

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240319002

多重摩擦摆新型隔震支座的理论分析及数值模拟*

李喜梅^{1,2}, 牛珂欣^{1,2}, 苏润田³, 母渤海⁴

(1. 兰州理工大学西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学防震减灾研究所, 甘肃 兰州 730050; 3. 浙江交投交通建设管理有限公司, 浙江 杭州 311200; 4. 中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 传统的摩擦摆支座虽然耗能能力强, 但存在支座本身位移过大的问题。因此在三重摩擦摆支座的基础上, 结合形状记忆合金(SMA)拉索提出了多重摩擦摆新型隔震支座(STFPB), 介绍了其基本构成和隔震原理, 利用力学平衡原理对摩擦摆隔震支座进行了理论分析, 推导出多重摩擦摆新型隔震支座的刚度和等效粘滞阻尼比, 构造了多重摩擦摆新型隔震支座的四折线滞回模型。采用有限元软件ABAQUS对多重摩擦摆新型隔震支座进行实体单元建模, 模拟低周反复荷载作用下该支座的滞回特性与反复特性, 并分别研究了竖向荷载、水平位移幅值、SMA拉索的数量和直径以及水平激励角度对其的耗能影响。研究表明:(1)理论分析和数值模拟结果吻合较好, 验证了提出的滞回模型计算公式的正确性;(2)相比传统的三重摩擦摆支座, 多重摩擦摆新型隔震支座的滞回曲线饱满, 具有良好的滞回性能;(3)耗能能力随竖向荷载的增大、水平位移幅值的增大以及SMA拉索的增多而增强;(4)45度激励作用下布置4根SMA拉索的刚度和耗能最大, 在进行支座布置时应考虑SMA拉索的布置位置。

关键词: 摩擦摆隔震支座; 低周反复; 滞回特性

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)04-0859-11

Theoretical Analysis and Numerical Simulation of a Novel Triple Friction Pendulum Bearing

LI Ximei^{1,2}, NIU Kexin^{1,2}, SU Runtian³, MU Bohai⁴

(1. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. Zhejiang Jiaotou Traffic Construction Management Co., Ltd., Hangzhou 311200, China; 4. CSECE AECOM Consultants Co., Ltd., Lanzhou 730050, China)

Abstract: Traditional friction pendulum bearings, while possessing strong energy dissipation capabilities, suffer from excessive displacement. Therefore, based on the triple friction pendulum bearing, a novel SMA-triple friction pendulum bearing (STFPB) incorporating shape memory alloy (SMA) cables was proposed, and its basic structure and isolation principles were introduced. A theoretical analysis of the friction pendulum bearing was conducted based on the principles of mechanical balance. The stiffness and equivalent viscous damping ratio of the novel bearing were derived, and a four-segment

* 收稿日期: 2024-03-19; 修回日期: 2024-05-07

基金项目: 国家自然科学基金(地区基金)(52268028)、甘肃省国合基地开放基金项目(G II 2023-D02)资助

作者简介: 李喜梅(1979—), 女, 副教授, 博士。主要从事桥梁结构减隔震分析、桥梁结构振动控制研究。

E-mail: mei611@163.com

hysteretic model was constructed. Utilizing finite element software ABAQUS, the solid elements of the bearing were modeled, and its hysteretic and recovery characteristics under low-cycle repeated loads were simulated. Additionally, the influence of vertical load, horizontal displacement amplitude, the number and diameter of SMA cables, and horizontal excitation angle on its energy dissipation was investigated. The results showed that: ①excellent agreement between theoretical analysis and numerical simulation validated the correctness of the proposed calculation formula for the hysteretic model. ② Compared with traditional triple friction pendulum bearings, the novel STFPB had a full hysteresis curve and superior hysteretic performance. ③Energy dissipation increased with higher vertical load, larger horizontal displacement amplitude, and an increased number of SMA cables. ④ Under 45-degree excitation, the configuration with four SMA cables achieved maximum stiffness and energy dissipation. Therefore, the arrangement of SMA cables should be considered when designing the bearings.

Keywords: friction pendulum bearing; low-cycle repeated; hysteretic characteristics

0 引言

随着减隔震技术的发展,传统的支座类型已经不能满足桥梁的抗震需求,越来越多的新型减隔震支座被各位专家学者提出和研究^[1]。三重摩擦摆支座(Triple Friction Pendulum Bearing, TFPB)是利用滑动摩擦耗能的一种摆动式减隔震支座,是基于单摩擦摆支座(Friction Pendulum Bearing, FPB)的一种有多重滑动机制的支座。由于其在滑动过程中所表现出来的自适应特性而受到工程界的关注。自1985年V. A. Zayas等^[2]首次提出FPB, M. C. Constantinou等^[3]、A. S. Mokha等^[4-7]、D. M. Fenz等^[8]持续开展相关研究。王宝夫等^[9]通过将多个单摩擦摆支座串联组成多滑动面摩擦摆支座并计算地震响应,认为采用MFPS支座的桥墩的地震响应比FPS支座有所减小且具有较大位移能力。张常勇等^[10]选择三种隔震支座的布置方案,探究了参数效曲率半径和摩擦系数对耗能的影响。王力等^[11]考查了摩擦摆支座在桥梁工程中的应用。针对传统摩擦摆支座的性能缺陷和性能不足,贺拥军等^[12]提出一种将竖向抗拉减震体系与摩擦摆支座并联的新型摩擦摆支座。欧进萍等^[13]提出大位移摩擦摆新型结构,构建大位移摩擦摆底层和多层隔震结构体系。马振霄等^[14]提出了一种综合隔震周期目标和摩擦力影响粗定等效曲率半径,并选择摩擦系数大小的摩擦摆支座隔震方案布设方法。赵守江等^[15]提出了一种组合型摩擦摆隔震装置(CFPSI),与FPB相比,除具有良好的隔震性能外,CFPSI还

表现出更强的自适应性。尚继英等^[16]通过提出一种变频(曲率)变摩擦的摩擦摆隔震支座(FPB-VFF),分析了该支座的力学性能和工作原理,推导出了其理论本构模型和滞回特性参数表达式。为了解决支座本身位移过大的问题,本文提出一种具有多重耗能机制且延长支座本身工作寿命的多重摩擦摆新型隔震支座。

