

波形钢板剪力墙抗侧性能的有限元分析

王 威¹, 高敬宇², 苏三庆¹, 李元刚¹, 张龙旭¹, 李艳超¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 山东同圆设计集团有限公司, 山东 济南 250101)

摘要: 为研究波形钢板剪力墙的抗侧力性能及验证钢板弹塑性本构模型和壳单元在钢板剪力墙有限元分析中的适用性, 本文以平钢板剪力墙、水平和竖向放置的波形钢板剪力墙试验为基础, 采用 ABAQUS 有限元分析软件建立了 19 个平钢板和波形钢板剪力墙模型, 通过与试验数据对比验证了有限元分析模型的精度和可靠性, 并进一步分析了钢板厚度、剪力墙高宽比和波形钢板波角等因素对其抗侧力性能的影响。研究表明: 随内嵌波纹钢板厚度增加、剪力墙高宽比的减小, 波形钢板剪力墙的抗侧力性能增强, 且波角为 30°和 45°时, 受力性能最佳。

关键词: 波形钢板剪力墙; 抗侧性能; 钢板厚度; 高宽比; 波角

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)05-0630-07

Lateral resisting behavior finite element analysis of corrugated steel plate shear wall

WANG Wei¹, GAO Jingyu², SU Sanqing¹, LI Yuangang¹, ZHANG Longxu¹, LI Yanchao¹

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

2. Shandong Tong Yuan Design Group CO. LTD, Ji'nan 250101, China)

Abstract: In order to research the lateral resisting behavior of corrugated SPSW and verify the steel plate elastic-plastic constitutive model and the applicability of the shell element in finite element analysis of SPSW, based on a test of shear wall with flat plate, horizontal and vertical direction corrugated steel plate, 19 flat steel plate and corrugated steel plate shear wall ABAQUS models were built here to validate the accuracy and reliability of the finite element analysis model by comparing with the experimental results, the influence of steel plate thickness, height to width aspect ratio of steel plate shear wall (SPSW) and corrugated steel plate wave angle to the lateral load resisting performance of corrugated SPSW were further analyzed and discussed. The study results show that with the increase of steel plate thickness, and decrease of aspect ratio, the lateral load resisting of corrugated SPSW are becoming stronger, and the best wave angles of the corrugated steel plate are 30° and 45°.

Key words: corrugated steel plate shear wall; lateral resisting behavior; steel plate thickness; height to width aspect ratio; wave angle

波形钢板是指将平钢板通过冷压或热轧成为梯形、正弦波形或“Z”字形的钢板件。将平钢板通过辊轧机辊轧成波形板后, 其弹性抗剪屈曲荷载较平钢板相比高出几倍甚至几十倍^[1-2]。其在运输与安装过程中具有较大的平面外刚度, 能克服传统的平钢板受剪易屈曲、薄钢板滞回曲线捏拢现象明显等缺点。目前, 波形钢板主要研究和应用于组合楼板和钢梁钢腹板中。Hassanein M F 等^[3-4]指出, 在桥梁结构中, 钢梁的腹板由平钢板改为波形钢板后, 其抗剪承载力及抗屈曲能力相对平钢板明显提高。Fereshteh Emami 等^[5]针对钢板厚度为 1.25 mm、高宽比为 0.75 的平钢板剪力墙和采

用 30°波角的同厚度同高宽比水平和竖向放置波形钢板剪力墙进行的拟静力试验研究发现波形钢板墙比普通平钢板剪力墙极限承载力低 17%, 但其耗能能力、延性率、初始刚度却分别提高了 52%、40%和 20%, 表现出更好的滞回性能。

目前对于波形钢板剪力墙承载力的理论计算较少, 根据我国学者郭彦林等人的研究成果^[6], 给出的普通波形钢板压剪承载力相关曲线表达式为

$$\frac{\sigma}{\varphi f_y} + \left(\frac{\tau}{\varphi_s f_{vy}} \right)^2 = 1 \quad (1)$$

式中, f_y 为波形钢板屈服强度, f_{vy} 为波形钢板抗剪强度设计值, φ_s 为波形钢板竖向放置时承受轴

向压力的稳定曲线, 其表达式为

$$\varphi_s = \begin{cases} 0.95 - 0.1\lambda^2 & \lambda \leq 0.7 \\ 1.08 - 0.4\lambda^2 & 0.7 < \lambda \leq 1.2 \\ 0.79/\lambda & \lambda > 1.2 \end{cases} \quad (2)$$

