

多向地震对非基岩场地核电厂房动力响应影响研究

陆新宇, 王 展, 余佳科, 齐文浩

(中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 本文采用大型振动台试验及有限元数值计算方法, 研究了多向地震对非基岩场地核电安全厂房动力响应的影响. 试验中土体选用均质粉质黏土, 将实际核电厂房简化为三层框架-剪力墙结构模型, 采用环形层叠剪切箱考虑土体的边界效应. 分别输入水平单向和三向人工地震动进行多工况振动台模型试验, 并采用有限元方法对振动台试验模型进行了数值模拟, 对比讨论了试验和数值计算结果. 研究表明: 在土-核电厂房体系中, 随着输入地震动幅值增大, 加速度放大系数减小; 多向地震动的耦合效应会导致核电厂房水平单向的加速度反应减小, 且这一结果主要由另一水平方向地震分量产生, 而竖向地震分量影响较小; 而多向地震动的组合效应会导致核电厂房水平向的总加速度反应增大. 此外, 耦合和组合效应均对核电厂房的加速度反应谱有一定影响, 耦合效应使反应谱中峰值周期附近幅值出现了明显降低, 而组合效应在长周期段(0.10s 以上)增大了反应谱幅值.

关键词: 多向地震动; 土-结构动力相互作用; 核电安全厂房; 振动台试验; 有限元分析

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)02-0280-08

Research of the effect of multi-directional earthquake on the response of nuclear power plant in non-rock site

LU Xinyu, WANG Zhan, YU Jiako, QI Wenhao

(Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

Abstract: In this paper, a large-scale shaking table test and finite element numerical computation were carried out to study the effect of multi-directional earthquake on the response of nuclear power plant in non-rock site. In the test, the soil model was uniform silted clay, and the actual nuclear power plant was simplified into a three-story frame shear wall structure model. The annular laminated shear model box was used to take the boundary effect of soil into consideration. The artificial seismic motion were input in only one horizontal direction or three directions for shaking table test. The model of shaking table test were calculated by finite element method, and results of the experiment and numerical computation were compared and discussed. The results of analysis show that the acceleration amplification factor in the soil-nuclear power plant system decreases with the increase of the input seismic motion amplitude. The coupling effect of multi-directional seismic motion leads to the reduction of the horizontal unidirectional acceleration response of the nuclear power plant, and this result is mainly generated by the other horizontal seismic component, while the vertical seismic component has little influence. The associative effect of multi-directional seismic motion increases the total horizontal acceleration response of the nuclear power plant. In addition, both the coupling effect and the associative effect have a certain impact on the acceleration response spectrum of the nuclear power plant. The coupling effect significantly reduces the amplitude near the peak period in the response spectrum, while the associative effect increases the amplitude of the response spectrum in the long period (more than 0.10s).

Key words: Multi-directional seismic motion; soil-structure dynamic interaction; safety-related nuclear structure; shaking table test; finite element analysis

收稿日期: 2022-07-11

修改稿日期: 2023-02-26

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2019B10)

第一作者: 陆新宇(1995—), 男, 博士生, 研究方向为土-结构动力相互作用. E-mail: luxinyu@nuaa.edu.cn

当前, 随着我国核电建设的快速发展, 沿海适合核电建设的基岩场地已日趋饱和, 核电建设不可避免地转向内地非基岩场地. 场地条件是一个影响建筑震害的重要因素^[1], 而核电工程具有上部结构质量大, 刚度大的特点^[2], 非基岩土地基上建造核电厂房在国内相对缺乏工程经验, 考虑到核电站抗震安全性能提升的需求, 有必要对非基岩场地核电厂房的地震响应进行深入研究.

现行《核电厂抗震设计标准》(GB50267—2019)^[3]第 3.2.1 条规定, 对地基土平均剪切波速不大于 2 400 m/s 或地基刚度不大于结构刚度两倍的地基, 应计入地基与结构的相互作用; 第 3.3.1 条规定, 结构应就两个正交水平方向和一个竖直方向计算地震作用. 同时, 大量试验研究表明, 相比于单向水平地震作用, 多向地震作用会对建筑结构水平方向的动力反应产生影响^[4-9], 且多为放大作用. 但是, 上述研究工作, 大多针对未考虑地基土体影响的刚性地基结构. Ioannis Politopoulos^[10]指出, 对于非隔震结构, 考虑 SSI 效应后, 竖向激励与水平响应的耦合关系可能会发生变化, 但未对此进行进一步的研究.

尽管目前众多学者已针对核岛厂房的地震反应完成了一些试验研究工作, 但大多将地基视为刚性, 未考虑土质地基的影响^[11-14], 或在试验中建立了地基土体模型, 但受限于所采用土箱, 不便进行三向加载, 仅沿水平单向输入地震动后进行分析^[15-16]. 王晓辉^[17]的试验中虽然对土质地基的 AP1000 核电厂房结构模型进行了单向、双向及三向的地震动输入, 但未对不同输入工况下核电厂房的水平地震响应进行比较.

