三类薄钢板剪力墙滞回性能及选型

曹正罡[1,2], 杜 鹏[1,2], 邱星玮[3], 范 峰[1,2]

(1.哈尔滨工业大学 结构工程灾变与控制教育部重点实验室, 150090 哈尔滨;
2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院,150090 哈尔滨; 3. 镇江市中建地产有限公司,212000 江苏 镇江)

摘 要: 为研究四边连接、两边连接及开竖缝薄钢板剪力墙的滞回性能并对其设计选型提出建议,利用ANSYS有限元软件对三类薄钢板剪力墙的滞回性能进行数值模拟研究,对比分析了三类薄钢板剪力墙在低周往复荷载作用下的初始刚度、峰值承载力、耗能性能以及延性.分析结果表明:三类薄钢板剪力墙均具有良好的延性和耗能能力;四边连接和两边连接薄钢板剪力墙的滞回曲线有一定程度的捏缩,但其初始刚度和峰值承载力较高,可用作高层或高烈度区的多层钢结构住宅的抗侧构件;开竖缝薄钢板剪力墙的滞回曲线呈饱满的梭形,但其初始刚度和峰值承载力较低,可用作低层或低烈度区的多层钢结构住宅的抗侧构件.

关键词: 四边连接;两边连接;开缝;薄钢板剪力墙;滞回性能
中图分类号: TU392.5 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2014)10-0010-07

Hysteretic performance study and lectotype suggestion for three types of thin steel plate shear walls

CAO Zhenggang[1,2], DU Peng[1,2], QIU Xingwei[3], FAN Feng[1,2]

(1. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control, Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;
3. China State Construction Land Group (Zhenjiang), 212000 Zhenjiang, Jiangsu, China)

Abstract: To study the hysteretic performance and lectotype suggestion of the thin steel plate shear walls with four-side connections, two-side connections and silts, the hysteretic performance of those thin steel plate shear walls were systematically investigated utilizing the ANSYS software package. Comparisons of the initial stiffness, peak load, ductility and energy dissipation capacity of those steel plate shear walls were carried out base on the numerical results. Results showed that those three types of steel plate shear walls had proper ductility and energy dissipation capacity. The hysteretic curves of the thin steel plate shear walls with four-side connections and two-side connections had pinch phenomenon, while their initial stiffness and peak load were relatively high. They could be used in the multistory steel structure residences in high intensive seismic region or high-rise steel structure residences. The hysteretic curves of the thin steel plate shear walls with silts exhibited plump loops, but its initial stiffness and peak load were low. This kind of shear walls could be applied on the multistory steel structure residences in low intensive seismic region or low-rise steel structure residences.

Keywords: four-side connections; two-side connections; silts; steel plate shear walls; hysteretic performance

钢板剪力墙是20世纪70年代发展起来的一种高效抗侧力构件,它由内填钢板及其边缘约束构件组成.根据内填钢板宽厚比(λ)的大小,钢板剪力墙可划分为薄钢板剪力墙($\lambda \geqslant 250$)和中厚钢板剪力墙($\lambda < 250$).薄钢板剪力墙通过钢板屈曲后沿对角线方向形成的拉力带为结构提供水平抗力,具有良好的经济性能[1].

收稿日期: 2013-09-20.
基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2011BAJ10B01).
作者简介: 曹正罡(1975—),男,副教授,博士生导师;
范 峰(1971—),男,教授,博士生导师.
通信作者: 杜 鹏, pengdu5219@hotmail.com.

内填钢板四边与框架梁、柱均连接时为四边连接薄钢板剪力墙，其内填钢板屈曲后形成的拉力带锚固在框架梁、柱上，将使柱内产生附加弯矩并过早地破坏，影响结构的抗震性能. 为此 Xue 等[2-3]于 1994 年提出了内填钢板仅与上下钢梁连接的两边连接薄钢板剪力墙. 因其仅通过钢梁锚固拉力带，可避免对钢柱的不利影响.

