

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.03.035

# 热-水-应力-迁移耦合条件下双重孔隙-裂隙介质的抗剪强度及有限元分析

张玉军<sup>1</sup>, 琚晓冬<sup>2</sup>

(1. 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; 2. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454000)

**摘 要:** 考虑裂隙的连通率、间距、孔隙基质和裂隙材料在表征单元 (REV) 中的体积分数, 并假定双重孔隙-裂隙介质的等效内摩擦角保持常数, 而等效黏聚力是固有黏聚力、等效塑性应变、基质吸力、溶质浓度及温度的函数, 提出了一种在热-水-应力-迁移耦合条件下确定表征单元内任一平面上等效的黏聚力及内摩擦角的方法。针对一个假定的位于非饱和双重孔隙-裂隙岩体中的高放废物地质处置模型进行了数值模拟及分析。结果表明, 基质吸力对于等效黏聚力的增强作用大于等效塑性应变和溶质浓度的减弱作用, 使得等效黏聚力得到了提高, 故减少了围岩中的塑性区; 由此岩体应力、孔(裂)隙水压力及流速、孔(裂)隙溶质浓度的分布及量值也发生相应的改变。

**关键词:** 热-水-应力-迁移耦合; 双重孔隙-裂隙介质; 抗剪强度; 有限元分析

中图分类号: O242

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2015) 03 - 877 - 08

## Shear strength of dual-pore-fracture medium and finite element analysis under thermo-hydro-mechanical-migratory coupling

ZHANG Yu-jun<sup>1</sup>, JU Xiao-dong<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China)

**Abstract:** Considering connectivity rate and spacing of fractures, volume fractions of pore matrix and fractured material in a representative element volume (REV), a method for determining the equivalent cohesion and internal friction angle is proposed under the condition of thermo-hydro-mechanical-migratory coupling. While the equivalent internal friction angle of the medium is assumed to be a constant, the equivalent cohesion will be a function of inherent cohesion, equivalent plastic strain, suction, solute concentration and temperature. A hypothetical disposal model for nuclear waste located in unsaturated dual-pore-fracture rock mass is analyzed and simulated with the proposed method. The results show that the enhancement for the equivalent cohesion by suction is larger than the weakening effect by equivalent plastic strain and solute concentration. The plastic zones in the surrounding rock mass reduce with the increasing of equivalent cohesion. Thus the distributions and values of rock mass stress, pressure and flow velocity of pore water and fracture water, solute concentration in pore and fracture also change correspondingly.

**Keywords:** thermo-hydro-mechanical-migratory coupling; dual-pore-fracture medium; shear strength; finite element analysis

### 1 引 言

对于双重孔隙-裂隙岩体, 除了基质的弹性模量、泊松系数以及裂隙的组数、间距、方向、连通率和刚度对岩体的本构关系有影响外<sup>[1-2]</sup>, 在热-水-应力-化学等多场耦合过程中, 力学演化(如应变硬化/软化)、基质吸力、溶质浓度等因素也将使岩体

的强度指标发生改变。因此, 需要在所用的塑性屈服准则中体现这一改变。对于热-水-应力(-化学)耦合的单一孔隙介质, 目前已有若干考虑了力、水、化学作用的弹塑性模型。Wu Wen-hua 等<sup>[3]</sup>提出了一种非饱和土热-水-应力的本构模型, 对其热力软化现象进行的定量模拟分析中指出, 非饱和土预固结压力值和 SI 曲线基质吸力临界值随加热进程而不

收稿日期: 2014-10-22

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(No.2010CB732101); 国家自然科学基金项目(No.51379201)

第一作者简介: 张玉军, 男, 1956年生, 博士, 研究员, 主要从事岩土力学与工程方面的研究工作。E-mail: yjzhang@whrsm.ac.cn

断减小；刘泽佳等<sup>[4]</sup>考虑孔隙水中有机污染物对多孔介质力学行为的影响及温度对溶质中污染物传输机制的作用，发展了一个多孔介质中的化学-热-水力-力学（CTHM）耦合本构模型；李荣涛等<sup>[5]</sup>提出了一种用于模拟高温下混凝土中化学-热-湿-力学耦合行为的化学塑性-损伤耦合本构模型，并导出了相应的一致性切线模量矩阵；Hueckel等<sup>[6]</sup>通过试验分析了在不排水条件下 Argillaceous 黏土的热应变、热力引发的超固结和孔隙水压力和强度的改变，考察了该黏土的热-水-力学性质对于碳酸岩含量的依存性，借助黏土的热-弹-塑理论修正了扩展的剑桥模型。然而，迄今为止，对于双重孔隙-裂隙介质则鲜见有相应的研究工作。

在水利水电、石油开采、地热利用、核废物深埋处置及 CO<sub>2</sub> 地质封存等工程领域中，往往涉及遍有节理的岩体，对其可看作为是具有双重孔隙-裂隙的介质。在所赋存的热-水-应力-化学耦合的环境条件下，存在着岩体的承载能力及稳定性问题，这其中就有如何正确地给出围岩进入塑性区的判别准则。所以建立可综合考虑应力、温度、水理和化学等因素影响的双重孔隙-裂隙介质的强度准则的重要性、必要性是不言而喻的。

