

文章编号 : 1000-4750(2014)10-0062-07

核电厂隔震结构的振动台试验研究

王 涛¹, 王 飞¹, 侯钢领², 丁路通¹

(1. 中国地震局工程力学研究所, 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 哈尔滨 150080;
2. 哈尔滨工程大学航天与建筑工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 将基础隔震技术应用于核电厂的设计和建造, 不仅可以实现上部结构和内部设备、管道的标准化设计, 缩短设计和建造周期, 提高核电厂建设的经济性, 而且可以提高结构的抗震裕度, 有效抵抗超过设防烈度的地震动。为此, 该文分别采用传统橡胶隔震支座和厚层橡胶隔震支座, 制作传统水平基础隔震模型和三维基础隔震模型, 结合油阻尼器控制核电厂结构的地震响应。通过振动台试验和数值模拟, 对比了隔震模型和非隔震模型在时域和频域的地震响应。研究表明, 在水平方向, 两种隔震结构的水平加速度相对于非隔震结构均可以降低约 50%; 在竖直方向, 三维隔震结构的楼层反应谱峰值向低频 2Hz~3Hz 移动, 避开了设备和管道的主频率范围 10Hz~20Hz, 即可以实现设备和管道的竖向隔震。同时, 试验和分析均证明对隔震层附加约为 15% 的水平阻尼比, 可以有效降低结构的地震响应, 并使水平楼层反应谱峰值减小约 50%。

关键词: 基础隔震; 橡胶隔震支座; 核电厂; 振动台试验; 楼层反应谱

中图分类号: TU271.5 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.03.0256

SHAKING TABLE TESTS ON BASE-ISOLATED NUCLEAR POWER PLANT

WANG Tao¹, WANG Fei¹, HOU Gang-ling², DING Lu-tong¹

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin, 150080 China;
2. College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Base isolation technique is able to standardize the seismic design of nuclear power plants, shorten design and construction period and improve economic benefits. Moreover, it provides nuclear power plants a larger seismic margin to protect structures and facilities from potential huge earthquakes. Two types of rubber-based isolators, namely traditional horizontal isolators and three-dimensional isolators, were employed to design and construct shaking table models of base-isolated nuclear power plants, together with oil dampers installed in the base isolation layer. Through the shaking table tests and numerical simulations, the response comparison in both time-domain and frequency-domain reveals that the peak of horizontal acceleration is suppressed by 50% for both isolated models than the one without isolation; the dominated frequency of three-dimensionally base-isolated model shifts to lower frequency of 2Hz~3Hz, thus avoiding the resonant of facilities and pipes with dominant frequencies ranging from 10 to 20Hz. Meanwhile, both experiment and calculation verify that 15% additional horizontal damping to the isolation layer is able to effectively suppress the structural response, and reduce the peak of horizontal floor spectrum by about 50%.

Key words: base isolation; rubber bearing; nuclear power plant; shaking table test; floor spectrum

收稿日期: 2013-03-25; 修改日期: 2013-08-25

基金项目: 地震行业科研专项经费项目(201208013); 中央级公益性研究所基本科研业务费专项项目(2010B04); 国家自然科学基金项目(51008287)

通讯作者: 王 涛(1977), 男, 山东人, 研究员, 博士, 从事结构抗震领域研究(E-mail: wangtao2004@gmail.com).

作者简介: 王 飞(1988), 男, 甘肃人, 硕士生, 从事结构抗震领域研究(E-mail: wangfei0330@gmail.com);

侯钢领(1973), 男, 陕西人, 副教授, 博士, 从事结构抗震领域研究(E-mail: hhgl@sina.com);

丁路通(1988), 男, 新疆人, 硕士生, 从事结构抗震领域研究(E-mail: dinglutong@163.com).

地震及其次生灾害会对核电厂的正常运行和安全产生重大的影响，同时也可能引发严重的环境问题和经济损失。在以往的核安全事件中，尽管大多数核电机组能够在地震中做到安全停堆，核安全事件处于人为控制的范围内，但仍然可能造成巨大的经济损失。例如，2007年7月16日，日本新泻县柏崎市沿海地区发生里氏6.8级地震及多次低于6级的余震，刈羽核电站距离震中16km。此次地震强度超过了核电站安全设计基准规定的6.5级，引发多起核电站安全事件。虽然刈羽核电站的4个反应堆在地震中自动安全停堆，但是由于核电站的关闭，东京电力公司声明经济损失约57.9亿美元^[1]。

