

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.04.020

基于地质和监测资料的地下洞室数值 仿真模型概化分析

聂卫平, 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: 以某水电站大型调压井工程为研究背景, 从介质类型、初始地应力场、主要结构面、地下水等方面进行概化分析, 建立三维数值计算模型进行洞室施工模拟, 分析了施工过程中围岩应力和位移的变化和分布规律, 将计算位移与实测位移进行对比分析, 得出一些有意义的结论。研究表明, 工程区的计算本构模型和初始地应力场均对围岩的稳定性造成一定的影响; 洞室施工期围岩较稳定; 该水电站大型调压井工程选择弹塑性本构模型并施加构造应力场进行施工期数值模拟计算, 更加接近真实的工程区围岩特性, 可为其它相关工程问题的数值计算提供参考。

关键词: 工程地质; 概化分析; 大型调压井; 本构模型; 初始地应力场

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)04-0096-06

Numerical Simulation Model of Underground Cavity Generalized Analysis Based on Geological and Monitoring Data

NIE Weiping, ZHENG Wentang

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

Abstract: With the large-scale surge tank engineering of a certain hydropower station as the research background, generalized analysis of the media type, the initial stress field, the main structure surface and groundwater was carried out; three dimensional numerical calculation model was established to simulate cavern construction; the stress and displacement change distribution of surrounding rock in the construction process were analyzed; some significant conclusions obtained by comparison the calculating displacement with the measured displacement. Studies show that, the calculation constitutive model and the initial stress field can produce certain effect to surrounding rock stability; surrounding rock is relatively stable in the construction process; for the large-scale surge tank engineering of such hydropower station, it is closer to real characteristics of surrounding rock that both the elastic-plastic constitutive model and tectonic stress field are chosen to participate in numerical simulation in the construction process, which has important guiding significance for the numerical calculation of other related engineering problems.

Key words: engineering geology; generalized analysis; large-scale surge tank; constitutive model; the initial stress field; numerical simulation calculation

工程地质层组的划分是地质模型概化和岩土体质量评价的基础和首要环节。通过工程地质层组的划分, 可以达到如下两个目的: (1) 地质模型概化和参数研究, 有助于设计师找出主要矛盾, 更好地

评价主要工程地质问题; (2) 可以更为清晰的反应地质结构的变化规律^[1]。数值仿真方法^[2-6]可以采用施工前的地质调查资料、设计资料和现场监测资料进行模拟, 了解工程设计的薄弱环节, 达到改造设计的目的。欲使岩体内部响应(变形、位移和应变)逼近真解, 其数值必须遵循几何、本构、力学和过程的仿真, 这是变形体解答的唯一性定理所决定的^[7]。数值仿真方法是一种近似算法, 影响计算结果的准确性的因素较多, 包括地质边界条件的准

收稿日期: 2015-08-11

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(41372275)

作者简介: 聂卫平(1982), 男, 江西临川人, 高级工程师, 博士, 主要从事城市电力隧道设计研究(e-mail) nieweiping@gedi.com.cn。

确性、地质概化模型的合理性、围岩力学参数的准确性、计算方法和本构模型的合理性、开挖和加固过程的仿真性等等,工程地质概化是进行洞室施工数值模拟的基础,因此,本文基于折减的围岩力学参数、设计支护参数和设计开挖方案,以某水电站大型调压井工程为研究背景,首先进行工程地质概化分析,然后建立地质概化模型和三维数值仿真模型进行数值模拟计算分析,对数值仿真的围岩应力、位移等力学性质进行分析,了解工程施工的围岩稳定性状况,获得工程区数值仿真合理的本构模型和初始地应力场,为洞室施工其它相关问题研究提供借鉴和指导。

1 工程地质模型概化

1.1 工程概况

某水电站尾水建筑物结构为三条尾水支洞连接一条尾水隧道,其交叉处连接一个尾水调压井共布置了三个尾水调压井。三个调压井按“一”字形布置,间距为102.0 m。计算考虑洞室有三个调压井、连通上室、九条尾水支洞、三条尾水隧洞。调压井开挖直径为29.3~34.3 m,净空高度92.0 m。调压井下部为五洞交叉口悬空结构,结构跨度大,对其洞室的支护提出了更高的要求。

