

刘建武, 叶茂, 谢秋林. 基于杠杆原理阻尼器关键机理和有限元分析[J]. 华南地震, 2019, 39(4): 98–103. [LIU Jianwu, YE Mao, XIE Qiulin. Key Mechanism and Finite Element Analysis of Damper Based on Lever Principle[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(4): 98–103]

## 基于杠杆原理阻尼器关键机理和有限元分析

刘建武, 叶茂, 谢秋林

(广州大学淡江大学工程结构灾害与控制联合研究中心, 广州 510405)

**摘要:** 针对部分阻尼器未能高效发挥耗能能力的不足之处, 研发出基于杠杆原理铅粘弹性阻尼器, 阐述了阻尼器的结构构造和耗能机理, 并基于 ABAQUS 建立起阻尼器有限元数值模型, 通过对比基于杠杆原理铅粘弹性阻尼器和无放大功能阻尼器的滞回曲线, 表明: 新型阻尼器构造合理, 耗能能力提升显著, 其耗能能力是无放大能力阻尼器的 9 倍。

**关键词:** 阻尼器; 杠杆原理; 滞回曲线; 耗能能力

中图分类号: TU392.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2019)04-0098-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2019.04.014

## Key Mechanism and Finite Element Analysis of Damper Based on Lever Principle

LIU Jianwu, YE Mao, XIE Qiulin

(Guangzhou University-Tamkang University Joint Research Center for Engineering Structure Disaster and Control, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** In view of the deficiency of some dampers that fail to play the energy dissipation capacity efficiently, a lead viscoelastic damper based on lever principle is developed. The structure and energy dissipation mechanism of the damper are described, and the finite element numerical model of the damper is established based on ABAQUS. By comparing the hysteretic curves of the lead viscoelastic damper based on lever principle and the damper without amplification function, it is shown that: the structure of new type damper is reasonable, and the energy consumption capacity of the damper is increased significantly, which is 9 times of that of the damper without amplification capacity.

**Keywords:** Damper; Lever principle; Hysteretic curve; Energy dissipation capacity

收稿日期: 2019-07-15

基金项目: 广州市高校科研项目(1201610505)

作者简介: 刘建武(1994-), 男, 硕士生, 主要从事装配式结构研究。

E-mail: 351233125@qq.com.

通信作者: 叶茂(1982-), 副研究员, 主要从事装配式结构研究。

E-mail: yemao@gzhue.edu.cn.

0 引言

附加阻尼器是提高结构抗震性能的一种有效方式,可分为金属屈服位移阻尼器、金属摩擦阻尼器、粘滞液体阻尼器、粘弹阻尼器和复合型阻尼器等。针对阻尼器,相关学者已经开展了大量的研究,张玉敏<sup>[1]</sup>等提出一种带缝软钢阻尼器,李宏男<sup>[2]</sup>设计出一种新型的形状记忆合金(SMA)阻尼器,研究表明阻尼器滞回曲线饱满和自复位强。韩建强<sup>[3]</sup>等发明一种可利用用于结构梁柱节点的摩擦耗能阻尼器;吴霄<sup>[4]</sup>设计了铅粘弹性阻尼器的拟静力循环加载性能试验,开展了加载频率、应变幅值和铅芯直径大小等参数变化对阻尼器耗能性能影响,周云等<sup>[5-6]</sup>提出“同时利用两种或以上耗能元件同时工作”的思想,先后发明了铅橡胶阻尼器、铅粘弹性阻尼器和钢铅粘弹性阻尼器等。吴福健<sup>[7]</sup>等设计一种新型位移放大型粘弹性阻尼器,并推导出阻尼力理论公式。Shen Hin Lim 和 Garth Pearce 等人<sup>[8]</sup>综合优化磁流变液的性能,并通过试验验证了改阻尼器的相关参数与阻尼器的关系。虽然已有大量的阻尼器研究与应用,但始终存在一个问题,当结构(特别是梁柱节点)位移或转角较小,现有大部分阻尼器的消能减震能力很难充分发挥。

