

钢板剪力墙结构的耗能能力

孙国华*, 顾强, 何若全, 方有珍

(苏州科技学院 江苏省结构工程重点实验室, 苏州 215011)

摘要:在钢板剪力墙结构(简称 SPSW)基于能量的性能抗震设计中,需要合理计算有不同滞回特征构件的滞回耗能。为反映剪力墙板滞回曲线的捏缩特征,本文提出了过程捏缩系数及平均捏缩系数,给出了剪力墙板滞回耗能的计算方法。采用数值方法细致分析 1 榀梁柱刚接的单层、单跨钢板剪力墙结构的滞回性能及耗能能力,并设计了 12 榀梁柱铰接的单层、单跨 SPSW 试件,考察了跨高比及高厚比两个参数对剪力墙板滞回性能的影响,总结了捏缩系数的变化规律,提出了简化计算公式。

关键词:钢板剪力墙结构;剪力墙板;滞回耗能;捏缩系数;跨高比;高厚比

中图分类号:P391 **文献标志码:**A doi:10.7511/jslx201303018

1 引言

基于能量的抗震设计理念是结构的耗能能力应大于地震输入能量^[1-3]。准确计算结构及构件的耗能能力是基于能量抗震设计方法是否合理的重要前提。钢板剪力墙结构(简称 SPSW)具有水平承载力高、抗侧刚度大及耗能能力优良等特点,非常适合于高烈度地震设防区使用^[4-6]。目前,关于 SPSW 结构的相关研究主要集中在抗震性能^[7,8]、新型 SPSW 结构体系的开发(如开缝钢板剪力墙^[9,10]、开洞钢板剪力墙^[11,12]、防屈曲钢板剪力墙^[13-16]等)、简化模型^[17-19]及设计方法^[20-22]等方面。对 SPSW 结构耗能能力的评价仅局限于低周往复试验结果分析中的简单评估,尚未清楚区分框架耗能还是剪力墙板耗能。

SPSW 结构根据剪力墙板的高厚比(λ)划分为三类^[20]:薄板($\lambda > 300$)、中厚板($300 \geq \lambda \geq 100$)和厚板($\lambda < 100$)。剪力墙板的高厚比对 SPSW 结构的滞回性能有显著影响,随着剪力墙板高厚比的增大,墙板易于屈曲,滞回曲线趋于捏缩,耗能能力下降。为量化剪力墙板的耗能能力,本文通过数值方法系统研究了剪力墙板的滞回耗能随高厚比及跨高比的变化规律,引入了捏缩系数反映滞回曲线的饱满程度,并给出简化计算公式,研究成果可为 SPSW 结构基于能量的性能抗震设计提供参考。

2 钢板剪力墙滞回耗能分析

2.1 计算模型

SPSW 结构由钢柱、钢梁及剪力墙板构成,周边钢框架对内填墙板形成有效的约束。本文以单层、单跨 SPSW 结构为算例,几何尺寸如图 1 所示,采用 ABAQUS 有限元软件对其滞回性能进行了分析。算例轴心跨度 5400 mm,层高为 3200 mm。梁、柱及剪力墙板均采用四节点一阶减缩壳单元(S4R),框架柱为 $500 \times 500 \times 30 \times 30$ 的箱型截面,框架梁为 $H400 \times 200 \times 10 \times 14$ 的工字型截面,剪力墙板厚度为 3.75 mm,对应的高厚比 $\lambda = 800$ 。钢材本构关系为不考虑强化的理想弹塑性模型,框架梁、柱的钢材屈服强度 $f_y = 345$ MPa,剪力墙板的屈服强度 $f_y = 235$ MPa,弹性模量 $E_s = 2.06 \times 10^5$ MPa。全程采用位移加载,每级荷载循环 2 次,加载历史如图 2 所示。为反映剪力墙板的初始几何缺陷,以剪力墙板 1 阶屈曲模态作为初始缺陷,缺陷幅值取层高的 1/1000。

2.2 结果分析

图 3 给出了 SPSW 结构整体、以及剪力墙板的滞回曲线。

从图 3(a)可以看出,SPSW 结构整体的滞回曲线较为饱满,这说明周边的钢框架对其滞回性能起重要作用。而图 3(b)剪力墙板的滞回曲线捏缩明显,主要由钢板剪力墙的屈曲所致。这进一步说明钢板剪力墙滞回曲线的形状由钢框架及剪力墙板共同决定,当钢框架起主要作用,整体滞回曲线

收稿日期:2012-02-20;修改稿收到日期:2012-04-29.

基金项目:国家自然科学基金(50978175);江苏省高校自然科学基金(10KJB560004)资助项目.

