

# 模块墙建筑新型钢-混凝土组合梁柱节点静力性能研究

苏佶智<sup>1</sup>, 王公成<sup>2</sup>, 乔文涛<sup>2,3\*</sup>, 李瑞峰<sup>2</sup>, 黄智远<sup>2</sup>

(1. 国网河北省电力有限公司经济技术研究院, 石家庄 050023; 2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043; 3. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 石家庄 050043)

**摘要:** 基于模块墙轻钢混凝土框架结构体系, 提出了一种适用于该体系的轻钢混凝土组合柱-H型钢梁节点。为研究此节点的力学性能, 对3组梁柱节点试件进行了单调加载试验。试验结果表明, 在梁端单调荷载作用下, 节点呈现出明显的半刚性特征。节点的破坏表现为型钢拼合柱内钢材的屈服变形和混凝土的开裂, 并且随着顶角钢弯曲变形加大和加劲肋焊缝裂缝发展, 最终节点失效。应用ABAQUS有限元软件进行了精细化模拟。结果显示有限元模型的变形过程和破坏特征与试验结果相吻合。考虑H型钢梁截面高度、C型钢厚度和角钢厚度三个关键参数, 进行了参数分析。结果显示, 通过增大梁截面高度和角钢连接件厚度能显著提高节点的抗弯承载力和初始转动刚度。相反, 增加C型钢厚度对节点的抗弯承载力影响有限, 对初始转动刚度的影响也较小。

**关键词:** 模块墙建筑; 冷弯薄壁型钢; 梁柱节点; 单调加载试验; 参数分析; 弯矩-转角关系

中图分类号: TU398<sup>+</sup>.9

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)05-0010-09

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20231123001

## Static Performance Analysis of Novel Steel-Concrete Composite Beam-Column Joints in Modular Wall Construction

SU Jizhi<sup>1</sup>, WANG Gongcheng<sup>2</sup>, QIAO Wentao<sup>2,3\*</sup>, LI Ruifeng<sup>2</sup>, HUANG Zhiyuan<sup>2</sup>

(1. Economic and Technical Research Institute of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050023, China; 2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 3. Shijiazhuang Tiedao University Key Laboratory of Road and Railway Engineering Safety Assurance, Ministry of Education, Shijiazhuang 050043, China)

\*Corresponding author: qwt@stdu.edu.cn

**Abstract:** Based on the lightweight steel-concrete framework system of modular wall structures, this study proposed a lightweight steel-concrete composite column-H-shaped steel beam joint suitable for this system. In order to study the mechanical properties of this joint, monotonic loading tests were carried out on three groups of beam-column joint specimens. The experimental results indicate that under monotonic loading at the beam end, the joint exhibits distinct semi-rigidity characteristics. The failure is characterized by yielding deformation of the flange of the combined steel column and concrete cracking, ultimately leading to joint failure due to excessive bending deformation of the top angle steel and the cracking of the stiffener weld. A refined simulation was conducted using ABAQUS finite element

收稿日期: 2023-11-23

基金项目: 河北省杰出青年科学基金(E2022210084)

作者简介:

苏佶智(1989—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事装配式建筑结构及绿色建造方面的研究。E-mail: sujizhi1989@163.com。

王公成(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事装配式建筑方面的研究。

通信作者:

乔文涛(1982—), 男, 博士, 教授, 主要从事创新结构与智能建造方面的研究。E-mail: qwt@stdu.edu.cn。

software. The deformation process and failure characteristics of the finite element model agree with the experimental results. The researchers consider three key parameters, namely, the height of the H-shaped steel beam section, the thickness of the C-shaped steel, and the thickness of the angle steel, a parametric analysis was performed. The results indicate that increasing the beam section height and the thickness of the angle steel connector significantly enhances the joint's flexural load-carrying capacity and initial rotational stiffness. In contrast, increasing the thickness of the C-shaped steel has a limited impact on the joint's flexural load-carrying capacity, with a minor effect on the initial rotational stiffness.

**Keywords:** modular wall construction; cold-formed thin-walled steel; beam-column joint; monotonic loading test; parametric analysis; bending moment-rotation relationship

冷弯薄壁型钢结构具有轻质高强、舒适节能、全预制化、施工便利、绿色美观、安全可靠等优点。与热轧型钢构件相比,冷弯薄壁型钢构件更容易制造,并且具有更高的比强度,易于运输和安装<sup>[1]</sup>。基于此,乔文涛等<sup>[2-3]</sup>提出了一种新型超低耗装配式建筑体系,其承重的结构为轻钢混凝土框架,框架柱的类型为轻钢-混凝土组合异形柱。

梁柱节点的试验对于探索框架结构的受力性能、安全性能和可维护性能都具有重要意义。目前的研究多以节点静力性能和抗震性能的分析为主,涉及节点的半刚性、结构类型、材料性能、连接形式等内容。这些研究成果在工程实践中得到了广泛应用,对于梁柱节点的力学性能研究具有重要参考价值。对于常见的钢管混凝土柱-型钢梁节点,其连接方式包括贯通式连接、单边螺栓连接等。试验研究表明,节点中部件的螺栓强度、端板厚度和柱壁厚度的相对大小关系对节点破坏模式有显著影响,相对较小的部件会先于节点中其余部件发生破坏,节点整体表现出良好的耗能能力和延性<sup>[4]</sup>。

