

# 新型模块化钢结构梁柱装配节点及其承载性能分析

曹雯韬, 张再华\*

湖南城市学院土木工程学院, 湖南 益阳

收稿日期: 2026年4月26日; 录用日期: 2026年5月18日; 发布日期: 2026年5月28日

## 摘要

针对传统模块化钢结构闭口截面内部施焊困难及螺栓连接削弱截面等局限, 本文提出了一种集成“十字型导向槽”与“工字型卡槽”的新型全焊接装配式方钢管梁柱节点。该节点借助专用连接件实现了吊装过程的精准定位与自动对中; 其采用的外部全焊接工艺, 有效避免了柱壁开孔导致的性能削弱, 确保了构件截面的力学完整性。本文深入剖析了该节点的传力机制, 分别构建了其在受拉、受剪及受弯工况下的承载力理论计算模型, 并利用ABAQUS有限元软件进行了可靠性验证。分析结果表明: 该节点传力路径明确且顺畅, 符合“强节点、弱构件”的抗震设计原则; 各工况下的理论计算值与有限元模拟值高度吻合, 充分证明了理论公式的准确性与工程安全性。本研究可为该类新型装配式节点的工程推广与应用提供重要的理论参考。

## 关键词

模块化钢结构, 方钢管节点, 装配式连接件, 承载性能, 理论计算, 有限元分析

# Analysis on the Bearing Capacity of a Novel Modular Steel Structure Beam-Column Assembly Joint

Wentao Cao, Zaihua Zhang\*

College of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang Hunan

Received: April 26, 2026; accepted: May 18, 2026; published: May 28, 2026

\*通讯作者。

文章引用: 曹雯韬, 张再华. 新型模块化钢结构梁柱装配节点及其承载性能分析[J]. 土木工程, 2026, 15(5): 349-360.  
DOI: 10.12677/hjce.2026.155144

## Abstract

In response to the limitations of traditional modular steel structures, such as the difficulty in internal welding of closed sections and the weakening of the section due to bolt connections, this paper proposes a new fully welded prefabricated square steel tube beam-column joint that integrates a “cross-shaped guide slot” and an “I-shaped slot”. This joint uses a dedicated connection component to achieve precise positioning and automatic centering during the hoisting process; its external full welding process effectively avoids the performance weakening caused by column wall openings, ensuring the mechanical integrity of the component section. This paper deeply analyzes the force transmission mechanism of this joint, respectively constructs theoretical calculation models for its bearing capacity under tension, shear and bending conditions, and uses ABAQUS finite element software for reliability verification. The analysis results show that the force transmission path of this joint is clear and smooth, in line with the seismic design principle of “strong joint, weak member”; the theoretical calculation values under each condition are highly consistent with the finite element simulation values, fully demonstrating the accuracy of the theoretical formula and the engineering safety. This research can provide important theoretical references for the engineering promotion and application of this type of new prefabricated joint.

## Keywords

Modular Steel Structure, Square Steel Tubular Joint, Prefabricated Connector, Load-Bearing Performance, Theoretical Calculation, Finite Element Analysis

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

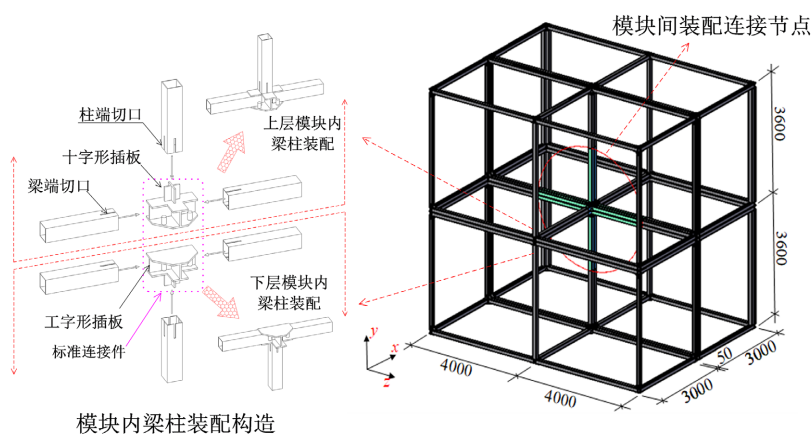
## 1. 引言

在全球应对气候变化与推动可持续发展的宏观背景下, 建筑行业全寿命周期的绿色化转型已成为必然趋势[1]。作为建筑工业化的高级发展阶段, 模块化钢结构将结构、机电与内装等系统在工厂内部高度集成于三维空间模块中, 现场仅需进行快速拼装, 极大缩短了施工周期并有效降低了环境污染[2]。在构件选型上, 传统的开口截面(如 H 型钢)往往存在抗扭刚度较弱、易发生侧弯扭转失稳等劣势; 相较之下, 方钢管等闭口截面则因其材料分布均匀、双向抗弯能力强以及卓越的抗扭性能, 成为模块化空间受力体系更为理想的选择。

