

波形腹板正对称阻尼器的抗剪承载力研究

王威[†], 徐善文, 苏三庆, 罗麒锐, 王冰洁, 孙壮壮

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:为研究波形腹板正对称阻尼器的滞回性能和抗侧性能,设计两个阻尼器试件分别为横向波形腹板阻尼器和竖向波形腹板阻尼器,并进行拟静力试验.试验结果表明:波形腹板阻尼器具有良好的滞回性能和耗能能力,竖向波形腹板阻尼器的承载力明显高于横向波形腹板阻尼器;阻尼器的耗能主要是依靠波形腹板的剪切和屈曲,翼缘板对阻尼器的承载力贡献相对较小.借助 ABAQUS 有限元软件仿真与试验对比验证,仿真结果与试验结果吻合度较高.以竖向波形腹板阻尼器为基础,建立 22 个有限元模型,变化参数为波形腹板的高宽比、厚度和波幅.结果表明:增大波形板的高宽比,阻尼器承载力大幅度下降;增加波形板的厚度,阻尼器承载力大幅度上升;增加波形板的波幅,对阻尼器的承载力有小幅提高.最后,结合有限元算例,推导、拟合得出了波形腹板阻尼器的抗剪承载力公式.

关键词:波形;阻尼器;性能试验;参数分析;抗剪承载力

中图分类号: TU375; TU352.1

文献标志码: A

Research on Shear Bearing Capacity of Corrugated Web Positive Symmetry Damper

WANG Wei[†], XU Shanwen, SU Sanqing, LUO Qirui, WANG Bingjie, SUN Zhuangzhuang

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

Abstract: In order to study the hysteretic performance and lateral resistance of positive symmetrical damper with corrugated web, two damper specimens, horizontal corrugated web damper and vertical corrugated web damper, were designed, and their quasi-static tests were carried out. The test results show that the designed corrugated web dampers have excellent hysteretic performance and energy dissipation capacity, and the bearing capacity of vertical corrugated web damper is obviously higher than the horizontal corrugated web damper. Meanwhile, the energy dissipation of the damper mainly depends on the shear and buckling of the corrugated web, whereas the contribution of the flange plate on the bearing capacity of the damper is relatively small. The simulation and experimental verification by ABAQUS finite element software show that the simulation results are in good agreement with the experimental results. Based on the vertical corrugated web damper, a total of 22 finite element models are established, with variable parameters including the aspect ratio, thickness and amplitude of the corrugated web. The results show that with the increase of the aspect ratio, the shear bearing capacity decreases greatly; with the increase of the thickness, the shear bearing capacity increases sharply; with the increase of the amplitude, the shear bearing capacity increases slightly. Finally, com-

* 收稿日期:2020-9-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878548, 51578449), National Natural Science Foundation of China(51878548, 51578449); 陕西省自然科学基金研究计划重点项目(2018JZ5013), The Key Project of Nature Science Foundation Program of Shaanxi Province(2018JZ5013)

作者简介:王威(1972—),男,陕西岐山人,西安建筑科技大学教授,博士生导师

[†] 通信联系人, E-mail: wangwgh1972@163.com

bined with the finite element models, the shear bearing capacity formula of the corrugated web damper is derived.

Key words: corrugated; damper; performance test; parameter analysis; shear bearing capacity

阻尼器是利用阻尼特性来减缓机械振动及消耗动能的装置,常用于机械工程方面^[1-2]。实际工程运用中,一些摩天大楼基于抗风、抗震的需要也会使用阻尼器,如台北 101 大厦,上海中心大厦等^[3]。金属阻尼器由于其滞回性能优异、结构简单、加工方便,同时阻尼器利用自身金属的弹塑性变形消耗大量的外界能量,保证建筑结构的主体安全,因而被广泛用于高层及超高层建筑中^[4]。

金属阻尼器按照其受力特点可分为:扭转屈服型、剪切屈服型、拉压屈服型、弯曲屈服型等。目前常见的金属阻尼器类型有:X 形板阻尼器^[5-6]、三角形钢板阻尼器^[7]、环形阻尼器^[8]、U 形钢阻尼器^[9]等。对于剪切型金属阻尼器,国内外学者做了大量研究。2008 年,陈之毅等^[10]对剪切板阻尼器的滞回性能进行了试验研究,并给出了相关参数的合理取值范围。2011 年,张蓬勃等^[11]为了研究以铝板作为摩擦材料的剪切式中间柱型摩擦阻尼器的力学性能和滞回曲线特征,对阻尼器进行不同方式的载荷试验,并建立力学分析模型。2016 年,黄镇等^[12]针对目前常规剪切钢板阻尼器防屈曲构造措施的不足,提出了改进型防屈曲构造方案,并推导了理论公式。2018 年,马宁等^[13]为了研究剪切型防屈曲钢板阻尼器的滞回性能,设计了 3 个试件并对其进行了拟静力试验,试验结果表明该阻尼器与传统钢板阻尼器相比,具有较强的耗能能力和良好的滞回性能。2019 年,林煜等^[14]设计制作了一种双拼工字型钢板阻尼器,研究结果表明双拼工字型钢板阻尼器能够有效限制耗能腹板的平面外变形,耗能能力稳定。

金属阻尼器在实际工程运用中较为广泛^[15-16],例如,拉压屈服型阻尼器适合布置在剪力墙墙趾部位,而剪切型阻尼器则适合布置在人字形支撑框架结构中^[17-18]。剪切型阻尼器可采用人字形支撑的形式布置在框架梁的跨中部位。阻尼器在水平荷载下剪切耗能,将地震能量及损伤破坏集中于阻尼器上,达到保护结构主体安全的目的。

