值。所以实际工程当中应尽量避免采用高宽比较大的试件,大高宽比试件若想通过减小高宽比来达到增大承载力的目的,其调整的幅度应适宜增大,此外随着高宽比减小到一定范围后,调整高宽比承载力提高的幅度会缩小。虽然实际工程中,试件高宽比越小所占的施工面积越大,缀管的用钢量越多,但是减小高宽比带来的承载力的提升效果却是显著的,所以建议高宽比不宜大于4.8。

图6展示了不同节间距与柱肢外径比下试件骨架曲线的走势,表3列出了图6中各个骨架曲线弹性刚度、屈服荷载、峰值荷载等的具体数值。

结合图6和表3可知,随着节间距与柱肢外径比减小,试件的弹性刚度、屈服荷载、峰值荷载都会增大。当节间距与柱肢外径比较大时($L_0/D=11.6$ 、 17.4),试件的承载力、延性都相对较低。因为节间距较大,导致试件整体稳定性差,随着施加的荷载增大,柱肢出现局部失稳,试件整体产生较大变形,承载力急剧下降。节间距与柱肢外径比从17.4减

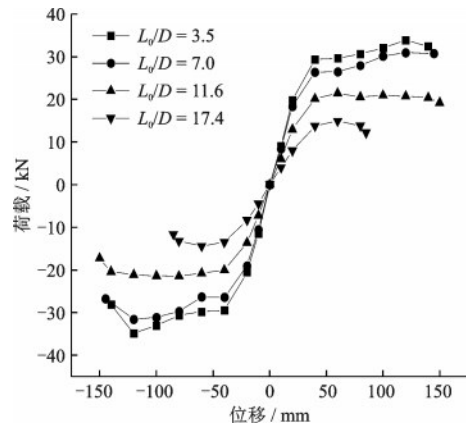


图6 不同节间距与柱肢外径比骨架曲线对比

Fig. 6 Comparison of skeleton curves at different ratios of section spacing to column outer diameter

表3 不同节间距与柱肢外径比各骨架曲线特征值
Table 3 Characteristic values of skeleton curves at different section spacing to column outer diameter

骨架曲线编号	弹性刚度/ (kN·mm ⁻¹)	屈服荷载/ kN	峰值荷载/ kN
$L_0/D=17.4$	4.0	8.0	14.9
$L_0/D=11.6$	6.5	13.0	21.4
$L_0/D=7.0$	9.2	18.3	30.9
$L_0/D=3.5$	9.9	19.8	33.9

小到11.6以及从11.6减小到7.0弹性刚度分别增加了62.5%、41.5%;屈服荷载分别增加了62.5%、40.8%;峰值荷载分别增加了43.6%、44.4%。说明此时试件的受力性能很大程度上受整体稳定性的影响,而不是材料属性。节间距与柱肢外径比从7.0减小到3.5,弹性刚度增加了8%,屈服强度增加了8%,峰值荷载增加了10%,承载力增加幅度相对较小。因为此时,试件整体稳定性已有很大提升,极限承载力不再由单根柱肢的稳定性决定。节间距与柱肢外径比过大,极大程度降低了试件的极限承载力,建议实际工程中节间距与柱肢外径比不宜大于7.0。

4 结论

(1) 试验中格构柱的破坏形式基本相同:柱脚处鼓曲严重且出现裂缝,肢管内混凝土被压碎,缀管与肢管连接处出现撕裂现象。4根格构柱的滞回曲线都相对饱满,表明此类结构有良好的耗能能力。

(2)采用合适的材料本构关系和各部件之间相互接触关系,利用软件ABAQUS建立的数值计算模型可较为准确的模拟往复荷载下四肢钢管混凝土格构柱的弹性刚度、承载力和强度退化,该计算模型可适用于参数分析。

(3)减小格构柱的高宽比和节间距与柱肢外径比对格构柱的受力性能有很大提升,建议实际工程中格构柱的高宽比不宜大于4.8;节间距与柱肢外径比低不宜大于7.0。

参考文献:

- [1] 惠存,李永刚,李克,等.多灾耦合作用下钢管混凝土柱承载性能研究进展[J].防灾减灾工程学报,2022,42(2):259-268.
Hui C, Li Y G, Li K, et al. Investigation on the load bearing capacity of concrete filled steel tube columns under the couple of multiple disasters[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(2):259-268. (in Chinese)
- [2] 丁发兴,卫心怡,潘志成,等.高轴压比方钢管混凝土柱-组合梁单边栓连刚接节点抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2023,44(7):105-115.
Ding F X, Wei X Y, Pan Z C, et al. Experimental study on seismic behavior of square CFST column-composite beam single side bolted rigid joint under high axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2023,44(7):105-115. (in Chinese)
- [3] 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.
- [4] 冯玉林,蒋丽忠,陈梦成,等.地震作用下轨道-桥梁系统损伤与轨道不平顺的对应关系[J].交通运输工程学报,2021,21(3):203-214.
Feng Y L, Jiang L Z, Chen M C, et al. Corresponding relationship between track-bridge system damage and track irregularity under seismic action [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(3): 203-214. (in Chinese)
- [5] Huang Z, Jiang L Z, Chen Y F, et al. Experimental study on the seismic performance of concrete filled steel tubular laced columns[J]. Steel and Composite Structures, 2018,26(6):719-731.
- [6] 蒋丽忠,黄志,陈善,等.钢管混凝土格构柱-组合箱梁节点抗震性能试验研究[J].振动与冲击,2014,33(18):156-163.
Jiang L Z, Huang Z, Chen S, et al. Tests for aseismic behavior of connection joints composed of concrete-filled steel tubular lattice columns and composite box girders [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(18):156-163. (in Chinese)
- [7] 胡昊宇.格构柱与管桁架相贯节点受力性能研究[D].重庆:重庆大学,2019.
Hu H Y. Study on mechanical behaviors of tubular joints of lattice columns and tube trusses [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (in Chinese)
- [8] 黄志,熊陆增,蒋丽忠,等.四肢钢管混凝土格构柱地震损伤模型及试验研究[J].应用力学学报,2022,39(4):717-725.
Huang Z, Xiong L Z, Jiang L Z, et al. Studies on seismic damage model of concrete-filled steel tube laced columns [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2022, 39(4): 717-725. (in Chinese)
- [9] 杨有福,刘敏,别雪梦.四肢格构式钢管混凝土轴压构件承载力研究[J].建筑钢结构进展,2022,24(5):18-26.
Yang Y F, Liu M, Bie X M, et al. Research on bearing capacity of four-legged CFST latticed members under axial compression [J]. Progress in Steel Building Structures, 2022,24(5):18-26. (in Chinese)
- [10] 邹昀,丁杰,王城泉,等.新型格构式钢骨混凝土柱的轴压性能研究[J].实验力学,2021,36(1):91-104.
Zou Y, Ding J, Wang C Q, et al. Axial compression behavior of a novel lattice steel reinforced concrete column [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2021, 36(1):91-104. (in Chinese)
- [11] 韩重庆,邵棚,许清风,等.受火后加固钢筋混凝土偏压格构柱受力性能试验研究[J].建筑结构学报,2021,42(1):169-178.
Han C Q, Shao P, Xu Q F, et al. Experimental research on eccentric compression performance of fire-damaged RC lattice columns strengthened with filling concrete [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(1):169-178. (in Chinese)
- [12] 欧智菁,陈盛富,吴庆雄,等.四肢变截面钢管混凝土格构柱恢复力模型计算方法[J].交通运输工程学报,2018,18(5):77-89.
Ou Z J, Chen S F, Wu Q X, et al. Calculation method of restoring force model of four-element variable cross-sectional concrete filled steel tubular laced column [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018,18(5):77-89. (in Chinese)

(本文编辑:周小潭)

(下转第 631 页)