在研究梁柱节点性能时应重点关注其破坏模式,许多学者对梁柱节点静力性能的影响因素,如转动刚度等进行了比较深入的研究。张爱林等<sup>[5]</sup>对方钢管混凝土柱-H型钢梁螺栓连接节点进行了试验研究,考察了节点在单调荷载作用下的初始转动刚度和极限承载能力等性能。结果表明,与纯钢节点相比,组合节点的初始转动刚度和承载力均有大幅度的提高,梁端位移延性系数达到2.2以上,满足抗震设计要求。康子恒等<sup>[6]</sup>对轻钢结构T型钢连接半刚性梁柱节点进行了试验和有限元研究,考察了自攻螺钉数量、间距、直径等因素对节点破坏模式的影响并进行了分析。结果表明,随着自攻螺钉数量、间距、直径的增加,节点极限弯矩和初始转动刚度均逐渐增大。赵莹等<sup>[7]</sup>对一组由自攻螺钉连接的冷弯薄壁C型钢梁柱节点的静力性能进行了研究,分析和探讨了该类节点的破坏模式、弯矩-转角关系、应力分布、荷载-位移关系。结果表明,梁截面高度的增加会减缓该类节点的刚度退化,还会显著提高该类节点的承载能力和初始刚度,但其延性和耗能能力会减弱,容易产

生梁腹板屈曲。

目前已有研究中的梁柱节点多由型钢柱与型钢梁通过角钢与螺栓相连而成,对于冷弯薄壁型钢组合异形柱与型钢梁组合的梁柱节点研究较少,且这些研究并未考虑装配式、低能耗或二者结合等因素的影响。

本文将文献<sup>[3]</sup>提出的轻钢混凝土组合异形柱框架结构承重体系中的一字形柱与普通型钢梁组合而成的梁柱节点为研究对象,对其进行单调加载试验研究,并开展数值仿真分析,探究节点的破坏机理及影响节点抗弯承载力与初始刚度的主要因素。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

为明确轻钢混凝土组合柱-H型钢梁节点的力学性能,对3组足尺的梁柱节点试件进行了单调加载试验,3组试件的变化参数如表1所示。梁柱节点详细构造如图1所示。试件A1和A2的H型钢梁采用HN300 mm×150 mm×6.5 mm×9 mm,试件A3的H型钢梁采用HN350 mm×150 mm×6.5 mm×9 mm。拼合柱由6个型号为160 mm×60 mm×20 mm,有一定厚度的冷弯薄壁C型钢拼合而成,试件A1和A3的C型钢厚度 $t$ 为1.5 mm,试件A2的C型钢厚度 $t$ 为3.0 mm。C型钢之间通过自攻螺钉连接固定,拼合柱的截面形式及尺寸如图2所示。H型钢梁与C型钢拼合立柱之间采用顶底角钢和双腹板角钢通过全螺栓连接的方式进行连接,为了确保角钢连接件的刚度,顶底角钢焊接有10 mm厚的加劲肋,角钢连接件规格如表2所示,螺栓采用8.8级M20高强螺栓;混凝土强度等级均为C30;轴压比 $\mu$ 均为0.2;顶底角钢和腹板角钢螺栓排数均为两排。

表1 试件编号及参数

Table 1 Numbering and parameters of specimens

试件编号	$t/\text{mm}$	$\mu$	$H/\text{mm}$
A1	1.5	0.2	300
A2	3.0	0.2	300
A3	1.5	0.2	350

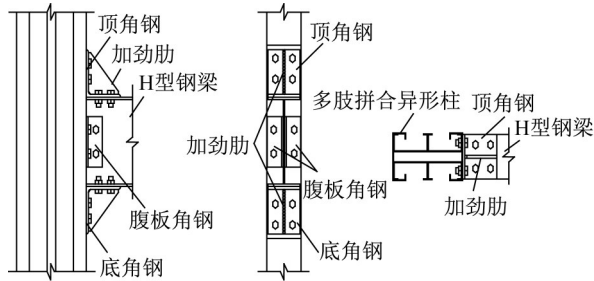


图1 梁柱节点构造

Fig. 1 Details of beam-column joints

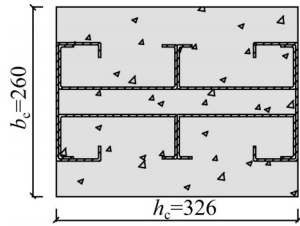


图2 拼合柱截面尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Cross-sectional dimensions of composite column (unit: mm)

表2 角钢连接件规格

Table 2 Specifications of angle steel connectors

角钢连接件	螺栓排数	截面尺寸/mm	$l_c$ /mm	$d_c$ /mm	$s_c$ /mm	$e_c$ /mm
顶底角钢	2	L160×10	150	35	80	60/70
腹板角钢	2	L75×8	170	45	80	45

