

# 核废物地质处置 THM耦合三维有限元分析<sup>\*</sup>

张玉军

(中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

**摘要:** 笔者将所建立的热—水—应力耦合模型及开发的有限元程序由二维分析拓展到三维分析, 并从方法论研究的角度, 以一个简单的核废物地质处置模型为算例进行热—水—应力耦合过程的三维数值模拟, 考察了近场的温度、饱和度、孔隙水压力、位移、正应力、流速等的分布与变化, 认为计算结果符合规律, 从而初步对程序的正确性作出了肯定的评价。

**关键词:** 核废物; 地质处置; 热—水—应力耦合; 三维模型; 有限元分析

中图分类号: O241 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2009)04-0664-06

## 3D Model and FEM Analysis for Coupled Thermo—Hydro—Mechanical Processes in Geological Disposal of Nuclear Waste

ZHANG Yu jun

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

**Abstract:** In this paper, the relative FEM program suggested by the author and a 2D analysis is developed in to 3D analysis for the coupled thermo—hydro—mechanical model. From a viewpoint of the methodology study, a 3D numerical simulation is carried out for the coupled thermo—hydro—mechanical processes in a simple model of geological disposal of nuclear waste, which is taken as the computation example. The distributions and changes of the temperature, the saturations degree, pore pressures, displacements, normal stresses and flow velocities in the near field are investigated. It is considered that the computation results are in keeping with the regular pattern. So the affirmative evaluation is given for the rightness of the program preliminarily.

**Keywords:** nuclear waste; geological disposal; thermo—hydro—mechanical coupling; 3D model; FEM analysis

## 1 引言

对于高放射性核废物地质处置中发生的流体—温度—力学的耦合现象, 虽然在不少情况下可将其简化为平面问题来处理, 但就其实质而言应是三维问题。近十多年来, 由于高放射性核废料地质处置研究的需要, 欧美及日本等发达国家已经开发出了不少用于岩土体热—水—应力耦合分析的计算软件<sup>[1,2]</sup>。中国针对高放废物地质处置的研究工作起步于上世纪八十年代中期, 到目前也取得了

不少进展。其中在数值模拟方面的有: 沈珍瑶等<sup>[3]</sup>建立了适合饱和与非饱和孔隙介质的热—水力耦合方程并给出了其求解方法, 对高放废物处置库近场热湿力耦合过程进行了初步的有限元分析; 刘亚晨<sup>[4]</sup>建立了 THM耦合的数学模型, 编制了相应的有限元程序, 探讨了核废物贮存裂隙岩体中水热耦合迁移以及应力响应等; 蒋中明等<sup>[5]</sup>结合现场试验成果, 对热诱导引起的岩体温度场、渗流场和应力场进行了有限元模拟; 笔者也已建立了一个饱和—非饱和孔隙介质中热—水—应力耦合过程

\* 收稿日期: 2009-01-26(修改稿)

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

基金项目: 国家自然科学基金项目(50578171)

的弹塑性模型,并开发了相应的二维有限元程序<sup>[6-8]</sup>,以核废物地质处置概念库及地下实验室试验为模拟对象,对程序的正确性和实用性作了检验。但上述计算均是针对平面问题进行的,更为贴近实际情况的三维分析尚未见到。随着笔者在本领域研究工作的深入,现将所开发的有限元程序由二维分析扩展到三维分析,并从方法论研究的角度,以一个简单的核废物地质处置模型为算例进行热-水-应力耦合过程的数值模拟,考察近场的温度、饱和度、孔隙水压力、位移、正应力、流速等的分布与变化,从而对程序的正确性和分析结果作出评价。

## 2 热-水-应力耦合模型

根据有关理论<sup>[9]</sup>,笔者已推得了求解平面问题的主要的控制方程<sup>[8]</sup>。现将其扩展到用于三维分析,有如下的算式:

### 2.1 增量型的应力平衡方程

$$\int_{\Omega} \mathbf{\hat{\epsilon}}^T D_T \frac{\mathbf{\hat{\epsilon}}}{\partial t} d\Omega - \int_{\Omega} \mathbf{\hat{\epsilon}}^T \mathbf{m} \{ \mathbf{s} \gamma_w \frac{\partial h}{\partial t} + (h - z) \gamma_w^2 D_s \frac{\partial h}{\partial t} \} d\Omega + \int_{\Omega} \mathbf{\hat{\epsilon}}^T D_T m A \frac{\partial h}{\partial t} \frac{1}{3} d\Omega + \int_{\Omega} \mathbf{\hat{\epsilon}}^T D_T \frac{m}{3k} [ \mathbf{s} \gamma_w \frac{\partial h}{\partial t} + (h - z) \gamma_w^2 D_s \frac{\partial h}{\partial t} ] d\Omega - \int_{\Omega} \mathbf{\hat{\epsilon}}^T D_T m \frac{\beta_s}{3} \frac{\partial T}{\partial t} d\Omega - \frac{\partial f}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

式中:  $D_T$  为  $6 \times 6$  的弹塑性模量矩阵;  $\mathbf{\hat{\epsilon}} = [ \mathbf{\hat{\epsilon}}_x \mathbf{\hat{\epsilon}}_y \mathbf{\hat{\epsilon}}_z \mathbf{\hat{\epsilon}}_{xy} \mathbf{\hat{\epsilon}}_{yz} \mathbf{\hat{\epsilon}}_{zx} ]^T$  为总应变增量;  $\mathbf{m} = [ 111000 ]^T$  为法向应力单位列阵;  $\mathbf{s}$  为饱和度;  $\gamma_w$  为水的容重;  $h$  为全水头;  $z$  为位置水头;  $D_s = \partial \mathbf{s} / \partial R_w$  为湿气容量 (moisture capacity);  $R_w$  为孔隙水压力;  $A = k_s^{k-1} F_{vmax} / (k\phi) d\phi / d\psi$  为膨胀力计算项;  $k$  为经验常数;  $K$  为孔隙介质的体积模量;  $\phi$  为孔隙度;  $F_{vmax}$  为最大膨胀应力,其由试验确定;  $\theta$  为体积含水率;  $\psi = h - z$ ;  $K$  为固相的体积模量;  $\beta_s$  为固相的热膨胀系数;  $dT$  为温度增量;  $df = \{ df_x df_y df_z \}^T$  为外荷载增量。

参考文献 [10], 取饱和度计算式为:

$$\mathbf{s} = (\mathbf{s}_s - \mathbf{s}_r) (1 + |\alpha \mathbf{\hat{\epsilon}}|)^{-m} + \mathbf{s}_r \quad (\alpha > 0) \quad (2)$$

式中:  $m = 1 - 1/n$  ( $0 < m < 1$ ,  $n > 1$ );  $\mathbf{s}_s$  为最大饱和度;  $\mathbf{s}_r$  为最小饱和度。

### 2.2 水连续性方程

$$-\nabla \cdot \left\{ \frac{K_r \gamma_w}{\mu_w} \nabla \psi \right\} + \mathbf{s} \left( m^T - \frac{m^T D_T}{3k} \right) \frac{\mathbf{\hat{\epsilon}}}{\partial t}$$

$$+ \gamma_w \left\{ D_s \phi + \frac{\phi \mathbf{s}}{k} + \mathbf{s} \left( \frac{1-\phi}{k} - \frac{1}{(3k)^2} m^T D_T m \right) \right\} \mathbf{s} + (h - z) \gamma_w D_s \left\} \frac{\partial h}{\partial t} - \left\{ \phi \mathbf{s} \beta_w + \mathbf{s} [ (1-\phi) \beta_s - \frac{m^T D_T m \beta_s}{3k} ] \right\} \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla^T D_t \nabla T = 0 \quad (3)$$

