

不同屈服点薄钢板剪力墙的受力性能研究

王先铁¹, 周清汉¹, 白连平², 马尤苏夫¹, 周超¹, 杨航东¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 中国建筑科学研究院西北分院, 陕西 西安 710061)

摘要: 采用有限元软件 ABAQUS 6.10 对薄钢板剪力墙屈服点为 235 N/mm² 和 345 N/mm² 的钢框架-薄钢板剪力墙进行了非线性数值分析, 对二者的承载力、刚度、剪力分配、滞回性能及延性等进行了研究。结果表明: 薄钢板剪力墙屈服点对初始承载力、刚度和剪力分配影响很小; 当薄钢板剪力墙屈服后, 其屈服点越高, 承载力和刚度亦越大, 钢板剪力墙承担的剪力越多; 高屈服点薄钢板剪力墙会增加受压柱的负担, 使其屈曲位置上移, 降低对薄钢板剪力墙的有效锚固; 加载初始阶段, 低屈服点薄钢板剪力墙先于高屈服点薄钢板剪力墙屈服耗能; 达到理想破坏的钢框架-薄钢板剪力墙具有很好的延性。

关键词: 薄钢板剪力墙; 不同屈服点; 剪力分配; 力学性能

中图分类号: TU398.2

文献标识码: A

文章编号: 1006-7930(2014)04-0492-05

薄钢板剪力墙 (下简称钢板墙) 承载力高、侧向刚度大、滞回性能好、具有良好的延性、耗能能力及优异的抗震性能^[1]。工程实践表明, 采用薄钢板墙的建筑在历次大地震中均表现出优异的抗震性能, 震后未出现明显的结构破坏。基于薄钢板墙的优异抗震性能, 国内外学者对其进行了较为广泛的研究。

1983 年, 加拿大学者 Thorburn 等^[2]首先提出利用钢板墙屈曲后强度的概念, 建立了非加劲钢板墙的拉杆分析模型, 提出了拉杆倾角计算公式, 为薄钢板墙的分析与设计提供了理论依据。2007 年, Hong-Gun Park^[3]等对 5 个单跨三层的框架-薄钢板墙试件进行了往复加载试验, 结果表明, 虽然薄钢板墙在加载初期发生了屈曲, 但仍表现出很好的初始刚度、强度和变形能力, 钢板墙的撕裂对承载能力和变形能力影响不大。2004 年, 陈国栋等^[4]对 6 个 1/3 比例的非加劲钢板墙、十字加劲钢板墙和交叉加劲钢板墙进行了低周反复荷载试验, 结果表明, 厚板和较强的加劲肋能够提高滞回曲线饱满度、增大滞回环面积。2008 年, 王迎春等^[5-7]分别对 14 个 1/3 比例的多层薄钢板墙进行了伪静力试验和理论研究, 证实了薄钢板墙具有良好的刚度、承载力、延性和耗能性能。2010 年, 聂建国等^[8]对两个两跨五层 1/5 比例的圆钢管混凝土柱边框内填薄钢板墙进行了低周往复荷载试验, 结果表明, 加劲和非加劲薄钢板墙都具有较高的承载力和稳定的滞回性能。

综上所述, 虽然国内外学者对薄钢板墙进行了大量的试验研究, 但对不同屈服点薄钢板墙的研究尚未见报道。本文采用非线性有限元软件 ABAQUS 6.10^[9]对薄钢板墙进行数值分析, 研究其剪力分配、刚度变化、柱子的受力性能和结构整体抗震性能的差异, 为不同屈服点薄钢板墙的研究和应用提供参考。

1 有限元模型验证

采用有限元软件 ABAQUS 进行非线性有限元分析, H 型钢梁选用八节点线性减缩六面体单元 (C3D8R), 钢板墙选用考虑大变形小应变的线性减缩薄壳单元 (S4R)。为验证有限元分析的可靠性, 取已有试验试件几何参数建模, 并将计算结果与试验结果进行对比^[10]。试件为单层单跨 H 型钢框架-钢板剪力墙, 框架梁、柱均为热轧 H 型钢, 柱截面为 HW150×150×7×10, 梁截面为 HN300×150×6.5×9, 内填钢板厚 3.5 mm。试件中心线尺寸为 1 500 mm (高) × 1 200 mm (宽)。材性试验结果见表 1。

