

AP1000 核电厂模型基底隔震振动台试验研究

周志光, 周龙定, 赵锦一

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 为研究 AP1000 核电厂基底隔震性能, 设计了缩尺比为 1/40 的 AP1000 核电厂模型结构, 进行了 AP1000 核电厂模型基底隔震振动台试验。试验中采用铅芯橡胶隔震支座进行隔震, 并选取 RG1.60 人工波、El Centro 波和 Kobe 波作为地震动输入。本文从加速度响应、楼层加速度反应谱、加速度峰值放大系数、减震率等方面对隔震与非隔震核电厂结构的地震响应特性进行了研究。试验结果表明: 隔震能明显减小上部结构水平向加速度响应和加速度反应谱峰值, 而在隔震频率处隔震模型加速度反应谱有所增加; 隔震模型由于摇摆效应在隔震频率处的水平向楼层加速度反应谱随楼层高度的升高先减小后增大; 在三向输入地震动作用下, 隔震和非隔震 AP1000 模型各楼层在竖向基频附近的竖向加速度反应谱较竖向输入的地震动放大较为明显。

关键词: 核电厂; 隔震; 振动台试验; 加速度反应谱; 摇摆效应

中图分类号: TU271.5

文献标志码: A

Shaking table test study of AP1000 base-isolated nuclear power plant

ZHOU Zhiguang, ZHOU Longding, ZHAO Jinyi

(Department of Civil Engineering of Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to study the base isolation performance of the AP1000 nuclear power plant (NPP), the AP1000 model structure was designed with a scale ratio of 1/40, and a base-isolation shaking table test was carried out. In the test, the lead rubber bearing was used for isolation, and RG 1.60 artificial wave, El Centro wave and Kobe wave were selected as ground motion input. In this paper, the seismic response characteristics of isolated and non-isolated NPP structure are studied from acceleration response, floor acceleration response spectrum, acceleration peak amplification factor and shock absorption rate. The test results show that the isolation can significantly reduce the horizontal acceleration response and the peak of the acceleration response spectrum of the superstructure, while the acceleration response spectrum of the isolation model increases at the isolation frequency. Because of the rocking effect, the horizontal acceleration response spectrum of the isolation model at the isolation frequency decreases first and then increases with the increase of the floor height. The seismic effect gradually increases with the increase of the input amplitude. Under the three-way input, the floor response spectrum values of isolated and non-isolated AP1000 model near the vertical fundamental frequency are obviously amplified compared with the input ground motion spectrum.

Key words: nuclear power plant; isolation; shaking table test; acceleration response spectrum; rocking effect

收稿日期: 2019-05-14; 修订日期: 2019-10-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51778491)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (51778491)

作者简介: 周志光 (1976-), 男, 副教授, 博士, 主要从事核电站抗震研究. E-mail: zgzhou@tongji.edu.cn

通讯作者: 周龙定 (1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事核电站抗震研究. E-mail: 1732355@tongji.edu.cn

引言

隔震的基本原理是通过在基础上放置柔性的隔震支座把结构的自然周期延长,比如延长到 $2\sim 4\text{ s}$,从而减弱地震动对结构的影响。隔震技术应用于核电工程能使核电厂结构获得许多潜在的好处,可以整体改进核电工程的安全性和可靠性,其中最重要的是使得核电厂的抗震设计和建造标准化^[1-4]。当针对不同程度地震动设计时,可以选择不同的隔震体系来满足这种变化,而不需要对隔震层上部的“结构、系统和部件(SSC)”进行重新设计。由于SSC的复杂性,避免SSC的重新设计可以节省大量人力及财力,而且采用运行记录良好的成熟SSC设计也更安全。此外,核电厂采用隔震技术还有其它优点^[2-11]: 1) 改善核电厂的抗震性能,增加其抗震安全裕度,降低SSC的抗震需求,提升其抗震性能,使得在地震高烈度区建核电厂成为可能; 2) 减少非结构性破坏,能让核电厂在经历大地震后快速恢复正常电力生产; 3) 未来随着人们对地震认识的提高,核电厂厂区地震灾害定义潜在的改变带来的影响较小,可以通过更换隔震装置或者补充阻尼耗能装置来应对; 4) 监管部门易于对核电厂的抗震性能进行评价,采用隔震技术后,即使碰到设计基准外事件,隔震层上部的SSC保持弹性,整个系统的非线性集中在隔震支座,可以根据隔震支座的实验数据对数值模型进行标定,数值分析的可靠性更高,免除了采用固定基底时SSC会广泛出现的局部屈服的问题。

虽然隔震技术已相当成熟,在我国的民用建筑中应用非常广泛,我国隔震建筑的数量也仅次于日本,但目前我国尚未将基底隔震技术应用于核岛结构。主要是由于核电厂隔震设计相关规范的不完善、新建核电厂审批的复杂性及耗时性等原因,隔震在核电工程中的应用很少^[3-5]。目前已经商业运行的核电厂中,只有南非的Koeberg核电厂和法国的Cruas核电厂使用了隔震技术^[3-4,12]。由于Koeberg核电厂和Cruas核电厂未经历过强震,无法取得实验数据表明隔震技术应用于核电厂的有效性^[13],但是在2011年福岛核泄露事件中,采用基底隔震技术的福岛核电厂“紧急应变中心”建筑物在地震后性能完好,在灾后发挥了重要的救灾作用^[14],这表明基底隔震在核电厂上有广阔的应用前景。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,隔震支座上部的水平向加速度峰值相对下部的峰值减小了 $2/3$ 左右^[15],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^[14]。竖向较柔的隔震支座也可能会导致上部结构产生摇摆效应,从而出现楼层反应谱随着楼层高度的升高先减小后增加的现象^[16]。目前广泛使用的隔震支座只能降低结构的水平地震响应,结构的竖向地震响应会放大^[14],并且水平向和竖向反应之间存在耦合效应^[17]。

