

核电厂隔震支座的受拉临界理论与结构振动台试验研究

刘文光¹, 程 颖¹, 李韶平², 杨 杰², 何文福¹

(1. 上海大学 土木工程系, 上海 200444; 2. 上海核工程研究设计院有限公司, 上海 200233)

摘 要: 基于隔震结构平移-摇摆耦合模型建立核电厂隔震结构的运动方程, 提出支座受拉地震动峰值界限公式, 并分析了高宽比和隔震周期对峰值界限影响规律。根据某核电厂结构设计了 1:10 的振动台试验缩尺模型, 分别进行了核电厂隔震结构在单向、双向和三向地震输入下的振动台试验和数值分析。结果表明: 隔震技术能有效降低核电厂上部结构的地震响应, 在单向和双向输入下, 上部结构具有良好减震效果, 水平向各层加速度反应谱峰值较台面输入峰值降低且结构主频向低频移动; 在超设计地震输入下, 隔震支座存在受拉现象。进一步对核电厂隔震结构振动台模型进行数值分析、试验结果及支座受拉临界输入理论对比, 结果显示理论公式、数值分析及试验结果一致。

关键词: 核电厂; 支座受拉; 振动台试验; 地震响应

中图分类号: TU352.1+2

文献标志码: A

DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2019.14.022

Theoretical analysis of bearings in tension and shaking table tests on a base-isolated nuclear power plant structure

LIU Wenguang¹, CHENG Ying¹, LI Shaoping², YANG Jie², HE Wenfu¹

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute, Shanghai 200233, China)

Abstract: The motion equation of a base-isolated nuclear power plant structure in consideration of uplift and rocking effects was established. The formula for the bound of earthquake input when the bearings were in tension was obtained. The effect of high-width ratio and isolation period on the peak bound was analyzed. Shaking table tests and numerical simulations on the base-isolated nuclear power plant structure were conducted with a 1/10 scale model under one-way, two-way and three-way earthquake input. The analysis results show that the seismic isolation technology can effectively reduce the seismic response of the upper structure. The horizontal peak accelerations of the upperstructure are less than those of the table under one-way and two-way earthquake input. The peak accelerations in the horizontal response spectrum move toward low frequency. The phenomenon of rubber bearings in tension can be observed when the earthquake input is beyond the designed one. The bound of earthquake input obtained by the analysis was compared with the results of model tests and numerical simulations, and it is found they are in good agreement.

Key words: nuclear power plant; bearing; shaking table test; seismic response

基础隔震技术是在建筑物基础与上部结构之间设置由隔震器、阻尼器等组成的隔震层, 将地震动与上部结构隔离, 可以有效地保护建筑物不受破坏^[1]。隔震层通过延长上部结构的周期和增大结构的阻尼, 从而达到降低结构动力响应的目标。

现阶段核电厂结构具有较高的抗震性能需求, 主要是通过低烈度区合理选址来抵抗地震, 但大量地震记录表明, 低烈度区仍可能发生大地震。当核电厂结

构遭遇到大地震时, 完全依靠结构本身难以吸收并消耗如此巨大的地震能量。核电厂隔震技术的研究目的是减少地震作用下核电厂结构的地震反应, 提高核电厂抗震安全性, 并且对核电厂形成标准的设计方法^[2]。世界各国都已开始研究怎样把隔震技术用到自己国家的核电站中, 特别是欧洲对 EFR 型核电站、日本对 DF-BR 型核电站、美国对 PRISM 型核电站的隔震技术研究^[3-4]。法国 1977 年首次将橡胶隔震器应用于南非的 Koeberg 核电站, 1984 年应用于法国的 Cruas 核电站^[5-6]。日本从 1989 年起, 对核电站进行隔震技术试验研究, 并且取得大量成果^[7]。2001 年日本出版了核电站水平隔震技术规范^[8], 规定水平隔震支座采用高

基金项目: 国家自然科学基金(51478257; 51778355)

收稿日期: 2018-02-23 修改稿收到日期: 2018-04-17

第一作者 刘文光 男 教授, 博士生导师, 1968 年生

阻尼分层橡胶、薄层橡胶都可行。同年,意大利采用核电站安全壳三维实体模型,对安全壳隔震和非隔震结构作了精确的分析和比较,进一步证明核电站隔震技术的可行性与经济性^[9]。

国内对核电厂隔震技术也陆续展开一系列研究,2007年李冬梅^[10]对某核电厂安全壳进行了水平隔震模拟分析,得出隔震后的安全壳地震反应仅为隔震前的20%左右。2009年曾奔等^[11]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,分析表明反应谱值显著降低。2010年花磊^[12]通过国内某典型压水堆核电厂,建立质点系模型,分析了该模型水平向地震反应,研究了场地特性对核电厂隔震结构地震反应的影响。2011年马永宏^[13]针对某典型压水堆核电厂建立质点系和三维实体模型,对比分析了模型水平向和竖向地震响应,研究了SSI(Soil Structure Interaction) 效应及结构偏心对核电厂隔震结构地震响应的影响。2012年王飞等^[14-17]设计了一套由厚层橡胶隔震支座和油阻尼器组成的三维隔震系统,通过试验检测了三维隔震装置的力学性能,最后进行了1/15缩尺模型的振动台试验,结果表明,在水平方向与传统隔震系统具有相同的隔震效果,而且可以对厂房内部设备和管道进行竖向隔震,具有较为稳定的振动特性,提高了核电厂结构的抗震能力。

