

# 设计参数对铅黏弹性连梁阻尼器力学性能分析

房晓俊,周 云

(广州大学土木工程学院,广东 广州 510006)

**摘 要** 目的 研究铅芯边距、铅芯直径、剪切钢板与约束钢板厚度比、复合黏弹性层中薄钢板与黏弹性层厚度比以及剪切模量对其力学性能的影响,给出各设计参数的建议值. 方法 采用 ABAQUS 软件建立铅黏弹性连梁阻尼器的有限元模型;然后对 15 组铅黏弹性连梁阻尼器进行参数分析,研究不同设计参数对铅黏弹性连梁阻尼器力学性能的影响规律;最后给出各设计参数的取值建议. 结果 铅黏弹性连梁阻尼器滞回曲线饱满,表现出良好的耗能能力. 各设计参数对铅黏弹性连梁阻尼器力学性能具有不同程度的影响,铅芯直径显著影响屈服荷载、屈服位移、最大阻尼力和等效黏滞阻尼比,对屈服后刚度具有较大影响;铅芯边距和剪切钢板与约束钢板厚度比主要影响屈服位移,而铅芯直径、剪切模量主要影响屈服后刚度;薄钢板与黏弹性层厚度比和钢材类型对力学性能影响较小. 结论 铅芯宜对称布置在复合黏弹性层外侧,铅芯边距取 1~1.5 倍的铅芯直径;铅黏弹性连梁阻尼器需求的屈服承载力可由铅芯直径大小确定;剪切钢板与约束钢板厚度比取 1.00~2.00,且剪切钢板厚度宜取 0.8 倍的复合黏弹性层厚度;薄钢板与黏弹性层厚度比取 0.4~0.8,且优先取较小值;宜选用低硬度的黏弹性材料和强度高的钢材以保证阻尼器正常工作,发挥其稳定的耗能能力.

**关键词** 功能自恢复;铅黏弹性连梁阻尼器;力学性能;设计参数

中图分类号 TU352.1;TU311.41 文献标志码 A

## Analysis of Mechanical Performance of Lead Viscoelastic Coupling Beam Damper by Design Parameters

FANG Xiaojun, ZHOU Yun

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

**Abstract:** This paper studied the influence of the lead viscoelastic coupling beam damper's (LVCBD) mechanical performance caused by different parameters, including the distance between lead core's center and outside edge of the composited viscoelastic layer, lead core diameter, thick-

收稿日期:2017-10-18

基金项目:国家重点研发计划重点专项(2017YFC0703608)

作者简介:房晓俊(1993—),男,博士研究生,主要从事结构减震控制方面研究.

ness ratio of shear plate to constrained plate, thickness ratio of thin plate to viscoelastic layer in the composited viscoelastic layer and shear modulus, which provides the suggested values of the design parameters. 15 groups of LVCBD models with different parameters are established and analyzed through finite element software called ABAQUS. The results show that: The hysteretic curve of LVCBD is full, showing a good energy dissipation capacity. The design parameters have different effects on mechanical performance of LVCBD, The lead diameter has significant influence on LVCBD's yield force, yield displacement, maximum damping force and equivalent viscous damping ratio, and also affects the post-yield stiffness; yield displacement is mainly affected by the distance between lead core's center and outside edge of the composited viscoelastic layer and the thickness ratio of shear plate to constrained plate, while the lead diameter and shear modulus mainly affect the post-yield stiffness; the thickness ratio of thin plate to viscoelastic layer and steel type slightly affect LVCBD's mechanical performance. The conclusion is as follows: the lead core should be symmetrically arranged on the outside of the composited viscoelastic layer and the distance should be 1 ~ 1.5 times of lead core diameter; the lead core diameter should be determined by requirements of the LVCBD's yield capacity; the thickness ratio of shear plate to constrained plate should be 1.00 ~ 2.00, and the thickness of shear plate should be 0.8 times of the thickness of the composited viscoelastic layer; the thickness ratio of thin plate to viscoelastic layer should be 0.4 ~ 0.8 and the smaller value should be taken priority; viscoelastic material with low hardness and higher strength steel plate are recommended to guarantee the normal work of LVCBD and exert a stable energy dissipation capacity.

**Key words:** self-resilient; lead viscoelastic coupling beam damper; mechanic performance; design parameter

可更换连梁是实现剪力墙结构震后功能可恢复的有效方法和途径,国内外学者研究提出不同类型和构造的可更换连梁,如金属耗能型可更换连梁<sup>[1-3]</sup>、摩擦耗能型可更换连梁<sup>[4]</sup>、黏弹性耗能型可更换连梁<sup>[5-6]</sup>、复合耗能型可更换连梁<sup>[7]</sup>等,证实了工程结构可更换的设计思想是可行的,实现了结构震后功能可恢复。

但在地震后可更换连梁进行更换成本高、安装周期长,此外地震中可更换连梁与结构的连接件变形或破坏会增加更换的难度。文献[8]研究发现,试验加载完成后可更换连梁跨中的“保险丝”部分存在残余变形,若残余变形过大将增加拆卸的难度,从而增加更换的成本和周期;文献[9-10]研究指出,在往复荷载作用下可更换连梁消能段与非消能段之间会产生螺栓的变形滑移、结构胶开裂导致连接处脆性破坏以及翼缘与端板焊缝断裂,不利于震后更换。针对可更换连梁存在的问题,设计了以铅黏弹性阻尼器为耗能梁

段的功能自恢复连梁<sup>[11]</sup>。基于此,笔者采用 ABAQUS 软件对铅黏弹性连梁阻尼器进行有限元数值模拟分析,研究铅芯边距、铅芯直径、剪切板与约束板厚度比、复合黏弹性层中薄钢板与黏弹性层厚度比及剪切模量等参数对铅黏弹性连梁阻尼器力学性能的影响,给出各设计参数的建议值。

## 1 铅黏弹性连梁阻尼器的构造与原理

铅黏弹性连梁阻尼器构造如图 1 所示,主要由① 剪力钢板;② 约束钢板;③ 铅芯;④ 黏弹性层;⑤ 薄钢板;⑥ 左连接板;⑦ 右连接板组成。复合黏弹性层由黏弹性层与薄钢板叠加硫化而成,根据剪切钢板数量不同分为双剪型铅黏弹性连梁阻尼器和复合型铅黏弹性连梁阻尼器。其耗能原理表现为:地震作用下剪力墙发生弯曲变形使得连梁发生相应的变形,设置在连梁跨中的铅黏弹性连梁阻尼器同时利用铅芯的剪切和挤压塑性滞回

