

模拟热 - 水 - 应力耦合作用的三维节理单元 及其数值分析

张玉军

(中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 对于具有相同厚度的空间 8 节点等参数节理单元, 考虑温度和孔隙水压力的影响, 将其的应力 - 位移关系加以拓展, 建立了相应的应力平衡方程、水连续性方程、能量守恒方程, 使之可用于分析饱和 - 非饱和岩体中存在不连续面时的热 - 水 - 应力耦合问题, 并结合实体单元, 研制出相应的三维有限元程序。针对一个假定的核废物地质处置模型, 通过有、无节理的热 - 水 - 应力耦合过程数值分析, 显示与无节理的情况相比, 由于节理的存在使得近场岩体中的温度、应力及水流速度的分布与数值都发生了明显的变化, 特别是节理附近的岩体中有某种水流“冷却”作用和一定程度的应力集中现象, 其它部位岩体的应力也有所增加。

关键词: 热 - 水 - 应力耦合; 节理单元; 有限元方法; 三维分析

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2009)08 - 1213 - 06

作者简介: 张玉军(1965 -), 男, 河南省济源市人, 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。

3D joint elements and relevant numerical analysis for simulating coupled thermo-hydro-mechanical processes

ZHANG Yu-jun

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Considering the influence of temperature and pore pressure, the stress-displacement relationship of a 8-node isoparametric space joint element with a constant thickness is expanded, so the momentum equilibrium equation, the continuity equation for water and the energy balance equation are established correspondingly for analysis of the coupled thermo-hydro-mechanical processes in saturated-unsaturated rockmass with discontinuities. Combining the joint elements with the solid elements, a relative 3D FEM code is developed. Against an assumed model of geological disposal of nuclear waste, numerical analyses are carried out for the cases with and without joints. The computed results show: compared with the case without joints, the existence of joints causes obvious changes of the distributions and the values of temperature, stresses and velocities of water flows in the near-field rockmass, and especially some cooling effects of water flows and stress concentrations to a certain extent in the rockmass near the joints, and the stresses in other parts of the rockmass also increase.

Key words: thermo-hydro-mechanical coupling; joint element; finite element method; 3D analysis

0 引 言

在高放射性核废物地质处置的研究中, 通过试验和理论的途径对岩体不连续面(节理、裂隙等)的热 - 水 - 应力耦合过程及其影响进行深入的探讨、建立合适的数学模型和提出可行的分析方法, 一直是很重要的工作内容^[1-3]。这是由于在选择高放废物地质处置的场地时, 无地下水、坚硬完整且规模巨大的岩体固然是最理想的, 但实际上往往无法完全避开地下水和不连续面, 而高放废物地质处置研究的核心问题是有

害核素如何随地下水流动而迁移、是否会进入生物圈和怎样对其进行阻滞等, 这其中因节理岩体的渗透系数要比均质岩体的渗透数大得多, 不连续面成了地下水流动的良好通道, 其存在会加快核素的扩散, 如处理不当可能过早危及到环境安全, 并且在热 - 水 - 应力耦合的作用下, 与均质岩体相比, 不连续面及其

基金项目: 国家自然科学基金项目(50578171)

收稿日期: 2008 - 06 - 19

母岩中的温度场、渗流场和应力场的表现要更为复杂。当用数值方法对高放废物处置库进行分析时,如果计算域中发育有若干条分散的大型不连续面,则除了岩体以外,也必须对不连续面建立能表现其中热-水-应力耦合作用的单元模型。在这方面,国外已经有一些二维问题的成果,如 Noorishad 等^[4]、Nguyen^[5]和 Tijani 等^[6]的工作,笔者曾对其优、缺点进行了评述,并且从严格遵循应力平衡、水连续性和能量守恒三大方程入手,也建立了一种表现不连续面热-水-应力耦合作用的平面 4 节点等厚度节理单元^[7]。随着在该领域研究的深入,笔者现将该平面等厚度节理单元及其对应的岩体单元和有限元程序拓展到三维分析,通过算例从定性方面显示了空间模拟中不连续面对岩体中热-水-应力耦合现象的影响,得出了若干认识。

