

带支撑节点板钢框架梁柱节点抗弯性能分析

谢思昱¹, 郑七振¹, 陈刚¹, 包亚敏², 武昭融³

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 上海久创建设管理有限公司, 上海 201204;
3. 同济大学浙江学院 交通运输工程系, 嘉兴 314051)

摘要: 研究了带支撑节点板钢框架梁柱节点的抗弯性能. 在 ABAQUS 有限元分析软件中采用 C3D8I 单元分别建立了 6 个由端板或双腹板角钢连接的钢框架梁柱节点模型, 其中, 2 个不带支撑节点板, 4 个带支撑节点板. 研究在正、负弯矩作用下支撑节点板对钢框架梁柱节点承载能力、转动刚度的影响, 并分析了增设底角钢、端板外伸等措施对带支撑节点板钢框架梁柱节点抗弯性能的影响. 分析结果表明, 支撑节点板使钢框架梁柱刚度提高, 具有了半刚性, 明显提高了节点的抗弯性能. 增设底角钢和端板外伸有助于提高带支撑节点板钢框架梁柱节点抗弯性能.

关键词: 支撑节点板; 钢框架梁柱节点; ABAQUS 软件; 抗弯性能

中图分类号: TU 391 **文献标志码:** A

Analysis on the Flexural Performance of Steel Frame Beam-column Connections with Gusset Plate

XIE Siyu¹, ZHENG Qizhen¹, CHEN Gang¹, BAO Yamin², WU Zhaorong³

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Shanghai Evertrans Construction Management Co., Ltd., Shanghai 201204, China;
3. Department of Transportation Engineering, Tongji Zhengjiang College, Jiaxing 314051, China)

Abstract: To explore the flexural performance of steel frame beam-column connections with gusset plate, the models of 6 steel frame beam-column joints, connected with double web angle or end plate were established by using the C3D8I element in ABAQUS finite element software. There were two of the joints with gusset plate and four without gusset plate. Considering two conditions in which the joints were respectively under the action of positive and negative bending moment, the effects of gusset plate on the load bearing capacity and rotational stiffness of steel frame beam-column joints were studied. The influences of the measures, such as adding a seat angle and setting an one-side extended end-plate, on the flexural performance of steel frame beam-column connections with gusset plate were investigated. The results show that the gusset plate makes the steel frame beam-column joints semi-rigid, which significantly improves the flexural performance of the joints. Adding the seat angle and setting the one-side extended end-plate are helpful to enhance the flexural performance of steel frame beam-column connections with the gusset plate.

收稿日期: 2016-04-16

第一作者: 谢思昱(1991-), 女, 硕士研究生. 研究方向: 结构设计计算. E-mail: xiesiyu91@qq.com

通信作者: 郑七振(1962-), 男, 教授. 研究方向: 结构设计计算理论、复杂结构计算机仿真分析等.
E-mail: zhengqz1@163.com

Keywords: gusset plate; steel frame beam column connections; ABAQUS software; flexural performance

1 支撑板式连接节点

支撑板式连接节点是一种用节点板连接支撑杆件和框架梁柱的新型支撑节点,如图1所示, t 为节点板厚度.与我国《高层民用建筑钢结构技术规程》^[1]中推荐的几种常用刚性连接支撑节点(图2)相比,这种板式连接节点具有构造简单、安装方便及耗能性能好等优点.在我国《建筑抗震设计规范》和《建筑工程抗震性态设计通则》等规范中也提到这种节点板式连接形式^[2-3],理论上这种节点形式只适用于不超过12层的结构.

