

# 考虑土-结构相互作用的核电厂楼层反应谱研究

高永武<sup>1</sup>, 王 涛<sup>2</sup>, 戴君武<sup>2</sup>, 金 波<sup>2</sup>

(1. 中国地震灾害防御中心, 北京 100029; 2. 中国地震局工程力学研究所, 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:** 楼层谱是核电厂设备、管道抗震设计和抗震裕度评估的重要依据。为了研究不同烈度下场地土对核电厂楼层谱的影响, 该文使用叠层剪切土箱模拟土体及其边界条件, 对某新型核电厂进行 1:25 缩尺模型地震模拟振动台实验。选取 10 组水平加速度地震动记录, 按照运行安全地震动 (OBE) 0.15 g、极限安全地震动 (SSE) 0.30 g 和超设计基准地震动 (ULE) 0.75 g 作为输入。在考虑土-结构相互作用条件下, 研究不同地震动强度引起楼层谱的变化规律, 并对《核电厂抗震设计规范》中楼层谱确定方法的输入基准地震动进行讨论分析。根据设备响应比分析, 揭示了现有核电设备抗震裕度评估方法具有一定的保守性, 特别是设备响应比为 1/1.5~1.5, 采用现有抗震裕度评估方法得到的设备抗震裕度可能小于审核地震动。为了得到该设备的真实抗震裕度, 建议对这些设备做更详细分析。

**关键词:** 楼层谱; 振动台试验; 地震动强度; 抗震裕度评估; 土-结构相互作用

中图分类号: TU311.3; TU435 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.11.0675

## STUDY ON FLOOR-RESPONSE SPECTRUM OF NUCLEAR POWER PLANTS CONSIDERING SOIL-STRUCTURE INTERACTIONS

GAO Yong-wu<sup>1</sup>, WANG Tao<sup>2</sup>, DAI Jun-wu<sup>2</sup>, JIN Bo<sup>2</sup>

(1. China Earthquake Disaster Prevention Centre, Beijing 100029, China;

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

**Abstract:** Floor response spectrum plays an important role in the seismic design and in the seismic margin analysis for the facilities and pipes inside a nuclear power plant (NPP). This study presents the results of a set of shaking table tests on a scaled nuclear power plant structure of 1:25, with the underlying soil simulated by a multi-functional laminated shear container where the viscous-elastic boundary has been well reproduced. A group of 10 ground motion records are selected as the input. The peak ground accelerations (PGA) of these motions are scaled to the operational basis earthquake (OBE 0.15 g), the safely shutdown earthquake (SSE 0.30 g), and the ultimate earthquake beyond the design basis standard (ULE 0.75 g), respectively. Considering the soil-structure interaction, the change of floor response spectra caused by the input intensity has been studied. The standard input earthquake for floor response analysis suggested by the "Code for seismic design of nuclear power plants" is also discussed accordingly. According to the analysis of equipment response, it is revealed that the evaluation method of seismic margin of existing nuclear power plant equipment is conservative. Especially the equipment response ratio of 1/1.5 ~ 1.5, the existing seismic margin assessment method to obtain the equipment seismic margin may be less than the qualified ground motion. In order to obtain the true seismic margin of the equipment, it is suggested that these kinds of equipment should be analyzed in a more detail. s of equipment should be analyzed in a more detail.

**Key words:** floor response spectrum; shaking table test; seismic intensity; seismic margin analysis; soil-structure interaction

收稿日期: 2019-11-18; 修改日期: 2020-04-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1504405); 中国地震局地震科技星火计划项目(XH18061Y); 河北省高等教育教学改革研究与实践项目(2018GJJG471)

通讯作者: 王 涛(1977—), 男, 山东邹城人, 研究员, 博士, 主要从事结构工程抗震研究 (E-mail: wangtao@iem.ac.cn).

作者简介: 高永武(1986—), 男, 河北张家口人, 高工, 博士, 主要从事结构工程抗震研究 (E-mail: gaoywjg@163.com);

戴君武(1967—), 男, 山东昌邑人, 研究员, 博士, 主要从事结构抗震减震方面研究 (E-mail: junwudai@126.com);

金 波(1973—), 男, 河北密云人, 副研究员, 博士, 主要从事结构工程与工程抗震研究 (E-mail: jinbo@iem.net.cn).

楼层谱作为核电厂设备抗震设计和抗震裕度评估的输入形式之一,研究其确定方法对设备抗震分析的可靠性有重要意义。确定楼层谱的方法主要有直接法和时程法<sup>[1]</sup>。直接法是确定性的分析方法,以设计反应谱为输入,依据结构和附属结构的不同物理力学性质,直接调整地震输入反应谱得到设备或管道支撑处的楼层谱;而时程法是采用地震动时程对设备支撑结构进行时程分析,得到设备或管道支撑处楼层加速度响应,再按照特定规则给出支撑点处的楼层谱。这些方法均与结构模型选取有关,结构模型可以选用集中质量模型、三维有限元模型或者经过合理简化、依据相似理论的试验模型。集中质量模型处理简单,计算量小,在初步确定楼层谱或研究结构参数的敏感性<sup>[2-3]</sup>时常被使用,但是该方法把复杂的核电厂结构简化为一个多质点模型,必然会降低精度;三维有限元模型可对原型结构进行较高精度的仿真,但模型中材料的本构关系,结构阻尼参数的选取,以及网格划分均影响楼层谱的精度和可靠性;鉴于数值模型的不足,有必要进行试验研究,为现有的楼层谱确定方法提供重要依据。

