

# SMA - 叠层橡胶复合隔震支座耗能能力的 影响因素研究\*

王锦力, 牟善鑫, 刘海卿

(辽宁工程技术大学 建筑工程学院, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:** 为研究 SMA 丝 - 叠层橡胶支座和 SMA 绞线 - 叠层橡胶支座力学性能, 基于 Auricchio & Sacco 本构模型分析形状记忆合金材料的超弹性特性, 采用有限元方法分别建立这两种橡胶支座模型, 在此基础上以位移幅值和竖向荷载作为主要影响因素, 数值模拟分析得出两种橡胶支座的恢复力 - 位移滞回曲线, 建立了位移和荷载变量对支座的等效水平刚度、等效阻尼比和单位循环耗能的关系, 进而分析两种橡胶支座的性能差异, 为该支座的工程设计和使用提供理论依据。

**关键词:** SMA 丝 - 绞线叠层橡胶支座; Auricchio & Sacco 本构; 有限元模拟; 滞回曲线

**中图分类号:** TU352      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000 - 0666(2017)01 - 0070 - 05

## 0 引言

隔震结构是指在建筑物上部结构与基础之间设置隔震层, 以延长结构自震周期、增大阻尼、减小地震作用对上部结构的响应, 达到预期的防震要求。形状记忆合金 (Shape Memory Alloy 缩写为 SMA) 是一种新型功能性和智能性材料, 它与普通材料相比, 具有独特的超弹性和形状记忆特性。应用 SMA 丝的超弹性和形状记忆特性与普通叠层橡胶支座制成的 SMA - 复合叠层橡胶支座在智能隔震减震领域具有良好的效果。

我国对形状记忆合金丝的基本力学性能进行了大量的研究并取得了重要的研究成果 (王社良等, 2007; 贺志荣, 2005; 钱辉等, 2013); 有关学者对应用了 SMA 丝 (绞线) 的叠层橡胶支座的动力响应和数值模拟等性能进行了研究 (庄鹏, 薛素铎, 2013; 庄鹏等, 2006; 刘海卿等, 2007); 但对于 SMA 丝和 SMA 绞线对支座刚度、耗能和等效阻尼比影响的分析很少, 为此本文应用 Auricchio & Sacco 本构模型采用有限元分析软件 ADINA 对 SMA 丝和 SMA 绞线对支座的性能差异进行数值模拟对比。

## 1 SMA 丝材料数值模拟研究

### 1.1 Auricchio&Sacco 本构模型

形状记忆合金材料的应变可以用如下公式表示:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \xi_s \beta + \alpha(T - T_0). \quad (1)$$

其中,  $\varepsilon^e$  为弹性应变,  $\xi_s \beta$  为相变应变,  $\alpha(T - T_0)$  为温度引起应变,  $\beta$  为马氏体逆向变参数,  $\alpha$  为热膨胀系数,  $T_0$  为参考温度,  $T$  为试验温度。

形状记忆合金材料的应力 - 应变关系可表示为

$$\sigma = E[\varepsilon - \xi_s \beta - \alpha(T - T_0)]. \quad (2)$$

弹性模量  $E$  与马氏体体积分数  $\xi_s$  有关, 采用下式:

$$E(\xi_s) = \frac{E_A E_S}{E_S + \xi_s(E_A - E_S)}. \quad (3)$$

式中,  $E_A$  为奥氏体弹性模量 (MPa),  $E_S$  为马氏体弹性模量 (MPa)。

\* 收稿日期: 2016 - 04 - 26.

基金项目: 辽宁省科学事业公益研究基金 (2015004019) 中国煤炭工业协会科学技术研究指导性计划项目 (MT-KJ2014 - 199) 资助

1.2 模型验证

王社良（2000）使用有效长度 150 mm、直径 0.1 mm、最大恢复应变 8%、最大恢复力为 600 Mpa 的形状记忆合金丝做拉伸试验，得到了一条形状饱满的应力应变曲线。数值模拟采用 Auricchio & Sacco 本构，通过有限元分析软件 ADINA 对相变伪弹性进行模拟，基本材料参数见表 1。通过试验结果和有限元模拟结果对比，数值模拟与试验结果拟合良好，如图 1 所示。

