

格构式大行程形状记忆合金限位装置研究

李永河¹, 王国炎¹, 党新志², 曹飒飒¹

(1. 广州大学 土木与交通工程学院, 广东 广州 510006; 2. 同济大学 桥梁工程系, 上海 200092)

摘要:为限制墩梁间过大的相对位移,在单根大行程形状记忆合金限位装置(long-stroke shape memory alloy restrainer, LSR)的基础上,拟提出一种基于形状记忆合金棒的格构式大行程限位装置(latticed long-stroke restrainer, LLSR)。该装置由具有良好超弹性能和自复位性能的形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)棒、MC尼龙、钢管和缀条或者缀板组成。SMA棒可消耗地震能量并提供自复位能力;MC尼龙和钢管构成防屈曲体系,可防止SMA棒在受压时发生屈曲。首先,阐明单根大行程形状记忆合金阻尼器和格构式大行程形状记忆合金阻尼器的构造和工作机理;其次,对不同热处理温度下的SMA棒进行拉伸试验,确定超弹性能最好的SMA棒,以超弹性能最好的SMA棒作为LSR的内芯,接着开展单根LSR的轴向拉压试验,进一步研究其力学性能;最后,以LSR试验数据为基础,并且基于ABAQUS有限元软件,对LLSR进行数值分析和参数分析,以数值分析和参数分析的结果为依据提出相应的设计方法。研究表明,LLSR不仅具有稳定的耗能能力,还有良好的自复位能力。

关键词:格构式;阻尼器;形状记忆合金;MC尼龙;试验;自复位

中图分类号:U442.5*5

文献标志码:A

Research on latticed long-stroke shape memory alloy restrainer

LI Yonghe¹, WANG Guoyan¹, DANG Xinzh², CAO Sasa¹

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

2. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to limit the excessive relative displacement between pier and beam, a latticed long-stroke restrainer(LLSR) based on shape memory alloy (SMA) bar is proposed on the basis of single long-stroke shape memory alloy restrainer (LSR). The device consists of SMA alloy bar with excellent superelasticity and re-centering performance, MC nylon, steel pipes and strips or plates. SMA bars can consume ground motion energy and provide re-centering capability. The MC nylon and steel pipe form an anti-buckling system to prevent the SMA bar from buckling under pressure. Firstly, the structure and working mechanism of single long-stroke shape memory alloy damper and lattice long-stroke shape memory alloy damper are described. Secondly, the tensile test of SMA bars under different heat treatment temperature was carried out to determine the SMA bar with the best superelasticity, which was then used as the inner core of the LSR. Then, the axial tension and compression experiment of a single LSR was conducted to further study its mechanical properties. Finally, based on the experimental data of the LSR and the finite element software of ABAQUS, the numerical analysis and parameter analysis of the LLSR were carried out, and the corresponding design method was proposed according to the results of numerical analysis and parameter analysis. The research shows that LLSR not only has stable energy dissipation capacity but also has good re-centering ability.

Key words: lattice; damper; shape memory alloy; MC nylon; test; re-centering

收稿日期:2024-01-16; 修回日期:2024-03-26

基金项目:国家自然科学基金项目(52178124,51608136,51278134);广东省自然科学基金项目(2020A1515010231)

作者简介:李永河(1970—),男,副教授,硕士,主要从事桥梁结构性能评估研究。E-mail:13500004217@139.com

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

0 引言

历次地震灾害表明,大量梁式桥会发生支座残余位移、碰撞和落梁等震害,如1971年San Fernando地震、1999年集集地震、2008年汶川地震中的碰撞和落梁破坏等^[1-4]。解决这些问题的办法有增大伸缩缝处的支承宽度、设置纵向限位器以及设置横向抗震挡块等^[5-8]。其中,新型限位装置的研究对于减轻上述震害具有积极意义。

已有学者提出用黏弹性阻尼器和金属阻尼器来减小相邻桥跨之间的相对位移,具有较好的控制效果,但是缺乏自复位的功能,导致在震后需要对其进行更换^[9-14]。超弹形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)是一种具有超弹能力的新型智能材料,最大可恢复应变可达6%~7%,并具有一定的材料滞回耗能特性^[15]。此外,超弹SMA材料还具有较强的耐腐蚀性能和良好的抗疲劳能力^[16-17]。为了解决金属阻尼器自复位能力差的问题,一些学者提出SMA阻尼器,通过拉压试验和振动台试验,发现该阻尼器比金属阻尼器具有更好的自复位能力^[18-19]。但是在相对位移较大的情况下,SMA阻尼器并不能起到很好的限位效果。因为在相对位移较大的情况下,需要采用细长的SMA棒作为阻尼器。但是由于SMA棒的长细比过高,会发生失稳破坏。为了防止SMA棒的失稳,邱灿星等^[20]提出一种SMA自复位支撑,利用钢板防止SMA棒的屈曲。CAO等^[21]提出大行程形状记忆合金阻尼器(long-stroke shape memory alloy restrainer, LSR),利用钢管和水泥砂浆构成的防屈曲体系防止SMA棒的屈曲。该装置具有变形能力大、承载能力大和自复位能力好的特点。但是,并未基于试验进行验证。

为增强抗屈曲性能和增大承载能力,本文基于文献[21]的研究基础,提出一种新型格构式大行程SMA限位装置(latticed long-stroke restrainer, LLSR)。并对单肢LSR进行试验,以验证LSR和MLSR的可行性和有效性。

1 格构式大行程形状记忆合金限位装置(LLSR)

1.1 构造

本文中的单肢LSR由一根超弹性SMA棒、MC尼龙和钢管三部分组成。MC尼龙和钢管构成的防屈曲系统防止细长的SMA棒屈曲,而超弹性SMA棒则起到自复位和消耗能量的作用。LLSR是4个单肢LSR用钢缀板(条)焊接而成,如图1所示。图1中 D_{bar} 为SMA棒两端未铣削直径; d_{bar} 为SMA内芯已铣削直径; d_{plastic} 为工业塑料尼龙直径; D_{tube} 为钢管直径; L_{ex} 为SMA棒两端未铣削长度; L_{bar} 为SMA中段已铣削长度; L_{tube} 为钢管长度^[22]; H 为LLSR截面高度。

