

软岩渗流规律研究进展

黄存捍¹,冯 涛²,谢雄刚¹

(1.中南大学资源与安全工程学院,湖南 长沙 410083 ;2.湖南科技大学能源与安全工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘要 在前人研究的基础上,介绍了软岩的概念和分类,指出按成因可将软岩分为原生软岩和次生软岩;从流固耦合的角度讨论了软岩渗流的数学模型、实验分析和数值模拟的研究现状;从应力与裂隙的相互作用关系方面分析了软岩和硬岩渗透性差异的理论原因。最后针对软岩渗流的研究工作和实际工程问题提出了一些展望。

关键词 软岩;流固耦合;全应力-应变渗流实验;数值模拟

中图分类号 :TV139.11 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2008)05-0086-05

Advances in research on permeability of soft rock//HUANG Cun-han¹, FENG Tao², XIE Xiong-gang¹ (1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China ;2. School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract : The concept and classification of soft rock on the basis of previous studies is introduced. Soft rock can be classified into primary soft rock and secondary soft rock, according to its formation conditions. The present status of research on the permeability of soft rock with fluid-solid coupled theory is described, with discussion of mathematical models, experimental studies and numerical simulations. The theoretical reasons for differences in the permeability of soft rock and hard rock are analyzed, in consideration of the relationship between stress and cracks. Finally, some prospects for future research are presented.

Key words : soft rock ; fluid-solid coupling ; complete stress-strain permeability test ; numerical simulation

近几十年来,随着经济的发展和技术的进步,地下资源和地下空间的开发得到了前所未有的提高,但是采动软岩问题已成为地下工程的难点和难题之一,它严重制约了生产和建设的发展。因此,研究采动软岩变形规律尤其是渗流规律具有十分重要的理论意义和实践价值。对软岩渗流问题,学者们进行了大量实验研究,分析了软岩的渗透规律,讨论了围压、轴向压力、温度、水化学作用等对软岩渗透性的影响^[1-3];从流固耦合角度建立了破碎岩体非 Darcy 渗流模型,以及节理岩体(或裂隙岩体)的等效连续介质模型、裂隙网络模型和双重介质模型,为工程应用奠定了理论基础;应用有限元法、有限差分法等数值模拟软件模拟了岩体渗流场的变化,为工程实践提供了可靠依据。但是软岩变形具有明显的蠕变特性,在研究软岩渗流规律时学者们对此考虑较少。

1 软岩的概念和类型

由于软岩结构和化学成分的复杂性,造成了其

物理化学性质和力学特征的多样性,因此软岩的概念难以确定,国内外学者根据工程特性和实际需要对此进行了大量的研究。Deere 提出并强调了软弱岩石(weak rock)的工程性质问题^[4];1981 年在东京举行的软弱岩石国际会议规定软岩(soft rock)、风化岩(weathered rock)和碎裂岩(fractured rock)为软岩;1986 年第五届国际工程地质会议将软弱岩石的工程性质列为第二专门议程;1990 年伦敦地质学会举行了软弱岩石工程地质会议,进一步推动了对其的研究;1979 年瑞士召开的第四届岩石力学会议提出膨胀岩问题,并成立了膨胀岩专门委员会。周维垣^[5]认为软岩是在高地应力、地下水和强风化作用下,具有显著渗流、膨胀或崩解特性的软弱、破碎、风化和节理化围岩;何满潮等^[6]根据工程力和围岩强度的关系提出了工程软岩的概念;杨新安等^[7]依据岩石坚硬程度(岩石单轴饱和抗压强度)和岩体完整程度(岩体完整性指数)将软岩划分为软弱型、破碎

型、高应力型、软弱破碎型和膨胀性型等 5 类 ; 顾保和等^[4]根据地质成因和工程特性将软岩分为极软岩、膨胀岩、构造岩、片状变质岩、含盐岩、疏松岩、风化岩等 7 种类型。软岩分类具有重要的现实意义, 笔者认为, 从成因方面考虑软岩应分为原生软岩(如节理化岩体、裂隙岩体等)和由工程扰动产生的次生软岩(如断裂破碎岩体、高应力软岩等)。

2 软岩渗流的数学模型

岩体渗流规律应考虑应力和渗流的耦合作用, 采动时软岩的应力变化会影响裂隙或孔隙的渗透率变化, 进而改变渗流场 ; 反过来渗流对岩体的扰动也会改变应力场的分布。因此, 软岩的渗流规律其实是采动后的流固耦合问题。

