

# 不同地基条件对核岛厂房结构 地震响应的影响

金煜皓, 尹训强, 王桂莹

(大连大学 土木工程技术与开发中心, 辽宁 大连 116622)

**摘要:** 以某 CPR1000 堆型反应堆厂房的集中质量简化模型为研究对象, 基于 Super FLUSH 软件平台, 考虑结构-地基动力相互作用(SSI), 并采用弹性模量模拟岩性地基线性特征, 等效线性模拟土质地基非线性特性. 建立不同地基条件的核岛厂房结构响应分析模型, 从而分析不同地基条件对核岛厂房结构地震响应的影响. 该模型计算结果表明: 随着地基条件的变化, 尤其是从岩性地基到土质地基, 核岛结构响应变化明显.

**关键词:** 能量传递边界; 岩性地基; 土质地基; 结构地震响应; 核岛; 厂房结构

**中图分类号:** TV 312

**文献标志码:** A

目前, 我国已建核电站均选址在沿海岩基上, 这是因为沿海岩性基础具有天然的高承载力. 然而, 我国的核电厂址资源日趋紧张, 基岩厂址已基本覆盖潜在的核电厂址区域. 为满足核电快速发展的要求, 在内陆地区的非岩性地基上建设核电厂, 成为核电发展的必然方向. 与此同时, 核电的加速发展, 也使人们越来越关注核电安全性. 核电工程结构的抗震能力是保障核电安全的重要内容之一<sup>[1-3]</sup>. 一般而言, 在地震作用下, 无论是沿海岩性地基还是内陆土质地基, 结构抗震分析均需考虑结构-地基动力相互作用(SSI)<sup>[4]</sup>. 因此, 考虑不同地基条件下的结构-地基动力相互作用就显得非常重要. 然而, 已有研究并没有将结构-地基相互作用与不同地基条件这 2 种要素有机的统一起来<sup>[5-7]</sup>, 且不同地基条件变化(岩基到土质地基)过程中, 对核岛厂房结构地震响应的规律认识还很不充分. 对这一过程的认识正是内陆核电厂厂址地基抗震适应性评价的关键内容之一. 为解决上述问题, 本文以我国某拟建内陆核电厂为研究背景, 以 Super FLUSH 程序作为研究平台, 将 CPR1000 型核岛厂房结构简化成多质点集中质量模型, 建立二维 CPR1000 型核岛厂房结构-地基相互作用模型, 研究不同地基条件对核岛结构地震响应的影响.

## 1 结构-地基动力相互作用

### 1.1 结构-地基相互作用方程

结构-地基动力相互作用运动方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{P}. \quad (1)$$

式(1)中:  $\mathbf{M}$  为质量矩阵;  $\mathbf{C}$  为阻尼矩阵;  $\mathbf{K}$  为刚度矩阵;  $\mathbf{u}$  为上部结构模型中节点相对于基础的位移向量;  $\mathbf{P}$  为外力向量. 为进一步说明人工边界问题, 上述运动方程可改写为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = -\mathbf{m}\mathbf{a} - \mathbf{T}. \quad (2)$$

式(2)中:  $\mathbf{a}$  为刚性基础加速度;  $\mathbf{m}$  为与  $\mathbf{a}$  方向相关的向量; 与能量传递有关的力向量  $\mathbf{T}$  为

$$\mathbf{T} = (\mathbf{R} + \mathbf{L})(\mathbf{u} - \mathbf{u}_f). \quad (3)$$

式(3)中:  $\mathbf{R}, \mathbf{L}$  是边界刚度矩阵, 该矩阵与频率有关;  $\mathbf{u}_f$  为自由场位移向量.

收稿日期: 2015-05-24

通信作者: 尹训强(1986-), 男, 讲师, 博士, 主要从事结构动力分析的研究. E-mail: lc-tm2008@163.com.

