

分阶段耗能软钢阻尼器的实现方法及数值模拟

薛松涛^{1,2} 李林^{1,*} 谢丽宇¹

(1. 同济大学结构工程与防灾研究所, 上海 200092; 2. 日本东北工业大学工学部建筑学科, 日本 仙台)

摘要 分析了软钢阻尼器分阶段屈服的优点和几种实现方法, 并通过改变耗能软钢片的屈服强度和厚度的方法, 采用两种不同的软钢片, 设计出了一个弯曲屈服型软钢阻尼器。利用有限元软件 ABAQUS 对其进行了模拟分析。结果表明: 软钢阻尼器具有较好的滞回耗能性能, 能够实现分阶段屈服的目标, 即小震作用下部分软钢片进入屈服耗能阶段, 中震、大震作用下所有软钢片进入屈服耗能阶段。为分阶段屈服软钢阻尼器在工程中的应用起到一定的借鉴作用。

关键词 分阶段屈服, 软钢阻尼器, 耗能能力, 有限元分析

DOI:10.15935/j.cnki.jggcs.2016.04.019

Implementation Methods and Numerical Simulation of Multi-stage Energy-dissipating Mild Steel Damper

XUE Songtao^{1,2} LI Lin^{1,*} XIE Liyu¹

(1. Research Institute of Structure Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Architecture, Tohoku Institute of Technology, Sendai, Japan)

Abstract The advantages and implementations of multi-stage yield mild steel damper were analyzed, the method of changing the yield strength and the width of mild steel was adopted to design a bending type mild steel damper, which contains two different mild steel sheets. The finite element software ABAQUS was used to analyze the performance of the proposed damper. The simulation results show: the energy dissipation capacity of the mild steel damper was good, it can realize the target of multi-stage yield, a part of mild steel sheets enter the yield stage under frequent earthquake, and all mild steel sheets enter the yield stage to dissipate energy under medium and rare earthquake. It can play a reference role for in engineering application.

Keywords multi-stage yield, mild steel damper, energy-dissipating capacity, finite element analysis

1 概述

金属屈服耗能器首先由新西兰的 Kelly 等^[1]提出, 目前应用最广的是 X 形软钢阻尼器和三角形软钢阻尼器, 分别由 Whittaker 等^[2]和 Tsai 等^[3]研发。软钢阻尼器是一种位移相关型耗能阻尼器, 主要是利用钢材的塑性滞回变形来耗散地震能量。软钢阻尼器采用屈服应力比较低的软钢作为材料, 构造简单, 经济耐用, 震后更换方便, 适于工程抗震^[4]。目前已有的低屈服点钢, 其屈

服强度基本分为三个级别, 即 100 MPa、160 MPa 和 225 MPa^[5]。文献 [6] 总结了国内外研究的多种软钢阻尼器, 对不同形式软钢阻尼器的构造、原理和性能进行了分析。软钢阻尼器的形式可分为轴向屈服型、弯曲屈服型、剪切屈服型和扭转屈服型。低屈服点的软钢阻尼器在较强的地震和风振下才会起作用^[7]。

目前许多软钢阻尼器设计为小震弹性, 而只在中震、大震下起耗能作用, 经济性较差。有些阻尼器能够在小震屈服耗能, 但附加给结构的刚度较大, 地震作用下对主体结构不利。所以, 结合

收稿日期: 2015-06-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478356)

* 联系作者, Email: 969646876@qq.com

“三水准、两阶段”的抗震设计方法,有必要对软钢阻尼器进行合理设计,以实现分阶段屈服的性能目标,为结构提供两道减震防线。

2 分阶段屈服软钢阻尼器实现方法

2.1 弯曲屈服型

本文所述弯曲屈服型软钢片为常见的 X 形,沿 h 高度各点基本同时达到屈服,如图 1 所示。忽略中间宽度 a 以及软钢片所受剪力和竖向轴力的影响,耗能软钢片的屈服位移按式(1)计算:

$$\Delta_y = \frac{f_y h^2}{2Et} \quad (1)$$

式中 f_y 为软钢屈服强度; h 为软钢片的高度; E 为软钢的弹性模量; t 为软钢片的厚度。

所以可以通过调整软钢阻尼器中各钢片的屈服强度 f_y 、高度 h 、厚度 t 来改变各钢片的屈服位移,以实现分阶段屈服。文献 [8] 通过调整软钢片的高度 h 以达到不同的屈服位移。

