



《土木工程学报》网络首发论文

题目：考虑土体非线性的核岛结构桩基础三维地震反应特性
作者：朱升冬，陈国兴，陈炜昀，高文生
DOI：10.15951/j.tmgcxb.22060641
收稿日期：2022-06-28
网络首发日期：2023-03-28
引用格式：朱升冬，陈国兴，陈炜昀，高文生. 考虑土体非线性的核岛结构桩基础三维地震反应特性[J/OL]. 土木工程学报. <https://doi.org/10.15951/j.tmgcxb.22060641>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.15951/j.tmgcxb.22060641

考虑土体非线性的核岛结构桩基础三维地震反应特性

朱升冬¹ 陈国兴^{*1,2} 陈炜昀³ 高文生⁴

(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: 以某沿海拟建的 AP1000 核岛结构为背景, 用 3D 集中质量-梁杆模型模拟核岛结构, 考虑土体的非线性滞回特性, 建立非均匀地基-群桩-厚筏-核岛结构体系的 3D 有限元模型, 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, 分析了群桩基础的地震反应特性。非线性场地效应和土-桩-结构动力相互作用效应的耦合作用会显著增大核岛结构的基础输入运动, 不论基准运行地震或安全停堆地震, 基础输入运动的水平向和竖向上包络加速度反应谱(5%阻尼比)的谱值显著大于对应的 AP1000 标准设计反应谱谱值; 桩顶累积绝对速度和地震峰值内力的大小受基岩输入地震动特性的影响显著, 与场地反应的非线性程度正相关, 其复杂的空间分布特征也受土-桩-结构动力相互作用效应和桩的几何布置的综合影响, 桩-筏交界处的桩身地震内力反应最大, 中-远场和远场强震作用对核岛桩基础的潜在破坏风险可能远大于近场中强地震作用。

关键词: 桩基础; 核岛结构; 土-桩-结构动力相互作用; 土的非线性; 地震反应

中图分类号: TU43

文献标识码: A

3D seismic response characteristics of piles of a nuclear island building considering nonlinearity of soil

Zhu Shengdong¹ Chen Guoxing^{*1,2} Chen Weiyun³ Gao Wensheng⁴

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

Abstract: Based on a proposed coastal AP1000 nuclear island structure (NIS), a 3D lumped mass-stick (LMS) model was applied to simulating the AP1000 NIS considering the nonlinear hysteretic characteristics of soil. Furthermore, a 3D finite element model of the inhomogeneous site-piles-AP1000 NIS system was established. This work presents results from a comprehensive simulation study on the seismic response of piles under the NIS subjected to near-field moderate-strong earthquake, moderate-far field strong earthquake, and far-field large earthquake scenarios. The combination of the nonlinear site effect and soil-pile-structure dynamic interaction (SPSI) effect may significantly increase the foundation input motions (FIMs) of the AP1000 NIS. As for the ultimate safety earthquake (SL-2 level) or the operational safety earthquake (SL-1 level), the upper envelopes of the 5% damping horizontal and vertical spectral accelerations of the FIMs at the SL-1 and SL-2 levels are significantly larger than those of the corresponding AP1000 standard response spectra. Under earthquake scenarios, the magnitudes of the cumulative absolute velocity and the peak seismic internal forces at the top of piles correlates positively with the degree of site nonlinearity and are strongly affected by the characteristics of input bedrock motions. The complex spatial distributions are significantly influenced by the coupling effect of the SPSI effect and the pile layout. The maximum values of the peak seismic internal forces of piles may occur at the pile-base mat. The moderate-far field and far-field strong motion scenarios with low-frequency components and long durations have a greater risk of damaging the piles under the NIS than the near-field strong motion scenario.

Keywords: pile foundation; nuclear island building; soil-pile-structure dynamic interaction; nonlinearity of soil; seismic response

***E-mail:** gxc6307@163.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1504301)

作者简介: 朱升冬, 博士研究生

*通讯作者: 陈国兴, 博士, 教授

收稿日期: 2022-06-28

引 言

核能作为新型清洁能源开发的重点,具有低碳环保及能量密度高等优势。我国“十四五”规划和2035年远景目标纲要中明确指出:安全稳妥推动沿海核电建设,建设一批多能互补的清洁能源基地。

我国是地震多发国家,破坏性地震乃至强地震时有发生。核岛结构的地震安全事关当地人民的生命财产安全、区域经济发展和社会稳定。核电厂的选址条件十分苛刻,对人口密度与分布、土地及水资源利用、地质、地形、地震等因素都有严格的要求。目前,美国和法国的核电厂已有一半以上建在软岩甚至土质场地之上。随着我国核电厂建设的迅速发展,优质基岩的厂址越来越少。由于沿海地区选址条件的限制,有的核岛结构只能建于软岩地基或土壤地基之上^[1]。已有的案例表明:桩基础对核岛结构的不良场地条件具有较强的适应性。例如:美国 Point-Beach 核电厂、H. B. Robinson 核电厂和瑞士 Gösigen-Däniken 核电厂均采用桩基础^[2]。

土-桩-上部结构动力相互作用(SPSI)的存在直接影响核岛结构本身和核岛结构周围土体的地震反应特性。从抗震设计角度看,核岛结构应能经受住所有潜在大地震的可能影响。目前关于 SPSI 效应对核岛结构及其桩基础地震反应的影响研究甚少,值得进一步研究。近年来,部分学者对考虑土-桩-结构动力相互作用(SPSI)效应的桩基核岛结构地震反应进行了相关研究。Zou 等^[2]采用多面体单元建立 3D 有限元模型并输入三分量地震动,数值模拟了桩基 AP1000 核岛结构的地震损伤,发现在超设计基准地震动作用下,桩身损伤最为严重的部位为桩与承台的交界面处。Luo 等^[3]通过非线性三维有限元数值模拟研究了地震作用下土-群桩-结构动力相互作用系统的地震反应,开展了采用等效线性模型和修正的 Drucker - Prager 非线性模型模拟土体的非线性特性的对比研究,结果表明:采用等效线性模型会明显低估核岛结构的加速度反应;SPSI 效应会抑制核岛结构的摇摆反应,并降低土-桩-核岛结构体系的位移反应。朱升冬等^[4]以 3D 集中质量-梁杆(lumped-mass stick, LMS)模型模拟 AP1000 核岛结构,考虑土体的滞回非线性特性,建立核岛结构-桩-筏基础-不均匀场地体系的 3D 精细化有限元模型,研究了核岛结构地震反应特性,结果表明:地基柔性及 SPSI 的耦合效应对基础输入地震动具有高频过滤、低频放大效应。因此,SPSI 效应的存在会直接影响核岛结构自身及场地的动力特性,从而影响核岛结构的地震安全性^{[2][3][4]}。目前,考虑 SPSI 效应的桩-筏基础核岛结构地震反应的研究甚

少,这是亟需土木工程师和地震工程研究者关注的一个问题。

本文以我国沿海地区某拟建的 AP1000 核电站作为研究背景,采用广义 non-Masing 滞回非线性本构模型模拟地震动作用下土体的复杂动力特性^{[5][6][7]};采用 3D 集中质量-梁杆模型模拟 AP1000 核岛结构^{[4][8][9]},基于 ABAQUS/Explicit 平台,数值模拟土-桩-筏基核岛结构体系,分析了不同频谱特性的地震作用下桩-筏基础的地震反应特征。

1 输入地震动与场地条件

1.1 区域历史地震

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,主要受华北地震带影响。自公元 408 年以来,记录到 4¾ 级地震 108 次,包括 1624 年的两次 5½ 级地震,震中距核电站约 47 km;记录到 6 - 6.9 级地震 13 次,6 次 7.0 级及以上地震,包括 1679 年震中距约 200 km 的 8.0 级地震、1888 年震中距约 120 km 的 7.5 级地震、1969 年震中距 147 km 的 7.4 级地震、1976 年震中距 168 km 的 7.8 级地震。因此,该核电厂场址的地震危险性相对较高。