式中:  $K = [ K_x K_y K_z ]$  为固有渗透系数矩阵;  $\mathbf{k}$  为比渗透系数矩阵,其是  $\mathbf{s}$  的函数;  $\mu_w$  为水的粘滞系数;  $k$  为水的压缩模量;  $\beta_w$  为水的热膨胀系数;  $D_t$  为温度梯度水分扩散系数。

### 2.3 能量守恒方程

$$-\nabla^T \lambda \nabla T + \phi \mathbf{s} \rho_w C_w (\nabla^T T) \mathbf{V} + [ (1-\phi) C_s T \frac{\rho_s}{K} + \phi C_w T \frac{\rho_w}{K} ] (\mathbf{s} + D_s \gamma_w (h - z) \gamma_w) \frac{\partial h}{\partial t} \{ (1-\phi) C_s T \rho_s \beta_s + \phi C_w T \rho_w \beta_w - [ (1-\phi) \rho_s C_s + \phi \rho_w C_w ] \} \frac{\partial T}{\partial t} + I \nabla^T \left\{ D_v \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \nabla (h - z) \right\} = 0 \quad (4)$$

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;  $\lambda$  为岩土介质的导热系数矩阵;  $\mathbf{V} = [ V_x V_y V_z ]$  为水流的表现速度;  $\theta$  是体积含水量;  $I$  是水蒸汽的潜热,其计算式为:<sup>[11]</sup>

$$I = 4200.0 \times (597.1 - 0.573 T) \quad (J/kg) \quad (5)$$

$D_v$  是水蒸汽扩散系数,其取为日本核燃料循环开发机构 (JNC) 模型<sup>[12]</sup>,则:

$$D_v = \frac{q (\theta - \theta_s)}{(\theta - b) (b - \theta_s)} \quad (6)$$

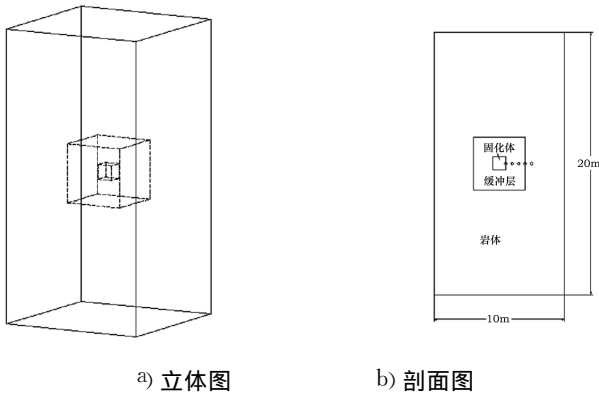
式中:  $\theta_s$  为最大体积含水量;  $q$ 、 $b$  为温度的线性函数。

### 2.4 弹塑性分析

在进行弹塑性计算时,可使用三种屈服函数<sup>[9]</sup>,即 (1)莫尔——库伦准则; (2)修正的剑桥粘土准则; (3)  $p - q - \theta$  临界状态准则。

## 3 核废料地质处置模型

目前国外所设计的核废物地质处置概念库一般是由竖井、联络坑道、主坑道和处置坑道群等组成<sup>[10]</sup>。而处置孔沿坑道纵向按一定的间距垂直地分布在洞室的底板下。玻璃固化体贮存罐被放置于处置孔内后,贮存罐与岩壁之间的空隙要用缓冲材料充填密实,并且相关的坑道也要用回填材料加以封堵。这样在一个处置单元中由里向外依次是玻璃固化体、包装容器、缓冲层和围岩,它们起着阻