形状记忆合金(Shape Memory Alloy, SMA)是近年来抗震研究常用的一种材料。SMA拉索由于其稳定的受力和滞回性能、优秀的自复位特性和耗能特性被选做隔震支座的改进材料。M. Dolce等^[17]将SMA丝与滑动支座结合,提出了SMA-滑动支座隔震装置,验证了其隔震效果。陈鑫等^[18]利用SMA棒材开发了适用于空间网壳结构的隔震支座。庄鹏等^[19-22]将形状记忆合金材料用于改进摩擦摆支座,进行了性能试验和结构的减震分析。王萌等^[23]结合SMA与负刚度隔震支座(NSD)各自的优点,提出一种间隙式SMA-NSD摩擦隔震支座并分析了其隔震性能。邱灿星等^[24]进一步分析间隙式SMA支座关键参数对减震效果的影响。然而,目前较少将SMA拉索用于三重摩擦摆支座的性能改进和优化研究。

本文将SMA拉索作为TFPB的限位装置,提出一种多重摩擦摆新型隔震支座(SMA-Triple Friction Pendulum Bearing, STFPB)。首先将TFPB和SMA拉索的受力耦合,建立了STFPB的恢复力模型。然后运用有限元分析软件ABAQUS分别建立STFPB和TFPB的实体模型,对比了理论滞回模型和有限元滞回模型,验证STFPB理论恢复力模型

的正确性。最后,对STFPB进行多种参数分析和优化,研究不同参数对STFPB的隔震性能影响,形成可供参考的多重摩擦摆新型隔震支座建模对照,为支座的减隔震技术发展提供有价值的研究参考。

1 多重摩擦摆新型隔震支座的设计原理及构造形式

1.1 设计原理

传统的摩擦摆支座具有强大的耗能能力,但位移过大会影响结构的稳定性和安全性。因此,采用三重摩擦摆机制和SMA拉索技术相结合的设计,平衡耗能能力与位移之间的关系。采用了SMA拉索与传统的三重摩擦摆支座并联,将SMA拉索安装在上滑块和下滑块之间,实现限位作用并耗散结构能量。SMA拉索具有超弹性变形的特点,可以通过变形来限制支座的位移,从而保证结构的稳定性和安全性。此设计不仅保留了传统摩擦摆支座的耗能能力,还解决了位移过大的问题,实现了良好的抗震效果。

1.2 构造形式

多重摩擦摆新型隔震支座由上下两个支座板、中间的滑块、上下滑动板、上下平板和限位SMA拉索组成,基本构造如图1所示。

其中,滑块的上、下表面、上滑动板的上表面和下滑动板的下表面均嵌有聚四氟乙烯材料,以提高摩擦性能。各滑移面均有一圈约束环作为初级位移限制,通过滑块与约束环碰撞触发下一级机制。内滑块和外滑块之间安装限位SMA拉索作为终极控制,以控制支座的最大位移。

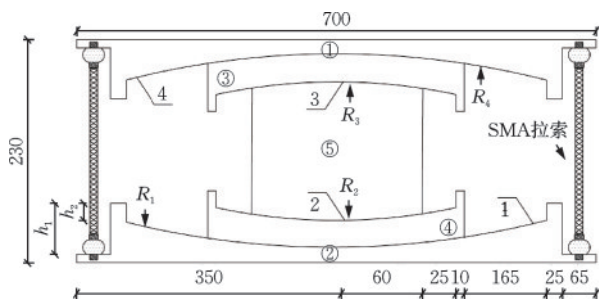


图1 STFPB的构造设计图

Fig.1 Structural design of STFPB

2 STFPB的力与位移关系

2.1 TFPB的恢复力模型

在进行多重摩擦摆新型隔震支座的设计时,需要根据被隔震结构的总重量W选择合适的支座类型和布设位置。同时需要选择每层滑动面的有效曲率半径、摩擦系数和设计位移,确保支座的承载力符合要求,并使其设计位移在合理范围内。结合图1,支座的运动阶段分为五个:

阶段1:当支座所受水平力大于最小摩擦力时,核心滑块⑤首先在内滑动面2和内滑动面3上滑动。

阶段2:当支座所受水平推力持续加大,核心滑块⑤继续滑动至触及内滑块③的挡块后,触发内滑块③开始在外滑动面4上滑动。

阶段3:支座所受水平推力达到极端,核心滑块⑤的底端触及内滑块④的挡块,并推动内滑块④底端触及下支座板②的挡块。

阶段4:内滑块③以及内滑块④分别在四个滑动面上同时滑动。

阶段5:内滑块③或内滑块④可能冲破上支座板①和下支座板②的挡块滑出,造成支座破坏,此时,SMA拉索发挥作用,其本身由于拉伸变形产生的内力提供水平分力作为阻力带动支座板往相反方向运动直至复位。

各参数应满足下列条件:有效曲率半径 $R_{eff2} = R_{eff3}, R_{eff1} = R_{eff4}$,滑动面的摩擦系数 $\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 < \mu_4$,位移限值 $d_2 = d_3, d_1 = d_4$ 。在这种情况下,支座的第二阶段和第四阶段将与第三阶段相同,而支座运动的五个阶段将被整合为三个阶段,即分别对应于小震、中震和大震三种设防地震。由于多重摩擦摆新型隔震支座在各个曲面上具有不同的受力特性和运动行为,因此其滑动顺序将由支座所受水平力和限位装置提供的水平反力来决定。

2.2 SMA拉索的控制力

具有超弹性效应的Ni-Ti SMA能够在一定恒温范围内完全自动恢复应力诱发马氏体相变变形^[25],且抗疲劳特性较好,性能较为稳定,可减少加载卸载循环过程中产生的损伤,从而避免影响其使用寿命。SMA的超弹性本构在实际应用中一般简化为四直线模型^[26],如图2所示。