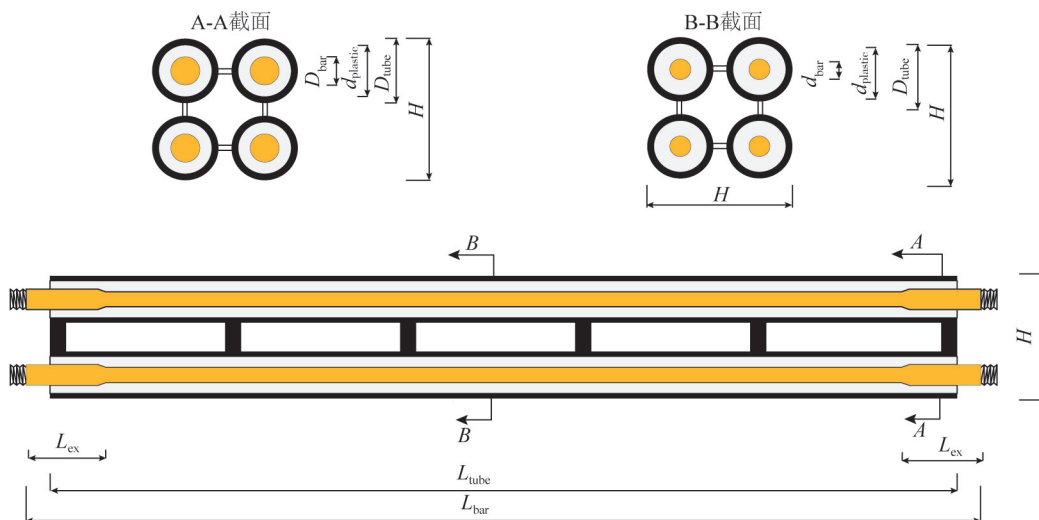


图1 LLSR构造图

Fig. 1 LLSR construction diagram

1.2 工作机理

LLSR的工作机理与LSR的工作机理基本相同。图2为LLSR在不同工作状态下的示意图。图中 δ 为

LLSR 拉伸和压缩产生的变形量,在图中表示的拉伸和压缩的变形量相等。LLSR 初始处于平衡状态,无变形,如图 2(a)所示。当荷载大于 SMA 棒的预紧力时,SMA 棒开始产生压缩或拉伸变形。受拉时,荷载由 SMA 棒全部承担如图 2(b)所示。受压时,荷载由 SMA 棒传递给 MC 尼龙,再由 MC 尼龙传递给钢管,如图 2(c)所示。LLSR 相较于 LSR 不同的是由于用缀板的连接使得 4 根独立的单肢 LSR 构成一个整体结构,从而改变了 LSR 截面形心的位置,使得整体防屈曲体系的抗弯刚度增大。因此,LLSR 的抗屈曲能力远大于 4 肢 LSR 之和。

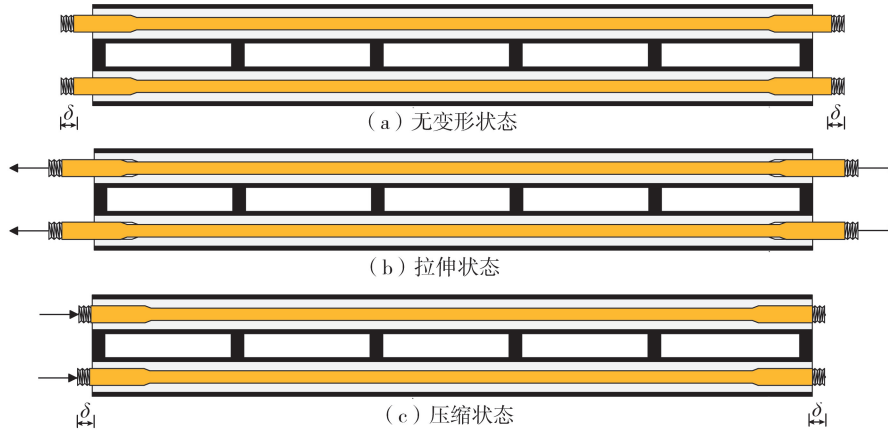


图 2 LLSR 工作机理

Fig. 2 Working mechanism of LLSR

1.3 稳定性分析

在提出 LLSR 设计方法之前需要先对其进行稳定性分析。为了简化 LLSR 的稳定计算方法,做出以下几点假设:

1) LLSR 的受力情况如图 3 所示,抗屈曲系统的简化受力模型如图 4 所示,SMA 棒的简化受力模型如图 5 所示。在该简化模型当中,SMA 棒与 MC 尼龙之间的接触力假设为均匀分布的压力 q ,LLSR 两端的约束假设为铰支,约束位置为 SMA 棒缩颈段端部。压力 q 和摩擦力 τ 可以通过试验或者数值模拟来确定。

2) LLSR 工作时每一肢 LSR 不受其余 3 肢 LSR 的影响。

3) 设 LLSR 中每一肢 LSR 同时发生屈曲并且当 LLSR 发生屈曲时,SMA 棒缩颈段端部的临界正应力为 σ_d ,临界的正应变为 ϵ_d ,则当其即将屈服时候两端的压力为式(1):

$$N = \sigma_d A_{\text{bar}} = \frac{\sigma_d \pi d_{\text{bar}}^2}{4} \tag{1}$$

式中, A_{bar} 为 SMA 棒截面的有效面积。

4) MC 尼龙与 SMA 棒之间的摩擦力相较于接触力而言很小,因此在防屈曲系统中不考虑摩擦力造成的影响。对于单肢 LSR 而言,其面积和惯性矩的计算公式为式(2),式(3):

$$A_{\text{sp}} = A_s + nA_p \tag{2}$$

$$I_{\text{sp}} = I_s + nI_p \tag{3}$$

式中: I_s 为钢管惯性矩; I_p 为 MC 尼龙惯性矩; A_s 为钢管截面面积; A_p 为 MC 尼龙面积; n 为 MC 尼龙弹性模量与钢管弹性模量的比值,表达式如式(4)所示:

$$n = \frac{E_p}{E_s} \tag{4}$$

式中: E_p 为 MC 尼龙的弹性模量; E_s 为钢管的弹性模量。



图 3 LLSR 受力图

Fig. 3 LLSR force diagram

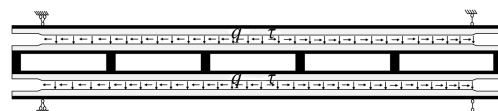


图 4 LLSR 抗屈曲体系

Fig. 4 LLSR anti-buckling system

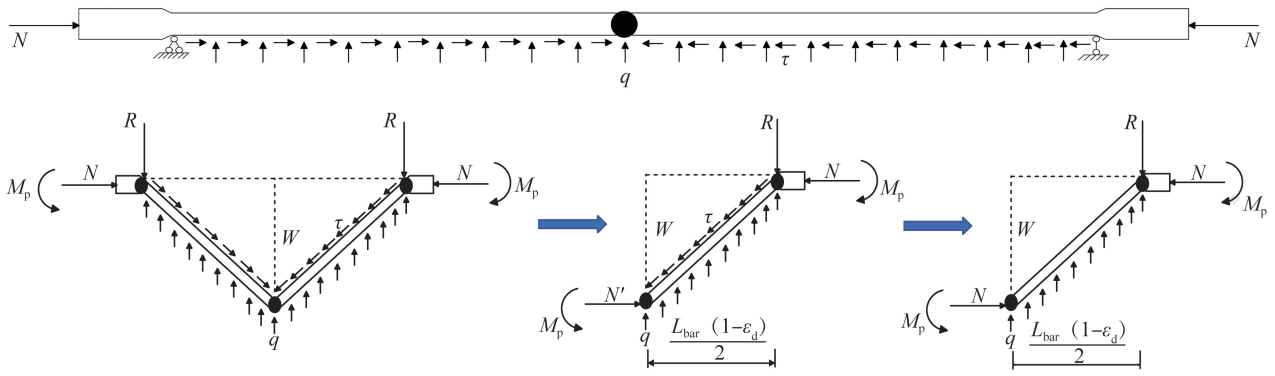


图5 单肢 LSR 屈曲体系受力分析

Fig. 5 Force analysis of the single-limb LSR buckling system

假设 LLSR 所受的压力为 $4N$, 则每一肢 LSR 所承受的压力为 N 。LLSR 截面面积 A 为 $4A_{sp}$, 惯性矩为式(5):

$$I = 4 [I_{sp} + A_{sp} (H - D_{tube})^2 / 4] \quad (5)$$

利用等效面积的原则将 MC 尼龙的材料换算成钢材, 可由式(6)计算抗屈曲系统所受到的最大应力值:

$$\sigma_{max} = \frac{M}{I} y_{max} = \frac{4qL_{bar}^2}{8I} \cdot \frac{H}{2} = \frac{qL_{bar}^2 H}{16 [I_{sp} + A_{sp} (H - D_{tube})^2 / 4]} \quad (6)$$

