

文章编号: 1000-7598 (2012) 11-3426-07

裂隙刚度随应力变化对双重孔隙介质 热-水-应力耦合影响的有限元分析

张玉军, 徐 刚, 杨朝帅

(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, 武汉 430071)

摘 要: 引入并修正了变刚度的连续屈服节理模型, 同时考虑应力拉压和压力(化学)溶解对裂隙开度的综合影响, 对所建立的双重孔隙-裂隙介质热-水-应力耦合有限元计算程序作了改进。通过一个假定的高放废物地质处置库的数值模拟, 就岩体裂隙刚度变化的 2 种工况, 分析了岩体中的温度、裂隙刚度、正应力、孔(裂)隙水压力和地下水流速的变化、分布情况。结果显示: 与裂隙刚度是常数时相比, 裂隙刚度是法向应力的函数时计算域中温度较低; 岩体应力的分布也有一定不同, 其分布与裂隙刚度“场”有明显的相似性; 并且负孔(裂)隙水压力的绝对值要略小一点, 约是常数时的 98%。

关 键 词: 双重孔隙介质; 连续屈服节理模型; 热-水-应力耦合; 有限元分析

中图分类号: O 242

文献标识码: A

Finite element analysis of influence of fracture stiffness changing with stress on thermo-hydro-mechanical coupling in dual-porosity medium

ZHANG Yu-jun, XU Gang, YANG Chao-shuai

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

Abstract: Introducing and modifying the continuously yielding joint model, and simultaneously considering the composite impact of mechanical dilation/compaction and pressure solution on fracture aperture, the FEM code for analysis of the thermo-hydro-mechanical coupling in dual-porosity medium established by the first author was improved. Through the numerical simulations in which there were two patterns of changing the fracture stiffness for a hypothetical nuclear waste repository, the variations and distributions of temperatures, fracture stiffnesses, normal stresses, pore (fracture) pressures, flow velocities of groundwater were investigated. The results show: compared with the case of unchangeable fracture stiffness, the temperatures in the computing domain are lower in the case whose fracture stiffness is an exponential function of normal stress; the magnitudes of stresses within the rock mass in two cases are also some different, but the characteristics of stress distribution are similar to those of fracture stiffnesses obviously; and the negative pore (fracture) pressures in the case with changeable fracture stiffness are smallish (about 98% of case of unchangeable fracture stiffness).

Key words: dual-porosity medium; continuously yielding joint model; thermo-hydro-mechanical coupling; finite element analysis

1 引 言

在地层深部, 由于地应力、温度及水头均较高, 使得岩体的物理力学性质与浅埋时相比有显著的不同^[1]。对岩体裂隙而言, 其变形刚度、开度及渗透性都要受到热、水、应力、化学等广义力源场的强烈作用, 从而与这些因素呈现出明显的非线性关系。对此国内外学者已进行了大量研究。如 Rutqvist

等^[2-3]提出了立方-块体概念模型, 将裂隙的开度表示为法向应力的指数函数, 用其对裂隙的渗透系数进行修正; Min 等^[4]基于室内试验结果, 认为岩体裂隙渗透率的改变起因于多种因素, 从而提出了加载(闭合)和卸载(张开)时单条裂隙开度变化的数学模型; Olivella 等^[5]在裂隙孔隙率与岩体体积应变(其取决于平均应力和温度)之间建立起关系, 以此给出了裂隙的渗透系数-孔隙率经验公式;

收稿日期: 2011-10-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51079145); 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(No. 2010CB732101)。

第一作者简介: 张玉军, 男, 1956 年生, 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

Yasuhara 等^[6-8]考虑应力腐蚀、压力溶解和自由面溶解、沉淀对裂隙扩张与闭合的作用, 建立了相应的裂隙开度随时间演化的表达式; 刘才华等^[9]通过对人工充填砂裂隙实施剪切试验, 提出了剪应力和法向有效应力耦合作用下裂隙岩石的渗流模型; 陈益峰等^[10]通过将岩体单裂隙视为非关联理想弹塑性体, 导出单裂隙在压剪荷载作用下, 其机械开度和水力传导度的解析模型。而在描述裂隙的力学性质、应力与位移的关系方面, 现在著名的常刚度的 Goodman 模型^[11]、变刚度的连续屈服模型^[12]和 Barton-Bandis 模型^[13]。

