

• 工程结构减震与隔震 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202400050



本刊网刊

## 大变形加载下铅芯橡胶隔震支座滞回特性与隔震性能分析

王 斌<sup>1,2</sup>, 杨怡昭<sup>1</sup>, 陈 鹏<sup>1\*</sup>, 张展宏<sup>2</sup>, 戴靠山<sup>1,2</sup>, 刘兢兢<sup>3</sup>

(1. 四川大学 土木工程系, 四川 成都 610207; 2. 四川大学 灾后重建与管理学院, 四川 成都 610041;

3. 四川省建筑科学研究院有限公司, 四川 成都 610000)

**摘 要:**建筑隔震技术是在上部结构与基础或下部支承结构之间设置隔震层,通过延长结构周期并增加阻尼的方式,减少地震能量向上部结构传输从而保护上部结构,是高烈度地区减轻地震灾害最有效的方式之一。由于隔震层的刚度小,隔震结构的变形绝大多数集中在隔震层。通常认为隔震支座的变形在中等剪切变形范围内基本符合双线性模型,但当支座在大变形加载( $> 250\%$ 剪切变形)下,橡胶的硬化特性会导致隔震支座的刚度和承载力明显增大。本文采用直径500和800 mm的铅芯橡胶隔震支座(LRB),分别进行基本滞回性能和大变形加载下的滞回性能试验,研究不同加载制度下支座最大剪切变形为350%时的滞回性能。结果表明:LRB在100%剪切变形加载下其滞回性能符合双线性模型,但是当剪切变形超过200%后便逐步表现出硬化效应,其硬化后刚度约为初始屈服后刚度的1.6倍;支座在大变形加载时表现出明显的强度退化,并且在不同的大变形加载制度下支座的承载力及退化有明显的差异。以2022年四川泸定地震中某基础隔震建筑为研究对象,对比分析不同LRB模型和不同类型地震作用下结构的隔震性能。分析结果表明:隔震支座的大变形力学特性对于隔震结构在强震作用下的动力响应有明显的影响;对于高烈度和近断层地区的隔震结构,支座大变形硬化行为导致上部结构剪力的增加,其性能评估建议采用能考虑大变形特征的精细化的支座模型。

**关键词:**隔震结构;铅芯橡胶隔震支座;大变形加载;支座硬化;强度退化

中图分类号:TU352.1

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2025)06-0070-11

近年来,随着地震工程的研究与工程实践的进步,隔震结构在世界范围内迅速发展,隔震技术也被认为是高烈度地区减轻地震灾害最有效的方式之一<sup>[1-2]</sup>。隔震结构是在上部结构与基础或下部支承结构之间安装隔震支座,通过隔震层延长结构的周期并增加阻尼,从而有效地减轻上部结构的地震响应。隔震支座根据其工作机理,主要分为橡胶支座、滑动支座和滚动支座。目前,中国实际工程应用中最为广泛的是铅芯橡胶支座(LRB)。在地震作用中,由于隔震层的刚度较小,所以隔震结构的变形主要集中在隔震层。地震作用下,隔震层产生的大变形行为,以及相关的位移限位和复位能力已被研究者广泛关注<sup>[3-5]</sup>。

在中等剪切变形的水平往复加载试验中,LRB的力-剪切位移曲线接近双线性滞回特征,所以在计算分析中LRB通常简化为双线性模型<sup>[6-7]</sup>,其中,支座的屈

服力主要由铅芯确定,而支座的屈服后刚度则主要取决于橡胶的特性。在中国的隔震设计标准中<sup>[6]</sup>,通常取支座剪切变形 $\gamma = 100\%$ 作为设防地震下的设计位移,而取 $\gamma = 250\%$ 作为罕遇地震下的设计位移,并以此变形分别计算与其对应的等效刚度 $K_h$ 和等效黏滞阻尼比 $h_{cq}$ 。此处支座的剪切变形 $\gamma$ 为支座的水平位移 $u$ 与橡胶层总厚度 $t_r$ 的比值。在工程应用中,双线性的支座模型可以适用于大多数隔震层在中等剪切变形下的隔震结构分析。但对于近断层地震作用下或核电设施隔震设计中,隔震支座的变形可能会超过250%的剪切变形<sup>[8]</sup>。2016年的日本熊本地震中,位于地震断层附近的阿苏医疗中心的隔震层最大变形大为460 mm,相当于支座发生了330%的剪切变形<sup>[9]</sup>。在中国建筑隔震设计标准<sup>[6]</sup>中对于特殊设防类的建筑,在极罕遇地震作用下支座的水平剪切位移 $u$ 可取支座总厚度的400%(即最大剪

收稿日期:2024-01-19 修回日期:2024-04-07 网络出版日期:2024-05-15

基金项目:国家自然科学基金项目(52208318);四川省自然科学基金项目(23NSFSC1413)

作者简介:王 斌(1985—),男,教授,博士。研究方向:结构抗震与韧性结构体系。E-mail:bin.wang@scu.edu.cn

\*通信作者:陈 鹏,副研究员,E-mail:pengchen@scu.edu.cn

切变形 $\gamma = 400\%$ )。但由于橡胶材料的结晶特性,在大应变加载下会表现出材料硬化的特性,导致隔震支座的刚度和承载力明显增大。通常,当LRB及高阻尼橡胶支座在剪切变形达到200%~250%时,便逐步呈现出硬化特性<sup>[10-13]</sup>。隔震支座在大变形下的硬化特性可能会导致上部主体结构的加速度及隔震层的剪力增大,其动力响应与采用常见的双线性分析模型的结果有明显的差异,从而影响设计预期的隔震效果<sup>[14]</sup>。

中国的隔震设计规范中未考虑橡胶支座大变形效应的影响。美国AASHTO<sup>[15]</sup>和ASCE 7<sup>[7]</sup>等隔震设计方法中,采用简化的界限设计方法来考虑隔震支座复杂非线性行为。目前,实现隔震结构的精细化分析,主要的难点在于未深入地掌握支座大变形非线性的规律,尤其是针对不同加载制度下LRB的力学特性和滞回规律的分析,以及缺少相适应的面向工程应用的数值单元模型。

针对LRB在大变形加载下的力学性能,Tyler等<sup>[16]</sup>对缩尺的隔震支座进行了不同频率(0.1~3.0 Hz)的加载测试,但是支座的最大剪切变形只加载到200%,所以试验结果中支座的滞回特性仍然符合双线性模型。吴倩芸等<sup>[17]</sup>分别对直径为600和1 100 mm的LRB进行了剪切变形400%的大变形加载试验,其试验结果表明支座在240%剪切变形后发生橡胶硬化,且硬化刚度随支座剪切变形的增大而增大,加载至400%时刚度约为屈服刚度的1.5倍;通过对隔震结构的动力弹塑性分析发现,当LRB进入硬化阶段后,隔震层水平位移减小,隔震效果减弱,上部结构的加速度与层间位移响应均明显增大。Eem等<sup>[18]</sup>进行了隔震支座的动力大变形(最大 $\gamma = 400\%$ )加载试验,并提出了相应的分析模型,结果表明考虑支座大变形特性的分析模型可以更准确地评估隔震结构的安全性能。从当前的震害调查和计算分析可以看出,LRB在强震作用下会产生可能超过250%剪切变形的需求,而LRB在大变形下会表现出不同于中等剪切变形加载下隔震支座的响应。

