

## 核电厂三维隔震技术的理论和试验研究

王涛 王飞 丁路通

(中国地震局工程力学研究所, 河北廊坊 065201)

**摘要:** 基础隔震技术可以实现核电厂上部结构和内部设备、管道的标准化设计, 并提高结构体系的抗震裕度。考虑隔设备和管道的抗震要求, 提出了一种核电厂三维基础隔震技术。首先采用单质点简化模型进行参数分析, 确定了减震层的合理参数。其次设计开发了三维隔震装置, 包括厚层橡胶隔震支座和油阻尼器, 并进行了相关的检测试验。最后进行了几何缩尺比例为1/15的振动台试验, 模型包括三维隔震模型和传统水平隔震模型以及非隔震模型。试验证明: 三维隔震系统在水平方向具备与传统隔震系统相同的隔震性能, 并且可以有效地实现核电厂内部设备及管道的竖向隔震。

**关键词:** 三维基础隔震; 厚层橡胶隔震支座; 核电厂; 振动台试验

**中图分类号:** TU317 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2012) S1-0238-05

## Theoretical and experimental study on three-dimensional base-isolated nuclear power plant

Wang Tao, Wang Fei, Ding Lutong

(Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Langfang 065201, China)

**Abstract:** The base isolation technique could provide nuclear power plants a larger seismic margin from design earthquakes and standardize the seismic design procedure for various seismic fortification intensities. Considering the seismic demands from facilities and pipes within plants, a three-dimensional base isolation system is proposed. It is first numerically examined by simplified models to search for suitable parameters for the base isolation layer. Then a laminated rubber bearing with thick rubber layers and an oil damper with adjustable flow rate are developed and experimentally examined. 1/15 scaled shaking table tests are conducted on two models using three-dimensional and horizontal-only isolators, respectively, and one primary model without isolation. It is found that three-dimensional isolation systems exhibit the same performance as the traditional isolation systems in the horizontal direction and could avoid dominated frequencies of most facilities and pipes within the plants in the vertical direction.

**Keywords:** three-dimensional base isolation; thick rubber bearing; nuclear power plant; shaking table test

**E-mail:** wangtao2004@gmail.com

## 引言

1991年,我国自主设计的第一个核电站——秦山30万kW压水堆核电站建成投运,此后我国又先后建设了大亚湾、秦山二期、岭澳、秦山三期和田湾核电站,并逐步形成浙江秦山、广东大亚湾和江苏田湾三个核电基地。截至2010年,我国已有6个投入运营的核电站,12个在建的核电站,25个筹建中的核电站。如何保证我国核电站的安全已经成为国内科研工作

者和工程师的重要课题之一。

法国率先建造了两座隔震的核电站,在此基础上,推广了由隔震技术支持的核电站标准化设计<sup>[1]</sup>。日本从20世纪80年代起,也开始了核电站隔震技术的研究,并于2000年出版了《原子力发电所免震构造设计技术指针》JEAG 4614<sup>[2]</sup>,系统地阐述了设计地震动的评价、隔震核电站的荷载组合和容许极限,隔震装置的设计方法和健全性评价以及隔震装置的质量管理和维护。欧盟原子委员会在1995年提出建立核电站及其设备隔震规范<sup>[3]</sup>,主要针对高阻尼橡胶支座。他们做了大量的试验,并通过三维实体模型分析证明了核电站隔震技术的可行性与经济性。美国也较早地开展了核电站隔震的研究,并应用于先进反应堆——PRISM上<sup>[4]</sup>。

基金项目: 中核核动力院工程力学研究所基本科研业务费专项资助(20101004);

国家重点基础研究项目资助(31008287)。

作者简介: 王涛,博士,副研究员。

收稿日期: 2012-05-15

近年来,我国学者也意识到了隔震技术对核电厂的巨大优越性。1999年,谷方毓等<sup>[5]</sup>对核电厂用隔震垫进行了性能试验,并且用有限元分析证明了隔震响应是不隔震地震响应的1/5~1/4。2012年,谢礼立等<sup>[6]</sup>对隔震技术在核电工程领域的应用作了系统的总结与介绍,指出了该技术可以改进核电工程的安全性和可靠性,并促进核电厂的标准化设计,同时也指出了在我国推广基础隔震技术仍需解决质量保证和规范空白等重要问题。

