

# 新型三维隔震装置力学性能试验研究

贾俊峰<sup>1</sup>, 欧进萍<sup>2,3</sup>, 刘明<sup>4</sup>, 张喆<sup>3</sup>

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090;  
3. 大连理工大学, 辽宁 大连 116024; 4. 鞍钢股份有限公司, 辽宁 鞍山 114009)

**摘要:**基于铅芯橡胶隔震垫、组合碟形弹簧和钢板阻尼器的各自力学性能特点,设计开发出一种新型的三维隔震装置,首先简要介绍了该三维隔震装置的组成构造和力学性能设计方法;通过一足尺三维隔震装置分别进行了水平向和竖向力学性能试验。试验结果表明,该三维隔震装置具有构造合理、传力机制明确等优点,在水平向和竖向都能够具有适宜的隔震刚度和阻尼耗能性能,并且在较大水平剪切变形时仍具有良好的整体稳定性。

**关键词:**竖向隔震; 三维隔震; 菱形钢板阻尼器; 组合碟形弹簧; 铅芯橡胶隔震支座; 抗震

**中图分类号:** TU352.1    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2012)01-0029-06

## Mechanical Performance Tests of a Novel Three-dimensional Isolation Bearing

JIA Jun-feng<sup>1</sup>, OU Jin-ping<sup>2,3</sup>, LIU Ming<sup>4</sup>, ZHANG Zhe<sup>3</sup>

(1. The College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China;  
2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, P. R. China; 3. Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, P. R. China; 4. Angang Steel Company Limited, Anshan 114009, Liaoning, P. R. China)

**Abstract:** A novel three-dimensional isolation bearing (3DIB) was proposed, based on respective mechanical characteristic of lead rubber bearing, combined disc springs and rhombic steel plated damper. Firstly, the configuration department and mechanical design methodology was introduced; the horizontal and vertical stiffness and energy dissipation performance test was performed on a full scale three-dimensional isolation bearing, respectively. The results indicated that the proposed three-dimensional isolation bearing has reasonable configuration and explicit mechanical transmission mechanism; appropriate stiffness and energy dissipation performance can be achieved by reasonable design, keeping favorable holistic stability at plentiful horizontal shear displacement.

**Key words:** vertical isolation; three-dimensional isolation; rhombic steel plate damper; combined disc spring; lead rubber bearing; earthquake resistance

隔震耗能减震技术作为研究和应用发展最为成熟的结构振动控制技术,近年来得到了众多研究者和工程师的广泛关注,已经进行了大量的理论和试验研究<sup>[1]</sup>,而且已在新结构设计和既有结构加固中得到了广泛应用<sup>[2-4]</sup>。目前已有一些隔震耗能建筑经受住了强烈地震的考验,在大地震中保证了结构的安全性,为隔震耗能技术的有效性和实用性提

供了有力证据<sup>[5]</sup>。但是,目前绝大部分隔震耗能技术仅仅指的是水平隔震耗能,而不能实现竖向隔震。这主要有2个方面的原因,一是传统观点认为与水平地震作用相比,竖向地震作用较小而且结构具有较大的竖向承载冗余度,一般不会对结构造成严重影响;另一方面隔震装置一般安装在建筑结构底部或桥梁上部结构与桥墩墩顶之间,这些隔震装置必

收稿日期: 2011-05-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB013600);“十一五”科技支撑计划项目(2006BAJ03B06)

作者简介: 贾俊峰(1982-),男,博士,主要从事近断层地震动特征、桥梁结构抗震和减震研究, (E-mail)jjiajunfeng\_HIT@126.com。

须具有很大的竖向承载能力以承受上部结构自重,而隔震技术又要求具有较小的隔震刚度。这样似乎就形成了较大竖向承载能力需求和较小隔震刚度需求的矛盾。这些原因造成了竖向及三维隔震技术的研究和发展严重滞后于水平隔震技术。然而,最近 20 年来获得的大量地震记录以及很多地震现场调查结果表明,竖向地震作用特别是在接近震中以及发震断层的近断层区域尤为明显,甚至在很多台站记录到竖向地震动远大于水平地震动<sup>[6-8]</sup>。竖向地震动逐渐引起相关专家学者的重视和研究,而且已有某些抗震设计规程对竖向地震作用进行了修正和补充。2001 年,日本经济产业省资助了一项用于下一代快速反应堆的三维隔震系统的研究项目,该项目开发了一批三维隔震装置并进行了相关性能试验<sup>[9]</sup>,但其应用目标为快速反应堆,并且其构造比较复杂,不能直接应用到桥梁、建筑等工程结构中。近年来中国也有学者进行了竖向以及三维隔震装置的开发和性能试验研究<sup>[10-13]</sup>,但大部分装置能够提供的竖向耗能能力比较有限。总体来看,对三维隔震装置的研究还刚刚开始,其装置构造设计以及力学性能仍是亟待解决的关键问题,仍需要广泛深入的研究。