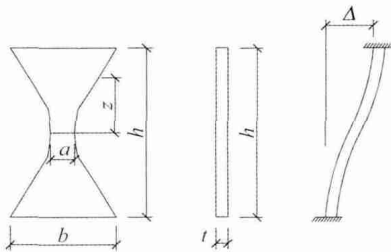


图 1 X 形弯曲屈服型软钢片

Fig. 1 X shaped bending type mild steel sheet

2.2 剪切屈服型

对于剪切屈服型软钢阻尼器,可以采用不同形式的剪切屈服软钢片,使其具有不同的屈服位移。在实际应用中,可以采用如图 2 所示的软钢阻尼器,通过开设不同尺寸的洞口,使洞口之间的软钢片具有不同的屈服位移,以实现分阶段屈服。

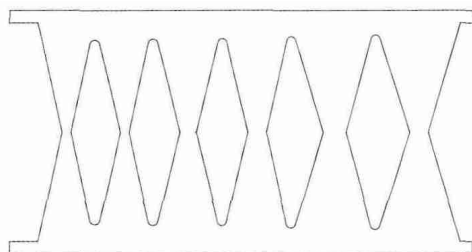


图 2 不同开孔尺寸的剪切屈服型软钢阻尼器

Fig. 2 Shearing type mild steel damper with different opening dimension

2.3 弯曲型与剪切型组合

剪切型软钢阻尼器包括剪切钢板阻尼器、蜂窝状阻尼器、槽形阻尼器、抛物线形阻尼器等。剪切型软钢阻尼器是基于钢片平面内受力,抗侧刚度较大,屈服位移较小;而弯曲型软钢阻尼器是基于钢片平面外受力,抗侧刚度较小,屈服位移较大。所以可以将弯曲型和剪切型钢片进行组合,得到分阶段屈服软钢阻尼器,在小震作用下剪切型钢片率先进入屈服耗能,弯曲型钢片仍保持弹性,在大震作用下,弯曲型和剪切型钢片同时屈服耗能,以保护主体结构。X 形弯曲屈服软钢片与剪切钢板组合的分阶段屈服软钢阻尼器如图 3 所示。

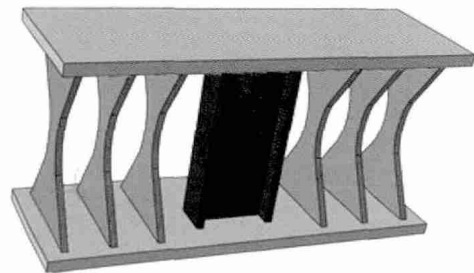


图 3 弯曲型与剪切型组合的软钢阻尼器

Fig. 3 Mild steel damper with bending and shearing type mild steel sheets

2.4 附加黏弹性材料

黏弹性材料属于速度相关型,只要有相对速度就能耗能,所以可以在软钢阻尼器中加入黏弹性材料,综合软钢阻尼器和黏弹性阻尼器的优点,以实现分阶段屈服的目标。分阶段耗能的过程:第一阶段,小震作用下黏弹性材料即开始耗能;第二阶段,中震或大震作用下软钢片进入屈服,黏弹性材料和软钢片共同耗能。

对于轴向屈服型软钢阻尼器,比如屈曲约束支撑,可以在端部约束套筒上焊接延伸钢板,在延伸钢板和芯材中间填充黏弹性材料,利用约束套筒和芯材的相对速度来耗散能量。

对于弯曲型软钢阻尼器,可以在上下连接钢板分别焊接延伸钢板,在延伸钢板之间填充水平或竖向黏弹性材料,其利用上下延伸钢板的相对速度来耗散能量。弯曲型软钢阻尼器附加黏弹性材料如图 4 所示。

