

魏陆顺, 张永山, 孔德睿, 等. 核电结构三维隔震研究[J]. 华南地震, 2015, 35(1): 37-42. [WEI Lushun, ZHANG Yongshan, KONG Derui, et al. Study on Three-dimensional Seismic Isolation of Nuclear Island[J]. South china journal of seismology, 2015, 35(1): 37-42.]

## 核电结构三维隔震研究

魏陆顺<sup>1</sup>, 张永山<sup>2</sup>, 孔德睿<sup>2</sup>, 刘文光<sup>3</sup>, 何文福<sup>3</sup>

(1. 佛山科学技术学院环境与土木建筑学院, 广东 佛山 528000; 2. 广州大学土木工程学院, 广州 510405;  
3. 上海大学土木工程系, 上海 200072)

**摘要:** 三维隔震对保护核电厂结构和内部设备设施安全具有重要意义。首先, 设计了一种三维隔震控制系统, 该系统包括水平隔震层和竖向隔震层, 在竖向隔震层中设置抗摇摆装置以达到控制结构摇摆反应。其次, 对三维隔震模型进行了振动台试验验证, 振动台试验结果表明, 该系统能有效减小上部结构地震响应。最后, 对核岛厂房采用三维隔震技术进行了讨论, 分析了强震作用下核岛厂房三维隔震结构反应特征。

**关键词:** 三维隔震; 核电厂; 摇摆控制; 振动台试验

**中图分类号:** P315.61 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2015) 01-0037-06

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2015.01.006

## Study on Three-dimensional Seismic Isolation of Nuclear Island

WEI Lushun<sup>1</sup>, ZHANG Yongshan<sup>2</sup>, KONG Derui<sup>2</sup>, LIU Wenguang<sup>3</sup>, HE Wenfu<sup>3</sup>

(1. Foshan University, Environment and Construction College, Foshan 528000, China; 2. Guangzhou University, School of Civil Engineering, Guangzhou 510405, China; 3. Shanghai University, Department of Civil Engineering, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** Three-dimensional (3D) seismic isolation technologies are important in protecting nuclear power plant and equipment facilities safety. Firstly, the paper designed a new 3D isolation system, which includes horizontal isolation layer and vertical isolation layer, and the rocking suppression devices were installed in the vertical layer to control the rocking motion of upper structure. Secondly, the paper conducted the shaking table tests for 3D isolation structure model. The shaking table test results show that the 3D isolation system can effectively reduce the seismic response of the upper structure. Finally, the paper discussed the nuclear island structure by adopting the 3D isolation technique, and analyzed the response characteristics of the nuclear island structure under strong seismic action.

**Keywords:** Three-dimensional seismic isolation; Nuclear power plant; Rocking motion control; Shaking table test

收稿日期: 2014-01-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51378135, 51308331, 51278291, 51078098)

作者简介: 魏陆顺 (1973- ), 男, 博士, 主要从事减震控制研究。

E-mail: 1174578590@qq.com.

## 0 引言

核电是一种技术成熟的清洁能源,核电与水电、火电一起构成世界能源的三大支柱,在世界能源结构中有着重要的地位<sup>[1]</sup>。核电工程结构的抗震能力是保障核电安全的重要内容之一<sup>[2-3]</sup>,核电结构抗震分两级设防,但地震的不确定性给核电厂的抗震安全带来巨大的挑战,至今,几次重大的核电工程安全事故也是由地震灾害引起的。2007 年日本柏崎刈羽核电站由于 6.8 级地震影响,引发核电厂多个装有放射性废料的罐子倾倒、含放射性物质的水泄漏等事故<sup>[4]</sup>。2011 年日本东北部海域发生里氏 9.0 级大地震引发巨大海啸,使得福岛核电站多个机组发生停堆。强震使得核电站外电网中断,同时应急柴油发动机也因为海啸丧失功能,所有电源中断,冷却功能失效,内部燃料过热熔毁,发生爆炸造成核泄露。福岛核电站辐射物质泄漏最终定性为 7 级核事故,这是迄今为止人类核电发展史上最严重的一次事故<sup>[5]</sup>。