本文研究内容是某核电公司为针对某土质地基第三代核电厂安全厂房的地基适应性进行分析, 而开展的“软土地基核岛厂房动力响应研究”项目中的一部分, 本文通过地震模拟振动台试验以及有限元计算, 分析了多向地震的耦合及组合效应对地基土-核电结构体系水平响应的影响.

1 振动台试验

1.1 项目背景

本项目的研究对象为某核岛厂房, 厂房平面布置如图 1 所示, 包括反应堆厂房、燃料厂房、电气厂房、安全厂房等, 核岛厂房共用一个筏板基础, 本研究主要以安全厂房 B 列为研究对象, 其为墙、板结构, 共 10 层、总高度约 40 m.

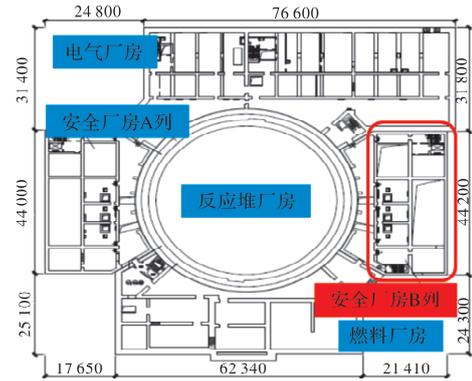


图 1 核岛厂房轮廓示意图

Fig. 1 Diagram of nuclear power plant

1.2 振动台系统

本试验采用中国地震局工程力学研究所 5 m × 5 m 三向六自由度大型地震模拟振动台系统, 可输入最大加速度为 2 g, 最大速度为 1.5 m/s, 最大行程为 ±0.5 m, 有效承重 30 t.

1.3 环形层状剪切箱

本试验模型箱采用自行研制的三维层叠剪切模型箱, 高度为 2.5 m, 内径为 2.8 m, 由多层可以相对独立运动的钢框架组合而成, 在振动时能够较好地模拟真实土体介质, 减小土箱效应^[18], 如图 2 所示.

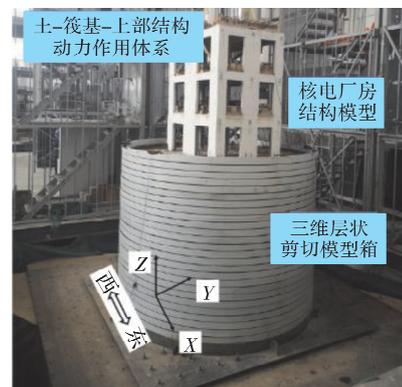


图 2 土-筏基-上部结构体系模型

Fig. 2 Model of soil-raft-superstructure system

1.4 核电厂房模型

地震模拟振动台土-结构动力相互作用试验是在常重力加速度条件下进行, 由于土是三相离散体, 且试验中无法采用原状土进行试验, 而是以扰动的重塑土代替, 因此目前无法实现对土体结构和重力的相似模拟. 在土-结构大型振动台试验中不可能给出严格的相似关系, 更不可能将试验结果定量地反演到原型结构, 仅可以定性研究土-结构动力相互作用规律和特征^[16]. 基于此, 本试验选取核电安全厂房的长度、楼板等效密度和频率作为基本量, 推导出核电厂房的动力相似关系, 见表 1, 据此设计

制作了核电厂房结构模型,如图 2 所示.该模型长 1.6 m,宽 1.1 m,共有 3 层,首层高度 0.65 m,第二层和第三层高度 0.60 m,墙体厚度 40 mm,楼板厚度 30 mm.采用强度等级为 C30 的微粒混凝土制作,楼板及墙体配筋采用直径 2 mm,网格间距 10 mm 的双向双排镀锌铁丝网片.结构模型采用筏板基础,由强度等级为 C40 的微粒混凝土制成,长、宽、高依次为 2 m、1.5 m 和 0.3 m.

表 1 核电厂房结构模型动力相似关系

Tab. 1 Dynamic similarity relation of nuclear power plant structural model

| 物理量 | 符号 | 数值 |
|------|--------|----------|
| 长度 | l | 1 : 20 |
| 等效密度 | ρ | 7 : 1 |
| 频率 | f | 4 : 1 |
| 位移 | u | 1 : 20 |
| 速度 | v | 1 : 5 |
| 加速度 | a | 1 : 1.25 |

1.5 地基土模型

本试验采用普通粉质黏土与中细砂进行混合配比,二者的质量比为粉质黏土:中细砂=2:1,模拟中硬土层.通过共振柱试验确定了试验土样的最大动剪切模量,并换算出剪切波速.土样参数见表 2.

