

文章编号:1673-2049(2016)02-0114-07

大尺寸超弹性镍钛形状记忆合金螺旋弹簧 滞回性能

庄 鹏^{1,2}, 聂 攀¹, 薛素铎³, 韩 森^{1,2}

(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 工程结构与新材料
北京高等学校工程研究中心, 北京 100044; 3. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124)

摘要:利用 2 种镍钛形状记忆合金(SMA)研制了大尺寸超弹性螺旋弹簧,对其进行了单轴反复荷载作用下的滞回性能试验,研究了超弹性 SMA 螺旋弹簧的恢复力特性与耗能能力,分析了加载频率、位移幅值对 2 种 SMA 螺旋弹簧滞回曲线以及等效刚度、单位循环耗能、等效阻尼比和残余位移等力学性能参数的影响;采用刚弹性模型和 Bouc-Wen 模型,建立了适用于整体结构分析的 SMA 螺旋弹簧简化恢复力模型,并利用该模型进行了数值模拟。结果表明:超弹性 SMA 螺旋弹簧具有稳定的滞回曲线,且具有良好的复位性能和大变形能力,可用于结构自复位控制装置的研发;数值模拟结果与试验结果吻合较好,验证了简化恢复力模型的正确性。

关键词:形状记忆合金;螺旋弹簧;超弹性;力学试验;滞回性能

中图分类号:TU352.1

文献标志码:A

Hysteretic Performance of Large Scale Superelastic NiTi Shape Memory Alloy Helical Spring

ZHUANG Peng^{1,2}, NIE Pan¹, XUE Su-duo³, HAN Miao^{1,2}

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Higher Institution Engineering Research Center of Structural Engineering and New Materials, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The large scale superelastic helical springs were fabricated with two types of NiTi shape memory alloy (SMA), and hysteretic performance test of superelastic SMA helical springs was carried out under uniaxial cyclic loading. The restoring force behavior and energy dissipation capacity of SMA helical springs were studied, and the influences of loading frequency, displacement amplitude on the hysteretic curves and the mechanical behavior parameters, such as equivalent stiffness, energy dissipation per cycle, equivalent damping ratio and residual displacement, were analyzed. Combining the rigid-elastic model and the Bouc-Wen model, a simplified restoring force model of SMA helical spring was established, which was available to integral structure, and the numerical simulation was performed with the model. The results show that SMA helical springs exhibit stable hysteresis curves, excellent re-centering performance and large deformation capacity. The remarkable properties make the SMA spring an ideal subcomponent for

收稿日期:2015-08-16

基金项目:北京市自然科学基金项目(8132024);北京市教育委员会科技计划项目(KM201510016004);

北京市优秀人才培养资助项目(2011D005017000006)

作者简介:庄 鹏(1976-),男,北京市人,讲师,工学博士,E-mail:zhuang_peng@sina.com。

use in re-centering devices. The numerical results match closely with the experimental data, proving the validity of the proposed restoring force model of the SMA helical springs.

Key words: shape memory alloy; helical spring; superelasticity; mechanical experiment; hysteretic performance

0 引言

形状记忆合金 (Shape Memory Alloy, 简称 SMA) 是一种新型功能材料, 其在奥氏体相状态所具有的超弹性效应可用于工程结构的被动减振控制^[1]。自 20 世纪 90 年代以来, 各国学者利用 SMA 丝材研制了多种阻尼器和隔震支座^[2-12]。近年来, 随着材料加工技术的发展, 大尺寸 SMA 部件逐渐被引入到结构减振控制中, 并已成为结构振动控制技术的一个研究新热点。研究人员提出了多种含有 SMA 棒或大尺寸 SMA 螺旋弹簧的减振、隔震装置, 并对其进行了理论分析和试验研究^[13-18]。

目前, 有关大尺寸 SMA 螺旋弹簧的试验研究尚不够充分, 科研人员对于 SMA 螺旋弹簧的力学行为在不同试验条件下的变化规律还缺乏深入的认识, 如 Speicher 等^[17]仅进行了单一加载频率下大尺寸 SMA 螺旋弹簧的拟静力试验。此外, 以往 SMA 螺旋弹簧的数值模拟主要采用精细化有限元模型^[18], 而缺少适合整体结构分析的理论模型。为了系统研究大尺寸 SMA 螺旋弹簧的滞回行为及其建模理论, 本文选取了 2 种中国产镍钛形状记忆合金 (NiTi SMA), 研制了簧杆直径为 12 mm 的 SMA 螺旋弹簧, 进行了多种工况下的单轴拉压循环力学试验, 分析了加载频率、位移幅值对 SMA 螺旋弹簧滞回性能的影响。在此基础上建立了 SMA 螺旋弹簧的恢复力简化计算模型, 并对恢复力模型的正确性进行了验证。本文的研究可为大尺寸 SMA 螺旋弹簧阻尼器的设计与性能分析提供参考。