为此,本文针对梁柱节点阻尼器,提出基于杠杆原理铅粘弹性阻尼器,可有效解决梁柱节点位移较小,其所在位置阻尼器耗能能力不能有效发挥的问题。

1 阻尼器原理和构造特点

根据转动相同角度的同一圆心、不同半径圆

弧的弧长等于它们半径之比的原理来实现位移或转角的放大,如图 1 所示,给出了基于杠杆原理的铅粘弹性阻尼器的位移放大原理,当梁与柱之间产生一个  $\alpha_0$  的角变形时,阻尼器的外弧板会产生一个  $d=Rad * \alpha$  的一个位移,转动钢板会随着转轴绕着滑动转轴转动,由于杠杆的作用,外弧的位移会导致剪切钢板最远处产生位移  $D = d * R/r$ ,位移放大值与两臂的比值  $R/r$  成线性关系。

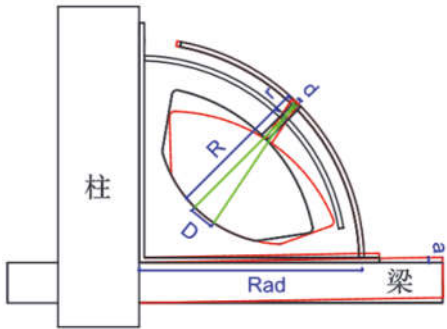


图 1 阻尼器的放大原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of amplification principle of damper

以上述原理和设想为基础,设计基于杠杆原理的铅粘弹性阻尼器,如图 2 所示,包括剪切钢板、固定钢板、外支撑钢板、铅芯、薄钢板、粘弹性橡胶层、转动轴 1、转动轴 2、滑动套孔、连接钢板和铅芯封盖。该阻尼器利用复合弹性体和铅芯共同耗能,内部通过两个轴实现杠杆机制,可将结构产生较小角位移进行放大,使得位移型阻尼器的耗能能力得到最充分的发挥。设计完成后的主要参数如图 3 所示,占用约为 1/4 半径 1 m 圆的面积。

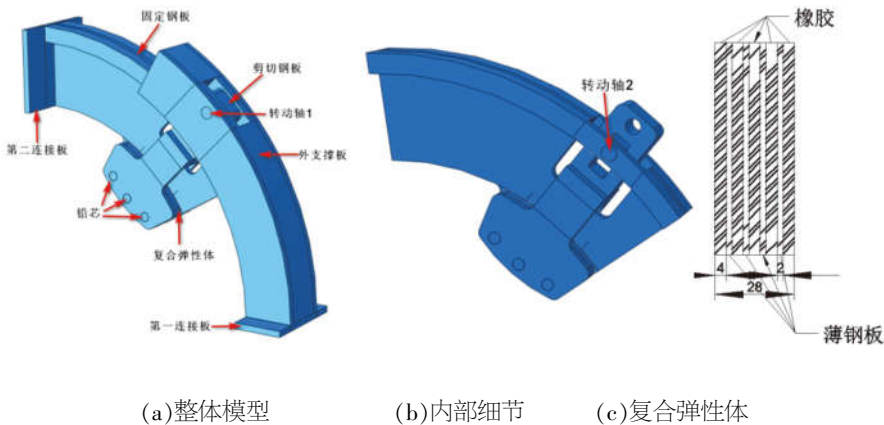


图 2 基于杠杆原理的铅粘弹性阻尼器构造特点

Fig.2 Construction characteristics of lead viscoelastic damper based on lever principle

