

负刚度磁流变弹性体三维隔震支座性能分析

杨 坤, 隋杰英*, 张宇明

(青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525)

摘要:为提高新兴装配式建筑的隔震性能,提出一种负刚度磁流变弹性体三维隔震支座。该支座基于磁流变弹性体刚度可随磁场变化而发生改变的属性,通过磁场强度调整支座整体刚度,同时加入碟簧组共同组成三维隔震支座。对新型隔震支座进行理论设计,确定支座各构件尺寸及磁路分布。利用有限元软件对所设计磁路进行验证,建立新型隔震支座模型,对其水平和竖直方向力学行为进行数值模拟。结果表明,负刚度磁流变弹性体隔震支座磁路设计合理,荷载作用下具有良好的滞回性能。随着磁感应强度的增加,支座水平刚度最大可增加 40.8%,等效阻尼比可增加 19.7%,相较于传统力学性能单一的隔震支座具有更好的隔震效果,从而在面对不同强度地震时具有更好的适应性。

关键词:磁流变弹性体;隔震;参数设计;力学性能

中图分类号:TU352.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4602(2026)01-0036-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-4602.2026.01.005

Performance analysis of negative stiffness magnetorheological elastomer three-dimensional seismic isolation bearings

YANG Kun, SUI Jieying*, ZHANG Yuming

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: To improve the seismic isolation performance of new prefabricated buildings, a negative stiffness magnetorheological elastomer three-dimensional seismic isolation bearing is proposed. Based on the properties that the stiffness of magnetorheological elastomer can change with the changes of magnetic field, the overall stiffness of the bearing is adjusted by the strength of the magnetic field. Meanwhile, disc spring group is added to form the three-dimensional seismic isolation bearing. Theoretical design of the new type of seismic isolation bearing is carried out to determine the size of the bearing components and the distribution of the magnetic circuit. The designed magnetic circuit is verified by finite element software, and the new seismic isolation bearing model is established to numerically stimulate its horizontal and vertical mechanical behaviors. The results show that the magnetic circuit of the negative stiffness magnetorheological elastomer seismic isolation bearing is designed reasonably and has good hysteretic properties under load. With the increase of magnetic induction

收稿日期:2024-07-12

基金项目:国家自然科学基金(52178488)

作者简介:杨 坤(1999—),男,山东莱州人。硕士,研究方向为隔震支座。E-mail:15762704545@163.com。

*通信作者:隋杰英(1973—),女,山东青岛人。博士,副教授,主要从事工程抗震、结构振动控制、混凝土结构设计方面的研究。
E-mail:1026788126@qq.com。

intensity, the horizontal stiffness of the bearing can be increased at most by 40.8%, and the equivalent damping ratio can be increased by 19.7%. Compared with the traditional seismic isolation bearings with single mechanical performance, the proposed bearing has a better isolation effect, and therefore has a better adaptability to earthquakes of different intensities.

Key words: magnetorheological elastomer; seismic isolation; parametric design; mechanical properties

地震具有突发性、不可预测性以及强大的破坏性等特点,严重威胁着人们的生命、财产安全,因此,有必要不断进行建筑隔震结构研究,进一步提高建筑的整体抗震性能。橡胶隔震体系是我国目前应用最为广泛的隔震体系,有着经济性好、技术成熟等优势。但由于橡胶本身耗能有限、力学性能单一,难以应对各种地震,尤其是在罕遇地震下更易因变形过大导致结构失稳。提出一种负刚度磁流变弹性三维体隔震支座,该支座应用了新型智能材料磁流变弹性体,使支座可对外界不同激励做出响应,进而更好地适应不同强度的地震。

磁流变弹性体(MRE)^[1]是将微米级铁磁颗粒填充到固态基体材料中形成的一种新型磁流变材料,它不仅兼具了传统磁流变材料在磁场作用下连续、迅速和可逆等流变特性,并且克服了磁流变液团聚和稳定性差以及存在污染的缺点^[2]。20世纪80年代,RIBIG等^[3]将铁磁颗粒填充进弹性体基体中,并研究了该弹性体在变化磁场下的各种力学行为,人们将这作为磁流变弹性体的开端。LI等^[4]针对传统基础隔震系统的脆弱性,设计了MRE与钢板交替黏结的叠层自适应隔震器,并进行了实验测试,结果表明自适应隔震器能够成功地对侧向刚度和阻尼力进行实时改变,变化量分别高达37%和45%。王奇^[5]完成了磁流变弹性体松弛实验、动态力学性能测试实验以及滞回实验,依据实验结果设计了一种采用锥形支座的MRE变刚度支座,相较现有磁流变弹性体支座可减少大量材料及能耗;YANG等^[6]提出了一种负刚度MRE隔震器,通过在隔震器上下两端设置永磁体为隔震器提供磁场,通入正电流时产生正方向磁场,与隔震器中的初始磁场相互抵消,隔震器刚度减小;通入负电流时产生负方向磁场,与隔震器中的初始磁场相互增强,提高隔震器刚度。磁流变弹性体等新兴智能材料的出现与发展在一定程度上为结构隔震提供了新的方向。

