

热 - 水 - 应力耦合模型及 FEBEX 原位试验二维有限元分析

张玉军

(中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 从建立应力平衡方程、水连续性方程、能量守恒方程和弹塑性矩阵入手, 提出了一个饱和 - 非饱和孔隙介质中且可考虑膨胀应力的热 - 水 - 应力耦合模型, 并编制了相应的二维有限元程序。以高放射性核废料地质处置的 FEBEX 原位试验为模拟对象进行了数值分析, 比较了实测值和计算值, 从而验证了程序的正确性并从分析结果中得到了一些有益的认识。

关键词: 热 - 水 - 应力耦合模型; 高放射性核废料; 地质处置; FEBEX 原位试验; 二维有限元分析

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2007)03 - 0313 - 06

作者简介: 张玉军(1956 -), 男, 博士, 研究员, 主要从事岩石力学与工程方面的研究工作。E-mail: yjzhang@whrsm.ac.cn。

Coupled thermo-hydro-mechanical model and 2D FEM analysis for FEBEX in-situ test

ZHANG Yu-jun

(Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: In the study on geological disposal of high level radioactive nuclear waste, it was important to establish the model of coupled thermo-hydro-mechanical processes and to simulate the laboratory and in-situ tests by numerical methods. Up to now many computation codes for THM coupling analysis had been made up in western countries and Japan. But in China the similar codes developed by Chinese was few. For this reason, through establishing the momentum equilibrium equation, the continuity equation for water, the energy balance equation and the elastoplastic matrix, one coupled thermo-hydro-mechanical model for saturated-unsaturated porous media, in which the swelling pressure could be considered, was suggested, and the relevant two dimensional code of finite element method was developed by the author. Taking the FEBEX in-situ test for geological disposal of high level radioactive nuclear waste as the modeling object, a numerical analysis was carried out. The measured data and the computed values of relative humidity, temperature, total water head and compressive stress in several parts are compared with each other, and some conclusions for the rightness of the code and the analyzed results were obtained.

Key words: coupled thermo-hydro-mechanical model; high level radioactive nuclear waste; geological disposal; FEBEX in-situ test; 2D FEM analysis

0 引 言

高放射性核废料最终被埋置于地下数百米深处的稳定岩层中后, 在处置库的近场存在着: 核废料的发热, 缓冲层的吸水湿润及其膨胀应力的产生, 岩体内地下水的流动和来自围岩的压力等。这些因素相互作用, 形成了复杂的热 - 水 - 应力耦合现象。为了搞清楚这种耦合现象的作用机理, 欧美及日本等发达国家已进行了许多的试验和理论工作。以原位试验为例, 有瑞士的 FEBEX、瑞典的 STRIPA、比利时的 BACCHUS、加拿大的 URL 及日本的釜石试验等项目。

与此同时, 国外也开发出了不少著名相关计算程序^[1], 如 MOTIF、THAMES、FRACON、ABAQUS、UDEC 等, 并开展了耦合模型验证的数值分析。

中国针对高放废物地质处置的研究工作虽然起步较晚, 但近十多年来还是取得了许多进展^[2-3]。与国外先进水平相比, 目前国内在相关研究中的软、硬件基础(如地下实验室和计算程序等)的建设方面还存在

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50578171); 国家自然科学基金重点资助项目(50239070)

收稿日期: 2005 - 12 - 31

较多不足, 鉴于这其中还缺少拥有自主知识产权的耦合分析计算软件的情况, 笔者在前期已经研制出了一个用于分析饱和孔隙介质中热-水-应力耦合弹塑性问题的二维有限元程序^[4-5], 现在其基础上加入了可处理非饱和及缓冲层膨胀力情况的功能。与国外类似软件相比, 本程序亦有一定的先进性, 如 FRACON 在能量守恒方程中没有考虑液相与固相的密度随孔隙水压力及温度的变化, THAMES 没有考虑材料屈服等。为了检验模型的可靠程度, 现以 FEBEX 原位试验为模拟对象, 将计算与实测所得的缓冲材料中相对湿度、岩体中温度、水头高度及应力进行比较, 从而对程序的正确性和分析结果作出评价。