2.1 渗流基本方程

渗流基本方程包括本构方程、应力平衡方程和渗流连续方程。对流固耦合问题本构方程的研究 Terzaghi^[8]最早提出了有效应力公式, 其物理意义为岩体变形是由外部载荷对应的全应力与孔隙流体压力的差值来确定, 即

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} p \tag{1}$$

式中 : σ_{ij} 为岩体所受的全应力, MPa ; σ'_{ij} 为有效应力, MPa ; p 为孔隙压力, MPa ; $\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & (i = j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases}$ 。

Terzaghi 有效应力原理只考虑了一维弹性孔隙介质中饱和流体运动时的固结规律, 20 世纪中期 Biot 从较严格的固结机理出发推导了准确反映孔隙压力消散与岩土骨架变形相互关系的三维固结方程 ; 后来 Robinson (1959 年) 和 Handin (1963 年) 等人提出了应用于岩石的有效应力公式^[9] :

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + a p \delta_{ij} \tag{2}$$

式中 a 为等效孔隙压系数, $0 \leq a \leq 1$ 。

任意取一岩石单元体, 根据单元体的静力平衡条件, 可在三维直角坐标系中建立研究对象的有效应力平衡微分方程 :

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_{ij}} + f = 0 \quad (i, j = 1, 2, 3) \tag{3}$$

式中 f 为体积力。

实际工程中, 流体在岩体中的渗流为非稳态渗流, 其连续方程表示如下 :

$$\frac{\partial (\rho n)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \tag{4}$$

式中 : ρ 为流体密度, kg/m^3 ; n 为孔隙率 ; v 为渗流

速度。

当渗流满足 Darcy 定律且坐标轴方向与渗透系数张量主方向一致时 :

$$\begin{aligned} v_x &= - \frac{k_x}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial x} \\ v_y &= - \frac{k_y}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial y} \\ v_z &= - \frac{k_z}{\rho g} \left(\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g \right) \end{aligned}$$

式中 : k_x, k_y, k_z 分别为 x, y, z 方向的渗透系数 ; g 为重力加速度。

假定流体不可压缩, 则渗流连续方程为

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho g} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial p}{\partial z} \right) \right] + \\ \frac{\partial k_z}{\partial z} = \frac{\partial n}{\partial t} \end{aligned} \tag{5}$$

鉴于渗透系数是应力或应变的函数, 联立本构方程、平衡方程和渗流连续方程并辅以渗流边界条件即可求得渗流应力耦合方程的解。

2.2 节理软岩渗流模型

节理软岩可以认为是裂隙较发育的岩体, 因此可以从裂隙岩体的角度分析其流固耦合问题。对此, 学者们提出了众多的渗流模型, 主要有 3 类 : 等效连续介质模型、裂隙网络模型 (离散介质模型) 和双重介质模型。

2.2.1 等效连续介质模型

等效连续介质模型最早由 Snow^[10]提出, Noorishad 等^[11]、Oda^[12]、仵彦卿^[13]和王媛等^[14]均在这方面做了大量的研究。该模型以渗透张量理论为基础, 用连续介质方法描述岩体渗流问题。其优点是可采用经典的孔隙介质渗流分析方法解决裂隙岩体渗流问题, 使用方便。其缺点有 : 要求岩体渗流的样本单元体积 (REV) 存在且远小于研究区域的尺寸 ; REV 的大小和等效水力参数难以确定 ; 模拟裂隙导水的有效性不理想。

2.2.2 裂隙网络模型

裂隙网络是由不同规模、不同成因、不同力学属性的裂隙个体在空间相互交叉构成的, 流体沿着裂隙网络运动。Wittke 提出线素模型, 运用线单元法建立裂隙系统中水流量、流速及压力特征之间的关系。简化的 Wittke 模型^[15]渗流控制方程为

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} \left(K \frac{\partial p}{\partial s} \right) + \zeta \phi \frac{\partial p}{\partial t} + \omega = 0 \tag{6}$$

