

斜入射地震波作用下非基岩场地 核电结构地震响应

刘又恺¹, 梁建文^{1,2}, 巴振宁^{1,2}, 王永光¹, 马英³

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300350; 2. 天津大学 水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300350;
3. 中国核电集团有限公司, 北京 100097)

摘要: 由于可供选择的优质基岩场地越来越少, 未来新建核电站将不可避免的选建于非基岩场地, 此时土-结构相互作用是核电站抗震设防必须考虑的因素。针对我国某非基岩场地拟建“华龙一号”核电站, 建立了场地-桩筏基础-核电结构三维有限元整体模型, 采用直接刚度法和边界子结构方法实现斜入射地震波输入, 研究了SV波以3种不同角度入射时核电结构的地震响应差异, 并进一步分析了土-结构相互作用(soil-structure interaction, SSI)对结构响应的规律。研究表明: 该核电站所在非基岩场地会显著放大基岩地震波, 地震波垂直入射时安全壳底部峰值加速度放大系数能达到3.6; 随着地震波入射角度增大, 核电结构水平加速度响应减小、竖向加速度响应增大, 同时水平和竖向加速度反应谱峰值分别向长周期和短周期方向偏移; SSI会显著影响非基岩场地核电结构的地震响应。

关键词: 核电结构; 非基岩场地; 入射角度; 地震响应; 直接刚度法; 土-结构相互作用

中图分类号: TU4

文献标识码: A

Seismic response of nuclear power structure on non-bedrock site under oblique incident seismic waves

LIU Youkai¹, LIANG Jianwen^{1,2}, BA Zhenning^{1,2}, WANG Yongguang¹, MA Ying³

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300350, China;
3. China National Nuclear Power Corporation Limited, Beijing 100097, China)

Abstract: Since there are fewer and fewer high-quality bedrock sites to choose from, it is inevitable that new nuclear power plants will be built on non-bedrock sites in the future. At this time, soil-structure interaction is a factor that must be considered in the seismic fortification of nuclear power plants. In this paper, a three-dimensional finite element model of the site-pile raft foundation-nuclear power plant is established for Hualong One nuclear power plant planned to be built on a non-bedrock site in China. The direct stiffness method and the boundary substructure method are used to achieve oblique incidence seismic waves input, and the difference in the seismic response of the nuclear power structure when SV waves are incident at three different angles is studied. The effect of soil-structure interaction (SSI) on the structural response is further analyzed. The results show that the non-bedrock site of the nuclear power plant will significantly amplify the bedrock seismic waves, and the peak acceleration amplification coefficient at the bottom of the containment can reach 3.6 when the seismic wave is vertically incident. With the increase of the incidence angle of the seismic wave, the horizontal acceleration response decreases and the

收稿日期: 2023-12-25; 修回日期: 2024-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2139208)

作者简介: 刘又恺(1999—), 男, 博士研究生, 主要从事地震工程研究。E-mail: liuyk412423712@163.com

通讯作者: 巴振宁(1980—), 男, 教授, 博士, 主要从事地震工程研究。E-mail: Bazhenning_001@163.com

vertical acceleration response increases, and the horizontal and vertical acceleration response spectra shift towards the long-period direction and the short period direction, respectively. SSI can significantly affect the seismic response of nuclear power structures in non-bedrock sites.

Key words: nuclear power structure; non-bedrock site; incident angle; seismic response; direct stiffness method; soil-structure interaction (SSI)

0 引言

核电作为清洁高效的无碳能源^[1],正迎来前所未有的发展机遇,但可供核电站建设的基岩厂址越来越少,在某些地区核电站将被迫建于地质条件较差的非基岩场地^[2],确保建设在非基岩场地核电在地震作用下的安全成为了一个重要课题。

诸多学者采用数值模拟或振动台试验方法对核电结构地震响应问题展开了研究。数值模拟方面:GAN等^[3]通过 ANSYS 模拟了 2 种地震波输入时 AP1000 核岛结构地震响应,论证了在安全停堆地震工况下的结构安全性。为对比基岩场地与非基岩场地核岛结构地震响应差异,TUÑÓN-SANJUR 等^[4]利用有限元软件建立集中质量和壳的核岛结构模型,分析了不同类型场地上核岛的楼层响应情况。FARAHANI 等^[5]通过有限元模型进行了正交地震波激励下的结构响应分析,进一步研究了非基岩场地核岛地震响应对于不同参数的敏感性。LUO 等^[6]的研究揭示了桩基在土与核岛结构相互作用中的重要性,发现桩基引入的相互作用非线性行为会导致核岛的位移响应有所降低,并且摇摆运动会受到抑制。沈亮等^[7]则研究了在非基岩厂址条件下核岛厂房不同埋置方法对结构地震动力响应的影响。朱升冬等^[8-9]拓展了近场中强震、中-远场强震及远场大震等不同情况下地震输入的研究,考察了松软场地上桩筏基础核岛结构的三维地震反应特性,讨论了不同地震工况对核岛结构的潜在破坏风险,同时论证了土-桩-结构相互作用耦合效应对地震波的高频过滤和低频放大效应。

振动台试验方面:景立平等^[10-11]利用振动台开展地震模拟试验,研究了不同地基土对土-结构相互作用的影响,以及地震对核岛桩基的破坏情况。李小军等^[12]通过振动台试验进一步研究了非基岩场地条件下核电结构的适用性和地震响应特征,试验结果说明了核电结构地震响应受场地条件影响明显,在进行核电地震响应分析时应充分考虑土-结构相互作用。

分析以上文献发现,目前大部分核岛地震响应研究采用在模型底部直接输入台站地震动记录作为基岩输入地震波的方法,只考虑地震波垂直入射或入射方向平行于某一坐标面^[13]。然而对于近场地震作用下的大型结构和重点防护结构,地震波斜入射引起的地面运动对结构的非一致效应不可忽略^[14],考虑斜入射才能真实反映近场地震动的三维效应。CHEN 等^[15]对 SV 波斜入射下高拱坝损伤情况开展了相关研究,论证了斜入射与垂直入射地震波造成的结构响应存在显著差异,只考虑垂直入射时部分关键位置响应会被低估。赵密等^[16]研究了不同场地条件下 P 波斜入射时 CAP1400 核岛结构的地震响应,结果显示分层场地和硬岩场地下结构响应随入射角度变化规律基本一致。

本文针对我国某地区拟建的“华龙一号”核电站,建立了场地-桩筏基础-核电结构三维整体模型,探究了斜入射 SV 波作用下非基岩场地核电结构的地震响应,并进一步分析了是否考虑土-结构相互作用(soil-structure interaction, SSI)对核电结构地震响应的影响,其结论对非基岩场地上核电结构的抗震设计具有相应参考价值。

1 数值模型

“华龙一号”是我国研发的具有自主知识产权的三代核电技术堆型,也是目前世界上最大的商用核反应堆之一,已逐步开始在国内外批量化建设。“华龙一号”的设计借鉴了 AP1000 等先进核电技术,并且充分考虑了福岛核事故等重大事件的经验反馈,具有应对各种极端工况的能力。传统核电机组大多采用单层安全壳设计,而“华龙一号”使用了大容积双层安全壳,其外壳主要用于抵御飞机撞击、龙卷风袭击等外部灾害,内壳的主要作用是抵御核事故时内部的高温高压以及屏蔽辐射,双层壳设计实现了更高的安全性。

本文选择我国某内陆非基岩场地拟建“华龙一号”核电站为研究对象,该核电站整体外围平面尺寸为 $102\text{ m}\times 96\text{ m}$,上部结构主要由5个部分组成:反应堆厂房、安全厂房A列、安全厂房B列、辅助厂房和燃料厂房,其中反应堆厂房采用了内外双层安全壳结构。反应堆厂房高度 72.1 m ,安全壳外径 51 m ,周围厂房高度 $30\sim 42\text{ m}$ 不等。厂房整体结构共用一块筏板基础,筏板厚度 3.7 m ,基底埋深为 13.2 m ,基础底部布设有桩基,桩端持力层位于玄武岩层。

核电站所在场地为三类场地,场地上部为第四系全新统海陆交互相沉积层、第四系上更新统海陆交互相沉积层,主要为粉质黏土,土层厚度约为 50 m 。

1.1 几何模型及材料参数

1.1.1 核电结构模型及材料参数

参照“华龙一号”核电站相关设计图纸,采用ABAQUS通用有限元软件建立核电结构模型,并按上部结构(包含反应堆厂房、安全厂房A列、安全厂房B列、辅助厂房及燃料厂房)、筏板、桩基的结构划分进行分区块建模。“华龙一号”核电结构有限元模型见图1。

