

SMA-橡胶复合支座的力学性能及在桥梁结构中的应用研究

苗晓瑜^{1, 2}, 王社良², 唐 娴³, 翁光远³

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;
3. 陕西交通职业技术学院 公路工程系, 陕西 西安 710018)

摘 要:利用形状记忆合金材料(SMA)在相变伪弹性阶段的工作原理与力学性能,建立其在荷载和温度等因素作用下的本构模型;针对桥梁结构在外界条件激励作用下的受力特性,制作成形状记忆合金与橡胶复合桥梁支座,形成新的结构隔震装置.该装置具有自复位功能,可以改变桥梁结构中普通橡胶支座变形过大,不能恢复的缺陷,避免桥梁结构过早地出现病害.为 SMA-橡胶桥梁复合支座的深入研究和广泛应用提供了理论基础.

关键词:形状记忆合金;桥梁支座;隔震支座;自复位调节器

中图分类号:TU313

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2012)01-0028-05

1 动力荷载作用下桥梁支座病害分析

经过对桥梁支座病害的大量调查发现,桥梁结构支座普遍存在的问题有两个:一是支座橡胶板由于橡胶老化、变质,梁体失去自由变形能力,直接导致梁端或墩、台帽混凝土破裂,造成掉角、啃边或橡胶板易位;二是出现支座板损坏,翘起断裂,垫石混凝土压坏、剥离掉角等病害现象.由于桥梁支座所处的特殊部位施工难度大,再加上橡胶材料和钢板材料特性的差异,两者不能完全融合,致使支座不能与梁体的底面充分结合,造成支座受力不均匀,出现严重偏压,支座表面异常鼓出或出现局部脱空.以上两种现象都会使桥梁结构在动力荷载下产生较严重的病害.

2008 年 5 月 12 日发生的汶川地震,造成大量公路桥梁破坏.据交通运输部门统计,公路、桥梁、隧道等各类交通基础设施损毁的直接经济损失高达 670 亿元,其中桥梁损毁最为严重,直接经济损失约为 500 亿元左右.根据本次地震的有关影像资料发现,震区大多数桥梁破坏都是以落梁为主.该地区的桥梁主要为桥面连续简支梁桥,支座多为直接搁置的板式橡胶支座,在地震中稳定性较差,主梁与桥墩连接较为薄弱,梁体横、纵向移位较大,最终导致落梁.因此,保证桥梁支座的可靠性,避免桥梁上部结构在支座处产生较大位移显得十分重要.为使桥梁结构支座部位始终处于正常、安全的受力状态,应当加强桥梁支座处动力防灾和抗灾响应规律和变形调节的研究,积极采用先进的新材料和新工艺,增强桥梁支座的防灾和抗灾性能,延长桥梁的使用寿命,有着重要的现实意义.

形状记忆合金(简称 SMA)是一种新型的智能材料,它具有形状记忆功能,其在低温下的塑性变形,在遇到高温时会完全消失而恢复到原始状态;同时,SMA 材料具有超弹性性能和较大的阻尼,具有较大的弹性恢复能力,能够耗散较大的外界能量;另外 SMA 材料还具有极强的复合能力,很容易与其他材料复合,形成 SMA 智能复合材料构件.因此,可以通过将形状记忆合金与普通橡胶支座结合为复合支座,令其充分发挥各自的功能,从而实现桥梁支座自复位的功能,实现减小桥梁灾变的可能性.

收稿日期:2010-01-14 **修改稿日期:**2011-12-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51178388,10972168);教育部高等学校博士点基金资助项目(200807030002);陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(09JS022);陕西工业攻关项目(2008K07-31)

作者简介:苗晓瑜(1971-),男,山西平遥人,讲师,博士,主要研究方向为钢筋混凝土结构与砌体结构的抗震与控制.

