

# 核电厂整体基础隔震体系的振动台试验研究

闫维明<sup>1</sup>, 戴颖楠<sup>1</sup>, 陈适才<sup>1</sup>, 孙运轮<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124; 2. 中核能源科技有限公司, 北京 100193)

**摘要:**为了解决基础隔震技术在核电工程中的应用问题,以某高温气冷堆核电厂房结构为背景,通过1:20缩尺模型地震模拟振动台试验,研究了水平双向和三向地震动作用下水平整体基础隔震核电结构(含设备)的地震响应规律和特点,包括结构的加速度和位移反应、楼层反应谱和设备反应以及隔震效果等。结果表明:隔震结构的前二阶振型为水平双向平动,且变形主要集中在隔震层,上部结构近于平动;考虑竖向输入后结构水平向加速度放大系数是水平双向输入的2~3倍,且竖向加速度响应较大;水平向楼层反应谱峰值远小于竖向,三向输入的竖向楼层反应谱峰值大于双向输入;设备与结构的反应规律和特点基本相似。总之,水平向隔震可以有效降低结构和设备的水平向地震反应,但对竖向反应基本无减震效果,且竖向地震动作用可能降低水平向隔震效果。

**关键词:**核电厂房; 振动台试验; 基础隔震; 动力分析

中图分类号: TU 352.1

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2018)12-1513-08

doi: 10.11936/bjutxb2017060048

## Shaking Table Test of a Base-isolated Nuclear Power Plant

YAN Weiming<sup>1</sup>, DAI Yingnan<sup>1</sup>, CHEN Shicai<sup>1</sup>, SUN Yunlun<sup>2</sup>

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;  
2. CHINERGY CO., LTD, Beijing 100193, China)

**Abstract:** To solve the application of base isolation technology in nuclear power, based on the structure of a high temperature gas-cooled reactor nuclear power plant, a 1:20 scale model earthquake simulation shaking table test was conducted to study the earthquake response rules and characteristics of horizontal bi-directional and three-directional earthquakes on the horizontal isolated nuclear structure (including equipment), including the structure of the acceleration and displacement response and floor response spectrum, equipment response, and isolation effect. Results show that the first two modes of the isolated structure are horizontal translation, the deformation is mainly concentrated in the isolation layer, and the superstructure is nearly translational. Considering the vertical input, the acceleration amplification factor in the structural horizontal direction is 2~3 times the horizontal two-way input, and the vertical acceleration response larger. The horizontal peak is much smaller than the vertical peak of the floor response spectrum, and the three-way input peak is larger than the two-way input peak of the vertical response spectrum. The earthquake reaction of the equipment are basically similar to the structure. In short, the horizontal isolation can effectively reduce the horizontal seismic response of the structure and equipment, however, has no damping effect on the vertical response, and the vertical seismic action may reduce the horizontal isolation effect.

**Key words:** nuclear power plant; shaking table test; base isolation; dynamic analysis

---

收稿日期: 2017-06-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51378039, 51421005)

作者简介: 闫维明(1960—), 男, 教授, 主要从事工程结构抗震、减隔震方面的研究, E-mail: Yanwm@bjut.edu.cn

核电是一种清洁高效能源,具有资源消耗少、环境影响小的优点,但也存在地震核泄漏等安全隐患,故提高核电厂房结构在地震中的安全性成为核电领域研究的重要课题之一。

基础隔震技术的可靠性、经济性及其在民用建筑中的应用已经得到广泛认可。通过隔震能降低上部结构的水平地震作用,提高结构的抗震裕度,故将隔震技术引入核电工程中将具有很大的优势<sup>[1]</sup>。但目前全世界运行的核电厂中,只有法国的 Cruas 核电厂和南非的 Koeberg 核电厂使用了基底水平隔震技术<sup>[2-3]</sup>。隔震技术在核电领域基本上还处于研究中,目前主要是通过振动台试验来验证和评估隔震后的性能,如王涛等<sup>[4]</sup>进行的 1:15 缩尺模型的安全壳振动台试验,孔德睿等<sup>[5]</sup>进行的 AP1000 核电站 1:80 隔震试验等,主要研究对象是压水堆的预应力混凝土安全壳。这些试验的研究结果表明,隔震后安全壳减震效果显著。

由于高温气冷堆核电厂结构复杂,包括反应堆、乏燃料、核辅助厂房及内部设备,其安全评估不仅需要考虑结构的安全,还需要考虑设备的安全。鉴于

此,本文以某高温气冷堆核电厂房为背景,通过 1:20 缩尺隔震模型地震模拟振动台试验,研究采取水平隔震措施后核电结构的动力特性、加速度、位移、楼层反应谱以及设备反应、隔震效果,以及水平双向和三向地震动输入的影响。

