

加劲型方钢管混凝土柱双向偏压力学性能研究

任德斌¹,张正涛¹,李泊飞²,郭兴野¹,杨倩怡¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 瓦格宁根大学环境工程学院,荷兰 瓦格宁根 6078PB)

摘要 目的 研究加劲型方钢管混凝土柱在双向偏心荷载作用下的力学性能,为实际工程的应用与相关试验研究提供理论依据. 方法 在有限元验证的基础上,研究加劲肋厚度、偏心距、偏心角以及长细比的变化对于试件承载力、抗弯刚度、延性的影响. 结果 在双向偏心荷载作用下,试件腔体内有加劲型与无加劲肋的钢管混凝土柱均发生挠曲变形;随着加劲肋厚度的增加,承载力逐渐提高,但提高幅度逐渐逐渐减小,且延性逐渐降低;随着偏心距的增大,试件承载力及刚度大幅度降低;改变偏心角对于承载力、刚度及延性几乎无影响;增加长细比使得试件由强度破坏逐渐变为失稳破坏,承载力与刚度均下降,但延性增加. 结论 加劲型钢管混凝土柱在双向偏心荷载作用下具有足够的安全储备,延性满足抗震要求.

关键词 加劲肋;钢管混凝土柱;双向偏压;挠度;延性系数

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Study on Biaxial Eccentric Compression Behavior of Concrete-Filled Square Steel Tubular Columns Stiffened with Reinforced Ribs

REN Debin¹, ZHANG Zhengtao¹, LI Bofei², GUO Xingye¹, YANG Qianyi¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Environmental Engineering, Wageningen University, Wageningen Netherlands, 6078PB)

Abstract: The purpose of this paper is to do research on mechanical behavior of concrete-filled square steel tubular columns stiffened with Reinforced ribs under bidirectional eccentric load, which provides a theoretical basis for practical engineering application and related experimental research. Based on the finite element verification, the effects of reinforced ribs thickness, eccentricity, the load angle and slenderness ratio on the bearing capacity, flexural rigidity and ductility of the specimens were studied. Under the action of two-way eccentric load, both the stiffened and non-stiffened concrete-filled steel tubular columns in the specimen cavity are bending deformation. Through parameter analysis, it is found that with the increase of the thickness of the stiffener, the bearing capacity is gradually increased, but the increasing range is gradually

收稿日期:2019-11-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51678373)

作者简介:任德斌(1960—),男,教授,主要从事组合结构方面研究.

decreasing, and the ductility is gradually reduced. With the increase of the eccentricity, the bearing capacity and stiffness of the specimen are greatly reduced; The eccentric angle has almost no influence on the bearing capacity, stiffness and ductility. Increasing the slenderness ratio makes the specimen gradually change from strength failure to instability failure, and the bearing capacity and stiffness decrease, but the ductility increases. The stiffened concrete-filled steel tubular column has sufficient safety reserve under the action of bidirectional eccentric load, and the ductility meets the seismic requirements.

Key words: reinforced ribs; concrete-filled square steel tubular columns; biaxial eccentric compression; deflection; ductility coefficient

近年来,随着高层、超高层建筑的迅速发展,对结构安全性能的要求也越来越高.因此,不同腔体构造的钢管混凝土得到了广泛的应用,加劲型钢管混凝土柱是其中的一种形式,这种柱是在钢管混凝土柱的基础上发展起来的,主要是在钢管内壁设置加劲肋,使得加劲肋与钢管协同作用,以此来提高试件的承载力及刚度.

针对加劲型钢管混凝土柱的力学性能,相关学者做了大量研究.徐兵等^[1]对腔体内设置直肋的钢管混凝土柱进行了轴压试验,研究表明,加劲肋能够有效提高试件的承载力与刚度;刘君平等^[2]以PBL加劲方钢管混凝土柱为研究对象进行了试验研究,在加劲肋相关构造参数分析的基础上,建议了PBL加劲钢管混凝土柱的简化计算公式;董宏英等^[3]以北京中国尊大厦所采用的钢管混凝土柱为原型,设计了6种不同腔体构造的钢管混凝土柱,并进行了轴压性能试验;姜磊等^[4]通过试验分析了PBL加劲钢管混凝土长柱的轴压性能,并建议了承载力计算公式.