其中 φ_s 为波形钢板水平放置时的抗剪稳定曲线, 其表达式为

$$\varphi_s = \begin{cases} 1 - 0.1\lambda_s^2 & \lambda_s \leq 1.0 \\ 0.85/\lambda_s^2 & \lambda_s > 1.0 \end{cases} \quad (3)$$

式中 λ_s 、 λ 均为正则化高厚比。

上述公式没有考虑边缘构件提供的抗侧刚度, 全部剪力由内嵌钢板承担, 适用于四边简支模型。此外, 该公式仅给出沿波形钢板波线方向的压-剪模型, 完全忽略压缩刚度, 没考虑其组合效应。同时, 对于波形钢板剪力墙与边缘构件的组合结构形式, 其抗侧移刚度和滞回性能的确定, 还没有比较成熟可靠的方法。

因此, 为研究波形钢板剪力墙在水平荷载作用下的抗侧性能。本研究即以此试验为基础, 通过建立 19 个平钢板和波形钢板剪力墙有限元分析模型, 结合试验数据验证了壳单元对这些有限元模型分析的适用性和精确性, 最后对比分析了不同钢板厚度、剪力墙高宽比和波形钢板波角等因素对其抗侧性能的影响。

1 钢板试件弹塑性本构模型的选取

用 ABAQUS 有限元分析软件对试件进行单调加载拟静力试验。试件采用钢材单轴受拉标准试件, 尺寸标注如图 1, 本构模型采用文献[5]建议的单轴受拉本构模型, 如图 2 所示。

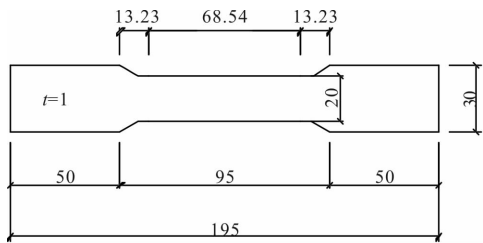


图 1 单轴拉伸试验标准试件(单位: mm)

Fig. 1 Standard specimen of the uniaxial tensile test (unit: mm)

$$\sigma = \begin{cases} E_s \epsilon & \epsilon \leq \epsilon_{ty} \\ \sigma_{ty} & \epsilon_{ty} \leq \epsilon \leq k_1 \epsilon_{ty} \\ k_3 \sigma_{ty} + \frac{E_s(1-k_3)}{\epsilon_{ty}(k_2-k_1)}(\epsilon - k_2 \epsilon_{ty})^2 & k_1 \epsilon_{ty} \leq \epsilon \leq k_2 \epsilon_{ty} \\ k_3 \sigma_{ty} & \epsilon \geq k_2 \epsilon_{ty} \end{cases}$$

式中: E_s 为钢材弹性模量; σ_{ty} 为受拉屈服应力;

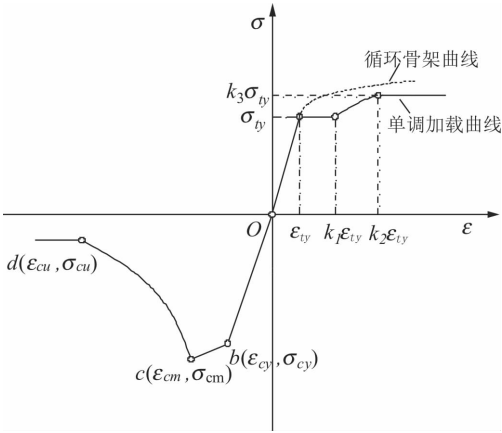


图 2 试件单轴拉伸本构关系

Fig. 2 The uniaxial tensile constitutive relationship of standard specimen

ϵ_{ty} 为受拉屈服应变; 参数 k_1 、 k_2 和 k_3 为用于控制单调加载曲线开关的参数, 其含义如图 2 所示。对于 Q235B、Q345B 钢材, 可取 $k_1=4.5$ 、 $k_2=45$ 和 $k_3=1.4$; 对于 Q460C 钢材, 可取 $k_1=6$ 、 $k_2=45$ 和 $k_3=1.4$; 对于 Q460D 钢材, 可取 $k_1=5$ 、 $k_2=46$ 和 $k_3=1.2$ 。文献[8]和文献[9]的分析表明, 建议的模型能够很好的描述试件的单调加载性能。

