

文章编号: 1000-7598-(2007) 增刊-0187-05

裂隙岩体的多孔介质水力等效性研究

王环玲¹, 何淼², 徐卫亚³

(1. 河海大学 交通、海洋学院, 南京 210098; 2. 江苏省交通科学研究院, 南京 210017; 3. 河海大学 岩土工程研究所, 南京 210098)

摘要: 工程岩体中数量众多的裂隙面限制了离散裂隙网络模型在岩体渗流中的应用, 迫使人们寻找能够用理论上成熟的等效连续介质模型替代, 这就要求进行岩体多孔介质的水力等效性研究。在野外大量实测裂隙的基础上, 进行裂隙密度、方位、大小、延续性、开度等几何参数的统计分析, 以 Enhanced Baecher 模型建立离散裂隙网络随机模型, 采用 Monte-Carlo 随机模拟方法进行三维裂隙网络随机模拟。在所生成的一定尺度的三维裂隙网络图基础上, 给出计算研究域 REV 的方法, 通过判断 REV 是否存在, 确定能否用等效连续介质模型分析岩体渗流。

关键词: 裂隙岩体; 多孔介质; 水力等效性; 三维裂隙网络; Monte Carlo 模拟
中图分类号: TU 452 **文献标识码:** A

Research on porous medium hydraulic equivalence of fracture rock mass

WANG Huan-ling¹, HE Miao², XU Wei-ya³

(1. College of Traffic, College of Ocean, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Transportation Research Institute, Nanjing 210017, China; 3. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The discrete fracture network model is confined in the application of rock mass seepage because of the numerous discontinuities in engineering rock mass. This makes investigators search mature equivalent continuum medium model in theory substitute the discrete fracture network model. Thus the research on porous medium hydraulic equivalence of fracture rock mass is necessary. Based on plenty of field measured fracture data, a statistical analysis about fracture density, azimuth, size, continuity, jaw opening is made, the random model of discrete fracture network is established on Enhanced Baecher model. The Monte Carlo random simulation is used in fracture network random simulation, thus the three-dimensional discrete fracture network figure of different dimension is obtained. On the basis of the three-dimensional discrete fracture network the REV is calculated, the equivalent continuum medium model can be analytical rock mass seepage.

Key words: fracture rock mass; porous medium; hydraulic equivalence; 3-D fracture network; Monte Carlo simulation

1 概述

目前, 研究裂隙岩体渗流的数学模型主要有三种, 即等效连续介质模型、离散裂隙网络模型以及混合模型。对岩体来说, 最主要的特征就是具有裂隙性, 如果避开岩体的裂隙性而谈其渗流特性则有失偏颇, 因为裂隙是岩体渗流的主要通道, 同多孔介质渗流相比, 裂隙岩体渗流的最明显特性就是有强烈的非均质性和各向异性。因此, 用离散裂隙网络模型描述岩体渗流是再合适不过了, 其模型本身认为岩块不透水, 整个地下水运动是通过裂隙网络来实现的。但是在工程岩体中数量众多的裂隙面限

制了它的使用, 建立离散裂隙网络数学模型, 就要弄清楚每条裂隙的几何参数特征(裂隙的迹长、隙宽、间距、密度等)以及裂隙之间的水量交换。裂隙的分布具有随机性, 统计如此之多的裂隙, 其工作量是非常大的, 虽然裂隙网络模拟生成技术在解决这一难题上取得了一定进展, 但计算裂隙间的水量交换则是非常困难的。另外, 对岩体非饱和渗流的研究是目前的前沿课题, 对非饱和渗流, 岩块的非饱和渗透系数与裂隙的非饱和渗透系数相比一般是不可忽略的^[1, 2], 否则会导致该模型拟真性的降低, 因为其忽略了岩块的渗透性。鉴于这些原因, 迫使研究者寻找能够用理论上成熟的等效连续介质方法

收稿日期: 2007-05-31

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(No. 2002CB412707), 国家自然科学基金(No. 50128908)联合资助。

作者简介: 王环玲, 女, 1976年生, 博士, 讲师, 主要从事岩石力学与工程方面的研究。E-mail: whl_hm@163.com

替代。等效连续介质模型是将裂隙中的水流等效平均到整个岩体中,将裂隙岩体模拟为具有对称渗透张量的各向异性连续体,此模型由于可以利用比较成熟的连续介质理论来进行分析,所以应用比较广泛。但问题在于该模型不是适合于所有工程,在某些情况下采用等效连续介质模型分析所得到的渗流状态与实际有很大差别。因此,就有这样的问题需要解决,亦即裂隙岩体渗流的水力等效连续介质的存在性以及有那些具体指标和准则是判断等效连续介质模型有效性的依据。

