

多模块高温气冷堆核岛厂房隔震结构振动台试验

陈 岩¹ 周中一² 王友刚¹ 徐智凌² 张君鸿¹ 穆少雄¹ 王 涛²

(1. 中核能源科技有限公司, 北京 100193; 2. 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江哈尔滨, 150080)

摘要: 为研究多模块高温气冷堆核岛厂房基底隔震结构的抗震性能, 设计缩尺比为 1/20 的核岛厂房振动台试验模型, 分别进行抗震、摩擦摆支座隔震、橡胶支座隔震三种工况下的振动台试验, 对比分析不同工况下核岛厂房隔震结构的动力响应规律, 包括结构动力特性、加速度和位移响应、楼层反应谱等。试验结果表明: 采用隔震措施后, 结构自振周期明显延长, 隔震效果显著; 三向地震动输入时, 隔震上部结构的加速度放大系数在四层以上会突然增大, 这是由于结构中部 T 形墙高度仅至四五层之间, 结构在此处被削弱; 结构整体刚度较大, 抗震结构和隔震后上部结构的相对位移均较小, 基本处于平动; 隔震措施能明显减小核岛厂房结构在其自振频率处的水平向加速度反应谱峰值, 而在隔震频率处隔震模型加速度反应谱值有所增加; 在三向地震动输入下, 隔震模型的竖向楼层加速度谱较抗震结构的竖向加速度谱有明显放大。

关键词: 多模块高温气冷堆; 核岛厂房; 橡胶支座; 摩擦摆支座; 隔震; 楼层反应谱

中图分类号: TM623.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-131X(2023)01-0037-12

Shaking table tests on base-isolated nuclear island building of multi-module high temperature gas cooled reactor

Chen Yan¹ Zhou Zhongyi² Wang Yougang¹ Xu Zhiling² Zhang Junhong¹ Mu Shaoxiong¹ Wang Tao²

(1. Chinergy Co., Ltd., Beijing 100193, China;

2. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

Abstract: To study the seismic performance of the base-isolated structure of nuclear island plant with the multi-module high temperature gas-cooled reactor, a shaking table test model of the nuclear island plant with a scale ratio of 1/20 is designed. The shaking table tests are carried out under three working conditions: seismic, friction pendulum bearing isolation and rubber bearing isolation. The dynamic response laws of the based-isolated structure of the nuclear island plant under different working conditions are compared and analyzed, including structural dynamic characteristics, acceleration and displacement responses, floor response spectrum, etc. The test results show that the natural vibration period of the structure is significantly prolonged and the isolation effect is remarkable. When three-dimensional ground motion is input, the acceleration amplification factor of the isolated superstructure for those floors above the fourth floor may suddenly increase, being attributed to the that that the height of the T-shaped wall is located in between the fourth and the fifth floors, where the structure is weakened. The overall stiffness of the structure is large, and the relative displacement of the seismic structure and the superstructure after isolation is small, which is basically translational. The isolation measures can obviously reduce the peak value of the horizontal acceleration response spectrum of the nuclear island plant structure at its natural frequency, while the acceleration response spectrum of the isolation model increases at the isolation frequency. With the three-dimensional ground motion input, the vertical floor acceleration spectrum of the isolation model is significantly larger than that of seismic structure.

Keywords: multi-module high temperature gas cooled reactor; nuclear plant; rubber bearing; friction pendulum support; isolation; floor response spectrum

E-mail: zhouzy@iem.ac.cn

基金项目: 国家科技重大专项课题(2017ZX06902012)

作者简介: 陈岩, 博士研究生, 正高级工程师

通讯作者: 周中一, 博士, 副研究员

收稿日期: 2021-11-12

引言

反应堆厂房是核电厂中最重要的组成部分，厂房的结构安全对于核安全目标的实现有直接影响，因此，在运行周期内必须保证反应堆厂房在地震作用下的安全性。研究表明^[1]：基底隔震技术能有效提高核电厂的地震安全性。

近年来，国内外对隔震技术的研究渐渐趋于成熟，基底隔震技术可以减弱结构的地震响应，保护结构内部重要设施的安全，因此在核电厂设计中采用基底隔震技术是未来的趋势。国内学者王启文等^[2]通过对嘉峪关第一人民医院进行隔震设计和分析，显著提高了结构的安全性能和经济效益；张雷等^[3]通过对反应堆厂房进行基底隔震设计和地震反应分析，揭示了基底隔震技术能显著减小结构的水平地震响应；王涛等^[4]分别制作反应堆厂房的水平基础隔震和三维隔震结构模型，发现隔震结构在水平方向的加速度响应能减小到非隔震结构的50%。在国外，法国率先利用基底隔震技术建造了Cruas核电厂，在此基础上，提出了核电厂标准化设计^[5]；潘华等^[6]对柏崎刈羽核电站的分析也表明隔震技术能够提高结构的抗震裕度，对结构的安全性能实现有重大影响。

目前，国内外学者已对隔震支座及基底隔震技术开展大量的研究，刘文光等^[7]详细研究了中国现有橡胶隔震支座的基本性能，并与中国和日本颁布的相关标准进行比对；朱秀云等^[8]利用有限元软件对反应堆厂房进行抗震与隔震对比分析，研究表明，基底隔震技术对反应堆厂房在水平向的隔震效果显著；侯纲领等^[9]基于核电站双层安全壳的结构特点和技术要求，提出基础隔震-调频质量阻尼抗震新型结构，一定程度上结合两方的优点；李吉超等^[10]提出利用厚层橡胶支座进行隔震的方法，并对厚层橡胶支座的力学性能进行系统的试验研究，发现厚层橡胶支座与普通橡胶支座相比具有基本相同的剪切刚度和较小的竖向刚度。Zayas等^[11]在1987年提出一种由凹形滑动面和铰接滑块组成的摩擦摆系统(FPS)隔震装置；郑迦译等^[12]通过对摩擦摆隔震框架的振动台试验，发现摩擦摆具有良好的隔震能力，能显著降低层间位移以及楼层加速度；尚继英等^[13]采用摩擦摆隔震体系对某模块化建筑进行基础隔震设计与研究，研究表明：在罕遇地震作用下，隔震结构中仅发现少量梁铰，无柱铰出现，上部结构基本处于弹性，隔震效果显著。

我国规范对隔震设计的要求大多从橡胶隔震支座出发，较少考虑摩擦摆隔震支座与橡胶隔震支座设计时的不同。为此本项目针对某多模块高温气冷堆核岛厂房进行了1:20缩尺模型设计，通过在抗震、橡胶支座隔震、摩擦摆支座隔震工况下的振动台试验，对比研究了隔震前后、不同隔震方式下结构的动力特性、加速度和位移反应、楼层反应谱，对结构的抗震性能进行评估，为后续类似的核电厂设计提供依据。

