

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201904069

波形钢板剪力墙几何初始缺陷的敏感度分析*

王 威, 向照兴, 王 俊, 梁宇建, 仲 凯

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:为研究波形钢板剪力墙的力学性能,进行了竖向和水平波形钢板剪力墙的试验研究,试验结果表明:水平波形钢板剪力墙的承载能力和滞回性能均优于竖向波形钢板剪力墙。试件均为纯钢构件,在制作、运输及安装过程中,易产生局部的几何变形,后续通过ABAQUS有限元分析软件建立10个有限元模型,考察不同初始缺陷大小对波形钢板剪力墙力学性能的影响,并与试验结果进行对比。通过对比结果分析得出以下结论:初始缺陷是波形钢板剪力墙建模分析时不可忽略的因素;随着初始缺陷峰值的增大,竖向和水平波形钢板剪力墙的承载力下降速率均随之增大,当初始缺陷峰值为腹板高度的1/250时,与完善剪力墙模型相比,其承载力分别下降了19%和9.5%;添加同样幅度的初始缺陷,其对竖向波形钢板剪力墙的力学性能影响远大于对水平波形钢板剪力墙力学性能的影响。

关键词: 钢板剪力墙; 波形; 滞回性能; 初始缺陷; 几何变形

中图分类号: TU392.402; TU317.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)05-1037-08

Sensitivity Analysis of Geometric Initial Defects of Corrugated Steel Plate Shear Wall

WANG Wei, XIANG Zhaoxing, WANG Jun, LIANG Yujian, ZHONG Kai

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties of corrugated steel plate shear wall, the experimental study of vertical and horizontal corrugated steel plate shear walls was carried out. The results show that the bearing capacity and hysteretic behavior of horizontal corrugated steel plate shear walls were better than that of vertical walls. The test pieces are all pure steel members, and local geometric deformation is easy to occur during the production, transportation and installation process. Then ten finite element models were established by ABAQUS finite element analysis software to investigate the effects of different initial defects on the mechanical properties of corrugated steel plate shear walls and compared with the experimental results. Through the analysis of the comparison results, the following conclusions are drawn: the initial defect is a factor that cannot be ignored in modeling and analysis of corrugated steel plate shear wall; With the increase of the peak value of the initial defect, the decrease rate of the bearing capacity of the vertical and horizontal wave steel plate shear walls increases. When the initial defect peak value is 1/250 of the web height, the bearing capacity of the shear wall model decreases by 19% and 9.5%, respectively, compared with the perfect shear wall model; The effect on the mechanical properties of vertical corrugated steel plate shear wall is much greater than that of

* 收稿日期:2019-04-23;修回日期:2019-07-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51878548,51578449)、陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目(2018JZ5013)资助

作者简介:王威(1972—),男,教授,博士。主要研究方向为钢与混凝土组合结构。E-mail:wangwgh1972@163.com

horizontal corrugated steel plate shear wall by adding initial defects of the same amplitude.

Keywords: steel plate shear wall; wave form; hysteretic behavior; initial defects; geometry deformation

引言

随着经济和技术水平的不断发展,我国建筑业的发展也如火如荼的进行着,各类不同形式的高层建筑也如雨后春笋般涌现出来。剪力墙作为高层建筑结构中的主要抗侧力构件也随着建筑结构形式和高度的变化得到了较大的发展。20世纪70年代,钢板剪力墙首先在国外发展成一种新型抗侧力构件^[1],由内嵌钢板和约束边缘构件组成。近年来,国内外学者针对钢板剪力墙的抗震性能和受力机理进行了大量试验研究^[2-4]。波形钢板墙是在平板的基础上发展起来的一种新型构件^[5],通过弯折钢板增加面外变形以提高平面外几何刚度,使其自身不易发生屈曲,波形钢板在厚度相当的情况下可获得较大的平面外刚度和屈曲强度。

F.Emami等^[6]对梯形波折钢板剪力墙的滞回性能进行了试验研究。试验结果表明,波折钢板剪力墙的耗能能力、延性比和初始刚度均优于非加劲钢板剪力墙。李靛姣^[7]对波浪形钢板剪力墙的受力性能进行了研究。赵秋红等^[8]对正弦波形的钢板剪力墙进行了抗侧性能分析。郭彦林等^[9]通过研究发现波形板抗剪承载力对初始缺陷较为敏感。目前,针对波形钢板剪力墙的试验研究较少,关于波形钢板剪力墙初始缺陷的分析较为少见。