裂隙岩体是否存在水力等效连续介质以及连续介质中的物理量和参数,文献[3]建立了渗流等效连续介质存在性判别的二维数值模拟试验方法。文献[4]依据结构面的几何特征和水力特征,建立了裂隙岩体水力等效连续介质存在性的二维评价方法。这些研究都在一定程度上验证了岩体水力等效连续介质的存在性和必要性。

本文基于统计学方法,在大量野外实测裂隙基础上,应用随机 Monte-Carlo 模拟技术模拟出三维离散裂隙网络,在裂隙网络模拟基础上给出计算研究区的样本体积(REV)的方法,通过判断 REV 的大小来确定是否可以采用等效连续介质模型,以便为裂隙岩体渗流计算选择简便、合理的数学模型。

2 Enhanced Baecher 模型

模拟岩体的裂隙网络,需要给定研究域中所有有效裂隙的几何参数。这给离散裂隙网络的模拟带来了较大的难度,但如果能在野外实测统计出大量的裂隙,对该离散裂隙网络的模拟还是比较容易实现的。进行三维裂隙网络模拟,确定裂隙面的形态十分重要,由于对裂隙的形成机制还不是很清楚,观察资料相对较少以及为了简化计算等原因,多数研究者把裂隙面简化为圆形、椭圆形和多边形等,其厚度忽略不计。本文采用 Enhanced Baecher 模型进行裂隙网络模拟。

Enhanced Baecher 模型(Dershowitz 1988年)^[5]是 Baecher 模型的扩展,主要考虑了裂隙的终结和更全面的裂隙形状。该模型考虑了裂隙的形状,认为裂隙是 3~20 边的多边形,这些多边形可以是等边的或者边长是可以延伸的,伸长度由应用者根据纵横比来定义^[6]。多边形裂隙的假设更加逼真和有效,它可以用一个单一的数学模型来近似地表征一个变化的裂隙形状。从裂隙的力学性质方面考虑,对均质岩石中的单个孤立裂隙形状应该是椭圆的,正如 Baecher(1977年)模型的假设。但是,岩石通常是非

均质的,绝对的椭圆形裂隙几乎是不存在的。在实际应用中,用具有相同面积的多边形裂隙代替椭圆形裂隙也很少出现错误。

对 Enhanced Baecher 模型,先在空间生成裂隙中点,随后生成的裂隙与先生成的裂隙在空间不断相交并扩展。所有的裂隙在空间从中心点开始以均一概率进行分布。对每一个裂隙,此模型会检查裂隙是否和先前生成的裂隙相互交叉,如有交叉,将根据“终结概率”来决定裂隙是否终结^[6]。如果裂隙终结时,超出交叉部位的那部分裂隙将丢弃不要。

Enhanced Baecher 模型同样需要给出统计的裂隙几何参数。岩体在经历了复杂的地质作用后,呈现各种产状的结构面,这些结构面看似杂乱无章,但经过统计研究,发现在某几个产状附近出现优势集中。这样可对裂隙进行优势分组。每组结构面的几何参数(如迹长、间距、开度等)也服从一定的分布规律,并不是完全随机、无规律可言。下面是 Enhanced Baecher 模型所需要的几何参数。

2.1 裂隙密度

裂隙密度是反映岩体破碎程度的基本测度之一。可以用线密度、面密度和体积密度来表示。其中,体密度是表示裂隙密度方法中最重要的一种方法,它可由线密度和面密度进行换算得到。

2.2 裂隙方位

裂隙在空间的分布状态,用倾向 β 和倾角 α 来表示,裂隙的方位决定了裂隙介质地下水渗流的方向,同时还控制着岩体的破坏机制。裂隙的方位一般利用罗盘或测斜仪测量。当裂隙的规模较大,或者需要测量的裂隙数量较多,亦或裂隙在磁异常区而不宜使用磁针时,可以采用摄影测量法。裂隙面产状的测量,是研究裂隙岩体渗透的各向异性的重要指标,是渗透系数张量计算中一个重要的几何量。

裂隙产状常用的概率分布有: Fisher 分布、Bingham 分布、双变量正态分布、均匀分布等。Dershowitz 和 Einstein(1988)比较了各种来源的现场测量数据,得出结论认为 Fisher 分布和 Bingham 分布提供了相对较佳的拟合^[5]。

