

考虑土-结构相互作用效应和隔震的核电 结构振动台试验研究^{*}

周志光 陈 浩 赵锦一

(同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 土-结构相互作用(SSI)对结构地震响应有明显的影响。为研究SSI效应对核电结构的影响,选取第三代核反应堆AP1000安全壳结构为研究对象,制作了1/40的安全壳模型进行振动台试验,采用柔性土箱消除边界效应。试验结果表明:1)对于核电非隔震结构,考虑SSI会降低系统自振频率,上部结构加速度反应谱高频成分减少,峰值频率从高频向低频移动,土体表现出一定的隔震效果,降低了某些频率处的加速度谱响应;2)对于核电隔震结构,考虑SSI几乎不对自振频率产生影响,但SSI效应会削弱隔震效果以及会加大某些频率处的加速度响应。

关键词: 核电结构; 土-结构相互作用; 隔震; 振动台试验; 楼层反应谱

DOI: 10.13204/j.gyjzG19100102

Study on Shaking Table Test of Nuclear Structure Considering SSI Effect and Isolation

ZHOU Zhiguang CHEN Hao ZHAO Jinyi

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

Abstract: Soil-structure interaction (SSI) has obvious influence on structural seismic response. To study the effect of SSI on nuclear, taking the third-generation reactor AP1000 containment structure as the object, a 1/40 scale model was fabricated for the shaking table test, and a flexible soil container was applied to simulate the unlimited site and eliminate the boundary effect as far as possible. The results indicate that: 1) for the non-isolated NPP structure, considering SSI will reduce the natural frequency of the model. Meanwhile, the effect makes the high-frequency component of the acceleration decrease, and the peak frequency moves from high frequency to low frequency. Therefore, the soil shows a certain isolation effect and reduces the acceleration of the containment structure; 2) for isolated NPP structure, considering SSI has almost no effect on the natural frequency, but SSI effect will weaken the isolation effect and increase the acceleration value at some frequencies.

Keywords: nuclear power plant; soil-structure interaction; seismic isolation; shaking table test; floor response spectrum

核电是一种技术成熟的能源,与火电、水电构成世界能源的三大支柱,具有高效、清洁、低成本等特点^[1]。发展核电是解决当前及未来能源危机和环境问题的有效途径之一。日本311大地震引发的核电泄漏事故引起世界对核电安全的关注。隔震技术是最为常见有效的减轻地震作用手段之一,不仅广泛应用于各类建筑,而且在核电重要基础设施中得以应用^[2]。隔震的基本原理是在基础上放置柔性的隔震支座使结构的基本周期延长,从而减弱地震动对结构的影响。核电结构采用隔震技术除改善抗震性能外,最重要的是使核电抗震设计标准化^[3-4]。

土-结构动力相互作用(简称SSI)效应主要表现为三点:地面运动特性改变、结构动力特征改变及结构响应改变^[5]。现有的结构抗震设计大多采用刚性地基假定,考虑到核电结构的特殊性(质量大、

刚度大、安全性要求高等),仍采用刚性地基假定的抗震设计可能影响到核电的安全性。李小军等对非基岩场地的CAP1400核电结构进行振动台试验,结果表明:核电结构地震响应受场地条件的影响明显,在分析中应考虑SSI效应^[6]。因此,考虑SSI效应和隔震的核电结构研究是核电抗震设计与安全分析中的重要课题。