四边连接和两边连接薄钢板剪力墙在受力初期均以内填钢板的剪切受力为主，极易发生剪切屈曲，滞回环存在一定程度的捏缩现象；另外，还存在因实际可使用钢板的最小厚度大于结构设计所需内填钢板厚度，造成结构刚度过大，地震作用偏高，边缘约束构件截面尺寸大幅增大等问题. 日本学者 Hitaka 等[4]提出了开竖缝薄钢板剪力墙的概念，即通过在内填钢板上开设竖缝，使其变形模式由整体剪切变形变为竖缝间小柱的弯曲变形. 试验证明这类剪力墙的抗侧刚度相对较小，但其滞回环饱满，当内填钢板厚度不变时，可通过开缝参数方便地调整其抗侧刚度及承载力.

目前在中国钢结构住宅结构体系研究及应用中，抗侧力构件采用薄钢板剪力墙的结构还不多见. 结合住宅体系中梁柱截面和柱距特点，针对薄钢板剪力墙的动力特性、耗能作用的对比分析以及选型研究也较少. 为此通过有限元软件 ANSYS 对四边连接、两边连接以及开竖缝薄钢板剪力墙在低周往复荷载作用下的受力性能进行对比分析，为钢结构住宅结构体系中抗侧力构件的选型设计提供参考.

1　薄钢板剪力墙的数值建模及验证

1.1　模型建立

为考虑边缘约束构件的影响，利用 Shell181 单元建立了单层单跨钢框架-薄钢板剪力墙结构的数值分析模型，如图 1 所示. 钢材本构采用双线性随动强化模型，其中弹性模量为 206 GPa，切线模量取为 2%的弹性模量，屈服强度为 235 MPa.

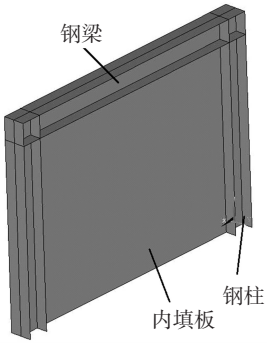


图 1　薄钢板剪力墙数值分析模型

模型采用一致缺陷模态法施加初始缺陷，即通过屈曲分析，得到薄钢板剪力墙的一阶屈曲模态，如图 2 所示，并按该模态的变形分布施加初始缺陷，最大面外变形取为内填钢板宽度的 1‰.

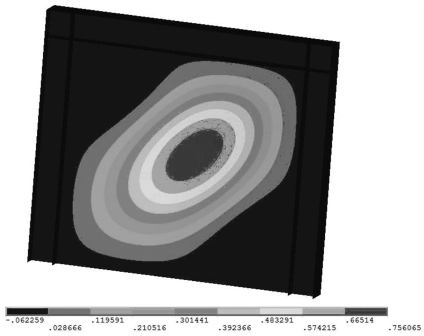
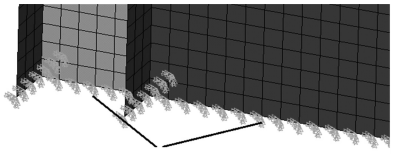
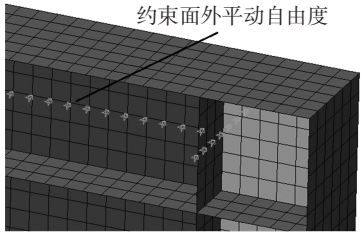


图 2　薄钢板剪力墙一阶屈曲模态(面外变形云图)

通过约束钢柱和内填钢板底部节点的平动及转动自由度模拟基础的嵌固作用，如图 3(a)所示；为防止钢梁发生面外位移，约束钢梁中轴线处节点在其腹板平面外的平动自由度，如图 3(b)所示.



(a)钢柱及内填表板底部约束



(b)钢梁面外约束

图 3　数值模型边界条件

通过耦合加载区节点的平动自由度形成加载刚性面，以减小加载区应力集中的影响，如图 4 所示.

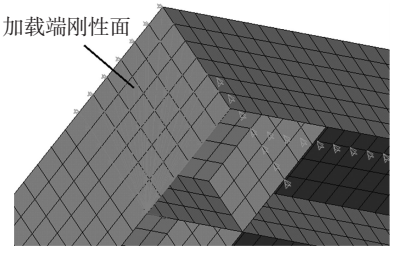


图 4　数值模型加载端刚性面

1.2　模型验证

选用文献[5]中试件 SPSW-H-2 的滞回试验数据对本文的建模方法进行验证，其中试件

SPSW-H-2的梁、柱和内填钢板的尺寸及材料性能如表1所示,试验加载制度如表2所示.根据本文建模方法建立数值模型并加载分析后所得模拟曲线与试验曲线对比如图5所示,相应的承载力对比如表3所示.数值模拟所得滞回曲线能够反映试验曲线的基本特征,且试验及模拟所得各级荷载作用下试件的峰值承载力也相差不大,说明本文所采用的数值建模及分析方法能够合理地跟踪整个试验过程.但因模拟所用材料模型及构件间连接均为理想情况,未能模拟试验过程中所发生的内填钢板开裂及连接滑移等现象,模拟曲线与试验曲线在卸载段存在一定程度的分离,各级承载力也有所差别.

