

文章编号:1673-2049(2018)05-0225-08

# 阵列型金属阻尼器钢棒耗能元件设计与性能研究

孙 威<sup>1</sup>,付腾燕<sup>1</sup>,居理宏<sup>2</sup>,孙 丽<sup>1</sup>,马井月<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学 土木工程学院,辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳城市现代建筑产业化管理办公室,辽宁 沈阳 110825)

**摘要:**设计了 5 种形式的 Q235 材质钢棒耗能元件,包括 1 种等截面钢棒耗能元件 RED A 和 4 种变截面钢棒耗能元件 RED B, RED C, RED D 和 RED E。首先,以数值模拟结合正交试验的方法分析各耗能元件的直径  $d$ 、长细比  $\delta$ 、端板锚固长度  $l_m$ 、内缩直径  $d_1$ 、锚固端延伸长度  $l_1$  以及中部等截面长度  $l_2$  等几何参数对其耗能性能的影响;其次,研究钢材力学性能参数对钢棒耗能元件耗能性能的影响,将材质为低屈服点钢 LYP100, LYP160 和 LYP225 的耗能元件耗能性能与 Q235 材质的耗能元件进行对比。结果表明:在 5 种耗能元件中,RED D 的耗能能力最强,且当其几何参数组合为直径  $d_0=40$  mm、长细比  $\delta=4$ 、内缩直径  $d_1=20$  mm、中部等截面长度  $l_2=20$  mm 时,耗能性能最优,耗能系数达到 2.71;当耗能元件材质为低屈服点钢时,耗能性能进一步提升;耗能元件 RED D 在最优几何参数条件下,采用低屈服点钢 LYP160 制作时,耗能系数高达 3.12。

**关键词:**阵列型金属阻尼器;钢棒耗能元件;数值模拟;正交试验;耗能系数

**中图分类号:**TU375.4 **文献标志码:**A

## Steel Rod Energy Dissipating Element Design and Performance Research of Array Type Metal Damper

SUN Wei<sup>1</sup>, FU Teng-yan<sup>1</sup>, JU Li-hong<sup>2</sup>, SUN Li<sup>1</sup>, MA Jing-yue<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, Liaoning, China;

2. Shenyang City Modern Building Industrialization Management Office, Shenyang 110825, Liaoning, China)

**Abstract:** 5 kinds of steel rod energy dissipating elements with Q235 steel were designed, which included 1 kind of equal cross-section element RED A and 4 kinds of variable cross-section elements RED B, RED C, RED D and RED E. Firstly, the methods of numerical simulation and orthogonal test were used to analyze the influence of elements' geometric parameters such as diameter  $d_0$ , slenderness ratio  $\delta$ , anchorage length in the plate  $l_m$ , internal shrinkage diameter  $d_1$ , extension length of anchorage section  $l_1$  and middle equal cross-section length  $l_2$  on their energy dissipation performances. Secondly, the influence of steel mechanics property parameters on energy dissipation performances of elements was also researched. The energy dissipation performances of elements with low yield point steel LYP100, LYP160 and LYP225 materials were compared with those of Q235 steel element. The results show that the energy dissipation performance of RED D is the best among all kinds of elements. When its geometric parameters are diameter  $d_0=40$  mm, slenderness ratio  $\delta=4$ , internal shrinkage diameter  $d_1=20$  mm, and middle equal cross-section length  $l_2=20$  mm, its energy dissipation performance is optimal, the

收稿日期:2018-06-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51578347);沈阳市科技计划项目(18-013-0-31);

沈阳建筑大学博士后基金项目(SJZUBSH201714)

作者简介:孙 威(1979-),男,辽宁辽阳人,副教授,工学博士,E-mail:lg1\_315@126.com。

energy dissipation coefficient is 2.71. When the material of energy dissipation elements is low yield point steel, the energy dissipation performance is increased further. When RED D is made with LYP160 steel and optimal geometrical parameters, the energy dissipation coefficient is as high as 3.12.

**Key words:** array type metal damper; steel rod energy dissipation element; numerical simulation; orthogonal test; energy dissipation coefficient