变形耗能与黏弹性材料的剪切滞回变形耗能耗散输入结构中的地震能量,从而很好地保护主体结构的安全。

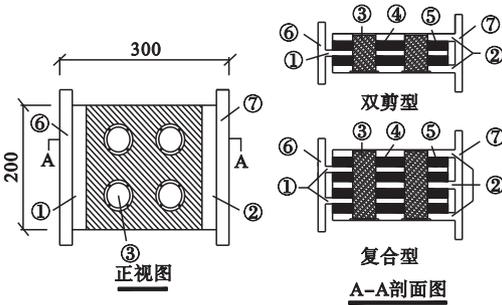


图 1 铅黏弹性连梁阻尼器构造

Fig. 1 Structural diagram of the lead viscoelastic coupling beam damper

## 2 铅黏弹性连梁阻尼器设计

为研究不同设计参数对铅黏弹性连梁阻

尼器力学性能的影响,笔者设计了 15 组双剪型铅黏弹性连梁阻尼器,具体参数见表 1。参考文献[8]中阻尼器试件尺寸,LVCBD1 ~ LVCBD14 尺寸参数长 × 高为 300 mm × 200 mm,阻尼器厚度为剪切钢板、约束钢板和复合黏弹性层三个部件厚度之和;统一采用 4 铅芯布置形式<sup>[12]</sup>,铅芯沿复合黏弹性层对角线对称布置,定义铅芯边距为铅芯圆心距离复合黏弹性层外边缘的最小距离;铅芯直径、剪切钢板与约束钢板厚度比和薄钢板与黏弹性层厚度比分别是铅芯直径、剪切钢板厚度和薄钢板厚度为变量,保持黏弹性层面积、约束钢板厚度和黏弹性层厚度不变的原则进行设计;其中,LVCBD0 与文献[13]中试件 II 同尺寸,用于有限元模拟分析方法的准确性校验。

表 1 铅黏弹性连梁阻尼器模型设计参数

Table 1 Design parameters of lead viscoelastic coupling beam dampers

| 模型编号    | 长 × 高 × 厚/mm    | 约束钢板厚度/mm | 剪切钢板厚度/mm | 黏弹性层面积 A/mm <sup>2</sup> | 铅芯直径/mm | 铅芯边距/mm | 薄钢板厚度/mm (层数) | 黏弹性层厚度/mm (层数) | 复合黏弹性层厚度/mm | 黏弹性材料剪切模量 G/MPa | 钢材类型 |
|---------|-----------------|-----------|-----------|--------------------------|---------|---------|---------------|----------------|-------------|-----------------|------|
| LVCBD0  | 700 × 450 × 243 | 20        | 20        | 600 × 400                | 50      | 125     | 3(4)          | 4(5)           | 32          | 0.55            | Q235 |
| LVCBD1  | 300 × 200 × 59  | 15        | 10        | 200 × 200                | 54      | 50      | 2(2)          | 5(3)           | 19          | 0.5             | Q235 |
| LVCBD2  | 300 × 200 × 59  | 15        | 10        | 200 × 200                | 54      | 55      | 2(2)          | 5(3)           | 19          | 0.5             | Q235 |
| LVCBD3  | 300 × 200 × 59  | 15        | 10        | 200 × 200                | 54      | 60      | 2(2)          | 5(3)           | 19          | 0.5             | Q235 |
| LVCBD4  | 300 × 200 × 59  | 15        | 10        | 200 × 200                | 54      | 50      | 2(2)          | 5(3)           | 19          | 0.5             | Q235 |
| LVCBD5  | 300 × 200 × 59  | 15        | 10        | 200 × 200                | 44      | 50      | 2(2)          | 5(3)           | 19          | 0.5             | Q235 |
| LVCBD6  | 300 × 200 × 59  | 15        | 10        | 200 × 200                | 34      | 50      | 2(2)          | 5(3)           | 19          | 0.5             | Q235 |
| LVCBD7  | 300 × 200 × 64  | 15        | 15        | 200 × 200                | 54      | 50      | 2(2)          | 5(3)           | 19          | 0.5             | Q235 |
| LVCBD8  | 300 × 200 × 69  | 15        | 20        | 200 × 200                | 54      | 50      | 2(2)          | 5(3)           | 19          | 0.5             | Q235 |
| LVCBD9  | 300 × 200 × 79  | 15        | 30        | 200 × 200                | 54      | 50      | 2(2)          | 5(3)           | 19          | 0.5             | Q235 |
| LVCBD10 | 300 × 200 × 61  | 15        | 10        | 200 × 200                | 54      | 50      | 3(2)          | 5(3)           | 21          | 0.5             | Q235 |
| LVCBD11 | 300 × 200 × 63  | 15        | 10        | 200 × 200                | 54      | 50      | 4(2)          | 5(3)           | 23          | 0.5             | Q235 |
| LVCBD12 | 300 × 200 × 65  | 15        | 10        | 200 × 200                | 54      | 50      | 2(2)          | 5(3)           | 19          | 0.3             | Q235 |
| LVCBD13 | 300 × 200 × 59  | 15        | 10        | 200 × 200                | 54      | 50      | 2(2)          | 5(3)           | 19          | 0.6             | Q235 |
| LVCBD14 | 300 × 200 × 59  | 15        | 10        | 200 × 200                | 54      | 50      | 2(2)          | 5(3)           | 19          | 0.5             | Q345 |

## 3 铅黏弹性连梁阻尼器有限元模型建立

### 3.1 单元类型

采用三维实体单元对铅黏弹性连梁阻尼器进行精细化建模,其中剪切钢板、约束钢

板、薄钢板、铅芯以及左、右连接板选用八节点六面体线性缩减积分单元(C3D8R)模拟;黏弹性层选用八节点六面体减缩杂交单元(C3D8RH)模拟<sup>[14]</sup>。

### 3.2 接触定义

复合黏弹性层与剪切钢板、约束钢板之

间以及铅芯与剪切钢板、约束钢板之间采用 Tie 接触;铅芯与复合黏弹性层的薄钢板以及黏弹性层之间法向定义为“硬接触”,接触面切向采用 Frictionless, 默认摩擦系数为 0, 面与面之间采用小滑移公式<sup>[14]</sup>。

