

# 半周负刚度摩擦阻尼装置振动台试验研究

孙天威<sup>1,2</sup>, 彭凌云<sup>1</sup>, 李小军<sup>1,3</sup>, 方国威<sup>4</sup>

(1. 北京工业大学工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100124; 2. 清华大学土木工程系, 北京 100084;  
3 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081; 4. 中国建筑科学研究院, 北京 100013)

**摘要:** 对具有负刚度特征的半周负刚度摩擦阻尼装置进行了振动台试验, 以某四层钢结构框架为减震研究对象, 分别在钢结构框架的一层和二层布置半周负刚度摩擦阻尼装置, 研究了在不同地震工况下结构的地震响应。结果表明, 半周负刚度摩擦阻尼装置可实现结构的位移与加速度响应双重控制, 安装在结构变形较大位置会获得更好的振动控制效果。

**关键词:** 减震; 负刚度; 半周; 摩擦阻尼; 振动台试验

**中图分类号:** TU352; TU317<sup>+</sup>.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2024)03-0423-13

**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2024.03.007

## 引言

在消能减震技术领域, 以使用提高结构阻尼和刚度的减震装置为主, 而刚度的提高会增大结构的加速度响应, 引起结构内力的增大, 这不利于结构的抗震。研究表明, 负刚度阻尼减震装置通过降低结构刚度以减少结构的加速度响应, 并通过附加阻尼减少因刚度下降引起结构位移响应增大的问题<sup>[1-2]</sup>, 可以实现对结构加速度与位移响应的双重控制。

Iemura 等<sup>[3-4]</sup>、Pradono 等<sup>[5]</sup>把负刚度减震技术从机械领域引入到结构振动控制中, 基于磁流变半主动控制技术开发了具有负刚度特征的阻尼装置, 有效减少了结构的剪力、位移与加速度响应。Kenneth 等<sup>[6]</sup>研发了可变负刚度装置, 通过负刚度减少结构侧向刚度, 使结构弱化, 实现结构抗震性能的提高, 并研究了附加阻尼的变化对可变负刚度装置减震系统的影响。Li 等<sup>[7-8]</sup>、Zhou 等<sup>[9-10]</sup>提出了并联传统耗能构件和预压负刚度弹簧的负刚度装置设计方案, 研发了负刚度黏滞阻尼装置和具有自复位功能的负刚度阻尼装置, 为负刚度装置的研发提供了设计思路。Azizi 等<sup>[11]</sup>、Nagarajaiah 等<sup>[12]</sup>、Sun 等<sup>[13-14]</sup>、Pasala 等<sup>[15]</sup>做了大量的负刚度减震研究, 构建了带有非稳态阻尼的多自由度系统动力学方程, 对负刚度和阻尼进行了参数化研究, 得出通过组合负刚度和阻尼可以实现降低结构峰值恢复力的同时控制结构的位

移响应, 减少结构变形的循环次数, 降低结构疲劳损伤的结论。付杰等<sup>[16-17]</sup>以 DSP 为基础开发了负刚度磁流变阻尼装置控制系统, 并通过分析 Benchmark 模型初步得到了该装置在建筑结构减震工程中的布局规律。彭凌云等<sup>[18]</sup>、方国威等<sup>[19]</sup>、孙天威等<sup>[20]</sup>、Sun 等<sup>[21]</sup>研发了多种负刚度阻尼装置, 并提出了一种仅在二、四象限提供阻尼的滞回模型, 研究表明该类滞回模型具有负刚度特征, 研发的装置具有构造简单、行程较大的优势。

上述研究对负刚度减震技术进行了较为全面的分析, 而具有负刚度特征的半周负刚度摩擦阻尼装置<sup>[19]</sup>的应用尚处于起步阶段, 其减震效果与布置方案还需要进一步探究。本文对半周负刚度摩擦阻尼装置进行了振动台试验, 验证了半周负刚度摩擦阻尼装置的减震效果, 并对布置位置进行了比较, 为半周负刚度摩擦阻尼装置的应用提供了试验依据。

## 1 半周负刚度摩擦阻尼介绍

半周负刚度摩擦阻尼是仅在第二、四象限提供摩擦阻尼的滞回模型, 其演变过程如图 1 所示。以摩擦阻尼模型为蓝本, 如图 1(a) 所示, 通过消除如图 1(b) 所示位于第一、三象限的摩擦阻尼, 可以得到一个仅在第二象限和第四象限提供摩擦阻尼的模型, 其在一个循环周期内各个时刻的刚度(例如:  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ )均为负刚度, 如图 1(c) 所示。

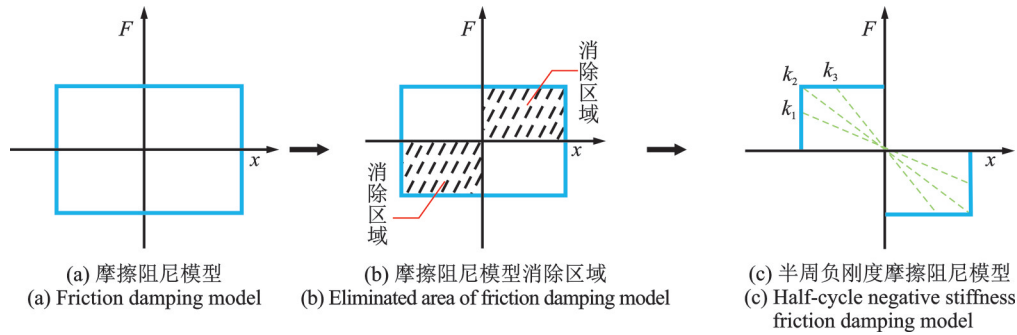


图 1 半周负刚度摩擦阻尼模型演变原理

Fig. 1 Evolution principle of half-cycle negative stiffness friction damping model

假定结构处于如图 2(a)所示刚度为  $k$  的弹性阶段,当如图 2(b)所示的半周负刚度摩擦阻尼附加于结构时,可以得到如图 2(c)所示的组合系统阻尼模型

型,其等效刚度  $k_e$  小于原结构刚度  $k$ ,滞回面积增加,实现了提高结构耗能能力的同时降低结构刚度的目的<sup>[19]</sup>,这有利于对结构加速度与位移响应的控制。

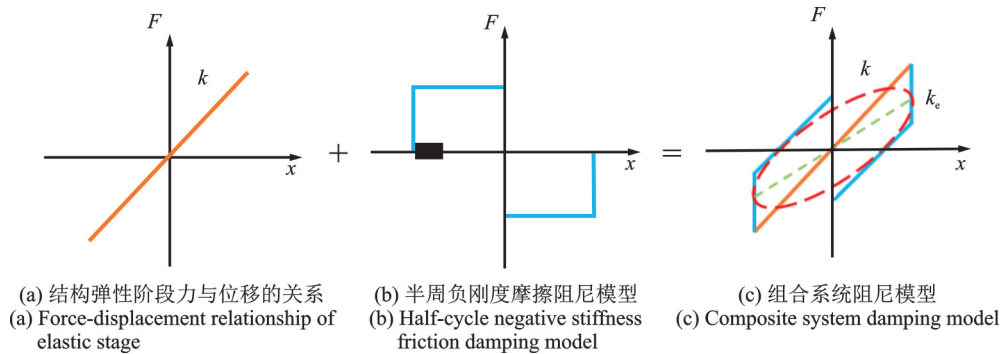


图 2 半周负刚度摩擦阻尼在结构中的工作原理

Fig. 2 Working principle of half-cycle negative stiffness friction damping in structure

## 2 试验概况

### 2.1 模型参数与地震模拟振动台概况

为验证半周负刚度阻尼装置在地震动作用下的减震效果,设计了如图 3 所示的四层钢框架结构模型,进行半周负刚度摩擦阻尼减震方案振动台试验。框架层高均为 1000 mm,总高度为 4000 mm,楼面尺寸为 1000 mm × 1000 mm × 10 mm,梁、柱均采用如图 4 所示的截面尺寸为长 30 mm、宽 20 mm、厚 2 mm 的方钢管制作,梁、柱、板均选用 Q235 钢材加工。

试验所采用的地震模拟振动台位于北京工业大学工程抗震与结构诊治北京市重点实验室,该振动台系统主要的性能与技术参数如表 1 所示。

### 2.2 半周负刚度摩擦阻尼装置设计及性能测试

拟通过半周负刚度摩擦阻尼装置对四层钢结构框架附加约 15% 的阻尼,采用文献[22]的方法对附加阻尼进行测算:以简谐地面运动激励结构,激励周期为结构的第一振型周期,调整激励幅度,使结构振动幅度与中震变形幅值接近,按此方法计算,得出当半周负刚度摩擦阻尼装置最大阻尼力为

