

半刚接钢框架-斜加劲钢板 剪力墙结构体系抗震性能试验研究

郭宏超^{1,2}, 郝际平¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西部建筑科技国家重点实验室(筹), 陕西 西安 710055)

摘 要: 在对一榀单跨两层半刚接框架-斜加劲钢板剪力墙结构低周反复荷载试验研究的基础上, 分析结构框架梁、柱、半刚节点的局部力学性能及整体破坏模式, 评价该种结构体系的抗震性能。结果表明: 结构具有良好的塑性变形能力、安全储备高; 节点刚度退化小, 内填钢板的设置缓解了节点区自身的延性要求, 半刚框架和墙板协同工作良好; 框架柱兼受轴力和弯距共同作用, 腹板参与抗剪, 应力状态复杂。研究为该种结构体系的工程应用和理论分析提供了依据。

关键词: 斜加劲; 钢板剪力墙; 滞回曲线; 破坏模式

中图分类号: TU973.3⁺¹

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2011)05-0631-07

1 引 言

钢板剪力墙结构的应用始于上世纪70年代, 由内填钢板和框架梁柱组成, 框架与墙体的抗侧刚度匹配, 结构具有较高的延性, 安全储备高, 多道设防, 是多高层钢结构建筑中经济、高效的抗侧力结构体系, 主要应用在美国和日本^[1-2]。

目前对该结构体系的分析均基于梁柱完全刚接或理想铰接假定, 而实际工程中的节点连接介于两种情况之间, 半刚性连接刚度较小, 对构件约束相对减弱, 会增大结构的层间位移, 弱化结构的整体稳定性^[3-7]。因此从工程实际出发, 真实模拟梁柱节点实际刚度, 准确分析二者之间的内力分布, 研究框架与墙板协同工作及该结构体系的整体力学性能具有现实意义。本文在对半刚接框架-斜加劲钢板剪力墙结构低周反复荷载试验研究的基础上, 分析了框架梁、柱、半刚节点的力学性能及结构整体破坏模式, 为这种新结构体系的推广和应用奠定了基础。

2 试验概况

2.1 试件设计

试件单跨两层, 跨度 1 350 mm, 高度 2 750 mm, 地梁截面 H410×350×12×25, 框架柱截面 HW150×150×7×10, 中梁截面 HN200×100×5.5×8, 顶梁截面 HN300×150×6.5×9, 顶底角钢 L140×90×8, 腹板角钢 L70×8, 内填钢板厚度 4.0 mm, 加劲肋—40×4 钢板, 内填钢板和框架梁、柱翼缘通过耳板等强连接, 梁柱连接节点采用刚度相对较弱的双腹板顶底角钢连接形式。根据相似理论设计原则和试验室加载系统的试验能力, 几何相似比例约为 1:3, 试件编号为 HAX, 试件详细尺寸见图 1, 图 2。

钢框架梁、柱、钢板均采用 Q235 钢, 根据国家标准《金属材料室温拉伸试验方法》(GB/T 228-2002)^[8]、《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》(GB/T 2975-1998)^[9] 的有关规定进行试验, 结果见表 1。

收稿日期: 2010-07-19 修改稿日期: 2011-08-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50878181); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20096120110004)

作者简介: 郭宏超(1981-), 男, 甘肃庆阳人, 博士研究生, 从事钢结构研究和设计工作。

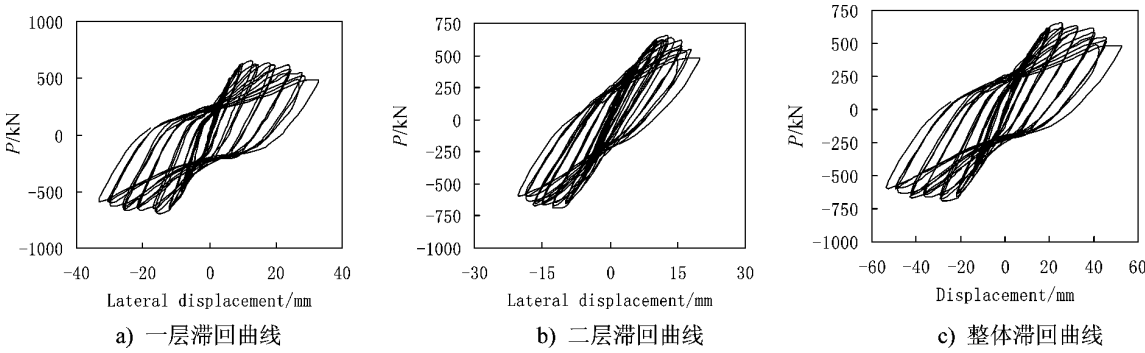


图 5 滞回曲线
Fig. 5 Hysteretic curves

3.2 骨架曲线

骨架曲线是荷载-位移曲线在各加载级的第一圈循环峰值点所连成的外包络曲线. HA X 骨架曲线如图 6 所示. 由图可知, 在塑性流动阶段, 试件整体侧移可达 49.2 mm, 层间侧移角为 1/56, 达到峰值荷载后, 曲线下降平缓.

