

# 半刚性节点钢框架-十字加劲钢板 剪力墙结构的数值分析

郝际平, 于金光, 王先铁, 郭宏超, 虎 奇

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘 要:** 为了研究半刚性节点钢框架-加劲钢板剪力墙结构体系的抗震性能和传力机理, 模拟实际框剪结构的底部两层, 对一榀单跨两层 1/3 缩尺半刚性节点钢框架-十字加劲钢板剪力墙结构进行了抗震拟静力试验研究, 在试验模型的基础上, 建立了非线性有限元模型, 并验证了模型的有效性. 考虑影响结构抗震性能的 4 个主要因素: 节点刚度、剪力墙厚度、框架柱的刚度、肋板刚度比, 进行了 4 个系列 16 个有限元模型的变参数分析. 结果表明: 降低节点刚度有利于提高结构的延性和耗能能力; 增加柱的刚度和肋板厚度可提高结构的初始刚度、承载力和延性性能; 增加内填墙板的厚度, 将降低试件的延性性能; 内填墙板在加载初期非常有效, 承担 70%~85% 的水平剪力, 研究为该种结构体系的工程应用和理论分析提供依据.

**关键词:** 钢框架; 半刚性节点; 钢板剪力墙; 十字加劲; 滞回曲线; 数值模拟; 非线性有限元

**中图分类号:** TU 392.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2012)02-0153-06

通过对半刚性框架-薄钢板剪力墙的研究发现<sup>[1-2]</sup>, 薄板墙存在以下问题: 屈曲时伴随类似击鼓的响声, 且产生较大的面外变形, 此意味着在较大风荷载或地震作用过程中, 舒适度不理想, 使用性欠佳; 薄钢板屈曲后形成拉立场效应对边柱产生较大的附加弯矩, 增加了柱的稳定负担, 且滞回曲线有不同程度的捏缩现象, 限制了其实际工程中的推广应用. 针对上述缺点, 为延缓薄钢板屈曲, 规避厚板墙用钢量大的缺陷, 可通过合理的加劲肋设置, 提高薄板的弹性刚度, 克服滞回曲线出现的捏缩现象, 降低钢板类鼓击噪声及震颤. 本文在拟静力抗震试验研究的基础上, 对半刚性连节点框架-十字加劲钢板剪力墙结构的滞回性能进行非线性有限元分析, 在此基础上对结构的主要影响参数进行了研究, 为该种结构体系的工程应用和理论分析提供了依据.

## 1 试验研究

### 1.1 试验概况

取一榀单跨两层结构模拟实际框剪结构的底部两层, 根据相似理论和试验室加载能力要求, 几何相似比例约为 1/3. 试件跨度 1 350 mm, 高度 2 750 mm, 框架柱截面选用 HW150×150×7×10, 中梁截面选用 HN200×100×5.5×8, 顶梁截面 HN300×150×6.5×9, 内填钢板厚度  $t=4.0$  mm, 加劲钢板-40×4, 内填钢板和框架梁、柱翼缘通过连接板等强焊接, 梁柱连接节点形式选用顶底角钢带双腹板角钢连接, 顶底角钢为 L140×90×8, 腹板角钢为 L70×8, 试件详图如图 1 所示. 试件编号为 HAC, 节点编

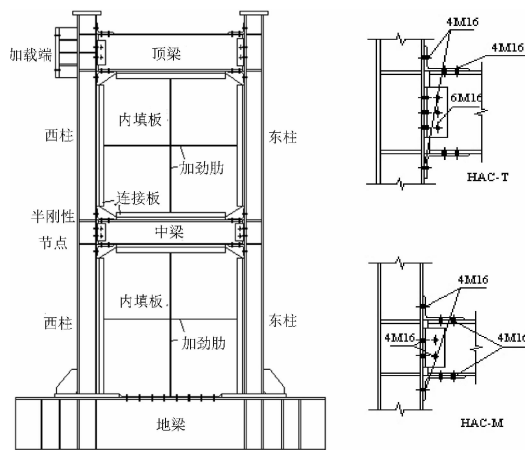


图 1 试件详图

Fig. 1 Layout of specimen

收稿日期: 2011-04-02 修改稿日期: 2012-03-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178381); 国家自然科学基金青年基金资助项目(51108369); 博士学科点专项科研基金(20096120110004); 教育部博士点新教师基金(20116120120008); 陕西省教育厅自然科学研究项目(11JK0942)

作者简介: 郝际平(1959-), 男, 山西襄垣人, 教授, 博士生导师, 从事结构工程研究.