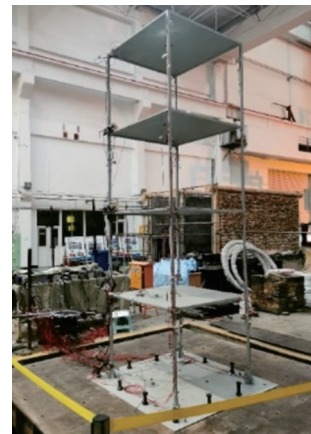


图 3 四层钢框架结构模型

Fig. 3 Four-storey steel frame structure model

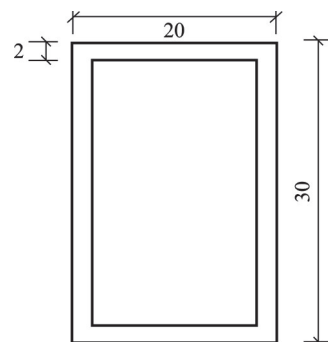


图 4 梁、柱截面尺寸(单位: mm)

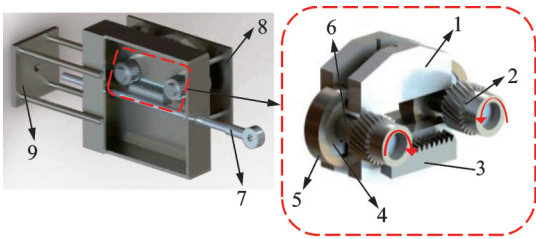
Fig. 4 Section size of beam and column(Unit: mm)

表 1 振动台主要性能与技术参数

Tab. 1 Main performance and technical parameters of shaking table

台面尺寸/m <sup>2</sup>	振动方向	最大荷载质量/t	最大水平位移/mm
3.0×3.0	水平单向	60	±127
最大水平速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	最大水平加速度/g	工作频率范围/Hz	最大倾覆力矩/(t·m)
600	1.0	0.4~50	30

1200 N 时,对结构附加的阻尼比为 15.63%。为实现具有上述力学性能的半周负刚度摩擦阻尼装置,设计了如图 5 所示的装置。该装置主要由单向摩擦阻尼系统、交替传动系统协同配合组成,与文献 [19] 的设计构造相比具有双面叠层放大机制,并且传动的齿轮、齿条更为稳定高效,提高了装置力学性能的稳定性的,其构造形式如图 5 红色虚线标注的局部放大图所示。

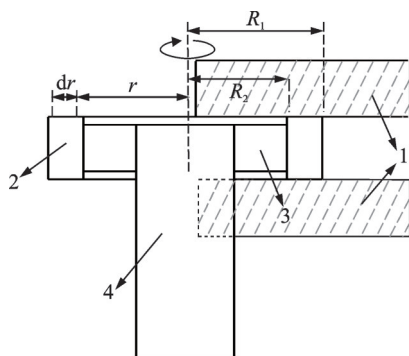


1.摩擦片; 2.齿轮; 3.齿条; 4.单向轴承; 5.摩擦环; 6.连接轴; 7.端部连接装置-I; 8.压板; 9.端部连接装置-II

图 5 半周负刚度摩擦阻尼装置立体图

Fig. 5 3D model of half-cycle negative stiffness friction damping device

单向摩擦阻尼系统如图 6 所示。单向轴承外圈嵌套摩擦环,摩擦环两侧受到摩擦片挤压,由于单向轴承具有沿一个方向内外圈可自由转动,沿另一个方向内外圈锁死的特性,所以当内外圈锁死单向轴承带动摩擦环转动时,可产生摩擦阻尼,当内外圈自由转动时单向轴承不带动摩擦环转动,不产生摩擦阻尼,从而实现了单向摩擦阻尼系统的设计。



1.摩擦片; 2.摩擦环; 3.单向轴承; 4.连接轴

图 6 单向摩擦阻尼系统

Fig. 6 One-way friction damping system

现假定被摩擦片挤压的是半径为  $r$  的微圆环,微圆环的厚度为  $dr$ ,  $e$  为摩擦环被挤压面占整个摩擦环的弧度比,可以得到被摩擦片挤压的微圆环的面积  $dA$  为:

$$dA = 2\pi erdr \quad (1)$$

那么在该微圆环产生的摩擦力矩  $dT_i$  为:

$$dT_i = 2\pi P\mu er^2 dr \quad (2)$$

式中  $P$  为摩擦环受到的压强。

则摩擦片挤压摩擦环产生的摩擦力矩  $T_i$  的表达式如下:

$$T_i = z \int_{R_2}^{R_1} 2\pi P\mu er^2 dr \quad (3)$$

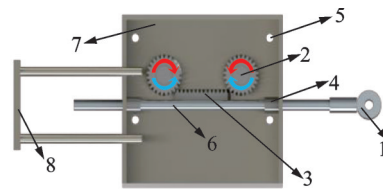
式中  $z$  为摩擦环被挤压面数,双面挤压  $z=2$ ;  $\mu$  为摩擦环与摩擦片间的摩擦系数;  $R_1$  为摩擦环外径;  $R_2$  为摩擦环内径。

由力矩  $T=FL$ , 其中  $L$  为力臂,将式(3)代入,则半周负刚度摩擦阻尼装置产生的最大摩擦阻力为:

$$F = \frac{z}{r_m} \int_{R_2}^{R_1} 2\pi P\mu er^2 dr \quad (4)$$

式中  $r_m$  为齿轮的分度圆。

交替传动系统如图 7 所示。半周负刚度摩擦阻尼装置两端设置有连接装置,用于与结构连接,传动杆与右端的连接装置相连,并穿过阻尼装置两侧的直线轴承,以保证半周负刚度摩擦阻尼装置的稳定运行,中部有固定齿条,可使传动杆带动齿条产生位移。齿条两端放置有与其相切的齿轮,当半周负刚度摩擦阻尼装置进行加载时,齿条只与一侧齿轮啮合;当反向加载时,齿条脱离一侧齿轮的同时与另一侧齿轮啮合,实现了阻尼装置的交替传动。



1.端部连接装置-I; 2.齿轮; 3.齿条; 4.直线轴承; 5.加压螺栓孔; 6.传动杆; 7.副板; 8.端部连接装置-II

图 7 交替传动系统

Fig. 7 Alternating transmission system

交替传动系统通过齿轮内部的连接轴与单向摩擦阻尼系统进行传动连接。如图 7 所示,当单向轴承内外圈沿红色方向自由转动,蓝色方向内外圈锁死布置时,在有外接激励作用下,即可实现如图 8 所示的滞回模型,其工作过程如下:

(1) 正向加载:齿条与一侧齿轮啮合产生转动,齿轮通过连接轴带动单向轴承转动,由于单向轴承内外圈自由转动,所以摩擦环外圈不产生转动,不与

摩擦片产生摩擦阻尼。

(2)正向卸载:单向轴承反向旋转,内外圈锁死,带动摩擦环外圈与摩擦片旋转,产生摩擦阻尼。

(3)反向加载:齿条与齿轮脱离的同时与另一侧齿轮进行啮合,由于单向轴承内外圈自由转动,摩擦环不产生摩擦阻尼。

(4)反向卸载:单向轴承由于内外圈锁死带动摩擦环转动,产生摩擦阻尼。

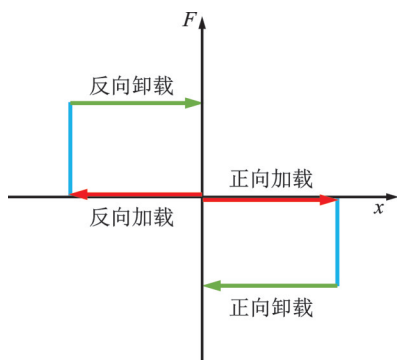


图8 半周负刚度摩擦阻尼装置工作过程

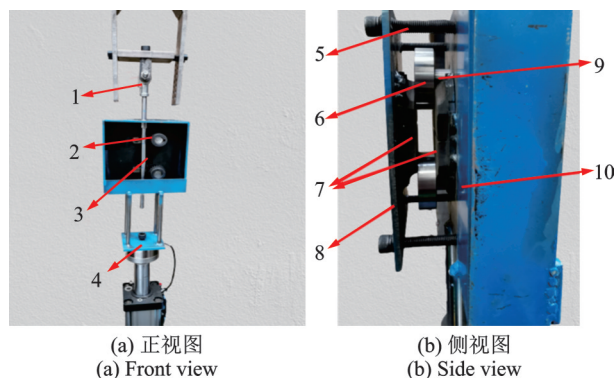
Fig. 8 Working process of half-cycle negative stiffness friction damping device