目前,国内外学者已经开展了一些有关SSI效应对隔震结构影响的研究。Constantinou等对采用基底隔震的单自由度结构进行分析,以体系基频的

* 国家自然科学基金面上项目(51778491)。

第一作者:周志光,男,1976年出生,博士,副教授。

电子信箱:zgzhou@tongji.edu.cn

收稿日期:2019-10-01

变化程度作为判别 SSI 效应对体系的影响标志^[7]。李忠献等对比了刚性地基与土性地基下橡胶隔震结构地震响应,发现考虑 SSI 后,隔震结构与未隔震结构的层间位移和剪力变化规律较为复杂,不能简单地认为传统抗震计算方法中不考虑 SSI 是偏于安全的^[8]。邹立华等分析了桩-土相互作用对隔震结构的影响,认为在一般隔震结构设计中可以不考虑 SSI 效应的影响^[9]。李延涛系统研究了考虑 SSI 效应的基础隔震与结构控制,其研究表明,软土地基上进行基础隔震与结构控制设计,必须考虑 SSI 对基础隔震与结构控制的影响^[10]。李海岭、王阿萍等采用子结构法分析 SSI 对线性基础隔震体系基频和结构响应的影响,指出基于刚性地基假定的隔震结构设计并不总偏于安全^[11-12]。

本文选取第三代核反应堆 AP1000 安全壳结构作为研究对象进行振动台试验,从隔震与非隔震、土性地基与刚性地基等方面对核电结构的地震响应特性进行研究。

1 试验概况

1.1 模型设计及制作

本文选取 AP1000 安全壳原型结构为研究对象。振动台试验模型由上部结构、隔震层以及地基土组成,见图 1。上部结构按照 1/40 的比例进行设计,模型采用有机玻璃制作,并在原型结构质量较大的楼层高度处采用钢板配重,使模型更接近于真实结构,其中上部结构共配重 3.4 kN。为满足隔震层的频率相似关系,且不影响上部结构响应,在模型底部配重 15.24 kN 钢板(图 2)。

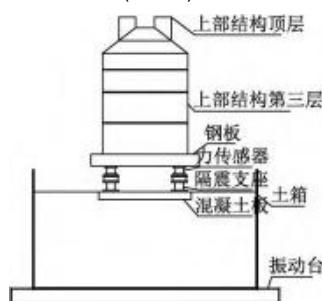


图 1 试验模型连接示意

Fig.1 Schematic diagram of test model

隔震层设置在基底和上部结构之间,由 4 个铅芯橡胶隔震支座组成。原型场地土参数选自文献[13]中第三类核电场地,其频率为 2.39 Hz。模型土采用上海粉质黏土,土层总厚度 1.18 m,土的实测密度为 1.890 kg/m³,实测剪切波速为 88.4 m/s。

1.2 相似比设计

结构动力试验可分为足尺模型试验和缩尺模型

试验。核电结构一般体积较大、成本极高,且受限于振动台尺寸,本次试验采用缩尺模型试验进行探究。在土-结构动力相互作用的振动台模型试验中将涉及到两种以上材料,很难完全满足试验参数与原型参数的相似关系。一方面需要考虑振动台性能与试验条件,另一方面需要最大程度地模拟土-隔震层-上部结构的动力相互作用特性。根据 Bockingham π 原理,参考周颖等提出的振动台试验模型等效设计方法^[14],取长度相似常数 $S_l = 1/40$,选择频率相似比 S_f 为主要控制参数,使模型结构的上部结构、隔震层、土三者的频率与原型结构的频率比等于频率相似常数,取 $S_f = 3.3$ 。原型结构与模型结构的各组成部分频率见表 2。

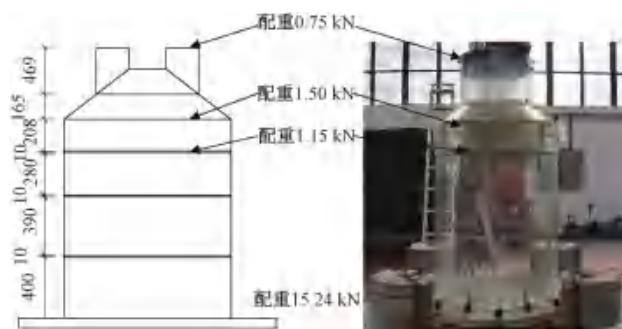


图 2 试验模型配重 mm

Fig.2 Counterweight diagram of test model

表 1 原型与模型概况

Table 1 Overview of the model and the prototype

模型	高度 / 直径 / m	壁厚 / m	材料
原型结构	71.10 44.2	0.9	钢: SA738, 屈服强度为 415 MPa, 弹性模量为 201.2 GPa, 泊松比为 0.3
1/40 模型	1.78 1.1	0.01 (不按比例)	有机玻璃: 弹性模量为 2.6 GPa