为了更好地研究波形钢板剪力墙中波形板对初始缺陷的敏感度,本文对竖向和水平波形钢板剪力墙的缩尺模型进行拟静力试验,并在ABAQUS有限元模拟中通过一致缺陷模态法对波形钢板剪力墙添加初始缺陷。通过改变初始缺陷的大小,将模拟结果与试验结果进行对比,研究初始缺陷峰值大小对波形钢板剪力墙承载能力的影响规律,为今后的工程应用提供参考。

1 波形钢板剪力墙的试验研究

1.1 试件设计与材料属性

试验试件以剪力墙层高为3.9 m、长为2.6 m的足尺剪力墙为原型,设计了2个缩尺比例为1:2的单跨单层试件,分别为竖向波形钢板剪力墙(SPSW

-2),水平波形钢板剪力墙(SPSW-3)。试件均由H型钢柱和H型钢梁与内嵌钢板组成,两个试件的外框架完全相同。试件的几何尺寸如图1所示。

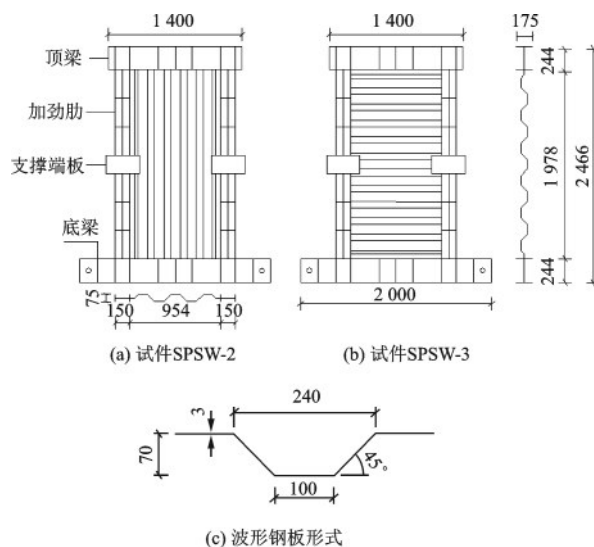


图1 试件构造

Fig.1 Details of specimens

试件所用钢板材均为Q235B级钢,并在西安建筑科技大学力学实验室的CSS-WAW300DL电液伺服万能试验机上进行单向拉伸试验,材性试验得到的钢材基本性能见表1。

表1 钢材主要参数

Table 1 Parameters of steel

部件	E_s /MPa	f_y /MPa	ϵ_y	f_u /MPa	ϵ_u
波形板	2.06×10^5	292.51	0.001 4	394.59	0.079
柱翼缘	2.20×10^5	277.96	0.001 3	399.52	0.083
柱腹板	2.21×10^5	292.65	0.001 3	414.08	0.092
梁翼缘	2.18×10^5	287.37	0.001 3	395.85	0.083
梁腹板	2.19×10^5	290.52	0.001 3	373.77	0.085

1.2 试验加载与试验现象

试验在西安建筑科技大学结构与抗震实验室进行,试验采用拟静力加载方法。试验过程中,为了模拟实际工程中结构所承受的竖向荷载,在顶梁中部通过油压千斤顶对试件施加150 kN恒定的轴向压力。为了防止剪力墙平面外变形过大致使试件发生失稳破坏,在剪力墙端柱两侧加设侧向支

撑,支撑与剪力墙之间通过滚轮接触。水平低周循环往复荷载通过MTS电液伺服加载作动器进行控制。具体试验加载装置如图2所示。

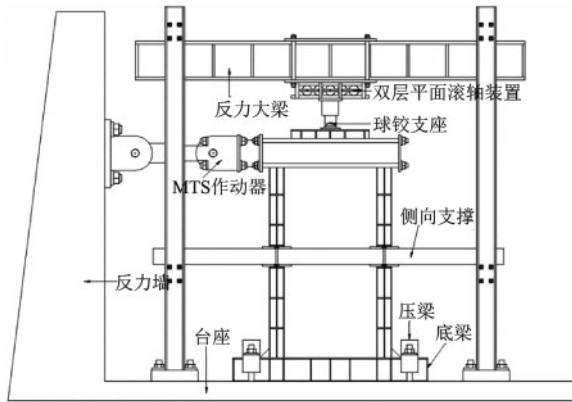


图2 加载装置
Fig.2 Test setup

本文试验在加载过程中按照《建筑抗震试验规程》^[10](JGJ/T 101-2015)中的相关规定制定加载程序,水平往复循环荷载采用力一位移双控制加载制度。

两个试件在施加竖向荷载时均未发生明显变化。试件SPSW-2在推向加载至280 kN时,波形板产生局部屈曲变形,剪力墙的荷载一位移曲线偏离直线,判断试件已进入屈服状态。然后以屈服位移的整数倍来控制加载并循环3圈,加载过程中发现波形板形成斜向拉力带,最终由于试件的变形过大导致试件破坏;试件SPSW-3在推向加载到330 kN时,试件进入屈服,在位移控制加载过程中观察到端柱发生较大的屈曲变形,此时波形钢板并未发生平面外的鼓曲,只是发出明显的挫屈声。最终试件变形过大而无法继续加载。试件破坏形态如图3所示。