本文采用工程实践中常用的直径500和800 mm的LRB试件,分别进行基本滞回性能加载和大变形加载下支座的滞回性能试验,研究不同加载制度下支座最大剪切变形为350%的滞回特性。以2022年9月四川泸定地震中某基础隔震建筑为研究对象<sup>[19]</sup>,对比分析考虑不同LRB模型和不同地震动输入下结构的隔震性能,为高烈度和近断层地区的隔震结构的性能评估提供参考。

## 1 LRB试验研究

### 1.1 试验设计

本试验采用中国厂家提供的LRB试件,支座的有

效直径分别为500和800 mm,铅芯直径分别是80和120 mm,支座具体的设计参数见表1。为了对比不同的加载制度及尺寸对支座滞回性能的影响,共设计3个LRB500和1个LRB800。试验在动态压剪试验机上进行,其最大竖向压力为30 000 kN,最大水平剪力为5 000 kN,最大水平加载位移为1 000 mm。图1为支座在压剪试验机中安装和试验情况。

表1 LRB试件设计参数

Tab. 1 Design parameters of LRB specimens

参数	取值	
	LRB500	LRB800
有效直径 $D/\text{mm}$	500	800
铅芯直径 $d/\text{mm}$	80	120
第一形状系数 $S_1$	21.3	22.0
第二形状系数 $S_2$	5.1	5.0
橡胶层总厚度 $t_r/\text{mm}$	95	160
橡胶层数 $n_r$	17	18
钢板厚度 $t_s/\text{mm}$	3	4
钢板层数 $n_s$	16	17

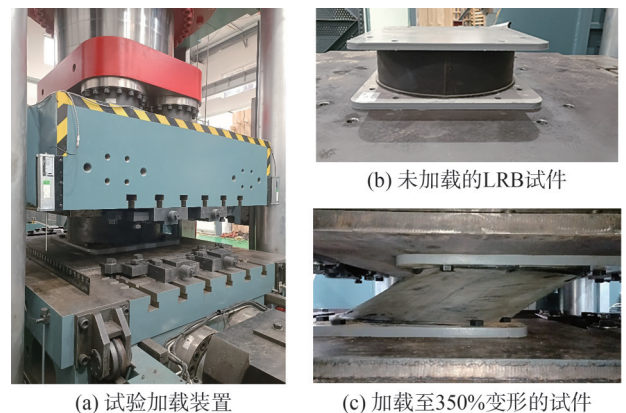


图1 LRB加载试验

Fig. 1 Loading tests of LRBs

### 1.2 试验方案

试验时,先给支座施加均匀的竖向压应力12 MPa(按照重点设防类建筑设计取值),再根据国家标准《橡胶支座 第1部分:隔震橡胶支座试验方法》<sup>[20]</sup>中建议的方法施加水平位移。本试验研究分为两阶段进行:第1阶段进行100%剪切变形的加载试验(图2(a)),以确定隔震支座的基本性能参数,采用正弦波加载11圈,加载频率为0.02 Hz;第2阶段进行不同加载制度下的大变形加载,最大剪切变形为350%。但是由于受加载设备性能的限制,采用平均速率约为2 mm/s等速率的三角形波进行支座大变形加载。两个加载阶段之间间隔2 d。具体试验的加载工况见表2,对应的加载制度见图2。其中:逐渐增幅加载制度(图2(b))是根据标准<sup>[20]</sup>中建议的支座剪切变形进行设计;为了考察支座在多次加载后性能的恢复情况,在进行非对称大变形(图2(c))加载前,先重复正弦加载11圈,以和第1阶

段的支座性能进行对比。非对称加载段考虑地震响应的随机性而设计;近断层加载制度(图 2(d))是参考 SAC 报告<sup>[21]</sup>中的加载制度在以 350% 剪切变形为基础上进行调整修改而成。

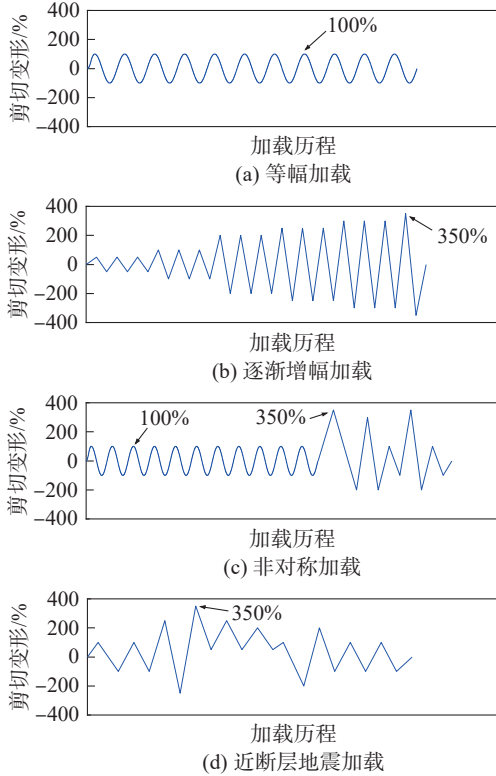


图 2 加载制度

Fig. 2 Loading protocols

表 2 试验工况

Tab. 2 Experimental cases

试件	第 1 加载阶段		第 2 加载阶段	
	加载要求	加载制度	加载要求	加载制度
LRB500-1			大变形加	图 2(b)
LRB500-2	100% 剪切	图 2(a)	载, 循环	图 2(c)
LRB500-3	变形, 循环		载至 350%	图 2(d)
	加载 11 圈		剪切变形	图 2(b)
LRB800				图 2(b)

根据 LRB 橡胶层厚度, 可得 LRB500 和 LRB800 在 100% 剪切变形下对应的加载幅值分别是 95.0 和 160.0 mm, 在 350% 剪切变形下对应的加载幅值分别是 332.5 和 560.0 mm。

## 2 试验结果分析

### 2.1 基本滞回性能

按照橡胶支座试验方法的要求, 先对支座进行 100% 剪切变形的加载试验, 以获取支座的基本性能参数。图 3 为 LRB500 和 LRB800 的水平力-剪切变形滞回曲线。由于 LRB500 的 3 个试件的滞回曲线基本重合, 所以在后续讨论中以 LRB500-3 为例进行说明。

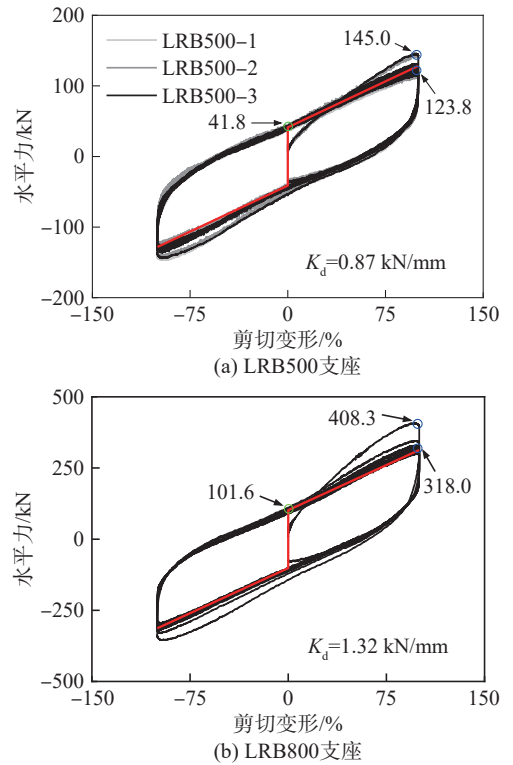


图 3 支座力-剪切变形滞回曲线(100% 剪切变形)