1 振动台试验模型设计

1.1 核岛厂房原型概述

本项目研究的原型结构为某多模块反应堆厂房，反应堆厂房平面布置如图1所示。核岛厂房包括反应堆厂房、燃料厂房、电气厂房、安全厂房等，反应堆厂房包括安全壳结构和内部结构，本文的研究对象为反应堆厂房内部结构，共7层，层高约5m，底板厚2m，墙厚1m，楼板厚0.8m。反应堆厂房直径为47.4m，高45.8m，结构质量为66044.32t。墙体为双侧钢板混凝土结构，外周布置6个相同的圆形筒体，中心布置多边形剪力墙，圆筒之间为钢管混凝土柱；楼板为单侧钢板混凝土结构。为降低施工难度，缩短建造工期，钢板混凝土结构中的钢结构部分设计成模块，在施工现场外预制，再运输、吊装至施工现场就位，安装和组对后，最后浇筑混凝土。反应堆厂房内部结构见图2。

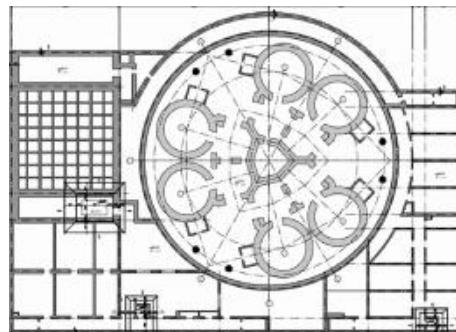


图1 反应堆厂房平面布置图

Fig. 1 Plan view of the plant

1.2 振动台试验模型简介

以上述多模块高温气冷堆核岛厂房为原型结构，按1/20的缩尺比进行模型设计，模型材料采用C35混凝土，承台材料采用C40混凝土，承台下设有0.01m厚的钢板。试验模型照片见图3，上部模型质量为6.57t，承台质量为6.831t，总质量13.4t。

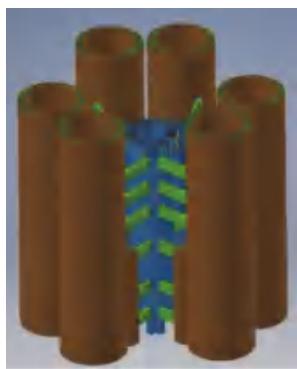


图 2 反应堆厂房内部结构竖向构件三维图

Fig. 2 A three-dimensional view of the vertical components of the internal structure of the reactor building



图 3 试验模型照片

Fig. 3 Photo of test model

1.3 相似比

小比例尺振动台试验模型材料选择的一般原则为小弹性模量、大密度，而且要求在弹塑性全过程保持近似，因而采用弹性模量较小的微粒混凝土材料，采用欠质量模型，原型结构与模型结构的设计频率如表 1 所示，计算相似比见表 2。

表 1 原型结构与模型结构的设计频率/Hz

Table 1 Design frequency of prototype

structure and model structure/Hz

| 频率 | 原型频率 | 模型频率 |
|------|------|-------|
| 一阶频率 | 3.54 | 25.51 |
| 二阶频率 | 3.56 | 25.52 |
| 竖向频率 | 4.50 | 26.30 |

按相似比计算得到的橡胶支座参数等效水平刚度太小，所需直径小，要满足这种参数，橡胶层总厚度得比较厚，实际不容易得到。因此设计时期望在宏观动力响应上达到一定的相似效果。

1.4 隔震方案

试验模型结构设置隔震支座体系，隔震层设置在基底与振动台之间，由于试验场地的限制，隔震支座

在结构外围对称布置。为了能够使结构达到期望的隔震目标，采取了橡胶支座和摩擦摆支座两种隔震方案。采用有限元软件对结构进行初步分析，分别选择 6 个直径 200mm 的铅芯橡胶支座（LRB 支座）和 6 个直径 70mm 的摩擦摆隔震支座（FPS 支座），两种隔震方案下结构周期均明显延长，隔震结构楼层加速度响应减小到抗震时的 1/6 左右。隔震支座平面布置图见图 4。

表 2 相似比

Table 2 Ratio of similitude

| 关键参数 | 相似比 |
|----------|-------|
| 长度、高度等尺寸 | 1/20 |
| 等效模量 | 0.4 |
| 等效密度 | 3.6 |
| 应力 | 0.4 |
| 时间、周期 | 0.15 |
| 变位 | 1/20 |
| 速度 | 0.33 |
| 加速度 | 2.22 |
| 频率 | 6.67 |
| 力 | 0.001 |
| 刚度 | 0.02 |
| 重力加速度 | 1 |

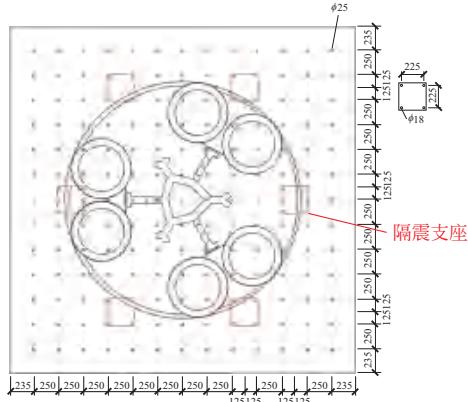


图 4 模型隔震支座布置

Fig. 4 Arrangement of isolation bearing model

200mm 铅芯橡胶支座见图 5, 支座参数见表 3。橡胶支座上下表面分别与模型底部和振动台台面采用螺栓连接。70mm 摩擦摆支座本构曲线见图 6, 支座见图 7。摩擦摆支座下表面与力传感器采用螺栓连接, 上表面与模型底部钢板进行焊接, 试验开始前将摩擦摆两侧固定板取下。



图 5 橡胶支座

Fig. 5 Rubber bearing

表3 橡胶隔震支座参数

Table 3 Parameters of rubber isolation bearing

| 参数 | LRB200 |
|--------------------|--------|
| 有效直径(mm) | 200 |
| 竖向刚度(kN/mm) | 440 |
| 屈服荷载(kN) | 4.0 |
| 100%屈服后刚度(kN/m) | 310 |
| 250%屈服后刚度(kN/m) | 278.44 |
| 100%等效水平刚度(kN/m) | 475 |
| 250%等效水平刚度(kN/m) | 345 |

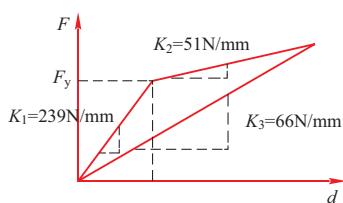


图6 摩擦摆双线性曲线

Fig. 6 Bilinear curve of friction pendulum



图7 摩擦摆支座

Fig. 7 Friction pendulum bearing

1.5 地震动输入

根据 RG1.60 改进型反应谱进行时程拟合, 得到单组三条(两个水平方向和一个竖直方向)相互正交、统计独立的人工时程曲线, 持时为 35s, 时间步长为 0.005s, 水平方向和竖直方向的加速度峰值分别为 $0.3g$ 和 $0.2g$ 。地震波时程曲线及相应的反应谱曲线见图 8。

