

文章编号: 1000-4750(2012)03-0150-06

# 钢铅粘弹性阻尼器试验研究

吴从晓, 周 云, 邓雪松

(广州大学土木工程学院, 广州 510006)

**摘 要:** 研制开发了一种钢铅粘弹性阻尼器, 介绍了该种阻尼器的构造、耗能机理及特点, 设计出钢铅粘弹性阻尼器试验模型, 利用压剪试验机完成阻尼器试验模型在不同幅值下的低周反复荷载试验, 采用 Bouc-Wen 模型和双线性模型模拟了钢铅粘弹性阻尼器的滞回性能。研究表明: 1) 钢铅粘弹性阻尼器滞回曲线光滑饱满, 具有良好的耗能性能; 2) 铅芯、钢芯和粘弹性材料在剪切变形过程中发挥了良好作用, 提高了阻尼器水平剪力、初始刚度和耗能能力; 3) 阻尼器在大变形过程没有出现粘弹性材料外鼓和撕裂现象, 并能恢复到原始加载位置, 其具有较好的大变形能力和自恢复性能; 4) Bouc-Wen 模型、双线性模型模拟的滞回曲线与试验滞回曲线吻合的较好, 分析时采用 Bouc-Wen 模型、双线性模型模拟阻尼器的滞回性能是可行的。

**关键词:** 钢铅粘弹性阻尼器; 滞回曲线; 力学模型; 耗能; 骨架曲线

**中图分类号:** TU352.1 **文献标志码:** A

## EXPERIMENTAL STUDY ON STEEL-LEAD VISCOELASTIC DAMPER

WU Cong-xiao, ZHOU Yun, DENG Xue-song

(School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** A new type steel-lead viscoelastic damper is developed, and its principle, configuration, characteristics are illustrated. The new type steel-lead viscoelastic damper model is tested under slow reversed cyclic horizontal loads. The non-linear hysteretic behavior of the SLVD is modeled to adopt the Bouc-Wen model and bilinear model. The results show that: 1) hysteretic curve of the steel-lead viscoelastic damper is slippery, and has good seismic energy dissipation capabilities; 2) the lead core, steel core and viscoelastic material plays an important part in energy dissipation of shear deformation, which can obviously increase the horizontal shear force, initial-stiffness and energy dissipation ability of the SLVD; 3) the SLVD has no tear and creak phenomenon of the viscoelastic material in a large displacement case, and can recovery the initial position. It has good self-recovery function and large deformation performance; 4) the simulating hysteretic curves with Bouc-Wen model and bilinear model are identical to the test results, it is feasible to adopt the Bouc-Wen model and bilinear model to simulate the damper element in the analysis of a structure with the SLVD.

**Key words:** steel-lead viscoelastic damper (SLVD); hysteresis curve; force model; energy dissipation; skeleton curve

耗能减震技术因其减震机理明确、减震效果显著、构造简单、适用范围广、维护方便等优点, 受到众多国内外研究者的重视, 目前国内外学者已经研究开发了多种不同类型和不同构造的耗能减震

装置(阻尼器)<sup>[1-8]</sup>, 并且已在新建工程和建筑抗震加固工程中得到应用, 取得了良好的经济效益和社会效益。

文献[9-10]针对耗能减震装置中多数采用单

收稿日期: 2010-06-12; 修改日期: 2010-07-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(50678040); 广东省自然科学基金团队项目(8351009101000001); 广东省-教育部产学研结合项目(2009B090300351)

通讯作者: 吴从晓(1981-), 男, 江西九江人, 讲师, 博士, 从事结构减震控制研究(E-mail: wu-congxiao@163.com).

作者简介: 周 云(1965-), 男, 云南人, 教授, 博士, 博导, 从事结构减震控制研究(E-mail: zhydxs@163.com);

邓雪松(1967-), 女, 黑龙江人, 副教授, 硕士, 从事结构减震控制研究(E-mail: deng2593@163.com).