表 2 土样参数

Tab. 2 Parameters of soil

| 序号 | 深度/m | 土样密度/ ($g \cdot cm^{-3}$) | 最大动剪切 模量/MPa | 剪切波 速/($m \cdot s^{-1}$) |
|----|------|--------------------------------|-----------------|-------------------------------|
| 1 | 2.3 | 1.80 | 81.664 | 213 |

1.6 传感器布置方案

为研究土体及核电厂房结构的动力反应,在土体及结构模型不同高度中心位置布置了三向加速度传感器,由土箱底部到结构顶部编号分别为 A1~A9,见图 3.

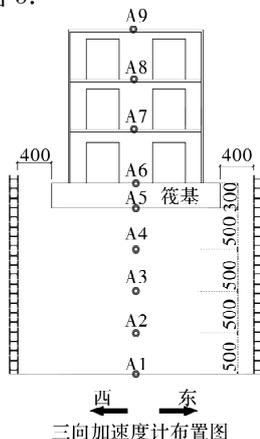


图 3 加速度传感器布置图

Fig. 3 Layout of acceleration sensor

1.7 输入地震动

本次试验选取根据美国 RG1.60 核电设计反应谱得到的人工地震动,调幅 0.05 g, 0.10 g, 0.20 g 和 0.30 g,考虑到地基模型无法满足相似关系,将时长进行适当压缩,压缩至原来的 1/5 后,依次沿 X 单向输入以及 XYZ 三向同时输入(三向同时输入时的幅值为 $X:Y:Z=1:0.85:0.65$, X、Y、Z 方向见图(2)),随幅值增大分级加载.输入地震动时程及反应谱如图 4 所示.此外为分析试验模型的频率变化,在试验开始前和各级加载试验后分别输入白噪声.

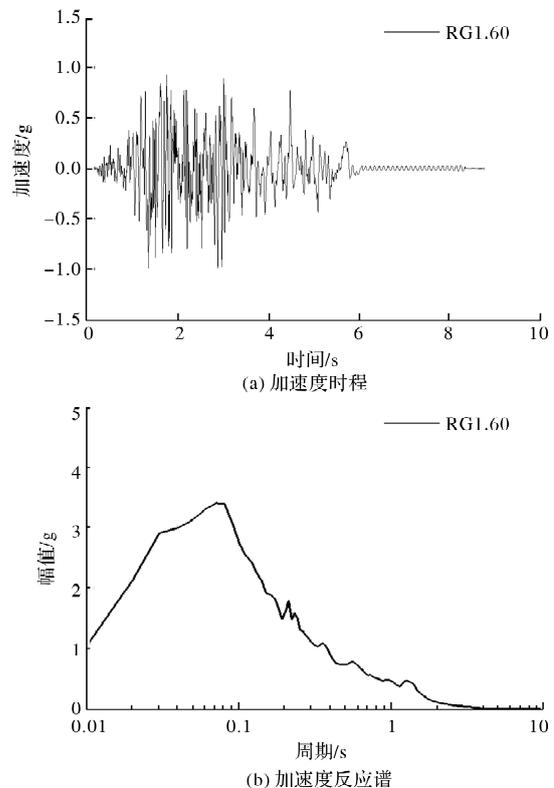


图 4 RG1.60 地震动加速度时程及反应谱

Fig. 4 Acceleration time history and response spectrum of RG1.60 seismic motion

2 试验结果分析

为更好地反映多向地震对非基岩场地核电安全厂房动力响应的影响,本文定义了两种指标:耦合效应和组合效应.将多向地震输入对体系单向地震输入方向反应的影响称为多向地震的耦合效应,将考虑此耦合效应影响后多向地震输入对上部结构水平方向总反应的影响称为多向地震的组合效应.

2.1 多向地震的耦合效应分析

通过均方根加速度和加速度反应谱对多向地

震的耦合效应进行分析. 均方根加速度 a_{rms} 的计算公式为

$$a_{rms}^2 = \frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} a^2(t) dt \quad (1)$$

式中: $a(t)$ 为测点的加速度时程; T_d 为地震动持续时间.