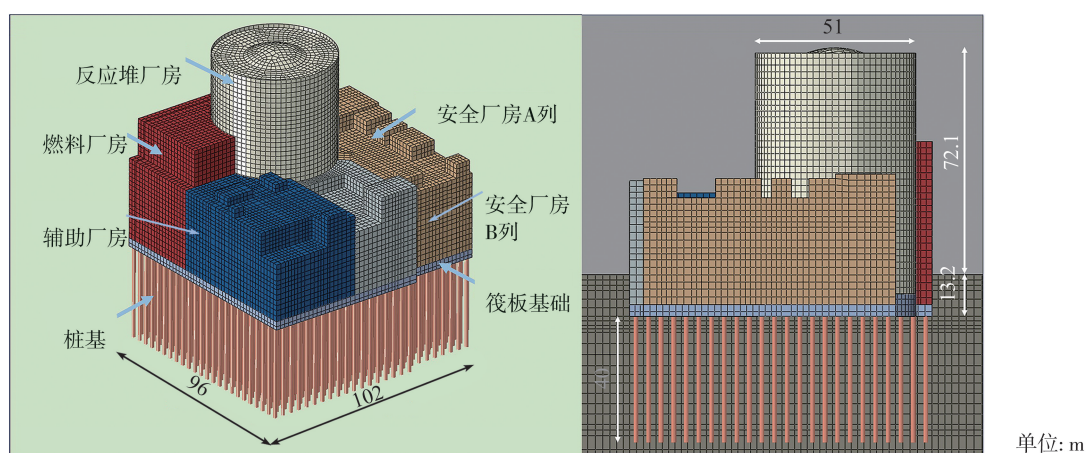


图1 “华龙一号”核电结构有限元模型

Fig.1 Finite element model of Hualong One nuclear power structure

1) 上部结构

厂房为一般墙板结构,墙厚为 $600\sim 1200\text{ mm}$ 不等,厂房外墙厚度较大,楼板厚为 $500\sim 600\text{ mm}$,安全壳外壳整体厚度为 1500 mm ,内壳筒壁厚为 1300 mm ,内壳壳顶厚为 1050 mm 。安全厂房A列含 $7\sim 8$ 个楼层,安全厂房B列和辅助厂房含 $6\sim 7$ 个楼层,燃料厂房含 9 个楼层,各厂房楼层层高为 $2.9\sim 8.5\text{ m}$ 不等。上部结构的主要质量和刚度分布在这些板壳结构上,因此厂房墙体、楼板以及安全壳均根据实际厚度和位置用壳单元进行建模,网格尺寸为 2 m 。反应堆厂房内部结构包含有部分长细设备构件,采用梁单元建模,网格尺寸同样为 2 m 。

2) 筏板基础

筏板基础水平尺寸与核电站外围平面尺寸一致,为 $102\text{ m}\times 96\text{ m}$,整体厚度为 3.7 m ,与安全壳外壳连接处加厚至 7.2 m 。筏板基础和安全壳内壳大厚度的底板都是大体积混凝土结构,采用实体单元进行建模,网格尺寸为 $0.5\sim 2.0\text{ m}$ 。

3) 桩基

桩长为 40 m ,桩径为 1.5 m ,桩中心距约 4 m ,在筏板底部均匀布设混凝土桩基。桩基采用梁单元建模,网格尺寸为 2 m 。

整个核电结构共划分为 64368 个网格单元。其中反应堆厂房还原了内部复杂结构,见图2。在模型中保留了安全壳内壳上的通气孔和设备孔等结构特征,模型内部设置了 1764 个集中质量点用以模拟分布在反应堆厂房内部的设备和冷却水箱。核电结构的主要材料为混凝土,假设为弹性材料,材料参数见表1。

上部结构部分阻尼采用Rayleigh阻尼:为模拟核电结构的振动耗能特性,基于本文考虑运行安全地震工况,阻尼比取 4% ^[17],根据文献[18]方法确定计算得到Rayleigh阻尼系数为 $\alpha=1.0168$, $\beta=0.001600$ 。

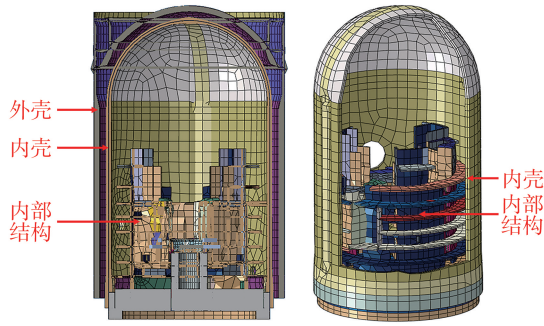


图 2 反应堆厂房内部结构有限元模型

Fig. 2 Finite element model of the internal structure of the reactor building

表 1 结构材料参数

Table 1 Structural material parameters

结构	材料类别	弹性模量 / ($\times 10^4$ MPa)	密度 / (kg/m^3)	泊松比
安全壳	C60	3.60	2500	0.2
厂房外墙	C45	3.35	2500	0.2
厂房内墙	C45	3.35	2500	0.2
厂房楼板	C40	3.25	2500	0.2
筏板基础	C40	3.25	2500	0.2
桩	C40	3.25	2500	0.2

1.1.2 场地模型及土体参数

根据现场岩土工程勘察报告,将场地简化为层状土体进行建模,场地土体模型尺寸取 $200\text{ m} \times 200\text{ m} \times 60\text{ m}$,材料参数见表 2,其中核电站基底持力层为第 2 层粉砂层,桩基底部位于第 8 层气孔状玄武岩层。土体采用实体单元进行网格划分,为了能准确模拟地震波在土体中的传播,按照沿地震波传播方向上不同介质的最短波长至少包含 8~10 个网格的规则进行划分^[19],同时综合考虑土体剪切波速和计算效率的影响,最终确定竖向网格尺寸为 1~4 m,水平向网格尺寸为 1.5~4 m,共计 150 731 个网格单元。

表 2 土体动力学参数

Table 2 Soil dynamic parameters

层号	土类	厚度/m	剪切波速/(m/s)	密度/(kg/m^3)	泊松比
1	粉质黏土	5.0	111	1894	0.49
2	粉砂	11.1	190	1952	0.49
3	淤泥质粉质黏土	2.2	161	2071	0.49
4	粉质黏土	10.6	246	1885	0.49
5	粉质黏土	5.5	262	1919	0.48
6	粉质黏土	13.1	313	1897	0.48
7	粉砂	3.6	335	1909	0.47
8	气孔状玄武岩	8.9	1566	2461	0.28

场地阻尼亦采用 Rayleigh 阻尼,由有限元模态分析得到场地前 2 阶固有频率分别为 0.994、1.038 Hz,根据土工试验取阻尼比 5%,由此得到瑞利阻尼系数为 $\alpha = 0.3190$, $\beta = 0.0078$ 。

1.2 接触与边界条件设置

核电站基础底部布桩较密集,桩身刚度大,因此桩基顶部与筏板基础之间采用绑定约束。同样的,核电上部结构与筏板基础之间也采取绑定约束。桩基础为嵌岩桩,持力层为较坚硬的玄武岩层,可假设桩身在土体内没有相对滑移,因此桩在场地土层中设置内置区域约束。核电站的埋置部分以及筏板基础与土体之间有着很大的接触面积,为了较好地还原两者之间的相互作用,厂房埋置部分与土体之间和筏板与土体之间采用法向硬接触,切向根据材料间摩擦系数定义罚函数接触。

为避免地震波传至模型边界时产生反射波对场地内部区域造成影响,在模型底部和四周的截断边界设置三维黏弹性人工边界。具体方法为在边界节点处设置 3 个坐标方向的弹簧-阻尼器单元,以边界节点 i 为例,法向弹性系数 K_{iN} ,切向弹性系数 K_{iT} ,法向阻尼系数 C_{iN} 和切向阻尼系数 C_{iT} 按式(1)确定:

$$\begin{cases} K_{iN} = \alpha_N \frac{G}{R} \cdot A_i \\ K_{iT} = \alpha_T \frac{G}{R} \cdot A_i \\ C_{iN} = \rho c_p \cdot A_i \\ C_{iT} = \rho c_s \cdot A_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: α_N 和 α_T 分别为法向和切向参数,根据文献[20]确定 $\alpha_N = 1.33$, $\alpha_T = 0.67$; c_p 和 c_s 分别为介质的压缩波速和剪切波速; G 为介质剪切模量; ρ 为介质质量密度; R 取近场结构几何中心至该人工边界节点的距离; A_i 为边界节点的影响面积。场地四周及底部施加三维黏弹性边界后,整体模型见图 3。

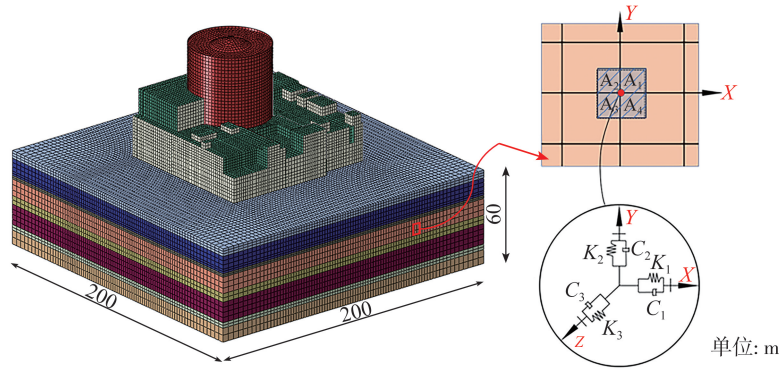


图3 土-结构相互作用模型及黏弹性边界示意图

Fig.3 Model of soil-structure interaction and schematic diagram of viscoelastic boundary

2 地震波输入方法

为研究核电结构在斜入射 SV 波作用下的地震响应,本文采用直接刚度法求解层状场地斜入射地震波响应^[21],随后通过边界子结构方法实现地震波输入^[22-23],实现流程见图4。

