

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.01.009

# 新型钢梁-中空夹层钢管混凝土柱节点的滞回性能研究

林建洲

(福建建工集团有限责任公司, 福建 福州 350014)

**摘要:** 中空夹层钢管混凝土(CFDST)柱因自重较轻且承载能力优异,在钢管混凝土结构体系中具有重要的应用价值,为了评估不同构造形式的钢梁-CFDST柱节点的滞回性能,通过拟静力试验对钢梁-传统CFDST柱节点(JD-PT)、钢梁-非贯穿加劲CFDST柱节点(JD-FG)和钢梁-贯穿加劲CFDST柱节点(JD-GT)进行对比分析,并建立有限元模型用于数值验证和参数化研究。结果表明:加劲肋能够显著提升节点的承载力、延性、刚度和耗能能力,其中JD-GT节点的性能提升最为明显,其承载力、延性和耗能能力较JD-PT节点分别提高了2.9倍、1.31倍和4.18倍。参数分析进一步表明,外钢管和加劲肋的屈服强度以及轴压比对节点滞回性能具有显著影响,而JD-GT节点在参数变化下表现出更高的稳定性。

**关键词:** 中空夹层钢管混凝土柱;梁-柱节点;加劲肋;参数分析;滞回性能

中图分类号: TU398.9

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)01-0074-09

## Hysteretic Performance of Novel Steel Beam-Concrete-Filled Double-Skin Tubular Column Joints

LIN Jianzhou

(Fujian Construction Group Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350014, China)

**Abstract:** Concrete-filled double-skin steel tubular (CFDST) columns, characterized by relatively light self-weight and excellent load-bearing capacity, have important application value in steel tube-concrete structural systems, and the seismic performance of their beam-column joints is therefore of significant engineering interest. This work aims to evaluate the hysteretic performance of steel beam-CFDST column joints with different structural configurations. Quasi-static tests were conducted on three joint types, namely the steel beam-traditional CFDST column joint (JD-PT), the steel beam-non-through stiffened CFDST column joint (JD-FG), and the steel beam-through stiffened CFDST column joint (JD-GT). A finite element model was subsequently established for numerical verification and parametric analysis. The test results indicate that the introduction of stiffeners can significantly enhance the load-bearing capacity, ductility, stiffness, and energy dissipation capacity of the joints. Among the three configurations, the JD-GT joint exhibits the most pronounced improvement, with its load-bearing capacity, ductility, and energy dissipation capacity increased by 2.9 times, 1.31 times, and 4.18 times, respectively, compared with the JD-PT joint. Parametric analysis further reveals that the yield strength of the outer steel tube and stiffeners, as well as the axial compression ratio, exerts a substantial influence on the hysteretic performance of the joints, while the JD-GT joint demonstrates superior stability under varying parameters.

**Keywords:** concrete-filled double-skin steel tubular column; beam-column joint; stiffener; parametric analysis; hysteretic performance

收稿日期:2025-09-24

修稿日期:2025-11-04

基金项目:福建省科技计划项目(2023J01343,2025-K-145,2025-K-146,2025-K-147)

作者简介:林建洲(1987—),男,高级工程师,主要从事建筑工程方面工作。E-mail:y18842801690@163.com

中空夹层钢管混凝土(CFDST)柱由同心布置的内外钢管和夹层混凝土组成,既继承了传统钢管混凝土(CFST)承载力高、延性好的优点,又因中空结构具有重量轻、抗弯刚度高等特点,已广泛应用于桥梁、地下结构和输电塔等工程<sup>[1]</sup>。已有研究表明,在钢管混凝土柱中设置加劲肋可显著提升抗屈曲能力和整体性能。Wang 等<sup>[2]</sup>的试验进一步证明,加劲 CFDST 柱在承载力、延性和耗能性能上均优于传统 CFDST 柱,显示出良好的抗震性能。

梁-柱节点在结构中起着至关重要的作用,是荷载传递的核心区域。它们的性能直接决定了框架结构的整体稳定性和抗震能力。因此,许多研究人员将研究重点放在了梁-CFDST 柱节点上。如 Zhang 等<sup>[3]</sup>设计了 RC 环梁-CFDST 柱节点,并对其抗震性能进行了评价,研究表明,该节点具有足够的强度和刚度,满足抗震设计中“强柱弱梁”的要求。为了降低节点施工的复杂性,对钢梁-CFDST 柱节点的研究逐渐增多。Yan 等<sup>[4]</sup>则分析了不等深钢梁-CFDST 柱节点的抗震性能,指出节点性能受轴压比和梁高比等参数影响显著。

然而,现有研究多集中在钢梁-传统 CFDST 柱节点,对钢梁-加劲 CFDST 柱节点的系统研究仍然有限,且大多为外加劲构造的探索性工作。例如, Bai 等<sup>[5]</sup>发现梁高显著影响外环式加劲节点的性能;Li 等<sup>[6]</sup>指出加劲肋的尺寸直接关系节点承载力和延性。而已有成果表明<sup>[2]</sup>,内加劲肋对提升 CFDST 柱的轴压和抗震性能具有重要作用,因此有必要进一步探索其在钢梁-CFDST 柱节点中的应用。

基于此,本文开展了拟静力试验,对比分析钢梁-传统 CFDST 柱(JD-PT)节点、钢梁-非贯穿加劲 CFDST 柱(JD-FG)节点和钢梁-贯穿加劲 CFDST 柱(JD-GT)节点的滞回性能。研究了滞回与骨架曲线、刚度退化、延性及耗能能力等关键指标,并在此基础上验证有限元模型的准确性。随后利用该模型进行参数化分析,考察外钢管和加筋肋的屈服强度以及轴压比对节点滞回性能的影响。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试件类型及参数

试验包括三种不同柱截面的节点:JD-PT 节点、JD-FG 节点和 JD-GT 节点,柱截面如图 1 所示。节点的构造和尺寸如图 2 所示(以 JD-PT 节点为例)。各部件基本参数如表 1 所示。CFDST 柱由同心布置的内外方钢管以及夹层混凝土组成。钢梁由 H