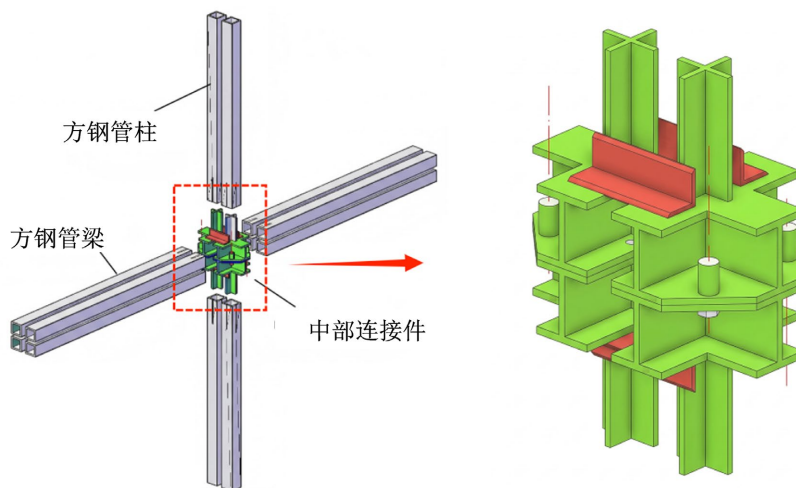
然而, 闭口截面模块间连接节点的受力性能与施工便捷性仍是制约该体系广泛应用的核心瓶颈。针对传统的方钢管梁柱节点, 现有技术面临显著的局限: 全焊接节点虽具有较高的初始刚度, 但在闭口截面内部施焊操作困难、焊接质量难以保证; 而传统高强螺栓连接需在柱壁开设操作手孔, 严重削弱了节点域截面, 难以满足“强节点、弱构件”的抗震设计原则。此外, 现有研究多聚焦于特定新型节点的试验验证与有限元分析[3], 缺乏通用的新型节点理论计算模型[4]; 现行规范中的刚度计算公式对该类节点的适用性亦存在局限[5]。基于此, 本文提出一种新型方钢管梁柱装配连接节点构造, 旨在通过严密的理论推演, 建立适用于该新型模块化装配节点在受拉、受剪与受弯多工况下的承载力计算模型, 为相关工程应用提供可靠的理论依据与设计参考。

## 2. 方钢管梁柱装配节点构造

以某方钢管梁柱装配模块化箱式房屋(箱体规格  $8000\text{ mm} \times 3000\text{ mm} \times 3600\text{ mm}$ , 梁柱截面均为  $\square 100 \times 100 \times 4$ , Q235 钢材)为例, 图 1 详细介绍了该梁柱装配连接节点构造。为克服方钢管闭口截面螺栓安装的不便, 该节点采用了焊接连接工艺, 通过设置标准装配连接件, 以解决传统模块化节点对中困难的问题。连接件顶部设有十字型导向槽, 水平方向集成工字型卡槽。使其在车辆吊装过程中, 让特定的槽口构造发挥了精准导向与限位功能, 促使上下层方钢管柱及相邻横梁实现快速自动对中。这一设计显著降低了对现场吊装精度的依赖, 大幅缩短了塔吊占用时间, 提升了施工效率。在侧向水平荷载(如地震或风荷载)等不同工况的作用下, 节点主要承受弯矩、剪力与轴力的复合作用[7]。由于标准连接件刚度远大于方钢管梁柱截面刚度, 可将连接件视为刚性体, 节点的变形主要考虑梁柱方钢管拉压变形及局部剪切变形。模块间装配连接构造如图 1(b)所示, 该构造形式的节点在传力机制和施工便捷方面还具有以下显著优势:



(a) 节点试件的选取位置图



(b) 模块间装配连接示意图

Figure 1. Schematic diagram of the modular square steel tube beam-to-column joint

图 1. 模块化方钢管梁柱节点构造图

(1) 梁柱连接采用专用的标准化装配连接件(图 1(a)), 其顶部设有“十字型导向槽”, 水平方向集成了“工字型卡槽”, 极大方便装配施工[6]。在吊装过程中, 该槽口构造能够提供精准的导向与限位功能,

实现上下层钢柱及相邻横梁的快速自动对中, 这种方式显著降低了施工对现场吊装精度的依赖, 进而降低了吊装难度与综合成本, 有效提升了现场施工效率。此外, 为解决方钢管闭口截面内部无法施焊或安装常规螺栓的施工难题, 采用全焊接工艺实现了纯“外部化作业”。无需在柱壁额外开设工艺孔, 既保证了构件截面的力学完整性, 又避免了使用盲栓连接的高昂造价。该节点体系高度契合现代工业化建造的发展趋势, 有效实现了“工厂预制、现场集成”的理念。

(2) 该节点的传力路径平滑且流畅, 连接件能将梁端承受的弯矩与剪力稳妥地传递至柱身, 从而有效削弱方钢管角部的应力集中效应, 实现节点应力的均匀分布。同时, 该构造对节点核心区变形具有显著的约束作用, 促使塑性较优先于梁端形成, 高度契合“强节点、弱构件”的抗震设计准则。在此机制下, 地震能量得以通过梁端的塑性变形被有效耗散, 规避了由节点过早破坏引发的结构连续性倒塌风险。

### 3. 方钢管梁柱节点承载力的理论分析

为建立适用于指导工程实践的通用设计方法, 必须构建该新型节点的系统力学计算模型。为此, 本文结合方钢管空心闭口截面的受力特性, 深入剖析了该节点的传力机制[7]。在此基础上, 分别针对受拉、受剪及受弯三种基础工况, 系统推导了该模块化节点的承载力理论公式。鉴于节点构造的几何对称性, 受弯工况的分析仅聚焦于其绕单一主轴的抗弯承载力[8]。

