

文章编号: 1671-6833(2006)04-0071-04

# 铅芯橡胶支座滞回曲线的扁环现象及其恢复力模型

何文福<sup>1</sup>, 刘文光<sup>2</sup>, 霍 达<sup>1</sup>, 滕海文<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学建工学院, 北京 100022; 2. 广州大学工程抗震研究中心, 广东 广州 510405)

**摘 要:** 大量的试验数据表明, 铅芯橡胶支座的滞回曲线与加载时程密切相关. 目前现有的铅芯橡胶支座恢复力模型中都没有考虑加载时程基础上的应变滞回特性, 针对铅芯橡胶支座的这一特性, 提出了铅芯橡胶支座的“扁环”效应, 根据双拐点原则建立了考虑加载时程应变滞回特性的剪切弹塑性的“扁环”效应恢复力模型, 并对提出的恢复力模型进行了静力试验验证. 试验结果表明: 作者提出的“扁环”效应能很好地描述铅芯橡胶支座加载时程的应变滞回特性, “扁环”效应恢复力模型合理、精确, 适合于精确的非线性时程分析.

**关键词:** 橡胶支座; 扁环效应; 恢复力模型; 加载时程

**中图分类号:** TV 672.3

**文献标识码:** A

## 0 引言

铅芯橡胶支座是在普通橡胶支座的中部圆形孔内压入铅, 以提高普通橡胶支座的阻尼, 隔震支座由橡胶提供竖向支承和水平柔性, 利用铅芯的塑性变形来提供阻尼, 吸收能量, 因此同时具有降低结构水平刚度和耗能的功能, 在实际使用时可以节省空间, 施工上也较为便利, 已成为工程应用较多一种隔震装置<sup>[1,2]</sup>.

现有的铅芯橡胶支座恢复力模型中, 常见的有双线性模型、修正双线性模型、Ramberg-Osgood模型及双线性+RO模型等<sup>[3,4]</sup>. 双线性恢复力模型是假定橡胶支座为理想的弹性材料, 铅芯为理想的弹塑性材料, 把铅芯橡胶支座的恢复力模型视为双线性. 双线性的优点是模型简单、计算较为方便. Skinner、Robinson (1993) 研究指出采用双线性恢复力模型进行隔震计算, 可以得到较为精确的近似结果, 但对于高度非线性的分析结果误差过大<sup>[5]</sup>. 部分学者提出了修正双线性模型, 通过修正橡胶支座的屈服刚度和屈服力来修正普通双线性模型<sup>[6]</sup>. Ramberg-Osgood模型适用于高阻尼橡胶隔震支座. 冯德民<sup>[7]</sup> (1998年) 提出了修正双线性模型与 Ramberg-Osgood模型组合使用的

BRO铅芯橡胶支座的恢复力模型, 即在卸载段和反向加载段采用 Ramberg-Osgood模型, 其他段采用双线性模型.

现有的铅芯橡胶支座的剪切恢复力模型具有一个共同的特点是仅在初始弹性段范围内考虑了铅芯橡胶支座的小应变相关特性, 当铅芯橡胶支座进入屈服状态后不考虑小应变特性, 对屈服荷载及屈服后刚度的修正仅在未经历状态修正, 经历后不再考虑, 骨架曲线未考虑各加载时程段的不同特点. 这使得在复杂的非线性分析计算中存在较大误差. 观察伪静力试验所得的滞回曲线看出, 橡胶支座的滞回曲线与加载时程密切联系. 作者针对这一特性, 考虑铅芯橡胶支座加载时程的应变特性, 提出铅芯橡胶支座的“扁环”效应及其恢复力模型.

## 1 铅芯橡胶支座的“扁环”效应及其恢复力模型

### 1.1 基本原则

对大量的试验数据进行分析<sup>[8,9]</sup>, 对于橡胶支座“扁环”效应特性进行如下假定:

(1) 弹塑性恢复力模型骨架曲采用修正双线性和 Ramberg-Osgood模型组合的方式.

收稿日期: 2006-06-20; 修订日期: 2006-09-23

基金资助: 国家自然科学基金资助项目 (50578045)

作者简介: 何文福 (1979-), 男, 福建云霄人, 北京工业大学博士研究生, 主要从事工程抗震方面研究.

(2)考虑橡胶支座屈服后的应变特性,在铅芯橡胶支座屈服后的卸载段和加载段除了和卸载点(或反向加载点)有关外,还与卸载点相关的加载点(反向加载点相关的卸载点)有关,即和滞回环的大小有关.

(3)当加载点(卸载点)和前一卸载点(加载点)的水平位移差为橡胶支座的最大水平位移时按冯德民的恢复力骨架曲线.当加载点(卸载点)和前一卸载点(加载点)的水平位移差为零时按小应变恢复力骨架曲线.

