

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.04.024

考虑土-结构相互作用效应和土质地基非线性的核岛厂房结构地震响应分析

尹训强¹, 金煜皓², 王桂萱¹

(1. 大连大学 土木工程技术研究与开发中心, 辽宁 大连 116622; 2. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 有效模拟土-结构相互作用 (SSI) 和土体非线性特征是进行土质地基条件下核岛厂房结构地震响应分析的关键技术问题。基于 SuperFLUSH 软件平台, 采用等效线性法描述近场地基非线性动力特征, 通过在地基有限区域设置黏性人工边界来模拟半无限地基辐射阻尼效应的影响, 并利用一维有限元法进行自由场响应分析实现地震动的输入, 从而建立土质地基条件核岛厂房结构地震响应分析计算模型。最后, 以某土质地基条件下的 CPR1000 堆型反应堆厂房的集中质量简化模型作为研究对象, 开展考虑 SSI 效应和分层土质地基非线性对于核岛厂房结构地震响应特征影响研究, 验证了该计算模型的精度和工程应用效果。研究表明: 考虑 SSI 效应, 可有效吸收散射波波动能量, 减小结构响应; 考虑土质地基非线性效应, 加速度幅值在不同方向均有不同程度的降低, 峰值频率明显的向低频偏移, 因此, 同时考虑 SSI 效应及土质地基的非线性特征, 并将两者相结合的分析方法对核岛厂房结构抗震分析是必要的。

关键词: 黏性边界; SSI 效应; 土质地基; 等效线性法; 核岛厂房地震响应

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)04-1114-07

Seismic response analysis of nuclear island buildings considering soil-structure interaction and nonlinear soil foundation

YIN Xun-qiang¹, JIN Yu-hao², WANG Gui-xuan¹

(1. R&D Center of the Civil Engineering Technology, Dalian University, Dalian, Liaoning 116622, China;

2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: The effective simulation of soil-structure interaction and the nonlinear characteristics of soil is a key technical problem for conducting a seismic response analysis of soil foundations on nuclear island. A one-dimensional finite element model of nuclear structure is established on the software platform of SuperFLUSH by simulating the radial damping through setting viscous artificial boundary in the limited area of foundation to analyze the response of free field to the ground motion input, then to describe the nonlinear dynamic characteristics in the near field ground using equivalent linear method. Furthermore a case study of a simplified lumped mass model for CPR1000 nuclear reactor in the soil foundation is investigated about the effect of SSI and nonlinear layered soil foundation on the seismic response characteristics of nuclear island building structure. Numerical results verify the reliability and applicability of the proposed model in engineering application. With the consideration of SSI effect, the model of viscous artificial boundary can effectively absorb the energy of scattered waves and reduce structural response. With the consideration of the nonlinear characteristics of soil, the acceleration amplitudes decrease to a certain extent in different directions, and the peak frequency shifts to low frequency. Based on above analysis, the combination of SSI and the nonlinear characteristics of soil is necessary for seismic analysis of nuclear island.

Keywords: viscous boundary; effect of SSI; soil foundation; equivalent linear method; seismic response of nuclear island plant

收稿日期: 2015-05-29

基金项目: 辽宁省博士启动基金(No. 201601309); 国家重大科技专项(No. 2011ZX06002-10); 辽宁省教育厅一般项目(No. L2014498); 大连大学优秀青年博士专项基金(No. 2015YBL010)资助课题。

This work was supported by the Doctoral Scientific Research Foundation of Liaoning Province (201601309), the National Grand Science and Technology Special Project of China (2011ZX06002-10), the General Project of Department of Education of Liaoning Province (L2014498) and the Outstanding Young Doctor Special Fund of Dalian University (2015YBL010).

第一作者简介: 尹训强, 男, 1986 年生, 博士, 讲师, 主要从事结构动力分析方面的研究工作。E-mail: lc-tm2008@163.com

通讯作者: 王桂萱, 男, 1960 年生, 博士, 教授, 主要从事大型工程结构抗震安全方面的研究工作。E-mail: tumuxinxi@163.com

1 引言

核能作为替代化石能源的清洁能源具有很大的发展潜力。然而,核能的加速发展,首要的挑战依旧是提高核能的安全性,其中,核电工程结构的抗震能力是保障核电安全的重要内容之一^[1-3]。

