

# 低矮砌体结构橡胶隔震支座力学性能试验研究

郑 瑶<sup>1</sup>, 孙艺嘉<sup>1</sup>, 靳 娜<sup>1</sup>, 肖华宁<sup>2</sup>, 张又超<sup>1</sup>

(1. 长安大学建工学院, 陕西 西安 710061; 2. 西安达盛隔震技术有限公司, 陕西 西安 710075)

**摘要:** 为了研究适用于村镇低矮砌体房屋的隔震支座, 对五种小直径铅芯叠层橡胶隔震支座进行水平刚度试验, 研究隔震支座水平剪应变、第二形状系数对其等效水平刚度、屈服后刚度、滞回性能等力学性能的影响, 给出不同剪应变下等效水平刚度、屈服后刚度随第二形状系数变化的拟合公式. 分析隔震支座水平刚度与结构模型减震系数、水平位移的关系, 给出了相关性曲线的拟合公式. 确定了村镇建筑隔震参数并以此选取了适用于振动台模型的隔震支座, 为隔震支座的设计提供了参考依据. 模拟振动台试验结果表明, 所选小直径铅芯叠层橡胶隔震支座能够使村镇低矮砌体结构达到理想的减震效果.

**关键词:** 叠层橡胶隔震支座; 试验研究; 等效水平刚度; 第二形状系数; 减震系数

中图分类号: TU241.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)03-0395-06

## Test study on mechanical property of laminated rubber bearing isolators for low-rise masonry structure

ZHENG Yao<sup>1</sup>, SUN Yijia<sup>1</sup>, JIN Na<sup>1</sup>, XIAO Huaning<sup>2</sup>, ZHANG Youchao<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061 China;

2. Xi'an Dasheng Isolation Technology, Xi'an 710075, China)

**Abstract:** In order to study the laminated rubber bearing isolators for low-rise masonry structure in villages and small towns, horizontal stiffness tests were done on five kinds of small diameter lead core laminated rubber bearing isolators. It was studied that the effect of horizontal shear strain and second shape factor on the mechanical properties of the laminated rubber bearing isolators which include horizontal equivalent stiffness, post-yielding stiffness and hysteretic performance. The fitting formulas of horizontal equivalent stiffness and post-yielding stiffness depending on second shape factor at different shear strain were given. The relationships between horizontal equivalent stiffness and hysteretic performance as well as horizontal displacement were analyzed and the fitting formulas were given. Meanwhile, the laminated rubber bearing isolator which is suitable for shaking table tests was chosen according to the isolation parameters of villages and small towns. The experiment and analysis provide a reference for laminated rubber bearing isolators designing. The result of simulation shaking table test indicate that the low-rise masonry structure with selected small-diameter is able to achieve the desired damping effect.

**Key words:** laminated rubber bearing isolators; experimental study; horizontal equivalent stiffness; second shape factor; horizontal seismic reduction factor

我国是一个遭受地震灾害严重的国家, 村镇建筑抗震能力偏低, 始终受到地震的严重威胁. 隔震技术因其良好的隔震效果成为一种日趋成熟的地震被动控制技术, 虽然国内外学者对建筑隔震问题进行了大量的试验研究和理论分析, 但大多集中在中、高层结构, 隔震支座的直径普遍偏大<sup>[1-8]</sup>, 难以应用于村镇低矮建筑. 研究选取适用于村镇低矮砌体房屋的小直径隔震支座的方法对村镇建筑防灾减灾具有重要意义<sup>[9-11]</sup>.

