

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20250430064

夹芯 SMA 蜂窝阻尼器的结构优化*

柳露薇, 曹飒飒

(广州大学土木与交通工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 针对传统抗震阻尼器强震后残余变形大、耗能效率低的不足, 提出一种新型镍钛形状记忆合金(NiTi-SMA) 蜂窝夹层阻尼器。其采用三层复合结构: 核心层为超弹性NiTi-SMA蜂窝板提供自复位能力, 中间层填充高阻尼橡胶或橡胶-钢板组合材料实现耗能, 外层设防屈曲约束钢板保障稳定性。采用ABAQUS建立精细化数值模型, 探究不同填充材料配置对其力学性能的影响。结果表明, 高阻尼橡胶填充可显著提升耗能能力, 与NiTi-SMA协同表现出优异滞回性能; 填充钢板能提高承载能力与初始刚度, 其体积与性能呈正相关且不影响自定心特性; 圆形钢板耗能效率优于六角形, 变壁厚与圆角优化可缓解应力集中、提升疲劳性能。该新型阻尼器通过多材料协同与结构优化, 兼顾自复位与高耗能特性, 为抗震工程提供了新型技术方案。

关键词: 形状记忆合金; 蜂窝结构; 高阻尼橡胶; 阻尼器; 拟静力试验

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)06-1464-11

Structural Optimization of SMA Sandwich Honeycomb Dampers

LIU Luwei¹, CAO Sasa^{1,*}

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: To address the shortcomings of traditional seismic dampers, such as large residual deformation and low energy dissipation efficiency after strong earthquakes, a novel nickel-titanium shape memory alloy (NiTi-SMA) honeycomb sandwich damper was proposed. It adopted a three-layer composite structure. The core layer was a superelastic NiTi-SMA honeycomb plate to provide self-centering capability, the intermediate layer was filled with high-damping rubber or rubber-steel plate composite material for energy dissipation, and the outer layer was equipped with buckling-restrained steel plates to ensure stability. A refined numerical model was established using ABAQUS to investigate the effect of different filling material configurations on its mechanical properties. The results showed that filling with high-damping rubber could significantly improve energy dissipation capacity, and it synergistically exhibited excellent hysteretic performance with NiTi-SMA. Filling with steel plates could enhance bearing capacity and initial stiffness, whose volume was positively correlated with the damper's performance without affecting the self-centering property. Circular steel plates demonstrated higher energy dissipation efficiency than hexagonal ones, and variable wall thickness and fillet optimization

* 收稿日期: 2025-04-30; 修回日期: 2025-08-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(52478151)资助

作者简介: 柳露薇(1999—), 女, 硕士研究生。主要从事抗震研究。E-mail: 2112316248@e.gzhu.edu.cn

通信作者: 曹飒飒(1982—), 男, 副教授, 硕导, 博士。主要从事桥梁抗震研究。E-mail: cao@gzhu.edu.cn

could effectively alleviate stress concentration and improve fatigue performance. Through multi-material synergy and structural optimization, this novel damper balances self-centering and high energy dissipation characteristics, providing a new technical solution for seismic engineering.

Keywords: shape memory alloy; honeycomb structure; high-damping rubber; damper; quasi-static test

0 引言

随着地震活动的频繁与强度的增加^[1],桥梁作为重要的交通基础设施,在地震中遭受的破坏也日益严重。近年研究发现,20%~40%的符合规范的结构在地震后会变得不适合重新使用,需要多年才能修复功能,超过15%的结构无法修复至正常使用状态^[2]。为了有效减轻地震对桥梁结构带来过度的塑性变形、残余变形、碰撞和冲击等问题。被动控制技术(如隔震支座^[3]、缆索限制器^[4]和阻尼器^[5])因能耗散能量、减少结构损害而被广泛应用。然而,最近常用的被动阻尼器(如粘滞阻尼器^[6]、摩擦阻尼器^[7]、粘弹性阻尼器^[8]、钢缝阻尼器^[9]),缺乏自定心能力,导致结构在地震后难以恢复正常位置,影响后续正常使用^[10]。

形状记忆合金(SMA)因其独特的超弹性性能成为自定心阻尼器的理想材料^[11]。SMA具有在7%的应变变形后恢复初始形状,通过奥氏体与马氏体间的可逆相变耗散能量的能力^[12]。SMA材料已经通过SMA丝^[13]、SMA杆^[14]、限位装置^[15]、减隔震支座^[16]、阻尼器^[17]等方式广泛应用于自定心减隔震装置的生产。然而,SMA材料有限的能量耗散能力限制了其进一步的能用^[18-20],仍然需要探索提高SMA减隔震装置大应变变形能力和能量耗散能力的方法。

六角形蜂窝结构兼具最佳强度与最少材料用量的特性^[21]。蜂窝结构用于提升形状记忆合金(SMA)耗能性能的研究已较为广泛,多项研究证实SMA与蜂窝结构的协同作用可实现低重量、高能量吸收与良好恢复性能的平衡^[22-24]。在我们之前的研究中^[20],将蜂窝结构引入SMA阻尼器可在一定程度上提升其耗能能力。但受限于SMA材料较弱的刚度性能,SMA蜂窝阻尼器(SHD)与常用阻尼器相比仍存在性能差距,蜂窝结构对SMA耗能能力的提升效果有限。填充是一种可以显著提升蜂窝结构刚度的方法^[25],特别是采用高阻尼特性聚合物填充时,可进一步优化结构抗震性能^[26]。具有高阻

尼特性的材料应用在减隔震装置中可以明显减轻结构的地震响应并增强能量耗散能力^[27-30]。高阻尼橡胶因剪切应变下的高效能量耗散被广泛应用于减隔震装置^[31-33]。目前主要应用于粘弹性阻尼器以发挥自身的高阻尼特性^[27,34]。将高阻尼橡胶和金属部件结合可以协同进行能量耗散^[35],这种协同耗散行为可以通过改变材料的类型和构型来进行优化^[36]。此外,SMA线缆已被用于增强高阻尼橡胶阻尼器的性能,其加入显著提升了阻尼器的自复位能力^[37]。然而,目前关于高阻尼橡胶增强SMA阻尼器能量耗散能力的研究仍显不足。