型钢制成。节点试件的梁和柱通过直接焊接进行连接,在梁-柱界面四角处加装直角梯形加筋板(厚度为 16 mm)。柱构件(包括加筋肋)采用 Q235 碳钢,钢梁腹板、翼缘板、外加筋板采用 Q345 碳钢。



图 1 CFDST 柱的截面类型

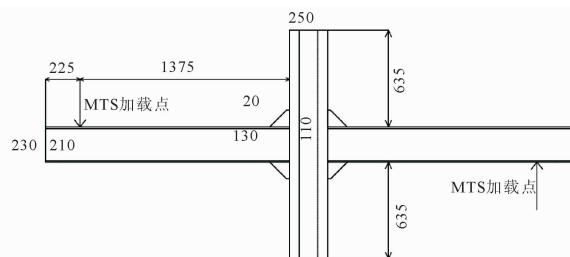


图 2 节点的构造和尺寸(JD-PT 节点)(单位:mm)

表 1 试件的基本参数 单位:mm

试件	$B_o$	$t_o$	$B_i$	$t_i$	$H$	$t_s$
JD-PT	250	5.75	120	3.75	1500	—
JD-FG	250	5.75	120	3.75	1500	5.75
JD-GT	250	5.75	120	3.75	1500	5.75

注: $B_o$ 和 $t_o$ 为外钢管的宽度和厚度; $B_i$ 和 $t_i$ 为内钢管的宽度和厚度; $t_s$ 为加劲肋的厚度; $H$ 为柱高;钢梁(H型)尺寸如下:单臂钢梁长 1 600 mm,高( $B_h$ ) 230 mm,宽( $B_w$ ) 170 mm,腹板厚度( $t_w$ ) 9.75 mm,翼缘厚度( $t_f$ ) 7.75 mm。

### 1.2 试验材料性能

#### 1.2.1 钢材

根据《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》<sup>[7]</sup>(GB/T 2975—2018),材料性能试验试件直接取自生产钢梁和钢管所用的同批次钢材。每种钢材制备 3 个名义完全相同的试件。钢材拉伸试验按照《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》<sup>[8]</sup>(GB/T 228.1—2021)进行。测试结果列于表 2。

表 2 钢材的材料性能

型号	$E_s$ /GPa	$f_y$ /MPa	$f_{i,s}$ /MPa	$\mu$
Q235-3.75	206.0	287.2	405.1	0.28
Q235-5.75	206.0	310.3	444.7	0.28
Q345-7.75	206.0	367.4	508.7	0.28
Q345-9.75	206.0	408.5	580.1	0.28
Q345-16	206.0	380.1	541.2	0.28

注: $E_s$ 代表钢材的弹性模量; $f_y$ 代表钢材的屈服强度; $f_{i,s}$ 代表钢材的抗拉强度; $\mu$ 代表泊松比。

### 1.2.2 混凝土

在 CFDST 柱浇筑过程中,同批浇筑了 3 个边长为 150 mm 的混凝土立方体试块。养护 28 d 后,采用 2 000 kN 万能试验机按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》<sup>[9]</sup> (GB/T 50081—2019) 进行抗压强度试验,加载速率为 0.5 MPa/s。试验结果表明,混凝土的平均立方体抗压强度( $f_{cu}$ )为 31.2 MPa。

### 1.3 试验装置与程序

测试仪器的布置如图 3 所示。测试装置包括一个 3 200 kN 的液压千斤顶,一个 200 kN 的 MTS 作动器,立柱顶部的横向支撑,以及平面铰链支撑。线性可变差动变压器(LVDT)的布局如图 4 所示,应变片用于测量钢梁翼缘、腹板和节点核心区域的应变,其布置如图 5 所示。

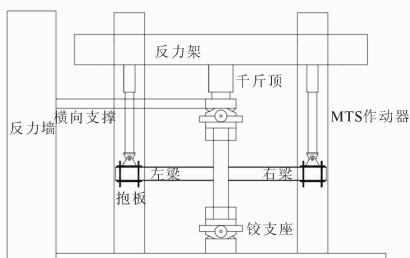


图 3 试验装置

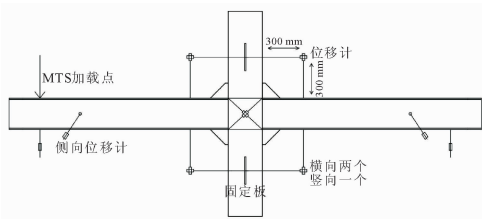


图 4 位移计布置

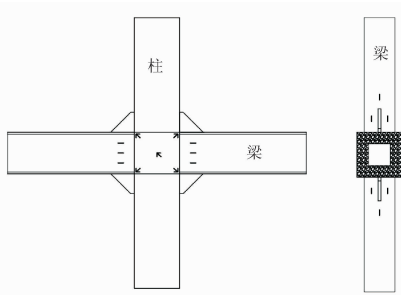


图 5 应变片布置

本试验采用梁端加载法。加载方式为位移控制,竖向轴力(恒定)由液压千斤顶提供。试验前,采用有限元方法模拟试件的受力情况。根据模拟结果,JD-PT 节点承受的竖向轴力约为 400 kN, JD-FG 和 JD-GT 节点承受的竖向轴力分别约为 600 kN 和

700 kN。在施加竖向轴力时,先加载到预定载荷的 10%,然后加载到 50%,最后加载到恒压。每次间隔 5 min,以消除试样与加载装置之间的间隙,同时也可以观察测试仪器的运行情况。

试件的位移加载速率为 1 mm/s。由于初始加载阶段试样处于弹性阶段,且变形较小,因此加载步长从 6 mm 开始,每个位移阶段循环一次,随后加载步长增加 6 mm。当加载步长达到 30 mm 时,每个位移阶段循环两次,加载步长增加 10 mm,直至达到最大加载值的 85%,或试件失效终止试验,加载程序完全符合《建筑抗震试验规范》<sup>[10]</sup> (JGJ/T 101—2015)。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 破坏模式