作者简介:孙国华*(1978-),男,博士,副教授
(E-mail: Sgh@mail.usts.edu.cn).

趋于饱满;当剪力墙板起主要作用,滞回曲线趋于捏缩。在基于能量的钢板剪力墙结构性态设计方法中必须考虑不同构件滞回性能差异的影响。

图4给出了剪力墙板在层间侧移比达到2%时的最大主应力分布及面外变形。图4(a)给出了钢板剪力墙在层间侧移比2%时刻的最大主应力分布,钢板剪力墙绝大部分区域均已进入屈服阶段,最大主应力方向基本为对角45°方向。从图4(b)可清晰地看出,剪力墙板在水平荷载作用下由于屈曲而产生的面外位移,并形成明显的拉力场,剪力墙板沿主压方向的屈曲是导致墙板滞回曲线捏缩的根源。

等效粘滞阻尼比主要用于量化构件或结构在低周往复荷载作用下的滞回耗能能量。图5给出了SPSW结构及剪力墙板的等效粘滞阻尼比随层

间侧移比的变化规律。从图5可以看出,随着层间侧移比的增大,等效粘滞阻尼比呈增大趋势,这意味着构件的塑性耗能随着构件塑性程度的深入而增加。层间侧移比为2%时,SPSW结构整体的等效粘滞阻尼系数为0.287,剪力墙板的等效粘滞阻尼系数为0.145,两者相差接近一半。

已有钢板剪力墙的相关试验,仅采用等效粘滞阻尼比或能量耗散系数对SPSW结构整体耗能进行了评估,尚未区分周边钢框架、内填墙板对SPSW结构整体耗能的贡献。基于能量的性态抗震设计方法是根据各类构件所分担的滞回耗能确定构件截面,因此,需合理计算各类构件的滞回耗能,这意味着SPSW结构必须考虑剪力墙板的捏缩效应,以及在整个加载历程中滞回曲线饱满程度的变化影响。

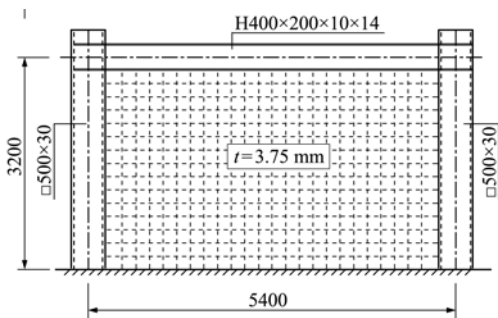


图1 SPSW的几何尺寸
Fig.1 The dimensions of SPSW

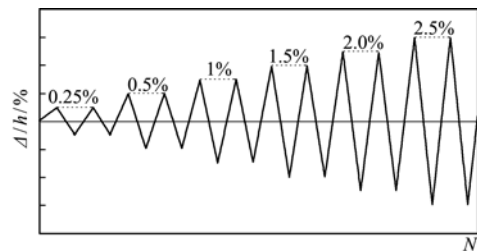
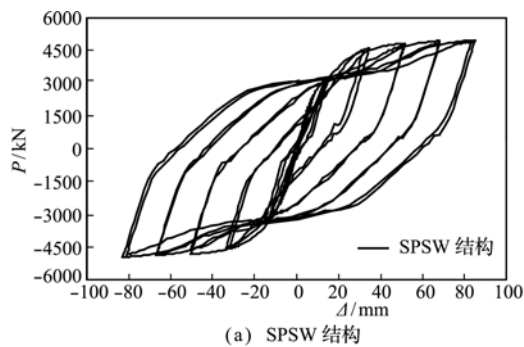
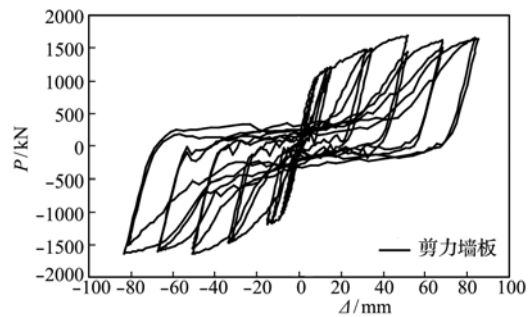


