

# 高阻尼橡胶隔震支座的力学性能 及隔震效果分析研究

袁涌<sup>1,2</sup> 朱宏平<sup>1,2</sup> 资道铭<sup>3</sup>

(1 华中科技大学 土木工程与力学学院 湖北武汉 430074 2 华中科技大学 控制结构湖北省重点实验室 湖北武汉 430074 3 柳州东方工程橡胶制品有限公司 广西柳州 545005)

**摘要:**本文对新型高阻尼橡胶隔震支座的力学性能及此支座对桥梁的隔震性能进行了实验研究。通过正弦波实验研究其力学性能,实验结果表明新型高阻尼橡胶隔震支座是速度相关型支座,加载频率对其等效水平刚度有较大的影响,但对其等效阻尼系数影响不大。然而加载经历对新型高阻尼橡胶隔震支座对其等效水平刚度与等效阻尼系数均有较大的影响。同时通过数值分析精确的定量地验证了新型高阻尼橡胶支座对桥梁的减隔震效果。

**关键词:**高阻尼橡胶隔震支座 数值分析 等效刚度 等效阻尼系数

## 1 引言

地震灾害造成大量的建筑、桥梁结构的破坏,引起较多的人员伤亡,导致巨大的经济损失,因此对工程结构进行有效地隔震保护显得非常迫切。目前,在我国的土木工程隔震结构中,最常用的隔震装置是铅芯叠层橡胶隔震支座。但是实验研究证明其使用的橡胶在低温下存在着迅速硬化的现象,大量的研究也表明在温度和交通荷载(低周疲劳)作用下支座中的铅芯将产生疲劳剪切破坏,使支座的阻尼性能大幅度的降低,5000次水平小位移低周反复加载后其阻尼大致降低25%<sup>[1]</sup>;同时铅芯叠层橡胶隔震支座在生产和使用过程中,铅将对环境造成无法弥补的污染。在使用过程中造成橡胶开裂、铅芯外露,将也会对环境造成污染,同时其使用功能也受到很大的影响。特别是在既是强地震带,又是自然保护区的西藏、云南等,铅对生态环境造成的污染将是无法弥补的。因此研究性能稳定的新型高阻尼橡胶隔震支座,既能有效地保证工程结构的安全,又可以避免对生态环境的污染,显得极为迫切。

目前,美国、西欧和日本等国投入了大量的物力和财力研制性能卓越的新型高阻尼材料隔震支座,既能够不污染环境又可以用于保护在地震灾害中工程结构的安全。在我国,目前主要是通过炭黑与橡胶分子链的游离基产生化学吸附与结合,形成炭黑-橡胶凝胶结构来增加橡胶的阻

尼<sup>[2]</sup>。但是炭黑-橡胶凝胶不是稳定的化学反应产物而是化学吸附与结合的产物,研究证明这种结构在应力的反复作用下容易破坏,阻尼性能不稳定;同时研究也表明炭黑对橡胶的硬化效应比较显著,使橡胶的延伸率降低。

本文在创新地开发出新型高阻尼橡胶隔震支座(HDR)的基础上,研究其力学性能,通过不同的加载顺序研究加载经历对新型高阻尼橡胶隔震支座的等效刚度和等效阻尼系数的影响,并推导出稳定后新型高阻尼橡胶隔震支座的等效刚度和等效阻尼系数的计算模型<sup>[3]</sup>。

## 2 力学性能试验研究

### 2.1 试验动力装置

本实验所用的竖向及其水平动力加载设备如图1所示。水平加载设备是美国MTS公司提供的动力液压伺服作动器,此作动器由MTS公司提供的FlexTest GT控制系统控制。同时FlexTest GT控制系统留有外部输入信号的接口,这样拟动力子结构实验中的数值子结构计算程序和DSP中控制程序就能和FlexTest GT控制系统连接进行数据信号交换。实验中使用的动力液压伺服作动器在动力加载时可以达到 $\pm 1000\text{kN}$ ,水平位移的范围是 $\pm 300\text{mm}$ 。竖向力由4个750kN的静力作动器产生,整个竖向加载是自平衡装置,大幅度的减少了设备的自重和加载过程中的摩擦力。