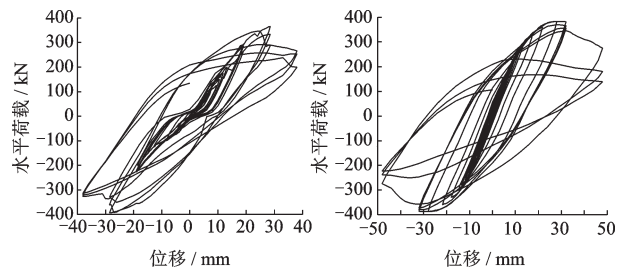
(a) 试件SPSW-2 (b) 试件SPSW-3

图3 试件破坏形态

Fig.3 Failures modes of specimens

1.3 试验结果分析

本文试验得到的滞回曲线如图4所示,由滞回曲线得到的试件特征点见表2。从图4中可以看出试件SPSW-2在加载初期,滞回曲线有一定的“捏缩”现象,这是由于试件在加载初期底梁产生部分滑动导致的。试件屈服前由于竖向波形钢板剪力墙在水平荷载作用下存在拉压效应^[11]其滞回环面积较大。随着加载位移的增大,滞回曲线呈现较好的梭形。试件SPSW-3在整个加载过程中滞回曲线均呈较好的梭形,在加载后期由于试件变形较大致使承载能力发生下降。由表2可以得到在水平荷载作用下试件SPSW-3的承载能力与延性均优于试件SPSW-2。



(a) 试件SPSW-2 (b) 试件SPSW-3

图4 试件滞回曲线示意

Fig.4 Hysteresis curves of specimens

表2 试件特征点及位移延性系数

Table 2 Characteristic points and displacement ductility coefficient of specimens

试件 编号	$P_y/$ kN	$\Delta_y/$ mm	$P_u/$ kN	$P_d/$ kN	$\Delta_d/$ mm	μ
SPSW-2	287.6	20.1	364.1	313.7	35.7	1.78
SPSW-3	327.4	16.1	384.0	326.4	42.1	2.61

2 波形钢板剪力墙有限元模型的建立与初始缺陷的引入

2.1 有限元模型的建立

本文选用ABAQUS有限元分析软件^[12]对波形钢板剪力墙进行非线性数值模拟分析。其中内嵌钢板采用S4R壳单元,其他构件采用C3D8R六面体线性缩减积分实体单元,各构件单元之间统一采用绑定(Tie)约束方式来模拟试验过程中的焊接。模型建立时,钢材采用弹塑性强化等效本构模型,材

料参数取材性试验得到的试验数据。考虑到剪力墙的实际受力形式,并为了防止单一结点加载造成的应力集中,在剪力墙的顶部和端部建立刚体,并为刚体设置相应的参考点,将刚体与相应的参考点进行耦合,然后将竖向和水平荷载施加至对应的参考点上。具体模型如图5所示。

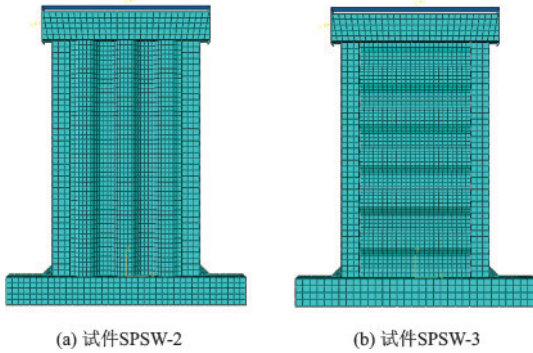


图5 试件对应的有限元模型

Fig.5 Finite element models corresponding to specimens

2.2 初始缺陷的引入

针对钢结构,其几何初始缺陷主要是指构件的初弯曲和初扭转。本文通过屈曲分析对模型施加初始缺陷。根据试验开始前对波形钢板剪力墙初始屈曲状态的观察,选取屈曲分析得到的多阶模态的叠加作为模型的初始几何形态。本文中模态的具体选择如图6所示。考虑初始缺陷大小对试件承