为此，核电厂的建造设计中，不仅仅需要选择和开发合理的核电建设技术，提高核电厂的抗震能力以保证核电站运行的安全性和可靠性；同时也应将性能设计方法引入到核电厂的设计当中，考虑设备和管道的抗震性能需求，尽可能地减小其因地震产生的损伤和破坏。将已经成功应用于民用建筑的基础隔震技术引入到核电厂的建设具有巨大的优势。其一，引入隔震技术使得上部结构对地震动的敏感性降低，同样的上部结构设计可以在一定程度下满足不同的地震动设计指标，从而可实现核电厂的标准化设计，缩短设计和建造周期，提高核电厂建设的经济性。其二，能够很大程度地降低上部结构、设备以及管道的地震响应，减小经济损失，并对其进行性能设计。最后，由于隔震层能够有效地抵抗超过设防烈度的地震动，可以进一步提高核电厂的抗震裕度^[2]。

目前在世界范围内共有六座投入运营的隔震压水堆，法国有四座，南非有两座，均采用橡胶支座和金属滑动支座的组合体，安全停堆地震动加速度峰值分别为0.2g和0.3g。这些反应堆均建于20世纪70年代，现已发现两种支座的耐久性均不能达到规范要求^[3]。日本在20世纪80年代末展开了为期15年的研究项目，评估隔震技术应用于核电设备的可能性。2000年日本电气协会原子能委员会发表了适用于快速增殖堆和轻水堆的隔震体系设计指南^[4]，系统研究了隔震核电厂的设计方法、隔震器材的检测和维护标准。20世纪90年代，美国西屋公司尝试着将隔震系统应用到AP600反应堆上^[3]，主要考虑该反应堆的标准化设计，以满足日本高烈度区(设计地震动加速度峰值大于

0.3g)的需求。竖向地震激励在常规核电厂的设计中是个重要的因素，采用整体隔震技术可以将水平和竖向隔震一体考虑。美国能源部在建设新型增殖实验堆 SAFR 的时候采用了整体竖向隔震技术^[5]，反应堆厂房的竖向频率能控制在3Hz~5Hz。尽管有了这些研究，决策机构仍然对隔震技术在核电领域的应用感到信心不足。美国 NRC 指出“核电厂隔震技术的应用需要广泛深入的研究，解决诸如隔震垫长期性能、安装前后的检测和试验、充足的隔震间隔等问题^[6]。”

本文为核电厂反应堆厂房基础隔震技术的试验研究，重点研究了采用两种不同的隔震支座的隔震系统在不同地震动激励下的动力响应特征，并对其隔震效果进行了评价。本文首先分别采用传统橡胶隔震支座和厚层橡胶隔震支座，制作了反应堆厂房的水平基础隔震模型和三维基础隔震模型，并组合使用油阻尼器控制地震响应。然后通过振动台试验和数值模拟，对比水平隔震模型、三维隔震模型和非隔震模型的地震响应，验证了基础隔震技术在应用于核电厂设计和建造方面的巨大优势。

1 核电厂隔震体系

本文的核电厂隔震体系采用反应堆厂房整体基础隔震技术，隔震层包括橡胶支座和油阻尼器，如图1所示。以往研究^[7]表明：1) 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。

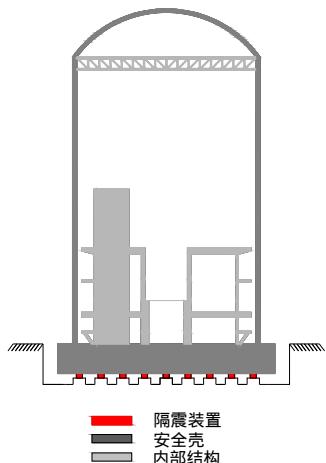


图1 反应堆厂房整体基础隔震示意图

Fig.1 Base isolated nuclear power plant

本文研究的隔震体系按照橡胶隔震支座的类型，分为水平隔震体系和三维隔震体系，分别采用传统橡胶支座和厚层橡胶支座。传统橡胶支座具有较小的水平刚度和较大的竖向刚度。而厚层橡胶支座的单层橡胶层厚度增大，既有较小的水平刚度，竖向刚度也比传统水平橡胶支座小很多。因此，三维隔震体系不仅可以和水平隔震体系一样实现结构的水平向隔震，而且在一定频域内可以实现内部重要设备和管道的竖向隔震。在应用时，由于橡胶支座基本不具有耗能能力，一般需要组合使用具有阻尼特性的装置，本研究采用油阻尼器，利用流体的紊流阻抗吸收地震能量。

2 振动台试验

2.1 相似比

本研究仅关注隔震结构与非隔震结构的位移、速度和加速度响应，安全壳一般具有足够的抗震安全储备^[8]，其受力状态及破坏不作为本文的研究重点。事实上，安全壳结构为弹性设计，在安全停堆地震动下严格保持弹性，因此相似律关系中不考虑结构的应力相似比，采用欠质量模型进行振动台试验。