## 1 试验模型概况

### 1.1 原型简介

本试验的原型为某高温气冷堆核电厂结构,该结构平面与立面均属于不规则建筑,平面为 L 形,最大平面尺寸为 68.80 m × 62.50 m;地上最高 44.10 m,地下埋深 15.50 m。核电厂房采用钢筋混凝土剪力墙结构,筏板基础,基础下的隔震层布置 329 个铅芯橡胶隔震支座(为了有效避免结构扭转及满足隔震结构的各项指标要求,选取了 LRB1100、LRB900、LRB800 三种隔震支座)。隔震支座的主要参数如表 1 所示(LRB200 用于试验模型,  $k_1$ 、 $k_2$  和  $\zeta_1$ 、 $\zeta_2$  分别为 100%、250% 剪应变下水平等效刚度和等效阻尼比)。隔震支座的布置如图 1 所示。

表 1 原型结构隔震支座参数

Table 1 Performance parameters of isolation bearing

参数	支座型号			
	LRB1100	LRB900	LRB800	LRB200
$k_1/(kN \cdot m^{-1})$	5 128	4 238	2 746	475
$\xi_1/\%$	23	23	23	22
$k_2/(kN \cdot m^{-1})$	3 305	2 732	1 770	345
$\xi_2/\%$	14.7	14.7	14.7	12.3
屈服力/kN	316.7	261.7	167.5	6.7
竖向刚度/(kN · m <sup>-1</sup> )	8 741	5 233	4 355	440

### 1.2 试验模型的设计与制作

核电厂房原型采用 C35 级混凝土,HRB400 级钢筋,质量为 203 090 t。考虑到振动台的试验能力,试验模型采用欠人工质量模型<sup>[6]</sup>,按 1:20 进行缩尺,采用微粒混凝土代替原型中混凝土,镀锌钢丝代替原型中的钢筋,并采用弹性模量等效的方法确定模型配筋。由于原型结构复杂,为便于模型制作且能满足原型主要控制指标的要求,经对结构有限元模型的反复试算,最终确定简化辅助厂房内部分墙体,但楼板尺寸、配筋及板上开洞均未简化。为考虑结构与设备动力相互作用的影响,将原型设备按照相似比 1:20 缩尺后安装在模型中。模型最大平面尺寸为 3.44 m × 3.13 m,总高度为 2.99 m(模拟地上高度为 2.21 m,地下高度为 0.78 m),总质量为

30.5 t。

模型微粒混凝土的实测弹性模量约为原型的 1/4,密度与原型基本相等,即模型的长度相似比为 1/20,弹性模量相似比为 1/4,密度相似比为 1。振动台试验的动力学物理量相似比需满足  $S_E/(S_p S_s S_l) = 1$ ,由此可得加速度相似比为 5,模型其余主要相似比由长度、弹性模量、密度、加速度相似比推导获得,如周期相似比  $S_T = 0.1$ 。制作完成的试验模型如图 2 所示。

### 1.3 隔震支座的布置与选型

考虑到隔震支座的制作及其与振动台的连接,并根据隔震层刚度和屈服特性相似的原则,确定采用 4 个铅芯橡胶支座(LRB200)作为模型结构的隔震支座(直径 200 mm,高度 122 mm,铅芯直径

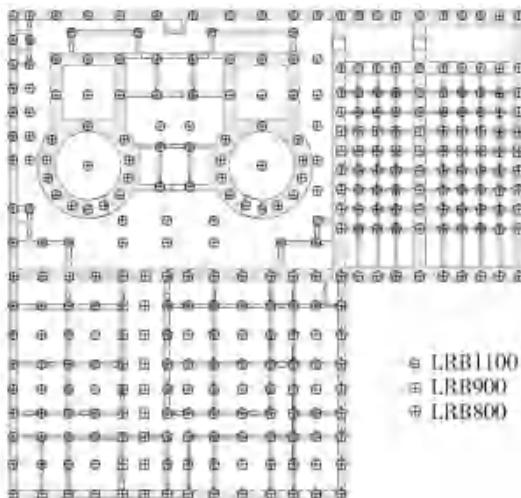


图 1 原型结构隔震支座布置

Fig. 1 Arrangement of isolation bearings



图 2 试验模型

Fig. 2 Model of the test

15 mm, 橡胶层总厚度 40 mm, 钢板总厚度 48 mm). 模型隔震支座的布置如图 3 所示。根据《建筑隔震橡胶支座》<sup>[7]</sup> 规定进行了隔震支座力学性能检测, 实测滞回曲线如图 4 所示, 其他参数见表 1.

