

DOI: 10.16285/j.rsm.2022.0838

土的次非线性对桩基核岛结构 三维地震反应的影响

朱升冬¹, 陈国兴^{1,2}, 陈炜昀³, 高文生⁴, 李文彪¹

(1. 南京工业大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210009; 2. 江苏省土木工程防震技术研究中心, 江苏 南京 210009
3. 中山大学土木工程学院, 广东 广州 510275; 4. 中国建筑科学研究院, 北京 100013)

摘 要: 随着核电厂工程建设快速发展, 核电厂选址不可避免地要面临土质场地。土-桩-结构动力相互作用对核岛结构的抗震安全性评价具有重要影响。以国内某拟建的 AP1000 核岛工程为背景, 建立土质场地-群桩-筏板基础-核岛结构动力相互作用体系的 3D 模型, 考虑场址的区域地震环境与历史地震活动性, 选用近场中强震、中-远场强震和远场大地震的三分量记录作为基岩输入地震动。使用一步法和二步法分别实现对土体真非线性和主非线性的模拟, 通过对比这两种方法计算的核岛结构地震反应的差异, 可知土的次非线性 (soil secondary nonlinearity, 简称 SSN) 对核岛结构地震反应的定量影响, 也即 SSN 效应。发现 SSN 效应对核岛结构水平向地震反应的影响明显大于对竖向地震反应的影响, SSN 效应会导致土质场地-群桩-核岛结构体系变得更“柔”; SSN 效应与基岩输入地震动的特性强相关, 近场中-强地震作用时 SSN 效应最强; SSN 会显著增大核岛结构的峰值加速度和峰值相对位移反应, 在核岛结构的抗震设计中不应忽视 SSN 效应。

关 键 词: 核岛结构; 地震反应; 土的次非线性; 土-桩-结构相互作用

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2023) 05-1501-11

Influence of soil secondary nonlinearity on 3D seismic responses of a pile-founded nuclear island structure

ZHU Sheng-dong¹, CHEN Guo-xing^{1,2}, CHEN Wei-yun³, GAO Wen-sheng⁴, LI Wen-biao¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech. University, Nanjing, Jiangsu 210009, China;
2. Civil Engineering and Earthquake Disaster Prevention Center of Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu 210009, China; 3. School of Civil Engineering,
Sun Yat-Sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China; 4. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: With the rapid development of nuclear power plant constructions, it has become an unavoidable issue to choose a soil site as the plant site. Soil-pile-structure interaction (SPSI) effect has an important influence on the seismic safety evaluation of a nuclear island structure (NIS). A 3D integrated simulation method is developed to evaluate the seismic responses of a pile-mat-founded AP1000 nuclear-island building system subjected to multidirectional earthquake motions. Considering the regional tectonic setting and historical seismicity around the plant site, a set of three-component recordings for scenarios near-field moderate-strong, moderate-far field strong, and far-field large earthquakes are selected and justified for determining the bedrock shakings used in this study. The whole nonlinearity including both the primary and secondary nonlinearities of soil and only the primary nonlinearity of soil are considered by one-step method and two-step method for performing the 3D response analysis of the SPSI system, respectively. The quantitative influence of soil secondary nonlinearity (SSN) on the NIS seismic responses (i.e., SSN effect) under earthquake scenarios can be obtained by comparing the results obtained from the above two methods. A finding is that the influences of SSN on the horizontal seismic responses of NIS are obviously greater than those of the vertical ones of NIS, and the SSN effect makes the SPSI system more flexible. The SSN effect is strongly related to the characteristics of bedrock shaking scenarios and is the largest under the near-field moderate-strong earthquake scenarios. Given SSN effect can significantly increase the NIS seismic responses, the SSN effect should not be ignored in the NIS seismic design.

Keywords: nuclear island structure; seismic response; soil secondary nonlinearity; soil-pile-structure interaction

收稿日期: 2022-06-01

录用日期: 2022-08-15

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2018YFC1504301)。

This work was supported by the National Key R&D Project of China (2018YFC1504301).

第一作者简介: 朱升冬, 男, 1991 年生, 博士研究生, 主要研究方向为土-结构动力相互作用。E-mail: sd_zhu@sina.cn

通讯作者: 陈国兴, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土动力学与岩土地震工程研究。E-mail: gxc6307@163.com

1 引言

随着核电厂建设的不断发展,优良的岩性核电厂址资源日趋紧张,将核电厂建于土质场地已是不可避免的现实,并成为必然的选择。

与岩性场地相比,土质场地核岛结构地震反应更加复杂,土与结构相互作用(soil-structure interaction, 简称 SSI)效应不可忽略,应对结构-基础-场地相互作用体系进行地震反应分析,并评价其地震安全性。经历 2011 年日本福岛核电事故之后,各国普遍提高了对核电结构抗震安全性的要求。例如,美国的《核电抗震设计规范》新版 SEI 4-16^[1]与旧版 SEI 4-98^[2]相比,在 SSI 建模与分析方面更加强调了复杂土质场地的 SSI 效应研究。

SSI 分析一般分为子结构法和直接法^[3-4]。子结构法是将场地与结构分为不同的子系统,通常在频域内求解,效率较高,但采用等效线性化方法来模拟土体的非线性特性,在强地震动作用时不能很好地体现土的非线性效应,且只能针对水平成层场地。直接法^[5-6]也称为整体法或一步法,将上部结构-基础-场地体系视为一个整体进行分析,一般在时域内进行数值分析。此法不仅可以通过土的动力本构模型考虑土的强非线性和滞回特性,且适用于复杂的非均质土场地。无疑,直接法的计算模型更为复杂且计算规模庞大,导致计算成本较高。

上述两种方法被众多学者在核岛地震反应研究中选用。林皋等^[7]提出了一种基于子结构法的适用于复杂场地的 SSI 分析方法,将可包含基础且可考虑不均匀土层的近场子结构作为一个隔离体,通过求取近、远场地基交界处人工边界的阻抗函数及激励来分析近场子结构的地震反应。Kabanda 等^[8]采用非线性黏弹性模型模拟土体的非线性,通过 OpenSees 平台对我国台湾花莲的大型 SSI 体系试验模型进行分析,对比该分析结果与 SASSI 软件分析及实测结果表明,采用黏弹性模型模拟土的非线性方法更能合理地表现强地震动作用时 SSI 体系的反应。Luo 等^[9]通过 3D 非线性数值模拟研究了土-群桩-结构体系的地震反应,对比了采用等效线性方法和修正 Drucker-Prager 非线性模型模拟土的非线性特性的地震反应,分析结果表明,采用等效线性方法会明显低估核岛结构的加速度反应;土-桩-结构相互作用效应(soil-pile-structure interaction, 简称 SPSI)会抑制核岛结构的摇摆反应,并降低 SPSI 体系的位移反应。朱升冬等^[10]以 3D 集中质量-梁杆(lumped-mass stick, 简称 LMS)模型模拟 AP1000

核岛结构,考虑土的滞回非线性特性,建立核岛结构-桩基-不均匀场地体系,分析 3D 地震反应特性发现,地基柔性及 SPSI 效应的耦合对基础输入地震动具有高频过滤、低频放大的效应。