图2 加载历史
Fig.2 Loading history

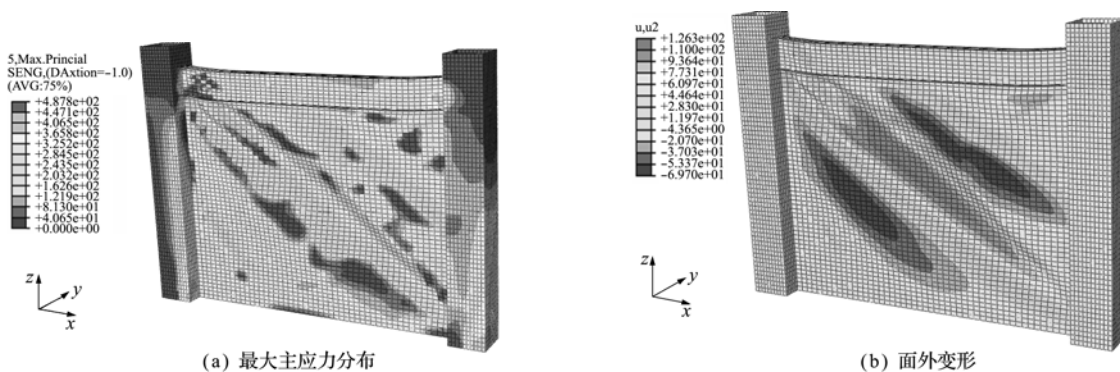


(a) SPSW结构



(b) 剪力墙板

图3 SPSW的滞回曲线
Fig.3 Load-displacement hysteretic curves of SPSW



(a) 最大主应力分布

(b) 面外变形

图4 2%层间侧移时剪力墙板的最大主应力及面外变形

Fig.4 The maximum principal stress distribution and the out-of-plane deformation of infill wall under 2% drift

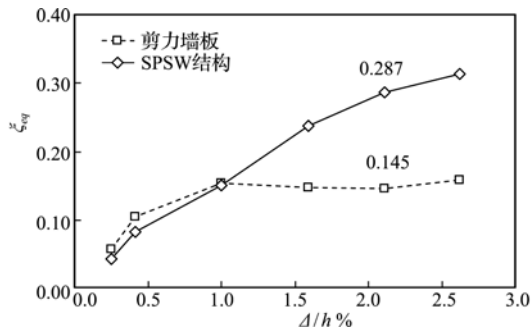


图5 等效粘滞阻尼比
Fig. 5 Equivalent viscous damping ratio

3 剪力墙板滞回耗能的量化方法

实际工程中不同类型结构(构件)的滞回性能存在显著差异,如图6所示。

钢板剪力墙结构中剪力墙板的滞回曲线中部捏缩明显,其形状趋于图6(c),由于相关因素的影响直接计算其滞回耗能存在一定难度。等效粘滞阻尼比及能量耗散系数等参数均无法直接衡量滞回曲线的饱满程度。菱形面积代表无捏缩结构的滞回耗能,物理意义明确,易于解析求解,只要确定捏缩形曲线面积相对菱形面积之比的变化规律,即可间接获得捏缩类结构或构件的滞回耗能。因此,本文定义过程捏缩系数 η_i ,即同一荷载级别下实际滞回曲线面积 $S_{(ABCD A),i}$ 与菱形面积 $S_{(AbCdA),i}$ 之比。图7为捏缩系数确定的示意图。

过程捏缩系数 η_i 可按式(1)计算:

$$\eta_i = S_{(ABCD A),i} / S_{(AbCdA),i} \quad (1)$$

$$S_{(AbCdA),i} = 4 \cdot V_y \cdot \Delta_y \cdot (\mu_i - 1) \quad (2)$$

式中 $S_{(ABCD A),i}$ 为第 i 级荷载实际结构滞回环面积,可根据实际获得的滞回曲线积分获得, $S_{(AbCdA),i}$ 为理想双线性结构滞回环面积, V_y 为结构的屈服剪力, Δ_y 为结构的屈服位移, μ_i 为第 i 级荷载结构的位移延性系数。

为反映整个加载历程中滞回曲线饱满程度的变化,本文还定义了平均捏缩系数 η 。

平均捏缩系数 η 按式(3)计算:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^N S_{(ABCD A),i}}{\sum_{i=1}^N S_{(AbCdA),i}} = \frac{\sum_{i=1}^N S_{(ABCD A),i}}{4 \cdot V_y \cdot u_y \cdot \sum_{i=1}^N (\mu_i - 1)} \quad (3)$$