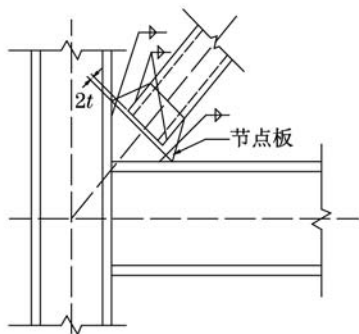


图1 支撑与节点板连接

Fig.1 Connection of gusset plate and bolster

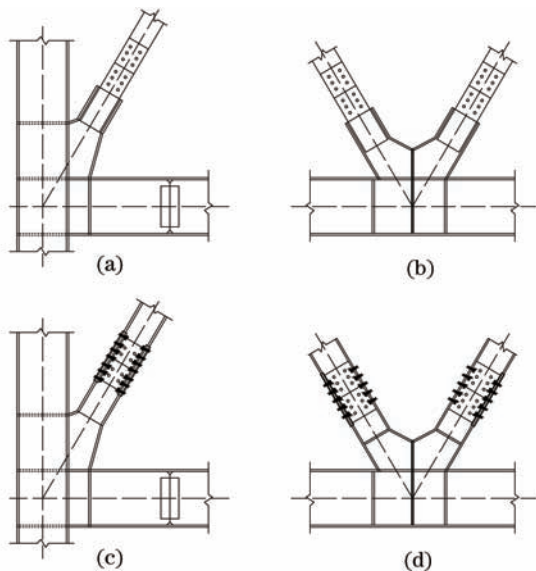


图2 支撑与节点连接

Fig.2 Connections of joint and bolster

钢框架梁柱节点经常采用双腹板角钢连接或者

平端板连接以承受轴向荷载,在设计中将节点假定为铰接,不传递任何弯矩,结构采用支撑体系来抵抗水平荷载,如风荷载、地震荷载等.1994年,美国北岭地震的震后调查结果显示^[4-5],钢框架结构的抗侧力体系严重破坏后,即支撑系统失效后,设计中被认为只承受竖向荷载的钢框架继续承受地震荷载,取得了意想不到的效果,而这是设计中经常被忽略的.可见,支撑节点板和框架节点共同工作的抗弯性能对于结构整体的抗震性能有很大影响.

Walbridge等^[6]认为节点板与梁柱节点共同工作具有较好的耗能性能,Yoo等^[7]提出支撑节点板在特殊中心支撑框架中经过适当的连接可以使结构具有更好的性能.目前,关于钢结构节点板连接的性能及其对结构的影响,国内已有一些研究成果^[8-9],但是,关于带支撑节点板梁柱节点转动刚度及其弯矩-转角关系,国内的理论和试验研究不多.本文为了探究支撑体系失效后钢框架节点与支撑节点板共同工作的抗弯性能,运用ABAQUS有限元分析软件对带支撑节点板的双腹板角钢连接、端板连接钢框架梁柱节点进行了数值模拟分析.

2 模型建立

2.1 模型设计

共设计了6个模型,如表1所示.为了分析支撑节点板对钢框架梁柱节点抗弯性能的影响,设计了两组对比试件,S-1和S-2使用双腹板角钢连接梁柱.其中:S-1带支撑节点板,S-2不带;S-3和S-4使用端板连接梁柱,其中,S-3带支撑节点板,S-4不带.另外,模型S-5在S-1的基础上增设底角钢,以分析底角钢对双腹板角钢连接的带支撑节点板钢框架梁柱节点的影响;模型S-6在S-3的基础上设置端板一端外伸,以分析端板外伸对端板连接的带支撑节点板钢框架梁柱节点的影响.

梁柱、角钢、端板、支撑节点板均采用Q345钢,柱子采用工字型钢,截面尺寸为350 mm × 350 mm × 19 mm × 12 mm,高2 800 mm,梁采用工字型钢,截面尺寸为250 mm × 250 mm × 14 mm × 9 mm,长度为2 800 mm,节点板尺寸为400 mm × 350 mm × 12 mm.节点由双腹板角钢连接时,角钢

与柱子翼缘之间采用 8.8 级 M20 高强螺栓连接,螺栓杆与孔洞之间的间隙为 1 mm,柱子翼缘与梁截面之间设置 10 mm 间隙.角钢与梁腹板之间采用三面围焊,焊条为 E50 焊条,角焊缝高度为 8 mm.端板连接的节点采用与双腹板角钢连接方法相同的高强螺栓连接.支撑节点连接板与梁上翼缘之间采用双面角焊缝,焊缝高度为 8 mm.各模型图如图 3~8 所示.

