

Research on seismic performance of lightweight double-plate flexure-restrained steel plate shear wall

Xiamin Zhu Hao Zhang

School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei, 056038, China

Abstract

There are many shortcomings in the effective combination of insulation design and seismic performance of traditional steel plate shear walls. In view of this, this paper proposes a new type of lightweight double steel plate buckling restrained steel plate shear wall. Analyze and compare the influence of aspect ratio (λ), aspect ratio (β), and sub board aspect ratio (λ_{sub}) on the mechanical properties of lightweight double steel plate buckling restrained steel plate shear walls through numerical simulation. The results indicate that increasing the thickness of the steel plate can significantly enhance its peak bearing capacity, but it needs to be optimized and balanced with economic considerations; Although increasing the width can improve the bearing capacity and help suppress buckling, it will reduce the initial stiffness; Reducing the height to thickness ratio of the sub board can effectively curb local buckling and reduce the occurrence of residual deformation.

Keywords

steel plate shear wall; double steel plate; restrained ties; finite element analysis

两边连接轻型双钢板屈曲约束钢板剪力墙抗震性能研究

祝夏敏 张浩

河北工程大学土木工程学院, 中国 · 河北 邯郸 056038

摘 要

传统钢板剪力墙在保温设计与抗震性能的有效结合方面存在诸多不足, 鉴于此, 本文提出一种新型轻型双钢板屈曲约束钢板剪力墙。通过数值仿真方系统分析对比高厚比 (λ)、高宽比 (β) 与子板高厚比 (λ_{sub}) 对轻型双钢板屈曲约束钢板剪力墙力学性能的影响规律。结果表明, 增大钢板厚度, 可以显著提升其峰值承载力, 不过需要结合经济性加以优化权衡; 增加宽度虽能够提高承载力且对抑制屈曲现象有所助益, 但会降低初始刚度; 降低子板高厚比可以有效遏制局部屈曲现象, 并减少残余变形情况的发生。

关键词

双层钢板; 钢板剪力墙; 抗震性能; 有限元分析

1 引言

钢板剪力墙凭借其高抗拉强度、良好延性及轻质的特性, 成为现代高层建筑中高效的抗侧力构件, 应用十分广泛^[1-2]。当前, 在我国《近零能耗建筑技术标准》(GB/T 51350-2019)^[3]对围护结构传热系数 ($K \leq 0.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) 的要求下, 传统钢板剪力墙通常需额外附加外保温系统, 如 EPS 板、岩棉等, 才能满足设计要求, 但这样的构造通常较为复杂且耐久性较差。结构-保温一体化技术虽能解决构造复杂的问题, 但仍存在一些缺陷, 如砖-柱-保温层一体化墙体, 砌体材料的抗震性能较差, 难以满足高烈度区的抗震需求; 预制混凝土夹心保温外墙系统, 尽管其采用混凝土的构造提升了抗震性能, 但保温材料会降低混凝土之间的粘

性能, 进而影响结构的抗震效果, 在地震作用下, 此类界面滑移可能引发局部屈曲甚至整体剪切破坏。因此, 开发兼具高抗震性能与低传热系数的集成化钢板剪力墙体系, 是目前工程实践中需要解决的关键问题。基于此, 本文提出一种轻型双钢板屈曲约束钢板剪力墙 (Lightweight Double Plate Flexure Restrained Steel Plate Shear Wall, 以下简称 LDPFR-SPSW)。

2 新型轻型双钢板屈曲约束钢板剪力墙

LDPFR-SPSW 由内框架体系、两侧对称配置的钢板以及高强螺栓、对拉螺栓组成, 如图 1 所示。内框架体系嵌入于双层钢板之间, 通过螺栓与上、下框架梁相连, 其详细构造如图 2 所示。内框架由横向和竖向边缘约束构件以及内约束构件组成, 如图 2(b) 所示。横向边缘构件、竖向边缘构件通过销轴形成边缘铰接框架, 内部增设内约束构件, 并在边缘铰接框架与内约束构件形成的空腔内以及双侧边缘铰