但是传统的隔震技术一般不考虑结构的竖向隔震,而竖向地震通常在10~20Hz的频率范围,引起核电厂设备的共振,为了降低竖向地震对核电厂结构、特别是对核电设备的损伤,三维隔震的概念被引入到核电厂抗震设计中。

本文设计了一套核电厂三维基础隔震系统,其中包括厚层橡胶隔震支座和油阻尼器。厚层橡胶隔震支座能显著降低结构的竖向频率,从而避开设备频率。油阻尼器为结构提供水平向附加阻尼,能够有效抑制上部结构的加速度响应。首先建立了核电厂三维隔震简化模型,通过参数分析研究了合理的隔震层参数选取,基于参数分析结果设计了厚层橡胶隔震支座和油阻尼器等装置,并通过试验检测了其力学性能,最后进行了1/15缩比模型的振动台试验,结果表明该三维隔震系统有良好的隔震效果。

## 1 简化模型参数分析

为了合理选取隔震层参数,本文建立了核电厂三维隔震结构的简化模型。其上部结构简化为质点-弹性杆-基础底板模型,隔震层简化为水平和竖向的弹簧-阻尼器模型,如图1所示。上部结构模型参数按某真实核电厂选取:弹性杆高度为27.5m,上部结构质量 $8.95 \times 10^7 \text{ kg}$ ,基础底板质量 $3.61 \times 10^7 \text{ kg}$ ,结构基本周期0.2s。本文采用20条近场地震动记录<sup>[7]</sup>(Somerville, 1999)进行时程分析,模型的竖向周期变化范围为0.05~4s,竖向阻尼比变化范围为2%~30%。模型顶部质点的位移、速度和绝对加速度的最大响应如图2所示。由图2可得以下结论:①当竖向周期由0.3s变化到2s时,位移和速度峰值响应急剧增加,但是以往研究<sup>[8]</sup>表明,当竖向周期大于1s时,摇摆振型将占主导地位,因此竖向周期宜小于1s;②增大结构阻尼比可以有效抑制顶点峰值加速度响应,因此隔震层需设置合理的附加阻尼比。