以上试验和理论研究结果主要集中于核电厂隔震结构减震效果、数值分析方法。在日本311地震中,地震动超过设计水准下的隔震结构存在不同程度的损伤,支座发生受拉现象,但是核电厂隔震结构超设计水准下动力响应,特别是隔震层受拉、脱离等力学行为鲜有研究成果。为了研究核电厂隔震结构超设计下地震动作用下动力响应,本文建立了核电厂隔震结构平摆耦合动力模型,研究隔震支座进入受拉的地震波输入界限理论,并对某一核电厂隔震结构进行了大型地震模拟振动台试验、数值分析,研究在超设计地震下隔震结构动力响应。

1 核电厂隔震结构体系动力方程

核电厂隔震结构力学模型如图1所示,核电厂结构刚度较大,上部视为刚体,质心与几何中心重合,质量为 m ,转动惯量为 J ,质心高度为 H ,结构宽度为 $2L$,隔震层可同时发生平动与转动。忽略隔震层扭转,仅考虑结构在平面内的运动,地震作用下,结构将发生平移-摇摆耦联运动。假定隔震层均匀布置 n 排支座,结构体系的运动方程为

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{\ddot{u}_g\} \quad (1)$$

式中: $[M]$, $[C]$, $[K]$ 分别为上部结构质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\{\ddot{u}_g\}$ 为地面运动加速度; $\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$

和 $\{u\}$ 分别为质心相对于基础的加速度、速度和位移向量。

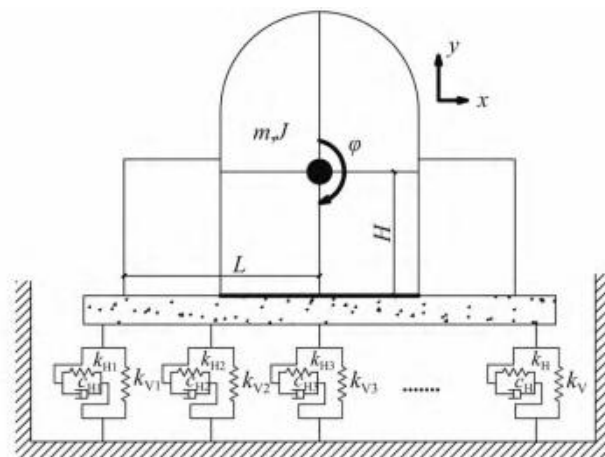


图1 核电厂隔震结构计算模型

Fig. 1 Calculation model of base-isolated nuclear power plant

$$\{\ddot{u}_g\} = \begin{Bmatrix} \ddot{x}_g \\ \ddot{y}_g + g \\ 0 \end{Bmatrix}, \{u\} = \begin{Bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{Bmatrix}, [M] = \begin{bmatrix} m & & \\ & m & \\ & & J \end{bmatrix},$$

$$[C] = \begin{bmatrix} c_H & 0 & -c_H H \\ 0 & 0 & 0 \\ -c_H H & 0 & c_H H^2 \end{bmatrix},$$

$$[K] = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n K_{Hi} & 0 & -H \sum_{i=1}^n K_{Hi} \\ 0 & \sum_{i=1}^n K_{Vi} & L \sum_{i=1}^j K_{Vi} \left(\frac{n+1-2i}{n-1} \right) \\ -H \sum_{i=1}^n K_{Hi} & L \sum_{i=1}^j K_{Vi} \left(\frac{n+1-2i}{n-1} \right) & H^2 \sum_{i=1}^n K_{Hi} + L^2 K_{y\theta} \end{bmatrix}$$

式中: x , y , θ 分别为 x 向、 y 向平移和转角; \ddot{x}_g , \ddot{y}_g , g 分别为 x 向、 y 向地震加速度和重力加速度; K_{Hi} , K_{Vi} 分别为隔震层第 i 个支座的水平刚度、竖向刚度; C_H 为隔震层阻尼。转动惯量 J 是刚体绕轴转动时惯性的量度,其量值取决于物体的形状、质量分布及转轴的位置。质量分布越集中,转动惯量越小,结构越容易发生转动和扭转。

隔震层发生角度为 θ 的微小转动,竖向变形为 y ,水平变形为 x ,隔震层同时考虑重力和摇摆脱离效应的变形示意图,如图2所示。水平地震作用为 F_{eh} ,竖向地震作用为 F_{ev} ,上部结构在水平地震作用下产生的倾覆力矩为 M_1 ,隔震层的抗倾覆力矩为 M_2 。

当隔震层发生的转角大于竖向变形时,支座开始进入受拉状态,将与竖向变形相等时的隔震层转角定义为支座受拉临界转角。产生微小转角 θ 的倾覆力矩 M_1 与隔震层均匀排列的橡胶支座产生的抗倾覆力矩 M_2 平衡,如式(2)所示,解得支座受拉时的临界转角,如式(3)所示。