目前有关加劲型钢管混凝土柱的研究成果主要集中在对轴压性能的分析,而对于加劲型钢管混凝土柱双向偏压的研究鲜见报道.基于此,笔者在验证有限元可靠的基础上,通过运用ABAQUS有限元软件对1个普通方钢管混凝土柱与9个加劲型方钢管混凝土柱进行双向偏压力学性能的研究,分析了加劲肋厚度、偏心距、偏心角、长细比等参数的变化对于试件承载力、抗弯刚度以及延性系

数的影响,从而为实际工程的应用及相关试验的开展提供理论依据.

1 有限元模型

1.1 有限元模型建立

1.1.1 材料本构关系选取

有限元模型建立过程中,需要选取合理的本构关系.对于普通钢管混凝土柱以及加劲型钢管混凝土柱,混凝土均受到钢管的约束作用,因此笔者采用韩林海提出的钢管混凝土本构模型,钢材的本构关系选取双折线模型^[5-7].

1.1.2 网格划分及单元类型的选取

在有限元模型建立过程中,核心混凝土采用实体单元,钢管采用壳单元.为了提高模拟结果的精度,网格划分时,钢管与混凝土网格对应,保证网格尺寸相近.在对钢管混凝土柱进行双向偏压计算时,需要将材料的单元类型设置为结构分析单元,核心混凝土采用三维实体单元C3D8R,钢管采用四节点缩减积分形式的壳单元S4R,并在厚度方向设置9个积分点^[8-12].

1.1.3 模型边界条件

柱的两端设有端板,将参考点与端板进行耦合.为了保证在加载过程中构件截面能够转动,构件两端X、Y、Z方向的转角不予约束.柱的上端,即加载端,约束X、Y方向的位移,通过施加Z方向的位移来实现加载,柱的底端约束X、Y、Z方向的位移^[13-14].

1.2 有限元模型的验证

目前针对加劲型方钢管混凝土柱双向偏

压的研究较少,因此笔者选用文献[15]试验中常温下方钢管混凝土柱进行有限元验证.试件高度 H 为 800 mm,宽度为 120 mm,长细比为 23.1,混凝土 28 d 抗压强度 $f_{cu} =$

44.5 MPa,弹性模量 $E_c = 33\ 800$ MPa,钢管壁厚为 3.7 mm,实测钢材强度性能指标见表 1.试件受双向偏心荷载时,偏心距为 15 mm,偏心角为 45° .

表 1 钢材力学性能指标

Table 1 Steel mechanical performance indicators

类型	钢管边长/mm	钢管壁厚/mm	屈服强度 f_y /MPa	极限强度 f_u /MPa	弹性模量 E_c /MPa
钢管	120	3.7	276	379	179 988

文献[15]研究表明,由于钢管与混凝土的协同作用,使得构件在加载初期变形较小,随着荷载逐渐增加,试件向截面对角线一侧弯曲,且弯曲变形逐渐增大,当加载至达到极限荷载的 80% 时,受压区一侧的钢管进入弹性阶段,出现了较大的变形,且变形发展速度较快,而此时受拉区钢管仍处于弹性阶段,

达到峰值荷载之后,试件受压区钢管中部开裂,试件严重破坏,最终停止试验;运用有限元软件 ABAQUS 进行数值模拟,得到试件变形模态如图 1 所示.由图可知,试件破坏时将沿截面对角线一侧发生侧向弯曲,跨中位置产生应力集中,最终在钢管上产生塑性铰,这与试验得到的变形形态基本吻合.