将各加速度测点与振动台面 X 方向均方根加速度值作商, 求得各试验工况中各测点的 X 方向加速度放大系数, 如图 5 所示. 无论单向输入还是三向输入工况, 土-结体系的 X 方向加速度放大系数均随高度增加而增大, 即出现了明显的“鞭梢效应”; 除土体底部测点 A1 基本保持不变外, 各测点的 X 方向加速度放大系数均随输入幅值增大而减小, 考虑到安全厂房结构的刚度较大, 推测这是由于输入地震动幅值增大导致土体阻尼增大, 体系耗能增大, 同时, 放大系数的减小速率随输入幅值增大而降低, 推测这是由于输入幅值增大导致剪切变形增大, 土体阻尼的增长逐渐趋缓; 各测点在三向输入地震动下的 X 方向放大系数基本都小于同一幅值单向地震动输入工况, 即相对于水平单向输入, 三向地震动的耦合作用减小了核电结构在该水平方向的加速度响应. 这与周志光^[19]的试验结果一致. 产生这一结果的原因是三向地震动输入时的合成运动幅值大于单向输入, 导致地基土体的阻尼变大, 传播至核电厂房结构基底的 X 方向地震动幅值减小. 对于结构加速度反应最大的顶部 A9 测点, 在 0.05、0.10、0.20 和 0.30g 地震动输入下, X 方向放大系数分别降低了 10.63%、8.16%、8.10%和 3.55%.

图 6 为结构顶板的 X 方向加速度反应谱对比结果, 由图可知, 三向地震动的输入对结构顶板 X 方向加速度反应谱的形状及峰值周期(0.07 s)基本无影响, 但对于峰值频率附近的反应谱幅值有较明显的降低.

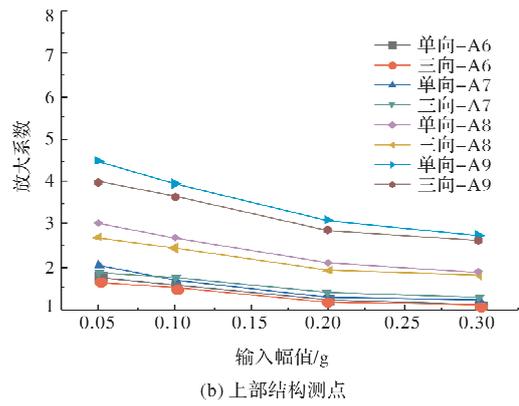
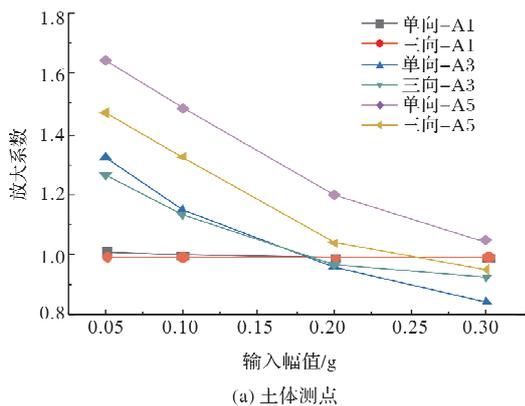
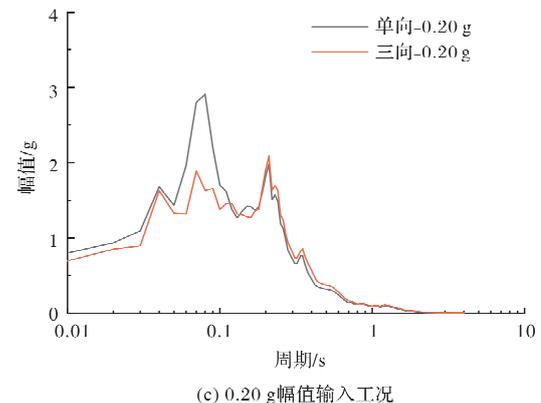
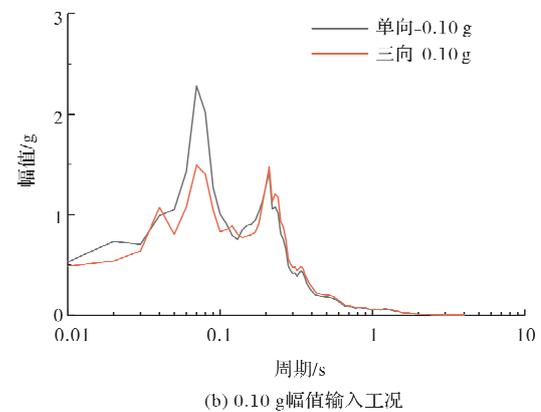
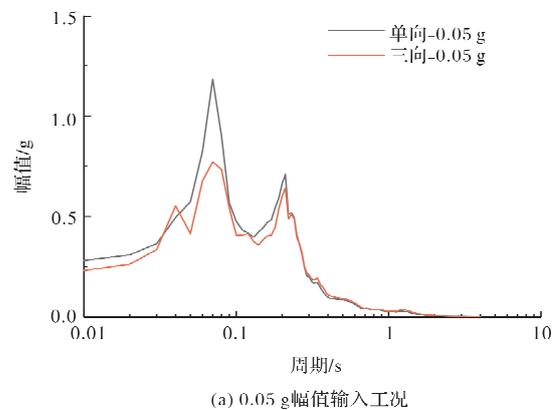