## 0 引言

近年来,消能减震技术成为建筑结构抗震加固的主要措施之一<sup>[1-3]</sup>,其中金属阻尼器具有耗能效果显著、耗能机理明确以及工作性能稳定、易于加工等优点而被广泛应用于老旧建筑和新建建筑的抗震加固领域<sup>[4-6]</sup>。阵列型金属阻尼器是金属阻尼器中的主要类型,它通常是由一定数量的耗能元件按照阵列型排列组合而成。阵列型金属阻尼器的耗能元件按照形状不同可分为钢板型耗能元件和钢棒型耗能元件<sup>[7-8]</sup>。目前,针对阵列型金属阻尼器的研究与应用主要集中于钢板耗能元件阻尼器,而对钢棒耗能元件阻尼器的研究相对较少。基于钢棒耗能元件的阵列型阻尼器由钢棒耗能元件和上下锚固端板构成。与钢板耗能元件相比,钢棒耗能元件具有如下优点<sup>[7]</sup>:①耗能能力各向均衡,可同时兼顾多方向的耗能效果,在工程应用中有利于减小阻尼器的用量,降低成本;②构造简单,加工和安装方便,通用性强,可按照需要任意扩充耗能元件;③屈服面积大,节约材料。因此,基于钢棒耗能元件的阵列型金属阻尼器具有广泛的应用前景。

本文针对阵列型钢棒阻尼器的耗能元件开展研究,设计 5 种不同形式钢棒耗能元件,以数值模拟结合正交试验的方法研究各钢棒耗能元件的几何参数对其耗能性能的影响,以确定最优的耗能元件形式及其几何参数。在此基础上,进一步研究不同类型钢材力学性能参数的差异对钢棒耗能元件耗能性能的影响,以确定钢棒耗能元件性能最优的材质。

## 1 钢棒耗能元件外形设计与耗能性能

### 1.1 钢棒耗能元件的外形设计

钢棒耗能元件可根据需要排列成各种阵列形式,如图 1 所示。钢棒耗能元件是阵列型钢棒阻尼器的基本耗能单元,它的耗能性能优劣决定着整个阻尼器的耗能性能。本文通过改变耗能元件外观几何参数设计了 5 种不同形式的钢棒耗能元件,分别为 RED A, RED B, RED C, RED D, RED E,如图 2

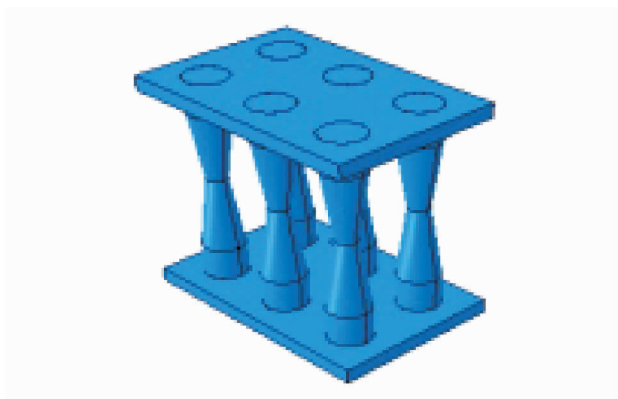


图 1 阵列型钢棒阻尼器

Fig. 1 Array Type Steel Rod Damper

所示,其中 RED A 是等截面钢棒,RED B~RED E 为变截面钢棒。各钢棒耗能元件涉及的几何参数包括:延伸有效长度  $l_0$ ,在端板中的锚固长度  $l_m$ ,锚固端长度  $l_1$ ,中部等截面长度  $l_2$ ,锚固端直径  $d_0$ ,内缩直径  $d_1$ 。钢棒耗能元件与锚固端板可采用焊接或栓接的方式。

### 1.2 钢棒耗能元件的有限元模型

利用大型有限元软件的三维实体单元建立钢棒耗能元件的有限元模型。耗能元件采用 Q235 钢,基本力学参数详见表 1。钢材的本构关系采用考虑包辛格效应的双线性随动强化模型,无初始刚度退化<sup>[9]</sup>。对于钢材的循环硬化准则即 Von Mises 流动准则,采用混合强化准则。目前,常用的准则包括各向同性强化准则、随动强化准则以及混合强化准则<sup>[10]</sup>。各向同性强化准则允许屈服后的屈服面膨胀或者收缩,如图 3(a)所示,该准则适用于单调加载;随动强化准则允许后继屈服面在应力空间中发生刚体平动,但不能转动,后继屈服面的大小、形状和方向不发生变化,如图 3(b)所示,反向加载时能够发生很小的应变软化;混合强化准则结合了前 2 种强化理论的优点,其后继的屈服面既能发生均匀膨胀或收缩也能发生刚体平动,如图 3(c)所示,能够反映钢材的包辛格效应和屈服平台等真实的力学特性<sup>[11-12]</sup>。

