空间岩体裂隙网络灌浆数值模拟研究

罗平平[1]，陈 蕾[2]，邹正盛[1]

（1．河南理工大学土木工程学院，河南 焦作 454001；2．河南理工大学图书馆，河南 焦作 454001）

摘 要：为提高和评估岩体灌浆效果，研究和预测浆液在空间岩体裂隙网络内的渗透规律，结合宾汉流体在单一光滑倾斜裂隙内的流动公式，建立了空间岩体裂隙网络的宾汉浆液渗流和裂隙变形耦合模型。在此模型上对灌浆进行实时模拟。另外还研究了灌浆过程中裂隙变形及对灌浆的影响。计算结果表明，通过该模型可预测浆液在岩体中渗透状态，改进灌浆参数。

关键词：裂隙网络；灌浆；数值模拟；岩体；浆液

中图分类号：TU472 文献标识码：A 文章编号：1000－4548(2007)12－1844－05

作者简介：罗平平(1976－)，男，江西上高人，博士，副教授，从事边坡稳定性和支护、裂隙岩体灌浆理论及数值模拟研究。E-mail: luopingping@hpu.edu.cn。

Numerical simulation of grouting in space fracture network of rock mass

LUO Ping-ping[1]，CHEN Lei[2]，ZOU Zheng-sheng[1]

(1. College of Civil Eng., Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454001, China; 2. Library, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454001, China)

Abstract: To improve and evaluate the effect of grouting, and to study and predict the pervasion law of grouts in space fracture network of rock mass, a seepage model for the Binghamian grouts flowing in space fracture network was put forward combining with the flow formula of Binghamian grouts in single smooth and inclined fracture. On the basis of the model, the grouting was real-timely simulated. In addition, the deformation of fractures and its effect upon grouting were studied during the process of grouting. It was indicatd that the grouting effect could be predicted and improred by the present model.

Key words: fracture network; grouting; numerical simulation; rock mass; grout

0 引 言

灌浆工程是一个隐蔽性工程，施工质量问题不能在短期内发现，发达国家已普遍采用先进的自动化设备来检测整个灌浆过程。传统的方法是通过求得浆液的扩散半径来获取浆液的扩散范围。由于岩体内裂隙分布复杂，岩体渗透性为各向异性，不能用简单的扩散半径来反映浆液在裂隙岩体内的流动规律。

刘嘉材[1]、Baker[2]等研究了牛顿浆液在裂隙内的渗透规律。Wittke[3-4]、Wallner[3]、H. B.加宾[3]、G. Lombardi[3,5]和 Amadei[6]等相继推导了宾汉流体在裂隙中的流动规律。但这此研究只限于单一光滑裂隙或裂隙均匀分布的岩体，很难反应岩体内实际的裂隙分布情况，且没有考虑由于灌浆压力的作用导致裂隙变形，进而影响浆液渗透的因素。

其后一些学者对浆液在岩体随机裂隙内的渗透规律做了研究。Hassler[7]研究了牛顿浆液在等张开度等宽的二维和三维光滑裂隙网络内的流动规律，但忽略了灌浆压力引起的裂隙变形。郝哲等[8]利用 Monte-Carlo 法生成裂隙网络，将裂隙水力学中渗流的纯压差流动公式作为平面裂隙灌浆扩散模拟中的迭代公式。杨米加[9]等在裂隙结构模拟的基础上，建立了二维裂隙网络非牛顿流体的渗流模型。

目前，有学者成功模拟了岩体内的三维随机裂隙网络。陈剑平[11]、张发明[12]等应用概率统计和蒙特卡洛模拟等知识，生成了三维随机裂隙网络。于青春等[13]通过逆建模方法解决了一维、二维观测数据来计算三维裂隙大小和密度的问题。Kulatilake[14]等也对岩体三维不连续面网络进行了模拟。三维裂隙网络的成功模拟，为研究浆液在三维裂隙网络内的渗透规律打好了基础。

本文结合宾汉流体在单一光滑倾斜裂隙内的流动公式[15]，建立了空间岩体裂隙网络的宾汉浆液渗流和裂隙变形耦合模型，在此基础上开发了数值模拟程序。

基金项目：河南理工大学博士基金资助项目（648184）

收稿日期：2006－11－28

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1　空间岩体裂隙网络灌浆数值模型

假定：①浆液在裂隙中为层流；②岩体为完全弹性，岩块不透水，浆液只在裂隙网络内流动；③浆液为宾汉浆液；④裂隙光滑，且裂隙在灌浆压力作用下只扩张而不扩展延伸产生新裂隙。