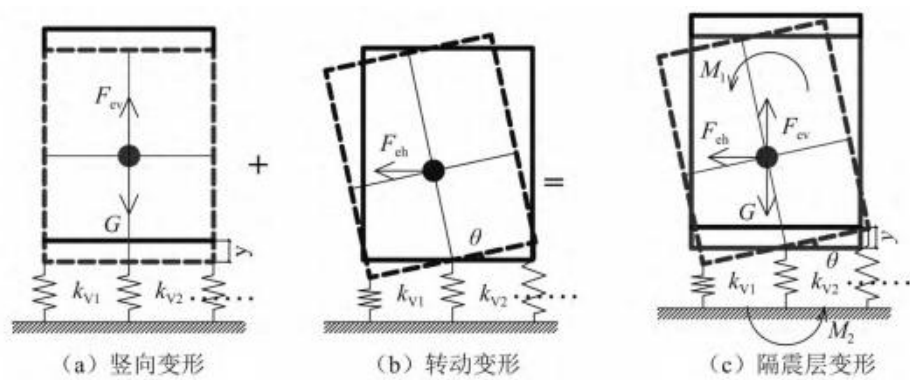


图 2 隔震层摇摆脱离变形示意图

Fig. 2 The sketch of isolation layer considering uplift and rocking effects

$$F_{eh} \times H = L^2 \theta \sum_{i=1}^n K_{Vi} \left(\frac{n+1-2i}{n-1} \right)^2 \tag{2}$$

$$\theta = \frac{F_{eh} \times H}{L^2 \sum_{i=1}^n K_{Vi} \left(\frac{n+1-2i}{n-1} \right)^2} \tag{3}$$

定义隔震层转角达到临界转角时的地震波输入峰值为输入界限值,即当地震波输入峰值低于该界限值时支座均处于受压状态。以边角支座为研究对象,根据支座受拉的临界条件 $\gamma = L\theta_1 + B\theta_2$, 即

$$\frac{G - F_{ev}}{\sum_{i=1}^n K_{Vi}} = L \times \frac{F_{ehx} \times H}{L^2 \sum_{i=1}^n K_{Vi} \left(\frac{n+1-2i}{n-1} \right)^2} + B \times \frac{F_{ehy} \times H}{B^2 \sum_{i=1}^n K_{Vi} \left(\frac{n+1-2i}{n-1} \right)^2} \tag{4}$$

式中: 水平 x 向地震作用 $F_{ehx} = \alpha_1 \times m a_g$; 水平 y 向地震作用 $F_{ehy} = \alpha_2 \times m (\kappa_1 a_g)$; 竖向地震作用 $F_{ev} = \alpha_3 \times m (\kappa_2 a_g)$, 解得支座受拉时地震动输入峰值界限公式

$$a_g = \frac{\gamma}{\left[\alpha_1 \left(\frac{H}{L} \right) + \alpha_2 \kappa_1 \left(\frac{H}{B} \right) \right] \times \frac{\sum_{i=1}^n K_{Vi}}{\sum_{i=1}^n K_{Vi} \left(\frac{n+1-2i}{n-1} \right)^2} + \kappa_2 \alpha_3} \tag{5}$$

界限公式的推导基于 RG1. 60 地震反应谱,其中: $\alpha = f(T, T_g, \xi)$ 为地震影响系数,是关于特征周期、结构自振周期和阻尼比的函数; κ 为地震波输入峰值比例系数; H 为结构高度; L, B 为结构宽度。

图 3 为阻尼比为 10% 时,输入界限值与结构高宽比和结构自振周期的关系,结构的高宽比越大,支座越容易进入受拉状态;相同高宽比下,结构周期越小,支座越容易进入受拉状态。

图 4 为结构高宽比为 1.5 时,输入界限值与阻尼比和结构自振周期的关系,结构周期越小,支座越

容易进入受拉状态;阻尼比越小,支座越容易进入受拉状态。

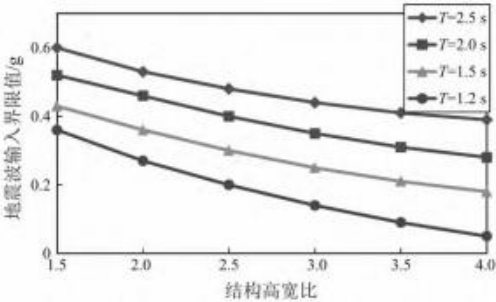


图 3 界限值与结构高宽比的关系

Fig. 3 Structural aspect ratio and the bound of earthquake input

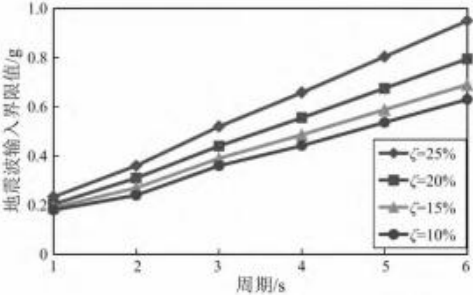


图 4 界限值与结构自振周期的关系

Fig. 4 Structure period and the bound of earthquake input

2 振动台试验概况

2.1 试验模型

综合考虑原型结构参数及试验研究目的,依据相似理论计算得出模型与原型结构的各相似常数,并依据几何与动力相似关系制作了几何相似比为 1/10 的试验模型,试验模型的几何与动力特性相似关系汇总如表 1 所示,模型结构的相关参数如表 2 所示。

表 1 试验模型的动力相似关系

Tab. 1 Table dynamic similitude of test model						
结构参数	质量	时间	频率	屈重比	速度	加速度
相似系数	1/2 965	1/3. 729	0. 268	1	0. 373	1. 392

原型结构隔震层采用 LRB1200 铅芯橡胶支座,为

表 2 模型结构相关参数
Tab. 2 Related references of test model

支座型号	$K_d /$ ($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$)	Q_d / kN	隔震层	
			隔震周期/s	屈重比%
LRB400 (100%)	0.83	9.1	0.72	8.47