节点破坏模式如图 6 所示。JD-PT 节点在加载位移达到 70 mm 时,外钢管与右梁角部及加筋板连接处均发生断裂。当位移进一步增大到 80 mm 时,外钢管与左梁加筋板的连接处也发生了断裂。JD-FG 节点在位移达到 50 mm 时,外钢管与右梁加筋板连接处发生焊缝断裂。当位移增大到 60 mm 时,左梁也出现了类似的破坏。由于焊缝强度不足,节点在达到理论承载能力前过早失效,导致实际失效模式与预期失效模式存在较大偏差。为了解决焊缝过早断裂的问题,对 JD-GT 节点的焊缝连接进行了加固。当位移达到 70 mm 时,JD-GT 节点仅在右梁下翼缘出现轻微屈曲。当位移增大到 80 mm 时,外钢管未发生断裂,但左右梁与节点连接处的翼缘均出现明显屈曲变形,表明节点已接近极限状态。由此可见,与 JD-PT 和 JD-FG 节点相比,JD-GT 节点在整体稳定性和延性上具有显著优势,其破坏模式符合“强柱弱梁”抗震设计原则。值得注意的是,钢梁翼缘局部屈曲和焊缝断裂是钢梁-CFST 柱节点的典型破坏模式,这在类似研究中已经得到证实<sup>[11]</sup>。

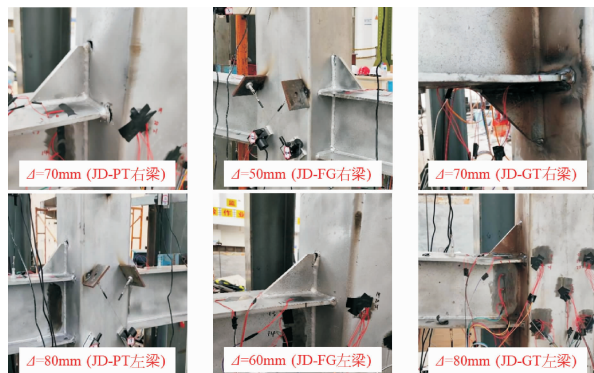


图 6 破坏模式

## 2.2 滞回和骨架曲线

图 7 为节点左梁端的滞回曲线和骨架曲线。可见,各节点的曲线具有相似的变化趋势。与 JD-PT 节点相比,JD-FG 和 JD-GT 节点的滞回曲线更饱满,耗能能力更强。虽然 JD-FG 节点在初期表现出良好的耗能能力,但由于焊缝质量的原因,加载位移达到 40 mm 左右后,滞回曲线出现明显的刚度退化,整体耗能能力和延性明显降低。而 JD-GT 节点则表现出更加稳定的滞回特性,其耗能能力优于 JD-FG 节点。此外,JD-GT 节点的滞回曲线没有明显的下降阶段,这是因为损伤主要集中在梁翼缘,而钢材良好的延性有效地延缓了性能退化。需要说明的是,JD-GT 节点在滞回曲线中虽未出现明显的承载力下降,但在加载至位移  $\Delta = 80$  mm 时,梁翼缘已发生明显屈曲并进入屈服状态,表明节点已接近极限工作状态。考虑到试验的对比性和统一性,所有试件(JD-PT、JD-FG、JD-GT 节点)均在相同的最大位移  $\Delta = 80$  mm 时终止加载。尽管 JD-GT 节点未出现明显的承载力退化,但其破坏模式已经形成,从而能够充分反映不同节点在相同变形水平下的性能差异。此外,进一步对比骨架曲线可知,JD-FG 和 JD-GT 节点的初始刚度和极限承载力显著高于 JD-PT 节点。说明加劲肋的设置可以有效地提高节点的力学性能。测试数据如表 3 所示。试验数据表明,在相同位移条件下,JD-FG 和 JD-GT 节点的极限承载力分别约为 JD-PT 节点的 2.4 倍和 2.9 倍。这主要是因为加劲肋的引入可以改善荷载的传递,促进荷载的均匀分布,从而显著提高节点的承载能力。

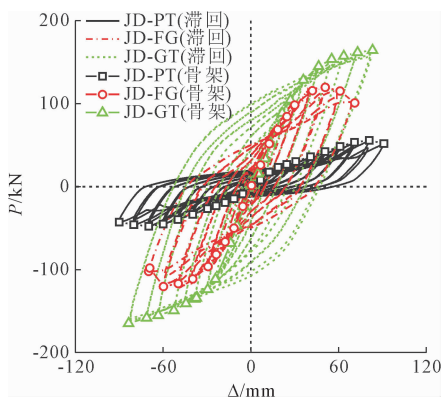


图 7 滞回和骨架曲线

## 2.3 延性

延性是评价结构抗震性能的重要指标之一。本文采用位移延性系数( $\mu_d$ )来衡量节点的延性<sup>[12]</sup>。 $\mu_d$ 按照式(1)计算。一般来说, $\mu_d$ 越大,构件的延

性越好。根据表 3 的计算结果,JD-FG 和 JD-GT 节点的平均  $\mu_d$  分别是 JD-PT 节点的 1.29 倍和 1.31 倍。这表明加劲肋不仅提高了节点的承载力,而且显著提高了节点的延性和塑性变形能力。

$$\mu_d = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

式中: $\Delta_y$  采用屈服弯矩法确定<sup>[12]</sup>。

表 3 试验测试结果

节点	梁 方向	$P_y$ /kN	$\Delta_y$ /mm	$P_u$ /kN	$\Delta_u$ /mm	$\mu_d$
JD-PT	左	+ 48.8	59.1	49.6	89.9	1.5
		- 42.1	-58.0	-42.2	-89.9	1.6
	右	+ 50.1	66.4	50.4	89.9	1.4
		- 44.9	-57.7	-43.6	-89.9	1.6
JD-FG	左	+ 104.2	34.6	99.2	70.1	2.0
		- 106.4	-36.2	-102.8	-70.0	1.9
	右	+ 107.6	34.0	102.1	67.8	2.0
		- 107.8	-34.0	-102.5	-68.7	2.0
JD-GT	左	+ 141.3	44.6	162.3	82.3	1.9
		- 136.4	-39.4	-165.0	-83.5	2.1
	右	+ 139.0	44.2	159.3	81.6	1.9
		- 134.2	-38.8	-161.6	-82.8	2.1