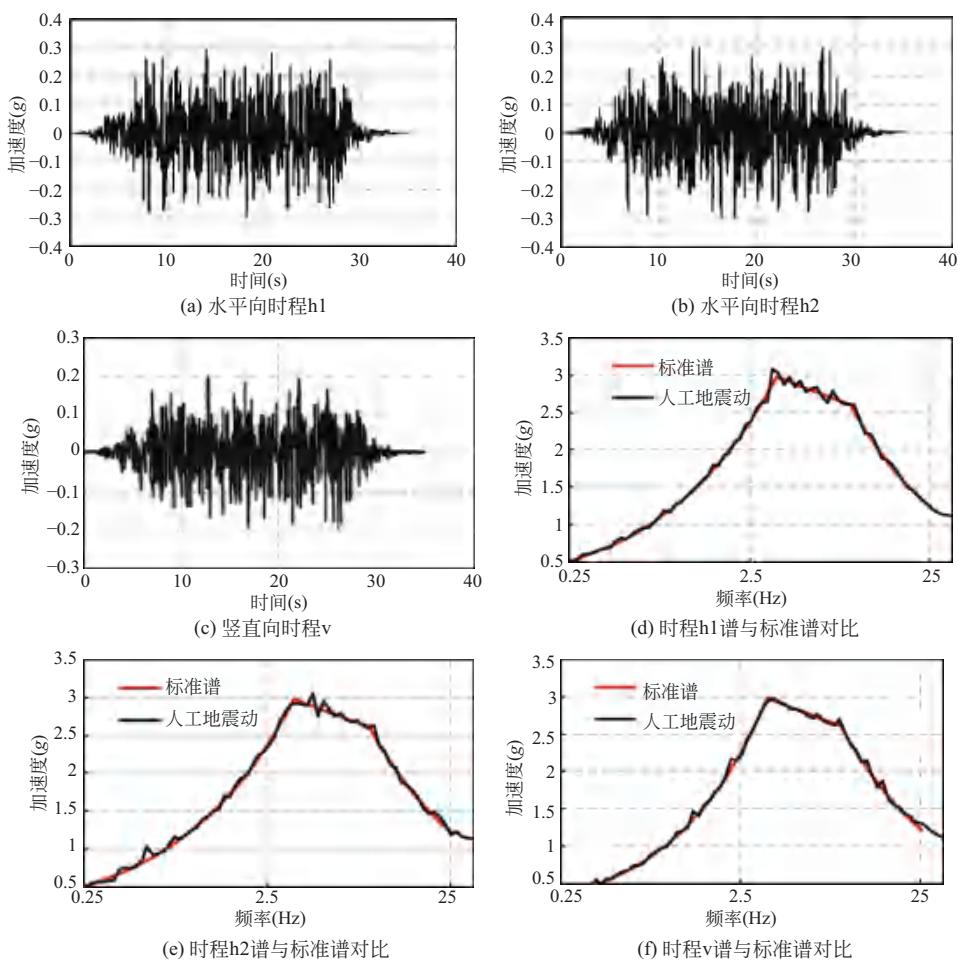


图8 人工加速度时程曲线与相应的5%阻尼比反应谱对比

Fig. 8 Artificial acceleration time-history curves and corresponding response spectrums of 5% damping ratio

1.6 测量方案

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响应。在反应堆厂房一层、四层、八层和周边筒体顶布置三向加速度传感器，每层布置 4 个，在台面、T 形墙和中部核心筒顶部各布置 2 个加速度传感器，一共布置了 22 个三向加速度传感器；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 18 个位移计，测点布置平面图如图 9 所示，剖面图如图 10 所示。

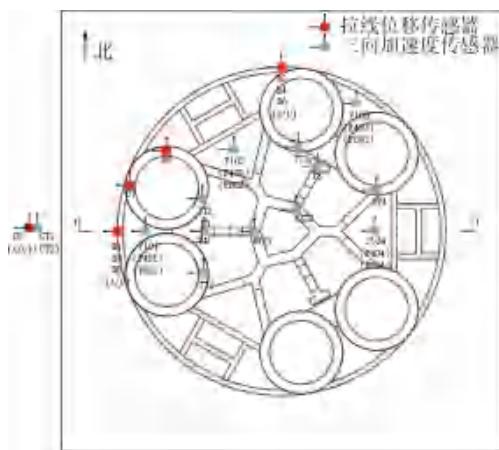


图 9 测点布置平面图

Fig. 9 Arrangement of the measuring points

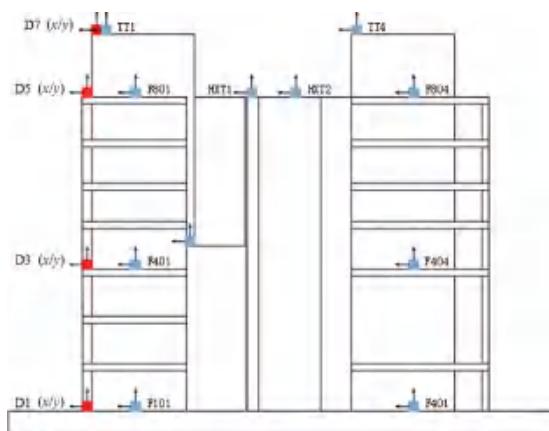


图 10 测点布置剖面图

Fig. 10 Layout profile of measuring points

在摩擦摆隔震试验中，采用了三向力传感器记录每个摩擦摆支座的三向力，三向力传感器见图 11，布置图见图 12。三向力传感器上、下表面分别与摩擦摆支座下表面和振动台台面采用螺栓连接。试验开始之前，为了避免安装不平造成摩擦摆受力不均，根据三向力传感器 Z 向力数据对模型进行调平，直至六个摩擦摆支座受力相同为止。



图 11 三向力传感器

Fig. 11 Triaxial force sensor

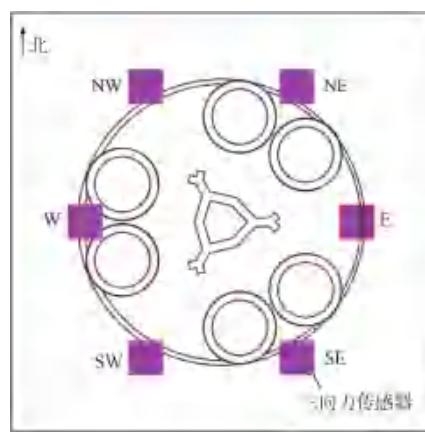


图 12 三向力传感器布置图

Fig. 12 Arrangement of the triaxial force sensors

1.7 加载方案

试验加载工况见表 4，采用的地震动为 RG1.60 改进型反应谱在 0.05 阻尼比条件下拟合的人工地震动，根据相似比关系对地震动进行了调幅，在进行振动台试验时，将加速度时程的时间步长变为原来的 0.15 倍，加速度幅值变为 2.22 倍。