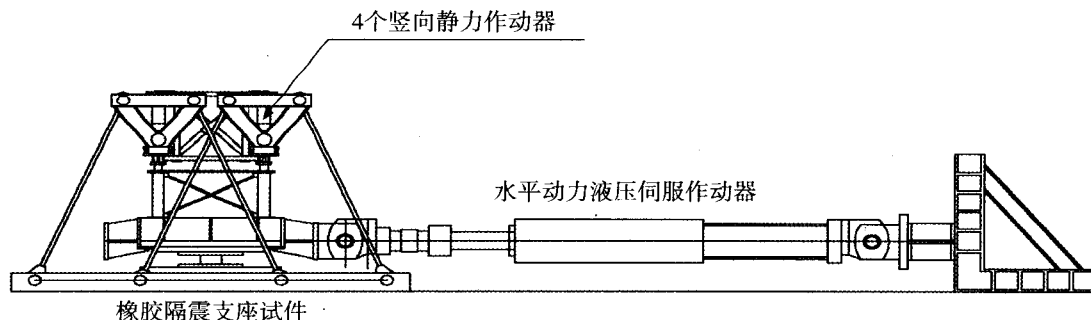


图1 水平和竖向加载示意图

## 2.2 实验试件

本实验的试件为4件性能相同的新型高阻尼橡胶隔震支座，其平面尺寸和橡胶层数都为 $400\text{mm} \times 400\text{mm} \times 6$ 层，橡胶每层厚度为 $20\text{mm}$ ，橡胶层总厚度为 $120\text{mm}$ ，橡胶的水平剪切弹性模量采用 $G12 (1.2\text{N}/\text{mm}^2)$ 。

## 2.3 试验方案

首先进行顺应变加载实验，实验中支座的竖向荷载为 $960\text{kN}$ （面荷载 $6\text{N}/\text{mm}^2$ ），并在实验中保持恒定。水平方向通过水平动力液压伺服作动器输入正弦激励波，为了研究频率对支座性能的影响，对3件新型高阻尼橡胶隔震支座分别输入频率为 $0.1\text{Hz}$ 、 $0.3\text{Hz}$ 、 $0.5\text{Hz}$ 的正弦波，对于每一频率的正弦波其振幅分别按 $100\%$ 、 $175\%$ 、 $250\%$ 应变的顺序进行改变，每一应变往返进行6次。而每一振幅实验之间将支座静置24小时，使其能恢复到弹性状态。

其次，为了研究加载经历对新型高阻尼橡胶隔震支座的力学性能的影响，对未进行过实验的1件新试件进行逆应变加载实验。实验中竖向荷载还是保持 $960\text{kN}$ 不变，水平方向输入频率为 $0.5$ 的正弦波，其振幅按 $250\%$ 、 $175\%$ 、 $100\%$ 应变顺序进行改变，每一应变往返进行6次。同样对于每一振幅实验之间将支座静置24小时，使其能恢复到弹性状态。

## 2.4 实验结果及其分析

顺应变与逆应变实验中得到的新型高阻尼橡胶隔震支座的滞回曲线如图2所示。并且根据每一频率下第二回至第六回的滞回曲线按最大位移法计算在不同应变下的等效水平刚度与等效阻尼

系数[3]。其等效水平刚度、等效阻尼系数和加载频率、应变的关系如图3、4所示。从图3中可以看出随着加载频率的增加，等效水平刚度有增加的趋势，大致上频率每增加 $0.01\text{Hz}$ ，其等效水平刚度增加 $0.042 (\text{kN}/\text{mm})$ 。但是实验结果等效阻尼系数随着频率的变化几乎没有多大的变化，这说明新型高阻尼橡胶隔震支座的阻尼性能是稳定的，与激励频率的相关性小。同时从图4中可以看出随着应变的增加，等效水平刚度与等效阻尼系数都变小。