1 三维等厚度节理单元

如图 1 所示,此是一具有相同厚度 h 的 8 节点三维等参数节理单元^[8]。分别对单元的上、下面插值,其位移函数及座标变换关系可表示为

$$\left. \begin{aligned} u &= \sum_{i=1}^4 N_i u_i, \\ v &= \sum_{i=1}^4 N_i v_i, \\ w &= \sum_{i=1}^4 N_i w_i, \\ x &= \sum_{i=1}^4 N_i x_i, \\ y &= \sum_{i=1}^4 N_i y_i, \\ z &= \sum_{i=1}^4 N_i z_i, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, u_i , v_i , w_i 依次为单元节点在 x , y 和 z 方向的位移, x_i , y_i , z_i 为单元节点的整体坐标。

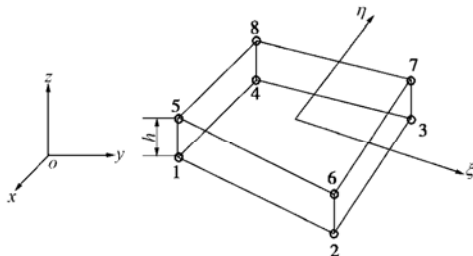


图 1 三维等厚度节理单元

Fig. 1 3D constant-thickness joint element

取单元的形函数为

$$N_i = \frac{1}{4}(1 + \xi_0)(1 + \eta_0) \quad (i=1,2,3,4), \quad (2)$$

式中, $\xi_0 = \xi_i \xi$, $\eta_0 = \eta_i \eta$ 。

在整体坐标系中,单元中上、下面任一对点的相对位移为

$$\left. \begin{aligned} \Delta u &= N_1 u_5 + N_2 u_6 + N_3 u_7 + N_4 u_8 - \\ &\quad (N_1 u_1 + N_2 u_2 + N_3 u_3 + N_4 u_4), \\ \Delta v &= N_1 v_5 + N_2 v_6 + N_3 v_7 + N_4 v_8 - \\ &\quad (N_1 v_1 + N_2 v_2 + N_3 v_3 + N_4 v_4), \\ \Delta w &= N_1 w_5 + N_2 w_6 + N_3 w_7 + N_4 w_8 - \\ &\quad (N_1 w_1 + N_2 w_2 + N_3 w_3 + N_4 w_4), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\text{或} \quad \{\Delta u\}_e = [B]\{\delta\}_e. \quad (4)$$

对节理单元建立局部坐标系 $x'y'z'$, 其中 z' 轴垂直于节理面。令节理面上沿 x' 和 y' 方向的切向刚度分别为 $k_{zx'}$ 和 $k_{zy'}$, 沿 z' 方向的法向刚度为 $k_{z'}$, 当单元厚度 h 较小且不计温度和孔隙水压力的影响时,切向应力和法向应力可表示为^[5]

$$\left\{ \begin{aligned} \tau'_{zx} \\ \tau'_{zy} \\ \sigma'_{z'} \end{aligned} \right\} = \begin{bmatrix} k_{zx'} & 0 & 0 \\ 0 & k_{zy'} & 0 \\ 0 & 0 & k_{z'} \end{bmatrix} \left\{ \begin{aligned} \gamma'_{zx} \\ \gamma'_{zy} \\ \varepsilon'_{z'} \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

$$\text{或} \quad \{\sigma'\}_e = [D']\{\varepsilon'\}_e. \quad (6)$$

$$\text{并且有} \quad \{\varepsilon'\}_e = \frac{1}{h} \{\Delta u' \quad \Delta v' \quad \Delta w'\}^T = \frac{1}{h} [T][B]\{\delta\}_e, \quad (7)$$

$$\text{式中,} \quad [T] = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix}, \quad l_i, \quad m_i \text{ 和 } n_i (i=1,2,3) \text{ 为}$$

各坐标轴的方向余弦,其值取决于整体坐标 x , y 和 z 对形函数坐标 ξ , η 的偏导数。

将局部坐标系中的弹性矩阵 $[D']$ 变换到整体坐标系中,有

$$[D] = [T]^T [D'] [T], \quad (8)$$

故可得整体坐标系中单元的刚度矩阵为

$$[k]_e = h \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [D] [B] \det |J| d\xi d\eta, \quad (9)$$