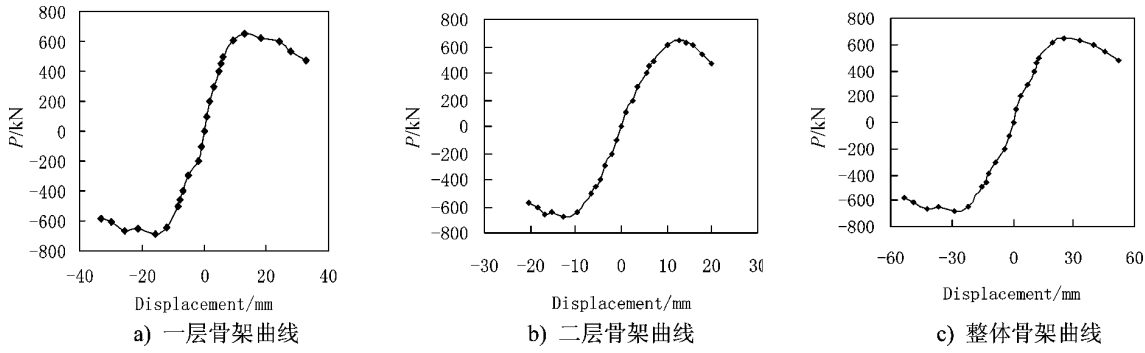
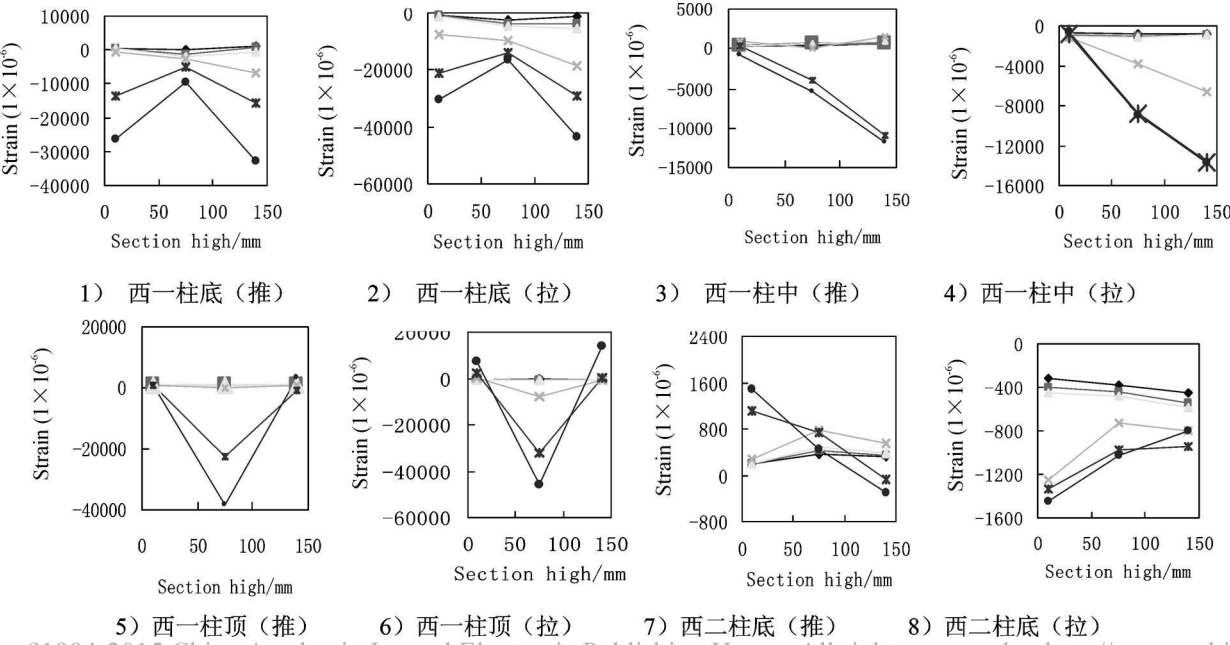