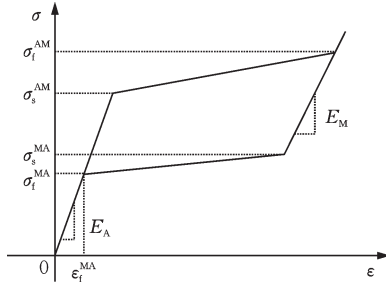


图2 SMA材料的简化模型

Fig.2 Simplified model of SMA material

注: σ_s^{AM} 为马氏体相变开始应力; σ_i^{AM} 为马氏体相变结束应力; σ_s^{MA} 为马氏体逆相变开始应力; σ_i^{MA} 为马氏体逆相变结束应力; E_A 为马氏体弹性模量; E_M 为奥氏体弹性模量

当支座开始水平运动时, SMA 拉索的伸长量 ΔL 为:

$$\Delta L = \sqrt{u_x^2 + (L + \delta_d)^2} - L \quad (1)$$

式中, u_x 为支座的水平位移; L 为 SMA 拉索的初始长度; δ_d 为支座水平运动时导致不同滑动面曲率所产生的竖向位移, 小震时为式(2), 中震时为式(3), 大震时为式(4)。

$$\delta_{d1} = \frac{u_x^2}{2R_2} \quad (2)$$

$$\delta_{d2} = \frac{u_x^2}{R_1 + R_3} \quad (3)$$

$$\delta_{d3} = \frac{u_x^2}{R_1 + R_4} \quad (4)$$

单根 SMA 拉索产生的拉应变为:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (5)$$

单根 SMA 拉索提供水平分力 F_{sx} 和竖向分力, F_{sy} 其水平分力加入整个支座的水平恢复力, 竖向分力作为竖向荷载施加在支座上。

$$F_{sx} = F_{SMA} \cos \alpha = \frac{u_x}{\sqrt{u_x^2 + (L + \delta_d)^2}} F_{SMA} \quad (6)$$

$$F_{sy} = F_{SMA} \sin \alpha = \frac{L}{\sqrt{u_x^2 + (L + \delta_d)^2}} F_{SMA} \quad (7)$$

$$F_{SMA} = \sum_{i=1}^n \sigma_i A_i \quad (8)$$

式中, F_{SMA} 为 SMA 拉索的轴向拉力; α 为 SMA 拉索随支座水平位移产生的角度; σ_i 为 SMA 的正应力; A_i 为 SMA 丝的横截面积。

2.3 小震作用下 STFPB 的水平恢复力模型

在小震作用下, 当考虑支座在受到水平力作用时的行为时, 可以发现当水平力小于支座内部的最

小摩擦力时, 支座保持静态, 其水平刚度处于弹性初始刚度。当水平力大于支座内部的最小摩擦力时, 支座的内滑块将开始运动, 此时支座的水平力由多个因素组成, 包括恢复力、摩擦力、以及 SMA 拉索提供的水平分力和竖向分力。这些力的大小与多个因素有关, 如水平位移、竖向荷载、滑动面 2 和滑动面 3 的曲率半径以及滑动面的摩擦系数等。具体来说, 当水平力大于最小摩擦力时, 式(9)~(11)关系式成立。

$$F = \frac{W + nF_{sy}}{2R_{eff2}} u + 2\mu_2(W + nF_{sy}) + nF_{sx} \quad (9)$$

$$k_{eff} = \frac{W + nF_{sy}}{2R_{eff2}} \quad (10)$$

$$u^* = 2(\mu_1 - \mu_2)R_{eff2} \quad (11)$$

2.4 中震作用下 STFPB 的水平恢复力模型

在中震发生时, 考虑到支座内滑块和上滑块产生滑动耗能, 此时支座的水平力由支座本身的恢复力、摩擦力以及 SMA 拉索提供的水平分力和竖向分力组成, 其大小与水平位移、竖向荷载、滑动面 1 和滑动面 3 的曲率半径与摩擦力有关。其具体表达式为(12)~(14)。

$$F = \frac{W + nF_{sy}}{R_{eff1} + R_{eff3}} u + \frac{2\mu_2 R_{eff2} + \mu_1 (R_{eff1} - R_{eff2})}{R_{eff1} + R_{eff3}} \times (W + nF_{sy}) + nF_{sx} \quad (12)$$

$$k_{eff} = \frac{W + nF_{sy}}{R_{eff1} + R_{eff3}} \quad (13)$$

$$u^{**} = u^* + (\mu_4 - \mu_1)(R_{eff1} + R_{eff3}) \quad (14)$$

2.5 大震作用下 STFPB 的水平恢复力模型

在大震作用下, 考虑到支座的三个滑块一起滑动, 此时支座的水平力由支座本身的恢复力、摩擦力及 SMA 拉索提供的水平分力和竖向分力组成, 其大小与水平位移、竖向荷载、滑动面 1、滑动面 2 和滑动面 4 的曲率半径与摩擦力有关。此时, SMA 拉索的拉伸长度达到极限, 限位拉索也被拉紧, 支座的位移受到限制, 以保证结构的安全性能。其具体表达式为(15)~(17)。

$$F = \frac{W + nF_{sy}}{R_{eff1} + R_{eff4}} u +$$

$$\frac{2\mu_2 R_{eff2} + \mu_1 (R_{eff1} - R_{eff2}) + \mu_4 (R_{eff4} - R_{eff2})}{R_{eff1} + R_{eff4}} \times$$

$$(W + nF_{sy}) + nF_{sx} \quad (15)$$

$$k_{\text{eff}} = \frac{W + nF_{Sy}}{R_{\text{eff1}} + R_{\text{eff4}}} \quad (16)$$

$$u^{***} \geq u^{**} + d_1 \left(1 + \frac{R_{\text{eff4}}}{R_{\text{eff1}}}\right) - (\mu_4 - \mu_1)(R_{\text{eff1}} + R_{\text{eff4}}) \quad (17)$$

式中, W 为上部结构的荷载; n 为 SMA 拉索的根数; u^* 为小震阶段支座的最大水平位移; u^{**} 为中震阶段支座的最大水平位移; u^{***} 为大震阶段支座的最大水平位移。

3 有限元模型及分析

为了验证所提出的 STFPB 理论公式的正确性, 本节进行了基于 ABAQUS 大型有限元软件的 STFPB 数值模拟。模拟考查了在低周往复荷载作用下的滞回耗能 and 自复位能力。在模拟中, 首先分别建立了 STFPB 和 TFPB 的三维有限元模型, 然后对其进行了低周往复荷载的静力分析, 得到了其受力状态。接着, 使用 ABAQUS 的动力学分析模块进行了低周往复荷载下的动力学分析, 得到了支座的滞回曲线和自复位能力。

