

新型半刚性梁-柱节点钢框架结构承载性能 数值模拟研究

方 瑜¹ 黄忠华¹ 吴祖咸¹ 段 雄² 罗金辉² 郭小农^{2,*}

(1. 浙江华云电力工程设计咨询有限公司, 杭州 310000; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘 要 本研究对传统的 H 型钢梁-柱端板连接节点进行了改进, 使得框架柱在两个主轴方向均可以
采用相同尺寸的端板节点与框架梁连接, 然后将改进的端板节点分别应用于单层单榀的带支撑框架和
不带支撑框架中, 用于框架柱强轴方向与框架梁的连接。根据有无交叉支撑、有无支撑连接板、加劲肋
形式、梁柱节点形式等参数设计了 7 个框架, 建立了框架的有限元计算模型, 对框架进行单调加载, 研究
框架的力学性能。研究表明, 使用改进端板节点框架的初始刚度、屈服荷载、极限承载力、位移延性
系数与普通端板节点连接的钢框架基本相同, 但节点区的剪切变形明显减小; 支撑的存在会显著提升框
架的刚度和承载力, 但会使得框架的破坏模式从端板弯曲转变为支撑的净截面拉断, 有支撑框架与无支
撑框架相比, 初始刚度提高了 144%, 屈服荷载提高了 123%, 极限承载力提高了 128%。

关键词 端板节点, 钢框架, 刚度, 极限承载力, 延性

中图分类号: TU391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.15935/j.cnki.jggcs.202601.0003

Numerical Simulation Study on Load-Bearing Performance of Steel Frame Structures with New Semi-Rigid Beam-Column Joints

FANG Yu¹ HUANG Zhonghua¹ WU Zuxian¹ DUAN Xiong² LUO Jinhui² GUO Xiaonong^{2,*}

(1. Zhejiang Huayun Power Engineering Design Consulting Co., Ltd., Hangzhou 310000, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract Traditional H-shaped steel beam-column end-plate connections were redesigned to enable frame
columns to connect to frame beams using identical end-plate joints along both principal axes. These modified
joints were subsequently applied in single-layer frames—both braced and unbraced—to connect frame
columns along the strong axis to the beams. Seven frame configurations were designed considering variables
such as the presence of cross-bracing, brace connection plates, stiffener types, and beam-column joint
details. Finite element models of these frames were developed and subjected to monotonic loading to
investigate their mechanical performance. The results show that frames with the improved end-plate joints
exhibit comparable initial stiffness, yield load, ultimate bearing capacity, and displacement ductility
coefficient to those with conventional end-plate joints. However, shear deformation within the joint core area is
significantly reduced. The inclusion of bracing markedly enhances frame stiffness and load-bearing capacity,
though it alters the failure mode from end-plate bending to net-section tension failure of the braces. Compared
with the unbraced frame, the braced frame demonstrates a 144% increase in initial stiffness, a 123% increase

收稿日期: 2025-06-03

作者简介: 方 瑜, 男, 正高级工程师, 研究方向为变电站土建设计。E-mail: 5008239@qq.com

*联系作者: 郭小农, 男, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为铝合金结构和钢结构。E-mail: guo-xiao-nong@tongji.edu.cn

in yield load, and a 128% increase in ultimate bearing capacity.

Keywords end-plate joint, steel frame, stiffness equation, ultimate bearing capacity, ductility

0 引言

近年来,随着装配式钢结构建筑的不断推广和施工效率的不断提升,传统的焊接节点已经不能满足建筑行业对钢构件之间连接的要求,特别是在框架梁和框架柱的连接上;而高强螺栓连接具有安装方便快捷、现场施工效率高、预制率高、力学性能较好等优点,成为目前钢结构梁柱间主要的连接方式,其中的端板节点更是目前最常

用的节点形式之一。

根据端板长度与梁翼缘高度的大小关系,可以将端板节点分为内缩式端板节点、平齐式端板节点和外伸式端板节点三类,如图1所示。内缩式端板节点通常被认为是铰接节点,传力效率低,使用场景较少;其他两种节点一般被认为是半刚性节点,但是外伸式端板节点可以通过增加端板厚度或加劲肋达到刚性节点的水平,是目前主要使用的端板节点形式。