等效面积则是认为在受压的过程中认为 MC 尼龙的应变 ε_p 和钢管的应变 ε_s 相等, 并且所受到的力相等。即 $E_s \varepsilon_s A_s = E_p \varepsilon_p A_p$ 。

为了防止 SMA 棒的屈曲, 并且使得钢管的变形只处于弹性变形阶段, 则钢管所受到的最大应力值应小于钢管的许用应力值, 如式(7)所示:

$$\sigma > \sigma_{max} \quad (7)$$

当 $\sigma = \sigma_{max}$ 时, 可以由式(8)得到均布荷载 q 的计算公式。LLSR 在其弹性工作阶段最大的挠度值可以由式(9)计算。

$$q = \frac{16\sigma [I_{sp} + A_{sp} (H - D_{tube})^2 / 4]}{L_{bar}^2 H} \quad (8)$$

$$w_{max} = \frac{5 \times 4qL_{bar}^4}{384E_s I} \quad (9)$$

将式(8)代入式(9)可以得到式(10):

$$w_{max} = \frac{5\sigma L_{bar}^2}{24E_s H} \quad (10)$$

当 SMA 棒的轴向应变值达到其设计应变时, 处于一种临界状态。并且当 SMA 棒的跨中形成塑性铰的时候, 中部所产生的位移为 w_{max} 。由于 SMA 棒与工程塑料尼龙之间的摩擦力很小, 因此不考虑摩擦的影响, 近似取 $N' = N$, 如图 5 所示。为了防止 SMA 棒的屈曲, 端点处产生的弯曲力矩应该小于自复位力矩, 即需满足式(11)。将式(9)代入式(11)可得式(12), 式(12)不等式的左边为临界刚度的解析表达式。如将不等式(12)改写成欧拉公式的形式, 可得式(13)。

$$q \cdot \frac{L_{bar}}{2} \cdot \left[\frac{(1 - \varepsilon_d) L_{bar}}{2} \right] \cdot \frac{2}{3} > N w_{max} \quad (11)$$

$$E_p I_p + E_s I_s + 0.25 E_s A_{sp} (H - D_{tube})^2 > \frac{5 L_{bar}^2 A_{bar} \sigma_d}{64} \quad (12)$$

$$\frac{\pi^2 [E_p I_p + E_s I_s + 0.25 E_s A_{sp} (H - D_{tube})^2]}{L_{bar}^2} > \frac{5 \pi^2 A_{bar} \sigma_d}{64} \quad (13)$$

由式(13)可得到 LLSR 中单肢 LSR 抗屈曲系统的轴向临界压力为 $\pi^2 [E_p I_p + E_s I_s + 0.25 E_s A_{sp} (H - D_{tube})^2] / L_{bar}^2$ 。保守计算, LLSR 抗屈曲系统的轴向临界压力可取为 $4\pi^2 [E_p I_p + E_s I_s + 0.25 E_s A_{sp} (H - D_{tube})^2] / L_{bar}^2$ 。从临界荷

载中可以看出,相较于 4 根 LSR 独立受力结果的叠加,LLSR 抗屈曲系统的轴向临界压力比 4 根 LSR 抗屈曲系统单独受力再进行叠加的轴向临界压力更大。所以 LLSR 的抗屈曲能力更强。与同肢数的 LSR 相比,能够提高材料的利用率。

由于忽略了 SMA 棒与 MC 尼龙之间的摩擦以及引入了计算假设,为考虑它们的影响引入一个系数 α 。屈曲系统的临界刚度如式(14)所示:

$$K_0 = \frac{5L_{\text{bar}}^2 A_{\text{bar}} \sigma_d}{64} \tag{14}$$

由不等式(13)可知,LLSR 抗屈曲系统的临界刚度可近似用式(15)所示:

$$K_c = \alpha K_0 \tag{15}$$

为了制作方便,4 肢之间可不采用缀条焊接,而采用钢丝简单绑扎。其构造图如图 6 所示,惯性矩见式(16)。其稳定性分析可参照上述采用缀条焊接的 LLSR 稳定性计算方法。

$$I = 4 \left(I_{\text{sp}} + A_{\text{sp}} \frac{D_{\text{tube}}^2}{4} \right) \tag{16}$$

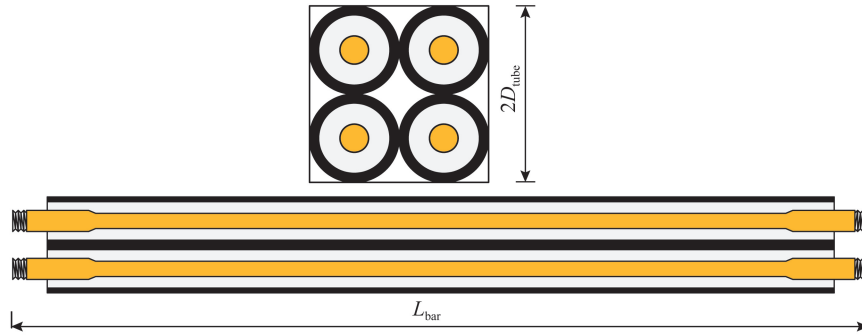


图 6 无缀板连接四肢 LSR 构造

Fig. 6 Structural diagram of LSR without batten plate connection for four-limbs

2 LSR 试验与数值模拟

2.1 试验试件

共测试 2 个试件,1 个 SMA 棒和 1 个 LSR 试件。进行拉伸试验,SMA 棒以 400 °C 进行 45 min 热处理,以获得较好的超弹性,其几何尺寸如图 7 所示,SMA 棒试件如图 8 所示。