表 4 试验加载工况

Table 4 Test loading condition

| 序号 | 工况名 | 加载幅值与方向 |
|----|--------|--------------------------|
| 1 | 白噪声 1 | 0.05g |
| 2 | 1/2SSE | $0.33gH1+0.33gH2+0.22gV$ |
| 3 | 1/2SSE | $0.33gH2+0.33gH1+0.22gV$ |
| 4 | 白噪声 2 | 0.05g |
| 5 | X1 | 0.66gH1 |
| 6 | X2 | 0.66gH2 |
| 7 | Y1 | 0.66gH1 |
| 8 | Y2 | 0.66gH2 |
| 9 | Z | 0.44gV |
| 10 | 白噪声 3 | 0.05g |
| 11 | X1+Y2 | $0.66gH1+0.66gH2$ |

续表

| 序号 | 工况名 | 加载幅值与方向 |
|----|-------|------------------------|
| 12 | X2+Y1 | 0.66gH2+0.66gH1 |
| 13 | 白噪声 4 | 0.05g |
| 14 | SSE | 0.66gH1+0.66gH2+0.44gV |
| 15 | SSE | 0.66gH2+0.66gH1+0.44gV |
| 16 | 白噪声 5 | 0.05g |
| 17 | X1 | 1.32gH1 |
| 18 | X2 | 1.32gH2 |
| 19 | Y1 | 1.32gH1 |
| 20 | Y2 | 1.32gH2 |
| 21 | Z | 0.88gV |
| 22 | 白噪声 6 | 0.05g |
| 23 | X1+Y2 | 1.32gH1+1.32gH2 |
| 24 | X2+Y1 | 1.32gH2+1.32gH1 |
| 25 | 白噪声 7 | 0.05g |
| 26 | 2SSE | 1.32gH1+1.32gH2+0.88gV |
| 27 | 2SSE | 1.32gH2+1.32gH1+0.88gV |
| 28 | 白噪声 8 | 0.05g |

2 振动台试验结果分析

2.1 动力特性分析

每个工况前后对模型结构输入三向峰值加速度均为 $0.05g$ 的白噪声，测试结构的自振频率变化情况。根据白噪声激励获得模型 X 向、 Y 向的动力特性如表 5、表 6 所示。

表 5 模型 X 向频率Table 5 Frequency of model in X direction (Hz)

| 工况 | 抗震 | 摩擦摆 | 橡胶支座 |
|-------|-------|-------|------|
| 白噪声 1 | 32.2 | — | 2.75 |
| 白噪声 2 | 29.32 | 11.74 | 2.67 |
| 白噪声 3 | 27.68 | 10.2 | 2.88 |
| 白噪声 4 | 28.49 | 9.62 | 3.07 |
| 白噪声 5 | 28.23 | 12.3 | 2.76 |
| 白噪声 6 | 24.2 | 10.91 | 3.48 |
| 白噪声 7 | 25.11 | 7.72 | 2.95 |
| 白噪声 8 | 24.71 | 7.16 | 2.67 |

由表 5、表 6 可见：

(1) 抗震结构 Y 向自振频率为 38.69Hz ，摩擦摆隔震结构 Y 向自振频率为 34.12Hz ，因为此时摩擦摆隔震支座并未开始滑动，故摩擦摆隔震结构自振频率与抗震结构的相差不大。

表 6 模型 Y 向频率Table 6 Frequency of model in Y direction (Hz)

| 工况 | 抗震 | 摩擦摆 | 橡胶支座 |
|-------|-------|-------|------|
| 白噪声 1 | 38.69 | 34.12 | 2.8 |
| 白噪声 2 | 37.89 | 11.85 | 2.75 |
| 白噪声 3 | 40.83 | 9.6 | 2.92 |
| 白噪声 4 | 39.36 | 12.57 | 2.81 |
| 白噪声 5 | 37.2 | 9.72 | 2.7 |
| 白噪声 6 | 31.39 | 12.7 | 3.02 |
| 白噪声 7 | 25.79 | 10.5 | 3 |
| 白噪声 8 | 26.24 | 6.87 | 2.86 |

(2) 摩擦摆支座起滑后，结构频率控制在 11 Hz 左右，约为抗震结构的 $1/3$ ；橡胶支座隔震结构，结构水平方向频率减小，大约为抗震结构的 $1/11$ 。

(3) 两种隔震支座都能使结构的周期延长，从而减小反应堆厂房的地震响应，与摩擦摆支座隔震结构相比，橡胶支座隔震结构的自振频率较低，隔震效果较好。

不同模型结构在不同幅值的地震动加载后两个方向的自振频率对比见图 13。

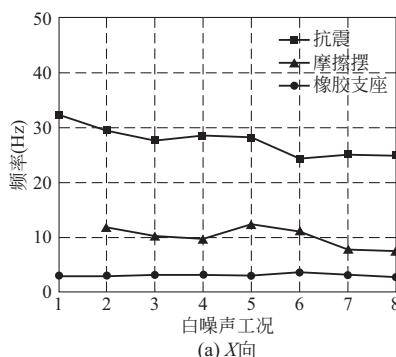
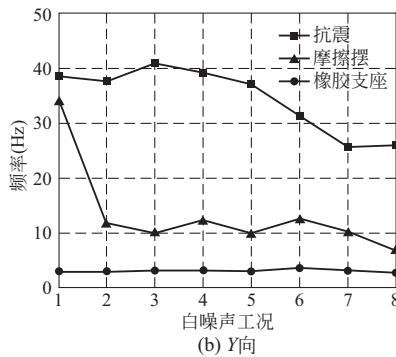
(a) X 向(b) Y 向

图 13 自振频率对比

Fig. 13 Comparison of the frequency

由图 13 可见：

(1) 隔震结构和抗震结构的自振频率均随着加载地震动幅值的增大而减小，加载前摩擦摆隔震结构

的频率略小于抗震结构，这说明摩擦摆支座没滑动时刚度比较大。

(2) 随着加速度幅值的增大抗震结构的自振频率下降的比隔震结构快，说明抗震结构的损伤大于隔震结构，即隔震层对结构起到了一定的保护作用。

2.2 加速度响应分析

在 SSE 地震动单向、双向、三向输入情况下， X 、 Y 向加速度放大系数随模型高度的变化，见图 14、图 15。图中楼层 0 代表振动台台面，选取了模型内部 1、4、8 层及筒顶作为关键层，筒顶记做第 9 层。加速度放大系数取隔震结构各层加速度峰值与振动台台面加速度峰值的比值。