注: $l_c$ 为角钢连接件长度; $d_c$ 为端距; $s_c$ 为栓距; $e_c$ 为线距。

## 1.2 位移计布置

位移计和应变片布置如图3所示。共布置了7个位移计,位移计W1~W4布置在顶底角钢肢尖所对应的柱截面平面位置,用于量测节点域剪切变形;位移计W5和W6分别布置在距离梁上下翼缘1倍梁高 $H_0$ (三组试件中W5和W6位移计距离梁上下翼缘1倍梁高 $H_0$ 平面处的对称位置,A1、A2试件 $H_0$ 取值为300 mm,A3试件 $H_0$ 取值为350 mm)。平面处的对称位置,用于量测平面内竖向位移;位移计W7布置在加载点梁端的加载点平面位置,用于量测加载点位移。

## 1.3 加载装置及加载方案

本梁柱节点单调加载试验在YJ-300多功能压剪试验机上进行,采用倒T形试件安装方法,组合柱沿水平方向放置而H型钢沿竖直方向放置。组合柱顶端为平板,与固定在反力架上的液压千斤顶直接连接,并通过拉杆固定于柱顶,确保其不会发生位移。组合柱底端的连接方式为铰接,安装于单向铰支座上,通过销轴约束其位

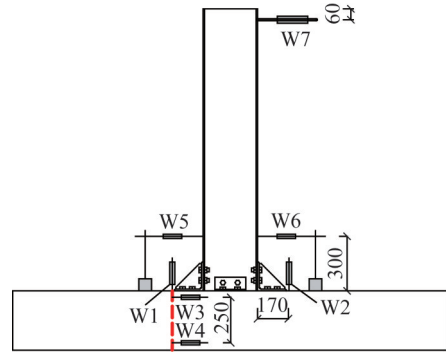


图3 位移计布置(单位:mm)

Fig. 3 Arrangement of displacement meters (unit: mm)

移。安装于反力架上部的水平作动器与H型钢梁自由端连接并向试件施加水平单向荷载,加载点位于距离梁自由端60 mm处,同时为防止在加载过程中梁发生平面外变形,梁端设有侧向支撑装置。试验装置如图4所示。

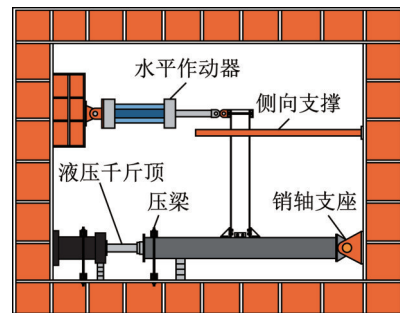


图4 试验加载装置

Fig. 4 Test loading setup

为确保试件轴心受压,在加工端板时直接加工好定位螺纹孔,并将端板与型钢骨架整体浇筑。在试验前对试件进行初步有限元分析,得到模拟荷载值。正式加载前先对试件预加10%的模拟荷载值,以检查试验机是否正常工作并减小浇筑不密实等现象对试验结果的影响,预加载完成后卸载。正式加载时,加载速率选择 $0.02 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,以模拟荷载值的10%对试件进行分级加载,每级加载时记录试件的轴向位移;当荷载总值达到模拟荷载值的80%后,再以模拟荷载值的5%进行分级加载;达到峰值荷载后继续加载,直至荷载下降至峰值荷载的85%时停止试验,或在试件因变形过大而无法继续加载时停止试验。

## 1.4 材性试验

试件钢材均采用Q235B钢材,分别在C型钢腹板、梁腹板和角钢处沿长度方向截取3组标准拉伸试样,按照《金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)<sup>[8]</sup>的规定进行金属材性试验,得到的钢材属性如表3所示。

表3 材性试验测试结果

Table 3 Test results of material properties

取样位置	弹性模量/ MPa	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	极限应变
C型钢	204 760	305	394	0.18
梁腹板	317 980	286	472	0.26
角钢	334 020	317	386	0.27

在组合柱浇筑过程中随机对混凝土进行取样,制作3组边长为150 mm的混凝土立方体试块,并依据《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2002)<sup>[9]</sup>测得28 d后立方体试块抗压强度 $f_{cu}$ 和弹性模量 $E$ 的实测平均值分别为28.7 MPa、29 791.0 MPa。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试验过程及现象

#### 2.1.1 试件A1

试验加载初期,试件发出轻微声响,当荷载加载至20 kN时,试件进入弹塑性阶段,梁端水平位移为33 mm;继续加载至40 kN时,试件出现轻微变形,梁端水平位移为73 mm,试件达到屈服状态。随后,随着梁端位移增加,顶角钢的弯曲变形加剧,腹板角钢上部发生轻微变形,梁柱之间的缝隙和顶角钢与梁之间的缝隙扩大,节点上部逐渐隆起,混凝土交界处出现开裂,自攻螺钉崩开的声音持续不断。当加载至53 kN时,试件达到峰值荷载,水平荷载急速下降,节点上部隆起明显,顶角钢加劲肋发生分裂,试件失效,试验终止。试件A1最终破坏特征和整体变形如图5所示。