## 2 三维隔震装置介绍

三维隔震装置包括厚层橡胶隔震支座和油阻尼器。

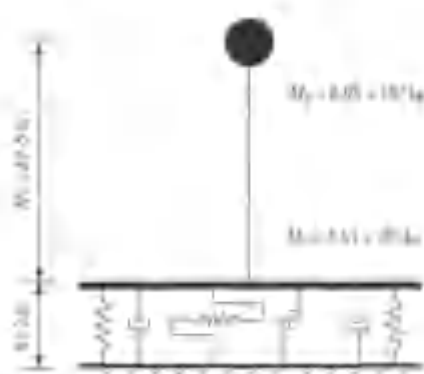


图1 核电厂三维隔震简化模型

Fig.1 Simplified NPP model

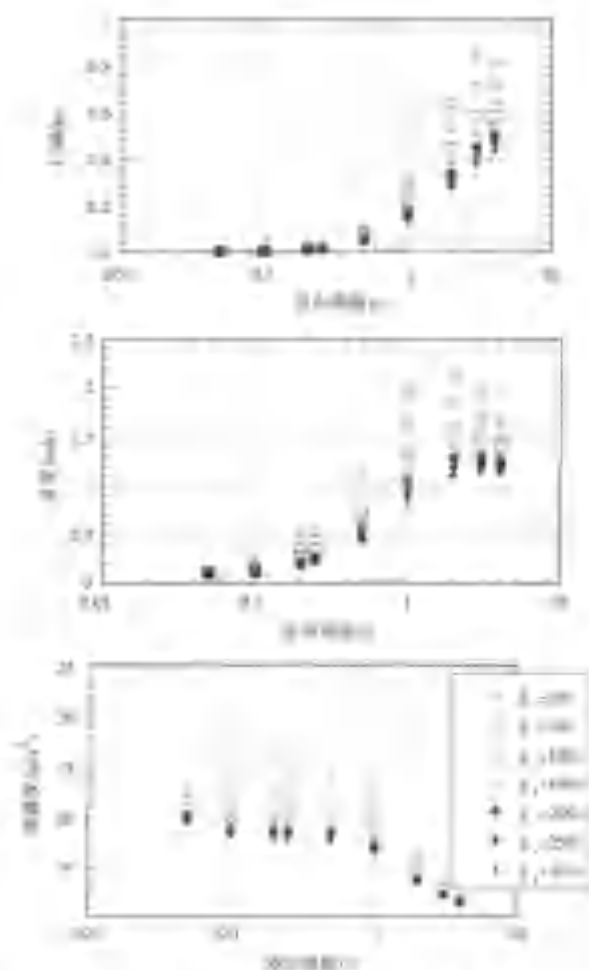


图2 简化模型顶点峰值响应

Fig.2 Seismic responses of simplified NPP model

厚层橡胶隔震支座在水平和竖向起到隔震作用;油阻尼器在水平方向提供阻尼,减小结构地震响应。

厚层橡胶隔震支座设计参数如图3和表1所示,设计剪切刚度和抗压刚度分别为0.221kN/mm和20.59kN/mm。需要注意的是,厚层橡胶隔震支座形状系数都显著小于普通橡胶隔震支座(普通隔震支座

第一形状系数  $S_1$  大于 15, 第二形状系数  $S_2$  大于 5)。

参考规范《建筑隔震橡胶支座》JG 118—2000<sup>[9]</sup> 对厚层橡胶隔震支座进行了力学性能检测, 包括隔震支座竖向刚度、水平剪切刚度以及竖向极限压应力。检测竖向刚度时, 首先分别对试样施加 75kN、150kN、200kN 和 300kN 轴向荷载, 然后以轴向荷载的 30% 为变化幅度做循环加载, 结果如图 4(a) 所示。检测水平剪切刚度时, 在竖向分别施加 75kN、150kN 的竖向轴压, 并在每个轴压下分别以 50%、100% 和 180% 为剪切变形幅值进行正弦波加载, 结果如图 4(b) 所示。试验证明, 厚层橡胶隔震支座力学性能稳定, 基本满足设计要求。检测竖向极限承载力时, 首先对隔震支座施加 55% 有效直径的水平位移, 保持此水平位移不变, 再竖向施加逐级增大的荷载, 直至支座外观发生明显变化, 由此测得厚橡胶支座竖向极限承载力, 最终在竖向荷载达到 700kN 时, 隔震支座外观发生明显异常, 隔震支座的极限压应力为 14.6MPa。由此可以知道, 隔震支座在大变形下仍然具有很大的稳定性。

