

文章编号: 1000-4750(2016)08-0110-12

# 不同改进形式钢板剪力墙滞回性能研究

王 萌, 杨维国

(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

**摘 要:** 钢板剪力墙的构造形式能够改善结构破坏模式、提高耗能能力及延性。为了系统全面地对比不同改进构造形式对钢板剪力墙滞回性能的影响, 利用通用有限元软件 ABAQUS 建立非线性有限元数值模型, 采用国内外已有拟静力试验, 验证数值分析手段能够真实地预测结构的受力行为。通过建立 8 种不同改进形式的钢板剪力墙模型, 对承载性能、滞回性能、退化特性、断裂性能、破坏形态以及耗能能力等问题进行对比分析, 探讨不同改进形式钢板剪力墙的延性、平面外变形、拉力场对柱子影响等关键问题, 为工程应用提供参考依据。分析结果表明: 通过改变结构的构造形式, 能够有效改善结构的滞回性能; 在高烈度区需要综合考虑抗震性能、延性、破坏形态、建筑要求以及经济指标选取合适的钢板剪力墙改进构造形式; 低屈服点钢板剪力墙由于其材料的特殊性, 承载效率较高, 耗能能力强, 延性优势突出, 但需要通过一定的措施抑制提早屈曲, 提高侧向刚度。

**关键词:** 钢板剪力墙; 改进构造形式; 有限元分析(FEM); 滞回行为; 耗能能力

**中图分类号:** TU398.2    **文献标志码:** A    **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.01.0017

## STUDY ON HYSTERETIC PERFORMANCES OF THE IMPROVED STEEL PLATE SHEAR WALLS

WANG Meng, YANG Wei-guo

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Constructional details have a great effect on the performance of steel plate shear wall structures and may also alter the failure modes of the structural members and improve their ductility and energy-dissipating capacity. To comprehensively compare the hysteretic behavior of steel plate shear walls with different details, an elaborate non-linear finite element model is established in ABAQUS. Eight steel shear wall models with different constructional details are established and their hysteretic behavior is compared and discussed in depth in terms of load carrying capacity, hysteretic behavior, degraded characteristics, fracture index, failure modes and energy-dissipating capacity. The ductility, out-of-plane deformation and the effect of tension field on column are also analysed, which could provide references for future engineering applications. The results show that variations in structural constructional details can improve the seismic performance of the structural members effectively; the ductility, failure modes, specified building requirements, and economic indicators should be taken into account comprehensively in the selection of appropriate constructional details of steel plate shear walls; for the material particularity, the low yield point steel plate shear wall has higher load efficiency, larger energy dissipation capacity and better ductility. However, some measures are needed to increase the lateral stiffness.

**Key words:** steel plate shear wall structures; improved details; finite element method (FEM); hysteretic behavior; energy-dissipating capacity

收稿日期: 2015-01-06; 修改日期: 2015-12-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408031, 51178041); 北京市自然科学基金项目(8154052); 北京交通大学人才基金项目(2015RC056)

通讯作者: 王 萌(1985-), 女, 黑龙江哈尔滨市人, 讲师, 博士, 从事钢结构抗震研究(E-mail: wangmeng1117@gmail.com).

作者简介: 杨维国(1973-), 男, 山西五台人, 教授, 博士, 博导, 从事钢结构研究(E-mail: wgyang1@bjtu.edu.cn).

钢框架-薄钢板剪力墙体系能够大幅度提高框架结构的抗侧刚度以及承载能力,并且具有较好的延性和经济性,目前正在部分高层结构工程中推广应用,例如,日本神户市政厅经受住1995年阪神大地震的考验<sup>[1]</sup>,我国的天津津塔也采用此结构形式<sup>[2]</sup>。因此,薄钢板剪力墙体系的抗震性能受到国内外学者的广泛关注。

大量研究表明,在强震作用下,钢板剪力墙会成为第一道抗震防线,钢框架为第二道抗震防线,使得结构具有合理的安全储备,并且两者材料一致,变形易协调,延性可以较好匹配,施工方便快捷<sup>[3]</sup>。薄钢板剪力墙由于内嵌钢板高厚比大(一般 $\lambda > 150$ ),当施加较小的水平力时,钢板已经提前发生屈曲,产生较大的平面外变形,形成较大的拉力场,令结构能够继续承担水平力。钢板所产生的拉力场会直接传到框架柱上,对框架柱产生较大影响<sup>[4]</sup>,因此,框架柱能承受钢板屈曲后拉力是保证钢板剪力墙体系充分发挥作用的前提。针对上述受力特点,目前为了提高薄钢板剪力墙的抗震性能,研究工作主要集中在两个方面。一方面从性能匹配的角度,提出“强框架、弱墙板”的设计理念。很多学者提出了各种剪力墙的形式都是基于这种思路,包括“低屈服点钢板剪力墙<sup>[5-8]</sup>”、“开洞钢板墙<sup>[5,9]</sup>”、“两侧开缝钢板剪力墙<sup>[10]</sup>”及“开竖缝钢板剪力墙<sup>[3,11-12]</sup>”等,降低钢板拉力场对框架柱的影响,如图1所示;另一方面内嵌钢板的提早屈曲会造成严重的平面外变形,产生巨大的声响,可能会影响建筑舒适度和使用功能的要求,因此部分学者提出对薄板墙采用不同形式加劲肋(如十字形、井字形、对角交叉形等<sup>[3,4,13]</sup>,如图1所示)、防屈曲措施<sup>[1,6]</sup>延缓墙板的屈曲行为。以上两方面的研究,对提高钢板剪力墙的耗能能力、降低屈曲带来的不利影响、满足工程的特殊需求、降低对框架的影响等方面有着重要的意义。

虽然国内外很多学者开展了这些方面的研究,探讨钢板屈曲后强度、屈曲后滞回性能等,但均是对其中一种或几种剪力墙形式进行研究,没有系统全面地对比不同构造形式薄钢板剪力墙的抗震性能,并且单靠试验难以建立完整的体系。因此,本文首先采用通用有限元软件ABAQUS建立非线性有限元数值模型,结合国内外已有拟静力试验,验证数值分析手段能够真实地预测结构的受力行为。然后,通过建立几种不同改进构造形式的钢板剪力

墙模型(包括:两侧开缝剪力墙、中间开竖缝剪力墙、十字加劲剪力墙、交叉加劲剪力墙、开洞剪力墙、低屈服点剪力墙等),对比分析其承载力、刚度、滞回性能、退化特性、断裂倾向指数、破坏形态以及耗能能力等,探讨不同形式钢板剪力墙延性、平面外变形、对柱子的作用、破坏行为等关键受力性能问题,研究多种形式钢板剪力墙真实受力和破坏机理,并提出相应的意见和建议。今后可以根据具体的需求选择钢板剪力墙的构造形式,为工程应用提供参考依据。

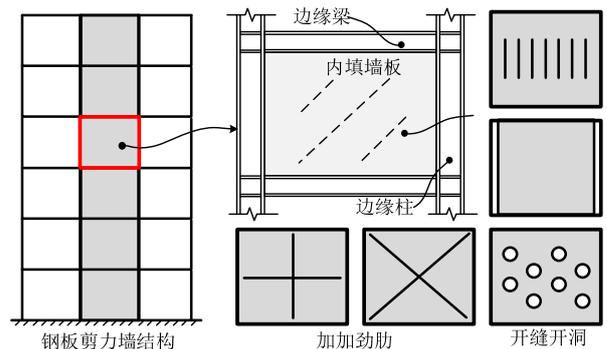
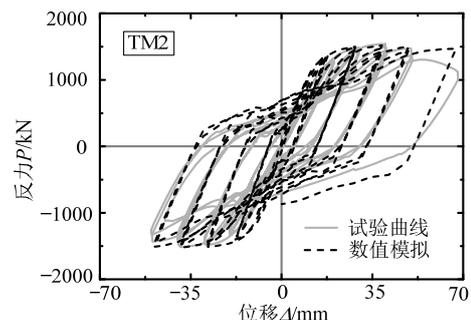


