

基于钢棒耗能元件阵列型阻尼器的耗能性能研究

孙威¹,王娅妮¹,阎石¹,王芳²,张东荣¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 中建二局第四建筑工程有限公司,天津 300457)

摘要 目的 研究基于钢棒耗能元件的阵列型阻尼器的耗能性能,验证其是否能够满足建筑抗震设计规范中的要求。方法 为考察阻尼器的耗能性能,设计了3组包含不同数量和排列形式的钢棒耗能元件的阵列型阻尼器,并对3组阻尼器开展同工况下的低周往复试验及数值模拟分析。结果 在试验研究中,阻尼器的实测耗能系数最高可达2.50;在数值模拟分析中,阻尼器的耗能系数为2.61,且该类型阻尼器的力学性能中屈服荷载、初始刚度与钢棒数量存在正比关系,屈服位移与钢棒数量无明显关系。结论 试验与数值模拟所得结果均能体现该类型阻尼器的力学性能均匀、稳定,且具有良好的耗能性能,能够满足建筑抗震设计规范中对金属阻尼器的要求。

关键词 阵列型阻尼器;钢棒耗能元件;低周往复试验;滞回曲线;耗能系数

中图分类号 TU311.41 文献标志码 A

Research on Performances of Array Type Damper Based on Steel Bar Energy Dissipation Element

SUN Wei¹, WANG Yani¹, YAN Shi¹, WANG Fang², ZHANG Dongrong¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. The Fourth Construction Engineering Co. Ltd., China Construction Second Engineering Bureau, Tianjin, China, 300457)

Abstract: The primary objective of this paper is to study whether the energy dissipation performance of the array damper based on the steel bar energy dissipation element can meet the requirements of the metal damper in the seismic design code of buildings. To explore the damper's dissipation capacity, the study designed three groups of different number and combination of steel bar dampers, analyzed the working performances by taking the low cycle reciprocating motion experiments and used finite element simulation to model the same conditions. The maximum energy dissipation coefficient of dampers is 2.50 in experiments, and it can reach 2.61 in simulation models, and the results proved that the yield load and initial stiffness are proportion to the number of steel bars, but the yield displacement of the damper is independent of the number of steel bars. The results of

收稿日期:2021-06-23

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0705602)

作者简介:孙威(1979—),男,副教授,博士,主要从事结构抗震加固方面研究。

experiments and simulation consistently show that the mechanical performance of array steel bar damper are uniform, stable and good in energy dissipation. In above, the array steel bar damper can meet the requirements of the seismic resistant design of structures.

Key words: array steel bar damper; steel bar energy dissipation element; low cycle reciprocating test; hysteresis curve; energy dissipation coefficient

地震是最常见的自然灾害之一,且无法精确预料。目前常用减震和隔震两种抗震加固方式来预防并减小地震带来的危害。减震即减小地震对结构的作用,主要是通过结构的连接部位安装阻尼器等方法减小地震波对结构层与层之间的变形和构件内力;隔震是通过隔震装置隔开地面与结构,加大结构在地震作用下的振动周期,以降低传入结构的地震能量,减小结构的地震反应系数,达到保护结构的效果。抗震加固方法源自于20世纪80年代J. M. Kelly等^[1]提出的耗能减震概念。这种方法为建筑结构抗震提供了新的途径。目前,世界各国学者在建筑结构抗震加固领域广泛开展针对各种阻尼器的研究工作,尤其是针对金属阻尼器的,已取得丰硕的成果。

阵列型金属阻尼器是金属阻尼器的一种类型,主要是一定数量的金属耗能元件以某种排列形式构成。该消能减震装置由于可附加给结构的有效阻尼比大、工作性能稳定、安装方便、耗能元件可替换性强等优点,被广泛应用于建筑结构中的抗震加固。李钢等^[2]研究了软钢阻尼器的钢板平面几何形状对框架体系的耗能影响,分析了五种钢板形式的软钢阻尼器的滞回耗能曲线及在结构体系中的耗能减震效果。王桂萱、章丛俊等^[3-4]总结了国内外的多种软钢阻尼器,分析了不同形式的软钢阻尼器的构造原理及性能。M. Khzaei、A. Manchalwar等^[5-6]研究了U型钢阻尼器和多调谐质量阻尼器在结构建筑中的抗震性能和最优位置。吴从晓、戴吉等^[7-8]分析了阻尼器在上海中心大厦、上海环球金融中心等案例中的抗振性能实际效果。张令心、周云等^[9-10]对开孔型钢板进行

