

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202107014

## 功能可控型减隔震支座的研发与性能分析\*

刘 猛<sup>1</sup>, 王君杰<sup>1</sup>, 桂鉴臣<sup>2</sup>, 张 兴<sup>2</sup>

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 河北宝力工程装备股份有限公司, 河北 衡水 053000)

**摘要:**为提升梁式桥的抗震性能,实现桥梁结构在地震作用下力学行为的可控性,基于减隔震设计原理,研发了一种功能可控型减隔震支座。通过数值模拟和模型试验研究了该支座的力学行为,结果表明:支座的滑动性能良好,摩擦行为稳定;剪力销力学行为可控,断后摩擦行为正常;环形钢阻尼元件滞回曲线饱满,耗能能力强;可控型支座整体力学行为稳定可控。最后以某3跨桥梁为例分析了可控型支座的减隔震效果,结果表明:合理选用可控型支座可以实现结构在地震作用下力学行为的可控性,使结构响应在力和位移之间取得较好的平衡,从而达到避免桥墩损伤破坏、防止落梁的目的。

**关键词:**桥梁工程;减隔震装置;可控型减隔震支座;模型试验;滞回曲线

**中图分类号:**U442.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2132(2021)04-0893-09

## Development and Performance Analysis on a Functionally Controllable Seismic Bearing

LIU Meng<sup>1</sup>, WANG Junjie<sup>1</sup>, GUI Jianchen<sup>2</sup>, ZHANG Xing<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Hebei Baoli Engineering Equipment Group Co., Ltd., Hengshui 053000, China)

**Abstract:** In order to improve the seismic performance of girder bridges and realize the controllability of mechanical behavior of bridge structure under earthquake action, a functionally controllable seismic bearing was developed based on the design principle of seismic isolation, which has the functions of transforming bridge structure system, dissipating seismic energy and preventing beam falling. It plays different roles in different stress stages. The mechanical behavior of the controllable bearing was studied by numerical simulation and model test. The test results show that the sliding performance of the bearing is good and the friction behavior is stable, the mechanical behavior of shear pin is controllable and the friction behavior is normal after fracture, the hysteretic curve of ring steel damper is full and its energy dissipation capacity is strong, the whole mechanical behavior of the controllable bearing is stable and controllable. Finally, seismic isolation design and numerical calculation on an actual bridge were carried out, and the seismic isolation effect of the controllable bearing was analyzed. The calculation results show that reasonable selection of the controllable bearing can realize the controllability of the mechanical behavior of the structure under earthquake action, and make the structural response achieve a better balance between the force and displacement, so as to achieve the goal of avoiding pier damage and preventing beam falling.

**Keywords:** bridge engineering; seismic and isolation device; controllable seismic bearing; model test; hysteresis curve

\* 收稿日期:2021-07-14;修回日期:2021-08-22

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1504306)、国家自然科学基金面上项目(52078384)资助

作者简介:刘猛(1993—),男,博士研究生。主要从事桥梁抗震方面的研究。E-mail:liumengsmart@163.com

通讯作者:王君杰(1962—),男,教授,博导。主要从事桥梁抗震与抗冲击方面的研究。E-mail:jjwang@tongji.edu.cn

# 引言

近些年,随着抗震设计理念的不断发展和深入,桥梁结构设计从墩柱的延性抗震设计逐步发展为减隔震设计。减隔震技术的基本原理是利用隔震装置来延长结构的自振周期,减少地震引起的结构内力反应;利用耗能装置来限制由于周期延长而产生过大的相对位移<sup>[1]</sup>。所以减隔震技术的关键在于能否研发出有效控制结构动力响应的新型减隔震装置<sup>[2]</sup>。

越来越多的专家学者开始对装置的研发和选用展开了深入的研究,A. Mori等<sup>[3]</sup>、J.H.Kelly等<sup>[4]</sup>对板式橡胶支座的力学行为进行了试验分析,汶川大地震震后调查发现:使用板式橡胶支座的绝大多数桥梁下部结构没有发生严重损伤;李建中等<sup>[5-7]</sup>对板式橡胶支座进行了深入研究,板式橡胶支座具有良好的剪切变形能力和稳定的滑移行为,能够很好地隔绝上部结构的惯性力,但会产生较大的梁体位移;为了使墩梁相对位移控制在一定的限值之内,项乃亮等<sup>[8]</sup>将弹塑性X形挡块与板式橡胶支座搭配使用,X形挡块耗能特性良好,能够有效地控制墩梁相对位移;叶爱君等<sup>[9]</sup>将三角形钢阻尼器与板式橡胶支座搭配使用,减震效果良好。这种减隔震设计理念逐步被大家认可并进行研究;高昊等<sup>[10]</sup>设计了一种球钢隔震支座,地震过程中熔断销剪断,支座发生滑动,释放上部结构的惯性力,与柱形、E形钢阻尼器配合使用,减隔震设计目标明确,效果良好。