在 SSI(或 SPSI)分析中,强震动作用引起的土的非线性行为特性不可忽略。美国核电抗震规范将土的非线性分为两类^[1]:①地震波在自由场(无结构物存在的场地)中传播引起的土的非线性称为土的主非线性(soil primary nonlinearity, 简称 SPN);②由于 SSI 效应的存在,土体受到结构震动影响而引起的非线性称为土的次非线性(soil secondary nonlinearity, 简称 SSN)。显然,不论是土的主非线性或非线性,如受到的地震动水平越高、持续时间越长,其非线性程度也越高^[11-12]。

鉴于 SSN 源自 SSI 效应,对考虑 SSI 或 SPSI 效应的土质场地上核岛结构地震反应的研究,不少学者采用等效线性方法考虑土的非线性特性,或者将土体视为等效黏弹性材料。因此,究其本质而言,该类方法忽略了 SSN 效应对 SSI 或 SPSI 体系地震反应的贡献;同时,对核岛结构建模的过度简化,也会导致模拟的核岛结构地震反应与实际情况有较大的偏差。目前鲜有关于 SSN 效应的研究报道。从核电安全评估和抗震设计的角度而言,SSN 效应对 SPSI 体系地震反应的影响值得探究。

本文以某海岸拟建的 AP1000 核岛结构为背景,基于 ABAQUS/Explicit 计算平台,建立 AP1000 核岛结构的 3D LMS 模型^[10, 13-14],使用广义 non-Masing 滞回非线性本构模型模拟土的动力非线性滞回特性^[15-17],建立非均质土场地-群桩-厚板基础的核岛结构整体的 SPSI 体系的 3D 模型,输入不同地震动特性的设定(情景)地震三分量记录,通过对比一步法(考虑土的真非线性,即 SPN+SSN)和二步法(仅考虑土的主非线性,即 SPN)计算的核岛结构地震反应的差异,定量分析了 SSN 效应对核岛结构地震反应的影响。

2 基岩地震动与场地条件

2.1 基岩输入地震动的选取

拟建 AP1000 核电厂场址周边地区(116°00′~119°40′E, 36°80′~39°50′N)为强地震活动区。记录到该地区历史上发生 4.7 级及以上地震共 108 次,包括 1624 年的 2 次 5.5 级地震,震中距约为 47 km;记录到 6.0~6.9 级地震 13 次,6 次 7.0 级及以上地震,包括震中距约为 200 km 的 1679 年 8.0 级地震、震中距约为 120 km 的 1888 年 7.5 级地震、震中距

为 147 km 的 1969 年 7.4 级地震、震中距为 168 km 的 1976 年 7.8 级地震。可见，该核电厂场址潜在的地震风险较高。核电厂的设计基准地震动水平分为 SL-1 级基准运行地震（operating-basis earthquake，简称 OBE）和 SL-2 级安全停堆地震（safety shutdown earthquake，简称 SSE）。基于该核电厂场址地震危险的确定性和概率方法的分析结果：SL-2 级水平及竖向基岩地震动峰值加速度 PBA（peak bedrock acceleration）为 200 cm/s^2 ，SL-1 级 PBA 为 100 cm/s^2 。

由于缺乏该核电厂场址及其邻近地区的历史

强震记录，依据场址的区域地震环境与历史地震活动性资料及震级、震中距相近的原则，选用不同频谱特性的近场中强震、中-远场强震及远场大地震的基岩加速度记录作为场址的基岩地震动，并将记录的峰值加速度调幅到 SL-2 级和 SL-1 级水平，作为基岩输入地震动。根据日本 KiK-net 强震台网数据，所选强震记录对应的井下台阵所在土层的剪切波速远大于 760 m/s ，可将其视为基岩记录。选取的地震动记录信息见表 1。图 1 给出了地震动水平 SL-1 级的基岩输入地震动加速度时程及其傅里叶谱。

表 1 基岩输入地震动的原始地震记录信息
Table 1 Details of the original earthquake records for bedrock input motions

地震事件				强震台站					PGA / g	$D_{5-95\%}$ / s	备注
地点	年份	矩震级	深度 / km	台站编号	位置	地质类型	震中距 / km	分量			
日本福岛县	2004 年	5.8	15	FKSH21	地表以下 200 m	硬凝灰岩	33	EW	0.071	4.77	近场 中强震
								NS	0.099	3.82	
								UD	0.048	8.78	
日本宫崎县	2016 年	7.3	12	OITH10	地表以下 20 m	硬岩石	105	EW	0.150	29.53	中-远场 强震
								NS	0.190	23.8	
								UD	0.140	34.35	
墨西哥米却肯州	1985 年	8.1	27	SUCHIL	地表	花岗闪长岩	228	EW	0.098	14.88	远场 大地震
								NS	0.078	20.41	
								UD	0.049	26.49	

注：EW 为东西向，NS 为南北向，UD 为竖向向；PGA 为地面峰值加速度（peak ground acceleration）； g 为重力加速度； $D_{5-95\%}$ 为 Arias 强度 5%~95% 间的有效持时。

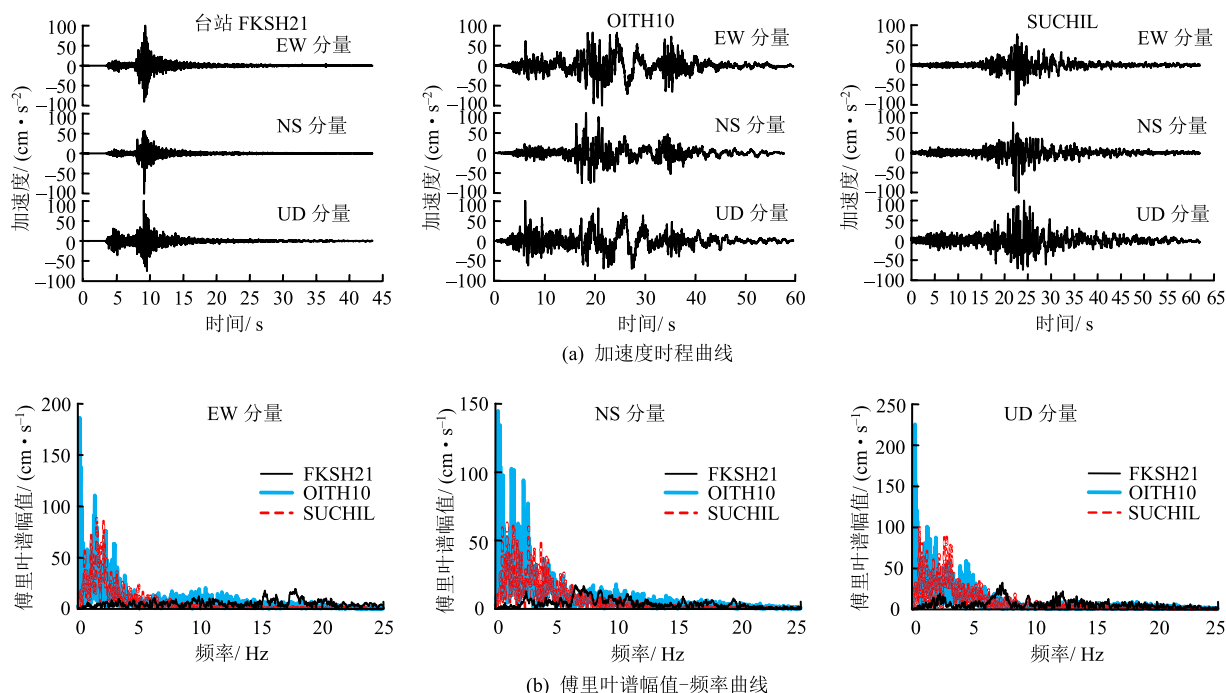


图 1 基岩输入地震动三分量加速度时程及其傅里叶谱 (PBA = 100 cm/s^2)