1 弹塑性热-水-应力耦合模型

该模型适用的介质为各向同性、均质连续且处于饱和-非饱和状态并有膨胀力的孔隙介质。根据有关的理论^[6], 笔者将主要的控制方程推导如下。

1.1 应力平衡方程

在饱和-非饱和的岩土体中, 总应力增量 $d\sigma$ 和有效应力增量 $d\sigma'$ 可分别表示为

$$d\sigma = d\sigma' - mdp, \quad (1)$$

$$d\sigma' = D_T(d\varepsilon - d\varepsilon_p - d\varepsilon_T - d\varepsilon_w). \quad (2)$$

式中 D_T 为切线弹塑性模量矩阵; $d\varepsilon$ 为总应变增量; $d\varepsilon_p$ 为孔隙压力引起的应变增量 $d\varepsilon_p = -m \frac{dp}{3K_s}$; $d\varepsilon_T$ 为

温度引起的应变增量 $d\varepsilon_T = m \frac{\beta_s}{3} dT$; $d\varepsilon_w$ 为膨胀引起

的应变增量 $d\varepsilon_w = -m \frac{dF_w}{3K_e}$; m 为法向应力单位列阵;

β_s 为固相的热膨胀系数; K_s 为固相的体积模量; K_e 为孔隙介质的体积模量; p 为孔隙压力 $p = s_w p_w + s_g p_g$; s_w , s_g 分别为孔隙水饱和度和孔隙气体饱和度; p_w , p_g 分别为孔隙水压力和孔隙气体压力; dT 为温度增量; dF_w 为膨胀力增量。

根据虚功原理, 增量型的应力平衡方程可写为

$$\int_{\Omega} \delta \varepsilon^T d\sigma d\Omega - \int_{\Omega} \delta u^T db d\Omega - \int_{\Gamma} \delta u^T d\hat{f} d\Gamma = 0. \quad (3)$$

式中 $d\sigma$ 为总应力增量; db , $d\hat{f}$ 分别为体积力和面力增量; $\delta \varepsilon$, δu 分别为虚应变和虚位移。

将式 (1) 代入式 (3) 可得

$$\int_{\Omega} \delta \varepsilon^T d\sigma' d\Omega - \int_{\Omega} \delta \varepsilon^T m dp d\Omega - d\hat{f} = 0, \quad (4)$$

$$\text{式中} \quad d\hat{f} = \int_{\Omega} \delta u^T db d\Omega + \int_{\Gamma} \delta u^T d\hat{f} d\Gamma. \quad (5)$$

将式 (2) 代入式 (4) 并各项除以 dt , 整理后得

$$\int_{\Omega} \delta \varepsilon^T D_T \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} d\Omega - \int_{\Omega} \delta \varepsilon^T m \frac{\partial p}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega} \delta \varepsilon^T D_T \cdot$$

$$m \frac{\partial p}{\partial t} \frac{1}{3K_s} d\Omega + \int_{\Omega} \delta \varepsilon^T D_T m \frac{\partial F_w}{\partial t} \frac{1}{3K_e} d\Omega - \int_{\Omega} \delta \varepsilon^T D_T m \frac{\beta_s}{3} \frac{\partial T}{\partial t} d\Omega - \frac{d\hat{f}}{dt} = 0. \quad (6)$$

令岩土介质的水饱和度为 s_w , 孔隙水压力为 p_w , 不计孔隙中空气压力, 则有

$$p = s_w p_w, \quad (7)$$

$$\text{取全水头} \quad h = p_w / \gamma_w + z, \quad (8)$$

式中, γ_w 为水的重度, z 为位置水头。

将式 (8) 代入式 (7) 得

$$p = s_w \gamma_w (h - z), \quad (9)$$

故

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} &= s_w \gamma_w \frac{\partial h}{\partial t} + (h - z) \gamma_w \frac{\partial s_w}{\partial t} \\ &= s_w \gamma_w \frac{\partial h}{\partial t} + (h - z) \gamma_w^2 D_s \frac{\partial h}{\partial t}, \end{aligned} \quad (10)$$