由于对村镇低矮建筑隔震技术研究经验较少, 需要通过振动台试验验证其隔震效果. 为了研究适

用于村镇低矮建筑振动台试验的隔震支座, 本文对一种小直径铅芯叠层橡胶隔震支座进行力学性能试验, 分析其影响因素. 同时, 根据铅芯隔震支座构造计算其剪切性能的理论公式并不完备<sup>[12]</sup>, 本文给出了不同剪应变下等效水平刚度、屈服后刚度随第二形状系数变化的拟合公式. 对隔震支座水平刚度与结构模型减震系数、水平位移的关系进行研究, 给出相关性曲线拟合公式. 确定了村镇建筑隔震参数并以此选取了适合振动台模型的隔震支座, 振动台试验表明, 本文选取的隔震支座能够使村镇砌体结构达到理想的隔震效果.

收稿日期: 2016-06-17

修改稿日期: 2017-05-26

基金项目: 陕西省工程标准编制基金资助项目(陕建承[2013]768号)

作者简介: 郑瑶(1983—), 男, 博士生, 主要从事砌体结构隔震理论及工程应用方面研究. E-mail: 175233935@qq.com

## 1 叠层橡胶支座试验概况

### 1.1 试验支座规格

试验所用的隔震支座均为外径 120 mm 的铅芯叠层橡胶隔震支座, 支座由封钢板、薄钢板、橡胶层及铅芯组成, 形状统一为圆柱体, 支座的详细构造及规格分别见图 1 及表 1, 其中每种型号的支座各两个。

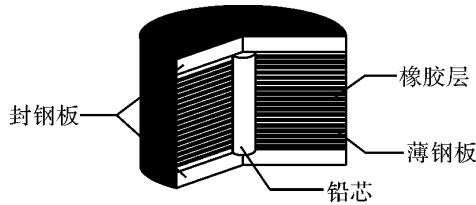


图 1 隔震支座示意图

Fig. 1 Laminated rubber bearing isolators

### 1.2 加载设备

对于以上支座进行水平刚度试验, 试验在广州大学工程抗震研究中心的 1 000 t 电液伺服压剪

试验机上进行, 水平动力加载设备如图 2 所示。

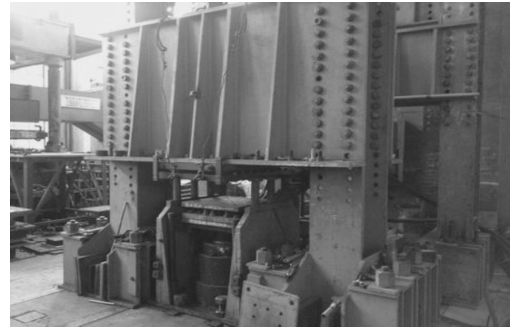


图 2 动力加载设备

Fig. 2 Dynamic loading equipment

### 1.3 加载方式

试验加载由位移控制, 竖向荷载为 30 kN, 同型号的两个支座分别在水平方向输入频率为 0.1 Hz、0.5 Hz 的正弦波, 最大位移均按照剪应变变为 50%、100%、250% 的顺序进行改变, 采取 4 次加载循环, 选取第 3 滞回环进行计算, 支座编号的末位代表输入正弦波的频率。

表 1 试验支座规格

Tab. 1 Specifications of laminated rubber bearing isolators

支座型号	橡胶剪切弹性模量/MPa	有效直径/mm	橡胶层数	橡胶层厚/mm	薄钢板厚/mm	薄钢板数	铅芯直径/mm	封钢板厚/mm	支座总高/mm	第二形状系数
GZ1	0.39	110	12	1.8	2	11	12	10	63.6	5.1
GZ2	0.39	110	12	2.5	2	11	13	10	72	3.7
GZ3	0.39	110	10	3.5	2	9	14	10	73	3.1
GZ4	0.39	110	12	1.9	2	11	10	10	64.8	4.8
GZ5	0.55	110	12	1.8	2	11	12	10	63.6	5.1

