

# 核电厂负刚度阻尼隔震结构的地震响应研究

杨巧荣,李传德,许 浩,刘文光

(上海大学 土木工程系,上海 200444)

**摘要:**隔震技术能有效减小核电厂上部结构的加速度响应,但强地震作用下隔震层位移过大导致管道断裂。本文基于曲面运动原理及预压弹簧伸缩特性提出了一种负刚度阻尼系统,通过球铰在拱球面曲线运动实现负刚度特性,并在弹簧压缩方向提供黏滞阻尼性能。提出了负刚度系统的理论恢复力模型并进行了力学特性分析,设计了负刚度装置并完成了静力试验,结果显示理论恢复力模型与试验结果的一致性较理想。将核电厂负刚度阻尼隔震结构与核电厂隔震结构进行了地震响应对比分析,比较了不同地震波输入下的地震响应。结果表明负刚度阻尼系统可有效同时减小核电厂上部加速度响应和隔震层位移响应。

**关键词:**核电厂;隔震结构;负刚度阻尼;地震响应

中图分类号:TU972.4 文献标志码:A 文章编号:1000-6931(2019)04-0718-10

doi:10.7538/yzk.2018.youxian.0461

## Seismic Response Analysis of Isolated Nuclear Power Plant Based on Negative Stiffness Damping

YANG Qiaorong, LI Chuande, XU Hao, LIU Wenguang

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

**Abstract:** Isolation technology can effectively reduce the acceleration of the superstructure of the nuclear power plant (NPP), however, under the strong earthquake, the large displacement of the isolation layer may lead to pipeline breakage. In this paper, a negative stiffness damping (NSD) system was proposed based on the principle of surface motion and the prestressing spring expansion and contraction. The negative stiffness was achieved by the spherical hinge movement on the curved surface of the arch, and its viscous damping worked in the spring compression direction. The theoretical restoring force model of negative stiffness system was also put forward and its mechanical properties were analyzed. The negative stiffness device was designed and the static test was completed. The test results are highly consistent with the theoretical restoring force model. The comparative analysis of seismic responses between isolated structure with NSD nuclear power plant and that with isolated nuclear power plant was carried out. By

收稿日期:2018-06-20;修回日期:2018-08-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51478257,51778356)

作者简介:杨巧荣(1965—),女,上海人,副教授,博士,从事工程抗震研究

网络出版时间:2018-11-01;网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20181030.1132.020.html>

comparing the seismic responses under different seismic wave inputs, the results show that the proposed NSD system can effectively reduce the upper acceleration response and isolation displacement response.

**Key words:** nuclear power plant; isolated structure; negative stiffness damping; seismic response

基础隔震技术能显著减小核电厂的构筑物、系统和设备(SSC)的地震作用,使地震输入能量大部分消耗在隔震层,从而有效实现核电厂在突发强地震条件下的安全<sup>[1-3]</sup>。但核电厂结构隔震设计会导致地震发生时核电厂隔震层出现过大变形<sup>[4]</sup>,导致出入核岛的管线在厂房连接处附近遭到断裂破坏。将负刚度阻尼(NSD)装置应用在隔震结构的铅芯橡胶支座(LRB)处,可合理调节隔震层刚度,同时附加阻尼,降低隔震层相对位移较大造成地下管道破裂的概率,提高核电厂隔震结构的隔震效果。

国内外许多学者对核电厂隔震技术进行了相关研究。Labbe<sup>[5]</sup>将隔震技术应用在核电厂基底,分析了不同地震水准下的地震响应,得出隔震技术可使核电厂标准设计突破地震动输入限制的结论。Jenna 等<sup>[6]</sup>通过改变某核电厂隔震参数,对隔震系统进行二维分析,说明不同初始刚度、屈服后刚度和屈服力对核电厂响应的影响。侯钢领等<sup>[7]</sup>对比分析了隔震技术对核电站安全壳的减震效果,并对隔震技术进行优化,得出隔震技术可降低结构最大剪力的 20%。Zhou 等<sup>[8]</sup>研究了核电厂模型在竖向地震作用下的结构响应,给出不同竖向隔震体系对竖向反应的影响。曾奔等<sup>[9]</sup>针对某压水堆核电厂结构采用功率谱密度法对水平隔震后的结构进行了楼层反应谱分析,研究表明反应谱显著降低。赵春风等<sup>[10]</sup>建立了三维安全壳有限元模型,并对比了极限安全地震动作用下隔震技术和非隔震技术安全壳的隔震效果,三向加速度分别降低了 79.52%、27.56% 和 79.47%。李松奇等<sup>[11]</sup>对某核电站应急指挥中心进行了隔震设计并进行相应分析,结果表明结构的减震效果达到 70% 左右,较大地提高了应急指挥中心的抗震裕量。陈健等<sup>[2]</sup>以某核电厂核岛厂房为例,进行核电厂基础隔震技术结构设计中的应用研究,对比研究隔震支座布置间距和隔震层恢复力模型对结构加速度和位移响应的影响,

研究结果表明,采用隔震措施后,结构自振周期明显增大,上部结构加速度响应明显减小,层间位移很小,但整体位移也会增加较大。纪晗等<sup>[12]</sup>针对长周期结构隔震效果较差的问题,采用 ANSYS 软件分析了 LRB 隔震体系、LRB 与 NSD 并联隔震体系的地震响应,结果表明,后者对层间位移和柱底剪力降低更明显,且天然橡胶支座(LNR)隔震层附加负刚度比不超过 -0.30 的 NSD 可获得较好的隔震响应,实现更长周期的隔震目标。

