

二维随机裂隙岩体灌浆数值模拟

罗平平^{1,2}, 朱岳明², 黄金桂³, 李爱民²

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 南昌大学建筑工程学院, 江西 南昌 330047;
3. 中国建筑东北设计研究院上海分院, 上海 200233)

摘要: 在已有裂隙岩体灌浆研究的基础上, 建立随机裂隙网络宾汉姆浆液的渗透模型, 利用 Monte-Carlo 法生成岩体裂隙网络, 研究宾汉姆浆液在该岩体裂隙网络内的渗透规律, 以及灌浆过程中裂隙变形对灌浆的影响. 研究表明, 通过该模型可预测浆液在岩体中的渗透状态, 改进灌浆参数, 提高灌浆质量.

关键词: 渗流; 灌浆; 节理岩体; 数值模拟; 裂隙网络

中图分类号: TU457 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2006)03-0295-04

扩散半径是灌浆工程的一个重要参数. 但由于岩体内裂隙分布复杂, 表现为各向异性, 因此不可能用简单的扩散半径公式来反映浆液在裂隙岩体内的流动规律, 而研究浆液特别是宾汉姆浆液在岩体裂隙内的渗透规律, 对于改进灌浆工艺、优化灌浆参数等具有重要意义. 目前的岩体灌浆理论或试验只限于单一裂隙或裂隙均匀分布的岩体, 难以反映现场复杂的裂隙分布情况. Hassler 等^[1-3]对浆液在裂隙岩体内的渗透规律做了一些研究, 但他们局限于研究浆液在等宽裂隙网络内的流动规律. 文献[2]研究的是牛顿浆液, 但大部分浆液的流动特性与宾汉姆流体的流动特性接近, 且文献[1~3]没有考虑灌浆压力和由其引起的裂隙变形的相互作用.

本文在文献[3]的基础上, 结合单一光滑倾斜裂隙内宾汉姆流体的流动公式, 建立了非等宽随机裂隙网络的宾汉姆浆液渗透和裂隙变形耦合模型, 并研究了岩体裂隙网络内宾汉姆浆液的渗透规律.

1 岩体裂隙网络生成

在岩体灌浆工程中, 浆液只能在岩体裂隙中流动^[1]. 天然岩体裂隙分布状况复杂, 目前难以确定裂隙精确位置和产状. 研究岩体裂隙分布特征通常采用物理模拟、数值模拟及概率统计方法, 而岩体裂隙网络的计算机模拟是岩体结构定量研究的最佳途径^[4]. 目前主要采用 Monte-Carlo 法来模拟岩体裂隙网络^[5-9].

Monte-Carlo 法的模拟过程与实测统计过程相反, 它是先用实测统计建立裂隙几何参数(包括岩体裂隙每组的产状、间距、迹长)概率模型, 然后利用随机数产生服从这种概率模型的随机变量, 最终生成岩体裂隙网络图.

2 宾汉姆浆液渗透模型

假定 (a) 浆液在裂隙中为层流 (b) 岩体为完全弹性 (c) 浆液为宾汉姆浆液 (d) 裂隙是光滑的, 且裂隙在灌浆压力下不扩展延伸.

二维岩体裂隙网络, 其构成要素主要是裂隙交点及交点间的裂隙段. 根据这一几何特征, 可把裂隙交点作为节点, 节点间的裂隙段作为线单元. 在此裂隙网络中取一由节点 i 和该节点相交的 M' 条线单元组成的均衡域, 根据质量守恒方程, 可得节点 i 处的浆液流动方程(非稳定流)^[3]

$$\left(\sum_{j=1}^{M'} q_j\right)_i - \left(\sum_{j=1}^{M'} \omega_j\right)_i + Q_i = -d_i \frac{dh_i}{dt} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

式中: q_j ——与节点 i 相连的某一线元内的流量; M' ——与节点 i 相连的线元数; ω_j —— i 点的垂直补给量;

Q_i ——汇源项; h_i ——节点*i*上的灌浆压力; $d_i = \frac{s_i}{2} \sum_{j=1}^M b_j l_j$,其中 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; l_j ——与*i*点相连的*j*线元长度; t ——灌浆时间; b_j ——第*j*条裂隙的宽度。