图 5 X 方向加速度放大系数对比图
Fig. 5 Comparison of acceleration amplification factor in X direction



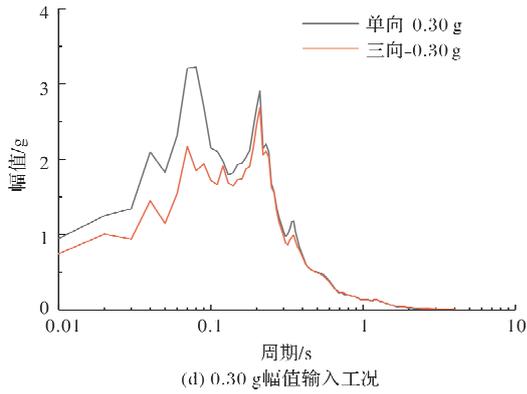


图 6 结构顶板 X 方向加速度反应谱

Fig. 6 Acceleration response spectrum of structural roof in X direction

2.2 多向地震的组合效应分析

在多向地震作用下，沿水平地震输入的合成方向(与 X 轴夹角为 40°)求出上部结构各测点水平向总加速度反应，由此得到组合均方根加速度值与加速度反应谱。为了方便地与单向输入工况所得放大系数进行对比，以上部结构各测点组合均方根加速度值除以振动台面输入 X 方向的均方根加速度值进行归一化，见图 7。与 X 单向加速度反应分析结果类似，无论地震动单向还是三向输入工况，核电结构的水平向动力反应均随高度增加而增大，各结构测点的动力反应均随输入幅值增大而减小。输入地震动幅值相同时，三向输入工况安全厂房的水平向总加速度反应均大于单向输入工况，即三向地震动的组合效应增大了单向地震动作用下核电结构的水平向总加速度响应。对于加速度反应最大的顶部 A9 测点，在 0.05、0.10、0.20 和 0.30 g 地震动输入下，水平向总加速度反应分别增大了 18.93%、10.63%、15.36% 和 22.37%。

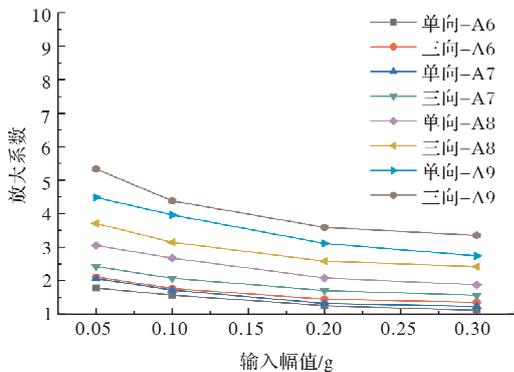


图 7 核电结构水平向总加速度放大系数对比图
Fig. 7 Comparison of horizontal total acceleration amplification factor of nuclear structure

图 8 为结构顶板的水平向加速度反应谱对比结果，由图可知，三向地震动输入工况结构顶板水平向总加速度反应谱的形状与单向地震动输入工况基本相同，但幅值有所不同，在长周期段(0.10 s 以上)大于单向地震动输入工况。