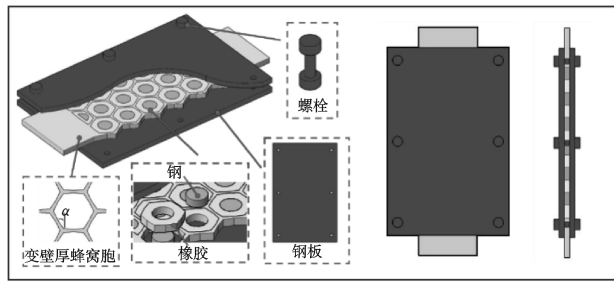
本研究旨在提出了一种同时具有高能量耗散和自定心能力的混合式被动阻尼器的概念设计,由SMA平面蜂窝板、用于防止SMA蜂窝板屈曲的外部钢板,以及填充在蜂窝板内的高阻尼橡胶或高阻尼橡胶与钢板组成。并基于我们以往的实验进行了数值模拟,说明了其抗震性能。高阻尼橡胶提供了优秀的能量耗散能力,SMA材料使结构拥有自定心的能力,蜂窝结构使结构拥有轻质性和卓越的强度重量比。这三者优势的结合使得本文所提出的超弹性粘性阻尼器拥有先进的混合响应。本文首先详细的阐述超弹性粘性阻尼器的设计方法与工作原理。然后,通过实验与模拟相结合的方式,研究了相关材料的性能,明确其特性参数。随后,使用Abaqus有限元分析软件展开数值模拟,针对所提出的超弹性粘性阻尼器进行了力学性能分析,并通过优化结构提升阻尼器的整体效能。最后,研究了填充钢板的体积与形状对阻尼器性能的增强机制以确定材料填充对阻尼器性能产生的具体影响。

1 夹芯SMA蜂窝阻尼器

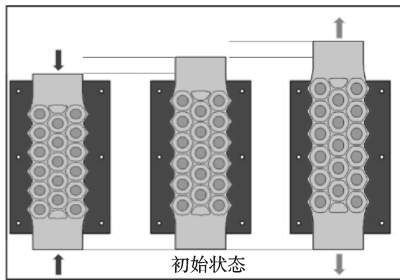
1.1 设计原理

SMA夹芯蜂窝阻尼器的构造设计,如图1所示,通过SMA蜂窝板、高阻尼橡胶环和圆形钢板的协同作用,实现了高效的能量耗散、自复位和承载能力。SMA蜂窝板作为核心部件,利用其超弹性特性,能够在较大变形后恢复原状,赋予阻尼器自复

位和自定心能力;同时,蜂窝结构的几何非线性特性使其能够在在大变形时提供变形空间,并通过填充高阻尼橡胶环和圆形钢板进一步增强结构的稳定性和刚度。高阻尼橡胶环在受拉或受压过程中通过剪切和压缩变形耗散能量,显著提升阻尼器的耗能性能。圆形钢板则通过限制橡胶环的过度变形,防止结构失稳,并进一步提升阻尼器的整体刚度和承载能力。此外,阻尼器外部设置了两块限位钢板,用于固定内部构件并防止平面外屈曲,确保阻尼器在承受复杂荷载时保持整体稳定性。这种多材料、多结构的协同设计使得阻尼器在承受外部荷载时,能够高效地耗散能量,同时保持结构的稳定性和自复位特性。



(a) 结构构造



(b) 工作机制

图1 橡胶增强SMA蜂窝阻尼器

Fig.1 Rubber-reinforced SMA honeycomb damper

1.2 理论分析

六角形蜂窝结构具有出色的强度重量比和能量吸收能力,其整体应变远高于局部应变。利用蜂窝结构几何非线性变形的特点,赋予SMA装置更高的变形能力。夹芯SMA蜂窝阻尼器通过结构优化拓展有效行程,并通过填充高阻尼橡胶提升最大刚度与阻尼比。将传统的尖角蜂窝改善为圆角,减少了以往尖角区域的局部应变系数,从结构方面进一步优化了性能。

对于正六边形蜂窝单元,由于钢板的存在,可视为蜂窝梁的横截面在变形前和变形后均保持与

中心轴相互垂直,且不产生应变(仍视为平面)。将蜂窝梁视为一段如图2所示的SMA梁,长度为 l 、壁厚为 t ,横梁在局部坐标系中发生变形时,横梁中线一点A移动至点B,纵横方向的点位移向量由和表示;采用Euler-Bernoulli梁理论,在局部坐标系下,单元壁上任一点的横向应变可表示为:

$$\epsilon(x, y) = \gamma(x) + yk(x) \quad (1)$$

式中, $\gamma(x)$ 表示蜂窝梁上中心轴任一点的横向应变函数, $k(x)$ 表示蜂窝梁的弯曲曲率。 $\gamma(x)$ 和 $k(x)$ 可以由和表示为:

$$\gamma(x) = \sqrt{\left(1 + \frac{dv}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dh}{dx}\right)^2} - 1 \quad (2)$$

$$k(x) = \frac{\frac{d^2h}{dx^2} \frac{dv}{dx} - \left(1 + \frac{dh}{dx}\right) \frac{d^2v}{dx^2}}{\left(1 + \frac{dv}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dh}{dx}\right)^2} \quad (3)$$

由此,沿单元壁厚方向积分可得内部合轴向力 $N(x)$ 和合弯矩 $M(x)$:

$$N(x) = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma dy \quad (4)$$

$$M(x) = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma y dy \quad (5)$$

式中, σ 为SMA材料在轴向应变下的应力,根据超弹性本构关系确定。

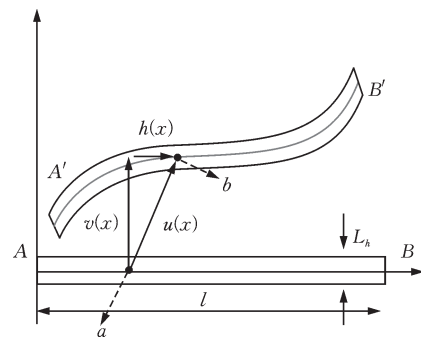


图2 蜂窝壁受力行为原理

Fig.2 Schematic diagram of mechanical behavior of honeycomb walls

由此,每个节点的内部虚功贡献可写为:

$$\delta W = \int_0^l [N(x) \delta \epsilon(x) + M(x) \delta k(x)] dx \quad (6)$$

