

# 弹性软碰撞防护装置试验研究

金建敏<sup>1</sup>, 肖 骥<sup>1</sup>, 谭 平<sup>1</sup>, 刘彦辉<sup>1</sup>, 陈 鹏<sup>1</sup>, 朱 健<sup>2</sup>

(1. 广州大学 工程抗震研究中心, 广东 广州 510405; 2. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021)

**摘要:** 为限制隔震层位移, 对能提供刚度的弹性软碰撞防护装置进行了试验研究, 该装置主要由天然橡胶支座、剪力键及中空连接钢板组成。首先对天然橡胶支座进行了设计压应力 12 MPa 下基本性能试验及压应力 0 MPa 下剪切试验。然后, 进行了三种型号的弹性软碰撞防护装置的水平力学性能测试试验, 测定该类装置的水平等效刚度及支座顶端在装置工作过程中的转角, 探讨不同剪力键连接方式、不同材质的剪力键及中空连接钢板、剪力键外圆面是否罩橡胶套、不同支座直径以及不同橡胶剪切模量的影响及差异。对比分析了弹性软碰撞防护装置的水平等效刚度与支座部分在 0 MPa 下试验结果的差异。结果表明: 单纯采用过盈配合的连接方式, 剪力键存在松动的可能, 改进的连接方式是可行的, 在剪力键外圆面罩上橡胶套后可避免或减轻中空连接钢板的损伤; 与 0 MPa 下支座试验结果相比较, 装置水平等效刚度的降低程度及支座顶端转角随支座部分剪应变的增大而增大; 不同支座直径及不同橡胶剪切模量, 装置水平等效刚度的降低程度及支座顶端转角有所差异。

**关键词:** 弹性软碰撞防护装置; 天然橡胶支座; 剪力键; 中空连接钢板; 试验研究

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)01-0063-09

## Experimental study on elastic soft impact protection device

JIN Jianmin<sup>1</sup>, XIAO Ji<sup>1</sup>, TAN Ping<sup>1</sup>, LIU Yanhui<sup>1</sup>, CHEN Peng<sup>1</sup>, ZHU Jian<sup>2</sup>

(1. Earthquake Engineering Research & Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China;

2. Department of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** In order to limit the displacement of the isolation layer, tests are conducted to the elastic soft impact protection device, which can provide stiffness. The device is mainly composed of linear natural rubber bearing, shear key and hollow connecting steel plate. Firstly, the basic performance test under design compressive stress of 12 MPa and the shear test under compressive stress of 0 MPa of liner natural rubber bearing are carried out. Then, three types of elastic soft impact protective devices are tested for the horizontal mechanical performance, in determining the horizontal equivalent stiffness of the device and rotation angle at the top end of the rubber bearing. The influence as well as difference of connection modes of shear key, different material of shear key and the hollow connecting steel plate, the outer surface of the shear key is covered with rubber bush or not, different bearing diameters and different shear modulus of rubber are discussed. The difference of the horizontal equivalent stiffness between the elastic soft impact protection device and the test results of the bearing parts under 0 MPa is compared and analyzed. Results show that shear keys may be loosened by using interference fit only, and the improved connection modes are feasible. The damage of hollow connection steel plate can be avoided or mitigated by covered the shear keys with rubber bush. Compared with test results of the bearing under 0 MPa, the degree of the horizontal equivalent stiffness decrease of the device and the rotation angle at the top end of the bearing increase with the shear strain of the bearing part. The degree of the horizontal equivalent stiffness decrease and the rotation angle at the top end of the bearing are different with different bearing diameters and different shear modulus of rubber.

**Key words:** elastic soft impact protection device; linear natural rubber bearing; shear key; hollow connecting steel plate; experimental study

隔震结构是在上、下部结构间设置隔震支座, 延长结构水平自振周期, 同时在隔震层附加阻尼装置, 因为隔震结构的周期远离地震卓越周期,

减小了地震作用, 水平刚度较小的隔震支座变形较大, 是整个结构安全保障的关键<sup>[1-3]</sup>。由于结构位移主要集中在隔震层, 隔震层的过大位移会造

收稿日期: 2018-12-10

修改稿日期: 2020-01-13

基金项目: 广州市科技计划基金项目(201707010333); 国家重点研发计划基金项目(2016YFC0701507, 2017YFC0703600); 国家自然科学基金项目(51778163, 51468050)

第一作者: 金建敏(1973—), 男, 高工, 博士, 主要从事隔震、抗震研究。E-mail: jinjianmin152@aliyun.com

成橡胶隔震支座损伤,甚至破坏;当隔震层位移超过隔震沟宽度,隔震结构与周边挡土墙的碰撞将导致上部结构地震响应放大,对上部结构造成不利影响,因此有必要对隔震层的限位防护进行相关研究.韩森等对隔震层软碰撞限位进行了研究<sup>[4-5]</sup>,并采用钢螺旋弹簧作为弹性限位装置进行了隔震钢架模型的软碰撞限位振动台试验研究<sup>[6-7]</sup>.堀则男等采用连接型摩擦阻尼器进行了隔震层限位研究<sup>[8]</sup>.Polycarpou P 等采用橡胶缓冲器减轻基础隔震结构与周边挡土墙碰撞的不利影响,吸收部分碰撞能量<sup>[9]</sup>.文献<sup>[10]</sup>对主要由天然橡胶支座、剪力键及中空连接钢板组成的弹性软碰撞防护装置进行了试验研究,该文采用剪切模量为 0.6 MPa (G6) 的天然橡胶支座进行了弹性软碰撞防护装置的试验研究,但未给出该类装置水平力学性能参数与 0 MPa 下天然橡胶支座剪切试验测得的支座水平力学性能参数的差异,相关细节未见描述,本文对不同剪力键连接方式、不同材质的剪力键及中空连接钢板、剪力键外圆面是否罩橡胶套、不同支座直径以及橡胶剪切模量的弹性软碰撞防护装置进行了详细的试验研究.