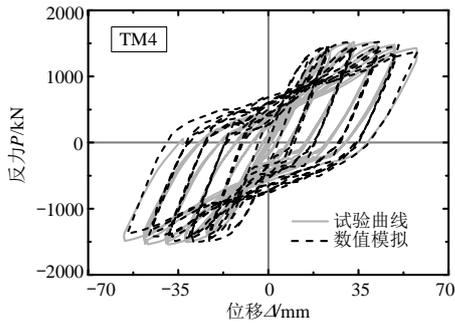
图1 不同改进构造形式钢板剪力墙

Fig.1 Steel plate shear walls with various advanced methods

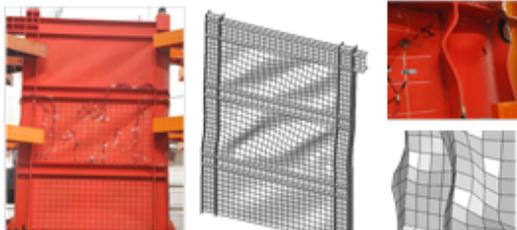
## 1 有限元模型验证

利用 ABAQUS 建立钢板剪力墙整体模型,其中边缘钢梁、钢柱以及内填钢板采用 ABAQUS 壳单元 S4R 进行模拟。为了准确地考察结构的滞回性能,选用钢材循环本构模型<sup>[14]</sup>。由于薄钢板剪力墙早期就会发生屈曲现象,因此为了更准确地描述钢板的变形,需引入初始缺陷。采用 ABAQUS 6.10 显示动力模块 ABAQUS/Explicit<sup>[14]</sup>,输入结构密度,并选取适合的加载速度。文献[15]选取国内外典型的试验<sup>[5,16]</sup>进行验证,典型试验对比结果如图 2 和图 3 所示,数值计算结果与试验结果基本一致,能够较准确地计算捏拢和累积损伤退化现象,能够对破坏形式以及变形发展过程有较好地预测。



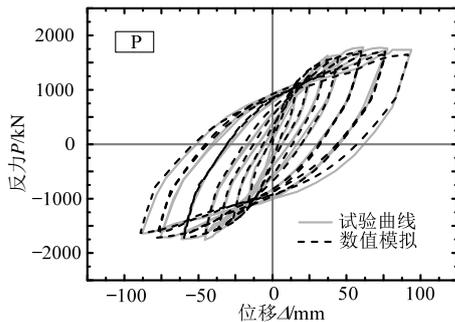
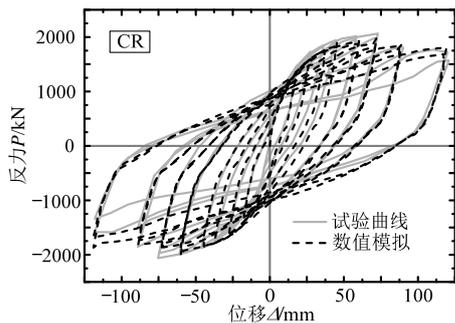


(a) 试滞回曲线对比图

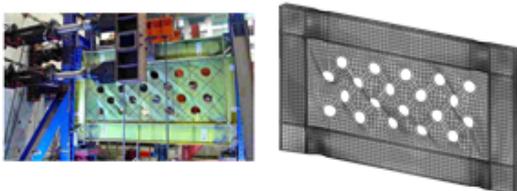


(b) 破坏形态对比图

图 2 文献[16]试验数值模拟滞回曲线对比图  
Fig.2 Hysteretic curves comparison of test and FEM of reference [16]



(a) 试滞回曲线对比图



(b) 破坏形态对比图

图 3 文献[5]试验数值模拟对比图

Fig.3 Comparison of test and FEM of reference [5]

## 2 不同改进形式钢板剪力墙参数设计

本文建立 8 个钢板剪力墙的有限元模型，与表 1 中①标准钢板剪力墙的受力性能进行全面对比分析。考虑工程实际，薄钢板剪力墙的尺寸范围为：跨高比  $L/h=1.0\sim 2.0$ ，高厚比  $\lambda=200\sim 400$ <sup>[16]</sup>，本文选取跨高比为 1.25，高厚比为 350，模型与实际工程尺寸比为 1:2，考察在较大高厚比的情况下钢板剪力墙的受力行为。美国与加拿大规范根据墙板拉应力场的发展程度对边柱的刚度提出了限值规定<sup>[17-18]</sup>，要求柱刚度  $\omega_h$  满足：

$$\omega_h = 0.7h_s \left[ \frac{t_i}{2L_s I_c} \right]^{0.25}, \omega_h \leq 2.5 \quad (1)$$

式中： $h_s$  为边梁中心距； $t_i$  为墙板厚度； $I_c$  为边柱惯性矩； $L_s$  为边柱中心距； $h$  为墙板的高度。本文模型取  $\omega_h=2.2$ ，一方面满足规范对柱子刚度的要求，另一方面考察边柱变形对钢板剪力墙结构的影响。

表 1 不同改进构造形式钢板剪力墙参数说明

Table 1 Parameters illustration of steel plate shear walls with different improved constructional details

影响因素	类型	编号
标准钢板剪力墙	① 标准剪力墙	SW-STA
钢板材料的影响	② 低屈服点剪力墙	SW-LYP
钢板开缝的影响	③ 两侧开缝剪力墙	SW-CF
	④ 开竖缝剪力墙	SW-SF
钢板加劲肋的影响	⑤ 十字加劲剪力墙	SW-SR
	⑥ 交叉加劲剪力墙	SW-CR
钢板开洞的影响	⑦ 开洞剪力墙-1	SW-H1
	⑧ 开洞剪力墙-2	SW-H2

钢板剪力墙结构的具体尺寸如图 4 所示，为方便比较，所有边梁、边柱尺寸一致，内填钢板构造形式有所不同，梁柱节点剪切域部分钢板加强为 14 mm。具体类型和编号如表 1 所示：1) 标准剪力墙(SW-STA)，为实心钢板剪力墙，钢板厚度为 4.5 mm。2) 低屈服点钢板剪力墙(SW-LYP)，内填墙板采用低屈服点钢材 LYP100，此系列考察不同内填钢板材料对抗震性能的影响，低屈服点钢材的滞回曲线更饱满，具有很好的耗能能力和延性<sup>[19-20]</sup>。3) 两侧开缝剪力墙(SW-CF)，内填钢板两侧与边柱不连接，留 50 mm 的缝隙；4) 中间开竖缝剪力墙(SW-SF)，内填钢板中间开竖缝，竖缝宽 5 mm，长 500 mm，每隔 100 mm 布置一道，与文献[12]的竖缝比例保持一致，③~④系列考察钢板开缝对钢板剪力墙结构抗震性能的影响。5) 十字加劲剪力墙

(SW-SR), 在内填钢板上焊接十字交叉加劲肋, 根据文献[3], 确定加劲肋尺寸; 6) 交叉加劲剪力墙 (SW-CR), 在钢板上焊接对角交叉加劲肋, ⑤~⑥系列考察加劲肋对钢板剪力墙抗震性能的影响。7) 开洞剪力墙-1(SW-H1), 一些钢板墙由于使用功能上的需求, 需要在墙上开洞通过管道, 根据文献[5], 确定实际工程中管道开洞尺寸为 400 mm, 根据实际工程 1:2 的尺寸确定模型开洞直径为 200 mm; 8) 开洞剪力墙-2(SW-H2), ⑦~⑧系列开洞的比例不同, 考察内填钢板开洞对抗震性能的影响。

基于“强框架, 弱墙板”的原则, 边梁边柱屈服强度为 380 MPa, 内填墙板屈服强度为 240 MPa, 低屈服点墙板(LYP100)名义屈服强度为 80 MPa。采用材料的循环本构参数, 如表 2 和图 5 所示<sup>[21-22]</sup>。从图 5(a)可以看出, 低屈服点钢材的滞回行为与普通钢材及高强度钢材有较大区别, 会导致其整体结构的滞回行为与普通钢板剪力墙有明显不同。结构底部固接, 在上部梁端增加侧向约束, 保证侧向稳定性。几何初始缺陷根据文献[16]建议取墙板高的 1/500。有限元加载计算过程分两个步骤: 首先, 在边柱顶部施加竖向荷载, 钢柱保持轴压比为 0.2<sup>[16]</sup>, 模拟结构在正常使用中传递的上部荷载, 同时考虑结构二阶效应的影响; 其次, 在边框梁上施加水平位移荷载, 模拟地震作用下剪力墙所遭遇的水平地震作用。所有钢板剪力墙结构施加相同的加载制度, 如图 6 所示, 定义层间位移角为  $\theta = \Delta / H$ ,  $\Delta$  为施加的位移,  $H$  为层高。抗震规范规定<sup>[23]</sup>, 罕遇地震作用下钢结构的层间位移角限值 0.02 rad, 本文中加载最大幅值为 60 mm, 相当于层间位移角  $\theta = 0.03$  rad, 考察剪力墙在罕遇地震作用下的受力行为。