在国内外已有的针对增强地热系统 (EGS)、CO₂ 地质封存、高放核废物地质处置等所涉及的热-水-应力 (THM) 耦合分析中, 一般计入了上述岩体裂隙的开度及渗透性随广义力源的演化^[3, 4, 6], 如笔者对其所建立的遍有节理岩体双重孔隙-裂隙介质热-水-应力耦合模型作了改进, 即利用 Rutqvist 等的立方-块体概念模型、Taron 的单条裂隙开度变化模型^[14] 以及 Davis 等的基岩孔隙率和渗透系数演化模型^[15], 根据即时的温度和应力, 对裂隙开度进行热-力张闭、压力 (化学) 溶解的调整, 从而不断地对孔隙率和渗透系数实施修正, 并研制出相应的二维有限元程序^[16], 以一个假定的高放废物地质处置库为对象进行了数值模拟。但这些计算中均是将裂隙的刚度作为不变量。前已讲过, 在岩体埋深较大的条件下, 裂隙的刚度应随应力呈非线性变化, 这不仅对地应力场有影响, 而且因力、水互动也将对渗流场产生作用。因此, 在相应的 THM 耦合分析中考虑裂隙的刚度随应力等因素的变化应更接近实际情况。

在本文中, 笔者基于文献[16]的工作, 引入并修正了变刚度的连续屈服节理模型, 以一个假定的高放废物地质处置库为算例, 在相同的初始温度、孔隙水压力和岩体应力条件下, 设定裂隙的开度及渗透系数、基岩的孔隙率和渗透系数分别遵从 Taron、Rutqvist 和 Davis 等提出模型规律变化, 针对以下 2 种工况: ①裂隙刚度是法向应力的指数函数 (限定变化范围); ②裂隙刚度是常数, 进行热-水-应力耦合平面有限元计算, 考察了处置库近场的温度、孔隙水压力、裂隙水压力、水流速度、裂隙刚度和正应力的分布与变化, 得出了若干有意义的认识。

2 裂隙刚度和开度及渗透系数

笔者所建立的遍有节理岩体双重孔隙-裂隙介

质热-水-应力耦合模型及其有限元方法可见文献[16]。现在在此基础上对裂隙刚度作如下修正。

Cundall 等^[12]在 1984 年曾提出了一种连续屈服的节理模型 (continuously yielding joint model), 其变形特性与荷载的关系可表示为

$$k_n = a_n \sigma_n^{e_n}, \quad k_s = a_s \sigma_n^{e_s} \quad (1)$$

式中: k_n 、 k_s 分别为法向刚度和切向刚度; σ_n 为法向应力; a_n 、 a_s 、 e_n 和 e_s 为模型参数。

笔者在引入该模型的同时, 为了体现 0 应力状态时的节理具有初始刚度、以及拉应力对刚度值的减弱作用, 将式 (1) 修改为

$$\left. \begin{aligned} k_n &= k_{n0}(1 + \alpha \sigma_n^{e_n}) \\ k_s &= k_{s0}(1 + \alpha \sigma_n^{e_s}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: k_{n0} 、 k_{s0} 分别为初始法向刚度和切向刚度; α 分别取“+1”及“-1”, 对应于压应力和拉应力。

为了避免应力绝对值较高时产生节理刚度过大、过小甚至出现负值从而使计算不稳定的问题, 笔者亦对刚度的变化限定了最大量和最小量^[13], 即 $k_{n,max}$ 、 $k_{s,max}$ 和 $k_{n,min}$ 、 $k_{s,min}$ 。

再引入裂隙的开度与其粗糙度系数的关系式^[17]

$$e = \frac{B^2}{JRC^{2.5}} \quad (3)$$

式中: JRC 为裂隙粗糙度系数; B 和 e 分别为岩体内裂隙的力学开度和水力开度。

从而, 得等效裂隙介质 (均化后) 的渗透系数为

$$K = \frac{g(e)^3}{12\nu s} \quad (4)$$

式中: g 为重力加速度, $g=9.81 \text{ m/s}^2$; ν 为运动黏度 (对于 20 °C 的纯水, $\nu=1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$); s 为裂隙间距。

对于二维问题, 在 xy 平面内岩体裂隙的孔隙率及渗透系数可表示为^[12]

$$\phi^f = F_\phi^f \phi_0^f \quad (5)$$

$$k_x^f = F_{kx}^f k_{x0}^f, \quad k_y^f = F_{ky}^f k_{y0}^f \quad (6)$$

式中: ϕ_0^f 、 k_{x0}^f 、 k_{y0}^f 分别为岩体裂隙初始状态的孔隙率及沿坐标轴方向的渗透系数; F_ϕ^f 、 F_{kx}^f 、 F_{ky}^f 分别为岩体裂隙孔隙率及渗透系数的修正因子。