表1　试件SPSW-H-2的构件尺寸及材料参数[5]

构件	构件尺寸/mm	σ_y/ MPa	E/ GPa
钢梁	HN300×150×6.5×9	295	201
钢柱	HW150×150×7×10	302	199
内填板	板厚 t = 3.5	340	205

表2　试件SPSW-H-2的加载制度[5]

荷载级别	荷载	循环圈数	加载类型
1	100 kN	1	力
2	200 kN	1	力
3	300 kN	1	力
4	400 kN	1	力
5	9.0 mm	3	位移
6	15.0 mm	3	位移
7	21.5 mm	3	位移
8	28.0 mm	3	位移
9	34.0 mm	3	位移

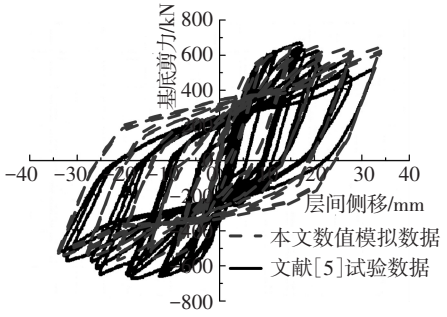


图5　SPSW-H-2的试验滞回曲线与本文模拟曲线对比

2　钢框架-薄钢板剪力墙试件设计

Lubell等[6]学者在对两个单层单跨四边连接薄钢板剪力墙进行低周往复加载试验后发现:如钢柱截面过小,试件将出现明显的"沙漏"现象,即薄钢板的拉力带作用会使钢柱过早弯曲,而后拉力带效应转移到刚度较大的钢梁上,导致内填钢板部分区域不能发挥作用.为避免该现象,美国规范FEMA450[7]和ANSI/AISC 341-10[8]及加拿大规范CAN/CSA S16-01[9]均要求框架柱绕垂直于内填钢板平面的主轴的截面惯性矩满足式(1)的要求:

$$I_c \geqslant \frac{0.00307 t_w h^4}{L}. \tag{1}$$

式中:I_c 为钢柱的惯性矩,t_w 为内填钢板厚度,h 为水平边缘约束构件轴线间距,L 为竖向边缘约束构件轴线间距.

根据钢结构住宅中常用构件截面以及层高,本文选用钢柱截面为HW300×300×10/15,钢梁截面为HN300×150×6.5/9,模型的其他基本尺寸如表4所示.为考虑框架跨度的影响,本文以钢结构住宅中常用跨度(L)作为分析参数,取值如表5所示.将上述L、h以及t_w带入式(1)可知,钢柱截面满足刚度要求.

表3　各级荷载作用下试件峰值承载力对比

荷载级别	实测值/kN	模拟值/kN	承载力差别/%
1	100	100	0
2	200	200	0
3	300	300	0
4	400	400	0
5	549	582	6.01
6	628	646	2.87
7	670	657	-1.94
8	678	653	-3.69
9	613	647	5.55

表4　模型基本尺寸

层高/m	内填板高/m	内填钢板高厚比	内填板厚/mm
2.8	2.5	300	8

表5　模型跨度及内填钢板宽度

序号	框架跨度/m	内填钢板宽度/m		
		四边连接	两边连接	开竖缝
1	1.8	1.5	1.3	1.3
2	2.4	2.1	1.9	1.9
3	3.0	2.7	2.5	2.5
4	3.6	3.3	3.1	3.1
5	4.2	3.9	3.7	3.7
6	4.8	4.5	4.3	4.3
7	5.4	5.1	4.9	4.9

两边连接和开竖缝薄钢板剪力墙的梁、柱构件截面,模型基本尺寸以及框架跨度与四边连接薄钢板剪力墙相同.但两边连接和开竖缝薄钢板剪力墙中的内填钢板均不与钢柱连接,且其两侧

与相应侧钢柱之间的预留间隙均为 100 mm，板宽如表 5 所示.由于内填钢板两侧与钢柱分离形成自由边，在水平剪切荷载作用下极易发生自由边失稳，需在内填钢板两侧设置加劲肋，其厚度（t_s = 12 mm）取为 1.5 倍的内填钢板厚度[10]，宽度（W_s = 180 mm）取为 15 倍的加劲肋厚度（t_s）.