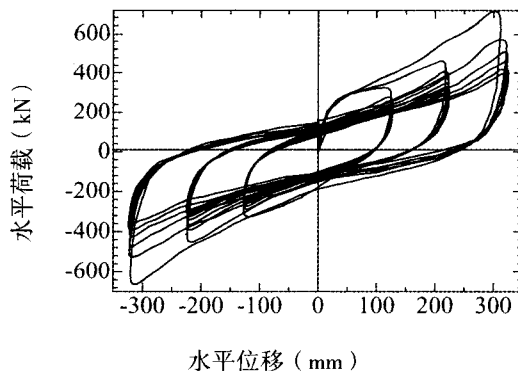


图2 (a) 顺应变实验滞回曲线-0.1Hz

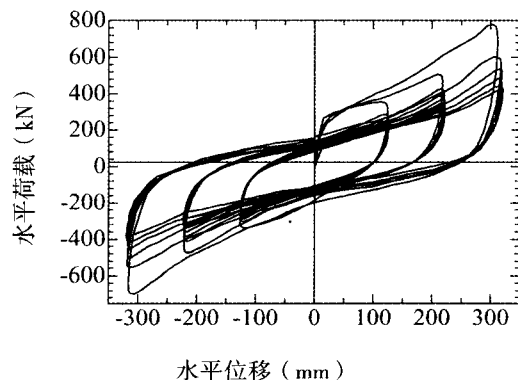


图2 (b) 顺应变实验滞回曲线-0.3Hz

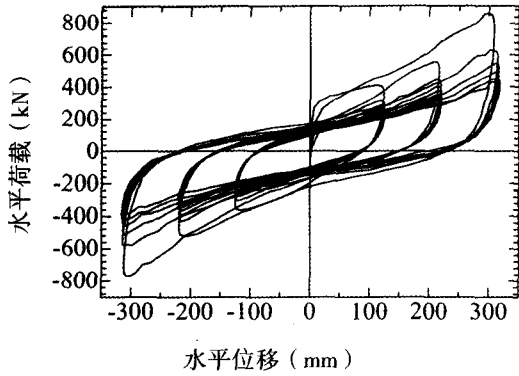


图2 (c) 顺应变实验滞回曲线-0.5Hz

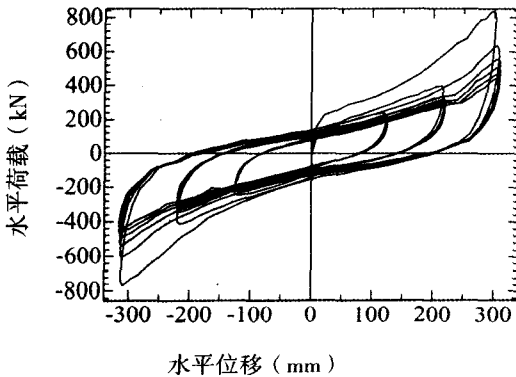


图2 (d) 逆应变实验滞回曲线-0.5Hz

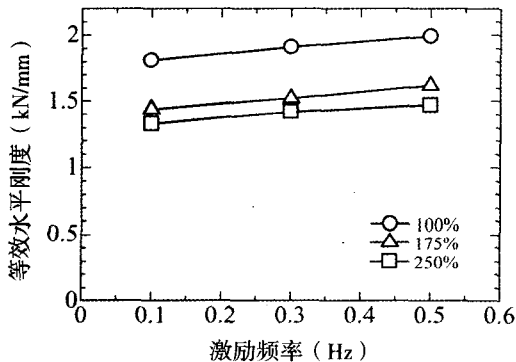
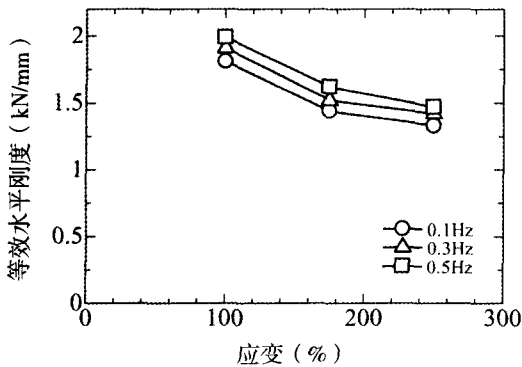


图3 等效水平刚度与应变、激励频率的关系

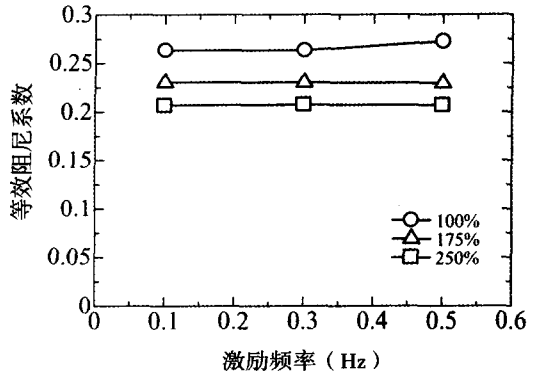
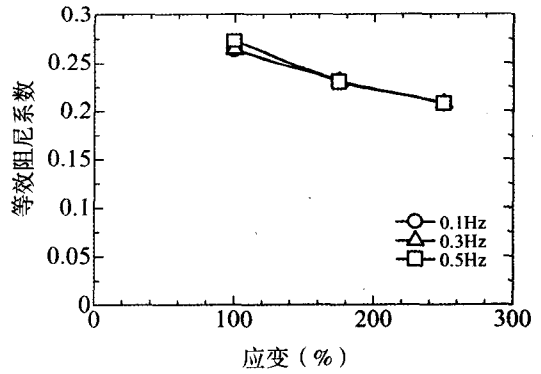


