

某核电厂非均质地基的岩土工程分析

李勇, 张润明, 郑文棠

(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: 随着我国电力需求的不断增加, 我国核电发展中非坚硬岩地基、非火成岩地基和非均质地基将纳入未来核电站设计的厂址类型, 因此非均质地基核电厂地基岩土工程勘察与分析摆在专业技术人员面积的一个首要问题。文章以某沉积岩核电厂址为例, 根据场地特点, 通过岩类划分、风化程度划分, 进而将每个核岛地基进行工程地质单元划分, 提出相对应的岩土设计参数, 提出了非均质地基岩土工程分析方法, 为我国非均质地基核电厂发展提供一定的技术支持, 对非均质地基核电厂岩土工程勘察具有一定的指导意义。

关键词: 核电; 非均质地基; 分析评价; 参数选用

中图分类号: P642

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)03-0091-05

Geotechnical Engineering Analysis of a Nuclear Power Plant with Heterogeneous Foundation

LI Yong, ZHANG Runming, ZHENG Wentang

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

Abstract: With the increasing power demand in China, the nuclear power development in non hard rock foundation, non igneous rock foundation and non homogeneous foundation will be incorporated into the future in the design of nuclear power plant site types. Therefore, non homogeneous soil nuclear power plant foundation geotechnical engineering investigation and analysis in the area of professional and technical personnel of a primary problem. This paper in a sedimentary rock nuclear power plant as an example, according to the characteristics of the site, through the rock classification, weathering degree division, and then each of the nuclear island foundation engineering geological unit division, put forward corresponding geotechnical design parameters proposed non-homogeneous foundation geotechnical engineering analysis method for the non homogeneous ground nuclear power development to provide technical support and on non homogeneous ground nuclear power plant of geotechnical engineering investigation has certain guiding significance.

Key words: nuclear power; heterogeneous foundation; analysis and evaluation; parameter selection

随着我国电力需求的不断增加, 我国核电发展开始进入加速轨道, 沿海坚硬基岩厂址已基本处于建设和正在建设阶段, 后期沿海核电大多为非均质地基(包括非硬质岩)厂址, 内陆核电的积极发展, 大部分也为非均质地基(包括非硬质岩), 未来核电厂址地基问题将更加复杂^[1]。随着优良核电站场址的减少, 非坚硬岩地基、非火成岩地基和非均质地基将纳入未来核电站设计的厂址类型。本工程以某

非均质核电厂址为例, 论述非均质核电厂地基的岩土工程分析评价及岩土设计参数的选取。

1 核电厂地基岩土工程条件^[2-5]

某核电厂工程位于广西境内, 核岛区地层为志留系下统连滩群第五组(S_1ln_5)沉积岩, 具有不同尺度的由粗到细的沉积韵律, 最小的单个韵律厚度仅为3~40 cm, 最大尺度可达900 m。岩性为薄层~中厚层状砂岩夹泥质粉砂岩、泥页岩, 岩层厚度多数0.01~0.6 m, 最大厚度1.2 m, 三种岩性存在互层或夹层的现象。

沉积岩具有层理构造, 受沉积韵律、地质构

收稿日期: 2016-02-01

作者简介: 李勇(1978), 女, 宁夏银川人, 高级工程师, 硕士, 主要从事电力工程勘察工作(e-mail) liyong@gedi.com.cn。

造、变质等地质运动作用的影响，地层岩性、层厚、产状等变化较大，沉积岩在水平及竖直方向均具有各向异性；是典型的沉积岩场地不均匀地基。

本工程具体地质结构特点如下：

1.1 褶皱作用

厂址场地地质构造以褶皱为主，在走向北东的褶皱上叠加了走向北西的褶皱，次级褶皱很发育。

核电场地北部(1#核岛)位于褶皱核部，岩层走向近NE60°，岩层倾角总体较平缓，多为10~30°，岩性以泥质粉砂岩和泥页岩为主；场地南部(2#核岛)位于褶皱翼部，岩层倾角较陡，多为40~70°，岩性以粉砂岩为主，夹泥质粉砂岩和泥页岩。

