

耦合岩体主干裂隙和网络状裂隙渗流分析及应用*

王洪涛, 聂永丰, 李雨松

清华大学 环境科学与工程系, 北京 100084

文 摘 对地下水在各项异性裂隙岩体中的三维渗流进行分析, 为裂隙岩体渗流计算提供更为有效的模拟分析方法。裂隙系统可以分为主干裂隙和网络状裂隙两类。对于岩体主干裂隙中的水运动使用离散介质渗流模型加以描述, 对于网络状裂隙则使用连续介质渗流模型加以描述, 并依据水量和水头关系把两者耦合起来, 给出了网络状裂隙的等效连续介质渗透系数计算方法和耦合模型中实现源与汇作用的方法。理论分析和实际应用结果表明, 耦合模型既能刻画主干裂隙特殊的导水作用, 又能体现网络状裂隙的贮水性质, 同时便于工程应用。耦合渗流模型被应用到乌江构皮滩水利枢纽的岩体渗流分析中。

关键词 主干裂隙; 网络状裂隙; 连续介质; 离散介质; 耦合渗流模型; 水利枢纽

分类号 P 641. 2

使用离散介质渗流理论描述岩体裂隙中水运动能够有效刻画裂隙的非均质各向异性水力性质^[1,2], 但由于其需要提供岩体全部有效裂隙的几何参数而给此方法的工程应用带来困难。连续介质方法理论成熟, 应用广泛, 但这种方法因把裂隙空间平均到渗流单元体上而不能很好地刻画裂隙的特殊导水作用。本文针对岩体中主干裂隙和网络状裂隙提出了裂隙岩体渗流的耦合分析方法, 即能刻画岩体裂隙的渗流性质, 又便于工程应用。

1 耦合渗流模型与解法

岩体中的非连续面按其渗流作用不同可分为主干裂隙和网络状裂隙两部分^[1]。主干裂隙如断层、剪切破裂带、层间错动带、大节理等, 通常切割深, 延伸长, 规模大。网络状裂隙主要由节理和裂隙等构成, 单体规模小, 总体密度大, 在空间上交割成立体网络

状。大量实践表明, 主干裂隙所占体积比率小, 但渗透性强, 其中地下水具有片状脉流特点, 是地下水的主要传导通道。网络状裂隙所占体积比率大, 但渗透性差, 是地下水的主要贮存空间。

耦合渗流分析的基本思路是用离散介质方法描述主干裂隙中的水运动, 用连续介质方法刻画网络状裂隙中的水运动。连续介质充满整个研究域, 离散介质按裂隙的空间产出状态分布于连续介质之中。对于连续介质域, 在两域相交面上的水头等于离散介质域对应点的水头; 对于离散介质域则使用连续介质域的水流量进行耦合。这种方法既能反映主干裂隙的特殊导水作用, 又避免了逐个计算网络状裂隙渗流所带来的困难^[2], 可以在较大研究域上进行岩体渗流分析。同时, 也解决了双重介质渗流模型用连续介质概化裂隙域所存在的问题^[3]。

连续介质域(也称岩块域)中的三维非恒定渗流方程为

$$\mu_{ms} \frac{\partial h}{\partial t} = \text{div}(K_m \text{grad} h) + W_m \quad (1)$$

其中, 下标 m 表示连续介质; $h(x, y, z, t)$ 为连续介质域水头; μ_{ms} 为贮水率; W_m 为源汇项, 包括水井、排水管道、降雨和蒸发等; K_m 为渗透系数张量。与离散介质域的耦合条件为

$$h(x, y, z, t) \Big|_{(\alpha, y, z) \in D_i} = H_i(x, y, z, t), \quad i = 1, 2, \dots, N_f \quad (2)$$

式中, D_i 为第 i 裂隙域; $H_i(x, y, z, t)$ 为第 i 个裂隙的水头; N_f 为裂隙数。式(1)在给定初边条件下可求得满足式(2)的解。

对于离散介质域(也称裂隙域)而言, 假设渗流在裂隙面局部坐标系下为二维非恒定流, 通过裂隙间的交叉与其它裂隙交换水量, 通过裂隙壁与连续介质域交换水量。各裂隙面二维流在研究域空间坐标系下组合成三维裂隙网络渗流体。

