

# 某核岛地基沉降分析与计算

郑文棠, 程小久

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** 以某核岛地基沉降为例, 介绍了核岛沉降计算所依据的核电标准、数值模型、参数取值、计算方法和评价标准, 计算表明: 地基在卸载和再加载条件下的非线性、地基岩土力学特性的空间变异性、地基地下水位变化的影响以及地基岩土力学参数因开挖、排水和回填而受扰动的几何尺寸和蠕变效应是核岛区地基沉降的影响因素, 采用三维有限元法预测的地基沉降值与实际监测资料规律一致, 可供类似工程参考。

**关键词:** 核电厂; 核岛地基; 三维地质模型; 沉降计算

中图分类号: TU433

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)04-0116-07

## Settlement Calculation and Analysis of a Nuclear Island Foundation

ZHENG Wentang, CHENG Xiaojie

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** A typical foundation settlement case of nuclear island in a certain nuclear power plant under construction is analyzed. The nuclear power standards, numerical model, mechanical parameters, calculation method and evaluation criteria are detailedly introduced. The calculation results show that: nonlinearity under unloading and reloading, spatial variability of mechanics characteristics, ground water level variation, disturbed zones by the excavation, drainage and backfill, creep effect are foundation settlement factors of nuclear island. The calculation results are in accordance with monitoring data, which can be used as a reference for the similar projects

**Key words:** nuclear power plant; nuclear island foundation; three-dimensional geology model; settlement calculation

我国滨海核电厂的核岛、泵房等重要的核安全相关物项, 一般选择硬质火成岩地基, 其特点为核岛持力层为微风化或新鲜火成岩, 岩质坚硬, 岩体剪切波速值高 ( $>100$  m/s), 岩基静态承载力大 ( $>1.0$  MPa), 地基动态响应以高频响应为主, 地基振动周期短、地震能量传导快、地基与基础为刚性接触, 为 I 类厂址。但随着核电技术的发展, 在厂址其他资源条件都十分理想, 同时很难找到合适的硬质火成岩厂址情况下, 非基岩厂址也成为当前核电厂核岛区地基的选择之一。国外已有较多成功运行的非基岩厂址案例, 地基沉降监测和预测是核

电站最终安全分析报告(FSAR)中不可缺少的章节。以往我国核电厂均选择硬质火成岩地基, 地基沉降可忽略不计。当遇到软岩厂址、第四系厂址等非基岩厂址, 如何依据现行核电规范, 分析评价核岛区地基沉降, 是当前亟待研究和应用的课题<sup>[1]</sup>。

本文以某核电厂(后简称为 A 核电厂)为例, 详细介绍了核岛沉降计算的所依据的核电标准、数值模型、参数取值、计算方法和评价标准, 以供类似工程参考。

### 1 沉降计算遵循的核电标准和限值规定

核安全局在 A 核电厂运行前期阶段的 FSAR 审评报告中指出: 要对比分析核岛区实际的沉降观测值与前期计算值的差异, 论证地基岩土设计参数取值的合理性、保守性及地基分析模型的正确性, 通过位移沉降监测与数值计算相结合的方法判断核岛

沉降规律。评审依据来自《审查核电厂安全分析报告的标准审查大纲》(对应 NRC 的 NUREG-0800) 第2章第2.5.4节“地基和基础的稳定性”条文:“静态工况下为确定地基土石的安全性、变形和沉降的结果”<sup>[2]</sup>。

《核设施厂址评价安全规定》(对应 IAEA 安全标准第 NS-R-3 号)第3.4.2节“厂址地面的塌陷、沉降或隆起”也指出:“必须评价厂址地面塌陷、沉降或隆起的可能性”<sup>[3]</sup>。

此外,《核安全导则汇编—核电厂的地基安全问题》(HAD 102/12)(对应 IAEA 安全导则第 NS-G-3.6 号)指出:静力荷载作用下的沉降评定是重要的,沉降在基础变形方面也是重要的,在施工期间以及在核电厂运行寿期内会发生弹性沉降,通常对安全没有重要意义;发生在电厂运行寿期内随时间变化的沉降很重要,必须考虑其对总体安全性的影响<sup>[4]</sup>。

HAD 102/12 同时也对地基沉降计算的计算模型(设计剖面)和计算方法做了详细规定。核电厂地基由基础结构、工程支承结构以及到某一深度和距离的下卧土和岩石材料组成,下卧层深度和距离的确定是根据它们的性质不再影响核电厂的安全。设计剖面的详细内容包括:(1)几何描述,诸如地下地层的描述,横向范围,分层数及层厚,模型的深度;(2)地基土和岩石的物理、化学性质,以及它们的分类标准;(3)应力—应变关系曲线,地震波传播特性,固结与渗透参数,静力与动力强度特性;(4)地下水位,水位设计标高以及由可能最大洪水及其他条件引起的最大水位标高。计算方法中指明地基土可用有限元法模拟,随时间变化的沉降可用经典的固结理论和其他精确的非线性分析法来计算,并要注意开挖、排水和回填过程中,地下材料在卸载和再加载条件下的非线性<sup>[4]</sup>。