结构隔震技术是目前世界上公认有效的控制技术。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>[6-7]</sup>。核电结构隔震应用是隔震技术研究重点之一,日本电气工业会于 2007 年 9 月发布着手开发次世代轻水反应堆采用隔震技术,2008 年 4 月能源综合工程学研究所以及日国内原子炉 3 家制造商(三菱重工业、日立 GE 核能、东芝公司)参加共同开发核电隔震研究项目<sup>[8]</sup>。

目前,隔震主要是隔离水平向地震作用<sup>[9]</sup>。2000 年,日本提出用于核反应堆的空气弹簧整体三维隔震技术和碟形弹簧-橡胶垫三维隔震技术,并于 2002 年,由清水建设开发了水平隔震采用橡胶隔震支座,竖向采用空气弹簧的新型的三维基础隔震系统,并采用油压系统抑制结构的摇摆,振动台试验结果表明,结构摇摆角控制在 1/1 000 以下,取得了较好的三维减震效果<sup>[10]</sup>。本文设计了一种新型的三维隔震系统,该系统包括水平隔震层和竖向隔震层,抗摇摆装置安装在竖向隔震层中用于控制结构摇摆反应。为研究该三维隔震系统性能,对二层钢框架结构模型进行了振动台试验研究,并对核岛采用三维隔震技术进行了探讨。

## 1 三维隔震系统及试验

本文设计了一种新型的三维隔震系统,该系统包括水平隔震层和竖向隔震层,抗摇摆装置安装

在竖向隔震层中用于控制结构摇摆反应(见图 1)。该系统的隔震支座功能单一,构造简单,抗摇摆系统也易于实施。为研究该三维隔震系统性能,对二层钢框架结构模型进行了振动台试验研究。

三维隔震结构模型为 2 层钢框架,平面尺寸

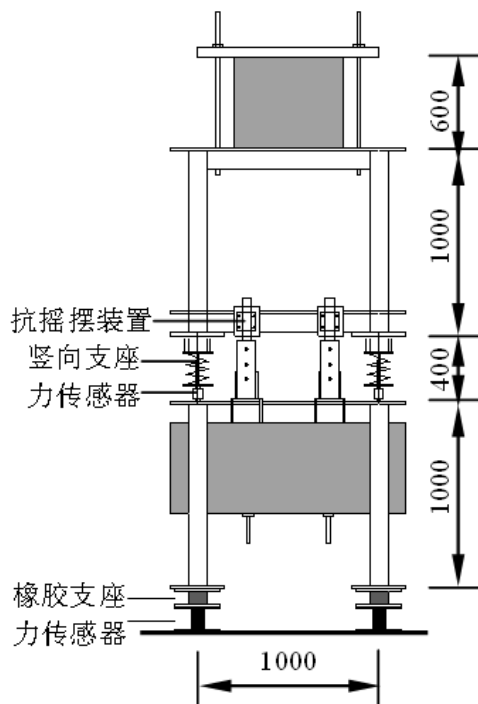


图 1 试验模型

Fig.1 Test model

为 1 m×1.6 m,结构层高 1m。考虑配重高度,模型 X 方向高宽比为 2.70, Y 方向高宽比为 1.69。钢框架结构模型重 24 kN,首层配重 24.2 kN,顶层配重 12.1 kN,总配重 36.3 kN,结构总重量 60.3 kN。水平隔震层采用 4 个 LRB100 低硬度铅芯橡胶隔震支座。竖向隔震层采用 4 个钢弹簧支座和 4 个竖向粘滞阻尼器,钢弹簧型号为 14×Φ110 中×235×5.5,竖向粘滞阻尼器提供竖向阻尼。抗摇摆系统采用 GGD35 型重载滚动直线导轨副。

试验相似比见表 1,尺寸相似系数取为 1/40。考虑重力加速度对隔震支座应力反应的影响加速度相似系数取为 1。竖向隔震周期为 0.49 s,对应原型为 3.13 s,水平隔震周期为 0.53 s,对应原型为 3.35 s,均属于合理的隔震周期范围。

## 2 振动台试验结果

试验采用的强震记录包括:1940 年 El Centro (El)、1952 年 Taft (Ta)、1968 年 Hachinohe (Ha) 和 1999 年 1999 年台湾集集地震 TCU068 (Chi)。

表 1 模型与原型相似比

Table 1 The similarity ratio between target building and test model

参数	原型	模型	相似系数
高度/m	80	2	1/40
平面尺寸/m	40×64	1×1.6	1/40
层数	27	2	/
*1 竖向隔震周期 $T_v$ /s	3.13	0.49	1/6.325
*2 水平隔震周期 $T_t$ /s	3.35	0.53	1/6.325

