

# 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

刘文光,于维欣,秦川,何文福

(上海大学 土木工程系, 上海 200072)

**摘要:** 超设计特大地震下 橡胶支座的力学模型对结构响应的影响在东日本大地震后得到了广泛的关注; 在双线性模型的基础上提出了一种适合铅芯橡胶隔震支座在大变形条件下的非线性硬化模型, 该模型考虑了支座硬化后的刚度退化现象以及压应力对于卸载曲线的影响。通过两组试验数据来验证模型的准确性, 并得出屈服刚度与最大剪切应变之间的关系; 采用数值分析方法研究隔震支座在特大地震下进入硬化后核电厂结构的地震响应。研究表明相比双线性模型, 核电厂结构采用硬化模型计算得出剪切力和加速度都出现显著增加的现象, 且在特大地震下隔震效果有所衰减。

**关键词:** 核电厂; 铅芯橡胶支座; 特大地震; 硬化模型; 大变形

中图分类号: TB535

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.18.013

## Hardening model for lead rubber bearings of base-isolated nuclear power plants and its influence on structural seismic responses

LIU Wenguang, YU Weixin, QIN Chuan, HE Wenfu

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** The effect of the mechanical model of isolation bearings on structural seismic responses under a severe earthquake excitation exceeding the designed value is widely concerned after the East Japan earthquake. An analytical nonlinear hardening model for lead rubber bearings (LRB) in the condition of large deformation, based on a bilinear model, was proposed. The descending of yielding stiffness after hardening and the influence of vertical load on unloading curves were both considered in the model. To confirm the validity of the model, analyses were performed on two sets of actual static loading tests data of the LRBs. The correlation between the yielding stiffness and the history of maximum shear deformation was also developed in the tests. Analyses using the new model were conducted to demonstrate the seismic responses of base-isolated nuclear power plants in the condition of large shear deformations of isolation bearings. The study indicates that the shear force and acceleration of nuclear power plant structures predicted by the new model increase obviously compared with those by the bilinear model. It also shows that the isolation effect will decline under severe earthquakes.

**Key words:** nuclear power plants; leading rubber bearings; severe earthquake; hardening model; large deformation

核电厂隔震设计目标是在保留核电站机组原先核岛厂房上部结构及内部所有配套核设施的标准设计不变的前提下, 仅在其核岛基础底板下设置隔震支座, 把原系列机组标准运行基准地震(OBE)的能力予以翻倍为安全停堆地震(SSE), 最后以超设计基准地震进行验算。运行基准地震水平是核电站使用期间可能预计到的最大地震, 安全停堆地震水平是核电站场地内最大的可能地震<sup>[1]</sup>。目前对于超设计基准地震加速度峰值取值尚无依据。与普通民用建筑设计要求不同, 在此

过程中支座必然会进入大应变的情况。支座达到一定水平变形后会引起硬化, 因而导致上部结构加速度以及隔震层剪切力剧增, 在极端条件下会导致支座损伤甚至完全破坏。对于核电厂而言, 结构的破坏带来的后果是十分严重的。因此应该深入研究核电厂房隔震结构的支座在大变形条件下的硬化模型以及上部结构的响应。

目前可以用于分析的隔震模型主要有双线性滞回模型、Rambeg-Osgood模型及 Bouc-wen模型<sup>[2-4]</sup>。这些模型都普遍适用于低–中应变情况, 但对于大应变下的某些效应则无法考虑, 因此, 近年来学者进行了一些关于隔震支座模型修正的研究。Kikuchi等<sup>[5]</sup>提出了一个可以用于预测隔震支座应变硬化和

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278291; 51478257); 教育部博士点

基金项目(20133108110024)