式中 : ϕ 为孔隙度 ; K 为裂隙的渗透系数 ; ζ 为水的压缩系数 ; ω 为源汇项 ; s 为线元坐标。

裂隙变形方程为

$$\begin{cases} \sigma_n = K_n \epsilon_n & \epsilon_n = \frac{\delta_n}{b} & \delta_n = \frac{b}{K_n} (\sigma_n - p) \\ \sigma_s = K_s \epsilon_s & \epsilon_s = \frac{\delta_s}{b} & \delta_s = \frac{b}{K_s} \sigma_s \end{cases} \quad (7)$$

式中: σ_n, σ_s 分别为裂隙的法向和切向总应力; K_n, K_s 分别为裂隙的法向和切向刚度; ϵ_n, ϵ_s 分别为裂隙的法向和切向总应变; b 为裂隙初始宽度, m; δ_n, δ_s 分别为裂隙的法向和切向变形。

但是线素模型只能表示稳定流, 不能反映裂隙水流的瞬间变化特征, 不能体现裂隙系统的不均匀性和渗流的各向异性。因此王恩志等^[16]在线素模型的基础上建立了三维裂隙网络模型, 其数值模型如下:

$$TH + Q = E \frac{dH}{dt} \quad (8)$$

式中: H 为节点水头列向量; T 为总体传导矩阵; E 为裂隙储水矩阵; Q 为补给和排泄列向量。

周创兵等^[17]根据渗流叠加理论提出了双场耦合模型, 揭示出渗透张量与应力耦合效应。

2.2.3 双重介质模型

双重介质模型是 Barrenblatt 等^[18]于 1960 年提出, 他们假定岩体是由储水的孔隙介质和导水的裂隙介质重叠形成的连续介质。该模型适用于稀疏结构面岩体的渗流问题, 如断层形成的裂隙网络和其间由多孔隙或密集小裂隙岩块组成的岩体渗流问题。其优点是在一定程度上刻画出优先流现象, 并且考虑了岩块裂隙间的流体交换, 因此有较好的拟真性, 但流体交换相较难确定。

2.3 破碎岩体流固耦合方程

李顺才等^[19]应用多孔介质的有效应力原理, 建立了破碎岩体饱和非达西渗流流固耦合的非线性动力学模型。对破碎岩体来说, 本构方程中要考虑岩体的孔隙度和体积应变的影响, 因此式(2)中 a 的取值如下:

$$a = \frac{a_0 - \epsilon_v}{1 - \epsilon_v} \quad (9)$$

式中: a_0 为岩体的初始孔隙度; ϵ_v 为破碎岩体的体积应变。

基于土体的线弹性本构模型, 建立破碎岩体的应力平衡方程为

$$(\lambda + 2G) \nabla^2 \epsilon_v + a \nabla^2 p + \Delta f = - [(1 - a) \rho_s + a \rho_f] \frac{\partial^2 \epsilon_v}{\partial t^2} + a \rho_f \frac{\partial v_{ri,j}}{\partial t} \quad (10)$$

式中: λ, G 为岩体骨架的拉梅常数; ρ_s, ρ_f 分别为流体和岩体骨架的质量密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; v_r 为流体相对于岩块的相对速度, 下标 i, j 为坐标轴方向。

破碎岩体的渗流属于非 Darcy 渗流, 非 Darcy 渗流的状态变量有 3 个: 渗透率、加速度系数和非 Darcy 流因子, 因此破碎岩体非 Darcy 渗流方程为

$$\rho_f C_a \frac{\partial v}{\partial t} = - \nabla p - \frac{\mu}{k} v - \beta \rho_f |v| v + f \quad (11)$$

式中: C_a 为加速度系数; μ 为流体的动力黏度; k 为流体的渗透率; β 为非 Darcy 流因子。

根据岩块和流体的连续性方程和状态方程得渗流场的控制方程:

$$\nabla v - \frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} + C_t \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (12)$$

式中 C_t 为与介质和流体体积压缩系数相关的系数。

式(9)~(12)即为破碎岩体流固耦合方程组, 在具体计算时还要根据实际情况进行简化求解。

3 岩体渗流规律的实验研究

国内外对岩石渗流-应力耦合问题做了大量实验研究, Brace 等^[20]研究了花岗岩在高围压和孔压下的渗透率变化规律, 指出花岗岩的渗透率随有效围压的增大而减小, 而孔隙压的影响则不同; 随后 Patsouls 等^[21], Gangi^[22], Walsh^[23], Kranz^[24]等对不同岩石渗透性的研究获得了类似的结论, 而且 Louis^[25], Snow^[10]和 Senseny 等^[26]根据实验成果提出了不同的裂隙岩体渗透系数和应力之间关系的经验公式。目前室内实验研究主要是采取三轴全应力应变渗流实验和相似模拟实验 2 种实验方法。