2 SMA 材料的相变伪弹性

SMA 材料具有相变伪弹性,当环境温度高于奥氏体相变结束温度($T > A_f$)时进行加卸载,SMA 可以提供饱满的滞回曲线并且卸载后没有残余变形。依据文献 1 中所述本构方程,采用程序模拟了 20℃ 合金丝在受到拉伸时的相变伪弹性,如图 1 所示。从图 1 可以看出,合金丝在加卸载的过程中出现了令人满意的迟滞循环效应,即在加载初期变形由材料奥氏体弹性拉伸引起;当达到马氏体相变点后出现相变而引起应力平台,直到最大可恢复应变这一段曲线较平缓;卸载时出现弹性下降段,这一段变形主要由材料的奥氏体刚度所决定;随后发生奥氏体相变而出现平缓的下降段;最后沿着奥氏体刚度回复到初始状态。从图中可以看出当应变恢复到零时,几乎没有残余应力。

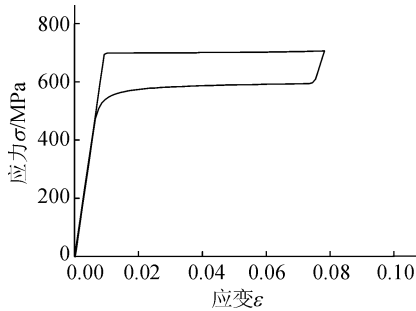


图 1 SMA 的相变伪弹性

Fig. 1 Phase transformation pseudo elasticity of SMA

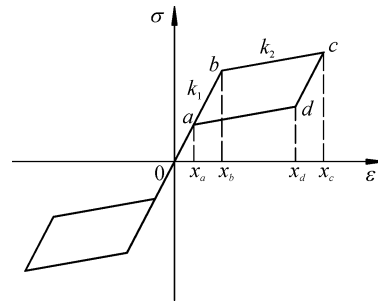


图 2 相变伪弹性分段线性化本构模型

Fig. 2 Stepwise linearized constitutive model of phase transformation pseudo elasticity

SMA 材料的应力与应变关系受到相变过程的影响,表现出典型的非线性特征,为了工程应用的方便,文献 1 提出了分段线性化本构模型形式,如图 2 所示。图 2 中 $0ab$ 段和 cd 段分别处于材料的奥氏体相和马氏体相,其斜率统一为 k_1 ,而 bc 段和 da 段则分别位于马氏体相变和奥氏体相变过程中,其斜率均简化为 k_2 ,则伪弹性 SMA 材料的恢复力 $F(x)$ 就可表示为

$$F(x) = \begin{cases} k_1 x & (0ab, a0) \\ (k_1 - k_2)x_b \text{sign}(x) + k_2 x & (bc) \\ (k_1 - k_2)(x_b - x_c) \text{sign}(x) + k_1 x & (cd) \\ (k_1 - k_2)x_a \text{sign}(x) + k_2 x & (da) \end{cases} \quad (1)$$

3 SMA 与橡胶复合桥梁支座的自恢复特性

在普通橡胶支座基础上沿四面对称布置两对交叉的 SMA 拉索,拉索上装有温度控制器,A 索处于常温马氏体状态,B 索温度 T_0 大于 SMA 奥氏体相变完成温度 T_f , T 应根据建筑物的设防烈度确定,SMA 拉索两端固定在橡胶支座外连接钢板上,长度 L 根据 SMA 的极限应变以及橡胶支座的水平位移确定,以确保拉索处于正常工作状态。拉索截面半径 20 mm,拉索的预应变为 3%,初始应力采用 500 MPa,拉索的超弹性范围按 7% 计算,极限变形为 6% 计算,极限变形为 9.3%。SMA-橡胶复合支座模型如图 3 所示:

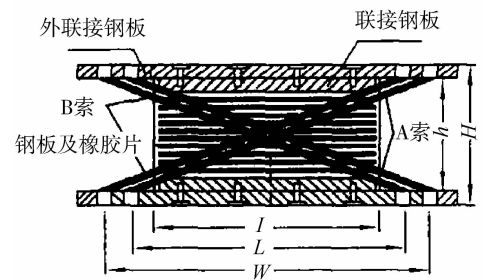


图 3 SMA-橡胶复合支座模型图

Fig. 3 Model of SMA-rubber bearing

SMA 与橡胶复合支座组合性能良好的自复位阻尼器,其减震机理如下:在正常使用荷载或小震的作用下,复合支座具有足够的初始刚度抵抗侧向变形,结构处于弹性工作状态。在强震作用下,复合支座进入滞回耗能状态,通过橡胶剪切滞回变形和 B 索的超弹性变形,耗散大量的地震动能量,使上部结构的地震响应减小,确保结构的安全。当结构地震反应过大或结构发生共振时,通过 SMA 拉索上的温

