

位移放大型扭转阻尼器性能分析

颜学渊¹, 冯欢¹, 洪超¹, 张超^{1†}, 毛会敏², 宁响亮³

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116; 2. 福建工程学院 生态环境与城市建设学院, 福建 福州 350118;
3. 株洲时代新材料科技股份有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘要:为了加固梁柱节点、避免框架结构出现“弱节点”的破坏模式、提高框架结构整体的抗震和耗能能力, 研制出一种具有自主知识产权的位移放大型扭转阻尼器(DATD), 并对其数值分析和试验研究。首先, 设计了 18 个具有不同参数的 DATD, 建立其有限元模型进行数值分析; 随后, 设计并制作了一个 DATD, 进行性能试验并与有限元分析结果对比。结果表明: DATD 滞回曲线饱满, 耗能能力强; 有限元分析与性能试验的滞回曲线吻合较好, 且随着加载位移的增加, 两者间误差变小, 因此可以采用建立的有限元模型来研究 DATD 的力学性能。最后, 对 DATD 进行参数影响分析, 研究了铅芯直径、铅芯距中轴距离、橡胶层直径、橡胶层厚度及橡胶剪切模量对其特征参数的影响, 结果表明: DATD 的屈服剪力、等效刚度、等效阻尼比及耗能系数随着铅芯直径增大而明显增大, 随着铅芯距中轴距离的增大略有增大; 随着橡胶层直径、橡胶剪切模量的增大, 屈服剪力及等效刚度逐渐增大而耗能系数及等效阻尼比逐渐减小; 4 个特征参数均随着橡胶层厚度的增大而略微减小。

关键词:结构抗震; 位移放大型扭转阻尼器; 有限元分析; 性能试验; 参数分析

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

Performance Analysis of Displacement-amplified Torsion Damper

YAN Xueyuan¹, FENG Huan¹, HONG Chao¹, ZHANG Chao^{1†}, MAO Huimin², NING Xiangliang³

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2. College of Ecological Environment and Urban Construction, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

3. Zhuzhou Times New Material Technology Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China)

Abstract: In order to strengthen beam-column joints, avoid the failure mode of "weak joints" in frames and improve the overall seismic and energy consumption capacity of frame structures, a displacement-amplified torsion damper (DATD) with independent intellectual property rights is developed. Numerical analysis and experimental study of DATD were carried out. Firstly, a total of 18 models of DATD with different parameters were designed and their finite element models were established, and then numerical analyses were performed. Then a DATD was designed and manufactured. The results of finite element analysis were verified by performance tests. The results show that the DATD has full hysteretic curve and strong energy dissipation capacity. The hysteretic curves of finite element analysis and performance test are in good agreement, and with the increase of loading displacement, the difference be-

* 收稿日期: 2020-11-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578160), National Natural Science Foundation of China(51578160); 福州市科技计划项目(2021-Y-082), Fuzhou Science and Technology Plan Project(2021-Y-082)

作者简介: 颜学渊(1982—), 男, 福建永春人, 福州大学教授, 博士生导师

† 通信联系人, E-mail: zhangchao1985@fzu.edu.cn

tween them decreases. So, the finite element model established in this paper can be used to study the mechanical properties of DATD. Finally, the parameter influence analysis of DATD was performed, the influences of the diameter of the lead core, the distance between the lead core and the central axis, the diameter of the rubber layer, the thickness of the rubber layer and the rubber shear modulus on its characteristic parameters were studied. The results show that the yield shear force, equivalent stiffness, equivalent damping ratio and the energy dissipation coefficient of DATD increase obviously with the increase of the diameter of the lead core, and increase slightly with the increase of the distance between the lead core and the central axis. With the increase of the diameter of the rubber layer and rubber shear modulus, the yield shear force and equivalent stiffness gradually increase, while the energy dissipation coefficient and equivalent damping ratio gradually decrease. The four characteristic parameters all decrease slightly with the increase of the thickness of the rubber layer.

Key words: structural earthquake-resistance; displacement-amplified torsion damper (DATD); finite element analysis; performance test; parameter analysis

在地震作用下,地震中的水平力会对框架结构中的节点核心区产生很大的水平剪力,导致其产生剪切脆性破坏^[1].通过在结构某些部位安装消能构件或耗能阻尼器来耗散地震能量,消能减震的效果较好,且耗能阻尼器独立于结构之外,安装拆卸方便,价格一般不高,因而应用广泛.国内外学者对耗能阻尼器进行了许多研究,复合型阻尼器已成为阻尼器发展的一个重要方向.

周云等^[2]对 2 个复合型铅黏弹性阻尼器进行性能试验,结果表明可考虑用强化的双线性模型来描述其恢复力模型.颜学渊等^[3]开展了钢铅复合阻尼器(CSLD)的性能试验和振动台试验,结果表明采用 CSLD 可显著降低结构层间位移和加速度响应.进一步地,颜学渊等^[4]对改进的新型钢铅组合耗能器(NCSLD)进行了力学性能试验,并对耗能器几何参数进行优选. Ibrahim 等^[5]提出一种能放大应变的新型黏塑性阻尼器(VPD),在低振动水平下仅放大轴向应变,而在中到强振动水平下还能增加能量耗散.陈云等^[6]提出一种新型耗能增强型 SMA 阻尼器,并推导出其恢复力模型,验证了该阻尼器在结构中的减震效果. Silwal 等^[7-8]提出一种超弹性黏性阻尼器(SVD),并对安装了 SVD 的钢框架结构的抗震性能进行了模拟研究,结果表明 SVD 能有效减小地震动力响应、提高钢框架结构承载力. Zhong 等^[9]提出了一种利用磁流变效应来补偿黏弹性材料热软化效应的新型黏弹性阻尼器,试验结果表明这种阻尼器能在各种温度条件下保持最佳的耗能性能.徐昕^[10]提出一种新型扇形铅黏弹性阻尼器(SLVD),其模拟分析

和试验表明,SLVD 能改善梁柱节点的抗震性能.张纪刚等^[11]提出一种基于位移放大器的扇形铅黏弹性阻尼器,对位移放大器的放大系数进行计算验证.颜学渊等^[12]提出了一种铅挤压摩擦复合阻尼器(LEFCD),其具有分阶段耗能的特点,通过试验及有限元分析验证了其耗能性能.蒋欢军等^[13]提出一种带 O 型钢板-黏弹性复合阻尼器的可更换连梁,通过对带可更换连梁的超高层结构在风荷载和地震作用下的反应进行分析,验证了该连梁的效果.

综上,尽管学者们对复合型阻尼器进行了一些研究,但这些阻尼器大多无法直接应用于梁柱节点来减少梁柱转角相对位移并且在小位移下耗能效果不好;开发出能放大位移、提高耗能效果并且能应用到梁柱节点上的新型复合型阻尼器是消能减震研究的重点.因此,本文提出了一种用于梁柱节点并具有位移放大作用的位移放大型扭转阻尼器(DATD),通过对 DATD 进行数值模拟及性能试验,对有限元模型进行参数分析以研究各参数对阻尼器性能的影响.