Fig. 3 Force-shear deformation hysteresis loops of bearings ( $\gamma = 100\%$ )

为了便于讨论支座的水平等效刚度  $K_h$ 、屈服力  $Q_d$ 、屈服后刚度  $K_d$  和等效阻尼比  $h_{eq}$ , 定义: 等效刚度  $K_h = (|Q_1| + |Q_2|) / (|\Delta^+| + |\Delta^-|)$ ; 屈服力  $Q_d$  是滞回曲线正向  $Q_d^+$  和负向  $Q_d^-$  与剪力轴交叉点的均值,  $Q_d = (|Q_d^+| + |Q_d^-|) / 2$ ; 屈服后刚度  $K_d = [(Q_1 - Q_d^+) / \Delta^+ + (Q_2 - Q_d^-) / \Delta^-] / 2$ , 其中,  $Q_1$  和  $Q_2$  分别为正向和负向最大水平力,  $\Delta^+$  和  $\Delta^-$  分别为  $Q_1$  和  $Q_2$  对应的正向和负向的最大位移; 等效阻尼比  $h_{eq} = (2E_{loop}) / [\pi K_h (|\Delta^+| + |\Delta^-|)^2]$ , 其中,  $E_{loop}$  为滞回曲线的包围面积。

由图 3 可以看出: 支座在多次反复加载过程中, 其第 1 圈的承载力明显高于后续加载的承载力, 比如, LRB500-3 支座的正向加载的第 1 圈峰值承载力为 145.0 kN, 而后续峰值承载力的平均值为 123.8 kN, 承载力降低约 14.6%; LRB800 支座的正向加载的第 1 圈峰值承载力为 408.3 kN, 而后续峰值承载力的平均值为 318.0 kN, 承载力降低约 22.1%。这种现象主要来自橡胶支座的扰动效应<sup>[22]</sup>。通常认为支座的扰动效应是永久性的, 但是, 当前研究认为当支座静置一段时间后, 其性能可以恢复或部分恢复到未扰动的状态。按照橡胶支座试验方法的要求, 支座的剪切性能参数应取第 3 次循环的测试值或取第 2~11 次循环的平均

值,但是由于支座初始加载的承载力与等效刚度与后续的加载有明显的差异,所以在近断层强震作用下,隔震结构分析时取第1次循环的测试值还是取第3次循环或者后续循环的平均测试值,可能会对隔震结构的性能评估产生一定的影响。

图 4 为 LRB500 和 LRB800 支座承载力和耗能随加载圈数的变化。由图 4 可以看出:LRB 在多次往复加载过程中,支座承载力会有一定程度的下降(LRB500 和 LRB800 承载力分别对应左侧和右侧纵坐标)。比如,LRB500-3 的屈服力在第 2 圈和第 11 圈时分别为 44.5 和 40.4 kN,承载力降低约 9.2%;LRB800 的屈服力在第 2 圈和第 11 圈时分别为 115.5 和 95.6 kN,承载力降低约 17.2%。这主要是铅芯在加载过程中温度升高导致的性能退化。随着加载圈数的增加,LRB 的性能趋于稳定。LRB500-3 在整个加载过程中耗能基本稳定,而 LRB800 的等效阻尼耗能则由第 1 圈的 22.3% 下降至第 11 圈的 20.1%。支座测试的速度对铅芯的温度变化有显著的影响,本试验中支座的加载频率为 0.02 Hz,属于较低的加载速率。如果在更高的加载速率,LRB 因铅芯发热而导致的承载力退化现象会更明显。

根据图 3 中第 2 次~第 11 次加载的平均试验结果,分别得出 LRB500-3 的有效刚度  $K_h = 1.34 \text{ kN/mm}$ ,其屈服力  $Q_d = 41.7 \text{ kN}$ ,其屈服后刚度  $K_d = 0.87 \text{ kN/mm}$ ,其等效阻尼比  $h_{eq} = 21.3\%$ ;LRB800 的有效刚度  $K_h = 1.95 \text{ kN/mm}$ ,其屈服力  $Q_d = 101.6 \text{ kN}$ ,其屈服后刚度  $K_d = 1.32 \text{ kN/mm}$ ,其等效阻尼比  $h_{eq} = 20.6\%$ 。图 3 中,红线为按照支座的性能参数而形成的双线性线段,由

红线可以看出支座在中等变形加载下采用双线性模型模拟隔震支座具有很好的精度。

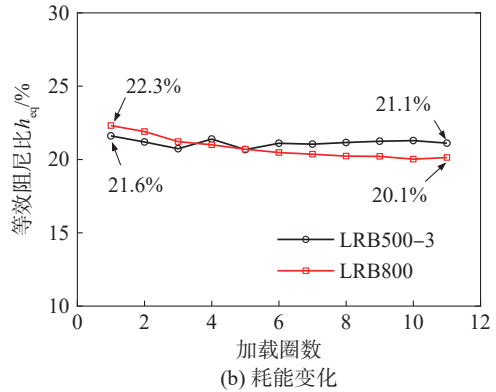
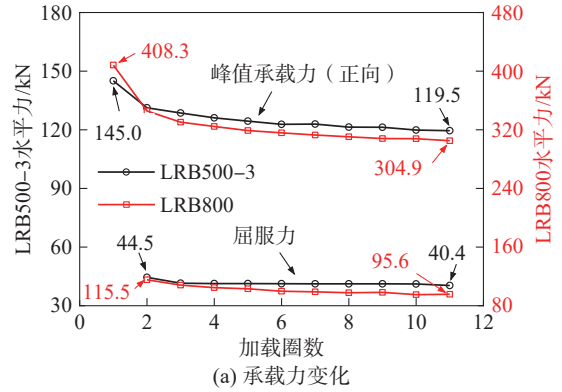


图 4 承载力和耗能随加载圈数的变化(100%剪切变形)  
Fig. 4 Variation of strength and energy dissipation with repeated cyclic loading ( $\gamma = 100\%$ )

2.2 大变形滞回性能

完成 100% 剪切变形加载试验后,试件静置 2 d,然后开始大变形试验的加载。图 5 为 LRB500 和 LRB800 在大变形加载下的水平力-剪切变形滞回曲线。

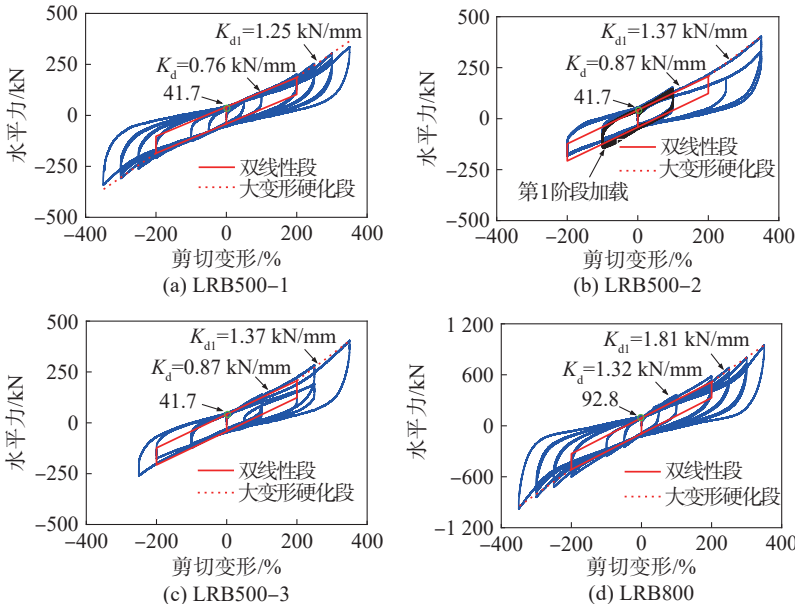


图 5 支座力-剪切变形滞回曲线(350%剪切变形)  
Fig. 5 Force-shear deformation hysteresis loops of bearings ( $\gamma = 350\%$ )

