

钟伟健, 刘彦辉, 何慧慧, 等. 多次循环往复荷载对铅芯橡胶支座剪切性能的试验研究[J]. 华南地震, 2018, 38(2): 122–126. [ZHONG Weijian, LIU Yanhui, HE Huihui, et al. Experimental Study on the Properties of Lead-rubber Bearings with Cycle Times Under Multi-cycle Loading[J]. South China journal of seismology, 2018, 38(2): 122–126]

多次循环往复荷载对铅芯橡胶支座 剪切性能的试验研究

钟伟健^{1,2}, 刘彦辉^{1,2}, 何慧慧^{1,2}, 金建敏^{1,2}, 沈朝勇^{1,2}

((1. 广州大学 工程抗震研究中心, 广州 510405; 2. 广东省地震工程与应用技术重点实验室, 广州 510405))

摘要: 针对高速荷载下循环次数对铅芯橡胶支座(LRB)剪切性能衰减的影响, 采用缩尺铅芯橡胶隔震支座, 通过进行压剪试验, 研究了高速荷载对铅芯橡胶支座的屈服力、屈服后刚度、等效水平刚度、等效阻尼比等的影响。研究表明: ① 高速荷载下随循环次数的增加, 屈服力和等效阻尼比都呈线性减小, 当循环次数接近 100 圈时, 两者的值都趋于稳定; ② 高速荷载下随循环次数的增加, 屈服后刚度和等效水平刚度都有小幅度的减小, 两者的值变化不大, 一直趋于稳定。本文研究对长历时地震作用下铅芯橡胶支座的剪切性能参数设计具有一定的参考价值。

关键词: 剪切性能; 屈服力; 屈服后刚度; 循环次数

中图分类号: TU352.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2018)02-0122-05

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.02.018

Experimental Study on the Properties of Lead-rubber Bearings with Cycle Times Under Multi-cycle Loading

ZHONG Weijian^{1,2}, LIU Yanhui^{1,2}, HE Huihui^{1,2},
JIN Jianmin^{1,2}, SHEN Chaoyong^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Applied Technology in Guangdong Province, Guangzhou 510405, China)

Abstract: Based on the effect of high speed loading on the reduction of shear properties of lead-rubber bearings (simplified as LRB) for several times, this paper aims to research the yield force, post-yielding stiffness,

收稿日期: 2017-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(51478131, 51778163); 广州市属高校科研项目项目(1201610135, 1201620162); 广东省高校优秀青年教师培养计划资助项目(YQ2015124)

作者简介: 钟伟健(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事结构工程隔震、减震以及抗震的试验研究。

E-mail: 383420582@qq.com.

通讯作者: 刘彦辉(1980-), 男, 副研究员, 博士后, 硕导, 国家一级注册结构工程师, 主要从事结构振动控制的研究。。

E-mail: liuyanhui2012@163.com.

equivalent horizontal stiffness and equivalent damping ratio of the lead-rubber bearings under high speed loading by using the press-shear test equipment. The research shows: the yield force and equivalent damping ratio reduce linearly with the increasing number of cycles under high speed loading; when the number of cycles is close to 100, the yield stress and the equivalent damping ratio becomes stable; the post-yielding stiffness and equivalent horizontal stiffness have a small decrease with the increasing number of cycles under high speed loading, which become stable all the time. This paper makes a certain reference value for the design of shear performance parameters of lead rubber bearing under long duration seismic action.

Keywords: Shear properties; Yield force; Post-yielding stiffness; Number of cycles

0 引言

隔震技术不同于传统的抗震技术,采取“以柔克刚”的新想法,在建筑物的基础结构与主体结构之间设置隔震层、阻尼器等隔震装置来阻断或减弱地震波传递给建筑物的能量,防止建筑物因地震作用而倒塌,造成人员伤亡、经济损失^[1-3]。该技术自 20 世纪 60 年代发展至今,中国、日本、美国、新西兰、意大利等国家都已对其进行了深入的研究^[4],我国自 1993 年建成首栋采用叠层橡胶支座的隔震房屋,至今已有数百栋隔震建筑,国际上建成了的隔震建筑也有近千栋,在经受了日本阪神、美国加州北岭及台湾海峡的地震考验,其减震效果显著,地震反应为非隔震结构的 1/8~1/12。叠层橡胶支座隔震体系是工程中应用最广泛的体系之一,而铅芯橡胶支座就是叠层橡胶支座的其中一种类型^[5]。