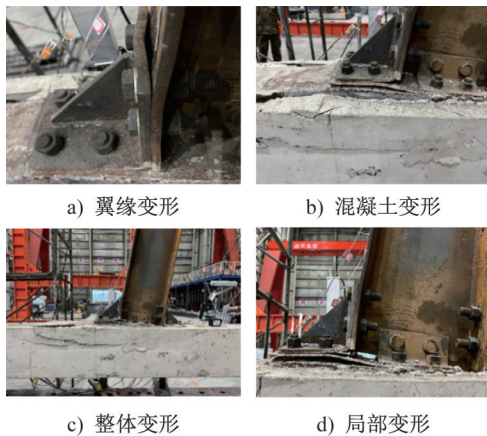


图5 试件A1破坏现象

Fig. 5 Failure phenomena of specimen A1

#### 2.1.2 试件A2

当荷载加载至25 kN时,梁柱间出现细小缝隙,梁段水平位移为22 mm,试件进入弹塑性阶段。当荷载加载

至40 kN后,按位移加载,当梁端位移达到60 mm时,顶角钢弯曲变形增大,腹板角钢与柱之间、顶角钢与梁上翼缘之间缝隙扩大。节点上部未隆起,柱未发生塑性变形,混凝土未开裂。当梁端位移达到110 mm时,垫板出现缝隙,且顶角钢第二排螺栓变形严重,此时荷载达到峰值点55 kN,而后由于顶角钢加劲肋的开裂,视为试件破坏失效,试验终止。试件A2最终破坏特征和整体变形如图6所示。

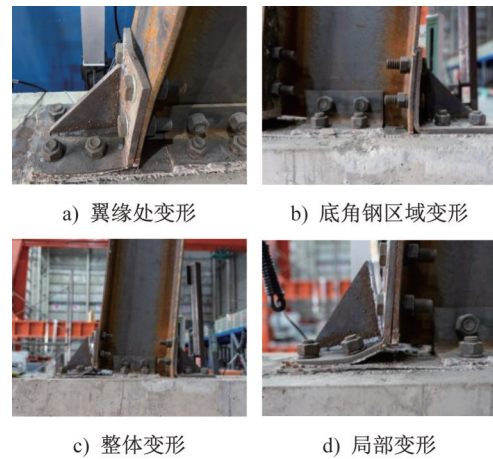


图6 试件A2破坏现象

Fig. 6 Failure phenomena of specimen A2

#### 2.1.3 试件A3

当荷载加载至30 kN时,试件顶角钢位置抬升,梁柱交界处产生缝隙,梁端水平位移为25 mm,试件进入弹塑性阶段。继续加载,梁上翼缘发生塑性变形,梁上翼缘与顶角钢之间的缝隙扩大,试件达到屈服状态,而后按位移加载,顶角钢和垫板逐渐抬升。当荷载加载至47 kN时,柱内型钢明显发生塑性变形,梁端水平位移为62 mm,梁柱交界处缝隙迅速增大,腹板角钢轻微变形。当梁端水平位移为113 mm时,型钢拼合柱发生塑性变形,自攻螺钉断裂,试件达到极限荷载54 kN。混凝土节点上部开裂,裂缝沿横向扩展,最终混凝土部分脱落,柱破坏加剧,试验终止。试件A3最终破坏特征和整体变形如图7所示。

### 2.2 荷载-位移曲线分析

试件荷载-位移曲线如图8所示,可以看出在试件加载初期,曲线的斜率均能保持定值,试件静力性能良好,基本处于弹性阶段,同时各试件的荷载-位移曲线都有较长的塑性段,说明在达到屈服荷载后节点具有很好的延性。