式中 $D_s = \frac{\partial s_w}{\partial p_w}$ 为湿气容量 (moisture capacity), 其

由孔隙介质的水分特性曲线确定。

参考文献[7], 取膨胀力的有关计算式为

$$F_w = F_{w \max} s_w^k, \quad (k > 0), \quad (11)$$

$$s_w = (s_{ws} - s_{wr})(1 + |\alpha \psi|^n)^{-m} + s_{wr},$$

$$(0 < m < 1, n > 1), \quad (\alpha > 0). \quad (12)$$

式中 $\psi = h - z$; $m = 1 - 1/n$; $F_{w \max}$ 为最大膨胀力, 其由试验确定; s_{ws} 为最大饱和度; s_{wr} 为最小饱和度。

$$\text{则} \quad dF_w = F_{w \max} k s_w^{k-1} ds_w, \quad (13)$$

因为 $\theta = \phi s_w$, 其中 θ 为体积含水率; ϕ 为岩土介质的孔隙度。

于是有

$$ds_w = \frac{ds_w}{d\psi} d\psi = \frac{d\theta}{\phi d\psi} dh, \quad (14)$$

$$\text{从而} \quad dF_w = -\frac{m}{3} A dh, \quad (15)$$

$$\text{式中,} \quad A = \frac{k s_w^{k-1}}{k_e \phi} F_{w \max} \frac{d\theta}{d\psi}.$$

将式 (10) 和式 (15) 代入式 (6) 得

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \delta \varepsilon^T D_T \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} d\Omega - \int_{\Omega} \delta \varepsilon^T m [s_w \gamma_w \frac{\partial h}{\partial t} + (h - z) \gamma_w^2 D_s \frac{\partial h}{\partial t}] d\Omega + \\ \int_{\Omega} \delta \varepsilon^T D_T m A \frac{\partial h}{\partial t} \frac{1}{3} d\Omega + \int_{\Omega} \delta \varepsilon^T D_T \frac{m}{3k_s} [s_w \gamma_w \frac{\partial h}{\partial t} + (h - z) \gamma_w^2 D_s \frac{\partial h}{\partial t}] d\Omega - \\ \int_{\Omega} \delta \varepsilon^T D_T m \frac{\beta_s}{3} \frac{\partial T}{\partial t} d\Omega - \frac{d\hat{f}}{dt} = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

1.2 水连续性方程

根据质量守恒原理, 在 dt 时段内流入某一物体的水量应等于其内部储水量的增加。设定水的渗流可以用达西定律来描述, 并认为水及孔隙介质的密度 ρ_w ,

ρ_s 是温度和孔隙水压力的函数, 即

$$\left. \begin{aligned} \rho_w &= \rho_{w0}(T, p), \\ \rho_s &= \rho_{s0}(T, p), \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中 ρ_{w0} , ρ_{s0} 分别是初始状态的水及孔隙介质的密度。

经过一系列的推导, 可得出水的连续性方程为

$$\begin{aligned} & -\nabla^T \left\{ \frac{K r_w \gamma_w}{\mu_w} \nabla h \right\} + s_w \left(m^T - \frac{m^T D_1}{3k_s} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \\ & \gamma_w \left\{ D_s \phi + \frac{\phi s_w}{k_w} + s_w \left(\frac{1-\phi}{k_s} - \frac{1}{(3k_s)^2} m^T D_1 m \right) [s_w + \right. \\ & \quad \left. (h-z) \gamma_w D_s] \right\} \frac{\partial h}{\partial t} - \{ \phi s_w \beta_w + \\ & \quad s_w [(1-\phi) \beta_s - \frac{m^T D_1 m}{3k_s} \beta_s] \} \frac{\partial T}{\partial t} = 0. \quad (18) \end{aligned}$$

式中 K 为固有渗透系数矩阵; r_w 为比渗透系数矩阵, 其是 s_w 的函数; μ_w 为水的黏滞系数; k_w 为水的压缩模量; β_w 为水的热膨胀系数。