## 2 试验结果分析

### 2.1 水平刚度

#### 2.1.1 水平刚度计算结果

根据文献[14]的要求, 经试验得到支座水平位移-荷载关系曲线(如图 7 所示), 采用正弦波频率为 0.5 Hz, 剪应变为 100% 时第 3 滞回环, 分别按照式(1)、(2)、(3)计算试验支座的等效水平刚度  $K_h$ 、等效阻尼比  $h_{eq}$ 、屈服后刚度  $K_d$ , 结果见表 2。

$$K_h = \frac{Q_1 - Q_2}{X_1 - X_2} \quad (1)$$

$$h_{eq} = \frac{2\Delta W}{\pi K_h (X_1 - X_2)^2} \quad (2)$$

$$K_d = \frac{1}{2} \left( \frac{Q_1 - Q_{d1}}{X_1} + \frac{Q_2 - Q_{d2}}{X_2} \right) \quad (3)$$

式中:  $Q_1$  为最大剪力;  $Q_2$  为最小剪力;  $X_1$  为最大位移;  $X_2$  为最小位移;  $Q_{d1}$ 、 $Q_{d2}$  为滞回曲线正向、负向与剪力轴交叉点;  $\Delta W$  为滞回曲线的包围面积。

表 2 试验支座水平刚度计算结果

Tab. 2 The calculation resultshorizontal equivalent stiffness

支座编号	GZ1-0.5	GZ2-0.5	GZ3-0.5	GZ4-0.5	GZ5-0.5
等效水平刚度/ $N \cdot mm^{-1}$	278.47	177.12	156.13	211.73	328.51
等效阻尼比/%	10.6	17.25	19.24	19.07	12.52
屈服后刚度/ $N \cdot mm^{-1}$	236	140	205	156	270

### 2.1.2 剪应变的影响

根据试验支座滞回曲线计算得到等效水平刚度与剪应变相关性,如图3所示.图3表明,等效水平刚度随剪应变的增大而减小;两者呈非线性关系,剪应变越大,试验支座抵御水平刚度退化的能力越强,即剪应变较小时( $\gamma=50\%$ ),支座的等效水平刚度受到其变化的影响较大,而剪应变较大时( $\gamma=100\%$ ;  $\gamma=250\%$ ),支座的等效水平刚度比较稳定.

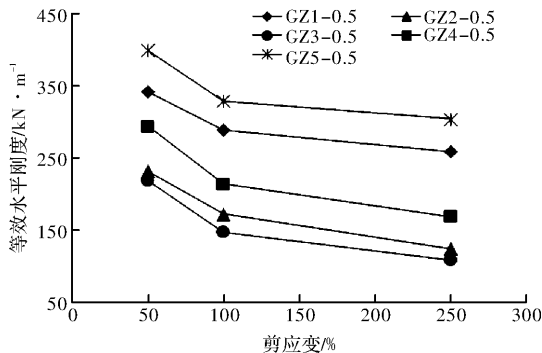


图3 等效水平刚度与剪应变相关性

Fig. 3 Horizontal equivalent stiffness change with shear strain increasing

图4为试验支座屈服后刚度与水平剪应变相关性,可以看出:相比于对试验支座等效水平刚度的影响,剪应变使其屈服后刚度退化的能力较小;试验支座屈服后刚度随剪应变的增大而减小,当剪应变从 $\gamma=100\%$ 增大到 $\gamma=250\%$ 时,试验支座的屈服后刚度变化在15%以内.

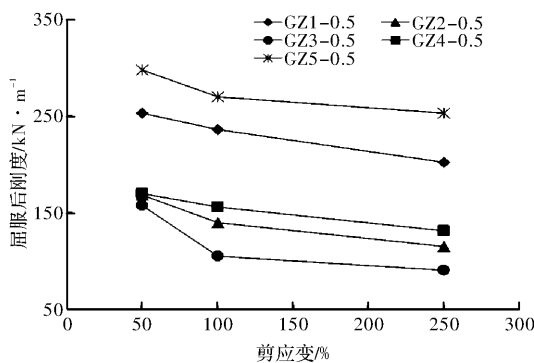


图4 屈服后刚度与剪应变相关性

Fig. 4 Post-yielding stiffness change with shear strain increasing

### 2.1.3 第二形状系数的影响

第二形状系数( $S_2$ )为试验支座多层橡胶直径与橡胶各层总厚度之比.由于5号支座使用的橡胶剪切弹性模量与其他4种支座不同,因此仅将1~4号支座进行对比,图5为支座等效水平刚度与 $S_2$ 的相关曲线.可以看出,不同的剪应变下等效水平

刚度随着 $S_2$ 的增大而增大,且增大的速率逐渐上升.

