

新型模块化钢框架模块间内套筒连接节点 力学性能研究

李铭瑜, 杨怡亭*, 王燕, 王梓旭
(青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266520)

摘要: 为实现模块化钢框架结构的高效装配, 对所提出的新型模块化钢框架模块间全螺栓装配式内套筒连接节点进行了有限元与理论分析。采用经验证的 ABAQUS 有限元模型, 分别对静力和拟静力作用下具有不同构造参数的新型模块间连接节点进行有限元参数分析, 研究了内套筒长度和厚度、连接板厚度以及模块柱间距等参数对新型节点承载能力的影响。结果表明: 新型模块间内套筒连接节点的承载力及抗震性能表现良好; 在梁影响域内, 增加内套筒长度可显著改善新型节点的受力性能。基于分析结果, 给出了新型节点的优化与设计建议, 并建立了适用于该新型节点的简化恢复力模型, 可为模块化钢框架结构的进一步推广与应用, 以及实现建筑工业化、产业化发展提供参考。

关键词: 模块化钢框架; 连接节点; 有限元分析; 力学性能; 恢复力模型

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)02-0091-13

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20230920001

Mechanical Properties of Inner Sleeve Connection Joint of New Modular Steel Frame

LI Mingyu, YANG Yiting*, WANG Yan, WANG Zixu

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

*Corresponding author: yiting123@qut.edu.cn

Abstract: In order to realize the efficient assembly of modular steel frame structures, finite element and theoretical analyses were conducted on the proposed new modular steel frame inter-module fully bolted assembled inner sleeve connection joints proposed by the group. Parametric analysis on the new inter-module connection joints with different structural parameters under static and quasi-static loading were conducted by using the validated ABAQUS finite element model. The effects of parameters such as the length and thickness of the inner sleeve, the thickness of the connecting plate and the spacing of the module columns on the bearing capacity of the new connection joints were investigated. The results show that the bearing capacity and seismic behavior of the new inter-module connection joints are good. In the affected domain of the beam, increasing the length of the inner sleeve can significantly improve the mechanical performance of the new connection joints. Based on the analysis results, this study gives suggestions for the optimization and design of the new connection joints, and establishes a simplified restoring force model suitable for the new connection joints, which provides a reference for the further popularization and application of modular steel frame structure to realize industrialization development.

Keywords: modular steel frame; connection joint; finite element analysis; mechanical property; restoring force model

收稿日期: 2023-09-20

基金项目: 国家自然科学基金(52078258)

作者简介:

李铭瑜(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事钢结构连接节点方面的研究。E-mail: lmingyu2023@163.com。

通信作者:

杨怡亭(1988—), 女, 博士, 副教授, 主要从事高性能结构钢材及其连接节点性能方面的研究。E-mail: yiting123@qut.edu.cn。

随着国家和社会对绿色环保的重视及“十四五”规划的发布,钢结构技术在建筑中得到了更为广泛的应用^[1]。其中,绿色环保的装配式建筑由于其轻量化的设计以及简易的装配环节,成为了建筑工业化、产业现代化发展的最重要标志^[2]。模块化建筑作为绿色装配式建筑的典型代表,具有受力性能好、工期短、工业化程度高以及环保等优点^[3],符合我国建筑全寿命周期可持续发展的理念。

模块化结构作为一种高度集成的建筑形式,由多个独立的钢结构箱型集成模块单元在施工现场组合而成,其连接节点具有“多柱多梁”的显著特征^[4]。为满足现场组装过程中安全可靠、便于施工等要求^[5],模块单元间连接作为模块化建筑的关键部分,成为了近年来研究的热点^[6]。ANNAN等^[7]、刘明扬等^[8]就焊缝连接的形式分别提出了带斜撑的模块间全焊接节点和新型模块间板式内套筒连接节点,并对相应节点的基本力学性能进行了研究。LACEY等^[9-11]和韩弘焯等^[12]对螺栓连接的形式进行了研究,分别提出了带有定位件的竖向螺栓连接节点和适用于低多层模块化钢结构体系的全螺栓连接节点。SHARAFI等^[13]、戴晓蒙等^[14]对自锁式连接节点进行了研究,并分别提出了不同形式的节点连接接头。CHO等^[15]、赵静等^[1]分别提出了不同螺栓类别的盖板螺栓连接节点,并为节点在实际工程中的应用提供了理论依据。DHANAPAL等^[16-17]提出了一种连接器式节点,并研究了该节点在轴向荷载作用下的结构性能。从当前的研究状况来看,国内外在模块化钢结构建筑螺栓连接节点、焊缝连接节点以及自锁式连接节点等方面进行了大量的研究,并取得了一定的成果。然而,现有的模块化连接装置在实际工程中存在安装过程较为复杂、通用性较低等问题。

本文对课题组所提出的一种新型模块化钢框架模块间连接节点进行了研究。通过本文有限元分析方法,对其他文献中的节点进行了分析对比,验证了本文有限元研究方法的可行性。通过ABAQUS软件建立节点有限元模型,对比不同参数下节点的单调静力性能和抗震性能,为实际工程应用的节点构造及其性能提供了理论依据。

1 新型模块间连接节点及其优化

1.1 新型模块间连接节点

基于目前模块化连接装置安装复杂、通用性较低的现状,课题组提出了一种新型模块化装配式钢框架模块间内套筒连接节点,该节点上下模块柱通过连接板、内套筒以及不等边角钢连接(图1),不等边角钢长肢以及连接板由工厂预制高强螺栓安装孔;工字钢梁与模块柱、下模块柱与内套筒以及内套筒与角钢的短肢采用四周围焊的方法在工厂进行预制加工;运输至现场后采用吊装的方法将连接板与角钢通过高强螺栓连接;上模块柱沿内套筒垂直下落至连接板上表面,并在现场采用焊缝连接。

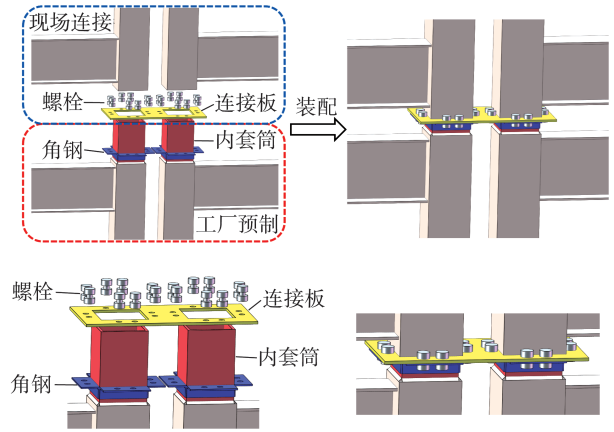


图1 新型模块间连接节点

Fig. 1 New inter-module connection joint

1.2 节点优化

上述节点主要采用螺栓连接,并辅以少量焊缝连接。这种设计能够实现模块单元的快速安装,提高施工效率。但该连接装置还存在现场施工空间受限以及装配化程度不够高、现场施焊的问题。为了进一步提高该模块化连接装置的工业化水平,实现工厂单元化生产,避免现场施焊带来的焊缝质量缺陷,实现现场全螺栓装配化,课题组对新型节点进行了优化设计(图2):(1)上模块柱与连接板上表面不再使用焊缝连接(图2红色虚线),而是通过构建表面摩擦达到固定的目的,可更好地实现模块单元的预制加工;(2)模块柱之间不再布置角钢(图2蓝框内),以缩小柱间距,加强钢框架结构模块间连接的整体性。

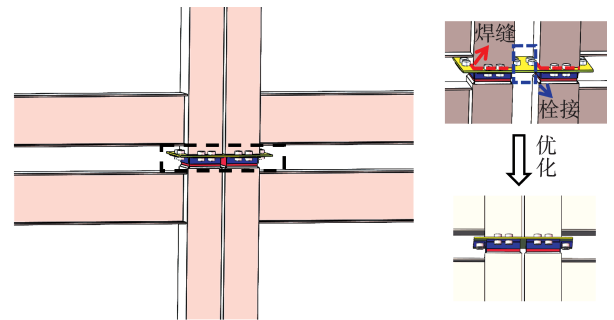


图2 节点连接局部优化示意图

Fig. 2 Schematic diagram of local optimization of the joint

2 新型模块间连接节点有限元模型建立

如图3所示,选取一榀框架中的“十字形”节点作为分析对象,通过ABAQUS有限元软件建立不同参数下节点的有限元模型,研究不同构造参数对新型模块间连接节点基本力学性能的影响。各构件间通过10.9级(M20)高强螺栓连接。