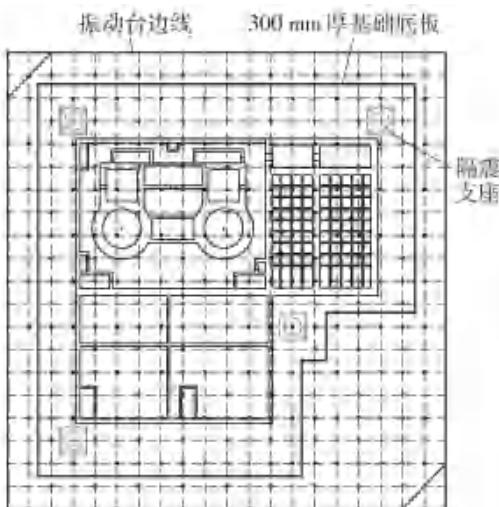


图 3 模型隔震支座布置

Fig. 3 Arrangement of isolation bearings model

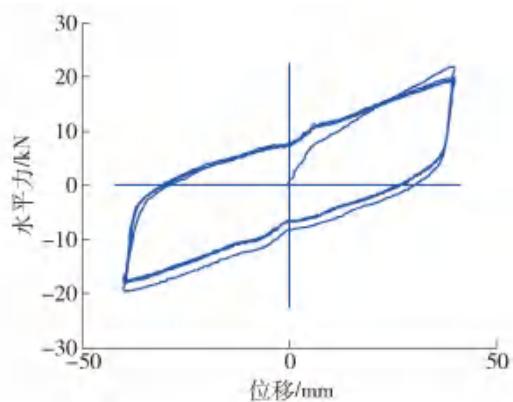


图 4 隔震支座的滞回曲线

Fig. 4 Hysteresis curve of isolated bearing

## 2 振动台试验

### 2.1 测点布置

本试验主要采用三向加速度传感器和拉线位移计测量核电厂房结构重要部位的加速度和位移或变形响应以及主要设备的加速度响应。分别在台面、基础、反应堆重要楼层处布置了 6 个三向加速度传感器, 在压力容器(设备 1)和蒸汽发生器(设备 2)的钢壁上各布置 1 个加速度传感器; 位移计分别布置在反应堆外部从台面至顶层的各层处, 沿水平向( $x$ 、 $y$  向)总共布置 12 个位移计; 在平面另 2 个角点各布置 1 个位移计, 以与反应堆相同标高处的位移计共同测量扭转响应, 如图 5 所示。

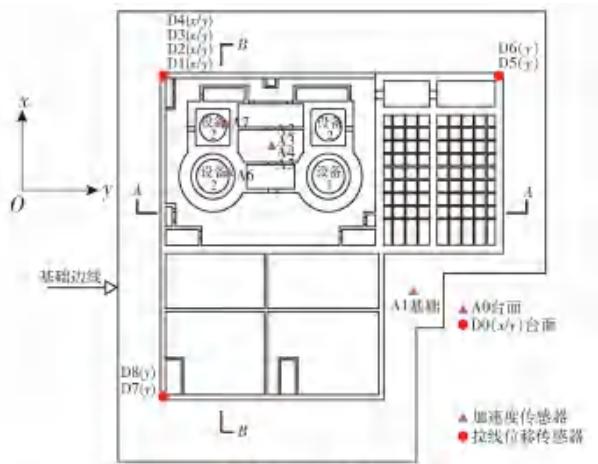
### 2.2 试验加载方案

采用时程分析法时一般选用实际强震记录和人工模拟的加速度时程曲线<sup>[8]</sup>, 所以模型试验时根据地震安评报告提供的厂址 SL-2 级设计基准地面运动基岩峰值加速度为 0.20g 的反应谱拟合而成 1 条人工波, 另外选取 2 条天然波(天然波 1 为 Sanfernando 波, 天然波 2 为 Parkfield 波), 其反应谱曲线如图 6 所示。本试验地震波分别采用双向( $x$  和  $y$  向)输入和三向( $x$ 、 $y$  和  $z$  向)输入, 根据《核电厂抗震设计规范》<sup>[9]</sup> 规定,  $x$ 、 $y$ 、 $z$  向的加速度峰值比为 1:1:0.65, 且加速度峰值分别调整为 0.85g 和 1.28g(分别对应原型的 0.20g 和 0.30g, 双向输入工况记为工况 1、2, 三向记为工况 3、4), 并在每个地震波加载工况前对模型输入白噪声以测定结构的动力特性。

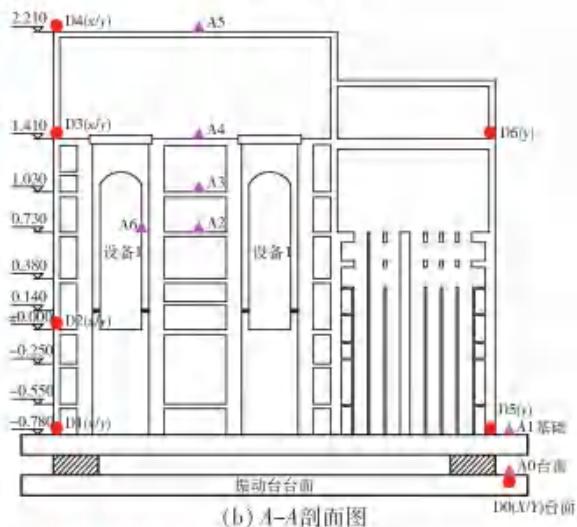
## 3 振动台试验结果与分析

### 3.1 模型的动力特性分析

根据白噪声激励获得的隔震模型在不同工况下



(a) 各测点布置平面图



(b) A-A剖面图

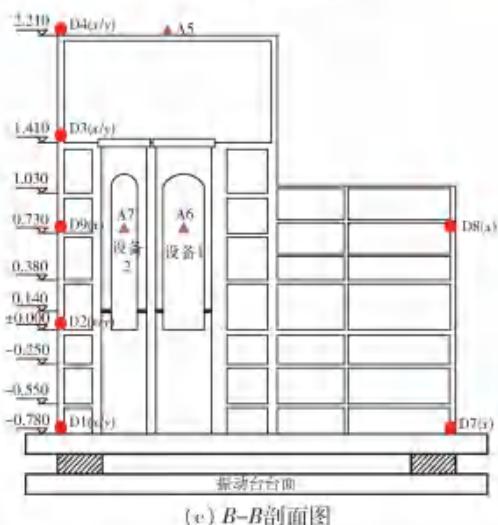


图 5 测点布置平面图(单位:m)