优化设计研究,验证了优化后的阻尼器减振效果更优。周云等^[11]提出梁段偏心支撑使用可更换的剪切钢板阻尼器,研究了耗能变形机制、耗能能力等。黄镇等^[12]提出3种改进型防屈曲剪切钢板阻尼器,验证了改进型阻尼器构造有效,耗能效果更优。何志明等^[13]总结了剪切型钢板阻尼器的原理及工程应用实例,并分析了需要改进的问题。

近年来,阵列型钢棒耗能元件阻尼器被提出,钢棒耗能元件具有力学性能各向同性、材料屈服面积大、耗能效果显著等优点。但由于提出时间较晚,仍然有很大优化空间^[14-15]。针对上述情况,笔者开展基于钢棒耗能元件的阵列型金属阻尼器耗能性能研究,为今后该类型阻尼器进一步开展更深入研究乃至应用于实际工程打下基础。

1 阵列型钢棒耗能元件阻尼器耗能性能试验

1.1 试件设计

阵列型耗能元件阻尼器是由不同规格型号的耗能元件按选取的数量进行排列组合,如图1所示。笔者考虑了钢棒变量和组合形式变量,钢棒试件尺寸变量取三组不同的直径 d ,标距 l_0 取 $10d$ 。

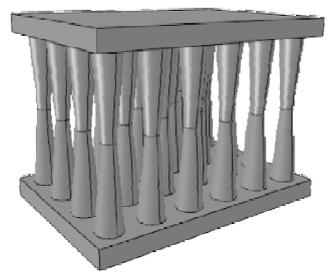


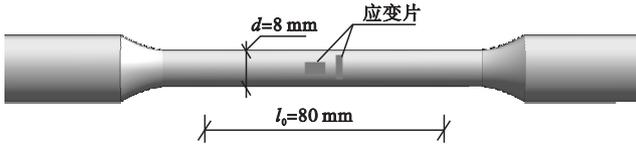
图1 阵列型钢棒耗能元件阻尼器

Fig. 1 The array damper with steel bar

1.2 钢棒耗能元件的材性试验

首先开展钢棒耗能元件的材性试验,得到数值模拟研究所需的力学参数。钢棒耗能元件采用 Q235 级钢材进行加工,材性试验

的试件尺寸如图 2 所示。对试件进行拉伸试验,测得钢材的泊松比、弹性模量等。钢材材性试验所得的钢材各项力学指标详见表 1。



(a)试件尺寸



(b)试验加载系统示意图

图 2 钢材材性测试

Fig. 2 The properties test of steel material

表 1 Q235 钢拉伸试验数据

Table 1 The test data of steel Q235

试件编号	基材直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	断后伸长率/%	弹性模量/GPa	泊松比
1	8.02	306.0	445.4	34.0	203.0	0.26
2	7.98	301.8	439.0	35.6	202.0	0.27
3	8.00	313.3	449.3	33.8	204.0	0.24

1.3 阻尼器试验

笔者在前期研究中,得到了具有最优耗能性能参数的棒体耗能元件几何参数^[15]。因此在本次试验中,以文献[15]的研究结果确定耗能元件的几何参数制作试件。三组试件阵列形式:1×2型(编号 SJ-1)、1×3型(编号 SJ-2)以及 2×2型(编号 SJ-3),如图 3 所示。阻尼器钢棒耗能元件采用 Q235 钢加工,两端带有螺纹,通过栓接固定于两平行端板之间,端板采用 Q345 钢。将阵列型钢棒阻尼器一侧端板固定于加载反力墙上,另一侧端板与液压千斤顶连接,如图 4 所示。

试验采用力和位移混合控制加载,具体加载制度如图 5 所示。在耗能元件屈服以前,以 5 kN 作为载荷步逐级递增往复加载,且每一载荷步往复循环两次,直到试件的承载力达到其屈服荷载 F_y ;当阻尼器屈服以后,采用位移控制加载,以 0.5 倍屈服位移 U_y 作为载荷步逐级递增往复加载,在其实际承载力下降为极限承载力的 80% 时停止加载。

