

文章编号:1673-2049(2014)04-0080-07

新型多功能桥梁滑移-减隔震支座性能试验

茅建校¹, 尹万云², 王 浩¹, 刘守诚², 邵传林², 傅大放¹

(1. 东南大学 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 江苏 南京 210096;

2. 中国十七冶集团有限公司, 安徽 马鞍山 243000)

摘要:针对传统桥梁减隔震支座性能单一, 无法满足正常使用荷载及地震极端荷载等不同工况的现状, 设计了一种新型多功能滑移-减隔震支座, 通过理论分析与有限元模拟相结合的方式建立了该多功能支座的剪切性能曲线, 并阐述了该曲线的力学特性及各个关键点意义。在此基础上, 进行了压缩性能、剪切性能及其相关性试验。结果表明: 新型多功能滑移-减隔震支座能够达到预期目标, 可同时满足桥梁在正常使用阶段的滑移和地震作用下的耗能要求; 支座剪切性能曲线的有限元分析结果与试验结果吻合良好, 有限元分析得到的剪切性能曲线可有效描述其力学行为; 所得结论为后续桥梁减隔震设计及动力时程分析提供了参考。

关键词:多功能滑移-减隔震支座; 力学特性; 有限元模拟; 剪切性能; 试验研究

中图分类号: U442 **文献标志码:** A

Experiment on Mechanical Properties of New Type of Multifunctional Sliding-isolation Bridge Bearing

MAO Jian-xiao¹, YIN Wan-yun², WANG Hao¹, LIU Shou-cheng²,
SHAO Chuan-lin², FU Da-fang¹

(1. Key Laboratory of C & PC Structure, Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China; 2. China MCC17 Group Co., Ltd., Ma'anshan 243000, Anhui, China)

Abstract: The traditional bridge sliding-isolation bearing's performance was single and couldn't meet the situation in different cases, such as normal load, severe seismic load, etc. In order to solve the problem, a new type of multifunctional sliding-isolation bearing was designed. Combining the theoretical analysis and finite element simulation, the shear behavior curve of the new type multifunctional sliding-isolation bearing was established. The mechanical property and the meaning of each key point of the curve were explained. Based on this, the correlation experiments on the compression behavior, shear behavior of the sliding-isolation bearing were carried out. Results show that the new type of multifunctional sliding-isolation bearing can achieve the predicted target. The developed bearing can meet the bridge demands of sliding in normal use and energy dissipation under earthquake action. Moreover, the finite element analysis results of shear behavior curve of bearing agree well with the experiment results. Therefore, the theoretical shear behavior curve can effectively reflect the mechanical property of bearing. The obtained results can provide basis for sliding-isolation design and dynamic time-history analysis of

收稿日期: 2014-05-26

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2242012R30002); 桥梁工程结构动力学国家重点实验室开放基金项目(201302)

作者简介: 茅建校(1990-), 男, 江苏南通人, 工学硕士研究生, E-mail: jianxiao1990@126.com。

the bridges in the future.

Key words: multifunctional sliding-isolation bearing; mechanical property; finite element simulation; shear behavior; experiment study

0 引 言

近年来,全球地震灾害频发,给人类造成了惨重的生命财产损失^[1]。桥梁作为交通线路上的枢纽,其损毁将给抗震救灾带来巨大困难,使得桥梁结构的抗震性能备受关注。传统的桥梁抗震设计理念主要着眼点是强度设计,在增加材料耗费量的同时,抗震能力不一定有所改善^[2-3]。此后,经过大量的试验研究、实际工程建设以及多次强震的考验,以工程结构控制理论为指导的结构减隔震技术进入了工程师们的视野,并因其在抗震方法、减震效果、安全性、经济性以及震后修复性等方面的优势而迅速发展。