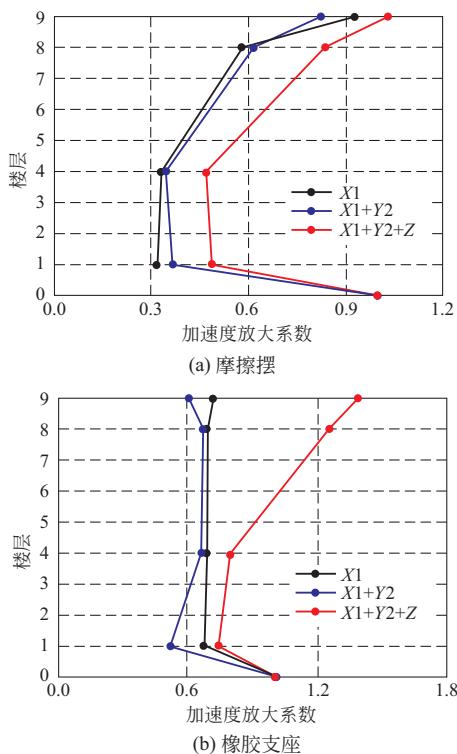


图 14 X 向加速度放大系数

Fig. 14 Acceleration amplification factor in X direction

由图 14、图 15 可见：

(1) 对于橡胶支座隔震结构，在 SSE 地震动单向和双向水平输入下，上部结构的水平加速度放大系数在 0.55~0.75 间，均小于 1；说明在地震作用下，上部结构沿水平向呈现平动的运动状态，且隔震效果良好；在 SSE 三向地震动作用下，上部结构八层和顶层处的加速度放大系数显著增大，甚至大于 1，说明竖向地震动作用减弱了自重抗倾覆的能力，产生的摇摆效应造成了顶部加速度峰值的放大。

(2) 对于摩擦摆隔震结构，在 SSE 地震动水平单向、双向和三向作用下，上部结构一层、四层水

平向加速度放大系数都小于 0.65；在四层以上，加速度放大系数突然增大，可能是模型 T 形墙高度仅至四、五层楼板之间，T 型墙以上结构的刚度有所减小。不同幅值的三向地震动输入下， Z 向加速度放大系数随模型高度的变化见图 16。

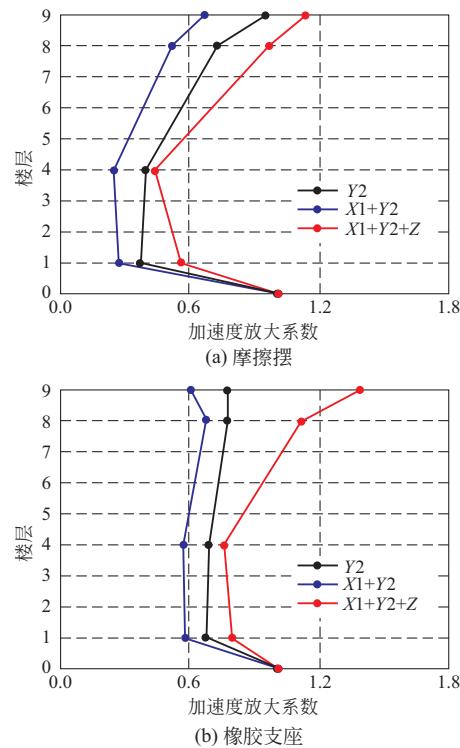
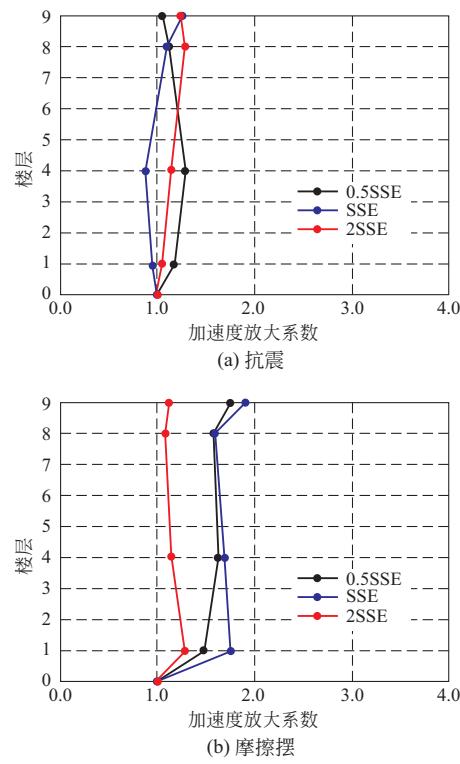


图 15 Y 向加速度放大系数

Fig. 15 Acceleration amplification factor in Y direction



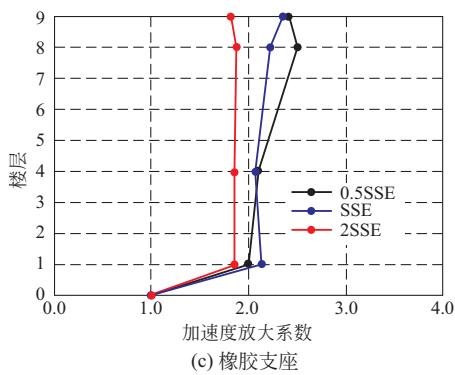
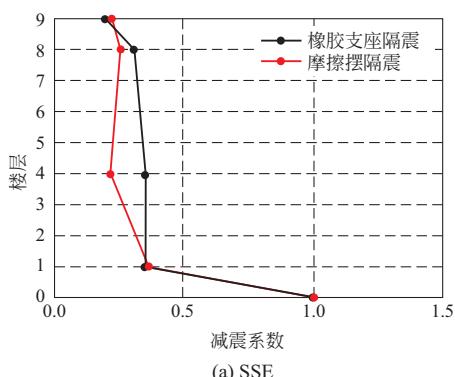


图 16 Z 向加速度放大系数

Fig. 16 Acceleration amplification factor in Z direction

由图 16 可见：抗震结构的竖向加速度放大系数在 0.75~1.29 之间；橡胶支座隔震结构和摩擦摆支座隔震结构的上部结构竖向加速度放大系数在 1.10~2.40 之间，说明水平隔震会放大竖向反应，且随着地震动幅值的增加，顶层处的竖向加速度放大系数有所减小。