2.1 有限元建模

为更好地进行静力和拟静力分析,选取C3D8R三维

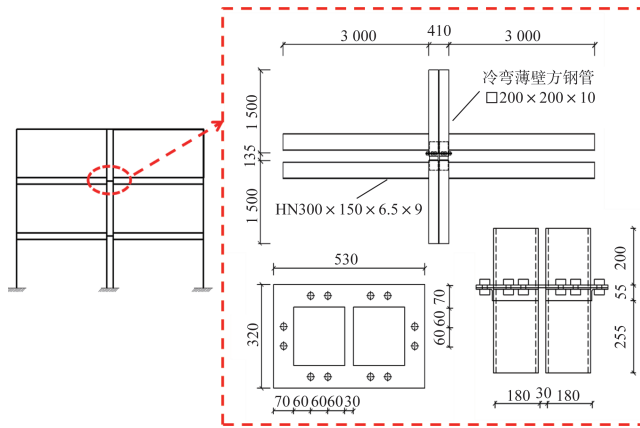


图3 节点基本构造及几何参数(单位:mm)

Fig. 3 Basic construction and geometric parameters of the joint(unit:mm)

8节点缩减积分实体单元对节点进行模拟。在模型中,模块梁柱之间、角钢与内套筒之间建立绑定连接;内套筒外表面和下模块柱上表面之间通过与三棱柱建立绑定来模拟焊缝连接,其余各接触面之间均采用面与面接触(Surface-to-Surface),切向摩擦系数为0.4,法向定义为“硬接触”,接触后分离,模型如图4a)所示。本研究选用目前实际工程中广泛推广应用的Q355钢材及10.9级(M20)高强螺栓。ABAQUS软件中输入的材性如图4b)、c)所示,Q355钢材采用多线性随动强化三折线本构模型^[18-19],高强螺栓采用双折线模型^[20]。

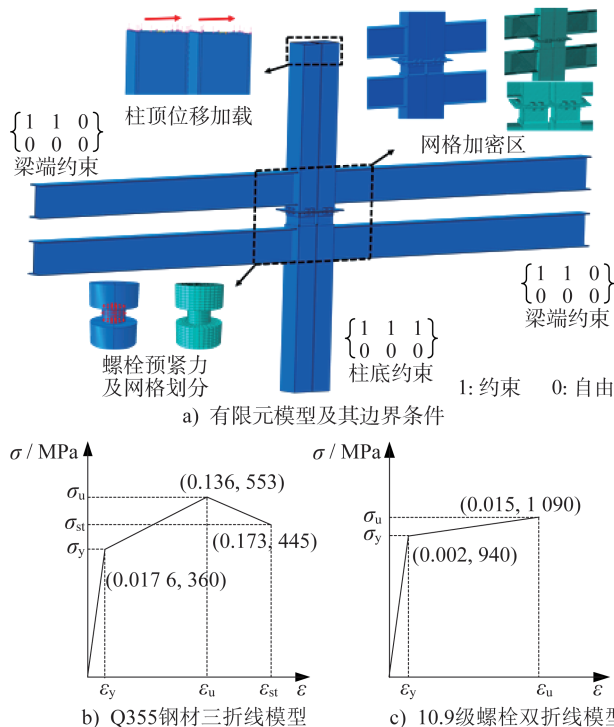


图4 有限元模型的建立

Fig. 4 Establishment of finite element model

为真实反映钢结构节点的受力过程,有限元分析的边界条件应与实际试验保持一致。在柱端和梁端位置建立参考点(Reference),并采用耦合(Coupling)方法将柱端和梁端截面的自由度约束至参考点。在耦合点处建立如图4a)所示的约束来模拟梁端和柱端反弯点。为确保计算的收敛性,在加载过程中设置多个分析步进行加载:第1步,先施加较小的螺栓预紧力和柱顶均布压力,以确保模型平稳运行;第2步,基于规范^[21]要求施加全部螺栓预紧力,并按照0.3的轴压比施加柱顶均布荷载;第3步,将螺栓设置为固定当前长度;第4步,为更加准确地模拟模块化钢框架体系侧向受力时梁、柱反弯点的边界条件,在上模块柱柱顶耦合点处按照位移加载的方式进行单调和循环加载。

2.2 有限元模型验证

为验证本文模块间连接节点有限元模型的可靠性,采用本文所建立的ABAQUS有限元模型对文献[22-23]中的模块间节点进行数值分析,并与其试验结果进行对比。分别选取文献[22-23]中具有代表性的T形节点ST1和十字形节点SC1,对其进行单调加载和循环往复加载数值模拟。

如图5~8所示,文献[22-23]中试件ST1和SC1在两种加载制度下的试验破坏模式均表现为梁柱连接部位发生焊缝撕裂,以及下模块柱与连接件分离产生间隙。相应地,本文的有限元模拟结果显示,梁柱连接位置处均出现了明显的应力集中现象,且柱与连接件之间出现缝隙,与文献[22-23]中的试验破坏模式基本相同。

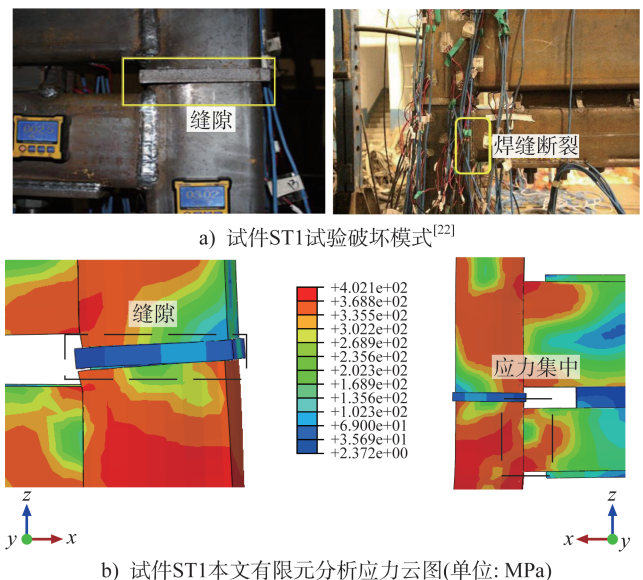
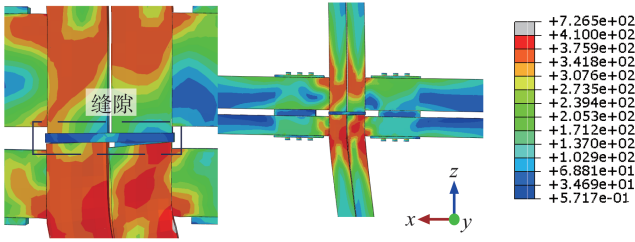


图5 试件ST1单调加载试验与有限元模拟破坏模式对比

Fig. 5 Comparison of failure modes between monotonic loading test and finite element simulation of specimen ST1



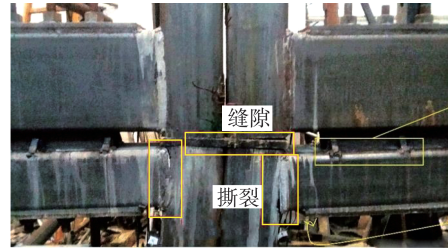
a) 试件SC1试验破坏模式^[23]



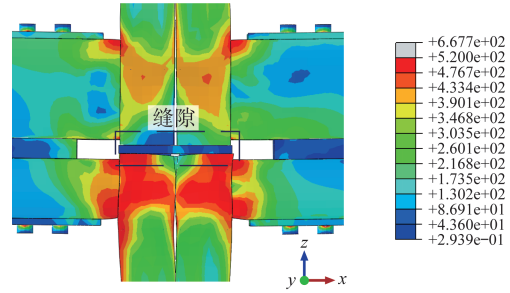
b) 试件SC1本文有限元分析应力云图(单位: MPa)

图6 试件SC1单调加载试验与有限元模拟破坏模式对比

Fig. 6 Comparison of failure modes between monotonic loading test and finite element simulation of specimen SC1