土-结构相互作用是确定楼层谱过程中需要考虑的必要因素。现有考虑土-结构相互作用的分析方法,比如阻抗函数法、整体有限元法和子结构法等,均很难有效考虑土体本构关系的复杂性以及基础与地基土接触边界的几何非线性。罗东(中国台湾)大比例模型原位试验<sup>[4-5]</sup>对比了几种在美国核工业领域常用的土-结构相互作用分析方法,但试验加速度峰值最高为0.21 g,强度有限,未能充分体现强地震作用引起的土体非线性响应。

采用易损性方法进行设备抗震裕度评估<sup>[6-7]</sup>,特定失效模式需要确定三个参数,中值地面加速度能力 $A_m$ ,随机不确定性 $\beta_r$ 和认知不确定性 $\beta_u$ 。为了方便计算,一般引入安全因子的概念进行分析, $F=A/A_{SSE}$ , $A$ 为设备满足一定置信水平的加速度能力, $A_{SSE}$ 为设计的安全停堆水平下的加速度。 $F$ 实际可以表示为:

$$F = \frac{\text{设备实际抗震能力}}{\text{设备对参考点SSE的实际响应}} = \frac{\text{设备实际抗震能力}}{\text{设备对楼层SSE的设计响应} \times \frac{\text{设备对楼层SSE的设计响应}}{\text{设备对参考点SSE的实际响应}}}$$

安全因子可以分为两个具有实际意义的因子:能力因子 $F_C$ 和响应因子 $F_R$ 的乘积, $F=F_C F_R$ ,其中 $F_C$ 为设备实际强度与设计强度比值,而响应因子可分为结构响应因子和设备响应因子, $F_R=F_{RS} F_{RE}$ 。设备抗震裕度评估一般采用极限安全地震动(SSE)分析楼层响应,然后根据设备类型和所在楼层的位置等因素乘以大于等于1的结构响应因子以考虑超设计基准地震动(ULE)引起楼层响应变化<sup>[8-9]</sup>。文献[10-11]采用该方法评估了保护系统机柜和安全壳喷淋热交换器的抗震裕度。该方法操作简单,通过调整结构阻尼比反映了地震动增大导致的结构非线性,考虑了地震动增大对楼层谱幅值的影响<sup>[12]</sup>。但是这种方法未能充分考虑强烈地震中土体和结构非线性对楼层谱形状和频谱的影响,这种复杂影响难以通过简单的参数调整体现出来。鉴于此,本文拟通过试验研究在抗震裕度评估中强烈地震输入引起的结构响应因子变化,以及不同地震动强度对楼层谱的影响规律,为核电设备抗震裕度评估提供参考。

## 1 振动台试验

本实验在中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动部门重点实验室进行,使用振动台多功能叠层剪切土箱模拟土体及其边界条件,对某新型核电厂房进行1:25缩尺模型地震模拟振动台实验,见图1,相似关系的推导和模型制作过程详见文献[12-13]。



图1 核电厂土-结构相互作用模型振动台试验  
Fig. 1 NPP shaking table test considering soil-structure interaction

### 1.1 原型结构简述

原型结构为某新型核电厂核岛部分的屏蔽厂房(含非能动水箱)和安全壳的内部结构<sup>[14-15]</sup>。屏





验可对应实际厂址条件在地下 37.5 m 内剪切波速为 1275 m/s, 按照《核电厂抗震设计规范》(GB50267—97)<sup>[17]</sup>可不考虑土-结构相互作用的基岩场地。

振动台试验加速度传感器布置, 如图 4, 为得到土-结构相互作用情况下不同强度地震动引起的场地土非线性反应<sup>[18]</sup>, 选取 10 组水平加速度地震动记录, 如表 2 所示, 分别按照运行安全地震动 (OBE)、极限安全地震动 (SSE) 和超设计基准地震动 (ULE) 作为输入, 其标准化的 5% 阻尼比反应谱如图 5 所示, 在设备主频范围 2 Hz~10 Hz 内, 与我国《核电厂抗震设计规范》(GB 50267—97) 中的基岩和硬土标准反应谱以及美国 RG 1.60 谱<sup>[19]</sup>符合较好, 同时原型外部屏蔽厂房和内部结构基频分别为 4.40 Hz 和 5.37 Hz, 均在该频率范围内。本文原型结构 OBE 为 0.15 g, SSE 取 0.30 g。核电厂抗震裕度评估中, 高置信低失效的抗震裕度值应大于等于 1.5 倍 SSE<sup>[20]</sup>。本文为了充分考虑