在蜂窝内填充的高阻尼橡胶,其力学行为可用超弹性-粘弹性组合模型描述。采用Mooney-Rivlin模型描述橡胶的超弹性响应,使用Prony级数表达粘弹性耗能效应,橡胶在小变形范围内的恢复力近似表达为:

$$F_r(u, \dot{u}) = E_r u + c_r \dot{u} \quad (7)$$

式中, E_r 表示高阻尼橡胶的等效弹性模量; c_r 表示橡胶的粘滞阻尼系数; u 表示发生变形时产生的位移; \dot{u} 表示变形速率。

考虑橡胶耗能后, 每个节点的内部虚功贡献可写为:

$$\delta W_r = \int_0^l (N(x) \cdot \delta \varepsilon(x) + M(x) \cdot \delta k(x) + F_r(u, \dot{u}) \cdot \delta u) dx \quad (8)$$

受填充橡胶后结构的弯矩变化为:

$$M_r = \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \sigma_y dy + M_r \quad (9)$$

M_r 由 Conway 点匹配法可得:

$$M_r = 0.17578 \sigma b (l \cos \theta)^2 \quad (10)$$

式中, σ 为整体结构在轴向应变下的应力; b 为高阻尼橡胶六角块深度。

正六边形单元的尖角处由于几何急剧变化, 容易形成应力集中, 导致局部最大应力远高于平均水平。为减小这种应力集中, 可以在单元尖角处采用圆角设计, 如图 3 所示。

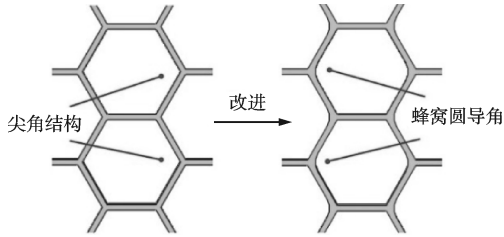


图 3 蜂窝内壁圆角设计示意

Fig.3 Schematic diagram of fillet design on inner walls of honeycomb

采用圆角优化后, 局部应力可以表示为:

$$\sigma_c = \sigma_0 \left[1 - \alpha \left(\frac{R_f}{t} \right)^\beta \right] \quad (11)$$

式中, R_f 为圆角半径; α 和 β 为通过实验数据或有限元仿真获得依赖于蜂窝单元几何形状系数。

最后, 经高阻尼橡胶和圆角优化后的总恢复力模型为:

$$F(u, \dot{u}) = \left[k_0 \left(1 + \alpha \left(\frac{R_f}{t} \right)^\beta \right) + E_r \right] u + \left[k_1 \left(1 + \alpha \left(\frac{R_f}{t} \right)^\beta \right) \right] u^3 + c_r \dot{u} \quad (12)$$

式中, k_0 和 k_1 是通过材料弹性模量确定的蜂窝 SMA

结构刚度参数。

圆角优化后每个节点的内部虚功贡献可写为:

$$\delta W = \int_0^l \left(\sigma_0 \left(1 + \alpha \left(\frac{R_f}{t} \right)^\beta \right) \cdot t \cdot \delta \varepsilon(x) + \sigma_0 \left(1 + \alpha \left(\frac{R_f}{t} \right)^\beta \right) \cdot \frac{t^2}{4} \cdot \delta k(x) + (E_r u + c_r \dot{u}) \cdot \delta u \right) dx \quad (13)$$

合弯矩变化为:

$$M_c = \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \sigma_0 \left(1 + \alpha \left(\frac{R_f}{t} \right)^\beta \right) y dy + M_r \quad (14)$$

2 夹芯蜂窝阻尼器试验与优化

2.1 SMA 蜂窝阻尼器试验与有限元模型设置

课题组设计并进行了 NiTi-SMA 蜂窝阻尼器减震装置的试验, 试验概况如图 4 所示^[20]。

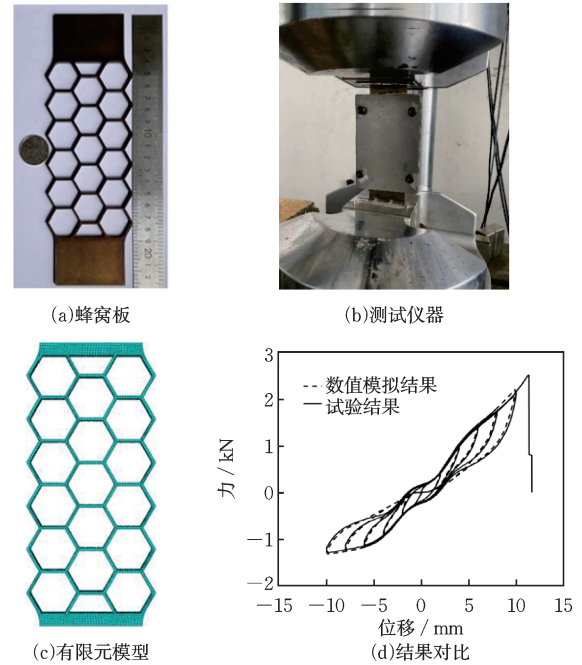


图 4 实验概况与实验结果

Fig.4 Overview and results of experiments

从试验与数值模拟对比图可以看出: 数值模拟的结果与试验结果展现出良好的一致性, 因此, 基于之前的本构模型与建模方法, 进行优化处理。模型采用高度非线性有限元分析 (FEA) 模型, 综合考虑了几何、材料和边界非线性特性。模型中所有接触相互作用均采用表面到表面离散化方法模拟, 并基于有限滑动公式进行定义。螺栓、钢板、SMA 蜂

窝板及高阻尼橡胶块之间的接触面均被完整建模,其中法向行为采用非线性惩罚力“硬”接触模型,切向行为基于库仑摩擦模型,摩擦系数设为 $\mu=0.05$ 。为简化计算,夹芯SMA蜂窝阻尼器组件通过合并为单一零件进行建模,同时保留几何边界和材料属性,并假设SMA与橡胶之间为理想粘合状态,优选该方法通过定义大量接触约束来减少分析所需的计算需求。

加载过程采用通用静态步长,通过位移控制的垂直载荷施加荷载,荷载和边界条件通过分布式连续耦合约束施加到参考点。为确保模型收敛性,所有部件均采用结构化网格划分,使用六面体单元进行离散。其中,钢板和SMA部件采用一阶8节点线性缩减积分单元(C3D8R),高阻尼橡胶则采用一阶8节点混合线性单元(C3D8H)。通过网格细化研究,在保证结果准确性的同时优化了计算效率,为后续非线性分析提供了可靠的数值模型基础。

