

杜永峰, 郑辉. 连梁软钢阻尼器设计及其多级耗能的实现[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2019, 34(4): 50-57. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.04.008

Du Y F, Zheng H. Design of Mild Steel Damper for Coupling Beam and Realization of Multi-level Energy Dissipation[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 34(4): 50-57. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.04.008

# 连梁软钢阻尼器设计及其多级耗能的实现

杜永峰<sup>1,2\*</sup>, 郑辉<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学 防震减灾研究所, 甘肃 兰州 730050;

2. 兰州理工大学 甘肃省减震隔震国际合作研究基地, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 为了提高剪力墙结构的抗震性能, 提出了一种安装在剪力墙连梁中部的连梁软钢阻尼器. 为了满足不同的耗能需求, 对阻尼器构造尺寸进行调整, 使其具有多级耗能的效果, 并通过有限元软件 ABAQUS 对连梁软钢阻尼器各项性能及其多级耗能效果进行研究. 研究表明: 连梁软钢阻尼器耗能性能优良, 可以根据单个全域屈服型耗能元件性能参数组合叠加的方式, 计算出连梁软钢阻尼器的性能参数; 多级耗能连梁软钢阻尼器的初始刚度和级数由中间约束钢板的孔洞直径和个数确定; 在全域屈服型耗能元件数量相同的情况下, 相对于不具有多级耗能效果的连梁软钢阻尼器, 多级耗能连梁软钢阻尼器具有初始刚度较低的优点, 并且两者的承载力和耗能能力在加载后期相近.

**关键词:** 软钢阻尼器; 剪力墙结构; 连梁软钢阻尼器; 多级耗能

**中图分类号:** TU352.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-9102(2019)04-0050-08

## Design of Mild Steel Damper for Coupling Beam and Realization of Multi-level Energy Dissipation

Du Yongfeng<sup>1,2</sup>, Zheng Hui<sup>1</sup>

(1. Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. International Research Base on Seismic Mitigation and Isolation of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** In order to improve the seismic performance of shear wall structures, mild steel damper for coupling beam installed in the middle of shear wall connecting beam was proposed. The performance of the damper was studied by finite element software ABAQUS. In order to satisfied different energy dissipation requirements, the structure size of the damper was adjusted to make the damper have the effect of multi-level energy dissipation. And the rationality of mild steel damper for coupling with multi-level energy dissipation was verified by ABAQUS. The results show that: the energy dissipation performance of the damper is great, and the performance parameters of mild steel damper for coupling beam can be calculated by combining the performance parameters of a single fully yielding energy dissipation cell; The initial stiffness and the series of mild steel damper for coupling beam with multi-level energy dissipation can be designed by changing the diameter and number of holes in the middle restraint plate of the damper; In the case of the same number of fully yielding energy dissipation cells, the initial stiffness of the mild steel damper for coupling beam with multi-stage energy dissipation is relatively low

收稿日期: 2019-06-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778276); 甘肃省重点研发项目资助(18YF1FA067)

\* 通信作者, E-mail: dooyf@sohu.com

compared with the mild steel damper for coupling beam, but at the later stage of loading, the bearing capacity and energy dissipation capacity of the two dampers are similar.

**Keywords:** mild steel damper; shear wall structure; mild steel damper for coupling beam; multi-level energy dissipation

剪力墙具有结构整体性较好、房间内部便于布置等优点,因此,被广泛应用于建筑结构中.但是,在强震作用下,剪力墙结构的墙体底部以及连梁中部破坏较为严重,想要在震后进行修复比较困难<sup>[1]</sup>.

为了解决这一问题, Fortney 等<sup>[2]</sup>研发了一种可更换“保险丝”; Chung 等<sup>[3]</sup>将一种摩擦阻尼器放置于连梁中部; Wang 等<sup>[4]</sup>在剪力墙结构的连梁中部设置了金属阻尼器,并对其进行试验研究; 腾军等<sup>[5]</sup>用连梁阻尼器完全代替混凝土连梁; 纪晓东等<sup>[6]</sup>提出了一种可更换连梁; 吴晓龙等<sup>[7]</sup>对设置金属阻尼器的预制装配式剪力墙结构抗震性能进行分析, 研究表明: 在连梁上设置阻尼器可提高结构的延性和耗能.