但是当前国内核电规范仅对核电厂地基沉降计算做了原则性规定,并无可参考的沉降计算规程和安全评价标准,正在修订的《核电厂抗震设计规范》(GB 50267)<sup>[5]</sup>也仅给出了地基抗滑移验算的安全系数标准。美国陆军工程兵团对地基工程的沉降分析和有限元法的应用做了详细的规定<sup>[6-7]</sup>,可作为核电厂地基沉降计算的指导规程。目前 AP1000 设计控制文件<sup>[8]</sup>给出了地基沉降量

的限值规定,即最大总沉降量应限于 6 英寸(152.4 mm),核岛基础持力层 50 英尺(50.24 m)内岩土层最大不均匀沉降量应限于 0.5 英寸(12.7 mm)。15 cm 的沉降值充分说明了 AP-1000 核电技术对地基岩土条件的适宜性,但考虑到我国还有 CPR、EPR 等其他堆型,同时根据国际岩土工程实践和高层建筑地基沉降土工经验,对于采用筏基的核岛基础,建议总沉降限于 1 英寸(25.40 mm),核岛区横向最大不均匀沉降限于 3/4 英寸(19.05 mm)<sup>[9-11]</sup>。

## 2 核岛地基不均匀沉降因素

HAD 102/12 核安全导则指出为预测地基沉降,需要准确分析诸如排水、开挖、回填、建筑物建造等作业而引起的卸载卸载历程,并指出地基在卸载和再加载的条件下呈现非线性状<sup>[4]</sup>。

结合工程实践和土工经验,笔者认为多种因素促成了核岛区地基出现较大沉降和不均匀沉降的现象:(1)地基在卸载和再加载条件下的非线性;(2)地基岩土力学特性的空间变异性;(3)地基地下水变化的影响;(4)地基岩土力学参数因开挖、排水和回填而受扰动的几何尺寸和蠕变效应。

### 2.1 地基在卸载和再加载条件下的非线性

核电站自山体开挖、核岛基坑负挖、第一罐混凝土浇注(后简称 FCD),至穹顶吊装和核设施安装,历经数年。以 A 核电厂建设时间来看:1 号核电(1RX)和 2 号核岛(2RX)自山体爆破开挖(最高▽34 m)至厂坪标高(▽-0.5 m)历时约 8 月,1RX 和 2RX 基坑负挖验收至 FCD 的间隔时间约 10 月和 15 月,1RX 从 FCD 到吊装穹顶历时约 21 月,2RX 从 FCD 到穹顶吊装历时约 24 月,山体开挖、地基暴露和施工加载时间均较长,表明地基岩土体承受了长期的卸载和再加载。HAD 102/12 第 6.2 条“建造和运行过程的监测”指出建造阶段中(包括开挖、回填和建筑物建造)地基土性状必须监测,开挖阶段必须监测地下材料的变形(隆起和沉降)并必须进行荷载测定。但目前核电建设的地基监测时间和频次普遍受施工条件限制,以 A 核电厂为例,1RX 在 FCD 后第 3 个月才第 1 次监测沉降数据,自第 1 次监测后 2 年内共计监测 7 次,监测频次较少、监测间隔周期较长。开挖阶段无监测资料,加载基坑开挖后无地基浅层岩体变形模量的损伤评价,重要

节点(如穹顶吊装当日可视为一个可靠的大型原位荷载试验)无对应的监测资料,以致无法分析核岛区沉降量的有效值和影响因素。

A 核电厂岩土工程勘察(山体未开挖前)做了大量的钻孔弹模试验。通过分析核岛钻孔的典型岩体原位加载/卸载试验可以很好地揭示卸载和再加载条件下核岛区岩体力学参数的取值范围。图 1(a) 给出一个典型的岩体加载卸载和重复加载应力应变曲线。图 1(b) 为 1RX 钻孔 EI01 孔深 76.22 m 的 NW 向压力变形曲线,加载阶段共记录 11 个值,卸载阶段共记录 6 个值,

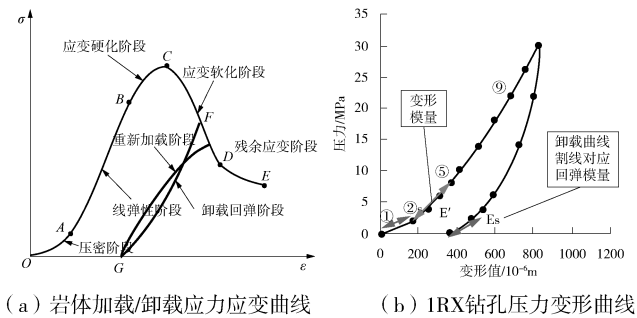


图 1 地基岩土体在不同加载条件下的应力应变曲线

Fig. 1 Stress-strain Curve Under Different Loading Condition in Rock and Soil Foundations

核岛场坪、核岛区基坑负挖时,表现为地基岩体因上覆岩体被开挖剥去,压力解除,岩石随之产生向上或向外的膨胀回弹,将产生应力释放而卸荷回弹,并形成平行于地面的层状裂隙等,导致卸载后的浅部岩体变形模量降低,对应为卸荷回弹变形的非线性阶段,图 1(a) 的 FG 段和图 1(b) 的  $E_s$  值。