1.2 围岩岩性概化

当前岩体变形参数的取值常按风化划界或以某一大的软弱层带或岩性相差很大的界面为界,将不同区带岩体视为等值连续体而取一个固定不变的综合变形模量进行计算,这是目前计算中地质原型概化和参数取值常用的模式^[8],某水电站调压井工程区以表层均匀风化为主,由地表向深处风化程度逐渐减弱。将工程区风化程度划分为全风化、强风化、弱风化上部、弱风化下部和微风化~新鲜五级。全风化底界水平与垂直深度一般0.00~10.00 m,强风化底界约10.00~20.00 m,根据揭露的风化程度信息,全风化和强风化分界线不明显,因此将这两层风化岩体归类为一层一全强风化岩体,便于分析。弱风化上部(弱上岩体)底界水平深度一般10.00~80.00 m,垂直深度一般10.00~50.00 m;弱风化下部(弱下岩体)底界水平深度一般30.00~90.00 m,垂直深度一般30.00~50.00 m;弱下岩体以下为微风化岩体和新鲜岩体,简称为微新岩体。

根据岩性和风化程度,将调压井工程及围岩划分为四种介质。全风化和强风化岩层地质界线不明显,均呈疏松状态,为散体结构,作为一种介质,即全强风化岩体;弱风化带上部比较疏松,含少量完整结构,作为一种介质,即弱上岩体;弱风化带下部比较坚硬,含少量散体结构,作为一种介质,即弱下岩体;微风化和新鲜岩体岩体性质差别不大,仅沿裂隙有轻微的风化,作为一种介质,即微新岩体。调压井工程洞室布置于微新岩体中,围岩岩性较好。

1.3 初始地应力场概化

将工程施工前就存在于岩体中的地应力,称之为初始应力或天然应力^[9]。根据该工程区ZK448和ZK450钻孔地应力监测资料发现,该区域垂直向应力以自重为主,地应力转化至三维有限元计算模型坐标下的应力与埋深呈线性关系,如图1所示。

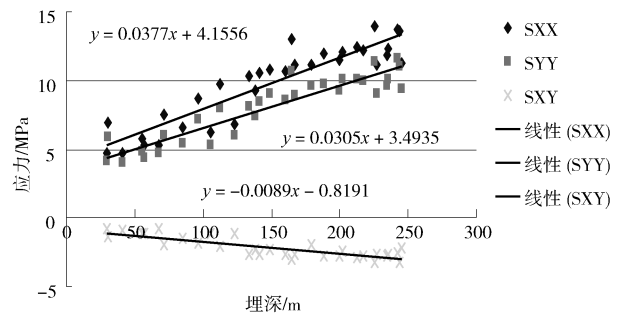


图1 转化到模型坐标系下应力与埋深关系

Fig. 1 Stress and depth relationship of 3-D finite element simulation model

根据不同的计算工况来施加初始地应力场,分为只考虑自重应力场、自重应力和构造应力联合应力场。考虑自重应力和构造应力联合应力场时,垂直方向采用自重应力,构造应力根据实测应力回归线性方程模拟,即 x 向构造应力与埋深 h 的关系为: $\sigma_x = 0.0377h + 4.1556$, y 向构造应力与埋深 h 的关系为: $\sigma_y = 0.0305h + 3.4935$ 。

1.4 结构面概化

通过尾水调压井地带的Ⅲ级断层有F20、F21、F22,属于Ⅲ级结构面的一般性断层、其余小断层、挤压面等Ⅳ级结构面发育平均间距约为20 m。调压井工程区主要断层详细情况见表1。

经地质资料分析,该调压井工程区受F20、F21、F22断层影响较大,数值仿真时地质构造考虑这三条断层,断层厚度、岩性和方位根据实际

情况进行概化。其他结构面因较细或距离开挖洞室较远，对洞室围岩稳定性影响较小，计算时不考虑。

表1 调压井工程区主要断层详细情况表

Tab. 1 Main faults of the surge tank engineering area details

断层	产状	宽度/m	迹长/m	等级
F20	N20°~30°E, NW∠60°~64°	0.3~0.4	>200	III
F21	N10°~28°W, SW∠72°~82°	0.9	>300	III
F22	N0°~22°W, SW∠42°~58°	0.5~1.2	>660	III

1.5 地下水概化

许多岩土工程事故的分析表明，裂隙岩体渗流场和应力场耦合作用对工程安全的重要性不可忽视^[10]。根据本工程的现场调查情况统计，微新岩体干燥或只有少量渗水，渗水量(钻孔压水试验求得岩体渗透系数，再由多布诺沃里斯基公式求得围岩的渗水量)为0.66~1.00 L·min⁻¹·m⁻¹；弱下岩体有渗水或滴水，渗水量为0.500~0.66 L·min⁻¹·m⁻¹；弱上岩体普遍有渗水滴水，渗水量为0.40~0.50 L·min⁻¹·m⁻¹；全强风化岩体普遍有渗水滴水，渗水量为0.40~0.50 L·min⁻¹·m⁻¹。