式中, $\det |J|$ 为雅可比矩阵的行列式, h 为单元厚度。

2 节理的热-水-应力耦合控制方程

假定节理中充满了水,即空隙度 $\phi=1.0$, 并且有温度的作用,则有关控制方程可从第 1 节及文献[7]改造如下。

2.1 应力平衡方程

在饱和的节理中,根据有效应力原理,可得增量型的应力平衡方程为

$$\int_{\Omega} \delta \varepsilon^T D \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} d\Omega - \int_{\Omega} \delta \varepsilon^T m \gamma_w \frac{\partial h}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega} \delta \varepsilon^T D m \gamma_w \frac{\partial h}{\partial t} \frac{1}{3K_w} d\Omega - \int_{\Omega} \delta \varepsilon^T D m \frac{\beta_w}{3} \frac{\partial T}{\partial t} d\Omega - \frac{\partial f}{\partial t} = 0, \quad (10)$$

式中, D 为由 $k_{zx'}$, $k_{zy'}$ 和 $k_{z'}$ 组成的弹性模量矩阵, $d\varepsilon$

为总应变增量, m 为法向应力单位列阵, γ_w 为水的重度, h 为全水头, K_w 为水的体积模量, β_w 为水的热膨胀系数, dT 为温度增量, df 为外荷载增量。

2.2 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。假定节理中水的渗透流可以用达西定律来描述, 可得出水的连续性方程为

$$-\nabla^T \left\{ \frac{K\gamma_w}{\mu} \nabla h \right\} + (m^T - \frac{m^T D}{3K_w}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + [\frac{1}{K_w} - \frac{1}{(3K_w)^2} m^T D m] \cdot \gamma_w \frac{\partial h}{\partial t} + [\frac{1}{3K_w} m^T D m \frac{\beta_w}{3} - \beta_w] \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \quad (11)$$

式中, K 为在整体坐标系中的渗透系数矩阵, 且有 $[K] = [T]^T [K'] [T]$, K' 为局部坐标系中沿着节理切向和法向的渗透系数矩阵, μ 为水的黏滞系数。

2.3 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。从而得出能量守恒方程为

$$C_w T \left(\frac{\rho_w}{K_w} \gamma_w \frac{\partial h}{\partial t} - \rho_w \beta_w \frac{\partial T}{\partial t} \right) + \rho_w C_w \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla^T \lambda \nabla T + \rho_w C_w (\nabla^T T) V^a = 0, \quad (12)$$

式中, C_w 为水的比热, $\rho_w C_w$ 为水的热容量, λ 为在整体坐标系中水的导热系数矩阵, 且有 $[\lambda] = [T]^T [\lambda'] [T]$, λ' 为局部坐标系中沿着节理切向和法向的水的导热系数矩阵, V^a 为水流速度。

而对于各向同性、均质连续且处于饱和一非饱和状态的岩土体, 其相应的控制方程与上述式子类似^[9]。

对节理及岩体的热-水-应力耦合模型建立有限元分析格式的方法可参见文献[7, 9]。

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^[10]。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, 它们起着阻滞放射性核素外泄及迁移的四重屏障的作用。

根据上述核废物地质处置的概念, 从方法论研究的角度, 采用了一个简单的计算模型, 长×宽×高=10 m×10 m×20 m, 其内部缓冲材料的尺寸为长×宽×高=4 m×4 m×4 m, 核废物贮存罐位于模型的中心, 在缓冲层底面、顶面上 1 m 处各有一条 5 cm 厚的水平节理面, 沿垂向剖开的半结构见图 2。由于对称性, 取图 2 模型的左半部分作为分析域, 对应的有限元网

格见图 3, 其中有 5203 个节点, 4016 个八节点等参数实体单元, 184 个八节点等厚度节理单元。假定核废物贮存罐的埋深为 500 m, 水头从地表向下为线性分布, 岩体中的初始温度为 20.0℃。取边界条件: 顶、底面水头及温度固定, 其余面为绝热及不透水面, 4 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来的节点荷载。

