

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.017

钢结构模块单元间卡件-螺栓式连接节点力学性能分析

王俊轶¹, 陈志华¹, 郭宁², 刘洋¹, 吕太辉³, 韩树勋³

(1. 天津大学建筑工程学院; 2. 河北浩石集成房屋有限公司; 3. 中铁十六局电气化工程有限公司)

摘要: 为提高钢结构模块单元连接效率,提出了块单元间的卡件-螺栓式连接节点,通过建立该节点的有限元模型分析了卡件-螺栓式连接节点构件静力性能、抗震性能及角件与模块钢梁焊接连接面的侧壁厚度(角件侧壁厚)、定位卡件壁厚、模块钢梁壁厚 3 个参数对节点力学性能的影响规律。结果表明:卡件-螺栓式连接节点构造简单合理,传力机理明确,抗震性能良好;增加模块钢梁壁厚可以在一定程度上提升节点的最大承载力以及整体刚度与耗能能力;增加定位卡件壁厚可以提高节点的初始刚度但会降低节点的耗能能力,且定位卡件壁厚过大会降低节点的极限承载力;增大角件侧壁厚可以提升节点的承载力,并较大程度上提升节点的耗能能力,但会削弱节点的刚度。

关键词: 卡件-螺栓式连接节点;抗震性能;静力性能;有限元分析

Analysis of mechanical performance of clamp-bolted connection joints between steel structure module units

Wang Junyi¹, Chen Zhihua¹, Guo Ning², Liu Yang¹, Lyu Taihui³, Han Shuxun³

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University; 2. Hebei Haoshi Integrated Housing Co., Ltd.; 3. China Railway 16th Bureau Electrification Engineering Co., Ltd.)

Abstract: To improve the connection efficiency of steel structure module units, a clamp-bolted connection joint between block units was proposed. A finite element model of the joint was established to analyze the static performance, seismic performance, and the influence laws of three parameters (side wall thickness of the welded connection surface between the corner fitting and the module steel beam (side wall thickness of corner fitting), wall thickness of the positioning clamp, and wall thickness of the module steel beam) on the mechanical performance of the joint. The results show that the clamp-bolted connection joint features a simple and reasonable structure, a clear load-transfer mechanism, and favorable seismic performance; increasing the wall thickness of the module steel beam can improve the maximum bearing capacity, as well as the overall stiffness and energy dissipation capacity of the joint to a certain extent; increasing the wall thickness of the positioning clamp can improve the initial stiffness of the joint but reduces its energy dissipation capacity, and excessive wall thickness of the positioning clamp reduces the ultimate bearing capacity of the joint; increasing the side wall thickness of the corner fitting can improve the bearing capacity of the joint, and greatly enhances its energy dissipation capacity, but weakens the stiffness of the joint.

Key words: clamp-bolted connection joint; seismic performance; static performance; finite element analysis

连接节点是装配式钢结构建筑结构体系中的重要部位,在结构中起到承受并传递轴力、弯矩和剪力的作用,与传统钢结构建筑相比,钢结构模块建筑的连接节点具有“多梁多柱”的特性^[1],在装配式钢结构体系中,连接节点的连接方式和性能会直接影响结构的可靠性和安全性以及施工的效率 and 结构的抗震能力。为了进一步促进装配式钢结构的应用,有必要对钢结构连接节点的力学性能进行研究。

陈志华等^[2]提出了一种由钢筋与 CGM(高强无收缩水泥)灌浆料组成的灌浆插筋式模块钢结构连接节点形式,并采用试验和理论分析方法对节点柱的轴压性能、轴拉性能和抗弯性能进行了深入研究。张忠豪等^[3]针对钢框架模块间连接节点试件的抗震性能开展了拟静力低周往复加载试验,研究了节点试件的滞回曲线、骨架曲线、延性、耗能、刚度退化、层间位移角和转动刚度等抗震性能指标,并对影响节点抗震性能的参

基金项目: 国家自然科学基金项目(52108166);天津市自然科学基金项目(24JCQNJC01600)