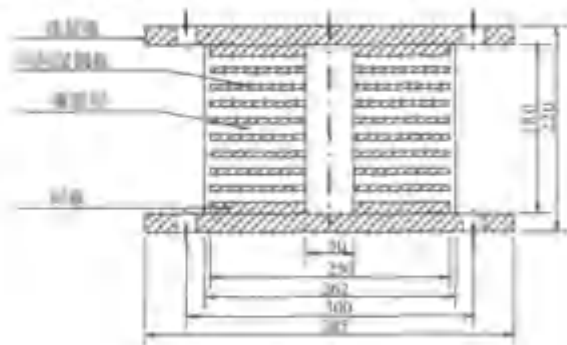


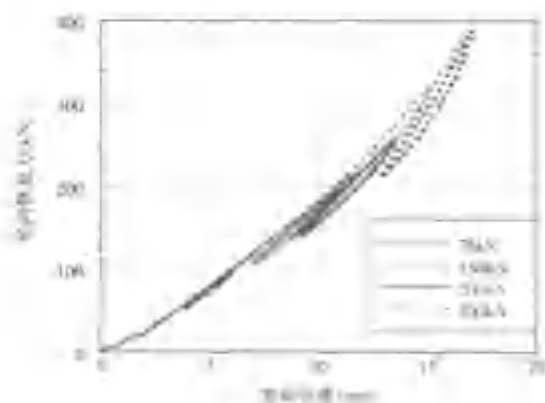
图 3 厚层橡胶隔震支座设计图

Fig. 3 Configuration of thick rubber bearing

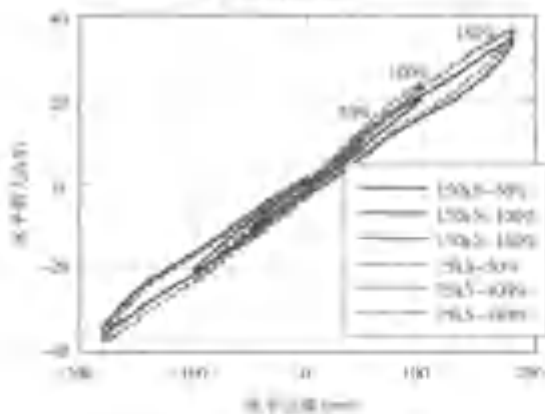
表 1 隔震支座设计参数表

Table 1 Parameter of scaled thick rubber isolator

橡胶	剪切模量( $G$ )	0.5MPa
	杨氏模量( $E_0$ )	2070MPa
	体积模量( $E_v$ )	1.42MPa
橡胶层	厚度	12mm
	数量	9
内部钢板	厚度	6mm
	数量	8
支座有效直径		250mm
设计应力		6.37MPa
第一形状系数( $S_1$ )		4.2
第二形状系数( $S_2$ )		2.3



(a) 竖向刚度检测



(b) 水平剪切刚度检测

图 4 滞回曲线

Fig. 4 Hysteretic curves

### 3 振动台试验

#### 3.1 振动台试验模型

本文使用的原型结构为预应力混凝土安全壳, 总重  $3.98 \times 10^7 \text{ kg}$ , 安全壳高 62.5m, 外径 37.8m, 筒体厚度 0.9m。采用欠质量模型, 并忽略应力的相似关系。时间相似比和位移相似比分别为 0.1814 和 1/15。共制作了 3 种缩比模型, 传统隔震模型, 三维隔震模型以及非隔震模型。其中传统隔震模型的隔震层由水平隔震支座及油阻尼器组成, 三维隔震模型隔震层则由厚层橡胶支座和油阻尼器构成。通过使用隔震装置的试验, 计算得到各个模型主要频率的理论值, 如表 2 所示。

表 2 模型主要频率表

Table 2 Theoretical frequency (Hz)

非隔震模型	传统隔震模型		三维隔震模型	
	水平方向	竖直方向	水平方向	竖直方向
基频	30.3	1.2	33.3	1.2
				12.3

### 3.2 数值模型

本文采用通用有限元计算软件 SAP2000 建立了缩比模型的数值模型。隔震支座采用线性 Link 单元进行模拟,油阻尼器则采用 Damper 单元模拟其非线性行为。隔震支座使用的水平刚度为剪切变形为 100% 时的试验值,竖向刚度为轴压 75kN 下的试验值。

### 3.3 地震波选取

振动台试验共采用 4 条典型地震波,分别是 El-Centro, Shin-Tokai, Chiuchi, Fuzhi, 其中 Shin-Tokai 是东海大地震的地震动记录。4 条地震波的反应谱如图 5 所示。水平方向地震动幅值分别为 75gal, 150gal 和 300gal, 且竖直方向幅值为水平方向的 2/3。地震动激励在水平方向和竖直方向分别加载,在加载时地震动幅值按照相似比进行调整。