基金项目: 国家重大科技专项资助课题(2011ZX06002-10); 辽宁省教育厅一般项目(L2014498)

### 1.2 能量传递边界模型

无限地基辐射阻尼效应描述半无限地基中能量的逸散, 是有效模拟结构-地基相互作用的关键. 而有限元模型一般在截断边界处, 施加局部人工边界对地基辐射阻尼进行模拟. 常用的局部人工边界有粘性边界、能量传递边界和粘弹性边界等. 能量传递边界最初由 Lysmer 等<sup>[8]</sup>提出. 计算分析表明, 在相同条件下, 能量传递边界比粘性边界更稳定, 不会出现低频失稳现象. 与粘弹性人工边界相比, 能量边界可进一步减小有限元部分截取范围, 从而节省计算单元. 因此, 文中选用能量传递边界模拟地基辐射阻尼, 能量传递边界模型, 如图 1 所示.

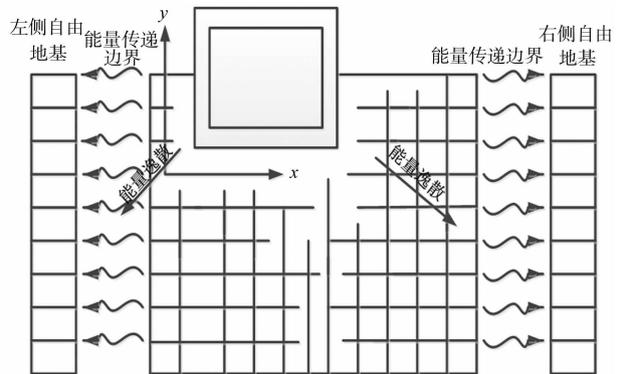


图 1 能量传递边界模型

Fig. 1 Energy-transmitting boundary model

对于有限元右侧边界, 考虑向  $x$  的正方向传播的表面波; 对于左侧边界, 则考虑向  $x$  的负方向传播的表面波. 假定自由地基地面为刚性基岩, 且无外力作用, 考虑自由地基中  $x$  方向传播的波动, 其运动方程为

$$(K^2[A] + iK[B] + [C] - \omega^2[M])\{U\} = 0. \tag{4}$$

这是一个以圆频率  $\omega$  为解析频率的求解复数特征值问题, 一般可用牛顿迭代法求解  $n$  层自由地基的  $4n$  个复数特征值  $K_s$  ( $2n$  个  $\pm K_s$  值) 及相应复数特征向量  $\{V_s\}$ . 由  $K_s$  和  $\{V_s\}$  可确定自由地基中表面波的传播特性和深度方向的振幅分布. 对于右侧能量传递边界, 根据虎克定律, 应力-应变关系为

$$\sigma_x(\lambda + 2G)\epsilon_x + \lambda\epsilon_y, \tag{5}$$

$$\tau_{x,y} = G\tau_{x,y}. \tag{6}$$

式(5)~(6)中:  $\lambda$  为拉梅常数;  $G$  为剪切模量.

由于左侧能量边界应力-应变和右侧边界表达式一致, 故在此不做赘述.

## 2 核岛厂房结构地震响应分析

### 2.1 计算模型及参数选取

2.1.1 核岛厂房结构 某 CPR1000 堆型反应堆厂房包括安全壳、内部结构和筏板基础. 该反应堆采用集中质量简化模型, 结构用来抵抗扭矩和剪切变形的几何惯性矩, 模型中节点间梁模拟剪切面积, 表现结构惯性的质量和转动惯量集中在各节点上.

核岛厂房结构模型, 如图 2 所示. 平面上  $x, y$  向对称, 梁单元参数, 如表 1 所示. 表 1 中:  $S_h$  为横截面积;  $I$  为惯性矩;  $a$  为剪切系数;  $S$  为剪切面积. 节点坐标、质量及转动惯量, 如表 2 所示. 表 2 中:  $m$  为质量;  $J$  为转动惯量. 混凝土材料性能参数如下: 动弹性模量为 40 GPa; 剪切模量为 16 GPa; 泊松比为 0.2; 质量密度为  $2.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ; 阻尼比为 7%.

