

# 超弹性形状记忆合金自恢复与耗能平衡设计理念

强旭红<sup>1</sup>, 蹇楠毅<sup>1,2</sup>, 姜旭<sup>1</sup>

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

**摘要:** 超弹性形状记忆合金具有优越的自恢复性能, 在工程抗震应用中能够赋予结构完美的自复位性能, 但由于其超弹性旗帜形本构关系, 自身耗能能力十分有限, 致使其难以满足结构地震下的抗震需求。探求在保留形状记忆合金自恢复性能的前提下, 尝试将超弹性形状记忆合金与摩擦阻尼器组合应用, 以使形状记忆合金系统的耗能能力最大化。首先, 对超弹性形状记忆合金自恢复耗能平衡设计理念进行深入研究, 引入系统平衡参数的概念, 提出相应的配比设计公式; 随后, 通过开展形状记忆合金超弹性性能试验、简易摩擦阻尼器试验以及组合张拉试验, 证明上述平衡设计理念的实用性以及平衡设计公式的可行性。平衡设计理念的提出以及其验证能够推进并指导形状记忆合金在工程抗震中的应用。

**关键词:** 形状记忆合金; 超弹性; 耗能能力; 平衡设计; 摩擦阻尼器

中图分类号: TU392

文献标志码: A

## Experimental Study on Balance Design Concept of Self-Recovery and Energy Dissipation of Superelastic Shape Memory Alloy

QIANG Xuhong<sup>1</sup>, JIAN Nanyi<sup>1,2</sup>, JIANG Xu<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Superelastic shape memory alloys have superior self-recovery properties, which can ensure the perfect self-centering performance of structures in engineering seismic applications. However, their energy dissipation capacity is very limited because of the flag-shaped hysteresis curve, which is difficult to meet the seismic demand of structures in earthquakes. Therefore, this paper explores to maximize the energy dissipation

capacity of shape memory alloy system while preserving the self-recovery performance, via combining superelastic shape memory alloy with friction dampers. First, it conducts an in-depth study of the balance design concept of self-recovery and energy dissipation of shape memory alloy and proposes the system balance parameter and corresponding design formula. Then, it demonstrates the practicality of the balanced design concept and the accuracy of the theoretical design formula by the superelasticity performance test of shape memory alloy, the simple friction damper test, and the combined tensile test. The balance design concept proposed and its successful verification can well promote and guide the engineering seismic application of shape memory alloy.

**Keywords:** shape memory alloy; superelasticity; energy dissipation capacity; balance design; friction damper

形状记忆合金(SMA)具有形状记忆效应以及超弹性 2 种特殊的力学性质。其中, 超弹性是指形状记忆合金在外荷载作用下产生变形、荷载消失后变形也同步消失的性质。一般来说, 建筑材料的可恢复应变是十分有限的, 主要以弹性应变为主, 大部分材料不超过 1%, 而具有超弹性的形状记忆合金可恢复应变高达 6%~8%, 被广泛用于航空航天、医学、机械等领域。随着生产工艺的不断进步, 生产成本不断降低, 形状记忆合金也逐步在土木工程抗震领域中得到应用。

超弹性性能在两方面对工程结构十分有益: 首先, 在外力卸载后, 合金形状将完全恢复, 基本无残余位移; 其次, 外力加载与卸载时的应力应变路径并不相同, 滞回曲线呈明显的旗帜型, 具有一定的滞回耗能能力<sup>[1]</sup>, 因此, 同时具有自恢复性能和耗能性能

收稿日期: 2022-09-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52278206, 52278207); 国家重点研发计划重点专项(2020YFD1100403, 2017YFB0304701); 中央高校基本科研业务费专项资金(02002150114)

第一作者: 强旭红, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为钢结构和施工技术。E-mail: qiangxuhong@tongji.edu.cn

通信作者: 姜旭, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为钢结构和钢与组合桥。E-mail: jiangxu@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

的超弹性形状记忆合金在工程抗震领域,特别是在减小结构残余位移方面具有很好的应用前景<sup>[2-4]</sup>。

在桥梁工程领域,常利用桥墩的延性来进行抗震设计,在强震作用下,允许桥墩进入塑性,通过大的弹塑性变形来耗散地震能量,在桥墩塑性铰区域,会出现混凝土剥落的情况,虽然能够保证“大震不倒”的抗震设防目标,但是会导致较大的残余位移产生<sup>[5]</sup>。形状记忆合金应用于开发减隔震装置能够在一定程度上降低桥梁在地震后的残余位移<sup>[6-9]</sup>。直接使用形状记忆合金配筋桥墩能够大幅降低桥梁体系地震后的残余位移,是形状记忆合金的另一种重要的应用形式。文献[10-12]通过试验对比常规钢筋混凝土柱、形状记忆合金配筋混凝土柱以及形状记忆合金配筋ECC柱的抗震性能,得到形状记忆合金配筋混凝土柱在震后的残余位移比传统钢筋混凝土柱降低67%,如果使用形状记忆合金配筋的ECC柱,更是能够降低83%的残余位移。Billah等<sup>[13-15]</sup>对形状记忆合金桥墩进行了地震下的概率易损性分析,通过数值研究证明了地震下易损性分析中考虑残余位移是十分必要的,而配有形状记忆合金的桥墩由于其强大的自复位能力,在地震下考虑残余位移的失效概率远低于传统钢筋混凝土桥墩。Shrestha等<sup>[16]</sup>对采用常规配筋和形状记忆合金配筋的单墩或多墩等3种共12座桥梁进行建模与参数分析,结果表明比起形状记忆合金筋,钢筋会在更小的应变下屈服。不同配筋桥墩在单调荷载作用下破坏形态不同,在钢筋混凝土桥墩中,钢筋屈服后、混凝土压碎前,结构变形会大幅度增加。而在形状记忆合金桥墩中,合金屈服和混凝土压溃基本同时发生。在不同配筋率下,形状记忆合金桥墩均能够保证在地震下最大位移与传统钢筋混凝土桥墩相同,而残余位移远小于传统桥墩。