## 1 弹性软碰撞防护装置

### 1.1 装置简介及支座参数

弹性软碰撞防护装置如图 1 所示,图中的橡胶支座部分内部型式与常规天然橡胶支座(LNR)相同,其高度、平面尺寸及形状系数可根据需要调整.在工程应用中,中空连接钢板与上部结构的隔震层梁中部底面相连,下连接板与支墩连接.中空连接钢板下表面与上连接钢板上表面在竖向预留一定的竖向距离,中空连接钢板中心部位设置圆形中孔,圆柱体剪力键顶端伸入圆形中孔一定长度,并在水平方向预留一定的水平间距(中空连接钢板的圆形中孔半径与圆柱体剪力键半径的差),在设定的水平位移范围内,该中空连接钢板

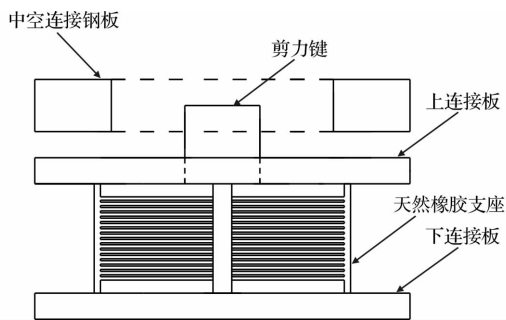


图 1 弹性软碰撞防护装置示意图

Fig. 1 Sketch of elastic soft impact protection device

与圆柱体剪力键不发生碰撞,一旦水平位移超过预留的水平间距时,该软碰撞防护装置即发挥作用,中空连接钢板带动下部的天然橡胶支座部分工作,天然橡胶支座产生水平变形,为隔震层提供附加刚度,从而限制隔震层位移.

本文选用工程中常用的  $S_2=5$  的 G4(剪切模量为 0.392 MPa)支座系列,制作了直径分别为 200 mm(2 个,1 号及 2 号)及 300 mm(1 个,3 号)的天然橡胶支座,支座参数见表 1.此外,还制作了 1 个 G6(剪切模量为 0.6 MPa,4 号)的直径 200 mm 支座,以考察剪切模量对软碰撞防护装置性能的影响,采用不同橡胶支座的弹性软碰撞防护装置分别称之为 LNR200-G4 型、LNR300-G4 型及 LNR200-G6 型软碰撞防护装置.

表 1 支座参数( $\gamma=\pm 100\%$ )

Tab. 1 Parameters for LNR( $\gamma=\pm 100\%$ )

支座型号	LNR	LNR	LNR
	200-G4	200-G6	300-G4
橡胶 $G$ 值/MPa	0.392	0.6	0.392
直径 $D$ /mm	200	200	300
中孔直径 $D_0$ /mm	15	15	30
内部橡胶总厚 $T_r$ /mm	40.5	40.5	58
高度 $H$ /mm	115.5	115.5	150
第 1 形状系数 $S_1$	30.83	30.83	33.75
第 2 形状系数 $S_2$	4.94	4.94	5.17
竖向刚度 $K_v$ /kN·mm <sup>-1</sup>	746	867	1 273
水平等效刚度 $K_h$ /kN·mm <sup>-1</sup>	0.298	0.457	0.467

### 1.2 剪力键连接方式

在试验过程中,剪力键与图 1 中的上连接钢板连接先后采用了三种连接方式:

#### (1)过盈配合

连接方式 1,依靠圆柱形剪力键与上连接钢板中孔的过盈值,即剪力键直径略大于中孔的直径,从而获得紧固的联接,如图 2(a)所示,与其它连接方式相比较,此方式加工简单,但易受到加工误差影响,在运输及试验过程中,可能会造成剪力键松动.

#### (2)过盈配合加焊接

连接方式 2,剪力键及中孔的尺寸同前述连接方式,不同之处在于,上连接钢板中孔上、下两端分别倒坡口,将剪力键压入中孔后,在上、下两端将剪力键与连接钢板焊接在一起,此方式在焊接完成后,需将焊接部位凸出的焊渣部分打磨

掉, 且需防止焊接过程中上连接钢板的焊接变形。

(3)改进的过盈配合

连接方式 3, 将圆柱形剪力键的底端加大, 即做成 T 形的圆柱体, 如图 2(b)所示, 上端部分与上连接钢板的中孔仍然采用过盈配合, 此方式可避免试验过程中, 由于联接力不足, 导致的剪力键的松动, 此方式需注意剪力键底部与上连接钢板底部连接部位的平整度, 防止剪力键凸出或凹进, 对机械加工要求较高。