试件A2的抗弯承载力比试件A1的抗弯承载力高5.76%,说明增大C型钢厚度对节点抗弯承载力有一定

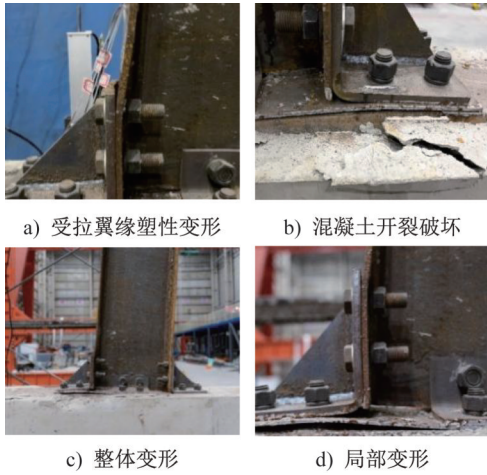


图7 试件A3破坏现象

Fig. 7 Failure phenomena of specimen A3

影响。试件A3的试验结果表明,增加梁截面高度会大大增加节点的初始转动刚度。

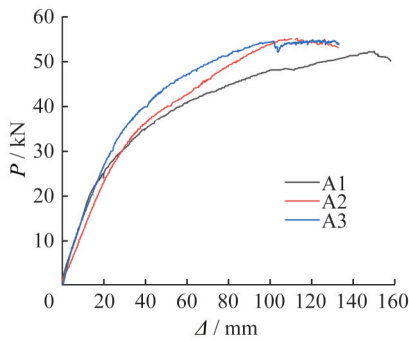


图8 荷载-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curves

### 3 有限元分析

#### 3.1 有限元模型建立

##### 3.1.1 单元类型及材料本构模型的选取

本文按照节点核心区域和非核心区域的划分方式,分别选择C3D8I和C3D8R两种实体单元建立有限元模型,如图9所示。

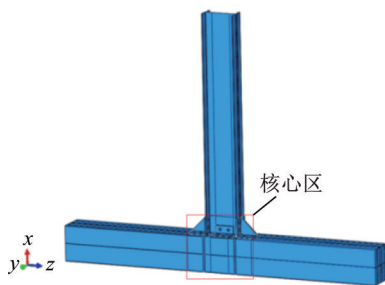


图9 梁柱节点有限元模型

Fig. 9 Finite element model of the beam-column joint

本文在有限元模型中所用的本构关系参考1.4节材料性试验数据,混凝土材料采用塑性损伤模型,本构关系为基于《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)的混凝土塑性损伤模型,混凝土单轴应力-应变曲线如图10所示。混凝土弹性模量为 $3.14 \times 10^4$  MPa,密度取为 $2400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,泊松比取为0.20,混凝土参数设置如表4所示。钢材属性根据文献[10]中提出的应力-应变关系,简化为双折线模型,如图11所示。

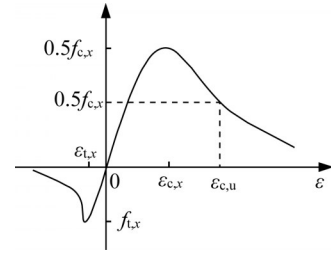


图10 混凝土应力-应变曲线

Fig. 10 Stress-strain curve of concrete

表4 混凝土参数设置

Table 4 Parameter setting of concrete

膨胀角/(°)	偏心率	$f_{b0}/f_{c0}$	K	黏性系数 $\mu_0$
30	0.1	1.16	0.067	0.0005

注: $f_{b0}$ 为混凝土双轴抗压强度,K为混凝土屈服形态的影响参数, $f_{c0}$ 为单轴抗压强度。

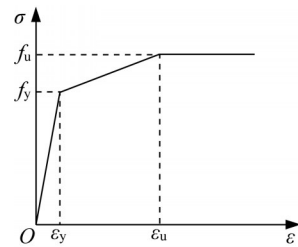


图11 简化后的钢材双折线应力-应变曲线

Fig. 11 Simplified bilinear stress-strain curve of steel

##### 3.1.2 边界条件及荷载施加

有限元模型的边界条件和荷载施加与试验保持一致,分别在柱顶、柱底、梁自由端截面设置参考点,每个参考点与对应截面设置耦合约束,并将边界条件和荷载施加在参考点上。

柱顶采用铰接方式,约束x、y方向的平动自由度,释放z方向的自由度,使柱顶截面能够施加轴向力并产生轴向位移,即 $U_1=U_2=0$ 。柱底同样采用铰接方式,约束3个方向的自由度和加载平面外方向的转动自由度,即 $U_1=U_2=U_3=0, U_{R1}=U_{R3}=0$ ,以模拟柱底与反力架之间连接的单向铰支座。在梁自由端施加z方向的位移边

界条件,以模拟单调加载试验,同时为防止梁发生侧向失稳,约束 $y$ 方向位移,即 $U_2=0$ 。

为确保荷载施加过程的平稳进行,将分析过程分为3个阶段:(1)施加螺栓荷载,M20 高强螺栓的预紧力为125 kN;(2)以集中力的形式施加柱轴压力,以达到预期轴压比;(3)施加梁端竖向位移,根据试验结果,设置竖向位移为150 mm,即 $U_3=150$  mm。

### 3.2 有限元模型的验证

将有限元模型分析结果与试件破坏特性进行对比,如图12~14所示。通过总体观察可见,有限元模型与试件的变形过程基本一致,其应力分布情况、破坏模式等特性与试验结果吻合较好。在单调加载过程中,梁柱节点试件的变形主要发生在靠近顶角钢的节点核心区域,试件的破坏特征为顶角钢的弯曲变形破坏和柱内C型钢塑性变形过大导致的混凝土开裂破坏,而当节点约束较强时,梁受拉翼缘可见明显的塑性变形。由于有限元模型是理想化的,因此模拟结果中的混凝土开裂现象不明显,顶角钢加劲肋焊缝未出现撕裂现象,节点破坏特性基本为角钢弯曲变形过大导致的失效。

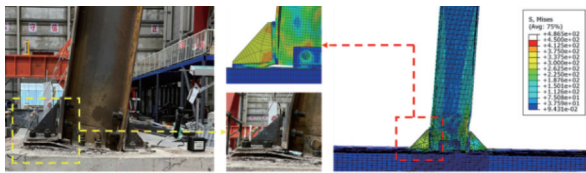


图12 试件A1的试验与有限元模拟破坏特性对比  
Fig. 12 Comparison of failure characteristics between test and finite element simulation of specimen A1

