

文章编号: 1006-4710(2013)02-0207-04

# 薄壁 U 形金属阻尼器剪切刚度计算分析

刘茂社, 卢俊龙

(西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 通过建立有限元模型,对薄壁型 U 形金属阻尼器在水平荷载作用下的内力与变形进行了计算,并结合不同厚度 U 形阻尼器的力-位移曲线的特征,对阻尼器的内力分布与屈服过程进行分析,通过对比屈服前后的刚度,研究了 U 形金属阻尼器的刚度随其厚度及宽度的变化规律。结果表明,U 形金属阻尼器的屈服开始于压弯段,屈服后其刚度退化较大;屈服前后阻尼器刚度均随厚度的增加而增加,且当厚度大于 6 mm 时,增加速度加快;当阻尼器厚度一定时,各刚度均随宽度增加而线性增加,刚度增加速度屈服前略快于屈服后。因此,在结构振动控制设计时应用薄壁 U 形金属阻尼器可根据刚度要求设置合理的厚度及宽度。

**关键词:** 薄壁 U 形金属阻尼器; 剪切刚度; 振动控制; 数值分析; 刚度分析

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

## Analysis of Shear Stiffness of the Thin U-Shape Metal Damper

LIU Maoshe, LU Junlong

(Faculty of Civil Engineering And Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an, 710048, China)

**Abstract:** The internal force and deformation of the thin U-shape metal damper under horizontal load are calculated through the establishment of finite element model. Then the distribution of internal force and the yield course of the stiffness of the damper are analyzed in combining with the characters of curve of internal force and displacement of the U-shape dampers with different thickness. By contrast of stiffness before and after the yields, the stiffness transformation of U-shape metal damper in different thickness and width are studied. The research results indicate that the commencement of the yield of U-shape metal damper is at the zone of compress and bent and that after yield the stiffness degrades much, and the stiffness of damper before and after the yields increases with an increase in its thickness. When the thickness exceeds over 6 mm, the rate of enhance of stiffness is accelerated. When the thickness of damper is fixed, each stiffness increases linearly with an increase in width. The stiffness increasing rate prior to the yield is slightly faster than the stiffness posterior to the yield. Accordingly, when the structure vibration control is designed, the use of thin U-shape metal damper can be based on the rational thickness and width setting requirement by the stiffness.

**Key words:** thin U-shape metal damper; shear stiffness; vibration control; numerical analysis; stiffness analysis

近年来,结构消能减震与振动控制技术在结构工程中的应用越来越广泛,并收到了良好的效果。由于传统抗震设计方法以结构自身来耗散地震能量,而地震作用具有很强的随机性,在工程应用中往往不能实现预定的目标。应用耗能减震技术在结构中设置特定的阻尼器或耗能元件,地震时耗能部件

吸收和耗散地震能量,从而保护主体结构不被破坏<sup>[1-3]</sup>。

U 形金属阻尼器是一种新型阻尼器,其构造简单,造价低廉,计算模型简单且能够满足相关技术要求,在结构基础隔震及消能减震技术中均有很多应用<sup>[3]</sup>。相关研究中应用平面刚架模型,对 U 形金属

收稿日期: 2012-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50868011);陕西省教育厅专项科研计划项目(12JK0908)。

作者简介: 刘茂社,男,工程师,研究方向为结构工程。E-mail: liumaoshe@xaut.edu.cn。

阻尼器的刚度进行了计算,并对其滞回特性进行了试验研究,给出了计算厚度大于 10 mm 时 U 形金属阻尼刚度的经验计算公式<sup>[4-6]</sup>。而对厚度小于 10 mm 的阻尼器,其受力后的力学行为与厚壁型 U 形金属阻尼器有一定区别,对其刚度计算公式尚未进行过相关研究。为了使 U 形金属阻尼器能够方便地应用于工程结构减震技术中,本文采用有限元方法,计算厚度小于 10 mm 的 U 形阻尼器的刚度,研究其刚度变化规律,为工程应用提供依据。