当前核电站设计中往往采用标准设计,因此,核电厂址的选择尤为重要。然而,我国的核电基岩厂址资源日趋紧张,在内陆地区的土质地基上建设核电厂成为核电发展的必然方向^[4-5]。显然,土质地基核岛厂房结构的地震响应分析就成了急需解决的关键问题。其中,需全面考虑结构-无限地基的动力相互作用、土体非线性、场地表面几何结构复杂多变等问题。目前,国内外针对这些问题开展了广泛的研究工作,取得了大量的研究成果,但目前比较广泛采用的结构-地基动力相互作用模型,在分析非均质地基以及考虑近场地基非线性方面也有诸多限制,影响计算效果。例如,边界元与比例边界有限元模型^[6-7]注重对无限域的精确模拟,能够严格满足无限远处的边界条件,且能与有限元无缝衔接,但若考虑近场地基的非线性,必须截取需要考虑的有限区域,因此,广义结构与无限地基交界面的离散自由度繁多,且往往时空全局耦合,造成存储和计算的巨大压力;阻尼溶剂抽取法^[8]是由 Song 等在 1994 年基于高阻尼有限域内波的振动衰减理论首次提出的一种新数值方法,虽然可方便处理非均质地基条件,但该方法同样属于子结构法范畴,在考虑近场地基非线性方面需要选取较大的有限区域,同时由于有限区域大小与人工高阻尼等关键因素相互制约而导致的动刚度求解误差方面的研究工作开展的还不够深入,不适于工程应用;相比较而言,局部人工边界模型^[9-10]则具有时空解耦特征,不仅简化了数值计算,且其在有限元模型的外边界设置能量传递边界来描述波动能量向无穷远场的逸散,计算效率高,也可较容易地与近场地基非线性结合,具有良好的实用性,因此,该类模型引起了学者的普遍重视,我国核电厂抗震设计规范也建议采用透射边界或黏性人工边界进行地震作用分析。值得注意的是,上述大部分模型的推导均建立在均质无限地基假定的基础上,如何实现层状地基或非均质地基条件下的地震动输入也需要深入研究;而对于核岛厂房近场地基非线性模拟方面的研究工作还较少,现国际上主要采用美国 ASCE4-86 标准推荐的计算程序,如 SASSI、CLASSI、FLUSH 等,主要采用 Idriss 等^[11]所提出的等效线性法,然而上述软

件对于解决实际工程项目还存在一定的局限性。CLASSI 与 SASSI 程序可进行三维动力分析,然而计算自由度有一定的限制,较难进行大规模计算,因此,三维核岛结构模型网格剖分较粗糙,且计算效率较低。另外,上述两程序计算中采用子结构法,若非岩性地基进行桩基处理研究,较难同时考虑土质非线性和桩-土相互作用,不适用于工程应用。FLUSH 程序主要采用拟三维动力分析,采用的刚性基面假设,刚性基面的设置深度必须采用敏感性分析才能确定,对反射波波动能量的吸收无法很好地解决。

为解决上述问题,本文以 SuperFLUSH 软件为计算平台,通过在有限元模型底部施加黏性边界模拟半无限地基,在侧面设置黏性边界吸收向侧面逸散的波动能量,并利用一维有限元法进行自由场响应分析实现地震动的输入;近场地基非线性效应方面,则采用等效线性法模拟,从而建立土质地基条件核岛结构地震响应分析模型。进而以某土质地基条件下的 CPR1000 堆型反应堆厂房的集中质量模型为研究对象,通过对比关键节点的楼层加速度反应谱研究 SSI 效应和土体非线性特征对核岛厂房结构地震响应的影响。研究成果对于评价类似内陆核电厂土质地基适应性具有一定指导与参考意义。

2 土质地基条件下核岛结构地震响应分析模型

如图 1 所示,非岩性地基条件核岛厂房结构-无限地基的动力相互作用模型由广义结构部分(FEM 部分)和设在其侧方以表现半无限地基为目的的层状自由地基模型部分组成,广义结构部分包括核岛厂房结构与部分岩性较复杂、需考虑不均匀性以及非线性特征的近场地基。各关键技术功能如下所述。

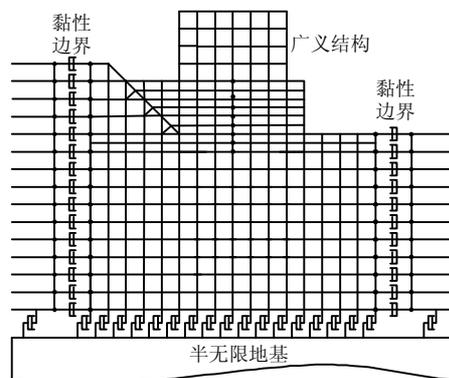


图 1 土质地基条件下核岛结构地震响应分析系统示意图
Fig.1 Seismic response analysis of nuclear island under the condition of soil foundation