开竖缝薄钢板剪力墙可通过开缝参数灵活地调整其抗侧刚度及承载力[4].为便于分析，本文统一采用表 6 所示开缝参数，其中 H、W 分别为内填钢板的高度和宽度，b、h 分别为缝间小柱的宽度和高度，H_u、H_m、H_d 分别为上、中、下壁高度，m 为开缝排数，d 为开缝宽度，参数意义如图 6 所示.

表 6　开竖缝薄钢板剪力墙开缝参数

b/m	h/m	H_u/m	H_m/m	H_d/m	d/m
0.10	0.50	0.38	0.12	0.38	0.01

3　薄钢板剪力墙滞回性能对比分析

根据上述模型参数及建模方法建立有限元模型并在加载刚性面处施加由位移控制的水平往复荷载以进行三类薄钢板剪力墙的滞回性能分析.根据 JGJ99—98《高层民用建筑钢结构技术规程》[11]规定的弹塑性层间位移角限值 1/70 以及 GB50011—2010《建筑抗震设计规范》[12]规定的弹塑性层间位移角限值 1/50 的要求，本文加载制度为从0到40 mm，每级荷载增量5 mm，且正负向循环一圈.根据 JGJ101—96《建筑抗震试验方法规程》[13]关于构件的破坏荷载及相应变形的规定，模型的极限荷载和变形取为层间侧移达到 40 mm时或承载力达到峰值后又下降到其峰值的 85%时所对应的荷载及变形.

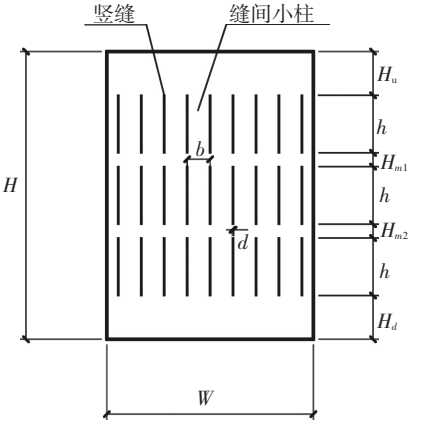


图 6　开竖缝薄钢板剪力墙开缝参数

3.1　滞回曲线

限于篇幅，仅将三类薄钢板剪力墙典型的滞回曲线示于图 7（WF 表示四边连接薄钢板剪力墙，WT 表示两边连接薄钢板剪力墙，WS 表示开竖缝薄钢板剪力墙，其后数字表示框架跨度，下同）.分析所得滞回曲线可知，相同类型薄钢板剪力墙的滞回曲线特征不随框架跨度变化，且四边连接和两边连接薄钢板剪力墙的滞回曲线都有一定程度的捏缩，而开竖缝薄钢板剪力墙的滞回曲线呈较为饱满的梭形.