1 试验概况

1.1 SMA 螺旋弹簧试件

SMA 螺旋弹簧分别由 2 种 NiTi 记忆合金材料制作而成, 其中, 材料 A 的化学成分为 $\text{Ni}_{50.8}, \text{Ti}_{49.2}$ (下标数值表示原子比百分数, 单位为%), 材料 B 的化学成分为 $\text{Ni}_{51.0}, \text{Ti}_{49.0}$ 。材料 A 和材料 B 的奥氏体相变结束温度分别为 $-12.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-26.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 故在室温下 2 种 SMA 的初始状态均为奥氏体状态。

利用上述 2 种 SMA 制作螺旋弹簧试件, 分别命名为弹簧 A (材料 A) 和弹簧 B (材料 B)。2 种弹

簧具有相同的尺寸, 如图 1 所示。

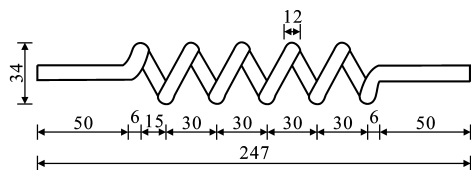


图 1 SMA 螺旋弹簧尺寸 (单位: mm)

Fig. 1 Dimensions of SMA Helical Springs (Unit: mm)

1.2 试验装置与试验工况

采用 SANS 微机控制电子万能试验机进行 SMA 螺旋弹簧滞回性能试验, 力和位移分别由试验机自带的力传感器和位移传感器测量。试验中 SMA 螺旋弹簧的加卸载过程由计算机位移控制, 采用三角波等频率加卸载, 测试结果由计算机自动采集。试验装置中的 SMA 螺旋弹簧见图 2。



图 2 试验装置中的 SMA 螺旋弹簧

Fig. 2 SMA Helical Spring in Experimental Apparatus

在室温 (约 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$) 状态下, 对超弹性 SMA 螺旋弹簧进行单轴拉压循环力学试验, 研究加载频率、位移幅值影响下 2 种试件超弹性滞回性能的变化规律, 具体试验工况为: ①加载频率依次取 0.005, 0.05, 0.15, 0.25 Hz, 位移幅值为 16 mm; ②位移幅值依次取 12, 20, 28, 36 mm, 加载频率为 0.2 Hz。

1.3 力学性能参数

为了研究 SMA 螺旋弹簧的滞回性能, 本文采用如下力学性能参数:

(1) 等效刚度 K_{eq} 为

$$K_{eq} = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}} \quad (1)$$

式中: F_{\max}, F_{\min} 分别为单次加卸载中的最大输出力

和最小输出力; D_{\max}, D_{\min} 分别为单次加卸载中的最大输出位移和最小输出位移。

(2)单位循环所消耗的能量 W_d , 即恢复力-位移曲线包围的面积, 反映 SMA 螺旋弹簧的耗能能力。

(3)等效阻尼比 ξ_{eq} 为

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

(4)残余位移, 即卸载为 0 时 SMA 螺旋弹簧的位移, 反映其自复位能力。

2 试验结果与分析

2.1 加载频率的影响

2 种 SMA 螺旋弹簧在不同加载频率下的恢复力-位移曲线如图 3 所示。试验的加载频率 f 分别为 0.005, 0.05, 0.15, 0.25 Hz, 位移幅值为 16 mm。图 4 给出了 2 种 SMA 螺旋弹簧力学性能参数随加载频率的变化曲线。