基于上述文献研究,本文设计了一种新型的波形腹板正对称阻尼器,阻尼器的耗能腹板采用平钢板弯折成波形钢板。波形腹板阻尼器克服了传统的

剪切型钢板阻尼器初始刚度过大,变形能力较差的缺点(传统的阻尼器钢板在受力作用时,容易发生局部屈曲,出现应力集中的现象)。本文在试验的基础上,分析了波形腹板横向放置与竖向放置对阻尼器承载力的影响,并利用 ABAQUS 有限元软件分析波形腹板的高宽比、波形钢板厚度、波幅等对阻尼器抗侧性能的影响,推导、拟合得出波形腹板正对称阻尼器的抗剪承载力公式,为后续研究阻尼器在人字形支撑框架结构中的应用提供参考。

1 试验设计

1.1 阻尼器试件的设计

基于本课题组之前的研究^[19-20],试验设计了 2 个阻尼器试件,分别为横向波形腹板阻尼器(CSPD-H)与竖向波形腹板阻尼器(CSPD-V),波形腹板为正对称布置。试件 CSPD-H 与 CSPD-V 的尺寸相同,端板、腹板及翼缘板的材质均为 Q235 钢材;波形板的厚度均为 6 mm,上下端板的厚度为 16 mm,波形腹板高(H)为 264.8 mm,宽(L)为 264.8 mm,翼缘板高(h)为 264.8 mm,波形板的波角均为 45° 。试件的波形腹板与翼缘板之间相互独立,预留 10 mm 的间距,防止腹板变形时与翼缘板相互挤压,能更好地发挥波形腹板的耗能能力;波形腹板、翼缘板与上、下端板之间采用二氧化碳保护焊连接。试件的基本尺寸及构造如图 1 所示。

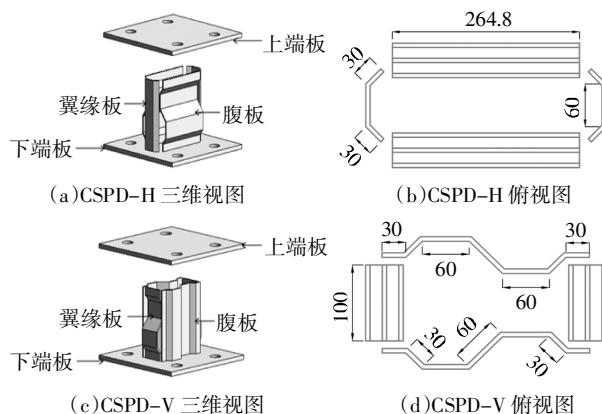


图 1 试件尺寸及构造示意图(单位:mm)

Fig.1 Schematic diagram of specimen size and construction(unit:mm)

1.2 材性试验

试验中钢材的本构模型参数采用静力拉伸试验的实测值,拉伸试件按照《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》(GB/T 2975—1998)^[21]的要求从阻尼器母材中切取,如图 2 所示.本次试验共选取 3 个材料标准试件进行静力拉伸试验,如图 3 所示.所测得的数据取平均值,材料的力学性能见表 1.

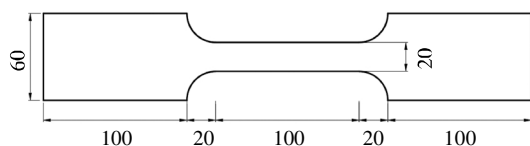
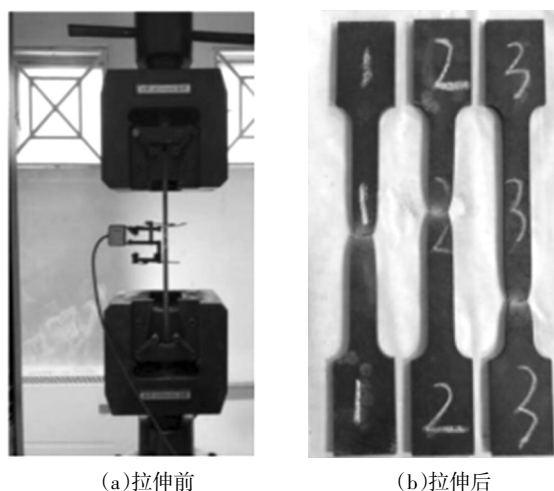


图 2 材性试件尺寸(单位:mm)

Fig.2 Dimensions of material property specimens (unit:mm)



(a)拉伸前

(b)拉伸后

图 3 材性试验

Fig.3 Material property test

表 1 材料的力学性能

Tab.1 Mechanical properties of materials

材料	f_y/MPa	f_u/MPa	ε_u	E_s	ν
Q235	273	399	0.081	2.0×10^5	0.3

注: f_y 为屈服强度; f_u 为极限强度; ε_u 为极限拉伸应变; E_s 为弹性模量; ν 为泊松比.

1.3 试验加载

1.3.1 加载装置

本试验采用拟静力的试验方法,低周循环往复加载,以此来研究阻尼器的力学性能和滞回性能.加载按照 JGJ/T 101—2015《建筑抗震试验规程》^[22]中的要求,采用荷载-位移双控制法.试验在西安建筑科技大学结构与抗震实验室进行,本试验的循环往复荷载由 MTS 电液伺服试验机施加.MTS 作动器一侧

为西侧,阻尼器试件一侧为东侧.为了方便试验现象的描述,规定 MTS 作动器的推力方向为正,拉力方向为负.加载装置如图 4 所示.

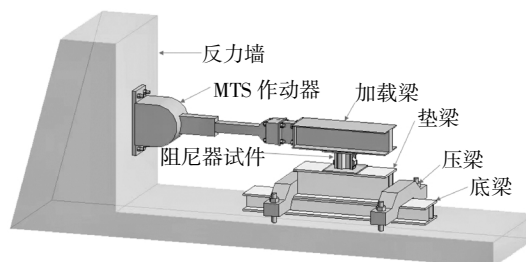


图 4 试验加载示意图

Fig.4 Schematic diagram of test loading

1.3.2 加载制度

试验的加载按照荷载-位移双控制法,先采用荷载控制,后采用位移控制.在阻尼器进入屈服阶段前,采用荷载来控制,定义 10 kN 的力为一级,加载一次;阻尼器屈服以后采用位移来控制,定义屈服位移为 Δ_y ,后面以 $0.5 \Delta_y$ 逐级增加,即 Δ_y 、 $1.5 \Delta_y$ 、 $2 \Delta_y$ 、 $2.5 \Delta_y$ 、 $3 \Delta_y$ 等进行,每一级的位移施加三次,当试件无法继续承载,或者荷载降低到峰值的 85% 以下时,加载停止.本试验采用常规的低周往复加载方式,并未对阻尼器的低周疲劳性能进行研究^[23],试验的加载制度如图 5 所示.