有鉴于此，笔者将遍有节理岩体看成是一种由孔隙基质和裂隙材料混合而成的复合介质，将孔隙基质和裂隙材料分别具有的强度对复合介质总体强度的“贡献”与其体积分数相联系，并在其中计入塑性应变、基质吸力和溶质浓度对总体强度的影响，在摩尔-库仑准则的基础上，提出了一种求解双重孔隙-裂隙介质的黏聚力及内摩擦角的方法，并将其引入笔者所研制的二维热-水-应力-迁移耦合弹塑性有限元程序中进行计算和验证。现假定一个高放废物地质处置模型位于非饱和的双重孔隙-裂隙介质中，地层内发育有水平和垂直分布的两组裂隙。以此为计算背景，拟定 2 种工况：岩体的黏聚力与基质吸力、溶质浓度无关；岩体的黏聚力随基质吸力、溶质浓度变化。在一定的初始温度、孔（裂）隙水压力、孔（裂）隙溶质浓度、岩体应力条件下，进行热-水-应力-迁移耦合有限元分析，考察了高放废物源近场的塑性区、应力、温度、孔（裂）隙水压力、流速、孔（裂）隙溶质浓度的分布，得出了若干新认识。

## 2 双重孔隙-裂隙介质的总体强度

### 2.1 屈服准则

对于 Mohr-Coulomb 屈服准则和 Drucker-Prager

屈服准则，分别有

$$F = \tau - c - \sigma \tan \varphi = 0 \quad (1)$$

$$F = \alpha J_1 + (J_2')^{1/2} - k' = 0 \quad (2)$$

而：

$$\alpha = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3(3 - \sin \varphi)}}, k' = \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3(3 - \sin \varphi)}} \quad (3)$$

式中： $\tau$ 、 $\sigma$  分别为作用在屈服面上的剪应力和正应力； $c$ 、 $\varphi$  分别为材料的黏聚力和内摩擦角； $J_1$ 、 $J_2'$  分别为第一应力不变量和第二偏应力不变量。

### 2.2 固有强度

图 1 为双重孔隙-裂隙介质岩体表征单元（REV）示意。REV 的体积为 1，其中发育有  $m$  组裂隙，每组裂隙的条数为  $n$ ，则可得：

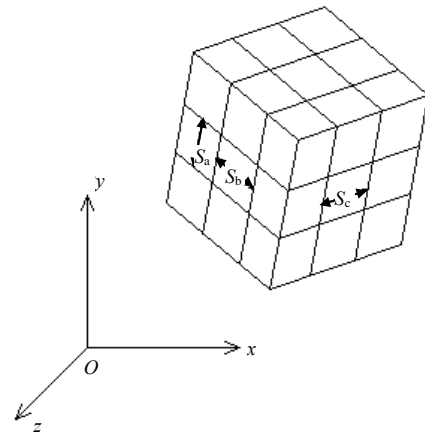


图 1 双重孔隙-裂隙介质岩体表征单元  
Fig.1 REV of dual-pore-fracture rock mass

$$r_R + r_J = r_R + \sum_{k=1}^m r_{Jk} = 1 \quad (4)$$

$$\frac{V_R}{V_Z} = r_R, \quad \frac{V_J}{V_Z} = r_J \quad (5)$$

$$V_J = \sum_{k=1}^m V_{Jk} = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n V_{Jki} l_{ki} \quad (6)$$

$$V_R + V_J = V_Z \quad (7)$$

式中： $r_R$ 、 $r_J$  和  $r_{Jk}$  分别为岩体孔隙基质、总裂隙及第  $k$  组裂隙的体积与表征单元体积之比（即体积分数）； $V_Z$ 、 $V_R$ 、 $V_J$ 、 $V_{Jk}$ 、依次为表征岩体单元、该单元中孔隙基质、总的裂隙及第  $k$  组裂隙的体积； $V_{Jki}$ 、 $l_{ki}$  分别为第  $k$  组、第  $i$  条裂隙（包括强度影响带）连通时的体积及该条裂隙的连通率（其值为 0~1）。如果第  $k$  组裂隙中单条裂隙的体积、间距和连通率均分别为  $V_k$ 、 $S_k$  及  $l_k$ ，则表征单元中该组裂隙的条数为  $n=1/S_k$ ，从而该组裂隙的体积为  $V_{Jk} = nV_k l_k$ ，本文中称这样的裂隙组为均匀裂隙组。

对于裂隙的强度影响带，目前还没有看到有相关研究成果发表。但华若丹<sup>[7]</sup>曾提出过预测断层强度降低带宽度的经验公式如下：

$$B_s = 8H + 2.09 \quad (8)$$

式中： $B_s$  为断层带及其强度降低带的宽度； $H$  为断层裂距。

笔者借用式(8)的函数形式作为裂隙体积的计算依据，但在数值试验中暂取  $B_s$  为  $2H$ 。故有

$$V_{Ji} = V_{Ji1} + V_{Ji2} = 3V_{Ji1} \quad (9)$$

式中： $V_{Ji1}$ 、 $V_{Ji2}$  分别为表征单元中单条裂隙及其强度降低带的体积。

考虑到裂隙的连通率，则第  $k$  组均匀裂隙的黏聚力及内摩擦角可表示为

$$\left. \begin{aligned} c_{Jk} &= c_R (1-l_k) + c_{jk} l_k \\ \varphi_{Jk} &= \varphi_R (1-l_k) + \varphi_{jk} l_k \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中： $c_R$ 、 $\varphi_R$  分别为岩体孔隙基质的黏聚力和内摩擦角； $c_{jk}$ 、 $\varphi_{jk}$  分别为连通裂隙的黏聚力和内摩擦角。