混合强化模型的参数计算公式如下<sup>[13]</sup>

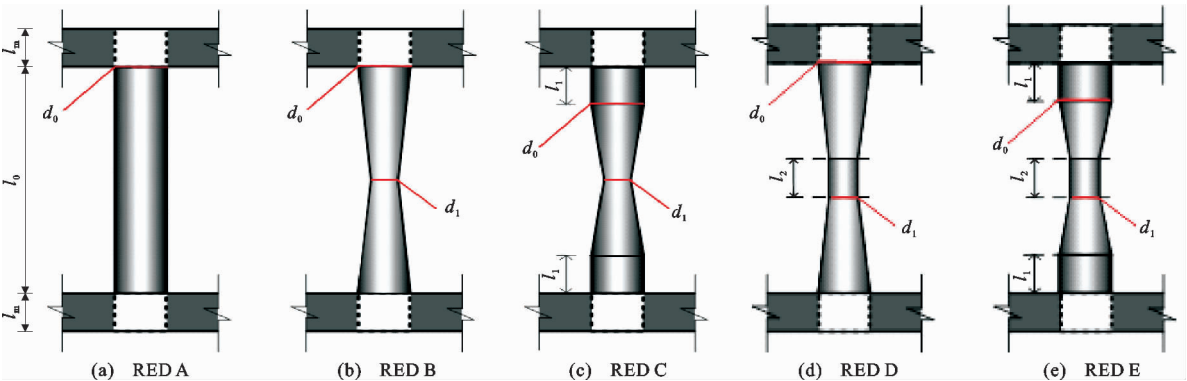


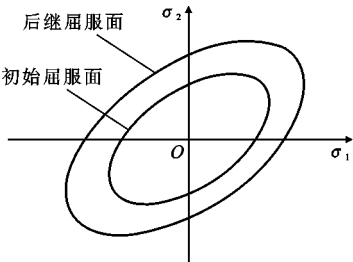
图 2  5 种钢棒耗能元件

Fig. 2  5 Kinds of Steel Rod Energy Dissipating Elements

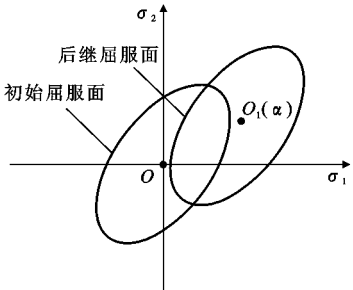
表 1  钢材性能指标

Tab. 1  Performance Indexes of Steels

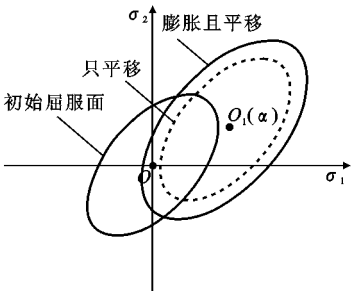
钢材型号	屈服强度/MPa	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	泊松比
Q235	235	206	376	0.26
LYP100	100	197	247	0.26
LYP160	160	204	248	0.26
LYP225	225	197	303	0.26



(a) 各向同性强化准则



(b) 随动强化准则



(c) 混合强化准则

图 3  硬化准则

Fig. 3  Hardening Laws

$$\sigma^0 = \sigma|_0 + Q_{\infty}(1 - e^{-b_{iso}\epsilon_p}) \tag{1}$$

式中: $\sigma^0$  为屈服应力; $\sigma|_0$  为等效塑性应变为 0 时的应力; $Q_{\infty}$  为屈服面最大变化值; $b_{iso}$  为屈服面随塑性应变变化的比率; $\epsilon_p$  为等效塑性应变。

式(1)为各向同性强化理论中屈服面与等效塑性应变的函数关系。对于第  $i$  圈加载循环,有

$$\sigma_i^0 = \sigma_i^t - \frac{\sigma_i^t + \sigma_i^c}{2} = \frac{\sigma_c^t - \sigma_i^c}{2} \tag{2}$$

$$\epsilon_p = \frac{1}{2} \Delta \epsilon_p (4i - 3) \tag{3}$$

将数据点 $(\epsilon_p, \sigma_i^0)$ 以及  $\sigma|_0$  的值进行拟合,可得式(4),进而得到  $Q_{\infty}, b_{iso}$  的值。

$$\Delta \epsilon_p = \Delta \epsilon - 2\sigma_i^t / E \tag{4}$$

式中: $E$  为弹性模量; $\sigma_i^0$  为第  $i$  圈屈服应力;  $\sigma_i^t$  为最大拉应力; $\sigma_i^c$  为第  $i$  圈最大压应力; $\Delta \epsilon$  为应变增量。