强地震动作用引起的土体非线性变化, 取 ULE 为 SSE 的 2.5 倍, 即 0.75 g。

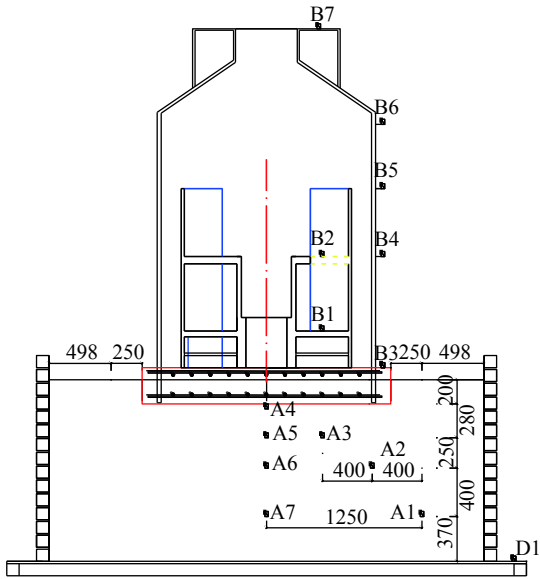


图 4 加速度传感器布置图 /mm  
Fig. 4 Deployment of accelerometers

表 2 试验中输入地震动记录  
Table 2 Input ground motion records for shaking table tests

输入顺序	地震动名称	震级 $M_w$	震中距/km	持时/s	时间间隔/s
1	Imperial Valley, 1940, El Centro	6.9	10	53.48	0.02
2	1995 Kobe	6.9	3.4	60.00	0.02
3	1994 Northridge	6.7	6.4	60.00	0.02
4	Palos Verdes	7.1	1.5	60.00	0.02
5	Morgan Hill, 1984, Gilroy	6.2	15	60.00	0.02
6	West. Washington, Olympia, 1949	6.5	56	80.00	0.02
7	Puget Sound, Wa., Olympia, 1949	7.1	80	81.84	0.02
8	Tabas, 1978	7.4	1.2	50.00	0.02
9	C. Mendocino, 1992, Petrolia	7.1	8.5	60.00	0.02
10	Northridge, 1994, Olive View	6.7	6.4	60.00	0.02

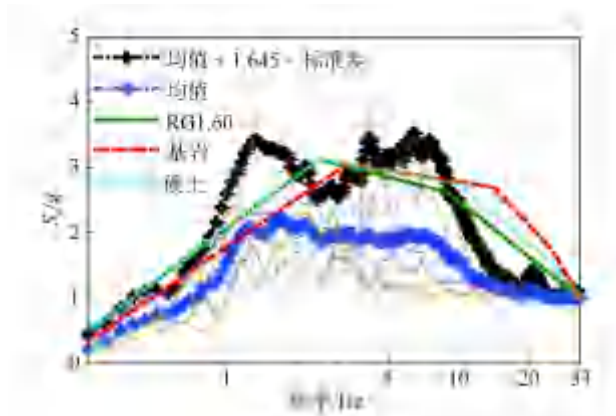


图 5 输入地震动标准化 5% 阻尼比加速度反应谱  
Fig. 5 Normalized acceleration response spectrum of selected ground motions considering 5% damping ratio

## 2 不同地震动强度楼层谱比较

下文中响应值已经根据相似律换算到原型结构。图 4 中 A 和 B 分别代表土层和结构的传感器。图 6 给出了 A4 位置不同地震动强度输入按照计算基岩面标准化后的反应谱, 从图中可以发现, 随着输入地震动强度的增大, A4 位置处的反应谱幅值和频率均发生了明显变化, 输入强度由 OBE、SSE 至 ULE 得到 A4 位置的加速度反应谱值, A4 楼层反应谱零周期加速度值 (ZPA) 分别为 3.73、1.95、1.19, 而峰值对应频率也由 OBE 时的 2.75 Hz 移至 ULE 时的 1.00 Hz, 虽 SSE 的峰值

对应频率也为 2.75 Hz, 但从图 6 中可以发现, 其峰值明显有向低频移动的趋势。从不同地震动强度输入得到 A4 位置响应的反应谱可以发现, 随着输入地震动强度的增大土层已发生明显的非线性响应。

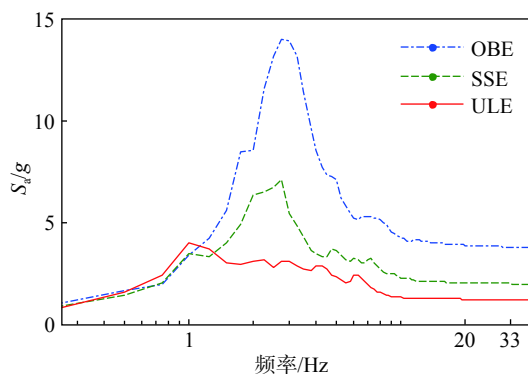


图 6 不同强度输入 A4 位置处 5% 阻尼比反应谱  
Fig. 6 A4 response spectrum with 5% damping ratio under different earthquakes