## 1 研究介绍

限制形状记忆合金配筋桥墩体系实际工程应用的主要原因是其耗能能力严重不足。究其根本,比起钢材进入塑性后的滞回环面积,利用超弹性性能进行耗能的形状记忆合金耗能能力略显不足,如图1所示。因此,超弹性形状记忆合金的耗能能力需要进一步增强,评估其耗能能力以及自恢复性能间的平衡需要相应的理论指导。本文基于运用自恢复与耗能平衡设计理念,运用摩擦阻尼器强化形状记忆合金的耗能能力,在保证形状记忆合金优秀自恢复

性能的前提下,最大化系统的耗能能力,提出了相应的配比计算公式,并通过试验研究进行验证。

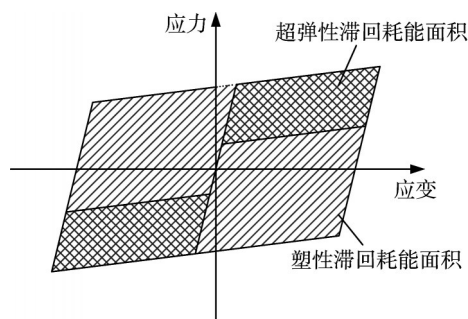


图1 超弹性耗能与塑性耗能滞回面积

Fig. 1 Hysteresis areas of superelastic and plastic dissipation energy

## 2 理论推导

### 2.1 形状记忆合金本构分解

超弹性形状记忆合金的理想旗帜型曲线如图2a所示<sup>[17-18]</sup>,曲线上存在4个刚度突变点,分别是马氏体相变开始点(A点)、马氏体相变结束点(B点)、奥氏体相变开始点(C点)以及奥氏体相变结束点(D点)。曲线上AB段为马氏体相变段,此阶段加载,合金相态由奥氏体相转化为马氏体相;CD段为奥氏体相变段,此阶段卸载,合金相态由马氏体相转换回奥氏体相。在理想曲线中,DA段与BC段的斜率相等,均等于形状记忆合金的弹性模量。

从图1中理想旗帜型曲线可以看出,超弹性形状记忆合金不仅具有完美的自恢复性能,由于加载与卸载的路径并不相同,它还具备一定的耗能能力。为了能分别评估这2种能力,在保证其自恢复性能的基础上,加强其耗能能力,需要对形状记忆合金的力学性能进行分解,体现在本构关系上便是将理想的旗帜型模型分解为一个代表其自恢复性能的双线性模型(如图2b)以及一个代表其耗能能力的弹塑性模型(如图2c)。分别取这2种模型各自的屈服强度评价形状记忆合金的自恢复性能和耗能能力。在理想情况下,形状记忆合金马氏体相变刚度与奥氏体相变刚度相等,即认为图2a中ABCD为一个平行四边形,基于以上假定,具体的分解公式如式(1)所示。式中, $f_y$ 为马氏体相变开始应力, $f_{P1}$ 为马氏体相变结束应力, $f_{T1}$ 为奥氏体相变开始应力, $f_{T2}$ 为奥氏体相变结束应力, $f_{ys}$ 、 $f_{ye}$ 分别为双线性模型屈服应力和弹塑性模型屈服应力, $f_{T2}=f_{ys}-f_{ye}$ 、 $f_y=f_{ys}+f_{ye}$ ,得到