铅芯橡胶支座是在普通橡胶支座中加入一定体积的铅芯,使支座不仅具有合理的水平刚度,而且具有一定的阻尼,提高了支座的耗能能力,在实际工程中得到了广泛的应用,并在多次实际地震中表现出良好的隔震效果。近年来,研究人员对不同类型铅芯橡胶支座的力学性能做了试验和研究,目前关于加载频率对铅芯橡胶支座的研究较多^[6-9],也有关于高阻尼和超低硬度隔震橡胶支座的研究^[10-12],但关于加载速率的试验和研究较少,且因当时试验设备条件的约束,无论是 1200 型的大直径建筑叠层铅芯橡胶隔震支座^[13],还是 Φ100 的小型叠层橡胶支座^[14],加载速率都较小,在 1~8 mm/s 之间,循环次数仅有 50 圈,不能准确反映实际地震对铅芯橡胶支座剪切性能的影响。

基于以上研究背景,本文将对铅芯橡胶支座在高速荷载下剪切性能的衰减进行研究,分析高速荷载循环次数对支座屈服力、屈服后刚度、等效阻尼比、等效水平刚度等的影响。

1 试验概况

本试验采用国内某厂家生产的 LRB90 型和 LRB110 型铅芯橡胶支座,支座参数见表 1,支座构造如图 1 所示。压剪试验采用广州大学压剪装置^[15],该设备竖向最大压力可达 3 000 kN,竖向位移行程最大可达 1 000 mm,水平最大荷载可达 1 100 kN,水平最大位移可达 800 mm,水平加载频率范围为 0.001~1.0 Hz,竖向加载和水平加载可同时控制,包括位移控制或力控制,试验装置构造如图 2 所示。

表 1 铅芯橡胶支座基本参数.

Table1 The basic parameters of the lead rubber bearing		
支座型式	LRB90	LRB110
剪切模量/MPa	0.392	0.392
外径/mm	100	120
橡胶外径/mm	90	110
铅芯直径/mm	18	22
封钢板厚度/mm	20	20
封钢板直径/mm	90	110
橡胶层厚/mm	1.2	1.2
橡胶层数/片	18	18
橡胶总厚/mm	21.6	21.6
薄钢板厚度/mm	1.2	1.2
薄钢板直径/mm	90	110
薄钢板层数/片	17	17
中孔面积/mm ²	254.469	380.133
支座有效面积/mm ²	6 107.256	9 123.185
支座面积/mm ²	6 361.725	9 503.318
高度(不含连接板)/mm	82	82.
第一形状系数	18.75	22.92
第二形状系数	4.17	5.09
橡胶硬度修正系数	0.9	0.9
橡胶标准弹性模量 (E_0 /MPa)	1.5	1.5
橡胶体积约束弹性模量 (E_1 /MPa)	2 040	2 040
橡胶压缩弹性模量 (E_C /MPa)	950.72	1419.47
橡胶修正压缩弹性模量 (E_{Cr} /MPa)	648.5	837.04
上部荷载重量框架(框剪)/kN	35.684 (36.183)	35.684 (36.183)
常值面压/MPa	5.61 (5.687 6)	3.7549 (3.8074)