文献[5]采用欧洲钢结构标准 EN 10025 S355 中 H 型钢 HE-B140、HE-B160 和 HE-B200, 本构模型参数取 $k_1=4.5$ 、 $k_2=45$ 和 $k_3=f_u/f_y$, 其截面特性见表 1。

表 1 构件截面尺寸(单位: mm)

Tab. 1 The cross sectional dimensions of the members (unit: mm)

构件类型	H	B	t_w	t_f
HEB140	140	140	7	12
HEB160	160	160	8	13
HEB200	200	200	9	15

钢材弹性模量 E 、屈服强度 f_y 、极限强度 f_u 和强屈比 $k_3=f_u/f_y$ 见表 2。

表 2 材料力学性能

Tab. 2 The mechanical property of materials

构件类型	规格	杨氏模量 E/GPa	屈服强度 f_y/MPa	抗拉强度 f_u/MPa	强屈比 f_u/f_y	伸长率/%
内嵌钢板	见表 3	210	207	290	1.41	41
边框柱	HEB160	210	300	443	1.48	33
边框梁	HEB140	210	288	456	1.58	37
	HEB200					

2 波形钢板剪力墙试验与有限元建模分析

2.1 波形钢板剪力墙试件的尺寸规格

文献[5]的试验采用了钢板厚度为 1.25 mm、高宽比为 0.75 的平钢板剪力墙和采用 30°波角的同厚度同高宽比水平和竖向放置的波形钢板剪力墙进行拟静力试验研究,各试件材料参数和规格尺寸如表 1 至表 3 所示,各钢板剪力墙试件如图 3—图 6 所示。

2.2 平钢板与波形钢板剪力墙在反复荷载作用下的试验过程及结果对比分析

(1)平钢板与波形钢板剪力墙试验现象及结果的对比分析

试验采用准静态位移控制进行加载,根据试验分析,弹性位移取 20.3 mm,加载初始先进行各三次 25%、50%和 70%弹性位移(Approximate Elastic Displacement)增量的往复加载,随后增至 100%弹性位移往复加载一周,再依次以 75%、50%和 25%弹性位移进行一次往复卸载,随后进

行三次 100%弹性位移的往复加载,以稳定力-位移响应。随后以 125%、150%、175%至 400%的弹性位移,并按同样的方式进行加载和卸载。

(2)平钢板与波形钢板剪力墙试验结果与有限元分析的对比验证

构件在反复荷载作用下滞回曲线的骨架曲线与单调加载时的荷载位移曲线相近,可取反复荷载下的骨架曲线近似为构件单调加载时的荷载位移曲线,故取文献[5]中三个试件加载的骨架曲线数据,通过建立有限元 ABAQUS 模型数值模拟,进行单调加载,依据试验结论,将侧向位移缓慢加载至 70 mm 进行荷载位移曲线的对比验证,有限元模型的建立如图 3—图 5 所示。梁、柱及其加劲肋和连接板采用 C3D8 实体单元,钢板采用 S4R 壳单元。

由图 6—图 8 的三个对比图可见,ABAQUS 数值模拟结果与试验的骨架曲线基本吻合,说明采用壳单元模拟钢板剪力墙,还是比较准确,这种建模计算方法可用于进一步分析不同因素影响下波形钢板剪力墙的抗侧性能。

表 3 试件主要参数

Tab. 3 Parameters of specimens

试件编号	墙高 H/mm	墙宽 B/mm	钢板厚度 t/mm	高宽比 H/B	波角 $\alpha/^\circ$	钢板放置方式
SPSW-1	1 500	2 000	1.25	0.75	0	平钢板
SPSW-2	1 500	2 000	1.25	0.75	30	竖向波形钢板
SPSW-3	1 500	2 000	1.25	0.75	30	水平波形钢板
SPSW-4	1 500	2 000	0.6	0.75	30	竖向波形钢板
SPSW-5	1 500	2 000	0.6	0.75	30	水平波形钢板
SPSW-6	1 500	2 000	2.5	0.75	30	竖向波形钢板
SPSW-7	1 500	2 000	2.5	0.75	30	水平波形钢板
SPSW-8	1 500	2 000	1.25	0.75	45	竖向波形钢板
SPSW-9	1 500	2 000	1.25	0.75	45	水平波形钢板
SPSW-10	1 500	2 000	1.25	0.75	60	竖向波形钢板
SPSW-11	1 500	2 000	1.25	0.75	60	水平波形钢板
SPSW-12	1 500	2 000	1.25	0.75	90	竖向波形钢板
SPSW-13	1500	2 000	1.25	0.75	90	水平波形钢板
SPSW-14	2 000	2 000	1.25	1	30	竖向波形钢板
SPSW-15	2 000	2 000	1.25	1	30	水平波形钢板
SPSW-16	3 000	2 000	1.25	1.5	30	竖向波形钢板
SPSW-17	3 000	2 000	1.25	1.5	30	水平波形钢板
SPSW-18	4 000	2 000	1.25	2	30	竖向波形钢板
SPSW-19	4 000	2 000	1.25	2	30	水平波形钢板