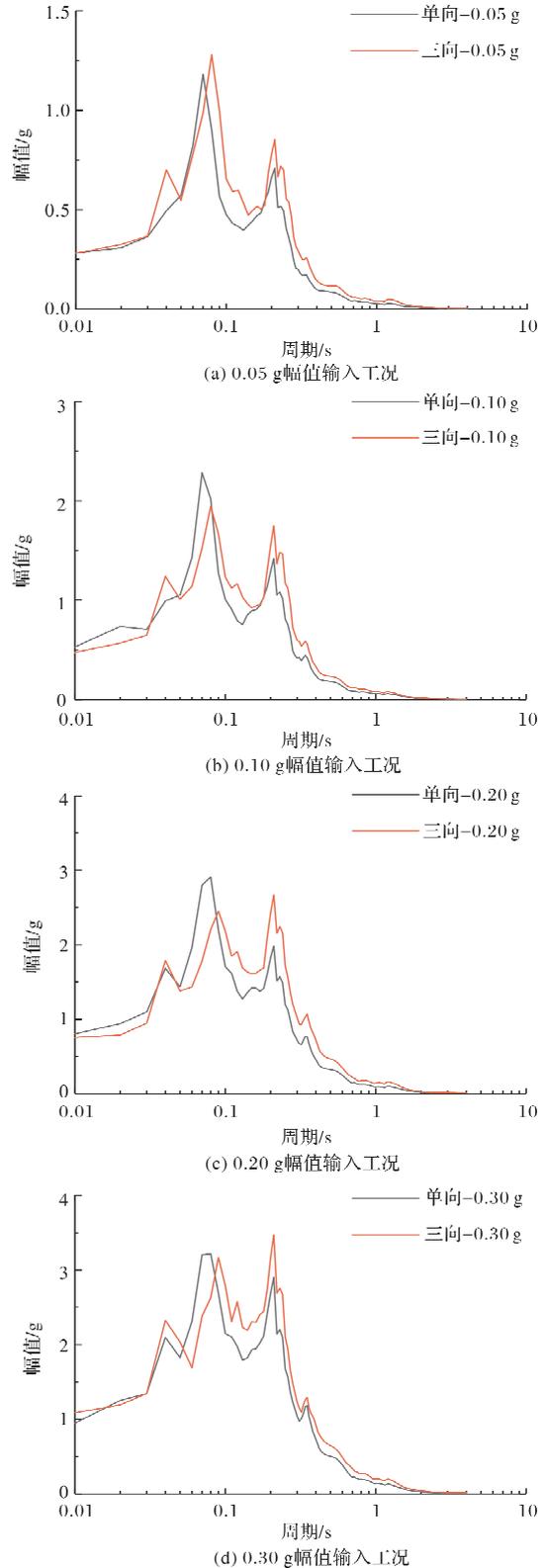


图 8 结构顶板水平向总加速度反应谱

Fig. 8 Horizontal total acceleration response spectrum of structural roof

3 有限元分析

3.1 数值模型建立

针对振动台试验模型建立了三维有限元分析模型。数值模拟的关键是边界条件和材料本构关系的选取, 本文数值计算模型的底边界采用加速度输入边界, 侧边界采用自由度绑定边界。土体的本构模型采用摩尔-库伦模型, 基础混凝土采用弹塑性本构模型, 基础钢筋采用双折线本构模型, 安全厂房微粒混凝土和镀锌铁丝采用线弹性本构模型。材料基本参数取值见表 3。

图 9 为有限元数值模型, 模型尺寸依据振动台试验模型进行设置, 土体及基础采用六面体实体单元进行网格剖分, 上部结构采用壳单元进行网格剖分。土体与基础之间采用标准接触(可以考虑法向接触与分离、切向摩擦的影响), 基础与上部结构之间采用绑定接触。模型单元总数为 37 008, 节点总数为 23 901。

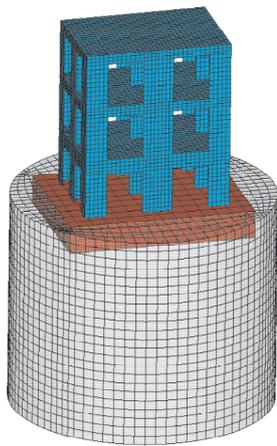


图 9 有限元模型

Fig. 9 Finite element model

表 3 基本材料参数

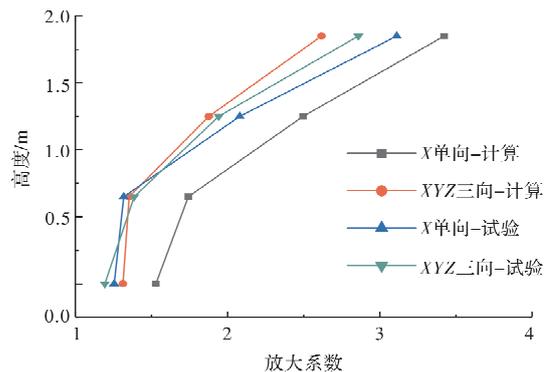
Tab. 3 Basic material parameters

| 材料 | 密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 弹性模量/ MPa | 泊松比 |
|----------------|--|--------------|------|
| 土体 | 1 800 | 204 | 0.25 |
| 混凝土-基础 | 2 560 | 19 095 | 0.20 |
| 钢筋-基础 | 7 850 | 200 000 | 0.30 |
| 微粒混凝土- 结构楼板 | 17 950 | 10 000 | 0.20 |
| 微粒混凝土- 结构侧墙 | 2 800 | 10 000 | 0.20 |
| 镀锌铁丝-结构 | 7 850 | 80 000 | 0.20 |

首先对有限元模型进行模态分析, 求得土-结构整体模型 X 方向频率为 16.58 Hz, 与实际振动台试验模型接近(试验开始前后白噪声扫频结果分别为 14.14 Hz 和 13.92 Hz)。然后对经过地应力平衡的有限元模型底部分别由 X 单向、XY 双向(1 : 0.85)、XZ 双向(1 : 0.65)以及 XYZ 三向(1 : 0.85 : 0.65)输入幅值为 0.20g 的 RG1.60 地震动时程(时间步长取 0.005 85 s, 共 1 500 步), 进行时域动力反应分析。