表 1 模型参数布置

Tab.1 Parameters of specimens

mm

模型编号	构造布置	构造参数	节点板尺寸
S-1	带节点板、双腹板角钢	角钢尺寸 90×90×10	400×350×12
S-2	双腹板角钢	角钢尺寸 90×90×10	—
S-3	带节点板、端板	端板尺寸 300×650×25	400×350×12
S-4	平端板	端板尺寸 300×320×25	—
S-5	带节点板、双腹板角钢、底角钢	角钢尺寸 90×90×10	400×350×12
S-6	带节点板、一端外伸端板	端板尺寸 300×730×25	400×350×12

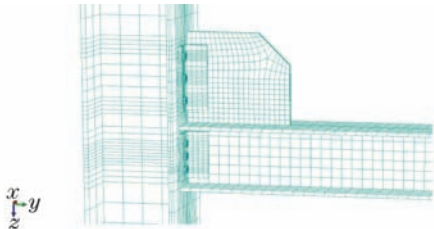


图 3 S-1 模型
Fig.3 Model of S-1

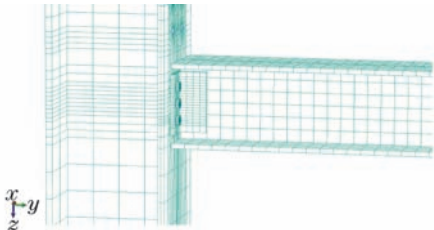


图 4 S-2 模型
Fig.4 Model of S-2

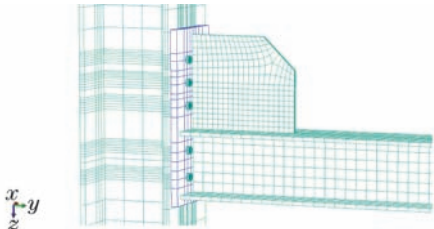


图 5 S-3 模型
Fig.5 Model of S-3

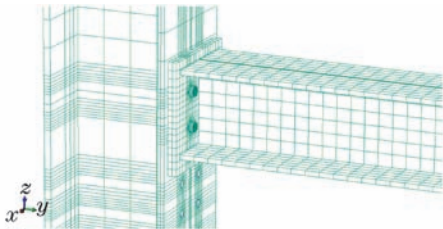


图 6 S-4 模型
Fig.6 Model of S-4

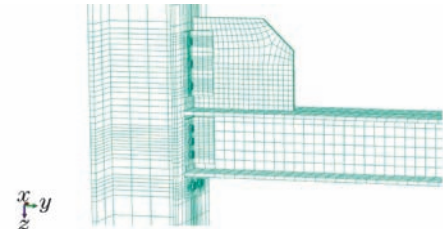


图 7 S-5 模型
Fig.7 Model of S-5

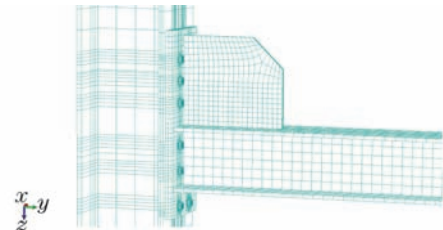


图 8 S-6 模型
Fig.8 Model of S-6

计算时约定,梁上部受拉、下部受压为承受负弯矩,上部受压、下部受拉为承受正弯矩.由于带支撑节点板的梁柱连接节点在支撑失效后,其承受正弯矩、负弯矩的性能不同,因此,在正、负弯矩情况下建立 10 个有限元模型,如表 2 所示.