式(4)~式(6)给出了剪应变分别为50%、100%、250%时等效水平刚度 $K_h$ 随 $S_2$ 变化的拟合公式.

$$K_h(50\%) = 39.1S_2^2 - 267.4S_2 + 678.9 (S_2 \leq 4.8) \quad (4)$$

$$K_h(100\%) = 34.9S_2^2 - 236.0S_2 + 560.3 (S_2 \leq 4.8) \quad (5)$$

$$K_h(250\%) = 52.2S_2^2 - 374.7S_2 + 777.5 (S_2 \leq 4.8) \quad (6)$$

从图中可以看出: $S_2$ 在4.8以内时等效水平刚度-第二形状系数曲线的斜率均值为35.89,最大值不超过63;但当 $S_2$ 超过4.8后等效水平刚度上升斜率明显增大,斜率的均值为226.22.因此, $S_2$ 在4.8以内时等效水平刚度的变化比较稳定,根据以上公式计算的结果较为准确.

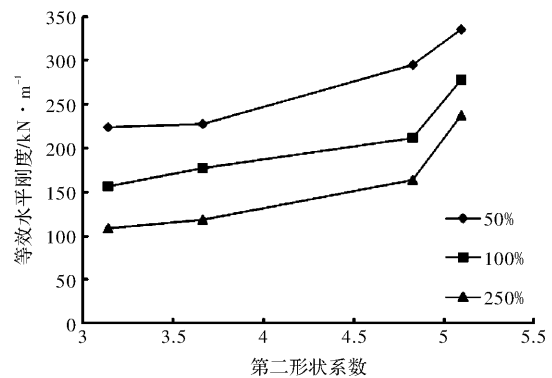


图5 等效水平刚度与第二形状系数相关性

Fig. 5 Horizontal equivalent stiffness change with horizontal equivalent stiffness increasing

通过计算,得到试验支座屈服后刚度 $K_d$ 与 $S_2$ 的相关性(见图6),结果表明在相同的竖向压力的作用下,屈服后刚度 $K_d$ 随 $S_2$ 的增加而增加; $S_2$ 增大到一定程度时, $K_d$ 增加幅度减小并最终趋近于一个定值,两者相关性可采用线性关系公式描述,拟合公式见式(7)~式(9).在一定范围内,增大 $S_2$ 可以达到提高隔震支座屈服后刚度的目的,但是当 $S_2$ 超过4.8时,这种提高的作用不再明显.因此在选择支座时,取第二形状系数在4.8以内,可以达到避免材料的浪费、降低造价的目的.