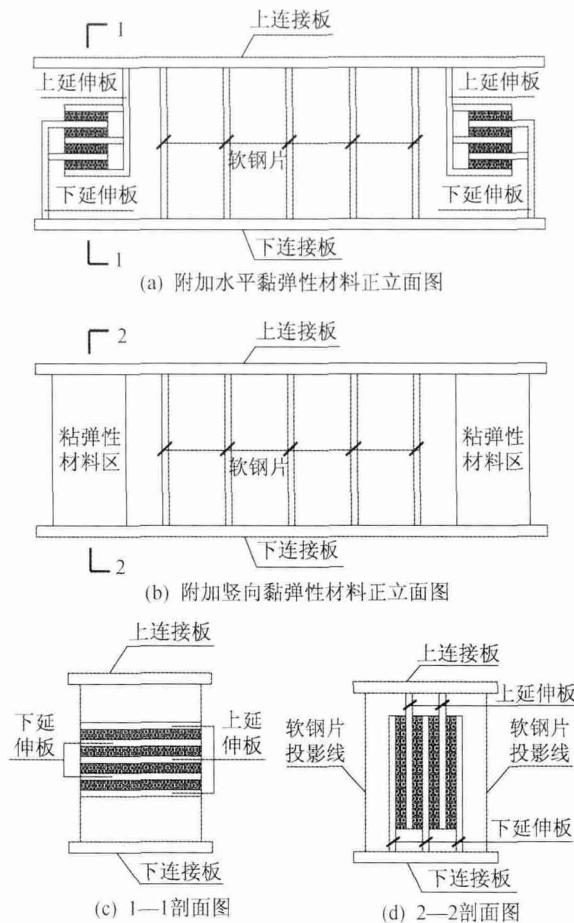


图4 附加黏弹性材料软钢阻尼器

Fig.4 Mild steel damper with viscoelastic material

3 分阶段屈服软钢阻尼器设计

3.1 软钢片屈服位移的确定

本文采用 X 形弯曲屈服型软钢片,通过调整软钢片的屈服强度和厚度来实现分阶段屈服的目标。分阶段屈服的思想是:第一阶段,部分软钢片在小震范围内便进入屈服耗能,另外一部分软钢片在超过小震位移时才开始耗能;第二阶段,在中震、大震作用下,所有软钢片进入屈服耗能。

根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[9] 框架剪力墙结构的弹性层间位移角限值为1/800,层高取3.6 m,则最大弹性层间位移限值为4.5 mm。根据分阶段屈服的思想,部分软钢片的屈服位移小于4.5 mm,另一部分软钢片的屈服位移大于4.5 mm。

3.2 软钢片设计参数的确定

软钢阻尼器的高度取为300 mm,小震作用下

即进入屈服的软钢片记为 A1,中震、大震作用下才屈服的软钢片记为 A2。A1 的屈服位移不宜太低,以避免风荷载长期反复作用下软钢片滞回耗能能力的降低。A1 的屈服强度取为 100 MPa,厚度 $t = 14$ mm,根据 X 形软钢片的屈服位移计算公式(1)可知,屈服位移为 1.56 mm。A2 的屈服强度取为 225 MPa,厚度 $t = 10$ mm,屈服位移为 4.9 mm。软钢片的具体设计参数如表 1 所示。X 形软钢片的平面尺寸如图 5 所示,分阶段屈服软钢阻尼器模型如图 6 所示,左边 5 个软钢片为 A1,右边 5 个软钢片为 A2,软钢片间距为 60 mm。上下为连接板,尺寸为 220 mm × 600 mm × 20 mm。

表 1 软钢片设计参数
Table 1 The design parameters of mild steel sheets

软钢片设计参数	A1	A2
钢材屈服强度 f_y /MPa	100	225
高度 h /mm	300	300
端部宽度 b /mm	180	180
中间宽度 a /mm	40	40
厚度 t /mm	14	10
屈服位移 Δ_y /mm	1.56	4.88
数量 n /个	5	5

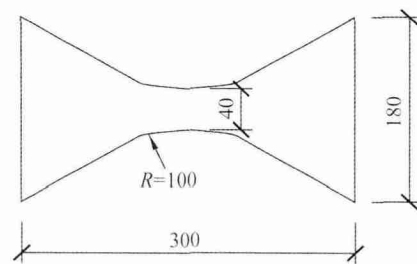


图5 X形软钢片平面尺寸(尺寸:mm)

Fig.5 The plane size of X shaped mild steel sheet (Unit:mm)

