

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.03.015

# 一种新型软钢阻尼器的设计及数值模拟\*

王 威, 王 俊, 苏三庆, 张 恒, 梁宇建, 向照兴

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 为避免既有金属剪切型阻尼器存在的应力集中问题, 进一步提高耗能能力, 提出一种新型波形软钢阻尼器。利用通用有限元软件建立实体模型, 对其进行数值模拟研究。通过对不同波角和厚度、腹板及翼缘材料的强度比对阻尼器力学性能的影响分析可以发现: 波角和腹板与翼缘的材料强度比不变时, 厚度为 5 mm, 阻尼器的力学性能最佳; 当厚度和腹板与翼缘的材料强度比不变, 波角为 60° 时, 阻尼器的力学性能最佳; 为充分发挥腹板的耗能作用, 腹板与翼缘的材料强度比为 1~1.47; 理论计算与数值模拟吻合度高, 可以通过计算改变相关参数, 得到实际工程所需阻尼器。

**关键词:** 波形软钢阻尼器; 滞回性能; 波角; 厚度; 强度匹配

**中图分类号:** TU352   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-2132(2020)03-0432-07

## Design and Numerical Simulation of a New Type of Mild Steel Damper

WANG Wei, WANG Jun, SU Sanqing, ZHANG Heng, LIANG Yujian, XIANG Zhaoxing  
(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** In order to avoid the stress concentration problem of the existing metal shear dampers and further improve the energy dissipation capacity, a new corrugated mild steel damper is proposed in this paper. In this study, a general finite element software is used to establish a solid model and its numerical simulation is carried out. By analyzing the effects of different wave angles and thickness, and the strength ratio of web to flange materials on the mechanical properties of damper, it is found that when the wave angle and the strength ratio of web to flange materials are constant, the damper has the best mechanical properties when the thickness is equal to 5 mm. When the thickness and the strength ratio of web to flange materials are constant, the mechanical properties of the damper are the best when the wave angle is 60 degrees, and the strength ratio of web to flange materials should be between 1 and 1.47 in order to make full use of the energy dissipation effect of web. The theoretical calculation is in good agreement with the numerical simulation, and the damper can be obtained by changing the relevant parameters.

**Keywords:** corrugated mild steel damper; hysteretic behavior; wave angle; thickness; strength match

\* 收稿日期:2018-06-11;修回日期:2018-07-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51578449,51878548)、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。主要从事钢与混凝土组合结构研究。Email:wangwgh1972@163.com

# 引言

传统的建筑抗震结构,为保证在遭受到不可预见的强烈地震时,结构不产生严重的破坏和坍塌,其抗震设计原则是允许结构中的部分次要构件产生一定的塑性损伤变形,利用结构的延性和塑性变形来耗散地震输入能量,防止结构倒塌,这种结构抗震理念是完全依靠结构自身的强度和变形来抵抗地震作用<sup>[1-2]</sup>;对于消能减震结构,通过附加消能减震装置减小原结构承受的地震作用,从而达到控制结构地震反应的目的,减轻主体结构的损伤程度。消能减震结构由于增设了阻尼器,很大程度上替代了主体结构的受力变形,因此容易实现比普通抗震结构更高的抗震性能<sup>[3]</sup>。现今,常见的阻尼器有速度相关型阻尼器和位移相关型阻尼器,位移相关型阻尼器应用最多的是金属阻尼器。在金属阻尼器中广泛采用钢材作为耗能材料,尤其是屈服点低于 235 MPa 的钢,因为低屈服点钢在不断裂的情况下,能够表现出饱满的纺锤型滞回曲线,在弹塑性范围以后具有较好的滞回性能。其中低碳钢屈服强度低、延性高,而采用这种材料的阻尼器被称为软钢阻尼器<sup>[4]</sup>。

