

文章编号:1673-2049(2018)05-0060-10

消能减震及软钢阻尼器的研究与应用综述

韩建强,丁祖贤,张玉敏

(华北理工大学 建筑工程学院,河北 唐山 063210)

摘要:以单自由度体系为例,从结构的力学和能量角度对比分析了传统结构和装有附加耗能装置结构之间的区别,从而得出消能减震结构的原理;从耗能材料、耗能机理、受力形式等不同的角度对各类阻尼器进行了简单的汇总和分类;总结了国内外几种典型的软钢阻尼器,如 X 形阻尼器、三角形阻尼器、中空菱形阻尼器、圆形阻尼器等,并对这几种软钢阻尼器的提出、发展、优化、几何构造、减震原理等方面做了简要说明;针对目前利用阻尼器耗能的消能减震结构仍存在的很多亟待解决的问题,提出了阻尼器研究中有待解决的若干问题和今后阻尼器设计时可采取的一些建议。结果表明:消能减震结构比传统结构在同样的地震力作用下增加了阻尼器耗能,使原结构的塑性变形耗能和滞回耗能需求减少,从而减轻了主体结构的损伤程度;软钢阻尼器因其构造简单、力学性能稳定、造价相对低廉、耗能效果显著等优点,研究和应用最为普遍;阻尼器设计中应考虑合理设置阻尼器平面形状,设置多个耗能元件及耗能机制,利用新材料新技术减少焊接连接,建立更准确的本构关系以及更完备的指导规范。

关键词:地震;消能减震;软钢阻尼器;力学原理

中图分类号:TU352.1 **文献标志码:**A

Summary of Research and Application of Energy Dissipation and Mild Steel Damper

HAN Jian-qiang, DING Zu-xian, ZHANG Yu-min

(College of Civil and Architectural Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China)

Abstract: Taking the single degree of freedom system as an example, the difference between the traditional structure and the structure with additional energy consuming devices was analyzed from the perspective of structural mechanics and energy, and the principle of energy dissipation structure was obtained. Various types of dampers were simply summarized and classified from different angles such as energy consuming materials, energy consumption mechanism, and force form. Several typical soft steel dampers at home and abroad were summarized, such as X-shaped dampers, triangular dampers, diamond-shaped opening dampers, circular dampers, etc. The brief descriptions of the proposed, development, optimization, geometric structure and damping principle of these kinds of mild steel dampers were given. Aiming at many problems that need to be solved for the energy dissipation structure using damper energy dissipation, several problems to be solved in the damper research and some suggestions that can be taken in the future damper design were proposed. The results show that the energy dissipation structure is more effective

收稿日期:2018-07-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51678237)

作者简介:韩建强(1977-),男,河北永年人,教授,工学博士,E-mail:tshjq@139.com。

than the traditional structure under the same seismic force, such as increasing the energy consumption of the damper, reducing the plastic deformation energy consumption and hysteretic energy consumption of the original structure, thereby reducing the damage of the main structure. The soft steel damper is the most common research and application due to its simple structure, stable mechanical performance, relatively low cost and remarkable energy consumption. The damper design should consider the reasonable plane shape, set up multiple energy consuming components and energy consumption mechanism, use new materials and new technologies to reduce solder joints, establish more accurate constitutive relationships and more complete guidelines.

Key words: earthquake; energy dissipation; mild steel dampers; mechanics principle

0 引言

地震作为一种正常的自然现象,是不可避免和无法预料的。1976 年中国唐山发生了 7.8 级地震,2008 年发生了“5·12”四川汶川 8 级地震,2017 年墨西哥海域发生 8.2 级强震并引发海啸,这些地震造成了大量房屋破坏和倒塌,人民生命和财产蒙受了巨大损失。因此,为了减小地震带给人们的损失,消能减震技术逐渐成为广大学者研究的热门课题。

1 消能减震原理

一般的传统抗震结构抗震设计的原则是允许结构中的次要构件产生一定的塑性变形,人为的在结构中设置薄弱层,利用结构本身的延性和塑性变形来消耗地震能量以满足抗震设防标准,即“小震不坏,中震可修,大震不倒”。然而,这种“硬碰硬”的抗震方式缺乏自我调节能力,在不可预知的地震力作用下,很有可能不能满足抗震要求。

对于消能减震结构,其设计思想是:在结构的支撑、剪力墙连梁、连接缝等部位附加消能减震装置,与原结构形成一个新的系统,通过附加消能减震装置的摩擦、弯曲、剪切等变形先于主体结构耗散地震输入的能量,衰减了结构的地震反应,使得主体结构承受的地震作用明显减小,从而减轻结构的损伤程度,达到减震控制的目的。

以单自由度体系为例说明消能减震结构的力学原理。对于传统结构单自由度体系,动力学方程为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + F(x) = -m\ddot{x}_0 \quad (1)$$

式中: m 为质量; x, \dot{x}, \ddot{x} 分别为结构位移、速度和加速度; $F(x)$ 为结构恢复力; \ddot{x}_0 为地面加速度。