考虑减隔震装置的经济性以及安装问题,已有研究将弹塑性耗能元件与支座组合到一起,常见的钢阻尼支座有C形钢阻尼支座<sup>[11-12]</sup>、E形钢阻尼支座<sup>[13-14]</sup>和拉索减震支座<sup>[15-16]</sup>。C形、E形钢阻尼支座耗能特性优良,具有一定的限位功能,但对于罕遇地震,其限位功能并不能完全避免落梁的发生,还需要设置挡块或者防落梁装置;拉索减震支座限位功能明显,但耗能性能不突出。本文研发了一种功能可控型减隔震支座,满足桥梁在正常使用状况下的需求,小震耗能、大震限位,实现桥梁结构体系地震行为的可控。

# 1 功能可控型减隔震支座

## 1.1 设计理念及目标

支座是连接桥梁主梁和桥墩的功能构件,固定支座可以实现在正常使用状况下对主梁的位移约束;活动支座可以满足主梁在正常使用状况下的伸缩。桥梁支座布置时需要考虑正常运营状况下的荷载,如温度、制动力、收缩徐变等,使主梁能够自由伸缩和转动。桥梁顺桥向,在简支梁桥中,主梁一端使用固定支座,另一端使用活动支座;在连续梁桥中,一联中只有一个桥墩使用固定支座,其余桥墩布置活动支座。桥梁横桥向,一般只设置一排固定支座。图1所示为一般连续梁的支座布置形式。

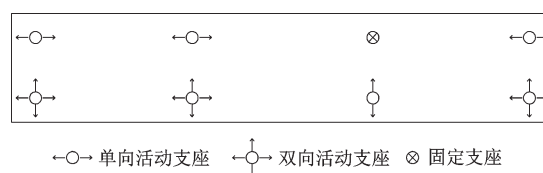


图1 连续梁支座布置形式

Fig.1 Layout of continuous beam bearings

地震荷载作用下,活动墩由于没有连接装置,会出现较大的墩梁相对位移,绝大部分的地震力由固定墩承担,罕遇地震下,固定墩的破坏较为严重。在历次的大地震中均发现支座破坏给桥梁结构带来巨大影响,支座的破坏模式有多种情况,存在支座破坏后桥梁力学特性不确定的问题。为提升梁式桥的抗震性能,实现桥梁在地震作用下力学行为的可控性,本文研发了一种新型的支座来克服普通支座的不足。

功能可控型减隔震支座主要通过支座主体、限位元件、耗能元件等发挥各自的功能,实现支座破坏模式稳定可控,桥梁结构力学行为按照预期方向发展,避免出现由于支座受力状态不确定而影响桥梁整体抗震性能的情况。新型支座应该具有的功能为:

(1) 支座布置能够满足桥梁在正常使用状况下的需求,主要为传递竖向支撑、满足梁体的正常伸缩和转动等。

(2) 频遇地震作用下,固定支座限位元件达到

设定能力后失效,制动墩转换为活动墩,然后各个支座上的阻尼元件发挥作用,耗散地震能量,同时发挥活动墩的抗震能力,各个桥墩共同承担地震荷载;罕遇地震作用下,支座不仅具有耗散能量的作用,还应该具有防落梁的功能。

(3)支座的力学行为稳定性要有所保证,各个元件相互搭配,破坏次序可控,任一元件的破坏后,其它元件继续发挥作用。

## 1.2 构造形式及工作原理

功能可控型减隔震支座基本构造如图2所示,主要包括顶板、球冠、中间衬板、下底板,中间衬板与底板设置有定向滑道和滑动摩擦副,在支座的两侧对称设有钢阻尼部件,钢阻尼的一端通过耳板1与中间衬板连接,另一端通过固定座与顶板连接。固定型支座的耳板1与钢阻尼的连接方式如图3(a)所示;活动型支座的耳板1与钢阻尼的连接方式如图3(b)所示。固定型支座与中间衬板连接的耳板2上设有剪力销孔,在对应的底板位置也设有剪力销孔,剪力销插入其中,限制中间衬板与底板的相对滑动;活动型支座不设置剪力销。

