

尹训强,滕浩钧,王桂萱.复杂地基条件下桩-土-核岛结构相互作用模型研究[J].地震工程学报,2019,41(6):1581-1586.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1581

YIN Xunqiang, TENG Haojun, WANG Guixuan. A Model for Pile-Soil-Nuclear Island Structural Interaction under Complex Foundation Conditions[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(6): 1581-1586. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1581

# 复杂地基条件下桩-土-核岛结构相互作用模型研究

尹训强, 滕浩钧, 王桂萱

(大连大学 土木工程技术与开发中心, 辽宁 大连 116622)

**摘要:** 合理有效地模拟桩-土-结构动力相互作用是软土地基条件下核岛厂房结构抗震适应性分析及地基处理的关键环节。以某拟建核岛厂房实际工程为研究背景,结合 SuperFLUSH 软件平台,以 Goodman 单元模拟桩与桩周土间的接触效应,采用等价线性法描述近场软土地基非线性特性,并在模型底部和侧面引入黏性边界模拟半无限地基辐射阻尼效应,从而建立土质地基条件下桩-土-核岛结构相互作用分析模型。进而,通过对原状地基和嵌岩桩处理地基条件下核岛厂房的楼层反应谱、结构节点相对位移(绝对值)的对比分析,探讨考虑桩-土间接接触效应的嵌岩桩基对核岛厂房结构的影响规律。研究成果可为实际工程中类似土质地基条件下核岛厂房结构的地基处理提供参考。

**关键词:** 接触效应; Goodman 单元; 软土地基; 黏性边界; 等价线性法; 桩-土-结构动力相互作用

**中图分类号:** TU431

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0844(2019)06-1581-07

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1581

## A Model for Pile-Soil-Nuclear Island Structural Interaction under Complex Foundation Conditions

YIN Xunqiang, TENG Haojun, WANG Guixuan

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

**Abstract:** Reasonably and effectively simulating pile-soil-structure dynamic interaction is important in the seismic response analysis and foundation treatment of the nuclear island building over soft ground conditions. In this paper, based on the actual project of a proposed nuclear island plant, the contact effect between the pile and soil around the pile was simulated with the Goodman element, and the nonlinear characteristics of the near-field soft soil foundation are described by equivalent linear method. At the bottom and side of the model, the viscous boundary was introduced to simulate the radiation damping effect of the semi-infinite ground, so that the analysis model for the pile-soil-nuclear island structure interaction was established under the condition of the soil foundation. Furthermore, by comparing and analyzing the floor response spectrum and relative displacement (absolute value) of structure nodes under conditions of the original founda-

**收稿日期:** 2018-05-06

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51678100, U1839202); 大连大学优秀青年博士专项基金项目(2015YBL010)

**第一作者简介:** 尹训强(1986-), 男, 山东泰安人, 博士, 讲师, 从事结构动力分析研究。E-mail: yinxunqiang@dlu.edu.cn.

tion and rock-socketed pile foundation, respectively, the influence of the rock-socketed pile foundation, considering the contact effect between the pile and soil on the nuclear island building, was analyzed. The results can provide some reference for the foundation treatment of nuclear island structures under similar soil foundations in practical engineering.

**Keywords:** contact effect; Goodman element; soft soil foundation; viscous boundary; equivalent linear method; pile-soil-structure dynamic interaction

## 0 引言

核电作为新兴清洁能源,得到快速发展。增长迅速的核电产业由于沿海厂址的日益减少,使得向内陆地区软土地基上建设核电厂房成为可能<sup>[1-3]</sup>。然而,强震作用下土体的动本构关系呈非线性,动力分析较为复杂,如何使得软土地基上核岛厂房结构的抗震适应性满足相关规范要求,已成为亟需解决的关键技术问题。由于桩基础适应性强,抗震性能好,成为土质地基处理的首选,因此,建立合理高效的桩-土-结构相互作用模型是获得复杂土质地基处理方案及其对结构地震响应影响的一项重要工作。