表 2 有限元模型

Tab.2 Finite element models

模型编号	弯矩方向	有限元模型编号
S-1	负弯矩	S-1-N
	正弯矩	S-1-P
S-2	—	S-2
S-3	负弯矩	S-3-N
	正弯矩	S-3-P
S-4	—	S-4
S-5	负弯矩	S-5-N
	正弯矩	S-5-P
S-6	负弯矩	S-6-N
	正弯矩	S-6-P

2.2 单元类型和网格划分
模型采用 ABAQUS 软件中的非协调单元

C3D8I. 非协调单元对网格的扭曲非常敏感,划分单元时必须确保在单元上产生的扭曲非常小,需要对连接孔洞处的网格进行精细划分,才能保证结果的精度^[10]. 模型网格采用结构化划分,在接触面、孔洞附近加密,如图9所示. 采用 Q345 钢,最大屈服承载能力为 345 MPa,弹性模量为 210 000 MPa.

2.3 施加荷载和边界条件

模型中 8.8 级 M20 高强螺栓的屈服承载能力为 640 MPa,抗拉承载能力为 800 MPa,应施加预应力 140 kN^[11]. 在 ABAQUS 软件中采用 bolt 荷载项,分三步施加螺栓预应力,第一步施加 10 N,确保接触面之间产生接触;第二步直接施加 140 kN 的荷载;第三步将螺栓预应力设置为保持螺栓杆长度不变的形式.

模型中柱子上端与下端均采用铰接,并在对应参考点设置边界条件,梁端施加 200 mm 的位移荷载,使梁柱节点发生转动,如图 10 所示. 角钢、支撑节点板、端板与梁之间均采用焊接,在焊接处采用绑定约束将两接触面间所有自由度耦合在一起,以考察等效塑性应变的 PEEQ 方式来判断焊接处的破坏情况. 其他接触面间采用面与面接触对,面与面之间的切线行为采用罚函数,设置摩擦系数为 0.3;假定法向界面之间不发生穿透,设定为硬接触. 由于 ABAQUS 软件无法直接模拟节点的断裂等行为,将所有模型的最大梁柱转角设定为 0.07 rad^[9]. 模型中会出现较大的变形,必须考虑二阶效应,在 ABAQUS 软件中将几何非线性选项设置为 ON.

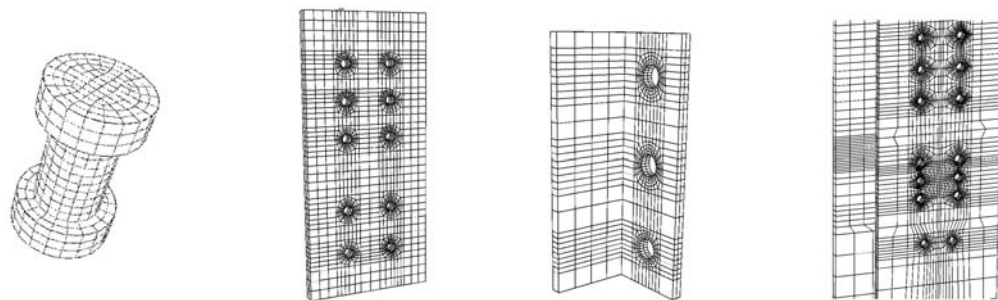


图9 有限元模型网格布置

Fig.9 Finite element model mesh

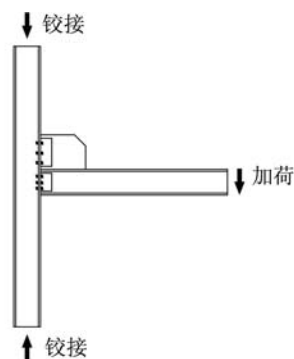


图10 边界条件

Fig.10 Boundary condition

3 结果分析

3.1 支撑节点板影响

为了分析节点板对梁柱节点抗弯性能的影响,通过数值分析得出带节点板模型 S-1, S-3 和不带节点板模型 S-2, S-4 在正、负弯矩下的弯矩转角曲线,如图 11 所示. 采用 ABAQUS 分析软件,其本