收稿日期: 2016-05-10 修改稿收到日期: 2016-07-12

第一作者 刘文光,男,教授,博士生导师,1968年生

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

支座往复循环软化效应的数学模型。Lizuka<sup>[6]</sup>提出了叠层橡胶支座变形的宏观模型,该模型以包络线方式表征大应变下支座的性能。Yamamoto等<sup>[7]</sup>提出了轴力剪力相互作用的隔震支座恢复力模型,该模型能表征大应变下时低应力下的刚度硬化和高应力下的屈曲行为。Takaoka<sup>[8]</sup>提出了一个具有大变形硬化点的橡胶隔震支座曲线恢复力模型,该模型考虑了硬化段屈服刚度退化现象。以上研究中虽然有些模型考虑了铅芯橡胶支座大应变下模型的一些试验特性,但是很少涉及支座在特大地震中的行为。2011年日本东北大地震中,福岛核电厂遭受特大地震超设计水准的地震动。因此,在突发断层或特大地震作用下,核电厂隔震支座的性能及对结构的影响需做深度的分析。

本文在双线性模型的基础上,提出了一种新的铅芯橡胶支座硬化模型,与试验数据进行比对。采用数值分析对铅芯橡胶支座进行时程计算,并对核电厂隔震结构在不同等级地震波下铅芯橡胶支座的力学性能进行了评价。

## 1 基本理论

在现有的铅芯橡胶大应变模型研究中,函数表达式很难由材料本构关系推导出来,或推导得出的表达式过于复杂,不便于进一步时程分析。因而现有函数都是以大量试验数据为基础进行曲线拟合。

本文基于铅芯橡胶支座屈服刚度 $k_d$ 和屈服力 $Q_y$ ,提出一种合适支座大变形时的硬化模型。

为了便于分析,模型采用以下假定:①未硬化阶段采用双线性模型,硬化阶段采用曲线模型;②铅芯橡胶支座硬化前卸载刚度为屈服刚度的13倍,即 $k_u = 13 \times k_d$ ;③硬化后卸载曲线回归点位置相同。

### 1.1 硬化前模型

本文中未硬化阶段仍然采用双线性模型(见图1)。用该模型表示滞回曲线时,由于用屈服后刚度( $k_d$ )和卸载刚度( $k_u$ )两种弹簧,以及屈服力进行模型化,所以屈服后刚度的大小对滞回曲线影响很明显<sup>[9]</sup>。

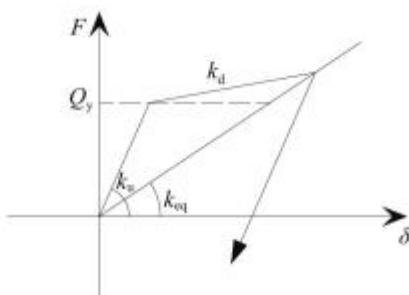


图1 铅芯橡胶支座双线性模型

### 1.2 硬化后模型

硬化部分包括加载曲线和卸载曲线(见图2)。

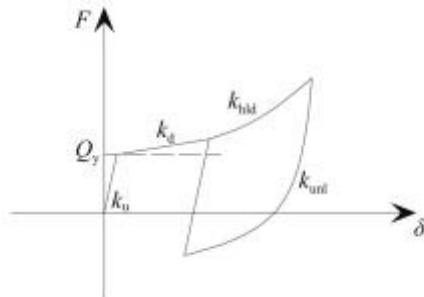


图2 铅芯橡胶支座硬化模型图

Fig. 2 Hardening model of LRB

通过拟合结果,加载曲线采用指数函数,可适当调整硬化刚度。当支座进入大变形段时,硬化加载段公式为

$$F_{\text{hld}}(\delta) = G_1 e^{\alpha(\frac{\delta}{\gamma_H h} - 1)} \quad (1)$$

对式(1)求导可得加载刚度

$$k_{\text{hld}}(\delta) = \frac{dF_{\text{hld}}(\delta)}{d\delta} = \frac{\alpha G_1}{\gamma_H h} e^{\alpha(\frac{\delta}{\gamma_H h} - 1)} \quad (2)$$

支座硬化后的卸载曲线采用正切函数,可准确描述卸载刚度前期较大,后期较为平稳的状态,硬化卸载段公式为

$$F_{\text{unl}}(\delta) = \frac{F(\delta_m) - G_2}{\tan\left(\frac{1}{2}\beta\pi\right)} \tan\left[\frac{\beta\pi(\delta - G_3)}{2(\delta_m - G_3)}\right] + G_2 \quad (3)$$

