

基于二维裂隙网络模拟的岩块搜索与岩层追踪方法

李爱华, 朱 江

(中国石油大学(华东), 山东 青岛 266580)

摘要: 脉动压力在岩石河床裂隙中的传播是导致大坝下游基岩冲刷破坏的主要原因之一。岩体裂隙网络作为水体的赋存空间,其结构特性决定了水流脉动压力波的传播规律。应用蒙特卡洛模拟方法,编译 Fortran 程序语言,模拟得出与天然岩体裂隙网络在统计上完全等效的、具有相似结构特性的仿真裂隙网络,实现管网线元和节点的自动编号存储。借助矩阵理论定义了衔接矩阵和回路矩阵,从数学意义上精确描述裂隙网络。提出了基岩冲刷破坏过程中,孤立岩块的自动搜索和逐层追踪的新方法。文中以 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 范围内的两组裂隙为例,依据裂隙网络的统计分布规律,通过蒙特卡洛模拟,给出由两组裂隙组成裂隙网络的模拟结构图以及块体逐层自动追踪的结果。研究结果为高坝下游基岩冲刷过程的模拟研究奠定基础。

关 键 词: 裂隙网络; 蒙特卡洛模拟方法; 块体搜索; 逐层追踪

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2014)06-0065-06

岩体裂隙中脉动压力的传播是导致高坝下游冲刷破坏的主要原因之一。自 1973 年的国际大坝会议以来,各国学者对脉动压力在缝隙中传播并导致水力冲刷破坏进行了大量的试验研究和数值模拟^[1-7],但这些研究大都局限在简单一维线裂隙或者二维面裂隙内,并没有考虑实际岩体复杂的裂隙结构特性。事实上,岩体是由岩块和分割岩块的裂隙网络所组成的结构体。岩体裂隙网络作为水体的赋存空间,其特殊的结构特性一如结构面密度、空间分布及其粗糙度、开度、填充情况等,从很大程度上决定了岩体裂隙介质中水流脉动压力传播的特殊性和复杂性。

国内潘别桐、陈建平等在统计学和概率论基础上提出了结构面的二维、三维网络模拟技术—即蒙特卡洛模拟方法,现已被广泛应用于裂隙渗流研究领域。刘晓丽等^[8-9]提出了相对于随机裂隙网络的衔接矩阵、关联矩阵、回路矩阵等科学的数学描述方法。陈剑平等^[10-12]给出了裂隙网络的砍树原理以及随机块体的搜索方法。

裂隙网络模拟可以综合反映裂隙系统的极不均匀性、水流的各向异性和局部非连续性,还可以描述裂隙中水流瞬时变化的特征。因此可以应用到岩体裂隙中压力波传播等问题的研究中。本文通过蒙特卡洛方法模拟岩体复杂裂隙网络,提出孤立块体逐层搜索的新方法,在裂隙水力学方法论上具有一定的创新性,而且是将岩体复杂裂隙结构特性引入到水力冲刷研究中的一次新的尝试。

1 岩体裂隙网络的蒙特卡洛模拟

蒙特卡洛法是根据现场结构面统计测量得出的各参数分布率来反求各参数的(伪)随机数,进而产生一个与真实岩体结构在统计上完全等效的结构面网络图形。三维空间裂隙岩体的模拟通常采用的是圆盘模型,二维空间裂隙岩体的模拟则是迹线网络图。针对高坝下游岩石河床冲刷问题,选取通过圆形射流轴线的

收稿日期: 2014-05-11

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(12CX04024A,13CX02049A)

作者简介: 李爱华(1978-),女,山西祁县人,副教授,主要从事流沙力学及计算流体力学方面的研究。

E-mail: aiwalj@upc.edu.cn

纵向断面切割岩体,进行数值模拟,如图 1。

对结构面各参数满足表 1 内统计分布的岩体网络进行蒙特卡洛二维模拟。图 2 给出由蒙特卡洛模拟方法得出的符合给定分布规律(表 1)的仿真裂隙网络。裂隙网络中共有 55 个节点、65 个线单元。