1.2 输入地震动的选取

国际原子能机构的核安全导则规定^[10]:厂址地震动水平的合理评估应包含基于确定性法和概率性方法的分析。核电厂的设计基准地震动水平分为 SL-1 级和 SL-2 级,其中,SL-1 级为基准运行地震,SL-2 级为安全停堆地震。SL-1 级的峰值加速度取为 SL-2 级的 1/2^[10]。该核电厂的抗震设防地震动水平取为:SL-2 级水平向和竖向基岩地震动峰值加速度(PBA)=200 cm/s²。相应地,SL-1 级 PBA=100 cm/s²。

由于该核岛场址及邻近地区缺乏历史强震记录,为了研究地震动特性对核岛结构地震反应的影响,根据区域历史地震资料,选取不同地震动特性的近场、中-远场及远场地震的基岩加速度记录作为核岛结构的基岩输入地震动。因所选地震记录的强震台站场址的剪切波速远大于 760 m/s,故将其视为基岩地震动记录是适宜的。输入地震动的信息详见表 1。图 1 为 SL-1 级的基岩输入地震动的加速度时程、傅里叶谱及 5% 阻尼比对应的加速度反应谱。通过图 1 中三条基岩输入地震的加速度反应谱与 AP1000 标准反应谱(标定 100 cm/s²)的对比,可以发现选用基岩输入地震动的频谱成分覆盖范围很广,在短周期及中长周期均明显高于 AP1000 标准谱,从核岛结构抗震设计角度看是偏于安全的选择,此外,选用的 3 次地震记录的频谱特性和持时均存在显著的差异,具有充分的代表性。

1.3 场地条件

某海岸拟建 AP1000 核电厂的场址以滨海平原地貌为主,局部为河流地貌和人工地貌,地形平坦,一般高程 3 - 5 m。场址表层为耕植土,中部为第四系全新统海陆交互相沉积层和第四系上更新统海陆

交互相沉积层,主要为粉质黏土,局部为砂土,整个土层厚度在 32.9 m~60.5 m;下部为第四系上更新统玄武岩和火山堆积层^[11]。拟建的场地剖面信息及土层分布具体如图 2 所示,各层土的物理及本构参数可参见作者已发表的论文^[4],此处不再赘述。

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)	CAV (m/s)	D _{5-95%} (s)	备注
地点, 日期	震级 (Mw)	深度 (km)	台站编号	位置	地质类型	震中 距 (km)	分量				
Fukushimaken, Japan, 2004	5.8	15	FKSH21	地表以下 200 m	硬凝灰岩	33	EW	0.071	0.78	4.77	近场
							NS	0.099	0.85	3.82	中强震
							UD	0.048	0.62	8.78	
Oitaken, Japan, 2016	7.3	12	OITH10	地表以下 20 m	硬岩石	105	EW	0.15	12.96	29.53	中-远场
							NS	0.19	12.61	23.8	强地震
							UD	0.14	11.83	34.35	
Michoacan, Mexico, 1985	8.1	27	SUCHIL	地表	花岗 闪长岩	228	EW	0.098	3.67	14.88	远场
							NS	0.078	2.85	20.41	大地震
							UD	0.049	2.81	26.49	

备注: g 为重力加速度; PGA: 峰值加速度; CAV: 累积绝对速度。D_{5-95%}为 Arias 强度 5% - 95%间的有效持时。

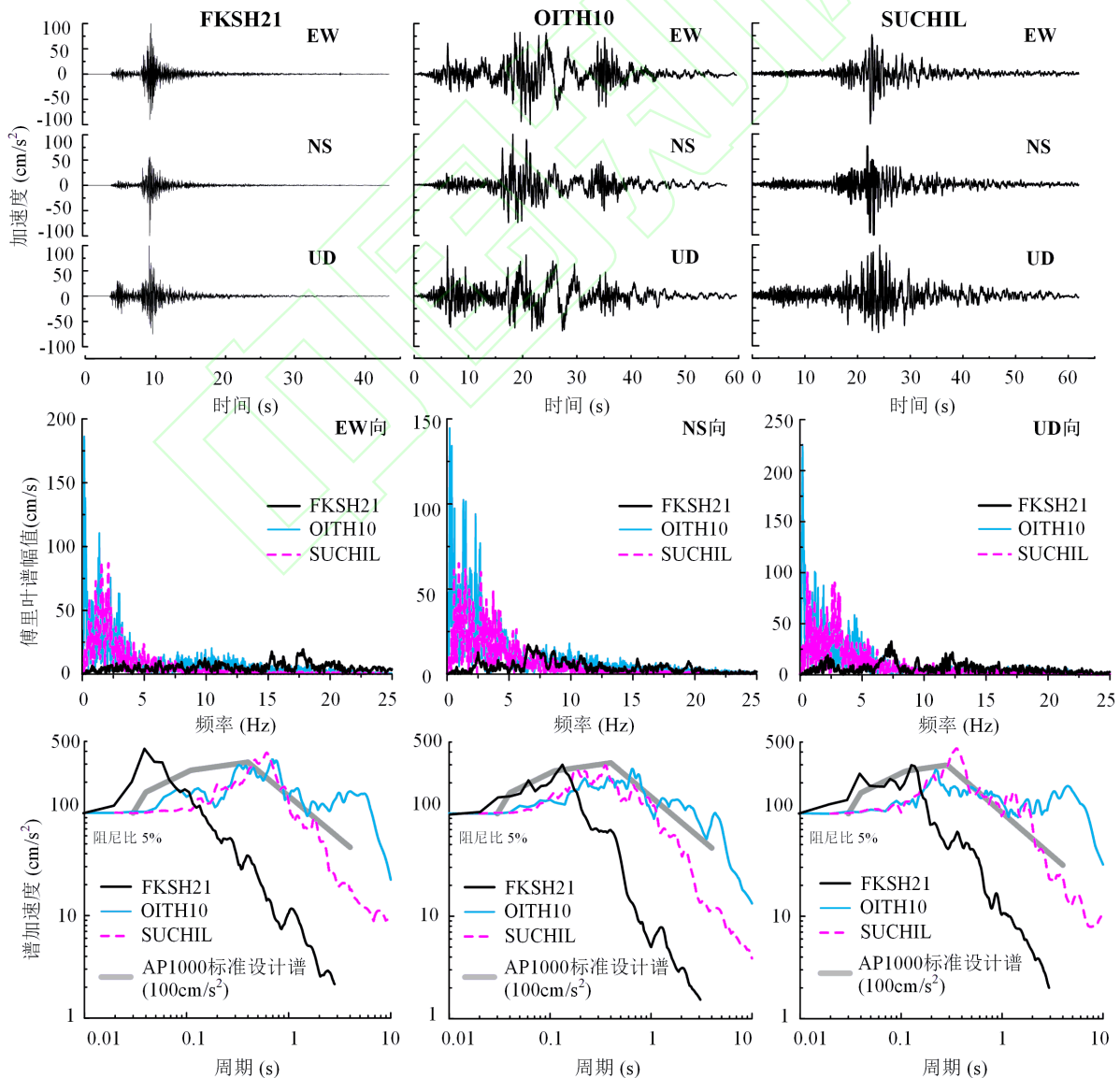


图 1 SL-1 水平的基岩输入地震动加速度时程、傅里叶谱及加速度反应谱

Fig. 1 Seismograms, Fourier spectra and acceleration response spectra at 5% damping for input bedrock motions at SL-1 level