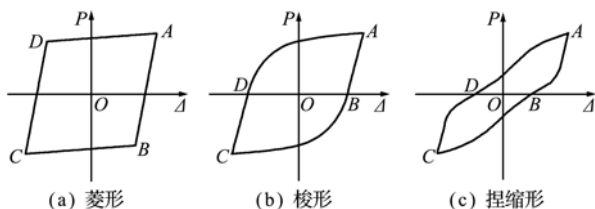


图6 滞回环类型
Fig. 6 The type of hysteretic curve

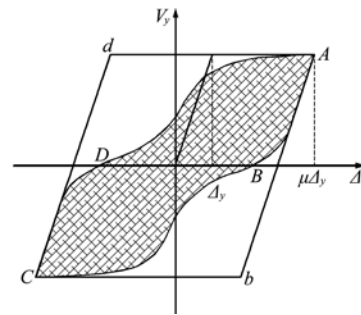


图7 捏缩系数确定方法
Fig. 7 The determination method of pinching parameter

式中 N 为加载历程中的加载次数,其他参数同前。为确保平均捏缩系数计算的合理性,整个加载历程的荷载增量应尽量均匀。

采用基于能量的抗震设计方法设计时,只需计算菱形面积及平均捏缩系数即可确定具有捏缩特征构件的滞回耗能。

4 剪力墙板捏缩系数的确定

为合理确定 SPSW 结构剪力墙板的捏缩系数,本文共设计了2个系列12个 SPSW 算例。所有算例梁柱采用铰接节点以消除钢框架对 SPSW 结构耗能能力的贡献,钢梁、钢柱均设计为无限刚。BASE 试件的几何尺寸如图8所示,试件高度及跨度均为3200 mm,剪力墙板的厚度为8 mm($\lambda=400$),钢材等级为 Q235B,本构关系为理想弹塑性。

考虑到加载循环次数对钢板剪力墙的滞回曲线形状影响较小,为节约计算时间,加载历史虽同2.1部分,但每级荷载循环1次。

考虑剪力墙板的跨高比 β 、高厚比 λ 两个主要参数的影响,以 BASE 试件为基础,设计了 SH(Ratio of Span to Height) 和 HT(Ratio of Height to Thickness) 两个系列。

SH 系列试件: $\lambda=400$, 维持 BASE 试件的其他参数不变,跨高比 $\beta=2, 1.5, 1, 0.75, 0.5$ 。

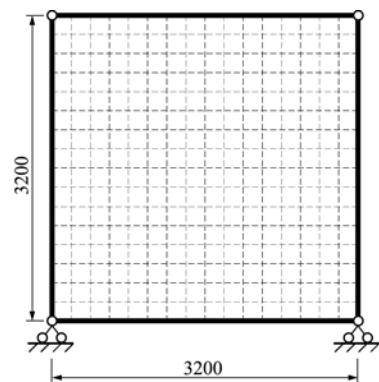


图8 BASE 试件
Fig. 8 BASE specimen

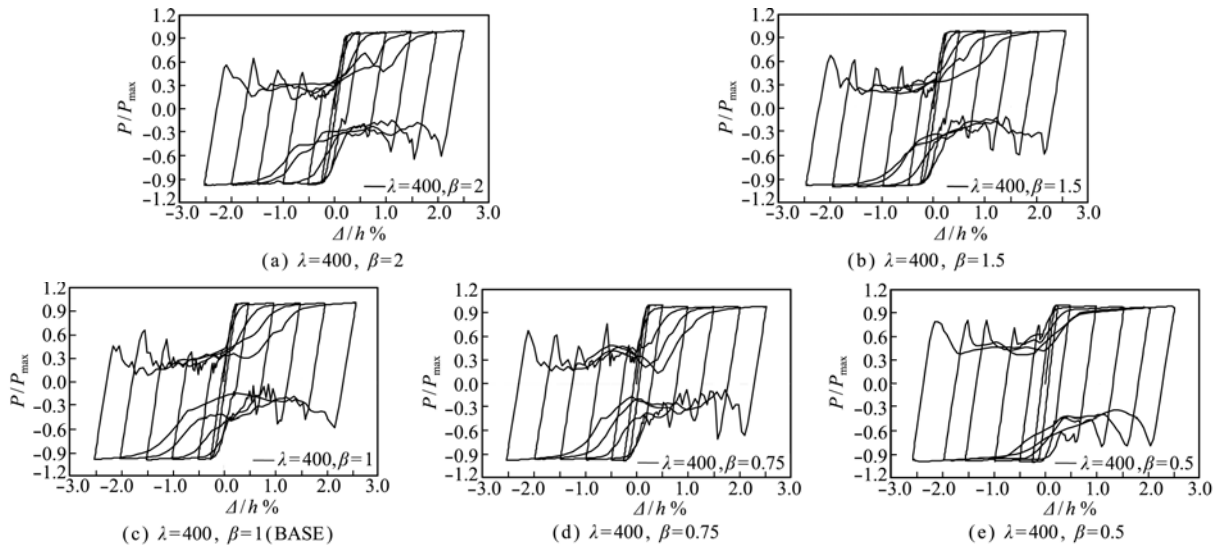


图9 SH系列剪力墙板的滞回曲线
Fig. 9 The hysteretic curves of infill wall of SH series

HT系列试件: $\beta=1$, 维持BASE试件的其他参数不变, 高厚比 $\lambda=1000、800、600、400、300、200、150、100$ 。