2.3 裂隙大小、延续性

裂隙大小是按照裂隙尖端被截止前的等效半径来定义的,等效半径是指和多边形面积相等的圆的半径,用下式表示,裂隙大小的分布是按其面积分布来确定。

$$A_f = \pi r_e^2 \quad (1)$$

式中: r_e 为等效的裂隙圆半径; A_f 为裂隙面积。

延续性是表征裂隙的展布范围和延伸长度，它是裂隙岩体很重要的特性之一。延续性在野外进行精确的定量是十分困难的。因为岩体的露头往往比延续的裂隙结构面面积或长度要小，这时真实的裂隙长度就只能进行估计。裂隙的延续性大多用迹长来描述，即测量裂隙在岩体露头上出露的长度。但是由于岩体露头的局限性，所测到的迹长有的是全迹长，有的是半迹长，有的是未见迹线两端点的被删节的部分迹长。因此，应根据野外露头上测量得到的迹长来推求出全迹长，可以采用延续裂隙的方法来预测。

2.4 裂隙开度

裂隙开度是指裂隙结构面相邻岩壁间的垂直距离，一般与岩性、结构面的粗糙度、充填程度以及所经历的变形历史等因素有关。裂隙的开度是表征裂隙渗透性最重要的几何参数之一。裂隙开度通常不大，一般为 mm 级，但也有特殊大的开度。野外常用塞尺测量裂隙的开度，但小的张开度用肉眼观测很困难，可以采用摄影图像法间接测量。

就单个裂隙而言，沿裂隙走向和倾向方向上裂隙的隙宽不是平直的。大量野外测量数据显示，单个裂隙系统的隙宽具有对数正态分布函数和负指数函数关系。本文由统计的直方图分析也得出是对数正态分布函数关系，因此，可以按对数正态分布来处理。

3 Monte-Carlo 模拟方法和过程

Monte-Carlo方法亦称为随机模拟方法，有时也称作随机抽样技术或统计试验方法。它的基本思想是，为了求解数学、物理、工程技术以及生产管理等方面的问题，首先建立一个概率模型或过程的观察或抽样试验来计算所求参数的统计特征，然后给出所求解的近似值。而解的精确度可用估计值的标准误差来表示。

统计出裂隙几何参数，利用Monte-Carlo方法模拟三维离散裂隙网络。生成三维离散裂隙网络的基本步骤如下：

(1) 定义一个裂隙网络所生成的空间。此空间坐标系为三维笛卡儿坐标系，它比实际研究域大，以避免边界效应影响。

(2) 对裂隙进行分组，确定每组裂隙的统计几何参数特征。根据裂隙统计的几何参数特征，建立起裂隙各几何参数的概率模型。

(3) 对每组裂隙，根据所建立起来的各几何参数的概率模型，应用Monte-Carlo方法进行模拟，通

过计算机生产随机数，进而产生符合上述裂隙分布规律模型的随机变量来模拟各组裂隙各要素：中心位置、产状、半径、开度。

(4) 求得所有裂隙之间以及裂隙和边界面之间的交线。

(5) 去掉Monte-Carlo模拟技术生成的裂隙网络中那些孤立裂隙、盲裂隙及构成封闭回路对导水没有意义的非连通裂隙。这步工作可在裂隙网络模拟的基础上，借助于计算机搜索方法搜索出一定范围内连通的裂隙网络图。

(6) 对模拟结果检验，如不符合原概率模型，则重新模拟。

(7) 输出经过检验过的图形和结果。

在本程序中，对特殊的裂隙，如断层和层间错动等，可以根据实际裂隙的展布情况直接给出其参数特征，不需要再进行模拟。

4 计算实例

以构皮滩水电站右岸雾雨区边坡为例，根据边坡平硐实测所得裂隙资料进行室内统计，确定裂隙的几何参数特征，进而应用Monte-Carlo模拟方法建立三维离散裂隙网络模型，并在裂隙网络模型的基础上进行岩体多孔介质的水力等效性分析。

裂隙面产状分布错综复杂，在计算中不可能把每条裂隙作为单个裂隙组处理，而首先要对已测得的所有裂隙面产状进行合理分组。本文用裂隙等密度图统计平硐优势裂隙组，并根据优势产状对裂隙面进行分组。表1、表2分别为边坡平硐I和平硐II的裂隙组数、每组裂隙个数、平均产状以及密度。

表1 平硐 I 裂隙优势组划分
Table 1 Predominant fractures partition of I region

裂隙优势组号	裂隙个数	平均倾向 /(°)	平均倾角 /(°)	裂隙密度 /m ⁻¹
1	197	46	71	0.353
2	107	73	69	0.162
3	103	21	75	0.154
4	98	130	68	0.144