就裂隙面局部坐标系而言, 第 i 个裂隙中的二

收稿日期: 1997-07-09

第一作者: 男, 1960年生, 博士, 副教授

* 国家自然科学基金资助项目, 59779014

维非恒定渗流满足方程:

$$\mu_{fi}^* \frac{\partial H_i}{\partial t} = \text{div}(T_{fi} \text{grad} H_i) + W_{fi} + F_i \quad (3)$$

其中, 下标 f 表示裂隙; H_i 为 i 裂隙的水头; μ_{fi}^* 为贮水系数; T_{fi} 为导水系数, $T_{fi} = K_{fi} b_i$; K_{fi} 为裂隙渗透系数; b_i 为裂隙的水力开度; W_{fi} 为源汇项; F_i 为与连续介质域的水量交换项, 定义为单位时间单位裂隙面积由连续介质域进入裂隙的水体积

$$F_i = K_{m1} dh/dn_1 + K_{m2} dh/dn_2 \quad (4)$$

式中, K_{m1} , K_{m2} 和 n_1 , n_2 分别为 i 裂隙两壁的渗透系数和外法线向量。裂隙交叉的水流条件为

$$H_i |_{B_{ij}} = H_j |_{B_{ji}}; \quad i, j = 1, 2, \dots, N_f; \quad i \neq j \quad (5)$$

其中, $B_{ij} = B_{ji}$ 为 i 与 j 裂隙的交叉线。

裂隙 i 的边界有两种: 1) 与研究域边界面相交, 边界条件由研究域边界确定; 2) 终止于研究域内部, 水流量为零。每个裂隙都有这样一个定解问题, 并通过式(5)将各个裂隙联系起来。

使用有限单元法求上述耦合渗流模型的数值解。在进行有限元剖分时, 离散介质域各裂隙的节点需要统一编号, 而单元则可以每个裂隙单独编号。为了不使节点重复, 裂隙交叉线上的节点号将由拥有该交叉线的裂隙共享。共享节点在裂隙各自坐标系中具有各自的坐标值。

微分方程(1)或(3)并不能单独求出解来, 这是因为两者以耦合形式存在。为此, 使用迭代方法求解之。基本步骤如下: 1) 把式(2)中的 H 用离散介质域的边界条件(边界节点)和初始条件(内节点)代替, 求解式(1), 得到 h ; 2) 根据得到的 h , 按(4)式求耦合项的流量贡献, 并代入式(3)求解之, 得到离散介质域本次迭代的水头 H ; 3) 把 H 代入式(2)求解式(1), 得到连续介质域本次迭代的水头 h ; 4) 重复 2), 3) 步, 直到满足迭代精度为止。实际运算表明, 上述迭代格式一般只需 3~ 4 次迭代即可达到计算精度。由于使用迭代法求解, 所以被裂隙完全隔开的几个连续介质域可以分开求解, 这使得每次求解的有限元方程组个数减少, 使模型解决实际问题的尺度扩大, 且求解速度加快。

2 计算网络状裂隙的等效连续介质渗透系数

网络状裂隙的等效连续介质渗透系数可以通过野外试验等方法确定。本文引入一种根据裂隙统计资料(实测或模拟生成^[4])计算渗透系数的方法。各向异性裂隙介质的恒定渗流方程为

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0,$$

$$v_i = - \frac{K_{ii} \partial h}{\partial i} - \frac{K_{ij} \partial h}{\partial j} - \frac{K_{ik} \partial h}{\partial k},$$

$$i = x, y, z; \quad j = x, y, z; \quad k = x, y, z \quad (6)$$

式中, (K_{ii}, K_{ij}, K_{ik}) 为各向异性渗透系数张量 K 的分量; h 为水头。

假设网络状裂隙统计区或裂隙模拟生成区^[4]为立方体, 在三轴上的长度为 (L_x, L_y, L_z) , 等间距剖分成 N_x 行 N_y 列 N_z 层, 共计 $N = N_x \times N_y \times N_z$ 个等大小的小立方体, 称为渗透单元体。为了求得网络状裂隙载体在 x 轴方向上的渗透系数, 边界条件设定为: $h|_{x=0} = 0$; $h|_{x=L_x} = 1$; 上下左右四边界面上的水头由左至右从 0 到 1 线性分布。在上述边界条件下, 求式(6)在给定各单元渗透系数情况下的有限差分数值解, 可求得 h , 并可进一步求得 (x, y, z) 方向上的流量 (Q_x, Q_y, Q_z) 。据此有

$$\begin{aligned} K_{xx} &= - Q_x L_x / L_y L_z, & K_{yx} &= - Q_y / L_z, \\ K_{zx} &= - Q_z / L_y. \end{aligned} \quad (7)$$