核岛 FCD、土建施工、穹顶吊装和核设施安装为再加载阶段,对应图 1(a) 的 OB 段或 GF 段。首先地基岩体经历一个压密阶段(“上凹”OA 段),大多数情况下在低压力段(对应图 1(b) 的②级载荷以下),压力与变形呈非线性关系,且变形增加很快,它表示岩体表层的卸荷裂隙、回弹变形和塑性变形的压密过程;此后岩体进入以线弹性为主要特征的线性 AB 阶段(对应图 1(b) 中压阶段②级~④级载荷),随着压力的增加,裂隙逐渐闭合,曲线斜率增大,压密以后的岩体变形模量增高,在高压阶段(⑤级)以上,压力与变形呈线性关系。现场钻孔弹模试验受到试验条件和设备的限制,试验曲线一般只能反映岩体的压密阶段和部分线弹性阶段,图 1

(a) 的 BC 段及 CE 段无法获得,除深埋洞室内的高放废物处置工程会涉及高应力状态下的塑形变形和应变软化,一般核电工程只需关注岩体的线弹性力学性质。

从核岛地基实际的应力历史来看,先经历了长期的爆破开挖和卸荷回弹,并有可能造成浅层地基岩体变形模量的降低,然后在缓慢的施工建造期内,经逐级加载筏基、穹顶及核设施,先表现为卸荷岩体的再压密,然后为上覆荷载的沉降变形,则地基总沉降量是卸载和再加载条件下共同作用的结果。

从这个方面上看,应精确地模拟整个核电建设中的卸载和再加载历程,并选择不同的岩体变形参数,即开挖卸载过程对岩体变形参数取卸荷回弹模量  $E_s$ ,加载过程取变形模量  $E'$ ,并考虑地基开挖后的岩体波速测试和钻孔弹模试验成果对卸荷区采用合理的参数弱化,是合理模拟实际沉降的前提。

## 2.2 地基岩土力学特性的空间变异性

沉积岩岩体的风化一般具有较强的空间变异性,使之岩体分区和强风化夹层分布复杂,这种具有空间变异性的岩土地基最好采用三维地质模型模拟。原始地形、基岩顶面、强风化夹层(特别是地基持力层内强风化夹层的空间分布)、卸荷区的影响深度等都是影响沉降计算的重要因素。

核电厂岩土工程勘察资料提供了不同深度的基岩平切图,A 核电厂在地基顶面标高  $\nabla -0.5\text{ m} \sim \nabla -18.5\text{ m}$  深度内,每间隔 2.0 m 绘制基岩平切图,则可准确模拟的最小地质单元几何尺寸为  $2.0\text{ m} \times 2.0\text{ m} \times 2.0\text{ m}$ 。先将三维地质模型由数万个  $2.0\text{ m} \times 2.0\text{ m} \times 2.0\text{ m}$  立方体堆积而成,再根据地形等高线、基岩平切图、钻探资料和物探解译资料对地质单元进行岩体分区(即不同岩体分区内的立方体赋予不同的材料分组),最后将不同岩体分区的地质单元群赋予对应的岩土力学参数和边界条件,从而生成三维有限元计算模型。

### 2.2.1 地基持力层之上原始地形和基岩面的模拟

核岛负挖前的原始地形还原和地应力计算是卸荷回弹计算的前提。基岩和土体重力密度相差较大,对地应力的分布规律会产生影响。根据核岛原地形的 AutoCAD 地形等值线插值生成地面。中等风化基岩面顶面可综合工程地质测绘、钻探及物探解译的成果生成三维等值线和曲面,将地面和基岩

面顶面之间的单元赋予强风化岩体的材料属性, 见图 2。

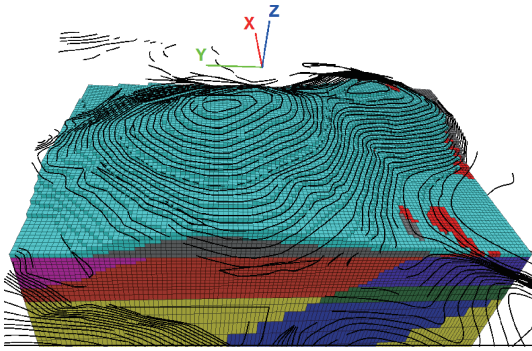
学性质将地基岩体分为 5 个分区,  $\nabla -18.5 \text{ m} \sim \nabla -81.0 \text{ m}$  深度无基岩平切图, 参照剖面图及上覆基岩分区的产状规律进行划分。

1) III<sub>Y</sub> 岩体, 为中等风化砂岩和泥质粉砂岩砂。

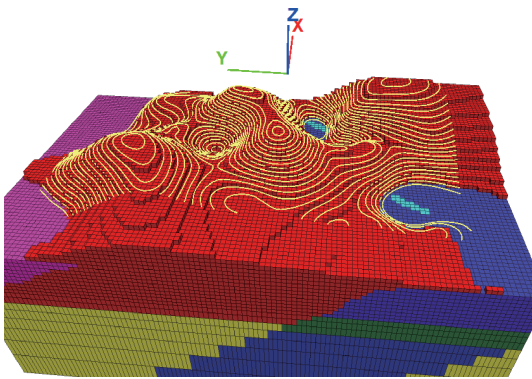
2) II<sub>Y</sub> 岩体, 为微风化砂岩夹薄层泥质粉砂岩及泥页岩。