1 DATD 阻尼器设计

DATD 由高阻尼橡胶、钢材、铅等材料组成.其构造如图 1 所示,主要包括 2 个传动钢臂、2 个齿轮圆柱、3 块圆形钢板、2 片高阻尼橡胶层、4 个铅芯;钢板与橡胶接触面之间硫化粘连;阻尼器整体上下对称,用 4 个铅芯柱贯通;齿轮圆柱直径小于圆形钢板,通过调整其相对大小,达到位移放大的目的;上

下两层圆形钢板底下均有一圆柱突起,嵌入中间圆形钢板凹槽内,相当于有个扭转支点,实现上下两层圆形钢板绕扭转支点扭转的目的。

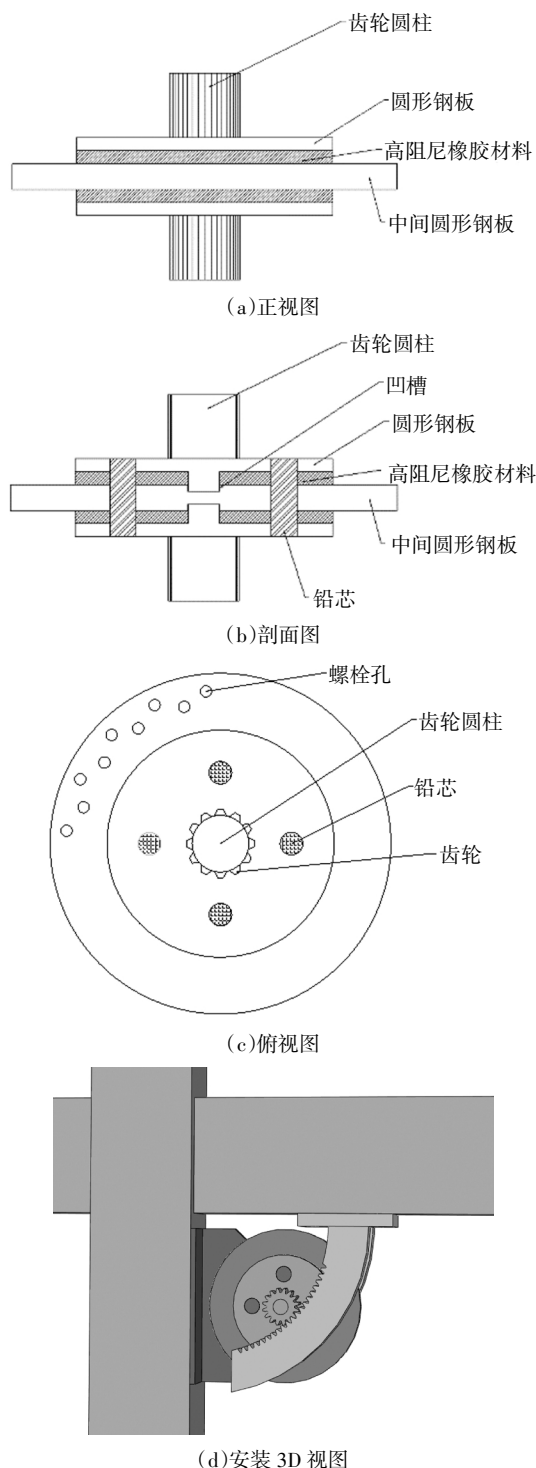


图 1 DATD 各视图

Fig.1 Each view of DATD

该阻尼器可放置于梁柱节点处,通过同心圆原理来放大地震作用下梁柱的微小位移,从而起到很好的消能减震效果.当梁柱发生角位移时,带动相连

的传动臂发生转动,传动臂带动上下齿轮圆柱和上下圆形钢板以其下表面圆柱突起为支点相对中间圆形钢板扭转,进而剪切高阻尼橡胶和铅芯,起到耗能的效果,耗能核心部件是铅芯和高阻尼橡胶材料。

2 有限元模型

2.1 有限元模型参数

本文依据抗震规范中梁端箍筋加密区长度的规定范围^[14-15]和阻尼器的构造特点,设计了 18 个具有不同铅芯直径、铅芯距中轴线距离、高阻尼橡胶层直径与厚度、橡胶剪切模量的位移放大型扭转阻尼器模型.表 1 给出了这 18 个阻尼器的几何参数.建立其有限元模型并分析各参数对阻尼器性能的影响.为方便书写,将这些阻尼器标记为“YX-*i*”,“YX”代表“圆形”,“*i*”代表数字编号,具体参见表 1.

2.2 有限元模型的建立

2.2.1 模型简化

在有限元分析中,为便于建模分析,做如下简化:①省略弧形传动钢臂;②将两端齿轮圆柱转动的方式变为中间圆形钢板转动(性能试验时,也采用这一加载方式);③将 3 块圆形钢板视为刚体。

2.2.2 模型建立

分别创建各个部件的实体模型,并进行装配.将钢板进行刚体处理,橡胶层定义为超弹性体,铅芯按不同接触材料划分成 5 个部分,并在中轴线上选取一个参考点 RP1 与中间圆形钢板通过刚体约束绑定,如图 2 所示。

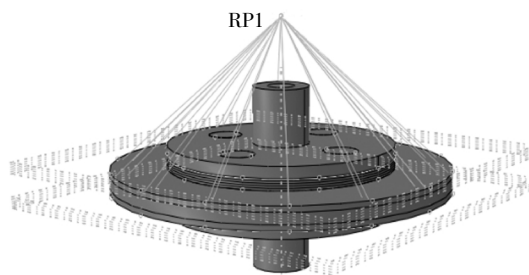


图 2 DATD 实体模型以及参考点 RP1 的设置

Fig.2 Model of DATD and the setting of reference point RP1

2.2.3 材料本构

采用的钢材为弹塑性材料,取弹性模量 $E_s = 2.06 \times 10^5$ MPa,泊松比 $\mu = 0.3$.铅芯可以认为是理想弹塑性材料^[16],屈服应力取 10.5 MPa,弹性模量 E_s 取 16.5 GPa,屈服后切线模量为 0 MPa,泊松比 μ 为 0.42.采用五常数 Mooney-Rivlin 模型选取橡胶材料