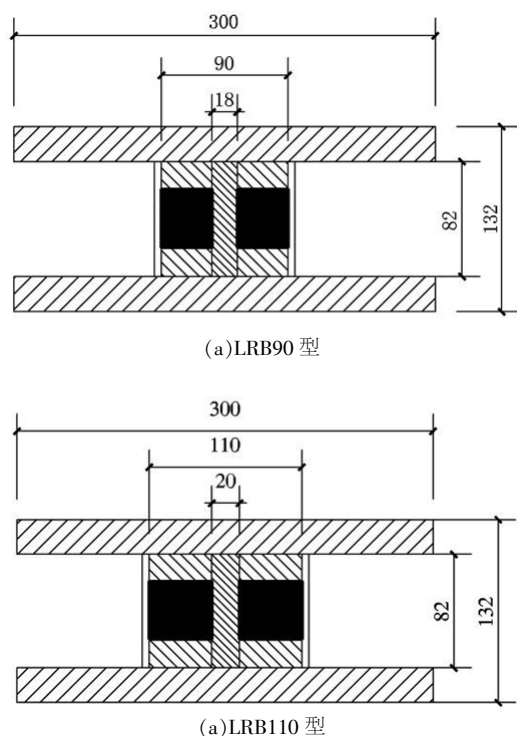


图1 支座构造图

Fig.1 Structural diagram of the bearing

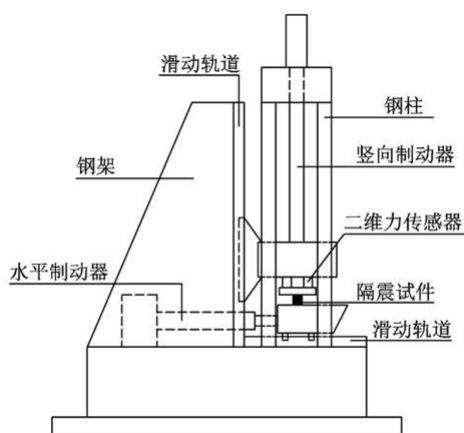


图2 压-剪试验装置

Fig.2 Press-shear test equipment

LRB90型和LRB110型铅芯橡胶支座所对应的试验工况相同：试验过程作用在支座上的压应力为4 MPa，剪切变形为100%，位移时程为21.6 mm，加载频率为0.8 Hz，加载速率为96 mm/s，循环次数为100圈。

2 剪切性能的计算公式

铅芯橡胶支座的剪切性能有屈服力、屈服后刚度、等效水平刚度、等效阻尼比等。由GB/T

20688.1-2007 橡胶支座：第1部分隔震橡胶支座试验方法可知^[16]，水平等效刚度的计算公式为：

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

等效阻尼比的计算公式为：

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

屈服后刚度的计算公式为：

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

屈服力的计算公式为：

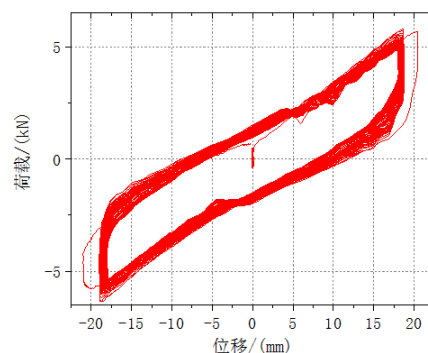
$$Q_d = \frac{1}{2} (Q_{d1} - Q_{d2}) \quad (4)$$

式中： Q_1 是最大剪力； Q_2 是最小剪力； X_1 是最大位移； X_2 是最小位移； Q_{d1} 、 Q_{d2} 是滞回曲线正向和负向与剪力轴的交叉点； ΔW 是滞回曲线的包络面积。

3 试验结果分析

3.1 支座滞回曲线及耗能能力分析

LRB90型和LRB110型铅芯橡胶支座在96 mm/s的加载速率下多次循环(共100圈)，滞回曲线如图3所示。



(a) LRB90 型

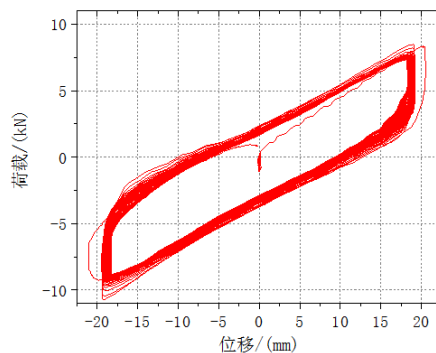


图3 支座滞回曲线

Fig.3 The hysteretic loops of the bearing

从图3可以看出,支座的滞回曲线平滑、饱满且对称,无论是LRB90型支座还是LRB110型支座,滞回曲线的包络面积都随着循环次数的增加而逐渐缩小,说明了在96 mm/s的高速加载速率下,铅芯橡胶支座的能量耗散性能随循环次数的增加越来越差:对于LRB90型支座,第1圈支座的耗能是145.16 J,循环到100圈后支座的耗能是74.55 J,减小了49%;对于LRB110型支座,第1圈支座的耗能是231.72 J,循环到100圈后支座的耗能是130.74 J,减小了44%。同时,随着循环次数的增加,支座滞回曲线的斜率逐渐减小,说明支座出现了水平刚度退化现象。