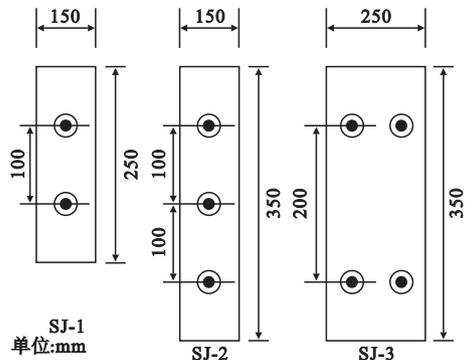


图 3 试件类型

Fig. 3 The type of specimens

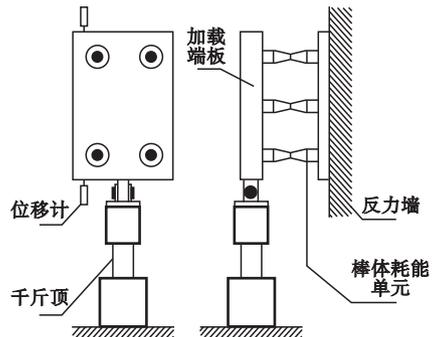


图 4 试验加载系统

Fig. 4 The test loading system

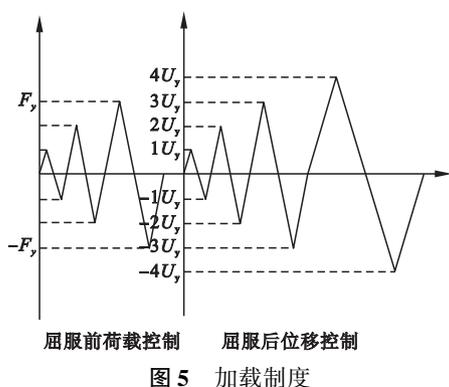


图5 The test loading method

1.4 试验现象及分析

在试件加载初始阶段,以力控制加载进程,当荷载不断增大,钢棒耗能元件出现屈服现象,随后钢棒进入塑性耗能阶段,遂改用位移控制加载。阻尼器“荷载-位移”曲线逐

渐形成梭形滞回环。随着加载不断深入,阻尼器的耗能元件逐渐由此前的直线形态变为剪切变形的形态,如图6所示。三组阻尼器试件的滞回曲线如图7所示。



图6 阻尼器破坏时的形态

Fig.6 The failure mode of damper

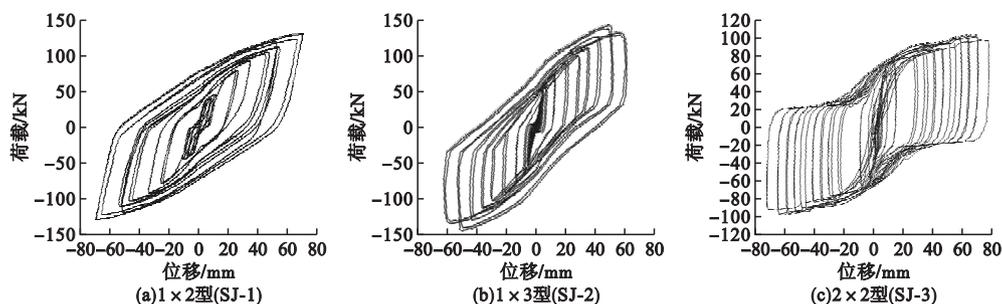


图7 通过试验获得的三组阻尼器的滞回曲线

Fig.7 The hysteretic curves of three types dampers obtained by test

从图7可看出,1×2型阻尼器的滞回曲线呈梭型、1×3型阻尼器的滞回曲线呈现为两头平缓的梭型、2×2型的滞回曲线为轻微的“S”型。三种不同排列形式的阻尼器滞回曲线虽然存在些许差异,但都具有对称性好、图像饱满的共同点。这充分说明了基于钢棒耗能元件的阵列型阻尼器的力学性能和耗能

特性良好。进一步考察阻尼器的各耗能参数,计算得到各试件的具体参数结果详见表2。由表2可知,在试验中各试件的最终耗能系数介于2.36~2.50。试验数据均体现了钢棒阵列型阻尼器的耗能性能良好,在实际工程结构抗震加固设计中满足对阻尼器需提供的附加阻尼要求。