1.2 “扁环”效应恢复力模型

新的恢复力模型如图 1 所示:其中  $K_t$  为切线刚度,  $K_d$  为屈服刚度,  $K_u$  为极限刚度. 其中,  $OA$  段为初始加载段

$$f=K_1u\ (0\leqslant u\leqslant u_y)\tag{1}$$

式中: $f$  为水平力; $u$  为水平位移; $K_1$  为初始刚度; $u_y$  为屈服时的水平位移,一般取水平应变 5% 时的位移.

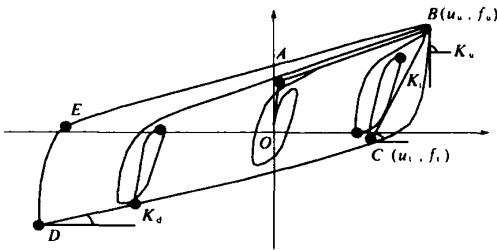


图 1 “扁环”效应恢复力模型

Fig.1 The flat hysteretic loop characteristic of the lead rubber bearings

$BC$  和  $DE$  段的  $g(\beta)$  推导过程如下. 定义:

$$\beta=\left|\frac{u_r-u_{r-1}}{u_{\max}}\right|\tag{2}$$

式中:  $u_r$  为加(或卸)载点;  $u_{r-1}$  前一次卸(或加)载点;  $u_{\max}$  为橡胶支座的最大水平位移.

设

$$g(\beta)=a(\beta)f_1+b(\beta)f_2\tag{3}$$

$f_1$  采用 Ramberg—Osgood 模型修正双线性模型:

$$u-u_u=(f-f_u)(a+b|f-f_u|)^{\gamma-1}\tag{4}$$

其中,  $a=\frac{1}{K_u}$ ,  $b=\frac{1}{|f_1-f_u|^{\gamma-1}}\left(\frac{1}{K_t}-\frac{1}{K_u}\right)$

式中:  $\gamma$  为剪切应变;  $K_t$  为切线刚度.

$f_2$  采用修正双线性模型为

$$u=\frac{1}{k_u}f\tag{5}$$

根据假设条件,代入公式(3),可得

$$\begin{cases} g(0)=a(0)f_1+b(0)f_2=f_1 \\ g(1)=a(1)f_1+b(1)f_2=f_2 \end{cases}\tag{6}$$

取方程的一组解为

$$g(\beta)=\beta f_1+(1-\beta)f_2\tag{7}$$

其中:  $\lambda$  为修正系数:

$$\lambda=\frac{K_d}{K_u}\tag{8}$$

则新模型的曲线方程为公式(9),其中刚度的公式为式(10).

$CD$  和  $EB$  段推导过程和上面相似,得到方程为式(11),刚度的公式为式(12). 所以,“扁环”效应的恢复力模型公式见(13)所示:

$$u=\beta^{\lambda}\{(f-f_u)\{a_1+b_1|f-f_u|^{\gamma-1}\}+u_u\}+(1-\beta)^{\lambda}\frac{1}{K_u}f\tag{9}$$

$$K_{\text{变}}=\frac{\partial f}{\partial u}=\frac{1}{\beta^{\lambda}(a+b\gamma|f-f_u|^{\gamma-1})+(1-\beta)^{\lambda}\frac{1}{K_u}}\tag{10}$$

$$u=\beta^{\lambda}\frac{1}{K_d}f+(1-\beta)^{\lambda}\frac{1}{K_u}f\tag{11}$$

$$K_{\text{变}}=\frac{\partial f}{\partial u}=\frac{1}{\beta^{\lambda}\frac{1}{K_d}+(1-\beta)^{\lambda}\frac{1}{K_u}}\tag{12}$$

$$\begin{cases} u-u_y=\left[\beta^{\lambda}\frac{1}{K_d}+(1-\beta)^{\lambda}\frac{1}{K_u}\right](f+K_1u_y) & (CD/EB) \\ u=\beta^{\lambda}\{(f-f_u)\{a_1+b_1|f-f_u|^{\gamma-1}\}+u_u\}+(1-\beta)^{\lambda}\frac{1}{K_u}f & (BC/DE) \end{cases}\tag{13}$$

2 试验研究

橡胶支座在实际的工作过程中,可能不是仅仅进行以橡胶支座的轴线为中心的往复运动,可能在橡胶支座存在一定的水平变形作用下,橡胶支座尚未回复到原来位置,又以当前的水平应变开始加载,卸载的情况一样,即存在上一节所提出的“扁环”效应现象,所以为研究铅芯橡胶支座的加载全时程的“扁环”效应特性,验证上一小节所建立的加载时程的模型方程,进行静力试验研究.