2.2 基于实验结果的优化

试验表明,试件在第6级加载拉伸阶段断裂,最大应变为8.91%。由图5可见,断裂点位于蜂窝胞外尖角与内部连接点处。为探究断裂机理,用Abaqus构建蜂窝试件全尺寸模型(图4(c)),模拟加载工况与试验一致。试验测得试件在拉伸位移12.41 mm(整体应变8.56%)时断裂。模拟结果显示,拉伸位移达12 mm时,断裂部位局部应变达14.01%,远超SMA材料7%的极限可恢复应变,证实尖角部位应力集中是断裂主因。

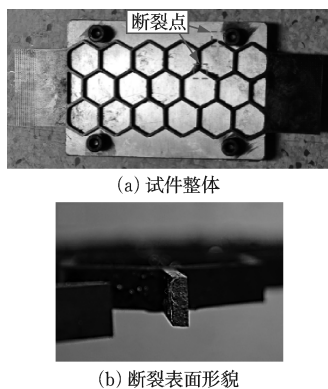


图5 试件断裂图像

Fig.5 Images of specimen fracture

断面分析表明,试件起始断裂面平整,其余部分呈发散性沟壑状裂痕,与NiTi-SMA疲劳裂纹扩展行为相符。过程为:起始断裂面现疲劳微裂缝,

在循环相变作用下,错位积累致试件沿断裂缝裂开,形成平整断裂面;未现疲劳裂缝的截面因应力激增拉伸破坏,断裂面从起始点向四周速扩,呈发散性沟壑状。综合断面形态与数值模拟可知,尖角应力集中引发微裂缝,在循环荷载下快速发展,导致试件断裂。

针对蜂窝结构尖角区域应力集中问题,本研究提出了一种优化设计方法:将尖角改为圆角,并采用适应蜂窝壁弯矩变化的变厚度SMA蜂窝结构,如图6所示。该设计遵循“端部厚、中间薄”的原则,旨在降低应力集中效应,提高结构可靠性,从而解决阻尼器因局部应力集中而过早失效的问题。为验证优化效果,利用Abaqus软件建立了优化后的蜂窝有限元模型。分析结果如图7所示,圆角设计显著改善了应力集中现象,使尖角区域局部应变系数降低5%,局部最大应变值降至8.19%。此外,圆角设计对蜂窝整体刚度影响较小,在有效缓解应力集中的同时,保持了结构的承载能力和稳定性。

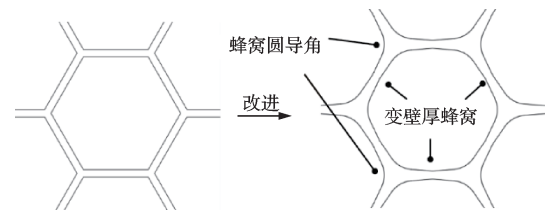


图6 蜂窝内壁优化后示意

Fig.6 Schematic diagram of optimized inner walls of honeycomb

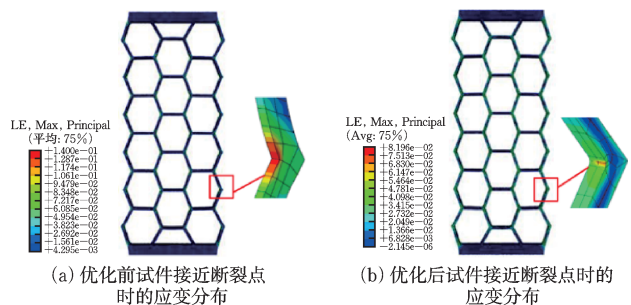


图7 优化前后应力云图对比

Fig.7 Comparison of stress contour maps before and after optimization

3 参数分析

3.1 高阻尼橡胶增强SMA蜂窝阻尼器

为了单独分析填充高阻尼橡胶对SMA蜂窝阻

尼器的影响,在Abaqus2021软件中建立了高阻尼橡胶夹芯 SMA 蜂窝阻尼器(SRHD)模型。通过对比未填充高阻尼橡胶的空心 SMA 蜂窝阻尼器(SHD)的数值模拟结果,分析高阻尼橡胶的粘弹性性能对 SHD 力学性能的影响。

如图 8 所示,用于填充的高阻尼橡胶块结构设计 with SHD 空心部分适配,其形状基于正六边形结构优化而成,具体如下:将正六边形的尖角部分,优化为圆心角 60° 、半径为 5 mm 的圆弧。同时,将原六边形的每条边从左右两端点向中点方向各倾斜 5° ,以改善应力集中问题。高阻尼橡胶块进行上述优化过程,目的在于能够完全嵌合于 SHD 的内部空心区域,从而更好地发挥其在结构中的作用。

在对 SHD 进行数值模拟研究时,对比了填充高阻尼橡胶前后的结果,如图 9 所示。模拟结果显示,

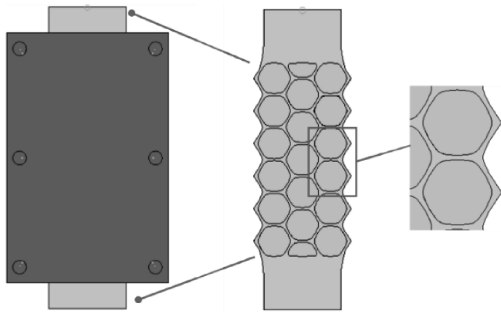


图 8 高阻尼橡胶夹芯 SMA 蜂窝阻尼器(SRHD)

Fig.8 SMA honeycomb damper with high-damping rubber sandwich (SRHD)

填充高阻尼橡胶后,SHD 的最大恢复力以及能量耗散能力均得到显著提升。SMA 结构赋予了高阻尼橡胶出色的自定心能力,经过变形后高阻尼橡胶仍能恢复至原始形状。填充高阻尼橡胶后,SHD 的能量耗散和最大恢复力均相比于填充前得到了提升。具体的提升量化分析如表 1 所示,可以看到,填充使 SHD 的总耗能能力提升了 6.53%,最大恢复力提升了 24.41%。压缩阶段的性能提升相较于拉伸阶段更明显,见表 1。填充材料的通过受限效应有效提升了结构的刚度与能量耗散能力。在 SHD 中,因长宽存在差异,压缩阶段高阻尼橡胶六角块受蜂窝胞壁结构限制,相较于拉伸阶段,其产生的形变更大,且参与了更多的受力过程^[38]。此外,SMA 材料自身在压缩与拉伸行为中,应力应变响应呈现不对称性^[39],橡胶的填充可能放大了这种差异。