【作者简介】祝夏敏 (1993-), 女, 中国山西长治人, 硕士, 从事工程结构研究。

接框架、内约束构件之间填充保温隔热材料。

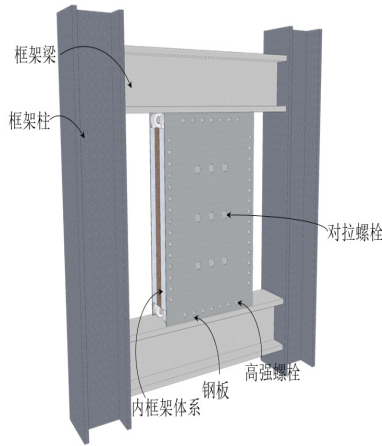


图 1 轻型双钢板屈曲约束钢板剪力墙构造图

两侧钢板与内框架之间采用高强螺栓连接，便于后期

拆卸与更换，同时避免焊接导致的残余应力和变形。横向边缘约束构件和竖向边缘约束构件通过销轴形成铰接结构，避免了水平力对其的作用，从而确保在使用过程中实现构件重复利用。此外，内部约束构件的设置，可以有效增强结构的整体性能。通过对拉螺栓将双层钢板与内框架体系的有效结合，形成疏密结合的整体，在钢板与内框架体系形成的空腔和内框架体系之间填充保温隔热材料，有效阻断了剪力墙的热能传播路径，从而实现良好的保温隔热效果。一体化设计为新建及既有结构的抗震与节能需求提供了创新解决方案。

3 参数分析

考虑在实际安装过程中两边连接，分析高宽比 β 、高厚比 λ 以及子板高厚比 λ_{sub} 对钢板剪力墙的力学影响，高度为 3000mm，双钢板间距 200mm，详细参数详见表 1。通过对 β ($\beta = H/L$)、 λ ($\lambda = H/T$) 等关键参数的深入探索，揭示轻型双钢板屈曲约束钢板剪力墙的受力特征。

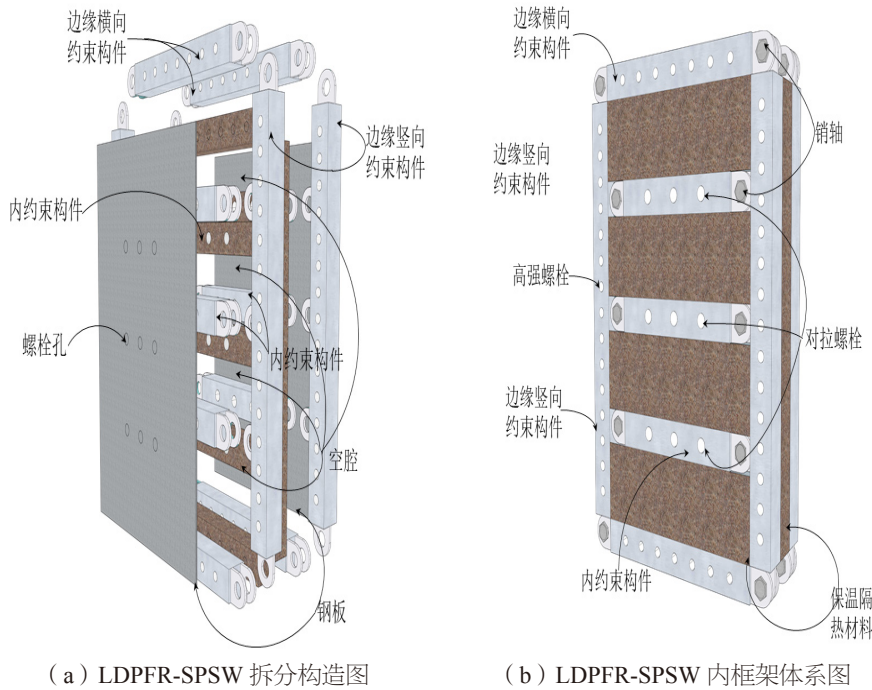


图 2 轻型双钢板屈曲约束钢板剪力墙构造图

表 1 试件参数表

试件类型	试件名称	H/mm	L/mm	T/mm
	LDPFR-SPSW-1.0	3000	1000	4、6、8
LDPFR-SPSW	LDPFR-SPSW-1.5	3000	1500	4、6、8
	LDPFR-SPSW-3.0	3000	3000	4、6、8