上述研究表明基础隔震技术可显著减小核电厂结构上部地震响应,LRB 与 NSD 并联隔震体系可得到较好的隔震效果。本文提出一种 NSD 装置并对其影响参数进行探究和分析,对其负刚度特性进行力学性能试验,通过 MATLAB 程序研究分析 NSD 隔震结构在低设计基准、设计基准以及超设计基准地震下的反应谱响应,探讨 NSD 装置对改善 LRB 隔震结构地震响应的有效性。

## 1 NSD 装置及其力学性能

### 1.1 NSD 装置构造

基于曲面运动原理及预压弹簧伸缩特性提出一种 NSD 装置,该装置由球铰、上连接板、下连接板、拱球面、预压弹簧、黏滞阻尼器、限位杆和支承底座等连接组成,限位杆通过其径内螺栓固定在底板上,定向轴承固定在拱球面内,并套在限位杆上面。试验装置如图 1 所示。

### 1.2 NSD 装置力学性能分析

NSD 装置运动示意图如图 2 所示,其预压弹簧刚度为  $k$ ,球铰半径为  $r_1$ ,拱球面曲率半径为  $r_2$ ,当球铰在曲面上运动时,初始时刻预压弹簧的长度为  $\gamma_0$ ,水平位移增量为  $\Delta x$ ,弹簧竖向恢复变形增量为  $\Delta y$ ,滚轮中心偏离平衡位置的相对角度为  $\theta$ ,此时,拱球面对球铰的支持力为  $F_N$ ,预压弹簧的竖向恢复力为  $F_V$ ,拱球面对球铰的支持力的水平分力为  $F_{N,x}$ ,用于提供负刚度水平恢复力。

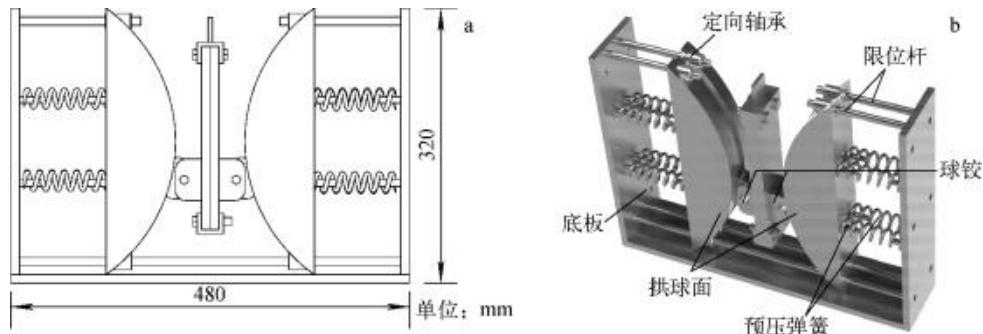


图 1 NSD 装置的尺寸(a)及构造(b)  
Fig. 1 Size (a) and structure (b) of NSD device

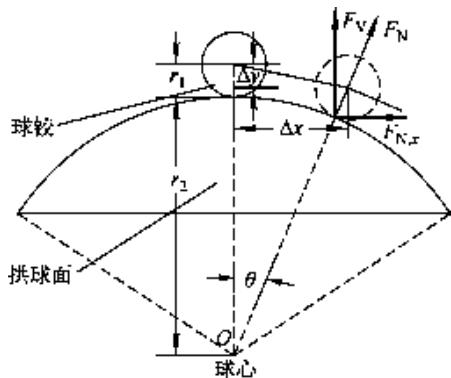


图 2 NSD 装置运动示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of motion of NSD device

$\theta$  与水平位移增量  $\Delta x$  和竖向恢复变形增量  $\Delta y$  的关系为:

$$\sin \theta = \frac{\Delta x}{\sqrt{\Delta x^2 + (r_1 + r_2 - \Delta y)^2}} \quad (1)$$

$$\cos \theta = \frac{r_1 + r_2 - \Delta y}{\sqrt{\Delta x^2 + (r_1 + r_2 - \Delta y)^2}} \quad (2)$$

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (3)$$

$\Delta x$  与  $\Delta y$  间的关系为:

$$\Delta y^2 - 2(r_1 + r_2)\Delta y + \Delta x^2 = 0 \quad (4)$$

令  $C = r_1 + r_2$ , 可得:

$$\Delta y = C - \sqrt{C^2 - \Delta x^2} \quad (5)$$

螺旋弹簧的竖向恢复力  $F_V$  为:

$$F_V = k(\gamma_0 - \Delta y) \quad (6)$$

由拱球面部分的受力分析可知:

$$F_N = F_{N,x} \cos \theta \quad (7)$$

由拱球面受力分析可知:

$$F_{N,x} = F_N \sin \theta = \frac{F_V \sin \theta}{\cos \theta} = F_V \tan \theta \quad (8)$$