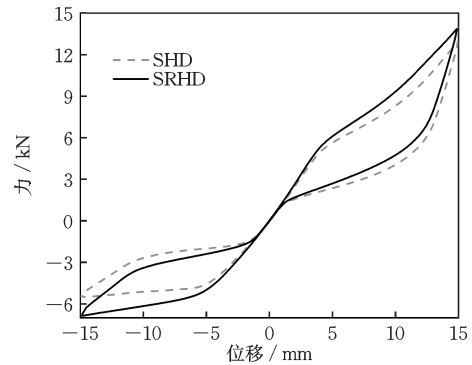


图 9 SHD 和 SRHD 性能对比

Fig.9 Comparison of performance between SHD and SRHD

表 1 SRHD 性能提升的量化分析

Table 1 Quantitative analysis of performance improvement of SRHD

项目	填充前能量耗散/J	填充后能量耗散/J	能量耗散提升/%	填充前最大恢复力/kN	填充后最大恢复力/kN	最大恢复力提升/%
拉伸阶段	43.56	46.04	5.69	12.93	13.85	7.14
压缩阶段	25.81	27.86	7.94	5.52	6.87	24.41
全过程	69.38	73.91	6.53	—	—	—

进一步分析不同位移阶段的工作机制可得,在小位移阶段,高阻尼橡胶凭借其中低刚度下提供高阻尼的特性,通过粘弹性作用使能量耗散滞后。此时,SMA 处于线性弹性阶段,主要功能是提供刚度。而在大位移阶段,SMA 进入超弹性阶段,依靠其特有的旗帜形滞回曲线进行耗能。与此同时,高阻尼橡胶在这一过程中以较低的刚度避免了与 SMA 的刚度叠加,二者相互协同,有效提高了装置的恢复力和能量耗散能力^[40]。

3.2 钢板夹芯高阻尼橡胶协同增强 SMA 蜂窝阻尼器

为进一步提升 SRHD 的性能,采取在高阻尼橡胶六角块中加入钢板并填充的方案,如图 10 所示。建模基于 SRHD 模型展开,确保填充钢板的形心与原高阻尼橡胶的形心重合。如图 11 所示, λ 为钢板内切圆半径 r 与高阻尼橡胶环外边的内切圆半径 R 的比值,即 $\lambda = r/R$ 。通过设计一系列不同边长的六角形钢板,对填充不同边长钢板的高阻尼橡胶填

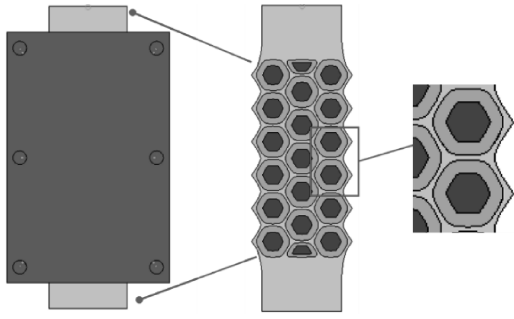


图10 高阻尼橡胶及钢板协同夹芯SMA蜂窝阻尼器(SRSHD)
Fig.10 SMA honeycomb damper with synergistic sandwich structure composed of high-damping rubber and steel plates (SRSHD)

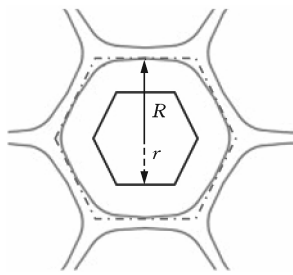


图11 λ 定义机理
Fig.11 Diagram of λ definition mechanism

充后的SMA蜂窝阻尼器(SRSHD)进行数值模拟并对比分析,以研究填充钢板大小对SRHD性能的影响

影响机制。

对比填充不同边长钢板SRSHD的数值模拟结果。如图12所示,钢板的加入显著提升了SRHD的整体性能。填充 $\lambda=0.7$ 的六角形钢板后,相较于SRHD,SRSHD在压缩阶段的最大恢复力提升了104.4%,能量耗散提升了57.75%。SRSHD性能随钢板尺寸变化的性能提升量化分析见表2和表3。压缩阶段SRSHD性能随钢板尺寸增大的提升速度,相比仅填充高阻尼橡胶时,比拉伸阶段的提升速度高出一倍。填充物性能与SRSHD压缩性能之间的关联性,相较于拉伸阶段更为紧密^[41]。钢板的

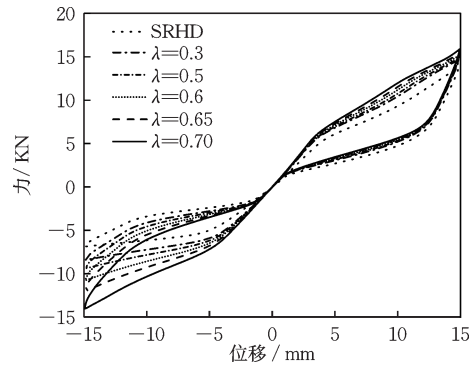


图12 SRHD和SRSHD性能对比
Fig.12 Comparison of performance between SRHD and SRSHD

表2 不同钢板尺寸填充后SRSHD耗能能力提升的量化分析

Table 2 Quantitative analysis of enhancement in energy dissipation capacity of SRSHD after filling with steel plates of different sizes

项目	拉伸阶段能量耗散/J	提升/%	压缩阶段能量耗散/J	提升/%	全过程能量耗散/J	提升/%
高阻尼橡胶	46.04	—	27.86	—	73.91	—
$\lambda=0.3$	52.57	14.18	32.63	17.12	85.21	15.29
$\lambda=0.5$	53.98	2.68	34.27	5.03	88.26	3.58
$\lambda=0.6$	56.33	4.35	36.68	7.03	93.03	5.40
$\lambda=0.65$	58.2	3.32	39.22	6.92	97.42	4.72
$\lambda=0.7$	60.38	3.75	43.95	12.06	104.34	7.10

表3 不同钢板尺寸填充后SRSHD最大恢复力提升的量化分析

Table 3 Quantitative analysis of enhancement in maximum restoring force of SRSHD after filling with steel plates of different sizes

