



核废料处置概念库近场热 - 水 - 应力耦合二维有限元模拟

张玉军

(中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 建立了分析饱和 - 非饱和介质中热 - 水 - 应力耦合现象的应力平衡方程、水连续性方程、能量守恒方程和弹塑性矩阵, 并使用所开发的有限元程序对一个核废料处置概念库近场的热 - 水 - 应力耦合过程进行了数值模拟, 考察了缓冲层及岩体中若干点的温度、饱和度、孔隙水压力及水平方向正应力随时间的变化情况, 并将部分结果与国外类似软件的计算数据作了对比, 看到二者的规律在定性上有某种一致性, 但定量上仍存在一定差别, 笔者试着分析了原因并得出了一定的认识。

关键词: 核废料处置概念库; 近场; 热 - 水 - 应力耦合; 二维有限元分析

中图分类号: P31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4548(2006)09 - 1053 - 06

作者简介: 张玉军(1956 -), 男, 研究员, 工学博士, 主要从事岩石力学与工程方面的研究。

2D FEM simulation for coupled thermo-hydro-mechanical processes of near field in conceptual nuclear waste repository

ZHANG Yu-jun

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

Abstract: The momentum equilibrium equation, the continuity equation for water, the energy balance equation and the elastoplastic matrix for analysis of coupled thermo-hydro-mechanical phenomena in saturated-unsaturated porous media were established, and the numerical simulation for the coupled thermo-hydro-mechanical processes of near field in a conceptual nuclear waste repository was made, and the variations of temperature, saturation, pore pressures and normal stresses in horizontal direction with time at several points of buffer and rockmass were investigated. The obtained results were compared with the calculated datum of foreign similar codes, and it was shown that the regulations of both results had certain identity qualitatively, but there existed some differences among them quantitatively. The author also tried to analyze the reasons and got some realization.

Key words: conceptual nuclear waste repository; near field; thermo-hydro-mechanical coupling; 2D FEM analysis

0 引 言

在高放射性核废料的地质处置中, 玻璃固化体和缓冲层被深埋后, 其近场环境要受到某些物理、化学及力学现象的作用。如核废料辐射放热导致温度效应, 来自围岩的地下水向工程屏障系统浸入, 缓冲层中因含水量增加而引起膨胀压力, 以及上覆岩体产生地应力荷载等。这些现象不是独立的, 而是强烈地彼此影响和相互耦合的。为了搞清楚近场及工程屏障系统的功能性态, 对所涉及的热 - 水 - 应力耦合过程进行评价是重要的。因此欧美及日本等国对非饱和的缓冲材料(一般是膨润土)的热传导、水渗流及膨胀压力开展了各种试验, 同时研制了不少著名的相关计算程序

[1-6]。目前国内高放射性核废料地下处置的研究也在进行中, 但是还缺少具有自主知识产权的计算软件。笔者有鉴于此, 故初步开发出了一个用于分析饱和 - 非饱和和孔隙介质中热 - 水 - 应力耦合弹塑性问题的二维有限元程序。现以一个核废料处置概念库为算例, 对其近场的热 - 水 - 应力耦合过程进行数值模拟, 试图通过考察结果得出某些规律性的认识, 并与国外类似软件的计算数据作对比, 寻找异同点和分析原因。

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

收稿日期: 2005 - 08 - 10

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^[7]，主要的控制方程可推导如下。

1.1 应力平衡方程

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

$$d\sigma = d\sigma' - m dp \quad (1)$$

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

而 $d\varepsilon_p = -m \frac{dp}{3K_s}$, $d\varepsilon_T = m \frac{\beta_s}{3} dT$, $d\varepsilon_w = -m \frac{dF_w}{3K_e}$ 。

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； $d\varepsilon_T$ 为温度引起的应变增量； $d\varepsilon_w$ 为膨胀引起的应变增量； m 为法向应力单位列阵； β_s 为固相的热膨胀系数； K_s 为固相的压缩模量； K_e 为孔隙介质的体积模量； dp 为孔隙压力增量； 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成为