选用Q345b钢材加工了如图5所示的半周负刚度摩擦阻尼装置,其阻尼装置最大设计行程为80 mm,齿轮规格为2模24齿,压板与副板一侧均固定有摩擦片,采用4个强度为12.9级的高强螺栓对压板与副板进行加压,使摩擦片挤压摩擦环两侧产生预紧力,试验照片如图9所示。采用频率为0.05 Hz,加载幅值为30 mm的正弦波进行5次循环加载,测得的试验结果如图10所示。

性能测试结果表明,通过合理布置单向轴承与齿轮、齿条,实现了对加载阶段摩擦阻尼力的有效屏蔽,使摩擦阻尼仅在卸载阶段产生,该装置滞回形状符合预期设计,可以获得稳定的半周负刚度摩擦阻尼,试验测得的最大阻尼力为1246 N,与预设阻尼力相差3.83%,该阻尼装置可以用于本次振动台试验。

### 2.3 试验工况

为探究半周负刚度阻尼装置的减震效果以及布置位置对减震效果的影响,分别在试验模型一层和二层柱长边方向两侧斜撑布置半周负刚度摩擦阻尼装置,布置方案如图11所示。选取4条卓越周期与结构自振周期接近的地震动记录,地震动加速度时程曲线和频谱分别如图12所示。沿柱长边方向分别施加 $PGA=0.2g$ 和 $0.25g$ 的地震动,具体加载方案如表2所示。为体现半周负刚度摩擦阻尼装置的减震特点,采用SAP2000软件创建了如



1.端部连接装置-I; 2.齿轮; 3.齿条; 4.端部连接装置-II; 5.加压螺栓孔; 6.摩擦环; 7.摩擦片; 8.压板; 9.连接轴; 10.副板  
图9 半周负刚度摩擦阻尼装置试验照片

Fig. 9 Test photographs of half-cycle negative stiffness friction damping device

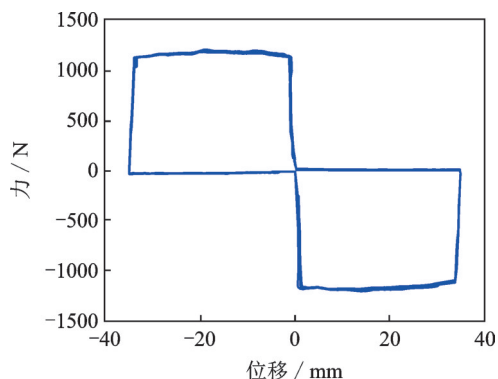


图10 半周负刚度摩擦阻尼装置试验结果

Fig. 10 Experimental results of half-cycle negative stiffness friction damping device

图13所示的与试验4层钢框架结构模型参数相同的有限元模型,分别在结构一层和二层采用Wen塑性单元模拟布置了最大阻尼力为623 N的摩擦阻尼装置(确保在位移幅值相同的一个循环周期内,摩擦阻尼装置与半周摩擦阻尼装置消耗能量相同),进行弹性时程分析,模拟工况与试验工况保持一致。



图11 半周负刚度摩擦阻尼装置振动台布置方案

Fig. 11 Layout scheme of shaking table for half-cycle negative stiffness friction damping device

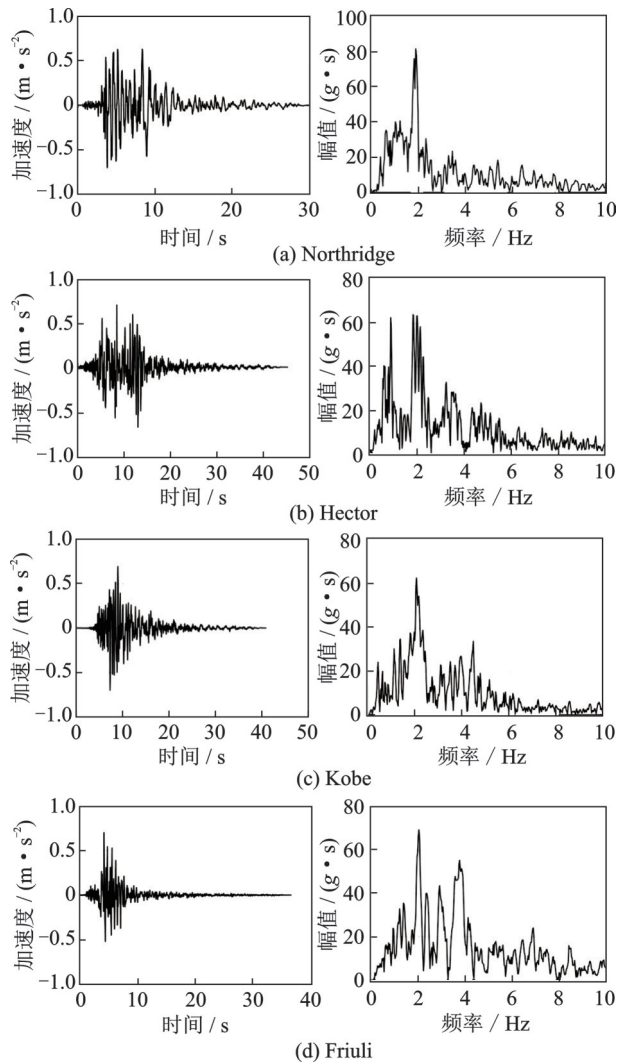


图 12 地震动加速度时程曲线和频谱

Fig. 12 Acceleration time history curves and frequency spectrum of ground motions

表 2 加载方案  
Tab. 2 Loading cases

加载方案	阻尼装置布置位置	PGA/g	地震动名称
1	一层柱长边方向	0.2	Northridge
2			Hector
3			Kobe
4			Friuli
5	二层柱长边方向	0.25	Northridge
6			Hector
7			Kobe
8			Friuli
9	一层柱长边方向	0.2	Northridge
10			Hector
11			Kobe
12			Friuli
13	二层柱长边方向	0.25	Northridge
14			Hector
15			Kobe
16			Friuli

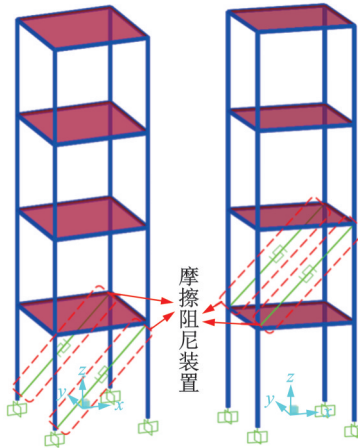


图 13 模拟摩擦阻尼装置振动台布置方案

Fig. 13 Layout scheme of shaking table for simulated friction damping device

### 2.4 传感器测点布置

四层钢框架模型的加速度传感器和位移传感器布置位置如图 14 所示。其中 A 为加速度传感器,如图 15 所示;U 为位移传感器,如图 16 所示。半周负刚度摩擦阻尼装置放置力传感器与位移传感器,如图 17 所示,用于检测在不同地震动作用下阻尼装置的力学性能。

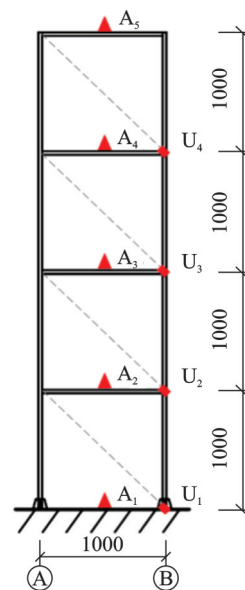


图 14 传感器布置示意图(单位:mm)

Fig. 14 Diagram of sensors arrangement(Unit:mm)