2.1 土质非线性模型

本文基于核电结构抗震分析中所采用的等效线性法来模拟土体的非线性特征。该模型是依据等效剪应变来获得等效剪切模量和等效阻尼比，将非线性问题简化为线性问题进行求解。计算中使用迭代原理，使用等效剪切模量和阻尼比，获得等效剪应变 r_{eff} ，再比较单元剪应变是否满足收敛要求，不满足要求的情况下，根据 $G-r$ 与 $D-r$ 关系曲线修正剪切模量和阻尼比，进行下一步计算，具体计算过程如图 2 所示。等效剪应变 r_{eff} 求解公式为

$$r_{\text{eff}} = 0.65r_{\text{max}} \quad (1)$$

式中：0.65 为等效应变系数； r_{max} 为单元的最大剪应变。由于等效线性法使用了线性迭代原理，每次迭代中保持总刚度不变，依据丰富的工程经验积累，迭代 5 次基本可满足要求，在满足工程精度要求的前提下，极大地减少了工作量和计算量。

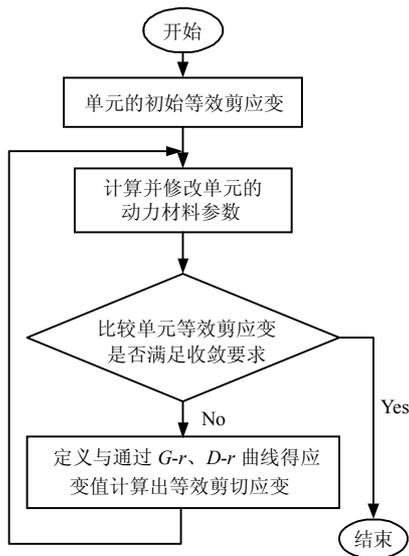


图 2 等价线性解析流程图
Fig.2 Equivalent linear flow chart

2.2 黏性边界场地模型

等效线性法模拟每次迭代中假定土体是保持线弹性的力学性质，因此，在地基计算区域的外边界处施加黏性人工边界来反映远场地基的辐射阻尼影响，也是 ASCE 4-98 所推荐。

黏性边界模型是通过黏性边界和等效荷载共同实现的，目的在于模拟实际波场的应力边界条件，如图 3 所示，以二维模型为例，通过设置阻尼器吸收反射波波动能量，并施加等效荷载力 P 以满足边界应力条件，则在人工边界点上施加的应力为

$$\sigma_x = a\rho V_p \dot{U}_x \quad (2)$$

$$\tau_{xy} = b\rho V_s \dot{U}_y \quad (3)$$

式中： ρ 为介质密度； V_p 、 V_s 分别为 P 波和 S 波波速； \dot{U}_x 、 \dot{U}_y 为人工边界处节点的法向和切向激励速度； a 、 b 为待定常数，根据边界能有效地吸收入射波的能量条件而确定。研究表明，当 $a=b=1$ 能基本满足充分吸收边界处反射波能量的条件。以节点 j 与相邻节点 $j+1$ 为例，节点上的等效荷载力 P 与等效应力 σ 、 τ 关系为

$$\begin{Bmatrix} P_{x,j} \\ P_{y,j} \\ P_{x,j+1} \\ P_{y,j+1} \end{Bmatrix} = \frac{h_j}{2} \begin{Bmatrix} \frac{2}{3}\sigma_{x,j} + \frac{1}{3}\sigma_{x,j+1} \\ \frac{2}{3}\tau_{xy,j} + \frac{1}{3}\tau_{xy,j+1} \\ \frac{1}{3}\sigma_{x,j} + \frac{2}{3}\sigma_{x,j+1} \\ \frac{1}{3}\tau_{xy,j} + \frac{2}{3}\tau_{xy,j+1} \end{Bmatrix} = [C_s]_j \begin{Bmatrix} \dot{U}_{x,j} \\ \dot{U}_{y,j} \\ \dot{U}_{x,j+1} \\ \dot{U}_{y,j+1} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$[C_s]_j = \frac{\rho_j h_j}{6} \begin{bmatrix} 2V_p & 0 & V_p & 0 \\ 0 & 2V_s & 0 & V_s \\ V_p & 0 & 2V_p & 0 \\ 0 & V_s & 0 & 2V_s \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中： h_j 为外边界上两相邻节点控制高度； $[C_s]_j$ 为黏性边界矩阵； \dot{U} 为施加散射场速度向量。