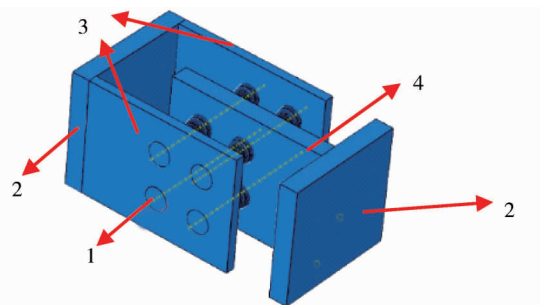
本文在前人的研究基础上, 基于作者提出的全域屈服型耗能元件(Fully Yielding Energy Dissipation Cell, FYEDC), 设计了应用于剪力墙连梁中部的连梁软钢阻尼器(Mild Steel Damper for Coupling Beam, MSDCB)对其各项性能进行数值模拟分析.

一般来说, 为了增大阻尼器的耗能能力就需要增加耗能元件的个数, 在没有合理的构造措施时, 阻尼器的刚度也会随之增大, 这样可能会导致结构先于阻尼器发生破坏<sup>[8]</sup>. 为了避免上述情况的发生, 刘伟庆等<sup>[9]</sup>在耗能钢片的形状及组合规律方面进行改进, 研发了一种剪切弯曲线分阶段屈服软钢阻尼器; 薛松涛等<sup>[10]</sup>采用 2 种不同的软钢片, 设计出了一个弯曲屈服型软钢阻尼器. 本文对提出的连梁软钢阻尼器的构造外形进行设计, 使得阻尼器具有多级耗能的效果, 以此来平衡阻尼器耗能能力和刚度之间的关系.

## 1 连梁软钢阻尼器构造及耗能原理

### 1.1 构造

连梁软钢阻尼器由全域屈服型耗能元件、连接钢板、两边约束钢板和中间约束钢板构成, 各钢板之间采用焊接, 耗能元件与钢板之间采用螺纹连接. 阻尼器构造外形如图 1 所示, 其组合形式可以通过耗能元件的个数及排列方式来决定.



1-全域屈服型耗能元件;2-连接钢板;3-两边约束钢板;4-中间约束钢板

图 1 连梁软钢阻尼器构造

全域屈服型耗能元件构造详图如图 2 所示, 图 2 中  $H$  为耗能元件耗能段的长度,  $D$  为端部直径,  $D_g$  为过渡段直径,  $H_g$  为过渡段长度,  $H_{T_1}$  为全域屈服型耗能元件与两边约束钢板的连接长度,  $H_{T_2}$  为全域屈服型耗能元件与中间约束钢板的连接长度.

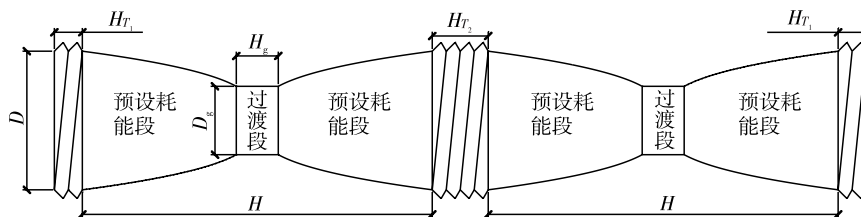


图 2 全域屈服型耗能元件构造

全域屈服型耗能元件的两侧对称, 两侧的外形尺寸满足式(1):

$$D(x) = \begin{cases} a\sqrt[3]{x}, & x_g < x \leq H/2; \\ D_g, & -x_g \leq x \leq x_g; \\ a\sqrt[3]{-x}, & -H/2 \leq x < -x_g. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $D(x)$ 为耗能元件任意截面直径; $x$ 为任意截面距离中心点( $H$ 的中点)的距离; $a$ 为形状系数, $\frac{1}{a} =$

$$\frac{H}{2D^3}; x_g \text{为过渡段两端截面距离中心点}(H \text{的中点}) \text{的距离}, x_g = \left(\frac{8\sqrt{3}D^3}{9H\pi}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{H}{2D^3}; D_g = \sqrt{\frac{8\sqrt{3}D^3}{9H\pi}}.$$