在桥梁正常使用状况下,固定墩上支座的剪力销发挥作用,约束墩梁的相对平动,活动墩上的支座通过预留空隙,使主梁在温度、收缩徐变等荷载

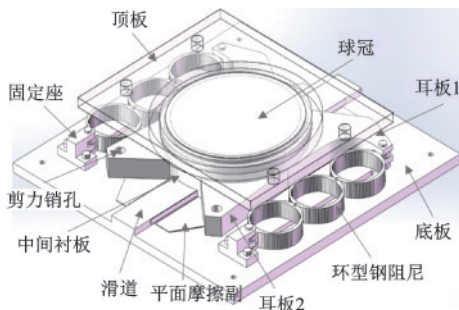


图2 支座构造形式

Fig.2 Structural form of the bearing

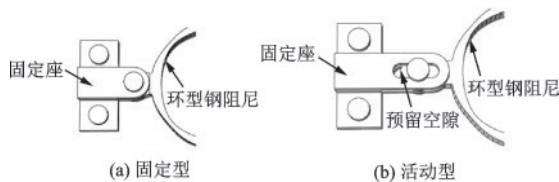


图3 支座连接方式

Fig.3 Connection types

作用下能够自由伸缩,可以满足主梁在正常使用状况下的要求。罕遇地震作用下,当支座承受的剪力超过设定的能力值时,剪力销被剪断,中间衬板与下底板沿滑道发生平动摩擦滑移,阻断主梁产生的惯性力继续传递到固定墩上。固定支座上的销钉被剪断后,各个支座上的环形钢阻尼元件发挥作用,耗散地震能量,当墩梁位移增大到一定程度时,钢阻尼器会形成拉杆或压杆,起到防落梁的作用,实现桥梁结构体系地震行为的可控。

## 2 环形钢阻尼元件力学模型

### 2.1 力学行为

环形钢阻尼器由  $n$  个圆环形钢元件串联构成,假定各个圆环形状相同、力学行为完全一致,只需研究单个圆环力学模型,如图4(a)所示。环形钢元件在力  $P$  的作用下,曲梁上任意微元将受到剪力  $Q$ 、轴力  $N$ 、弯矩  $M$  的作用,当  $r > 5b$  时可以忽略轴力和剪力的影响,若要使整个圆环钢耗能元件等应力分布,则截面钢板厚度  $s$  应按照图4(b)进行设计。

理想塑性状态下截面屈服弯矩  $M_p$  为:

$$M_p = \sigma_y \frac{sb^2}{4} \quad (1)$$

式中,  $\sigma_y$  为钢材的屈服应力;  $s$  为截面钢板厚度;  $b$  为截面高度。

屈服力  $F_p$  为:

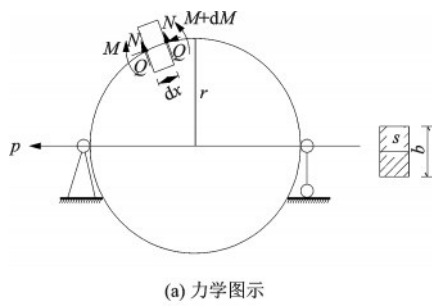
$$F_p = \frac{2(M_{AP} + M_{BP})}{r} \quad (2)$$

式中,  $M_{AP}$  为 A 截面屈服弯矩;  $M_{BP}$  为 B 截面屈服弯矩;  $r$  为圆环半径。

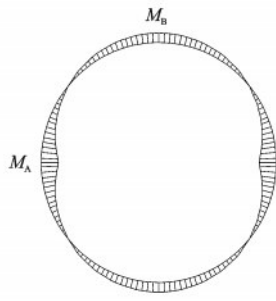
### 2.2 数值模拟

采用有限元软件 ABAQUS 对单个圆环进行数值模拟分析,本文所设计的环形钢阻尼器初步采用 Q460 钢材制作,力学参数为:  $E=2.0 \times 10^5$  MPa、屈服强度  $f_y=460$  MPa,材料本构选用简化的双线性模型。圆环半径  $r=800$  mm、钢板厚度  $s=40$  mm、截面高度最大处  $b=13$  mm、压块间隙  $\Delta x=60$  mm,有限元模型如图5所示。

圆环的一端固定,对另一端进行单向拉伸和压缩,得到力学骨架曲线如图6所示,拉、压的力学行



(a) 力学图示



(b) 内力分布

图4 单环力学模型

Fig.4 The single ring mechanical model

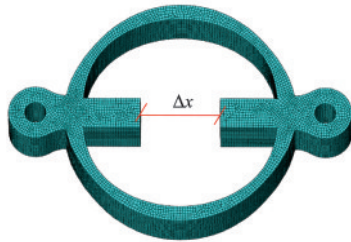


图5 环形钢阻尼器模型

Fig.5 Ring steel damper model

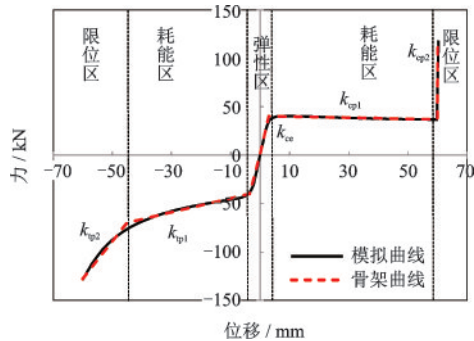


图6 骨架曲线

Fig.6 Skeleton curves

为都可以等效成三折线,根据环型钢阻尼器的功能可以定义为弹性段、耗能段和限位段。设环型钢阻尼器的活动端位移为 $x$ ,当 $x > 0$ 时,圆环钢阻尼器受压; $x < 0$ 时,圆环钢阻尼器受拉。阻尼力为 $F(x)$ ,单环力学模型为:

$$F(x) = \begin{cases} k_{te} \delta_{te} + k_{tp1} (\delta_{tp1} - \delta_{te}) + k_{tp2} (x - \delta_{tp1}), & x \leq \delta_{tp1} \\ k_{te} \delta_{te} + k_{tp1} (x - \delta_{te}), & \delta_{tp1} < x \leq \delta_{te} \\ k_{te} x, & \delta_{te} < x \leq 0 \\ k_{ce} x, & 0 < x \leq \delta_{ce} \\ k_{ce} \delta_{ce} + k_{cp1} (x - \delta_{ce}), & \delta_{ce} < x \leq \delta_{cp1} \\ k_{ce} \delta_{ce} + k_{cp1} (\delta_{cp1} - \delta_{ce}) + k_{cp2} (x - \delta_{cp1}), & \delta_{cp1} < x \end{cases} \quad (3)$$

式中, $k_{ce}$ 为受压弹性刚度; $k_{cp1}$ 为受压屈服后第一段刚度, $k_{cp2}$ 为受压屈服后第二段刚度; $\delta_{ce}$ 为受压第一个拐点位移; $\delta_{cp1}$ 为受压第二个拐点位移; $k_{te}$ 为受拉弹性刚度; $k_{tp1}$ 为受拉屈服后第一段刚度, $k_{tp2}$ 为受拉屈服后第二段刚度; $\delta_{te}$ 为受拉第一个拐点位移; $\delta_{tp1}$ 为受拉第二个拐点位移。

模型循环加载计算得到的环形钢阻尼器的滞回曲线如图7所示,曲线饱满,具有较强的耗能能力,随着加载位移的增大,曲线进入限位段,刚度迅速增大,可以起到限位作用。

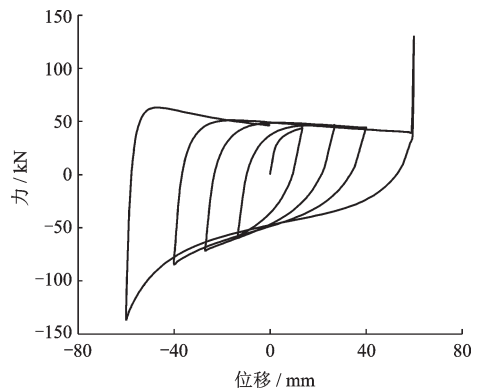


图7 滞回曲线

Fig.7 Hysteresis curve

### 3 支座拟静力试验

试验在河北宝力工程装备股份有限公司的试验室进行,采用1500 t支座电液伺服加载系统。

#### 3.1 试验目的

功能可控型减隔震支座的力学行为稳定性要有所保证,各个元件相互搭配,破坏次序可控,任一元件的破坏后,其它元件继续发挥作用。依据上述目标,设计功能可控型减隔震支座试验,试验目的如下:

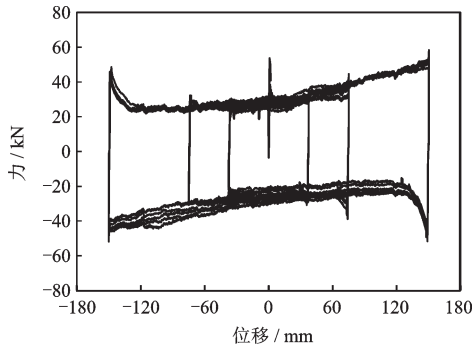
(1)分析剪力销力学行为,检验剪力销是否在指定荷载作用下失效;研究其失效之后是否会干扰

其他元件的正常运行。

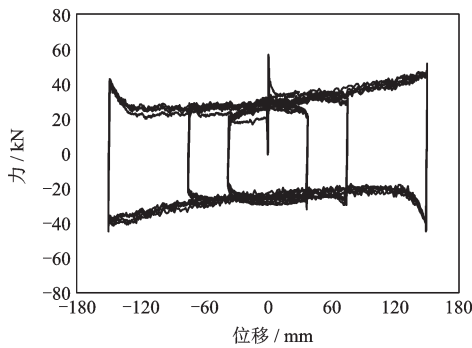
- (2)分析摩擦副性能,测量摩擦系数。
- (3)研究钢阻尼元件滞回性能。

### 3.2 摩擦试验

在进行支座摩擦试验时,不安装剪力销和钢阻尼元件,支座的竖向承载力为3 000 kN,水平位移行程为±150 mm。试验过程中在3 000 kN的竖向压力下进行水平往复加载,按照位移幅值分别为±37.5 mm、±75 mm和±150 mm加载,每个位移幅值按正弦波循环加载5周。共有两种工况,加载频率分别为0.01 Hz和0.05 Hz。往复加载滞回曲线如图8所示。两种不同加载频率下,支座的滑动性能较为稳定,动摩擦系数约为0.01,力学行为具有可控性。