4.1 跨高比对剪力墙板耗能能力的影响

图9给出SH系列SPSW结构剪力墙板的标准化滞回曲线。

图10给出SH系列内填剪力墙板在层间侧移比达到2%时标准化滞回曲线的对比。

从图9和图10可以看出, 加载初期剪力墙板滞回曲线与图3(b)略有不同, 这主要由于梁柱无穷刚可充分协调剪力墙板变形所致。跨高比对SPSW结构剪力墙板滞回曲线的影响较小, 特别是跨高比大于0.75时, 滞回曲线的捏缩程度基本一致。当跨高比为0.5时, 滞回曲线趋于饱满, 这主要是剪切变形的影响程度减弱, 而弯曲变形的成分增加所致。

图11给出了SH系列剪力墙板的过程捏缩系数 η_i 随层间侧移比的变化规律。从图11可以看出, 除随着层间侧移比的增大, 剪力墙板的滞回曲线捏缩趋于严重外, 在跨高比大于0.75时, 剪力墙

板捏缩系数的数值及变化规律基本一致。当跨高比为0.5时, 跨高比对剪力墙板捏缩系数的影响程度显著增加, 在层间侧移比为2%时, 较其他跨高比剪力墙板的捏缩系数增加26.8%。

图12给出SH系列剪力墙板的平均捏缩系数 η 随跨高比 λ 的变化规律。图12进一步表明了剪力墙板平均捏缩系数除跨高比为0.5的试件达到0.754外, 其余试件基本相等, 其平均值为0.575。考虑到实际工程中剪力墙板的跨高比一般均大于1, 因此, 可忽略跨高比对剪力墙板耗能能力的影响。

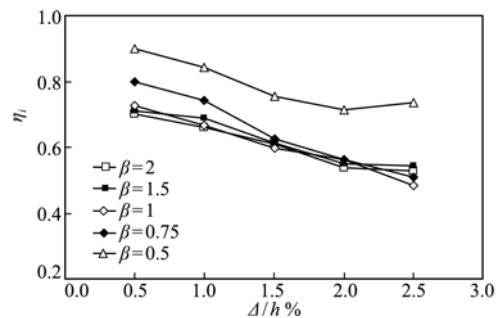


图11 SH系列剪力墙板的过程捏缩系数
Fig. 11 The pinning parameter η_i of infill wall of SH series

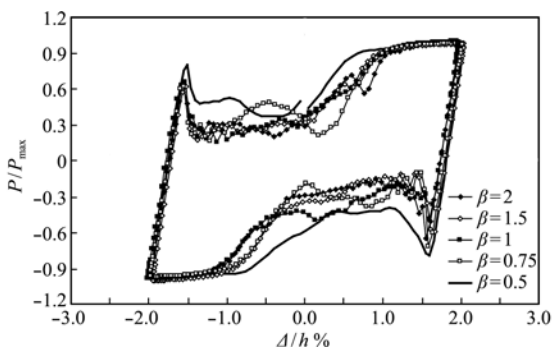


图10 SH系列2%层间侧移比时刻剪力墙板滞回曲线的对比
Fig. 10 The comparison of infill wall hysteretic curves of SH series under 2% drift

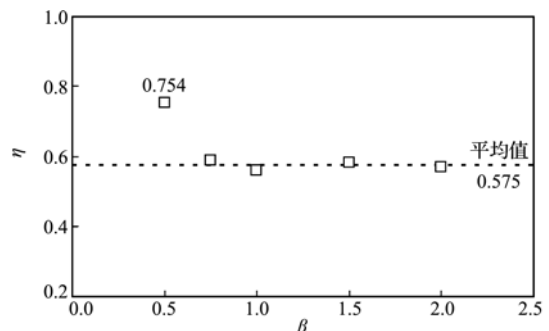


图12 SH系列剪力墙板的平均捏缩系数
Fig. 12 The average pinning factor η of infill wall of SH series

4.2 高厚比对剪力墙板耗能能力的影响

图 13 给出了 HT 系列剪力墙板的标准化滞回曲线。图 14 给出 HT 系列剪力墙板在层间侧移比 2% 时标准化滞回曲线的对比。

从图 13 和图 14 可以看出,由于剪力墙板的屈曲导致了滞回曲线的捏缩。在相同跨高比的前提下,随着剪力墙板高厚比的降低,滞回曲线趋于饱满。高厚比较大的试件,在层间侧移比较小时,其滞回曲线存在一定的捏缩,剪力墙板往往发生弹性失稳。当剪力墙板高厚比较小时,特别是剪力墙板趋于厚板时,在层间侧移比较小时,滞回曲线非常饱满,几乎没有捏缩;但随着层间侧移比的增大,滞回曲线的捏缩趋于明显,剪力墙板往往发生弹塑性失稳。滞回曲线的饱满程度充分反映了结构进入