模型采用低周往复加载, 有限元计算滞回曲线与试验滞回曲线对比如图 1 所示, 有限元计算最大荷载 681.5 kN, 弹性刚度 134.03 kN/mm, 试验最大荷载 670.5 kN, 弹性刚度 150 kN/mm, 最大荷载与弹性刚度分别相差 1.64%, 10.65%。试验与有限元模型的破坏模式相近, 首先钢板墙屈曲形成拉力带, 随后柱脚开

表 1 材性试验结果

Tab.1 Mechanical properties of steel

试件	$f_y/\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	$f_u/\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	$E/\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	$\delta/\%$
柱	302	421	198 500	27.7
梁	295	398	200 600	29.3
墙板	340	451	205 300	37.1

收稿日期: 2013-11-29

修改稿日期: 2014-07-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51108369); 陕西省青年科技新星项目 (2013KJXX-54); 住房和城乡建设部科学技术项目 (2014-K2-007)

作者简介: 王先铁 (1979-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为钢结构与钢管混凝土结构。E-mail: wangxiantie@163.com

始屈服,当达到极限荷载时,墙板基本完全屈服并在循环荷载下产生不可恢复的残余变形,柱脚鼓曲形成塑性铰.模型加载全过程与试验试件受力机理吻合.综合试验现象、滞回曲线、计算结果与破坏模式对比表明,有限元分析具有良好的精度.

2 分析模型

设计两个单跨两层的足尺模型,钢板墙尺寸为 $3\,000\text{ mm}\times 3\,000\text{ mm}$,钢板墙厚度为 4 mm ,其宽高比为 1 ,高厚比为 750 .柱子截面尺寸为 $\text{H}550\times 450\times 14\times 22$,底梁和顶梁截面尺寸均为 $\text{H}400\times 250\times 20\times 22$,中梁截面尺寸为 $\text{H}400\times 250\times 12\times 18$.两个模型的编号分别为 SW235 和 SW345,其中,SW235 钢板墙的屈服强度为 235 N/mm^2 ,SW345 钢板墙的屈服强度为 345 N/mm^2 .H 型钢柱和钢梁均采用 Q345 钢材,屈服强度 $f_y=345\text{ N/mm}^2$,钢材弹性模量 $E_s=2.06\times 10^5\text{ MPa}$,泊松比 $\nu=0.3$.钢材的本构关系定义为理想弹性.分析模型具体尺寸如图 2 所示.模型的网格划分如图 3 所示.实际结构中,梁上铺设刚性楼板,相当于对梁设置了平面外支撑,能有效防止其平面外整体失稳,因此,在有限元分析中,约束 H 型钢梁上翼缘的面外平动自由度.柱脚刚接,柱顶按照 0.40 的轴压比施加竖向荷载.基于弹性屈曲分析结果,对内填板施加 $1/1000$ 的初始几何缺陷.水平荷载采用位移加载,位移幅值分别为: $\pm\delta_y, \pm 2\delta_y, \pm 3\delta_y, \pm 4\delta_y, \pm 5\delta_y, \dots$,取屈服位移 $\delta_y=30\text{ mm}$.