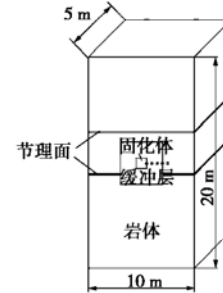


图 2 沿垂向剖开的半模型

Fig. 2 Half model with vertical section

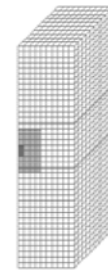


图 3 有限元网格

Fig. 3 FEM mesh

认为缓冲材料符合 JNC 模型, 其与非饱和计算有关的一些物性值设定如下^[10-11]。

(1) 膨胀应力

膨胀应力 F_w (MPa) 与饱和度 s_w 呈现函数关系, 以回归曲线表示为

$$F_w = F_{wmax} s_w^2, \quad (13)$$

式中, $F_{wmax} = 0.35$ MPa。

(2) 比渗透系数

比渗透系数 r_w 与饱和度 s_w 的函数关系为

$$r_w = s_w^t, \quad (14)$$

式中, t 是经验常数, 本文取 2.0。

(3) 水分特性曲线

水分特性曲线用 Van Genuchten 模型描述,

$$\frac{s_w - s_{wr}}{s_{ws} - s_{wr}} = [1 + (\alpha \psi)^n]^{-m}, \quad (15)$$

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, α , 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

表 1 主要计算参数

Table 1 Main parameters

介质	重度 γ $/(kN \cdot m^{-3})$	孔隙率 ϕ	渗透系数 $k/(m \cdot s^{-1})$	弹性模量 E/MPa	泊松 系 μ	比热 C $/(kJ \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	热膨胀系数 $\beta/(^\circ C^{-1})$	导热系数 λ $/(W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$
岩石	25.0	0.1	1.0×10^{-8}	3.7×10^3	0.25	1.0	1.0×10^{-6}	3.0
缓冲材料	18.0	0.5	1.0×10^{-10}	3.0×10^1	0.30	0.4	2.0×10^{-5}	0.8
固化体	27.0	0.0	1.3×10^{-5} (//)	2.0×10^1 (//)	0.23	0.7	1.0×10^{-6}	55.0
节理	10.0	1.0	1.3×10^{-8} ($\perp$)	2.0×10^2 ($\perp$)	—	4.2	6.0×10^{-4}	0.6

注：“//”、“ $\perp$ ”分别表示平行和垂直于节理面方向。

$$D_{\theta v} = \frac{(2.99 \times 10^{-8} T - 3.78 \times 10^{-7})_1 (\theta - \theta_s)}{(\theta + 2.49 \times 10^{-3}) (-2.49 \times 10^{-3} - \theta_s)} \quad (16)$$

(5) 温度梯度水分扩散系数

$$D_t = D_{t0} \exp(\alpha_T \frac{T - T_0}{T_0}) \quad (17)$$

式中， $D_{t0} = 7.0 \times 10^{-12}$ ， $\alpha_T = 0.0$ ， $T_0 = 30.0^\circ C$ 。

(6) 湿气容量

$$\frac{\partial s_w}{\partial p_w} = \frac{1}{\phi \gamma_w} \alpha(n-1)(\theta_s - \theta_e)^{1/m} (1 - s_e^{1/m})^m \quad (18)$$

$$s_e = (1 + |\alpha \psi|^n)^{-m} \quad (\alpha > 0) \quad (19)$$

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 500 W 的不变功率释放热量，时间经历了 120 a。进行弹性分析。

4 有限元数值分析

图 2 剖面上标注了 5 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 4 是有、无节理情况下上述 5 个点的温度随时间变化曲线，从中看到，两种情况下各点温度随时间变化的形态、趋势均相似，量值也很接近，如到 17 a 时有、无节理情况下各点的温度依次为 74.0℃、73.0℃（2422 点），50.4℃、49.4℃（2423 点），34.3℃、33.4℃（2424 点），25.4℃、24.6℃（2425 点），23.7℃、23.1℃（2426 点）。而到 60 a 时图 3 前表面上的温度等值线见图 5，看到有、无节理情况岩体中的温度分布有明显的差别，这是由于节理内部水的流速较大（特别是在缓冲层的顶部），对节理附近的岩体产生了一定的“冷却”作用，甚至使得节理壁处的温度低于 20.0℃。可知当缓冲层附近有不连续面存在时，将对岩体的温度场分布产生较大的影响。

