

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.02.009

# 钢管混凝土扁柱-钢梁节点抗震性能有限元分析

黄志鹏<sup>1</sup>, 蒋庆<sup>1,2</sup>, 王瀚钦<sup>1</sup>, 宣典春<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 土木工程结构与材料安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**为避免钢框架结构中梁柱节点凸出墙体,文章提出一种钢管混凝土扁柱与钢梁节点,采用 ABAQUS 有限元模拟软件建立 4 个不同连接位置的钢管混凝土扁柱-钢梁节点的有限元模型,分析节点在低周往复荷载下的破坏模式和抗震性能;结果表明,所提出的节点构造可以实现梁柱刚性连接,所有节点均发生梁铰破坏,抗震性能和耗能能力良好。进一步研究轴压比、竖向隔板厚度和连接构造对节点抗震性能的影响规律,结果表明:随着轴压比的提高,柱端峰值承载力随之下降;减小柱内竖向内隔板的厚度会导致柱端承载力的降低;将盖板连接改为竖向加劲肋连接后,能有效缓解节点处柱壁的应力集中现象。

**关键词:**钢管混凝土扁柱;梁柱节点;有限元模拟;抗震性能;参数分析

**中图分类号:**TU398.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)02-0200-07

## Finite element analysis of seismic performance of joints between concrete-filled steel tubular flat columns and H-beams

HUANG Zhipeng<sup>1</sup>, JIANG Qing<sup>1,2</sup>, WANG Hanqin<sup>1</sup>, XUAN Dianchun<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Key Laboratory of Civil Engineering Structures and Materials, Hefei 230009, China)

**Abstract:** To avoid the projection of beam-column joints from the wall in the steel frame structure, this paper proposes a kind of joint between concrete-filled steel tubular flat column and H-beam. Finite element model of the joints with four different connection positions was established in ABAQUS software to analyze the failure mode and seismic performance of the joints under low-cyclic reversed loads. Finite element analysis results show that the proposed joints can achieve a rigid beam-column connection. All joints are subject to beam-hinged damage with good seismic performance and energy dissipation capacity. On this basis, the effects of axial compression ratio, thickness of vertical internal plate and beam-end configuration on the seismic performance of the joints were further investigated. The results show that the force applied on the column-end decreases with the increase of axial pressure ratio and the decrease of the thickness of vertical internal plate. The stress concentration effect at the joint can be effectively relieved by replacing the cover plate connection with the vertical stiffeners reinforced connection.

**Key words:** concrete-filled steel tubular flat columns; joints between columns and beams; finite element simulation; seismic performance; parametric analysis

装配式钢结构具有重量轻、强度高、抗震性能好、施工速度快、工业化程度高等特点<sup>[1]</sup>,符合建筑工业化和住宅产业化的发展方向。在高层装配式钢结构住宅建筑中,作为主要抗侧力构件的钢

管混凝土柱,通常需要较大的截面尺寸,以满足整体结构的刚度和承载力需求,从而导致建筑室内钢梁及梁柱节点突出墙体的现象。为了解决上述问题,学者们提出不同类型的钢管混凝土柱,如钢

收稿日期:2022-10-27;修回日期:2023-02-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878233)

作者简介:黄志鹏(1996—),男,安徽合肥人,合肥工业大学硕士生;

蒋庆(1984—),男,安徽蚌埠人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail:ahhfjq@163.com.

管混凝土异形柱、钢管混凝土扁柱、钢管混凝土柱等,并提出相应的梁柱节点<sup>[2-8]</sup>。

文献[2]分析钢管混凝土扁柱的优缺点,并提出一种扁钢管混凝土柱节点区域附加外套板增强、穿芯高强对拉螺栓连接节点形式,通过拟静力试验研究和有限元分析,验证节点可以实现刚性连接,轴压比、梁端板厚度以及加劲肋厚度对节点的承载力均有一定影响;文献[3]提出一种矩形钢管混凝土柱-H型钢梁外顶板式节点,并对 7 个该种节点进行拟静力试验研究,结果表明节点满足“强节点,弱构件”的设计要求,且增大顶板厚度或长边高度可提高节点承载力,同时应严格控制焊接质量以避免发生焊缝破坏;文献[4-6]对 T 型、十字型等钢管混凝土异形柱与钢梁连接节点进行低周往复加载试验和有限元分析,得出所设计的钢管混凝土异形柱与钢梁连接节点抗震性能较好的结论;文献[7]提出一种适用于钢结构住宅的壁式钢管混凝土柱(walled concrete-filled steel tubular column, WCFT column),通过对 WCFT column 的低周反复加载试验及有限元分析,得出该种壁式柱具有良好的抗震性能的结论;文献[8]基于文献[7]的研究提出一种 WCFT column 与钢梁连接的侧板式节点,并通过 3 个节点试件的拟静力试验发现,该种壁式钢管混凝土柱与钢梁连接的侧板式节点具有较理想的抗震性能,可以应用于装配式钢结构建筑。