减隔震支座为工程结构减隔震中的常用装置,不少科学家对此做出了一定的改进和研究,如 Constantinou 等^[4]考虑了聚四氟乙烯支座与螺旋弹簧组合使用的情况,并通过给定结构的振动台试验对支座的隔震性能进行测试,获得了支座的剪切性能滞回曲线等,但是其没有考虑该组合隔震系统在正常使用时的适应性;朱玉华等^[5-9]针对建筑结构进行了减隔震研究,其中考虑了将夹层橡胶隔震支座和滑板摩擦支座并联组合使用的情况,并分析了隔震结构的力学性能及其地震响应特性,然而上述研究

均未涉及桥梁结构及其对应的组合隔震系统。就桥梁结构而言,工程技术人员希望桥梁支座既能满足正常使用状态下的位移要求,又具有较好的耗能能力以减小桥梁结构在遭受地震作用时的破坏。显然,已有的绝大多数桥梁支座均难以同时满足上述 2 个方面的要求,这方面的研究工作仍亟待加强。

本文中笔者根据桥梁结构运营期间的受力特点,在综合聚四氟乙烯滑板和铅芯橡胶隔震支座各自优点的基础上,设计并制作了一种新型多功能滑移-减隔震支座,并且采用有限元分析及模型试验等方法对该支座力学性能进行了深入的分析,以期为今后桥梁结构的减隔震设计和动力时程分析提供参考。

1 新型多功能滑移-减隔震支座构造

本文中所设计的多功能滑移-减隔震支座的上半部分为聚四氟乙烯-不锈钢板滑移装置,下半部分为 LRB300 型铅芯橡胶隔震垫,具体参数如表 1 所示。在该支座上、下部分之间设置转换装置,由 1 个四面相围的挡板构成,可满足上部结构纵向 30 mm、横向 20 mm 的滑移量。支座整体构造及加工成形模型如图 1、2 所示。

表 1 铅芯橡胶隔震支座参数

Tab. 1 Parameters of Lead Rubber Isolation Bearing

橡胶剪切弹性 模量/MPa	有效直径/mm	铅芯直径/mm	中间橡胶层		中间钢板层		1 次形状系数	2 次形状系数	支座总高度/mm
			层数	厚度/mm	层数	厚度/mm			
0.392	300	60	18	3.39	17	1.50	22.12	4.92	106.5