(a) 加载频率0.01 Hz



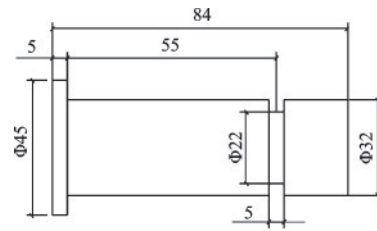
(b) 加载频率0.05 Hz

图8 摩擦行为滞回曲线

Fig.8 Hysteretic curves of friction behavior

### 3.3 剪力销剪断试验

剪力销的材料选择常用的45#钢,具体尺寸如图9所示,开矩形口,外径为32 mm、内径为22 mm。每个支座放置两个剪力销,如图10所示。为了清晰地得到剪力销的试验结果,在进行此试验时,未安装钢阻尼元件。支座在3 000 kN的竖向压力



(a) 尺寸



(b) 试件

图9 抗震熔断装置-剪力销

Fig.9 Seismic fuse-shear pin

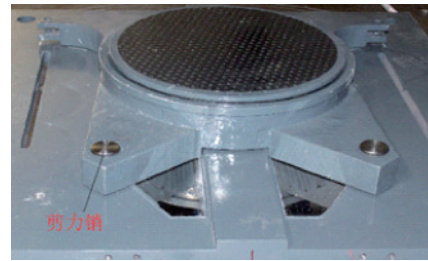


图10 剪力销布置

Fig.10 Arrangement of shear pins

下进行水平加载,试验主要分为2个阶段:以0.2 mm/s的恒定速率进行水平加载,直至剪力销被剪断;再将作动器的加载频率调整为0.05 Hz,以正弦波往复加载,位移幅值为150 mm,循环2周。

剪力销被剪断时发出一声清脆的巨大声响,为脆性破坏,破坏后的剪力销及断口如图11所示,剪力销均在预设的矩形槽内断裂,断口截面平整,是典型的剪切破坏形式。共进行了2组剪力销的剪断试验,图12为剪力销的力—位移曲线,2组剪力销力



图11 剪力销破坏断面

Fig.11 Fracture morphology of shear pins

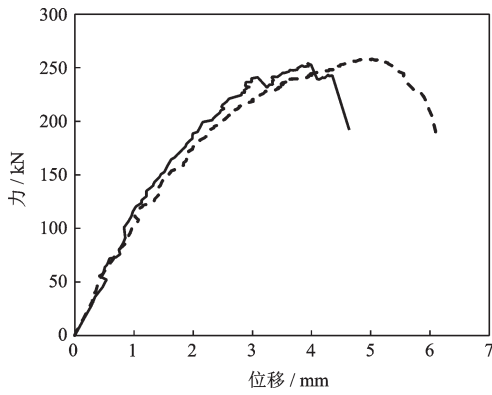


图 12 剪力销试验曲线

Fig.12 Test curve of shear pins

学行为基本相同,剪断力大小比较接近,分别为 258 kN 和 252 kN,相差 2%,力学行为稳定可控。剪力销被剪断后,支座的摩擦行为与 3.2 节初始摩擦行为对比如图 13 所示,表明摩擦行为正常,剪断的剪力销对支座的摩擦行为没有影响。

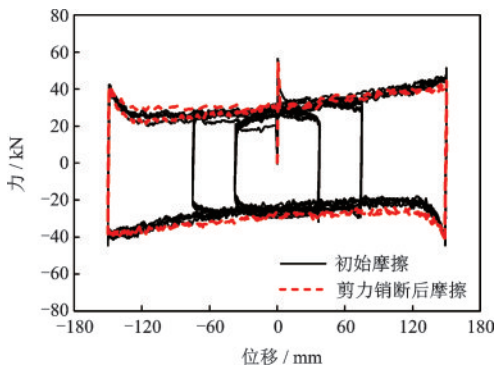
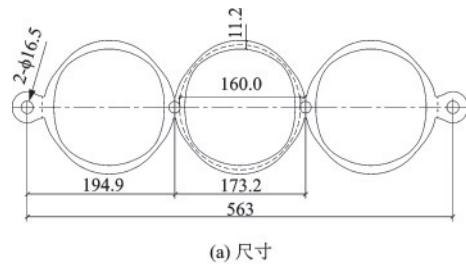


图 13 摩擦行为滞回曲线

Fig.13 Hysteretic curves of friction behavior

### 3.4 环形钢阻尼元件试验

环形钢阻尼元件尺寸及试件如图 14 所示,采用 Q460 钢材。为了能够清晰准确的分析钢阻尼元件的力学性能,进行钢阻尼元件试验时,未安装剪力销,不对支座施加竖向荷载,进行水平位移加载,试验分三级位移加载,分别为 20、40、60 mm,每个位移幅值按正弦波循环加载 4 周,加载频率为 0.01 Hz。支座试件及试验过程如图 15 所示。钢阻尼元件试验和数值模拟的滞回曲线如图 16 所示,曲线较为饱满,耗能特性良好。本次试验并没有检验钢阻尼元件限位段的功能,改进后第二次试验将对钢阻尼元件的限位功能进行验证。



