

某沿海软土地地区核电厂核岛天然地基 及桩基抗震承载力分析*

王桂萱, 张睿*, 赵杰

(大连大学 土木工程技术研究与开发中心, 辽宁 大连 116622)

摘要: 针对我国核岛厂房建设尚没有采用桩基础的现状, 以某拟建核电厂嵌岩桩加固后的软土地基为研究对象, 采用滑面应力法确定地基天然承载力, 采用等效线性法描述近场地基非线性特征, 粘性人工边界模拟辐射阻尼效应及考虑桩土效应影响的节点耦合, 建立了桩-土-结构动力相互作用模型, 并通过有限元分析计算得到静力、地震作用下桩体内力分布, 给出满足抗震承载力要求的配筋方案。研究结果可为类似条件下的核岛厂房软土地基处理方案的抗震设计提供借鉴与参考。

关键词: 软土地基; 嵌岩桩; 抗震承载力; 桩-土-结构动力相互作用模型; 核岛厂房

中图分类号: TV431

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2016)01-0015-07

0 引言

核电作为一种安全、清洁且经济高效的新型能源, 为我国解决能源缺口和环境问题提供了一条重要途径(郭勇, 郑砚国, 2008; 叶奇慕, 2012)。随着我国核电的快速发展, 沿海地区符合核电厂标准设计的厂址资源日益减少, 导致新建核电厂的选址往往无法规避软土地基, 而软土地基的天然承载力又不能满足核电厂的建设要求, 需要对地基进行加固处理。我国已建核电厂多位于硬质岩质地基, 尚没有核岛厂房采用桩基础的先例。同时, 土体在强震作用下复杂的非线性特征使动力分析变得更加困难, 因此建立合理高效的桩-土-结构动力相互作用计算模型, 并在此基础上开展对软土地基及其地基处理后抗震承载力的研究是十分必要且有意义的。

目前, 嵌岩桩因承载力大、沉降小、抗震性能好、施工工艺成熟等优点被广泛用于地基加固工程中, 其承载力的确定一方面可采用理论公式法、经验公式法及现场试验法等, 但这些方法在可靠性、经济性等方面存在诸多限制(黄锋等, 1998); 另一方面可借助数值分析, 在准确给出土体内部应力场和位移场分布情况的基础上, 通过

增量有限元或滑面应力分析等方法确定其极限承载力。其中, 建立合理的桩-土-结构动力相互作用计算模型是保证数值模拟可靠性的前提。卢华喜等(2007)在桩土动力分析二维接触模型的研究中, 考虑了桩-土-结构相互作用及土体的非线性, 但底部设计使用刚性边界, 未能消除无限阻尼辐射效应的影响; 王满生等(2005)为解决桩土动力相互作用中部分能量耗散问题, 将阻尼成分加入现有 Goodman 接触单元, 并采用粘弹性人工边界模拟土体边界, 但忽略了土体的非线性影响。上述研究都未能很好的解决土体的非线性特性、无限地基辐射阻尼效应等问题。

为解决上述问题, 本文以国内某沿海核电的软土地基为研究对象, 在通过有限元法验证天然地基无法满足抗震承载力要求的情况下, 建立可全面考虑桩-土-结构相互作用、地基土的非线性及无限地基辐射阻尼效应影响的核岛厂房地震响应计算模型, 并基于此模型, 对处理后核岛地基的抗震承载力进行评价。

1 天然地基承载力确定方法

采用滑面应力分析法确定天然地基承载力。该方法首先通过有限元方法得到计算域内土体真

* 收稿日期: 2015-11-16.

基金项目: 辽宁省教育厅资助项目(L2015035)及大连市科技计划项目(2014E13SF145)联合资助.

✉ 通讯作者: 张睿(1989~), 硕士, 主要从事土工结构抗震稳定性评价. E-mail: zhang_rui0989@163.com.