地震作用下结构能量平衡方程为

$$E_K + E_D + E_S = E_{EQ} \quad (2)$$

式中: E_{EQ} 为地震输入给系统的总能量; E_K 为系统

的动能; E_D 为系统的阻尼耗能; E_S 为系统的变形能。

E_S 由结构弹性变形能 E_E 、塑性变形能 E_P 、滞回耗能 E_H 组成,即

$$E_S = E_E + E_P + E_H \quad (3)$$

当地震结束后,结构停止振动,此时系统速度、加速度均为 0,结构的弹性变形恢复,故地震结束后动能 E_K 、弹性变形能 E_E 均为 0。式(2)改写成

$$E_D = E_P + E_H + E_{EQ} \quad (4)$$

这就说明地震作用输入到结构的能量最终由结构阻尼耗能、塑性变形能和滞回耗能耗散组成。

从式(4)看出,在地震作用下,结构的阻尼耗能、塑性变形能和滞回耗能大于地震输入的能量,结构即可抵御地震作用。通常增强结构抵御地震能力有 2 种途径:一是减小式(4)右侧 E_{EQ} 的值,即减小地震输给结构的能量,这种方法对应于隔震减震技术(如在结构基础部位增设隔震橡胶垫);另一种是增加式(4)左侧的值,即增强结构耗能能力,这种方法对应于消能减震技术(如增置阻尼器)。

对于单自由度消能减震结构,由于结构中增加了阻尼器,其所提供的恢复力为 $F_S(\dot{X}, X)$,在地震作用下,结构的振动方程为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + F(x) + F_S(\dot{X}, X) = -m\ddot{x}_0 \quad (5)$$

结构能量平衡方程为

$$E_D + E_P + E_H + E_S = E_{EQ} \quad (6)$$

比较式(6)和式(4)可知,在同样的地震力作用下,消能减震结构与传统结构相比,由于附加的阻尼器对结构的地震输入能量 E_{EQ} 没有影响,而耗能能力增加了阻尼器耗能项 E_S ,从而使原结构的塑性变形耗能和滞回耗能需求减少,这样就减轻了主体结构的损伤程度。

2 阻尼器的主要类型

阻尼器按照速度与位移相关性可分为位移相关

性阻尼器(软钢阻尼器、摩擦阻尼器等)、速度相关性阻尼器(黏滞阻尼器等),近年来又开发出了复合型阻尼器(铅黏弹性阻尼器等);按照耗能材料,阻尼器可分为金属阻尼器(软钢阻尼器、铅阻尼器等)、黏滞阻尼器(油阻尼器等)、智能材料阻尼器(SMA 阻尼器等);按照耗能机理,阻尼器可分为摩擦阻尼器(板式摩擦阻尼器等)、弹塑性阻尼器(软钢阻尼器等)等;按照受力形式,阻尼器可分为弯曲线型(弯曲梁耗能器等)、剪切型(剪切钢板阻尼器等)、挤压型(铅挤压阻尼器等)、扭转型(扭转梁阻尼器等)等。

在众多阻尼器中,软钢阻尼器因其构造简单、力学性能稳定、耐疲劳性能良好、造价相对低廉、破坏后方便更换、减震效果显著等优点,研究和应用最为普遍。软钢阻尼器应该同时具备 2 个特点:初始刚度大、屈服后良好的变形耗能能力,才能充分发挥这种新的“组合耗能体系”作用。自 1972 年 Yao^[1] 提出结构振动控制概念以来,各国学者对软钢阻尼器进行了大量理论和试验研究。在结构中设置金属阻尼器来耗散地震能量的做法开始于 Kelly 等^[2] 所做的研究。1972 年, Kelly 等利用软钢屈服后性能稳定等优点,研制出扭转梁、弯曲梁、U 形钢等形式的阻尼器。随后广大学者研发出了各式各样的阻尼器。下面着重介绍几种典型的软钢阻尼器。

3 几种典型的软钢阻尼器

3.1 X 形和三角形阻尼器

X 形和三角形加劲阻尼器由若干块相互平行的钢板和钢板间的定位装置组成,如图 1 所示。在地震力作用下,层间相对位移使阻尼器钢板产生弹塑性变形(侧向弯曲屈服)耗散地震能量。这种加劲阻尼装置最大的优点是钢板等厚度处各点可同时达到屈服,从而充分发挥材料的塑性能。

X 形加劲钢板阻尼器(XADAS)最早由 Whitaker 等^[3] 于 1989 年提出并进行试验研究,结果表明 XADAS 具有较强的耗能能力。1993 年 Tsai 等^[4] 提出并研制了三角形加劲钢板阻尼器(TADAS),并对装有该阻尼器的钢框架进行了伪静力试验,结果表明 TADAS 消除了 X 形阻尼器竖向轴力的影响且有效减小了框架的地震响应,是一种理想的耗能装置。

1995 年欧进萍等^[5] 进行了摩擦型和 X 形、三角形软钢阻尼器的静力加载和低周疲劳试验,并对装有阻尼器的单层剪切型钢框架模型进行振动台试验,分析比较了摩擦型和 X 形、三角形阻尼器的减

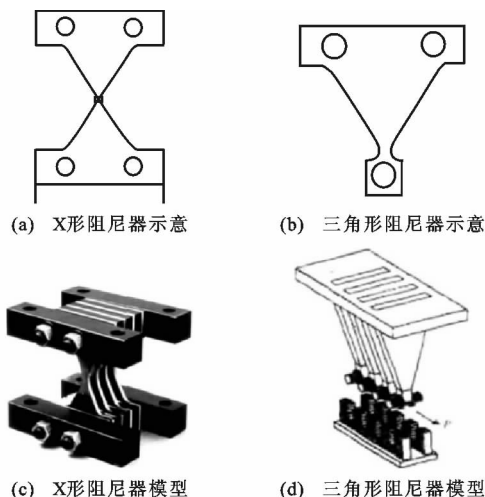


图 1 X 形、三角形阻尼器

Fig. 1 X and Triangular-shaped Dampers

震效果,得到了此类阻尼器的恢复力计算模型和参数确定方法。随后吴斌等^[6] 建立了 X 形和三角形阻尼器的弹塑性计算式,确定了疲劳模型参数和疲劳寿命曲线,为这种阻尼器参数设计提供了依据。1997 年吴斌等^[7] 就钢板屈服阻尼器的薄膜效应进行了讨论,提出了考虑薄膜效应的疲劳验算准则。2004 年李冀龙等^[8-9] 分别利用软钢的 Ramberg-Osgood 本构关系(R-O 模型)和双线性本构关系,推导建立了 X 形和三角形钢板阻尼器的恢复力模型,并分析了恢复力模型及其参数与试验结果存在误差的原因,即需考虑钢板阻尼器的几何非线性和消除薄膜效应的影响。