$$K_d(50\%) = 21.1S_2 + 29.7 (S_2 \leq 4.8) \quad (7)$$

$$K_d(100\%) = 69.2S_2 - 112.6 (S_2 \leq 4.8) \quad (8)$$

$$K_d(250\%) = 48.3S_2 + 4.5 (S_2 \leq 4.8) \quad (9)$$

### 2.2 滞回性能

对五种试验支座分别输入频率为0.5Hz的正

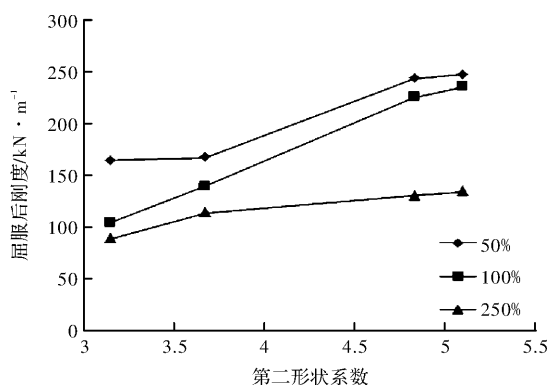


图6 屈服后刚度与第二形状系数相关性

Fig. 6 Post-yielding stiffness change with horizontal equivalent stiffness

弦波, 最大位移按照剪应变为 50%、100%、250%加载, 由于不同型号的隔震支座变化趋势差异不大, 因此以支座 GZ5-0.5 的滞回曲线对比图为例, 如图 7 所示。

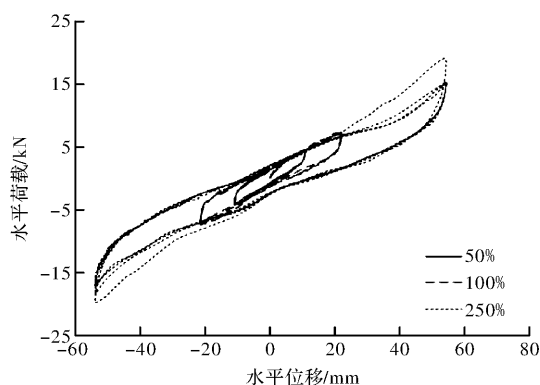


图7 不同剪应变下支座 GZ5-0.5 滞回曲线对比图

Fig. 7 Comparison the hysteretic curve of bearing GZ5-0.5 with shear strain increasing

从图中可以看出:

(1) 当剪应变为 50% 及 100% 时, 支座的滞回曲线近似为一平行四边形, 每一滞回环的加载可按照图形分为四个阶段, 每一阶段水平荷载和位移基本上呈现线性关系;

(2) 剪应变为 250% 时, 滞回曲线的正方向出现了反 S 形的趋势, 说明与之前的阶段相比, 支座的刚度有所退化, 这是由于支座内部橡胶与钢板的相对滑移程度增大所致;

(3) 滞回曲线的面积随着剪应变的增加而增大, 表明支座的耗能能力也随之增加。

## 2.3 支座水平刚度对隔震效果的影响

### 2.3.1 村镇建筑隔震参数的确定

隔震支座的隔震效果可以通过水平向减震系数和水平位移来衡量。按照文献[13]的规定: 在抗

震设防烈度为 6~8 度 (0.20 g) 的村镇地区, 水平向减震系数应小于 0.4; 隔震结构的水平位移不应超过支座有效直径的 0.55 倍和支座内部橡胶总厚度 3.0 倍二者的较小值, 本文选取隔震支座的水平位移限值应取有效直径的 0.55 倍, 为 60.5 mm。

### 2.3.2 有限元计算模型设计

选取典型的村镇砌体结构房屋为原型, 依据相似比理论, 设计振动台试验模型。模型为二层单开间砖砌体房屋, 缩尺比例为 1:2, 缩尺后的模型尺寸为 2.25 m×1.95 m×3.3 m, 墙厚为 120 mm。房屋四角设置 4 个相同的隔震支座, 一层留有 450 mm 宽门洞, 门两侧分别设置滑移支座。滑移支座的型号与隔震支座相同, 其上部与结构连接, 下部可以在与底座接触的平面上自由滑移。文献[11]介绍了利用有限元分析软件 SAP2000 建立上述隔震结构分析模型的具体方法, 将 1~4 号支座分别作为模型的隔震支座, 对模型分别输入 X、Y 方向 el-centro 波, 其峰值按照 8.5 度调整到 300 gal, 通过模型计算得到结构的水平减震系数和最大水平位移。