3.1 三轴全应力-应变渗流实验

全应力-应变渗流实验是指在一定的围压和孔隙水压条件下加载轴向压力, 它能直观地反映岩石变形直到破坏整个过程的渗透规律, 获得较可靠的实验数据。全应力-应变过程中岩石渗透率在不同阶段的变化规律^[27]: 在弹性阶段, 渗透率随应力的增大而略有降低或渗透率变化不大; 在弹塑性阶段, 随着新生裂隙的扩展、贯穿, 岩石的渗透率先是缓慢增加然后急剧增大, 在峰值附近有极大值的突跃; 岩石破坏后随应变的增加, 渗透率随岩性的不同可能继续增加或平缓降低, 也有可能快速降低。姜振泉等^[2]分析了软岩(泥岩和页岩)和脆性坚硬岩在全应力-应变过程的变形规律及渗透性差异。文献^[28]利用三轴应力渗透仪分别对煤矿底板的硬岩和软岩进行三轴应力渗透试验, 试验证明有效应力越大, 渗透系数越小, 软岩裂隙的渗透系数小于硬岩裂隙的渗透系数且受应力的影响较大。

3.2 相似模拟渗流实验

相似模拟又称物理模拟, 它是研究者根据几何相似、运动相似、动力相似等相似准则和实验要求制作

实体模型进行实验模拟分析的方法,在解决实际工程问题中有非常重要的意义。但是在相似材料模拟实验过程中运动相似和动力相似很难模拟,且与实际情况偏差较大,造成实验结果不理想,所以在研究中一般作为其他实验方法的印证。学者们采用相似模拟对地下水渗流问题的研究较多,而对软岩流固耦合问题考虑较少。流固耦合实验研究集中体现在讨论硬岩的渗透率和应力之间的关系上,较少考虑软岩如节理化软岩、膨胀岩等岩体的流固耦合关系。因此,笔者认为,在进行软岩流固耦合实验研究的同时应该把软岩的蠕变特性结合起来进行研究。

4 流固耦合的数值模拟

由于现场实验和室内实验的成本比较高,而且实验过程中存在一定的系统误差和人为误差,因此相对成本较低且计算精度较高的数值模拟成为学者们研究的热点。流固耦合的数值模拟方法主要有有限单元法、有限差分法和离散单元法等,相应的计算软件为 ANSYS,FLAC 和 UDEC 等。另外唐春安课题组^[29]开发了岩石破裂过程渗流与损伤耦合作用分析系统(F-RFPA^{2D}),并在工程中得到了广泛的应用。

吕克璞^[30]推导出地下水渗流方程,并采用有限元数值方法进行了流场模拟;李炳乾等^[31]应用有限差分法对弹性孔隙介质在无水平应力作用下的充水过程和充水稳定后部分区域阻塞情况下水头调整过程进行了分析;唐春安等^[29]应用 F-RFPA^{2D}对孔隙水压作用下岩石试件加载破坏过程进行数值模拟,讨论了孔隙水压力大小和梯度对岩石试样中裂纹的萌生和扩展的影响;刘俊杰等^[32]应用 RFPA^{2D}模拟了采场覆岩应力场的变化与重新分布规律;Zangerl 等^[33]用二维离散单元法软件 UDEC 中的水力耦合模块分析了裂隙岩体中隧道开挖对地表沉降的影响问题。但是传统的数值模拟方法划分单元较多,计算耗时较大,在实际应用中很不方便,因此无网格流形法成为解决渗流问题的热点。无网格流形法的基本思想是用离散的点通过移动最小二乘法来拟合场函数,节点和积分网格可独立设置,不受单元的限制,克服了传统方法由于场函数的局部化近似引起的误差,因而计算精度较高。李树忱等^[34] Galerkin 法与有限元法耦合求解节理岩体的渗流问题,取得了较好的结果。