1 负刚度磁流变弹性体隔震支座的构造及原理

磁流变弹性体具有各向异性(Anisotropic MRE)和各向同性(Isotropic MRE)两种形式^[7-8],如图1所示。各向异性的磁流变弹性体在一定的磁场下进行固化,使铁磁颗粒呈柱状或链状结构保留在基体中;各向同性磁流变弹性体则在无磁场的环境中进行固化,颗粒在基体中随机分布,比较均匀,没有固定的结构形式。

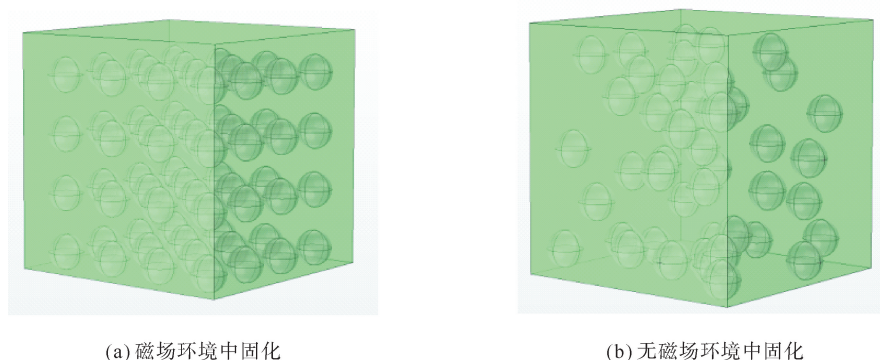


图1 碳基铁粉在橡胶基体中的分布

负刚度磁流变弹性体隔震支座如图2所示,相较于各向同性MRE,各向异性MRE具有更高的磁流变效应和磁致模量变化。因此,该支座将叠层支座中橡胶层改进为各向异性磁流变弹性体,弥补传统被动

隔震系统固有缺陷。该支座在水平方向采用传统叠层橡胶隔震器的设计,为磁流变弹性体和加劲钢板叠层结构,使支座在水平变形较大时,依旧能够承受较大荷载。在结构上下两端布置2块永磁体为支座提供初始磁场,使磁流变弹性体持续处于一定磁场状态下,为支座提供较大的刚度。在竖直方向应用碟形弹簧(碟簧)进行耗能,布置3组碟簧组,同时增设黏弹性体随碟簧组变形进一步消耗竖向地震能量。

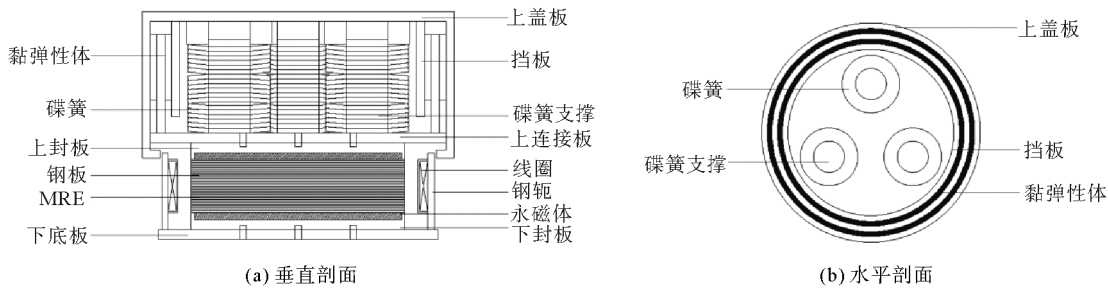


图2 负刚度磁流变弹性体隔震支座

当地震发生时,外置式线圈被通入电流产生与永磁体相反的磁场,支座中磁场强度减弱,从而使支座水平刚度一定程度地降低,增大了支座水平变形能力,使结构具有更大的自振周期,更好地远离地震动的卓越周期。根据地震强度通过改变支座中电流的大小控制磁场强度进而控制支座刚度,从而做到使支座小震下承载,大震下变形。支座竖向采用碟簧与黏弹性材料并联耗能的形式,碟簧上下变形耗能的同时带动外围黏弹性材料发生剪切变形,黏弹性材料高阻尼的性能可以进一步降低竖向结构的共振振幅,防止结构因动应力而损坏。

2 负刚度磁流变弹性体隔震支座理论分析

2.1 竖向隔震结构设计

支座的竖向力学性能主要由碟簧组的力学性能所决定。碟簧具有体积小、承载能力大、缓冲减震能力强的特点,基于其变刚度的特性,即承受荷载与变形量之间是一种非线性的关系,常被用于建筑物竖向隔震。

