

# 考虑 SSI 效应的核电结构水平与竖向地震响应的耦合效应研究

周志光<sup>1,\*</sup> 郭晶<sup>1</sup> 魏晓冬<sup>1</sup> 张建国<sup>2</sup>

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海城投原水有限公司, 上海 201250)

**摘要** 本文通过振动台试验研究第三代核反应堆 AP1000 核安全壳模型水平与竖向地震响应的耦合效应, 对该结构模型在单向和三向激励下的加速度响应进行了对比分析。分析结果表明, 对于刚性地基: 无隔震时, 在结构频率附近, 上部结构在三向地震输入下的加速度响应大于单向地震输入下的加速度响应; 有隔震时, 上部结构在三向地震输入下的加速度响应大于单向地震输入下的加速度响应。对土性地基来说: 无隔震时, 在 2~10Hz 范围内, 上部结构在单向地震输入下的加速度响应大于三向地震输入下的加速度响应; 有隔震时, 在隔震系统频率附近, 上部结构在单向地震输入下的加速度响应大于三向地震输入下的加速度响应。

**关键词** 核电站, 振动台试验, 耦合效应, 土-结构相互作用, 隔震

DOI:10.15935/j.cnki.jggcs.2018.s1.013

## Research of Coupling Effect of Horizontal and Vertical Seismic Response of Nuclear Structures Considering SSI Effect

ZHOU Zhiguang<sup>1,\*</sup> GUO Jing<sup>1</sup> WEI Xiaodong<sup>1</sup> ZHANG Jianguo<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai SMI Raw Water Co., Ltd., China)

**Abstract** Through a series of shaking table tests, the coupling effect of vertical and horizontal seismic response for the AP1000 nuclear power plant structure model is investigated. Acceleration response under 1D and 3D excitations is analyzed and compared. The analysis results show that the AP1000 structure model of nuclear power plant is divided into different subgrade response. For structures without isolation on the rigid foundation, the acceleration response under 3D excitation is greater than the acceleration response under 1D excitation near the structure frequency. For structures with isolation on the rigid foundation, the acceleration response under 3D excitation is greater than the acceleration response under 1D excitation. On the contrary, for structures without isolation on the soil foundation, the acceleration response under 1D excitation is greater than the acceleration response under 3D excitation when the frequency ranges from 2~10 Hz. For structures with isolation on the soil foundation, the acceleration response under 1D excitation is greater than the acceleration response under 3D excitation around the frequency of the isolation system.

**Keywords** nuclear power plants, shaking table test, seismic coupling effect, soil structure interaction (SSI), isolation

收稿日期: 2017-08-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478357)、上海市高峰学科项目

\* 作者简介: 周志光, 男, 副教授, 主要从事工程结构抗震、消能及隔震、电厂结构及设备抗震等的研究。Email: zgzhou@tongji.edu.cn

## 0 引言

到目前为止,大多数的核电厂在设计的时候没有充分考虑竖向地震的影响。日本福岛第一核电厂“紧急应变中心”建筑物采用由铅芯橡胶支座、天然橡胶支座及滑动支座组成的隔震体系,在 2011 年东日本大地震中,该系统有效地降低了结构的水平响应,但是竖向响应被放大了,竖向 PGA 为 0.44 g,一楼和二楼楼层的竖向响应分别被放大了 16% 和 39%,相应的楼层竖向反应谱也比竖向地震动的反应谱高<sup>[1]</sup>。这表明,使用传统隔震支座,地震响应的水平分量可以显著减少,但是激励的竖向分量却会直接传递到结构中。这一现象对于核电站这类结构就显得尤为重要,因为这类结构内部的专业设备和机器不仅昂贵,而且对安全操作至关重要。因此研究核电结构在竖向地震分量下的响应显得非常重要<sup>[2]</sup>。

