

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*

李伟鑫, 尹训强✉, 王桂萱

(大连大学 土木工程技术研究与开发中心, 辽宁 大连 116622)

摘要: 在有限元框架内以全耦合方式考虑群桩效应的影响, 引入粘性人工边界模拟无限地基辐射阻尼效应, 并采用等效线性法模拟地基非线性特征, 建立了嵌岩桩-土-结构动力相互作用计算模型; 基于此模型, 以 CPR1000 核岛厂房结构为研究对象, 综合对比分析原状土质地基条件下和嵌岩桩处理地基条件下核岛厂房地震响应。研究结果可为类似地基条件下核岛厂房的抗震设计提供参考。

关键词: 软土地基; 嵌岩桩; 等价线性法; 桩-土-结构动力相互作用

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2016)01-0040-06

0 引言

随着对核能利用的不断增加, 核电产业快速发展, 厂址资源日趋紧张, 为满足核电快速发展的需求, 在内陆地区软土地基上建设核岛厂房成为发展趋势(戚承志, 钱七虎, 2000; 朱立新等, 2011; 赵小辉等, 2012)。然而, 软土在强震作用下的非线性特征效应明显, 动力分析较为复杂, 土质地基上核岛厂房结构的抗震适应性有时无法满足核电规范设计要求。而桩基处理是软土地基处理时行之有效的首选方案, 因此, 研究该复合地基条件下, 核岛厂房结构的动力响应具有重要的工程意义。

长期以来, 在桩-土-结构动力相互作用模型方面, 国内外学者(杨小卫, 2006; 王辉, 2006; 马文丽, 2004)进行了较多的研究工作, 并建立了相应的力学模型。但在描述无限地基辐射阻尼效应、土体非线性等因素的研究上还存在诸多限制。曹晓岩等(2004)从桩-土-结构在地震作用下的受力分析入手, 考虑平面应变假设, 用有限元法建立相互作用系统模型, 但在边界条件处理方面采用固定边界, 未考虑无限地基的辐射阻尼效应; 刘立平等(2004)采用动力有限元

时程分析方法, 以多高层框架结构为对象, 研究了水平地震作用下桩-土-结构相互作用时上部结构弹塑性动力特性和规律, 但在考虑边界条件问题时, 两侧采用自由边界, 底部采用固定边界, 在描述无限地基辐射阻尼效应方面存在一定限制。

为解决上述问题, 本文以某 CPR1000 核电工程实际项目为背景, 建立了土质地基条件下嵌岩桩-土-核岛厂房结构动力相互作用数值模型。其中, 在有限元框架内以全耦合方式考虑群桩效应, 采用粘性边界模拟无限地基辐射效应, 并采用等价线性模型描述地基土的非线性特性。进而, 基于此模型, 对原状地基条件和桩基处理地基条件下, 核岛厂房的楼层反应谱、层间位移以及层间剪力进行综合对比分析, 得出桩基处理对核岛厂房的影响规律。

1 桩-土-核岛动力相互作用计算模型

1.1 桩-土动力相互作用模型

本文基于 SuperFLUSH 计算平台, 在有限元框架内以全耦合方式考虑群桩效应。采用有限元法模拟桩-土结构动力相互作用, 不仅可以有效模拟桩体的几何位置和形状, 反映桩-土动力相互

* 收稿日期: 2015-11-16.

基金项目: 国家重大科技专项“cap1400 安全审评技术与独立验证试验”(2011ZX06002-10)和辽宁省教育厅一般项目(2014498)联合资助。

✉ 通讯作者: 尹训强(1986~), 博士, 主要从事结构动力分析研究. E-mail: Lc-tm 2008@163.com.