Fig.1 Seismograms and Fourier spectra of bedrock input motions at SL-1 level (PBA = 100 cm/s^2)

2.2 场地条件

拟建核电厂场址为中软土、II 类场地，以平原

地貌为主。表层为耕植土，中部为第四系全新统海陆交互相沉积层和上更新统海陆交互相沉积层，以

粉质黏土为主，局部为砂土，土层厚度为 32.9~60.5 m；下部为第四系上更新统玄武岩和火山堆积层。地层信息参见图 2 和表 2。

3 SPSI 体系的计算模型

3.1 SPSI 体系的建模

SPSI 效应中的非线性可归结为 3 个方面：①土

的非线性；②桩-土、板基础-土界面处的几何非线性；③桩-板基础、核岛结构的材料非线性。本文仅研究 SSN 效应对核岛结构地震反应的影响，且不考虑地下结构物、土的脱离与滑移是偏于安全的^[18-19]。故只考虑土的非线性，桩-土、板基础-土的界面假设为刚性约束，桩-板基础、核岛结构材料视为弹性。

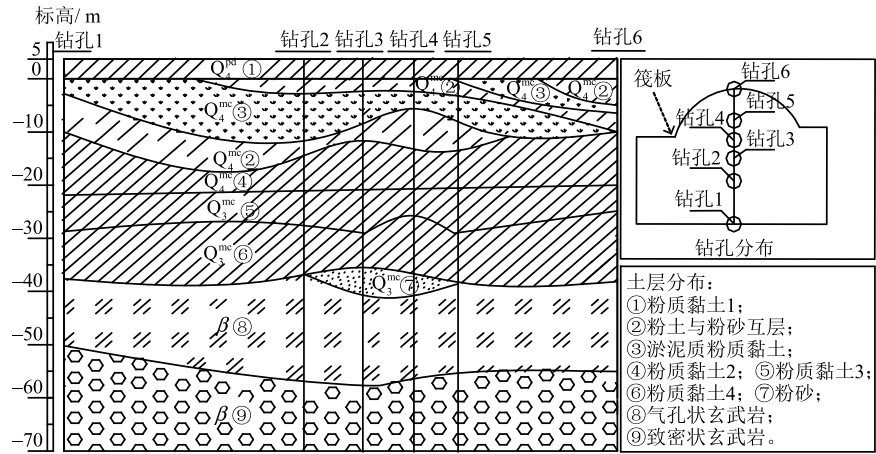


图 2 拟建核岛地层剖面
Fig.2 Geological profile of plant site

表 2 场地信息和土的本构模型参数
Table 2 Details of plant site and soil parameters for DCZ model

土层结构	沉积环境	土体类别	速率/(m·s ⁻¹)		密度 /(kg·m ⁻³)	与土体相关的试验 拟合参数		参考剪应变 $\gamma/(10^{-4})$
			P 波	S 波		A	B	
表层	第四系全新统耕植土 Q ^d	粉质黏土 1	1 050	105	1 810	1.03	0.47	5.28
		淤泥质粉土与粉砂互层	1 020	102	1 900	1.01	0.45	6.04
中层	第四系全新统海陆交互相沉积层 Q ^{mc}	淤泥质粉质黏土	1 520	239	1 930	1.03	0.46	5.90
		粉质黏土 2	1 510	237	1 890	1.03	0.45	6.01
下层	第四系上更新统海陆交互相沉积层 Q ^{mc}	粉质黏土 3	1 504	254	1 940	1.04	0.45	6.61
		粉质黏土 4	1 577	325	1 960	1.06	0.44	7.41
		粉砂	1 580	346	2 010	1.08	0.44	8.29
底层	第四系火山玄武岩 β	气孔状玄武岩	2 525	1 360	2 620	1.15	0.40	47.13
		密致状玄武岩	4 356	2 417	—	—	—	—

3.1.1 核岛结构

AP1000 核电厂由核岛、汽轮机厂房、附属厂房、柴油发电机厂房及放射性核废料厂房构成^[20]。核岛内含安全壳(钢制安全壳及壳内结构)、屏蔽建筑和辅助厂房。采用 3D LMS 模型表征核岛安全壳、安全壳内部结构、屏蔽结构与辅助结构^[10, 13-14]。3D LMS 模型由集中质量单元、弹性梁、杆单元和刚性约束组成。集中质量位于主要楼层及结构的不连续位置。通过刚性约束将集中质量连接到竖向弹性梁上,以实现结构的刚度中心与质量中心之间偏心的模拟。此外,次要子系统和设备以集中质量等效,集成

到 3D LMS 模型。核岛结构通过底部节点 Node 500 以点-面耦合(coupling)约束的方式与厚板基础表面相连。核岛结构-桩-厚板基础-场地体系的 3D SPSI 模型如图 3、4 所示。核岛结构的主要参数及建模的合理性验证,可参阅作者发表的论文^[10]。

3.1.2 群桩-厚板基础

核岛结构由群桩-厚板基础支承,共布桩 230 根(图 4(a)和 4(d)),桩径为 1.5 m、长为 36.0 m,桩顶嵌入厚板为 0.15 m、桩底嵌入玄武岩为 2.0 m。桩、板混凝土的强度等级均为 C40。筏板采用 8 节点线性块体单元(C3D8R)模拟,桩体采用梁单元

(B31) 模拟。

已有研究表明:不考虑桩-土之间的法向脱离与滑移的数值模拟结果与离心机试验结果相符^[18];忽略地下结构体与土体的相对滑移是偏于安全的^[19]。

鉴于厚板基础整体尺寸很大且埋深较深、桩数多且桩的上、下端嵌固,本文选用嵌入约束模拟桩与承台、岩层之间的连接^[21],将筏板与土的进行绑定,不考虑土与筏、桩之间的脱开与滑移。

3.1.3 3D 非均质土地

计算域的尺寸为 400 m×300 m×62 m,水平尺寸约为厚板基础的 5 倍,参见图 3 和图 4(b)。为使基岩地震动有效地传播至基础和结构,随空间变化的离散单元尺寸在沿地震波的传播方向应小于最小波长(对应截止频率)的 1/10~1/8^[22],本文取 25 Hz 为截止频率。由于沉积土的空间不均匀性,模型采用非均匀网格划分,水平向尺寸为 0.4~3.0 m、竖