随着第三代非能动AP1000机组在我国的发展和建设,给隔震技术在核电厂上的应用带来巨大机遇,主要表现在: 与常规压水堆相比,AP1000机组大大简化了电厂建造,使用较少的安全级和非安全级的设备,大部分主回路系统设备处于厂房中较低的位置^[18],隔震带来的楼层反应谱的变化对设备抗震的影响也将减小。因此,开展隔震技术的研究,对我国新一代机组的应用具有重大意义。

为了解核电厂结构、隔震系统以及基础作为一个整体考虑时的地震动响应特性及规律,选取第三代核反应堆AP1000厂房结构作为研究对象,进行AP1000核电厂模型基底隔震振动台试验。本文分别从隔震与非隔震、单向输入与三向输入、地震动输入幅值等方面对核电厂隔震结构的地震响应特性进行了研究。

1 振动台试验模型设计

1.1 AP1000屏蔽厂房概述

本试验研究的原型结构为AP1000核电厂核岛部分的屏蔽厂房结构。屏蔽厂房为预应力混凝土结构,钢材为SA738(Grade B),屈服强度 $f_y=415\text{ MPa}$,弹性模量 $E=201.15\text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.3$; 混凝土弹性模量 $E=32.5\text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.2$ 。屏蔽厂房主要由筒壁和非能动水箱组成,总高约 71.05 m ,圆筒外径 44.20 m ,内径 42.36 m ; 非能动水箱未存水时,屏蔽厂房加非能动水箱的总质量约为 $17\,780\text{ t}$ 。

1.2 振动台试验模型简介

以AP1000屏蔽厂房为原型结构,按 $1/40$ 的缩尺比设计模型结构,模型用有机玻璃为材料制作,并采用钢板配重,其中上部模型分3层共配重 340 kg ,配重后上部模型共重 422 kg 。钢底板重 $1\,873\text{ kg}$,钢底板的重

量是为了使隔震体系的频率满足相似关系的要求,不影响上部结构的响应。模型总重 2 295 kg,原型和模型结构概况如表 1 所示。

模型配重均布置在原型结构质量较大的楼层高度处,这些部位的楼层反应是抗震分析时需要着重关注的。同时在结构某些高度处采用加厚处理,增加结构强度并使模型更接近于真实结构,模型设计图及照片如图 1 所示。

试验模型结构设置隔震支座体系,隔震层设置在基底与上部结构之间,由 4 个隔震支座组成。试验中隔震支座为铅芯橡胶隔震支座,如图 2 所示。

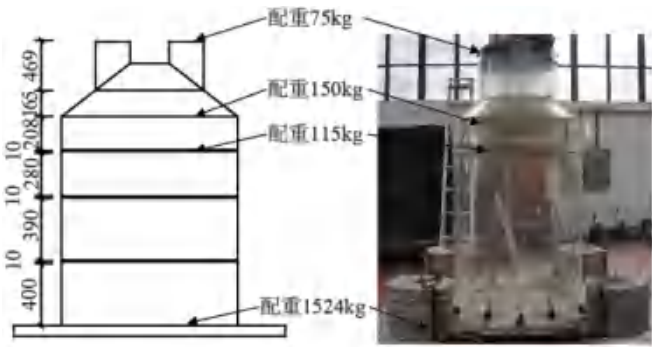


图 1 试验模型设计图及照片
Fig. 1 Design drawing and photo of test model



图 2 铅芯橡胶隔震支座
Fig. 2 Lead rubber isolation bearings

1.3 相似比设计

本试验为 AP1000 核电厂模型基底隔震振动台试验,选择频率相似常数 S_f 为主要控制参数,使模型结构的上部结构、隔震系统的频率与原型结构的频率之比等于频率相似常数。原型结构与模型结构的设计频率如表 2 所示,振动台试验相似比如表 3 所示。

表 2 原型结构与模型结构的设计频率

Table 2 Design frequency of prototype structure and model structures		
频率	原型频率(Hz)	模型频率(Hz)
上部结构	3. 27	10. 79
隔震系统	0. 63	2. 08

表 3 试验相似比

Table 3 Similarity ratio of test model			
物理性能	物理量	相似关系	相似常数
几何性能	长度	S_l	1/40
	弹性模量	S_E	0.08
材料性能	应力	$S_\sigma = S_m S_a / S_l^2$	0.056
	质量密度	$S_\rho = S_\sigma / (S_a S_l)$	8.26
	质量	S_m	0.000 13
荷载性能	集中力	$S_F = S_\sigma S_l^2$	0.000 035
	线荷载	$S_q = S_\sigma S_l$	0.001 4
	面荷载	S_σ	0.056
	力矩	$S_M = S_\sigma S_l^3$	8.8×10^{-7}
动力性能	时间	$S_T = S_l^{0.5} S_a^{-0.5}$	0.30
	频率	$S_f = S_l^{-0.5} S_a^{0.5}$	3.30
	速度	$S_v = (S_a S_l)^{0.5}$	0.082 5
	加速度	S_a	0.272

1.4 传感器布置

本试验采用同济大学土木工程防灾国家重点实验室 25 t 三向六自由度模拟地震振动台。试验中布置加速度传感器 16 个,位移传感器 7 个,力传感器 4 个,其中力传感器设置于隔震支座下方。振动台试验模型的传感器布置正视图和剖视图分别如图 3、图 4 所示。