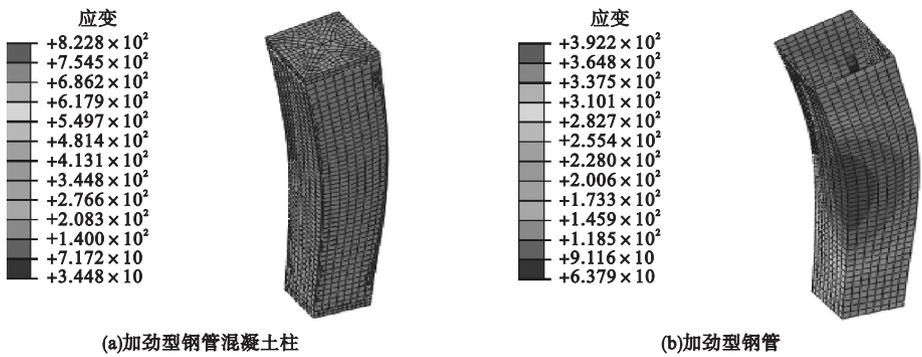


图 1 试件变形模态

Fig. 1 Failure pattern of specimens

参照文献[15]提取偏心荷载-水平位移 ($N-U_c$) 曲线如图 2 所示.其中 U_c 为试件中部水平组合位移,可通过沿试件中部 X 方向与 Y 方向的位移 U_x 、 U_y 计算得到, $U_c = \sqrt{U_x^2 + U_y^2}$.通过观察荷载-挠度曲线发现,有限元计算结果与试验结果吻合程度较高,由此证明了有限元分析的可靠性.

2 加劲型钢管混凝土柱双向偏压力学性能模拟分析

2.1 试件参数

为了研究加劲型钢管混凝土柱双向偏压力学性能,设置 10 组试件,构件参数见表 2.

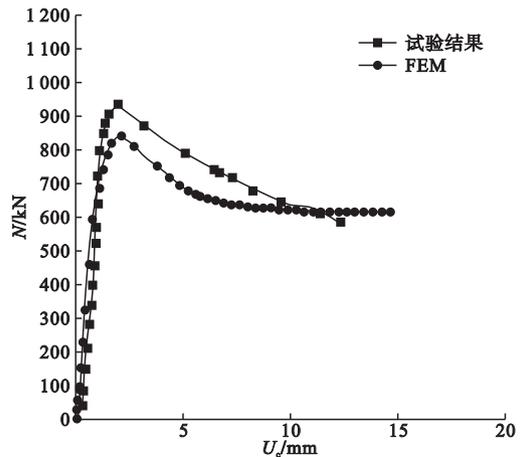


图 2 有限元计算与试验实测结果对比

Fig. 2 Comparison of finite element calculation with test results

其中 SC1 为普通钢管混凝土柱,作为对照组,其余试件为加劲型钢管混凝土柱,截面形

式及加载位置如图 3 所示.

表 2 试件参数

Table 2 The parameters of specimens

试件编号	截面长 × 宽/mm	试件高度/mm	偏心距 e /mm	长细比	偏角 β /(°)	加劲肋厚度/mm
SC1	500 × 500	2 000	60	19.6	45	—
SC2	500 × 500	2 000	60	19.6	45	8
SC3	500 × 500	2 000	60	19.6	45	10
SC4	500 × 500	2 000	60	19.6	45	12
SC5	500 × 500	2 000	90	19.6	45	8
SC6	500 × 500	2 000	120	19.6	45	8
SC7	500 × 500	2 000	60	19.6	15	8
SC8	500 × 500	2 000	60	19.6	30	8
SC9	500 × 500	3 000	60	29.4	45	8
SC10	500 × 500	3 500	60	34.3	45	8