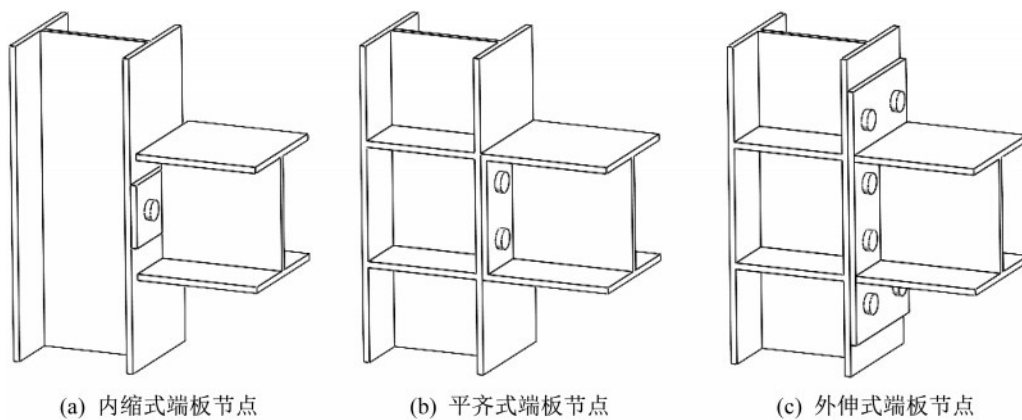


图1 三类端板节点构造

Fig.1 Construction of three types of end plate joints

目前,有大量的学者对端板节点的力学性能和设计方法进行了研究。王元清等^[1]采用有限元分析软件 ANSYS 研究了半刚性端板连接节点对多层框架设计的影响,对比了刚接节点和半刚性节点连接时框架的内力和变形,并给出了结构设计时考虑节点刚度的建议。王可峰等^[2]对半刚性连接下框架柱的稳定性进行了研究,得出了框架柱计算长度公式,探究了半刚性连接对框架承载性能的影响。陈健等^[3]对梁柱弱轴方向的端板连接节点的刚度进行了试验研究,得到了节点的弯矩-转角关系曲线,结果表明,相同构造下弱轴方向的端板节点初始刚度仅有强轴方向的 30%~40%。孟宝等^[4]对端板连接钢框架的抗倒塌性能进行了数值模拟和理论推导,结果表明梁的高跨比和端板厚度对框架的抗倒塌性能影响显著。Cassiano 等^[5]对研究了端板节点中螺栓数量、螺栓

排布、端板厚度、截面尺寸等参数对节点力学性能的影响,提出了端板厚度的计算公式。Shi 等^[6]对不同构造端板节点的数值模型进行了开发与优化,并将数值模拟的结果与试验结果进行比较,结果表明,优化后的数值模型可以很好地模拟螺栓预紧力和构件之间的接触,数值模拟结果与试验结果吻合。Sofias 等^[7]使用外伸式端板节点连接框架柱和翼缘削弱的框架梁,并对两个足尺的试件进行了往复加载试验和数值模拟,结果表明两个试件的抗震性能良好,梁翼缘削弱区域形成塑性铰,避免了其他构件的破坏。针对端板节点试验中全尺寸原型节点与缩尺节点相似误差的组成形式及演变规律,Zhao 等^[8]基于试验结果建立了有限元模型,并提出了补偿缩比模型相似误差的计算方法,结果表明使用补偿方法可将两种模型的误差降低至 5% 以内。

从现有的研究可以看出,目前针对端板节点力学性能和设计方法的研究已经比较成熟,但对使用端板节点连接框架的整体性能研究较少。为此,本研究对传统的端板节点进行了改进,使得H形两个主轴方向均能用构造相同的端板节点与框架梁连接,建立了框架的有限元模型,研究了有无交叉支撑、有无支撑连接板、加劲肋形式、梁柱节点形式等参数对框架主轴方向力学性能的影响。