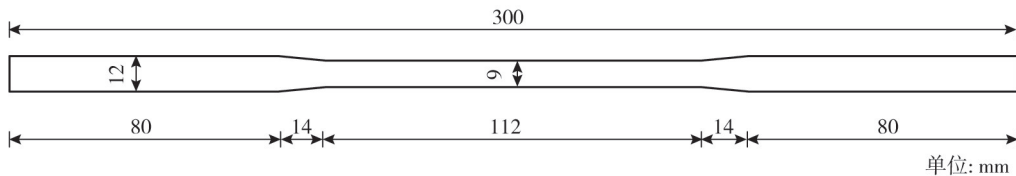


图 7 9 mm SMA 棒几何尺寸

Fig. 7 Dimensions of the 9 mm SMA bar



图 8 SMA 棒试件

Fig. 8 SMA bar specimen

试验的 LSR 试件如图 9 所示,其几何参数如表 1 所示。以直径为 12 mm 镍钛形状记忆合金棒作为内芯材料,以长度为 1 100 mm 的 MC 尼龙和钢管作为防屈曲系统的材料。MC 尼龙的材料参数和钢管的材料参数如表 2 所示。LSR 主要的加工工艺如



图 9 LSR 试件

Fig. 9 Specimen of LSR

下,首先将 MC 尼龙剖开,将 SMA 棒包裹在 MC 尼龙中,其次用胶水将 MC 尼龙的切口黏合,最后固定住 MC 尼龙的末端,从另外一端将钢管嵌入。SMA 棒的两端加工有车螺纹,并且用螺母拧紧便于夹具夹紧固定。

表 1 LSR 几何尺寸

Table 1 LSR geometric dimensions

d_{bar}	D_{bar}	d_{plastic}	D_{tube}	L_{ex}	L_{bar}	L_{tube}
12	16	32	42	112.5	1 000	1 100

表 2 钢管和 MC 尼龙的材料参数

Table 2 Material parameters of steel pipes and MC nylon

材料	弹性模量/GPa	强度/MPa	泊松比 ν	密度/(kg/m^3)
A36 级钢	200.0	300	0.30	7 800
工程塑料尼龙	31.9	90	0.38	1 150

2.2 试验装置与加载设置

采用 MTS-810 液压伺服万能试验机加载,如图 10 所示。9 mm SMA 棒拉伸试验的应变速率为 0.000 5/s,应变幅值逐步增加,分别为 1%、2%、3%、4%、5%、6%、7%、8%。每一级加载的位移为 1.12 mm,最大加载位移为 8.96 mm。其中 SMA 棒的加载情况如图 11 所示。



图 10 试验装置

Fig. 10 Experimental setup



图 11 SMA 棒拉伸试验

Fig. 11 SMA bar tensile test

LSR 拉压试验加载的速率是 0.002 5/s,采用逐级加载的方式进行加载,每级的加载应变为 1%、2%、3%、4%、5%、6%、7%。

2.3 试验结果与分析

2.3.1 SMA 棒试验结果

SMA 棒拉伸试验的应力-应变曲线如图 12 所示。由图可知,SMA 棒拉伸至 6%时残余应变为 0.6%,具有较好的自复位能力。LSR 内芯 SMA 棒的热处理方式与其相同。根据拉伸试验结果确定 SMA 棒材料参数如表 3 所示。

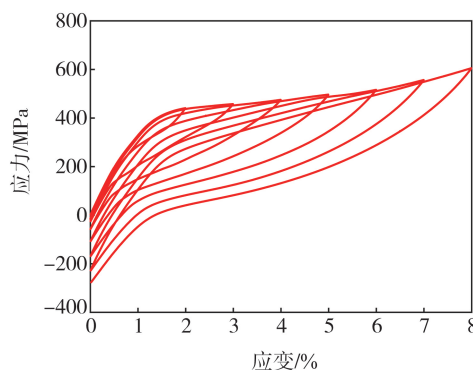


图 12 SMA 棒试件应力-应变曲线

Fig. 12 Stress-strain curves of SMA bar specimen

表 3 SMA 棒的材料参数
Table 3 Material parameters of SMA bars

参数名称	数值	参数名称	数值
奥氏体弹性模量 E_A/GPa	38	$\delta\sigma/\delta T$ 卸载 $(\delta\sigma/\delta T)_U$	6.7
马氏体弹性模量 E_M/GPa	38	奥氏体起始应力 σ_{i0}^S/MPa	251
奥氏体泊松比 ν_A	0.33	奥氏体结束应力 σ_{i0}^E/MPa	102
马氏体泊松比 ν_M	0.33	压缩时马氏体起始应力 σ_{cl}^S/MPa	605
最大转变应变 ε^L	0.045	定义屈服曲线的应力应变对数量 i	2
$\delta\sigma/\delta T$ 加载 $(\delta\sigma/\delta T)_L$	6.7	屈服曲线上的第 1 个应力点 σ_1^P/MPa	1 662
马氏体起始应力 σ_{iL}^S/MPa	418	屈服曲线上的第 1 个应变点 ε_1	0.07
马氏体结束应力 σ_{iL}^E/MPa	517	屈服曲线上的第 2 个应力点 σ_2^P/MPa	2 288
参考温度 $T_0/^\circ\text{C}$	22	屈服曲线上的第 2 个应变点 ε_2	0.208

2.3.2 LSR 试验结果

图 13 为 LSR 试验数据。试验结果表明,当加载到60 mm时,LSR 试件未发生破坏,且残余位移较小。表明其具有较好的自恢复能力。

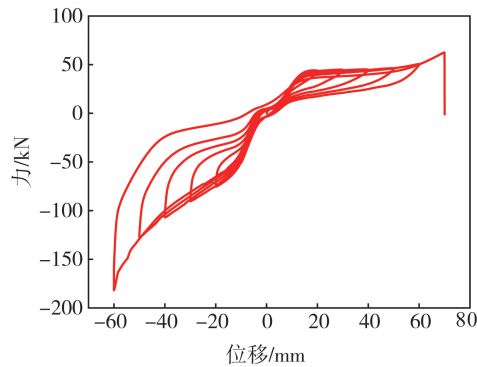


图 13 LSR 力-位移曲线

Fig. 13 LSR force-displacement curves

当试件拉伸到 70 mm 的时候,LSR 发生破坏,于其上部加载处缩颈处被拉断,黏合在钢管上的 MC 尼龙被拉出而且有一小段被拉断,如图 14 所示。

为进一步研究加载幅值对减震性能的影响,图 15 绘制了最大恢复力、耗散能量大小、等效阻尼比和割线刚度随位移幅值的变化曲线。其中割线刚度与等效阻尼比采用式(17)和式(18)进行计算,

$$K = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}} \tag{17}$$

式中: F_{\max} 和 F_{\min} 分别为受拉情况和受压情况下最大力和最小力; D_{\max} 和 D_{\min} 分别为加载在 0 位移时的最大和最小位移。