不同幅值的三向地震动输入下，隔震结构楼层 X、Y、Z 向减震系数随模型高度的变化对比，见图 17-图 19。



(a) SSE

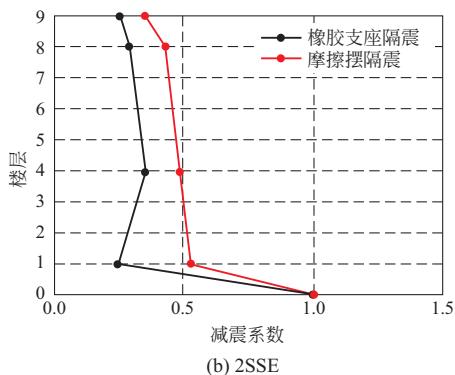
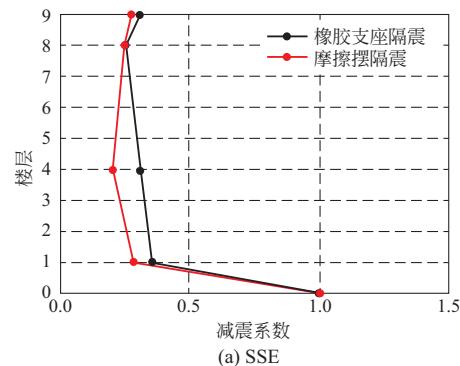


图 17 X 向减震系数

Fig. 17 Seismic reduction coefficient in X direction



(a) SSE

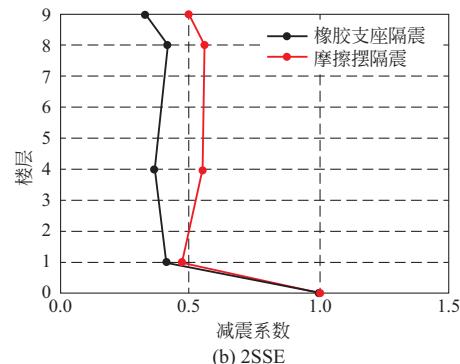
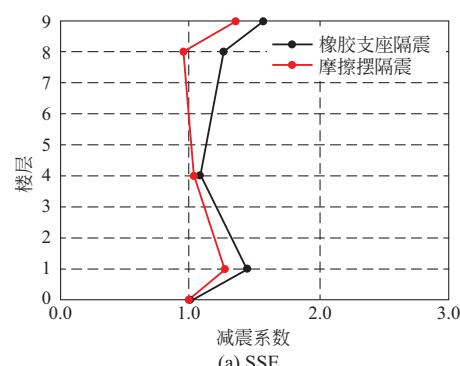


图 18 Y 向减震系数

Fig. 18 Seismic reduction coefficient in Y direction



(a) SSE

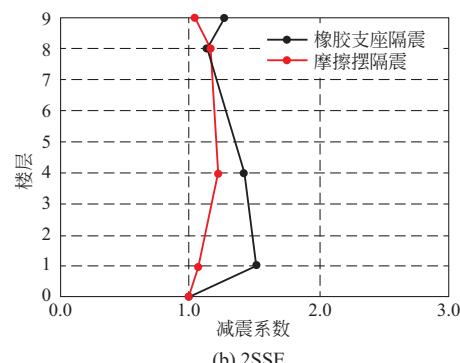


图 19 Z 向减震系数

Fig. 19 Seismic reduction coefficient in Z direction

由图 17-图 19 可见：

(1) 在 SSE 地震动三向加载时, 摩擦摆支座隔震和橡胶支座隔震上部结构水平向减震系数都在 0.2~0.35 之间, 摩擦摆隔震上部结构的水平向减震系数较小。

(2) 在 2SSE 地震动三向加载时, 摩擦摆支座隔震和橡胶支座隔震上部结构减震系数都在 0.25~0.55 之间, 橡胶支座隔震上部结构的水平向减震系数较小。

(3) 在 SSE 和 2SSE 三向地震动输入时, 摩擦摆隔震和橡胶支座隔震上部结构的 Z 向减震系数都大于 1, 摩擦摆隔震上部结构的竖向减震系数要小于橡胶支座隔震时的减震系数。

2.3 水平位移响应分析

隔震和抗震模型在 SSE 三向地震动作用下沿高度变化的水平向相对振动台台面的位移峰值, 图中 0 层代表振动台台面, 1 层代表上部结构基础位置, 见图 20。

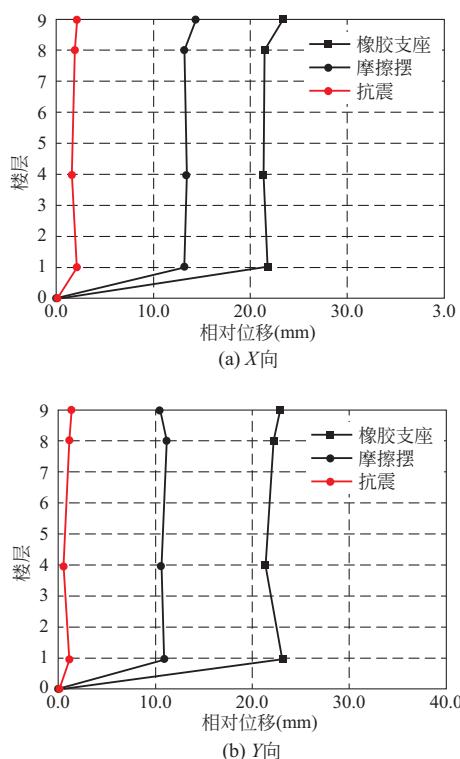


图 20 水平位移峰值对比

Fig. 20 Comparison of peak values of horizontal displacement

由图 20 可见：

(1) 在三向地震动作用下, 抗震结构水平向位移峰值较小, 沿高度大致均匀分布, 几乎是平动。

(2) 摩擦摆隔震结构的水平位移峰值分别为 14.30mm(X 向)、11.16mm(Y 向), 橡胶支座隔震结

构的水平位移峰值分别为 23.28mm(X 向)、23.19mm(Y 向)。虽然隔震结构的位移较大, 但是上部的层间位移较小, 说明隔震结构的位移主要发生在隔震层, 上部结构基本处于弹性。

