

邹爽, 池永昌容, 五十子幸树, 等. 连接型摩擦阻尼器对基础隔震结构地震响应位移控制的试验研究[J]. 华南地震, 2016, 36(4): 97-103.  
[ZOU Shuang, IKENAGA Masahiro, IKAGO Kohyu, et al. Control of Seismic Response Displacement of Base Isolated Structure Specimen by Friction Damper with Coupling Mechanism, 2016, 36(4): 97-103.]

## 连接型摩擦阻尼器对基础隔震结构地震 响应位移控制的试验研究

邹爽<sup>1</sup>, 池永昌容<sup>2</sup>, 五十子幸树<sup>2</sup>, 福见祐司<sup>2</sup>, 井上范夫<sup>2</sup>  
(1. 广州大学工程抗震研究中心, 广州 510405; 2. 日本东北大学, 日本仙台 980-0845)

**摘要:** 为了避免和减轻由过大的隔震层位移引起的损害, 井上等人提出了一种控制隔震层位移的新型控制装置—连接摩擦阻尼器。介绍了阻尼器的构造和工作原理, 通过对阻尼器进行单体试验和振动台试验, 研究阻尼器的性能、控制效果以及对上部结构振动特性的影响。试验结果表明: 连接型摩擦阻尼器具有完全弹塑性恢复力特性, 对隔震层最大位移控制效果明显, 同时也会略微放大上部使结构加速度。由于连接型摩擦阻尼器连接后隔震层刚度增加, 使得上部结构的高频振动成分增加。但是, 在连接型摩擦阻尼器连接的瞬间, 并未出现加速度急剧增加的问题。

**关键词:** 基础隔震结构; 位移控制; 振动台试验; 摩擦阻尼器; 高频振动

中图分类号: TU352.12 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662 (2016) 04-0097-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2016.04.015

## Control of Seismic Response Displacement of Base Isolated Structure Specimen by Friction Damper with Coupling Mechanism

ZOU Shuang<sup>1</sup>, IKENAGA Masahiro<sup>2</sup>, IKAGO Kohyu<sup>2</sup>,  
FUKUMI Yuji<sup>2</sup>, INOE Norio<sup>2</sup>

(1. Earthquake Engineering Research & Test Center of Guangzhou University, Guangzhou 510405, China;  
2. Tohoku University, Sendai 980-0845, Japan)

**Abstract:** To avoid or mitigate the damage caused by such excessive displacement, a new device for controlling seismic displacement of base isolated structure by the means of a friction damper with coupling mechanism was proposed by Inoue et al. In this paper, the structure and working principle of the damper was introduced. Through the harmonic loading test and shaking table test, the performance of damper, control effect and impact on the vibration characteristics of the upper structure was researched. The results show that the damper with

收稿日期: 2016-08-26

基金项目: 广东省自然科学基金项目 (2016A939310255)

作者简介: 邹爽 (1984-), 女, 助理研究员, 主要从事防震减灾工作。

E-mail: zoushuang\_2015@163.com.

elastic perfectly has plastic restoring force characteristics. After installing the damper, the maximum response displacement of the isolated story is controlled effectively, and the maximum acceleration on the superstructure is slight increased. Due to the increase of the stiffness of the isolation layer after the damper is coupled, the higher order vibration components is increased. But there is no obvious increase in the acceleration of the isolated structure in the moment of the damper connection. viscous dampers as the isolation layer, the shaking table test for a mid-story isolation structure was conducted. For a four-story steel frame model, the locations of isolation layer are set at bottom of the first story, top of the first story, top of the second story or top of the third story in turn. Changing the location of isolation layer, acceleration, story displacement and story shear force coefficient were measured. The results show that mid-story.