ABAQUS 数值模拟加载采用位移加载模式,结果与试验结果对比如图 6—图 8。

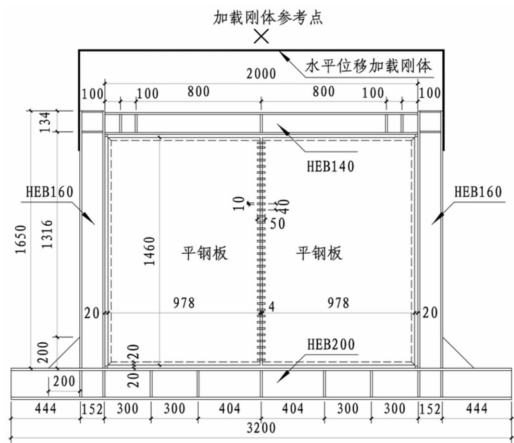


图 3 平钢板剪力墙 (单位: mm)
Fig. 3 Flat steel plate shear wall (unit: mm)

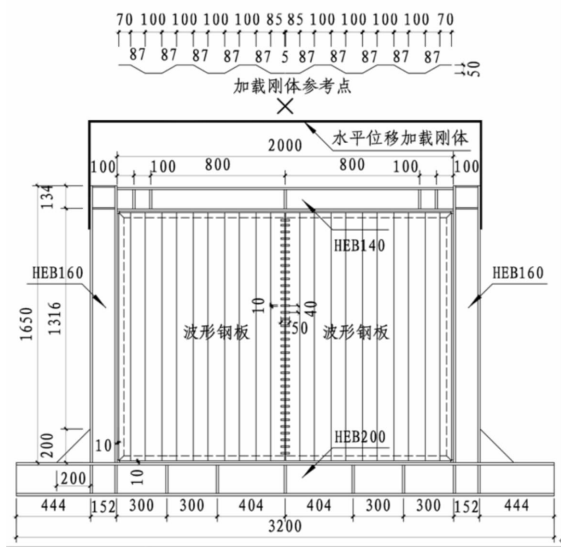


图 4 波纹竖向放置的钢板剪力墙 (单位: mm)
Fig. 4 Vertical corrugated steel plate shear wall (unit: mm)

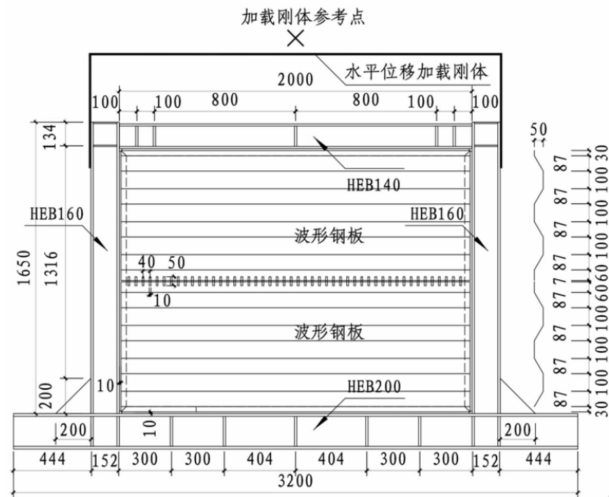


图 5 波纹水平放置的钢板剪力墙 3 (单位: mm)
Fig. 5 Horizontal corrugated steel plate shear wall (unit: mm)

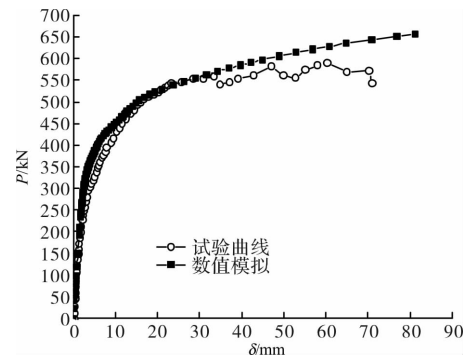


图 6 试件 SPSW-1 数值模拟与试验的荷载—位移曲线对比 ($H/B=0.75$)
Fig. 6 Comparison of load-displacement curve between numerical simulation and experimental results of specimen SPSW-1 ($H/B=0.75$)