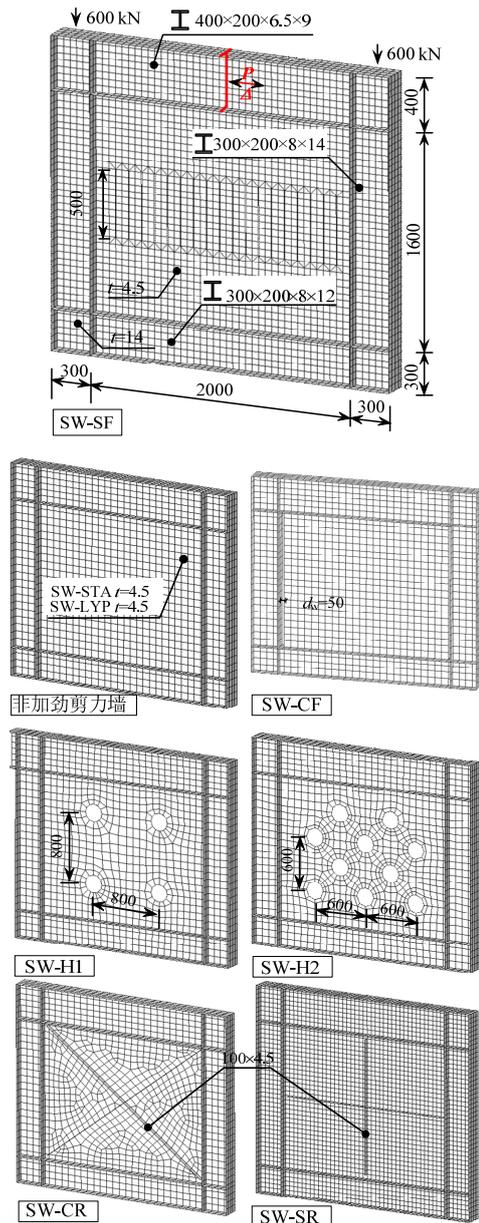


图 4 不同构造形式钢板剪力墙局部尺寸及有限元模型 /mm  
Fig.4 Detailed dimensions and finite element models of steel plate shear wall structures

表 2 模型材料参数校准

Table 2 Calibrated parameters of specimen materials

	$\sigma_0$ /MPa	$Q_\infty$ /MPa	$b_{iso}$	$C_{kin,1}$ /MPa	$\gamma_1$	$C_{kin,2}$ /MPa	$\gamma_2$	$C_{kin,3}$ /MPa	$\gamma_3$	$C_{kin,4}$ /MPa	$\gamma_4$
边梁、边柱	380	16	1.1	4924	154	3101	120	2730	31	1450	26
普通墙板	240	21	1.2	4924	154	3101	120	2730	31	1450	26
低屈服点墙板	80	100	8.0	8000	400	1200	130	2730	100	—	—

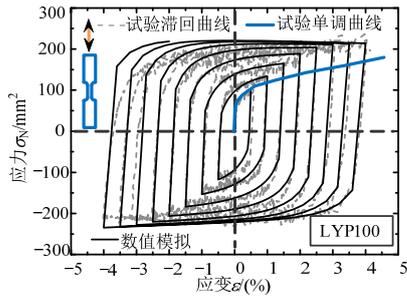
### 3 不同改进形式钢板剪力墙的滞回行为分析

#### 3.1 滞回性能对比分析

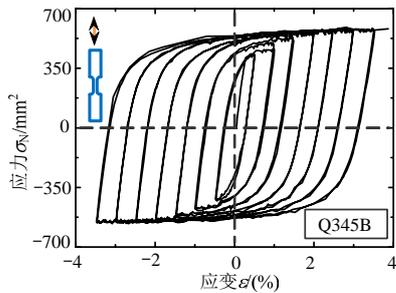
由于结构采用循环强化本构模型, 单调加载曲

线 在 加 载 初 期 退 化 未 发 生 之 前 会 低 于 循 环 骨 架 曲 线, 因 此, 为 了 考 察 后 期 循 环 导 致 的 退 化 现 象, 图 7 所 说 的 等 效 单 调 曲 线 确 定 方 法 为 加 载 位 移 在 20 mm 之 前 为 循 环 加 载, 然 后 单 调 加 载 至 60 mm。从 图 7 可 以 看 出, 总 体 来 说, 随 着 滞 回 圈 数 的 增 加,

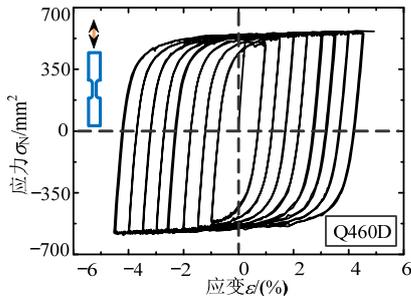
滞回曲线和等效单调曲线越来越远离，这主要是由于循环加载导致内嵌钢板发生严重的往复鼓屈，随着加载幅值的增加，框架柱在拉力场的作用下发生局部屈曲，令结构的承载力及刚度不断退化，即使是等位移加载的情况滞回圈也并不重合。图 8 中循环骨架曲线为奇数滞回圈峰值的连线，从骨架曲线的对比能够看出，不同构造的钢板剪力墙退化的起始位置、程度、路径、稳定性各不相同。



(a) 低屈服点钢材材料滞回曲线



(b) 普通钢材



(c) 高强度钢材

图 5 不同钢材应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of different steels

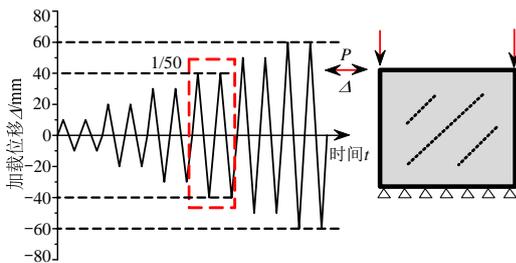


图 6 加载制度

Fig.6 Loading pattern

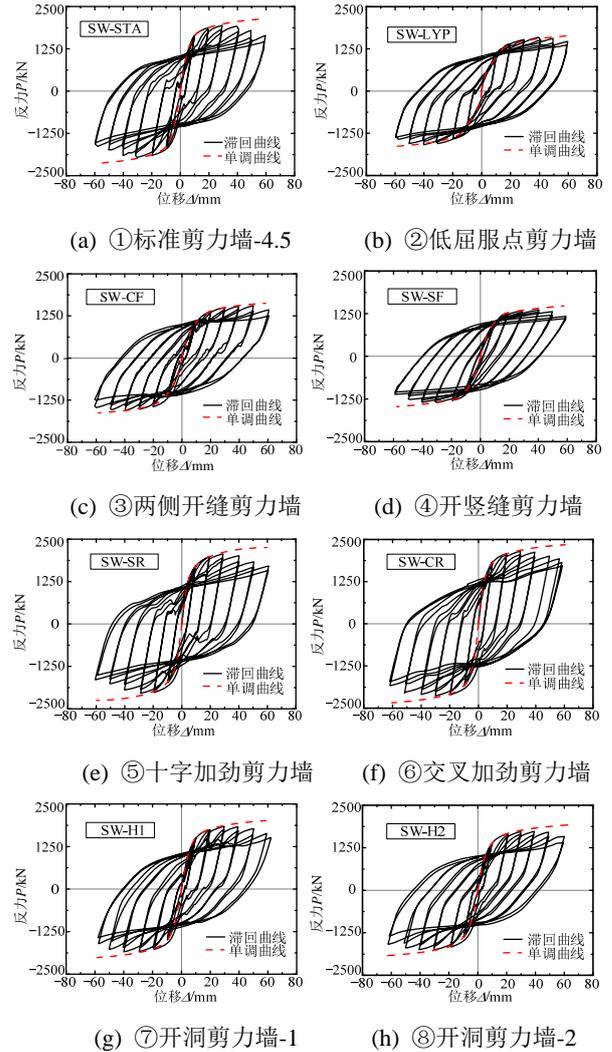


图 7 钢板剪力墙滞回曲线对比分析图

Fig.7 Comparison of hysteretic curves

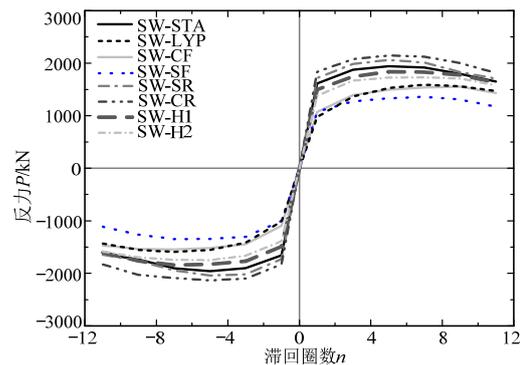


图 8 钢板剪力墙滞回骨架曲线对比分析图

Fig.8 Comparison of skeleton curves

由于钢板的平面内往复鼓屈，薄钢板剪力墙的滞回曲线出现一定程度的捏拢现象，并伴随双向拉力带逐步形成。从图 7 可以看出，不同构造形式的钢板剪力墙捏拢程度并不一致。②低屈服点钢板剪力墙滞回曲线相对饱满，承载力退化的程度较低，