**Keywords:** Base isolated structure; Control of seismic response displacement; Shaking table test; Friction damper; Higher mode vibration

## 0 前言

滑移隔震技术具有简单易行, 造价低廉, 受地面运动频率特性的影响较小, 几乎不发生共振现象, 发生滑移位后, 不影响其支座的竖向承载能力等优点。但是, 滑移隔震技术也有较明显的缺点, 即在大震作用下基底产生很大的位移, 容易引起隔震结构与周围维护结构之间发生碰撞, 给结构带来不利影响<sup>[1-3]</sup>。2011年日本东北大地震中, 检测到最大隔震层位移达到0.335m, 超过设计值0.3m的隔震层预留安全距离<sup>[4]</sup>。Nagarajan<sup>[5]</sup>等利用美国1994年Northridge地震中一座滑移隔震结构的地震反应实测数据, 对该结构进行了系统识别, 发现在地震中隔震结构的底板与基坑发生了碰撞, 并增大了上部结构的加速度和剪力。为了克服这个缺点, 国内外学者提出了例如摩擦摆结构, 恢复力摩擦结构以及带限位装置的滑移隔震结构。由于较大的滑移量, 往往将这些隔震结构的摩擦系数设计的较大, 使得这些控制结构虽然能减小基底最大滑移量, 但却放大了中小地震作用时上部结构的地震响应。针对于此, Inoue等人提出了一种带有连接部件, 并可只在大震时发挥作用, 有效控制隔震层位移的新型阻尼器-连接型摩擦阻尼器(以下简称FDC)。FDC是一种当阻尼器的变形超过设定的连接距离时, 开始发挥作用, 抑制隔震层位移的被动减震装置。对于小震或中等强度地震, FDC不发挥控制作用, 仅靠摩擦滑移支撑就足以达到较好的控制效果, 避免了由于安装了阻尼器而放大了上部结构地震响应的弊端。对于大地震, FDC开始发挥作用, 将基底滑移位控制在可接受的范围内。因此, 这种连接型摩擦阻尼器对地震强度较大或较小的

范围均有效。

本文中, 介绍FDC的构造和工作原理, 并通过对阻尼器进行单体试验和振动台试验, 来确认其性能、位移控制效果以及探讨FDC对上部结构振动特性的影响。

## 1 FDC的构造原理及特点<sup>[6-7]</sup>

图1所示为FDC构造。FDC由摩擦和连接两部分组成。摩擦部分由内部摩擦拉杆、摩擦套筒以及两侧的螺旋弹簧构成。阻尼器的摩擦力是由内部摩擦拉杆和摩擦套筒之间的摩擦而产生。通过调节摩擦套筒紧固内部摩擦拉杆的程度来控制摩擦力的大小。两侧螺旋弹簧提供一定大小的弹性刚度, 衰减连接部分连接时的冲击作用, 抑制高频振动的响应。连接部分是由外部拉杆和内部摩擦拉杆构成, 一旦发生连接非人力作用不再断开。阻尼器的连接距离可人为设定。

FDC工作过程中分为两个阶段:

(1) 连接前: 阻尼器的变形小于设定连接距离 $L_s$ , FDC不发挥作用(如图1a所示)。

(2) 连接后: 阻尼器的变形超过设定连接距离 $L_s$ (如图1b所示), 外部拉杆和内部摩擦拉杆发生连接, 并传递内部摩擦拉杆上产生的摩擦力。当内部摩擦拉杆上产生力的作用时, 首先摩擦部分的两根螺旋弹簧发生伸缩, 发挥弹性恢复力的作用。当内部摩擦拉杆上产生的作用力大于设定的摩擦力 $F_d$ 时, 摩擦套筒和内部摩擦拉杆之间开始发生相对滑动, 产生摩擦力。基于此工作原理, FDC具有如图2所示的完全弹塑性恢复力特征。