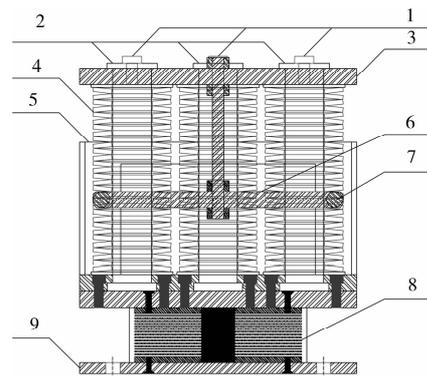
本文基于铅芯橡胶隔震垫、组合碟形弹簧和菱形钢板阻尼器等各自的构造以及力学特征,开发出一种新型三维隔震装置。首先介绍了该装置的组成构造特点和力学性能设计方法,然后通过一足尺三维装置及其各部件分别进行水平和竖向力学性能试验,验证其三维隔震刚度和阻尼等力学性能。

## 1 三维隔震装置构造和力学性能设计

### 1.1 三维隔震装置构造设计

课题组开发出一种新型三维隔震装置(发明专利申请号:201010300849),该装置主要由 3 部分构成,分别是装置下部用于水平隔震的铅芯橡胶隔震垫,装置上部用于竖向隔震的组合碟形弹簧和菱形钢板耗能阻尼器(Rombic Additional Damping And Stiffness, RADAS),另外还有一些其他辅助构造部件,该新型三维隔震装置构造示意图如图 1 所示。碟形弹簧结构尺寸和工作空间较小,但具有较大的承载能力,在满足承载力需求的前提下碟形弹簧可以通过不同的组合形式得到适宜的竖向隔震刚度<sup>[14]</sup>,几组组合碟形弹簧放置于中间连接板的两侧或者周边,组合碟形弹簧中间设置导向轴,导向轴的顶端设置抗拉螺栓和抗拉挡板,防止受到较大拉力时上联结板脱离组合碟形弹簧。菱形钢板阻尼器中间通过螺杆连接于装置上联结板,两端支承于固定

在中间连接板上的支承架上。中间连接板以上的组合碟形弹簧和菱形钢板阻尼器构成竖向隔震系统。用于水平隔震的下部铅芯橡胶支座由多层钢板和橡胶经过高温硫化而成,经过合理设计可以提供适宜的水平隔震刚度和阻尼性能。铅芯橡胶支座和上部的竖向隔震系统通过中间的连接板构成整体三维隔震装置。另外,在设计中应该按照设计最大荷载对组合碟形弹簧中心导向轴、螺栓和螺杆以及菱形钢板支承架等各部件进行强度和刚度计算,保证三维隔震装置在实际工作时的安全性和可靠性。



1. 抗拉螺栓; 2. 抗拉挡板; 3. 上联结板; 4. 组合碟形弹簧;  
5. 阻尼器支架; 6. 菱形钢板阻尼器; 7. 阻尼器端部支承圆柱;  
8. 铅芯橡胶隔震垫; 9. 下联结板

图 1 新型三维隔震装置构造示意图

强烈地震作用下,上部结构作用在装置上连接板的水平力通过组合碟形弹簧中心的导向轴传递给装置中间连接板,经过下部的铅芯橡胶垫水平隔震后传递给建筑结构基础或者桥梁结构桥墩;由于铅芯橡胶隔震垫的水平隔震作用,装置上部结构基本处于刚性平动状态。竖向地震作用下上部结构的竖向力直接通过上联结板压在几组组合碟形弹簧和菱形钢板阻尼器上,然后经过中间连接板作用在下部铅芯橡胶垫上,最后传递给下部基础结构。铅芯橡胶垫有很大的竖向刚度,竖向变形很小,装置的竖向变形主要是组合碟形弹簧的压缩变形,同时又是菱形钢板耗能阻尼器的弯曲变形,组合碟形弹簧碟片间和边缘处的摩擦耗散少部分能量,大部分竖向振动能量通过菱形钢板阻尼器弯曲耗能,并且钢板阻尼器能够提供部分初始刚度。