并且有

$$F_{\phi}^f = \frac{B_{xt} + B_{yt}}{B_x + B_y} \quad (7)$$

$$F_{kx}^f = \frac{B_{yt}^3}{B_y^3}, F_{ky}^f = \frac{B_{xt}^3}{B_x^3} \quad (8)$$

式中: B_x 、 B_y 分别为初始状态时沿坐标轴方向的裂隙开度; B_{xt} 、 B_{yt} 分别为 t 时刻的相应裂隙开度。

而加载(闭合)时单条裂隙开度变化的计算式为^[14]

$$B_{mc} = B_c^r + \{B_m^r - B_c^r + B_m^{\max} \exp(-\omega\sigma')\} \cdot \exp[-\sigma'(\beta - \chi/T)] \quad (9)$$

式中: B_{mc} 为在给定温度 T 、有效应力 σ' 时的裂隙开度; B_m^r 、 B_c^r 分别为极端力学应力、极端化学应力时的残余裂隙开度; B_m^{\max} 为最大可能的裂隙开度改变量(或初始与残余的裂隙开度之差); ω 、 β 、 χ 为经验参数,依次表征裂隙开度的应力、化学和温度依存性。

当卸载(张开)时裂隙开度的计算式为

$$B_{m(u)} = B_{mc}(\sigma'_{\max}) + R_m B_m^{\max} [\exp(-\omega\sigma') - \exp(-\omega\sigma'_{\max})] \quad (10)$$

式中: $B_{mc}(\sigma'_{\max})$ 为最大荷载时的裂隙开度,根据卸载前的最大应力由式(9)确定; R_m 为裂隙开度的恢复率,是通过热-力卸载恢复的力学(非化学)闭合量。

将式(9)、(10)中的 σ' 分别用 t 时刻的 σ'_x 、 σ'_y 取代可得到相应的 B_{xt} 和 B_{yt} 。

而基岩的孔隙率和渗透系数的计算式为^[15]

$$\phi = \phi_r + (\phi_0 - \phi_r) \exp(a\sigma'_m) \quad (11)$$

$$k = k_0 \exp[c(\phi/\phi_0 - 1)] \quad (12)$$

式中: ϕ_0 、 k_0 分别为 0 应力状态的基岩孔隙率和渗透系数; ϕ_r 为高应力状态下的残余基岩孔隙率; σ'_m 为平均有效应力; a 、 c 分别为由试验确定的参数。

3 算例模型

如图 1 所示,有一个圆柱状核废料玻璃固化体被埋入地下一定深处,其周围的岩体为非饱和的双重孔隙-裂隙介质。作为近似简化,可认为这是一个平面应变问题。取计算域尺寸水平向为 4 m,垂直向为 8 m,有 800 个单元,861 个节点。从固化体

边缘向右的点号依次为 432、433、434、435、436,彼此间隔 0.2 m。

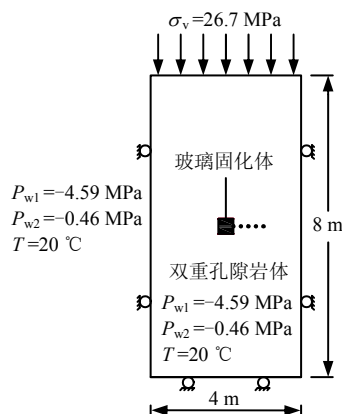


图 1 计算模型

Fig.1 Computation model

对于边界条件,计算域的顶面位移自由,其上作用有分布荷载 $\sigma_v = 26.7$ MPa;左、右侧面的水平方向位移约束;底面的垂直方向位移约束;所有边界的孔隙水压力 $P_{w1} = -4.59$ MPa、裂隙水压力 $P_{w2} = -0.46$ MPa 及温度 $T = 20$ °C 固定。岩体中发育有水平及垂直两组裂隙。有关的计算参数见表 1、2。初始状态时,岩体的温度为 20 °C。核废物以 1 kW 的不变功率释放热量,时间经历了 4 a。

孔隙介质和裂隙介质的初始饱和度分别为 0.44 和 0.02,其水分特性曲线符合 Van Genuchten 模型,即

$$s_w = (s_{ws} - s_{wr})(1 + |\alpha\psi|^n)^{-m} + s_{wr} \quad (13)$$

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: $\alpha = 5.26 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$, $n = 2.55$; $m = 1 - 1/n$; ψ 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

$$k_{rw} = s_w^2 \quad (14)$$

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

$$D_t = 2.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2 / (\text{s} \cdot ^\circ\text{C})$$