3.1 ABAQUS 模型建立

该支座的几何尺寸如表 1 所示, 设计位移为 150 mm, 假定结构的静摩擦与动摩擦相等, 示意图如图 3 所示。

表 1 STFPB 几何尺寸

Table 1 Geometric dimensions of STFPB	
参数	滑块
滑面半径/mm	R_1 R_2 R_3 R_4
	1 387 642 642 1 387
滑块移动距离/mm	d_1 d_2 d_3 d_4
	57 25 25 57
摩擦系数	μ_1 μ_2 μ_3 μ_4
	0.08 0.06 0.06 0.1
滑块高度/mm	h_1 h_2 h_3 h_4
	95 70 70 95

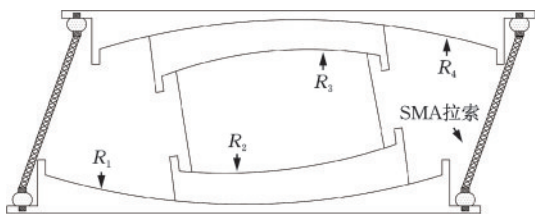


图 3 STFPB 示意

Fig.3 Schematic diagram of STFPB

三重摩擦摆支座除 SMA 拉索外, 其他几何参数均相同。由于支座包含有摩擦接触面且几何外形规整, 整个模型为 8 节点六面体线性减缩积分 (C3D8R) 实体单元, 提供了更高的自由度, 更准确地模拟物体的变形。外滑块、内滑块与核心滑块彼此之间分别设置接触对, 接触关系选择表面与表面接触, 其中横向摩擦力遵循库仑定律, 为罚摩擦, 竖向摩擦力为硬接触。为了简化问题, 忽略摩擦系数与滑动速度的相关性, 假定摩擦系数为常数。SMA 拉索与支座的连接方法为 Tie 绑定, 即假设 SMA 拉索与支座的接触面之间不发生脱离。

钢材选用 Q235 双折线塑形本构, 如图 4 所示, 弹性模量为 2.65e5 MPa, 泊松比为 0.3; SMA 拉索选用抗疲劳特性较好、性能较稳定的超弹性 Ni-Ti SMA, 参照文献 [27] 中由直径 0.8 mm 的 Ni-Ti SMA 丝所组成的等效直径为 5.6 mm 得到 SMA 拉索, 本构参数如表 2 所示, 根据表中参数可计算 SMA 拉索所提供的水平和竖向控制力。

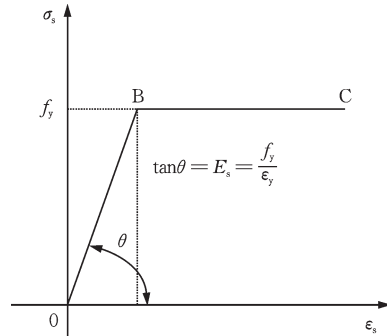


图 4 Q235 钢材的本构模型

Fig.4 Constitutive model of Q235 steel

表 2 SMA 本构参数

Table 2 Constitutive parameters of SMA				
SMA 本构参数	E_A /MPa	E_M /MPa	σ_s^{AM} /MPa	σ_f^{AM} /MPa
参数值	18 245	25 500	325	980
SMA 本构参数	σ_s^{MA} /MPa	σ_f^{MA} /MPa	ϵ_L /%	ν_A/ν_M
参数值	510	100	7.77	0.33

3.2 模拟结果分析

由于真实支座处于上部结构与桥墩之间, 忽略其竖向变形, 在支座上表面耦合一个参考点, 限制其竖向位移, 在参考点施加竖向荷载 P 和水平位移作为激励。

首先仅施加竖向荷载模拟上部结构的重量;然后保持竖向荷载不变并逐级施加水平位移,最大位移150 mm。按照上述加载条件,分别对TFPB和STFPB($n=2$)进行加载分析,对比TFPB和S-TFPB的恢复力曲线,分析加入SMA拉索对三重摩擦摆支座的滞回性能影响。由图5可以看出,理论模型与数值模拟结果有一致性,验证了STFPB的水平恢复力模型提出的理论公式的正确性。

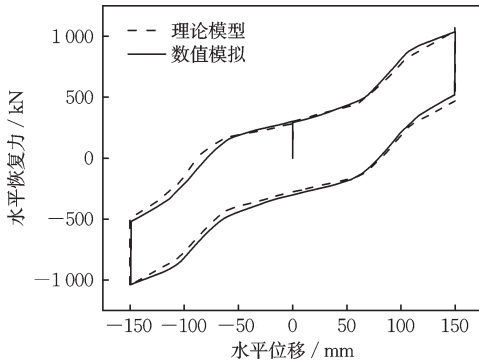


图5 理论公式与数值模拟的滞回曲线对比

Fig.5 Comparison of hysteresis curves between theoretical formula and numerical simulation

由图6可以看出,在低周往复荷载作用下,支座位移达到 u^* 时SMA起到限位作用,导致STFPB支座的刚度比TFPB支座逐渐增大,耗能能力增强,即与传统的三重摩擦摆支座相比,加入SMA拉索提高支座的刚度和稳定性,SMA拉索的超弹性也使得支座在受力后能够产生形变,从而能够吸收更多的能量,具有良好的滞回耗能和自复位能力,既能够在保证支座自身的稳定性的同时,也能够防止结构发生较大变形。

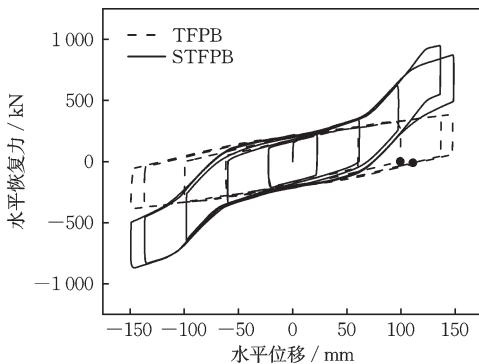


图6 TFPB与STFPB的滞回性能对比

Fig.6 Comparison of hysteretic performance between TFPB and STFPB

4 支座参数分析

为方便对比分析各支座在不同影响因素下的效果,选取等效刚度、等效阻尼比作为力学性能参数。

等效刚度 K_{eq} 的计算表达式^[19]为:

$$K_{eq} = \frac{F_{max} - F_{min}}{D_{max} - D_{min}} \quad (18)$$

式中, F_{max} 、 F_{min} 分别为单次循环作用中位移幅值对应的最大、最小水平力; D_{max} 、 D_{min} 分别为单次循环作用中位移最大、最小幅值。