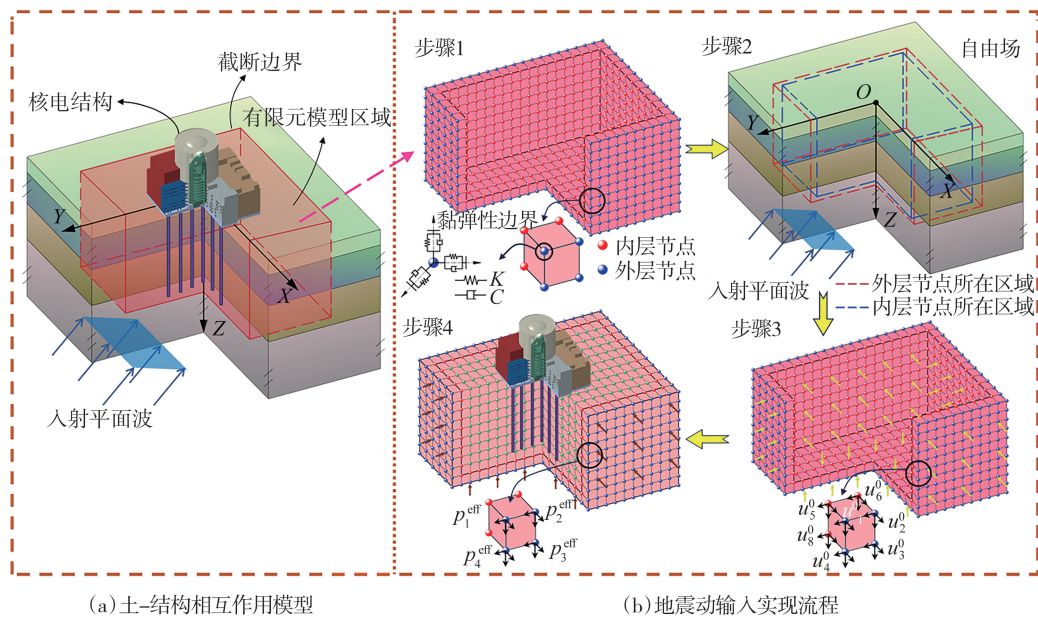


图4 地震波输入方法流程示意图

Fig.4 Schematic diagram of the process of seismic waves input method

地震波输入方法具体步骤如下:

步骤1:建立边界子结构模型。在 ABAQUS 中利用杀死单元的方法使场地模型的内部单元全部失效,只保留模型底部及四周最外层实体单元及其外侧的弹簧-阻尼器单元,以此得到边界子结构模型。通过编写 Python 代码,批量输出边界子结构模型所有单元的节点编号及其坐标。

步骤2:直接刚度法求解自由场响应。以文献[22]中理论推导得到的三维层状场地整体动力刚度矩阵为基础,编写了用于计算斜入射地震波时三维层状场地自由场响应的 Fortran 程序。通过提供输入地震波时程、入射角度、层状场地的几何与材料参数等输入参数,程序能输出该自由场任何位置处的地震响应。读取步骤1中边界子结构模型所有节点的编号和坐标信息,利用该程序输出对应位置处的自由场三向位移时程响应 u^0 。

步骤3:边界子结构模型动力计算。通过编写代码将步骤2输出的自由场位移时程 u^0 对应施加到边界子结构模型所有节点上并进行动力计算,然后提取模型外层节点的三向反力时程。

步骤4:等效地震荷载输入。根据波动法的基本原理,上述计算得到的场地模型截断边界处的节点反力

即为输入地震波的等效地震荷载 p^{eff} 。因此,将提取的节点反力对应施加到土-结构相互作用模型上并进行动力计算,就能模拟地震波斜入射时核电结构的地震响应。

考虑到当前边界子结构模型的节点数量过多,用于记录节点自由场位移时程和反力时程的数据量较大,若直接应用上述方法会出现软件读取内存大小超出限制的问题,难以直接进行计算。鉴于此,采用重启动分析的方法解决该问题,在进行上述步骤 3 和步骤 4 工作时,根据地震波持时长短,将完整输入的自由场位移时程和外层节点反力时程拆分为数个分析步分段输入,确保每个分析步内的时程文件大小不会超过内存读取的限制。随后在计算完第 1 个分析步骤后,利用软件的重启动分析功能对后续每个分析步进行计算,以实现整个地震时段的等效地震荷载输入,其流程见图 5。

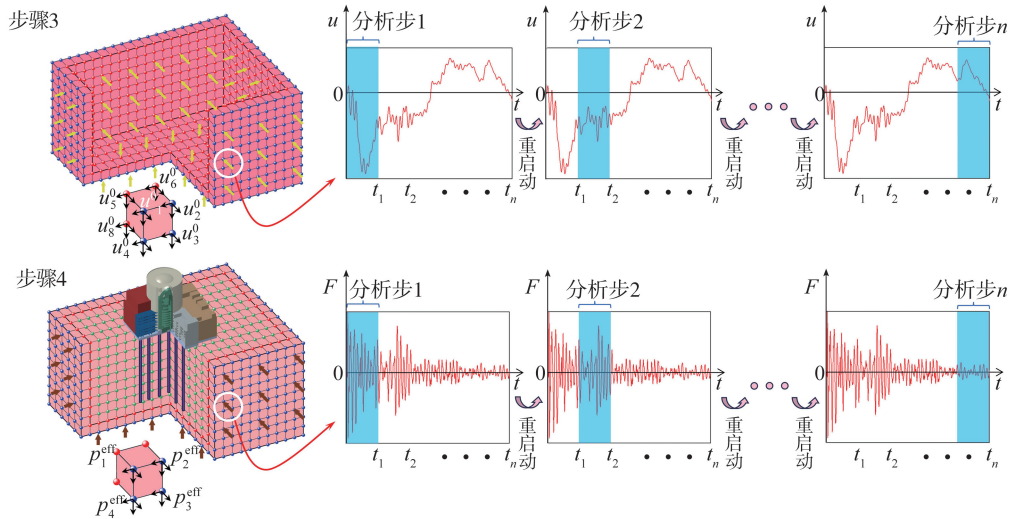


图 5 重启动分析流程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of restart analysis process

3 数值结果及分析

为对比分析是否考虑土-结构相互作用对核电结构相应的影响,本文同时建立了不含场地土体和桩基的核电结构模型,通过直接在筏板基础底部施加 Fortran 程序计算得到的对应位置处自由场响应来模拟不考虑土-结构相互作用时地震波的输入。

1) 地震波选取

由于该拟建电厂址及其附近地区缺乏历史强震记录,分别选取一条天然波和人工波作为输入地震波。天然波选取基岩处记录的 El Centro 波,地震波持时 40 s;人工波选取基岩处的 RG1.60 改进型反应谱拟合得到的地震波时程(后文统称人工波),持时为 25 s。本文研究核电结构在运行安全设计基准下地震响应,根据场地地震安全性评价报告,SL-1 级竖向和水平向基岩地震波峰值加速度取 0.1 g,因此将 2 条输入地震波均调幅到 0.1 g。2 种地震波的加速度时程和傅里叶谱见图 6。

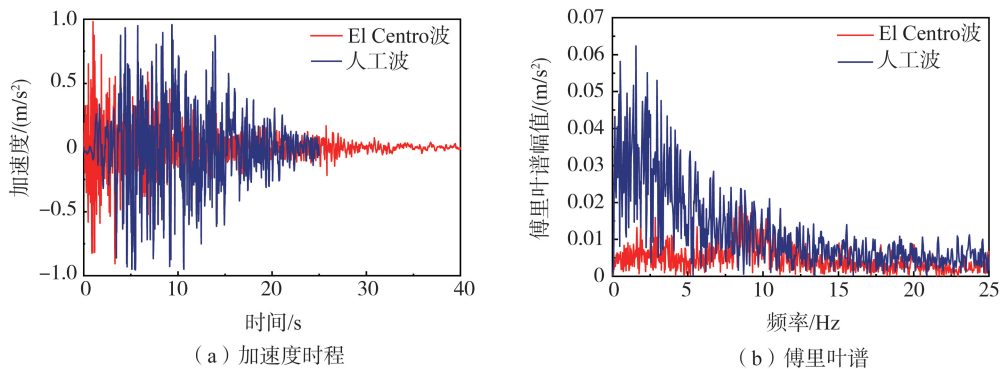


图 6 2 种输入地震波加速度时程及傅里叶谱

Fig. 6 Two input seismic waves acceleration time histories and Fourier spectra

2) 计算工况设置

为了分析斜入射对核电结构的影响,本文采用 Y-Z 平面内与 Z 轴正向夹角分别为 0°(垂直入射)、30°和 60°共 3 个角度进行入射,见图 7。对于每种地震入射角,均分别采用了 El Centro 波和人工波入射,且对每种入射工况都进行了考虑 SSI 和不考虑 SSI 的数值分析,见表 3。所有工况的输入 SV 波都在 Y-Z 平面内入射,根据数值模拟得到的结果,结构在 Y 方向的响应远大于 X 方向,因此后文提到的水平向响应均指代 Y 方向的响应。