图4 等效阻尼系数与应变、激励频率的关系

从逆应变滞回曲线可以看出,当新型高阻尼橡胶隔震支座首先经历了大应变变形后,小应变实验的初始刚度比顺应变实验结果降低了,同时等效水平刚度与等效阻尼系数也发生了变化。根据每一频率下第二回至第六回的滞回曲线按最大位移法计算逆应变实验的等效水平刚度和等效阻尼系数,并与顺应变实验结果进行对比,其结果如图5所示。从图5中可以看出,在顺应变实验中100%、175%应变的等效水平刚度比逆应变分别高25%、19%,而250%应变时两者却几乎相同。对于等效阻尼系数,逆应变实验结果均比顺应变的实验结果小,100%、175%、250%应变时分别小了7.3%、0.9%、16.9%。由此可见新型高阻尼橡胶隔震支座的等效水平刚度、等效阻尼系数与加载顺序有很强的相关性。

### 3 隔震性能分析研究

#### 3.1 分析方案

##### 3.1.1 力学模型

分析中使用的隔震桥梁的某桥墩如图6(a)所示,图3(b)是其简化的3自由度模型。

在分析中采用了10m高的混凝土桥墩，桥墩基础的平面尺寸6.3m×6.3m，基础高度为2.0m，桥墩的断面尺寸为5.22m×2.4m，高度为9.5m，桥面的重量为714ton。实验的桥墩模型的1次振型为{0.08, 0.133, 0.991}<sup>T</sup>，其周期为1.27秒。

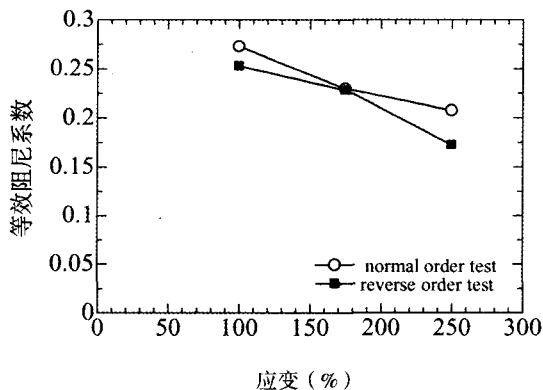
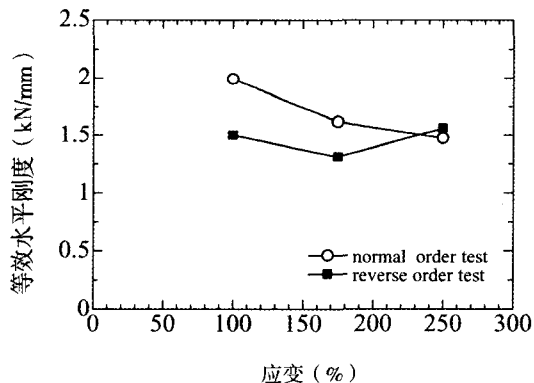
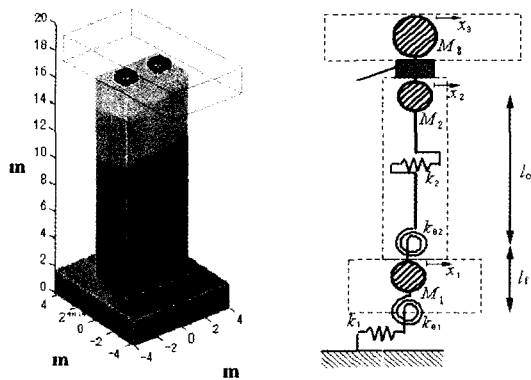