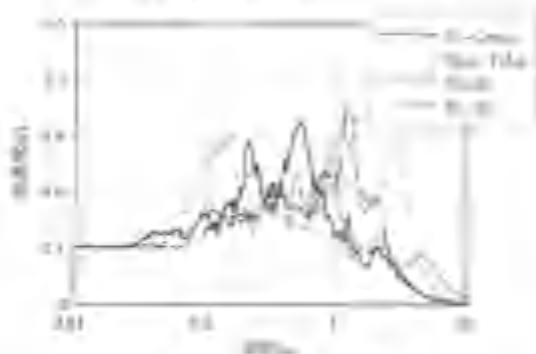


图 5 地震波加速度反应谱

Fig. 5 Acceleration response spectrum

### 3.4 振动台试验结果

振动台试验以结构响应的加速度和隔震层位移作为检验隔震效果的参数。为此,在安全壳顶部安装水平和竖直方向的加速度传感器,并在安全壳底板上也设置两个方向的位移传感器,如图 6 所示。采用上文中所描述的 4 条地震波进行加载,由于篇幅限制,仅给出 El-Centro 地震波的试验结果。



图 6 振动台试验测量示意图

Fig. 6 Layout of sensors

首先,以非隔震结构的地震响应为基准,得到两种隔震结构的加速度归一化对比图,如图 7 所示。三维隔震模型的结构水平响应加速度与传统隔震模型的相近,且二者相比于非隔震模型减幅均大于 50%,且不会随地震动激励幅值的增加而发生明显变化。由此可以说明,三维隔震模型在水平方向上具有与传统隔震模型一样的减震效果。在竖直方向上,由于传统隔震模型的竖向刚度与非隔震模型接近,所以其响应比值约为 1。而对于三维隔震模型,由于其竖向刚度降低,模型结构竖向频率向地震动卓越频率移动,故竖向结构加速度响应被放大,约 3 倍左右。虽然竖向加速度响应的放大对于结构是不利的,但是其竖向频率的改变对设备的隔震却是有益的。

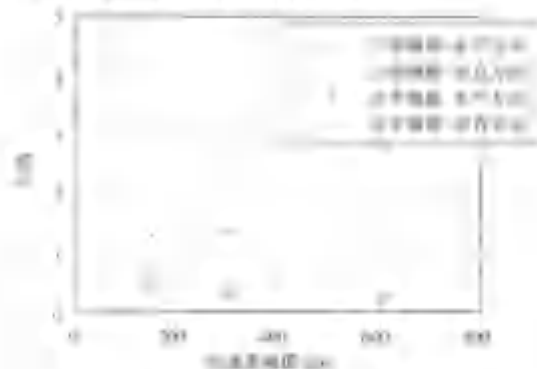


图 7 结构响应加速度归一化对比图

Fig. 7 Comparison of structural response

由于振动台能力的限制,部分工况将采用数值模拟计算结果。通过对比三维隔震模型的数值模拟和振动台试验结果,可以说明数值模拟的结果是可靠的。为了说明三维隔震结构可以有效对设备和管道进行隔震,绘制了各个模型顶点加速度的楼层响应谱,如图 8 所示。通过观察图 8(a) 可以知道,相比于非隔震结构,传统隔震模型和三维隔震模型的楼层水平响应谱均向低频(约为 1Hz)移动,很好地避开了地震动的卓越频率(对应模型结构,地震卓越频率约为 15Hz)。图 8(b) 则说明三维隔震结构可以实现对设备和管道竖向隔震。因为传统隔震模型具有和非隔震模型相近的竖向刚度,其竖向频率恰好落在了结构内部设备和管道的主要频率范围内,这对于核电站内部设备和管道是非常不利的。与此同时,由于三维隔震结构采用了厚层橡胶隔震支座,模型结构竖向频率(约 30Hz)向低频(约 10Hz)移动,避开了设备和管道的主要频率范围(对应缩比模型,约 50Hz 左右),因而具备实现设备和管道竖向隔震能力。