根据空间岩体裂隙网络交叉特征，把裂隙交叉点作为节点，节点与节点之间的裂隙作为线单元，每个线单元流向共同节点的流量之和等于零（稳定流）或等于储存量的变化量（非稳定流），依次建立灌浆渗流连续条件的控制方程，结合初始条件和边界条件来建立空间裂隙岩体灌浆数值模型。

图 1 是空间岩体裂隙网络示意图，图中虚圆球域为表征单元的均衡域。

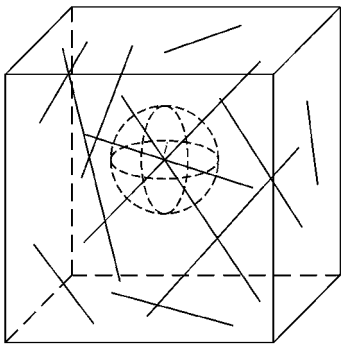


图 1 空间裂隙网络示意图

Fig. 1 Schematic diagram of space fracture

以 i 点为中心形成一表征单元域，为取包含 i 节点，且通过各衔接线单元的中点，作一闭合曲面而形成。在表征单元域内，某一时刻流进和流出各衔接单元的流量为 $q_j(j=1,2,\mathrm{L}\ ,M')$，表征单元域中每个线元上的垂直补给量为 $\omega_j(j=1,2,\mathrm{L}\ ,M')$，$i$ 节点上汇（源）项为 Q_i，其中 M' 为与节点 i 相连的线元数。则单位时间内，流进和流出表征单元域的流量差值等于表征单元域内储存量的变化量，则有浆液渗流场数学模型[15]：

$$a_{ij}k_jJ_j-a_{ij}\omega_j+Q_i=-\frac{s_i}{2}(a_{ij}e_jl_j)\frac{\mathrm{d}h_i}{\mathrm{d}t}$$
$$(i=1,2,\mathrm{L}\ ,N;\ j=1,2,\mathrm{L}\ ,M)\quad ; \tag{1}$$

初始条件：

$$h_i\big|_{t=0}=h_0,(x_1,x_2,x_3)\in\Omega\quad ; \tag{2}$$

边界条件：

$$h_i\big|_{\Gamma}=h^*,(x_1,x_2,x_3)\in\Gamma\quad 。 \tag{3}$$

其中　$k_j=\dfrac{ge_j^{\,3}}{12\nu}+\dfrac{\tau_0^3}{3\nu g^2\rho^3I_j^{\,3}}-\dfrac{\tau_0e_j^{\,2}}{4\rho\nu I_j}$　。　(4)

式中　g 为重力加速度；e 为裂隙宽度；ν 为浆液运动黏度；J 为与 i 点相连的某衔接线元的渗透梯度；τ_0 为浆液剪切强度；ρ 为浆液密度；N 和 M 分别为计算区域内的节点数和线元数；ω_j 为 i 点的垂直补给量；Q_i 为汇源项；h_i 为节点 i 上的灌浆压力；$d_i=\dfrac{s_i}{2}\sum_{j=1}^{M'}e_jl_j$，$s_i$ 为裂隙以 i 点为中心的表征单元域内弹性储（释）水系数；e_j 和 l_j 分别为与 i 点相连的 j 线元宽度和长度；t 为灌浆时间；h_0 为初始压力水头；h^* 为边界已知压力水头；Γ 为已知水头边界；Ω 为计算域；$A=\{a_{ij}\}_{N\times M}$ 为裂隙网络的 $N\times M$ 阶衔接矩阵，该矩阵中元素 a_{ij} 可表述为

$$a_{ij}=\begin{cases}+1,\ j\text{线元衔接于}i\text{节点}\ ,\\ \quad\text{且指向}i\text{节点方向}\ ,\\ 0,\ \ j\text{线元衔接于}i\text{节点}\ ,\\ -1,\ j\text{线元衔接于}i\text{节点},\\ \quad\text{且指向}i\text{节点方向}\ 。\end{cases} \tag{5}$$