表 1 有限元模型几何参数
Tab.1 Geometric parameters of finite element simulation models

阻尼器 编号	齿轮圆 柱半径 r_1/mm	橡胶层 半径 r_2/mm	中间圆形 钢板半径 R/mm	上下圆形 钢板厚度 h_{s1}/mm	中间圆形 钢板厚度 h_{s2}/mm	橡胶层 厚度 h_r/mm	铅芯距 中轴距离 a_i/mm	铅芯 直径 Φ/mm	橡胶剪 切模量 G_r/MPa
YX-1	50	200	300	20	40	20	115	40	0.41
YX-2	50	200	300	20	40	20	125	40	0.41
YX-3	50	200	300	20	40	20	135	40	0.41
YX-4	50	200	300	20	40	20	115	50	0.41
YX-5	50	200	300	20	40	20	125	50	0.41
YX-6	50	200	300	20	40	20	135	50	0.41
YX-7	50	200	300	20	40	20	115	60	0.41
YX-8	50	200	300	20	40	20	125	60	0.41
YX-9	50	200	300	20	40	20	135	60	0.41
YX-10	50	220	300	20	40	20	125	60	0.41
YX-11	50	240	300	20	40	20	125	60	0.41
YX-12	50	260	300	20	40	20	125	60	0.41
YX-13	50	200	300	20	40	20	125	60	0.31
YX-14	50	200	300	20	40	20	125	60	0.41
YX-15	50	200	300	20	40	20	125	60	0.51
YX-16	50	200	300	20	40	20	125	60	0.61
YX-17	50	200	300	20	40	15	125	60	0.41
YX-18	50	200	300	20	40	25	125	60	0.41

的参数,5 个力学性能常数: C_{10} 取 $2.060\ 1\times 10^{-1}$, C_{01} 取 $1.857\ 7\times 10^{-3}$, C_{20} 取 $4.100\ 1\times 10^{-3}$, C_{30} 取 $2.807\ 0\times 10^{-5}$, C_{11} 取 $1.009\ 2\times 10^{-3}$; 橡胶材料的 E 与材料常数的关系式是 $E=6(C_{01}+C_{10})$,因此弹性模量 $E=1.24\ \text{MPa}$, 剪切模量 $G=E/3=0.41\ \text{MPa}$,泊松比 μ 为 $0.499\ 7^{[17]}$.

2.2.4 单元选择

钢板和铅芯材料均采用 C3D8R 单元,该单元对位移的求解计算结果较精确,对于橡胶材料采用 C3D8H 单元来模拟^[18].

2.2.5 接触定义

由于铅芯与不同的材料均有接触,故划分成 5 个部分.与圆形钢板接触采用的是面与面的 Tie 接触,将经刚体处理的圆形钢板接触面设为主面,铅芯接触面设为从面.铅芯和橡胶接触面间设置相互作用,在法向方向采取“硬接触”,在切向方向采取库伦摩擦形式,摩擦因数取 0.5.将两个齿轮圆柱上下的边界条件设为完全固接,荷载直接施加在与中间钢板绑定的参考点 RP1 上.

2.2.6 网格划分

由于 DATD 上下左右均对称,网格划分方式为扫略网格.对于上下圆形钢板,全局种子尺寸为 15,局部种子近似单元尺寸为 15.对于中间圆形钢板,全局种子尺寸为 12,局部种子近似单元尺寸为 12.对于橡胶层,全局种子尺寸为 5,局部种子近似单元尺寸为 10.而对于铅芯,全局种子尺寸为 5,局部种子近似单元尺寸为 5,网格划分后的阻尼器如图 3 所示.

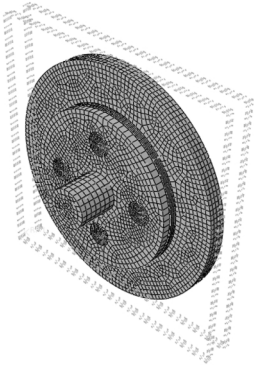


图 3 DATD 模型网格划分
Fig.3 Meshing of the model of DATD

2.2.7 约束和加载制度

将 DATD 两端固定住,对参考点 RP1 施加转角位移,设置 20 个分析步,每个循环加载的转角位移幅值分别为 0.008、0.016、0.032、0.048、0.064,单位为 rad,如图 4 所示。

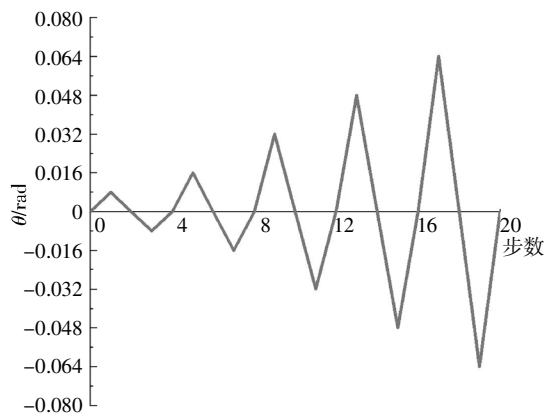


图 4 转角位移加载曲线

Fig.4 Loading curve of the angular displacement

3 有限元分析验证

3.1 性能试验概况

考虑到梁柱尺寸的大小以及阻尼器模具制作等因素,设计并加工 1 个 DATD 试件,试件几何尺寸与表 1 中模型 YX-15 相同. 采用的高阻尼橡胶由湖南株洲时代新材料科技股份有限公司提供, 剪切模量为 0.47 MPa; 钢材均采用 Q345; 铅芯使用一般铅材料; 钢板与橡胶层之间高温高压硫化. 选择 MTS 电液伺服试验机作为加载设备. 为了便于得到阻尼器整体的性能以及考虑到实验器材的使用方式, 采用与数值模拟方式相同的中间钢板转动的加载方式. 另外加工了一个基座用以固定阻尼器、一个直条齿轮传动杆与试验机的作动器连接, 并在基座上焊接限位板以保证竖直受力. 采用低周反复加载的方法, 在竖直方向上使用 MTS 电液伺服试验机加载, 试验装置如图 5 所示。

试验加载频率为 0.02 Hz, 加载位移分别为 1 mm、2.5 mm、5 mm、10 mm、15 mm, 使用正弦位移激励下循环 3 圈, 试验过程中实时采集荷载值和加载位移数据. 当试验加载到 15 mm 加载幅值时, 橡胶层向内收缩, 呈现类似轻微“麻花”叠层状, 可明显看到位移放大型扭转阻尼器中间圆形钢板带动高阻尼橡胶层对铅芯进行往复剪切, 圆形钢板与橡胶层接缝处粘连溢出的橡胶剥落, 有些地方出现细微裂缝, 但阻尼器并未发生破坏。