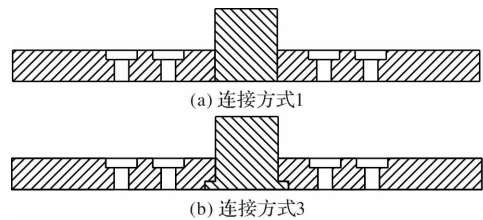


图 2 剪力键的连接方式  
Fig. 2 Connection mode of shear key

1.3 剪力键与中空连接钢板的组合

分别采用 Q235B 及 Q345B 为基材, 生产了三套剪力键与中空连接钢板的组合, 剪力键直径与凸出高度、水平间距以及中空连接钢板尺寸等见表 2。

表 2 剪力键与中空连接钢板的组合

	Tab. 2 Combination of shear key and hollow connecting steel plate		
	组合 1	组合 2	组合 3
剪力键及中空连接钢板材料	Q235B	Q235B	Q345B
剪力键直径/mm	60	60	60
剪力键凸出高度/mm	40	40	50
水平间距/mm	70	60	60
剪力键连接方式	(1)	(2)	(3)
中空连接钢板尺寸/mm	300×300×50		
中空连接钢板中孔直径/mm	200	180	180
支座编号	1	3	2, 4

2 试验概况

试验加载设备为广州大学工程抗震中心的拉压剪试验机, 该设备竖向最大压载 500 t、拉载 300 t, 水平荷载最大 100 t。首先进行 4 个支座的基本性能试验, 设计压应力为 12 MPa, 测定支座竖向刚度  $K_v$  及水平等效刚度  $K_h$  ( $\gamma = \pm 100\%$ , 加载频率 0.05 Hz)。然后进行 0 MPa 水平力学性能试验(剪应变  $\gamma = \pm 50\%$ 、 $\pm 100\%$ 、 $\pm 150\%$ 、 $\pm 200\%$ ), 测定不同剪应变时支座水平等效刚度  $K_h$ ,

其中, 1 号支座分别进行了频率恒定为 0.05 Hz 及频率变化的试验(加载速度 50 mm/s, 加载频率见表 3,  $\gamma = \pm 50\%$  时, 频率 0.33 Hz 的加载速度略低于 50 mm/s 是结合设备能力确定的), 以考察加载频率对测试结果的影响, 2~4 号支座只进行了加载速度 50 mm/s 的试验, 相应的加载频率见表 3, 测试结果为第 3 圈结果<sup>[11-12]</sup>。然后, 撤除支座上连接板, 将中空连接钢板与设备上部相连, 并将带剪力键的上连接板(以下简称为带剪力键连接板)与支座上部相连, 剪力键与中空连接钢板的组合为表 2 中的组合 1, 试验安装照片见图 3, 中空连接钢板下表面与带剪力键连接板上表面的竖向距离设定为 20 mm, 剪力键伸入中空连接钢板中孔一定长度, 压剪试验设备上部竖向悬空, 采用位控命令保持恒定位置, 并通过位控命令控制设备下部水平往复移动, 进行橡胶支座剪切变形试验( $\gamma = \pm 50\%$ 、 $\pm 100\%$ 、 $\pm 150\%$ 、 $\pm 200\%$ ), 加载速度为 50 mm/s, 以检验弹性软碰撞防护装置工作性能及测定其水平力学性能指标, 采用组合 1 的 LNR200-G4 型装置的加载频率依次为 0.088 Hz、0.072 Hz、0.061 Hz 及 0.053 Hz, 采用组合 2、3 的装置的加载频率见表 3。

在支座的试验过程中, 支座顶端无转角, 而在装置的试验过程中, 橡胶支座部分的顶端为自由端, 在支座水平变形时, 支座顶端会产生转角。为测定该转角, 在带剪力键连接板侧面安装了角钢, 以便于在支座两边各安装竖向 2 个传感器, 通过测定竖向传感器的竖向位移差, 除以传感器之间的水平距离, 两边的结果取平均值, 以得到转角。同时为了避免或减轻剪力键与中空连接钢板硬碰硬导致的损伤, 分别在剪力键外圆面罩橡胶套(2 mm 厚 G4 橡胶片)及不罩橡胶套, 进行了装置的试验, 测试结果如未做特殊说明, 为第 3 圈结果。

表 3 试验工况  
Tab. 3 Test conditions

剪应变 $\gamma/\%$	加载频率/Hz			
	直径 200 mm		直径 300 mm	
	支座	装置	支座	装置
$\pm 50$	0.33	0.099	0.274	0.086
$\pm 100$	0.196	0.079	0.137	0.067
$\pm 150$	0.131	0.066	0.091	0.054
$\pm 200$	0.098	0.056	0.069	0.045



图3 安装照片

Fig. 3 Installation photograph

### 3 试验结果分析

#### 3.1 LNR200-G4 型软碰撞防护装置

在 12 MPa 下, LNR200-G4 支座基本性能测试结果见表 4, 表中 1 号支座的竖向刚度与水平等效刚度测试值与设计值(见表 1)的偏差分别为  $-7.5\%$  及  $+22.5\%$ , 2 号支座的偏差分别为  $-4.5\%$  及  $+10.4\%$ . 表 5 为 0 MPa 下的支座水平等效刚度( $\gamma = \pm 50\% \sim \pm 200\%$ )测试结果, 从表中结果可见, 支座的水平等效刚度受频率相关性的影响并不明显, 水平等效刚度随剪应变的增大而减小; 对比 0 MPa( $\gamma \pm 100\%$ )与 12 MPa 下的水平等效刚度可见, 水平等效刚度的变化较小; 从实测结果可见, 2 号支座的剪切模量低于 1 号支座.