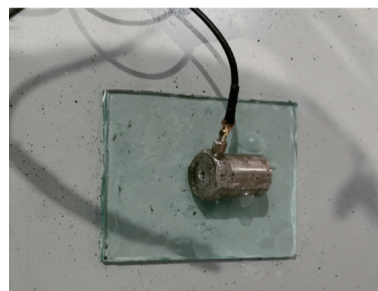


图 15 加速度传感器

Fig. 15 Acceleration sensor

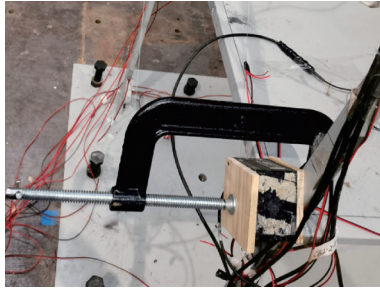


图 16 位移传感器

Fig. 16 Displacement sensor

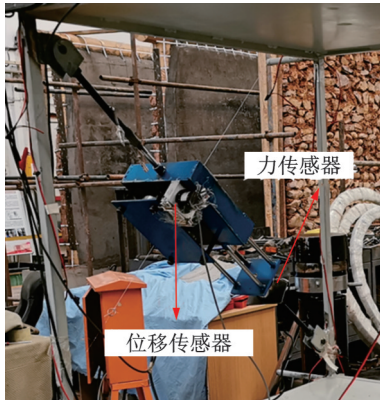


图 17 阻尼装置数据采集设备

Fig. 17 Damping device data acquisition equipment

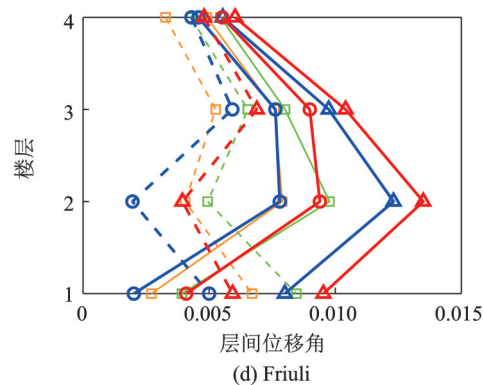
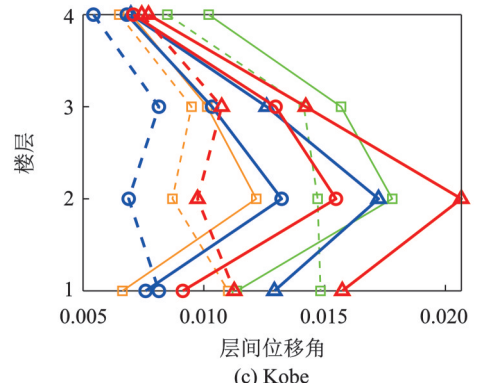
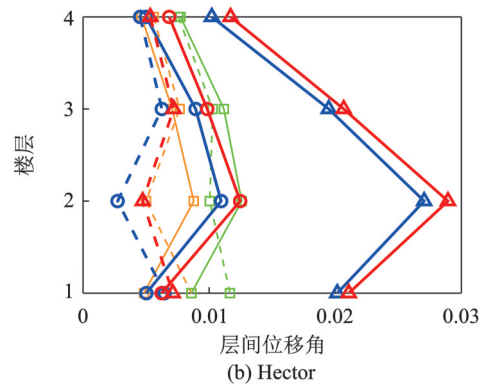
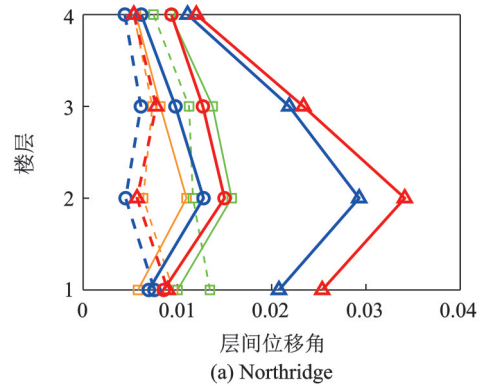
### 3 振动台试验结果

#### 3.1 层间位移角减震效果分析

图 18 为振动台试验各工况下结构各层层间位移角对比,可知:

(1)当  $PGA=0.2g$  时,在结构一层布置半周负刚度摩擦阻尼装置,与原结构相比结构一层的层间位移角得到了有效控制,4 条地震动 Northridge, Hector, Kobe, Friuli 在减震层(一层)的减震率分别为 66.47%, 75.12%, 41.25%, 74.82%;在非减震层的二、三、四层结构变形的控制效果呈现距离减震层越远,减震效果下降的趋势,四层的减震效果均为最差,其中地震动 Northridge, Hector, Friuli 在四层的减震率分别为 44.29%, 51.09%, 17.43%。由于地震动的差异性,模型的动力响应有所不同,地震动 Kobe 在四层的减震率仅有 2.47%。

(2)当  $PGA=0.25g$  时,在结构一层布置半周负刚度摩擦阻尼装置,结构各层的层间位移角与  $PGA=0.2g$  相比均呈现略微放大的趋势,但是整体结构变形依然得到了较好的控制,结构的最大变形出现在第二层并随着楼层的增高,减震效果递减,4 条地震动 Northridge, Hector, Kobe, Friuli 在减震



- $PGA=0.2g$  一层布置半周负刚度摩擦阻尼装置减震方案
- $PGA=0.2g$  二层布置半周负刚度摩擦阻尼装置减震方案
- △—  $PGA=0.2g$  无控结构
- ◇—  $PGA=0.25g$  一层布置半周负刚度摩擦阻尼装置减震方案
- ▽—  $PGA=0.25g$  二层布置半周负刚度摩擦阻尼装置减震方案
- $PGA=0.25g$  无控结构
- 模拟  $PGA=0.2g$  一层摩擦阻尼装置减震方案
- 模拟  $PGA=0.2g$  二层摩擦阻尼装置减震方案
- 模拟  $PGA=0.25g$  一层摩擦阻尼装置减震方案
- 模拟  $PGA=0.25g$  二层摩擦阻尼装置减震方案

图 18 各工况下结构各层层间位移角对比

Fig. 18 Comparison of the inter-story drift angle of each structural floor under different loading cases

层(一层)的减震率分别为66.29%,70.45%,41.93%和57.11%,在四层的减震率分别为21.99%,41.62%,2.85%和8.55%。

(3)当 $PGA=0.2g$ 时,在二层布置半周负刚度摩擦阻尼装置有效控制了二层的结构变形,并且与一层布置减震装置相比,结构的二、三、四层变形得到了更好的控制,说明在结构变形较大位置安装半周负刚度摩擦阻尼装置要优于安装在其他位置。同样呈现了距离减震层越远,减震效果递减的趋势,4条地震动Northridge,Hector,Kobe,Friuli在减震层(二层)的减震效果分别为84.61%,89.88%,60.01%和84.05%,在四层的减震率分别为60.00%,55.67%,22.29%和22.49%,与减震装置布置在一层相比明显改善了对结构顶层的控制效果。在地震动Friuli下,结构一层的减震效果与一层布置减震装置相比下降较多,但是依然具有37.52%的减震率。

(4)当 $PGA=0.25g$ 时,在二层布置半周负刚度摩擦阻尼装置,结构各层的层间位移角与 $PGA=0.2g$ 相比呈现略微放大的趋势,同样呈现出距离减震层越远,减震效果递减的趋势,4条地震动Northridge,Hector,Kobe,Friuli在减震层(二层)的减震率分别为83.23%,83.64%,52.88%和70.82%,在四层的减震率分别为55.17%,54.45%,3.68%和20.47%,与 $PGA=0.2g$ 相比略有下降。

(5)半周负刚度摩擦阻尼装置振动台试验结果与模拟摩擦阻尼装置方案相比对结构的变形控制效果趋势相似。在地震动Northridge,Hector下,在二层布置半周负刚度摩擦阻尼装置取得了更好的控制效果。

### 3.2 层间位移减震效果分析

图19包含了在一层布置半周负刚度摩擦阻尼装置,当 $PGA=0.2g$ 和 $0.25g$ 时,减震层(一层)的层间位移减震效果对比。可以看到4条地震动记录下结构的位移响应均得到了有效控制,通过摩擦阻尼有效控制了等效刚度降低引起减震层位移放大的问题,当 $PGA=0.2g$ 时和与原结构相比,在地震动Northridge,Hector和Kobe和Friuli下,减震层(一层)的均方根减震率分别为87.22%,85.28%,76.86%和93.08%;当 $PGA=0.25g$ 时,与原结构相比,在地震动Northridge,Hector,Kobe和Friuli下,减震层(一层)的均方根减震率分别为80.46%,80.53%,72.42%和81.69%,呈现出随着地震动加速度峰值的增大,半周负刚度摩擦阻尼的减震效果下降的趋势。