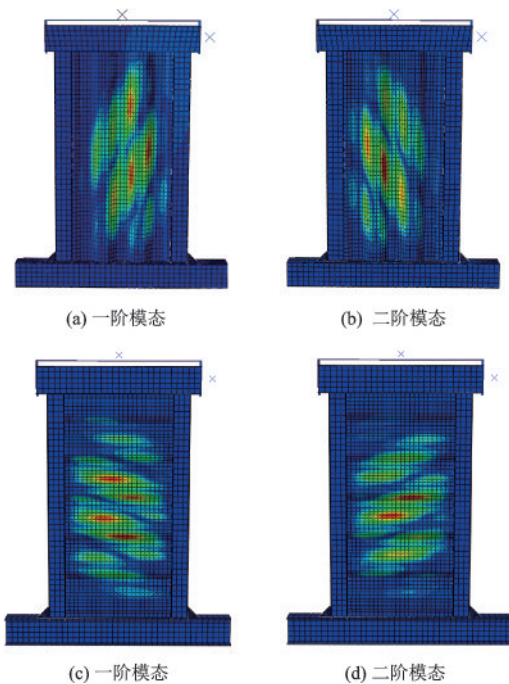


图6 有限元模型所选取的屈曲模态

Fig.6 Buckling modes selected by finite element models

载力的影响^[13],建立初始缺陷大小从 $h_w/1\ 000$ 增大到 $h_w/250$ 的模型进行对比分析,研究不同波形对初始缺陷的敏感程度以及不同初始缺陷大小对波形钢板剪力墙承载能力的影响规律。本文建立的模型参数见表3。

表3 模型参数

Table 3 Parameters of models		
模型编号	波形腹板特征	初始缺陷大小
Model-1	竖向波纹	0
Model-2	水平波纹	0
Model-3	竖向波纹	$h_w/1\ 000$
Model-4	水平波纹	$h_w/1\ 000$
Model-5	竖向波纹	$h_w/750$
Model-6	水平波纹	$h_w/750$
Model-7	竖向波纹	$h_w/500$
Model-8	水平波纹	$h_w/500$
Model-9	竖向波纹	$h_w/250$
Model-10	水平波纹	$h_w/250$

注:其中 h_w 表示的是波形腹板的高度

3 波形钢板剪力墙不同初始缺陷下的有限元分析

3.1 竖向波形钢板剪力墙初始缺陷分析

本文建立了5个初始缺陷大小不同的竖向波形钢板剪力墙,其初始缺陷大小见表3。为了保证有限元模拟结果与试验结果的一致性,在有限元分析过程中采用与试验相同的加载制度。将试验得到的滞回曲线与有限元模拟得到的滞回曲线进行对比,其对比结果如图7所示。

从图7可以看出在加载初期,模拟的初始刚度和滞回曲线与试验结果存在差异,这是由于有限元模拟的是试件的理想情况,而试件材料强度的离散性、焊接应力、试件在安装固定时的误差都可能对试验结果产生一定的影响,但在试件进入塑形阶段,其模拟结果与试验结果吻合较好。根据图7所示的滞回曲线,得到各个模型的峰值荷载并与试验结果进行对比,具体结果见表4。

分析表4中的数据可以得到:由Model-1和其他模型的对比结果可知,带初始缺陷的模拟更接近试验结果;由Model-3~Model-9所得的结果可以看出,初始缺陷从 $h_w/1\ 000$ 增大到 $h_w/750$ 时,所得的荷载相差8.3 kN,初始缺陷从 $h_w/750$ 增大到 $h_w/500$