由于每个FDC只能在一个方向上发生连接, 所以, 在实际应用中, 往往要在位移的正方向和负方向上分别安装1个或多个FDC共同作用。

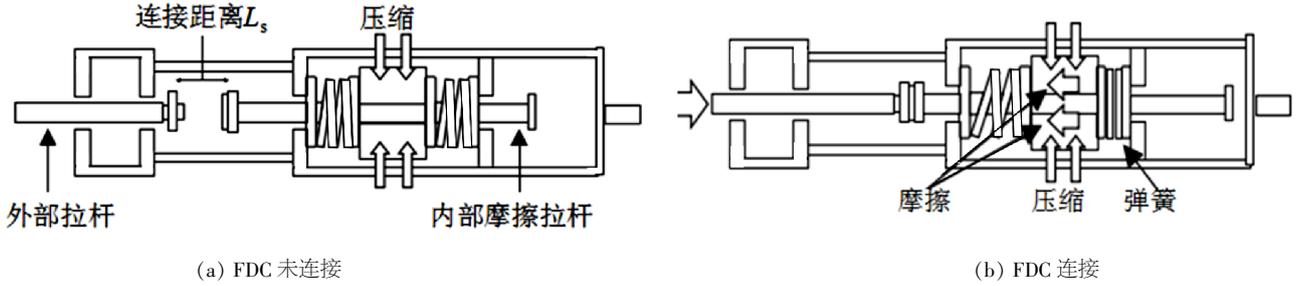


图 1 FDC 构造图

Fig.1 Mechanism of FDC

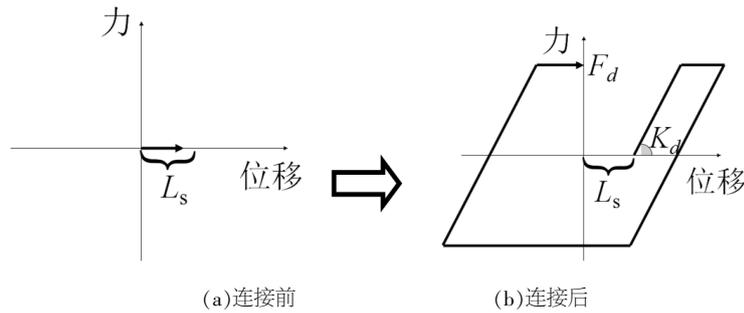


图 2 FDC 的力学模型

Fig.2 Mechanical model of the FDC

### 2 FDC 的单体试验

为了把握 FDC 的力学特征,对阻尼器试件进行单体加载试验。试验装置的设置情况如图 3 所示,将阻尼器的一端固定在固定夹具上,另一端通过力传感器连接到振动台的装配架上,沿着阻尼器的轴向加载。阻尼器的行程为 $\pm 100$  mm,摩擦力的大小( $F_d \leq 1.0$  kN)。

设定 FDC 的连接距离为 70 mm。采用振幅 90

mm,周期为 3s 的正弦波反复加载,得到如图 4 所示的摩擦力-变形关系。由图 4 可知,当阻尼器变形小于 70 mm 时,阻尼器不发生连接,此时阻尼器的摩擦力仅为 0.03 kN。当变形达到设定连接距离 70 mm 瞬间,阻尼器发生连接,摩擦力以 74.5 kN/m 的弹性刚度线性增加,直至达到设定摩擦力  $F_d$ 。阻尼器发生连接后,摩擦力-变形关系曲线平滑,可以确认阻尼器连接后性能的稳定性。

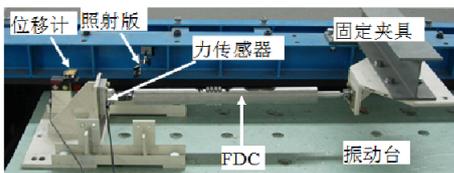


图 3 FDC 的设置

Fig.3 The setup of FDC

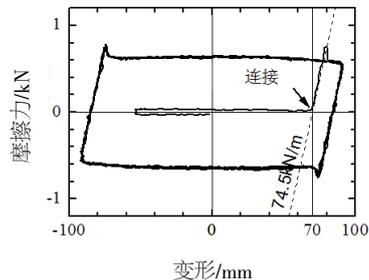


图 4 FDC 的摩擦力-变形关系

Fig.4 The friction - deformation relation of the FDC

### 3 FDC 的振动台试验

#### 3.1 试验概况

将一个 3 层钢框架固定在隔震层上构成了本实验中的隔震体系,如图 5 所示。隔震层是由一个

直线滑动轨道和螺旋弹簧构成。由静力加载和自由振动试验测得:直线滑动轨道摩擦力为 0.061kN,螺旋弹簧刚度为 12.4 kN/m,隔震体系的质量、刚度和固有周期如表 1 所示。上部 3 层框架的衰减系数为 0.1%。振动模态如图 6 所示。在