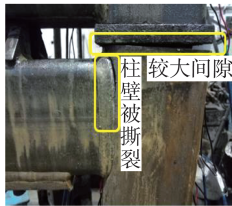
a) 试件SC1试验破坏模式^[23]



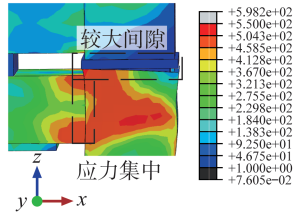
b) 试件SC1本文有限元分析应力云图(单位: MPa)

图8 试件SC1循环加载试验与有限元模拟破坏模式对比

Fig. 8 Comparison of failure modes between cyclic loading test and finite element simulation of specimen SC1



a) 试件ST1试验破坏模式^[22]



b) 试件ST1本文有限元分析应力云图(单位: MPa)

图7 试件ST1循环加载试验与有限元模拟破坏模式对比

Fig. 7 Comparison of failure modes between cyclic loading test and finite element simulation of specimen ST1

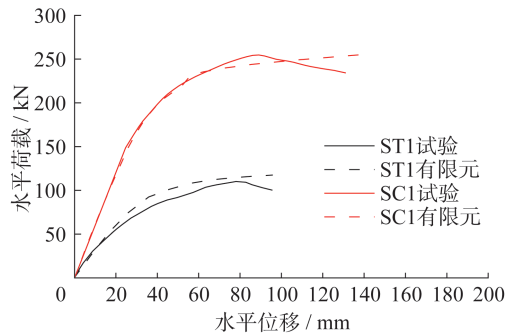


图9 试件ST1和SC1荷载-位移曲线对比

Fig. 9 Comparison of load-displacement curves of specimen ST1 and SC1

如图9~11所示,本文有限元分析曲线与文献[22-23]试验曲线的总体趋势基本一致。试验曲线在加载后期由于梁柱连接处焊缝撕裂出现下降段,而本文有限元分析曲线则未表现出明显的下降段。这是由于有限元模型为平衡计算精度与效率,采用“绑定”约束对焊缝连接进行简化模拟,而试验试件存在初始缺陷、焊接残余应力等,其实际承载能力会受到影响。如表1所示,试验与有限元分析的峰值荷载差值表明,本文有限元结果仅比文献[22-23]试验结果高约6%。由此表明本文建立的ABAQUS有限元模型能够较为准确地反映模块间连接节点的承载性能,可用于分析本文提出的新型节点的承载能力。

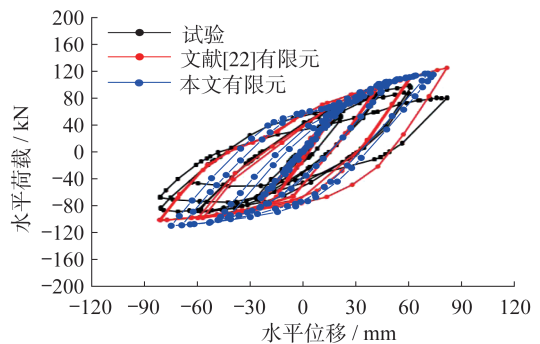


图10 试件ST1循环加载荷载-位移曲线对比

Fig. 10 Comparison of load-displacement curves of specimen ST1 under cyclic loading

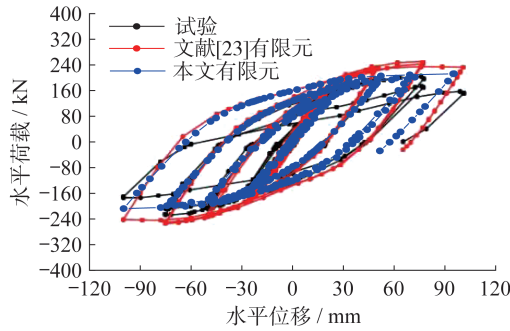


图11 试件SC1循环加载荷载-位移曲线对比

Fig. 11 Comparison of load-displacement curves of specimen SC1 under cyclic loading

表1 峰值荷载对比

Table 1 Comparison of peak loads

试件编号	加载制度	文献试验结果/kN	本文有限元分析结果/kN	差值/%
ST1	单调	110.13	114.27	3.7
	循环	103.13	109.54	6.2
SC1	单调	254.73	243.90	4.2
	循环	205.38	212.57	3.5

3 新型模块间连接节点静力性能分析

3.1 新型节点破坏模式

以节点BASE为基础模型,采用柱端位移控制加载的方式分析该节点在静力荷载作用下的破坏模式,图12、13分别为节点BASE及其构件在柱端位移达到150 mm (层间位移角 $\theta=0.1$ rad)时的应力云图。

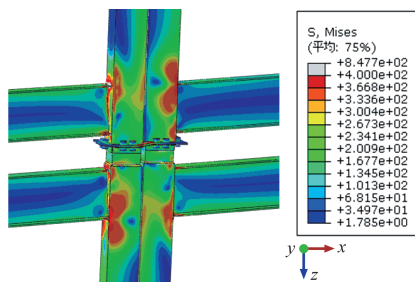
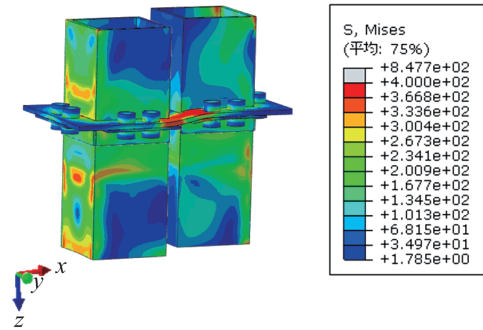


图12 节点BASE整体应力云图(单位:MPa)

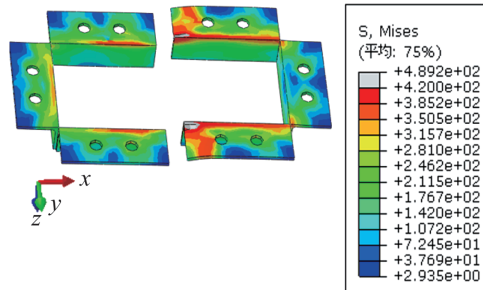
Fig. 12 Overall stress contour of joint BASE(unit: MPa)

加载初期,节点BASE首先于梁翼缘端部出现小范围的应力集中,随着加载位移的增加,钢梁上下翼缘处应力集中显著,并在梁柱连接处出现明显的局部屈曲,连接板孔洞边缘以及角钢内边缘位置逐渐出现应力集中。当位移加载至81 mm时,屈曲区域沿柱壁不断扩展,柱壁出现鼓曲变形,连接板在双柱位移作用下产生剪切变形,角

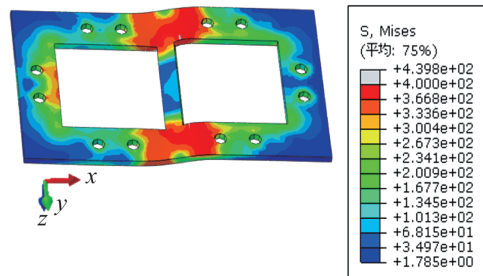
钢应力集中部位由内边缘向外边缘扩散,此时节点达到屈服状态。当加载至150 mm时(即极限承载力状态),如图12、13所示,柱壁和连接板处变形更为显著,上柱与内套筒之间出现脱离缝隙。此时,屈服区域位于钢梁根部与柱壁连接处,连接板中部孔洞直角区域完全贯通,达到屈曲状态并产生严重变形。高强螺栓处应力变化较小,且均未达到屈服状态,因此节点最终破坏模式为梁端破坏。



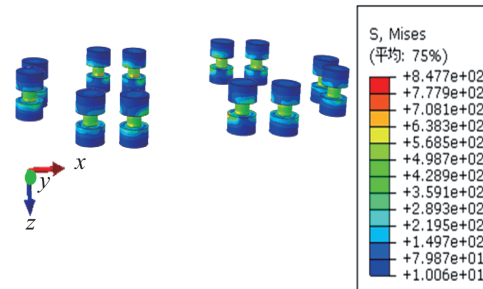
a) 内套筒应力云图



b) 角钢应力云图



c) 连接板应力云图



d) 螺栓应力云图

图13 节点BASE局部应力云图(单位:MPa)