## 1 U 形金属阻尼器构造

如图 1 所示,U 形金属阻尼器由 Q235 软钢带片弯曲制作而成,与其刚度特征相关的几何参数为板厚  $t$ 、板宽  $b$ 、弯曲半径  $R$  及外延长度  $L$ 。设计中可通过调整阻尼器的几何参数,能够提供适当的刚度,并能满足复位功能要求;而当产生大位移后,阻尼器中金属带片屈服,提供阻尼,并能满足相关构件的位移限制条件。

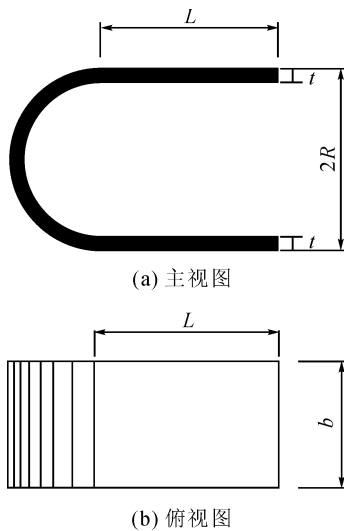


图 1 U 形金属阻尼器几何尺寸  
Fig. 1 Size of U-type metal damper

研究表明,在与长度  $L$  平行方向的外力作用下,U 形金属阻尼器的滞回曲线呈梭形,骨架曲线为双线性;屈服后呈滚动卷曲,刚度较小。在结构中,阻尼器可通过滑移及塑性变形吸收地震能量<sup>[6]</sup>。可见,U 形金属阻尼器的塑性变形量与其耗能性能密切相关,下面通过数值计算,分析薄壁 U 形金属阻尼器在屈服前后的刚度规律。

## 2 计算模型

### 2.1 几何参数

本研究中所采用的 U 形金属阻尼器的几何参

数为: $L = 150 \text{ mm}$ ,  $b = 75 \text{ mm}$ ,  $R = 50 \text{ mm}$ ,厚度从 2 mm 依次增加到 10 mm,相关研究提出的经验计算公式不适用,为此,通过依次增加水平力,计算阻尼器的刚度。

### 2.2 材料物理力学参数

如图 2 所示,按阻尼器的几何尺寸,采用 4 结点平面壳单元,建立有限元分析模型,计算阻尼器的刚度。阻尼器材料采用理想弹-塑性模型,应力-应变关系曲线见图 3,其中,弹性模量  $E = 210 \text{ GPa}$ ,屈服强度  $f_y = 215 \text{ MPa}$ 。

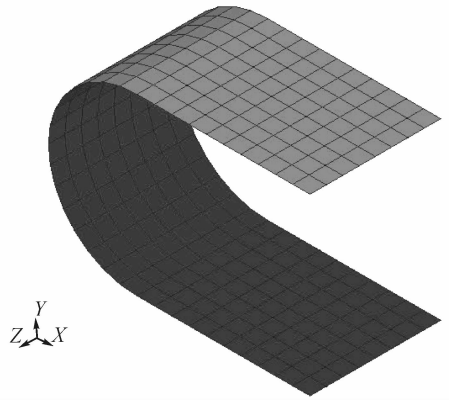


图 2 U 形金属阻尼器数值计算模型  
Fig. 2 Numerical model of U-type metal damper

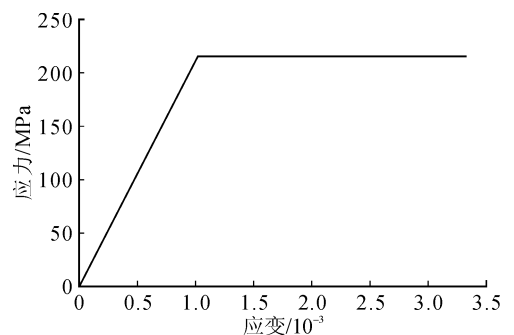


图 3 金属阻尼器材料的应力-应变关系曲线  
Fig. 3 Curve of relationship of stress and strain of U-type metal damper