自 1972 年 J. M. Kelly 等<sup>[5]</sup>首先进行了金属阻尼器的研究和试验后,国内外设计开发了大量具有不同耗能机理和耗能形式的软钢阻尼器,由最开始的单片矩形钢板阻尼器发展成为各种不同几何形状的阻尼器,如软钢棒体阻尼器<sup>[6]</sup>、开孔形软钢阻尼器<sup>[7]</sup>、抛物线外形软钢阻尼器<sup>[8]</sup>、U 形软钢阻尼器<sup>[9]</sup>、加劲钢板阻尼器<sup>[10]</sup>、X 形软钢阻尼器<sup>[11]</sup>等,但是仍存在部分问题未得到解决,如单块板的软钢阻尼器承载能力和耗能能力不佳,U 形、X 形等阻尼器易发生不可恢复的平面外变形,本文针对现有软钢阻尼器的不足,设计出一种新型具有波纹形状的剪切型软钢阻尼器,简称波形软钢阻尼器。

## 1 波形软钢阻尼器的设计及本构模型的选择

### 1.1 波形软钢阻尼器的构造

本文设计的波形软钢阻尼器由中间两块波形腹板和两块矩形翼缘板与上下端板焊接组合而成,腹板焊接在两端翼缘上,本文中,波形板是指将矩形板按照固定角度弯折而成的板,上下端板视为刚

性区域,具体结构示意如图 1 所示。

图 1 中的波形腹板可以分为平波加斜波两部分。设计时为满足实际受力需求,可以通过调整几何参数来获得不同耗能能力和承载能力的阻尼器,具体几何参数如图 2 所示。

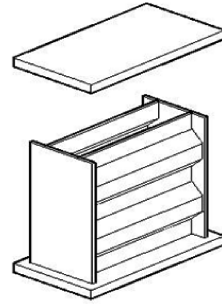


图 1 波形软钢阻尼器的构造

Fig.1 Constructional details of CMSD

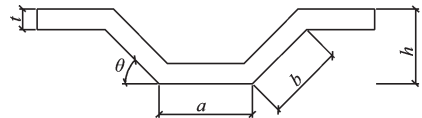


图 2 波形钢板截面参数

Fig.2 Sectional parameters of the corrugated steel plate  
注: $t$ 为板厚, $h$ 为波幅, $\theta$ 为波角, $a$ 为平波段长, $b$ 为斜波段长

### 1.2 材性试验

钢材本构由西安建筑科技大学的 CSS—WAW300DL 电液伺服万能试验机静力拉伸试验得到。钢材的应力—应变关系曲线如图 3 所示。其中钢材 Q160 屈服强度实测值为 136 MPa。

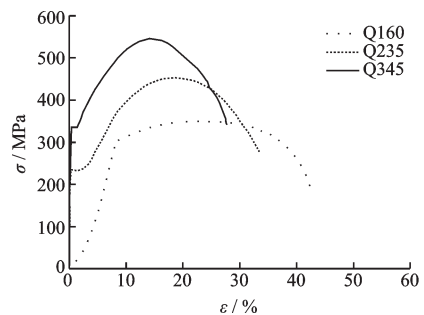


图 3 钢材应力—应变关系曲线

Fig.3 Stress—strain curve of steel

## 2 波形软钢阻尼器参数设计与模型的建立

选用 ABAQUS 有限元分析软件<sup>[12]</sup>建立 10 个

波形软钢阻尼器模型并进行数值分析。阻尼器采用八节点六面体线性减缩积分单元(C3D8R),翼缘、腹板和上下端板的焊接以及翼缘和腹板的焊接均采用绑扎(Tie)连接,试件下表面的3个平动自由度和转动自由度均设为0,建立一参考点与上端板左面耦合,在耦合点施加水平位移荷载,加载级数为屈服位移的整数倍,具体的加载制度如图4所示。

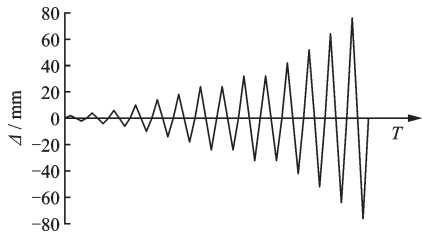


图4 加载制度示意

Fig.4 Schematic diagram of the loading scheme

取波角  $\theta$ 、厚度  $t$  以及腹板和翼缘的屈服强度比三个因素作为自变量,建立10个有限元模型,命名为 Model-1~Model-10,变量参数见表1。10个模型的翼缘厚度和对应的腹板厚度相同,宽120 mm,高与腹板相同;腹板水平方向宽度为200 mm。以试件 Model-1 为例,垂直方向尺寸如图5所示。