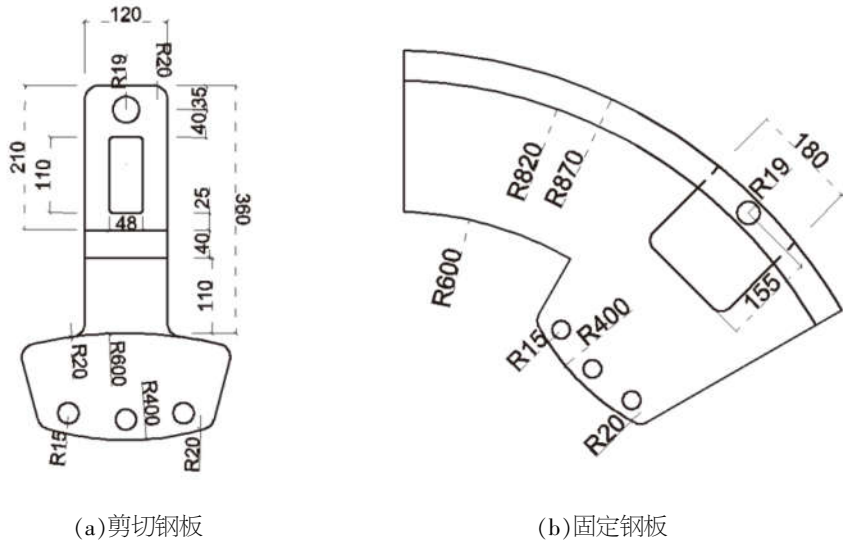


图3 构件主要尺寸(mm)  
Fig.3 Main dimensions of components (mm)

2 有限元模型的建立

选取 ABAQUS 有限元软件建立基于杠杆原理铅粘弹性阻尼器的有限元模型，并开展分析。

(1)单元的选取和划分。整个阻尼器采用三维实体建模，钢板和铅芯材料组成的构件，分析过程中要充分考虑弹塑性和接触性等影响，采用八节点六面体线性减缩积分单元(C3D8R)。橡胶材料具备不可压缩的性质，使用三维 8 节点六面体的杂交单元(C3D8H)来进行模拟。

(2)材料本构。基于杠杆原理铅粘弹性阻尼器中的钢材采用双线性随动强化模型(Kinematic)模

拟，考虑了钢材的包辛格效应其中。转动剪切钢板、固定钢板、连接板和外支撑钢板采用的 Q345 钢，复合弹性体中的薄钢板采用 Q235 钢，弹性模量取为  $E_s=2.06\times10^5$  MPa，泊松比为  $\nu=0.3$ ，切线模量为弹性模量的 2%。

橡胶为硬度为 40 的天然橡胶，采用五常数 Mooney-Rivlin 模型来模拟，其本构模型中的各参数如表 1 所示。

铅芯看作理想弹塑性材料，铅芯的屈服应力为 10.5 MPa，弹性模量 E 为 16.46 GPa，泊松比取 0.42。

表 1 橡胶力学模型 Mooney-Rivlin 本构性能常数(单位:MPa)

Table 1 Constitutive property constants of Mooney Rivlin rubber mechanical model (unit: MPa)

$C_{10}$	$C_{01}$	$C_{20}$	$C_{30}$	$C_{11}$
0.206 01	0.001 857 7	0.004 100 1	0.001 009 2	$2.807\times10^{-5}$

(3)相互作用定义。由于基于杠杆原理铅粘弹性阻尼器由多个构件组装而成，存在大量的相互作用关系，需要在 ABAQUS 中进行准确的定义，这也是整个模拟过程中的关键。

复合粘弹性层与转动剪切钢板是利用工业硫化作用加工而成，采用 Tie 进行模拟；为简化分析，铅芯与转动剪切钢板、固定钢板之间连接也同样采用 Tie 进行模拟；铅芯与复合粘弹性层的薄钢板以及橡胶面之间法向定义为“硬接触”；阻尼器中两处轴的位置，模拟时采用定义铰连接器的

功能实现。

(4)边界条件和加载制度。与阻尼器固定钢板相连的连接板底部施加固接，与外固定支撑板相连的连接板底部采用耦合 (Couping)约束：用于将一个约束控制点(RP)和一个面的运动约束在一起。加载只需要在约束控制点 (RP)上进行。采用位移加载模式，如图 4 所示。