### 3.3 网格划分

对铅黏弹性连梁阻尼器各组成部件划分不同大小的网格尺寸进行水平单向加载,通过对比荷载-位移曲线,最终确定铅芯和复合黏弹性层网格尺寸大小取 10, 剪切钢板、约束钢板和左、右连接板网格尺寸大小取 12.5。

### 3.4 材料本构

钢材的材料本构采用双线性随动强化模型(Kinematic);铅为理想弹塑性体,其力学模型可简化为理想弹塑性模型,材料本构采用双线性等向强化模型(Isotropic),钢材和铅的材料本构参数见表 2。

表 2 钢、铅本构模型参数

Table 2 Constitutive parameters of steel and lead

| 材料 | 弹性模量<br>$E/\text{MPa}$ | 屈服后切线<br>模量 $E/\text{MPa}$ | 泊松比<br>$\nu$ | 屈服应力<br>$F_y/\text{MPa}$ |
|----|------------------------|----------------------------|--------------|--------------------------|
| 钢材 | 206 000                | 4 120                      | 0.3          | —                        |
| 铅  | 16 460                 | 0                          | 0.42         | 10.5                     |

黏弹性材料本构采用五项三阶多项式模型(Polynomial),应变较小时黏弹性材料的剪切模量与弹性模量关系为  $G = E/3 = 2(C_{10} + C_{01})$ , 且  $C_{10}/C_{01} = 0.05$ , 泊松比为  $\nu = 0.4997$ <sup>[15-16]</sup>, 本构模型中各参数取值见表 3。

表 3 Polynomial 本构模型参数

Table 3 Constitutive parameters of polynomial model

| $C_{10}$  | $C_{01}$  | $C_{20}$  | $C_{11}$  | $C_{02}$  |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0.238 095 | 0.011 905 | 0.004 100 | 0.001 009 | 0.000 028 |

注:  $C_{ij}$  为本构模型中多项式的系数。

### 3.5 边界条件和加载方式

铅黏弹性连梁阻尼器右连接板底面设为固定端,约束位移和转角 6 个方向的自由度;左连接板顶面中心通过设置参考点采用耦合约束(Coupling),在参考点上施加位移以实现循环往复位移控制加载,加载点除加载方

向自由度,其他方向均约束。

对于模型 LVCBD0,采用与文献[13]中试验相同的加载幅值对铅黏弹性阻尼器进行加载;模型 LVCBD1 ~ LVCBD3 采用图 2(a)所示加载制度,模型 LVCBD4 ~ LVCBD14 采用图 2(b)所示加载制度。

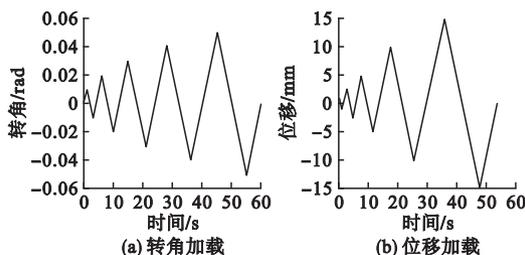
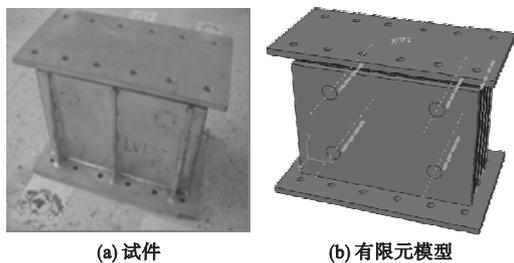


图 2 加载制度

Fig. 2 Loading system

## 4 有限元模拟分析方法校验

LVCBD0 采用与文献[13]中试件 II 相同的加载条件,按剪切变形分别为 25%、50%、75% 和 100% 进行位移加载. 图 3(a)、(b)分别为试验试件和对应的有限元模型。



(a) 试件

(b) 有限元模型

图 3 试件与有限元模型

Fig. 3 Test specimen and finite element model

数值模拟分析得到的滞回曲线与试验结果对比见图 4。由图可知两滞回曲线基本重合,计算得到阻尼器最大阻尼力相差 6.61%,屈服前刚度基本吻合,屈服后刚度最大相差 13.8%,均小于 15%,试验中小位移下铅芯由于存在迟滞表现出捏缩,而模拟采用的理想接触条件无法体现这一点;图 5(a)所示为 100% 剪切变形条件下中间约束钢板与连接板连接处油漆剥落情况,说明此处受到的应力最大,这与图 5(b)数值模拟分析所得 Von Mises 应力云图相一致。

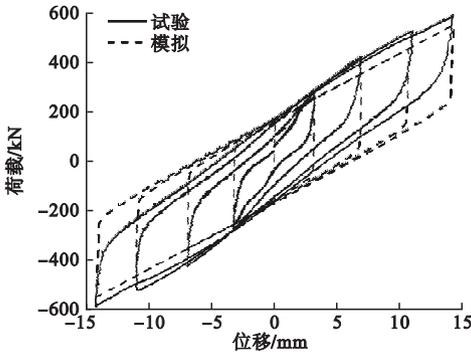


图 4 试验与模拟滞回曲线对比

Fig. 4 Comparison of hysteretic curves between test and simulation

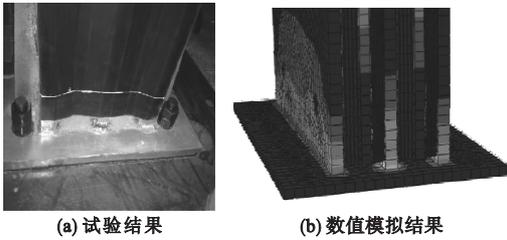


图 5 试验与模拟受力对比

Fig. 5 Stress comparison between test and simulation

综上,笔者采用的有限元数值模拟分析方法所得结果与试验结果吻合良好,可用于铅黏弹性连梁阻尼器的数值模拟研究。

## 5 铅黏弹性连梁阻尼器参数分析

### 5.1 铅芯边距

对铅芯边距 ( $s$ ) 分别为 50 mm (LVCBD1)、55 mm (LVCBD2) 和 60 mm (LVCBD3) 的三个铅黏弹性连梁阻尼器进行分析,在保持其他设计参数一致的条件下研究铅芯分布位置对阻尼器力学性能的影响。