度控制器,升高 A 索温度,使其产生奥氏体相变,材料处于奥氏体状态,此时拉索残余变形消失,拉索长度与 B 索相同,从而隔震层 SMA 提供的刚度增加一倍,改变了结构的自振周期,使结构远离共振频率,从而降低结构的地震响应;另外,当 SMA 处于奥氏体状态时,其超弹性效应也大大增加了隔震支座的耗能能力,从而进一步降低结构的地震响应.因此,SMA 复合橡胶支座具有很好的隔震能力和自适应能力;同时,由于纯马氏体 SMA 极限强度可达 1.10 GPa 以上,即拉索具有极大的硬化刚度,因而 SMA-复合橡胶支座具有很大的极限应变刚度,从而可以防止隔震层产生过大位移.振动结束后,若支座存在残余变形,可通过温度控制器升高 A 拉索温度,利用其形状记忆效应,产生恢复力使结构复位.

SMA-橡胶复合支座解决了普通橡胶支座存在的问题.在地震波作用下,该复合支座产生水平方向的运动.一方面,橡胶垫产生剪切变形,避开地震波的卓越周期,另一方面,合金丝在地震波作用下产生变形,其超弹性恢复力使支座恢复变形,同时由于其非线性变形产生滞回耗能,可以消耗大量的地震能量.橡胶垫的隔震与合金丝的耗能功能使地震反应大大降低,起到了良好的减震效果.为避免合金丝在地震作用过程中产生压应力而产生压屈松弛现象,合金丝应进行预张拉,这样,该复合支座才能在整个地震作用过程中始终发挥作用.

为了把 SMA 自复位阻尼器引入到实际结构进行设计,首先要确定其恢复力模型.由于阻尼器的滞回曲线表现出了强烈的非线性,出于应用方便的目的,文献 1 提出了一种分段线性化的模型.依据 SMA 材料分段线性化的本构关系(式 1),首先计算得到耗能组和回位组的简化恢复力模型,然后将二者叠加,最后推算出阻尼器恢复力模型各个参数.

耗能组曲线具有较大的滞回环面积,并且近似为四边形,可将其简化为平行四边形的恢复力特征,恢复力模型如图 4 所示.

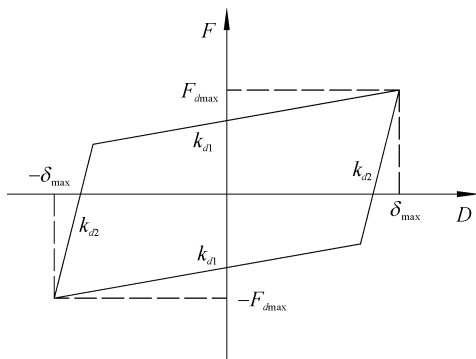


图 4 SMA 桥梁支座的自恢复特性

Fig. 4 Self-restoring characteristic of SMA-rubber bearing

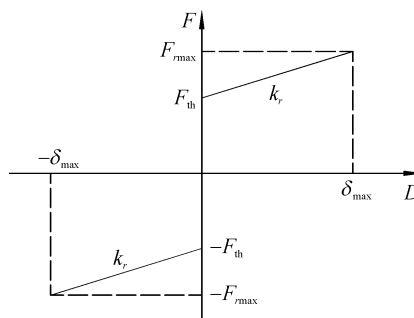


图 5 回位组恢复力模型

Fig. 5 Restoring model of self-centering unit

恢复模型的参数主要有设计最大行程 δ_{\max} 、最大恢复力 $F_{d\max}$ 、加载刚度 K_{d1} 和卸载刚度 K_{d2} ,可由下列式子确定.

$$\begin{aligned} F_{d\max} &= n_d A_d [(k_1 - k_2)(x_b - x_a) + 2k_2 \frac{\delta_{\max}}{L_d}] \\ K_{d1} &= \frac{2k_2 n_d A_d}{L_d} \\ K_{d2} &= \frac{2k_1 n_d A_d}{L_d} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 n_d 为耗能组合合金丝的根数, A_d 为合金丝的有效截面积, L_d 为合金丝预应变前的长度, k_1 、 k_2 、 x_a 和 x_b 为材料相变伪弹性本构模型的参数,其意义详见式(1).