作者简介: 王俊轶(2002—),男,硕士研究生,主要从事模块钢结构研究。E-mail:1054920633@qq.com

通信作者: 刘洋(1990—),男,副研究员,博士,主要从事模块钢结构研究。E-mail:yangliu_0516@tju.edu.cn

数进行了分析。Chen 等^[4]提出了一种箱式模块间的“梁梁”连接节点,通过试验和参数分析研究了模块框架的压缩行为,结果表明梁柱连接的相对刚度主要影响横向平移。王小盾等^[5]提出了一种角件旋转式模块单元间连接节点,并通过静力拉伸试验研究了角件和旋转件在节点受拉时的受力特性以及下角件顶板厚度对节点抗拉承载力的影响,结果表明,下角件顶板厚度是影响节点承载力的重要因素,增加下角件顶板厚度有利于提高节点屈服承载力。Deng 等^[6]提出了一种箱式模块间的铸头-十字板连接节点,并提出了考虑单元间连接约束的柱屈曲长度理论模型,开发了三维非线性有限元模型来模拟铸头-十字板连接的模块柱压缩行为,研究结果表明,榫头对极限载荷和相应的钢柱端部缩短量有重要的影响,其中榫头的长度是最重要的因素。以上模块连接节点均对施工有较高要求,难以在实际工程中实现快速精准的安装。

在保证节点整体刚度的同时提高施工精度,并在施工时能够快速装配,本文中提出了一种模块单元间的卡件-螺栓式连接节点,并通过 Abaqus 有限元软件模拟分析了该节点的静力性能与抗震性能,以期工程应用提供技术参考。

1 卡件-螺栓式连接节点构造

卡件-螺栓式连接节点主要由模块立柱、模块钢梁、连接板、定位卡件、垂直锁件、水平锁件、硬质箱角垫块、角件、盖板、抗剪件等部件组成,如图 1 所示。模块钢梁为长 250 mm、宽 150 mm、厚度 8 mm 的方钢管,模块立柱为长 200 mm、宽 200 mm、厚度 8 mm 的方钢管,材质均为 Q345B 型钢材,二者为结构的主要受力构件。角件材质也是 Q345B 型钢材,底部的圆孔用于安装垂直锁件,侧面的圆孔用于连接相邻模块。连接板上的定位孔和角件以及定位卡件配合用于安装时的定位。框架柱与框架梁分别垂直焊接在角件上。工厂加工阶段,框架柱与框架梁焊接在角件上。施工时,先安装定位下部 2 个模块。同层相邻 2 个模块间预留一定的宽度缝隙,通过螺栓连接下部 2 个模块,然后依次吊装上部 4 个模块,通过梁上的定位卡件与定位孔进行定位,并通过高强螺栓连接相邻模块角件。

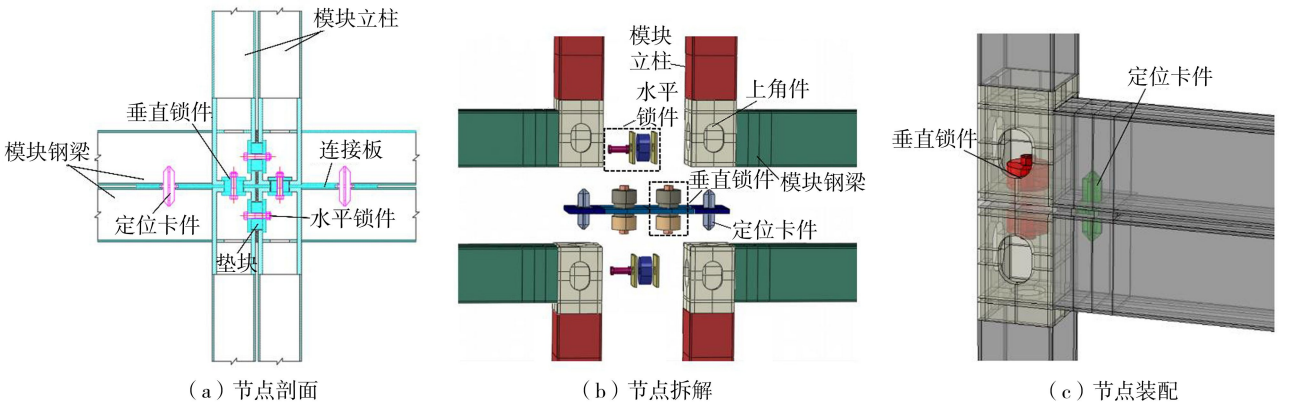


图 1 卡件-螺栓式连接节点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of clamp-bolted connection joint