本文针对矩形截面的钢管混凝土扁柱,提出一种新型的梁柱节点构造,采用 ABAQUS 有限元软件分析节点的抗震性能,验证该构造可以实现“强节点,弱构件”的设计目标,并进一步研究节点构造、轴压比等参数对节点抗震性能的影响。

### 1 节点构造

本文提出的钢管混凝土扁柱-钢梁节点构造如图 1 所示。钢管混凝土扁柱由角钢和竖向隔板焊接组成,形成多腔扁柱构造;钢梁部分焊接在钢管混凝土柱壁上,并且在梁端上下翼缘处分别焊接盖板,在加劲肋处焊接梁端封板。

本文设计研究 4 个钢管混凝土扁柱-钢梁节点,除了钢梁对称型中节点 JD1 外,还有钢梁错层中节点 JD2、钢梁弱轴方向对称型中节点 JD3 以及弱轴方向钢梁偏心中节点 JD4。

4 个节点柱截面尺寸均为 450 mm×150 mm,柱强轴与柱弱轴方向节点在钢梁截面尺寸上有细微差别,柱强轴方向钢梁截面尺寸为 350 mm×

150 mm×6 mm×10 mm,而柱弱轴方向钢梁截面尺寸为 250 mm×150 mm×6 mm×10 mm。各组节点上、下盖板尺寸一致,钢管柱壁厚度均为 8 mm。内部隔板厚度与上、下盖板尺寸如图 2、图 3 所示,图 2 的单位为 mm,图 3 中,钢管柱壁厚度为 10 mm。模型尺寸参数见表 1 所列。

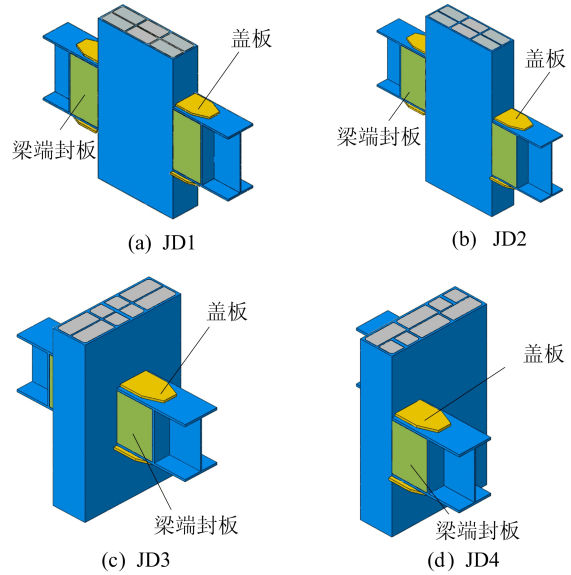


图 1 节点构造示意图

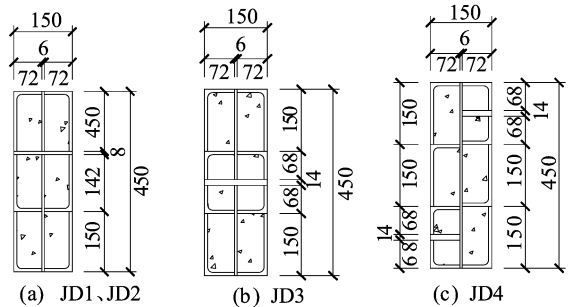


图 2 钢管混凝土柱剖面图

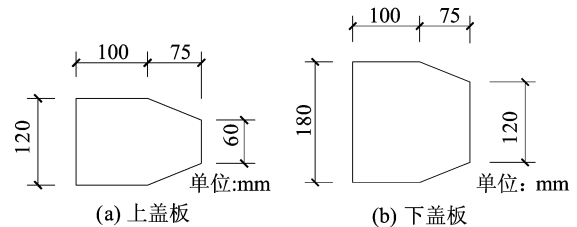


图 3 上、下盖板尺寸

表 1 模型尺寸参数 单位:mm

节点编号	强弱轴	柱截面尺寸	柱高度	梁截面尺寸	梁长度
JD1	强轴	450×150	2 900	350×150×6×10	1 800
JD2	强轴	450×150	2 900	350×150×6×10	1 800
JD3	弱轴	450×150	2 900	250×150×6×10	1 800
JD4	弱轴	450×150	2 900	250×150×6×10	1 800