### 2.3 计算结果

如图 2 所示,将 U 形金属阻尼器分为上平直段、弯曲段、下平直段三部分,将下平直段  $X$  方向端线固定,在上平直段沿  $X$  轴正方向施加水平力<sup>[7-8]</sup>。此时,上平直段为受拉段、下平直段为压弯段,由于受拉段的承载力远高于弯曲段和压弯段,因而阻尼器的屈服由下平直段的失稳决定;当荷载反向时,阻尼器的屈服由上平直段的压弯决定,因具有对称性,正反两个方向的刚度相同,故只计算荷载沿  $X$  轴正向的刚度。

逐步增大荷载值,直到阻尼器屈服后产生较大

位移。计算给出厚度  $t$  从 2 ~ 9 mm 变化时金属阻尼器的剪力-位移关系曲线,如图 4 所示。

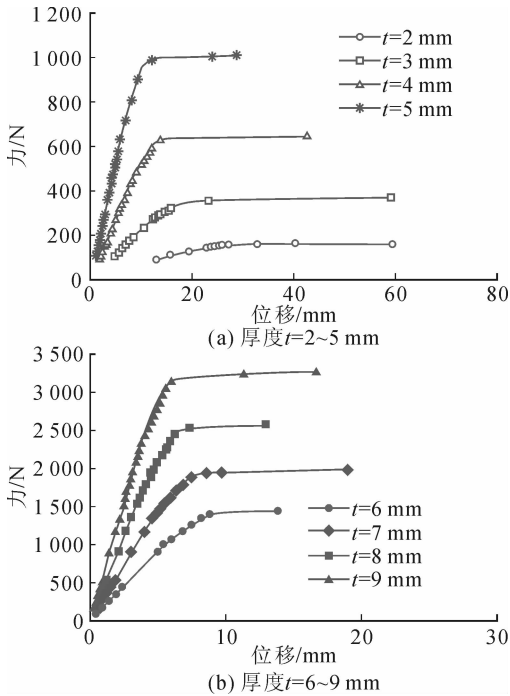
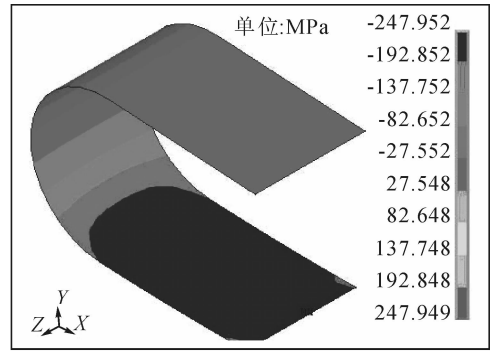


图 4 U 形金属阻尼器力-位移关系曲线  
Fig. 4 Curves of relationship of stress and strain of U-type metal damper

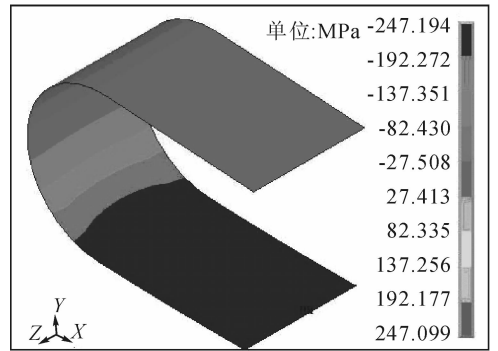
由图 4 可见,当阻尼器厚度变化时,力-位移关系曲线均呈现双线性,屈服点随厚度的增加而显著提高,屈服前的刚度随厚度增加较为显著,且刚度值较大。同时,阻尼器的厚度在 2 ~ 5 mm 变化时,厚度每增加 1 mm,其屈服强度大约增加 1 倍,屈服后外力随位移的增加缓慢,刚度退化明显。