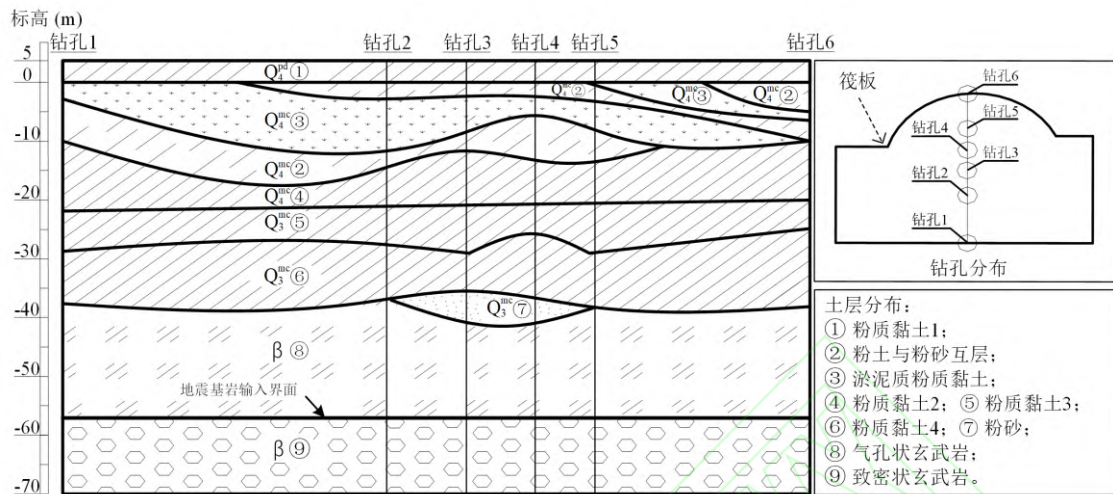


图 2 核岛场址地层剖面图
Fig. 2 Geological profile of the nuclear island site

2 地基-桩-筏基础-核岛结构体系建模

2.1 AP1000 核岛结构

AP1000 机组主厂房分为五个部分^[10]：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。坐落在厚筏上的核岛是核电厂最为关键的结构，包括安全壳（钢制安全壳及其内部结构）、屏蔽建筑和辅助厂房。依据 AP1000 设计控制文件，在 ABAQUS 平台基于坐标、材料属性、单元属性、截面或构件特性和约束等信息建模^[4]。

采用 3D LMS 模型表征核岛安全壳、安全壳内部结构、耦合的屏蔽结构与辅助结构^{[4][8][9]}。3D LMS 模型由集总质量点、弹性结构杆和刚臂组成。集中质量位于主要的楼层高度和结构的不连续位置。通过水平刚臂将集中质量连接到竖向弹性结构梁上，以模拟结构的刚度中心与质量中心之间的偏心。此外，部分子系统和设备简化为集中质量，集成到 3D LMS 模型。AP1000 核岛结构的主要参数及设定可参阅作者发表的论文^[4]。

图 3 对比了分别基于 ANSYS 与 ABAQUS 平台建立的 AP1000 核岛结构 LMS 模型的第 1 至第 15 阶的模态频率。其中，前 4 阶频率模拟了屏蔽建筑顶部的冷却水箱以及其箱内晃动水体的集中质量-弹簧体系的振动模态，第 5~6 阶频率模拟了与冷却系统相关联的 2 个辅助子结构的振动模态，而第 7~15 阶频率则模拟了核岛主体结构（不含水箱及 2 个辅助子结构）

的振动特性。可以看出，基于两个不同软件平台建模的 LMS 模型的各阶模态频率很接近。

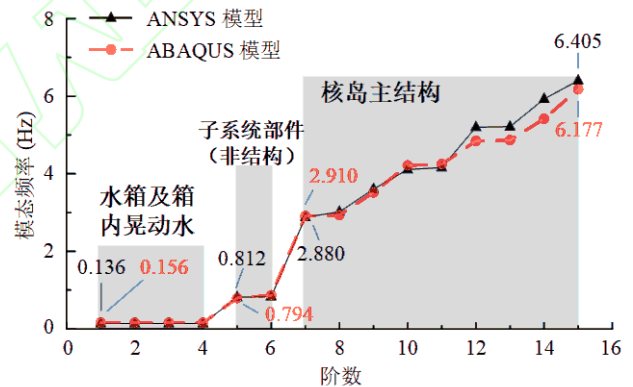


图 3 核岛结构 ABAQUS 与 ANSYS 模型的模态频率对比
Fig. 3 Comparison of the modal frequencies of ABAQUS and ANSYS models for the nuclear island building

2.2 桩-筏基础

该核岛结构坐落在桩径 1.5 m、桩长 36 m 的 230 根群桩基础上，桩顶嵌入筏板 0.15 m，桩底嵌入玄武岩 2 m。桩、筏混凝土强度的等级 C40。厚 3 m 的筏板被分割成 2140 个 8 节点线性块体单元和 58 个 6 节点线性三棱柱单元。每根桩被分割成 20 个梁单元，桩顶与筏板固接。筏板和桩均视为弹性材料。图 4 为核岛结构-桩-筏基础-地基体系的 3D 模型图，其中，布桩方式和桩-筏基础有限元模型如图 4(c)和(d)所示。

由于桩嵌入筏板和岩层，故选用嵌入式约束方式模拟桩与承台、岩层之间的连接^{[12][13]}。Banerjee 等^[14]

的研究表明:不考虑桩-土之间的法向脱开与滑移的数值模拟结果与离心机试验结果相符。此外, Huo 等^[15]认为忽略地下结构体与土体的相对滑移是偏于安全

的。鉴于群桩基础的整体尺寸和筏板埋深大、桩数多且桩的上、下端嵌固,本文将筏板与土的接触视为绑定约束,不考虑土与筏、桩之间的脱开和滑移。

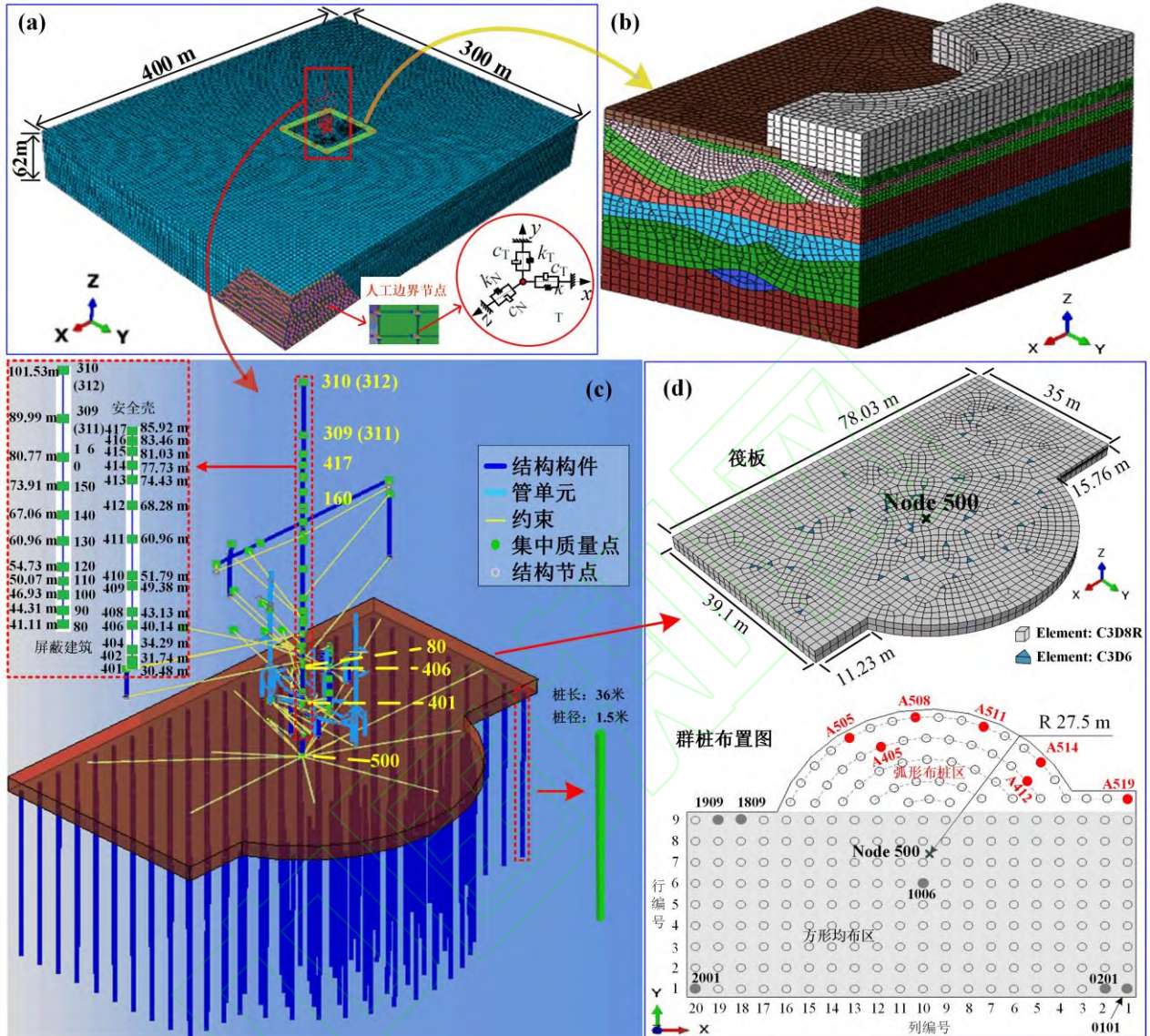


图 4 核岛结构-桩-筏基础-场地体系三维模型图

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

2.3 场地模型与地震动输入

2.3.1 不均匀场地建模

计算区域尺寸为 400 m×300 m×62 m, 平面尺寸约为基础尺寸的 5 - 6 倍。为使基岩地震动能精确地上传播至地表, 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(对应最高频率)的 1/10 - 1/8^[16], 截止频率取为 25 Hz。由于土体的空间不均匀性, 采用水平向 0.4 m ~3.0 m、竖向 0.5 m ~5 m 的非均匀网格。桩侧和筏板附近土体网格相对较细。选取剪切波速为 2417 m/s 的致密玄武岩作为地震基岩。