根据该三维隔震装置构造特点,该装置可以应用于桥梁结构、建筑结构以及核反应堆设施的三维隔震,将装置上联结板与上部结构连接,同时在导向柱位置留出大小适宜的孔洞以满足碟簧竖向压缩变形需要,装置下联结板与基础或桥墩顶端通过螺栓连接。与国内外已有的其他三维隔震装置相比,此新型三维隔震装置不仅在水平方向能够提供比较稳定的隔震刚度和良好的耗能能力,而且可以在竖向提供适

宜的刚度和良好的钢板滞回耗能能力,其力学性能通过相应的竖向压缩和水平压剪试验进行测试。

### 1.2 三维隔震装置力学性能设计

新型三维隔震装置的力学性能包括水平剪切力学性能和竖向压缩力学性能。整个装置的水平隔震性能由铅芯橡胶隔震垫的水平力学性能所决定,上部的竖向隔震系统对装置水平隔震性能基本没有影响。装置下部铅芯橡胶垫具有非常大的竖向刚度,在确定装置竖向力学性能时可不考虑其对竖向隔震性能的影响,装置竖向力学性能主要由上部的组合碟形弹簧和菱形钢板阻尼器所决定。

三维隔震装置水平隔震力学性能即下部铅芯橡胶垫的隔震性能,其水平剪切刚度可按式(1)计算:

$$K_h = \frac{GA}{nt_r} \quad (1)$$

式中:  $G$  为橡胶剪切模量;  $A$  为铅芯橡胶隔震垫横截面积;  $n$  为铅芯橡胶隔震垫橡胶层数;  $t_r$  为单层橡胶厚度。铅芯橡胶垫水平力学性能可按双线性模型,屈服前初始弹性刚度可取屈服后刚度的 6~15 倍。

三维隔震装置的竖向力学性能由组合碟形弹簧和菱形钢板阻尼器的力学性能决定。单个碟形弹簧刚度可由式(2)计算得到,组合碟形弹簧的承载力和刚度可根据国家相关规范规定进行计算确定<sup>[15]</sup>。

$$K = \frac{4E}{1-\mu^2} \cdot \frac{t^3}{K_1 D^2} \cdot \left\{ \left[ \left( \frac{h_0}{t} \right)^2 - 3 \cdot \frac{h_0}{t} \cdot \frac{f}{t} + \frac{3}{2} \left( \frac{f}{t} \right)^2 \right] + 1 \right\} \quad (2)$$

其中:

$$K_1 = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{[(C-1)/C]^2}{(C+1)/(C-1) - 2/\ln C}$$

式中:  $K$  为碟形弹簧刚度;  $E$ 、 $\mu$  分别为弹簧钢弹性模量和泊松比;  $h_0$ 、 $t$  为碟形弹簧压平时变形量和碟形弹簧厚度;  $f$  为碟形弹簧行程;  $C = D/d$  为碟形弹簧直径比;  $D$ 、 $d$  分别为碟形弹簧外径和内径。当碟形弹簧  $h_0/t$  比值在 0~0.5 之间时,碟形弹簧的特性曲线接近于直线变化,因此可接近似线性刚度来计算<sup>[14]</sup>。

菱形钢板阻尼器的力学性能可看作是 2 个三角形钢板阻尼器的边和边对接而成,因此可以看作是 2 个并联三角形钢板阻尼器的力学性能。单个三角形钢板阻尼器力学特性可按式(3)~(6)计算<sup>[16]</sup>。

$$K_d = \frac{Ebt^3}{6h^3} \quad (3)$$

$$\Delta_y = \frac{\sigma_y h^2}{Et} \quad (4)$$

$$P_y = \frac{bt^2}{6h} \sigma_y = K_d \cdot \Delta_y \quad (5)$$

$$P_p = \frac{bt^2}{4h} \sigma_y \quad (6)$$

式中:  $K_d$  为弹性刚度;  $P_y$  为屈服强度;  $P_p$  为塑性强度;  $\Delta_y$  为屈服位移;  $t$  为钢板厚度;  $h$  为钢板高度;  $b$  为钢板宽度;  $E$  为钢材弹性模量;  $\sigma_y$  为钢材屈服应力。三角形钢板阻尼器力学特性曲线可按双线性力-位移关系设计。