控制橡胶支座的尺寸效应,较好地模拟原型支座的性能和变形要求,模型结构采用了 LRB400 铅芯橡胶支座。剪切模量 G 为 0.493 N/mm^2 ,铅芯直径为 38 mm ,橡胶层总厚度为 75 mm ,第一形状系数 $S_1 = 33.33$,第

二形状系数 $S_2 = 5.33$ 。

2.2 隔震装置介绍

为了保证振动台试验的安全和试验结果的可靠性,对支座进行了基本力学性能试验。其中隔震支座的水平刚度分别为剪切变形为 100% 和 200% 时的试验值,竖向刚度为轴压分别为 7.5 MPa 和 10 MPa 时的试验值。支座试验结果如表 3 所示,由各支座的试验结果可知,其力学参数无明显差异,表明各支座力学性能稳定。

表 3 LRB400 支座相关性能试验结果汇总

Tab. 3 Test results of LRB400

支座 编号	竖向刚度 $K_v / (\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$		$\pm 100\%$ 剪切变形				$\pm 200\%$ 剪切变形			
	$7.5 \text{ MPa} \pm 30\%$	$10 \text{ MPa} \pm 30\%$	$K_d /$ ($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$)	$Q_d /$ kN	$H_{eq} /$ %	$K_{eq} /$ ($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$)	$K_d /$ ($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$)	$Q_d /$ kN	$H_{eq} /$ %	$K_{eq} /$ ($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$)
1#	1 271.40	1 464.70	0.86	9.55	7.90	0.99	0.73	13.30	6.47	0.86
2#	1 288.60	1 488.00	0.85	9.38	7.81	0.99	0.71	13.06	6.42	0.85
3#	1 194.40	1 482.10	0.85	9.69	8.18	0.98	0.71	12.93	6.35	0.85
4#	1 309.30	1 476.90	0.85	9.79	8.34	0.97	0.70	13.29	6.65	0.83

2.3 测点布置

试验中共采用 8 个 ESM-100kN 型三向力传感器、22 个压电式加速度传感器和 5 个 ASM 拉线式位移传感器采集振动台试验数据。压电式加速度传感器采集振动台台面及模型各位置的 X 向、 Y 向和 Z 向加速度响应,ASM 拉线式位移传感器采集试验中隔震层与振动台台面之间 X 向、 Y 向和 Z 向三向的相对位移。具体传感器布置如图 5 所示。

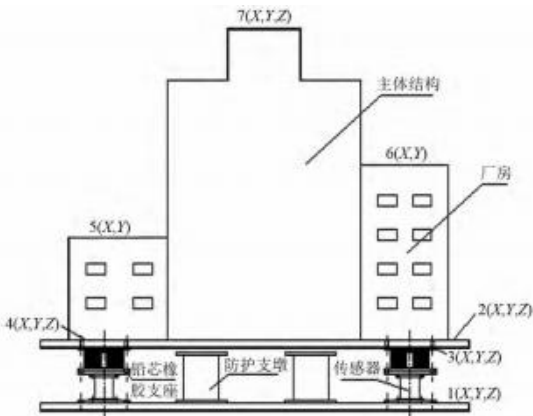


图 5 测点布置
Fig. 5 Arrangement of testing points

2.4 加载方案

试验加载的地震波是由天然波基于 RG1.60 修正谱拟合得到的两组人工地震波,分别为 Art-El 波和 Art-Taft 波,每组地震波均包含三向分量, RG1.60 谱、RG1.60 修正谱及各组地震波反应谱如图 6 所示。地震波分别采用 $0.3g$ 和 $0.6g$ 的峰值输入(按照相似比例调整后相当于 $0.42g$ 和 $0.84g$),进行 X 向单向输入、 $X+Y$ 双向输入和 $X+Y+Z$ 三向输入。地震波各向分

量的比例均按核电厂设计规范的规定采用,三向输入比例为 $1:1:1$ 。

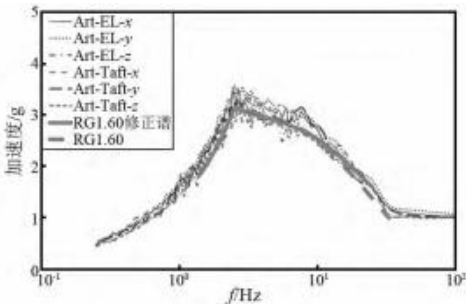


图 6 各组地震波反应谱
Fig. 6 Response spectrum of selected waves

3 振动台试验结果

对比分析结构在时域和频域的差别,时域方面主要以各测点加速度响应峰值为分析对象,频域方面采用楼层反应谱峰值和结构主频作为分析对象。

3.1 加速度响应结果

各工况下台面输入地震动峰值和隔震层响应峰值,如表 4 所示,台面峰值与设计地震动峰值基本吻合。在水平方向:结构的实测加速度响应均显著减小,减震率为 $32\% \sim 66\%$,隔震效果显著。在竖直方向:三向输入下,隔震层加速度峰值较底板加速度峰值放大了 $6\% \sim 19\%$ 。

图 7 给出了模型各测点水平加速度响应峰值,在单向输入、双向输入和三向输入下,均观察到了显著的隔震效果。单向输入和双向输入工况下,隔震层以上各测点加速度响应接近,上部结构近似于平动状态。