Fig. 5 Arrangement of the measuring points (unit: m)

的动力特性如表 2 所示(自振频率和阻尼比分别用 TFT 传递函数和半功率带宽法求得<sup>[10]</sup>)。由表 2 可知,隔震后第一振型为  $x$  向平动,第二振型为  $y$  向平

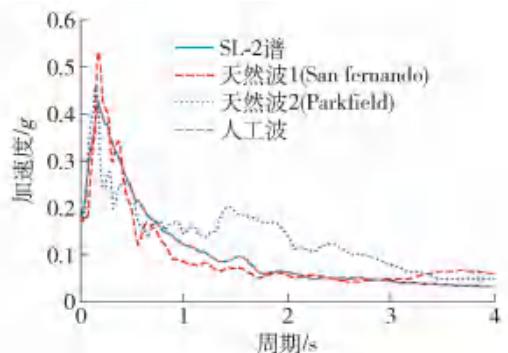


图 6 地震波反应谱曲线

Fig. 6 Response spectrum of earthquake waves

动,模型结构未产生明显的整体扭转现象。此外,模型结构在不同工况下的各阶自振频率基本保持不变,说明上部模型结构处于弹性工作状态,未出现大的损伤。

### 3.2 结构加速度试验结果分析

图 7~9 描述了加速度放大系数随模型高度的变化。可知:在双向和三向地震动输入下,基础 ~2.21 m 的水平向放大系数随高度而增大,但均明显小于 1,说明采取水平向隔震措施后水平向隔震效果良好;三向地震动输入下水平向加速度放大系数是双向地震动输入下的 2~3 倍,部分楼层竖向加速度放大系数明显大于 1.0,说明竖向地震动输入会明显降低水平向隔震效果,且水平隔震会明显放大竖向加速度反应。这对结构与设备的抗震是不利的。

### 3.3 位移试验结果分析

图 10~11 给出了各工况下模型最大相对位移沿高度的分布情况。可知,在双向和三向地震动输入下,模型上部结构的相对位移较小,沿高度大体呈均匀分布,近于平动,而隔震层最大位移较大,分别为 5.9 mm(0.85g)、7.5 mm(1.28g),说明隔震后体系变形主要发生在隔震层,上部结构基本处于弹性。