号顶层梁柱节点为 HAC-T, 底层梁柱节点为 HAC-M. 钢框架梁、柱、钢板和角钢均采用 Q235 钢.

## 1.2 主要的试验结果分析

试件最终破坏模式见图 2, 破坏模式为: 内填钢板以小区格局部屈曲为主, 伴随相关屈曲; 加劲肋发生多重屈曲; 框架柱脚及中梁梁柱节点下均形成塑性铰; 卸载后一层钢板面外残余变形达 10 mm, 二层钢板小区格面内拉力带明显; 试件面内呈弯曲破坏模式, 后期钢框架柱面外弯扭变形较大. 文献[2]试件的破坏模式为: 内填钢板拉力带形成明显, 拉力带的交叉处局部撕裂, 框架柱脚及梁柱连接以下均形成塑性铰, 柱脚翼缘及其侧腹板被拉裂, 节点角钢发生轻微转动, 框架柱面外弯扭失稳; 卸载后一层钢板面外残余变形达 15 mm, 二层钢板拉力带形成, 但残余变形不如一层明显. 从二者的破坏过程可以看出: 加劲肋有效的提高了薄板的屈曲荷载, 抑制了板的面外变形, 并有效的减少了边缘柱的内凹程度, 加劲钢板墙变形有整体屈曲、小区隔板的局部屈曲和相关屈曲三种形式, 主要取决于板的初始缺陷和加劲肋刚度.

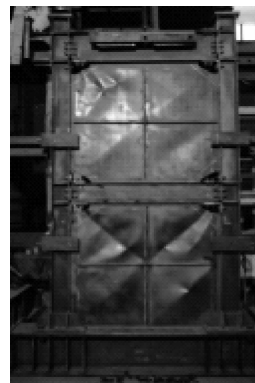


图 2 试件破坏模式  
Fig. 2 Failure mode of test specimen

## 2 有限元分析

### 2.1 建模过程

采用 ANSYS 程序建立非线性有限元模型, 对钢框架、墙板以及肋板均采用壳单元 Shell181 来模拟, 梁柱四角钢连接节点采用刚性板法结合 Combin39 单元联合模拟, 本文位于梁柱连接处建立两个弹性模量为实际钢材模量  $10^4$  倍的刚性板, 二者之间在梁的中性轴与腹板交叉处设置一个 Combin39 单元连接, 将刚性板的中性轴上的所有结点  $u_x$ 、 $u_y$  自由度进行耦合, 以实现连接的真实性和真实性, 其模型建立如图 3.

本文采用 Kishi-Chen 三参数幂函数模型来模拟半刚性连接的非线性弯矩—转角关系模型<sup>[3]</sup>. 该模型包括三个参数, 分别为初始刚度  $R_{ki}$ , 极限弯矩  $M_u$  和形状参数  $n$  其表达式如式 1.

$$M = \frac{R_{ki}\theta_r}{[1 + (\theta_r/\theta_0)^n]^{1/n}} \quad (1)$$

式中:  $\theta_0$  为极限弯矩  $M_u$  对应的塑性转角;  $\theta_r$  为试件的转角. 初始刚度  $R_{ki}$  和极限弯矩  $M_u$  采用 Kishi-Chen 的解析法获得, 曲线的形状参数  $n$  由试验曲线统计回归分析得出, 采用带双腹板的顶底角钢的经验公式 2 计算. 试件各节点的弯矩—转角关系见图 4.