由于双重介质岩体呈现出力学性质各向异性的特点<sup>[2]</sup>，本文将裂隙的黏聚力及内摩擦角当成矢量看待，即其同时具备大小和方向特征，且可对任意方向分解，由此对第  $k$  组均匀裂隙给出：

$$\left. \begin{aligned} c_{Jk} \cos \alpha_i &= c_{ix}, c_{Jk} \cos \beta_i = c_{iy}, c_{Jk} \cos \gamma_i = c_{iz} \\ \varphi_{Jk} \cos \alpha_i &= \varphi_{ix}, \varphi_{Jk} \cos \beta_i = \varphi_{iy}, \varphi_{Jk} \cos \gamma_i = \varphi_{iz} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中： $\alpha_i$ 、 $\beta_i$ 、 $\gamma_i$  依次为裂隙面法线与坐标轴  $x$ 、 $y$ 、 $z$  夹角的余弦； $c_{ix}$ 、 $c_{iy}$ 、 $c_{iz}$  和  $\varphi_{ix}$ 、 $\varphi_{iy}$ 、 $\varphi_{iz}$  分别为  $c_{Jk}$ 、 $\varphi_{Jk}$  在 3 个坐标轴方向的分量。

根据混合材料强度的概念<sup>[8]</sup>，笔者假定：双重孔隙-裂隙介质的总体强度值等于孔隙基质及裂隙的相应强度值与各自体积比的乘积之和。从而有

$$\left. \begin{aligned} r_R c_R + \sum_{k=1}^m r_{Jk} c_{iK} &= c_K \\ r_R \varphi_R + \sum_{k=1}^m r_{Jk} \varphi_{iK} &= \varphi_K \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中： $K = x, y, z$ ； $c_K$ 、 $\varphi_K$  分别为双重孔隙-裂隙介质岩体在  $K$  轴方向的黏聚力和内摩擦角。

对于式(12)若是单一孔隙岩体(无裂隙存在)，即  $r_{Jk} = 0$ ，则  $r_R = 1$ ，此时有  $c_K = c_R$ 、 $\varphi_K = \varphi_R$ 。

借助于弹性力学中由作用在一点上的 3 个主应力分量求该过点任一平面上正应力的方法<sup>[9]</sup>，因双重孔隙-裂隙介质岩体在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴方向的黏聚力和内摩擦角分别为  $c_x$ 、 $c_y$ 、 $c_z$  和  $\varphi_x$ 、 $\varphi_y$ 、 $\varphi_z$ ，则

其表征单元中任一平面上有

$$\left. \begin{aligned} c_N &= r^2 c_x + p^2 c_y + q^2 c_z \\ \varphi_N &= r^2 \varphi_x + p^2 \varphi_y + q^2 \varphi_z \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中： $c_N$ 、 $\varphi_N$  分别为这一平面上的黏聚力和内摩擦角； $r$ 、 $p$ 、 $q$  为该平面法线的方向余弦。

### 2.3 塑性应变、吸力和浓度对强度的“贡献”

假定在热-水-应力-迁移耦合的条件下，双重孔隙-裂隙介质的等效内摩擦角  $\varphi$  保持为常数  $\varphi_N$ ，而等效黏聚力  $c$  是  $c_N$ 、等效塑性应变  $\bar{\varepsilon}^p$ 、基质吸力  $s$ 、溶质浓度  $C$  及温度  $T$  的函数<sup>[4-5]</sup>，即

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \varphi_N \\ c &= c_N + k_{pe} \bar{\varepsilon}^p + k_{ps} (\Delta T) s + k_{pC} C \\ s &= p_a - p_w \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

而

$$\left. \begin{aligned} r_R s_R + \sum_{k=1}^m r_{Jk} s_J &= s \\ r_R C_R + \sum_{k=1}^m r_{Jk} C_J &= C \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中： $p_a$ 、 $p_w$  分别为气体压力和非饱和孔隙水压力(后面计算中取大气压力为基准值，即  $p_a = 0$ )； $k_{pe}$ 、 $k_{ps}$ 、 $k_{pC}$  为依存于双重孔隙-裂隙介质特性的材料参数； $\Delta T$  为当前温度和参考温度  $T_r$  的差值； $s_R$ 、 $C_R$  和  $s_J$ 、 $C_J$  分别为孔隙基质和裂隙介质中的吸力与溶质浓度(注意：相应于多组裂隙，只有 1 对  $s_J$ 、 $C_J$ )。

## 3 弹塑性分析

在进行弹塑性计算时，有效应力增量可表示为

$$d\sigma' = \left[ \begin{aligned} &D^e \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma'} \right\} \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma'} \right\}^T D^e \\ &A + \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma'} \right\}^T D^e \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma'} \right\} \end{aligned} \right] d\varepsilon \quad (16)$$

式中： $\sigma'$ 、 $\varepsilon$  分别为有效应力列阵和应变列阵； $D^e$  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。

本程序中使用相关联的流动法则，并令  $A = 0$ ，取摩尔-库仑准则为屈服函数<sup>[10]</sup>，即

$$F = (\sigma'_1 - \sigma'_3) + (\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin \varphi - 2c \cos \varphi = 0 \quad (17)$$

或

$$\left. \begin{aligned} F &= \frac{1}{3} J_1 \sin \varphi + (J_2')^{1/2} \left( \cos \theta - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta \sin \varphi \right) - c \cos \varphi = 0 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

