

文章编号: 1004-4574(2007)06-0199-05

# 形状记忆合金丝-橡胶支座 钢框架隔震效果分析

刘海卿, 王学庆, 杨 飞, 崔衍斌

(辽宁工程技术大学 土木建筑工程学院, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:** 根据作者开发研制的形状记忆合金丝-橡胶复合支座, 建立了传统抗震结构和两种不同支座隔震结构体系的运动方程, 并对某个实际工程四层钢框架结构进行了数值模拟, 分析其在阪神波和 E1 Centro 波作用下的时程反应。研究表明, SMA 丝-橡胶复合支座是一种很有效的隔震装置, 将它用于钢框架结构, 能有效地减小结构的位移、速度及加速度时程反应, 而对于加速度峰值较大的阪神波的隔震效果更为明显, 说明该复合支座能有效地提供罕遇地震作用下钢结构的隔震效果。

**关键词:** 形状记忆合金; SMA 丝-橡胶复合支座; 钢框架; 隔震结构

中图分类号: TU352.1 文献标识码: A

## Analysis of isolation effect of steel frame with shape memory alloy fiber-rubber bearing

LIU Hai-qing WANG Xue-qing YANG Fei CUI Yan-bin

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

**Abstract** Motion equations of traditional earthquake resistant structure and shock isolation structure with different isolators were presented based on shape memory alloy (SMA) fiber-laminated rubber bearing developed by the authors. Numerical simulation of a four-floor steel-frame structure with different isolators was carried out to analyze the seismic response of structure excited by Hanchin and E1 Centro waves. Analysis shows that SMA fiber-laminated rubber bearing works very well in shock isolation and the dynamic response, such as displacement, velocity and acceleration of steel-frame structure supported on it can be reduced effectively. The larger acceleration of seismic wave, the more remarkable of isolation effect, that is to say, SMA fiber-laminated rubber bearing makes isolation effect dramatically better when structure is excited by rare earthquake.

**Keywords** shape memory alloy; SMA fiber-rubber bearing; steel-frame; isolated structure

普通橡胶支座是目前应用最广泛的隔震元件, 但由于橡胶本身耗能不足, 当遭遇罕遇地震作用时易造成因隔震层变形过大所导致的支座失稳<sup>[1]</sup>; 为克服普通橡胶支座震后失稳和更好地恢复原位, 作者设计了一种新型的 SMA 丝-橡胶复合支座<sup>[2-7]</sup>。为了更好的研究该复合支座的隔震效果, 同时验证该复合支座对于钢框架结构地震激励下振动控制的有效性, 本文将对传统抗震结构和两种不同支座隔震结构体系进行地震响应的数值模拟对比分析, 研究该复合支座能有效地提高罕遇地震作用下钢框架结构的隔震效果。

收稿日期: 2007-05-10 修订日期: 2007-10-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50678079); 辽宁省教育厅科研基金资助项目 (2004D245)

作者简介: 刘海卿 (1965-), 男, 教授, 主要从事工程结构抗震及振动控制研究。E-mail: lhq2008@163.com

# 1 隔震结构体系运动方程的建立

## 1.1 传统抗震结构运动方程

传统单自由度结构地震作用下的运动方程为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + K_1x = -M\ddot{x}_g \quad (1)$$

其中,  $\ddot{x}$ ,  $\dot{x}$ ,  $x$  分别为质点的加速度、速度和位移反应;  $M$ ,  $C$  和  $K_1$  分别为质点的质量、阻尼和刚度;  $\ddot{x}_g$  为地面运动加速度。

## 1.2 普通橡胶支座下隔震结构运动方程

当设置普通橡胶隔震支座时, 地震作用下隔震体系运动方程为

$$M(\ddot{x} + \ddot{x}_b + \ddot{x}_g) + K_2x_b = 0 \quad (2)$$

其中,  $M$  为上部结构总质量,  $\ddot{x}$ ,  $\ddot{x}_b$ ,  $\ddot{x}_g$  为上部结构的水平加速度反应、底板水平加速度反应和地面水平加速度反应,  $x_b$  为底板水平位移反应,  $K_2$  为橡胶支座的水平刚度。

上部结构相对运动方程为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + K_1x = -M(\ddot{x}_g + \ddot{x}_b) \quad (3)$$