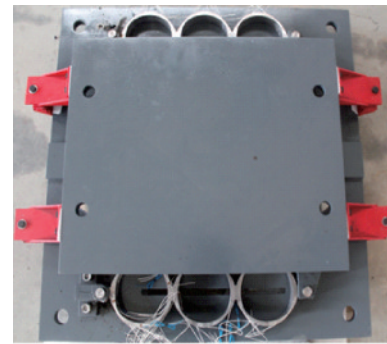
(a) 尺寸



(b) 试件

图 14 钢阻尼元件

Fig.14 Steel damping element



(a) 支座试件



(b) 支座加载过程

图 15 支座试验照片

Fig.15 Photographs of the bearing test

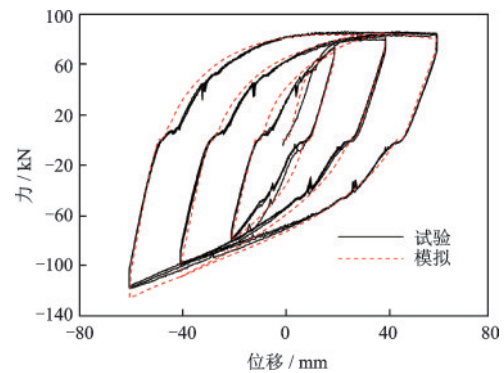


图 16 钢阻尼元件滞回曲线

Fig.16 Hysteretic curves of steel damping element

## 4 案例分析

以某3跨连续梁桥为背景建立有限元模型进行分析,全桥孔径布置为30 m+50 m+50 m,梁体采用单箱单室预应力混凝土箱梁,桥墩采用矩形花瓶墩,基础采用钻孔灌注桩,位于II类场地。

利用ABAQUS软件建立有限元模型,主梁和墩柱采用空间梁单元模拟,采用“m”法将桩基础等效为地基弹簧,普通支座的摩擦滞回行为采用双线弹簧模拟,剪力销的失效行为采用一般连接的失效特性进行模拟,钢阻尼元件采用实体单元模拟。图17为桥梁整体模型示意图,对其进行非线性时程分析,分为两种工况,工况一:支座按常规形式布置,2#墩采用固定球钢支座,其余墩采用活动球钢支座;工况二:2#墩布置固定可控型支座,3#墩布置活动可控型支座,1#、4#墩布置活动球钢支座。

选用LOS ANGELES地震波,峰值加速度调整为0.3g。图18为两种工况的计算结果对比,采用可控型支座后,地震过程中,随着固定墩(2#墩)受到主梁传递给它的水平力不断增大,到达限定能力后,可控型支座的剪力销失效,钢阻尼元件开始发挥耗能作用(图18(e)),上部结构产生的地震力向

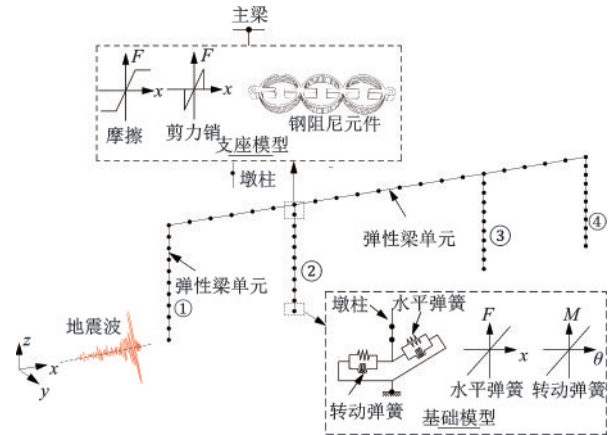


图17 桥梁结构模型

Fig17 Numerical model of bridge structures

下传递的方式发生改变,内力进行重分布,活动墩(3#墩)会共同承担上部结构产生的地震力,固定墩(2#墩)的受力状态会有很大的改善,墩底弯矩比采用常规固定支座有很大程度的减少(图18(a)),符合减震的设计目标。

释放墩梁的平动约束后,墩梁相对位移开始逐渐增大(图18(c)),当到达一定的界限值后,钢阻尼元件形成拉杆或者压杆(图18(f)),限制墩梁相对位移继续增大,防止落梁。受到钢阻尼元件的限位作用,活动墩(3#墩)的墩梁相对位移比采用常规活