构模型存在软化段,其模拟结果可以呈现下降段,可从图 11 中看到, S-3-N 有明显下降段. 模型 S-1 和 S-2 是通过双腹板角钢连接的梁柱节点,从图 11 中可知,带节点板的模型 S-1 在正、负弯矩作用下的转动刚度和承载能力都明显优于不带节点板的模型 S-2. 比较由端板连接的梁柱节点模型 S-3 和 S-4,带节点板的模型 S-3 比不带节点板的模型 S-4 具有更好的转动刚度和承载能力. 根据欧洲规范 EC3 节点分类,模型 S-2 和 S-4 虽然具有一定刚度,但是,此时刚度较小,可以认为是铰接连接,而考虑节点板作用后的钢框架梁柱节点具有了明显的半刚性. 从图 11 中还可以得知,在考虑节点板作用的情况下,端板连接的 S-3 比双腹板角钢连接的 S-1 具有更好的转动刚度和承载能力.

比较模型 S-3 和 S-4 的等效塑性应变可知, S-3 在承受负弯矩时,最大等效塑性应变为 0.18,出现在梁连接节点板末端附近的梁下翼缘处;在承受正弯矩时,最大等效塑性应变为 0.42,出现在连接梁柱的受拉下排螺栓处,如图 12 所示. 而 S-4 的最大等效塑性应变为 0.80,出现在连接梁的上排螺

栓处. 由于节点板和柱连接部位承受较大外力,可以有效减小节点核心区在弯矩作用下的变形,

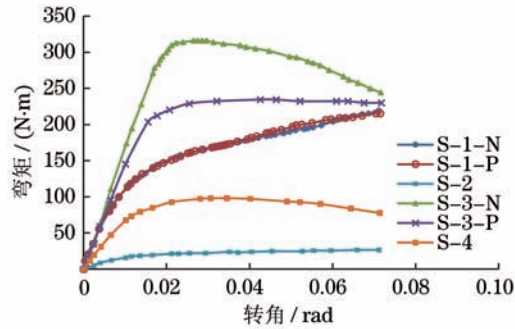


图 11 S-1, S-2, S-3, S-4 弯矩转角曲线
Fig. 11 Moment-rotation curves of S-1, S-2, S-3 and S-4

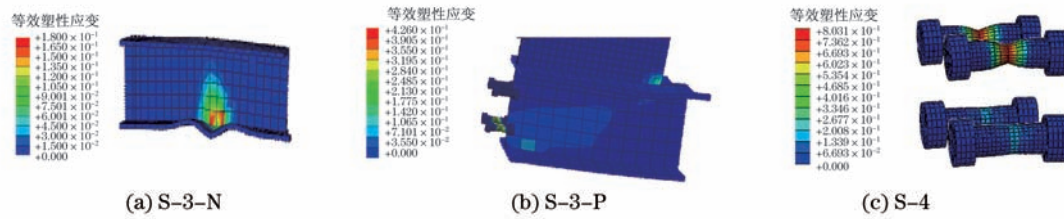


图 12 S-3, S-4 等效塑性应变示意图
Fig. 12 Equivalent plastic strain diagrams of S-3 and S-4