在随动强化理论中,背应力的函数关系式为

$$\alpha_k = \frac{C_{kin,k}}{\gamma_k} (1 - e^{\gamma_k \epsilon_p}) \tag{5}$$

$$\alpha_i = \sum_{k=1}^n \alpha_k \tag{6}$$

$$\alpha_i = \sigma_i - \frac{\sigma_i - \sigma_n}{2} \tag{7}$$

随动强化理论的塑性应变表达式为

$$\epsilon_i^p = \epsilon_i - \frac{\sigma_i}{E} - \epsilon_p^0 \tag{8}$$

式中: $\alpha_k$  为第  $i$  个加载循环某加载步的背应力; $\alpha_i$  为第  $i$  个加载循环的背应力; $\sigma_i$  为第  $i$  个加载循环的屈服应力; $C_{kin,k}, \gamma_k$  为参数; $\sigma_i^p = 0; \epsilon_p^0$  为随动强化模型应力-应变曲线的应力为 0 时的塑性应变值。

对试验数据点 $(\epsilon_i^p, \alpha_i)$ 进行数值拟合,然后与公式(5)进行校对,得到参数  $C_{kin,k}$  和  $\gamma_k$  的值。通过公式(5)~(8)所得的混合强化模型的材料本构参数如

表 2 所示。

在分析过程中,对钢棒耗能元件模型施加低周往复荷载。根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—

2010)要求确定加载制度,采用位移加载的方式<sup>[14-15]</sup>,如图 4 所示。在耦合点处施加水平位移<sup>[16]</sup>,设置的分析步为静态分析步。

表 2 混合强化模型钢材本构参数

Tab. 2 Steel Constitutive Parameters of Combined Reinforcement Model

钢材型号	$\sigma_0$	$Q_{\infty}$	$b_{iso}$	$c_1$	$\gamma_1$	$c_2$	$\gamma_2$	$c_3$	$\gamma_3$
Q235B	215	198	5.0	16 061	151	315	15.8	64	3.5
LYP100	48	198	5.0	32 123	850	630	89.0	128	20.0
LYP160	129	118	4.5	18 667	1 133	1 267	233.0	2 730	127.0
LYP225	165	53	5.0	62 105	1 611	4 986	413.0	1 978	95.0

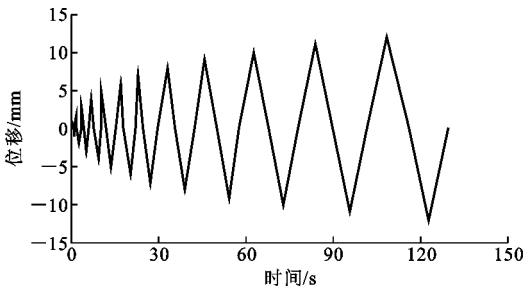


图 4 位移加载制度

Fig. 4 Displacement Loading System

1.3 基于正交试验法的各耗能元件性能对比

1.3.1 各耗能元件性能对比分析的正交试验法

由于各耗能元件涉及的几何参数较多,所以采用正交试验法<sup>[17-18]</sup>简化分析问题过程,以确定最优耗能元件外形及几何参数。正交试验法的设计过程包括确定试验因素及水平数<sup>[19]</sup>,列出分析方案及结果。对正交试验设计结果进行极差分析,确定最优或较优因素水平组合,如表 3 所示, $K_1, K_2, K_3$  分别为因素一水平、二水平、三水平经过有限元计算所得的耗能系数之和, $R_i$  为极差。

通过调整耗能元件 RED A 的长细比  $\delta$ 、直径  $d_0$  以及端板锚固长度  $l_m$  来确定其最优几何参数组合。设计三水平三因素正交试验,进行有限元计算分析,从表 3 可以看出:因素 A 的极差最大,因素 C 的极差最小,因素 B 的极差在两者中间。因素 A 中  $K_1$  较大,因素 B 中  $K_2$  较大,因素 C 中  $K_1$  较大,故可知其几何尺寸搭配为直径  $d_0=30\text{mm}$ 、长细比  $\delta=6$ 、端板锚固长度  $l_m=20\text{ mm}$  时,等截面棒体耗能元件 RED A 的耗能效果最好;通过调整耗能元件 RED B 的长细比  $\delta$ 、直径  $d_0$ 、端板锚固长度  $l_m$  以及内缩直径  $d_1$ ,来确定耗能元件 RED B 的最优几何参数组合。设计三水平四因素正交试验,从表 3 还可以看出:因素 B 的极差最大,其次是因素 D,然后是因素 C,因素 A 的极差最小;因素 A 中均值  $K_2$  较大,因素 B 中  $K_2$  较大,因素 C 中  $K_1$  较大,因素 D 中  $K_1$