1.3 能量守恒方程

根据能量守恒原理, 在 dt 时段内流入某一物体的热量应等于其内能的增加。经过推导可得出能量守恒方程为

$$\begin{aligned} & -\nabla^T \lambda \nabla T + \phi s_w \rho_w C_w (\nabla^T T) V^a + [(1-\phi) C_s T \frac{\rho_s}{K_s} + \\ & \quad \phi C_w T \frac{\rho_w}{K_w}] (s_w + D_s \gamma_w (h-z)) \gamma_w \frac{\partial h}{\partial t} - \\ & \quad \{ (1-\phi) C_s T \rho_s \beta_s + \phi C_w T \rho_w \beta_w - [(1-\phi) \rho_s C_s + \\ & \quad \phi \rho_w C_w] \} \frac{\partial T}{\partial t} = 0. \quad (19) \end{aligned}$$

式中 C_w , C_s 分别是水及岩土介质的比热; $\rho_w C_w$ 、 $\rho_s C_s$ 分别是水及岩土介质的热容量; λ 为岩土介质的导热系数矩阵; V^a 为水流的表观速度。

1.4 弹塑性分析

在进行弹塑性计算时, 本程序中使用了三种屈服函数^[6], 即

(1) 莫尔-库仑准则

$$F = (\sqrt{3} \cos \theta_0 - \sin \theta_0 \sin \varphi) q - 3p \sin \varphi - 3c \cos \varphi = 0. \quad (20)$$

(2) 修正的剑桥黏土准则

$$F = \frac{q^2}{M_{cs}^2} - 2pp_c(\varepsilon_v^p) + p^2 = 0. \quad (21)$$

(3) $p-q-\theta$ 临界状态准则

$$F = [p - \alpha_p(\varepsilon_v^p)]^2 + \left[\frac{q}{n(\theta)} \right]^2 - \alpha^2(\varepsilon_v^p) = 0, \quad (22)$$

式中 $\theta_0 = \tan^{-1} \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2) - (\sigma_2 - \sigma_3)}{\sqrt{3}(\sigma_1 - \sigma_3)} \right], \quad -\frac{\pi}{6} \leq$

$\theta_0 \leq \frac{\pi}{6}$; $p = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$; $q^2 = \sigma_1(\sigma_1 - \sigma_2) + \sigma_2(\sigma_2 - \sigma_3) + \sigma_3(\sigma_3 - \sigma_1)$; c , φ 分别为岩土介质的黏聚力及内摩擦角; M_{cs} 为在 $p-q$ 平面内破坏线的坡度; $p_c(\varepsilon_v^p)$ 为当前屈服椭圆面在 p 方向的半径; $\alpha_p(\varepsilon_v^p)$ 为屈服椭圆面中心在 p 轴上的坐标; $n(\theta)$ 为椭圆面的在 q 和 p 方向上直径之比; $a(\varepsilon_v^p)$ 为椭圆面在 p 轴上的半径; ε_v^p 为塑型体积应变。

2 FEBEX 原位试验

2.1 试验概况

FEBEX 原位试验场^[8-12]位于瑞士的阿尔卑斯山脉, 海拔 1725 m, 其埋深约 450 m。基岩为由花岗岩和片麻岩等组成的结晶质岩类, 且规模巨大。试验坑道的平均直径是 2.28 m, 长度为 70.4 m。在坑道内模拟核废料贮存罐的加热器被水平放置, 在其周围填充了作为缓冲层的高密度压缩的膨润土块体。该试验的目的是: ①人工屏障系统真实性的演示; ②近场中热-水-应力耦合现象的研究; ③近场中热-水-地球化学耦合现象的研究。图 1 为 FEBEX 原位试验的概要图。其中加热器有两台, 每台外径是 0.90 m, 长度为 4.54 m, 材质是碳素钢。膨润土块体的平均含水率是 14.4%, 平均干重度为 17.0 kN/m³。填充完毕后缓冲层的干重度为 16.0 kN/m³。试验进行中缓冲层的最高温度被控制在 100°C。为此加热器的出力按以下步骤实施: 最初的 20 d 每台加热器以 1200 W 的功率加热; 之后的 33 d 每台加热器的功率提高到 2000 W 工作, 以使得钢衬的表面温度达到 100°C; 53 d 后以固定温度为 100°C 来控制加热器的功率。加热器出力的历时变化见图 2。

