

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201910007

场地剪切波速对核电站结构地震响应的影响*

李小军^{3,1}, 王芳^{1,2}, 杨建华², 陈苏¹

(1. 中国地震局物理研究所, 北京 100081; 2. 中国核电工程有限公司, 北京 100840;
3. 北京工业大学建筑学院, 北京 100124)

摘要: 利用土-结相互作用的 ACS SASSI 动力分析程序, 对某核电厂厂房建立三维有限元模型并进行地震响应计算, 与简化的集中质量杆模型的地震响应对比分析, 得到在水平方向上二者的振动特征相似, 但三维有限元模型能更真实地反映结构的动力特性, 尤其是竖向的局部模态。在场地剪切波速 400~2 400 m/s 时, 选取 9 种不同剪切波速值, 用 ACS SASSI 程序进行不同场地条件下核电厂结构地震响应计算分析。结果表明, 随着场地剪切波速的增大, 结构响应的卓越频谱成分有向高频移动的趋势; 在低频部分, 剪切波速较小的场地上结构地震响应较大; 在高频部分, 场地剪切波速较大的结构地震响应较大; 对于非基岩场地的厂址, 需要重视结构的低频反应。在一定的剪切波速范围内, 结构响应的峰值加速度和反应谱的峰值均随着场地剪切波速的增大而增大, 而峰值加速度对于剪切波速小的场地更为敏感。

关键词: 核电站; 结构地震响应; 土-结构相互作用; 抗震分析; 剪切波速

中图分类号: TU352.11; TU38 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)06-1195-07

Effect of Site Shear Wave Velocity on Seismic Response of Nuclear Power Plant Structure

LI Xiaojun^{3,1}, WANG Fang^{1,2}, YANG Jianhua², CHEN Su¹

(1. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China;

2. China Nuclear Power Engineering Co., LTD., Beijing 100840, China;

3. College of Architecture and Civil Engineering Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Three-dimensional finite element model of a nuclear power plant structure was established and the seismic response simulation of the model was carried out by the ACS SASSI software for 3D dynamic analysis of the soil-structure interaction. Compared with the simplified lumped-mass stick model, the three-dimensional finite element model can more truly reflect the dynamic characteristics of the structure, especially the local vertical modes of the structure, although the vibration characteristics of the two models are similar in the horizontal direction. Nine different shear velocity values in the range of 400-2400 m/s were selected for the seismic response of nuclear power plant structure under different site conditions by the ACS SASSI software. The results show that: with the increase of site shear wave velocity, the predominant spectrum components of the structural response have the tendency to move to the high frequency section; in the low frequency part, the seismic response of the struc-

* 收稿日期: 2019-10-12; 修回日期: 2019-11-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51738001, 51421005)资助

作者简介: 李小军(1965—), 男, 研究员, 博士。主要从地震波动数值模拟研究。E-mail: beerli@vip.sia.com

ture on the site with small shear wave velocity is larger; in the high frequency part, the seismic response of the structure with large shear wave velocity is larger; for non-bedrock site, it is necessary to pay attention to the low-frequency response of the structure. In a certain range of shear wave velocity, the peak acceleration and the peak value of floor response spectrum of the structural response increase with the increase of the site shear wave velocity, and the peak acceleration is more sensitive to the site with smaller shear wave velocity.

Keywords: nuclear power plant; structural seismic response; soil-structure interaction; seismic analysis; shear wave velocity

引言

地震是核安全研究的永恒课题,核电厂的结构和设施对其抗震性能有严格要求。在各个设计阶段,都要采取最安全的措施。2011年福岛事故后,核电厂的安全问题更是引起了广泛关注,世界各国都在积极开展相关研究。中国的核电发展经历了从二代到三代的发展过程,从引进国外技术开始到现在已经具有自主设计和建设三代核电站的能力,抗震分析方法也在不断地改进和优化。