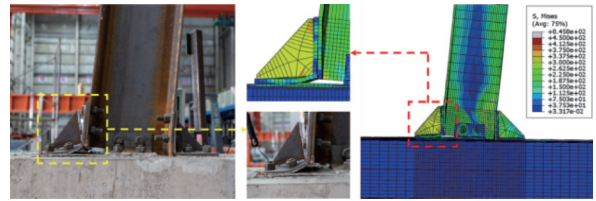


图13 试件A2的试验与有限元模拟破坏特性对比  
Fig. 13 Comparison of failure characteristics between test and finite element simulation of specimen A2

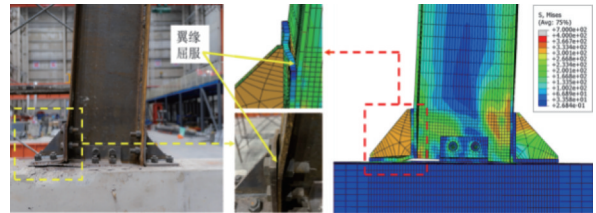


图14 试件A3的试验与有限元模拟破坏特性对比  
Fig. 14 Comparison of failure characteristics between test and finite element simulation of specimen A3

各试件荷载-位移曲线的有限元与试验结果对比如图15所示,可以看出,有限元分析曲线与试验曲线的变化趋势基本一致。从抗弯承载力和初始转动刚度方面来看,有限元分析结果在弹性阶段与试验结果相差不大,而不同的是,当试件荷载达到极限承载力之后,有限元模型未很好地模拟出荷载的下降阶段。产生差异的原因在于试验装置中的边界条件存在一定误差,且试验中试件存在一定的加工精度问题,这些由初始缺陷导致的结果误差是不可避免的。但从整体变化趋势来看,有限元模型能够基本呈现试件的受力特征。

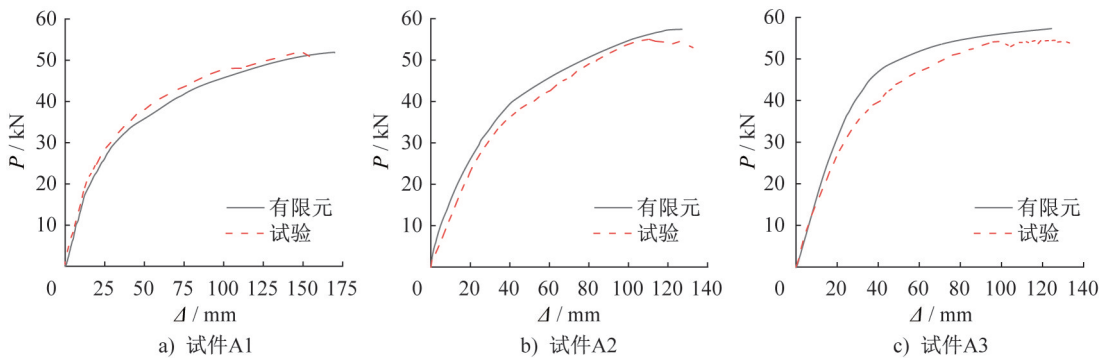


图15 试件荷载-位移曲线的有限元与试验结果对比  
Fig. 15 Comparison of load-displacement curves between finite element and test results

## 4 参数分析

本节对梁柱节点有限元模型进行变参数对比分析,从而得到不同参数对节点性能的影响规律。根据试验试件的变形特征,以及刚度和承载力的变化规律,共选

取梁截面高度 $h$ 、C型钢壁厚 $t$ 和角钢厚度 $t_s$ 三个主要影响因素,按上节所述的建模方法,对梁柱节点模型进行非线性参数分析,绘制出弯矩-转角曲线,并总结节点的初始刚度、承载力变化规律以及破坏规律。有限元模型

所用的本构关系和材料强度与1.4节材性试验数据保持一致。

### 4.1 梁截面高度

不同梁截面高度下模型的荷载-位移曲线和弯矩-转角曲线如图16~17所示,可以看出,各模型在加载初期的曲线呈线性变化,并在屈服后出现了刚度下降的现象,塑性发生明显的变化。由此可见梁截面高度的变化显著改变了梁柱节点的静力性能,增大梁高不仅能增大节点的抗弯承载力,同时也增大了节点的初始转动刚度。与梁高为250 mm的节点相比,梁高为300 mm和350 mm的节点塑性抗弯承载力分别提高了10.99%和20.66%,极限抗弯承载力分别提高了19.68%和29.51%,初始转动刚度分别提高了33.15%和77.27%。节点的抗弯承载力和初始转动刚度均随着梁截面高度的增大而增大,说明这两个静力性能指标与H型钢梁截面的抗弯刚度成正比。这一现象的原因在于梁高度的增加从根本上增大了梁截面尺寸,由此提高了梁柱节点的承载能力。