对式(3)求导可得卸载刚度

$$k_{\text{unl}}(\delta) = \frac{dF_{\text{unl}}(\delta)}{d\delta} = \frac{[F(\delta_m) - G_2]\beta\pi}{4(\delta_m - G_3)\tan\left(\frac{1}{2}\beta\pi\right)} \sec^2\left[\frac{\beta\pi(\delta - G_3)}{2(\delta_m - G_3)}\right] \quad (4)$$

其中:

$$G_1 = k_d \gamma_H h + \frac{12}{13}Q_y \quad (5)$$

$$G_2 = G_1 - 2Q_y \quad (6)$$

$$G_3 = \frac{G_1 + G_2}{k_d} - \gamma_H h \quad (7)$$

式中: $\gamma_H$ 为硬化时支座剪切应变,一般可取200%~250%; $h$ 为橡胶层厚度; $Q_y$ 为铅芯橡胶支座屈服力; $k_d$ 为铅芯橡胶支座硬化后的屈服刚度; $\delta_m$ 为铅芯橡胶支座历程最大位移; $\alpha$ 为加载曲线的刚度硬化系数; $\beta$ 为卸载曲线的压力相关系数。 $\alpha$ 和 $\beta$ 对大变形条件下的非线性恢复力模型形状起到重要作用。随着 $\alpha$ 值的增大,硬化后模型刚度越大(见图3(a));随着 $\beta$ 值的增大,硬化模型卸载曲线越饱满(见图3(b))。控制 $\alpha$ 的参数是支座大变形后屈服刚度;控制 $\beta$ 的参数是支座竖向应力的值, $\alpha$ 和 $\beta$ 基于试验确定。

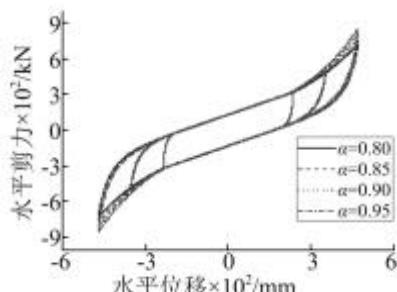
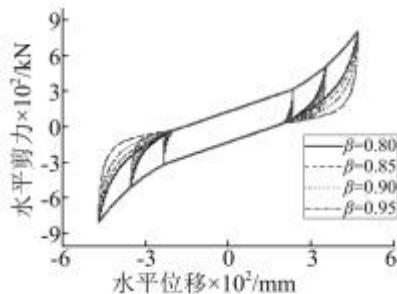
(a)  $\alpha$  对硬化模型的影响(b)  $\beta$  对硬化模型的影响

图3 系数对硬化模型的影响

Fig. 3 Influence of parameter on hardening model

## 2 数值分析与试验比较

### 2.1 支座试验概况

对于 LRB600 试件, 试验方法是在竖向压缩应力 5 MPa 作用下, 剪切应变分别为  $\gamma = 200\%、300\%、400\%、460\%$  和  $500\%$  时的压缩剪切试验, 记录隔震支座水平力和位移之间的关系。其中  $\gamma = 200\%$  和  $300\%$  时取 4 次反复加载循环的第 3 次循环的数据;  $\gamma = 400\%、460\%$  和  $500\%$  时, 由于受到国内现有压剪试验机性能的限制, 因此只能做 1 次循环加载。试验由两台不同型号的液压伺服试验机各自进行, 分别为试验 A 和试验 B。

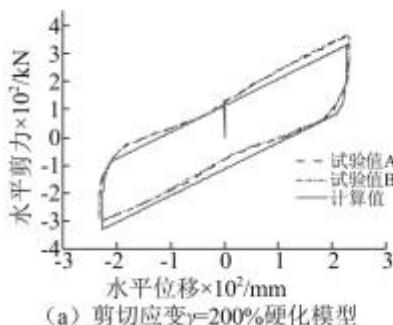
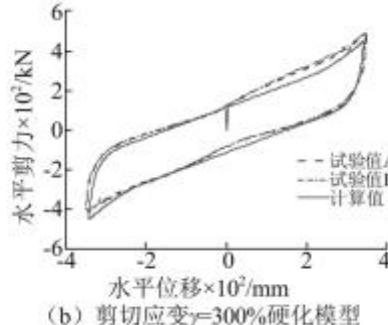
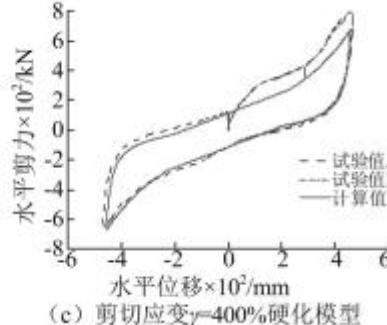
(a) 剪切应变  $\gamma=200\%$  硬化模型(b) 剪切应变  $\gamma=300\%$  硬化模型(c) 剪切应变  $\gamma=400\%$  硬化模型