表1 模型主要参数

Table 1 Parameters of the models

模型编号	$\theta/(^\circ)$	$t/\text{mm}$	翼缘 $f_y/\text{MPa}$	腹板 $f_y/\text{MPa}$
Model-1	0	5	160	160
Model-2	45	5	160	160
Model-3	30	5	160	160
Model-4	60	5	160	160
Model-5	45	3	160	160
Model-6	45	7	160	160
Model-7	45	5	160	235
Model-8	45	5	160	345
Model-9	45	5	345	235
Model-10	45	5	345	160

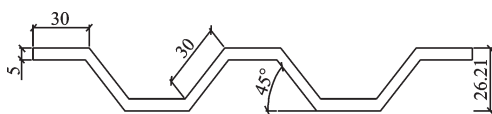


图5 model-1腹板尺寸示意

Fig.5 Dimensions of the model-1 web

### 3 有限元结果分析

#### 3.1 波角对阻尼器力学性能的影响

图6为模型 Model-2~Model-4的滞回曲线示意。从图中可以看出模型 Model-4的滞回曲线略微比模型 Model-2和模型 Model-3的饱满,在加载初期,3个模型的滞回曲线近乎重合,但过了峰值荷载进入下降段时,模型 Model-3下降速度最快;模型 Model-3的耗能能力和承载能力相比模型 Model-2和模型 Model-4较差;现对比模型 Model-1和模型 Model-3的滞回曲线(图7)。模型 Model-3的滞回曲线明显比模型 Model-1饱满,且承载能力和耗能能力均优于模型 Model-1,说明,波形板可以沿波纹方向形成拉压应力场且有良好的平面外刚度使得这种软钢阻尼器具有稳定的滞回耗能能力,并且克服了传统矩形板阻尼器易过早发生局部屈曲的缺点。

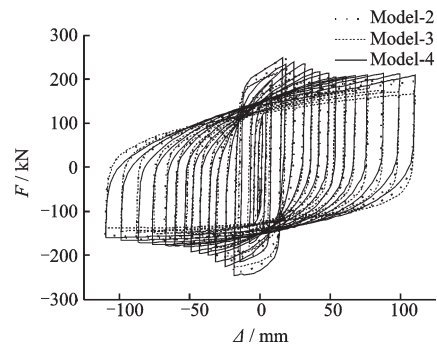


图6 Model-2~Model-4滞回曲线示意

Fig.6 Hysteresis curve of Model-2 to Model-4

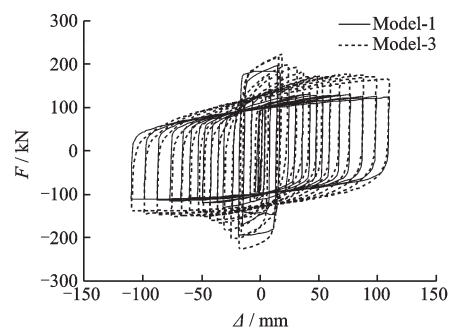


图7 Model-1和Model-3滞回曲线示意

Fig.7 Hysteresis curve of Model-1 and Model-3

根据图6和图7计算得出4个模型的特征点荷载位移及延性耗能系数<sup>[13]</sup>见表2。表2中: $F_y$ 为屈服剪力, $K$ 为模型的初始刚度, $F_d$ 为峰值力, $\mu$ 为延

性系数,  $\varphi$  为耗能系数。表中模型 Model-4 的峰值荷载、延性和耗能系数均大于另外 3 个模型, 说明当波角为  $60^\circ$  时, 波形软钢阻尼器的力学性能最佳; 模型 Model-1 的力学性能最差, 说明这种波形软钢阻尼器优于传统的矩形板软钢阻尼器。

表 2 波角不同的模型特征点及延性系数

Table 2 Feature points and ductility coefficient of the models with different wave angles