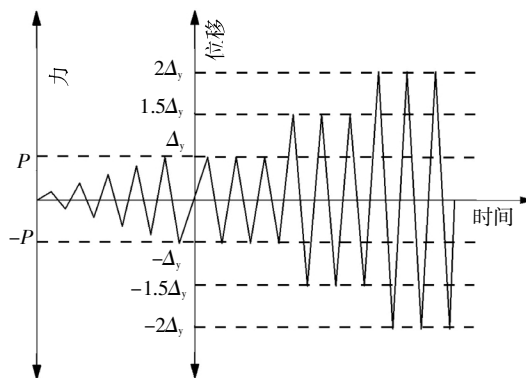


图 5 加载制度示意图

Fig.5 Schematic diagram of loading system

1.4 试验现象

1.4.1 试件 CSPD-H

在试件的加载初期,由于试件 CSPD-H 处于弹性阶段,现象不明显.当试件加载至 +5 mm 时,南北两侧的腹板均向外轻微鼓曲;当试件加载至 -5 mm 时,南北两侧腹板波峰向外鼓曲,西侧翼缘板出现微小变形;当试件加载至 +7 mm 时,南北两侧腹板向外鼓曲加重;当试件加载至 +12 mm 时,腹板波谷中部

产生变形;当试件加载至+14 mm 时,北侧腹板上部出现较大变形;当试件加载至-14 mm 时,南侧及北侧腹板底部出现了约 10 mm 的裂缝;当试件加载至+15 mm 时,西侧翼缘板顶端产生了局部变形;当试件加载至+18 mm 时,南侧腹板上部出现了约 5 mm 的裂缝;当试件加载至-18 mm 时,北侧腹板下部裂缝继续扩展;当试件加载至+20 mm 时,试件耗能腹板变形严重,承载力低于其峰值的 85%,阻尼器不适合继续加载,加载停止.如图 6 所示,试件 CSPD-H 的波形腹板变形严重,图 7 为试件 CSPD-H 最终破坏示意图.

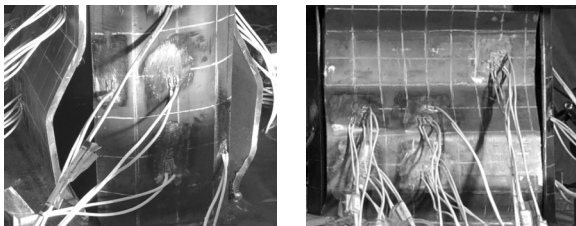


图 6 试件 CSPD-H 腹板变形
Fig.6 Web deformation of CSPD-H specimen

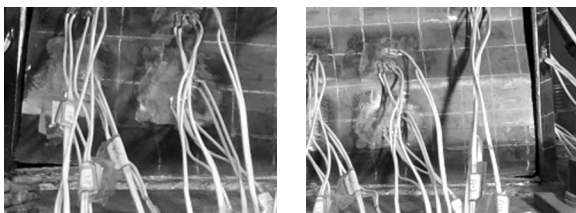


图 7 试件 CSPD-H 破坏图
Fig.7 Failure diagram of CSPD-H specimen

1.4.2 试件 CSPD-V

在试验加载初期,试件 CSPD-V 同样处于弹性阶段,现象不明显.当试件加载至+6 mm 时,观察发现南侧腹板中部向外微微鼓曲;当试件加载至-8 mm 时,南侧腹板的西侧平波段产生了局部变形现象.当试件加载至+10 mm 时,北侧腹板的西侧产生局部变形;当试件加载至-10 mm 时,南侧腹板和北侧腹板的波峰均同时向外鼓曲;当试件加载至+12 mm 时,南侧腹板和北侧腹板均产生了较大变形,可以观察到两侧翼缘板都向内侧倾斜的现象;当试件加载至+14 mm 时,北侧腹板的底部产生了约 15 mm 的裂缝;当试件加载至+16 mm 时,北部腹板底端裂缝继续增长,承载力低于其峰值的 85%,阻尼器不适合继续加载,加载停止.图 8 为试件 CSPD-V 的腹板变形图,图 9 为试件 CSPD-V 的最终破坏图.

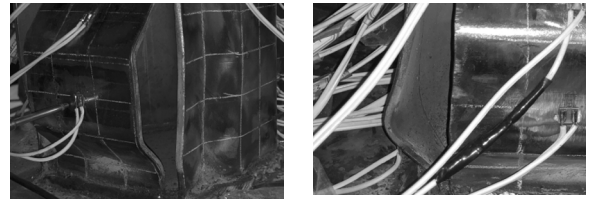


图 8 试件 CSPD-V 腹板变形
Fig.8 Web deformation of CSPD-V specimen

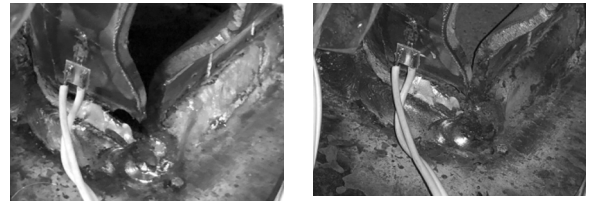


图 9 试件 CSPD-V 破坏图
Fig.9 Failure diagram of CSPD-V specimen

1.5 试验结果

试验的滞回曲线与骨架曲线如图 10 所示.由图 10(a)可以看出,试件 CSPD-H 的滞回曲线呈梭形,试件 CSPD-V 的滞回曲线呈弓形.在试件加载初期,阻尼器试件尚未屈服,试件滞回曲线的斜率变化不明显,随着试验的进行,腹板开始产生较大的塑性变形,腹板开始大量耗能,试件滞回曲线的斜率缓慢增大.试件 CSPD-H、CSPD-V 滞回曲线均相对饱满,均表现出良好的耗能能力.

