

装配式端板连接钢混梁柱节点抗震性能及受力分析研究

鲁万卿¹, 田为¹, 李正英², 刘红军²

1. 中建七局西南建设有限责任公司, 重庆 400045

2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045

DOI: 10.61369/ME.2026010038

摘 要 : 本研究基于低多层预制装配建筑, 参考钢结构中的端板连接, 提出新型全装配式梁柱节点, 研究了端板厚度、螺栓规格尺寸、螺栓布置间距及加劲肋构造等其对节点应力传递机制、极限承载与变形规律的控制作用。结果表明: 适当增加端板厚度与合理设置加劲肋能增强节点的转动约束与抗弯承载性能; 螺栓直径偏小容易引起节点早期破坏而间距的变化影响相对有限。

关 键 词 : 低多层装配式建筑; 端板连接; 全装配式梁柱节点; 受力性能; 有限元分析

Research on Seismic Performance and Stress Analysis of Prefabricated End Plate Connection Steel-Concrete Beam-Column Joints

Lu Wanning¹, Tian Wei¹, Li Zhengying², Liu Hongjun²

1. China Construction Seventh Engineering Division Southwest Construction Co., LTD., Chongqing 400045

2. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045

Abstract : Based on low-rise multi-story prefabricated buildings and referring to the end plate connection in steel structures, this study proposes a new type of fully prefabricated beam-column joint. The control effects of end plate thickness, bolt specifications and sizes, bolt spacing, and stiffener structure on the stress transfer mechanism, ultimate bearing capacity and deformation laws of the joint were studied. The results show that appropriately increasing the end plate thickness and reasonably setting the stiffeners can enhance the rotational restraint and bending bearing capacity of the joint; a smaller bolt diameter is prone to cause early joint failure, while the change in spacing has a relatively limited impact.

Keywords : low-rise multi-story prefabricated buildings; end plate connection; fully prefabricated beam-column joint; stress performance; finite element analysis

引言

低多层住宅在我国中小城市及乡镇建设中占比很高, 因其相比高层住宅存在多种优势。地震作用下, 干式连接能将破坏控制在节点区和连接件内, 预制构件损伤小, 因此震后修复便捷, 只需更换局部节点即可^[1]。美日 PRESSS^[2-5]项目推动了预制混凝土结构抗震研究, 其中螺栓连接与预应力节点被广泛关注。Nakaki^[6]研究带延性连接器的节点虽表现出优良的耗能性能, 但其构造复杂且经济性较差。Ertas^[7]通过试验证实, 螺栓连接节点在施工便捷性、耗能效率与延性性能等方面均具有显著优势。Vidjeapriya^[8]等分别对加劲牛腿节点和组合节点进行研究, 存在耗能能力有限或构造复杂等问题。Nzabonimpa^[9]研究 U 形钢筋锚固节点表现出良好的耗能与延性。

国内研究方面, 吕西林^[11]等指出后浇整体式节点抗震性能与现浇节点相近。范力^[12]等发现橡胶垫螺栓连接节点虽能有效控制残余变形, 却存在能量耗散能力不足。黄斌等研究的端板连接节点承载力随构造尺寸提高而增强。蔡小宁^[14]提出的 PTED 节点通过角钢变形耗能, 并展现出显著的自复位特性。刘建华^[13]研究的螺栓连接牛腿节点承载力高、耗能性好, 便于更换修复。

综上所述, 现有装配式节点仍多依赖湿作业, 干式连接则面临构造复杂、传力不直接、耗能有限及成本较高等问题。为提升装配式结构体系的综合性能, 本研究以节点抗震设计为核心, 引入端板连接, 提出了一种新型全装配式混凝土梁柱节点设计方案。

一、有限元模型

(一) 节点设计

为确保分析结果能够真实反映节点的实际受力状态,本研究依据某多层民宿结构,选取其二层框架边节点作为试验原型,如图1所示。同时试件从梁和柱的反弯点处提取,为有效模拟节点的真实边界约束。