针对岩体裂隙刚度变化 2 种工况,计算了岩体中的温度、孔隙水压力、裂隙水压力、饱和度、水流速度和正应力的分布与变化情况。

4 结果分析

2 种工况条件下计算域中的温度变化有一定差

别。以工况 1 为例, 图 1 中 432、433、434、435 各点处的温度随时间的变化曲线见图 2。看到在开始的约 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 80.2、64.3、54.7、47.6 °C, 而工况 2 的对应点温度为 85.6、69.4、59.5、52.0 °C, 产生差别的原因在于: 在工况 1 中, 因为裂隙的刚度随法向应力而变化(压应力时刚度增加), 使得岩体的整体变形较小, 如计算域顶部中点的垂直向下位移位为 0.25 m (工况 2 中达到 0.72 m), 则由于变形-热耦合效应导致岩体中温度较低。但 2 种工况中温度分布相似, 图 3 是工况 1 在 4 a 时计算域中的温度等值线。

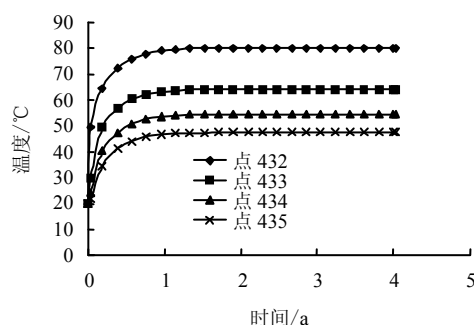


图 2 温度-时间曲线

Fig.2 Temperatures versus time at some nodes

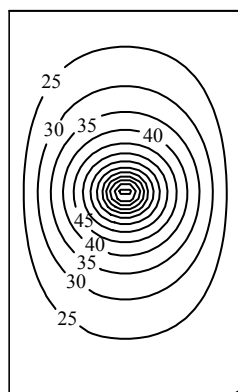


图 3 4 a 时的温度等值线 (单位: °C)

Fig.3 Temperatures contours at 4 years (unit: °C)

图 4 是工况 1 在 4 a 时计算域中 2 组裂隙的刚度等值线, 其变化范围: 水平裂隙的 $k_n=2.94 \sim 2.95$ GPa/m、 $k_s=1.47 \sim 1.48$ GPa/m, 垂直裂隙的 $k_n=1.65 \sim 1.80$ GPa/m、 $k_s=0.82 \sim 0.90$ GPa/m。而工况 2 的 2 组裂隙刚度在全域内为常数, 即 k_n 、 k_s 分别为 1.0、0.5 GPa/m。2 种工况在 4 a 时计算域中正应力等值线见图 5、6。从图看到, 由于工况 1 中裂隙刚度是法向应力的函数, 与常裂隙刚度的工况 2 相

比, 两者的岩体应力场有较显著的差别, 如玻璃固化体右缘中点的水平正应力和垂直正应力之比 σ_H/σ_V 分别为, 工况 1 为 -0.17 MPa/ -26.33 MPa, 工况 2 为 -0.09 MPa/ -26.66 MPa。可看出工况 1 中裂隙刚度“场”与正应力分布有明显的相似性。