3.1 高厚比 λ 的影响

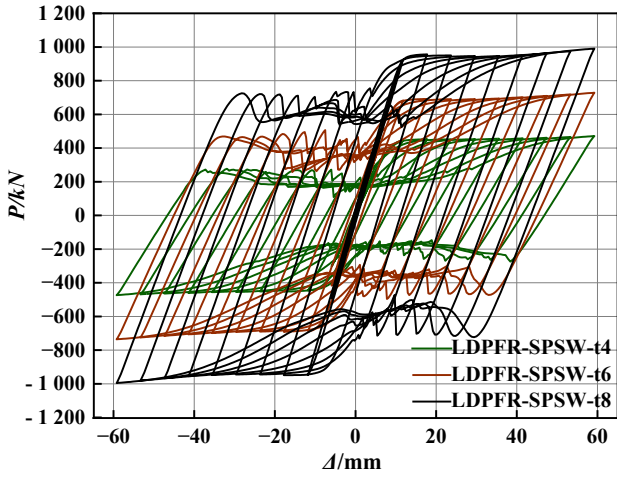
图 3 呈现了轻型双钢板屈曲约束钢板剪力墙的平均剪应力 - 层间位移角曲线。由图可知，钢板厚度的增加显著提升了结构的承载能力与耗能性能。LDPFR-SPSW-t8 试件的滞回曲线呈现饱满的梭形，峰值承载力达到约 $\pm 1000\text{kN}$ ，且滞回环面积最大，表明其耗能能力最优；LDPFR-SPSW-t6

试件的约为 $\pm 800\text{kN}$ ，滞回环略收缩，但仍保持稳定；LDPFR-SPSW-t4 试件的仅为 $\pm 600\text{ kN}$ ，滞回环明显捏缩，尤其在位移超过 $\pm 40\text{mm}$ 时出现刚度退化，残余变形增大。此外，随着厚度增加，结构刚度显著提高。

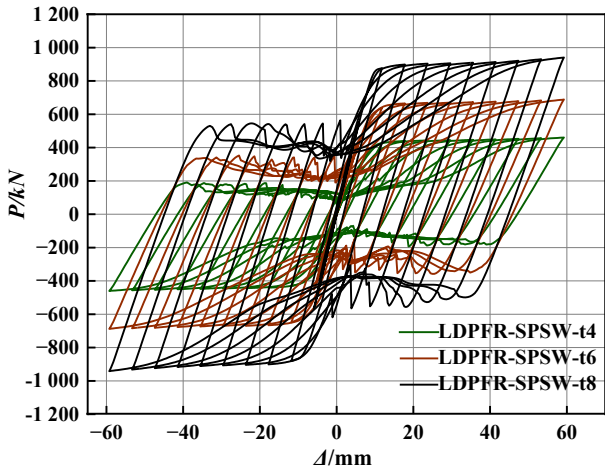
3.2 高宽比 β 的影响

图 4 展示了不同高宽比组合下的荷载 - 层间位移角滞回曲线。在同一高厚比情况下，宽度对滞回性能的影响呈现出规律性变化。当宽度从 1000mm 增至 3000mm，试件的承载力和刚度均有所提高。如图 4(c) 所示，宽度为 3000 mm 的曲线峰值剪力达到 8000kN，较 1000mm 的宽度试件提升显著，且滞回环更为饱满，说明增大宽度可有效抑制局部屈曲，

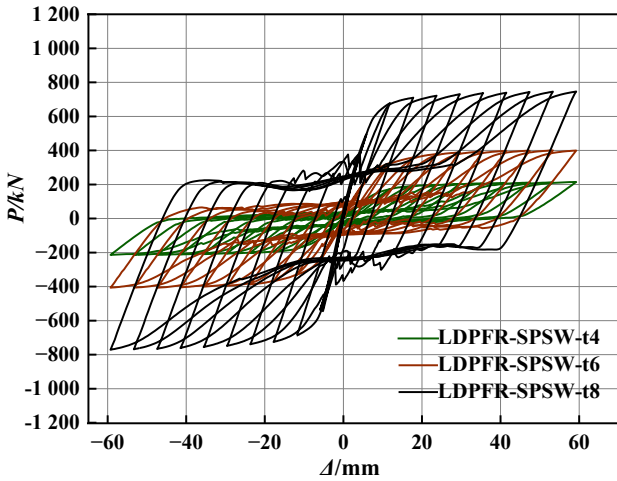
增强整体稳定性。此外，高厚比较大的试件，在宽度增大时表现出更平缓的刚度退化，表明其变形协调能力更优。然而，高厚比过高可能加剧初始刚度损失，需通过优化高宽比平衡承载与延性需求。