实的应力场分布,采用插值方法得到给定滑动面上的应力值,按照安全系数的定义公式计算沿滑动面的安全系数,并采用优化算法进行最小安全系数及相应滑动面的搜索,通过确定安全系数是否趋近于 1.0 来判断土体结构是否达到极限状态,同时求解极限承载力(赵杰,2006)。

对于平面应变问题,假设土体所构成的平面区域为 S ,并且已知 S 内土体的应力分布,如图 1 所示。土体的抗剪强度采用摩尔-库仑公式计算,即

$$\tau_f = \sigma_n \tan \varphi + c. \quad (1)$$

式中, σ_n 为曲线上一点土体的法向应力, φ 是土体的有效内摩擦角, c 是有效粘聚力。令 l 为 S 内的任意一条曲线,用 $y = y(x)$ 表示,土体沿曲线 l 的滑动稳定安全系数定义为

$$F_s = \frac{\int_0^l (\sigma_n \tan \varphi + c) dl}{\int_0^l \tau dl}. \quad (2)$$

式中, τ 为沿曲线任意一点的剪应力, τ_f 为沿曲线任意一点的抗剪强度。

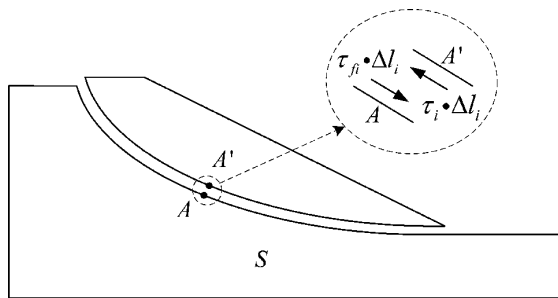


图 1 任意土体单元的抗剪力与剪应力
Fig. 1 The shear resistance and shearing stress of any soil element

2 桩-土-结构动力相互作用计算模型

2.1 桩-土动力相互作用的模拟

为有效模拟桩体的几何位置与界面特性,反映桩-土间的动力相互作用,土体单元与桩单元的接触采用共节点但材料性质不同的连续介质模

型来模拟,结构动力响应采用拟三维分析。较之于真三维分析,具有更高的计算精度和效率,并且在国际上也有着成熟应用经验,如日本的大岛快仁和宇高竹和(2008)已将拟三维动力分析应用于核电站等建筑物的抗震以及稳定性评价中。

2.2 土体非线性特性的模拟

土体具有复杂的非线性特征,且地震动越大、非线性特性越明显。鉴于传统的非线性时程分析方法计算复杂、费时长及分析参数多等限制,采用等价线性法不但可以近似考虑土体在地震作用下的复杂非线性变化,同时也极大地提高了计算效率。等价线性法的实现途径为:在计算开始时输入各地层的剪切模量 G 和阻尼比 D ,及初始值 G_0 和 D_0 ,使用 G_0 和 D_0 进行线弹性分析,计算各地层的剪切应变 γ 时程变化,并得到等效剪应变 γ_{e1} ,如图 2 所示。取 γ_{e1} 对应的 G_1 和 D_1 重新进行线弹性时程分析,再次获得各地层的剪切应变时程曲线。利用迭代手段使用第 n 回的 G_{n-1} 、 D_{n-1} 计算获得的 γ_{en} 对应的 G_n 、 D_n 之间的误差在容许误差范围之内,通常经过 5 次迭代即可使精度满足要求(李建波等,2014)。等效线性法计算流程如图 3 所示。