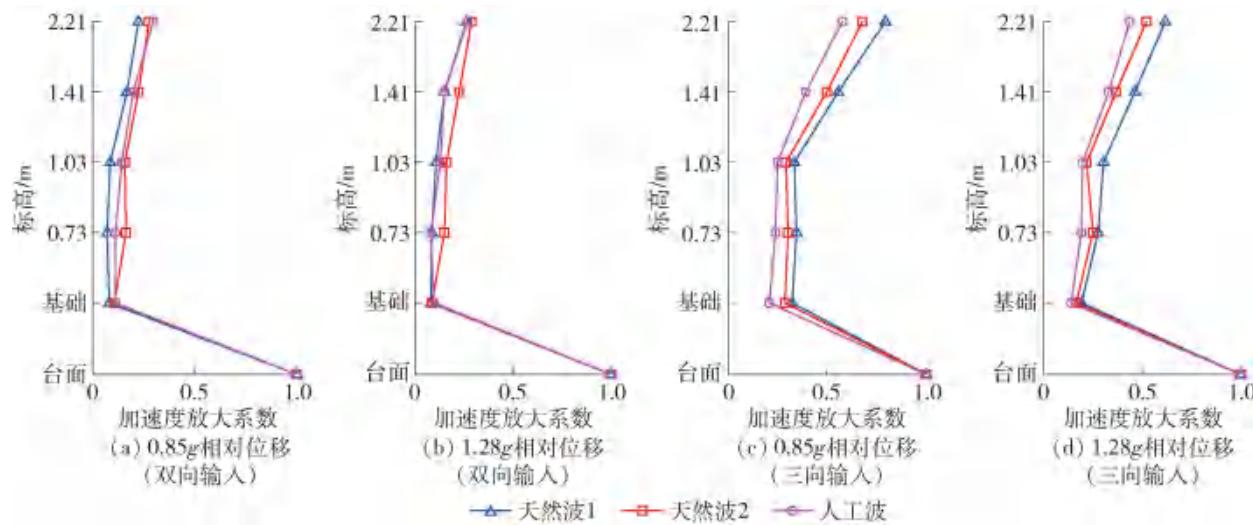
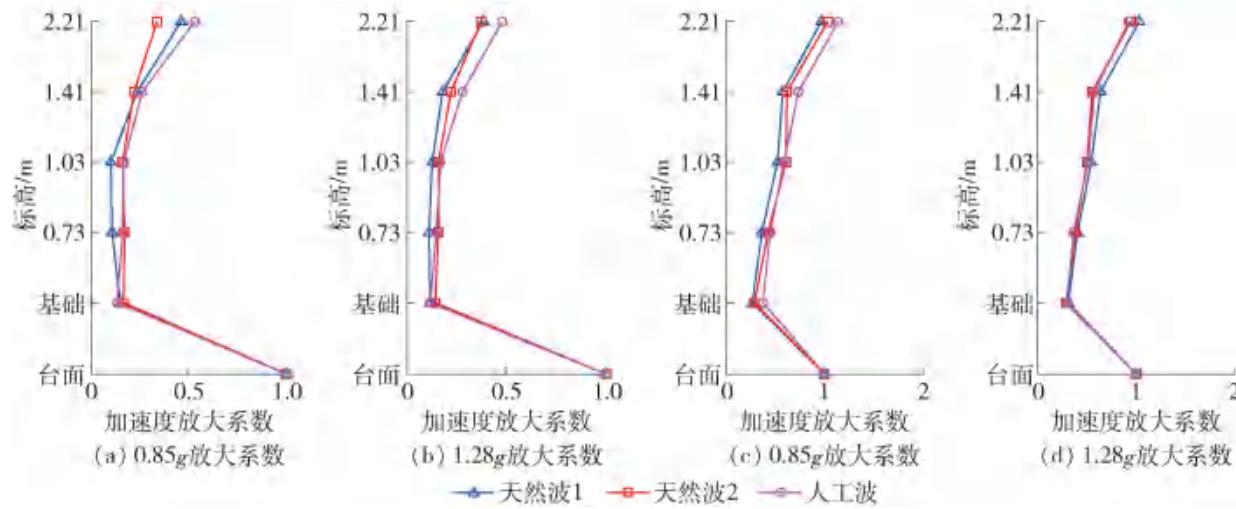
三向地震动输入下隔震层的最大位移和上部结构的相对位移比双向地震动输入下的略大,说明竖向地震动的输入对隔震层和上部结构的变形影响较小。

### 3.4 模型结构扭转位移分析

由于结构模型平面呈 L 型,需进一步分析其扭转位移响应。根据《建筑抗震设计规范》<sup>[8]</sup>的规定,若  $[\delta_1, \delta_2]_{\max} / 0.6(\delta_1 + \delta_2) \geq 1.0$ , (其中  $\delta_1, \delta_2$  为平面两端的相对位移),结构平面属于扭转不规则,反

表 2 结构的动力特性  
Table 2 Dynamic characteristics of structure

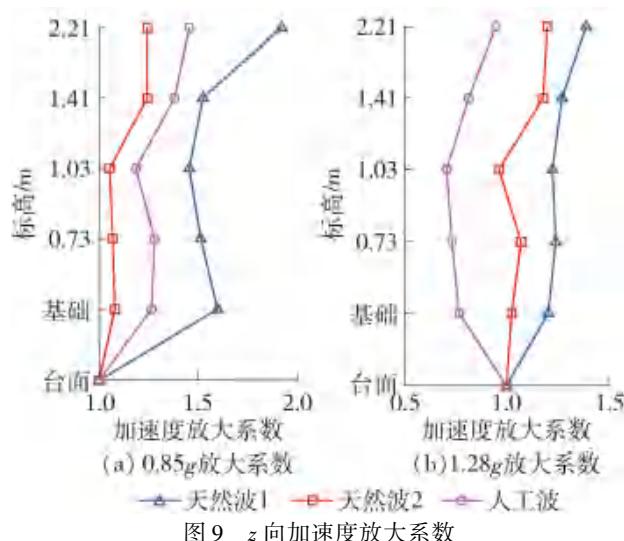
工况	水平 $x$ 向(第一振型)		水平 $y$ 向(第二振型)		竖向	
	频率/Hz	阻尼比	频率/Hz	阻尼比	频率/Hz	阻尼比
1	3.546	0.03	3.560	0.03	26.20	0.008
2	3.543	0.03	3.558	0.03	26.27	0.008
3	3.563	0.03	3.584	0.03	26.72	0.008
4	3.558	0.03	3.566	0.03	26.79	0.008

图 7  $x$  向加速度放大系数Fig. 7 Acceleration amplification factor in the  $x$  direction图 8  $y$  向加速度放大系数Fig. 8 Acceleration amplification factor in the  $y$  direction

之为平面规则。各工况下,  $[\delta_1, \delta_2]_{\max}/0.6(\delta_1 + \delta_2)$  的实测结果如表 3 所示。可见, 结构平面扭转规则, 说明隔震后减小了结构的平面扭转现象, 提高了上部结构的安全性。