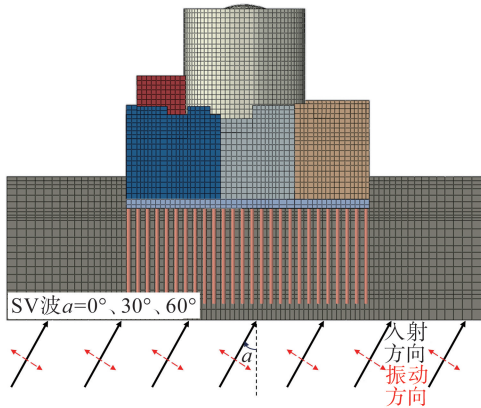


图 7 入射 SV 波角度示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the incident SV wave angle

表 3 地震入射分析工况

Table 3 Seismic incidence analysis conditions

入射角/(°)	地震波	是否考虑 SSI
0	El Centro 波	是
	人工波	否
30	El Centro 波	是
	人工波	否
60	El Centro 波	是
	人工波	否

选取安全壳和周边厂房不同高度处的代表性节点作为参考点,通过分析参考点的响应结果以反映核电结构的地震响应特性和规律。

3) 安全壳响应输出位置选取

定义参考点的峰值加速度与输入基底地震波峰值加速度之比为峰值加速度放大系数,在安全壳正西侧的(X 轴正方向)内壳和外壳表面,沿结构高度从底部至顶部每 10 m 取一个参考点进行峰值加速度分析,参考点选取位置见图 8。

4) 安全厂房 A 列响应输出位置选取

沿安全厂房 A 列同一水平位置的 1~8 层房间楼板中心设置一系列参考点,用于分析楼层的峰值相对位移,参考点选取见图 9。

5) 结构加速度反应谱分析位置选取

在安全壳和厂房不同位置处选取 N1~N6 共 6 个代表性参考点,用于分析 5% 阻尼比下的水平向加速度反应谱和竖向加速度反应谱,其位置见图 10。其中 N1 位于反应堆厂房内部结构的底座中心顶部,N2 位于反应堆厂房内部的顶层环形楼板,N3 位于安全壳内壳壁的最大开孔边缘,N4 位于安全壳外壳顶部的隔层处,N5 位于安全厂房 B 列的 4 层楼板处,N6 位于安全厂房 A 列的楼顶。N1 和 N5 基本处在同一高度,N2、N3 和 N6 也基本处于同一高度。

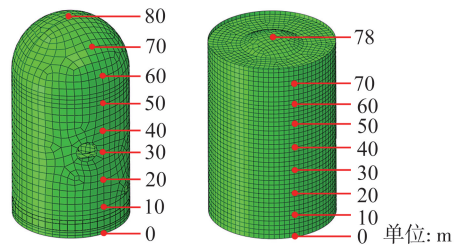


图 8 峰值加速度分析参考点选取

Fig. 8 Selection of reference points for peak acceleration analysis

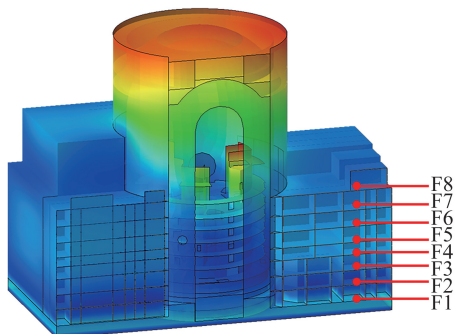


图 9 层间位移分析参考点选取

Fig. 9 Selection of reference points for inter-story displacement analysis

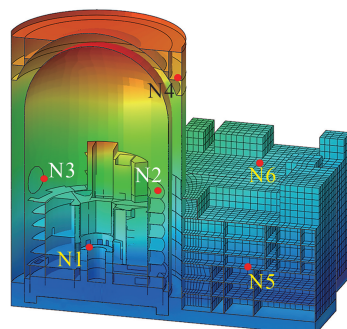


图 10 加速度反应谱分析参考点选取

Fig. 10 Selection of reference points for acceleration response spectrum analysis

不考虑土-结构相互作用时,筏板基础底部的地震动响应与该位置处的自由场响应一致。由于地震波斜入射时基础底部各位置处响应存在差异,故输出底部中心位置处的响应作为参考,不同地震波输入工况时筏板基础底部对应位置处自由场响应见图 11 和图 12。对照图 11 和图 12 与图 6(a)中的时程曲线可以看出,在不考虑土-结构相互作用时,筏板基础底部位置处地震响应相较于基岩输入地震波有明显放大作用。

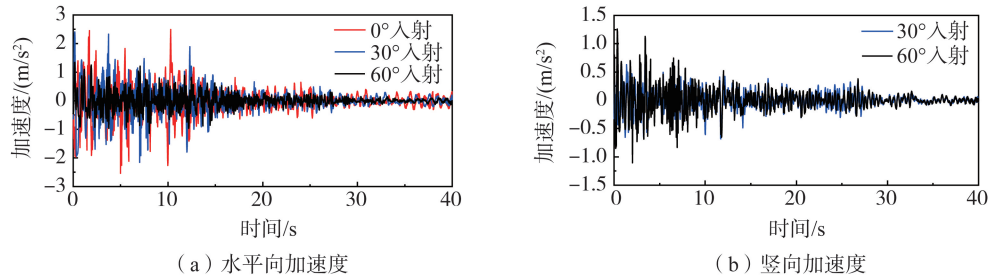


图 11 输入 El Centro 波时筏板基础底部对应位置自由场响应

Fig. 11 Free field response at the corresponding position at the bottom of the raft foundation when the El Centro wave is input

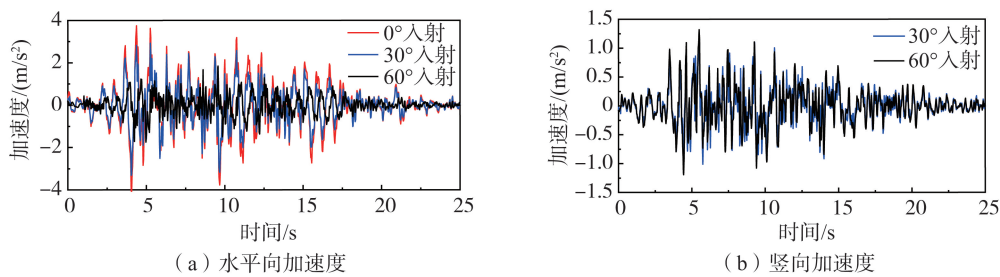


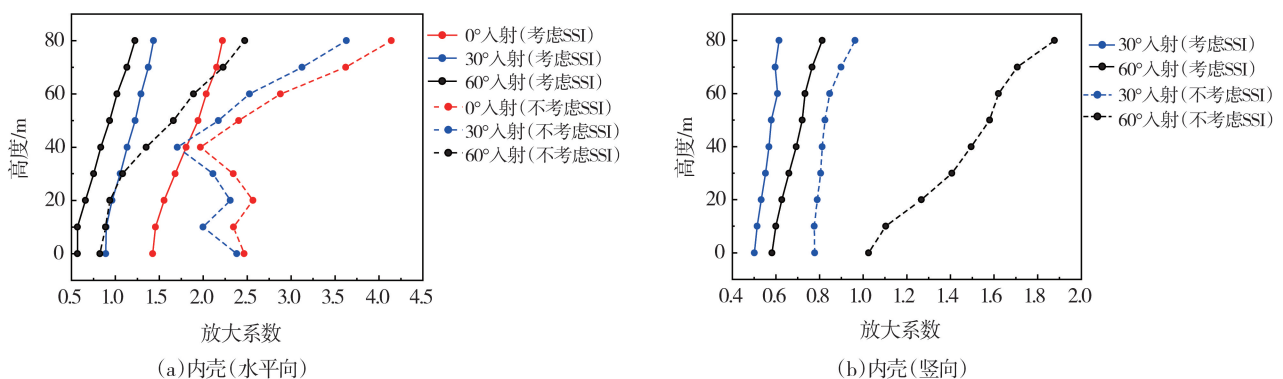
图 12 输入人工波时筏板基础底部对应位置自由场响应

Fig. 12 Free field response at the corresponding position at the bottom of the raft foundation when the artificial wave is input

3.1 峰值加速度分析

图 13 和图 14 分别给出了输入 2 种地震波时安全壳内壳和外壳在 2 个方向上的峰值加速度放大系数。对照图 13(a)、(c),以及对照图 14(a)、(c)可知:考虑 SSI 时,内壳和外壳水平向峰值加速度均随结构高度的增加而增大,并且相同高度处内外壳的响应大小接近;不考虑 SSI 时,相同高度外壳响应大于内壳,且随高度增加外壳响应的增大更为剧烈,在 50 m 结构高度以上部位尤其明显。这是内外壳结构形式差异导致的,内壳有较厚的底板,整体刚度较大,同时内壳顶部形状类似半球形收束,而外壳整体为柱状结构且顶部存在质量较大的多层壳壁,因此这些因素共同导致了地震作用下外壳顶部的摇摆作用大于内壳,体现为同等高度处水平向加速度响应大于内壳。由图 13(a)和图 14(a)可知:不考虑 SSI 时,部分地震输入工况下内壳 20~40 m 高度处出现响应异常减小的现象。这是因为内壳在 30 m 高度附近壳壁存在大尺寸开孔导致刚度发生突变。