图 5 DATD 性能试验

Fig.5 Performance test of DATD

3.2 试验与模拟对比

有限元分析得到的滞回曲线与试验所得的滞回曲线对比见图 6. 由图可见: 1) 模拟与试验所得的滞回曲线均饱满且有规律, 体现了良好的滞回耗能性能. 模拟滞回曲线关于原点对称, 试验值呈上小下大的状态, 这是由于试验中限位板与直条齿不完全平行, 下压时有作用力. 2) 在小位移幅值下, 试验的承载力明显小于模拟值, 其滞回环面积也相差较大, 随着位移幅值的增大, 试验和模拟的结果逐渐接近, 滞回曲线逐渐吻合, 这是由于在小位移时铅芯和剪切钢板及约束橡胶的接触滞后造成的. 3) 试验所得的滞回曲线在大位移下会出现承载力骤然增大的现象, 这是由于采用的高阻尼橡胶在较大位移下扭转收缩会造成刚度的增加, 而模拟并未考虑到这种强化效应; 因为在较大位移角 (约 0.05 rad) 才发生强化效应, 所以在结构弹塑性层间位移角限值内不考虑这种强化效应完全满足要求。

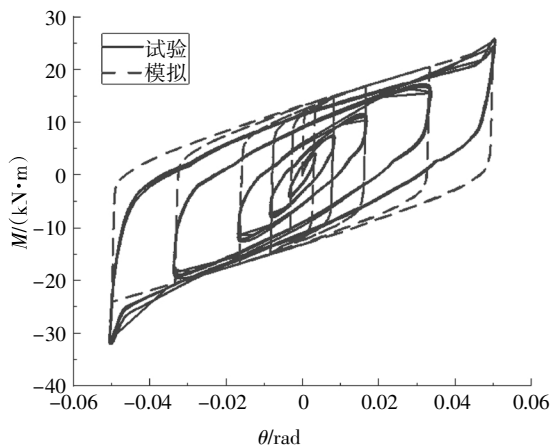


图 6 试验与模拟滞回曲线对比

Fig.6 Comparison of the hysteretic curves of experiment and simulation

综上, 有限元分析与试验所得的滞回曲线吻合

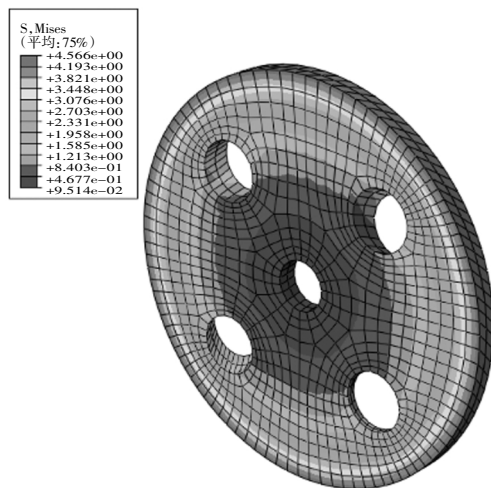
较好,且随着加载位移的增加,两者差值缩小.因此,本文建立的有限元模型及模拟分析方法可行,可以用来研究位移放大型扭转阻尼器的力学性能.

3.3 铅芯和橡胶受力状态

图 7 给出了有限元分析结果中铅芯及橡胶应力云图.从图中可看出铅芯与中间钢板接触的区域绕着阻尼器中轴旋转从而剪切铅芯耗能,从橡胶层边缘网格变形可看出橡胶层发生明显的扭转,应力呈环形规律分布,最外圈应力最大.



(a) 铅芯应力云图



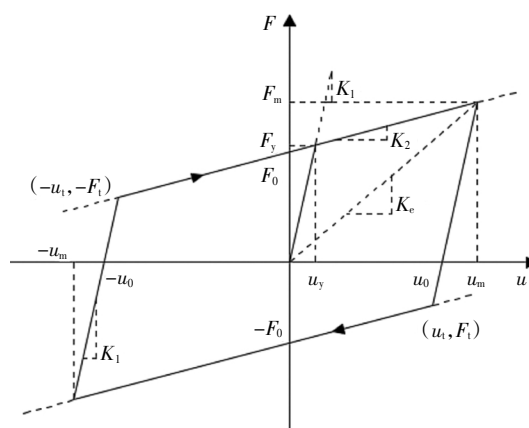
(b) 橡胶层应力云图

图 7 铅芯和橡胶应力云图

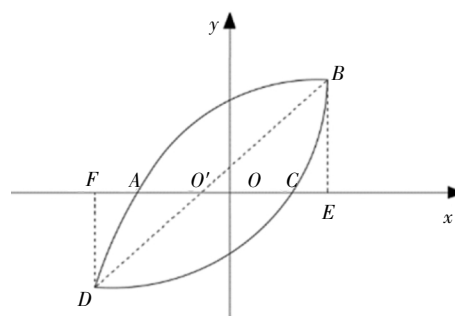
Fig.7 Stress cloud diagram of lead and rubber

3.4 特征参数的计算方法

位移放大型扭转阻尼器耗能机制是铅与高阻尼橡胶剪切耗能,其力学特性可用双线性力学模型来表示.通过有限元分析可得到阻尼器的滞回曲线,根据力学模型及滞回曲线计算阻尼器的各特征参数,如图 8 所示,计算公式如下.



(a) 双线性力学模型



(b) 滞回曲线示意图

图 8 特征参数计算方法示意图

Fig.8 Schematic diagram for calculating characteristic parameters

初始刚度:

$$K_1 = \frac{F_y}{u_y} \quad (1)$$

屈服后刚度:

$$K_2 = \frac{F_m - F_y}{u_m - u_y} \quad (2)$$

等效刚度:

$$K_e = K_1 \left(\frac{1-\alpha}{\mu} + \alpha \right), \alpha = \frac{K_2}{K_1}, \mu = \frac{u_m}{u_y} \quad (3)$$

耗能系数:

$$\psi = \frac{S_{(ABC+CDA)}}{S_{(O'BE+O'DF)}} \quad (4)$$

等效阻尼比:

$$\zeta_{eq} = \frac{S_{(ABC+CDA)}}{2\pi S_{(OBE+ODF)}} \quad (5)$$

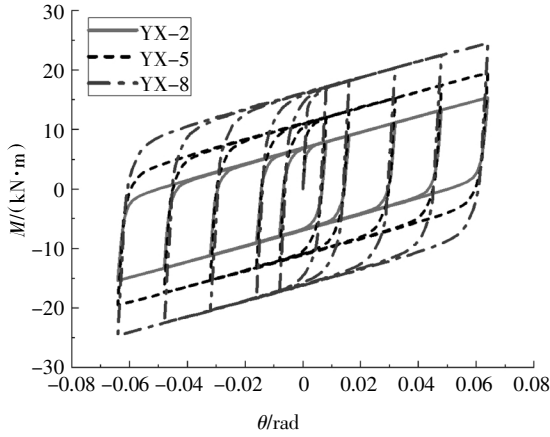
式中: S 表示面积.