Fig. 13 Local stress contours of joint BASE(unit: MPa)

3.2 不同构造参数对新型节点承载力影响分析

为进一步掌握新型模块化内套筒节点的承载能力并进行优化,在BASE模型分析的基础上,通过改变内套筒长度、内套筒厚度、连接板厚度、角钢厚度及模块柱间距

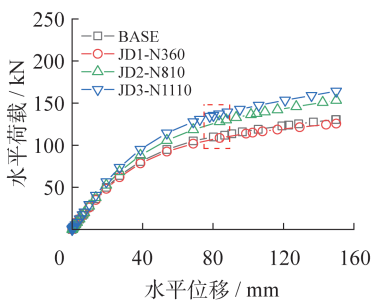
等参数建立大量有限元分析模型,获取单调静力作用下不同参数节点的应力分布及变形,分析不同参数(表2)对节点力学性能的影响,得到各节点的荷载-位移曲线如图14所示。

表2 有限元模型参数

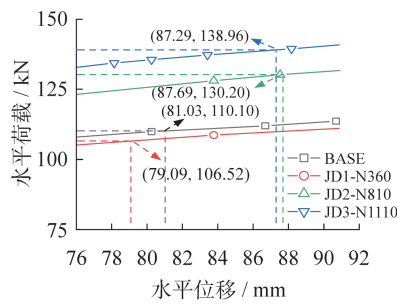
Table 2 Parameters of finite element models

mm

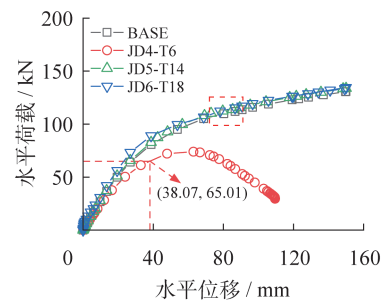
模型编号	内套筒尺寸(长度)	连接板尺寸	角钢尺寸	模块柱间距
BASE	180×180×10(510)	530×320×10	70×45×5	10
JD1-N360	180×180×10(360)	530×320×10	70×45×5	10
JD2-N810	180×180×10(810)	530×320×10	70×45×5	10
JD3-N1110	180×180×10(1 110)	530×320×10	70×45×5	10
JD4-T6	180×180×6(510)	530×320×10	70×45×5	10
JD5-T14	180×180×14(510)	530×320×10	70×45×5	10
JD6-T18	180×180×18(510)	530×320×10	70×45×5	10
JD7-B14	180×180×10(510)	530×320×14	70×45×5	10
JD8-B16	180×180×10(510)	530×320×16	70×45×5	10
JD9-B20	180×180×10(510)	530×320×20	70×45×5	10
JD10-J4	180×180×10(510)	530×320×10	70×45×4	10
JD11-J6	180×180×10(510)	530×320×10	70×45×7	10
JD12-J7	180×180×10(510)	530×320×10	70×45×6	10
JD13-Z20	180×180×10(510)	540×320×10	70×45×5	20
JD14-Z30	180×180×10(510)	550×320×10	70×45×5	30
JD15-Z40	180×180×10(510)	560×320×10	70×45×5	40



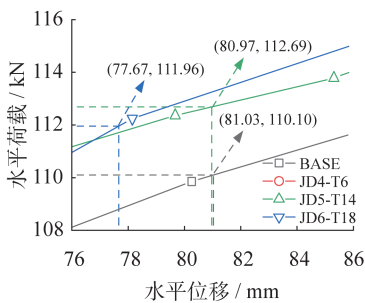
a) 不同内套筒长度节点荷载-位移曲线对比



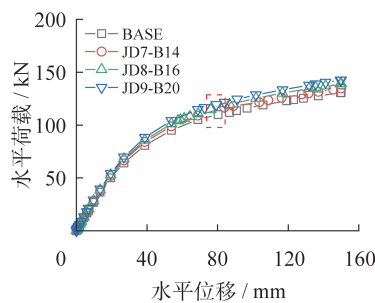
b) 不同内套筒长度节点荷载-位移曲线局部放大对比



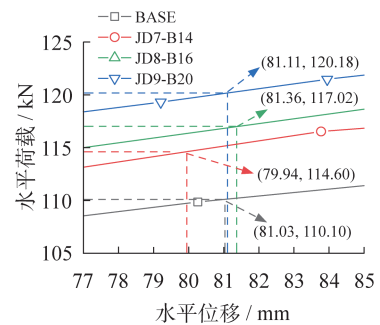
c) 不同内套筒厚度节点荷载-位移曲线对比



d) 不同内套筒厚度节点荷载-位移曲线局部放大对比



e) 不同连接板厚度节点荷载-位移曲线对比



f) 不同连接板厚度节点荷载-位移曲线局部放大对比

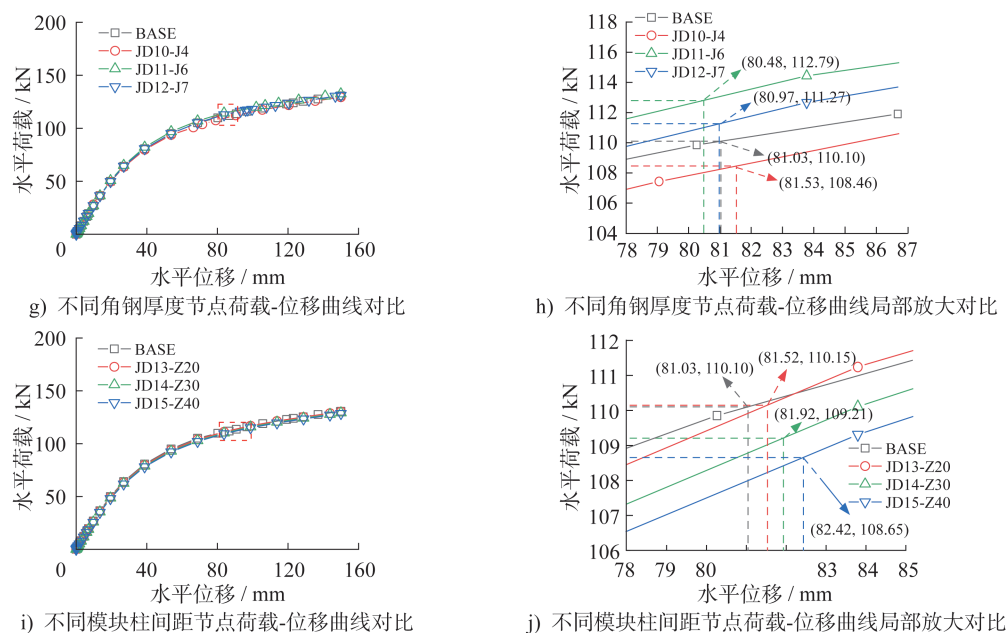


图 14 不同参数下节点荷载-位移曲线对比

Fig. 14 Comparison of load-displacement curves of joints with different parameters

如图 14a)、b)所示,内套筒长度变化对节点承载力影响较大。内套筒长度由 510 mm 增加至 810 mm 时,承载力提高了 17.47%;由 810 mm 增加至 1110 mm 时,承载力提高了 7.19%,增幅减小。内套筒长度在梁截面高度范围内变化时可有效提升节点的承载力;超过梁截面高度后,提升效果下降。如图 14c)、d)所示,除 JD4-T6 外,其他节点在单向静力作用下荷载-位移曲线的变化规律基本一致,

增加内套筒厚度对节点承载力影响较小。而当内套筒厚度减小至 6 mm 时,节点 JD4-T6 荷载-位移曲线显著下降,破坏模式发生变化,如图 15 所示。节点上下模块柱连接处,内套筒筒壁单独承载区域在上下模块间的相互作用下发生剪切变形,腹板发生明显鼓曲,呈现出失稳破坏特征。因此,内套筒作为连接上下模块柱的主要传力构件,其厚度需满足节点抗剪需求,筒壁厚度不宜小于 6 mm。