试验结果与模拟结果如图 1 所示，通过对比分析，数值模拟结果与文献的试验结果有较好的拟合性，应用此本构模型可以对 SMA 丝的超弹性进行较好的模拟。

表 1 SMA 材料参数

Tab. 1 Material parameters of SMA

| 模量/Mpa        | 转换温度<br>/(℃) | 转换常数<br>/(Mpa·℃ <sup>-1</sup> ) | 最大残余<br>应变 |
|---------------|--------------|---------------------------------|------------|
|               | $M_f=9$      |                                 |            |
| $E_A=67\ 300$ | $M_S=18.4$   | $C_A=13.8$                      | 0.067      |
| $E_S=26\ 300$ | $A_S=34.5$   | $C_S=8$                         |            |
|               | $A_f=49$     |                                 |            |

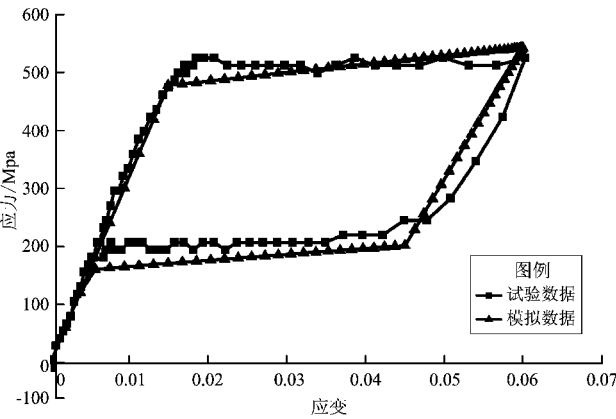


图 1 SMA 丝数值模拟与试验结果对比  
Fig. 1 Comparison of SMA wire numerical simulation and test results

2 SMA 丝、SMA 绞线 - 叠层橡胶支座有限元分析

2.1 模型建立

SMA - 叠层橡胶支座主要由形状记忆合金丝（绞线）、橡胶、薄钢板组成。橡胶属于超弹性近

似不可压缩材料，具有较好的弹性，在外力作用下能发生较大位移，表现出复杂的材料非线性和几何非线性，采用 Mooney - Rivlin 模型分析和计算（江宜城等，2008；郑明军等，2003）。形状记忆合金丝（绞线）用 Truss 单元连接于叠层橡胶支座的封板之间，整体结构采用 8 结点 3D 实体单元建模，效果图如图 2 所示。

2.2 材料参数

叠层橡胶支座直径 200 mm，材料参数如表 2、3 所示，试件中钢板均采用 Q235。形状记忆合金丝直径 1 mm，绞线用 7 根直径 1 mm 合金丝按照钢绞线国家标准机械捻制而成，加工后绞线直径 4.5 mm，主要性能参数如表 1（刘海卿，2006）。

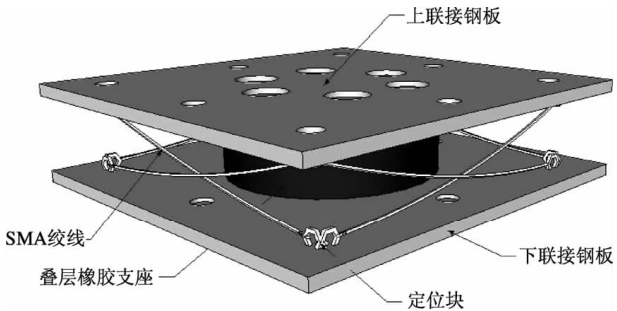


图 2 SMA 绞线 - 叠层橡胶支座构造  
Fig. 2 Sketch map of SMA strands laminate rubber bearing structure

表 2 200 mm 的叠层橡胶支座规格

Tab. 2 Standard of 20 mm laminate rubber bearing 单位：mm

| 直径  | 中孔直径 | 橡胶厚度 | 钢板厚度 | 封板厚度 | 高度 |
|-----|------|------|------|------|----|
| 200 | 40   | 3    | 1.5  | 11   | 70 |

表 3 叠层橡胶垫参数

Tab. 3 Parameters of the laminate rubber mat

| 邵氏<br>硬度 | 弹性模量/<br>MPa | 剪切模量/<br>MPa | 体积模量/<br>GPa | 密度/<br>(kg·m <sup>-3</sup> ) |
|----------|--------------|--------------|--------------|------------------------------|
| 45       | 1.8          | 0.581        | 1.9          | 1.5                          |

2.3 数值模拟

分析 SMA 丝 - 叠层橡胶支座和 SMA 绞线 - 叠层橡胶支座在受力和变形不同条件下的性能差异，用表 1 形状记忆合金丝材料参数进行了 2 种工况模拟试验。模拟工况 1，控制竖向压力不变，研究水平位移幅值加载对形状记忆合金丝、绞线的影响。