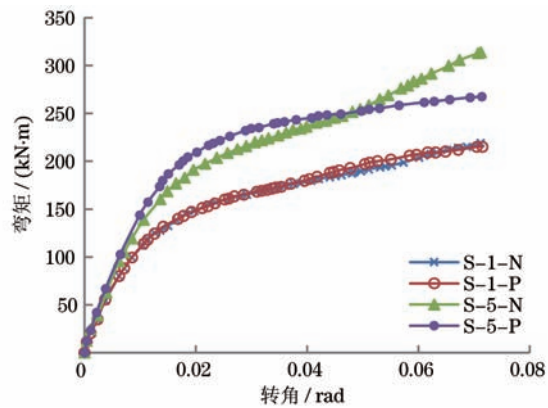


图 13 S-1, S-5 弯矩转角曲线
Fig. 13 Moment-rotation curves of S-1 and S-5

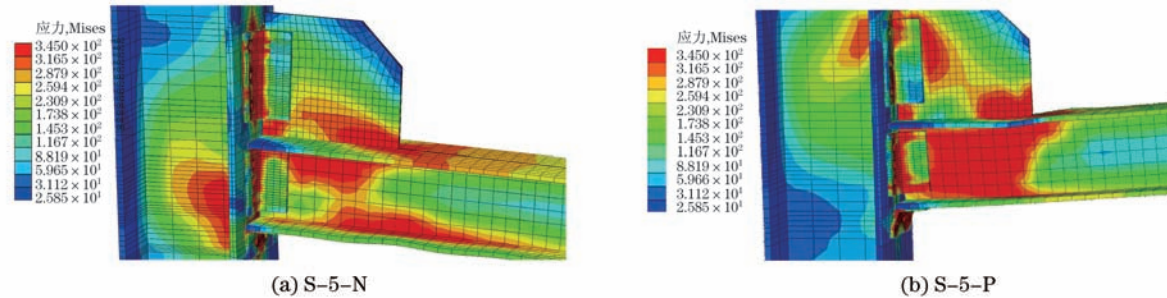


图 14 S-5 应力云图
Fig. 14 Cloud diagrams of the stress of S-5

有利于梁式侧移机构的形成.

从以上分析可知,支撑节点板能有效提高钢框架梁柱节点的转动刚度和承载能力,并且带支撑节点板的端板连接梁柱节点的抗弯性能优于带支撑节点板的双腹板角钢连接梁柱节点的.

3.2 底角钢的影响

模型 S-5 在模型 S-1 的基础上增设底角钢,用以分析增设底角钢对带支撑节点板梁柱节点抗弯性能的影响.由图 13 可知,增设了底角钢的模型 S-5 一定程度上限制了节点的变形,节点的转动刚度和承载能力都有所提高.

模型 S-1 未设置底角钢,其承受正、负弯矩的转动刚度和承载能力相差不大,而模型 S-5 承受正

弯矩作用下的初始刚度高于负弯矩作用下的初始刚度.进入强化阶段后, S-5-N 比 S-5-P 具有更好的承载能力.图 14 为 S-5 进入弯矩转角曲线强化阶段后的应力云图,由图 14(a)和图 14(b)可以发现,模型 S-5-N 承受负弯矩作用下,转动中心位于梁腹板角钢螺栓附近,而 S-5-P 承受正弯矩作用时的转动中心位于梁腹板靠近节点板处,模型 S-5 承受正弯矩的力臂小于负弯矩的力臂,故 S-5-P 的初始刚度大于 S-5-N 的.

因此,增设底角钢对提高带支撑节点板梁柱节点的抗弯性能有一定效果,还能使其在承受正弯矩时的初始刚度高于承受负弯矩时的初始刚度.

3.3 端板外伸影响

为了分析端板外伸对带支撑节点板梁柱节点抗弯性能的影响,对模型 S-3, S-6 进行了计算对比分析. 计算表明,在承受负弯矩时,外伸端板对于节点的转动刚度和承载能力影响不大,而在承受正弯矩时,模型 S-6 的转动刚度和承载能力明显大于未设外伸端板的 S-3 的,如图 15 所示. S-3-P 的最大等效塑性应变为 0.4,出现在连接梁柱的下排螺栓处;而 S-6-P 的等效塑性应变为 0.02,出现在梁上翼缘与节点板连接外端附近,如图 16 所示. 由此可见,设置外伸端板能有效增加节点承受正弯矩的转动刚度与承载能力.