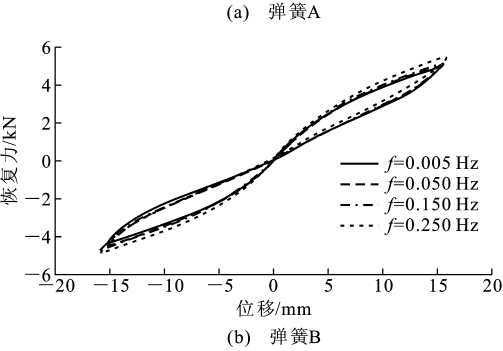
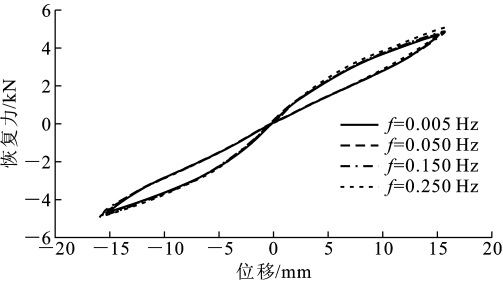
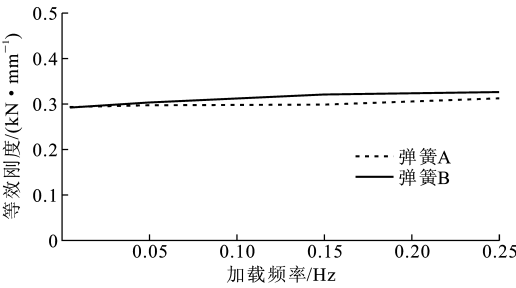


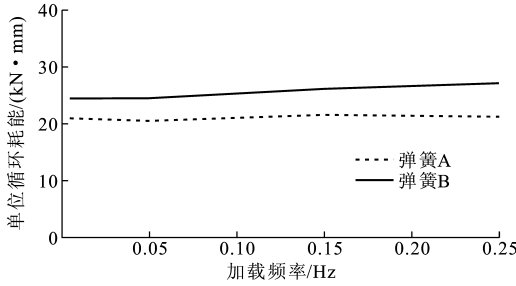
图 3 不同加载频率下 SMA 螺旋弹簧的恢复力-位移曲线
Fig. 3 Restoring Force-displacement Curves of SMA Helical Springs Under Different Loading Frequencies

由图 3 可见: 在不同加载频率条件下, 2 种 SMA 螺旋弹簧均能在正向和反向加卸载区间提供近似对称的梭形恢复力-位移曲线; 随着加载频率的增加, 弹簧 A 和弹簧 B 的恢复力-位移曲线不完全重合, 2 种弹簧的滞回环均向斜上方和斜下方发展。

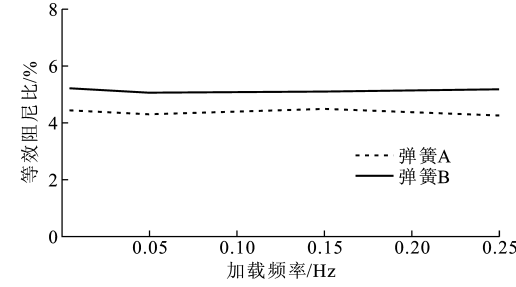
由图 4 可见: 随着加载频率的增加, 弹簧 A 的等效刚度由加载频率为 0.005 Hz 时的 $0.293\ 5\text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ 增至加载频率为 0.25 Hz 时的 $0.311\ 7\text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$, 增加了 6.20%, 而弹簧 B 的等效刚度



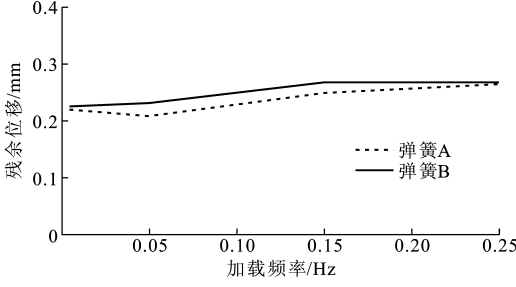
(a) 等效刚度-加载频率曲线



(b) 单位循环耗能-加载频率曲线



(c) 等效阻尼比-加载频率曲线



(d) 残余位移-加载频率曲线

图 4 SMA 螺旋弹簧力学性能参数随加载频率的变化曲线
Fig. 4 Variation Curves of Mechanical Behavior Parameters of SMA Helical Springs with Loading Frequencies

由 0.005 Hz 时的 $0.291\ 1\text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ 增至 0.25 Hz 时的 $0.325\ 3\text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$, 增加了 11.75%; 在加载频率为 0.005~0.25 Hz 的区间内, 弹簧 A 的最大单位循环耗能和最小单位循环耗能分别为 $21.439\ 1\text{ kN}\cdot\text{mm}$ 和 $20.401\ 5\text{ kN}\cdot\text{mm}$, 其最大值较最小值增加了 5.09%, 而弹簧 B 在相同加载频率区间内的最大和最小单位循环耗能分别为 $27.021\ 5\text{ kN}\cdot\text{mm}$ 和 $24.332\ 8\text{ kN}\cdot\text{mm}$, 最大值较最小值增加了 11.05%; 在加载频率区间内, 弹簧 A 的等效阻