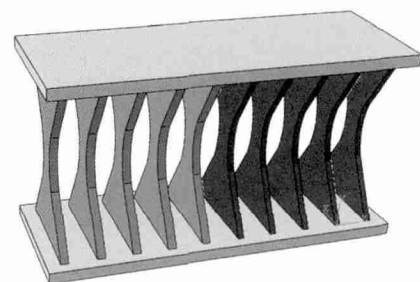


图6 分阶段屈服软钢阻尼器模型

Fig.6 Model of multi-stage yield mild steel damper

4 分阶段软钢阻尼器滞回性能模拟

4.1 建模方法

利用 ABAQUS 有限元分析软件进行建模分析,从而研究分阶段屈服软钢阻尼器的滞回耗能性能。上下连接板对阻尼器的滞回耗能性能影响小,采用离散刚体建模,耗能软钢片采用变形体建模。软钢片端部与连接板的连接假定完全刚性,采用绑定(tie)约束。在下连接板和上连接板的形心分别建立参考点 RF1 和 RF2。将下连接板固接,约束参考点 RF1 的 6 个自由度,上连接板只允许在板长方向能发生位移。为了更加准确地进行模拟,耗能软钢片厚度方向网格划分四层。网格划分如图 7 所示。

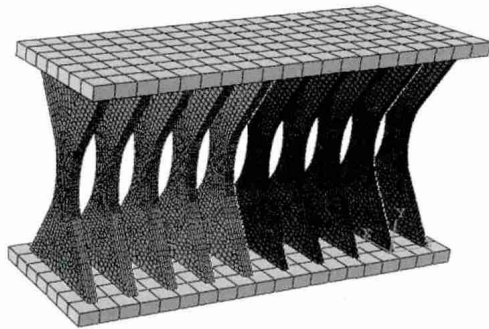


图 7 网格划分模型

Fig. 7 Model of grid partitioning

4.2 钢材性能

采用 Von Mises 屈服准则和双线性随动强化模型来模拟耗能软钢片,钢材弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5$ MPa,泊松比 $\nu = 0.3$,屈服后刚度比为 0.02。A1 的屈服强度为 100 MPa,A2 的屈服强度为 225 MPa。钢材本构关系如图 8 所示。

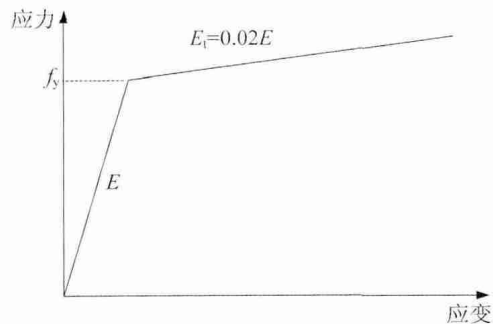
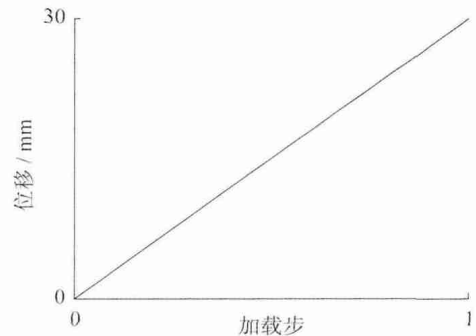


图 8 钢材应力应变关系

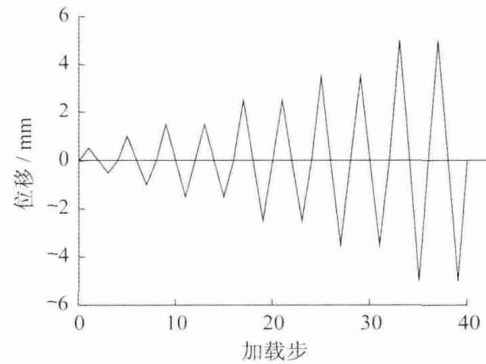
Fig. 8 The stress-strain relationship of steel