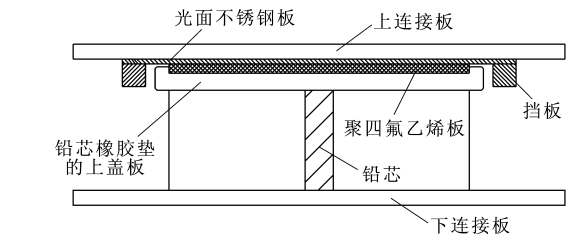


图 1 支座整体构造

Fig. 1 Integral Construction of Bearing

2 支座力学行为理论及有限元分析

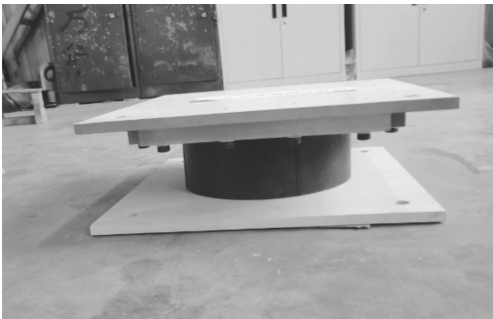
2.1 力学行为理论分析

滑移-减隔震支座包括上半部分的摩擦滑移隔震支座和下半部分的铅芯橡胶隔震支座,其力学性

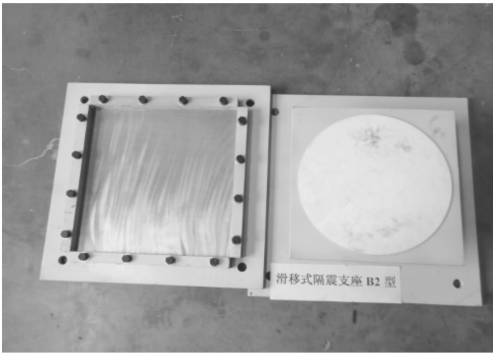
能主要体现在滑移-隔震上,故有必要将二者分别进行分析。

2.1.1 摩擦滑移隔震支座

摩擦滑移隔震支座在小位移(约为 0.2 mm)时表现为接合面阻尼耗能,较大位移时为库仑摩擦阻尼耗能,耗能效率较高^[10]。接合面阻尼由小变形所产生,体现为静摩擦力控制。当接合面的受力达到静摩擦力极限时,支座发生较大变形,动摩擦力开始发挥作用,体现出库仑摩擦阻尼耗能特征^[11],其力-位移曲线如图 3 所示^[12-13],其中, F 为摩擦力, x 为位移, F_0 为滑动摩擦力,由竖向压力 N 和摩擦因数 μ 确定^[14]。



(a) 支座模型整体



(b) 支座模型内部

图 2 支座加工成形模型

Fig. 2 Processed Model of Bearing

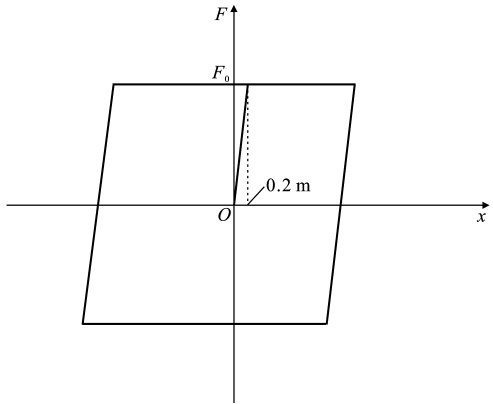


图 3 摩擦滑移隔震支座的力-位移曲线

Fig. 3 Force-displacement Curve of Friction Sliding-isolation Bearing

2.1.2 铅芯橡胶隔震支座

铅芯橡胶隔震支座的力学特性主要体现在恢复力模型中,采用双线性恢复力模型,其力-位移曲线见图 4,其中, K_i 为初始刚度, K_d 为屈服后刚度, K_h 为水平等效刚度, Q_d 为屈服力。

2.2 支座剪切性能有限元分析

在理论分析的基础上,利用 ANSYS 对滑移-减隔震支座进行模拟与分析,得出其力-位移曲线,见图 5,其中, F' 为剪力, K_{eq} 为等效水平刚度, K_1 、 K_2 分别为隔震垫的屈服前刚度和屈服后刚度。滑移-

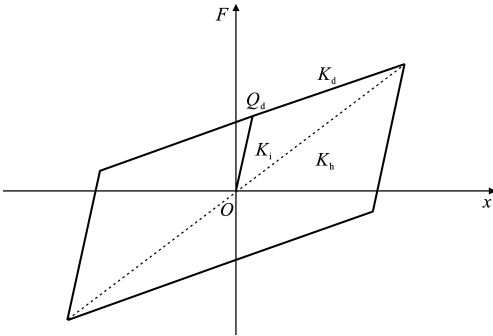


图 4 铅芯橡胶隔震支座力-位移曲线

Fig. 4 Force-displacement Curve of Lead Rubber Isolation Bearing

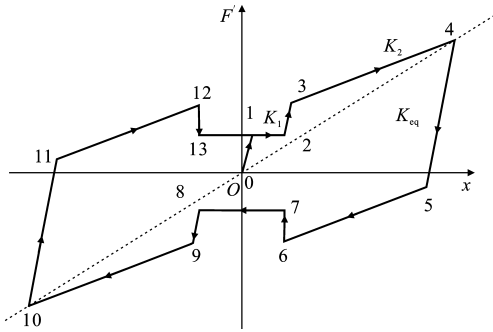


图 5 多功能桥梁滑移-减隔震支座的力-位移曲线

Fig. 5 Force-displacement Curve of Multifunctional Sliding-isolation Bridge Bearing