尼比处于 4.25%~4.48% 之间,弹簧 B 的等效阻尼比处于 5.03%~5.20% 之间,2 种弹簧等效阻尼比的最大值较最小值分别提高了 5.41% 和 3.38%;弹簧 A 和弹簧 B 的残余位移随加载频率的增加而变化,在加载频率区间内,2 种弹簧的残余位移均在 0.2~0.3 mm 之间,其中,弹簧 A 的残余位移最大值较最小值增加了 23.81%,弹簧 B 的残余位移最大值较最小值增加了 21.74%。

2.2 位移幅值的影响

图 5 为 2 种 SMA 螺旋弹簧在不同位移幅值下的恢复力-位移曲线。位移幅值分别为 12, 20, 28, 36 mm, 加载频率为 0.2 Hz。图 6 给出了 2 种弹簧的力学性能参数随位移幅值的变化曲线。

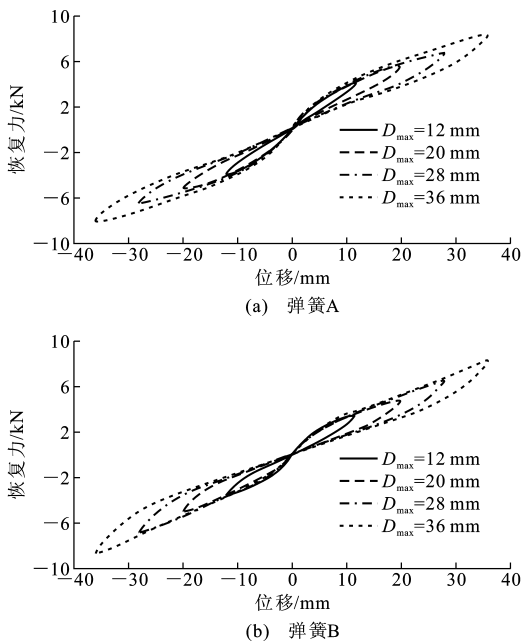


图 5 不同位移幅值下 SMA 螺旋弹簧的恢复力-位移曲线
Fig. 5 Restoring Force-displacement Curves of SMA Helical Springs Under Different Displacement Amplitudes

由图 5 可见:弹簧 A 和弹簧 B 在正向加载和反向加载过程中均可提供光滑的梭形恢复力-位移曲线,且二者的滞回曲线在正向加载和反向加载阶段基本对称,同时,2 种弹簧在卸载后几乎无残余变形;当位移幅值由 12 mm 增至 36 mm 时,弹簧 A 的滞回曲线加载段未出现非线性强化;当位移幅值小于 20 mm 时,弹簧 B 的加载段曲线未出现非线性强化,但是当位移幅值区间为 28~36 mm 时,弹簧 B 的加载段曲线斜率增加,使得其滞回曲线出现硬化的趋势。

