

# 一种全域屈服型软钢阻尼器设计及性能模拟

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] 设计了一种可用于预制装配式混凝土框架结构梁柱节点的梁柱节点软钢阻尼器, 对其耗能元件进行形状优化设计, 得到全域屈服型耗能元件, 并采用有限元软件 ABAQUS 对全域屈服型耗能元件及梁柱节点软钢阻尼器进行数值模拟分析。研究表明: 在外部荷载的作用下, 全域屈服型耗能元件在其预设耗能段上各截面同时达到初始屈服, 当荷载逐步增大时, 各截面内部的屈服区域逐步增大, 直至各截面达到全截面屈服, 提高了材料的利用率; 梁柱节点软钢阻尼器的弯矩-转角滞回曲线饱满, 耗能性能优良, 其耗能能力与全域屈服型耗能元件的尺寸及布置位置有关。

[关键词] 梁柱节点软钢阻尼器; 全域屈服型耗能元件; 优化设计数学模型; 装配式框架结构; 耗能减震

[中图分类号] TU352.1 [文献标识码] A

## Design and performance simulation of a fully yielding mild steel damper

Du Yong-feng<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:** A new type of mild steel damper for beam-column joint of precast concrete frame structures is designed, and the fully yielding energy dissipating cell in the damper is obtained by shape optimization of the energy dissipating cell. The fully yielding energy dissipating cell and the mild steel damper for beam-column joint are simulated and analyzed by finite element software ABAQUS. The results show that: under the action of external loads, all sections of the preset energy dissipation part of the fully yielding energy dissipating cell can yield at the same time. When the load increases gradually, the yield area in each section increases gradually until all sections yield, and the utilization ratio of materials is improved. The bending moment-rotation hysteretic curve of mild steel damper for beam-column joint is full, so the energy dissipation performance of the damper is great. The energy dissipation capacity of the damper is related to the size and arrangement of the fully yielding energy dissipating cells.

**Keywords:** mild steel damper for beam-column joint; fully yielding energy dissipating cell; mathematical model of optimal design; PC frame structure; energy dissipation

**E-mail:** dooyf@sohu.com

## 0 引言

预制装配式混凝土(PC)结构体系对于推动建筑工业化具有重要的意义,成为近年来土木工程领域的一个研究热点。由于预制装配式混凝土结构施工过程中存在二次浇筑混凝土接缝问题,因此其节点连接的整体性与现浇混凝土相比较差,进而导致

结构的整体抗震性能较差。为了改善装配式混凝土结构节点的抗震性能,国内外学者提出了多种用于装配式结构节点减震的阻尼器,如梁柱节点摩擦阻尼器<sup>[1]</sup>、扇形铅粘弹性阻尼器<sup>[2]</sup>、转动式铅剪切阻尼器<sup>[3]</sup>等。

由于软钢强度较低,性能稳定,屈服后具有良好的滞回性能,所以非常适合用于制造各种形式的耗能装置,如三角形的加劲钢板阻尼装置<sup>[4]</sup>、锥形钢悬臂阻尼器<sup>[5]</sup>、槽型阻尼器<sup>[6]</sup>、中空菱形阻尼器<sup>[7]</sup>、工字型软钢阻尼器<sup>[8]</sup>、圆环阻尼器<sup>[9]</sup>、抛物线外形

[收稿日期] 2019-04-08

[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(18YF1FA067)

的新型软钢阻尼器<sup>[10]</sup>、组合式双圆锥形阻尼器<sup>[11]</sup>、U 型钢板阻尼器<sup>[12]</sup>、变截面软钢剪切阻尼器<sup>[13]</sup>等。本文针对软钢阻尼器所做的研究表明：软钢阻尼器耗能元件的形状对其耗能效率有很大的影响，因此现有软钢阻尼器的耗能元件外形大多都有进一步优化的必要。