从以往的国内外研究资料来看,对核电厂结构的模拟普遍采用简化的集中质量杆模型,而且对于地震响应的分析大都是基于基岩厂址,非基岩场址的技术资料就比较缺乏。随着计算机软硬件水平的提高,采用越来越精细的结构模型已经成为抗震分析的趋势。另外,虽然目前已建和在建的核电厂都位于地基刚度较高的基岩地基上,但随着核电的快速发展,核电厂潜在厂址的选择已经涉及到非基岩地基。在非基岩场地条件中对地震响应影响的主要动力参数是:剪切波速、泊松比和阻尼比。其中剪切波速反映了土的刚度特性(即坚硬或密实程度),最能反映场地土的动力性能,对地震响应的影响最为显著,泊松比和阻尼比的影响就相对较小。因此,本文对于某核电厂结构,建立了考虑一定埋置效应的三维有限元模型,与集中质量杆模型进行对比;并利用 ACS SASSI 程序,计算了不同剪切波速下结构的地震响应,以促进非基岩地基条件下核电厂厂房的抗震适应性研究。

1 土-结构动力相互作用

在地震过程中,结构与支承它的地基之间总

存在某种程度的相互作用,也就是结构迫使土壤变形,从而引起不同于在自由场观察到的结构-土体界面处的运动^[1]。这种相互作用称之为土-结构相互作用(SSI)。在 ASCE4-16^[2]中明确指出,所有核安全相关的结构都应该考虑土-结构相互作用。

土-结构相互作用其研究方法按求解域划分为频域法和时域法;按结构体系划分为整体法(直接法)和子结构法。在 ACS SASSI 程序^[3-4]中采用复频域内的子结构法,包括柔性体积法(the Flexible Volume method)和柔性界面法(the Flexible Interface method),可以处理任意刚性或者柔性埋置地基上的结构问题。这两种方法的区别只是相互作用点定义的位置不同,而用的算法和矩阵公式都是相同的,阻抗问题变为确定水平分层的黏弹性系统中有限节点的阻抗矩阵问题。确定阻抗矩阵最方便的方法是在频域内取它作为动力柔度矩阵的倒数。整个结构和基础的运动方程为:

$$[M]\{\ddot{u}\}+[K]\{u\}=\{Q\} \quad (1)$$

式中, $[M]$ 、 $[K]$ 分别为总质量矩阵和刚度矩阵; $\{u\}$ 为节点位移; $\{Q\}$ 为节点土体子结构和上部结构子结构之间产生的总节点力。

对于频率为 ω 的谐和扰动,其荷载和位移矢量可以写为复数幅值的形式即: $\{Q\}e^{-i\omega t}$ 和 $\{u\}e^{-i\omega t}$

因此,每一频率的运动方程为:

$$[C]\{u\}=\{Q\} \quad (2)$$

这里, $[C]$ 是与频率有关的复数刚度矩阵:

$$[C]=[K]-\omega^2[M] \quad (3)$$

应用子结构理论,在频域范围,结构的最终运动可以根据下式确定:

$$\begin{bmatrix} C_{ss} & C_{si} \\ C_{is} & C_{ii}-C_{if}-X_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_s \\ U_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ X_{ff}u_{ff}^i \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, U_s 为结构运动位移矢量; U_f 为自由场运动位

移矢量; X_{if} 为与频率相关的阻抗矩阵; 公式中下标 s, i, f 分别表示上部结构、基础、挖掉的土壤的节点自由度。

土—结构相互作用的分析可以简化为以下三个步骤:

(1) 求解场地反应的问题以得到结构埋置部分所处的自由场运动。

(2) 求解阻抗的问题以得到频率相关的阻抗矩阵。

(3) 求解结构运动的问题, 包括形成公式中的复合刚度矩阵和荷载矢量, 最终求解系统的运动方程得到最终土—结构相互作用响应位移。

2 地震动输入参数

地震动输入参数采用美国核管理委员会(NRC)改进的RG1.60设计谱所拟合的人工地震动加速度时程。极限安全地震动峰值加速度取值水平和竖向均为0.3g。人工时程基于NRC《标准审查大纲(SRP)》^[5]的要求拟合而成, 为单组时程, 包括两条水平方向时程和一条竖直方向时程, 分别代表X、Y和Z三个方向, 水平方向时程如图1、2所示。时程的时间步长为0.01 s, 总点数为2 500, 时程的总持时为25 s。所有设计地震动时程之间的标准化互相关系数均小于0.16, 即它们之间均可认为是统计独立的。根据SRP^[5]的规定, 每条人工加速度时程均满足最小功率谱密度(PSD)的包络要求。以防止设计地面运动加速度时程在任何频率段出现能量不足的现象。