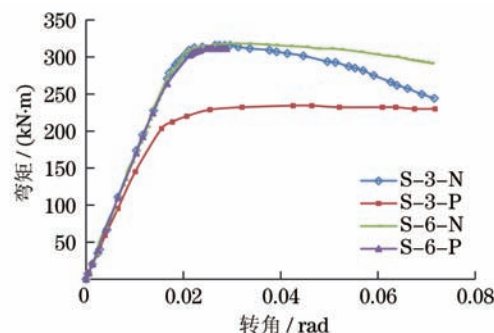


图 15 S-3, S-6 弯矩转角曲线

Fig. 15 Moment-rotation curves of S-3 and S-6

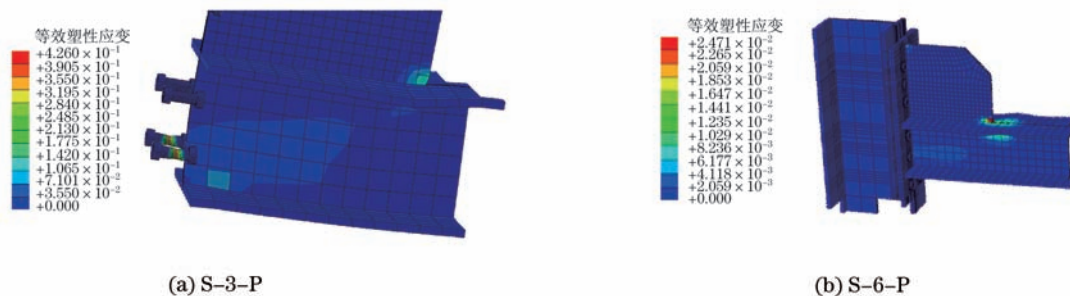


图 16 S-3-P, S-6-P 等效塑性应变示意图

Fig. 16 Equivalent plastic strain diagrams of S-3-P and S-6-P

4 结论

a. 带支撑节点板钢框架梁柱节点的力学性能具有明显的半刚性,比不带支撑节点板的梁柱节点具有更好的转动刚度和承载能力.

b. 在带支撑节点板的梁柱节点上增设底角钢,节点的转动刚度与承载能力均得到提高,承受正弯矩时的初始刚度比承受负弯矩时的明显增大.

c. 在带支撑节点板使用端板连接的梁柱节点上设置外伸端板能有效增加节点承受正弯矩的转动刚度与承载能力.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国建设部. JGJ 99-1998 高层民用建筑钢结构技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 1998.
- [2] 中华人民共和国建设部. 国家质量监督检验检疫总局. GB 50011-2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2004.
- [3] 中国工程建设标准化协会. CECS 160-2004 建筑工程抗震性态设计通则[S]. 北京:中国计划出版社, 2004.
- [4] TREMBLAY R, STIEMER S F. Back-up stiffness for improving the stability of multi-storey braced frames under seismic loading[C]// Structural Stability Research

Council Technical Session. Bethlehem: Structural Stability Research Council, 1994.

- [5] TREMBLAY R, FILIATRAULT A, TIMLER P, et al. Performance of steel structures during the 1994 Northridge earthquake[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1995, 22(2): 338-360.
- [6] WALBRIDGE S S, GRONDIN G Y, CHENG J J R. Gusset plate connections under monotonic and cyclic loading[J]. Journal of Civil Engineering, 2005, 32(5): 981-995.
- [7] YOO J H, LEHMAN D E, ROEDER C W. Influence of connection design parameters on the seismic performance of braced frames[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(6): 607-623.
- [8] 施刚, 石永久, 王元清, 等. 多层钢框架半刚性端板连接的试验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(3): 391-394.
- [9] 徐凌, 朱浮声, 李晓龙. 不同节点轻钢框架的受力性能试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2006, 27(10): 1165-1168.
- [10] 庄茁, 由小川, 廖剑晖, 等. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2009.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 82-2011 钢结构高强度螺栓连接技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.

(编辑:石 瑛)