表 4 隔震结构实测加速度响应对比分析
Tab. 4 Comparison and analysis of acceleration response

加载方式 加速度方向	Art-EL 波 单向加载		Art-Taft 波 单向加载		Art-EL 波 双向加载		Art-Taft 波 双向加载		Art-EL 波 三向加载		Art-Taft 波 三向加载			
	水平向		水平向		水平向		水平向		水平向	竖直向	水平向	竖直向	水平向	竖直向
设计地震动/g	0.42	0.84	0.42	0.84	0.42	0.84	0.42	0.84	0.84	0.84	0.42	0.42	0.84	0.84
台面加速度/g	0.41	0.83	0.46	0.90	0.44	0.87	0.44	0.87	0.86	0.98	0.45	0.53	0.92	1.03
隔震层加速度/g	0.14	0.32	0.27	0.53	0.25	0.47	0.29	0.59	0.48	1.04	0.31	0.63	0.56	0.97
减震率/%	66	62	40	41	43	47	35	32	44	-6	32	-19	39	-6

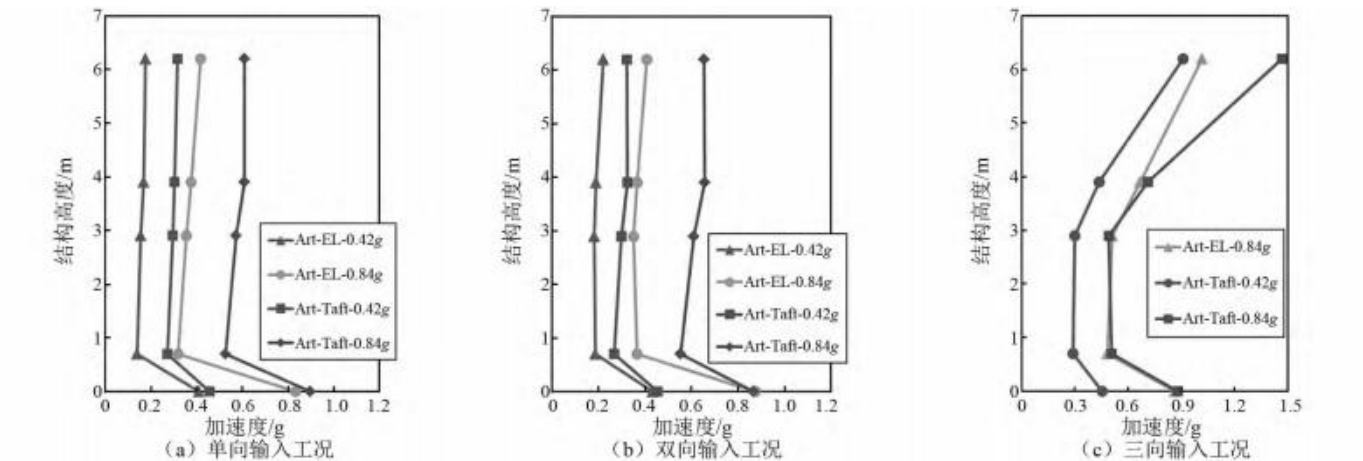


图 7 结构水平向实测加速度响应包络图

Fig. 7 Enveloping graph of horizontal acceleration response

三向输入工况下,由于结构振型影响以及多向耦合作用,模型顶部的加速度超出了输入峰值。

3.2 隔震支座受拉现象

核电厂隔震结构振动台试验中,单向加载工况下的隔震支座均保持受压状态,但在输入峰值为 0.84g 时,Art-EL 波、Art-Taft 波双向输入和 Art-EL 波三向输入工况下,观察到支座出现了受拉现象,支座竖向滞回曲线如图 8 所示。隔震支座试验的竖向力与位移结果

如表 5 所示,由结果可知,在 Art-EL 波双向输入工况下,支座竖向拉力最大为 62.37 kN(应力为 0.50 MPa);在 Art-Taft 波双向输入工况下,支座竖向拉力最大为70.02 kN(应力为 0.56 MPa);在 Art-EL 波三向输入工况下,由于竖向地震与水平地震的耦合作用,支座竖向拉力进一步增大到 143.04 kN(应力为 1.14 MPa),支座拉伸状态更为显著。