模型的相似律^[9]计算如下所述。模型质量 m_m 与原型质量 m_p 、几何相似比 l_r 以及密度相似比 ρ_r 之间的关系为：

$$m_m = m_p l_r^3 \rho_r \quad (1)$$

考虑模型的部分人工质量 m'_a ，计算得到模型的等效密度相似比 $\bar{\rho}_r$ ：

$$\bar{\rho}_r = \frac{m_m + m'_a}{l_r^3 m_p} \quad (2)$$

模型的频率相似比 ω_r ：

$$\omega_r = \sqrt{E_r / \bar{\rho}_r} / l_r \quad (3)$$

其中， E_r 弹性模量的相似比，为已知量。

模型的加速度相似比 a_r ：

$$a_r = E_r / (l_r \bar{\rho}_r) \quad (4)$$

模型时间相似比 t_r ：

$$t_r = l_r \sqrt{\bar{\rho}_r / E_r} \quad (5)$$

本模型的相似比的取值如表 1 所示。

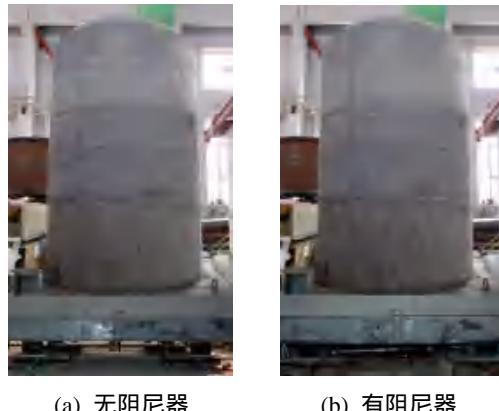
表 1 模型相似律

Table 1 Similitude law

时间 t_r	0.1814	频率 ω_r	5.5138
位移 l_r	0.0667	力 f_r	0.0009
速度 v_r	0.3676	阻尼 c_r	0.0024
加速度 a_r	2.0268	应力 σ_r	0.2000

2.2 试验模型介绍

安全壳原型结构为某一钢筋混凝土预应力结构，原型质量 m_p 为 39825t，筒体混凝土为 C40，弹性模量 $E_p=3.25 \times 10^4$ MPa，密度 $\rho_p=2.4 \times 10^3$ kg/m³。安全壳模型的几何相似比 l_r 为 1/15，采用微粒混凝土制作，其强度为 M2.5，弹性模量 $E_m=6.5 \times 10^4$ MPa，密度 $\rho_m=2.3 \times 10^3$ kg/m³，试验模型如图 2 所示。



(a) 无阻尼器 (b) 有阻尼器

图 2 基础隔震模型

Fig.2 Base-isolated shaking table models

对于水平隔震模型、三维隔震模型以及非隔震模型，应用 ARMA 时域模态识别方法^[10]，使用白噪声的数据进行模态参数识别，得到结构的主要频率，并与理论计算值进行对比，如表 2 所示。需要注意的是，由于振动台的高频能力不足，且采用单输入多输出的模态识别方法，15Hz 以上高频识别失真较为严重，如表中斜体所示，因此模型主要频率应以计算值为准。括号中的数值对应相应的原型结构，且后文中无特殊说明均为原型结构数值。

表 2 模型主要频率表
Table 2 Main frequency of model /Hz

	非隔震模型基频	水平隔震模型		三维隔震模型	
		水平向	竖向	水方向	竖向
计算值	30.3(5.5)	1.2(0.2)	33.3(6.0)	1.2(0.2)	12.3(2.2)
模态识别	18.2(3.3)	1.4(0.3)	22.1(4.0)	1.4(0.3)	11.9(2.2)

2.3 隔震装置介绍

本文采用的隔震装置为传统橡胶支座和厚层橡胶支座，由夹层钢板和橡胶片叠合而成，如图 3 所示。

按照《JG 118-2000 建筑隔震橡胶支座》^[11]中的规定，对两种隔震支座的力学性能进行了检测，其结果如表 3 所示。其中，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，该轴压接近于隔震支座在振动台试验中的实际轴压。需要注意的是，

《CECS126-2001 叠层橡胶支座隔震技术规程》^[12]中规定：在一般情况下，第一形状系数 S_1 不宜小于 15，第二形状系数 S_2 不宜小于 5。本文中的厚层橡胶隔震支座的第一形状系数明显小于传统橡胶隔震支座，并小于规范中的规定值。两种橡胶支座的第二形状系数均小于规范中的建议值，这是由本研究中隔震支座的竖向承载力和水平刚度决定的。试验证明两种隔震支座在水平位移为支座内部橡胶直径 0.55 倍状态时的极限压应力均大于 10MPa，具有良好的稳定性。