由于回位组滞回曲线包围的面积较小,可以忽略其耗能能力简化为一种刚弹性模型.在计算恢复力模型时,需要处理一个重要的参数,就是屈服后的弹性刚度 K_r .确定 K_r 的方法有多种,本文取屈服开始点与最大行程点连线的刚度值作为 K_r 的数值.回位组模型如图 5 所示.

其参数主要有阻尼器设计最大行程 δ_{\max} 、最大恢复力 $F_{r\max}$ 、界限力 F_{th} 和 K_r .

$$\begin{aligned}
 F_{r\max} &= n_r A_r [(k_1 - k_2) x_b + k_2 (\frac{\delta_{\max}}{L_r} + \epsilon_{0r})] \\
 F_{th} &= n_r A_r [(k_1 - k_2) x_a + k_2 \epsilon_{0r}] \\
 K_r &= \frac{F_{r\max} - F_{th}}{\delta_{\max}}
 \end{aligned} \quad (3)$$

将消能组和回位组的恢复力特性合成,得到 SMA 自复位阻尼器的恢复力模型,合成的原则是在相同的变形下,将二者的恢复力进行叠加,如图 6 所示。

合成后的阻尼器恢复力模型参数主要有:初始刚度 K_1 ,屈服后刚度 K_2 ,卸载刚度 K_3 ,屈服力 F_{yh} ,设计极限承载力 F_{ph} ,卸载力 F_{xh} ,屈服位移 δ_{yh} ,极限位移 δ_{ph} 。其中初始刚度 K_1 做了以下处理,由于理论上的分析结果是回位组的初始刚度为无穷大,因而组合后阻尼器 K_1 也应为无穷大,但这是在理想情况下的分析结果,在实际中由于受套筒刚度及合金丝锚固等因素的影响, K_1 并不是无穷大的数量级别,一般作近似处理。其它参数可由下列方程确定。