5 软岩与硬岩变形过程渗透性比较

岩石试样的渗透性强弱与 2 个因素有关:一是岩体本身的岩性,二是应力与裂隙的作用关系。当应力对裂隙表现为压密作用时,渗透性随应力的增

大而降低;当应力对裂隙表现为拉张作用时,渗透性随应力增大而增强^[35]。根据已有的岩石全应力-应变实验结果^[2]可知,原生裂隙较发育的软岩在弹塑性变形及屈服段应力对裂隙的拉张作用较明显,此时岩石的渗透性随应力增大而增大,至破坏时达到峰值;在应变软化段,应力对裂隙表现为压密作用,裂隙闭合,渗流通道变小,因此岩石的渗透性随应变增大而减弱,至塑性流变阶段渗透系数达到最小值并趋于稳定。相对来说,弹性较强的硬岩在弹塑性变形阶段,应力对岩石以压密作用为主,至岩石屈服前岩石渗透性较弱且变化不明显;在岩样屈服至破坏段,岩石裂隙发育,渗流通道变大,此时岩石渗透性增强,渗透系数达到峰值;在应变软化段,岩石被压密,渗透性降低。

6 结论及展望

a. 学者们对软岩的概念和分类进行了大量的研究,但是没有形成统一的思想,应该根据工程实际进行深入研究。

b. 对节理化软岩或裂隙岩体的流固耦合问题,人们提出了等效连续介质、裂隙网络模型和双重介质等理论模型,研究水压力、岩体应力(或应变)和渗透率或渗透张量之间的关系,获得了许多有意义的成果。但是,学者们假定的都是水平产状的岩体,对于倾斜产状的层状节理化软岩,还应该考虑其层间效应,即不同倾角下层间下滑力对岩体渗流场的影响。

c. 硬岩(如花岗岩、灰岩)的全应力应变渗流实验研究较多,软岩的应力应变渗流实验研究较少,而且实验中轴向加载普遍采用静态加载方式。在采矿工程和其他地下工程中,围岩受到的扰动是周期性或非周期性的动载荷作用。因此,在实验中必须考虑动载荷作用下岩体渗透系数的变化规律,同时应该将软岩的蠕变特性结合起来分析。

d. 数值模拟已成为解决流固耦合问题的重要方法之一,可以方便地进行渗流场的计算。由于采动软岩渗流的环境极其复杂,因此新的数值模拟方法(如无网格流形法)和渗流与应力、温度等多场耦合分析是今后研究的重点。由中仿科技有限公司开发的基于多物理场耦合分析软件 COMSOL 在这方面会有很好的应用空间。

e. 人们大多从渗流-应力、渗流-损伤等方面来研究软岩的渗流规律,而忽略了流体的化学效应对软岩渗流和变形的影响。对于泥岩遇水的泥化作用、膨胀岩遇水的膨胀作用,可以从化学损伤的角度来分析其渗流问题,建立软岩的渗流-应力-化学损伤耦合分析模型,从而全面深入地研究采动时软岩的渗流规律。

f. 软岩的流固耦合分析在工程应用方面主要有软基岩的坝体和高陡边坡的稳定性问题、软岩隧道的开挖问题以及软岩巷道的顶底板突水问题等。

参考文献：

[1] 汤连生,周萃英.渗透与水化学作用之受力岩体的破坏机理[J].中山大学学报,1996,35(6) 95-100.

[2] 姜振泉,季梁军.岩石全应力-应变过程渗透性试验研究[J].岩土工程学报,2001,23(2) 153-156.

[3] 徐增辉,刘光廷,叶源新等.温度对软岩渗透系数影响的试验研究[J].三峡大学学报,2006,28(4) 301-304,311.

[4] 顾保和,曲永新,彭涛.劣质岩(问题岩)的类型及其工程特性[J].工程勘察,2006(1) 1-7.

[5] 周维恒.高等岩石力学[M].北京:水利电力出版社,1990 25.

[6] 何满潮,景海河,孙晓明.软岩工程力学[M].北京:科学出版社,2002 11.

[7] 杨新安,黄宏伟,张禹.软弱岩体分类及其变形规律的研究[J].上海铁道大学学报:自然科学版,1997,18(4) 113-118.

[8] TERZAGHI. Theoretical soil mechanics [M]. New York :John Wiley and Sons Inc,1943.

[9] 赵阳升.矿山岩石流体力学[M].北京:煤炭工业出版社,1995 69.

[10] SNOW D T. Rock fracture specings, openings and porosities [J]. J Soil Mech Foud Div Proc ASCE94, 1968,94 73-79.