相比摩擦桩,嵌岩桩具有单桩承载能力高、差异变形小、横向刚度大等特点,更适用于核电厂房软土地基处理。目前,国内外学者对桩-土-结构相互作用模型进行了大量研究。然而,在复杂地基条件下土的非线性对群桩效应与桩-土间的接触效应等问题还存在诸多限制。王辉等<sup>[4]</sup>采用整体分析法建立桩-土-结构相互作用模型,并利用接触单元模拟桩-土的接触效应,但其仅对均匀土层地基进行了计算,未考虑复杂地基对群桩相互作用的影响。徐章洁等<sup>[5]</sup>基于 ANSYS 建立了桩-土相互作用有限元模型,利用 Goodman 单元模拟桩与桩周土间的接触效应,但是只针对单桩情况下的接触作用进行了研究,没有考虑群桩的情况。李伟鑫等<sup>[6]</sup>在对地震作用下桩-土-结构的响应分析中,考虑了群桩效应和地基土的非线性特性,用黏性边界来模拟无限地基的辐射效应,但并未考虑桩-土间的摩擦效应。

针对上述问题,本文以某 CPR1000 核电实际工程为背景,考虑桩-土间接触效应、近场软土地基非线性动力特性以及半无限地基辐射阻尼效应等因素,建立复杂土质地基条件下桩-土-核岛厂房结构相互作用分析模型,探讨原状地基和嵌岩桩处理地基条件下核岛厂房的地震响应规律。

## 1 桩-土-核岛结构动力相互作用模型

如图 1 所示,复杂土质地基条件下桩-土-核岛厂房结构相互作用分析模型主要包括核岛厂房结

构、近场地基(考虑非线性特性)以及黏性人工边界模型组成。该模型各关键技术部分如下所述:

### 1.1 黏性人工边界场地模型

实际工程中的地基是一个半无限体,由于数值计算的局限性,采用由 Lsyrer 等<sup>[7]</sup>提出的黏性人工边界反映远场地基辐射阻尼效应。如图 1 所示,外边界反射波由设置的阻尼器来吸收,边界应力条件则通过施加等效荷载力  $P$  来满足。具体公式可参见文献<sup>[8]</sup>。值得注意的是,非均质地基的地震动输入首先需进行自由场分析,得到截断边界处的响应后再通过等效荷载输入。实际工程中远场土层一般简化为层状地基,地表的地震波类似于垂直入射,因而本文将采用一维剪切谐波理论进行土层地震反应分析,获得各土层处的运动向量,使其作为人工边界模型的输入。

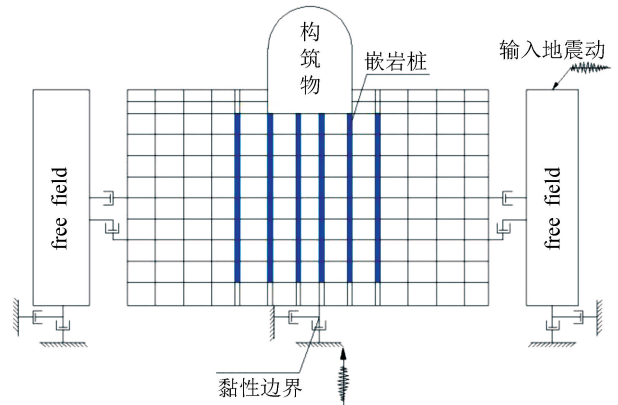


图 1 复杂土质地基条件下桩-土-核岛结构相互作用分析模型

Fig.1 A model for pile-soil-nuclear island structural interaction under complex foundation condition

### 1.2 土质非线性模型

所建立模型采用等价线性法<sup>[9]</sup>来模拟强震作用下土体非线性特征,该方法是目前核电抗震分析软件中采用的主流方法。等价线性法是通过线性等效迭代的思想解决土体的非线性问题,在每次的迭代动力分析中剪切模量  $G$  和阻尼比  $D$  保持常数,通过求出当前迭代步的等效剪应变  $r_{eff}$ ,并依据  $G-r$  和  $D-r$  曲线得到下一迭代分析的剪切模量  $G$  和阻尼