卡件-螺栓式连接节点在传统的螺栓连接节点基础上增设定位卡件、连接板等部件,施工精度与施工速度都有一定的提升。传统螺栓连接在现场施工过程中依赖人工测量,需反复调整,施工精度受工人经验、环境因素影响大,多模块拼接时定位误差逐级累积容易导致最终接口错位,需要后期修正,且在安装过程中定位过程耗时占比较高,整体施工进度受限于单节点调整时间。卡件-螺栓式连接节点吊装时可通过定位卡件辅助进行预定位,确保螺栓可以高效穿过螺栓孔,并且卡件-螺栓式节点允许上层模块在下层初步固定后进行同步调整,有并行施工的可能性。

卡件-螺栓式连接节点已应用于河北浩石模块化办公楼工程。该工程位于天津市宁河区,建筑面积 3 645.23 m²,高 18.75 m,地上 5 层(局部 4 层),无地下室。工程门厅部分结构体系为钢框架结构体系,其余部分为钢模块单元,模块单元共计 68 个,模块单元的边节点和角节点均采用卡件-螺栓式连接节点。卡件-螺栓式连接节点传力路径明确,连接高效可靠,一定程度上提高了模块的装配效率。

2 有限元模型建立

本文采用通用有限元软件 Abaqus(2022)对卡件-螺栓式连接节点进行静力及低周往复荷载下的抗震性能分析。

2.1 参数设计

如表 1 所示,共设计 7 个有限元模型试件,其中试件 S-01 的角件与模块钢梁焊接连接面的侧壁厚度(以下简称“角件侧壁厚”)为 12 mm,定位卡件壁厚为 8 mm,模块钢梁壁厚为 8 mm,梁长为 2 521 mm,柱长为 1 750 mm,其他模型试件在试件 S-01 的基础上分别增大或减小角件侧壁厚、定位卡件壁厚和模块钢梁壁厚。

2.2 模型单元选取及网格划分

本文采用实体 C3D8I 单元建立卡件-螺栓式连接节点的有限元模型,在节点有限元模型建立过程中,不同部件上布置了不同密度的网格:离梁柱端焊接位置 16 mm 范围内,网格尺寸加密为 10 mm;在远离核心区域的部分,梁柱部件的网格则相对稀疏,网格尺寸为 30 mm,如图 2 所示。

表 1 试件参数

Table 1 Specimen parameters

编号	角件侧壁厚/mm	定位卡件壁厚/mm	模块钢梁壁厚/mm
S-01	12	8	8
S-02	20	8	8
S-03	16	8	8
S-04	12	10	8
S-05	12	6	8
S-06	12	8	10
S-07	12	8	12

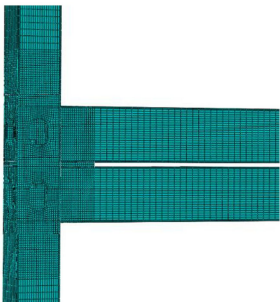


图 2 有限元模型网格划分
Fig. 2 Finite element model meshing

2.3 本构关系

有限元模型模拟分析中采用的钢材型号为 Q345B,钢材采用二折线本构模型,杨氏模量为 206 GPa,泊松比取 0.3,密度为 7 800 kg/m³。高强螺栓应力-应变关系采用二折线的理想弹塑性模型来模拟,材料的具体属性指标如下:杨氏模量为 206 GPa,泊松比取 0.3,屈服强度为 900 GPa,极限强度为 1 000 GPa。

2.4 接触设置

部件之间的接触方式可以分为两种,一种是焊接连接,如模块立柱与角件之间的焊接和模块钢梁与角件之间的焊接,两者接触的地方不能产生相对位移;另一种是摩擦接触,如模块钢梁与定位板间的接触,部件之间存在摩擦力但是可以发生相对位移。在有限元分析中,部件之间的焊接接触采用绑定(Tie)方式进行模拟;在模拟部件之间的摩擦接触时,切向摩擦通过 Abaqus 中的罚(Penalty)接触模拟,而法向接触则采用硬接触(Hard Contact)来模拟^[7-11]。本文模型中所有摩擦接触均为钢构件之间的摩擦,考虑到钢材表面进行了除锈处理,摩擦系数设为 0.3。