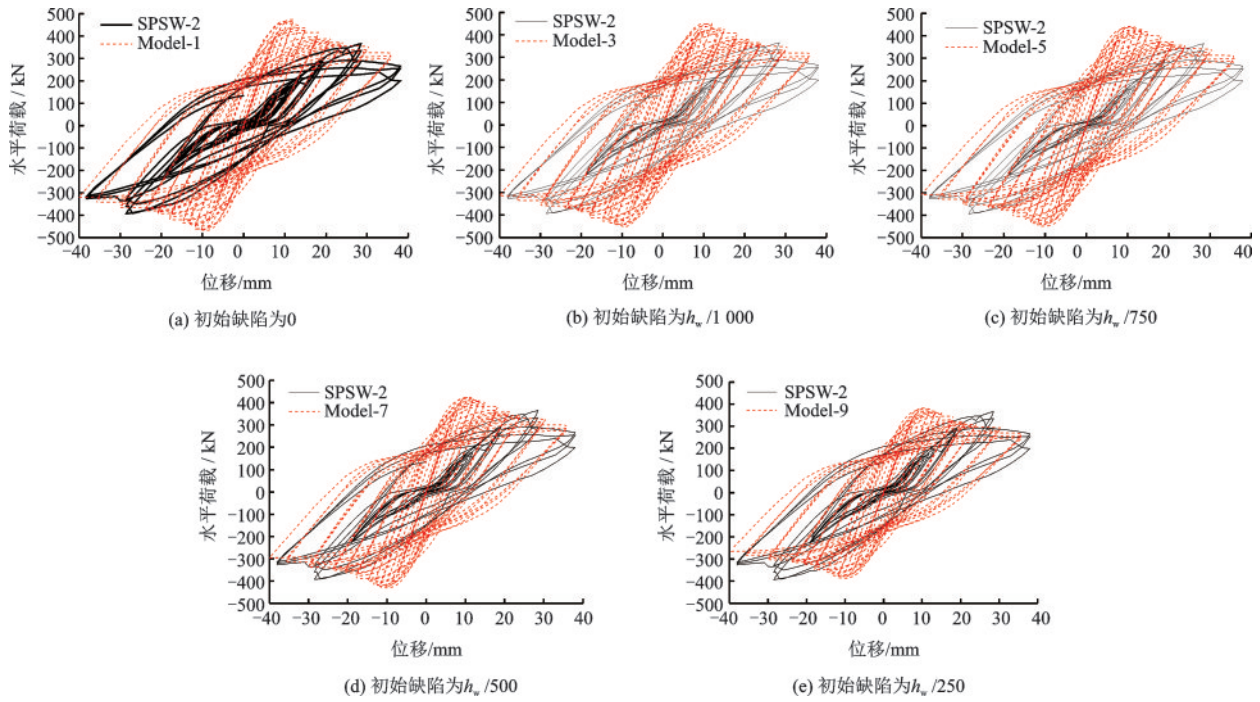


图7 试验与模拟滞回曲线对比

Fig.7 Comparison of hysteresis curves between specimens and models

表4 竖向波形钢板剪力墙峰值荷载的有限元计算结果和试验结果对比

Table 4 Comparison between finite element calculation results and experimental results of the peak load of vertical waveform steel plate shear wall

试件编号	$P_{u,t}/\text{kN}$	P_u/kN	$P_{u,t}/P_u$
Model-1	474.8	364.1	1.304
Model-3	452.5	364.1	1.243
Model-5	444.2	364.1	1.220
Model-7	425.4	364.1	1.168
Model-9	384.1	364.1	1.055

注： $P_{u,t}$ 为峰值荷载的有限元分析结果， P_u 为峰值荷载的试验结果，取推拉平均值

时荷载相差 18.3 kN，初始缺陷从 $h_w/500$ 增大到 $h_w/250$ 时荷载相差 41.3 kN，且当初始缺陷峰值为 $h_w/250$ 时，其承载能力较完善剪力墙偏低 19%。这证明竖向波形钢板剪力墙对于初始缺陷的敏感度较高，且随着初始缺陷的增大，峰值荷载差值也随之增大；当初始缺陷的大小为 $h_w/250$ 时，其有限元计算结果与试验结果的误差在 5.5%，可以较好的模拟试验工况。

3.2 水平波形钢板剪力墙初始缺陷分析

本文中的水平波形钢板剪力墙与竖向钢板剪力墙一样，建立了 5 个初始缺陷大小不同的模型。

试验与模拟滞回曲线的对比如图 8 所示。

从图 8 可以看出，有限元分析得到的滞回曲线与试验结果的吻合程度较好。根据图 8 中的滞回曲线，得到水平波形钢板剪力墙的峰值荷载并与试验结果进行对比，具体见表 5。

表5 水平波形钢板剪力墙峰值荷载的有限元计算结果和试验结果对比

Table 5 Comparison between finite element calculation results and Test results of Peak load of horizontal waveform steel plate shear wall

试件编号	$P_{u,t}/\text{kN}$	P_u/kN	$P_{u,t}/P_u$
Model-2	410.5	384.0	1.069
Model-4	407.5	384.0	1.061
Model-6	400.4	384.0	1.043
Model-8	388.6	384.0	1.012
Model-10	371.2	384.0	0.967

注： $P_{u,t}$ 为峰值荷载的有限元分析结果， P_u 为峰值荷载的试验结果，取推拉平均值

分析表 5 中的数据可以得到：与竖向波形钢板剪力墙相同，初始缺陷与模拟结果的准确性息息相关，且随着初始缺陷的增大，峰值荷载的差值也随之增大，其峰值荷载具体相差分别为 7.1、11.8、17.4 kN；当初始缺陷的大小为 $h_w/250$ 时，比不加初始缺陷的模型相比承载力下降了 9.5%，这时有限元计算