表 1 岩体裂隙参数的统计分布

Tab. 1 Statistical distribution of rock mass fracture parameters

裂隙几何参数	分布规律	10 m×10 m 范围内有两组裂隙	
		第一组裂隙	第二组裂隙
密度	随机分布		
倾角	正态分布	均值 60°, 方差 2°	均值 -60°, 方差 2°
迹线长	负指数分布	均值 7.0 m	均值 10.0 m
裂隙中心点位置	均匀分布	10 条/10 m	8 条/10 m

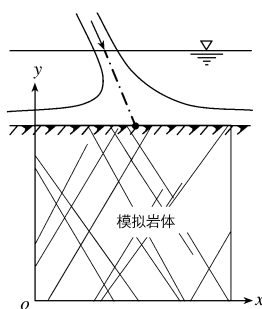


图 1 岩石河床冲刷示意

Fig. 1 Sketch of rock bed scour

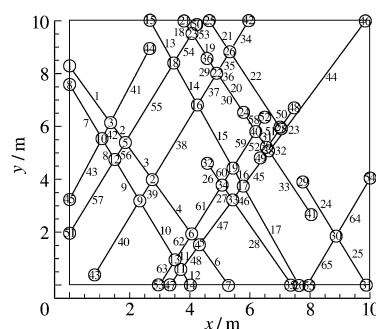


图 2 仿真裂隙网络

Fig. 2 Simulated fractures network

使用 Fortran 程序语言编制程序,在生成仿真裂隙网络的同时,进行以下工作:

(1) 去除网络中的孤立裂隙。若裂隙没有通过相互交割最终沟通到干扰波源,即沟通到控制体的顶边界,则裂隙中不可能有干扰波的存在以及传播。这种裂隙称为孤立裂隙或者死裂隙,在研究中不予考虑。

(2) 实现对裂隙网络中线单元以及节点的自动编号。对于简单裂隙网络,可以进行手动编号;但是对于复杂裂隙网络,有序合理的编号工作变得非常复杂。本文应用 Fortran 程序语言使编号工作变得既简单、便捷,又具有很高的准确性。

对裂隙网络给出合理的数学描述。引入复杂裂隙网络的衔接矩阵、回路矩阵,将裂隙网络图形用数学矩阵的方法形象地表示出来,这样才能建立合理的裂隙网络瞬变流模型。衔接矩阵 $A = \{a_{ij}\}$ 定义了裂隙节点与裂隙线单元之间的衔接关系以及裂隙方向,其中:

$$a_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{线元 } j \text{ 不衔接于节点 } i \\ +1, & \text{线元 } j \text{ 衔接于节点 } i, \text{ 且线元 } j \text{ 的方向离开节点 } i \\ -1, & \text{线元 } j \text{ 衔接于节点 } i, \text{ 且线元 } j \text{ 的方向指向节点 } i \end{cases} \quad (1)$$

考虑当岩体某一层发生破坏后,裂隙网络仍用衔接矩阵进行数学描述,为避免引起裂隙节点和线元编号的混乱,另定义衔接矩阵如下:

$$a_{ij} = l_j (i = 1, j = 2 \sim j_{\max} + 1) \quad (2)$$

$$a_{ij} = m_i (j = 1, i = 2 \sim i_{\max} + 1) \quad (3)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{线元 } l_j \text{ 不衔接于节点 } m_i \\ +1, & \text{线元 } l_j \text{ 衔接于节点 } m_i, \text{ 且线元 } l_j \text{ 的方向离开节点 } m_i \left(\begin{matrix} i = 2 \sim i_{\max} + 1, \\ j = 2 \sim j_{\max} + 1 \end{matrix} \right) \\ -1, & \text{线元 } l_j \text{ 衔接于节点 } m_i, \text{ 且线元 } l_j \text{ 的方向指向节点 } m_i \end{cases} \quad (4)$$