作用对群桩、上部结构动力响应的影响,并且可以将土的非线性和不均匀特性考虑进来,在桩-土-结构动力相互作用分析中应用很广。

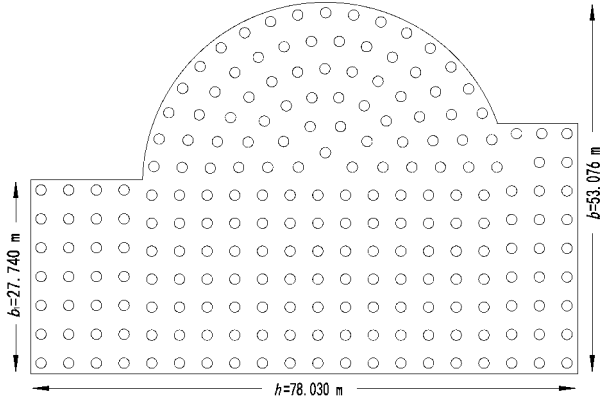


图1 嵌岩桩平面布置图

Fig. 1 The plan arrangement of rock-socketed piles

桩-土-结构动力分析采用拟三维分析,将三维群桩-土-结构模型等效为两平面简化模型,保证结构动力特性变化较小。为了得到较为精确的平面问题的解,对每根桩的刚度进行等效简化,使其转化为平面应变问题来分析。首先,根据嵌岩桩平面布置图,以图1为例,将三维模型中一个桩间距范围内的嵌岩桩分别沿 y 轴、 x 轴向 $X-Z$ 平面和 $Y-Z$ 平面上进行简化,然后将该平面中每个桩间距范围内的嵌岩桩简化为二维计算模型中的一根桩,简化后嵌岩桩的断面积和惯性矩可根据公式(1)和(2)得到:

$$S_n = S \times n / b_n, \quad (1)$$

$$I_n = I \times n / b_n. \quad (2)$$

式中, S_n 和 I_n 分别为简化后桩的断面积和惯性矩; n 为该嵌岩桩简化前的根数; b_n 为该简化桩在沿 x 轴或 y 轴方向上对应的筏板宽度。

1.2 粘性人工边界场地模型

实际工程中的地基是一个半无限体,但在分析半无限地基问题时,必须截取一定范围的计算模型,并对所截取模型的人工边界通过规定边界上的力-位移关系来考虑边界延伸到无穷远地基的作用效应。粘性边界(Lysmer, Kuhlemeyer, 1969)沿截断边界设置的阻尼系数与频率无关,处理方法简单,物理概念清晰,是模拟地基无限域动力模型采用的通用方式之一。

粘性边界的施加首先是通过在外边界上布置一系列的阻尼器来达到吸收边界反射波的目的,并施加等效荷载模拟实际波场的应力边界条件。以P波入射粘性边界为例,法向粘滞力和剪切粘滞力的计算公式为

$$\sigma = -\rho C_p v_n, \quad (3)$$

$$\tau = -\rho C_s v_s. \quad (4)$$

式中, v_n 和 v_s 分别为边界上的法向和切向速度分量; ρ 为质量密度; C_p 和 C_s 分别为P波和S波的波速。

1.3 土质非线性模型

对于土质地基材料,地震作用下其应力应变关系复杂,不同应力条件下相同的应力增量所引起的应变增量并不是相同的,非线性明显。本文采用基于核电结构抗震分析中所推荐的等效线性方法(Lysmer, Seed, 1968)模拟土体非线性特性。

等效线性方法通过等价线性迭代的方法,将非线性问题转化为线性问题,用等效剪切模量和阻尼比来模拟不同条件下的剪切模量和阻尼比。该方法使用迭代原理,即在每一次计算中,使用等效剪切模量和阻尼比,获得等效剪应变之后修正剪切模量和阻尼比,进行下一步计算,在每一步计算中,保持总刚度阵不变。

2 工程概况

本文以某内陆土质地基上CPR1000堆型反应堆厂房为背景,对比分析了地震作用下原状土质地基和桩基处理地基工况下核岛厂房结构的动力响应。

2.1 地基计算模型及参数选取

地基为不均匀软土地基,由不同类型的粘土、砂土等成分组成,水平成层明显,共8层,各分层厚度、动剪模量等参数见表1。各类土动剪切模量比和阻尼比随剪应变的变化规律通过试验得到,其土层的 $G-\gamma$ 与 $D-\gamma$ 关系,如图2所示。