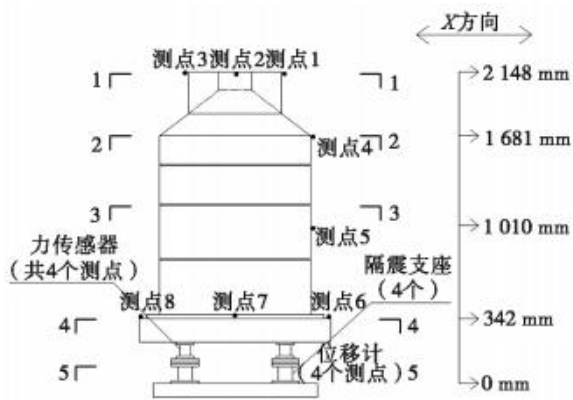


图 3 传感器布置正视图
Fig. 3 Sensor layout elevation

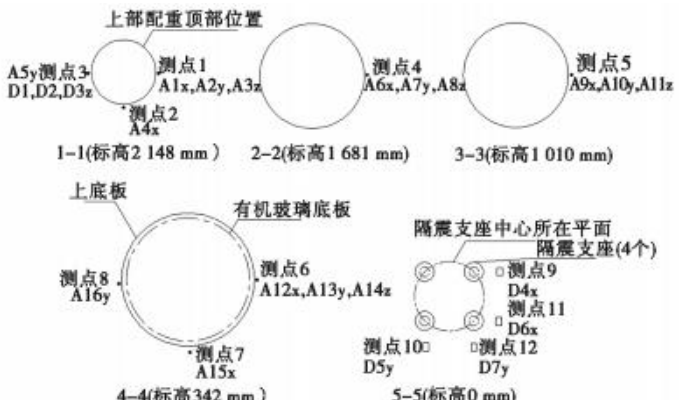


图 4 传感器布置剖视图
Fig. 4 Sensor layout cutaway view

1.5 地震动选取

本次试验选用两条天然波和一条人工波作为振动台台面激励。天然波包含 El Centro 波和 Kobe 波,均为三向激励。人工波 RG1.60 是根据 AP1000 设计地震反应谱生成的,包含单向激励和三向激励。每条地震动三个方向的地震输入彼此独立、各不相同。为了对比 3 条地震动的频谱特性,给出 AP1000 设计地震反应谱与 3 条地震动(三向加速度峰值均为 0.3 g)在阻尼比为 5% 时的加速度反应谱曲线,如图 5 所示。可见人工波 RG1.60 的加速度反应谱曲线与设计地震反应谱拟合较好。

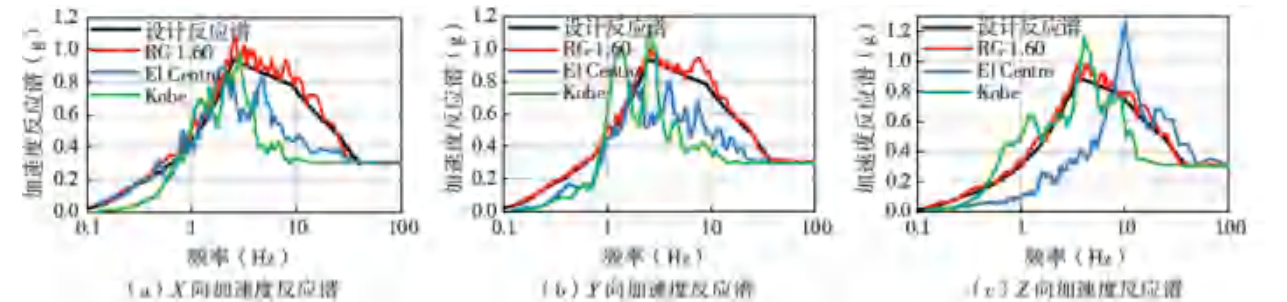


图 5 3 条地震动加速度反应谱和 AP1000 设计地震反应谱
Fig. 5 Three seismic wave acceleration response spectra and AP1000 designed seismic response spectra

1.6 工况设计

本文研究内容为刚性地基的 2 个试验组,隔震试验组和非隔震试验组。天然波(El Centro 波和 Kobe 波)均采用三向输入,人工波包含单向和三向输入,隔震试验组增加正弦波激励工况(工况 22)。模型试验时,各工况下输入的地震加速度幅值见表 4,同时本试验还采用白噪声激励,以得到模型的频率等动力特性。隔震试验组加载工况为表 4 中工况 1~22,非隔震试验组加载工况为表 4 中工况 1~21。

表 4 试验工况

Table 4 Test cases

工况	地震动类型	加载方向	地震动加速度幅值(g)			工况	地震动类型	加载方向	地震动加速度幅值(g)		
			X 向	Y 向	Z 向				X 向	Y 向	Z 向
1	白噪声	X、Y、Z	0.07	0.07	0.07	12	RG 1.60	X	0.573		
2	RG 1.60	X	0.172			13	RG 1.60	X、Y、Z	0.573	0.602	0.696