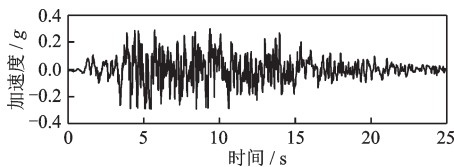


图1 水平X方向加速度时程
Fig.1 Horizontal X acceleration time history

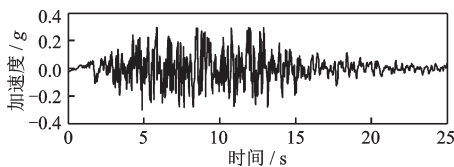


图2 水平Y方向加速度时程
Fig.2 Horizontal Y acceleration time history

3 计算模型比较

在以往的二代核电厂的抗震分析中, 用于地震响应计算的结构模型为简化的集中质量杆模型。这种模型在当时的计算机水平下较好地满足了核电厂结构抗震分析的需要, 它的优点是模型简单, 计算速度快。集中质量杆模型将结构用梁单元和集中质量单元模拟, 其参数由三维有限元模型推导而来, 三维有限元模型按照厂房的实际结构进行建立, 可以输出厂房任意位置的楼层反应谱, 并且可以考虑埋置效应, 但节点数量多, 计算量大, 时间长, 对计算条件有较高要求。

分别建立核电厂厂房的三维有限元模型和集中质量杆模型, 模态分析结果分别见表1~3。

从模态对比来看, 两种模型的水平向分析结果比较接近, 而在竖向有一定区别。对剪切波速2 400 m/s、阻尼比2%情况, 标高0.0 m和21.6 m处两种模型的楼层反应谱的结果进行对比, 如图3~5所示。从这两个标高处的反应可以看出:

在结构的整体地震响应上, 比如峰值加速度和加速度反应谱的最大值, 两种模型的结果有较好的

表1 模态分析结果(X方向)

三维有限元模型			集中质量杆模型		
模态	频率/Hz	有效质量/kg	模态	频率/Hz	有效质量/kg
1	4.447	0.261E8	1	4.689	0.269E7
7	12.796	0.476E7	4	14.516	0.594E7

表2 模态分析结果(Y方向)

三维有限元模型			集中质量杆模型		
模态	频率/Hz	有效质量/kg	模态	频率/Hz	有效质量/kg
3	7.838	0.25E8	2	6.031	0.284E8
14	15.799	0.224E7	6	16.119	0.448E7

表3 模态分析结果(Z方向)

三维有限元模型			集中质量杆模型		
模态	频率/Hz	有效质量/kg	模态	频率/Hz	有效质量/kg
5	10.735	0.711E7	5	15.989	0.285E8
6	11.765	0.230E7	6	16.119	0.174E7
7	12.492	0.237E7			
14	15.799	0.224E7			

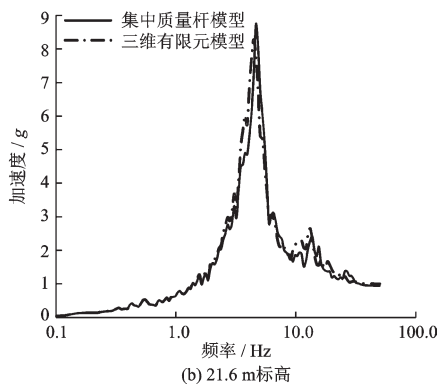
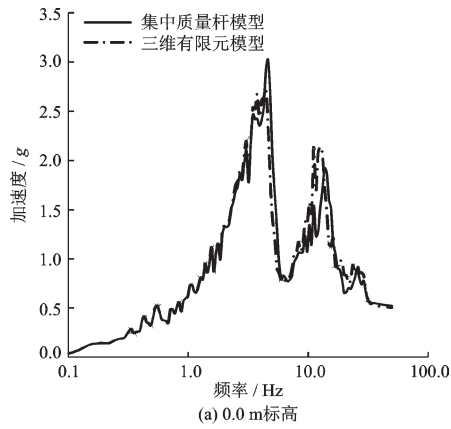