2.3 无限地基的模拟

在地基计算区域的外边界处施加粘性人工边界来反映远场地基的辐射阻尼影响,是地基无限域动力模型采用的通用方式之一。粘性边界是由

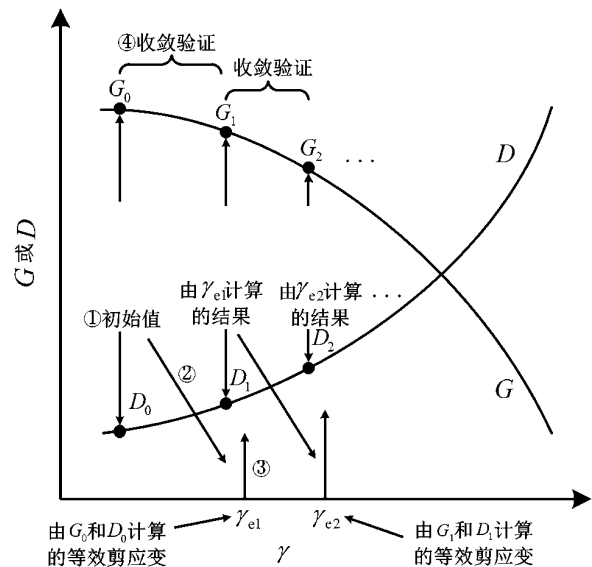


图 2 等价线性法解析图

Fig. 2 Analysis diagram of the equivalent linear method

Lysmer 和 Kuhlemeyer (1969) 提出的一种人工边界, 主要思想是通过一系列布置在边界上的阻尼器来吸收外边界反射波波动能量, 达到模拟波动在人工边界上透射的效果, 如图 4 所示。同时施加等效荷载力 P 以满足边界应力条件, 人工边界的法向和剪切应力的计算公式为

$$\sigma_x = -\rho C V_p \dot{U}_x, \quad (3)$$

$$\sigma_{xy} = -\rho C V_s \dot{U}_y. \quad (4)$$

式中, \dot{U}_x 和 \dot{U}_y 分别为边界上的法向和切向速度

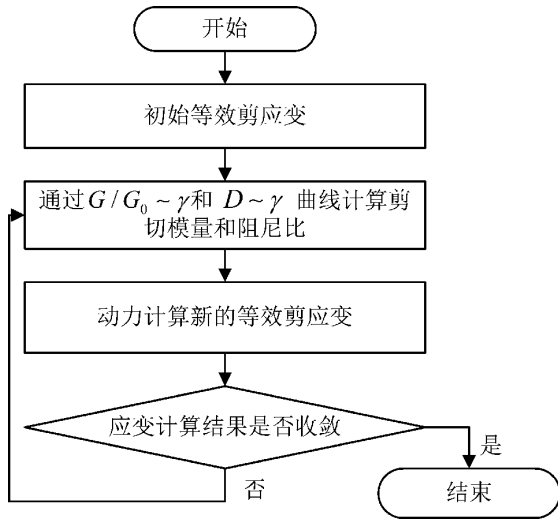


图 3 等价线性法计算流程图

Fig. 3 Calculation flow chart of the equivalent linear method

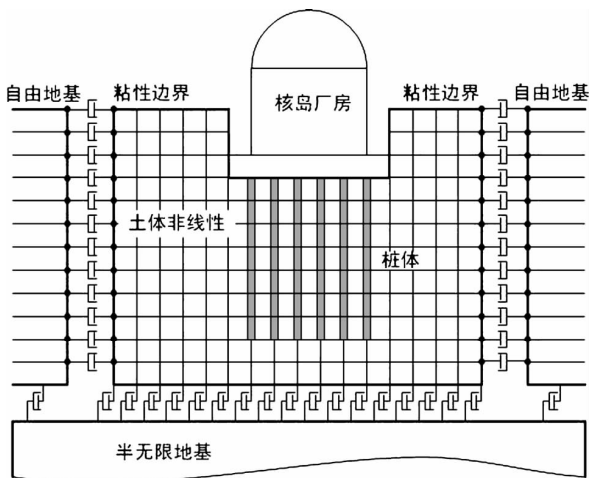


图 4 桩-土-结构动力相互作用系统示意图

Fig. 4 The sketch diagram of pile-soil-structure dynamic interaction system

分量, 以边界节点的总场速度 \dot{U} 减去自由地基的节点速度 \dot{U}_f 来考虑有限元结构受周围影响导致的地震波波动逸散; ρ 为质量密度; V_p 和 V_s 分别为 P 波和 S 波的波速。