2.1 试验概况

试验体采用直径为 300 mm 和 600 mm 两种类型共 5 个铅芯橡胶支座进行,文中采取的试验数据为直径  $\Phi 600$  mm 的试验体所得的试验数据,

600 mm试验体规格如表 1 所示.

表 1   Φ600 mm 的铅芯橡胶支座试验体规格  
Tab.1   Size of specimen of the lead rubber bearings ( Φ600 mm)

试验体规格	直径/mm	中孔直径/mm	高度/mm	橡胶层总厚度/mm	第一形状系数 $S_1$	第二形状系数 $S_2$	剪切弹性模量 $G/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$
LRB-4	600	120	214	120	30	4	0.4

水平位移从初期的水平应变 10%, 20%, 50%, 到较大应变, 在大应变位置上再进行一些小的滞回环, 模拟地震发生时铅芯橡胶支座实际可能出现的情况.

2.2 试验曲线和模型比较

其中 LRB 4 试验的滞回曲线和新提出的模型比较见图 2、图 3, 可以看出, 滞回曲线上存在“扁环”效应, 由于它的存在, 使得整个滞回曲线不像单调的往复试验所得的试验曲线那样光滑, 这说明用原有的大应变的滞回模型是不能准确的分析, 所以考虑“扁环”效应的恢复力模型的提出具有现实意义.

比较试验曲线和考虑加载时程应变特性的“扁环”效应恢复力模型, 发现两者吻合良好, 由此验证了提出的“扁环”效应恢复力模型理论的合理性和精确性.

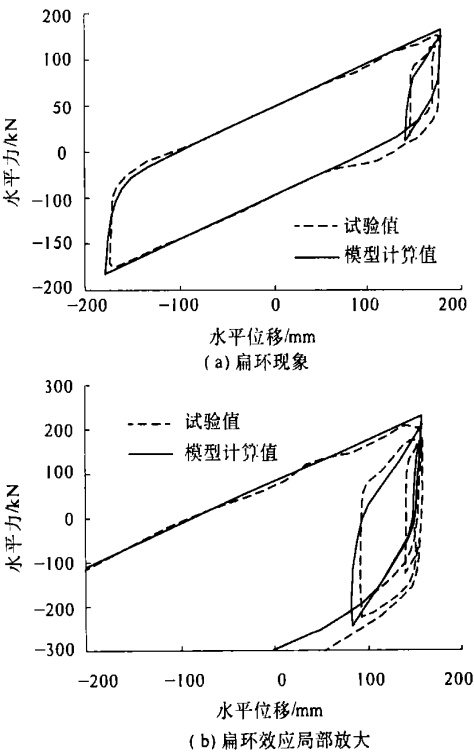


图 3 试验曲线和“扁环”效应恢复力曲线的比较  
Fig.3 Compare of test curve and new model

2.3 试验曲线和各模型的耗能比较

计算试验曲线和各模型的耗能, 即计算阻尼力做功为各滞回曲线循环所占面积, 过程如下:

$$W_c = \oint F dx \tag{14}$$

图 4 为各个恢复力模型和试验结果消耗的能量时程的比较. 滞回过程消耗的总能量为 780 376.1 kN/m, 由“扁环”效应模型和修正双线性+RO 模型计算的消耗的总能量分别为 772 681.7 kN/m, 760 164.9 kN/m, 误差分别为 0.97%和 2.58%, 而由双线性计算出的总能量消耗为 650 300.7 kN/m, 误差为 16.67%. 从图 4 可以看出, 修正双线性+RO 模型和“扁环”效应模型都考虑了小滞回环耗能的特性, 这两种恢复力模型的耗能情况都十分接近实际的耗能能量, 但由于“扁环”效应模型考虑了铅芯橡胶支座的扁环效

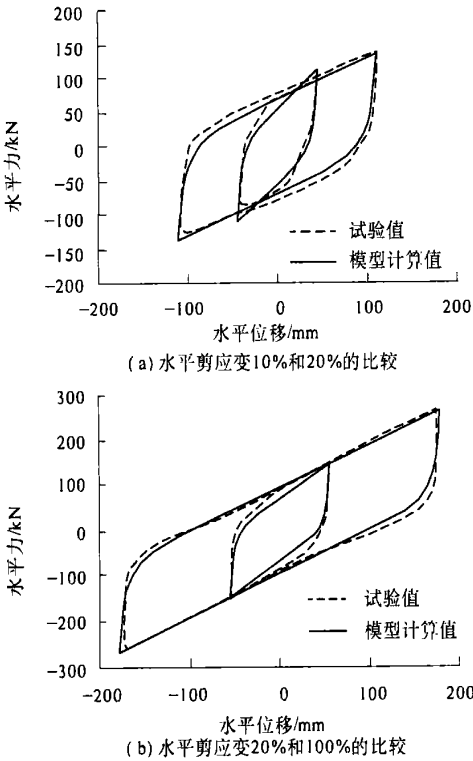


图 2 试验曲线和“扁环”效应恢复力曲线的比较  
Fig.2 Compare of test curve and new model

应,使得它与实际耗能更接近.双线性未考虑橡胶支座的小滞回环耗能能力,所以由双线性模型所计算出的耗能能量与实际情况相差较大.