2.3.2 人工边界与地震动输入

地震动输入的方法决定 SPSI 系统地震反应数值模拟的精度。为了减小计算域尺度, 只将受 SPSI 系

统地震反应影响较大的局部场地映射到计算域, 在截止边界设置人工边界^{[6][7]}。该条件允许散射波通过截止边界向无限远处传播而不反射。本文将章小龙等提出的改进黏弹性人工边界条件应用于计算域的四个侧向边缘和底部(地震基岩面)^{[17][18]}。2D 和 3D 非线性地震反应分析的结果验证了该人工边界条件的有效性^{[11][6][7][19]}。

对于多向地震动输入, 地震记录的东向西(EW)、南北向(NS)和竖向(UD)分量分别作为 X 轴、Y 轴和 Z 轴方向的地震动输入(见图 4)。

2.3.3 土的本构模型

采用广义 non-Masing 模型描述土体在地震作用下的非线性滞回特性^{[5][6][7]}。

本构模型的初始骨架曲线采用双曲线形式:

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

式中: τ 、 γ 分别为剪应力和剪应变; γ_r 为参考剪应变; A 和 B 为拟合参数; G_{\max} 为小应变剪切模量, $G_{\max} = \rho V_s^2$, 其中 ρ 和 V_s 分别为密度和剪切波速。

针对拟建核岛场地的典型钻孔原状土样开展了共振柱试验, 得到图 5 中的剪切模量衰减 (G/G_{\max}) 和阻尼比变化曲线 (λ)。

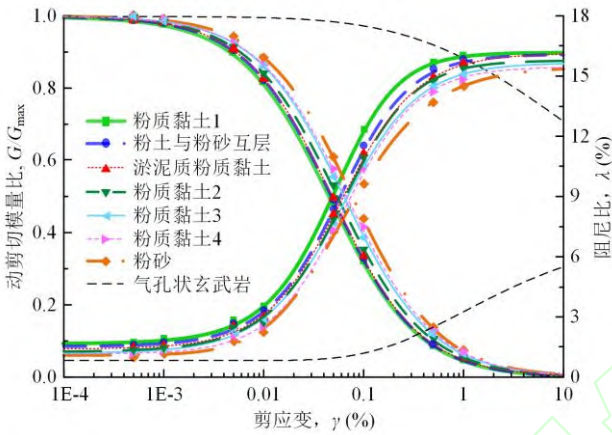


图 5 场地的动剪切模量比与阻尼比曲线

Fig. 5 Curves of shear modulus ratio and damping ratio of the site soils

2.4 动力平衡方程

基于 ABAQUS/Explicit 平台, 对 3D LMS 模拟的核岛结构-桩-筏基础-场地模型整体进行数值分析。ABAQUS/Explicit 采用基于显式中心差分时间积分算法求解动力方程。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} 是施加的荷载矢量, \mathbf{I} 为内力矢量, 上标 i 为显式动力计算的时步步数。为了使强非线性动力分析获得较好的收敛, 时步间隔取 10^{-6} s - 10^{-5} s。该并行算法在 2D 和 3D 非线性地震反应分析中均表现出很好的适用性^{[1][4][6][19-21]}。

3 桩-筏基础的地震反应特性

3.1 非线性程度

Nakamura 等^[22]发现地表处地震动的放大特性可以由水平向/竖直向 (H/V) 谱比法估算。为了量化地震作用下场地反应引起的土体的非线性特性, Noguchi 和 Sasatani^[23]定义了反应非线性程度的量化指标

DNL (Degree of Nonlinearity):

$$DNL = \sum_{i=N1}^{N2} \left| \log \left\{ \frac{R_{\text{strong}}}{R_{\text{weak}}} \right\} \right| (f_{i+1} - f_i) \quad (3)$$

式中, R_{strong} 和 R_{weak} 分别为强震和弱震作用时对应的傅里叶 (H/V) 谱比曲线; f_i 为 $N1 \sim N2$ 频率区间内的第 i 个频率点, $N1$ 对应 0.5 Hz, $N2$ 对应 20 Hz。

当强震作用时的 H/V 谱比曲线与弱震作用时 H/V 谱比曲线差异越大时, DNL 数值越大, 且当 $DNL > 4$ 时, 可认为场地发生了非线性反应^[23]。

本节以基础顶面 Node 500 处的 DNL 值作为评价地震作用下场地反应非线性程度的量化指标。通过 0.4 Hz 的 Parzen 窗对傅里叶谱曲线进行平滑, 可以避免傅里叶谱曲线起伏过大而造成的后期 DNL 值偏差^[23]。为了模拟线弹性范围内的土体反应, 取 5 cm/s^2 和 10 cm/s^2 两个弱震水平, 将三条基岩输入地震动进行调幅并作为弱震输入, 接着对所有弱震工况的 Node 500 处的谱比反应求平均以绘制出较为平滑、合理的弱震 H/V 谱比平均值曲线。

结合 SL-1 级和 SL-2 级的强震 H/V 谱比曲线, 可获得不同设定地震对应的 DNL 值。如图 6 所示。可以发现, 所有工况的 DNL 值均大于 4。这说明不论是 SL-1 级还是 SL-2 级地震水平, 三个设定地震作用时, 场地均发生了非线性反应, 且在中-远场强震作用时, 场地非线性效应最为明显。此外, 地震水平越高时, DNL 值越大, 也即非线性越强烈。

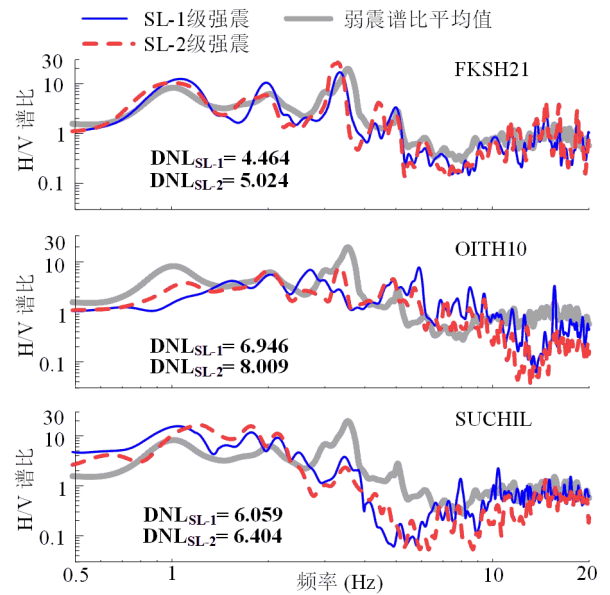


图 6 Node 500 处弱震谱比平均值与强震谱比曲线的对比
Fig. 6 Comparison of the weak-motion mean spectral ratios with the strong-motion spectral ratios at Node 500

3.2 基础输入运动

3D LSM 核岛结构模型与桩-筏基础是通过筏板顶面节点 Node 500 耦联的, 故 Node 500 的地震反应代表基岩地震动经由地层通过基础传递给核岛结构的地震动输入, 即核岛结构基础输入运动。

图 7 给出了 Node 500 的加速度反应三分量的时程与相应基岩输入地震动分量的对比。可以发现, 对于设定的近场中强地震, Node 500 处水平向峰值加速度 (HPGA) 明显小于基岩输入地震动的水平向峰值加速度 (HPBA)。这是由于近场地震动包含丰富的高频成分, 经过土层传播到地表时, 高频滤波效应明显, 导