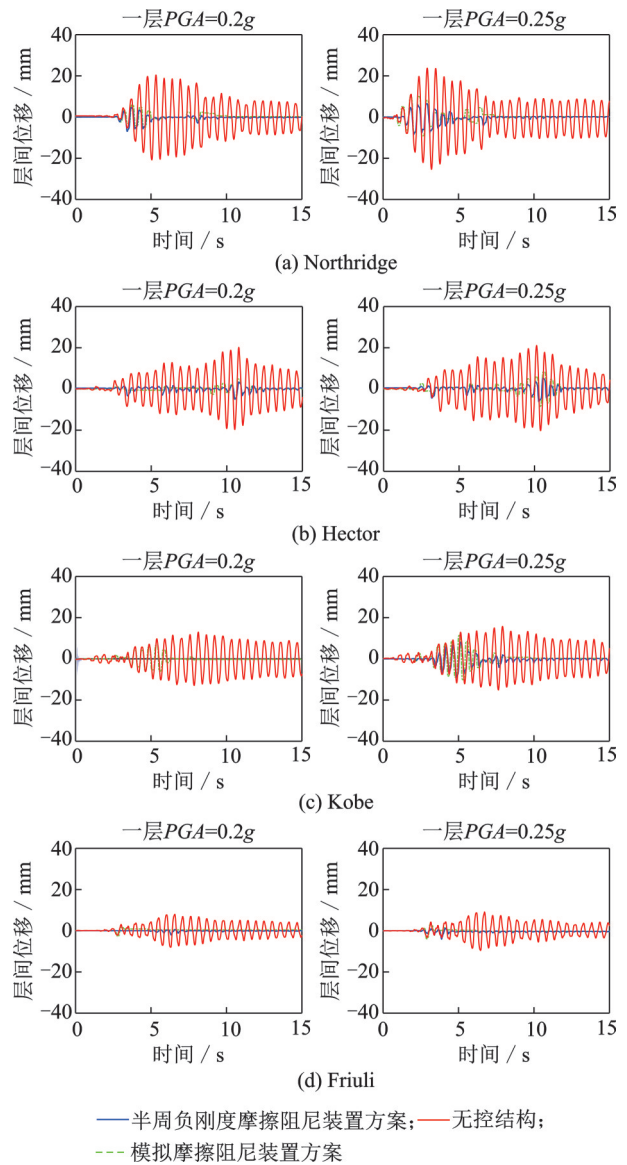


图19 一层布置半周负刚度摩擦阻尼装置减震层(一层)位移时程对比

Fig. 19 Displacement time history of the shock absorption floor (first floor) with half-cycle negative stiffness friction damping device arranged on the first floor

图20包含了在二层布置半周负刚度摩擦阻尼装置,当 $PGA=0.2g$ 和 $0.25g$ 时,减震层(二层)的层间位移减震效果对比分析,减震层(二层)并未出现因等效刚度的降低引起结构位移响应放大的问题。当 $PGA=0.2g$ 时,与原结构相比,在地震动Northridge,Hector,Kobe和Friuli下,减震层(二层)的均方根减震率分别为88.02%,90.15%,84.60%和92.05%;当 $PGA=0.25g$ 时,与原结构相比,在地震动Northridge,Hector,Kobe和Friuli下,减震层(二层)的均方根减震率分别为85.41%,78.61%,79.48%和88.89%,随着地震动加速度峰值的增大,半周负刚度摩擦阻尼的减震效果同样呈现下降趋势。

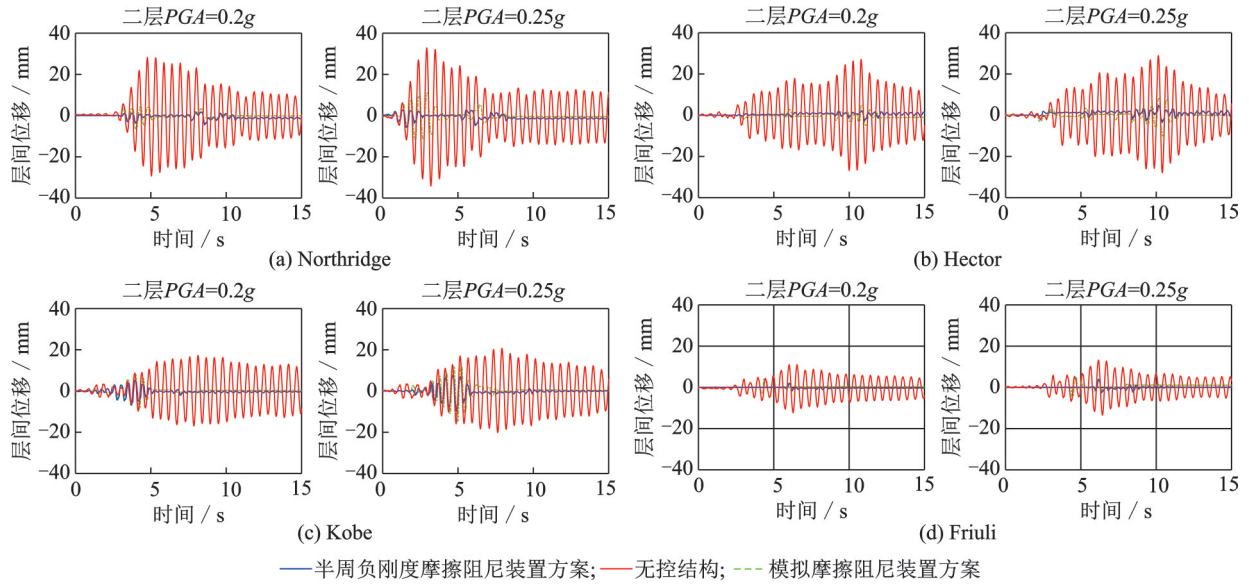


图 20 二层布置半周负刚度摩擦阻尼装置减震层(二层)位移时程对比

Fig. 20 Displacement time history of the shock absorption floor(second floor) with half-cycle negative stiffness friction damping device arranged on the second floor

与模拟摩擦阻尼装置结果相比,半周负刚度摩擦阻尼装置在减震层对结构的位移响应控制效果基本相同。在各个工况下均出现了部分时刻位移响应更小的现象,并且在二层布置半周负刚度摩擦阻尼装置时该现象更显著。

各层的位移响应峰值及其减震率(与无控结构相比)如表 3 所示。在未布置减震装置的楼层,其层

间位移也取得了很好的控制效果,并且在 4 组地震动下,减震效果随着距离减震层(一层/二层)越远,均呈现递减的趋势。与模拟摩擦阻尼装置相比,半周负刚度摩擦阻尼对结构的位移响应控制效果基本相同,并且未出现在地震动 Kobe 作用下结构三层和四层位移响应放大的现象。

表 3 各工况下结构各层层间位移峰值对比(单位: mm)

Tab. 3 Comparison of peak displacement between layers of structure under different loading cases(Unit: mm)

Northridge(PGA=0.2g)							
楼层	无控结构	一层布置半周装置	模拟一层布置摩擦装置	一层布置半周减震率(摩擦减震率)	二层布置半周装置	模拟二层布置摩擦装置	二层布置半周减震率(摩擦减震率)
4	11.08	6.17	5.60	44.29%(49.47%)	4.43	5.38	60.00%(51.45%)
3	21.86	9.80	8.19	55.19%(62.53%)	6.13	7.34	71.95%(66.42%)
2	29.28	12.77	10.97	56.38%(62.54%)	4.51	6.37	84.61%(78.25%)
1	20.77	6.96	5.82	66.47%(71.98%)	7.56	9.55	63.62%(54.03%)
Northridge(PGA=0.25g)							
楼层	无控结构	一层布置半周装置	模拟一层布置摩擦装置	一层布置半周减震率(摩擦减震率)	二层布置半周装置	模拟二层布置摩擦装置	二层布置半周减震率(摩擦减震率)
4	12.01	9.37	9.27	21.99%(22.80%)	5.38	7.46	55.17%(37.87%)
3	23.37	12.70	13.74	45.67%(41.20%)	7.75	11.24	66.85%(51.90%)
2	34.12	15.00	15.76	56.03%(53.81%)	5.72	11.65	83.23%(65.86%)
1	25.36	8.55	10.01	66.29%(60.53%)	8.98	13.45	64.59%(46.97%)
Hector(PGA=0.2g)							
楼层	无控结构	一层布置半周装置	模拟一层布置摩擦装置	一层布置半周减震率(摩擦减震率)	二层布置半周装置	模拟二层布置摩擦装置	二层布置半周减震率(摩擦减震率)
4	10.21	5.00	4.64	51.09%(54.57%)	4.53	5.60	55.67%(45.17%)
3	19.48	8.93	7.07	54.14%(63.71%)	6.25	7.66	67.94%(60.68%)
2	27.05	10.95	8.78	59.51%(67.54%)	2.74	5.00	89.88%(81.52%)
1	20.16	5.02	4.84	75.12%(76.00%)	6.46	8.59	67.96%(57.40%)