一的耗能机制(即一种方式耗散能量),耗能能力有限的问题,提出了“综合利用不同耗能原理或机制来设计耗能减震装置,即同时利用两种或两种以上的耗能原理、耗能元件同时工作、同时耗能”研制和开发阻尼器的思想。研制开发了铅粘弹性阻尼器,该种阻尼器,是利用铅的剪切或挤压屈服后产生塑性变形和粘弹性材料的剪切滞回变形耗能。其充分利用了粘弹性阻尼器小变形作用下就能发挥耗能作用和铅剪切、挤压型阻尼器屈服位移小、屈服后刚度小、自恢复性能好的优点,因此,可以用于结构的地震反应控制和风振反应控制。铅粘弹性阻尼器的研究已开展了 10 余年,根据实际工程应用中的不同需求,不断改进阻尼器构造和形式,研制出了多种不同类型的铅粘弹性阻尼器,其中包括:铅橡胶阻尼器、组合式铅橡胶阻尼器、铅粘弹性阻尼器等<sup>[11-21]</sup>。

本文针对实际工程中梁单元截面宽度有限,而较小截面阻尼器难以满足较大水平刚度和耗能能力性能需求的问题,结合钢材滞回性能特点和铅粘弹性阻尼器的研究成果提出了一种钢铅粘弹性阻尼器,介绍了其原理、构造及特点,对其进行了性能试验研究,采用 Bouc-Wen 模型、双线性模型模拟了其滞回性能。

### 1 阻尼器构造、原理与特点

钢铅粘弹性阻尼器由高阻尼橡胶材料、薄钢板、铅芯、钢芯和连接板所组成。橡胶、薄钢板、连接封板中央预先留有圆孔,并通过高温高压硫化为一体,然后将铅灌入预留孔中,同时将钢棒插入预留孔中,在上下连接板处铅芯用封口板封住,将钢芯与阻尼器上、下连接板进行焊接,保证上、下连接相对运动时带动钢芯剪切塑性变形,实现钢芯的耗能性能。

钢铅粘弹性阻尼器的耗能原理为:阻尼器上、下连接板产生相对位移时,钢芯和铅芯都能发生剪切塑性变形耗能,同时粘弹性材料产生剪切变形耗能(保证小变形时的耗能能力);将钢铅粘弹性阻尼器安装结构中,在正常使用荷载或多遇地震作用下,具有足够的初始刚度来控制结构侧向变形,钢铅粘弹性阻尼器不产生屈服,结构体系处于弹性状态,在设防或罕遇地震作用下,钢铅粘弹性阻尼器在主体结构屈服之前就屈服和剪切变形进入滞回耗能状态耗散大量的能量,使结构的地震反应减小

约 30%~40%,从而避免或减少结构主要构件进入塑性状态,保证主体结构不产生严重破坏或者倒塌。

钢铅粘弹性阻尼器利用了三种耗能元件(二种耗能机制)同时耗能,提高了其耗能能力;阻尼器中铅芯和钢芯直径和数量可调整,满足不同性能要求;阻尼器中的粘弹性材料采用橡胶材料,具有取材容易等特点。

### 2 钢铅粘弹性阻尼器设计

为了研究钢铅粘弹性阻尼器的工作性能和耗能能力及阻尼器屈服荷载、屈服后刚度、初始刚度等参数,设计钢铅粘弹性阻尼器试验模型,阻尼器长为 800mm,宽为 120mm,高为 230mm,阻尼器中粘弹性材料层采用 G4 型橡胶,钢棒采用 Q235 软钢,阻尼器其它参数如表 1 所示。其构造图和加工完成的实物图如图 1 和图 2 所示。

表 1 阻尼器参数

Table 1 Parameters of the SLVD

尺寸/mm	橡胶剪切模量/MPa	橡胶保护层厚度/mm	钢板厚度/mm
800×120×230	0.392	6	3
橡胶总厚度/mm	铅芯直径/mm	钢棒直径/mm	连接板厚度/mm
113	55	35	30