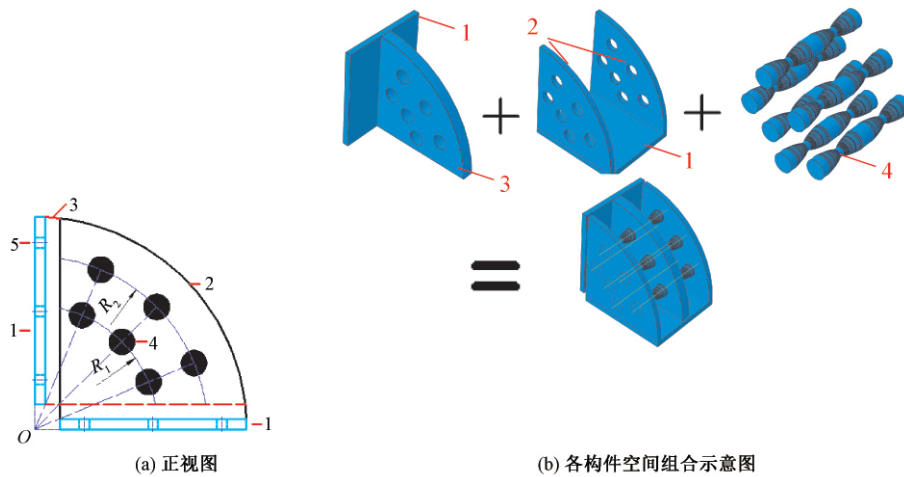
本文针对预制装配式框架结构梁柱连接节点相对薄弱这一特殊问题，设计了梁柱节点软钢阻尼器 (Mild Steel Damper for Beam-to-Column Joint, 简称 MSDBCJ)，同时，为了使材料耗用量相同的耗能元件 (Energy Dissipation Cell, 简称 EDC) 发挥出最佳的耗能性能，给出承受任意荷载且支承形式任意的耗能元件形状优化数学模型，并对梁柱节点软钢阻尼器的耗能元件进行形状优化设计，得到全域屈服型耗能元件 (Fully Yielding Energy

Dissipation Cell, 简称 FYEDC)。全域屈服型耗能元件在其预设耗能段上具有全长截面同时屈服的特点，避免了由于端部应力集中和过渡段发生剪切破坏使得耗能元件提前退出工作，材料可以得到充分地利用。

1 梁柱节点软钢阻尼器的构造与工作原理

1.1 梁柱节点软钢阻尼器的构造

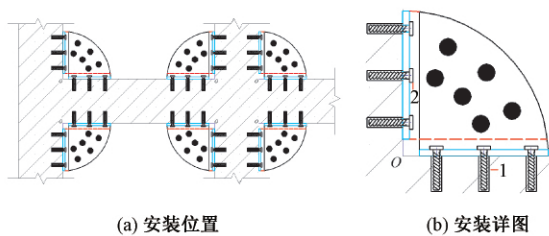
本文设计的梁柱节点软钢阻尼器由全域屈服型耗能元件、中间约束钢板、两边约束钢板和连接钢板组成。图 1 为梁柱节点软钢阻尼器构造示意图，全域屈服型耗能元件与约束钢板采用螺纹连接，连接板与约束钢板之间采用焊接连接。除了图(1)所示的组合方式外，还可以通过全域屈服型耗能元件数目、尺寸和位置的改变来组合成不同构造的梁柱节点软钢阻尼器。



1-连接钢板; 2-两边约束钢板; 3-中间约束钢板; 4-全域屈服型耗能元件; 5-连接螺栓孔

图 1 梁柱节点软钢阻尼器构造示意图

Fig.1 Detailing diagram of MSDBCJ



1-预埋套筒; 2-螺栓

图 2 梁柱节点软钢阻尼器安装示意图

Fig.2 Diagram of installation of MSDBCJ

1.2 梁柱节点软钢阻尼器的工作原理

图 2 为梁柱节点软钢阻尼器安装示意图，首先

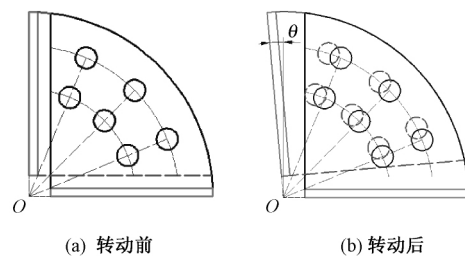


图 3 梁柱节点软钢阻尼器转动示意图

Fig.3 Diagram of rotation of MSDBCJ

将预埋套筒在结构的施工过程中浇筑在梁柱内，并在工厂完成对阻尼器的组装，然后在施工现场通过螺栓连接将阻尼器的连接钢板和梁柱连接起来，实

现阻尼器在梁柱节点上的安装。

在地震作用下,梁柱之间会产生相对转动,带动中间约束钢板和两边约束钢板发生绕  $O$  点的相对转角  $\theta$  (见图 3 所示),使得全域屈服型耗能元件发生弯曲变形;当转角  $\theta$  达到一定数值时,全域屈服型耗能元件产生塑性变形而耗能,耗散地震输入的能量,减小框架结构的侧移及层间位移角。

## 2 全域屈服型耗能元件

### 2.1 形状优化设计目标

理想状态下,希望耗能元件的材料得到充分利用,即:希望耗能元件沿长度方向各截面都参与耗能,参与耗能的截面达到全截面屈服(整个截面的拉压应力达到材料的屈服应力  $f_y$ )。

为了尽可能达到上述理想的耗能效果,对承受任意荷载且支承形式任意的耗能元件进行形状优化设计,优化目标如下:

(1)最大限度地增大耗能元件沿长度方向参与耗能的区域,即沿着耗能元件长度方向,尽可能使各截面的外表面同时达到屈服。

(2)最大限度地提高各截面参与耗能的程度,即在强震作用下,每个参与耗能的截面尽可能达到全截面屈服的状态。

为实现优化目标(1)、(2),首先将优化目标(1)作为目标函数,初步确定耗能元件外形,然后将优化目标(2)作为约束条件,对耗能元件外形进一步优化。

### 2.2 形状优化设计数学模型

#### 2.2.1 形状优化设计变量

对图 1 所示的耗能元件进行形状优化设计,找到能够实现优化目标的耗能元件外形。因此,将耗能元件的外形函数  $f(x)$  作为设计变量。

#### 2.2.2 形状优化设计目标函数

为实现优化目标(1),当耗能元件全长截面同时屈服时,沿长度方向参与耗能的区域最大。此时,耗能元件上任意截面的表面最大应力应满足下式:

$$\sigma_{\max}(x) = f_y \quad (1)$$

式中:  $\sigma_{\max}(x)$  为耗能元件屈服时,任意截面对应的最大拉压应力;  $f_y$  为材料屈服应力。

将式(1)转换为目标函数的表达形式,可得式(2):

$$\min B = \left| \sigma_{\max}(x) - f_y \right| = \left| \frac{M(x) \times y_{\max}(x)}{I_z(x)} - f_y \right| \quad (2)$$

式中:  $M(x)$  为耗能元件屈服时,任意截面弯矩;  $y_{\max}(x)$  为任意截面距离中性轴最远的距离;  $I_z(x)$  为任意截面对中性轴  $Z$  的惯性矩。

#### 2.2.3 形状优化设计约束方程

首先,考虑到耗能元件实际的工作状态,耗能元件必须是连续的,即:

$$f(x) > 0 \quad (3)$$

其次,为了达到目标(2)的要求,耗能元件发生剪切破坏不可早于弯曲破坏的破坏模式,即耗能元件必须先弯曲破坏,才可受剪屈服。为了最大限度地提高各截面参与耗能的程度,认为所有截面都达到全截面屈服时,耗能元件发生弯曲破坏。

当耗能元件弯曲破坏时,任意截面的最大切应力应满足式(4):

$$\tau_{\max}(x) = \frac{V_p(x) S_{z,\max}^*(x)}{I_z(x) b(x)} \leq f_v \quad (4)$$

式中:  $f_v$  为材料抗剪强度;  $\tau_{\max}(x)$  为耗能元件弯曲破坏时,任意截面上的最大切应力;  $V_p(x)$  为耗能元件弯曲破坏时,任意截面上的剪力;  $S_{z,\max}^*(x)$  为任意截面上中性轴一侧的面积对中性轴的静矩;  $b(x)$  为任意截面在中性轴处的宽度。

当某一截面全屈服时,该截面弯矩为:

$$M_q(x_3) = A_c(x_n) f_y Y_{CT}(x_n) = A_T(x_n) f_y Y_{CT}(x_n) \quad (5)$$

式中:  $x_n$  为截面位置;  $A_c(x_n)$ 、 $A_T(x_n)$  分别为某一截面全屈服时,该截面上受压、受拉的面积;  $Y_{CT}(x_n)$  为某一截面全屈服时,该截面上受拉面与受压面两者形心的距离。

耗能元件开始屈服时,就进入了塑性状态,刚度开始下降,当某一截面全屈服时,应按实际情况计算其剪力分布,但是,为了保证该截面屈服的更彻底,耗能效果更好,当耗能元件某一截面全屈服时,仍然认为耗能元件处于弹性状态。所以,当某一截面全截面屈服时,耗能元件剪力的分布可表示为:

$$V_q(x) = V_q(x, M_q(x_n)) \quad (6)$$

当最后一个截面全截面屈服时,耗能元件各截面剪力最大,此时任意截面上的剪力:

$$V_p(x) = \text{MAX}[V_q(x)] = \text{MAX}[V_q(x, M_q(x_n))] \quad (7)$$

将式(7)代入式(4),可得到优化后的约束函数:

$$\frac{MAX[V_q(x, M_q(x_n))] S_{z, \max}^*(x)}{I_z(x) b(x)} \leq f_v \quad (8)$$

由式(2)、(3)、(8)得到任意耗能元件的形状优化数学模型如下:

$$\begin{aligned} & \text{find } f(x) \\ & \text{min } B = \left| \frac{M(x) \times y_{\max}(x)}{I_z(x)} - f_y \right| \\ & \text{s.t. } \frac{MAX[V_q(x, M_q(x_n))] S_{z, \max}^*(x)}{I_z(x) b(x)} \leq f_v \\ & f(x) > 0 \end{aligned} \quad (9)$$

### 2.3 全域屈服型耗能元件形状优化设计

由图4可知,梁柱节点软钢阻尼器的耗能元件两端固结,中部受到垂直长度方向的位移加载。取长度为 $2H$ 、端部直径为 $D$ 的单个耗能元件进行形状优化设计。为了说明及计算简便,将耗能元件分解为两端固结,其中一端受到垂直长度方向位移加载的两个对称耗能元件,耗能元件分解及计算简图见图5所示。