比  $D$ ,直到土体的动力参数达到误差允许范围内。根据工程经验,迭代 3~5 次即可得到较好的收敛效果。其计算流程如图 2 所示。

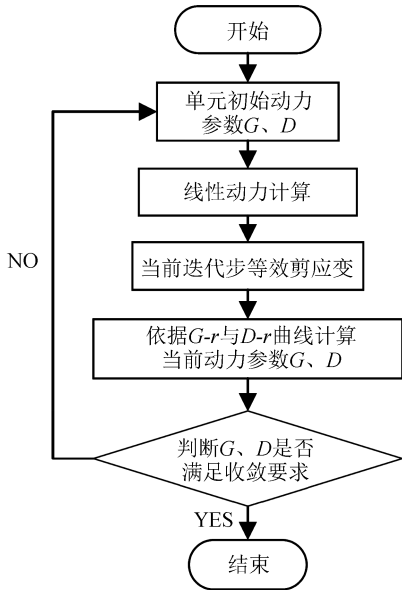


图 2 等价线性模型计算流程图

Fig.2 Calculation flow chart of the equivalent linear model

### 1.3 桩-土动力相互作用模型

以 SuperFLUSH 软件为计算平台,根据国内外现有应用经验<sup>[10-12]</sup>,采用拟三维动力分析方法模拟桩-土动力相互作用。基于拟三维等效刚度简化原则,将三维群桩地基模型等效简化为两平面模型。如图 3 所示,分别沿 X 轴和 Y 轴将嵌岩桩投影到 X-Z 平面或 Y-Z 平面,然后将三维桩间距内的嵌岩桩简化为二维平面内的一根等效桩,简化后嵌岩桩的截面积和惯性矩根据式(1)得到。

$$S_{en} = S \times n / b_n \rho; I_n = I \times n / b_n \quad (1)$$

其中: $S_{en}$ 和  $I_{en}$ 分别为等效桩的截面积和惯性矩; $n$ 为该嵌岩桩简化前的根数; $b_n$ 为该等效桩在沿  $x$  轴或  $y$  轴方向上对应的筏板宽度。

实际工程中混凝土材料与土体性质相差较大,在地震作用下,当应力状态超过一定的限制时,桩基和土体位移不连续,从而导致桩-土的接触面上出现错动或者脱离现象。为合理模拟桩-土间的变形特性,需要考虑两者间的接触效应。建立模型中采用 Goodman 接触单元来模拟桩-土间接触面的变形特性。如图 4 所示,Goodman 单元由两个长度为  $L$  的接触面 1-2 和 3-4 构成,且假定两接触面之间由无数切向和法向的小弹簧相联系。未受力时上下接触面重合,即 Goodman 单元只有长度没有薄厚,是一维单元。它可以较好地模拟接触面位移的不连续性。

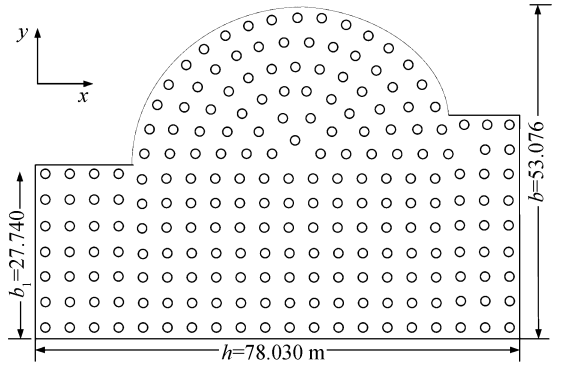


图 3 嵌岩桩平面布置图

Fig.3 Plan layout of rock-socketed piles

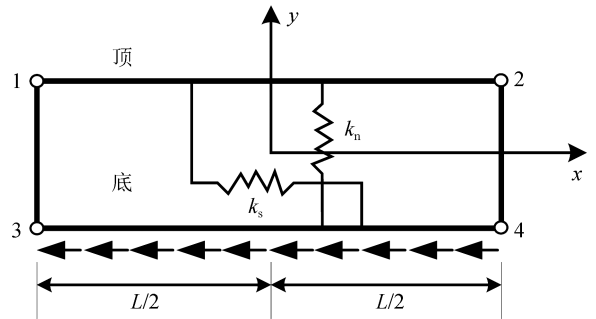


图 4 二维 Goodman 单元模型

Fig.4 2D Goodman element model

## 2 核岛厂房结构地震响应分析

基于上述所建立的模型,以拟建某软土地基上 CPR1000 核岛厂房为背景,进行地震作用下核岛厂房结构-土地基动力相互作用计算,对不同工况条件下核岛厂房结构的动力响应进行对比分析。