### 2.3.3 结果分析

根据有限元分析的结果, 分别分析模型水平减震系数、最大水平位移关于试验支座屈服后刚度、等效水平刚度的关系, 如图 8—图 11 所示。结果表明, 模型减震系数随支座屈服后刚度的增大有明显的增大趋势, 且基本呈线性关系; 在支座的屈服后刚度较小时, 结构 X、Y 方向的减震系数无明显差别, 但随着屈服后刚度的增大, 结构 X、Y 方向减震系数的差值也在增大, 这是由于模型在 X、Y 方向的刚度不同导致的; 式 (10)、式 (11) 分别为 X、Y 方向减震系数 ( $\beta_x$ 、 $\beta_y$ )—屈服后刚度 ( $K_d$ ) 相关性曲线拟合公式。

$$\beta_x = 1.6 \times 10^{-3} K_d + 0.122 \quad (10)$$

$$\beta_y = 8.6 \times 10^{-4} K_d + 0.178 \quad (11)$$

模型水平位移随支座屈服后刚度的增大而减小, 且基本呈线性关系; 结构 X、Y 方向水平位移的差值均在 3 mm 以内, 表明屈服后刚度对两方向水平位移的差值无明显影响。因此, 为了使计算结果偏于安全选取位移值较大的 X 方向进行拟合, 得到水平位移 ( $u$ )—屈服后刚度 ( $K_d$ ) 相关性曲线公式见式 (12)。

$$u = -0.147 K_d + 84.709 \quad (12)$$

模型减震系数、水平位移关于等效水平刚度的变化规律与两者关于屈服后刚度的变化规律具有相似性,但线性关系显著程度相对降低。

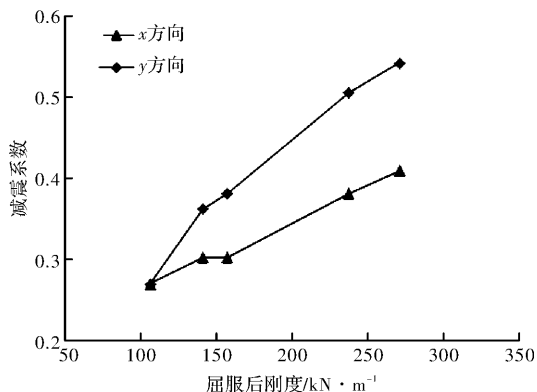


图8 减震系数与屈服后刚度相关性

Fig. 8 Horizontal seismic reduction factor change with post-yielding stiffness increasing

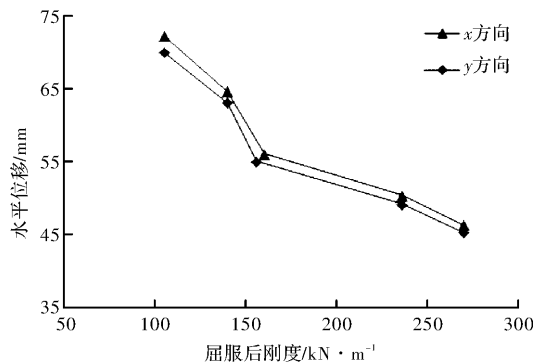


图9 水平位移与屈服后刚度相关性

Fig. 9 Horizontal displacement change with horizontal post-yielding stiffness increasing

通过曲线拟合发现, X、Y 方向减震系数( $\beta_x$ 、 $\beta_y$ )-等效水平刚度( $K_h$ )相关性曲线拟合公式依旧可以通过线性关系式表达(见式(13)、式(14)),而水平位移( $u$ )-等效水平刚度( $K_h$ )相关性曲线采用二次函数式拟合更为准确, X 方向的拟合公式见式(15)。

$$\beta_x = 8.1 \times 10^{-4} K_h + 0.147 \quad (13)$$

$$\beta_y = 1.51 \times 10^{-3} K_h + 0.065 \quad (14)$$

$$u = 9.1 \times 10^{-4} K_h^2 - 0.583 K_h + 139.87 \quad (15)$$

根据水平位移应小于 60.5 mm、减震系数小于 0.4 的要求, 隔震支座的屈服后刚度应取 149.7~167.8 N/mm、等效水平刚度应取 193.9~218.65 N/mm, 因此选取 4 号支座应用于振动台试验。