向尺寸为 0.5~5.0 m 的。桩-筏基础邻近土的网格相对较细。将剪切波速为 2 417 m/s 的致密玄武岩作为地震基岩。

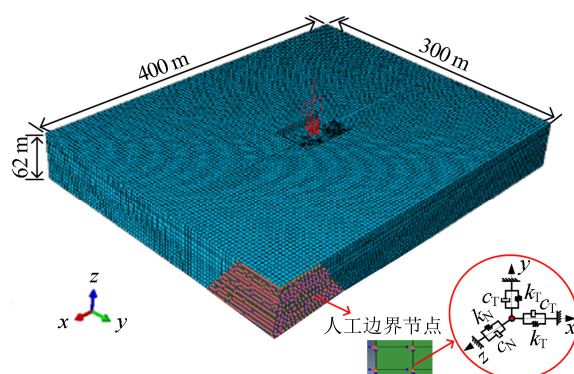


图3 土质场地-基础-核岛结构体系的 3D SPSI 模型
Fig.3 3D SPSI model of the soil site-pile-mat foundation-AP1000 nuclear island structure system

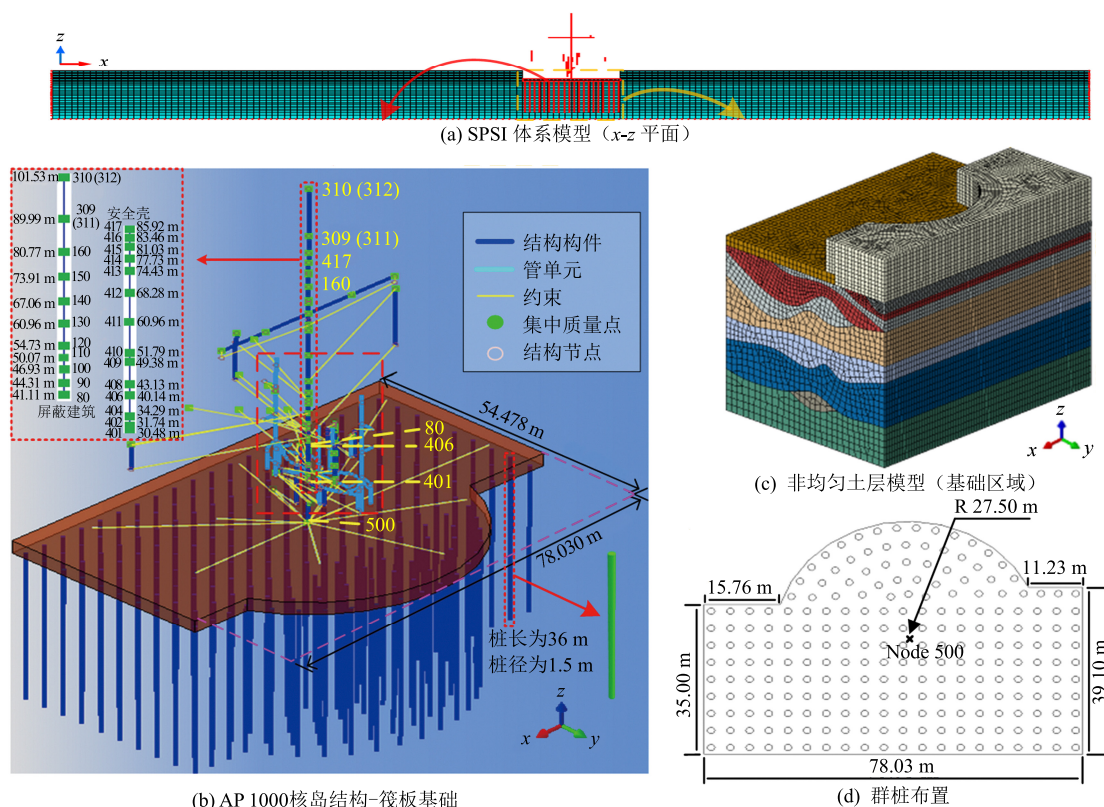


图4 核岛结构-桩-筏基础-场地体系的 3D SPSI 模型概况

Fig.4 Overview of 3D SPSI model of the soil-pile-mat foundation-AP1000 nuclear island building system

3.1.4 土的动力本构模型

采用广义 non-Masing 模型描述土的非线性滞回特性^[15-17]。初始骨架曲线可(图 5(a))表示为

$$\tau = G_{\max} \gamma \left\{ 1 - \left[\frac{(\gamma / \gamma_r)^{2B}}{1 + (\gamma / \gamma_r)^{2B}} \right]^A \right\} \quad (1)$$

式中: τ 、 γ 分别为剪应力和剪应变; A 和 B 为无

量纲参数,可通过剪切模量比 $G / G_{\max}$ 和阻尼比 λ 双曲线的最佳拟合确定; G 为应变相关的剪切模量; $G_{\max}$ 为小应变剪切模量,由土的密度 ρ 与剪切波速 V_s 确定,即 $G_{\max} = \rho V_s^2$ 。

针对该核岛场地典型钻孔的原状土样,室内试验给出的 $G / G_{\max}$ 和 λ 曲线如图 5(b)所示。各层土的本构参数见表 2。

3.1.5 地震动的输入

SPSI 体系地震反应的模拟精度与地震动的输入方法高度相关。为了减小计算规模,在计算域的 4 个侧向边界和底部设置改进的黏弹性人工边界条件^[23],以允许散射波通过人工边界向无限域传播而不反射。2D 和 3D 非线性地震反应分析已验证了该人工边界条件的有效性^[10, 16-17, 24-26]。图 3 局部展示了场地模型人工边界的设定。地震动记录的东西向 (EW)、南北向 (NS) 和竖向 (UD) 分量分别在模型底面沿 X 轴、 Y 轴和 Z 轴方向输入。

3.2 数值模拟的一步法与二步法

采用一步法和二步法对比分析 SSN 效应对核

岛结构地震反应的影响。一步法以广义 non-Masing 模型本构描述土的动力非线性和滞回特性,采用时域逐步积分法计算 3D SPSI 模型的地震反应。二步法的第一步是采用时域逐步积分法计算拟建场地的 3D 自由场地震反应,土的动力非线性和滞回特性也采用广义 non-Masing 模型本构描述,计算出每一个土单元的剪应变时程曲线,取最大剪应变的 0.65 倍作为等效剪应变值^[27-32],再在试验给出的动剪切模量比和阻尼比曲线上标定其相应的值 (图 5);第二步是采用第一步标定的与土单元应变相容的等效剪切模量与等效阻尼比作为黏弹性土体的输入参数,对 3D SPSI 模型进行线性地震反应分析。