4 阻尼器性能参数影响分析

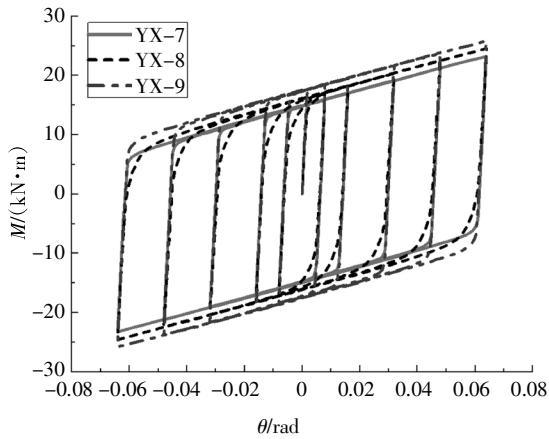
4.1 铅芯的影响

与铅芯有关的影响参数有 2 个: 铅芯直径和铅芯距中轴距离. 在其他参数一样的前提下, 分别设计了铅芯距中轴距离为 115 mm、125 mm、135 mm 和铅

芯直径为 40 mm、50 mm、60 mm 的 9 个构件 (YX-1 YX-9), 部分构件滞回曲线对比如图 9 所示.



(a) 不同铅芯直径下 $M-\theta$ 滞回曲线对比



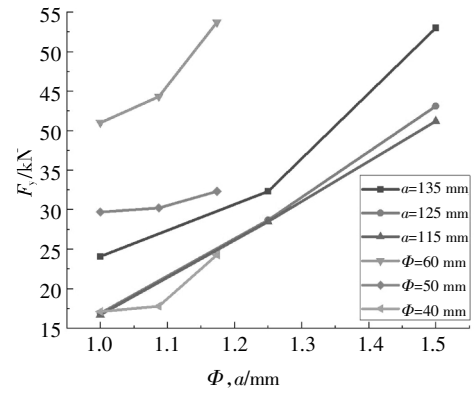
(b) 不同铅芯距中轴距离下 $M-\theta$ 滞回曲线对比

图 9 铅芯影响参数下 $M-\theta$ 滞回曲线对比

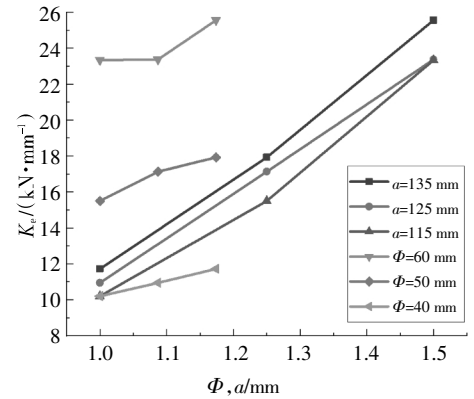
Fig.9 Comparison of the $M-\theta$ hysteresis curves under different lead core parameters

通过不同铅芯直径的 YX-2 (40 mm)、YX-5 (50 mm)、YX-8 (60 mm) 滞回曲线对比可发现, 大直径铅芯的滞回环包裹小直径铅芯的滞回环, 滞回环面积随着铅芯直径的增大明显增大, 大直径铅芯的阻尼器耗能能力较强. 由不同铅芯距中轴距离的 YX-7 (115 mm)、YX-8 (125 mm)、YX-9 (135 mm) 滞回曲线对比可知, 铅芯距中轴距离大的滞回环同样包裹小直径铅芯的滞回环, 滞回环面积随着铅芯距中轴距离的增大略有增大. 由此可见, 铅芯直径对阻尼器耗能性能的影响大于铅芯距中轴距离.

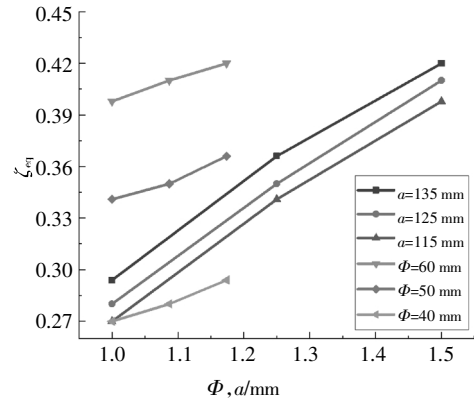
图 10 给出了位移放大型扭转阻尼器三组设计构件在 $\theta = 0.064$ rad 转角幅值下, 屈服剪力 (F_y)、等效刚度 (K_e)、等效阻尼比 (ζ_{eq}) 和耗能系数 (Ψ) 随铅芯直径及铅芯距中轴距离的变化趋势, 其中横坐标进



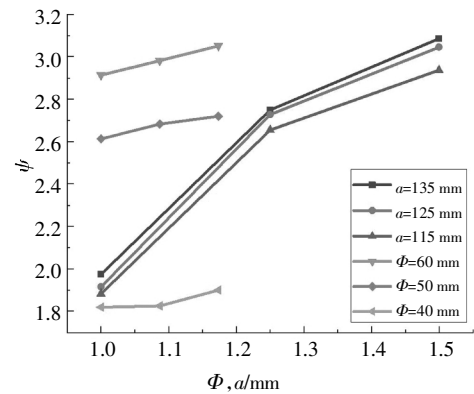
(a) F_y 随铅芯直径 Φ 及铅芯距中轴距离 a 变化



(b) K_e 随铅芯直径 Φ 及铅芯距中轴距离 a 变化



(c) ζ_{eq} 随铅芯直径 Φ 及铅芯距中轴距离 a 变化



(d) Ψ 随铅芯直径 Φ 及铅芯距中轴距离 a 变化

图 10 特征参数随铅芯直径及铅芯距中轴距离变化

Fig.10 Changes of characteristic parameters with the diameter and distance from the central axis of the lead core

行了标准化. 从图 10(a)中可看出屈服剪力随着铅芯直径及铅芯距中轴距离的增大而增大, 其中铅芯直径的影响更为明显; 在铅芯距中轴距离为 125 mm 时, 铅芯直径 40 mm、50 mm、60 mm 所得的屈服剪力分别为 16.9 kN、28.7 kN、43.1 kN, 直径为 60 mm 的比 50 mm、40 mm 分别增大了 50.17% 和 155%. 图 10(b)表明随着铅芯直径及距中轴距离的增大, 等效刚度同样增大, 变化规律与屈服剪力类似. 从图 10(c)和(d)可看出随着铅芯直径及距中轴距离的增大, 等效阻尼比及耗能系数均增大, 且随着铅芯直径变化更明显. 其中, 当铅芯直径为 50 mm 时, 铅芯距中轴距离从 115 mm 增大到 135 mm, 其耗能系数由 2.61 增大到 2.72, 增幅仅有 4%; 而在铅芯距中轴距离为 125 mm 时, 铅芯直径从 40 mm 增大到 60 mm, 耗能系数由 1.92 增大到 3.05, 增幅为 58.9%.