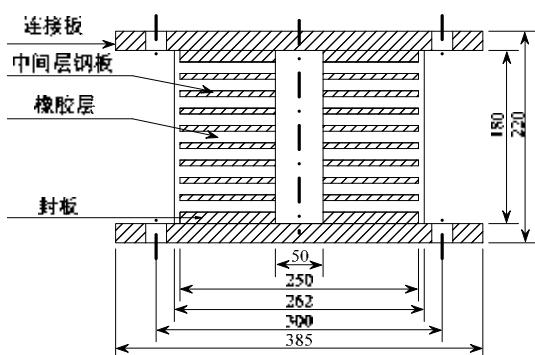


图 3 隔震支座设计图 /mm
Fig.3 Rubber-based isolators

表 3 隔震支座力学性能
Table 3 Mechanical property of rubber isolator

	传统橡胶支座	厚层橡胶支座
剪切刚度/(kN/mm)	0.229	0.245
压缩刚度/(kN/mm)	260.5	25.34
极限压应力 σ (MPa)	20.1	14.6
第一形状系数(S_1)	22.1	4.2
第二形状系数(S_2)	2.3	2.3

2.4 振动台简介

本次振动台试验在中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动实验室进行。该振动台最大荷重为 30t，最大倾覆力矩为 75t·m。满荷时最大加速度在水平 x, y 方向为 $1g$ 在竖直 z 方向为 $0.7g$ 。最大速度单向振动时为 60cm/s，三向振动时为 30cm/s。最大位移在 x 和 y 方向为 $\pm 8\text{cm}$ ，在 z 方向为 $\pm 5\text{cm}$ 。振动台的工作频率范围为 0.5Hz~40Hz。

2.5 数值模型

本文同时采用通用有限元计算软件 SAP2000 建立了缩比模型的数值模型，与振动台试验结果进行分析对比，数值模型如图 4 所示，模型的初始阻尼比为 5%。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，阻尼器的具体性能参考文献[13]。

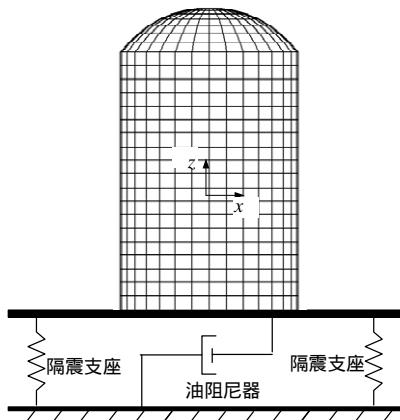


图 4 数值模型示意图

Fig.4 Numerical model

2.6 加载制度

共采用了 4 条地震动，分别为 El-Centro、Chichi、Fn-Tkt 和 Shin-Tokai 地震动。其中 Chichi 来自台湾集集地震(M7.1, 1999)，Shin-Tokai 地震动是根据日本东海大地震(M9.0, 2011)推断的人工地震动，均具备较为显著的低频成分。Fn-Tkt 为日本神户地震(M6.9, 1995)中 JR 鹰取站记录到的垂直于断层的地震动。选取地震动的加速度反应谱与《核电厂抗震设计规范》^[14]的标准设计反应谱的对比如图 5 所示。这些反应谱对应的地震动加速度幅值为 300gal，采用的阻尼比均为 5%。从图 5 可以看出，El-Centro 地震动基本在设计反应谱的包围内，而其余三条地震动在小于 0.5Hz 的低频范围内均大于设计反应谱，对隔震结构不利，因此利用这些地震动对振动台模型进行振动测试评估得到的结果偏于保守。

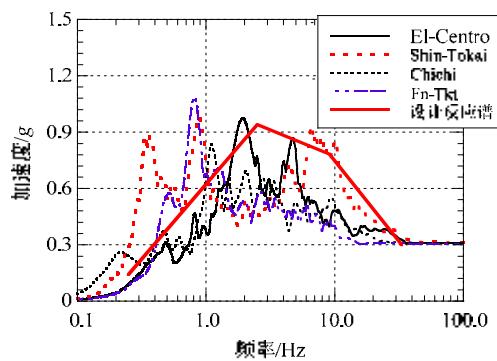


图 5 水平方向反应谱

Fig.5 Horizontal response spectrum

此次振动台进行的全部试验工况如表 4 所示。加载分为水平方向和竖直方向，其中竖直方向的加载幅值为水平方向的 2/3。对应原型结构的输入地震动加速度峰值 75gal，采用四种地震动进行加载，