$$\begin{aligned} n &= 1.398 \lg \theta_0 + 4.631 & \lg \theta_0 > -2.721 \\ n &= 0.827 & \lg \theta_0 < -2.721 \end{aligned} \quad (2)$$

### 2.2 模型验证

为了验证有限元模型, 选用有限元模型尺寸、材性及加载方式与试验试件一致. 拟从滞回曲线、极限承载力、刚度方面等分别进行比较. 见图 5, 有限元计算滞回曲线的“捏拢”现象较试验曲线少, 有限元试件的零位移点处, 承载力波动更大, 进入弹塑性阶段后, 曲线差别相对增大, 有限元承载力下降较为缓慢. 有限元计算极限荷载(推向 686.4 kN, 拉向 696.2 kN)与试验极限荷载(推向 684.6 kN, 拉向 690.0 kN)都非常吻合.

试验和有限元的刚度退化曲线, 如图 6. 通过刚度退化曲线比较, 弹性段有限元计算刚度较试验刚度大(最大误差 28%), 二者最终变化趋于相同(误差 5%), 产生上述现象的原因, 由于试件存在初始缺陷而有限元模型忽略缺陷的存在, 假设结构处于理想状态造成.

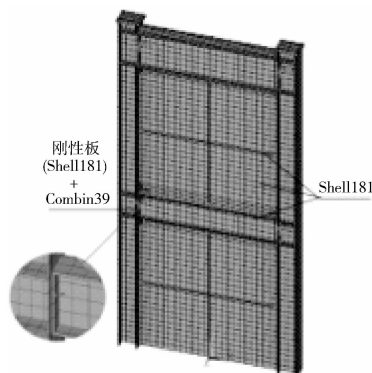


图 3 有限元模型  
Fig. 3 FE model

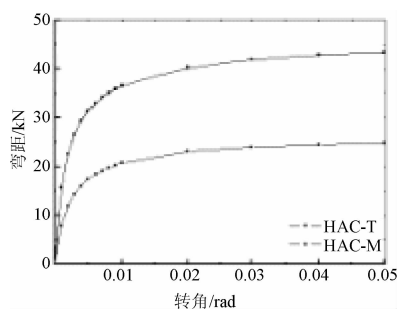


图 4 试件节点  $M-\theta$  曲线  
Fig. 4 Moment-rotation relationship

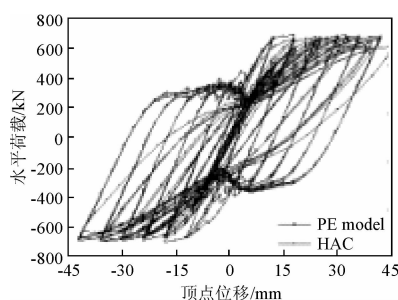


图5 滞回曲线

Fig. 5 Hysteretic curves

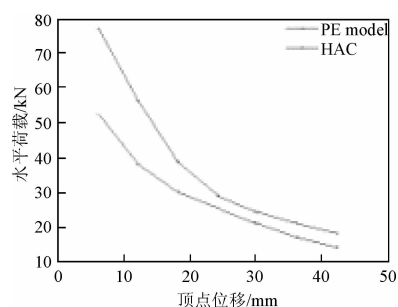


图6 刚度退化曲线

Fig. 6 Degeneration curve of rigidity

### 2.3 有限元参数分析

有限元分析模型以试验试件为基本模型(HAC-B),各材料属性统一采用名义值,材料屈服强度  $f_y = 235$  MPa. 考虑影响结构受力性能的主要参数:框架柱的柔度(HAC-C系列),剪力墙的高厚比(HAC-W系列),节点的转动刚度(HAC-PR系列)、加劲肋与内填墙板的刚度比(HAC-SW系列),共设计了4组共计16个模型. 对上述模型全部进行了单调荷载作用下有限元模拟. 施加轴压比保持与试验试件相同,以考虑上部结构的作用.