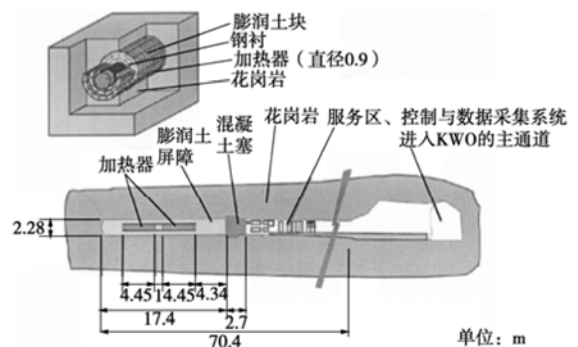


图 1 FEBEX 原位试验的概要图

Fig. 1 Outline of FEBEX in-situ test

2.2 FEBEX 膨润土的特性

根据室内试验, 可得到 FEBEX 膨润土的物性值如下。

(1) 膨胀应力

膨胀应力与干密度呈现函数关系, 以回归曲线表示为

$$P_s = \exp(6.77\rho_d - 9.07), \quad (23)$$

式中, P_s 是膨胀应力 (MPa), ρ_d 是干密度 (g/cm^3)。

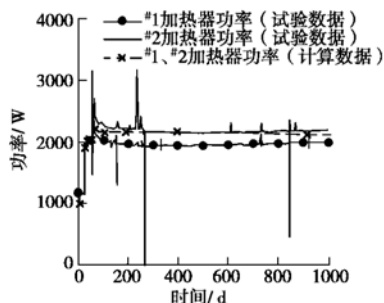


图2 加热器出力的历时变化

Fig. 2 Variation of output of heaters with time

(2) 剪切弹性模量

剪切弹性模量与干密度及饱和度呈线性关系, 以下式表示

$$G = -234.7 + 176.0\rho_d + 2.1S_r, \quad (24)$$

式中, G 是剪切弹性模量 (MPa), S_r 是饱和度。

(3) 饱和渗透系数

饱和渗透系数与干密度的函数关系式为

$$\log k = -2.97\rho_d - 8.57, \quad (25)$$

式中, k 是饱和渗透系数 (m/s)。

(4) 比渗透系数

比渗透系数与饱和度的函数关系式为

$$r_w = S_w^n, \quad (26)$$

式中, r_w 是比渗透系数, n 是经验常数, 本文取 2.0。

(5) 水分特性曲线

水分特性曲线用 Van Genuchten 模型描述, 如下式所示

$$\frac{S_w - S_{wmin}}{S_{wmax} - S_{wmin}} = [1 + (s/P_0)^{1-\lambda}]^{-\lambda}. \quad (27)$$

式中 s 是基质吸力 (MPa); S_{wmax} , S_{wmin} 分别是最大和最小饱和度, 其值为 1.0 和 0.0; P_0 , λ 是材料参数, 其值分别为 90 MPa 和 0.45。

(6) 比热

固相的比热是温度的函数, 在 45°C 和 150°C 之间以下式表示

$$C_s = 1.38T + 732.5, \quad (28)$$

式中, C_s 是固相的比热 ($\text{J}/\text{kg}/\text{K}$), T 是温度 ($^\circ\text{C}$)。

设定缓冲材料的总体比热容量为

$$(\rho C)_m = (1-n)\rho_s C_s + nS_w\rho_w C_w. \quad (29)$$

式中 n 是孔隙率; ρ_s 是固相的密度; C_w , ρ_w 分别是水的比热和密度。

(7) 导热系数

导热系数是饱和度的函数, 以回归曲线表示为

$$\lambda_m = 1.28 + \frac{0.57 - 1.28}{1 + \exp(\frac{S_w - 0.65}{0.10})}, \quad (30)$$