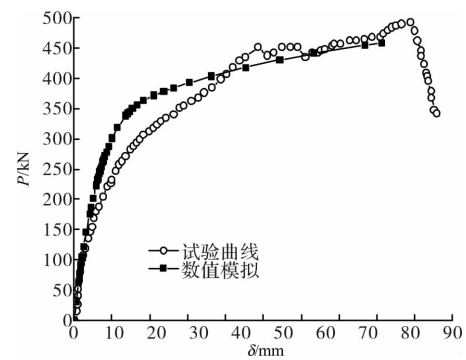


图 7 试件 SPSW-2 的数值模拟与试验的荷载—位移曲线对比 ($H/B=0.75$)
Fig. 7 Comparison of load-displacement curve between numerical simulation and experimental results of specimen SPSW-2 ($H/B=0.75$)

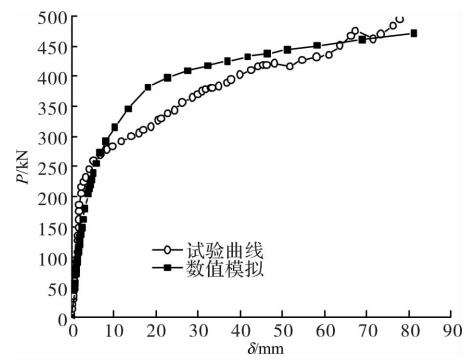


图 8 试件 SPSW-3 的数值模拟与试验的荷载—位移曲线对比 ($H/B=0.75$)
Fig. 8 Comparison of load-displacement curve between numerical simulation and experimental results of specimen SPSW-3 ($H/B=0.75$)

3 不同因素对波形钢板剪力墙的抗侧力影响的有限元分析

为分析内嵌钢板厚度、波角、钢板剪力墙高宽比等因素对钢板剪力墙的抗侧性能的影响, 建

立了19个钢板剪力墙有限元计算模型,各模型参数见表3.取各试件位移加载终点对应的刚体参考点反力作为试件的侧向力进行对比分析如下.

3.1 钢板厚度的影响

图9和图10中不同厚度的内嵌波形钢板竖向放置和水平放置的钢板剪力墙位移加载终点对应的侧向力列于表4中.

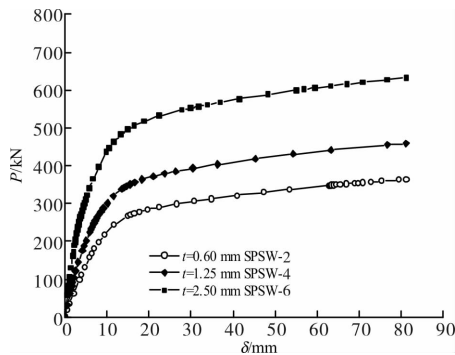


图9 不同厚度竖向波形钢板剪力墙的荷载-位移曲线 ($H/B=0.75$, $\alpha=30^\circ$)

Fig. 9 The load-displacement curve of the vertical corrugated steel plate shear wall with variable steel plate thickness ($H/B=0.75$, $\alpha=30^\circ$)

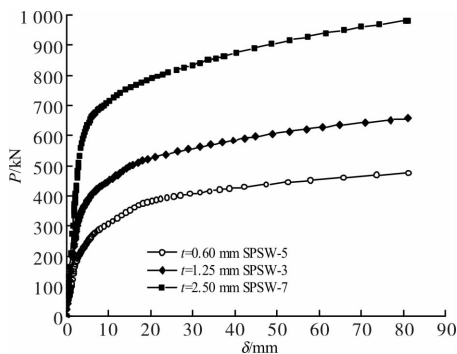


图10 不同厚度水平波形钢板剪力墙的荷载-位移曲线 ($H/B=0.75$, $\alpha=30^\circ$)

Fig. 10 The load-displacement curve of the horizontal corrugated steel plate shear wall with variable steel plate thickness ($H/B=0.75$, $\alpha=30^\circ$)

由表4可见,随波形钢板厚度的增加,波形钢板竖向和水平放置的钢板剪力墙的水平抗侧力性能均随厚度增加而增大,计算表明,波形钢板水平波纹放置比竖向波纹放置时的抗侧承载力要高一些.这主要是由于波形钢板的手风琴效应^[10],即顺波纹方向的拉伸和压缩会使其刚度退化.在水平荷载作用下波形钢板竖向放置时手风琴效应明显,而水平放置的波形钢板这种刚度退化现象可有效地避免,因此承载力更高.随钢板厚度成倍增

加,虽然钢板剪力墙的抗侧承载力并不成倍增大,但仍有可观的提升,因此可以适度增加钢板厚度来提高波形钢板剪力墙的抗侧力性能.