由于调压井洞室所处的微新岩体地下渗水较少，洞室施工亦未见围岩有明显地下水渗出，因此在数值计算时不考虑地下水对洞室施工的影响。

2 三维有限元模型和计算本构

2.1 三维有限元模型建立

根据上述地质概化分析，建立工程区的三维有限元计算模型。模型范围： $x = -349 \sim -103 \text{ m}$ ， $y = 0 \sim 450 \text{ m}$ ， $z = 501 \sim 865 \text{ m}$ ，共划分单元184 336个，节点38 954个，采用FLAC^{3D}软件进行模拟采用位移边界，实体单元模拟，钢筋和锚杆采用cable单元模拟。地下洞室布置及断层有限元计算模型见图2，围岩包括全强风化岩体、弱上岩体、弱下岩体、微新岩体，调压井地下洞室群处于微新岩体中，为II级围岩，岩性较好。工程区三维地质模型如图3。洞室总共分38步开挖。初期支护参数的锚杆和锚索采用cable单元模拟，喷混凝土采用shell单元模拟，设计初期支护参数见表2，初始地应力采用侧压力系数法施加。

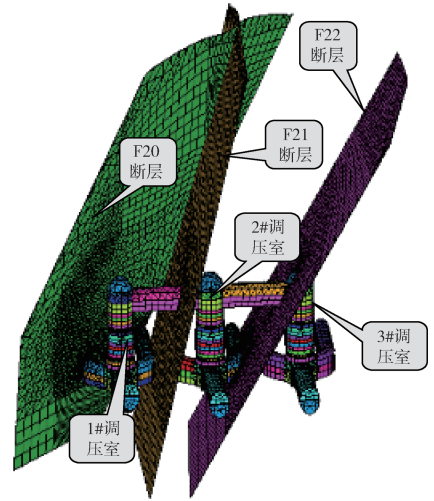


图2 地下洞室布置及断层有限元计算模型

Fig. 2 Underground cavern layout and faults finite element computation model

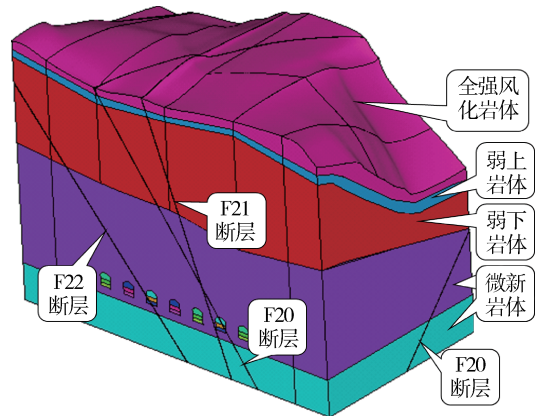


图3 调压井工程区三维地质模型

Fig. 3 3D Geological model of surge shaft project area

表2 设计初期支护参数

Tab. 2 Design primary support parameters

位置	部位	支护参数		
		锚杆	预应力锚索	喷混凝土
顶拱		Φ28@2 m×2 m, L=6 m	1 000 kN	C30, 厚度0.2 m
		Φ36@2 m×2 m, L=9 m	无粘结	
井身、顶拱及五岔口	井身及五岔口边墙	Φ25@2 m×2 m, L=4.5 m	1 000 kN	C20, 厚度0.15 m
		Φ32@2 m×2 m, L=9 m	无粘结	
锁口锚杆		预应力: 125 KN Φ32@1 m×1 m, L=9 m	—	—
		Φ32@2 m×2 m, L=9 m	—	—

表2(续) 设计初期支护参数

位置	部位	支护参数		
		锚杆	预应力锚索	喷混凝土
连通上室、尾水支洞、尾水隧洞	顶拱及边墙	$\Phi 25@2\text{ m}\times 2\text{ m}$, $L=4.5\text{ m}$	—	C20, 厚度0.15 m
	锁口	预应力: 125 kN $\Phi 32@1.5\text{ m}\times 1\text{ m}$, $L=9\text{ m}$	—	—