表4 基本性能测试结果

Tab. 4 Test result of basic performance

性能指标	1 号支座	2 号支座
竖向刚度 $K_v / \text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	690.3	712.2
水平等效刚度 $K_h / \text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	0.365	0.329

表5 支座水平等效刚度(0 MPa)

Tab. 5 Horizontal equivalent stiffness of bearing(0 MPa)

剪应变 $\gamma / \%$	水平等效刚度 $K_h / \text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$				
	频率 /Hz	1 号 支座	频率 /Hz	1 号 支座	2 号 支座
$\pm 50$	0.05	0.419	0.330	0.448	0.398
$\pm 100$	0.05	0.381	0.196	0.401	0.343
$\pm 150$	0.05	0.360	0.131	0.376	0.318
$\pm 200$	0.05	0.344	0.098	0.358	0.312

接着进行装置(1 号支座, 组合 1)的试验, 在剪力键外圆面不罩橡胶套的试验中, 观察到中空连接钢板侧壁有损伤, 见图 4, 且在  $\gamma = \pm 150\%$  试验过程中, 由于剪力键发生松动倾斜后, 从中空连接钢板中脱出, 未能完成  $\gamma = \pm 150\%$  的试验. 之后的试验将中空连接钢板拆下, 旋转 90 度, 重新与设备上部相连, 将剪力键重新敲入上连接板



图4 中空连接钢板损伤(Q235B)

Fig. 4 Damage of the hollow connecting steel plate(Q235B)

中孔后, 在剪力键外圆面罩上橡胶套后进行支座剪应变  $\pm 50\% \sim \pm 150\%$  的试验, 为避免剪力键的再次脱出,  $\gamma = \pm 150\%$  的试验只循环 1 圈, 罩橡胶套实测的滞回曲线见图 5. 为考察采用 Q345B 钢材的中空连接钢板, 在剪力键外圆面不罩橡胶套的情况下是否会发生损伤, 制作了中空连接钢板和剪力键均采用 Q345B 钢材的试件, 中空连接钢板下表面与带剪力键连接板上表面的竖向距离设定为 20 mm, 对装置(2 号支座, 组合 3)分别进行了罩、不罩橡胶套的试验, 剪应变  $\pm 50\% \sim \pm 200\%$ , 试验照片见图 6. 图 7 为不罩橡胶套工况完成后, 中空连接钢板的照片, 由图 7 可见, 即使采用 Q345B 为基材, 碰撞仍然会造成中空连接钢板侧壁的损伤, 需要说明的是, 该损伤在罩橡胶套的工况时并未出现.

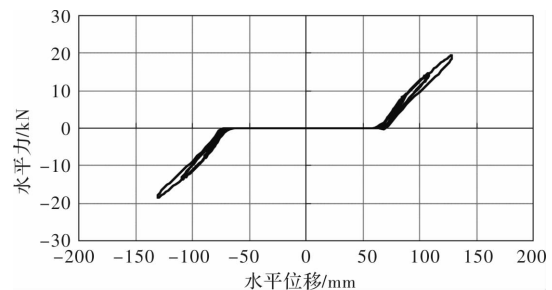


图5 水平力-位移滞回曲线

(1 号支座, 组合 1, 罩橡胶套)

Fig. 5 Horizontal force-displacement hysteretic curve (No. 1 bearing, combination 1, cover with rubber bush)

图 8 为罩橡胶套实测的滞回曲线, 为计算弹性软碰撞防护装置水平等效刚度, 将左、右侧的滞回曲线分别向右、左平移预留的水平间距, 两侧曲线形成整圈的滞回曲线, 实测的装置水平等效刚度见表 6, 表中, 采用 1 号支座的装置(罩橡胶套, 支座剪应变  $\gamma = \pm 150\%$ )的试验结果为第 1 圈结果. 图 9 为 0 MPa 下 2 号支座实测滞回曲线与装置实测(罩、



图 6 试验照片(2号支座, 组合 3, 罩橡胶套)  
Fig. 6 Test photo (No. 2 bearing, combination 3, cover with rubber bush)



图 7 中空连接钢板损伤(Q345B)  
Fig. 7 Damage of the hollow connecting steel plate(Q345B)

不罩橡胶套)的滞回曲线的对比( $\gamma = \pm 50\% \sim \pm 200\%$ ). 分析可知, 与不罩橡胶套对比, 罩橡胶套对水平等效刚度基本无影响; 与 0 MPa 下测试的支座水平等效刚度相比较, 弹性软碰撞防护装置水平等效刚度有所降低, 且降低程度随支座部分的剪应变增大而增大, 采用 2 号支座的弹性软碰撞防护装置的水平等效刚度(罩橡胶套), 剪应变为  $\pm 50\%$ 、 $\pm 100\%$ 、 $\pm 150\%$ 、 $\pm 200\%$ , 分别降低为 89.2%、86.6%、81.8%、76.0%.

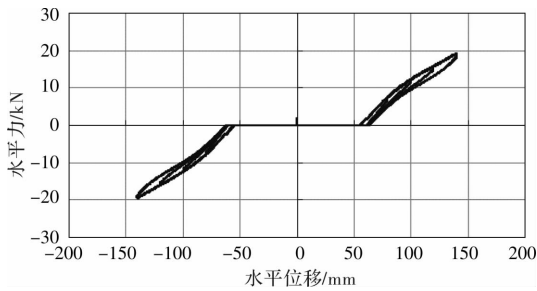


图 8 水平力-位移滞回曲线  
(2号支座, 组合 3, 罩橡胶套)  
Fig. 8 Horizontal force-displacement hysteretic curve  
(No. 2 bearing, combination 3, cover with rubber bush)