$$\xi_{\text{eq}} = \frac{E_D}{4\pi E_{S_0}} \tag{18}$$

式中: E_D 为力-位移曲线下的面积; E_{S_0} 为同一循环的最大应变能,计算为具有相同最大位移和力的线性系统所吸收的能量。

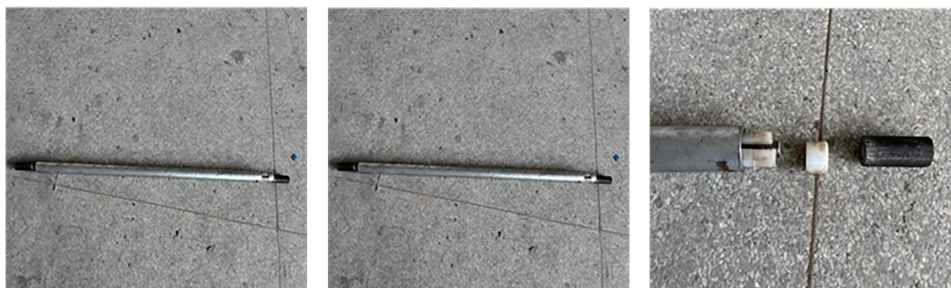




图 14 破坏情况

Fig. 14 Damage situation

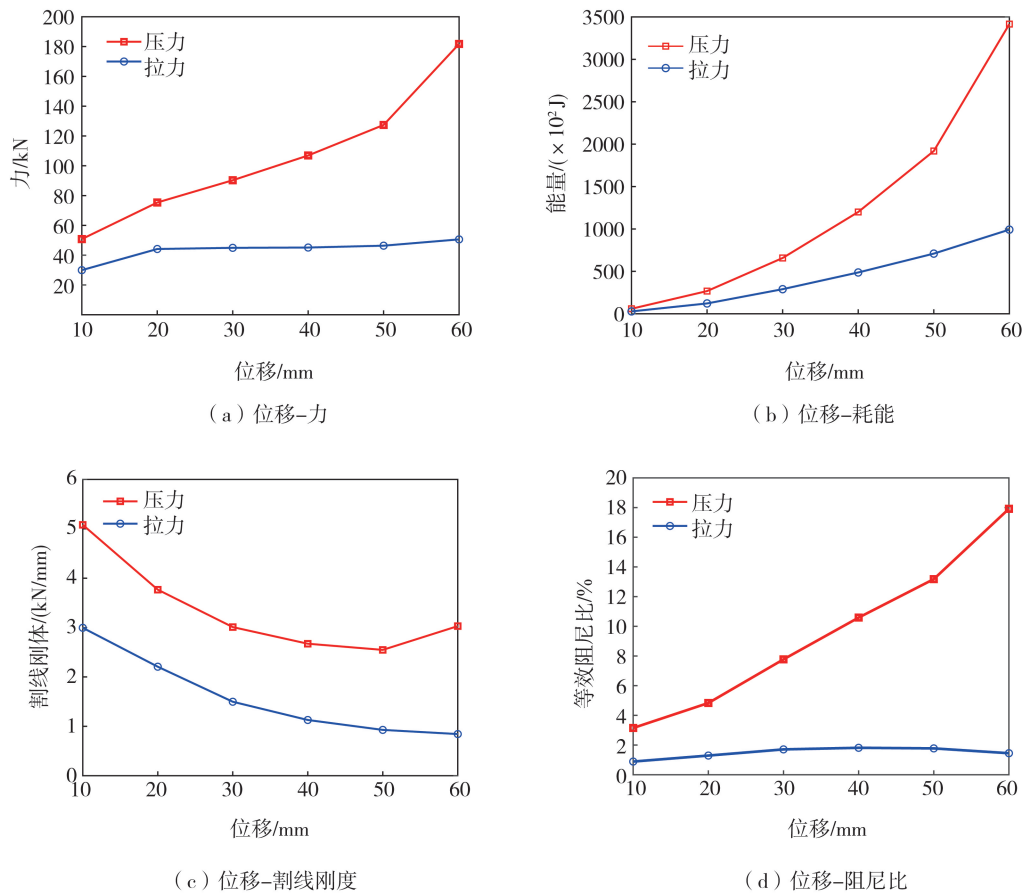


图 15 各种力学性能随外加位移幅值的变化

Fig. 15 Variation of mechanical properties with the amplitude of applied displacement

由图可知,压缩时的等效阻尼比远大于拉伸时的等效阻尼比。拉伸时的等效阻尼比在加载到4%的时候达到最大随后开始减小,而压缩时的等效阻尼比则不断增大。就耗散能量而言,压缩时耗散的能量远大于拉伸时所耗散的能量,这是由于在压缩时MC尼龙与钢管也参与耗能。拉伸时的割线刚度小于压缩时的割线刚度。总体而言,LSR受压性能优于其受拉性能。与只受拉的SMA棒相比,LSR具有良好的自复位能力和耗能能力。

2.4 数值模拟

2.4.1 SMA棒数值模拟

为了模拟SMA棒的拉伸试验,在ABAQUS2022有限元软件中,建立SMA棒的三维高精度有限元模型,其网格划分情况以及拉伸至8%时的应力云图如图16所示。在ABAQUS中,SMA棒采用实体单元建立。在边界条件的设定当中,SMA棒的下端 x 、 y 和 z 这3个方向的位移均为0约束,上端 x 与 z 方向的位移设为0,在 y 方向施加循环的位移荷载进行模拟。其模拟结果与试验结果比较情况如图17所示。

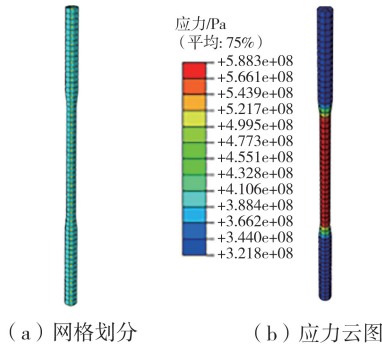


图 16 SMA 棒网格划分与 Von-Mises 分布情况
Fig. 16 SMA bar meshing and Von-Mises distribution

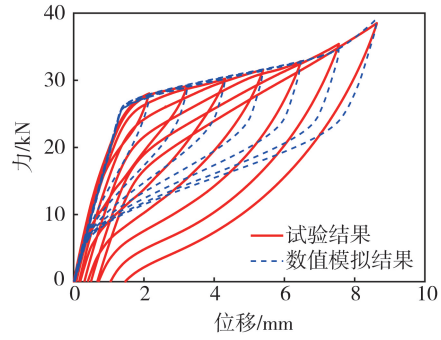


图 17 SMA 棒试验结果与数值模拟对比
Fig. 17 Comparison of experimental results with numerical models of SMA bar

2.4.2 LSR 数值模拟

为了模拟 LSR 循环加载-卸载过程,基于 ABAQUS2022,建立 LSR 的三维高精度有限元模型,如图 18 所示。在有限元模型中,LSR 的每一构件均采用实体单元。其边界条件设定为下端 3 个方向的位移为 0,上端 x 与 z 方向的位移为 0。由于 MC 尼龙与钢管整体构成防屈曲体系,所以 MC 尼龙与钢管之间采用绑定约束;其中钢管为主面,MC 尼龙为从面。SMA 棒与 MC 尼龙之间采用表面与表面接触;其中 SMA 棒为主面,MC 尼龙为从面,MC 尼龙和 SMA 棒的摩擦系数为 0.01。最后在上端的 y 方向施加 1%到 6%加载-卸载的循环位移,对试验过程进行模拟。图 19 为 LSR 试验与数值模拟结果的比较。