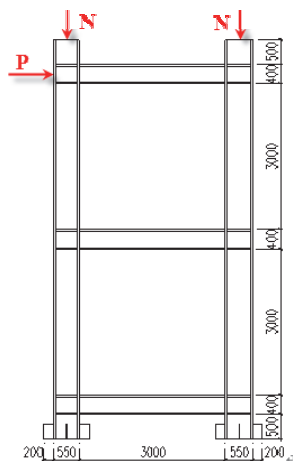


图2 模型尺寸
Fig.2 Geometric dimensions of models

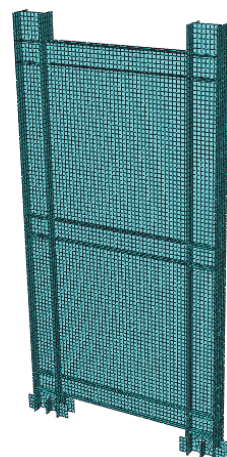


图3 模型网格划分
Fig.3 Finite element model

3 计算结果分析

3.1 侧向承载力

图 4 为钢框架-薄钢板墙单调加载下的荷载-位移曲线.由图可知,加载初始阶段,结构处于弹性,两模型的荷载-位移曲线重合,表明薄钢板墙钢材的屈服点不会影响钢框架-薄钢板墙的初始侧向承载力.随着侧向位移的增大,薄钢板墙开始进入屈服,逐渐形成拉力场,模型 SW345 的荷载-位移曲线比模型 SW235 高,表明薄钢板墙的屈服点越高,框架-薄钢板墙的极限承载力就越大,与 SW235 相比,SW345 的极限承载力提高了 21.4% .

拉力场对竖向边缘构件产生压力时,该竖向边缘构件称为受压柱,反之,称之为受拉柱.受压柱是框架-薄钢板墙的关键受力构件之一^[11-13].图 5 为钢框架-薄钢板墙受压柱的应力云图,由图可知,SW345 受压柱底的屈曲位置高于 SW235,表明高屈服点薄钢板墙增加了受压边柱的负担,使得其屈曲位置上移,屈曲面积增大.

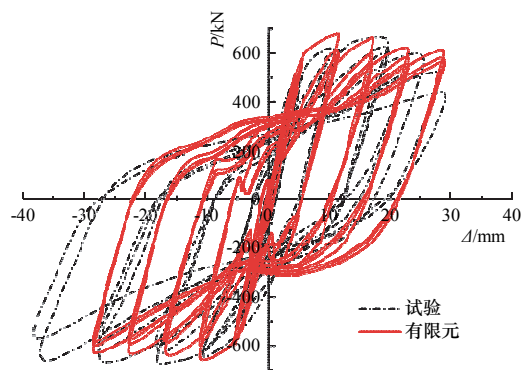


图1 滞回曲线对比
Fig.1 Comparison of hysteretic curves

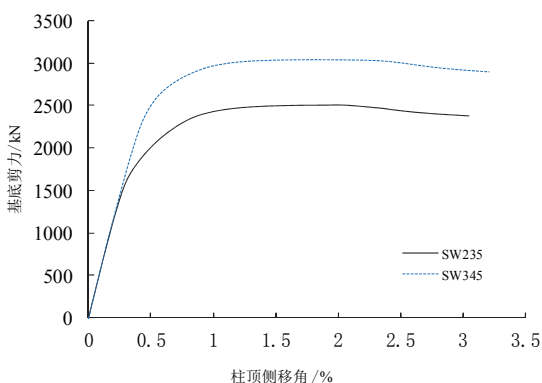


图4 水平荷载-位移曲线
Fig.4 Horizontal load-lateral displacement curves

文献[14]给出了钢框架-薄钢板墙侧向极限承载力的计算公式, 基于其计算原理, 本文分析模型的极限承载力计算公式为:

$$\sum_{i=1}^{n_s} v_i h_i = 2M_{pc1} + \sum_{i=1}^{n_s} M_{pbi} + \sum_{i=1}^{n_s} \frac{1}{2} F_y L h_i (t_i - t_{i+1}) \sin 2\alpha$$

其中: v_i 为作用在第 i 层的水平荷载; h_i 为第 i 层到基底的高度; L 为钢板墙的宽度; t_i 为第 i 层的板厚; α 为拉力场倾角 (与竖向边缘构件的夹角); F_y 为钢板墙的屈服强度; M_{pc1} 为柱底端塑性弯矩; M_{pbi} 为 i 层梁端塑性弯矩. 钢框架-薄钢板墙侧向极限承载力的理论计算值和单调加载有限元分析值见表 2, 二者吻合较好.