由图 10(b)可以看出,试件 CSPD-H 与 CSPD-V 的骨架曲线均呈 S 形.试件加载初期,CSPD-V 的骨架曲线斜率大于试件 CSPD-H 的骨架曲线斜率,说明试件 CSPD-V 的初始刚度较大;试件加载后期,试件 CSPD-H 的骨架曲线下降不明显,而试件 CSPD-V 骨架曲线有下降趋势.试件 CSPD-H 的峰值承载力平均值为 107.33 kN,试件 CSPD-V 的峰值承载力平均值为 208.88 kN,两者相差 48.6%,试件 CSPD-V 的承载力明显高于 CSPD-H.

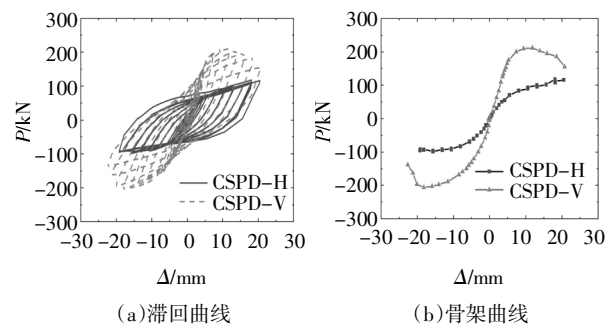


图 10 试验滞回曲线与骨架曲线
Fig.10 Test hysteresis curve and skeleton curve

1.6 耗能机理分析

试件 CSPD-H 和 CSPD-V 的波形腹板与阻尼器的上下端板之间均为焊接, 试件 CSPD-H 是沿直线焊接, 对波形腹板的约束较弱; 试件 CSPD-V 是沿波纹边焊接, 焊接面积大, 对波形腹板的约束较强. 因此试件 CSPD-V 的侧向刚度大, 承载力更高. 在水平荷载的作用下, 试件 CSPD-H 的腹板首先产生局部变形, 波峰和波谷分别扩张与收缩, 在整个过程中, 主要依靠波形腹板的变形来耗能. 试件 CSPD-V 在水平荷载作用下, 波形腹板沿对角线方向形成拉力场, 腹板的损伤不断累积, 最后腹板与端板之间焊缝不断撕裂, 最终破坏. 总的来说, 波形腹板正对称阻尼器主要依靠波形腹板在水平荷载作用下剪切耗能.

2 有限元分析

2.1 有限元仿真与试验的验证

对波形腹板正对称阻尼器(CSPD-V), 建立有限元模型, 验证有限元仿真与试验的吻合程度. 本文采用 ABAQUS 有限元软件建立试件模型, 加载制度与试验保持一致, 本构参数由材性试验得出, 结合课题组之前的研究, 本文中的本构模型采用混合强化模型^[24]. 阻尼器的腹板、翼缘板采用 S4R 壳单元, 模型的上、下端板采用 C3D8R 实体单元, 模型的上、下端板采用扫掠网格技术划分, 腹板、翼缘板采用结构优化网格技术划分; 考虑到阻尼器的波形腹板为主要耗能部件, 因此网格大小需精细一点, 而阻尼器端板为连接部件, 刚度较大, 网格大小可稍微大一点; 模型中各构件采用绑定的方式连接. 需要说明的是, 为充分保证耗能腹板的性能, 本文忽略了焊接应力的影响.

有限元模型如图 11(a)所示, 施加往复荷载的方向为坐标系的 X 轴正方向. 有限元仿真得出了阻尼器的应力云图, 如图 11(b)(c)(d)所示, 腹板出现了较大的变形, 在 X 轴负方向, 两侧腹板出现内缩现象, 这是由于波形腹板的波峰向外鼓曲; 在 X 轴正方向, 两侧腹板出现外扩现象, 这是由于波形腹板的波谷向内鼓曲, 仿真结果与试验现象较为吻合. 由应力云图可以看出翼缘板对阻尼器的承载力贡献较小, 阻尼器的核心耗能部件为波形腹板, 阻尼器性能的退化主要是由于波形腹板的屈曲变形, 如图 11(b)所示.

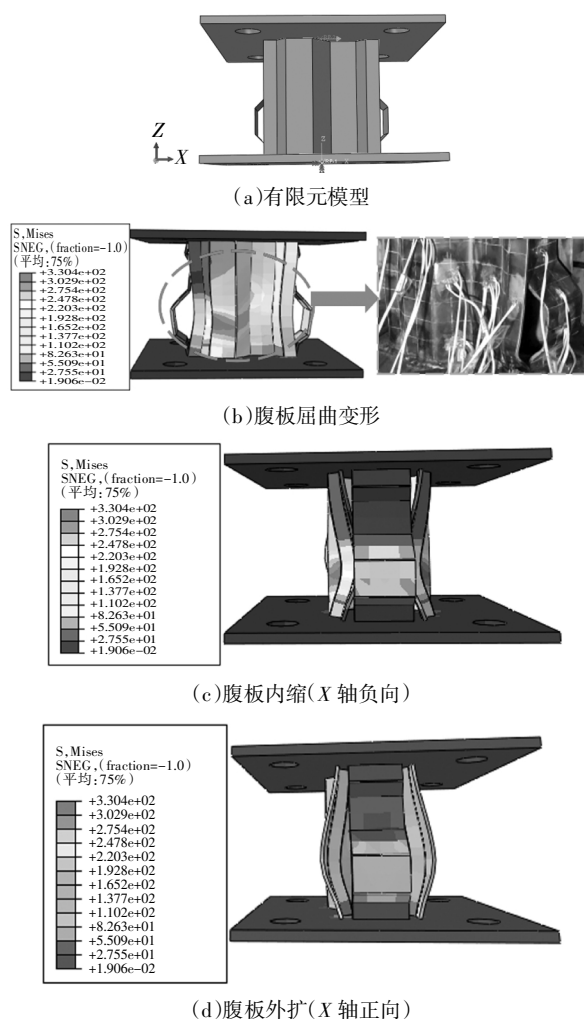


图 11 有限元模型与应力云图

Fig.11 Finite element model and stress cloud diagram

2.2 滞回曲线和骨架曲线分析

由 ABAQUS 有限元软件计算, 提取出滞回曲线及骨架曲线, 与试验进一步对比, 如图 12 所示. 由图 12(a)可以看出, 有限元仿真的滞回曲线的滞回环面积比试验的滞回曲线的滞回环面积略大. 这是由于试件加工过程中存在误差, 同时试件在加工、搬运过程中存在初始缺陷, 而有限元软件仿真较理想化.