3.2 中空菱形阻尼器

2003 年中国地震局工程力学研究所的邢书涛等^[10] 研究了一种纵截面为中空菱形的阻尼器,如图 2 所示。以一幢六层钢筋混凝土框架为算例,研究了阻尼器参数对试验的影响,确定了此种阻尼器的阻尼力模型和疲劳验算式,并给出了阻尼器的最佳参数取值范围,为中空菱形阻尼器的进一步研究和应用奠定了重要的基础。2008 年张文元等^[11] 对 6 组中空菱形阻尼器单片进行了往复加载试验,证明了这种阻尼器具有良好的滞回性能和抗疲劳性能;通过振动台对比试验,以三层钢框架为研究对象,证明了阻尼器对结构的加速度和位移都有很好的控制作用,减震效果显著。2015 年王桂萱等^[12] 针对菱形开洞阻尼器,分别采用理想弹塑性模型、双线性随动强化模型和混合模型,分析其滞回性能,得到了不同模型下的滞回曲线并比较了各模型的优缺点;研究还利用有限元软件 ANSYS 进行了基于混合模型的

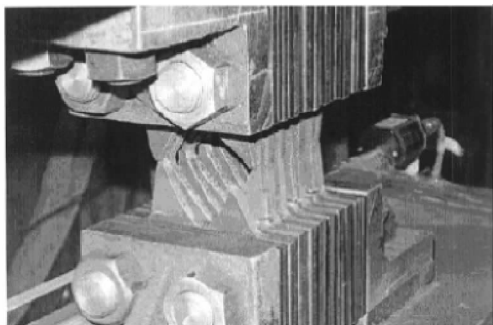


图 2 中空菱形阻尼器

Fig. 2 Diamond-shaped Opening Dampers

90°,60°,45°菱形开洞的数值模拟,通过极限位移时的应力分布云图和滞回曲线分析,验证了混合模型是菱形开洞软钢阻尼器相对比较精确的本构模型。

3.3 其他几种平面钢板阻尼器

3.3.1 李钢等提出的新型软钢阻尼器

很多软钢阻尼器是利用平面外钢板等厚度各点同时达到屈服来实现耗能的,这类阻尼器虽有塑性变形大、滞回性能稳定等优点,但是不容忽视的不足之处在于阻尼器的初始刚度较小,承载能力不足,在一般的小震作用下并不需要阻尼器参与工作。针对这种不足,2006 年李钢等^[13]提出了一种软钢阻尼器设计新思路:利用钢板平面内受力实现耗能并通过改变阻尼器平面几何形状使钢板出现多点屈服的方法来增强耗能能力。基于这种新思路,他们研制了 5 种新型钢板阻尼器并进行了拟静力往复加载试验。结果表明,单圆孔形阻尼器和双 X 形软钢阻尼器(图 3)具有滞回性能稳定、塑性变形大、有一定的初始刚度、力学性能稳定等优点,是一种理想的耗能阻尼器。随后李钢等^[14]又分别对装有这 2 种“双功能”阻尼器的框架结构进行了模拟地震振动台试验,结果表明这 2 种阻尼器可以耗散大部分地震能量,明显降低结构损伤,实现了小震下为结构提供初始刚度和大震下消耗地震能量的设计理念。

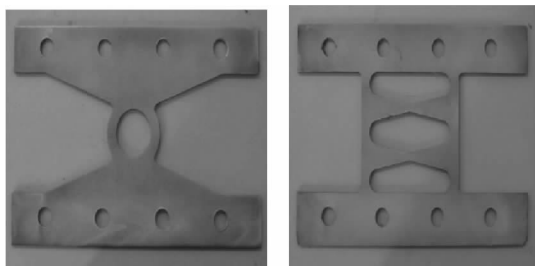


图 3 单圆孔形和双 X 形阻尼器

Fig. 3 Single Circular and Double X-shaped Dampers

3.3.2 滕军等开发的连梁阻尼器

连梁在剪力墙抗震体系中发挥着至关重要的作用,但由于剪力墙构造和连梁所处洞口尺寸限制的原因,使得连梁多具有跨度小、截面大的特点。针对连梁构造与保证其刚度和延性方面的矛盾问题,国内外学者虽提出了斜对角交叉暗柱式配筋、菱形配筋等诸多构想,但多由于配筋率高、施工方法复杂难以推广等原因,应用并不是很多。2007 年滕军等^[15]基于耗能减震方法提高剪力墙抗震设计思想,设计了一种新型软钢阻尼器用于替换或附加于连梁的构造方案(图 4)。这种方案有效缓解了连梁配筋难的问题。设计构件首先采用了 2 种开洞形式,并与未开洞的平面钢板耗能性能做了对比。ABAQUS 有限元软件的分析表明,双列孔开洞形式不仅保证了耗能构件的阻尼比和抗侧刚度,还使得塑性变形更加充分,耗能效果更佳突出。