NSD 装置的水平恢复力  $F_{N,x}$ 、负刚度  $K_N$

与  $\Delta x$  的关系为:

$$F_{N,x} = \frac{k \Delta x (\gamma_0 - C + \sqrt{C^2 - \Delta x^2})}{\sqrt{C^2 - \Delta x^2}} \quad (9)$$

$$K_N = \frac{k(\gamma_0 - C + \sqrt{C^2 - \Delta x^2})}{\sqrt{C^2 - \Delta x^2}} + \frac{k \Delta x^2 (\gamma_0 - C + \sqrt{C^2 - \Delta x^2})}{(C^2 - \Delta x^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{k \Delta x^2}{C^2 - \Delta x^2} \quad (10)$$

图 3 示出预压弹簧刚度  $k$ 、预压弹簧的长度  $\gamma_0$  以及  $C$  对装置力学性能的影响。由图 3 可见, 水平位移-弹簧恢复力曲线呈钟形, 水平位移-水平力曲线呈反 S 形, 水平位移-水平刚度曲线呈倒钟形。由图 3a 可知, 预压弹簧刚度及初始长度一定时, 两球的半径之和越小, 球铰的运动轨迹变化越大, 同时, 水平力和水平刚度在初始状态时刻的数值也会增大, 但作用范围较小。由图 3b 可知, 预压弹簧刚度和两球的半径之和一定时, 预压弹簧的长度越长, 弹簧恢复力及水平力也会随之变大, 但随水平位移的增大, 预压弹簧的长度对水平刚度的作用并不明显。由图 3c 可知, 预压弹簧的长度与两球的半径之和一定时, 弹簧刚度越大, 弹簧恢复力越大, 水平力及水平刚度也会随之增大, 但对负刚度的作用范围并没有影响。

## 2 NSD 装置拟静力试验

为验证装置负刚度的力学性能效果, 对装置进行竖向加载试验。试验加载装置为竖向试验力 100 kN、拉伸压缩行程 600 mm 的 WDW-100A 电子万能试验机。

试验采用竖向静位移加载, 设计选取了

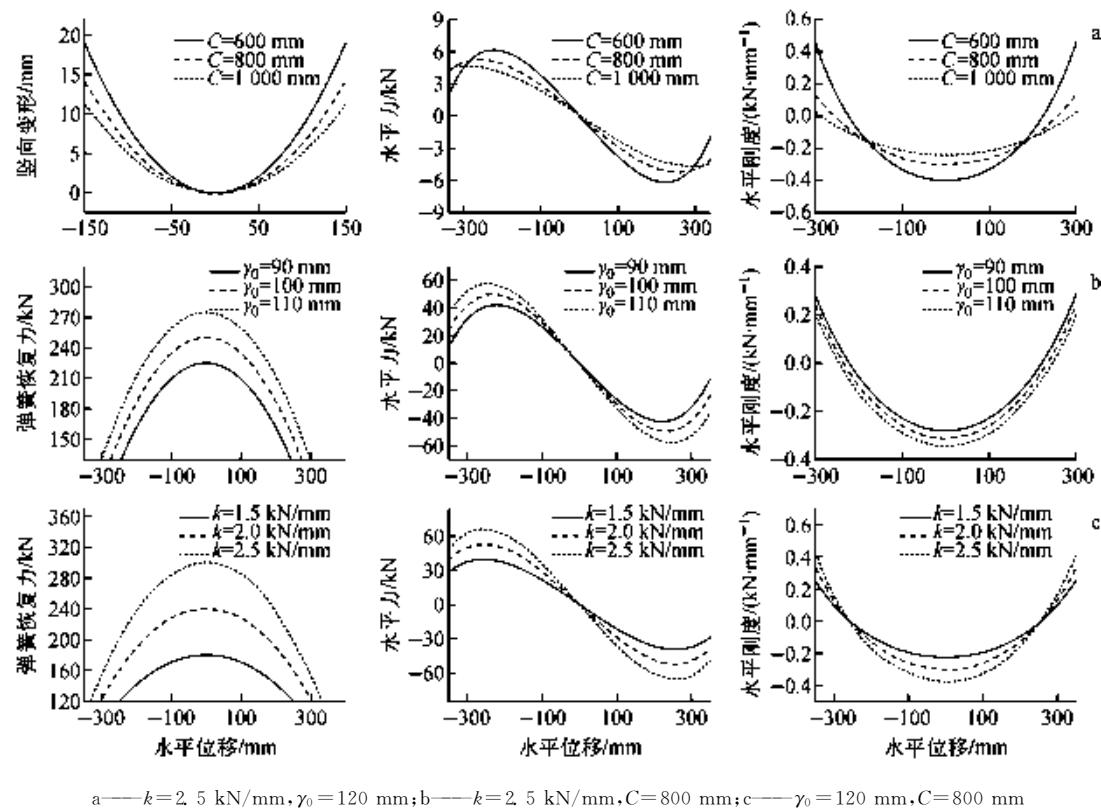


图 3 负刚度阻尼参数的影响

Fig. 3 Influence of NSD parameter

3 种刚度、3 种预压变形长度的弹簧,共 9 组试验工况,考虑到弹簧刚度对装置的影响,对加载速率分 4、5 和  $6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  3 级进行加载,试验工况列于表 1。

表 1 试验工况

Table 1 Load case

工况	$k/(k\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	加载类型	加载速率/ $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	$\gamma_0/\text{mm}$
case1	0.39	位移加载	4	20
case2	0.39	位移加载	4	25
case3	0.39	位移加载	4	30
case4	0.42	位移加载	5	20
case5	0.42	位移加载	5	25
case6	0.42	位移加载	5	30
case7	0.45	位移加载	6	20
case8	0.45	位移加载	6	25
case9	0.45	位移加载	6	30

