

形状记忆合金-摩擦摆支座滞回性能数值模拟

庄鹏^{1,2,3}, 杨忠贺¹

(1. 北京建筑大学 土木与交通工程学院, 北京 100044;

2. 北京建筑大学 大型多功能振动台阵实验室, 北京 100044;

3. 北京建筑大学 工程结构与新材料北京高等学校工程研究中心, 北京 100044)

摘要: 在常规的摩擦摆支座 FPB 中引入呈竖向布置的形状记忆合金 SMA 丝, 可形成一种新型隔震支座 SMA-FPB。根据先期开展的试件设计方案, 利用 ABAQUS 建立了上述 SMA-FPB 的精细化有限元模型。在此基础上, 进行了该新型 SMA-FPB 隔震装置在往复加载下的滞回性能数值模拟, 将其与数值模拟结果进行了对比, 从而验证了所建模型的准确性。基于上述数值模型, 考察了 SMA 丝数量、摩擦系数以及滑移面曲率半径对此隔震装置滞回性能的影响。研究表明, 随 SMA 丝数量和摩擦系数的变化, SMA-FPB 的等效刚度、单位循环耗能以及等效阻尼均产生了较大幅度的增加和减小, 而滑动面曲率半径的变化对 SMA-FPB 滞回性能影响较小。

关键词: 摩擦摆支座; 形状记忆合金; 滞回性能; 往复加载; 有限元模拟

中图分类号: TU973.31

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)04-0132-06

Numerical Simulation of Hysteresis Behaviors of Shape Memory Alloy-Friction Pendulum Bearing

ZHUANG Peng^{1,2,3}, YANG Zhonghe¹

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;

2. Multi-Functional Shaking Tables Laboratory, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;

3. Beijing Higher Institution Engineering Research Center of Structural Engineering and New Materials, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: A conventional friction pendulum bearing (FPB) was combined with SMA wires with a vertical configuration to form a novel SMA-FPB. According to the specimen design for the previous experiment, a refined finite element model of the SMA-FPB is established using ABAQUS. Moreover, the cyclic responses of the SMA-FPB isolator are simulated considering the experimental loading conditions. The accuracy of the numerical model of the SMA-FPB is verified by comparing the numerical results with the experimental results. Based on the numerical model, the effects of the number of SMA wires, friction coefficient, and slip surface curvature radius on the hysteresis performance of the isolation device were investigated. The analytical results show that the changes in the number of SMA wires and friction coefficient, the equivalent stiffness, unit cycle energy consumption, and equivalent damping of SMA-FPB all increase and decrease significantly, while the change in the curvature radius of the sliding surface has little effect on the hysteresis performance of SMA-FPB.

Keywords: friction pendulum bearing; shape memory alloys; hysteresis behavior; cyclic loading; finite element simulation

收稿日期: 2023-04-09

修稿日期: 2023-05-07

基金项目: 北京市自然科学基金项目(8182016); 北京建筑大学大型多功能振动台阵实验室开放研究专项基金(2022MFSTL12)

作者简介: 庄鹏(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要从事结构工程等方面的工作。E-mail: zhuangpeng@bucea.edu.cn

通讯作者: 杨忠贺(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为结构工程。E-mail: yang18201653226@163.com

20 世纪 80 年代,美国学者 Zayas 提出了摩擦摆支座^[1] (friction pendulum bearing, FPB)。FPB 因其优秀的隔震耗能与自复位能力,其在被提出后就成为国内外的研究^[2-4] 与工程应用^[5-8] 的热点。在 FPB 的基础上,科研人员陆续研发了复摩擦摆支座^[9] (double friction pendulum bearing, DFPB),三重摩擦摆支座^[10-11] (triple friction pendulum bearing, TFPB) 等改进型 FPB。然而,上述 FPB 及其衍生的球面滑动摩擦隔震装置由相互独立的部件(顶板、底板、滑块)依靠接触摩擦形成整体,若强震导致的滑行使位移超过此类隔震支座的位移设计能力,滑块与顶、底板的滑动区域边缘挡环可能发生碰撞并导致支座解体,从而威胁隔震结构的抗震安全^[12]。因此,如何改进 FPB 的控制能力,特别是改善其在位移极限状态下的抗提离和抗解体能力,吸引了国内外专家的关注。