由于层厚和岩性的不同，褶皱发生过程中，抗塑性变形能力较强的中厚层砂岩为褶皱中的能干层，在褶皱的各部位层厚变化不大，局部厚层泥质粉砂岩及泥页岩中的薄层砂岩，在褶皱等地质构造过程中，由于泥质粉砂岩及泥页岩揉皱、扭曲等变形幅度较大，使薄层砂岩在周围软岩大幅度变形影响下，发生脆性变形，产生“弯断”现象。泥质粉砂岩、泥页岩受强烈挤压作用下，常发生塑性变形，发生塑性变形的物质逐渐由受挤压的翼部向扩张的核部流动，即弯流作用。因此钻孔岩芯中泥、页岩多见流纹状纹理，在褶皱翼部泥质粉砂岩、泥页岩夹层较薄或缺失，在核部厚度相对增大且发生强烈揉皱。



图1 褶皱中各岩层厚度变化情况

Fig. 1 Variation of the thickness of the layers in the fold

1.2 变质作用

场地中志留系下统连滩群地层发生了不同程度的浅变质作用，从地表至深部，均有不同程度的变质作用，随深度加深，变质作用加强。根据岩矿鉴定成果，砂岩成分主要为石英(65%~90%)、水云母及绢云母(5%~25%)；泥质粉砂岩主要为石英(60%~70%)，水云母及绢云母(25%~30%)；



图2 钻孔中泥页岩揉皱现象

Fig. 2 The Crumpled phenomenon of the mud and shale in the borehole

泥页岩主要为石英(10%~30%)，水云母及绢云母(60%~90%)。三种岩类变质矿物主要为水云母及绢云母，且由砂岩-泥质粉砂岩-泥页岩水云母及绢云母含量逐渐增加，说明变质程度也逐渐增强，但变质作用并不彻底，因此泥质粉砂岩及泥页岩多为变余结构、构造，以隐晶质为主，原岩层理已发生变化，表现为板岩化或千枚岩化，见图3钻孔中所揭露的泥岩、页岩的板岩化。



图3 钻孔中所揭露的泥岩、页岩板岩化

Fig. 3 The slate phenomenon of the mud and shale in the borehole

1.3 蚀变作用

晚古生代地层经褶皱作用，褶皱形成过程中伴随热液活动，热液充填于节理裂隙中，形成黄铁矿-石英脉，同时受热液活动影响的岩脉周围岩石或微裂隙、孔隙发育的地层遭受蚀变作用，从而形成硅化，黄铁矿化(褐铁矿化)蚀变带。一般呈带状及团块状分布，经蚀变后的岩体其强度有所提高，其特点如下：

- 1) 一般分布于黄铁矿-石英脉或被褐铁矿化的石英脉周围。

2) 多发育于节理裂隙或孔隙较发育的砂岩中。

3) 经蚀变作用后,岩层强度有所提高,矿化蚀变程度深的地段岩层层理难辨。

1.4 差异风化作用

核岛区基岩以砂岩、泥质粉砂岩、泥页岩为主,不同的岩性,其矿物成分不同,抗风化能力也不尽相同。砂岩矿物成分以石英为主,含少量水云母及绢云母,其抗风化能力较强。泥页岩矿物成分主要为水云母及绢云母石英,含少量石英,其抗风化能力较弱。泥质粉砂岩中石英、水云母及绢云母矿物含量均处于砂岩、泥页岩之间,其抗风化能力也处于两者之间。

由于上述原因,核岛区差异风化作用明显,钻孔中强风化层和中等风化层交替出现的现象较为普遍,上部以强风化层为主,夹中等风化层;中部以中等风化层为主,夹强风化层;下部主要为中等风化层和微风化层,不均匀风化夹层的产状与地层产状基本一致。



图4 钻孔中揭露的岩体差异风化情况

Fig. 4 Differential weathering of rock masses exposed in borehole

2 岩土体单元的划分^[2-5]

2.1 岩类划分

本工程核岛区出露岩土层主要为砂岩、泥质粉砂岩、泥页岩等,岩层厚度多数0.01~0.6 m,最大厚度1.2 m,三种岩性存在互层或夹层的现象。勘测过程中将核岛区的地层划分为砂岩、泥质粉砂岩、泥页岩三大岩类:

1) 砂岩类:以细砂岩和粉砂岩为主,包括砂岩中夹有薄层其它岩性的地层,这一类地层经褶皱变形后厚度变化不大,抗风化能力较强,在近地表处揭露的砂岩类地层多呈中等风化状态。