其中, (K_{xx}, K_{yx}, K_{zx}) 即为在 x 方向水力梯度作用下的等效渗透系数。类似地, 通过改变边界条件可以求得 (K_{xy}, K_{yy}, K_{zy}) 和 (K_{xz}, K_{yz}, K_{zz}) 。

上述计算中, 渗透单元体的渗透系数给定为^[5]

$$K_j = \frac{\gamma}{12\mu\Delta x \Delta y \Delta z} \cdot \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n b_i^3 s_i (1 - n_{xi}^2) & - \sum_{i=1}^n b_i^3 s_i n_{xi} n_{yi} & - \sum_{i=1}^n b_i^3 s_i n_{xi} n_{zi} \\ - \sum_{i=1}^n b_i^3 s_i n_{yi} n_{xi} & \sum_{i=1}^n b_i^3 s_i (1 - n_{yi}^2) & - \sum_{i=1}^n b_i^3 s_i n_{yi} n_{zi} \\ - \sum_{i=1}^n b_i^3 s_i n_{zi} n_{xi} & - \sum_{i=1}^n b_i^3 s_i n_{zi} n_{yi} & \sum_{i=1}^n b_i^3 s_i (1 - n_{zi}^2) \end{vmatrix} \quad (8)$$

式中, K_j 为 j 单元体的渗透系数; $\Delta x \Delta y \Delta z$ 为 j 单元体体积; μ 和 γ 为水的动力粘滞系数和容重; b_i 和 s_i 为 i 裂隙的水力开度和在单元体中的面积; (n_{xi}, n_{yi}, n_{zi}) 为 i 裂隙法线的方向余弦。式(8)适用于贯通裂隙的渗透张量计算, 对于非贯通裂隙则存在误差。非贯通裂隙越多, 误差也越大。因此剖分的单元体要小, 以尽量减少单个单元体中非贯通裂隙数, 以提高等效渗透系数的计算精度。

3 算例—单侧回水渗流问题

边长为 110 m 的正方体岩体中有 6 个裂隙, 如图 1 所示。研究域的左右边界面给定水头, 上下前后 4 个边界面隔水。初始水头 $H_0 = 80$ m, 之后左边界

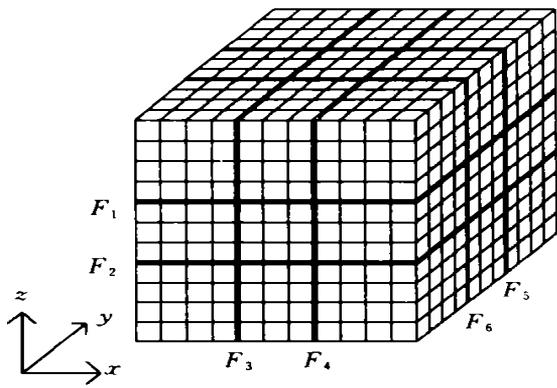


图1 研究域及其有限元剖分情况

水头瞬时上升至 100 m, 右边界水头不变, 求此条件下研究域的水头分布。岩块渗流参数为: $\mu_m^* = 0.001$, $K_m = 0.1 \text{ m/d}$ 。各裂隙的渗流参数相同: $\mu_f^* = 0.001$, $T_f = 100 \text{ m}^2/\text{d}$