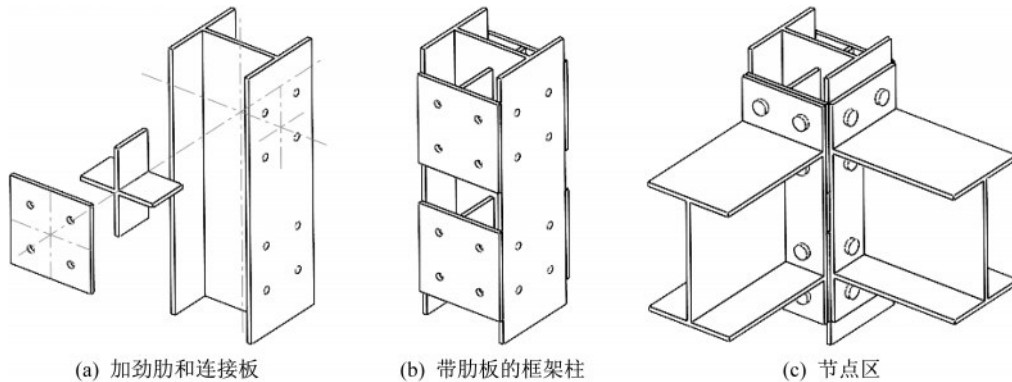


图2 节点构造示意图

Fig.2 Schematic diagram of joint construction

1.2 框架的几何模型

改进的端板连接形式对节点区的力学性能会产生影响,为研究使用改进节点的钢框架主轴方向的性能,设计了一个不带支撑的纯框架和一个带交叉支撑的框架,如图3所示。使用ABAQUS2020对框架进行建模分析,框架柱截面为H200×200×6×10(mm),长度为2.95 m,节点区中心高度为2.52 m,框架梁截面为H280×150×6×10(mm),长度为3 m,支撑截面为C100×50×3×3(mm),长度为3.55 m,支撑中心线与节点区中心点和柱底中心点连线重合。整个框架中的所有构件材料均采用Q355B钢,框架梁柱节点采用8.8级M16高强螺栓连接,预紧力为80 kN,支撑与框

1 有限元模型的建立

1.1 改进端板节点的构造

改进端板节点的构造如图2所示,将传统端板节点中的水平加劲肋改为十字形加劲肋,然后在加劲肋上焊接一块连接板,使得弱轴方向形成一个平整的表面,框架柱两个主轴方向可以采用相同的端板节点与框架梁进行连接。

架采用10.9级M22螺栓连接,预紧力为190 kN。

模型中,十字形加劲肋、连接板、支撑板、柱脚加劲肋和框架柱使用一个部件建立,相互之间没有接触关系;框架左侧还建立了一个用于施加位移荷载的加载头,然而不是简单地将柱翼缘耦合到一个参考点上,这样可以更加准确地考虑水平荷载对框架的影响。

在此基础上,本研究还根据有无交叉支撑、有无支撑连接板、加劲肋形式、梁柱节点形式等参数额外设计了5个试件,用于和两个使用改进端板节点连接的试件进行比较,各个试件的编号和区别见表1,表格中N代表无支撑框架,B代表有支撑框架,设计试件N-4是为了单独评估支撑连接板对框架力学性能的影响。

表1

试件编号和区别

Table 1

Specimen numbers and differences

试件编号	研究方法	交叉支撑	支撑连接板	加劲肋形式	梁柱节点形式
N-1	有限元分析	无	无	十字形加劲肋	端板节点
N-2	有限元分析	无	无	水平加劲肋	端板节点
N-3	有限元分析	无	无	十字形加劲肋	焊接节点
N-4	有限元分析	无	有	十字形加劲肋	端板节点
B-1	有限元分析	有	有	十字形加劲肋	端板节点
B-2	有限元分析	有	有	水平加劲肋	端板节点
B-3	有限元分析	有	有	十字形加劲肋	焊接节点