#### 2.3.1 框架柱刚度(HAC-C系列)

Kuhn<sup>[4]</sup>基于Wagner<sup>[5]</sup>的板梁理论中翼缘的柔度要求给出了钢板墙柱柔度参数  $\omega$ ,如式3所示,并建议应  $\omega \leq 2.5$ ,以防止柱的内凹变形严重,满足承载力和延性的要求,此规定被CAN/CSA S16-01<sup>[6]</sup>和AISC 341-05<sup>[7]</sup>所广泛采用,本文选用  $\omega = 2.68$ ,不满足Kuhn的限定.

$$\omega = 0.7 \sqrt{\frac{h^4 t}{2L I_c}} \quad (3)$$

$$\omega = 0.7 \sqrt{\frac{h^4 t}{L(I_c + I_s)}} \quad (4)$$

其中: $h$ 为层高; $L$ 为跨度; $I_c$ 为柱截面垂直与板平面的惯性矩; $I_s$ 为加劲板件垂直与板平面的惯性矩. 该系列采用公式(3)的无量纲参数  $\omega$  来反映边框柱与钢板墙的相对刚度, $\omega$ 参数如表1所示.

表1 HAC-C设计参数

Tab. 1 HAC-C design parameter

试件编号	HAC-C1	HAC-C2	HAC-B	HAC-C3	HAC-C4
截面选择	HW200×200×12×12	HW160×160×8×11	HW150×150×7×10	HW130×130×7×10	HW96×96×6×8
$\omega$	2.00	2.50	2.68	3.00	4.00

图7为HAC-C系列试件的荷载-位移曲线,可见,随着柔度比  $\omega$  的增加,结构的初始刚度和极限承载力明显降低,试件的延性也明显降低. 图8为HAC-C系列的三组试件在1/50位移角时柱的变形图,在整体变形的基础上  $\omega = 2.5$  (C2),柱的最大内凹值为1.4mm,而  $\omega = 4$  (C4)时柱的最大内凹值为157mm,而C2的承载力C4的2.2倍,延性也远远优于C4,可见为充分发挥体系的抗侧性能,柱应具备足够的刚度为板提供锚固.

本文将非加劲薄钢板剪力墙试件HPP<sup>[2]</sup>与HAC柱的变形图对比如图9,由图可以看出加劲肋设置,有效的减缓柱的内凹效应,  $\omega$  限制为针对薄板墙的限制,对于加劲墙可以适当放宽,或若加劲肋有足够的抗弯刚度,建议选取小区格按照公式4计算.