工况 case1~case3 加载时,弹簧受水平力产生均匀压缩变形,拱球面水平运动较为平稳,两个拱球面上、下尖端的水平距离并没有很大

变化,随加载的竖向位移增大,水平位移逐渐增大,当位移加载到 45 mm、达到装置中心时,水平位移逐渐减小,出现负刚度现象,最大出力可达 7.8 kN。

工况 case4~case6 加载时,两个拱球面不再平行,出现稍微的倾角,倾角随加载位移的增大而减小,当位移加载达到 50 mm 时出现负刚度现象,同时,竖向反力出现不稳定现象,最大出力达 8.8 kN。

工况 case7~case9 加载时,拱球面之间的倾角明显,弹簧受到水平反力而产生压缩变形,随压缩变形增大,弹簧出现屈曲现象,下部限位杆同时出现弯曲变形,竖向位移加载到 50 mm 时,竖向反力达到 12.2 kN,装置出现不稳定现象。

### 3 力学性能试验结果对比分析

根据力-位移曲线得到 NSD 装置的力学参数,表 2 列出理论分析力学模型刚度与试验刚度的对比。由表 2 可知,不同工况下得到的性能参数基本吻合,相对误差在  $\pm 8\%$  以内,波动

较小,NSD 装置力学性能稳定,符合试验对负刚度参数探究的基本要求。

表 2 试验刚度与理论刚度对比

Table 2 Comparison of test stiffness and theoretical stiffness

工况	$k/(kN \cdot mm^{-1})$		相对偏差/%
	试验值	理论值	
case1	-0.177	-0.172	2.82
case2	-0.190	-0.195	-2.63
case3	-0.243	-0.245	-0.82
case4	-0.156	-0.168	-7.69
case5	-0.211	-0.208	1.42
case6	-0.266	-0.274	-3.01
case7	-0.196	-0.206	-5.10
case8	-0.253	-0.246	2.77
case9	-0.341	-0.324	4.99

不同刚度弹簧对装置的负刚度产生不同的作用效果。总体来说,试验负刚度要比理论值小,分析原因主要是两个球铰之间的摩擦力的

分力对反力的影响较大。此外,装置表面之间涂有润滑油,是造成加载到球铰中心时出力不稳定的原因之一。控制弹簧预压变形,不同弹簧的刚度对装置力学性能的影响如图 4 所示。从力-位移曲线可知:相同预压变形下, $k$  越大,预压弹簧对装置的作用效果越大,但对负刚度的作用范围( $0\sim60$  mm)没有影响;在预压弹簧长度为 30 mm、刚度为  $0.45 kN \cdot mm^{-1}$  时,最大出力可达 12 kN。

通过控制弹簧刚度探究预压变形对 NSD 装置力学性能的影响,不同弹簧长度对装置水平刚度的影响如图 5 所示。由刚度-位移曲线可知,随弹簧预压变形的增大,装置的负刚度效果越强。同时,随弹簧刚度的增加,同等级预压弹簧产生的负刚度差值也会增大。对于 NSD 装置,负刚度的作用位移范围基本在  $-60\sim60$  mm 内,不会发生明显变化。当弹簧的刚度  $k=0.45 kN \cdot mm^{-1}$  时,弹簧的负刚度达到最大为  $-0.341 kN/mm$ 。因此,可调整不同的预压弹簧长度和弹簧刚度控制 NSD 装置的负刚度大小。