图5 顺应变与逆应变实验结果的对比



(a) 实际桥墩结构 (b) 简化数值模型

图6 实验中使用的数值模型

3.2 分析中使用的橡胶隔震支座及其地震波

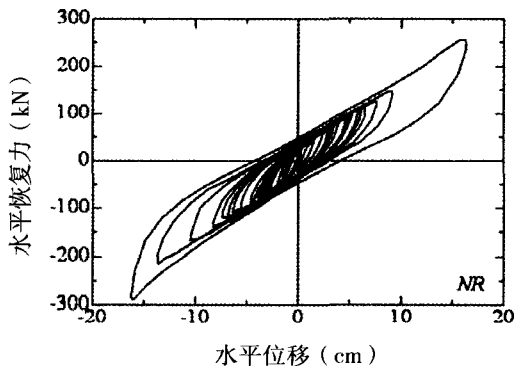
在本次分析使用的是板式橡胶支座NR，新

型高阻尼橡胶隔震支座HDR。其平面尺寸都采用方形400mm×400mm，纯橡胶层总厚度为120mm，橡胶的剪切弹性模量为1.2N/mm<sup>2</sup>。其175%应变时的阻尼比设计值分别为0.04, 0.21。采用针对2类场地的地震波L2T1Soil2，其最大加速度峰值为0.22g，地震波的标准输入时间间隔为ΔT=0.01。

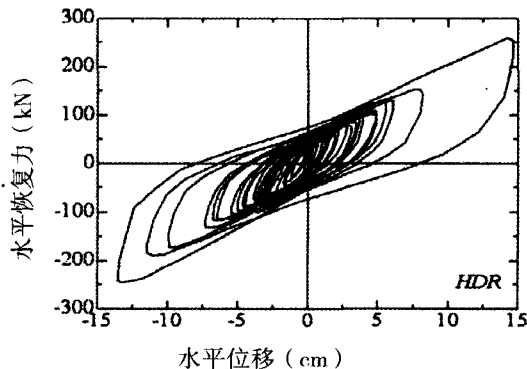
3.3 实验结果及分析

10m高桥墩在L2T1Soil2地震波输入条件下，2种支座的反应滞回曲线如图7所示。为了定量的评价其隔震效果，从分析结果中直接得桥墩顶部的最大位移，桥面的最大位移，桥面的最大加速度，同时通过式(2)的计算求得桥墩底部的最大弯矩，结果如表1所示。分析结果表面新型高阻尼橡胶隔震支座对桥梁有良好的隔震效果。

$$M_p = l_c (M_2 \ddot{x}_2 + M_3 \ddot{x}_3) \quad (2)$$



(a) 板式橡胶支座的滞回曲线



(b) 新型高阻尼橡胶隔震支座的滞回曲线

图7 支座在实时子结构拟动力实验中的滞回曲线

(下转第33页)

原因。由于桥梁运营使用造成的损伤和动力参数变化,往往淹没在由于环境温度变化、风基础沉降等引起的动力参数扰动中,给损伤识别的实现带来困难。因此,这个方向的研究应该予以足够的重视。

(4) 智能传感元件及其耐久性。智能传感元件,例如光栅光纤传感器用于监测系统有着良好的效果,在航空航天机械行业得到成功的应用,在桥梁监测中也具有可以预见的良好前景。目前一些专家学者正在进行探索性研究,在智能传感元件的相容、大应变和耐久性问题的研究上,还有大量工作需要开展。

#### 参考文献

- [1] 王岩松,冷曦晨. 桥梁健康监测技术研究与应用[J]. 吉林交通科技, 2005,1.
- [2] Muria Vila D., Gomez R., King C. Dynamics Structural Properties of Cable Stayed Tampico Bridge[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1991,117(1).
- [3] 孙晓燕. 桥梁结构健康检测技术研究进展[J]. 中外公路, 2006,4.
- [4] 张启伟. 大型桥梁健康监测概念与监测系统设计[J]. 同济大学学报, 2001,29(1).
- [5] 韩大建,谢峻. 大跨度桥梁健康监测技术的近期研究进展[J]. 桥梁建设, 2002,6.
- [6] 邹晓光,徐祖恩. 大型桥梁健康监测动态及发展趋势[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2003,23.
- [7] 周智,欧进萍. 土木工程智能健康监测与诊断系统[J]. 传

感器技术, 2001,20(11).