模拟工况 2，保持两试件水平位移幅值不变，对其进行变压力加载，工况数值见表 4。模拟试验可得

到 SMA 丝、绞线叠层橡胶支座的恢复力 - 位移滞回曲线，实验结果如 3 图所示。

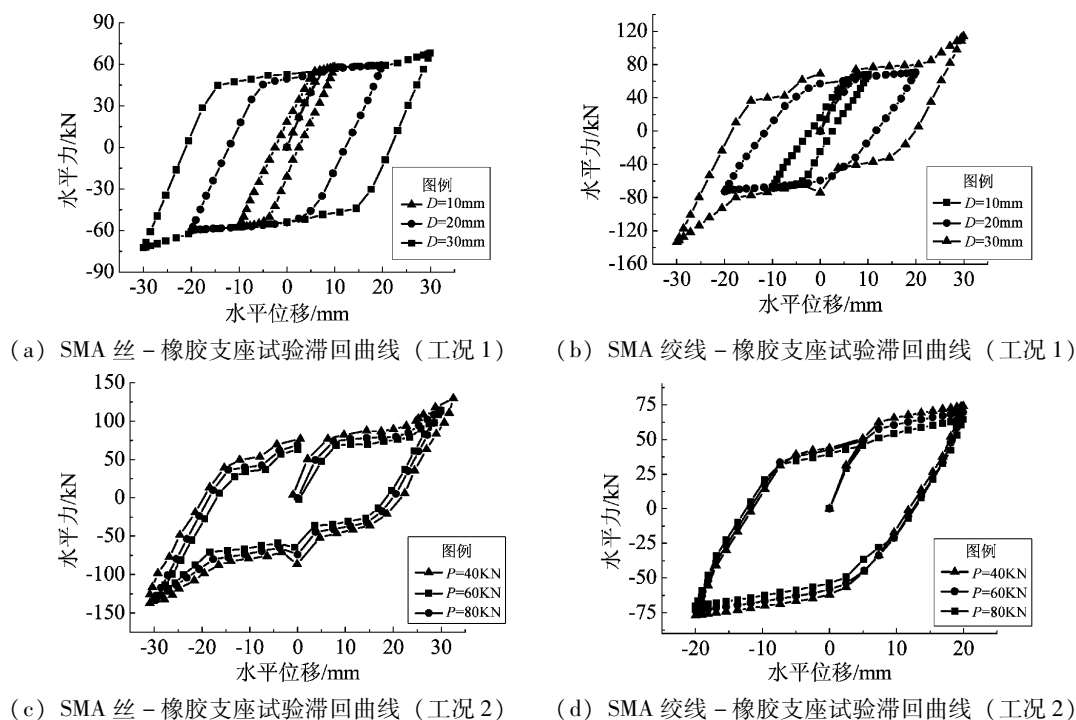


图 3 不同工况下 SMA 绞线 - 橡胶支座试验滞回曲线

Fig. 3 Curves under different conditions of SMA strand - rubber bearing tests

表 4 SMA 丝、绞线 - 橡胶叠层橡胶支座模拟工况

Tab. 4 Simulation condition of SMA wire and SMA strands rubber laminate bearing

| 模拟工况 | 竖向荷载 $P/\text{kN}$ |    |    | 位移幅值 $D/\text{mm}$ |    |    |
|------|--------------------|----|----|--------------------|----|----|
| 工况一  | 30                 | 30 | 30 | 10                 | 20 | 30 |
| 工况二  | 40                 | 60 | 80 | 20                 | 20 | 20 |

### 3 结果分析

根据试验工况结果计算 SMA 丝、绞线 - 叠层橡胶支座的单位循环耗能  $W_s$ 、等效刚度  $K_s$  和等效阻尼比  $\xi_s$ ，由于滞回曲线的形状和面积反映了叠层橡胶支座的耗能能力，滞回曲线越饱满，面积越大，耗能越大，阻尼越大，因此，可用滞回曲线所包围的面积表示单位循环耗能，等效刚度和等效阻尼比的计算公式如下

$$K_s = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (4)$$

$$\xi_s = \frac{W_s}{2\pi K_s \Delta^2} \quad (5)$$

式中， $X_{\max}$  为最大水平正位移； $X_{\min}$  为最大水平负位移； $Q_{\max}$  为与  $X_{\max}$  对应的水平剪力； $Q_{\min}$  为与  $X_{\min}$  对应的水平剪力； $\Delta$  为循环幅值。