续表

工况	地震动类型	加载方向	地震动加速度幅值(g)			工况	地震动类型	加载方向	地震动加速度幅值(g)		
			X 向	Y 向	Z 向				X 向	Y 向	Z 向
3	RG 1.60	X、Y、Z	0.172	0.181	0.209	14	El Centro	X、Y、Z	0.679	0.562	0.294
4	El Centro	X、Y、Z	0.204	0.169	0.088	15	Kobe	X、Y、Z	0.820	0.809	0.444
5	Kobe	X、Y、Z	0.246	0.213	0.133	16	白噪声	X、Y、Z	0.07	0.07	0.07
6	白噪声	X、Y、Z	0.07	0.07	0.07	17	RG 1.60	X	0.859		
7	RG 1.60	X	0.344			18	RG 1.60	X、Y、Z	0.859	0.903	1.043
8	RG 1.60	X、Y、Z	0.344	0.361	0.417	19	El Centro	X、Y、Z	1.018	0.844	0.441
9	El Centro	X、Y、Z	0.407	0.337	0.176	20	Kobe	X、Y、Z	1.230	1.063	0.667
10	Kobe	X、Y、Z	0.492	0.425	0.267	21	白噪声	X、Y、Z	0.07	0.07	0.07
11	白噪声	X、Y、Z	0.07	0.07	0.07	22	正弦波	X			

2 振动台试验结果分析

本次试验结果分析主要针对对于刚性地基基底隔震和非隔震 AP1000 核电厂模型的地震响应。

2.1 模型动力特性分析

地震动输入前对模型结构输入三向峰值加速度均为 0.07 g 的白噪声激励。根据白噪声激励获得隔震模型和非隔震模型的动力特性如表 5 所示。由表 5 可知隔震模型和非隔震模型第 1 阶振型均为 Y 向平动，第 2 阶振型均为 X 向平动。

表 5 模型结构动力特性
Table 5 Model structure dynamic characteristics

试验组	1 阶频率(Hz)	2 阶频率(Hz)	竖向频率(Hz)
隔震模型	2.25(Y 向)	2.25(X 向)	18.87(Z 向)
非隔震模型	10.82(Y 向)	11.13(X 向)	11.14(Z 向)

2.2 单向输入地震响应研究

图 6 为单向(X 向) 输入 RG1.60 地震动下 隔震和非隔震 AP1000 模型结构顶部加速度时程对比图。从图 6 可以看出非隔震 AP1000 模型结构顶部加速度响应相对于输入地震动放大约 3.8 ~ 4.7 倍; 而隔震 AP1000 模型结构顶部的水平加速度相对于输入地震动可以降低约 27% ,同时相对于非隔震模型结构可以降低约 80% ~ 85% 。以工况 2 为例 X 向输入地震动幅值为 0.172 g 时 ,非隔震 AP1000 模型结构顶部加速度响应幅值为 0.813 g ,而隔震 AP1000 模型结构顶部加速度响应幅值则为 0.126 g。

图 7 为单向(X 向) 输入 RG1.60 地震动下 ,隔震和非隔震 AP1000 模型结构顶部楼层加速度反应谱对比。非隔震模型 X 向固有频率为 11.13 Hz ,而 X 向输入的 RG1.60 地震动的加速度反应谱最大值对应的频率接近非隔震模型 X 向固有频率; 故导致 X 向输入的 RG1.60 地震动下 ,非隔震 AP1000 模型结构顶部楼层加速度响应相对于输入地震动放大明显。隔震模型 X 向固有频率为 2.25 Hz ,避开了 X 向输入的 RG1.60 地震动的加速度反应谱最大值对应的频率; 故有 X 向输入的 RG1.60 地震动下 ,隔震 AP1000 模型结构顶部楼层加速度响应相对于输入地震动减小 ,同时相对于非隔震模型减小较大。

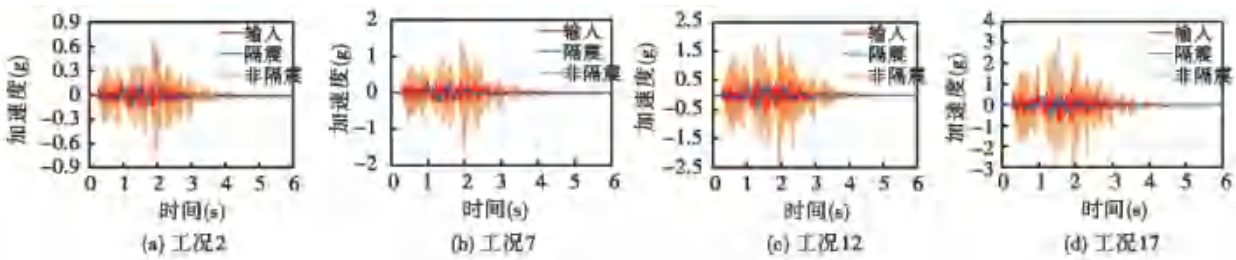


图 6 单向输入 RG1.60 下结构顶部加速度时程对比

Fig.6 Time history comparison of top acceleration of structure under unidirectional input RG1.60