$$K_2 = K_r + K_{d1} \quad (4)$$

$$K_3 = K_r + K_{d2} \quad (5)$$

$$\delta_{ph} = \delta_{\max} \quad (6)$$

$$F_{yh} = F_{th} + F_{d\max} - K_{d1} \cdot \delta_{ph} \quad (7)$$

$$F_{ph} = F_{th} + K_r \cdot \delta_{ph} + F_{d\max} \quad (8)$$

$$F_{xh} = F_{th} - (F_{d\max} - K_{d1} \cdot \delta_{ph}) \quad (9)$$

$$\delta_{yh} = F_{yh} / K_1 \quad (10)$$

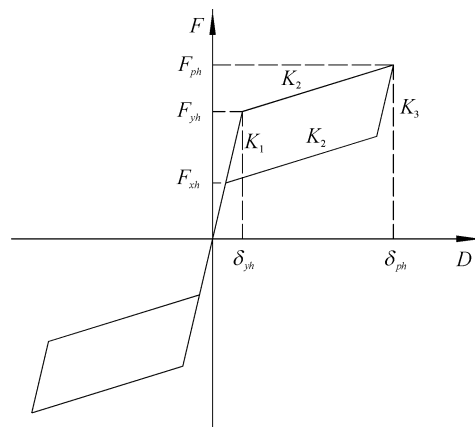


图 6 SMA 自复位阻尼器的恢复力模型

Fig. 6 Restoring model of SMA self-centering damper

4 结 论

(1)在动力荷载作用下,桥梁结构的病害主要始于桥梁的支座,因此保证桥梁支座的受力特性非常重要。

(2)采用 SMA 与橡胶自复位桥梁支座时,恢复力的大小能够满足动力荷载下桥梁支座的响应,因此能够实现桥梁支座病害的有效防治。

(3)对于 SMA 自复位桥梁支座的工程应用,需要进一步进行试验研究,确定桥梁支座的结构构造以及与主梁结构的可靠连接。

参考文献 References

- [1] 王社良. 形状记忆合金在结构控制中的应用[M]. 西安:陕西科学技术出版社,2000.
WANG She-liang. Application of shape memory alloy for structural control[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2000.
- [2] MAURO D, DONATELLO C. Implementation and testing of passive control device based on shape memory alloy [J]. Earthquake Eng. and Struc. Dyn, 2000(29):945-968.
- [3] BRINSON L C, BEKKER A, HWANG S. Deformation of shape memory alloys due to thermo-induced transformation[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2010(7), 97-106.
- [4] 王社良, 苏三庆. 形状记忆合金的超弹性恢复力模型及其结构抗震控制[J]. 工业建筑, 1999, 29(3): 49-52.
WANG She-liang, SU San-qing. On super-elastic restoring force models of shape memory alloy and its application in aseismic control of structures[J]. Industrial Construction, 1999, 29(3): 49-52.
- [5] 江世哲, 王社良, 李启明. SMA 被动隔震装置及其阻尼性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2003, 35(4): 317-320.

- JIANG Shi-zhe, WANG She-liang, LI Qi-ming. Research on damp capacity of passive isolation device based on shape memory alloy [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. : Natural Science Edition, 2003, 35(4): 317-320.
- [6] 彭刚, 李黎, 唐家祥. 形状记忆合金耗能阻尼器设计的理论方法[J]. 工业建筑, 2002, 32(8): 317-320.
- PENG Gang, LI Li, TANG Jia-xiang. Theory method of designing Shape Memory Alloy damper [J]. Industrial Construction, 2002, 32(8): 47-49.
- [7] 张庆新. 磁控形状记忆合金特性及其执行器应用基础研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2006.
- ZHANG Qing-xin. Study on properties of magnetically controlled shape memory alloy and its application for actuators [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2006.
- [8] 张庆新, 王凤翔, 李文君. Ni-Mn-Ga 合金磁控形状记忆效应及外特性[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(8): 1264-1266.
- ZHANG Qing-xin, WANG Feng-xiang, LI Wen-jun. Magnetic shape memory effect and external characteristic of Ni-Mn-Ga alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(8): 1264-1266.
- [9] 王社良, 马怀忠, 沈亚鹏. 形状记忆合金在结构抗震控制中的应用[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 1998, 30(2): 115-118.
- WANG She-liang, MA Huai-zhong, SHEN Ya-peng. Applications of shape memory alloy in aseismic control of structures [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. : Natural Science Edition, 1998, 30(2): 115-118.
- [10] 王凤翔, 张庆新, 吴新杰. 磁控形状记忆合金蠕虫型直线电机研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 140-144.
- WANG Feng-xiang, ZHANG Qing-xin, WU Xin-jie. Study on inchworm linear motor of magnetically controlled shape memory alloy [J]. Proceedings of the Csee, 2004, 24(7): 140-144.
- [11] 陈海全. 应用形状记忆合金的大跨桥梁结构振动控制理论与振动台试验[D]. 天津: 天津大学, 2003.
- CHEN Hai-quan. Theoretical research and shaking-table test on vibration control for long-span bridges using shape memory alloys [D]. Tianjin: Tianjin University, 2003.

Mechanical property and applied study of SMA-rubber bearing for bridge structures

MIAO Xiao-yu^{1,2}, WANG She-liang², TANG Xian³, WENG Guang-yuan³

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University Xi'an 710064, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology Xi'an 710055, China;

3. Department of Highway Engineering, Shaanxi College of Communication Technology, Xi'an 710018, China)

Abstract: With the working principle and mechanical properties of shape memory alloy (SMA) in the pseudo-elastic state, the constitutive model is established considering the role of the external load and temperature. According to the force characteristics of the bridge structure under external incentive, The SMA-rubber bridge bearing which forms a new structure isolation device is made. This device has self-reset function and changes the bridge structure of defects where the deformation of the normal rubber bearing are too large and can not be restored. In this way, the bridge structure diseases can be avoided as early as possible. Meanwhile the analysis and research of the paper provides a theoretical basis for the depth research and extensive application of SMA-rubber bearing.

Key words: SMA; Bridge Bearings; structure isolation device; self-reset controller