

# 反复荷载下端板连接半刚性钢框架滞回性能研究

王 来,陈相龙,关巧英

(山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室,山东 青岛 266590)

**摘 要:**为研究半刚性连接钢框架抗震性能,建立了具有刚性连接和半刚性连接的三层两跨钢框架有限元分析模型,利用大型有限元软件 ANSYS,研究了刚性连接、平齐端板半刚性连接和外伸端板半刚性连接三种钢框架在低周反复荷载下的滞回曲线,分析对比了框架侧移、滞回性能、延性性能和耗能性能。研究表明,平齐端板半刚性连接和外伸端板半刚性连接钢框架抗震性能明显优于刚性连接钢框架。

**关键词:**端板连接;半刚性钢框架;滞回曲线;延性;耗能性能

中图分类号:TU391

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2013)04-0052-05

## Analysis of Hysteretic Performance of Steel Frames with End-plate Semi-rigid Connections under Periodic Load

Wang Lai, Chen Xianglong, Guan Qiaoying

(Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation,  
Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

**Abstract:** The finite element model of the 3-floor and 2-span frame was established to study the seismic performance of semi-rigid frame. And by using finite element analysis software ANSYS, their lateral displacement, hysteretic performance, ductility performance and energy dissipation ability of steel frames with rigid connections and end-plate semi-rigid connections under periodic load were analyzed. The results show that, compared with the rigid connected steel frame, the end plate semi-rigid connected steel frame has better seismic performance.

**Key words:** end-plate connection; semi-rigid steel frame; hysteretic curve; ductility performance; energy dissipation ability

端板连接是钢框架中比较普遍的梁-柱节点连接方式,端板连接节点主要由端板、螺栓、节点域柱翼缘和腹板等部分组成。根据其组成构造不同,可以将端板连接设计为刚性连接和半刚性连接两种方式,但目前绝大多数端板连接节点一般认为是刚性连接。20 世纪 60 年代开始,国内外学者开始对端板连接节点进行了多方面的研究,包括平齐端板连接节点<sup>[1]</sup>和外伸端板连接节点<sup>[2-3]</sup>、刚性端板节点和半刚性端板节点<sup>[4]</sup>。

研究表明,半刚性连接钢框架具有较强的变形能力<sup>[5]</sup>,能够延长结构的自振周期,梁端塑性铰的出现可耗散地震能量,提高耗能能力,从而避免因连接节点破坏而引起结构的倒塌,大大降低震害,有利于抗震<sup>[6]</sup>。本文以端板连接半刚性框架,包括平齐端板半刚性连接和外伸端板半刚性连接框架抗震性能为研究对象,利用有限元软件 ANSYS,研究了半刚性框架在低周反复荷载作用下的滞回性能,并对刚性连接钢框架、外伸端板半刚性连接钢框架和平齐端板半刚性连接钢框架在反复荷载作用下的抗震性能进行了对比,为半刚性钢结构的工程应用提供理论依据。

收稿日期:2013-04-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51178259);山东省“泰山学者”建设工程专项经费项目

作者简介:王 来(1963—),男,山西阳高人,教授,博导,主要从事钢结构及组合结构方面的教学与研究。

E-mail:wlkdtjxy@sina.com

## 1 有限元模型的建立

框架分析模型采用三层两跨平面框架,一层层高 1.2 m,二层、三层层高 0.9 m,跨度 1.25 m。三种框架模型,即刚性连接钢框架 GX、外伸端板半刚性连接钢框架 BGX-1 和平齐端板半刚性连接钢框架 BGX-2,框架模型具体杆件尺寸及节点材料如表 1 所示,框架模型结构如图 1 所示,钢框架 BGX-1 和 BGX-2 的节点构造如图 2 所示。

表 1 模型杆件组成及规格表

Tab. 1 Size chart of the model

试件	端板厚度/mm	柱截面尺寸/mm	梁截面尺寸/mm	端板外伸长度/mm	螺栓直径/mm	柱腹板加劲肋
GX	无	300×300×10×15	200×200×8×12	无	无	有
BGX-1	16	300×300×10×15	200×200×8×12	80	20	有
BGX-2	16	300×300×10×15	200×200×8×12	10	20	有

