

岩体三维不连续裂隙网络及其逆建模方法

于青春¹, 大西有三²

(1. 日本筑波软件工程公司; 2. 日本京都大学土木工程系)

摘要: 通过拟合实测的二维裂隙编录图和钻孔裂隙编录图, 优化裂隙三维大小和密度参数, 使模型能够准确再现野外所观测到的实际现象, 包括开挖面和钻孔上不同裂隙的数量、密度和长度. 通过计算实例验证了方法的可行性.

关键词: 裂隙网络; 逆方法; 模型.

中图分类号: P641.2 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2003)05-0522-05

作者简介: 于青春(1963—), 男, 教授, 主要从事裂隙岩体块体理论、非连续渗流及物质迁移和计算机应用方面的研究. E-mail: qingchunyu@hotmail.com

0 引言

裂隙是岩体中的软弱结构面, 同时也是地下水等流体的通道, 是控制岩体力学特征的最重要的因素. 正确地把握、描述岩体中的裂隙网络是建立可靠的岩体力学及渗流力学模型的基础. 建立岩体裂隙网络的数学模型需要对岩体中的每个裂隙的几何参数进行数学描述, 包括每个裂隙的空间位置、方向、形状、大小等. 通常即使在很小的范围内, 实际存在的裂隙数也非常巨大, 而能够通过天然露头、人工开挖、钻孔等手段进行观察测量的只是其中的一小部分. 因此, 在对岩体中的裂隙进行数字化描述时, 一般只能把裂隙的几何参数处理为随机变量, 建立随机的裂隙网络模型.

建立三维裂隙网络模型的最大困难之一是如何解决一维、二维观测数据和三维参数的矛盾. 其中有 2 个问题, 一是如何利用钻孔(或测线)上的一维裂隙密度和露头(天然或人工)上的二维裂隙密度正确地计算裂隙在三维空间中的密度(即单位体积岩体中裂隙的个数); 另一个是如何利用露头上裂隙迹线的长度观测数据计算裂隙面的三维大小. 本文主要讨论前人在解决上述 2 个问题的方法中存在的问题, 并提出了自己的方法, 即逆建模方法.

1 裂隙的空间位置和密度

最常用于描述裂隙三维空间位置分布的模型是 Poisson 过程. 在 Poisson 模型中, 每个裂隙的产生是独立的, 裂隙中心的空间坐标由一个均匀分布函数产生, 不考虑在其之前发生的裂隙的坐标分布. 所产生裂隙的多少只由一个参数控制, 这个参数规定单位体积岩体内裂隙的个数.

目前已存在一些考虑裂隙空间位置关系的模型, 如母子模型^[1]等. 这些考虑不同大小级别裂隙空间位置关系的模型对野外观测数据的要求都很高, 目前还很难用于实际的岩体力学及渗流力学模型中. 本文假设一个裂隙网络由少数确定性大裂隙和大量的随机性小裂隙构成, 确定性大裂隙指那些具有特殊重要性, 其位置、方向、形状等已经能够通过某些观测手段进行确定; 随机性小裂隙的空间分布可以用 Poisson 过程进行描述.

要模拟岩体的裂隙, 首先必须确定一定岩体体积中裂隙的个数. 因此裂隙密度是一个必不可少的参数. 本研究中有 3 个密度参数, 即一维密度(d_1), 二维密度(d_2)和三维密度(d_3). 其中 d_1 指沿裂隙平均单位矢量方向的钻孔上的单位长度上裂隙的个数; d_2 指二维露头上单位面积范围内裂隙迹线的条数; d_3 指单位体积岩体内裂隙面的枚数(对圆盘形裂隙即裂隙面中心的个数). 3 个密度参数中 d_1 和 d_2 为现场观测数据, d_3 必须由 d_1 和 d_2 推出. 由于