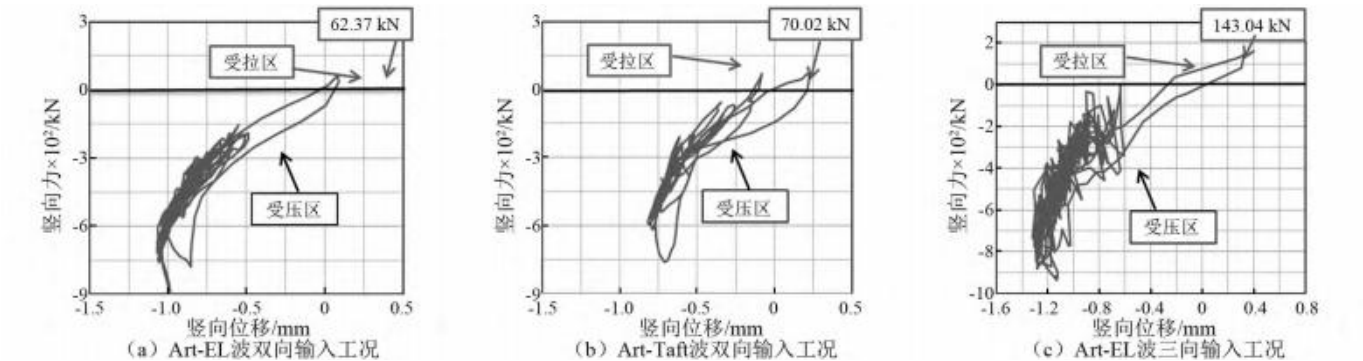


图 8 支座竖向滞回曲线

Fig. 8 Vertical hysteretic curves of isolator

表 5 隔震支座竖向力-位移响应

Tab. 5 Vertical force-displacement of isolation bearing

工况编号	加载方向	输入峰值	支座竖向力/kN(支座应力/MPa)		支座竖向位移/mm	
			最大值	最小值	最大值	最小值
Art-EL	X + Y	0.84	62.37(0.50)	-917.92	0.09	-1.25
Art-Taft			70.02(0.56)	-760.15	0.22	-1.26
Art-EL	X + Y + Z		143.04(1.14)	-936.12	0.32	-1.32

3.3 隔震结构楼层反应谱

绘制原型结构各楼层反应谱,如图9所示。在水平方向上,测点1的卓越频率为4.91 Hz,测点2的卓越频率为0.49 Hz,经过隔震后,楼层反应谱的卓越频率向低频移动,可以避开核电厂内部大部分设备和管道的固有频率。表6为隔震结构楼层反应谱峰值对比,从表格可以看出,隔震层水平向加速度反应谱峰值降低约20%~59%,减震效果明显。但在三向输入下,核岛顶部的加速度反应谱峰值有

所放大。

在竖直方向上,在核电厂本身高阶振型及摇摆转动影响下,各楼层反应谱的卓越频率为3~6 Hz,与设备和管道的振动主频接近。振动台试验在0.84g超设计输入下,核岛顶部的实测加速度反应谱峰值较台面输入的反应谱峰值放大。与钏路市市政厅和福冈市东区某医院的竖向强震观测结果^[18]相吻合,所以核电厂结构的竖向隔震值得今后重点研究分析。

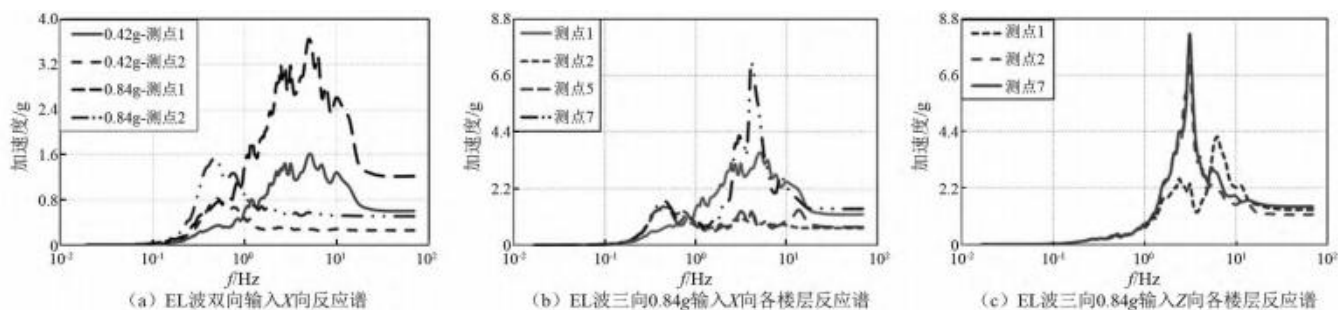


图9 楼层反应谱对比

Fig. 9 Response spectra of different layers

表6 隔震结构楼层反应谱峰值对比

Tab. 6 Response spectrum of isolated structure

加载方式 加速度方向	Art-EL 波 单向加载		Art-Taft 波 单向加载		Art-EL 波 双向加载		Art-Taft 波 双向加载		Art-EL 波 三向加载		Art-Taft 波 三向加载	
	水平向	水平向	水平向	水平向	水平向	水平向	水平向	水平向	水平向	竖向向	水平向	竖向向
台面加速度/g	1.38	3.54	1.86	3.84	1.60	3.64	1.78	3.78	3.57	4.20	1.93	2.70
隔震层加速度/g	0.91	1.55	1.48	2.78	0.83	1.54	1.42	2.68	1.48	7.04	1.18	2.53
隔震层减震率/%	34	56	20	28	48	58	20	29	59	-68	39	6
核岛顶部加速度/g	1.07	1.80	1.69	3.14	0.96	1.81	1.64	3.24	7.10	8.20	3.04	4.78
核岛顶部减震率/%	22	49	9	18	40	50	8	14	-99	-95	-58	-77

4 核电厂隔震结构地震响应数值分析

4.1 数值分析模型及分析工况

核电厂结构上部刚度较大,水平地震作用上部结构基本为平动,故将上部结构简化为单质点建立数值分析模型,如图10所示。支座本构模型如图11所示,水平双线性,竖向根据文献[19]考虑支座的拉压不等,支座的拉伸刚度取为压缩刚度的1/7。