B1、B2、B4、B5、B6、B7 对应着原型结构关键楼层标高分别为: 4.575 m、20.000 m、20.000 m、34.000 m、46.750 m、67.500 m, 如图 4 所示, 其中 B1 为支撑蒸汽发生器的关键楼层。图 7 给出了 OBE 下内部结构和屏蔽厂房不同楼层位置的水平楼层反应谱, 均取均值加 1.645 倍标准差, 即具有 95% 的超越概率。楼层谱幅值随着层高的增加而增加, 与这些楼层处的最大峰值加速度变化一致, 动力放大系数约为 3.8。结合图 6 可以得出, 从 D1 到 A4, 其加速度峰值由 0.15 g 放大到 0.56 g, 放大 3.73 倍, B2 位置的加速度峰值为 0.97 g, 是 A4 处的 1.73 倍。由此可以发现, 加速度峰值在土层中和结构中放大效应不一致, 引起这种差异的主要原因是土-结构相互作用。

图 8 给出了 SSE 地震作用下内部结构和屏蔽厂房不同楼层位置的具有 95% 超越概率的水平楼层反应谱。内部结构与屏蔽厂房楼层谱的形状随标高有所区别, 内部结构的楼层谱峰值出现非“尖峰”形式, 而屏蔽厂房随着标高的增加非“尖峰”形式逐渐转化成“尖峰”。这种规律将会使得安装在 B4 以上屏蔽厂房的设备和管道的楼层谱按照《核电厂抗震设计规范》的方法进行峰值拓宽的范围缩小, 峰值对应频率的敏感区间减小。通过与图 7 比较发现内部结构和屏蔽厂房不同楼层动力放大系数较 OBE 地震动时变小。因

此, 在以 SSE 输入时, 虽然较 OBE 输入幅值增大一倍, 但相同位置的楼层谱并未出现成倍的放大。

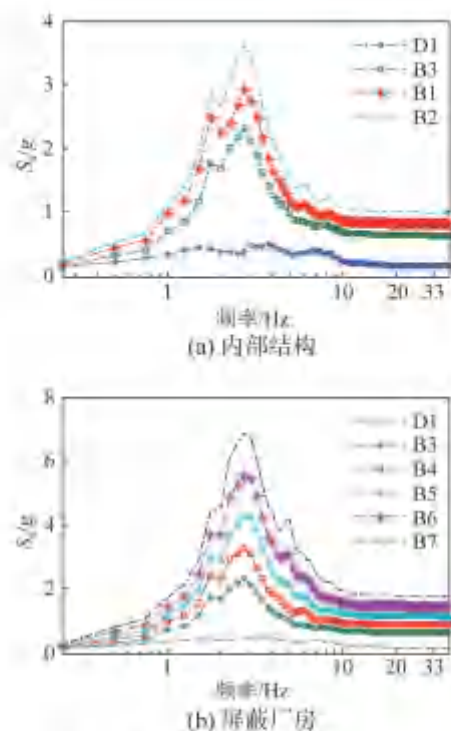


图 7 OBE 地震下 5% 阻尼比楼层谱 (PGA 0.15 g)  
Fig. 7 Floor response spectrum with 5% damping ratio under OBE earthquakes (PGA 0.15 g)

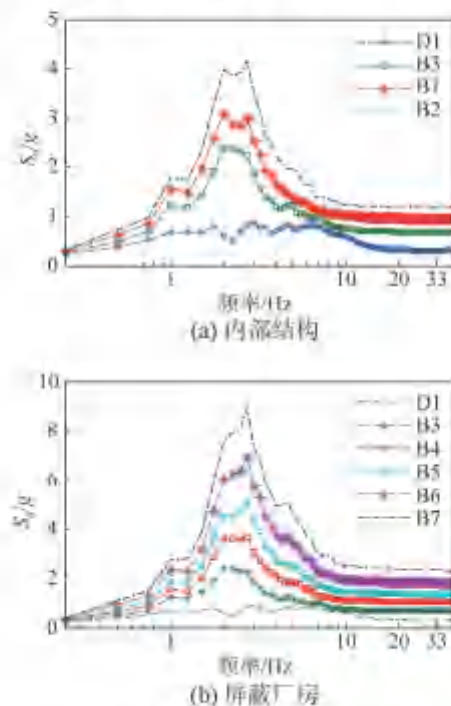


图 8 SSE 地震下 5% 阻尼比楼层谱 (PGA 0.30 g)  
Fig. 8 Floor response spectrum with 5% damping ratio under SSE earthquakes (PGA 0.30 g)