从图 5 可以看出:LRB500 的屈服力 41.7 kN 基本与第 1 加载阶段的结果相同(41.8 kN),而 LRB800 的屈服力 92.8 kN 低于第 1 加载阶段的屈服力(101.6 kN)。LRB500-2 在进行大变形加载前先重复正弦加载 11 圈,可以看出第 1 阶段与第 2 阶段的滞回曲线基本重合,表明当变形后的隔震支座静置一段时间后,基本可以恢复之前的性能。

分别以支座加载到 200% 剪切变形时的结果计算双线性参数(图 5 中红线段),可以看出:即使在 200% 的剪切变形下,双线性模型模拟支座的滞回行为已经表现出明显的误差,尤其是在非对称和近断层地震加载制度(LRB500-2 和 LRB500-3)情况下。支座在大变形加载下,其卸载段的滞回曲线有明显变宽的现象。同时,由图 5 中计算的隔震支座的初始屈服后刚度  $K_d$  和硬化段刚度  $K_{d1}$ (以 200% 剪切变形为分界点)可知:支座在 200% 剪切变形后硬化刚度有明显的增加。比如,LRB500-1 的初始屈服后刚度  $K_d = 0.76 \text{ kN/mm}$ ,而硬化刚度  $K_{d1} = 1.25 \text{ kN/mm}$ 。LRB500 的硬化刚度约为初始屈服后刚度的 1.6 倍,而 LRB800 的硬化刚度约为初始屈服后刚度的 1.4 倍。

图 6 为支座承载力和等效刚度随加载应变的变化,图 6 中,LRB500 和 LRB800 的承载力分别对应左侧和右侧纵坐标。由图 6(a)可以发现:加载路径对支座在大变形加载下的承载力有明显的影响。同样是在 350% 剪切变形的加载下,逐渐增幅加载的 LRB500-1 正向对应的承载力为 336.4 kN;而采用非对称和近断层地震加载时 LRB500-2 和 LRB500-3 对应的承载力分别为 401.1、404.4 kN,其承载力增加约 20.2%。另外,支座在大变形加载下表现出明显的强度退化现象。这种退化主要体现在第 1 圈与第 2 圈加载之间,而第 2 圈之后加载相对比较稳定。以 250% 剪切变形的加载为例,LRB500-1 正向第 1 圈对应的承载力为 253.8 kN,第 2 圈的承载力退化为 238.2 kN,减低了约 6.1%;但是,LRB500-3 正向第 1 圈对应的承载力为 283.4 kN,第 2 圈承载力退化为 186.2 kN,减低了约 34.2%。隔震支座在大变形加载下的退化行为也被称为 Mullins 效应<sup>[23]</sup>。但是在不同的加载制度下,这种支座强度退化的程度有明显的差异。分析结果表明,如果隔震结构在遭受近断层地震作用(如 LRB500-3)时,其实际的支座承载力可能与按照规程试验方法建议的取值有明显的差异。对于不同直径的支座,LRB500 和 LRB800 表现出类似的大变形滞回特性。由图 6(b)可知,支座的等效刚度随着加载变形的增大而降低,比如,在 100% 剪切变形下 LRB500-1 和 LRB800 对应的等效刚度分别为 1.27 和 2.26 kN/mm,经过逐步增幅加载后,

350% 剪切变形对应的等效刚度分别降低为 1.11 和 1.71 kN/mm。但是,从 200% 到 350% 剪切变形之间等效刚度变化很小,这也表明在 200% 的加载后支座硬化现象明显。

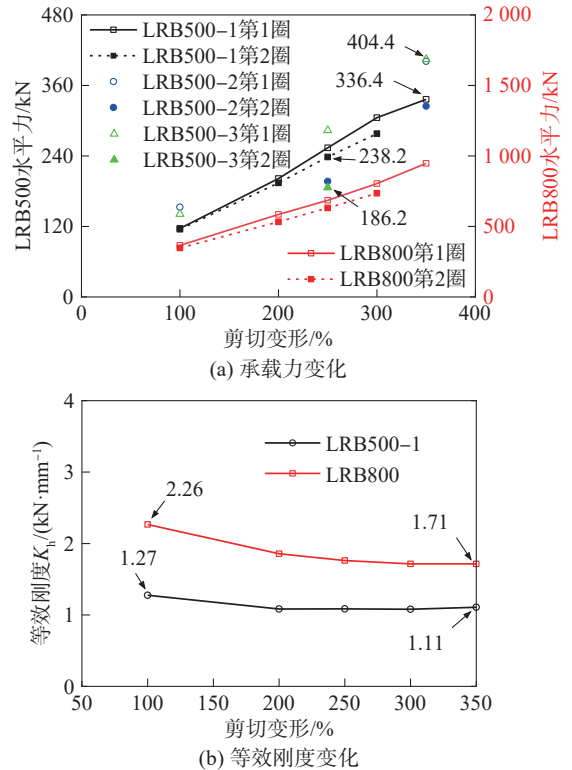


图 6 承载力和等效刚度随加载应变的变化(350% 剪切变形)

Fig. 6 Variation of strength and equivalent stiffness with strain amplitude ( $\gamma = 350\%$ )

### 3 隔震结构性能评估

#### 3.1 隔震结构模型

以 2022 年 9 月四川省泸定地震某基础隔震建筑为研究对象,对比分析隔震结构考虑支座大变形力学特性时的动力响应。参考文献[24]中的结构的力学参数,采用 OpenSees 软件建立简化分析的层模型,如图 7 所示。

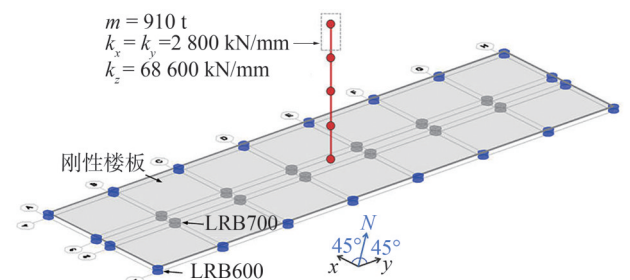


图 7 隔震结构简化分析模型

Fig. 7 Simplified numerical model of base isolated building

图 7 中, $m$  为上部结构总质量, $k_x$ 、 $k_y$  为水平向等效刚度, $k_z$  为竖向等效刚度。建筑  $y$  向为 7 等跨,每跨 8 m; $x$  向

为 3 跨,跨距分别为 7 m、2 m 和 7 m。隔震层共布置 12 个 LRB700 支座,均在隔震层内部;布置 20 个 LRB600 支座,分布在隔震层四周。隔震上部结构共 4 层,层高均为 3.5 m。