## 2 有限元模型建立

### 2.1 单元类型与网格划分

本文采用大型有限元软件 ABAQUS 对上述 4 个节点进行非线性有限元分析,模型按照实际设计构件尺寸参数进行建模。

有限元模型中的钢管柱、钢梁、上盖板以及下盖板等钢构件与混凝土部分均采用八节点六面体线性减缩积分单元 C3D8R。网格尺寸在一定程度上会影响模型计算的收敛性和结果的准确性,经过多次试算最终确定钢梁部分网格边长为 30 mm,钢管混凝土柱网格边长为 50 mm,其余部件网格边长为 25 mm。

### 2.2 材料本构模型与相互作用

本文所有钢构件采用的钢材强度均为 Q235B,填充混凝土强度为 C30。在 ABAQUS 中,钢材采用混合强化本构模型并参考文献[9]的参数进行设置,弹性模量取  $E_s=200$  GPa,泊松比取 0.3,其余参数取值见表 2 所列。钢管混凝土柱中的核心混凝土材料本构模型采用文献[10]中塑性损伤模型参数计算,泊松比取 0.2。有限元模型采用 tie 约束模拟实际焊接连接。钢管柱与填充混凝土接触面切向定义的摩擦系数参考文献[11]推荐的钢材与混凝土的界面摩擦系数,取值范围为 0.25,法向定义为“硬接触”。

表 2 钢材混合强化本构模型参数

参数	数值	参数	数值
$Q^\infty$ /MPa	21	$\gamma_2$	120
硬化参数 $b_{iso}$	1.2	$C_{kin,3}$ /MPa	3 026
$C_{kin,1}$ /MPa	6 013	$\gamma_3$	32
$\gamma_1$	173	$C_{kin,4}$ /MPa	990
$C_{kin,2}$ /MPa	5 024	$\gamma_4$	35

### 2.3 边界条件与加载方式

本文的有限元模型依据设计构件试验进行加载,在柱顶施加水平往复位移,柱底设置铰支座,钢梁梁端设置铰支撑。在 ABAQUS 有限元软件中,通过约束柱底 X、Y、Z 方向的平动自由度、梁端 Y、Z 方向自由度,模拟试验的边界条件,并且在梁翼缘部分区域设置 Z 方向的平面外约束,防止试件发生平面外位移,边界条件如图 4 所示。

有限元模型的加载方式如下:首先在指定位置施加轴压力(轴压比  $n=0.2$ ),在整个加载过程中保持轴压力不变;然后在有限元模型中的柱顶

施加 X 方向的低周往复荷载。加载制度参考文献[12]采用位移加载,位移角分别取 0.375%、0.500%、0.750%、1%、2%、3%、4% 所对应的位移,具体如图 5 所示。