灌浆压力作用下的裂隙变形方程[15]：

$$\left.\begin{aligned}\Delta\delta_1&=\frac{(1-\mu^2)}{\pi E}\rho gl(\Delta h_1^j+\Delta h_2^j)\ ,\\ \Delta\delta_2&=\frac{2(1-\mu^2)}{\pi E}\rho gl(\Delta h_1^j+\Delta h_2^j)\ 。\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中　Δh_1^j 和 Δh_2^j 分别为第 j 条裂隙两端所受的压力水头；$\Delta\delta_1^j$，$\Delta\delta_2^j$ 分别为第 j 条裂隙中点和端点的张开量；E，μ 分别为岩体弹模和泊松系数；其它符号意义同上。

方程（1）和（6）构成了空间岩体灌浆的数值模拟耦合模型。

2　程序的开发

由于式（1）为非线性方程，本文采用 Newton-Raphson 法求解。据此开发了空间岩体裂隙网络的灌浆模拟程序 GIRRM-3D.FOR，程序框图见图 2。图 2 中，i_t 为迭代时步数，t 为迭代时刻，dt 为迭代时步长，d_{mul} 为时步长递增比例系数，$t_{\max}$ 为最终迭代时刻。

3　浆液在空间裂隙网络中的渗流特性分析

空间岩体裂隙网络和计算域见图 3，裂隙宽度为 1 mm。其中入渗点为第 8，11 和 14 号节点；出渗点为第 68，71 和 74 号节点，出渗点压力假定为 0 MPa。灌浆压力 1 MPa，其它灌浆参数为：浆液密度 ρ 为

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1.35×10^3 kg/m^3，浆液动力黏度 μ 为 0.028 Pa·s，浆液初始剪切强度 τ_0 为 13 Pa。

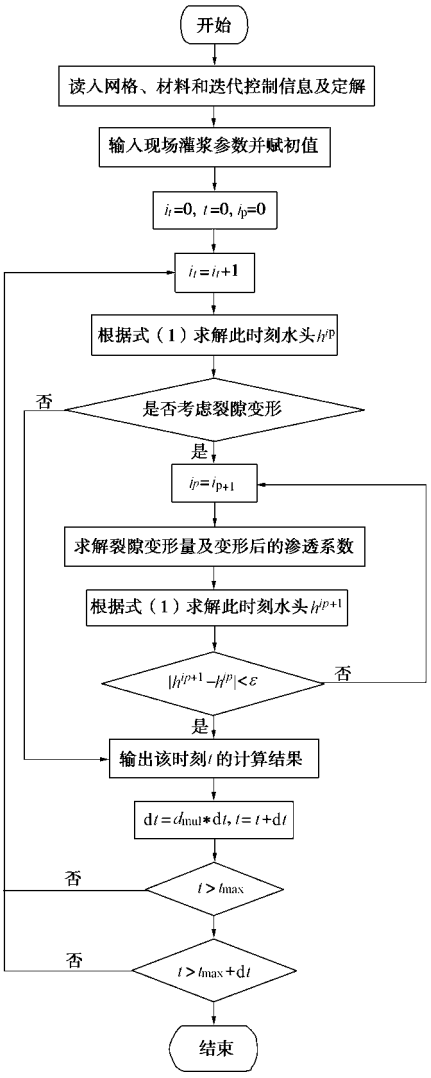


图 2 空间岩体裂隙网络灌浆数值模拟程序框图

Fig. 2 Numerical simulation program of grouting in space fracture network

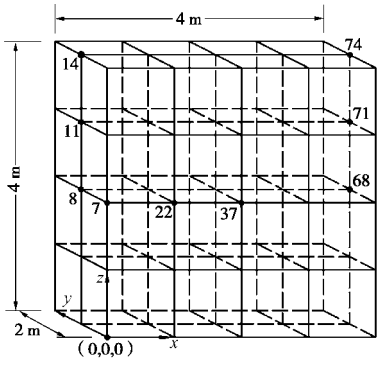


图 3 空间岩体裂隙网络灌浆计算模型

Fig. 3 Calculating model of grouting in space fracture network

整个灌浆计算时间 600 s，分十个时步，每个时步 60 s。分两个工况，第一个工况不考虑裂隙变形，第二个工况考虑灌浆压力作用下裂隙变形对浆液渗透的影响。

计算结果见图 4～12。其中图 4～6 为工况一灌浆时间分别在 60，300 和 600 s 时 z=2.0 截面的节点压力等值线图；图 7～9 为工况二灌浆时间分别在 60，30 和 600 s 时 z=2.0 截面的节点压力等值线图；图 10 为工况一部分节点的压力随灌浆时间的变化图；图 11 为工况二部分节点的压力随灌浆时间的变化图；图 12 为两个工况中各个时步灌浆量的曲线图。