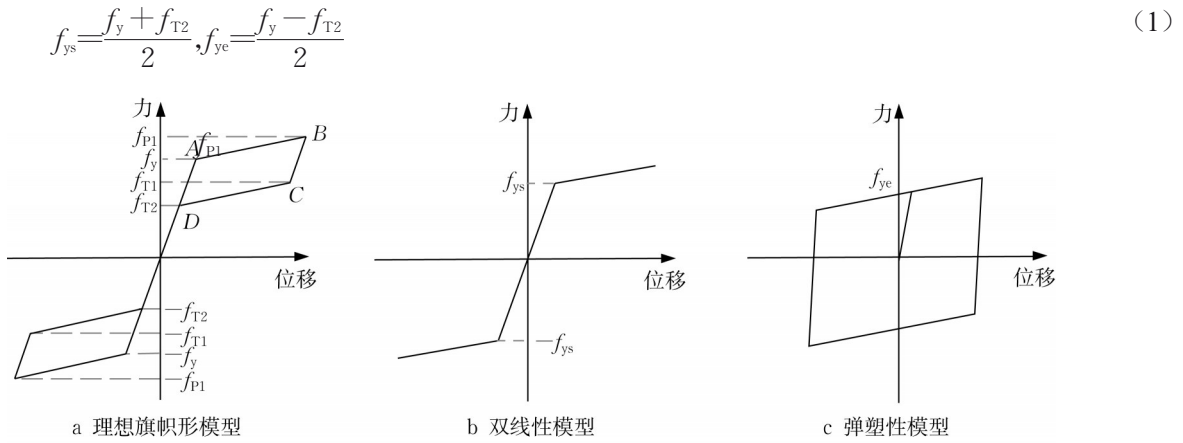


图 2 旗帜形模型的分解图

Fig. 2 Decomposition of flag-shaped model

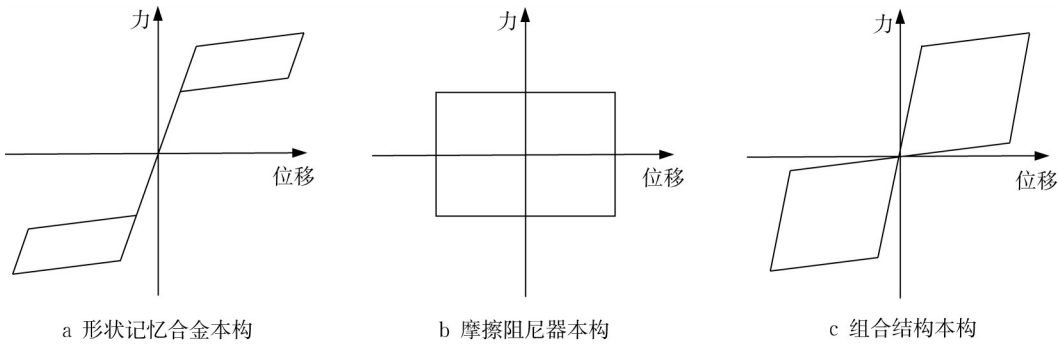


图 3 形状记忆合金与摩擦阻尼器组合图

Fig. 3 Combination of shape memory alloy and friction damper

### 2.2 平衡参数的引入

将形状记忆合金的恢复性能以及耗能能力分解,通过引入一个性能平衡参数 $\lambda$ 来评估它们之间的比例关系<sup>[19]</sup>。 $\lambda$ 定义为形状记忆合金的自恢复性能与耗能能力的比值,如式(2)所示:

$$\lambda = \frac{f_{ys}}{f_{ye}} \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)中即可得到平衡参数的具体计算如式(3)所示:

$$\lambda = \frac{f_y + f_{T2}}{f_y - f_{T2}} \quad (3)$$

当 $\lambda=1$ 时,可以认为材料的自恢复性能及耗能能力已达到了最佳平衡。一般来说,镍钛形状记忆合金的性能平衡参数 $\lambda$ 是大于1的,表明其自恢复性能远强于其耗能能力,此时可以通过另外的外部的耗能机制来增加系统耗能能力,例如 Xiang 等<sup>[20]</sup>通过组合应用形状记忆合金与普通钢筋来调整 $\lambda$ 值,提高组合系统耗能能力的同时保留自恢复性能。

本文通过摩擦阻尼器增强系统耗能能力定义一个新的评价整体系统的性能平衡参数 $\lambda'$ ,如式(4)

所示:

$$\lambda' = \frac{f_{ys}}{f_{ye} + f_s} \quad (4)$$

式中: $f_s$ 为为阻尼器滑动摩擦参数。分母代表整个系统的耗能能力,包括形状记忆合金自身的耗能能力以及摩擦阻尼器所提供的耗能能力,分子则代表系统的自复位性能,该部分全部由超弹性SMA筋提供。当系统平衡参数等于1时,整个力学系统达到最优平衡状态,即在保持一定自恢复性能的情况下,耗能能力达到最大值,如图3所示。通过式(4)可计算形状记忆合金与摩擦阻尼器的最优配比关系。

## 3 试验验证

### 3.1 形状记忆合金超弹性性能试验

为给后续配比理论计算提供真实可靠的材性数据,首先进行了形状记忆合金的超弹性性能试验。试验所采用的镍钛形状记忆合金为直径为0.8 mm的丝状材料。试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室的300 kN电子试验机上进行,如图4所示。