综上, 铅芯直径与铅芯距中轴距离对其耗能性能及各项特征参数均有影响, 随着铅芯直径与铅芯距中轴距离的增大, 滞回曲线愈发饱满, 滞回环面积逐渐增大, 耗能增多, 等效阻尼比及耗能系数等参数也随之增大. 总体来看, 耗能性能和各项特征参数受铅芯直径的影响大于铅芯距中轴距离的影响.

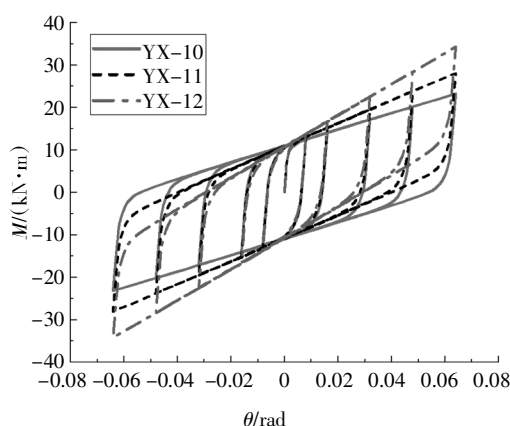
4.2 高阻尼橡胶层的影响

与高阻尼橡胶层有关的影响参数有 3 个: 橡胶层直径、橡胶层厚度和橡胶剪切模量.

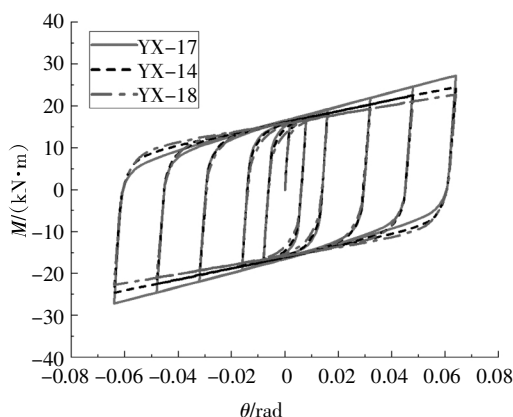
4.2.1 橡胶层直径和厚度的影响

在其他参数相同的前提下, 设计了 3 个橡胶层直径分别为 440 mm、480 mm、520 mm (YX-10、YX-11、YX-12) 和 3 个橡胶层厚度分别为 15 mm、20 mm、25 mm (YX-17、YX-14、YX-18) 的阻尼器. 图 11 给出了不同橡胶层直径和厚度对阻尼器性能的影响.

通过不同橡胶层直径的 YX-10 (440 mm)、YX-11 (480 mm)、YX-12 (520 mm) 滞回曲线对比可发现, 滞回环面积基本上没有明显变化, 橡胶层直径的增大使得滞回环的倾斜度增大, 滞回环整体逐渐上扬, 橡胶层直径大的阻尼器的承载力更大. 而不同橡胶层厚度的 YX-17 (15 mm)、YX-14 (20 mm)、YX-18 (25 mm) 滞回曲线对比可发现, 滞回环面积相差较小, 但橡胶层厚度大的滞回环的倾斜度变小, 阻尼器的承载力变小. 从整体上看, 增加橡胶层直径和减小橡胶层厚度会使滞回曲线绕原点逆时针旋转相应的角度, 其中橡胶层直径的影响更为显著.



(a) 不同橡胶层直径下 $M-\theta$ 滞回曲线对比



(b) 不同橡胶层厚度下 $M-\theta$ 滞回曲线对比

图 11 橡胶层不同直径及厚度下 $M-\theta$ 滞回曲线对比

Fig.11 Comparison of the $M-\theta$ hysteretic curves under different diameter and thickness of rubber layer

图 12 给出了位移放大型扭转阻尼器构件在 $\theta=0.064$ rad 转角幅值下, 屈服剪力、等效刚度、等效阻尼比和耗能系数随橡胶层直径及厚度的变化趋势. 从图 12(a)和(c)可知, 屈服剪力、等效刚度均随着橡胶层直径的增大而增大, 随着橡胶层厚度的增大而减小. 橡胶层直径由 400 mm 增大到 520 mm, 屈服剪力提高了 49.2%, 等效刚度增大了 10.4%; 橡胶层厚度从 15 mm 增大到 25 mm, 屈服剪力减小了 11.3%, 等效刚度减小 6.7%. 可以看出, 屈服剪力及等效刚度受橡胶层直径影响大于受橡胶层厚度的影响, 且屈服剪力的变化比等效刚度更明显. 从图 12(b)和(d)可知, 等效阻尼比和耗能系数均随橡胶层直径和厚度的增大而减小. 橡胶层直径为 400 mm 和 520 mm 时, 等效阻尼比由 0.46 减小为 0.38, 减幅为 17.4%, 耗能系数由 0.48 减小为 0.38, 减幅为 20.8%; 橡胶层厚度从 15 mm 增大到 25 mm, 等效阻尼比减小 5.3%, 耗能系数减小了 8.6%. 对比可知, 等效阻尼比及耗能系数受橡胶层直径变化的影响大于受橡胶层厚度的影响.