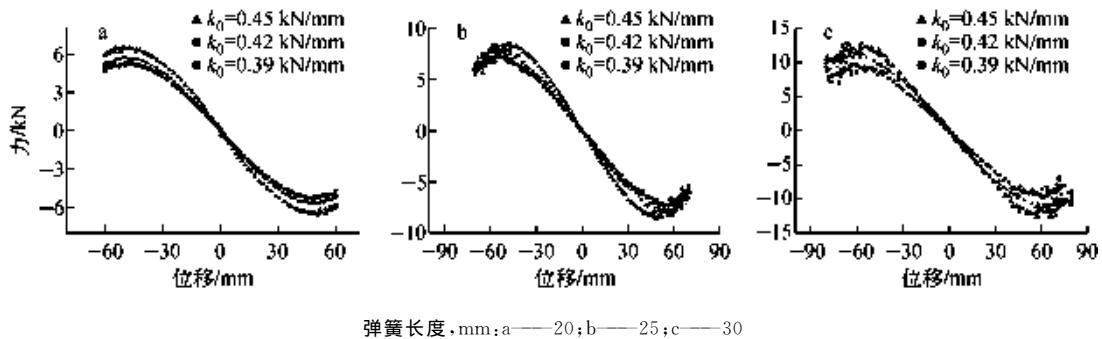


图 4 弹簧刚度对力学性能的影响

Fig. 4 Effect of spring stiffness on mechanical property

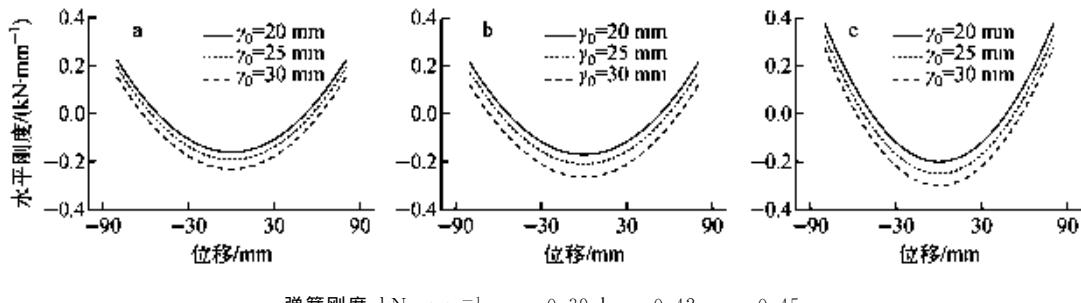


图 5 弹簧长度对水平刚度的影响

Fig. 5 Effect of spring length on horizontal stiffness

## 4 核电厂 NSD 隔震结构地震响应分析

### 4.1 核电厂隔震结构与 NSD 隔震结构动力特性对比

与传统隔震结构相比,NSD 隔震结构隔震层附加了阻尼和负刚度,通过调节隔震层支座装置布置的数量、位置及单个装置的阻尼和负刚度的大小,间接控制隔震结构隔震层在地震作用下层间位移的大小,从而达到优化结构的目的,图 6 示出核电厂隔震结构模型及其简化单质点模型。

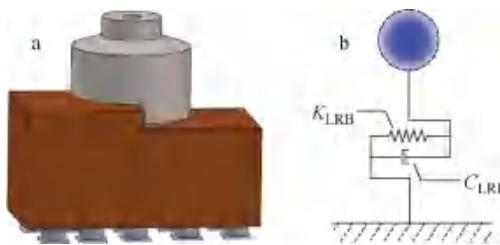


图 6 核电厂隔震结构模型(a)及其单质点简化模型(b)

Fig. 6 Model of isolated nuclear power plant (a) and single particle simplifying model (b)

在 NSD 存在的隔震结构中,对于位移的控制尤为重要,为保证其隔震层位移小于隔震结构的位移,采用动力放大系数进行理论推导,得出 NSD 对隔震结构的影响,主要控制参数为阻尼比和频率比。 $R_{dn}$  和  $R_{do}$  分别为 NSD 隔震结构和传统隔震结构的动力放大系数<sup>[13]</sup>:

$$R_{dn} = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + [2\zeta_n(\omega/\omega_n)^2]^2}} \quad (11)$$

$$R_{do} = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_0)^2]^2 + [2\zeta_0(\omega/\omega_0)^2]^2}} \quad (12)$$

式中: $\omega$  为外荷载激励频率; $\omega_n$ 、 $\zeta_n$  分别为 NSD 隔震结构的频率和阻尼比; $\omega_0$ 、 $\zeta_0$  分别为传统隔震结构的频率和阻尼比。为保证  $R_{dn} > R_{do}$ , 定义动力放大系数比  $\eta$ 、频率比  $\alpha$ 、阻尼比  $\beta$  分别为:

$$\eta = \left( \frac{R_{do}}{R_{dn}} \right)^2 \quad (13)$$

$$\alpha = \frac{\omega_0}{\omega_n} \quad (14)$$

$$\beta = \frac{\zeta_0}{\zeta_n} \quad (15)$$

将式(14)、(15)代入式(13)可得:

$$\eta = \frac{1 - 2\left(\frac{\alpha\omega}{\omega_0}\right)^2 + (1 + 4\zeta_0^2/\beta^2)\left(\frac{\alpha\omega}{\omega_0}\right)^4}{1 - 2\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + (1 + 4\zeta_0^2)\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^4} \quad (16)$$

传统隔震结构的阻尼比对动力放大系数比的影响如图 7 所示。当  $\eta < 1$  时,即可保证  $R_{dn} > R_{do}$ , 实现 NSD 隔震结构有较好的隔震效果。由图 7 可见:当  $0 < \zeta_0 < 1$  时,对于不同的  $\zeta_0$ ,  $\eta$  总会交于一点;  $\zeta_0$  越小,  $\eta$  的变化越明显。

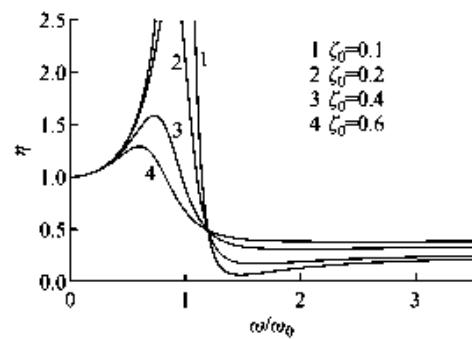


图 7  $\zeta_0$  对  $\eta$  的影响

Fig. 7 Effect of  $\zeta_0$  on  $\eta$

### 4.2 核电厂 NSD 隔震结构地震响应实例分析

本文采用某典型百万 kW 级压水堆核电厂钢筋混凝土反应堆厂房<sup>[14]</sup>为计算模型,该结构模型在  $x$  和  $y$  方向对称,由 3 筏板基础、安全壳结构、内部结构组成,总质量约为 6.2 万 t,高度约为 50 m,分别在隔震层布置 LRB800 隔震支座和 NSD 装置,核电厂隔震结构简图如图 8 所