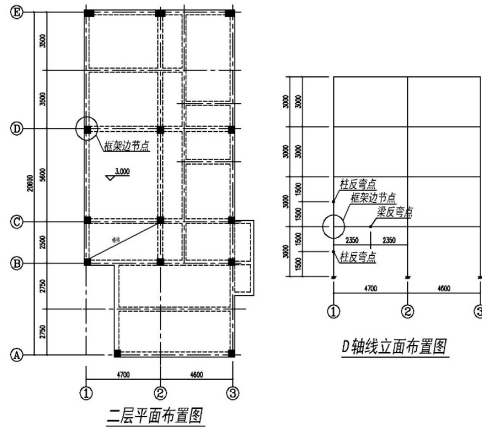


图1 试件节点位置示意图

依据 EC3 规范^[16],本研究采用其规定的半刚性连接转动刚度下限值,在 Etabs 工程软件中通过释放梁端弯矩的方式,以模拟节点的半刚性特性。最终确定的梁柱设计参数如下:梁与柱均采用 C40 混凝土,其中,梁截面为 200mm×500mm,跨度为 2.15 米;柱截面为 400mm×400mm 400mm×400mm,净高为 3 米,并承受 1000kN 的轴向压力,控制其轴压比为 0.30。选用 HRB400 级钢筋,保护层厚度为 20mm,连接件 Q355 级钢材,并配备 10.9 级 M24 摩擦型高强度螺栓。试件尺寸见图 2 所示。

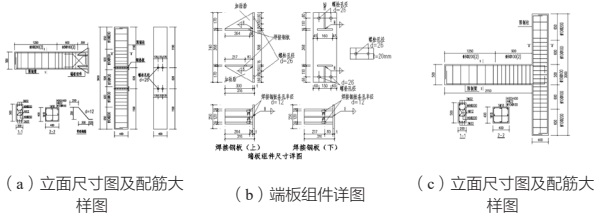


图2 连接节点立面尺寸图及配筋大样图

(二) 材料本构模型

在混凝土本构模型采用塑性损伤模型,以更准确地模拟混凝土材料在低周反复荷载下的塑性及损伤行为。该模型的一个关键优势在于其能够区分材料在拉、压受力状态下不同的力学性能,从而能够更为精确地再现混凝土在循环加载过程中的复杂力学响应^{[18]~[20]}。钢材本构关系通过随动强化模型进行定义。

(三) 单元的选取和网格的划分

本文基于 Abaqus 建立了端板连接梁柱节点的有限元模型。钢筋采用 T3D2 桁架单元进行模拟。模型中其余组成部分,均使用 C3D8R 实体单元。

为提高计算精度并保证数值收敛性,对模型实施了差异化的网格划分策略,具体方案见图 3。其中,混凝土梁与柱采用基准尺

寸为 50mm 的稀疏网格,但在应力集中的螺栓孔周边进行了局部加密,网格尺寸细化至 10mm。端板组件以 10mm 的单元尺寸进行划分,并在厚度方向布置了 4 层单元。高强螺栓采用更为精细的 5mm 网格,而梁柱内部钢筋的单元尺寸则统一设置为 50mm。

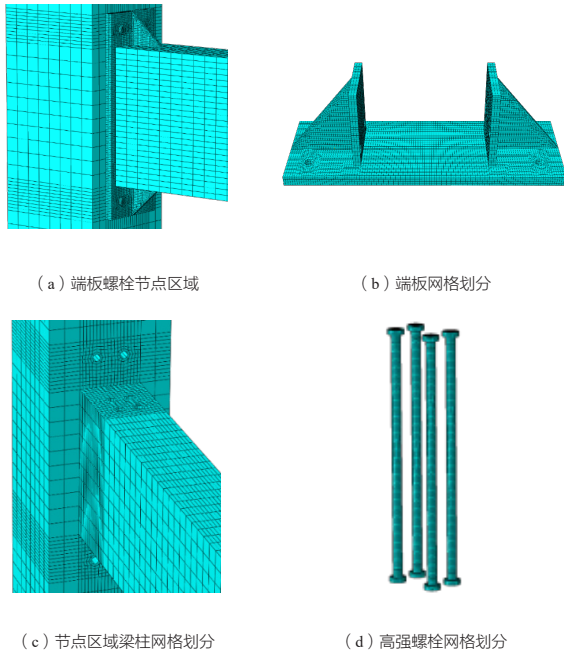


图3 有限元模型网格划分

(四) 边界条件和加载制度

有限元分析结果的可靠性高度依赖于荷载条件、边界约束及加载制度的合理定义。为排除非必要因素的干扰并确保模拟真实性,本章模型按图 4 所示设置边界条件。

荷载通过以下分析步顺序施加:首先,在第一步对螺栓施加 50% 的设计预拉力 (0.5P),采用“螺栓载荷”实现;第二步将预拉力增至完整值 P;第三步施加载顶轴向荷载;最后在第四步于梁端实施往复位移加载。位移加载制度按位移角分级进行,依次为 0.1%、0.3%、0.5%、0.75%、1%、1.5%、2%、2.5%、3%、4%、5%...,每级位移循环 2 次,如图 5 所示。