#### 3.1 等效刚度

由有限元分析软件经公式计算得出 SMA 丝、绞线 - 叠层橡胶支座位移幅值和竖向力与刚度的关系曲线，如图 4a、b 所示。结果表明：(1) 位移幅值和竖向应力的变化对 SMA 丝、绞线叠层橡胶支座的等效刚度有影响，且影响效果与加载值有关；(2) 等效刚度随位移幅值和竖向力的增大而减小，且位移幅值对刚度的影响较明显；(3) SMA 绞线较 SMA 丝对支座的等效水平刚度影响较大，为支座提供更大的等效水平刚度。

#### 3.2 等效阻尼比

位移幅值和竖向荷载对 SMA 丝、绞线 - 叠层橡胶支座等效阻尼比的影响如图 5a、b 所示。结果表明：在一定位移变化范围内等效阻尼比随位移的增大而增大，高于某一值时随位移的增大而减小，且竖向荷载的变化对等效阻尼比的影响较小；外界条件相同时，SMA 丝 - 叠层橡胶支座比 SMA 绞线 - 叠层橡胶支座的等效阻尼比大。

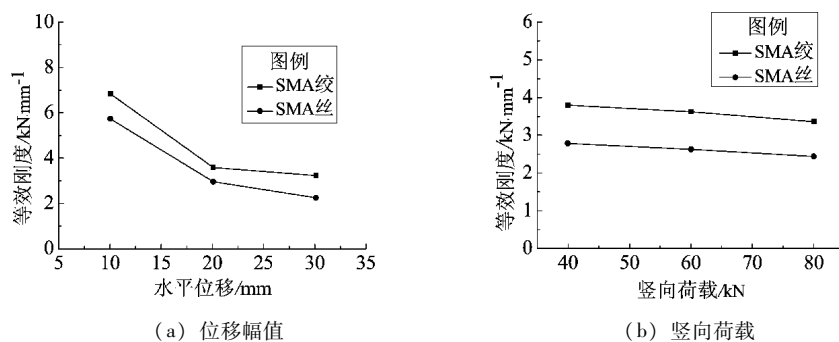


图 4 SMA 丝、绞线的等效刚度

Fig. 4 Equivalent stiffness of SMA wire and strand

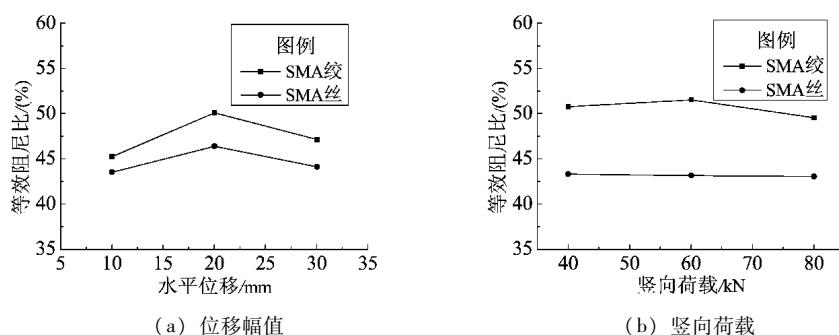


图 5 SMA 丝、绞线的等效阻尼比

Fig. 5 Equivalent damping ratio of SMA wire and strand

### 3.3 单位循环耗能

位移幅值和竖向荷载对 SMA 丝、绞线 - 叠层橡胶支座等效阻尼比的影响如图 6 所示。图示结果表明: 不论是 SMA 丝还是 SMA 绞线 - 叠层橡胶支座, 水平位移与单位循环耗能成正比, 竖向荷载

与单位循环耗能成反比, 且位移因素对单位循环耗能的影响非常显著; SMA 绞线的耗能能力优于 SMA 丝的耗能能力, 说明 SMA 绞线可以有效提高叠层橡胶支座的超弹性性能, 但同时也降低了它的耗能能力。