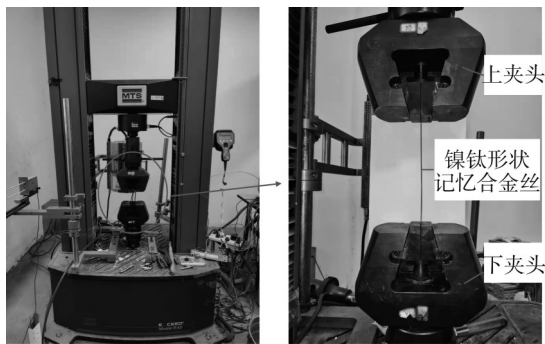


图4 超弹性试验装置

Fig. 4 Test set-up of superelasticity

试验试件均为长300 mm的镍钛形状记忆合金丝,其中夹持端上下各控制为50 mm,中间段为200 mm。根据张拉至最终应变的不同,共设计了5组试验,分别将SMA丝张拉至应变3%(6mm)、4%(8 mm)、5%(10 mm)、6%(12 mm)以及一组循环加载,加载速率均恒定为 $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,随后以相同速率将拉力卸载至零。每组试验重复3次,以消除试验过程中的偶然误差,具体试验分组见表1。由于丝材难以安装引伸计,试验开始前需对机器显示位移值进行验证。通过对试件进行预加载,对比游标卡尺实际测量夹头两端拉伸值与机器显示位移值。多次对比结果表明两者基本相等,证明在此试验中,严格控制夹头中间部分长度时,机器显示位移值可近似等同于中间段材料拉伸值。

表1 超弹性试验分组

Tab. 1 Grouping of superelasticity test

组号	张拉应变/%	加载制度
1-1	3	张拉至指定应变后卸载
1-2	4	张拉至指定应变后卸载
1-3	5	张拉至指定应变后卸载
1-4	6	张拉至指定应变后卸载
1-5	3,4,5,6	循环加载

由于试验丝材横截面面积较小,试验机张拉时拉力较小,导致拉力波动相对较大,在数据采集频率较大的情况下,绘制出的荷载—位移曲线会出现抖动的情况。运用MatLab数学处理软件中的Smooth函数对所得试验曲线进行平滑处理,处理效果如图5所示,处理后曲线与试验机采集曲线基本吻合。

试验1-1—1-4的应力—应变曲线经过平滑处理后如图6所示。分析试验曲线可知,本次使用的镍钛形状记忆合金弹性模量为43 GPa,约为钢材的1/5。其马氏体相变开始应变为1.6%,马氏体相变开始应力为550 MPa,奥氏体相变结束应变为0.9%,奥氏体相变结束应力为300 MPa。其马氏体相变以

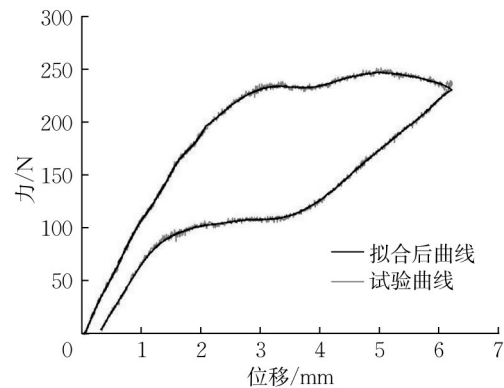


图5 数据曲线的平滑处理

Fig. 5 Smoothing of curves

及奥氏体相变刚度基本相等且不随最大张拉应变改变而改变。卸载后,材料基本无残余位移,自恢复性能优越。

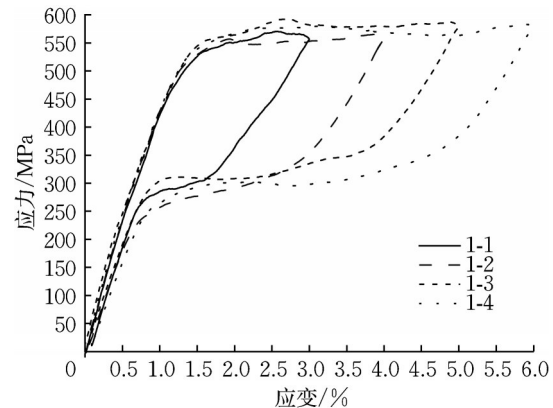


图6 4组试件的应力—应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of 4 sets of specimens

循环加载试验1-5的应力—应变曲线如图7所示,由图可知,多次循环对形状记忆合金的弹性模量、马氏体相变刚度、奥氏体相变刚度的影响不大。随着应变的增大,材料马氏体相变开始点应力及奥氏体相变结束点应力略微降低,材料残余位移略有增加,但最大残余位移小于加载应变的5%,仍可忽略不计。

上述试验所得的曲线数据需要经过一定的数学处理,将其转化为后续试验和数值模拟中所需要的理想旗帜型曲线。曲线处理的原则有以下四点:①认为材料弹性模量在加载与卸载时相等;②拟合曲线马氏体相变结束点与试验结果保持一致;③一次加载—卸载过程中耗散的能量相同,即曲线所包围的面积相等;④马氏体相变刚度与奥氏体相变刚度相等,即 $k_M = k_A = k$ 。以试验1-2为例,转化理想旗帜形曲线见图8。