3 工程概况

某沿海核电采用 AP1000 机组, 厂址地层上部为第四系全新统海陆交互沉积层, 土体主要为粉质粘土, 局部有粉砂和粉土, 揭露厚度在 32.9 ~ 60.5 m, 共分为 7 层; 覆盖层下部为第四系更新统玄武岩和火山堆积岩, 平均揭露厚度达 60 m, 且分布较连续。岩土体力学参数取值如表 1 所示, 由试验得到的各类土体动剪切模量比和阻尼比随剪应变的变化规律如图 5 所示。

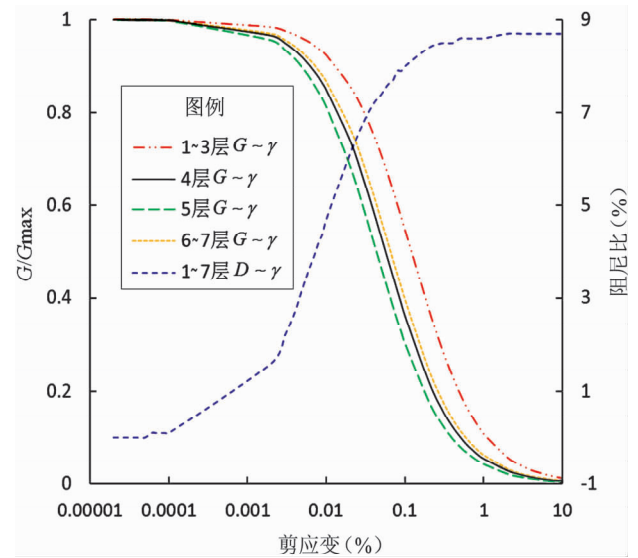


图 5 土体材料 $G-\gamma$ 与 $D-\gamma$ 曲线

Fig. 5 The curves of $G-\gamma$ and $D-\gamma$ of soil materials

核岛厂房包括屏蔽厂房、安全壳内部结构及各类辅助厂房等, 总设计荷载 1 243 100 kN, 筏基底板面积为 2 952.38 m², 厚度为 1.8 m, 基底高程为 -5.29 m。厂房结构采用集中质量单元与梁单元相结合的形式模拟, 并分别沿筏板长度 (78 m) 方向和宽度 (53 m) 方向进行简化, 形成 X-Z、Y-Z 两个平面模型, 如图 6 所示。地基模型边界自筏基底板左右两侧各向外延伸 117 m, 深度方向取 51 m; 嵌岩桩采用 C30 混凝土, 桩长 39.6 m, 桩径 1.5 m, 水平间距 3.95 m, 有限元模型如图 7 所示。

表 1 土体材料物理力学参数

Tab. 1 Physical mechanic parameters of geotechnical materials

地层编号及名称	层厚/m	弹性模量 E/MPa	动弹模量 E_d/MPa	泊松比 ν	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	内聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
①粉质黏土	5	13.7	70	0.49	1 950	12.9	5.4
②粉砂	7	43.6	210	0.49	2 010	13.0	26.7
③淤泥质粉质黏土	2	11.4	160	0.49	1 880	8.2	3.5
④粉质黏土	11	19.5	340	0.49	1 980	15.9	8.9
⑤粉质黏土	6	15.3	390	0.48	1 910	9.1	4.5
⑥粉质黏土	13	19.9	550	0.48	1 980	24.2	16.7
⑦粉砂	4	57.5	630	0.47	2 030	17.8	32.7
⑧气孔状玄武岩	40	1 2550	6 039	0.26	2 450	5 690	43.73

根据厂址地震安评报告,核岛厂房结构所受地面运动的水平 X 向、水平 Y 向和竖直 Z 向峰值加速度分别为 0.30 g 、 0.29 g 及 0.30 g ,地震动持