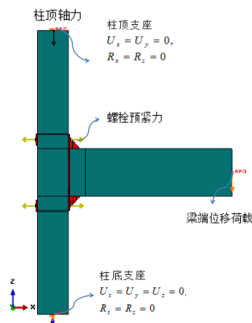


图4 边界条件

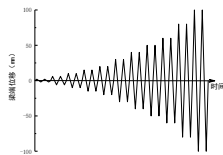


图5 有限元模型加载制度

二、端板连接节点设计参数分析

针对本文提出的全装配式端板连接节点,其力学性能受多重

参数影响，主要包括螺栓强度等级、直径与数量，端板尺寸、厚度与材料强度，以及加劲肋的设置。为系统研究上述关键参数对节点力学行为的作用机制，本节开展参数化分析。

(一) 节点参数设计

JD1作为本节的基准模型用于对比分析，本节将重点分析端板厚度、螺栓配置与加劲肋配置等关键设计变量对节点力学性能的作用规律。节点中梁、柱截面尺寸及配筋构造均按图2采用，各连接件的具体设计参数列于表1。

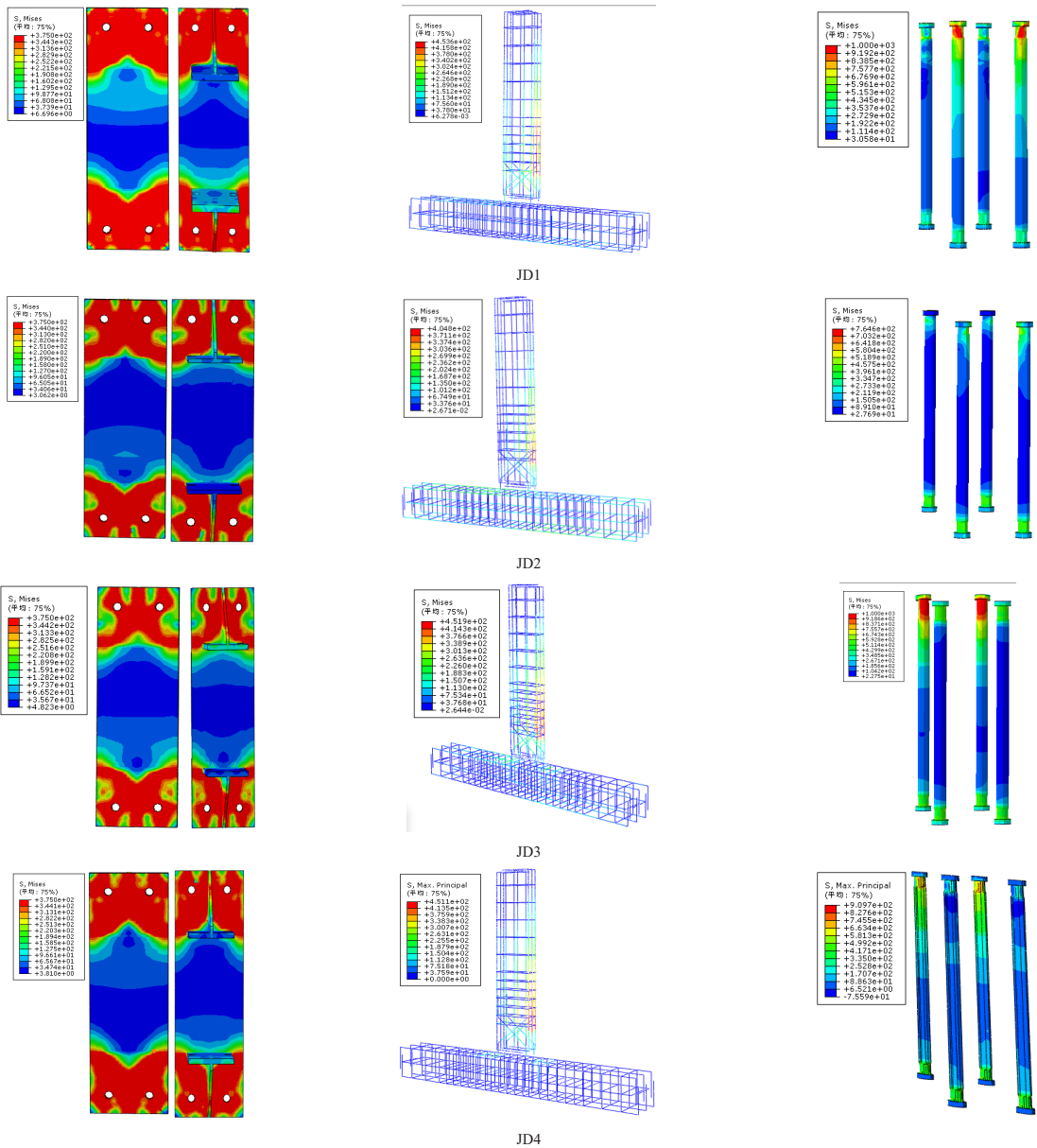
表1 端板参数设计

试件编号	端板厚度 (mm)	螺栓直径 (mm)	螺栓间距 (mm)	有无加劲肋
JD1	16	24	110	有加劲肋
JD2	12	24	110	有加劲肋
JD3	16	16	110	有加劲肋
JD4	16	24	150	有加劲肋
JD5	16	24	110	无加劲肋

(二) 有限元参数分析结果

1. 节点应力分布

图6为各试件中端板、内部钢筋骨架与高强螺栓的应力云图。在螺栓能提供足够抗拉承载力的情况下，随着端板厚度的增加，节点连接部位的变形成得到有效控制，端板自身的塑性发展范围也相应扩大，并引起内部钢筋骨架与高强螺栓所受拉力的同步增长；若螺栓直径减小，节点将因螺栓过早发生拉伸破坏而失效，此时端板尚未充分发挥其材料性能，致使节点的整体承载力降低；同时螺栓间距的增大对节点性能影响相对较小，仅引起变形微量增加及螺栓拉力有所减弱；加劲肋的设置对节点力学行为的影响最为显著，在设置加劲肋时端板呈现出明显的双向弯曲，其焊接钢板外侧两端出现大范围塑性发展区域；相比之下，无加劲肋试件中的端板仅表现出单一方向的弯曲变形，塑性发展区集中于焊接钢板与剪贴板的接合区以及螺栓孔连线的相邻范围。