根据该工程地基承载力要求,嵌岩桩布置212根,桩间距为3.949 m,其布置和筏板尺寸如图1所示。嵌岩桩长37.41 m,嵌入玄武岩2 m。核岛基础筏板长度为 $h = 78.03$ m,宽度 $b = 53.07$ m,因此地基 $X-Z$ 平面和 $Y-Z$ 平面有限元计算模型

的左右两侧取 $l = 1.5 h$ 、 $l = 1.5 b$ ，深度取至玄武岩以下 3 m，共 51 m，域内采用四节点平面等参元离散，如图 3 所示。

表 1 地基计算参数

Tab. 1 Calculating parameters of the foundation

岩性	土层 编号	厚度 /m	动剪模量 /GPa	泊松 比	密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	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

2.2 核岛计算模型及参数选取

CPR1000 反应堆厂房结构主要由 3 大部分组成：筏板基础、安全壳结构和内部结构，这些厂房共用同一筏基。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 3 所示，图中数字 1 - 12 分别表示反应堆厂房结构简化后各集中质量点，编号①~⑪分别表示反应堆厂房结构简化后各梁单元。各楼层其他参数见表 2、表 3。

表 2 核反应堆模型节点坐标、质量及转动惯量

Tab. 2 Nodal coordinates, mass and moment of inertia for nuclear reactor model

质量 点号	高程 /m	惯性矩/ m^4 $J_{XX} = J_{YY}$	转动惯量/ $10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	
			$J_{XX} = J_{YY}$	J_{ZZ}
1	-6.790	217.1	21.727	42.345
2	-1.290	345.9	16.237	49.768
3	2.625	59.0	10.928	21.327
4	13.085	78.2	14.639	28.015
5	23.210	76.3	14.728	27.397
6	33.210	76.3	14.728	27.397
7	42.360	79.1	14.485	27.861
8	53.230	161.6	23.454	44.510
9	7.210	147.2	9.536	0
10	13.530	153.9	10.155	0
11	22.360	174.0	12.887	0
12	32.210	32.7	2.835	0