### 3 刚度特性分析

为了分析 U 形阻尼器在加载屈服时的应力分布特征,取厚度  $t = 4$  mm 及  $t = 8$  mm 且对加载至屈服时的应力等值线进行分析,如图 5 所示。当加载至阻尼器屈服时,上平直段的拉应力较小,而下平直段的压应力值接近钢材的屈服强度值;在下平直段与弯曲段交接部位,应力发生连续变化,应力等值线近似与阻尼器宽度方向平行,约在弯曲段中心位置,应力值趋于稳定。可以看出,U 形金属阻尼器加载后,其变形以卷曲变形为主,其承载力由压弯段的屈服决定,当压弯段最大应力值达到屈服应力时,便在该区段出现塑性铰线,且对于不同厚度的阻尼器,其最大应力的分布位置均较为接近。而后阻尼器刚度开始发生改变,随着变形量的加大,塑性铰线继续推移,阻尼器刚度趋于稳定。



(a) 厚度  $t = 4$  mm



(b) 厚度  $t = 8$  mm

图 5 U 形金属阻尼器屈服时应力等值线  
Fig. 5 Stress contour of U-type metal damper

#### 3.1 刚度随厚度变化规律分析

由阻尼器剪切刚度与厚度的关系曲线(图 6)可见,屈服前后刚度均随厚度的增加而提高。当厚度  $t \leq 4$  mm 时,刚度随厚度近似呈线性增加,且屈服前刚度  $K_1$  约为屈服后刚度  $K_2$  的 2 倍左右;当厚度  $t > 4$  mm 时,  $K_1$  与  $K_2$  均随厚度增加快速提高,此时  $K_2$  约为  $K_1$  的  $\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3}$  左右。

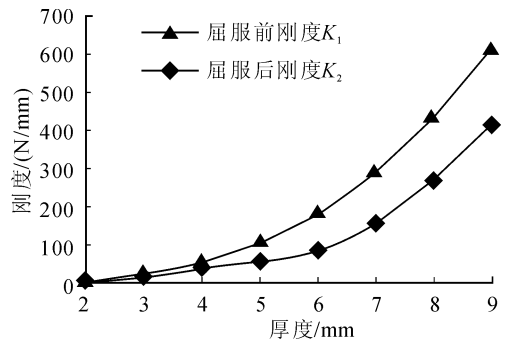


图 6 剪切刚度与阻尼器厚度关系曲线  
Fig. 6 Relation Curves of shear stiffness and thickness of damper

结合刚度变化特征分析可见,当厚度  $t \leq 4$  mm 时,阻尼器屈服主要由压弯段的失稳破坏控制,因厚度较小,其屈服后刚度退化较多。当厚度  $t > 4$  mm 时,压弯段的屈服由强度破坏控制,故其屈服后刚度

$K_2$  较  $K_1$  相差较少。

### 3.2 刚度随宽度变化规律分析

分别计算厚度  $t = 4 \text{ mm}$  及  $t = 8 \text{ mm}$ , 宽度  $b$  分别为 75、100、125、150、200 mm 时阻尼器的刚度, 如图 7 所示。