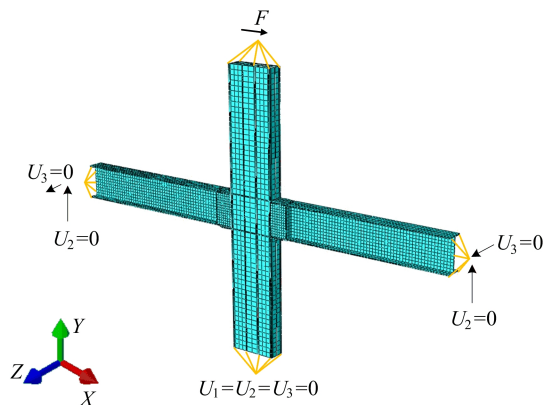


图 4 有限元模型示意图

因为在 ABAQUS 有限元模型中没有考虑金属的累积损伤,所以软件中每个加载级只加载 1 圈。

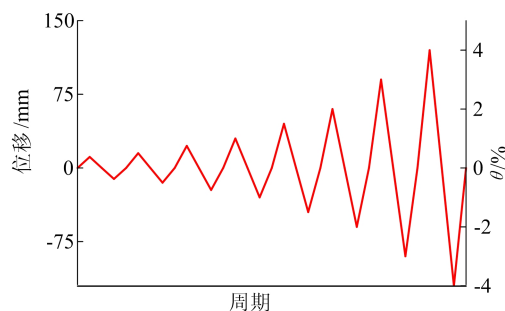


图 5 加载制度示意图

### 2.4 有限元验证模型

为了验证有限元建模方式的正确性,本文选取文献[13]中的 SJ1 作为验证模型。运用上述建模方式以及材料本构进行建模,模拟结果的滞回曲线与参考文献的试验结果滞回曲线以及与试验现象的对比如图 6、图 7 所示。

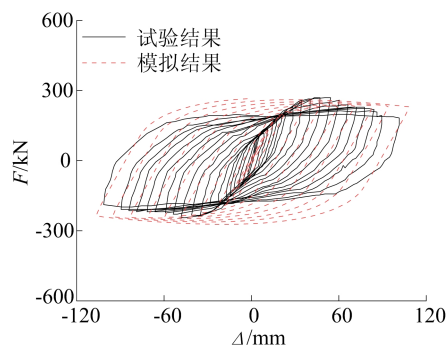


图 6 荷载-位移曲线对比结果

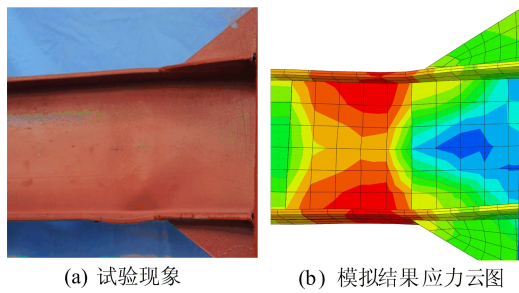


图 7 试验现象与模拟结果对比

从图 6 可以看出,由于有限元分析没有考虑焊缝开裂的情况,模拟得到的滞回曲线更为饱满,没有出现“捏缩”现象;除此之外,模拟滞回曲线的刚度和峰值承载力与试验曲线吻合较好。从图 7 可以看出,模型屈服应力发生位置与试验钢梁塑性铰产生位置大致相符,说明本文的有限元建模方式具有合理性。

### 3 有限元模拟结果与分析

#### 3.1 节点破坏模式

各个节点的有限元模拟结果 Mises 应力云图如图 8 所示。

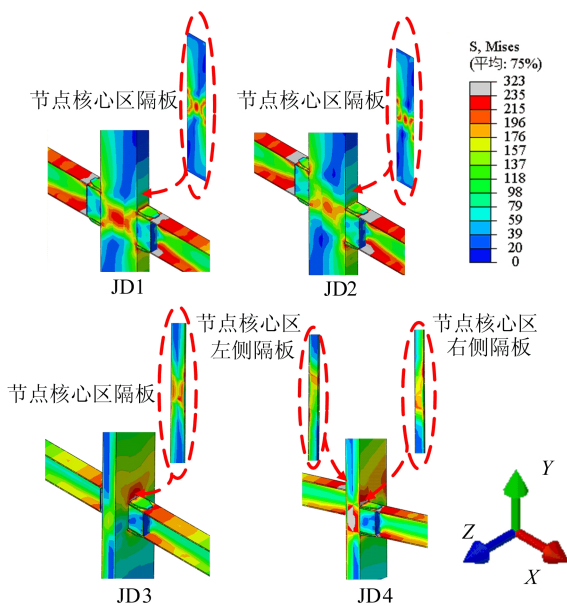
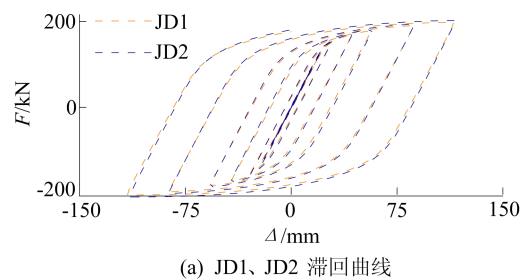