以考虑地震动类型的变化，即具有不同频谱特性的地震动对隔震结构的地震作用不同。然后，采用 El-Centro 和 Shin-Tokai 地震动，变换地震动幅值来检验隔震装置的工作性能。地震动加速度幅值依次选取为 75gal、150gal、300gal。其中前两个幅值分别对应我国《核电厂抗震设计规范》规定的运行安全地震动和极限安全地震动，300gal 为第三代核电站 AP1000 的安全停堆地震动。对于三维隔震模型和水平隔震模型均通过油阻尼器为隔震层添加水平方向的附加阻尼比，以抑制结构的地震响应。

表 4 试验工况

Table 4 Test cases

试验模型	地震动类型	地震动加速度幅值	加载方向	附加阻尼
水平隔震模型	El-Centro	75gal	水平	有/无
三维隔震模型	Chichi	150gal	竖直	无
非隔震模型	Fn-Tkt	300gal		
	Shin-Tokai			

2.7 测量方案

试验数据采集系统最大采样频率为 1000Hz，试验中采用 200Hz 的采样频率，可以保证数据的完备性和精确性。测量内容主要为隔震层、安全壳的位移和加速度响应，传感器的布置如图 6 所示。

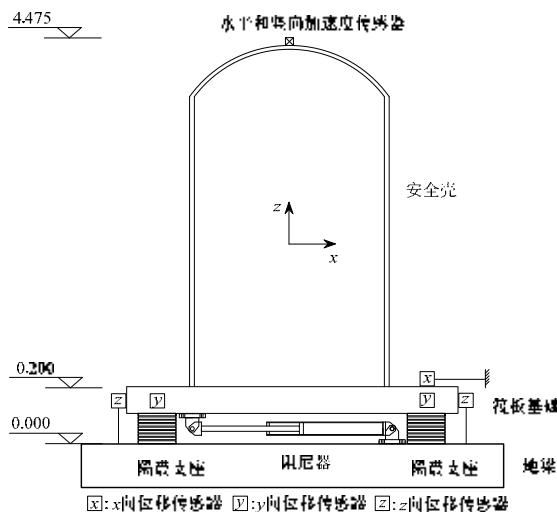


图 6 传感器布置图

Fig.6 Layout of sensors

为了测量模型的平动、扭转以及摇摆运动，共使用 8 个量程 $\pm 80\text{mm}$ 的位移传感器。其中，在筏板基础的侧面，沿 x 、 y 方向各安装 2 个水平位移传感器；在筏板基础的 4 个角部，沿 z 方向各安装 1 个竖向位移传感器。在安全壳顶部各安装了 1 个水平和竖向的加速度传感器以记录顶点的加速度时程，以此可以进一步计算获得安全壳顶点的楼层反应谱。

3 振动台试验结果与分析

3.1 地震动类型的影响

为了考察地震动类型变化的影响，采用上述四条地震动，针对无附加阻尼结构，施加 75gal 的地震激励，分别对比结构响应在时域和频域的差别。时域方面主要以安全壳顶点的加速度响应幅值作为研究对象，频域方面则采用楼层反应谱作为分析的手段。

首先，根据试验得到隔震结构和非隔震结构加速度峰值的比值，如表 5 所示。可以看到：在水平方向，对于 El-Centro 地震动和 Fn-Tkt 地震动，隔震结构的加速度显著减小，但是对于 Shin-Tokai 地震动和 Chichi 地震动，减小效果稍差。这是因为在隔震结构的基频 0.2Hz 左右，这两条波的成分更多，因而导致结构响应增大。在竖直方向，两种隔震结构的竖向加速度放大 2 倍左右，这是由于隔震结构的竖向频率远远小于非隔震结构，且向地震卓越频率接近，引起了结构的竖向共振。可见水平隔震技术虽然可以有效地降低结构的水平地震作用，但是却无法减小结构和设备的竖向地震作用，甚至还存在着一定的放大现象。而三维隔震技术将解决采用水平隔震技术所产生的设备和管道的竖向隔震问题，可以通过下面的楼层反应谱来说明。

表 5 不同地震动类型:隔震与非隔震结构的响应加速度比值

Table 5 Different ground motion type: the acceleration ratio of isolated model and model without using isolation technique

结构类型	El-Centro	Shin-Tokai	Chichi	Fn-Tkt	均值
水平方向	0.27	0.58	0.80	0.17	0.45
三维隔震	0.31	0.60	0.91	0.17	0.50
竖直方向	1.92	3.54	1.75	1.74	2.24
非隔震模型	2.59	1.57	1.77	1.02	1.74