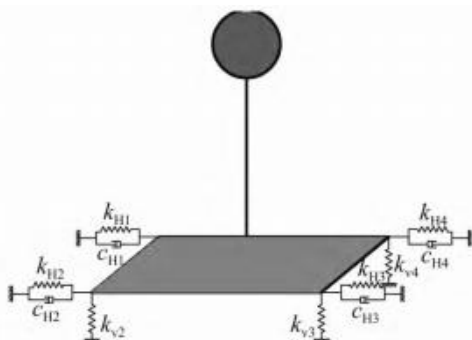


图10 单质点模型

Fig. 10 Single-particle model

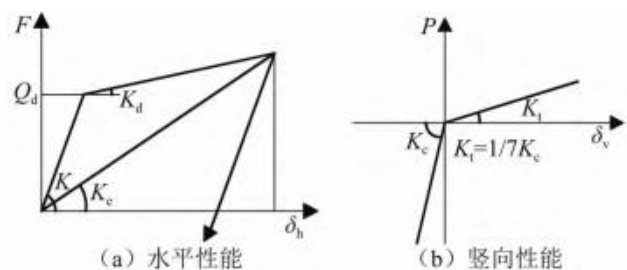


图11 隔震支座恢复力模型

Fig. 11 Hysteretic model of isolation bearing

4.2 隔震结构加速度响应对比分析

振动台试验和数值分析结果如表7所示,在单向、双向和三向地震作用下,振动台试验和数值分析的加速度响应峰值有一定的差异,偏差率为4%~16%。数值分析的加速度响应如表8所示,上部结构加速度响应均显著降低,减震率为35%~46%,隔震效果明显。

不同输入峰值下支座的最大应力分布,如图12所示,理论分析的支座进入受拉状态的输入临界值为0.54g。数值模拟中,当地震波输入峰值小于0.54g

表 7 数值分析与振动台试验的加速度峰值对比

Tab.7 Acceleration response of numerical analysis and dynamic test												
加载方式	Art-EL 波 单向加载		Art-Taft 波 单向加载		Art-EL 波 双向加载		Art-Taft 波 双向加载		Art-EL 波 三向加载		Art-Taft 波 三向加载	
数值分析 /g	0.15	0.35	0.30	0.57	0.22	0.38	0.35	0.60	0.50	0.29	0.53	
试验响应 /g	0.14	0.32	0.27	0.53	0.25	0.47	0.29	0.59	0.48	0.31	0.56	
减震率均值 /%	8		9		16		11		4		6	

表 8 输入地震动峰值与单质点加速度响应峰值平均值对比
Tab.8 Comparison of input peaks and acceleration response

加载方式	单向加载		双向加载		三向加载	
地震波输入峰值/g	0.42	0.84	0.42	0.84	0.42	0.84
单质点响应峰值/g	0.23	0.46	0.29	0.49	0.29	0.52
减震率平均值/%	46		37		35	

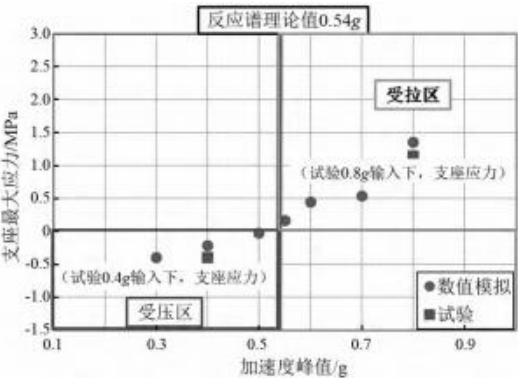


图 12 支座应力分布图
Fig. 12 Distribution of bearing stress

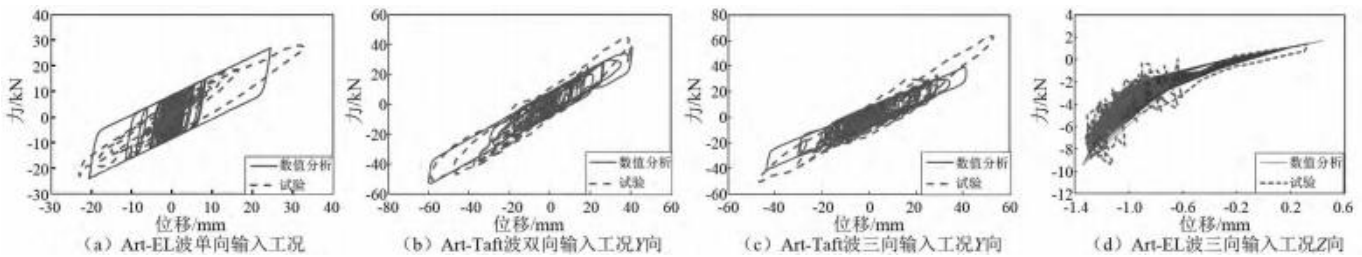


图 13 隔震层滞回曲线对比
Fig. 13 Comparison of hysteretic curve of isolation layer

5 结 论

建立考虑隔震层竖向刚度的结构体系运动方程，对核电厂隔震结构进行振动台试验，对比分析隔震结构在单向、双向和三向地震作用下的地震响应特性，并与数值分析结果对比，主要结论如下：

(1) 建立考虑隔震层竖向刚度结构体系平摆模型的运动方程，提出支座进入受拉状态的地震波输入界限公式，理论分析的支座进入受拉状态的输入临界值为 0.54g。数值模拟中，当地震波输入峰值小于 0.54g 时，支座均处于受压状态；当地震波输入峰值大于 0.54g 时，支座进入受拉状态；在 0.42g 和 0.84g 输入下，支座的最大应力与振动台试验的分析结果接近。