图 9 给出了 ULE 地震作用下内部结构和屏蔽厂房不同楼层位置的具有 95% 超越概率的水平楼

层反应谱。随着输入地震动强度的增大,内部结构和屏蔽厂房的反应谱形状有明显差异,内部结构楼层谱的峰值形状仍然呈“尖峰”型,与 OBE 和 SSE 的结果类似,但是其楼层谱峰值对应的频率向低频移动。这是由于随着地震动输入的增大,土体进入塑性,其对输入地震动的滤波和放大效应频带发生改变而造成的。图 9 中在 4 Hz~12 Hz 频率区间内部结构楼层谱小于输入地震动反应谱值,结合 OBE 和 SSE 输入在这个频率区间的变化趋势,可以发现在这一频率区间,随着输入地震动强度的增加,滤波频率区间越来越宽,致使滤波作用更加明显。因此强震下由于土体的非线性,以内部结构为支撑、对该频率区间较敏感的设备 and 管道,所受到的地震作用将会降低。从图 9(b) 可以看出, B4 以下的反应谱形状与内部结构相似。在 4-12 Hz 频率区间也随着地震动的增大楼层谱有滤波效应。但随着楼层高度增加,这一效应的影响逐渐降低,而峰值平台宽度会明显扩大。屏蔽厂房不同高度的楼层谱随着地震动强度增大而楼层谱峰值由“尖峰”逐渐向“平台”变化。因此,在设备抗震设计和抗震裕度评价中,楼层谱不论是频谱还是幅值均应区别选取。

采用台面峰值加速度对各层的加速度响应进行标准化,图 10 给出了标准化后楼层谱特征参数

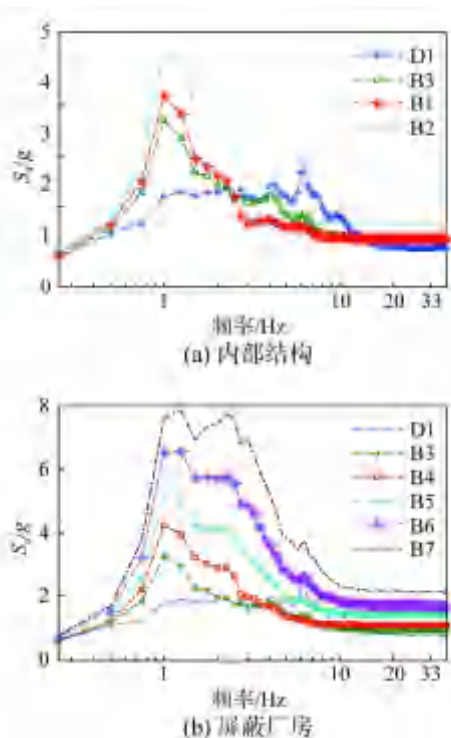


图 9 ULE 地震下 5% 阻尼比楼层谱

Fig. 9 Floor response spectrum with 5% damping ratio under ULE earthquakes (PGA 0.75 g)

值。随着地震动输入强度从 OBE-SSE-ULE 增大,如内部结构 B2 楼层谱峰值从 24.07-13.74-6.53 下降,幅度达 72.87%;而零周期加速度 (ZPA) 也由 6.49-3.86-1.57 下降,下降幅度基本相同,达 75.80%;动力放大系数变化为 3.71-3.56-4.14,变化较小。同时,峰值频率由 2.70 Hz 移至 1.10 Hz。

屏蔽厂房各层楼层谱也有类似的规律,如 B6 楼层谱峰值从 37.12-23.07-9.63,下降了 74.06%;

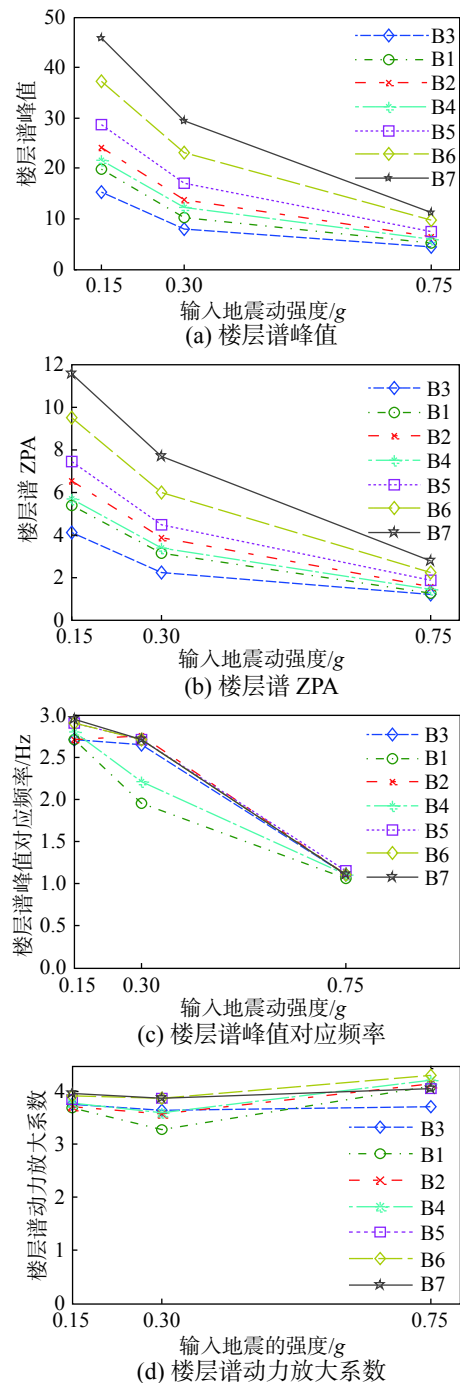


图 10 不同地震动强度输入各楼层谱特征参数

Fig. 10 Profile parameters of normalized floor response spectrum at different stories under different earthquakes