### 1.2 耗能原理

连梁软钢阻尼器在剪力墙结构中的安装位置如图 3 所示.剪力墙结构中的连梁在地震作用下会发生图 4 所示的相对错动,这样会导致阻尼器两边的连接钢板发生图 5 所示的相对位移(由于连梁中部水平向位移相对较小,只考虑竖向相对位移),当外部荷载增大时,则相对位移( $\Delta$ )增大,使得全域屈服型耗能元件进入塑性状态,耗散地震输入的能量,从而减小结构的地震响应,提高结构整体的抗震性能.

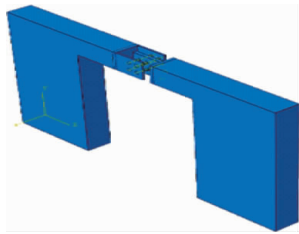


图 3 连梁软钢阻尼器在剪力墙结构中的安装

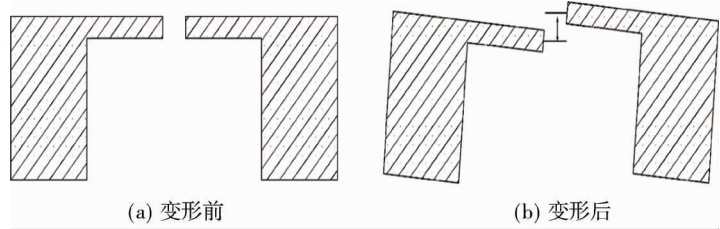


图 4 剪力墙结构变形

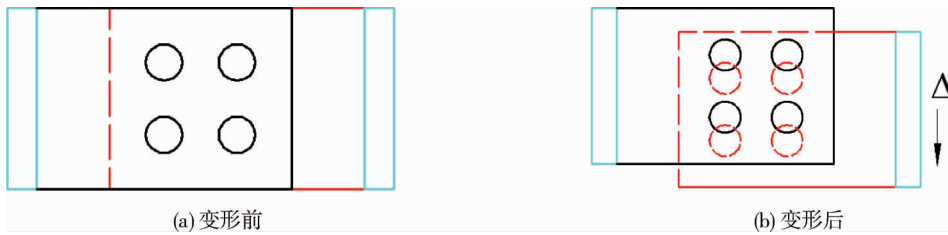


图 5 连梁软钢阻尼器变形

## 2 连梁软钢阻尼器数值模拟分析

### 2.1 连梁软钢阻尼器设计

连梁软钢阻尼器各构件平面尺寸如图 6 所示,其中两边约束钢板厚度为  $H_{T_1}$ ,中间约束钢板厚度为  $H_{T_2}$ ,连接钢板厚度为 20 mm.全域屈服型耗能元件各尺寸分别为  $H = 100$  mm,  $D = 50$  mm,  $D_g = 24.75$  mm,  $H_{T_1} = 20$  mm 以及  $H_{T_2} = 40$  mm.

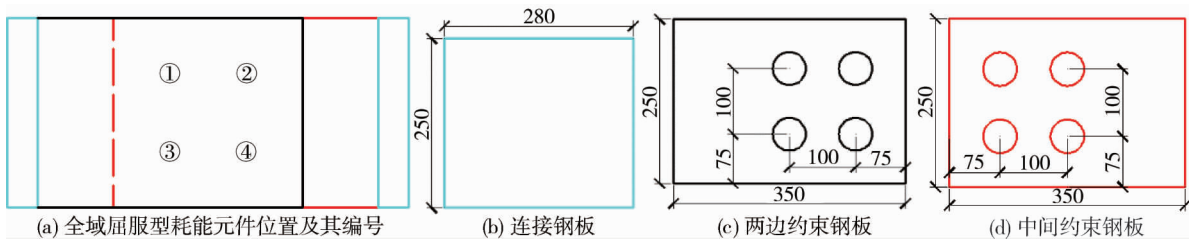


图 6 连梁软钢阻尼器各构件平面尺寸(单位:mm)

设计了表 1 所对应的 3 种连梁软钢阻尼器,通过有限元软件 ABAQUS 来研究耗能元件的数量和位置

对阻尼器各项性能的影响.