由图 12(b)可以看出, 试验与有限元仿真的骨架曲线均为 S 形, 形状基本一致. 有限元仿真得出的负向峰值承载力为 199.53 kN, 试验得出的负向峰值承载力为 -188.60 kN, 两者相差 5.48%; 有限元仿真得出的正向峰值承载力为 200.50 kN, 试验得出的正向峰值承载力为 211.50 kN, 两者相差 5.5%; 有限元仿真的峰值承载力平均值为 200.02 kN, 试验的峰值承载力平均值为 200.05 kN. 综上所述, 有限元仿真与试验对比, 误差较小, 有限元仿真结果可以为后续的阻尼器参数分析提供一定的参考依据.

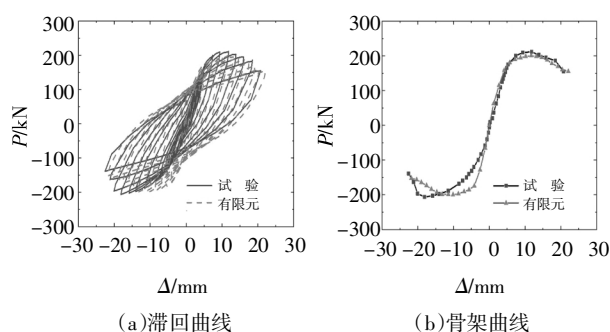


图 12 有限元模拟与试验对比

Fig.12 Comparison between finite element simulation and test

3 主要影响参数

根据试验与有限元仿真结果可以发现,阻尼器主要靠波形腹板剪切耗能,翼缘板对阻尼器的承载力贡献较小.为了研究波形腹板的高宽比、厚度及波幅等参数对阻尼器承载力的影响,对阻尼器试件建立有限元模型,并进行参数扩展及参数敏感性分析.波形腹板的宽度定为 264.8 mm;波形腹板的波角定为 45° ,对试件 CSPD-V 建立 22 个有限元模型.

波形板的尺寸定义如图 13 所示. H 为波形板的高度, L 为波形板的宽度, d 为波幅(中轴线到波峰的垂直距离), a 为平波段长度, b 为斜波段长度, t 为波形板的厚度, θ 为波角(斜波段与中轴线的夹角).表 2 为各个模型的具体参数取值.

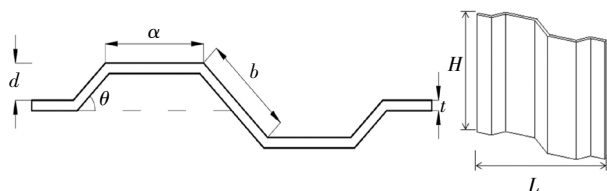


图 13 波形板尺寸示意图

Fig.13 Schematic diagram of corrugated plate size

3.1 高宽比

为了直观地反映波形腹板的高宽比对阻尼器承载力的影响,结合有限元仿真的结果,提取出阻尼器的骨架曲线.保持模型的波形板厚度、波幅不变,只改变波形腹板的高宽比.以水平位移为横坐标,阻尼器的水平荷载为纵坐标,绘制出阻尼器的峰值点承载力随高宽比的变化曲线,如图 14 所示.当高宽比增大时,阻尼器的峰值点承载力明显下降;高宽比增加 0.2,其承载力约降低 61.3 kN.有限元仿真结果表明,高宽比的变化对阻尼器的承载力产生较大影响,从阻

尼器的设计方面考虑,阻尼器的高宽比不宜过大.

表 2 模型的参数

Tab.2 Parameters of the model

模型编号	高宽比(H/L)	厚度/mm	波幅/mm
Model-1	0.8	5	36.21
Model-2	0.8	6	36.21
Model-3	0.8	7	36.21
Model-4	0.8	8	36.21
Model-5	1.0	5	31.21
Model-6	1.0	6	31.21
Model-7	1.0	7	31.21
Model-8	1.0	8	31.21
Model-9	1.2	5	26.21
Model-10	1.2	6	26.21
Model-11	1.2	7	26.21
Model-12	1.2	8	26.21
Model-13	1.4	5	21.21
Model-14	1.4	6	21.21
Model-15	1.4	7	21.21
Model-16	1.4	8	21.21
Model-17	1.0	8	36.21
Model-18	1.2	8	36.21
Model-19	1.4	8	36.21
Model-20	1.2	6	21.21
Model-21	1.2	6	31.21
Model-22	1.2	6	36.21

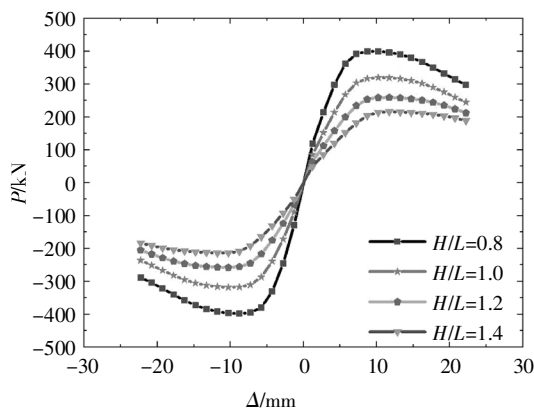


图 14 高宽比的影响

Fig.14 Effect of aspect ratio

3.2 厚度

为了探究波形钢板的厚度对阻尼器承载力的影响,保持模型的高宽比、波幅不变,只改变波形板的厚度.以水平位移为横坐标,阻尼器的水平荷载为纵坐标,绘制出阻尼器的峰值点承载力随波形板厚度变化的曲线,如图 15 所示.当波形板厚度增加时,阻

尼器的承载力有明显的提高;波形板厚度增加 1 mm,其承载力大约提高 44.7 kN.有限元仿真结果表明,增加波形钢板的厚度,对提高阻尼器的承载力有一定的作用.在实际工程应用中,可以适当增大钢板的厚度来提高结构的承载力,但钢板的厚度不宜过大.