3) III<sub>H</sub><sup>±</sup> 岩体, 为中等风化泥质粉砂岩和泥页岩。

4) III<sub>H</sub><sup>下</sup> 岩体, 为中等风化砂岩夹薄层泥质粉砂岩和泥页岩。



(a) 地貌单元与原始地形等高线的拟合



(b) 中等风化岩面与物探等直线的拟合

图 2 原始地形和基岩面模拟示意图

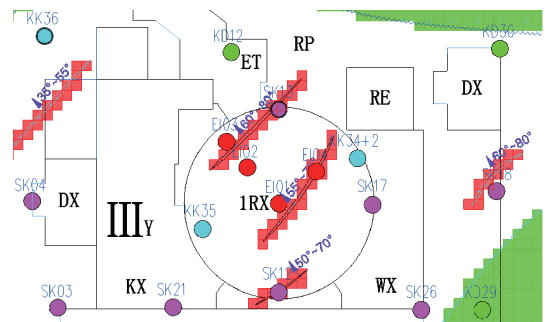
Fig. 2 Numerical Modeling of Topography and Bedrock

### 2.2.2 地基持力层内的强风化夹层模拟

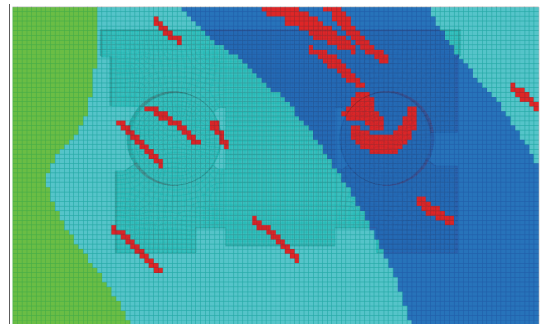
强风化夹层的变形模量较低, 对地基沉降影响较大。同时强风化夹层具有空间变异性, 同样导致了沉降的不均匀性。如何精确地模拟强风化夹层的分布规律是三维地质建模的难点。笔者基于 AutoCAD 平台开发了基于基岩平切图的有限元网格生成和岩体材料分区。通过采用地基标高  $\nabla -0.5 \text{ m}$  以下每隔  $2.0 \text{ m}$  的 CAD 图确定了地基岩土体横向和纵深范围内的强风化夹层的分布位置, 见图 3。

### 2.2.3 地基持力层内的岩体分区模拟

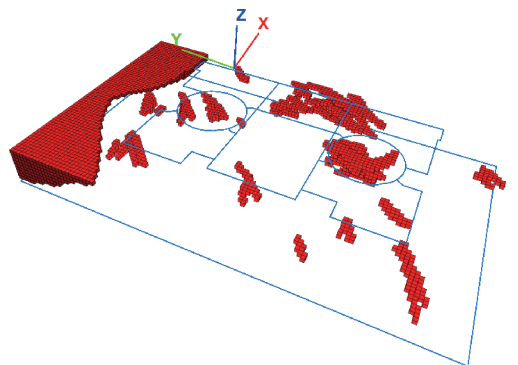
根据岩土工程勘察报告提供的核岛场地岩类分布情况、褶皱发育情况, 将场地核岛基础下地基进行分区, 该核岛区地基有六种岩体组成, 即中等风化砂岩、泥质粉砂岩、泥页岩及微风化砂岩、泥质粉砂岩、泥页岩。按照工程力学特性进行划分, 同一分段内不同岩性但主要物理、声学、力学指标相近, 将这段岩体视为同一力学层考虑。根据工程力



(a) 基于 AutoCAD 图形的强风化夹层有限元单元模拟



(b) 核岛区  $\nabla -0.5 \text{ m}$  强风化夹层有限元单元俯视图



(c) 核岛区地基持力层内强风化夹层分布示意图

图 3 地基持力层内强风化夹层的模拟示意图

Fig. 3 Numerical Modeling of Strongly-weathered Intercalated Layers in Foundation Bearing Layer

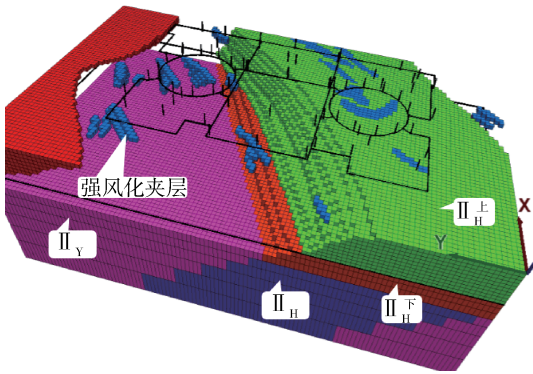


图4 地基持力层内的岩体分区模拟示意图

Fig. 4 Numerical Modeling of Zoning Map of Rockmass Quality in Foundation Bearing Layer