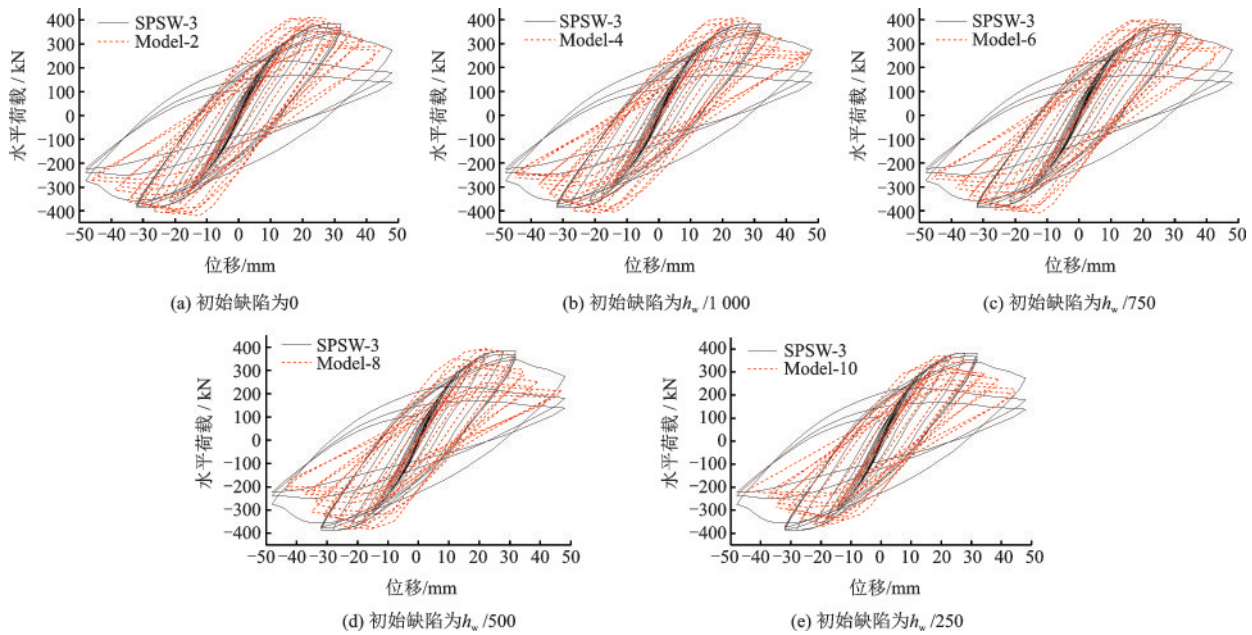


图8 试验与模拟滞回曲线对比

Fig.8 Comparison of hysteresis curves between specimens and models

结果小于试验结果,这是由于在模拟时初始缺陷添加的过大。对于水平波形钢板剪力墙,其初始缺陷的大小为 $h_w/500$ 时,有限元计算结果与试验结果的吻合较好,误差在 1.2%;对比竖向波形钢板剪力墙与水平波形钢板剪力墙的有限元计算结果可以发现竖向波形钢板剪力墙对初始缺陷的敏感度比水平波形钢板剪力墙高,这是由于波形腹板在竖向波形钢板剪力墙中发挥的作用更大,既能抗弯又能抗剪;而水平波形钢板剪力墙中的腹板只能抗剪。

4 波形钢板剪力墙受力机理分析

通过前文对初始缺陷的研究,发现竖向和水平波形钢板剪力墙均随着初始缺陷的增大其承载力下降速率增大,且竖向波形钢板剪力墙的下落速率远大于水平波形钢板剪力墙。为进一步验证模拟的可靠性,选取两个与试验结果吻合较好的波形钢板剪力墙模型进行受力机理分析,即对 Model-9 与 Model-8 进行具体的受力分析。

4.1 波形钢板剪力墙模型在竖向荷载下的响应

通过 ABAQUS 有限元分析软件,调出竖向荷载作用下,竖向波形钢板剪力墙以及水平波形钢板剪力墙的 Mises 应力及面外变形图,其能够直观地

反应波形钢板剪力墙在竖向荷载作用下的响应。图 9 可知,在竖向荷载作用下,对于竖向波形钢板剪力墙由于波形钢板的面外刚度较大,竖向波形腹板能够有效的承担部分竖向荷载,所以竖向波形钢板剪力墙的平面外变形较小,腹板和端柱均参与受力。对于水平波形钢板剪力墙由于内嵌水平波形钢板的面外刚度可忽略不计,其竖向荷载基本由端柱承担,波形腹板的面外变形较大。具体如图 9 所示。