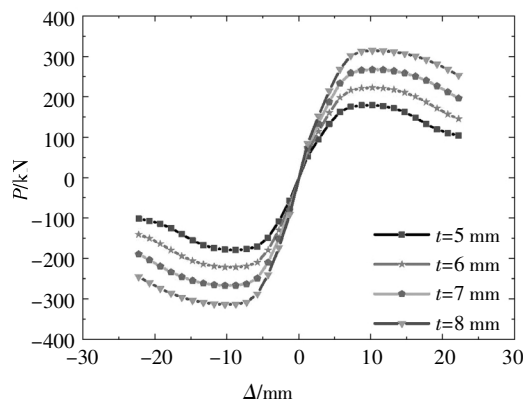


图 15 厚度的影响

Fig.15 Effect of thickness

3.3 波幅

为进一步研究波形板的波幅对阻尼器承载力的影响,保持波形板的高宽比、厚度不变,只改变波形板的波幅.以水平位移为横坐标,阻尼器的水平荷载为纵坐标,绘制出阻尼器的峰值点承载力随波幅变化的曲线,如图 16 所示.当波幅增大时,阻尼器的承载力提高,但提高幅度较小;波幅增加 5 mm,其承载力大约提高 6.3 kN.有限元仿真结果表明,增大波幅,对阻尼器的承载力有小幅度的增大.

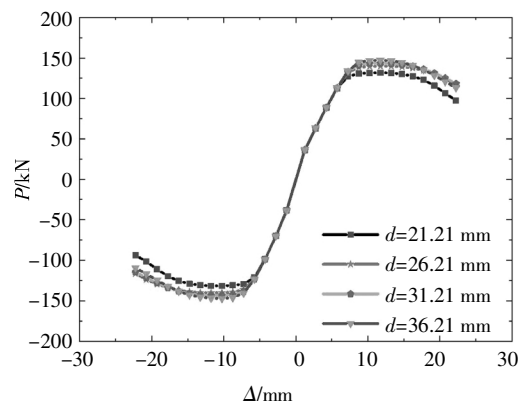


图 16 波幅的影响

Fig.16 Effect of amplitude

4 抗剪承载力

4.1 抗剪承载力计算

对于波形钢板的承载力,国内外学者做了大量的研究.Galambos^[25]提出了经典板的屈曲理论;Yi

等^[26]借助有限元软件,推导得出了波形钢板的承载力公式;《波形钢板组合结构技术规程》^[27](以下简称规程),给出了单片波形钢板的承载力计算方法,可按公式(1)计算.

$$V = H\varphi_s t\tau_y \quad (1)$$

式中: V 为单片波形板的抗剪承载力; φ_s 为单片波形板的受剪稳定系数; t 为波形板的厚度; H 为波形板的平直边长度; τ_y 为剪切屈服应力,由 Mises 屈服准则确定, τ_y 可按公式(2)计算.

$$\tau_y = f_y / \sqrt{3} \quad (2)$$

式中: f_y 为钢材屈服强度.

4.2 波形钢板的弯曲刚度

波形钢板可以看作正交各向异性板,相互垂直的两个方向的弯曲刚度一般相差较大.波形板的强轴与弱轴弯曲刚度可按公式(3)(4)计算.

$$D_x = \frac{Etd^2}{2b_0} \left(a + \frac{b}{3\cos\theta} \right) \quad (3)$$

$$D_y = \frac{b_0}{S} \cdot \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (4)$$

$$H_0 = \frac{S}{b_0} \cdot \frac{Et^3}{12(1+\nu)} \quad (5)$$

式中: D_x 、 D_y 为波形钢板的强轴、弱轴弯曲刚度; H_0 为波形钢板的扭转刚度常数; E 为钢材的杨氏模量; ν 为钢材的泊松比; d 为波形钢板的波幅; a 为波形钢板的平波段长度; b 为波形钢板的斜波段长度; θ 为波形钢板的波角; b_0 为波形钢板重复波形的波长; S 为波形钢板重复波形的展开长度.

4.3 正则化高厚比

正则化高厚比 λ_s 为波形钢板的重要影响参数, λ_s 综合反映了波形钢板的几何参数对结构或构件力学性能的影响.波形钢板的高宽比、波幅、厚度等,都会对波形板的承载力产生影响.规程中对于正则化高厚比的规定,可按公式(6)计算.

$$\lambda_s = \sqrt{\frac{tH\tau_y}{V_{cr}}} \quad (6)$$

式中: V_{cr} 为波形钢板受剪弹性屈曲荷载,可按公式(7)计算.

$$V_{cr} = K \cdot \frac{\sqrt[4]{D_x^3 D_y}}{H} \quad (7)$$

式中: K 为波形钢板的屈曲系数,按公式(8)计算.

$$K = (7 + 20\gamma)\beta^2 + 8\beta + 61.2 + 29.5\gamma \quad (8)$$

式中: γ 为波形板的刚度常数比; β 为波形板的等效宽高比; γ 与 β 的计算式详见《波形钢板组合结构技术规程》^[27].