图 6 分别对比三个阻尼器的滞回曲线、第一圈正向加载荷载-位移曲线以及等效黏滞阻尼比,各力学性能对比见表 4,主要包括屈服荷载  $M_y$ 、屈服位移  $\Delta_y$ 、屈服后刚度  $K'$ 、最大阻尼力  $M_u$ 、等效黏滞阻尼比  $\xi$ ,图 7 为对比铅黏弹性连梁阻尼器在转角变形条件下三个阻尼器中铅芯的 Von Mises 应力云图。

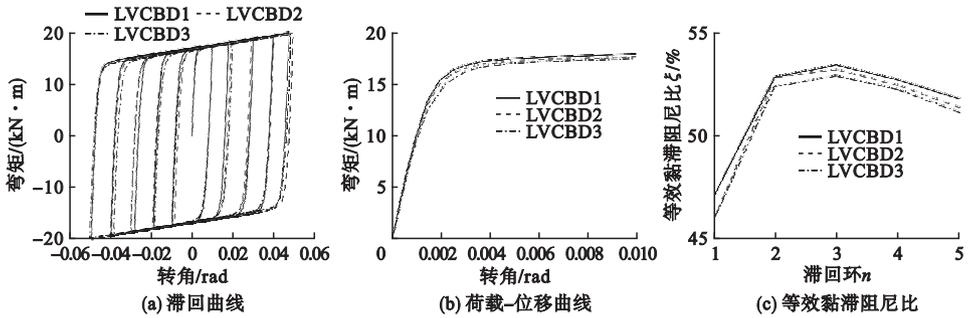


图 6 不同铅芯边距的阻尼器力学性能对比

Fig. 6 Comparison of mechanical performance of LVCBDs with different  $s$  value

表 4 不同铅芯边距的阻尼器力学性能对比

Table 4 Comparison of mechanical performance of LVCBDs with different  $s$  value

| 模型编号   | 转角/rad | $s$ /mm | $M_y$ /<br>(kN·m) | $\Delta_y$ /mm | $K'$ /<br>(kN·m·rad <sup>-1</sup> ) | $M_u$ /<br>(kN·m) | $\xi$ / % |
|--------|--------|---------|-------------------|----------------|-------------------------------------|-------------------|-----------|
| LVCBD1 | 0.05   | 50      | 15.316            | 0.001 93       | 101.976                             | 20.218            | 51.824    |
| LVCBD2 | 0.05   | 55      | 15.014            | 0.001 97       | 106.704                             | 20.139            | 51.402    |
| LVCBD3 | 0.05   | 60      | 14.868            | 0.002 14       | 105.453                             | 19.915            | 51.167    |

由图 6 和表 4 可知,三个阻尼器的滞回曲线均饱满,表现出良好的滞回耗能能力。LVCBD1 ~ LVCBD3 的屈服荷载、屈服后刚度、最大阻尼力和等效黏滞阻尼比最大差值均在 5% 内,说明铅芯边距对屈服荷载、屈服

后刚度、最大阻尼力和等效黏滞阻尼比影响较小,随铅芯边距的增大,屈服荷载、最大阻尼力和等效黏滞阻尼比略有增大,屈服后刚度略有减小; LVCBD1 的屈服位移较 LVCBD 2 和 LVCBD 3 分别小 2.07%、

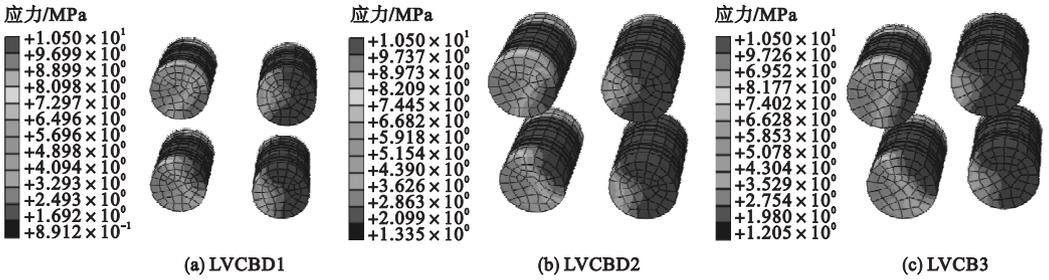


图7 不同铅芯边距的阻尼器铅芯 Von Mises 应力云图

Fig.7 Von Mises of lead cores of LVCBDs with different s value

10.88%,说明铅芯边距对屈服位移影响较大,且随铅芯边距的减小,屈服位移亦趋于减小;由图7可知,相同转角变形条件下三个阻尼器的铅芯均已屈服,进而产生塑性变形耗能,铅芯受到的应力随铅芯边距的增大而减小.由此可知,在相同的阻尼器尺寸参数条件下,铅芯边距小的铅黏弹性连梁阻尼器的抗弯性能较铅芯边距大的好,建议设计时铅芯对称布置在复合黏弹性层外侧,铅芯边距取1~1.5倍的铅芯直径.

5.2 铅芯直径

对铅芯直径( $d$ )分别为54 mm

(LVCBD4)、44 mm (LVCBD5)、34 mm (LVCBD6)的三个铅黏弹性连梁阻尼器进行分析,在保持其他设计参数一致的条件下研究铅芯直径大小对阻尼器力学性能的影响.

图8分别对比三个阻尼器的滞回曲线、第一圈正向加载荷载-位移曲线以及等效黏滞阻尼比,各力学性能对比见表5,主要包括屈服荷载 $P_y$ 、屈服位移 $\Delta_y$ 、屈服后刚度 $K'$ 、最大阻尼力 $P_u$ 、等效黏滞阻尼比 $\xi$ .图9为100%剪切变形条件下三个阻尼器的铅芯 Von Mises 应力云图.