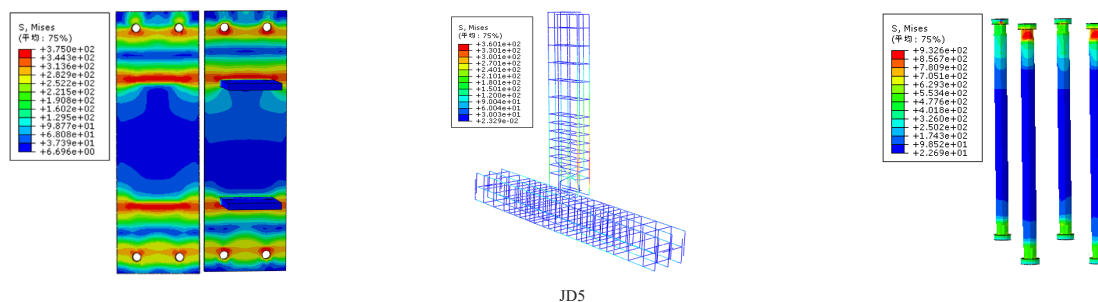


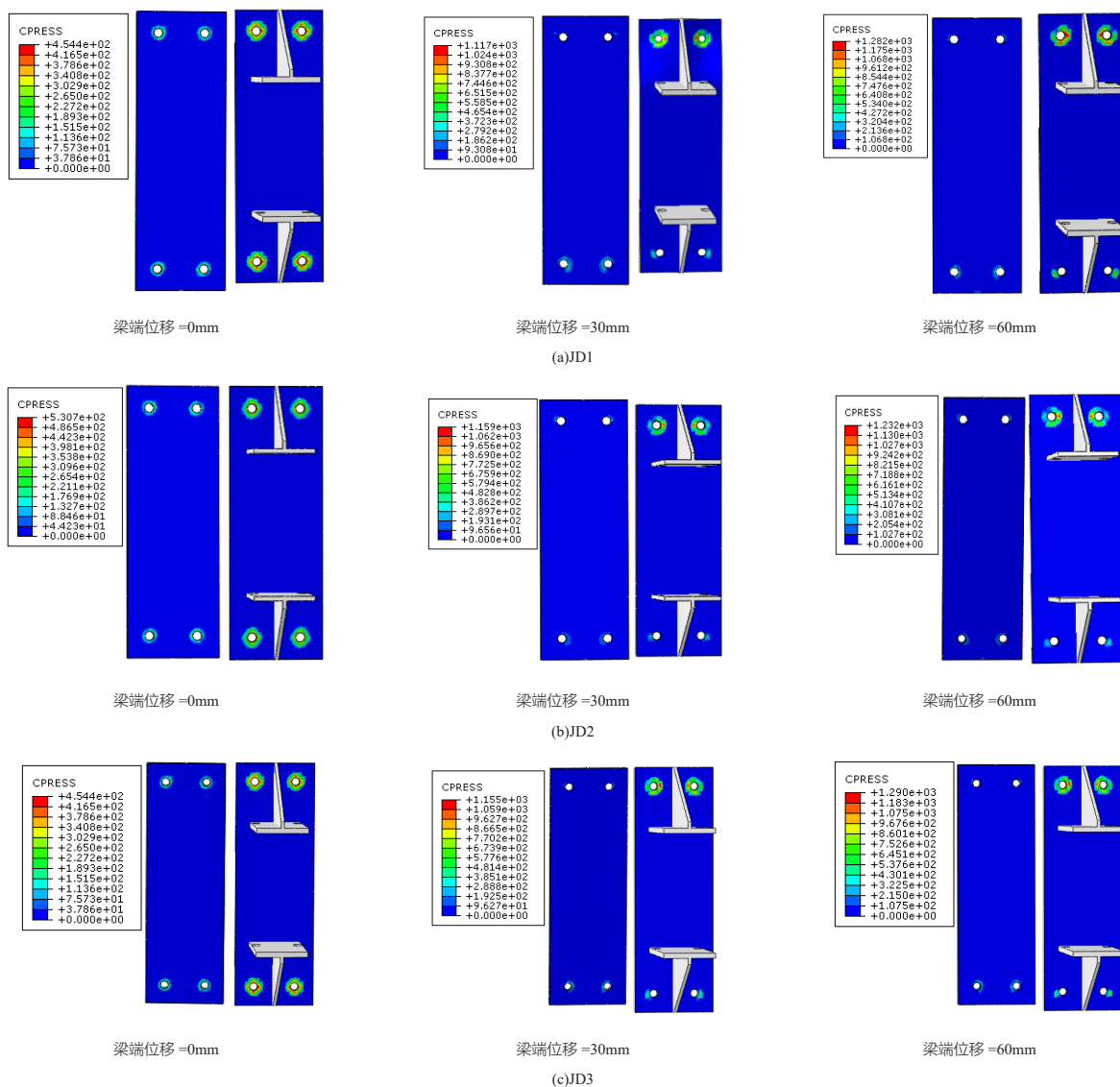
图6节点应力云图

2. 端板变形分析

图7反映了不同位移水平下各节点端板接触压应力的分布状态。节点应力集中在螺栓孔周围区域。在初始无位移条件下，节点内力主要由高强螺栓的预紧力所提供，端板与接触面之间呈现出数值较小且在四个螺栓孔附近对称且均匀的压应力分布。

在持续增大的梁端位移作用下，端板-柱接触面的应力分布模式发生显著改变，位于受拉区的端板逐渐与柱面脱离接触，致

使该区域压应力不断降低，作用范围也随之缩小。端板与梁端接触区的压应力集中于螺栓螺帽作用范围，与此同时，受拉侧的应力值亦随着位移加载而持续升高；而在受压区，由于混凝土柱与端板产生的协同变形作用，高强螺栓预应力相应降低。所有节点的接触压应力均未扩散至螺栓孔以外的区域，表明节点在变形过程中端板端部未出现明显的撬力作用。