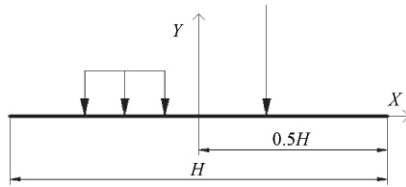


图4 耗能元件受任意荷载且支撑形式任意示意图

Fig.4 EDC subjected to arbitrary loads under arbitrary supporting conditions

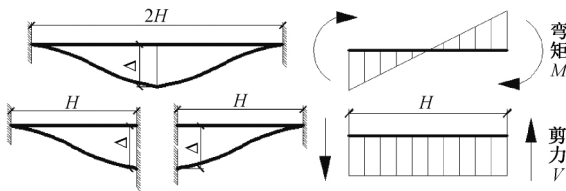


图5 耗能元件分解示意及计算简图

Fig.5 Decomposition and calculation diagram of EDC

当中间约束钢板转动时,其对耗能元件作用的方向具有随机性,为了保证耗能元件在同一截面任意方向的力学响应一致,要求耗能元件的外形是一个回转体。图6为耗能元件任意截面示意图,则耗能元件任意截面的几何特征可表示为:

$$I_z(x) = \frac{\pi D^4(x)}{64} \quad (10)$$

$$S_{z, \max}^*(x) = \frac{D^3(x)}{12} \quad (11)$$

$$2y_{\max}(x) = b(x) = D(x) \quad (12)$$

式中: $D(x)$ 为耗能元件任意截面直径。

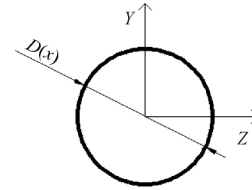


图6 耗能元件任意截面示意图

Fig.6 Arbitrary section of EDC

该耗能元件外形可用任意截面直径表示,取设计变量为:

$$f(x) = D(x) \quad (13)$$

取端部截面屈服时的受力状态为耗能元件形状优化设计时的受力状态,此时端部弯矩大小为:

$$M = f_y \times I_z \times \frac{2}{D} = \frac{\pi D^3}{32} f_y \quad (14)$$

式中: $I_z$ 为端部截面惯性矩: $I_z = \frac{\pi D^4}{64}$ 。

由结构力学知识可得耗能元件端部屈服时(即耗能元件屈服时),弯矩和剪力分布分别为( $-H/2 \leq x \leq H/2$ ):

$$M(x) = \frac{\pi D^3}{16H} f_y x \quad (15)$$

$$V(x) = \frac{\pi D^3}{16H} f_y \quad (16)$$

基于上述截面形式、边界条件、受力特点,得到梁柱节点软钢阻尼器耗能元件的形状优化数学模型如下:

$$\begin{aligned} & \text{find } D(x) \\ & \text{min } B = f_y \times \left| \frac{2D^3}{H} \times \frac{x}{D^3(x)} - 1 \right| \\ & \text{s.t. } \frac{16MAX\left[\frac{D^3(x_n)}{12x_n} f_y\right]}{3\pi D^2(x)} \leq \frac{f_y}{\sqrt{3}} \\ & D(x) > 0 \end{aligned} \quad (17)$$

定义满足式(17)的耗能元件为全域屈服型耗能元件,通过求解,确定全域屈服型耗能元件的外形尺寸函数如式(18)所示,构造详图见图7所示,其中 $H_{T1}$ 为耗能元件与两边约束钢板的连接长度, $H_{T2}$

为耗能元件与中间约束钢板的连接长度。

$$D(x) = \begin{cases} a\sqrt[3]{x} & (x_g < x \leq H/2) \\ \sqrt{\frac{8\sqrt{3}D^3}{9H\pi}} & (-x_g \leq x \leq x_g) \\ a\sqrt[3]{-x} & (-H/2 \leq x < -x_g) \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $x_g = \left(\frac{8\sqrt{3}D^3}{9H\pi}\right)^{\frac{3}{2}} \times \frac{H}{2D^3}; \frac{1}{a^3} = \frac{H}{2D^3}$