5)  $II_H$  岩体, 为微风化砂岩夹薄层泥质粉砂岩和泥页岩。

### 2.3 地基地下水位变化的影响

核岛区场坪带来的大规模山体开挖改变了地基岩土体的地下水位和流场, 地下水位的显著降低和补径排变化对沉降的影响应予以考虑。

根据开挖前后钻孔内的地下水位埋深, 插值生成三维地下水面(见图5), 对地下水面以下的岩土体考虑孔隙水压力和饱和容重。场坪后地下水位降低至 $\nabla -0.5\text{ m}$ 以下, 在计算中根据降低后的水位标高修改岩土体的孔隙水压力。

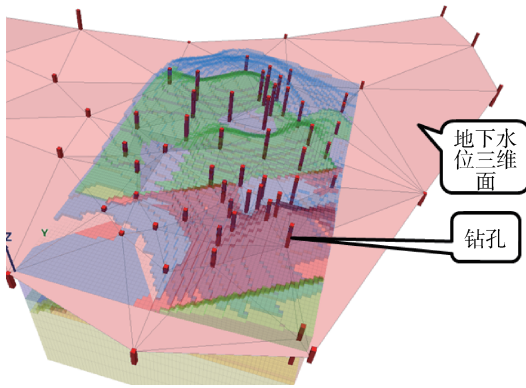


图5 钻孔控制的三维地水面示意图

Fig. 5 Numerical Modeling of Underground Water Table by Drill Holes

### 2.4 地基岩土力学参数的卸荷影响和蠕变效应

HAD 102/12 指出力学参数则与材料的基本规律(荷载—变形—时间的关系曲线)及其强度性质有关。水利工程中, 坝基深挖后, 建基面暴露的新鲜岩体不及时浇灌混凝土时, 会随着时间产生卸荷松弛、爆裂和风化破坏, 岩体质量总体上将逐渐降低

至一个稳定值, 可以通过分析岩体力学参数(如波速或弹性模量)开挖前后变化情况来确定卸荷影响的范围及程度。但是核电工程勘察资料往往缺乏地基负挖前后的岩体力学参数变化资料。参照水利工程的经验, 可以利用钻孔弹模法评价核电地基岩体的卸荷特征, 按累计波速变化率超过5%所对应的孔深定义为卸荷影响深度<sup>[12]</sup>, 对该孔深范围的岩体变形模量适量折减, 折减系数可根据监测资料进行反演确定。

若地基沉降在所有核设施安装后仍然持续, 且沉降速率没有降低, 则需进一步考虑岩体中软弱夹层的蠕变效应, 开展流变试验以作长期沉降分析。

本文因缺乏试验资料, 暂不考虑地基岩体的卸荷影响和蠕变效应, 仅从前三个因素来计算地基沉降量和分析不均匀沉降规律。

## 3 某核电厂核岛区沉降案例分析

### 3.1 计算模型

根据以上考虑因素对某核电厂核岛区沉降进行模拟, 地基有限元计算域、边界条件和单元尺寸的规定, 遵循HAD 102/12的规定。三维有限元模型的共196 444个六面体单元, 节点共209 742个, 长224 m × 宽134 m × 埋深-81 m。坐标系取2RX与1RX圆心连线方向为坐标系Y轴正向, 与指北针夹角为 $10^\circ$ , 计算模型高程系统与场地高程一致。1RX和2RX核岛筏基标高从 $\nabla -0.50\text{ m} \sim \nabla 4.50\text{ m}$ , 厚度为5.5 m。LX、NR、NLH和KX的筏基按实际尺寸模拟, 标高从 $\nabla -0.50\text{ m} \sim \nabla 2.5\text{ m}$ , 厚度为3.0 m。核岛筏基三维有限元计算模型见图6。

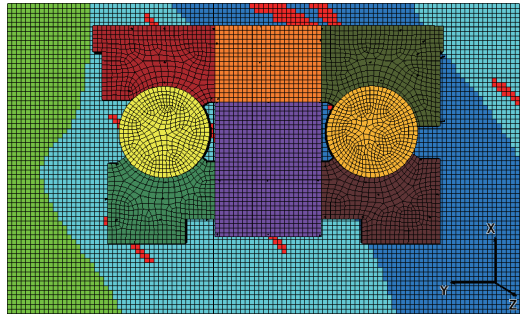


图6 核岛筏基分区模拟示意图

Fig. 6 Numerical Modeling of Raft Foundation of Nuclear Island

### 3.2 地基岩土计算参数

核岛地基的设计参数有静参数和动参数两

类。这里仅考虑静力荷载下的地基变形, 不考虑地震动荷载, 则沉降计算采用的地基静设计参数有: 岩土体的重力密度、抗压强度、抗剪强度参数、弹性模量(变形模量)、静泊松比和地基承载力。