#### 3.1. 受拉工况中的抗拉承载力

本文构建的模块化盒式钢结构方钢管节点抗拉承载力计算模型如图 2 所示。在边界条件与受力状态设定上, 上下层方钢管柱与中心节点均采用刚性固接; 下层方钢管柱底端设为固定约束, 并于上层方钢管柱顶端施加竖向拉力荷载。该理论计算主要基于以下两点假设: 1) 忽略模块内部构件对整体抗拉承载力的贡献; 2) 忽略节点在纯受拉状态下, 抗剪键对抗拉承载力的附加作用。基于上述设定, 节点在受拉作用下的潜在破坏模式主要表现为以下两种: 1) 中心节点钢构件连接处的焊缝破坏; 2) 中心区域节点钢构件对接处的焊缝破坏; 3) 方钢管柱柱壁拉弯屈服破坏。

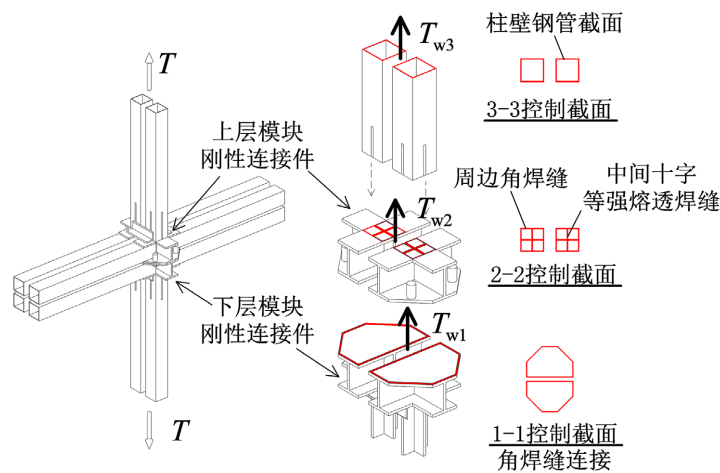


Figure 2. Calculation model for tensile capacity of square steel tube joints  
图 2. 钢结构方钢管节点抗拉承载力计算模型图

#### 1) 中心节点钢构件连接处受拉破坏

基于上述破坏模式, 本节依据《钢结构设计标准》(GB 50017-2017)[9]对节点的抗拉承载力进行理论推导。针对方钢管柱与中心连接件间的角焊缝连接, 焊缝截面形式详见图 2 中 1-1 剖面, 当轴向拉力垂

直于焊缝长度方向作用时, 该焊缝属于正面角焊缝。从受力机制分析, 其抗拉承载力  $T_{w1}$  主要受焊缝有效截面的强度控制, 具体计算公式如下:

$$T_{w1} = \beta_f f_f^w h_e l_w \quad (1)$$

式中:  $T_{w1}$  为正面角焊缝的抗拉承载力;  $\beta_f$  为正面角焊缝的强度设计值增大系数, 承受静载时, 通常取  $\beta_f$ ;  $f_f^w$  为角焊缝的强度设计值;  $h_e$  为角焊缝的有效厚度, 通常取  $h_e = 0.7h_f$  (其中  $h_f$  为焊脚尺寸);  $l_w$  为角焊缝的有效计算长度。

### 2) 中心节点钢构件对接处的焊缝破坏

由于中心节点间采用全熔透对接焊缝相连, 其受力性能可视为与母材等同。结合图 2 中 2-2 剖面所示的焊缝截面构造, 其抗拉承载力按下式计算:

$$T_{w2} = f_t^w l_w t \quad (2)$$

式中:  $T_{w2}$  为对接焊缝的抗拉承载力;  $f_t^w$  为对接焊缝的抗拉强度设计值其数值通常与母材的抗拉强度设计值相同;  $l_w$  为焊缝的有效计算长度, 取实际焊缝长度;  $t$  为连接部位的有效厚度。

### 3) 方钢管柱柱壁拉弯屈服破坏

结合图 2 中 3-3 剖面所示的柱壁截面, 依据《钢结构设计标准》(GB 50017-2017)关于轴心受拉构件的强度规定, 其抗拉承载力计算公式为:

$$T_{w3} = f \cdot A_n \quad (3)$$

式中:  $T_{w3}$  为抗拉承载力;  $f$  为钢材的抗拉强度;  $A_n$  为构件的净截面面积。

综上, 模块化盒式方钢管梁柱节点的抗拉承载力为:

$$T = \min(T_{w1}, T_{w2}, T_{w3}) \quad (4)$$

## 3.2. 受剪工况中的抗剪承载力

在水平外力荷载作用下, 模块化盒式方钢管节点核心区的钢管管壁与中心区域连接件协同参与抗剪。节点各部分的受力机制分解及抗剪承载力计算模型如图 3 所示。本节理论计算主要基于以下假设: 1) 忽略方钢管梁柱构件本身对节点整体抗剪承载力的贡献。基于上述受力机制, 节点在受剪作用下的潜在失效模式主要表现为以下两种: 1) 中心节点焊缝的抗剪切破坏; 2) 节点与柱连接处焊缝剪切破坏; 3) 柱壁剪切发生破坏。