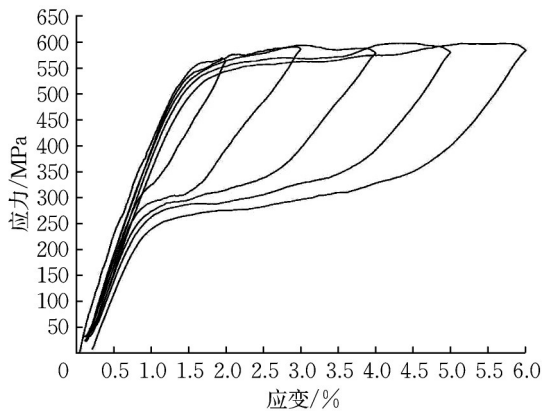


图 7 形状记忆合金的循环张拉试验曲线

Fig. 7 Cyclic tensile test curves of shape memory alloys

### 3.2 简易阻尼器的滞回试验

试验通过简易摩擦阻尼器来增强镍钛形状记忆合金丝的耗能性能。所设计的简易阻尼器由 4 块钢板组成,包括:2 块尺寸为 140 mm×80 mm×15 mm 的盖板,1 块纵向开有直径为 6 mm 中通圆孔、尺寸为 110 mm×80 mm×15 mm 的中上板,1 块纵向同

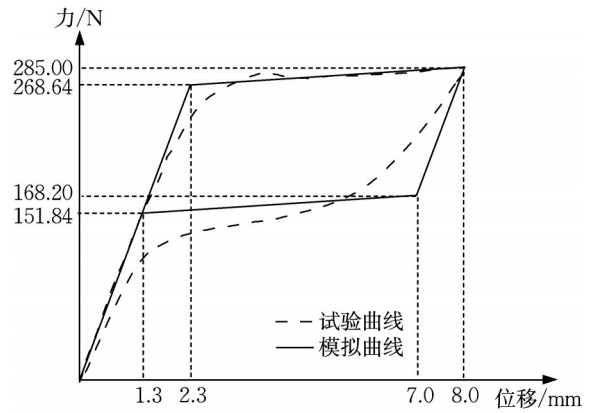


图 8 理想旗帜型荷载一位移曲线

Fig. 8 Transformation of ideal flag load-displacement curve

样开有中通圆孔、尺寸为 90 mm×80 mm×15 mm 的中下板。2 块盖板及中间下板均开直径为 10 mm 的螺栓孔,它们组合后的位置相对不变;而中上板开 30 mm 的长圆孔,使其能够在 2 块盖板之间滑动,通过中上板与 2 块盖板之间的摩擦进行耗能。简易阻尼器的设计三视图及渲染图如图 9 所示。

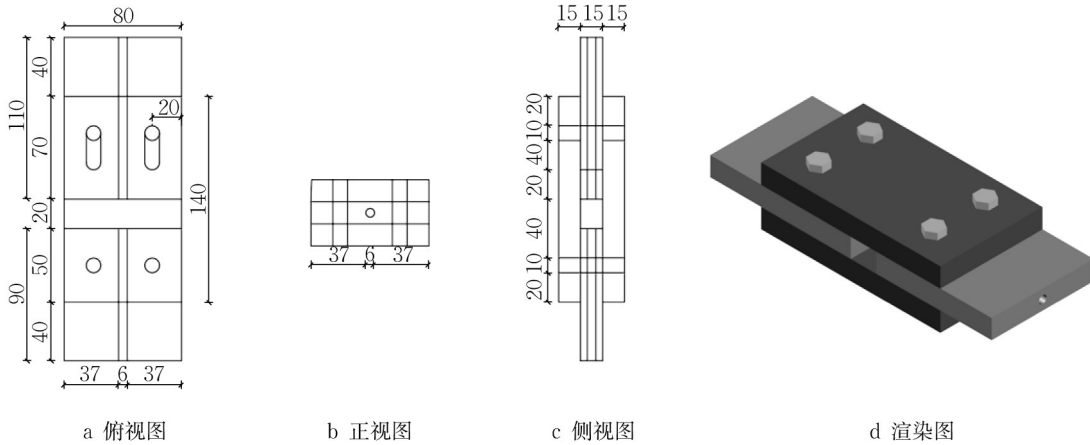


图 9 简易阻尼器的三视图及渲染图(单位:mm)

Fig. 9 Three-view drawing of simple damper (unit: mm)

加工成品俯视图如图 10a 所示,侧视图如图 10b 所示。其中,中下板及中上板在试验机的夹持下出现明显的压痕。各板面均已打磨光滑,尽可能减少多次往复拉压试验中由于板面磨损导致的滑动摩擦力发生较大变化的情况出现。

应用有限元分析软件 ABAQUS 对上述装置进行模拟,边界条件为中下板一端固定,对 4 个螺栓施加 100 N 的预紧力,各板间摩擦系数设置为 0.15。并对中上板设定 10 mm 的往复位移,读取模拟的荷载一位移曲线。模拟图及结果曲线如图 11 所示。