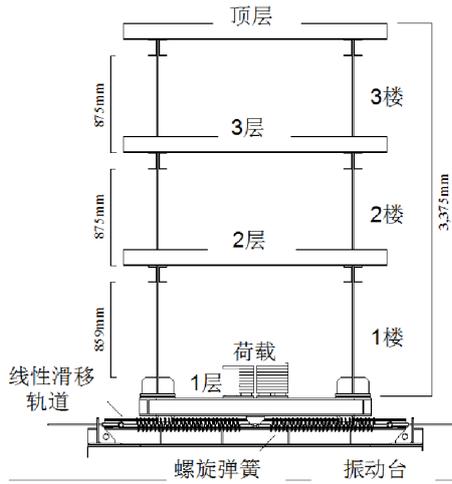


图5 隔震体系立面图

Fig.5 Elevation map of the isolation system

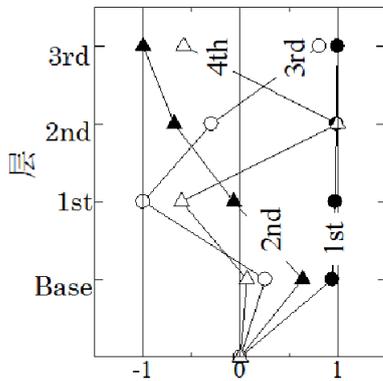


图6 振动模式

Fig.6 Vibration modes

在以下两种模式下进行试验。

(1) 没安装 FDC: 隔震体系的隔震层中不安装 FDC。

(2) 安装 FDC: 分别将 FDC 的摩擦力设定为  $F_d=0.5$  kN 和  $0.9$  kN, 连接距离为  $L_s=50$  mm, 让阻尼器发生连接发挥作用。

隔震体系分别在包含隔震台架在内的 4 个质点系(4DOF)的情况下和通过限制上部 3 层框架的层间位移将上部视为刚体的 1 个质点系(1DOF) 的情况下进行试验。整个试验的共有 6 个试验工况, 如表 2 所示。

表 2 隔震体系固有周期

Table 2 Natural Period of the the isolation system

模态	周期/s
1	3.22
2	0.48
3	0.23
4	0.17

表 1 隔震体系的刚度、质量、固有周期

Table 1 Mass, stiffness and natural period of the isolation system

层	质量/t	刚度/(kN/m)
3	0.49	262.0
2	0.56	243.0
1	0.62	221.0
隔震层	1.50	12.4

隔震层中安装作为衰减装置的油压阻尼器和作为位移控制装置的 FDC, 阻尼器设置情况如图 7 所示。油压阻尼器的粘性衰减系数为  $2.1$  kNs/m (相对于总质量的 16.7%)。FDC 的参数采用单体试验结果。

### 3.2 试验工况和输入地震波

利用振动台在水平方向上进行加载试验。由于只有一个 FDC 试件, 因此先分析没安装 FDC 的情况下隔震层的位移时程曲线, 确认先达到连接距离的位移方向, 然后将 FDC 安装在此方上。并