式中, λ_m 是导热系数 ($\text{W}/\text{m}/\text{K}$)。

(8) 线膨胀系数

线膨胀系数的平均值为

$$\beta = 1.0 \times 10^{-4}, \quad (31)$$

式中, β 是线膨胀系数 ($1/^\circ\text{C}$)。

3 数值分析与结果

3.1 计算条件

为模拟 FEBEX 原位试验, 取正交于单台加热器轴线且位于其长度中点的垂直面作为分析剖面, 近似地将三维问题简化为平面应变问题。考虑到试验布局的对称性和影响范围, 取计算域为直径是 25 m 的半圆形, 从其中心向外依次是加热器、缓冲层和岩体。坐标原点与圆心重合, X 轴向左为正, Y 轴向上为正。有限元网格见图 3, 其中共有 1156 个节点和 1100 个四边形等参数单元。

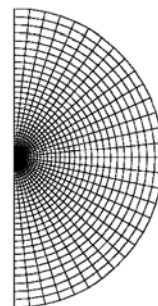


图3 有限元网格

Fig. 3 FEM mesh

初始条件设定为缓冲层和坑道回填完毕, 此时整个计算域的温度是 10°C 。不考虑伴随开挖发生的围岩中应力重分布和水压变化。因缓冲层的含水率是 14.4%, 与其相当的压力水头是 -9194.7 m, 除此之外, 岩体部分给与了 100 m 的全水头。

在圆周边界上, 温度及全水头是固定值。加热器的发热出力与实际试验相同, 即前 20 d 的功率是 1200 W/台, 之后的 33 d 调整为 2000 W/台, 53 d 后保持加热器的温度为 100°C 。

3.2 物理力学参数

缓冲材料的物性值已在前面专门介绍了。假定岩体和加热器是各向同性的均匀介质, 其物理力学指标见表 1。

3.3 有限元程序

使用了笔者基于前述热-水-应力耦合模型所开

表 1 岩体和加热器的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rockmass and heater								
介质	重度 ρ $/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	孔隙率 ϕ	渗透系数 $k/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	弹性模量 E/MPa	泊松系数 μ	比热 C $/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	热膨胀系数 $\beta/$ $(1 \cdot \text{K}^{-1})$	导热系数 λ $/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
岩体	26.4	0.1	1.0×10^{-12}	3.2×10^3	0.25	0.92	2.5×10^{-5}	3.3
加热器	70.0	0.0	1.0×10^{-20}	2.1×10^5	0.23	0.40	1.0×10^{-5}	200.0

注：岩体的 Van Genuchten 模型参数是 $\theta_s=1.6 \times 10^{-2}$, $\theta_r=0.0$, $\alpha=8.0 \times 10^{-3} \text{ 1/m}$, $n=1.6$, 岩体的比渗透系数 $r_w=S_e^{1/2}[1-(1-S_e^{1/m})^m]^2$ 。

发的有限元程序，其具有以下特点：

- (1) 可使用平面三节点、四节点及八节点等参数单元。
- (2) 可求解平面应力、平面应变及空间轴对称问题。
- (3) 可使用整体解法。
- (4) 可使用 $2 \times 2, 3 \times 3$ 或 4×4 的高斯求积方法。

3.4 计算结果

图 4 是加热器和缓冲层的剖面示意图，其中标有 A, B, C 三个观测点,它们依次位于加热器边缘、缓冲层中部和围岩内缘。设定相对湿度是基质吸力和温度的函数,以下式表示