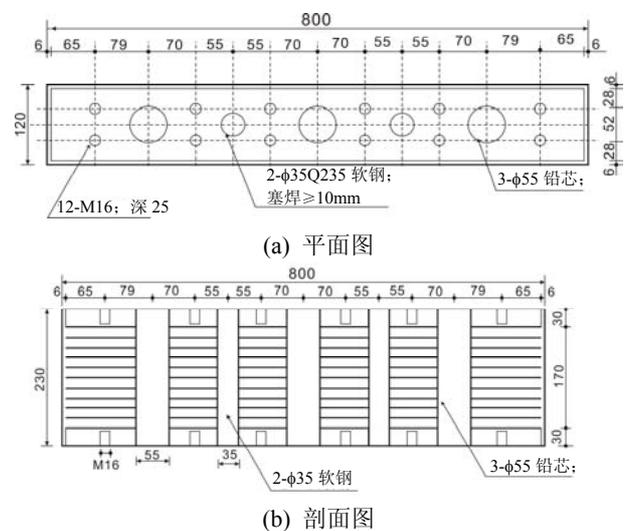


图 1 钢棒铅芯阻尼器构造图

Fig.1 Steel-lead viscoelastic damper



图 2 实物图

Fig.2 Photo of the SLVD

### 3 试验设备与加载方案

试验设备采用广州大学工程抗震研究中心大型液压伺服压剪试验系统，试验加载系统如图 3 所示。试验系统主要参数为：竖向最大荷载  $P_{max,v}=15000kN$ ，水平最大荷载  $P_{max,h}=\pm 2000kN$ ，水平位移为  $\pm 500mm$ 。加载采用正弦循环加载(竖向压力为  $0MPa$ )，加载采用位移控制方式。试验的量测内容为钢铅粘弹性阻尼器在加载过程中的剪力(阻尼力)以及剪切变形(位移)，阻尼力由作动器反馈给试验系统得到，位移采用在钢铅粘弹性阻尼器上连接板和下连接板上分别布置量程为  $\pm 150mm$  的位移传感器获取。试验开始前先加载  $\pm 5.5mm$  位移幅值 3 圈，测试试件与台座连接是否正常，如无异常再进行如表 2 所示的加载方案的常规性能试验。



图 3 试验加载系统  
Fig.3 Test setup

表 2 常规性能试验加载方案  
Table 2 Loading scheme

试验序号	试验控制 位移/mm	剪切应变 幅值 $\gamma$ (%)	加载 频率/Hz	试验循环次数
1	$\pm 5.5$	5		
2	$\pm 11$	10		
3	$\pm 22.6$	20		
4	$\pm 33.9$	30		
5	$\pm 40$	35	0.02	2
6	$\pm 45.2$	40		
7	$\pm 56.5$	50		
8	$\pm 67.8$	60		

### 4 试验结果及分析

试验所得钢铅粘弹性阻尼器的滞回曲线如图 4 所示(阻尼器水平位移加载到  $45mm$  时，压剪机底板开始翘动，发出响声，随着位移幅的增加，响声明显增大，为保护试验设备，位移幅值加到  $67mm$  时试验中止)，图 4 中滞回曲线取 2 圈的平均值，从图 4 中可以看出，阻尼器滞回曲线饱满，具有良好的耗能能力，其形状呈平行四边形，体现出铅芯和

钢芯在剪切变形中发挥了良好的作用，在卸载与重复加载过程中，滞回曲线有明显的圆弧过渡段，体现出粘弹性材料的性能。

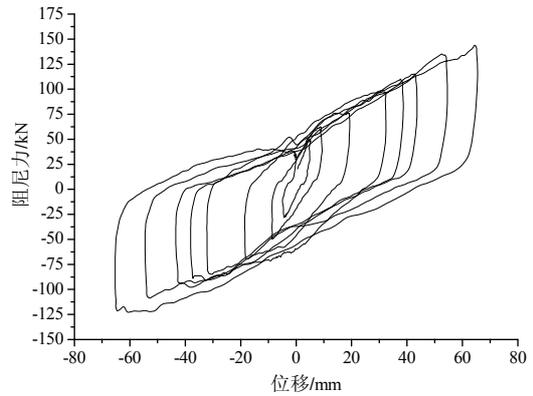


图 4 阻尼器滞回曲线  
Fig.4 Hysteretic curve of the damper

试验过程中阻尼器在  $\pm 67mm$  和  $0mm$  剪切变形时的图片如图 5 和图 6 所示，从图 5 和图 6 中可以看出，阻尼器在大变形过程中没有出现粘弹性材料外鼓，撕裂现象，并能回到原始位置，没有出现明显的残余变形，再继续加载时还能达到最大变形位置，表明阻尼器具有良好的大变形能力和自恢复能力。