按照本章所述尺寸选取村镇建筑施工实际采用的材料建造模型进行振动台试验。输入 8.5 度(峰值加速度 300 gal) el-centro 波后, 变形集中发

生在隔震层, 上部结构基本平动, 未产生明显裂缝, 当地震波的峰值加速度达到 800 gal 时, 结构未发生明显破坏, 隔震支座水平位移的最大值仍在规定的位移允许值以内, 试验结果验证了支座选取的合理性。

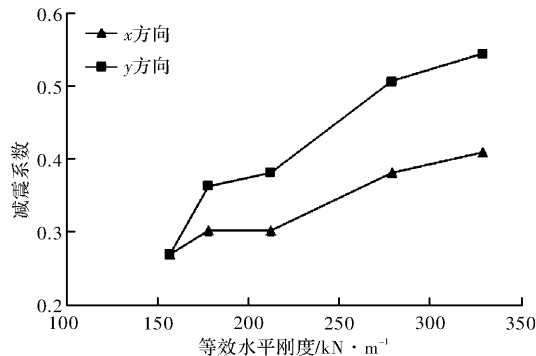


图10 减震系数与等效水平刚度相关性

Fig. 10 Horizontal seismic reduction factor change with horizontal equivalent stiffness increasing

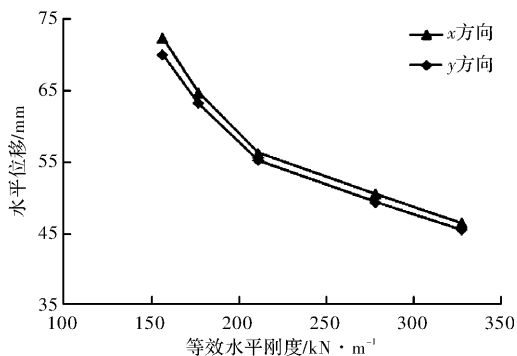


图11 水平位移与等效水平刚度相关性

Fig. 11 Horizontal displacement change with horizontal equivalent stiffness increasing

### 3 结论

(1)研究了一种适用于村镇低矮砌体结构的小直径隔震支座。试验研究表明, 在罕遇地震下, 隔震支座具有较强的抵御水平刚度退化的能力和良好的水平变形能力, 采用本文设计的小直径隔震支座, 能够使村镇砌体结构在 8.5 度(0.3 g)地震下达到理想的隔震效果。

(2)给出了不同剪应变下支座等效水平刚度、屈服后刚度随第二形状系数变化的拟合公式。研究发现: 第二形状系数在 4.8 以内时, 支座等效水平刚度随第二形状系数变化较稳定, 采用拟合曲线计算结果较为准确; 而且将第二形状系数限制在 4.8 以内可以达到降低造价的目的, 可应用于村镇低矮砌体结构的小直径隔震支座的设计。

(3)揭示了结构的水平减震系数、水平位移与

支座水平刚度相关性关系,得到了四条相关性曲线拟合公式,可根据结构水平减震系数及水平位移的限值计算所需支座的水平刚度,在此基础上确定了应用于振动台试验的隔震支座的合理水平刚度范围。