## 1.3 SMA丝-橡胶复合支座下隔震结构运动方程

当设置 SMA 丝-橡胶复合支座时, 地震作用下的隔震体系运动方程为

$$M(\ddot{x} + \ddot{x}_b + \ddot{x}_g) + (K_2 + K_3)x_b = 0 \quad (4)$$

其中,  $M$  为上部结构总质量,  $\ddot{x}$ ,  $\ddot{x}_b$ ,  $\ddot{x}_g$  为上部结构的水平加速度反应、底板水平加速度反应和地面水平加速度反应,  $x_b$  为底板水平位移反应,  $K_2$  为橡胶支座的水平刚度,  $K_3$  为 SMA 丝的刚度。

上部结构相对运动方程为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + K_1x = -M(\ddot{x}_g + \ddot{x}_b) \quad (5)$$

# 2 钢框架结构隔震性能数值模拟分析

采用 ANSYS 软件对钢结构进行单自由度模型模拟分析。根据 建筑抗震设计规范 (GB50011-2001) 可知, 橡胶支座的平均压应力限值为 15 MPa。由于模拟的是 4 层钢结构, 根据结构重量计算, 应采用直径 600 mm 的同规格 SMA 丝-橡胶复合支座。

## 2.1 模型简介

本模型为一个 4 层钢框架结构, 每层高度均为 3.6 m, 结构总高度为 3.6 m × 4 = 14.4 m, 开间均为 7.2 m × 7.2 m, 横向总长为 7.2 m × 6 = 43.2 m, 纵向总宽为 7.2 m × 2 = 14.4 m, 钢柱尺寸为 H400 × 300 × 16 × 24 mm, 钢梁尺寸为 H400 × 200 × 10 × 14 mm, 钢材弹性模量  $E = 2.06 \times 10^{11}$  Pa, 泊松比  $\nu = 0.3$ , 密度为 7800 kg/m<sup>3</sup>。楼板和外墙厚度均为 200 mm, 采用 C30 混凝土, 即  $E = 3.0 \times 10^{10}$  Pa, 泊松比  $\nu = 0.2$ , 密度为 2700 kg/m<sup>3</sup>。

ANSYS 中, 钢柱和钢梁采用 BEAM188 单元, 楼板和外墙采用 SHELL63 单元。为了模拟 3 种不同约束下的隔震效果, 我们采用下述方法: 固定支座下将所有柱底的全部自由度约束; 普通橡胶支座下采用 COMBIN14 单元模拟隔震支座; SMA 丝-橡胶复合支座下由于形状记忆合金采用 COMBIN40 单元, 故采用 COMBIN40+COMBIN14 两种单元来模拟<sup>[8-10]</sup>。

## 2.2 阪神波和 EICentro 波下的瞬态分析

利用日本的阪神波和美国的 EICentro 波进行地震波模拟, 得出此时钢框架下顶层和一层的位移、速度和加速度, 两种地震波下时程分析结果见表 1 和表 2。

表 1 阪神波下不同结构时程分析结果一览表

Table 1 Time history analysis of different structures excited by Hanshin wave

结构类型	地震响应最大幅值			
	位移 / mm	速度 / (mm s <sup>-1</sup> )	加速度 / (mm s <sup>-2</sup> )	
传统抗震结构	顶层	25 117	317. 923	4 108. 18
	一层	24 472	309. 769	4 001. 99
普通橡胶支座隔震结构	顶层	12 437	121. 28	1 276. 5
	一层	11 897	125. 47	1 031. 5
SMA丝-橡胶复合	顶层	7 170. 5	71. 941	626. 26
合支座隔震结构	一层	7 160. 3	71. 550	709. 61

表 2 E1Centro波下不同结构时程分析结果一览表

Table 2 Time history analysis of different structures excited by E1Centro wave

结构类型	地震响应最大幅值			
	位移 / mm	速度 / (mm s <sup>-1</sup> )	加速度 / (mm s <sup>-2</sup> )	
传统抗震结构	顶层	7 407. 8	105. 22	1 237. 4
	一层	7 217. 8	102. 53	1 206. 3
普通橡胶支座隔震结构	顶层	5 643. 5	70. 948	568. 41
	一层	5 404. 2	65. 719	454. 11
SMA丝-橡胶复合	顶层	3 326. 5	35. 586	335. 30
合支座隔震结构	一层	3 302. 6	37. 549	544. 55