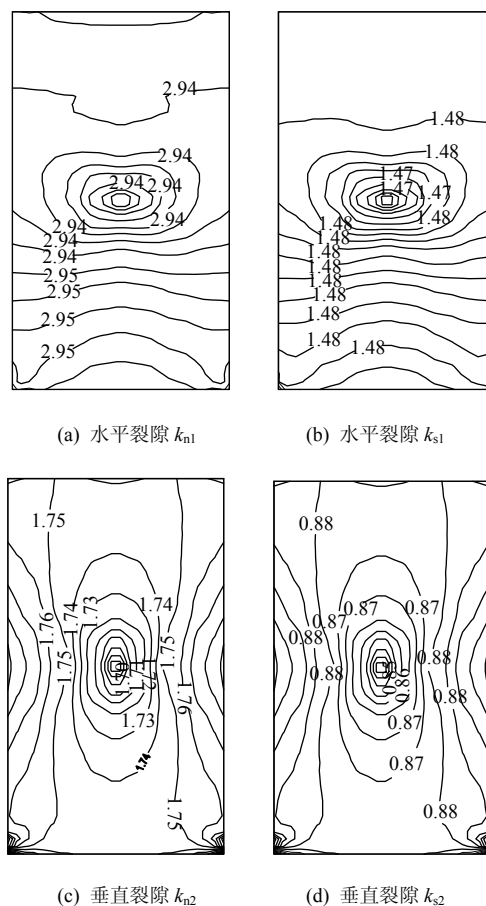
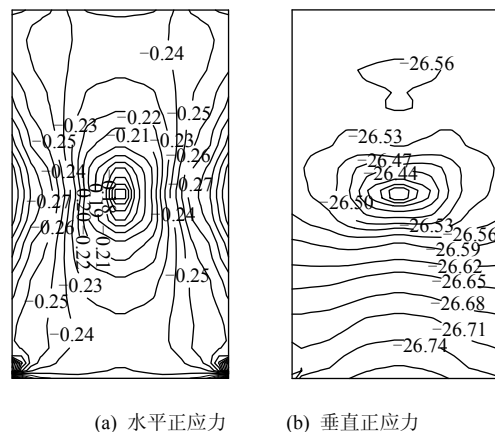


图 4 工况 1 在 4 a 时 2 组裂隙的刚度等值线 (单位: GPa/m)

Fig.4 Stiffness contours of two fracture sets at 4 years for case 1 (unit: GPa/m)



(a) 水平正应力 (b) 垂直正应力

图 5 工况 1, 4 a 时岩体中正应力等值线 (单位: MPa)

Fig.5 Normal stress contours in rock mass at 4 years for case 1 (unit: MPa)

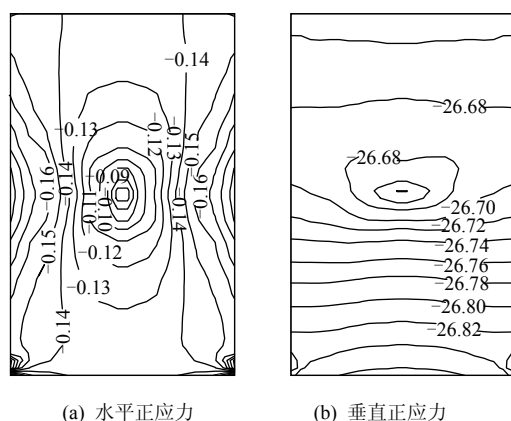


图6 工况2, 4 a时岩体中正应力等值线 (单位: MPa)
Fig.6 Normal stress contours in rock mass
at 4 years for case 2 (unit: MPa)

图7是工况1中432、433、434、435各点处的孔隙水压力及裂隙水压力随时间的变化曲线。从图看到, 在开始的约0.03 a之内, 负裂隙水压力迅速上升, 并一度达到 $-3.22 \sim -2.85$ MPa, 随之由于来自地下水浸润的水分补给大于温度梯度引起的水分减少, 使得孔隙和裂隙中的饱和度不断增加, 表现为负的孔(裂)隙水压力绝对值较快下降, 在约0.6 a之后孔(裂)隙水压力仅有微小波动, 二者渐趋稳定。裂隙水压力一开始出现较大波动的原因在于: 初期时岩体应力调整幅度大, 致使较高的孔隙水压力(绝对值)与较低的裂隙水压力(绝对值)快速趋于平衡。因为加热导致裂隙空间增大, 而裂隙水体积变化相对较小引起的裂隙饱和度减少, 进而导致负压绝对值增大。到计算终了的4 a时, 上述4个测点处的孔隙水压力/裂隙水压力依次为 -0.785 MPa/ -0.735 MPa、 -0.773 MPa/ -0.728 MPa、 -0.756 MPa/ -0.719 MPa和 -0.739 MPa/ -0.706 MPa, 此时岩体中孔(裂)隙水压力等值线分布见图8。对于工况2, 岩体中孔(裂)隙水压力随时间的变化、分布及量值与工况1相似, 其绝对值略大一点, 如计算终了时上述4个点处的孔隙水压力/裂隙水压力依次为 -0.796 MPa/ -0.743 MPa、 -0.784 MPa/ -0.737 MPa、 -0.766 MPa/ -0.727 MPa和 -0.748 MPa/ -0.714 MPa。

2种工况条件下计算域中的孔隙水流速和裂隙水流速矢量分布也相似。以工况1为例, 4 a时岩体中孔(裂)隙水流速矢量分布见图9。注意两种流速矢量的比例为1:0.1。其中以432点为例, 孔隙水流速和裂隙水流速分别为: 工况1: 3.00×10^{-9} m/s, 2.41×10^{-8} m/s; 工况2: 3.10×10^{-9} m/s, 2.55×10^{-8} m/s。