表1 连梁软钢阻尼器设计

连梁软钢阻尼器编号	全域屈服型耗能元件数量	布置位置
L-1	4	1,2,3,4
L-2	2	1,3
L-3	2	2,4

## 2.2 有限元模型建立

连梁软钢阻尼器的有限元模型由全域屈服型耗能元件、两边约束钢板、中间约束钢板和连接钢板组成.耗能元件的有限元模型通过旋转(Revolution)方式建立,其材料模型采用双折线随动强化模型,屈服强度取 $f_y = 230$  MPa, 极限强度取 $f_u = 309$  MPa, 弹性模量取 $E = 2.06 \times 10^5$  MPa, 屈服后弹性模量取 $E' = 0.01 E$ , 泊松比为 $\nu = 0.3$ , 由于本文旨在探讨全域屈服型耗能元件对该阻尼器各项性能的影响,其余构件采用刚体建模.

模型各组成构件之间的连接用绑接(Tie)接触形式来模拟,整体采用结构化网格划分方式以及8节点六面体线性减缩积分单元(C3D8R)分析.

在有限元分析过程中,对阻尼器左侧连接钢板施加固结边界条件,对右侧连接钢板施加循环位移加载,如图7所示.图8为右侧连接钢板循环位移加载历程,图9为连梁软钢阻尼器L-1有限元模型网格划分,其余阻尼器网格划分与阻尼器L-1一致,只是全域屈服型耗能元件的数量和位置不同.

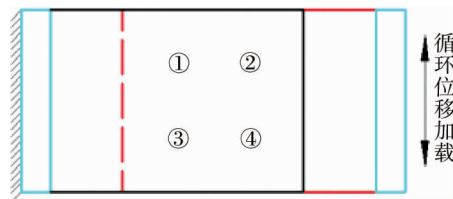


图7 连梁软钢阻尼器边界条件及加载方式

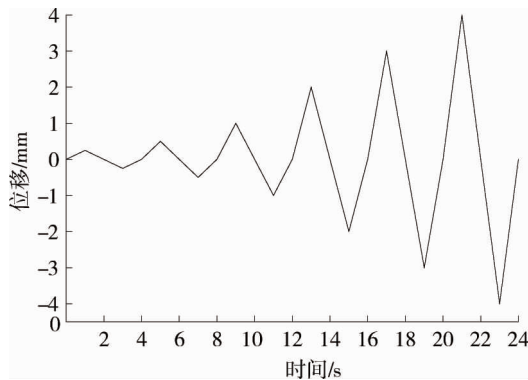


图8 循环位移加载历程

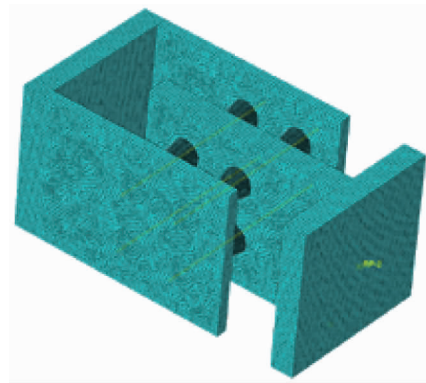


图9 连梁软钢阻尼器L-1有限元模型网格划分

## 2.3 数值模拟结果

由前文建模要求可知:两边约束钢板固定,中间约束钢板产生图7所对应的循环位移平动,所以各全域屈服型耗能元件两端固结,中部位移相同.因此,可将阻尼器看作是多个耗能元件的串联体系,当阻尼器由 $N$ 个尺寸相同的耗能元件组成时,则该阻尼器的初始刚度理论值为 $NK_1$ ( $K_1$ 为耗能元件初始屈服刚度),屈服后刚度理论值为 $NK_2$ ( $K_2$ 为耗能元件屈服后刚度),屈服位移为 $\Delta_y$ ( $\Delta_y$ 为耗能元件屈服位移).