ZPA 从 9.49-5.97-2.23, 下降了 76.50%; 同样, 峰值频率从 2.90 Hz 降为 1.10 Hz; 而动力放大系数变化不大, 分别为 3.91、3.86 和 4.31。

由此可见, 虽然各楼层谱动力放大倍数相差不大, 但是确定设计楼层谱的重要特征参数: 楼层谱峰值、ZPA 和峰值对应频率, 将在不同地震动强度输入时存在明显差异。这种差异使得不同地震动强度下的设备标准设计楼层谱, 不能够通过简单的缩放或者阻尼比的调整实现相互转换。

### 3 抗震裕度分析楼层谱

《核电厂抗震设计规范》给出了设备楼层谱的确定方法, 根据设备支撑点楼层加速度响应, 取 2% 阻尼比反应谱作为设备抗震 OBE 楼层谱, 取 4% 阻尼比作为 SSE 楼层谱, 参照美国核管会 NRC 导则 RG1.122<sup>[21]</sup> 和美国土木工程师协会标准 ASCE 4-98<sup>[22]</sup> 建议的方法, 考虑楼层谱生成涉及主体结构地震反应的诸多不确定因素, 需要拓宽由特定时期得到的楼层反应谱尖峰; 为避免设计的过分保守, 可适当削减楼层反应谱的峰值而得到设备的设计楼层反应谱<sup>[17]</sup>。但规范未给出核电厂抗震裕度评估中 ULE 的楼层反应谱如何确定。由于地震动强度引起土体性质的变化, 进而使楼层响应的频谱特性有较大差异, 因此不能简单的采用调整阻尼比来确定楼层响应谱, 还应针对移频现象、峰值降低和拓宽现象进行研究。参考文献 [9] 设备裕度评估中设备响应的阻尼比因子取 1.5, 不确定系数取 0.2, 得设备超设计基准地震 (ULE) 楼层谱阻尼比为  $1.5 \times e^{0.2} \times 4\% = 7.3\%$ , 本文取 7%。

取 OBE 为 0.15 g、SSE 为 0.30 g 和 ULE 为 0.75 g 作为地震动输入, 考虑土-结相互作用, 对不同输入地震动强度的楼层反应谱进行对比研究。图 11 给出了 B2 位置对应 OBE 的 2% 阻尼比楼层谱, 对应 SSE 的 4% 阻尼比楼层谱和对应 ULE 的 7% 阻尼比楼层谱。

根据试验分析结果, 在 SSE 为 0.30 g 和 ULE 为 0.75 g 地震作用下, 取内部结构和屏蔽厂房不同位置处, 4% 阻尼比的水平楼层反应谱比值 SSE/ULE, 研究不同地震动强度对核电设备抗震裕度的影响, 如图 12 所示。不同楼层位置的结构响应比存在一定差异, 但是所有楼层结构响应比随频率变化趋势一致。同时还可以发现, 不同频率对应各楼层响应比差异较大。

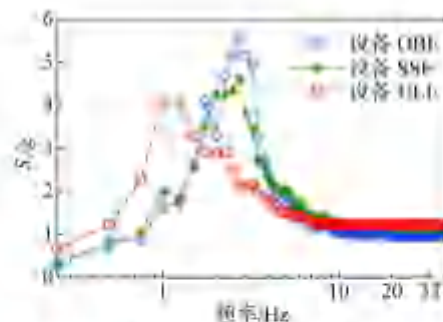


图 11 试验 B2 楼层谱

Fig. 11 B2 floor response spectrum of test of shaking table

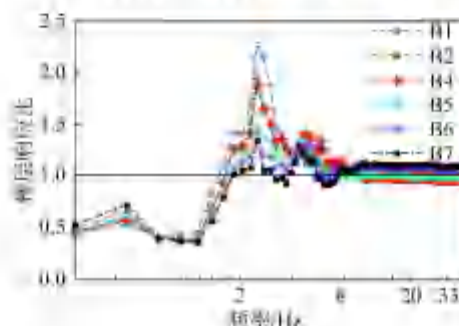


图 12 楼层响应比

Fig. 12 Ratio of floor response

为了同时考虑结构响应和设备响应对设备抗震裕度的影响, 图 13 给出了 SSE 和 ULE 地震动下, 内部结构和屏蔽厂房不同位置处, 各楼层阻尼比为 4% SSE 楼层谱和阻尼比为 7% ULE 楼层谱的 SSE/ULE 设备响应比值。设定能力因子  $F_c$  为 1, 图 13 与图 12 有类似的规律, 在 0 Hz~1.7 Hz, 设备响应比小于 1, 表示设备 SSE 楼层谱得到的设备响应低于 ULE 楼层谱, 此时欲得到真实的抗震裕度, 需要采用 SSE 除以设备响应比, 保守的得到了该设备的抗震裕度。当频率在 1.7 Hz~8.0 Hz, 由于 SSE 楼层谱得到的设备响应大于 ULE 楼层谱, 此时需要采用安全因子法得到设备抗震裕度, 由 SSE 乘以设备响应因子得到设备的抗震裕度。假设我们审核地震动选取 1.5 倍 SSE, 那么需