减隔震支座剪切性能曲线的分析工况如表 2 所示,其中,剪应变为下部铅芯橡胶垫的剪应变,不包括上部摩擦滑移隔震装置的滑移量。

表 2 滑移-减隔震支座剪切性能曲线的分析工况

Tab. 2 Analysis Conditions of Shear Behavior Curve for Sliding-isolation Bearing

剪应变	竖向压力/kN	滑移量/mm	摩擦因数
1	350	30	0.03

由图 5 可知:0~13 均为支座受力变形曲线中的关键点,其中 0 为支座受力开始点;1 为上部滑移支座的起滑点;2 为支座滑移区的终结点,滑移-隔震的体系转换装置开始发挥作用,带动下部的隔震垫运动;3 为隔震垫内部铅芯屈服点;4 为支座剪应变达到 100% 的标志点,开始受反向剪切力作用;5 为隔震垫内部铅芯反向屈服点;6 为隔震垫内部铅芯受力逐步减小;7 表示开始退化为摩擦滑移隔震支座;过程 8-13 等同于过程 2-7,支座的剪切性能不受支座受力方向的影响;当支座受力达到点 13 时,即开始下一个滑移-隔震的受力过程;过程 0-1,2-3,4-5 均由隔震垫的屈服前刚度 K_1 控制;过程 3-4,5-6 由隔震垫的屈服后刚度 K_2 控制;过程 1-2,7-8 由摩

擦滑移隔震装置的动摩擦力控制;过程 6-7 由滑移装置动、静摩擦因数的变化控制;4 与 10 连线的斜率可定义为该支座的等效水平刚度 K_{eq} 。

3 支座力学性能试验研究

3.1 试验加载装置

试验在华中科技大学控制结构湖北省重点实验室的大型压剪试验机上进行,压剪试验机见图 6。该设备可提供 25 MN 的竖向最大加载力、2.8 MN 的水平向最大加载力,最大作动行程为 ± 600 mm。试验采用正弦波加载,通过调整正弦波的频率、幅值来实现不同的加载工况。



图 6 压剪试验机
Fig. 6 Pressure-shear Test Machine

3.2 试验及结果分析

根据滑移-减隔震支座模型的相关设计参数,依据文献[15],[16],设计了试验的内容及对应工况。

3.2.1 竖向压缩性能试验

竖向压缩性能试验按 $0-P_{\max}-0$ 方式加载 3 次(P_{\max} 为荷载最大值),取第 3 次数据进行分析,并按下式计算支座的竖向压缩刚度 K_v ,即

$$K_v=\frac{P_2-P_1}{Y_2-Y_1}$$

(1)

式中: P_1 为本次循环的较小压力,取 $P_1=0.7P_0$, P_0 为支座有效最小截面处设计压力, $P_0=707$ kN; P_2 为本次循环的较大压力,取 $P_2=1.3P_0$; Y_1 , Y_2 分别为本次循环的较小位移和较大位移。

表 3 中给出了竖向压缩性能试验结果。由表 3 可以看出,滑移-减隔震支座的竖向压缩刚度较大,与普通铅芯橡胶支座的竖向压缩刚度($900\sim 1\,000$ kN \cdot mm $^{-1}$)接近,在经历几次循环压缩后,未发现鼓出、偏置、不均匀压缩等不良现象,能够满足实际使用要求。

3.2.2 剪切性能及其相关性试验

为考察不同加载工况对支座剪切性能的影响,

表 3 竖向压缩性能试验结果

Tab. 3 Experiment Results of Vertical Compression Behavior

P_1 /kN	Y_1 /mm	P_2 /kN	Y_2 /mm	K_v /(kN \cdot mm $^{-1}$)
495	0.75	919	1.24	865

进行了剪切性能及其相关性试验,具体加载工况见表 4。限于篇幅,本文中只考虑支座 30 mm 滑移量方向的剪切性能。

表 4 剪切性能试验加载工况

Tab. 4 Test Loading Conditions of Shear Behavior

试验项目	试验加载工况	
	固定参数	变化参数
剪切性能	竖向压力 350 kN, 加载频率 0.1 Hz	剪切位移 30,50,80,100, 120,130,140 mm
压应力相关性	滑移量 50 mm,加载频率 0.1 Hz	竖向压力 200,350,707, 848 kN
反复加载次数相关性	滑移量 50 mm,加载频率 0.1 Hz,竖向压力 200 kN,循环加载 30 次	