### 3.5 楼层反应谱

核电厂房结构中楼层反应谱是设备抗震设计的依据, 故本文根据实测数据计算了模型的水平和竖向楼层反应谱。以下仅对输入加速度峰值为  $0.85g$

Fig. 9 Acceleration amplification factor in the  $z$  direction

时的楼层反应谱进行分析。

由图 12 可知, 双向地震动作用下, 水平向楼层反应谱最大峰值出现在  $0.26 \sim 0.28$  s(模型的隔震结构周期)范围。根据周期相似比  $S_T = 0.1$  可知, 原型的水平向楼层反应谱最大峰值出现在  $2.6 \sim 2.8$  s 范围, 避开了地震动卓越周期( $0.16 \sim 0.18$  s)与设备周期(核电设备周期范围  $0.02 \sim 0.10$  s)。竖向楼层反应谱最大峰值出现在  $0.02$  s, 原型的竖向楼层反应谱最大峰值出现在  $0.20$  s, 与地震动卓越周期较接近而产生共振效应, 又与设备周期范围接近, 对设备的抗震产生不利影响。

由图 13 三向地震动作用下的楼层反应谱可知, 水平向楼层反应谱最大峰值出现在  $0.26 \sim 0.35$  s(模型的隔震结构周期)范围, 根据周期相似比可知

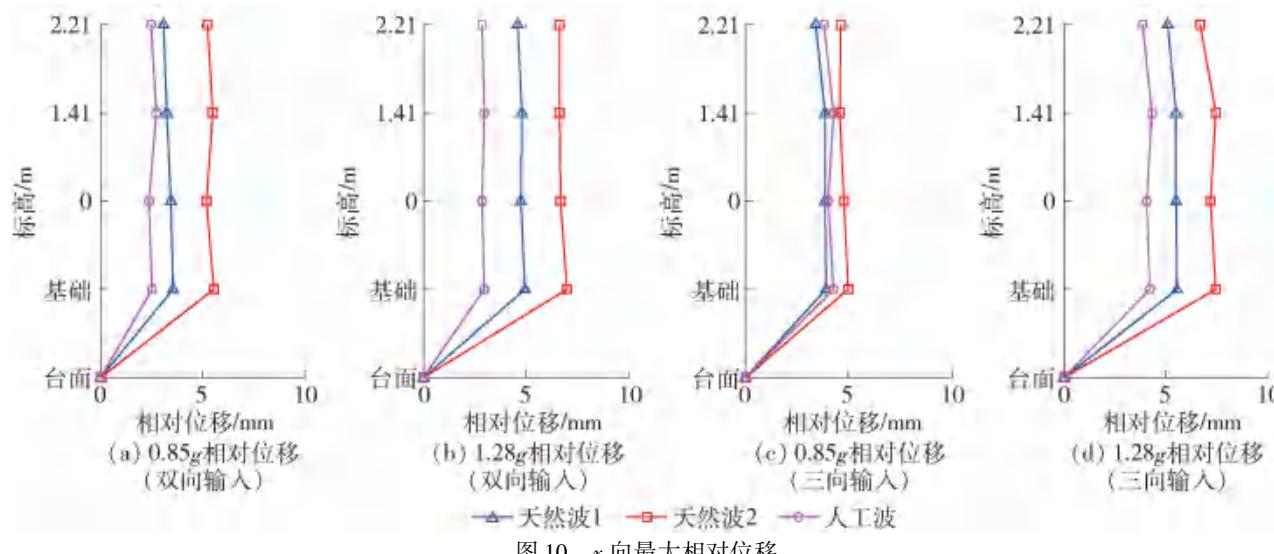
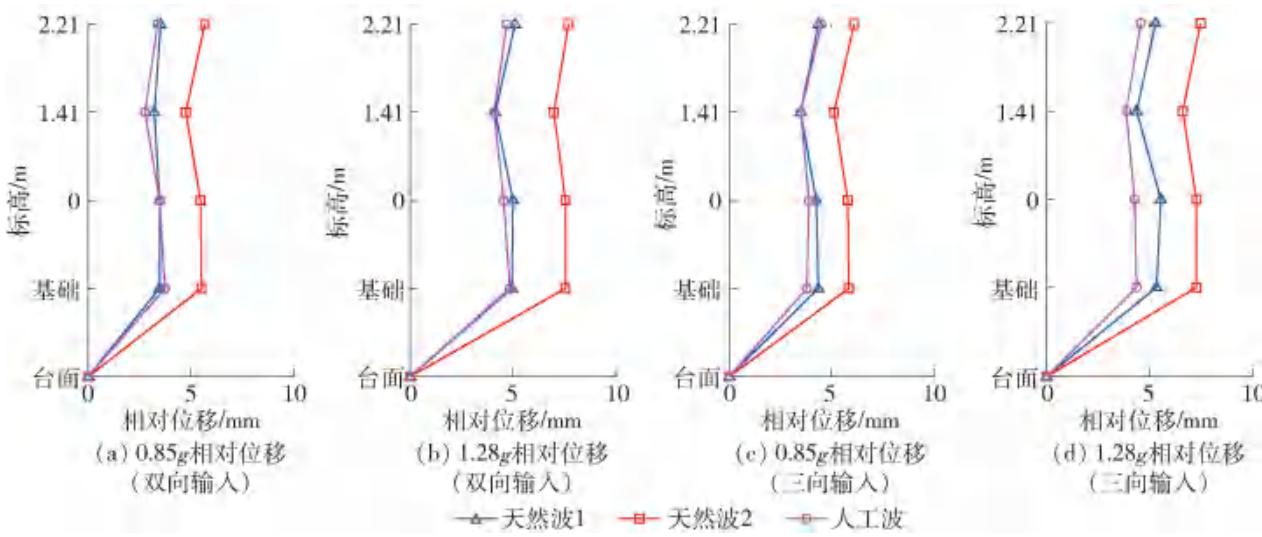
Fig. 10 Maximum relative displacement in the  $x$  directionFig. 11 Maximum relative displacement in the  $y$  direction