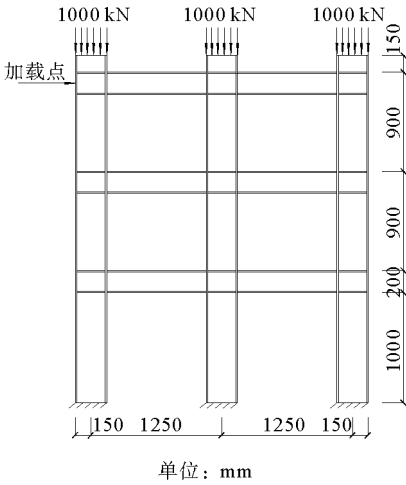


图 1 模型受力简图

Fig. 1 Force diagram of the model

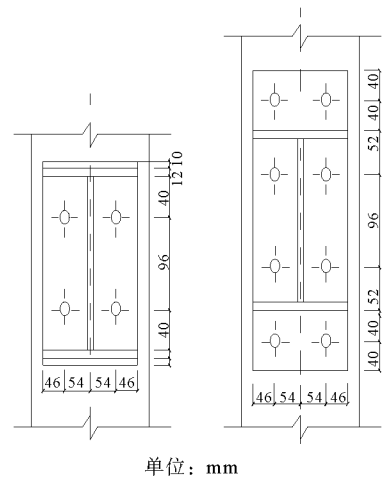
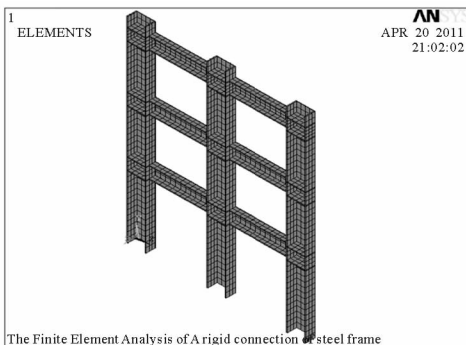


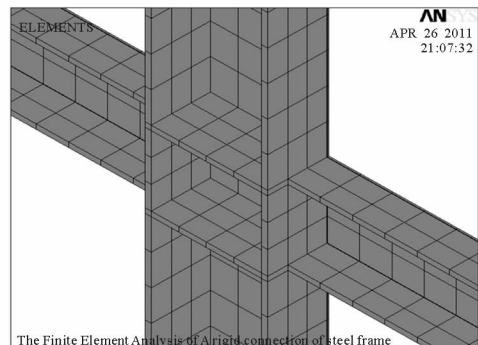
图 2 梁柱节点构造图

Fig. 2 Joints structure

框架模型梁、柱、端板等钢构件用三维八节点的 SOLID45 单元模拟,端板与柱翼缘之间的接触面选用目标单元 TARGE170 和接触单元 CONTA173,高强螺栓通过命令 PSMESH 生成的三维预紧单元 PRETS179 来施加预拉力。三个框架模型的有限元网格划分如图 3—图 5 所示。