根据三种模型的安全壳顶点的加速度时程记录，计算得到了 4 条地震动作用下安全壳在水平方向和竖直方向上的楼层反应谱，并按照相似比转换为对应于原型的试验结果，如图 7 和图 8 所示。本文仅给出 El-Centro 和 Shin-Tokai 地震动的楼层反应谱的试验与分析结果。图 7 和图 8 的 3D、2D 和 P 分别代表三维隔震结构、水平隔震结构和非隔震结构。由于振动台的能力限制，振动台激励中大于 30Hz 的高频成分均不可靠，因此采用数值模型补充。图 7、图 8 中隔震模型试验值与计算值比较吻合，证明数值模型是正确的，而非隔震结构的数值模型与隔震模型的上部结构相同。

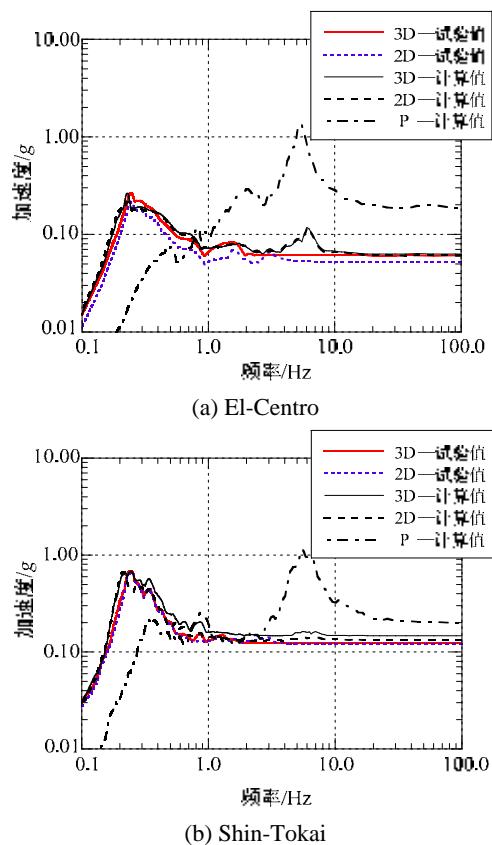


图 7 水平方向楼层加速度反应谱

Fig.7 Horizontal floor spectrum

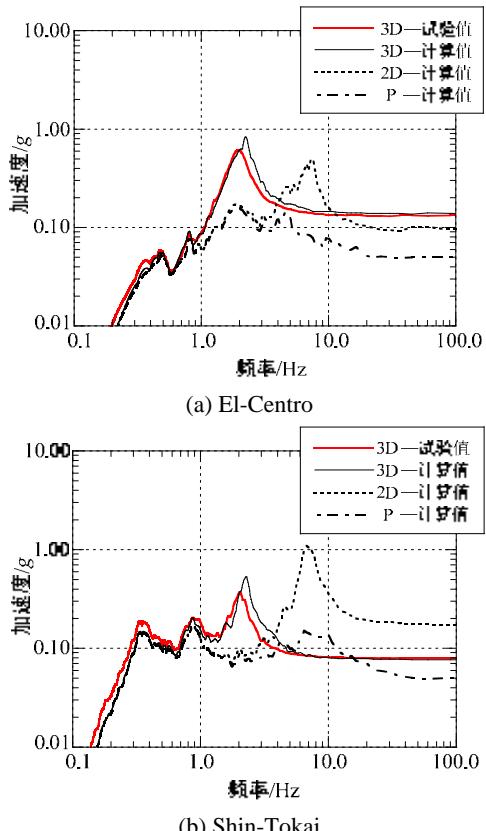


图 8 垂直方向楼层加速度反应谱

Fig.8 Vertical floor spectrum

在水平方向，两个隔震结构的楼层反应谱卓越频率向 0.2Hz~0.5Hz 移动，即隔震结构的固有频率。这对设备的抗震是非常有利的，因为卓越频率向低频转移，正好避开了设备运行的主要频率范围 10Hz~20Hz。并且经过水平隔震，相对于非隔震结构，楼层反应谱峰值降低约 2 倍~5 倍，减震效果明显。

在竖直方向，水平隔震结构的楼层反应谱的卓越频率恰好落在了设备和管道的主要频率范围内，这对设备和管道的隔震是非常不利的。但是三维隔震结构的楼层反应谱的卓越频率约为 2Hz~3Hz，进一步向低频移动，很好地解决了采用水平隔震技术产生的设备和管道的竖向隔震问题。

3.2 地震动幅值的影响

仍然对于上述两条地震动，分别计算不同地震动幅值下隔震模型与非隔震模型的加速度响应比值，如表 6 所示。对于无附加阻尼的隔震模型，随着地震动幅值的增大，甚至超越规范设计地震动水平，水平隔震模型和三维隔震模型都展现了非常稳定的力学行为，即隔震体系的线性性质保证了隔震效果不会随地震强度的改变而发生明显的变化。同时，楼层反应谱的幅值也随着地震动的增大体现了近似线性的变化，限于篇幅不再给出。