较大,故可知其尺寸搭配为直径  $d_0=50\text{ mm}$ 、长细比  $\delta=5$ 、端板锚固长度  $l_m=20\text{ mm}$  以及内缩直径  $d_1=d_0/2=25\text{ mm}$  时,变截面棒体耗能元件 RED B 的耗能效果最好;通过调整耗能元件 RED C 的长细比  $\delta$ 、直径  $d_0$ 、端板锚固长度  $l_m$ 、内缩直径  $d_1$  以及锚固端延伸长度  $l_1$ ,来确定耗能元件 RED C 的最优参数组合。设计五因素四水平正交试验,从表 3 进一步可以看出:因素 D 的极差最大,其次是因素 B、因素 E、因素 A,因素 C 的极差最小,因素 A 中均值  $K_1$  较大,因素 B 中  $K_3$  较大,因素 C 中  $K_1$  较大,因素 D 中  $K_2$  较大,因素 E 中  $K_2$  较大,故可知其尺寸搭配为直径  $d_0=50\text{ mm}$ 、长细比  $\delta=5$ 、端板锚固长度  $l_m=20\text{ mm}$ 、内缩直径  $d_1=1/2d=25\text{ mm}$ 、锚固端延伸长度  $l_1=5d_0/6=41.67\text{ mm}$  时,变截面棒体耗能元件 RED C 的耗能效果最好;通过调整耗能元件 RED D 的直径  $d_0$ 、长细比  $\delta$ 、内缩直径  $d_1$  和中部等截面长度  $l_2$ ,来确定耗能元件 RED D 的最优几何参数组合。设计三水平四因素正交试验,从表 3 的正交数据分析还可以得到,极差  $R_d>R_a>R_c>R_b$ ,因素 A 中  $K_1$  最大,因素 B 中  $K_1$  最大,因素 C 中  $K_2$  最大,因素 D 中  $K_2$  最大,因此可得最优几何尺寸为直径  $d_0=40\text{ mm}$ 、长细比  $\delta=4$ 、内缩直径  $d_1=1/2d_0=20\text{ mm}$ 、中部等截面长度  $l_2=1/2d_0=20\text{ mm}$ ;通过调整耗能元件 RED E 的直径  $d_0$ 、长细比  $\delta$ 、内缩直径  $d_1$ 、中部等截面长度  $l_2$  和锚固端延伸长度  $l_1$ ,来确定耗能元件 RED E 的最优几何参数组合。设计三水平五因素正交试验,从表 3 的正交数据分析可以得到,极差  $R_c>R_b>R_a>R_d=R_e$ ,因素 A 中  $K_3$  最大,因素 B 中  $K_3$  最大,因素 C 中  $K_2$  最大,因素 D 中  $K_2$  最大、因素 E 中  $K_2$  最大,可得最优几何尺寸为直径  $d_0=50\text{ mm}$ 、长细比  $\delta=5$ 、内缩直径  $d_1=2/3d_0=33.33\text{ mm}$ 、中部等截面长度  $l_2=1/2d_0=25\text{ mm}$ 、锚固端延伸长度  $l_1=5d_0/6=41.67\text{ mm}$ 。

1.3.2 最优耗能元件外形及最优几何参数组合

通过有限元计算结合正交试验法,分析得到5

表 3 正交试验数据  
Tab. 3 Orthogonal Test Data

因素	耗能元件	因素水平				
		$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$R_i$
A (直径 $d_0$ )	RED A	6.890	6.435	6.806	8.950	0.455
	RED B	7.570	7.157	7.123		0.100
	RED C	8.932	9.183	9.059		0.251
	RED D	7.410	6.810	6.950		0.600
	RED E	6.690	6.960	6.440		0.520
B (长细比 $\delta$ )	RED A	6.537	6.847	6.747	8.677	0.310
	RED B	7.274	7.369	6.693		0.676
	RED C	8.933	9.194	9.32		0.643
	RED D	7.230	6.900	7.040		0.330
	RED E	6.340	6.910	6.840		0.570
C (端板锚固长度 $l_m$ )	RED A	6.794	6.548	6.789	9.983	0.246
	RED B	7.182	7.029	7.126		0.153
	RED C	9.113	8.985	8.917		0.130
	RED D					
	RED E					
D (内缩直径 $d_1$ )	RED A				9.317	
	RED B	7.208	6.962	7.126		0.246
	RED C	8.452	9.357	8.998		0.905
	RED D	6.780	7.220	7.170		0.440
	RED E	6.380	6.670	7.040		0.660
E (锚固端延伸长度 $l_1$ )	RED A				9.155	
	RED B					
	RED C	8.686	9.142	9.141		0.469
	RED D					
	RED E	6.690	6.990	6.510		0.480
F (中部等截面长度 $l_2$ )	RED A					
	RED B					
	RED C					
	RED D	6.590	7.320	7.260		0.730
	RED E	6.590	6.990	6.510		0.480