图 4 连梁阻尼器

Fig. 4 Coupling Beam Damper

滕军等^[16]于 2010 年对 11 个连梁阻尼器进行了伪静力试验,采用数据拟合法分析试验数据得到了阻尼器的初始刚度、极限承载力和非线性刚度经验公式,并提出了三参数评价指标,即孔间柱长宽比 α ,2 列孔的列间距与孔间距之比 γ 和开孔率 p ,结合试验现象和数据分析,给出了合理的三参数取值范围,为工程实际设计、选型提供了参考。随后进行了附加连梁阻尼器的单片双肢剪力墙拟动力试验和数值仿真分析^[17]。对比分析表明,连梁阻尼器性能稳定,对剪力墙结构抗震性能效果提高显著,结构地震输入能量越大,减震效果越显著。为解决阻尼器嵌固区与墙肢协同工作及连接的适用性问题,滕军等^[18]于 2014 年优化了阻尼器设计,通过对阻尼器工作区域的划分(图 5),使新型阻尼器施工难度大大降低,实现了形成耗能连梁及抗震多道防线的设计理念。

3.4 剪切钢板阻尼器

剪切钢板阻尼器(Steel Shear Panel Dampers,

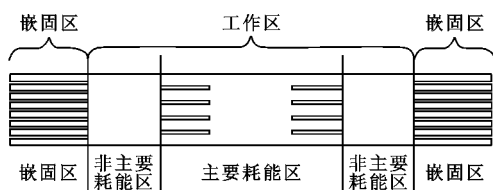


图 5 连梁阻尼器的工作区域划分

Fig. 5 Working Area Division of Coupling Beam Dampers

SSPD)主要由上下端连接板、中间腹板、左右侧翼缘组成(图 6)。上下端板起连接作用,腹板为主要耗能构件,翼缘为腹板提供约束,抑制腹板转动,同时在地震作用下发生弯曲变形而作为次要耗能部件。SSPD 的耗能原理为利用中间腹板(钢板)产生平面内剪切变形以消耗地震输入能量。影响 SSPD 性能的参数主要有腹板宽厚比、加劲肋布置、翼缘的钢材、连接方式等因素。



图 6 剪切钢板阻尼器

Fig. 6 Shear Plate Damper

1997 年日本的田中清、佐佐木康等研究了腹板宽厚比对 SSPD 的影响,试验设计了 2 组试件,其中腹板宽厚比较大的一组在水平剪切力作用下,随着剪切变形的增大,腹板沿对角线出现平面外失稳的现象越明显,建议腹板宽厚比宜小于 40,以保证阻尼器的滞回性能。2006 年同济大学陈之毅等^[19]采用 ABAQUS 分析了腹板宽厚比对 SSPD 的影响,引入参数柔细比 R_w ,给出了 R_w 应在 0.2~0.5 之间的建议。

加劲肋的设置可以为腹板提供有效约束,防止腹板面外失稳,提高腹板屈曲应力,从而增强了阻尼器的延性。1999 年田中清等研究了加劲肋的设置数目对 SSPD 的影响,结果表明合理设置加劲肋有效抑制了平面外失稳现象,但过多的加劲肋虽使耗能区域增大,却由于焊缝残余应力等因素的影响,阻尼器的性能稳定性并不能得到保障。针对桥梁工程所受地震力较大,所用 SSPD 要求强度高的特点,2007 年 Miyama 等^[20]对阻尼器腹板采用 LYP225

钢并对横向加劲肋作削角处理来限制腹板面外失稳,同时保证了阻尼器延性。

1996 年日本的三山刚史等研究了不同翼缘钢材对 SSPD 性能的影响,试验设计了 3 组试件,对比研究发现,不同翼缘钢材下,SSPD 的屈服力、极限剪切力、最大水平位移并无明显区别。林坚湘等^[21]对不同翼缘宽厚比剪切钢板阻尼器进行了试验研究。结果表明:较大的翼缘厚度可减小腹板平面外失稳,翼缘宽厚比小,滞回曲线出现明显的捏合,因此建议翼缘与腹板厚度比大于 3。

SSPD 中加劲肋与腹板等连接多采用焊接连接,但由于焊接工艺等原因,会出现焊缝残余应力等因素影响阻尼器的弹性刚度。外国学者 Hossain 等^[22]利用 ANSYS 有限元软件模拟了考虑焊缝残余应力的 SSPD 模型,模拟证实了残余应力对阻尼器刚度的不利影响。结合国内外诸多学者的研究成果发现,采用机械连接形式的阻尼器可有效避免焊缝残余应力的不利影响。

针对 SSPD 防屈曲措施的不足、存在焊缝残余应力、钢板面外变形等问题,2016 年东南大学的黄镇等^[23]提出了 3 种改进型防屈曲阻尼器构造方案:夹板防屈曲、肋板防屈曲、边框防屈曲方案。防屈曲约束装置设置在剪切钢板两侧,中间设置聚四氟乙烯隔离层代替焊接。研究推导了 3 种改进型阻尼器的基本性能参数计算式。ANSYS 有限元软件模拟表明钢板应力更加均匀,全截面基本进入塑性;低周往复加载试验结果显示,采用肋板和夹板防屈曲方案的阻尼器,滞回曲线饱满,耗能能力显著增强,说明这 2 种改进型 SSPD 是一种理想的耗能阻尼器方案,但采用边框防屈曲方案的阻尼器滞回曲线存在一定的捏缩效应,说明此方案并不能完全约束钢板屈曲。

3.5 圆环阻尼器

最早的圆环阻尼器由 2 根平行的钢棒卷成圆形组成。1983 年 Tyler 等对这种阻尼器进行了试验研究,结果显示其抗疲劳性能差,前苏联中央结构设计科学研究所哈萨克分院利用不同截面的工字型钢制成了环形、方形和矩形内框耗能器,研究结果表明,环形耗能器耗能能力最强。