2.2 本构模型及其参数

由围岩变形监测资料分析可知, 施工过程中调压井围岩未出现流变特征, 所以只考虑弹性本构和弹塑性本构模型对其进行模拟分析。

2.2.1 弹性本构模型及其参数

弹性本构模型为各向同性的线弹性本构, 其主要计算参数为弹性模量 E , 泊松比 μ 和岩体密度。

2.2.2 弹塑性本构模型及其参数

弹塑性本构采用 Mohr-Coulomb 本构模型, 所需要的参数包括弹性模量 E 、泊松比 μ 、岩体密度、抗拉强度、粘聚力 c 和内摩擦角 φ 。计算力学参数见表3。

表3 有限元计算力学参数

Tab. 3 Mechanical parameters for finite element calculation

围岩类别	微新岩体	弱下岩体	弱上岩体	全强风化岩体	断层
摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	54.46	50.19	41.99	34.99	11.97
粘聚力 c/MPa	1.70	1.00	0.30	0.20	0.03
弹性模量 E/GPa	24.05	10.00	3.20	0.23	0.60
容重 $(\text{kN}/\text{m}^{-3})$	26.10	25.70	24.50	23.50	20.00
泊松比	0.22	0.24	0.26	0.28	0.33
抗拉强度 MPa	8.00	6.50	3.40	1.50	0.28

表5 各工况开挖完成后应力和位移计算结果统计

Tab. 5 Statistical results of surrounding rock stress and displacement after calculation of each conditions

工况编号	主应力范围/MPa		总位移/mm	应力位移计算结果分析
	大主应力	小主应力		
GK1	-25.13 ~ -0.05	-2.99 ~ 1.26	0.00 ~ 8.74	(1) 弹塑性模型的拉应力值较弹性明显要小; 初始地应力场对围岩的应力计算结果影响较大; 相同本构模型下, 构造应力场使得围岩拉应力增大; 不同的本构模型下, 围岩最大拉应力均较小, 最大拉应力为 2.70 MPa, 远小于微新岩体的抗拉强度, 围岩不会因为应力过大而发生破坏; 调压井洞室拐角、断层穿越部位容易出现应力集中; (2) 初始地应力场和本构模型对围岩变形影响均较大; 对于相同的本构模型, 施加构造应力场使得变形增大; 弹性本构模型开挖造成的位移要比弹塑性小; 在不同的本构模型下, 围岩变形较小, 最大位移 17.20 mm, 围岩较稳定; 构造应力场对围岩位移分布影响很大; 断层对位移有影响, 断层附近位移相对较大。
GK2	-42.41 ~ -2.46	-8.44 ~ 2.70	0.00 ~ 15.73	
GK3	-26.52 ~ -0.04	-4.45 ~ 0.83	0.00 ~ 13.21	
GK4	-32.54 ~ -0.08	-9.75 ~ 1.02	0.00 ~ 17.20	

注: 应力以拉为正, 压为负。

3 计算工况

根据分析目的, 拟定四种计算工况进行数值模拟分析, 计算工况见表4。

表4 数值模拟计算工况

Tab. 4 Calculation conditions of numerical simulation

工况编号	本构模型	工况说明
GK1	线弹性	初始地应力只考虑自重应力场
GK2	线弹性	初始应力场考虑自重和构造应力场
GK3	弹塑性	初始地应力只考虑自重应力场
GK4	弹塑性	初始应力场考虑自重和构造应力场

4 计算成果分析

各个工况开挖完成后, 围岩应力、位移计算结果分别见表5。为确定工程区洞室施工需采用的合理本构模型和初始地应力场, 选取2号、5号、8号尾水支洞三个收敛断面(尾支0+098.00、尾支0+102.00、尾支0+090.00)的表面收敛计 BC 测线位移进行对比分析, BC 测线高程为 573.25 m, 表面收敛计 BC 测线布置如图4。各个工况下测线收敛位移与计算位移对比见图5~图7。

由测线位移对比可知, 尾支0+098.00 断面处 GK1、GK2、GK3、GK4 计算值相对监测值变化值分别为 15.18%、5.45%、13.14%、3.80%; 尾支0+102.00 断面处 GK1、GK2、GK3、GK4 计算值相对监测值变化值分别为 15.96%、5.25%、8.99%、2.23%; 尾支0+090.00 断面处 GK1、GK2、GK3、GK4 计算值相对监测值变化值分别为