图5 计算曲线与试验数据对比

Fig. 5 Comparison between hardening model and static loading tests

### 3 硬化模型时程分析

#### 3.1 分析模型

由于核电厂上部结构刚度远大于隔震层刚度, 上部结构可近似刚体。故本文通过 MATLAB 软件建立核电厂房隔震单质点模型, 并对隔震结构在铅芯橡胶支座发生大变形的情况下所产生的响应进行预测。隔震结构周期为 2.7 s, 单个支座的基本面压为 8 MPa, 屈重

### 2.2 试验结果比对

图 4 为支座每经过一次大变形之后与屈服刚度下降程度之间的关系。评价铅芯橡胶隔震支座屈服刚度比  $k_{dn}/k_{d100}$  和剪切应变历程最大值  $\gamma_m$  变化的方程近似表示如下

$$k_{dn}/k_{d100} = 0.018 4 \gamma_m^2 - 0.175 3 \gamma_m + 1.160 5 \quad (8)$$

图 5(a) 为  $\gamma = 200\%$  时支座水平力和位移之间的关系, 计算曲线与试验曲线形状略有误差, 但滞回曲线的面积大致相同。从图 5(b)、图 5(c) 可知, 当  $\gamma > 300\%$  时, 铅芯橡胶支座每经历过一次硬化后, 屈服刚度会有所下降。此外, 从两组不同试验数据 A 和试验数据 B 可看出, 铅芯橡胶支座的硬化现象以及力学性能较为稳定, 支座硬化现象能以数学函数形式表达。

从图 5(c) 可知, 由于支座剪应变  $\gamma = 400\%$  的试验只做了 1 圈, 故起始加载曲线受到压剪试验机摩擦力影响产生了较大误差, 但是与计算得出的卸载曲线和反向加载曲线都能较好吻合。

图 6 为支座剪切应变分别为  $\gamma = 200\%、300\%、400\%、460\%$  和  $500\%$  时的压缩剪切试验数据与公式计算值的对比。从图 6 可知, 硬化公式得出的计算值能够合理拟合试验数据。