1996 年周云等^[24]利用低碳钢板卷成圆环,焊接成了一种圆环阻尼器(图 7),这种阻尼器可安装在 X 形和 K 形支撑上。试验研究了圆环阻尼器耗能机理,对不同参数的阻尼器进行了低周往复加载对比试验。研究结果表明圆环阻尼器具有稳定的工

作性能、较强的变形能力、较好的耗能性能,耗能性能与圆环直径、厚度有关,但是这种阻尼器存在初始刚度低、承载力有限等问题。为此,在此试验基础上,提出了“利用 2 个或多个耗能元件协同工作,同时耗能”的思想,设计制作了 3 种不同构造的双环软钢阻尼器^[25]:普通双环软钢阻尼器、局部加强双环软钢阻尼器、加盖双环软钢阻尼器。循环加载试验表明,普通双环软钢阻尼器和局部加强双环软钢阻尼器改善了之前研制的单环阻尼器初始刚度低、承载力不足的缺点,耗能能力增强,变形能力好,尤其以局部加强双环阻尼器性能最优,具有广阔的应用前景。随后孙峰等^[26]又提出“耗能器应具有多道耗能减震防线”的思想,设计制作了加劲圆环耗能器(图 8)。这种阻尼器除了具有以往阻尼器的优点外,最大的特点是具有两级耗能减震防线。

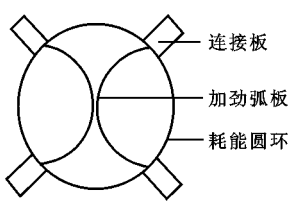
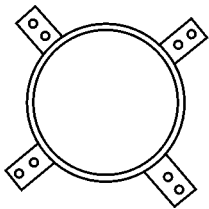


图 7 圆环阻尼器

图 8 加劲圆环阻尼器

Fig. 7 Ring Damper

Fig. 8 Stiffened Ring Damper

研究发现圆环阻尼器与支撑连接处易产生应力集中而导致破坏,针对这种情况,王涛等^[27]提出了局部削弱的圆环耗能器(图 9),削弱形式有圆弧式和长条式;设计了 13 组不同参数的削弱圆环阻尼器,采用 ABAQUS 有限元软件对安装在支撑框架结构中的圆环耗能器进行参数分析。结果表明,局部削弱阻尼器比不削弱阻尼器耗能效果更佳,削弱形式宜采用圆弧式,削弱宜控制在圆环钢板宽度的 20%~30% 内,阻尼器支撑角宜取 45°。圆环钢板厚度增加或外直径减小,阻尼器的初始刚度、屈服力和耗能量都会明显增加。



图 9 圆弧式削弱圆环阻尼器

Fig. 9 Weaken Ring Damper of Arc Type

3.6 其他形式的阻尼器

3.6.1 E 形、C 形、ε 形钢阻尼器

以往研制的阻尼器大多应用在建筑结构中,对于桥梁结构,这些阻尼器并不适用。2009 年潘晋等^[28]借鉴了国内外研究成果,依托南京长江隧道工程右汉自锚式悬索桥结构抗震需要,采用高强度钢设计了 E 形钢阻尼器(图 10)并进行了试验和仿真分析。结果表明该阻尼器具备良好的耗能性能且采用高强度钢可降低成本。2014 年沈朝勇等^[29]提出了一种新型 C 形金属阻尼辐及其与滑动摩擦相组合的新型支座,并应用于桥梁抗震结构,试验分析了 C 形阻尼元件和组合支座,结果表明该新型阻尼元件和组合支座阻尼特性稳定,具有良好的弹塑性变形能力。ε 形钢阻尼器(图 11)采用双 C 形结构,兼有 E 形钢阻尼器阻尼力大和 C 形阻尼器塑性变形均匀的优点,且同等性能下,ε 形钢阻尼器的质量仅为 E 形钢阻尼器的 1/3,占用空间也仅为 1/2。目前 ε 形钢阻尼器已投入到桥梁抗震应用。针对无统一设计计算公式可供指导的问题,2015 年刘军等^[30]对影响阻尼器性能的因素进行了分析,利用工程力学推导出了设计计算公式,可用于指导 ε 形钢阻尼器的设计。

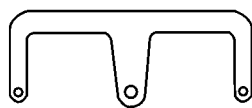


图 10 E 形钢阻尼器

Fig. 10 E-shaped Damper

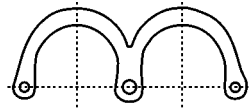


图 11 ε 形钢阻尼器

Fig. 11 ε-shaped Damper

3.6.2 分阶段屈服阻尼器

2010 年南京工业大学工程抗震研究中心研发了一种由 2 种不同几何尺寸的 X 形软钢耗能片组成的分阶段屈服耗能新型软钢阻尼器(图 12),这种阻尼器最大的特点是可以根据地震大小实现分阶段屈服耗能。小震作用下,小钢片率先屈服,阻尼器部分进入塑性,实现小震不坏的目标;地震力较大时,大小钢片全部屈服,阻尼器整体进入塑性状态,从而达到中震可修、大震不倒的目的。刘锋等^[31]对这种阻尼器进行了滞回试验和 ABAQUS 有限元数值模拟。研究表明这种新型阻尼器耗能能力强,性能稳定。2016 年,在此设计和试验基础上,刘伟庆等^[32]在耗能钢片形状和组合方式上加以改进,研发了一种剪切弯曲组合型分阶段屈服软钢阻尼器。这种两阶段屈服阻尼器耗能钢片由 1 片初始刚度大、屈服位移小的剪切型矩形耗能钢片和 16 片初始刚度小、屈服位移大的弯曲型 X 形耗能钢片组成(图 13)。