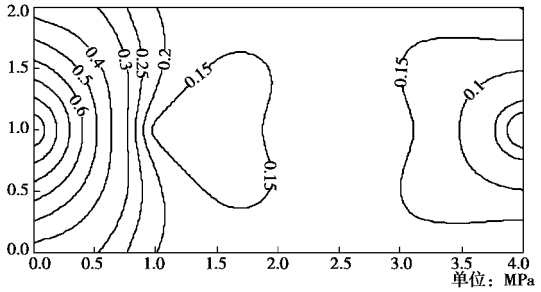


图 4 忽略裂隙变形 t=60 s 时 z=2.0 截面的压力等值线

Fig. 4 Contour of the nodal pressure in section of z=2.0 at t=60 s ignoring the deformation of fracture

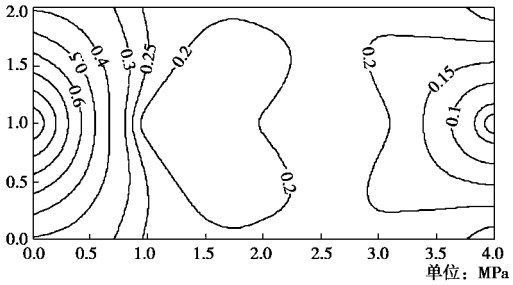


图 5 忽略裂隙变形 t=300 s 时 z = 2.0 截面的压力等值线

Fig. 5 Contour of the nodal pressure in section of z=2.0 at t =300 s ignoring the deformation of fracture

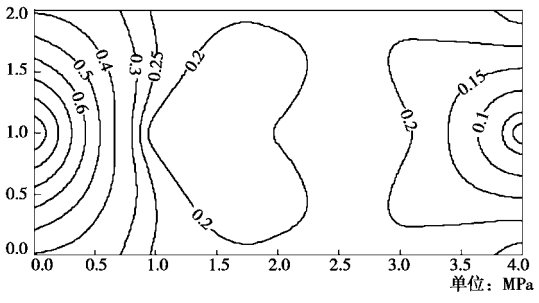


图 6 忽略裂隙变形 t=600 s 时 z = 2.0 截面的压力等值线

Fig. 6 Contour of the nodal pressure in section of z=2.0 at t =600 s ignoring the deformation of fracture

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

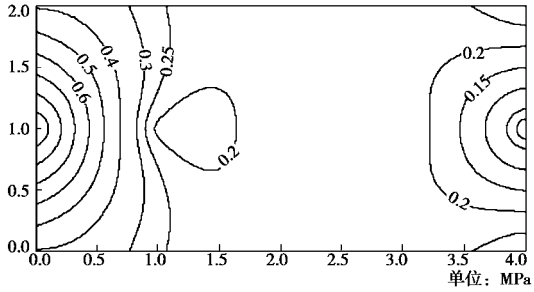


图 7 考虑裂隙变形 t=60 s 时 z=2.0 截面的压力等值线

Fig. 7 Contour of the nodal pressure in section of z=2.0 at t=60 s considering the deformation of fracture

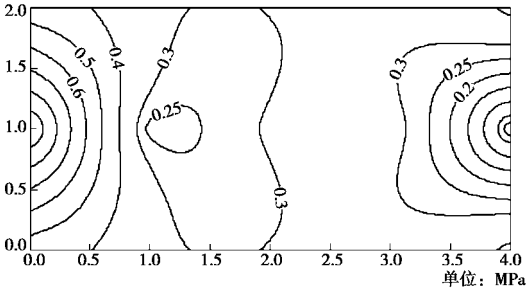


图 8 考虑裂隙变形 t =300 s 时 z=2.0 截面的压力等值线

Fig. 8 Contour of the nodal pressure in section of z=2.0 at t=300 s considering the deformation of fracture