表 1 梁单元参数

Tab. 1 Parameters of beam element

单元类别号	梁号	$S_h/\text{m}^2$	$I/\text{m}^4$		$a$		$S/\text{m}^2$	
			$I_{x,x} = I_{y,y}$		$a_x = a_y$		$S_{a,x} = S_{a,y}$	
1	1	31.031	2 975.2		1.110		27.957	
2	2	4.536	787.9		2.000		2.268	
3	3~7	2.758	495.9		2.000		1.379	
4	8	1.289	147.4		2.632		0.490	
5	9	2.835	210.3		1.571		1.804	
6	10	3.608	210.3		2.000		1.804	
7	11	1.546	8.4		2.000		0.773	

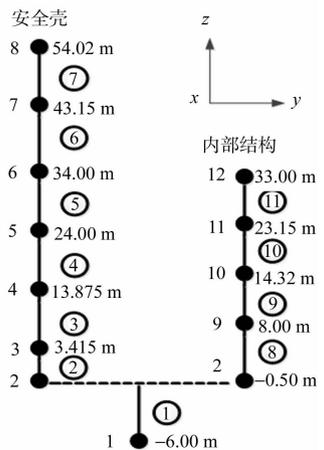


图 2 核岛厂房结构简化模型

Fig. 2 Calculation model of nuclear reactor

表2 节点坐标、质量及转动惯量

Tab. 2 Nodal coordinates, mass and moment of inertia

节点序号	$m/Mg$	$J/Gg \cdot m^2$		节点序号	$m/Mg$	$J/Gg \cdot m^2$	
		$J_{x,x}=J_{y,y}$	$J_{z,z}$			$J_{x,x}=J_{y,y}$	$J_{z,z}$
1	217.1	21.727	42.345	7	79.1	14.485	27.861
2	345.9	16.237	49.768	8	161.6	23.454	44.510
3	59.0	10.928	21.327	9	147.2	9.536	0
4	78.2	14.639	28.015	10	153.9	10.155	0
5	76.3	14.728	27.397	11	174.0	12.887	0
6	76.3	14.728	27.397	12	32.7	2.835	0

2.1.2 地基参数 为表现不同的地基条件,选取可以体现由岩性到非岩性变化过程的地基,标准如下:硬质基岩地基,剪切波速  $V_s \geq 1066.80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;软质岩石地基,剪切波速  $V_s \geq 731.52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;土质地基(中软土),剪切波速  $V_s = 161 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . 岩土剪切波速是反映岩土动力特征的参数,是岩土层刚度的反映. 为定量研究不同地基条件,选取硬质基岩地基、软质岩石地基、更软质岩石地基和土质地基4种代表性地基作为模型地基参数的输入依据. 不同地基条件的输入参数,如表3所示. 表3中: $V_s$ 为剪切波速; $E_d$ 为弹性模量; $\nu$ 为泊松比; $\rho$ 为密度.

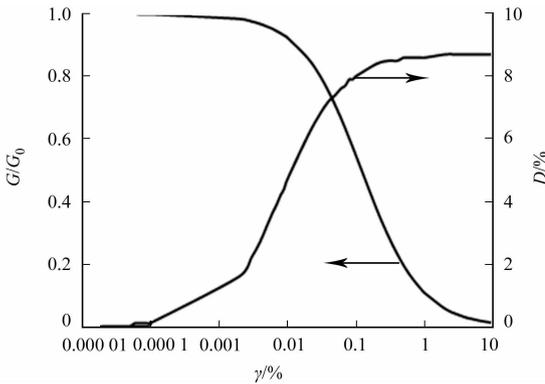
表3 不同地基条件输入参数

Tab. 3 Input parameters of different foundation conditions

地基	$V_s/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$E_d/\text{GPa}$	$\nu$	$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
玄武岩	1569	15.49	0.28	2.45
细砂岩	980	9.01	0.29	2.23
砂质页岩	740	4.18	0.32	2.13
淤泥质粉质粘土	161	0.16	0.49	1.88