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

式中 $d\sigma$ 为总应力增量； db 、 $d\hat{f}$ 为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

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

式中 $d\hat{f} = \int_{\Omega} \delta u^T db d\Omega + \int_{\Gamma} \delta u^T d\hat{f} d\Gamma$ 。

将式(2)代入式(5)并各项除以 dt ，整理后得

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

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

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

取全水头 $h = p_w / \gamma_w + z$ ，

式中 γ_w 为水的容重； z 为位置水头。

将式(8)代入式(7)得

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

故 $\frac{\partial p}{\partial t} = s_w \gamma_w \frac{\partial h}{\partial t} + (h - z) \gamma_w \frac{\partial s_w}{\partial t} = s_w \gamma_w \frac{\partial h}{\partial t} +$

$$(h - z) \gamma_w^2 D_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (10)$$

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

由孔隙介质的水分特性曲线确定。

参考文献[9]，取膨胀力的有关计算式为

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

$$s_w = (s_{ws} - s_{wr})(1 + |\alpha \psi|^n)^{-m} + s_{wr} \quad (\alpha > 0) \quad (12)$$

式中 $\psi = h - z$ ； $m = 1 - 1/n$ ， $(0 < m < 1, n > 1)$ ； F_{wmax} 为最大膨胀力，由试验确定； s_{ws} 为最大饱和度； s_{wr} 为最小饱和度。则

$$dF_w = F_{wmax} k s_w^{k-1} ds_w \quad (13)$$

因为 $\theta = \phi s_w$ (θ 为体积含水量； ϕ 为岩土介质的孔隙度)。于是有

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

从而 $dF_w = -\frac{m}{3} A dh$ ，

式中 $A = \frac{k s_w^{k-1}}{k_e \phi} F_{wmax} \frac{d\theta}{d\psi}$ 。

将式(10)和式(15)代入式(6)得

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

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。经过一系列的推导，可得出水的连续性方程为

$$-\nabla^T \left\{ \frac{K r_w \gamma_w}{\mu_w} \nabla h \right\} + s_w (m^T - \frac{m^T D_T}{3k_s}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \gamma_w \{ D_s \phi + \frac{\phi s_w}{k_w} + s_w (\frac{1-\phi}{k_s} - \frac{1}{(3k_s)^2} m^T D_T m) [s_w + (h-z) \gamma_w D_s] \} \frac{\partial h}{\partial t} - \{ \phi s_w \beta_w + s_w [(1-\phi) \beta_s - \frac{m^T D_T m \beta_s}{3k_s}] \} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (17)$$

式中 K 为固有渗透系数矩阵； r_w 为比渗透系数矩阵，是 s_w 的函数； μ_w 为水的粘滞系数； 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

$$-\nabla^T \lambda \nabla T + \phi s_w \rho_w C_w (\nabla^T T) V^a + [(1-\phi) C_s T \frac{\rho_s}{K_s} + \phi C_w T \frac{\rho_w}{K_w}] (s_w + D_s \gamma_w (h-z)) \gamma_w \frac{\partial h}{\partial t} - \{ (1-\phi) C_s T \rho_s \beta_s +$$

$$\phi C_w T \rho_w \beta_w - [(1-\phi)\rho_s C_s + \phi \rho_w C_w] \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \quad (18)$$

式中 C_w 、 C_s 分别为水及岩土介质的比热； $\rho_w C_w$ 、 $\rho_s C_s$ 分别为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 为水流的表现速度。

1.4 弹塑性分析

在进行弹塑性计算时，有效应力增量可表示为

$$d\sigma' = \left[D^e - \frac{D^e \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma'} \right\} \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma'} \right\}^T D^e}{A + \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma'} \right\}^T D^e \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma'} \right\}} \right] d\varepsilon, \quad (19)$$

式中 D^e 为弹性矩阵； A 为硬化参数； Q 、 F 分别为塑性势及屈服函数。

当 $Q=F$ 时称为相关联的流动法则，当 $Q \neq F$ 时称为不相关联的流动法则。

本程序中使用了如下 3 种屈服函数^[7]