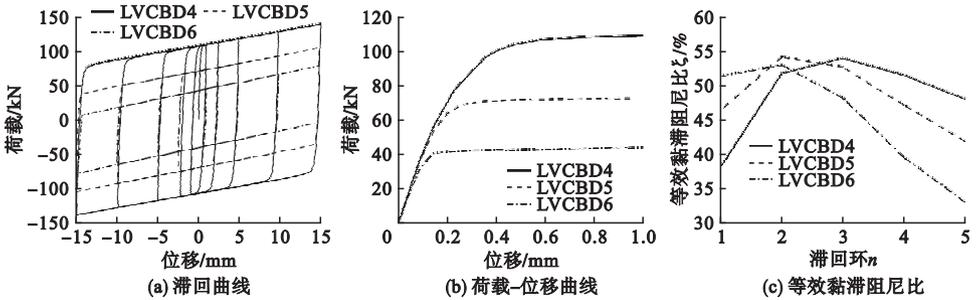


图8 不同铅芯直径阻尼器力学性能对比

Fig.8 Comparison of mechanical performance of LVCBDs with different lead core diameters

表5 不同铅芯直径阻尼器力学性能对比

Table 5 Comparison of mechanical performance of LVCBDs with different lead core diameters

| 模型编号   | $\Delta$ /mm | $d$ /mm | $P_y$ /kN | $\Delta_y$ /mm | $K'/(kN \cdot mm^{-1})$ | $P_u$ /kN | $\xi/\%$ |
|--------|--------------|---------|-----------|----------------|-------------------------|-----------|----------|
| LVCBD4 | 15           | 54      | 94.875    | 0.342          | 3.052                   | 139.612   | 48.062   |
| LVCBD5 | 15           | 44      | 63.900    | 0.198          | 2.812                   | 105.526   | 41.957   |
| LVCBD6 | 15           | 34      | 37.683    | 0.124          | 2.771                   | 78.900    | 33.130   |

由图8和表5可知,三个模型的滞回曲线均饱满,表现出良好的滞回耗能能力.LVCBD4的屈服后刚度较LVCBD5和LVCBD6分别增大7.86%、9.21%,说明铅

芯直径对屈服后刚度影响较大;LVCBD4的屈服荷载、屈服位移、最大阻尼力和等效黏滞阻尼比分别较LVCBD5增大32.65%、42.11%、24.41%、12.70%,较LVCBD6增

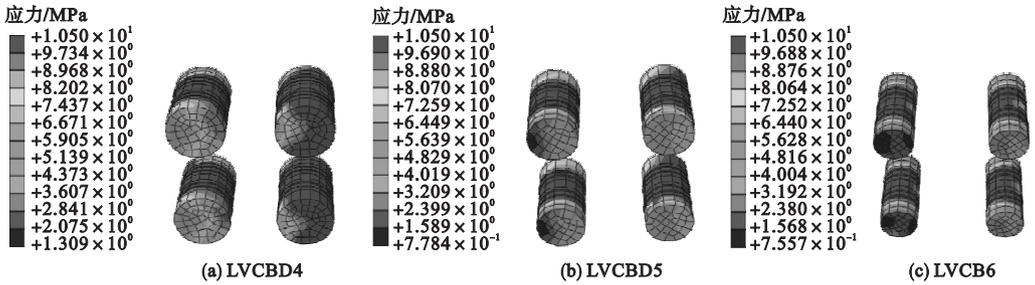


图 9 不同直径铅芯 Von Mises 云图

Fig. 9 Von Mises of lead core with different lead diameters

大 60.28%、63.74%、43.49%、31.07%，说明铅芯直径显著影响屈服荷载、屈服位移、最大阻尼力和等效黏滞阻尼比，且均随铅芯直径的增大而显著增大；由图 9 可知，相同剪切变形条件下三个阻尼器的铅芯均已屈服耗能，铅芯屈服进入塑性的分布面积随铅芯直径的增大而增大。由此可知，铅芯直径是铅黏弹性连梁阻尼器的主要性能影响参数之一，在仅控制铅芯直径为单一变量条件下，铅芯直径大的铅黏弹性连梁阻尼器的性能较铅芯直径小的优，建议设计时根据阻尼器需求的屈服承载力确定铅芯直径大小。

### 5.3 剪切钢板与约束钢板厚度比

对剪切钢板与约束钢板厚度比( $\delta$ )分别

为 0.67 (LVCBD4)、1.00 (LVCBD7)、1.33 (LVCBD8)、2.00 (LVCBD9) 的四个铅黏弹性连梁阻尼器进行分析，在保持其他设计参数一致的条件研究不同剪切钢板与约束钢板厚度比对铅黏弹性连梁阻尼器力学性能的影响。

图 10 分别对比四个阻尼器的滞回曲线、第一圈正向加载荷载-位移曲线以及等效黏滞阻尼比，各力学性能对比见表 6，主要包括屈服荷载  $P_y$ 、屈服位移  $\Delta_y$ 、屈服后刚度  $K'$ 、最大阻尼力  $P_u$ 、等效黏滞阻尼比  $\xi$ 。图 11 为对比 100% 剪切变形条件下四个阻尼器中钢板的 Von Mises 应力云图。

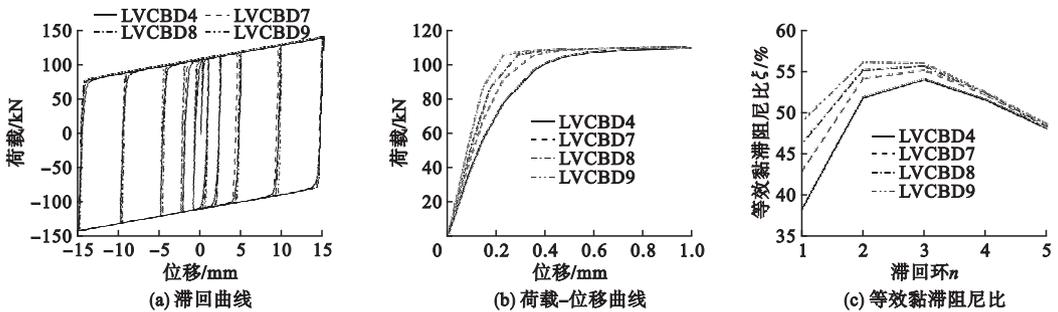


图 10 不同  $\delta$  值阻尼器力学性能对比

Fig. 10 Comparison of mechanical performance of LVCBDs with different  $\delta$  value

表 6 不同  $\delta$  值阻尼器力学性能对比

Table 6 Comparison of mechanical performance of LVCBDs with different  $\delta$  value

| 模型编号   | $\Delta$ /mm | $\delta$ /mm | $P_y$ /kN | $\Delta_y$ /mm | $K'$ /(kN·mm <sup>-1</sup> ) | $P_u$ /kN | $\xi$ /% |
|--------|--------------|--------------|-----------|----------------|------------------------------|-----------|----------|
| LVCBD4 | 15           | 0.67         | 94.875    | 0.342          | 3.052                        | 139.612   | 48.062   |
| LVCBD7 | 15           | 1.00         | 95.292    | 0.261          | 3.004                        | 139.564   | 48.263   |
| LVCBD8 | 15           | 1.33         | 94.307    | 0.220          | 3.079                        | 139.814   | 48.375   |
| LVCBD9 | 15           | 2.00         | 95.029    | 0.181          | 3.000                        | 139.488   | 48.558   |