## 2 三维隔震装置力学性能试验

### 2.1 试验设置

试验在哈尔滨工业大学力学与结构试验中心完成。三维隔震装置竖向压缩试验在 250 t MTS 试验机上完成;水平压剪试验采用试验中心的四连杆压剪试验系统,水平剪力采用 63 t 德国 SCHENCK 电液伺服试验机加载,竖向压力采用液压千斤顶施加。试验采用的足尺三维隔震装置构造如图 1 所示,其中下部的铅芯橡胶隔震支座采用 LRB300 型支座,其具体构造参数如表 1 所示。采用的碟形弹簧规格为国家标准《碟形弹簧》(GB/T 1972—2005)中附录 A 中系列 A 的 D140 型碟形弹簧。碟形弹簧中心导向轴直径 70 mm,其高度为组合碟形弹簧和上联结板厚度之和。菱形钢板阻尼器加工尺寸及构造图见下文介绍。

表 1 LRB300 型铅芯橡胶支座构造参数

参数	取值	参数	取值
单层橡胶厚度/mm	3.125	钢板厚/mm	2
橡胶层数	16	钢板层数	15
橡胶总厚度/mm	50	钢板总厚度/mm	30
端钢板厚/mm	10	支座总高度/mm	140
橡胶剪切模量/MPa	0.55	铅芯直径/mm	60

### 2.2 竖向力学性能试验

三维隔震装置竖向隔震系统采用组合碟形弹簧和菱形钢板阻尼器。试验三维隔震装置采用 6 组并列的组合碟形弹簧,每组采用 30 个碟形弹簧对合组合。单个碟形弹簧外径 140 mm,内径 72 mm,厚度 8 mm,压平时变形 3.2 mm,近似线性刚度 35.54 kN/mm。对合组合碟形弹簧示意图如图 2 所示,没有添加钢板阻尼器时三维隔震装置竖向理论近似力-位移曲线与试验测试力-位移曲线如图 3 所示。从图 3 中可以看出,各级加载和卸载曲线有较好的重复性;在压缩位移较小时,由于组合碟形弹簧之间存在间隙等因素,竖向力-位移曲线表现为明显的非线性,但随着行程加大试验加载和卸载曲线基本都为线性。由于碟片之间以及碟片边缘处存在摩擦,加载时使碟形弹簧负荷增大,卸载时使碟形弹簧负荷减小,加载和卸载曲线并不重合,具有一定的耗能作用,但从试验结果中可以看出,碟形弹簧之间的摩擦能够提供的阻尼耗能作用比较小,目前中国有

学者仅仅采用组合菱形钢板作为竖向隔震部件,而没有其他辅助竖向耗能部件,从试验得到的组合碟形钢板压缩滞回曲线来看,特别是对合组合碟形弹簧能提供的滞回耗能阻尼比较小,不能够提供足够的竖向耗能能力,所以如果作为竖向隔震部件,还需要其他辅助耗能阻尼器或装置。从试验曲线可以计算得到试验加载和卸载曲线近似线性刚度分别为  $8.32 \text{ kN/mm}$  和  $7.91 \text{ kN/mm}$ ,与理论线性刚度  $7.57 \text{ kN/mm}$  分别相差  $9.9\%$  和  $4.5\%$ ,这主要是由于碟片间以及边缘处存在摩擦引起的,由此可见,根据给出的计算碟形弹簧刚度的计算方法能够比较好地预测组合碟形弹簧的刚度,进而可以设计适合于目标结构的竖向隔震系统。



图 2 组合碟形弹簧示意图

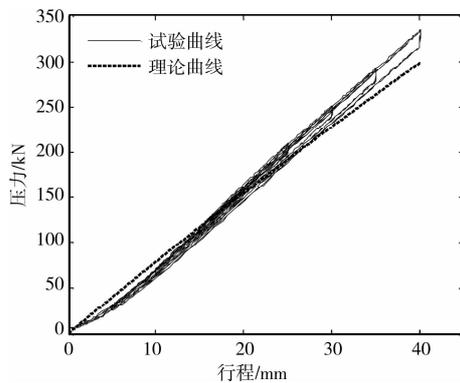
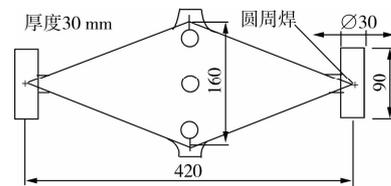