由图 6 可见:2 种弹簧的等效刚度随位移幅值的增加而降低,如弹簧 A 的等效刚度由位移幅值为

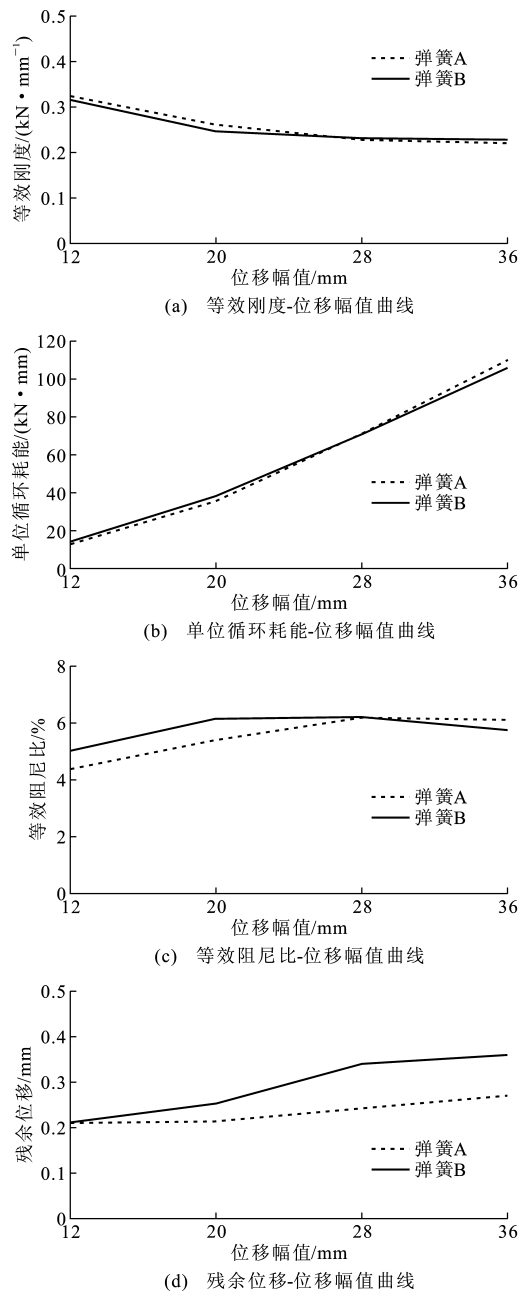


图 6 SMA 螺旋弹簧力学性能参数随位移幅值的变化曲线
Fig. 6 Variation Curves of Mechanical Behavior Parameters of SMA Helical Springs with Displacement Amplitudes

12 mm 时的 $0.3231 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ 降至位移幅值为 36 mm 时的 $0.2194 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$, 减小 29.0%, 相同条件下弹簧 B 的等效刚度由 $0.3149 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ 降至 $0.2268 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$, 减小 28.29%; 2 种弹簧的单位循环耗能随着位移幅值的增加而增大, 当位移幅值由 12 mm 增至 36 mm 时, 弹簧 A 的单位循环耗能由 $12.7813 \text{ kN} \cdot \text{mm}$ 增至 $110.3429 \text{ kN} \cdot \text{mm}$, 增加了 763.32%, 弹簧 B 的单位循环耗能由 $14.2719 \text{ kN} \cdot \text{mm}$ 增至 $106.1039 \text{ kN} \cdot \text{mm}$, 增加了 643.45%;

2 种弹簧的等效阻尼比均随位移幅值的增加而增大,在位移幅值为 28 mm 时达到最大,在这一位移幅值下弹簧 A 和弹簧 B 的等效阻尼比分别为 6.18% 和 6.22%,其后继续增大位移幅值,2 种弹簧的等效阻尼比略微降低,位移幅值为 36 mm 时弹簧 A 和弹簧 B 的等效阻尼比分别为 6.12% 和 5.75%;2 种弹簧的残余位移随位移幅值的增加而增大,位移幅值为 36 mm 时,弹簧 A 和弹簧 B 的残余位移分别为 0.27 mm 和 0.36 mm,其值较位移幅值为 12 mm 时 2 种弹簧的残余位移分别增加了 35.0% 和 71.43%,在整个位移幅值区间内,弹簧 A 的残余位移占位移幅值的 0.75%~1.67%,弹簧 B 残余位移占位移幅值的 1.0%~1.75%,2 种 SMA 螺旋弹簧的残余位移均极小。

3 SMA 螺旋弹簧恢复力的数值模拟

3.1 简化计算模型

现有关于 SMA 减振装置的数值模拟主要采用分段线性模型,但是通过分段线性模型得到的恢复力-位移曲线在转折处带有尖角,将其用于受控结构动力分析可能导致计算结果失真。基于实体单元的精细化有限元模型也可用于 SMA 螺旋弹簧的数值模拟,但其计算效率较低,难以用于整体结构的分析。为了便捷地模拟出光滑的恢复力-位移曲线,本文选择适当的函数建立 SMA 螺旋弹簧简化滞回模型,并利用试验结果对模型的正确性进行验证。

考虑到大尺寸 SMA 螺旋弹簧试验滞回曲线的特点,本文采用刚弹性恢复力模型和滞回模型进行叠加以近似模拟 SMA 螺旋弹簧的恢复力模型,即

$$F_s = F_r + F_w \quad (3)$$

式中: F_s 为 SMA 螺旋弹簧的总体恢复力; F_r 为刚弹性恢复力; F_w 为滞回模型恢复力。

在上述恢复力模型中,刚弹性恢复力模型如图 7 所示,其表达式为

$$F_r = \pm(K_r x + F_b) \quad 0 \leq |x| \leq x_d \quad (4)$$

式中: K_r 为 SMA 螺旋弹簧的屈服后刚度,可利用试验数据通过最小二乘法线性拟合得到; F_b 为位移为 0 时由刚弹性模型得到的恢复力; x 为位移; x_d 为 SMA 螺旋弹簧的设计位移。