(1) 剪切性能试验

按表 4 所示的工况进行试验,所得第 3 圈力-位移滞回曲线见图 7,剪切位移对滞回环面积和等效水平刚度的影响见图 8。

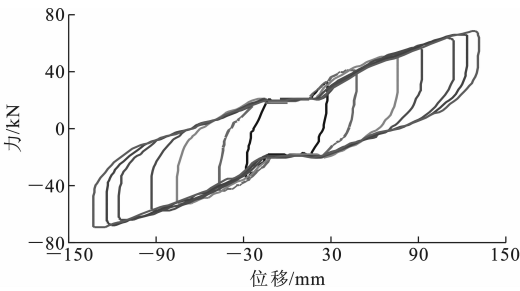


图 7 剪切性能试验力-位移滞回曲线
Fig. 7 Force-displacement Hysteretic Curves of Shear Behavior

由图 7 可知,支座耗能能力随着剪切位移的增大而增加,支座上部滑移装置的功能受剪应变影响较小,下部铅芯橡胶隔震垫的刚度退化较小。

由图 8 可知,在各工况下,滑移-减隔震支座均具有较好的滑移隔震能力,其滞回环的面积与剪切位移近似成正比,在先滑移后隔震的“多功能”实现的同时,支座耗能能力逐步增强;滑移-减隔震支座的等效水平刚度随剪切位移的增大而减小,在 80 mm 剪切位移前下降较快,之后较平缓。在上述基础上,计算了滑移-减隔震支座在不同剪切位移下的等效阻尼比,结果见表 5。

由表 5 可知,随着支座剪切位移的增大,等效阻

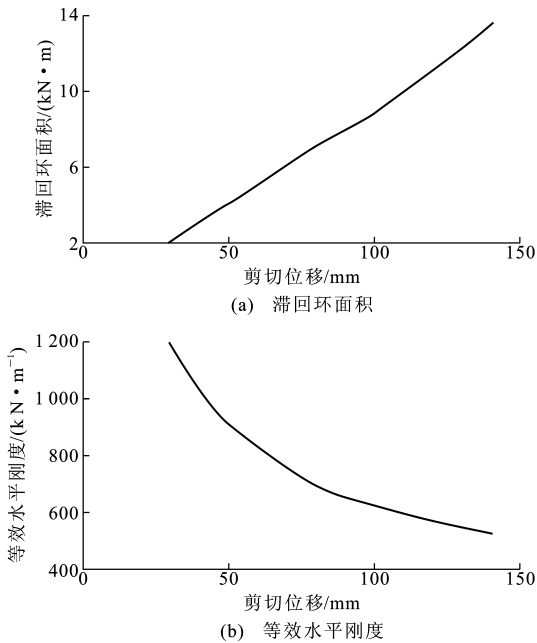


图 8 不同剪切位移时的力学参数

Fig. 8 Mechanical Parameters of Different Shear Displacements

表 5 不同剪切位移下的等效阻尼比

Tab. 5 Equivalent Damping Ratios of Different Shear Displacements

剪切位移/mm	30	50	80	100	120	130	140
等效阻尼比/%	30.3	28.5	25.6	22.5	21.5	20.9	21.0

尼比逐渐减小,但是等效阻尼比均保持在 20% 以上,表明滑移-减隔震支座具有较好的隔震耗能能力且性能稳定。

(2)压应力相关性

为了分析竖向压力对滑移-减隔震支座剪切性能的影响,按表 4 所示的工况进行试验,取第 3 圈滞回曲线进行分析(图 9),并在此基础上计算了对应的滞回环面积,如图 10 所示。