采用上述参数设计，划分单元后的阻尼器模型如图5 所示。

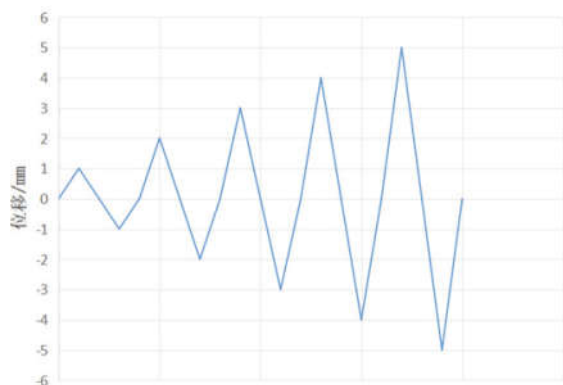


图4 位移加载模式

Fig.4 Displacement loading mode

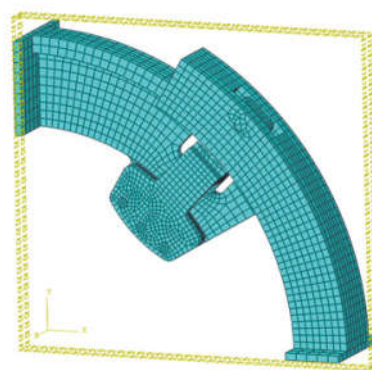


图5 阻尼器有限元模型

Fig.5 Finite element model of damper

### 3 有限元分析结果

(1)耗能能力提升水平。通过建立无放大功能的简单剪切板型阻尼器模型,如图6所示,与基于杠杆原理的铅粘弹性阻尼器相比,仅仅去除放大机构,其余均相同。对两个阻尼器施加相同单

调幅值荷载,力与位移滞回曲线如图7所示,在相同剪切位移幅值作用下基于杠杆原理铅粘弹性阻尼器的耗能为  $981.93 \text{ kN} \cdot \text{mm}$ ,对比模型阻尼器的耗能为  $108.25 \text{ kN} \cdot \text{mm}$ ,是杠杆原理铅粘弹性阻尼器的  $1/9$ ,表明基于杠杆原理铅粘弹性阻尼器能够有效提高阻尼器的耗能效率。

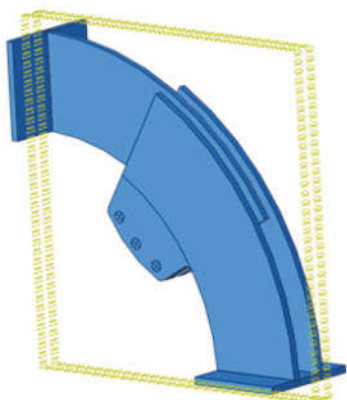


图6 无放大功能的简单剪切板型

Fig.6 Simple shear plate without amplification function

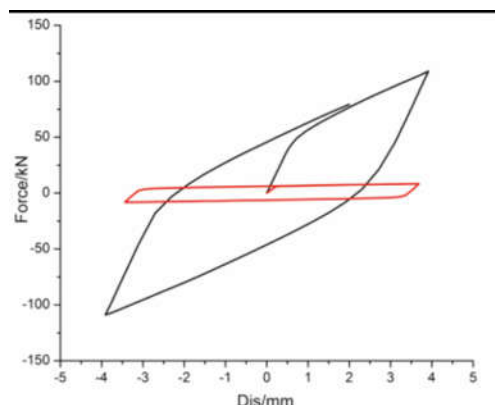


图7 耗能效果滞回曲线对比图

Fig.7 Comparison of hysteretic curve of energy consumption effect

(2)铅芯变形应力分布对比。铅芯是铅粘弹性阻尼器的主要耗能部件,其耗能能力大小主要受铅芯挤压和剪切塑性变形的影响,图8分别是基于杠杆原理的铅粘弹性阻尼器和简单剪切板型的铅粘弹性阻尼器在相同位移下铅芯所产生的变形应力分布图,基于杠杆原理铅粘弹性阻尼器中铅芯所产生剪切变形远大于简单剪切板型铅粘弹性阻尼器中铅芯的剪切变形,阐述了基于杠杆原理的铅粘弹性阻尼器耗能能力更好的原因。图8表明,铅芯与复合弹性体接触两个面都产生完全屈服,而铅芯与固定钢板和剪切钢板接触区域均未