### 2.1 地基模型及参数

核岛厂房地基为水平成层软土地基,由不同的黏土、砂土等组成,共 8 层,水平成层明显,各分层厚度  $h$ 、动剪模量  $G$ 、泊松比  $\gamma$ 、密度  $\rho$  及阻尼比  $D$  如表 1 所列。各土层的  $G-r$  和  $D-r$  关系曲线由动三轴试验获得,如图 5 所示。

由工程实际和规范计算地基承载力可得,嵌岩桩的布置和筏板基础尺寸如图 3 所示,其中,嵌岩桩嵌入玄武岩 2 m,筏板基础长度为  $h=78.03$  m,宽度为  $b=53.07$  m。因而, $X-Z$  和  $Y-Z$  两平面方向的地基模拟范围向两侧各延伸  $1.5h$  和  $1.5b$ ,深度取 51 m,并采用四节点平面等参元离散,网格密度可保证每个波长内有 4~8 个节点,所建立桩-土-核岛动力相互作用计算模型如图 6 所示。对于桩土相互作用中 Goodman 接触单元的相关参数参考文献<sup>[13]</sup>。

表 1 地基计算参数

Table 1 Calculation parameters of the foundation soil

岩性	土层编号	厚度 /m	动剪模量 /GPa	泊松比	密度 /( $g \cdot cm^{-3}$ )	阻尼比 /%
粉质黏土	①	5	0.02	0.50	1.95	3.9
粉砂	②	7	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			6.04	0.28	2.45	2.81

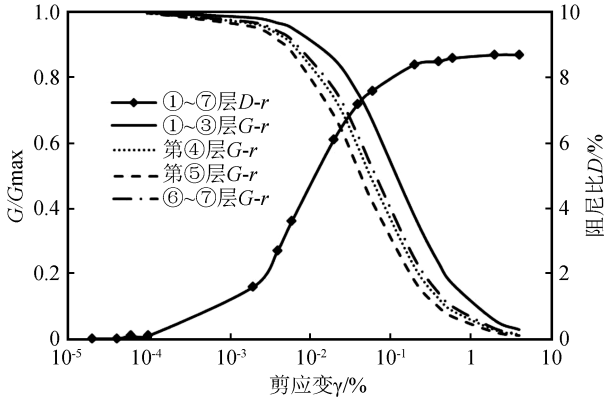


图 5 各土层的  $G-\gamma$  和  $D-\gamma$  关系曲线

Fig.5 Relation curves of  $G-\gamma$  and  $D-\gamma$  for each soil

2.2 核岛结构模型及参数

CPR1000 反应堆厂房主要是由内部结构、安全壳结构和筏板基础组成,且根据相关资料,两结构共用筏板基础。依据等刚度、等质量的简化原则,将结构质量和转动惯量均集中在相应的质量节点上,质量节点之间由梁单元连接,且质量节点间的惯性矩和剪切面积由连接两节点的梁单元模拟,反应堆在平面上即 X 和 Y 向是对称的。反应堆质量节点-梁单元模型如图 6 所示。其中数字 1~12 分别表示各质量点,编号①~⑪分别表示梁单元。各楼层其他参数信息见文献[14]。

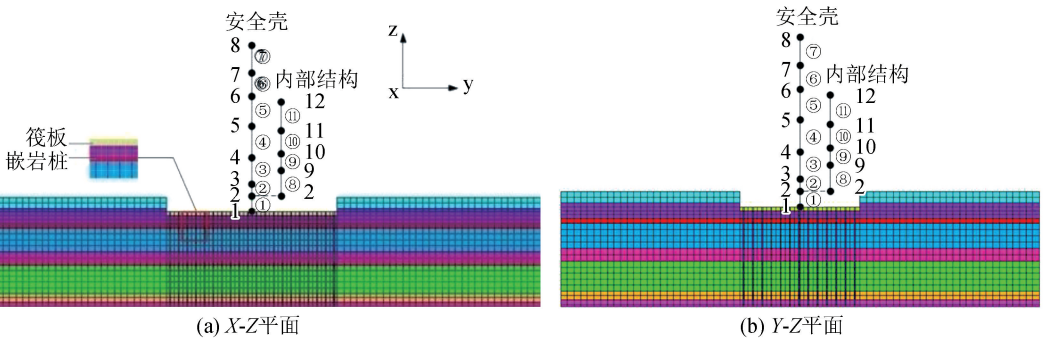


图 6 桩-土-核岛动力相互作用等效简化计算模型

Fig.6 An equivalent simplified model for the pile-soil-nuclear island dynamic interaction