图 8 节点 Mises 应力云图

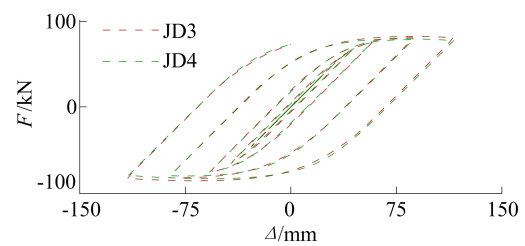
从图 8 可以看出,JD1~JD4 4 个节点在加载过程中梁端上、下盖板外侧翼缘局部达到屈服应力,同时节点核心区域隔板未达到屈服应力。由此可以得出,4 个节点的破坏模式均为钢梁先发生塑性铰,符合“强柱弱梁,强节点弱构件”的抗震设计要求。

对于弱轴方向梁偏心节点 JD4,根据 Mises 应力云图可以发现,在梁翼缘局部达到屈服应力

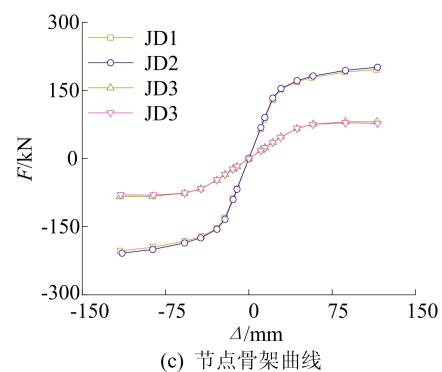
的同时,钢管混凝土扁柱节点区域的柱壁也达到屈服应力。ABAQUS 有限元模拟的柱端荷载-位移( $F-\Delta$ )滞回曲线如图 9 所示。



(a) JD1、JD2 滞回曲线



(b) JD3、JD4 滞回曲线



(c) 节点骨架曲线

图 9 节点滞回曲线和骨架曲线

图 9 中,4 个节点的滞回曲线均呈现为饱满的梭形,说明本文设计的钢管混凝土扁柱-钢梁节点具有良好的滞回耗能能力。从图 9a、图 9b 可以看出,柱强轴方向节点 JD1、JD2 的滞回曲线几乎重合,柱弱轴方向节点 JD3、JD4 也同样如此,说明钢梁位置变化对于节点滞回性能的影响较小。

从图 9c 可以看出:JD1 正向最大承载力约为 195.9 kN,负向最大承载力约为 -203.7 kN;JD2 正向最大承载力约为 201.1 kN,负向最大承载力约为 -208.4 kN;JD3 正向最大承载力约为 81.0 kN,负向最大承载力约为 -83.5 kN;JD4 正向最大承载力约为 77.5 kN,负向最大承载力约为 -79.9 kN。

#### 3.2 轴压比对节点受力性能的影响

为了研究柱端轴压比对节点受力性能的影响,将轴压比分别取为 0.1、0.3、0.4 (BASE 模型轴压比  $n$  为 0.2),在 JD1~JD4 的 BASE 模型基