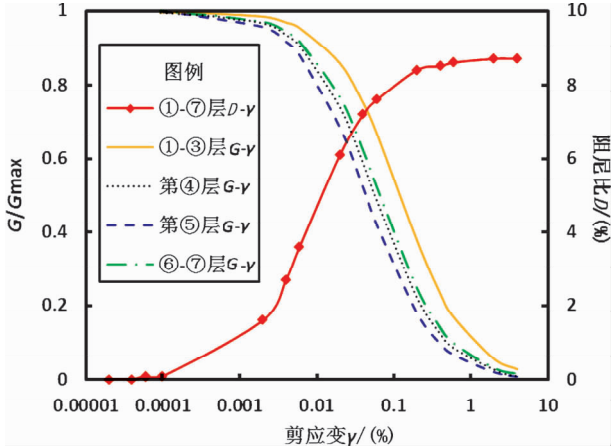


图 2 各土层的 $G - \gamma$ 和 $D - \gamma$ 曲线

Fig. 2 The curves of $G - \gamma$ and $D - \gamma$ of each layer of soil

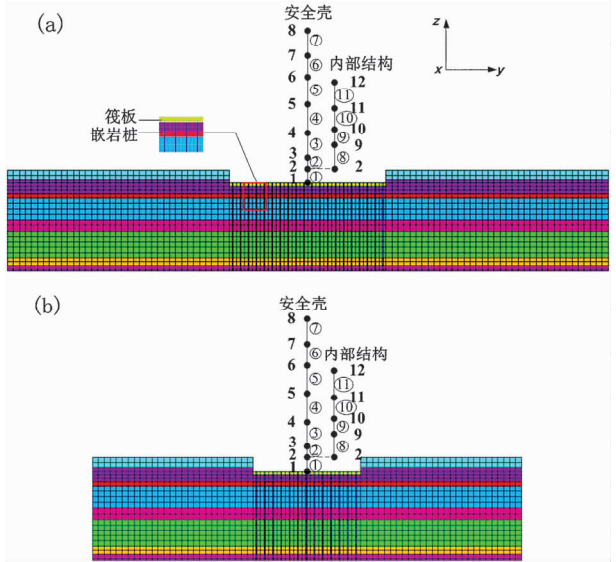


图 3 $X - Z$ (a) 和 $Y - Z$ (b) 平面嵌岩桩 - 土 - 核岛动力相互作用系统计算模型

Fig. 3 Calculation model of dynamic interaction system of the socketed pile - soil - structure in $X - Z$ (a) and $Y - Z$ (b) planes

2.3 输入地震动

图 4 给出了核反应堆厂房结构所受的水平向和竖直向地震基岩处的运动加速度时程曲线。水平向运动峰值加速度为 1.078 m/s^2 ，垂直运动峰值加速度为 1.176 m/s^2 ，总持时 25 s，时间步长 0.01 s。

2.4 核岛厂房地震反应分析

分别选取安全壳最高点楼层处（节点 8）、内部结构最高处（节点 12）和最低点楼层处（节点 1），对比分析了在不同工况条件下计算的 5% 阻尼比加速度反应谱，如图 5 ~ 7 所示，结果具有代表性。

表 3 核反应堆模型梁单元特性参数
Tab. 3 Characteristic parameters of beam element
for nuclear reactor model

梁号	横截面积 /m ²	惯性矩/m ⁴ $J_{XX} = J_{YY}$	剪切系数 $\alpha_x = \alpha_y$	剪切面积/m ² $S_{ax} = S_{ay}$
1	31.031	2 975.2	1.11	27.957
2	4.536	787.9	2	2.268
3	2.758	495.9	2	1.379
4	2.758	495.9	2	1.379
5	2.758	495.9	2	1.379
6	2.758	495.9	2	1.379
7	2.758	495.9	2	1.379
8	1.289	147.4	2.632	0.490
9	2.835	210.3	1.571	1.804
10	3.608	210.3	2	1.804
11	1.546	8.4	2	0.773