近年来,智能材料开始被引入土木工程领域,其中的形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)拥有独特的超弹性耗能特性,可用于设计新型减隔震装置^[13]。当前,可用选用的 SMA 部件主要为 SMA 丝或 SMA 拉索。例如,Dezifuli 等在橡胶支座周边布置交叉状 SMA 丝,设计了一种 SMA-橡胶支座^[14]。Silwal 等在粘弹性阻尼器中布设 SMA 拉索,形成了一种 SMA-粘弹性耗能装置^[15]。Cao Sasa 等利用多组不同功能的 SMA 拉索改善传统铅芯橡胶支座的隔震性能,提出了一种具有多级水准的铅芯橡胶支座^[16]。此外,SMA 还可用于开发新型滑动隔震装置。Zheng Wenzhi 等^[17] 在 FPB 的滑块和顶板之间连接了呈横向的 SMA 丝,提出了一种新型 FPB。由于 SMA 丝仅能承受拉力,因此,该隔震支座往复滑动时,有部分 SMA 丝受压退出工作,降低了 SMA 的使用效率。Liang Dong 等^[18] 将 SMA 拉索呈竖向布置于平面滑动摩擦支座的顶板和底板之间,当该支座往复滑动时,SMA 拉索始终处于受拉状态,保证了其高效发挥耗能限位作用。但是,在 SMA 拉索发挥作用之前,平面滑动摩擦支座尚缺乏有效的复位机制。

基于以往研究成果,庄鹏等^[19] 将 SMA 丝呈竖向布置在 FPB 滑块周边,研制了一种新型隔震支座 SMA-FPB,对其开展了滞回性能试验研究,验证了附加 SMA 的 FPB 具有优良的自适应控制性能。本文在此基础上,通过 ABAQUS 建立了上述 SMA-FPB 的精细化有限元模型,利用所获得的试验结果验证了该模型的准确性,进而,将 SMA 丝数量、摩擦系数

以及滑动面曲率半径作为影响参数,研究了其对支座滞回性能的影响。

1 SMA-FPB 构造与隔震控制机理

1.1 基本构造

SMA-FPB 构造示意图见图 1。由图 1 可知,该支座由 FPB 与竖向安插的 SMA 丝组合而成,而 FPB 由顶板、底板和滑块组成。当 SMA-FPB 的滑块沿水平方向启动后,初始呈竖向布置的 SMA 丝开始产生倾斜并受拉,并在张拉过程中由松弛状态逐步拉紧发挥耗能控制作用。

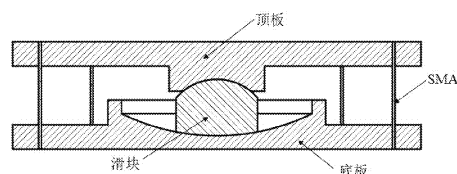


图 1 SMA-FPB 构造示意图

1.2 隔震控制机理

FPB 启动后,其在水平方向的恢复力 F_B 为:

$$F_B = \frac{W}{R}u + \mu W \operatorname{sgn}(\dot{u}) \quad (1)$$

式中: W 为支座所受压力; R 为支座滑动面的曲率半径; u 为支座的水平位移; $\dot{u}$ 为支座水平向滑动速度; μ 为支座滑动面的摩擦系数。

SMA-FPB 是在 FPB 的基础上加入了 SMA 丝,在 FPB 产生水平滑动时 SMA 丝受拉产生拉应力,其拉伸量 ΔL 和轴向控制力 F_{SMA} 可表示为:

$$\Delta L = \sqrt{u^2 + (L_1^2 + \delta_h^2)} - L_1 \quad (2)$$

$$F_{SMA} = \sum_{i=1}^n \sigma_i A_i \quad (3)$$

式中: L_1 为 SMA 丝的初始长度; δ_h 为支座的竖向位移; σ_i 为 SMA 丝产生的正应力; A_i 为单个 SMA 丝的横截面面积。

SMA 丝总拉力在水平方向和竖向的分量分别为:

$$F_{Sh} = \frac{u}{\sqrt{u^2 + (L_1^2 + \delta_h^2)}} F_{SMA} \quad (4)$$

$$F_{Sv} = \frac{L_1}{\sqrt{u^2 + (L_1^2 + \delta_h^2)}} F_{SMA} \quad (5)$$

式中: F_{Sh} 为 SMA 丝控制力的水平分量; F_{Sv} 为 SMA 丝控制力的竖向分量。

SMA-FPB 总体的水平向恢复力 F_H 可表示为:

$$F_H = \frac{N}{R}u + \mu N \operatorname{sgn}(\dot{u}) + F_{Sh} \quad (6)$$

2 SMA-FPB 精细化有限元建模

2.1 SMA 本构模型

利用 ABAQUS 内置的 Super Elasticity 材料模型,建立 SMA 的本构模型。该材料模型基于 Auricchio 本构关系^[20],设定奥氏体与马氏体为各向同性的线弹性体,相应的分段线性化模型如图 2 所示,其中,加载过程(0→A→B→C→D→A→0)分别代表加载时的奥氏体弹性变形以及奥氏体向马氏体的转变、卸载时马氏体向奥氏体的逆向转变及奥氏体的弹性变形。

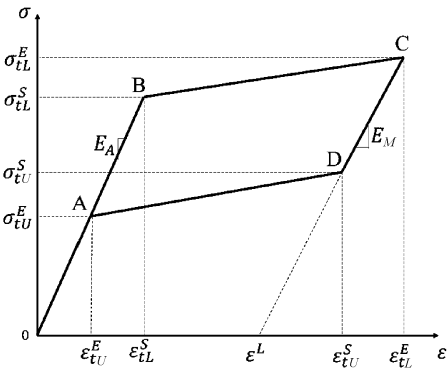


图 2 SMA 分段线性化模型示意图

上述模型各阶段的应力-应变关系为:

$$\sigma = \begin{cases} E_A \varepsilon, & (0 \rightarrow B, A \rightarrow 0) \\ \sigma_{il}^S + \frac{\sigma_{il}^E - \sigma_{il}^S}{\varepsilon_{il}^E - \varepsilon_{il}^S} (\varepsilon - \varepsilon_{il}^S), & (B \rightarrow C) \\ \sigma_{il}^E + E_M (\varepsilon - \varepsilon_{il}^E), & (C \rightarrow D) \\ \sigma_{iu}^E + \frac{\sigma_{iu}^S - \sigma_{iu}^E}{\varepsilon_{iu}^S - \varepsilon_{iu}^E} (\varepsilon - \varepsilon_{iu}^E), & (D \rightarrow A) \end{cases} \quad (7)$$

式中: E_A 为奥氏体弹性模量; E_M 为马氏体弹性模量; σ_{il}^S 为拉伸相变起点应力; σ_{il}^E 为拉伸相变终点应力; σ_{iu}^S 为卸载相变起点应力; σ_{iu}^E 为卸载相变终点应力; ε^L 为单轴转换应变; $\varepsilon_{il}^S = \sigma_{il}^S/E_A$ 为拉伸相变起点应变; $\varepsilon_{il}^E = \varepsilon^L + \sigma_{il}^E/E_M$ 为拉伸相变终点应变; $\varepsilon_{iu}^S = \varepsilon^L + \sigma_{iu}^S/E_M$ 为卸载相变起点应变; $\varepsilon_{iu}^E = \sigma_{iu}^E/E_A$ 为卸载相变终点应变。

建立 SMA 本构模型所需的力学性能参数参考已开展的 SMA 丝单轴拉伸试验结果^[19](见图 3)。可以看出,SMA 丝的滞回曲线呈现为独特的旗帜型,且残余应变较小,较好地展现了 SMA 材料的超弹性。通过对试验数据的拟合,获得了 SMA 本构模型的关键参数取值,如表 1 所示。