连梁软钢阻尼器力-位移滞回曲线如图10所示,连梁软钢阻尼器数值模拟结果见表2,表3为连梁软钢阻尼器数值模拟结果与理论值对比.

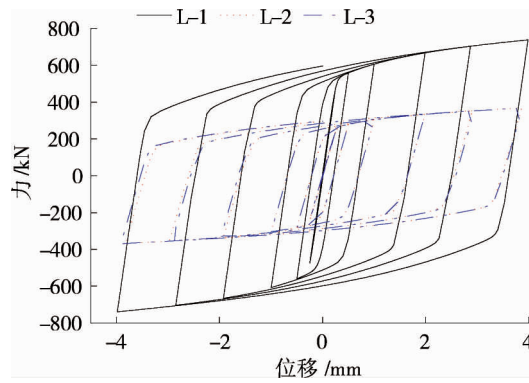


图10 连梁软钢阻尼器力-位移滞回曲线

表2 连梁软钢阻尼器数值模拟结果

阻尼器编号	屈服位移/mm	屈服荷载/kN	初始刚度/(kN/mm)	屈服后刚度/(kN/mm)	最后一圈滞回环面积/(kN·mm)	耗能系数
L-1	0.25	474.8	1 899.0	30.3	8 403.2	2.85
L-2	0.25	238.9	955.5	15.3	4 029.2	2.85
L-3	0.25	238.6	954.2	15.0	4 029.4	2.85

表3 连梁软钢阻尼器数值模拟结果与理论值对比

阻尼器编号	计算方法	屈服位移/mm	初始刚度/(kN/mm)	屈服后刚度/(kN/mm)
L-1	理论叠加	0.25	1 881.2	30.2
	数值模拟	0.25	1 899.0	30.3
L-2	理论叠加	0.25	940.6	15.1
	数值模拟	0.25	955.5	15.3
L-3	理论叠加	0.25	940.6	15.1
	数值模拟	0.25	954.2	15.0

注:单个全域屈服型耗能元件的屈服位移为 0.25 mm,初始刚度为 470.3 kN/mm,屈服后刚度为 7.55 kN/mm

通过各连梁软钢阻尼器力-位移滞回曲线对比可知:

1)滞回曲线呈现平行四边形,耗能系数达到 2.85,结果表明:连梁软钢阻尼器的材料耗能利用率高,耗能性能优良.

2)阻尼器 L-1 的初始刚度比 L-2 和 L-3 分别增大了 98% 和 102%,最后一圈滞回环面积增大了 108.6% 和 108.5%.结果表明:连梁软钢阻尼器的初始刚度和耗能能力随着耗能元件的增多而增大.

3)连梁软钢阻尼器 L-2 与 L-3 的各项性能相比:屈服位移相同,屈服荷载减小了 0.1%,屈服刚度增大了 0.1%,总滞回耗能相差约为 0,各项差值都非常小.结果表明:耗能元件位置对连梁软钢阻尼器的各项性能的影响可以忽略不计.

由表 3 可知:阻尼器中耗能元件各项参数叠加得到的理论值与数值模拟结果相近.结果表明:将连梁软钢阻尼器看作是多个全域屈服型耗能元件的并联体系是合理的,也证明了连梁软钢阻尼器的耗能能力和全域屈服型耗能元件的数量有关而与位置无关.

### 3 多级耗能连梁软钢阻尼器数值模拟分析

#### 3.1 多级耗能连梁软钢阻尼器设计

由图 5 可知,全域屈服型耗能元件进入耗能状态的时机是由中间约束钢板来确定的.因此,可以对中间约束钢板进行图 11 所示的构造设计,增大部分孔洞直径,使得阻尼器在加载初期,中部直径与中间约束钢板直径大小相同的全域屈服型耗能元件直接参与耗能.当加载位移达到一定数值时(两者半径之差为  $\Delta r$ ),剩余的全域屈服型耗能元件才会参与耗能,这样就会使连梁软钢阻尼器具有二级耗能效果.如果孔洞直径与全域屈服型耗能元件中部直径的差值不同( $\Delta r_1 \neq \Delta r_2$ ),就会使得连梁软钢阻尼器具有三级耗能效

果,以此类推,可得到具有多级耗能效果的连梁软钢阻尼器(Mild Steel Damper for Coupling Beam with Multi-level Energy Dissipation, MSDCBMED).