a) 立体图                      b) 剖面图

图 1 核废物地质处置模型

Fig 1 Model of geological disposal for nuclear waste

滞放射性核素外泄及迁移的四重屏障作用。

根据上述核废物地质处置的概念,从方法论研究的角度,笔者采用了一个简单的计算模型,见图 1。该模型的尺寸为长×宽×高=10m×10m×20m,其内部缓冲材料的尺寸为长×宽×高=4m×4m×4m,核废物贮存罐位于模型的中心。由于对称性,取沿垂向剖开的 1/4 模型作为分析域,对应的有限元网格有 4891 个节点,4000 个八节点等参数单元。假定核废物贮存罐的埋深为 500m,水头从地表向下为线性分布,岩体中的初始温度为 20.0℃。考虑到概念处置库的布局特点<sup>[12]</sup>,设取边界条件为:顶、底面水头及温度固定,其余面为绝热及不透水面,四个垂直面及底面的法线方向位移约束,而顶面是位移自由的,其上并作用有上部岩体自重转化的节点荷载。

认为缓冲材料符合 JC 模型,其与非饱和计算有关的一些物性值设定如下:<sup>[12]</sup>

(1) 膨胀应力:

$$F_w = F_{wmax} \xi_w \quad (7)$$

$$\text{而 } F_{wmax} = 0.35 \text{ MPa}$$

(2) 比渗透系数:

$$k_w = S_w^0 \quad (8)$$

(3) 水分特性曲线:

$$\frac{S_w - S_{wr}}{S_{ws} - S_{wr}} = [1 + (\alpha \psi)^n]^{-m} \quad (9)$$

式中:  $S_{ws}$ 、 $S_{wr}$  分别是最大和最小饱和度,其值为 1.0 和 0.0,  $\alpha$ 、 $n$  和  $m$  是材料参数,其值依次为  $5.2 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ 、1.7 和  $1 - 1/n$ 。

(4) 水蒸汽扩散系数:

$$D_v = \frac{(2.99 \times 10^{-8} T - 3.78 \times 10^{-7})_1 (\theta - \theta_s)}{(\theta + 2.49 \times 10^{-3}) (-2.49 \times 10^{-3} - \theta_s)} \quad (10)$$

(5) 温度梯度水分扩散系数:

$$D_t = D_0 \exp\left(\alpha_T \frac{T - T_0}{T_0}\right) \quad (11)$$

式中,  $D_0 = 7.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2 / \text{s} \cdot \text{C}$ ,  $\alpha_T = 0.0$ ,  $T_0 = 30.0 \text{ C}$

(6) 湿气容量:

$$D_s = \frac{1}{\phi \gamma_w} \alpha (n-1) (\theta_s - \theta_r) S_e^{1/m} (1 - S_e^{1/m})^m \quad (12)$$

$$\xi = (1 + |\alpha \psi|^n)^{-m} (\alpha > 0) \quad (13)$$

岩体、缓冲材料及玻璃固化体(含贮存罐)的主要计算参数见表 1。岩体是饱和介质,缓冲材料的初始饱和度是 0.5。假定贮存罐、缓冲材料是同时刻一并埋置完毕,核废物以 500W 的不变功率释放热量,时间经历了 120 年。进行弹性分析。

## 4 有限元数值分析

图 1 b 显示的剖面即为图 2 有限元网格的正面,上面标注了五个计算结果输出点的位置,其中 2422 点位于贮存罐的外缘,2423 点、2424 点位于缓冲层的内部,2425 点位于缓冲层和处置孔壁的交界处,2426 点位于围岩中。图 2 是上述五个点的温度随时间变化曲线,从中看到,各点的温度在开始阶段快速上升,离贮存罐越近的点其温度越高,在前 7 年温度增加最明显,之后温度增长缓慢,到 17 年时五个点的温度依次为 73.0℃ (2422 点)、49.4℃ (2423 点)、33.4℃ (2424 点)、24.6℃ (2425 点)、23.1℃ (2426 点)。