注:左、右为钢梁的两个梁段(图 3); $P_y$  和  $\Delta_y$  分别为节点等效屈服荷载和屈服位移; $P_u$  和  $\Delta_u$  分别表示节点的极限荷载和极限位移; $\mu_d$  为位移延性系数。

## 2.4 刚度退化

节点刚度用割线刚度( $K_i$ )表示,用式(2)计算。节点刚度退化曲线如图 8 所示。可见,JD-FG 和 JD-GT 节点的刚度退化率明显低于 JD-PT 节点。值得注意的是,在相同的荷载条件下,JD-GT 节点表现出更加优越的刚度保持。这表明加劲肋在提高节点刚度和抑制刚度退化方面起着至关重要的作用。

$$K_i = \left| \frac{P_i}{\Delta_i} \right| \quad (2)$$

式中: $P_i$  和  $\Delta_i$  分别为第  $i$  次循环的峰值荷载和相应的位移。

## 2.5 能量耗散

耗能能力是评价结构抗震性能的另一个关键指标,通常通过滞回曲线的包络面积来衡量(如图 11 所示)。包络曲线越饱满,节点的耗能能力越强。本研究采用等效粘性阻尼系数( $h_e$ )来量化节点的耗能能力。一般认为, $h_e$  越大,节点的耗能能力越强。 $h_e$  可由式(3)计算,计算结果如表 4 所示。选取加载位移为 50 mm 时的  $h_e$ ,以比较不同节点的耗能能力。在此位移时,构件已进入明显塑性阶段,局部损伤尚未严重,处于相对稳定的塑性耗能阶段,能

够充分体现节点整体耗能性能。结果表明,与 JD-PT 节点相比,JD-FG 和 JD-GT 节点的  $h_e$  分别提高了 0.22 倍和 0.4 倍;而累积能量耗散( $E_{sum}$ )分别增加了 0.69 倍和 4.18 倍。这说明加劲肋的存在显著提高了节点的耗能能力,特别是对于采用贯通加劲肋设计的 JD-GT 节点,其改善最为明显。

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \times \frac{S_{\Delta FBE} + S_{\Delta FDE}}{S_{\Delta AOB} + S_{\Delta COD}} \quad (3)$$

式中: $S_{\Delta FBE}$  等参数表示由图 9 所示的包络曲线所围成的特定部分的面积。

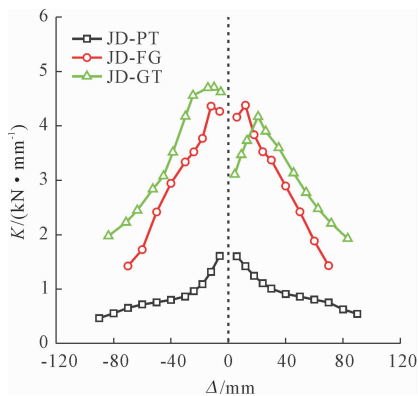


图 8 刚度退化曲线

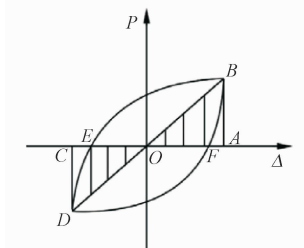


图 9  $h_e$  的计算方法

表 4 耗能系数计算结果

节点	位移/mm	$h_e/\%$	$E_{sum}/(\text{kN} \cdot \text{m})$
JD-PT	50	14.62	31.94
	70	16.20	
	80	20.56	
JD-FG	50	17.81	54.06
	60	22.47	
	70	25.22	
JD-GT	50	20.38	165.43
	70	24.22	
	80	27.32	

## 3 有限元建模

### 3.1 有限元模型

在 ABAQUS 中建立有限元模型时,混凝土部分采用八节点三维实体单元(C3D8R),钢材部分采用

四节点壳单元(S4R)。钢管与混凝土的法向接触采用“硬接触”以表征两者在荷载作用下的接触和分离;切向采用“罚函数法”摩擦模型。结合 Yan 等<sup>[12]</sup>对加劲 CFDST 柱轴压试验的数值模拟结果,本研究选取摩擦系数为 0.3,以描述界面的滑移摩擦行为,用于描述界面的滑移摩擦行为。外加筋板、外钢管和钢梁之间的连接采用壳-固耦约束来确定,以确保刚性连接。图 10 给出了有限元模型的边界条件和载荷施加情况。加载过程分为两个阶段:首先在柱顶施加恒定的轴向压力,然后在梁两端同时施加往复载荷,完成加载设置。

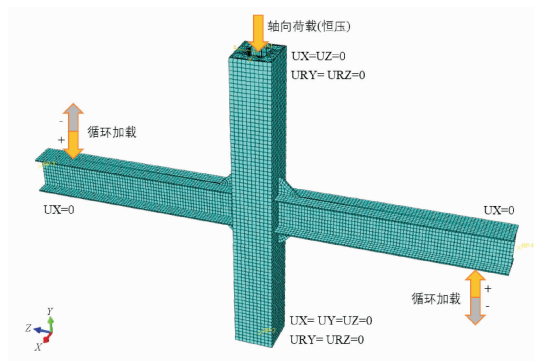


图 10 有限元模型的边界条件和载荷施加

### 3.2 材料模型

在有限元分析中,钢材的应力-应变关系采用 Han 等<sup>[13]</sup>提出的五阶段多线性等向强化模型。混凝土部分采用 ABAQUS 中常用的混凝土损伤塑性(CDP)模型,以模拟其塑性性能及循环荷载作用下的刚度退化。约束混凝土的压缩应力-应变关系采用韩林海等<sup>[14]</sup>提出的应变硬化-软化两阶段模型,该模型同时考虑了约束效应和混凝土强度的影响。混凝土受拉性能则通过 ABAQUS 内置的开裂应力-断裂能关系模型进行模拟<sup>[15]</sup>。在 CDP 模型中,依据 Tao 等<sup>[16]</sup>提出的参数选取原则,关键塑性参数设定为:膨胀角为  $30^\circ$ ,初始等效双轴受压屈服应力与初始单轴受压屈服应力的比值为 1.16,屈服面受拉子午线第二应力不变量与受压子午线第二应力不变量比值为  $2/3$ ,粘性系数为 0.0005,偏心率为 0.1。