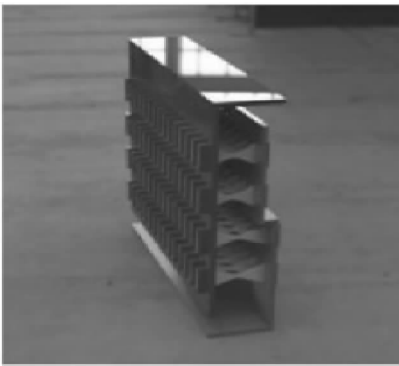


图 12 分阶段屈服阻尼器

Fig. 12 Separable Phase Yielding Damper

这种阻尼器耗能特点为:小震时,剪切型钢片屈服耗能,此时弯曲型钢片仍为弹性状态,这是第 1 阶段耗能,大震时,弯曲型钢片与剪切型钢片共同屈服耗散地震能量,实现第 2 阶段耗能。研究表明这种阻尼器性能稳定,变形良好,而且可通过调整钢片数量及高度、厚度等参数制作不同性能阻尼器。

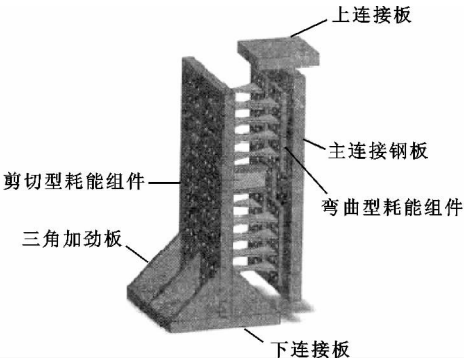


图 13 新型分阶段屈服阻尼器

Fig. 13 New Type of Separable Phase Yielding Damper

3.6.3 抛物线型阻尼器

为使阻尼器全长截面同时屈服,充分利用材料,徐艳红等^[33]利用平面内弯曲耗能思想设计了抛物线型阻尼器(图 14),根据工程力学知识推导了阻尼器外形公式,并对 2 组阻尼器进行了拟静力试验,结果表明这种阻尼器可有效避免应力集中,采用指导公式设计的阻尼器可实现整体屈服耗能,且滞回性能稳定,是一种理想的耗能元件。

3.6.4 新型编织式阻尼器

为克服现有阻尼器变形集中的缺点,贾传果等^[34]设计了一种新型编织式阻尼器(图 15),这种阻尼器由若干根纵向钢条和横向钢板组成编织状构成,纵向钢条呈波浪形弯曲。耗能原理为:地震时,随着低强度钢条的弯曲变形,波峰波谷位置随之改变(图 16),在此过程中,通过钢条的塑性变形耗散



图 14 抛物线型阻尼器

Fig. 14 Parabolic Damper

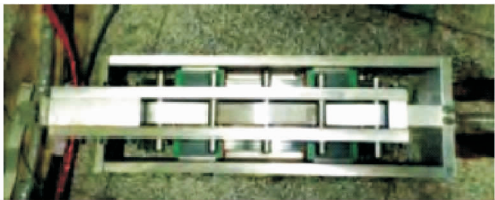


图 15 新型编织式阻尼器

Fig. 15 New Type of Braided Damper

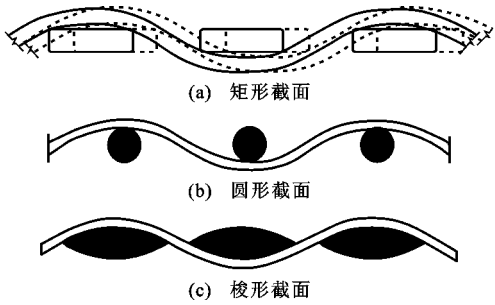


图 16 钢条变形耗能示意图

Fig. 16 Diagram of Deformation Energy Dissipation of Steel Bar

地震能量。后期试验考虑到矩形钢板与钢条在接触过程中可能存在应力集中现象,将矩形钢板换成了圆钢杆。经过 ANSYS 有限元数值模拟及试验研究发现滞回曲线存在捏缩效应。为了改善这种现象,将截面改为了梭形,改进后的阻尼器滞回曲线饱满,减震性能良好。

4 软钢阻尼器设计建议

在进行软钢阻尼器设计时,可采取以下建议:

(1)合理的平面形状。软钢阻尼器的性能很大程度上取决于其外形形状,在材料相同时,阻尼器的平面形状影响其塑性变形时的应力、应变分布。适当的钢板平面形状和合理的开洞、开缝形式能使阻尼器塑性变形时应力、应变分布更均匀,使阻尼器大部分材料都参与耗能,实现良好的变形与耗能性能。同时,阻尼器厚度直接影响着阻尼力的大小,可根据耗能或使用需求调整软钢平面厚度。

(2)多个耗能元件。除核心耗能元件外,可把阻尼器连接件等附属构件设计成次要耗能元件,或加设适当的加劲装置,形成多级耗能元件共同工作。把连接件设计成次要耗能构件可充分利用“闲置材料”,而适当的耗能加劲装置也可以为阻尼器提供有效约束,防止面外失稳,增强阻尼器的延性。

(3)多级耗能机制。在设计软钢阻尼器时,可以充分利用不同的耗能机制进行组合,实现多级耗能。在普通剪切型或弯曲型软钢阻尼器材料基础上,可以考虑加入摩擦材料或黏滞性材料,通过合理的布置与连接,在小震下实现一级耗能机制首先耗能,中大震时另一级耗能机制参与工作实现二级耗能。