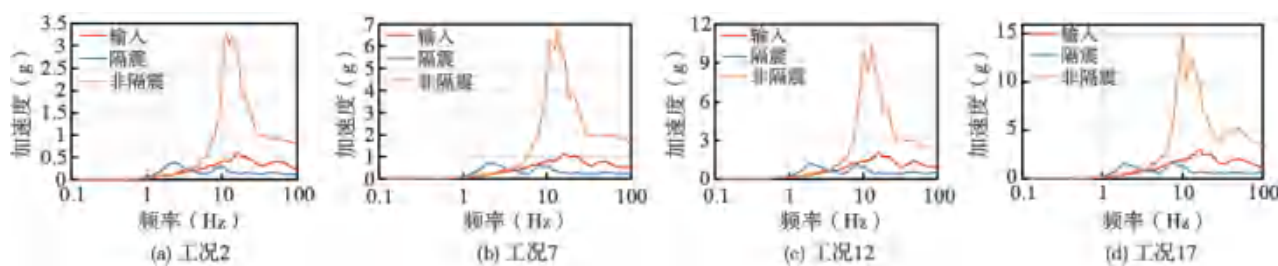
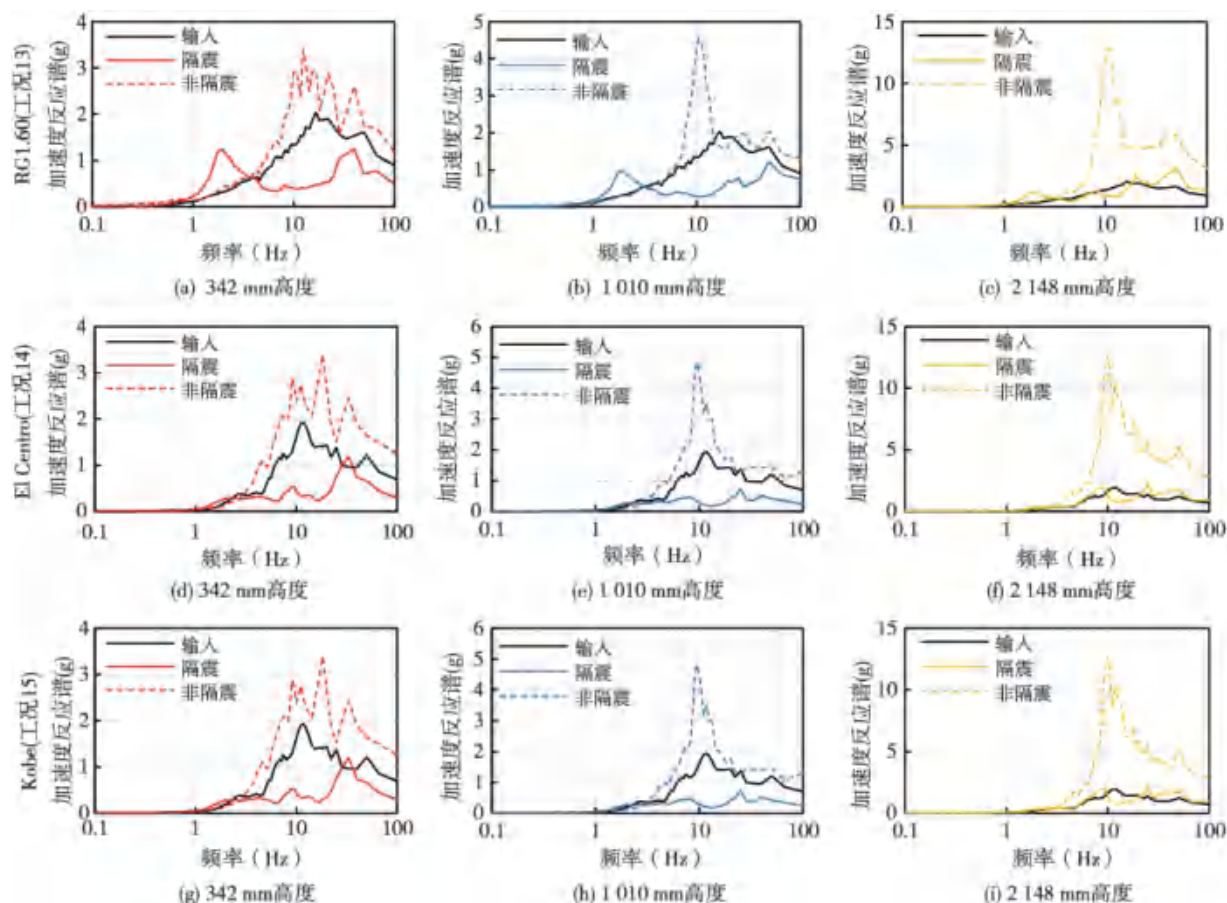


图7 单向输入 RG1.60 下结构顶部楼层加速度反应谱对比

Fig. 7 Acceleration response spectrum comparison of top floor of structure under unidirectional input RG1.60

2.3 三向输入地震响应研究

三向输入 RG1.60 波、El Centro 波以及 Kobe 波分别在相同输入幅值下隔震与非隔震模型 X 向各个高度处的加速度反应谱对比图如图 8 所示。从图中可以看出: 相对于非隔震模型, 三向输入地震动下隔震模型能明显减小上部结构自然频率处的加速度反应谱谱值, 而隔震模型在隔震频率处的加速度反应谱谱值相对于非隔震模型有所增加。在同一输入地震动下, 隔震模型加速度反应谱峰值相对于非隔震模型同一高度处加速度反应谱峰值降低明显。同一高度处隔震模型加速度反应谱在频率大于 4 Hz 时(避开隔震模型固有频率)比非隔震模型加速度反应谱降低明显, 可见隔震的效果较好。从图 8 中还可以看出对于相同输入下的同一条地震动, 非隔震模型在隔震模型的隔震频率处的 X 向楼层加速度反应谱基本遵循随着楼层高度升高而增大的规律, 而隔震模型在隔震频率处的 X 向楼层加速度反应谱则随着楼层高度的升高先减小后增大。这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。

图8 不同楼层高度处隔震与非隔震模型 X 向楼层加速度反应谱Fig. 8 X -direction floor acceleration response spectrum of isolated and non-isolated models at different floor heights