时为 25 s ,时间步长 0.01 s , X 、 Y 及 Z 向加速度时程如图 8 所示。

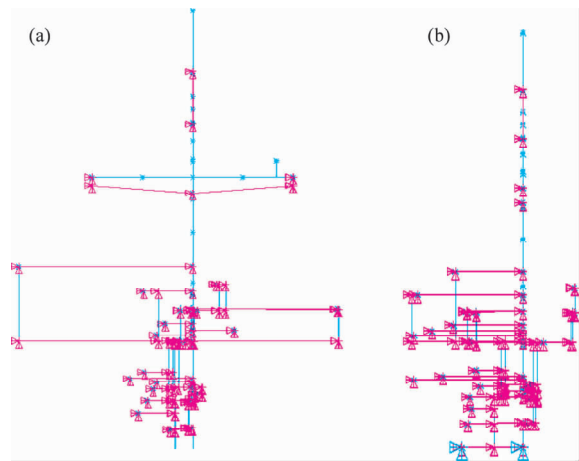


图 6 $X-Z$ (a)、 $Y-Z$ (b) 平面 AP1000 二维简化模型

Fig. 6 The AP1000 two-dimensional simplified model of $X-Z$ (a) and $Y-Z$ (b) planes

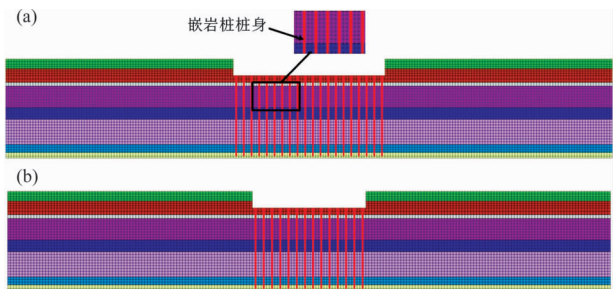


图 7 $X-Z$ (a)、 $Y-Z$ (b) 平面桩基有限元模型
Fig. 7 The FEM of pile foundation in $X-Z$ (a) and $Y-Z$ (b) planes

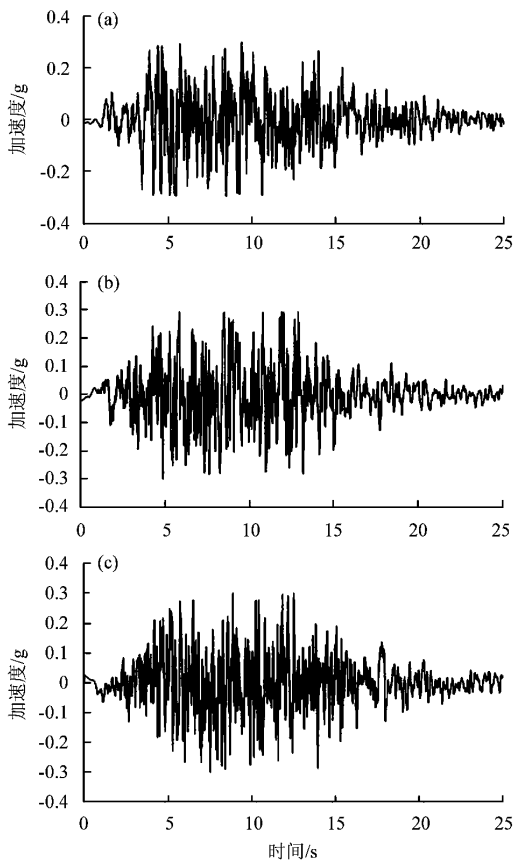


图 8 输入地震动加速度时程曲线
(a) X 方向 ($\text{PGA} = 0.3\text{ g}$); (b) Y 方向 ($\text{PGA} = 0.29\text{ g}$);
(c) Z 方向 ($\text{PGA} = 0.3\text{ g}$)

Fig. 8 The acceleration time histories curve of the input ground motions
(a) X direction ($\text{PGA} = 0.3\text{ g}$); (b) Y direction ($\text{PGA} = 0.29\text{ g}$); (c) Z direction ($\text{PGA} = 0.3\text{ g}$)