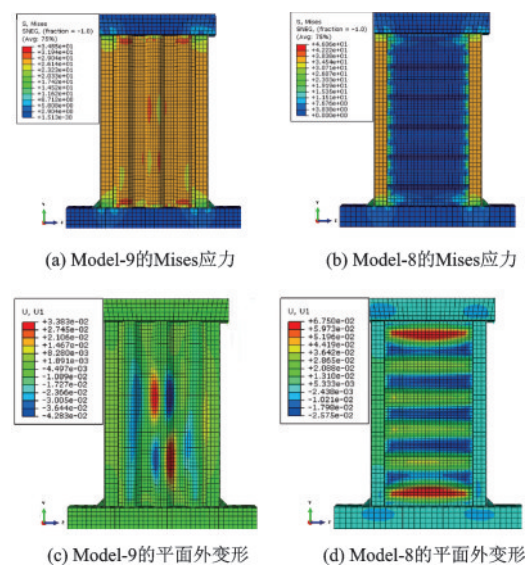
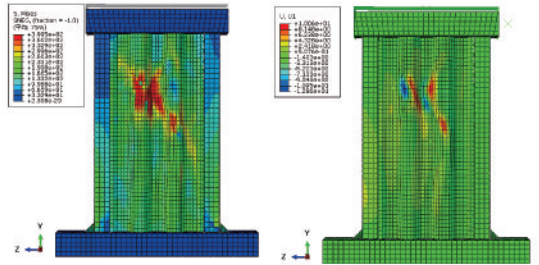


图9 钢板剪力墙模型在竖向荷载作用下的应力及面外变形

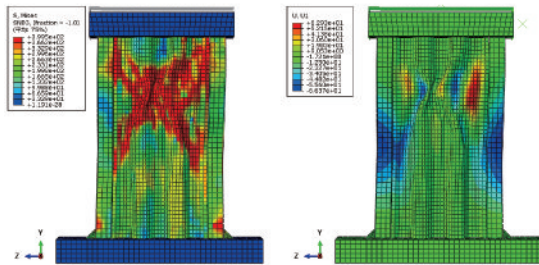
Fig.9 Stress and out-of-plane deformation of steel plate shear wall models under vertical load

4.2 波形钢板剪力墙模型在水平荷载下的响应

运用ABAQUS有限元分析软件得到竖向和水平波形钢板剪力墙加载过程中不同状态时的应力和面外变形图,并与试验得到的结果进行对比,具体如图10和图11所示。



(a) 屈服时Model-9的应力和面外变形

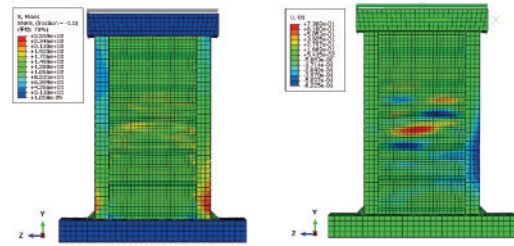


(b) 破坏时Model-9的应力和面外变形

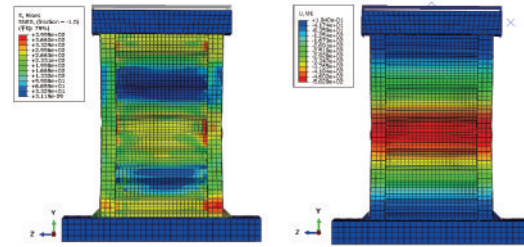
图10 模型Model-9在水平荷载作用下的应力和面外变形
Fig.10 Stress and out-of-plane deformation of Model-9 under horizontal load

由图10可以看出:竖向波形钢板剪力墙在屈服状态时,内嵌波形钢板首先从中间发生局部屈服,中部偏上区域应力较大,应力分布向四周依次递减,两侧的端柱变形较小,如图10(a)所示。这与试验观察到试件屈服时,仅在腹板发生局部屈曲变形相吻合;在破坏状态时,内嵌波形钢板中部偏上部位形成了斜向的拉压应力带,端柱的平面外变形较大,如图10(b)所示。这与试验观察到试件破坏时,波形腹板产生斜向拉力带,端柱的面外变形较大相吻合。模拟的变形集中于中上部,而试验结果偏中下部,这是由于试验加载前试件中下部的初始变形较大,而通过一致模态法添加的初始变形在应力集中处大小相同,故会导致变形位置有所差异。但整个试件的破坏形态和机理保持一致。

图11为水平波形钢板剪力墙在水平加载过程中不同状态下的应力和面外变形图。在水平波形钢板剪力墙屈服时,波形腹板的应力较小,但会出现面外的鼓曲现象,端柱存在局部的屈曲变形,如