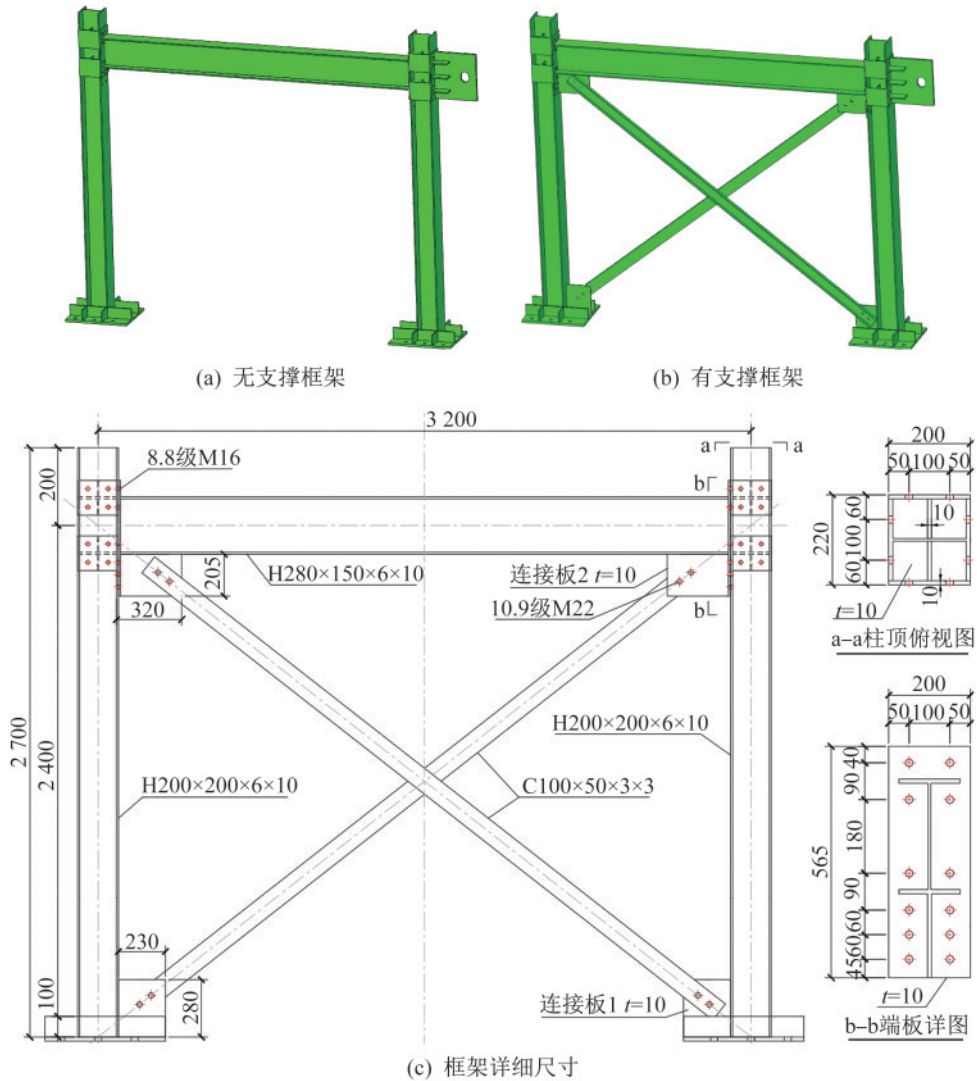


图3 试件几何示意图(单位:mm)

Fig.3 Schematic diagram of specimen geometry (Unit:mm)

1.3 材料属性和网格划分

模型中梁柱支撑构件使用Q355B钢材的本构模型采用了一个带下降段的三折线模型,如图4所示,材料的弹性模量(E)为206 GPa,屈服强度(f_y)为400 MPa,极限抗拉强度(f_u)为500 MPa,极限应变为0.15,下降段最终强度为300 MPa,最终应变为0.3。高强螺栓采用理想弹性模型,根据厂家提供的参数,8.8级高强螺栓屈服强度(f_y)为650 MPa,10.9级高强螺栓屈服强度(f_y)为900 MPa,两种螺栓的弹性模量(E)为200 GPa。

模型中所有部件均采用8节点6面体线性减缩积分单元C3D8R建立,梁柱构件全局单元网格

尺寸为20 mm,支撑为15 mm,螺栓为8 mm。在各个试件上划分了局部网格,确保每个构件上的板件在厚度方向上至少有3个单元,并且对节点区的网格进行了加密,如图5所示。