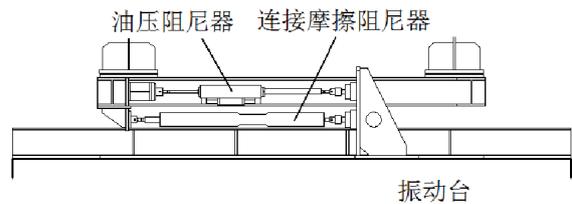


图7 阻尼器的设置

Fig.7 The settings of damper

输入地震波采用了 El Centro NS 方向地震记录 (1941 年 Imperial valley 地震)和八户港湾 EW 方向的地震记录(1968 年日本十胜沿海地震)。在 4DOF 没安装 FDC 的情况下, 使得隔震层最大位移达到  $90$  mm, 来设定输入地震波的输入大小分别为 61.0%、51.5%。输入地震波的加速度反应谱如图 8 所示。由图 8 可知, 一阶固有周期附近隔震体系的响应基本相同。高阶周期附近处, EI-Centro NS 波输入时隔震体系的响应更大。所以, 在此仅给出 EI-Centro NS 波输入时试验结果。

### 3.3 试验结果

(1) 时程曲线和滞回曲线。图 9 所示为 CASEA1 和 CASEA4 试验工况下, 顶层和隔震层加速度、隔震层位移的时程曲线。图 10 所示为隔震层加速度的傅里叶振幅。由图 9 可知, 1DOF 和 4DOF 情况下隔震层位移几乎重合。4DOF 情况下的响应加速度要比 1DOF 情况下的响应加速度大,

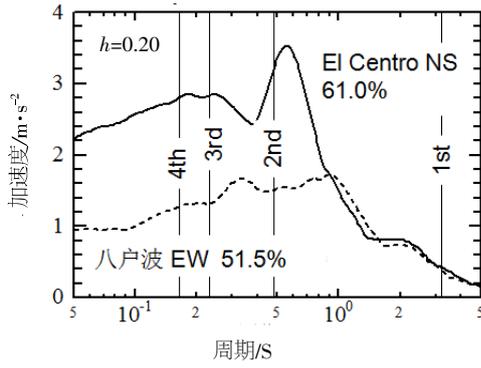


图 8 加速度反应谱

Fig.8 Acceleration response spectra of input ground motions

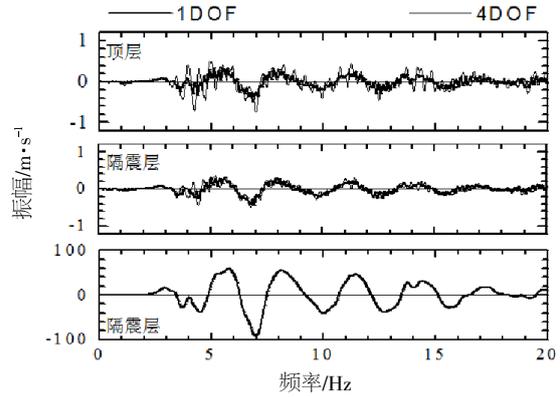


图 9 时程曲线

Fig.9 The time-history curve of response

而且高频振动成分增加，特别是在隔震体系的顶层。由图 10 可知，4DOF 情况下结构的 2 阶振动成分增加。图 11 所示为 CASE A4 和 CASE B-1 两试验工况下的试验结果的比对。虽然，由于安装了 FDC，使得隔震体系的高频振动成分和最大响应加速度增加，但是，在阻尼器发生连接的瞬间并未发现剧烈的加速度增加的现象，并且与未安装 FDC 的情况相比，隔震层的最大位移被减小了 40%左右。

图 12 所示为 CASE A4 和 CASE B-1 两试验工况下的滞回曲线。比较图 2 和图 12 可知，虽然在滑移摩擦过程中摩擦力出现脉冲响应，但是对结构的响应影响不大。并且，阻尼器能够按照预先设计地发生连接，发挥阻尼力的作用。

(2) 最大响应值。图 13 所示为隔震体系的最大响应值。由图可知在 4DOF 情况下，顶层和 1 层加速度较大，2 层加速度相对较小。出现这样的情况是因为如图 6 所示的 2 阶振动成分的影响增大