图 13 和图 14 共同表明考虑 SSI 时,安全壳加速度响应随结构高度的变化趋势较为一致,而不考虑 SSI 时,安全壳加速度响应随高度的变化趋势存在较大差异。



(a)内壳(水平向)

(b)内壳(竖向)

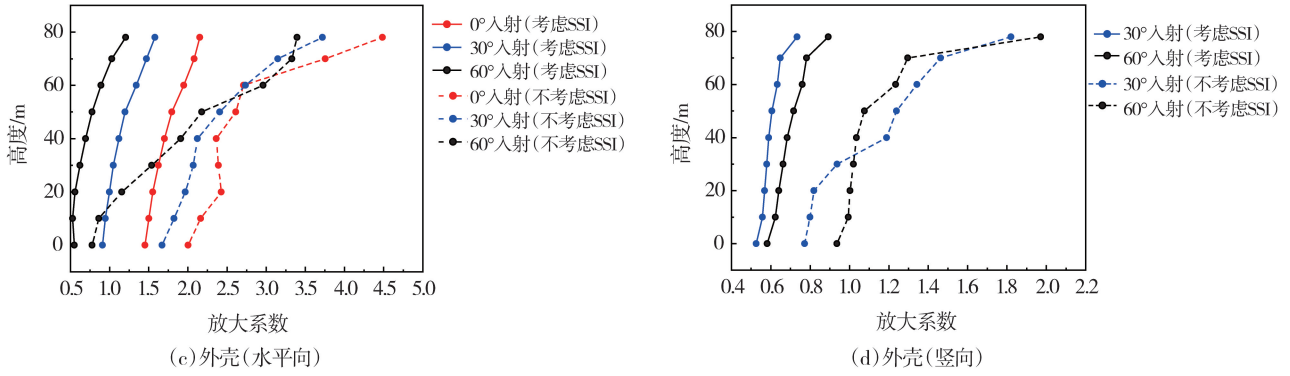


图 13 输入 El Centro 波时安全壳峰值加速度放大系数

Fig. 13 Amplification coefficient of peak acceleration of containment when El Centro wave is input

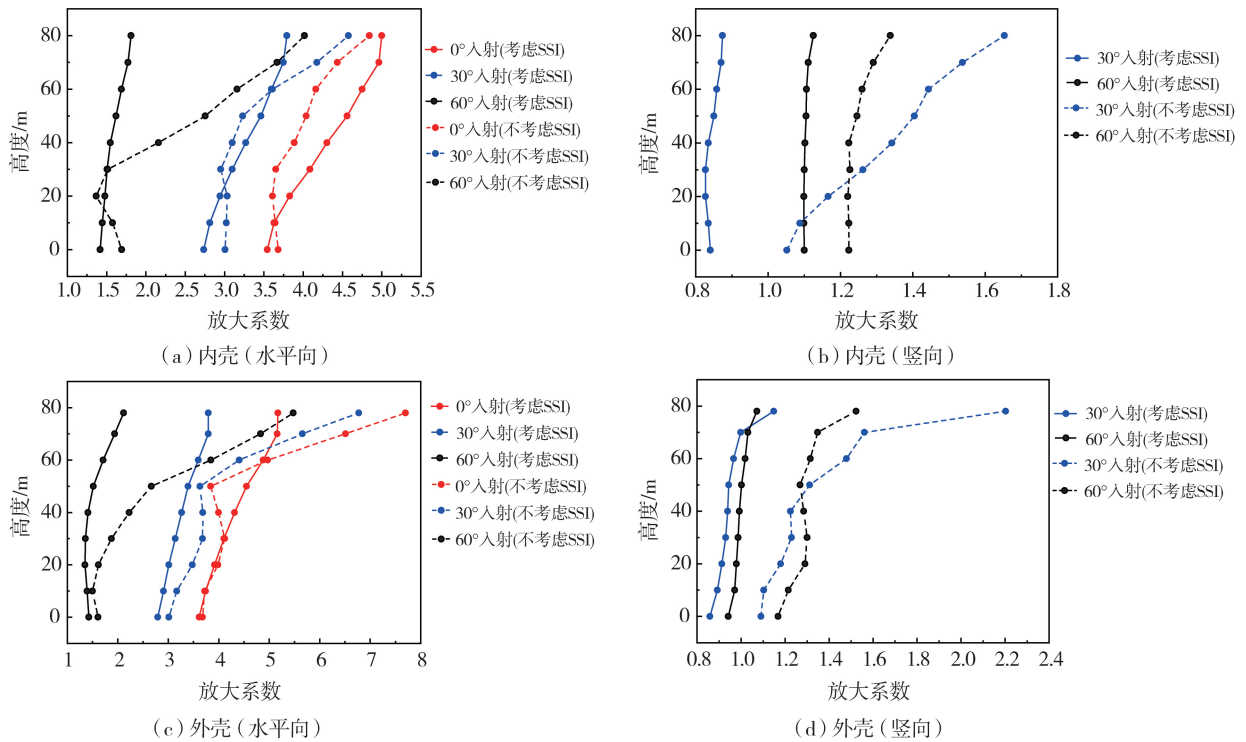
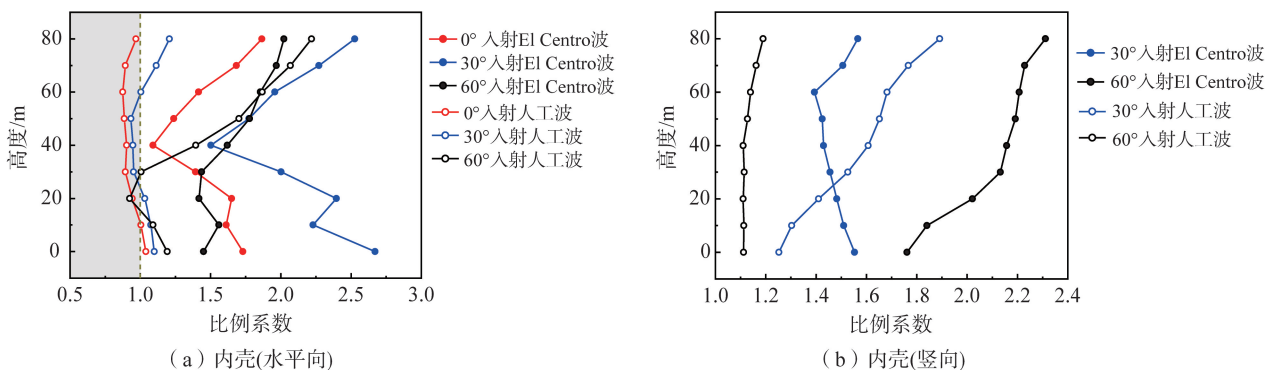


图 14 输入人工波时安全壳峰值加速度放大系数

Fig. 14 Amplification coefficient of peak acceleration of containment when the artificial wave is input

现将不考虑 SSI 时参考点的峰值加速度与考虑 SSI 时的峰值加速度之比定义为峰值加速度比例系数。图 15 给出安全壳内壳和外壳在 2 个方向上的峰值加速度比例系数。由图 15 可知,在采用 El Centro 波入射时,安全壳水平向和竖向峰值加速度比例系数均大于 1,而采用人工波入射时,安全壳部分位置处水平向峰值加速度比例系数略小于 1。这表明 SSI 会使结构的地震加速度响应减小,但在某些地震波以某种角度入射时,可能会出现 SSI 使局部结构加速度响应放大的现象。



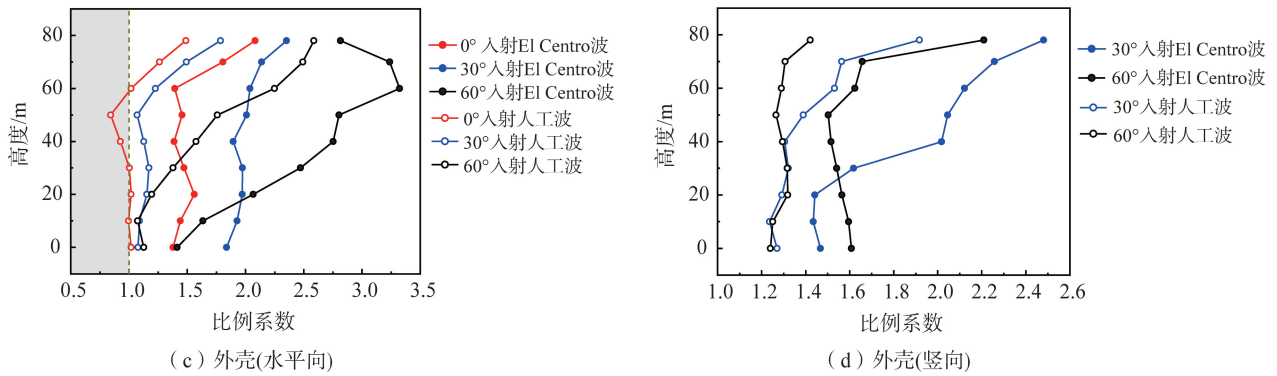


图 15 安全壳峰值加速度比例系数

Fig. 15 Proportional coefficient of peak acceleration of containment

如图 15 所示,内壳水平向峰值加速度比例系数最大为 2.7,外壳比例系数最大为 3.3,而内外壳竖向峰值加速度比例系数约为 2.4,可见 SSI 对水平向加速度响应的影响比竖向更大。