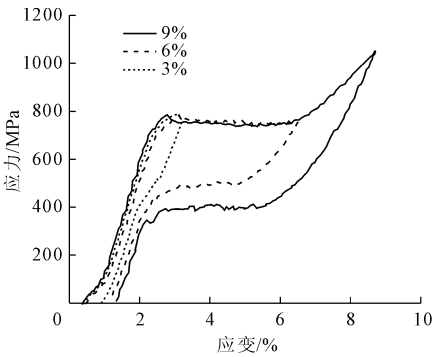


图 3 SMA 丝单轴拉伸试验曲线

表 1 SMA 本构模型参数取值

参数名称	参数符号	参数数值
奥氏体模量	E_A/MPa	20333.3
马氏体模量	E_M/MPa	16704.0
单轴转换应变	ε^L	0.0398
拉伸相变起点应力	σ_{il}^S/MPa	600.00
拉伸相变终点应力	σ_{il}^E/MPa	827.60
卸载相变起点应力	σ_{iu}^S/MPa	391.38
卸载相变终点应力	σ_{iu}^E/MPa	286.37

根据表 1 所示的参数取值,将 SMA 本构关系赋予了 T3D2 两节点线性三维桁架单元,在 ABAQUS 中建立了直径为 1 mm、长度为 100 mm 的 SMA 丝模型。仿照试验条件,对该 SMA 丝进行轴向拉、卸载数值模拟,所得应力-应变曲线数值模拟结果与试验结果的对比如图 4 所示,可见二者吻合较好。

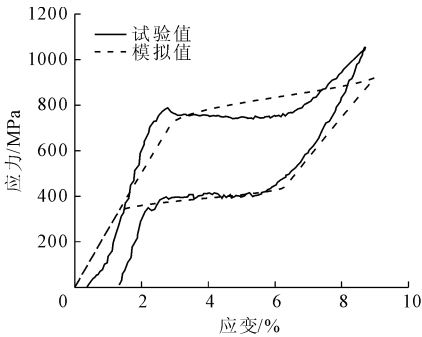


图 4 数值与试验滞回曲线对比

2.2 SMA-FPB 有限元模型建立

根据已往试验研究^[19]所采用的 SMA-FPB 试件尺寸(见图 5),建立其有限元模型,如图 6 所示。其中,FPB 的顶板、底板和内部滑块均采用 Q345B 钢材,弹性模量为 2.06×10^5 MPa,泊松比为 0.3,采用 C3D8R 减缩积分八结点线性六面体单元进行网格划分。滑动面在法向为硬接触,在切向为罚函数(摩擦系数为 0.10)。通过 MPC 约束,将 SMA 丝与

FPB 的顶板和底板进行铰接,并将 SMA 本构关系赋予 SMA 丝模型。

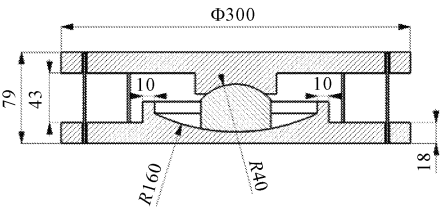


图5 SMA-FPB 尺寸图

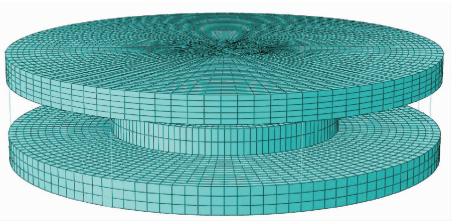


图6 SMA-FPB 有限元模型网格划分

3 有限元分析结果与试验结果对比

考虑竖向压力为 5 kN 时,对 SMA-FPB 进行水平位移幅值分别为 10 mm 和 15 mm 的往复位移加载数值模型。图 7 为 SMA-FPB 的位移云图,可以看出 SMA 丝随着滑块的运动产生拉伸变形。将有限元模拟结果与已得到试验结果^[15]进行对比,如图 8 所示。可以发现,利用模拟得到的滞回曲线与试验所得滞回曲线较为吻合,说明通过该有限元模型能够准确反映 SMA-FPB 的滞回性能。