(1) 莫尔-库伦准则

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

(2) 修正的剑桥粘土准则

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

(3) p - q - θ 临界状态准则

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

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

$p = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$; $q^2 = \sigma_1(\sigma_1 - \sigma_2) + \sigma_2(\sigma_2 - \sigma_3) + \sigma_3(\sigma_3 - \sigma_1)$; c 、 φ 分别为岩土介质的粘聚力及内摩擦角； 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 核废料处置概念库

所考虑的核废料处置概念库如图 1 所示，其设计是根据了目前日本的构想之一^[8-9]。在此设计中，地质体是花岗岩，处置井被垂直地布置在一系列埋深为 530 m 的平行坑道的底板下。缓冲材料将被充填在处置井内的玻璃固化体贮存罐周围，之后相关的坑道也要用回填材料加以封堵。认为处置井的布置具有重复的对称性，则系统的一个代表单元由单个处置井及一

定范围内的岩体和回填材料组成，其主要部分见图 2，由里向外依次是玻璃固化体、包装容器、缓冲层和围岩，它们起着阻滞放射性核素外泄及迁移的四重屏障的作用。来自玻璃固化体的热输出显示在图 3 中。在计算模拟中，暂不考虑开挖效应，并假定核废料、缓冲及回填材料是在 $t=0$ 时刻一并埋置完毕，区域内的初始温度是 30°C，坑道中心点的压力水头是 530 m，岩体是饱和介质，缓冲及回填材料的初始饱和度是 0.42。

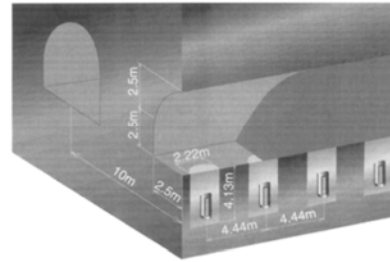


图 1 核废料处置概念库

Fig. 1 Conceptual nuclear waste repository

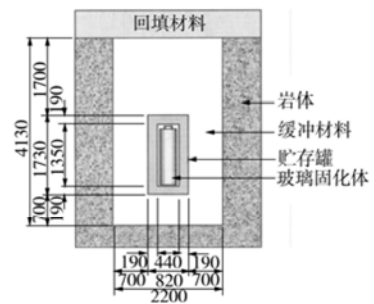


图 2 工程屏障系统

Fig. 2 System of engineering barrier

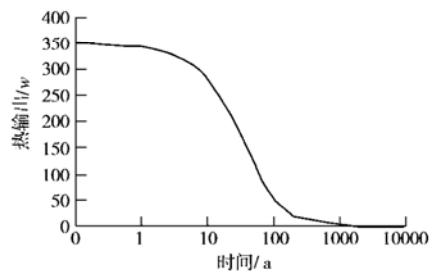


图 3 玻璃固化体的热输出曲线

Fig. 3 Heat output from the waste

3 有限元数值分析

使用 Galerkin 方法和整体解法 (Monolithic Augmentation Approach) 分别将式 (16)、(17) 和 (18) 在空间域以及时间域离散,就可得到相应的有限元计算格式^[10-11]。

假定图 1 中的一个代表单元是平面应变问题。由

表 1 主要计算参数

Table 1 Main computation parameters

介质	重度 ρ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	孔隙率 ϕ	固有渗透系数 K/m^2	弹性模量 E/MPa	泊松系数 μ	比热 $C/(\text{KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1})$	热膨胀系数 $\beta/(1 \cdot \text{C}^{-1})$	导热系数 $\lambda/(W \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1})$
岩石	26.7	0.1	1.0×10^{-16}	3.7×10^3	0.25	1.0	1.00×10^{-6}	2.8
缓冲及回填材料	16.0	0.5	1.4×10^{-20}	$58.74 - 1.87w$	0.30	$(34.1 + 4.18w)/(100 + w)$	1.00×10^{-4}	$4.44 \times 10^{-1} + 1.38 \times 10^{-2}w + 6.14 \times 10^{-3}w^2 - 1.69 \times 10^{-4}w^3$
固化体	28.0	0.0	1.0×10^{-30}	8.2×10^4	0.30	0.96	1.00×10^{-6}	1.2
贮存罐	70.0	0.0	1.0×10^{-30}	2.0×10^5	0.30	0.4	1.64×10^{-6}	200.0