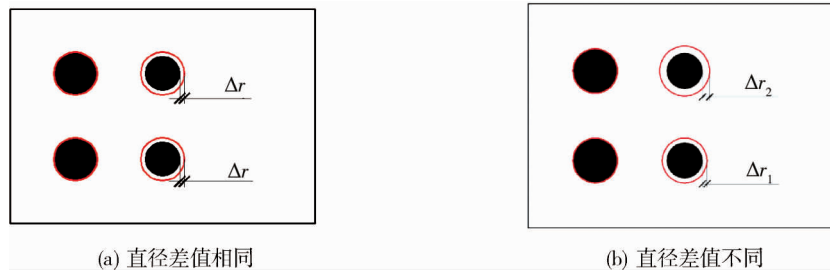


图 11 多级耗能连梁软钢阻尼器中间约束钢板构造

为了对连梁软钢阻尼器多级耗能的可行性及其各项性能进行研究,以表 1 中连梁软钢阻尼器 L-1 为基础,设计了表 4 所示的多级耗能连梁软钢阻尼器.

表 4 多级耗能连梁软钢阻尼器设计

编号	中间约束钢板孔洞直径/mm			
	1#	2#	3#	4#
L-1-2	51	50	50	50
L-1-3	51	52	50	50

注:阻尼器 L-1-2 的 1#孔洞直径增大 1 mm;阻尼器 L-1-3 的 1#孔洞直径增大 1 mm,2#孔洞直径增大 2 mm

### 3.2 有限元模型建立

多级耗能连梁软钢阻尼器的有限元模型的建模过程、边界条件与前文中连梁软钢阻尼器建模方式一致,将阻尼器 L-1-2 的中间约束钢板 1#孔洞直径修改为 51 mm,阻尼器 L-1-3 的中间约束钢板 1#孔洞直径修改为 51 mm,2#孔洞直径修改为 52 mm,并将相应的全域屈服型耗能元件与中间约束钢板的连接方式由绑接(Tie)改为接触(Contact).

此外,为了更直观地看到多级耗能连梁软钢阻尼器的分级耗能效果,对阻尼器 L-1, L-1-2 及 L-1-3 进行单向加载及循环位移加载,单向位移加载历程如图 12 所示,循环位移加载历程如图 13 所示.

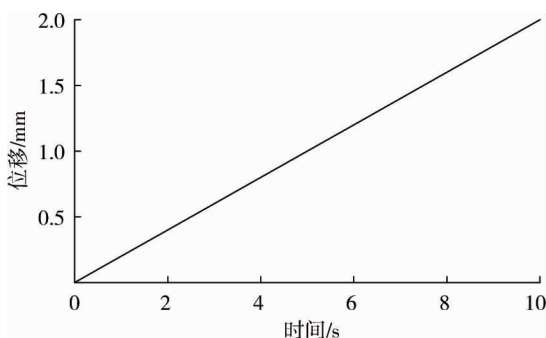


图 12 单向位移加载历程

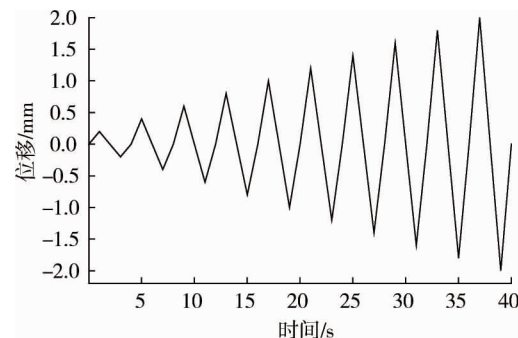


图 13 循环位移加载历程

### 3.3 数值模拟结果

图 14 为连梁软钢阻尼器力-位移曲线,图 15 为连梁软钢阻尼器 L-1 力-位移滞回曲线,图 16 为多级耗能连梁软钢阻尼器 L-1-2 力-位移滞回曲线,图 17 为多级耗能连梁软钢阻尼器 L-1-3 力-位移滞回曲线.