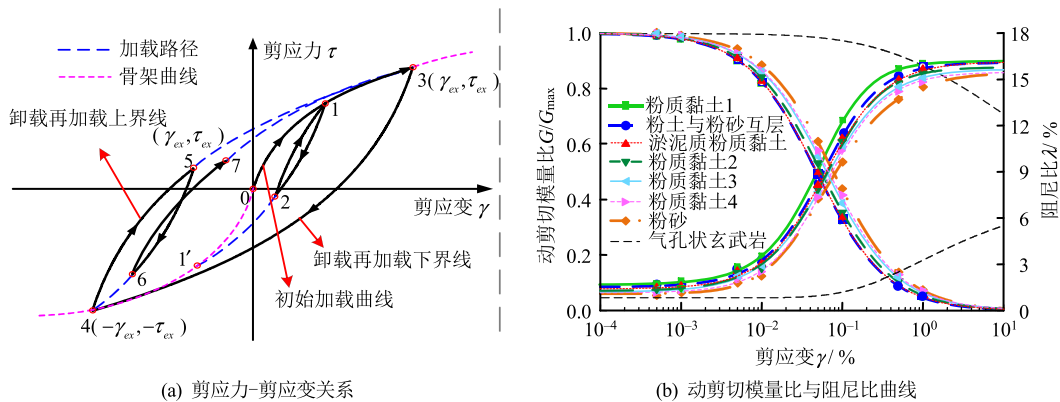


图 5 土的 non-Masing 本构模型
Fig.5 Non-masing nonlinear and hysteretic model of soil

一步法可获取考虑土的真非线性 (SPN+SSN) 的 3D SPSI 体系的地震反应,一步法与二步法计算的 3D SPSI 体系地震反应的差异是由于土的次非线性 (SSN) 效应所引起的。因此,对比两者的差异,即可定量分析 SSN 效应对核岛地震反应的影响。

3.3 动力平衡方程的求解

基于 ABAQUS/Explicit 中心差分算法在时域内求解 3D 自由场、3D SPSI 体系的动力方程。起始时刻 t 的加速度矢量 $\mathbf{a}$ 可以采用下式计算:

$$\mathbf{a}^{(i)} = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{F}^{(i)} - \mathbf{I}^{(i)}) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{M}$ 为对角质量矩; $\mathbf{F}$ 为施加的荷载矢量; $\mathbf{I}$ 为内力矢量; 上标 i 为显式动力计算的时步步数。为了使强非线性的动力分析获得较好的收敛性,时步设为 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ s。2D、3D 非线性地震反应分析验证了该并行算法具有很好的稳定性及适用性^[10, 16, 24-26]。

4 SSN 效应的定量分析

4.1 对峰值加速度的影响

定义 SSN 效应对核岛结构峰值加速度 PA (peak

acceleration) 的影响系数 ICPA (influence coefficient of peak acceleration):

$$\text{ICPA} = \frac{\text{PA}_{\text{一步法}} - \text{PA}_{\text{二步法}}}{\text{PA}_{\text{一步法}}} \quad (3)$$

对于核岛结构的水平向地震反应, PA 取两个水平分量加速度时程的矢量和的峰值加速度。由 ICPA 的定义可知, ICPA 越大, 则 SSN 效应越显著。

图 6 展示了近场、中-远场及远场地震动作用下 ICPA 沿核岛结构高程 (相对核岛零高程面) 的变化。可以发现: 地震动水平 SL-2 级时水平向 ICPA 较之地震动水平 SL-1 级时的更大, 竖向 ICPA 则与之相反; 不论地震动水平 SL-1 级还是 SL-2 级, 对于水平向 ICPA, 高频丰富的近场中-强震作用时最大, 低频丰富的远场大地震作用时次之, 中、低频丰富且频带宽的中-远场强震作用时最小; 对于竖向 ICPA, 远场大地震作用时最大、中-远场强震作用时次之、近场中-强震作用时最小。ICPA 值的这一现象, 综合反映了土层的高频滤波和低频放大效应以及土的强非线性特性。

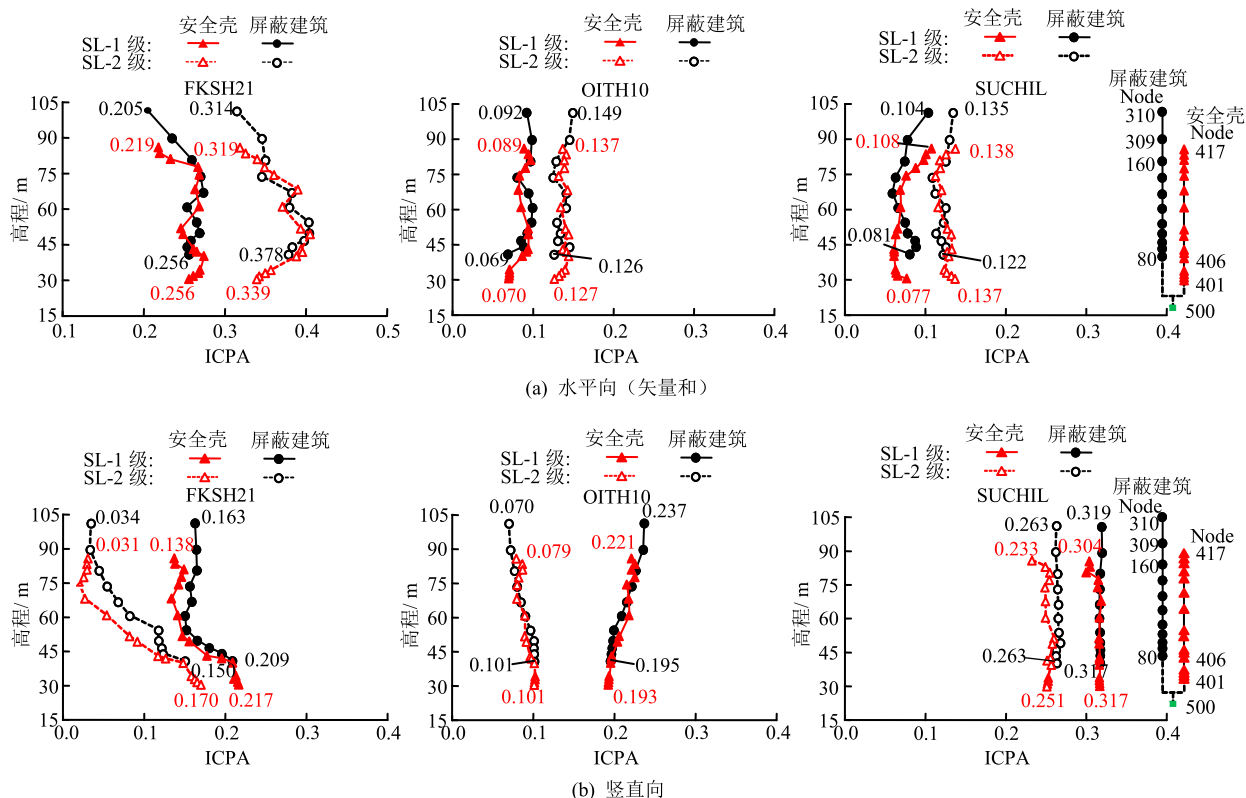


图6 不同的设定地震作用下土的次非线性对核岛结构峰值加速度的影响

Fig.6 Influences of soil secondary nonlinearity on peak accelerations of nuclear island structure for scenario earthquakes

中-远场及远场地震作用时的水平向ICPA沿核岛结构高度的变化幅度明显小于近场地震作用时的水平向ICPA,这一现象在竖向尤为明显。考虑到核岛结构自身的刚度很大,其本身对地震动的长周期分量不敏感,因此,中-远场及远场地震作用时核岛结构反应随高度的变化较小,相应地,SSN效应对不同高度处核岛结构观测点的地震反应影响的差异也较小。此外,由于屏蔽建筑与安全壳的材料特性及结构动力特性的不同,SSN效应对这两个结构的峰值加速度反应的影响略有不同。不论地震动水平SL-1级或SL-2级,SSN效应可能会显著增大桩基核岛结构的峰值加速度反应。