地基模型中,岩性地基表现为线弹性特征,将弹性模量作为地基参数输入. 淤泥质粉质粘土所代表的中软土在地震作用下,具有强烈的非线性特性,所以无法用单一的弹性模量作为地基参数输入,应采用等效线性法模拟地基非线性特征<sup>[9]</sup>. 该方法根据动剪切模量  $G$  和剪切应变  $\gamma$  的关系曲线、阻尼比  $D$  和剪切应变  $\gamma$  的关系曲线修正剪切模量和阻尼比,直到结果收敛误差达到要求的范围为止. 淤泥质粉质粘土  $G-\gamma$  与  $D-\gamma$  关系曲线,如图3所示.

2.1.3 模型的计算 某核岛厂房基础筏板长度为  $b=39 \text{ m}$ ,地基有限元计算模型计算范围:左右两侧各延伸  $50 \text{ m}$ ;深度  $85 \text{ m}$ ;域内采用4节点平面等参元离散;有限元网格密度均保证每个波长内有  $4 \sim 8$  个节点. 整个模型共有节点  $1142$  个,单元  $1031$  个,如图4所示. 图4中: $a_{\max}$ 为峰值加速度; $t$ 为时间.

图3  $G-\gamma$  与  $D-\gamma$  关系曲线Fig. 3 Curve between  $G-\gamma$  and  $D-\gamma$ 

## 2.2 工况的计算

为了考察不同地基条件对核岛厂房结构动力响应的影 响,选取4种工况进行对比计算,条件如表4所示.

## 2.3 地震动的输入

考虑地震动谱特性,探讨地震动选择方案的合理性可以使计算结果更合理、准确<sup>[10]</sup>. 因此,在计算分析中,选用美国 RG1.60 地震动,开展考虑 SSI 效应不同地基

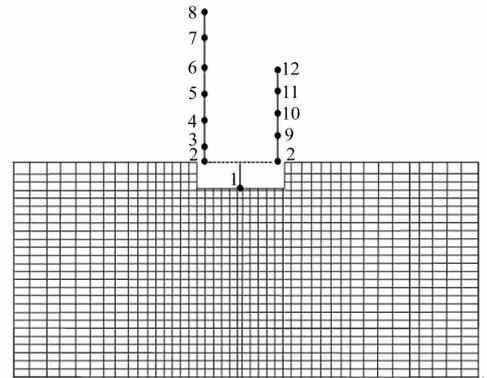


图4 地基计算模型

Fig. 4 Finite element model of foundation

表4 不同地基条件对核岛厂房结构动力响应  
Tab. 4 Seismic response of nuclear island factory building structure under different ground conditions