模型编号	$F_y/kN$	$K/(kN \cdot mm^{-1})$	$F_d/kN$	$\mu$	$\varphi$
Model-1	102.4	24.9	199.8	4.7	2.9
Model-2	135.0	30.7	242.5	7.0	3.8
Model-3	132.4	27.5	223.1	6.5	3.2
Model-4	141.8	33.7	248.2	8.8	3.9

### 3.2 厚度对阻尼器力学性能的影响

图 8 为不同厚度阻尼器的滞回曲线示意, 根据图 8, 将所求特征荷载、延性和耗能系数<sup>[13]</sup>列于表 3。

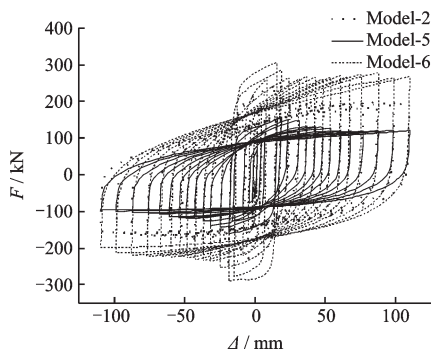


图 8 不同厚度模型的滞回曲线示意

Fig.8 Hysteresis curve of the models with different thickness

表 3 厚度不同的模型特征点及延性系数

Table 3 Feature points and ductility coefficient of the models with different thickness

模型编号	$F_y/kN$	$K/(kN \cdot mm^{-1})$	$F_d/kN$	$\mu$	$\varphi$
Model-2	135.0	30.7	242.5	7.0	3.8
Model-5	96.8	20.0	156.6	7.9	3.9
Model-6	196.5	42.5	306.5	6.5	2.9

由图 8 和表 3 可以看出: 相比波角, 厚度的改变对模型的承载能力和变形耗能能力影响较大。模型 Model-6 的承载能力最大, 在宽度不变的条件下, 增加厚度, 承载能力得到提升, 但由于尺寸效应使

得其延性和耗能系数低于模型 Model-2 和 Model-5; 模型 Model-5 的延性和耗能系数最优, 但由于厚度过小导致承载能力不佳; 模型 Model-2 相比于模型 Model-5, 延性降低约 12.9%, 耗能系数降低约 2.6%, 可承载力提升幅度为 54.9%; 模型 Model-2 相比于模型 Model-6, 承载力降低约 26.4%, 耗能系数提升约 31%, 延性系数提升约 7.7%; 故厚度为 5 mm 时, 模型效果最优; 厚度偏大, 导致延性和耗能能力下降幅度过大; 厚度偏小, 导致承载能力下降幅度过大。

### 3.3 翼缘和腹板的材料强度对阻尼器力学性能的影响

当翼缘屈服强度与腹板屈服强度的比值大于 1 时, 绘制模型 Model-9 和 Model-10 的骨架曲线如图 9 所示; 应力云图如图 10 所示。根据图 9 得出: 模型 Model-9 的承载能力大于模型 Model-10, 延性和耗能系数均优于模型 Model-10, 模型 Model-10 的峰值荷载下降速度远大于模型 Model-9, 这是由于翼缘和腹板的屈服强度比值为 2.16 时, 远大于模型 Model-9 翼缘和腹板的屈服强度比值 1.47, 导致波形腹板没有充分利用。从图 10 中可以看出, 两个模型的