致加速度峰值反应被明显降低。相反, 对于设定地震的中-远场强震和远场大地震, 由于输入地震动的中-低频丰富, Node 500 处 HPGA 均明显大于 HPBA。不论设定地震为近场中强地震、中-远场强震还是远场大地震, 由于土体的强非线性滞回特性, SL-1 级地震动作用引起的 HPBA 放大效应明显要比 SL-2 级的大。也可以发现, Node 500 处竖向峰值加速度 (VPGA) 相较于基岩竖向峰值加速度 (HPBA) 均有不同程度的放大, 且输入近场地震动时 VPGA 放大最小, 而输入远场地震动时 VPGA 放大最大。

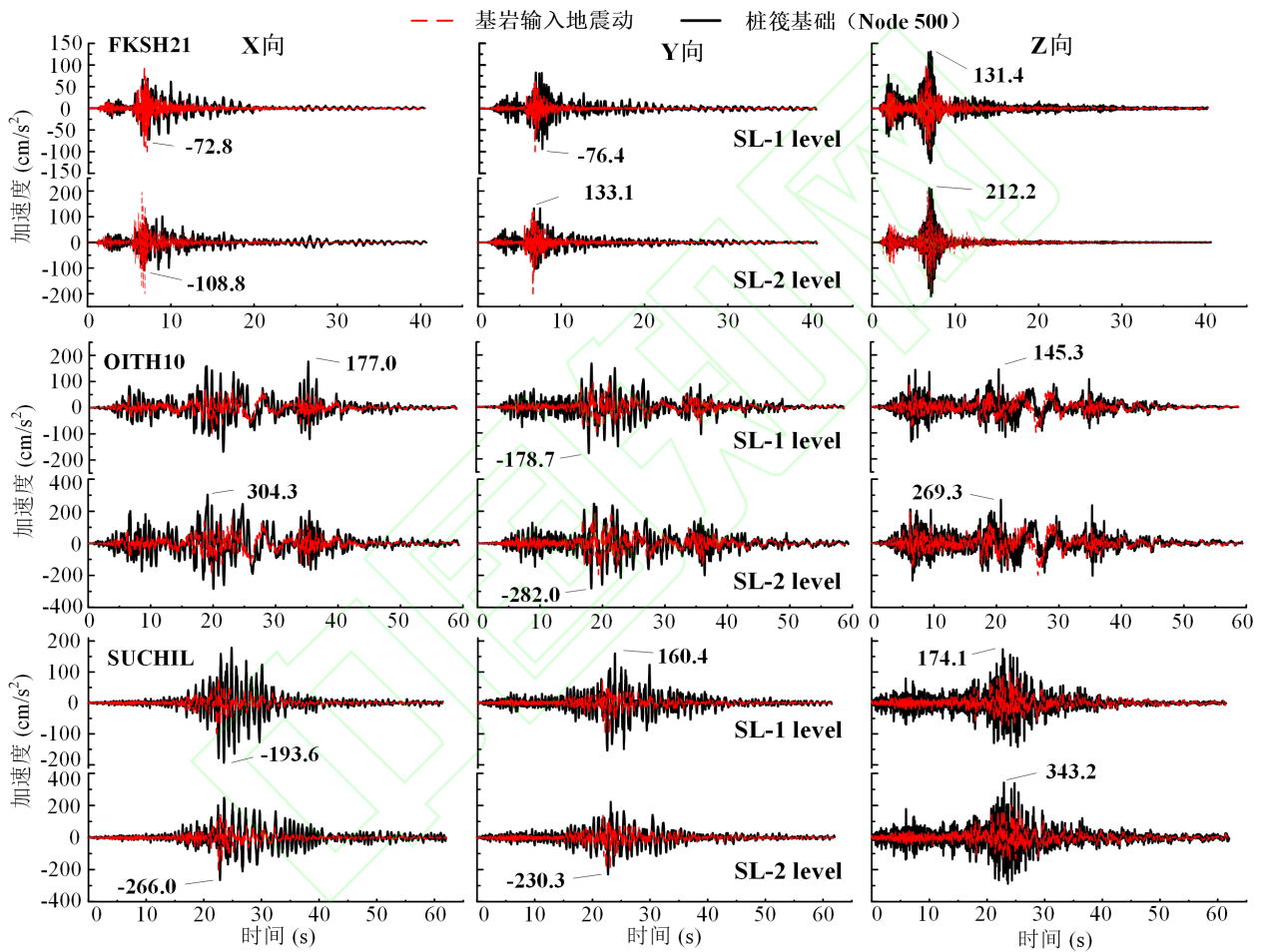


图 7 基岩输入地震动与筏板顶面 Node 500 处地震动加速度时程对比

Fig. 7 Comparison of the acceleration time-histories of bedrock input motions and the foundation input motions at Node 500

图 8 对比了 SL-1 和 SL-2 级地震动水平的 AP1000 标准设计反应谱^[9]和 Node 500 处 5% 阻尼比的加速度反应谱及其上包络线。可以发现: 设定地震的中-远场强震地震动对周期大于 1 s 的上包络谱纵坐标起控制作用。对于 SL-1 级地震动水平, 对应 100 cm/s² 的水平向和 AP1000 设计谱的纵坐标明显低于上包络谱; 除周期约 0.5 s 附近外, 对应 100 cm/s² 的竖向 AP1000 设计谱的纵坐标也明显低于上包络谱。对于 SL-2 级地震动水平, 对应 200 cm/s² 的水平向 AP1000 设计谱的

纵坐标在周期大于 0.15 s (水平向) 时和整个周期范围内 (竖向) 都低于上包络谱的值。上述对比可知: 与场地无关的 AP1000 设计谱相比, 非线性场地效应和非线性 SPSI 效应的耦合作用显著增大了核岛结构基础输入运动, 将对核岛结构的地震安全性产生显著的负面影响。这一结果表明了非线性 SPSI 分析对评估桩-筏基础核岛结构抗震性能的重要性。

3.3 桩顶加速度反应

累计绝对速度 (Cumulative absolute velocity,

CAV) 考虑了地震动的累积持续效应, 使用 CAV 指标评价遭受地震时核岛结构的潜在损伤风险, 可以有效避免单纯由于峰值加速度过大而发生报假警导致停堆的情况。CAV 的计算公式定义如下^[24]:

$$CAV = \int_0^{t_{max}} |a(t)| dt \quad (4)$$

式中: t_{max} 为加速度时程的持时, $|a(t)|$ 为 t 时刻的加速度绝对值。

考虑到桩顶与筏板连接位置处具有较大的潜在地

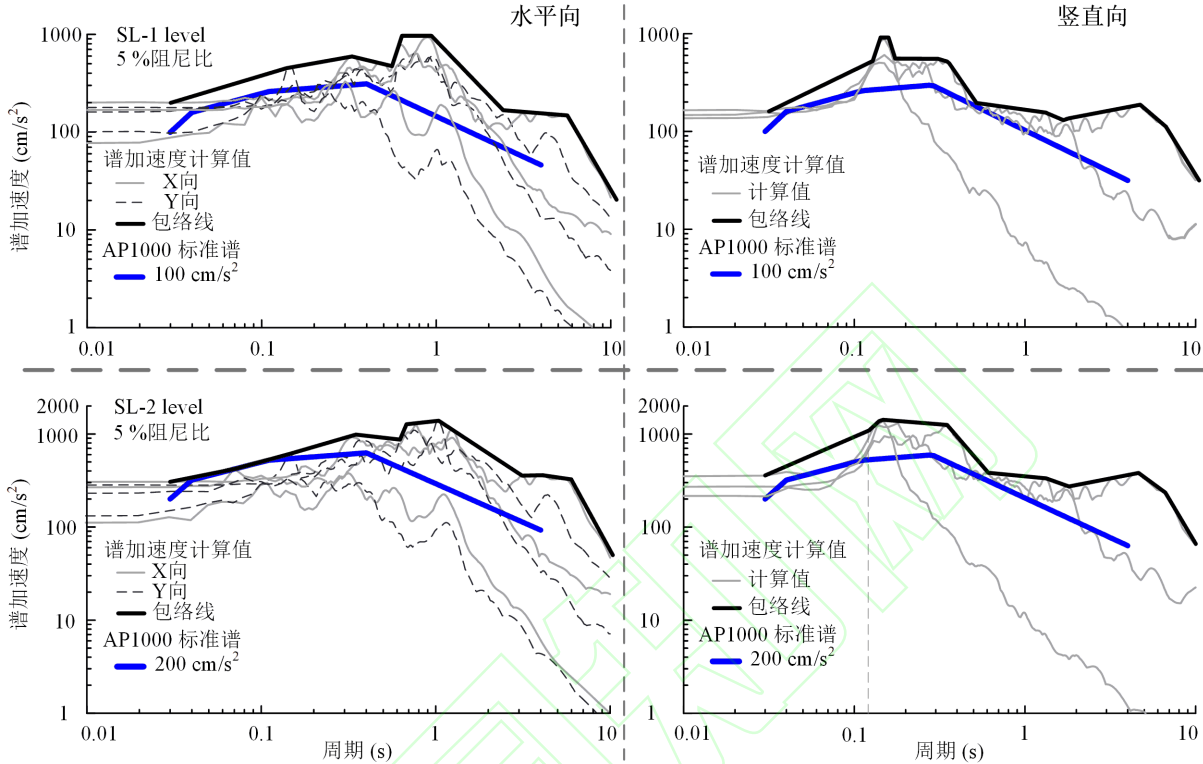


图 8 设定地震作用下筏板顶面 Node 500 处谱加速度 (5%阻尼比) 与相应的 AP1000 标准设计反应谱的比较

Fig. 8 Comparison of the spectral accelerations of Node 500 for three scenario earthquakes and the AP1000 standard design response spectra at the 5% damping (log-log scale)

震破坏风险, 选取该位置作为具有代表性的界面来表征桩-筏基础核岛结构的桩顶地震反应。图 9 展示了不同的设定地震作用下桩顶地震反应三分量 CAV 的等值线图。可以发现: 不论 SL-1 或 SL-2 级地震动水平, 在不同的设定地震作用下桩顶地震反应三分量 CAV 等值线的分布特征存在明显的差异。当 PBA 相同时, 近场中强地震作用所致的桩顶地震反应三分量 CAV 明显小于中-远场强震和远场大地震作用所致的桩顶 CAV; 中-远场强震作用所致的桩顶地震反应三分量 CAV 稍大于远场大地震作用所致的桩顶 CAV。究其原因, 一方面是由于近场中强地震的地震动持时 $D_{5.95\%}$ 远短于中-远场强地震和远场大地震的地震动持时 $D_{5.95\%}$; 另一方面是由于高频丰富的近场地震动在经由软土层上传时会发生更显著的滤波现象, 从而使桩顶地震加速度反应较小。简而言之, 与地震动水平相同而持时短的近场中强地震相比, 持时明显更长的中-远场强地震和远场大地震对核岛桩-筏基础的潜在破坏风险更大。桩顶地震反应三分量 CAV 的最大值基本

发生在弧形布桩区边桩 A505 - A511、角桩 A519, 以及方形均布区角桩 1909 和第 2-3 行边桩, 筏板中部的桩位的 CAV 相对较小, 且弧顶边桩 A508 附近的 CAV 最大。总体而言, 基岩输入地震动的持时与频谱特性对桩顶地震反应三分量 CAV 大小有显著影响, 同时, CAV 值与 DNL 值也表现出一定的正相关性。此外, CAV 复杂的空间分布会受到非线性 SPSI 效应、桩位平面布置及核岛结构质量和刚度分布的空间非对称性等诸多因素的复杂影响。

3.4 桩顶地震内力反应

图 10 给出了不同的设定地震作用下桩顶地震内力(峰值剪力和弯矩)的等值线图。可以发现, 桩顶地震内力的整体大小与其对应工况的 DNL 值存在正相关性, 近场中强地震作用所致的桩顶地震内力明显小于中-远场强地震和远场大地震作用所致的桩顶地震内力, SL-2 级地震动作用的桩顶地震内力远大于 SL-1 级地震动作用的桩顶地震内力。对于 SL-1 级地震动作用, 近场中强地震和远场大地震作用引起的 X 向和 Y

向桩顶峰值剪力、绕 X 轴和 Y 轴的桩顶峰值弯矩的差异不显著，而中-远场强地震作用引起的 X 向桩顶峰值剪力显著大于 Y 向桩顶峰值剪力、绕 Y 轴的桩顶峰值弯矩显著大于绕 X 轴的桩顶峰值弯矩。对于 SL-2 级地震动作用，近场中强震作用引起的 X 向和 Y 向桩

顶峰值剪力、绕 X 轴和 Y 轴的桩顶峰值弯矩的差异仍不显著；中-远场强地震作用引起的 Y 向桩顶峰值剪力显著大于 X 向桩顶峰值剪力、绕 X 轴的桩顶峰值弯矩显著大于绕 Y 轴的桩顶峰值弯矩，而远场大地震作

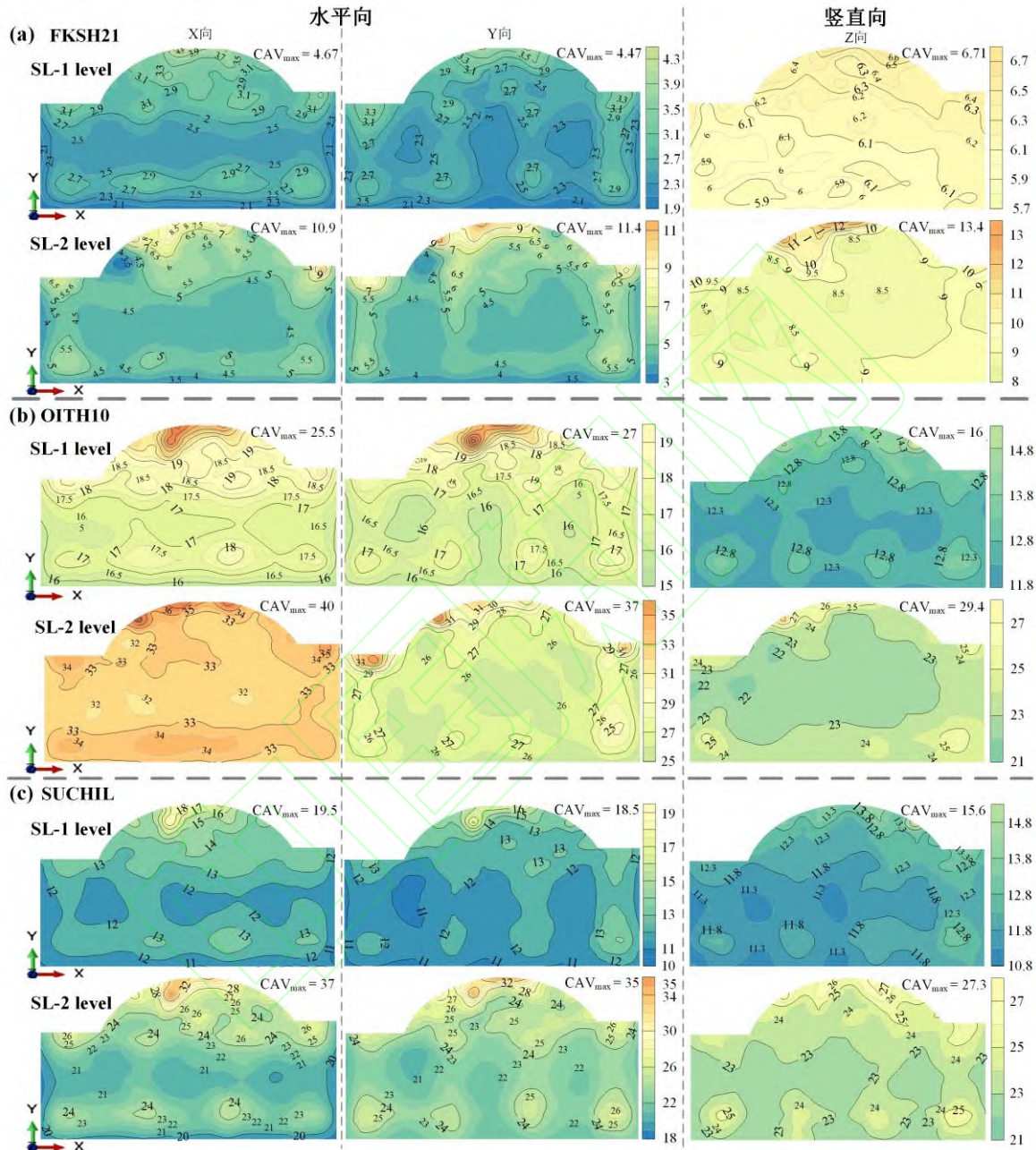


图 9 不同的设定地震作用下桩顶地震反应三分量 CAV (m/s) 的等值线图

Fig. 9 Contours of the CAVs (m/s) of tri-directional components of seismic responses at the top of piles under different earthquake scenarios