4.2 对峰值相对位移的影响

定义相对位移为核岛结构某节点相对核岛底部节点Node 500的位移时程之差,而峰值相对位移PRD (peak relative displacement) 则为该位移时程之差的峰值。定义SSN效应对核岛结构峰值相对位移的影响系数ICPRD (influence coefficient of peak relative displacement) 如下:

$$ICPRD = \frac{PRD_{\text{一步法}} - PRD_{\text{二步法}}}{PRD_{\text{一步法}}} \quad (4)$$

对于核岛结构水平向相对位移反应,PRD取两个

水平分量时程的矢量和的峰值相对位移。由ICPRD的定义可知,ICPRD越大,则SSN效应越显著。

由图7(a)可知,地震动水平SL-2级时的水平向ICPRD较之地震动水平SL-1级时的小,而竖向ICPRD则与之相反。水平向ICPRD的大小关系与水平向ICPA的一致,表现为近场中强地震动作用时最大、远场大地震作用时次之、中-远场强震作用时最小。与水平向相比,竖向ICPRD明显较小且随高度的变化也相对较小(图7(b)),尤其近场地震及中-远场地震作用时,SSN效应的影响较小。

由于屏蔽建筑与安全壳的材料特性及结构动力特性的不同,SSN效应对这两个结构的峰值相对位移反应的影响也略有不同。不论地震动水平SL-1级或SL-2级,SSN效应可能会显著增大桩基核岛结构的峰值相对位移反应。

4.3 对谱加速度的影响

三向地震动作用下3D SPSI体系在节点Node 500处的地震反应,可视为该核岛建筑的基础输入运动。因此,可选取节点Node 500作为代表性节点,研究SSN效应对核岛结构谱加速度SA (spectral acceleration) 的影响,定义 $SAR_{\text{one/two}}$ 为一步法计算的谱加速度SA与二步法计算的谱加速度SA的比值。水平向SA取两个水平分量谱加速度的矢量和。

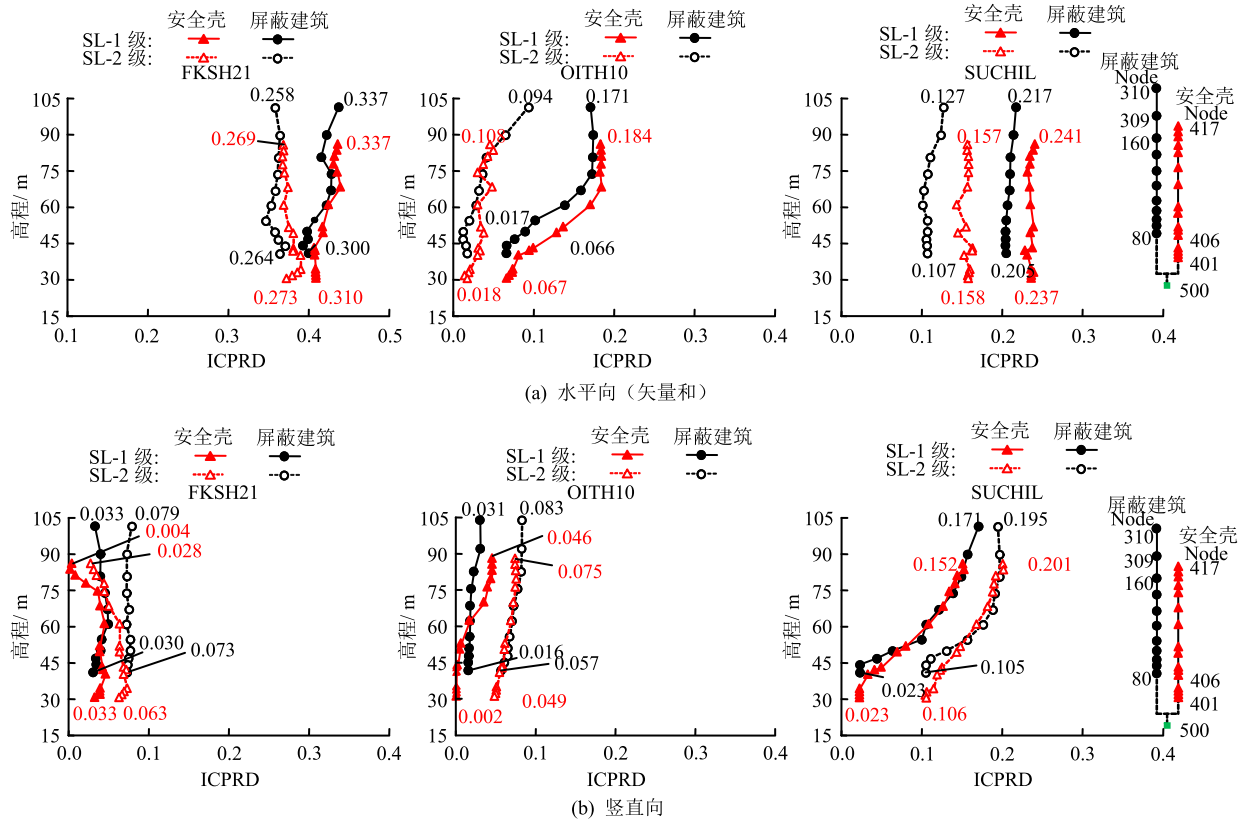


图7 不同的设定地震作用下土的次非线性对核岛结构峰值相对位移的影响

Fig.7 Influence of soil secondary nonlinearity on the peak relative displacements of nuclear island structure for scenario earthquakes

图8(a)给出了地震动水平 SL-1 级时一步法和二步法计算的 Node 500 处的 SA 及对应的 $SAR_{one/two}$ 。不论近场地震还是中-远场、远场地震作用, $T=1$ s 附近的水平向 $SAR_{one/two}$ 均出现显著的峰值, 与二步法计算的水平向 SA 曲线相比, 一步法计算的水平向 SA 明显向长周期偏移的趋势, 这说明 SSN 效应可能导致 SPSI 体系变得更“柔”, 从而使 SPSI 体系的基本周期增大。

另外, 也可进一步发现, 近场中-强地震作用时, 一步法计算的水平向 SA 包络二步法计算的 SA, $SAR_{one/two}$ 在全周期范围均大于 1, 也即 SSN 效应对水平向 SA 有放大效应; 周期 $T < 0.39$ s 时, 竖向 $SAR_{one/two} > 1$; 而在周期 $T > 0.39$ s 时, SSN 效应对竖向 SA 的影响以减小为主。中-远场强震、远场大地震作用时, SSN 效应对水平向 SA 以放大效应为主, 仅在低-中周期段(约 0.40~0.75 s)的 $SAR_{one/two} < 1$, SSN 效应降低水平向 SA 的反应。不论近场地震还是中-远场、远场地震作用, 低-中周期段(约小于 0.40 s)竖向 $SAR_{one/two} > 1$, 而在中-长周期段(约大于 0.40 s)竖向 $SAR_{one/two} \approx 1$, 且中-远场、远场地震作用时在 $T \approx 0.14$ s 处 $SAR_{one/two}$ 出现显著的峰值。这说明 SSN 效应对低-中周期的竖向地震反应