2.5 边界条件

在设定边界条件之前,需要在梁端和柱端的形心位置处建立参考点,并在这些位置施加耦合约束。根据滞回试验的要求,柱底和柱顶的约束有所不同^[12-15]。对于柱底,需要约束 x 、 y 、 z 3 个方向上的位移和 x 、 z 方向上的转角,从而限制柱子只能绕 y 轴旋转;而对于柱顶,则需要约束 x 、 y 方向上的位移和 x 、 z 方向上的转角,以确保柱子只能在 z 轴方向移动和绕 y 轴旋转,如图 3 所示。

2.6 荷载施加

本文节点有限元模型施加的荷载可分为高强螺栓的预紧力和节点模块钢梁梁端的往复荷载两组。节点模块钢梁梁端单调与往复加载采用位移控制,在模块钢梁梁端的耦合点处施加 200 mm 单调荷载,进行初步的模拟,进而通过计算得到的荷载-位移曲线,在曲线出现拐点处得到节点的屈服承载力和屈服位移,为后续施加往复荷载时采用的屈服荷载提供参考。往复荷载加载制度如图 4 所示。

2.7 模型验证

为验证构建的有限元模型的准确性,选用 Wang 等^[16]的全尺寸 T 字形节点试件的抗弯性能试验数据进

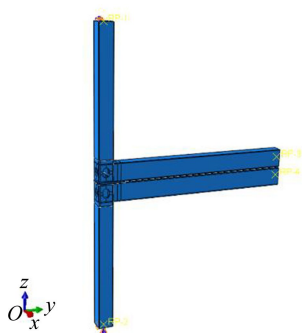


图 3 约束条件设置

Fig. 3 Setting of constraint conditions

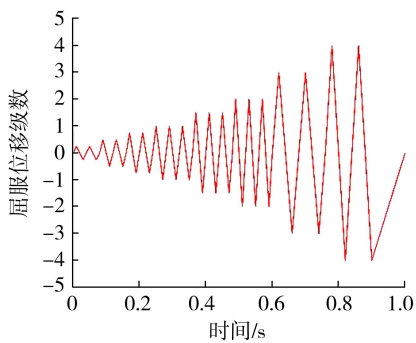


图 4 往复加载制度

Fig. 4 Cyclic loading regime

行验证,试件模块柱为高度 1 400 mm、截面为 200 mm×200 mm×8 mm 的方钢管。地板梁和天花板梁长度均为 1 500 mm,分别为高 200 mm、宽 200 mm、腹板厚 8 mm、翼缘厚 12 mm 的 H 型钢和高 194 mm、宽 150 mm、腹板厚 6 mm、翼缘厚 9 mm 的 H 型钢。上、下模块柱间通过尺寸为 424 mm×212 mm×212 mm 的盒形件进行连接,单元内连接为焊接。T 字形节点试件中的螺栓采用 10.9 级 M24 高强螺栓,在工厂进行连接时先利用扭矩扳手施加 225 kN 的预紧力。参照 Wang 等^[16]的试验建立了有限元模型,有限元模拟的破坏状态应力云图如图 5 所示,试验破坏形态与有限元模拟破坏形态一致,均产生“V”字形变形。节点柱端沿 y 轴负方向的荷载-位移曲线如图 6 所示,试验与有限元模拟的荷载-位移曲线整体趋势吻合较好。试验测得节点初始刚度为 1.66 kN/mm,有限元模拟结果为 1.68 kN/mm,误差约为 1.2%,表明有限元模拟方法较为可靠。

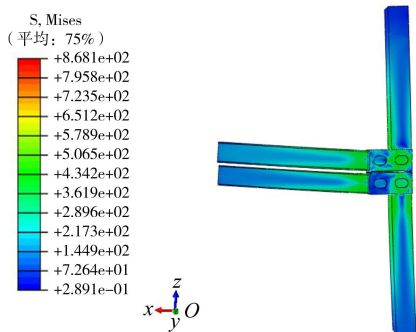


图 5 有限元模拟的破坏状态应力云图(单位:MPa)