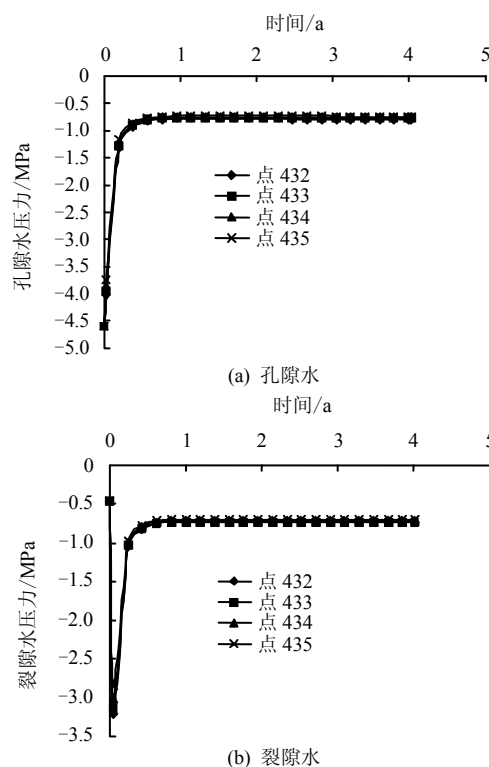


图7 工况1孔(裂)隙水压力-时间曲线
Fig.7 Pore and fracture water pressures versus
time at some nodes for case 1

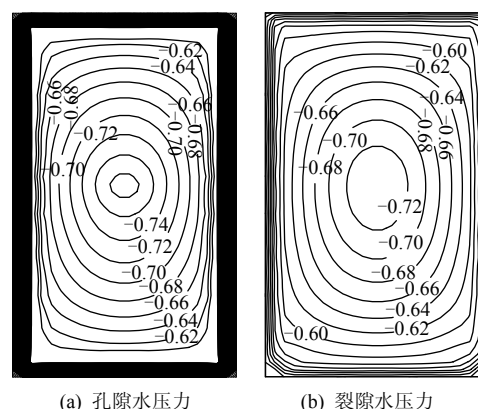


图8 工况1, 4 a时岩体中水压力等值线 (单位: MPa)
Fig.8 Contours of pore and fracture water pressures in
rock mass at 4 years for case 1 (unit: MPa)

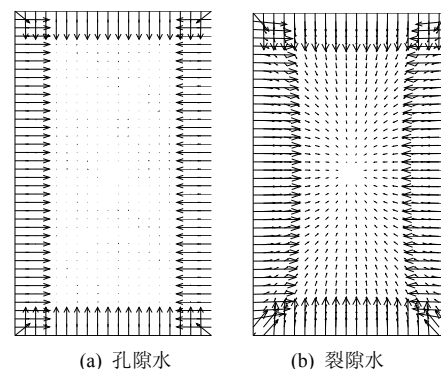


图9 工况1在4 a时计算域中的水流速矢量
Fig.9 Flow vectors of pore and fracture water in
calculation domain for case 1 at 4 years

表 1 主要计算参数

Table 1 Main computation parameters

介质	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	孔隙率 ϕ_{10}	渗透系数 $k_{10}/(\text{m}/\text{s})$	弹性模量 E/GPa	泊松系数 μ	比热 C $/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	热膨胀系数 $\beta/^\circ\text{C}^{-1}$	导热系数 λ $/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$
岩体	26.7	0.1	1.24×10^{-13}	37	0.23	1.0	8.8×10^{-6}	2.8
固化体	25.0	0.0	1.0×10^{-27}	53	0.21	0.7	1.0×10^{-5}	5.3

注：岩体的 $\phi_r=0.05$, $a=0.02$, $c=2.0$ 。

表 2 裂隙组的计算参数

Table 2 Parameters for fracture sets used in calculation

裂隙 类型	裂隙系数			法向刚度 $/(\text{GPa}/\text{m})$			切向刚度 $/(\text{GPa}/\text{m})$			孔隙率 $\phi_{20}/10^{-2}$	初始开度 B_m^0/mm	化学残余开度 B_m^r/mm	力学残余开度 B_m^l/mm	最大开度 改变量 B_m^{\max}/mm	渗透系数 $k_{20}/10^{-8}(\text{m}/\text{s})$
	间距 S/m	连通率 l	倾角 $\theta/^\circ$	k_{n0}	$k_{n,\max}$	$k_{n,\min}$	k_{s0}	$k_{s,\max}$	$k_{s,\min}$						
水平	0.3	1	0	1.0	3.0	0.5	0.50	2.00	0.25	0.42	1.25	0.10	0.25	1.00	1.28
垂直	0.3	1	90	1.0	3.0	0.5	0.50	2.00	0.25	0.42	1.25	0.10	0.25	1.00	1.28