表4 内嵌钢板厚度对波形钢板剪力墙的抗侧力影响

Tab. 4 The influence of steel plate thickness to the lateral load-resisting performance of corrugated SPSW

钢板厚度/mm	试件编号	钢板剪力墙侧向力/kN	
		内嵌竖向 波形钢板	内嵌水平 波形钢板
$t=0.60$	SPSW-4	363.78	367.83
	SPSW-5		
$t=1.25$	SPSW-2	458.67	472.08
	SPSW-3		
$t=2.50$	SPSW-6	631.65	633.97
	SPSW-7		

3.2 高宽比影响

图11和图12中不同高宽比的内嵌波形钢板竖向放置和水平放置的钢板剪力墙位移加载终点对应的侧向力列于表5中.由表5可见,随着剪力墙高宽比的增大,剪力墙由低矮墙向中高墙转变,其破坏形态也由剪切破坏逐渐向弯剪破坏和弯曲破坏模式转变.波形钢板竖向放置和水平放置的钢板剪力墙的抗侧力性能均随高宽比的增大而大大降低.但与厚度影响不同的是:高宽比改变时水平放置波形钢板剪力墙,均比竖向放置的墙承载力大,且高宽比越大水平放置的波形钢板剪力墙抗侧力越大,类似于钢筋混凝土剪力墙中增加了水平分布钢筋,故抗侧力大大提高.

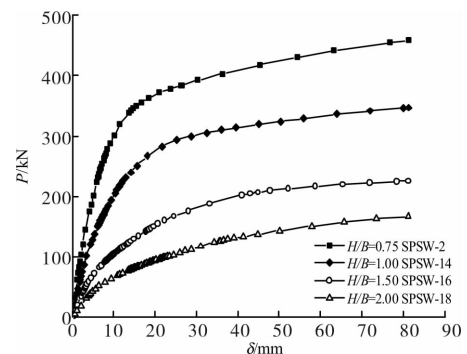


图11 不同高宽比竖向波形钢板剪力墙的荷载-位移曲线 ($t=1.25$ mm, $\alpha=30^\circ$)

Fig. 11 The load-displacement curve of the vertical corrugated steel plate shear wall with variable aspect ratio ($t=1.25$ mm, $\alpha=30^\circ$)

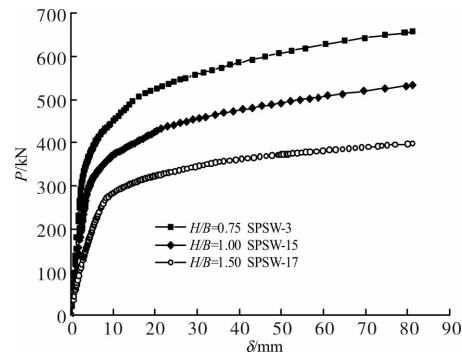


图 12 不同高宽比水平波形钢板剪力墙的荷载-位移曲线 ($t=1.25\text{ mm}$, $\alpha=30^\circ$)

Fig. 12 The load-displacement curve of the horizontal cor-rugated steel plate shear wall with variable aspect ratio ($t=1.25\text{ mm}$, $\alpha=30^\circ$)

表 5 剪力墙高宽比对波形钢板剪力墙抗侧力的影响
Tab. 5 The influence of SPSW's height to width aspect ratio to the lateral resisting behavior of corrugated SPSW

剪力墙高宽比 H/B	试件编号	钢板剪力墙侧向力/kN	
		内嵌竖向波形钢板	内嵌水平波形钢板
$H/B=0.75$	SPSW-2	458.67	471.91
	SPSW-3		
$H/B=1.00$	SPSW-14	347.23	355.11
	SPSW-15		
$H/B=1.50$	SPSW-16	225.74	295.84
	SPSW-17		
$H/B=2.00$	SPSW-18	166.26	251.86
	SPSW-19		

3.3 波角的影响

波角如图 13 所示定义.