续表

Hector( $PGA=0.25g$ )							
楼层	无控结构	一层布置半周装置	模拟一层布置摩擦装置	一层布置半周减震率(摩擦减震率)	二层布置半周装置	模拟二层布置摩擦装置	二层布置半周减震率(摩擦减震率)
4	11.70	6.83	7.73	41.62%(33.91%)	5.33	7.56	54.45%(35.36%)
3	20.67	9.85	11.17	52.35%(45.97%)	7.19	10.28	65.23%(50.27%)
2	28.94	12.46	12.58	56.94%(56.53%)	4.73	10.05	83.64%(65.27%)
1	21.07	6.23	8.59	70.45%(59.23%)	7.12	11.65	66.22%(44.71%)
Kobe( $PGA=0.2g$ )							
楼层	无控结构	一层布置半周装置	模拟一层布置摩擦装置	一层布置半周减震率(摩擦减震率)	二层布置半周装置	模拟二层布置摩擦装置	二层布置半周减震率(摩擦减震率)
4	6.98	6.81	6.99	2.47%(-0.14%)	5.43	6.50	22.29%(6.93%)
3	12.60	10.34	10.14	17.91%(19.51%)	8.14	9.49	35.40%(24.67%)
2	17.23	13.22	12.17	23.26%(29.35%)	6.89	8.70	60.01%(49.50%)
1	12.92	7.59	6.63	41.25%(48.67%)	8.14	11.01	36.94%(14.76%)
Kobe( $PGA=0.25g$ )							
楼层	无控结构	一层布置半周装置	模拟一层布置摩擦装置	一层布置半周减震率(摩擦减震率)	二层布置半周装置	模拟二层布置摩擦装置	二层布置半周减震率(摩擦减震率)
4	7.71	7.08	10.20	2.85%(-32.21%)	7.43	8.49	3.68%(-10.05%)
3	14.22	12.97	15.68	8.78%(-10.30%)	10.74	14.14	24.42%(0.54%)
2	20.66	15.47	17.80	25.14%(13.86%)	9.74	14.71	52.88%(28.81%)
1	15.73	9.13	11.37	41.93%(27.70%)	11.26	14.83	28.41%(5.70%)
Friuli( $PGA=0.2g$ )							
楼层	无控结构	一层布置半周装置	模拟一层布置摩擦装置	一层布置半周减震率(摩擦减震率)	二层布置半周装置	模拟二层布置摩擦装置	二层布置半周减震率(摩擦减震率)
4	5.54	4.58	4.91	17.43%(11.42%)	4.30	3.27	22.49%(41.00%)
3	9.74	7.63	7.59	21.67%(22.06%)	5.92	5.26	39.19%(45.98%)
2	12.31	7.80	7.90	36.65%(35.85%)	1.96	4.05	84.05%(67.11%)
1	8.00	2.01	2.71	74.82%(66.13%)	5.00	6.70	37.52%(16.25%)
Friuli( $PGA=0.25g$ )							
楼层	无控结构	一层布置半周装置	模拟一层布置摩擦装置	一层布置半周减震率(摩擦减震率)	二层布置半周装置	模拟二层布置摩擦装置	二层布置半周减震率(摩擦减震率)
4	6.03	5.52	5.45	8.55%(9.69%)	4.80	4.27	20.47%(29.24%)
3	10.41	8.99	8.01	13.62%(23.07%)	6.89	6.53	33.87%(37.28%)
2	13.49	9.39	9.77	30.38%(27.60%)	3.94	4.94	70.82%(63.39%)
1	9.53	4.09	3.92	57.11%(58.86%)	5.93	8.46	37.72%(11.20%)

注:半周装置为半周负刚度摩擦阻尼装置简称;摩擦装置为摩擦阻尼装置简称;括号内为摩擦阻尼装置减震率数据。

### 3.3 加速度减震效果分析

图21为振动台试验各工况下结构顶点加速度响应对比,可知:

(1)当半周负刚度摩擦阻尼装置布置于结构一层位置且 $PGA=0.2g$ 时,半周负刚度摩擦阻尼装置有效控制了结构的顶点加速度响应,在地震动Northridge, Hector, Kobe和Friuli下的加速度峰值减震率分别为66.48%,71.56%,19.50%和10.76%。

(2)当半周负刚度摩擦阻尼装置布置于结构一

层位置且 $PGA=0.25g$ 时,在地震动Northridge, Hector, Kobe和Friuli下的顶点加速度峰值减震率分别为55.56%,47.38%,10.52%和4.39%,与 $PGA=0.2g$ 时相比出现了一定程度的下降。

(3)当 $PGA=0.2g$ 时,在二层布置半周负刚度摩擦阻尼装置,与一层布置相比对结构的顶点加速度响应取得了更好的控制效果,在地震动Northridge, Hector, Kobe和Friuli下的的加速度峰值减震率分别为73.37%,76.44%,12.01%和18.77%。表明半周负刚度阻尼装置的布置位置对加速度的减震

效果有一定的影响。

(4)当  $PGA=0.25g$  时,在二层布置半周负刚度摩擦阻尼装置,在地震动 Northridge, Hector, Kobe 和 Friuli 下的顶点加速度峰值减震率分别为 66.24%, 76.39%, 11.73% 和 15.30%, 与  $PGA=0.2g$  时相比减震效果略有下降。

(5)与模拟摩擦阻尼装置方案相比,当布置半周负刚度摩擦阻尼装置时,结构顶点未出现在地震动 Kobe 或 Friuli 作用下加速度响应放大现象;在地震动 Northridge 或 Hector 作用下,虽然模拟摩擦阻尼

装置对结构的顶点加速度响应具有控制效果,但整体控制水平低于半周负刚度摩擦阻尼装置方案。

各层的加速度响应峰值及其减震率(与无控结构相比)如表 4 所示。在一层进行减震布置,  $PGA=0.2g$  时,地震动 Northridge, Hector, Kobe 和 Friuli 下的减震层(一层)的减震率分别为 2.87%, 10.65%, 9.27% 和 12.43%, 初步分析原因为装置工作时会产生刚度突变,造成高阶振型参与,导致加速度控制效果下降。在二层布置减震装置,当  $PGA=0.2g$  时,在地震动 Northridge, Hector, Kobe 和 Friuli 下,减震层(二层)的加速度峰值减震率分别达到了 50.08%, 45.91%, 11.57% 和 14.63%, 与一层布置半周装置相比没有放大减震层的加速度响应。各工况未出现与模拟摩擦阻尼装置方案相比较为明显的加速度响应放大现象。

### 3.4 半周负刚度摩擦阻尼装置滞回曲线

图 22 为  $PGA=0.2g$  和  $0.25g$  时,4 条地震动作用下半周负刚度摩擦阻尼装置产生的滞回曲线。由于力传感器安装在阻尼装置端部,造成阻尼装置存在活动间隙,当进行振动台试验时,阻尼装置出现了一定程度的晃动,使数据采集结果不稳定,但测得的最大阻尼力与设计值基本吻合。振动台试验时,观察到相比于一层布置半周负刚度摩擦阻尼装置,在二层布置该装置可以更早地进入工作阶段,因此对地震动输入到结构的能量可以更早地进行耗散,这有利于减少结构的地震响应。