计算结果如图 2, 3 所示。可见左边界水位上升之后, 裂隙由于较好的导水性, 水头随之迅速上升, 并沿裂隙迅速向右传递; 裂隙间的岩块由于渗透性

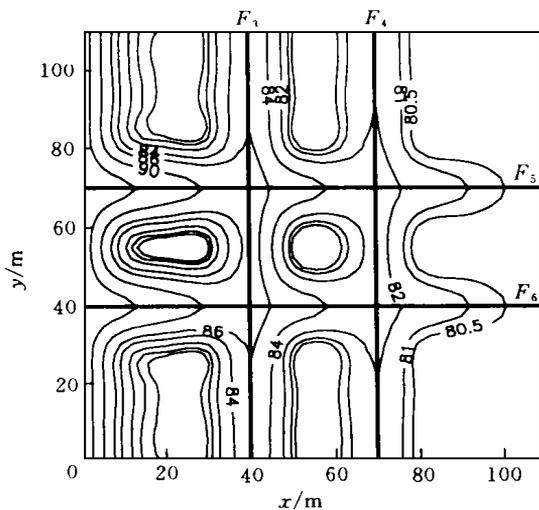


图2 回水 30 min 时表层水头平面等值线图, 单位: m

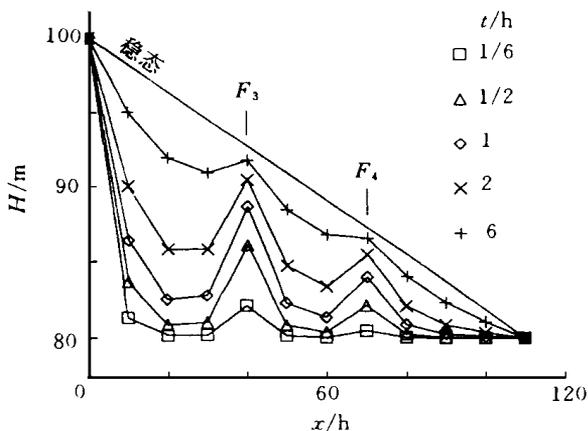


图3 第3层3行各节点不同时间的水头变化

较差, 最初水头上升速度慢, 存在明显滞后。随着时间增长, 裂隙域水头上升速度减小, 并趋于恒定; 岩块域水头继续上升, 最后达到恒定渗流状态。为了把本文方法与单纯等效连续介质方法和仅考虑裂隙的离散介质方法进行比较, 对后两种方法也进行了计算。图 4 给出了 5 层 3 行 6 列节点上的水头变化情况(耦合模型, 只考虑裂隙的模型, 等效多孔介质模型)。可见仅考虑裂隙的离散介质方法由于裂隙不向岩块供水, 水头上升速度快, 达到恒定时间短, 不能反映岩块的滞水作用; 而等效多孔介质方法(等效渗透系数为 1 m/d)水头滞后较长时间后才开始上升, 且上升速度慢, 达到恒定时间长, 不能反映裂隙的特殊导水作用。本文提出的耦合模型解决了上述问题

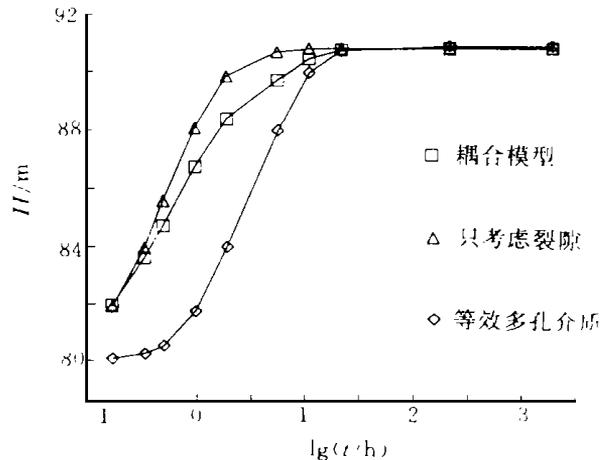


图4 计算水头随时间的变化

4 应用—乌江构皮滩水利枢纽水垫塘区岩体渗流计算

乌江构皮滩水利枢纽位于贵州省余庆县境内。坝址以上控制流域面积 43 250 km², 多年平均流量 707 m³/s。双曲拱坝顶高程 639 m, 高 231 m, 长 536.7 m, 坝下有水垫塘和二道坝。电站装机容量 200 万 kW, 年均发电量 88.85~91.92 亿 kW·h, 是乌江上最大的水电站

岩体渗流计算重点考虑坝下游泄洪消能区。通过渗流分析确定此区在泄洪条件下的地下水流场, 为防渗漏设计和充水边坡稳定分析提供依据。计算区面积为 0.58 km², 含水介质为二迭系吴家坪组 (P_{2w})、茅口组 (P_{1m}) 和栖霞组 (P_{1q}) 灰岩。岩层走向 30°~45°, 倾向北西, 倾角 40°~55°。灰岩之下为韩家店组 (P_{1h}) 和石牛栏组 (P_{2sh}) 以页岩为主的岩性, 构成隔水体。计算区东北部、西北部和西南部三边界为