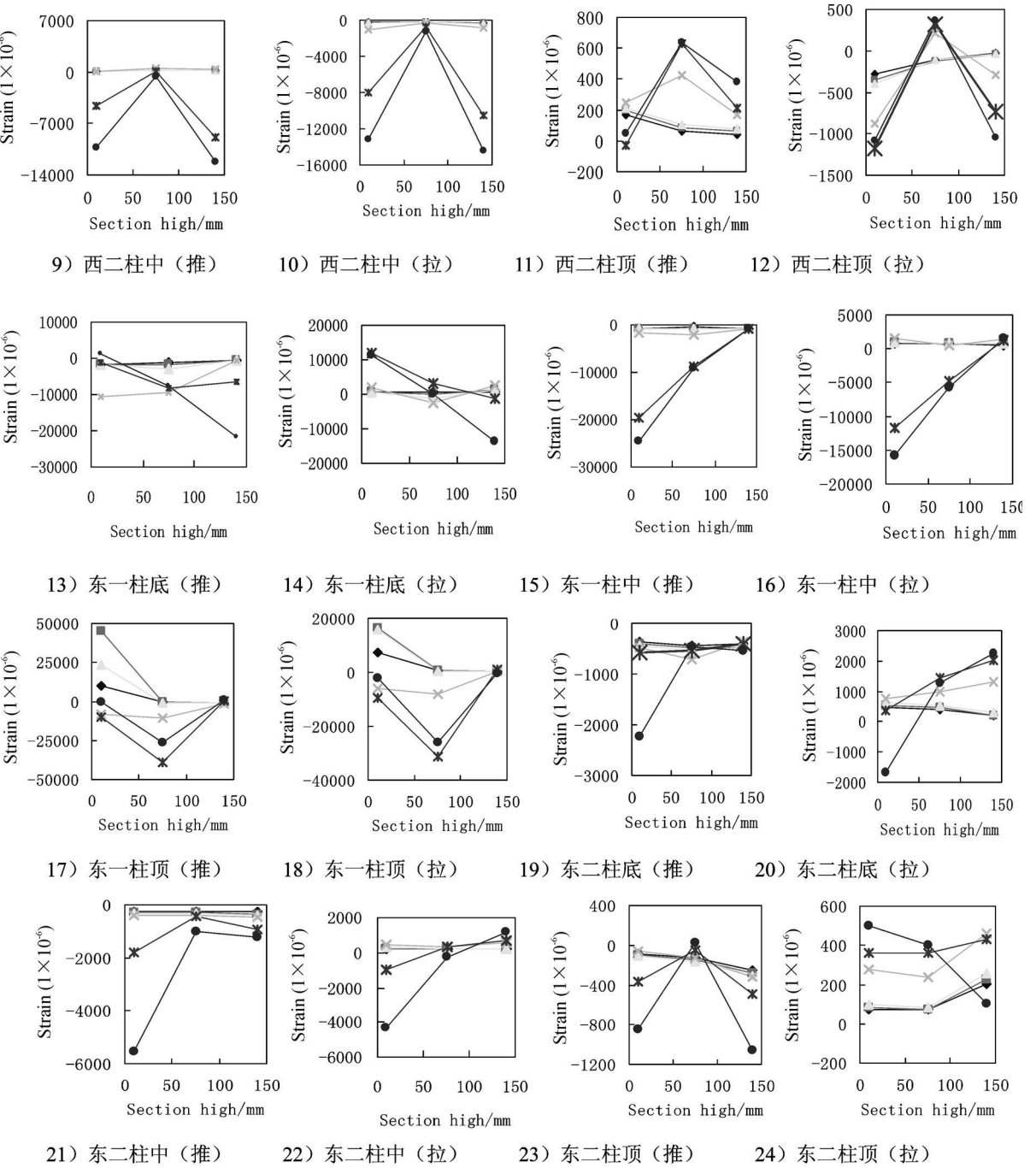