这主要由于低屈服点钢材材料特性所致，但由于其内填钢板屈服强度低，导致其承载力和刚度与标准剪力墙相比降低较多。③~④系列的钢板剪力墙滞回曲线呈现梭形，对于两侧开缝剪力墙，柱子对钢板的约束作用有限，钢板发生一定程度的弯曲，因此曲线较饱满；中间开缝钢板剪力墙令剪切变形转换为钢板条的弯曲变形，破坏模式发生变化，导致滞回曲线形状和其他剪力墙有较大区别。⑤~⑥系列加劲肋提高了结构的承载能力，但是由于加劲肋刚度有限，钢板屈曲变形和加劲肋局部屈曲相继出现，导致滞回曲线仍然存在明显的捏拢和退化行为。⑦~⑧系列开洞对滞回曲线及承载力的影响不明显，曲线出现一定的捏拢。

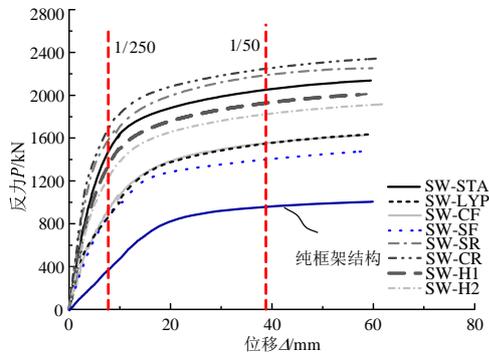


图9 钢板剪力墙单调加载曲线对比分析图  
Fig.9 Comparison of monotonic loading curves

### 3.2 承载性能对比分析

薄钢板剪力墙在侧向力作用下较早发生平面外鼓曲，随水平位移的增大其抗侧刚度也相应降低，呈现较强的非线性特征，如图9所示。纯框架结构的单调加载承载力为 1006.28 kN，刚度为 48.99 kN/mm，极限承载力不到标准剪力墙的一半；在层间位移角为 1/250 时的承载力 375.58 kN(1/250

为我国规范规定的弹性层间位移角限值，因此取此时的割线刚度作为钢板剪力墙的刚度参考)，为标准剪力墙的 1/4 左右；初始刚度为标准剪力墙 1/6 左右，以上对比数据说明钢板剪力墙对框架结构的承载能力有大幅度的提高作用。

从图9和表3可以看出，不同形式剪力墙的承载力和刚度相差较大，②系列钢板材料屈服强度降低 67%，单调承载力降低 23%，循环承载力降低 18%，初始刚度降低 8%，1/250 的割线刚度降低近 40%左右，说明低屈服点钢板剪力墙材料利用率较高，但对刚度的影响较大，由于其屈服点低，钢板很快屈服及屈曲，刚度降低较快。③系列钢板两侧开缝，单调承载力降低 20%，循环承载力降低 24%，初始刚度降低 40%，1/250 的割线刚度降低近 38%，说明侧向柱对内嵌钢板有较强的约束作用。④系列钢板中间开缝，单调承载力降低 31%，循环承载力降低 31%，初始刚度降低 45%，1/250 的割线刚度降低近 41%，说明中间开缝钢板剪力墙虽然改善了钢板剪力墙的滞回性能，但对承载力有较大影响。⑤~⑥系列对钢板墙增加加劲肋，承载力及刚度有所提高，⑤系列十字加劲肋，钢板用钢量增加 11%，单调承载力提高 5%，循环承载力提高 6%，初始刚度提高 27%，1/250 的割线刚度提高 8%左右，十字加劲肋对承载力提高效率较小，但对初始刚度提高作用显著；⑥系列交叉加劲肋，钢板用钢量增加 16%，单调承载力提高 9%，循环承载力提高 11%，初始刚度提高 36%，1/250 的割线刚度提高 15%左右，交叉加劲肋对刚度有较大提高作用。⑦系列钢板中间开洞率为 4%，单调承载力降低 6%，循环承载力降低 5%，初始刚度降低 15%，1/250 的割线

表3 钢板剪力墙承载性能对比分析

Table 3 Comparison of load-carrying capacity

类型	编号	循环承载力 峰值 $P_{cu}/kN$	$P_{cu}/P_{cu1}$	单调承载力 峰值 $P_{mu}/kN$	$P_{mu}/P_{mu1}$	初始刚度 $K_i/kN/mm$	$K_i/K_{i1}$	1/250 割线刚度 $K_{s1}/kN/mm$	$K_{s1}/K_{s1}$	$K_{s1}/K_i$	变形形态
① 标准剪力墙	SW-STA	1943.21	1.00	2135.34	1.00	280.70	1.00	192.01	1.00	0.68	钢板屈曲
② 低屈服点剪力墙	SW-LYP	1592.47	0.82	1635.74	0.77	257.25	0.92	116.23	0.61	0.45	钢板屈曲
③ 两侧开缝剪力墙	SW-CF	1553.27	0.80	1627.47	0.76	168.23	0.60	119.46	0.62	0.71	钢板屈曲+弯曲
④ 开竖缝剪力墙	SW-SF	1331.24	0.69	1475.39	0.69	155.43	0.55	113.42	0.59	0.73	钢板条弯曲
⑤ 十字加劲剪力墙	SW-SR	2063.34	1.06	2252.21	1.05	357.84	1.27	208.12	1.08	0.58	区格屈曲+加劲肋屈曲
⑥ 交叉加劲剪力墙	SW-CR	2148.09	1.11	2336.68	1.09	383.02	1.36	220.85	1.15	0.58	区格屈曲+加劲肋屈曲
⑦ 开洞剪力墙-1	SW-H1	1837.71	0.95	2010.37	0.94	238.95	0.85	175.70	0.92	0.74	钢板屈曲
⑧ 开洞剪力墙-2	SW-H2	1730.22	0.89	1916.84	0.90	241.19	0.86	160.29	0.83	0.66	钢板屈曲

注：循环承载力为循环骨架曲线的峰值；初始刚度取 1.2 mm 位置的割线刚度。

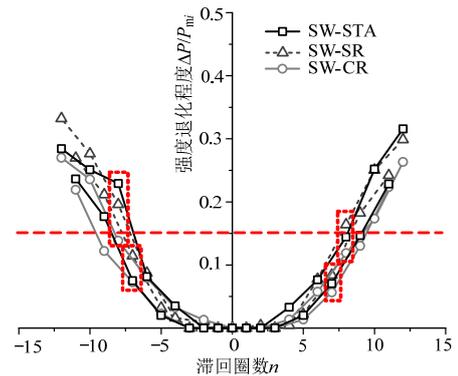
刚度降低近 8%；③系列钢板中间开洞率为 10%，单调承载力降低 10%，循环承载力降低 11%，初始刚度降低 14%，1/250 的割线刚度降低近 17%，开洞对承载力的影响与削减面积成正比，但对刚度的影响稍大。综上所述，构造形式会对结构的承载性能产生较大影响，但与纯框架相比，均有大幅度提高，因此在具体选用时，可根据对延性、耗能能力、经济性要求、使用功能选取适合的构造形式。