种耗能元件达到最优性能时的力学指标参数,见表 4。由表 4 可知,在 5 种耗能元件中,当耗能元件 RED D 几何参数组合为直径  $d_0=40$  mm、长细比  $\delta=4$ 、内缩直径  $d_1=d_0/2=20$  mm、中部等截面长度  $l_2=d_0/2=20$  mm 时耗能性能最优,其耗能系数最大达到 2.71。耗能元件 RED D 的滞回曲线及应力、应变云图见图 5。从图 5 可以看出:其滞回曲线饱满,表明具有良好的耗能能力;耗能元件屈服区域分布较大,表明耗能元件屈服时材料得到充分利用。

## 2 不同力学性能的钢材对耗能元件耗能性能的影响

进一步考察不同钢材力学性能对耗能元件耗能

表 4 各耗能元件在最优几何参数组合下的耗能性能参数  
Tab. 4 Energy Dissipation Performance Parameters of All Energy Dissipation Elements Under Optimal Geometric Parameters

耗能元件	屈服荷载/N	屈服位移/mm	初始刚度/ (N·mm <sup>-1</sup> )	耗能系数
RED A	9 758	0.88	11 075.8	2.38
RED B	22 047	2.18	10 104.1	2.52
RED C	22 971	1.48	15 468.8	2.59
RED D	15 216	0.64	23 775.9	2.71
RED E	36 277	1.27	28 564.6	2.57

性能的影响,以最优耗能元件 RED D 及其最优几何参数组合作为研究对象( $d_0=40$  mm,长细比  $\delta=4$ ,内缩直径  $d_1=20$  mm,中部等截面长度  $l_2=20$  mm)。

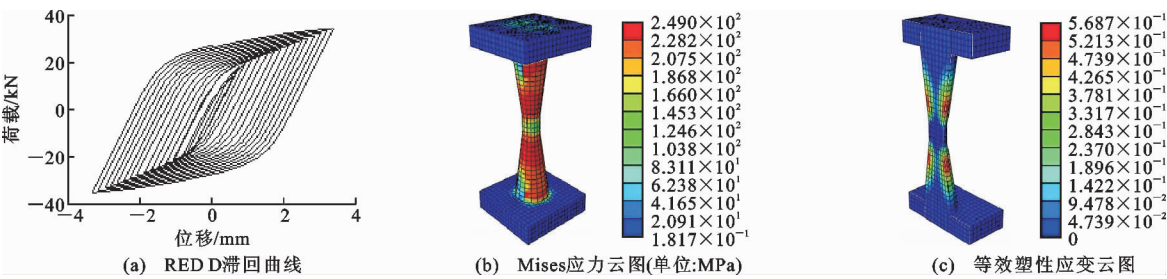


图 5 材质为 Q235 的 RED D 滞回曲线及应力、应变云图

Fig. 5 Hysteretic Curves and Stress, Strain Nephograms of RED D with Q235 Steel

在数值模拟分析中,分别赋予耗能元件 RED D 的材质为低屈服点钢 LYP100,LYP160,LYP225,并将分析结果与 Q235 材质的钢耗能元件 RED D 的耗能性能进行对比,考察用不同力学性能的钢材制作耗能元件对其耗能性能的影响。各种钢材的力学性能参数及混合强化模型钢材本构关系详见表 1,2。由表 1 可知,3 种低屈服点钢的弹性模量略低于 Q235 钢,但屈服强度明显低于 Q235 钢。本研究的数值模拟分析结果详见表 5,由表 5 可知,低屈服点钢 LYP100,LYP160,LYP225 耗能元件的耗能性能均比 Q235 钢棒耗能元件耗能性能有所提高。LYP225 耗能元件的耗能系数达到 2.97,LYP100 耗能元件的耗能系数达到 2.85,LYP160 耗能元件的耗能性能最好,耗能系数达到 3.12。结果表明,当

耗能元件采用低屈服点钢时,其耗能能力大幅增强。LYP100,LYP160,LYP225 钢棒耗能元件的滞回曲线、应力及应变云图如图 6~8 所示。图 6~8 显示低屈服点钢耗能元件均体现出良好的耗能性能和材料利用率。

表 5 RED D 在各材质下的耗能性能有限元分析结果

Tab. 5 Finite Element Analysis Results of Energy Dissipation Performance of RED D with All Kinds of Steels

钢材	屈服位移/mm	屈服荷载/N	初始刚度/(N·mm <sup>-1</sup> )	耗能系数
Q235	0.64	14 980.90	23 407.6	2.71
LYP100	0.18	3 952.85	21 960.2	2.85
LYP160	0.44	10 443.70	23 735.6	3.12
LYP225	0.44	10 476.50	23 810.2	2.97