等效阻尼比 ζ_{eq} 的计算表达式^[19]为:

$$\zeta_{eq} = \frac{W_d}{2\pi K_{eq} D_{max}^2} \quad (19)$$

式中, W_d 为单位循环耗能,即单次滞回曲线所包围的面积。

4.1 竖向荷载

竖向荷载反映了桥梁结构在正常使用条件下的恒定负载,对支座的性能有直接影响,为了确保支座能够在预期的荷载范围内提供稳定的隔震性能,依据《公路桥梁抗震设计细则》^[28],结合一座三跨连续梁桥上部结构的反力工程案例,设置竖向荷载分别为1 500、2 500、3 500 kN的三种工况考查竖向荷载对STFPB的性能影响。

从图7中可以看出,随着竖向荷载的增大,提供的摩擦力更大,支座的滞回曲线更加饱满,耗能也逐渐增大。表3中列出了不同竖向荷载时STFPB的性能参数,可以看到当竖向荷载由1 500 kN增加

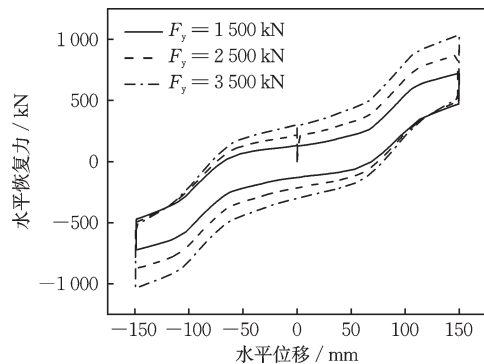


图7 竖向荷载对STFPB的滞回性能影响

Fig.7 Influence of vertical load on hysteretic performance of STFPB

表3 不同竖向荷载时STFPB的性能参数

Table 3 Performance parameters of STFPB under different vertical loads

竖向荷载/kN	性能参数		
	$K_{eq}/(kN \cdot mm^{-1})$	$W_d/(kN \cdot mm^{-1})$	ζ_{eq}
1 500	4.821	82 444.595	0.121
2 500	5.895	129 055.700	0.156
3 500	6.918	177 317.356	0.182

至3 500 kN后,支座的等效刚度、耗能面积和等效阻尼比分别增加43%、115%和50%。这说明竖向荷载对支座的性能有显著影响,随着竖向荷载的增大,支座的耗能能力和自复位能力也相应提高。

4.2 水平位移加载幅值

水平位移幅值是评估隔震支座耗能能力和滞回性能的关键参数,选择竖向荷载为2 500 kN,为三重摩擦摆支座装配2根SMA拉索,考查水平位移加载幅值对支座滞回曲线的影响。

从图8和表4中可以看出,随着支座的水平位移幅值增大,其滞回曲线的面积也随之增大,表明支座的耗能能力稳定提升。当支座水平位移在62 mm以内时,SMA拉索未起到较大的控制作用,此时支座滞回曲线的面积随着位移幅值的增大而增大。当支座水平位移超过62 mm后,SMA拉索开始发挥控制作用,拉伸长度增加,为支座提供水平力和竖向力,导致支座的水平恢复力、刚度和耗能面积均增加,等效阻尼比则持续减小,且位移越大,控制效果越明显。

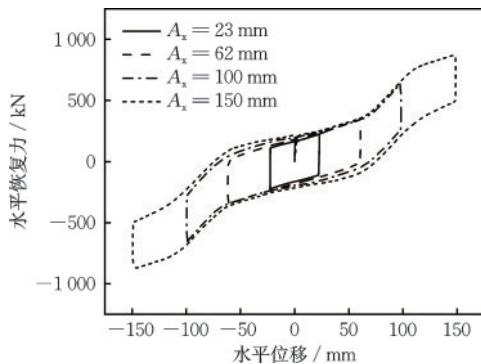


图8 加载幅值对STFPB的滞回性能影响

Fig.8 Influence of loading amplitude on hysteretic performance of STFPB

表4 水平位移加载幅值时STFPB的性能参数^[22]

Table 4 Performance parameters of STFPB under horizontal displacement loading amplitudes^[22]

加载幅值/mm	性能参数		
	$K_{eq}/(kN \cdot mm^{-1})$	$W_d/(kN \cdot mm^{-1})$	ζ_{eq}
23	9.835	14 890.007	0.461
62	5.617	44 448.364	0.330
100	6.653	77 210.359	0.185
137	7.773	115 519.209	0.126
150	7.933	134 856.650	0.101

4.3 SMA拉索直径

为了对STFPB的设计进行优化,SMA拉索的直径选择是一个非常重要的因素。本小节研究不同直径的SMA拉索对STFPB性能的影响,分别选取7×7×0.8 mm规格和7×7×1 mm规格的SMA拉索进行数值模拟分析。

图9和表5结果显示,当SMA拉索开始发挥控制作用后,拉索的直径越大,支座的刚度明显增加,且增加幅度与支座位移成正相关。具体来说,每增加1 mm的直径,支座的等效刚度增加了31%。但是,耗能能力的提升并不显著,单位循环耗能只增加了5%。这表明拉索直径的增加不能有效改善支