4.4 稳定系数

波形钢板的受剪稳定系数 φ_s 与正则化高厚比 λ_s 之间存在密切关系,以正则化高厚比 λ_s 为横坐标,稳定系数 φ_s 为纵坐标,结合上文所建立的有限元算例,绘制出正则化高厚比与稳定系数之间的散点图,如图 17 所示.进一步拟合得出 φ_s 与 λ_s 之间的关系式. φ_s 可按公式(9)计算.

$$\varphi_s = \frac{V_s}{V_u} \quad (9)$$

式中: V_s 为波形钢板的极限承载力; V_u 为波形钢板的屈服荷载.

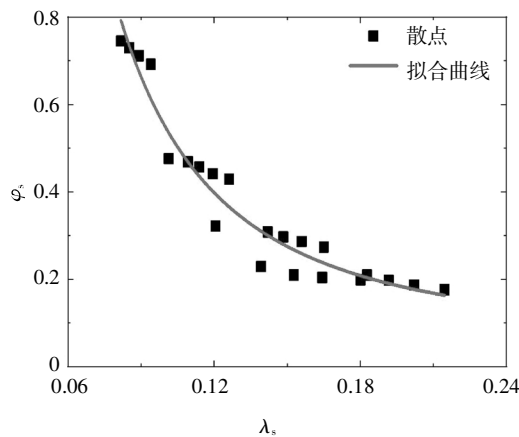


图 17 拟合示意图

Fig.17 Schematic illustration of the fitting

由图 17 可以看出,正则化高厚比与稳定系数之间呈非线性关系,有规律可循.拟合曲线与散点图的走势比较贴合,拟合效果良好,最终得到稳定系数 φ_s 与正则化高厚比 λ_s 的关系式,可按公式(10)计算.

$$\varphi_s = 0.057 + 0.005/\lambda_s^2 \quad (10)$$

上文中分析阻尼器的波形腹板抗剪承载力,仅选取了单片波形板进行研究.根据叠加原理,阻尼器的波形板为 2 片波形板正对称布置,则可以认为阻尼器的抗剪承载力近似为单片波形板抗剪承载力数值的 2 倍.因此,得到波形腹板阻尼器的抗剪承载力 V_{cs} 计算公式为:

$$V_{cs} = 2H\varphi_s t\tau_y \quad (11)$$

4.5 计算值与仿真值对比

为进一步验证阻尼器抗剪承载力公式的准确性,对于上文中建立的 22 个有限元模型,提取阻尼器抗剪承载力的具体数值,同时采用公式(11)计算得出阻尼器的抗剪承载力理论值.从图 18 可以看出,计算值与有限元仿真值误差较小,基本在 10%左右,验证了公式(11)具有一定的可靠性.

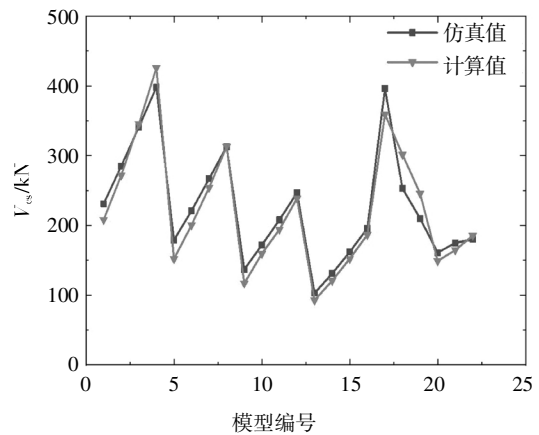


图 18 仿真值和计算值对比

Fig.18 Comparison between calculated and simulated values

5 结论

1)试验结果表明:波形腹板正对称阻尼器具有良好的滞回性能和耗能能力;该阻尼器耗能主要是依靠波形腹板剪切、屈曲耗能;竖向波形腹板阻尼器由于焊接面积大,对波形腹板的约束较强,承载力明显高于横向波形腹板阻尼器.

2)有限元仿真结果与试验吻合度较好,对于几何参数的影响,仿真结果表明:波形腹板的高宽比增大,阻尼器的承载力下降明显;增大波形板的厚度,其承载力上升明显;增大波形板的波幅,其承载力有小幅提高.

3)提出波形腹板阻尼器的稳定系数计算式,进而得到波形腹板正对称阻尼器的抗剪承载力公式.计算值与有限元仿真值误差较小,可以为波形腹板正对称阻尼器的设计提供参考.

参考文献

- [1] 李岩,廖明夫,王四季.配合关系对弹性环式挤压油膜阻尼器减振特性的影响[J].振动与冲击,2020,39(11):232—238.
LI Y, LIAO M F, WANG S J. Effect on vibrating attenuation by the fit of elastic ring squeeze film damper [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(11): 232—238. (In Chinese)
- [2] 祝长生.剪切型磁流变脂阻尼器转子系统的动力特性[J].机械工程学报,2006,42(10):91—94.
ZHU C S. Dynamic behaviour of shear-type magnetorheologic grease damper rotor system [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(10): 91—94. (In Chinese)
- [3] 吴杰,徐洪俊,张其林.良态风和台风下的上海中心大厦动力参数分析[J].同济大学学报(自然科学版),2019,47(8):1100—1105.
WU J, XU H J, ZHANG Q L. Dynamic analysis of parameters of Shanghai tower in normal wind and typhoon [J]. Journal of Tongji