上部楼层结构与 LRB 均采用 twoNodeLink 单元

表 3 铅芯橡胶支座力学参数

Tab. 3 Mechanical properties of lead rubber bearings

型号	有效直径/mm	竖向刚度/(kN·mm <sup>-1</sup> )	初始刚度/(kN·mm <sup>-1</sup> )	屈服刚度/(kN·mm <sup>-1</sup> )	屈服力/kN	橡胶层总厚度/mm
LRB600	600	2 400	11.48	0.88	63	122
LRB700	700	2 600	15.19	1.17	90	129

隔震支座在竖向通过单轴材料并联的方式,支座的拉压刚度比为 1/10。为比较橡胶支座的大变形特性带来的结果差异,支座的水平向采用传统的 Bouc-Wen 模型(BW)和基于改进的 Bouc-Wen 模型(GBW)对 LRB 分别进行模拟。既有的能考虑橡胶支座大变形行为的模型,主要包括 Grant 模型<sup>[25]</sup>、多弹簧模型<sup>[26]</sup>、DHI<sup>[27]</sup>等。本文采用的 GBW 模型通过引入附加滞回单元及与等效剪切变形相关的损伤指数,来考虑支座大变形情况下的硬化和退化现象,模型表达简洁且便于应用。详细的模型介绍及试验对比验证参考文献[28]。在给定的低周往复加载工况下,GBW 模型与本文 LRB800 逐渐增幅加载试验结果对比,如图 8 所示。

图 8 结果表明,GBW 模型与试验结果拟合良好。GBW 模型能较好反映橡胶支座的大变形硬化和退化效应。本文通过 OpenSees 基于 C++ 语言的二次开发技术,在 OpenSees 程序中实现 GBW 模型隔震支座单元的建模与分析。

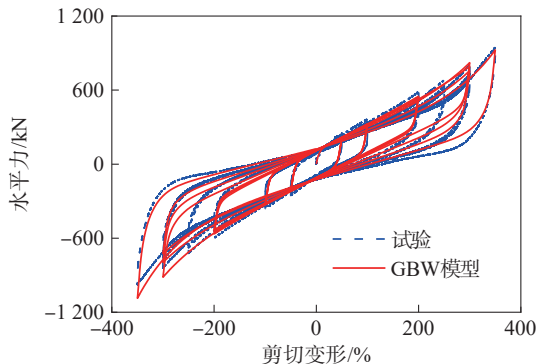


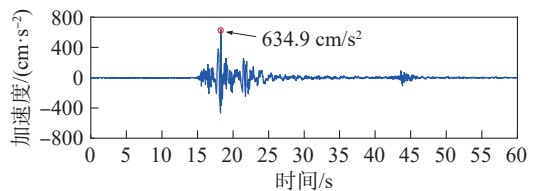
图 8 GBW 模型试验验证

Fig. 8 Experimental validation of GBW model

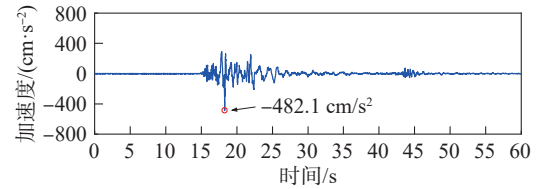
### 3.2 地震动输入

采用的地震动输入为实际结构附近的台站三向加速度记录,分别选用典型远场类型地震动(台站编号 SC.T2471)和近断层类型地震动(台站编号 SC.V2271),二者的地震动时程记录及反应谱与场地罕遇地震设计谱的对比,分别如图 9 和 10 所示。

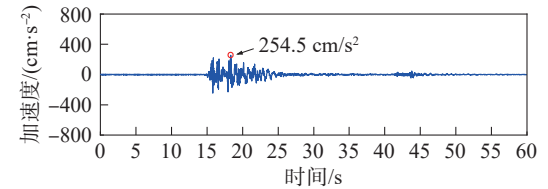
进行模拟,通过赋予 uniaxialMaterial 单轴材料的方式定义水平和竖向的力学行为。隔震层顶板采用刚性楼板假定,建立 RigidLink 单元将集中质量模型的底部质点与支座顶部节点相连。隔震上部结构考虑了 3% 的瑞利阻尼。LRB 的力学参数见表 3。



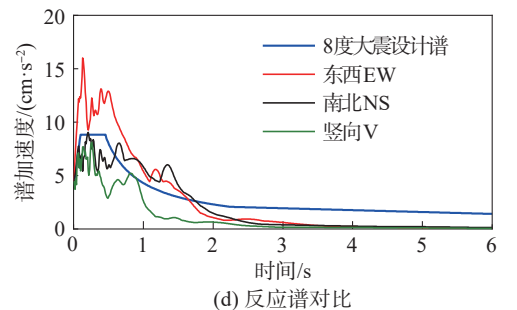
(a) EW向加速度时程



(b) NS向加速度时程



(c) V向加速度时程



(d) 反应谱对比

图 9 远场地震输入(编号 SC.T2471)

Fig. 9 Far-field earthquake record (No. SC.T2471)

对比图 9、10 可知:近断层地震动与远场地震动峰值加速度均超过设防烈度 8 度(0.2g)的罕遇地震加速度时程最大值(400 cm/s<sup>2</sup>)。对于远场地震动,反应谱在大于 2.0 s 的长周期段显著小于规范谱。近断层地震动记录反应谱值在 1.0~2.0 s 周期段较大。特别是 NS 向反应谱值显著较大,反映出较明显的近断层脉冲特点。结构的水平 x、y 向与地震动记录方向均呈 45°角,建模时将结构转动 45°后,按照实际地震输入角度进行计算。

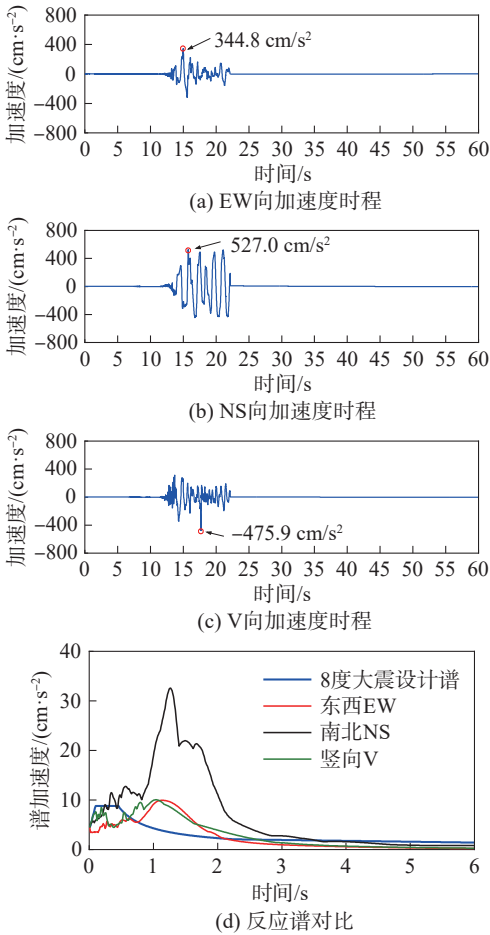


图 10 近断层地震输入(编号 SC.V2271)

Fig. 10 Near-field earthquake record (No. SC.V2271)

### 3.3 结构响应对比

选取典型角部支座(LRB600)进行地震响应对比。远场地震输入下 BW 和 GBW 模型计算的支座剪切变形的时程响应,如图 11 所示。由图 11 可知:由于远场地震中支座的剪切变形较小,支座未表现出明显的大变形非线性特征。LRB 采用 BW 和 GBW 模型得到的变形时程和滞回响应比较接近。在结构  $x$  方向, BW 和 GBW 模型计算的支座最大变形分别为 112% 和 117%; 在  $y$  向, BW 模型计算结果为 73%, 而 GBW 模型计算支座变形结果为 54%。