发生屈服,这是由于钢板与铅芯之间形成了一个“套箍”的约束作用。

(3)整体应力分布。基于杠杆原理铅粘弹性阻尼器的耗能构件是铅芯和复合弹性体,但是,要确保阻尼器正常实现耗能,整个阻尼器的其他部分需要足够的强度。阻尼器工作过程中的应力分布情况能够反映各个构件的强度是否足够,并明确阻尼器在工作过程中的薄弱部件,为阻尼器性能的合理设计提供有效的参考。阻尼器在工作过程中的总体应力分布如图9所示,阻尼器外支撑钢板、固定钢板和剪切钢板出现一定区域的应力

集中现象,外支撑钢板的应力最大处主要出现在与连接板的连接处,固定钢板的应力最大处同样也出现在与连接板的连接处,剪切钢板的应力分布如图 9(b)所示,剪切钢板最大应力也是整个阻尼器结构体系的最大应力位置,这是由于剪切钢

板在阻尼器耗能过程中充当杠杆作用,且剪切钢板上部杆处需要开一个长型孔,导致了该处的刚度突变,应力集中。因此,阻尼器工作过程中最薄弱部位为剪切钢板杆轴开孔处。

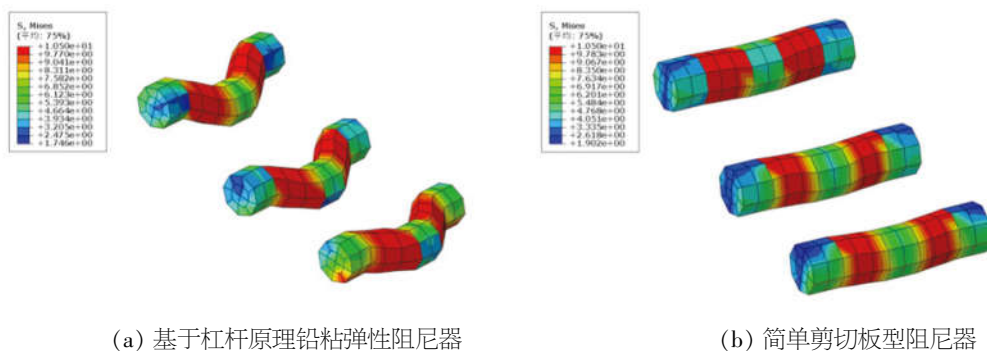


图 8 两个对比模型铅芯应力分布云图

Fig.8 Cloud chart of stress distribution in lead core of two comparison models

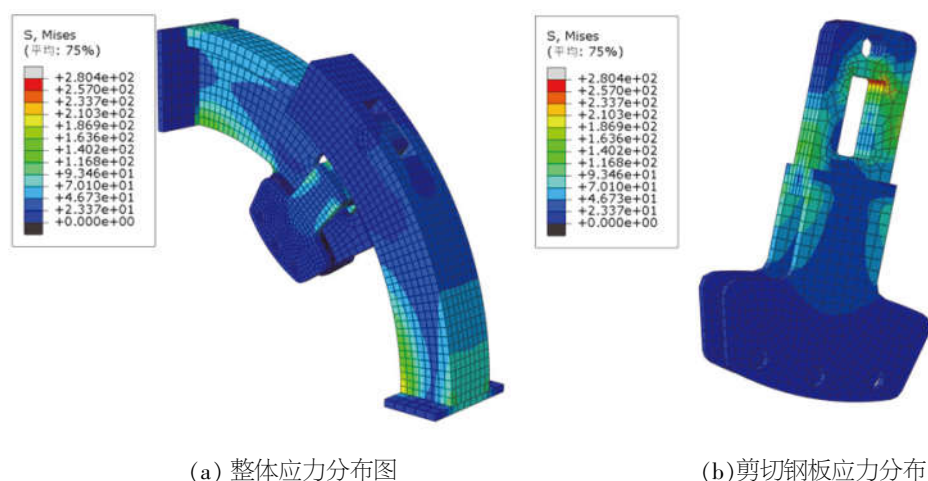


图 9 阻尼器整体和剪切钢板应力分布

Fig.9 Stress distribution of damper and shear steel plate

## 8 结语

基于杠杆原理铅粘弹性阻尼器可对梁柱节点位移进行放大,使得阻尼器的耗能能力得到最充分发挥,得到如下结论:

(1) 杠杆原理铅粘弹性阻尼器的耗能能力是简单剪切板型阻尼器的 9 倍,表明基于杠杆原理铅粘弹性阻尼器能够有效提高阻尼器的耗能效率。

(2) 由于杠杆机制的作用,基于杠杆原理铅粘弹性阻尼器中铅芯所产生剪切变形远大于简单剪切板型铅粘弹性阻尼器中铅芯的剪切变形,进一步阐述了基于杠杆原理铅粘弹性阻尼器耗能能力更好的原因。

(3) 通过研究基于杠杆原理铅粘弹性阻尼器的整体应力分布,表明该阻尼器工作过程中最薄弱部位为剪切钢板杆轴开孔处。