图 3 是上述五个点的饱和度随时间变化曲线,从中得知,由于 2426 点位于围岩中,该点饱和度始终保持为 1.0。2425 点位于缓冲层和处置孔壁的交界处,该点得到地下水的快速浸润,其在约 0.88 年时饱和度达到了 1.0。而位于缓冲层内部的三个点的饱和度开始均有所下降,其原因在于:一是在开始阶段热-水-应力耦合现象强烈,缓冲材料受到围岩的挤压作用后其含水量减少(特别是在离围岩较近之处,如 2424 点),二是在开始阶段缓冲层中距离贮存罐近的部位的温度升高较快,温度梯度引起了水分扩散(向外)而水力梯度产生的水分迁移(向内)尚未到达该部位,使得该部位的干燥程度不断增加。一定时间后随着地下水分的到达和浸润作用的增强,缓冲层中各点的含水率才逐渐变大,各点的饱和度达到 1.0 的时间依次为:115.7 年 (2422 点)、102.6 年 (2423 点)、88.3 年

(2424点)。

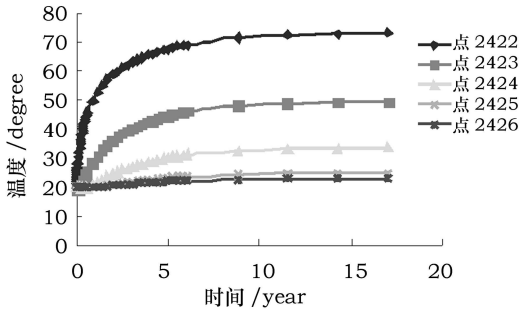


图2 温度—时间曲线  
Fig 2 Temperature—time curves

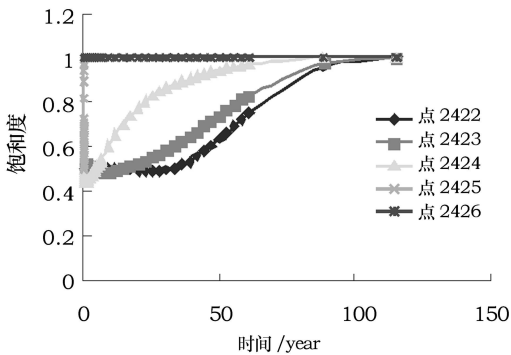
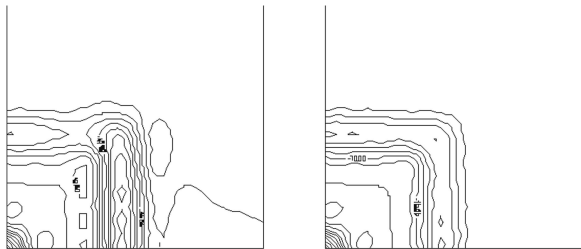


图3 饱和度—时间曲线  
Fig 3 Saturation degree—time curves



a)  $\sigma_x$ 等值线路      b)  $\sigma_z$ 等值线

图4 水平剖面上正应力等值线 (MPa)

Fig 4 Contours of normal stresses in horizontal cross section

现考察一下当时间为60年时在图1高度之半的水平剖面上和在该图前表面上的正应力、位移、流速、孔隙水压力及温度的分布及变化情况。

水平剖面上正应力  $\sigma_x$ 、 $\sigma_z$ 的等值线见图4。从中看到,应力分布集中的区域位于缓冲层和处置孔壁交界两侧附近,该面上的最大的  $\sigma_x$ 、 $\sigma_z$ 值分别为  $-42.2\text{MPa}$ 和  $-25.6\text{MPa}$ (均为压性)。而从前表面上的正应力  $\sigma_x$ 和  $\sigma_z$ 的等值线看到,应力分布集中的区域亦位于缓冲层和处置孔壁交界两侧附近,该面上的最大的  $\sigma_x$ 和  $\sigma_z$ 值分别为  $-46.7$