## 2.2.1 阪神波

阪神波作用下的时程分析结果如图 1 所示。

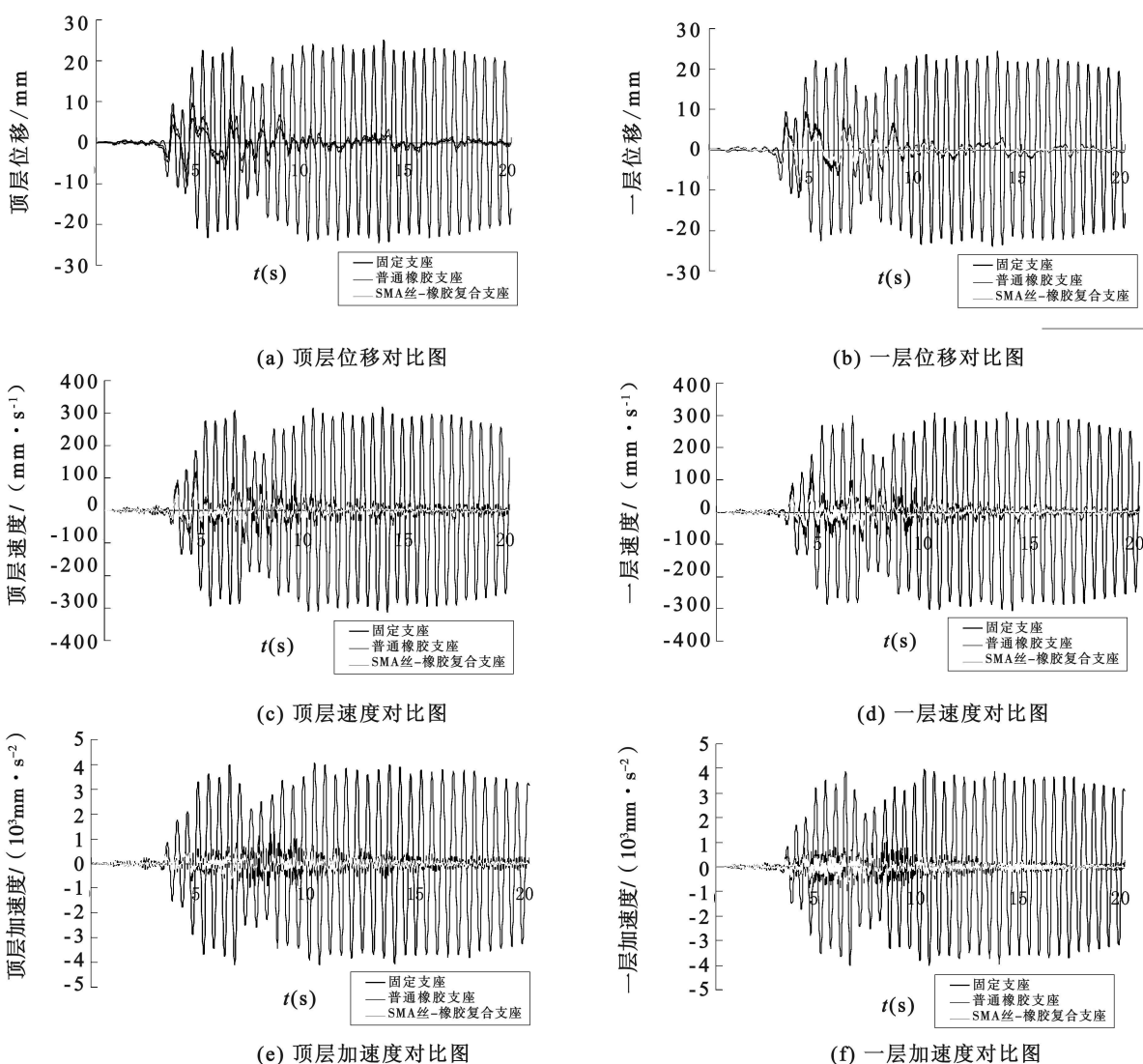


图 1 阪神波作用下钢框架结构的地震响应时程曲线

Fig 1 Seismic response time histories of steel-frame construction excited by Hanshin wave