Politopoulous 等分析了一个简化的 2 自由度水平及竖向耦合模型和一个使用低阻尼橡胶支座的核电厂三维壳模型,发现在某些情况下竖向地震激励会使结构在竖向及水平向都振动,会影响侧向剪力、位移及加速度<sup>[3]</sup>。汪向荣对竖向激励对水平加速度响应的影响进行了一系列数值研究,分析结果表明当垂直向扰动具有一定程度的加速度值,其影响将不容忽视<sup>[4]</sup>。黄昱华以框架结构为研究对象,建立体系水平和竖向耦合振动的运动微分方程,并对结构进行了水平和竖向地震波耦合激励下的弹性动力时程计算;与体系单输入竖向地震波之弹性动力响应进行对比后,发现耦合激励下框架边柱竖向响应变大而中柱竖向响应变小,并建议在结构抗震设计中宜适当考虑地震的耦合影响<sup>[5]</sup>。张延年通过分析研究得出竖向地震作用的存在,使结构各层的层间位移峰值有不同程度的增加,其增量随着竖向地震作用的增加而增加,因此建议在高烈度地区的建筑物考虑竖向地震作用对结构的影响<sup>[6]</sup>。黄昆指出在耦合地震作用下结构的地震反应比单纯水平地震作用下有所增加,以倾覆力矩的增加最明显,因此高烈度地区应该考虑竖向地震的影响<sup>[7]</sup>。张玉梅采用集总参数法,推导了结构在竖向地震和水平地震作用下的运动方程,对某高层建筑的地震反应进行了数值分析,结果表明:竖向地震作用使结构的地震反应有不同程度的增加<sup>[8]</sup>。

本文将探讨核电站结构水平与竖向地震响应的耦合作用。对以核电站 AP1000 结构为原型的结构模型进行振动台试验,通过对该模型在 RG1.60 地震波单向和三向激励下的加速度响应进行对比分析,探讨核电站结构竖向激励和水平向地震响应的耦合作用。

## 1 试验概况

### 1.1 模型设计

选择频率相似常数  $S_f$  为主要控制参数,使原型结构的上部结构、隔震系统、土三者的频率与模型结构的三者频率之比等于频率相似常数。本次试验取  $S_f = 3.3$ 。在相似比设计中,参考了周颖等提出的振动台试验模型等效设计方法<sup>[9]</sup>。原型结构与模型结构的频率如表 1 所示。在土箱选用上,参考陈跃庆等提出的柔性土箱,该容器可以较好地消除边界效应对土体地震反应的影响,为进行结构—地基相互作用体系的振动台试验提供了条件<sup>[10]</sup>。柔性容器取为圆筒体,侧壁采用橡胶膜,固定在上环板和底板上,上环板和底板间用上下端均带万向铰的支杆予以支撑。土的实测密度为 1 890 kg/m<sup>3</sup>,实测剪切波速为 88.4 m/s。根据原型结构与模型结构的频率对应关系,原型结构的场地参考 APR1400 九个设计场地中的五号场地,即选取 4.3 Hz 作为原型场地频率<sup>[11]</sup>。本次试验的模型连接示意图如图 1 和图 2 所示。

表 1 原型结构与模型结构的频率

Table 1 The frequency of the prototype structure and the model structure

部位 \ 频率	原型频率	模型频率
上部结构	3.27	10.80
隔震系统	0.68	2.24
土	4.30	14.20

### 1.2 地震波选取

在 AP1000 的抗震设计中, RG1.60 规范反应谱是一个主要的设计谱。本文选取人工波 RG1.60 波<sup>[12]</sup>。该波为拟合的地震记录,持时 20.48 s,按照  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向峰值 1:1:0.67,  $X$  向和  $Y$  向最大加速度为 0.5 g,  $Z$  最大加速度为 0.33 g。对应的加速度时程如图 3—图 5 所示。