工况	不同地基条件	地震波输入
1	玄武岩	地表三向输入
2	细砂岩	地表三向输入
3	砂质页岩	地表三向输入
4	淤泥质粉质粘土	地表三向输入



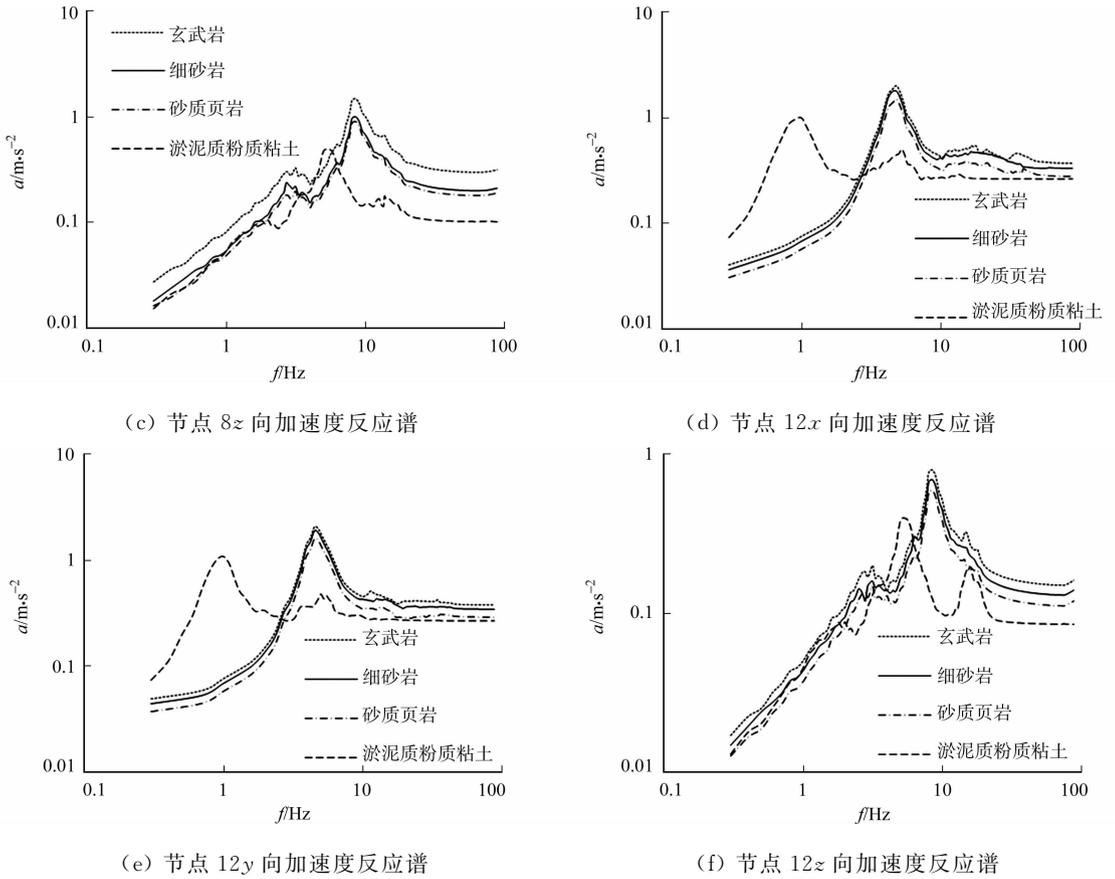


图6 上部厂房集中质量点不同工况地震响应对比

Fig. 6 Comparison of the concentrated mass seismic response under different conditions

从上述结果可以看出,随着地基岩性的减小,结构动力响应随之减小.这是因为代表岩性地基软硬程度的地基弹模对核岛厂房结构动力响应有着明显的影响,且地基弹模越大,核岛厂房结构响应越强烈;相反,弹性模量减小,地基刚度随之减小,则柔性增加,从而地基辐射阻尼效应也会变得更加明显,所以其引起的结构响应减小幅度也更显著.此外,节点8的减小幅度大于节点12,说明不同地基条件下,较高的楼层结构响应变化较为明显.

从节点8与节点12水平方向加速度反应谱可以看出:对比工况1,2,3的岩性地基条件,工况4所代表的土质地基核岛厂房结构地震动力响应显著减弱,最大减小幅度为66.5%,且主频向低频移动明显.这是因为考虑非线性效应后,等效线性法模型中,剪切模量以及阻尼比随着等效剪应变的变大而分别降低和增大,导致地基主频有所降低(约在1.0 Hz附近),从而使核岛结构的加速度幅值在较低频段有所增大.

### 3 结论

不同地基条件对核岛结构地震响应影响研究,是核电厂内陆发展厂址地基抗震适应性评价的核心内容之一.文中通过选用能量边界模拟无限地基辐射阻尼效应,考虑结构-地基相互作用,采用弹性模量模拟岩性地基线弹性特征,并运用等效线性模拟近场土体的非线性,建立了不同地基条件下的核岛厂房结构响应分析模型,进而对CPR1000堆型反应堆厂房结构进行了4种工况条件下的楼层谱响应分析,通过对比可得出以下3点结论.