SMA 螺旋弹簧超弹性恢复力中的滞回部分采用计算效率较高的 Bouc-Wen 模型^[19],如图 8 所示,其表达式为

$$F_w = \alpha \frac{F_y}{x_y} x + (1 - \alpha) F_y z \quad 0 \leq |x| \leq x_d \quad (5)$$

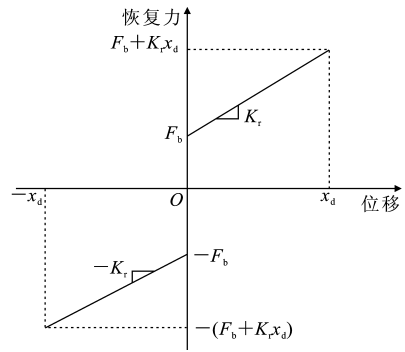


图 7 刚弹性模型

Fig. 7 Rigid-elastic Model

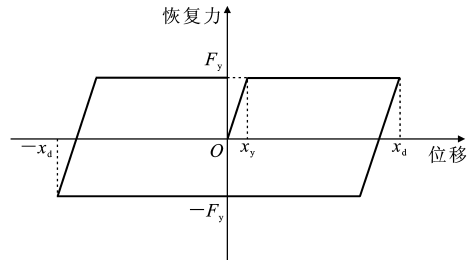


图 8 滞回模型

Fig. 8 Hysteretic Model

式中: F_y 为屈服力; x_y 为屈服位移,其值可利用试验曲线通过最小二乘法线性拟合得到; α 为刚度系数(屈服后刚度与初始刚度的比值); z 为量纲为 1 的滞回分量。

滞回分量 z 满足如下微分方程

$$x_y \dot{z} + \gamma |\dot{x}| z |z|^{n-1} + \beta \dot{x} |z|^n - A \dot{x} = 0 \quad (6)$$

式中: γ, β, A, n 均为描述滞回曲线总体形状的常数。

由上述刚弹性模型与滞回模型合成后得到的模拟曲线应具有如下特征:①模拟曲线在卸载完毕时的恢复力为 0;②模拟曲线中的最大恢复力与试验曲线中的最大恢复力相等。基于上述条件,可列出如下方程组

$$\left. \begin{aligned} F_b - F_y &= 0 \\ K_r x_d + F_b + F_y &= F_d \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: F_d 为试验曲线中对应于设计位移的最大恢复力。

求解式(7),可确定刚弹性模型和滞回模型中的特征参数取值,以便将其用于 SMA 螺旋弹簧非线性恢复力的模拟。

3.2 模拟结果与分析

以不同位移幅值下 2 种 SMA 螺旋弹簧滞回行为的数值模拟为例考察本文恢复力模型的正确性。首先,通过不同位移幅值下的试验数据确定弹簧 A 和弹簧 B 的屈服位移 x_y 取值分别为 4.6 mm 和 4.5

mm,屈服后刚度分别为 $0.191\ 4\ \text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ 和 $0.199\ 8\ \text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。进而,利用不同位移幅值下的试验结果可确定最大恢复力 F_d 的取值(表 1)。在此基础上,通过求解式(7)得到不同位移幅值下的恢复力模型特征参数取值,其中,当弹簧 A 的位移幅值分别为 12,20,28,36 mm 时,对应的 F_b 分别为 $0.753\ 3,0.755\ 3,0.733\ 8,0.743\ 0\ \text{kN}$,而相同位移幅值下 F_y 的取值与 F_b 的取值相同;同理,在上述位移幅值下,弹簧 B 的 F_b 等于 F_y ,对应于 12,20,28,36 mm 四种位移幅值的 F_b 分别为 $0.565\ 3,0.578\ 3,0.521\ 1,0.538\ 7\ \text{kN}$ 。此外,Bouc-Wen 模型中的常数 α,γ,β,A,n 统一取为 $0,0.5,0.5,1,2$ 。基于以上参数取值,按照式(3)~(6)编写 MAT-