### 3.3 退化特性对比分析

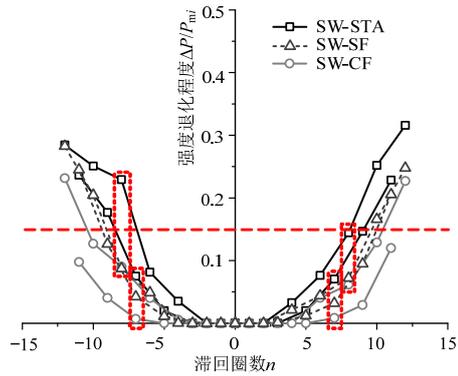
承载力退化程度定义为  $\Delta P / P_{mi}$ ，其中  $\Delta P$  为实际循环幅值位移所对应的承载能力与单调加载幅值位移所对应的承载能力  $P_{mi}$  的差值。退化主要由累积的塑性变形、钢板鼓屈、加劲肋局部屈曲以及钢柱局部屈曲引起。随着加载圈数和幅度的增加，单调加载曲线和滞回曲线逐渐远离，说明不能只用单调加载来评判结构性能。

加载制度为每次相同位移循环两次，从滞回曲线上可以看出，同一位移作用下会发生承载力的降低，因此退化曲线按照奇数加载圈和偶数加载圈分开绘制，图 10 中虚线矩形框是层间位移角 1/50 的退化程度，如表 4 所示。表 5 对比了最终退化位置(层间位移角 1/30)结构的退化程度。从图 10(a)可以看出，在 1/50 的位置，标准钢板剪力墙的退化最为显著，交叉加劲肋相对较小，在最终退化位置，十字加劲肋的退化率最大，主要是由于加劲肋强烈屈服及屈曲，降低了抑制作用。从图 10(b)能够看出，在 1/50 的位置，中间开缝钢板墙退化程度较低，但后期由于钢板条带的严重变形，导致退化率增加；两侧开缝钢板墙退化性能较稳定。从图 10(c)可以看出，低屈服点钢板剪力墙的退化程度，无论是在 1/50 的位置，还是最终退化位置都比标准剪力墙低，并没有发生剧烈的退化现象，退化性能稳定，延性最好。从图 10(d)可以看出，开洞钢板剪力墙在 1/50 的位置退化程度较低，但最终退化程度较为相近，说明开洞对退化程度影响不大，曲线较为接近。根据抗震规范要求<sup>[23]</sup>，如果定义在强震作用下承载力退化 15%的位置为破坏，发生的越晚表示钢板剪力墙的延性相对更好。在 1/50 的位置，标准剪力墙和十字加劲剪力墙超过限值，但加劲肋墙晚于标准剪力墙达到限值，与非加劲钢板剪力墙相比，加劲肋明显提高了结构延性。低屈服点钢板剪力墙、开缝剪力墙、开洞剪力墙在 1/50 的位置，承载力下降均不到 15%，具有较好的延性，其中低屈服点钢板

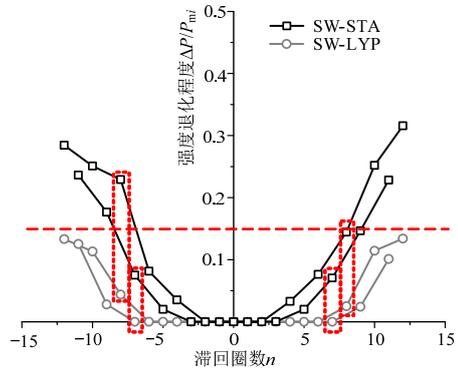
剪力墙延性最好。



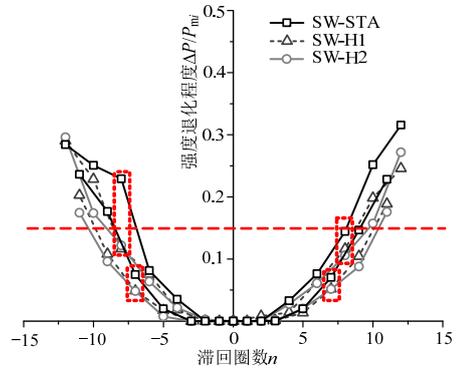
(a) 钢板加劲肋的影响



(b) 钢板开缝的影响



(c) 钢板材料的影响



(d) 钢板开洞的影响

图 10 钢板剪力墙承载力退化程度对比分析

Fig.10 Comparison of strength degradation

表4 钢板剪力墙退化特性结果(40 mm 位置, 即 1/50)  
Table 4 Degraded characteristics of steel plate shear wall structures (40mm position, inter-story drift angle is 1/50)

类型	编号	$\left(\frac{\Delta P}{P_{mi}}\right)_{\max}^{+,e}$	$\left(\frac{\Delta P}{P_{mi}}\right)_{\max}^{-,e}$	$\left(\frac{\Delta P}{P_{mi}}\right)_{\max}^{+,o}$	$\left(\frac{\Delta P}{P_{mi}}\right)_{\max}^{-,o}$
① 标准剪力墙(4.5)	SW-STA	0.14	0.23	0.07	0.07
② 低屈服点剪力墙	SW-LYP	0.02	0.04	0.00	0.00
③ 两侧开缝剪力墙	SW-CF	0.06	0.09	0.01	0.01
④ 开竖缝剪力墙	SW-SF	0.07	0.09	0.03	0.04
⑤ 十字加劲剪力墙	SW-SR	0.16	0.20	0.08	0.11
⑥ 交叉加劲剪力墙	SW-CR	0.11	0.13	0.06	0.07
⑦ 开洞剪力墙-1	SW-H1	0.12	0.12	0.05	0.04
⑧ 开洞剪力墙-2	SW-H2	0.10	0.12	0.05	0.04

表5 钢板剪力墙退化特性结果(最终位置)

Table 5 Degraded characteristics of steel plate shear wall structures (final position)

类型	编号	$\left(\frac{\Delta P}{P_{mi}}\right)_{\max}^{+,e}$	$\left(\frac{\Delta P}{P_{mi}}\right)_{\max}^{-,e}$	$\left(\frac{\Delta P}{P_{mi}}\right)_{\max}^{+,o}$	$\left(\frac{\Delta P}{P_{mi}}\right)_{\max}^{-,o}$
① 标准剪力墙(4.5)	SW-STA	0.31	0.28	0.22	0.23
② 低屈服点剪力墙	SW-LYP	0.13	0.13	0.10	0.12
③ 两侧开缝剪力墙	SW-CF	0.22	0.23	0.11	0.09
④ 开竖缝剪力墙	SW-SF	0.24	0.28	0.20	0.24
⑤ 十字加劲剪力墙	SW-SR	0.29	0.33	0.24	0.26
⑥ 交叉加劲剪力墙	SW-CR	0.26	0.27	0.22	0.21
⑦ 开洞剪力墙-1	SW-H1	0.24	0.29	0.18	0.20
⑧ 开洞剪力墙-2	SW-H2	0.27	0.29	0.17	0.17

注:  $\left(\frac{\Delta P}{P_{mi}}\right)_{\max}^{+,e}$  为偶数加载圈正向承载力退化程度最大值;  $\left(\frac{\Delta P}{P_{mi}}\right)_{\max}^{-,e}$  为偶数加载圈负向承载力退化程度最大值;  $\left(\frac{\Delta P}{P_{mi}}\right)_{\max}^{+,o}$  为奇数加载圈正向承载力退化程度最大值;  $\left(\frac{\Delta P}{P_{mi}}\right)_{\max}^{-,o}$  为奇数加载圈负向承载力退化程度最大值。

### 3.4 断裂性能对比分析

等效塑性应变(PEEQ)是一种塑性应变累积表征量,为单调递增函数,该指标反映了钢材局部的延性以及断裂倾向,因此也称为断裂倾向指标,PEEQ 越大,说明该位置塑性应变累积越大,越容易发生断裂,具体表达如下式:

$$PEEQ = \tilde{\varepsilon}^{Pl} \Big|_0 + \int_0^t \dot{\tilde{\varepsilon}}^{Pl} dt \quad (2)$$

式中,  $\dot{\tilde{\varepsilon}}^{Pl} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}^{Pl} : \dot{\varepsilon}^{Pl}}$ ,  $\dot{\varepsilon}^{Pl}$  为塑性流动率;  $\dot{\tilde{\varepsilon}}^{Pl}$  为等效塑性应变率;  $\tilde{\varepsilon}^{Pl} \Big|_0$  为初始等效塑性应变。