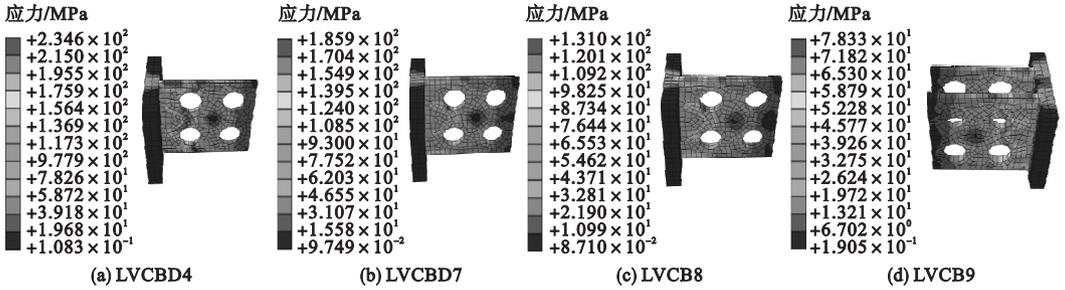


图 11 不同  $\delta$  值阻尼器钢板 Von Mises 应力云图

Fig. 11 Von Mises of steel plates of LVCBDs with different  $\delta$  value

由图 10 和表 6 可知,四个阻尼器的滞回曲线均饱满,表现出良好的滞回耗能能力。LVCBD4 和 LVCBD7 ~ LVCBD9 四个阻尼器的屈服荷载、屈服后刚度、最大阻尼力和等效黏滞阻尼比最大差值均在 2% 内,说明剪切钢板与约束钢板厚度比对屈服荷载、屈服后刚度、最大阻尼力和等效黏滞阻尼比影响较小; LVCBD4 的屈服位移分别较 LVCBD7、LVCBD8、LVCBD9 大 23.68%、35.67%、47.08%,说明剪切钢板与约束钢板厚度比对屈服位移有显著影响,且随剪切钢板与约束钢板厚度比的增大而减小;由图 11 可知,剪切钢板与约束钢板厚度比越大,钢板所受应力越小,发生屈服进入塑性的程度越低。仅 LVCBD4 剪切钢板局部超过钢板的屈服应力,随剪切钢板与约束钢板厚度比的增加,钢板最大应力部位将由剪切钢板转移到约束钢板(LVCBD9)。由此可知,钢板厚度主

要对铅黏弹性连梁阻尼器屈服位移有较显著的影响,建议设计时剪切钢板与约束钢板厚度比取 1.00 ~ 2.00,且剪切钢板厚度宜取 0.8 倍的复合黏弹性层厚度以保证其功能正常使用。

5.4 薄钢板与黏弹性层厚度比

对薄钢板与黏弹性层厚度比( $\gamma$ )分别为 0.4 (LVCBD4)、0.6 (LVCBD10)、0.8 (LVCBD11)的三个铅黏弹性连梁阻尼器进行分析,在保持其他设计参数一致的条件下研究不同薄钢板与黏弹性层厚度比对铅黏弹性连梁阻尼器力学性能的影响。

图 12 为对比三个阻尼器的滞回曲线、第一圈正向加载荷载 - 位移曲线以及等效黏滞阻尼比,各力学性能对比见表 7。图 13 为对比 100% 剪切变形条件下三个阻尼器中复合黏弹性层和薄钢板的 Von Mises 应力云图。

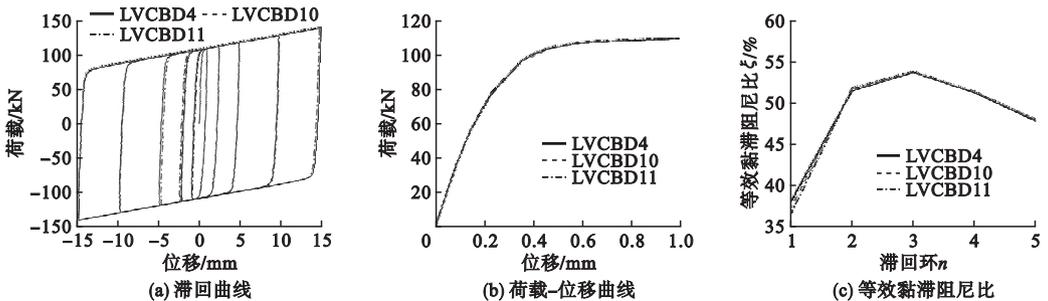


图 12 不同  $\gamma$  值阻尼器力学性能对比

Fig. 12 Comparison of mechanical performance of LVCBDs with different  $\gamma$  value

表 7 不同  $\gamma$  值阻尼器力学性能对比

Table 7 Comparison of mechanical performance of LVCBDs with different  $\gamma$  value

| 模型编号    | $\Delta$ /mm | $\gamma$ /mm | $P_y$ /kN | $\Delta_y$ /mm | $K'$ /<br>(kN·mm <sup>-1</sup> ) | $P_u$ /kN | $\xi$ /% |
|---------|--------------|--------------|-----------|----------------|----------------------------------|-----------|----------|
| LVCBD4  | 15           | 0.4          | 94.875    | 0.342          | 3.052                            | 139.612   | 48.062   |
| LVCBD10 | 15           | 0.6          | 95.388    | 0.345          | 3.002                            | 139.376   | 48.109   |
| LVCBD11 | 15           | 0.8          | 95.707    | 0.348          | 2.951                            | 138.949   | 48.195   |