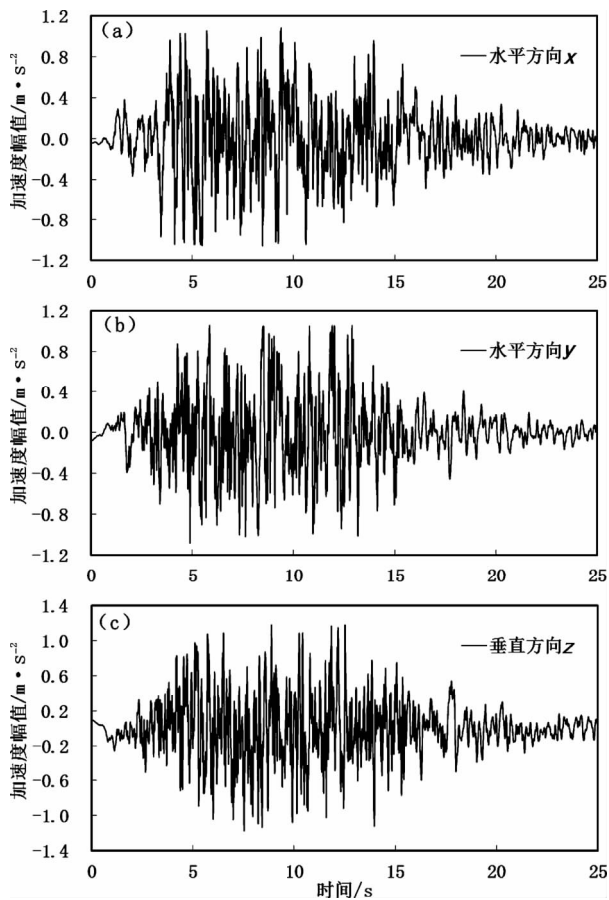


图 4 运动加速度输入时程曲线

Fig. 4 Time-history curves of the input ground motions

从图 5 ~ 7 可以看出，随着高程的增加，节点 1、12、8 的响应呈现逐渐增大的趋势，且各节点反应谱曲线变化规律基本一致。在考虑桩 - 土 - 结构相互作用的情况下，即在桩基处理地基工况下，使低频段加速度谱峰值有一定的削减，高频段幅值有一定的放大。在水平方向，经过桩基处理的厂址地基条件下，节点 1、12、8 低频段（0 ~ 1.8 Hz 左右）反应谱值均在原状软土地基条件下包络范围内，且随着高程增加，包络现象明显。

在水平 X 向，节点 1、12、8 桩基处理情况下，相比于原状软土地基工况下，低频段峰值分别下降 12.8%、18.6%、20.3%。在水平 Y 向，节点 1、12、8 桩基处理情况下，相比于原状软土地基

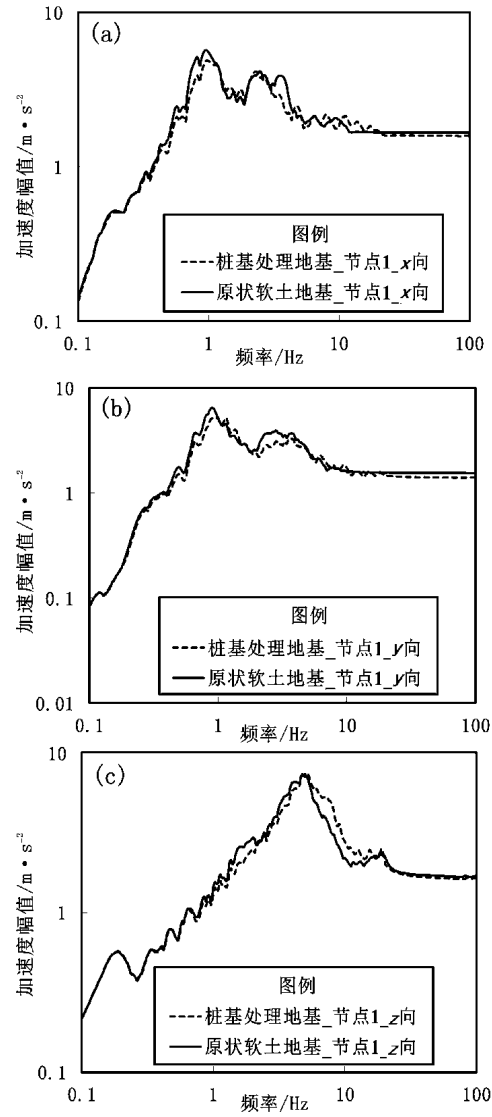


图 5 上部结构节点 1 加速度反应谱对比

Fig. 5 Comparison of acceleration response spectrum for node 1 of the upper structure