岩体地表分水岭或沟谷, 构成零通量边界; 底边界以 300 m 高程为限, 当灰岩与页岩的岩性分界面高于此限时, 取岩性界面, 否则取 300 m 高程为界, 认为其下地下水处于滞流状态, 底界面亦为零通量边界; 灰岩与页岩的分界面在地表的出露线构成了计算区的东南部边界。以防渗帷幕为界分成上、下游两部分, 上游部分全部按连续介质概化, 下游部分分别考虑主干裂隙(按离散介质概化)和岩块(按连续介质概化)。所考虑的主干裂隙包括断裂 F_{37} , F_{35} , F_{49} , F_{34} , F_{165} , F_{39} , F_{100} , 层间错动 F_{b114} , F_{b113} , F_{b112} , F_{b82} , F_{b88} , F_{b93} , F_{b81} , F_{b54} , F_{b59} , F_{b63} 等。防渗帷幕用 8 个低渗透面概化。

渗透系数以区内 62 个压注水试验钻孔的 2 163 个注水段的试验成果为基础给定。由于压注水试验代表了注水段上(高度为 5~10 m)渗透性的平均值, 不代表主干裂隙(钻孔揭穿高度一般为 0.1 m~1.0 m)的渗透系数, 所以在处理中, 用注水段高度与主干裂隙被揭穿高度的比值放大渗透系数增加的部分后, 再叠加趋势值作为主干裂隙的渗透系数, 渗透系数的趋势值赋给岩块。防渗帷幕的渗透系数为天然渗透系数的 1/20~1/30。贮水系数取 0.05, 全区一致。

根据裂隙的大小和交叉关系以及与防渗帷幕的关系等条件对裂隙域进行有限元剖分, 共计剖分 1 688 个节点, 2 335 个单元; 根据岩层岩性和与裂隙的关系对岩块域进行剖分, 共计剖分 4 324 个节点, 5 933 个单元。

模拟分析了 3 种工况的地下水流场: 库水位 $Z_u = 630$ m, 下游水位 $Z_d = 463.76$ m; $Z_u = 630$ m, $Z_d = 480$ m, 洪水频率 1%, 有泄洪雾化降雨补给; $Z_u = 632.17$ m, $Z_d = 483.23$ m, 洪水频率 0.2%, 有雾化降雨补给。以工况 2 为例说明之。泄洪 3 d 结束时的地下水浸润曲面如图 5 所示。沿剖面 F-I 的水头等值线图如图 6。

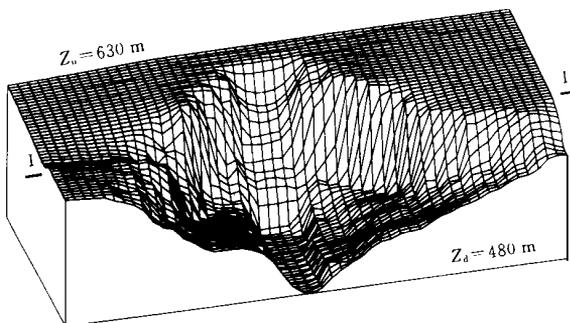


图 5 泄洪结束时地下水浸润曲面

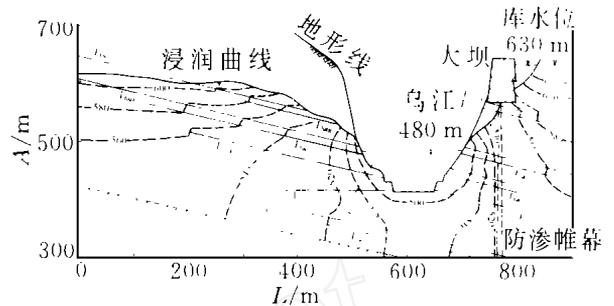


图 6 泄洪结束时沿 F-I 剖面地下水头等值线图, 单位: m

水库泄洪后, 雾化降雨的大量补给使水垫塘两侧岩体地下水位迅速上升。但是, 由于多条层间断裂近于垂直地穿过乌江, 沟通了岩体与乌江的水力联系, 使岩体中的地下水在上升的同时, 沿断裂不断排泄到乌江, 岩块地下水同时流向断裂。从剖面上看, 由于断裂渗透性好, 造成水位等值线通过时发生弯曲。浸润曲面附近水流动速度最快, 向深部变小。从水库向下游到防渗帷幕, 水力梯度为 0.01~0.30。由于防渗帷幕的阻挡, 地下水在越过帷幕过程中水位从 593~612 m 跌落到 535~550 m。越过帷幕后, 地下水快速流向乌江, 水力梯度为 0.3~0.8。地下水在排向乌江时有 15~20 m 高的渗出面。