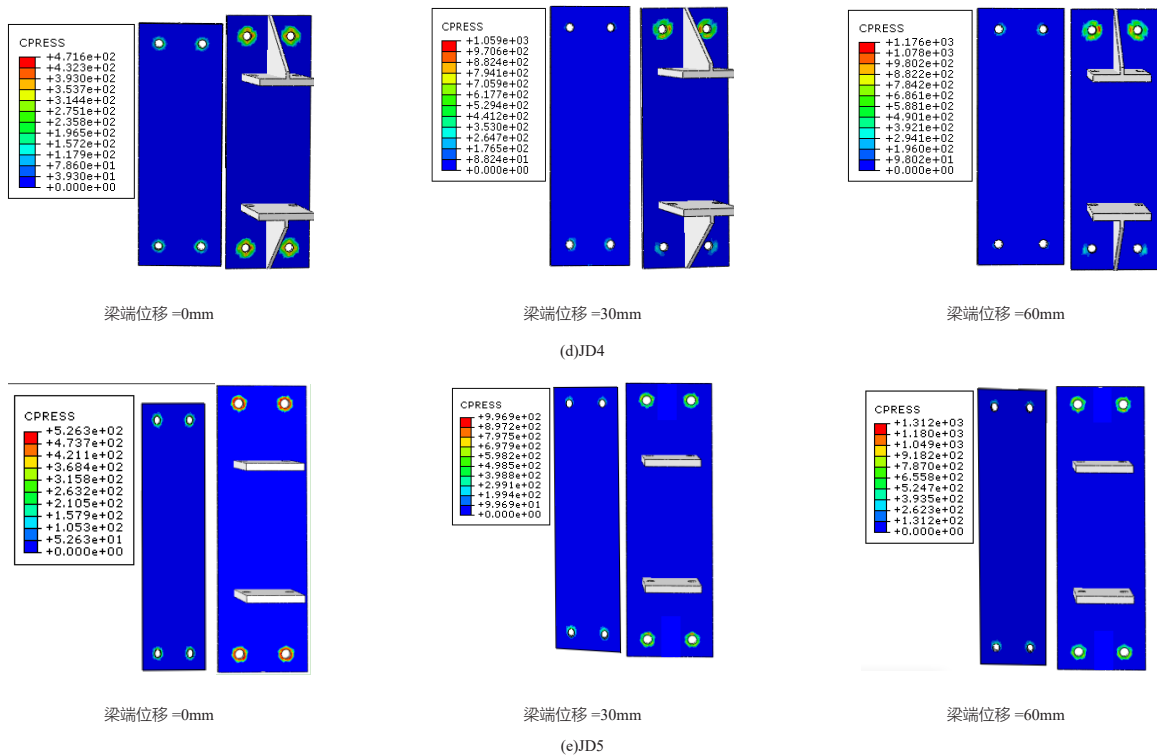
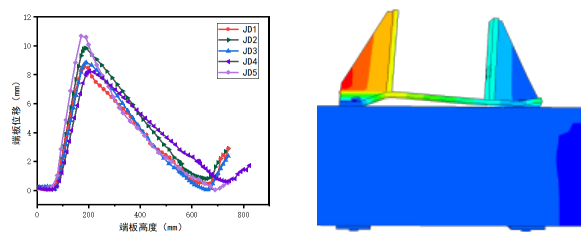


图7 端板接触应力云图

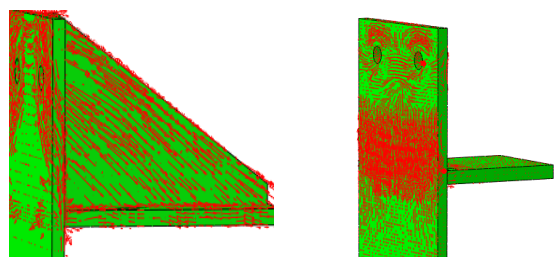
如图8所示,通过在端板上设置AB和BC两条路径并提取位移数据,可获取端板在高度与宽度方向的变形特征,如图9所示。图10对比了端板主拉应力矢量分布。主应力迹线图中仅给出JD1与JD5的典型主应力迹线对比分析,JD2~JD4试件的分布与JD1基本一致。

沿AB路径观测发现,设有加劲肋的试件JD1~JD4在加劲肋位置出现明显位移增大;而未设加劲肋的试件JD5在宽度方向几乎未发生位移。各试件在BC路径的变形模式基本一致。端板顶部(B点)位移趋近于零,至水平焊接钢板处达到峰值,随后在受压侧螺栓位置减为零,呈现近似线性递减。图10进一步表示加劲肋的引入改变了端板传力机制,使其在加劲肋处承担更大荷载,从而导致该区域形成显著的局部变形。