用引起的 X 向桩顶峰值剪力稍大于 Y 向桩顶峰值剪力、绕 X 轴的桩顶峰值弯矩稍大于绕 Y 轴的桩顶峰值弯矩。总体而言，在同一设定地震作用下，如 X 向桩顶峰值剪力大于 Y 向桩顶峰值剪力，则绕 Y 轴的桩顶峰值弯矩大于绕 X 轴的桩顶峰值弯矩；反之也是如此。

对于不同的设定地震，边桩的桩顶地震内力大于内部桩的桩顶地震内力，弧形布桩区的边桩桩顶地震

内力大于方形布桩区的桩顶地震内力。结合图 4(d) 的群桩布置可以发现，在方形布桩区，角桩 1909 处的桩顶地震内力最大、内桩 1006 附近的桩顶地震内力最小；在弧形布桩区，边桩 A505、A508、A511 和 A514 处的桩顶地震内力明显较大，值得关注。由于筏板局部为圆弧形且筏板的长边为 X 向，从而导致筏板 Y 向的布桩数量显著少于 X 向的布桩数量；另外，结合

AP1000 核岛结构动力特性分析发现, 总体上其在 X 向的侧移刚度大于 Y 向的侧移刚度。这是导致 X 向和 Y 向的桩顶地震峰值剪力、绕 X 轴和 Y 轴的峰值弯矩存在差异的重要原因。

地震动水平越高, 土体非线性滞回特性越强, 土

的动剪切模量衰减越大, 桩体需承担更大的地震作用引起的弯矩和剪力。对于 SL-1 级地震动作用, 远场大震所致的 X 向桩顶地震内力最小值位于弧形布桩区的 A412 附近, 而远场大震所致的 Y 向桩顶地震峰值剪力和绕 X 向的峰值弯矩与中-远场强地震作用时较为

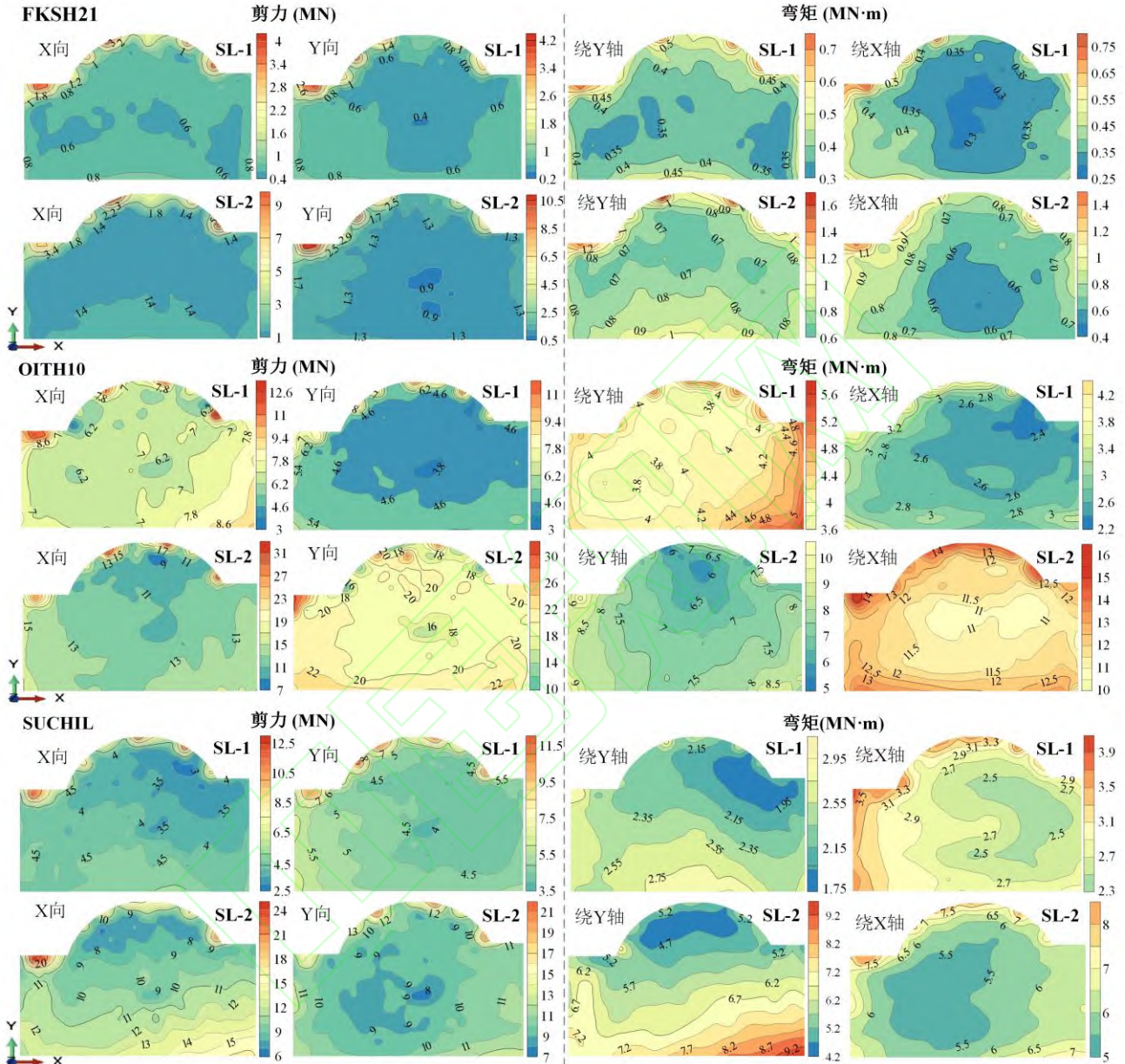


图 10 不同的设定地震作用下桩顶峰值剪力和弯矩的等值线图

Fig. 10 Contours of the peak shear forces and the peak bending moments at the top of piles under different earthquake scenarios

相似。相较于 SL-1 级地震动作用, SL-2 级地震动水平的远场大地震所致的方形布桩区长边边桩的桩顶地震内力显著增大, 角桩 0101 和 0201 处的桩顶地震内力最大。

桩顶地震内力大小受输入基岩地震动的强度和频谱特性的影响, 与场地反应非线性程度呈现为正相关。此外, 群桩桩顶地震内力的空间分布会受非线性 SPSI 效应、群桩平面布置以及核岛结构自身质量和刚度在 X 向和 Y 向的偏心情况等因素的综合影响, 因此,

核岛结构的群桩桩顶地震内力的空间分布特征极为复杂。

3.5 代表性桩的地震内力反应

结合桩顶处 CAV 和地震内力的大小及空间分布特征, 选取方形布桩区角桩 1909 和弧形布桩区边桩 A508 作为对象, 研究桩身峰值剪力及峰值弯矩随深度的变化, 具体见图 11 及图 12。总体上, 地震引起的边桩 1909 和 A508 的桩身峰值剪力随深度增大而减小, 桩顶地震峰值剪力远大于桩身其他部位, 浅层淤

泥质土层(浅层约 3 m)处桩身地震峰值剪力比较大。地震引起的边桩 1909 和 A508 的桩身峰值弯矩随深度并非单调减小,桩顶的地震峰值弯矩远大于桩身其他部位,浅层淤泥质土层(浅层约 3 m)处的桩身地震峰值弯矩比较大。对 SL-2 级地震动水平,距桩顶约 20 m 处的桩身峰值弯矩急剧增大。这是由于该处地层为软弱的 Q_{mc} 4 粉质黏土 2,土体已进入强非线性状态,土的强度和刚度衰退的程度很大,导致该处的桩体地震峰值弯矩急剧增大。