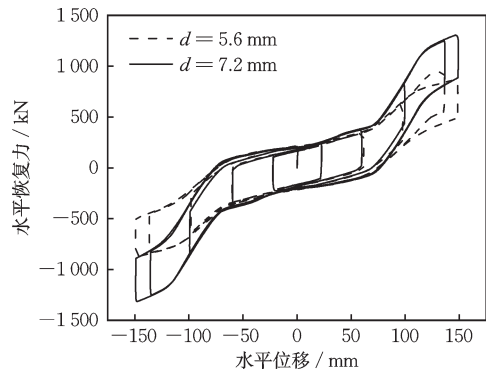


图9 SMA拉索直径对STFPB的滞回性能影响

Fig.9 Influence of SMA cable diameter on hysteretic performance of STFPB

表5 不同SMA拉索直径时STFPB的性能参数

Table 5 Performance parameters of STFPB with different SMA cable diameters

SMA拉索直径d/mm	性能参数		
	$K_{eq}/(kN \cdot mm^{-1})$	$W_d/(kN \cdot mm^{-1})$	ζ_{eq}
5.6	5.895	129 055.700	0.156
7.2	8.856	138 912.851	0.112

座的耗能能力。因此,在进行STFPB的优化设计时,需要综合考虑拉索直径的刚度和耗能能力的影响,以实现最优的设计方案。

4.4 SMA拉索布置数量

拉索布置如图10(以8根拉索为例)所示。为了研究SMA拉索数量对STFPB性能的影响,对2、4、8根SMA拉索的STFPB进行了加载分析,布置方案如图11所示。当设置2根SMA拉索时,拉索布置在支座的1号和2号位置点。当增至4根拉索时,布置点扩展至1号、2号、3号和4号位置。而当配置8根拉索时,支座的每一对应位置上均布置一根拉索。

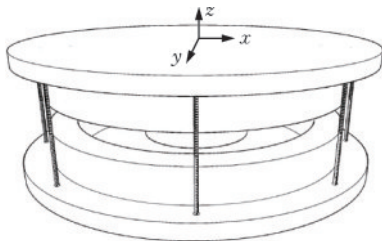


图10 SMA拉索布置三维图

Fig.10 Three-dimensional diagram of SMA cable arrangement

注: x 为顺桥向, y 为横桥向。

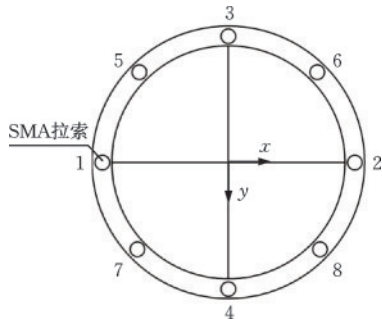


图11 SMA拉索布置平面图

Fig.11 Plane diagram of SMA cable arrangement

根据图12和表6所示,当支座的加载位移为150 mm,竖向力为2 500 kN时,随着SMA拉索的数量增加,支座的等效刚度几乎成倍增加,耗能能力也不断增强,等效阻尼比逐渐减小。具体而言,当SMA拉索数量增加到8根时,支座的等效刚度增加了近三倍,耗能面积增加了一倍多,而等效阻尼比则减小了近50%。这是因为更多的SMA拉索增加了水平力和竖向力的提供,使得支座的水平恢复力和刚度均增加,从而提高了支座的刚度和耗能能力。但同时,SMA拉索数量的增加也会导致支座的等效阻尼比逐渐减小,降低了支座的自复位能力和

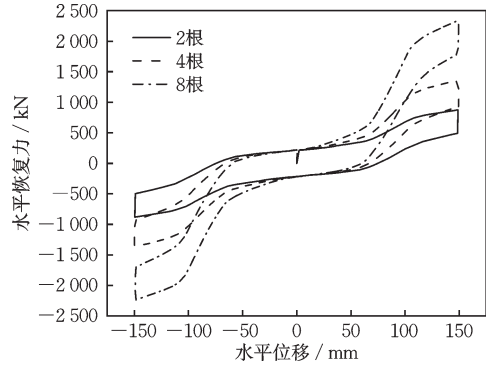


图12 SMA拉索布置数量对STFPB的滞回性能影响
Fig.12 Influence of number of SMA cables on hysteretic performance of STFPB

表6 不同SMA拉索布置数量时STFPB的性能参数

Table 6 Performance parameters of STFPB with different numbers of SMA cable arrangement

SMA 数量/根	性能参数		
	$K_{eq}/(kN \cdot mm^{-1})$	$W_d/(kN \cdot mm^{-1})$	ζ_{eq}
2	5.895	129 055.700	0.156
4	9.154	129 055.654	0.100
8	15.677	177 317.359	0.081

减震效果。

综上所述,SMA拉索数量对STFPB的性能影响较大,适当增加SMA拉索数量可以有效提高支座的刚度和耗能能力,但也要注意其对支座的等效阻尼比产生的影响。

4.5 激励输入方向

为了评估SMA拉索在不同地震激励方向下的控制效果,根据图12的分析结果选取表7中工况进行分析。

从图13(a)、(b)可以看出,在只使用两根SMA拉索的情况下,地震激励的方向垂直或平行于SMA拉索对支座的滞回性能没有影响。然而,在沿45度夹角的激励作用下,使用2根或4根SMA拉索时,支座的等效刚度和耗能均比平行方向有所增加,而等效阻尼比则减小。

从图13(b)、(c)可以看出,当45度激励作用下使用4根SMA拉索时,刚度最大,耗能最大,等效阻尼比最小,这符合分析出的SMA拉索数量对STFPB性能影响的趋势。这些结果表明,通过合理的布置和数量的SMA拉索,可以有效提高结构的耗能能力和刚度,并减少结构的等效阻尼比,从而提高结构的地震响应控制能力。

表7 不同地震激励输入方向时STFPB的性能参数

Table 7 Performance parameters of STFPB under different seismic excitation input directions

激励输入 方向	性能参数		
	$K_{eq}/(kN \cdot mm^{-1})$	$W_d/(kN \cdot mm^{-1})$	ζ_{eq}
2-DSMA	5.895	129 055.654	0.156
2-VSMA	5.876	129 810.845	0.156
2-45DSMA	7.391	133 351.703	0.128
4-DSMA	9.154	129 055.654	0.010
4-45DSMA	11.605	149 759.624	0.009

注:2-DSMA:沿布置SMA拉索方向,2根拉索;2-VSMA:沿垂直SMA拉索方向,2根拉索;2-45DSMA:沿45度夹角方向,2根拉索;4-DSMA:沿布置SMA拉索方向,4根拉索;4-45DSMA:沿45度夹角方向,4根拉索