项目	拉伸阶段最大恢复力/kN	提升/%	压缩阶段最大恢复力/kN	提升/%
高阻尼橡胶	13.85	—	6.87	—
$\lambda=0.3$	14.68	5.95	8.42	22.65
$\lambda=0.5$	14.86	1.25	9.40	11.57
$\lambda=0.6$	15.16	2.02	10.76	14.47
$\lambda=0.65$	15.48	2.11	12.03	11.85
$\lambda=0.7$	15.88	2.55	14.03	16.66

加入提高了系统的整体刚度,使高阻尼橡胶受力更均匀,产生更大范围的形变,进而利用其粘弹性特性增强能量耗散。此外,整体刚度的提升还有利于SMA的相变恢复更加稳定,提高了最大恢复力。

$\lambda=0.7$ 的SRSHD达到了最佳性能,这很可能是因为填充钢板的体积最大导致了最好的性能提升。但是关于填充钢板属性对于SRSHD性能的影响机制,不仅仅只关系到体积的大小,形状同样也是重要的影响因素。关于填充钢板体积和形状对于SRSHD性能影响的分别影响机制。将在下一节中进行讨论。

3.3 钢板形状对阻尼器性能的影响

在上一节研究中,围绕不同尺寸钢板对SRSHD性能的影响展开探讨,发现填充钢板尺寸与SRSHD的最大恢复力、耗能能力呈正相关,其中填充 $\lambda=0.7$ 的钢板的SRSHD性能最优。尽管使用高阻尼橡胶和钢板协同填充显著提升了SRSHD性能,但钢板形状对SRSHD的影响机制尚未深入阐明。基于上一节采用的 $\lambda=0.7$ 、 $\lambda=0.65$ 、 $\lambda=0.6$ 、 $\lambda=0.5$ 填充钢板,本节构建了面积更小的钢板形状模型,将钢板优化为原钢板形状的内切圆,如图13所示。经计算,优化后的圆形钢板体积相较于原钢板减少约9.31%。

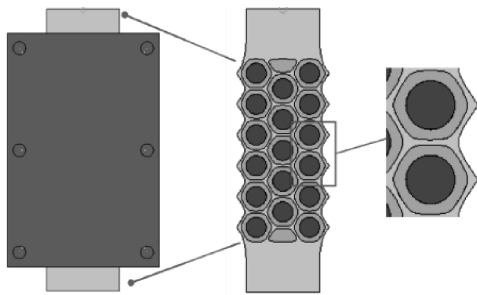


图13 钢板形状优化后的SRSHD

Fig.13 SRSHD with optimized steel plate shape

基于 $\lambda=0.7$ 的原钢板优化后的钢板用 $R_{it}=0.7$ 表示,其余不同参数优化后的钢板依此规则标记。分别对比了不同优化前后的数值模拟结果以探索填充物形状变化对于SRSHD性能的影响,如图14所示。并对所有填充效果进行了综合对比,如图15所示。可以看到,形状优化为圆形的钢板尽管体积变得更小,但是填充圆形钢板的SRSHD滞回曲线面积相较于之前更大,耗能能力得到了进一步提升。此外。优化后SRSHD在拉伸阶段拥有更好

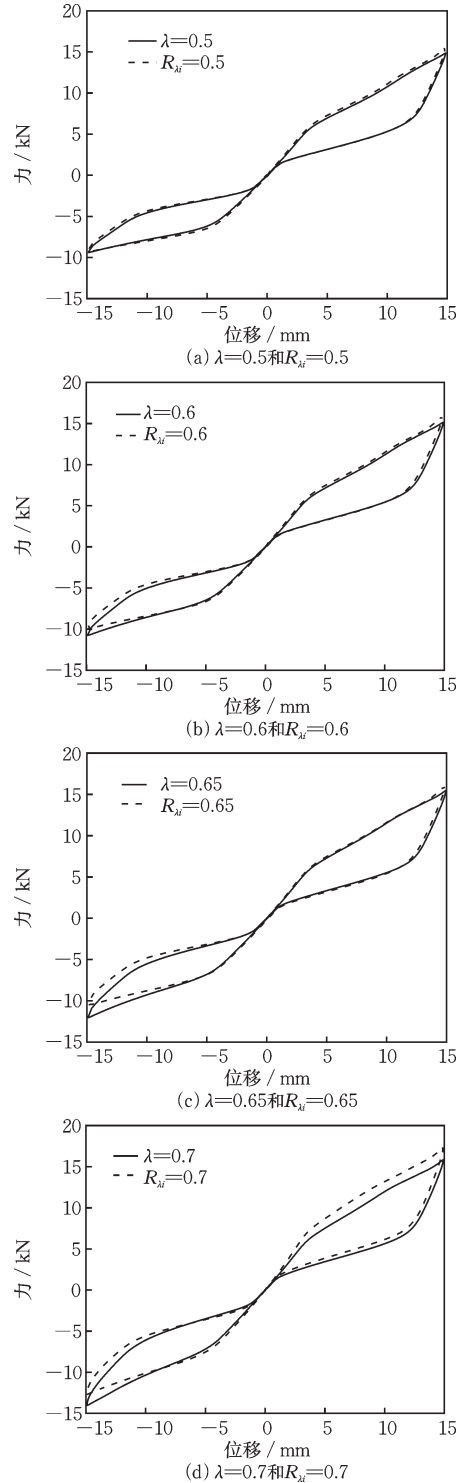


图14 不同尺寸钢板形状优化前后的SRSHD性能对比
Fig.14 Comparison of SRSHD performance before and after optimization of steel plates of different shapes and sizes

的最大恢复力,而压缩阶段的最大恢复力则因为填充钢板的面积减小而降低。

对于钢板形状变化带来的性能提升具体的量化分析见表4和表5。从结果中可以清晰地观察到,当

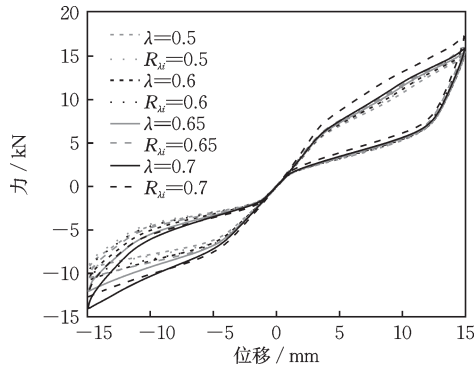


图15 填充不同尺寸和形状钢板的SRSHD性能对比
Fig.15 Performance comparison of SRSHD filled with steel plates of different sizes and shapes