注: w 为含水率。

于对称性, 取计算域尺寸为水平向 5 m, 垂直向 60 m, 有限元网格见图 4 (水平向和垂直向的尺寸比例不同), 其中共有 810 个单元, 874 个节点, 图中 A 、 B 两点位于缓冲层内, C 点位于岩体内。边界条件: 顶底面水头及温度固定, 右边界绝热及不透水, 左右边界只可在垂直方向位移, 底面只可在水平方向位移, 而顶面是位移自由的。岩体、玻璃固化体、贮存罐、缓冲和回填材料的主要计算参数见表 1^[9]。

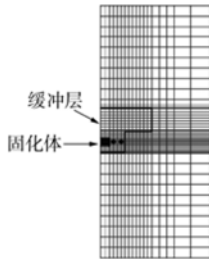


图 4 有限元网格(从固化体边缘向右的点号依次 A 、 B 、 C)

Fig. 4 FEM mesh (the point numbers are A , B and C towards the right from the edge of vitrified waste successively)

参考文献[9, 12, 13]取用与非饱和状态及膨胀力有关的计算式如下

$$s_e = (1 + |\alpha\psi|^n)^{-m}, \quad (\alpha > 0), \quad (23)$$

$$\frac{\partial s_w}{\partial p_w} = \frac{1}{\phi\gamma_w} \alpha(n-1)(\theta_s - \theta_r) s_e^{1/m} (1 - s_e^{1/m})^m, \quad (24)$$

$$F_w = 3.7s_w^{1/2} \quad (\text{单位为 MPa}), \quad (25)$$

$$r_w = s_w^2. \quad (26)$$

式中 s_e 为有效饱和度; θ_s 为饱和体积含水量; θ_r 为残余体积含水量; $n=1.6$, $\alpha=8.0 \times 10^{-3} 1/\text{m}$, $\theta_s=0.403$, $\theta_r=0.0$, $s_{ws}=1.0$, $s_{wr}=0.0$ 。

计算模拟玻璃固化体被埋入地下后经历了 2000 a, 其间图 4 中 A 、 B 、 C 3 点的温度、饱和度、孔隙水压力及水平方向正应力随时间的变化曲线见图 5 至图 8。从中看到: A 、 B 、 C 3 点的温度在开始阶段快速上升, 约 2 a 时达到峰值, 依次为 77.7°C , 60.7°C 和 43.7°C , 之后下降, 约 100 a 时依次变为 39.2°C , 35.8°C 和 32.6°C , 再往后变化很缓慢, 约 1000 a 时依次减小到 32.9°C 、 31.7°C 和 30.7°C 。