式中： $\sin 3\theta = -\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{(J_2)^{3/2}}$ ； $J_1 = \sigma'_x + \sigma'_y + \sigma'_z$ ； $J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma'_x - \sigma'_y)^2 + (\sigma'_y - \sigma'_z)^2 + (\sigma'_z - \sigma'_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]$ ； $J_3 = \sigma'_x \sigma'_y \sigma'_z + 2\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx} - \sigma'_x \tau_{yz}^2 - \sigma'_y \tau_{zx}^2 + \sigma'_z \tau_{xy}^2$ ； $\sigma'_1$ 、 $\sigma'_3$  分别为有效最大主应力和有效最小主应力； $c$ 、 $\varphi$  分别为岩土介质的黏聚力及内摩擦角； $\sigma'_x$ 、 $\sigma'_y$  和  $\sigma'_z$  为有效正应力； $\tau_{xy}$ 、 $\tau_{yz}$  和  $\tau_{zx}$  为剪应力，在平面应变的情况下  $\tau_{yz}$ 、 $\tau_{zx}$  为 0。

对于双重孔隙-裂隙介质岩体，因其强度具有各向异性的特性，故应求出最不利的剪切面  $i$ （可能的剪切破坏面），使用该面上的黏聚力  $c_i$ 、内摩擦角  $\varphi_i$ （二者由式（13）（14）求得）及相应的屈服函数  $F_i$  进行上述的弹塑性有限元计算，其方法可参见文献[11-12]。

而双重孔隙-裂隙介质的热-水-应力-迁移耦合模型的控制方程可参阅文献[13]。

### 4 算 例

如图 2 所示，在地下一定深度处埋入一核废料玻璃固化体，其周围岩体为非饱和的双重孔隙-裂隙介质。将该模型近似简化为实验室尺度的平面应变问题。取计算域尺寸为水平  $x$  方向为 4 m，垂直  $y$  方向为 8 m，有限元计算划分为 800 个单元，861 个节点。从固化体边缘向右的节点号依次为 432、433、434、435、436。其边界条件为：顶面无约束，其上作用有分布荷载  $\sigma_v = 26.7$  MPa；左、右侧面约束水平方向位移；底面约束垂直方向位移；所有边界的孔隙水压力、裂隙水压力分别为 -4.59、-0.46 MPa（二者相异的原因在于处置洞开挖和回填时孔隙及

裂隙渗流场受到扰动不同），此外环境温度设定为 20 °C。岩体中发育有水平及垂直两组裂隙，其开度、间距分别均为 1.0 cm 和 0.1m。孔隙基质及二组裂隙的黏聚力和内摩擦角分别为： $c_R = 3.5$  MPa， $\varphi_R = 60^\circ$ ； $c_1 = 0.5$  MPa， $\varphi_1 = 20^\circ$ ； $c_2 = 1.7$  MPa， $\varphi_2 = 35^\circ$ 。取表征单元体积为 1 m<sup>3</sup>，有  $r_R = 0.6$ ， $r_{J1} = r_{J2} = 0.2$ ， $r_j = r_{J1} + r_{J2} = 0.4$ ，由此可得  $c_x = 2.2$  MPa， $c_y = 2.44$  MPa， $\varphi_x = 40^\circ$ ， $\varphi_y = 43^\circ$  并假定依存于双重孔隙-裂隙介质特性的材料参数为常数，并且  $k_{p\varepsilon} = c_N$ ， $k_{ps}(\Delta T) = 1.0 \times 10^{-3}$ ， $k_{pC} = -4.0$  MPa/(mol/m<sup>3</sup>)<sup>[4]</sup>。由式（14）第 2 式可知，因等效塑性应变  $\bar{\varepsilon}^p$  为负值、基质吸力  $s$  和溶质浓度  $C$  为正值，故其对等效黏聚力  $c$  依次起着减弱、增强、减弱的作用。其他相关计算参数见表 1、2。初始状态时，岩体温度为 20 °C，而核废物以 1 000 W 的不变功率历时 4 a 持续释放热量。

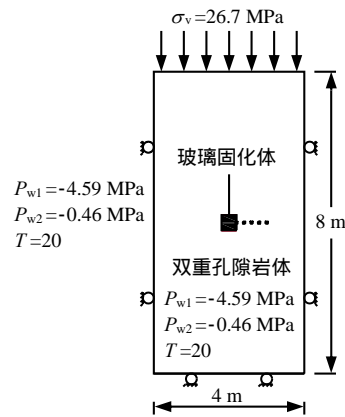


图 2 计算模型

Fig.2 Computation model

表 1 岩石和固化体的主要计算参数

Table 1 Computation parameters of rock and vitrified waste

介质	重度 $\gamma$ /(kN·m <sup>-3</sup> )	孔隙率 $\varphi_1$	渗透系数 $k_1$ /(m/s)	弹性模量 $E$ /GPa	泊松系数 $\mu$	比热 $C$ /(kJ·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	热膨胀系数 $\beta$ /°C <sup>-1</sup>	导热系数 $\lambda$ /(W·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )
岩石	26.7	0.11	$1.24 \times 10^{-13}$	37	0.30	1.0	$8.8 \times 10^{-6}$	2.8
固化体	25.0	0.00	$1.0 \times 10^{-27}$	53	0.25	0.7	$1.0 \times 10^{-5}$	5.3

表 2 裂隙组的计算参数

Table 2 Calculation parameters of fracture sets

裂隙参数	间距 $S$ /m	连通率 $l$	倾角 $\theta$ /(°)	法向刚度 $k_n$ /(MPa/m)	切向刚度 $k_s$ /MPa/m	孔隙率 $\varphi_2$	渗透系数 $k_2$ /(m/s)
水平裂隙	0.1	1	0	1 000	500	0.01	$9.7 \times 10^{-9}$
垂直裂隙	0.1	1	90	500	250	0.01	$9.7 \times 10^{-9}$