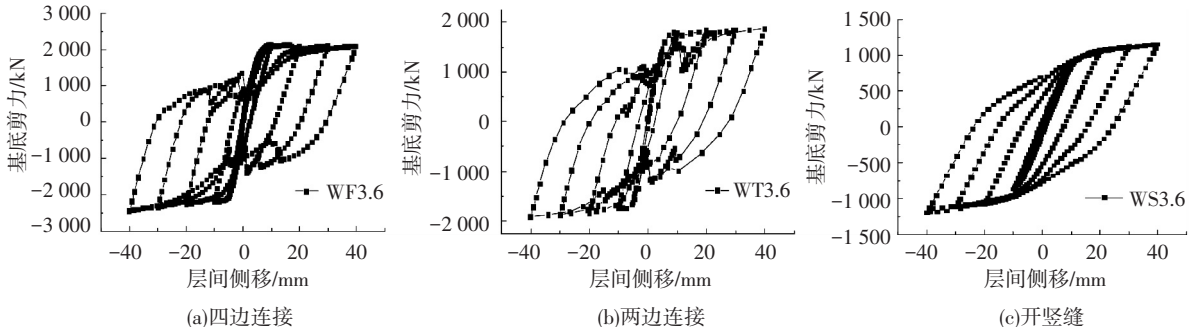
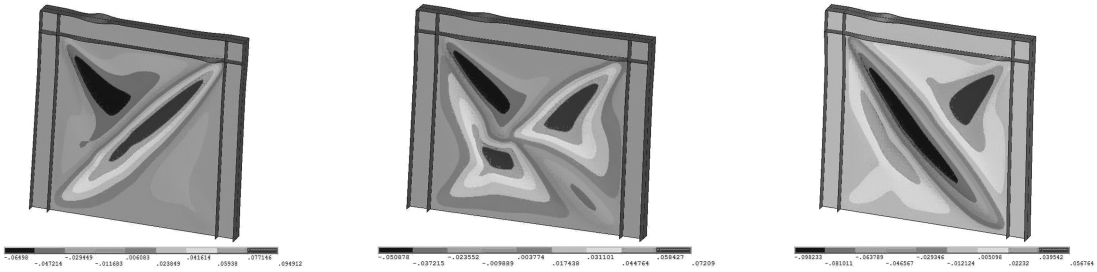


图 7　三类薄钢板剪力墙典型滞回曲线

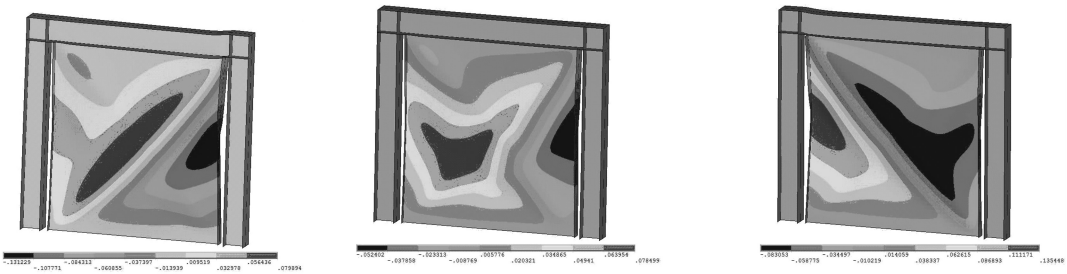
图 8～10 分别为四边连接、两边连接以及开竖缝薄钢板剪力墙在一个循环周期内的面外变形云图.图 11 为层间侧移达到 40 mm 时，三类薄钢板剪力墙内填钢板的 Von Mises 应力云图.如图 8、9 所示，四边连接和两边连接薄钢板剪力墙的内填钢板在水平剪切荷载作用下发生屈曲以及较大的面外变形，通过如图 11（a）、（b）所示沿对角线方向的拉力带继续承担水平荷载并屈服耗能；当层间侧移减小到零并反向加载时，内填钢板反向屈曲，其拉力带方向改变，但在承担反向荷载前，需先将正向加载时拉力带上产生的面外变形拉直，剪力墙呈现刚度弱化现象，该现象反映到滞回曲线上即为曲线的捏缩.开竖缝薄钢板剪力墙在加载过程中也存在一定的面外变形（图 10），但如图 11（c）所示，其内填钢板内的应力主要分布在竖缝间小柱的两端，即其主要受力模式为竖缝

间小柱的弯曲,通过小柱两端受弯形成的塑性铰消耗能量,其滞回曲线没有出现明显的捏缩现象.因残余应变的存在,层间侧移降至零点时,三类薄钢板剪力墙的内填钢板均有残余面外变形.