- [8] 左云,陈明宪,赵跃宇. 桥梁健康监测及传感器的优化布置[J]. 公路, 2004,4.
- [9] 李宏男,李东升. 土木工程结构安全性评估、健康监测及诊断综述[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(3)
- [10] 高赞明,孙宗光,倪一清. 基于振动方法的汲水门大桥损伤检测研究[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(4).
- [11] 裴强,郭迅,张敏政. 桥梁健康监测及诊断研究综述[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 4.
- [12] Yukikazu Yanaka, Shuichi Suzuki. Monitoring the Akashi Kaikyo Bridge: First Experiences, Satoshi Kashima. Structure Engineering International, 2001, (2).
- [13] Akira Todoroki and Shintaro Miyatani. Wireless Strain Monitoring by Impedance Change of Composite Materials[A]. Structural Health Monitoring[C]. Edited by Fu-kuo Chang, 2002.
- [14] Mita A. et al. Health Monitoring of Smart Structures Using Damage Index Sensors[J]. Smart structures and Materials, San Diego, 2002.
- [15] F Myroll, E Dibiagio. Instrumentation for Monitoring the Skarnsunder Cable-stayed Bridge[C]. Jon Krokeborg, Proceeding of the Third Symposium on Strait Crossing, Rotterdam. Balkema, 1994.
- [16] J M Caicedo, et al. Monitoring of Bridge to Detect Changes in Structural Health[A]. 2001 America Control Conference[C]. Arlington, Virginia, 2001.
- [17] 欧进萍. 土木工程结构用智能感知材料、传感器与健康监测系统的发展现状[J]. 高层论坛, 2005, 2(5).
- [18] 谢强,薛松涛. 土木工程结构健康监测的研究状况与进展[J]. 中国科学基金, 2001.
- [19] 董学武,张宇峰,徐宏等. 苏通大桥结构健康监测及安全评价系统简介[J]. 桥梁建设, 2006, 4.
- [20] 缪长青,李爱群,冯兆祥等. 润扬大桥结构健康监测系统设计研究[J]. 世界桥梁, 2006, 3.
- [21] 张敏,杨志芳,朱利明. 东海大桥桥梁结构健康监测系统设计研究与设计[J]. 桥梁建设, 2006, 2.

(上接第23页)

表1 实时子结构拟动力实验结果

支座	桥墩顶部的最大位移	桥面的最大加速度	桥面的最大位移	桥墩底部的最大弯矩
	mm	gal	mm	kN·mm
NR	46.8	40.78	218.2	294
HDR	40.3	33.52	192.6	244

## 4 结论

本文对新型高阻尼橡胶隔震支座的力学性能与对桥梁的隔震性能进行了实验研究。实验结果表明新型高阻尼橡胶隔震支座是速度相关型支座,加载频率对其等效水平刚度有较大的影响,但对其等效阻尼系数影响不大。通过分析精确的定量地验证了新型高阻尼橡胶支座对桥梁的减隔震效果。

#### 参考文献

- [1] 袁涌,青木徹彦,山本吉久. 关于高阻尼橡胶隔震支座的

动力特性的研究[J]. 日本构造工学论文集, 2005.3,Vol. 51A:

- [2] 庄学真,沈朝勇,金建敏. 桥梁高阻尼橡胶支座力学性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006.10,Vol26,No.5: 208-212.
- [3] Yuan, Y., Aoki, T. and Yamamoto, Y. Experiment Study of the Dynamic Behavior of high-damping-rubber bearing isolator[C] //the First International conference on Advances in Experimental Structural Engineering, Nagoya, Japan 2005:505-511.
- [4] Nakashima, M., Kato, H. and Takaoka, E. Development of Real-time Pseudo Dynamic Testing[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamic, 1992, 21:79-92.
- [5] Nakashima, M. and Kato, H. Experimental error growth behavior and error growth control in on-line computer test control method [C] // Building Research Institute, Ministry of Construction, Research Paper, 1987:123-130.
- [6] 邱法维,钱稼茹,陈志鹏. 结构抗震实验方法[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [7] Hirokazu, I., and Akira, I. Real-time Substructure Hybrid Earthquake Loading System for Super-high-damping Rubber Bearing[C] // the First International conference on Advances in Experimental Structural Engineering, Nagoya, Japan 2005:401-408.
- [8] 范力,赵斌,吕西林. 拟动力试验中几个问题的讨论[J]. 结构工程师, 2006,10, Vol.22:50-53.