从 PEEQ 分布图 11 中可以获得结构可能的断裂和破坏位置。由于边柱受到钢板拉力带作用,几

乎所有结构的边柱均出现局部屈曲现象,形成明显的塑性铰,内嵌钢板的角部出现较大 PEEQ,可能会引起角部焊缝开裂。SW-STA 标准剪力墙 PEEQ 在钢板的中部最大,并相较集中。SW-LYP 低屈服点剪力墙由于钢板屈服强度较低,因此塑性应变累积较大,分布范围较广。SW-CF 在钢板中间 PEEQ 很集中,变形形态和与柱子相连的剪力墙相差较大,出现弯曲破坏形态,没有形成明显的拉力带。SW-SF 开竖缝剪力墙的 PEEQ 在边缘竖缝的角部最大,容易引起钢板撕裂。SW-SR 十字加劲钢板剪力墙在加劲肋与钢板相连的部分 PEEQ 值最大,可能会引起加劲肋与钢板连接的焊缝开裂,使加劲肋失去抑制屈曲的作用。SW-CR 交叉加劲肋在加劲肋交点以及加劲肋与钢板连接的部分最大,可能会引起连接焊缝开裂,与文献[13]现象一致。SW-H1 开洞

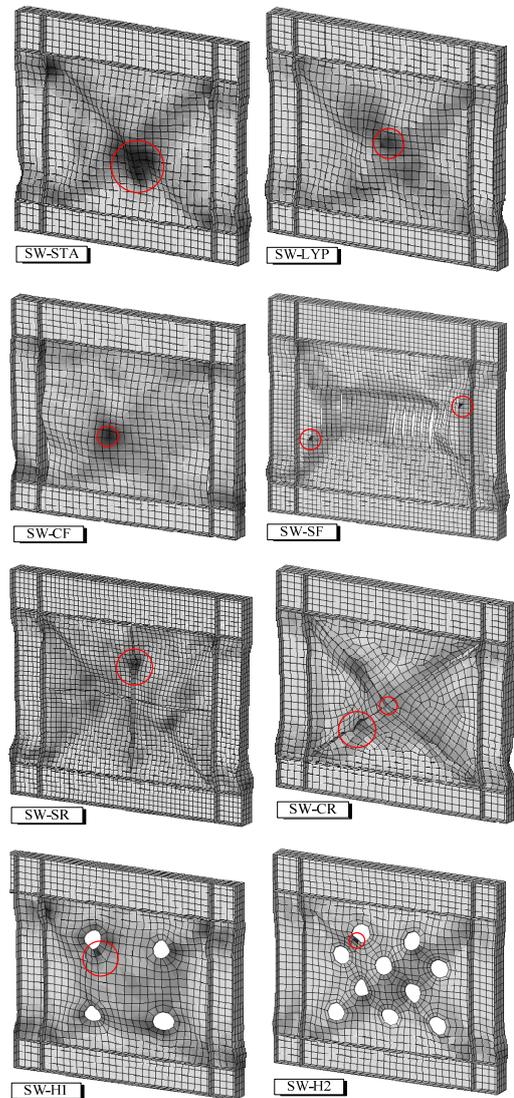


图 11 钢板剪力墙 PEEQ 分布对比图  
Fig.11 Comparison of PEEQ distribution

钢板墙的破坏模式和实心钢板墙有较大区别，拉力带被均匀化，在开洞的边缘 PEEQ 最大，易发生撕裂现象。SW-H2 由于开洞率较高，会形成较为明显的交叉拉力带。从上述的分析可以看出，构造形式会改变结构的变形形态和塑性应变累积位置，改善结构的受力性能。

图 12 选取了剪力墙中间位置(考察剪力往复作用的影响)、剪力墙角部位置(考察钢板与边缘梁柱焊缝位置的影响)、柱翼缘中心、柱翼缘边缘(考察拉力场对边柱的影响)的 PEEQ 最大值进行对比分析。SW-SF、SW-SR、SW-CR、SW-LYP 在剪力墙中间部分的 PEEQ 高于标准剪力墙 SW-STA，主要是由于竖缝应力集中、加劲肋局部屈曲及墙板进入深度屈服引起的。SW-CR 角部的 PEEQ 大于标准剪力墙，由于交叉加劲肋连接位置也在角部，所以会导致角部的塑性应变累积增加；其他剪力墙角部 PEEQ 均小于标准剪力墙，能够降低钢板墙与边缘梁柱焊缝断裂的几率。SW-CF、SW-LYP、SW-H1、SW-H2 剪力墙与标准剪力墙相比，降低了柱子翼缘和腹板两端的 PEEQ 值，说明改善了钢板墙拉力带对柱子的不利影响，SW-SR，SW-CR 对内嵌钢板进行加强，增加了对边柱的影响。

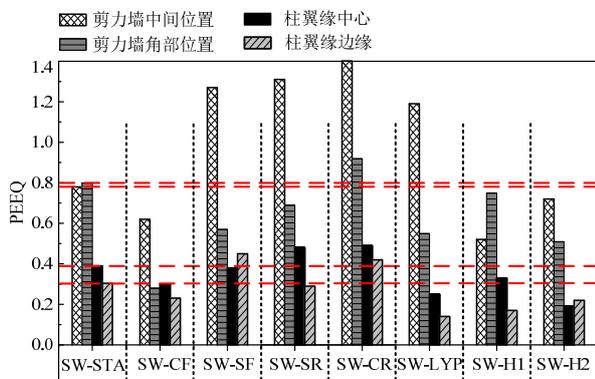


图 12 钢板剪力墙最大 PEEQ 对比分析  
Fig.12 Comparison of maximum PEEQ

### 3.5 破坏形态对比分析

从图 13 中能够看出，钢板开洞、钢板开缝及加加劲肋都会改变薄钢板的变形行为，导致破坏形态发生变化。SW-STA、SW-LYP 变形为一个主波鼓屈，形成明显双向拉力带；SW-CF 没有形成明显的拉力带，呈现多波弯曲的破坏模式；SW-SF 为钢板条带的弯曲变形，没有明显的主波形成，抑制平面外变形；SW-SR 由于加劲肋的分格，形成小区域的拉力带；SW-CR 在加劲肋相交的位置变形最大，由于加劲肋刚度有限，形成一个主波鼓屈的破坏模

式；SW-H1 和 SW-H2 将一个主波的变形平均化，显著降低了平面外变形。

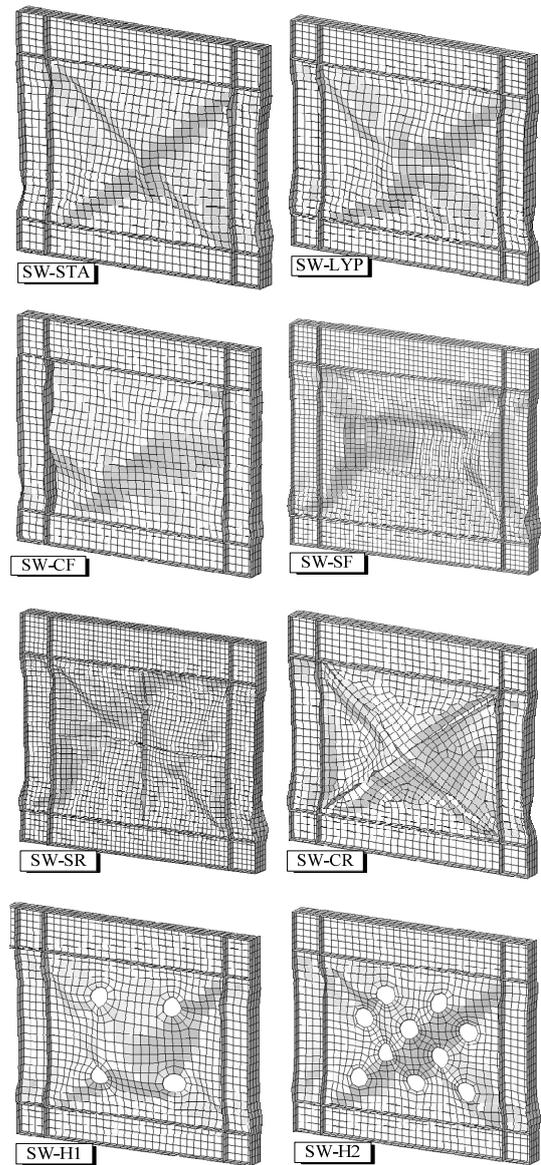


图 13 钢板剪力墙破坏形态对比分析  
Fig.13 Comparison of failure modes

在加载过程中，薄钢板剪力墙早期就会发生屈曲，并形成明显的拉力带，出现不同程度的平面外鼓屈现象，导致滞回曲线出现捏拢，同时伴随较大声响。表 6 对比了结构平面外变形的最大值，分别为层间位移角 1/50 时候以及最终破坏时刻。加劲肋剪力墙(SW-SR 和 SW-CR)由于后期加劲肋严重局部屈曲，不能起到持续抑制屈曲的作用，导致平面外变形也大幅增加；开洞式剪力墙、开缝剪力墙由于破坏形态的改善导致平面外变形得到一定程度的抑制；低屈服点钢板剪力墙由于很早就进入屈服状态，因此前后变形的变化不大。