时，支座均处于受压状态；当地震波输入峰值大于 0.54g 时，支座进入受拉状态；在 0.42g 和 0.84g 输入下，支座的最大应力与振动台试验的分析结果接近。

4.3 隔震层滞回曲线对比

隔震层滞回曲线对比如图 13 所示。在水平方向上，单向地震作用下，试验滞回曲线形状较为稳定，滞回环饱满，与数值分析结果能较好地吻合；多向地震作用下，试验滞回曲线呈现复杂形状，但总体趋势与数值分析的结果吻合；此外，在多向输入下，由于耦合效应，隔震层位移较单向输入有明显放大。在竖直方向上，数值模拟与试验测得的竖向位移相差较小。由试验曲线可以看出，支座的竖向力学性能呈微塑性，本文数值模拟是采用 SAP2000 中的多段线弹性单元 (Multi Linear Elastic)，数值模拟结果与试验结果虽存在误差，但位移和力的幅值较接近，数值模拟精度尚可接受。

(2) 对比分析试验结果，水平加速度减震率为 32% ~ 66%；单向和双向输入下，各层加速度峰值小于台面加速度峰值，但三向输入下核岛顶部加速度峰值超过输入值；在单向输入下，支座均处于受压状态，但在 Art-EL 波、Art-Taft 波双向和 Art-EL 波三向 0.84g 输入下，支座出现受拉现象，其中 Art-EL 波三向输入下最大竖向拉力应力达 1.14 MPa。

(3) 水平隔震技术有效降低核电厂各楼层的加速度反应谱峰值，隔震层水平向减震率为 20% ~ 59%，楼层反应谱的卓越频率向低频段移动；但在竖直方向上，楼层反应谱的卓越频率为 3 ~ 6 Hz，与设备和管道的竖向振动主频接近，设计时需要特别注意，值得今后重点研究解决。

参考文献

- [1] 谢礼立. 核电工程应用隔震技术的可行性探究[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(1): 1-10.
XIE Lili. A prospective study on applicability of base isolation in nuclear power plants[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(1): 1-10.
- [2] TANAKA T. The development of seismic-isolated APWR plants[C]// Proceedings of 16th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Okinawa: International Committee on Reactor Structural Mechanics, 2001.
- [3] CAL. Seismic base isolation for nuclear facilities [C]// Proceedings of 10th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Los Angeles: International Committee on Reactor Structural Mechanics, 1989.
- [4] NARA. Seismic isolation, passive energy dissipation and active control of vibrations of structures[C]// Proceedings of 13th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Los Angeles: International Committee on Reactor Structural Mechanics, 1995.
- [5] COLADANT C. Seismic isolation of nuclear power plants—EDF's philosophy [J]. Nuclear Engineering and Design, 1991, 127: 243-251.
- [6] 刘浩吾. 核建筑与普通建筑隔震技术的进展[C]//第七届全国反应堆结构力学会议论文集. 上海: 中国力学学会反应堆结构力学专业委员会, 1992.
- [7] KATO M, WATANABE Y, KATO A, et al. Design study of the seismic-isolated reactor building of demonstration FBR plant in Japan: SMiRT-13 [S]. Porto Alegre: IASMiRT, 1995.
- [8] KAGEYAMA M, IBA T, UMEKI K, et al. Development of three-dimensional base isolation system with cable reinforcing air spring: SMiRT-17 [S]. Prague: IASMiRT, 2003.
- [9] GENOVA, BOLOGNA. A sensitivity investigation upon the dynamic structural response of a nuclear plant on aseismic isolating devices [C]// Proceedings of 16th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Okinawa: International Committee on Reactor Structural Mechanics, 2001.
- [10] 李冬梅. 某核电厂安全壳的隔震地震反应分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
- [11] 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.
- [12] 花磊. 核电厂的三维减震分析模型及地震响应研究[D]. 上海: 上海大学, 2010.
- [13] 马永宏. 三维减震装置的力学性能及核电厂结构的三维减震分析研究[D]. 上海: 上海大学, 2011.
- [14] 王飞. 核电厂整体基础隔震系统的理论与试验研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2013.
- [15] 王涛, 王飞, 丁路通. 核电厂三维隔震技术的理论和试验研究[J]. 土木工程学报, 2012(增刊1): 238-242.
WANG Tao, WANG Fei, DING Lutong. Theoretical and experimental study on three-dimensional base-isolated nuclear power plant [J]. China Civil Engineering Journal, 2012 (Sup 1): 238-242.
- [16] 王涛, 王飞, 丁路通. 采用三维隔震技术的核电厂抗震性能研究[C]//第十七届全国反应堆结构力学会议. 上海: 核技术, 2012.
- [17] 王涛, 王飞, 侯钢领, 等. 核电厂隔震结构的振动台试验研究[J]. 工程力学, 2014, 10: 62-68.
WANG Tao, WANG Fei, HOU Gangling, et al. Shaking table tests on base-isolated nuclear power plant [J]. Engineering Mechanics, 2014, 10: 62-68.
- [18] 张强, 刘文光, 何文福, 等. 隔震结构的强震观测及数值响应分析结果[J]. 结构工程师, 2012, 28(3): 109-116.
ZHANG Qiang, LIU Wenguang, HE Wenfu, et al. Strong motion observation and numerical response analysis of isolation structures [J]. Structural Engineers, 2012, 28(3): 109-116.
- [19] 刘文光. 橡胶隔震支座力学性能及隔震结构地震反应分析研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2003.