4 抗震承载力分析

4.1 天然地基抗震承载力

仅在上部结构自重作用下，以增量有限元法得到的土体极限承载力为 615 kPa，此时滑面应力分析所求得安全系数为 1.01，图 9 给出了 $X-Z$ 、

$Y-Z$ 两个平面的最危险滑动面位置。从图 10 的地基安全系数时程曲线中可以看出，在设计荷载作用下天然地基的动力安全系数在多个时刻均小于 1，其动力安全系数最小值为 0.63，最小平均安全系数为 0.98，平均安全系数为 1.58，故天然地基的抗震承载力未能满足设计要求，需要对其进行加固处理。

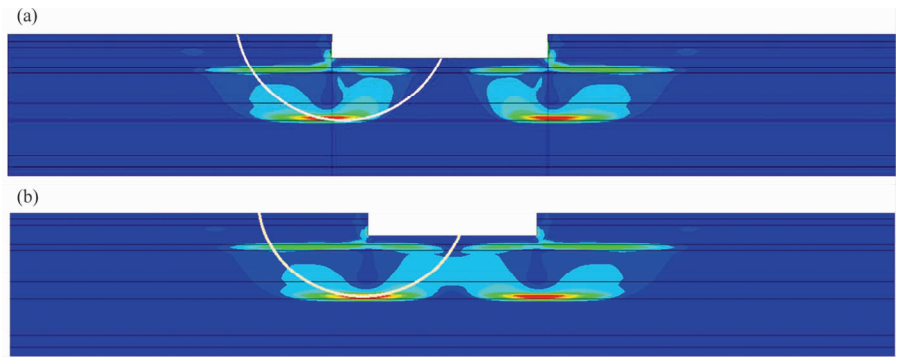


图 9 地基破坏时 $X-Z$ (a)、 $Y-Z$ (b) 平面大主应变分布及滑动面位置
Fig. 9 The distribution of maximum major principal strain and the location of critical surface slip in $X-Z$ (a) and $Y-Z$ (b) planes with foundation broken

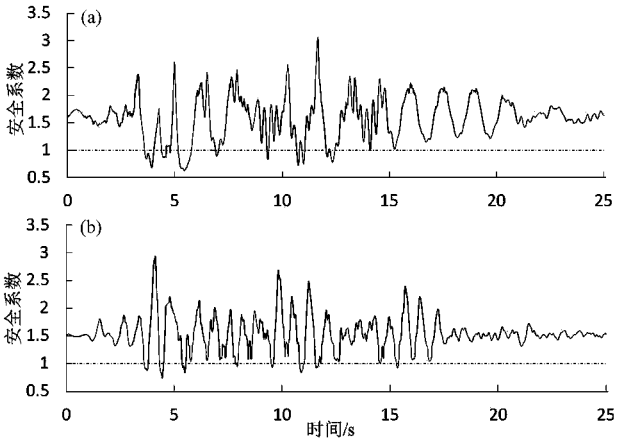


图 10 $X-Z$ (a)、 $Y-Z$ (b) 平面模型地基安全系数时程曲线

Fig. 10 The safe factor time histories curve in $X-Z$ (a) and $Y-Z$ (b) planes

4.2 桩基抗震承载力

图 11 给出了 $X-Z$ 、 $Y-Z$ 平面静力、地震作用下的嵌岩桩桩身内力图，并将桩身内力最大值汇总于表 2，从表中可以看出：

(1) 结合《建筑桩基技术规范》(JGJ94—2008) 中的相关规定可以得到，单桩极限承载力约为 15 162.1 kN，远大于静力作用下 5 451 kN 和

地震作用下 3 430 kN 的桩身轴力，故桩身竖向承载力有着较高的安全裕度。

(2) 桩身所受剪力在土层的刚度变化处，即软土—基岩分界处达到最大值；所受弯矩在桩顶处达到最大值。

(3) 相比于地震作用下桩身所受到的弯矩和剪力，静力作用下的弯矩和剪力值可以忽略不计，故地震荷载应作为控制荷载指导截面配筋设计。

表 2 嵌岩桩桩身内力最大值			
Tab. 2 The maximum internal force of the rock socketed pile			
工况	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m)
静力	5 451	75.08	422.93
地震	3 430	1 310 ($X-Z$)	4 990 ($X-Z$)
		3 060 ($Y-Z$)	3 980 ($Y-Z$)