RG1.60 三向地震动输入下, 隔震和非隔震模型水平 Y 方向楼层加速度反应谱如图 9 所示, 图中 0 mm

处的加速度反应谱为输入地震动的加速度反应谱。对比图9中RG1.60三向输入地震动下隔震和非隔震模型的不同楼层处加速度反应谱可以看出有明显的隔震效果。 Y 向输入幅值0.181 g(工况3)非隔震模型上部结构的加速度反应谱峰值为4.53 g,而隔震模型的加速度反应谱峰值为0.97 g;隔震模型在隔震频率处的加速度反应谱峰值为0.47 g,而非隔震模型则为0.12 g。 Y 向输入幅值0.903 g(工况18)非隔震模型上部结构的加速度反应谱峰值为16.09 g,而隔震模型的加速度反应谱峰值为5.6 g;隔震模型在隔震频率处的加速度反应谱峰值为2.13 g,而非隔震模型则为0.81 g。对于隔震和非隔震模型,结构顶部的加速度反应谱较其它楼层放大较多。非隔震模型的 Y 向楼层加速度反应谱谱值在结构自身频率(10.82 Hz)附近遵循随高度增加逐渐增大。隔震模型由于摇摆效应在隔震频率处的 Y 向楼层加速度反应谱也随着楼层高度的升高先减小后增大。

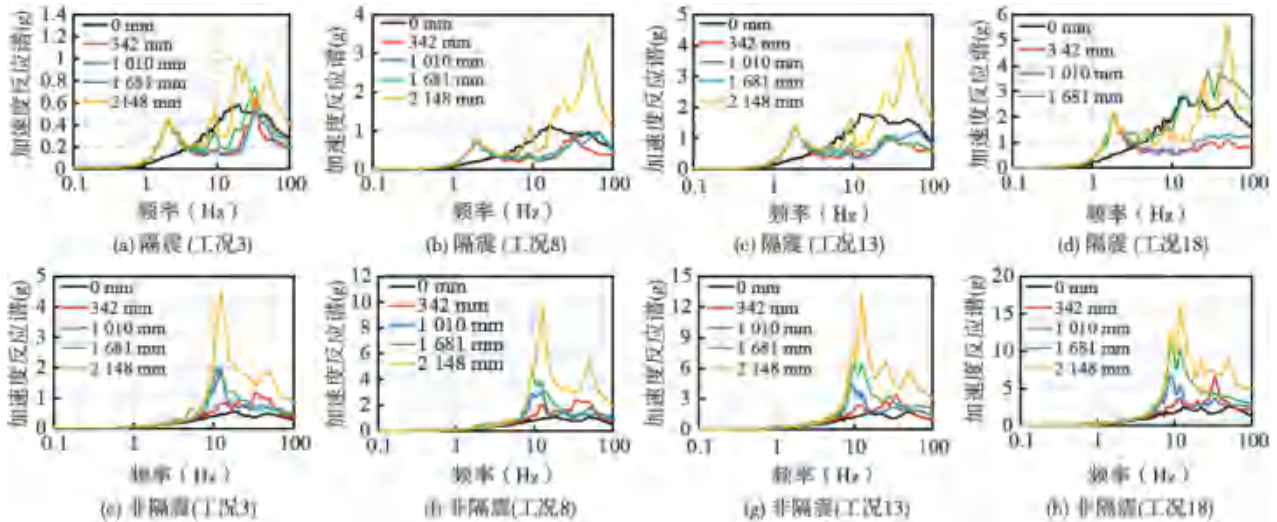


图9 RG1.60三向输入下隔震和非隔震模型 Y 向楼层加速度反应谱

Fig. 9 Y -direction floor acceleration response spectra of isolated and non-isolated models with three-way input RG1.60

定义楼层加速度峰值放大系数为楼层加速度峰值与输入地震动加速度峰值之比。利用试验中位于隔震层上部(标高342 mm)、上部结构中部(标高1010 mm)和上部结构上部(标高1681 mm)、上部结构顶部(标高2148 mm)这些不同高度处测点测得的加速度记录,可以得到相对于输入地震动的楼层加速度峰值放大系数。三条地震动在三向输入情况下,隔震和非隔震模型 Y 向楼层加速度峰值放大系数对比图如图10所示。

由图10可得,对于三条地震动,隔震层上部(标高342 mm)的加速度峰值均小于隔震层下部(标高0 mm)的加速度峰值(输入地震动的加速度峰值),体现出较好的隔震效果。隔震和非隔震模型上部结构的加速度峰值均出现在结构顶部,并且非隔震模型的加速度峰值随高度升高而增大,而隔震模型的加速度峰值随高度变化较小,隔震对于AP1000有明显的减震效果。

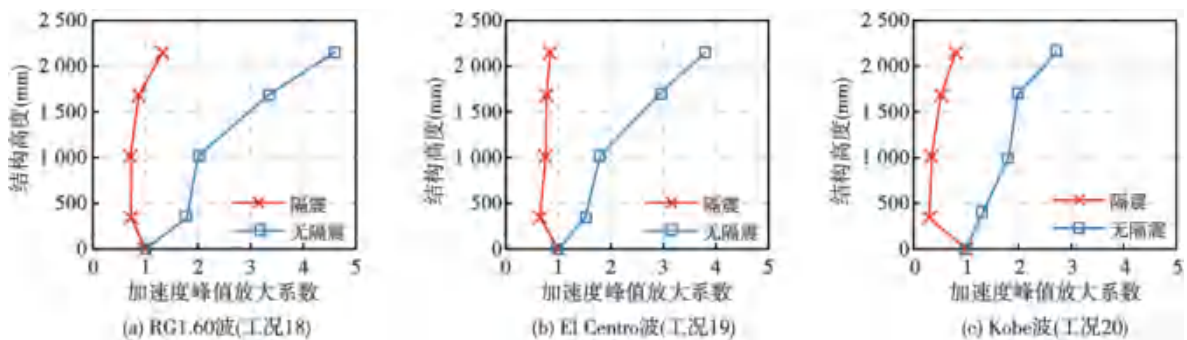


图10 隔震和非隔震模型 Y 向楼层加速度峰值放大系数对比图

Fig. 10 Comparison of amplification coefficient of peak floor acceleration in Y -direction of isolated and non-isolated models