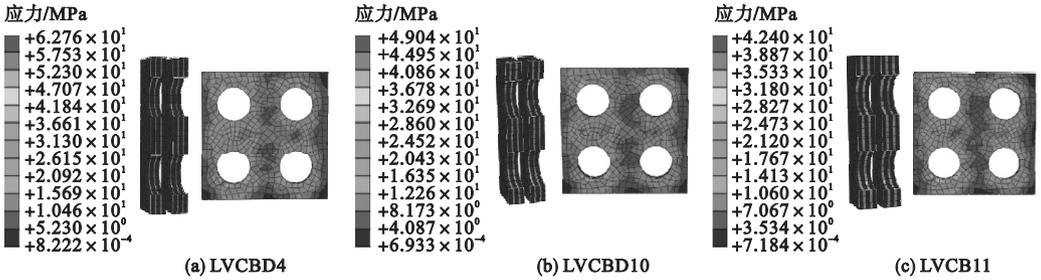


图 13 不同  $\gamma$  值阻尼器复合黏弹性层 Von Mises 云图

Fig. 13 Von Mises of complex viscoelastic layer with different  $\gamma$  value

由图 12 和表 7 可知,三个阻尼器的滞回曲线均饱满,表现出良好的滞回耗能能力。LVCBD4、LVCBD10 和 LVCBD11 的屈服荷载、屈服位移、屈服后刚度、最大阻尼力和等效黏滞阻尼比最大差值均在 5% 内,说明薄钢板与单层橡胶厚度比对各力学性能影响较小,且随其值的增大,屈服荷载、屈服位移和等效黏滞阻尼比略有增大,屈服后刚度、最大阻尼力略有减小;由图 13 可知,相同剪切变形条件下三个阻尼器的复合黏弹性层中薄钢板受到的应力均远大于黏弹性层受到的应力,且薄钢板距离铅芯越近的部位其受到的应力值越大。随薄钢板与黏弹性层厚度比减小,三个阻尼器薄钢板所受的应力趋于增大,但远低于钢板的屈服强度,最大值分别为 42.40 MPa ( $\gamma = 0.8$ )、49.04 MPa ( $\gamma = 0.6$ )、62.76 MPa ( $\gamma = 0.4$ )。由此可知,薄钢板与黏

弹性层厚度比对铅黏弹性连梁阻尼器力学性能影响较小。从经济节约的角度考虑,设计时建议薄钢板与黏弹性层厚度比取 0.4 ~ 0.8,且优先取较小值以获得良好的滞回耗能效果。

### 5.5 剪切模量

对剪切模量 ( $G$ ) 分别为 0.3 (LVCBD12)、0.5 (LVCBD4)、0.6 (LVCBD13) 的三个铅黏弹性连梁阻尼器进行分析,在保持其他设计参数一致的条件下研究不同黏弹性材料剪切模量对铅黏弹性连梁阻尼器力学性能的影响。

图 14 为对比三个阻尼器的滞回曲线、正向加载荷载 - 位移曲线以及等效黏滞阻尼比,各力学性能对比见表 8。图 15 为 100% 剪切变形条件下三个阻尼器及其复合黏弹性层的 Von Mises 应力云图。

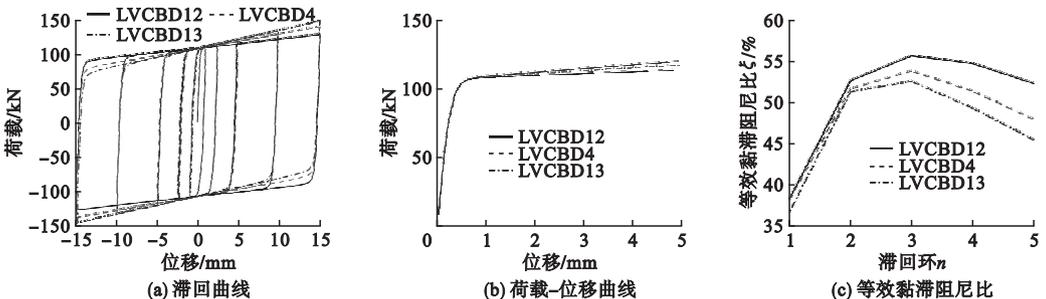


图 14 不同剪切模量阻尼器力学性能对比

Fig. 14 Comparison of mechanical performance of LVCBDs with different shear modulus

表8 不同剪切模量阻尼器力学性能对比

Table 8 Comparison of mechanical performance of LVCBDs with different shear modulus

| 模型编号    | $\Delta/\text{mm}$ | $G$ | $P_y/\text{kN}$ | $\Delta_y/\text{mm}$ | $K'/$<br>( $\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ ) | $P_u/\text{kN}$ | $\xi/\%$ |
|---------|--------------------|-----|-----------------|----------------------|---|-----------------|----------|
| LVCBD12 | 15                 | 0.3 | 94.305          | 0.339                | 2.3   | 128.02          | 52.462   |
| LVCBD4  | 15                 | 0.5 | 94.875          | 0.342                | 3.052                                       | 139.612         | 48.062   |
| LVCBD13 | 15                 | 0.6 | 95.274          | 0.344                | 3.558                                       | 147.419         | 45.57    |

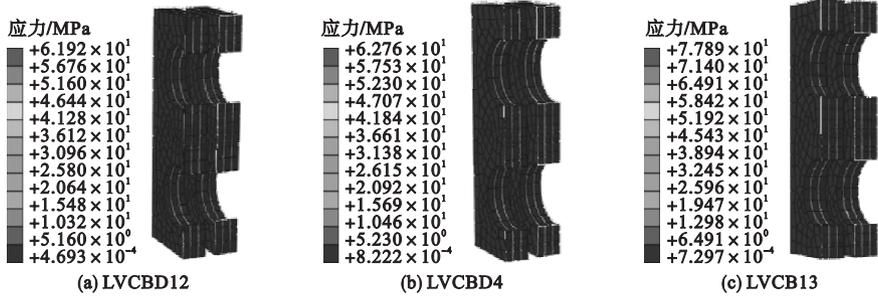


图15 不同剪切模量阻尼器复合黏弹性层 Von Mises 应力云图

Fig. 15 Von Mises of composited viscoelastic layer of LVCBDs with different shear modulus

由图14和表8可知,三个阻尼器的滞回曲线均饱满,表现出良好的滞回耗能能力。LVCBD12、LVCBD4和LVCBD13的屈服荷载和屈服位移最大差值均在2%内,说明剪切模量对屈服荷载、屈服位移影响较小;LVCBD12的屈服后刚度和最大阻尼力分别较LVCBD4增大32.72%、9.05%,较LVCBD13增大54.72%、15.15%;等效黏滞阻尼比分别较LVCBD4减小8.39%,较LVCBD13减小13.14%,说明剪切模量对屈服后刚度具有显著影响,对最大阻尼力和等效黏滞阻尼比具有较大影响,且随剪切模量的增大,屈服后刚度和最大阻尼力越大,等效黏滞阻尼比越小;由图15可知,相同剪切变形条件下三个阻尼器的复合黏弹性层中的Von Mises应力随黏弹性材料剪切模量的增大而增大。由此可知,材料剪切模量主要影响铅黏弹性连梁阻尼器屈服后刚度,设计时选用硬度较低的材料能够使阻尼器获得较好的耗能效果。