由图 11 可知:按照设计标准<sup>[6]</sup>要求, BW 模型的屈服后刚度在水平变形  $\gamma = 100\%$  时采用支座剪切试验第 3 圈数据; 而 GBW 模型初始屈服后刚度采用第 1 圈试验结果, 其屈服后刚度值根据加载历程进行折减。实际上, 支座在  $\gamma = 100\%$  水平变形时, 前两圈滞回也存在一定程度的 Mullins 效应, 第 3 圈的屈服后刚度为退化后的稳定刚度。在中等剪切变形情况下, GBW 模型的初始圈屈服后刚度略大于 BW 模型。根据以上对比可知, 在中等变形情况下采用精确的 GBW 力学模型, 也能提升计算结果的精确。

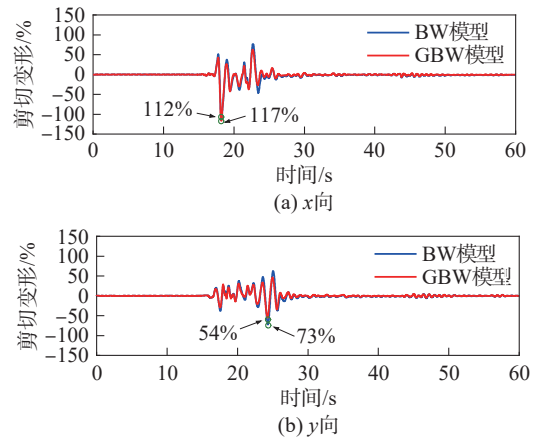


图 11 远场地震位移时程

Fig. 11 Displacement time history responses under far-field earthquake

相应的远场地震输入下 BW 和 GBW 模型计算的支座力-剪切变形滞回曲线, 如图 12 所示。由图 12 可见, 滞回曲线对比结果与剪切变形结果一致, 表明在支座中等变形情况下, GBW 模型对于计算精度有一定提升, 中等变形情况时支座未表现出硬化特性。

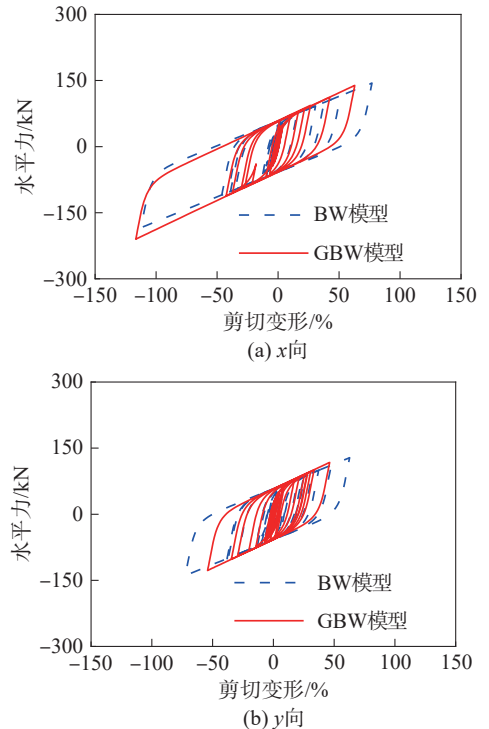


图 12 远场地震支座滞回曲线

Fig. 12 Bearing hysteretic curves under far-field earthquake

在典型近断层地震作用下, 由于地震波中的速度脉冲效应, 隔震支座易出现较大的剪切变形。近断层地震作用的 BW 和 GBW 模型支座的剪切变形时程, 如图 13 所示。由图 13 可见: 在支座的  $x$  和  $y$  方向, 两类 LRB 模型的计算结果均出现了较大差异。以支座峰值位移出现的  $y$  向为例, BW 和 GBW 模型的最大剪切变

形分别为 428% 和 363%,其主要原因在于 GBW 模型考虑了支座大变形下的硬化现象。因此,支座大变形的硬化特性可以抑制支座的峰值位移。

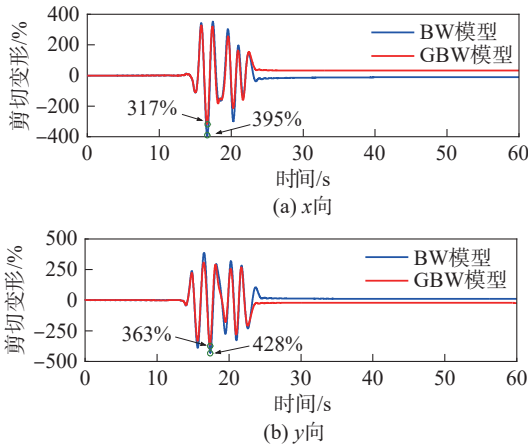


图 13 近断层地震位移历程

Fig. 13 Displacement time history responses under near-field earthquake

图 14 对比了相应的近断层地震下 BW 和 GBW 模型计算的支座的滞回曲线。

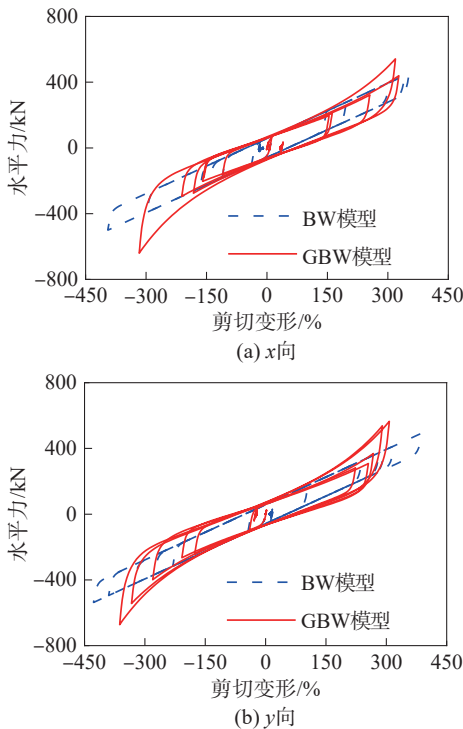


图 14 近断层地震的支座滞回曲线

Fig. 14 Bearing hysteretic curves under near-field earthquake

由图 14 可见:两种支座模型的滞回结果有较大的差异,双线性力学特征的 BW 模型无法反映支座的大变形响应特征,而 GBW 模型表现出较为复杂的大变形硬化行为和后续滞回圈的退化行为。图 14 的结果也表明在支座遭遇大变形时支座剪力会有明显的增大。传统的 BW 模型无法准确预测这种隔震层剪力增大的

现象。支座在大变形下的硬化特征会导致向上部结构传递力的增大,可能会对上部结构产生不利的影响。

为进一步讨论支座大变形硬化对隔震上部结构的不利影响,图 15 对比了远场和近断层地震作用下 BW 和 GBW 模型计算的上部结构层间位移角。图 15 的结果表明:除了局部楼层外,采用精细的 GBW 支座模型计算的层间位移角在远场地震和近断层地震下均有不同程度的增大。在远场地震作用下,支座的剪切变形较小,此时的层间位移角差异主要是支座屈服后刚度模拟方式不同而导致的。在近断层地震作用下,支座大变形的硬化行为导致隔震层剪力增大,使得上部结构层间位移角明显增大,对上部结构产生不利的影响。由于在近断层强震作用下支座大变形硬化行为会增加上部结构剪力,因此在罕遇地震下评估隔震结构的抗震性能时应考虑支座大变形硬化行为。