(a) LDPFR-SPSW-1.0

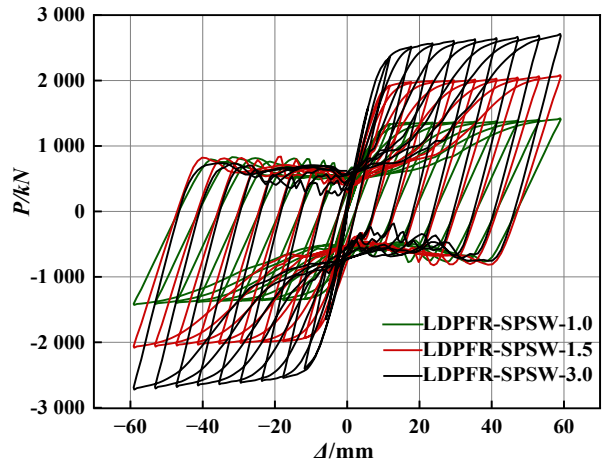


(b) LDPFR-SPSW-1.5

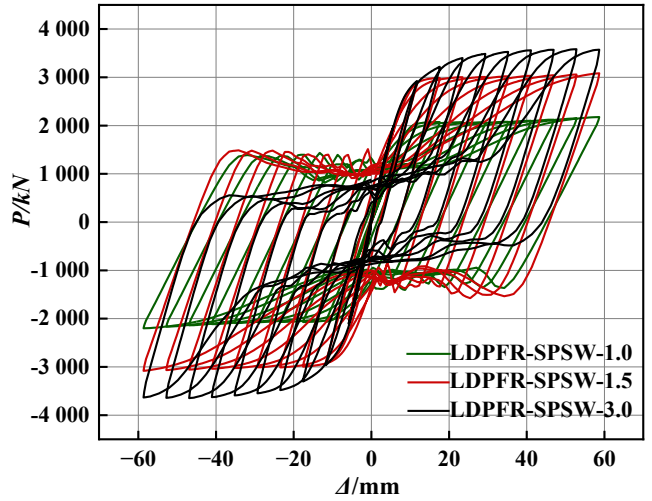


(c) LDPFR-SPSW-3.0

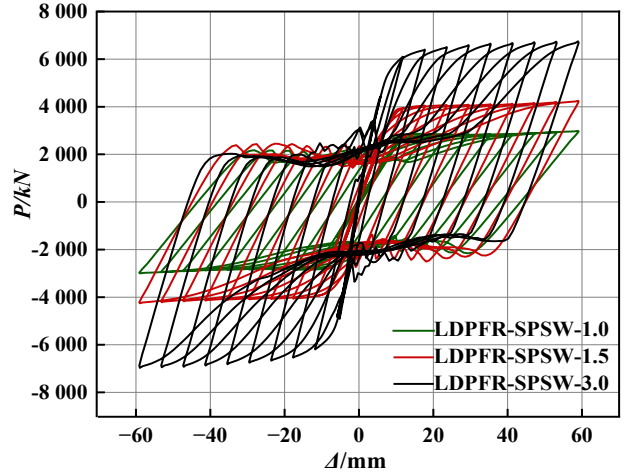
图 3 滞回曲线



(a) $\lambda = 750$



(b) $\lambda = 500$



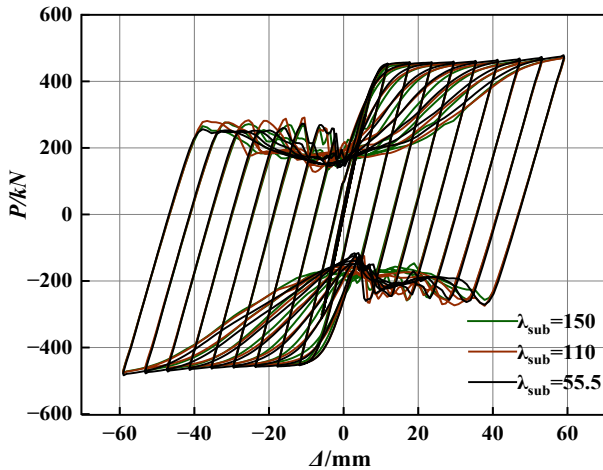
(c) $\lambda = 375$

图 4 滞回曲线

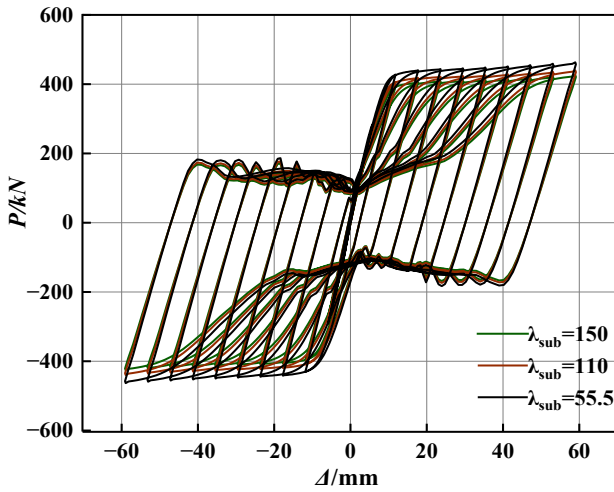
3.3 子板高厚比 λ_{sub} 的影响

λ_{sub} 为钢板被内约束构件划分成小块的高厚比。根据图 5 滞回曲线分析表明，不同子板高厚比对钢板剪力墙的滞回性能具有显著影响。子板高厚比为 150 的试件滞回曲线呈

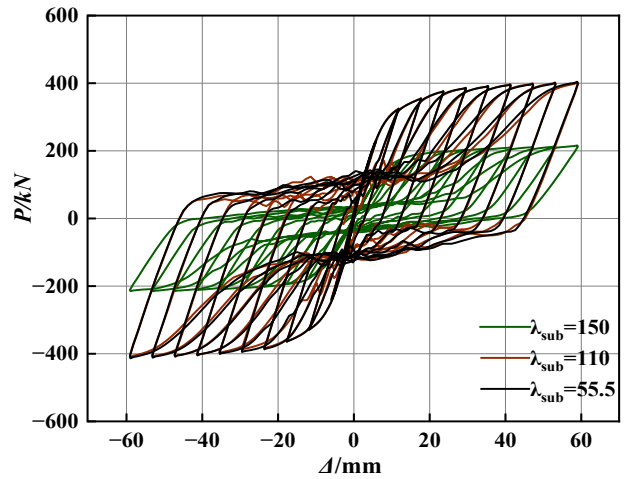
现明显的捏缩效应, 滞回环面积较小, 表明其耗能能力较弱, 残余变形较大, 导致承载力和延性降低。子板高厚比为 110 的试件滞回环饱满度有所提升, 位移幅值相近时刚度退化减缓, 增强子板厚度可以提升整体稳定性, 但仍存在一定的捏缩现象。子板高厚比为 55.5 的试件滞回曲线最为饱满, 滞回环面积显著增大, 且在 $\pm 60\text{mm}$ 位移范围内刚度退化程度最低, 残余变形明显减小, 说明子板高厚比能有效抑制局部屈曲, 提升结构的延性和耗能效率。