填充钢板的形状优化为圆形后,填充不同尺寸钢板的SRSHD,其耗能能力均得到显著提升。圆形钢板的平滑边缘在受力时能促使应力更均匀地分布,有效减少应力集中,让高阻尼橡胶更充分地参与耗能过程。在最大恢复力方面,优化填充钢板后,拉伸阶段最大恢复力提升,压缩阶段则减小,但是 $R_{\lambda i}=0.7$ 的钢板压缩阶段的最大恢复力仍然超过了 $\lambda=0.65$ 的钢板。考虑到 $\lambda=0.65$ 的钢板体积小于 $R_{\lambda i}=0.7$ 的钢板体积,这表明在压缩阶段SRSHD的最大恢复力与SRSHD的整体刚度之间的关系联系十分密切。圆形钢板平滑边缘带来的良好应力分布特性使拉伸阶段最大恢复力得以提升。

表4 不同填充钢板尺寸形状优化后SRSHD耗能能力提升的量化分析

Table 4 Quantitative analysis of enhancement in energy dissipation capacity of SRSHD after optimization of filled steel plates of different sizes and shapes

项目	拉伸阶段能量耗散/J	提升/%	压缩阶段能量耗散/J	提升/%	全过程能量耗散/J	提升/%
$\lambda=0.5$	53.98		34.27		88.26	
$R_{\lambda i}=0.5$	57.37	6.28	38.98	13.74	96.36	9.18
$\lambda=0.6$	56.33		36.68		93.03	
$R_{\lambda i}=0.6$	59.06	4.85	40.65	10.82	99.73	7.20
$\lambda=0.65$	58.2		39.22		97.42	
$R_{\lambda i}=0.65$	60.13	3.32	42.14	7.45	102.3	5.01
$\lambda=0.7$	60.38		43.95		104.34	
$R_{\lambda i}=0.7$	61.77	2.30	46.44	5.67	108.49	3.98

表5 不同填充钢板尺寸形状优化后SRSHD最大恢复力提升的量化分析

Table 5 Quantitative analysis of enhancement in maximum restoring force of SRSHD after optimization of filled steel plates of different sizes and shapes

项目	拉伸阶段最大恢复力/kN	提升/%	压缩阶段最大恢复力/kN	提升/%
$\lambda=0.5$	14.86		9.4	
$R_{\lambda i}=0.5$	15.61	5.06	9.33	-0.73
$\lambda=0.6$	15.16		10.76	
$R_{\lambda i}=0.6$	16.02	5.69	10.01	-7.48
$\lambda=0.65$	15.48		12.03	
$R_{\lambda i}=0.65$	16.27	7.12	10.57	-8.62
$\lambda=0.7$	15.88		14.03	
$R_{\lambda i}=0.7$	17.40	9.63	12.71	-10.38

4 结论

基于填充前的SMA蜂窝阻尼器实验结果和填充后的数值模拟研究,探讨了填充高阻尼橡胶及不同尺寸和形状的钢板前后SMA蜂窝阻尼器对能量吸收以及结构刚度和承载能力的影响,从研究中可

以得出以下结论:

(1)基于过去的实验,通过变壁厚和圆角优化设计减小了实验中SMA蜂窝阻尼器试件在尖角处应力集中的问题。

(2)高阻尼橡胶的填充使SMA蜂窝阻尼器有着显著的性能提升。高阻尼橡胶的刚度小于SMA材料,因此与SMA蜂窝阻尼器协同工作时表现良好。

(3)在高阻尼橡胶中进一步填充相同形状的钢板没有对SMA的自定心能力产生影响。SRSHD中的高阻尼橡胶和钢板协同作用性能相比于SRHD更加优秀。钢板的体积增大提升了SRSHD整体刚度,与试件的性能有着明显的正相关关系。

(4)将SRSHD中填充的钢板优化为圆形钢板后,在更小的体积下使SRSHD拥有更加优秀的耗能能力。试件在压缩阶段的最大恢复力与试件的整体刚度有着更强的关联。而耗能能力以及拉伸阶段的性能则与SRSHD中填充物的应力分布关系更大。

参考文献:

[1] 张令心,刘妍,钟江荣,等. 1949—2021年我国成灾地震及其损失的时空特征[J]. 自然灾害学报, 2024, 33(4): 152-163.
Zhang L X, Liu Y, Zhong J R, et al. Spatiotemporal characteristics of disaster-inducing earthquakes and their losses in China from 1949 to 2021 [J]. Journal of Natural Disasters, 2024, 33(4): 152-163. (in Chinese)

[2] Asfaw A M, Cao L, Ozbulut O E, et al. Development of a shape memory alloy-based friction damper and its experimental characterization considering rate and temperature effects [J]. Engineering Structures, 2022, 273: 115101.

[3] Kumar M, Whittaker A S, Constantinou M C. An advanced numerical model of elastomeric seismic isolation bearings [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2014, 43(13): 1955-1974.

[4] Muñoz-Igualada J, Shivik J A, Domínguez F G, et al. Traditional and new cable restraint systems to capture fox in central Spain [J]. The Journal of Wildlife Management, 2010, 74(1): 181-187.

[5] Lee D, Taylor D P. Viscous damper development and future trends [J]. The Structural Design of Tall Buildings, 2001, 10(5): 311-320.

[6] 曾明,赵均. 钢框架-混凝土核心筒结构装设粘滞阻尼器的减震控制分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(5): 524-529.
Zeng M, Zhao J. Seismic reduction and control analysis of steel frame-concrete core wall structure with viscous dampers [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(5): 524-529. (in Chinese)

[7] 张敏,杜曜涵. 带摩擦阻尼器底部框架砌体减震结构地震响应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(6): 950-958.
Zhang M, Du Y H. Analysis of seismic response of shock-absorbing structure with friction dampers in bottom frame [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(6): 950-958. (in Chi-

nese)

[8] 王烨华,周云,丁鲲. 粘弹性阻尼减震结构研究与应用的新进展[J]. 防灾减灾工程学报, 2006, 26(1): 109-121.
Wang Y H, Zhou Y, Ding K. Recent advances in research and applications of viscoelastically damped structure [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2006, 26(1): 109-121. (in Chinese)

[9] 刘猛,王君杰,桂鉴臣,等. 功能可控型减隔震支座的研发与性能分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(4): 893-901.
Liu M, Wang J J, Gui J C, et al. Development and performance analysis on a functionally controllable seismic bearing [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(4): 893-901. (in Chinese)

[10] Xu G, Guo T, Li A Q, et al. Review on self-centering damper for seismic resilient building structures [J]. Structures, 2023, 54: 58-77.