3.2 数值计算结果

首先将数值模拟和振动台试验结果进行对比, 以验证所建立有限元模型的正确性。图 10(a)为有限元模型计算与振动台试验实测的安全厂房 X 方向加速度放大系数曲线对比结果, 可以看出, 有限元计算结果与试验结果较为一致, RG1.60 波不同方向输入工况中有限元计算结果的安全厂房 X 方向加速度放大系数的差异更大, 但有限元计算结果和振动台试验结果反映的定性规律相同, 即三向地震动的耦合作用减小了核电结构水平单向的加速度响应, 说明可以使用此有限元模型进行地基-核电安全厂房动力相互作用分析。图 10(b)为 0.20 g 幅值的地震动不同方向输入工况 X 方向的放大系数对比。XYZ 三向、XY 双向及 XZ 双向输入工况结构顶部测点 X 方向的放大系数较 X 单向输入工况分别减少了 23.55%、20.36% 和 0.92%。可知另一个水平方向(Y 方向)地震动分量对结构水平单向(X 方向)的响应有较大幅度的减小, 而竖向(Z 方向)地震动分量对结构水平单向(X 方向)的响应影响较小。图 10(c)为 0.20 g 幅值地震动由 XY 双向及 XYZ 三向输入工况水平向总加速度反应对比。XYZ 三向输入时安全厂房水平向总加速度反应的数值计算结果与试验结果较为一致, 且与 XY 双向输入时的数值计算结果相差不大, 表明竖向(Z 方向)地震动分量对结构水平向总加速度响应影响较小。



(a) X单向放大系数的振动台试验与数值计算结果对比

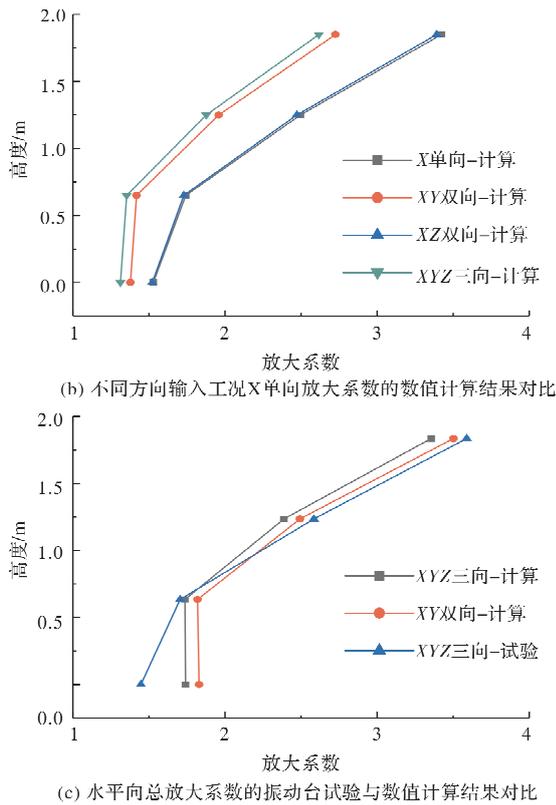


图10 加速度放大系数对比

Fig. 10 Comparison of acceleration amplification factor

3 结论

本文基于非基岩场地土体-核电安全厂房结构动力相互作用振动台试验及有限元数值计算,分析了多向地震耦合效应和组合效应对土质地基核电厂房地震响应的影响,得到以下主要结论:

(1)由于土体阻尼增大,耗能增大,土-安全厂房系统各测点的加速度放大系数随输入地震动幅值增大而减小,且减小速率随输入幅值增大而降低。

(2)多向地震动的耦合效应会减小核电厂房水平单向的加速度反应,多向输入时另一水平方向地震分量对结构单向输入时水平加速度反应有明显减小作用,但竖向地震分量的影响较小,因此三向地震动的耦合效应主要是由另一水平地震分量所导致。

(3)多向地震动的组合效应会增大上部核电厂房水平向的总加速度反应,试验结果表明,三向输入时结构顶部测点水平向总加速度反应相比X单向输入增大了10.63%~22.37%。

(4)多向地震动输入的耦合效应和组合效应对安全厂房水平加速度反应谱形状及峰值周期改变较小,但耦合效应明显降低了峰值周期处的反应谱幅值,而组合效应增大了长周期段(0.10 s以上)