(a) 框架



(b) 节点

图 3 GX 模型网格划分图

Fig. 3 Meshing of model GX

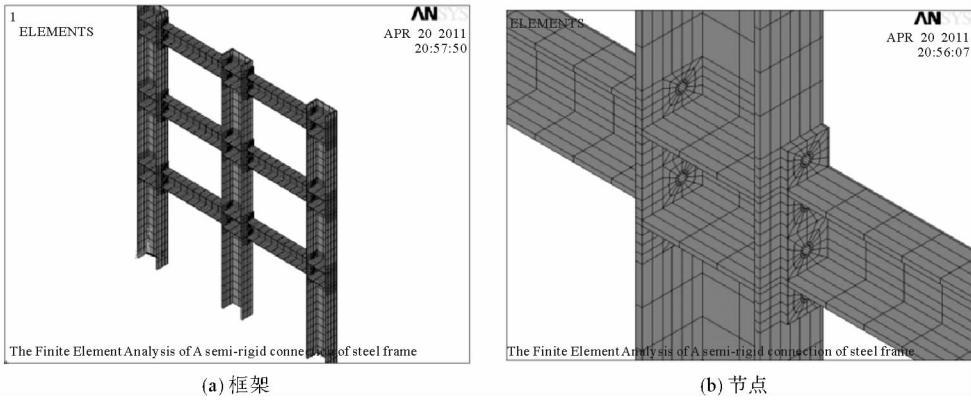


图 4 BGX-1 网格划分图

Fig. 4 Meshing of model BGX-1

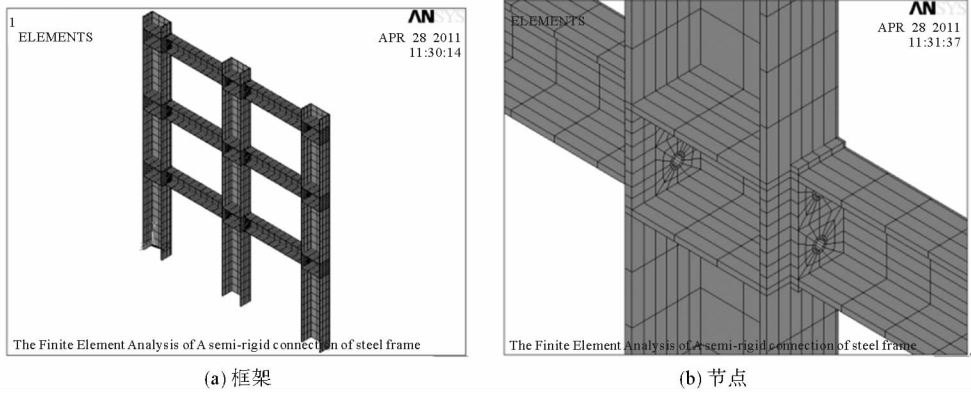


图 5 BGX-2 网格划分图

Fig. 5 Meshing of model BGX-2

梁柱和端板材料为 Q235, 高强螺栓选用 10.9 级摩擦型高强螺栓, 所有钢材均假定为各向同性, 泊松比取 0.3, 端板摩擦面的抗滑移系数取 0.45。通过实验测定, 梁柱和端板材料屈服强度为 280 MPa, 弹性模量为  $2.0 \times 10^5$  MPa, 极限强度为 390 MPa。材料应力-应变模型如图 6 和图 7 所示<sup>[7]</sup>。

在三个框架模型的三个柱顶施加竖向力均为 1000 kN, 水平反复荷载采用位移控制的加载方式, 框架 GX、BGX-1 和 BGX-2 的每级施加位移值分别取它们的屈服位移, 每级荷载循环三次, 如图 8 所示。

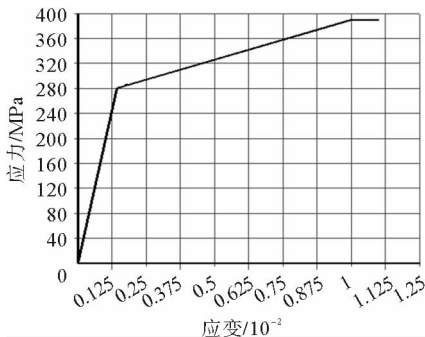


图 6 梁柱和端板的应力-应变关系图

Fig. 6 Stress-strain relations of beam-column and end plate

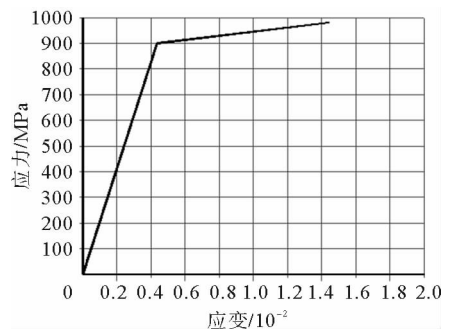


图 7 高强度螺栓的应力-应变关系图

Fig. 7 Stress-strain relations of high strength bolts

## 2 框架变形分析

刚性连接钢框架 GX、外伸端板连接钢框架 BGX-1 和平齐端板连接钢框架 BGX-2 在  $5\Delta$  时的应力及变形如图 9 所示。分析模拟的楼层水平位移见表 2。

在即将达到极限承载力 ( $5\Delta$ ) 时, BGX-1 和 BGX-2 均产生了较大的水平位移, 而 GX 水平位移值较小, 说明节点的刚度对框架的侧移变形具有较大的影响, 半刚性连接框架节点刚度不如刚性连接框架, 因此其位移较大。三种钢框架 GX、BGX-1 和 BGX-2 层间位移曲线基本呈线性关系, GX-2 位移稍大于 GX-1。