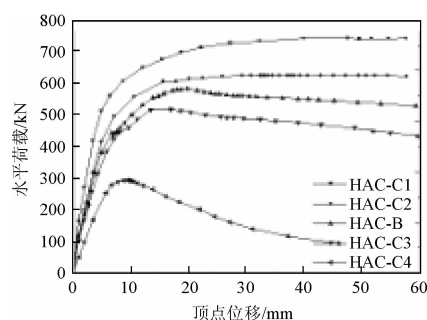


图7 HAC-C系列荷载-位移曲线

Fig. 7 HAC-C load-displacement envelope

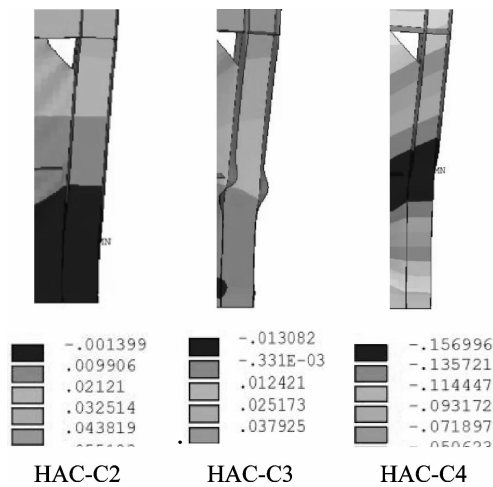


图8 有限元一层柱变形图

Fig. 8 Column deformation of FE model

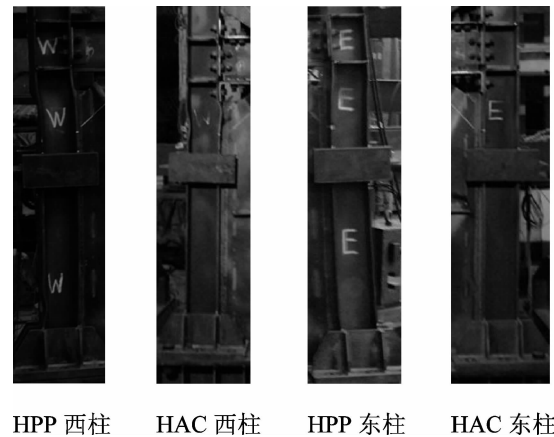


图9 试验一层柱变形图

Fig. 9 Column deformation of test model

### 2.3.2 剪力墙的高厚比(HAC-W 系列)

该系列改变剪力墙的厚度考虑剪力墙的高厚比对体系承载力、延性和水平剪力分配的影响,试件的高厚比参数如表2(不考虑加劲分隔)。

图10为HAC-W系列试件的荷载-位移曲线,随着墙厚的增加结构的初始刚度和极限承载力显著提高,但是试件的延性急剧下降。HAC-W3模型可视为厚板墙,其屈服荷载和峰值荷载,均为此系列模型的最大值,而其延性最低,而HAC-W2与HAC-W3表现出了良好的延性,可见厚板墙相对薄板墙更有可能发生脆性破坏。

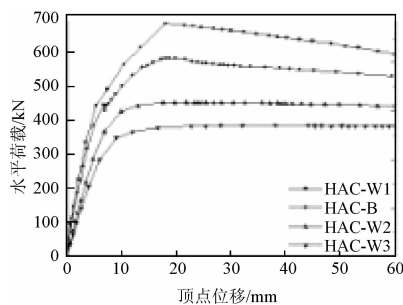


图10 HAC-W系列荷载-位移曲线

Fig. 10 HAC-W load-displacement envelope

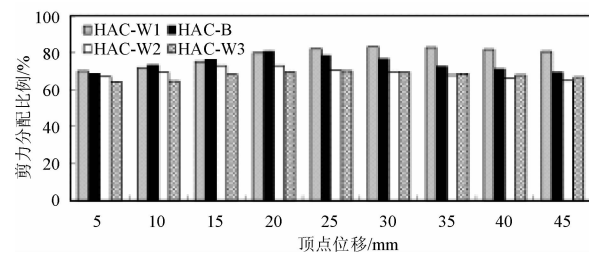


图11 HAC-W系列内力分配比较

Fig. 11 HAC-W force distribution comparison

图11为HAC-W系列试件的墙板承担的水平剪力的变化规律。板高厚比越大,钢板墙所承担的水平剪力越小,HAC-W1墙板承担的水平剪力约为70%~85%,HAC-W3钢板墙承担的水平剪力约为65%~70%。由此可见,新结构作为一种双重抗侧力体系,当第一道防线钢板墙先于框架屈服时,会有一部分剪力转移到框架,而半刚性框架作为第二道防线,要能提供足够的承载力,对钢板提供足够的锚固作用。

### 2.3.3 肋板刚度比(HAC-SW 系列)

该系列采用肋板刚度比,即单位宽度的加劲肋与板抗弯刚度之比,分析其对体系承载力、延性和水平剪力分配的影响,试件的肋板刚度比参数如表3。

表2 HAC-W 设计参数

Tab. 2 HAC-W design parameter

试件编号	HAC-W1	HAC-B	HAC-W2	HAC-W3
高厚比	200	300	400	500

表3 HAC-SW 设计参数

Tab. 3 HAC-SW design parameter

试件编号	HAC-SW1	HAC-B	HAC-SW2	HAC-SW3
肋板刚度比	0	12	40	80

图 12 为 HAC-SW 系列试件的荷载-位移曲线. 可见, 相对于不设置加劲肋的薄板, 设置加劲肋能显著提高结构的极限承载力和试件的延性. 对于已设置加劲肋的薄板, 肋板刚度比越大, 模型的极限承载力越大, 但增大的幅度不显著, HAC-SW3 的极限承载力较 HAC-B 仅提高了 3%, 分析原因加劲肋刚度增大到某一阈值时, 可有效的约束钢板墙的整体面外变形, 加劲肋刚度再继续提高对钢板墙的约束能力提高有限. 考虑经济性的要求, 建议肋板刚度比阈值控制在 40 左右.