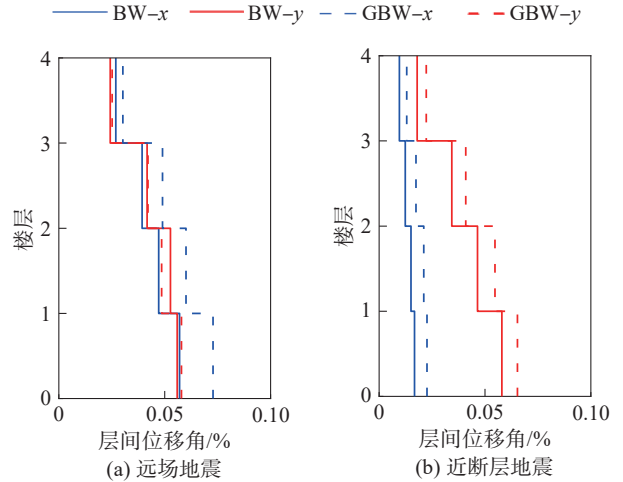


图 15 上部结构层间位移角

Fig. 15 Story drifts of the superstructure

### 4 结 论

当前隔震结构分析中,双线性的支座模型适用于大多数的支座变形为中等剪切变形的隔震分析,但是 LRB 在强震作用下会产生支座大变形的需求,这种大变形的 LRB 会表现出不同于中等变形加载下隔震支座的响应。目前针对工程应用的 LRB 的研究中仍缺乏大变形加载下滞回特性的研究,尤其是针对不同加载制度下 LRB 的力学特性和滞回规律的分析。本文采用直径为 500 和 800 mm 的 LRB 试件,分别进行基本滞回性能和大变形加载的滞回性能试验,对比研究不同加载制度下支座最大剪切变形为 350% 的滞回特性。对比分析考虑不同 LRB 模型和不同地震动输入下隔震结构的隔震性能。主要结论如下:

1) 隔震支座常用的双线性模型模拟中等变形加

载下(如 100%的剪切变形)的滞回响应具有很高的精度。但在大变形加载下,双线性模型模拟支座的滞回行为已经表现出明显的误差。这种误差对隔震支座在不同加载制度下的响应表现尤为明显。

2)隔震支座在剪切变形超过 200%后便逐步表现出硬化效应,支座的承载力和刚度都有明显的增大,最大的硬化后刚度可达初始屈服后刚度的 1.6 倍。

3)支座在大变形加载下表现出明显的强度退化现象。这种退化主要体现在第 1 圈与第 2 圈加载之间,而第 2 圈之后加载相对比较稳定。不同的加载制度下,这种支座强度退化的程度有明显的差异。

4)在近断层强震作用下,LRB 的大变形力学特征对于隔震结构的隔震层及上部结构的动力响应均有显著的影响。对于高烈度、近断层地区的隔震结构性能评估建议采用精细化的隔震支座分析模型。

#### 参考文献:

- [1] Pan Peng,Zamfirescu D,Nakashima M,et al.Base-isolation design practice in Japan:Introduction to the post-Kobe approach[J].*Journal of Earthquake Engineering*,2005,9(1):147-171.
- [2] Zhou Fulin,Tan Ping.Recent progress and application on seismic isolation energy dissipation and control for structures in China[J].*Earthquake Engineering and Engineering Vibration*,2018,17(1):19-27.
- [3] Wang Bin,Chen Peng,Zhu Songye,et al.Seismic performance of buildings with novel self-centering base isolation system for earthquake resilience[J].*Earthquake Engineering & Structural Dynamics*,2023,52(5):1360-1380.
- [4] Wang Bin,Zhu Songye,Casciati F.Experimental study of novel self-centering seismic base isolators incorporating superelastic shape memory alloys[J].*Journal of Structural Engineering*,2020,146(7):04020129.
- [5] Zhou Ying,Chen Peng.Shaking table tests and numerical studies on the effect of viscous dampers on an isolated RC building by friction pendulum bearings[J].*Soil Dynamics and Earthquake Engineering*,2017,100:330-344.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑隔震设计标准:GB/T 51408—2021[S].北京:中国计划出版社,2021.
- [7] American Society of Civil Engineers.Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures:ASCE/SEI 7[S].Reston:American Society of Civil Engineers,2022.
- [8] Liu Wenguang,Yu Weixin,Qin Chuan,et al.Hardening model for lead rubber bearings of base-isolated nuclear power plants and its influence on structural seismic responses[J].*Journal of Vibration and Shock*,2017,36(18):85-90.[刘文光,于维欣,秦川,等.核电厂隔震支座硬化模型及其对结构地震响应的影
- 响分析[J].*振动与冲击*,2017,36(18):85-90.]
- [9] Hamaguchi H,Wake T,Yamamoto M,et al.Practical application of lead rubber bearings with fail-safe mechanism[J].*Japan Architectural Review*,2019,2(3):323-339.
- [10] Toki S,Fujimaki T,Okuyama M.Strain-induced crystallization of natural rubber as detected real-time by wide-angle X-ray diffraction technique[J].*Polymer*,2000,41(14):5423-5429.
- [11] Lee J J.The potential application of strain-induced stiffening in base isolation system[D].Berkeley:University of California,Berkeley,2018.
- [12] Micozzi F,Ragni L,Gioiella L,et al.Variability of dynamic properties of rubber compounds for elastomeric bearings [J].*Structural Control and Health Monitoring*,2023,2023(1):6638748.
- [13] Liu Yanhui,Zhong Weijian,Mercan O,et al.A new nonlinear model to describe the degradation law of the mechanical properties of lead-rubber bearings under high-speed horizontal loading[J].*Structural Control and Health Monitoring*,2021,28(12):e2836.
- [14] Wang Bin,Karavasilis T L,Chen Peng,et al.Seismic modeling and performance evaluation of seismically isolated building considering large strain effects under near-fault earthquakes[J].*Journal of Building Engineering*,2024,90:109339.
- [15] American Association of State Highway and Transportation Officials.Guide Specifications for seismic isolation design:AASHTO[S].Washington,DC:American Association of State Highway and Transportation Officials,2014.
- [16] Tyler R G,Robinson W H.High-strain tests on lead-rubber bearings for earthquake loadings[J].*Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*,1984,17(2):90-105.
- [17] Wu Qianyun,He Wenfu,Liu Wenguang,et al.Large deformation hardening model of lead rubber bearings and elastic-plastic analysis for a structure with seismic isolation [J].*Journal of Vibration and Shock*,2017,36(15):90-97.[吴倩芸,何文福,刘文光,等.铅芯橡胶隔震支座大变形硬化模型及隔震结构弹塑性分析研究[J].*振动与冲击*,2017,36(15):90-97.]
- [18] Eem S,Hahm D.Large strain nonlinear model of lead rubber bearings for beyond design basis earthquakes[J].*Nuclear Engineering and Technology*,2019,51(2):600-606.
- [19] Dai Kaoshan,Yang Yijian,He Zhihong,et al.Postearthquake investigation of a base-isolated building in the 2022 Ms 6.8 Luding earthquake[J].*Journal of Performance of Constructed Facilities*,2023,37(5):04023037.
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家