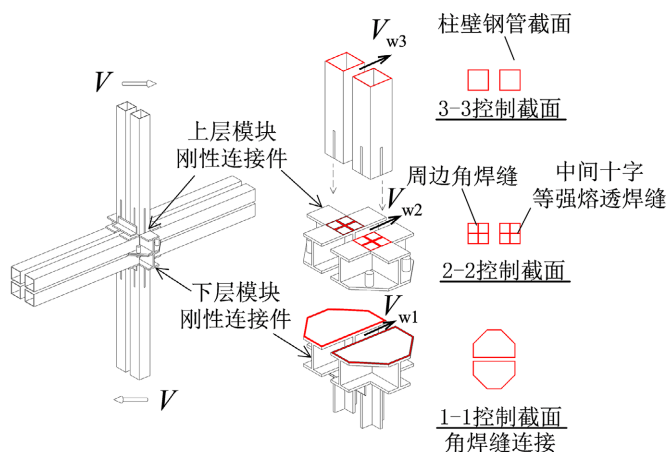


Figure 3. Calculation model for shear capacity of square steel tube joints

图 3. 钢结构方钢管节点受剪承载力计算模型图

## 1) 中心节点焊缝的抗剪切破坏

针对节点核心区焊缝形式图 3 中 1-1 的受剪破坏模式, 本研究同样基于《钢结构设计标准》(GB 50017) 对其受剪承载力进行计算。假设破坏沿焊缝有效发生, 其抗剪承载力  $V_{w1}$  满足下式计算:

$$V_{w1} = h_e \left( b_1 + b_2 + 2h_1 + 2\sqrt{\left(\frac{b_2 - b_1}{2}\right)^2 + h_2^2} \right) f_{fw} \quad (5)$$

式中:  $b_1$  为焊缝顶部平直段的长度;  $b_2$  为焊缝底部平直段的长度;  $h_1$  为焊缝两侧垂直段的长度;  $h_2$  为焊缝两侧斜边段的垂直投影高度;  $f_{fw}$  为角焊缝的抗剪强度。

## 2) 节点与柱连接处焊缝剪切破坏

对于该装配式节点与方钢管柱中的连接焊缝形式如图 3 中 2-2 所示, 假定其施焊路径沿其外侧轮廓连续闭合。该外缘连续焊缝的有效计算长度可由其特征尺寸解析求得可得该类截面焊缝的抗剪承载力通用计算公式如下:

$$V_{w2} = \frac{f_{vw}^f}{\sqrt{\left(\frac{1}{A_w} + \frac{e \cdot b}{2I_p}\right)^2 + \left(\frac{e \cdot (2h + s)}{2I_p}\right)^2}} \quad (6)$$

式中:  $A_w$  为焊缝群的有效截面积;  $b$  为焊缝的宽度;  $h$  为焊缝的高度;  $s$  为两焊缝间垂直间距;  $e$  为剪力的偏心距;  $f_{vw}^f$  为角焊缝的抗剪强度设计值;  $I_p$  为整个焊缝群对整体形心的极惯性矩。

## 3) 柱壁剪切发生破坏

当节点两侧的方钢管梁受剪时, 梁截面中性轴处的剪切应力达到最大值, 因此其抗剪承载力  $V_{w3}$  满足以下公式:

$$V_{w3} = \frac{I \cdot t_w \cdot f_v}{S} \quad (7)$$

$$I = \frac{BH^3 - bh^3}{12} \quad (8)$$

式中:  $f_v$  为钢材的抗剪强度设计值;  $t_w$  为中性轴处的腹板厚度;  $S$  为中性轴截面对于中性轴的面积矩;  $I$  为截面惯性矩;  $H$  为方钢管截面的外部高度;  $B$  为方钢管外部宽度;  $t$  为方钢管的壁厚。

综上, 模块化盒式方钢管梁柱节点的抗剪承载力为:

$$V = \min(V_{w1}, V_{w2}, V_{w3}) \quad (9)$$

## 3.3. 受弯工况中的抗弯承载力

模块化盒式方钢管节点绕 y 轴正向的抗弯承载力计算模型如图 4 所示。破坏模式有: 1) 方钢管梁与连接件焊缝受弯破坏; 2) 中心节点与柱端连接面的焊缝破坏; 3) 钢管柱截面屈服破坏。

## 1) 方钢管梁与连接件焊缝受弯破坏

受力如图 3 中 1-1 截面, 为一个典型的杠杆受力模型: 假设受压区集中在底部转动支点 O, 受拉区的焊缝被离散为多层, 其产生拉力  $T_1, T_2, T_3$ , 通过拉力与力臂形成抵抗弯矩, 其抗弯承载力按下式计算:

$$M_b = \sum_{i=1}^n (A_{we,i} \cdot f_{vw}^f) \cdot y_i \quad (10)$$

式中:  $n$  为受拉侧焊缝的排数;  $A_{we,i}$  为第  $i$  层水平受拉部分角焊缝的有效截面积;  $f_{vw}^f$  为角焊缝的抗拉强度;  $y_i$  为第  $i$  层受拉焊缝中心线到受压区中心点 O 的力臂距离。