## 4 模型验证

### 4.1 破坏模式

图 11 对比了试验与有限元模拟节点的破坏模式。总体而言,有限元模型预测能有效再现节点破坏特征,表明该模型具有较高的可靠性。对于 JD-

GT 节点,有限元模拟准确再现了钢梁翼缘的屈曲破坏现象,与试验中的破坏位置和破坏形态几乎完全一致。此外,有限元模拟中 JD-FG 节点的破坏模式与 JD-GT 节点相似,但试验中 JD-FG 节点的破坏特征是柱损伤较大,梁屈曲变形较小。这种差异主要是由于 JD-FG 节点的焊接质量问题,导致焊缝在试验中未达到最大承载能力时发生断裂,限制了构件性能的充分发挥。

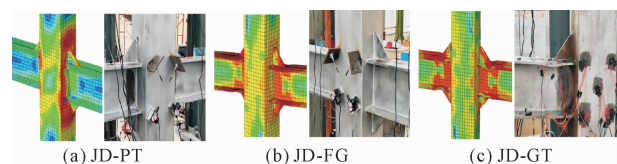


图 11 试验与有限元预测的破坏模式对比

#### 4.2 滞回和骨架曲线

图 12 为节点左梁端的试验与有限元模拟的滞回曲线和骨架曲线对比。除 JD-FG 节点在梁-柱连接位置焊缝开裂造成差异外,其他两个节点的有限元模拟结果与试验结果基本吻合,验证了有限元模型的可靠性。其中,JD-FG 节点加载位移达到约 40 mm 前的有限元模拟结果与试验结果吻合较好,承载力误差控制在 10% 以内。但随着位移的增大,梁-柱连接处焊缝出现裂纹,导致节点性能无法充分

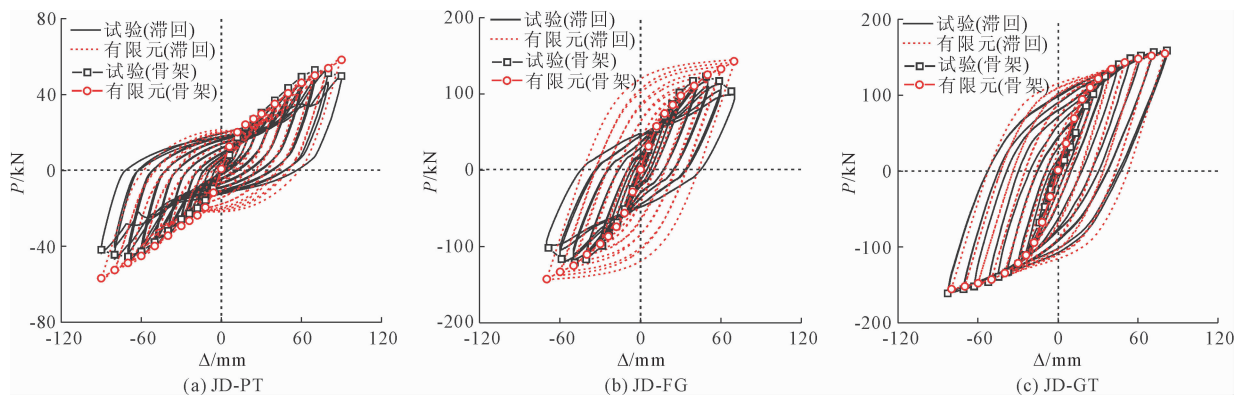


图 12 试验与有限元预测的滞回和骨架曲线对比

## 5 参数分析

在经过验证的有限元模型基础上,进一步讨论了不同参数(外钢管和加筋肋的屈服强度以及轴压比)对加劲节点(JD-FG 和 JD-GT)滞回性能的影响。参数分析的有限元模型细节,如表 5 所示。根据节点类型将有限元模型分为三组,G1 代表 JD-PT,G2 代表 JD-FG,G3 代表 JD-GT。

发挥。因此,有限元模拟结果与试验结果存在差异,表现为滞回曲线的饱满度明显减小,承载力误差增大。相比之下,JD-GT 节点的有限元模拟曲线与试验曲线几乎完全吻合,滞回曲线呈梭形,抗震性能较好。此外,JD-PT 节点有限元模拟曲线的右下方相比于试验曲线有轻微偏差。这是由于加载过程中梁的轻微扭转,造成不可避免的测量偏差所致。需要指出的是,试验结果表明,JD-GT 节点在位移  $\Delta = 80$  mm 时梁翼缘已出现明显屈曲并进入屈服状态,但由于钢材良好的延性有效延缓了性能退化,其承载力下降阶段出现滞后,滞回曲线并未表现出显著的退化特征。有限元分析结果与此现象一致,曲线保持饱满且承载力未明显下降。同时,为了充分发挥节点性能并更直观地揭示不同构造的受力差异,模型未考虑焊缝断裂等导致节点提前失效的因素,因此三个节点的破坏模式更接近 JD-GT 节点的梁翼缘屈曲型破坏,而未出现 JD-PT 节点的最终焊缝开裂或 JD-FG 节点的提前断裂。这也是模拟曲线在大变形阶段没有明显下降段的主要原因。但整体来看,试验与模拟在趋势和力学响应上吻合良好,不影响对节点滞回行为的预测,也保证了后续参数分析结果的可靠性。