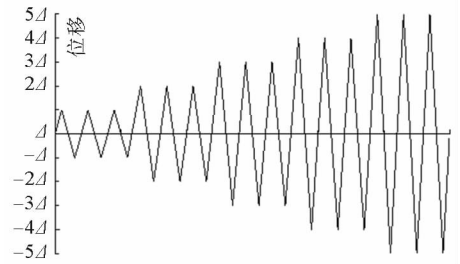


图 8 模型加载方式图

Fig. 8 Loading system of model

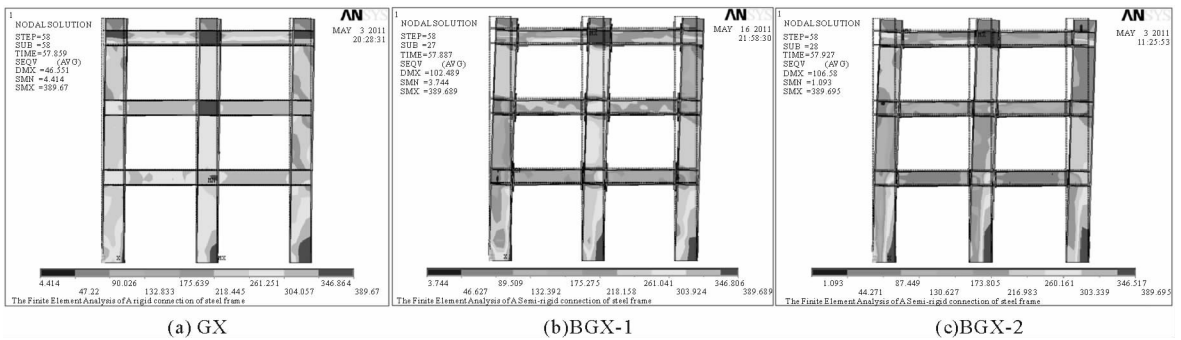


图 9 钢框架在  $5\Delta$  时的应力及变形图

Fig. 9 Stress and deformation map of steel frame under  $5\Delta$

## 3 框架滞回性能分析

经过计算, 刚性连接钢框架 GX、外伸端板连接钢框架 GX-1 和平齐端板连接钢框架 GX-2 的滞回曲线如图 10 所示<sup>[8]</sup>。

三种钢框架结构屈服之前, 侧向位移都很小, 加载和卸载基本为弹性阶段, 残余应变很小, 一个加载周期后为斜直线, 基本不能形成滞回环。当框架达到屈服后, 侧向位移有所增加, 卸载后的残余应变也逐步增加, 随着荷载的增大滞回环也越来越饱满。当框架趋于极限承载力, 塑性变形逐渐增大, 承载力不再增加。刚接框架 GX、半刚性框架 BGX-1 和 BGX-2 的  $P-\Delta$  滞回曲线均基本对称, 不过 BGX-1 和 BGX-2 的二层和一层滞回曲线出现一定的不对称, 主要原因是刚性节点变形较小, 端板连接半刚性节点则发生了较大的变形。对 GX 与 BGX-1B 和 GX-2 的滞回曲线进行对比分析, 发现: ①刚性连接钢框架 GX 滞回曲线不太饱满, 曲线包裹面积小, 耗能能力不高; 平齐端板连接 BGX-2 与外伸端板连接钢框架 BGX-1 的滞回曲线较为饱满, 无明显的“捏缩效应”, 接近于“梭形”, 曲线包裹面积较大, 耗能能力较好。②刚性框架 GX 的水平极限承载力最大, 但变形能力与延性不强; 而端板连接半刚性框架极限承载力较小, 而且承载力下降速度较慢, 变形能力强, 延性较好。③平齐端板连接 BGX-2 与外伸端板连接框架 BGX-1 的滞回曲线均较为饱满, 耗能能力较好, 延性和变形性能较好, BGX-1 的极限承载力比 BGX-2 稍高一些, 但比刚接框架的承载力低。

表 2 楼层水平位移值表

Tab. 2 Horizontal displacement of the floor mm

模型 层号	楼层水平位移/mm		
	GX	BGX-1	BGX-2
1	17.67	24.13	24.01
2	34.67	54.18	55.11
3	51.43	87.37	90.85