2) 泥质粉砂岩类:以泥质粉砂岩为主,包括泥

质粉砂岩与砂岩互层及泥质粉砂岩中夹有薄层其它岩性的地层,这一类地层经褶皱变形后厚度有一定程度的变化,抗风化能力处于砂岩类与泥页岩类之间。

3) 泥页岩类:以页岩为主,包括泥岩及泥页岩与泥质粉砂岩互层的地层,这一类地层经褶皱变形后厚度变化较大,在褶皱的翼部这一类较薄或缺失,在褶皱的核部较厚,有揉皱现象,泥页岩类抗风化能力较弱。

2.2 风化程度划分

岩体的风化等级划分分定性及定量两种,本工程根据两种分级标准并结合具体岩土层条件进行风化等级的划分。风化程度划分中剪切波速的划分,充分考虑了原位测试得出的不同状态地基岩土工程参数。综上,将场地岩体风化程度划分为四个风化等级:即全风化(V)、强风化(IV)、中等风化(III)、微风化(II)四个风化等级,具体见表1。

表1 各岩类风化等级划分

Table 1 Classification of weathering grade of each rock type

风化程度	野外特征	剪切波速 $v_s / (m \cdot s^{-1})$	等级
全风化层	灰黄色、土黄色,岩体结构已经基本破坏,层理特征已模糊,但仍有结构强度,泥页岩风化呈粘土状,砂岩及泥质粉砂岩除石英外,其它矿物已完全风化,呈粉质粘土状,岩体可干钻,岩芯用手可捏碎。	<400	V
强风化层	风化裂隙发育,沿裂隙面多有泥质充填。泥页岩以浅灰~灰色为主,岩芯呈硬土状,岩芯中心部分可见层理及页理,层理及页理面颜色变浅,云母矿物以白云母或水云母为主;砂岩及泥质粉砂岩以黄褐色为主,岩体结构大部分破坏,矿物成分显著变化,岩质疏松易碎,多呈半岩半土状,小块岩芯用手易折断。	400 ~ 1000	IV
中等风化层	泥页岩呈灰~深灰色,少数为黑色,经浅变质,变余层理构造,隐晶结构,岩芯多呈碎块状,少数呈饼状,局部见板状劈理,劈理面呈丝绸光泽,局部岩芯手折可断;泥质粉砂岩、砂岩呈青灰色,块状构造,岩体结构部分破坏,沿节理面有次生矿物,岩芯呈块状或柱状,表面粗糙,风化裂隙发育,小块岩芯用手难折断。	1000 ~ 1800	III
微风化层	岩石经浅变质,块状构造,变余层理构造,层理面已熔结,隐晶结构或变余砂状结构,泥页岩呈深灰~黑色,砂岩及泥质粉砂岩呈灰白~浅灰色,原泥岩和砂岩呈薄层状互层的地层,经变质后在岩石中形成黑白相间的纹理,岩芯柱状,表面光滑,锤击声脆。	>1900	II

2.3 地基岩土单元划分

核岛场地地质构造情况见图5。1RX 地段位于褶皱翼部，岩层倾角较陡，岩性以粉砂岩夹泥质粉砂岩为主；2RX 地段位于褶皱核部，岩层倾角较缓，岩性以泥质粉砂岩和泥页岩为主。因此，在平面上将其分为两个区。

根据场地工程地质测绘及钻探资料、原位测试数据，充分考虑场地岩层岩性、产状、风化状态，将1、2号核岛场地进行工程地质分区(或分段)，见表2。以通过核岛中心的典型纵剖面为例进行工程地质分区(或分段)，见表2和图6。

表2 核岛场地地基工程地质分区

Tab. 2 Engineering geological division of island ground

风化等级	1号核岛背斜翼部 (Y)	2号核岛背斜核部 (H)
强风化(IV)	IV	IV
中等风化(III)	III _Y	III _H ^上 III _H ^下
微风化(II)	II _Y	II _H

3 地基主要岩土参数分析和选用^[2]

3.1 适用性分析

本文采用一定的勘测手段，将沉积韵律不均、岩性多样、地质及构造复杂的水平及竖直方向均处于各向异性的不均匀沉积岩场地，通过岩类划分，风化程度划分，进行地基岩土单元的划分，各岩土层参数以地基岩土单元为单位提供，从而指导物理模型和力学模型的建立，将复杂的问题简单化，因此，其适用性较强。