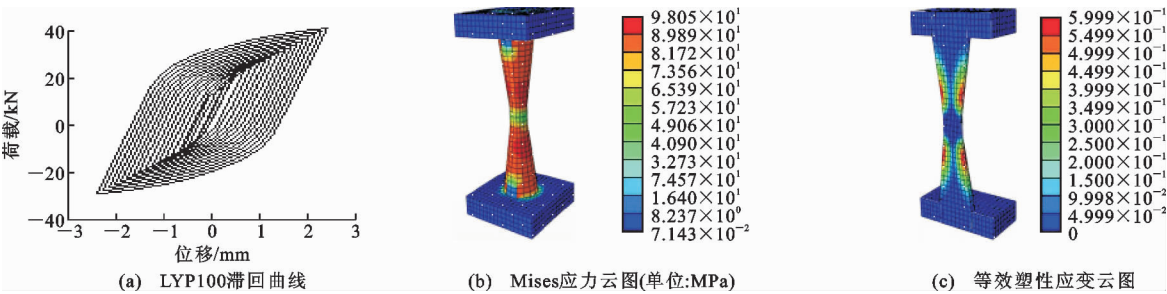


图 6 材质为 LYP100 的 RED D 滞回曲线、应力及应变云图

Fig. 6 Hysteretic Curves and Stress, Strain Nephograms of RED D with LYP100 Steel

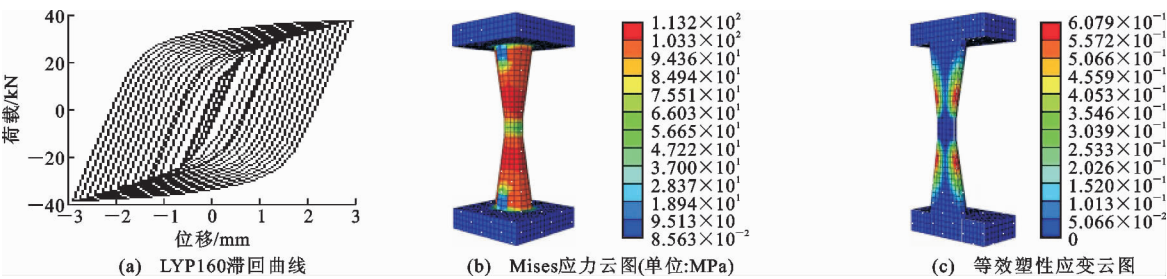


图 7 材质为 LYP160 的 RED D 滞回曲线、应力及应变云图

Fig. 7 Hysteretic Curves and Stress, Strain Nephograms of RED D with LYP160 Steel

3 结 语

(1)通过对 5 种不同截面形式的 Q235 钢棒耗

能元件数值模拟得到每种元件的耗能系数,对比选出最优耗能元件形式为 RED D,其最优几何参数组合为直径  $d_0=40\text{ mm}$ 、长细比  $\delta=4$ 、内缩直径  $d_1=$



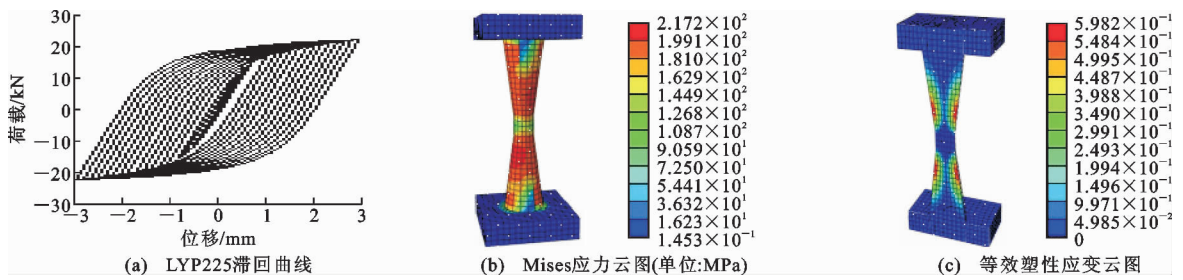


图8 材质为 LYP225 的 RED D 滞回曲线、应力及应变云图

Fig. 8 Hysteretic Curves and Stress, Strain Nephograms of RED D with LYP225 Steel

20 mm、中部等截面长度  $l_2 = 20$  mm,耗能系数最高可达到 2.71。

(2)钢棒耗能元件的滞回曲线饱满,耗能系数基本可达到 2.5 以上,说明阵列型钢棒体阻尼器耗能性能良好,满足工程中对阻尼器性能的要求,且钢棒耗能元件屈服面积较大,材料得到充分利用。

(3)通过研究不同钢材对钢棒耗能元件力学性能的影响发现,低屈服点钢对钢棒耗能元件的耗能性能具有明显的提高作用。其中材质为低屈服点钢 LYP160 的钢棒耗能元件耗能系数最高可达到 3.12,与 Q235 钢棒耗能元件的耗能系数相比提高了 15%。

# 参考文献:

## References:

[1] 李宏男,阎石. 中国结构控制的研究与应用[J]. 地震工程与工程振动,1999,19(1):107-112.  
LI Hong-nan, YAN Shi. State-of-the-art Review: Researches and Applications of Structural Control in China[J]. Seismic Engineering and Engineering Vibration,1999,19(1):107-112.