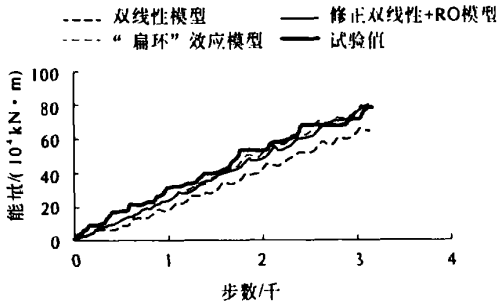


图 4 滞回曲线耗能比较  
Fig.4 Compare of energy spectrum

由以上的比较可以得出,作者提出的考虑铅芯橡胶支座加载时程应变特性的“扁环”效应恢复力模型能精确的描述铅芯橡胶支座的小滞回环特性及扁环效应,能量分析结果与实验接近,所以可以认为新提出的模型合理、精确.

3 结论

作者考虑铅芯橡胶支座加载时程的应变特性,并针对这一特性,提出了铅芯橡胶支座“扁环”效应的概念,并建立了铅芯橡胶支座考虑加载时程应变特性的剪切恢复力的“扁环”效应模型,并对提出的模型进行了试验验证,试验结果表明:铅芯橡胶支座考虑加载时程应变特性的剪切恢复力

模型不仅能考虑“扁环”效应的耗能特性,并且能很好的拟合小应变滞回环.

参考文献:

[1] 唐家祥. 建筑结构隔震设计[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1993.

[2] 杜晓伟,陈 淮,孙国钧.大型双槽渡槽动力特性分析[J]. 郑州大学学报(工学版),2002,23(4):22~25.

[3] 濂户裕,竹中康雄.修正双线性模型表现隔震装置两方向非线性模型的延伸[A].日本建筑学会.日本建筑学会学术讲演梗概集(B-2)[C].东京:日本建筑学会,1996.805~806.

[4] GENT A N, HENRY R L, ROXBURY M L. Interfacial stresses for bonded rubber blocks in compression and shear [J]. Journal of Applied Mechanics, 1974, 15(12):10~15.

[5] SKINNER R I, ROBINSON W H, MCVERRY G H. 工程隔震概论[M]. 谢礼立,周雍年,赵兴权,译.北京:地震出版社,1996.

[6] LINDLEY P B. Natural rubber structural bearings [J]. Joint Sealing and Bearing System for Concrete Structures (ACI), 1981, (1):353~378.

[7] FENG D M, MIYAMA T, TSUGIO T, et al. A new analytical model for the lead rubber bearing [A]. Pro of 12 WCEE[C]. New Zeland, 2000.

[8] 刘文光,周福霖,冯德民,等. G4 天然橡胶隔震支座力学性能[R]. 广州:广州大学,2002.

[9] 刘文光,周福霖,冯德民,等. G6 天然橡胶隔震支座力学性能[R]. 广州:广州大学,1999.

Flat-loop Effect and Hysteresis Property of the Rubber Bearings

HE Wen-fu<sup>1</sup>, LIU Wen-guang<sup>2</sup>, HUO Da<sup>1</sup>, TENG Hai-wen<sup>1</sup>

(1.College of Civil and Architecture Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2.EERTC of Guangzhou University, Guangzhou 510405, China)

**Abstract:** The experiments show that the hysteresis property of lead plug rubber bearings (LRB) is closely related to load time, which is not considered in the existing mechanics model of LRB. Based on the strain hysteresis property during the load or unload process of LRB, the flat-loop effect is provided in the paper. The shear hysteretic model which includes the flat-loop effect is established according to the double knee point principle, it is also proposed in the paper in the load or unload process. We complete the static test with the original rubber bearings to testify the new hysteretic model provided in the paper. The results show that the new hysteretic model could describe the flat-loop effect of LRB, and the analysis results considered the flat-loop effect are more ideal, the new model is suitable for a higher precise numerical analysis for isolated structures.

**Key words:** rubber bearings; flat-loop effect; mechanics model; load-time