3.2 可靠性分析

本工程核岛基坑开挖后，进行了工程地质编录工作，通过对1、2号核岛场地岩性、岩层产状、岩体风化程度、蚀变、褶皱、节理裂隙分析验证，得出核岛区的地质条件与上述核岛区岩土工程分析与评价结论是一致的，地基设计参数是合理的。说明本工程采用的岩土工程分析是可靠的。

3.3 保守性分析

以剪切波速为例进行保守性分析，剪切波在岩

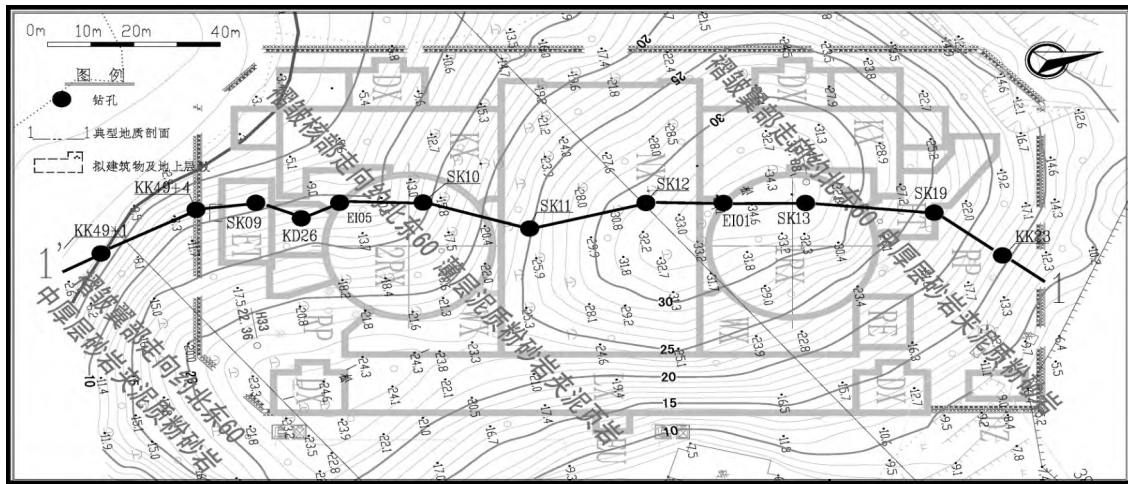


图5 核岛场地地质构造情况

Fig. 5 Geological conditions of the island site

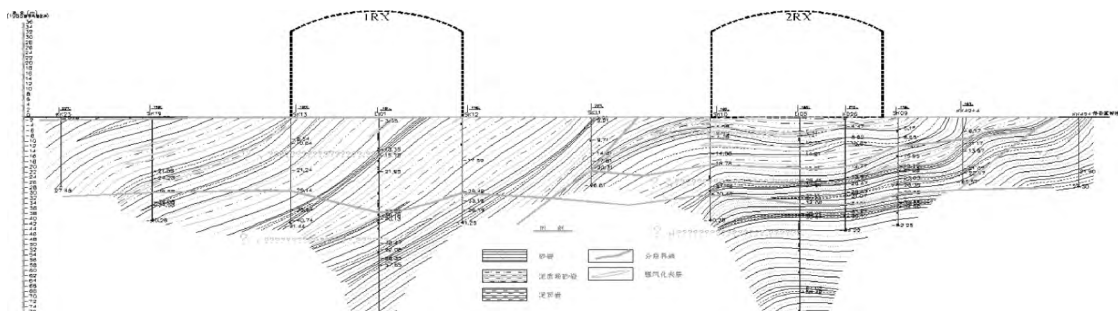


图6 横穿核反应堆场地1-1剖面工程地质分区

Fig. 6 Engineering geological division of the 1-1 section across the nuclear reactor site

表 3 核岛场地各工程地质分区物理力学参数

Tab. 3 The physical and mechanical parameters of the island site engineering geological division