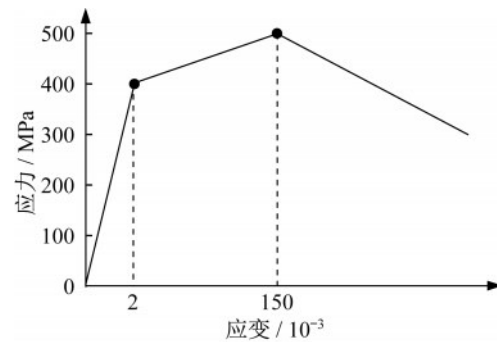


图4 Q355B钢材的本构模型

Fig.4 Constitutive model of Q355B steel

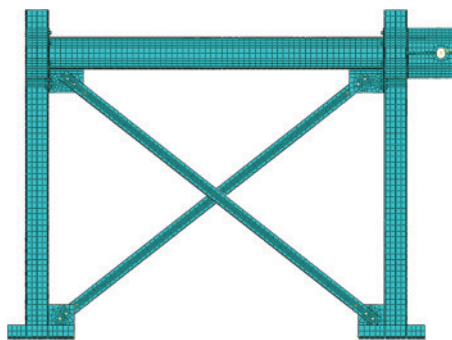


图5 框架网格划分
Fig.5 Frame mesh division

1.4 接触关系和边界条件

模型中接触关系包括:端板与柱翼缘、左侧加载接头与柱翼缘、螺帽(螺母)与板件、螺杆与螺孔、支撑与支撑连接板。所有接触均采用表面与表面的接触类型,相互作用属性为法向“硬接触”,允许接触后分离,切向为采用“罚函数”的摩擦接触,摩擦系数为0.3。

模型中共设置了三个分析步,第一个分析步中在两根框架柱的柱底施加完全固定约束,然后对螺栓施加预紧力;第二个分析步中,在柱顶表面施加总和为 700 kN 的均布荷载,每根框架柱的轴压比为 0.35。将右侧加载接头的销轴孔耦合到一个参考点上,然后在第三个分析步中在参考点上施加 150 mm 水平位移,如图 6 所示。

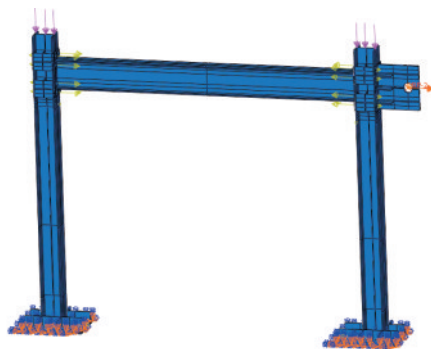


图6 模型边界条件
Fig.6 Model boundary conditions

最后需要说明的是,本文的研究是在“新型半刚性梁-柱节点钢框架结构承载性能试验研究”的基础上开展的,建立的数值模型已得到试验验证。

2 有限元分析结果

2.1 各个试件的破坏模式

7个试件的破坏模式如图7所示,无支撑框架中,使用改进端板节点框架的破坏模式为端板的弯曲破坏,使用传统端板节点框架的破坏模式为节点区的剪切破坏,使用焊接节点框架的破坏模式为节点区和梁端上下翼缘的强度破坏,使用改进端板节点并带有支撑连接板框架的破坏模式为节点区底部柱翼缘受压时的局部失稳;有支撑框架中,所有框架的破坏模式均为受拉支撑螺栓孔处的净截面破坏。

2.2 试件的荷载-位移曲线

各个试件水平加载点(如图6右上角所示)上荷载-位移曲线如图8所示,从图中可以看出:

(1) 无论是否有交叉支撑,使用传统端板节点与改进端板节点框架的初始刚度和极限承载力接近,但是使用传统端板节点的框架有更好的延性。

(2) 使用焊接节点的框架中,由于梁、柱之间的约束增强,框架的初始刚度和极限承载力得到了提升,但延性系数有所下降,符合实际情况。

(3) 对比试件 N-4 和 N-1 的曲线,可以看出支撑连接板的存在显著提高了框架的初始刚度和极限承载力,主要原因在于柱底的连接板增大了框架的截面高度,减小了柱的计算长度。