[11] NOORISHAD J,AYATOLLAHI P. A finite element method for coupled stress and flow analysis in fractured rock mass Int[J]. Rock Mech Min Sci Geomech Abstr,1982,19(4) 185-193.

[12] ODA M. An equivalent continuum model for coupled stress and fluid flow analysis in jointed rock masses [J]. Water Resources Research,1986,22(13) 1845-1856.

[13] 仵彦卿.岩体裂隙系统渗流场与应力场耦合模型[J].地质灾害与环境保护,1996,7(1) 31-34.

[14] 王媛,速宝玉,徐志英.等效连续裂隙岩体渗流与应力全耦合分析[J].河海大学学报,1998,26(2) 26-30.

[15] 李地元,李夕兵,张伟.裂隙岩体的流固耦合研究现状与应用展望[J].水利与建筑工程学报,2007,5(1) 1-4,11.

[16] 王恩志,杨成田.裂隙网络地下水数值模型及非连通裂隙网络水流的研究[J].水文地质工程地质,1992(1) 12-14.

[17] 周创兵,熊文林.双场耦合条件下裂隙岩体的渗透张量[J].岩石力学与工程学报,1996,15(12) 338-344.

[18] BARRENBLATT G I, ZHELTOV P, KOCHINA I N. Basic concepts in the theor of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks [J]. Appl Math Mech,1960,24 1286-1303.

[19] 李顺才,缪协兴,陈占清.破碎岩体非达西渗流的非线性

性动力学分析[J].煤炭学报,2005,30(5) 557-561.

[20] BRACE W F, WALSH J B, FRANGOS W T. Permeability of granite under high pressure [J]. J Geophys Res,1978,73(6) : 2225-2236.

[21] PATSOULS G, GRIPPS J C. An investigation of the permeability of Yorkshire chalk under differing pore water and confining pressure conditions [J]. Energy Sources,1982,6(4) 321-334.

[22] GANGI A F. Variation of whole and fractured porous rock permeability with confining pressure [J]. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr,1978,15(5) 249-257.

[23] WALSH J B. Effect of pore pressure and confining pressure on fracture permeability [J]. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr,1981,18(5) 429-435.

[24] KRANZ R L. The permeability of whole and jointed barre granite [J]. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr,1979,16(4) 225-234.

[25] LOUIS C. Rock Hydraulics [M]. Muller Leds : Rock Mechanics,1974.

[26] SENSENY P E, CAIN P J, CALLAHAN G D. Influence of deformation history on permeability and specific storage of masaverde sandstone [C]//MATHEWSON C C. Proceeding of 24th US symposium on Rock Mechanics. Rotterdam : A A Balkema Pubblishers,1983 525-531.

[27] 叶源新,刘光廷.岩石渗流应力耦合特性研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(14) 2518-2525.

[28] 郑纲.岩体裂隙三轴应力渗透规律的试验研究[J].工程地质学报,2004,12(1) 30-33.

[29] 唐春安,杨天鸿,李连崇,等.孔隙水压力对岩石裂纹扩展影响的数值模拟[J].岩土力学,2003,24(增刊) 17-20.

[30] 吕克璞.地下水渗流问题及其有限元数值模拟[J].西北师范大学学报:自然科学版,1998,34(2) 38-44.

[31] 李炳乾,尹京苑,钱家栋,等.含水层渗透性能变化对水位影响的数值模拟研究[J].地震,2000,20(3) 61-66.

[32] 刘俊杰,陈雄,张后全.运用 RFPA^{2D}数值模拟开采条件下的渗流通道[J].岩石力学与工程学报,2005,24(9) : 1522-1526.

[33] ZANGERL C, EBERHARDT E, LOEW S. Ground settlements above tunnels in fractured crystalline rock : numerical analysis of coupled hydromechanical mechanisms [J]. Hydrogeology Journal,2003(11) 162-173.

[34] 李树忱,李术才,隋斌,等.节理岩体渗流的无网格与有限元耦合方法[J].岩石力学与工程学报,2007,26(1) : 75-80.

[35] JONES F O. A laboratory study of the effects of confining pressure on fracture flow and storage capacity in carbonate rock [J]. Journal of Petrol Technology, 1975, 27(1) 21-27.

(收稿日期 2007-09-19 编辑 方宇彤)