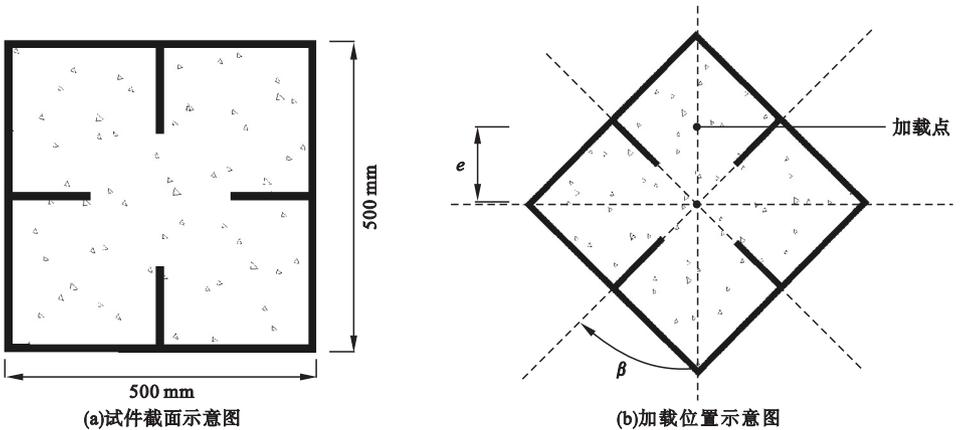


图 3 试件截面形式及加载位置

Fig. 3 Cross-section form and loading position

2.2 建立加劲型钢管混凝土柱有限元模型

加劲型钢管混凝土柱是在普通钢管混凝土柱的基础上发展起来的一种新的结构形式,相比普通钢管混凝土,其主要是在钢管腔体内附加加劲肋,以此来提高试件的承载力及刚度. 笔者研究的加劲型钢管混凝土柱是在钢管内壁焊接通高竖向加劲肋,选用的加劲肋尺寸分别为 $8\text{ mm} \times 75\text{ mm}$ 、 $10\text{ mm} \times 75\text{ mm}$ 、 $12\text{ mm} \times 75\text{ mm}$,钢管壁厚取 16 mm ,钢材选用 Q345 级,混凝土强度等级为 C50. 加劲钢管混凝土有限元模型如图 4 所示.