值得注意的是，在人工边界处，总场波动可以分为自由场波动与散射场波动的叠加，表示为

$$\dot{U}_t = \dot{U} + \dot{U}_f \quad (6)$$

式中： \dot{U}_t 为总体速度向量； \dot{U}_f 为自由场速度向量，自由场是本文模型的地震输入量。

对于多层非均质地基的地震动输入，需要得到边界处的响应以便等效荷载力的施加，因此，必须进行自由场响应分析^[12]。本文利用一维有限元法进行自由场响应分析，得到各网格匹配节点处的运动向量，作为人工边界模型的已知输入条件。如图 3 所示，可建立土柱有限元模型，四周自由边界，其一端与内域有限元相连，另一端连接远域半无限地基。

3 核岛厂房结构地震响应分析

采用本文所建地震响应分析计算模型，以某内陆土质地基上 CPR1000 堆型反应堆厂房为背景，对地震作用下的核岛厂房结构作动力响应分析。

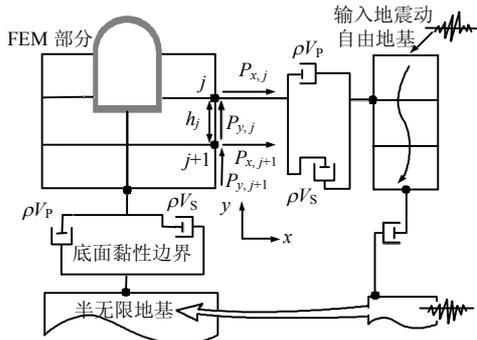


图 3 自由场响应分析及地震动输入模型示意图
Fig.3 Response analysis of free field and seismic input

3.1 计算模型及参数选取

3.1.1 核岛厂房结构

对于 CPR1000 反应堆厂房 (RX)，其结构由 3 大部分组成：筏板基础、安全壳结构、内部结构。厂房结构整体采用集中质量-梁单元模拟，结构的质量和转动惯量均集中在各节点上，两相邻节点间的几何惯性矩和剪切面积由连接节点的梁来模拟，结构在平面上即 X 和 Y 向是对称的。核反应堆模型如图 4 所示。各楼层其他参数见文献[13]。

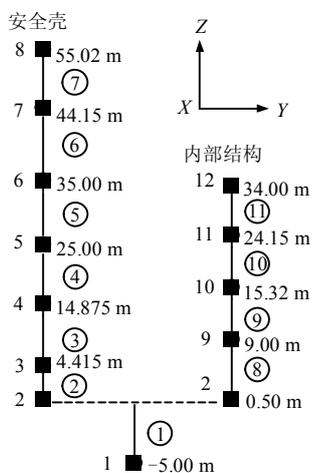


图 4 核反应堆简化模型
Fig.4 Simplified computational model of nuclear reactor

3.1.2 地基计算模型与参数

核岛厂址地基计算参数选自国内某拟建内陆厂址地基勘察资料，地基为不均匀土质地基，由不同类型的黏土、砂土等组成，水平成层明显，共 8 层，各分层厚度、动剪模量等参数见表 1。

经试验测得各层土的动剪切模量比 G/G_0 、阻尼比 D 和应变 γ 的关系曲线，如图 5 所示。

核岛基础筏板长度为 $b=39\text{ m}$ ，因此，地基有限元计算模型的左右两侧及深度方向各取大于 $l=2b$ ，具体计算范围为：左右两侧各延伸 50 m，深

度取 85 m，域内采用四节点平面等参元离散，并且有限元网格密度均保证每个波长内有 4~8 个节点。

表 1 地基计算参数
Table 1 Calculating parameters of foundation

岩性	层号	厚度	动剪模量 /GPa	动泊松比	密度 /(g/cm^3)	阻尼比 /%
粉质黏土	①	5	0.02	0.50	1.95	3.9
粉砂	②	3	0.07	0.49	2.01	2.5
淤泥质粉质黏土	③	2	0.05	0.49	1.88	3.9
粉质黏土	④	11	0.12	0.49	1.98	3.9
粉质黏土	⑤	6	0.13	0.48	1.91	3.0
粉质黏土	⑥	13	0.19	0.48	1.98	3.2
粉砂	⑦	4	0.21	0.47	2.03	2.5
玄武岩	⑧	41	6.04	0.28	2.45	2.8