4.3 桩基配筋方案

以地震荷载作为设计控制荷载，结合《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010) 的规定，按圆形截面受弯构件的正截面承载力进行配筋设计，综合给出的嵌岩桩配筋方案为： $\Phi 32@150$ mm，配筋率为 1.43%，配筋图如图 12 所示；经校核，配筋方案满足偏心受压、弯功能。

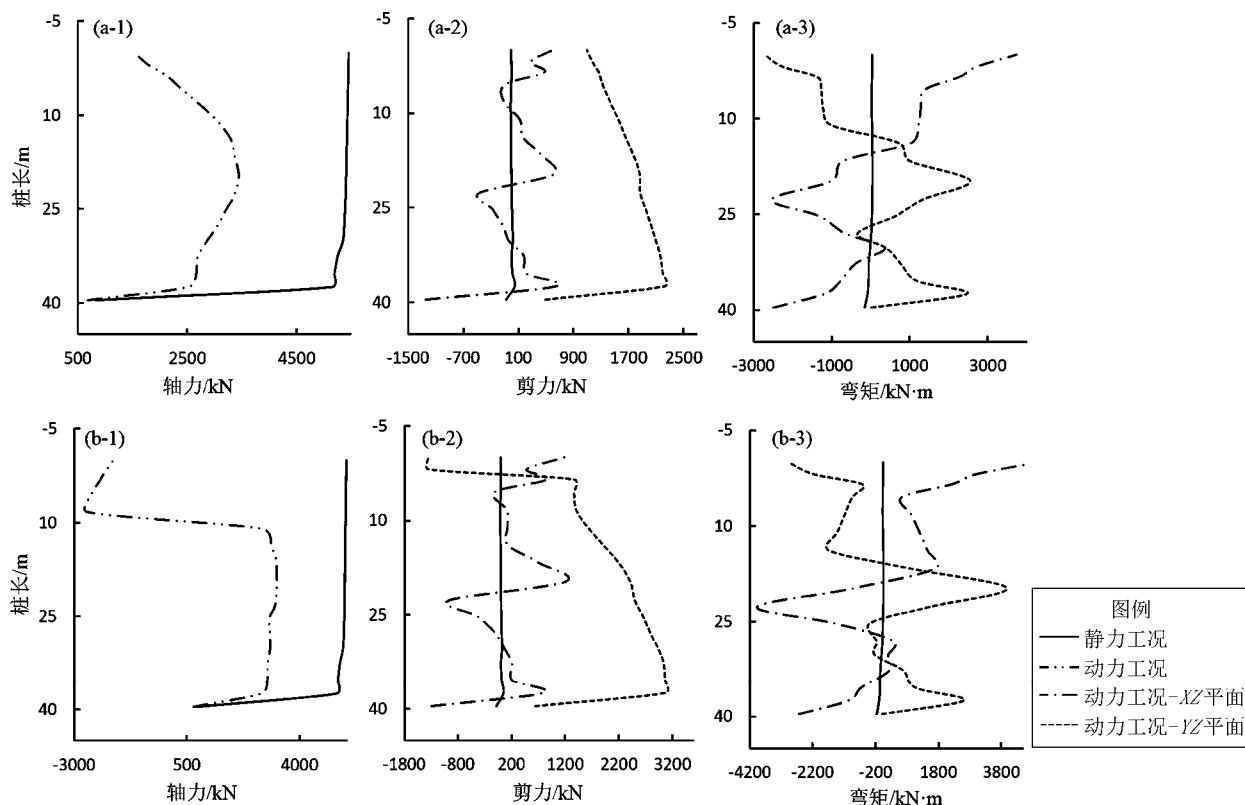
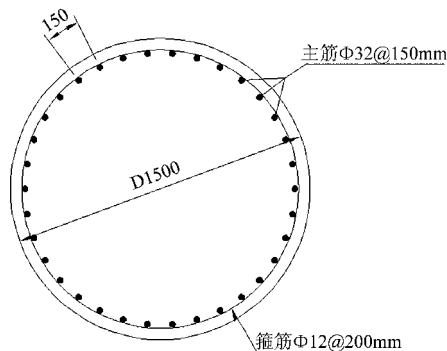
图 11 $X-Z$ (a) 和 $Y-Z$ (b) 平面模型桩身内力图Fig. 11 The internal force of pile of models in $X-Z$ and $Y-Z$ planes