入射角相同时,采用 El Centro 波入射得到的峰值加速度比例系数在大部分情况下明显大于采用人工波入射得到的相同位置处的峰值加速度比例系数。说明该系统在输入 El Centro 波时,是否考虑土-结构相互作用对结构响应的差异更明显。

3.2 层间位移分析

图 16 给出了 2 种地震波入射时安全厂房 A 列各楼层相对底层的峰值位移。由图 16 可知,无论是否考虑 SSI,峰值相对位移均随楼层的增加而增大。在考虑 SSI 时,垂直入射时每层楼的峰值相对位移最大,且随着地震波入射角度的增大而减小。不考虑 SSI 时,出现了地震波垂直入射时楼层峰值相对位移小于斜入射的现象,地震波为 El Centro 波时,60°入射的峰值相对位移最小,而地震波为人工波时,垂直入射的峰值相对位移最小。地震波以相同角度入射时,无论是否考虑 SSI,采用人工波输入时的楼层峰值相对位移都明显大于 El Centro 波输入时的响应,考虑 SSI 时垂直入射 El Centro 波的顶层峰值相对位移只有 2.44 mm,而垂直入射人工波对应位置的相对位移能达到 5.96 mm。

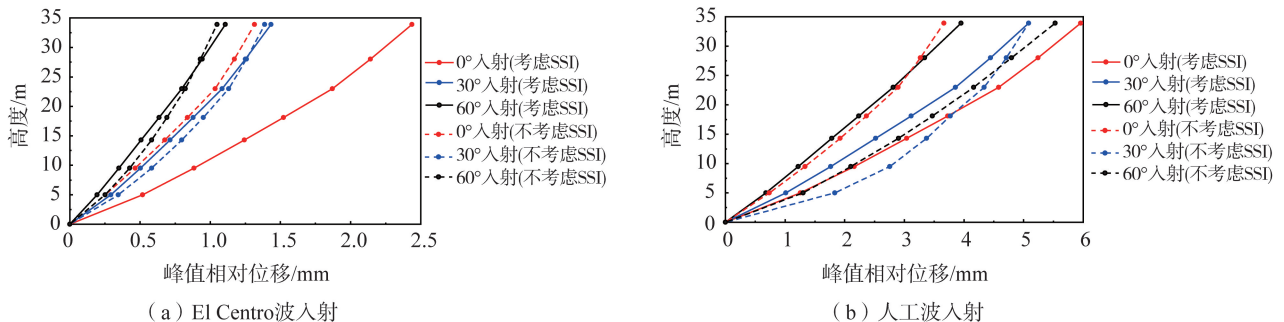


图 16 2 种地震波入射时楼层峰值相对位移

Fig. 16 Relative displacement of floor peak value when two seismic waves are incident

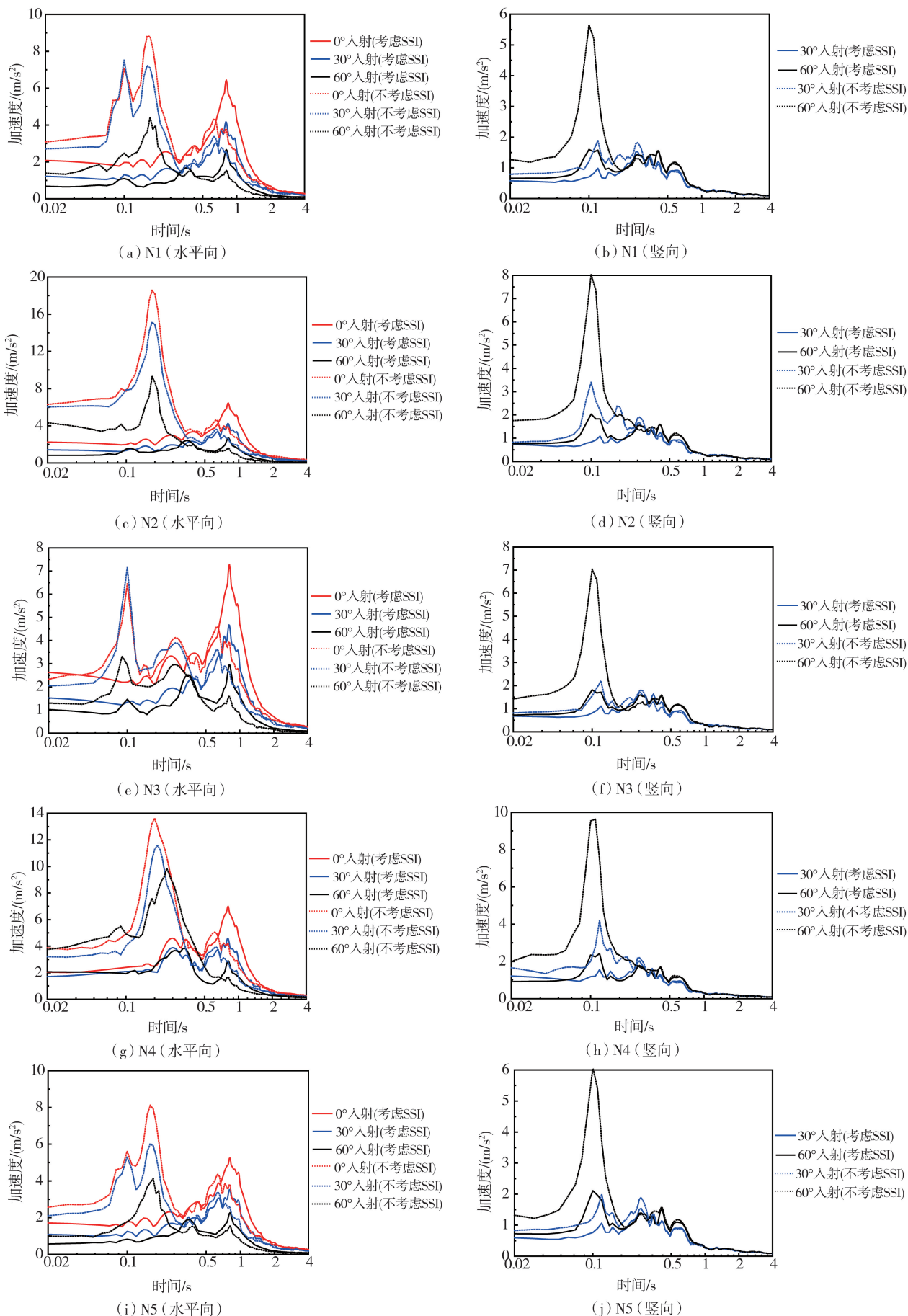
2 种地震波垂直入射时,考虑 SSI 得到的楼层峰值相对位移都要大于不考虑 SSI 的峰值相对位移。但对于斜入射,2 种地震波导致的位移响应规律存在一定差异,采用 El Centro 波斜入射时出现了中下部楼层考虑 SSI 的峰值相对位移小于不考虑 SSI 的情况,而采用人工波斜入射时所有楼层考虑 SSI 的峰值相对位移均小于不考虑 SSI 的响应。

3.3 加速度反应谱分析

图 17 和图 18 分别给出了 2 种地震波入射时,N1~N6 的水平向和竖向加速度反应谱。由图 17 和图 18 可知,无论是否考虑 SSI,采用人工波入射时,6 个参考点的水平向加速度谱值都大于 El Centro 波入射的谱值。说明采用人工波入射时,核电结构的水平向加速度响应都更剧烈。

观察 6 个参考点的加速度反应谱,可以看出在考虑 SSI 时,水平向加速度谱值在地震波垂直入射时最大,且谱值随着入射角度的增大而减小,竖向加速度谱值则随着入射角的增大而增大。采用 El Centro 波入射时,6 个参考点考虑 SSI 时的竖向加速度谱峰值都要小于不考虑 SSI 的谱峰值,水平向加速度谱峰值在 N3 处出现了考虑 SSI 时大于不考虑 SSI 的异常结果,而其他点均遵循考虑 SSI 的谱峰值更小的规律。处在相同