表 2 模型结构与原型结构频率

Table 2 Frequency of the model and the prototype Hz

项目	原型频率	模型频率
上部结构	3.27	10.80
隔震层	0.61	2.00
土	2.39	7.89

1.3 土边界模拟

在实际 SSI 分析中,地基在理论上是没有边界的,但在振动台试验中,采用有限尺寸容器装载模型土。由于边界处的地震波反射及体系振动形态的变化将产生一定误差,即“模型箱效应”。目前在振动台试验研究土-结构相互作用中,常采用柔性土箱和层状剪切型土箱消除或尽可能地减小边界效应^[15-16]。

本试验采用柔性土箱以减小“模型箱效应”,如

图3所示。该土箱为直径3 000 mm的圆筒，侧壁采用厚5 mm的橡胶膜。外侧用钢筋作圆周式加固，提供径向刚度且允许土体作层状水平剪切变形。内侧制作花纹，在底钢板上用环氧树脂粘上碎石，形成粗糙表面，减少土与容器界面的相对滑移。在试验过程中，可以看到明显的剪切变形。



图3 柔性土箱
Fig.3 Flexible soil box

1.4 测点布置

试验采用加速度传感器、力传感器、土压力计等测量上部结构、隔震层、基础和地基土的动力响应，

试验测点布置如图4所示。

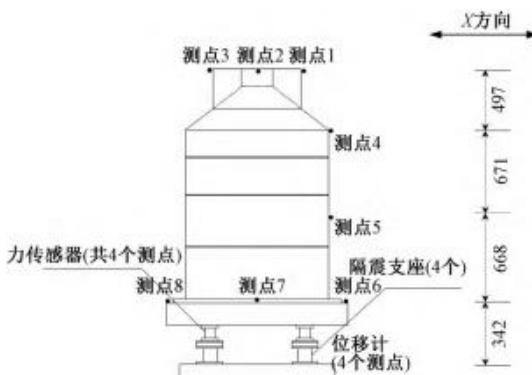


图4 测点布置 mm

Fig.4 Arrangement of measuring points

1.5 输入地震波与试验加载方案

为探讨不同地震波输入时SSI效应对核电隔震结构地震响应的影响，试验选择了3条具有代表性的地震波作为振动台输入，分别为El Centro波、Kobe波及人工波RG1.60，采用三向激振。图5为输入地震波的反应谱。试验加载方案及振动台面输入峰值加速度 a_{PGA} 见表3。

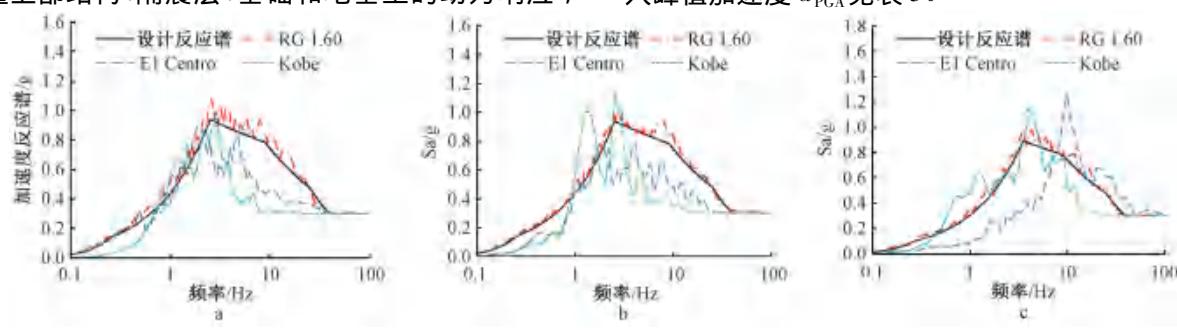


图5 输入地震波加速度反应谱($a_{PGA} = 0.30g$)