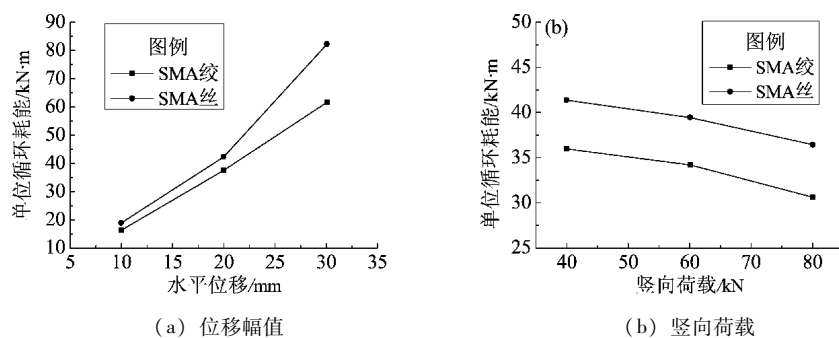


图 6 SMA 丝、绞线的单位循环耗能

Fig. 6 Dissipation per loop of SMA wire and strand

## 4 结论

本文基于 Auricchio & Sacco 本构模型分析 SMA 丝 - 叠层橡胶支座和 SMA 绞线 - 叠层橡胶支座力

学性能, 通过研究位移幅值和竖向荷载的变化规律, 建立了位移和荷载变量对支座的等效水平刚度、等效阻尼比和单位循环耗能的关系, 分析了 SMA 线 - 叠层橡胶支座与 SMA 绞线 - 叠层橡胶支座的性能差异, 初步得到如下结论:

(1) 采用 Auricchio & Sacco 本构模型能够较完整地反映形状记忆合金材料超弹性和形状记忆特性, 数值模拟结果与试验结果有较高的拟合度, 说明该本构模型有广泛的适用性。

(2) 由结果分析可得到, 位移幅值和竖向应力的变化对 SMA 丝、绞线叠层橡胶支座的单位循环耗能、等效刚度和等效阻尼比都有影响, 其影响效果与加载方式和加载数值有关, 且在一定范围内位移幅值对单位循环耗能、等效刚度和等效阻尼比的影响效果比较明显。

(3) 对 2 种工况的分析表明, SMA 绞线 - 叠层橡胶支座较 SMA 丝 - 叠层橡胶支座有更好的耗能能力和刚度, 但等效阻尼比低于 SMA 丝 - 叠层橡胶支座, 说明 SMA 绞线相对 SMA 丝具有更强大的超弹性性能, 但在获得这一方面的优势时, 不可避免地降低了它的单位变形耗能能力。

#### 参考文献:

- 贺志荣. 2005. TiNi 形状记忆合金的工程应用研究现状和展望[J]. 材料导报, 19(4): 50 - 53.
- 江宜城, 聂肃非, 叶志雄, 等. 2008. 多铅芯橡胶隔震支座非线性力学性能试验研究[J]. 工程力学, 25(7): 11 - 17.
- 刘海卿, 陈小波, 王学庆. 2007. SMA 绞线 - 叠层橡胶复合支座结构的动力反应[J]. 自然灾害学报, 16(5): 130 - 134.
- 刘海卿. 2006. SMA 绞线 - 叠层橡胶复合支座的研制及其隔震性能试验研究[D]. 天津: 天津大学.
- 钱辉, 李静斌, 李宏男, 等. 2013. 结构振动控制的不同直径 NiTi 丝力学性能试验研究[J]. 振动与冲击, 32(24): 89 - 95.
- 王社良, 赵祥, 朱军强, 等. 2007. 形状记忆合金材料相变伪弹性有限元分析[J]. 工程力学, 24(10): 180 - 185.
- 王社良. 2000. 形状记忆合金在结构震动控制中的应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社.
- 郑明军, 王文静, 陈政南. 2003. 橡胶 Mooney - Rivlin 模型力学性能常数的确定[J]. 橡胶工业, 50(8): 462 - 465.
- 庄鹏, 薛素铎, 李彬双. 2006. SMA - 橡胶支座隔震系统的动力响应研究[J]. 振动与冲击, 25(3): 85 - 89.
- 庄鹏, 薛素铎. 2013. SMA - 橡胶支座恢复力的实用模拟[J]. 振动与冲击, 32(8): 204 - 212.

## The Performance Contrast Research between SMA Wire and SMA Strands laminate Rubber Bearing

WANG Jinli, MOU Shanxin, LIU Haiqing

(College of Architecture and Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000 Liaoning, China)

#### Abstract

In order to study the mechanics performance difference of SMA wire - laminated rubber bearing and SMA strands laminate rubber bearing, constitutive model of Auricchio&Sacco is established to study the hyperelastic characters of SMA. Taking the displacement amplitude and vertical load as the main factors, finite element model is established based on SMA wire - laminated rubber bearing and SMA strands laminate rubber bearing. The restoring force displacement - hysteresis curves of SMA wire - laminated rubber bearing and SMA strands laminate rubber bearing were established. The curves about displacement amplitude and the vertical load on the SMA wire and wire - laminated rubber bearing equivalent horizontal stiffness and equivalent damping ratio and energy consumption were established. This study analyzed the differences about laminated rubber bearing and provided the basis to engineering use and design.

**Keywords:** SMA wire - strand laminated rubber bearing; Auricchio & Sacco constitutive; finite element model; hysteresis curve