表 6 装置水平等效刚度

Tab. 6 Horizontal equivalent stiffness of device

剪应变 $\gamma/\%$	水平等效刚度 $K_h/\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$			
	1 号支座, 组合 1		2 号支座, 组合 3	
	罩橡胶套	不罩橡胶套	罩橡胶套	不罩橡胶套
$\pm 50$	0.420	0.441	0.355	0.356
$\pm 100$	0.369	0.380	0.297	0.303
$\pm 150$	0.320	/	0.260	0.264
$\pm 200$	/	/	0.237	0.241

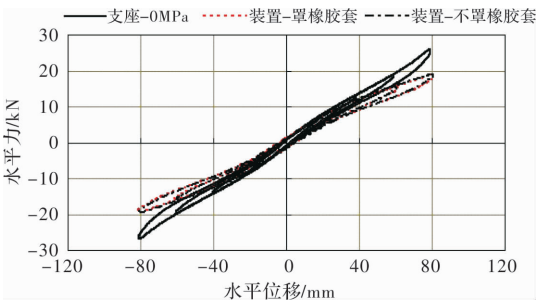


图 9 水平力-位移滞回曲线对比(2号支座及装置)  
Fig. 9 Comparison of horizontal force-displacement hysteretic curve (No. 2 bearing and device)

表 7 为罩橡胶套时, 转角测定结果, 表中, 采用 1 号支座的装置(支座剪应变  $\gamma = \pm 150\%$ )的试验结果为第 1 圈结果, 图 10 为  $\gamma = \pm 200\%$  时, 转角与剪应变关系, 由表 7 及图 10 可见, 转角的增大明显大于剪切应变的增大, 呈现出非线性增大的趋势; 图 11 为  $\gamma = \pm 50\% \sim \pm 200\%$  时, 支座弯矩与转角关系, 由图 11 可见, 不同剪应变工况最大弯矩的增大小于最大转角的增大.

表 7 转角(1号, 2号支座)

Tab. 7 Rotation angle(No. 1, No. 2 bearing)

剪应变 $\gamma/\%$	转角/rad			
	1 号支座, 组合 1		2 号支座, 组合 3	
	左	右	左	右
$\pm 50$	-0.002 8	0.004 4	-0.007 6	0.008 3
$\pm 100$	-0.017 2	0.020 0	-0.028 7	0.029 2
$\pm 150$	-0.040 7	0.046 3	-0.065 0	0.067 1
$\pm 200$	/	/	-0.114 6	0.111 2

3.2 LNR300-G4 型软碰撞防护装置

12 MPa 下, 3 号支座竖向刚度及水平等效刚度分别为  $1\,279.0\text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$  及  $0.466\text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ , 与设计值的偏差分别为  $+0.5\%$  及  $-0.2\%$ . 0 MPa 下的 3 号支座水平等效刚度 ( $\gamma = \pm 50\% \sim \pm 200\%$ ), 测试结果见表 8.

在之后进行装置(3号支座, 组合 2)的试验,

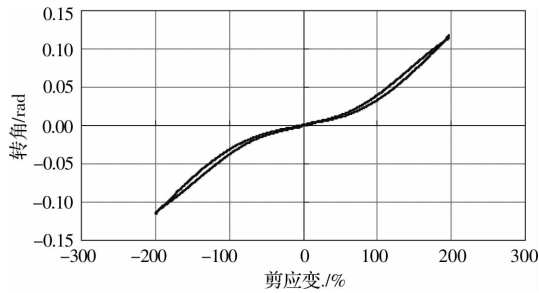


图 10 转角-剪应变(2号支座, 组合 3, 罩橡胶套)  
Fig. 10 Rotation angle-shear strain (No. 2 bearing, combination 3, covered with rubber bush)

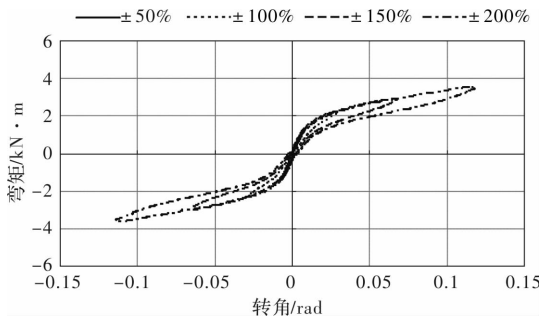


图 11 弯矩-转角(2号支座, 组合 3, 罩橡胶套)  
Fig. 11 Moment-rotation angle (No. 2 bearing, combination 3, covered with rubber bush)

中空连接钢板下表面与带剪力键连接板上表面的竖向距离设定为 20 mm, 分别进行了罩、不罩橡胶套的试验, 剪应变 $\pm 50\% \sim \pm 200\%$ , 图 12(a)为罩橡胶套实测的滞回曲线。实测的装置水平等效刚度见表 8, 罩与不罩橡胶套, 水平等效刚度差异很小; 与 0MPa 下测试的支座水平等效刚度相比较, 装置的水平等效刚度(罩橡胶套), 剪应变为 $\pm 50\%、\pm 100\%、\pm 150\%、\pm 200\%$ , 分别降低为 97.0%、96.3%、95.0%、91.9%。转角测定结果见表 9, 与 LNR200-G4 型装置的支座顶端转角相比较, 相同剪应变, LNR300-G4 型装置的支座顶端转角明显变小, 转角的增大同样明显大于剪切应变的增大, 但应注意到 200 mm 支座直径较小, 会增加内部橡胶硫化时平整度控制难度, 这将导致支座剪切变形时转角的增大。