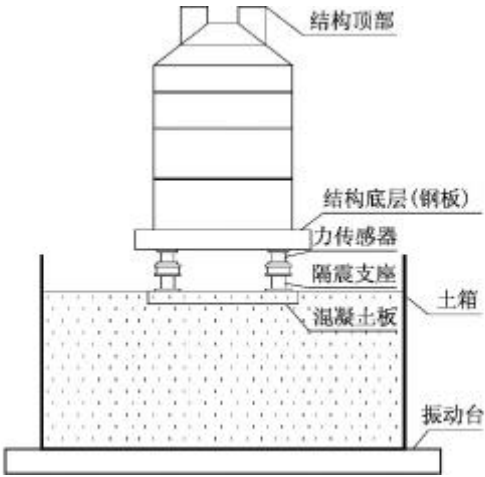


图1 土性地基-有隔震连接示意图  
Fig.1 Soil foundation-structure with isolation

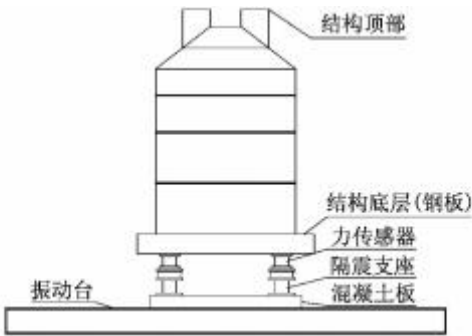


图2 刚性地基-有隔震连接示意图  
Fig.2 Rigid foundation-structure without isolation

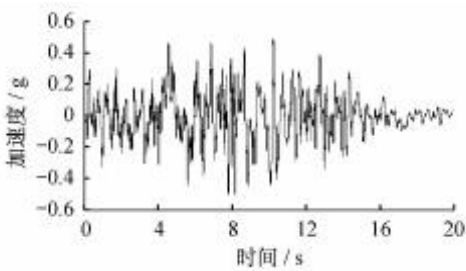


图3 RG1.60波X向时程  
Fig.3 Time-history curve of RG1.60 wave (X)

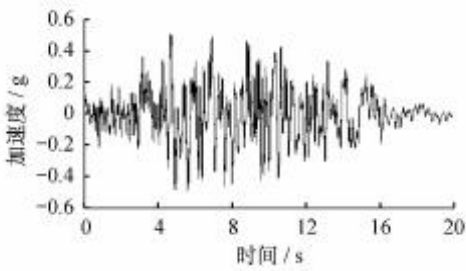


图4 RG1.60波Y向时程  
Fig.4 Time-history curve of RG1.60 wave (Y)

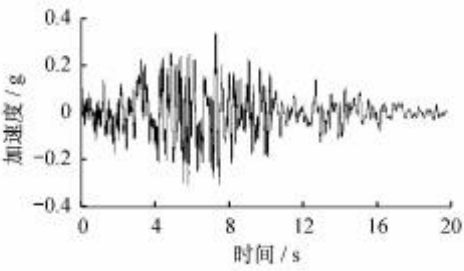


图5 RG1.60波Z向时程  
Fig.5 Time-history curve of RG1.60 wave (Z)

1.3 试验组

为了对比核电结构模型在不同地基上的地震响应,设置了土性地基和刚性地基对照组。为了探讨隔震支座对水平向竖向响应耦合作用的影响,设置了有隔震支座和无隔震支座两种情况。其中隔震支座选用铅芯橡胶隔震支座。该隔震支座为圆柱形,高10 cm,直径10.4 cm。试验组及内容见表2,试验顺序按表中组进行。在每一个试验组中,在不同水准地震波输入前后,对模型进行白噪声扫频,测量结构的自振频率、阵型和阻尼比等动力特征参数。

表2 试验组			
Table	The schedule of the test groups		
试验组序号	试验组编号	地基情况	隔震情况
1	SPL	土性地基	铅芯隔震支座
2	SPN	土性地基	无隔震
3	RPL	刚性地基	铅芯隔震支座
4	RPN	刚性地基	无隔震