LAB 计算程序。表 2 和表 3 分别给出了不同位移幅值下 2 种 SMA 螺旋弹簧的等效刚度、单位循环耗能、等效阻尼比试验值与模拟值,可见力学性能参数试验值和模拟值之间的相对误差绝大部分在 10%以内,仅有个别相对误差在 10%~15%之间。研究结果表明,本文简化恢复力模型能够较好地模拟 SMA 螺旋弹簧的恢复力-位移滞回曲线。

表 1 SMA 螺旋弹簧的最大恢复力

Tab.1 Maximum Restoring Forces of SMA Helical Springs

弹簧类型	不同位移幅值 D_{\max} (mm)下的最大恢复力/kN			
	12	20	28	36
弹簧 A	3.803 3	5.338 6	6.726 8	8.346 5
弹簧 B	3.528 2	5.152 6	6.636 5	8.270 2

表 2 弹簧 A 力学性能参数试验结果与模拟结果的对比

Tab.2 Comparison of Mechanical Behavior Parameters Between Experimental and Numerical Results of Spring A

位移幅值/ mm	等效刚度/ $(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$		等效刚度相 对误差/%	单位循环耗能/ $(\text{kN}\cdot\text{mm})$		单位循环耗能 相对误差/%	等效阻尼比/%		等效阻尼比 相对误差/%
	试验值	模拟值		试验值	模拟值		试验值	模拟值	
12	0.323 1	0.333 6	3.25	12.781 3	13.140 3	2.82	4.37	4.35	0.46
20	0.260 7	0.267 7	2.69	35.356 9	39.668 9	12.20	5.40	5.90	9.26
28	0.227 7	0.238 7	4.83	69.370 3	73.518 8	5.98	6.18	6.25	1.13
36	0.219 4	0.226 8	3.37	110.342 9	114.377 2	0.33	6.12	6.19	1.14

表 3 弹簧 B 力学性能参数试验结果与模拟结果的对比

Tab.3 Comparison of Mechanical Behavior Parameters Between Experimental and Numerical Results of Spring B

位移幅值/ mm	等效刚度/ $(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$		等效刚度相 对误差/%	单位循环耗能/ $(\text{kN}\cdot\text{mm})$		单位循环耗能 相对误差/%	等效阻尼比/%		等效阻尼比 相对误差/%
	试验值	模拟值		试验值	模拟值		试验值	模拟值	
12	0.314 9	0.315 8	0.29	14.271 9	13.871 9	2.80	5.01	4.85	3.19
20	0.246 9	0.241 8	2.07	38.130 7	36.007 0	5.57	6.14	5.93	3.42
28	0.232 3	0.228 3	1.72	71.164 5	68.496 2	3.75	6.22	6.09	2.09
36	0.226 8	0.223 6	1.41	106.103 9	96.613 0	8.94	5.75	5.31	7.65

4 结 语

(1)随着加载频率的增加,2 种 SMA 螺旋弹簧的恢复力-位移曲线在正向加载阶段和反向加载阶段分别向斜上方和斜下方发展;在试验研究的加载频率区间内,2 种 SMA 螺旋弹簧的等效刚度均逐渐增加,单位循环耗能和等效阻尼比则变化较小,残余位移均有所增大。

(2)随着位移幅值的增加,2 种 SMA 螺旋弹簧的滞回环均在坐标系内渐呈狭长的梭形;在位移幅值区间内,2 种弹簧的单位循环耗能均成倍增加,等效阻尼比均在位移幅值为 28 mm 时达到最大值,随后等效阻尼比有所减小;卸载后 2 种弹簧的残余位移均累积增加,但其值极小。

(3)基于刚弹性模型和 Bouc-Wen 模型可建立大尺寸 SMA 螺旋弹簧的简化恢复力模型,使用该

简化模型能够较好地描述记忆合金螺旋弹簧的滞回行为,且力学性能参数的模拟值与试验值较为接近,从而验证了该模型的合理性与有效性。

参考文献:

References:

[1] GRAESSER E,COZZARELLI F. Shape Memory Alloys as New Materials for Aseismic Isolation[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1991, 117 (11): 2590-2608.

[2] DOLCE M,CARDONE D,MARNETTO R. Implementation and Testing of Passive Control Devices Based on Shape Memory Alloys[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2000, 29 (7): 945-968.