表 2 有限元分析结果与计算结果比较

Tab.2 The comparison of finite element analysis results and calculated results

模型编号	理论计算值/kN	有限元分析值/kN	$\Delta/\%$
SW235	2417	2504	3.6
SW345	3077	3039	-1.2

注: $\Delta = (\text{有限元分析值} - \text{理论计算值}) / \text{理论计算值}$.

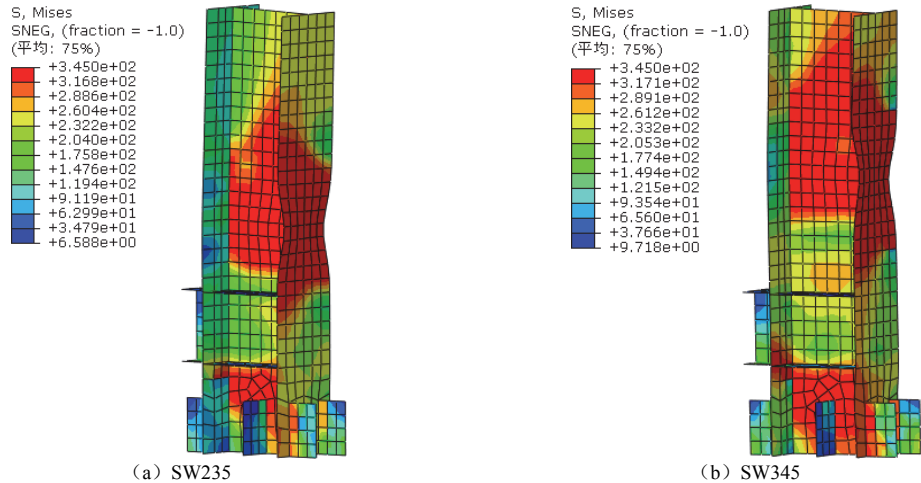


图 5 受压柱应力云图
Fig.5 von Mises stress of compression column

3.2 刚度

图 6 为钢框架-薄钢板墙的柱顶侧移角-刚度曲线. 由图可知, 加载初始阶段, 两曲线几乎重合, 随着柱顶侧移角的增大, SW345 的刚度比 SW235 更大, 表明薄钢板墙的屈服点对屈服前的薄钢板墙刚度影响很小, 但对屈服后的薄钢板墙, 屈服点越高, 薄钢板墙刚度越大.

3.3 剪力分配

图 7 为钢框架-薄钢板墙的剪力分配曲线. 由图可知, 当层间侧移角小于 0.5% 时, 二者的剪力分配曲线几乎重合, 说明在试件屈服前不同屈服点薄钢板墙对剪力分配影响较小; 随着层间侧移角的增大, SW345 中钢板墙承担的剪力百分比比 SW235 大, 表明薄钢板墙的屈服点越高, 其屈服后钢板墙所承担的剪力百分比越大.