碟簧竖向隔震部分采用3组碟簧组呈三角形布置的方式,根据上部结构的竖向荷载以及碟簧的承载力和变形要求,确定适当的碟簧尺寸和碟簧组的组合方式。

假设上部结构竖向荷载为 F_0 ,则每组碟簧组承受的荷载大约为 $F_0/3$ 。

单片碟簧压平时的荷载 F_c ^[9],见式(1)。

$$F_c = \frac{4E}{1-\mu^2} \times \frac{ht^3}{K_1 D^2} \times K_4^2 \quad (1)$$

其中荷载计算系数 K_1 可按式(2)计算:

$$K_1 = \frac{1}{\pi} \times \frac{\frac{C-1^2}{C}}{\frac{C+1}{C-1} - \frac{2}{\ln C}} \quad (2)$$

式中: E 为弹簧钢的弹性模量; μ 为泊松比; t 为厚度; h 为压平时的变形量; K_4 为无支撑面碟簧的荷载计算系数, $K_4=1$; C 为外径与内径之比, $C=D/d$, D 、 d 分别为外径与内径。

根据总荷载确定叠合碟簧数量 n ,则每片碟簧受力 $F_1=F_0/3n$ 。

根据每片碟簧受力与每片碟簧压平时力的比例 F_1/F_c ,确定碟簧受力变形占总变形的比例 f/h ,进而确定碟簧总变形量 f ,碟簧刚度 F' 计算见式(3):

$$F' = \frac{4E}{1-\mu^2} \times \frac{t^3}{K_1 D^2} \times K_4^2 \times \left\{ K_4^2 \left[\left(\frac{h}{t} \right)^2 - 3 \times \frac{h}{t} \times \frac{f}{t} + \frac{3}{2} \left(\frac{f}{t} \right)^2 \right] + 1 \right\} \quad (3)$$

碟簧外圈并联圆筒式黏弹性阻尼器,支座上连接板设计半径为 425 mm,根据碟簧的布置及碟簧组的高度确定黏弹性阻尼器挡板厚 25 mm,黏弹性体厚度为 20 mm,宽度为 200 mm。黏弹性阻尼器的剪切变形幅值主要由碟簧组的总变形量 f 决定,最大剪应变为 80%,力-位移滞回曲线为椭圆形。

2.2 水平隔震结构设计

工作状态一:支座在正常承载或承受小震而发生微小变形时,在永磁体作用下磁流变弹性体处于较大磁场状态下,此时支座具有较大的水平刚度,水平变形极小,可保证上部建筑物正常使用的舒适度。

工作状态二:支座在承受较大地震作用时,线圈会被通入电流,支座的水平刚度会显著降低,促使建筑发生整体平动,由刚性抗震转变为柔性抗震,避开地震卓越周期,降低地震对建筑物的影响。

磁流变弹性体未施加磁场时,力学性能主要由基体材料决定,按橡胶支座计算。对于橡胶支座,与其水平、竖向相关的数据可按式(4)~(9)计算:

第一形状系数 S_1 ,即竖向刚度与每层橡胶垫厚度的关系:

$$S_1 = \frac{d_o}{4T_r} \quad (4)$$

第二形状系数 S_2 ,即用于区分支座不同形状对支座水平刚度的影响:

$$S_2 = \frac{d_o}{T_r} \quad (5)$$

支座允许水平位移 χ_d :

$$\chi_d = h\gamma_w \quad (6)$$

最大纵向承载力 W_{\max} :

$$W_{\max} = A'GS_1\gamma_w \quad (7)$$

式中: d_o 为内部钢板的外径; T_r 为内部橡胶总厚度; h 为 MRE 整体厚度; γ_w 为单片 MRE 最大允许剪切应变; A' 为支座最大位移时的重叠面积; G 为 MRE 零场剪切模量。

支座竖向压缩刚度 K_v :

$$K_v = \frac{AE_c}{T_r} \quad (8)$$

式中: E_c 为修正压缩模量; A 为内部橡胶平面面积。

支座的水平等效刚度 K_h :

$$K_h = G \frac{A}{T_r} \quad (9)$$

2.3 磁路设计

对于各向异性 MRE,当磁场方向与橡胶基体内部铁磁颗粒的成链方向相同时,磁场对 MRE 力学性能的影响最为明显;磁场方向与成链方向垂直时,磁场对其力学性能影响最小^[10]。磁路设计的目的是尽可能地使支座的磁阻降低,将更多的磁场垂直作用于中心磁流变弹性体上,减少漏磁,降低能量损失。

磁流变弹性体支座中,线圈与 MRE 的相对位置主要有端置式、分离式和外置式 3 种,端置式是将线圈置于叠层结构的两端,在叠层结构较厚时,磁路之间的距离会过大,导致支座磁阻较大;分离式是将线圈置于叠层结构外部,此方法会导致支座中的磁场不均匀,造成能源浪费;外置式是在叠层结构外套一层钢轭将其包裹在线圈内,形成完整磁路的同时也可保护内部结构。因此,所设计磁路采用线圈外置式结构。