对于宾汉姆流体,有^[3]

$$q = \bar{v}e = \frac{ge^3}{12\nu}I + \frac{\tau_0^3}{3\eta g^2 \rho^3 I^2} - \frac{\tau_0 e^2}{4\nu\eta}$$

(2)

式中: g ——重力加速度; e ——裂隙宽度; ν ——浆液运动黏度; I ——与*i*点相连的某衔接线元的渗透梯度; τ_0 ——浆液剪切强度; ρ ——浆液密度。

把式(2)代入式(1)并设区域内有*N*个节点,*M*个线元,则式(1)最终可表示为

$$a_{ij}\beta_j l_j - a_{ij}\omega_j + Q_i = -\frac{s_i}{2}(a_{ij}e_j l_j)\frac{dh_i}{dt} \quad (i = 1\ 2\ \dots\ N\ j = 1\ 2\ \dots\ M)$$

(3)

式中: i ——自由标; j ——哑标; $\beta_j = \frac{ge_j^3}{12\eta} + \frac{\tau_0^3}{3\eta g^2 \rho^3 l_j^3} - \frac{\tau_0 e_j^2}{4\rho\eta l_j}$; $A = \{a_{ij}\}_{N \times M}$,
 A ——裂隙网络的*N*×*M*阶衔接矩阵,该矩阵中元素 a_{ij} 可表述为

$$a_{ij} = \begin{cases} +1 & (j\text{ 线元衔接于 } i\text{ 节点, 且指向 } i\text{ 节点方向}) \\ 0 & (j\text{ 线元不衔接于 } i\text{ 节点}) \\ -1 & (j\text{ 线元衔接于 } i\text{ 节点, 且指向离开 } i\text{ 节点方向}) \end{cases}$$

灌浆压力导致裂隙的扩张和岩体的变形,裂隙的张开引起注浆量的增加。岩体裂隙边界受灌浆压力作用引起的变形可用半无限边界上作用有均布力的弹性变形 Boussinesq 公式求解,裂隙变形量为

$$\Delta\delta_1 = \frac{1-\mu^2}{\pi E}\rho g\Delta h l(1-\ln l) \quad \Delta\delta_2 = \frac{2(1-\mu^2)}{\pi E}\rho g\Delta h l(1-\ln l)$$

(4)

式中: $\Delta\delta_1$ 、 $\Delta\delta_2$ ——裂隙中点和端点由于灌浆压力水头 Δh 引起的变形量; E 、 μ ——岩体弹模和泊松系数; l ——裂隙长度; ρ ——浆液密度; g ——重力加速度。

式(3)(4)构成了裂隙岩体灌浆控制方程。

若考虑 $\gamma(t) = \alpha e^{\beta t}$,其中 α 和 β 为由浆液性质决定的待定常数,利用式(3)还可研究黏时变浆液在裂隙岩体中的流动规律。

根据以上结论,笔者编制了平面随机裂隙岩体灌浆数值模拟程序,程序流程如图1所示。

3 算 例

图2为某坝址区岩体裂隙网络,图中粗线段*AB*为深10 m的灌浆孔。假定左右两侧节点为出浆点,压力为0 MPa。主要灌浆参数:整个灌浆孔段灌浆压力为2 MPa,浆液密度 $\rho = 1.5 \times 10^3\text{ kg/m}^3$,运动黏度 $\nu = 0.023\ 3\text{ m}^2/\text{s}$,储水系数 $s_i = 0.3$,浆液初始剪切 $\tau_0 = 14\text{ Pa}$,整个灌浆时间为600 s。

计算分2种工况,第1种工况是将整个灌浆时间600 s平均分成10个时步,不考虑裂隙面的变形;第2种工况也是将整个灌浆时间600 s平均分成10个时步,但考虑裂隙变形和灌浆的相互影响。限于篇幅,只给出这2种工况最后一个时步分别不考虑和考虑裂隙变形情况下节点灌浆压力等值线图(图3)。