Fig.5 Acceleration response spectra of input waves ($a_{PGA} = 0.30g$)

表3 试验加载方案

Table 3 Test loading program

序号	工况编号	地震波类型	a_{PGA}/g
1	W1	白噪声	0.07/0.07/0.07
2	RG1	El Centro 波	0.30/0.30/0.20
3	EL1	Kobe 波	0.30/0.18/0.18
4	KB1	人工波 RG1.60	0.30/0.23/0.12
5	W2	白噪声	0.07/0.07/0.07
6	RG2	El Centro 波	0.50/0.50/0.33
7	EL2	Kobe 波	0.50/0.31/0.30
8	KB2	人工波 RG1.60	0.50/0.38/0.20
9	W3	白噪声	0.07/0.07/0.07

0.30/0.30/0.20指振动台面三个方向(X、Y、Z)输入的峰值加速度值。

1.6 试验组

为对比核电模型结构在不同地基、不同隔震情况下的地震响应，本试验设置土性地基与刚性地基对照组及隔震与未隔震对照组，试验组及内容见表4。

表4 试验组

Table 4 Test groups

序号	试验组编号	地基情况	隔震情况
1	FF	土性地基	—
2	SL	土性地基	铅芯橡胶支座
3	SN	土性地基	未隔震
4	RL	刚性地基	铅芯橡胶支座
5	RN	刚性地基	未隔震

自由场试验组用FF表示；土性地基用S表示，刚性地基用R表示；铅芯隔震支座用L表示，未隔震用N表示。

2 试验结果与分析

2.1 模型结构动力特性

采用0.07g白噪声对各试验组模型进行扫频，评估体系的自振频率，结果见表5。安全壳模型结构的水平向自振频率为11.02 Hz(Y向)和11.14 Hz(X向)，与设计模型结构频率10.80 Hz接近。

表 5 各试验组模型自振频率

Table 5 The natural frequency of the system in each test group

试验组	Y 向一阶频率	X 向二阶频率	Z 向竖向频率	Hz
SL	2.25	2.38	13.33	
SN	5.48	5.55	12.58	
RL	2.25	2.32	18.72	
RN	11.02	11.14	11.14	

分析表 5 可得如下规律:

1) 不同地基上模型结构采用基底隔震后, 水平自振频率均降低, 且刚性地基更为显著; 竖向自振频率均提高, 且刚性地基更为显著。

2) 对于隔震模型结构, 考虑 SSI 几乎不对水平自振频率产生影响, 但会降低竖向自振频率; 对于非隔震模型结构, 考虑 SSI 则会降低水平自振频率, 对竖向频率影响较小。

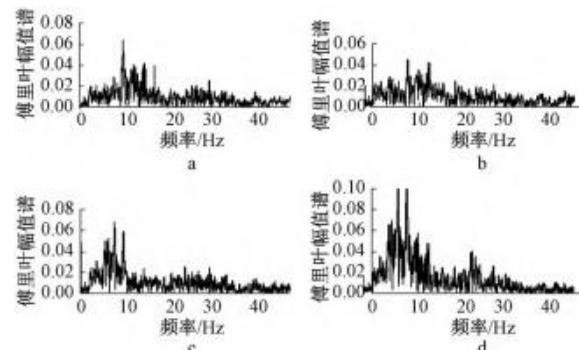
由于土体是一种典型的非线性材料, 随着输入地震动峰值的增加, 土体“软化”, 土性地基上模型结构的自振频率会发生一定变化。SL 试验组模型的水平自振频率主要由隔震层控制, 变化幅度较小。SN 试验组模型的水平自振频率由土体和上部结构共同控制, 变化幅度相对较大。