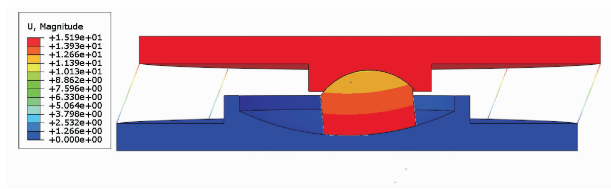


图7 SMA-FPB 位移云图

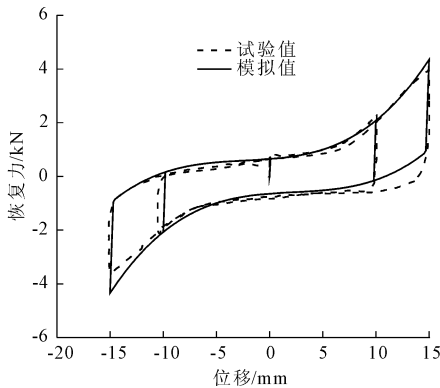


图8 试验和数值模拟滞回曲线对比

4 参数分析

4.1 SMA 丝数量的影响

利用上文所建的 SMA-FPB 有限元模型,改变支座所连接的 SMA 丝数,并对其进行滞回模拟,模拟工况如表 2 所示。选取单位循环耗能 W_d ,等效刚度 K_{eq} 和等效阻尼比 ξ_{eq} 分析隔震支座的力学性能。其中,单位循环耗能 W_d 为隔震支座加载一周时滞回曲线所包围的面积;等效刚度 K_{eq} 和等效阻尼比 ξ_{eq} 分别按如下公式计算:

$$K_{eq} = \frac{F_{max}}{D_{max}} \tag{8}$$

$$\xi_{eq} = \frac{W_d}{2\pi K_{eq} D_{max}^2} \tag{9}$$

式中: F_{max} 表示单次循环中的最大水平力, D_{max} 表示单次循环中的水平最大位移。

表2 考虑不同 SMA 数量的模拟工况

SMA 丝数量	SMA 直径/mm	位移幅值/mm	竖向力/kN	摩擦系数
2/4/6/8	1	15	6	0.10

模拟结果如图 9 所示,可以看出,随着 SMA 丝数量的增加,滞回曲线所包围的面积和恢复力都明显增大,这是由于参与工作的 SMA 丝数量增多,使得支座的刚度和耗能能力增加效果更加明显。表 3 所示为考虑不同 SMA 丝数量的隔震装置力学性能参数。经计算发现,当 SMA 丝数量由 2 根增加到 8 根时,其等效刚度增加了 167%,单位循环耗能增加了 50.66%,等效阻尼比减少了 43.35%。

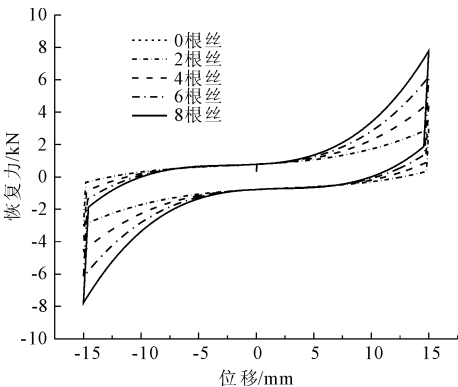


图9 含有不同 SMA 丝数量的隔震装置滞回曲线

4.2 摩擦系数的影响

选取含有 8 根 SMA 丝(直径为 1 mm)的 SMA-FPB 模型,将摩擦系数分别设置为 0.05、0.10 和 0.15。进行往复加载时,竖向压力为 6 kN,位移幅