- University (Natural Science), 2019, 47(8): 1100—1105. (In Chinese)
- [4] 赵昕, 杜冰洁, 李浩. 超高层建筑黏滞阻尼器及屈曲约束支撑混合减振结构系统集成优化设计 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41(3): 25—35.
- ZHAO X, DU B J, LI H. Integrated optimization design of hybrid vibration damping structure system of viscous damper and buckling restrained brace for super high-rise buildings [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(3): 25—35. (In Chinese)
- [5] 项乃亮, 李建中. 非规则梁桥横向 X 形弹塑性阻尼器合理参数分析 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(7): 980—986.
- XIANG N L, LI J Z. Analysis of transverse X-shaped elastic-plastic damper's proper parameters on irregular girder bridges [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(7): 980—986. (In Chinese)
- [6] 任文杰, 李宏男, 宋钢兵. 基于形状记忆合金的 X 形板阻尼器的力学模型 [J]. 振动与冲击, 2006, 25(4): 53—57.
- REN W J, LI H N, SONG G B. Mechanical model of x type sma plate damper [J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(4): 53—57. (In Chinese)
- [7] 沈星, 倪晓博, 叶爱君. 桥梁新型横向金属阻尼器研究 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(21): 96—101.
- SHEN X, NI X B, YE A J. A new type of metallic damper for bridges' aseismic performance in transverse direction [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(21): 96—101. (In Chinese)
- [8] 陈云, 刘涛, 蒋欢军, 等. 环形 Q235 钢板阻尼器力学性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2018, 39(11): 139—147.
- CHEN Y, LIU T, JIANG H J, *et al.* Experimental study on mechanical properties of annular Q235 steel dampers [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(11): 139—147. (In Chinese)
- [9] 苏宇坤, 潘鹏, 邓开来, 等. 双向地震作用下 U 形钢阻尼器力学性能研究 [J]. 建筑结构学报, 2014, 35(8): 44—49.
- SU Y K, PAN P, DENG K L, *et al.* Mechanical properties of U-shaped steel damper subjected to bi-axial ground motions [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(8): 44—49. (In Chinese)
- [10] 陈之毅, 葛汉彬, 宇佐美勉, 等. 剪切板阻尼器的滞回性能参数研究 [J]. 土木工程学报, 2008, 41(11): 13—17.
- CHEN Z Y, GE H B, Usami Tsutomu, *et al.* Parametric study on the hysteretic behavior of shear panel dampers [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(11): 13—17. (In Chinese)
- [11] 张蓬勃, 赵世春, 孙玉平, 等. 铝板摩擦材剪切型摩擦阻尼器的研究 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, 43(5): 218—223.
- ZHANG P B, ZHAO S C, SUN Y P, *et al.* Study on shear type friction damper of aluminum alloy [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2011, 43(5): 218—223. (In Chinese)
- [12] 黄镇, 李芮秋, 刘峰, 等. 改进型防屈曲剪切钢板阻尼器受力性能研究 [J]. 建筑结构学报, 2016, 37(6): 85—92.
- HUANG Z, LI R Q, LIU F, *et al.* Research on mechanical performance of improved buckling restrained shear panel damper [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(6): 85—92. (In Chinese)
- [13] 马宁, 苏利刚. 剪切型防屈曲钢板阻尼器的滞回性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2018, 39(11): 148—157.
- MA N, SU L G. Experimental study on hysteretic behavior of shear type buckling restrained shear panel dampers [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(11): 148—157. (In Chinese)
- [14] 林煜, 杨森, 郭正兴, 等. 双拼工字型钢板阻尼器滞回性能试验研究 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(5): 911—917.
- LIN Y, YANG S, GUO Z X, *et al.* Experimental study on hysteretic behaviors of duplex assembled I-shaped steel panel dampers [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2019, 49(5): 911—917. (In Chinese)
- [15] 胡晓斌, 李文霞, 刘坤, 等. 外置金属阻尼器的新型自复位约束砌体墙抗震性能研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(7): 50—56.
- HU X B, LI W X, LIU K, *et al.* Seismic performance of a new type of self-centering confined masonry wall with external steel dampers [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(7): 50—56. (In Chinese)
- [16] 蒋欢军, 黄有露, 李恺轩. 带组合型阻尼器的可更换连梁 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(1): 26—35.
- JIANG H J, HUANG Y L, LI K X. Replaceable coupling beam with combined dampers [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(1): 26—35. (In Chinese)
- [17] HABIBI A, CHAN R W K, ALBERMANI F. Energy-based design method for seismic retrofitting with passive energy dissipation systems [J]. Engineering Structures, 2013, 46: 77—86.
- [18] 连鸣, 苏明周, 李慎. Y 形高强度钢组合偏心支撑框架结构弹塑性层剪力分布研究 [J]. 建筑结构学报, 2016, 37(11): 86—96.
- LIAN M, SU M Z, LI S. Elasto-plastic story shear distribution of Y-type high strength steel composite eccentrically braced frame [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(11): 86—96. (In Chinese)
- [19] 王威, 王俊, 苏三庆, 等. 波形反对称软钢阻尼器力学性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41(6): 92—100.
- WANG W, WANG J, SU S Q, *et al.* Experimental research on mechanical behavior of corrugated antisymmetric mild steel damper [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(6): 92—100. (In Chinese)
- [20] WANG W, LUO Q R, WANG B J, *et al.* Performance research and optimization of corrugated mild steel damper with considering weld failure [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2020: 1—20.
- [21] 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备: GB/T 2975—1998 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1998: 1—4.
- The sampling position of mechanical properties of steel and steel products and the preparation of sample: GB/T 2975—1998 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1998: 1—4. (In Chinese)
- [22] 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 10—16.
- Specification for seismic test of buildings: JGJ/T 101—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015: 10—16. (In Chinese)
- [23] 周云, 卢德辉, 张敏等. 钢管铅阻尼器疲劳性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2018, 39(7): 131—136.
- ZHOU Y, LU D H, ZHANG M, *et al.* Experimental study on fatigue property of lead-filled steel tube damper [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(7): 131—136. (In Chinese)
- [24] 王威, 王万志, 梁宇建, 等. 一种弯剪型软钢阻尼器的力学性能 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(10): 2925—2940.
- WANG W, WANG W Z, LIANG Y J, *et al.* Mechanical performance of a flexural shear mild steel damper [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(10): 2925—2940. (In Chinese)
- [25] GALAMBOS T V. Guide to stability design criteria for metal structures [M]. Hoboken, New Jersey: Wiley, 1976: 150—163.
- [26] YI J, GIL H, YOUM K, *et al.* Interactive shear buckling behavior of trapezoidally corrugated steel webs [J]. Engineering Structures, 2008, 30(6): 1659—1666.
- [27] 波形钢板组合结构技术规程: T/CECS 624—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020: 70—79.
- Technical specification for structures with corrugated steel plate components: T/CECS 624—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020: 70—79. (In Chinese)