图 6 骨架曲线
Fig. 6 Load versus displacement envelope

3.3 框架柱受力分析

柱脚放置应变片和应变花监测其塑性铰发展情况, 位置如图 4. 为了更清楚说明钢柱沿柱高不同截面处应变分布规律, 整理了钢柱的应变图 (图 7), 图中数据为每个荷载组第 1 循环荷载峰值对应的应变.





图例示意加载阶段：◆ 400 kN ■ 450 kN ▲ δy × $2\delta y$ * $3\delta y$ ● $4\delta y$

图 7 钢柱各截面应变关系

Fig. 7 Strain relationship of various sections on steel column

由图可知,东、西两柱在力控制加载阶段,柱中腹板受力不大,基本满足平截面假定,能较真实反应柱子的实际受力状态,两柱变形基本对称.在位移控制加载阶段,由于钢板拉力带的发展,东、西底层钢柱顶部截面腹板应变远大于翼缘,与钢板连接的柱内翼缘在复合受力状态下,应变远大于钢柱外翼缘,截面变形不对称;后期加载阶段,底板屈服进入塑性,靠塑性变形耗散能量,拉力带的发育对柱子依赖程度较高,框架柱兼受轴力和弯距共同作用,腹板参与抗剪,应力状态复杂,二层钢板受力较小,拉力带初现,柱子应变基本在弹性范围.通过对框架柱的数据分析可知,该种结构框架与钢板墙的抗侧刚度相匹

配, 刚度分布均匀, 框架与墙板协同工作良好, 当结构达到极限承载力时, 底层钢板充分发挥其屈曲后耗能能力, 在反复荷载作用下局部撕裂, 钢框架柱脚及中梁梁柱连接部位往下 150 mm 处均形成塑性铰。

3.4 钢梁受力分析

中梁上下翼缘采用连接耳板与墙体焊接连接, 内填钢板同时约束中梁变形, 通过翼缘与耳板等强连接, 将二层水平荷载传递给一层, 并保证连接部位不先于试件破坏. 为了考察双腹板顶底角钢连接节点处中梁的受力情况, 在距柱内翼缘 180 mm 位置处放置了应变片和应变花, 详见图所示. 由实验数据整理的中梁梁端应变变化规律如图 8 所示, 图中数据均为荷载组第 1 个循环荷载峰值所对应的应变. 由图可知, 东边中梁在拉向荷载作用下均未屈服, 推向荷载作用下中梁下翼缘在 3 δ 位移控制阶段以后均出现推向屈服, 截面屈服前两加载方向应变变化基本对称; 西边中梁在推、拉荷载作用下均未屈服。

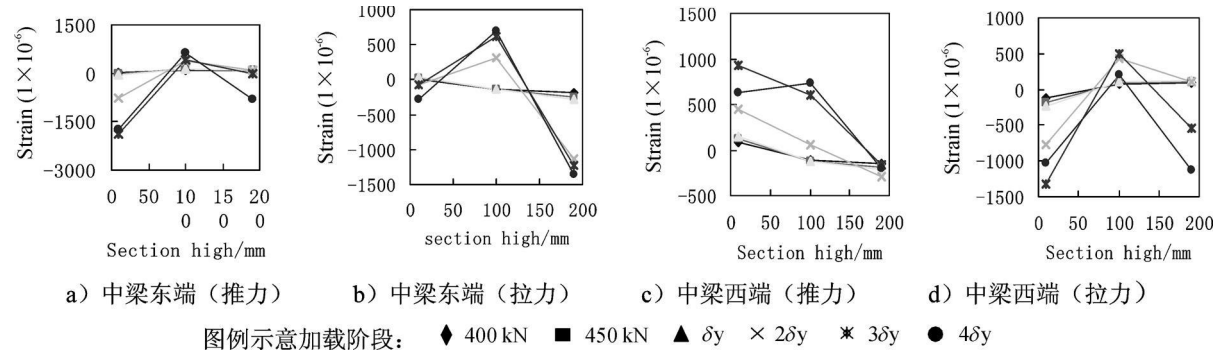


图 8 钢梁各截面 应变关系

Fig. 8 Strain relationship of various sections on steel beam

3.5 半刚性节点受力分析

试件梁柱节点采用双腹板顶底角钢连接, 详见图 2 所示. 为了研究这种半刚接节点与钢板剪力墙协同工作效果及节点的受力变形性能, 在连接部位设置了斜向百分表来测试其荷载—转角的关系. 具体仪表布置见图 4. 根据仪表测试结果, 采用下式近似计算转角 α 式中 disp 为百分表的测试数据.

$$\alpha = \arccos \left[\frac{125\,000 - (250\sqrt{2} + \text{disp})^2}{125\,000} \right] - \frac{\pi}{2}$$

中梁节点荷载转角关系如图 9 所示. 在弹性阶段, 两表测试的数据基本能反应连接部位的真实受力; 加载至第四荷载步, 试件局部进入塑性, 钢板有震颤, 面外变形较大, 仪表连接部位松动, 随着反复加载, 表针时常脱离测量面, 数据跳跃有异常, 曲线没有明显规律, 不能真实反映节点实际受力. 总体而言,