基础上根据不同轴压比改变在柱顶施加的轴力,并且保持其他参数不变的情况下进行有限元模拟运算。最终得到不同轴压比下各节点的荷载-位移曲线,结果如图 10 所示。

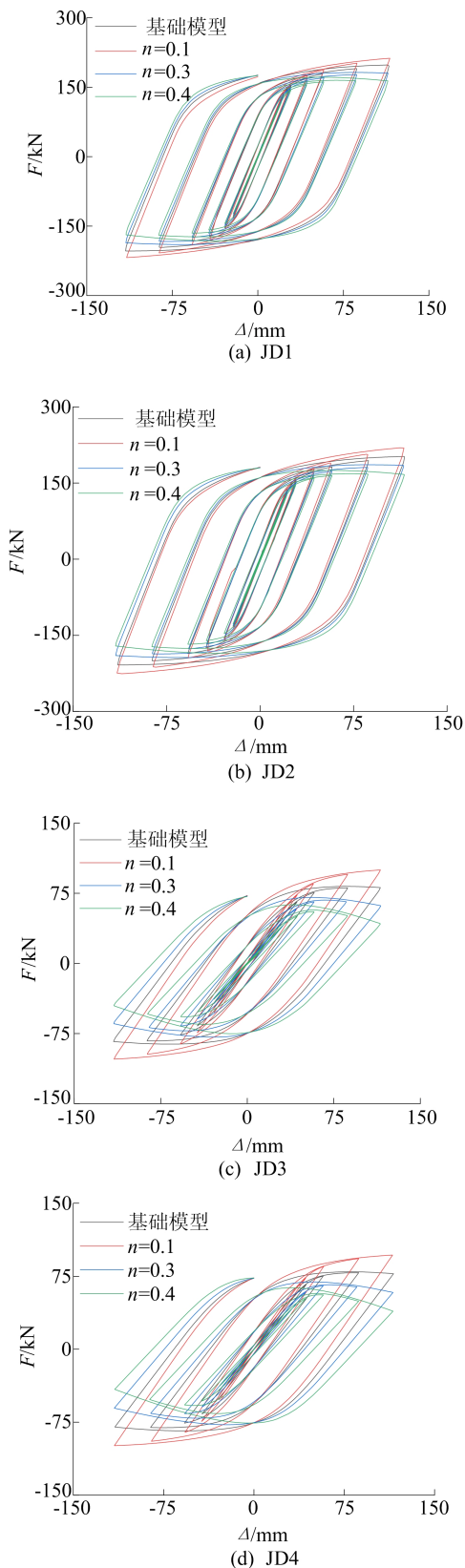


图 10 JD1~JD4 在不同轴压比下的荷载-位移曲线

从图 10 可以看出,随着轴压比从 0.1 提升至 0.4,承载力随之不断减小。出现该现象的原因是钢管柱的  $P-\Delta$  效应,即随着竖向轴力的增大,由轴力产生的附加弯矩随之增大,同时柱端承载力随之减小。节点模型受力简图如图 11 所示,节点结构所受外力为竖向轴力  $N$ 、水平推力  $P$ ,对柱底支座取矩,根据弯矩平衡可得:

$$PL_c + N\Delta = F_L L_b + F_R L_b \quad (1)$$

其中:  $L_c$  为柱顶受力点距柱底铰支座轴心距离;  $\Delta$  为柱顶加载点水平位移;  $F_L$ 、 $F_R$  为钢梁两侧支座处反力;  $L_b$  为钢梁支座距柱子竖向轴线距离。若外力产生弯矩不变,在同样的水平位移  $\Delta$  下,当柱顶竖向轴力  $N$  提高,水平推力  $P$  会相应下降,因此柱端承载力也随之下降。柱端竖向轴力以轴压比 0.1 为基准,各节点在不同轴压比下模拟柱端峰值承载力差值与实际计算峰值承载力差值,对比结果见表 3 所列。

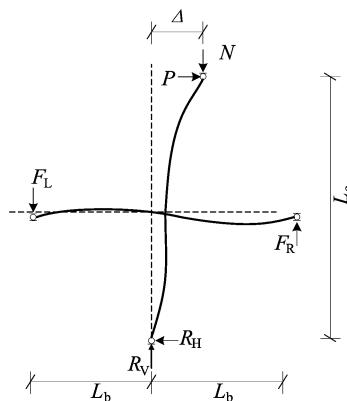


图 11 节点受力简图

表 3 轴压比提高对承载力的影响

节点编号	轴压比	模拟承载力/kN	承载力差值/kN	计算所得承载力差值/kN
JD1	0.1	212.6		
	0.2	195.9	-16.7	-16.7
	0.3	180.4	-32.2	-33.4
	0.4	163.6	-49.0	-50.1
JD2	0.1	218.8		
	0.2	201.1	-17.7	-16.7
	0.3	184.6	-34.2	-33.4
	0.4	165.9	-52.9	-50.1
JD3	0.1	99.9		
	0.2	81.0	-18.9	-19.2
	0.3	61.3	-38.6	-38.4
	0.4	42.2	-57.7	-57.6
JD4	0.1	96.7		
	0.2	77.5	-19.2	-19.2
	0.3	58.3	-38.4	-38.4
	0.4	39.0	-57.7	-57.6

表 3 中,以  $n = 0.1$  为基准,位移为 116 mm。从表 3 可以看出,模拟值与计算值吻合良好,说明节点的柱端承载力下降是由于钢管柱的  $P-\Delta$  效应导致的。

### 3.3 梁端竖向加劲肋对节点受力性能的影响

结合有限元模拟结果的应力云图,节点的应力集中主要发生在钢梁与钢管柱壁连接处。为了缓解梁柱连接处应力集中的现象,将梁端盖板替换为加劲肋构造。

JD1~JD4 改为加劲肋构造后的荷载-位移曲线如图 12 所示。

从图 12 可以看出:将钢管混凝土扁柱-钢梁节点中的梁端盖板改为竖向加劲肋构造后,节点的滞回曲线趋势没有明显变化,说明梁端加劲肋构造对于节点滞回性能没有明显影响;同时竖向加劲肋构造对于节点的承载力影响亦不明显。