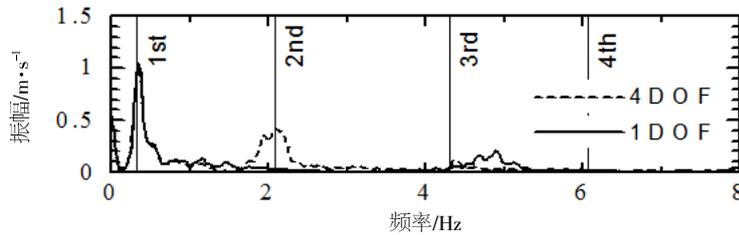


图 10 隔震层加速度傅里叶振幅(CASEA1; CASEA4)

Fig.10 Fourier amplitude spectra of the response acceleration on isolated first floor(CASEA1; CASEA4)

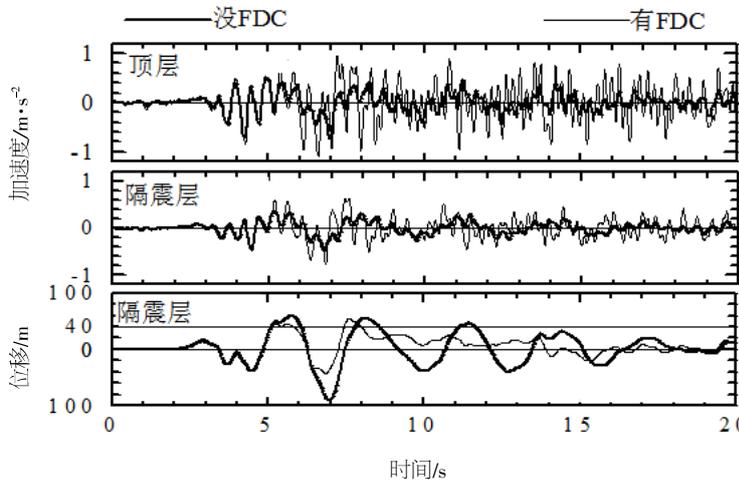


图 11 响应时程曲线 (CASEA4; CASEB4-1)

Fig.11 Response time histories (CASEA4; CASEB4-1)

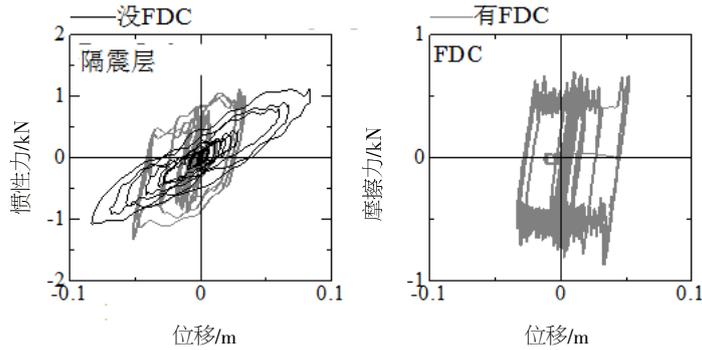


图 12 滞回曲线 (CASEA4 和 CASEB4-1 工况)