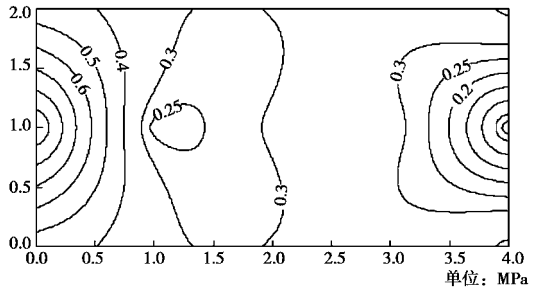


图 9 考虑裂隙变形 t=600 s 时 z=2.0 截面的压力等值线

Fig. 9 Contour of the nodal pressure in section of z=2.0 at t=600 s considering the deformation of fracture

从图 4～9 可以看出，由于几何和力学行为的对称性，节点压力也呈对称分布。另外可以看出，在灌浆初始阶段，节点灌浆压力一般较小，随着灌浆的持续进行，离入渗点较远节点的压力逐渐增大。靠近入渗点和出渗点的节点压力等值线几乎各自围绕入渗点和出渗点呈圆形。

将图 4～6 和图 7～9 比较后发现，若考虑灌浆压力作用下裂隙变形效应对浆液渗透的影响，在同一时间和地点的节点压力要比不考虑裂隙变形情况下的节点压力大。说明由于灌浆压力的作用，裂隙将扩张，这将导致浆液渗透更加广泛。

从图 10 和 11 可以发现，节点压力与时间呈幂函数关系。随着灌浆时间的延长，节点压力逐渐增大，最终趋于稳定。通过这种特性可以预测灌浆可以结束的时间，通过预测此次算例，发现工况一在提供的灌浆参数下，大约需要灌浆 4 min；工况二在提供的灌浆参数下，大约需要灌浆 5 min。

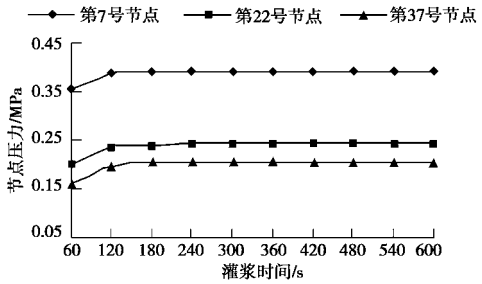


图 10 不考虑裂隙变形部分节点的压力随时间变化图

Fig. 10 Some nodal pressure versus time ignoring the deformation of fracture

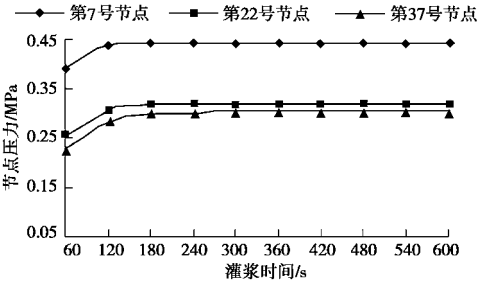


图 11 考虑裂隙变形部分节点的压力随时间变化图

Fig. 11 Some nodal pressure versus time considering the deformation of fracture

将图 10 和图 11 比较后发现，工况二即考虑裂隙变形效应的节点压力要比工况一即不考虑裂隙变形效应的节点压力要大，这也验证了前面的结论。

图 12 表明，各个时间步的灌浆量与灌浆时间也呈幂函数关系。灌浆量随着时间持续增加，最终趋于稳定，而且稳定的时间与节点压力稳定的时间几乎同步。工况一的灌浆量大约为 26.27 t，工况二的灌浆量大约为 50.47 t。工况二的灌浆量要比工况一的灌浆量多很多，这表明灌浆量对裂隙的扩张极为敏感，因此在实

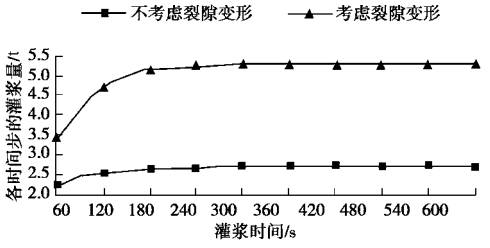


图 12 各时间步的计算灌浆量

Fig. 12 Calculated grouting quantity of every time step

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

际工程计算中，必须充分详细地调查灌浆区域的岩体裂隙参数。

4 结 论

（1）该空间岩体裂隙网络灌浆模型能实时反映灌浆进程以及浆液在裂隙网络中的流动规律。计算结果表明岩体中节点压力和各时步的灌浆量与时间成幂函数关系，即它们都随时间递增，并逐步趋于稳定。根据该特征，可以估计出灌浆可以结束的时间。