图3 水平X方向两种模型的楼层反应谱对比

Fig.3 Horizontal X-directional structural seismic response

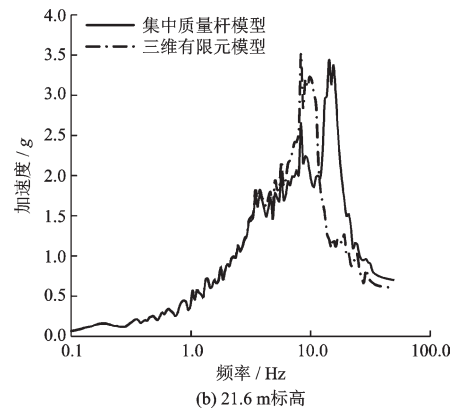
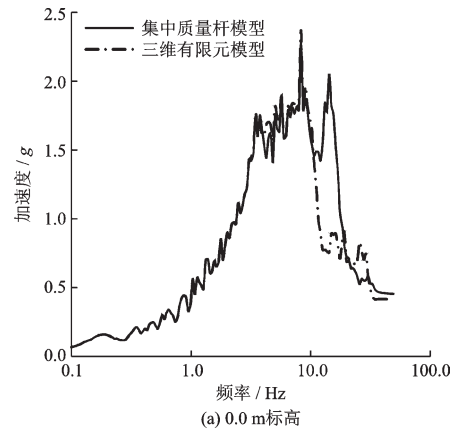


图5 竖直Z方向两种模型的楼层反应谱对比

Fig.5 Vertical Z-directional structural seismic response

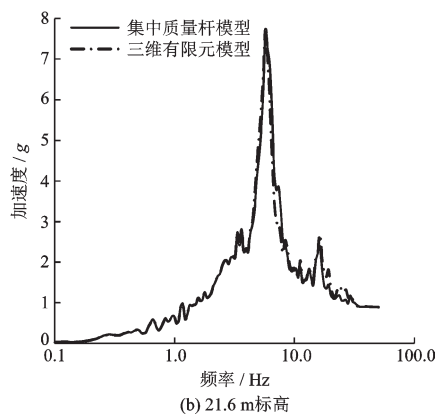
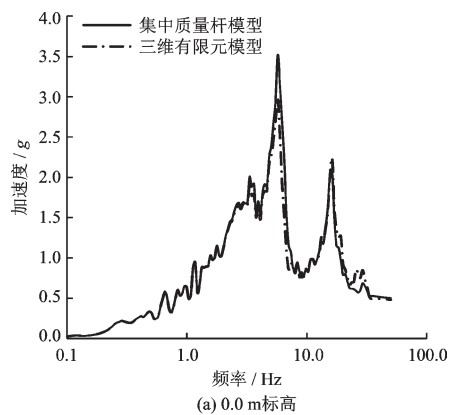


图4 水平Y方向两种模型的楼层反应谱对比

Fig.4 Horizontal Y-directional structural seismic response

一致性。

在水平方向上,杆模型和三维模型的反应谱谱形基本一致,即两者的动力特性近似。

竖直方向上,杆模型从刚性楼板假定而来,并且墙体被模拟为梁单元,也增加了墙体的整体性,反应谱谱形右移,峰值频率为15.989 Hz,而三维模型考虑了结构的质量和刚度的空间分布,包括基础、墙体和楼板的柔度,能够充分代表楼板和墙体的平面外的弯曲效应,其反应谱峰值频率为10.7 Hz左右。

在10 Hz以下,杆模型和三维模型竖直方向的谱形基本一致,而10 Hz以上的高频范围内二者的谱形有显著差异,说明该厂房在10 Hz以上有局部的竖向模态,而局部的响应很难在杆模型中所反映。