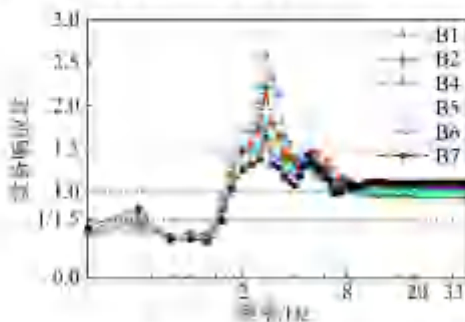


图 13 设备响应比

Fig. 13 Ratio of equipment response

要注意,当设备响应比在 1/1.5~1.5 的设备,所得设备抗震裕度小于审核地震动,此时需对设备进行更加详细的抗震裕度评估。同时还发现,设备响应比出现大于 2.5 的情况。此时得到的设备抗震裕度大于 0.75 g,由于整座核电厂抗震裕度评估采用的是“最大最小”原则,不影响整座核电厂的抗震裕度评估结果。虽然,由以上方法的得的设备抗震裕度能够满足 1.5 倍 SSE 审核地震动的要求,但是与真实的抗震裕度存在一定差异,得到设备的抗震裕度是一个保守估计。

## 4 结论

本文对我国某三代安全壳的内部结构和屏蔽厂房进行缩尺设计,使用叠层剪切土箱模拟土体边界,进行地震模拟振动台试验,针对安全壳的内部结构和屏蔽厂房的关键楼层进行楼层谱分析,得出以下结论:

(1) 考虑土-结构相互作用,不同强度的地震动输入不仅使土体性质发生明显变化,而且基础与地基接触关系也在发生非线性变化,进而造成了各楼层谱的幅值、形状和峰值对应频率的变化。随着地震动强度从 OBE 向 ULE 增加,7 层楼层谱均值的零周期峰值加速度(ZPA)、楼层谱峰值而言,分别下降了高达 75.13% 和 73.39%,而峰值频率由 2.81 Hz 降为 1.10 Hz,而动力放大系数变化不大,可以忽略。该变化规律将会给设备和管道的抗震设计和抗震裕度评估产生不同的影响,楼层谱应区别确定。

(2) 楼层谱峰值、ZPA 和峰值对应频率是确定设计楼层谱的重要特征参数,研究考虑土-结构相互作用对这些参数的影响,得出不同地震烈度得到楼层谱特征参数有明显差异,为不同地震强度设备设计标准谱的确定提供参考。

(3) 讨论了核电厂设备抗震设计和抗震裕度评估中设备地震动输入的确定。分析得出,不同强度地震动输入引起楼层谱差异不但峰值大小不同,而且峰值频率也有较大差异,这种差异使得不能由单一地震动强度通过阻尼比调整而得到设备不同荷载级别的输入需求。建议核电厂抗震设计规范中确定楼层谱时不仅要考虑土体和结构固有不确定性,还应该考虑地震动强度对土-结构特性的改变引起的不确定性。

(4) 设定设备能力因子 FC 为 1,通过分析各楼

层设备响应比,在 0 Hz~1.7 Hz, SSE 除以该设备响应比可得到设备的抗震裕度;对基频为 1.7 Hz~8.0 Hz 的设备,采用安全因子方法得出设备的抗震裕度。而这些方法得到的设备抗震裕度均较保守。特别是设备响应比在 1/1.5~1.5,采用以上方法得到的设备抗震裕度可能小于审核地震动,建议这些设备需做更详细的抗震裕度分析。

## 参考文献:

- [1] 刘燕军,林皋,李建波,等. 计算核电厂楼层反应谱的直接法及其对比分析[J]. 世界地震工程, 2011, 27(2): 93 — 99.  
Liu Yanjun, Lin Gao, Li Jianbo, et al. A direct method for computation of floor response spectrum of a nuclear power plant [J]. World Earthquake Engineering, 2011, 27(2): 93 — 99. (in Chinese)
- [2] 李忠献,李忠诚,沈望霞. 核反应堆厂房结构楼层反应谱的敏感性分析[J]. 核动力工程, 2005, 26(1): 44 — 50.  
Li Zhongxian, Li Zhongcheng, Shen Wangxia. Sensitivity analysis for floor response spectra of nuclear reactor buildings [J]. Nuclear Power Engineering, 2005, 26(1): 44 — 50. (in Chinese)
- [3] 李建波,林皋,钟红,等. 核电结构设计中参数不确定性对楼层谱计算影响分析[J]. 大连理工大学学报, 2011, 51(5): 725 — 730.  
Li Jianbo, Lin Gao, Zhong Hong, et al. Analyses of effect of parameter uncertainty in NPP design on computation of floor response spectra [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2011, 51(5): 725 — 730. (in Chinese)
- [4] 谢君斐. 罗东(台湾)土-结构相互作用大比例模型试验的启示(I)[J]. 世界地震工程, 1993(3): 41 — 52.  
Xie Junfei. The learning from the large scale Lotong soil-structure interaction experiments (I) [J]. World Earthquake Engineering, 1993(3): 41 — 52. (in Chinese)
- [5] 谢君斐. 罗东(台湾)土-结构相互作用大比例模型试验的启示(II)[J]. 世界地震工程, 1993(4): 49 — 59.  
Xie Junfei. The learning from the large scale Lotong soil-structure interaction experiments (II) [J]. World Earthquake Engineering, 1993(4): 49 — 59. (in Chinese)
- [6] EPRI-TR-103959. Methodology for Developing Seismic Fragilities [R]. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute (EPRI), 1994.
- [7] EPRI-1002988. Seismic Fragility Application Guide [R]. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute (EPRI), 2002.
- [8] EPRI NP-6041-SL. A methodology for assessment of nuclear power plant seismic margin (Revision1) [R]. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute(EPRI), 1991.
- [9] EPRI-1019200. Seismic Fragility Application Update Guide [R]. Palo Alto, California: Electric Power Research