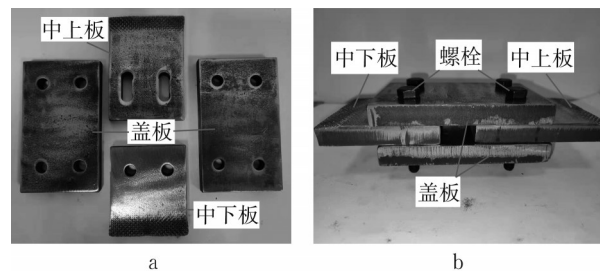


图 10 阻尼器部件及组装成品

Fig. 10 Parts and assembly of a simple damper

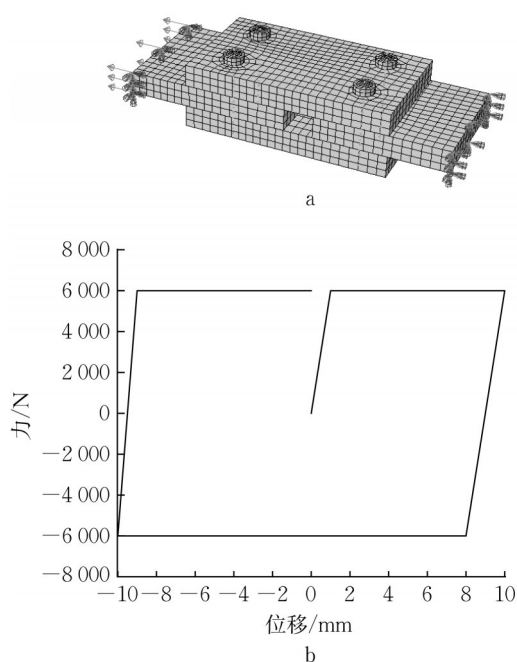


图11 阻尼器有限元模型及模拟结果曲线

Fig. 11 Finite element model of damper and simulation result curve

由图11b可知,该装置的滞回环饱满,能够有效增强形状记忆合金的耗能。上下两平台段数值为滑动摩擦力参数,主要通过改变螺栓预紧力来进行调整。

简易阻尼器滞回试验采用同济大学土木工程防灾国家重点实验室的电子万能试验机进行,试验装置如图12所示。调节螺栓松紧度,改变阻尼器的滑动摩擦力,设定程序机器首先以恒定 $2\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率将阻尼器张拉至 $5\text{ mm}$ 处,随后将阻尼器压缩至 $-5\text{ mm}$ 处,最后将阻尼器张拉至原位( $0$ 位移处),将上述程序循环 $5$ 次,输出试验机的荷载一位移曲线。

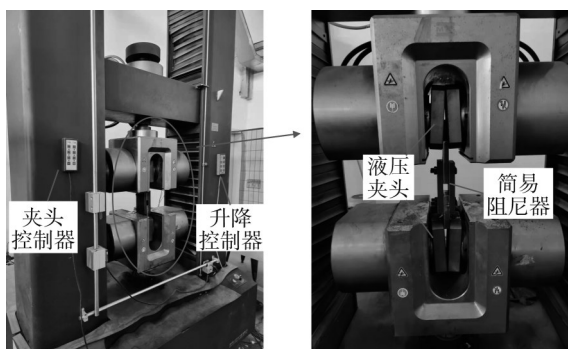


图12 阻尼器滞回试验的试验装置

Fig. 12 Set-up of damper hysteresis test

调整螺栓松紧,能够获得不同的滑动摩擦力值,根据多次试验结果,阻尼器可调节的摩擦力范围在 $2\ 000\sim 15\ 000\text{ N}$ 之间。以滑动摩擦力在 $3\ 500\text{ N}$ 左右的试验为例进行分析,其荷载一位移曲线如图13所示。从图中可以看出阻尼器滞回曲线十分饱满,能够有效达到增强耗能的目的,但曲线存在一定波动,每进行一次拉压,阻尼器的滑动摩擦力都会有一定程度的增大,据分析,这是由于摩擦面不够光滑平整,在较大的预紧力作用下,每次滑动都会使摩擦面出现新的损伤,增大摩擦面粗糙程度,从而增大滑动摩擦系数,使摩擦力增大。通过减少螺栓的预紧力,打磨摩擦面,在摩擦面上涂黄油等措施能够有效缓解这种情况。简易阻尼器所受外力在拉压之间转换时,其摩擦力相应地由动摩擦向最大静摩擦进行转化,出现摩擦力增大的情况,故在曲线上体现为拉压转换位移处荷载出现明显增大。

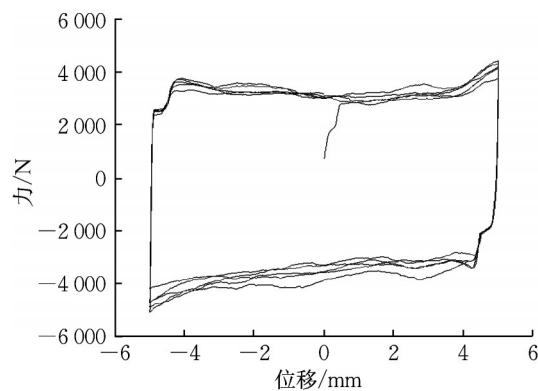


图13 阻尼器的滞回曲线

Fig. 13 Hysteresis curve of damper

### 3.3 组合张拉试验

利用所推导的公式计算最优配比情况下阻尼器的参数和SMA丝的数量之间的关系。利用式(3)计算图8中所得到的理想旗帜型曲线的平衡参数为

$$\lambda = \frac{f_y + f_{T2}}{f_y - f_{T2}} = \frac{268.64 + 151.84}{268.64 - 151.84} = 3.6$$