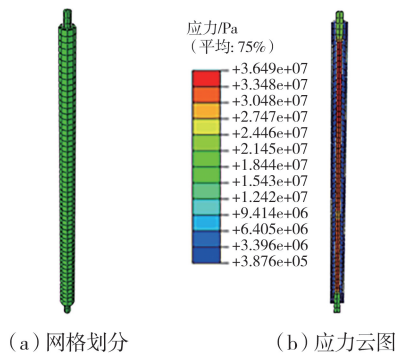


图 18 LSR 网格划分与 Von-Mises 分布情况
Fig. 18 LSR grid division and Von-Mises distribution

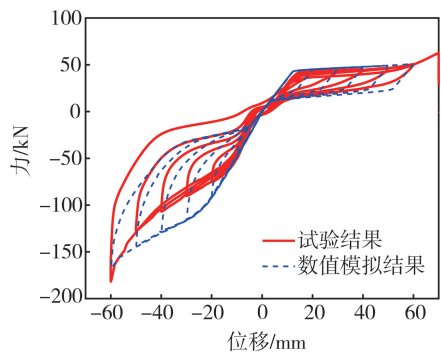


图 19 LSR 试验结果与数值模拟对比
Fig. 19 Comparison of LSR experimental results with numerical models

试验结果显示,当试件拉伸到 70 mm 时,LSR 发生破坏。在 ABAQUS 中模拟将 LSR 拉伸至 7%应变时,数值模拟的结果如图 20 所示,模拟结果表明缩颈段位置由于应力集中可能发生破坏,与试验结果一致。

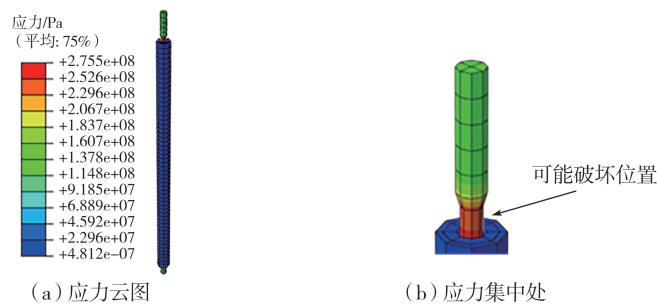


图 20 LSR 拉伸至 7%时 Von-Mises 分布情况
Fig. 20 Distribution of Von-Mises when LSR is stretched to 7%

3 LLSR 参数分析与设计方法

3.1 LLSR 摩擦系数分析

为了探究摩擦力对 LLSR 性能的影响,在 ABAQUS 有限元软件中建立了 LLSR 三维高精度模型,SMA

棒、MC 尼龙和钢管的几何尺寸与表 1 相同，截面高度 H 取为 110 mm。SMA 棒、MC 尼龙和钢管的参数取值、相互作用设置和约束设置均与 LSR 相同。钢缀板的材料参数与钢管相同，与每根不同的钢管之间采用绑定约束。将 MC 尼龙与 SMA 棒之间的摩擦系数设置为 0.005 和 0 进行数值模拟，其力-位移曲线如图 21 所示。LLSR 不同摩擦系数下 Von-Mises 分布如图 22 和图 23 所示。

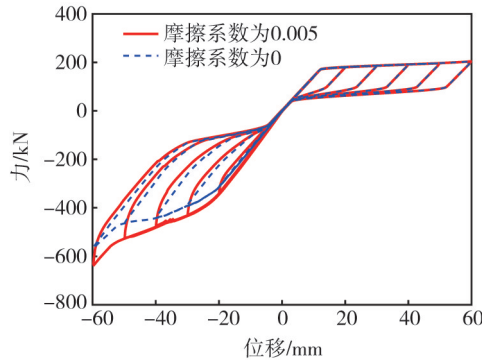


图 21 不同摩擦系数滞回曲线比较

Fig. 21 Comparison of hysteresis curves with different friction coefficients

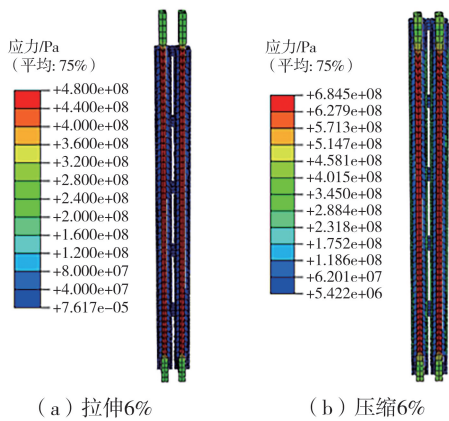


图 22 摩擦系数为 0.005 的 LLSR 的 Von-Mises 分布

Fig. 22 Von-Mises distribution of LLSR with friction coefficient is 0.005

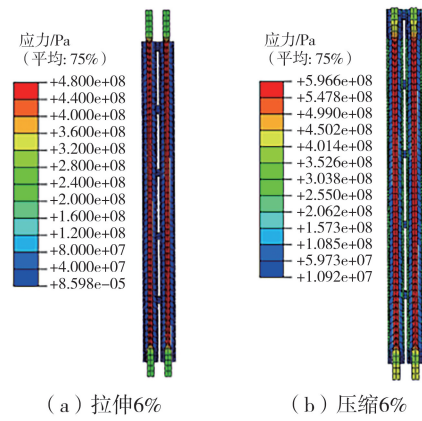


图 23 无摩擦的 LLSR 的 Von-Mises 分布

Fig. 23 Frictionless Von-Mises distribution of LLSR

从数值模拟的结果来看，SMA 棒与 MC 尼龙之间的摩擦力主要在受压的时候产生不同，而对受拉的计算结果并无影响。对于受压的影响主要是在力和耗能方面产生影响。如果在计算时忽略摩擦，会导致耗能的计算结果和发生相同位移时所产生的力的计算结果偏小。摩擦系数为 0.005 和无摩擦的受压耗能和相同位移幅值下的力的比较结果如图 24 所示。

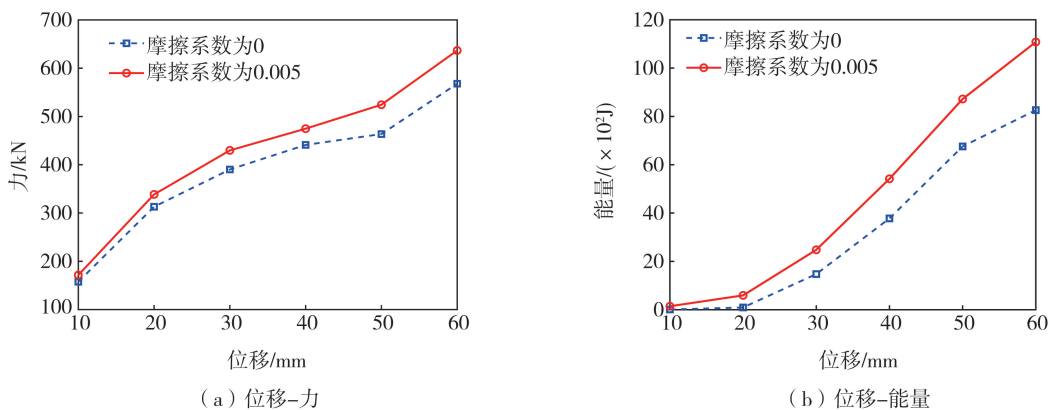


图 24 不同摩擦系数下 LLSR 力学性能的变化

Fig. 24 Changes of mechanical properties of LLSR under different friction coefficients