式中: l 为线元编号; $j_{\max}$ 为线元条数; m 为节点编号; $i_{\max}$ 为节点个数。

回路矩阵 $L = \{L_{kj}\}$ 可以描述网络中的基本回路,每一个基本回路对应一个多边形岩块,其中:

$$L_{kj} = \begin{cases} 0, & \text{线元 } j \text{ 不在回路 } k \text{ 中} \\ +1, & \text{线元 } j \text{ 在回路 } k \text{ 中,且方向与回路同向} \\ -1, & \text{线元 } j \text{ 在回路 } k \text{ 中,且方向与回路反向} \end{cases} \quad (5)$$

2 孤立块体自动搜索方法

孤立块体自动搜索即为寻找控制体内的封闭回路。在进行块体搜索之前,需要对裂隙网络进行砍树处理,即对裂隙线元进行循环判断,删除无交点或只有一个交点的线元,直至线元互相存在“搭接”。衔接矩阵经过砍树处理成为回路衔接矩阵。

块体搜索的总体思路是:在删减矩阵内任取一条线元为基元 S_1 ,取基元上一端点为基点 A_1 ,追踪与基元相交于基点 A_1 的线元 S_2 ,在 S_2 上找到与 A_1 相邻的节点 A_2 ,追踪与线元 S_2 相交于 A_2 点的线元 S_3 ,在 S_3 上找到与 A_2 相邻的节点 A_3 ,……,直至回路闭合于 S_1 的另一端点,即完成一个随机块体的搜索。然而,搜索到的回路并不一定对应于一个孤立的块体,事实上很可能包含有多个孤立块体。通常裂隙网络中的回路有两种:内回路和外回路。内回路是最小的回路,其内部不包括更小的封闭回路;外回路则不然,其内部可能包含有多个更小的封闭回路。

举例说明:图3中给出通过回路追踪得出的一个随机块体。可见,这个外回路内实际包含了3个内回路,也就是包含有3个孤立块体。在实际水力冲刷数值模拟过程中,有必要对各个孤立块体的受力情况进行分析,因此必须明确每个孤立块体的空间几何形态,才能合理地开展数值研究。文献[10]对总体思路作了修正,认为在回路追踪过程中,应以方向角的大小排序寻求衔接线元及相邻交点,从而通过封闭回路搜索得出了随机块体可能出现的最大区域。但同样,这一思路仍不能确保追踪得到的随机块体为最小块体。

本文认为:不妨设定每个孤立块体的方向为顺时针方向,以两线元之间的逆时针夹角排序,取最小夹角的线元和对应节点分别为前一线元和节点的衔接线元和相邻节点,依次追踪直至回路封闭。可以肯定,所得到的随机块体为网络内最小随机块体(如图4)。

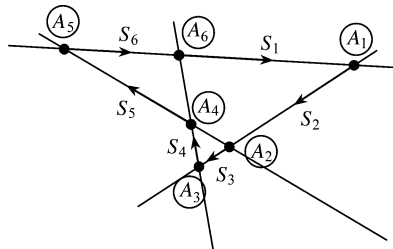


图3 回路追踪总体思路

Fig. 3 General idea of loop tracing

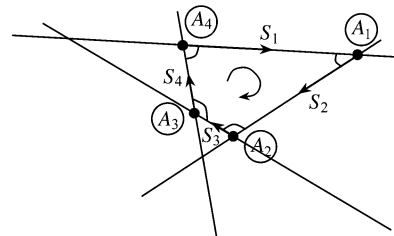


图4 回路追踪本文思路

Fig. 4 Idea of loop tracing in this paper

3 复杂裂隙岩体逐层自动追踪方法

在水利工程中,基岩受高速下泄水流的冲击作用,发生冲刷破坏。冲坑的形成过程是岩体逐层发生破坏的过程:高速水流作用于基岩表层,剧烈的动水压力超过岩体的等效重力,表层岩体中的关键块体被水流拨起并冲走,相邻块体则由于某一方向的约束释放极易发生连锁性破坏;表层岩体破坏后,新的水岩交界面形成新的表层岩体,并被逐层破坏;随着冲坑的发展,下泄水流所携带的能量被不断消耗在冲坑和岩体裂隙介质中,也就是说:随着冲坑深度的增加,作用在表层岩体上的动水压力强度不断减小,当表层岩体上的动水压力与其等效重力达到平衡时,冲坑不再发展,此时的冲坑深度即为平衡冲深(极限冲深)。因此,对真实复杂