根据磁路中的基尔霍夫定律:

$$\sum_{i=1}^n H_i l_i = NI \quad (10)$$

式中: H_i 为第 i 条磁路中的磁场强度, $i=1,2,3,\dots,n$; l_i 为对应磁路长度; N 为线圈匝数; I 为电流强度。

磁感应强度和磁场强度关系为

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (11)$$

式中: B 为磁感应强度; μ_0 为真空磁导率; μ_r 为材料相对磁导率; H 为磁场强度。

磁通量 ϕ 为

$$\phi = BS \quad (12)$$

式中: S 为与磁力线方向垂直的面积。

磁阻为

$$R_{mi} = \frac{l_i}{\mu_0 \mu_r S} \quad (13)$$

式中, R_{mi} 为各部分磁阻。

由式(10)~(13)可得线圈匝数 N , 见式(14):

$$\sum_{i=1}^n \phi_i R_{mi} = NI \quad (14)$$

式中: ϕ_i 为第 i 条磁路中的磁通量。

3 支座水平隔震部分磁路数值模拟

通过 Comsol 多物理场有限元软件进行支座的磁路设计模拟, 模拟支座在无电流和有电流时结构中磁力线的走向, 以验证前期磁路设计的可行性。

建立水平隔震部分三维模型, 为各个构件定义材料属性并设置空气域包裹支座, 支座上连接板、下底板、上下封板以及钢轭基材均采用 20 号钢; 线圈的绕线筒采用不导磁的不锈钢, 相对磁导率定义为 1; MRE 采用天然橡胶基体, 相对磁导率为 1; 填充铁磁颗粒为直径 $3 \mu\text{m}$ 的羰基铁粉颗粒; 叠层结构中的钢板采用电工铁片, 其相较于钢材材料具有更高的磁导率和磁饱和感应强度; 线圈为铜材质, 相对磁导率为 1; 永磁体选择钕铁硼永磁体, 剩磁 1.21 T, 矫顽力 955 kA/m。

由于所设计支座为圆柱体对称结构, 为简化计算, 取其二维截面进行仿真计算。磁力线分布如图 3 所示, 从中可以看出磁力线路径基本为: 永磁体—MRE 叠层结构—上封板—上连接板—钢轭—下底板—下封板—永磁体。

当仅有永磁体提供磁场时, 磁力线均匀、规律且方向单一; 在通入电流后, 线圈产生反方向磁场, 与永磁体产生的磁场相互抵消, 削弱支座整体磁场。磁力线在经过叠层结构时基本为竖直状态, 与基体内部铁磁颗粒成链方向一致, 表明设计的磁路较为合理, 可以最大程度影响 MRE 的力学性能。

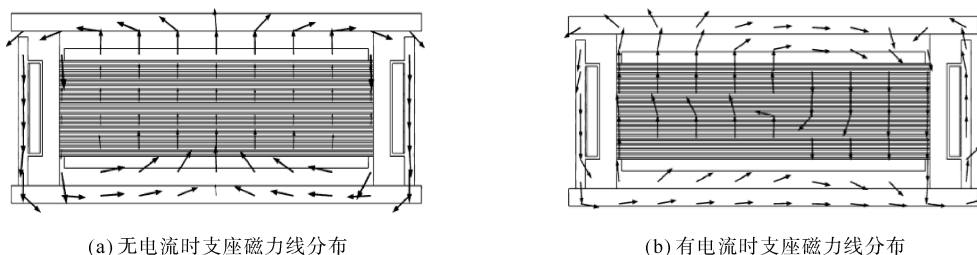


图3 水平隔震部分磁力线分布

4 负刚度磁流体弹性体隔震支座力学性能数值模拟

4.1 建立 ANSYS 模型

为了进一步研究新型隔震支座的力学性能, 建立支座实体模型并进行网格划分, 如图 4 所示, 其中, 碟形弹簧外径 250 mm, 内径 127 mm; 内圈黏弹性阻尼层内径 385 mm, 外径 405 mm, 外圈黏弹性阻尼层内径 430 mm, 外径 450 mm, 剪切圆环长度为 200 mm; 叠层结构由直径为 650 mm 的磁流变弹性体片与钢板硫化叠合而成, 其中磁流变弹性体片厚 5 mm, 钢板厚 3 mm。

对支座分别施加 4、8、12 mm 竖向位移荷载,模拟其竖向滞回性能;对水平隔震部分上连接板施加 30、60、100 mm 的水平位移荷载研究其水平滞回性能。

4.2 模拟结果分析

根据上述条件得到的支座水平方向的滞回曲线如图 5、图 6 所示,新型隔震支座水平方向加载后的力-位移曲线与普通叠层橡胶支座类似,呈较为狭长的长条状。根据图 5 可知,磁感应强度及其他加载条件不变时,支座水平方向输出的阻尼力随着加载幅值的增大而增大,支座力-位移曲线面积急剧增大,支座耗能明显提高。