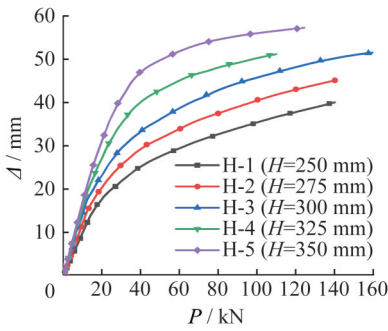


图16 不同梁截面高度下P-Δ曲线

Fig. 16 P-Δ curves for different beam section heights

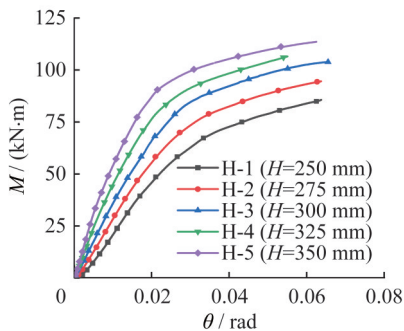


图17 不同梁截面高度下M-θ曲线

Fig. 17 M-θ curves for different beam section heights

### 4.2 C型钢厚度

不同C型钢厚度模型的荷载-位移曲线和弯矩-转角曲线如图18~19所示。可以看出,各模型在梁端单调荷载作用下的曲线变化趋势基本一致,在加载初期,各模型的初始转动刚度不变,而当荷载达到25 kN时,模型出现

刚度下降现象。当C型钢厚度由2.0 mm增加至3.0 mm时,梁柱节点的塑性抗弯承载力增大了0.91%,极限抗弯承载力增大了3.54%;而当C型钢厚度由3.0 mm增加至4.0 mm时,梁柱节点的塑性抗弯承载力增大了1.15%,极限抗弯承载力增大了6.93%,说明节点的抗弯承载力与C型钢厚度基本为线性正相关。这一现象的原因在于增大C型钢厚度相当于增大了柱内C型钢截面的抗弯刚度,进而增强了节点抵抗螺栓拉力导致变形的能力,因此增大C型钢厚度对于节点的静力性能有一定程度的影响。

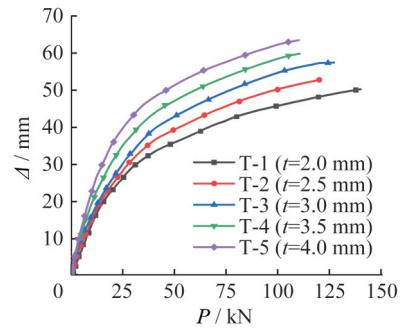


图18 不同C型钢厚度下P-Δ曲线

Fig. 18 P-Δ curves for different C-shaped steel thicknesses

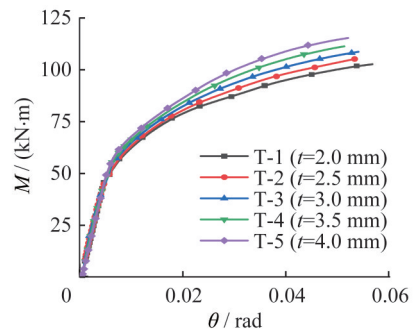


图19 不同C型钢厚度下M-θ曲线

Fig. 19 M-θ curves for different C-shaped steel thicknesses

### 4.3 角钢连接件厚度

不同角钢厚度节点模型的荷载-位移曲线和弯矩-转角曲线如图20~21所示。在加载初期各节点均处于线弹性阶段,当进入弹塑性阶段后,不同角钢厚度节点的塑性和延性发展程度差异不大,说明角钢厚度的增加对于节点进入屈服阶段后的静力性能影响较小。角钢厚度由8 mm增加至10 mm时,节点的塑性抗弯承载力增大了21.34%,极限抗弯承载力增大了20.91%;而当角钢厚度由10 mm增加至12 mm时,节点的塑性抗弯承载力增大了21.04%,极限抗弯承载力增大了22.26%,说明节点抗

弯承载力与角钢厚度基本为线性正相关。这一现象的原因在于角钢厚度的增加从根本上增大了角钢肢截面的抗弯刚度,使得由角钢组件提供的抗弯承载力和转动刚度都得到了提高。

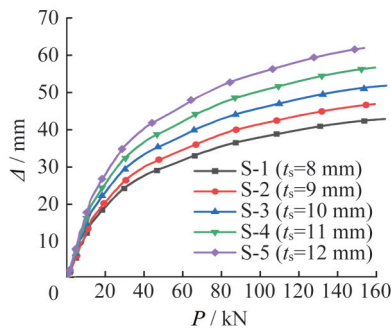


图20 不同角钢连接件厚度下 $P-\Delta$ 曲线

Fig. 20  $P-\Delta$  curves for different angle steel connector thicknesses

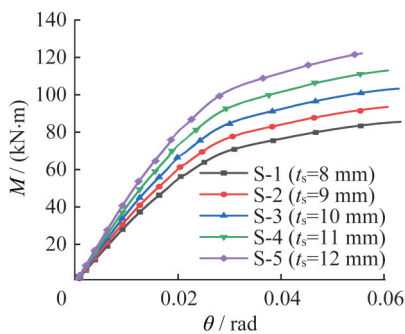


图21 不同角钢连接件厚度下 $M-\theta$ 曲线

Fig. 21  $M-\theta$  curves for different angle steel connector thicknesses

## 5 结论

本文对轻钢混凝土框架结构梁柱节点进行了单调加载试验,将试验结果与有限元模拟分析结果进行对比,验证了有限元模型的准确性,并选择对承载力产生影响的3个主要因素,分别对15个梁柱节点模型进行了有限元模拟分析,得到如下主要结论:

(1) 提出了拼合多肢冷弯薄壁型钢混凝土组合柱和H型钢梁连接的梁柱节点构造;通过梁柱节点的单调加载试验可知,随着梁端位移的增加,顶角钢、腹板角钢、H型钢上下翼缘的变形将逐渐增大,同时节点上部区域逐渐隆起,型钢拼合柱与混凝土交界处出现开裂现象并逐渐分离。裂缝沿着上部区域扩展,并伴随自攻螺钉崩开。最后,顶角钢加劲肋分裂,节点破坏严重,试件失效。

(2) 有限元模型分析结果与试验数据曲线的变化趋势基本一致。试验装置中的边界条件与试验试件加工精度所造成的误差并不影响模拟结果,从整体变化趋势来

看,有限元分析能够基本呈现试件的受力特征。

(3) 3种参数对节点刚度和抗弯承载力的影响存在差异,梁截面高度对节点初始转动刚度的影响最为显著,梁截面高度增加50 mm,节点初始转动刚度约增大35%,二者呈线性正相关关系;C型钢厚度对节点静力性能的影响有限,C型钢厚度增加1 mm,节点极限抗弯承载力约增加3.5%,而节点初始转动刚度没有明显变化;增加角钢厚度使梁柱节点抗弯承载力和初始转动刚度显著增大,而角钢厚度的改变对进入屈服阶段后的节点延性影响较小。

## 参考文献:

- [1] YE J, MOJTABAEI S M, HAJIRASOULIHA I. Seismic performance of cold-formed steel bolted moment connections with bolting friction-slip mechanism[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 156: 122-136. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.01.013.
- [2] 乔文涛,王玉环,尹晓祥,等.装配式冷弯薄壁型钢组合房屋结构体系及施工方法:201811339798.7[P].2018-11-12. QIAO Wentao, WANG Yuhuan, YIN Xiaoxiang, et al. Fabricated type cold-formed thin-walled shape steel combined building structure system and construction method thereof: 201811339798.7[P].2018-11-12.(in Chinese)
- [3] 乔文涛,尹晓祥,王泽雄,等.模块化装配式复合墙、装配式建筑结构体系及施工方法:CN110130527B[P].2020-06-30. QIAO Wentao, YIN Xiaoxiang, WANG Zexiong, et al. Modular fabricated composite wall, fabricated building structure system and construction method: CN110130527B[P].2020-06-30.(in Chinese)
- [4] 李国强,段炼,陆焯,等.H型钢梁与矩形钢管柱外伸式端板单向螺栓连接节点承载力试验与理论研究[J].建筑结构学报,2015,36(9):91-100.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2015.09.012. LI Guoqiang, DUAN Lian, LU Ye, et al. Experimental and theoretical study of bearing capacity for extended endplate connections between rectangular tubular columns and H-shaped beams with single direction bolts [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(9): 91-100. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2015.09.012.(in Chinese)
- [5] 张爱林,孙勇,刘学春,等.方钢管混凝土柱-H形钢梁螺栓连接节点受力性能试验研究[J].建筑结构学报,2017,38(11):64-73.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2017.11.008. ZHANG Ailin, SUN Yong, LIU Xuechun, et al. Experimental study on mechanical performance of concrete-filled square steel tubular columns to H-section steel beam bolted connection[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(11): 64-73. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2017.11.008.(in Chinese)
- [6] 康子恒,王森林,杜喜凯,等.T形钢连接半刚性梁柱节点受力性能研究[J].建筑结构学报,2020,41(增刊1):44-54. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2020.S1.006.

- KANG Ziheng, WANG Senlin, DU Xikai, et al. Study on mechanical behavior of semi-rigid beam-column joints with T-shaped steel connections [J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41 (Suppl. 1) : 44-54. DOI: 10.14006/j. jzjgxb. 2020. S1.006. (in Chinese)
- [ 7 ] 赵莹, 吴学韬. 冷弯薄壁 C 型钢梁柱节点静力性能研究 [J]. *钢结构*, 2018, 33(10) : 19-23. DOI: 10.13206/j. gjg201810004. ZHAO Ying, WU Xuetao. Research on the static behavior of cold-formed thin-wall C steel beam-column joints [J]. *Steel Construction*, 2018, 33(10) : 19-23. DOI: 10.13206/j. gjg201810004. (in Chinese)
- [ 8 ] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 金属材料拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021. State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. *Metallic Materials-Tensile Testing-Part 1: Method of Test at Room Temperature: GB/T 228.1—2021 [S]*. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [ 9 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 普通混凝土拌合物性能试验方法标准: GB/T 50080—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. Ministry of House and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. *Standard for Test Method of Performance on Ordinary Fresh Concrete: GB/T 50080—2002[S]*. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002. (in Chinese)
- [ 10 ] 钱凯, 王越宇, 李治, 等. 带翼缘开洞剪力墙抗震性能 [J]. *北京工业大学学报*, 2021, 47(7) : 736-747. DOI: 10.11936/bjutxb2020110019. QIAN Kai, WANG Yueyu, LI Zhi, et al. Seismic performance of shear walls with flanges and openings [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2021, 47(7) : 736-747. DOI: 10.11936/bjutxb2020110019. (in Chinese)