Fig. 5 Stress contour of failure state in finite element simulation (unit: MPa)

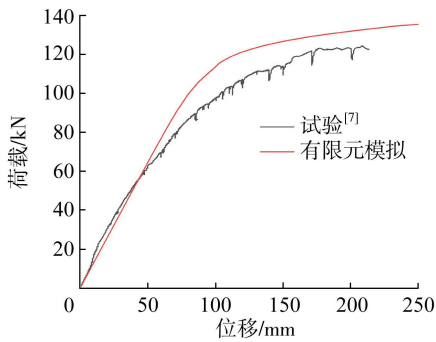


图 6 荷载-位移曲线对比

Fig. 6 Comparison of load-displacement curves

3 结果与分析

3.1 节点抗弯性能

3.1.1 破坏模式

从有限元模拟得到的应力云图(图 7)可以看出,角件、定位板和定位卡件应力较大,有明显的剪切变形。试件最大应力出现在定位卡件与模块钢梁接触面处以及模块钢梁与角件底部连接处,表明定位卡件除了在施工过程中可以起到定位作用外,还可以在节点模块钢梁承受荷载时起到抗剪的效果。定位板在荷载作用下产生弯曲变形,一定程度上起到了提高节点极限承载力和刚度的作用,在极限承载力的作用下模块钢梁与角件的连接区域形成塑性铰时连接板并未出现屈服现象。角件与模块钢梁连接端的侧壁产生了鼓曲变形,模块钢梁底板由于弯曲变形与定位板间出现了缝隙。

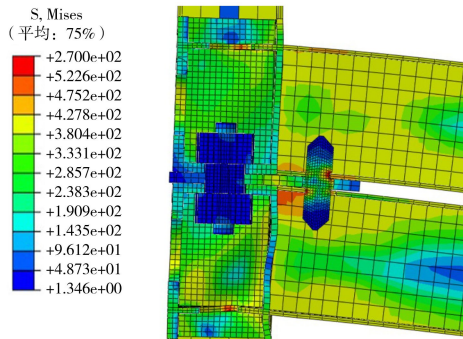


图 7 单调加载的剖面应力云图(单位:MPa)

Fig. 7 Sectional stress contour under monotonic loading (unit: MPa)

3.1.2 荷载-位移曲线

卡件-螺栓式连接节点单调加载的荷载-位移曲线如图 8 所示。模型的初始刚度、屈服荷载和屈服位移的大小通过最远点法^[16-17]来获得,即在构件荷载-位移曲线上,以原点与峰值点连线的平行线与力-变形曲线的切点为屈服点^[16-17]。由图 8 可以看出,节点模型的弹性极限位移为 48 mm,屈服位移为 67 mm。过原点作节点荷载-位移曲线的切线,其斜率即为节点的初始刚度(1.011 kN/mm)。

通过对 7 个试件进行单调加载有限元分析,得到在不同参数条件下单调加载的卡件-螺栓式连接节点荷载-位移曲线如图 9 所示。试件 S01~S07 的刚度分别为 1.011、1.032、0.932、1.000、0.923、1.112、1.080 kN/mm,极限承载力分别为 75.5、81.3、85.2、69.1、82.0、81.4、81.3 kN。由图 9(a)可知,随着角件侧壁厚由 12 mm 增加到 20 mm,节点的刚度稍有下降,极限承载力由 75.5 kN 增大到 85.3 kN,增大了 12.98%,角件侧壁厚增加可以提高节点的极限承载力但会削弱节点的刚度。由图 9(b)可知,当定位卡件壁厚从 6 mm 增加到 10 mm 时,节点的极限承载力由 82.0 kN 降低到 69.1 kN,下降了 15.73%,因此在进行节点设计时不应将定位卡件壁厚设计得过大。由图 9(c)可知,随着模块钢梁壁厚从 8 mm 增加到 12 mm,节点的刚度有一定的提升,极限承载力从 75.5 kN 增大到 81.4 kN,增大了 7.81%,因此节点设计时,在保证经济性以及“强柱弱梁”条件的情况下,可以增加模块钢梁壁厚进而增加节点的承载力。