## 参考文献:

- [1] 张玉敏,万永波. 预制剪力墙带缝软钢阻尼器性能有限元分析[J]. 建筑结构,2018,48(S2):691-694.
- [2] 李宏男,钱辉,宋钢兵,等. 一种新型 SMA 阻尼器的试验和数值模拟研究[J]. 振动工程学报, 2008,2(21): 179-184.
- [3] 韩建强,裴亚晖,杨娜,等. 附加角钢与附加阻尼器的预应力装配框架节点试验研究[J]. 建筑结构,2015,45(12):58-60

- [4] 吴霄. 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
- [5] 周云,刘季. 粘弹性阻尼器结构的抗震设计方法 [J].世界地震工程,1996,12(1):23-31
- [6] 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.
- [7] 吴福健,刘文光,郭彦,等. 位移放大型粘弹性阻尼器减震结构地震响应分析方法研究[J]. 工程抗震与加固改造,2017,39(06):62-67+61.
- [8] 赖文龙,陈洋洋,燕乐纬,等. 基于模拟退火算法的高层结构粘滞阻尼器优化布置[J]. 华南地震,2017,37(4):88-93.
- [9] 张纪刚,陶雪,韩永力. 扇形铅橡胶阻尼器滞回性能试验研究[J]. 青岛理工大学学报,2017,38(3):1-9.
- [10] 龚微,熊世树,郑鑫城. 磁流变液阻尼器三级线性变阻尼模型及试验验证[J]. 华南地震,2018,38(2):88-93.
- [11] 张恒.扇形粘弹性阻尼器试验研究与有限元模拟[D]. 北京:中国矿业大学,2018.
- [12] 石菲,邓雪松. 设计参数对铅粘弹性阻尼器力学性能影响的有限元分析[J]. 建筑结构学报,2016,37(1):6-9.
- [13] 明杰婷.橡胶材料粘弹性本构模型的研究及其在胎面橡胶块上的应用[D]. 长春:吉林大学,2016.
- [14] 闫维明,吴军,王宝顺. 大行程筒式铅剪切阻尼器性能的有限元模拟与试验研究[J]. 工程抗震与加固改造. 2017,39(6):58-59.
- [15] 王 维,贾传果,刘天姿,等. 编织式金属阻尼器试验与有限元分析[J]. 建筑结构. 2017,47(S1):664-665.