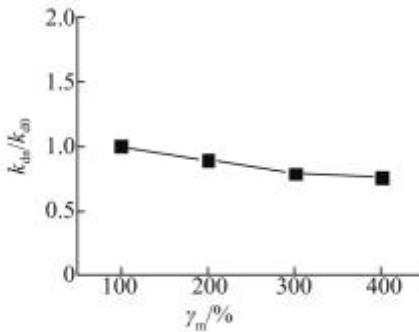


图4 屈服刚度和历程最大剪切应变关系图

Fig. 4 Correlation between yielding stiffness and history of maximum deformation

比为 5.5%。模型采用文本提出的硬化函数，并以纽马克 $\beta$ 非线性加速度法进行时程计算。核电站隔震结构模型和单质点简化模型如图 7 和图 8 所示。

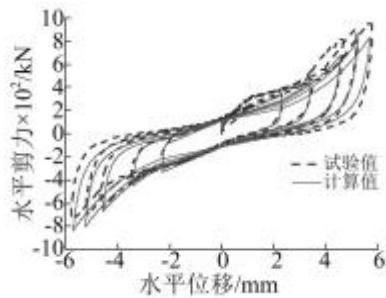


图 6 LRB600 硬化模型

Fig. 6 Hardening model of LRB600

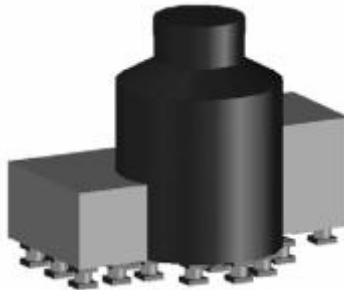


图 7 核电站隔震结构模型

Fig. 7 Base-isolated nuclear power plants

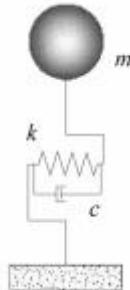


图 8 单质点简化模型

Fig. 8 Single-particle model

### 3.2 时程分析

分析采用 3 条地震波，分别为 1952 年美国加利福尼亚地震时的 Taft 修正波、1940 年 El Centro-Imp Vall IRR 地区的 El Centro-180#成分修正波(El Centro)、1995 年神户地震时的八户波(Hachinohe)。地震波峰值从 0.1g 开始逐次递增至 0.6g，由此模拟硬化模型在不同等级地震下的响应。

表 1、表 2、表 3 分别为硬化模型在 Taft、El Centro、Hachinohe 波作用下的隔震层加速度最大值和位移最大值。从计算结果可知，在地震波峰值  $< 0.3g$  的情况下，双线性模型和硬化模型完全一致；当地震波峰值  $> 0.3g$  时，两种模型的偏差率随地震波峰值的增大而增大。当地震波峰值为 0.4g 时，加速度的偏差率  $< 10\%$ ，剪切变形的偏差率  $\approx 1\%$ ，属于工程允许误差范围内。当地震波峰值为 0.5g 和 0.6g 时，两种模型之间的偏差率急速上升。由此双线性模型的剪切力会被低估，从而致使特大地震下铅芯橡胶支座以及上部结构的地震响应比实际情况小。

图 9、图 10 分别为质点模型在峰值为 0.6g 下三种地震波的加速度时程曲线以及滞回曲线。从图可知，相比双线性模型，硬化模型的加速度响应增大了 30%。

而此时铅芯橡胶支座的剪切应变偏差在 10% 左右。此外相比双线性模型，硬化模型计算得出的剪切力峰值较大，而位移峰值较小。

图 11 为两种模型在不同等级地震下的隔震效果。可以发现就双线性模型而言，随着地震波峰值增加，隔震效果越显著。对于硬化模型，当地震波峰值在 0.3g 附近时，隔震效果维持不变；当地震波峰值大于 0.4g 时隔震效果甚至开始衰减。可见在特大地震作用下，铅芯橡胶支座的硬化对隔震效果影响较大。

表 1 Taft 波下加速度与位移的峰值对比

Tab. 1 Comparison of acceleration and displacement under Taft

地震波峰值	双线性模型加速度 / (m·s⁻²)	硬化模型加速度 / (m·s⁻²)	加速度峰值偏差率/%	双线性模型位移 / mm	硬化模型位移 / mm	位移峰值偏差率/%
0.1g	0.64	0.64	0	27	27	0
0.2g	1.05	1.05	0	102	102	0
0.3g	1.60	1.60	0	202	203	0
0.4g	2.17	2.38	10	308	305	-1
0.5g	2.87	3.47	21	437	418	-4
0.6g	3.72	4.64	25	612	469	-23

表 2 El Centro 波下加速度与位移的峰值对比

Tab. 2 Comparison of acceleration and displacement under El Centro

地震波峰值	双线性模型加速度 / (m·s⁻²)	硬化模型加速度 / (m·s⁻²)	加速度峰值偏差率/%	双线性模型位移 / mm	硬化模型位移 / mm	位移峰值偏差率/%
0.1g	0.65	0.65	0	28	28	0
0.2g	0.82	0.82	0	59	59	0
0.3g	1.36	1.36	0	159	159	0
0.4g	2.01	2.09	4	277	275	-1
0.5g	2.68	3.22	20	401	383	-5
0.6g	3.38	4.60	36	506	470	-8