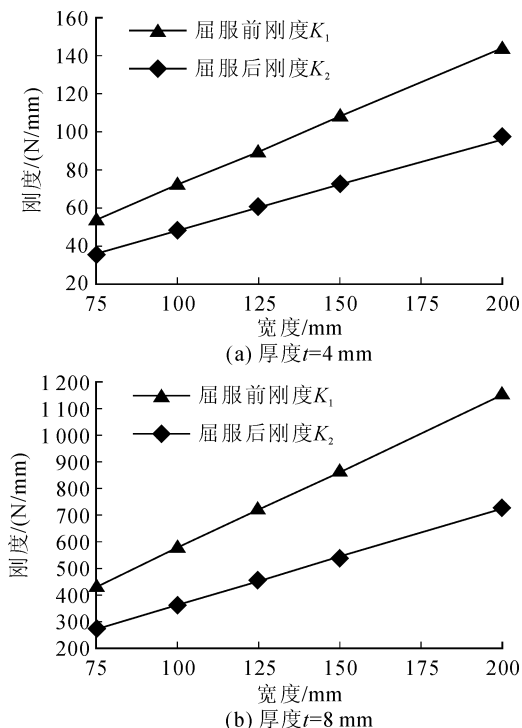


图7 剪切刚度与阻尼器宽度关系曲线

Fig. 7 Relation curves of shear stiffness and width of damper

可以看出, 两种厚度条件下阻尼器屈服前及屈服后的刚度均随其宽度的增加呈现线性提高, 且屈服前刚度  $K_1$  随宽度增加速度较  $K_2$  略快。

## 4 结论

通过建立不同厚度及宽度薄壁型 U 形金属阻尼器的有限元计算模型, 计算给出了阻尼器的加载曲线, 分析了其刚度特性, 主要结论列示如下。

1) 加载时薄壁型 U 形金属阻尼器的屈服主要由上压弯段或下压弯段的失稳所决定。

2) 不同厚度阻尼器的剪力-位移关系曲线均呈双线性变化, 屈服点随厚度的增加而显著提高。

3) 屈服前 U 形金属阻尼器的刚度值较大, 且刚度随厚度增加较为显著, 屈服后刚度较屈服前下降。

4) 屈服前后阻尼器的刚度均随厚度增加而提高。

5) 厚度  $t \leq 4 \text{ mm}$  的阻尼器, 屈服主要由压弯段的失稳破坏控制, 屈服后刚度降低较多, 而当厚度  $t > 4 \text{ mm}$  时, 压弯段的屈服由强度破坏控制, 故其屈服后刚度降低较少。

6) 当阻尼器厚度一定时, 其剪切刚度随其宽度呈线性增加关系, 且屈服前刚度较屈服后刚度增加较快。

### 参考文献:

- [1] 卢俊龙. 围护墙 TMD 减震结构协同工作及减震性能研究[R]. 西安: 长安大学博士后研究报告, 2011.  
Lu Junlong. Research on cooperative and vibration absorption performance of infilled walls TMD vibration absorption structures[R]. Xi'an: Research Report of Postdoctoral of Chang'an University, 2011.
- [2] 卢俊龙, 何明胜, 田洁. 填充墙 MTMD 减震结构优化参数分析[J]. 西安理工大学学报, 2013, 29(1): 27-31.  
Lu Junlong, He Mingsheng, Tian Jie. Analysis of vibration performance and optimal parameter of in-filled wall MTMD structure[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2013, 29(1): 27-31.
- [3] 滕军. 结构振动控制与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [4] 李钢, 李宏男. 新型软钢阻尼器的减震性能研究[J]. 振动与冲击, 2006, 25(3): 66-72, 206-207.  
Li Gang, Li Hongnan. Study on vibration reduction structure with a new type of mild metallic dampers[J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(3): 66-72, 206-207.
- [5] 霍晓鹏. 一种新型滑移隔震体系的理论分析与研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.  
Huo Xiaopeng. Theoretical analysis and research on a new kind of sliding base isolation system[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2007.
- [6] 姚谦峰. 软钢 U 型带片的限位、消能性能分析[J]. 西安建筑科技大学学报, 1997, 29(1): 22-26.  
Yao Qianfeng. Behavior of mild U-shaped steel plate restraining displacement and absorbing energy[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology, 1997, 29(1): 22-26.
- [7] 张智慧. 滑移隔震结构滑移元件损伤的地震反应分析研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.  
Zhang Zhihui. The seismic response analysis of damaged slip component of sliding isolated structure[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010.
- [8] 邢书涛, 郭迅. 一种新型软钢阻尼器力学性能和减震效果的研究[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(6): 179-186.  
Xing Shutao, Guo Xun. Study on mechanical behavior and effectiveness of a new type of mild steel damper[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(6): 179-186.