2.3 输入地震动

依据该核电厂地震安评报告,输入地震动加速

度时程曲线如图 7 所示,水平向峰值加速度为  $1.078 m/s^2$ , 竖向向峰值加速度为  $1.176 m/s^2$ , 总持时

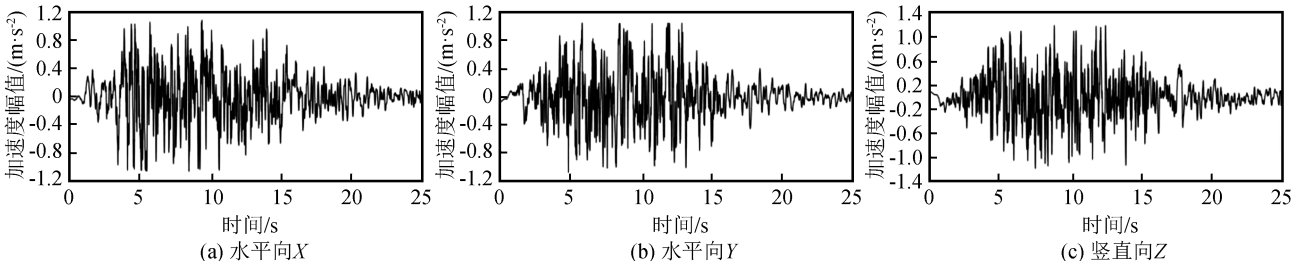


图 7 输入地震动加速度时程曲线

Fig.7 Acceleration time-history curves of the input ground motions

25 s,时间步长 0.01 s。

### 2.4 核岛地震响应分析

为方便进行对比分析,本文通过 3 种工况进行动力计算:工况 1 为原状软土地基;工况 2 为未考虑接触效应嵌岩桩基处理地基;工况 3 为考虑接触效

应的嵌岩桩处理地基。

分别选取具有一定包络及代表性结构最高点,安全壳结构(节点 8)和内部结构(节点 12),对比不同工况条件下 5% 阻尼比楼层加速度反应谱,如图 8~图 9 所示。

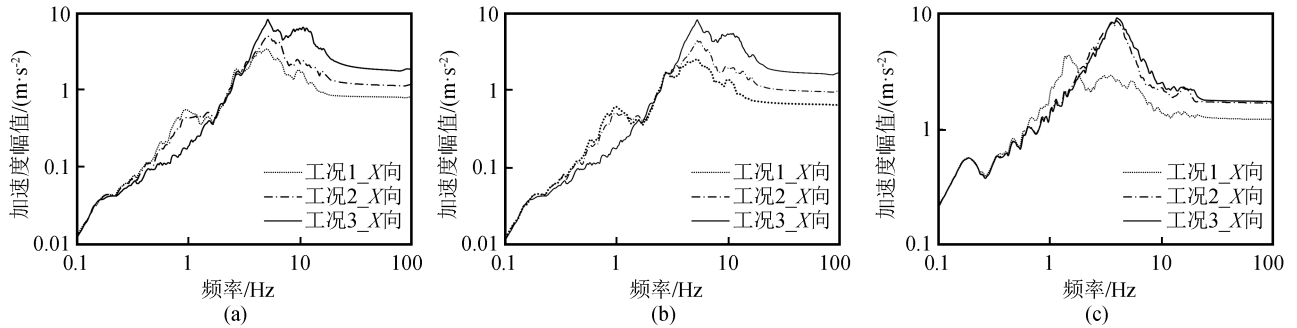


图 8 不同工况条件下节点 12 的加速度反应谱对比曲线

Fig.8 Comparison of acceleration response spectra for node 12 under different operating conditions