表2 各试件的性能参数

Table 2 The performance parameters of each test specimen

试件编号	屈服荷载/kN	屈服位移/mm	初始刚度/ (kN·mm ⁻¹)	最大荷载/kN	F _{max} 时位移/mm	F _{max} 时耗能系数
SJ-1	37.0(43.0)	2.8(2.4)	13.2(17.9)	134.2(86.2)	69.2(24.9)	2.43(2.59)
SJ-2	48.0(65.0)	3.1(2.4)	19.2(27.0)	135.1(129.0)	50.5(20.5)	2.36(2.61)
SJ-3	68.0(89.0)	2.9(2.4)	23.4(37.0)	104.3(172.4)	71.4(26.1)	2.50(2.60)

注:表中括号外的数据为试验结果,括号内的数据为数值模拟结果。

依据表2 试验数据进一步绘制阻尼器耗能相关力学参数指标与耗能元件数量之间的关系曲线,如图8所示。

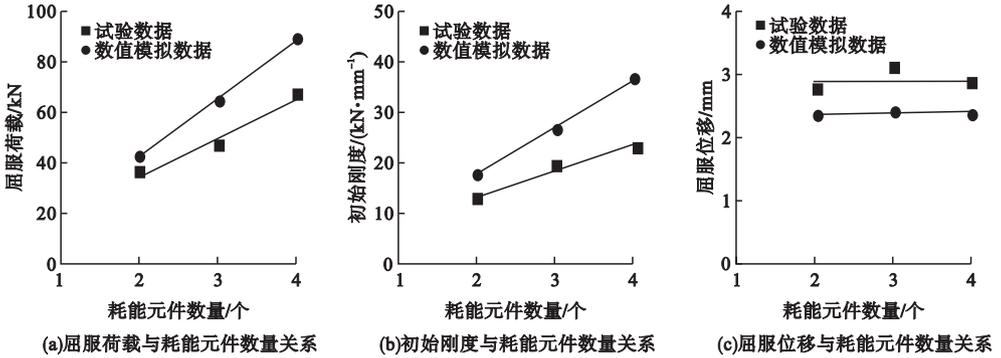


图8 试件屈服时阻尼器的各性能参数与耗能元件数量的关系

Fig. 8 The relationship between the performance parameters of dampers and the number of steel bar energy dissipation component when the dampers yield

由图8可知,阵列型钢棒阻尼器的初始刚度、屈服荷载与钢棒数量呈正比,即钢棒数量越多,阻尼器的初始刚度和屈服荷载值随之增大;各试件的屈服位移相近,均在2.8~3.1 mm,反映了阵列型金属阻尼器的屈服位移与耗能元件数量无关的特性,同时也说明基于钢棒耗能元件的阵列型阻尼器具有力学性能均匀的特点。

2 阵列型钢棒耗能元件阻尼器耗能性能的数值模拟

2.1 有限元模型的建立

对阻尼器进行数值模拟分析,阻尼器分为耗能元件端部锚固端板和钢棒耗能元件两个部分,均采用八节点六面体的线性减缩积分单元(C3D8R)建立。钢材的应力-应变关系采用考虑包辛格(Bauschinger)效应的双线性随动强化模型。对于钢材的Von Mises流动准则,其结合了随动强化准则与各项同性强化准则的优点,采用混合强化准则。钢材的后继屈服面既能发生平移现象,也能发生均匀膨胀(收缩)现象^[14-16]。

在随动强化理论中,背应力的函数关系式为

$$\alpha_k = \frac{c_{kin,k}}{\gamma_k} (1 - e^{\gamma_k \varepsilon_p}). \quad (1)$$

$$\alpha = \sum_{k=1}^n \alpha_k. \quad (2)$$

$$\alpha_i = \sigma_i - \frac{(\sigma_1 + \sigma_n)}{2}. \quad (3)$$

其中, α_k 为第 k 个加载循环某加载步的背应力; α_i 为第 i 个加载循环的背应力; σ_i 为第 i 个加载循环的屈服应力。塑性应变表达式:

$$\varepsilon_i^p = \varepsilon_i - \frac{\sigma_i}{E} - \varepsilon_p^0. \quad (4)$$