4 不同剪切波速场地下结构地震响应

4.1 计算模型和剪切波速的取值范围

根据第3节的对比,三维有限元模型比集中质量杆模型能更真实地反映结构的动力特性。因此,

在后续的分析中采用了三维有限元地基模型,对某核电厂厂房建立三维结构模型,相邻厂房结构采用集中质量杆模型以考虑相邻厂房之间的影响(图6)。

场地条件中剪切波速反应了土的刚度特性(即坚硬或密实程度),最能反映场地土的动力性能,对地震响应的影响最为显著。

2011年12月美国核管会(NRC)批准的《AP1000设计控制文件》(第19版)^[6]中给出六种地

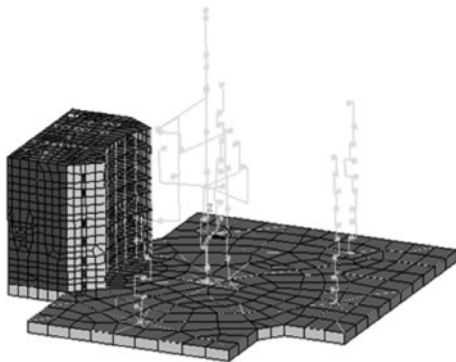


图6 某核电厂结构三维有限元模型

Fig.6 3D finite element model of a nuclear power plant

质剖面参数,剪切波速为304.8~2 438.3 m/s,剪切波速大于等于2 438.3 m/s(8 000 ft/s)的场地为基岩场地(Hard Rock Site),剪切波速为304.8 m/s的场地为软土地地。

ASEC4-16^[2]定义基岩厂址剪切波速为8 000 ft/s,ISG17^[7]规定剪切波速9 200 ft/s的场地为基岩场址。

《核电厂抗震设计标准》^[8]认为,结构地基岩土的平均剪切波速大于2 400 m/s时,可不考虑地基与结构的相互作用。故本文以剪切波速400 m/s作为起点,选取9种不同的剪切波速以代表不同的地基条件,采用等效线性法模拟地基的非线性特征,作为地基参数的输入依据。剪切波速的取值为400~2 400 m/s。

4.2 结构响应的加速度反应谱

根据厂房结构特点,选取具有代表性的三处标高进行结构的地震响应分析。图7和图8分别比较了水平X方向和Y方向随剪切波速变化的楼层响应加速度反应谱。

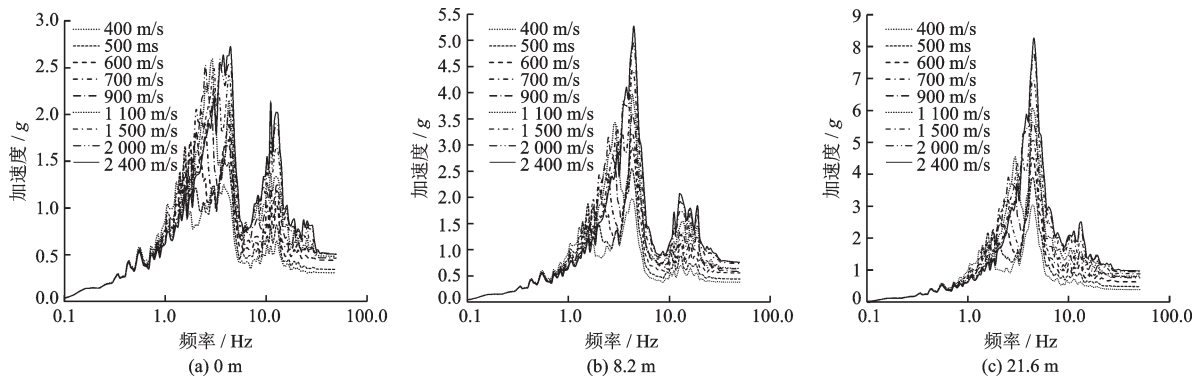


图7 X方向楼层反应谱随场地剪切波速的变化

Fig.7 Variation of floor response spectra with shear wave velocity(X-dir)