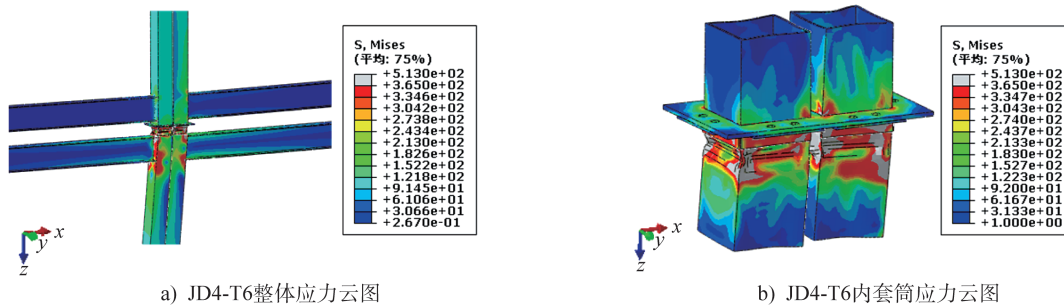


图 15 节点 JD4-T6 应力云图(单位:MPa)

Fig. 15 Stress contours of joint JD4-T6 (unit: MPa)

如图 14e)、f)所示,在弹塑性阶段,不同连接板厚度的节点荷载-位移曲线差异较为显著,承载力变化较为明显。当连接板厚度为 20 mm 时,节点承载力比节点 BASE 的承载力高 9.21%(表 3),连接板屈曲变形减小。连接板在该装置中起到水平连接的作用,在一定程度上增加连接板厚度可提高节点的水平向连接强度。

如图 14g)~j)所示,角钢厚度和模块柱间距的变化对节点承载力的影响极小,承载力变化幅度不超过 2%(表 3)。结果表明:角钢只有连接作用,几乎不承担传递

力和弯矩的作用;在《钢结构模块建筑技术规程》(T/CECS 507—2018)^[24]的规定范围内增加模块柱间距,不会影响节点承载力。

4 节点抗震性能分析

根据上述单调加载分析结果,角钢厚度和模块柱间距对节点承载力的影响较小,继续深入研究意义有限。因此,针对节点 JD1-N360~JD9-B20 进行循环加载分析,以进一步掌握内套筒、连接板等构造参数对节点抗震性能的影响。

表3 节点静力性能分析结果

Table 3 Static performance analysis results of joints

模型编号	屈服荷载/kN	屈服位移/mm	峰值荷载/kN	承载力增幅/%
BASE	110.10	81.03	130.60	—
JD1-N360	114.32	84.35	135.21	3.40 ↑
JD2-N810	130.20	87.69	153.42	17.47 ↑
JD3-N1110	138.96	87.29	164.15	25.69 ↑
JD4-T6	65.01	38.07	74.03	-43.32 ↓
JD5-T14	112.69	80.97	133.78	2.38 ↑
JD6-T18	111.96	77.67	134.58	2.96 ↑
JD7-B14	114.60	79.95	134.64	3.09 ↑
JD8-B16	117.02	81.36	139.09	6.50 ↑
JD9-B20	120.18	81.11	142.63	9.21 ↑
JD10-J4	108.46	81.53	129.24	-0.92 ↓
JD11-J6	112.79	80.48	132.55	1.49 ↑
JD12-J7	111.27	80.98	131.01	0.31 ↑
JD13-Z20	110.15	81.52	130.26	-0.26 ↓
JD14-Z30	109.21	81.92	129.20	-0.77 ↓
JD15-Z40	108.65	82.42	128.51	-1.60 ↓

4.1 滞回曲线分析

循环加载作用下,不同参数节点的滞回曲线如图16所示。滞回曲线具备能量量纲,是评估结构抗震性能的主要依据^[25]。如图16a)所示,进入弹塑性阶段后,节点JD1-N360与BASE的滞回曲线几乎重合;节点JD2-N810、JD3-N1110与BASE的滞回曲线相比,曲线峰值更高,所

主要依据^[25]。如图16a)所示,进入弹塑性阶段后,节点JD1-N360与BASE的滞回曲线几乎重合;节点JD2-N810、JD3-N1110与BASE的滞回曲线相比,曲线峰值更高,所

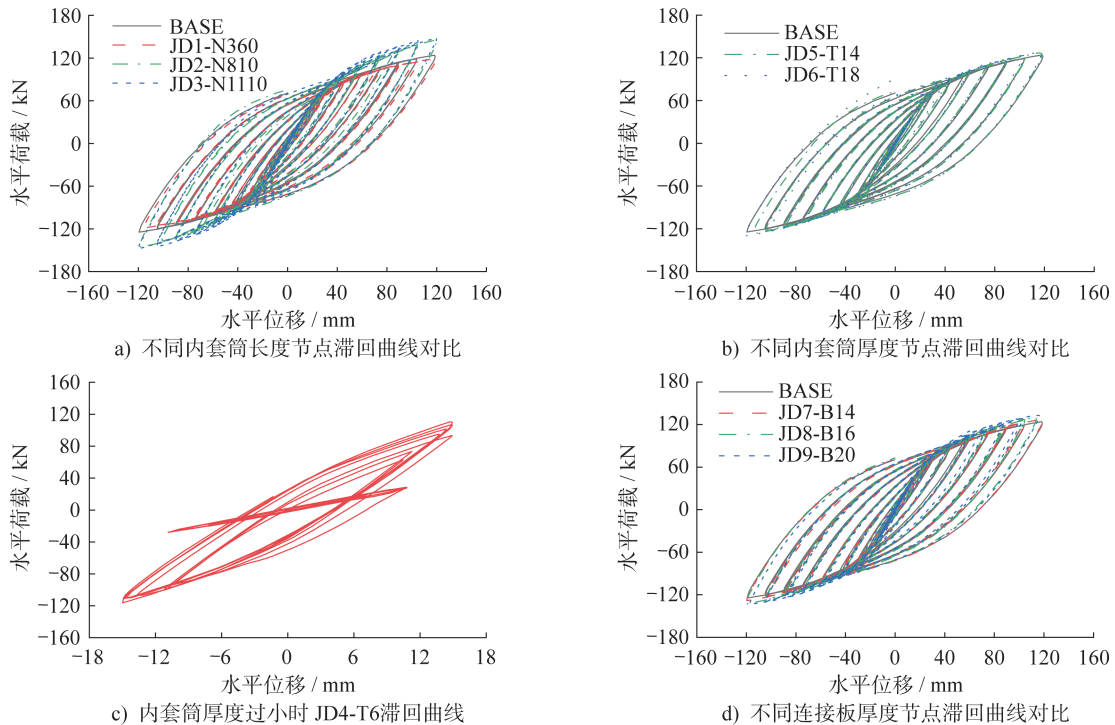


图16 不同参数节点滞回曲线

Fig. 16 Hysteresis curves of joints with different parameters

包围的面积更大,且节点JD2-N810与JD3-N1110的滞回曲线几乎重合。由此表明增加内套筒长度可提高节点的滞回性能,但内套筒长度超过梁截面影响区域后,其变化产生的影响效果降低。如图16b)、d)所示,各节点滞回曲线的重合度较高,增加内套筒和连接板厚度对节点整体滞回性能的影响较小,可忽略不计。如图16c)所示,当内套筒厚度过小时,如节点JD4-T6,其在加载初期处于弹性阶段,荷载与位移呈线性关系,卸载后其变形可以完全恢复,能量耗散较少;在层间位移角加载至0.0075 rad时,上下模块间剪力导致节点突然屈服,内套筒发生屈曲变形,此时卸载后变形不可完全恢复;节点最终在层间位移角加载至0.01 rad时,因变形过大而发生失稳破坏。综上,除节点JD4-T6外,其余不同参数节点的滞回曲线均呈饱满的梭形,耗能能力较好,表现出良好的抗震性能,因此对其进行更为深入的性能分析是有必要的。节点JD4-T6的滞回环捏缩明显,且发生局部失稳破坏,表明其承载能力不足,再对其进行深入分析意义不大,因此后续分析不再涉及节点JD4-T6。

4.2 骨架曲线分析

骨架曲线作为滞回曲线的包络图,能够直观反映节点的承载能力和变形情况。如图17所示,各节点的骨架曲线整体变化规律较为一致,呈明显的“S”形,正负向骨架曲线对称性较好。其中,增加内套筒厚度对新型节点屈服强度及承载力的影响较小,承载力增幅不超过4%(表4)。如图17a)、c)所示,各节点屈服时骨架曲线开始逐渐分离,承载力随着内套筒长度和连接板厚度的增加而增大。当内套筒长度从510 mm增加至810 mm时,承载力提升幅度较大,约为16.92%(表4)。内套筒长度在梁对柱壁的影响区域内变化时,可有效分担梁对柱的局部作用力,加强柱壁,提高节点的承载力及抗震性能。当连接板厚度从10 mm增加至20 mm时,节点承载力提升