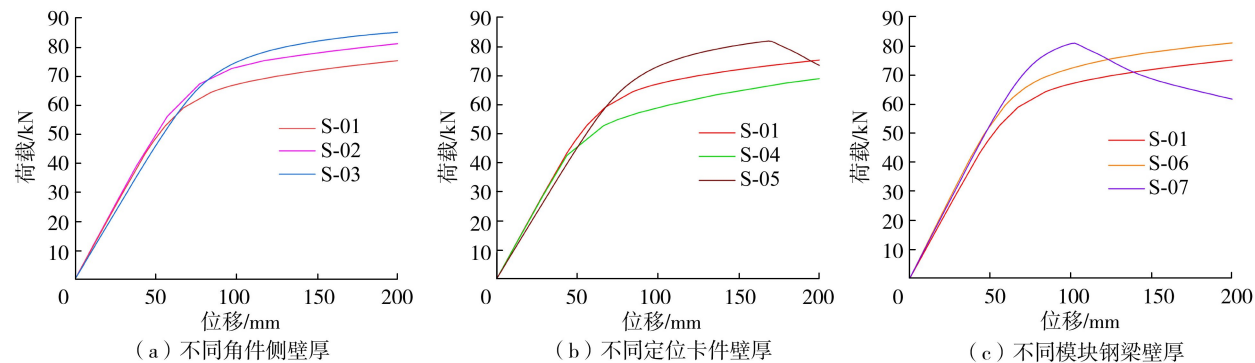


图 9 不同参数条件下单调加载的荷载-位移曲线对比

Fig. 9 Comparison of load-displacement curves under monotonic loading with different parameters

3.2 节点抗震性能

3.2.1 滞回曲线

卡件-螺栓式连接节点的荷载-位移滞回曲线如图 10 所示,加载开始时,由于位移较小,节点变形呈弹性状态,滞回曲线几乎重合,并没有产生由于塑性变形而形成的滞回环。随着荷载位移的持续增大,节点开始产生塑性变形,滞回曲线形成的滞回环包围的面积进一步增大,节点的耗能能力越来越强。节点的滞回曲线比较稳定,基本为梭形,捏拢效应较小,表现出良好的延性与变形能力。

3.2.2 骨架曲线

卡件-螺栓式连接节点的力学性能指标如表 2 所示,7 个试件均满足 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》的要求。卡件-螺栓式连接节点骨架曲线如图 11 所示,左右两端对称性良好,梁端位移在 100 mm 以内时,节点整体大致处于弹性状态,在梁端位移 100~200 mm 之间节点构件产生较大的弹塑性变形,延性系数介于 1.92~1.16 之间,平均值为 1.47。

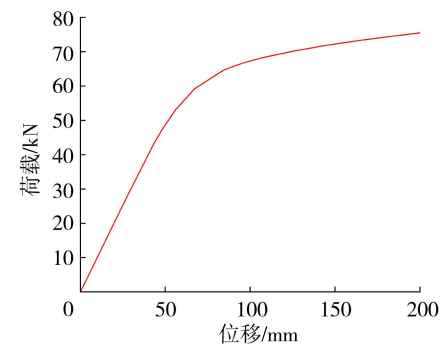


图 8 单调加载的荷载-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curves under monotonic loading

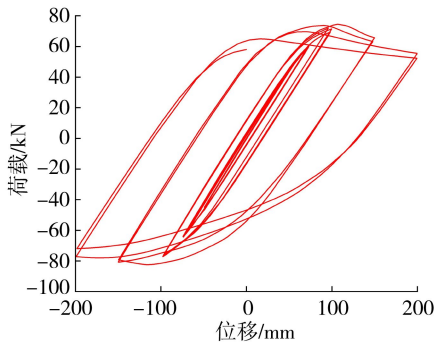


图 10 荷载-位移滞回曲线

Fig. 10 Load-displacement hysteretic curves

表 2 不同试件力学性能指标

Table 2 Mechanical performance indexes of different specimens

试件编号	初始刚度/(kN/mm)	正向峰值荷载/kN	负向峰值荷载/kN	平均峰值荷载/kN	承载力变化/%	延性系数
S-01	0.912	74.540	82.450	78.490		1.92
S-02	1.014	81.317	87.579	84.448	7.60	1.18
S-03	0.913	82.120	78.990	80.560	2.60	1.62
S-04	1.020	77.529	79.829	78.679	0.24	1.16
S-05	0.902	75.090	82.190	78.640	0.19	1.57
S-06	1.126	85.990	82.167	84.059	7.09	1.22
S-07	0.948	78.830	78.780	78.810	0.40	1.65