[3] DOLCE M,CARDONE D,PONZO F, et al. Shaking Table Tests on Reinforced Concrete Frames Without

- and with Passive Control Systems[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2005, 34 (14): 1687-1717.
- [4] OZBULUT O, HURLEBAUS S. Optimal Design of Superelastic-friction Base Isolators for Seismic Protection of Highway Bridges Against Near-field Earthquakes[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2011, 40(3): 273-291.
- [5] 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, 22(2): 143-148.
LI Zhong-xian, CHEN Hai-quan, LIU Jian-tao. Bridge Isolation with SMA-composite Rubber Bearing[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2002, 22(2): 143-148.
- [6] 李 惠, 毛晨曦. 新型 SMA 耗能器及结构地震反应控制试验研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2003, 23(1): 133-139.
LI Hui, MAO Chen-xi. Experimental Investigation of Earthquake Response Reduction of Buildings with Added Two Types of SMA Passive Energy Dissipation Devices[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2003, 23(1): 133-139.
- [7] 薛素铎, 董军辉, 卞晓芳, 等. 一种新型形状记忆合金阻尼器[J]. *建筑结构学报*, 2005, 26(3): 45-50.
XUE Su-duo, DONG Jun-hui, BIAN Xiao-fang, et al. A New Type of Shape Memory Alloy Damper[J]. *Journal of Building Structures*, 2005, 26(3): 45-50.
- [8] 赵 祥, 王社良, 周福霖, 等. 基于 SMA 阻尼器的古塔模型结构振动台试验研究[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(11): 219-223.
ZHAO Xiang, WANG She-liang, ZHOU Fu-lin, et al. Shaking Table Tests for Ancient Pagoda Model Structure Based on Shape Memory Alloy Actuating Devices[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(11): 219-223.
- [9] 钱 辉, 李宏男, 任文杰, 等. 形状记忆合金复合摩擦阻尼器设计及试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2011, 32(9): 58-64.
QIAN Hui, LI Hong-nan, REN Wen-jie, et al. Experimental Investigation of an Innovative Hybrid Shape Memory Alloys Friction Damper[J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(9): 58-64.
- [10] 任文杰, 李宏男, 宋钢兵, 等. 新型自复位 SMA 阻尼器对框架结构减震控制的研究[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(6): 14-20.
REN Wen-jie, LI Hong-nan, SONG Gang-bing, et al. Study on Seismic Response Control of Frame Structure Using Innovative Re-centering SMA Damper[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(6): 14-20.
- [11] ATTANASI G, AURICCHIO F, URBANO M. Theoretical and Experimental Investigation on SMA Superelastic Springs[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2011, 20(4): 706-711.
- [12] 黄 斌, 蒲武川, 张海洋, 等. 基于超弹性 SMA 螺旋弹簧的基础隔震研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2014, 34(2): 209-215.
HUANG Bin, PU Wu-chuan, ZHANG Hai-yang, et al. Study on Seismic Responses of Base Isolated Structures with Superelastic SMA Helical Springs[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2014, 34(2): 209-215.
- [13] MILLER D, FAHNESTOCK L, EATHERTON M. Development and Experimental Validation of a Nickel-titanium Shape Memory Alloy Self-centering Buckling-restrained Brace [J]. *Engineering Structures*, 2012, 40: 288-298.
- [14] BHUIYAN A, ALAM M. Seismic Vulnerability Assessment of a Multi-span Continuous Highway Bridge Fitted with Shape Memory Alloy Bars and Laminated Rubber Bearing[J]. *Earthquake Spectra*, 2012, 28(4): 1379-1404.
- [15] 陈 鑫, 李爱群, 丁幼亮, 等. 空间网架结构形状记忆合金隔震研究[J]. *工程力学*, 2010, 27(9): 86-93, 101.
CHEN Xin, LI Ai-qun, DING You-liang, et al. Study on Isolation of Space Grid Structure Using Shape Memory Alloy[J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(9): 86-93, 101.
- [16] 何小辉. 钢框架新型耗能梁柱节点滞回性能的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
HE Xiao-hui. Hysteretic Behavior of New Energy-dissipated Beam-to-column Connections in Steel Frame [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [17] SPEICHER M, HODGON D, DESROCHES R, et al. Shape Memory Alloy Tension/Compression Device for Seismic Retrofit of Buildings[J]. *Journal of Material Engineering and Performance*, 2009, 18(5): 746-753.
- [18] MIRZAEIFAR R, DESROCHES R, YAVARI A. A Combined Analytical, Numerical and Experimental Study of Shape-memory-alloy Helical Springs[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2011, 48(3/4): 611-624.
- [19] WEN Y K. Method for Random Vibration of Hysteretic System[J]. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1976, 102(2): 249-263.