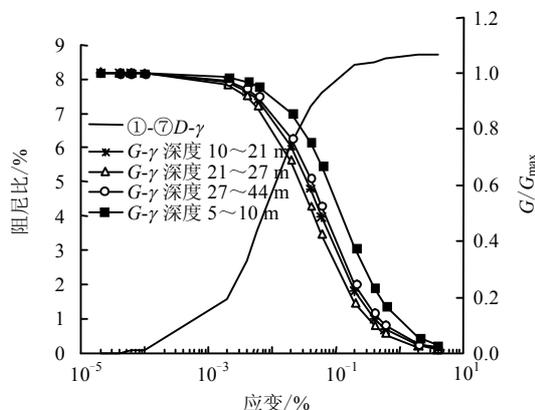


图 5 各土层的 $G-r$ 与 $D-r$ 曲线
Fig.5 Curves of $G-r$ and $D-r$ of soils

整个模型共有节点 1915 个，单元 1810 个，土质地基有限元计算模型如图 6 所示。

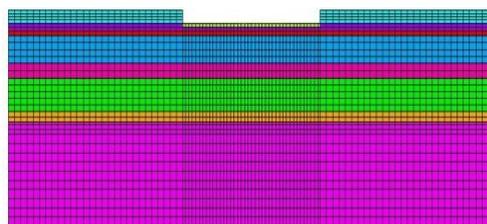


图 6 地基有限元计算模型
Fig.6 Finite element model for foundation

3.2 输入地震动

计算分析中，选用美国 RG1.60 地震动来开展核岛厂房结构地震响应特征影响研究，这是因为地震动所对应的 RG1.60 反应谱峰值段比较宽，具有包容性，一般都能包络国内的厂址特定谱，较为典型，满足核电抗震设计上来进行土质地基上核岛结构的抗震分析的需要，可以反映场地特点。RG1.60 地震时程曲线如图 7 所示，其中，水平向峰值加速度为 0.932 m/s^2 ，垂直向峰值加速度为

0.540 m/s², 总持时为 28 s, 时间步长为 0.01 s。

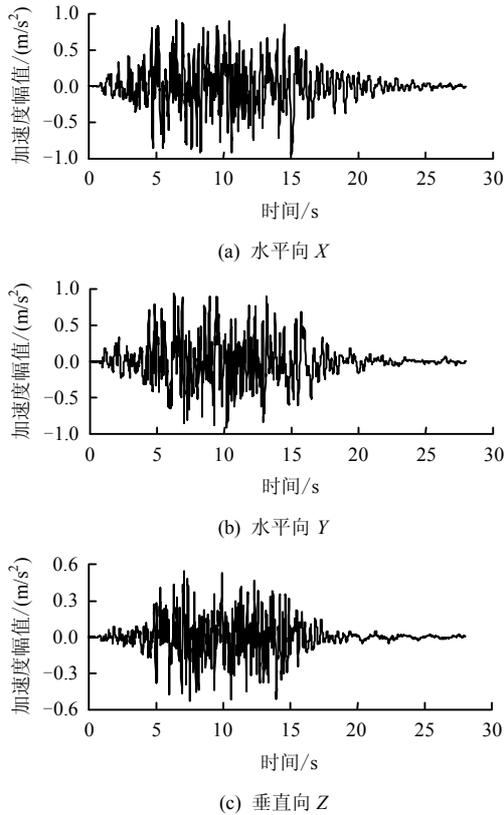


图 7 地面运动加速度输入时程曲线

Fig.7 Time-histories of ground motions acceleration input

3.3 计算工况

为考察土-结构动力相互作用以及土质地基非线性的影响, 选取 3 种不同工况进行对比, 见表 2。

3.4 计算结果分析

分别选取安全壳最高点楼层处(节点 8)和内部结构最高点楼层处(节点 12), 对比分析工况条件下 5%阻尼比加速度反应谱。顶点处地震响应值较下部节点响应值大, 相应的计算结果之间的差值也较下部节点的大, 具有包络及代表性。

表 2 不同计算工况

Table 2 Different calculation cases			
工况	无限地基数值模型	地基非线性	地震波输入
1	刚性地基	不考虑	地表三向输入
2	黏性边界	不考虑	地表三向输入
3	黏性边界	考虑	地表三向输入

图 8 所示为 8、12 号节点的加速度反应谱曲线。表 3 为两节点在 3 种工况下反应谱峰值加速度以及相应峰值频率的对比。

通过对比工况 1、2 两种工况考虑 SSI 效应的影响, 从图 8 可以看到, 较之工况 1 刚性地基模型, 采用黏性边界所模拟无限地基辐射阻尼对核岛加速度响应起了显著的削弱作用, 虽加速度反应谱曲线趋势基本相似, 但量值整体减小, 水平向最大减小幅度约 39%, 竖向最大减小幅度约 55%; 另外, 从表 3 同样可以看出, 工况 1、2 的峰值频率基本一致, 但峰值加速度相差较大。这是因为在地基有限域较小时, 刚性地基模型对于模拟半无限空间具有一定的局限性, 较之黏性边界模型, 其无法有效吸收散射波波动能量, 导致计算结果偏大, 而黏性边界吸收了逸散能量, 使得结构响应减小。