3.2.3 刚度退化曲线

卡件-螺栓式连接节点的刚度退化曲线对比如图 12 所示。除试件 S-06 外,其他试件的刚度退化趋势大致相同,在荷载施加的过程中,刚度退化曲线大致经历了曲线呈平直状态的刚度退化弹性阶段和曲线呈下降状态的刚度退化阶段。提升定位卡件壁厚会使得节点构件的初始刚度稍有提升,若继续增大则对初始刚度影响不大。节点试件整体刚度在一定范围内随着模块钢梁壁厚的增大而增大,而若继续增大模块钢梁壁厚则会导致模块钢柱在加载过程中先产生破坏,因此对节点的刚度提升不大。角件侧壁厚对节点的承载力与刚度具有一定的影响,在进行节点设计时,可以适当增加角件侧壁厚进而增加节点的承载力和刚度。

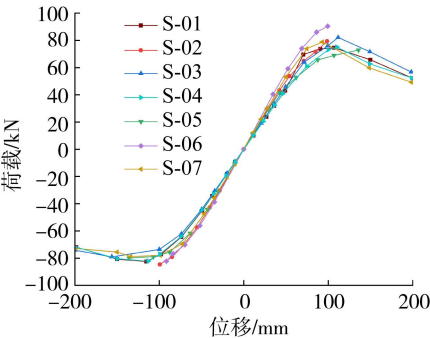


图 11 不同试件骨架曲线对比

Fig. 11 Comparison of skeleton curves of different specimens

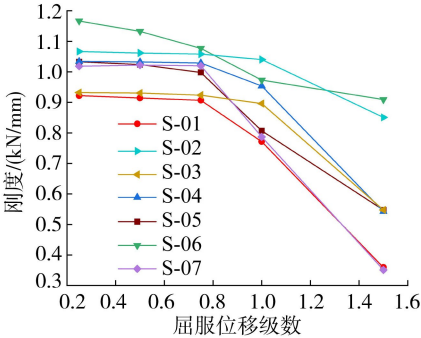


图 12 不同试件刚度退化曲线对比

Fig. 12 Comparison of stiffness degradation curves of different specimens

3.2.4 耗能能力

试件 S01~S07 的等效黏滞阻尼系数分别为 0.272、0.092、0.315、0.114、0.358、0.092、0.388,可以看出试件 S-01 与试件 S-03 的等效黏滞阻尼系数远大于试件 S-02,说明角件侧壁厚增大会在一定程度上提高节点的耗能能力,但持续增大后则会使得耗能能力降低。试件 S-01 与试件 S-05 的等效黏滞阻尼系数均远大于试件 S-04,说明加大定位卡件壁厚会降低节点的耗能能力。试件 S-07 的等效黏滞阻尼系数较试件 S-01 高出了 42.65%,说明提高模块钢梁壁厚可以使得节点的耗能能力有较大提升。

4 结 论

- a. 增加模块钢梁壁厚可以在一定程度上提升卡件-螺栓式连接节点的最大承载力以及整体刚度与耗能能力。
- b. 增加定位卡件壁厚可以提高卡件-螺栓式连接节点的初始刚度但会降低节点的耗能能力,且定位卡件壁厚过大会降低节点的极限承载力。
- c. 增大角件侧壁厚可以提升卡件-螺栓式连接节点的承载力,并较大程度上提升节点的耗能能力,但会削弱节点的刚度。

参考文献:

[1] 刘洋. 角件旋转式节点连接的柱承重型钢模块结构抗震性能研究[D]. 天津:天津大学,2021.
[2] 陈志华,孟凡贵,刘红波,等. 灌浆插筋式模块钢结构连接节点力学性能试验研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技

术版),2024,57(3):311-320. (Chen Zhihua, Meng Fangui, Liu Hongbo, et al. Experimental research on mechanical properties of grout-reinforced connections in modular steel structures[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2024, 57(3): 311-320. (in Chinese))

[3] 张忠豪,王燕,安琦,等. 模块化钢框架模块间内套筒连接节点抗震性能试验研究[J]. 建筑钢结构进展,2024,26(5):1-11. (Zhang Zhonghao, Wang Yan, An Qi, et al. Seismic performance test on inner sleeve splicing joints between modules of modular steel frame[J]. Progress in Steel Building Structures, 2024, 26(5): 1-11. (in Chinese))

[4] Chen Zhihua, Liu Jiadi, Yu Yujie. Experimental study on interior connections in modular steel buildings [J]. Engineering Structures, 2017, 147: 625-638.