- 标准化管理委员会. 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.
- [21] Krawinkler H, Gupta A, Medina R, et al. Loading histories for seismic performance testing of SMRF components and assemblies[R]. Richmond:SAC Joint Venture,2000.
- [22] Constantinou M C, Whittaker A S, Kalpakidis Y,等. 桥梁地震保护系统[M]. 北京:中国铁道出版社,2012.
- [23] Diani J, Fayolle B, Gilormini P. A review on the Mullins effect[J]. *European Polymer Journal*,2009,45(3):601–612.
- [24] Tao Siyu, Qu Zhe. Seismic response analysis of the lead rubber bearings in a base-isolated building in the 2022 Luding earthquake, China[J]. *Progress in Steel Building Structures*,2023,25(1):29–37. [陶思宇, 曲哲. 2022年泸定地震某隔震建筑铅芯橡胶支座地震反应分析[J]. *建筑钢结构进展*,2023,25(1):29–37.]
- [25] Grant D N, Fenves G L, Whittaker A S. Bidirectional modeling of high-damping rubber bearings[J]. *Journal of Earthquake Engineering*,2004,8(sup001):161–185.
- [26] Ishii K, Kikuchi M. Improved numerical analysis for ultimate behavior of elastomeric seismic isolation bearings[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*,2019,48(1):65–77.
- [27] Hu Xiaorong, Zhou Zhiguang. Seismic analysis of a reinforced concrete building isolated by high damping rubber bearings using deformation history integral type model[J]. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*,2020,29(18):e1811.
- [28] Chen Peng, Wang Bin, Zhang Zhanhong, et al. A generalized model of lead rubber bearing considering large strain stiffening and degradation[J]. *Engineering Structures*,2023,275:115264.

## Hysteretic Behavior and Seismic Isolation Analyses of Lead Rubber Bearings Under Large Cyclic Strain Loading

WANG Bin<sup>1,2</sup>, YANG Yizhao<sup>1</sup>, CHEN Peng<sup>1\*</sup>, ZHANG Zhanhong<sup>2</sup>, DAI Kaoshan<sup>1,2</sup>, LIU Jingjing<sup>3</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Sichuan University, Chengdu 610207, China;

2. Institute for Disaster Management and Reconstruction, Sichuan University, Chengdu 610207, China;

3. Sichuan Institute of Building Research, Chengdu 610000, China)

### Abstract:

**Objective** Lead rubber bearings (LRBs) tend to exhibit significant stiffening and degradation behavior when subjected to large shear strain deformation. However, these two phenomena, attributed to the Scragging and Mullins effects, are not thoroughly examined or adequately integrated into seismic isolation design procedures. The objective of this study is to comprehensively investigate the large-strain properties of LRBs. In addition, a numerical comparison is presented to demonstrate variations in seismic response when different modeling techniques are applied during strong earthquake shaking. The findings of this study significantly contribute to developing a more precise design methodology for seismically isolated structures, particularly in regions with high seismic intensity.

**Methods** Reversed cyclic tests were conducted on two different types of bearings. The dynamic compression-shear machine was employed for these tests. The reversed cycles were executed in a pseudo-static manner with an average velocity of 2 mm/s. A constant compression of 12 MPa was maintained throughout the test. The testing protocol consisted of four distinct loading sequences that covered both low-to-moderate and large strain loading amplitudes. The test sequences include equal amplitude, increasing amplitude, unsymmetric, and near-field loading scenarios, respectively. The maximum shear force in the first cycle was significantly greater than that of the subsequent cycles, primarily due to the Scragging effect. From the second to the eleventh cycles, the force gradually decreases, attributed to the temperature increase in the lead core. The maximum shear force decreases by 14.6% and 22.1% in total for LRB500 and LRB800, respectively. The variation in the equivalent damping ratio follows a similar trend. In addition, the results demonstrated that the traditional bilinear model adequately captures the hysteretic response of LRBs under design-level shear strain with satisfactory accuracy.

**Results and Discussions** The experimental results for large shear strain deformation were compared. A significant stiffening effect occurred when the shear strain exceeded 200%. The secant stiffness after the stiffening stage was found to be 1.6 times and 1.4 times greater than the design-level stiffness for LRB500 and LRB800, respectively. The loading history influenced the stiffening behavior, where a 20.2% additional increase in shear force occurred under the same shear amplitude level. In addition, the experiment revealed the occurrence of degradation, primarily during the initial large strain loading cycle. The traditional model failed to accurately capture the hysteretic response of LRBs under large shear strain deformation. A comprehensive evaluation of the seismic performance of an actual base-isolated building was conducted using the benchmark model of an isolated RC frame structure located in Luding, Sichuan Province. This building experienced significant shear failure in most of its isolators during the 2022 Luding earthquake. Regarding modeling techniques, a simplified multi-degree-of-freedom shear-type model was adopted to represent the isolated superstructure, while the isolation layer was modeled in detail. Both the traditional Bouc–Wen (BW) model and the General-

ized Bouc–Wen (GBW) model were utilized to represent the horizontal hysteretic behavior of LRBs to investigate the seismic response of the building, considering the large strain nonlinearities of LRBs. The GBW model was specifically developed to account for the large-strain behavior of LRBs, building upon the basic framework of the BW model. It is demonstrated that the hysteretic curves generated by the GBW model closely matched the test results. The analysis employed field-recorded seismic waves from both far-field and near-field sources. The time history and response spectrum were given. The peak input acceleration was  $527 \text{ cm/s}^2$ , and a significant velocity pulse was observed in the near-field record. This study examined the differences in seismic response when using the BW and GBW models. A comparison was made for the shear deformation and hysteretic curves of LRBs under far-field earthquakes. The results indicated that LRBs experienced moderate shear strain under far-field earthquakes; thus, the large strain nonlinearities were not significant. Therefore, the isolation displacement and hysteretic curves obtained using both models were similar. However, under near-field earthquakes, differences were observed. The maximum shear deformations calculated using the BW and GBW models were 428% and 363%, respectively. The significant hardening behavior observed during the first large strain cycle effectively limited the maximum isolation displacement of the LRB-isolated building; however, it raised concerns regarding the potential amplification of peak shear forces. The result demonstrated that incorporating the large strain behavior of LRBs in the modeling led to increased story drift in the isolated superstructure.

**Conclusions** This study provides comprehensive insights into the large-strain nonlinearities of LRBs through experimental investigations. In addition, numerical simulations were performed to compare the dynamic seismic response of an isolated building while considering these large-strain nonlinearities. The results indicate that LRBs exhibit significant hardening and degradation behavior under considerable shear strain, which significantly influences the seismic response of both the isolation layer and the superstructure. These findings establish a foundation for developing a more accurate seismic isolation design methodology. Future research should further investigate the mechanical properties of seismic isolators under ultimate seismic conditions to enhance the seismic resilience of structures located in near-fault regions.

**Key words:** seismically isolated structure; lead rubber bearing; large strain loading; bearing hardening; strength degradation

(编辑 赵 婧)

引用格式: Wang Bin, Yang Yizhao, Chen Peng, et al. Hysteretic behavior and seismic isolation analyses of lead rubber bearings under large cyclic strain loading[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2025, 57(6): 70–80. [王斌, 杨怡昭, 陈鹏, 等. 大变形加载下铅芯橡胶隔震支座滞回特性与隔震性能分析[J]. *工程科学与技术*, 2025, 57(6): 70–80.]