表 3  $[\delta_1, \delta_2]_{\max} / 0.6(\delta_1 + \delta_2)$  实测值Table 3  $[\delta_1, \delta_2]_{\max} / 0.6(\delta_1 + \delta_2)$  measured value

工况	$[\delta_1, \delta_2]_{\max} / 0.6(\delta_1 + \delta_2)$	
	x	y
双向 0.85g	天然波 1	0.268
	天然波 2	0.870
	人工波	0.927
双向 1.28g	天然波 1	0.585
	天然波 2	0.926
	人工波	0.898
三向 0.85g	天然波 1	0.272
	天然波 2	0.884
	人工波	0.818
三向 1.28g	天然波 1	0.883
	天然波 2	0.888
	人工波	0.878

注:D8、D9 测量 x 向;D3、D6 测量 y 向, 均取测点的位移最大值.

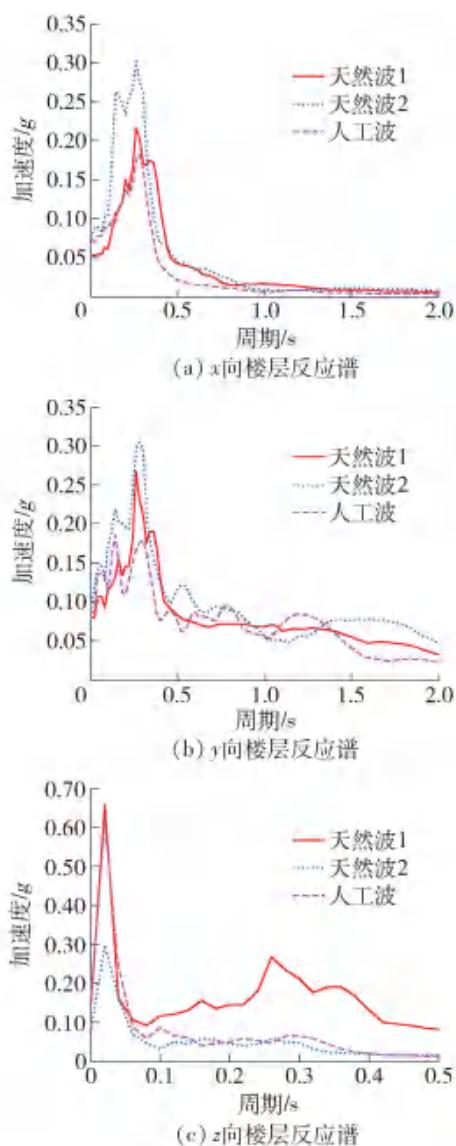


图 12 楼层反应谱(双向输入)

Fig. 12 Floor response spectrum (bidirectional input)

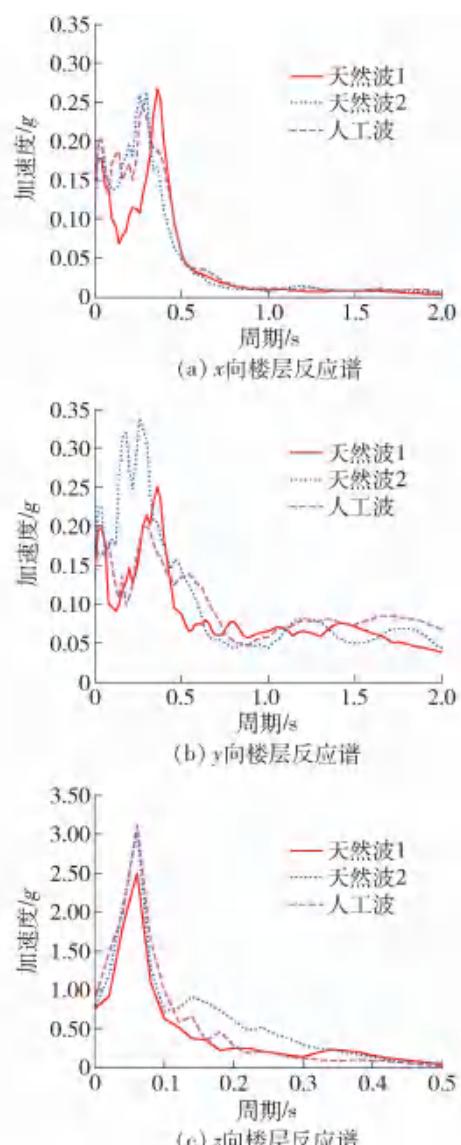


图 13 楼层反应谱(三向输入)