表 3 含有不同 SMA 丝数量的隔震支座力学性能参数

SMA 丝 数量	等效刚度 /(kN·mm ⁻¹)	单位循环耗能 /(kN·mm)	等效 阻尼比
2	0.178	43.65	0.173
4	0.277	51.11	0.131
6	0.376	58.49	0.110
8	0.475	65.77	0.098

值为 15 mm。考虑不同摩擦系数的模拟结果如图 10 所示,可以看出,随着摩擦系数的增加,SMA-FPB 滞回曲线所包围的面积增大,水平恢复力增加,并且滞回曲线形状呈上下对称变化趋势,表明拟静力状态下的残余位移有所增加。表 4 为考虑不同摩擦系数情况下的力学性能参数。通过计算发现,当摩擦系数由 0.05 增长到 0.15 时,其等效刚度增加了 36.9%,单位循环耗能增加了 193.59%,等效阻尼比增加了 121.05%。

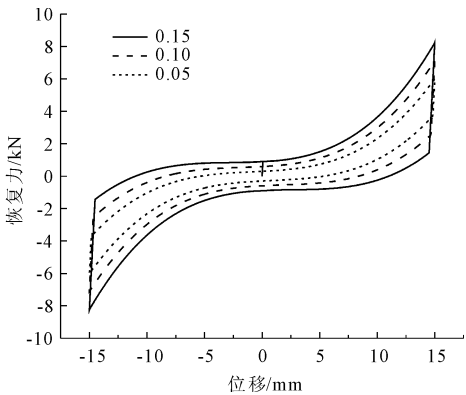


图 10 考虑不同摩擦系数的隔震装置滞回曲线

滑移面 摩擦系数	等效刚度 /(kN·mm ⁻¹)	单位循环耗能 /(kN·mm)	等效 阻尼比
0.15	0.549	97.59	0.126
0.10	0.475	65.77	0.098
0.05	0.401	33.24	0.057

4.3 滑移面曲率半径的影响

采用含有 8 根 SMA 丝(直径为 1 mm),且滑移面摩擦系数为 0.1 的 SMA-FPB,将其曲率半径分别设置为 120 mm、160 mm 和 200 mm。进行往复加载时,该 SMA-FPB 的竖向压力为 6 kN,位移幅值为 15 mm。模拟结果如图 11 所示,可以看出,随着支座滑移面曲率半径的增大,SMA-FPB 滞回曲线所包围的面积变化不大,水平恢复力小幅减小。表 5 为不同滑移面曲率半径的支座力学性能参数,可见,曲率半径由 120 mm 增加到 200 mm 时,SMA-FPB 的等效刚

度减少了 14.72%,单位循环耗能减少了 0.87%,等效阻尼比增加了 16.85%。

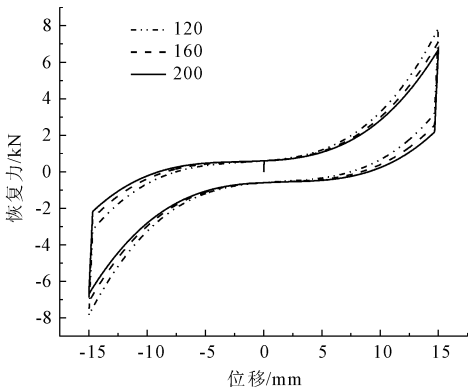


图 11 考虑不同曲率半径的隔震装置滞回曲线

曲率半径 /mm	等效刚度 /(kN·mm ⁻¹)	单位循环耗能 /(kN·mm)	等效 阻尼比
120	0.523	66.16	0.089
160	0.475	65.77	0.098
200	0.446	65.58	0.104

5 结 论

利用 ABAQUS,建立了精细化 SMA-FPB 有限元模型,并据其进行了参数分析,根据研究结果得到了如下结论:

- (1) 将 SMA 丝模型与 FPB 模型集成后可建立 SMA-FPB 有限元模型,利用该模型可较好的模拟该新型隔震装置的实际滞回性能。
- (2) 对 SMA-FPB 隔震装置中的主要参数进行了数值分析,结果表明:随着 SMA 丝数量的增加,支座等效刚度与单位循环耗能均增加,等效阻尼比减小;随摩擦系数的增加,支座的等效刚度、单位循环耗能以及等效阻尼比均增加;随滑动面曲率半径的增加,支座的等效刚度和单位循环耗能均减小,等效阻尼比增加。
- (3) 对比了主要参数对该隔震装置力学性能的影响程度,结果表明:SMA 丝数量和摩擦系数对该隔震支座的滞回性能影响显著,而滑动面曲率半径对该隔震装置力学性能参数的影响较小。

参考文献:

[1] Zayas V A, Low S S, Mahin S A. A simple pendulum technique for achieving seismic isolation[J]. Earthquake Spectra, 1990,6(2):317-333.

[2] Mokha A, Constantinou M C, Reinhorn A M, et al. Ex-

- perimental study of friction-pendulum isolation system [J]. *Journal Structural Engineering*, 1991, 117 (4): 1201-1217.
- [3] Almanzán J L, Delallera J C. Analytical model of structures with frictional pendulum isolators [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2002, 31 (2): 305-332.
- [4] Almanzán J L, Delallera J C. Physical model for dynamic analysis of structures with FPS isolators [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2003, 32 (8): 1157-1184.
- [5] Mokha A S, Amin N, Constantinou M C, et al. Seismic isolation retrofit of large historic building [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1996, 122 (3): 298-308.
- [6] Erosy S, Saadeghaziri M A, Liu G Y, et al. Analytical and experimental seismic studies of transformers isolated with friction pendulum system and design aspects [J]. *Earthquake Spectra*, 2001, 17 (4): 569-595.
- [7] Dicleli M, Mansour M Y. Seismic retrofitting of highway bridges in Illinois using friction pendulum seismic isolation bearings and modeling procedures [J]. *Engineering Structures*, 2003, 25 (9): 1139-1156.
- [8] 周忠发,朱忠义,周 笄,等. 国家体育馆 2022 冬奥新建训练馆摩擦摆隔震设计 [J]. *建筑结构*, 2020, 50 (20): 1-7.
- [9] Fenz D M, Constantinou M C. Behavior of the double concave friction pendulum bearing [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2006, 35 (11): 1403-1424.
- [10] Fenz D M, Constantinou M C. Spherical sliding isolation bearing with adaptive behavior: Theory [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2008, 37 (2): 162-183.
- [11] Fenz D M, Constantinou M C. Spherical sliding isolation bearing with adaptive behavior: Experimental verification [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2008, 37 (2): 184-205.
- [12] Becker T C, Bao Yu, Mahin S A. Extreme behavior in a triple friction pendulum isolated frame [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2017, 46 (15): 2683-2698.
- [13] Graesser E J, Cozzarelli F A, Mahin S A. Shape memory alloys as material for aseismic isolation [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1991, 117 (11): 2590-2608.
- [14] Dezifuli F H, Alam M S. Shape memory alloy wire-based smart natural rubber bearing [J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22 (4): 045013.
- [15] 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.
- [16] Cao Sasa, Ozbulut O E, Shi Fei, et al. Experimental and numerical investigation on hysteretic response of a multi-level SMA/lead rubber bearing seismic isolation system [J]. *Smart Materials and Structures*, 2022, 31 (3): 035024.
- [17] Zheng Wenzhi, Wang Hao, Li Jian, et al. Performance evaluation of bridges isolated with SMA-based friction pendulum system at low temperatures [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 125: 105734.
- [18] Liang Dong, Zheng Yue, Fang Cheng, et al. Shape memory alloy (SMA)-cable-controlled sliding bearings: development, testing, and system behavior [J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29 (8): 085006.
- [19] 庄 鹏,孙仕琦. 形状记忆合金-摩擦摆支座滞回性能试验 [J]. *建筑结构*, 2021, 51 (S1): 849-855.
- [20] Auricchio F, Taylor R L. Shape-memory alloys: modeling and numerical simulations of the finite-strain superelastic behavior [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1997, 143 (1/2): 175-194.