注：\*1：竖向隔震装置对应的结构周期；\*2：屈服后刚度对应的结构周期。

为验证三维隔震技术的隔震效果，对同一结构模型进行了固接和隔震的对比试验，输入地震记录速度峰值为 4 cm/s（对应原型为 25 cm/s）。三向输入工况下，加速度对比结果见图 2。

4 条强震记录作用下，对比输入值，传统结构顶层加速度放大系数均值  $X$  向为 3.78， $Y$  向为 3.47， $Z$  向为 2.49；隔震结构顶层加速度放大系数均值  $X$  向为 1/1.07， $Y$  向为 1/1.71， $Z$  向为 1.29。传统结构顶层加速度放大系数  $X$  向为隔震结构的 4.05 倍， $Y$  向为 5.95 倍， $Z$  向为 1.93 倍。三向隔震能有效地减小上部结构地震反应，具有较好的

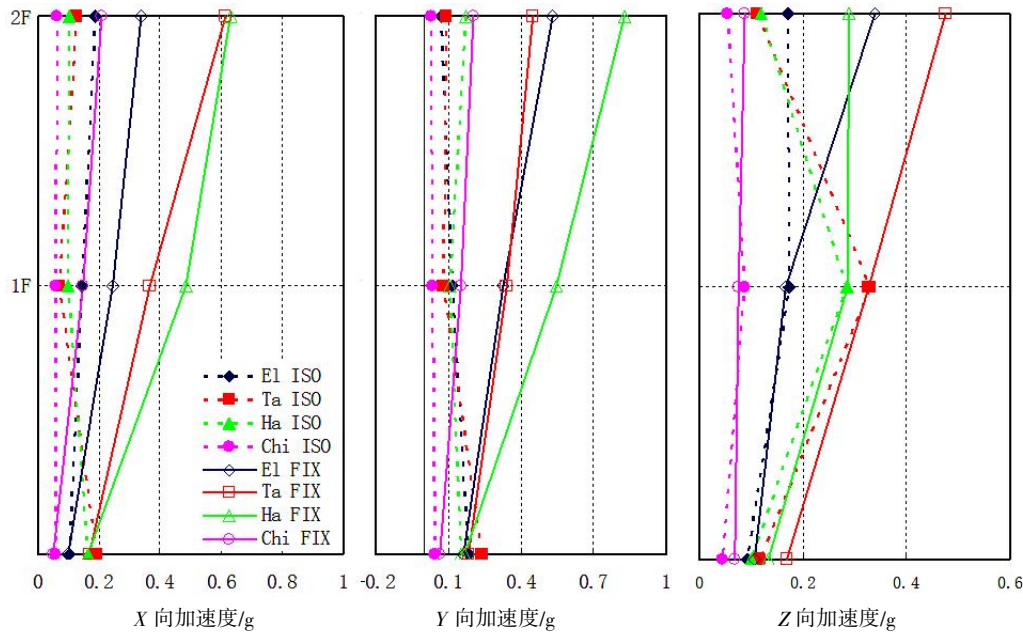


图 2 加速度反应对比

Fig. 2 Comparison of response acceleration between fixed and 3D isolated models

隔震效能。

三维隔震结构中竖向隔震层设置在 1 层顶部，对比 1 层加速度，顶层加速度  $Z$  向放大系数均值为 1/1.91，竖向隔震效果显著。

3 核电结构三维隔震探讨

本文以我国引进的第三代 AP1000 核电厂为研究对象，研究核岛厂房系统的三维隔震地震反应，其总重量约为 128 000 t。AP1000 核岛及内部设备见图 3，为研究 AP1000 核岛厂房的三维隔震控制方法，其三维隔震模型如图 4 所示，包括水平隔震层和竖向隔震层，抗摇摆装置安装在竖向隔震层中用于控制结构摇摆反应。该系统的隔震支座

功能单一，构造简单，抗摇摆系统也易于实施。

三维隔震设计目标在保留 AP1000 机组原先核岛厂房上部结构及内部所有配套核设施的标准设计不变的前提下，把原 AP1000 系列机组标准抗震设计 0.30 g 的能力予以翻倍成 0.60 g（水平向为 0.60 g，竖向为 0.80 g），以适应今后更严峻的地震设计环境。