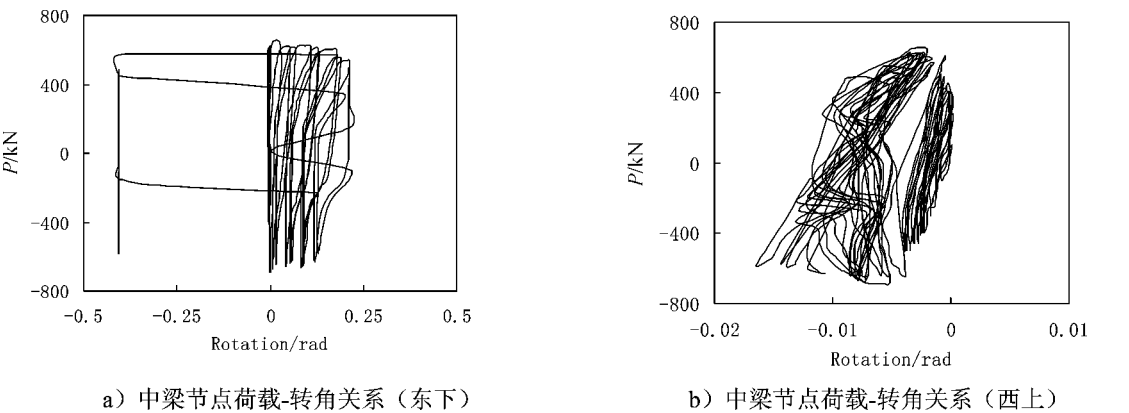


图 9 荷载-转角 关系

Fig. 9 Rotation versus load of middle beam

从加荷初期到后期, 节点连接刚度没有明显退化趋势, 随着后期钢板的塑性发展, 其对节点受力性能的影响有限.

3.6 钢板面外变形

分别在一、二层钢板中心位置了两个位移计, 测量内填钢板的面外变形. 在两对角位置设置应变花, 检测拉力带的发展情况. 由实验数据可知, 底层钢板屈服前, 面外变形基本呈线性, 变形幅值大约 10 mm 左右; 试件屈服后, 面外变形达 20 mm 以上, 底板面外变形较大, 且有残余应力, 卸载后变形不可恢复, 钢板表面凹凸不平, 位移计退出工作; 二层钢板在加载后期面外变形较大, 变形幅值大约 10 mm; 试件总体面外变形离散性大, 曲线没有明显规律.

3.7 结构整体受力机理及破坏模式分析

结构的水平荷载主要由以下两部分承担: (1)钢框架剪切变形承担部分水平荷载. 梁柱半刚性连接弱化了结构的整体刚度, 框架自身承担的荷载有限; (2)钢梁通过耳板与剪力墙等强连接, 以此传递水平荷载, 剪力墙承担了大部分水平荷载, 靠钢板的塑性变形耗散能量; 框架给墙体提供了很好的刚度支撑, 保证了薄钢板墙的传力机理及拉力带的发育, 墙板的设置有缓解了半刚节点区自身的延性要求, 增加了结构的整体刚度及稳定性, 墙板与框架协同工作, 抗侧刚度匹配, 结构体系多道设防, 整体性好, 是一种新型抗侧力体系, 特别适用于地震高烈度区的高层建筑.

试件最终破坏模式见图 10 所示, 破坏模式为: 底层钢柱柱脚及中梁梁柱节点往下 150 mm 处均形成塑性铰; 一层钢板在反复荷载作用下局部撕裂, 卸载后板面外残余变形达 20 mm 以上, 斜加劲肋多重屈曲, 二层钢板沿斜对角线位置拉力带明显; 试件整体面内呈弯曲破坏模式, 后期钢框架柱面外弯扭变形较大.

4 结 论

(1)薄钢板拉力带发育对柱子依赖程度较高, 框架柱兼受轴力和弯距共同作用, 腹板参与抗剪, 应力状态复杂; 框架中梁受上、下墙板斜向拉力作用, 竖向分力相互平衡, 主要以传递水平荷载为主, 基本应变处于弹性状态.

(2)底层钢柱柱脚及中梁梁柱节点往下 150 mm 处均形成塑性铰; 一层钢板在反复荷载作用下局部撕裂, 斜加劲肋多重屈曲; 试件整体面内呈弯曲破坏模式, 后期钢框架柱面外弯扭变形较大.