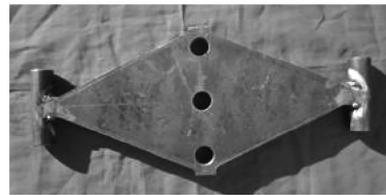
图 3 组合碟形弹簧力-位移曲线

用于竖向辅助耗能的菱形钢板阻尼器采用中国最新研发生产的 AQ225GJC 级别钢材,经材料试验拉伸力学性能测试,该新型钢材具有良好的塑性行为和稳定的拉伸力学性能。目前,已有理论和试验研究表明,三角形以及 X 形钢板耗能阻尼器具有良好的耗能特性和稳定的工作性能,受到众多研究人员的重视,并且在既有结构加固改造及新型结构设计中得到了较多应用<sup>[17]</sup>。菱形钢板耗能阻尼器是 2004 年台湾学者施加祥教授提出的另一种形式钢板弯曲耗能阻尼器<sup>[18]</sup>,其两端采用铰接支承,减小了轴力对钢板耗能性能的影响;同时利用对称性在固定端产生对称效果,钢板耗能部分不需要焊接联结,构造更为合理。目前国内还基本上没有对此类型钢板耗能阻尼器进行系统的理论和试验研究。本文巧妙利用了其形状及构造上的特点,将其作为三

维隔震装置的竖向隔震耗能部件,为竖向隔震提供初始刚度及阻尼耗能。首先加工制作了一足尺菱形钢板阻尼器如图 4 所示,并对其进行了滞回性能试验,该菱形钢板阻尼器厚度为  $30 \text{ mm}$ ,宽度  $160 \text{ mm}$ ,长度  $420 \text{ mm}$ 。经过材料性能力学试验测得菱形钢板所用 AQ225GJC 钢材弹性模量为  $222 \text{ GPa}$ ,屈服应力为  $242 \text{ MPa}$ 。在  $250 \text{ t}$  MTS 拉压试验机上测试该足尺菱形钢板阻尼器弯曲滞回力学性能试验,采用位移控制模式正弦加载,加载频率为  $0.02 \text{ Hz}$ ,第一、二级加载幅值  $2 \text{ mm}$  和  $5 \text{ mm}$ ,以后每级加载幅值递增  $5 \text{ mm}$  直到  $50 \text{ mm}$ ,每级加载进行 3 个循环,该菱形钢板阻尼器的阻尼力-位移曲线如图 5 所示。从图中可以看出,菱形钢板阻尼器与以往的三角形钢板和 X 形钢板阻尼器类似,每级 3 个加载滞回曲线重复性较好,具有非常稳定的弹塑性滞回耗能能力;并且滞回曲线比较饱满,耗能能力强,具有比较显著的双线性滞回耗能能力;能够在较小的位移时就发生弹塑性屈服耗能,是辅助组合碟形弹簧进行竖向隔震减震的有效措施。通过菱形钢板阻尼力-位移曲线可以计算得到初始弹性刚度为  $29.75 \text{ kN/mm}$ ,与理论弹性刚度为  $31.26 \text{ kN/mm}$  相差  $4.8\%$ ;试验测得屈服力为  $53.1 \text{ kN}$ ,与理论屈服力为  $52.52 \text{ kN}$  相差  $1.1\%$ ,由此可见,采用该种钢材进行菱形钢板钢板阻尼器设计时,可以近似按照双线性模型设计阻尼器构造尺寸。



(a) 菱形钢板构造尺寸示意图



(b) 菱形钢板阻尼器加工成品

图 4 菱形钢板阻尼器构件尺寸和加工成品

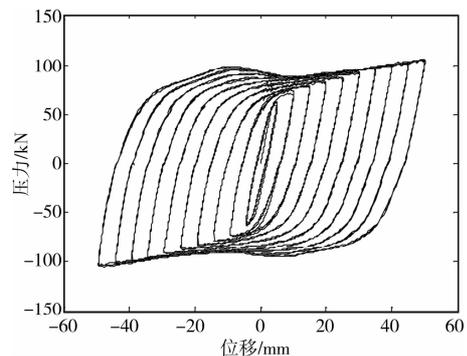


图 5 菱形钢板阻尼器滞回曲线

为了验证三维隔震装置整体竖向力学性能,采用 250 t MTS 拉压试验机进行了安装菱形钢板时的整个三维隔震装置的竖向力学性能试验,试验设备布置如图 6 所示,并且与未考虑菱形钢板时的力-位移曲线进行比较。设计平衡位置为 50 mm,此时设计承载力为 500 kN,按±5 mm 逐级加卸载,每个级别 3 个循环,压缩位移在 30~70 mm 之间变化。设置和不设置菱形钢板阻尼器的竖向压力-位移关系曲线如图 7 所示,从图中可以看出以下几个特点:



图 6 三维隔震装置竖向压缩试验

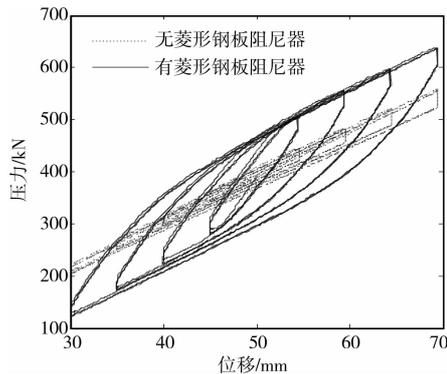


图 7 三维隔震装置竖向压力-位移曲线

1) 从平衡位置开始,在较小的位移时,菱形钢板阻尼器没有屈服,此时菱形钢板阻尼器具有较大的初始刚度,对组合碟形弹簧起到附加刚度的作用,整个竖向隔震系统有较大的初始刚度,可以防止在偶然荷载作用下三维隔震支座发生过大的竖向位移。

2) 随着竖向压力的增大,组合碟形弹簧仍保持线弹性,但菱形钢板阻尼器进入塑性屈服状态,同时阻尼器的屈服后刚度比较小,造成整个三维隔震装置的竖向刚度较小,与组合碟形弹簧的竖向压缩刚度比较接近。反向卸载时菱形钢板屈服后三维隔震装置的卸载刚度与组合碟形弹簧的卸载刚度基本一致。

3) 从有菱形钢板阻尼器和无阻尼器的竖向拉压滞回曲线中可以明显看出,无阻尼器时组合碟形弹簧碟片间以及边缘处摩擦提供的阻尼耗能相对较小,但增加辅助菱形钢板阻尼器后显著提高了组合碟形弹簧竖向隔震系统的阻尼耗能能力,滞回耗能

曲线相对饱满,滞回工作性能比较稳定,能够达到比较理想的竖向隔震减震效果,充分说明了采用菱形钢板阻尼器和组合碟形弹簧作为竖向隔震耗能系统的可行性和有效性。

### 2.3 水平剪切力学性能试验

为验证提出的三维隔震装置的水平剪切性能以及工作稳定性,采用四连杆压剪试验系统对开发制作的三维隔震装置进行了水平剪切力学性能试验,图 8 为四连杆压剪加载试验布置图。试验过程中同时测量装置上联结板和中间连接板处的水平相对位移,以考察上部组合碟形弹簧内部导向轴的水平变形情况。试验加载轴向恒定压力为 500 kN,初始循环最大位移为±5 mm,以后按 10 mm 递增逐级加载直到最大位移为 60 mm,即橡胶剪切应变为 120%,每级加载 3 个循环。三维隔震装置水平压剪试验测试结果表明,装置上联结板和中间连接板相对位移很小,即上部组合碟形弹簧内部的导向轴具有足够的水平抗侧刚度,可以保证较大水平剪力时上部组合碟形弹簧的工作稳定性,由此可以判断,该三维隔震装置的水平剪切性能即其底部铅芯橡胶隔震支座的剪切性能,符合了三维隔震装置设计预期。该三维隔震装置水平剪力-位移曲线如图 9 所示,从图中可以看出,三维隔震装置在剪切变形较小时,具有较大的初始刚度;随着剪切变形的增加,三维隔震装置进入塑性屈服状态,剪切刚度明显下降,进而延长隔震周期以避开上部结构的共振周期;另外,三维隔震支座水平剪切弹塑性滞回曲线饱满,耗能能力强,每级加载性能比较稳定,能够起到很好的水平隔震减震效果,符合该三维隔震装置水平隔震效果预期。根据装置的水平压剪滞回曲线,可以计算得到装置底部 GZY300 型铅芯橡胶垫的屈服前刚度为 13.33 kN/mm,屈服位移 3.1 mm,屈服力为 41.4 kN,屈服后刚度为 847 kN/m,等效刚度为 1 310 kN/m,屈服前后刚度比为 15.7;而根据铅芯橡胶隔震支座双线性模型计算理论屈服后刚度和屈服力分别为 777.2 kN/m 和 37.2 kN,与试验值误差分别为 8.2% 和 10.1%,由于橡胶材料和铅材料的基本材料性能具有一定的离散性能,造成采用不同材料参数预测的力学性能与试验值会有一定误差。