图 13 为 HAC-SW 系列试件的墙板承担的水平剪力的变化规律. 可见, 四组试件的变化规律基本一致. 加载初期墙板的作用非常明显, 四者的墙板承担水平剪力基本一致, 初始刚度基本相同, 可见加载初期墙板未发生屈曲前, 加劲作用不明显, 薄钢板作为主要的抗侧力构件非常有效; 但随着水平荷载增大, 墙板屈曲后, 未设置加劲肋的薄板墙的刚度和分担的剪力要低于设置加劲肋的薄板墙.

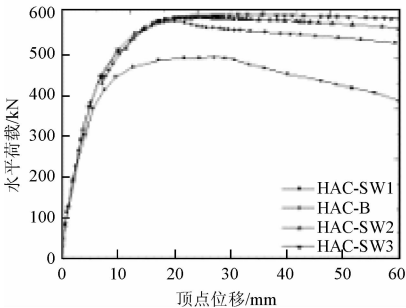


图 12 HAC-SW 系列荷载-位移曲线  
Fig. 12 HAC-SW load-displacement envelope

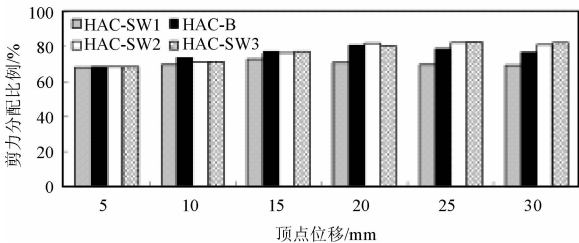


图 13 HAC-SW 系列内力分配比较  
Fig. 13 HAC-SW force distribution comparison

2.3.4 节点刚度系列(HAC-PR 系列)

该系列采用改变节点的抗弯承载力, 考虑节点转动刚度变化对体系承载力和刚度的影响, 试件的肋节点参数如表 4.

图 14 为 HAC-RT 系列试件的荷载-位移曲线, 可见在弹性阶段, 节点的刚度对试件的承载力和刚度基本无影响. 进入到弹塑性阶段后, 节点的刚度越大, 试件的极限承载力越大, 但增大的幅度比较小, HAC-RT2 比 HAC-RT1 的极限承载力仅提高了 3%, 而 HAC-RT1 的延性却优于其他. 分析原因钢板墙的设置对节点转动起到了约束作用, 降低了节点的抗弯能力对结构受力性能的影响, 钢板墙角部的“衬板”作用明显, 从而加强了节点, 即使是铰接节点, 也能将梁柱连接起来, 使其起到抗弯作用.

3 结 论

通过对半刚性节点钢框架-十字加劲钢板剪力墙结构在反复水平荷载作用下的试验研究和有限元分析, 得到以下结论:

- (1) 十字加劲肋的设置, 改善了钢板的受力, 延缓钢板屈曲, 提高墙体刚度、延性和承载力; 同时, 克服滞回曲线出现的捏缩现象, 减小钢板噪声及震颤.
- (2) 钢板墙的“衬板”作用明显, 节点刚度退化小, 且内填钢板的设置缓解了节点区自身的延性要求, 节点的转动刚度对试件的承载力和初始刚度影响不大.
- (3) 增加内填墙板的厚度, 柱的刚度和肋板厚度可提高结构的初始刚度和承载力, 能够有效地提高结构的整体性能, 结构的柱柔度对于充分加劲构件可放宽, 肋板刚度比应控制在 40 左右.