(4)利用新材料,减少焊接。在阻尼器加工过程中,很多构件是通过焊接连接在一起的,而焊接工艺水平往往不能得到保障,很大程度上存在焊缝残余应力等不利因素,严重影响阻尼器性能。在设计时,可多采用机械连接或设置聚四氟乙烯等材料形成隔离层代替焊接,最大程度减小焊接工艺对阻尼器性能的影响。

(5)多方向工作机理。由于地震或风载方向的不确定性,对阻尼器消耗任意方向输入能量的性能提出了挑战,而一般的阻尼器往往只能满足一个方向耗能需求。在此,提出一种多方向工作机理的阻尼器设计设想,例如,可以借鉴球形的外形优势。球形在空间内任意方向都可实现自由变形,通过合理的外形设计和软钢自由组合,是否可设计出一种基于多方向(甚至是任意方向)工作机理实现耗能的阻尼器值得探索。

5 结 语

(1)阻尼器连接板等构件多采用焊接连接,如何保证焊接施工工艺,防止焊缝引起的残余应力,使阻尼器更有效地发挥作用在设计时值得关注。

(2)阻尼器工作时局部屈曲和钢板的薄膜效应会对阻尼器滞回性能产生影响,需建立更准确的本构关系。

(3)地震、风振、温度等综合因素作用下阻尼器的塑性累积变形会对阻尼器性能产生严重影响,阻尼器的耐久性和可靠性问题需进一步探讨。

(4)大多数阻尼器虽试验性能优良,但多停留在实验室阶段,开发性能优良、安全可靠的阻尼器应用于实际工程成为研究工作的重中之重。

(5)为充分利用耗能材料,提高阻尼器的效率,设计时可采用“多个耗能元件协同工作,利用不同耗

能机制,多道耗能防线共同耗能”等新思路。

(6)应建立健全更完备的指导规范使阻尼器的设计、应用更标准化、系统化。

参考文献:

References:

- [1] YAO J T P. Concept of Structure Control[J]. Journal of the Structural Division, 1972, 98(7): 1567-1574.
- [2] 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.
- [3] WHITTAKER A S, BERTERO V V, THOMPSON C L, et al. Seismic Testing of Steel Plate Energy Dissipation Devices[J]. Earthquake Spectra, 1991, 7(4): 563-604.
- [4] 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.
- [5] 欧进萍, 吴 斌. 摩擦型与软钢屈服型耗能器的性能与减振效果的试验[J]. 地震工程与工程振动, 1995, 15(3): 73-87.
OU Jin-ping, WU Bin. Experimental Comparison of the Properties of Friction and Mild Steel Yielding Energy Dissipators and Their Effects on Reducing Vibration of Structure Under Earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1995, 15(3): 73-87.
- [6] 吴 斌, 欧进萍. 软钢屈服耗能器的疲劳性能和设计准则[J]. 世界地震工程, 1996(4): 8-13, 18.
WU Bin, OU Jin-ping. Fatigue Properties and Design Criteria of Mild Steel Yielding Energy Dissipators[J]. World Earthquake Engineering, 1996(4): 8-13, 18.
- [7] 吴 斌, 欧进萍. 钢板屈服耗能器的薄膜效应分析[J]. 世界地震工程, 1997, 13(3): 27-34.
WU Bin, OU Jin-ping. Analysis of Membrane Effects in Steel Plate Yielding Energy Dissipators[J]. World Earthquake Engineering, 1997, 13(3): 27-34.
- [8] 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 Ji-long, OU Jin-ping. Damping Force Hysteresis Loop Models of X Type and Triangle Mild Steel Dampers(I) — Based on Double Linear Constitutive Model[J]. World Earthquake Engineering, 2004, 20

- (1):10-16.
- [9] 李冀龙,欧进萍. X形和三角形钢板阻尼器的阻尼力模型(Ⅱ)——基于 R-O 本构关系[J]. 世界地震工程, 2004,20(2):129-133.
- LI Ji-long, OU Jin-ping. Damping Force Hysteresis Loop Models of X Type and Triangle Mild Steel Dampers(Ⅱ) — Based on Ramberg-Osgood Constitutive Model[J]. World Earthquake Engineering, 2004, 20(2):129-133.
- [10] 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 Shu-tao, 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.
- [11] 张文元,张敏政,李东伟. 新型加劲软钢阻尼器性能与试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(12):1888-1894.
- ZHANG Wen-yuan, ZHANG Min-zheng, LI Dong-wei. An Experimental Research on Performance and Application of a New Type of Mild Steel Damper Added Damping and Stiffness (ADAS)[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(12):1888-1894.
- [12] 王桂萱,孙晓艳,赵 杰. 基于不同本构模型的新型软钢阻尼器的滞回性能研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(3):296-301.
- WANG Gui-xuan, SUN Xiao-yan, ZHAO Jie. Hysteretic Performance Study on a New Type of Mild Steel Damper Based on Different Constitutive Models[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(3):296-301.
- [13] 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 Hong-nan. Study on Vibration Reduction of Structure with a New Type of Mild Metallic Damper[J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(3):66-72, 206-207.
- [14] 李 钢,李宏男. 装有“双功能”软钢阻尼器框架结构振动台试验与分析[J]. 振动与冲击, 2010, 29(8):164-168.
- LI Gang, LI Hong-nan. Shaking Table Experiment of Frame Structure with “Dual-functions” Metallic Damper[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(8):164-168.
- [15] 滕 军,马伯涛,周正根,等. 提高连肢墙抗震性能的连接耗能构件关键技术[J]. 工程抗震与加固改造, 2007, 29(5):1-6.
- TENG Jun, MA Bo-tao, ZHOU Zheng-gen, et al. Key Technique of Energy Dissipating Damper on Coupling Beam to Improve Eismic-resistance Performance of Coupling Shear Wall Structures[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2007, 29(5):1-6.
- [16] 滕 军,马伯涛,李卫华,等. 联肢剪力墙连梁阻尼器伪静力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(12):92-100.
- TENG Jun, MA Bo-tao, LI Wei-hua, et al. Pseudo-static Test for Coupling Beam Damper of Coupled Shear Wall Structure[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(12):92-100.
- [17] 滕 军,马伯涛,李卫华,等. 联肢剪力墙连梁阻尼器地震模拟试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(12):101-107.
- TENG Jun, MA Bo-tao, LI Wei-hua, et al. Seismic Simulation Test for Coupling Beam Damper of Coupled Shear Wall Structure[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(12):101-107.
- [18] 滕 军,李 靖,王立山,等. 基于耗能连梁钢板阻尼器的高层结构耗能减振分析及应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(3):302-307.
- TENG Jun, LI Jing, WANG Li-shan, et al. Energy Dissipation Analysis and Application of High-rise Structures Based on Coupling Beam Damper[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(3):302-307.
- [19] 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 Zhi-yi, GE Han-bin, USAMI TSUTOMU, et al. Parametric Study on the Hysteretic Behavior of Shear Panel Dampers[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(11):13-17.
- [20] MIYAMA T, TANAKA K, MENG L, et al. Study of the Passive Vibration Control Building with Low Yield Point Steel Damper[R]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 1994:1043-1044.
- [21] 林坚湘. 高性能剪切钢板阻尼器的性能模拟分析与试验研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2011.
- LIN Jian-xiang. Simulation Analysis and Experimental Study on Hysteretic Behavior of High-performance Shear Panel Damper[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [22] HOSSAIN M R, ASHRAF M, ALBERMANI F. Numerical Modelling of Yielding Shear Panel Device for