#### 5.1 外钢管屈服强度的影响

图 13 为不同外钢管屈服强度( $f_{y0}$ )下节点的滞回曲线和骨架曲线。可见, $f_{y0}$ 对 JD-PT 节点的力学性能有显著的影响。其中,当 $f_{y0}$ 从 235 MPa 增加到 345 MPa 时,JD-PT 节点的极限承载力提高 22.25%;当 $f_{y0}$ 进一步增大到 420 MPa 时,节点极限承载力比 $f_{y0}$ 为 345 MPa 时提高了 10.29%。相比之下,对于 JD-FG 和 JD-GT 节点, $f_{y0}$ 的增加对其力学性能的影响相对较小,这体现在骨架曲线的初始刚度几乎不

变, 极限承载力仅略有增加。这种差异可归因于 JD-FG 和 JD-GT 节点中加强肋的重要作用。通过加劲肋的增强, 外钢管具有足够的约束能力, 从而限制了进一步增加约束刚度对节点性能改善的影响程度。

表 5 参数分析的有限元模型细节

类型	序号	$t_s$ /mm	$f_{y0}$ /MPa	$f_{ys}$ /MPa	$\mu_n$	$h_c$ /%	$E_{sum}$ /(kN·m)
G1	JD-1	—	235	—	0.125	20.61	30.73
	JD-2	—	345	—	0.125	19.50	33.99
	JD-3	—	420	—	0.125	18.09	34.80
	JD-4	—	345	—	0.300	19.73	33.95
	JD-5	—	345	—	0.500	23.51	29.77
	JD-6	—	345	—	0.700	—	—
	JD-7	5.75	235	345	0.125	35.01	151.89
JD-8	5.75	345	345	0.125	34.75	153.50	
JD-9	5.75	420	345	0.125	34.30	154.08	
G2	JD-10	5.75	235	235	0.125	32.25	126.61
	JD-11	5.75	235	420	0.125	35.22	154.43
	JD-12	5.75	345	345	0.300	35.10	155.84
	JD-13	5.75	345	345	0.500	34.85	147.64
	JD-14	5.75	345	345	0.700	—	—
G3	JD-15	5.75	235	345	0.125	35.05	152.43
	JD-16	5.75	345	345	0.125	34.46	155.05
	JD-17	5.75	420	345	0.125	34.16	156.03
	JD-18	5.75	235	235	0.125	33.20	128.82
	JD-19	5.75	235	420	0.125	35.48	161.67
	JD-20	5.75	345	345	0.300	35.01	154.79
	JD-21	5.75	345	345	0.500	36.20	154.60
	JD-22	5.75	345	345	0.700	37.12	154.11

注:  $f_{y0}$  和  $f_{ys}$  分别为外钢管和加筋肋的屈服强度;  $\mu_n$  为轴压比; 钢梁和 CFDST 柱尺寸与试验试件相同(详见表 1); 各节点柱高均为 1 940 mm。

## 5.2 加劲肋屈服强度的影响

图 14 为不同加劲肋屈服强度( $f_{ys}$ )下节点的滞回曲线和骨架曲线。显然, 与  $f_{y0}$  相比,  $f_{ys}$  的变化对加劲节点的滞回性能有更明显的影响。随着  $f_{ys}$  的增

大, 各节点骨架曲线的初始刚度变化不大, 但极限承载力呈上升趋势。其中, 当  $f_{ys}$  由 235 MPa 增加到 345 MPa 时, JD-FG 节点的极限承载力提高了 8.45%; 当  $f_{ys}$  进一步增大到 420 MPa 时, 节点极限承载力比  $f_{ys}$  为 345 MPa 时提高了 4.73%。相应地, JD-GT 节点的极限承载力分别提高了 14.36% 和 6.88%。可见, 在相同条件下, JD-GT 节点的性能提升明显优于 JD-FG 节点。但随着  $f_{ys}$  的进一步增大, 两种节点极限承载力的增强均呈下降趋势。这可能是由于随着  $f_{ys}$  的增加, 钢管的侧向约束刚度增强, 从而提高了节点的整体刚度和承载能力。然而, 随着  $f_{ys}$  的不断增大, 钢管已经具备了足够的约束能力。因此, 进一步增加  $f_{ys}$  对节点力学性能的影响逐渐减小。

## 5.3 轴压比的影响

不同轴压比( $\mu_n$ )下节点的滞回曲线和骨架曲线如图 15 所示。可见,  $\mu_n$  对节点的力学性能有显著影响。当  $\mu_n$  从 0.125 增加到 0.3 时, 各节点的极限承载力变化不大。但当  $\mu_n$  增大至 0.5 时, JD-PT 节点的极限承载力急剧下降, 下降幅度为 26.34%。而 JD-FG 和 JD-GT 节点由于加筋肋的存在, 节点的力学性能相对稳定。JD-FG 节点的极限承载力仅下降 4.41%, 而 JD-GT 节点几乎不受影响。当  $\mu_n$  进一步增大至 0.7, 并加载至位移约 30 mm 时, JD-PT 节点失稳, 极限承载力进一步降低 28.16%。随着加载至位移约 40 mm 后, JD-FG 节点也出现失稳现象, 极限承载力下降 15.37%。值得注意的是, 在此条件下, JD-GT 节点的极限承载力几乎没有降低, 表现出较强的滞回性能。综上, JD-FG 和 JD-GT 节点对  $\mu_n$  的敏感性低于 JD-PT 节点, 特别是 JD-GT 节点在较高的  $\mu_n$  下仍能保持较强的承载能力。