表 6 不同地震动幅值：隔震与非隔震模型
加速度响应比值

Table 6 Different ground motion amplitude: the acceleration ratio of isolated model and model without using isolation technique

水 地 震 动 幅 值	水平隔震模型		三维隔震模型	
	El-Centro	Shin-Tokai	El-Centro	Shin-Tokai
方 向	75	0.27	0.58	0.31
	150	0.24	0.56	0.25
	300	0.23	0.43	0.19

竖 地 震 动 幅 值	水平隔震模型		三维隔震模型	
	El-Centro	Shin-Tokai	El-Centro	Shin-Tokai
方 向	50	1.12	0.91	2.59
	100	1.17	0.99	2.46
	200	1.19	1.00	2.40

3.3 附加阻尼的影响

在加速度幅值为 300gal 的地震模拟作用下，通过 ARMA 模态识别，油阻尼器为隔震层添加了约 15% 的附加阻尼比。计算得到有附加阻尼结构和无附加阻尼结构的隔震层位移响应幅值的比值，见表 7。可以看到，附加阻尼有效地抑制了隔震层的位移响应。

通过试验和数值模拟，计算无阻尼和附加阻尼

的隔震模型楼层反应谱，并转换为原型，如图9所示。可以看到附加阻尼在一些频段内会放大楼层反应谱的数值，但是却很好地削减了楼层反应谱的峰值，降幅约为50%，起到了很好的抑制作用。

表7 阻尼的影响：位移比值

Table 7 Effect of damping: Ratio of displacement

	El-Centro	Shin-Tokai
水平隔震模型	0.70	0.47
三维隔震模型	0.67	0.42

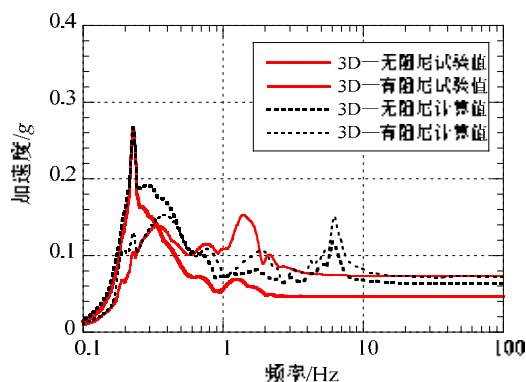


图9 附加阻尼比对水平方向楼层反应谱的影响
Fig.9 Horizontal floor spectrum affected by additional damping

4 结论和展望

研究发现：在水平方向，水平隔震系统与三维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，但是可以对核电厂房内部重要设备与管道进行竖向隔震。

同时得到以下主要结论：

(1) 时域方面：水平方向隔震时，结构水平加速度响应随地震动类型的不同而呈现出不同的变化规律。对于短周期成分较多的地震动(El-Centro 和 Fn-Tkt)，水平加速度降低到非隔震模型的20%~30%，对于长周期成分较多的地震动(Chichi 和 Shin-Tokai)，水平加速度降低不是很显著，降低效果不到50%。综合4条地震动来看，隔震结构水平方向加速度响应降低约50%。竖直方向隔震时，对于不同的地震动类型，结构响应加速度均存在着明显的放大现象，放大约2倍。

(2) 频域方面：对于不同的地震动类型，水平方向的隔震均可以有效地削减楼层反应谱的峰值，且峰值向低频0.2Hz~0.5Hz移动。对于竖直方向的隔震，竖向楼层反应谱的峰值无显著降低现象，但峰值向三维隔震结构的频率2Hz~3Hz移

动，避开了设备和管道的主要频率范围10Hz~20Hz，可以有效地实现设备和管道的竖向隔震。

(3) 对于不同地震动幅值，尤其是在水平极限地震动的2倍作用下，两种隔震结构均展现出稳定且良好的隔震效果，即保证了核电厂在不同大小的设防烈度下的抗震能力。

(4) 附加阻尼可以有效的抑制隔震结构的地震响应，同时可以有效地削减楼层反应谱的峰值，降低约为50%。

本研究通过模型振动台试验对比了两种隔震系统与非隔震系统在多种地震类型下的地震响应。由于篇幅限制，本文未包含隔震支座的力学性能检测试验，隔震支座的徐变特性、老化后刚度变化，以及抗辐射性能等也都需要深入细化的研究。另外关于核电厂隔震层合理的位移限值，本文也没有涉及。这些研究内容将在后续文章中进行论述。