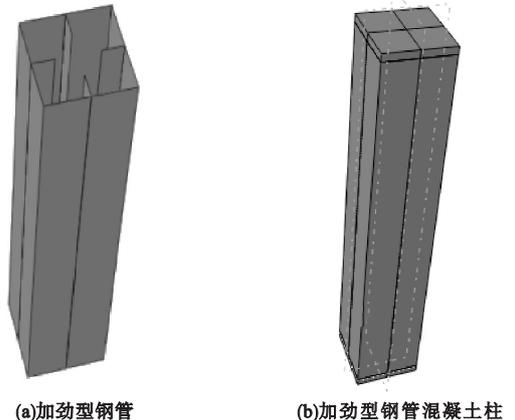


图 4 有限元模型

Fig. 4 Finite element mode

2.3 计算结果分析

2.3.1 典型试件破坏模式

SC1、SC2 分别对应钢管腔体内无加劲

肋和有加劲肋的试件,通过有限元计算得到试件的破坏模式如图5所示。

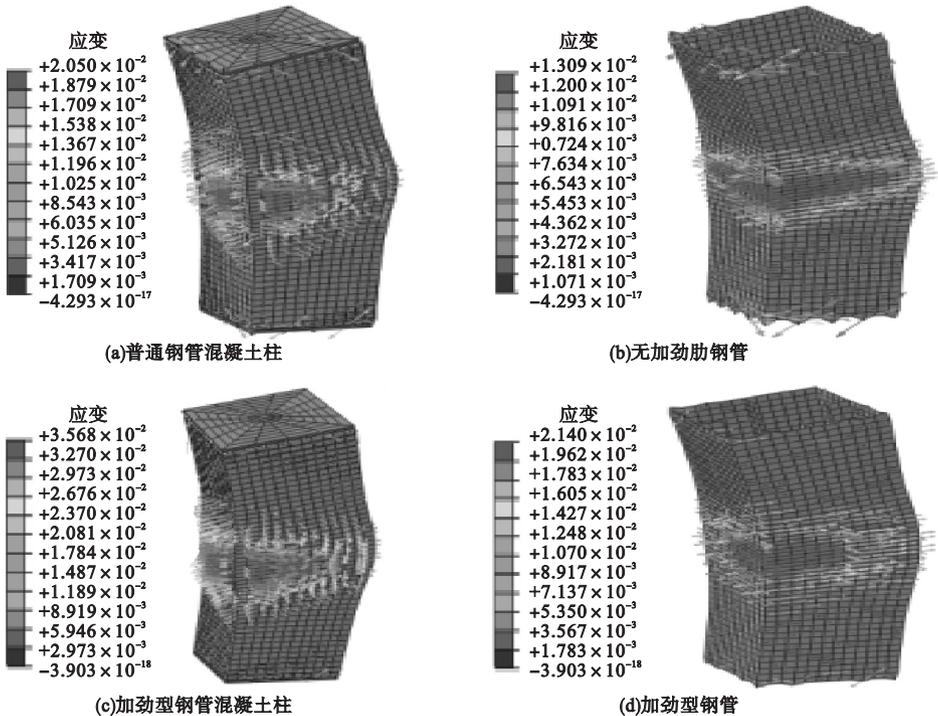


图5 构件破坏模式

Fig. 5 Failure pattern of specimens

通过对比普通钢管混凝土柱与加劲型钢管混凝土柱发现,二者在双向偏压荷载作用下均产生了挠曲变形.普通钢管混凝土柱在双向偏压荷载作用下,受压侧钢管中部内凹,且横向变形随着荷载的增加而逐渐增大,当达到极限应变后,受压侧钢管发生严重的屈曲破坏,从而失去了对内部混凝土的约束作用.加劲型

钢管混凝土柱与普通混凝土的变形类似,但由于竖向加劲肋的存在,一方面使得钢管与混凝土的粘结作用增强,另一方面延缓了受压侧钢管的屈曲,以此提高了试件的承载能力。

2.3.2 加劲肋厚度

图6为不同加劲肋厚度下试件竖向荷载-挠度曲线。

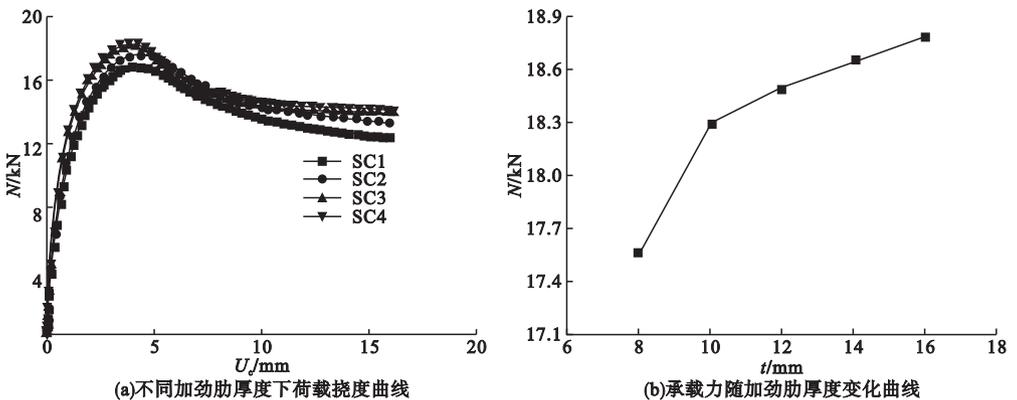


图6 不同加劲肋厚度下的有限元计算结果

Fig. 6 Results of the calculation of finite elements at different thickness of separators

SC1 为普通钢管混凝土柱, SC2、SC3、SC4 分别对应加劲肋厚度为 8 mm、10 mm、12 mm 的试件, 通过有限元计算发现, 普通钢管混凝土在双向偏压荷载作用下极限承载力为 16.767 MN, 设置加劲肋后, 其极限承载力为 17.56 MN, 承载力提高了 4.7%; 进一步地, 将加劲肋厚度由 8 mm 分别增加至 10 mm、12 mm、14 mm、16 mm 时发现, 试件承载力均有所提高, 但提高幅度逐渐减小。

2.3.3 不同偏心距

以 SC2 为基准模型, 保持试件长细比、加载偏心角以及加劲肋厚度不变, 仅改变偏心距, 试件在双向偏压荷载作用下的荷载-挠度曲线如图 7 所示。通过图 7 发现, 试件依次经历了弹性阶段、弹塑性阶段以及破坏阶段, 当试件偏心距从 60 mm 分别增加至 90 mm、120 mm 时, 试件的极限承载力及抗弯刚度均显著降低。当偏心距为 60 mm 时, 试件侧向挠度超过 4.35 mm 后, 钢管发生严重的屈曲破坏, 当偏心距取 90 mm 时, 试件中部侧向挠度达到 5.11 mm 后钢管才发生屈曲破坏, 当偏心距达到 120 mm 时, 试件破坏时侧向挠度为 5.57 mm。由此可见, 改变偏心距将会使得构件拉压面积比发生变化, 并且随着偏心距的增大, 构件将发生失稳破坏。