## 6 结论

(1) 铅芯边距主要影响铅黏弹性连梁阻尼器的屈服位移,且随铅芯边距的增大而增大;建议铅芯对称布置在复合黏弹性层外侧,铅芯边距取1~1.5倍的铅芯直径。

(2) 铅芯直径显著影响铅黏弹性连梁阻尼器的屈服荷载、屈服位移、最大阻尼力和等效黏滞阻尼比,对屈服后刚度具有较大影响,且均随铅芯直径的增大而增大;建议设计时根据阻尼器需求的屈服承载力确定铅芯直径大小。

(3) 剪切钢板与约束钢板厚度比显著影响铅黏弹性连梁阻尼器的屈服位移,且随该值的增大而减小,对屈服荷载、屈服后刚度、最大阻尼力和等效黏滞阻尼比影响较小;建议剪切钢板与约束钢板厚度比取1.00~2.00,且剪切钢板厚度宜取0.8倍的复合黏弹性层厚度以保证其功能正常使用。

(4) 薄钢板与黏弹性层厚度比对铅黏弹性连梁阻尼器的力学性能影响较小,主要影响复合黏弹性层中薄钢板的应力;建议薄钢板与黏弹性层厚度比取0.4~0.8,且优先取较小值以保证其稳定的滞回耗能。

(5) 黏弹性材料的剪切模量显著影响铅黏弹性连梁阻尼器的屈服后刚度,且随剪切模量的增大而增大,对最大阻尼力和等效黏滞阻尼比影响较大,对屈服荷载和屈服位移影响较小;建议选用低硬度黏弹性材料和高强度钢材以使阻尼器获得较好的耗能效果。

## 参考文献

- [1] FORTNEY P J, SHAHROOZ B M, RASSATI G A. The next generation of coupling beams [C]//5th international conference on composite construction in steel and concrete. USA: ASCE, 2006: 619 - 630.
- [2] 熊谷仁志, 島崎和司, 林静雄. 中央部に鋼材ダンパーを有するRC境界梁に関する実験的研究—低降伏点鋼を用いた境界梁ダンパーに関する研究(その1)[J]. 日本建築学会構造系論文集, 2009, 74(638): 755 - 763. (HITOSHI K, KAZUSHI S, SHIZUO H. Experimental study on coupling beams with steel dampers in mid-span; coupling beam dampers with low yield point steel(part 1)[J]. Journal of structural & construction engineering, 2009, 74(638): 755 - 763.)
- [3] 熊谷仁志, 島崎和司, 林静雄. 中央部に鋼材ダンパーを有するRC境界梁の復元力特性: 低降伏点鋼を用いた境界梁ダンパーに関する研究その2[J]. 日本建築学会構造系論文集, 2009, 74(643): 1677 - 1684. (HITOSHI K, KAZUSHI S, SHIZUO H. Restoring force characteristic of coupling beam dampers; coupling beam dampers with low yield point steel(part 2)[J]. Journal of structural & construction engineering, 2009, 74(643): 1677 - 1684.)
- [4] 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 & special buildings, 2009, 18(7): 807 - 822.
- [5] CHRISTOPOULOS C, MONTGOMERY M. Viscoelastic coupling dampers (VCDs) for enhanced wind and seismic performance of high-rise buildings [J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2013, 42(15): 2217 - 2233.
- [6] MONTGOMERY M, CHRISTOPOULOS C. Experimental validation of viscoelastic coupling dampers for enhanced dynamic performance of high-rise buildings [J]. Journal of structural engineering, 2014, 141(5): 04014145.
- [7] KIM H J, CHOI K S, OH S H, et al. Comparative study on seismic performance of conventional RC coupling beams and hybrid energy dissipative coupling beams used for RC shear walls [C]//15WCEE, Lisbon, Portugal, 2012, Paper-ID: 2254.
- [8] 吕西林, 陈云, 蒋建军. 带可更换连梁的双肢剪力墙抗震性能试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(2): 175 - 182. (Lü Xilin, CHEN Yun, JIANG Huanjun. Experimental study of seismic performance of coupled shear wall structure with replaceable coupling beams [J]. Journal of tongji university (natural science), 2014, 42(2): 175 - 182.)
- [9] 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. (JI Xiaodong, MA Qifeng, WANG Yandong, et al. Cyclic test of replaceable shear links in steel coupling beams [J]. Journal of building structures, 2014, 35(6): 1 - 11.)
- [10] 纪晓东, 王彦栋, 马琦峰, 等. 可更换钢连梁抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(10): 1 - 10. (JI Xiaodong, WANG Yandong, MA Qifeng, et al. Experimental study on seismic behavior of replaceable steel coupling beams [J]. Journal of building structures, 2015, 36(10): 1 - 10.)
- [11] 周云, 石菲, 邓雪松. 一种联肢剪力墙的消能减震连梁构造: CN205653916 [P]. 2016. (ZHOU Yun, SHI Fei, DENG Xuesong. An energy dissipating coupling beam in coupled shear wall; ZL CN205653916 [P]. 2016.)
- [12] 石菲, 周云, 邓雪松. 设计参数对铅阻器力学性能影响的有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(增刊1): 62 - 70. (SHI Fei, ZHOU Yun, DENG Xuesong. Analysis of influence on mechanical performance of lead viscoelastic dampers by design parameters [J]. Journal of building structures, 2016, 37(S1): 62 - 70.)
- [13] 石菲. 新型(铅)黏弹性阻尼器性能与应用研究[D]. 广州: 广州大学, 2012: 49 - 72. (SHI Fei. Performance and application research of (lead) viscoelastic damper [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2012: 49 - 72.)
- [14] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 51 - 60. (SHI Yiping, ZHOU Yurong. ABAQUS FEA example explanation [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2006: 51 - 60.)
- [15] 张少实, 庄茁. 复合材料与粘弹性力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 165 - 176. (ZHANG Shaoshi, ZHUANG Zhuo. Composite materials and viscoelastic mechanics [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2007: 165 - 176.)
- [16] GRACIA L A, LIARTE E, PELEGAY J L, CALVO B. Finite element simulation of the hysteretic behavior of an industrial rubber; application to design of rubber components [J]. Finite element in analysis and design, 2010, 46(4): 357 - 368.