AP1000 采用修正 RG1.6 反应谱。依据设计反应谱，采用等效线性方法对应的水平反应结果见图 5。为控制隔震层位移反应，停堆地震作用下，由屈服后刚度对应的隔震结构周期在 2.0 s，对应下阻尼比 15%左右是合理的设计值，其对应的基底剪力系数 0.3~0.4 之间。

三维隔震分析输入地震时程记录基于实测的

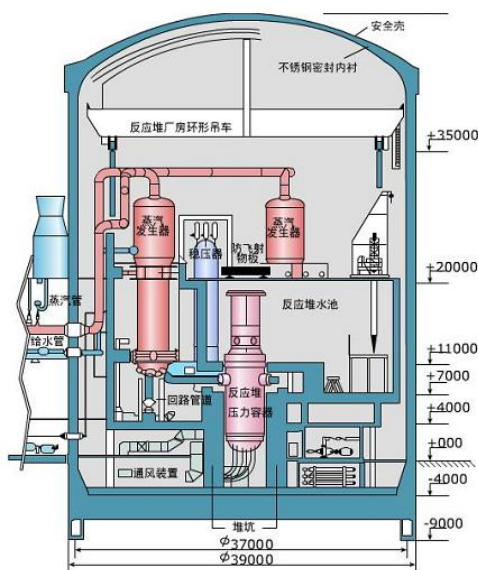


图3 AP1000 核岛  
Fig.3 Nuclear island of AP1000

Taft (简称 Ta) 和 El Centro (El) 地震记录, 通过频域调幅的方法, 保留了实测记录的相位, 时程反应谱及其与 5% 阻尼比的 RG1.60 修正谱的匹配情况见图 6。隔震采用单质点模型分析, 三维隔震结构  $X$  向、 $Y$  向屈服后刚度对应隔震周期取 2.06 s, 屈重比为 7.5%,  $Z$  向隔震周期 2 s, 阻尼比为 15% 情况下, 在  $X$  向、 $Y$  向和  $Z$  向输入加速度幅值分别为 0.6 g、0.6 g 和 0.8 g, 得到隔震后  $X$  向记录 5% 阻尼比反应谱的对比见图 6。隔震层滞回性能见图 7, 最大位移  $X$  向 593 mm,  $Y$  向 486 mm,  $Z$  向 369 mm。

由图 6 对比结果可知, 水平输入 0.6 g 情况下, 1 Hz 以上频率范围内, 隔震后记录反应谱幅值较 0.3 g 设计谱仍小很多。对于大于 1 Hz 的核电结构、设备和设施, 采用隔震后, 其地震作用