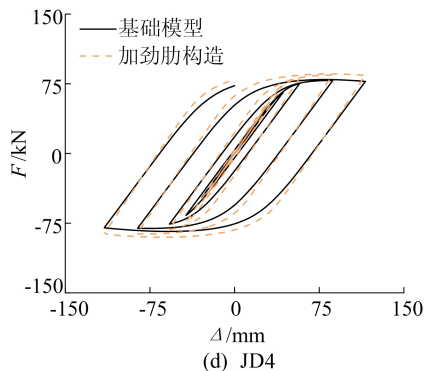


图 12 JD1~JD4 在加劲肋构造下的荷载-位移曲线

模型 JD1 盖板构造与加劲肋构造等效塑性应变(equivalent plastic strain, PEEQ)分布对比如图 13 所示。从图 13 可以看出,加劲肋构造有效缓解了梁柱连接处应力集中的现象。

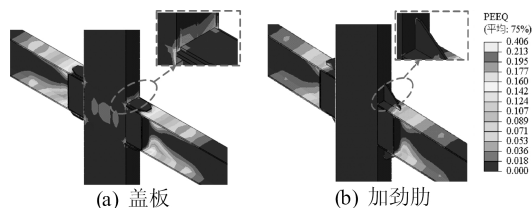
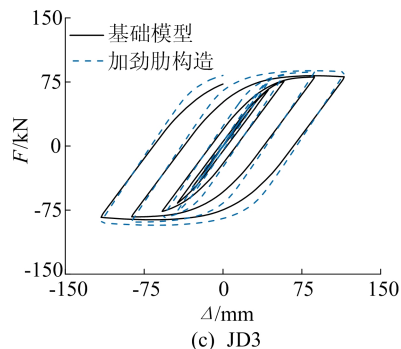
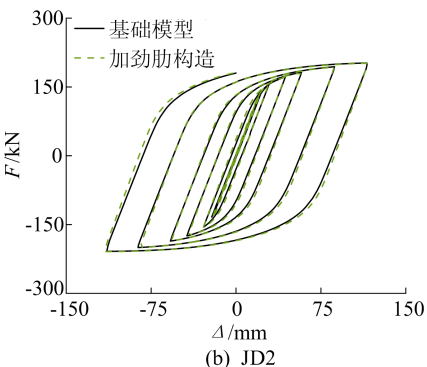
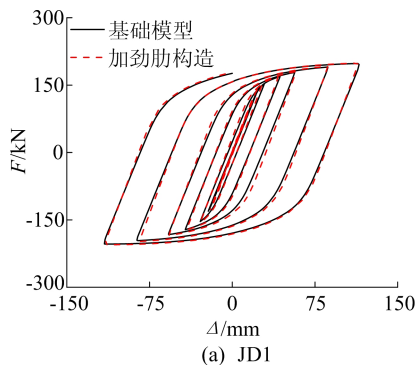


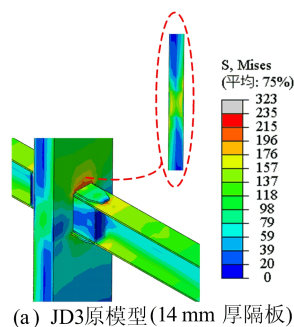
图 13 模型 JD1 盖板构造、加劲肋构造 PEEQ 分布对比

### 3.4 竖向隔板削弱厚度的影响

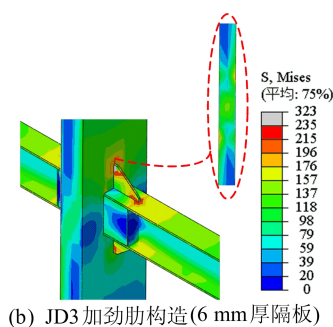
对于钢管混凝土扁柱构件,弱轴方向相较于强轴方向的抗弯刚度有一定程度的削减,因此弱轴方向的节点抗震性能一般低于强轴方向。