5 结 语

本文提出的耦合主干裂隙和网络状裂隙系统渗流分析方法既能包容岩体裂隙, 反映主干裂隙的特殊导水作用和网络状裂隙和岩块的贮水作用, 又能在较大研究域上进行渗流计算, 是一种有效实用的岩体渗流分析方法。

参 考 文 献

- 1 王洪涛, 李永祥. 三维随机裂隙网络非稳定渗流理论模型研究. 水利水运科学研究, 1997, (2): 123~129
- 2 Ezzedine S, Marsily G E. Study of transient flow in hard fractured rocks with a discrete fracture network model. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1993, 30(7): 1 605~1 609
- 3 Huyakorn P S, Lester B H, Faust C. Finite element techniques for modelling ground water flow in fractured aquifers. Water Resour Res, 1983, 19(4): 1 019~1 035
- 4 Dverstop B, Andersson J, Nordqvist W. Discrete fracture network interpretation of field trace migration in sparsely fractured rock. Water Resour Res, 1992, 28(9): 2 327~2 343
- 5 田开铭, 万力. 各向异性裂隙介质渗透性的研究与评价. 北京: 学苑出版社, 1989

(下转第 31 页)

- 6 Nichols TR. The organization of heterogenic reflexes among muscles crossing the ankle joint in the decerebrate cat, *J Physiol*, 1989, 410: 463 ~ 477
- 7 刘 刚, 蓝 宁. 关节运动中对抗肌的神经控制模型 见: '95 生物医学工程联合学术年会 北京 1995, 444 ~ 445
- 8 Li Yong, Lan Ning, Yang Fusheng. Feedback regulation of joint equilibrium states with $\alpha\gamma$ coactivation. In: 19th annual international conference of the IEEE engineering in medicine and biology society. 1997, 1906 ~ 1908

Influence of feedback in motorneuro control model

LI Yong, LAN Ning, YANG Fusheng

Institute of Biomedical Engineering,

Department of Electrical Engineering,

Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract The mechanism of the control of neuro system to the limb is a frontal problem in the area of biological cybernetics. Based on the $\alpha\gamma$ co-activation, the springlike characteristic of the muscle and the feedback of the spindle, a new $\alpha\gamma$ model is established. The results of the openloop $\alpha\gamma$ model, the autogenic reflex and reciprocal inhibition in the closed loop are discussed. The openloop $\alpha\gamma$ model can realize motor control, but it suffers from the defect for not considering the effect of feedback. The differences between autogenic reflex and reciprocal inhibition are not intrinsic, except when the movement is under different coactivation.

Key words neuromuscular control; equilibrium point hypothesis; $\alpha\gamma$ motorneurons; feedforward and feedback control

(上接第 26 页)

Flow analysis by coupling dominant fracture and network fracture systems and its application

WANG Hongtao, NIE Yongfeng, LI Yusong

Department of Environmental Science and Engineering,

Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract Dealing with the analysis of three dimensional fluid flow in a fractured anisotropic rock mass, an effective and practical simulation method is provided for the calculation of ground water flow in this rock mass where hydropower project is constructed. Fractures in a rock mass can be divided into dominant fracture system and network fracture system. A distinct medium method is applied to describe flow in the dominant fracture system while a continuum method is applied to describe flow in the network fracture system. The two systems are coupled together by hydraulic head and flux to constitute a coupled model. A method for the calculation of equivalent porous permeability is presented by using the fracture geometry data in a network fracture system. The results show that the coupled approach can effectively reflect the special effects of dominant fractures in terms of transmissivity and the properties of rock matrixes in terms of water storage. This model can be easily applied to practical engineering. The method was applied to the Wujiang hydropower project for ground water flow calculation in the rock mass.

Key words dominant fracture; network fracture; continuum medium; distinct medium; coupled seepage model; hydropower project