(b) BC路径(高度)位移曲线

图9 端板变形曲线



(a) 端板加劲肋主拉应力迹线

(b) 端板主拉应力迹线

图10 端板主拉应力迹线

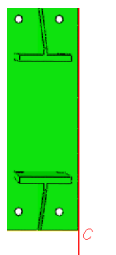
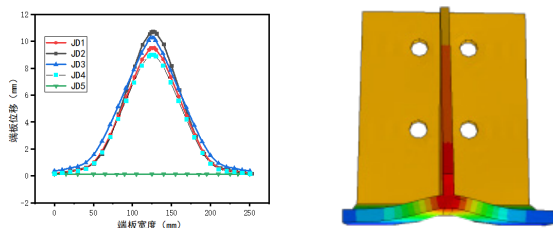


图8 路径示意图



(a) AB路径(宽度)位移曲线

3.承载力及弯矩-转角曲线

表2汇总了各试件的承载力计算结果。从图8所示的节点弯矩-转角骨架曲线可以看出,所有曲线均表现出典型的反“Z”形态。随着相对转角的增加,曲线切线斜率持续降低,反映出节点转动刚度呈现持续衰减的趋势,最终荷载逐渐趋于稳定值。依据EC3^[16]规范中对无支撑结构的分类标准,图中以虚线段标示了斜率分别为 $25EI/L$ 与 EI/L 的界限(其中为梁线刚度)。通过对比各曲线初始切线刚度可知,所有模拟节点均属于半刚性连接范畴,其初始转动刚度排序为:JD1 > JD4 > JD3 > JD2 > JD5。参

数分析表明：

(1) 端板厚度 (JD1与 JD2对比)：增加厚度可有效提升节点刚度与承载力；

(2) 螺栓直径 (JD1与 JD3对比)：直径减小时螺栓过早屈服，限制端板塑性发展，导致承载力下降；

(3) 螺栓间距 (JD1与 JD4对比)：间距增大会轻微降低转动刚度，但可略微提高抗弯承载力，综合考虑经济性与规范^[17]要求，建议采用标准容许间距；

(4) 加劲肋设置 (JD1与 JD5对比)：无加劲肋节点传力路径改变，塑性铰集中于螺栓连接与焊接区域，显著降低节点承载能力。

表2 试件节点弯矩及转角模拟结果对比

试件 编号	屈服弯矩 $M_y / kN \cdot m$	$\frac{M_{yJD1}}{M_{yJD1}}$	屈服转角 θ_y / rad	峰值弯矩	$\frac{M_{maxJD1}}{M_{maxJD1}}$	峰值转角 θ_y / rad
JD1	149.40	—	0.0055	193.54	—	0.0112
JD2	91.17	0.57	0.0044	120.38	0.61	0.0143
JD3	100.86	0.78	0.0057	144.39	0.73	0.0099
JD4	176.17	1.17	0.0067	217.24	1.1	0.0078
JD5	85.43	0.57	0.0045	117.23	0.33	0.02

表中 $i=2,3,4,5$

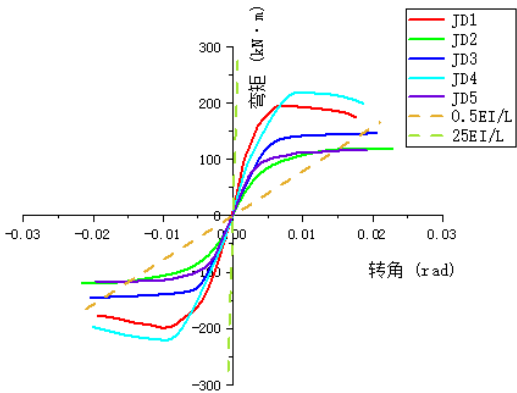


图8 不同参数的节点模拟骨架曲线对比

三、结论

本研究基于 Abaqus 有限元分析，对端板连接节点的力学性能开展了系统的参数化分析，主要获得以下结论：

(1) 数值分析结果表明，该类型节点表现出明显的半刚性力学行为，其初始转动刚度的数值介于刚接与铰接状态之间。在循环荷载作用下，混凝土损伤主要出现在梁构件上，而柱构件基本保持完好。配置加劲肋的节点在梁身形成分布范围较广的损伤区，且在靠近梁端部位最为严重；在未设加劲肋的节点中，破坏区域集中于梁端角部。