4.3 加载方法

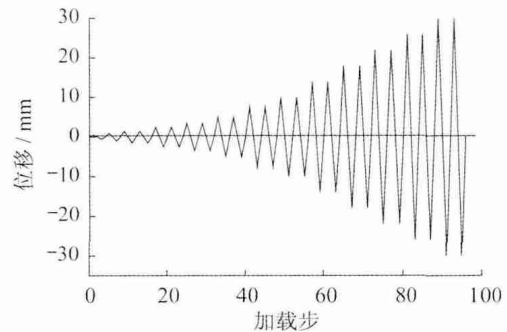
在上连接板施加沿板长方向的位移,采用三种加载工况,工况 1 为最大位移等于 30 mm 的单调位移加载,工况 2 为最大位移等于 5 mm 的循环往复位移加载,工况 3 为最大位移等于 30 mm 的循环往复位移加载。工况 2 和工况 3 分别模拟小震和大震作用下软钢阻尼器的耗能性能。位移加载谱如图 9 所示。



(a) 单调加载(工况 1)



(b) 小震循环往复加载(工况 2)



(c) 大震循环往复加载(工况 3)

图 9 加载方法

Fig. 9 The loading scheme

4.4 两种软钢片的有限元模拟

对于软钢片的模拟,采用工况 3,即最大位移等于 30 mm 的循环往复位移加载,得到两种软钢片的滞回曲线,如图 10 所示。可以看出:两种软

钢片的滞回曲线饱满,耗能能力良好,软钢片 A1 屈服位移较小,小震时率先进入塑性变形耗散地震能量,软钢片 A2 在大震时进入屈服,与小钢片共同耗散地震能量,符合分阶段屈服的思想。软钢片屈服后刚度系数约为 1%~3%,符合二折线本构关系。

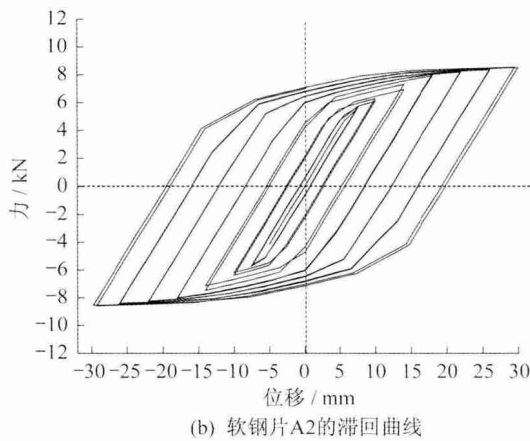
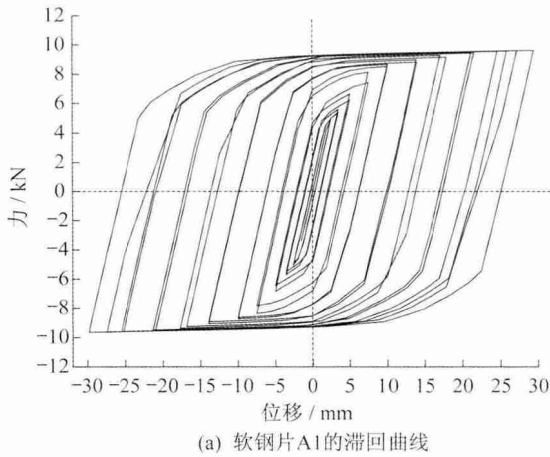


图 10 两种软钢片的滞回曲线

Fig. 10 The hysteretic curves of two mild steel sheets

4.5 软钢阻尼器单调位移加载有限元模拟

单调加载作用下,反力-位移关系如图 11 所示。反力与位移呈三折线关系,当加载位移较小时,所有软钢片均处于弹性范围,软钢阻尼器的弹性刚度 $K_{OA} = 15\ 403\ \text{kN/m}$;当加载位移达到 A1 软钢片的屈服位移 (A 点) 后,A1 软钢片进入塑性屈服阶段,而此时 A2 软钢片仍处于弹性范围,软钢阻尼器的第二刚度 $K_{AB} = 5\ 898\ \text{kN/m}$;当加载位移达到 A2 软钢片的屈服位移 (B 点) 后,所有软钢片均处于塑性屈服阶段,软钢阻尼器的第三刚度 $K_{BC} = 447\ \text{kN/m}$,略大于 $0.02K_{OA}$,这是因为软钢片中间宽度为 40 mm,中间局部区域处于