其中, $\varepsilon_i^p = 0$; ε_p^0 是随动强化模型应力-应变曲线的应力为0时的塑性应变值。对试验数据 $(\varepsilon_i^p, \alpha_i)$ 进行数值拟合,然后与式(1)的结果进行比对分析,得到参数 $c_{kin,k}$ 和 γ_k 的值。通过上述混合强化准则模型的参数计算公式得到的钢棒元件阻尼器本构力学参数,详见表2。

在数值模拟过程中,设置静态分析步。对钢棒耗能元件模型施加与试验相同的位移加载制度,如图5所示。直到试件模型破坏^[16-17]。钢棒耗能元件屈服前的刚度取 EI ,屈服后的刚度取 $0.02EI$ 。在耦合点处施加水平的位移荷载。

2.2 有限元结果分析

在有限元分析中,采用与试验相同的加载模式。图9所示的各阻尼器滞回曲线呈标

准的纺锤型,轮廓均匀、饱满、对称性好,进一步证明了该类型阻尼器具有良好的耗能性能。

能。试件屈服后的应力云图如图10所示。

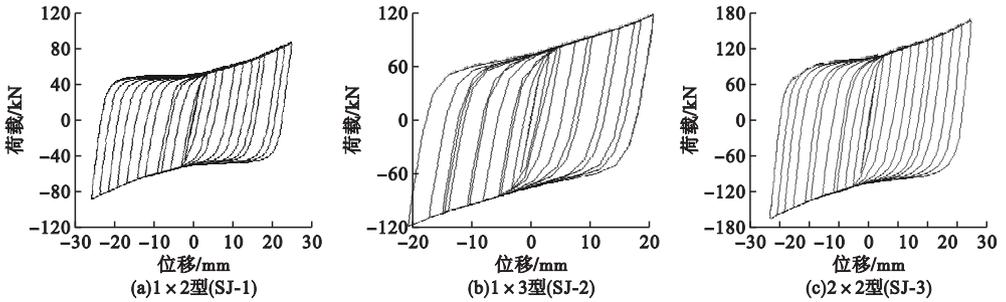


图9 数值模拟得到的各阻尼器滞回曲线

Fig. 9 The hysteresis curves of dampers obtained by numerical simulation

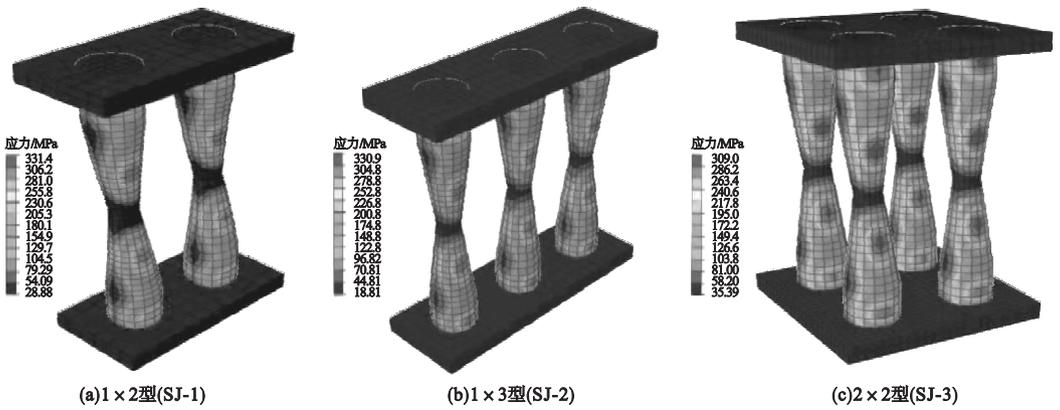


图10 各阻尼器的应力云图

Fig. 10 The stress nephogram of dampers

从图10可以看出,钢棒耗能元件的屈服区域分布面积较大,体现钢棒耗能元件具有良好的材料利用率。在有限元分析中,计算阻尼器的耗能系数等性能参数时,选取与试验研究中相同的承载力受力工况,相关的计算结果详见表2括号中的数据。该表数据显示,各试件的最终耗能系数在2.6左右,略优于试验所得的最大耗能系数。该结果与试验结果形成印证,从数值模拟角度证明了基于钢棒耗能元件的阵列型阻尼器具有良好的耗能能力,能够满足工程结构抗震加固的需求。同时,也能看出数值模拟分析中,数据一致性较好,这说明在理想状态下该类型阻尼器的耗能性能受钢棒耗能元件的数量、阵列形式影响较小。依据图8得到耗能元件数量与阻尼器的各项参数指标之间的关系曲线,该图