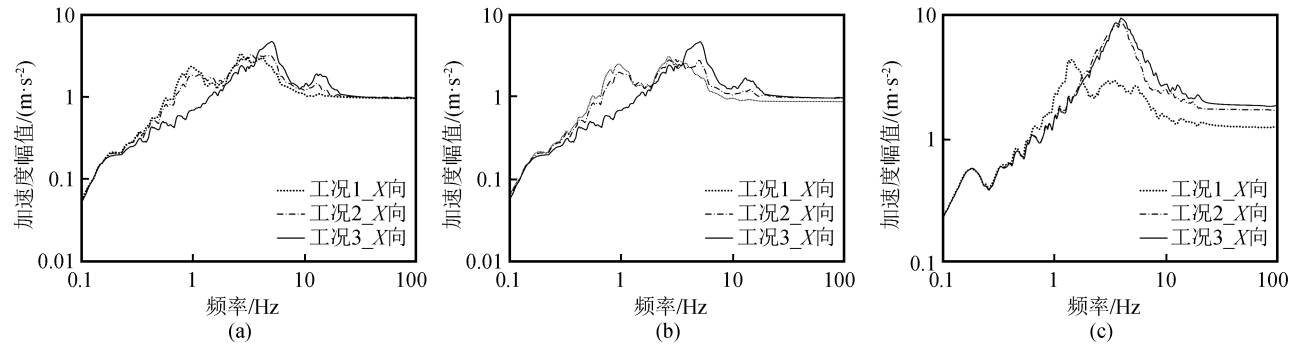


图 9 不同工况条件下节点 8 的加速度反应谱对比曲线

Fig.9 Comparison of acceleration response spectra for node 8 under different operating conditions

对比工况 1 和 2 下桩-土相互作用的影响,节点 12 和节点 8 的响应随高程的增加而增大,且各点的加速度反应谱曲线在同一方向的变化趋势基本相似。在水平向,工况 2 的低频段 $[0.1, 0.96]$ Hz 范围内,反应谱值均在工况 1 包络范围内,而在区段 $[4.9, 100]$ Hz 内,工况 1 的反应谱峰值加速度均小于工况 2 的峰值加速度,其反应谱值也在工况 2 包络范围内。在竖直向的变化规律基本类似。这是因为使用嵌岩桩进行软土地基的处理,使得地基的刚度增大,导致结构节点加速度反应谱在低频段有显著的削弱作用,而在高频段桩基处理地基条件对地震动信号有一定的放大作用,且相对于高频段,低频段的峰值下降趋势更为明显。

对比工况 2 和 3 桩-土接触效应的影响,在水平向,桩与桩周土间的接触效应对于桩-土相互作用的影响相较于竖直向更大。水平 X 向中,两节点在工况 2 的最大加速度峰值分别为  $5.08 \text{ m/s}^2$  和  $3.28$

$\text{m/s}^2$ ,工况 3 的最大加速度峰值分别为  $8.18 \text{ m/s}^2$  和  $4.69 \text{ m/s}^2$ ,节点 12 和节点 8 的最大增幅分别为 61% 和 43%;水平 Y 向中,工况 2 的最大加速度峰值分别为  $4.25 \text{ m/s}^2$  和  $2.90 \text{ m/s}^2$ ,工况 3 的最大加速度峰值分别为  $8.09 \text{ m/s}^2$  和  $4.12 \text{ m/s}^2$ ,节点 12 和节点 8 的最大增幅分别为 90% 和 42%;竖直 Z 向中,工况 2 的最大加速度峰值分别为  $8.63 \text{ m/s}^2$  和  $8.81 \text{ m/s}^2$ ,工况 3 的最大加速度峰值分别为  $9.24 \text{ m/s}^2$  和  $9.44 \text{ m/s}^2$ ,两节点最大增幅分别为 9.2% 和 7.15%。这是由于使用 Goodman 单元模拟桩-土相互作用的接触效应后,桩-土间的不耦合以及位移不连续,从而导致地基的刚度有所降低,工况 3 反应谱的变化趋势与工况 2 基本类似。

此外,如图 10 所示对比了在工况 2 和 3 条件下两节点的相对变形(绝对值)峰值时刻附近的时程曲线。不难发现,两节点在水平向 X 相对变形的变化趋势基本类似,并且相对变形峰值所发生的时刻基