7.09%(表4)。连接板主要抵抗模块柱错动产生的剪力,增加其厚度对节点抗震性能有一定改善。

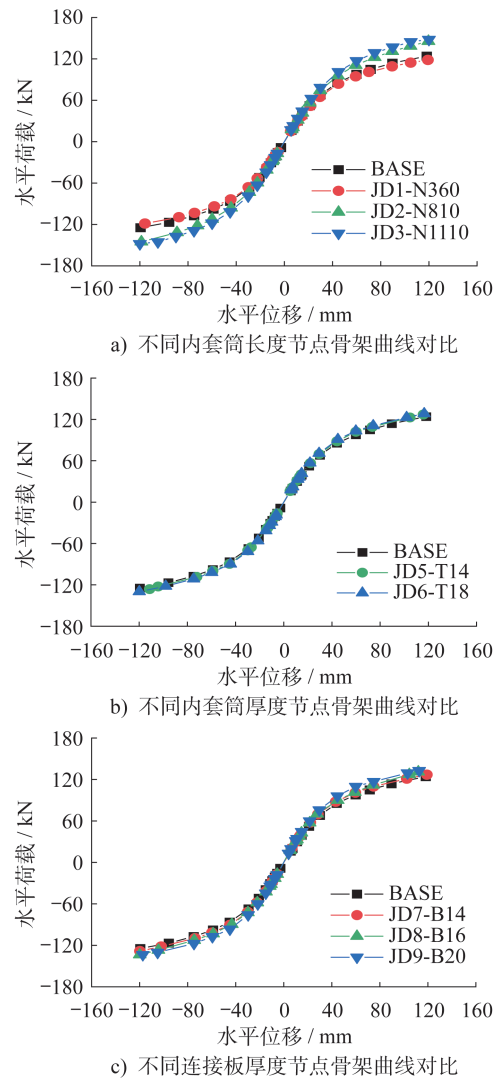


图17 不同参数节点骨架曲线

Fig. 17 Skeleton curves of joints with different parameters

表4 节点拟静力性能分析结果

Table 4 Quasi-static performance analysis results of joints

模型编号	屈服荷载/kN	屈服位移/mm	峰值荷载/kN	承载力增幅/%
BASE	104.96	71.76	124.04	—
JD1-N360	100.96	70.09	118.45	-4.51 ↓
JD2-N810	123.40	76.96	145.03	16.92 ↑
JD3-N1110	126.89	72.53	148.15	19.44 ↑
JD5-T14	107.53	70.37	127.06	2.43 ↑
JD6-T18	108.58	69.73	128.40	3.51 ↑
JD7-B14	107.14	70.23	126.91	2.31 ↑
JD8-B16	109.94	71.37	131.02	5.63 ↑
JD9-B20	113.06	66.54	132.83	7.09 ↑

4.3 刚度退化分析

随着柱端位移的增加,节点刚度不断减小的现象称为刚度退化。本文采用割线刚度来反映节点刚度的退化,计算公式如下:

$$K_i = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|+X_i| + |-X_i|} \quad (1)$$

式中: K_i 为第*i*级加载的刚度; F_i^+ 、 F_i^- 分别为第*i*级滞回环正负向加载的峰值点荷载; Δ_i^+ 、 Δ_i^- 分别为第*i*级滞回环正负向加载的峰值点位移^[26]。

如图18所示,各节点的刚度退化均呈现出先快后慢的规律,其中内套筒长度变化的影响最为显著。如图18a)所示,各节点初始刚度较接近,加载初期,内套筒对柱的加强作用不明显,各节点刚度退化程度较为一致。而在加载中后期塑性铰形成后,内套筒对箱型柱的加强作用增强,当层间位移角达到0.08 rad时,节点BASE的刚度为1.03 kN·mm⁻¹,节点JD2-N810的刚度为1.26 kN·mm⁻¹,增幅为22.3%。随着内套筒长度的增加,节点刚度下降趋缓,因此刚度退化速度出现差异。如图18b)、c)所示,增加内套筒厚度和连接板厚度均可提高节点初始刚度,改善刚度退化,但效果均不显著。

5 新型节点恢复力模型

节点恢复力是指节点在外部荷载作用下产生变形后恢复至初始状态的能力。循环荷载作用下的节点恢复力模型能够反映节点在承载、变形能力、耗能以及刚度退化等方面的性能,是动力分析的基础。为进一步分析本研究所提出的新型模块间连接节点恢复力的变化规律,采用拟合法初步建立适用于新型节点的恢复力模型。

5.1 骨架曲线模型建立

大量有限元参数分析结果表明,内套筒和连接板对节点的抗震性能影响较大。采用拟合法对具有不同内套筒及连接板构造参数的新型节点的骨架曲线进行拟合,建立骨架曲线模型及其表达式。取峰值荷载点(P_m , Δ_m),对正负向荷载值*P*及其位移值 Δ 进行无量纲处理,以整合各节点的骨架曲线数据。如图19所示,无量纲骨架曲线的正负向发展趋势与双折线模型^[27]相吻合,其各阶段的表达式如式(2)~(5)所示。

$$AB \text{ 段: } \frac{P}{P_m^+} = 0.167 \frac{\Delta}{\Delta_m^+} + 0.793 \quad (2)$$

$$OA \text{ 段: } \frac{P}{P_m^+} = 2.144 \frac{\Delta}{\Delta_m^+} \quad (3)$$

$$OC \text{ 段: } \frac{P}{P_m^-} = 2.156 \frac{\Delta}{\Delta_m^-} \quad (4)$$

$$CD \text{ 段: } \frac{P}{P_m^-} = 0.150 \frac{\Delta}{\Delta_m^-} - 0.800 \quad (5)$$