图 5 阻尼器大变形图片  
Fig.5 Photo of big deformation



图 6 试验结束图片  
Fig.6 Photo of the damper off-test

根据试验所得的滞回曲线，读取每加载圈峰值位移的剪力，可绘制成阻尼器的骨架曲线(图 7 中只给出了阻尼器在水平拉力作用时的骨架曲线)，如图 7 所示，从图 7 中可以得出阻尼器的屈服位移  $d_y=$

2.17mm, 屈服剪力  $P_y=51.72\text{kN}$ , 阻尼器的屈服位移较小, 能满足《建筑抗震设计规范》中要求, 同时也表明阻尼器在多遇地震作用时能耗散地震能量, 给结构提供附加阻尼比。从图 7 中可以得出阻尼器的屈服位移  $d_y$  和屈服剪力  $P_y$  及阻尼器在每一位移幅值的最大位移  $d_0$  和最大剪力  $P_0$ 。通过这 4 个参数可以得出阻尼器的初始刚度  $K_u$ , 屈服后刚度  $K_d$  和等效刚度  $K_e$ , 其计算公式为:

$$\begin{cases} K_u = \frac{P_y}{d_y} \\ K_d = \frac{P_0 - P_y}{d_0 - d_y} \\ \gamma = \frac{K_d}{K_u} \\ K_e = \frac{P_u}{d_0} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\gamma$  为屈服后刚度比。

由试验所得的滞回曲线, 对其进行积分可得出阻尼器在不同位移幅值下的滞回耗能值, 采用下式可计算阻尼器的阻尼比, 即:

$$\xi_d = W_c / (2\pi K_e d_0^2) \quad (2)$$

式中:  $W_c$  为阻尼器循环一周耗能值(滞回曲线 1 圈包含的面积);  $K_e$  为阻尼器对应的该圈滞回曲线的等效刚度;  $d_0$  为该圈滞回曲线的最大剪力时的

位移。

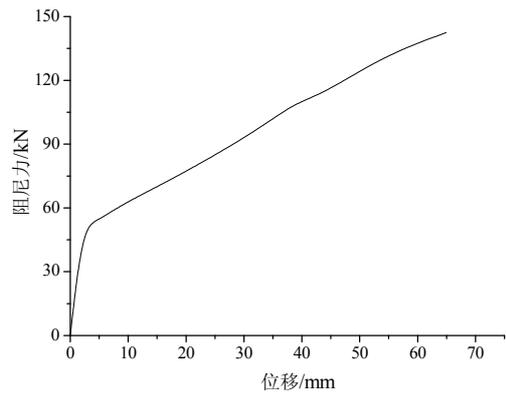


图 7 阻尼器骨架曲线

Fig.7 Skeleton curve of the damper

通过式(1)和式(2)计算出阻尼器的性能参数如表 3 所示, 从表 3 中得出, 随着位移幅值的增加, 阻尼力随之增加, 体现出了位移相关型阻尼器特性。钢铅粘弹性阻尼器的阻尼比随着位移幅值的增加也随之增大, 当位移在 20mm~30mm 时, 阻尼比达到最大值为 32.6%, 体现了阻尼器在 20mm~30mm 位移幅值时具有较好的耗能效果, 其后随着位移幅值的继续增加阻尼比又趋于减小, 但阻尼比基本都大于 20%, 说明阻尼器具有较强的耗能能力; 阻尼器屈服后刚度比为 0.061, 比软钢的屈服后刚度比略大, 体现了阻尼器中钢芯和铅芯屈服后, 粘弹性材料层继续能剪切变形耗能。