本相同,节点12水平向X的相对变形最大值发生在5.63 s,且峰值为3.53 mm,节点8水平向X的相对变形最大值发生在5.66 s,且峰值为12.3 mm。

水平向Y的变化规律与水平X向基本类似,只是幅值有一定的差异,由于嵌岩桩的入岩,在竖向Z的变化规律及变化幅值均基本一致。

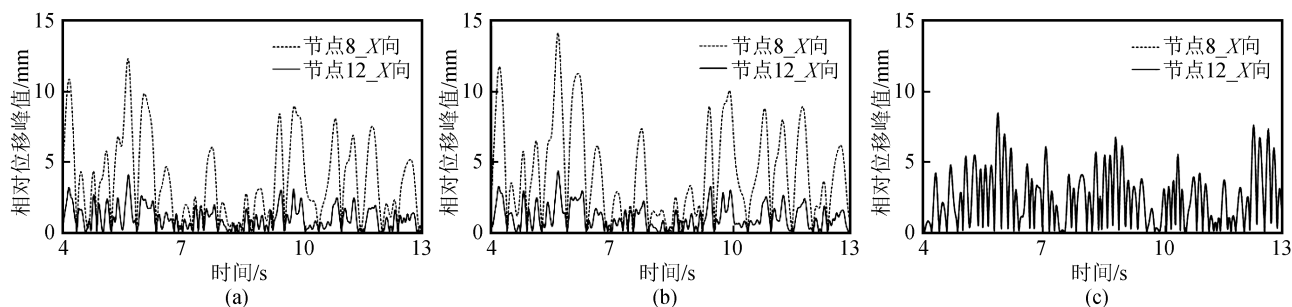


图10 结构不同节点位移差(绝对值)分布图

Fig.10 Distribution of displacement difference (absolute value) for different nodes on the structure

上述结果表明,桩-土间的接触效应对结构的沉降有一定影响,接触效应可模拟桩-土间的位移不协调,能较为实际的反映接触界面的滑移和分离,基础的平动与转动增大,从而增加了核岛厂房结构的位移,尤其是顶部节点的位移变化幅值更为显著。

### 3 结论

基于所建立的复杂地基条件下桩-土-核岛结构相互作用数值模型,对CPR1000反应堆厂房进行了不同工况条件的地震响应分析,可得出以下结论:

(1) 考虑桩-土-结构相互作用、软土地基非线性特征以及桩-土接触效应,并将三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) 软土地基在进行桩基处理后,可有效降低加速度反应谱低频段的谱值,同时,高频段的谱值也有明显的放大效应。

(3) 在软土地基条件下,考虑桩-土接触效应对核岛的响应(反应谱及相对变形)都有一定程度的影响。

### 参考文献(References)

[1] 赵小辉,邹树梁,刘永.内陆核电发展形势分析[J].南华大学学报(社会科学版)2012,13(3):1-7.  
ZHAO Xiaohui, ZOU Shuliang, LIU Yong. Analysis of Inland Nuclear Power Development Situation[J]. Journal of Nanhua University (Social Science Edition), 2012, 13(3): 1-7.

[2] 叶奇蓁.后福岛时期我国核电的发展[J].中国电机工程学报, 2012, 32(11): 1-8.  
YE Qizhen. China's Nuclear Power Development After Fukushima Nuclear Power Plant Accident [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(11): 1-8.

[3] 孔宪京,林皋.核电厂工程结构抗震研究进展[J].中国工程科

学, 2013, 4: 62-74.

KONG Xianjing, LIN Gao. Research Advances on Engineering Structural Seismic Safety of Nuclear Power Plant [J].

, 2013, 4: 62-74.

[4] 王辉.桩-土-结构相互作用三维数值模拟[D].哈尔滨,哈尔滨工业大学,2006.

WANG Hui. Three-Dimensional Numerical Simulation of Pile-soil-structure Interaction [D]. Harbin, Harbin Institute of Technology, 2006.

[5] 徐章洁.考虑接触效应的高层建筑桩-土相互作用分析[D].北京,北京交通大学,2008.

XU Zhangjie. Analysis on Pile-soil Interaction of High-rise Building Considering Contact Effect [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.

[6] 李伟鑫,尹训强,王桂莹.考虑桩-土-结构动力相互作用的土质地基条件下核岛厂房地震响应分析[J].地震研究, 2016, 39(1): 40-46.

LI Weixin, YIN Xunqiang, WANG Guixuan. Seismic Response Analysis of Nuclear Power Plant on Soil Foundation Considering Pile-soil-structure Dynamic Interaction [J]. Journal of Seismological Research, 2016, 39(1): 40-46.

[7] LYSMER J, KUHLEMEYER R. Finite Dynamic Model for Infinite Media [J]. ASCE, J Eng Mech, 1969, 95(4): 859-877.

[8] 尹训强,金煜皓,王桂莹.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[J].岩土力学, 2017, 38(4): 1114-1120.