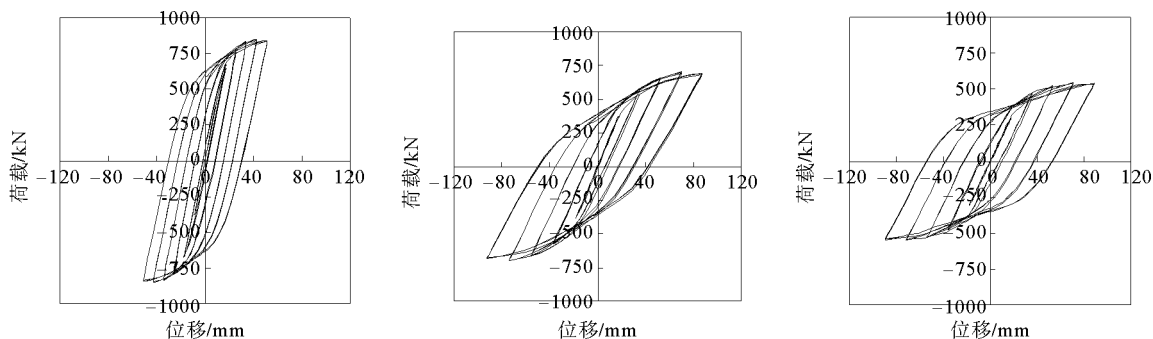


图 10 钢框架三层滞回曲线图

Fig. 10 Hysteresis curve of the third floor of rigid steel frame

## 4 结论

通过分析刚性连接钢框架、平齐端板连接半刚性钢框架和外伸端板连接半刚性钢框架在反复荷载作用下的滞回性能,得到如下结论:

1) 刚性连接节点的刚度大,钢框架的抗侧移能力强,水平侧向位移相对较小。一般来讲,在梁柱端板连接方式确定后,连接节点的螺栓布置、螺栓数量、端板厚度、接触面抗滑移力等对节点的刚度都有较大影响,节点刚度越大,位移越小。

2) 刚接框架与半刚性连接框架相比较,滞回曲线较为对称,但曲线不饱满,耗能能力不高,延性差。

3) 平齐端板连接和外伸端板连接钢框架侧移比刚性框架大,滞回曲线均较为饱满,耗能性能较好,延性和变形性能较好,抗震性能好。对于平齐端板连接和外伸端板连接两种半刚性钢框架,平齐端板连接的耗能性能和延性均优于外伸端板连接框架。

4) 从框架的水平承载力来看,刚度较大的框架其承载力较大。刚接框架极限承载力最大,外伸端板连接钢框架承载力中等,平齐端板连接钢框架的承载力最小。

### 参考文献:

- [1]Phillips J,Packer J A. The effect of plate thickness on flush end-plate connections[M]//Howlett J H,Jenkins W M,Stainsby R. Joints in Structural Steelwork. London:Pentech Press,1981:677-692.
- [2]Aggarwal A K,Coates R C. Moment-rotation characteristics of bolted beam-column connections[J]. Journal of Constructional Steel Research,1986,6:303-318.
- [3]Jenkins W M,Tong G S,Prescott A T. Moment-transmitting endplate connections in steel construction and a proposed basis for flush endplate design[J]. The Structural Engineer,1986,64A(5):121-136.
- [4]施刚,石永久,王元清. 钢结构梁柱半刚性端板连接弯矩-转角全曲线计算方法[J]. 工程力学,2006,5(23):67-73,55.  
Shi Gang,Shi Yongjiu,Wang Yuanqing. Calculation method on moment-rotation curves of beam-to-column semirigid end-plate connections[J]. Engineering Mechanics,2006,5(23):67-73,55.
- [5]施刚,石永久,李少甫,等. 多层钢框架半刚性端板连接的循环荷载试验研究[J]. 建筑结构学报,2005,2(26):74-80,93.  
Shi Gang,Shi Yonjiu,Li Shaofu,et al. Cyclic tests of semirigid end-plate connections in multi-story steel frames[J]. Journal of Building Structures,2005,2(26):74-80,93.
- [6]郭兵,顾强,柳锋,等. 梁柱端板连接节点的滞回性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2002,23(3):8-13.  
Guo Bing,Gu Qiang,Liu Feng,et al. Experimental research on hysteretic behavior of end-plate beam-column connections[J]. Journal of Building Structures,2002,23(3):8-13.
- [7]王来,周楠楠,王国兵. 角钢连接的半刚性钢框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构,2009,39(5):54-58.  
Wang Lai,Zhou Nannan,Wang Guobing. Experimental research on seismic behavior of steel frame with top and seat angle with double web angles semi-rigid connections[J]. Building Structures,2009,39(5):54-58.
- [8]关巧英. 端板半刚性连接钢框架在周期荷载作用下的抗震性能分析[D]. 青岛:山东科技大学,2011:1-30.