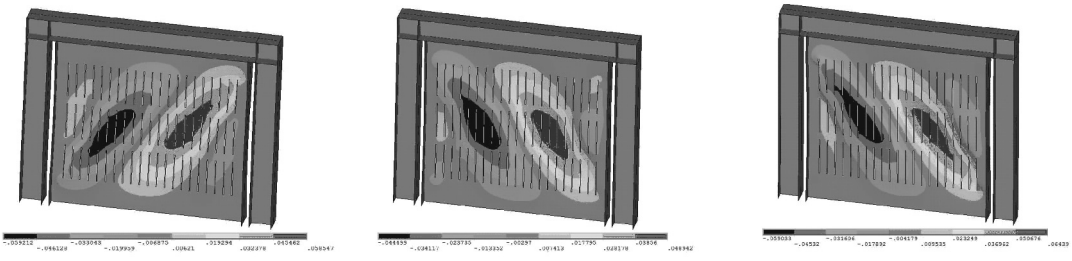
(a)正向位移加载极值点 (b)加载零点 (c)负向位移加载极值点

图 8 四边连接薄钢板剪力墙面外变形云图(m)



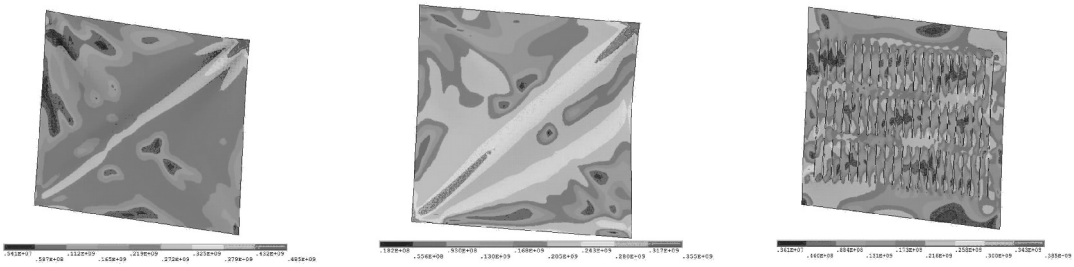
(a)正向位移加载极值点 (b)加载零点 (c)负向位移加载极值点

图 9 两边连接薄钢板剪力墙面外变形云图(m)



(a)正向位移加载极值点 (b)加载零点 (c)负向位移加载极值点

图 10 开竖缝薄钢板剪力墙面外变形云图(m)



(a)四边连接 (b)两边连接 (c)开竖缝

图 11 三类薄钢板剪力墙内填钢板 Von Mises 应力云图(位移荷载为 40 mm 时,单位 Pa)

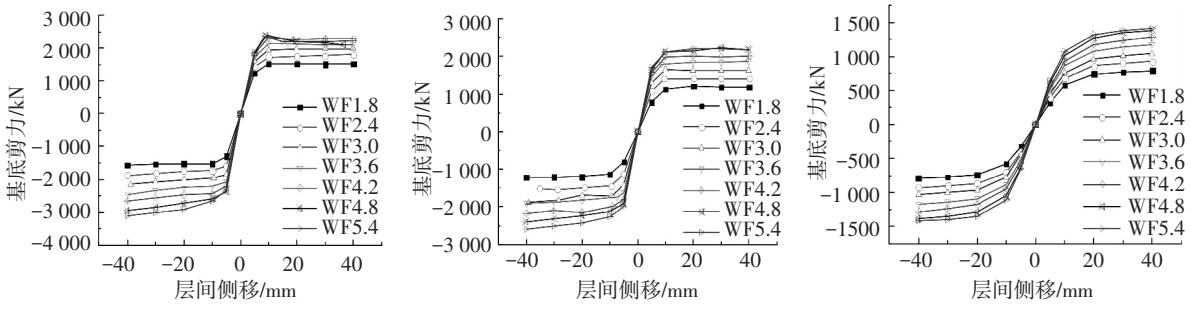
3.2 骨架曲线

连接滞回曲线上各级荷载第一圈循环的峰值点所得的外包曲线即为该滞回曲线的骨架曲线.图 12 所示为薄钢板剪力墙的骨架曲线,三类薄钢板剪力墙在进入塑性后,随着层间侧移的逐渐增大,承载力变化均较为平缓,具有良好的延性.

3.3 初始刚度

图 13 所示为三类薄钢板剪力墙的初始刚度随框架跨度的变化曲线,其中四边连接薄钢板剪力墙的初始刚度最高,其次为两边连接薄钢板剪

力墙，但与四边连接时相差不多，而开竖缝薄钢板剪力墙的初始刚度最低，且与前两类剪力墙相差较多.说明竖缝的存在，对薄钢板剪力墙的初始刚度具有削弱作用.