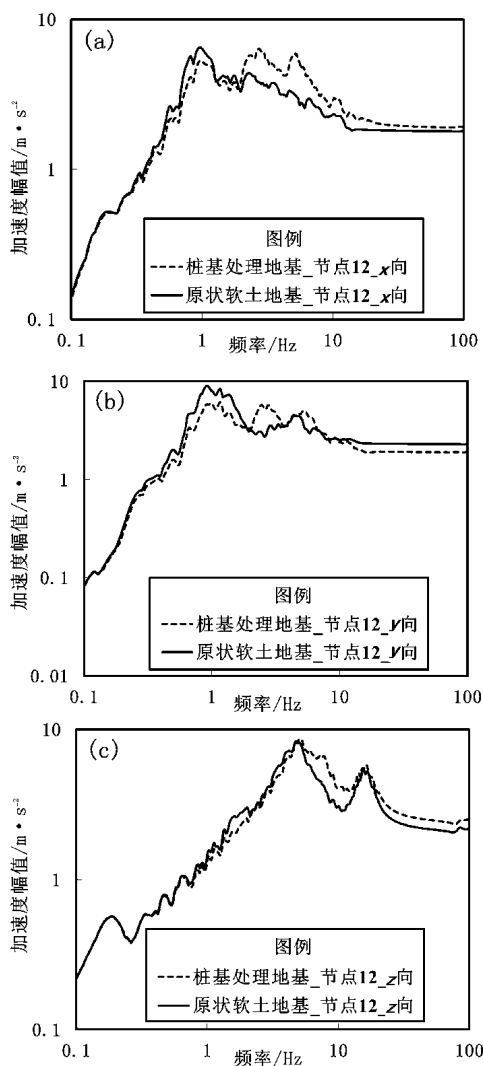


图6 上部结构节点12加速度反应谱对比

Fig. 6 Comparison of acceleration response spectrum for node 12 of the upper structure

工况下, 低频段峰值分别下降 19.7%、31.7%、16.4%。在竖直 Z 向, 桩基处理的厂址地基条件下, 节点 1、12、8 低频段 ($0 \sim 4.5$ Hz) 反应谱值均在原状软土地基条件下包络范围内, 且低频段峰值减小的趋势相较于水平方向不甚明显。

选取 X 向核岛厂房层间位移和层间剪力进行分析, 结果如表 4 所示, 表 4 中层编号与上部结构的梁单元编号对应。

3 结论

本文通过有限元框架内以全耦合方式考虑桩-土相互作用, 引入粘性人工边界模拟半无限地基辐射阻尼效应, 并采用等效线性法模拟地基非

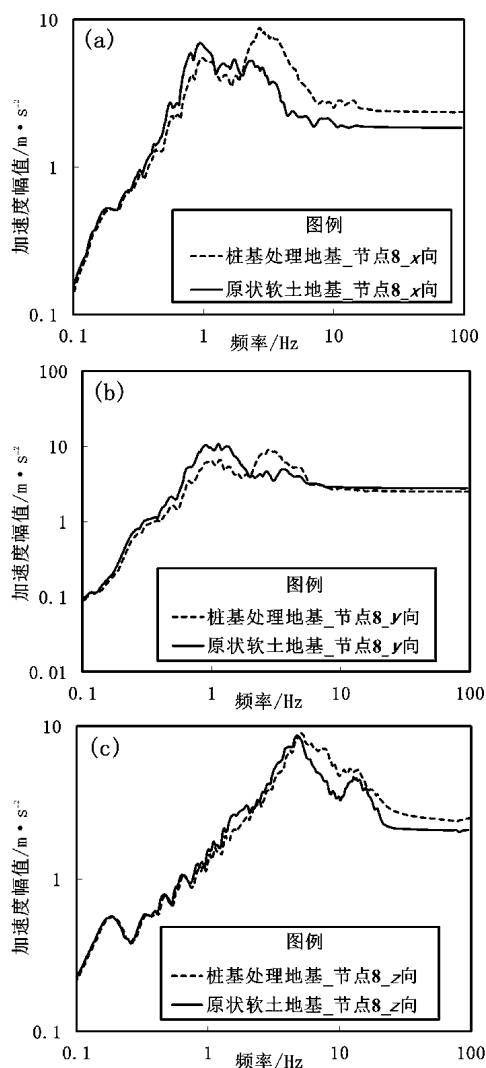


图7 上部结构节点8加速度反应谱对比

Fig. 7 Comparison of acceleration response spectrum for node 8 of the upper structure

线性效应, 从而建立了土质地基条件下桩-土-核岛动力相互作用计算模型。进而, 结合实际核岛厂址地基, 对 CPR1000 堆型反应堆厂房进行了不同工况条件下的楼层谱响应分析, 通过对比可得出以下结论:

(1) 在桩基处理和软土地基情况下, 核岛厂房各节点楼层反应谱变化规律一致, 且随着高程的增加, 楼层响应呈现逐渐增大的趋势。考虑桩-土相互作用对核岛厂房的影响, 由于嵌岩桩的加强, 地基刚度明显增大, 导致桩筏基础地基主频相比于无桩地基主频有所提高, 因此节点反应谱低频段峰值有明显的削减作用, 而高频段峰值增大, 且水平向低频段峰值下降趋势较竖直向更为明显。

表 4 层间位移及层间剪力计算结果比较
Tab. 4 Comparison of the calculation result of story displacement and shear force

层 编 号	原状软土地基 - 层间位移 /cm	桩基处理地基 - 层间位移 /cm	原状软土地基 - 层间剪力 /N	桩基处理地基 - 层间剪力 /N
1	0.4	0.01	2 447.3	2 204.3
2	0.3	0.1	952.6	898.8
3	0.9	0.3	855	825.3
4	0.9	0.2	720.5	731.1
5	0.9	0.2	585.3	615.2
6	0.8	0.2	446.9	481.9
7	1	0.3	301.2	332.8
8	0.7	0.4	928.9	954.7
9	0.5	0.2	663.3	701.1
10	0.7	0.2	382	413.2
11	0.7	0.2	60.6	66.7

(2) 考虑桩 - 土相互作用后，上部结构层间位移相对减小，截面内力部分减少，但某些部分截面处反而增大，但增加的数值很小，相比于设计标准值是安全的。

(3) 本文所建立模型采用拟三维分析，且属于直接法的范畴，计算效率、数据处理等方面优

于真三维分析，可方便地进行桩 - 土 - 结构动力相互作用数值模拟研究，应在更多的实际工程中得到应用。

参考文献：

曹晓岩,李晓莉,李立新等. 2004. 桩 - 土 - 结构相互作用地震反应分析[J]. 世界地震工程,20(1):90 - 94.

刘立平,李英民,韩军. 2004. 桩 - 土 - 结构相互作用弹塑性地震反应分析[J]. 世界地震工程,20(3):160 - 165.

马文丽. 2004. 桩 - 土 - 上部结构动力相互作用简化分析方法研究[D]. 长沙:湖南大学.

戚承志,钱七虎. 2000. 核电站抗震研究综述[J]. 地震工程与工程振动,20(3):76 - 86.

王辉. 2006. 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.

杨小卫. 2006. 桩 - 土 - 结构动力相互作用的数值分析[D]. 武汉:武汉理工大学.

赵小辉,邹树梁,刘永. 2012. 内陆核电发展形势分析[J]. 南华大学学报(社会科学版),13(3):1 - 7.

朱立新,刘宇,马明俊. 2011. 内陆核电厂发展状况与安全监管探讨[J]. 核安全,(3):9 - 14.

LysmeIdriss I M,Seed H B. 1968. Seismic response of horizontal soil layers[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, American Society of Civil Engineers,94(SM4):1003 - 1031.

Lysmer J, Kuhlemeyer R. 1969. Finite dynamic model for infinite media[J]. Journal of Engineering Mechanics,95(4):859 - 877.

Seismic Response Analysis of Nuclear Power Plant on Soil Foundation
Considering Pile - soil - structure Dynamic Interaction

LI Weixin, YIN Xunqiang, WANG Guixuan

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

Abstract

Firstly, considering the pile group effect by the way of unity coupling within a finite element framework, we simulated the radiation damping effect of infinite foundation by the introduction of artificial viscous boundary, and the nonlinearity of the near - field foundation of the model by using the equivalent linearization method. Secondly, the calculation model of the rocked pile - soil - structure dynamic interaction is established. Finally, according to the calculation model, take the CPR1000 nuclear power plant as the research object, we compared and analyzed the seismic response of the nuclear power plant in the condition of undisturbed soil foundation and socketed pile treatment foundation. The conclusions can be the reference for seismic design of nuclear power plan under the similar foundation conditions.

Key words: soft foundation; socketed pile; equivalent - linear method; pile - soil - structure dynamic interaction