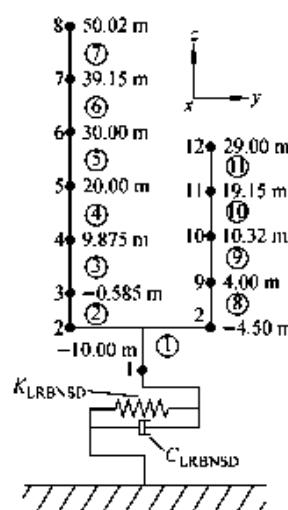


图 8 核电厂隔震结构模型

Fig. 8 Model of isolated nuclear power plant

示, LRB800 隔震支座参数列于表 3。

表 3 LRB800 参数  
Table 3 Parameter of LRB800

参数	理论值
支座直径, mm	800
铅芯直径 $D_p$ , mm	140
第一形状系数 $S_1$	33.3
第二形状系数 $S_2$	5.1
屈服前刚度 $k_1$ , $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	16.447
屈服后刚度 $k_2$ , $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	1.265
压缩刚度 $K_v$ , $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	3.671
剪切屈服力 $Q_d$ , kN	123

#### 4.3 时程分析

地震响应分析采用 7 条不同类型的地震波, 分别为 Livermore 波、San Fernando 波、springs 波、NORTH 波、loma prieta 波、coyote 波和 mtlewis 波。为比较核电厂在低设计基准、设计基准以及超设计基准地震下的不同地震响应, 加速度峰值分别设置为  $0.2g$ 、 $0.4g$ 、 $0.6g$  和  $0.8g$ 。采用单向输入, 图 9 示出 7 条地震波的反应谱。NSD 装置采用刚度为  $0.25 \text{ kN}/$

$\text{mm}$ 、预压长度为  $100 \text{ mm}$  的预压弹簧, 选用黏滞阻尼, 并用 MATLAB 编程分析, 将 NSD 隔震结构与传统隔震结构对比, 分析比较隔震层的位移及加速度响应。

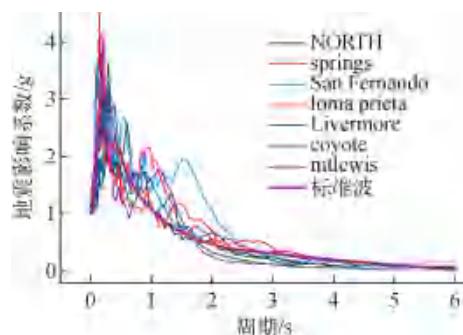


图 9 地震波反应谱

Fig. 9 Response spectrum of seismic wave

表 4 列出地震波作用下隔震层加速度峰值的对比。表 4 中, AVE 为均值, LRB 为铅芯橡胶支座核电厂隔震结构, LRBNSD 为带有 NSD 装置的铅芯橡胶支座核电厂隔震结构。由表 4 可见, 隔震层加速度峰值较输入加速度峰值有显著减小,  $0.2g \sim 0.8g$  输入下, 相比 LRB 结构, LRBNSD 结构的减震率在  $10\% \sim 29\%$  之间,  $0.8g$  输入下, 其减震率达到最大  $29.62\%$ 。

表 4 地震波作用下隔震层加速度峰值对比

Table 4 Comparison of acceleration peak of seismic isolation layer under seismic wave

结构类型	输入加速度峰值/g	隔震层加速度峰值/g							
		Livermore	San Fernando	springs	NORTH	loma prieta	coyote	mtlewis	AVE
LRB	0.2	0.073	0.100	0.069	0.082	0.084	0.085	0.085	0.083
	0.4	0.125	0.153	0.127	0.116	0.135	0.099	0.107	0.123
	0.6	0.160	0.202	0.182	0.142	0.180	0.121	0.124	0.159
	0.8	0.208	0.253	0.259	0.161	0.210	0.148	0.139	0.197
LRBNSD	0.2	0.070	0.092	0.070	0.073	0.074	0.070	0.069	0.074
	0.4	0.089	0.112	0.090	0.101	0.110	0.079	0.088	0.095
	0.6	0.123	0.134	0.104	0.119	0.149	0.093	0.100	0.117
	0.8	0.136	0.160	0.136	0.131	0.186	0.109	0.111	0.138

表 5 列出地震波作用下隔震层位移峰值的对比。由表 5 可见, 带有 NSD 装置隔震层最大位移较无装置结构的隔震层有显著减小,  $0.2g \sim$

$0.8g$  输入下, 相比 LRB 结构, LRBNSD 结构的减震率在  $-2\% \sim 18\%$  之间,  $0.6g$  输入下, 其减震率达到最大  $17.65\%$ 。

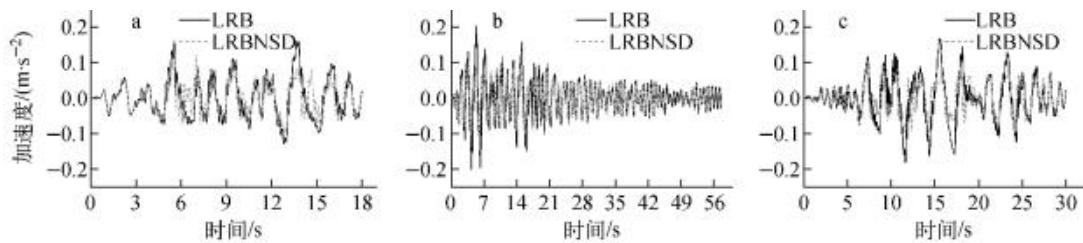
表 5 地震波作用下隔震层位移峰值的对比

Table 5 Comparison of value of displacement peak for seismic isolation layer under seismic wave