Fig.12 The hysteresis curves of the isolated story and the FDC

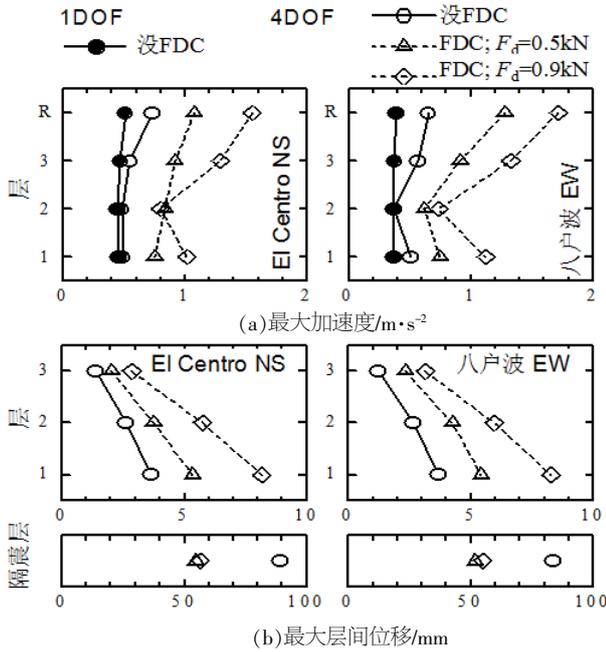


图 13 最大响应值

Fig.13 Maximum response values

所致。这符合图 12 得出的结论。

CASE A4 情况下, 隔震层最大位移为 90 mm, 安装 FDC 后, 最大位移被控制在 50~60 mm 范围内。CASE B4-1 情况下, 隔震体系最大加速度和各层层间位移没有大幅增加。CASE B4-2 的情况下, 虽然对隔震层的位移控制效果与 CASE B4-1 的情况相同。但是, 最大加速度和最大层间位移却比 CASE B4-1 的情况增加(表 3)。

表 3 试验工况

Table 3 Test conditions

质点系	没安装 FDC	安装 FDC( $L_s=50$ mm)	
		$F_d=0.5$ kN	$F_d=0.9$ kN
1DOF	CASE A1	CASE B1-1	CASE B1-2
4DOF	CASE A4	CASE B4-1	CASE B4-2

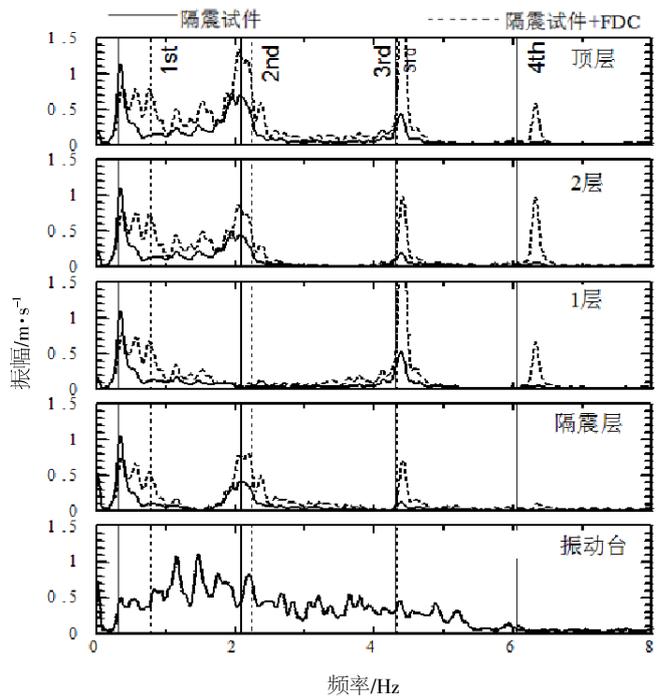


图 14 加速度傅里叶振幅(4DOF)

Fig.14 Fourier amplitude spectra of the response acceleration (4DOF)

### 4 振动特性

图 14 所示是 CASE A4 和 CASE B4-1 两试验工况中测得的响应加速度的傅里叶振幅。分别用实线表示 CASE A4 工况下隔震体系的固有频率(如表 1 所示), 用虚线表示 CASE B4-1 工况阻尼器已发生连接的情况下, 隔震体系的固有频率。此情况时隔震层的弹性刚度为 86.9kN/m, 是螺旋弹簧的刚度 12.4kN/m 和 FDC 的弹性刚度 74.5kN/m 之和。如虚线所示第一固有频率为 0.77Hz。