岩土体本构模型采用摩尔库伦本构模型。主要物理指标、变形参数和强度参数取值见表 1。

表 1 地基岩土计算参数

Table 1 Calculating Parameter of Rock and Soil Foundations

地段	岩土层	$\gamma$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$E_s$ /GPa	$E'$ /GPa	C /MPa	$\Phi$ /°	$\nu$
核岛区	强风化夹层	20	0.46	0.46	0.04	22.8	0.30
1 号核岛	-0.50 ~ -29.0 m III <sub>Y</sub>	25	1.51	2.13	10.8	30.3	0.27
核岛	-29.0 ~ -81.0 m II <sub>Y</sub>	27	5.28	5.28	18.3	42.6	0.26
2 号核岛	-0.50 ~ -20.0 m III <sub>H</sub>	23	0.66	0.80	6.2	22.6	0.28
核岛	-20.0 ~ -34.0 m III <sub>H</sub>	25	1.51	2.13	10.8	30.3	0.27
核岛	-34.0 ~ -81.0 m II <sub>H</sub>	27	5.28	5.28	18.3	42.6	0.26

注: 卸荷回弹模量  $E_s$  和变形模量  $E'$  取标准值; 强风化夹层的泊松比在计算中取 0.30。

### 3.3 沉降计算流程

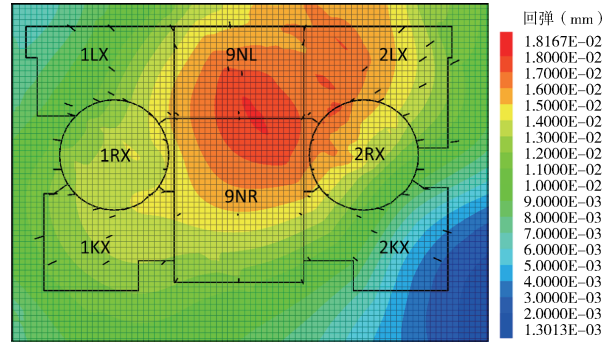
沉降计算包括原始山体的自重应力场计算、开挖卸荷回弹分析和加载筏基及核设施沉降分析。计算软件采用岩土数值分析软件 FLAC<sup>3D</sup>, FLAC<sup>3D</sup> 广泛用于核安全、核废料处置等分析计算<sup>[13-18]</sup>。

计算流程如下: 先计算自重应力场并清零自重产生的位移场, 然后计算开挖至  $\nabla -0.5 \text{ m}$  标高时的卸荷回弹变形量。构建筏基有限元模型, 筏基采用弹性本构模拟, 取穹顶及核设施的竖向荷载为 450 kPa, 以均布压力作用在 1RX 和 2RX 筏基表面, 对卸荷回弹变形进行清零, 叠加初始压密阶段的变形, 并计算加载后地基持力层顶面的总沉降量。

### 3.4 核岛受载卸载历程分析

根据 A 核电厂沉降监测资料, 沉降较大的监测点主要分布在 2RX 的北东侧、9NL、9NR 的东南侧和 2LX 的北西侧。其中 9NL 以中部沉降最大, 2RX 以北东侧沉降最大。核岛开挖后的回弹变形云图见图 7, 分析可知: 回弹变形以 2RX 的北东侧、9NL、9NR 的东南侧和 2LX 的北西侧卸荷回弹最

大, 并以 9NL 中部变形最大。回弹变形极值的分布规律与沉降监测数据极值的分布规律一致, 这从客观上说明了强风化层的变形模量较低, 对核岛地基沉降的贡献最大。

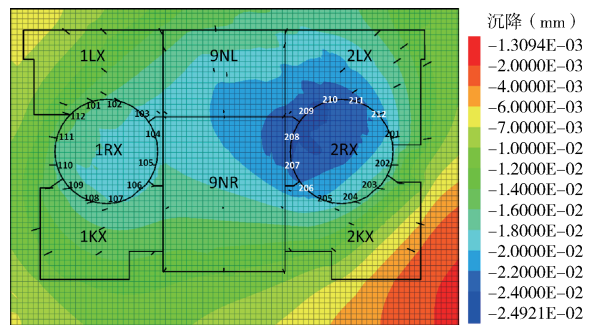


注: 位移正值代表位移方向竖直向上

图 7 核岛开挖后的卸荷回弹位移云图

Fig. 7 Unloading Rebound Displacement Nephogram After Foundation Excavation

按照实际监测点坐标在 1RX 和 2RX 各设置 12 个沉降监测点(见图 8)。施加筏基和核设施荷载, KX、LX、NR 和 NL 因未收集核设施荷载资料仅考虑筏基荷载, 将回弹变形作为加载后的初始压密沉降量叠加至最终沉降值中, 如图 8 所示。计算值和监测值的对比表明: 1RX 计算值和监测值吻合较好, 1 号核岛沉降计算值和监测值偏差为  $-1.15 \sim 0.37 \text{ mm}$ , 平均偏差为  $-0.60 \text{ mm}$ ; 2RX 计算值小于监测值, 偏差为  $-0.25 \sim 4.83 \text{ mm}$ , 平均偏差为  $2.70 \text{ mm}$ , 其中 2RX 核岛东北角沉降最大值监测点(208 ~ 210)的计算值和监测值偏差为  $0.65 \sim 2.65 \text{ mm}$ , 平均偏差为  $1.74 \text{ mm}$ 。监测点回弹及沉降计算值见表 2。