定义减震率为:同一高度处隔震模型楼层加速度峰值与非隔震模型相应楼层加速度峰值的比值。图11为三向输入地震动时隔震模型的 Y 向减震率,通过图11(a)~图11(d)可以看出:RG1.60地震动的减震效果相对于Kobe波和El Centro波都较差;3条地震动三向输入下隔震层上部的减震率大约在30%~60%范围,结构中部的减震率大约在20%~50%范围,结构上部的减震率大约在10%~50%范围,结构顶部的减

震率大约在 10% ~ 50% 范围,基本遵循楼层高度越高减震率越小的规律,结构上部减震效果好于结构中部好于隔震层上部。

2.4 竖向地震响应研究

图 12 为 RG1.60 三向输入地震动时隔震与非隔震 AP1000 模型的竖向加速度反应谱曲线。从图中可以得出如下结论:

隔震 AP1000 模型结构,隔震层上部(标高 342 mm)的竖向加速度反应谱在 18.87 Hz(隔震模型 1 阶频率)附近达到峰值,且在 40 Hz 处出现第二峰值。非隔震 AP1000 模型结构,相应位置的竖向加速度反应谱在 11.14 Hz(非隔震模型 1 阶频率)附近出现第一峰值。

在隔震和非隔震情况下,各楼层竖向基频附近的谱值较竖向输入的地震动谱值放大较为明显。通过图 12 可以观察到,由于隔震层上部(标高 342 mm)有较大质量的钢板和质量块,地震动输入后加速度反应谱谱值峰值出现在隔震层上部,并且加速度反应谱谱值随着高度增加先减小后增加。因此对于竖向加速度敏感型构件或设备在放置于隔震层上部时应当加以注意。

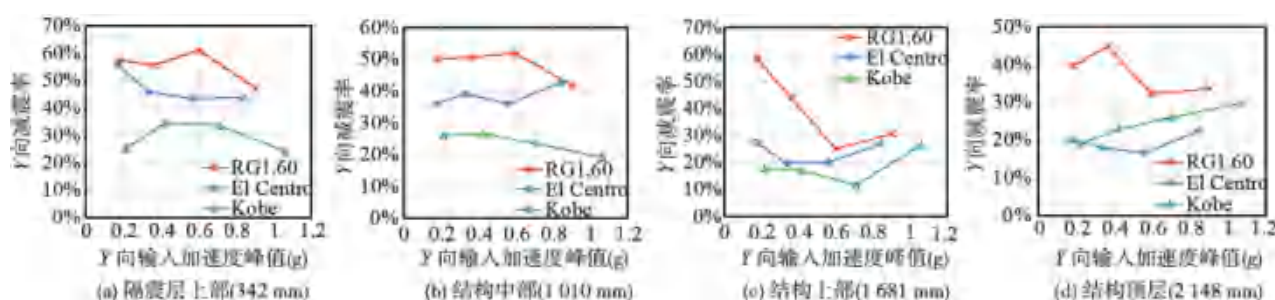


图 11 三向输入地震动时隔震模型的 Y 向减震率

Fig. 11 The Y-direction decreasing amplitude ratio of the three-way input earthquake isolation model

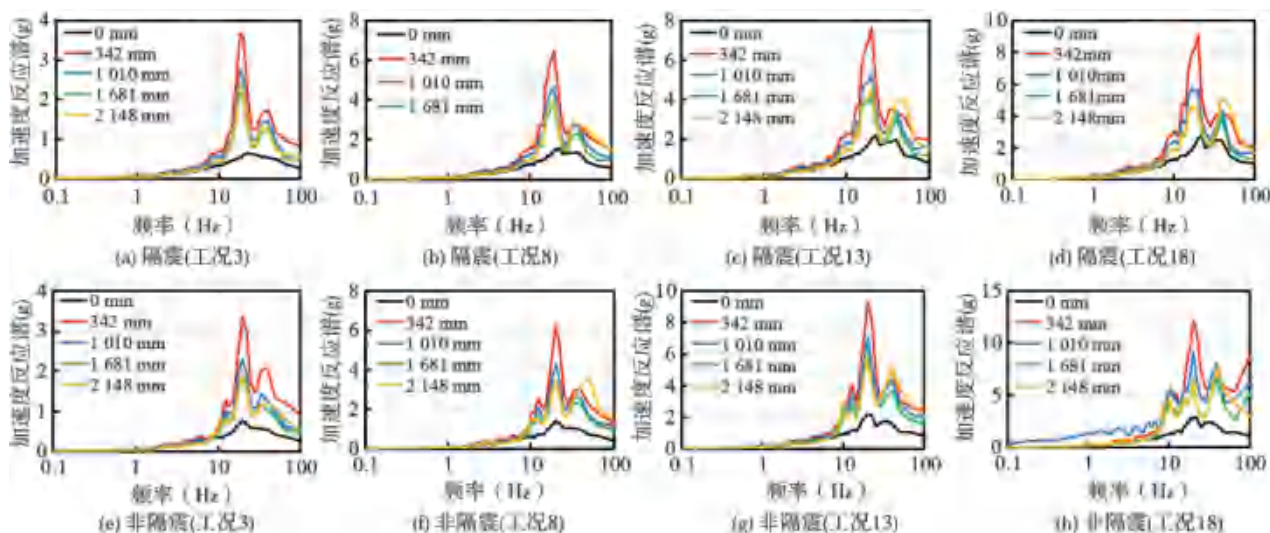


图 12 RG1.60 三向输入下隔震和非隔震模型竖向楼层加速度反应谱

Fig. 12 Z-direction floor acceleration response spectra of isolated and non-isolated models with three-way input RG1.60