岩体中裂隙数量直接由 d_3 决定,因此 d_3 具有特殊的意义。

关于 d_3 的推算方法,Cacas 等^[2]曾使用了如下关系式

$$SD=2f. \quad (1)$$

式中, S 为裂隙的平均面积, D 为三维密度, f 为岩心上裂隙的频度(即视密度)。

很明显,上式为一经验公式,只适合某一特殊岩体。美国岩石力学委员会^[3]曾建议一个简单的估算公式

$$N_l = N_v A \cos\theta. \quad (2)$$

式中, N_l 为测线或钻孔上裂隙的频度, N_v 为三维密度, A 为裂隙平均面积, θ 为裂隙平均矢量方向与测线方向的夹角。基于这一关系式,如假设裂隙的形状为圆盘形,可以容易地证明 d_1 与 d_3 的关系为

$$d_3 = 4d_1/\pi E(D^2). \quad (3)$$

上式中 $E(D^2)$ 为裂隙圆盘直径平方的均值。

Kulatilake 等^[4]曾采用了与上式稍微不同的关系式

$$d_3 = 4d_1/\pi E(D^2)E(|\mathbf{n} \cdot \mathbf{i}|). \quad (4)$$

式中, \mathbf{n} 为裂隙个体的单位矢量, \mathbf{i} 为某组裂隙的平均单位矢量(请注意裂隙参数的统计是分裂隙组进行的)。

在 Poisson 模型中,如果模拟范围内岩体体积为 V ,第 i 组裂隙的三维密度为 d_3^i ,则模拟产生的裂隙数 N 为

$$N = V \sum d_3^i. \quad (5)$$

利用关系式(1),(3)或(4)对裂隙进行模拟后,如果我们再就模拟的裂隙网络进行检查,统计其一维密度 d_1 ,就会发现模拟的裂隙网络的 d_1 与实际观测的 d_1 在多数情况下都会相差甚远。笔者认为产生上述现象的原因主要包括下面几点:(1)上述关系式中均严格假设裂隙是圆盘形,实际情况不会如此。因此使用上述关系式时需要一定的修正。(2)上述关系式中都只考虑了裂隙面积和方向的平均值。实际上,三维密度不只取决于面积和方向的平均值,也受分布形状的影响。(3)上述关系式中的裂隙直径也是通过某个解析式,依据露头上的裂隙迹线统计数据推出的,其本身也会存在一定的误差。

为了克服上述困难,使模型能够产生与野外统计相一致的结果,也即使模型能够再现野外实际所观察到的现象,本文提出逆建模方法。也就是先通过

解析式算出(也可根据经验猜测出)直径分布参数的初始值,然后把模型的结果与实际的露头及钻孔裂隙数据对比,循环改进模型参数,直到模型的结果与实际观测数据一致为止。

关于对裂隙数的推算,本文建议对(5)式进行修正,增加一个无量纲修正参数 C_i ,即计算裂隙的数量使用下式

$$N = \sum \frac{4VC_i d_1^i}{\pi E(D_i^2)}. \quad (6)$$

C_i 为一校正参数,即通过逆方法对模型进行校正后确定的参数。在本文研究的逆建模过程中,将通过 C_i 和裂隙直径参数的优化,使模型产生的裂隙网络具有与观测相一致的裂隙迹线长度和一维裂隙密度。

一般来讲,一个二维露头往往能够比一维的测线或钻孔提供更多的信息,似乎我们没有理由把露头上的二维数据弃置不用。对一个具体的实际工程也往往是既有一些钻孔岩心的观测数据,也有一些开挖面的裂隙编录图,在这种情况下本文建议同时使用裂隙编录图和钻孔数据对裂隙的数量进行估算,即

$$N = \sum C_i \cdot d_2^i \cdot V \cdot f_1^i. \quad (7)$$

式中: C_i (无量纲)为一个校正参数; f_1^i (量纲 1/L)为第 i 组裂隙在钻孔上出现的频度; V 为岩体体积; d_2^i 为这 i 组裂隙的二维密度(量纲 1/L²)。