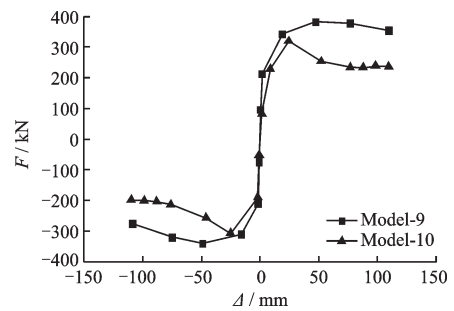


图 9 Model-9 和 Model-10 骨架曲线

Fig.9 Skeleton curve of Model-9 and Model-10

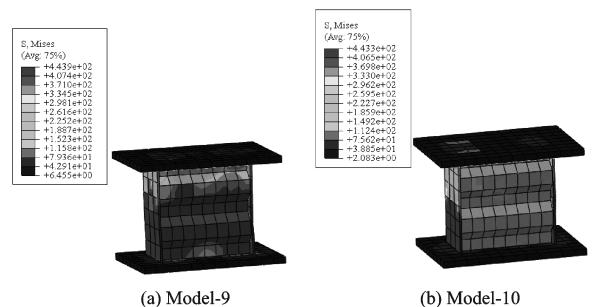


图 10 Model-9 和 Model-10 的应力云图

Fig.10 Stress contours of Model-9 and Model-10

翼缘根部应力集中明显,最终破坏模式为翼缘板根部的断裂,从而无法有效发挥腹板的耗能作用。

当翼缘屈服强度与腹板屈服强度的比值小于等于1时,绘制模型 Model-2、Model-7 和 Model-8 的骨架曲线如图 11 所示,应力云图如图 12 所示。

可以看出:模型 Model-2 的承载能力和耗能能力均低于模型 Model-7 和 Model-8,这是因为当翼缘的材料强度小于等于腹板的材料强度时,模型的破坏为腹板的剪切破坏,所以腹板的材料强度有决定性作用,翼缘更多的是起到一种约束作用;模型 Model-7 和模型 Model-8 的骨架曲线近乎一致,应力云图相似性也很高,说明当腹板强度是翼缘强度的 1.47 倍时,已经是最佳强度比,再增加腹板的强度,对模型承载能力和耗能能力的提升很小。所以在本文设计的剪切型波形软钢阻尼器中,腹板的材料强度与翼缘的比值为 1~1.47。

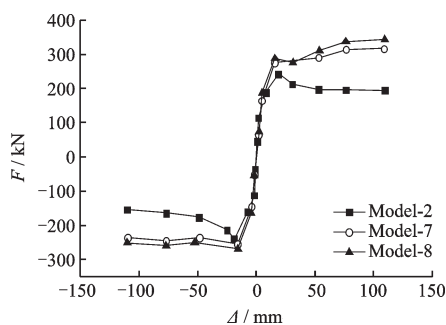


图 11 Model-2、Model-7 和 Model-8 骨架曲线

Fig.11 Skeleton curve of Model-2、Model-7 and Model-8

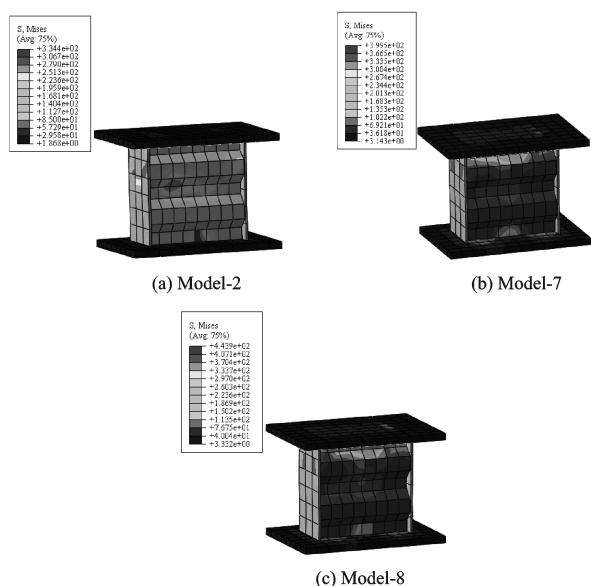


图 12 Model-2、Model-7 和 Model-8 的应力云图

Fig.12 Stress contours of Model-2, Model-7 and Model-8

### 3.4 理论计算与有限元计算的对比

本文着重研究波形板,所以仅对比模型 Model-2~Model-6 的理论计算与有限元计算的结果。在模型 Model-2~Model-6 中,翼缘主要起到约束腹板的作用,发生弯曲破坏,其计算简图如图 13 所示,高度为  $h$ ,宽度为  $b_0$ ,厚度为  $t$ ,屈服强度为  $f_y$ , $y$  为力臂。根据材料力学,计算公式为:

屈服剪力:

$$V_y = \frac{M_s}{y} = \frac{f_y b_0 t^2}{6h} \quad (1)$$

极限剪力:

$$V_d = \frac{3}{2} V_y = \frac{f_y b_0 t^2}{4h} \quad (2)$$

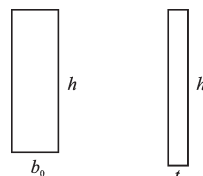


图 13 翼缘板计算简图

Fig.13 Calculation diagram of the flange slab

本文中腹板是承受剪切作用的主要构件,其计算参数如图 2 所示。屈服剪力根据 Mises 屈服准则确定:

$$V_y' = \frac{f_y b_1 t_1}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

本文波形腹板属于梯形波折腹板,其极限剪应力公式<sup>[14]</sup>为:

$$\tau_m = \frac{\tau_1 \cdot \tau_{ge}}{\tau_1 + \tau_{ge}} \quad (4)$$

$$\tau_1 = k \times \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{a}\right)^2 \quad (5)$$

$$\tau_{ge} = 36\beta \frac{D_y^{1/4} D_x^{3/4}}{t b_1^2} \quad (6)$$

式中, $\tau_m$  为波折腹板的最大剪切应力; $\tau_1$  为欧洲规范<sup>[15]</sup>给出的剪切局部屈曲临界应力; $k$  为局部屈曲剪切系数; $E$  为弹性模量; $\nu$  为泊松比; $t$  为波折板厚度; $a$  为一个波段内平波的长度; $\beta$  为整体屈曲剪切系数; $D_y$  为波折腹板单位长度的横向弯曲刚度; $D_x$  为波折腹板单位长度的竖向弯曲刚度; $b_1$  为波折腹板的宽度。

剪应力沿着腹板高度方向均匀分布是波形腹板的一大特点<sup>[16]</sup>,本文的应力云图也进一步验证了

这一特征,故波折腹板极限剪力对应的作用面可以取上表面。

$$V_d' = \tau_m b_1 t \quad (7)$$

根据上述公式,将理论计算结果与有限元模拟计算结果对比(表4),翼缘和腹板均是正对称,故最后计算结果是单片翼缘和腹板所求值的2倍。

表4 模型计算结果

Table 4 Calculation results of the models

模型编号	理论计算/kN		数值模拟/kN		误差/%	
	屈服剪力	极限剪力	屈服剪力	极限剪力	屈服剪力	极限剪力
Model-2	157.8	268.9	135	242.5	14.4	9.8
Model-3	156.7	254.3	132.4	223.1	15.5	12.3
Model-4	157.9	285.6	141.8	248.2	10.2	13.1
Model-5	110.9	176.3	96.8	156.6	12.7	11.2
Model-6	221.2	346.8	196.5	306.5	11.2	11.7

由表4可以看出:理论计算结果和模拟计算结果误差基本在15%以内,说明理论计算和数值模拟都反映了模型同样的受力特征,由于波角改变的仅仅是高度,仅对翼缘的抗剪产生影响,而厚度的改变直接影响腹板的抗剪作用,故波角对模型承载力的影响远小于厚度对模型承载力的影响。

## 4 结 论

(1) 本文设计的波形软钢阻尼器相比传统的矩形剪切板阻尼器具有承载能力高,延性性能好,耗能能力强等特点。

(2) 波角对阻尼器性能的影响程度远小于厚度的影响,波角定为60°时,阻尼器性能最优。

(3) 宽度恒定为200 mm,为同时保证阻尼器的承载能力和耗能能力,腹板和翼缘厚度应选取为5 mm。

(4) 对于波形软钢阻尼器,为充分发挥波形腹板的耗能作用,腹板的材料强度与翼缘的材料强度比值为1~1.47。

(5) 波形软钢阻尼器的理论计算与数值模拟吻合良好,设计时可以通过改变相关参数达到实际所需数值。

## 参考文献:

[1] Constantinou M C, Symans M D. Seismic response of

structures with supplemental damping [J]. The Structure Design of Tall Buildings, 1993, 2(2): 77-92.

[2] 潘 鹏,叶列平,钱稼茹,等. 建筑结构消能减震设计与案例[M]. 北京:清华大学出版社,2014:1-2.

Pang P, Ye L P, Qian J R, et al. Seismic design of building structures equipped with energy dissipation devices [M]. Beijing: Qinghua University Press, 2014: 1-2. (in Chinese)

[3] 吕西林,陈 聪. 带有可更换构件的结构体系研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(1): 27-36.