$\lambda$ 值远大于 $1$ 表明本次使用的镍钛形状记忆合金丝的耗能能力还有较大的提升空间,现通过运用简易摩擦阻尼器来增强其耗能能力。通过调整镍钛形状记忆合金丝的根数以及简易阻尼器的滑动摩擦力参数来调整平衡参数 $\lambda'$ 。

首先应用式(1)计算使用的镍钛合金丝的 $f_{ys}$ 、 $f_{ye}$ ,为



$$f_{ys} = \frac{268.64 + 151.84}{2} = 210.24$$

$$f_{yc} = \frac{268.64 - 151.84}{2} = 58.4$$

令式(4)中 $\lambda'$ 等于1并进行数学变形可得到SMA丝根数 $n$ 与滑动摩擦力 $f_s$ 参数的关系为

$$\lambda = 1 + \frac{f_s}{nf_{yc}} \Rightarrow n = \frac{f_s}{151.84}$$

为了尽可能减少所需要SMA丝的数量,防止因丝数过多导致试验中SMA滑移或受力不均,对阻尼器表面涂抹黄油来进一步降低其滑动摩擦力参数下限。通过调节阻尼器螺栓松紧度,控制阻尼器的滑动摩擦力参数在600N左右,则此时根据式(3)、式(4),最优配比所需要的SMA丝数为4根。

本试验同样利用同济大学土木工程防灾国家重点实验室电子万能试验机,将多根形状记忆合金丝从简易阻尼器中心预留的孔洞处穿过,并运用2块总厚度与阻尼器中板厚度相同的夹片在阻尼器两端进行夹持,如图14所示。根据多次测试结果,试验能够保证阻尼器与SMA丝具有相同的位移,SMA丝与夹片不发生相对滑移。



图 14 组合张拉试验装置

Fig. 14 Set-up of combined tension test

共设计5组试验,通过在摩擦面涂抹黄油,将简易阻尼器滑动摩擦力参数大致设置为600 N,分别配置2根、4根、6根镍钛SMA丝。除此之外,额外设计2组对照组,分别为仅张拉4根镍钛SMA丝组以及仅张拉简易阻尼器组,试验分组如表2所示。以 $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速率将SMA丝与简易阻尼器同步张拉至5 mm位移处,随后以相同的速率将位移降低至零,每组试验重复3次,绘制加卸载过程中的荷载—位移曲线。其中,2-1组试验,单独张拉简易阻尼器;2-2组试验,单独张拉4根镍钛形状记忆合金丝;2-3

组试验,同时张拉阻尼器及4根镍钛形状记忆合金丝,其荷载—位移曲线对比如图15所示。可以认为拉力为零时的位移为试件残余位移,曲线与Y轴包裹的面积为试件的耗能能力,残余位移与耗能能力比较如表3所示。根据试验数据可知,组合运用镍钛形状记忆合金和简易阻尼器能够使系统在既保留一定自恢复性能的情况下大幅提高耗能能力。比起单独使用形状记忆合金,系统自恢复性能降低了约45%,而其耗能能力却提高了5倍左右。

表 2 组合张拉试验分组

Tab. 2 Grouping of superelasticity test

组号	阻尼器参数/N	镍钛丝根数
2-1	600	0
2-2	0	4
2-3	600	4
2-4	600	2
2-5	600	6

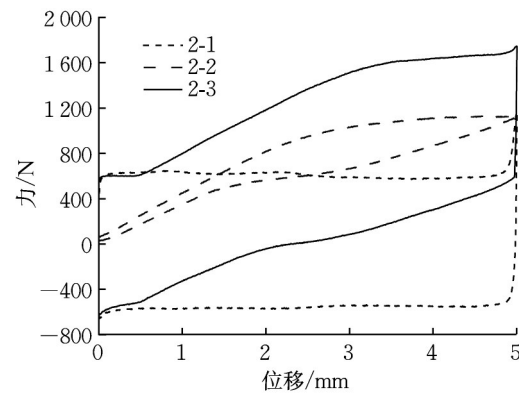


图 15 2-1—2-3组合张拉试验的荷载—位移曲线

Fig. 15 Load-displacement curves of combined tensile tests of 2-1 - 2-3

表 3 残余位移与耗能能力的比较

Tab. 3 Comparison of residual displacement and energy dissipation capacity

试验组号	残余位移/mm	耗能能力/(N·mm)	$\lambda$
2-1	5.00	5 827	—
2-2	0.17	1 046	3.60
2-3	2.32	6 267	0.96

当保持螺栓预紧力为600N不变,分别配置2根、4根、6根镍钛形状记忆合金丝后,它们的荷载—位移曲线如图16所示。从试验曲线可以看出,不同参数配比的阻尼器和镍钛形状记忆合金丝系统表现出不同的力学性能。随着镍钛丝根数减少,在阻尼器参数不变的条件下,系统平衡参数也随之减小,曲线表现出整体向下移动的趋势。2-3组试验配比为