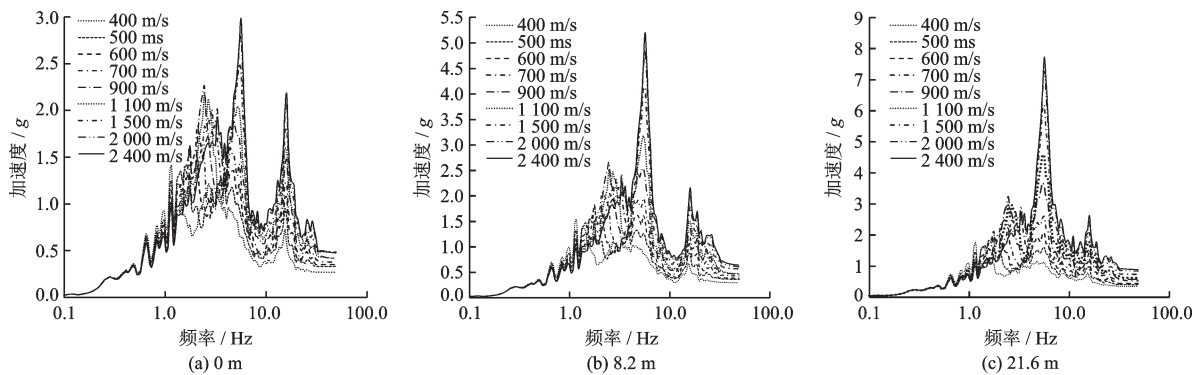


图8 Y方向楼层反应谱随场地剪切波速的变化

Fig.8 Variation of floor response spectra with shear wave velocity(Y-dir)

从图中可以看出,场地的剪切波速对结构的动力响应有明显影响。剪切波速从400 m/s增大到2400 m/s,标高0 m、8.2 m和21.6 m的X方向峰值加速度(零周期加速度反应谱值)分别增大到2.56倍、2.46倍和2.46倍;Y方向峰值加速度分别增大到2.96倍、3.04倍和2.49倍。

随着土体剪切波速的增大,核电厂结构响应的反应谱谱形有向高频移动的趋势。说明土-结构体系的频率随着地基刚度的增大而增大。在低频部分,结构响应的反应谱值随场地剪切波速的增加而降低,地基刚度小的结构响应大;而在高频部分,结构响应的反应谱值随地基刚度的增加而增大,即地基刚度大的结构响应大,不同剪切波速的水平X方向和Y方向楼层响应的反应谱均在33 Hz附近收敛。

对于软岩厂址,频率为1~3 Hz时,结构的反应比较大,由于高频时土体的滤波作用,结构在高频时的反应比较小。表明考虑土-结构相互作用后,在低频处,非基岩厂址上的结构反应比基岩厂址上的大。因此,对于建立在非基岩厂址上的核电厂结构,更需要注意低频的反应。

在相同的楼层标高,楼层响应的峰值加速度和反应谱的峰值均随着剪切波速的增大而增大。

而对于竖向的结构地震响应,除了和场地剪切波速有关,还和结构的平面外刚度、楼层高度以及荷载大小等有关,限于篇幅不再赘述。

4.3 结构响应的峰值加速度随场地剪切波速的变化

0.0、8.2、21.6 m三个标高的楼层响应的峰值加速度随场地剪切波速的变化如图9所示。从图中可以看出,当场地剪切波速低于700 m/s时,结构响应的峰值加速度随场地剪切波速的增大比较明显,从剪切波速400 m/s到700 m/s,峰值加速度增加了近2倍;当剪切波速高于700 m/s时,峰值加速度随场地剪切波速的变化越来越缓慢;而从700 m/s到3000 m/s,峰值加速度增加了不到40%。

剪切波速的大小反映的是场地土层的“软”、“硬”程度,计算结果表明土层越软,结构楼层反应的峰值加速度对场地剪切波速的变化越敏感。在不同的楼层标高和不同的计算方向,这种增大的趋势均是相同的。