表 8 水平等效刚度(3号支座及装置)

Tab. 8 Horizontal equivalent stiffness (No. 3 bearing and device)

剪应变 $\gamma/\%$	水平等效刚度 $K_h/\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$		
	3 号支座	罩橡胶套	不罩橡胶套
$\pm 50$	0.570	0.553	0.556
$\pm 100$	0.488	0.470	0.471
$\pm 150$	0.443	0.421	0.422
$\pm 200$	0.431	0.396	0.397

表 9 转角(3号支座)

Tab. 9 Rotation angle(No. 3 bearing)

剪应变 $\gamma/\%$	转角/rad			
	罩橡胶套		不罩橡胶套	
	左	右	左	右
$\pm 50$	-0.002 0	0.002 6	-0.001 6	0.003 5
$\pm 100$	-0.007 6	0.008 5	-0.006 6	0.009 4
$\pm 150$	-0.020 9	0.024 8	-0.018 1	0.022 5
$\pm 200$	-0.046 8	0.054 0	-0.041 7	0.050 9

表 10 转角对比

Tab. 10 Comparison of rotation angle

竖向距离之比	剪应变 $\gamma/\%$	最大转角比值
5 : 20 /mm	$\pm 150$	0.982
	$\pm 200$	0.658
2 : 20 /mm	$\pm 150$	0.561
	$\pm 200$	0.403

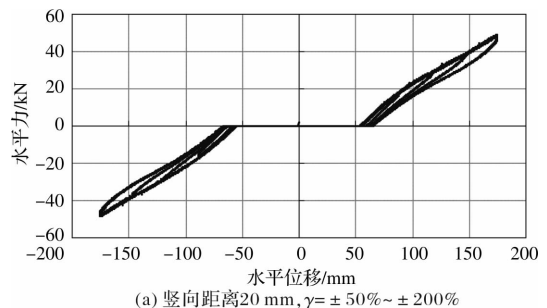
表 11 水平等效刚度(竖向距离 5 mm 及 2 mm)

Tab. 11 Horizontal equivalent stiffness  
(Vertical distance 5 mm and 2 mm)

剪应变 $\gamma/\%$	水平等效刚度 $K_h/\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	
	竖向距离 5 mm	竖向距离 2 mm
$\pm 150$	0.415	0.422
$\pm 200$	0.400	0.410

分析可见, 随支座剪应变的增大而增大的支座顶端转角造成水平等效刚度降低程度增大, 因此, 考虑将竖向距离降低, 以希望通过中空连接钢板与带剪力键连接板发生接触限制转角, 从而减轻转角对支座水平刚度的影响, 将中空连接钢板下表面与带剪力键连接板上表面的竖向距离分别设定为 5 mm 及 2 mm 进行了剪应变为 $\pm 150\%、\pm 200\%$ 的试验(罩橡胶套), 试验频率分别为 0.054 Hz、0.045 Hz。

试验过程中, 当竖向距离为 5 mm 时, 中空连接钢板与带剪力键连接板仅在两端发生接触, 实





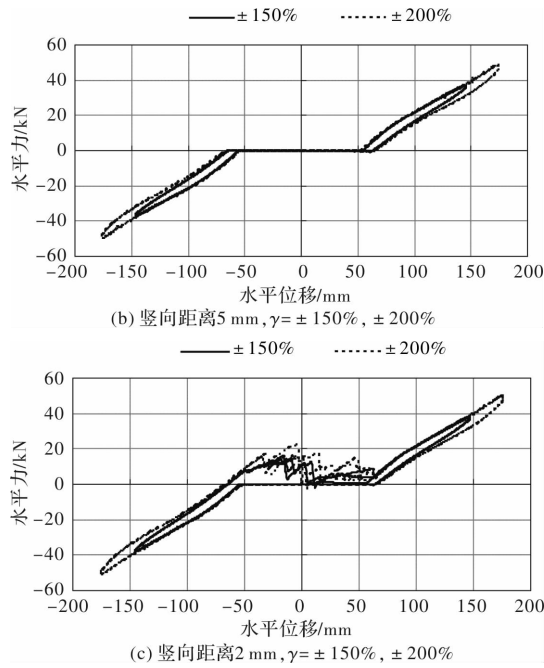


图 12 水平力-位移滞回曲线  
(3 号支座, 组合 2, 罩橡胶套)

Fig. 12 Horizontal force-displacement hysteretic curve  
(No. 3 bearing, combination 2, covered with rubber bush)

测的滞回曲线见图 12(b); 当竖向距离为 2 mm 时, 中空连接钢板与带剪力键连接板不仅在两端发生接触, 且中空连接钢板下表面与剪力键连接板上表面接触, 两块板之间发生明显的错动与抖动, 实测的滞回曲线见图 12(c). 由图 12(b)、图 12(c)可见, 当水平位移小于 60 mm, 竖向距离为 5 mm 时, 未测到水平力, 但竖向距离为 2 mm 时, 测得水平力为中空连接钢板下表面与剪力键连接板上表面之间的摩擦力, 20 kN 左右, 大于支座剪应变 50% 时的水平力. 图 13(a)、图 13(b), 为竖向距离分别为 5 mm 及 2 mm, 转角与设备水平位移关系 (剪应变为  $\pm 150\%$ 、 $\pm 200\%$ ), 由图 13(a)、图 13(b)可见, 竖向距离为 5 mm 时, 左、右两侧的转角尚能保持一定的对称, 竖向距离为 2 mm 时, 则无对称性可言. 表 10 为竖向距离分别为 5 mm 及 2 mm 与竖向距离为 20 mm 比较, 最大转角的对比, 表 11 为水平等效刚度对比 (剪应变为  $\pm 150\%$ 、 $\pm 200\%$ ), 从表 10 可见, 剪应变  $\pm 150\%$  工况的最大转角均有所降低, 剪应变  $\pm 200\%$  工况的降低效果明显; 从表 11 可见, 与竖向距离 20 mm 比较, 水平等效刚度以略有提高为主, 水平等效刚度提高效果不明显的原因, 是因为装置水平等效刚度 (竖向距离 20 mm, 罩橡胶套) 相对与 0 MPa 的测试结果降低较少.