注：为考虑岩体屈服后产生扩容和渗透能力增强<sup>[16]</sup>，将塑性单元的渗透系数  $k_1$ 、 $k_2$  提高到初始值的 1.3 倍。

孔隙介质和裂隙介质的水分特性曲线符合 Van Genuchten 模型<sup>[14]</sup>，即

$$s_w = (s_{ws} - s_{wr})(1 + |\alpha\psi|^n)^{-m} + s_{wr} \quad (19)$$

式中：对于孔隙介质： $\alpha = 3.86 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ ， $n = 1.41$ ；对于裂隙介质： $\alpha = 5.26 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ ， $n = 2.55$ ；

$m = 1 - 1/n$ ； $\psi$  为水势； $s_{ws}$  为最大饱和度，其值为 1.0； $s_{wr}$  为最小饱和度，其值对孔隙介质和裂隙介质各取 0.19 和 0.01。

比渗透率与饱和度的关系为

$$k_{rw} = s_w^{2.0} \quad (20)$$

取孔隙介质及裂隙介质的温度梯度水分扩散系数相同，其为： $D_t = 2.5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}^\circ\text{C}$ 。玻璃固化体为孔隙岩体中的源项，某种污染物的释放强度为  $Q_c = 1.44 \times 10^{-8} \text{ mol} \cdot \text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。设与污染物的渗透迁移有关且在计算中不变的参数为：孔隙曲折率  $\tau_1$ 、 $\tau_2$  分别为 0.4、0.8，纵向弥散度  $\alpha_{1L}$ 、 $\alpha_{2L}$  分别为 1、2 m，横向弥散度  $\alpha_{1T} = \alpha_{1L}/10$ ，分子扩散系数  $\alpha_{1m}$ 、 $\alpha_{2m}$  分别为  $1.0 \times 10^{-9}$ 、 $2.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ，分配系数  $K_{d1}$ 、 $K_{d2}$  分别为 8.0、5.3 mL/g，干密度  $\rho_{d1}$ 、 $\rho_{d2}$  分别为 23.0、21.0 kg/m<sup>3</sup>，参数  $\bar{\omega}$  为 100 m<sup>2</sup>，污染物的衰减常数  $\chi = \ln 2/T_{\text{half}}$ ，其中  $T_{\text{half}}$  是半衰期，取为 1 000 a。

针对上述 2 种岩体黏聚力变化的工况，计算了岩体的温度、应力、塑性区、孔（裂）隙水压力、流速、孔（裂）污染物浓度等的变化及分布情况，其主要结果及分析如下。

由于渗流和地应力对核废物释热的影响较小<sup>[15]</sup>，故 2 种工况条件下计算域中的温度场基本相同。以工况 1 为例，432、433、434、435 各点处的温度随时间的变化曲线见图 3。可以看出，在约 0.1 a 内缓冲层的温度快速上升，之后增加减缓，到计算终了时 432、433、434、435 各点的温度依次为 77.8、61.9、52.6、45.7 °C。图 4 是工况 1 在 4 a 时计算域内的温度等值线分布图。

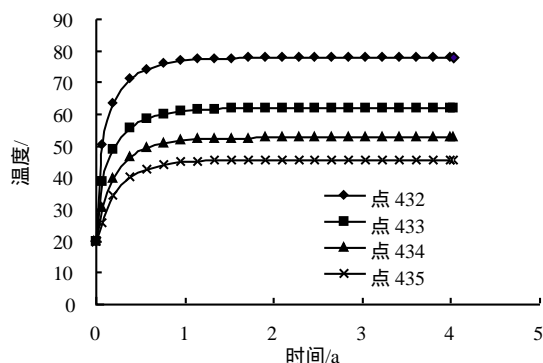


图 3 工况 1 温度-时间曲线  
Fig.3 Temperature versus time for case 1

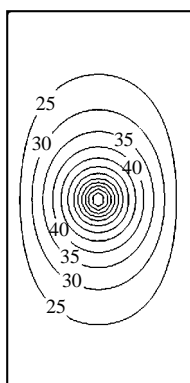


图 4 4 a 时工况 1 计算域中温度等值线(单位：°C)  
Fig.4 Contour of temperature at 4 years for case 1(unit: °C)

从图 5 可知，两种工况下计算域中应力量值及分布存在一定差别。如在 4 a 时 432、433、434、435 点的水平正应力/垂直正应力依次为：工况 1 时，-1.00/-26.29、-1.62/-25.87、-1.03/-26.29、-1.06/-26.28 MPa；工况 2 时，-1.00/-26.31、-1.01/-26.30、-1.04/-26.29、-1.34/-26.05 MPa。