参考文献：

- [1] 潘华, 李金臣, 吴迪忠. 2007年7月16日日本新泻地震对柏崎刈羽核电站的印象[J]. 国际地震动态, 2007, 11(347): 21~32.
Pan Hua, Li Jinchen, Wu Dizhong. The impacts on the Kashiwazaki-Kariwa nuclear power station due to the Niigata-ken Chuetsu-oki earthquake on 16 July 2007 [J]. Recent Developments in World Seismology, 2007, 11(347): 21~32. (in Chinese)
- [2] 谢礼立, 翟长海. 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)
- [3] Malusht R S, Whittaker S A. Survey of past base isolation applications in nuclear power plants and challenges to industry/regulatory acceptance [C]. Beijing, Transactions of the 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 18), 2005: 3404~3410.
- [4] 日本电气协会(JEAG), 原子力发电所免震构造设计技术指针 JEAG-4614[M]. 2000: 101~232.
Japan Electric Association, Technical design guidelines on base-isolated nuclear power plants, JEAG-4614 [M]. 2000: 101~232. (in Japanese)
- [5] Clark P W, Aiken I D, Kelly J M. Experimental testing of reduced-scale seismic isolation bearing for the Advanced Liquid Metal Reactor [C]. Proceeding of The First Research Coordination Meeting, San Petersburg, Russian Federation, 1996: 27~31.

(参考文献[6] [14]转第84页)

- 域分析[J]. 工程力学, 2007, 24(1): 123—128.
- Han Wanshui, Chen Airong. Time-domain buffeting analysis of cable-stayed bridge considering pylon wind field [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(1): 123—128. (in Chinese)
- [5] Ding Q S, Chen A R, Xiang H F. Coupled buffeting response analysis of long-span bridges by the CQC approach [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2002, 14(5): 505—520.
- [6] Scanlan R H. The action of flexible bridges under wind, II: Buffeting theory [J]. Journal of Sound and Vibration, 1978, 60(2): 201—211.
- [7] Deodatis G. Simulation of ergodic multivariate stochastic processes [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1996, 122(8): 778—787.
- [8] 李敏娜. 多塔斜拉桥抖振及风载内力分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [9] 中交公路规划设计院. JTGD62-01-2004, 公路桥梁抗风设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- CCCCC Highway Consultants Company. JTGD62-01-2004, Wind-resistant design specification for highway bridges [S]. Beijing: China Communication Press, 2004. (in Chinese)
- [10] Xu Y L, Sun D K, Ko J M, et al. Fully coupled buffeting analysis of Tsing Ma suspension bridge [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 85(1): 97—117.

(上接第 68 页)

- [6] Huang Y N, Whittaker A S, Constantinou C M, Malusht S. Seismic demands on secondary systems in base-isolated nuclear power plants [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2007, 36(12): 1741—1761.
- [7] Wang T, Wang F. Three-dimensional base-isolated system using thick rubber bearings [C]. SPIE Smart Structures and Materials and Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, International Society for Optics and Photonics, San Diego, US, 2012.
- [8] 段安, 钱稼茹. CNP1000 核电厂安全壳模型结构抗震安全分析[J]. 工程力学, 2009, 26(4): 153—157.
- Duan An, Qian Jiaru. Aseismic safety analysis of a containment vessel model for CNP1000 nuclear power plant [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(4): 153—157. (in Chinese)
- [9] 张敏政. 地震模拟实验中相似律应用的若干问题[J]. 地震工程与工程振动, 1997, 17(2): 52—58.
- Zhang Minzheng. Study on similitude laws for shaking table tests [J]. Journal of Earthquake Engineering and Earthquake Vibration, 1997, 17(2): 52—58. (in Chinese)
- [10] 王济. MATLAB 在振动信号处理中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版, 2006: 34—56.
- Wangji. Application of MATLAB in the processing of the vibration signal [M]. Beijing: China Water Power Press, 2006: 34—56. (in Chinese)
- [11] 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 Standards Publishing House, 2000. (in Chinese)
- [12] CECS 126-2001, 叠层橡胶支座隔震技术规程[S]. 北京: 中国工程建设标准化协会, 2001.
- CECS 126-2001, Technical specification for seismic-isolation with laminated rubber bearing isolators [S]. Beijing: China Association for Engineering Construction Standardization, 2001. (in Chinese)
- [13] Wang F, Wang T, Ding L T. Numerical and experimental study on seismic behavior of base-isolated nuclear power plant [C]. The 15 World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, 2012.
- [14] GB 50267-97, 核电厂抗震设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1997.
- GB 50267-97, Code for seismic design of nuclear power plants [S]. Beijing: China Planning Press, 1997. (in Chinese)