注: 位移负值代表位移方向竖直向下

图 8 考虑卸载加载的沉降计算值云图

Fig. 8 Settlement Displacement Nephogram by Foundation Excavation and Loading

表2 核岛地基监测点计算统计表

Table 2 Statistical Table of Monitoring Points in Nuclear Island

监测点编号	卸荷回弹/mm	加载变形/mm	计算值/mm
1RX101	11.27	3.21	14.48
1RX102	12.72	3.25	15.97
1RX103	14.23	3.30	17.53
1RX104	14.75	3.49	18.23
1RX105	13.95	3.56	17.51
1RX106	14.05	3.19	17.24
1RX107	13.96	3.13	17.09
1RX108	13.56	3.11	16.66
1RX109	13.02	3.15	16.17
1RX110	12.06	3.30	15.36
1RX111	11.17	3.33	14.51
1RX112	10.93	3.22	14.14
2RX201	11.88	5.72	17.59
2RX202	10.05	5.77	15.82
2RX203	8.90	5.62	14.52
2RX204	9.81	5.49	15.31
2RX205	11.95	5.45	17.41
2RX206	14.27	5.48	19.75
2RX207	15.95	6.00	21.95
2RX208	16.58	5.86	22.44
2RX209	16.67	5.72	22.39
2RX210	16.13	5.71	21.85
2RX211	15.18	5.68	20.86
2RX212	13.80	5.81	19.61

注：加载变形为仅考虑筏基和核设施作用下的沉降。

由核岛基底  $-0.5\text{ m}$  以下强风化夹层分布示意图(见图3(c))可知, 9NL、2LX 和 2RX 筏基下强风化夹层较多, 对地基卸荷回弹和沉降变形的影响较其他区域更为显著, 监测资料也表明这些区域沉降最大。计算表明: 计算值与监测值的分布规律一致, 最大沉降位置受软弱岩层的分布影响显著, 核岛区沉降值包括了压密阶段的浅表层压缩变形, 若仅考虑筏基、穹顶和核设施荷载下的地基沉降, 沉降值仅为  $3.21\sim 6.00\text{ mm}$ 。按照本文建议的沉降限制标准, A 核电厂地基总沉降小于  $25.40\text{ mm}$ , 核岛区横向最大不均匀沉降小于  $19.05\text{ mm}$ , 满足核安全的要求, 但需关注未来核电厂运行期间的沉降趋势, 如沉降速率无减小迹象, 需进一步考虑蠕变。

## 4 结论

本文详细介绍了核岛沉降计算的所依据的核电

标准、计算思路、参数取值、计算方法和评价标准, 结论如下:

1) 核岛区沉降计算中可考虑地基在卸载和再加载下的非线性、地基岩土力学特性的空间变异性、地基地下水位变化的影响以及地基岩土力学参数因开挖、排水和回填而受扰动的几何尺寸和蠕变效应。

2) 核岛区地基下的软弱夹层是不均匀沉降的主要因素, 合理的三维地质模型是准确预测沉降的前提。

3) 建议核电厂在厂坪之前及建造阶段持续监测, 建造阶段包括开挖、回填和建筑物建造, 开挖阶段必须监测地基岩土体的变形(隆起和沉降), 开挖后测定地基岩土体变形参数的变化; 增加沉降监测的频次, 并可采用无线遥测技术; 在重大荷载施加期间(如穹顶吊装), 可作为一次现场原位载荷试验并反演岩体变形模量。

### 参考文献:

- [1] 郑文棠, 徐晓斌, 张敏. 中硬土及软岩厂址勘察技术研究报告 [R]. 广东省电力设计研究院, 2013.
- [2] NUREG-0800. 审查核电厂安全分析报告的标准审查大纲 [S]. 美国核管理委员会核反应堆管理局.  
NUREG-0800. Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants; LWR Edition Site Characteristics and Site Parameters [S]. U. S. NRC.
- [3] 核设施厂址评价安全规定 [S]. 国家环境保护总局核与辐射安全中心, 2006.  
NS-R-3, Site Evaluation for Nuclear Installations [S]. International Atomic Energy Agency, 2003.
- [4] HAD 102/12, 核安全导则汇编—核电厂的地基安全问题 [S]. 国家核安全局.  
NS-G-3.6, Geotechnical Aspects of Site Evaluation and Foundations for Nuclear Power Plants [S]. International Atomic Energy Agency, 2004.
- [5] GB 50267-201x, 核电厂抗震设计规范(征求意见稿) [S].  
GB 50267-201x, Code for Seismic Design of Nuclear Power Plants [S].
- [6] United States Army Corps of Engineers. Rock Foundations [R]. EM1110-1-2908.
- [7] United States Army Corps of Engineers. Settlement Analysis [R]. EM1110-1-1904.
- [8] 美国西屋公司. AP-1000 设计控制文件(第18版) [R]. 2012.  
Westinghouse Electric Corp. AP1000 Design Control Document (Ver. 18) [R]. 2012.