图 12 嵌岩桩配筋图

Fig. 12 The reinforcement figure of the rock socketed pile

5 结语

针对我国核电尚无桩基础案例的现状, 本文以国内某核电软土地基和桩基础为研究对象, 通过有限元计算分析得到如下结论:

(1) 通过增量有限元计算及滑面应力分析结果, 厂址天然地基的静承载力满足核岛设计荷载

要求, 但抗震承载力不足;

(2) 在进行桩基抗震承载力分析时, 采用等效线性法描述土体材料非线性特征, 粘性人工边界模拟辐射阻尼效应, 节点耦合考虑桩土效应影响, 结果证明是可行且合理的;

(3) 在强震作用下, 由于土层运动使桩身内力在软硬土层界面处达到最大值, 极易引发桩身弯曲或剪切破坏, 因此可通过合理配筋使得桩基抗震承载力满足要求。

参考文献:

- 大島快仁, 宇高竹和. 2008. 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]//第63回年次学術講演会講演概要集. 東北大学: 平成20年度土木学会全国大会, 619-620.
- 郭勇, 郑硯国. 2008. 电力供求、环境保护与核电布局内陆化[J]. 系统工程, 27(8): 57-61.
- 黄锋, 刘朝钢, 李广信等. 1998. 桩承载力确定方法的探讨[J]. 清华大学学报(自然科学版), 38(1): 28-32.
- 李建波, 王继东, 朱秀云. 2014. 基于ANSYS的核电成层覆盖土地场地地震响应分析[J]. 水电能源科学, 32(11): 129-132.
- 卢华喜, 尚守平, 余俊. 2007. 桩土动力分析中二维接触模型的研究[J]. 工程力学, 24(9): 129-133.

- 王满生, 周锡元, 胡丰贤. 2005. 桩土动力分析中接触模型的研究[J]. 岩土工程学报, 27(6): 616–620.
- 叶奇蓁. 2012. 后福岛时期我国核电的发展[J]. 中国电机工程学报, 32(11): 1–8.
- 赵杰. 2006. 边坡稳定有限元分析方法中若干应用问题研究[D]. 大连: 大连理工大学.
- JGJ94—2008, 建筑桩基技术规范[S].
- Lysmer J, Kuhlemeyer R L. 1969. Finite model for infinite media[J]. Journal of engineering mechanics division, ASCE, 95(3): 377–392.
- GB50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].

Analysis on Seismic Bearing Capacity of Natural and Pile Foundations about a Coastal Nuclear Power Plant in Soft Ground

WANG Guixuan, ZHANG Rui, ZHAO Jie

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

Abstract

In view of the status that no use of pile foundation in the nuclear power plant in China, taking the soft soil ground of the reinforced rock – socketed piles of a planned nuclear power plant as research subject, we determined the natural bearing capacity of the ground by the slip surface stress analysis method. Considering the non-linearity characteristic of the near – field foundation of the model by using the equivalent linearization method, the radiation damping effect simulated by the viscous artificial boundary, and the interaction of pile and soil is considered by the way of node coupled, we set up the model of pile – soil – structure dynamic interaction. Based on the above model, we calculated the internal force of piles under static force and earthquake through the finite element analysis, and then got the reinforced distributing which meets the requirement of seismic bearing capacity. The obtained study results can provide the reference for the seismic design of foundation treatment scheme of nuclear power plant in the similar conditions.

Key words: soft ground; rock – socketed pile; seismic bearing capacity; pile-soil-structure dynamic interaction; nuclear power plant