3 结论

在当前中国核电厂大力发展的时期,隔震核电结构的安全性冗余度和抗大震性能仍是需要深入研究的问题。本文通过缩尺比为 1/40 的核电厂模型振动台试验,对比了隔震与非隔震核电厂模型楼层的地震响应,探讨了不同地震动、不同输入幅值地震动下核电厂的地震反应。主要结论如下:

(1) 单向输入 RG1.60 地震动下,隔震模型结构顶部的水平加速度相对于输入地震动可以降低约 27%,相对于非隔震模型结构可以降低约 80% ~ 85%。

(2) 隔震模型上部结构水平向加速度反应谱在频率大于 4Hz 时(避开隔震模型固有频率)比非隔震模型加速度反应谱降低明显,而在隔震频率处的加速度反应谱谱值较非隔震模型有所增加。

(3) 对于同一条地震动,非隔震模型在隔震模型的隔震频率处的水平向楼层加速度反应谱基本遵循随着楼层高度升高而增大的规律,而隔震模型由于摇摆效应在隔震频率处的水平向楼层加速度反应谱则随楼层高度的升高先减小后增大。

(4) 非隔震模型的楼层加速度峰值随高度升高而增大,而隔震模型的楼层加速度峰值随高度变化较小,隔震对于 AP1000 有明显的减震效果;并且楼层高度越高减震效果越好。

(5) 在三向输入地震动作用下,隔震和非隔震 AP1000 模型各楼层在竖向基频附近的竖向加速度反应谱较竖向输入的地震动放大较为明显。

参考文献:

- [1] 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]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2012, 32(1): 1-10. (in Chinese)
- [2] Eidinger J, Kelly J. Seismic isolation for nuclear power plants: technical and non-technical aspects in decision making[J]. Nuclear Engineering and Design, 1985, 84: 383-409.
- [3] Coladant Ch. Seismic isolation of nuclear power plants-EDF's philosophy[J]. Nuclear Engineering and Design, 1991, 127: 243-251.
- [4] Labbe P. Pioneering actual use of seismic isolation for nuclear facilities. 1st Kashiwazaki International Symposium on Seismic Safety of Nuclear Installations. Nov. 24-26, Kashiwazaki, Niigata, Japan, 2010.
- [5] Forni M. Seismic Isolation of Nuclear Power Plants[C]//Contribution to the "Italy in Japan 2011" initiative Science, Technology and Innovation, 2011: 1-8.
- [6] LD FRANO R, Forasassi G. Preliminary analysis of the structural effects due to dynamic loads of the isolated next generation lead cooled reactor [C]//20th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Seppo Vuori & Rouno Rinatamas-VTT, 2009: 1-9.
- [7] Diaz S. The anti-seismic bearings of ITER & JHR[J]. 1st Kashiwazaki International Symposium on Seismic Safety of Nuclear Installations, Kashiwazaki, Niigata, Japan, 2010.
- [8] Combescure D, Beltran F, Rueda F, et al. Structural analysis and optimization of the ITER-tokamak complex[C]//1st Kashiwazaki International Symposium on Seismic Safety of Nuclear Installations, Kashiwazaki, Niigata, Japan, 2010.
- [9] Germane L. Seismic isolation of the Jules Horowitz Reactor[C]//1st Kashiwazaki International Symposium on Seismic Safety of Nuclear Installations, Kashiwazaki, Niigata, Japan, 2010.
- [10] Kitamura S, Morishita M, Yabana S. et al. Shaking table tests with large specimens of seismically isolated FBR Plants-part 1: response behavior of test specimen under design ground motions[C]//ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference (PVP 2009), Prague, Czech Republic, 2009.
- [11] Okamura S, Kamishima Y, Negishi K, et al. Seismic isolation design for JSFR[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2011(4): 688-692.
- [12] 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.
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. (in Chinese)
- [13] Wong J, Zhou Z, Mahin S. On-going research activities for seismically isolated facilities at nuclear power stations[C]//Report of Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 2012.
- [14] 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[C]//International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, JAEE, Tokyo, Japan, 2012.
- [15] 周志光,孙朝鑫. 东日本大地震福岛核电厂震动实测数据分析[J]. 地震工程与工程振动, 2016, 36(3): 8-15.
ZHOU Zhiguang, SUN Chaoxin. Seismic response analysis of Fukushima nuclear power plants under the 2011 Great Eastern Japan Earthquake [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2016, 36(3): 8-15. (in Chinese)
- [16] Zhou Z, Wong J, Mahin S. Potentiality of using vertical and three-dimensional isolation systems in nuclear structures[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2016, 48(5): 1237-1251.
- [17] Politopoulos I, Moussallam N. Horizontal floor spectra of base-isolated buildings due to vertical excitation[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2012, 41(3): 587-592.
- [18] 臧明昌. 第三代核电和西屋公司 AP1000 评述[J]. 核科学与工程, 2005, 25(2): 106-115.
ZANG Mingchang. Current status of generation III nuclear power and assessment of AP1000 developed by Westinghouse[J]. Chinese Journal of Nuclear Science & Engineering, 2005, 25(2): 106-115. (in Chinese)