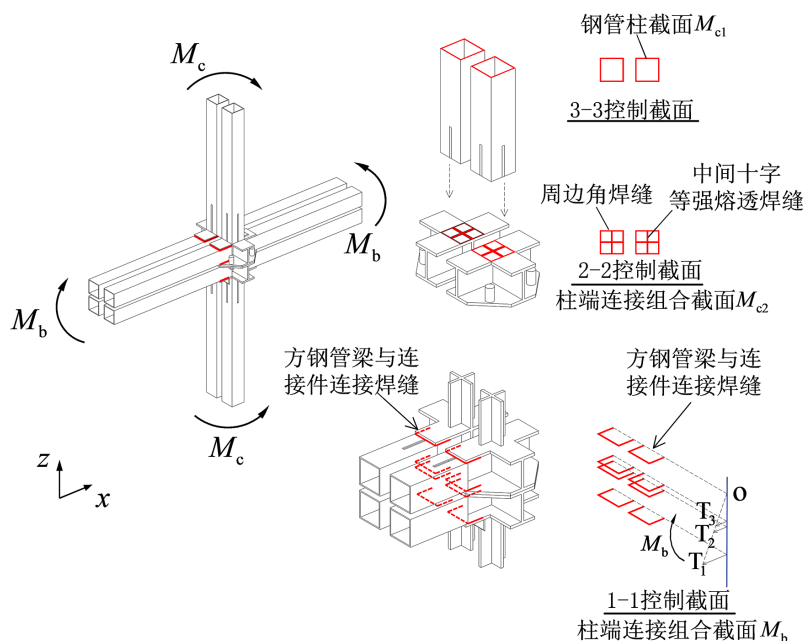


Figure 4. Calculation model for bending capacity of square steel tube joints  
图 4. 钢结构方钢管节点受弯承载力计算模型图

## 2) 中心节点与柱端连接面的焊缝破坏

在绕  $y$  轴的弯矩作用下, 节点界面的焊缝群如图 3 中 2-2 截面会产生“一侧受拉、一侧受压”的应力分布。当焊缝群为截面的最薄弱环节时, 其抗弯承载力按下式计算:

$$M_{c2} = W_{wy} f_w \quad (11)$$

式中:  $W_{wy}$  为焊缝群绕轴的有效截面模量;  $f_w$  为焊缝的强度。

## 3) 钢管柱截面屈服破坏

如图 3 中 3-3 截面验算的是双拼方钢管柱本体在节点区外的受弯承载力。这是节点设计中“强柱弱梁”或“等强设计”的基准参考值, 破坏模式为钢管屈服或屈曲, 其抗弯承载力按下式计算:

$$M_{c1} = 2 \cdot \gamma_x \cdot W_{cx} \cdot f \quad (12)$$

式中:  $W_{cx}$  为单根方钢管柱截面绕受弯主轴的弹性截面模量;  $f$  为钢材的抗弯强度设计值;  $\gamma_x$  为截面塑性发展系数。

为准确评估节点的抗弯性能, 本研究综合考虑了构件截面塑性屈服、焊缝群受弯破坏以及力矩偶合传力机制, 分别建立了抗弯承载力理论计算公式, 为满足“强节点、弱构件”的抗震设计准则, 节点的实际极限抗弯承载力应取上述三种失效模式计算结果的最小值, 则受弯工况中的抗弯承载力:

$$M_u = \min(M_b, M_{c2}, M_{c1}) \quad (13)$$

## 4. 方钢管梁柱节点承载力的数值模拟

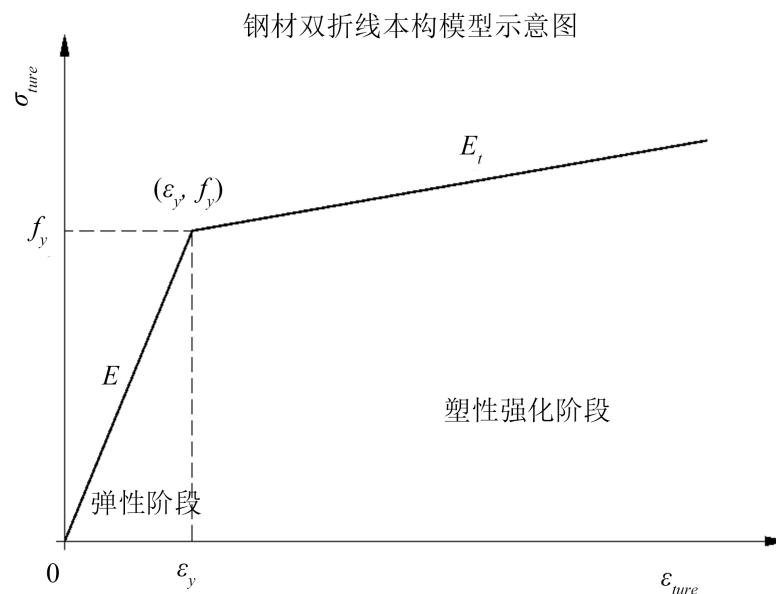
### 4.1. 材料属性

针对图 1 所示的模块化钢结构中梁柱方钢管装配节点进行模拟分析, 钢材采用 Q235B 材质, 具体物理力学性能参数取值如表 1 所示[10]。其中, 弹性模量  $E$  取  $2.06 \times 10^5$  MPa, 泊松比  $\nu$  取 0.3, 密度  $\rho$  取  $7.85 \times 10^{-9}$  t/mm<sup>3</sup>。屈服强度与极限强度依据《钢结构设计标准》(GB 50017-2017)。

**Table 1.** Material properties schedule  
**表 1.** 材性参数明细表

材料类型	弹性模量 $E$ (MPa)	屈服强度 $f_y$ (MPa)	极限强度 $f_u$ (MPa)	泊松比 $\nu$
Q235	$2.06 \times 10^5$	235	370	0.3