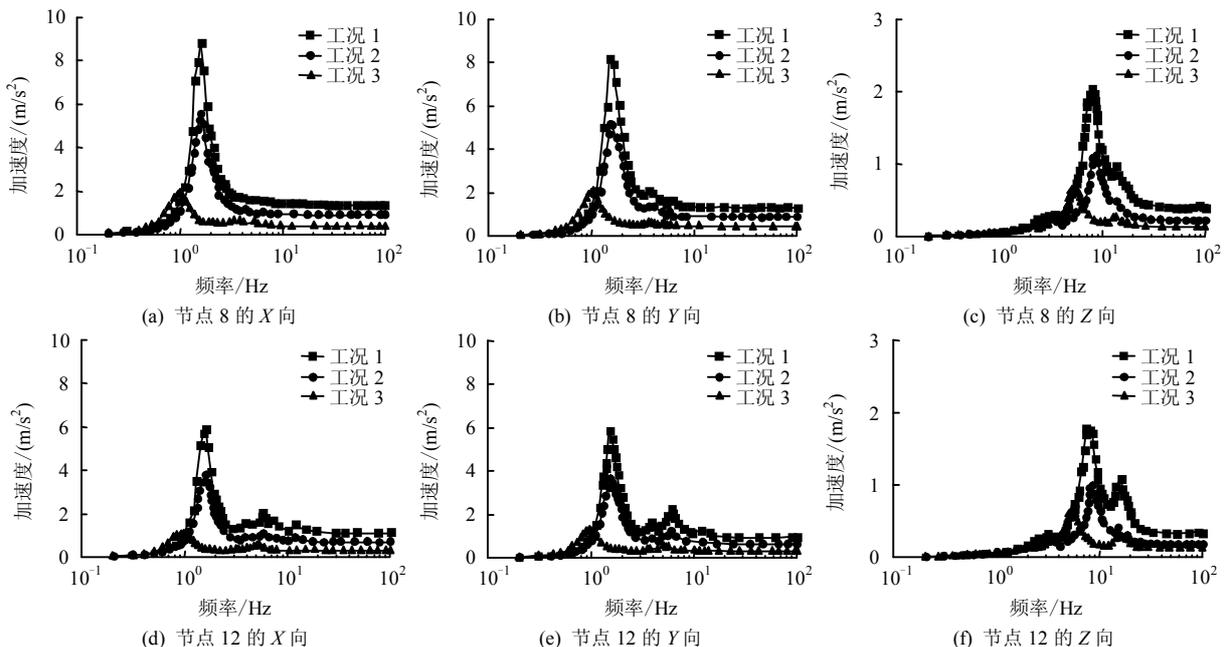


图 8 上部厂房集中质量点不同工况加速度反应谱对比

Fig.8 Comparisons of acceleration response spectra of the lumped masses of upper buildings under different conditions

为考虑土质非线性的影响，从图 8 所示工况 2、3 计算结果可以发现，在水平向较之工况 2 不考虑土质非线性的情况，工况 3 在考虑土质非线性影响后，加速度反应谱的低频段峰值频率向较低频偏移，并且反应谱幅值也有不同程度的降低，因为考虑非线性效应后，等效线性法模型中剪切模量以及阻尼比随等效剪应变的变大而分别降低和增大，导致地基主频有所降低，从而使核岛结构的加速度幅值在较低频段有所增大，同时对未线性化处理的谱峰值起到了消减作用；在竖直向加速度反应谱的变化规律与水平向大致相同，但幅值较之水平向的变化要小一些。

表 3 楼层反应谱峰值加速度、频率对比
Table 3 Comparisons of peak value of acceleration response and frequency

集中质量点	峰值频率 (工况 1/2/3) /Hz	加速度峰值 (工况 1/2/3) /(m/s ²)
8 点 X	1.6/1.5/1.0	8.8/5.4/1.7
8 点 Y	1.5/1.4/1.0	8.2/5.1/2.1
8 点 Z	8.0/8.6/5.4	2.0/1.1/0.6
12 点 X	1.6/1.5/1.1	5.9/3.6/1.2
12 点 Y	1.5/1.4/1.0	5.8/3.6/1.3
12 点 Z	7.5/8.5/5.3	1.8/0.8/0.6