高度处的 N2 和 N6 没有出现这种现象,这是因为 N3 位于壳壁开孔侧缘处,应力集中使其水平向加速度响应与相同高度楼层结构的响应有所不同。



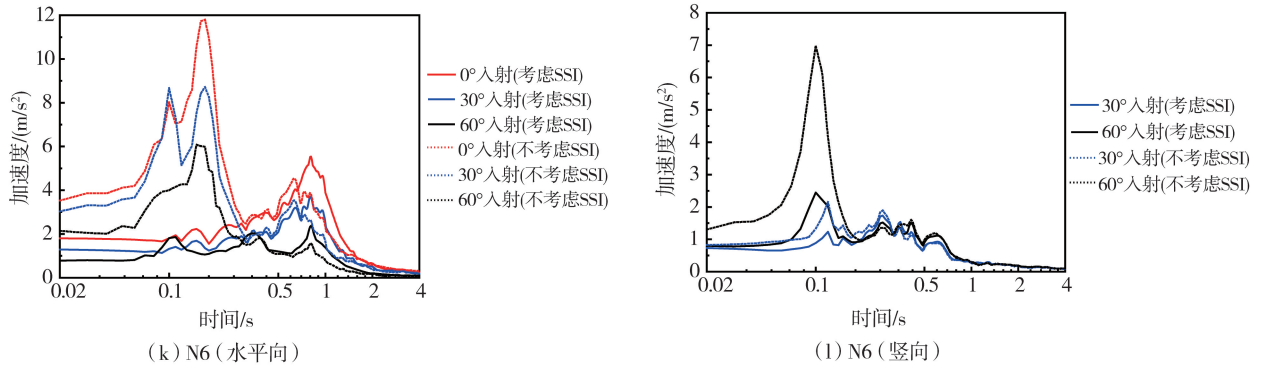
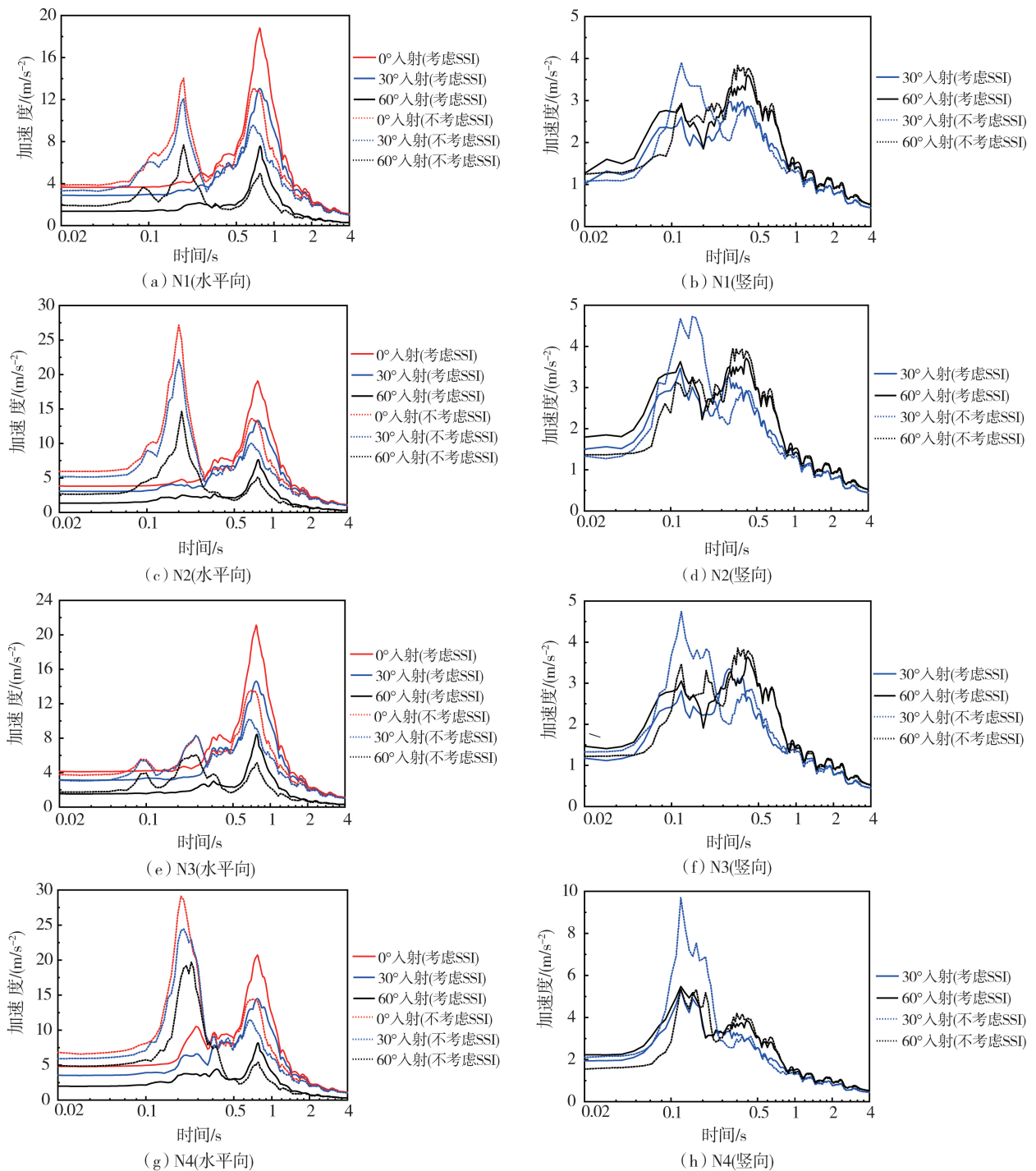


图 17 输入 El Centro 波时结构加速度反应谱

Fig. 17 Structural acceleration response spectrum when El Centro wave is input



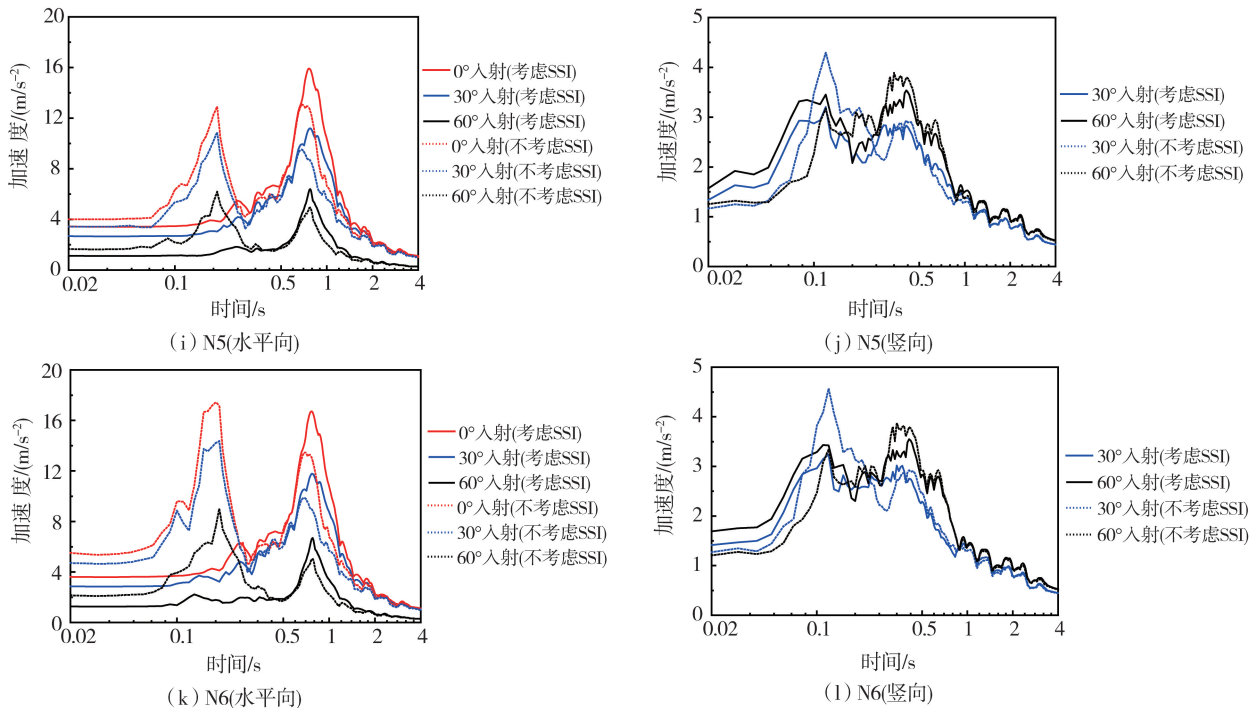


图 18 输入人工波时结构加速度反应谱

Fig. 18 Structural acceleration response spectrum when artificial wave is input

采用人工波入射时,相比不考虑 SSI,6 个参考点考虑 SSI 的竖向加速度谱峰值都略有减小,但减小的幅度没有输入 El Centro 波时明显,谱曲线整体也较为接近,而水平向加速度谱峰值在 3 种地震波入射角度下都有参考点出现了考虑 SSI 时谱峰值更大的情况。这体现了对于竖向加速度,SSI 对 2 种地震波输入时的结构响应都有抑制作用且 El Centro 波输入时效应更强;对于水平向加速度,SSI 对 El Centro 波输入时整体有明显抑制作用,但对人工波输入时可能出现抑制作用也可能出现放大作用。

对于水平向加速度反应谱,当采用 El Centro 波入射时,考虑 SSI 时反应谱主峰值出现在周期 0.81 s 附近,不考虑 SSI 时峰值在 0.17 s 附近;当采用人工波入射时,考虑 SSI 时峰值出现在 0.77 s 附近,不考虑 SSI 时出现在 0.19 s 附近。可见 SSI 会大幅影响振动频率特性,考虑 SSI 时水平加速度主峰值对应周期接近场地的第 1 阶水平平动自振周期 0.85 s,不考虑 SSI 时水平加速度主峰值对应周期接近核电上部结构的第 1 阶水平平动自振周期 0.23 s。不考虑 SSI 时,采用 El Centro 波输入,N3 处主峰值对应周期为 0.10 s,相较于其他参考点出现较大偏移;采用人工波输入时,N3 主峰值周期达到了 0.69 s,相较于其他参考点出现了主峰和次峰互换的情况。因此在不考虑 SSI 时,结构特殊位置如刚度突变、几何突变处,更容易出现相较于其他部位的异常响应,导致结构在地震作用下出现薄弱位置。