(3)钢框架给墙体提供了很好的刚度支撑, 保证了薄钢板墙的传力机理及拉力带的发育; 内填钢板的设置有缓解了半刚节点区自身的延性要求, 增加了结构的整体刚度及稳定性, 墙板与框架协同工作, 抗侧刚度匹配, 结构体系多道设防, 是一种抗震性能优异的抗侧力体系.

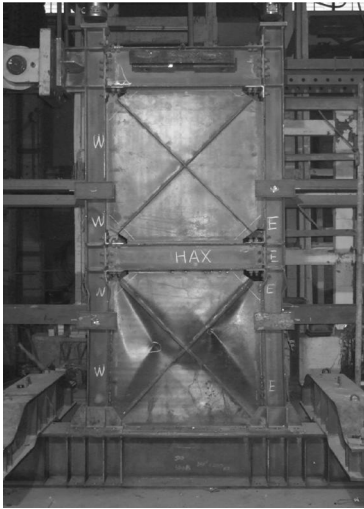


图 10 试件破坏模式

Fig. 10 Failure mode of test specimen

参考文献 References

[1] 王迎春, 郝际平. 钢板剪力墙的力学性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2007, 39(2): 181-186.
WANG Ying-chun, HAO Ji-ping, Study on mechanical property of steel plate shear walls [J]. J. Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2007, 39(2): 181-186.

[2] 曹春华. 斜加劲钢板剪力墙性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
CAO Chun-hua. The investigation to behavior of diagonal stiffened steel plate shear walls [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2008.

[3] 王 燕, 李华军, 厉见芬. 半刚性梁柱节点连接的初始刚度和结构内力分析[J]. 工程力学, 2003, 20(6): 65-69.
WANG Yan, LI Hua-jun, LI Jian-fen. Initial stiffness of semi-rigid beam-to column connections and structural in-

- ternal force analysis [J]. Engineering mechanics, 2003, 20(6): 65-69.
- [4] 周楠楠. 半刚性连接钢框架抗震性能的分析[J]. 工业建筑, 2009, 39(3): 112-115.
ZHOU Nan-nan. Nonlinear finite element analysis of seismic behavior of semi-rigid connection steel frame[J]. Industrial construction, 2009, 39(3): 112-115.
- [5] 李文岭, 郝际平. 钢梁柱弱轴顶底角钢半刚性连接的抗弯特性[J]. 华南理工大学学报, 2007, 35(3): 106-110.
LI Wen-ling, HAO Ji-ping. Flexural Resistance of Semi-Rigid Connection of Steel Beam to Column minor Axis with Top and Seat Angles[J]. Journal of South China University of Technology, 2007, 35(3): 106-110.
- [6] KISHIT N. Behavior of tall buildings with mixed use of rigid and semi-rigid connections[J]. Computers and structures, 1996, 61(6): 1193-1206.
- [7] KIM S E. Practical advanced analysis for semi-rigid space frames[J]. International journal of solids and structures, 2001, 38, 9111-9131.
- [8] GB/T 228-2002, 金属材料室温拉伸试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
GB/T 228-2002, Metallic materials-Tensile testing at ambient temperature [S]. Beijing: China Standard Press, 2002.
- [9] GB/T 2975-1998 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
GB/T 2975-1998 Steel and steel products-Location and preparation of test pieces for mechanical testing [S]. Beijing: China Standard Press, 1998.

Experimental study on seismic behavior of semi-rigid composite steel frame with diagonally stiffened steel plate shear walls system

GUO Hong-chao^{1,2}, HAO Ji-ping¹

- (1. Department of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
2. State Key Laboratory of Architecture Science and Technology in Xi'an(XAUAT), Xi'an 710055, China)

Abstract: Based on the experiment of semi-rigid composite steel frame with diagonally stiffened steel plate shear wall under low cyclic loading, the paper analyzed the framework of beams, columns, semi-rigid nodes in the local mechanical properties and the overall failure mode. The structural system of seismic performance was evaluated. The results showed that the specimen have good plastic deformation capacity and high safety margin. The stiffness degradation of the joints was small, and the requirement of ductility was lowered by arranging infill panels. And the frame and the steel plate shear wall work well. Furthermore, the columns are subject to the axial force and bending moment interaction. Participation in shear webs and the stress state is complex. The research provides a basis for engineering application and theoretical analysis of the structural system.

Key words: diagonally stiffened; steel plate shear wall; hysteretic curves; failure mode