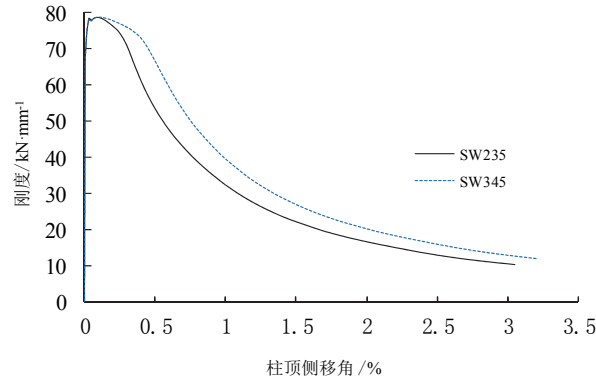


图 6 刚度-侧移角曲线
Fig.6 Stiffness-lateral drift angle curves

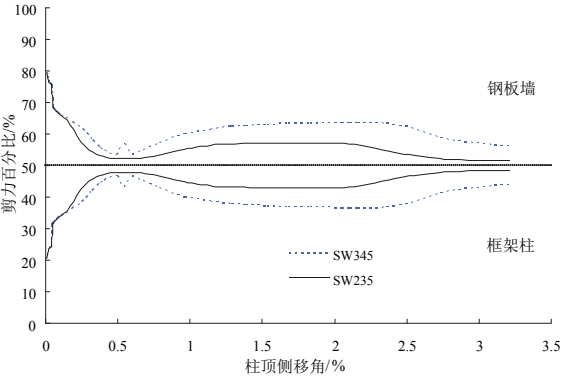


图 7 剪力分配曲线
Fig.7 Shear distribution curves

3.4 滞回曲线

图 8 (a) 为分析模型的柱顶侧移角-基底剪力滞回曲线. 由图可知, 二者的滞回曲线饱满, 滞回性能稳定, 但 SW345 的极限承载力下降较快. 加载位移 $\delta_y=30$ mm 时的滞回环如图 8 (b) 所示, SW235 的滞

回环比 SW345 更饱满, 表明在加载初始阶段, 较低屈服点的薄钢板墙会更早地屈服耗能。

图 9 为钢框架-薄钢板墙破坏时各阶段的 von Mises 应力云图。由图 9(a)~(b)可知, 钢板墙大面积屈曲形成拉力带时, 周边框架基本处于弹性状态; 图 9(c)~(d)为破坏时的应力分布云图, 节点区域几乎全部屈服, 柱脚与中梁形成塑性铰, 同时钢板墙均有不可恢复的面外变形, 达到了理想的破坏形态, 即“弱板强框架”。SW235 的延性系数为 7.0, SW345 的延性系数为 7.1, 表明理想破坏的钢框架-薄钢板墙具有很好的延性, 不同屈服点薄钢板墙对延性系数影响较小。

在实际工程中, 采用较低屈服点的薄钢板墙, 能够使抗侧力构件的布置更加分散、均匀, 可避免个别抗侧力构件的破坏导致结构倒塌, 同时, 在地震作用下, 较低屈服点薄钢板墙能够更早地屈服耗能, 减小地震作用, 避免主体结构破坏。