2.2 自由场分析

自由场分析是土-结构动力相互作用研究中的

重要组成部分。一方面, 可以分析土层的非线性特征和场地土层对输入地震动谱特征的影响程度; 另一方面, 可以通过反演分析获取基岩处的地震动作为模型结构的输入。

试验中加速度传感器布置在距离土表面 0, 0.38, 0.98, 1.18 m 处。图 6 为土层各测点处的傅里叶谱, 表 6 为土表面相对于输入地震波加速度的放大系数。可以看到随着离土表面的距离越近, 加速度峰值越大, 傅里叶谱幅值向低频移动, 高频成分减少, 说明试验中的软土地基具有滤波和放大作用, 且放大作用随着输入地震动峰值的增大而减小。



a—1.18 m; b—0.98 m; c—0.38 m; d—0 m。

图 6 土层各测点傅里叶幅值谱

Fig.6 Fourier amplitude spectrum at each measuring point

表 6 自由场下加速度峰值放大系数

Table 6 Amplification factor under free field condition

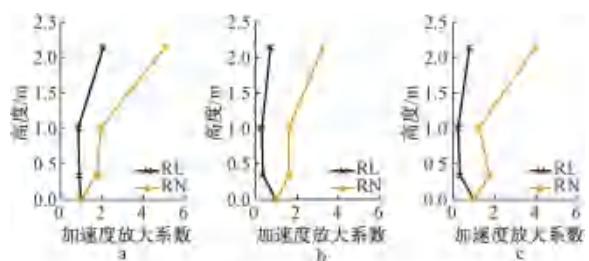
设计输入 地震动/g	RG1.60			El centro			Kobe		
	输入/g	土表面/g	放大系数	输入/g	土表面/g	放大系数	输入/g	土表面/g	放大系数
0.3	0.334	0.435	1.302	0.347	0.559	1.611	0.333	0.671	2.015
0.5	0.519	0.562	1.083	0.517	0.669	1.294	0.558	0.874	1.566

采用 SVSA 系统对自由场进行地基土频率的识别, 根据识别结果确定土的频率为 8 Hz, 与设计值 7.89 Hz 接近。

2.3 隔震有效性分析

隔震效果表现为上部结构响应相对于输入地震动减小程度。此处定义加速度放大系数为上部结构的加速度峰值与输入地震动的加速度峰值之比, 通过对比隔震组与未隔震组加速度放大系数说明隔震效果。由于铅芯橡胶支座只对水平向提供隔震能力, 故图 7 和图 8 只给出了 X 向的 RL 与 RN、SL 与 SN 加速度放大系数对比。可以看出, 无论是土性地基还是刚性地基, 铅芯橡胶支座均表现出很好的隔震效果。

隔震组与非隔震组(如 RL 与 RN)围成的面积可以体现隔震支座对结构整体的隔震效果。显然, 土性地基下隔震围成的面积更小, 即 SSI 效应削弱了隔震支座的隔震能力。



a—RG1.60; b—El Centro; c—Kobe.

Fig.7 Comparison of acceleration amplification factor between RL and RN (X-direction)

2.4 试验组 SL 模型结构地震响应分析

为了扩大核电的选址范围及应用隔震支座于核电结构中, 了解土性地基下的核电隔震模型结构(即 SL 试验组)的响应规律极为重要。图 9 为各地震波输入下安全壳模型的加速度放大系数。可知, 水平向加速度响应随楼层的升高先减小再增大。其主要原因: 一是基础转动效应显著, 使上

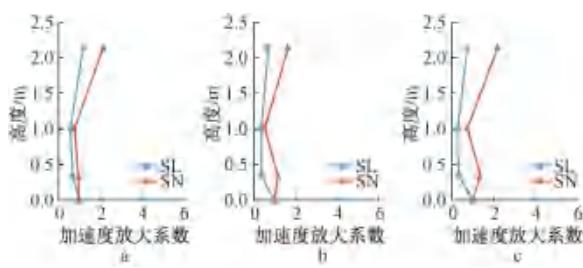


图 8 SL 与 SN 加速度放大系数对比(X 向)
Fig.8 Comparison of acceleration amplification factor between SL and SN (X-direction)