地段	岩土层	静参数						动参数				
		重力密度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	饱和单轴抗压强度 f_r / MPa	粘聚力 C / MPa	内摩擦角 $\Phi (^\circ)$	弹性模量 $/ \text{MPa}$	泊松比 ν	剪切波速 $V_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	压缩波速 $V_p / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	动态剪变模量 $/ \text{MPa}$	动态弹性模量 $/ \text{MPa}$	动态泊松比 ν
核岛场地	强风化夹层	20	—	0.04	22.8	610	—	* 660 1 140	* 1 210 2 200	* 1 100 3 300	* 2 800 8 700	* 0.37 0.37
		1 号核岛	III _Y	25	14	10.8	30.3	2 730	0.27	1 800	3 200	8 000
2 号核岛	II _Y	27	55	18.3	42.6	7 340	0.26	2 200	3 900	13 400	34 200	0.30
		III _H ^上	23	10	6.2	22.6	1 100	0.28	1 600	2 800	6 600	16 500
核岛	III _H ^下	25	14	10.8	30.3	2 730	0.27	1 800	3 200	8 000	20 400	0.33
		II _H	27	55	18.3	42.6	7 340	0.26	2 200	3 900	13 400	34 200

注: * 为检层法获得的动参数; 其余动参数为跨孔波速获得。

体或岩层中传播速度除受岩石的强度影响外, 岩石的密度和岩体或岩层中节理裂隙的发育程度对剪切波速也有影响, 本核电厂址核岛区中等风化岩石的密度较高, 节理裂隙不发育。核岛区地基按深度进行分段统计, 且采取了略低的参数值作为设计输入有相对的保守性。

跨孔波速测试剖面位于强风化夹层较发育地段, 2 号核岛双跨孔剖面是核岛区中等风化层面最低, 强风化夹层最发育的地段, 以该地段的现场测试成果作为设计输入也有一定的保守性。

3.4 主要参数选用

以工程地质分区为单位进行参数统计, 主要参数见表 3。

4 结论

本文以某沉积岩核电厂址为例, 通过岩类划分、风化程度划分, 将每个核岛地基进行工程地质

单元划分, 再以每个工程地质单元为单位, 提出相对应的岩土设计参数, 并通过施工检验, 得出上述核电厂非均质地基岩土工程分析评价方法切实可行, 提出的地基设计参数合理, 从而使复杂问题简单化, 具有一定的可操作性。

参考文献:

- [1] 国家发展和改革委员会. 核电中长期发展规划(2005—2020 年) [L]. 2007-10-01.
- [2] 李勇. 某核电厂一期工程核岛区初步设计阶段(详测)岩土工程勘测报告(B 版) [R]. 广州: 广东省电力设计研究院, 2009: 25-147.
- [3] 李勇, 郑文棠. 核电厂沉积岩岩基激振试验研究 [J]. 震灾防御技术, 2011, 6(1): 69-76.
- [4] GB 50021-2001, 岩土工程勘察规范(2009 年版) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [5] DL/T 5093-1999. 火力发电厂岩土工程勘测资料整编技术规范 [S]. 北京: 中国电力出版社, 1999.

(责任编辑 高春萌)

(下接第 78 页 Continued from Page 78)

- [20] GUPTA V, PICU R C, BERGSTR J S. Nucleation of splitting cracks in columnar freshwater ice [J]. Acta Materialia. 1997, 45(4): 1411.
- [21] FROST H J. Mechanisms of crack nucleation in ice [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2001; 68(17-18): 18-23.
- [22] MENGER F M, ZHANG H, CARAN K L, et al. Gemini-induced columnar jointing in vitreous ice. cryo-hrsem as a tool for discovering new colloidal morphologies [J]. Journal of the American Chemical Society, 2002, 124(7): 1140-1141.
- [23] FRENCH J W. The fracture of homogeneous media [J]. Trans.

- Geol. Soc. Glasgow, 1925(17): 50-68.
- [24] HULL D, CADDOCK B. D. Simulation of prismatic cracking of cooling basalt lava flows by the drying of sol-gels [J]. Journal of Materials Science, 1999; 34(23): 5707.
- [25] OKABE A, BOOTS B, SUGIHARA K, et al. Spatial tessellations: concepts and applications of voronoi diagrams [M]. 2nd ed. Chichester: John Wiley, 2000.
- [26] 石崇, 褚卫江, 郑文棠. 块体离散元数值模拟技术及工程应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

(责任编辑 高春萌)