图 8 三维隔震装置水平压剪试验

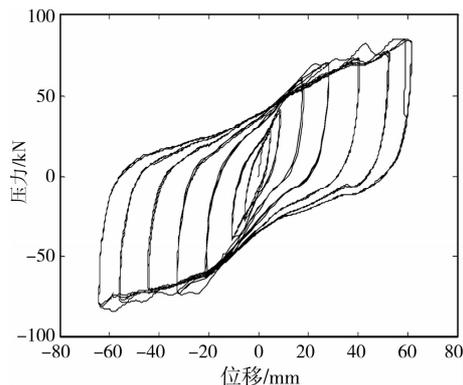


图9 三维隔震装置水平剪力-位移曲线

### 3 结论

目前研究和应用比较成熟的隔震技术仅能实现水平隔震,但是强烈地震中的近场地震区域表现出显著的三维地震作用,于是国内外学者开始关注三维隔震技术的研究。但目前对三维隔震装置以及技术理论的研究还远远不能满足工程应用的需要。正是基于此背景,本文基于铅芯橡胶隔震垫、组合碟形弹簧和菱形钢板各自的构造和力学性能特征,开发了一种构造合理、传力路径明确的新型三维隔震装置,通过一足尺三维隔震装置的水平向和竖向力学性能试验研究了该装置的水平向和竖向力学性能,试验结果表明所设计的三维隔震装置具有适宜的三维隔震刚度和良好的阻尼耗能特性,并且该装置在较大的水平剪切位移时仍具有良好的工作稳定性,试验结果与理论预测结果比较接近。

#### 参考文献:

- [1] 李忠献,岳福青,周莉.城市隔震高架桥梁地震反应的半主动控制[J]. 土木工程学报, 2007, 40(1):42-48.  
LI ZHONG-XIAN, YUE FU-QING, ZHOU LI. Semi-active control on seismic responses of vibration-insulated urban elevated bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(1):42-48.
- [2] KAWASHIMA K. Remarkable design examples of recent application of seismic isolation to new and reconstructed viaducts in Japan [C]//7<sup>th</sup> International Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibrations of Structures, Assisi, Italy, October 2-5, 2001.
- [3] SARRAZIN MAURICIO, MORONI MARIA O, SOTO PEDRO, et al, Applications on seismic isolation and energy dissipation bridges in Chile and Venezuela [C]//7<sup>th</sup> International Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibrations of Structures, Assisi, Italy, October 2-5, 2001.
- [4] CHANG K C, HO M C, HWANG J S, et al.

- Development and application of seismic isolation and energy dissipation systems for buildings in Taiwan[J]. Journal of Architecture, 2007, 62, Special Issue on Technology, 133-148.
- [5] NAGARAJAIAH SATISH, SUN XIAO-HONG. Response of base-isolated USC hospital building in Northridge Earthquake [J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(10):1177-1186.
- [6] PAPAIOGLOU A J, ELNASHAI A S. Analytical and field evidence of the damaging effect of vertical earthquake ground motion[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1996, 25:1109-1137.
- [7] WANG ZI-FA. A preliminary report on the Great Wenchuan Earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 7(2):225-234.
- [8] 贾俊峰, 欧进萍. 近断层竖向与水平向加速度反应谱比值特征[J]. 地震学报, 2010, 32(1):41-50.  
JIA JUN-FENG, OU JIN-PING. Vertical-to-horizontal acceleration response spectrum ratio of near-fault ground motion[J]. Acta Seismologica Sinica, 2010, 32(1):41-50.
- [9] MORISHITA MASAKI, INOUE KAZUHIKO, FUJITA TAKAFUMI. Development of three-dimensional seismic isolation systems for fast reactor application[J]. Journal of Japan Association for earthquake Engineering, 2004, 4(3) (Special Issue):305-310.
- [10] 熊世树, 陈金凤, 梁波, 等. 三维基础隔震结构多维地震反应的非线性分析[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2004, 32(12):81-84.  
XIONG SHI-SHU, CHEN JIN-FENG, LIANG BO, et al. Nonlinear analysis of multi-dimensional seismic response in 3D base isolated structure[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2004, 32(12):81-84.
- [11] 孟庆利, 林德全, 张敏政. 三维隔震系统振动台实验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(3):116-120.  
MENG QING-LI, LIN DE-QUAN, ZHANG MIN-ZHENG. Study on three-dimensional isolated system in shaking table test[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(3):116-120.
- [12] 赵亚敏, 苏经宇, 周锡元, 等. 碟形弹簧竖向隔震结构振动台实验及数值模拟研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(6):99-106.  
ZHAO YA-MIN, SU JING-YU, ZHOU XI-YUAN et al. Shaking table test and numerical analysis of vertical-isolated building model with combined disk spring bearing [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(6):99-106.
- [13] 徐赵东, 时本强, 巫可益, 等. 粘弹性多维隔震结构竖向振动台试验与研究[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39(10):1709-1715.