塑性状态后耗能能力的大小。总体上,随着高厚比的增大,耗能能力呈降低趋势。

图 15 给出了 HT 系列剪力墙板的过程捏缩系数 η_i 随层间侧移比的变化规律。从图 15 可以看出,随着层间侧移比的增大,剪力墙板屈曲严重,滞回曲线趋于捏缩,捏缩系数呈降低趋势;随着内填剪力墙板高厚比的增大,其捏缩系数呈降低趋势。

图 16 给出 HT 系列剪力墙板的平均捏缩系数 η 随高厚比 λ 的变化规律,并拟合了相关公式。图 16 描述了 SPSW 剪力墙板的平均捏缩系数随着高厚比增大呈降低趋势。在跨高比大于 0.75 时,薄板及中厚剪力墙板的捏缩系数可按简化式(4)计算:

$$\eta = 1.5 - 0.15\ln(\lambda), 1000 \geq \lambda \geq 100 \quad (4)$$

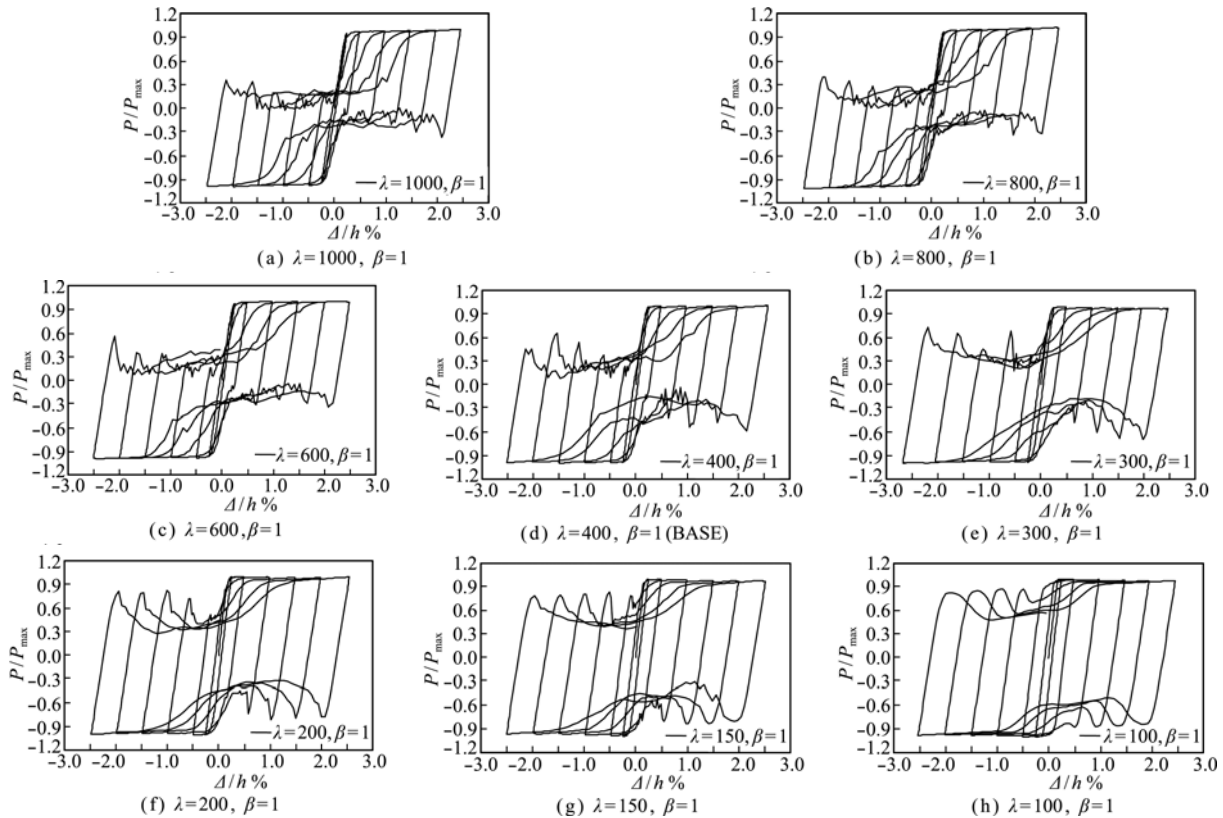


图 13 HT 系列剪力墙板的滞回曲线
Fig. 13 The hysteretic curves of infill wall of HT series

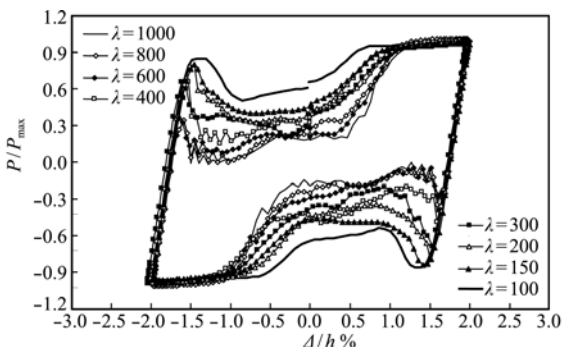


图 14 HT 系列 2% 层间侧移比时剪力墙板滞回曲线的对比
Fig. 14 The comparison of infill wall hysteretic curves of HT series under 2% drift

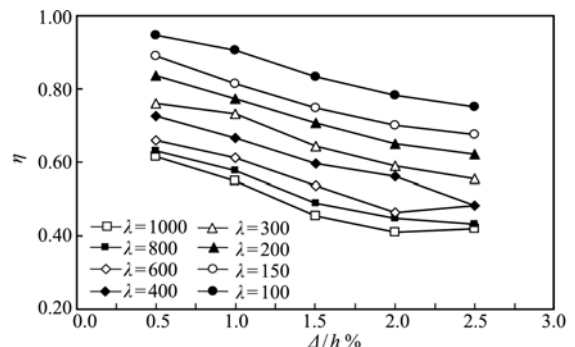


图 15 HT 系列剪力墙板的过程捏缩系数
Fig. 15 The pinning parameter η_i of infill wall of HT series

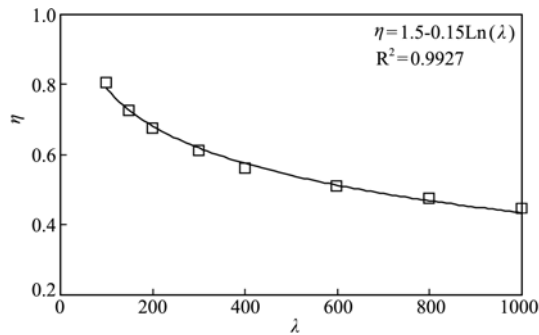


图 16 HT 系列剪力墙板的平均捏缩系数

Fig. 16 The average pinning parameter η of infill wall of HT series

5 结 论

本文采用数值方法系统分析了钢板剪力墙结构的滞回耗能,重点研究了内填剪力墙板对塑性耗能的贡献。通过 12 个单层、单跨、梁柱铰接的 SPSW 算例的滞回性能分析,总结了 SPSW 结构剪力墙板的耗能规律,提出了过程捏缩系数及平均捏缩系数的确定方法,给出了过程捏缩系数随结构进入塑性的变化规律。主要得出以下结论。

(1) 基于能量的性能抗震设计方法在计算 SPSW 结构塑性耗能时,需区分各主要构件耗能能力的不同,即应考虑剪力墙板滞回曲线捏缩程度的影响。

(2) 在参数分析的基础上,提出了考虑高厚比影响的平均捏缩系数计算公式。

(3) 高厚比对捏缩系数影响显著,跨高比对捏缩系数影响相对较小,实际工程中可忽略跨高比的影响。

参考文献 (References):

- [1] Housner G W. Limit design of structures to resist earthquakes [A]. Proceedings of the 1st World Conference Earthquake Engineering [C]. EERI, Berkeley, CA, 1956.
- [2] Decanini L D, Mollaioli F. An energy-based methodology for the assessment of seismic demand [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2001, **21**(2): 113-137.
- [3] Erol Kalkan. Prediction of Seismic Demand in Building Structures [D]. Civil and Environmental Engineering, University of California, 2006.
- [4] Caccese V, Elgaaly M, Chen R. Experimental study of thin steel-plate shear walls under cyclic load [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1993, **119**(2): 573-587.
- [5] Driver R G, Kulak G L, Kennedy D J L, et al. Cyclic

test of four-story steel plate shear wall [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1998, **124**(2): 112-120.