表 6 钢板剪力墙平面外变形对比分析 /mm  
Table 6 Comparison of out-of-plane deformations

类型	编号	1/50 状态	最终状态
① 标准剪力墙(4.5)	SW-STA	105.86	163.89
② 低屈服点剪力墙	SW-LYP	139.82	159.17
③ 两侧开缝剪力墙	SW-CF	115.72	158.25
④ 开竖缝剪力墙	SW-SF	95.51	142.58
⑤ 十字加劲剪力墙	SW-SR	105.01	158.96
⑥ 交叉加劲剪力墙	SW-CR	122.65	168.06
⑦ 开洞剪力墙-1	SW-H1	108.32	136.72
⑧ 开洞剪力墙-2	SW-H2	104.73	132.96

### 3.6 耗能能力对比分析

能量耗散系数是衡量结构耗能能力的指标之一，根据文献[24]，能量耗散系数  $E_p$  应按下式计算：

$$E_p = \frac{S_{ABC} + S_{CDA}}{S_{OBE} + S_{ODF}} \quad (3)$$

式中： $S_{ABC}$  和  $S_{CDA}$  代表上半部和下半部滞回曲线的面积(图 14 中填充部分)； $S_{OBE}$  和  $S_{ODF}$  代表虚线围成的三角形面积，如图 14 所示。 $E_p$  值越大，说明滞回曲线越饱满，耗能能力越强。

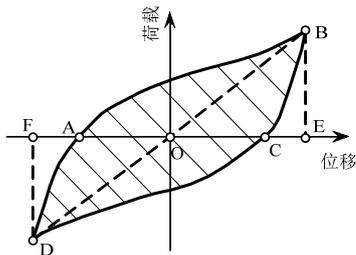
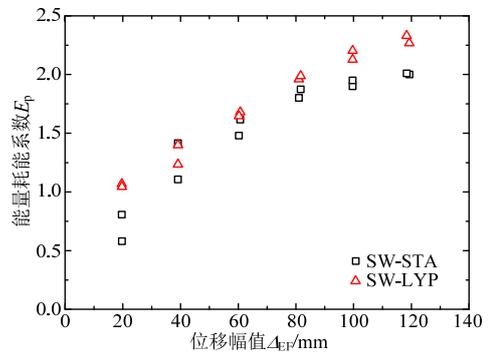


图 14 能量耗散系数计算示意图

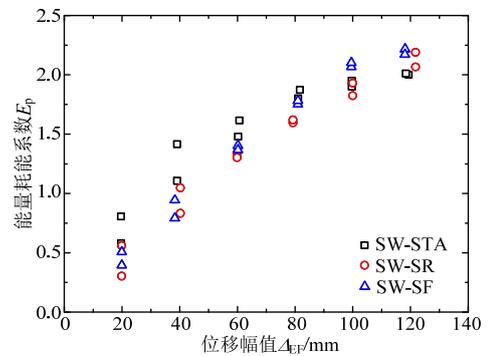
Fig.14 Calculative method of energy dissipation coefficients

由于内嵌钢板的平面外鼓屈，钢板剪力墙的滞回曲线出现一定程度的捏拢现象，影响结构的耗能能力。图15为所有钢板剪力墙的能量耗散系数随图 14 中 EF 点之间的距离增加的变化趋势。从图 15(a) 可以看出低屈服点钢板剪力墙结构的耗能能力明显高于标准剪力墙。图 15(b) 中的开缝剪力墙由于初始刚度低，进入塑性较晚，因此前期的耗能能力比标准剪力墙低，但是随着结构逐渐进入塑性，滞回曲线没有出现明显捏拢，耗能能力不断提高，其增长率比标准剪力墙高。从图 15(c) 可得，虽然设置加劲肋能够改善钢板的平面外变形，但由于加劲肋的刚度有限，加载后期约束作用降低，导致滞回曲线仍然有比较明显的捏拢现象，耗能能力提高有限。在图 15(d) 中，开洞钢板剪力墙与图 15(b) 同样的原因导致前期的能量耗散不及标准剪力墙，但随着进入塑性程度的加深，耗能能力逐步提高。从图 15(e)

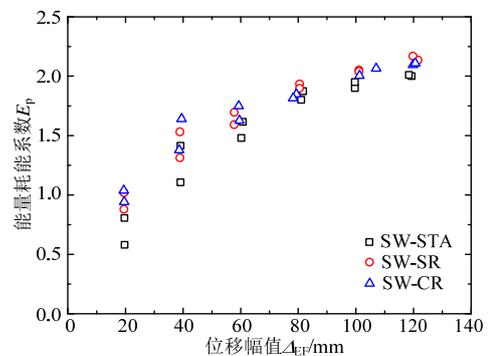
最终能量耗散系数对比能够看出，构造形式的改变会改善结构的耗能能力，其中低屈服点钢板剪力墙的能量耗散能力最强，比标准剪力墙提高近 16.5%。



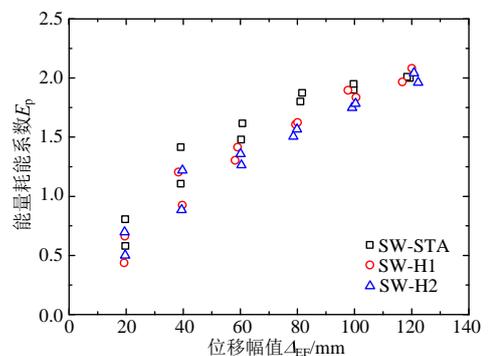
(a) 钢材材料的影响



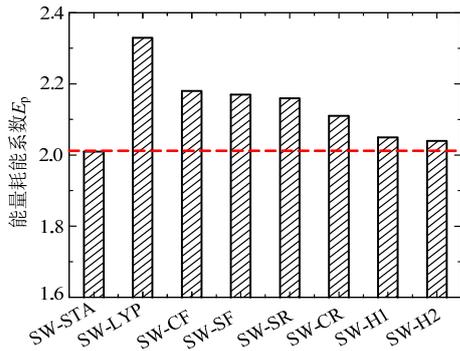
(b) 钢板开缝的影响



(c) 钢板加劲肋影响



(d) 钢板开洞的影响



(e) 最终的能量耗散系数对比图

图 15 钢板剪力墙能量耗散系数对比分析

Fig.15 Comparison of energy dissipation coefficients

### 3.7 不同改进形式抗震性能总结对比分析

综合前面所述各项性能指标, 8种钢板剪力墙结构的抗震性能对比分析结果如表7所示。通过改变钢板剪力墙的构造形式, 能够有效改善结构的变形行为、耗能能力、防断裂性能、延性以及破坏形态, 对提高结构的抗震性能起到良好的作用。例如,

表 7 钢板剪力墙抗震性能对比分析

Table 7 Comparison of seismic behavior

类型	承载性能	耗能能力	防焊缝断裂 (钢板角部)	防钢板断裂 (钢板中间)	对柱子的 附加作用	退化 性能(延性)	破坏 形式	经济 性能
① 标准剪力墙	SW-STA	—	—	—	—	×	—	○
② 低屈服点剪力墙	SW-LYP	△	○	△	○	○	△	△
③ 两侧开缝剪力墙	SW-CF	△	△	○	○	○	△	○
④ 开竖缝剪力墙	SW-SF	×	△	○	×	△	○	△
⑤ 十字加劲剪力墙	SW-SR	○	△	△	×	△	△	△
⑥ 交叉加劲剪力墙	SW-CR	○	△	×	×	△	×	△
⑦ 开洞剪力墙-1	SW-H1	○	△	△	○	△	○	△
⑧ 开洞剪力墙-2	SW-H2	○	△	○	○	△	○	△