从数值模拟角度证明了“阵列型金属阻尼器的屈服荷载、初始刚度与钢棒数量成正比关系,阵列型金属阻尼器的屈服位移与钢棒数量无关”的性质。

3 试验与有限元结果对比分析

(1) 对比耗能系数

通过有限元计算得到的阻尼器耗能系数稳定在2.60左右。而通过试验得到的阻尼器耗能系数可达到2.5。试验研究的最大耗能系数与有限元计算的耗能系数相近,这一结果从试验和数值模拟两方面证明了基于钢棒耗能单元的阵列型阻尼器具有良好的耗能性能,可满足工程抗震加固对阻尼器的技术指标要求。当然,与有限元计算相比,试验数据离散性较大。这是由于有限元分析是在理

想状态下进行的,数据具有较好的一致性。而在试验研究中,试件的加工误差、安装质量以及试件材质的均匀性对试验结果都会造成影响。且随着耗能元件的数量增加,可能导致阻尼器中各耗能元件不能完全且同步发挥耗能效果,从而引起试验数据的离散性。这充分说明了试验中存在的上述问题,也是今后开展类似试验甚至是实际工程应用需要改进和注意的地方。

(2) 对比试验和数值模拟滞回曲线

在数值模拟中,阻尼器的滞回曲线形状在初始时呈现为斜直线,随着荷载的加大逐渐从斜直线变为纺锤型。随着阻尼器所受荷载的增加,其滞回曲线所围面积不断增大,最终的滞回曲线图像具有饱满、对称的特性,形状呈现为标准的纺锤型。对于试验研究,阻尼器的滞回曲线起初呈现为较小的梭形,随着试件荷载的不断增大,逐渐变为纺锤型。当阻尼器达到极限承载力时,对应的滞回环面积最大,试件最终耗能系数是以此刻的滞回曲线为基础计算得出。随后,随着阻尼器承载力的下降,其滞回环的面积有所降低。这反映了钢棒耗能元件在材料达到极限荷载后性能的衰退现象。通过试验研究所得的滞回曲线同样具有良好的对称性和饱满程度。

(3) 对比阵列型钢棒阻尼器的相关力学性能参数

无论是试验还是数值模拟,均可证明“阵列型金属阻尼器的屈服荷载、初始刚度与钢棒数量成正比关系,阵列型金属阻尼器的屈服位移与钢棒数量无关”这一结论。从数据分析看,试验数据仍然具有一定的离散型,而数值分析数据一致性较好。

4 结 论

(1) 基于钢棒耗能元件的阵列型阻尼器滞回曲线清晰饱满、对称性好。阻尼器的试验耗能系数最高可达 2.50,数值模拟耗能系数在 2.60 左右;说明该新型阻尼器具有力学

性能均匀、稳定的特点,且具有良好的耗能性能,能够满足工程结构抗震加固对金属阻尼器的要求。

(2) 依据数值分析得到的应力云图可以看出,钢棒耗能元件达到极限承载力时,屈服区域分布较大,体现了良好的材料利用率。

(3) 基于钢棒耗能元件的阵列型阻尼器力学性能中屈服荷载、初始刚度与钢棒数量存在正比关系,屈服位移与钢棒数量无明显关系。

(4) 三个工况的试验研究所得滞回曲线存在差异,1×2 型和 1×3 型的滞回曲线均为梭型,1×2 型阻尼器的滞回曲线呈梭型、1×3 型阻尼器的滞回曲线呈现为两头平缓的梭型,这是滞回性能下降现象,说明钢棒元件排列变长,试件受力情况变差。2×2 型的滞回曲线为轻微的“S”型,与 1×2 型试件相比,滞回性能明显开始下降,对比前两种钢棒排列形式,区别在于钢棒元件排列间距较宽,因此滞回曲线存在差异的原因可能在于钢棒元件的排列间距和排列形式不同。

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] 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): 66-73.
(LI Gang, LI Hongnan. Study on the performance of a new type of soft steel dampers [J]. Journal of vibration and shock, 2006, 25(3): 66-73.)
- [3] 王桂莹,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, 30(1): 7-14.
(WANG Guixuan, SUN Xiaoyan, ZHAO Jie. Study of different types of mild steel damper [J]. Journal of disaster prevention and reduction, 2014, 30(1): 7-14.)
- [4] 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, 36(9): 17-21.
(ZHANG Congjun, LI Aiqun, ZHAO Ming. Summary of research on and applications of passive energy dissipation systems of mild steel