- Institute(EPRI), 2002.
- [10] 胡晓英. 核电厂保护系统机柜抗震裕度研究[J]. 核动力工程, 2014, 35(5): 28 — 30.
- Hu Xiaoying. Study on seismic margin of protection system cabinet for nuclear power plants [J]. Nuclear Power Engineering, 2014, 35(5): 28 — 30. (in Chinese)
- [11] 李强, 岑鹏, 甄洪栋, 等. 安全壳喷淋热交换器抗震裕度分析 [C]//第十七届全国反应堆结构力学会议, 上海, 2012.
- Li Qiang, Cen Peng, Zhen Hongdong, et al. The seismic margin analysis of a heat exchanger of the containment spraying cooling system of nuclear power plants [C]// 17th national Conference on Structural Mechanics in Rector Technology, Shanghai, 2012. (in Chinese)
- [12] 高永武. 核电厂安全壳及某抗震 I 类设备的抗震裕度评估方法研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2016.
- Gao Yongwu. Study on containment and equipment classified of seismic category I seismic margin assessment of nuclear power plants [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2016. (in Chinese)
- [13] 高永武, 王涛, 戴君武, 等. 不同场地条件下某新型核电厂房的地震响应试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(18): 214 — 222.
- Gao Yongwu, Wang Tao, Dai Junwu, et al. Experimental research on seismic responses of a new type of nuclear power plant under different site conditions [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(18): 214 — 222. (in Chinese)
- [14] 赵春风, 陈健云, 王静峰. AP1000核电厂房动力特性参数化分析与优化[J]. 工程力学, 2017, 34(增刊): 282 — 288.
- Zhao Chunfeng, Chen Jianyun, Wang Jingfeng. Dynamic performance of AP1000 nuclear power plant by parametrical analysis and optimizatoin [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(Suppl): 282 — 288. (in Chinese)
- [15] Wang D, Wu C, Zhang Y. Elastic-plastic behavior of AP1000 nuclear islandstructure under mainshock-aftershocksequences [J]. Annals of Nuclear Energy, 2019, 123(4): 1 — 7.
- [16] 李振宝, 李晓亮, 唐贞云, 等. 土-结构动力相互作用的振动台试验研究综述[J]. 震灾防御技术, 2010, 5(4): 439 — 450.
- Li Zhenbao, Li Xiaoliang, Tang Zhenyun, et al. Review of research on shaking table test of dynamicsoil-structure interaction [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2010, 5(4): 439 — 450. (in Chinese)
- [17] GB50267—97. 核电厂抗震设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1997.
- GB50267—97. Code for seismic design of nuclear power plants [S]. Beijing: China Planning Press, 1997. (in Chinese)
- [18] 胡进军, 李琼林, 郭迪, 等. 基于PSHA的核电厂近断层抗震设计谱构建方法[J]. 工程力学, 2019, 36(5): 192 — 199.
- Hu Jinjun, Li Qionglin, Wu Di, et al. Construction method of the near fault seismic design spectrum for nuclear power plants based on probabilistic seismic hazard analysis [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(5): 192 — 199. (in Chinese)
- [19] NRC Regulatory guide 1.60 (revision 2). Design response spectra for seismic design of Nuclear Power Plants [S]. Washington: U.S Unclear Regulatory Commission, 2014.
- [20] 白晋华, 赵树峰, 谌登华, 等. 运行核电厂抗震裕度评价研究[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(12): 1446 — 1450.
- Bai Jinhua, Zhao Shufeng, Chen Denghua, et al. Research on seismic margin analysis of operation nuclear power plant [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(12): 1446 — 1450. (in Chinese)
- [21] NRC Regulatory Guide 1.122(Revision 1). Development of floor design response spectra for seismic design of floor supported equipment or components [S]. Washington:U.S Unclear Regulatory Commission, 1978.
- [22] ASCE 4—98. Seismic analysis of Safety-Related Nuclear structures and commentary [S]. Virinia:American Society of Civil Engineers, 1999.