通过对比工况 1、3 可以发现，在同时考虑黏性边界模型与土质非线性后，加速度反应谱幅值的变化较为显著，最大减小幅度约 81%，减小幅值约 7.1 m/s²，出现在节点 8 的 X 向，另外加速度峰值频率同样向较低频偏移。此外表 4 中典型位置节点 8、12 的位移值得到的规律与结构加速度反应谱相似，即工况 1 位移值最大，工况 2、3 依次减小，进一步说明了考虑无限地基辐射阻尼及土质地基非线性特征对结构动力响应的削弱，另外水平方向较竖直方向位移明显增大，说明结构主要受水平方向地震剪切作用。

表 4 核岛结构典型位置最大位移值 (单位: cm)
Table 4 Maximum displacement values for typical positions in nuclear structure (unit: cm)

集中质量点	工况 1	工况 2	工况 3
8 点 X 向	10.5	6.8	2.3
8 点 Y 向	9.8	6.1	2.5
8 点 Z 向	2.8	1.7	1.1
12 点 X 向	7.1	4.4	1.4
12 点 Y 向	6.9	4.5	1.3
12 点 Z 向	2.1	1.0	0.7

最后，为有效说明上述计算结果具有代表性，运用国内某拟建内陆核电厂实际厂址的地震动进行验证 (水平向峰值加速度为 0.932 m/s²，垂直向峰值加速度为 0.540 m/s²)，图 9 给了节点 8、12 的 X、

Z 两个方向的加速度反应谱，由图可知，所得上部结构动力响应加速度反应谱变化规律与上述已有描述非常相近，其验证亦说明了文中输入 RG1.60 地震动能够较为准确地反映出结构的动力效应。

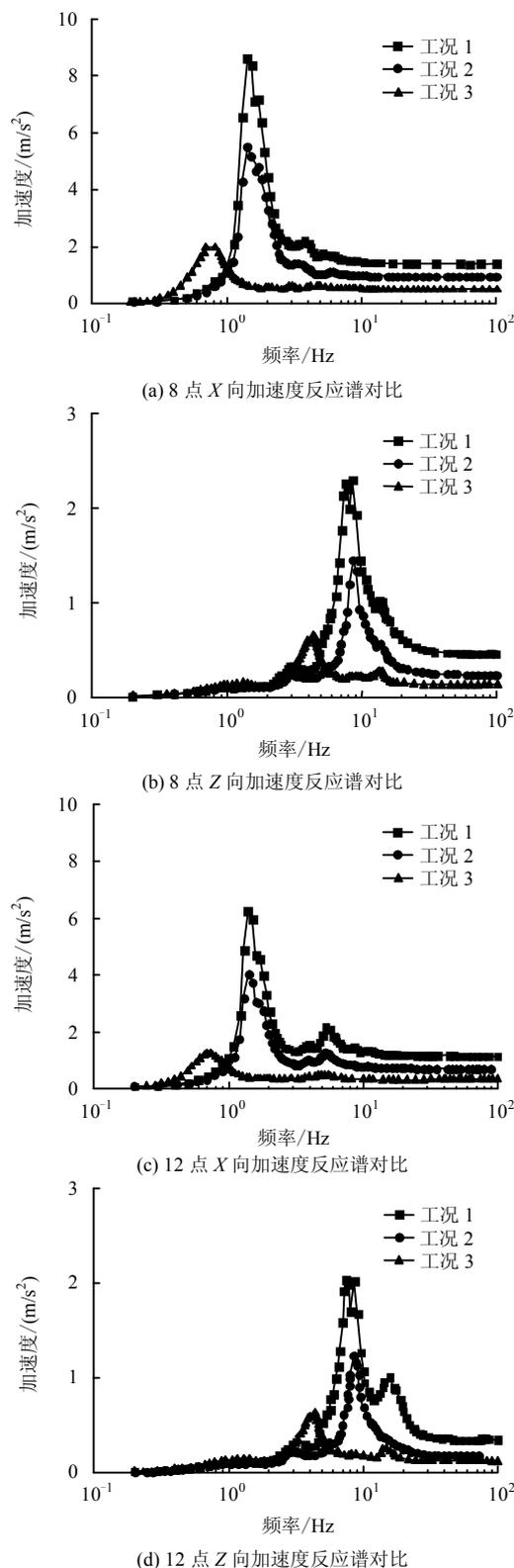


图 9 上部厂房集中质量点不同工况加速度反应谱对比
Fig.9 Comparisons of acceleration response spectra of the lumped masses of upper buildings under different conditions