2 刚性地基地震响应分析

试验结果分析得出,试验模型的上部结构频率为10.80 Hz,隔震系统的频率2.24 Hz。

2.1 刚性地基无隔震试验组加速度响应

图6为刚性地基-无隔震(RPN)试验组振动台输入谱。由于单向和三向地震输入时,x向模拟地震波无法保证完全一样,所以采用楼层加速度反应谱放大系数来进行分析。楼层加速度反应谱放大系数的含义为每个频率处楼层加速度反应谱的值与输入地震动反应谱的比值。图7为刚性地基-无隔震(RPN)试验组结构顶部加速度反应谱。图8为刚性地基-无隔震(RPN)试验组试验

结果,从图中曲线可以看出: 10 Hz 左右时楼层加速度反应谱放大系数出现峰值,该处为上部结构频率附近。在该峰值处,三向输入比单向输入放大效果更明显,说明竖向激励和水平向响应之间存在耦合作用。即同时施加竖向激励与水平向激励的水平响应,大于水平激励下的水平响应。竖向激励会导致水平向响应变大,即竖向激励和水平向响应之间存在耦合作用。

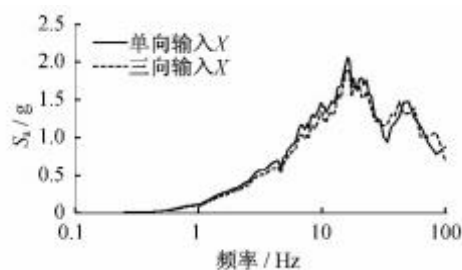


图6 RPN 试验组振动台输入谱

Fig. 6 Earthquake excitation spectrum of the shaking table ( RPN test group)

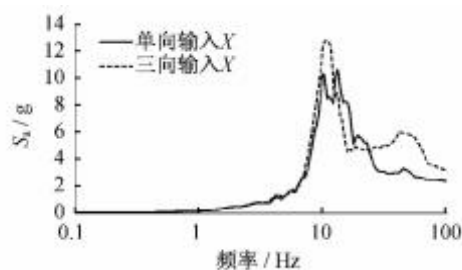


图7 RPN 试验组结构顶部加速度反应谱

Fig. 7 Acceleration response spectrum on top of the structure ( RPN test group)

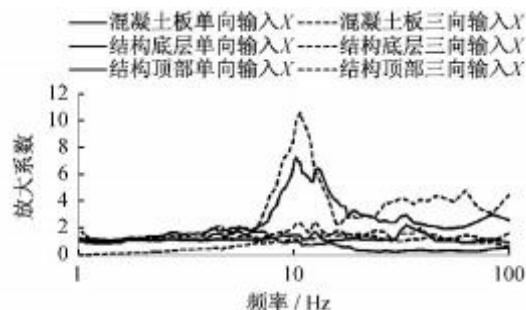


图8 RPN 试验组-加速度响应放大系数

Fig. 8 Amplification factor of the acceleration response ( RPN test group)

## 2.2 刚性地基有隔震试验组加速度响应

图9 为刚性地基有隔震( RPL) 试验组试验结

果,从图中曲线可以看出: 对上部结构( 结构顶层和结构底层) 来说,三向地震输入的放大系数大于单向地震输入的放大系数。即上部结构的三向地震输入的加速度响应大于单向地震输入的加速度响应。

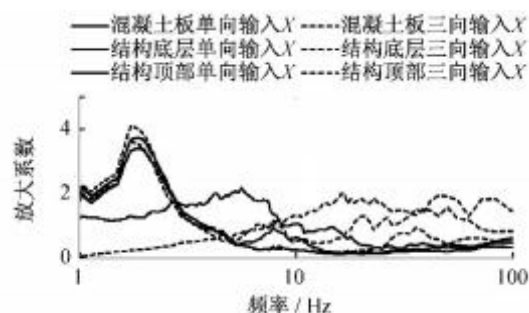


图9 RPL 试验组-加速度响应放大系数

Fig. 9 Amplification factor of the acceleration response ( RPL test group)