为了研究钢管混凝土扁柱-钢梁节点在弱轴方向的竖向隔板对于节点抗震性能的影响,将 JD3、JD4 的隔板厚度削弱至 6 mm,并在不同节点构造下进行模拟计算。

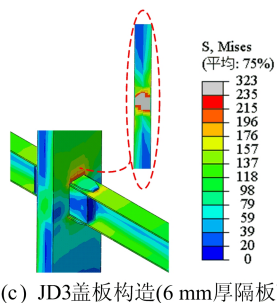
JD3 柱端位移加载至 29 mm 时不同板厚及构造下的 Mises 应力云图、节点的滞回曲线如图 14、图 15 所示。从图 14、图 15 可以看出,在加载至相同位移条件下,隔板削弱至 6 mm 的盖板构造节点核心区域隔板均已达到材料屈服状态。



(a) JD3原模型(14 mm 厚隔板)



(b) JD3 加劲肋构造(6 mm厚隔板)



(c) JD3 盖板构造(6 mm厚隔板)

图 14 JD3 竖向隔板 Mises 应力云图

该现象说明:竖向隔板厚度对于节点的抗震性能有明显影响;同时,将盖板构造改为竖向加劲肋构造后,由于加劲肋增加了节点域范围,节点核心区区域隔板应力明显减小。

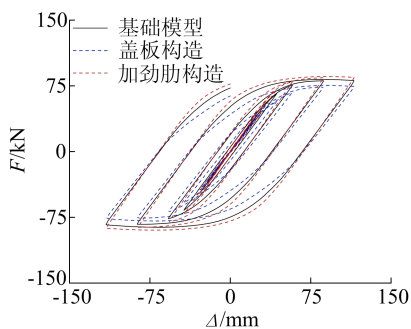


图 15 JD3 不同节点构造及竖向隔板厚度滞回曲线

## 4 结 论

1) 本文提出的钢管混凝土扁柱-钢梁连接节点在柱端水平荷载作用下,钢梁首先形成塑性铰,节点域处于弹性状态,可以满足“强节点,弱构件”的抗震设计要求;节点滞回曲线均为较饱满的梭形,具有良好的滞回性能。由于  $P-\Delta$  效应的存在,随着柱端轴压比由 0.1 提高到 0.4,柱端的峰值承载力随之递减。

2) 通过对钢管扁柱与钢梁之间的连接构造分析可以看出,将盖板构造改为竖向加劲肋构造可以有效缓解梁柱连接处的应力集中。

3) 将柱弱轴方向节点 JD3 的竖向隔板厚度削弱后发现,节点的承载力发生一定程度下降,因此竖向内隔板的厚度对钢管混凝土扁柱-钢梁节点的抗震性能有较大的影响。

## [参 考 文 献]

- [1] 徐培蓁,张志鹏,高代明,等. 强梁弱柱型钢管混凝土柱-钢梁节点抗震性能研究[J]. 结构工程师, 2021, 37(1): 134-143.
- [2] 吴丹. 扁钢管混凝土柱-型钢梁节点优化设计及力学性能研究[D]. 南京:东南大学, 2018.
- [3] 付波,王彦超,童根树. 矩形钢管混凝土柱-H形钢梁外顶板式节点抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2020, 37(7): 125-137.
- [4] 周鹏,薛建阳,陈茜,等. 矩形钢管混凝土异形柱-钢梁框架节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(8): 41-50.
- [5] 许成祥,吴赞军,曾磊,等. T形钢管混凝土柱-工字钢梁框架顶层边节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(8): 58-65.
- [6] 何子奇,胡盛文,李彬洋,等. 十字形钢管混凝土柱-H形钢梁框架节点抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(11): 95-106.
- [7] 孙晓岭,郝际平,薛强,等. 壁式钢管混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(6): 92-101.
- [8] 黄育琪,郝际平,樊春雷,等. WCFT柱-钢梁节点抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2020, 37(12): 34-42.
- [9] 王萌. 强烈地震作用下钢框架的损伤退化行为[D]. 北京:清华大学, 2013.
- [10] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010(2016年版)[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2016: 209-212.
- [11] BALTAY P, GJELSVIK A. Coefficient of friction for steel on concrete at high normal stress[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1990, 2(1): 46-49.
- [12] American Institute of Steel Construction. Seismic provisions for structural steel buildings: AISC/ANSI 341—16[S]. Chicago: AISC, 2016: 147-148.
- [13] 何闯. 外端板加强式方钢管混凝土柱-钢梁焊接节点抗震性能试验研究[D]. 西安:长安大学, 2020.

(责任编辑 张 镛)