### 2.2.2 E1Centro波

埃尔森特罗波作用下的时程分析结果如图 2所示。

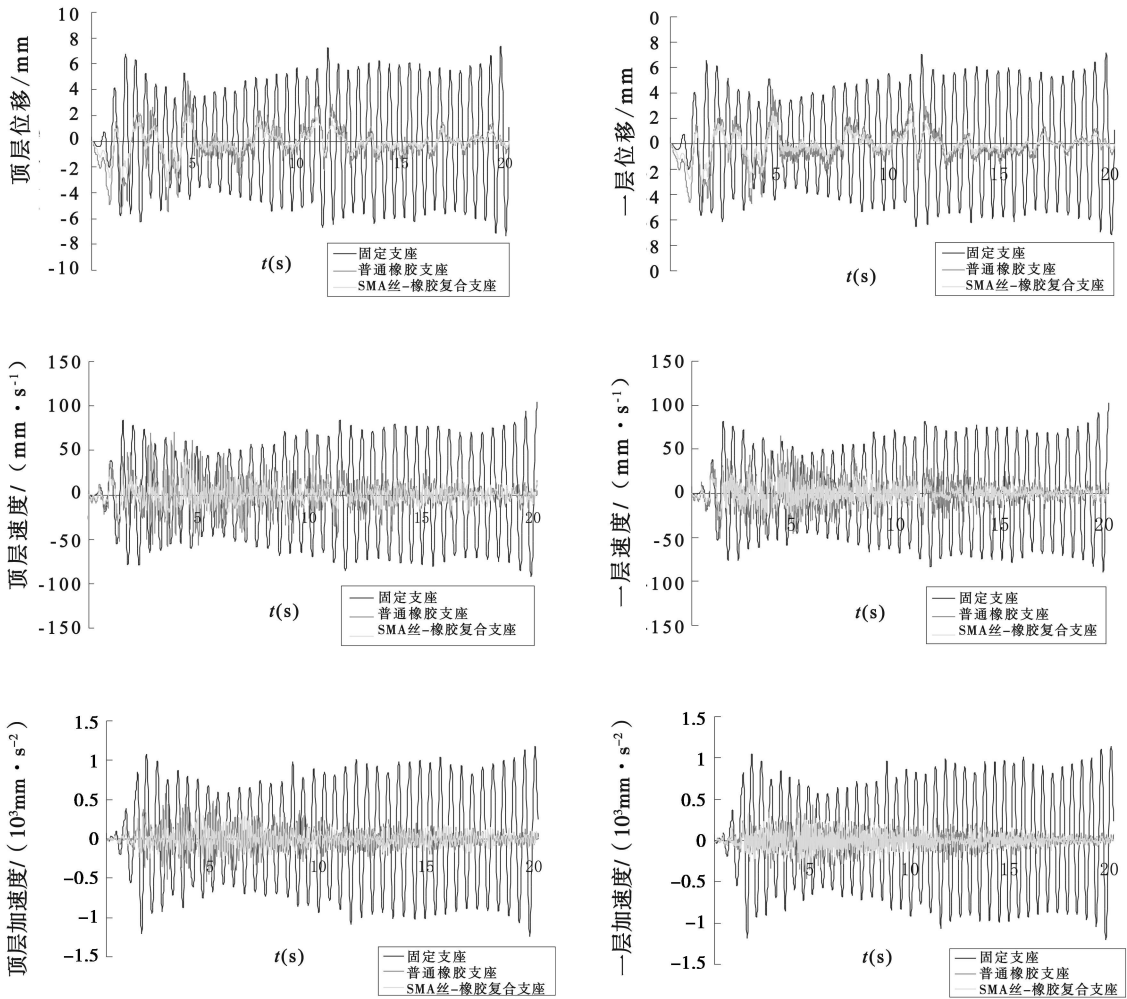


图 2 E1Centro波作用下钢框架结构的地震响应时程曲线

Fig 2 Seismic response time histories of steel-frame construction excited by E1Centro wave

### 3 形状记忆合金丝 – 橡胶复合支座的隔震效果分析

阪神波加速度峰值为  $817.82 \text{ cm/s}^2$ , E1Centro波加速度峰值为  $341.7 \text{ cm/s}^2$ 。从上述图表可以看出, 无论是阪神波还是 E1Centro波, SMA丝 – 橡胶复合支座条件下钢框架的顶层及一层位移、速度和加速度均降低很多。与普通橡胶支座对比, SMA丝 – 橡胶复合支座条件下钢框架的各种响应均有所降低。