注： $JRC=2.74$, $\omega=0.0002$, $\beta=0.0151$, $\chi=0.2$ 。

5 结 论

(1) 对于所建立的遍有节理岩体双重孔隙-裂隙介质热-水-应力耦合模型，在可考虑应力拉压和压力（化学）溶解对裂隙开度的综合影响的基础上，改进了裂隙刚度的计算方法（其为法向应力的指数函数），从而实现了裂隙刚度、孔隙率和渗透系数的适时修正，使得相应的二维有限元程序更能体现 THM 耦合现象的非线性特点。

(2) 以一个假定的高放废物地质处置库为算例，进行了岩体裂隙刚度变化的 2 种工况的数值分析，其结果显示：与裂隙刚度不变的情况相比，裂隙刚度随法向应力变化时计算域中温度场量值较低，岩体应力的分布与裂隙刚度“场”有明显的相似性；2 种工况的孔（裂）隙水渗流场形态相似，但裂隙刚度随法向应力变化时负孔（裂）隙水压力的绝对值略小。这表明裂隙刚度改变会对 THM 耦合过程及其场量产生一定的影响。

(3) 在笔者改进的裂隙刚度随法向应力变化的指数函数中，也可考虑拉应力对裂隙刚度的减弱效应，然而在本文计算的特定条件下，岩体中全是压应力，故其对裂隙刚度只有增大作用，这对 THM 耦合的影响从总体上看是不太大的。笔者推测，岩体中若有范围大、量值高的拉应力存在，对 THM 耦合的影响将可能更明显。对此应进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] U. S. National Committee on Tunneling Technology and U.S. National Committee for Rock Mechanics. Advances in technology for the construction of deep-underground facilities[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 1988, 3(1): 25—44.
- [2] JONNY RUTQVIST, CHIN-FU TSANG. Analysis of

thermal-hydrologic-mechanical behavior near an emplacement drift at Yucca mountain[J]. **Journal of Contaminant Hydrology**, 2003, 62—63: 637—652.

- [3] RUTQVIST J, BARR D, DATTA R, et al. Coupled thermal-hydrological-mechanical analyses of the Yucca mountain drift scale test—comparison of field measurements to predictions of four different numerical models[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2005, 42(5/6): 680—697.
- [4] MIN K B, RUTQVIST J, ELSWORTH D. Chemically and mechanically mediated influences on the transport and mechanical characteristics of rock fractures[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2009, 46(1): 80—89.
- [5] OLIVELLA S, GENS A. Double structure THM analyses of a heating test in a fractured tuff incorporating intrinsic permeability variations[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2005, 42(5/6): 667—679.
- [6] YASUHARA H, ELSWORTH D. Compaction of a rock fracture moderated by competing roles of stress corrosion and pressure solution[J]. **Pure Applied Geophysics**, 2008, 165(7): 1289—1306.
- [7] YASUHARA H, ELSWORTH D, POLAK A. Evolution of permeability in a natural fracture: Significant role of pressure solution[J]. **Journal of Geophysical Research**, 2004, 109(B3): B03204. doi:10.1029/2003JB002663.
- [8] YASUHARA H, ELSWORTH D, POLAK A, et al. Spontaneous switching between permeability enhancement and degradation in fractures in carbonate: Lumped parameter representation of mechanically and chemically-mediated dissolution[J]. **Transport in Porous Media**, 2006, 65: 385—409.
- [9] 刘才华, 陈从新, 付少兰. 二维应力作用下岩石单裂隙