(a) 屈服时Model-8的应力和面外变形



(b) 破坏时Model-8的应力和面外变形

图11 模型Model-8在水平荷载作用下的应力和面外变形
Fig.11 Stress and out-of-plane deformation of Model-8 under horizontal load

图11(a)所示。当水平波形钢板剪力墙破坏时,由于内嵌波形钢板水平放置时,其面外刚度可忽略不计,竖向荷载仅由端柱承担,致使端柱的柱底和柱的中部应力较大,并产生较大的面外变形,波形腹板中的应力较小。如图11(b)所示。这与试验得到的破坏形态保持一致。

5 结论

(1)通过试验研究发现,水平波形钢板剪力墙的承载能力和滞回性能均优于竖向波形钢板剪力墙。

(2)对于波形钢板剪力墙在有限元分析时,若不考虑初始缺陷,其峰值承载力的模拟计算值与试验值误差较大,所以初始缺陷的影响不可忽略。

(3)在本文中,竖向和水平波形钢板剪力墙的承载力下降速率随初始缺陷的增大而增大,当初始缺陷的大小为 $h_w/250$ 时,与不加初始缺陷的模型相比其承载力分别下降了19%和9.5%。

(4)竖向波形钢板剪力墙对初始缺陷的敏感度高于水平波形钢板剪力墙。

参考文献:

[1] Wang W, Wang Y, Lu Z. Experimental study on seismic behavior of steel plate reinforced concrete compos-

- ite shear wall[J]. Engineering Structures, 2018, 160(4):281-292.
- [2] 王威, 张龙旭, 苏三庆, 等. 波纹钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(10):75-84.
Wang W, Zhang L X, Su S Q, et al. Experimental research on seismic behavior of corrugated steel plate shear wall[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(10):75-84. (in Chinese)
- [3] 王萌, 杨维国, 钱凤霞. 钢板剪力墙水平荷载作用下简化滞回理论模型研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(10):59-67.
Wang M, Yang W G, Qian F X. Simplified hysteretic theoretical model of steel plate shear wall structure under horizontal load[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(10):59-67. (in Chinese)
- [4] 孙军浩. 波纹钢板剪力墙的抗侧及抗震性能研究[D]. 天津:天津大学, 2016.
Sun J H. Research on lateral performance and seismic behavior of corrugated steel plate shear walls[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016. (in Chinese)
- [5] 刘佳, 金双双, 欧进萍. 防屈曲开斜槽耗能钢板剪力墙的滞回性能分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(3):296-301.
Liu J, Jin Sh Sh, Ou J P. Hysteretic behavior of buckling-restraining slotted steel plate shear wall[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(3):296-301. (in Chinese)
- [6] Emami F, Mofid M. On the hysteretic behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls[J]. Structural Design of Tall & Special Buildings, 2014, 23(2):94-104.
- [7] 李靓姣. 波浪形钢板墙的受力性能及设计方法研究[D]. 北京:清华大学, 2012.
Li J J. Research on behaviour and design methods of sinusoidal steel plate wall[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [8] 赵秋红, 李楠, 孙军浩. 波纹钢板剪力墙结构的抗侧性能分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2016, 49(增1):152-160.
Zhao Q H, Li N, Sun J H. Analysis on lateral performance of sinusoidally corrugated steel plate shear walls[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2016, 49(Sup 1):152-160. (in Chinese)
- [9] 郭彦林, 童精中, 姜子钦. 波形腹板钢结构设计原理与应用[M]. 北京:科学出版社, 2015.
Gou Y L, Tong J Zh, Jiang Z Q. Design fundamentals and application of corrugated-web steel structures[M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese)
- [10] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震试验规程 JGJ/T 101-2015[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2015.
China Academy of Building Research. Specification for seismic test of buildings: JGJ/T 101-2015[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [11] Oh J Y, Lee D H, Kang S K. Accordion effect of prestressed steel beams with corrugated webs[J]. Thin-Walled Structures, 2012, 57(1):49-61.
- [12] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS有限元分析实例详解[M]. 北京:北京机械工业出版社, 2006.
Shi Y P, Zhou Y R. Detailed Explanation of ABAQUS finite element analysis Example[M]. Beijing: Beijing Machinery Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [13] 郭彦林, 张庆林, 王小安. 波浪腹板工形构件抗剪承载力设计理论及试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(10):45-52.
Guo Y L, Zhang Q L, Wang X A. A theoretical and experimental study of the shear strength of H-Shaped members with sinusoidal corrugated webs[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(10):45-52. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)