由图 24 可知,随着位移幅值的增大,耗能和对应幅值下的力之间偏差将会不断增大。在位移幅值较小的情况下,有无摩擦的计算结果的差距并不大。但是随着位移幅值的增大,计算结果将会有较大的差距。因此,在位移幅值较小时,可以忽略摩擦的影响;位移幅值较大时,不能够忽略摩擦所带来的影响。

3.2 LLSR 参数分析

LLSR 抗屈曲体系设计的关键是建立参数 α 与截面尺寸之间的关系。以下将基于 ABAQUS2022 进行参数分析,确定 α 与 LLSR 截面尺寸之间的关系。在参数分析的过程中,设计应变 ε_d 取为 6%。以 LLSR 内芯 SMA 棒的直径为基本变量,对其进行抗屈曲分析。LLSR 的截面高度为 110 mm,其余参数汇总于文献[21]。对 LLSR 中每一个单肢 LSR 不同的抗屈曲刚度值 $E_p I_p + E_s I_s + 0.25 E_s A_{sp} (H - D_{tube})^2$ 进行分析,得到临界刚度 K_c 。在不改变抗屈曲体系截面尺寸的情况下,通过改变其弹性模量 E_s 和 E_p 来改变抗屈曲刚度值的大小,再通过二分法来确定临界刚度 K_c 的值。其具体计算步骤参考文献[21]。

根据有限元计算结果,4 根 LSR 的屈曲情况如图 25 所示,未屈曲情况如图 26 所示。计算结果的 K_0 、 K_c 和 α 如表 4 所示,图 27 显示了 d_{bar} 和参数 α 之间的关系,用红色圆点表示。进行一维线性回归分析,得到回归方程,如图蓝色虚线所示。为确保所有情况下都不发生屈曲,将回归方程修改为式(19),且在图中用黑色实线表示。

$$\alpha = 0.01816d_{bar} + 2.9625 \tag{19}$$

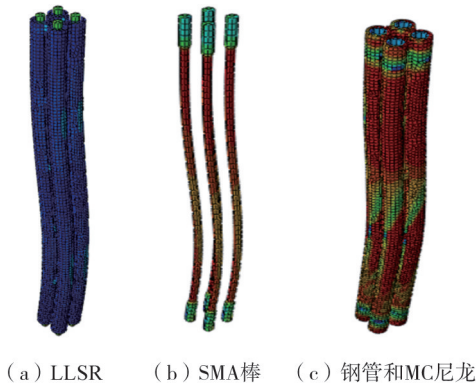


图 25 LLSR 屈曲图

Fig. 25 LLSR buckling diagram

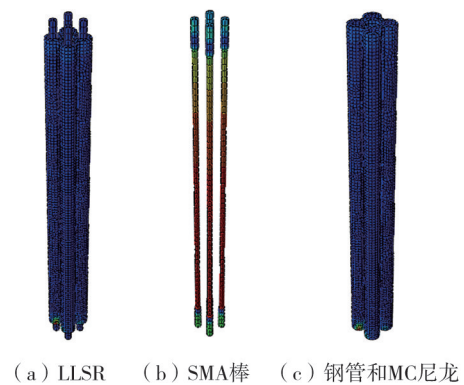


图 26 LLSR 未屈曲图

Fig. 26 LLSR non-buckling diagram

表 4 K_0 、 K_c 、 α 与 d_{bar} 的关系

Table 4 Relationship among K_0 , K_c , α and d_{bar}

d_{bar}/mm	A_{bar}/mm^2	$K_0/(kN \cdot mm^2)$	$K_c/(kN \cdot mm^2)$	α
12	113	5 689	17 668	3.105 8
14	154	7 743	24 428	3.154 8
16	201	10 113	32 471	3.210 8
18	254	12 799	41 530	3.244 7
20	314	15 802	51 300	3.246 4
22	380	19 120	62 458	3.266 6
24	452	22 755	74 918	3.292 4
26	531	26 705	88 708	3.321 8

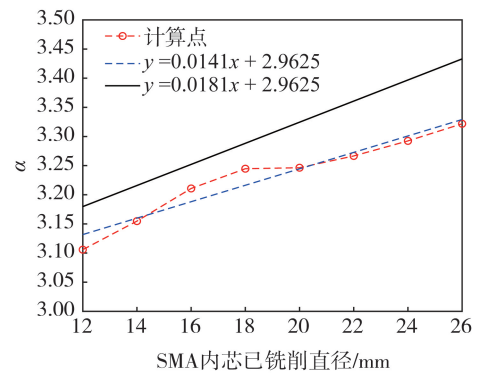


图 27 d_{bar} 与 α 关系

Fig. 27 Relationship between d_{bar} and α

3.3 LLSR 设计方法

根据上一节的参数分析结果,提出 LLSR 的设计方法如图 28 所示,总结如下:

1) 根据所需要限制的最大相对位移 S 确定所用 SMA 棒内芯的长度。假设设计应变取为 6%,则所需要 SMA 棒的长度如式(20)所示:

$$L_{bar} = \frac{S}{6\%} \tag{20}$$

2) 根据发生最大位移时所需的力 F 确定 SMA 棒缩颈段面积。SMA 棒压缩时马氏体起始应力为 σ_{CL}^S , 则总的受力面积如式 (21) 所示:

$$A_{\text{总}} = \frac{F}{\sigma_{CL}^S} \quad (21)$$

单肢 SMA 棒的受力面积如式 (22) 所示:

$$A_{\text{bar}} = \frac{A_{\text{总}}}{4} \quad (22)$$

3) 根据单肢 LSR 的受力面积确定颈缩段的直径 d_{bar} 。

4) 根据式 (19) 确定 α 的值。

5) 由式 (14) 确定 K_0 的值, 并由式 (15) 确定 K_c 的值。

6) 根据不等式 (12) 确定出防屈曲体系中钢管的厚度以及 MC 尼龙的厚度。

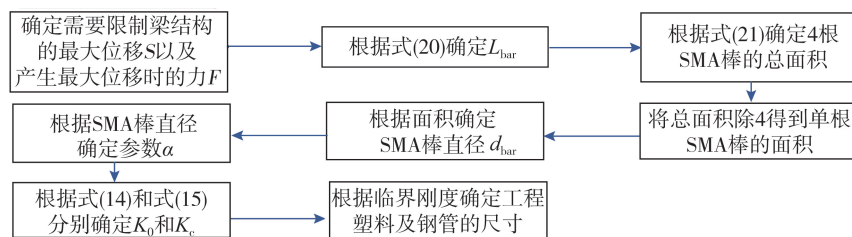


图 28 LLSR 设计流程图

Fig. 28 LLSR design flow chart

4 结论

本文提出了一种新型 LLSR, 基于单肢 LSR 的试验, 对 LLSR 的减震机理和设计方法进行了研究, 主要得到以下结论:

1) 在 MC 尼龙和钢管的约束作用下, LLSR 不仅可以在受拉时耗能, 还可以在受压的状态下不发生屈曲, 耗散比受拉时更多的能量。

2) LLSR 不仅具有较强的自复位能力, 还具有很好的耗能能力。

3) 一般来说, 随变形增大, LLSR 的自恢复能力、耗能能力和阻尼比逐渐增大, 而割线刚度逐渐减小。此外, 受压时的各种力学恢复力、耗能能力、割线刚度和阻尼比均显著高于受拉状态的值。

4) 通过对 LLSR 的稳定性分析, 提出相应的设计方法, 可为合理设计 LLSR 提供参考。

参考文献:

- [1] 高玉峰, 蒲黔辉, 李晓斌. 梁桥地震碰撞响应及防碰撞与落梁措施研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(1): 80-88.
GAO Yufeng, PU Qianhui, LI Xiaobin. State-of-arts of earthquake-induced pounding responses of girder bridges and measures for preventing pounding and span collapse[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2011, 31(1): 80-88. (in Chinese)
- [2] 罗韧, 许慧荣, 李鸿晶, 等. 汶川地震中百花大桥倒塌模拟分析[C]//中国建筑学会抗震防灾分会, 中国地震学会地震工程专业委员会, 中国地震工程联合会. 第八届全国地震工程学术会议论文集(I). 南京工业大学道桥与交通工程研究所, 中国地震局地壳应力研究所, 2010: 54-56.
LUO Ren, XU Huirong, LI Hongjing, et al. Simulation analysis of Baihua bridge collapse in Wenchuan earthquake [C]//Earthquake Prevention Branch of Architectural Society of China, Earthquake Engineering Professional Committee of Seismological Society of China, China Earthquake Engineering Federation. Proceedings of the 8th National Conference on Earthquake Engineering (I). Institute of Road, Bridge and Traffic Engineering, Nanjing University of Technology, Institute of Crustal Stress, China Earthquake Administration, 2010: 54-56. (in Chinese)
- [3] 孟杰, 刘钊. 汶川地震中的桥梁落梁震害分析及启示[J]. 结构工程师, 2010, 26(2): 95-100.
MENG Jie, LIU Zhao. Causation analysis and enlightenment on bridge unseating in the great Wenchuan earthquake[J]. Structural Engineers, 2010, 26(2): 95-100. (in Chinese)
- [4] 王克海, 李茜. 桥梁抗震的研究进展[J]. 工程力学, 2007(增刊2): 75-82, 128.
WANG Kehai, LI Qian. Research progress on seismic resistance of bridges[J]. Engineering Mechanics, 2007(Sup. 2): 75-82, 128. (in Chinese)
- [5] 王军文, 李建中, 范立础. 桥梁结构地震碰撞效应及防落梁措施研究现状[J]. 公路交通科技, 2007, 24(5): 71-75, 80.

- WANG Junwen, LI Jianzhong, FAN Lichu. State of art of current studies on the effect of seismic induced pounding between adjacent bridge decks and falling-off prevention measures [J]. Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(5): 71-75, 80. (in Chinese)
- [6] WANG J Q, LI S, HEDAYATI DEZFULI F, et al. Sensitivity analysis and multi-criteria optimization of SMA cable restrainers for longitudinal seismic protection of isolated simply supported highway bridges[J]. Engineering Structures, 2019, 189: 509-522.
- [7] BUCKLE I G. The Northridge, California earthquake of January 17, 1994 performance of highway bridges[R]. Buffalo, NY: National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, 1994: 3-7.
- [8] YI Z, MIN W, MIN Z. Seismic design and retrofit of bridges [J]. Science & Technology Vision, 2017(19): 160-161.
- [9] CHOI E, PARK J, YOON S J, et al. Comparison of seismic performance of three restrainers formultiple-span bridges using fragility analysis[J]. Nonlinear Dynamics, 2010, 61(1): 83-99.
- [10] 邢德进, 李忠献. 基于 SMA 阻尼器的大跨桥梁地震位移控制分析[J]. 大连理工大学学报, 2006(增刊 1): 94-98.
XING Dejin, LI Zhongxian. Seismic displacement control analysis of long-span Bridges based on SMA dampers [J]. Dalian University of Technology, 2006(Sup. 1): 94-98. (in Chinese)
- [11] WANG B, NISHIYAMA M, ZHU S Y, et al. Development of novel self-centering steel coupling beams without beam elongation for earthquake resilience[J]. Engineering Structures, 2021, 232: 111827.
- [12] WANG B, ZHU S Y, CHEN K X, et al. Development of superelastic SMA angles as seismic-resistant self-centering devices[J]. Engineering Structures, 2020, 218: 110836.
- [13] WANG B, ZHU S Y, QIU C X, et al. High-performance self-centering steel columns with shape memory alloy bolts; Design procedure and experimental evaluation[J]. Engineering Structures, 2019, 182: 446-458.
- [14] SEO J, HU J, KIM K H. Analytical investigation of the cyclic behavior of smart recentering T-stub components with superelastic SMA bolts[J]. Metals, 2017, 7(10): 386.
- [15] 邓宗才, 刘春国. SMA 超弹性及减隔震器的研究与发展[J]. 工程建设, 2006, 38(5): 1-6.
DENG Zongcai, LIU Chunguo. Research and development of SMA super-elasticity and damper and shock isolator[J]. Engineering Construction, 2006, 38(5): 1-6. (in Chinese)
- [16] PEREIRO-BARCELÓ J, BONET J L. Ni-Ti SMA bars behaviour under compression[J]. Construction and Building Materials, 2017, 155: 348-362.
- [17] WANG B, ZHU S Y. Cyclic tension-compression behavior of superelastic shape memory alloy bars with buckling-restrained devices [J]. Construction and Building Materials, 2018, 186: 103-113.
- [18] DESROCHES R, DELEMONT M. Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloys[J]. Engineering Structures, 2002, 24(3): 325-332.
- [19] 孟庆利, 闫维明, 冯军和. 形状记忆合金金属橡胶阻尼器防高墩桥梁地震碰撞振动台试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(2): 201-206.
MENG Qingli, YAN Weiming, FENG Junhe. Shaking table testing of seismic pounding of high-pier bridge with an SMA PRM damper[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(2): 201-206. (in Chinese)
- [20] 邱灿星, 姜天缘, 刘家旺, 等. 基于防屈曲镍钛 SMA 棒的自复位隅撑钢框架: 构件试验和结构行为[J]. 工程力学, 2023, 40(10): 33-46.
QIU Canxing, JIANG Tianyuan, LIU Jiawang, et al. Self-centering knee-braced steel frames with buckling-restrained niti sma bars; Component test and structural behavior[J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(10): 33-46. (in Chinese)
- [21] 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.
- [22] 胡付龙, 曹飒飒. 自恢复大行程形状记忆合金限位装置研究[J]. 工程力学, 2022, 39(增刊 1): 202-206.
HU Fulong, CAO Sasa. Experimental study on mechanical properties of long-stroke SMA restrainer [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(Sup. 1): 202-206. (in Chinese)