表 3 分析结果

Table 3 Analysis results

位移幅值/mm	最大位移/mm	最大剪力/kN	等效刚度/(kN/mm)	耗能/(kN·mm)	阻尼比/(%)	屈服后刚度比
	2.17(屈服位移)	51.72(屈服荷载)	23.8341(初始刚度)	0		
±5.5	4.8	54.03	10.54922	253.69	0.164486	
±11	8.9	61.77	6.909396	860.27	0.248062	
±22.6	19.2	75.65	3.940104	2974.1	0.326051	
±33.9	32.4	96.6	2.981481	6416.1	0.326429	0.061
±40	38.6	109.2	2.829016	6801	0.256923	
±45.2	43.7	113.6	2.599542	7566.2	0.242694	
±56.5	54.2	131.7	2.429889	10414	0.232313	
±67.8	64.9	142.5	2.195686	14602	0.251416	

## 5 力学模型

阻尼器恢复力模型是耗能减震结构分析和设计的基础, 目前阻尼器常采用的恢复力数学模型大致有两类: 一种是用复杂的数学公式予以描述的曲线型, 如 Ramberg-Osgood 模型等; 另一种是分段线性化的折线型模型, 如理想弹塑性模型、双线性模型。曲线型恢复力模型给出的刚度是连续变化的, 与工程实际较为接近, 但对于刚度的确定及其

计算比较困难。目前较为广泛使用的是折线型模型。结合现有通用分析软件中采用较多的恢复力模型——Bouc-Wen 模型和双线性模型, 对铅粘弹性阻尼器的滞回性能进行模拟, 以便于其在现有分析软件中的实现。

### 5.1 Bouc-Wen 模型

Bouc-Wen 模型最早是由 Bouc 在 1967 年提出来的, 其后, Wen 和其它许多学者该模型进行了改

进<sup>[22-23]</sup>。该模型的恢复力和变形与一个具有不确定参数的非线性微分方程联系起来,通过合理地选择非线性微分方程中的参数,可以得到大量不同形状的滞回曲线,用来模拟不同条件和不同类型阻尼器的非线性特性。

Bouc-Wen 模型的关系式为:

$$P(d, z) = \gamma K_u d + (1 - \gamma) K_u z \quad (3)$$

$$\dot{z} = A \dot{d} - \alpha |\dot{d}| z |z|^{n-1} - \beta \dot{d} |z|^n \quad (4)$$

式中:  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $A$  和  $n$  分别为滞回曲线形状控制参数。

通过文献[24]中的相关推导,可得出 Bouc-Wen 模型的相关公式,并编程了相应程序,程序中模型形状控制参数:  $n=1$ 、 $\alpha=0.5$ 、 $\beta=0.5$ 、 $A=1$ ,模型中其它参数如表 3 所示,试验滞回曲线与 Bouc-Wen 模型模拟出的滞回曲线如图 8 所示,从图 8 中可以看出, Bouc-Wen 模型能较好的模拟钢铅粘弹性阻尼器的滞回性能;由于试验过程中支座连接的误差和竖向作动器的晃动使阻尼器的屈服位移偏大,导致模拟的滞回曲线在卸载过程中刚度偏小;试验采用压剪试验机完成,支座上连接板与试验设备竖向作动器连接(竖向压力为 0MPa),与水平作动器连接支座底板是采用拱针转动而产生移动,试验中当水平推力加大时,底板会出现微小的翘动(机器发出大的响声),导致试验采集的数据会减小,从而出现试验数据不对称现象,导致该部分模拟滞回曲线与试验滞回曲线存在一定的差异,但阻尼器在拉力作用时还是吻合得较好,为此,采用 Bouc-Wen 模型模拟阻尼器的滞回性能是合理、可行的。