1) 岩性地基条件,随着弹性模量的减小,地基刚度减小,地基变柔,核岛结构动力响应减小,且相同条件下,较高楼层结构响应变化较为明显.

2) 非岩性地基条件,地震作用下,地基非线性特性更为明显,水平向地基主频有所降低(约在1.0 Hz附近),同时核岛结构的加速度幅值在较低频段有所增大;与岩性地基条件相比,核岛厂房结构响应峰值显著降低,说明了等效线性的应用对未经线性化处理的谱峰值起到了消减作用.

3) 考虑结构-地基动力相互作用,通过比较不同地基条件对核岛厂房结构地震响应的影响,说明了核岛厂房结构动力响应随着地基岩性变化(岩性地基到土质地基)而发生显著的变化,所得变化规律对不同地基条件,尤其是将来内陆核电站厂址地基的抗震适应性分析,具有一定的参考价值。

#### 参考文献:

- [1] 戚承志,钱七虎. 核电站抗震研究综述[J]. 地震工程与工程振动,2000,20(3):76-86.
- [2] 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,2013,15(4):63-70.
- [3] VIALLET E, LABBÉ P, GALLITRE E. Seismic re-evaluation of EDF Bugey 900 PWR nuclear power plant in the frame of the 3rd periodic safety review[J]. Nuclear Engineering and Design,2010,240:1306-1319.
- [4] 陈灯红,杜成斌. 结构-地基动力相互作用的时域模型[J]. 岩土力学,2014,35(4):1165-1172.
- [5] 裴强,薛志成,胡波. 考虑地基不均匀性核反应堆地震响应分析[J]. 地震工程与工程振动,2011,31(6):168-172.
- [6] 王天运,任辉启,刘国强,等. 考虑土-结构相互作用的核电站动力分析方法[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(22):3841-3845.
- [7] 李忠献,李忠诚,梁万顺. 考虑地基岩土参数不确定性的核电厂结构随机地震反应分析[J]. 核动力工程,2006,27(2):31-36.
- [8] LYSMER J, DRAKE L A. A finite element method for seismology[C]//Methods of Computational Physics. New York:Academic Press,1972:34-35.
- [9] 李昕,周晶,陈建云. 考虑土体非线性特性的直埋管道-土体系统的动力反应分析[J]. 计算力学学报,2011,8(2):168-172.
- [10] 刘良林,王全凤,沈章春. 基于弹性总输入能的地震波选择方法[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2009,30(2):191-194.
- [11] 侯春林,李小军,潘蓉,等. AP1000 设计地震反应谱在具体厂址评价中的应用[J]. 原子能科学技术,2013,47(7):1197-1201.
- [12] 李忠献,李忠诚,沈望霞. 核反应堆厂房结构楼层反应谱的敏感性分析[J]. 核动力工程,2005,26(1):45-50.

## Effects of Different Ground Conditions on Seismic Response of Nuclear Island

JIN Yuhao, YIN Xunqiang, WANG Guixuan

(Research and Development Center of Civil Engineering Technology, Dalian University, Dalian 116622, China)

**Abstract:** A nuclear reactor CPR1000 calculation model of different ground conditions based on the software of Super FLUSH was established, which adopted the concentrated mass by setting energy-transmitting boundary in the limited area of foundation. The elastic modulus was used to simulate the linear elasticity of rock and the equivalent linear method was applied to consider the nonlinear characteristics of soil foundation. The seismic response models with different ground conditions were analyzed, the effects of different ground conditions on seismic response of nuclear island were investigated. The calculation results indicate: the seismic response changes obviously for the ground condition variation from soil to rock.

**Keywords:** energy-transmitting boundary; rock foundation; soil foundation; structural seismic response; nuclear island; factory building structure

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)