4 a 时的岩体塑性区见图 6，工况 1、2 的塑性区面积分别为 7.36、6.56 m<sup>2</sup>。产生差异的原因在于：

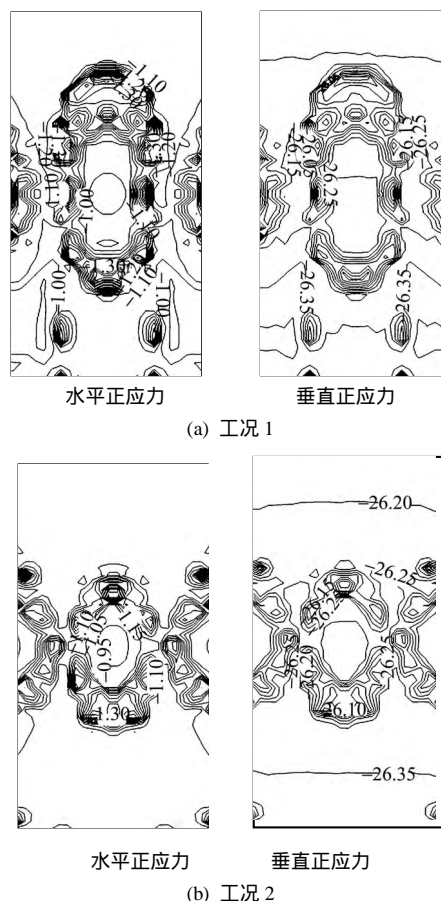


图 5 4 a 时计算域中正应力等值线 (单位：MPa)  
Fig.5 Contours of normal stress at 4 years (unit: MPa)

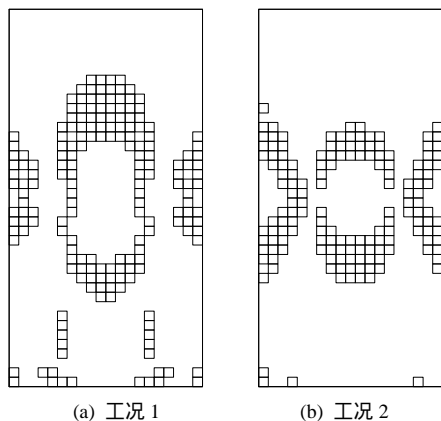


图 6 4 a 时计算域中塑性区  
Fig.6 Plastic zones in calculation domain at 4 years

工况 2 中基质吸力对于等效黏聚力的增强作用大于等效塑性应变和溶质浓度的减弱作用，总体上相比于工况 1 而言等效黏聚力得到了提高，故工况 2 的塑性区较之工况 1 有所减少。

计算终了时，两种工况中的孔（裂）隙水压力等值线见图 7。可以看出两种工况的孔隙水压力等值线分布接近，而裂隙水压力等值线的分布有较明显的差异。4 a 时 432、433、434、435 点的孔隙水压力值/裂隙水压力值依次为：工况 1 时，-6.840 2/-0.730 3、-6.682 6/-0.732 0、-6.496 0/-0.727 2、-6.230 8/-0.716 4 MPa；工况 2 时，-6.718 2/-0.827 7、-6.506 2/-0.827 0、-6.268 5/-0.830 0 MPa。

图 8 为两种工况在 4 a 时计算域中的孔（裂）隙水流速矢量分布，其孔隙水与裂隙水的比例为 50:1。可以看出，流速与孔（裂）隙水压力分布存在一定的对应关系。在 4 a 时 432、433、434、435 点的孔隙水流速/裂隙水流速依次为：工况 1 时， $2.66 \times 10^{-8}/1.04 \times 10^{-7}$ 、 $3.99 \times 10^{-8}/1.23 \times 10^{-7}$ 、 $2.27 \times 10^{-8}/1.06 \times 10^{-7}$ 、 $3.54 \times 10^{-8}/2.54 \times 10^{-7}$  m/s；工况 2 时， $2.60 \times 10^{-8}/1.20 \times 10^{-7}$ 、 $3.12 \times 10^{-8}/1.45 \times 10^{-7}$ 、 $3.32 \times 10^{-8}/1.80 \times 10^{-7}$ 、 $3.59 \times 10^{-8}/3.21 \times 10^{-7}$  m/s。

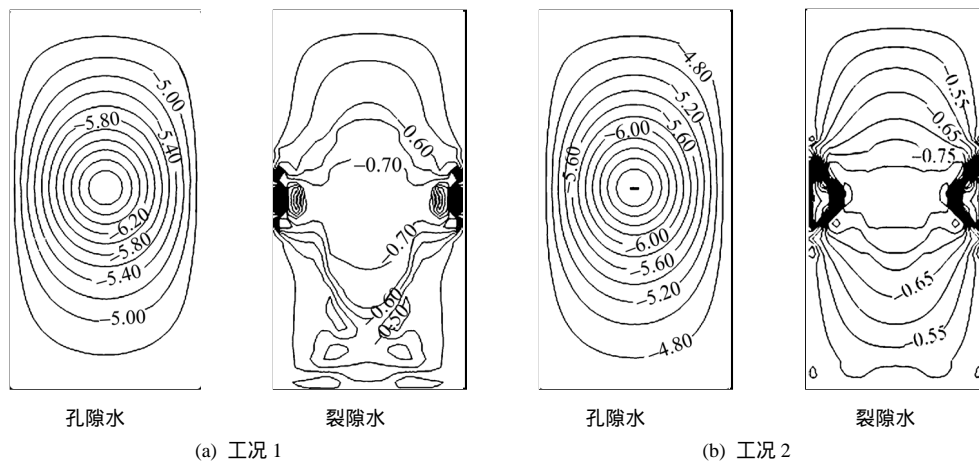


图 7 4 a 时岩体中的孔隙水压力等值线(单位：MPa)  
Fig.7 Contours of pore water pressure in rock mass at 4 years (unit: MPa)