图 6 是有、无节理情况下上述 5 个点的饱和度随时间变化曲线，从中看到，两种情况下各点饱和度随时间变化的形态、趋势均相似，量值也很接近。各点达到饱和的时间为，有节理：94.61 a（2422 点）、92.99 a（2423 点）、71.73 a（2424 点）、0.60 a（2425 点）、

0.55 a（2426 点）；无节理：94.44 a（2422 点）、92.84 a（2423 点）、71.49 a（2424 点）、0.88 a（2425 点）、0.58 a（2426 点）。由此可见，有节理时缓冲层离围岩近的部分较快进入饱和，而贮存罐周围的部分则相反。这是因为缓冲层的渗透系数非常低，来自节理的较多水量在短时间内可以加快浸润缓冲层的表面附近，但难以进入缓冲层内部，同时随着时间的推移，在热 - 水 - 应力耦合的作用下，部分进入缓冲层的水量又从与其相通的节理流向了岩体（见图 7）。故当近场有不连续面存在时，缓冲层的饱和过程也是比较复杂的。

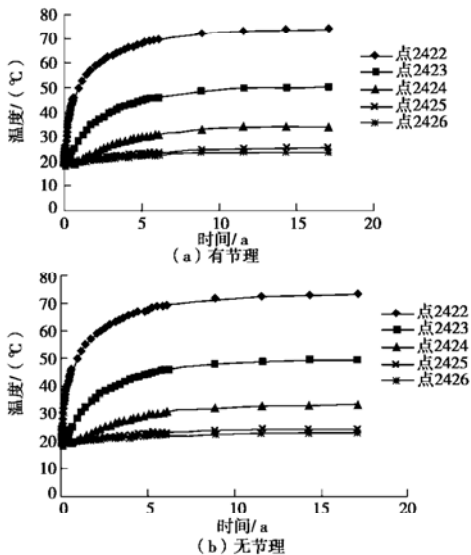


图 4 温度 - 时间曲线
Fig. 4 Temperature - time curves

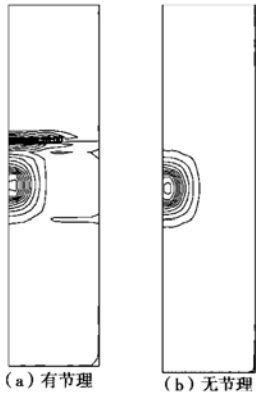


图 5 岩体中温度等值线
Fig. 5 Contours of temperature in rock mass

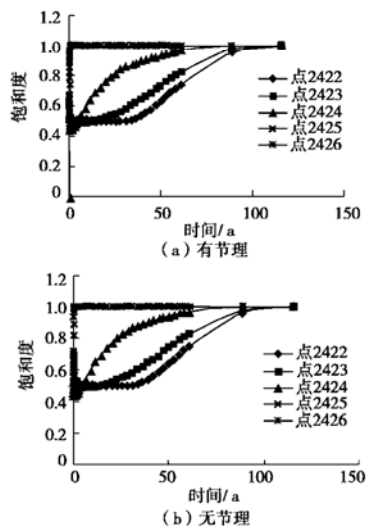


图 6 饱和度 - 时间曲线
Fig. 6 Saturation - time curves

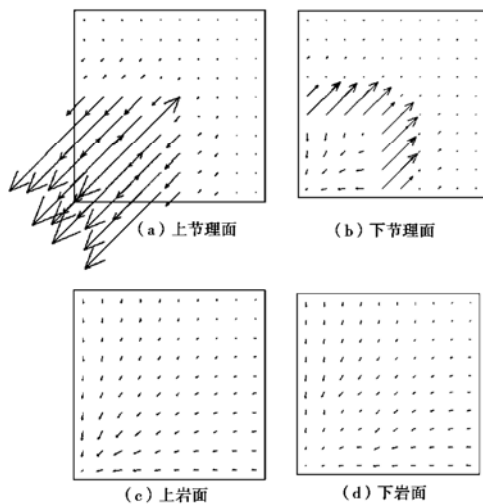


图 7 60 a 时两个节理面及对应的无节理岩体剖面上的水流速度矢量
Fig. 7 Velocity vectors of water flows in two joint surfaces and the corresponding sections of rockmass without joints after 60 years