所计算出的最佳配比,从图中也可看出,其曲线卸载段在刚度变化点处与 X 轴相交,表明了该配比能在获得优越自恢复性能的同时具备较强的耗能能力。当卸载曲线中的平行段靠近 X 轴时,系统的自恢复性能迅速丧失。因此,在工程应用中,确定合适的配比十分重要,不当的配比有可能让桥梁系统自复位性能丧失,如试验组 2-5 组。

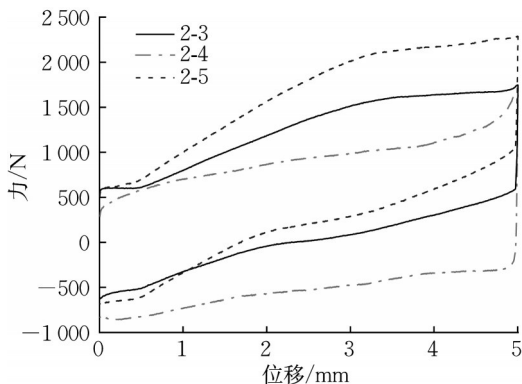


图 16 2-3—2-5 组合张拉试验的荷载—位移曲线

Fig.16 Load-displacement curve of combined tension tests of 2-3—2-5

## 4 结论

结合理论与试验研究,验证了形状记忆合金自恢复与耗能性能平衡理念的合理性与可行性。首先在前人的基础上,理论推导了形状记忆合金与摩擦阻尼器组合使用的最佳配比公式,通过引入平衡参数对体系自复位能力与耗能能力之间的平衡进行评估。随后,进行了形状记忆合金超弹性性能试验、简易阻尼器滞回试验以及组合张拉试验。

试验结果表明,合理配比的镍钛 SMA 丝—阻尼器组合系统能够在保持 SMA 丝自恢复性能的前提下最大化系统的耗能能力。同时,所推导的最佳配比公式能够较好地指导确定镍钛丝根数以及阻尼器参数的配比。试验的成功也进一步表明利用其他耗能装置来改善形状记忆合金旗帜型力学曲线是合理可行的,提出的系统平衡参数以及平衡设计理论公式能够实际应用并指导工程实践。

### 作者贡献声明:

强旭红:学术指导、论文框架设计、论文修正指导。

蹇楠毅:理论研究、试验验证、论文撰写。

姜旭:学术指导。

### 参考文献:

- [1] CLADERA A, WEBER B, LEINENBACH C, *et al.* Iron-based shape memory alloys for civil engineering structures: An overview [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 63: 281.
- [2] 王社良,赵祥,朱军强,等.记忆合金自复位阻尼器隔震结构的地震反应分析[J].*建筑结构学报*,2006(5):110.  
WANG Sheliang, ZHAO Xiang, ZHU Junqiang, *et al.* Earthquake response analysis of isolated structure with shape memory alloy re-centering dampers [J]. *Journal of Building Structures*, 2006(5):110.
- [3] 王振营,毛晨曦,张亮泉.新型 SMA 耗能连梁框架剪力墙结构抗震性能研究[J].*土木工程学报*,2012,45(S2):53.  
WANG Zhenying, MAO Chenxi, ZHANG Lianguan. Seismic performance of reinforced concrete frame-shear wall structure with novel shape memory alloy dampers in coupling beams [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012,45(S2):53.
- [4] 李春祥,汤钰新.混合形状记忆合金和屈曲约束支撑系统自复位抗震研究[J].*振动与冲击*,2014,33(10):152.  
LI Chunxiang, TANG Yuxin. Self-centering earthquake-resistance of a hybrid shape memory alloy and buckling-restrained brace system [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014,33(10):152.
- [5] 李建中,管仲国.桥梁抗震设计理论发展:从结构抗震震后震后可恢复设计[J].*中国公路学报*,2017,30(12):1.  
LI Jianzhong, GUAN Zhongguo. Research Progress on Bridge Seismic Design: Target from Seismic Alleviation to Post-earthquake Structural Resilience [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(12):1.
- [6] OSMAN E O, STEFAN H. Evaluation of the performance of a sliding-type base isolation system with a NiTi shape memory alloy device considering temperature effects [J]. *Engineering Structures*, 2010, 32: 238.
- [7] DEZFULI F H, ALAM M S. Shape memory alloy wire-based smart natural rubber bearing [J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(4): 045013.
- [8] 李惠,刘金龙,马赫,等. OpenSees 平台的 SMA 被动阻尼器及其在斜拉桥减震中的应用[J].*计算力学学报*,2009,26(3):374.  
LI Hui, LIU Jinlong, MA He, *et al.* Control on nonlinear seismic response of cable-stayed bridge using SMA damper based on OpenSees [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2009,26(3):374.
- [9] 王景全,李帅,张凡.采用 SMA 智能橡胶支座的近断层大跨斜拉桥易损性分析[J].*中国公路学报*,2017,30(12):30.  
WANG Jingquan, LI Shuai, ZHANG Fan. Seismic fragility analyses of long-span cable-stayed bridge isolated by SMA wire-based smart rubber bearing in near-fault regions [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017,30(12):30.