由图 9 可知:滞回曲线随竖向压力变化,竖向压

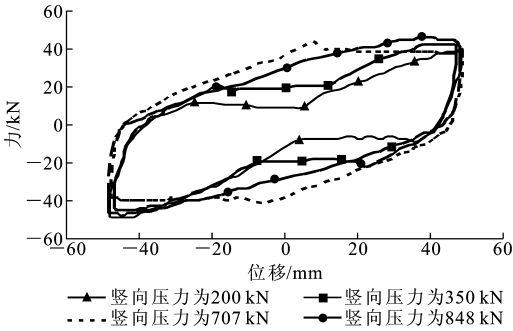


图 9 压应力相关性试验中的力-位移滞回曲线

Fig. 9 Force-displacement Hysteretic Curves During Compressive Stress Correlation Experiments

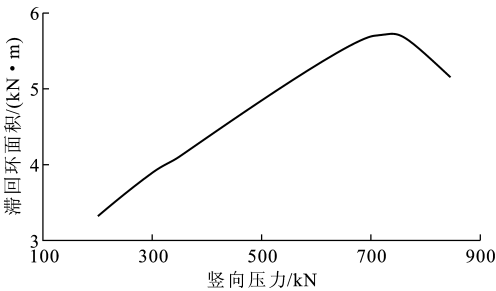


图 10 不同竖向压力作用下的滞回环面积

Fig. 10 Hysteresis Loop Area of Different Vertical Pressures

力在 200~350 kN 时,有限元结果与试验结果吻合良好,但是起滑点相差较大;当竖向压力大于 707 kN 时,有限元结果与试验结果差别较大,这是由于此时支座上部摩擦力过大,使得滑移装置无法滑移,滞回曲线只能表征下部铅芯橡胶隔震垫的剪切性能。

由图 10 可知,滑移-减隔震支座存在最佳竖向压力点。随着压力的增大,支座的耗能能力增强;当支座竖向压力增大至滑移装置不可发挥作用时,其耗能能力随之下降。

(3)反复加载次数相关性

按表 4 所示的工况对滑移-减隔震支座进行反复加载次数相关性试验,所得力-位移滞回曲线如图 11 所示。

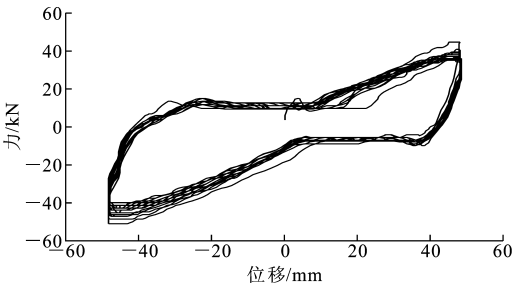


图 11 反复加载次数相关性试验中的力-位移滞回曲线

Fig. 11 Force-displacement Hysteretic Curves of Correlation Experiments Under Repeated Loading Times

由图 11 可知,在反复循环加载下,滑移-减隔震支座的滞回曲线形状变化较小,其剪切性能稳定可靠。提取试验第 3,6,9,12,15,18,21,24,27,30 圈的滞回曲线,计算其滞回环面积和滑动摩擦力,结果见表 6。

由表 6 可知,随着反复加载次数的增加,滑移-减隔震支座滞回环面积变化较小,耗能能力较稳定,在多次循环加载下,该支座的滑移-隔震功能稳定可靠。

表 6 反复加载次数对滑移-减隔震支座剪切性能的影响

Tab. 6 Effects of Repeated Loading Times on Shear Behavior of Sliding-isolation Bearing

反复加载次数	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	平均值
滞回环面积/(kN·m)	3.180	3.150	3.079	3.100	3.163	3.115	3.038	3.061	3.103	3.115	3.110
滑动摩擦力/kN	8.993	8.991	8.993	8.993	8.992	8.993	8.993	8.993	8.993	9.650	9.058

3.3 有限元分析与试验结果比较

为了验证上述有限元分析所得滑移-减隔震支座剪切性能曲线的合理性,准确地把握支座的剪切变形能力,根据表 7 所示的工况将有限元分析所得的剪切变形曲线与试验所得的剪切变形曲线进行对比,结果见图 12。

表 7 剪切性能理论值与试验值的对比工况

Tab. 7 Comparison Conditions of Shear Behavior Between Theoretical Results and Experiment Results