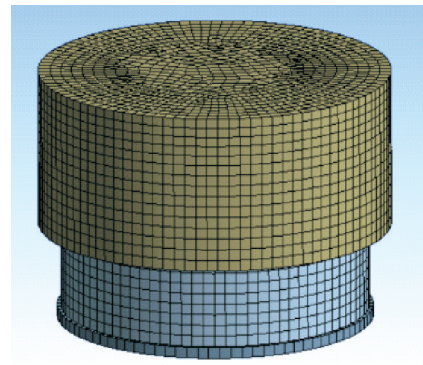


图 4 负刚度磁流变弹性体隔震支座实体模型

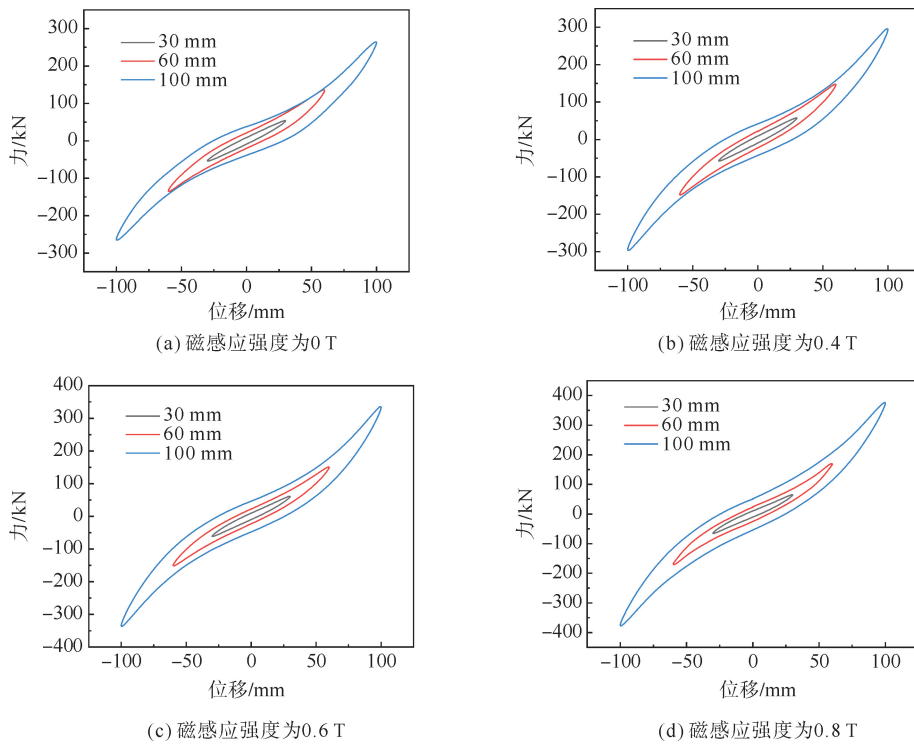


图 5 不同加载幅值下的滞回曲线

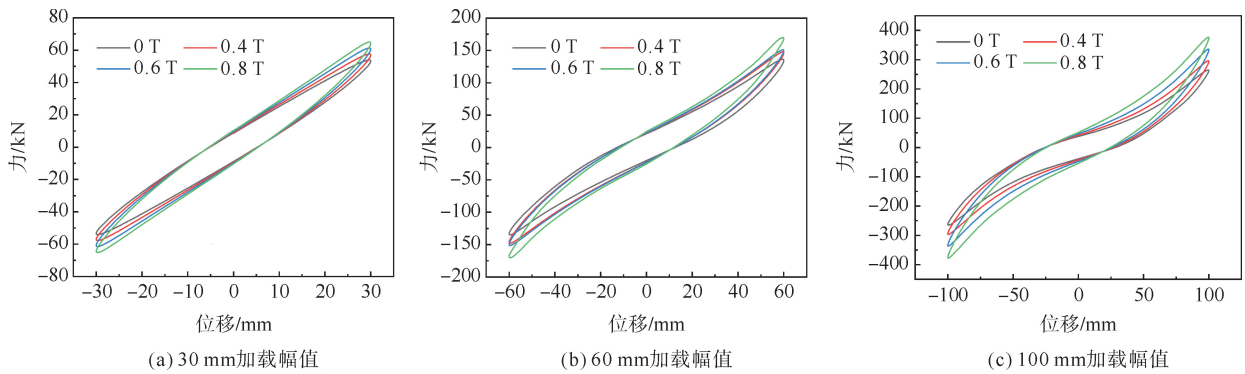


图 6 不同磁感应强度下的滞回曲线

根据图 6 中的滞回曲线可知,随着加载幅值的增大,滞回曲线被拉长,支座滞回曲线面积均迅速增加,耗能能力不断增强且随着磁感应强度的增加,加载幅值对支座耗能能力的影响愈加明显。在 0 T 时加载