有放大效应, 而对中-长周期的竖向地震反应几乎没有影响。

图 8(b)给出了地震动水平 SL-2 级时一步法和二步法计算的 Node 500 处的 SA 及对应 $SAR_{one/two}$ 。与地震动水平 SL-1 级时的 $SAR_{one/two}$ 曲线相比, 总体而言, 地震动水平 SL-2 级时的 SSN 效应的影响是类似的, 且水平向 $SAR_{one/two}$ 曲线峰值对应的周期进一步向长周期方向偏移; 在近场、中-远场和远场地震作用时的水平向 $SAR_{one/two}$ 曲线的峰值分别表现为适度减小、显著减小和显著增大; 此外, 近场、中-远场和远场地震作用时的竖向 $SAR_{one/two}$ 曲线的峰值有适度的降低, 远场地震作用时的水平向 $SAR_{one/two}$ 曲线的峰值稍微增大, 且在中-长周期段(近场地震: $T > 0.34$ s; 远场地震: $T > 0.52$ s)竖向 $SAR_{one/two}$ 均存在适度减小的现象, 但对中-远场地震作用时中-长周期段($T > 0.60$ s)的竖向 $SAR_{one/two} \approx 1$ 。

综上所述, SSN 效应对核岛结构基础输入运动谱加速度的影响与基岩地震动特性密切相关, SSN 效应对其竖向谱加速度的影响主要表现为在短-中周期段的放大、中-长周期段略有减小或没影响; SSN 效应对其水平向谱加速度的影响以放大为主, 可能导致谱加速度曲线向长周期方向移动, 使 SPSI

体系变得更为“柔”性,且SSN效应对特定的短周期、中-长周期处的谱加速度的放大效应极为显著;

输入地震动水平对SSN效应的影响也与基岩输入地震动特性密切相关。

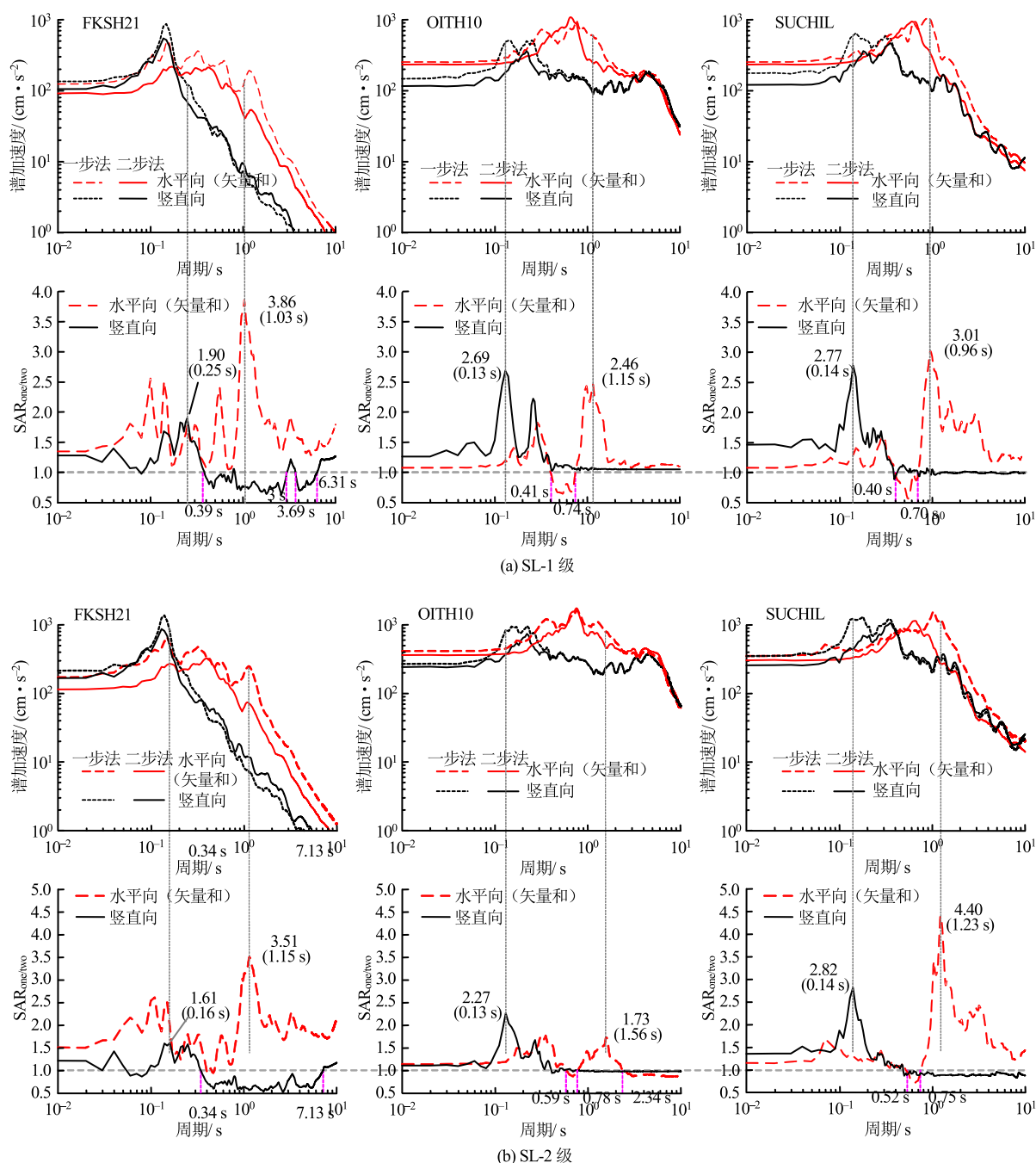


图8 一步法和二步法计算的节点 Node 500 处的加速度反应谱(5%阻尼比)及其谱比 $SAR_{one/two}$
Fig.8 5% damping acceleration response spectra obtained by the one-step method and the two-step method and the spectral acceleration ratios ($SAR_{one/two}$) of the two methods

5 结 论

本文以某拟建的桩基 AP1000 核电厂为研究对象,采用能考虑土的真非线性的一步法和仅考虑土的主非线性的二步法,用数值模拟了 3D SPSI 体系的地震反应,分析了土的次非线性效应对核岛结构地震反应的影响,主要结论如下:

(1) SSN 效应对核岛结构地震反应的影响非常复杂,与基岩输入地震动的强度及频谱特性高度相关,SSN 效应显著增大核岛结构的水平向和竖向峰值加速度和峰值相对位移反应,有可能高达 30%甚至更高。近场中-强地震作用时 SSN 效应的影响最大、远场大地震作用时次之、中-远场强震作用时最小。

(2) SSN 效应对核岛结构的基础输入运动的影响显著, 且与基岩输入地震动的强度和频谱特性密切相关。SSN 效应会使水平向基础输入运动的谱加速度增大, 尤其对特定的短周期、中-长周期处的谱加速度放大效应极为显著, 使 SPSI 体系变得更为“柔”性; SSN 效应对竖向基础输入运动的短-中周期谱加速度有放大效应, 而对中-长周期的竖向地震反应几乎没有影响。