可见, 降低中空连接钢板下表面与带剪力键

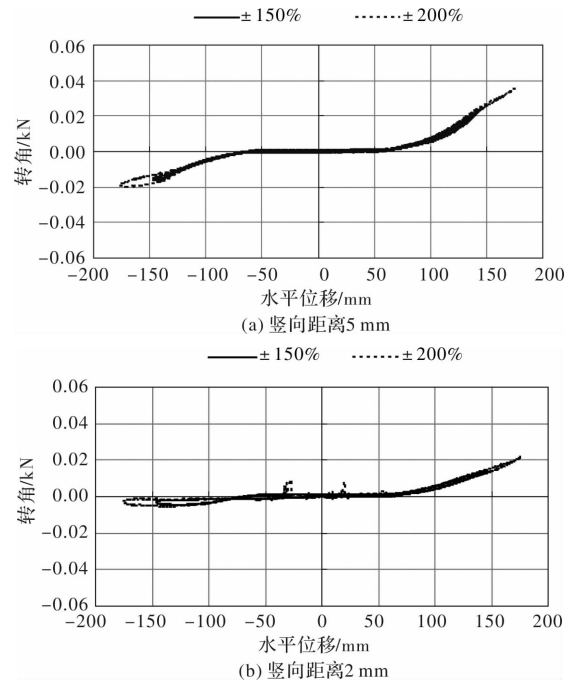


图 13 转角-水平位移  
(3 号支座, 组合 2, 罩橡胶套)

Fig. 13 Rotation angle-horizontal displacement

(No. 3 bearing, combination 2, covered with rubber bush)

连接板上表面的竖向距离, 虽然对降低转角及提高水平等效刚度有效果, 但避免所留竖向距离过近时, 中空连接钢板下表面与剪力键连接板上表面大面积接触, 两块板之间发生明显的错动与抖动, 影响装置正常发挥作用.

### 3.3 LNR200-G6 型软碰撞防护装置

在 12 MPa 下, 4 号支座竖向刚度及水平等效刚度分别为  $836.4 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$  及  $0.521 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ , 与设计值的偏差分别为  $-3.5\%$  及  $+14.0\%$ . 0 MPa 下的 4 号支座水平等效刚度 ( $\gamma = \pm 50\% \sim \pm 200\%$ ) 试验结果见表 12. 中空连接钢板下表面与带剪力键连接板上表面的竖向距离设定为 20 mm, 对装置 (4 号支座, 组合 3) 分别进行了罩、不罩橡胶套的试验, 剪应变  $\pm 50\% \sim \pm 200\%$ , 图 14 为罩橡胶套实测的滞回曲线.

表 12 水平等效刚度 (4 号支座及装置)

Tab. 12 Horizontal equivalent stiffness  
(No. 4 bearing and device)

剪应变 $\gamma/\%$	水平等效刚度 $K_h/\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$		
	4 号支座	罩橡胶套	不罩橡胶套
$\pm 50$	0.602	0.574	0.546
$\pm 100$	0.528	0.480	0.443
$\pm 150$	0.500	0.413	0.381
$\pm 200$	0.476	0.361	0.356

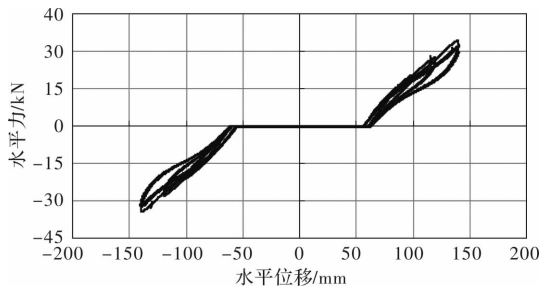


图 14 水平力-位移滞回曲线

(4号支座, 组合3, 罩橡胶套)

Fig. 14 Horizontal force-displacement hysteretic curve

(No. 4 bearing, combination3, covered with rubber bush)

实测的装置水平等效刚度见表12, 可见, 与不罩橡胶套对比, 罩橡胶套对水平等效刚度影响较小; 与0 MPa下测试的支座水平等效刚度相比较, 装置的水平等效刚度(罩橡胶套)有所降低, 剪应变为 $\pm 50\%$ 、 $\pm 100\%$ 、 $\pm 150\%$ 、 $\pm 200\%$ , 罩橡胶套, 分别降低为95.4%、90.9%、82.6%、75.8%。表13为罩橡胶套的转角测定结果, 与LNR200-G4型装置的2号支座顶端转角相比较, 在剪应变为 $\pm 150\%$ 之前, LNR200-G6型装置的支座顶端转角有一定程度降低, 随着剪应变的增大, 差异逐步减小, 当剪应变为 $\pm 200\%$ 时, 基本无差异。

表 13 转角(4号支座)