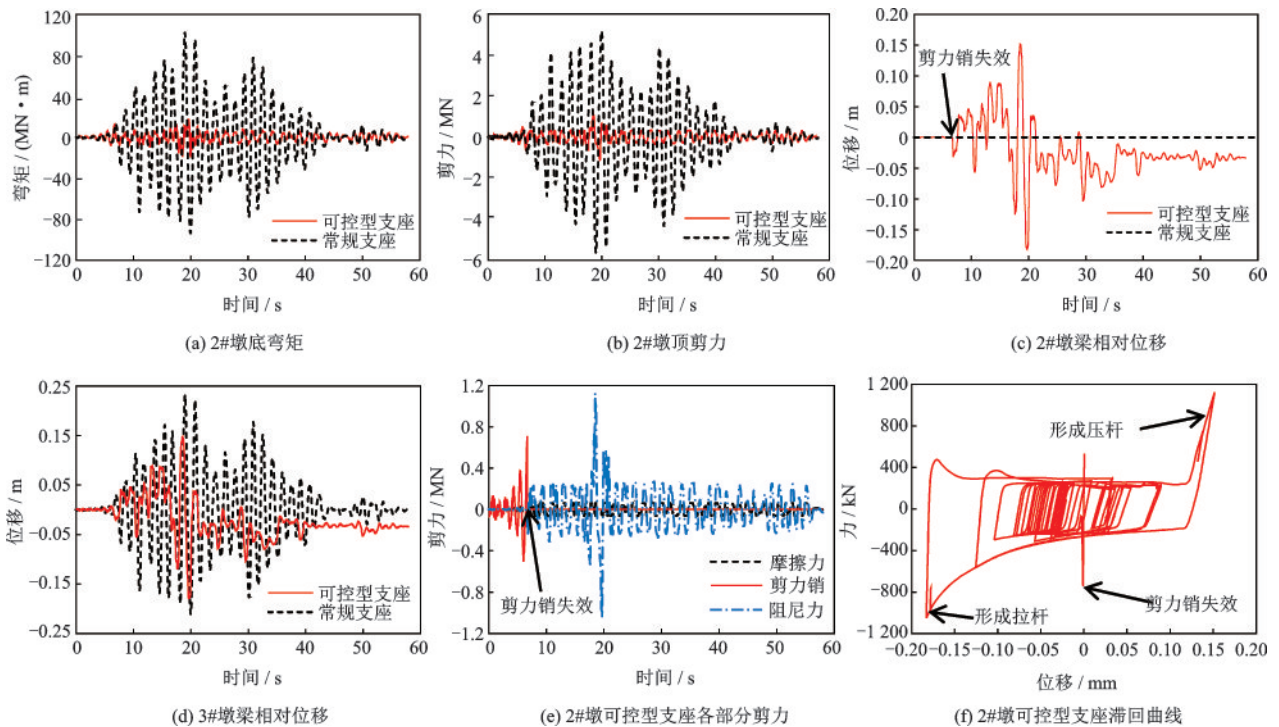


图18 结构地震响应

Fig.18 Seismic response of structures

动支座也会有所减少(图 18(d))。结构响应在力和位移之间取得较好的平衡,墩柱处于弹性状态,墩梁相对位移又控制在可接受的范围内。

## 5 结 论

(1)本文研发的功能可控型减隔震支座原理简单、受力合理、功能明确,有效解决了目前桥梁中耗能器、防落梁装置与支座分离制作、安装的问题。

(2)可控型支座力学行为稳定可控,失效元件不会干扰其它元件的正常运行,环形钢阻尼元件滞回曲线饱满,耗能能力强。

(3)在地震反应过程中,可控型支座具有转换桥梁结构体系、耗散地震能量、防落梁的功能,在不同受力阶段发挥不同的作用,实现桥梁结构地震行为可控。合理选用可控型支座可以使结构响应在力和位移之间取得较好的平衡,从而实现避免桥墩损伤破坏、防止落梁的目的。