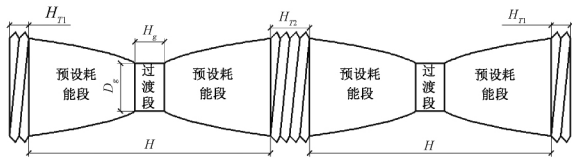


图 7 全域屈服型耗能元件构造详图  
Fig.7 Detailing diagram of FYEDC

### 3 全域屈服型耗能元件合理性验证

#### 3.1 耗能元件设计及有限元模型建立

为了验证全域屈服型耗能元件形状优化数学模型的合理性,对表 1 所示的 6 种不同外形尺寸的耗能元件进行数值模拟分析。

表 1 耗能元件尺寸设计

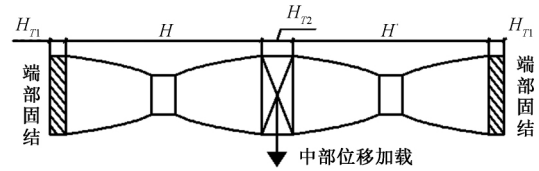
Tab.1 Design dimensions of EDC

耗能元件 编号	H (mm)	D (mm)	D <sub>min</sub> (mm)	H <sub>T1</sub> (mm)	H <sub>T2</sub> (mm)
Y-1	100	50	24.75	20	40
Y-2	100	40	17.71	20	40
Y-3	120	50	22.59	20	40
Y-4	100	50	10	20	40
Y-5	100	40	10	20	40
Y-6	120	50	10	20	40

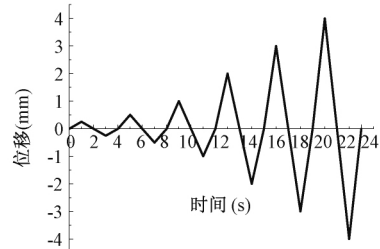
注: D<sub>min</sub> 为耗能元件最小截面直径;耗能元件 Y-1、Y-2 及 Y-3 为全域屈服型耗能元件;耗能元件 Y-4、Y-5 及 Y-6 的过渡段直径 D<sub>min</sub> < D<sub>g</sub>, 不满足优化设计要求。

通过旋转 (Revolution) 方式建立耗能元件有限元模型,材料模型采用双折线随动强化模型,屈服强度取  $f_y = 230\text{MPa}$ , 极限强度取  $f_u = 309\text{MPa}$ , 弹性模量取  $E = 2.06 \times 10^5\text{MPa}$ , 屈服后弹性模量取  $E' = 0.01E$ , 泊松比为  $\nu = 0.3$ , 采用八节点六面体线性减缩积分单元 (C3D8R) 以及结构化网格划分方式。

耗能元件两端 ( $H_{T1}$ ) 固结,在其中部 ( $H_{T2}$ ) 施加垂直长度方向的循环位移加载,见图 8 所示。



(a) 边界条件和加载位置



(b) 循环位移加载历程

图 8 耗能元件边界条件和加载方式

Fig.8 Boundary conditions and loading mode of EDC

#### 3.2 数值模拟结果分析

图 9 为各耗能元件屈服时的应力云图,图 10 为各耗能元件力-位移滞回曲线,表 2 为耗能元件数值模拟结果。

由图 9 可知,全域屈服型耗能元件 Y-1、Y-2 及 Y-3 的预设耗能段全长截面外表面同时达到了屈服,在其端部、中部以及过渡段没有应力集中现象,应力沿全长分布均匀,过渡段也未发生剪切破坏;耗能元件 Y-4、Y-5 及 Y-6 只在过渡段附近有极小区域发生了屈服,且过渡段应力集中显著。结果表明:优化后的耗能元件,其预设耗能段全长截面同时初始屈服,提高了材料的利用率。

由表 2 可知:全域屈服型耗能元件 Y-1、Y-2 及 Y-3 的耗能系数最小值为 2.9,而耗能元件 Y-4、Y-5 及 Y-6 的耗能系数最大值为 2.04,前者比后者增大了 42.16%。结果表明:材料及耗用量相同时,全域屈服型耗能元件的耗能性能更加优良。

由表 2 中各耗能元件最后一圈滞回环面积对比可知:全域屈服型耗能元件 Y-1 比耗能元件 Y-4 增大了 97.4%,全域屈服型耗能元件 Y-2 比耗能元件 Y-5 增大了 76.1%,全域屈服型耗能元件 Y-3 比耗能元件 Y-6 增大了 146.07%。结果表明:材料及耗用量相同时,全域屈服型耗能元件的耗能能力更强。

表 2 耗能元件数值模拟结果  
Tab. 2 Finite element simulation results of EDCs

耗能元件 编号	屈服位移 (mm)	屈服力 (kN)	初始刚度 (kN/mm)	屈服后刚度 (kN/mm)	最后一圈滞回环面积 (耗散能量)(kN·mm)	耗能系数
Y-1	0.25	117.578	470.31	7.55	2155.85	3.00
Y-2	0.26	58.762	226.01	3.65	1136.45	2.99
Y-3	0.3	93.304	311.01	6.13	1737.88	2.90
Y-4	0.08	35.335	441.68	14.91	1092.33	2.04
Y-5	0.09	19.445	216.06	8.04	645.51	2.04
Y-6	0.07	19.607	280.10	12.96	706.24	1.85