幅值 100 mm 相对于 30 mm 水平等效刚度约增加 19.8%，而在 0.8 T 磁感应强度下水平等效刚度最大约增加 32%。新型隔震支座在相同加载幅值下，其他加载条件不变时，支座剪力随着磁感应强度的增加明显增大。对模拟数据进一步分析可知，在 100 mm 加载幅值下，磁感应强度为 0 T 时支座等效刚度为 2.52 kN/mm，等效阻尼比为 0.071；在磁感应强度为 0.8 T 时支座等效刚度为 3.55 kN/mm，等效阻尼比为 0.085，刚度增加了 40.8%，等效阻尼比增加了 19.7%，支座刚度变化明显，耗能能力显著增强，体现了支座刚度、阻尼可通过磁场进行调节的特性，表现出应对不同强度地震的良好适应性。支座在水平方向 100 mm 加载幅值下橡胶与钢板的应力分布如图 7 所示，橡胶层与钢板层的应力集中区域存在显著差异，橡胶层应力分布更均匀且数值相对较低；钢板层易在几何突变处出现应力集中。

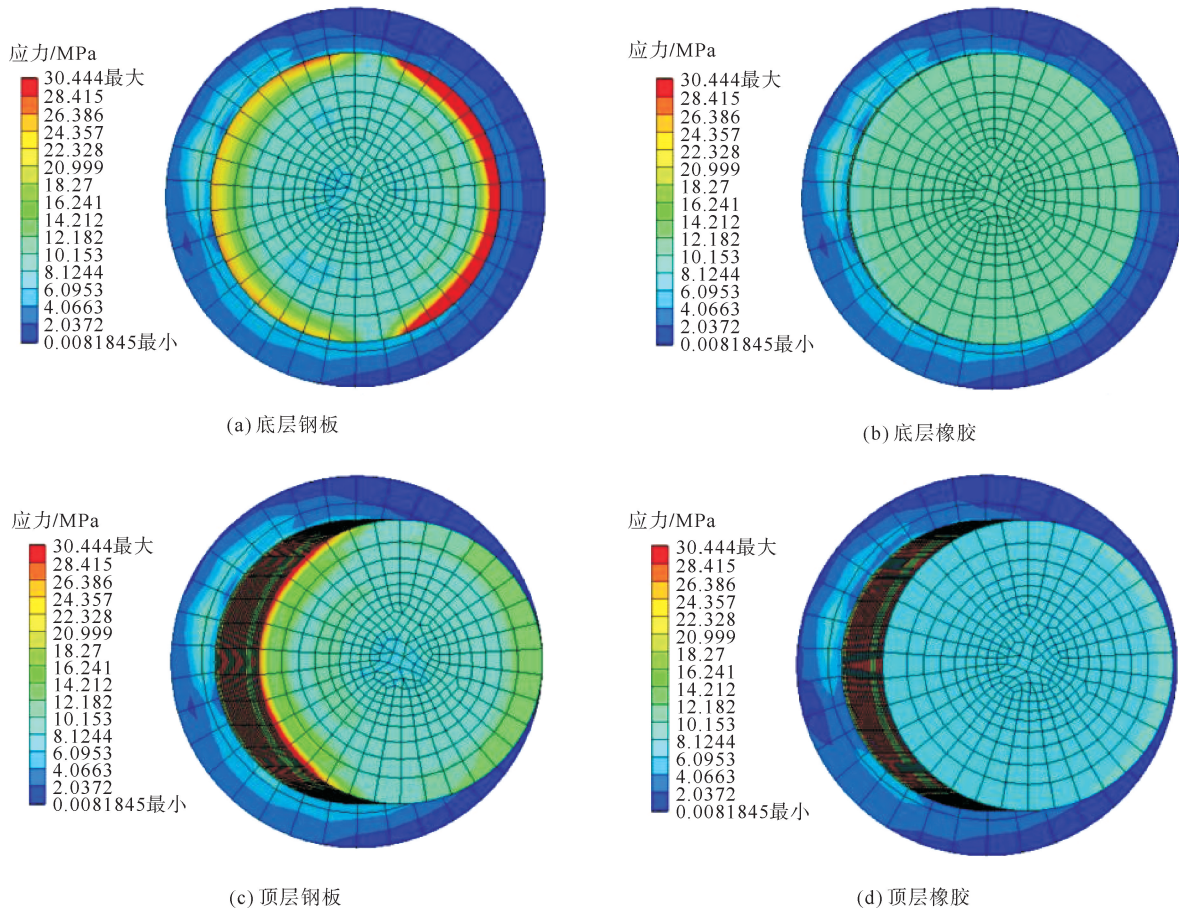


图 7 水平方向 100 mm 加载幅值下应力云图

图 8 为支座并联隔震与单一碟簧隔震滞回曲线对比，可以看出支座在加载过程中表现出一定的线性特征，这与弹簧的基本性能一致，而在卸载过程中，曲线初始阶段表现出较为明显的非线性特征，并和加载曲线构成一个滞回环。