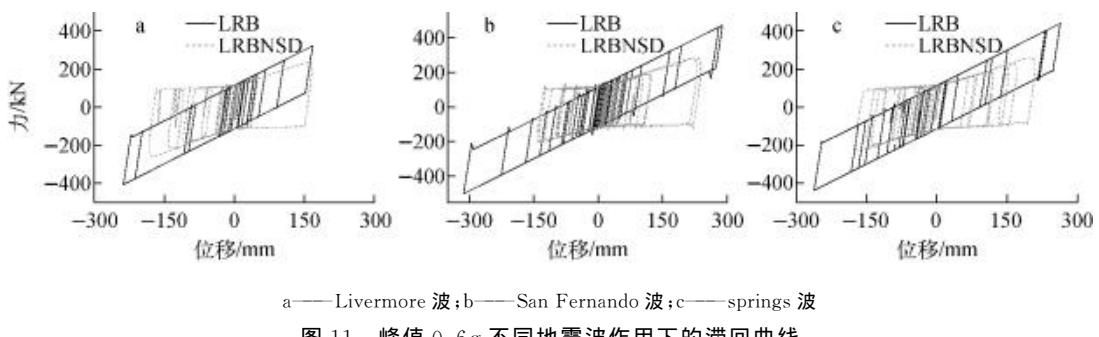
结构 类型	输入加速度 峰值/g	隔震层位移峰值/mm							
		Livermore	San Fernando	springs	NORTH	loma prieta	coyote	mtlewis	AVE
LRB	0.2	54.75	94.02	45.77	31.64	66.96	52.21	52.21	56.79
	0.4	153.05	194.67	144.70	95.85	171.71	110.29	85.31	136.51
	0.6	237.60	350.86	263.53	166.51	265.08	173.60	126.66	226.27
	0.8	323.51	431.89	442.49	232.86	342.31	238.30	162.33	310.53
LRBNSD	0.2	68.24	70.77	62.24	27.78	68.91	54.19	55.72	58.27
	0.4	134.59	155.90	161.52	80.58	176.12	106.48	91.39	129.51
	0.6	201.91	239.17	209.26	135.31	233.69	145.35	139.66	186.34
	0.8	261.16	308.81	238.19	192.48	447.45	225.68	179.38	264.74

图 10 示出峰值  $0.6g$  不同地震波作用下隔震层的加速度。由图 10 可知, LRBNSD 结构隔震层加速度较 LRB 结构的显著减小。图 11 示出峰值  $0.6g$  不同地震波作用下的滞回曲线

线。图 12 示出峰值  $0.4g$  地震波作用下的加速度。由图 12 可知, LRBNSD 结构各节点编号处加速度均小于 LRB 结构加速度, NSD 装置隔震效果明显。



a——Livermore 波; b——San Fernando 波; c——springs 波

图 10 峰值  $0.6g$  不同地震波作用下隔震层的加速度Fig. 10 Acceleration of seismic isolation layer under different seismic waves at peak of  $0.6g$ 

a——Livermore 波; b——San Fernando 波; c——springs 波

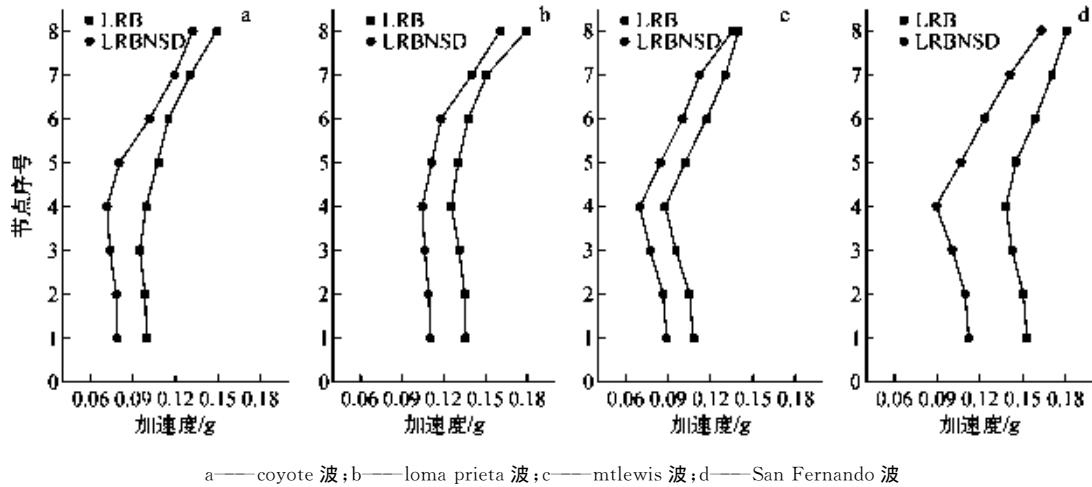
图 11 峰值  $0.6g$  不同地震波作用下的滞回曲线Fig. 11 Hysteresis loop of seismic isolation layer under different seismic waves at peak of  $0.6g$ 