表2 平硐 II 裂隙优势组划分
Table 2 Predominant fractures partition of II region

裂隙优势组号	裂隙个数	平均倾向 /(°)	平均倾角 /(°)	裂隙密度 /m ⁻¹
1	166	17	71	0.281
2	124	48.5	74.5	0.209
3	117	125	70	0.198
4	93	16	74	0.157

裂隙进行分组后，对每组裂隙计算其各参数的统计分布，见表3、表4。

表3 平硐 I 裂隙统计参数特征

Table 3 Statistical parameter characteristics of I region						
参数	统计值	组别				最佳概率分布
		1	2	3	4	
倾向/(°)	均值	46	73	21	130	Fisher分布
	标准差	3.2	2.7	2.1	3.2	
倾角/(°)	均值	71	69	75	68	Fisher分布
	标准差	3.1	2.6	3.4	3.1	
半径/m	均值	5.24	3.02	7.92	6.17	对数正态
	标准差	0.6	0.31	1.02	0.22	
隙宽/mm	均值	4.32	3.51	2.38	2.44	对数正态
	标准差	0.71	1.54	0.41	0.5	
迹长/m	均值	6.87	5.65	4.78	3.12	负指数
	标准差	0.05	0.24	0.15	0	

表4 平硐 II 裂隙统计参数特征

Table 4 Statistical parameter characteristics of II region						
参数	统计值	组别				最佳概率分布
		1	2	3	4	
倾向/(°)	均值	17	48.5	125	16	Fisher分布
	标准差	3.2	2.6	3.0	2.4	
倾角/(°)	均值	71	74.5	74	74	Fisher分布
	标准差	3.7	2.9	3.4	2.8	
半径/m	均值	6.43	6.62	5.04	7.39	对数正态
	标准差	0.6	1.1	0.82	1.48	
隙宽/mm	均值	5.65	4.76	2.2	3.86	对数正态
	标准差	0.2	2.1	1.3	1.5	
迹长/m	均值	6.58	6.12	4.97	5.25	负指数
	标准差	0.29	0.1	0.26	0.13	

由于事先不知道研究区域的REV是否存在或者存在REV的大小，分别以0，20，30，40，50 m等不同尺度作为试算的裂隙网络生成空间区域大小，用以进行裂隙岩体的多孔介质等效性的研究。根据上述表中的输入数据，应用Monte-Carlo模拟法生成两个平硐的三维裂隙网络图。图1和图2为模拟出的平硐 I 和 II 30 m尺度的裂隙网络图。

在实际工程应用当中，绝大部分大尺度研究并不需要详细了解每一条裂隙的渗流特征，而只需要得到总体的宏观结果。所以，随着一些大尺度研究课题的兴起，需要寻求出从离散裂隙模型向等效连续体模型转化的启点，这就要求能够证明可以定义一个等效多孔介质，其与真正的离散裂隙系统具有近似相同的渗流性质，这就需要计算岩体REV大小。

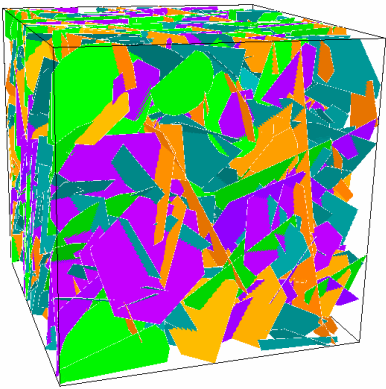


图1 平硐 I 30 m尺度的裂隙网络图
Fig.1 Fissured network of 30 m size in I region

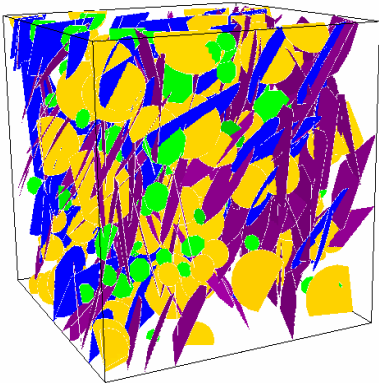


图2 平硐 II 30 m尺度的裂隙网络图
Fig.2 Fissured network of 30 m size in II region

5 REV大小估计

能否把裂隙岩体等效为均质各向异性介质，实际上有两个问题需要解决，一是均质等效性；二是各向异性等效性。能否把离散型的裂隙介质概化为等效的连续介质，需要说明所研究区域的 REV 是否存在。对于裂隙介质，如果在研究域内能够找到一个尺度，在这个尺度之上介质的平均渗透性不再有显著的变化，则这个尺度就可以作为 REV 的大小，在此尺度上的介质就可以被看作具有均质性。