裂隙网络内的水流运动规律以及冲坑形成过程开展数值研究,首先需要实现裂隙网络中复杂块体的自动逐层搜索,并明确各孤立块体的空间几何形态。

复杂裂隙网络内孤立块体的逐层搜索方法分为以下 4 步:基元的确定、基点的确定、块体自动搜索以及岩块稳定性评估,最终实现随机块体的逐层搜索。具体步骤如下:

(1)基元的确定。基元为随机块体的一边,位于水岩交界面上。对于未曾破坏的基岩,考虑将水岩界面(即控制体顶边界)所包含的线元加入网络衔接矩阵,经砍树处理后剩余的每条线元为 1 条基元,各自对应于 1 个孤立块体。当岩体某一层发生解体破坏后,去掉回路衔接矩阵中的所有基元并进行砍树处理,得出未破坏的回路衔接矩阵。同时建立已破坏块体包含的所有线元的线元集合。求解已破坏线元集合与未破坏回路衔接矩阵的交集,即为新的水岩交界面上的网络基元。

(2)基点的确定。为确保块体的顺时针方向,选取基元的左端点还是右端点(垂直基元的上端点还是下端点)作为基点必须明确给定。这主要取决于孤立块体位于基元的上半空间或是下半空间(垂直基元的左半空间或是右半空间)。若块体位于基元的下半空间,与块体回路方向相一致,回路追踪方向从基元左端点指向右端点,以右端点作为其基点;若块体位于基元的上半空间,与块体回路方向相一致,回路追踪方向从基元右端点指向左端点,以左端点作为其基点;若基元为垂直线元,块体位于基元左半空间则回路追踪方向从上端点指向下端点,块体位于基元右半空间则回路追踪方向从下端点指向上端点(如图 5)。

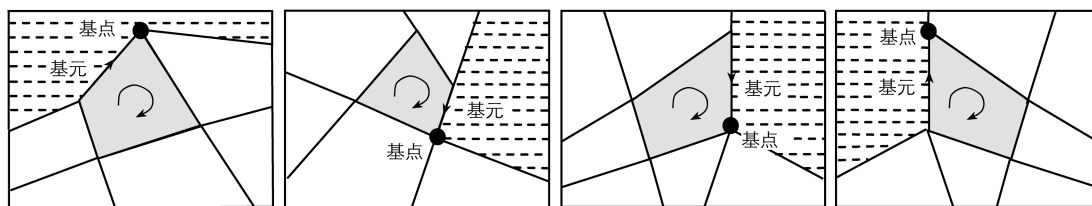


图 5 基点确定方法

Fig. 5 A method for determining the basic node

(3)块体自动搜索。采用上述方法,以两线元间的夹角排序,取最小夹角的线元和相应节点作为衔接线元和相邻节点,直至回路封闭,最终得出裂隙网络表层的回路矩阵。由于 1 个随机块体可能包含 1 条或者多条基元,当块体自动搜索完毕,需要删除重复的随机块体。比较简洁的方法是:对回路矩阵实施线形变换,去除矩阵中线形相关的行向量。得到基本回路矩阵,矩阵的每一行向量对应于本层的 1 个孤立块体。孤立块体的各条组成线元的长度、各组成节点的坐标等均可以通过衔接矩阵与节点、线元信息相关联,这样复杂孤立块体的空间几何特性最终可以用数学矩阵的方式被明确地表达出来。