## 5 结论

本文提出一种 NSD 装置,通过拟静力试验探究其力学性能,并与传统核电厂隔震结构模

型进行对比,可得到如下结论。

1) NSD 的负刚度受弹簧预压变形、弹簧的刚度和球铰半径影响。在负刚度作用范围

图 12 峰值  $0.4g$  不同地震波作用下的加速度Fig. 12 Acceleration under different seismic waves at peak of  $0.4g$ 

内,预压变形和弹簧的刚度越大,负刚度组合装置刚度与承载力越大。对于相同参数装置,负刚度作用范围未发生变化。拟静力试验结果表明,试验结果和理论模型基本吻合,采用所提出的力学模型可有效模拟负刚度装置的力学性能。

2) 基于核电厂隔震结构模型进行动力时程对比分析,得出 NSD 隔震结构较传统隔震结构的加速度、位移有所减小,隔震层位移峰值减震率在  $10\% \sim 29\%$  之间,隔震层加速度峰值在小震作用下会有  $2\%$  左右的放大,大震的减震率可达到  $18\%$ 。

3) 与传统核电厂隔震结构相比,NSD 隔震结构的隔震层滞回曲线呈现中间小、两头宽的非线性趋势,附加阻尼隔震作用良好。

#### 参考文献:

- [1] 中国工程院. 核电站地震安全[M]. 北京:高等教育出版社,2013.
- [2] 陈健,马佳,蒋迪. 核电厂隔震结构动力分析[J]. 工业建筑,2016,46(11):105-110.  
CHEN Jian, MA Jia, JIANG Di. Dynamic analysis for isolation structure of nuclear power plants[J]. Industrial Construction, 2016, 46 (11): 105-110(in Chinese).
- [3] 周志光. 隔震体系的特征参数对 AP1000 地震响应影响的研究[M]//工程防震减灾新技术、新进展和新应用:下. 北京:中国土木工程学会,2016.
- [4] 朱秀云,林皋,潘蓉. 基底隔震对核电站反应堆厂房的地震响应影响分析[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(4):706-712.  
ZHU Xiuyun, LIN Gao, PAN Rong. Influence analysis on seismic response of reactor building of NPP affected by based-seismic isolation[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(4): 706-712(in Chinese).
- [5] LABBE P. Pioneering actual use of seismic isolation for nuclear facilities[C]// Workshop on Seismic Isolation of Nuclear Facilities. Japan: JNES/EDF, 2010.
- [6] JENNA W, ANDREAS S, STEPHEN M. Effects of isolator modeling on floor response spectra of seismically base isolated nuclear power plant[C]// Proceedings of 13th Word Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures. Japan: [s. n.], 2013.
- [7] 侯钢领,陈树华,李冬梅. 核电站安全壳隔震减振分析[J]. 核动力工程,2011,32(S1):76-79.  
HOU Gangling, CHEN Shuhua, LI Dongmei. Analysis of structural seismic response of nuclear power plant concrete containment vessel with isolating devices[J]. Nuclear Power Engineering, 2011, 32(S1): 76-79(in Chinese).
- [8] ZHOU Zhiguang, JENNA W, STEPHEN M. Potentiality of using vertical and three-dimensional isolation system in nuclear structures[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2016, 48(2): 285-596.
- [9] 曾奔,周福霖,徐忠根. 基于功率谱密度函数法

- 的核电厂房增加隔震措施后的楼层反应谱分析[J]. 核动力工程,2009,30(3):13-16.
- ZENG Ben, ZHOU Fulin, XU Zhonggen. Floor response spectra analysis of nuclear reactor buildings with additional base-isolation measures based on PSDF[J]. Nuclear Power Engineering, 2009, 30(3): 13-16(in Chinese).
- [10] 赵春风,陈健云. 基础隔震系统对核电站安全壳抗震的影响[J]. 爆炸与冲击,2014,34(5):615-621.
- ZHAO Chunfeng, CHEN Jianyun. Influence of base isolation on seismic resistance of nuclear power plant containment[J]. Explosion and Shock Waves, 2014, 34 (5): 615-621 (in Chinese).
- [11] 李松奇,李忠诚,张涛. 核电站应急指挥中心隔震设计及地震响应分析[J]. 工业建筑,2014,44(12):41-47.
- LI Songqi, LI Zhongcheng, ZHANG Tao. Design and seismic response analysis of seismic isolation system for an emergency control center building of a nuclear power plant[J]. Industrial Construction, 2014, 44(12): 41-47(in Chinese).
- [12] 纪晗,熊世树,袁涌. 基于负刚度原理的结构隔震效果分析[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2010,38(2):76-79.
- JI Han, XIONG Shishu, YUAN Yong. Analyzing vibration isolation effect of structures using negative stiffness principle[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2010, 38(2): 76-79 (in Chinese).
- [13] 刘晶波. 结构动力学[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [14] 李忠献,李忠诚,沈望霞. 核反应堆厂房结构楼层反应谱的敏感性分析[J]. 核动力工程,2005,26(1):44-50.
- LI Zhongxian, LI Zhongcheng, SHEN Wangxia. Sensitivity analysis for floor response spectra of nuclear reactor buildings[J]. Nuclear Power Engineering, 2005, 26(1): 44-50(in Chinese).