2 裂隙分组和方向性

岩体中裂隙的方向,既不会很有规律也不会纯粹地杂乱无章。通常在一个露头上观察到的裂隙会近似平行 3~5 个平面。那些方向比较接近的裂隙被划分为一组。本研究的裂隙调查和统计是按组进行的,而裂隙的分组是按其方向性进行的。

描述一组裂隙方向的随机分布可采用 Fisher 分布、Bingham 分布、Bivariate Fisher 分布、Bivariate Bingham 分布等。下面以 Fisher 分布为例进行讨论,其他分布请参考文献^[5]。

Fisher 分布是描述裂隙方向性的最常用形式。如图 1 所示,一个裂隙的方向可用其平面的单位法线矢量 OP 代表。设 θ 为 Z 坐标轴与 OP 沿顺时针方向的夹角, φ 为 X 轴与 ON 沿逆时针方向的夹角(N 为 P 点在 XOY 平面上的投影)。

对某组裂隙,若设其平均单位矢量的坐标为 $(\bar{\theta}, \bar{\varphi})$,在 Z 坐标轴旋转到 $(\bar{\theta}^*, \bar{\varphi}^*)$ 后,新坐标系 (θ^*, φ^*)

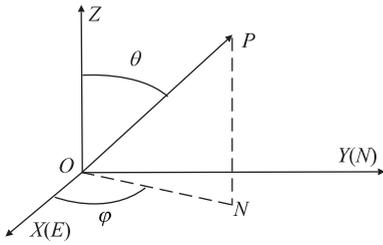


图 1 裂隙面单位矢量坐标

Fig. 1 Coordinate system of a fracture unit normal

φ^*)下描述这组裂隙单位矢量分布的 Fisher 分布函数有下面简单形式:

$$f_{\kappa}(\theta^*) = \frac{\kappa \sin \theta^*}{2 \sin h \kappa} e^{\kappa \cos \theta^*}, 0 \leq \theta^* \leq \pi, \kappa \geq 0,$$

$$f(\varphi^*) = 1/2\pi, 0 \leq \varphi^* \leq 2\pi. \quad (8)$$

地质学中,裂隙方向一般用倾向和倾角(α, β)表示,而非(θ, φ).图 1 中如果令 X 轴向东, Y 轴向北, (θ, φ)与(α, β)有如下关系:

$$\varphi = 2\pi - (\alpha - \pi/2), \theta = \beta. \quad (9)$$

Fisher 分布只由一个参数 κ 控制. κ 为一集中程度参数,若 $\kappa=0$,裂隙在极点投影图上均匀分布. κ 的值越大,裂隙在极点图上越集中于平均方向.产生(或随机模拟)一组具有 Fisher 分布的裂隙,包括以下步骤:(1)根据裂隙的平均倾向和倾角,利用(9)式计算($\bar{\theta}, \bar{\varphi}$).(2)用蒙特卡洛法产生服从 Fisher 分布的数据对(θ_i^*, φ_i^*), $i=1, 2, 3, \dots, N$ (N 为裂隙个数). θ^* 和 φ^* 2个随机数分别独立产生.(3)把坐标系旋转回旧坐标系,计算(θ_i, φ_i).在旧坐标系中, X 轴向东, Y 轴向北, Z 轴朝上.(4)利用(9)把极点坐标(θ_i, φ_i)转换成倾向和倾角.

3 裂隙的三维形状和大小

要建立三维裂隙网络模型,裂隙个体的三维形状及空间延展性是不可避免的问题.裂隙个体曾被前人假设为圆盘形、椭圆形和多边形.哪种形状更接近于实际的岩体情况目前尚无定论.单从建立三维模型的角度上讲,椭圆形和多边形由于含有更多的参数,在“拟合”野外岩体裂隙时更具灵活性.但从工程应用的角度考虑,很难利用野外数据确定这些参数.因此本文采用圆盘模型.