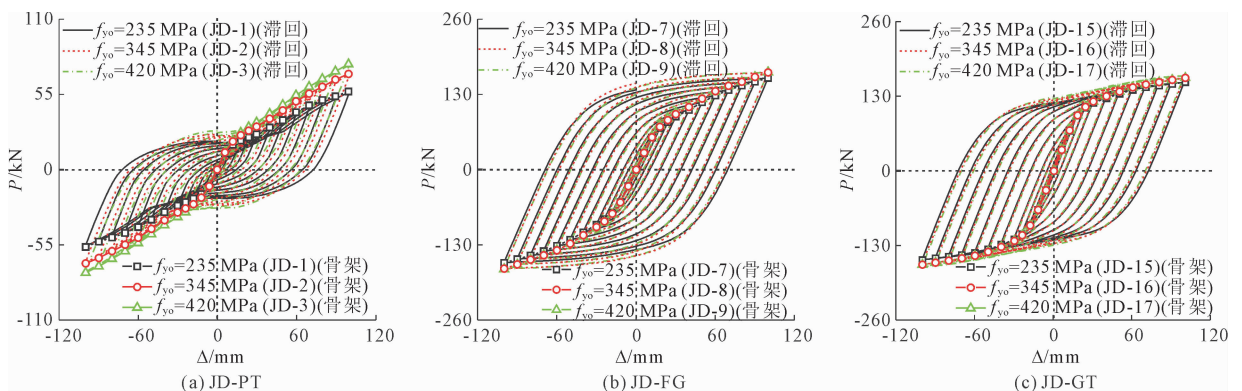


图 13 不同外钢管屈服强度对节点滞回和骨架曲线的影响

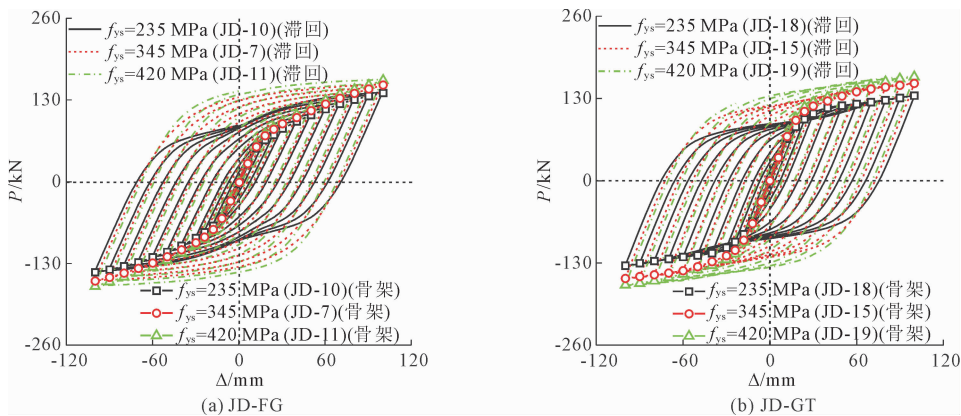


图 14 不同加劲肋屈服强度对节点滞回和骨架曲线的影响

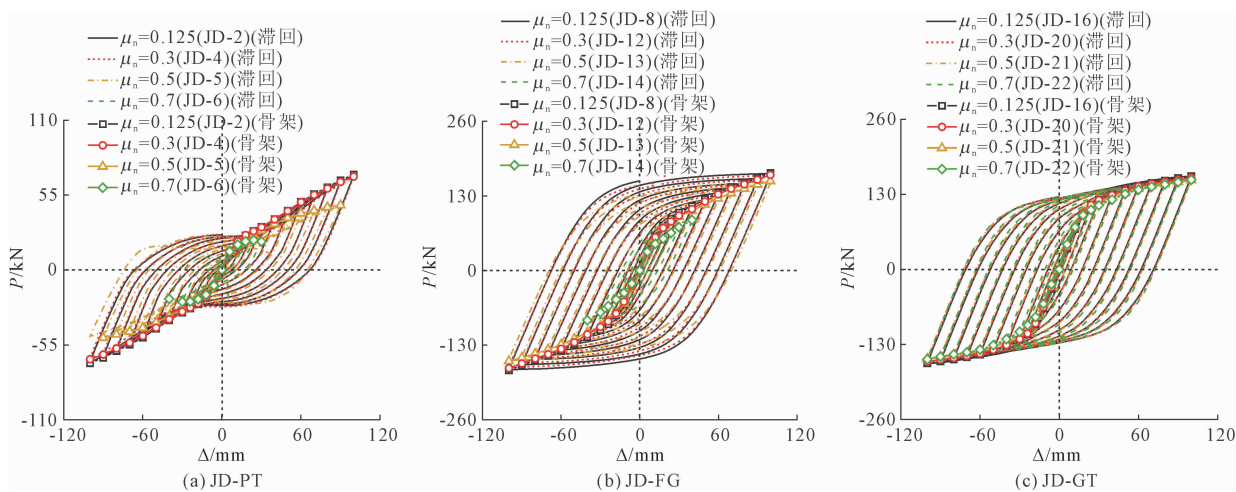


图 15 不同轴压比对节点滞回和骨架曲线的影响

## 6 结 论

本文针对新型钢梁-中空夹层钢管混凝土(CFDST)柱节点的滞回性能进行了系统研究,结合试验与数值分析揭示了其主要受力特征及关键影响因素。根据研究结果,主要得出以下结论:

(1) 加劲肋的引入显著提升了各节点的承载力、延性、刚度和耗能能力,其中采用贯通式加劲肋设计的 JD-GT 节点性能提升最为显著。同时,JD-GT 节点最终的破坏主要表现为梁的局部屈曲,符合“强柱弱梁”的抗震设计原则,说明该节点具备良好的抗震性能。

(2) 外钢管屈服强度的提高显著提高了 JD-PT 节点的承载力、刚度和耗能能力。JD-FG 和 JD-GT 节点的外钢管在加劲肋作用下具有足够的约束刚度,使得外钢管屈服强度的进一步提高对节点抗震性能的改善作用有限。