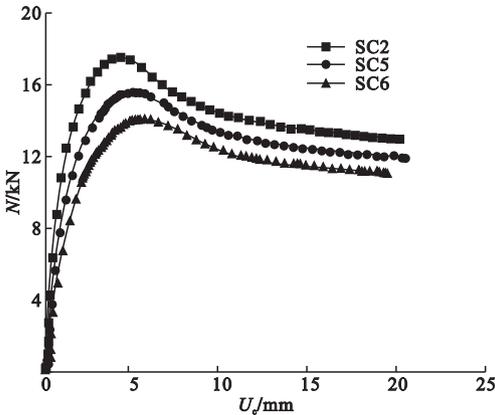


图 7 不同偏心距下荷载-挠度曲线

Fig. 7 Load-deflection curves with different eccentricities

2.3.4 不同偏心角

相比 SC2, 试件 SC7 与 SC8 是在保持长细比、偏心距以及加劲肋厚度的基础上, 通过改变偏心角来实现双向加载的, SC2、SC7、SC8 分别对应偏心角为 15°、30°、45°的试件, 加载后试件荷载-跨中侧向挠度曲线如图 8 所示。通过图 8 发现, 偏心角为 15°、30°、45°时的荷载-挠度曲线几乎重合, 改变偏心角对于试件承载力及抗弯刚度几乎无影响, 这与文献[16]的研究结果基本一致。产生这一现象的主要原因在于试件从截面形式及几何构造上呈现多轴对称, 组成试件的各类材料的最大拉压应力、拉压面积受偏心角变化影响较小, 最终导致在不同角度下的荷载-挠度非常接近。

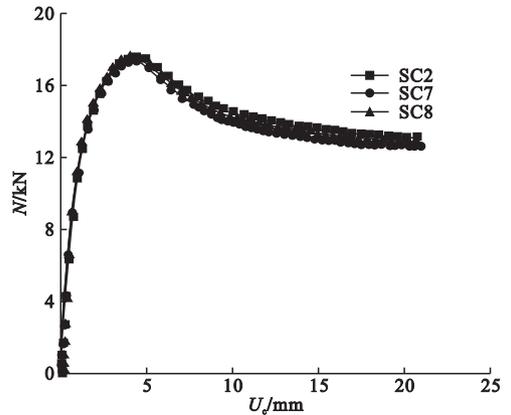


图 8 不同偏心角下荷载-挠度曲线

Fig. 8 Load-deflection curves with different load angles

2.3.5 不同长细比

针对长细比, 主要通过改变试件长度来实现, 试件长度取 2 000 mm、3 000 mm 以及 3 500 mm, 对应的长细比为 19.6、29.4、34.3。图 9 为长细比变化情况下试件的荷载-挠度曲线, 由图可知, 增加构件的长细比将会导致其承载力及抗弯刚度显著下降, 通过对比试件破坏时的侧向挠度发现, 当长细比为 19.6 时, 试件破坏时中部侧向挠度为 4.35 mm, 当长细比增加至 34.3 时, 试件破坏时侧向挠度达到 13.9 mm, 最终发生失稳

破坏.与此同时,通过荷载-挠度曲线发现,随着长细比的增大,试件达到极限承载力后荷载下降趋势逐渐趋于平缓,表现出了良好的延性.

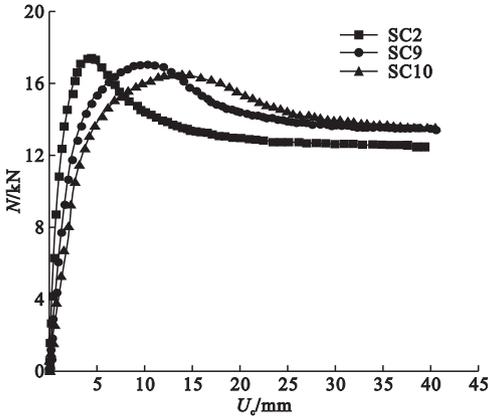


图9 不同长细比下荷载-挠度曲线

Fig. 9 Load-deflection curves with different slender-ness ratios

2.3.6 延性系数

良好的延性能够有效避免试件发生脆性破坏,因此笔者通过对位移延性系数的计算,以此来分析试件的延性性能.构件延性系数参照文献[17]进行计算:

$$\mu = \Delta_u / \Delta_y \quad (1)$$

式中: Δ_u 表示屈服位移,取荷载-挠度曲线弹性段延长线与过峰值点切线交点处的位移; Δ_y 表示极限位移,取承载力下降至极限承载力的85%时的位移.