- damper [J]. *Industry construction*, 2006, 36 (9):17-21.)
- [5] KHAZAEI M, VAHDANI R, KHEYRODDIN A. Optimal location of multiple tuned mass dampers in regular and irregular tall steel buildings plan [J]. *Shock and vibration*, 2020, 16:1-20.
- [6] MANCHALWAR A, BAKRE S V. Seismic performance of structure with isolated foundation using U-shape steel damper as an isolator [J]. *Soil mechanics and foundation engineering*. 2020, 57(2):170-176.
- [7] 吴从晓,周云,王廷彦. 金属耗能器的类型、性能及工程应用[J]. *工程抗震与加固改造*, 2006, 28(1):87-94.
(WU Congxiao, ZHOU Yun, WANG Tingyan. Types and performance of metallic dampers and their engineering applications [J]. *Earthquake resistant engineering and retrofitting*, 2006, 28(1):87-94.)
- [8] 戴吉,李春祥. 阻尼器在我国重大工程中的应用与发展[J]. *四川建筑科学研究*, 2014, 40(3):183-187.
(DAI Ji, LI Chunxiang. Application and development of damper in China's major projects [J]. *Sichuan building science*, 2014, 40(3):183-187.)
- [9] 张令心,朱柏洁,王涛. 形状优化的菱形开孔剪切型金属阻尼器减震性能[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2018, 34(4):655-665.
(ZHANG Lingxin, ZHU Baijie, WANG Tao. Study on mechanical behavior of assembled steel shear panel dampers with optimized diamond hole [J]. *Journal of Shenyang jianzhu university (natural science)*, 2018, 34(4):655-665.)
- [10] 周云,龚晨,陈清祥,等. 开孔钢板装配式屈曲约束支撑减震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(8):101-107.
(ZHOU Yun, GONG Chen, CHEN Qingxiang, et al. Experimental study on seismic performance of perforated steel-plate assembled buckling-restrained brace [J]. *Journal of building structures*, 2016, 37(8):101-107.)
- [11] 周云,何志明,张超,等. 可更换剪切钢板阻尼器偏心支撑框架分析[J]. *地震工程与工程振动* 2015, 35(5):68-78.
(ZHOU Yun, HE Zhiming, ZHANG Chao, et al. Structure analysis of replaceable shear link eccentrically brace with steel shear panel damper [J]. *Earthquake engineering and engineering dynamics*, 2015, 35(5):68-78.)
- [12] 黄镇,李茵秋,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 Yinqiu, 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.)
- [13] 何志明,周云,陈清祥. 剪切钢板阻尼器研究与应用进展[J]. *地震工程与工程振动*, 2012, 32(6):124-135.
(HE Zhiming, ZHOU Yun, CHEN Qingxiang. Advance in research and application of steel shear panel dampers [J]. *Earthquake engineering and engineering dynamics*, 2012, 32(6):124-135.)
- [14] 周云,黄慧敏,朱勇. 组合式双圆锥耗能器的设计与性能模拟分析[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(1):131-139.
(ZHOU Yun, HUANG Huimin, ZHU Yong. Design and FE analysis for an assembled biconical energy dissipator [J]. *Journal of vibration and shock*, 2012, 31(1):131-139.)
- [15] 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 Wei, ZHANG Tieshan, MENG Xianhong. A study on the design principle and perform of an rod energy dissipator [J]. *World earthquake engineering*, 2015, 31(2):196-201.)
- [16] 马井月. 钢棒耗能元件阻尼器设计与结构加固方法研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学, 2018.
(MA Jingyue. Damper design based on rod steel energy dissipation elements and research on structure reinforcement method [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2018.)
- [17] 孙威,付腾燕,居理宏,等. 阵列型金属阻尼器钢棒耗能元件设计与性能研究[J]. *建筑科学与工程学报*, 2018, 35(5):225-232.
(SUN Wei, FU Tengyan, JU Lihong, et al. Design and research on performances of array type damper based on steel rod energy dissipation element [J]. *Journal of construction science and engineering*, 2018, 35(5):225-232.)

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)