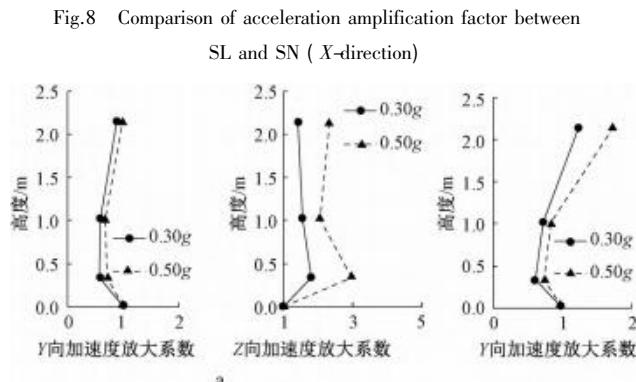


图 9 试验组 SL 各楼层加速度放大系数
Fig.9 Acceleration amplification factor at each floor of SL

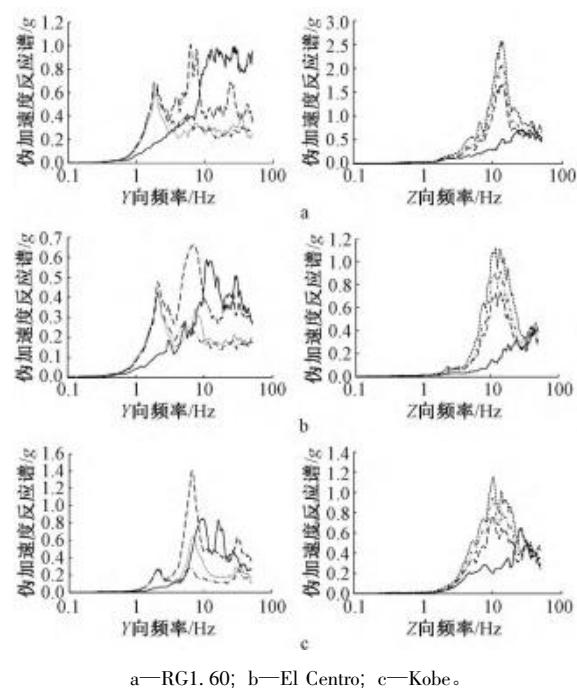


图 10 试验组 SL 楼层反应谱
Fig.10 Floor response spectrum of SL

(隔震层频率)和8 Hz(地基土频率)时出现峰值,顶部的楼层反应谱远大于其他楼层反应谱。

2) 对于竖直方向,各楼层反应谱在13 Hz(SL试验组模型竖向频率)附近出现峰值,且随楼层的升高,反应谱值逐渐减小。

考虑土-结构相互作用效应和隔震的核电结构振动台试验研究——周志光 等

部结构产生摇摆;二是铅芯橡胶隔震支座产生变形,使上部结构产生摇摆。竖向加速度则随楼层的升高逐渐减小。对于同一地震波,随着输入峰值的增大,各楼层处加速度响应虽逐渐增大,但其放大系数却是逐渐减小。

核电结构是一种特殊的结构形式,需要提供楼层反应谱用于设备振动分析。本文对楼层高2.15,1.01,0.34 m处进行楼层反应谱分析,结果见图10。结果表明:

1) 对于水平方向,各楼层反应谱总是在2 Hz

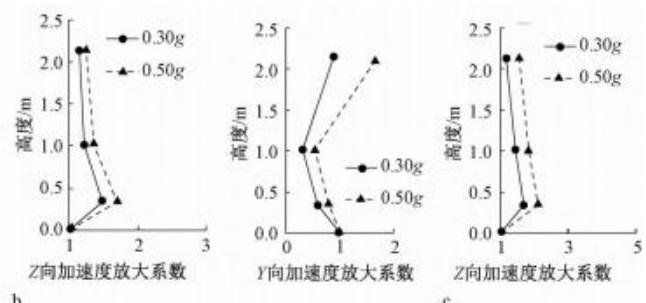


图 10 试验组 SL 楼层反应谱
Fig.10 Floor response spectrum of SL

因此,在土性地基上进行核电隔震结构设计时,应充分考虑上部结构摇摆效应造成的影响。设备位置的选择应避免楼层反应谱最大的位置。同时设备运行频率应尽量避开隔震层频率、地基土频率以及结构体系竖向频率。