Fig. 13 Floor response spectrum(three-directional input)

原型的水平向楼层反应谱最大峰值出现在 2.6 ~ 3.5 s, 避开了地震动卓越周期(0.16 ~ 0.18 s)与设备周期(核电设备周期范围 0.02 ~ 0.10 s); 由于竖向地震动的作用, 竖向楼层反应谱峰值远大于水平双向输入工况, 后者约为前者的 5 倍, 且楼层竖向反应谱值亦远大于水平向楼层反应谱值。因此, 竖向地震动输入对结构竖向反应影响较大, 三向地震动输入比双向输入更为不利, 仅水平向隔震对竖向无减震效果。

### 3.6 设备的响应分析

取布置在压力容器(设备 1)钢壁上的加速度传感器测量结果进行分析。由表 4 可知, 隔震后设备的加速度放大系数除三向地震动输入的竖向工况外, 其余均小于 1.0, 说明采用隔震措施后设备自身

的加速度响应降低,对设备抗震十分有利,但竖向的放大系数约为水平向的6倍;三向地震动输入的放大系数为双向地震动输入的2~3倍,与结构的水平向放大系数规律相似,但比结构的竖向放大系数的影响更大,可见三向地震动输入对设备的竖向抗震更为不利,此规律与上述楼层反应谱的规律相似。

**表4 设备的加速度放大系数**

**Table 4 Acceleration amplification factor of equipment**

工况	加速度放大系数( $x/y/z$ )
双向 $0.85g$	天然波1 0.072/0.115/0.778
	天然波2 0.150/0.163/0.631
	人工波 0.110/0.156/0.644
	平均值 0.110/0.144/0.684
双向 $1.28g$	天然波1 0.080/0.146/0.819
	天然波2 0.146/0.151/0.841
	人工波 0.097/0.153/0.531
	平均值 0.107/0.150/0.730
三向 $0.85g$	天然波1 0.247/0.384/1.669
	天然波2 0.244/0.436/1.015
	人工波 0.220/0.407/1.305
	平均值 0.237/0.409/1.330
三向 $1.28g$	天然波1 0.247/0.412/1.332
	天然波2 0.196/0.404/1.017
	人工波 0.161/0.352/0.790
	平均值 0.201/0.389/1.046

## 4 结论

1) 隔震结构的第一和第二振型分别为 $x$ 和 $y$ 向平动,未产生明显扭转现象,且在 $0.85g$ 和 $1.28g$ (分别对应原型的 $0.20g$ 和 $0.30g$ )地震作用下,模型结构的自振频率基本不变,结构大体保持弹性。

2) 隔震结构的变形主要集中在隔震层,上部结构近于平动,但三向地震动输入下水平向加速度放大系数是双向地震动输入下的2~3倍,且竖向加速度响应较大;水平向楼层反应谱峰值远小于竖向楼层反应谱峰值,三向地震动输入的竖向楼层反应谱峰值大于双向地震动输入。这说明竖向地震动作用可能降低水平向隔震效果,且仅水平向隔震对竖向无减震效果。

3) 水平隔震有效降低了设备的水平向地震反应,但竖向地震反应仍然较大,这与结构的反应规律基本相似。建议采取适当措施(如设备隔震或减震技术),以提高设备的竖向抗震裕度。

## 参考文献:

- [1] 谢礼立,翟长海. 核电工程应用隔震技术的可靠性探讨[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32 (1): 1-6.  
XIE L L, ZHAI C H. A prospective study on applicability of base isolation in nuclear power plants [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32 (1): 1-6. (in Chinese)
- [2] MALUSHTE S R, WHITTAKER A S. Survey of past isolation applications in nuclear power plants and challenges to industry/regulatory acceptance [C] // Transactions of the 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT 18). Beijing: China Atomic Energy Press, K10-7, 2005.
- [3] FORNI M. Seismic isolation of nuclear power plants [C] // Proceedings of the "Italy in Japan 2011" Initiative Science, Technology and Innovation. Roman: ENEA, 2011: 1-8.
- [4] 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, 31(10): 62-68, 84.  
WANG T, WANG F, HOU G L, et al. Shaking table tests on base-isolated nuclear power plant [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(10): 62-68, 84. (in Chinese)
- [5] 孔德睿,魏陆顺,梁欢文. 核电结构隔震试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2016, 38(2): 58-62.  
KONG D R, WEI L S, LIANG H W. Experimental study of seismic isolation of nuclear structure [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(2): 58-62. (in Chinese)
- [6] 周颖,吕西林. 建筑结构振动台模型试验方法与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2015: 9-11.
- [7] 中华人民共和国建设部. 建筑隔震橡胶支座: JG 118—2000 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2000: 3-11.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 8-10.
- [9] 国家地震局. 核电厂抗震设计规范: GB 50267—97 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1998: 13-14.
- [10] 刘晶波,杜修力. 结构动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 60-62.

(责任编辑 杨开英)