- 渗流规律的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1194—1198.
- LIU Cai-hua, CHEN Cong-xin, FU Shao-lan. Testing study of seepage characteristic of a single rock fracture under two-dimentional stresses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(8): 1194—1198.
- [10] 陈益峰, 周创兵, 盛永清. 应变敏感的裂隙及裂隙岩体水力传导特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2441—2452.
- CHEN Yi-feng, ZHOU Chuang-bing, SHENG Yong-qing. Strain-dependent hydraulic conductivity for single rock fracture and fractured rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(12): 2441—2452.
- [11] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990: 276—282.
- [12] CUNDALL P A, HART R D. Analysis of block test No. 1 inelastic rock mass behavior: Phase 2—A characterization of joint behavior (final report)[R]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, 1984.
- [13] BANDIS S C, BARTON N R, CHRISTIANSON M. Application of a new numerical model of joint behaviour to rock mechanics problems[C]//Fundamentals of Rock Joints (Proceedings of the International Symposium on Fundamentals of Rock Joints. Lulea, Sweden: Centek Publishers, 1985: 345—356.
- [14] TARON J, ELSWORTH D. Thermal-hydrologic-mechanical-chemical processes in the evolution of engineered geothermal reservoirs[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2009, 46(5): 855—864.
- [15] DAVIS J P, DAVIS D K. Stress-dependent permeability: Characterization and modeling[R]. [S. l.]: Society of Petroleum Engineers. 1999, SPE Paper no. 56813.
- [16] 张玉军, 张维庆. 裂隙开度的压力溶解对双重孔隙介质热-水-应力耦合影响的有限元分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1269—1275.
- ZHANG Yu-jun, ZHANG Wei-qing. Finite element analysis of influence of pressure solution of fracture aperture on T-H-M coupling in dual-porosity medium[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(4): 1269—1275.
- [17] OLSSON R, BARTON N. An improved model for hydromechanical coupling during shearing of rock joints[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38(3): 317—329.

《岩土力学》2012 年第 8 期被 EI 收录论文 (45 篇, 收录率 100%)

序号	论文题名	作者	页码
1	湛江黏土的蠕变模型与变参数塑性元件	孔令伟, 何利军, 张先伟	2241—2246
2	预应力锚索工作应力的检测方法——拉脱法的检测机制和试验研究	付 丹, 郭红仙, 程晓辉, 等	2247—2252
3	传递函数在地下工程地震响应研究中的应用	盛 谦, 崔 臻, 刘加进, 等	2253—2258
4	基于均匀试验的半填半挖路基边坡稳定性灰色关联分析法	苏永华, 罗正东, 李 翔	2259—2264
5	考虑尺寸排除效应颗粒迁移模型的建立	刘泉声, 赵 军, 张程远	2265—2268
6	非饱和土应力变量选取原则刍议	谢新宇, 刘 斌, 周 建	2269—2276
7	初始静剪应力对粗粒土与结构接触面循环力学特性的影响	冯大阔, 张建民	2277—2282
8	基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究	王卫东, 王浩然, 徐中华	2283—2290
9	富水软岩隧道突泥塌方及地层沉降的模型试验	魏 星, 沈 乐, 陶志平	2291—2296
10	南宁膨胀土非线性流变模型研究	李珍玉, 肖宏彬, 金文婷, 等	2297—2302
11	岩石非线性黏弹性蠕变特性的时温等效效应	朱元广, 刘泉声, 张程远, 等	2303—2309
12	一个可考虑球应力和剪应力共同作用的结构性参数	邓国华, 邵生俊, 陈昌禄, 等	2310—2314
13	基于岩体不连续面三维分形维岩体质量评价研究	周福军, 陈剑平, 徐黎明, 等	2315—2322
14	不同应力条件下砾石土防渗料和反滤料联合抗渗试验研究	邹玉华, 陈 群, 何昌荣, 等	2323—2329
15	钢套管灌注群桩施工顺序对多隧道的影响	宋福贵, 王炳龙, 黄大维, 等	2330—2336
16	高填方涵洞加筋减载的现场试验研究	马 强, 郑俊杰, 张 军	2337—2342
17	悬浮颗粒的浓度对其在饱和多孔介质中迁移和沉积特性的影响	陈星欣, 白 冰, 闫瑜龙, 等	2343—2348
18	崩积体剪切性能试验研究	刘忠强, 薛亚东, 黄宏伟, 等	2349—2358
19	降雨入渗条件下软岩边坡稳定性分析	付宏渊, 曾 铃, 王桂尧, 等	2359—2365
20	工程先验知识辨识下的滑坡非平稳变形支持向量机预测	董 辉, 陈家博, 杨果岳, 等	2366—2372
21	空沟对列车运行引起的地基振动隔振效果研究	曹志刚, 蔡袁强, 徐长节	2373—2382
22	湖相软土流变模型识别及其工程应用分析	邵 勇, 阎长虹, 许宝田, 等	2383—2387

(未完, 见第 3515 页)