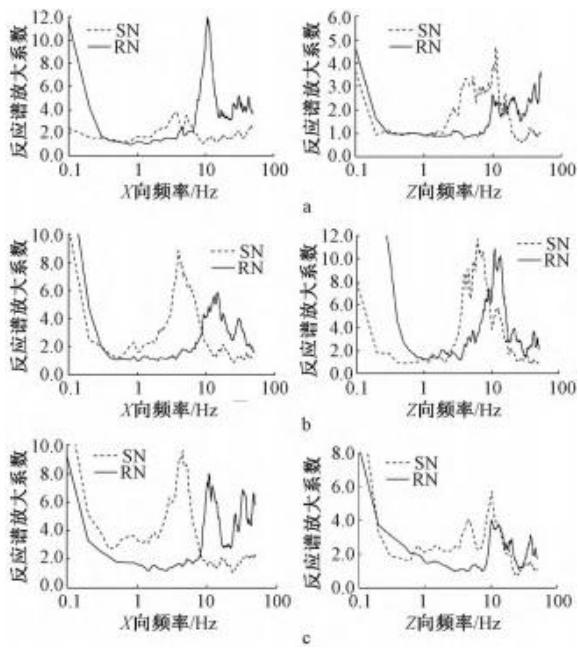
2.5 SSI 效应对非隔震结构的影响分析

从表6知,实际输入峰值与设计输入峰值不可能完全一致,为消除此误差产生的影响,采用反应谱放大系数对试验组SN和RN进行对比分析,讨论SSI效应对核电非隔震结构地震响应的影响。

定义反应谱放大系数(简称PSA放大系数)为楼层反应谱与输入地震波反应谱对应频率处谱值之比。图11为试验组SN和RN模型顶部PSA放大系数对比。可知:对于水平向,土性地基下PSA放大谱的峰值出现在4~5 Hz附近,与SN试验组模型基本频率(5.55 Hz)接近且偏小,主要原因是较大的地震波输入使土体软化,较白噪声扫频结果偏低。刚性地基下峰值出现在11 Hz,与RN试验组模型基本频率一致。即SSI效应使得非隔震模型加速度的高频成分降低,峰值频率从高频向低频移动。土体降低了核电非隔震结构的加速度响应,使其竖直向表现出与水平向类似的趋势。

2.6 SSI 效应对隔震结构的影响分析

试验组SL和RL的反应谱放大系数对比结果

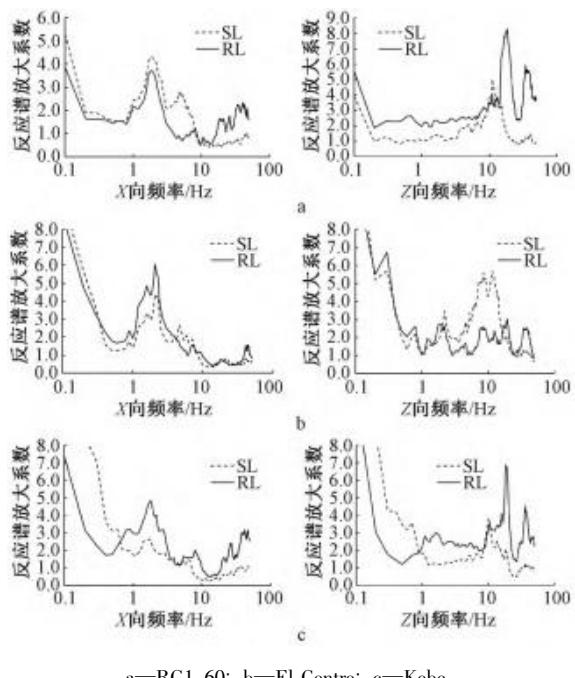


a—RG1.60; b—El Centro; c—Kobe.