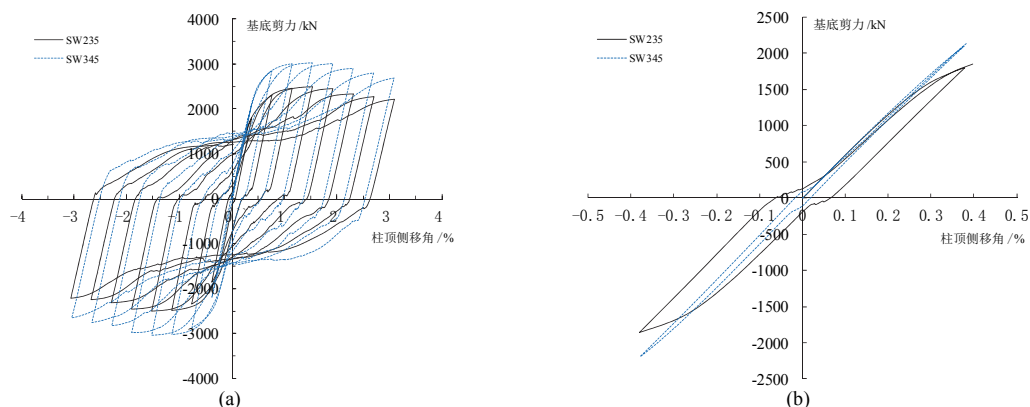


图 8 滞回曲线
Fig.8 Hysteretic curves

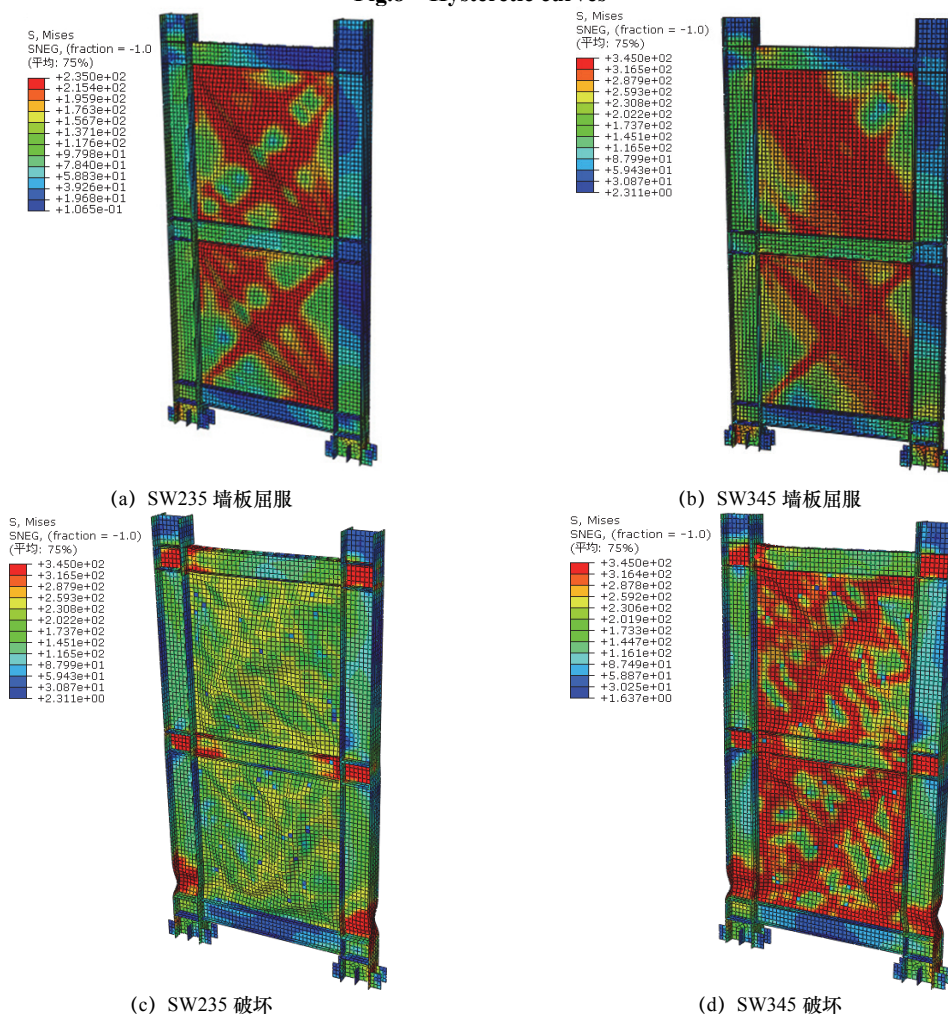


图 9 应力云图
Fig.9 von Mises stress

4 结论

(1) 薄钢板墙的屈服点对框架-薄钢板墙初始阶段的承载力影响很小,但屈服后,薄钢板墙屈服点越高,框架-薄钢板墙的极限承载力越高,其极限承载力下降较快。

(2) 高屈服点薄钢板墙会增加受压边柱的负担,使其屈曲位置上移,降低对薄钢板墙的有效锚固。

(3) 薄钢板墙的屈服点对框架-薄钢板墙的初始刚度和初始剪力分配影响很小,但对屈服后的薄钢板墙,薄钢板墙的屈服点越低,其屈服后所承担的剪力和刚度越小。

(4) 加载初始阶段,与高屈服点薄钢板墙相比,低屈服点薄钢板墙更早地屈服耗能。达到理想破坏形态的钢框架-薄钢板墙具有良好的延性。

参考文献 References

- [1] 郭彦林,董全利. 钢板剪力墙的发展与研究现状[J]. 钢结构, 2005, 20(1):1-6.
GUO Yanlin, DONG Quanli. Research and application of steel plate shear wall in high-rise buildings[J]. Steel Construction, 2005, 20(1):1-6.
- [2] THORBURN L J, KULAK G L, MONTGOMERY C J. Analysis of steel plate shear walls[R]. Structural Engineering Report No. 107, Department of Civil Engineering, university of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, 1983.
- [3] PARK H G, KWACK J H, JEON S W. Framed steel plate wall behavior under cyclic lateral loading[J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(3):378-388.
- [4] 陈国栋,郭彦林,范珍,等. 钢板剪力墙低周反复荷载实验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(2):19-26.
CHEN Guodong, GUO Yanlin, FAN Zhen, et al. Cyclic test of steel plate shear walls[J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(2):19-26.
- [5] 王迎春,郝际平,曹春华,等. 栓焊混合连接钢板剪力墙试验研究[J]. 建筑钢结构进展, 2009, 11(1):16-20.
WANG Yingchun, HAO Jiping, CAO Chunhua, et al. Experimental studies on steel plate shear walls with welded-bolted connection[J]. Progress in Steel Building Structures, 2009, 11(1):16-20.
- [6] 郝际平,曹春华,李峰,等. 开洞薄钢板剪力墙低周反复荷载试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(2):79-85.
HAO Jiping, CAO Chunhua, LI Feng, et al. Cyclic test of thin steel plate shear wall with openings[J]. Journal of earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(2):79-85.
- [7] 曹春华,郝际平,王迎春,等. 开缝薄钢板剪力墙低周反复荷载试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2008, 40(1):46-52.
CAO Chunhua, HAO Jiping, LI Feng, WANG Yingchun et al. Cyclic test of thin steel plate shear wall with slits[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2008, 40(1):46-52.
- [8] 聂建国,樊建生,黄远. 钢板剪力墙的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(9):1-8.
NIE Jianguo, FAN Jiansheng, HUANG Yuan. Experimental research on steel plate shear wall[J]. Journal of Building Structure, 2010, 31(9):1-8.
- [9] Dassault Systèmes Simulia Corp. ABAQUS analysis user's manual version 6.10[M]. PROVIDENCE, RI: DASSAULT SYSTÈMES SIMULIA CORP, 2010.
- [10] 李峰,李慎,郭宏超,等. 钢板剪力墙抗震性能的试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2011, 43(5):623-630.