- Passive Energy Dissipation[J]. Thin-walled Structures, 2011, 49(8): 1032-1044.
- [23] 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 Zhen, LI Rui-qiu, LIU Feng, et al. Research on Mechanical Performance of Improved Buckling Restrained Shear Panel Damper[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(6): 85-92.
- [24] 周 云, 刘 季. 圆环耗能器的试验研究[J]. 世界地震工程, 1996, 12(4): 1-7.
- ZHOU Yun, LIU Ji. Experimental Study on the Behavior of Circular Ring Energy Dissipator[J]. World Earthquake Engineering, 1996, 12(4): 1-7.
- [25] 周 云, 刘 季. 双环软钢耗能器的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 1998, 8(2): 117-123.
- ZHOU Yun, LIU Ji. Experimental Study on Double Circular Ring Mild Steel Energy Dissipator[J]. Seismic Engineering and Engineering Vibration, 1998, 8(2): 117-123.
- [26] 孙 峰, 周 云, 俞公骅, 等. 加劲圆环耗能器性能的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19(3): 115-120.
- SUN Feng, ZHOU Yun, YU Gong-hua, et al. Experimental Study of Properties of Added Stiffness Circular Ring Energy Dissipator[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1999, 19(3): 115-120.
- [27] 王 涛, 邓雪松, 周 云. 不同构造参数对圆环耗能器性能的影响分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(4): 429-435.
- WANG Tao, DENG Xue-song, ZHOU Yun. Performance Study on Ring Damper Under Different Constitutional Parameters[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(4): 429-435.
- [28] 潘 晋, 吴成亮, 全 强, 等. E型钢阻尼器数值仿真及试验研究[J]. 振动与冲击, 2009, 28(7): 192-195.
- PAN Jin, WU Cheng-liang, TONG Qiang, et al. Simulation and Experimental Study on an E-shaped Steel Damper[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(7): 192-195.
- [29] 沈朝勇, 马玉宏, 黄襄云, 等. C型金属阻尼器的试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2014, 40(1): 207-212.
- SHEN Chao-yong, MA Yu-hong, HUANG Xiang-yun, et al. Test Study on Mechanical Property of C Shape Steel Damper[J]. Sichuan Building Science, 2014, 40(1): 207-212.
- [30] 刘 军, 律 伟, 张小锋, 等. ϵ 形钢阻尼器设计仿真分析及试验研究[J]. 铁道建筑, 2015(2): 21-24.
- LIU Jun, LU Wei, ZHANG Xiao-feng, et al. Simulation Analysis and Experimental Study on ϵ Shape Steel Damper Design[J]. Railway Building, 2015(2): 21-24.
- [31] 刘 锋, 王曙光, 杜东升, 等. 新型软钢阻尼器滞回性能的试验与模拟分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2012, 34(6): 80-86.
- LIU Feng, WANG Shu-guang, DU Dong-sheng, et al. Hysteretic Performance Test and Simulation Analysis of a New Type of Mild Steel Damper[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2012, 34(6): 80-86.
- [32] 刘伟庆, 缪卓君, 王曙光, 等. 新型分阶段屈服型软钢阻尼器的试验研究及数值模拟[J]. 振动与冲击, 2016, 35(3): 87-92.
- LIU Wei-qing, MIAO Zhuo-jun, WANG Shu-guang, et al. Experiments and Numerical Prediction on a New Type of Mild Steel Damper with Separable Phase Yielding[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(3): 87-92.
- [33] 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 Yan-hong, LI Ai-qun, HUANG Zhen. Experimental Study of Mild Steel Dampers with Parabolic Shape[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(12): 202-209.
- [34] 贾传果, 周 微, 胡鹏飞, 等. 新型编织式金属阻尼器减震性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(5): 41-46.
- JIA Chuan-guo, ZHOU Wei, HU Peng-fei, et al. Research on Seismic Performance of a Novel Woven Metal Damper[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015, 35(5): 41-46.