## 3 考虑 SSI 效应的地震响应分析

### 3.1 土性地基无隔震试验组加速度响应

图10 为土性地基-无隔震( SPN) 试验组试验结果,从图中曲线可以看出: 结构顶部响应的峰值出现在 3 Hz 至 6 Hz 处,与刚性地基上峰值出现在 10 Hz 左右处不同,这是由于在土-结构相互作用的影响下系统的频率发生了变化。对结构来说,在 2 ~ 10 Hz 范围内,单向地震输入的放大系数大于三向地震输入的放大系数,即单向地震输入的加速度响应大于三向地震输入的加速度响应。

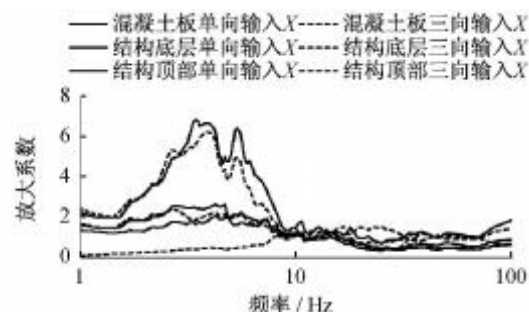


图10 SPN 试验组-加速度响应放大系数

Fig. 10 Amplification factor of the acceleration response ( SPN test group)

Ioannis Politopoulos 提到在有 SSI 作用时竖向激励与水平向响应的耦合关系会发生一定程度的变化<sup>[3]</sup>,以上的试验结果体现出了这种趋势: 有

SSI 效应时与无 SSI 效应时的结果有所不同。

### 3.2 土性地基有隔震试验组加速度响应

图 11 为土性地基-有隔震(SPL) 试验组试验结果,从图中曲线可以看出:有隔震试验组,响应峰值出现在 1~2 Hz 处,与无隔震试验组的 3~6 Hz 形成对比。在隔震系统频率 2.24 Hz 附近,单向地震输入的放大系数大于三向地震输入的放大系数,即单向地震输入的加速度响应大于三向地震输入的加速度响应。

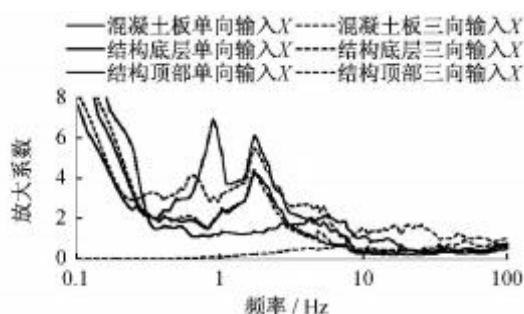


图 11 SPL 试验组-加速度响应放大系数

Fig. 11 Amplification factor of the acceleration response (SPL test group)

## 4 结 论

本文为了验证核电站 AP1000 结构模型的竖向激励和水平向地震响应的耦合作用,通过振动台试验,对该结构模型在单向和三向 RG1.60 地震波激励下的加速度响应进行了对比分析。分别对比刚性地基和土性地基上单向波和三向波的响应结果,得出以下结论:

#### 1) 对刚性地基

无隔震时,对上部结构,在结构频率 10 Hz 附近,三向地震输入的楼层加速度响应大于单向地震输入的加速度响应;有隔震时,对上部结构,三向地震输入的加速度响应大于单向地震输入的加速度响应。

#### 2) 对土性地基

无隔震时,对上部结构,在 2~10 Hz 范围处,单向地震输入的加速度响应大于三向地震输入的加速度响应;有隔震时,对上部结构,在隔震系统频率附近,单向地震输入的加速度响应大于三向地震输入的加速度响应。