2.4 楼层反应谱分析

SSE 三向地震动输入时, 不同楼层高度处抗震及隔震模型 X 向楼层加速度反应谱见图 21, 阻尼比为 0.05。

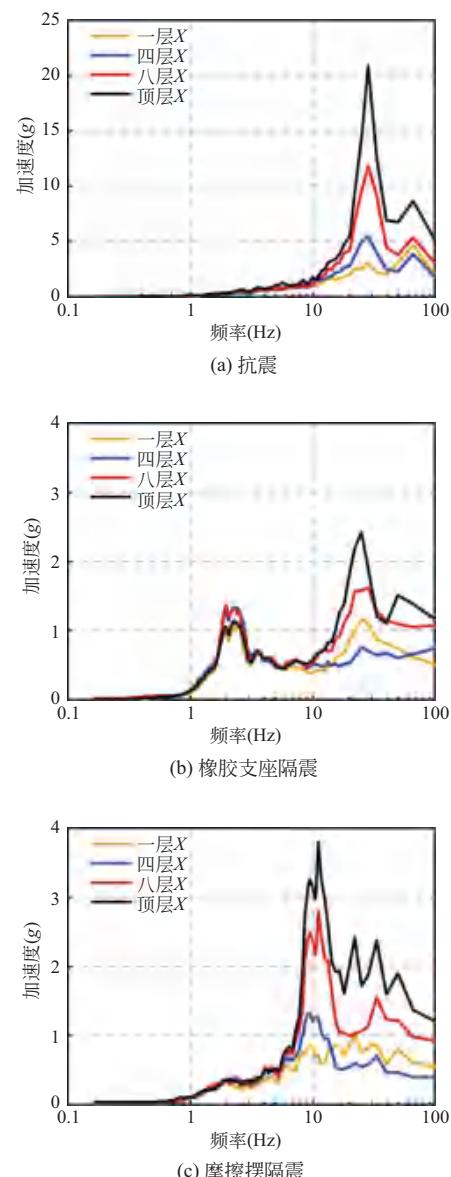


图 21 楼层加速度反应谱

Fig. 21 Floor acceleration response spectrum

由图 21 可见：

(1) 抗震模型, 在其振动频率(33Hz)处随着楼层的增加, X 向加速度谱值逐渐增加。

(2) 橡胶支座隔震模型, 在其隔震频率(2.2Hz)处, X 向楼层谱的谱值随着楼层的增大先增大后减

小；在 28Hz 附近， X 向加速度谱值则随着楼层的增大先减小后增大，是因为使用铅芯橡胶隔震支座而使得上部结构产生了一定的摇摆效应。

(3) 摩擦摆支座隔震模型，在其隔震频率(11Hz)处， X 向楼层谱的谱值随着楼层的增加而增加。

SSE 三向地震动输入时，不同楼层高度处抗震及隔震模型三向楼层加速度反应谱对比见图 22~图 24。

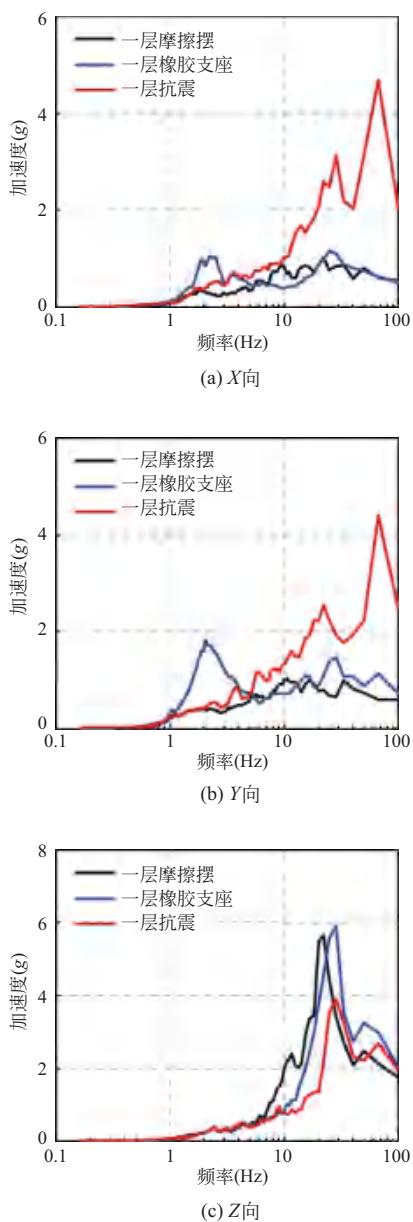


图 22 一层加速度反应谱对比

Fig. 22 Comparison of acceleration response spectra of the first floor

由图 22~图 24 可见：

(1) 以顶层楼面为例，抗震结构在 2.2Hz、11Hz、28Hz 处的 X 向加速度谱值分别为 $0.45g$ 、

$1.87g$ 、 $20.47g$ 。

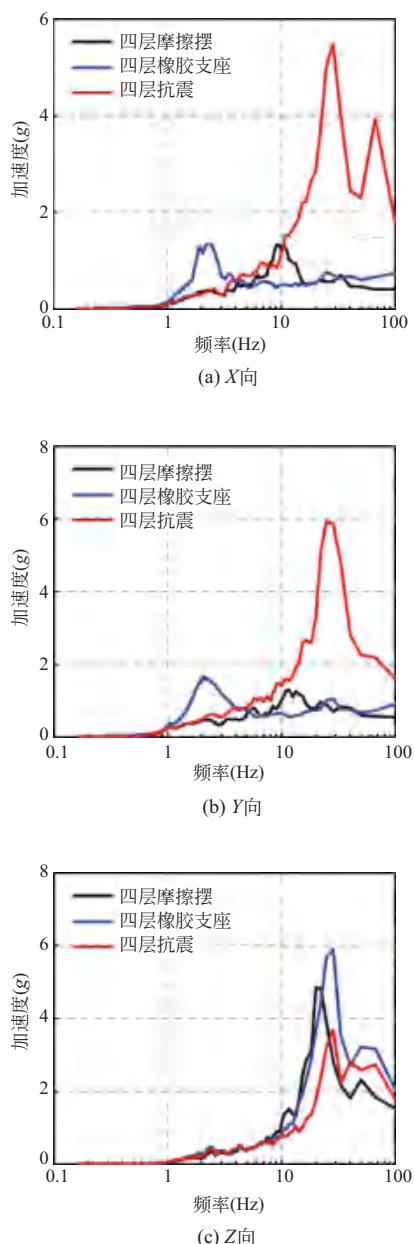


图 23 四层加速度反应谱对比

Fig. 23 Comparison of acceleration response spectra of the fourth floor

(2) 橡胶支座结构在 2.2Hz、28Hz 处的 X 向加速度谱值分别为 $1.13g$ 、 $1.91g$ ，摩擦摆隔震结构在 11Hz、28Hz 处的 X 向加速度谱值分别为 $3.80g$ 、 $1.87g$ 。

(3) 与抗震结构相比，隔震结构可以明显减小上部结构自然频率处的水平向加速度反应谱谱值，而隔震频率处的加速度反应谱谱值相对于非隔震结构有所增大；这是由于核反应堆厂房采用延长结构周期的隔震措施来降低地震响应，在高频处能有效减小水平向加速度反应谱值，隔震效果显著，而在结