参考文献

- [1] American Society of Civil Engineers. SEI 4-16 Seismic analysis of safety-related nuclear structures[S]. New York: [s. n.], 2016.
- [2] American Society of Civil Engineers. SEI 4-98 Seismic analysis of safety-related nuclear structures[S]. New York: [s. n.], 1998.
- [3] KAUSEL E. Early history of soil-structure interaction[J]. **Soil Dynamics & Earthquake Engineering**, 2010, 30(9): 822-832.
- [4] LOU M, WANG H, CHEN X, et al. Structure-soil-structure interaction: literature review[J]. **Soil Dynamics & Earthquake Engineering**, 2011, 31(12): 1724-1731.
- [5] COLEMAN J L, BOLISSETTI C, Whittaker A S. Time-domain soil-structure interaction analysis for nuclear facilities[J]. **Nuclear Engineering & Design**, 2016, 298(3): 264-270.
- [6] JEREMIC B, JIE G, PREISIG M, et al. Time domain simulation of soil-foundation-structure interaction in non-uniform soils[J]. **Earthquake Engineering Structure Dynamic**, 2009, 38(5): 699-718.
- [7] 林皋, 李志远, 李建波. 复杂地基条件下土-结构动力相互作用分析[J]. **岩土工程学报**, 2021, 43(9): 1573-1580.
LIN Gao, LI Zhi-yuan, LI Jian-bo. Analysis of soil-structure dynamic interaction under complex foundation condition[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2021, 43(9): 1573-1580.
- [8] KABANDA J, KWON O S, KWON G. Time and frequency domain analyses of the Hualien large-scale seismic test[J]. **Nuclear Engineering and Design**, 2015, 295: 261-275.
- [9] LUO C, YANG X, ZHAN C, et al. Nonlinear 3D finite element analysis of soil-pile-structure interaction system subjected to horizontal earthquake excitation[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2016, 84: 145-156.
- [10] 朱升冬, 陈国兴, 蒋鹏程, 等. 松软场地上桩筏基础 AP1000 核岛结构的三维非线性地震反应特性[J]. **工程力学**, 2021, 38(1): 129-142.
ZHU Sheng-dong, CHEN Guo-xing, JIANG Peng-cheng, et al. 3D nonlinear response characteristics of the pile-raft-supported AP1000 nuclear island building in soft deposits subjected to strong ground motions[J]. **Engineering Mechanics**, 2021, 38(1): 129-142.
- [11] KRÁLIK J, ŠIMONOVIC M. Earthquake response analysis of nuclear power plant buildings with soil-structural interaction[J]. **Mathematics and Computers in Simulation**, 1999, 50: 227-236.
- [12] PITILAKIS D, CLOUTEAU D. Equivalent linear substructure approximation of soil-foundation-structure interaction: model presentation and validation[J]. **Bulletin of Earthquake Engineering**, 2010, 8(2): 257-282.
- [13] Westinghouse Electric Company. AP1000 design control document, Revision 17[R]. Washington D. C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2009.
- [14] LEONARDO T S, RICHARD S O, SENER T, et al. Finite element modeling of the AP1000 nuclear island for seismic analyses at generic soil and rock sites[J]. **Nuclear Engineering and Design**, 2007, 237: 1474-1485.
- [15] 赵丁凤, 阮滨, 陈国兴, 等. 基于 Davidenkov 骨架曲线模型的修正不规则加卸载准则与等效剪应变算法及其验证[J]. **岩土工程学报**, 2017, 39(5): 888-895.
ZHAO Ding-feng, RUAN Bin, CHEN Guo-xing, et al. Validation of modified irregular loading-unloading rules based on Davidenkov skeleton curve and its equivalent shear strain algorithm implemented in ABAQUS[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(5): 888-895.
- [16] CHEN G X, RUAN B, ZHAO K, et al. Nonlinear response characteristics of undersea shield tunnel subjected to strong earthquake motions[J]. **Journal of Earthquake**

- Engineering**, 2020, 24(3): 351-380.
- [17] CHEN G X, WANG Y Z, ZHAO D F, et al. A new effective stress method for nonlinear site response analyses[J]. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, 2021, 50: 1595-1611.
- [18] BANERJEE S, GOH S H, LEE F H. Earthquake-induced bending moment in fixed-head piles in soft clay[J]. **Geotechnique**, 2014, 64(6): 431-446.
- [19] HUO H, BOBET A, FERNÁNDEZ G, et al. Load transfer mechanisms between underground structure and surrounding ground: evaluation of the failure of the daikai station[J]. **Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering**, 2005, 131(12): 1522-1533.
- [20] International Atomic Energy Agency. Nuclear power reactors in the world, reference data series No. 2[R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2021.
- [21] 庄海洋, 于旭. 土-桩-隔震结构动力相互作用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- ZHUANG Hai-yang, YU Xu. Dynamic interaction of soil-pile-isolation structure[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [22] KUHLEMEYER R L, LYSMER J. Fine element method accuracy for wave propagation problems[J]. **Journal of Soil Mechanics & Foundations Division, ASCE**, 1973, 99(5): 421-427.
- [23] 章小龙, 李小军, 周正华, 等. 黏弹性人工边界等效荷载计算的改进方法[J]. **力学学报**, 2016, 48(5): 1126-1135.
- ZHANG Xiao-long, LI Xiao-jun, ZHOU Zheng-hua, et al. An improved method of the calculation of equivalent nodal forces in viscous-elastic artificial boundary[J]. **Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics**, 2016, 48(5): 1126-1135.
- [24] RUAN B, ZHAO K, WANG S Y, et al. Numerical modeling of seismic site effects in a shallow estuarine bay (Suai Bay, Shantou, China)[J]. **Engineering Geology**, 2019, 260: 105233.
- [25] LI F R, CHEN G X. Nonlinear seismic response characteristics of CAP1400 nuclear island structure on soft rock sites[J]. **Science and Technology of Nuclear Installations**, 2020, 2020(4): 1-17.
- [26] CHEN G X, JIN D D, ZHU J, et al. Nonlinear analysis on seismic site response of Fuzhou Basin, China[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 2015, 105(2A): 928-949.
- [27] HASHASH Y M A, MUSGROVE M I. DEEPSOIL 6.1, User Manual[R]. Urbana: University of Illinois, 2016.
- [28] SEED H B, IDRISS I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. **Journal of Geotechnical Engineering Division**, 1971, 97(9): 1249-1273.
- [29] SCHNABEL P B, LYSMER J, SEED H B. Shake: a computer program for earthquake ground response analysis for horizontally layered sites. Report No: EERC 72-12[R]. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 1972.
- [30] SCHNABEL P B, LYSMER J, SEED H B. Computer program shake: a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites[R]. Berkeley: University of California, 2012.
- [31] ORDÓÑEZ G A. Shake2000: a computer program for the 1-D analysis of geotechnical earthquake engineering problems[R]. Lacey: GeoMotions, Limited Liability Company, 2004.
- [32] EduPro Civil Systems Inc. PROSHAKE V1.1 User's manual[M]. Washington D. C.: EduPro Civil Systems Inc., 2012.