对阪神波而言, 从位移看, 传统抗震结构的最大位移绝对值为  $25.117 \text{ mm}$ , 普通橡胶支座为  $12.437 \text{ mm}$ , SMA丝 – 橡胶复合支座为  $7.1705 \text{ mm}$ , 相比之下, 普通橡胶支座降低  $50.5\%$ , SMA丝 – 橡胶复合支座降低  $71.5\%$ ; 从速度看, 传统抗震结构的最大速度绝对值为  $317.92 \text{ mm/s}$ , 橡胶支座为  $121.28 \text{ mm/s}$ , SMA丝 – 橡胶复合支座为  $71.941 \text{ mm/s}$ , 相比之下, 普通橡胶支座降低  $61.9\%$ , SMA丝 – 橡胶复合支座降低  $77.4\%$ ; 从加速度看, 传统抗震结构的最大加速度绝对值为  $4108.2 \text{ mm/s}^2$ , 橡胶支座为  $1276.5 \text{ mm/s}^2$ , SMA丝 – 橡胶复合支座为  $626.26 \text{ mm/s}^2$ , 相比之下, 普通橡胶支座降低  $68.9\%$ , SMA丝 – 橡胶复合支座降低  $84.8\%$ 。

对 E1Centro波而言, 从位移看, 传统抗震结构的最大位移绝对值为  $7.4078 \text{ mm}$ , 普通橡胶支座为  $5.6435 \text{ mm}$ , SMA丝 – 橡胶复合支座为  $3.3265 \text{ mm}$ , 相比之下, 普通橡胶支座降低  $23.8\%$ , SMA丝 – 橡胶复合支座降低  $55.1\%$ ; 从速度看, 传统抗震结构的最大速度绝对值为  $105.22 \text{ mm/s}$ , 橡胶支座为  $70.948 \text{ mm/s}$ , SMA丝 – 橡胶复合支座为  $35.586 \text{ mm/s}$ , 相比之下, 普通橡胶支座降低  $32.6\%$ , SMA丝 – 橡胶复合支座降低  $66.2\%$ ; 从加速度看, 传统抗震结构的最大加速度绝对值为  $1237.4 \text{ mm/s}^2$ , 橡胶支座为  $568.41 \text{ mm/s}^2$ , SMA

丝 - 橡胶复合支座为  $335 \text{ } 30 \text{ mm} / \text{s}^2$ , 相比之下, 普通橡胶支座降低 54.1%, SMA 丝 - 橡胶复合支座降低 72.9%。

## 4 结论

(1) SMA 丝 - 橡胶复合支座比普通橡胶支座具有更明显的隔震效果, 无论是位移、速度还是加速度, 两种地震波下均至少降低 15%。

(2) 该复合支座对罕遇地震 (加速度峰值较大的阪神波) 的隔震效果更加明显。显示出本文设计的 SMA 丝 - 橡胶复合支座的隔震优越性。

## 参考文献:

- [1] 周福霖. 工程结构减震控制 [M]. 北京: 地震出版社, 1997
- [2] 李忠献, 陈海泉, 刘建涛. 应用 SMA 复合橡胶支座的桥梁隔震 [J]. 地震工程与工程振动, 2002, 4(22): 143-148
- [3] 刘海卿, 李忠献. 应用形状记忆合金 (SMA) 橡胶支座的建筑结构隔震 [J]. 自然灾害学报, 2006, 15(3): 86-90
- [4] 刘海卿, 陈小波, 王学庆. 基于状态空间法的 SMA - 橡胶支座隔震结构分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(5): 173-176
- [5] 杨飞. 应用 SMA 丝 橡胶复合支座的钢框架结构隔震研究 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2006
- [6] 陈海泉. 应用形状记忆合金的大跨桥梁结构振动控制理论研究及振动台试验 [D]. 天津: 天津大学, 2003
- [7] 刘海卿, 李忠献, 陈海泉. 基于 SMA 复合橡胶支座的建筑结构自适应隔震 [J]. 振动工程学报, 2004, 8(增刊): 1060-1063
- [8] 郝文化. ANSYS 土木工程应用实例 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005
- [9] 刘涛, 杨凤鸣. 精通 ANSYS [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002
- [10] 龚曙光. ANSYS 工程应用实例解析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003