注:耗能系数,又称能量耗散系数或能量耗散比,是耗能元件在一个振动周期内能量耗散量与振幅最大处所具弹性势能的比值,详见 JGJ/T 101—2015《建筑抗震试验方法规程》;表 2 中耗能系数为图 10 中最后一圈滞回环的值。

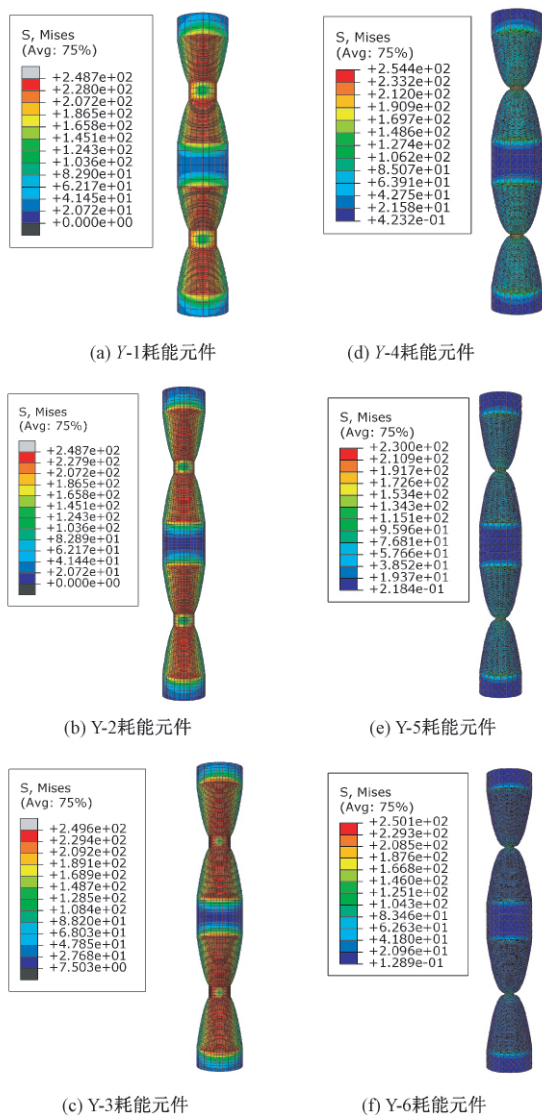


图 9 耗能元件屈服时的应力云图  
Fig.9 Stress contour diagrams of EDCs at yield

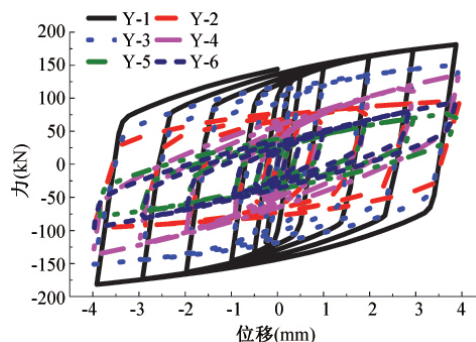


图 10 耗能元件力-位移滞回曲线  
Fig.10 The F-D hysteretic loops of EDCs

### 4 梁柱节点软钢阻尼器性能分析

#### 4.1 梁柱节点软钢阻尼器设计

图 11 为梁柱节点软钢阻尼器各构件平面尺寸,中间约束钢板厚度为  $H_{T2}$ ,两边约束钢板厚度为  $H_{T1}$ 。

为了研究全域屈服型耗能元件对梁柱节点软钢阻尼器各项性能的影响,采用 ABAQUS 对表 3 所示的 6 组不同构造的梁柱节点软钢阻尼器进行数值模拟分析。

表 3 梁柱节点软钢阻尼器的设计

Tab. 3 The design of MSDBCJs

梁柱节点软钢 阻尼器编号	全域屈服型耗 能元件类型	数量	布置位置
D-1	Y-1	6	1-6
D-2	Y-2	6	1-6
D-3	Y-1	3	4-6
D-4	Y-2	3	4-6
D-5	Y-2	3	1-3
D-6	Y-3	6	1-6

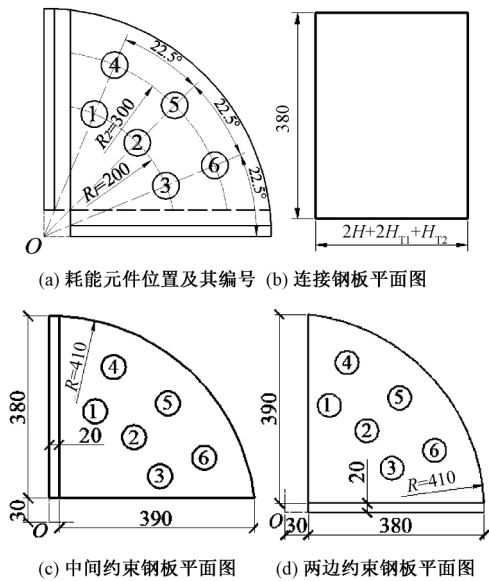


图 11 梁柱节点软钢阻尼器各构件平面尺寸  
Fig.11 Plane dimensions of MSDBCJ

4.2 有限元模型建立

梁柱节点软钢阻尼器的有限元模型由连接钢板、中间约束钢板、两边约束钢板和相应数量的全域屈服型耗能元件构成,全域屈服型耗能元件按前文所述方法进行建立,通过拉伸(Extrusion)方式建立其余构件计算模型。