(a)四边连接　　(b)两边连接　　(c)开竖缝

图 12　三类薄钢板剪力墙骨架曲线

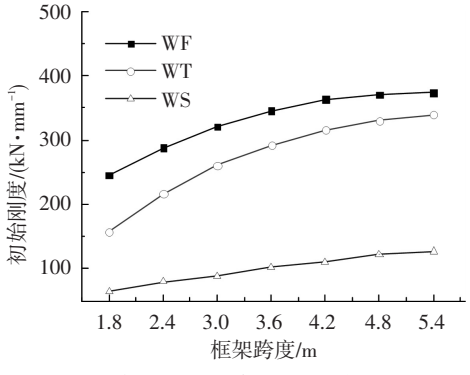


图 13　初始刚度随框架跨度变化曲线

3.4　峰值承载力

图 14 所示为三类薄钢板剪力墙的峰值承载力随框架跨度的变化曲线.四边连接薄钢板剪力墙的峰值承载力最高，但与两边连接时相差不大；开竖缝薄钢板剪力墙的峰值承载力最低，与前两类剪力墙也相差较多.竖缝对薄钢板剪力墙的峰值承载力同样具有削弱作用.

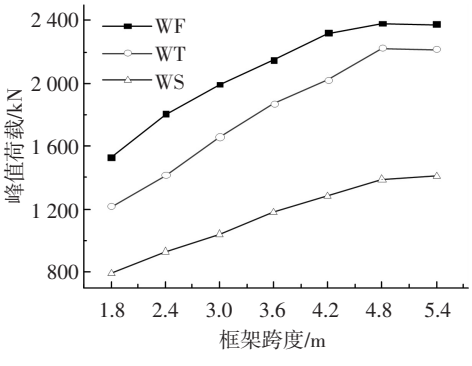


图 14　峰值荷载随框架跨度变化曲线

3.5　能量耗散系数

构件的耗能能力可由滞回曲线所包围的面积衡量，其能量耗散系数 E 按照式(2)计算[13]：

$$E = \frac{S_{(ABC+CDA)}}{S_{(OBE+ODF)}}. \tag{2}$$

如图 15 所示，$S_{(ABC+CDA)}$ 为滞回曲线外包线所包围的面积，$S_{(OBE+ODF)}$ 为极限荷载所对应的坐标点和原点的连线与横轴所包围的两个三角形面积之和.

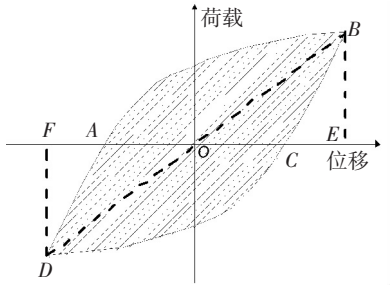


图 15　能量耗散系数计算方法示意

三类薄钢板剪力墙的能量耗散系数随框架跨度的变化曲线如图 16 所示.三类薄钢板剪力墙均具有良好的耗能能力，且耗能效率随框架跨度的变化不大.四边连接与两边连接薄钢板剪力墙的能量耗散系数较为接近，且均高于开竖缝薄钢板剪力墙.产生这种差别的原因是：四边连接与两边连接薄钢板剪力墙均是通过内填钢板屈曲后所形成的拉力带屈服消耗能量，而开竖缝薄钢板剪力墙则通过竖缝间钢板小柱两端弯曲屈服所形成的塑性铰消耗能量，且这两种能量耗散机制的效率不同.

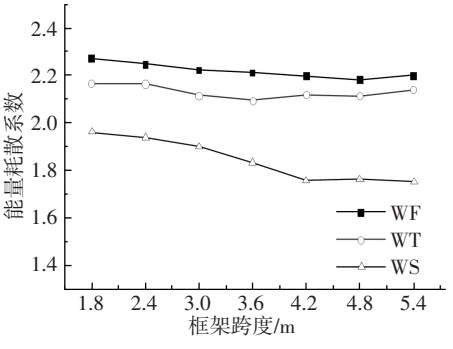


图 16　能量耗散系数随框架跨度变化曲线

3.6　延性

本文采用“通用屈服弯矩法”获得三类薄钢板剪力墙的屈服位移，如图 17 所示.开竖缝薄钢

板剪力墙的抗侧刚度最小,其屈服时的层间侧移最大;而四边连接和两边连接薄钢板剪力墙具有相近且较大的抗侧刚度,因此其屈服位移也接近且均较小.