表3为计算所得的试件延性系数.通过对比SC1发现,在试件腔体内设置加劲肋虽然能够提高试件的承载力与抗弯刚度,但试件延性却降低,并且随着加劲肋厚度的增加,延性逐渐降低;对比偏心距为60 mm、90 mm、120 mm的试件发现,随着偏心距的增加,试件延性系数逐渐增大,但增长幅度较小;改变试件的长细比使得试件承载力与刚度大幅度降低,而延性系数逐渐增大,当试件长细比达到34.3时,延性系数基本与普通钢管混凝土柱处在同等水平;改变偏心角对于试件承载力、刚度以及延性影响较小.

表3 构件延性系数

Table 3 Ductility coefficients of specimens

试件编号	极限承载力/MN	屈服位移/mm	极限位移/mm	延性系数
SC1	16.77	1.24	8.47	6.83
SC2	17.56	1.22	8.90	6.27
SC3	18.29	1.25	6.73	5.38
SC4	18.46	1.28	6.87	5.37
SC5	15.65	1.67	10.62	6.38
SC6	14.04	1.88	12.07	6.43
SC7	17.44	1.27	7.97	6.25
SC8	17.51	1.28	8.0	6.25
SC9	17.18	3.00	19.52	6.52
SC10	16.53	3.99	29.44	7.37

对于普通钢管混凝土柱与加劲型钢管混凝土柱,其延性系数均在4.0以上,满足文献[15]中的相关要求.通过4组参数的分析发现,偏心距对试件延性以及承载能力影响较大,因此在实际工程的应用或试验研究过程中,可以适当改造其钢管腔体构造,以此来满足结构功能要求,使结构本身具有足够的安全储备.

3 结论

(1)对于试件腔体内有加劲肋与无加劲肋的试件,在双向偏压荷载作用下,均发生挠曲变形,但加劲肋的存在能够提高试件的强度与抗弯刚度.

(2)随着偏心距的增大,试件承载力及抗弯刚度大幅度降低;长细比的增加使得构件承载力与刚度均下降,但变化幅度不大,且随着长细比的增加,试件最终的破坏形式由强度破坏变为失稳破坏;增大加劲肋厚度能够提高试件承载力及刚度,但提高幅度较小;改变偏心角对于承载力及抗弯刚度几乎无影响.

(3)普通钢管混凝土柱与加劲型钢管混凝土柱的延性系数均在4.0以上,满足结构抗震要求.加劲肋的存在使得试件延性降低,增大偏心距使得延性系数大幅度增加,偏心

角的变化对试件延性无影响.