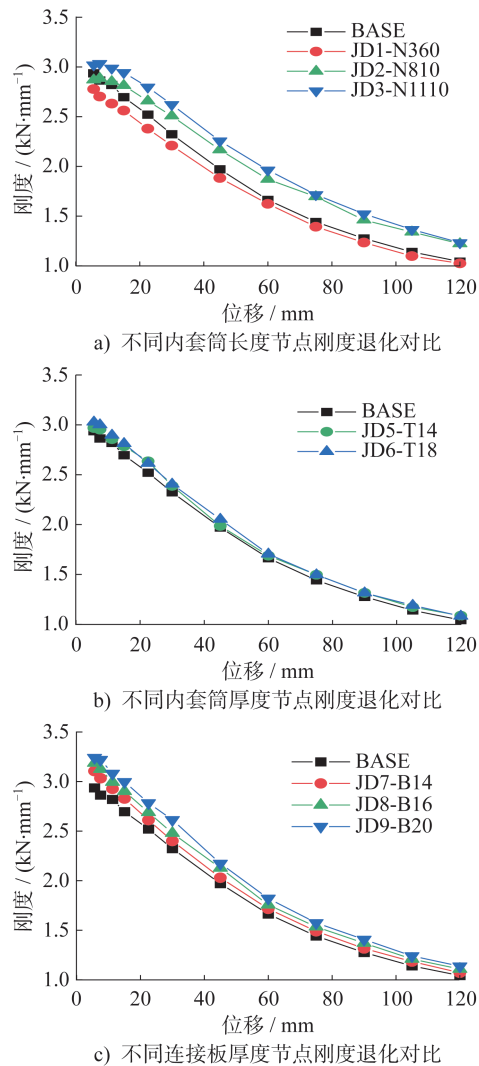


图18 不同参数节点刚度退化曲线

Fig. 18 Stiffness degradation curves of joints with different parameters

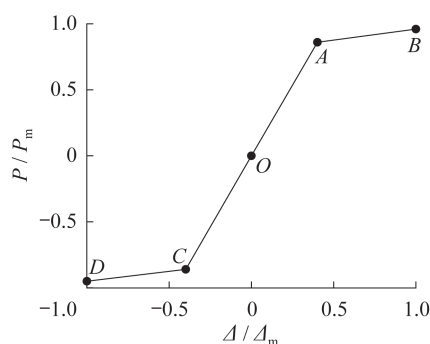


图19 无量纲骨架曲线模型

Fig. 19 Dimensionless skeleton curve model

5.2 刚度退化规律建立

参数分析结果表明,随着内套筒和连接板构造参数的变化,新型节点的刚度退化趋势较为接近,在正负向加卸载时均存在刚度退化。通过对不同构造参数新型

节点的无量纲化数据进行线性回归拟合,得到其各阶段的刚度退化趋势如图20所示,对应的表达式如式(6)~(9)所示。

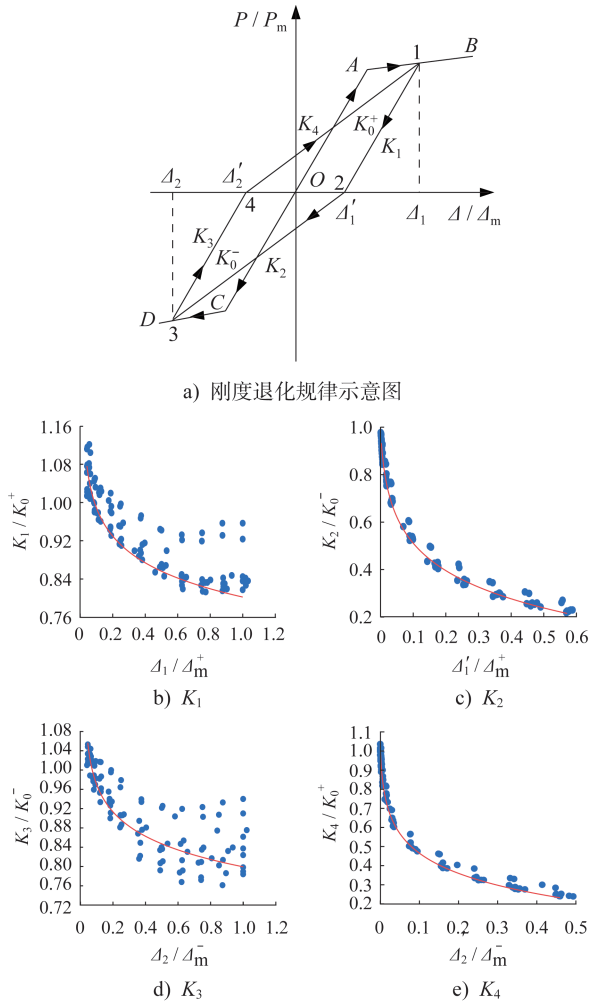


图20 各阶段节点刚度退化规律

Fig. 20 Stiffness degradation law of joints at all stages

正向加载刚度 K_1 :

$$K_1/K_0^+ = 0.801 - 0.076 \ln(\Delta_1/\Delta_m^+ - 0.014) \quad (6)$$

负向加载刚度 K_2 :

$$K_2/K_0^- = 0.119 - 0.176 \ln(\Delta_1'/\Delta_m^+ + 0.007) \quad (7)$$

负向卸载刚度 K_3 :

$$K_3/K_0^- = 0.798 - 0.066 \ln(\Delta_2/\Delta_m^- - 0.025) \quad (8)$$

正向卸载刚度 K_4 :

$$K_4/K_0^+ = 0.112 - 0.155 \ln(\Delta_2'/\Delta_m^- + 0.003) \quad (9)$$

式中: K_0^+ 、 K_0^- 分别为正、负向初始刚度; Δ_m^+ 、 Δ_m^- 分别为加载至峰值荷载时对应的正、负向位移; Δ_1 为正向卸载点1的位移值; Δ_1' 为正向力卸载至0 kN时(点2)的位移值; Δ_2 为负向卸载点3的位移值; Δ_2' 为负向力卸载至0 kN时(点4)的位移值。

5.3 恢复力模型建立

根据无量纲化骨架曲线模型和刚度退化规律,建立无量纲化新型模块间连接节点的恢复力模型,如图21所示。滞回规则如下:

(1) 点A、C为分别正、负向屈服点,屈服前正负向加载分别沿OA和OC方向进行,并沿AO和CO方向卸载,此时处于弹性阶段,无残余变形,卸载刚度近似为正负向初始刚度 K_0^+ 、 K_0^- 。

(2) 进入屈服阶段后,正向加载沿AB方向进行至点1,沿路线点1→点2进行正向卸载,此时考虑刚度退化,正向卸载刚度等效为点1、点2连线的斜率 K_1 ; 正向卸载至力为0 kN(点2)后,沿点2→点3负向加载,负向加载刚度等效为点2、点3连线的斜率 K_2 ; 加载至点3后,沿点3→点4负向卸载,负向卸载刚度等效为点3、点4连线的斜率 K_3 ; 负向卸载至力为0 kN后,沿点4→点1正向加载,斜率为 K_4 ; 正向沿骨架曲线AB段继续前进,进入下一循环,沿点5→点6→点7→点8→点5的路径,遵循上述加卸载规律重复进行循环加载。

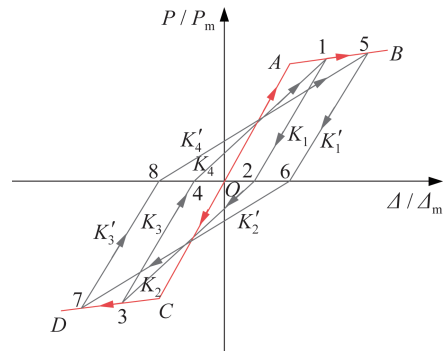


图21 恢复力模型

Fig. 21 Restoring force model

5.4 恢复力模型验证

为验证所建立的恢复力模型对新型节点力学特征描述的可靠性,选取节点BASE以及与其性能相差最大的节点JD3-N1110,分别建立相应的恢复力模型曲线,并与有限元分析曲线进行对比,如图22所示。结果表明,本文所建立的恢复力模型曲线与有限元分析曲线的发展趋势较为一致,但滞回环饱满程度略有差异。原因是在模型建立过程中对刚度拐点进行了预测,对实际加载过程中残余变形的复原及反向加载过程中的刚度变化进行了简化。但通过该模型可分析得到节点最大位移点对应的荷载值,且误差低于5%,吻合度较高,能够反映不同构造参数的新型节点滞回曲线的发展趋势,为其进一步修正和完善提供了基础。

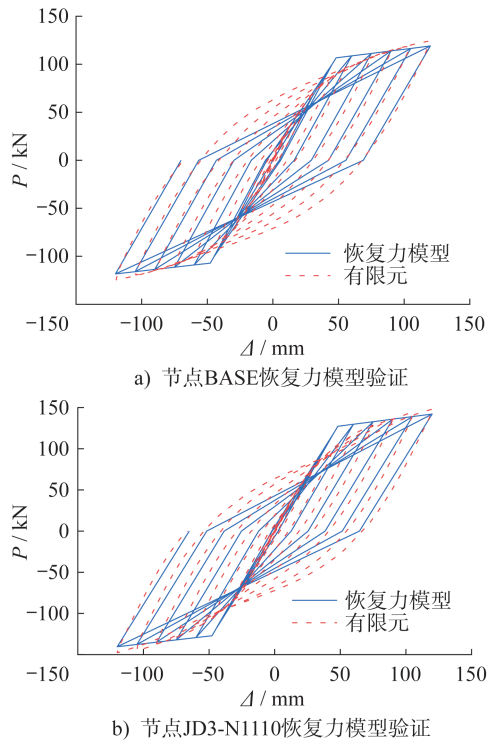


图22 有限元与恢复力模型滞回曲线对比

Fig. 22 Comparison of hysteretic curves between finite element and restoring force models

6 结论

本研究提出一种新型模块化内套筒连接节点,并通过建立 ABAQUS 有限元模型,对具有不同构造参数的新型模块间连接节点进行静力及拟静力作用下的承载能力分析,并基于理论分析,初步建立节点恢复力模型,得到以下主要结论:

(1) 该新型模块间连接节点经优化后,可实现现场全螺栓装配式作业,各构件可快速安装拆卸,易于回收,为建筑工业化、产业化发展提供了重要参考依据。

(2) 单调静力荷载作用下,需保证内套筒厚度达到 10 mm,以满足新型节点的抗剪需求;提高内套筒长度和连接板厚度,新型节点承载力可显著提高。

(3) 拟静力荷载作用下,新型节点滞回曲线呈饱满的“梭形”,正负向对称性良好,所包围的面积大。当层间位移角为 0.08 rad 时,节点承载力达到 120 kN 且仍未出现下降趋势,满足《建筑结构抗震设计规范》(GB 50011—2010)中对钢框架 1/50 的层间位移角限值要求,表明该新型节点具有良好的抗震性能。

(4) 内套筒长度在梁截面影响域内增加时,新型节点各项力学性能显著提升;超过该区域后,其影响相对降低。考虑节点综合性能及经济性,建议内套筒长度取 810 mm。内套筒厚度建议取值范围为 1.0~1.4 倍柱厚,以防止内套筒发生失稳破坏。

(5) 连接板在新型节点中起水平连接作用,需承受模块柱之间错动产生的剪切力,增加其厚度可提高节点抗震性能和初始刚度,但程度有限,建议连接板的厚度取值为 10~14 mm。

(6) 本文初步建立的简化恢复力模型与有限元分析结果的吻合度较高,可有效预测本文新型模块间连接节点在循环荷载作用下的受力特征,为该节点的进一步深入分析提供了基础模型和理论依据。

参考文献:

- [1] 赵静. 螺栓连接模块化高层建筑性能的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
ZHAO Jing. Research on the performance of bolted joint in modularized high-rise buildings [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. (in Chinese)
- [2] 刘明扬, 王燕, 郑书朔. 新型模块化钢框架板式内套筒连接节点力学性能研究[J]. 钢结构, 2018, 33(1): 1-5, 10. DOI: 10.13206/j.gjg201801001.
LIU Mingyang, WANG Yan, JIA Shushuo. Research on the mechanical properties of new plate-inner sleeve joint of steel modular frame [J]. Steel Construction, 2018, 33(1): 1-5, 10. DOI: 10.13206/j.gjg201801001. (in Chinese)
- [3] 王文静, 李志武, 于春义, 等. 模块化钢结构建筑结构体系研究进展[J]. 施工技术, 2020, 49(11): 24-30, 36. DOI: 10.7672/sjgs2020110024.
WANG Wenjing, LI Zhiwu, YU Chunyi, et al. State of the art of modular steel building system [J]. Construction Technology, 2020, 49(11): 24-30, 36. DOI: 10.7672/sjgs2020110024. (in Chinese)
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 住房和城乡建设部办公厅关于印发装配式钢结构模块建筑技术指南的通知: 建办标函[2022]209号[A/OL]. (2022-06-09). https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zc/wjk/art/2022/art_17339_766654.html.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Notice of the General Office of the Ministry of Housing and Urban-Rural Development on Issuing the Technical Guidelines for Prefabricated Steel Structure Modular Buildings: Jian Ban Biao Han [2022] No. 209 [A/OL]. (2022-06-09). https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zc/wjk/art/2022/art_17339_766654.html. (in Chinese)
- [5] 徐龙河, 杨晓乐, 张格. 新型模块化钢结构插入式连接节点受力性能研究[J]. 工程力学, 2024, 41(1): 30-38. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.03.0239.
XU Longhe, YANG Xiaole, ZHANG Ge. Study on mechanical behavior of a novel modular steel structure plug-in connection [J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(1): 30-38. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.03.0239. (in Chinese)
- [6] CHEN Z H, WANG J, LIU J D, et al. Seismic behavior and moment transfer capacity of an innovative self-locking inter-module connection for modular steel building [J]. Engineering Structures, 2021, 245: 112978. DOI: 10.1016/j.engstruct.

- 2021.112978.
- [7] ANNAN C D, YOUSSEF M A, EL NAGGAR M H. Experimental evaluation of the seismic performance of modular steel-braced frames[J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(7): 1435-1446. DOI: 10.1016/j.engstruct.2009.02.024.
- [8] 刘明扬. 模块化钢框架新型连接节点及结构力学性能研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
LIU Mingyang. Study on the mechanical properties of the modular steel frame new connection node and structure[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [9] LACEY A W, CHEN W S, HAO H, et al. New interlocking inter-module connection for modular steel buildings: Simplified structural behaviours[J]. *Engineering Structures*, 2021, 227: 111409. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111409.
- [10] LACEY A W, CHEN W S, HAO H, et al. Shear behaviour of post-tensioned inter-module connection for modular steel buildings[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 162: 105707. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.105707.
- [11] LACEY A W, CHEN W S, HAO H, et al. Lateral behaviour of modular steel building with simplified models of new inter-module connections[J]. *Engineering Structures*, 2021, 236: 112103. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112103.
- [12] 韩弘焱. 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.
HAN Hongye. Research on mechanical properties of full-bolt joints of low-layer modular steel structure [D]. Tianjin: Tianjin University, 2020. (in Chinese)
- [13] SHARAFI P, MORTAZAVI M, SAMALI B, et al. Interlocking system for enhancing the integrity of multi-storey modular buildings[J]. *Automation in Construction*, 2018, 85: 263-272. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.10.023.
- [14] 戴晓蒙. 模块化钢结构插入自锁式节点抗震性能与设计方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
DAI Xiaomeng. Research on seismic behavior and design method of self-lock plug-in joints in modular steel construction [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019. (in Chinese)
- [15] CHO B H, LEE J S, KIM H, et al. Structural performance of a new blind-bolted frame modular beam-column connection under lateral loading[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(9): 1929. DOI: 10.3390/app9091929.
- [16] DHANAPAL J, GHAEDNIA H, DAS S, et al. Structural performance of state-of-the-art VectorBloc modular connector under axial loads[J]. *Engineering Structures*, 2019, 183: 496-509. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.01.023.
- [17] RAJANAYAGAM H, POOLOGANATHAN K, GATHEESHGAR P, et al. A state-of-the-art review on modular building connections[J]. *Structures*, 2021, 34: 1903-1922. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.08.114.
- [18] NIE J G, QIN K, CAI C S. Seismic behavior of connections composed of CFSSTCs and steel-concrete composite beams: finite element analysis[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2008, 64(6): 680-688. DOI: 10.1016/j.jcsr.2007.12.003.
- [19] DUNNE F, PETRINIC N. Introduction to computational plasticity[M]. Oxford: Oxford University Press, 2005: 17-45.
- [20] 曾武凤. 基于模块化低层住宅的内套筒对拉螺栓连接构造研究[D]. 成都: 西华大学, 2018.
ZENG Wufeng. Study on the connection construction of inner sleeve-to-pull bolt based on the modular low-rise housing[D]. Chengdu: Xihua University, 2018. (in Chinese)
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构高强度螺栓连接技术规程: JGJ 82—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specification for High Strength Bolt Connections of Steel Structures: JGJ 82—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [22] 刘佳迪. 钢结构模块节点和构件耐火试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
LIU Jiadi. Experimental research on joint of steel module and fire resistance of components[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017. (in Chinese)
- [23] CHEN Z H, LIU J D, YU Y J. Experimental study on interior connections in modular steel buildings [J]. *Engineering Structures*, 2017, 147: 625-638. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.06.002.
- [24] 中国工程建设标准化协会. 钢结构模块建筑技术规程: T/CECS 507—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
China Association for Engineering Construction Standardization. Technical Specification for Steel Modular Buildings: T/CECS 507—2018 [S]. Beijing: China Planning Press, 2018. (in Chinese)
- [25] 王迅, 王燕, 张百悦. 非对称加强式节点抗震性能研究[C]//中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会第13届(ISSF-2012) 学术交流会暨教学研讨会论文集. 北京: 《钢结构》编辑部, 2012: 413-424.
WANG Xun, WANG Yan, ZHANG Baiyue. Mechanical study of asymmetric reinforced nodes[C]//Proceedings of the 13th Academic Exchange Meeting (ISSF-2012) of Structural Stability and Fatigue Branch, China Steel Construction Society. Beijing: Steel Construction Editorial Office, 2012: 413-424. (in Chinese)
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for Seismic Test of Buildings: JGJ/T 101—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [27] CLOUGH R W. Effect of stiffness degradation on earthquake ductility requirements [C]//Proceedings of the 2th Japan Earthquake Engineering Symposium. Tokyo: [s.n.], 1966.