3.2 支座水平剪切性能分析

LRB90型和LRB110型铅芯橡胶支座在96 mm/s的加载速率下循环加载100圈后,屈服力、屈服后刚度、等效水平刚度、等效阻尼比分别如图4、5、6和7所示。

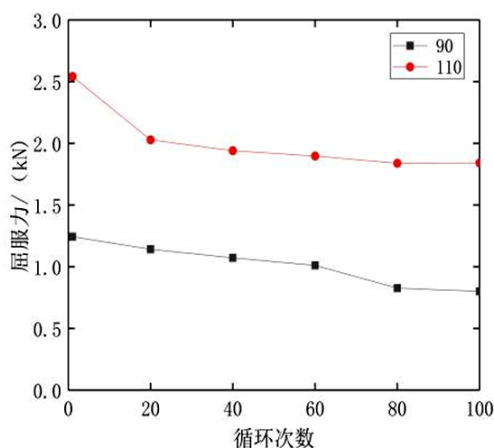


图4 支座屈服力

Fig.4 The yield force of the bearing

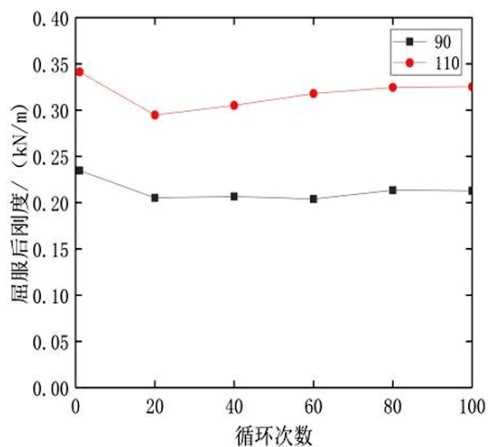


图5 支座屈服后刚度

Fig.5 The post-yielding stiffness of the bearing

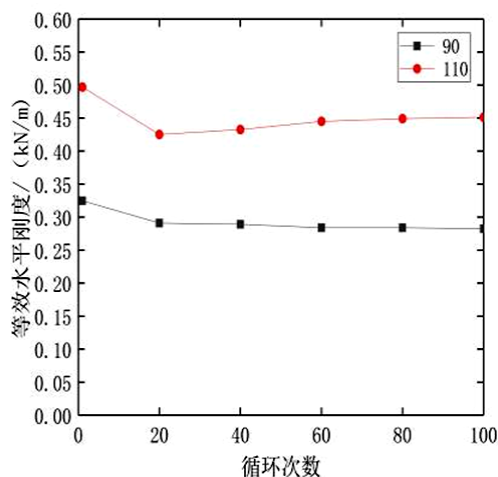


图6 支座等效水平刚度

Fig.6 The equivalent stiffness of the bearing

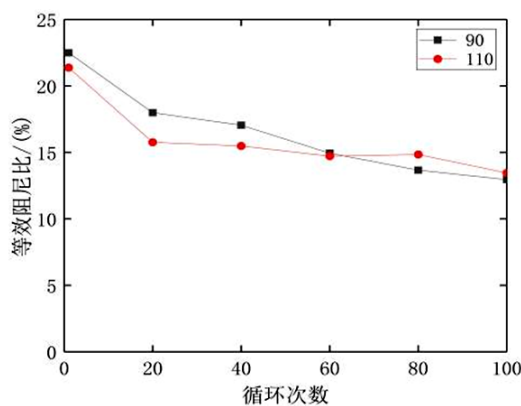


图7 支座等效阻尼比

Fig.7 The equivalent damping ratio of the bearing

从图4可以看出,无论是LRB90型还是LRB110型支座,在高速荷载下屈服力都随循环次数的增加而减小。对于LRB90型支座,铅芯橡胶支座的屈服力随循环次数增加而线性减小,第1圈支座的屈服力是1.24 kN,第100圈支座的屈服力是0.80 kN,减小了35%;对于LRB110型支座,铅芯橡胶支座的屈服力随循环次数增加而线性减小,第1圈支座的屈服力是2.54 kN,第100圈支座的屈服力是1.84 kN,减小了28%。

从图5可以看出,无论是LRB90型还是LRB110型支座,在高速荷载下屈服后刚度都随循环次数的增加而小幅度减小,基本变化不大。对于LRB90型支座,铅芯橡胶支座的屈服后刚度随循环次数增加有小幅度的减小,第1圈支座的屈服后刚度是0.234 kN/m,第100圈支座的屈服后刚度是0.213 kN/m,只减小了9%,基本趋于稳定;对于LRB110型支座来说,铅芯橡胶支座的屈

服后刚度随循环次数增加有小幅度的减小,第1圈支座的屈服后刚度是0.341 kN/m,第100圈支座的屈服后刚度是0.325 kN/m,只减小了5%,基本趋于稳定。