参考文献

- [1] 徐兵,吴发红,徐桂中,等.不同加劲的方钢管混凝土短柱轴压性能试验研究[J].四川建筑科学研究,2018,44(6):43-46.
(XU Bing, WU Fahong, XU Guizhong, et al. Experimental study on the axial compressive performance of CFST short columns with different stiffeners [J]. Sichuan building science, 2018, 44(6):43-46.)
- [2] 刘君平,周宗源,刘永健,等.具有PBL加劲的方钢管混凝土构件受弯性能[J].工程力学,2017,34(12):104-111.
(LIU Junping, ZHOU Zongyuan, LIU Yongjian, et al. Mechanical performance of concrete-filled square steel tube stiffened with PBL under bending [J]. Engineering mechanics, 2017, 34(12):104-111.)
- [3] 董宏英,李瑞建,曹万林,等.不同腔体构造矩形截面钢管混凝土柱轴压性能试验研究[J].建筑结构学报,2016,37(5):69-81.
(DONG Hongying, LI Ruijian, CAO Wanlin, et al. Axial compression performance of rectangular concrete-filled steel tubular columns with different cell details [J]. Journal of building structures, 2016, 37(5):69-81.)
- [4] 姜磊,刘永健,张俊光.开孔钢板加劲型方钢管混凝土柱轴压性能试验研究[J].建筑结构学报,2016,37(5):122-128.
(JIANG Lei, LIU Yongjian, ZHANG Junguang. Experimental study on axial compression behavior of concrete-filled square steel tubular long column with stiffened PBL [J]. Journal of building structures, 2016, 37(5):122-128.)
- [5] 韩林海.钢管混凝土结构-理论与实践[M].北京:科学出版社,2016.
(HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures-theory and practice [M]. Beijing: Science Press, 2016.)
- [6] 韩林海,杨有福.现代钢管混凝土结构技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2004.
(HAN Linhai, YANG Youfu. Technology of concrete filled with steel tubular structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.)
- [7] 李岷昌,杨宇,杨志坚,等.工字形CFRP-高强方钢管高强混凝土轴压短柱有限元分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2019,35(6):779-786.
(LI Guochang, YANG Yu, YANG Zhijian, et al. Finite element analysis of axial compression behavior of high strength concrete-filled square high strength steel tube with inner I-shape CFRP [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(6):779-786.)
- [8] 黄宏,张安哥,赵兵.方钢管混凝土双向偏压构件有限元分析[J].华东交通大学学报,2009,26(2):8-12,71.
(HUANG Hong, ZHANG Ange, ZHAO Bing. Finite element analysis of concrete-filled steel tubular members subjected to biaxial eccentric compression [J]. Journal of east China jiaotong university, 2009, 26(2):8-12, 71.)
- [9] 甘丹,周政,周绪红,等.带斜拉肋方钢管混凝土短柱轴压性能有限元分析[J].建筑结构学报,2017,38(增刊1):210-217.
(GAN Dan, ZHOU Zheng, ZHOU Xuhong, et al. Finite element analysis on axial loading behavior of stub columns of square concrete-filled steel tube with diagonal ribs [J]. Journal of building structures, 2017, 38(S1):210-217.)
- [10] 李兵,张齐,孟爽.方钢管再生混凝土短柱轴压承载力有限元分析[J].建筑科学与工程学报,2014,31(4):29-34.
(LI Bing, ZHANG Qi, MENG Shuang. Finite element analysis of bearing capacity for recycled concrete-filled square steel tubular stub columns under axial compression [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2014, 31(4):29-34.)
- [11] XU Yafeng, SUN Pengju, ZHANG Li. Finite element an-analyze for a connection between steel reinforced concrete filled with steel tube column and steel beam [J]. Advanced materials research, 2011, 243:51-54.
- [12] VIPULKUMAR I P, QING Quanliang, MUHAMMAD N S. Behavior of biaxially-loaded rectangular concrete-filled steel tubular slender beam-columns with preload effects [J]. Thin-walled structures, 2014, 79:166-167.
- [13] LIANG Q Q, PATEL V I, HADI M N S. Biaxially loaded high-strength concrete-filled steel tubular slender beam-columns, part I: multiscale simulation [J]. Constructures steel research, 2012, 75:64-71.
- [14] GUO L H, WANG Y Y, ZHANG S M. Experiment study of concrete-filled rectangular HSS columns subjected to biaxial bending [J]. Advanced structures engineering, 2012, 15(8):1329-1344.
- [15] 姜绍飞,李明,付春,等.高温后方钢管混凝土双向偏压构件试验[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2004,20(4):280-283.
(JIANG Shaofei, LI Ming, FU Chun, et al. Experimental studies on concrete filled square steel tube column after high temperature subjected to biaxial eccentric compression [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2004, 20(4):280-283.)
- [16] 徐亚丰,孙鹏举,SYSOEV O E, et al. 碳纤维钢筋-钢管混凝土柱双向偏压有限元分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2011,27(6):1085-1092.
(XU Yafeng, SUN Pengju, SYSOEV O E, et al. Finite element analysis on CFRP steel reinforced concrete filled with steel tube column under bidirectional eccentric load [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2011, 27(6):1085-1092.)
- [17] KELLEY L, MICHAEL L. Design philosophy for structural strengthening with FRP [J]. Concrete international, 2000(2):77-82.
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)