当时间为 60 a 时在图 3 高度之半的水平剖面上正应力 σ_x 的等值线见图 8。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，处置孔壁上最大的 σ_x 值为 -49.3 MPa（有节理）、-42.2 MPa（无节理）。而在图 3 前表面上的正应力 σ_z 的等值线见图 9。从中看到，除了缓冲层和处置孔壁交界附近外，有节理时在节理附近也形成了明显的应力集中区域，处置孔壁上最大的 σ_z 值分别为 -75.6 MPa（有节理）和 -67.8 MPa（无节理）。在前表面上缓冲层和处置孔壁的交界处的水平正应力 σ_x 随时间的变化曲线见图 10。从中看到，开始时该处正应力为拉性，但很快转变为压性并时间增大，在 60 a 时其值上升到 -47.9 MPa（有节理）、-41.6 MPa（无节理）。由此可知，不连续面的存在使得围岩中的应力有所增加。

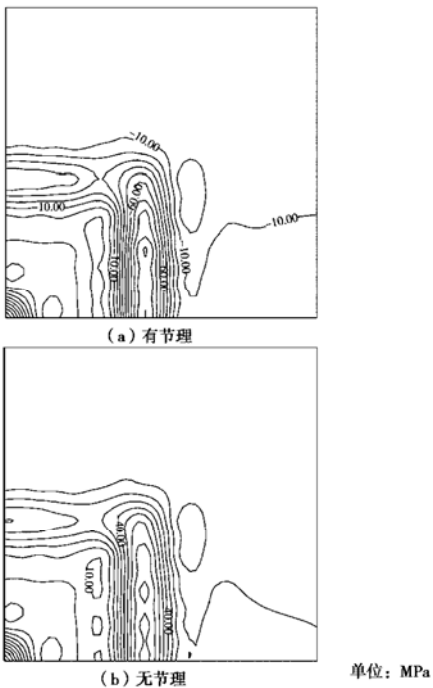


图 8 水平剖面上的 σ_x 等值线
Fig. 8 Contours of σ_x in the horizontal section

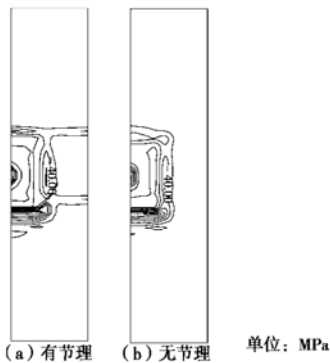


图 9 垂直剖面上的 σ_z 等值线
Fig. 9 Contours of σ_z in the vertical section

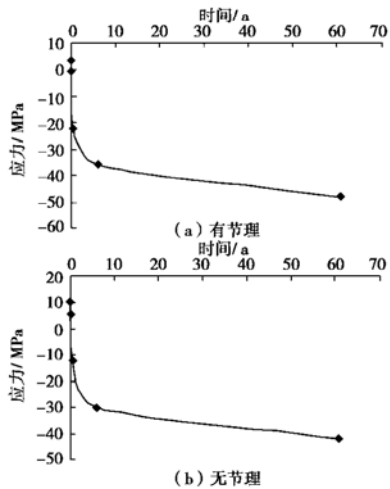


图 10 前表面上缓冲层和处置孔壁的交界处的水平正应力 σ_x 随时间变化曲线
Fig. 10 Variation of horizontal normal stress σ_x at boundary between buffer and disposal hole wall in front surface with time

60 a 时两个节理面及对应的无节理岩体剖面上的水流速度矢量见图 7。从中看到,在缓冲层顶部的节理面上在相应于缓冲层的区域内流速较其它部位大得多,且主要是向中心流动,这是由于在该区域内水头梯度很高和沿节理面的渗透系数较大(比岩体高二个数量级)的缘故;同时在与缓冲层相通的节理面上在缓冲层附近的流速也较大,但基本是朝着离开贮存罐的方向流动;相比之下无节理时两个岩面上的流速很小(上岩面比下岩面略大一点),且均向中心流动。4个面上的最大流速矢量的绝对值依次为 1.35×10^{-6} m/s(上节理面), 4.42×10^{-7} m/s(下节理面), 7.45×10^{-8} m/s(上岩面), 5.07×10^{-8} m/s(下岩面)。