21.30%、6.59%、9.86%、3.18%。

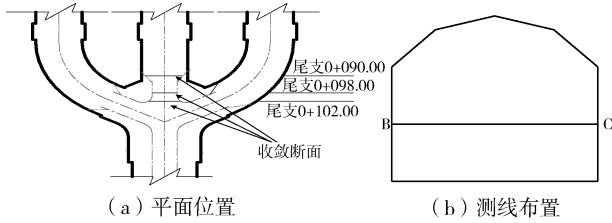


图4 表面收敛计 BC 测线布置

Fig. 4 Measuring line BC of surface convergence gauge layout

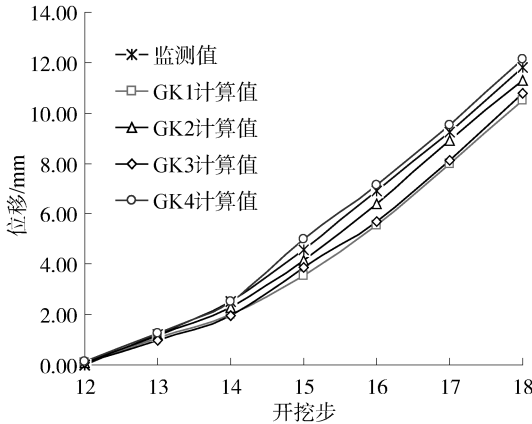


图5 尾支 0+098.00 断面 BC 测线位移对比

Fig. 5 Comparison of measuring line BC displacement of section 0+098.00

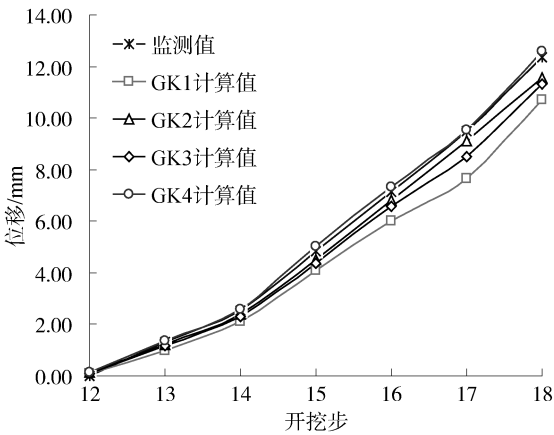


图6 尾支 0+102.00 断面 BC 测线位移对比

Fig. 6 Comparison of measuring line BC displacement of section 0+102.00

因此, GK4 计算位移变化过程与监测的位移变化的相关性最好, 该水电站大型调压井选择弹塑性本构模型并施加水平构造应力场进行施工期数值模拟计算, 更加接近真实的工程区围岩特性。

5 结论

结论如下:

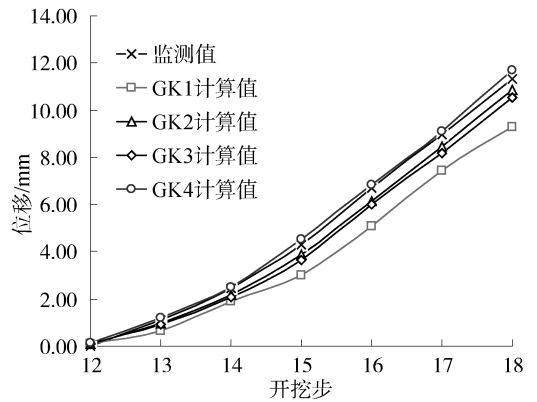


图7 尾支 0+090.00 断面 BC 测线位移对比

Fig. 7 Comparison of measuring line BC displacement of section 0+090.00

1) 洞室施工过程中的最大拉应力均小于调压井围岩抗拉强度, 调压井围岩不会因为应力而发生破坏。

2) 初始地应力场对围岩的应力和变形影响较大; 调压井洞室拐角、断层穿越部位容易出现应力集中, 结构面对围岩变形有较大影响; 模型本构类型对应力位移均有较大影响。

3) 围岩最大变形 17.20 mm, 说明该水电站大型调压井工程围岩较稳定, 洞室开挖不会破坏围岩的稳定性。围岩与断层相交处以及断层附近围岩较松软, 所以造成变形相对较大, 需要加强监测和支护。

4) 通过计算位移和监测位移对比分析, 弹塑性本构模型并施加构造应力场更加接近真实的工程区围岩特性, 对其它问题研究的数值计算具有重要的参考价值

参考文献:

- [1] 李晓昭, 罗国煜, 龚洪祥. 土体工程地质层组的划分 [J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 759-763.
- [2] 凌标灿, 彭苏萍. 工程因素对围岩稳定性影响二维数值模拟分析 [J]. 工程地质学报, 2001, 11(2): 367-371.
- [3] 杨为民, 陈卫忠, 李术才, 等. 快速拉格朗日分析目型地下洞室群稳定性 [J]. 岩土工程学报, 2005, 27(2): 230-234.
- [4] 陈帅宇, 周维恒, 杨强, 等. 二维快速拉格朗日法进行水布娅地下厂房的稳定性分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 22(7): 1047-1053.
- [5] 崔银祥, 聂德新, 陈强. 某电站大型地下洞室群主变洞确定性块体稳定性评价 [J]. 工程地质学报, 2005, 13(2): 212-217.
- [6] SAMANIA N, KOMPANI Z M, BARRY D A. Modflow e-quipped with a new method for the accurate simulation of axisymmetric flow [J]. Advances in Water Resources, 2004, 27(1): 31-45.

- [7] 王千. 龙滩工程地下洞室群围岩稳定和支持参数研究 [D]. 南京: 河海大学, 2005
- [8] PIRQUIER W. The effect of dam foundation conditions upon the design of dams [C]//14th International Congress of Large, 1986(3): 173-208.
- [9] 徐志英. 岩石力学 [M]. 北京: 中国水利水电出版

社, 1993.

- [10] ITO H, KITAHARA Y. The influence of the dispersion of the mechanical properties foundation [C]//Proc. of 6th ICRM, Montreal, 1987: 467-474.

(责任编辑 隋卿毅)

(上接第 68 页 Continued from Page 68)

- [6] 庄池杰, 曾嵘, 龚有军, 等. 交流输电线路的无线电干扰计算方法 [J]. 电网技术, 2008, 32(2): 56-60.
- [7] TRINH N G, MARUVADA P S. A method of predicting the corona performance of conductor bundles based on cage test results [J]. IEEE Trans., 1977(1): 312-325.
- [8] 庄池杰, 曾嵘, 龚有军, 等. 交流输电线路的无线电干扰计算方法 [J]. 电网技术, 2008, 32(2): 56-60.
- [9] 无线电干扰标准化技术委员会. 高压架空送电线无线电干扰计算方法: DL/T691—1999 [S]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [10] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册 [M]. 北京: 中国

电力出版社, 2004.

- [11] 国家能源局. 2011—2012 年投产电力工程项目造价情况 [EB/OL]. [2014-05-29]. <http://www.docin.com/p-1549995373.html>.
- [12] 国家能源局. 全国 6 000 千瓦及以上电厂发电设备平均利用小时情况 [EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2015-01/21/c_133936073.htm.
- [13] 中国电力企业联合会. 输变电工程经济评价导则: DL/T 5438—2009. [S]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

(责任编辑 高春萌)

(上接第 77 页 Continued from Page 77)

参考文献:

- [1] 环境保护部科技标准司. 火电厂大气污染物排放标准: GB 13223—2011 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [2] 戴铁华, 李彦, 胡昌斌, 等. 大型燃煤电厂大气污染物近零排放技术方案 [J]. 湖南电力, 2014, 34(6): 47-50.

- [3] 方宝龙. 燃煤电厂烟气近“零”排放技术方案浅析 [J]. 科技与创新, 2014(10): 146-150.
- [4] 刘晓威, 王冰, 鞠鑫, 等. 火电厂大气污染物近“零”排放污染控制技术的示范应用 [J]. 电力科技与环保, 2015, 31(6): 25-27.

(责任编辑 黄肇和)

(上接第 81 页 Continued from Page 81)

参考文献:

- [1] 林建中, 张赢. 脱硫废水零排放方案选择 [R]. 广州: 广东省电力设计研究院, 2014.

- [2] 吴海波, 龙国庆, 唐刚. 高硫酸根高氯根高硬度含盐废水处理工艺的选择 [J]. 中国给水排水, 2015, 31(18): 31-33.
- [3] 李培元. 火力发电厂水处理及水质控制(第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 238.

(责任编辑 张春文)

(上接第 91 页 Continued from Page 91)

5) 如果考虑将桩建入计算模型, 可以通过本方法得出的四个刚度参数输入到弹簧支座刚度矩阵中, 能够节省桩建模及其内部单元带来的大自由度, 计算模型更容易维护。笔者认为, 这也是一体化建模(上部结构、基础、地基在同一个计算模型中)发展过程中的一个重要里程碑。

参考文献:

- [1] 高大钊. 土力学与基础工程 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [2] 中华人民共和国建设部. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

(责任编辑 张春文)