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,所以其余构件采用刚体建模。用绑接(Tie)接触形式来模拟模型各构件之间的连接,模型整体采用结构化网格划分方式以及八节点六面体线性减缩积分单元(C3D8R)分析。

与约束钢板相连的连接钢板下部固结,与中间

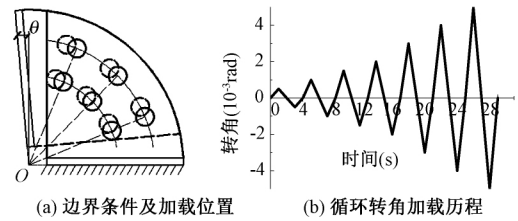


图 12 梁柱节点软钢阻尼器边界条件及加载方式

Fig.12 Boundary conditions and loading mode of MSDBCJ

约束钢板相连的连接钢板施加绕 O 点的循环转角加载,见图 12 所示。

4.3 梁柱节点软钢阻尼器模拟结果分析

图 13 为梁柱节点软钢阻尼器弯矩-转角滞回曲线,表 4 为梁柱节点软钢阻尼器数值模拟结果。

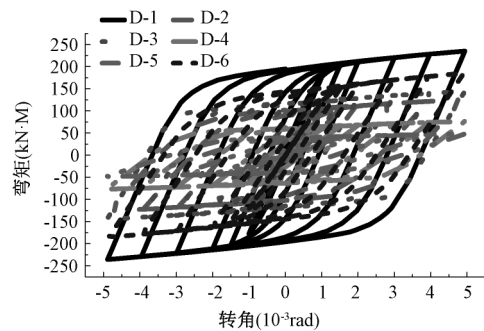


图 13 梁柱节点软钢阻尼器弯矩-转角滞回曲线

Fig.13 The M-θ hysteretic loops of MSDBCJ

由图 13 可以看出,各阻尼器的弯矩-转角滞回曲线饱满,呈平行四边形,由表 4 可知,各阻尼器的耗能系数最大值为 3.054,最小值为 2.857,耗能系数较大。分析结果表明:梁柱节点软钢阻尼器耗能性能优良。

表 4 梁柱节点软钢阻尼器数值模拟结果

Tab.4 Finite element simulation results of the MSDBCJs

梁柱节点软钢 阻尼器编号	屈服转角 ( $10^{-4}$ rad)	屈服弯矩 (kN·M)	初始刚度 (kN·M/rad)	屈服后刚度 (kN·M/rad)	最后一圈滞回环面积 (耗散能量)(kN·M·rad)	最后一圈滞回环 耗能系数
D-1	8.44	157.86	193107	6796.8	3.5075	3.019
D-2	8.92	79.86	91685	3742.9	1.8067	2.953
D-3	8.64	109.60	133792	4281	2.1757	3.054
D-4	8.73	53.79	63476	2279.5	1.1409	3.02
D-5	12.92	35.59	28348	1461.2	0.7015	2.941
D-6	9.8	118.86	122079	6938.5	2.5947	2.857

由表4中各阻尼器最后一圈滞回环面积对比可知:

(1)梁柱节点软钢阻尼器D-1比D-2增大了94.1%,D-3比D-4增大了90.7%。结果表明:梁柱节点软钢阻尼器的耗能能力随全域屈服型耗能元件端部直径 $D$ 的增大而增大。

(2)梁柱节点软钢阻尼器D-4比D-5增大了62.6%。结果表明:梁柱节点软钢阻尼器的耗能能力随着全域屈服型耗能元件与转动原点 $O$ 的距离的增大而增大。

(3)梁柱节点软钢阻尼器D-1比D-6增大了35.2%。结果表明:梁柱节点软钢阻尼器的耗能能力随着全域屈服型耗能元件的长度增大而减小。

## 5 结论

本文针对预制装配式梁柱节点连接相对薄弱的问题,提出了梁柱节点软钢阻尼器,并基于形状优化数学模型对其耗能元件进行形状优化设计,得到全域屈服型耗能元件,最后通过有限元软件对全域屈服型耗能元件及梁柱节点软钢阻尼器进行数值模拟分析,得出以下结论:

(1)全域屈服型耗能元件在其预设耗能段具有全长截面同时初始屈服的特点,应力沿其长度方向均匀分布,端部未出现应力集中现象,过渡段未发生剪切破坏。

(2)针对本文所设计的耗能元件,材料耗用量相同时,相对于不满足形状优化设计的耗能元件,全域屈服型耗能元件的耗能系数增大42.16%及以上,耗能性能更加优良;最后一圈滞回环面积增大76.1%及以上,耗能能力更强。

(3)梁柱节点软钢阻尼器耗能系数达到2.86及以上,耗能性能优良,其耗能能力随着全域屈服型耗能元件端部直径和距离转动原点的半径的增大而增强,随着全域屈服型耗能元件长度的增大而减弱。

## 参考文献 (References):

- [1] Morgen B G, Kurama Y C. Seismic design of friction-damped precast concrete frame structures[J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(11):1501-1511
- [2] 吴从晓,赖伟山,周云,等.新型预制装配式消能减震混凝土框架节点抗震性能试验研究[J].土木工程学报,2015,48(9):23-30
- Wu Cong-xiao, Lai Wei-shan, Zhou Yun, et al. Experimental study on seismic behaviors of new energy-

dissipative prefabricated concrete frame structure joints [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48 (9): 23-30(in Chinese)

- [3] 闫维明,顾智,彭凌云,等.新型转动式铅剪切阻尼器的试验研究与有限元分析[J].防灾减灾工程学报,2015,35(2):277-282
- Yan Wei-ming, Gu Zhi, Peng Ling-yun, et al. Study on the experiment and finite element analysis of a new rotating lead shear damper [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35 (2): 277-282(in Chinese).
- [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, 2012, 9 (3): 505-528
- [5] Tyler R G. Tapered steel energy dissipators for earthquake resistant structures [J]. Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, 1978, 11(4):282-294
- [6] Wada A, Huang Y H, Iwata M. Passive damping technology for buildings in Japan [J]. Progress in Structural Engineering & Materials, 2015, 2(3):335-350
- [7] 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(in Chinese)
- [8] 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 dampers [J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(3):66-72(in Chinese)
- [9] Maleki S, Bagheri S. Pipe damper, Part I: Experimental and analytical study [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(8-9):1088-1095
- [10] 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 (in Chinese)



- [11] 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 Hui-min, Zhu Yong. Design and FE Analysis for an assembled biconical energy dissipator [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(1): 131-139 (in Chinese).
- [12] 杜红凯,韩森,闫维明,等.U 型钢板力学性能受硬度和层数的影响分析[J]. 工程力学, 2016, 33(S1): 101-106  
Du Hong-kai, Han Miao, Yan Wei-ming, et al. Mechanical properties analysis of U-shape steel plates of different hardness and numbers of layers[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(S1): 101-106 (in Chinese)
- [13] 邓开来,潘鹏. 变截面软钢剪切阻尼器试验研究[J]. 工程力学, 2016, 33(5): 82-88  
Deng Kai-lai, Pan Peng. Experimental study of steel shear panel dampers with varying cross-sections [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(5): 82-88 (in Chinese)

[作者简介] 郑辉(1994-),男,河南信阳人,硕士生,从事结构减震控制研究

(上接第 133 页)

- [15] 徐秀凤. 基于性能的砌体结构加固与修复研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所, 2015  
Xu Xiu-feng. Performance based strengthening and repairing study for masonry structures [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2015(in Chinese)
- [16] 叶列平. 混凝土结构[M]. 北京:清华大学出版社, 2005  
Ye Lie-ping. Concrete Structure[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005(in Chinese)
- [17] 施楚贤. 砌体结构设计与计算[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2003  
Shi Chu-xian. Design and calculation of masonry structure [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003(in Chinese)
- [18] 东南大学,天津大学,同济大学. 混凝土结构设计原理[M]. 北京,中国建筑工业出版社, 2011  
Southeast University, Tianjin University, Tongji University. Design principle of concrete structure [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011 (in Chinese)
- [19] 汪训流,陆新征,叶列平. 往复荷载下钢筋混凝土柱受力性能的数值模拟[J]. 工程力学, 2007, 24(12): 76-81  
Wang Xun-liu, Lu Xin-zheng, Ye Lie-ping. Numerical simulation for the hysteresis behavior of RC columns under cyclic loads [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(12): 76-81(in Chinese)

[作者简介] 徐秀凤(1987-),女,博士,副教授,主要从事结构抗震性能方面研究

(上接第 146 页)

- Zhang De-wen, Wei Fu-xuan. Model updating and damage detection [M]. Beijing: Science Press, 1999 (in Chinese)
- [13] 周峰,杨卓. 基于静力应变的新型空间结构损伤诊断数值研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2014, 36(2): 107-111  
Zhou Feng, Yang Zhuo. A numerical study of damage identification for a new spatial structure based on static strain [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2014, 36(2): 107-111(in Chinese)

[作者简介] 杨浩(1994-),男,安徽人,硕士研究生,研究方向:结构工程