表 3 Hachinohe 波下加速度与位移的峰值对比

Tab. 3 Comparison of acceleration and displacement under Hachinohe

地震波峰值	双线性模型加速度 / (m·s⁻²)	硬化模型加速度 / (m·s⁻²)	加速度峰值偏差率/%	双线性模型位移 / mm	硬化模型位移 / mm	位移峰值偏差率/%
0.1g	0.66	0.66	0	29	29	0
0.2g	0.96	0.96	0	85	85	0
0.3g	1.51	1.51	0	186	186	0
0.4g	1.98	2.06	4	273	271	-1
0.5g	2.47	2.86	15	318	306	-4
0.6g	3.29	3.85	17	513	429	-16

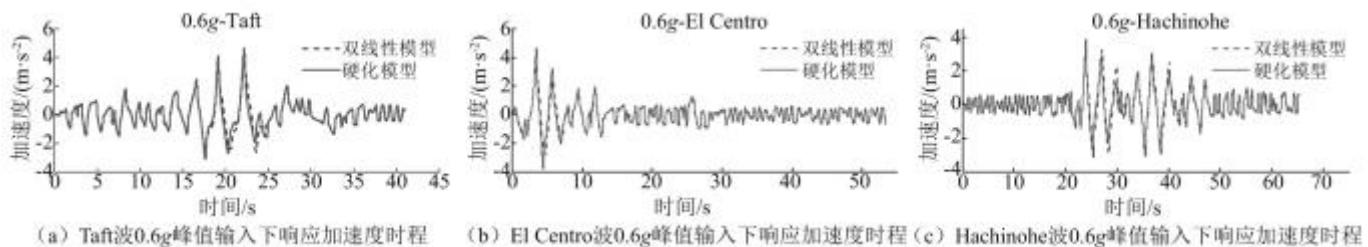


图9 0.6g 峰值不同地震波下的响应加速度时程对比

Fig. 9 Comparison of acceleration between two models under different seismic wave at peak of 0.6g

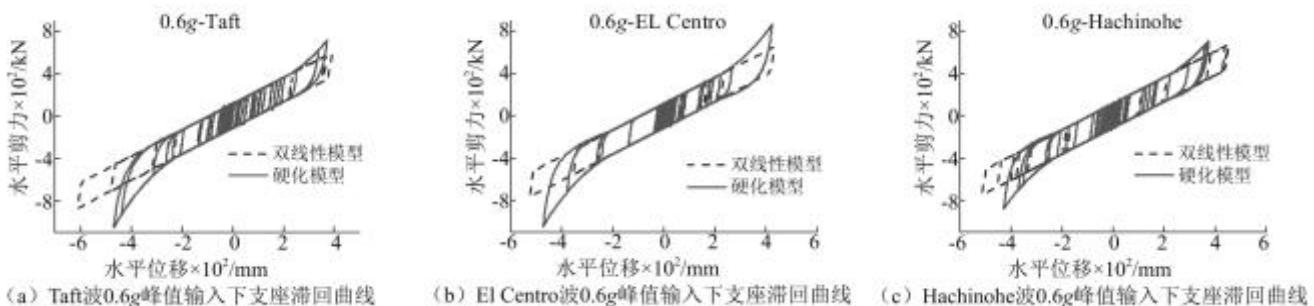


图10 0.6g 峰值不同地震波下的滞回曲线对比

Fig. 10 Comparison of hysteresis loops between two models under different seismic wave at peak of 0.6g

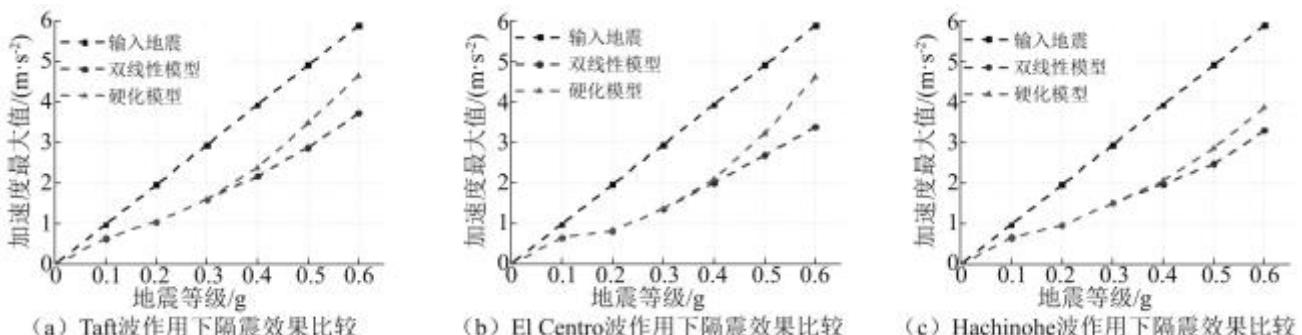


图11 两种模型在不同等级地震下隔震效果的比较

Fig. 11 Comparison of isolation effect between two models under different level of earthquake