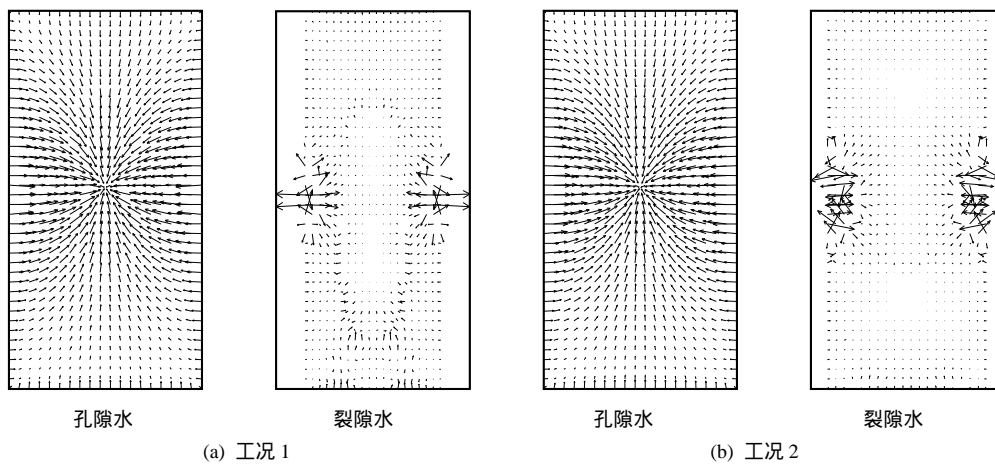


图 8 4 a 时计算域中的孔隙水流速矢量  
Fig.8 Flow vectors of void water at 4 years for two cases

图 9 为 4 a 时计算域中孔隙与裂隙的污染物溶质浓度等值线，其分布情况与孔（裂）隙水压力及其流速相关。在 4 a 时 432、433、434、435 各点处的孔

隙污染物浓度/裂隙污染物浓度为：工况 1 时，8.44/9.33、5.10/8.26、3.64/7.22、2.68/6.41 mol/m<sup>3</sup>；工况 2 时，8.32/9.29、4.97/8.21、3.51/7.18、2.59/6.40 mol/m<sup>3</sup>。

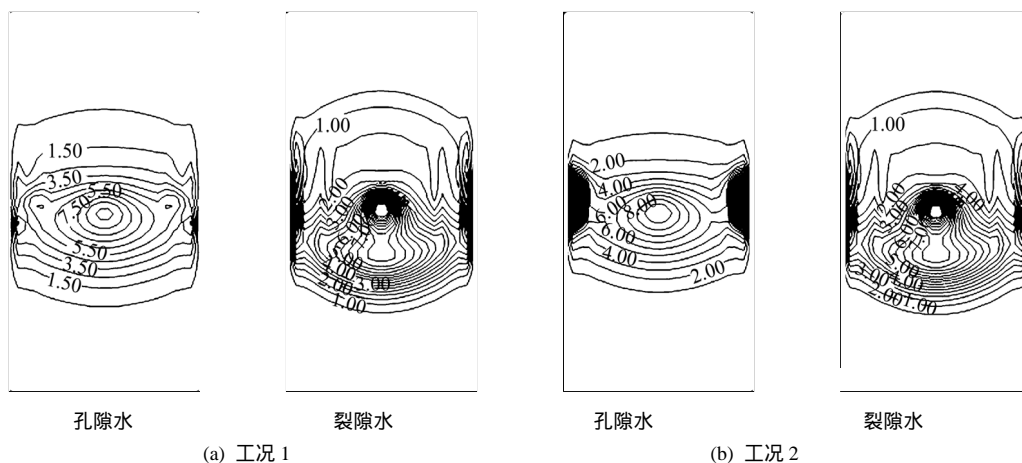


图 9 4 a 时岩体中污染物浓度等值线(单位： $\text{mol}/\text{m}^3$ )  
Fig.9 Contours of pollutant concentration in rock mass at 4 years (unit:  $\text{mol}/\text{m}^3$ )

## 5 结 论

(1) 针对双重孔隙-裂隙介质，计入裂隙的连通率、间距、孔隙基质和裂隙材料在三维表征单元 (REV) 中的体积分数，并假定该类型介质的等效内摩擦角保持为常数，而等效黏聚力是固有黏聚力、等效塑性应变、基质吸力、溶质浓度及温度的函数，由此提出了一种在热-水-应力-迁移耦合条件下确定此种表征单元中任一平面上等效的黏聚力及内摩擦角的方法。

(2) 假定一位于非饱和双重孔隙-裂隙岩体中的高放废物地质处置模型，按岩体的黏聚力与基质吸力、溶质浓度有无关系拟定 2 种工况，进行了数值模拟及分析。其结果显示：两种工况的温度场基本相同；基质吸力对于等效黏聚力的增强作用大于等效塑性应变和溶质浓度的减弱作用，使得等效黏聚力得到了提高，相比于等效黏聚力不变的工况 1 而言等效黏聚力可变的工况 2 的塑性区有所减少；由此岩体应力、孔(裂)隙水压力及流速、孔(裂)隙溶质浓度的分布及量值也发生相应的改变。

## 参 考 文 献

[1] 张玉军. 遍有节理岩体的双重孔隙-裂隙介质热-水-应力耦合模型及有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 947 - 955.  
ZHANG Yu-jun. Coupled thermo-hydro-mechanical model and finite element analyses of dual-porosity fractured medium for ubiquitous-joint rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(5): 947 - 955.

[2] ELSWORTH D, MAO B. Flow-deformation response of

dual-porosity media[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1992, 118(1): 107 - 124.