- stayed bridges[C]// Proceedings of the 10th International Conference of Chinese Transportation Professionals, ASCE, 2010.
- [6] 李宏江,李万恒,张劲泉,等.天津永和大桥的维修与加固[J].世界桥梁,2009,6(1):53-56.  
LI HONG-JIANG, LI WAN-HENG, ZHANG JIN-QUAN, et al. Rehabilitation and strengthening of Yonghe Bridge in Tianjin[J]. World Bridges, 2009, 37(1):53-56.
- [7] 张欣禹,郎宏继,孙庆东,等.沈阳市富民主桥合龙设计[J].桥梁建设,2004,34(S1):11-13.  
ZHANG XIN-YU, LANG HONG-JI, SUN QING-DONG, et al. Closure design of main bridge of Fumin Bridge in Shenyang[J]. Bridge Construction, 2004, 34(S1):11-13.
- [8] JTG/T J23—2008 公路桥梁加固施工技术规范[S].北京:人民交通出版社,2008.
- [9] 林国雄,秦顺全,朱华民,等.宁波招宝山大桥加固重建工程设计[J].桥梁建设,2001,31(3):18-21.  
LIN GUO-XIONG, QIN SHUN-QUAN, ZHU HUAMIN, et al. Design for the strengthening and rehabilitation of Zhaobaoshan Bridge in Ningbo [J]. Bridge Construction, 2001, 31(3): 18-21.
- [10] 干伟忠,HANS PASCHMANN.超流态免振混凝土配合比的优化设计研究[J].土木工程学报,2004,37(5):39-43.  
GAN WEI-ZHONG, HANS PASCHMANN. Optimal mix design for superfluidity self-compacting concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(5):39-43.
- [11] 李宏江,王荣霞,王磊.在役预应力混凝土斜拉桥的结  
构状态模拟[J].山东建筑大学学报,2010,25(4):405-409.  
LI HONG-JIANG, WANG RONG-XIA, WANG LEI. Simulation on structural state of PC cable-stayed bridges in service [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2010, 25(4):405-409.
- [12] 王浩,王付全,李爱群,等.大跨度缆索支撑桥梁分阶段有限元模型修正[J].工程力学,2009,26(10):111-116.  
WANG HAO, WANG FU-QUAN, LI AI-QUN, et al. Multi-phase fe model updating on long-span cable-supported bridges [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(10):39-43.
- [13] JTGD 62—2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].北京:人民交通出版社,2004.
- [14] 李宏江,张劲泉,李万恒,等.PC斜拉桥辅助墩拉力摆断裂后的状态模拟[J].深圳大学学报:理工版,2010,27(3):280-285.  
LI HONG-JIANG, ZHANG JIN-QUAN, LI WAN-HENG, et al. Simulation on the state after fracture of tension rocker bearing cables at auxiliary piers in a PC cable-stayed bridge[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2010, 27(3):280-285.
- [15] 李宏江.用于结构状态判别的PC斜拉桥温度效应[J].土木建筑与环境工程,2009,31(5):81-85.  
LI HONG-JIANG. Temperature effect analysis for structural state estimation of PC cable-stayed bridge [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009,31(5):81-85.

(编辑 王秀玲)

(上接第 34 页)

- XU ZHAO-DONG, SHI BEN-QIANG, WU KE-YI, et al. Vertical shaking table tests on the structure with viscoelastic multi-dimensional earthquake isolation and mitigation devices[J]. Sci China Ser E-Tech Sci, 2009, 39(10):1709-1715.
- [14] 张英会,刘辉航,王德成.弹簧手册[M].北京:机械工业出版社,1997.
- [15] 中国国家标准化管理委员会.GB/T 1972—2005 碟形弹簧[S].2005.
- [16] TSAI KEH-CHYUAN, CHEN HUAN-WEI, HONG CHING-PING, et al. Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction[J]. Earthquake Spectra, 1993, 9(3):505-528.
- [17] 李冀龙.结构耗能减振金属阻尼器的阻尼力模型及其应用[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
- [18] SHI MING-HSIANG, SUNG WEN-PEI, GO CHEER-GERM. Investigation of newly developed added damping and stiffness device with low yield strength steel[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2004, 5(3):326-334.

(编辑 胡英奎)