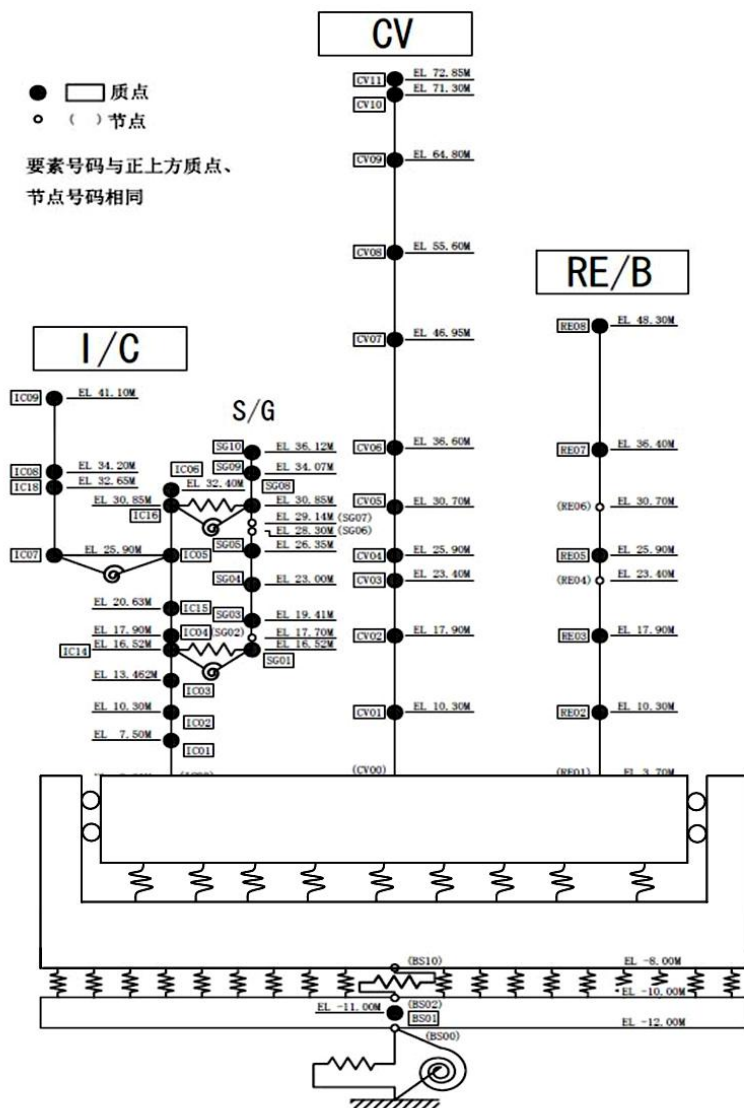


图4 AP1000 核岛结构三维隔震模型

Fig.4 The 3D isolation model of AP1000 nuclear island structure

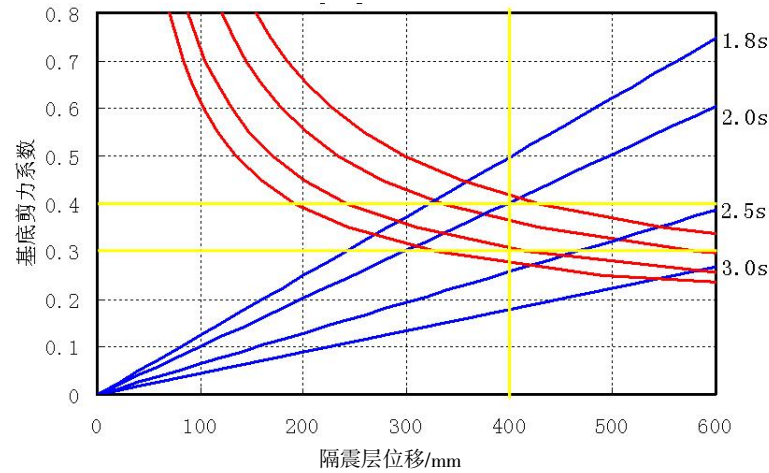


图 5 水平反应预测

Fig.5 Forecast results of horizontal response

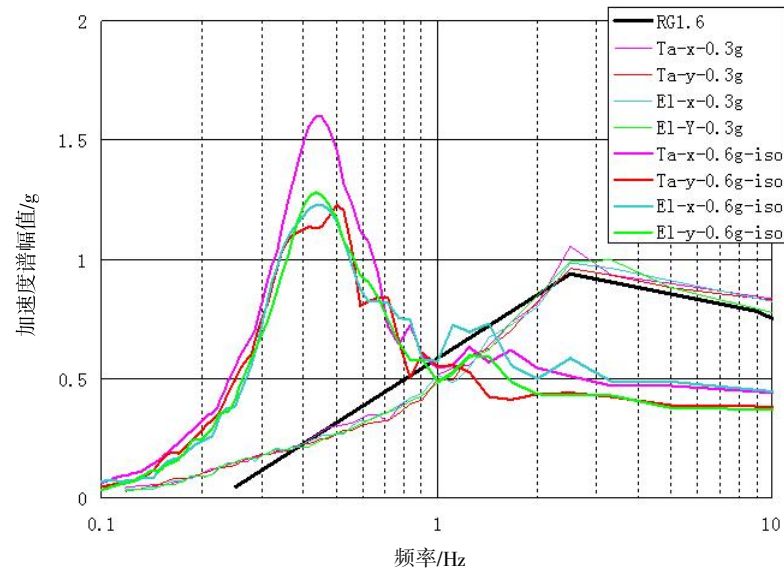


图 6 水平输入反应谱对比

Fig.6 Comparison of horizontal input response spectra

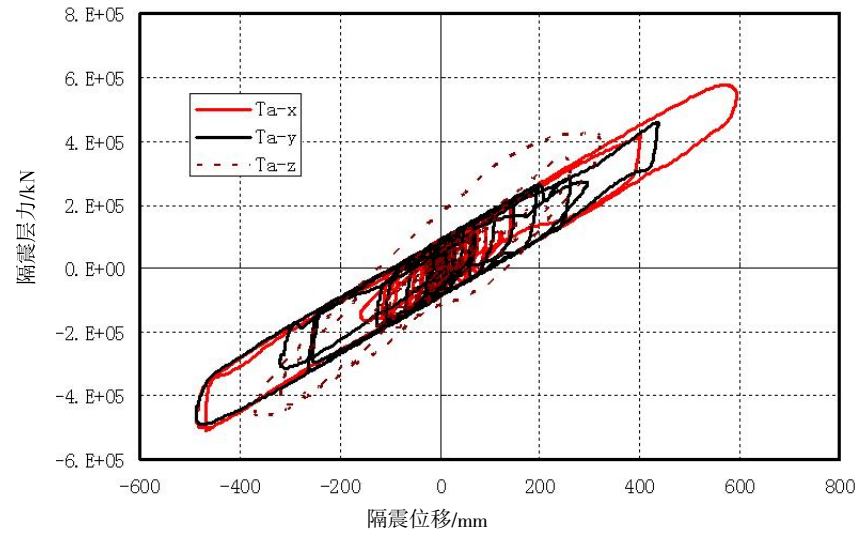


图 7 隔震层滞回性能

Fig.7 Hysteresis loops of isolation layer

大大降低, 抗震安全性大大提高; 对于基频小于 1 Hz 的如管线、水池等, 在 0.6 g 作用下, 其地震反应较设计谱会大很多, 应是核电隔震设计中重点考虑内容, 可提高对应构件的支撑刚度或增加阻尼以降低其反应。

## 4 结论

本文对 2 层钢框架三维隔震结构模型进行了验证试验研究, 并对 AP1000 核岛结构采用三维隔震进行了分析, 结论如下:

(1) 与传统结构放大效果相比, 三维隔震结构隔震效果显著。传统结构顶层加速度与隔震结构比  $X$  向为 4.05 倍,  $Y$  向为 5.95 倍,  $Z$  向为 1.93 倍, 三维隔震结构抗震性能大大提高。

(2) 基于修正 RG1.6 设计反应谱, 采用三维隔震技术, AP1000 系列机组其标准抗震设计能力可实现翻倍。

(3) 通过单质点时程分析可知, 采用三维隔震后, 低频反应谱幅值较设计谱有较大增加, 对于基频小于 1 Hz 设备, 其抗震性能应重点考虑。

(4) 核电结构采用三维隔震后, 核电站整体结构抗震性能显著提升, 对提高核电厂抗震性能具有重要参考意义。

## 参考文献:

- [1] 丁其华, 王海丹. 2009 年世界核电发展回顾[J]. 国外核新闻, 2010 (01): 13-18.