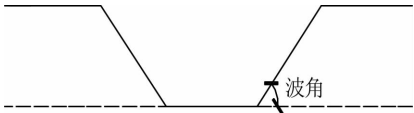


图 13 波角
Fig. 13 Wave angle

图 14 和图 15 中不同波角内嵌波形钢板竖向放置和水平放置的钢板剪力墙位移加载终点对应的侧向力列于表 6 中.

由表 6 可见, 随内嵌波形钢板波角的增大水平抗侧力性能呈下降趋势, 当波角由 30° 变为 45° 时略有下降, 但由 45° 增加至 60° 和 90° 时降低幅值加剧. 究其原因, 可以理解为随着波形角度的增大, 相当于钢板的总截面面积增大, 类似与钢筋混凝土剪力墙中, 水平分布钢筋增多, 故抗剪承载力增大.

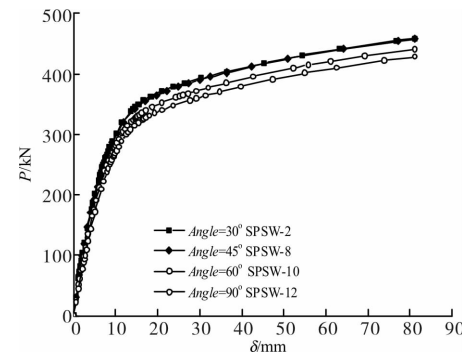


图 14 不同波角竖向波形钢板剪力墙的荷载-位移曲线 ($H/B=0.75$, $t=1.25\text{ mm}$)

Fig. 14 The load-displacement curve of the vertical cor-rugated steel plate shear wall with variable wave angle ($H/B=0.75$, $t=1.25\text{ mm}$)

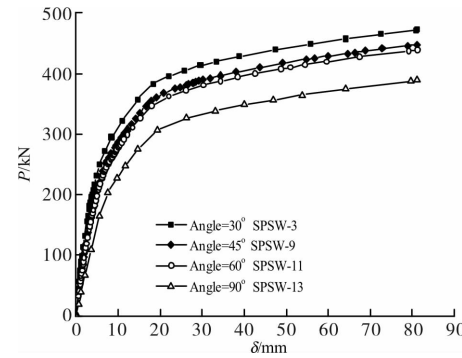


图 15 不同波角水平波形钢板剪力墙的荷载-位移曲线 ($H/B=0.75$, $t=1.25\text{ mm}$)

Fig. 15 The load-displacement curve of the horizontal cor-rugated steel plate shear wall with variable wave angle ($H/B=0.75$, $t=1.25\text{ mm}$)

表 6 内嵌钢板波角对波形钢板剪力墙的抗侧力影响

Tab. 6 The influence of corrugated steel plate wave angle to the lateral load-resisting performance of corrugated SPSW

内嵌钢板波角 $\alpha/^\circ$	试件编号	钢板剪力墙侧向力/kN	
		内嵌竖向波形钢板	内嵌水平波形钢板
30	SPSW-2	458.67	471.91
	SPSW-3		
45	SPSW-8	457.98	447.64
	SPSW-9		
60	SPSW-10	440.74	438.75
	SPSW-11		
90	SPSW-12	428.47	388.81
	SPSW-13		

波角影响与钢板厚度和高宽比不同的是: 水平波纹比竖向波纹对波角的变化更敏感. 可见, 实际设计中可以通过改变波角, 来抑制波形钢板的手风琴效应, 缩小波形钢板竖向放置与水平向放

置的抗侧力差异。

4 讨论

(1) 本文所采用的波形钢板为目前多用于组合楼盖的“Z”字型压型钢板,因尺寸限制需要将两块板拼接成为内嵌波形钢板。且目前单片最大厚度仅有1.5 mm,试验研究表明^[4]:在钢板与边框梁、柱连接处和波形钢板的拼接处易被撕裂破坏,从而导致承载力过早下降。分析表明,若能采用厚度和波角适中的单块波形钢板,就能避免波形钢板连接处的破坏,可获得更好的抗侧承载力。