从图6可以看出,无论是LRB90型还是LRB110型支座,在高速荷载下等效水平刚度都随循环次数的增加有较小幅度减小,减小的幅度比屈服后刚度大。对于LRB90型支座,铅芯橡胶支座的等效水平刚度随循环次数有小幅度的减小,第1圈支座的等效水平刚度是0.325 kN/m,第100圈支座的等效水平刚度是0.282 kN/m,只减小了13%,基本趋于稳定;对于LRB110型支座来说,铅芯橡胶支座的等效水平刚度随循环次数有小幅度的减小,第1圈支座的屈服后刚度是0.497 kN/m,第100圈支座的屈服后刚度是0.451 kN/m,只减小了10%,基本趋于稳定。

从图7可以看出,无论是LRB90型还是LRB110型支座,在高速荷载下等效阻尼比都随循环次数的增加而减小。对于LRB90型支座,铅芯橡胶支座的等效阻尼比随循环次数的增加而线性减小,第1圈支座的等效阻尼比是22.5%,第100圈支座的等效阻尼比是13.0%,减小了42%;对于LRB110型支座,铅芯橡胶支座的等效阻尼比随循环次数增加而线性减小,第1圈支座的等效阻尼比是21.4%,第100圈支座的等效阻尼比是13.5%,减小了37%。

4 结语

通过对LRB90型和LRB110型铅芯橡胶支座进行压剪试验,研究了高速荷载下反复循环次数对支座剪切性能衰减的影响,得出以下主要结论:

(1) 高速荷载下支座的滞回环面积随循环次数的增加而减小,能量耗散性降低,且循环次数接近100圈时,能量耗散性降低了接近50%。

(2) 高速荷载下支座的屈服力和等效阻尼比都随循环次数的增加而线性减小,且循环次数接近60圈时,屈服力和等效阻尼比的变化都基本趋于稳定。

(3) 高速荷载下支座的屈服后刚度和等效水平刚度都随循环次数的增加有小幅度的减小,且变化不大,基本趋于稳定。

由于试验设备性能约束的问题,虽然试验加载速率较高,达到0.8 Hz,但加载速度只有96 mm/s,还达不到实际地震时的加载速率,结果仍然具有一定的局限性。

参考文献:

- [1] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京:地震出版社,1997.
- [2] 日本隔震构造协会. 隔震构造入门[M]. 北京:科学出版社,1998.
- [3] 张荫,姚谦峰. 自阻尼叠层橡胶隔震支座阻尼特性及恢复力模型[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2003,35(2):120-126.
- [4] 贾俊峰,欧进萍. 连续板桥竖向隔震的弹性时程分析[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2006,38(4):463-466.
- [5] 朱宏平,周方圆,袁涌. 建筑隔震结构研究进展与分析[J]. 工程力学,2014,31(3):1-10.
- [6] 辛伟,王海洋,李政. 铅芯直径对铅芯橡胶隔震支座极限剪切性能的影响分析[J]. 河南科学,2014,33(10):2044-2047.
- [7] 王建强,辛伟,李政. 铅芯橡胶支座剪切性能的压力相关性试验研究[J]. 地震工程与工程振动,2016,36(5):200-206.
- [8] 张季超,李霆,李宏胜. 新型大直径隔震支座性能检测试验研究[J]. 建筑结构,2010,40(8):31-3.
- [9] 王建强,辛伟,李政. 铅芯橡胶支座剪切性能影响因素分析[J]. 世界地震工程,2014,30(3):77-81.
- [10] 沈朝勇,周福霖,崔杰. 高阻尼隔震橡胶支座的相关性试验研究及其参数取值分析[J]. 地震工程与工程振动,2012,32(6):95-103.
- [11] 高山,薛瑞杰,孙红兰,等. 高阻尼隔震橡胶支座力学性能试验研究[J]. 公路,2015,60(11):74-79.
- [12] 沈朝勇,谭平,崔杰. 超低硬度橡胶隔震支座水平力学性能相关性试验研究[J]. 地震工程与工程振动,2014,34(5):204-216.
- [13] 庄学真,周福霖,冯德民. 1200型大直径建筑叠层铅芯橡胶隔震支座性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2008,52(3):368-375.
- [14] 韩森,张一捷,杜红凯. 小型叠层橡胶支座的剪切性能试验研究[J]. 工程抗震与加固改造,2017,40(2):111-116.
- [15] SHEN C-Y, TAN P, CUI J, et al. Critical tension-shear load of elastomeric seismic isolators: An experimental perspective[J]. Engineering Structures, 2016, 121: 42-51.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 20688.1-2007 橡胶支座:第1部分隔震橡胶支座试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2007.