计算结果表明,在灌浆初始阶段,浆液只分布在灌浆孔两侧附近。但是随着灌浆的进行,浆液便沿着裂隙网络交叉渗透,逐渐深入。裂隙随机分布、相互交叉的这种网络特征极大地影响了浆液渗透特性。从图3可以看出,尽管已经灌浆600 s,但局部区域节点灌浆压力还是0。其原因是这些节点所处裂隙都是孤立的,不直接与灌浆孔相连,或没有间接通过其他裂隙与灌浆孔相连,不是浆液渗透路径。可见,要想取得良好的灌浆效果,灌浆前必须精心地进行地质条件勘察,了解被灌区域岩体裂隙分布特

图1 程序流程
Fig.1 Flow chart
of program

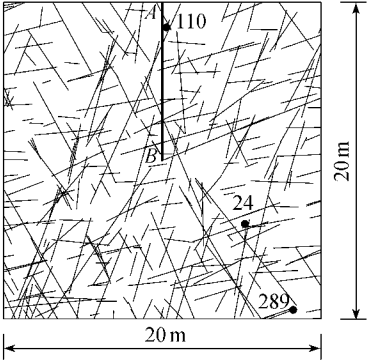


图2 岩体裂隙网络
Fig.2 Fracture network of rock mass

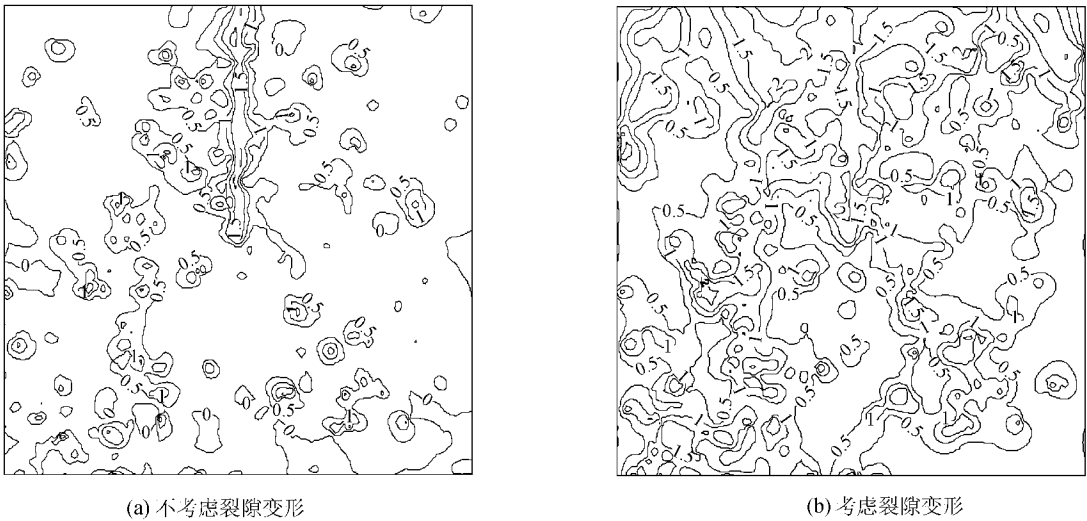


图 3 灌浆 600 s 时节点压力等值线(单位 :MPa)
Fig.3 Contour of nodal pressure for $t = 600\text{ s}$ (unit :MPa)

征 ,合理布置灌浆孔。

从图 3 可以看出 ,考虑由于灌浆压力导致裂隙面变形的情况下 ,浆液渗透速度较快 ,渗透范围也更广 .为直观地反映裂隙面变形对浆液流动的影响 ,以 24 号和 110 号节点为例 (节点位置见图 2) 给出考虑裂隙面变形前后节点压力随灌浆时间变化的对比图 (图 4) .从图 4 可以看出 ,离灌浆孔越近的节点 ,节点压力越大 ,考虑裂隙面变形时的节点灌浆压力要大于不考虑裂隙面变形时的节点灌浆压力 ;节点灌浆压力逐渐趋于稳定 ,节点压力曲线呈幂函数图形 .289 号节点是孤点 ,不论是否考虑裂隙变形 ,其压力总是 0 .这些都与实际岩体灌浆特征相符合 .