### 3.3 能量分析

对峰值为0.6g的三条地震波进行能量分析,可知不同场地类型的地震波对铅芯橡胶支座硬化模型与传统双线性模型的能量吸收差异影响较小。表4为两种模型的铅芯橡胶支座累计能量消耗对比。在Taft波作用下,屈服耗能偏差为3%;在El Centro作用波下,屈服耗能偏差为4%;在Hachinohe作用波下,屈服耗能偏差为11%。而在三条地震波作用下,阻尼耗能偏差均<5%。

图12为两种模型支座屈服耗能时程对比图。从图12可知,虽然峰值相同的地震波对于线性模型和硬化模型之间的差异影响较小,但是对于同一隔震结构消耗能量差异的影响较大。在El Centro波作用下,硬化模型消耗的能量较多,而在Taft波和Hachinohe波作用下,双线性模型消耗的能量较多。

表4 铅芯橡胶支座累计能量消耗

Tab. 4 Cumulative energy dissipation of LRB kN · m

		屈服耗能	阻尼耗能
Taft	双线性模型	$2.32 \times 10^4$	$3.72 \times 10^3$
	硬化模型	$2.26 \times 10^4$	$3.70 \times 10^3$
El Centro	双线性模型	$1.58 \times 10^4$	$2.72 \times 10^3$
	硬化模型	$1.65 \times 10^4$	$2.71 \times 10^3$
Hachinohe	双线性模型	$2.89 \times 10^4$	$2.04 \times 10^3$
	硬化模型	$2.57 \times 10^4$	$1.94 \times 10^3$

### 4 结论

通过铅芯支座的水平剪切弹性试验研究,结果表明铅芯橡胶支座每经历过一次大变形后,屈服刚度会相应减小,且刚度衰减程度与隔震支座经过的最大剪切应变值有关。

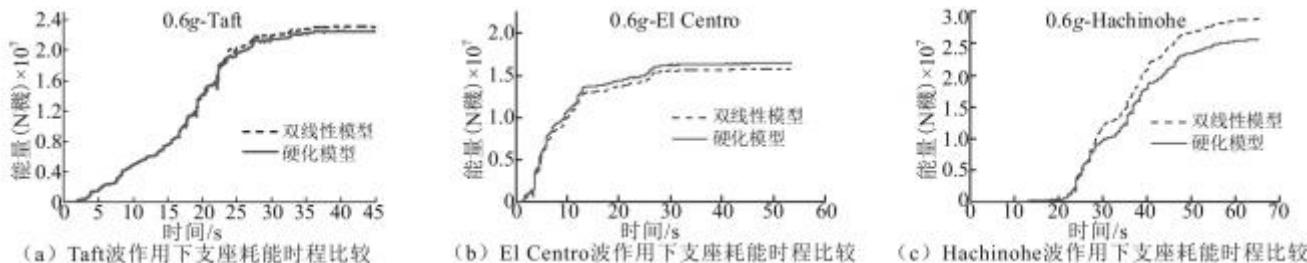


图 12 铅芯橡胶支座屈服耗能时程

Fig. 12 Cumulative energy dissipation of LRB

本文在铅芯橡胶支座双线性模型的基础上,提出了一种基于屈服刚度和屈服力的硬化模型。该模型考虑了支座硬化后的刚度退化现象以及压应力对于卸载曲线的影响。经过与试验的比对,得出计算值与两组试验数据都能较好吻合。