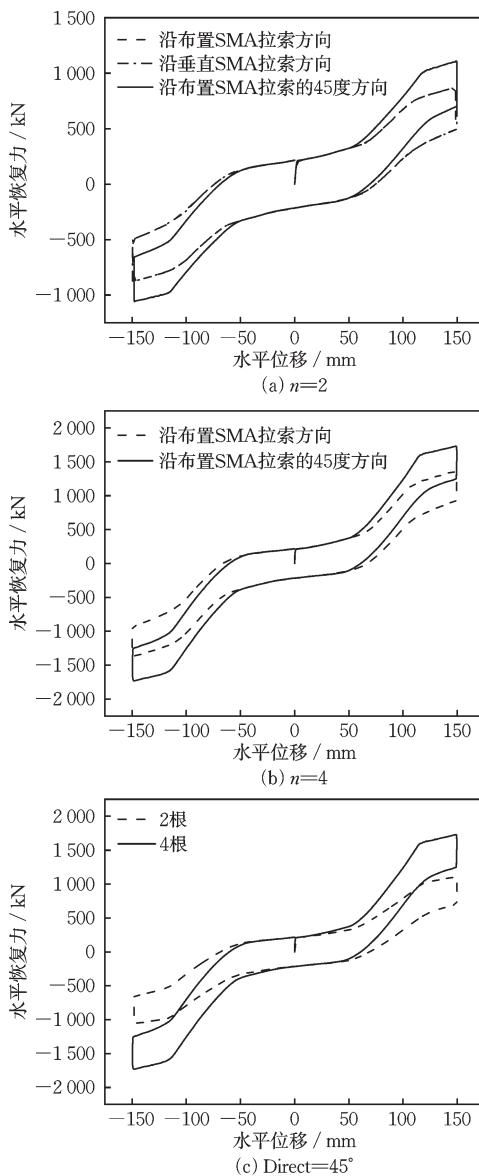


图13 地震激励输入方向对STFPB的滞回性能影响

Fig.13 Influence of seismic excitation input direction on hysteretic performance of STFPB

5 结论

本文介绍了一种以形状记忆合金(SMA)材料为改进形式的多重摩擦摆新型隔震支座,用于解决传统三重摩擦摆支座的缺点。通过对支座的理论分析和数值模拟,得出了该支座的理论滞回模型,并验证了该模型的正确性。本文还对竖向荷载、水平位移、拉索数量和直径以及地震激励方向这五个变量进行了参数分析,得出了以下主要结论:

(1)通过分析形状记忆合金的力学模型及其与三重摩擦摆支座的相互作用关系,提出了适用于小震、中震与大震的力学模型。分析结果表明,TFPB的三阶段力学模型在加入SMA后变成四线型力学模型。这表明STFPB具有自适应特性,可以根据荷载变化自动调整其刚度特性。

(2)提出小震、中震以及大震作用下STFPB的水平恢复力模型,通过采用ABAQUS建立相同参数的TFPB和STFPB实体模型,为STFPB的设计和性能分析提供了可靠的基础。将理论分析与STFPB的数值模拟结果进行对比,验证了理论公式的正确性。TFPB与STFPB的对比发现,随着加载位移幅值的逐渐增大,STFPB除等效阻尼比略降低外,等效刚度和单位循环耗能均优于相同条件下的TFPB,不仅在水平方向上改变了其恢复特性,也增强了垂直方向的抗拉功能。因此适应能力优于传统的TFPB,可以更好地适应复杂荷载状态。

(3)以竖向荷载、水平位移幅值、SMA拉索的数量和直径以及荷载激励的方向为参数,进行STFPB的参数影响分析。研究表明:STFPB支座的滞回曲线随着荷载增加和水平位移的增大呈现出明显的非线性特性,支座的承载力和变形能力均有所提高;随着拉索数量和直径的增加,支座的承载力和变形能力均呈现出增加趋势,但当拉索数量和直径超过一定范围时,增加的效果变得不明显;支座在不同方向的地震激励下,其滞回曲线和承载力均有所不同,因此在实际应用中需要针对不同的地震方向进行设计和选型。

参考文献:

[1] 周云,龚健.摩擦摆隔震技术研究和应用的回顾与前瞻(II):摩擦摆隔震结构的性能分析及摩擦摆隔震技术的应用[J].工程抗震与加固改造,2010,32(4):1-19.