[5] 王小盾,丛子怡,刘佳迪. 角件旋转式模块单元连接节点抗拉性能研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(13): 93-101. (Wang Xiaodun, Cong Ziyi, Liu Jiadi. Study on the tensile behavior of rotary inter-module connection joint[J]. Building Structure, 2021, 51(13): 93-101. (in Chinese))

[6] Deng Enfeng, Yan Jiabao, Ding Yang, et al. Analytical and numerical studies on steel columns with novel connections in modular construction[J]. International Journal of Steel Structure, 2017, 17(4): 1613-1626.

[7] 韩弘烨. 低多层模块化钢结构全螺栓连接节点力学性能研究[D]. 天津:天津大学, 2020.

[8] 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, 2019, 40(3): 33-40. (Ding Yang, Deng Enfeng, Zong Liang, et al. State-of-the-art on connection in modular steel construction[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(3): 33-40. (in Chinese))

[9] 李豫明. 模块化钢结构单边螺栓连接节点力学性能研究[D]. 天津:天津大学, 2018.

[10] 邓恩峰,宗亮,丁阳. 集成模块钢结构螺栓-封板节点有限元分析[C]//中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会. 中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会第16届(ISSF-2018)学术交流会暨教学研讨会论文集. 北京:中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会, 2018: 470-476.

[11] 邓恩峰,宗亮,丁阳. 钢结构集成模块建筑新型节点力学性能研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2018, 51(7): 702-710. (Deng Enfeng, Zong Liang, Ding Yang. Mechanical properties of innovative connection for integrated modular steel construction[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2018, 51(7): 702-710. (in Chinese))

[12] 王腾基,苏雷,周林禄,等. 地震与波浪联合作用下重力式沉箱码头动力响应分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(2): 98-106. (Wang Tengji, Su Lei, Zhou Linlu, et al. Dynamic response analysis of gravity caisson wharf under the joint action of earthquake and wave[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(2): 98-106. (in Chinese))

[13] 韦芳芳,林澳庆,赵有正,等. 基于机器学习的简支梁式渡槽结构地震响应与易损性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(3): 101-108. (Wei Fangfang, Lin Aoqing, Zhao Youzheng, et al. Seismic response and vulnerability analysis of simply supported beam aqueduct structure based on machine learning method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(3): 101-108. (in Chinese))

[14] 方有珍,赵帅领,徐飞,等. BRS板部分自复位连接新型卷边 PEC 柱-钢梁组合框架边节点抗震机理试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(4): 309-316. (Fang Youzhen, Zhao Shuailing, Xu Fei, et al. Experimental study on seismic mechanism of new PEC column-steel beam joint with partial self-centering BRS connection[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(4): 309-316. (in Chinese))

[15] 夏逸鸣,吴胜兴,曲卓杰. 钢框架实际作用与其等效节点荷载的比较分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(4): 432-435. (Xia Yiming, Wu Shengxing, Qu Zhuojie. Comparative analysis of steel frames under real and equivalent nodal loads [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2003, 31(4): 432-435. (in Chinese))

[16] Wang Xiaodun, Lu Guannan, Liu Yang, et al. Lateral stiffness of modular steel joint with semi-rigid bolted intra-module connection [J]. Journal of Building Engineering, 2024, 97: 110668.

[17] 冯鹏,强翰霖,叶列平. 材料、构件、结构的“屈服点”定义与讨论[J]. 工程力学, 2017, 34(3): 36-46. (Feng Peng, Qiang Hanlin, Ye Lieping. Discussion and definition on yield points of materials, members and structures[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(3): 36-46. (in Chinese))