(2) 用于纯钢结构剪力墙中的波形钢板属于缺陷敏感型材料,由于高厚比、宽厚比较大,板件的承载力随着荷载增加波形曲面易被拉平、扭曲而下降,无法充分发挥其平面外刚度大的几何优势,故其滞回性能并不十分理想^[3,4]。经过分析,建议在波形钢板外侧浇筑混凝土,使波形钢板内嵌于混凝土中,形成波形钢板混凝土组合剪力墙。混凝土使波形钢板平面内和平面外的变形均受到约束,而波形钢板如同链齿与混凝土互相咬合嵌固,可防止二者界面间的粘结失效,保证二者能够有效组合,共同承载变形,不但减轻了手风琴效应的不利影响,且能克服现有纯钢板剪力墙、平钢板与混凝土组合剪力墙容易屈曲的致命缺陷。

5 结论

(1) 波形钢板剪力墙相对平钢板剪力墙,抗侧力略有降低,但其允许破坏的侧向变形能力却增大很多,表现出不易失稳的特征;

(2) 波形钢板剪力墙,当其波纹水平放置时,比竖向放置时的抗侧力性能更好;原因是水平波纹的横肋直接抵抗水平剪力,减小了手风琴效应的不利影响,类似于钢筋混凝土剪力墙中水平分布钢筋,提高了墙体水平抗剪承载力;

(3) 高宽比越大,波形钢板剪力墙的抗侧力性能越差,破坏形态由剪切型向弯曲型转变,且延性提高;

(4) 波形钢板的波角在30°和45°时,波形钢板剪力墙的抗侧力性能比其他波角更好。

参考文献 References

- [1] 张哲,李国强,孙飞飞. 波纹腹板钢梁受弯稳定性研究[J]. 工程力学, 2011, 28(8): 77-82.
ZHANG Zhe, LI Guoqiang, SUN Feifei. Research on flexural stability of the H-beams with corrugated webs [J]. Engineering Mechanics. 2011, 28(8): 77-82.
- [2] 李国强,范昕,孙飞飞,等. 波纹腹板H型钢梁柱铰接节

点静力性能试验研究及有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(4): 107-114.

- LI Guoqiang, FAN Xin, SUN Feifei, et al. Investigation of static behavior of pinned connections of H-beams with corrugated webs [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(4): 107-114.
- [3] HASSANEIN M F, KHAROOB O F. Shear buckling behavior of tapered bridge girders with steel corrugated webs [J]. Engineering Structures, 2014(74): 157-169.
- [4] HASSANEIN M F, KHAROOB O F. Linearly tapered bridge girder panels with steel corrugated webs near intermediate supports of continuous bridges [J]. Thin-Walled Structures, 2015 (88): 119-128.
- [5] Fereshteh Emami, Massood Mofid, Abolhassan Vafai. Experimental study on cyclic behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls [J]. Engineering Structures, 2013, 48: 750-762.
- [6] 郭彦林,王小安,张博浩,等. 波浪腹板钢结构设计理论研究及应用现状[J]. 工业建筑, 2012, 42(7): 1-13.
GUO Yanlin, WANG Xiaolan, ZHANG Bohao, et al. Research and application of wave plate web steel structure design theory [J]. Industrial Building, 2012, 42(7): 1-13.
- [7] 王萌,石永久,王元清. 考虑累积损伤退化的钢材等效本构模型研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(10): 73-83.
WANG Meng, SHI Yongjiu, WANG Yuanqing. Study on equivalent constitutive model of steel with cumulative degradation and damage [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(10): 73-83.
- [8] SHI Y J, WANG M, WANG Y Q. Extremely low cycle fatigue experimental and constitutive model study of structural steel under cyclic loading [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(8): 1185-1197.
- [9] SHI G, WANG M, BAI Y, et al. Experimental and modeling study of high-strength structural steel under cyclic load-ing [J]. Engineering Structures, 2012, 37: 1-13.
- [10] Jae Yuel Oh, Deuck Hang Lee, Kang Su Kim. Accordion effect of prestressed steel beams with corrugated webs [J]. Thin Walled Structures, 2012(57): 49-61.
- [11] 王威,王伟涛,苏三庆,等. 拉结筋对内配钢板混凝土剪力墙组合作用影响的有限元模型分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(1): 26-32.
WANG Wei, WANG Weitao, SU Sanqing, et al. Effect of tie rods on composite action analyzing for R. C. shear wall in-filled with steel plate by the finite element models [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2015, 47(1): 26-32.
- [12] 王威,杨腾,苏三庆,等. 带栓钉的内置钢板混凝土组合剪力墙抗剪性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2014, 46(1): 27-33.
WANG Wei, YANG Teng, SU Sanqing, et al. Research of shear capacity performances of embedded steel plate concrete shear walls with studs [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2014, 46(1): 27-33.

(编辑 沈 波)