对于竖向加速度反应谱,无论是否考虑 SSI,整体而言相较于水平加速度反应谱更加平滑。特别是采用人工波时,除位置较高的 N4 点外,反应谱没有明显尖锐的主峰,是否考虑 SSI 两者的曲线峰值也较为接近。无论是水平向加速度反应谱还是竖向加速度反应谱,考虑 SSI 均会使反应谱的短周期成分减小,长周期成分增大,谱峰值右移。

地震波入射角的变化也会略微影响加速度反应谱主峰的位置。随着入射角度的增加,水平向加速度反应谱峰向长周期方向偏移,竖向加速度反应谱峰向短周期方向偏移。参考点位置越高,该规律越明显。

参考点 N1 和 N5,N2 和 N6 各处于大约同一高度,对照它们的水平向加速度反应谱可以看出 N1 处的水平向加速度响应明显大于 N5,N2 处的响应明显大于 N6。这是该核电结构特性导致的,N1 和 N2 位于反应堆厂房内部,振动由筏基传至内壳底板,再往上由半开放式结构传至参考点;而 N5 和 N6 位于安全厂房,振动由筏基通过墙体和楼板传播至参考点处,2 条不同振动传播路径的传递函数有所差异。

4 结论

针对我国某非基岩场地拟建“华龙一号”核电结构,采用通用有限元软件 ABAQUS 建立了场地-桩筏基

础-核电结构三维整体模型,开展了多种地震波入射工况下的数值仿真模拟,对比了不同输入工况核电结构地震响应的差异,并着重分析了入射角度及 SSI 对结构响应的影响,得到了如下结论:

1) 随着地震波入射角度的增大,考虑 SSI 时,结构水平向加速度和相对位移响应均减小,竖向加速度响应增大;而不考虑 SSI 时,安全壳外壳中上部位置会出现水平向加速度随之增大,竖向加速度减小的现象,结构相对位移出现地震波垂直入射时响应整体小于斜入射的情况。

2) 大部分情况下,考虑 SSI 时安全壳加速度响应显著小于不考虑 SSI 时的响应,即不考虑 SSI 分析结构的地震加速度响应通常是偏于保守的。但在某些地震波斜入射情况下,考虑 SSI 时局部结构的加速度响应反而更大,应当充分考虑不同地震波和不同入射角时 SSI 可能对结构地震响应产生的不利影响。

3) 地震波入射角度对结构加速度反应谱特征影响较小,且结构所处位置越高影响越明显。SSI 则会显著改变结构加速度反应谱,使反应谱的短周期成分减小,长周期成分增大,谱峰值右移。

4) 分别采用幅值相同的 2 种地震波输入,结构地震响应存在很大差异,整体而言人工波输入时结构响应更大。且场地会明显放大输入地震波,地震波垂直入射时安全壳底部峰值加速度放大系数最大可达 3.6。

参考文献:

- [1] 李萍, 杨红义, 刘琳, 等. “碳中和”目标下中国核电发展[J]. 节能技术, 2023, 41(1): 10-15.
LI Ping, YANG Hongyi, LIU Lin, et al. Development of nuclear power in China under carbon neutrality target [J]. Energy Conservation Technology, 2023, 41(1): 10-15. (in Chinese)
- [2] 黄海华. 新形势下的沿海核电厂址选择[J]. 南方能源建设, 2019, 6(1): 71-75.
HUANG Haihua. Selection of coastal nuclear power plants under current situation [J]. Southern Energy Construction, 2019, 6(1): 71-75. (in Chinese)
- [3] GAN B S, NGUYEN D K, HAN A L. Dynamic response of AP1000 nuclear island due to safe shutdown earthquake loading [J]. MATEC Web of Conferences, 2017, 138: 02008.
- [4] TUÑÓN-SANJUR L, ORR R S, TINIC S, 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(12/13): 1474-1485.
- [5] FARAHANI R V, DESSALEGN T M, VAIDYA N R, et al. Seismic soil-structure interaction analysis of a nuclear power plant building founded on soil and in degraded concrete stiffness condition [J]. Nuclear Engineering and Design, 2016, 297: 320-326.
- [6] LUO C, YANG X, ZHAN C B, 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.
- [7] 沈亮, 于跃, 马英. 不同地基条件下不同埋置方法对核岛厂房地震动力响应的分析 [J]. 建筑结构, 2022, 52(增刊 1): 2387-2390.
SHEN Liang, YU Yue, MA Ying. Analysis of the influence of different embedding methods on the seismic dynamic response of nuclear island building under different foundation conditions [J]. Building Structure, 2022, 52(Sup. 1): 2387-2390. (in Chinese)
- [8] 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 Shengdong, CHEN Guoxing, JIANG Pengcheng, 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)
- [9] 朱升冬, 陈国兴, 陈炜昀, 等. 考虑土体非线性的核岛结构桩基础三维地震反应特性 [J]. 土木工程学报, 2023, 56(11): 124-136.
ZHU Shengdong, CHEN Guoxing, CHEN Weiyun, et al. 3D seismic response characteristics of piles of a nuclear island building considering nonlinearity of soil [J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(11): 124-136. (in Chinese)
- [10] 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. (in Chinese)
- [11] 汪刚, 景立平, 王友刚, 等. 土性对土-桩-核岛结构动力相互作用影响的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(11): 2353-2364.
WANG Gang, JING Liping, WANG Yougang, et al. Experimental study on the influence of soil properties on seismic-soil-pile-nuclear island structure interaction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(11): 2353-2364. (in Chinese)
- [12] 李小军, 王晓辉, 贺秋梅, 等. 非基岩核电厂结构地震响应振动台试验研究 [J]. 核动力工程, 2017, 38(4): 31-35.
LI Xiaojun, WANG Xiaohui, HE Qiumei, et al. Shaking table test for evaluation of seismic behavior of nuclear power plants on non-rock site [J]. Nuclear Power Engineering, 2017, 38(4): 31-35. (in Chinese)
- [13] 宗娟. 地震波空间斜入射时核电结构土-结动力相互作用分析 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
ZONG Juan. Soil-Structure interaction analysis of nuclear reactor structure subjected to obliquely incident seismic wave [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
- [14] 张奎, 夏佩林, 李伟华, 等. 斜入射水下地基地震输入的一维化时域方法 [J]. 工程力学, 2019, 36(11): 91-101.
ZHANG Kui, XIA Peilin, LI Weihua, et al. 1d time-domain method for 2d wave motion in underwater site with obliquely incident plane wave [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(11): 91-101. (in Chinese)

- [15] CHEN D H, PAN Z Y, ZHAO Y Y. Seismic damage characteristics of high arch dams under oblique incidence of SV waves[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, 152: 107445.
- [16] 赵密, 王鑫, 钟紫蓝, 等. P波斜入射下非基岩场地中核岛结构地震响应规律研究[J]. *工程力学*, 2020, 37(12): 43-51, 77.
ZHAO Mi, WANG Xin, ZHONG Zilan, et al. Study on seismic responses of nuclear island structure in non-bedrock site under obliquely-incidence of P waves[J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(12): 43-51, 77. (in Chinese)
- [17] GB 50267—2019 核电厂抗震设计标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
GB 50267—2019 Standard for seismic design of nuclear power plants[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)
- [18] 渠亚卿. 强震下核岛厂房地震反应及易损性分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
QU Yaqing. Seismic response subjected to strong earthquakes and fragility analysis of nuclear island [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [19] KUHLEMEYER L, LYSMER J. Finite element method accuracy for wave propagation problems [J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1973, 99(5): 421-427.
- [20] 刘晶波, 李彬. 三维黏弹性静-动力统一人工边界[J]. *中国科学 E 辑: 工程科学 材料科学*, 2005(9): 72-86.
LIU Jingbo, LI Bing. Three-dimensional viscoelastic static and dynamic unified artificial boundary[J]. *Science in China Ser. E: Engineering & Materials Science*, 2005(9): 72-86. (in Chinese)
- [21] 梁建文, 巴振宁. 三维层状场地的精确动力刚度矩阵及格林函数[J]. *地震工程与工程振动*, 2007, 27(5): 7-17.
LIANG Jianwen, BA Zhenning. Exact dynamic stiffness matrices of 3-D layered site and its Green's functions[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2007, 27(5): 7-17. (in Chinese)
- [22] 刘晶波, 谭辉, 宝鑫, 等. 土-结构动力相互作用分析中基于人工边界子结构的地震波动输入方法[J]. *力学学报*, 2018, 50(1): 32-43.
LIU Jingbo, TAN Hui, BAO Xin, et al. The seismic wave input method for soil-structure dynamic interaction analysis based on the substructure of artificial boundaries[J]. *Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, 50(1): 32-43. (in Chinese)
- [23] 李述涛, 刘晶波, 宝鑫, 等. 人工边界子结构地震动输入方法在 ABAQUS 中的实现[J]. *自然灾害学报*, 2020, 29(4): 133-141.
LI Shutao, LIU Jingbo, BAO Xin, et al. Implementation for seismic wave input method based on the artificial boundary substructure in ABAQUS[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2020, 29(4): 133-141. (in Chinese)