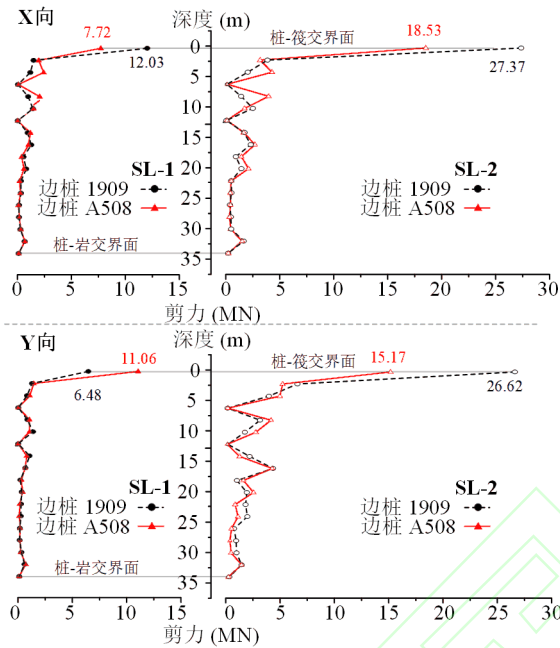


图 11 中-远场强地震作用下桩身峰值剪力随深度的变化

Fig. 11 Variation of the peak shear forces of the pile shaft under the moderate-far field strong earthquake scenario

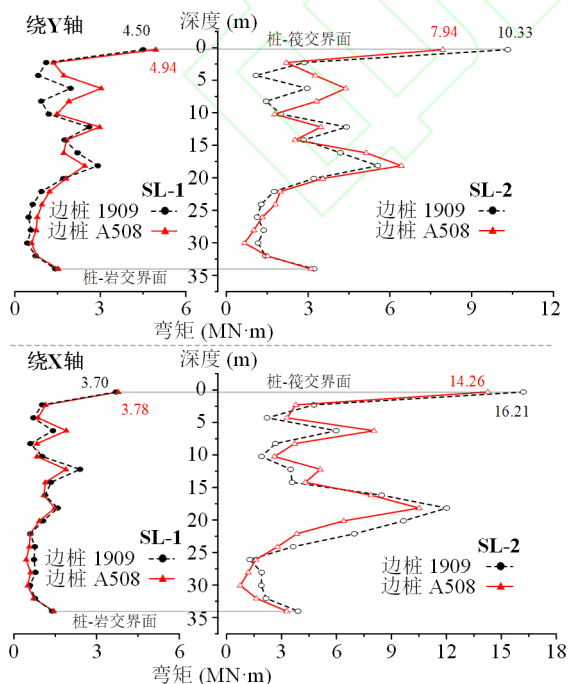


图 12 中-远场强地震作用下桩身峰值弯矩随深度的变化

Fig. 12 Variation of the peak bending moments of the pile shaft

under the moderate-far field strong earthquake scenario

4 结 论

以某海岸拟建的 AP1000 核电工程为背景,建立了考虑土体非线性滞回特性及土-结构动力相互作用的不均匀地基-群桩-筏板基础-AP1000 核岛结构体系的 3D 有限元模型,对比分析了三向地震动输入的近场中强震、中-远场强地震和远场大地震作用下群桩基础的地震反应特性,主要结论如下:

(1) 高频丰富的近场地震动水平分量在经软地层到达筏板时滤波效应明显,其峰值加速度显著减小;与此相反,中-远场和远场地震动作用时,场地反应的非线性程度更高,筏板水平向峰值加速度均有明显放大。相较于竖向基岩地震动,筏板竖向峰值加速度均有放大,近场地震时放大最小、远场地震时放大最大。

(2) 不论是 SL-1 或 SL-2 级地震动水平,非线性的场地效应和 SPSI 效应的耦合作用显著增大 AP1000 核岛结构的基础输入运动,导致基础输入运动的水平向和竖向上包络加速度反应谱谱值均显著大于对应的场地无关的 AP1000 标准设计反应谱谱值。

(3) 群桩桩顶 CAV 及地震内力的大小取决于输入基岩地震动的强度和频谱特性,并与场地反应的非线性程度正相关,此外,其复杂的空间分布会受 SPSI 效应、群桩的几何布置及核岛结构自身的动力特性等因素的影响。群桩桩顶 CAV 及地震内力最大反应发生在方形布桩区的角桩及弧形布桩区的边桩处,在抗震设计时对此区域应格外关注。不论是 SL-1 或 SL-2 级地震动水平,与近场中强地震作用相比,持时更长且低频丰富的中-远场强震和远场大地震对核岛桩-筏基础的潜在破坏风险更大;桩身的最大地震内力反应位于桩-筏交界面处(桩顶),软弱地层处的桩身地震内力反应显著增大。

参考文献:

[1] 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.

[2] ZOU D G, SUI Y, CHEN K. Plastic damage analysis of pile foundation of nuclear power plants under beyond-design basis earthquake excitation. Soil Dynamics and Earthquake Engineering[J]. 2020; 136(2): 106179.

[3] 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.

[4] 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. (in Chinese))
- [5] 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 Dingfeng, Ruan Bin, Chen Guoxing, 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. (in Chinese))
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY. AP1000 design control document, Revision17[R]. US: NRC, 2009.
- [9] 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.
- [10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Nuclear Power Reactors in the World, Reference Data Series No. 2[R]. Vienna: IAEA, 2021.
- [11] 胡云壮, 胥勤勉, 袁桂邦, 等. 河北海兴小山 CK3 孔磁性地层与第四纪火山活动记录[J]. 古地学报, 2014, 16(3): 411-426. (HU Yun-zhuang, XU Qin-mian, YUAN Gui-bang, et al. Magnetostratigraphy of borehole CK3 and record of the Quaternary volcanic activities in Xiaoshan of Haixing, Hebei Province[J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 16(3): 411-426. (in Chinese))
- [12] 庄海洋, 于旭. 土-桩-隔震结构动力相互作用[J]. 岩土力学, 2016, v.37(S1): 291. (Zhuang Hai-yang, Yu xu. Dynamic interaction of soil-pile-isolation structure[J]. Rock and soil mechanics, 2016, v. 37(S1): 291. (in Chinese))
- [13] Turello D F, Pinto F, Sanchez P J. Embedded beam element with interaction surface for lateral loading of piles[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2016;40(4): 568-582.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Kuhlemeyer, RL, Lysmer, J. Fine element method accuracy for wave propagation problems[J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Division, ASCE, 1973; 99(5): 421-427.
- [17] 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. (in Chinese))
- [18] 章小龙. 场地地震波动模拟边界处理及盆地效应研究[D]. 南京工业大学, 2017.
- [19] 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.
- [20] 陈国兴, 陈磊, 景立平, 等. 地铁地下结构抗震分析并行计算显式与隐式算法比较[J]. 铁道学报, 2011, 33(11):111-118. (CHEN Guo-xing, CHEN Lei, JING Li-ping, et al. Comparison of implicit and explicit finite element methods with parallel computing for seismic response analysis of metro underground structures. Journal of the China Railway Society. 2011; 33(11): 112-117. (in Chinese))
- [21] 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.
- [22] Nakamura Y. What is the Nakamura method? Seismological Research Letters[J]. 2019; 90(4): 1437-1443.
- [23] Noguchi S, Sasatani T. Nonlinear soil response and its effects on strong ground motions during the 2003 Miyagi-Oki intraslab earthquakes[J]. Zishin, 2011; 63:165-187.
- [24] Electrical Power Research Institute. A criterion for determining exceedance of the operating basis earthquake. Report NP-5930[R]. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute, 1988.

朱升冬 (1991—), 男, 博士研究生。主要从事土-结构动力相互作用研究。

陈国兴 (1963—), 男, 博士, 教授。主要从事土动力学与岩土地震工程研究。

陈伟均 (1986—)，男，博士，副教授。主要从事土动力学和波动理论研究的研究工作。

高文生 (1967—)，男，博士，研究员。主要从事地基基础与结构共同作用研究。