野外条件下无法直接统计裂隙在三维空间上的大小分布.如果假设裂隙为圆盘形,可以推出裂隙面半径的分布与裂隙迹线长度分布的解析关系式,然

后利用这一关系式,由迹线长度的分布形式、均值、方差推出裂隙直径(或半径)的分布形式、均值和方差.但这种方法存在 2 个问题,一是尽管迹线长度为一简单的指数、对数正态分布形式,所推出的直径分布也仍为一个复杂的不可积分形式,在进行蒙特卡洛模拟时不易使用.另一个问题是由于野外观测条件的限制,很难对迹线长度进行较准确的统计.如许多工程都是通过地下勘探平硐的手段对岩体裂隙进行调查的,这些平硐的高度通常只有 1~2 m,这种情况下得到的裂隙长度要比实际裂隙长度偏小,因此要对统计结果进行校正.受直接解析法的限制,一般又很难对校正进行检验和迭代改进.在本研究的逆建模方法中,不对裂隙迹线长度数据进行校正,而是对模型和实际岩体进行同样条件下的抽样统计,通过逆方法令模型拟合实际观测数据.也就是说通过逆方法循环改进裂隙直径的分布参数,直到模型能再现野外实际测到的露头 and 钻孔裂隙编录图.

4 裂隙网络的模拟过程

4.1 输入数据

建立裂隙网络模型的第一步是确立裂隙网络中裂隙的几何参数.本文的方法中需根据野外数据得到如下参数:裂隙的组数、各组裂隙方向的分布形式和分布参数、各组裂隙的一维密度(或一维视密度)、各组裂隙的二维密度及各组裂隙迹线长度的分布形式、均值和方差,裂隙数据来源的露头及钻孔的空间位置和形状.

裂隙分组通常是首先整理露头 and 钻孔上的裂隙方向数据,作出吴氏网或施密特网极点图,然后用手工或自动方法将裂隙分组,同时确定各组裂隙的平均方向.最后选择一个适当的分布函数去拟合极点分布以确定分布函数中的未知参数,如 Fisher 分布的 κ 等.一维密度可用钻孔编录图求出,也可用测线法获得.直接用钻孔(或测线)上的裂隙数与钻孔(测线)长度之比得到的密度总是比裂隙真正的一维密度偏小.要得到真正的一维密度需要进行方向校正,本文的方法可直接使用视密度.确定裂隙迹线长度的分布需对某些代表性露头进行详细的裂隙编录及统计,作出长度分布直方图,进而确定分布形式、均值、方差.由于本文的方法要对模拟产生的裂隙进行野外相同条件下的取样,因此需要裂隙观测露头面和钻孔的坐标数据.

4.2 裂隙网络模拟过程

裂隙网络由某些确定性的大裂隙和大量的随机小裂隙组成。确定性裂隙的位置、方向、大小等可进行直接测量, 不需要进行随机模拟, 直接作为输入读入即可。图 2 为随机裂隙的模拟过程流程图。

模拟流程中以下几点需要注意: (1) 裂隙直径的均值和标准差用猜测值进行初始化, 如可采用迹线长度的均值和标准差。(2) 参数 C_i 的初始值可设为 1.0。为避免边界效应, 裂隙产生的范围要比实际的研究范围稍大。(3) 对模拟裂隙进行抽样统计时, 抽样条件要与野外相一致。即抽样面要与野外露头在大小、方向、形状上相同; 每个钻孔的长度与方向要与野外相同。(4) 在拟合野外数据时考虑如下各参数: ① 露头上裂隙迹线的平均值和标准差; ② 钻孔和测线上的一维视密度; ③ 露头上裂隙的二维密度。

本文的逆方法采用了下山法^[6], 目标函数为方程 (10) (若不拟合实测钻孔, 令目标函数中 $d_1^{i,c} = d_1^{i,m}$):

$$f = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{u_i^c - u_i^m}{u_i^m} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_i^c - \sigma_i^m}{\sigma_i^m} \right)^2 + \left(\frac{d_1^{i,c} - d_1^{i,m}}{d_1^{i,m}} \right)^2 + \left(\frac{d_2^{i,c} - d_2^{i,m}}{d_2^{i,m}} \right)^2 \right]. \quad (10)$$