由图 14 可知:多级连梁软钢阻尼器 L-1-2 在加载位移达到 0.5 mm 的时候,刚度有明显的突变,阻尼器 L-1-3 在加载位移达到 0.5 mm 及 1 mm 的时候,刚度有明显的突变,并且刚度突变时对应的位移大小符合表 4 中设置的中间约束钢板孔洞与全域屈服型耗能元件之间的半径差值.

由图 16 和图 17 可知:多级耗能连梁软钢阻尼器 L-1-2 与 L-1-3 滞回曲线多级耗能效果显著,特别是在刚度突变的位置其耗能能力有明显的提升.结果表明:通过中间约束钢板孔洞直径的改变可以控制全域屈服型耗能元件进入耗能的时机,并且随着加载位移的增大,越来越多的全域屈服型耗能元件参与耗能,使得连梁软钢阻尼器的耗能能力增强.

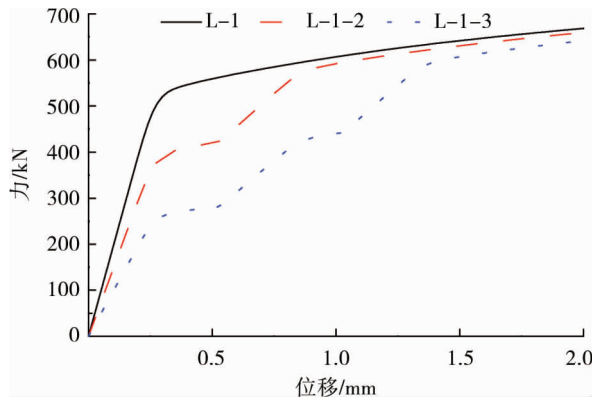


图 14 连梁软钢阻尼器力-位移曲线

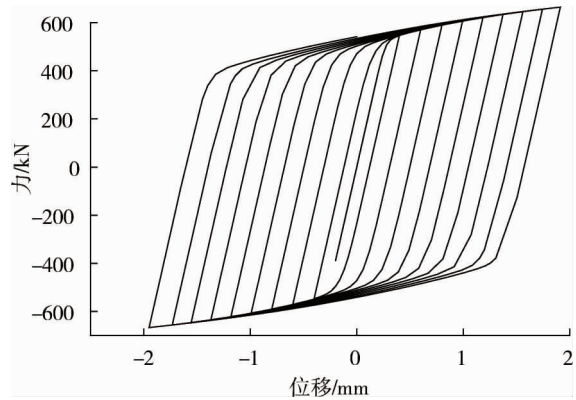


图 15 连梁软钢阻尼器 L-1 力-位移滞回曲线

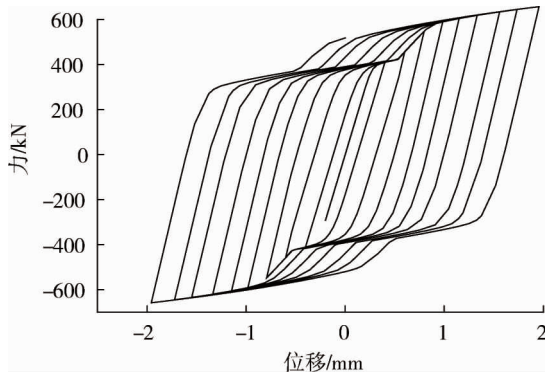


图 16 多级耗能连梁软钢阻尼器 L-1-2 力-位移滞回曲线

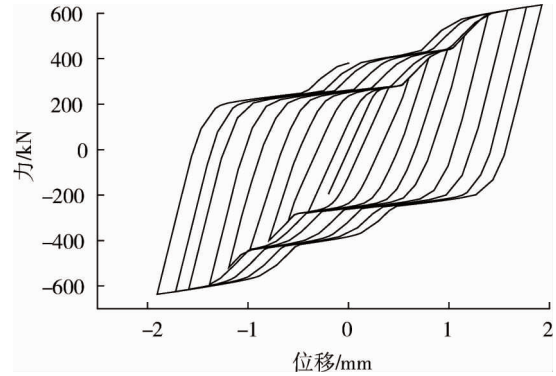


图 17 多级耗能连梁软钢阻尼器 L-1-3 力-位移滞回曲线

为了方便地描述多级耗能连梁软钢阻尼器的各项性能指标,定义初始刚度为  $K_1$ ,第 2 次部分耗能元件屈服时的刚度为  $K_2$ ,第 3 次部分型耗能元件屈服时的刚度为  $K_3$ ,以此类推,得到多级耗能连梁软钢阻尼器数值模拟结果如表 5 所示.