(下转第127页 Continued on Page 127)

经过上述调整后, 台板的在工作频率  $25 \text{ Hz} \times (1 \pm 10\%) (22.5 \sim 27.5 \text{ Hz})$  范围内的振动均方根速度降低到了  $2.8 \text{ mm/s}$  以内, 达到了 ISO 10816 -2 中 A 区的标准。因此, 若想让台板的振动达到规范要求的标准, 台板的尺寸至少要做出如下调整, 见表 4。

表 4 台板尺寸调整表

Table 4 Section Adjustment of Table Beams

台板截面名称	初始尺寸/ mm	调整后尺寸/ mm	增加的混凝土量/ $\text{m}^3$	增加总量
CB1	1 970 × 4 300	1 970 × 4 800	14.1	287.7
CB2	1 465 × 3 740	2 015 × 4 240	42.6	
CB3	1 700 × 3 730	3 200 × 4 730	111.1	
CB4	2 380 × 4 230	2 380 × 5 230	41.7	
CB5	2 700 × 5 384	4 000 × 5 384	21.0	
LB2	2 750 × 3 100	3 250 × 3 100	18.8	
LB3	2 750 × 3 100	3 250 × 3 100	18.8	
LB4	3 193 × 3 200	3 693 × 3 200	19.6	

值得一提的是, 调整前, 台板混凝土重量为  $44\ 151 \text{ kN}$ , 设备重量为  $50\ 024 \text{ kN}$ , 双方之比为  $0.88:1$ , 基础混凝土重量比设备重还轻。调整后, 台板混凝土重量达到  $51\ 344 \text{ kN}$ , 双方之比为  $1.03:1$ , 基础混凝土重量超过了设备总重量。

### 3 结论

本文介绍了一个核电厂半速汽轮发电机基础的设计实例, 该基础设计过程中遇到了按照厂家给出的参考截面和规范方法提供的不平衡荷载进行动力分析, 得出基础的振动不满足规范要求的情况。通过仔细研究基础的振动特性, 针对性地调整混凝土截面的尺寸, 将基础的振动峰值均调整至工作频率的 10% 以上, 从而有效地降低了基础的振动幅值, 使之满足规范的要求, 实现了一个合格的基础设计。

#### 参考文献:

- [1] GB 50040 - 1996, 动力机器基础设计规范[S].
- [2] DIN4024 Part1 - Machine Foundations; Flexible Structures That Support Machines with Rotating Elements[S].
- [3] ISO 1940 - 1 Mechanical Vibration-balance Quality Requirements for Rotors in a Constant (Rigid) State-Part 1: Specification and Verification of Balance Tolerances[S].
- [4] ISO 10816 - 2 Mechanical Vibration-evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-rotating Parts-Part 2: Land-based Steam Turbines and Generators in Excess of 50 MW with Normal Operating Speeds of 1 500 r/min, 1 800 r/min, 3 000 r/min and 3 600 r/min[S].

(责任编辑 林希平)

(上接第 122 页 Continued from Page 122)

- [9] 太沙基, 佩克, 梅西. 工程实用土力学 [M]. 威立出版社, 1996.  
TERZAGHI K, PECK R B, MESRI G. Soil Mechanics in Engineering Practice [M]. Wiley, 1996.
- [10] 鲍尔斯. 基础工程分析与设计 [M]. 威立出版社, 1982.  
BOWLES J E. Foundation Analysis and Design [M]. Wiley, 1982.
- [11] PECK R B. Foundation Engineering [M]. Wiley, 1953.
- [12] 尹健民, 艾凯, 刘元坤, 等. 钻孔弹模法评价小湾水电站坝基岩体卸荷特征 [J]. 长江科学院院报, 2006, 23(4): 44-46.  
YIN Jianmin, AI Kai, LIU Yuankun, et al. Unloading Characteristic Valuation of Xiaowan Hydropowerstations Foundation Rock Mass by Borehole Elasticity Modulus Method [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2006, 23(4): 44-46.
- [13] Waste Control Specialists LLC. Evaluation of Structural Stability of Disposal Units by Numerical Modeling with FLAC [R]. Appendix 3.4-1: Low-level Radioactive Waste Disposal License Application, 2007.
- [14] 孙锋, 潘蓉, 张顶立, 等. 秦山一期海堤软土地基沉降规律的耦合分析 [J]. 核安全, 2011, 4(4): 18-22.

- SUN Feng, PAN Rong, ZHANG Dingli, et al. Coupling Analysis on the Soft Ground Settlement Laws in Qinshan Nuclear Power Phase I Sea Wall Project [J]. Nuclear Safety, 2011, 4(4): 18-22.
- [15] 刘浩. 重庆市涪陵核电厂厂区内边坡稳定性研究[D]. 成都理工大学, 2012.
- [16] 郑文棠. 核电厂高边坡抗震验算和加固设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(Supp2): 3691-3971.  
ZHENG Wentang. Antiseismic Stability Analysis And Reinforcing Design Of Nuclear Power Plant High Slopes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Supp2): 3691-3971.
- [17] 吕涛, 杨球玉, 耿学勇, 等. 岩石坚硬程度对核电厂地基—基础地震响应特征的影响分析 [J]. 岩土力学, 2010, 04: 1319-1325.  
LÜ Tao, YANG Qiuyu, GENG Xueyong, et al. Study of Influence of Rock Hardness on Characteristic of Seismic Response of Bedrock-foundation of Nuclear Power Plants [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1319-1325.

(责任编辑 高春萌)