从图 5 可以看出 ,若考虑裂隙变形 ,灌浆初始阶段灌浆量增多 ,但衰减快 ,意味着将更快结束灌浆 ;另外 ,灌浆量随时间递减 ,这主要是由于浆液的黏度较大所致 .根据上述特性 ,若不考虑裂隙变形和灌浆的相互影响 ,完全灌浆时间大致要 900 s ,否则灌浆时间只需 720 s .计算表明 ,灌浆到 600 s 时 ,若不考虑裂隙变形影响 ,总灌浆量为 76.2 t ,否则总灌浆量为 79 t .

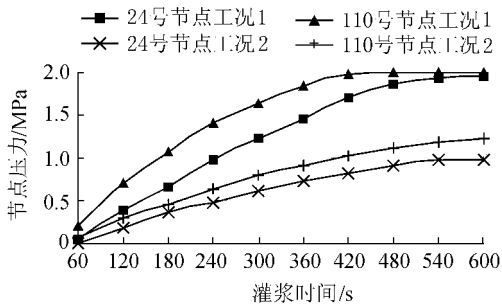


图 4 第 24 号和 110 号节点的节点压力时程对比
Fig.4 Comparison between nodal pressures at
Node 24 and Node 110

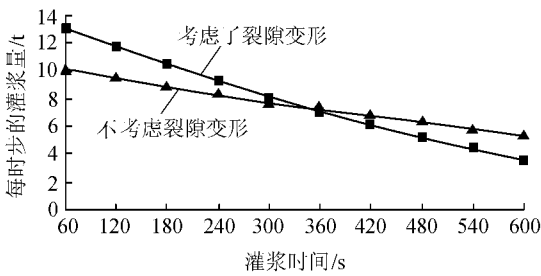


图 5 计算时步灌浆量随时间的变化
Fig.5 Change of grout quantity
for each time step

4 结 论

a. 二维随机裂隙岩体灌浆数值模型能实时地反映灌浆进程以及浆液在裂隙网络中的流动规律 .通过该模型能计算出特定时刻需要的灌浆量和浆液渗透范围 ,也可以计算出灌注一定灌浆量或某个位置节点达到一定压力所需要的时间 .

b. 二维随机裂隙岩体灌浆数值模型可以模拟黏时变浆液在岩体裂隙内的流动 ,还可以优化灌浆孔的方位 .

c. 岩体裂隙随机分布、相互交叉的网络特征 ,对浆液渗透特性有一定的影响 .若不考虑裂隙扩展延伸 ,

浆液总是沿着相互连接并与灌浆孔相连的裂隙流动,可见不能用通常的灌浆半径来反映浆液渗透范围,要想取得良好的灌浆效果,灌浆前必须认真进行地质条件勘察,了解被灌区域岩体裂隙分布特征,合理布置灌浆孔。

d. 计算时步的灌浆量是随灌浆时间递减的,若考虑裂隙变形与灌浆的相互影响,则衰减速度更快,因此可估计出结束灌浆的时间,节点灌浆压力随时间递增,并逐步趋于稳定。

参考文献:

- [1] HASSLER L, HAKANSSON U, STILLE H. 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[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 727-730.
- [3] 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.
- [4] 朱文彬. 节理网络模拟研究及其初步应用[J]. 矿冶工程, 1992, 12(3): 1-4.
- [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.
- [6] BINGHAM C. Distribution on the sphere and on the projective plan[D]. Connecticut: Yale University, 1964.
- [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]. Int J Rock Mech Min Sci and Geomech Abstr, 1983, 20: 73-89.

Two-dimensional numerical simulation of grouting in random fractured rock mass

LUO Ping-ping^{1,2}, ZHU Yue-ming², HUANG Jin-gui³, LI Ai-min²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. School of Architecture & Architectural Engineering, Nanchang University, Nanchang 330047, China;

3. Shanghai Branch, CNADRI, Shanghai 200233, China)

Abstract Based on the former research, a seepage model for Binghamian grouts flowing in random fracture network was developed, and the Monte-Carlo method was used to generate the fracture network. The study of the seepage law of Binghamian grouts in the fracture network and the influence of fracture deformation on grouting shows that the model may help to predict the seepage state of grouts, to adjust the grouting parameters, and to improve the quality of grouting.

Key words seepage; grouting; jointed rock mass; numerical simulation; fracture network