- Zhou Y , Gong J. State of the art and prospect of the research and application of friction pendulum isolation technology(II): performance analysis of friction pendulum isolated structures and applications of friction pendulum isolation technology [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010, 32 (4) : 1-19. (in Chinese)
- [2] Zayas V A, Constantinou M C, Tsopelas P, et al. Testing of friction pendulum seismic isolation bearings for bridges[C]//Fourth World Congress on Joint Sealants and Bearing Systems for Concrete Structures. California: [s.n.], 1997.
- [3] Constantinou M C, Caccese J, Harris H G. Frictional characteristics of teflon-steel interfaces under dynamic conditions [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1987, 15(6) : 751-759.
- [4] Mokha A S, Constantinou M C, Reinhorn A M. Teflon bearings in base isolation I: testing [J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(2) : 438-454.
- [5] Mokha A S, Constantinou M C, Reinhorn A M. Teflon bearings in base isolation II: modeling [J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(2) : 455-474.
- [6] Mokha A S, Constantinou M C, Reinhorn A M, et al. Experimental study of friction-pendulum isolation system [J]. Journal of Structural Engineering, 1991, 117 (4) : 1201-1217.
- [7] Mokha A S, Constantinou M C, Reinhorn A M. Verification of friction model of teflon bearings under triaxial load [J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119 (1) : 240-261.
- [8] Fenz D M, Constantinou M C. Spherical sliding isolation bearings with adaptive behavior: Theory [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1998, 37 (2) : 163-183.
- [9] 王宝夫, 韩强, 杜修力. 滑动摩擦支座隔震桥梁地震反应分析 [J]. 土木工程学报, 2016, 49(增2) : 85-90.
Wang B F, Han Q, Du X L. Seismic response analysis of isolated bridge with friction pendulum bearings [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49 (Sup2) : 85-90. (in Chinese)
- [10] 张常勇, 钟铁毅, 杨海洋. 摩擦摆支座隔震连续梁桥地震能量反应研究 [J]. 振动与冲击, 2017, 36(16) : 63-67, 121.
Zhang C Y, Zhong T Y, Yang H Y. A study on seismic energy responses of a continuous girder bridge isolated by a friction pendulum system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(16) : 63-67, 121. (in Chinese)
- [11] 王力, 杨延超, 刘世忠, 等. 长联大跨摩擦摆支座隔震连续梁桥多维地震反应分析 [J]. 世界地震工程, 2020, 36 (2) : 129-137.
- Wang L, Yang Y C, Liu S Z, et al. Multi-dimensional seismic response analysis of long-span isolated continuous girder bridge with friction pendulum system [J]. World Earthquake Engineering, 2020, 36 (2) : 129-137. (in Chinese)
- [12] 贺拥军, 陈兴发, 马义飞. 新型摩擦摆支座理论与有限元分析 [J]. 中国科技论文, 2021, 16(2) : 181-187, 192.
He Y J, Chen X F, Ma Y F. Theoretical and finite element analysis of new friction pendulum bearing support [J]. China Science Paper, 2021, 16 (2) : 181-187, 192. (in Chinese)
- [13] 欧进萍, 武沛松, 关新春. 大位移摩擦摆底层和多层隔震韧性结构 [J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41 (4) : 657-676.
Ou J P, Wu P S, Guan X C. Seismic resilient base isolated structure equipped with super-large displacement friction pendulum bearing and isolated structure equipped with multi-super-large displacement friction pendulum bearing [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41 (4) : 657-676. (in Chinese)
- [14] 马振霄, 温文露, 管庆松, 等. 摩擦摆支座等效线性化参数及隔震设计方法研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(4) : 751-760.
Ma Z X, Wen W L, Guan Q S, et al. Study on equivalent linearization parameters and base-isolation design method of friction pendulum system [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42 (4) : 751-760. (in Chinese)
- [15] 赵守江, 柏文. 组合型摩擦摆隔震装置的设计与试验研究 [J]. 工程力学, 2025, 42(8) : 223-330.
Zhao S J, Bai W. Design and experimental study on combined friction pendulum seismic isolator [J]. Engineering Mechanics, 2025, 42(8) : 223-330. (in Chinese)
- [16] 尚继英, 谭平, 韩建平, 等. 变频变摩擦的摩擦摆隔震支座力学性能 [J]. 建筑结构学报, 2024, 45(5) : 92-103.
Shang J Y, Tan P, Han J P, et al. Mechanical behavior of friction pendulum bearing with variable frequency and friction [J]. Journal of Building Structures, 2024, 45 (5) : 92-103. (in Chinese)
- [17] Dolce M, Cardone D, Ponzo F C. Shaking-table tests on reinforced concrete frames with different isolation systems [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2010, 36(5) : 573-596.
- [18] 陈鑫, 李爱群, 左晓宝, 等. 新型形状记忆合金隔震支座

- 设计与分析[J]. 振动与冲击, 2011, 30(6):256-260.
- Chen X, Li A Q, Zuo X B, et al. Design and study on novel shape memory alloy isolator[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(6):256-260. (in Chinese)
- [19] 庄鹏, 薛素铎, 韩森, 等. SMA 弹簧-摩擦支座的滞回性能研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(9):94-100, 116.
- Zhuang P, Xue S D, Han M, et al. Hysteretic performance of a SMA spring-friction bearing [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(9):94-100, 116. (in Chinese)
- [20] 庄鹏, 徐蒙, 韩森, 等. 新型多功能复摩擦摆隔震支座的滞回特性试验研究[J]. 施工技术, 2020, 49(增1):1601-1611.
- Zhuang P, Xu M, Han M, et al. Experimental study on hysteresis properties of a new multifunctional double friction pendulum isolation bearing [J]. Construction Technology, 2020, 49(Sup1):1606-1611. (in Chinese)
- [21] 庄鹏, 孙仕琦, 韩森, 等. SMA 拉索-复摩擦摆隔震支座性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(增2):482-489.
- Zhuang P, Sun S Q, Han M, et al. Performance experiment of SMA cable-double friction pendulum isolation bearing [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(Sup2):482-489. (in Chinese)
- [22] 庄鹏, 王尉, 韩森, 等. 超弹性-复摩擦摆隔震支座的性能试验与数值模拟[J]. 世界地震工程, 2023, 38(1):99-109.
- Zhuang P, Wang W, Han M, et al. Experimental and numerical study of superelastic-double friction pendulum isolation bearing [J]. World Earthquake Engineering, 2023, 38(1):99-109. (in Chinese)
- [23] 王萌, 李承甜, 唐雨晴, 等. 近场脉冲地震下间隙式 SMA-NSD 摩擦支座筒支桥梁隔震研究[J]. 地震工程与工程振动, 2023, 43(4):37-44.
- Wang M, Li C T, Tang Y Q, et al. Performance of gap SMA-NSD friction bearing in simply-supported bridge under near-field pulse ground motions[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2023, 43(4):37-44. (in Chinese)
- [24] 邱灿星, 吴诚静, 杜修力, 等. 间隙式 SMA 隔震支座性能分析及负刚度改进研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(9):19-26.
- Qiu C X, Wu C J, Du L X, et al. Performance analysis of gap-SMA isolation bearing and its negative stiffness improvement [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(9):19-26. (in Chinese)
- [25] 方成, 王伟, 陈以一. 基于超弹性形状记忆合金的钢结构抗震研究进展[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(7):1-12.
- Fang C, Wang W, Chen Y Y. State-of-the-art for application of superelastic shape memory alloy in seismic resistant steel structures [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(7):1-12. (in Chinese)
- [26] 刘震. 新型 SMA 自复位耗能支撑的研发及其性能研究与应用[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- Liu Z. Development of an innovative SMA self-centering energy dissipating brace and its performance study and application [D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese)
- [27] 王悦. 基于形状记忆合金自复位耗能支撑的结构振动控制方法研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.
- Wang Y. Research on the method of structural vibration control based on shape memory alloy self-centering energy dissipation brace [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [28] 公路桥梁抗震设计细则: JTG/T B02-01—2008[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.

(本文编辑: 池营营)