MPa和  $-67.8\text{MPa}$ (均为压性)。在前表面上缓冲层和处置孔壁的交界处的水平正应力  $\sigma_x$ 随时间的变化曲线见图5。从中看到,开始时该处正应力为拉性,其值为  $10.31\text{MPa}$ ,但很快转变为压性并随时间增大,在60年时其值上升到  $-41.6\text{MPa}$ 。在水平剖面上及前表面上的位移矢量、流速矢量分别见图6和图7。看到缓冲层中的位移较大,处置孔壁处的最大位移矢量的绝对值分别为  $1.3\text{cm}$ (水平剖面)、 $3.0\text{cm}$ (前表面),而岩体中流速矢量均指向缓冲层方向,最大流速矢量的绝对值分别为  $1.81 \times 10^{-7}\text{m/s}$ (水平剖面)、 $1.78 \times 10^{-7}\text{m/s}$ (前表面),且二者均位于缓冲层内。

在水平剖面上及前表面上的孔隙水压力等值线、温度等值线见图8和图9。看到孔隙水压力和温度变化明显的区域主要是在缓冲层内,其中绝对值最大的负孔隙水压力分别为  $-20.2\text{MPa}$ (水平剖面)、 $-22.0\text{MPa}$ (前表面),而最大温度值分别为  $72.2^\circ\text{C}$ (水平剖面)、 $72.2^\circ\text{C}$ (前表面)。

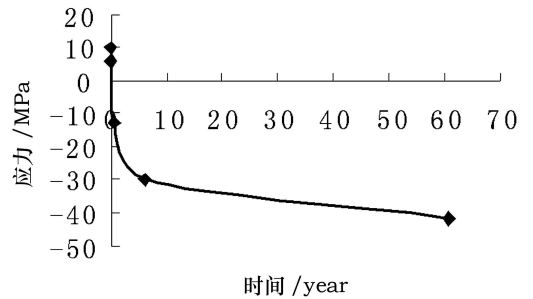
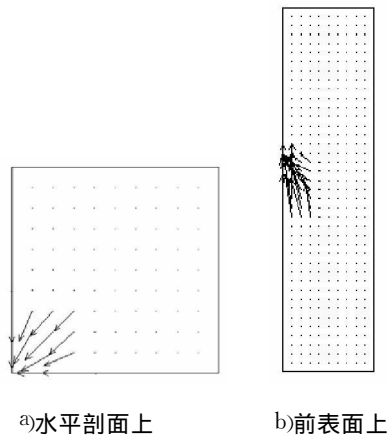


图5 前表面上缓冲层和处置孔壁的交界处的水平正应力  $\sigma_x$ 随时间变化曲线

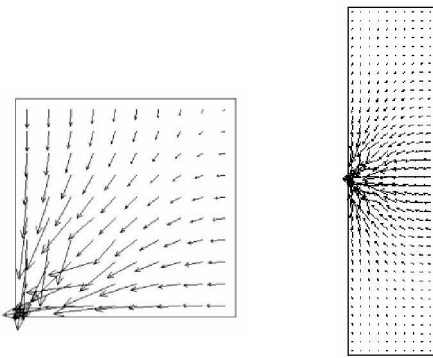
Fig 5 Change of horizontal normal stress  $\sigma_x$  at boundary between buffer and disposal hole wall in front surface