工况编号	剪切位移/mm	加载频率/Hz	竖向压力/kN	滑移量/mm
1	50	0.1	350	30
2	100	0.1	350	30
3	50	0.1	350	20
4	100	0.1	200	30

由图 12 可知:有限元分析结果和试验结果总体上吻合良好,滑移段和隔震段均表现出良好的一致性,表明有限元分析得到的新型多功能滑移-减隔震支座剪切性能曲线可有效描述其力学行为,但是滑移-隔震转折点存在一定偏差,且铅芯橡胶隔震垫屈服后刚度的试验值要大于有限元结果;当竖向压应力较小时,有限元分析结果和试验结果所得的滑移段吻合较差,但是屈服后刚度仍吻合较好。

4 结 语

(1)滑移-减隔震支座的竖向压缩刚度较大,与已有的铅芯橡胶支座比较接近,能够满足实际使用要求。

(2)滑移-减隔震支座均具有较好的滑移隔震能力,且其力-位移滞回曲线的面积与剪切位移近似成正比,在先滑移后隔震的“多功能”实现的同时,支座耗能能力逐步增强。

(3)滑移-减隔震支座存在最佳竖向压力点。随着压力的增大,支座的耗能能力增强,但是当支座的竖向压力增大至滑移装置不可发挥作用时,其耗能能力随之下降。

(4)在反复循环加载下,滑移-减隔震支座的滑移隔震功能仍较为稳定、可靠。

(5)总体而言,滑移-减隔震支座的有限元分析

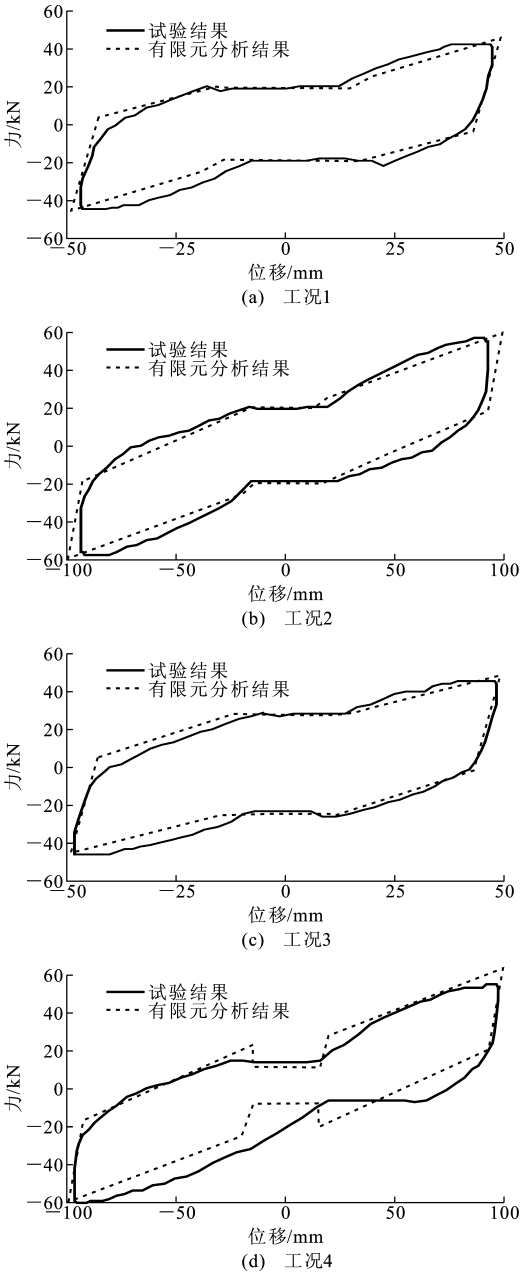


图 12 剪切性能曲线有限元分析与试验结果的对比

Fig. 12 Comparisons of Shear Behavior Curves Between Finite Element Analysis and Experiment Results

得到的剪切性能曲线可以有效描述其力学行为,并为后续桥梁减隔震设计及动力时程分析提供依据。

参考文献:

References:

[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 Li-chu, WANG Zhi-qiang. Seismic Mitigation and Isolation Design of Bridges[M]. Beijing: China Communications Press,2001.
- [2] PRIESTLEY M J N, SEIBLE F, CALVI G M. Seismic Design and Retrofit of Bridges[M]. New York: John Wiley & Sons,1996.
- [3] EN 1998-1-1:1994, Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance of Structures, Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings[S].
- [4] CONSTANTINOU M C, MOKHA A S, REINHORN A M. Study of Sliding Bearing and Helical-steel-spring Isolation System[J]. Journal of Structural Engineering,1991,117(4):1257-1275.
- [5] 朱玉华,吕西林.组合基础隔震系统地震反应分析[J].土木工程学报,2004,37(4):76-81.
- ZHU Yu-hua, LU Xi-lin. Analysis of the Seismic Response of the Combined Isolating System[J]. China Civil Engineering Journal,2004,37(4):76-81.
- [6] 魏陆顺.组合隔震与三维隔震(振)理论及试验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- WEI Lu-shun. Theoretic and Experimental Study of Combined Base Isolation and Three-dimensional Seismic and Vibration Isolation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2009.
- [7] 王建强,丁永刚,李大望.组合基础隔震结构双向地震反应分析[J].地震工程与工程振动,2007,27(3):126-131.
- WANG Jian-qiang, DING Yong-gang, LI Da-wang. Analysis of Seismic Responses for Base-isolated Structures with Combined Isolation System Under Bilateral Ground Excitation[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2007,27(3):126-131.
- [8] 赵世峰,熊进刚,程文灏,等.并联基础隔震框架在竖向压应力变化时的隔震层性能分析[J].振动工程学报,2008,21(4):417-421.
- ZHAO Shi-feng, XIONG Jin-gang, CHENG Wen-rang, et al. Analysis of Base-isolated Layer Combined by Rubber and Sliding Isolated Bearings Under Vertical Stress Variation[J]. Journal of Vibration Engineering,2008,21(4):417-421.
- [9] 徐义,卢文胜.并联组合基础隔震体系的简化计算方法及试验分析[J].结构工程师,2011,27(增1):294-299.
- XU Yi, LU Wen-sheng. Seismic Testing and a Simplified Calculating Method for Parallel-composite Base Isolation System[J]. Structural Engineers,2011,27(S1):294-299.
- [10] 张立涛.橡胶隔震支座与滑移隔震支座并联的基础隔震体系研究[D].南京:东南大学,2005.
- ZHANG Li-tao. Research on Parallel Base Isolation Seismic System with Rubber and Sliding Supports[D]. Nanjing: Southeast University,2005.
- [11] BONDONET G, FILIATRAULT A. Frictional Response of PTFE Sliding Bearings at High Frequencies[J]. Journal of Bridge Engineering,1997,2(4):139-148.
- [12] 荣强,盛严,程文灏.滑移隔震支座的试验研究及力学模型[J].工程力学,2010,27(12):40-45.
- RONG Qiang, SHENG Yan, CHENG Wen-rang. Experimental Investigation and Mechanical Model of Sliding Isolation Bearings[J]. Engineering Mechanics,2010,27(12):40-45.
- [13] 张富有.基础隔震的可靠度及串、并联隔震的研究[D].南京:东南大学,2003.
- ZHANG Fu-you. Research on Reliability of Base Isolation and Performance of Parallel and Series Isolation Structures[D]. Nanjing: Southeast University,2003.
- [14] GB 20688.4—2007,橡胶支座——第4部分:普通橡胶支座[S].
- GB 20688.4—2007, Rubber Bearings—Part 4: Normal Rubber Bearings[S].
- [15] GB/T 20688.1—2007,橡胶支座——第1部分:隔震橡胶支座试验方法[S].
- GB/T 20688.1—2007, Rubber Bearings—Part 1: Seismic Protection Isolators Test Methods[S].
- [16] GB 20688.2—2006,橡胶支座——第2部分:桥梁隔震橡胶支座[S].
- GB 20688.2—2006, Rubber Bearings—Part 2: Elastic Seismic-protection Isolators for Bridges[S].