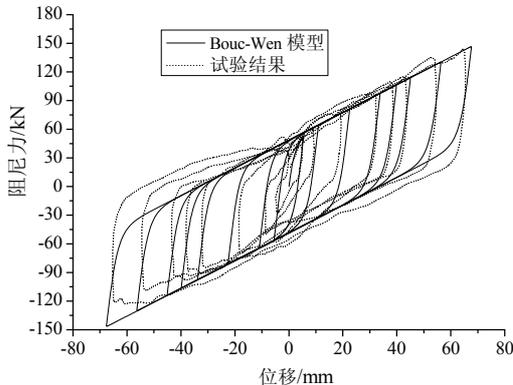


图 8 滞回曲线对比

Fig.8 Comparison of hysteresis curve of the SLVD

### 5.2 双线性模型

双线性恢复力模型主要由直线段组成,如图 9 所示。在双线性模型中当金属耗能器的剪力达到屈

服力  $P_y$  之前,耗能器中的金属材料都是线弹性,因此,此时耗能器只提供附加刚度而不提供附加阻尼,该段刚度为弹性刚度  $K_u$ ,当剪力超过  $P_y$  后,金属耗能器的金属材料开始屈服并且出现强化阶段,为屈服后刚度  $K_d$ 。在强化阶段的任一点开始卸载,卸载的路径平行于弹性加载时的路径,即  $AB \parallel OE$ 。钢铅粘弹性阻尼器采用双线性模型分析时,可分解为铅阻尼器、钢阻尼器和粘弹性阻尼器模型的叠加,考虑阻尼器在卸载和反向加载刚度不变,将滞回曲线中的曲线段用直线代替,从而达到双线性模型的要求。采用双线性模型模拟的滞回曲线(对加荷方向改变时采用三线形段过渡)与试验结果如图 10 所示,从图 10 中可以看出:双线性模型也能较好的反应钢铅粘弹性阻尼器的滞回性能,但在卸载和反向加载过程中用直线段代替弧线,忽略了一部分阻尼器耗散的能量,但这部分能量值很小,分析时可忽略不计,同时忽略的能量部分可使计算阻尼器附加结构阻尼比比实际值要小,可使设计的结构更偏于安全,为此,采用双线性模型模拟阻尼器的滞回性能也是合理、可行的。

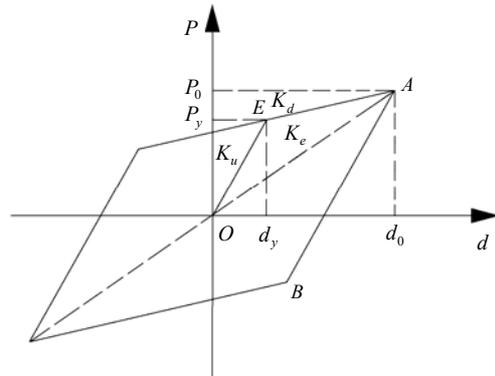


图 9 双线性恢复力模型

Fig.9 Bilinear restoring-force model

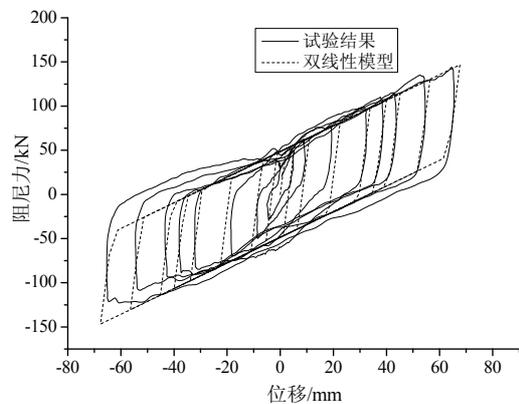


图 10 滞回曲线对比

Fig.10 Comparison of hysteresis curve of the SLVD

## 6 结论

本文提出了一种新型钢铅粘弹性阻尼器,对其性能和力学模型进行了研究,得出以下结论:

(1) 钢铅粘弹性阻尼器滞回曲线光滑饱满,具有良好的耗能性能。

(2) 铅芯、钢芯和粘弹性材料在剪切变形过程中发挥了良好作用,提高了阻尼器水平剪力、初始刚度和耗能能力,提高了阻尼器的耗能能力。

(3) 阻尼器在大变形过程中粘弹性材料没有出现外鼓和撕裂现象,并能恢复到原始加载位置,其具有较好的大变形能力和自恢复性能。

(4) Bouc-Wen 模型、双线性模型模拟的滞回曲线与试验滞回曲线吻合的较好,分析时采用 Bouc-Wen 模型、双线性模型模拟阻尼器的滞回性能是可行的。

### 参考文献:

- [1] Soong T T, Dargush G F. Passive energy dissipation on systems in structure engineering [M]. New York: John Wiley & Sons. Inc., 1997.
- [2] Pall A S, Marsh C. Friction-damped concrete shear walls [J]. ACI, 1981, 78(3): 187—193.
- [3] Cherry S, Filiatrault A. Seismic response control of buildings using friction dampers [J]. Earthquake Spectra, 1993, 9(3): 447—466.
- [4] Skinner R I, Kelly J M, Heine A J. Hysteresis dampers for earthquake-resistant structures [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1975, 3: 287—296.
- [5] Tsai K C. Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction [J]. Earthquake Spectra, 1993, 9(3): 505—528.
- [6] 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.
- [7] Robinson W H, Greenbank L R. An extrusion energy absorber suitable for the protection of structures during an earthquake [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1976, 4: 251—259.
- [8] Li Hongnan, Li Gang. Experimental study of structure with 'dual function' metallic dampers [J]. Engineering Structures, 2006, 28(10): 1—12.
- [9] 周云, 刘季. 新型耗能(阻尼)减震器的开发与研究[J]. 地震工程与工程振动, 1998, 18(1): 71—79.  
Zhou Yun, Liu Ji. Development and study of new energy dissipaters (dampers) [J]. Earthquake Engineering and

- Engineering Vibration, 1998, 18(1): 71—79. (in Chinese)
- [10] 周云. 建筑耗能减震新技术与新体系[D]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑大学, 1996.  
Zhou Yun. New technology and system about seismic energy dissipation of building structure [D]. Harbin: Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1996. (in Chinese)
- [11] 周云. 新型耗能减震器的研究及耗能减震体系的分析与设计方法研究[R]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2000.  
Zhou Yun. Experimental study of new damper and design method of structure with dampers [R]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2000. (in Chinese)
- [12] 刘冰, 周云, 邓雪松, 等. 铅橡胶复合阻尼器的性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 1998, 22(5): 105—114.  
Liu Bing, Zhou Yun, Deng Xuesong, et al. Experimental study on properties of combined lead rubber dampers [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1998, 22(5): 105—114. (in Chinese)
- [13] 周云, 徐赵东, 邓雪松, 等. 组合式铅橡胶复合阻尼器的性能试验研究[J]. 世界地震工程, 2000, 16(2): 35—40.  
Zhou Yun, Xu Zhaodong, Deng Xuesong, et al. Experimental study on properties of combined lead rubber dampers [J]. World information on Earthquake Engineering, 2000, 16(2): 35—40. (in Chinese)
- [14] 周云, 邓雪松, 徐赵东. 铅粘弹性阻尼器性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(1): 139—144.  
Zhou Yun, Deng Xuesong, Xu Zhaodong. Experimental study on properties of lead-viscoelastic dampers [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(1): 139—144. (in Chinese)
- [15] 周云, 邓雪松, 阴毅, 等. 复合型铅粘弹性阻尼器的性能试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2005, 27(1): 42—47.  
Zhou Yun, Deng Xuesong, Yin Yi, et al. Study on behavior of the mixed lead viscoelastic damper [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2005, 27(1): 42—47. (in Chinese)
- [16] 周云, 邓雪松, 黄文虎. 装有铅橡胶复合阻尼器结构的减震研究[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 18(4): 103—110.  
Zhou Yun, Deng Xuesong, Huang Wenhui. Study of seismic control of structure with mixed lead rubber damper [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 18(4): 103—110. (in Chinese)
- [17] 徐赵东. (铅)粘弹性阻尼结构的试验与研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2001.  
Xu Zhaodong. Experiment and study about the (lead) viscoelastic structure [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2001. (in Chinese)