（2）该模型的不足之处在于只考虑了浆液的单相流，事实上流体是以两相（浆液和水）甚至三相（浆液、水和气）的形式在岩体裂隙内流动。另外模型没有考虑裂隙粗糙度对浆液流动的影响，这些都是今后的研究方向。

参考文献：

[1] HASSLER Lars, HAKANSSON Ulf, STILLE Hakan. Computer-simulated flow of grouts in jointed rock[J]. Tunneling and Underground Space Tech, 1992, **7**(4): 441－446.

[2] 郝 哲, 王介强, 何修仁. 岩体裂隙注浆的计算机模拟研究[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(6): 727－730. (HAO Zhe, WANG Jie-qiang, HE Xiu-ren. Computerized simulation of crack grouting in rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(6): 727 － 730. (in Chinese))

[3] SHI Cai-jun, DAY Robert L. Acceleration of the reactivity of fly ash by chemical activation[J]. Cement and Concrete Research, 1995, **25**: 15－21.

[4] 杨米加, 贺永年, 陈明雄. 裂隙岩体网络注浆渗流规律[J]. 水利学报, 2001(7): 41－46. (YANG Mi-jia, HE Yong-nian, CHEN Ming-xiong. Law of grouting penetrating through fracture network of rock mass[J]. Journal of Hydraulic Engneering, 2001(7): 41－46. (in Chinese))

[5] 伍法权. 统计岩体力学原理[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993. (WU Fa-quan. Principle of statistical rock mass mechanics[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1993. (in Chinese))

[6] BINGHAM C. Distribution on the sphere and on the projective plan [D]. Yale University, 1964: 93.

[7] SHANLEY R J, MATHTAB M A. Delineation and analysis of clusters in orientation data[J]. Math Geol, 1976, **8**: 9－23.

[8] PRIEST S D, HUDSON J A. Estimation of discontinuity spacing trace length using scanline[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1981, **19**(2): 183－197.

[9] HUDSON J A, PRIEST S D. Discontinuity frequency in rock masses[J]. Inter J Rock Mech Min Sci and Geomech Abstr, 1983, **20**: 73－89.

[10] 潘别桐, 井兰如. 岩体结构概率模拟和应用[M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1989: 55－79. (PAN Bie-tong, JING Lan-ru. Probability simulation and application of rock mass structure[M]. Northeast Institute of Technology Press, 1989: 55－79. (in Chinese))

[11] 陈剑平. 岩体随机不连续面三维网络数值模拟技术[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(4): 397－402. (CHEN Jian-ping. 3D net work numerical modeling technique for random[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(4): 397－402. (in Chinese))

[12] 张发明, 汪小刚, 贾志欣, 等. 3D 裂隙网络随机模拟及其工程应用研究[J]. 现代地质, 2002, **16**(1): 100－103. (ZHANG Fa-ming, WANG Xiao-gang, JIA Zhi-xin, et al. 3D Joint random simulation and its application to rock engineering[J]. Geoscience, 2002, **16**(1): 100－103. (in Chinese))

[13] 于青春, 大西有三. 岩体三维不连续裂隙网络及其逆建模方法[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2003, **28**(5): 522－526. (YU Qing-chun, YUZO Ohnishi. Three-dimensional discrete fracture network model and its inverse method[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2003, **28**(5): 522－526. (in Chinese))

[14] KULATILAKE P H S W, et al. Joint network modeling with a validation exercise in Stripa Mine Sweden[J]. Int J Rock Mech Sci & Geomech Abstr, 1993(1): 1－23.

[15] 罗平平, 朱岳明, 赵咏梅, 等. 岩体灌浆的数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(8): 918－921. (LUO Ping-ping, ZHU Yue-ming, ZHAO Yong-mei, et al. Numerical simulation of grouting in rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(8): 918－921. (in Chinese))

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net