a)水平剖面上      b)前表面上

图6 位移矢量

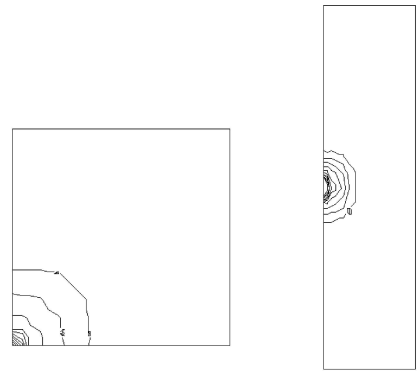
Fig 6 Displacement vectors



a) 水平剖面上 b) 前表面上

图 7 流速矢量图

Fig 7 Flow velocity vectors



a) 水平剖面上 b) 前表面上

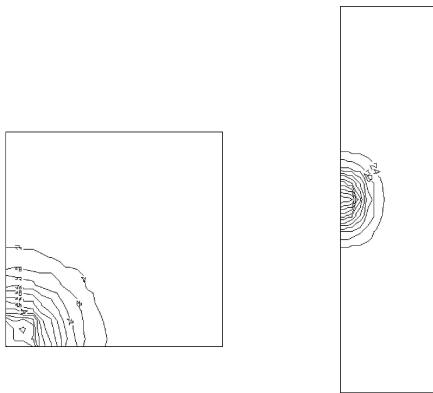
图 8 孔隙水压力等值线 (MPa)

Fig 8 Pore pressure contours (MPa)

表 1 主要计算参数

Table 1 Main computation parameters

介质	重度 $\rho$ /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	孔隙率 $\varphi$	渗透系数 $k/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松系数 $\mu$	比热 $C/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1})$	热膨胀系数 $\beta/(\text{°C}^{-1})$	导热系数 $\lambda$ /( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ )
岩石	25.0	0.1	$1.0 \times 10^{-8}$	$3.7 \times 10^3$	0.25	1.0	$1.0 \times 10^{-6}$	3.0
缓冲材料	18.0	0.5	$1.0 \times 10^{-10}$	$3.0 \times 10^3$	0.3	0.4	$2.0 \times 10^{-5}$	0.8
固化体	27.0	0.0	$1.0 \times 10^{-20}$	$5.8 \times 10^3$	0.23	0.7	$1.0 \times 10^{-6}$	55.0



a) 水平剖面上 b) 前表面上

图 9 温度等值线 (°C)

Fig 9 Temperature contours (°C)

## 5 结论

通过上述分析可得以下结论:

(1) 核废物的释放热量使得处置模型近场的温度不断增高,但在时间上呈现前快后慢的趋势。在热-水-应力耦合的作用下,缓冲层中的孔隙水压力由负值转为正值,对应的饱和度也由 0.5 上升为 1.0 围岩中变形及应力状态也随时间发生变化,特别是若干年后在处置孔壁附近产生了较高的压应力。

(2) 在本算例特定的条件下,核废物地质处置

模型近场的温度、饱和度、孔隙水压力、位移、正应力、流速等的分布与变化与笔者已有的二维计算结果规律性较为一致,故初步认为所建立的热-水-应力耦合模型及其有限元程序由二维分析拓展到三维分析是成功的。

(3) 与二维分析相比,三维分析更为符合实际情况,能反映和提供更多的计算信息,对相关的研究、设计和施工就具有更强的辅助与支撑作用。但由于数据准备和结果处理工作量大、所需计算时间也长,故三维分析的成本也较高。当使用自己研制的程序进行三维分析时,为提高效率,应该在相应的数据前、后处理及数值算法方面进行优化。

(4) 本计算模型比较简单,其使用目的主要是为验证三维有限元程序的正确性。而实际的高放核废物地质处置是分坑道开挖、固化体埋设及洞室封闭三个阶段完成的,要更加准确地了解核废料地质处置中的热-水-应力耦合过程及影响,应该将上述三个阶段分别模拟,作为一个工程整体来分析。

参考文献:

- [1] Ruqvist J, Bergesson L, Chijimatsu M, et al. Thermo-hydro-mechanics of partially saturated geological media: governing equations and formulation of four finite ele-