4 结 论

(1) 同时考虑 SSI 效应以及非岩性地基的非线性特征, 并将两者相结合的分析方法对核岛厂房结构抗震分析是必要的。

(2) 土质地基条件下核岛结构地震响应模型能够同时对无限辐射效应以及近场地基非线性效应进行合理的模拟, 将其应用到某实际核岛厂房结构的动力时程响应分析中, 计算结果验证了该模型的合理可靠性。

(3) 所建立模型属于直接法的范畴, 可在考虑 SSI 效应和土质地基非线性的同时, 进行桩-土-结构的动力相互作用分析。因此, 若核岛厂址地基无法满足抗震适应性要求, 可方便地将桩部分加入模型, 进行地基处理方案的数值模拟研究, 这也是下一步的主要研究工作内容。

参 考 文 献

- [1] 戚承志, 钱七虎. 核电站抗震研究综述[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(3): 76—86.
QI Cheng-zhi, QIAN Qi-hu. Overview of seismic research for nuclear power plant[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2000, 20(3): 76—86.
- [2] 赵杰, 金煜皓, 王桂萱. 田湾核电站 5、6 号机组常规岛主厂房结构抗震性能分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2014, 36(6): 89—94.
ZHAO Jie, JIN Yu-hao, WANG Gui-xuan. Structural dynamic antiseismic performance analysis on the main machine hall in conventional island of Tianwan nuclear power station unit 5,6[J]. **Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting**, 2014, 36(6): 89—94.
- [3] 尹训强, 袁文志, 王桂萱. 复杂非均质场地条件下核电厂 HPX 泵房的静动力联合分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 2): 745—752.
YIN Xun-qiang, YUAN Wen-zhi, WANG Gui-xuan. Static-dynamic coupling analysis of pumping station of nuclear power plant under complicated heterogeneous site condition[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Supp.2): 745—752.
- [4] 李小军, 侯春林, 戴志军, 等. 核岛结构设计地基场地及计算基底效应研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(8): 2202—2208.
LI Xiao-jun, HOU Chun-lin, DAI Zhi-jun, et al. Research on site effects of soil layers and bedrock on designing the foundation of nuclear island structure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(8): 2202—2208.
- [5] 金煜皓, 尹训强, 王桂萱. 不同地基条件对核岛厂房结构地震响应的影响[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2015, 36(6): 711—715.
JIN Yu-hao, YIN Xun-qiang, WANG Gui-xuan. Effects of different ground conditions on seismic response of nuclear island[J]. **Journal of Huaqiao University (Natural Sciences)**, 2015, 36(6): 711—715.
- [6] 艾智勇, 蔡建邦. 层状地基上弹性地基梁的有限元-边界元耦合分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 2): 686—688.
AI Zhi-yong, CAI Jian-bang. FEM/BEM coupling analysis of elastic foundation beam on layered soils [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(Supp.2): 686—688.
- [7] 陈灯红, 杜成斌. 结构-地基动力相互作用的时域模型[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 1165—1172.
CHEN Deng-hong, DU Cheng-bin. A computational model for structure-foundation dynamic interaction in time domain[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(4): 1165—1172.
- [8] SONG C, WOLF J P. Dynamic stiffness of unbounded medium based on damping solvent extraction[J]. **Earthquake Engineering Structure Dynamic**, 1994, 23(2): 169—181.
- [9] 卢华喜, 梁平英, 尚守平. 地基非线性波动问题中黏-弹性人工边界研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1911—1916.
LU Hua-xi, LIANG Ping-ying, SHANG Shou-ping. Research on viscoelastic artificial boundary for problem of nonlinear wave motion in soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(7): 1911—1916.
- [10] HAGSTROM T. Radiation boundary conditions for the numerical simulation of waves[J]. **Acta Numerica**, 1999, 8: 47—106.
- [11] I DRISS I M, SEED H B. Seismic response of horizontal soil layers[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**, 1968, 94(4): 1003—1031.
- [12] 邱流潮, 金峰. 地震分析中人工边界处理与地震动输入方法研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1501—1504.
QIU Liu-chao, JIN Feng. Study of method of earthquake input and artificial boundary conditions for seismic soil-structure interaction analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(9): 1501—1504.
- [13] 李建波, 林皋, 朱秀云, 等. 核电厂楼层谱抗震计算的场地模型及其影响分析[J]. 核动力工程, 2010, 31(4): 91—95.
LI Jian-bo, LIN Gao, ZHU Xiu-yun, et al. Study on ground numerical models for floor response spectra analysis of nuclear power plant and their influences[J]. **Nuclear Power Engineering**, 2010, 31(4): 91—95.