(3) 随着加劲肋屈服强度的增加,JD-FG 和 JD-GT 节点的承载力、刚度和耗能能力均先增大后趋于

稳定。说明加筋肋屈服强度达到一定水平后,其进一步提高对节点抗震性能的影响有限。因此,为了充分发挥加筋肋的性能,建议加筋肋的设计屈服强度不超过 345 MPa。

(4) 当轴压比从 0.5 增加到 0.7 时,JD-PT 和 JD-FG 节点的极限承载力分别下降 28.16% 和 15.37%,而 JD-GT 节点的极限承载力几乎不受影响。这表明,过大的轴压比削弱了 JD-PT 和 JD-FG 节点的抗震性能。因此,建议将轴压比限制在 0.5 以内,以保证足够的抗震能力。

### 参考文献:

[1] 沈乐,冯宸,杨波,等.多腔体中空夹层钢管超高性能混凝土短柱轴心受压性能试验研究[J].建筑结构学报,2021,42(S2):204-211.  
 [2] Wang Zhibin, Zhang Jianbin, Li Wei, et al. Seismic performance of stiffened concrete-filled double skin steel tubes [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020,169:106020.  
 [3] Zhang Yufen, Zhao Junhai, Cai Chunsheng. Seismic be-

- havior of ring beam joints between concrete-filled twin steel tubes columns and reinforced concrete beams[J]. *Engineering Structures*, 2012,39:1-10.
- [4] Yan Xueyuan, Li Anlong, Liu Xuhong, et al. Seismic performance of the joint between unequal-depth steel beam and CFDST column[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2025,225:109175.
- [5] Bai Yongtao, Wang Shuhong, Mou Ben, et al. Bi-directional seismic behavior of steel beam-column connections with outer annular stiffener[J]. *Engineering Structures*, 2021,227:111443.
- [6] Li Shen, Ding Shihao, Li Xiaolei, et al. Experimental study and mechanical properties of prefabricated beam-column joint with L-shaped stiffeners[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2022,199:107627.
- [7] GB/T 2975—2018 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备[S]. 北京:中国标准出版社,2018.
- [8] GB/T 228.1—2021 金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2012.
- [9] GB/T 50081—2019 混凝土物理力学性能试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [10] JGJ/T 101—2015 建筑抗震规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [11] Fan Junchao, Zhao Junhai, Hua Linwei, et al. Seismic performance of prefabricated joint for hollow CFDST column[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022,45:103653.
- [12] Yan Xueyuan, Shi Shen, Yu Jitao, et al. Experimental and numerical investigation of multi-cavity concrete-filled double-skin steel tubular short column[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2025,227:109357.
- [13] Han Linhai, Zhao Xiaoling, Tao Zhong. Tests and mechanics model for concrete-filled SHS stub columns, columns and beam-columns[J]. *Steel and Composite Structures, An International Journal*, 2001,1(1):51-74.
- [14] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践[M]. 第 4 版. 北京:科学出版社,2022.
- [15] Manual A U. Abaqus theory guide. Version 6.14[J]. USA.: Dassault Systemes Simulia Corp, 2014.
- [16] Tao Zhong, Wang Zhibo, Yu Qing. Finite element modelling of concrete-filled steel stub columns under axial compression[J]. *Journal of constructional steel research*, 2013,89:121-131.

(上接第 32 页)

(4) 振动响应与安全评估:加速度以低频成分为主,位移均方根值通常处于  $10^{-2}$  mm 量级,整体振动水平较低,对结构整体危害性小。但外侧局部高动载与低水位差  $\Delta H$  下的相对动载仍应作为疲劳与局部构件校核的重点。

#### 参考文献:

- [1] 田少杰,陈隽祎,王雪梅,等. 复杂条件下某大型挡潮闸的设计方案研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2021,52(S2):187-192.
- [2] 王正中,徐超. 国内外大跨度挡潮闸应用评述[J]. *长江科学院院报*,2018,35(12):1-11.
- [3] 王文涛,石清文. 枕头坝一级水电站泄洪闸弧形闸门流激振动研究[J]. *人民长江*,2021,52(S2):216-219.
- [4] 顾功开,徐栋栋,李德. 乌东德水电站水工闸门动力安全评价[J]. *人民长江*,2020,51(3):136-142.
- [5] 张亮,徐强,严根华,等. 大型液压启闭下卧式弧形闸门流激振动及抗振优化研究[J]. *水利与建筑工程学报*,2023,21(2):13-19,67.
- [6] 刘计良,奚宏林,司政,等. 基于流固耦合的弧形闸门-闸墩体系的流激振动研究[J]. *水资源与水工程学报*,2023,34(5):149-154,171.
- [7] 段杭,张文远,柯传芳,等. 白鹤滩导流底孔弧形工作闸门流激振动原型观测研究[J]. *水电能源科学*, 2025,43(1):137-140.
- [8] 刘竹丽,陈赞,伊元忠. 不同开度下平面钢闸门流固耦合数值模拟研究[J]. *人民黄河*,2020,42(11):79-83.
- [9] 刘昉,李文胜,王延召,等. 巴塘水电站导流洞平面闸门流激振动试验研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2021,32(1):136-142.
- [10] Tappin R G R, Dowling P J, Clark P J. Design and model testing of the Thames Barrier gates[J]. *Structural Engineer*, 1984,62:115-124.
- [11] Kendrick M. The Thames barrier[J]. *Landscape and Urban Planning*, 1988,16(1-2):57-68.
- [12] SL74—2019 水利水电工程钢闸门设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2019.
- [13] 俞伟,唐新军,卢廷浩. 溢流面板坝泄槽流激振动特性研究[J]. *水电能源科学*,2017,35(8):65-69.
- [14] 刘昉,李文胜,王延召,等. 巴塘水电站导流洞平面闸门流激振动试验研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2021,32(1):136-142.
- [15] 严根华. 我国大跨度闸门应用趋势与抗振对策[J]. *水利水运工程学报*,2009(4):134-142.
- [16] Oberrecht D, Wurpts A. Impact of controlled tidal barrier operation on tidal dynamics in the Ems estuary[J]. *Die Küste*, 2014,81:427-433.