**致谢** 本课题组高昊同学在论文试验方案讨论阶段给出了宝贵建议,并于试验期间付出了辛勤劳动。

### 参考文献:

- [1] 范立础,王志强. 桥梁减隔震设计[M]. 北京:人民交通出版社,2001.  
Fan L Ch, Wang Zh Q. Seismic mitigation and isolation design of bridges [M]. Beijing: China Communications Press, 2001. (in Chinese)
- [2] Sharabash A M, Andrawes B O. Application of shape memory alloy dampers in the seismic control of cable-stayed bridges-science direct [J]. Engineering Structures, 2009, 31(2):607-616.
- [3] Mori A, Carr A J, Cooke N, et al. Compression behaviour of bridge bearings used for seismic isolation[J]. Engineering Structures, 1996, 18(5):351-362.
- [4] Kelly J H, Buckel I G, Tsai H C. Earthquake simulator testing of a base-isolated bridge deck[R]. Berkeley: University of California, Earthquake Engineering Research Center College of Engineering, 1986.
- [5] 项乃亮,李建中. 考虑板式支座滑移的中小跨度梁式桥振动台试验[J]. 土木工程学报, 2018, 51(7):104-111.  
Xiang N L, Li J Zh. Shaking table tests of a short to medium-span girder bridge considering the sliding of laminated-rubber bearings [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51 (7): 104-111. (in Chinese)
- [6] 李建中,汤虎. 中小跨径板式橡胶支座梁桥横向抗震设计研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(11):69-78.  
Li J Zh, Tang H. Study on transverse seismic design of small and medium span bridges with elastomeric bearing pads [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49 (11): 69-78. (in Chinese)
- [7] 汤虎,李建中,邵长宇. 板式橡胶支座梁桥横向抗震加固研究[J]. 地震工程与工程振动, 2016, 36(4):33-41.  
Tang H, Li J Zh, Shao Ch Y. Study of seismic retrofit for girder bridge supported on elastomeric pad bearings in the transverse direction [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2016, 36 (4) : 33-41. (in Chinese)
- [8] 项乃亮,李建中. 不同挡块形式对中小跨径梁桥横向抗震性能的影响[J]. 工程力学, 2016, 33(3):188-195.  
Xiang N L, Li J Zh. Effect of different types of retainers on transverse seismic performance of small and mid span girder bridges [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33 (3) : 188-195. (in Chinese)
- [9] 叶爱君,方家欣,张少为,等. 小箱梁桥横向减震体系及其耗能特性[J]. 中国公路学报, 2017, 30(12):21-29.  
Ye A J, Fang J X, Zhang Sh W, et al. Transverse seismic system of Multi-box girder bridge and its energy dissipation characteristics [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30 (12) : 21-29. (in Chinese)
- [10] 高昊,王君杰,刘慧杰,等. 连续梁桥地震行为可控设计准则及实用装置[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(5):1718-1727.  
Gao H, Wang J J, Liu H J, et al. Design criterion and applied devices for controlled seismic behavior of continuous girder bridges [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50 (5) : 1718-1727. (in Chinese)
- [11] 张银喜,郝红肖,陈彦北,等. 一种钢阻尼滑板橡胶支座设计与试验研究[J]. 铁道建筑, 2016(10):29-31.  
Zhang Y X, Hao H X, Chen Y B, et al. Design and experimental study on sliding plate rubber bearing with steel damper [J]. Railway Engineering, 2016(10) : 29-31. (in Chinese)
- [12] 钟琼,袁涌,李一鸣,等. C形钢分离式隔震装置的力学性能[J]. 土木工程与管理学报, 2020, 37(2):79-85.  
Zhong Q, Yuan Y, Li Y M, et al. Mechanical properties of C-shaped steel isolation device [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2020, 37 (2) : 79-85. (in Chinese)
- [13] 范佐银. E型钢阻尼支座在连续梁桥中的应用[J]. 城市道桥与防洪, 2013(6):260-262.

Fan Z Y. Application of E-steel damping bearing in continuous girder bridge [J]. Urban Roads Bridges and Flood Control, 2013 (6): 260-262. (in Chinese)

[14] 郑晓龙, 金怡新, 吕娜. E型钢阻尼支座的设计与减震性能分析[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(2): 70-75.

Zheng X L, Jin Y X, Lyu N. The design and seismic isolation performance analysis of bearings with E-shape metallic dampers [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32 (2): 70-75. (in Chinese)

[15] 袁万城, 曹新建, 荣肇骏. 拉索减震支座的开发与试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(12): 1593-1600.

Yuan W Ch, Cao X J, Rong Zh J. Development and experimental study on cable-sliding friction a seismic bearing [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31 (12): 1593-1600. (in Chinese)

[16] 袁万城, 韦正华, 曹新建, 等. 拉索减震支座及桥梁抗震设计应用研究[J]. 工程力学, 2011, 28(增2): 204-209.

Yuan W Ch, Wei Zh H, Cao X J, et al. Cable-sliding friction a seismic bearing and its application in bridge seismic design [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28 (Sup 2): 204-209. (in Chinese)

(本文责编: 赵霞)



## 《防灾减灾工程学报》征订启事

《防灾减灾工程学报》由中国灾害防御协会和江苏省地震局联合主办, 南京工业大学、河海大学、大连理工大学、上海交通大学、中科院武汉岩土力学研究所、广州大学、北京工业大学、重庆大学和中科院寒区旱区环境与工程研究所协办。主要刊载地震、地质岩土、飓风、火灾和爆炸等灾害对工程结构和基础设施系统的极端作用、损伤和破坏效应以及防灾减灾工程对策等方面的前沿学术论文和应用性科研成果。本刊为双月刊, 全年6期, 定价30.00元/册, 全年定价180.00元(含邮费)。《防灾减灾工程学报》向国内外公开发行, 国内统一刊号: CN32-1695/P。

订阅: 天津市河西区联订服务部, 代号5219(注明订《防灾减灾工程学报》)

开户银行: 工商银行天津市尖山分理处

账号: 0302060509104619603

地址: 天津市大寺泉集北里别墅17号

邮政编码: 300385

电话: 022-23973378, 022-23962479, 传真: 022-23973378

网址: www.lhzd.com ; Email: lhzd@public.tpt.tj.cn