图 15 所示为 4 个质点系, 没安装 FDC 和安装 FDC 时试件的振动模态的比较。由图 15 可知, 安

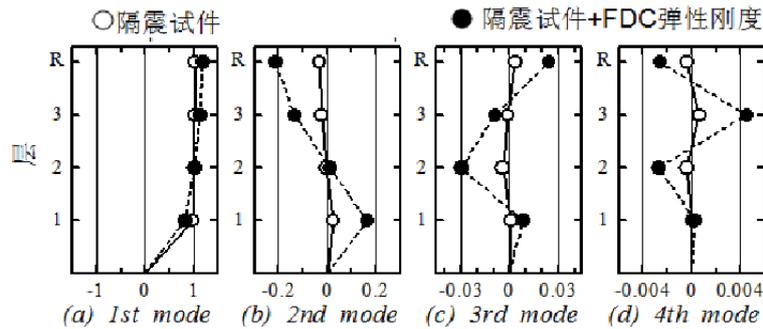


图 15 振动模态比较

Fig.15 Comparison of Participation Vectors

装了 FDC 的情况,高阶振动模态影响增加,使得具有高频成分响应加速度增加(如图 14 所示)。另外,阻尼器本身具有弹塑性滞回特性,将加剧高频振动成分的增加,但是增加的幅度不大。并且, FDC 对位移响应的控制效果明显,所以该阻尼器应该被采用。

## 5 结语

试验结果表明, FDC 可以有效地控制隔震层的过大位移。在阻尼器连接之后结构的高频振动稍微增加。另外,安装 FDC 后,隔震层刚度的增大而引起了高频成分的增加。所以,今后有必要对阻尼器的摩擦力、刚度和连接距离等参数进行优化设计,使其发挥最优的控制作用。

### 参考文献:

- [1] Arinori N, Iizuka M, Takanaka Y, et al. Shaking table tests on ultimate behavior of slender base-isolated buildings, Part6 effect of stopper on ultimate behaviors [C]//Summaries of Technical Papers of Annual Meeting of Architectural Institute of Japan, Sendai Japan, 2000, B-2: 649-650.
- [2] Kajii T, Sakatani M, Hisada Y. The elastoplastic response analysis of seismically isolated structure in consideration of the collision [C]//Summaries of Technical Papers of Annual Meeting of Architectural Institute of Japan. Sendai Japan, 2000, B-2: 527-528.
- [3] Kashiwa H, Nakayasu N, Nakashima M. Response and damage of base-isolated buildings subjected to very large earthquakes [J]. Journal of Structural Engineering, Architectural Institute of Japan, 2005, 51 (B): 237-246.
- [4] Iiba M, Azuhata T, Inoue N, et al. Behavior of seismically isolated structures for houses by the 2011 off the pacific coast of Tohoku earthquake, Part2 Field investigation and correlation between displacement and ground motion [C]//Summaries of Technical Papers of Annual Meeting of Architectural Institute of Japan, Sendai Japan, 2012, B-2: 513-514.
- [5] Nagarajaib. Base isolated FCC building impact response in northridge earthquake [J]. Journal of Structural and Engineering, 2001, 127 (9): 1 063-1 075.
- [6] Inoue N, Ikago K. Displacement control design - design method of seismic isolation, long-period buildings against earthquakes [M]. Sendai Japan: Marozen publish, 2012.
- [7] Zou S, Ikenaga M, Hori N, et al. Development of friction damper with coupling mechanism for displacement control of base-isolated system [J]. AIJ Journal of Technology and Design, 2013, 19 (43): 855-860.
- [8] Koyama K, Zen T, Fukumi Y, et al. Excessive displacement control design of base-isolated structure using a coupling mechanism friction damper [C]// Summaries of Technical papers of Annual Meeting of Japan. Sendai Japan, 2011, B-2: 455-456.
- [9] Ikenaga M, Ikago K, Inoue N. Application of friction damper with coupling mechanism designed in accordance with input ground motion levels to a base-isolated detached house [C]//13th world conference on seismic isolation energy dissipation and active vibration control of structure commemorating JSSI 20th anniversary. Sendai Japan, 2013.
- [10] Fukumi Y, Zou S, Ikenaga M, et al. Design method of sliding bearings base-isolated housing with friction damper with coupling mechanism part1:method as the one stopper [C]//Summaries of Technical papers of Annual Meeting of Japan. Sendai Japan, 2013, B-2: 455-456.