图 11 SN 与 RN 试验组模型顶部 PSA 放大系数对比

Fig.11 Comparison of amplification factor of PSA at the top of the model between SN and RN

如图 12 所示。可看出: 对于水平向, SL 试验组的 PSA 放大系数在 2.5~8 Hz 频段内比 RL 试验组的大; 对于竖向 峰值频率从 19 Hz 改变到 11 Hz, 这与表 5 分析结果基本一致。2.5~8 Hz 频段中两端数值恰好接近隔震层频率与地基土频率。即在此特征频率区间内 SSI 效应放大了核电隔震结构的加速度响应。因此核电隔震结构设计时需要考虑 SSI 效应。



a—RG1.60; b—El Centro; c—Kobe.

图 12 SL 与 RL 试验组模型顶部 PSA 放大系数对比

Fig.12 Comparison of amplification factor of PSA at the top of the model between SL and RL

3 结束语

本文通过核电结构振动台试验,探讨了 SSI 效应对核电结构地震响应的影响,主要结论如下:

- 1) 对于隔震结构,考虑 SSI 几乎不对体系水平自振频率产生影响,但会降低竖向自振频率;对于非隔震结构,考虑 SSI 则会降低水平自振频率,对竖向频率影响较小。
- 2) 在土性地基上进行核电隔震结构设计,应充分考虑上部结构摇摆效应造成的影响。设备位置的选择应避免楼层反应谱最大的位置,设备运行频率应尽量避开隔震层频率、地基土频率以及体系竖向频率。
- 3) 对于非隔震结构,SSI 效应会降低加速度反应谱高频成分,使峰值出现频率从高频向低频移动。土体表现出一定的隔震效果降低了某些频率处的加速度谱响应。
- 4) 对于隔震结构,SSI 效应会削弱隔震效果,而且会在某些频段处放大加速度响应。因此,在核电隔震结构设计中,土-结构动力相互作用分析和隔震支座的选择至关重要。

参考文献

- [1] 丁其华. 2009 年世界核电发展回顾 [J]. 国外核新闻, 2010 (1): 13-18.
- [2] 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.
- [3] LABBE P. Pioneering actual use of seismic isolation for nuclear facilities [C] // 1st Kashizaki International Symposium on Seismic Safety of Nuclear Installations. 2010: 24-26.
- [4] COLADANT C H. Seismic isolation of nuclear power plants-EDF's philosophy [J]. Nuclear Engineering and Design, 1991, 127: 243-251.
- [5] CLOUGH R W, PENZIEN J. Dynamics of structures [M]. Leyden, the Netherlands: McGraw-Hill, 1993: 738.
- [6] 李小军, 王晓辉, 贺秋梅等. 非基岩核电厂结构地震响应振动台试验研究 [J]. 核动力工程, 2017(4): 31-35.
- [7] CONSTANTINOU M C, KNEIFATI M. Dynamics of soil-base-isolation structure systems [J]. Journal of Structure Engineering, ASCE, 1988, 114 (1): 211-221.
- [8] 李忠献, 李延涛, 王健. 土-结构动力相互作用对基础隔震的影响 [J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23 (5): 180-186.
- [9] 邹立华, 赵人达, 赵建昌. 桩-土-隔震结构相互作用地震响应分析 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26 (6): 782-786.
- [10] 李延涛. 考虑土-结构动力相互作用的基础隔震与结构控制理论研究 [D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [11] 李海岭, 葛修润. 土-结构相互作用对基础隔震体系的影响 [J]. 土木工程学报, 2001, 34 (4): 83-87.
- [12] 王阿萍, 姚谦峰. 土与隔震结构共同作用的随机地震反应分析 [J]. 北京交通大学学报, 2007, 31 (4): 40-44.
- [13] PAUL C. Advanced nuclear power plant APR1000, determination of seismic analysis parameters for site envelope design [R]. Final Report Submitted to Korea Power Engineering Company Inc., 2010.
- [14] 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.
- [15] 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, 16 (3): 25-30.
- [16] 陈国兴, 王志华, 左熹等. 振动台试验叠层剪切型土箱研究 [J]. 岩土工程学报, 2010, 31 (1): 89-96.