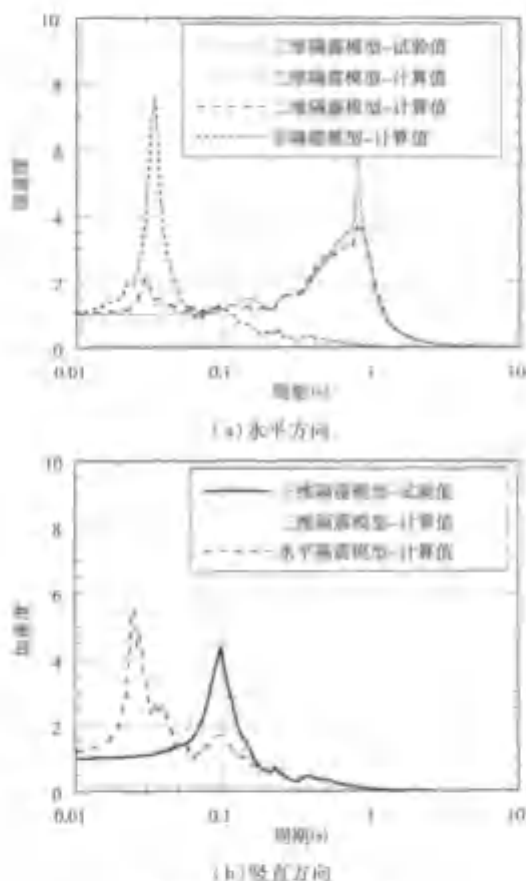


图8 楼层归一化响应谱

Fig. 8 Floor response spectrum

## 4 结论

(1) 在水平方向,三维隔震系统与传统隔震系统具有相同的隔震效果,可以有效降低结构的水平地震作用;在竖直方向,三维隔震系统的结构响应虽然被放大,但是可以对核电厂内部重要设备与管道的进行竖向隔震。

(2) 对于各种地震动幅值,三维隔震系统具有较

为稳定的振动特性,保证了各种地震幅值作用下的隔震效果,提高了核电厂结构在不同设防烈度下的抗震能力。

## 参考文献

- [1] Coladant C. Seismic isolation of nuclear power plants-EDF's philosophy [J]. Nuclear Engineering and Design, 1991, 127: 243-251
- [2] 原子力发电所免震构造设计技术指针 [S]. 2000 (JEAG-4614 Design specifications of base isolation technology of nuclear power plant [S]. 2000 (in Japanese))
- [3] Martelli A, Formi M, Bergamo G, et al. Proposal for design guidelines for isolated nuclear facilities [C]//13th SMIRT. Italy, 1995
- [4] Tajirian F F, Kelly M J, Glueckler E L. Testing of seismic isolation bearings for the PRISM advanced liquid metal reactor under extreme loads [C]//10th SMIRT. CA, USA, 1989
- [5] Sun L, Gu F Y. A primary study of base isolation technology in NPP [C]//15th SMIRT. Korea, 1999
- [6] 谢礼立, 崔长海. 核电工程应用隔震技术的可行性探讨 [J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(1): 1-10 (Xie Lili, Zhai Changhai. A prospective study on applicability of base isolation in nuclear power plants [J]. Journal of Earthquake Engineering and Earthquake Vibration, 2012, 32(1): 1-10 (in Chinese))
- [7] Somerville P. Development of ground motion time histories for phase 2 of the FEMA/SAC steel project [R]. SAC Background Document, 1999
- [8] Wang T, Wang F. Three-dimensional base-isolation system using thick rubber bearings [C]//Smart Structures, SPIE Conference. San Diego, CA, USA, 2012
- [9] JG 118—2000 建筑隔震橡胶支座 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2000 (JG 118—2000 Rubber isolation bearings for buildings [S]. Beijing: China Standard Press, 2000 (in Chinese))

王 涛(1980-),男,博士,副研究员。主要从事结构抗震与消能减震技术研究。

王 飞(1980-),男,硕士研究生。主要从事结构抗震与消能减震技术研究。

丁路通(1980-),男,硕士研究生。主要从事结构抗震与消能减震技术研究。