## 参考文献

- [1] Hijikata K, Takahashi M, Aoyagi T, et al. Behavior of a base-isolated building at Fukushima dai-ichi nuclear power plant during the great east Japan earthquake. International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, March 1-4, JAEE, Tokyo, Japan, 2012.
- [2] Zhiguang Zhou, Jenna Wong, Stephen Mahin. Potentiality of using vertical and three-dimensional isolation systems in nuclear structures [J]. Nuclear Engineering & Technology, 2016, 48( 5) : 1237-1251.
- [3] Ioannis Politopoulos, Nadim Moussallam. Horizontal floor response spectra of base-isolated buildings due to vertical excitation [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012, 41( 3) : 587-592.
- [4] 汪向荣,游忠翰,林旺春,等. 垂直扰动对于斜面式滚动隔震支承水平性能之影响探讨 [C]. 第四届海峡两岸地震工程青年学者研讨会暨第六届壹湾边界元素法会议,台湾,2015.  
Wang Xiangrong, You Zhonghan, Lin Wangchun, et al. Effect of vertical excitation on horizontal performance of sloped rolling-type isolation bearings [C]. The Fifth Earthquake Engineering Seminar for Young Scholars from Both Sides of the Taiwan Straits. Taiwan, 2015. ( in Chinese)
- [5] 黄昱华,刘洪兵. 框架结构水平和竖向地震耦合作用时程分析 [J]. 内陆地震, 2007, 21( 1) : 58-65.  
Huang Yuhua, Liu Hongbing. The time history analysis of frame structure subjected to the coupling excitation of the vertical and horizontal seismic component [J]. Inland Earthquake, 2007, 21( 1) : 58-65. ( in Chinese)
- [6] 张延年,董锦坤,朱朝艳,等. 考虑竖向地震作用的振动控制及其优化研究 [J]. 力学与实践, 2006, 28( 3) : 24-29.  
Zhang Yannian, Dong Jinkun, Zhu Chaoya, et al. Seismic response control of vertical earthquake is of structures when the effect considered and its optimization [J]. Mechanics in Engineering, 2006, 28( 3) : 24-29. ( in Chinese)
- [7] 黄昆,邹立华. 考虑耦合地震作用的底层柔性结构体系振动控制 [J]. 自然灾害学报, 2014, 23( 6) : 116-123.  
Huang Kun, Zou Lihua. Vibration control of soft-first story structure considering coupling seismic action [J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23( 6) : 116-123. ( in Chinese)
- [8] 张玉梅,宋玉普,张晓东. 多向地震耦合作用下高

- 耸结构土—结构动力相互研究 [J]. 工程力学, 2008, 25(2): 154-159.
- Zhang Yumei, Song Yupu, Zhang Xiaodong. Investigating the soil structure dynamic interaction for tall buildings under coupled action of multi-directional earthquake [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(2): 154-159. (in Chinese)
- [9] 周颖, 吕西林, 卢文胜. 不同结构的振动台试验模型等效设计方法 [J]. 结构工程师, 2006, 22(4): 37-40.
- Zhou Ying, Lv Xilin, Lü Wensheng. Shaking table test model design in different structures [J]. Structural Engineers, 2006, 22(4): 37-40. (in Chinese)
- [10] 陈跃庆, 吕西林, 黄炜. 结构—地基相互作用振动台试验中土体边界条件的模拟方法 [J]. 结构工程师, 2000(3): 25-30.
- Chen Yueqing, Lü Xilin, Huang Wei. Simulation method of soil boundary condition in shaking table tests of soil-structure interaction [J]. Structural Engineers, 2000(3): 25-30. (in Chinese)
- [11] Paul C. Rizzo Associates, Inc., Western Region (Rizzo-West), “Advanced Nuclear Power Plant APR1000, Determination of Seismic Analysis Parameters for Site Envelope Design”, Final Report Submitted to Korea Power Engineering Company, Inc. (KOP-EC), March 30, 2010.
- [12] 周志光. 核电厂隔震设计相关规范的现状及发展 [J]. 结构工程师, 2013, 29(5): 180-187.
- Zhou Zhiguang. The status and development of design codes for seismic isolated nuclear power plants [J]. Structural Engineers, 2013, 29(5): 180-187. (in Chinese)