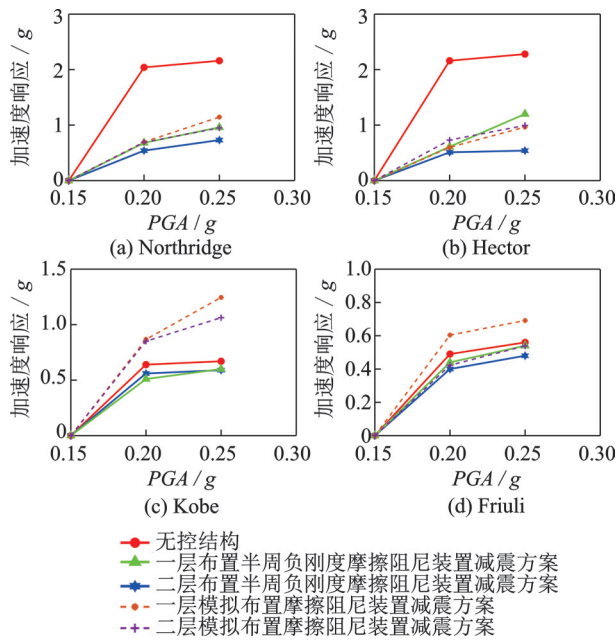


图 21 各工况下结构顶点加速度响应对比

Fig. 21 Comparison of the peak acceleration response of structural top floor under different loading cases

表 4 各工况下结构各层加速度响应峰值对比(单位: g)

Tab. 4 Comparing the peak acceleration response of each floor of the structure under different loading cases(Unit: g)

楼层	Northridge( $PGA=0.2g$ )						
	无控结构	一层布置半周装置	模拟一层布置摩擦装置	一层布置半周减震率(摩擦减震率)	二层布置半周装置	模拟二层布置摩擦装置	二层布置半周减震率(摩擦减震率)
4	2.04	0.68	0.70	66.48%(65.92%)	0.54	0.69	73.37%(66.21%)
3	0.87	0.48	0.69	44.78%(20.55%)	0.30	0.61	65.42%(30.19%)
2	0.75	0.53	0.52	29.40%(30.7%)	0.38	0.47	50.08%(37.17%)
1	0.40	0.39	0.47	2.87%(-17.74%)	0.34	0.56	14.98%(-40.93%)
楼层	Northridge( $PGA=0.25g$ )						
	无控结构	一层布置半周装置	模拟一层布置摩擦装置	一层布置半周减震率(摩擦减震率)	二层布置半周装置	模拟二层布置摩擦装置	二层布置半周减震率(摩擦减震率)
4	2.16	0.96	1.14	55.56%(47.01%)	0.73	0.95	66.24%(56.05%)
3	0.94	0.79	0.92	16.03%(2.59%)	0.55	0.96	41.36%(-2.65%)
2	0.69	0.53	0.82	22.69%(-9.42%)	0.54	0.70	22.48%(-1.60%)
1	0.33	0.31	0.61	5.40%(-85.58%)	0.30	0.66	10.41%(-99.10%)

续表

Hector( $PGA=0.2g$ )							
楼层	无控结构	一层布置半周装置	模拟一层布置摩擦装置	一层布置半周减震率 (摩擦减震率)	二层布置半周装置	模拟二层布置摩擦装置	二层布置半周减震率 (摩擦减震率)
4	2.16	0.61	0.60	71.56%(72.26%)	0.51	0.73	76.44%(66.19%)
3	0.84	0.40	0.43	52.41%(48.35%)	0.28	0.71	66.81%(14.96%)
2	0.65	0.44	0.50	32.80%(23.12%)	0.35	0.45	45.91%(30.99%)
1	0.38	0.34	0.48	10.65%(-25.88%)	0.33	0.55	12.11%(-44.24%)
Hector( $PGA=0.25g$ )							
楼层	无控结构	一层布置半周装置	模拟一层布置摩擦装置	一层布置半周减震率 (摩擦减震率)	二层布置半周装置	模拟二层布置摩擦装置	二层布置半周减震率 (摩擦减震率)
4	2.28	1.20	0.97	47.38%(57.67%)	0.54	0.99	76.39%(56.39%)
3	0.84	0.73	0.70	13.87%(16.20%)	0.40	0.87	53.00%(-3.44%)
2	0.70	0.59	0.73	15.46%(-4.20%)	0.47	0.58	32.33%(17.40%)
1	0.33	0.36	0.63	-10.74%(-91.84%)	0.35	0.73	-6.12%(-122.39%)
Kobe( $PGA=0.2g$ )							
楼层	无控结构	一层布置半周装置	模拟一层布置摩擦装置	一层布置半周减震率 (摩擦减震率)	二层布置半周装置	模拟二层布置摩擦装置	二层布置半周减震率 (摩擦减震率)
4	0.64	0.51	0.87	19.50%(-35.49%)	0.56	0.85	12.01%(-32.96%)
3	0.55	0.51	0.71	7.37%(-28.51%)	0.51	0.84	7.65%(-53.05%)
2	0.46	0.41	0.57	9.82%(-24.25%)	0.41	0.52	11.57%(-12.24%)
1	0.24	0.22	0.48	9.27%(-99.21%)	0.23	0.57	6.22%(-138.91%)
Kobe( $PGA=0.25g$ )							
楼层	无控结构	一层布置半周装置	模拟一层布置摩擦装置	一层布置半周减震率 (摩擦减震率)	二层布置半周装置	模拟二层布置摩擦装置	二层布置半周减震率 (摩擦减震率)
4	0.67	0.60	1.25	10.52%(-85.87%)	0.59	1.06	11.73%(-58.58%)
3	0.57	0.52	0.89	8.49%(-55.49%)	0.50	1.09	13.09%(-90.99%)
2	0.47	0.44	0.81	5.37%(-72.92%)	0.45	0.64	3.27%(-36.46%)
1	0.27	0.23	0.63	15.00%(-133.77%)	0.27	0.65	2.42%(-139.79%)
Friuli( $PGA=0.2g$ )							
楼层	无控结构	一层布置半周装置	模拟一层布置摩擦装置	一层布置半周减震率 (摩擦减震率)	二层布置半周装置	模拟二层布置摩擦装置	二层布置半周减震率 (摩擦减震率)
4	0.49	0.44	0.60	10.76%(-23.27%)	0.40	0.42	18.77%(13.69%)
3	0.39	0.32	0.41	17.83%(-5.05%)	0.29	0.48	25.68%(-24.22%)
2	0.31	0.26	0.33	15.77%(-7.39%)	0.26	0.40	14.63%(-30.48%)
1	0.24	0.21	0.31	12.43%(-30.86%)	0.23	0.39	4.38%(-61.30%)
Friuli( $PGA=0.25g$ )							
楼层	无控结构	一层布置半周装置	模拟一层布置摩擦装置	一层布置半周减震率 (摩擦减震率)	二层布置半周装置	模拟二层布置摩擦装置	二层布置半周减震率 (摩擦减震率)
4	0.56	0.54	0.69	4.39%(-23.48%)	0.48	0.54	15.30%(3.78%)
3	0.44	0.40	0.57	10.20%(-28.93%)	0.38	0.55	14.89%(-25.42%)
2	0.37	0.34	0.44	9.94%(-20.15%)	0.33	0.44	10.53%(-17.60%)
1	0.27	0.26	0.46	4.80%(-71.55%)	0.26	0.50	2.66%(-86.12%)