本文以生成的裂隙网络作为研究 REV 大小的全区域。在全区域中，从其中心位置分别取出一系列不同尺度的正六面体作为计算域。对于每个计算域，分别在其 2 个相对的面上施加单位水头差，将另外 4 个面取为不透水边界条件，可以计算出其 3 对相对面间的流量，根据渗透系数和水力梯度的关系可以得到其 3 个方向上的平均渗透系数。这样，最后得到 3 组不同尺度的渗透系数，将这些渗透系数绘制在以计算尺度为横轴的坐标系中，如发现在某个尺度之后，3 个方向的渗透系数均不再有明显的变化，则这个尺度就可以作为 REV 的大小^[7]。

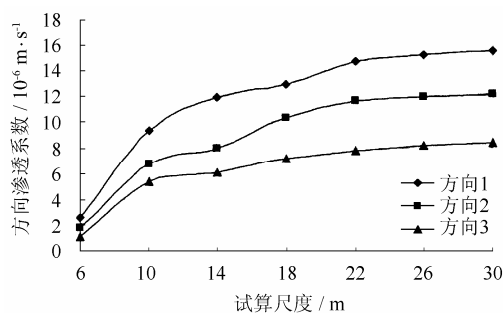


图3 平硐I试算尺度上的方向渗透系数

Fig.3 Directional hydraulic conductivity in orthogonal directions of I region

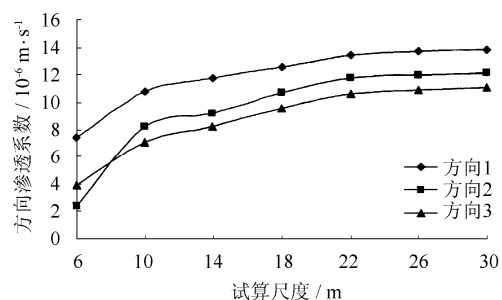


图4 平硐II试算尺度上的方向渗透系数

Fig.4 Directional hydraulic conductivity in orthogonal directions of II region

对30 m尺度的裂隙网络,分别选取6, 10, 14, 18, 22, 26, 30 m大小的同心立方体作为REV大小的试算尺度。得到的各个方向渗透系数绘制于图3、图4中。

根据方向渗透系数随试算尺度的变化幅度,可以看出,当计算尺度为22 m左右时,其方向渗透系数的变化幅度很小,具有一致性。因此,认为在30 m尺度时岩体的REV存在,并由此确定出平硐I, II的REV为22 m³,故将整个边坡的REV定为22 m³。

通过以上分析岩体的REV存在,也说明了描述渗流的等效连续介质模型用于研究本边坡裂隙岩体渗流是有效的。

对裂隙岩体渗流的研究,最需要预先解决的就是岩体渗流模型的选择。本文就离散裂隙网络模型在岩体渗流应用中的困难,进行了岩体多孔介质的水力等效性研究,以期证明可以定义一个等效多孔介质,其与真正的离散裂隙系统具有近似相同的渗流性质。

参考文献

- [1] Wang J S Y, Narasimhan T N. Hydrologic mechanisms governing fluid flow in a partially saturated, fractured, porous medium[J]. **Water Resources Research**, 1985, 21(12): 1 861—1 874.
- [2] Salam A. A, Chrysikopoulos C V. Unsaturated flow in a quasi-three-dimensional fractured medium with spatially variable aperture[J]. **Water Resources Research**, 1996, 32(6): 1 531—1 540.
- [3] Long J. C. S, Remer J S. Porous equivalents for networks of discontinuous fractures[J]. **Water Resources Research**, 1982, 18(2): 645—658.
- [4] 肖裕行, 王泳嘉, 卢世宗, 等. 裂隙岩体水力等效连续介质存在性的评价[J]. **岩石力学与工程学报**, 1999, 18(1): 75—80.
XIAO Yu-xing, WANG Yong-jia, LU Shi-zong et al. Assessment of hydromechanically equivalent continuum model for fracture rock masses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(1): 75—80.
- [5] Dershowitz W S, Einstein H H. Characterize rock geometry with joint system models[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 1988, (21): 21—51
- [6] Dershowitz W S, Lee G Geier. Fracman user documentation[M]. Golder Associates Inc. WA, 1990.
- [7] 王环玲. 高坝泄洪雾雨作用下饱和和非饱和裂隙岩质边坡稳定性研究[博士学位论文D]. 南京: 河海大学, 2006.