(a) LDPFR-SPSW-1.0



(b) LDPFR-SPSW-1.5



(c) LDPFR-SPSW-3.0

图 5 滞回曲线

4 结论

本文提出一种新型轻型双钢板屈曲约束钢板剪力墙, 并进行不同参数下钢板剪力墙的有限元分析, 根据分析结果得到以下结论:

增加钢板厚度提升剪力墙峰值承载力、初始刚度及延性, 降低残余位移。

增加钢板宽度提升剪力墙承载力及延性, 抑制局部屈曲, 但初始刚度下降, 需优化高厚比以平衡初始刚度与延性需求, 避免过度刚度损失。

降低子板高厚比可显著抑制局部屈曲, 提升承载力、提升能量耗能效率, 残余变形减少, 抑制刚度退化, 抗震性能最优。

参考文献

- [1] 徐强, 杨志, 张翔, 等.冷弯薄壁型钢混凝土框架-波纹钢板剪力墙结构抗震性能研究[J].建筑科学, 2024, 40(01): 127-135.
- [2] 任常保, 周文瑛, 葛冬云, 等.天津津塔钢板剪力墙与钢管混凝土柱复杂节点深化设计研究[J].施工技术, 2011, 40(18): 59-63+79.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 近零能耗建筑技术标准: GB/T 51350-2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.