式中, n 为裂隙组数; u_i^c, u_i^m 分别为第 i 组模拟和实测裂隙的迹线长的平均值; σ_i^c, σ_i^m 分别为第 i 组模拟和实测裂隙的迹线长的标准差; $d_1^{i,c}, d_1^{i,m}$ 分别为第 i 组模拟和实测裂隙的迹线长的一维视密度; $d_2^{i,c}, d_2^{i,m}$ 分别为第 i 组模拟和实测裂隙的迹线长的二维密度。

公式 (10) 的使用条件是假设只拟合一个实测露

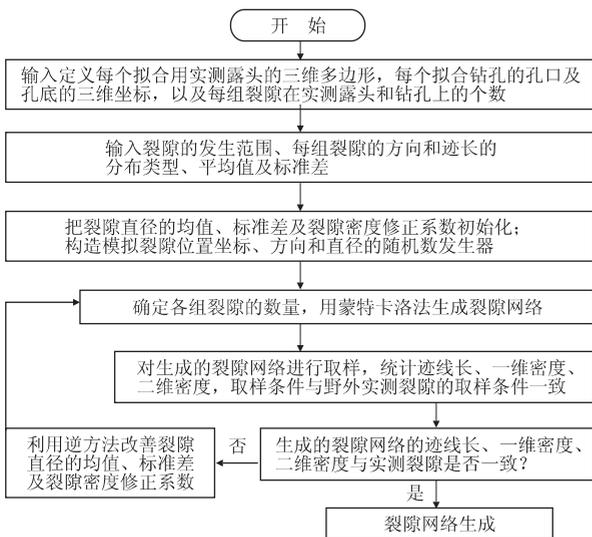


图 2 裂隙网络模拟过程流程

Fig. 2 Flowchart of fracture network simulation

头, 且所有钻孔方向相同。如果要拟合多个实测面, 或存在多个方向钻孔, 只需对不同露头面或不同方向钻孔分别用 (10) 式计算目标函数, 然后对目标函数简单求和即可。

5 应用实例

为了研究地下深处岩体的力学特征, 日本核动力集团在釜石矿山地下进行了各种试验。此矿山为一已废弃的铁矿矿山, 位于日本东北部太平洋岸边, 现在被用作地下核废料研究试验场, 其中有一项实验为竖井入渗试验。竖井周围 160 m² 的开挖面被详细编录 (图 3); 施工了 7 个孔内电视钻孔 (KBH₁—KBH₇, 每个孔深度 8.0 m)。在开挖面上发现了 613 条裂隙, 7 个钻孔揭露了 227 条裂隙。被编录的裂隙及钻孔的位置如图 3 所示。

实测数据的统计整理表明, 研究岩体的裂隙可分为 3 组, 裂隙的方向服从 Fisher 分布, 裂隙迹线长满足对数正态分布。表 1 为实测裂隙的整理结果。表 2 为开挖面和钻孔上的模拟裂隙数、裂隙迹线长、优化参数及优化后得到的三维密度。图 4 为模拟产生的裂隙网络。

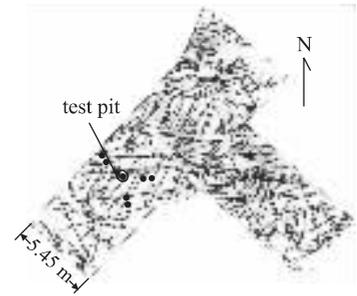


图 3 竖井周围编录裂隙 (黑点为钻孔位置)

Fig. 3 Mapped fractures around the test pits

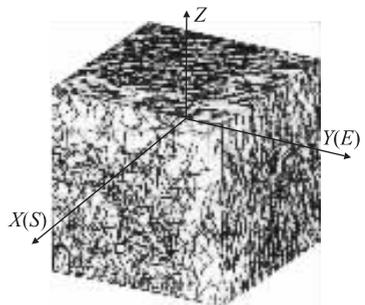


图 4 模拟三维裂隙网络 (20 m × 20 m × 20 m)