注:半周装置为半周负刚度摩擦阻尼装置简称;摩擦装置为摩擦阻尼装置简称;括号内为摩擦阻尼装置减震率数据。

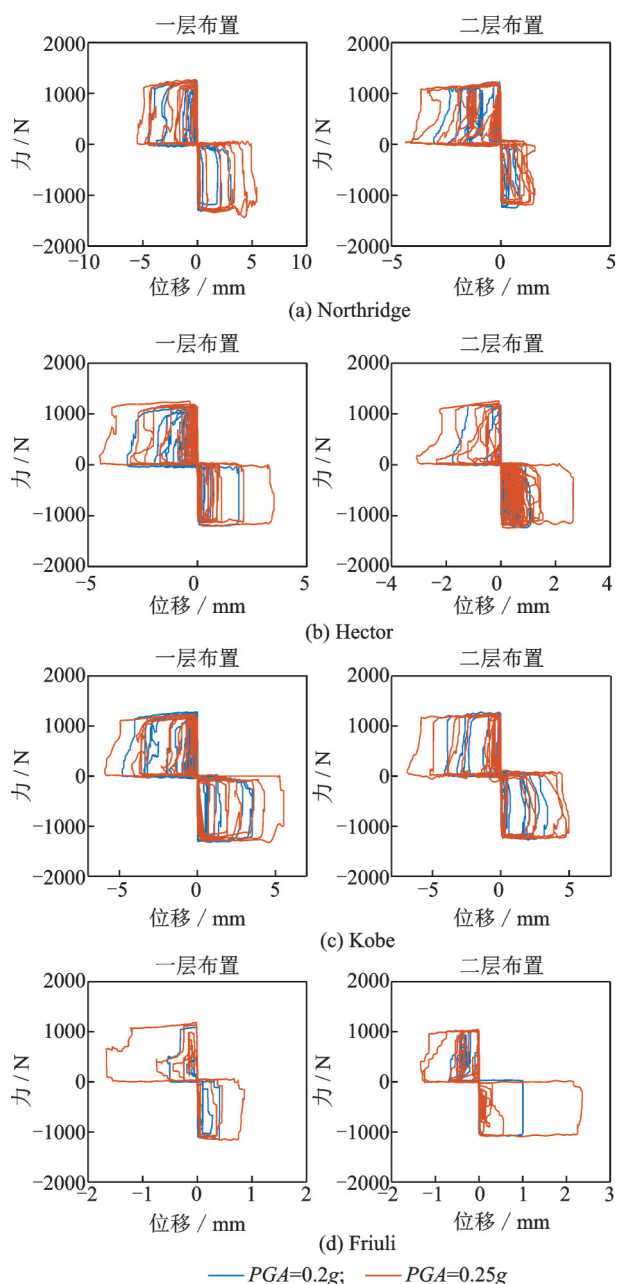


图22 各地震动下装置产生的滞回曲线

Fig. 22 Hysteresis curves generated by the device under different ground motions

## 4 结论

通过振动台试验方法,分别在某四层钢结构框架模型的一层和二层布置半周负刚度摩擦阻尼装置,得到了以下结论:

(1) 通过合理设计半周负刚度摩擦阻尼装置的参数与布置位置,可以实现结构的位移与加速度响应双重控制,有效提高了结构的抗震性能。

(2) 半周负刚度摩擦阻尼装置宜布置于结构变形较大位置,这有利于装置更早地参与结构能量的耗散,获得更为优异的减震效果。

(3) 未布置有半周负刚度阻尼装置的楼层也获得了较为理想的减震效果,呈现出距离布置位置越远,减震效果递减的趋势。

(4) 振动台试验结果与模拟摩擦阻尼装置结果相比,在对结构的位移响应控制效果相近的情况下,对结构整体的加速度响应控制效果具有明显优势。

## 参考文献:

- [1] Sun T W, Peng L Y, Li X J, et al. Development and analysis of negative stiffness friction damping device[J]. KSCSE Journal of Civil Engineering, 2021, 25 (7): 2587-2602.
- [2] 孙天威, 彭凌云, 李小军, 等. 负刚度摩擦阻尼装置的开发及应用研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(6): 243-249.  
Sun Tianwei, Peng Lingyun, Li Xiaojun, et al. Development and application of a negative stiffness friction damping device[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(6): 243-249.
- [3] Iemura H, Pradono M H. Advances in the development of pseudo-negative-stiffness dampers for seismic response control[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2009, 16(7-8): 784-799.
- [4] Iemura H, Igarashi A, Pradono M H, et al. Negative stiffness friction damping for seismically isolated structures[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2006, 13(2-3): 775-791.
- [5] Pradono M H, Iemura H, Igarashi A, et al. Passively controlled MR damper in the benchmark structural control problem for seismically excited highway bridge[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2009, 16 (6): 626-638.
- [6] Kenneth K W, Evan B, Eric P S, et al. Variable negative stiffness device for seismic protection of building structures through apparent weakening[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2018, 144(9): 04018090.
- [7] Li H, Liu M, Ou J P. Negative stiffness characteristics of active and semi-active control systems for stay cables [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2008, 15(2): 120-142.
- [8] Li H, Liu J, Ou J P. Seismic response control of a cable-stayed bridge using negative stiffness dampers[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2011, 18 (3): 265-288.
- [9] Zhou P, Liu M, Li H. A passive negative stiffness damper in series with a flexible support: theoretical and experimental study[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2020, 27(9): e2594.
- [10] Zhou P, Liu M, Li H. Optimized negative stiffness

- damper with flexible support for stay cables[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2021, 28(6): e2717.
- [11] Azizi S, Karami K, Nagarajaiah S. Developing a semi-active adjustable stiffness device using integrated damage tracking and adaptive stiffness mechanism[J]. *Engineering Structures*, 2021, 238: 112036.
- [12] Nagarajaiah S, Sen D. Apparent-weakening by adaptive passive stiffness shaping along the height of multistory building using negative stiffness devices and dampers for seismic protection[J]. *Engineering Structures*, 2020, 220: 110754.
- [13] Sun C, Nagarajaiah S. Study of a novel adaptive passive stiffness device and its application for seismic protection[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2019, 443: 559-575.
- [14] Sun F, Wang M, Nagarajaiah S. Multi-objective optimal design and seismic performance of negative stiffness damped outrigger structures considering damping cost[J]. *Engineering Structures*, 2021, 229: 111615.
- [15] Pasala D T R, Sarlis A A, Nagarajaiah S, et al. Adaptive negative stiffness: new structural modification approach for seismic protection[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2013, 139(7): 1112-1123.
- [16] 付杰. 负刚度磁流变阻尼器减震系统的理论与实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.  
Fu Jie. Theoretical and experimental studies on vibration control system of negative stiffness magnetorheological damper[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [17] 付杰, 熊世树, 纪晗, 等. 多自由度结构的拟负刚度阻尼器减震效果分析[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(2): 46-50.  
Fu Jie, Xiong Shishu, Ji Han, et al. Analyzing vibration reduction effect of multi-degree of freedom structures using pseudo-negative-stiffness dampers[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 42(2): 46-50.
- [18] 彭凌云, 陈李光, 孙天威, 等. 负刚度线性滞回阻尼减震效果分析与应用研究[J]. *北京工业大学学报*, 2020, 46(12): 1355-1364.  
Peng Lingyun, Chen Liguang, Sun Tianwei, et al. Analysis and application of damping effect of linear hysteretic damping with negative stiffness[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2020, 46(12): 1355-1364.
- [19] 方国威, 孙天威, 彭凌云, 等. 具有负刚度特征的半周摩擦阻尼装置的开发及应用研究[J]. *振动工程学报*, 2021, 34(2): 347-356.  
Fang Guowei, Sun Tianwei, Peng Lingyun, et al. Development and application of half-cycle friction damping device with negative stiffness characteristic[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2021, 34(2): 347-356.
- [20] 孙天威, 彭凌云, 李小军. 负刚度摩擦阻尼装置减震原理分析及振动台试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2023, 44(11): 92-101.  
Sun Tianwei, Peng Lingyun, Li Xiaojun. Analysis of seismic reduction principle and shaking table test of negative stiffness friction damping device[J]. *Journal of Building Structures*, 2023, 44(11): 92-101.
- [21] Sun T W, Peng L Y, Ji X D, et al. Development of a negative stiffness friction damping device with an amplification mechanism[J]. *Engineering Structures*, 2023, 275: 115286.
- [22] 彭凌云, 周锡元, 闫维明, 等. 重要建筑的抗震性能设计-实例分析[J]. *工业建筑*, 2006, 36(9): 347-356.  
Peng Lingyun, Zhou Xiyuan, Yan Weiming, et al. Performance-based seismic design for critical building-an exemplary analysis[J]. *Industrial Construction*, 2006, 36(9): 347-356.

## Shaking table test of a half-cycle negative stiffness friction damping device

SUN Tian-wei<sup>1,2</sup>, PENG Ling-yun<sup>1</sup>, LI Xiao-jun<sup>1,3</sup>, FANG Guo-wei<sup>4</sup>

(1.Beijing Key Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2.Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3.Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China; 4.China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

**Abstract:** The shaking table test of a half-cycle negative stiffness friction damping device with negative stiffness characteristics is carried out. Taking a four-floor steel structure frame as the seismic reduction research object, the half-cycle negative stiffness friction damping devices were arranged on the first and second floors of the steel structure frame respectively, and the seismic response of the structure under different ground motions was analyzed. The results show that the half-cycle negative stiffness friction damping device can control the acceleration and displacement response of the structure, and better seismic reduction effect can be obtained if it is arranged on the position with large structural deformation.

**Key words:** seismic reduction; negative stiffness; half-cycle; friction damping; shaking table test

**作者简介:** 孙天威(1990—), 男, 博士, 助理研究员。E-mail: tianweisun1990@163.com。

**通讯作者:** 彭凌云(1976—), 男, 博士, 教授。E-mail: ply@bjut.edu.cn。