## 参考文献 References

- [1] 沈朝勇,周福霖,温留·汉黑沙,等.不同桥梁隔震橡胶支座力学性能对比试验研究[J].土木工程学报(增刊),2012,45(1):233-237.  
SHEN Chaoyong, ZHOU Fulin, WEN liuhan · He-isha, et al. Test study on mechanical property of different type of isolators for bridge[J]. China civil engineering journal, 2012,45(s):233-237.
- [2] 徐凯,谭平,王斌,等.两类新型简易隔震支座的试验性能对比研究.地震工程与工程振动,2014,34(6):12-18.  
XU Kai, TAN Ping, WANG Bin, et al. Experimental comparative study of both types of novel simple isolators [J]. Earthquake Engineering And Engineering Dynamics, 2014,34(6):12-18.
- [3] 张又超,王毅红,郑瑶,等.低矮砌体结构橡胶隔震支座力学性能研究[J].工业建筑,2016,46,(1)75-79.  
ZHANG Youchao, WANG Yihong, ZHENG Yao, et al. Research on mechanical properties of rubber isolation bearing for low-rise masonry structure[J]. Industrial Construction, 2016,46,(1)75-79.
- [4] 庄文娟,朱玉华.铅芯橡胶隔震支座阻尼特性有限元分析[J].建筑结构,2010,40(增刊):94-98.  
ZHUANG Wenjuan, ZHUYuhua. Finite element analysis on damping properties of lead-rubber bearings[J]. Building Structure, 2010,40(s):94-98.
- [5] 张荫,姚谦峰.自阻尼叠层橡胶隔震支座力学性能试验研究及刚度分析[J].工业建筑,2003,33(9):44-47.  
ZHANG Yin, YAO Qian-feng. Research on mechanical properties and stiffness analysis of self-damping steel-plate-laminated-rubber-bearing-isolation support [J]. Industrial Construction, 2003,33(9):44-47.
- [6] 何文福,刘文光,杨彦飞,等.厚层橡胶隔震支座基本力学性能试验[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2011,12(03):258-263.  
HE Wenfu, LIU Wenguang, YANG Yanfei, et al. Basic mechanical properties of thick rubber isolators [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011, 12(03):258-263.
- [7] 杨彦飞,何文福.橡胶隔震支座基本力学性能试验研究[J].建筑科学,2010,26(5):7-9.  
YANG Yanfei, HE Wenfu. Research on basic mechanical properties of rubber isolators [J]. Building Science, 2010, 26(5):7-9.
- [8] 江宜城,叶志雄,聂肃非,等.方形铅芯橡胶支座力学性能试验研究及隔震桥梁地震响应分析[J].公路交通科技,2007,24(10):94-98.  
JIANG Yicheng, YE Zhixiong, NIE Sufei, et al. Experimental Study of Mechanical Properties of Square Lead Rubber Bearing and Seismic Response Analysis of Isolated Bridge. Journal of Highway and Transportation Research and Development [J] 2007, 24(10):94-98.
- [9] 谭平,徐凯,王斌,等.基于新型简易隔震支座的村镇建筑的隔震性能研究[J].土木工程学报,2013,46(5):64-70.  
TAN Ping, XU Kai, WANG Bin, et al. Performance study of isolated rural buildings using novel simple isolators, [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46:64-70.
- [10] 王毅红,张又超,樊琨,等.村镇砌体结构叠层橡胶支座隔震试验研究[J].工程抗震与加固改造,2014,36(2):16-20.  
WANG Yihong, ZHANG Youchao, FAN Kun, et al. Isolation performance test of laminated rubber isolator for rural masonry structure [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2014, 36(2):16-20.
- [11] 靳娜.砌体结构隔震模型试验参数研究, [D].西安:长安大学,2016.  
JIN Na. Parametric Study of the Isolation Model Test of the Masonry Building, [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [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,2006.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the P. R. C. Rubber bearings-Part3: Elastomeric seismic-protection isolators for buildings; GB/T20688.3-2006 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [13] 中华人民共和国建设部.建筑抗震设计规范:GB50011-2010 [S].北京:中国建筑工业出版社,2010.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the P. R. China. Code for seismic design of buildings: GB50011-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [14] 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:隔震橡胶支座标准试验方法:GB/T 20688-2007 [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 bearings-Part1: Seismic-protection isolators test methods: GB/T 20688.1-2007 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.

(编辑 吴海西)