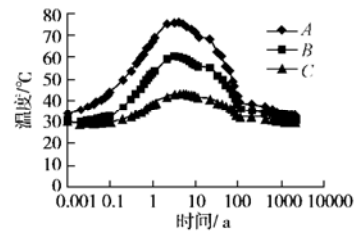


图 5 温度 - 时间曲线

Fig. 5 Temperature - time curves

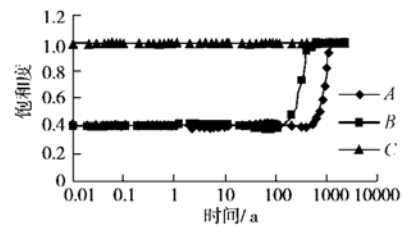


图 6 饱和度 - 时间曲线

Fig. 6 Degree of saturation - time curves

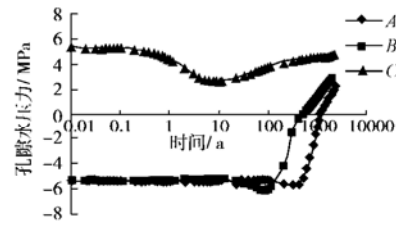


图 7 孔隙水压力 - 时间曲线

Fig. 7 Pore pressure - time curves

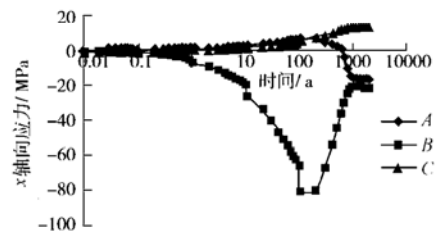


图 8 水平方向正应力 - 时间曲线

Fig. 8 Horizontal normal stresses - time curves

B 、 A 两点的饱和度在开始后相当长的一个时期内变化不大 (有所降低), 其分别在约 210 a 和 600 a 后

才明显上升,各自约在 610 a 和 1310 a 时达到 1.0。这是因为在开始阶段缓冲层中的温度快速升高,使得 B、A 两点的干燥程度有所增加,之后随着温度下降和地下水的浸润,B、A 两点的饱和度才逐渐变大,同时由于比渗透系数是饱和度二次方的函数,故水在缓冲层中的渗透速度(亦即饱和度的上升速度)呈现前慢后快的趋势。而 C 点的饱和度始终保持为 1.0,原因在于该点位于围岩和缓冲层的交界面处,始终得到了地下水的充分浸润。

B、A 两点孔隙水压力的变化趋势与饱和度相似,且分别在约 2000 a 时由开初的 -5.07 MPa 变为 2.88 MPa 和 2.01 MPa。而 C 点的孔隙水压力先下降后上升,但始终保持为正值,在约 2000 a 时为 4.72 MPa。

A、B、C 3 点的水平方向正应力 σ_{xA} 、 σ_{xB} 和 σ_{xC} 在时间 ≤ 0.1 a 时均为压性且量值较小,随之 σ_{xA} 先转成拉性后又变为压性,而 σ_{xB} 和 σ_{xC} 则至终为压性和拉性。 σ_{xA} 分别是拉应力和压应力时最大值各达到 6.41 MPa 和 -16.9 MPa, σ_{xB} 的最大值是 -80.1 MPa,而 σ_{xC} 的拉应力最大值为 13.19 MPa。到 1000 a 后 σ_{xA} 、 σ_{xB} 和 σ_{xC} 的变化就很小了。这些现象正反映温度、水流与应力的耦合作用。

操上就该核废料处置概念库用 THAMES 程序^[14]和基本相同的参数进行了有限元分析^[9]。计算所得的 A、B、C 3 点的温度、饱和度随时间的变化曲线见图 9 和图 10。将其与图 5 和图 6 对比,看到两种结果的规律在定性上有某种一致性,但定量上仍存在一定差别,如温度和饱和度的变化、到达温度峰值和饱和度为 1.0 的时间均有不同。其原因在于两种计算模型的控制方程有所差异。如在 THAMES 程序中,对于缓冲及回填材料中的渗流,用 $(D_{\theta})_{ij} \frac{\partial \theta}{\partial \psi}$ 代替 $r_w \frac{\gamma_w K_{ij}}{\mu_w}$, 这里 D_{θ} 是水分扩散系数, θ 是体积含水量, ψ 是压力水头;在达西定律中计入温度的贡献 $(D_T)_{ij} T_{,j}$, 这里 D_T 是温度梯度水分扩散系数, T 是温度;还有膨胀力的处理也有其独特之处等。

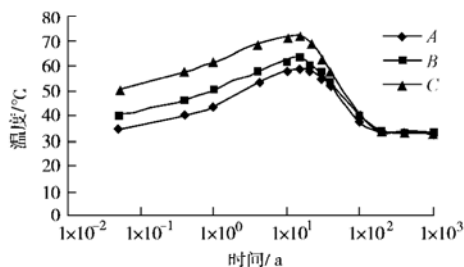


图 9 温度 - 时间曲线 (由文献 [9] 重绘)

Fig. 9 Temperature - time curves (Based on Reference [9])