2.3 不同试件力学性能的比较

从曲线上提取了各个试件的初始刚度、屈服荷载、极限承载力和位移延性系数,其中初始刚度是各曲线上的原点切线斜率,屈服荷载和屈服弯矩通过“几何作图法”得到,极限承载力是曲线上的最大荷载,延性系数是 85% 极限承载力所对应的位移与屈服位移的比值。

将各项数据整理到表 2 中,从表格中可以得出以下结论:

(1) 通过比较 N-1 和 N-2、B-1 和 B-2,发现相较于传统的水平加劲肋,十字形加劲肋可以略微提升框架主轴方向的初始刚度、屈服荷载和极限承载力,在无支撑框架中,初始刚度提升 1.73%,屈服荷载提升 2.64%,极限承载力提升 3.22%;在

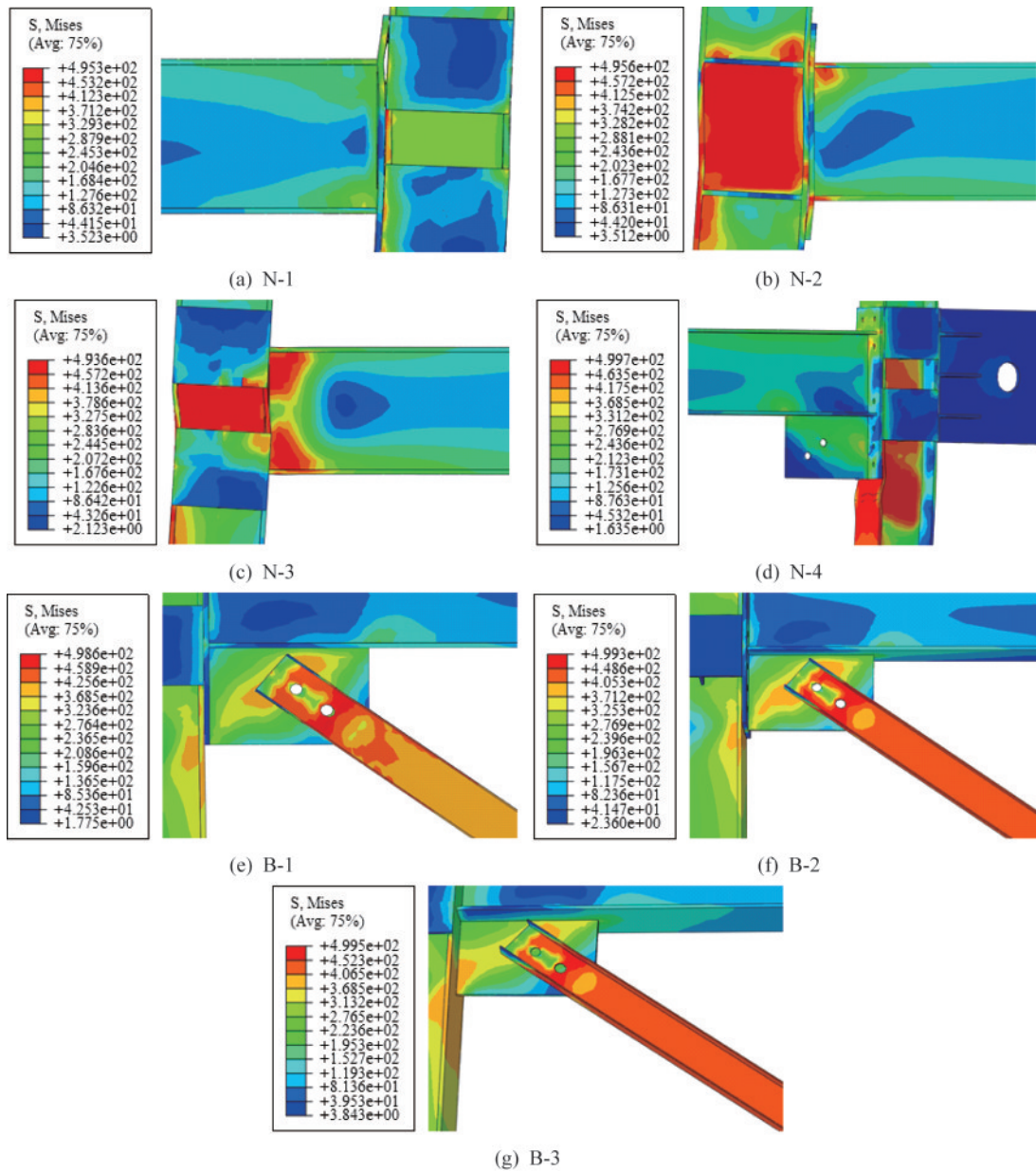


图7 各个试件的破坏模式

Fig.7 Failure modes of each specimen

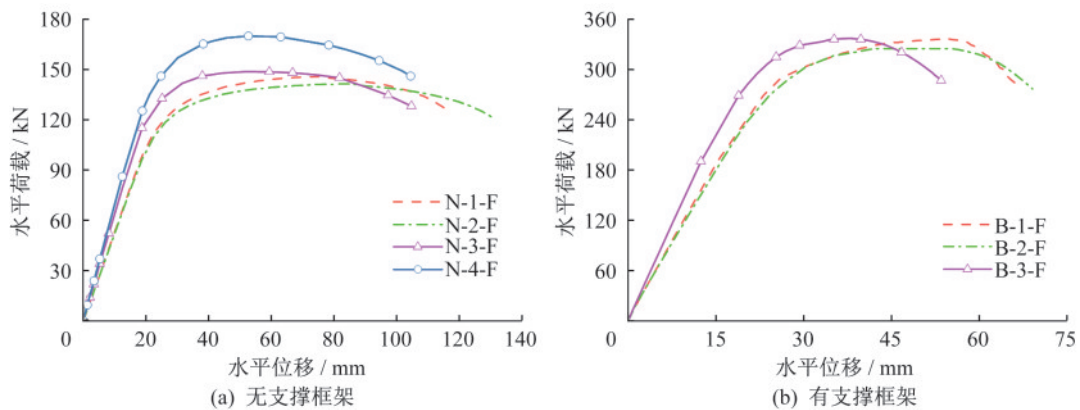


图8 荷载-位移曲线

Fig.8 Load-displacement curves

有支撑框架中,初始刚度提升 6.04%,屈服荷载提升 3.12%,极限承载力提升 3.60%。

(2) 通过比较 N-1 和 N-3、B-1 和 B-3,可以发现梁柱节点形式对框架的屈服荷载和极限承载力的影响不大,使用端板节点的框架延性系数略高,但节点形式对框架的初始刚度有极大的影响,使用端板节点框架的初始抗侧刚度约为使用焊接节点框架的 83%。

(3) 通过比较 N-1、N-4 和 B-1,可以得出框架本身、支撑连接板、交叉支撑对框架初始刚度的贡献分别为 5.30 kN/mm、1.68 kN/mm、6.00 kN/mm,

对框架极限承载力的贡献分别为 145.52 kN、24.45 kN、157.83 kN,交叉支撑和连接板的存在使得框架的初始刚度提升了 145%,极限承载力提升了 125%,与试验结果一致。

(4) 由于数值模型是不存在任何缺陷的理想模型,数值模型中框架的力学性能普遍优于试验所得,特别是对于位移延性系数,由于实际缺陷的存在,框架的破坏提前,导致试验测得的位移延性系数与数值模拟之间存在较大的误差,无支撑框架相差 10.9%,有支撑框架相差 5.3%。