根据刚度的定义，其刚度可以根据滞回曲线的原点与加载-卸载曲线转折点之间的斜率来表征^[11]。从图 8 中可以看出碟簧的卸载刚度随着加载幅值的增大是逐渐减小的，这与碟簧簧面的摩擦及外围圆筒式阻尼器的作用有关，加载幅值增大，簧面之间的压力越大，摩擦力增大，耗能能力也就随之增强，而圆筒式阻尼器的加入使得卸载曲线非线性更为突出，呈现

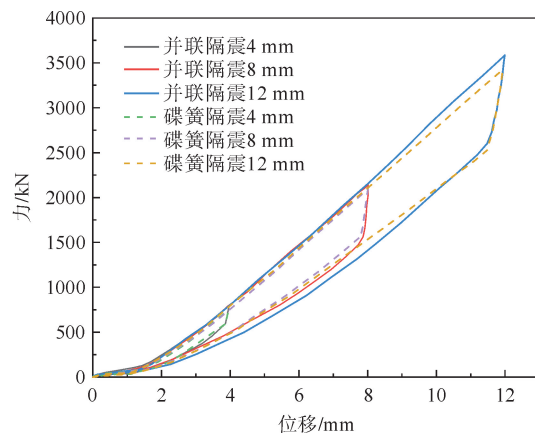


图 8 竖直方向不同加载幅值下滞回曲线

出明显的下凸趋势,新型隔震支座竖向滞回曲线比单一的碟簧隔震具有更强的非线性,相同的加载幅值下滞回曲线更为饱满,滞回曲线面积约增加 25.2%。竖向隔震部分底层碟簧在不同加载幅值下的应力分布如图 9 所示,应力主要集中在接触边缘,并且随着加载幅值的增大高应力区域范围也增大。

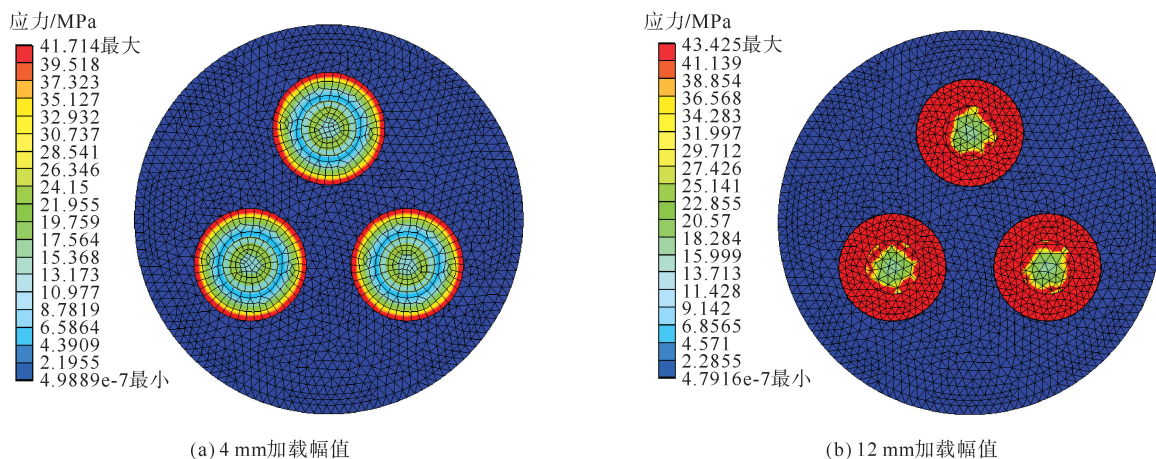


图 9 竖直方向底层碟簧应力云图

5 结论

本文提出一种负刚度磁流变弹性体隔震支座,探讨了其在水平隔震和竖向隔震结构的材料、参数以及磁路的设计方法,应用有限元软件对设计的磁路和新型支座的滞回性能进行了验证与分析。

1) 结果表明该磁路设计比较完整,可在叠层结构内部产生满足工作需求的竖向均匀磁场,虽然一定区域存在漏磁,但基本满足预设目标。

2) 该支座水平部分随着磁场增加,支座剪力升高,滞回环面积明显增大,刚度最大可增加 40.8%,等效阻尼比增加 19.7%;剪切幅值增大时,力-位移滞回环面积迅速增加,等效刚度最大可增加 32%,等效阻尼比略有减小。

3) 竖向部分随着加载幅值的增大,加载曲线与卸载曲线所围成面积急剧增加,曲线非线性明显增强,且由于圆筒式阻尼器的影响,支座在卸载时表现出更强的非线性行为,面积明显大于仅碟簧组加载曲线面积,滞回曲线面积约增加 25.2%。