在 ABAQUS 有限元数值模拟中, 钢材被定义为各向同性弹塑性材料, 其受力过程可划分为弹性与塑性两个阶段。在弹性阶段, 材料变形遵循胡克定律, 表现为线弹性特征, 核心控制参数为弹性模量  $E$  与泊松比  $\nu$ ; 在塑性阶段, 采用 Von Mises 屈服准则作为材料进入塑性状态的判定依据。为准确模拟钢材屈服后的应变强化效应及往复荷载作用下的包辛格效应, 本文引入了双折线随动强化模型。该模型将钢材的应力-应变关系简化为两段直线: 第一段为弹性阶段, 斜率即为弹性模量  $E$ ; 第二段为塑性强化阶段, 斜率为切线模量  $E_t$ 。综合相关文献与工程经验, 切线模量取值为  $E_t = 0.01E \sim 0.03E$ , 该钢材的本构关系模型详见图 5。



**Figure 5.** Simplified stress-strain relationship of steel  
**图 5.** 钢材的简化应力应变关系

#### 4.2. 单元类型和接触关系

本文统一选用 ABAQUS 软件中的 C3D8R 单元对钢柱、钢梁、角钢、连接件及柱帽梁帽等所有构件进行离散建模。该单元类型在处理接触非线性及几何非线性问题时表现稳健, 不仅能有效避免剪切闭锁现象, 且在配合较细密网格时能显著提高位移求解精度并克服沙漏模式的影响。鉴于网格划分质量直接决定了计算的收敛速度与结果的可靠性, 建模过程中遵循“分区切分、疏密有致”的原则: 首先通过几何切割技术将复杂构件划分为规则区域以生成高质量的结构化网格, 随后依据应力梯度分布进行局部加密处理, 在确保精度的同时兼顾计算效率。具体设置上, 钢梁与钢柱的主体部分及梁柱帽等非关键区域采用相对稀疏的网格, 全局控制尺寸设定为 15 mm; 对于应力集中显著的连接件及节点核心区, 为了精确捕捉局部屈服与接触行为, 将控制单元尺寸加密至 4 mm; 角钢及其接触垫片等细部构造则采用 6 mm 的网格尺寸。最终建立的有限元模型及其网格划分效果详见图 6。

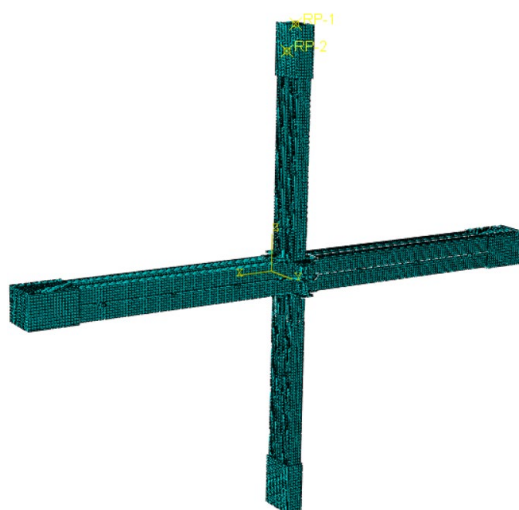


Figure 6. Mesh generation of the model  
图 6. 模型网格划分

模型中各部件间的相互作用均采用“表面 - 表面”接触算法进行模拟。接触属性包括法向行为与切向行为：切向采用库仑摩擦模型，摩擦系数设定为 0.3；为兼顾计算精度与收敛性，摩擦公式选用罚函数法，并将接触刚度比例因子设为 0.5。接触区域主要涵盖连接件与梁、以及角钢与梁柱接触面等位置。

### 4.3. 数值模拟结果分析

本文基于上述方钢管梁柱装配模块化箱式房屋，在不同工况下方钢管节点的有限元模型应力云图、数值模拟与理论计算结果的对比分别如图 7 和表 2 所示。

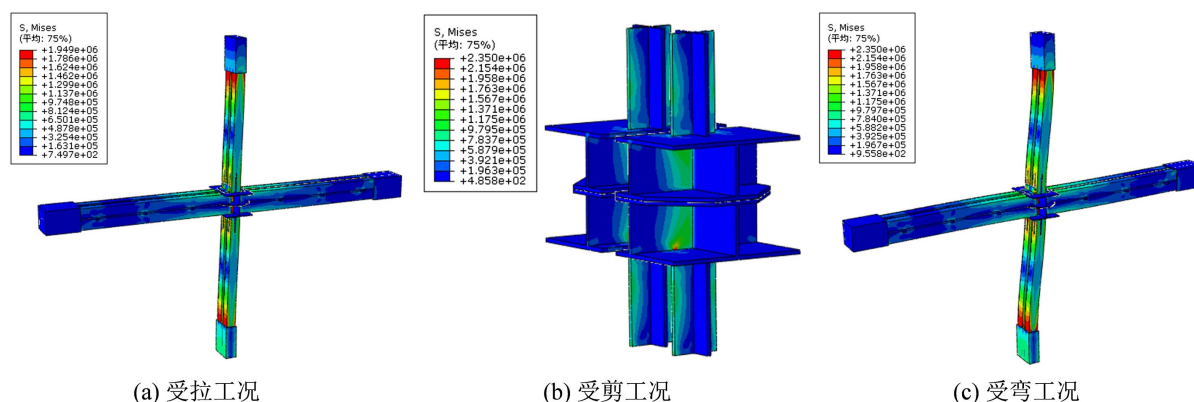


Figure 7. Finite element verification results under various working conditions  
图 7. 各工况下的有限元验证结果