Lyu X L, Chen C. Research progress on structural systems with replaceable components[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 34(1): 27-36. (in Chinese)

[4] 许立言,聂 鑫,樊健生,等. 低屈服点钢剪切型阻尼器试验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2016, 56(9): 991-996.

Xu L Y, Nie X, Fan J Sh, et al. Experimental investigation of low-yield-point steel shear panel dampers [J]. Journal of Tsinghua University (Nature Science), 2016, 56(9): 991-996. (in Chinese)

[5] Kelly J M, Skinner R I, Heine A J. Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures[J]. Bulletin of New Zealand Society for Earthquake Engineering, 1972, 5(3): 63-88.

[6] 孙 威,张铁山,孟宪宏. 软钢棒体阻尼器耗能元件设计与性能分析[J]. 世界地震工程, 2015, 31(2): 196-201.

Sun W, Zhang T Sh, Meng X H. Design and performance analysis of energy-dissipating element of mild steel rod damper[J]. World Seismic Engineering, 2015, 31(2): 196-201. (in Chinese)

[7] 王 爽,张春梅,周 云. 新型开孔H型钢阻尼器有限元分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(3): 346-352.

Wang Sh, Zhang Ch M, Zhou Y. Finite element analysis of a new type of h-section steel damper with hole opening[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(3): 346-352. (in Chinese)

[8] 徐艳红,李爱群,黄 镇. 抛物线外形软钢阻尼器试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(12): 202-209.

Xu Y H, Li A Q, Huang Zh. Experimental study of mild steel dampers with parabolic shape[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(12): 202-209. (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] 宋中霜,李冀龙,韩露,等.低屈服点钢剪切板阻尼器滞回性能试验研究[J].防灾减灾工程学报,2014,34(3):289-295.  
Song Zh Sh, Li J L, Han L, et al. Experimental study on hysteretic behavior of shear panel dampers made of steel with low yield point [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(3): 289-295. (in Chinese)
- [11] 李冀龙,欧进萍.X形和三角形钢板阻尼器的阻尼力模型(I)—基于双线性本构关系[J].世界地震工程,2004,20(1):10-16.  
Li J L, Ou J P. Damping force hysteresis loop models for X type and triangle mild steel dampers (I)—based on double linear constitutive model [J]. World Earthquake, 2004, 20(1):10-16. (in Chinese)
- [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,2006:51-58.  
Shi Y P, Zhou Y R. ABAQUS finite element analysis [M]. Beijing: Beijing Machinery Industry Press, 2006: 51-58. (in Chinese)
- [13] 建筑抗震试验规程:JGJ 101—1996[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.  
Seismic test code for buildings:JGJ 101—1996[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [14] Yi J, Gil H, Youm K, et al. Interactive shear buckling behavior of trapezoidally corrugated steel webs[J]. Engineering Structures, 2008, 30(6):1 659-1 666.
- [15] Herrmann H, Bucksch H. Eurocode3-Design of steel structures[M]. Wörterbuch GeoTechnik. Springer Berlin Heidelberg: Dictionary Geotechnical Engineering, 2014.
- [16] 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,2015:14-16.  
Guo Y L, Tong J Zh, Jiang Z Q. Design principle and application of corrugated web steel structure [M]. Beijing: Science Press, 2015:14-15. (in Chinese)
- (本文责编:池营营)



(上接第 379 页)

- [22] 王建强,辛伟,李政,等.铅芯橡胶支座剪切性能的压力相关性试验研究[J].地震工程与工程振动,2016,36(5):200-206.  
Wang J Q, Xin W, Li Zh, et al. Experimental study on vertical pressure dependency about shear properties of lead rubber bearing [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2016, 36(5): 200-206. (in Chinese)
- [23] 王建强,赵云,刘耀东,等.铅芯橡胶支座竖向刚度试验研究[J].铁道建筑,2015,55(11):33-36.  
Wang J Q, Zhao Y, Liu Y D, et al. Experimental study on vertical stiffness of lead-centered rubber bearings [J]. Railway Engineering, 2015, 55(11): 33-36. (in Chinese)