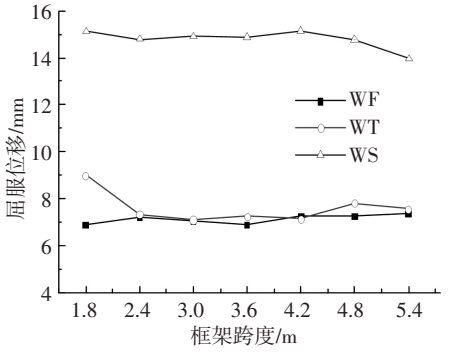


图17 屈服位移随框架跨度变化曲线

图18所示为薄钢板剪力墙的极限承载力与峰值承载力的比值.当层间侧移达到40 mm时,三类薄钢板剪力墙的承载力均未下降到0.85倍的峰值承载力,说明三类薄钢板剪力墙均具有良好的延性.

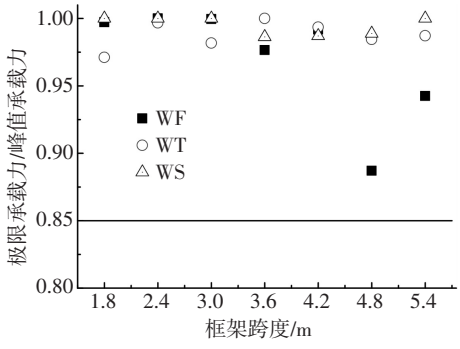


图18 极限承载力与峰值承载力比值

4 结 论

1)三类薄钢板剪力墙均具有良好的延性和耗能能力.

2)四边连接和两边连接薄钢板剪力墙的滞回曲线虽有一定程度的捏缩,但其初始刚度以及峰值承载力均较高.

3)开竖缝薄钢板剪力墙的初始刚度以及峰值承载力较低,但其滞回曲线呈饱满的梭形,可通过开缝参数方便地调整其抗侧刚度和承载力.

4)在高层钢结构或高烈度区的多层钢结构住宅等对抗侧刚度以及承载力要求较高的结构中,建议选用四边连接或两边连接薄钢板剪力墙作为结构的主要抗侧构件,选用开竖缝薄钢板剪力墙作为调整结构局部刚度及抗侧承载力的辅助抗侧构件.

5)在低层或低烈度区的多层钢结构住宅中,建议选用开竖缝薄钢板剪力墙作为结构的抗侧构件,以获得与结构设计相匹配的抗侧刚度以及承载力.

参考文献

[1] LASHGARI M. Finite element analysis of thin steel plate shear walls[J]. World Academy of Science, Engineering & Technology, 2009, 58: 436-440.

[2] XUE M, LU L W. Interaction of infilled steel shear wall panels with surrounding frame members [C]// Proceedings of Structural Stability Research Council Annual Technical Session. Bethlehem: Lehigh University, 1994:339-354.

[3] XUE M, LU L W. Monotonic and cyclic behavior of infilled steel shear panels [C]//Proceedings of 17th Czech and Slovak International Conference on Steel Structures and Bridges. Bratislava: Slovak university of technology in Bratislava, 1994:152-160.

[4] HITAKA T, MATSUI C. Experimental study on steel shear wall with slits [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(5):586-595.

[5] 董子建. 非加劲钢板剪力墙试验与理论研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2005.

[6] LUBELL A S, PRION H G L, VENTURA C E, et al. Unstiffened steel plate shear wall performance under cyclic loading[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(4):453-460.

[7] FEMA 450. NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures part 1: provisions [S]. Washington D. C.: Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency, 2003.

[8] ANSI/AISC 341—10 Seismic provisions for structural steel buildings[S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2010.

[9] CAN/CSA S16—01 Limits states design of steel structures [S]. Mississauga: Canadian Standards Association, 2001.

[10] 马欣伯,张素梅,郭兰慧.侧边加劲肋对两边连接钢板剪力墙弹性屈曲的影响[C]//庆祝刘锡良教授八十华诞暨第八届全国现代结构工程学术研讨会论文集.天津:天津大学, 2008:1171-1176.

[11] JGJ99—98 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.

[12] GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.

[13] JGJ101—96 建筑抗震试验方法规程[S].北京:中国建筑工业出版社,1997.

(**编辑** 赵丽莹)