Tab. 13 Rotation angle (No. 4 bearing)

剪应变 $\gamma/\%$	$\pm 50$	$\pm 100$	$\pm 150$	$\pm 200$
转角 左	-0.003 0	-0.014 7	-0.049 6	-0.111 6
/rad 右	0.004 7	0.019 4	0.054 3	0.117 3

## 4 结论

通过三种型号的弹性软碰撞防护装置的试验研究, 得出如下结论:

(1) 当水平位移超过设定的水平间距, 剪力键与中空连接钢板发生碰撞, 弹性软碰撞防护装置的橡胶支座部分开始产生剪切变形, 提供水平等效刚度, 这表明, 在隔震层附加本装置, 可为隔震层附加刚度, 以起到限位作用。

(2) 通过剪力键与支座上连接钢板的3种不同连接方式的试验表明, 单纯采用过盈配合(连接方式1)的连接方式, 剪力键存在松动的可能, 采用过盈配合加焊接(连接方式2)或T形的圆柱体剪力键(连接方式3)是可行的。

(3) 采用Q235B或Q345B为基材, 当剪力键与中空连接钢板直接碰撞时, 均会造成中空连接

钢板侧壁的损伤, 在剪力键外圆面罩上橡胶套, 可避免或减轻中空连接钢板侧壁的损伤。且对装置的水平等效刚度及支座顶端转角基本无影响。

(4) 与0 MPa下测试的支座水平等效刚度对比, 弹性软碰撞防护装置的水平等效刚度有所降低, 降低的程度随剪应变的增大而增大, 支座顶端转角随剪应变的增大而增大; 增大支座直径后, 支座顶端转角明显降低, 但应注意直径较小的支座, 内部橡胶硫化时平整度控制难度增加, 这将导致支座剪切变形时转角的增大。

(5) 通过对LNR300-G4型弹性软碰撞防护装置中空连接钢板下表面与带剪力键连接板上表面的竖向距离分别设定为20 mm、5 mm、2 mm的试验表明, 降低竖向距离虽然可降低支座顶端转角、提高装置的水平等效刚度, 但应避免该竖向距离过于接近, 导致装置工作时, 中空连接钢板下表面与带剪力键连接板上表面大面积接触, 影响装置正常发挥作用。

(6) 增加橡胶剪切模量, 支座顶端转角有所减小, 但随着剪应变的增大, 差异逐步变小, 当剪应变 $\pm 200\%$ 时, 基本无差异。

## 参考文献 References

- [1] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京:地震出版社, 1997.  
ZHOU Fulin. Seismic control of structures[M]. Beijing: Seismological Press, 1997.
- [2] 日本建筑协会. 隔震结构设计[M]. 刘文光, 译, 北京:地震出版社, 2006.  
Japanese Architecture Institute. Recommendation for design of base isolated building[M]. LIU Wenguang, Translated. Beijing: Seismological Press, 2006.
- [3] 欧进萍. 结构振动控制[M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
OU Jinping. Structural vibration control [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [4] 韩森, 周锡元. 基础隔震建筑软碰撞保护分析[J]. 建筑科学, 1999, 15(1): 14-20.  
HAN Miao, ZHOU Xiyuan. Analysis of soft-collision safety for base isolated buildings[J]. Building Science, 1999, 15(1): 14-20.
- [5] 韩森, 王秀梅. 基础隔震层软碰撞限位试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2005, 27(3): 70-72.  
HAN Miao, WANG Xiumei. Experimental study on



- soft pounding limiting deformation of base isolating layer[J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2005, 27(3): 70-72.
- [6] 韩淼, 李仙华, 杜红凯. 钢螺旋弹簧软碰撞限位隔震试验位移反应分析[J]. *工程抗震与加固改造*, 2007, 29(6): 25-28.
- HAN Miao, LI Xianhua, DU Hongkai. Analysis on displacement response of steel spiral spring soft-collision limiting displacement isolating testing[J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2007, 29(6): 25-28.
- [7] 韩淼, 李仙华, 杜红凯. 基础隔震层钢螺旋弹簧软碰撞限位实验研究[J]. *世界地震工程*, 2007, 23(4): 39-43.
- HAN Miao, LI Xianhua, DU Hongkai. Experiment on limiting displacement of steel spiral spring soft-collision for a base isolating layer[J]. *World Earthquake Engineering*, 2007, 23(4): 39-43.
- [8] 堀則男, 趙自由, 井上範夫. 連結機構摩擦ダンパーを用いた3層フレーム免震試験体の地震時過大変形抑制実験[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, 東京: 日本建築学会, 2010, B-2: 363-366.
- [9] POLYCARPOU P, KOMODROMOS P. Simulating the use of rubber shock absorbers for mitigating poundings of seismically isolated buildings during strong earthquakes[C]// ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering. Rhodes, Greece: 2009.
- [10] 伊藤敦, 吉澤幹夫, 田代靖彦ほか. 過大変位積層ゴムの開発[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, 東京: 日本建築学会, 2014, B-2: 429-436.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 橡胶支座-第1部分: 隔震橡胶支座试验方法: GB/T 20688.1-2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the P. R. China. Rubber bearing-Part 1: seismic-protection isolators test methods: GB/T 20688.1-2007 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 橡胶支座-第3部分: 建筑隔震橡胶支座: GB 20688.3-2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the P. R. China. Rubber bearing-Part 3: Elastomeric seismic-protection isolators for building: GB 20688.3-2006 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.

(编辑 沈 波)