- [2] 林 皋. 核电工程结构抗震设计研究综述 (I)[J]. 人民长江, 2011, 42 (19): 1-5.
- [3] 林 皋. 核电工程结构抗震设计研究综述 (II) [J]. 人民长江, 2011, 42 (21): 1-6.
- [4] 気象庁 (日本). 2007 年 7 月 16 日 10 13 分ころ新県上中越で発生した地震について (報道発表資料) [N]. 新潟県災害対策本部, 2007
- [5] 「メルトダウン」という悪夢—ドキュメント原発神話崩壊 (緊急特集 3.11 日本最大の試練.Nikkei business (1583)[N]. 日経 BP 社, 2011.
- [6] 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). K10 - 7. 出版者不详, 2005.
- [7] Forni M. Seismic isolation of nuclear power plants [C] // Proceedings of the “Italy in Japan 2011” Initiative Science, Technology and Innovation. 出版者不详, 2011.
- [8] 山本知史, 古川茂, 島本龍, 等. 次世代軽水炉の免震技術の開発 : (その1) 免震技術の開発計画 (免震 (1), 原子力プラント, 構造 II) [C]// 日本建築学会大会学術講演梗概集. 出版者不详 2010: 1131-1132.
- [9] Bujar Myslimaj, Mitsumasa Midorikawa et al. Seismic behavior of a newly developed baseisolation system for houses [J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2002, 1 (2): 17-24
- [10] 魏陆顺, 刘雷斐, 梁欢文. 三维隔震振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 42 (03): 33-38.