注: ○代表较好; △代表中等; ×代表较差。

## 4 结论

本文建立 8 种钢板剪力墙结构的非线性有限元数值计算模型, 对比分析八 8 种不同改进构造钢板剪力墙的抗震性能, 得到如下结论:

(1) 低屈服点钢板剪力墙总体承载效率较高; 加劲肋钢板剪力墙承载力提高有限, 但对刚度有较大提高作用(20%以上); 开缝剪力墙承载力与刚度降低很多; 开洞剪力墙承载力降低程度与削弱面积成正比, 但对刚度降低影响较大。

(2) 根据抗震规范要求, 在强震作用下按照承载力退化 15%定义为破坏, 发生的越晚表示结构的延性相对更好。分析表明, 各种改进形式的钢板剪力墙均能够提高结构的延性, 达到预期的效果, 其中低屈服点钢板剪力墙承载力退化稳定, 延性最好。

开竖缝结构能够提高结构的耗能能力, 抑制平面外变形, 改善曲线捏拢情况, 降低拉力场对柱子的影响, 但其承载力和刚度却有大幅度降低。加劲钢板剪力墙结构的承载性能有较大提高, 但由于加劲肋刚度有限, 在加载后期发生严重局部屈曲, 抑制屈曲的能力降低, 故曲线仍然有明显的捏拢现象, 对耗能能力提高有限, 如果提高加劲肋刚度会增加建筑成本, 增加拉力带对柱子的作用。开洞钢板剪力墙改变了破坏形态, 减小了平面外变形, 并且有效降低了拉力场对柱子的影响。低屈服点钢板剪力墙结构能够显著提高结构的耗能能力, 延性很好, 承载效率较高, 可削减拉力带对边柱产生的不利作用, 但由于材料屈服强度低, 对后期刚度有一定影响。总得来说, 今后可以根据具体的需求, 综合考虑结构的承载性能、抗震性能及经济性能, 进而选择适合的钢板剪力墙构造形式。

(3) 构造形式会改变结构的变形形态和塑性应变累积位置, 改善结构受力性能、焊缝断裂性能。除 SW-CR, 其他剪力墙角部 PEEQ 均小于标准剪力墙, 能够降低钢板墙与边缘梁柱焊缝断裂几率。SW-CF、SW-LYP、SW-H1、SW-H2 剪力墙与标准剪力墙相比, 明显降低柱子塑性铰位置的 PEEQ 值, 进而有效减小了钢板墙拉力场对柱子的不利影响。

(4) 开洞式剪力墙、开缝剪力墙由于变形形式发生很大变化, 所以平面外变形得到一定程度的抑制和改善。开洞对耗能能力影响不大; 低屈服点钢材耗能能力最强, 比标准钢板剪力墙提高近 16.5%; 开缝剪力墙由于变形模式发生变化也令耗能能力有较大提高。

(5) 在高烈度区要综合考虑抗震性能、延性、

破坏形态、建筑要求以及经济指标选取合适的钢板剪力墙构造形式。低屈服点钢板剪力墙因其材料的特殊性,材料使用效率较高,耗能能力强,延性好,但需通过一定措施抑制提早屈曲,提高侧向刚度。

#### 参考文献:

- [1] 董全利. 防屈曲钢板剪力墙结构性能与设计方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2007.  
Dong Quanli. Studies on structural behavior and design method of buckling-restrained steel plate shear wall [D]. Beijing: Tsinghua University, 2007.
- [2] 汪大绥, 陆道渊, 黄良, 王建, 徐麟, 朱俊. 天津津塔结构设计[J]. 建筑结构学报, 2010(增刊 1): 1—7.  
Wang Dasui, Lu Daoyuan, Huang Liang, Wang Jian, Xu Lin, Zhu Jun. Structure design of Jinta in Tianjin [J]. Journal of Building Structures, 2010(Suppl 1): 1—7. (in Chinese)
- [3] 李峰. 钢板剪力墙抗震性能的试验与理论研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.  
Li Feng. Experimental and theoretical investigation to earthquake resistant behavior of steel plate shear wall [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011. (in Chinese)
- [4] 郭彦林, 董全利. 钢板剪力墙的发展与研究现状[J]. 钢结构, 2005, 25(1): 1—6.  
Guo Yanlin, Dong Quanli. Research and application of steel plate shear wall in high-rise buildings [J]. Steel Construction, 2005, 25(1): 1—6. (in Chinese)
- [5] Vian Darren, Bruneau Michel, Tsai K. C, Lin Y C. 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.
- [6] 蔡克铨, 林盈成, 林志翰. 钢板剪力墙抗震行为与设计[J]. 建筑钢结构进展, 2007, 9(5): 19—25.  
Cai Keshuan, Lin Yingcheng, Lin Zhihan. Seismic responses and design of steel plate shear wall [J]. Progress in Steel Building Structures. 2007, 9(5): 19—25. (in Chinese)
- [7] Chena Shengjin, Chyuan Jhang. Experimental study of low-yield-point steel plate shear wall under in-plane load [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(6): 977—985.
- [8] Chena Shengjin, Chyuan Jhang. Cyclic behavior of low yield point steel shear walls [J]. Thin-Walled Structures, 2006, 44(7): 730—738.
- [9] 王磊. 开圆孔钢板剪力墙结构性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.  
Wang Lei. The Investigation to structural behavior of perforated steel shear walls [D]. Xian: Xian University of Architecture and Technology, 2009. (in Chinese)
- [10] 郭彦林, 缪友武, 董全利. 全加劲两侧开缝钢板剪力墙弹性屈曲研究[J]. 建筑钢结构进展, 2007, 9(3): 58—62.  
Guo Yanlin, Miao Youwu, Dong Quanli. Elastic buckling behavior of stiffened steel plate shear walls slotted at two edges [J]. Progress in Steel Building Structures, 2007, 9(3): 58—62. (in Chinese)
- [11] Toko Hitaka, Chiaki Matsui. Experimental of study on shear wall with slits [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(5): 586—595.
- [12] 陈以一, 宁燕琪, 蒋路. 框架-带缝钢板剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(7): 133—139.  
Chen Yiyi, Ning Yanqi, Jiang Lu. Experimental study on seismic behavior of frame-steel plate shear wall with slits [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(7): 133—139. (in Chinese)
- [13] 李峰, 李慧, 李振敏, 李振军, 陈小峰, 丁磊. 交叉加劲肋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, 2009, 41(1): 57—62.  
Li Feng, Li Hui, Li Zhenmin, Li Zhenjun, Chen Xiaofeng, Ding Lei. Cyclic test of diagonally stiffened steel plate shear wall [J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2009, 41(1): 57—62. (in Chinese)
- [14] ABAQUS. Analysis user's manual I\_V. Version 6.10. USA: ABAQUS, Inc., Dassault Systèmes; 2010.
- [15] 王萌, 杨维国. 薄钢板剪力墙结构滞回行为研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(1): 68—77.  
Wang Meng, Yang Weiguo. Seismic behaviors study of thin steel plate shear wall structures [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(1): 68—77.
- [16] 徐建. 非加劲薄钢板剪力墙性能试验与设计方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.  
Xu Jian. Research on the behavior and design methods of unstiffened thin steel plate shear wall [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. (in Chinese)
- [17] CAN/CSA-S16-01, Limits states design of steel structures [S]. Canada: Standards Council of Canada, 2001.
- [18] ANSI/AISC 341-05, Seismic provisions for structural steel buildings [S]. America: American Institute of Steel Construction, 2005.
- [19] Peter D, Ahmad M I, Ian G B. Cyclic response of plate steels under large inelastic strains [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(2): 156—164.
- [20] Nakashima M. Strain-hardening behavior of shear panels made of low-yield steel I: test [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1995, 121(12): 1742—1749.
- [21] Shi Gang, Wang Meng, Wang Yuanqing, Wang Fei. Cyclic behavior of 460MPa high strength structural steel and welded connection under earthquake loading [J]. Advances in Structural Engineering, 2013, 16(3): 451—466.
- [22] Shi Yongjiu, Wang Meng, Wag Yuanqing. Experimental and constitutive model study of structural steel under cyclic loading [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(8): 1185—1197.
- [23] GB50011-2001, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.  
GB50011-2001, Code for seismic design of buildings [S]. Beijing, China Architecture & Building Press, 2001. (in Chinese)
- [24] JGJ101-96, 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991.  
JGJ101-96, Specification of testing methods for earthquake resistant building [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1991. (in Chinese)