1) 在受拉工况下，应力分布特征表明，节点内部的拉力主要沿方钢管、角钢至中心核心区域传递，此传力路径与理论分析中假设的三种潜在破坏构件完全对应。数值模拟与理论计算所得的破坏模式一致，均表现为方钢管与中心节点交接处的屈服失效，且极限承载力数值差异极小。然而，数值模拟结果普遍略高于理论值，其内在原因在于：有限元模型常将焊缝处理为理想的“Tie(绑定)”约束，默认界面具有绝对的连续性与高强度；但真实试验中的焊缝不可避免地包含微小气孔、咬边及夹渣等初始缺陷，这些物理缺陷客观上会导致节点实际承载力的下降。

2) 在受剪工况下, 数值模拟的应力分布特征表明, 节点核心区的水平剪力几乎全部由内置中心节点承担与传递。这一主导性的传力路径, 与理论分析中预测的破坏模式完全一致。此外, 数值模拟与理论推导得出的受剪极限破坏荷载吻合度极高, 两者差异极小。与受拉工况易受焊缝微观缺陷影响不同, 节点在受剪时的承载力主要由抗剪键的几何截面与材料抗剪屈服强度决定。由于这种机械抗剪机制受加工缺陷的敏感度较低, 且有限元模型对结构纯剪切与局部承压状态的模拟精度较高, 因此两者的受剪承载力结果表现出了极好的一致性。

3) 在受弯工况下, 有限元数值模拟的应力分布特征表明, 弯矩作用诱发的极端应力主要集中于方钢管与中心节点相连的焊缝界面处。该失效现象与理论推导中预设的“焊缝受弯破坏”模式完全一致。同时, 数值模拟与理论计算所得的极限破坏荷载高度吻合, 数值差异微乎其微。这不仅印证了理论假设的合理性, 也进一步表明: 在承受纯弯矩或压弯作用时, 方钢管与连接件之间的全焊缝界面主导了节点的极限状态; 有限元模型能够高保真地还原焊缝群的受弯力学行为, 从而实现了数值解与理论解析解的高度统一。

**Table 2.** Comparison between theoretical calculation and FEM simulation

**表 2.** 理论计算与有限元结果对比

工况	模型理论值 $Q$	有限元模拟值 $W/\text{kN}$	$(Q-W)/W\%$
受拉工况	330.24 kN	351.47	-6.04%
受剪工况	85.43 kN	87.41	-2.26%
受弯工况	11.90 kN·m	12.58	-5.41%

## 5. 工程应用讨论

### 5.1. 加工精度与装配控制

本文节点依赖“十字型导向槽”与“工字型卡槽”实现吊装过程中的快速定位与自动对中, 因此, 其连接件的加工精度宜高于一般非定位型节点。结合该节点的构造特点, 建议连接件采用工厂数控下料并配合专用胎架进行组装制作, 重点控制导向槽中心线位置、槽口宽度与深度, 以及主要受力面的垂直度和平面度等关键几何参数。对于导向槽与卡槽等装配敏感部位, 宜遵循“小间隙、可插入、配合稳定”的控制原则, 以兼顾吊装导向能力与现场装配顺畅性, 避免因配合间隙过大引起初始偏心。

综合考虑该类节点的安装需求与加工实现条件, 本文建议将连接件关键定位尺寸偏差控制在 $\pm 1.0\text{ mm}$ 以内, 槽口宽度与深度偏差控制在 $\pm 0.5\sim 1.0\text{ mm}$ 范围内; 梁、柱端部切口的端面倾斜和局部不平度宜控制在 $1.5\text{ mm}$ 以内, 构件装配后的轴线错边量宜不大于 $2.0\text{ mm}$ 。上述指标可作为该类新型定位装配节点的推荐加工与安装控制要求, 实际工程中可结合构件尺寸、加工设备能力及试拼装结果进行适当调整。对于承受全焊透对接焊及主要受力角焊缝的连接部位, 应保证装配质量满足焊接工艺要求; 当局部间隙超出允许范围时, 应在焊前通过修磨、补板或重新校正等方式处理, 而不宜直接依赖施焊填充消除装配误差。

### 5.2. 现场焊接与质量控制

由于该节点采用外部全焊接连接方式, 其实际工程性能在较大程度上取决于现场焊接工艺及施工质量控制水平。为降低焊接残余应力和局部变形对节点装配精度及受力性能的不利影响, 建议在正式施焊前完成节点复测与临时固定, 重点检查梁柱对中状态、连接件嵌合情况及主要焊缝部位的装配间隙; 在此基础上, 按照“先定位、后对称, 先关键受力部位、后一般连接部位”的原则组织施焊, 以保证节点

在焊接过程中的构造稳定性和传力连续性。

从工艺实施角度看,宜采用与母材性能相匹配的焊接方法完成现场连接,对接部位应按设计要求进行坡口处理和焊前清理。对于全焊透对接焊缝,应重点保证根部焊透质量;对于主要角焊缝,应重点控制焊脚尺寸、焊缝连续性及转角过渡质量。施焊过程中宜采用分区、分层、对称的施工方式,必要时可结合构件刚度、板厚及环境条件采取预热、分段退焊或多道多层焊等措施,以减小热输入集中引起的局部收缩变形。