[11] Muntasir Billah A, Rahman J, Zhang Q. Shape memory alloys (SMAs) for resilient bridges: A state-of-the-art review [J]. Structures, 2022, 37: 514-527.

[12] Fang C, Zheng Y, Chen J B, et al. Superelastic NiTi SMA cables: Thermal-mechanical behavior, hysteretic modelling and seismic application [J]. Engineering Structures, 2019, 183: 533-549.

[13] Dolce M, Cardone D, Marnetto R. Implementation and testing of passive control devices based on shape memory alloys [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2000, 29(7): 945-968.

[14] Qiu C X, Fang C, Liang D, et al. Behavior and application of self-centering dampers equipped with buckling-restrained SMA bars [J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(3): 035009.

[15] Cao S S, Ozbulut O E. Long-stroke shape memory alloy restrainers for seismic protection of bridges [J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(11): 115005.

[16] Cao S S, Ozbulut O E, Shi F, et al. Experimental and numerical investigations on hysteretic response of a multi-level SMA/lead rubber bearing seismic isolation system [J]. Smart Materials and Structures, 2022, 31(3): 035024.

[17] Lagoudas D C, Khan M M, Mayes J J. Modelling of shape memory alloy springs for passive vibration isolation [C]//Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New York, New York, USA: American Society of Mechanical Engineers, November 11-16, 2001: pp. 259-269.

[18] 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.

[19] Yang W F, Cao S S, Liu W X, et al. Mechanical prop-

- erties of a novel friction dampers incorporated with buckling restrained shape memory alloy bars [J]. *Advances in Bridge Engineering*, 2024, 5(1): 21.
- [20] Cao S S, Hu F L, Zhang G X. Superelastic shape memory alloy honeycomb damper [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(24): 13154.
- [21] Kee P, Thayamballi A, Sung K. The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels [J]. *Thin-Walled Structures*, 1999, 35(3): 205-231.
- [22] Qi C, Jiang F, Yang S. Advanced honeycomb designs for improving mechanical properties: A review [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 227: 109393.
- [23] Zhang Y T, Wei D X, Chen Y, et al. Non-negligible role of gradient porous structure in superelasticity deterioration and improvement of NiTi shape memory alloys [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2024, 186: 48-63.
- [24] Michailidis P A, Triantafyllidis N, Shaw J A, et al. Superelasticity and stability of a shape memory alloy hexagonal honeycomb under in-plane compression [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2009, 46(13): 2724-2738.
- [25] Ghoddousi S, Yakhforvazan A V, Safarabadi M. Effects of foam filling on flexural performance of 3D printed chiral honeycombs [J]. *Thin-Walled Structures*, 2025, 209: 112893.
- [26] Xu Z, Yao N, Li H, et al. The analysis and prediction of nonlinear damping characteristics of partially filled all-composite honeycomb-core sandwich panels [J]. *Thin-Walled Structures*, 2025, 205: 112463.
- [27] 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.
- [28] Tsai C S, Chen K C, Chen C S. Seismic resistibility of high-rise buildings with combined velocity-dependent and velocity-independent devices [C]// *Technologies in reactor safety, fluid-structure interaction, sloshing and natural hazards engineering: 1998 ASME (American Society of Mechanical Engineers)/JSME joint pressure vessels and piping conference*. San Diego, California: July 26-30, 1998.
- [29] Marshall J D, Chamey F A. Seismic response of steel frame structures with hybrid passive control systems [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2012, 41(4): 715-733.
- [30] Xu Z D, Wang D X, Shi C F. Model, tests and application design for viscoelastic dampers [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2011, 17(9): 1359-1370.
- [31] 左志鹏, 王义强. 减隔震技术在连续梁桥中的应用 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2013, 33(增1): 154-160.
Zuo Z P, Wang Y Q. Application of seismic mitigation and isolation technique on continuous girder bridge [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2013, 33(Sup 1): 154-160. (in Chinese)
- [32] 江苏省地震局隔震研究中心. 高阻尼增强隔震橡胶新型材料及其应用简介 [J]. *地震学刊*, 1996, (2): 77-79.
Seismic Isolation Research Center of Jiangsu Provincial Earthquake Bureau. Brief introduction of new rubber material with high damping and enhanced isolation and its application [J]. *Journal of Seismology*, 1996, (2): 77-79. (in Chinese)
- [33] 周敕, 朱国强, 刘平均, 等. 软土地区高墩梁桥抗震支座选型及横向约束构造研究 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2021, 41(5): 936-945.
Zhou M, Zhu G Q, Liu P J, et al. Research on seismic bearing type selection and transverse restraint structure of high pier beam bridge in soft soil area [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2021, 41(5): 936-945. (in Chinese)
- [34] Modhej A, Zahrai S M, Moghadam A S. Effect of rubber properties on the performance of Visco-Hyperelastic Damper (VHD) [J]. *Structures*, 2023, 58: 105683.
- [35] Ahmad M, Seyed Mehdi Z. Cyclic testing of a new visco-plastic damper subjected to harmonic and quasi-static loading [J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2022, 81(3): 317-33.
- [36] Modhej A, Zahrai S M. Numerical study of visco-hyperelastic damper with high axial damping rubber subjected to harmonic loading [J]. *Structures*, 2021, 29: 1550-1561.
- [37] Wei D X, Shi Y F, Qian H, et al. Seismic response control of recentering steel frame with innovative SMA-high damping rubber dampers under sequential earthquakes [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2025, 188: 109033.
- [38] Hu Q F, Zhang X Y, Zhang J J, et al. A review on energy absorption performance of auxetic composites with fillings [J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 205: 112348.
- [39] Ostadrahimi A, Taheri-Behrooz F, Choi E. Effect of tension-compression asymmetry response on the bending of prismatic martensitic SMA beams: Analytical and experimental study [J]. *Materials*, 2021, 14(18): 5415.
- [40] Wang Z G, Liu J F. Numerical and theoretical analysis of honeycomb structure filled with circular aluminum tubes subjected to axial compression [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 165: 626-635.
- [41] Alkhader M, Vural M. Mechanical response of cellular solids: Role of cellular topology and microstructural irregularity [J]. *International Journal of Engineering Science*, 2008, 46(10): 1035-1051.

(本文编辑:周小潭)