- [6] Chen S J, Chyuan Jhang. Cyclic behavior of low yield point steel shear walls [J]. *Thin-Walled Structures*, 2006, **44**(7): 730-738.
- [7] Qu B, Bruneau M, Chih-Han Lin. Testing of full-scale two-story steel plate shear wall with reduced beam section connections and composite floors [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2008, **134**(3): 364-373.
- [8] Bhowmick A K, Driver R G, Grondin G Y. Seismic analysis of steel plate shear walls considering strain rate and P-delta effects [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2009, **65**(5): 1149-1159.
- [9] Toko Hitaka, Chiaki Matsui. Experimental study on steel shear wall with slits [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003, **129**(5): 586-595.
- [10] 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 Chun-hua, HAO Ji-ping, WANG Ying-chun, et al. Cyclic test of thin steel plate shear wall with slits [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2008, **40**(1): 46-52. (in Chinese))
- [11] Vian D, Bruneau M, Tsai K C, et al. Special perforated steel plate shear walls with reduced beam section anchor beams. I: experimental investigation [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2009, **135**(3): 211-220.
- [12] Vian D, Bruneau M, Purba R. Special perforated steel plate shear walls with reduced beam section anchor beams. II: analysis and design recommendations [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2009, **135**(3): 221-228.
- [13] Zhao Q H, Abolhassan Astaneh-Asl. Cyclic behavior of traditional and innovative composite shear walls [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2004, **130**(2): 271-284.
- [14] 郭彦林, 董全利, 周明. 防屈曲钢板剪力墙滞回性能的理论及试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2009, **30**(1): 31-39. (GUO Yan-lin, DONG Quan-li, ZHOU Ming. Tests and analysis on hysteretic behavior of buckling-restrained steel plate shear wall [J]. *Journal of Building Structures*, 2009, **30**(1): 31-39. (in Chinese))
- [15] 马新伯. 两边连接钢板剪力墙及组合剪力墙抗震性能研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2009. (MA Xin-bo. Seismic Behaviour of Steel Plate Shear Walls and Composite Shear Walls with Two-side Connections [D]. Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese))
- [16] 孙飞飞, 高辉, 李国强. 两边组合钢板墙试验研究 [A]. 第四届海峡两岸及香港钢结构技术交流会论文

- 集 [C]. 上海, 2006: 281-291. (SUN Fei-fei, GAO Hui, LI Guo-qiang. Experimental research on two-sided composite steel plate walls [A]. Proceedings of the Fourth Trilateral Communication Seminar on Technique of Steel Construction [C]. Shanghai, 2006: 281-291. (in Chinese))
- [17] Elgaaly M. Post-buckling behavior of thin steel plates using computational models [J]. *Advances in Engineering Software*, 2000, **31**(8,9): 511-517.
- [18] Shishkin J J, Driver R G, Grondin G Y. Analysis of Steel Plate Shear Walls Using the Modified Strip Model [R]. University of Alberta, Department of Civil & Environmental Engineering, Canada, Alberta, 2005.
- [19] 李 然, 郭兰慧, 张素梅. 钢板剪力墙滞回性能分析与简化模型 [J]. *天津大学学报*, 2010, **43**(10): 919-927. (LI Ran, GUO Lan-hui, ZHANG Su-mei. Hysteretic analysis and simplified model of steel plate shear wall [J]. *Journal of Tianjin University*, 2010, **43**(10): 919-927. (in Chinese))
- [20] Toko Hitaka, Chiaki Matsui. Implementation of M-PFI method in design of steel plate walls [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2008, **64**(4): 465-479.
- [21] Siddhartha Ghosh, Farooq Adam, Anirudha Das. Design of steel plate shear walls considering inelastic drift demand [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2009, **65**(7): 1431-1437.
- [22] Berman J W, Bruneau M. Capacity design of vertical boundary elements in steel plate shear walls [J]. *Engineering Journal*, 2008, **45**(1): 57-71.

Energy dissipation capacity of steel plate shear walls

SUN Guo-hua*, GU Qiang, HE Ruo-quan, FANG You-zhen

(Jiangsu Key Laboratory of Structure Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

Abstract: Hysteretic energy of steel components with different hysteretic characters in steel plate shear wall (SPSW) need to be calculated reasonably using energy-based seismic design method. In order to reflect the pinching effect of hysteretic curve, the stage and average pinching parameter were proposed in this paper, and the simplified computing method of steel component hysteretic energy with different pinching characters was also suggested. An one-story steel plate shear wall with moment resisting steel frame was designed, and the hysteretic behavior and energy dissipation capacity were analyzed. A total of twelve one-bay, one-storey SPSW with pinned connections were designed, and the effects of the ratios of span to height and height to thickness on hysteretic behavior of steel infill wall were analyzed. The rule of pinching parameter was concluded, and simplified calculating formula was proposed.

Key words: steel plate shear wall; infill wall; hysteretic energy; pinching parameter; the ratio of span to height; the ratio of height to thickness