在质量控制方面,应将焊前检查、焊接过程控制与焊后检验贯穿于节点施工全过程。焊前重点检查母材状态、坡口尺寸、装配偏差及焊材匹配性;焊中应控制焊接参数、层间温度及施焊顺序;焊后则应结合焊缝重要程度与节点受力特点开展针对性检验。对于全焊透对接焊缝及主要受力焊缝,宜采用超声检测或射线检测进行内部质量检验;对表面裂纹敏感部位及应力集中区域,可辅以磁粉检测或渗透检测进行复核。通过建立“装配精度控制-焊接过程控制-无损检测复核”的质量保证路径,可为该类节点的工程应用提供必要的施工质量支撑。

### 5.3. 与传统连接形式的比较

与穿心螺栓连接、端板连接等传统形式相比,本文提出的节点在构造方式、施工组织及综合应用效果方面具有一定差异[11]。穿心螺栓连接施工方法较为成熟,现场安装相对便捷,但通常需要在闭口截面柱壁开孔或预留操作空间,易对节点域截面完整性产生不利影响;端板连接设计方法较为成熟,但对端部加工精度和安装精度要求较高,且节点外伸构造可能对模块拼装空间形成一定限制[12]。相比之下,本文节点通过专用连接件实现吊装导向、限位与自动对中,并通过纯外部焊接完成最终连接,可在避免构件开孔削弱的同时保持闭口截面受力的连续性与完整性。

在制造成本与安装效率方面,该节点需增加专用连接件的制作工序,并对连接件定位精度提出较高要求,因此其前期加工成本可能高于常规简单连接形式;但其装配过程定位明确、现场校正工作量相对较小,能够在一定程度上缩短吊装对位时间,提高安装效率,尤其适用于标准化程度较高、重复性较强的模块化建造场景。从综合经济性看,当工厂预制精度能够得到保证、现场装配节奏较为紧凑时,该节点在施工效率、截面完整性及节点整体刚度方面具有较好的应用潜力;而传统螺栓连接或端板连接则在设计体系成熟、施工经验丰富的常规项目中仍具有较强适用性。

## 6. 结论

本文针对传统模块化钢结构节点在闭口截面施焊与螺栓连接中的局限,提出了一种集成导向槽与卡槽的新型全焊接装配式方钢管节点。通过理论推导与 ABAQUS 有限元数值模拟,对该节点在不同工况下的受力性能进行了系统分析,得出以下主要结论:

1) 构造优势:提出的专用连接件通过“十字型导向槽”与“工字型卡槽”实现了模块吊装的精准限位与自动对中,且全焊接纯“外部化作业”避免了柱壁开孔对截面强度的削弱,提升了施工效率与节点整体刚度。

2) 理论模型可靠:基于弹性力学与屈服破坏准则建立的受拉、受剪及受弯理论计算模型,能够准确预测节点的失效模式与极限承载力。

3) 有限元高度吻合:数值模拟结果与理论计算结果吻合度极高。在受拉、受剪和受弯工况下,两者的承载力误差分别为-6.04%、-2.26%和-5.41%。微小误差主要源于有限元模型对焊缝理想化处理与实际微观缺陷之间的差异,表明所提理论公式具有充分的工程安全裕度,可为该类新型节点的工程推广提供可靠的设计参考。

4) 工程应用方面: 该节点在加工制造阶段对连接件定位精度和焊接质量控制提出了较高要求, 但其在装配效率、截面完整性及节点整体受力连续性方面具有一定优势。对于标准化程度较高、工厂预制能力较强的模块化钢结构体系, 该节点具有较好的工程推广潜力。

## 参考文献

- [1] 国务院办公厅关于大力发展装配式建筑的指导意见[EB/OL]. [https://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content\\_5120699.htm](https://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5120699.htm), 2026-05-25.
- [2] 丁阳, 邓恩峰, 宗亮, 等. 模块化钢结构建筑连接节点研究进展[J]. 建筑结构学报, 2018, 40(3): 33-40.
- [3] 倪真, 马靖, 刘学春, 等. 模块化装配式钢框架抗震性能研究[J]. 工业建筑, 2014, 44(8): 19-22.
- [4] 陈红磊, 陈琛, 李国强. 模块化建筑钢结构模块间新型节点及其承载性能[J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24(4): 15-23.
- [5] Chen, Z., Wang, J., Liu, J. and Khan, K. (2021) Seismic Behavior and Moment Transfer Capacity of an Innovative Self-Locking Inter-Module Connection for Modular Steel Building. *Engineering Structures*, **245**, Article ID: 112978. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112978>
- [6] Chen, Z., Liu, J. and Yu, Y. (2017) Experimental Study on Interior Connections in Modular Steel Buildings. *Engineering Structures*, **147**, 625-638. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.06.002>
- [7] 苏明周, 王清霖, 戚宏宇. 十字板-端板式模块化钢结构连接节点抗震性能试验研究[J]. 施工技术, 2020, 49(5): 85-90.
- [8] 金波, 罗斌黎, 舒兴平, 等. 榫卯连接组合框架节点受力性能试验及理论分析[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(2): 173-183.
- [9] 王涛. 端板连接弯矩—转角关系及半刚性钢框架抗震性能的研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [10] 石永久, 施刚, 王元清, 等. 钢结构半刚性端板连接弯矩-转角曲线简化计算方法[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 19-23.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50017-2017 钢结构设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [12] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.