表 2 不同试件的力学性能

Table 2 Mechanical properties of different specimens

试件编号	初始刚度/(kN·mm ⁻¹)	屈服荷载		极限承载力		85% 极限承载力		延性系数
		力/kN	位移/mm	力/kN	位移/mm	力/kN	位移/mm	
N-1	5.30	130.40	32.51	145.42	71.15	123.61	116.05	3.57
N-2	5.21	127.05	32.06	140.89	74.84	119.76	130.93	4.08
N-3	6.38	134.89	31.38	148.62	51.86	126.33	104.72	3.34
N-4	6.98	152.94	28.02	169.97	52.72	144.47	104.38	3.72
B-1	12.98	306.60	29.05	337.40	54.21	286.79	65.87	2.27
B-2	12.24	297.32	28.97	325.67	55.65	276.82	68.90	2.37
B-3	15.70	309.11	24.02	337.80	37.94	287.13	53.33	3.22

3 结 论

本文根据有无交叉支撑、有无支撑连接板、加劲肋形式、梁柱节点形式等参数对 7 个框架进行了数值模拟,研究了框架的在单调荷载作用下的力学性能,得到以下结论:

(1) 无支撑框架的破坏主要发生在节点区,有支撑框架的破坏模式为受拉支撑的净截面拉断。

(2) 有支撑框架与无支撑框架相比,初始刚度提高 144%,屈服荷载提高 123%,极限承载力提高 128%,表明柔性交叉支撑的存在可以有效提高框架的侧向承载力和刚度。

(3) 有支撑框架的位移延性系数小于 3,并且在支撑拉断以后承载力迅速下降,表明交叉支撑的存在会严重削弱框架的延性。

(4) 与使用传统节点框架相比,由于十字形加劲肋和连接板的存在,改进的端板节点对框架

和主轴方向的力学性能有一定提升效果,更重要的是极大地减小了节点区的剪切变形。

(5) 与使用焊接节点的钢框架相比,使用改进端板节点的钢框架初始刚度下降了 13%,但框架的承载力基本没有受到影响。

参 考 文 献

- [1] 王元清,张一舟,舒兴平,等.端板连接半刚性节点对多层钢框架设计的影响[J].青岛理工大学学报,2010,31(1):33-37.
WANG Yuanqing, ZHANG Yizhou, SHU Xingping, et al. Influence of semi-rigid endplate-connected joints on design of multi-storey steel frames [J]. Journal of Qingdao Technological University, 2010, 31 (1) : 33-37. (in Chinese)
- [2] 王可峰,李慧.半刚接钢框架柱稳定承载力研究[J/OL].钢结构,2018,33(2):19-25.
WANG Kefeng, LI Hui. Research on the stable bearing capacity of semi-rigidly connected steel frame columns

- [J/OL]. Steel Construction, 2018, 33 (2) : 19-25. (in Chinese)
- [3] 陈健, 郑晓燕, 李峰宇. 梁柱弱轴端板螺栓连接刚度的试验研究[J/OL]. 钢结构, 2017, 32(6): 13-17, 51.
CHEN Jian, ZHENG Xiaoyan, LI Fengyu. Experimental study on stiffness of beam-column weak-axis end-plate bolted connections[J/OL]. Steel Construction, 2017, 32 (6): 13-17, 51. (in Chinese)
- [4] 孟宝, 钟炜辉, 郝际平, 等. 平齐端板连接钢框架梁柱子结构的抗倒塌性能分析[J/OL]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2016, 48(3): 376-382.
MENG Bao, ZHONG Weihui, HAO Jiping, et al. Analysis of collapse-resistant performance of steel frame beam-column sub-structures with flush end-plate connections[J/OL]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2016, 48(3): 376-382. (in Chinese)
- [5] CASSIANO D, D' ANIELLO M, REBELO C. Parametric finite element analyses on flush end-plate joints under column removal[J/OL]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 137: 77-92.
- [6] SHI G, SHI Y, WANG Y, et al. Numerical simulation of steel pretensioned bolted end-plate connections of different types and details [J/OL]. Engineering Structures, 2008, 30(10): 2677-2686.
- [7] SOFIAS C E, KALFAS C N, PACHOUMIS D T. Experimental and FEM analysis of reduced beam section moment endplate connections under cyclic loading [J/OL]. Engineering Structures, 2014, 59: 320-329.
- [8] ZHAO D, LI H, ZHOU Y. Coupling error modeling and compensation of beam-column endplate connection system [J/OL]. Journal of Constructional Steel Research, 2023, 208: 108005.