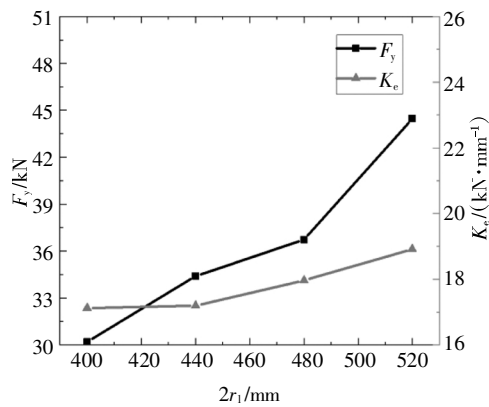
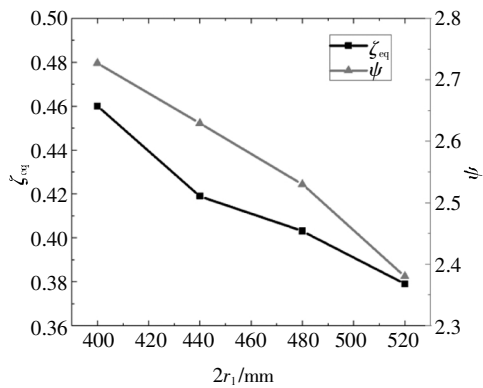
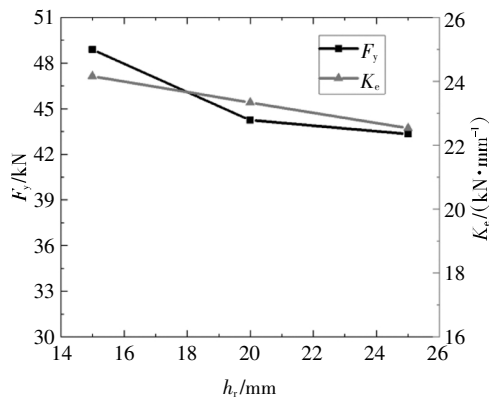
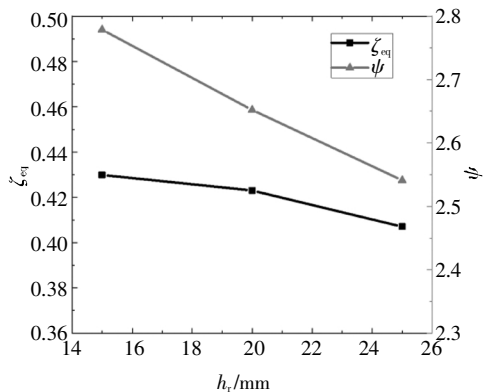
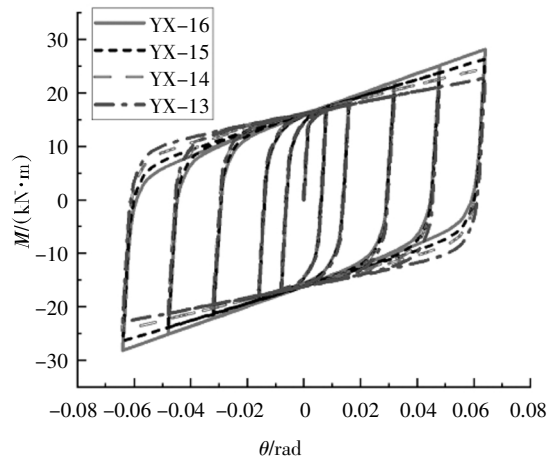
(a) F_y 及 K_e 随橡胶层直径变化(b) ζ_{eq} 及 ψ 随橡胶层直径变化(c) F_y 及 K_e 随橡胶层厚度变化(d) ζ_{eq} 及 ψ 随橡胶层厚度变化

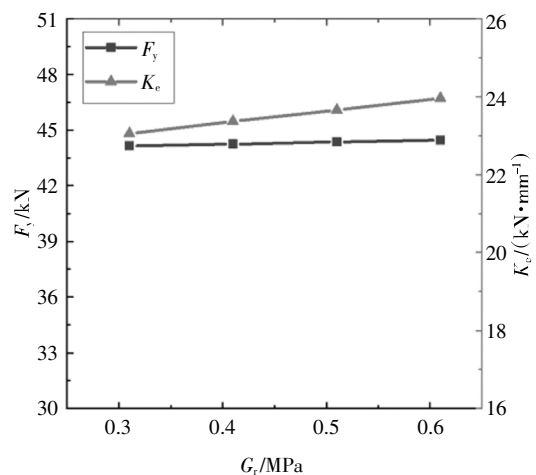
图 12 特征参数随橡胶层直径及厚度变化
Fig.12 Changes of characteristic parameters with the diameter and thickness of the rubber layer

4.2.2 橡胶剪切模量的影响

在其他参数相同的前提下,设计了 4 个橡胶剪切模量分别为 0.31 MPa、0.41 MPa、0.51 MPa、0.61 MPa(YX-13~YX-16)的构件.图 13 给出了具有不同橡胶剪切模量的阻尼器的滞回曲线,以及在 $\theta=0.064$ rad 转角幅值下,屈服剪力、等效刚度、等效阻尼比与耗能系数随橡胶剪切模量的变化趋势.由图 13(a)可发现,滞回环面积基本上没有明显的变化,随着橡胶剪切模量增大,滞回环的倾斜度增大,滞回环会逐渐上扬,橡胶剪切模量大的阻尼器的承载力更大,但增幅不大.综上,橡胶剪切模量对滞回环面积影响较小,滞回环形状相似,相当于滞回曲线绕原点旋转了相应的角度.从图 13(b)可发现,屈服剪力、等效刚度均随着橡胶弹性模量的增大而稍有增大,但增大得不明显.从图 13(c)可知等效阻尼比和耗能系数均随橡胶剪切模量的增大而略有减小.等效阻尼比大致在 41.21%~42.70% 范围内,耗能系数在 2.59~2.68 范围内,变化幅度均很小.



(a) 不同橡胶剪切模量的滞回曲线

(b) F_y 及 K_e 随橡胶剪切模量变化

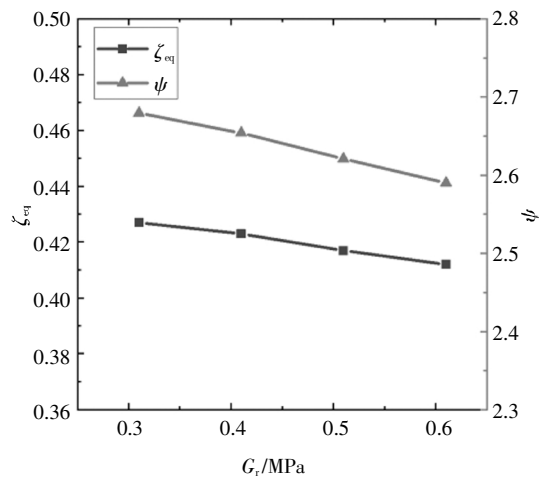
(c) ζ_{eq} 及 ψ 随橡胶剪切模量变化

图 13 不同橡胶剪切模量的滞回曲线及

特征参数随橡胶剪切模量变化

Fig.13 Hysteretic curves and changes of characteristic parameters with the shear modulus of the rubber

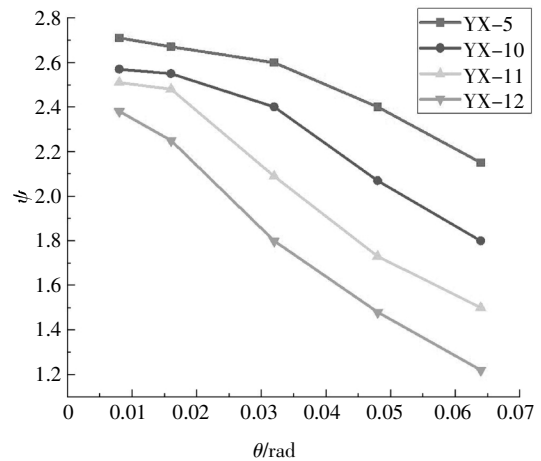
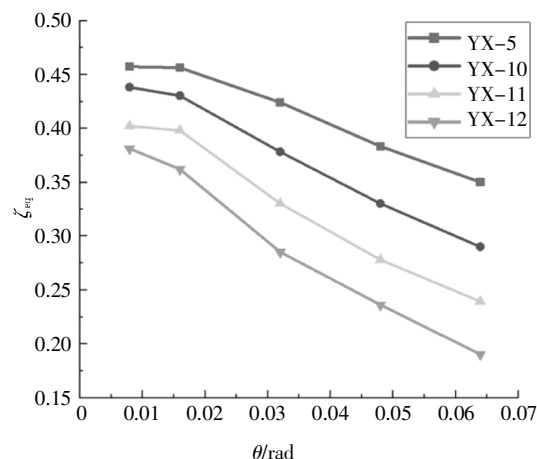
(b) ψ 随角位移幅值变化