从以上分析也可以看出结构的振动特性不仅

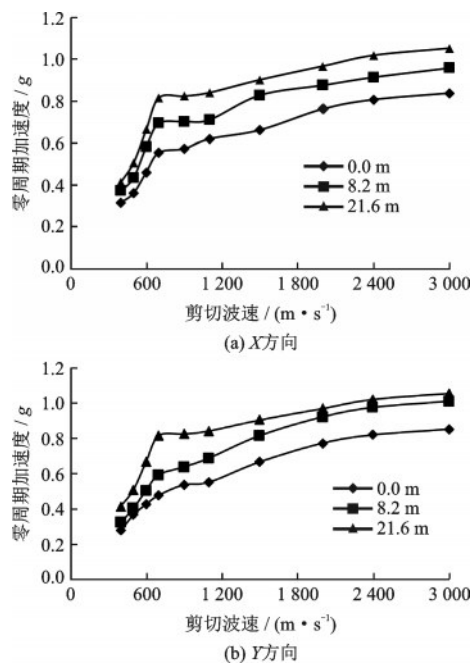


图9 X、Y方向峰值加速度随场地剪切波速的变化
Fig.9 Variation of X- and Y-directional peak acceleration with site shear wave velocity

与结构本身有关,由于土-结构相互作用的影响它还和地基特性有关,只有当地基表现为刚性的时候,结构的振动特性才完全决定于上部结构。当地基比较“软”,表现为柔性的时候,土-结构共同体系的主频比刚性地基时的主频小,即自振周期增长。

5 结 语

对于非基岩厂址,只有尽可能采用精确的模型进行土-结构相互作用分析,才能证实地基的适宜性,完善核电厂的抗震设计。本文对核电厂结构的集中质量杆模型和三维有限元模型进行了对比,采用ACS SASSI软件进行了不同剪切波速场地条件下土-结构动力相互作用分析,探讨了核电厂结构的地震响应特征。研究得到了以下认识:

(1)随着计算机技术的发展,很容易实现直接采用核电厂结构的三维有限元模型进行地震分析,而且三维有限元模型优于杆模型。为了更真实更精细地模拟结构的动力特性,尤其是结构竖向的动力特性,应采用三维有限元模型。

(2)对于核电厂结构,随着场地剪切波速(地基刚度)的增大,结构地震响应的卓越频谱成分有向

高频移动的趋势;在低频部分,地基刚度越小结构地震响应越大;在高频部分,地基刚度越大结构地震响应越大。对于非基岩厂址,更应该注意结构的低频地震响应。

(3)在一定的场地剪切波速范围内,结构楼层响应的峰值加速度和反应谱的最大值均随着地基刚度的增大而增大,峰值加速度对于刚度小的地基更敏感。

(4)结构刚度与地基刚度的相对比值不同,土—结构体系的主频变化对场地剪切波速的敏感性也不一样。土—结构相互作用会改变结构的振动特性,当场地剪切波速小,即地基较软时,土—结构体系的自振周期值比刚性地基时的大,即自振周期较长。

参考文献:

[1] R. 克拉夫, J. 彭津. 结构动力学[M]. 王光远, 等, 译. 2版(修订版). 北京: 高等教育出版社, 2006: 515.
Clough R, Penzien J. Dynamics of structures [M]. 2nd ed (revised edition). Wang G Y, et al. Beijing: Higher

Education Press, 2006: 515.

- [2] Seismic analysis of safety-related nuclear structures and commentary, ASCE Standard 4-16[S]. US: American Society of Civil Engineers, 2017: 23.
- [3] ACS SASSI version 2.3.0 user manual revision 1.0 [M]. US: GhioceI Predictive Technologies, 2009: 20-21.
- [4] ACS SASSI version 3.0 including options A, AA and FS user manual revision 9 [M]. US: GhioceI Predictive Technologies, 2018: 35-36.
- [5] Standard review plan for the review of safety analysis reports for nuclear power plants, NUREG-0800[S]. US: Nuclear Regulatory Commission, Revision 4, 2014.
- [6] Westinghouse AP1000 design control document APP-1000-S2C-012 [R]. US: Westinghouse Electric Company LLC, 2011.
- [7] Interim staff guidance on ensuring hazard-consistent seismic input for site response and soil structure interaction analyses DC/COL-ISG-017[S]. US: Nuclear Regulatory Commission, 2009.
- [8] 核电厂抗震设计标准: GB50267—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019: 13.

(本文责编: 池营营)