$$\frac{P}{P_0} = \exp\left(\frac{\psi}{RT}\right), \tag{33}$$

式中, P/P_0 是相对湿度, R 是气体常数。

图 5 显示了相对湿度随时间的变化。对比实测值和计算值可见，二者在围岩内缘 C 点较为一致，但在加热器边缘 A 点和缓冲层中部 B 点则差别较大。

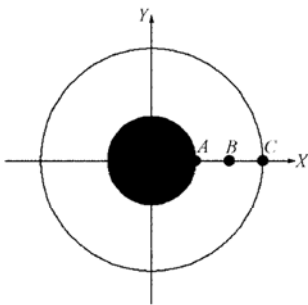


图 4 加热器和缓冲层的剖面示意图

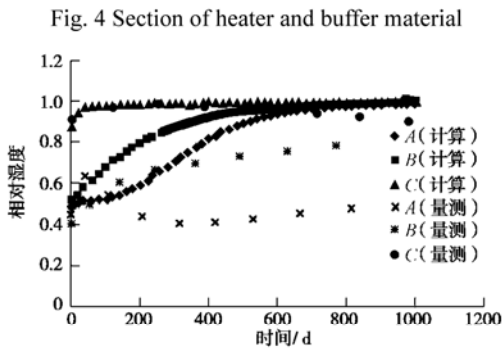


图 5 相对湿度 - 时间曲线

Fig. 5 Relative humidity - time curves

图 6 显示的是沿水平方向围岩中半径不同的若干

点处温度随时间的变化。对比实测值和计算值可见，二者吻合程度较好。

图 8 显示的是沿水平方向围岩中半径为 5.49 m 和 13.75 m 的二点处全水头随时间的变化。对比实测值和计算值可见，二者也存在较大差别。

图 9 显示了图 4 中 Y 轴与缓冲层外缘交点处压应力随时间的变化。对比实测值和计算值可见，二者在量级和发展趋势上是大体一致的。

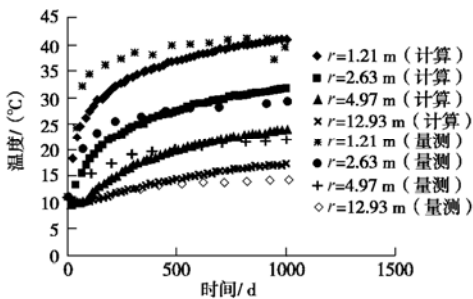


图 6 温度 - 时间曲线

Fig. 6 Temperature - time curves

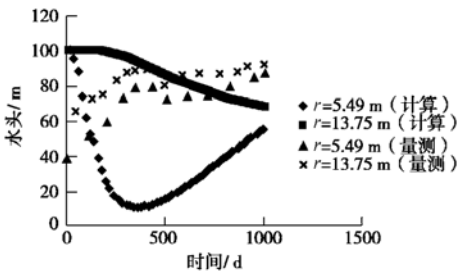


图 7 全水头 - 时间曲线

Fig. 7 Total water head - time curves

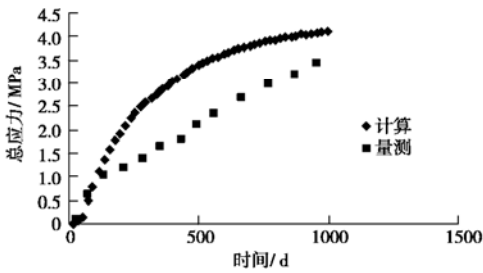


图 8 压应力 - 时间曲线

Fig. 8 Compressive stress - time curves

通过上述分析可知，使用所研制有限元程序模拟 FEBEX 原位试验，就实测值和计算值的对比而言，温度及应力随时间的变化较为一致，相对湿度随时间的

变化在围岩内缘点上也基本相符,但在加热器边缘点和缓冲层中部点上则差别较大,全水头随时间的变化也有较大差别。产生这些现象的原因可能在于:岩体的非均质连续及各向异性的影响,三维问题简化为平面问题带来的误差,没有考虑坑道开挖发生的围岩中应力重分布和水压变化等。需要指出,日本京都大学工学部的操上广志博士使用著名的 THAMES 程序^[13]对 FEBEX 原位试验曾进行了三维有限元模拟^[7],所用计算条件与物理力学参数与本文基本相同,也对比了实测值和计算值,二者的吻合程度与本文的结果大体相当。

4 结 论

(1)为评价高放射性核废料处置库近场的热-水-应力耦合现象,需要对缓冲材料和岩体开展膨胀应力、变形及强度指标、渗透系数、非饱和水分特性及热物性等基本参数的试验。

(2)在某种程度上所建立的模型能够表现处置库近场的热-水-应力耦合现象。

(3)温度、应力及某些部位的相对湿度随时间变化的计算值与实测值较为一致。

(4)处置库周围的应力场、渗流场、温度场要受到岩体的物理力学性质、洞室的几何形状和尺寸以及开挖方法的影响。

参考文献:

- [1] RUTQVIST J, BÖRGESSON L, CHIJIMATSU M, et al. Thermohydromechanics of partially saturated geological media: governing equations and formulation of four finite element methods[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2001, **38**(1):105 - 127.
- [2] 王 驹. 我国高放废物地质处置战略规划探讨[C]// 王 驹, 范显华, 徐国庆, 郑华铃. 中国高放废物地质处置十年进展. 北京: 原子能出版社, 2004:13 - 26.(WANG Ju. The strategic plan for deep geological disposal of high level radioactive waste in China[C]// WANG Ju, FAN Xian-Hua, XU Guo-qing, ZHENG Hua-ling. Geological disposal of high level radioactive waste in China: progress in last decade. Beijing: Atomic Energy Press, 2004:13 - 26.(in Chinese))
- [3] 沈珍瑶, 李国鼎, 李书绅. 高放废物处置库近场热湿力耦合初步模拟[C]// 王 驹, 范显华, 徐国庆, 郑华铃. 中国高放废物地质处置十年进展. 北京: 原子能出版社, 2004:370 - 378.(SHEN Zhen-yao, LI Guo-ding, LI Shu-shen. The coupled calculation in near field of a Hlw deep geological disposal repository[C]// WANG Ju, Fan Xian-hua, XU Guo-aing, ZHENG Hua-ling. Geological disposal of high level radioactive waste in China: progress in last decade. Beijing: Atomic Energy Press, 2004:370 - 378.(in Chinese))
- [4] 张玉军. 热-水-应力耦合弹塑性二维有限元程序的研制[J]. 地下空间与工程学报, 2005, **1**(1):108 - 111.(ZHANG Yu-jun. Development of 2D finite element program for coupled thermo-hydro-mechanical elasto-plastic problem[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2005, **1**(1):108 - 11.(in Chinese))
- [5] 张玉军. 一种模拟热-水-应力耦合作用的节理单元及其数值分析[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(3):270 - 274.(ZHANG Yu-jun. A kind of joint element simulating coupled thermo-hydro-mechanical phenomenon and relevant numerical analyses[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, **27**(3):270 - 274.(in Chinese))
- [6] LEIWS R W, SCHREFLER B A. The finite element method in the deformation and consolidation of porous media[M]. New York: John Wiley, 1987.
- [7] 操上广志. 地盘における热水应力连成现象のモデル化に関する研究[D]. 京都: 京都大学, 2003.(Kurikami Hiroshi, Study on modeling for coupled thermo-hydro-mechanical phenomena in rock mass[D]. Kyoto: Kyoto University, 2003.(in Japanese))
- [8] ENRESA: FEBEX project final report[R]. Publications tecnica 1/2000, 2000.
- [9] KEUSEN H R, GANGUIN J, SCHULER P, BULETTI M. Grimsel test site[R]. *Geology, Nagra*, NTB 87-14E, 1989.
- [10] MEIER P, FERNANDEZ P, CARRERA J, GUIMERA J. FEBEX-PHASE 1. Results of hydraulic testing in boreholes[R]. FBX 95.001, FBX 95.002, Nagra, NTB 96-14, 1995.
- [11] GUIMERA J, ORTUNO F, VAZQUEZ E, RUIZ B, MARTINEZ L, GARRERA J, MEIER P. Pulse tests at "in drift" boreholes, performance and evaluation[R]. UPC, 70-UPC-L-0-1001, 1996.
- [12] ALONSO E E, ALCOVERRO J, COSTE F, et al. DECOVALEX III, Task 1: Modeling of FEBEX in-situ test. Part A: hydro-Mechanical modeling of the rock, Project report[R]. 2001.
- [13] OHNISHI Y, KOBAYASHI A. THAMES. Coupled thermo-hydro-mechanical processes of fractured media[C]// Elsevier: Development in Geotechnical Engineering. Stephansson O, Jing L, Tsang C-F, 1996, **79**:545 - 549.