图 14 特征参数随角位移幅值变化

Fig.14 Changes of characteristic parameters with the angular displacement amplitude

4.3 角位移幅值的影响

选取 YX-5、YX-10、YX-11 和 YX-12 这四个构件来研究转角幅值对耗能系数和等效阻尼比的影响. 图 14 给出了等效阻尼比和耗能系数随角位移幅值的变化规律, 从图 14 可发现, 等效阻尼比和耗能系数与转角幅值整体呈负相关关系, YX-5 的耗能系数由 2.73 减小至 2.18, 各级转角幅值的减幅分别为 1.47%、4.09%、6.59%、9.54%, 减幅随着角位移幅值增大而增大, 等效阻尼比也由 45.4% 减小到 35.0%, 减幅为 22.9%. 综上, 这 2 个特征参数均随着转角幅值的增大而减小.

(a) ζ_{eq} 随角位移幅值变化

5 结论

本文提出一种位移放大型扭转阻尼器, 介绍了阻尼器的组成, 对其进行循环加载试验和数值分析, 得到如下结论:

1) 位移放大型扭转阻尼器充分利用了铅与橡胶剪切变形两种耗能机制协同工作, 滞回曲线饱满, 耗能能力强. 数值分析和试验结果对比表明, 采用 ABAQUS 软件进行有限元建模分析能够较好地模拟位移放大型扭转阻尼器的性能.

2) 铅芯直径对 DATD 的耗能性能影响显著, 增大铅芯直径能有效地增大滞回环面积, 增加阻尼器耗能, 其屈服剪力、等效刚度、等效阻尼比及耗能系数也明显增大. 铅芯距中轴距离对阻尼器耗能有一定影响, 随着铅芯距中轴距离的增大, 滞回环面积有一定的增大但不显著, 其各项特征参数均有一定的增大.

3) 橡胶层的直径、厚度及剪切模量对阻尼器滞回环面积的影响均不大, 但对各项特征参数具有一定的影响. 其屈服剪力及等效刚度随着橡胶直径的增大明显增大, 随着橡胶层厚度的增大而略有减小, 随着橡胶剪切模量增大稍有增大; 等效阻尼比及耗能系数随着橡胶层直径、厚度及剪切模量的增大均略有减小.

4) 当转角位移幅值为 0.064 rad 以内时, 随着转角位移幅值的增大, DATD 的耗能系数和等效阻尼比逐渐减小.

参考文献

- [1] 丰定国,王社良. 抗震结构设计[M]. 武汉:武汉工业大学出版社,2001:151—153.
FENG D G, WANG S L. Design of seismic structural [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2001: 151—153. (In Chinese)
- [2] 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 Y, DENG X S, YIN Y, *et al.* Study on behavior of the mixed lead viscoelastic damper [J]. Earthquake Resistant Engineering, 2005, 27(1): 42—47. (In Chinese)
- [3] 颜学渊,张永山,王焕定,等. 钢铅组合耗能器参数优选及减震效果[J]. 工程力学,2009,26(2):234—241.
YAN X Y, ZHANG Y S, WANG H D, *et al.* Parameter optimizing and cushioning effect of combined steel lead damper[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(2): 234—241. (In Chinese)
- [4] 颜学渊,王焕定,张永山,等. 新型钢铅组合耗能器性能试验及参数优选[J]. 哈尔滨工业大学学报,2009,41(12):20—24.
YAN X Y, WANG H D, ZHANG Y S, *et al.* Performance test and parameter optimization of new-style combined steel lead damper [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(12): 20—24. (In Chinese)
- [5] IBRAHIM Y E, MARSHALL J, CHARNEY F A. A visco-plastic device for seismic protection of structures[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(11): 1515—1528.
- [6] 陈云,吕西林,蒋欢军. 新型耗能增强型形状记忆合金阻尼器减震性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2013,40(2):31—38.
CHEN Y, LÜ X L, JIANG H J. Seismic performance study on new enhanced energy dissipation SMA damper[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2013, 40(2): 31—38. (In Chinese)
- [7] SILWAL B, MICHAEL R J, OZBULUT O E. A superelastic viscous damper for enhanced seismic performance of steel moment frames [J]. Engineering Structures, 2015, 105: 152—164.
- [8] SILWAL B, OZBULUT O E, MICHAEL R J. Seismic collapse evaluation of steel moment resisting frames with superelastic viscous damper [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 126: 26—36.
- [9] ZHONG Y, TU J W, YU Y, *et al.* Temperature compensation in viscoelastic damper using magnetorheological effect [J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 398: 39—51.
- [10] 徐昕. 新型扇形铅粘弹性阻尼器性能及应用研究 [D]. 广州:广州大学,2012:126—127.
XU X. Performance and application research on sector lead viscoelastic dampers [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2012: 126—127. (In Chinese)
- [11] 张纪刚,毛立旸. 位移放大型扇形阻尼器在预制装配式结构中的设计与应用[J]. 建筑技术,2018,49(S1):14—16.
ZHANG J G, MAO L Y. Design and application of displacement amplification sector damper in prefabricated assembly structure [J]. Architecture Technology, 2018, 49(S1): 14—16. (In Chinese)
- [12] YAN X Y, CHEN Z X, QI A, *et al.* Experimental and theoretical study of a lead extrusion and friction composite damper [J]. Engineering Structures, 2018, 177: 306—317.
- [13] 蒋欢军,黄有露,李恺轩. 带组合型阻尼器的可更换连梁[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2020,47(1):26—35.
JIANG H J, HUANG Y L, LI K X. Replaceable coupling beam with combined dampers [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(1): 26—35. (In Chinese)
- [14] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010:60—61.
Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 60—61. (In Chinese)
- [15] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010:118—120.
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 118—120. (In Chinese)
- [16] 李冀龙,欧进萍. 铅剪切阻尼器的阻尼力模型与设计[J]. 工程力学,2006,23(4):67—73.
LI J L, OU J P. Damping force models and designs of lead shear dampers [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23 (4): 67—73. (In Chinese)
- [17] 寇巍巍. 高温后叠层橡胶支座及串联隔震体系性能研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2009:32—33.
KOU W W. Research on properties of laminated rubber bearing and series seismic isolation system after high temperature [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2009: 32—33. (In Chinese)
- [18] GINER E, SUKUMAR N, TARANCÓN J E, *et al.* An Abaqus implementation of the extended finite element method [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76(3): 347—368.