弹性,屈服后刚度有所增加。

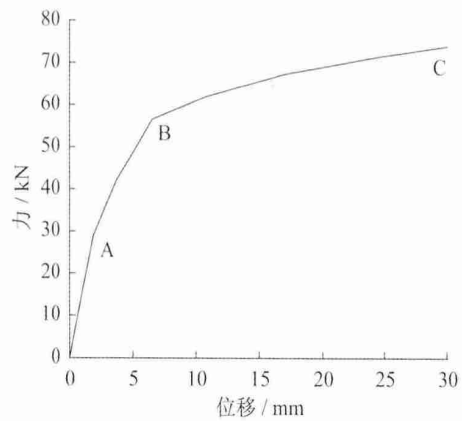


图 11 单调加载反力-位移曲线

Fig. 11 Reaction force-displacement curve under monotonic loading

4.6 软钢阻尼器循环往复位移加载有限元模拟

4.6.1 小震作用下有限元模拟

工况 2 情况下,当位移幅值为 5 mm 时,软钢阻尼器的滞回曲线如图 12 所示。滞回曲线饱满、稳定,软钢阻尼器在小震作用下具有良好的耗能能力,此时 A2 软钢片仍处于弹性,软钢阻尼器的屈服后刚度 $K' = 6\ 088\ \text{kN/m}$,与单调加载作用下的第二刚度 K_{AB} 相近。

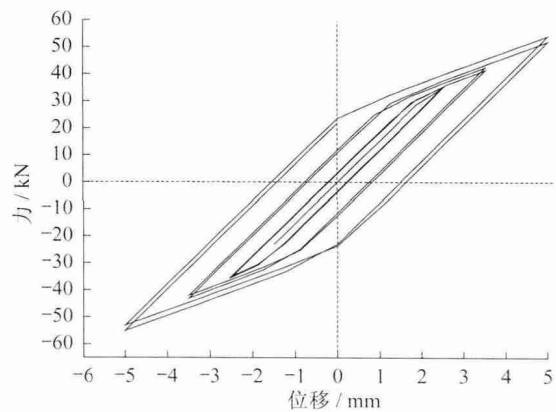


图 12 工况 2 的滞回曲线

Fig. 12 The hysteresis curve under case 2

4.6.2 大震作用下有限元模拟

工况 3 情况下,当位移幅值为 30 mm 时,软钢阻尼器的滞回曲线如图 13 所示。滞回曲线饱满、稳定,具有良好的耗能能力,骨架曲线呈三折线型,表明通过改变软钢片的屈服强度和厚度能够达到较好的分阶段屈服效果。在小震、中震和大震作用下,软钢阻尼器均有较好的耗散地震能

量的作用。

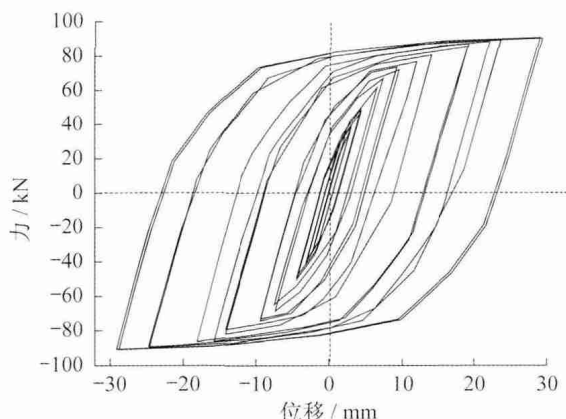


图 13 工况 3 的滞回曲线

Fig. 13 The hysteresis curve under case 3

当 A1 软钢片达到屈服强度 100 MPa 时,软钢阻尼器的 Mises 应力云图如图 14 所示。可知 A1 此时已经开始进入塑性耗能阶段,软钢片中部弯矩较小,处于弹性阶段,A2 软钢片仍处于弹性范围。

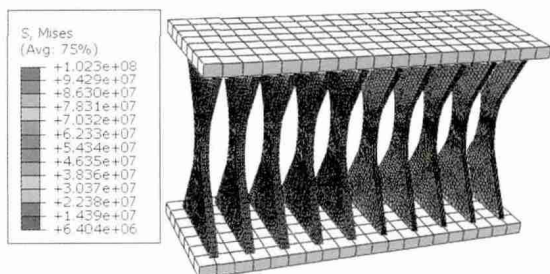


图 14 A1 软钢片屈服时应力云图(单位: Pa)