(2) 端板厚度的增加能够显著提升节点的抗弯性能与转动约束能力；而若螺栓直径偏小，则可能因其提前进入屈服阶段，最终引发节点的脆性失效模式。适当增加螺栓间距虽会引起转动刚度轻微下降，但能够略微提升承载力，总体影响有限；未设置加劲肋会明显削弱节点的承载能力与转动刚度。

(3) 接触压应力的分布特征表明，螺栓孔周边区域形成了稳定的应力集中区，该核心分布特征对端板厚度、螺栓直径与间距以及加劲肋的设置均不敏感，说明节点受力过程中端板端部未出现撬力效应。

(4) 加劲肋的设置改变了节点的内力传递路径：加劲肋的引入促使端板的变形模式由单向弯曲转变为双向弯曲，从而显著优化了荷载的传力路径与扩散效率；而无加劲肋的端板仅产生竖向弯曲。在高度方向上，两类节点的变形规律基本一致，均以受压侧螺栓为中心发生转动，变形从受拉侧焊接钢板处的最大值开始，沿朝向受压侧螺栓的方向逐渐衰减。

参考文献

[1] 吴刚, 冯德成. 装配式混凝土框架节点基本性能研究进展 [J]. 建筑结构学报, 2018, 39(02): 1-16.

[2] Arden L, Bement Jr, National Research Council Forum on the 25th Anniversary of the National Earthquake Hazards Reduction Program[C], February 20, 2003.

[3] KS Elliott, Research and development in precast concrete framed structure[J]. Progress in Structural Engineering & Materials, 2000, (02): 405-428.

[4] KS Elliott, Research and development in precast concrete framed structure[J]. Progress in Structural Engineering & Materials, 2000, (02): 405-428.

[5] Priestley, M. J. Nigel and Jian Ren Tao. Seismic response of precast prestressed concrete frames with partially debonded tendons. PCI Journal, 1993, Vol. 38(1): 58-66.

[6] Nakaki S D, Englekirk R E, Plaehn J L. Ductile connectors for a precast concrete frame[J]. PCI journal, 1994, 39(5): 46-59.

[7] Ertas, Onur, Sevkett Ozden, Ductile Connections in Precast Concrete Moment Resisting Frames [J]. PCI Journal, 2006(3): 66-76.

[8] R. Vidjeapriya, K. P. Jaya. Experimental Study on Two Simple Mechanical Precast Beam-Column Connections under Reverse Cyclic Loading[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2013, 27(4): 402-414.

[9] aider Hamad Ghayeb, Hashim Abdul Razak, N.H. Ramli Sulong. Development and testing of hybrid precast concrete beam-to-column connections under cyclic loading. Construction and Building Materials, 2017, 151: 258-278.

[10] J.D. Nzabonimpa, Won-Keel Hong, Jisoon Kim. Experimental and non-linear numerical investigation of the novel detachable mechanical joints with laminated plates for composite precast beam-column joint[J]. Composite Structures, 185(2018): 286-303.

- [11] 赵斌, 吕西林, 刘海峰. 预制高强混凝土结构后浇整体式梁柱组合件抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2004(06):22-28.
- [12] 范力. 装配式预制混凝土框架结构抗震性能研究 [D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [13] 黄频. 端板螺栓连接钢-混凝土组合节点试验及力学性能研究 [D]. 湖南大学, 2011.
- [14] 蔡小宁. 新型预应力预制混凝土框架结构抗震能力及设计方法研究 [D]. 东南大学, 2012.
- [15] 刘建华. 新型装配式半刚性梁柱节点的抗震性能实验研究 [D]. 安徽建筑大学, 2018.
- [16] American Institute of Steel Construction: Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings, Chicago, IL, 1999.
- [17] 《钢结构设计标准》: GB 50017-2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [18] 江见鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [20] Faella C, Piluso V, Rizzano g. Structural steel semi rigid connections: theory, design, and software IM. CRC press, 1999.
- [21] 黄频. 端板螺栓连接钢-混凝土组合节点试验及力学性能研究 [D]. 湖南大学, 2011.