YIN Xunqiang, JIN Yuhao, WANG Guixuan. Seismic Response Analysis of Nuclear Island Buildings Considering Soil-structure Interaction and Nonlinear Soil Foundation [J]. Rock and Soil Foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(4): 1114-1120.

[9] 宋建希,李建波,林皋.层状场址自由场动力分析的等价线性法研究[J].地震研究, 2016, 39(1): 126-130.

SONG Jianxi, LI Jianbo, LIN Gao. Research on Equivalent Linearization Method for Free Field Dynamic Analysis of Layer Site [J]. Journal of Seismological Research, 2016, 39(1): 126-130.

- ment under Train Vibration Load[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [12] 高志华, 石坚, 张淑娟, 等. 高含冰量冻土动强度和残余应变的试验研究[J]. 冰川冻土, 2009, 31(6): 1143-1149.  
GAO Zhihua, SHI Jian, ZHANG Shujuan, et al. Experimental Study of the Dynamic Strength Characteristics and Residual Strain of Ice-Rich Frozen Soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(6): 1143-1149.
- [13] 田立慧, 凌贤长, 王立娜, 等. 青藏铁路高温多年冻土区列车行驶路基长期永久变形数值模拟研究[J]. 地震工程学报, 2014, 36(4): 850-856.  
TIAN Lihui, LING Xianchang, WANG Lina, et al. Numerical Simulation of Permanent Deformation of Embankment Induced by Train Load in Permafrost Regions along the Qinghai-Tibet Railway[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4): 850-856.
- [14] 赵淑萍, 朱元林, 何平, 等. 冻土动力学参数测试研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增刊 2): 2677-2681.  
ZHAO Shuping, ZHUYuanlin, HE Ping, et al. Testing Study on Dynamic Mechanics Parameters of Frozen Soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Supp2): 2677-2681.
- [15] 赵涛, 吴志坚, 梁庆国, 等. 青藏高速公路路基地震动力响应分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(12): 2381-2387.  
ZHAO Tao, WUZhijian, LIANG Qingguo, et al. Seis Mic Dyna Mic Response Analysis of e Mbankment along the Qinghai-Tibet Expressway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(12): 2381-2387.
- \*\*\*\*\*
- (上接第 1586 页)
- [10] 宇高竹和, 大島快仁. 2次元かいせき解析に基づいた地震時の擬似 3次元地盤安定評価法(その1)[C]//平成 20 年度土木学会全国大会第 63 回年次学術講演会講演概要集. 仙台: 土木学会, 2008: 617-618.  
Takehisa Ukaya, Kazuhito Oshima. Pseudo Three Dimensional Ground Stability Evaluation Method at the Time of Earthquake Based on Two Dimensional Analysis (Part 1)[C]//National Conference of the Society of Civil Engineers 2008 Heisei 63rd Annual Scientific Lecture Presentation summary. Sendai: JSCE, 2008: 617-618.
- [11] 大島快仁, 宇高竹和. 2次元かいせき解析に基づいた地震時の擬似 3次元地盤安定評価法(その2)[C]//平成 20 年度土木学会全国大会第 63 回年次学術講演会講演概要集. 仙台: 土木学会, 2008: 619-620.  
Okishima Jin, Ukaya Takeka. Pseudo Three Dimensional Ground Stability Evaluation Method at the Time of Earthquake Based on Two Dimensional Analysis (Part 2)[C]//The 63th Annual Scientific Lecture of the National Convention of the Society of Civil Engineers of Heisei 20th Sendai: Society of Civil Engineers, 2008: 619 - 620.
- [12] 尹训强, 薛志强, 王桂萱. 非岩性地基条件下核岛厂房拟三维地震分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(9): 111-116.  
YIN Xunqiang, XUE Zhiqiang, WANG Guixuan. Seismic Analysis of Pseudo Three Dimensional of Nuclear Island Plant Under Non-lithology Foundation Condition [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(9): 111-116.
- [13] 刘莹骏. 土-结构薄层接触单元的开发及其应用[D]. 大连, 大连理工大学, 2014.  
LIU Yingjun. Implementation and Application of Thin-Layer Solid Element for Soil-Structure Interaction [D], Dalian, Dalian University of Technology, 2014.
- [14] 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 Jianbo, LIN Gao, ZHU Xiuyun, 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.