Fig. 14 The stress nephogram when A1 (Unit: Pa) mild steel sheets yield

当 A2 软钢片达到屈服强度 225 MPa 时,软钢阻尼器的 Mises 应力云图如图 15 所示。此时所有软钢片均处于塑性耗能阶段,由于 A1 和 A2 的屈服强度不一样,所以达到屈服时两种钢片的应力云图颜色不同。

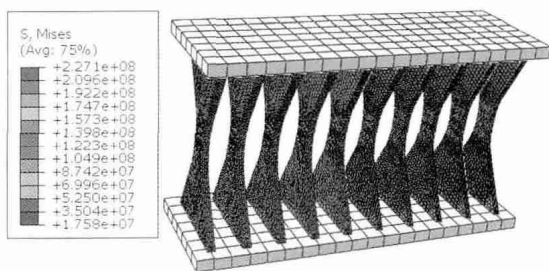


图 15 A2 软钢片屈服时应力云图(单位: Pa)

Fig. 15 The stress nephogram when A2 (Unit: Pa) mild steel sheets yield

5 结论

本文探讨了分阶段屈服软钢阻尼器的实现方法,并采用了改变耗能软钢片的屈服强度和厚度方式,设计两种不同的软钢片,并对其进行了有限元数值模拟,结论如下:

(1) 弯曲屈服型软钢阻尼器可以通过改变软钢片的屈服强度、厚度和高度的方法来实现分阶段屈服;剪切屈服型软钢阻尼器可以设置不同尺寸的开孔来实现分阶段屈服;也可以采用弯曲型和剪切型软钢片相结合的方法和在软钢阻尼器中附加黏弹性材料的方法来实现分阶段屈服。

(2) 分阶段屈服软钢阻尼器在单调递增位移作用下,荷载-位移曲线呈三折线形,在小震作用下部分软钢片屈服后仍能给结构提供较大的刚度。

(3) 数值模拟表明,本文所设计的分阶段屈服软钢阻尼器具有稳定的滞回性能和良好的塑性变形能力,能够达到分阶段屈服耗能的目标。

(4) 分阶段屈服软钢阻尼器具有两道减震防线,更加安全、可靠,同时具有良好的耗能能力,在实际工程中具有更广泛的应用前景。

(5) 软钢片应能保证在风振作用下处于弹性阶段,对于小震即进入屈服耗能的软钢片,应进一步研究其塑性累积变形和疲劳性能。

参考文献

[1] 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 National Society for Earthquake Engineering, 1972, 5(3): 63-88.

[2] Whittaker A S, Bertero V V, Thompson C I, et al. Seismic testing of steel plate energy dissipation devices [J]. Earthquake Spectra, 1991, 7(4): 563-604.

[3] Tsai K C, Chen H W, Hong C P, et al. Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction [J]. Earthquake Spectra, 1993, 9(3): 505-528.

[4] 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. (in Chinese)
- [5] 温东辉,宋凤明.低屈服点钢在建筑抗震设计中的应用[J].宝钢技术 2007 02:9-12.
Wen Donghui ,Song Fengming. Application of low yield point steel in design of earthquake resistant buildings [J]. Technology of Baosteel 2007 02: 9-12. (in Chinese)
- [6] 王桂萱,孙晓艳,赵杰.不同形式软钢阻尼器的研究[J].防灾减灾学报 2014 01:7-15.
Wang Guixuan ,Sun Xiaoyan Zhao Jie. Study of different types of metallic dampers [J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction ,2014 ,01: 7-15. (in Chinese)
- [7] 章丛俊,李爱群,赵明.软钢阻尼器耗能减震结构的研究与应用综述[J].工业建筑 2006 09:17-21.
Zhang Congjun ,Li Aiqun Zhao Ming. Summary of research on and applications of passive energy dissipation systems of mild steel damper [J]. Industrial Construction 2006 09: 17-21. (in Chinese)
- [8] 姜昕.新型软钢阻尼器的研制及其力学性能分析[D].南京:南京工业大学 2011.
Jiang Xin. Development and mechanical property analysis of a new type of mild steel damper [D]. Nanjing: Nanjing University of Technology 2011. (in Chinese)
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture and Building Press ,2010. (in Chinese)