表 4 HAC-PR 设计参数  
Tab. 4 HAC-PR design parameter

试件编号	节点	HAC-PR1	HAC-B	HAC-PR3
节点受弯	HAC-T	0.20M <sub>p</sub>	0.40M <sub>p</sub>	无穷大
承载力	HAC-M	0.20M <sub>p</sub>	0.56M <sub>p</sub>	无穷大

注:  $M_p$  为梁端全截面塑性弯矩; 无穷大即为全刚性节点.

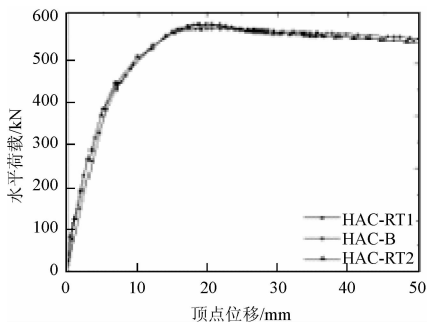


图 14 HAC-RT 系列荷载-位移曲线  
Fig. 14 HAC-RT load-displacement envelope

## 参考文献 References

- [1] 郝际平,郭宏超.半刚性连接钢框架-钢板剪力墙结构抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2011,21(3):33-40.  
HAO Ji-ping, GUO Hong-chao. Seismic Performance of Semi-rigid Composite Steel Frame with Steel Plate Shear Walls [J]. Journal of Building Structures, 2011, 21(3): 33-40.
- [2] 于金光,郝际平.腹板双角钢连接框架-非加劲薄钢板剪力墙抗震性能试验研究[J].地震工程与工程振动,2011,31(5):84-90.  
YU Jin-guang, HAO Ji-ping. Experimental Study on Seismic Behavior of Double Web-angle Connected Steel Frame-unstiffened Thin Steel Plate Shear Walls [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(5): 84-90.
- [3] KISHI N, CHEN W F, GOTO Y, et al. Effective length factor of columns in semi-rigid and unbraced frame [J]. J Struct Eng, ASCE1997, 123(3):313-320.
- [4] KUHN P, PETERSON J P, LEVIN L R. A Summary of Diagonal Tension, Part 1-Methods of Analysis[R]. National Advisory Committee for Aeronautics, Technical note:2661-2662, 1952.
- [5] WAGNER H. Flat Sheet Metal Girders with Very Thin Webs[R]. Technical Memorandum No. 606, National Advisory Committee for Aeronautics, 1931.
- [6] CSA (2001), CAN/CSA S16-01, Limit States Design of Steel Structures[S]. Toronto, ON, Canada.
- [7] AISC (2005c), ANSI/AISC 341-05, Seismic Provisions for Structural Steel Buildings[S]. American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.

## Numerical simulation of sheer walls of semi-rigid composite steel frame with stiffened steel plate

HAO Ji-ping, YU Jin-guang, WANG Xian-tie, GUO Hong-chao, HU Qi

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** In order to study the seismic behavior and force distribution in the structural system of the semi-rigid composite steel frame with steel plate shear walls, based on the experiment of a one-third scale, one-bay, two-story semi-rigid composite steel frame model with cross-stiffened steel plate shear wall under lateral cyclic loads, a non-linear finite element analysis model was built, and then the finite-element analysis model was validated by experimental data. Parametric analyses of 4 series and 16 finite element models were performed, in which 4 main influential factors including rotational stiffness of connections, different infill wall slenderness ratios, column flexibility, rigidity of stiffener were considered. The results showed that the reduction rotational stiffness of the connections may enhance the width of infill walls. Use of suitable parametric of column flexibility, rigidity of stiffener would improve the performance of the whole structure. The infill plates are the structure with the infill plates are very effective in the initial stages of loading. The infill plates undertakes 70%~85% of overall lateral load. The research provides a basis for engineering application and theoretical analysis of the structural system.

**Key words:** steel frame; semi-rigid composite; steel plate shear wall; cross-stiffened; hysteretic curves; numerical simulation; nonlinear finite element