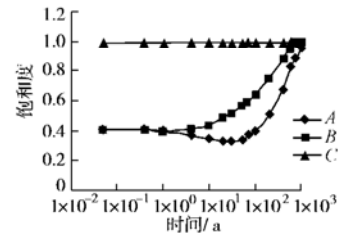


图 10 饱和度 - 时间曲线 (由文献 9 重绘)

Fig. 10 Degree of saturation - time curves (Based on Reference [9])

4 结 语

笔者通过上述的有限元数值模拟,初步地探讨了核废料处置概念库近场饱和 - 非饱和孔隙介质中的热 - 水 - 应力耦合现象,对相关过程的规律性有所了解,并比较了使用两种程序对同一问题的计算结果,分析了存在差异的原因。从而认识到:对于核废料地质处置中的热 - 水 - 应力耦合现象,单从力源的组成来看,就有温度应力、自重应力、孔隙水压力和膨胀应力等,涉及到复杂的物理、化学及力学作用,因此在其研究中拥有一个功能较强的有限元或其它数值分析软件是必不可少的。与目前国外先进的同类软件相比,笔者所开发的二维有限元程序还有不足之处,需要不断地改进和完善,使其的计算分析能更好地反映工程实际。

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] GUVANASEN V, CHAN T. A new three-dimensional finite-element analysis of hysteresis thermohydromechanical deformation of fractured rock mass with dilatance in fractures[C]// Proceedings of the Second Conference on Mechanics of Jointed and Faulted Rocks. Vienna, Austria, 1995:347 - 422.

[3] OHNISHI Y, KOBAYASHI A THAMES. Coupled thermo-hydro- mechanical processes of fractured media[C]// STEPHANSSON O, JING L, TSANG C-F. Development in Geotechnical Engineering, Elsevier, 1996:545 - 9.

[4] NGUYEN TS. Description of the computer code FRACON Coupled thermo-hydro-mechanical processes of fractured media[C]// STEPHANSSON O, JING L, TSANG C-F, editors. Development in Geotechnical Engineering, Elsevier, 1996:539 - 44.

- [5] BÖRGESSON L, ABAQUS. Coupled thermo-hydro-mechanical processes of fractured media [C]// STEPHANSSON O, JING L, TSANG C-F, editors. Development in Geotechnical Engineering, Elsevier, 1996:565 - 70.
- [6] ISRAELSSON JI. Short description of UDEC and 3DEC Coupled thermo-hydro-mechanical processes of fractured media [C]// STEPHANSSON O, JING L, TSANG C-F, editors. Development in Geotechnical Engineering, Elsevier, 1996:523 - 8.
- [7] LEIWS R W, SCHREFLER B A. The finite element method in the deformation and consolidation of porous media[M]. New York: John Wiley, 1987.
- [8] CHIJIMATSU M, FUJITA T, KURIKAMI H, ITO A, SUGITA Y. Subtask BMT1-B: Implication of THM coupling on the near-field of a nuclear waste repository in a homogeneous rock mass[Z]. DECOVALES III-Task3-Bench Mark Test 1(BMT1), 2002:1 - 43.
- [9] 操上广志.地盘における熱 - 水 - 応力連成現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.)
- [10] 张玉军.熱 - 水 - 応力耦合弾塑性二维有限元程序的研制[J].地下空間与工程学报,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 - 111.)
- [11] 张玉军.一种模拟熱 - 水 - 応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.)
- [12] CHIJIMATSU M, FUJITA T, KOBAYASHI A, NAKANO M. Experiment and validation of numerical simulation of coupled thermal, hydraulic and mechanical behavior in engineering buffer material[J]. Int J for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2000,24(4):403 - 424.
- [13] CHIJIMATSU M, FUJITA T, SUGITA Y, AMEMIYA K, KOBAYASHI A. Field experiment, results and THM behavior in the Kamishi Mine experiment[J]. Int J of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001,38(1):79 - 94.
- [14] OHNISHI Y, KOBAYASHI A, THAMES. Coupled thermo-hydro- mechanical processes of fractured media [C]// STEPHANSSON O, JING L, TSANG C-F, editors. Development in Geotechnical Engineering, Elsevier, 1996:545 - 9.