[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):66-72,206.  
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):66-72,206.

[3] 欧进萍,吴斌,龙旭. 耗能减振结构的抗震分析与设计方法[J]. 振动工程学报,1999,12(2):202-209.  
OU Jin-ping, WU Bin, LONG Xu. Seismic Design Approaches of Passive Energy Dissipation Systems[J]. Journal of Vibration Engineering, 1999, 12(2): 202-209.

[4] 陈运泰,杨智娴,张勇,等. 从汶川地震到芦山地震[J]. 中国科学:地球科学,2013,43(6):1064-1072.  
CHEN Yun-tai, YANG Zhi-xian, ZHANG Yong, et al. From the Wenchuan Earthquake to the Lushan

Earthquake[J]. Scientia Sinica: Terrae,2013,43(6):1064-1072.

[5] 邓雪松,陈子康,周云. 不同构造参数对弧形钢棒阻尼器性能的影响分析[J]. 土木工程学报,2012,45(增2):93-98.  
DENG Xue-song, CHEN Zi-kang, ZHOU Yun. Performance Study on Arc-shaped Steel Damper Under Different Constructional Parameter[J]. China Civil Engineering Journal,2012,45(S2):93-98.

[6] 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 Cong-xiao, ZHOU Yun, WANG Ting-yan. Types and Performance of Metallic Dampers and Their Engineering Applications[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting,2006,28(1):87-94.

[7] 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 Tie-shan, MENG Xian-hong. Design and Performance Analysis of Energy-dissipating Element of Mild Steel Rod Damper[J]. World Earthquake Engineering,2015,31(2):196-201.

[8] 张铁山. 阵列型软钢棒体阻尼器的设计及在结构加固中的应用研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2016.  
ZHANG Tie-shan. Design of the Array Type Mild Steel Rod Damper and Its Study Application in Structural Strengthening[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University,2016.

[9] MATTEIS G D, LANDOLFO R, MAZZOLANI F M. Seismic Response of MR Steel Frames with Low Yield Steel Shear Panels[J]. Engineering Structures, 2003,25(2):155-168.

[10] KUNISUE A, KOSHIKA N, KUOKAWA Y, et al. Retrofitting Method of Existing Reinforced Concrete Building Using Elastic-plastic Steel Dampers[C]// WCEE. Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland: WCEE, 2000:

- 0648.
- [11] KOIKE Y, YANAKA T, USAMI T, et al. An Experimental Study on Developing High-performance Stiffened Shear Panel Dampers[J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 54(2): 372-381.
- [12] 耿雪林. 高层钢框架耗能减震性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.  
GENG Xue-lin. Studies on the Damping Energy Consumption Properties of the High-rise Steel Frame [D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [13] ESMAEILY A, XIAO Y. Behavior of Reinforced Concrete Columns Under Variable Axial Loads: Analysis [J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(5): 736-744.
- [14] GB 50011—2001, 建筑抗震设计规范[S].  
GB 50011—2001, Code for Seismic Design of Buildings[S].
- [15] 周 云, 刘 季. 圆环耗能器的试验研究[J]. 世界地震工程, 1996(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.
- [16] 吴从晓, 周 云, 张 超, 等. 布置耗能器的现浇与预制装配式框架梁柱组合体抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(6): 61-68.  
WU Cong-xiao, ZHOU Yun, ZHANG Chao, et al. Experimental Study on Seismic Performance of Beam-column Subassembly Between Cast-in-situ and Precast Frame Structure with Dampers[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(6): 61-68.
- [17] 龚文惠, 雷红军, 宁 虎. 正交试验法在土工试验中的应用[J]. 土工基础, 2006, 20(5): 78-80.  
GONG Wen-hui, LEI Hong-jun, NING Hu. The Method of Orthotropic Test and Its Application in Geotechnical Test[J]. Soil Engineering and Foundation, 2006, 20(5): 78-80.
- [18] 别 致, 周 云, 陈子康, 等. 带弧形钢棒阻尼器的大跨度型钢混凝土框架结构抗震性能分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2013, 35(6): 80-86.  
BIE Zhi, ZHOU Yun, CHEN Zi-kang, et al. Analysis on Seismic Performance of Large-span SRC Frame Structure with Arc-shaped Steel Damper[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2013, 35(6): 80-86.
- [19] 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.