表 5 多级耗能连梁软钢阻尼器数值模拟结果

阻尼器编号	屈服荷载/kN	初始屈服位移/mm	$K_1/(kN/mm)$	$K_2/(kN/mm)$	$K_3/(kN/mm)$	最大承载力/kN
L-1	474.8	0.25	1 899.1	-	-	668.48
L-1-2	355.5	0.25	1 422.0	477.4	-	659.67
L-1-3	237.7	0.25	950.9	452.3	465.9	641.85

由表 5 可知:多级耗能连梁软钢阻尼器 L-1-2 的初始屈服刚度相对于连梁软钢阻尼器 L-1 减少了 25.1%,阻尼器 L-1-3 相对于 L-1 减少了 49.9%,多级耗能连梁软钢阻尼器初始刚度下降明显.到了加载后期,相对于连梁软钢阻尼器 L-1,多级耗能连梁软钢阻尼器 L-1-2 的承载力下降 1.3%,L-1-3 的承载力下降 3.98%,各阻尼器的承载力差值较小.结果表明:在全域屈服型耗能元件数量相同的情况下,相对于连梁软钢阻尼器,多级耗能连梁软钢阻尼器的初始刚度较低,并且随着加载位移的增大,参与耗能的全域屈服型耗能元件数量增多,多级耗能连梁软钢阻尼器的承载力和耗能能力有明显提升.

### 4 结论

1) 本文提出的连梁软钢阻尼器耗能系数达到 2.85,耗能性能优良,其初始刚度和耗能能力随着耗能

元件的个数增多而增大,但与耗能元件的排列方式无关.

2) 可以根据单个全域屈服型耗能元件性能参数组合叠加的方式计算出连梁软钢阻尼器的性能参数.

3) 通过改变中间约束钢板孔洞直径的大小和个数,可对连梁软钢阻尼器的初始刚度和多级耗能的级数进行设计,得到多级耗能连梁软钢阻尼器.

4) 在全域屈服型耗能元件数量相同的情况下,相对于连梁软钢阻尼器,多级耗能连梁软钢阻尼器初始刚度相对较低,但在加载后期,两者具有相近的承载力和耗能能力.

#### 参考文献:

- [1] 梁兴文,董振平,王应生,等.汶川地震中离震中较远地区的高层建筑的震害[J].地震工程与工程振动,2009,29(1):24-31.
- [2] Fortney P J, Shahrooz B M, Rassati G A. Large-Scale Testing of a Replaceable “Fuse” Steel Coupling Beam[J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(12):1801-1807.
- [3] Chung H S, Moon B W, Lee S K, et al. Seismic performance of friction dampers using flexure of rc shear wall system[J]. Structural Design of Tall and Special Buildings, 2009, 18(7): 807-822.
- [4] Wang T, Guo X, He X K, et al. Experimental Study on Replaceable Hybrid Coupling Beams[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 166:1779-1784.
- [5] 滕军,李祚华,高春明,等.耗能模块型钢板阻尼器复合连梁设计及应用[J].地震工程与工程振动,2014,34(2):187-194.
- [6] 纪晓东,马琦峰,王彦栋,等.钢连梁可更换消能梁段抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2014,35(6):1-11.
- [7] 吴晓龙,李宏男,马荣全,等.设置金属阻尼器的预制装配式剪力墙结构抗震性能分析[J].地震工程与工程振动,2016,36(5):46-54.
- [8] 李刚,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.
- [9] 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.
- [10] 薛松涛,李林,谢丽宇.分阶段耗能软钢阻尼器的实现方法及数值模拟[J].结构工程师,2016,32(4):132-138.