构低频处水平向加速度反应谱值明显增大。

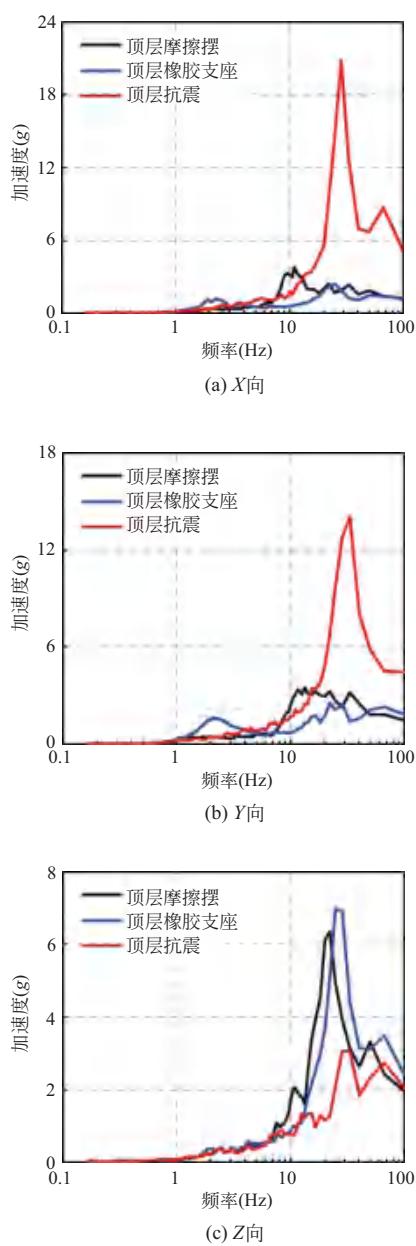


图 24 顶层加速度反应谱对比

Fig. 24 Comparison of acceleration response spectra of the top floor

(4) 橡胶支座和摩擦摆隔震结构的 Z 向加速度楼层谱峰值相比抗震结构的均有明显放大效应, 这可能是由于竖向地震动作用减弱了隔震结构自重抗倾覆的能力, 产生了结构摇摆效应, 造成了竖向加速度楼层谱值的放大。

3 结 论

(1) 核岛厂房摩擦摆支座隔震结构的自振周期约为抗震结构的 1/3, 核岛厂房橡胶支座隔震结构的自

振周期约为抗震结构的 1/10, 隔震效果显著。

(2) 在 SSE 地震动水平作用下, 采用橡胶支座隔震和摩擦摆隔震时, 上部结构水平加速度放大系数均在 0.55~0.75 之间, 三向地震动输入的水平加速度放大系数大于水平双向地震动输入, 说明竖向地震的作用会降低水平向隔震效果。

(3) 橡胶支座隔震结构和摩擦摆支座隔震结构的上部结构竖向加速度放大系数在 1.10~2.40 之间, 说明水平隔震会放大竖向反应, 且随着地震动幅值的增加, 顶层处的竖向放大系数有所减小。

(4) 抗震和隔震工况时, 上部结构的层间相对位移均较小, 表明结构的整体刚度较大。

(5) 与抗震结构相比, 隔震结构可以明显减小上部结构自然频率处的水平向加速度反应谱谱值, 而隔震频率处的加速度反应谱谱值相对于非隔震结构有所增大。

参 考 文 献

- [1] 李忠诚, 张涛, 许波涛. 基底隔震技术用于核电厂厂房的问题研究 [J]. 核动力工程, 2014, 35(4): 21-26 (Li Zhongcheng, Zhang Tao, Xu Botao. Application survey and prospect of base-seismic isolation technology for nuclear power plants [J]. Nuclear Power Engineering, 2014, 35 (4): 21-26 (in Chinese))
- [2] 王启文, 周斌, 唐熙, 等. 嘉峪关第一人民医院隔震结构设计与分析 [J]. 建筑结构, 2019, 49(24): 67-71 (Wang Qiwen, Zhou Bin, Tang Xi, et al. Design and analysis of isolation structure of Jiayuguan First People's Hospital [J]. Building Structure, 2019, 49 (24): 67-71 (in Chinese))
- [3] 张雷, 梁伟桥, 王罡, 等. 核反应堆厂房基底隔震设计与地震响应分析 [J]. 工业建筑, 2019, 49(7): 70-76 (Zhang Lei, Liang Weiqiao, Wang Gang, et al. Base seismic isolation design and seismic response analysis of nuclear reactor buildings [J]. Industrial Construction, 2019, 49(7): 70-76 (in Chinese))
- [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 Tao, Wang Fei, Hou Gangling, et al. Shaking table tests on base-isolated nuclear power plant [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31 (10): 62-68, 84 (in Chinese))
- [5] Coladant C. Seismic isolation of nuclear power plants—EDF's philosophy [J]. Nuclear Engineering and Design, 1991, 127(3): 243-251
- [6] 潘华, 李金臣, 吴迪忠. 2007 年 7 月 16 日日本新潟地震对柏崎刈羽核电站的影响 [J]. 国际地震动态, 2007 (11): 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): 21-32 (in Chinese))
- [7] 刘文光, 周福霖, 庄学真, 等. 铅芯夹层橡胶隔震垫基

- 本力学性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19(1): 93-99 (Liu Wenguang, Zhou Fulin, Zhuang Xuezhen, et al. Research on fundamental mechanic characteristics of lead rubber bearings [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1999, 19(1): 93-99 (in Chinese))
- [8] 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 base-seismic isolation [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(4): 706-712 (in Chinese))
- [9] 侯钢领, 吴灵枢, 李孟, 等. 设有基础隔震-TMD的双层安全壳核电站结构抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(增1): 52-59 (Hou Gangling, Wu Lingshu, Li Meng, et al. Seismic performance of BIS-TMD structure of nuclear power plants with double containments [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(S1): 52-59 (in Chinese))
- [10] 李吉超, 尚庆学, 罗清宇, 等. 厚层橡胶支座的力学性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(9): 157-165 (Li Jichao, Shang Qingxue, Luo Qingyu, et al. Tests for mechanical performance of thick rubber bearings [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(9): 157-165 (in Chinese))
- [11] Zayas V A, Low S S, Mahin S A. UCB/EERC-87 The FPS earthquake resisting system [R]. Berkeley: University of California, 1987
- [12] 郑迦译, 宋薇, 雷远德, 等. 摩擦摆隔震框架结构振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(增2): 240-245 (Zheng Jiayi, Song Wei, Lei Yuande, et al. Shaking table test study on friction-pendulum isolated frame structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(S2): 240-245 (in Chinese))
- [13] 尚继英, 谭平, 张亚飞, 等. 模块化钢框架变摩擦摆隔震结构抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(11): 1-12 (Shang Jiying, Tan Ping, Zhang Yafei, et al. Seismic performance of modular steel frame isolated structures with variable friction pendulum bearings [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(11): 1-12 (in Chinese))

陈 岩(1980—),女,博士研究生,正高级工程师。主要从事钢筋混凝土结构及组合结构抗震研究。

周中一(1980—),男,博士,副研究员。主要从事工程结构抗震研究。

王友刚(1985—),男,硕士,高级工程师。主要从事钢筋混凝土结构及组合结构抗震研究。

徐智凌(1997—),女,硕士研究生。主要从事工程结构抗震研究。

张君鸿(1993—),女,硕士,助理工程师。主要从事钢筋混凝土结构及组合结构抗震研究。

穆少雄(1994—),男,硕士,助理工程师。主要从事钢筋混凝土结构及组合结构抗震研究。

王 涛(1978—),男,博士,副研究员。主要从事工程结构抗震研究。