- ment method[J]. *Int J Rock Mech Min Sci* 2004, 38(1): 105—127.
- [2] L. Jing, C. F. Tsang, Q. Stephansson and F. Kautsky. Validation of mathematical models against experiments for radioactive waste repositories. DECOVALEX experience[C]. In Stephansson Q, Jing L, Tsang C—F, eds. Coupled thermo-hydro-mechanical processes of fractured media, vol. 79. Elsevier, Development in Geotechnical Engineering, 1996, 23—55.
- [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, 主编: 中国高放废物地质处置十年进展, 原子能出版社, 2004, 370—377. (SHEN Zhenyao, LI Guodong, LI Shushen. The coupled calculation in near field of a H/W deep geological disposal repository[C]. WANG Ju, FAN Xianhua, XU Guoqing, ZHENG Hualing, editor. Geological disposal of high level radioactive waste in China: progress in last decade, Beijing: Atomic Energy Press, 2004, 370—377. (in Chinese))
- [4] 刘亚晨. 核废料贮存围岩介质 THM耦合过程的数值模拟[J]. 地质灾害与环境保护, 2006, 17(6): 78—82. (LIU Yachen. Numerical simulation for THM coupling of fractured rock mass surrounding nuclear waste repositories[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation* 2006, 17(6): 78—82. (in Chinese))
- [5] 蒋中明. Dashnor HOXHA 核废料贮存库围岩体热响应耦合场研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 953—956. (JIANG Zhongming, Dashnor HOXHA. Studies on coupled field of thermal response in rock mass of nuclear waste repository[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* 2006, 28(8): 953—956. (in Chinese))
- [6] 张玉军. 热—水—应力耦合模型及 FEBEX 原位试验二维有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 313—318. (ZHANG Yujun. Coupled thermo-hydro-mechanical model and 2D FEM analysis for FEBEX in situ test[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* 2007, 29(3): 313—318. (in Chinese))
- [7] 张玉军. 核废料处置概念库近场热—水—应力耦合模型及数值分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 17—22. (ZHANG Yujun. Coupled thermo-hydro-mechanical model and relative numerical analysis for near field of conceptual nuclear waste repository[J]. *Rock and Soil Mechanics* 2007, 28(1): 17—22.
- [8] 张玉军. 不同场热—水—应力耦合过程二维有限元分析[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(3): 444—449. (ZHANG Yujun. 2D FEM analysis for coupled thermo-hydro-mechanical processes with different field[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering* 2007, 3(3): 444—449. (in Chinese))
- [9] Lewis R W, Schrefler B A. The finite element method in the deformation and consolidation of porous media[M]. New York: John Wiley, 1987.
- [10] 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]. 京都大学博士学位论文, 2003.
- [11] Ohnishi Y, Kobayashi A, Kurikami H. User's Guide of THAMES Rj. Faculty of Engineering, Kyoto University, 2003.
- [12] Chijimatsu M, Fujita T, Kurikami H, et al. Subtask BMT1—B: Implication of THM coupling on the near-field of a nuclear waste repository in a homogeneous rock mass[R]. DECOVALEX III—Task3—Benchmark Test 1 (BMT1)—2002, 1—43. (in Chinese))

## (上接第 658 页)

- [4] 傅景辉, 宋二祥. 刚性桩复合地基工作特性分析[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 335—339. (FU Jinghui, SONG Erxiang. Analysis of rigid pile composite foundation's working performance[J]. *Rock and Soil Mechanics* 2000, 21(4): 335—339. (in Chinese))
- [5] 王闪闪. 考虑上部结构共同作用的桩筏基础分析[D]. 重庆大学硕士学位论文, 2005. (WANG Shanshan. Finite element analysis for interaction of superstructure raft foundation and soil via object-oriented approach[D]. A Dissertation for the Degree of Master in Chongqing University, 2005. (in Chinese))
- [6] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 北京: 水力电力出版社, 1979. (ZHU Bo-fang. The finite element method theory and application[M]. Beijing: China Irrigation and Hydropower Press, 1979. (in Chinese))
- [7] 吴晓涵. 面向对象结构分析程序设计[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (WU Xiaohan. Object-oriented structure analysis program design[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))