Fig. 4 Simulated 3-D fracture network

表 1 开挖面和钻孔上实测裂隙数、裂隙方向和裂隙迹线长

Table 1 Numbers, directions and trace lengths of measured fractures on outcrops and bore-holes

组别	裂隙数/条		裂隙方向		迹线			
	$S/(160\text{ m}^2)$	钻孔/ $(7\times 8.0\text{ m})$	$\bar{\alpha}/(^{\circ})$	$\bar{\beta}/(^{\circ})$	Fisher 分布 κ	分布形式	u/m	σ/m
1	474	93	337.7	78.0	7.38	对数正态	1.26	1.00
2	118	46	55.8	63.1	5.95	对数正态	1.09	0.73
3	21	88	240.6	24.3	5.73	对数正态	1.22	0.68

S. 开挖面; $\bar{\alpha}$. 平均倾向; $\bar{\beta}$. 平均倾角; u . 平均值; σ . 标准差.

表 2 开挖面和钻孔上的模拟裂隙数、迹线长、优化参数和三维密度

Table 2 Numbers, trace lengths, optimized parameters and three dimension densities of simulated fractures on outcrops and bore-holes

组别	裂隙数/条		迹线			优化参数			d_3/m^{-3}
	$S/160\text{ m}^2$	钻孔/ $(7\times 0.8\text{ m})$	u_1/m	σ_1/m	分布形式	C_i	u_2/m	σ_2/m	
1	512	91	1.27	0.81	对数正态	0.72	1.22	0.31	3.519
2	111	49	1.08	0.70	对数正态	0.72	1.68	0.35	0.442
3	18	86	1.29	0.68	对数正态	0.73	1.89	0.14	0.150

S. 开挖面; u_1 . 迹线长平均值; σ_1 . 迹线长方差; C_i . 校正参数; u_2 . 裂隙直径平均值; σ_2 . 裂隙直径方差; d_3 . 裂隙三维密度; $\sum d_3 = 4.111\text{ m}^{-3}$.

6 结语

模拟三维裂隙网络首先必须确定的 2 个参数是裂隙的三维大小和三维密度. 这 2 个参数都无法直接观测统计, 目前一般的作法首先用露头上迹线长度数据推出裂隙三维大小. 然后将其作为已知数, 利用其平均值再结合钻孔和测线上得到的一维密度计算出单位体积岩体内裂隙存在的数量, 进而确定模型范围内应该产生的裂隙个数. 这种简单的一步到位的直接法所建立的模型一般不能再现野外实际现象. 本文的逆建模方法首先把直接解法的结果作为初始值(也可以据判断给出粗略的初始值), 再通过优化方法对模型进行校正, 直到模型能够准确再现野外实际观测, 包括实测露头及钻孔上不同方向裂隙的数量、密度及迹线长度. 笔者开发了相应的计算机程序, 并用实例验证了方法的可行性. 理论上讲, 随机模型需要反复实验来检验其稳定性. 笔者曾证明本文的模型是稳定的, 感兴趣的读者请参考文献[5].

参考文献:

[1] Long J C S, Billaux D M. From filed data to fracture

network modeling: An example incorporating spatial structure [J]. Water Resource Research, 1987, 23(7): 1201—1206.

- [2] Cacas M C E, Ledoux G, Marsily B, et al. Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: Calibration and validation, 1. the flow model [J]. Water Resources Research, 1990, 26: 479—489.
- [3] National Research Council. Rock fracture and fluid flow: Contemporary understanding and applications [M]. Washington DC: National Academy Press, 1996.
- [4] Kulatilake P H S W, Wathugala D N M, Stephansson O. Joint network modeling with a validation exercise in strip mine, Sweden(Abstracts) [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomech, 1993, 30: 503—526.
- [5] Yu Q. Analysis for fluid flow and solute transport in discrete fracture network [D]. Kyoto: Kyoto University, 2000.
- [6] Pressn W H, Flannery B P, Teukolsky S A, et al. Numerical recipes, the art of scientific computing (FORTRAN version) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.

(下转 544 页)