4) 负刚度磁流变弹性体隔震支座利用 MRE 这一新型材料的性质弥补了传统橡胶支座力学性能单一的缺点,该支座可以通过对电流等参数的调节,按需改变叠层结构的力学性能;通过碟簧与圆筒式阻尼器的并联显著提高了支座的耗能能力,使其在应对不同强度地震时具有较强的适应性。

参考文献(References):

- [1] 孙书蕾. 磁流变体有限变形数值模拟及本构建模研究[D]. 西安:西北工业大学,2015.
SUN Shulei. Research about numerical modeling and constitutive modeling of magnetorheological elastomers under finite deformation[D]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University,2015.
- [2] 周亚东,葛爱迪,闫敏杰,等. 新型磁流变隔震支座的力学动态性能研究[J]. 地震工程与工程振动,2024,44(1):178-186.
ZHOU Yadong,GE Aidi,YAN Minjie, et al. Study on mechanical dynamic performance of new magnetorheological isolation bearing[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics,2024,44(1):178-186.
- [3] RIGBI Z,JILKEN L. The response of an elastomer filled with soft ferrite to mechanical and magnetic influences[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials,1983,37(3):267-276.
- [4] LI Y C,LI J C,LI W H, et al. Development and characterization of a magnetorheological elastomer based adaptive seismic isolator[J]. Smart Materials and Structures,2013,22(3):035005.
- [5] 王奇. 磁流变弹性体与变刚度支座及其智能隔震减振系统性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2018.

- WANG QI. Performance assessment of MRE, variable stiffness isolator, and its smart vibration isolation/reduction systems[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [6] YANG J, SUN S S, DU H, et al. A novel magnetorheological elastomer isolator with negative changing stiffness for vibration reduction[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(10): 105023.
- [7] 李刚, 陈硕, 胡国良, 等. 磁流变弹性体力学性能与磁流变效应研究进展[J]. 磁性材料及器件, 2023, 54(1): 98-107.
LI Gang, CHEN Qi, HU Guoliang, et al. Research progress on mechanical properties and magnetorheological effects of magnetorheological elastomers[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2023, 54(1): 98-107.
- [8] 魏克湘, 黄河清, 朱石沙. 硅橡胶基磁流变弹性体的制备及其力学性能测试[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2010, 20(1): 35-38.
WEI Kexiang, HUANG Heqing, ZHU Shisha. Preparation and mechanics properties of mr elastomers based on silicone rubber[J]. Journal of Hunan Institute of Engineering(Natural Science Edition), 2010, 20(1): 35-38.
- [9] GB/T 1972—2005, 碟形弹簧[S].
GB/T 1972—2005, Disc spring[S].
- [10] 刘强, 范吉庆, 周强, 等. 磁流变弹性体及其振动控制应用综述[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2024, 29(1): 1-12.
LIU Qiang, FAN Jiqing, ZHOU Qiang, et al. Research progress of magnetorheological elastomers and their vibration control applications[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2024, 29(1): 1-12.
- [11] 蔡茵. 碟簧竖向隔震支座的试验研究[D]. 广州: 广州大学, 2012.
CAI Yin. Test research of disc spring vertical isolation device[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2012.

(责任编辑 张晓靖; 英文校审 程文华)

(上接第 28 页)

- [21] 李光明, 李明生. 悬挂式止水帷幕基坑降水控制措施研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(3): 921-932.
LI Guangming, LI Mingsheng. Research on control measures unclosed curtain for cutting off drains on dewatering of foundation pit[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(3): 921-932.
- [22] 钟建文, 李罡, 牛磊, 等. 基于抽水试验的参数反演和基坑降水过程数值分析[J]. 工程勘察, 2019, 47(7): 36-41.
ZHONG Jianwen, LI Gang, NIU Lei, et al. Parameter inversion based on pumping test and numerical analysis of dewatering process in deep excavation[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2019, 47(7): 36-41.
- [23] 吴彬, 刘磊, 党建新. Modflow 在石河子某工程基坑降水设计中的应用[J]. 新疆农业大学学报, 2010, 33(4): 369-372.
WU Bin, LIU Lei, DANG Jianxin. Application of Modflow to precipitation design of an engineering in Shihhotze[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2010, 33(4): 369-372.
- [24] 许锡金, 李东霞. 基坑降水引起地面沉降计算方法研究[J]. 岩土工程技术, 2004, 18(4): 194-198.
XU Xijin, LI Dongxia. Study on calculating method of ground subsidence caused by pit dewatering[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2004, 18(4): 194-198.
- [25] 刘厚成, 郭启军. 悬挂式地连墙地铁深基坑地下水渗流场及其变形规律研究[J]. 土工基础, 2021, 35(2): 91-95.
LIU Houcheng, GUO Qijun. Groundwater seepage and deformation of diaphragm wall supported excavations of a subway station[J]. Soil Engineering and Foundation, 2021, 35(2): 91-95.

(责任编辑 张晓靖; 英文校审 程文华)