5 结 论

(1)建立了一种用于分析饱和和不连续面中热-水-应力耦合过程的三维节理单元模型,并结合笔者已提出的三维饱和-非饱和热-水-应力耦合岩土体单元模型,编制出了相应的有限元程序。

(2)与无节理时相比,缓冲层附近节理的存在明显地影响到了核废物处置孔围岩中的温度分布,特别是因节理中水的流速相对较高而对节理部位的岩体有一定的“冷却”作用,使得该部岩体的温度可能低于初始地温。

(3)当缓冲层附近有多条节理存在时,在热-水-应力耦合的作用下,有的节理中水流向缓冲层,有的节理则从缓冲层中“输出”水,出现某种对流效应,并且对缓冲层各部分的含水率达到饱和的时间产生“加快”或“滞后”的作用。

(4)节理的存在对近场围岩中的应力场有严重的影响,既造成节理部位岩体的应力集中现象,又使得其它部位岩体中的应力值有所增加。

(5)由于节理的存在对核废物处置库围岩中的温度场、渗流场和应力场及其耦合过程有着强烈的作用,必须通过理论分析、室内和现场试验、数值模拟等手段对节理的热-水-应力耦合现象进行认真的研究。

参考文献:

- [1] OHNISHI Y, CHAN T, JING L. Constitutive models for rock joints[C]// Coupled Thermo-hydro-mechanical Processes of Fractured Media, Vol. 79, Elsevier: Development in Geotechnical Engineering, 1996: 57 - 91.
- [2] RUTQVIST J, CHIJIMATSU M, JING L, et al. A numerical study of THM effects on the near-field safety of a hypothetical nuclear waste repository — BMT1 of the Decoalex III project. Part 3: effects of THM coupling in sparsely fractured rocks[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2005, 42(5-6): 745 - 755.
- [3] 井兰如, 冯夏庭. 放射性废物地质处置中主要岩石力学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(4): 833 - 841. (JING Lan-ru, FENG Xia-ting. Main rock mechanics issues in geological disposal of radioactive wastes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(4): 833 - 841. (in Chinese))
- [4] NOORISHAD J, TSANG C F. Coupled thermohydroelasticity phenomena in variably saturated fractured porous rocks—formulation and numerical solution[C]// Coupled Thermo-hydro-mechanical Progresses of Fractured Media, 79, Elsevier: Development in Geotechnical Engineering, 1996: 93 - 134.
- [5] NGUYEN T S. Description of the computer code FRACON[C]// Coupled thermo-hydro-mechanical Progresses of Fractured Media, 79, Elsevier: Development in Geotechnical Engineering, 1996: 539 - 544.
- [6] TIJANI S M, VOUILLE G. FEM analysis of coupled THM processes in fractured media with explicit representation of joints, In: Stephansson[C]// Coupled Thermo-hydro-mechanical Progresses of Fractured Media, 79, Elsevier: Development in Geotechnical Engineering, 1996: 165 - 180.
- [7] 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))
- [8] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990: 110 - 116. (ZHOU Wei-yuan. Advanced rock mechanics[M]. Beijing: China Water Power Press, 1990: 110 - 116. (in Chinese))
- [9] 张玉军. 饱和-非饱和介质热-水-应力耦合二维有限元分析[J]. 安全与环境学报, 2005, 5(5): 50 - 55. (ZHANG Yu-jun. 2D FEM analysis for coupled thermo-hydro-mechanical processes in saturated-unsaturated media[J]. Journal of Safety and Environment, 2005, 5(5): 50 - 55. (in Chinese))
- [10] 操上广志. 地盘における热水应力连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. (in Japanese))
- [11] CHIJIMATSU M, KURIKAMI H, ITO A, et al. Subtask BMT1-B: implication of THM coupling on the near-field of a nuclear waste repository in a homogeneous rock mass[R]. Decoalex III-Task3-Bench Mark Test 1(BMT1), 2002: 1 - 43.