建立单质点模型进行时程分析,得出双线性模型和硬化模型之间加速度响应的偏差率随地震波峰值增加而变大,且在 0.6g 输入峰值下偏差率为 15%~40%。隔震效果会因铅芯橡胶支座的硬化而下降。隔震支座的最大变形较常规双线性模型计算结果的基础上减小 20%,隔震层的最大剪力较常规双线性模型计算结果的基础上增加 40%。

东日本大地震造成福岛核电站发生核泄漏事故,核电站在超设计地震下的安全问题再次受到关注。关于核电厂多质点硬化模型的隔震结构响应将在今后评价,此外本研究同样适用于民用类建筑。

#### 参考文献

- [1] 梅木芳人,足立高雄,杉田浩之,等.3次元モデルを用いた耐震設計手法の高度化に関する研究(その1)非線形応答解析手法の検討[C].日本建築学会大会学術講演梗概集.近畿,2014.
- [2] ROBINSON W H, TUCKER A G. Test results for lead-rubber bearing for the William M Clayton building, Toe Toe bridge and Waiotukupuna bridge [J]. Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering , 1983 , 14( 1 ) : 21 ~ 33 .
- [3] FUJITA T, SUZUKI S, FUJITA S. High damping rubber bearings for seismic isolation of buildings ( 1st report , hysteretic restoring force characteristics and analytical models) [R]. Trans Japan Soc Mech Eng C56 , 1990 .
- [4] PARK Y J, WEN Y K, ANG H S. Random vibration of hysteretic systems under bi-directional ground motions [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics , 1986 , 14 ( 4 ) : 543 ~ 557 .
- [5] KIKUCHI M, AIKEN I D. An analytical hysteresis model for elastomeric seismic isolation bearings [J]. Engineering and Structural Dynamics , 1997 , 26( 2 ) : 215 ~ 231 .
- [6] LIZUKA M. A macroscopic model for predicting large-deformation behaviors of laminated rubber bearing [J]. Engineering Structures , 2000 , 22( 4 ) : 323 ~ 334 .
- [7] YAMAMOTO S, KIKUCHI M, UEDA M, et al. A mechanical model for elastomeric seismic isolation bearings including the influence of axial load [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics , 2009 , 38 ( 2 ) : 157 ~ 180 .
- [8] TAKAOKA E. Shaking table test and analysis method on ultimate behavior of slender base-isolated structure supported by laminated rubber bearings [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics , 2011 , 40( 5 ) : 551 ~ 570 .
- [9] 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.

(上接第 48 页)

- [23] WEATHERSBY J H. Investigation of bond slip between concrete and steel reinforcement under dynamic loading conditions [D]. Louisiana: Louisiana State University , 2003 .
- [24] SAMEER H, TAHER A L, BRIAN Z. Rate effect on pullout behavior of steel fibers embedded in very-high strength concrete [J]. American Journal of Engineering & Applied Sciences , 2010 , 3( 2 ) : 454 ~ 463 .
- [25] ALAVI-FARD M, MARZOUK H. Bond of high-strength concrete under monotonic pull-out loading [J]. Magazine of Concrete Research , 2004 , 56( 9 ) : 545 ~ 557 .
- [26] CHEN Xudong, WU Shengxing, ZHOU Jikai. Experimental study on dynamic tensile strength of cement mortar using split Hopkinson pressure bar technique [J]. Journal of Materials in Civil Engineering , 2014 , 26( 6 ) : 150 ~ 153 .
- [27] ZHOU Jikai, CHEN Xudong. Stress-strain behavior and statistical continuous damage model of cement mortar under high strain rates [J]. Journal of Materials in Civil Engineering , 2013 , 25( 1 ) : 120 ~ 130 .
- [28] KIM K, LIM Y M. Simulation of rate dependent fracture in concrete using an irregular lattice model [J]. Cement and Concrete Composites , 2011 , 33( 9 ) : 949 ~ 955 .
- [29] VOS E, REINHARDT H W. Influence of loading rate on bond behavior of reinforcing steel and prestressing strands [J]. Materials & Structures , 1982 , 15( 1 ) : 3 ~ 10 .
- [30] 王礼立.应力波基础[M].北京:国防工业出版社 2005 .
- [31] 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2002 [S].北京:中国建筑工业出版社,2002.