LI Feng, LI Shen, GUO Hongchao, et al. Experimental investigation of seismic performance of steel plate shear walls[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2011, 43(5):623-630.
- [11] 陈国栋,郭彦林. 十字加劲钢板剪力墙的抗剪极限承载力[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(1):71-78.
CHEN Guodong, GUO Yanlin. Ultimate shear carrying capacity of steel plate shear wall with cross stiffeners[J]. Journal of Building Structure, 2004, 25(1):71-78.
- [12] VIAN D, BRUNEAU M. Steel plate shear walls for seismic design and retrofit of building structure[R]. Buffalo, N. Y.: Technical Rep. No. MCEER-05-0010, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 2012.
- [13] TSAI KEH-CHYUAN, LI CHAO-HSIEN. Cyclic tests of four two-story narrow steel plate shear walls —Part I: studies and specimen design[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2010, 39(7):775-799.
- [14] BERMAN J W, BRUNEAU M. Plastic analysis and design of steel plate shear walls[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(11):1448-1456.

Mechanical behavior study of different yield point thin steel plate shear walls

WANG Xiantie¹, ZHOU Qinghan¹, BAI Lianping², MA Yousufu¹, ZHOU Chao¹, YANG Hangdong¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Northwest Branch, Institution of Chinese Architecture Science, Xi'an 710061, China)

Abstract: Nonlinear numerical analysis is conducted on the steel frame-thin steel plate shear walls with 235 N/mm² or 345 N/mm² yield point by using the finite element software ABAQUS 6.10. The load carrying capacity, stiffness, shears distribution, hysteretic behavior and ductility are investigated. Results obtained from this study are as follows: The yield point of thin steel plate shear walls has no influence on the initial load carrying capacity, stiffness and shears distribution. After the thin steel plate shear walls yield, the higher the yield point, the higher the bearing capacity; and the larger the stiffness, the more the distributed shear. Higher yield point thin steel plate shear wall will increase the tension action of compressed column, which will move up the column's buckling and reduce the effective anchorage of steel plate shear walls. At initial loading stage, lower yield point steel plate shear walls yield earlier than higher yield strength steel. The thin steel plate shear walls with idealized failure mechanism have excellent ductility.

Key words: thin steel plate shear walls; different yield point; distribution of shear; mechanical behavior

(本文编辑 桂智刚)