(参考文献[18]—[24]转第 162 页)

- 出版社, 2006.  
Civil King Software Technology Co., Ltd, China Institute of Building Standard Design & Research. User Guide for Chinese Version of SAP2000 [M]. Beijing: China Communications Press, 2006. (in Chinese)
- [11] Pacific Earthquake Engineering Research Center. PEER strong motion database [DB/OL]. 2005. <http://peer.berkeley.edu/smcat/index.html>
- [12] 王建民, 朱晞. 地面运动强度度量参数与双线性单自由度系统变形需求的相关性研究[J]. 地震学报, 2006, 28(1): 76—84.  
Wang Jianmin, Zhu Xi. Correlation study between ground motion intensity measure parameters and deformations for bilinear SDOF systems [J]. Acta Seismologica Sinica, 2006, 28(1): 76—84. (in Chinese)
- [13] 申彦利, 杨庆山, 田玉基. 基于概率的多点激励地震场强度参数研究[J]. 工程力学, 2010, 27(1): 202—208.  
Shen Yanli, Yang Qingshan, Tian Yuji. Research on earthquake intensity measures of multiple support excitation based on probability [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(1): 202—208. (in Chinese)
- [14] Choi E, DesRoches R, Nielson B. Seismic fragility of typical bridges in moderate seismic zones [J]. Engineering Structures, 2004, 26: 187—199.
- [15] Baker J W. Probabilistic structural response assessment using vector-valued intensity measures [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamic, 2007, 36: 1861—1883.
- [16] Sewll R T, Toro G R, McGuire R K. Impact of ground motion characterization on conservatism and variability in seismic risk estimates [R]. Rockville, MD, USA: US. Nuclear Regulatory Commission, Report NUREG/CR-6467, 1996/7.
- [17] Brendon A B, Dhakal P D. Error estimation of closed-form solution for annual rate of structural collapse [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamic, 2008, 37: 1721—1737.

(上接第 155 页)

- [18] 吴宵. 铅粘弹性阻尼器的性能试验和耗能减震结构的设计方法[D]. 太原: 太原理工大学, 2002.  
Wu Xiao. Performance test of lead-viscoelastic damper and studies on design method for energy dissipation structure [D]. TaiYuan: Tai Yuan University of Techonlogy, 2002. (in Chinese)
- [19] 周云, 徐赵东, 邓雪松. 铅粘弹性阻尼器的计算模型[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(1): 120—124.  
Zhou Yun, Xu Zhaodong, Deng Xuesong. Calculation models of lead viscoelastic damper [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20(1): 120—124. (in Chinese)
- [20] 周云, 吴从晓, 邓雪松. 铅粘弹性阻尼器的开发、研究与应用[J]. 工程力学, 2009, 26(增刊 II): 80—90.  
Zhou Yun, Wu Congxiao, Deng Xuesong. Development, research and application of lead viscoelastic damper [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(Sup.II): 80—90. (in Chinese)
- [21] 施卫星, 李振刚. 铅芯橡胶阻尼器性能研究[J]. 四川建筑科学研究, 2007, 33(2): 118—121.  
Shi Weixin, Li Zhengang. Study on properties of lead-core rubber damper [J]. Sichuan Building Science, 2007, 33(2): 118—121. (in Chinese)
- [22] Bouc R. Forced vibration of mechanical systems with hysteresis [C]// Applied mech, Proceedings of the 4th conference on nonlinear oscillations. Prague, Czechoslovakia. 1967.
- [23] Wen Y K. Method for random vibration of hysteretic systems [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1976, 103(2): 203—249.
- [24] 吴从晓. 高位转换耗能减震结构体系分析研究[D]. 广州: 广州大学, 2007.  
Wu Congxiao. Analytical studies on the system of high-level transfer structure with energy dissipated device [D]. GuangZhou: Guangzhou University, 2007. (in Chinese)