[3] WU Wen-hua, LI Xi-kui, CHARLIER R, et al. A thermo-hydro-mechanical constitutive model and its numerical modelling for unsaturated soils[J]. *Computers and Geotechnics*, 2004, 31(2): 155 - 167.

[4] 刘泽佳, 李锡夔, 武文华. 多孔介质中化学-热-水力-力学耦合过程本构模型和数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 797 - 803.  
LIU Ze-jia, LI Xi-kui, WU Wen-hua. A constitutive model and numerical simulation for coupled chemo-thermo-hydro-mechanical process in porous media[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(6): 797 - 803.

[5] 李荣涛, 李锡夔. 高温下混凝土化学塑性-损伤耦合本构模拟及破坏分析[J]. 应用力学学报, 2008, 25(1): 51 - 56.  
LI Rong-tao, LI Xi-kui. Coupled chemo-elastoplastic-damage constitutive model of concrete at high temperature and failure analysis[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2008, 25(1): 51 - 56.

[6] HUECKEL T, PELLEGRINI R, OLMO C. A constitutive study of thermoelasto-plasticity of deep carbonatic clays[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1998, 22(7): 549 - 574.

[7] 华若丹. 利用隐伏断层定量预测公式确定断层的延展范围[J]. 江苏煤炭, 1996, (4): 41 - 42

[8] 沈观林, 胡更开. 复合材料力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

[9] 徐芝纶. 弹性力学(上册)[M]. 北京: 人民教育出版社,

- 1980.
- [10] OWEN D, HINTON E. Finite element in plasticity: Theory and practice[M]. Swansea UK: Pineridge Press Limited, 1980.
- [11] 张玉军, 唐仪兴. 考虑层状岩体强度异向性的地下洞室平面有限元分析[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(3): 307 - 310.  
ZHANG Yu-jun, TANG Yi-xing. 2D FEM analysis for an underground opening considering the strength anisotropy of the layered rock mass[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(3): 307 - 310.
- [12] 张玉军, 刘谊平. 层状岩体抗剪强度的方向性及剪切破坏面的确定[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 254 - 257.  
ZHANG Yu-jun, LIU Yi-ping. Anisotropy of shear strength of layered rocks and determination of shear failure plane[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(3): 254 - 257.
- [13] 张玉军, 张维庆. 双重孔隙介质 THMM 耦合模型及其有限元分析[J]. 力学学报, 2010, 42(4): 660 - 669.  
ZHANG Yu-jun, ZHANG Wei-qing. Coupled thermo-hydro-mechanical-migratory model and FEM analyses for dual-porosity medium[J]. **Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics**, 2010, 42(4): 660 - 669.
- [14] CHIJIMATSU M, KURIKAMI H, ITO A, et al. Implication of THM coupling on the near-field of a nuclear waste repository in a homogeneous rock mass[R]. DECOVALES III-Task3-Bench Mark Test 1(BMT1)-Subtask BMT1-B. Tokyo: Hazama Corporation, 2002: 1 - 43.
- [15] 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 DECOVALEX III project. Part 3: Effects of THM coupling in sparsely fractured rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2005, 42(5/6): 745 - 755.
- [16] 阎岩, 王恩志, 王思敬, 等. 岩石渗流-流变耦合的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2095 - 2103.  
YAN Yan, WANG En-zhi, WANG Si-jing, et al. Study of seepage-rheology coupling experiment of rocks[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(7): 2095 - 2103.

## 混凝土结构工程施工及验收手册

著者：国振喜，小 16 开本，精装，708 页，定价：99 元，出版单位：中国建筑工业出版社，版次：第 1 版，出版时间：2015-01，标准书号：ISBN 978-7-112-16551-3，征订号：25393。

内容简介：本书是以国家最新颁布实施的中华人民共和国国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB50666 - 2011、《混凝土结构设计规范》GB50010 - 2010、《建筑抗震设计规范》GB50011 - 2010、《建筑地基基础设计规范》GB50007 - 2011、《建筑结构荷载规范》GB50009 - 2012、《地下工程防水技术规范》GB50108 - 2008 等；及中华人民共和国行业标准《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ3 - 2010、《钢筋焊接及验收规程》JGJ18 - 2012、《钢筋机械连接技术规程》JGJ107 - 2010、《建筑工程冬期施工规程》JGJ/T104 - 2011、《建筑施工安全检查标准》JGJ59 - 2011 等；以及其他国家现行的规范、标准、规程等。并结合工程实践和重要著述等编写而成。本书内容包括：混凝土结构工程施工总则、术语及基本规定；混凝土结构工程施工模板工程；混凝土结构工程施工钢筋工程；混凝土结构工程施工预应力工程；混凝土结构工程施工混凝土制备与运输；混凝土结构工程施工现浇结构工程；混凝土结构工程施工装配式结构工程；混凝土结构工程冬期、高温和雨期施工；高层建筑混凝土结构工程施工；地下工程防水构造与做法；建筑施工安全检查规定；常用资料等共 12 章。本书宗旨是帮助广大施工人员迅速、正确地解决各种施工技术问题，提高施工工作效率。全书重点推广新技术、新材料、新工艺；全书以表格化、条文化编写；充分体现先进性、实用性、便捷性，内容全面、系统、丰富，应用方便。本书可供广大建筑施工人员、施工监理人员、管理人员及土建设计人员使用，也可供大专院校土建专业师生参考。

读者对象：本书可供广大建筑施工人员、施工监理人员、管理人员及土建设计人员使用，也可供大专院校土建专业师生参考。

(摘自 中国建筑书店)