(4)岩块稳定性评估。如果本层岩块中某些块体在水流冲击及重力等共同作用下发生失稳破坏,则应剔除裂隙网络中这些岩块的相关裂隙单元,形成新的河床面,并返回第(1)步继续。如此循环以实现随机块体的逐层搜索。

对于图 2 生成的仿真裂隙网络,模拟岩石河床在射流脉动压力作用下的逐层冲刷破坏过程。图 6 分别给出初始岩体、第 1 层岩层发生冲刷破坏后、第 2 层岩层发生冲刷破坏后的裂隙岩体图形,其中灰色岩块是应用块体自动搜索方法获得的本阶段岩体表层岩块。

假定第 3 层岩层中,岩块 9 和 10 受脉动压力作用被拔出坐穴;岩块 8 的稳定力(重力)足以克服水体脉动压力作用而保持稳定在坐穴中,最终形成平衡冲坑,如图 6(d)所示。

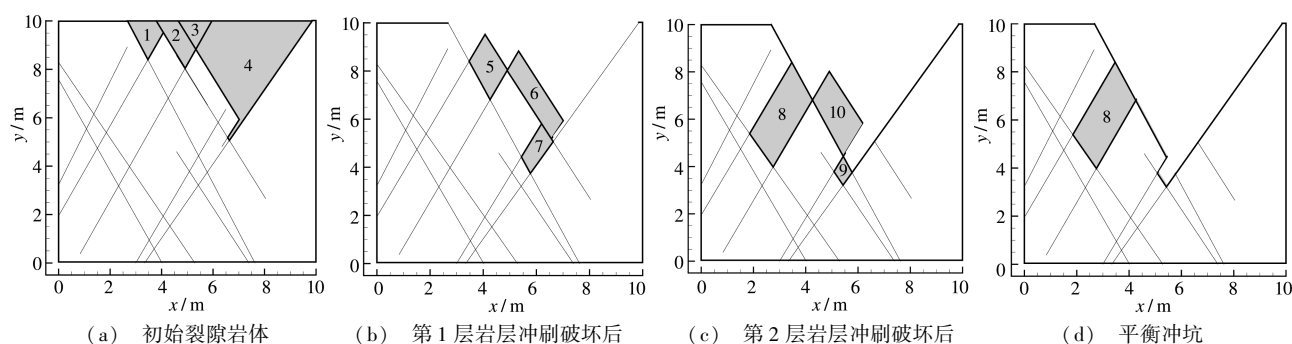


图6 平衡冲坑的形成

Fig. 6 Formation of limited scour pool

4 结 语

天然岩体是由复杂裂隙网络分割的结构体,要研究天然岩体在高速冲击水流作用下如何解体破坏、形成冲坑,必须结合冲击射流的水力特性和受冲击岩体的地质特性来研究。基于本文研究内容,得出以下结论:

(1)应用蒙特卡洛模拟方法生成了与给定分布的裂隙网络在统计上完全等效的仿真裂隙网络,作为水体的赋存空间。

(2)提出裂隙网络内岩块自动搜索的思路:以岩块两相邻线元间夹角最小(顺时针)确定搜索路径,才能确保追踪获得的随机块体为网络内最小随机块体。

(3)在河床冲刷破坏的每个阶段,通过基元、基点确定、块体自动搜索以及岩块稳定性评估,可自动追踪获得裂隙网络的表层岩块及其关联矩阵,实现岩层的逐层搜索。

参 考 文 献:

- [1] BELLIN A, FIOROTTO V. Direct dynamic force measurement on slabs in spillway stilling basins[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1995, 121(10): 686-693.
- [2] FIOROTTO V, RINALDO A. Fluctuating uplift and lining design in spillways stilling basins[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1992, 118(4): 578-596.
- [3] LIU Pei-qing, LI Ai-hua. Model discussion of pressure fluctuations propagation within lining slab joints in stilling basins[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2007, 133(6): 618-624.
- [4] LIU Pei-qing, LI Ai-hua. Fluctuating uplift acting on rock blocks at the bottom of river bed and estimation of the limiting scour depth[J]. Journal of Hydraulic Research, IAHR, 2007, 45(4): 478-485.
- [5] LI Ai-hua, LIU Pei-qing. Mechanism of rock-bed scour due to impinging jet[J]. Journal of Hydraulic Research, 2010, 48(1): 14-22.
- [6] 李爱华,王腾,刘沛清. 溪洛渡坝区岩石河床冲刷过程数值模拟[J]. 水力发电学报, 2012, 31(5): 154-158. (LI Ai-hua, WANG Teng, LIU Pei-qing. Numerical simulation of rock bed scour behind the dam of Xiluodu hydropower station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(5): 154-158. (in Chinese))
- [7] 李爱华,刘沛清. 岩石河床在冲击水流脉动压力作用下的解体破坏机理[J]. 水利学报, 2007, 38(11): 1324-1328. (LI Ai-hua, LIU Pei-qing. Mechanism of disintegration of rock bed under fluctuating pressures due to impinging jet[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(11): 1324-1328. (in Chinese))
- [8] 刘晓丽,王恩志,王思敬,等. 裂隙岩体表征方法及岩体水力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1814-1821. (LIU Xiao-li, WANG En-zhi, WANG Si-jing, et al. Representation method of fractured rock mass and its hydraulic properties study[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1814-1821. (in Chinese))
- [9] 刘晓丽,王恩志,王思敬. 裂隙岩体精细结构描述及工程特性数值试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增2): 1814-1821. (LIU Xiao-li, WANG En-zhi, WANG Si-jing. Fine structure description for fractured rock mass and numerical tests

- on its engineering properties[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Suppl2): 3935-3940. (in Chinese))
- [10] 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 network numerical modeling technique for random discontinuities of rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 397-402. (in Chinese))
- [11] 陈剑平, 卢波, 王良奎, 等. 复杂不稳定块体的自动搜索及其失稳方式判断—基于随机不连续面三维网络模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1126-1131. (CHEN Jian-ping, LU Bo, WANG Liang-kui, et al. Automatic search for complex unstable rock blocks and the judgment of instability mode-based on 3D network simulation of random fractures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1126-1131. (in Chinese))
- [12] 卢波, 陈剑平, 王良奎. 基于三维网络模拟基础的复杂有限块体的自动搜索及其空间几何形态的判定[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1232-1238. (LU Bo, CHEN Jian-ping, WANG Liang-kui. Automatic seeking for complex finite rock block and judgment of its spatial geometrical shape based on 3D network modeling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8): 1232-1238. (in Chinese))

A rock block auto-searching and rock layer auto-tracing method based on 2D fracture network simulation

LI Ai-hua, ZHU Jiang

(China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: Rock bed scour downstream of high dams is mainly due to propagation of the fluctuating pressure within rock mass fractures. The fractures network is the storage of groundwater, and its structure determines the propagation law of the fluctuating pressure. In this paper, applying the Monte-Carlo simulation method, a simulated network of rock fractures is obtained by compiling a Fortran program. The simulated network is equivalent to the real rock fractures network in the aspect of statistics and has similar structure characteristics with the real network. Meanwhile, the cells' and nodes' numbers are automatically added to the network. Based on the matrix theory, the network is accurately represented by the joint matrix and the loop matrix. In order to reproduce the bed scour process, new methods of isolated block auto-searching and rock layer auto-tracing are proposed in the study. In this paper, as an example, two groups of the rock mass fractures in the area of 10 m×10 m are simulated by the Monte-Carlo simulation method. The figure of the fracture network is given and the results of rock layer auto-tracing at different scour stages are given by the Monte-Carlo method. These analysis results have laid a solid foundation for numerical simulation of riverbed scour process at the downstream of high dams.

Key words: fractures network; Monte-Carlo simulation method; rock block auto-searching; rock layer auto-tracing