的反应谱幅值。

参考文献 References

- [1] 彭小波.汶川地震强震动记录分析及应用[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2011.
PENG Xiaobo. Analysis of strong motion recordings and its application from Wenchuan earthquake [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2011.
- [2] 于磊,景立平,汪刚,等.单桩-土-结构振动台试验模型数值计算分析[J].世界地震工程,2020,36(3):151-160.
YU Lei, JING Liping, WANG Gang, et al. Numerical analysis of single pile-soil-structure shaking table test model [J]. World Earthquake Engineering, 2020, 36 (3): 151-160.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部.中华人民共和国国家标准-核电厂抗震设计标准:GB50267-2019[S].北京:中国计划出版社,2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for seismic design of nuclear power plants:GB50267-2019[S]. Beijing:China Planning Press, 2019.
- [4] Jenn-Shin Hwang. Experimental study of isolated building under triaxial ground excitations [J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(8): 879-886.
- [5] 朱玉华,吕西林,施卫星,等.多向地面运动作用时铅芯橡胶隔震房屋模型振动台试验研究[J].结构工程师,2001(1):34-38.
ZHU Yuhua, LÜ Xilin, SHI Weixing, et al. Study on shaking table tests of model building with lead rubber bearing under multi-direction component input [J]. Structural Engineers, 2001(1):34-38.
- [6] Ryan K L, Dao N D, Sato E, et al., NEES/E-defense base-isolation tests: Interaction of horizontal and vertical response[C]//Proceedings of the Thirteenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (WCEE-15). Lisbon, Portugal:WCEE,2012.
- [7] XU Weizhi; DU Dongsheng; WANG Shuguang; et al. Shaking table tests on the multi-dimensional seismic response of long-span grid structure with base-isolation [J]. Engineering Structures. 2019. 201(000):109802.
- [8] 沈超,钱德玲,朱志鹏,等.多向地震作用下土-框筒结构动力响应试验研究与数值模拟[J].振动与冲击,2019,38(10):206-214.
SHEN Chao, QIAN Deling, ZHU Zhipeng, et al. Experimental and numerical investigation on the dynamic response of a frame-core tube structure under the excitation of multi-direction seismic waves considering the

- soil-structure effect [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(10):206-214.
- [9] 崔亮,孔璟常,曲淑英. 双向地震作用下填充墙框架结构反应分析[J]. *防灾科技学院学报*, 2022, 24(1): 13-22.
CUI Liang, KUN Jingchang, QU Shuying. Response analysis of infilled wall frame structure under two-direction earthquake[J]. *Journal of Institute of Disaster Prevention*, 2022, 24(1):13-22.
- [10] POLITOPOULOS I, MOUSSALLAM N. Horizontal floor response spectra of base-isolated buildings due to vertical excitation [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2012, 41(3):587-592.
- [11] 闫维明,戴颖楠,陈适才,等. 核电厂整体基础隔震体系的振动台试验研究[J]. *北京工业大学学报*, 2018, 44(12):1513-1520.
YAN Weiming, DAI Yingnan, CHEN Shicai, et al. Shaking table test of a base-isolated nuclear power plant[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2018, 44(12):1513-1520.
- [12] 刘文光,程颖,李韶平,等. 核电厂隔震支座的受拉临界理论与结构振动台试验研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(14):153-160.
LIU Wenguang, CHENG Ying, LI Shaoping, et al. Theoretical analysis of bearings in tension and shaking table tests on a base-isolated nuclear power plant structure[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(14):153-160.
- [13] 周志光,周龙定,赵锦一. AP1000 核电厂模型基底隔震振动台试验研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2020, 40(2):64-72.
ZHOU Zhiguang, ZHOU Longding, ZHAO Jinyi. Shaking table test study of AP1000 base-isolated nuclear power plant[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2020, 40(2):64-72.
- [14] 陈岩,周中一,王友刚,等. 多模块高温气冷堆核岛厂房隔震结构振动台试验. *土木工程学报*: 2023, 56(1): 37-48.
CHEN Yan, ZHOU Zhongyi, WANG Yougang, et al. Shaking table tests on base-isolated nuclear island building of multi-module high temperature gas cooled reactor. *China Civil Engineering Journal*, 2023, 56(1): 37-48.
- [15] 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.
- [16] 景立平,汪刚,李嘉瑞,等. 土-桩基-核岛体系动力相互作用振动台试验及数值模拟[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(1):163-172, 207-208.
JING Liping, WANG Gang, LI Jiarui, et al. Shaking table tests and numerical simulations of dynamic interaction of soil-pile-nuclear island system [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(1):163-172, 207-208.
- [17] 王晓辉. 非基岩场地核电厂地震反应试验与数值模拟分析[D]. 北京:北京工业大学, 2017.
WANG Xiaohui. Shaking table tests and numerical simulation analysis of nuclear power plants in non-rock site [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017.
- [18] 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. Summary of shaking table test research on soil structure dynamic interaction [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2010, 5(4):439-450.
- [19] 周志光,郭晶,魏晓冬,等. 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[J]. *结构工程师*, 2018, 34(S1):82-87.
ZHOU Zhiguang, GUO Jing, WEI Xiaodong, et al. Research of coupling effect of horizontal and vertical seismic response of nuclear structures considering SSI effect[J]. *Structural Engineers*, 2018, 34(S1):82-87.

(编辑 桂智刚)