

用投影法求算岩体结构面三维连通率[◆]

陈剑平¹, 卢波^{1, 2}, 谷宪民¹, 范建华¹

¹ 吉林大学建设工程学院 (130026)

² 中国科学院 武汉岩土力学研究所 (430071)

email: chenjp@jlu.edu.cn

摘要: 岩体结构面三维连通率是一个内涵空间岩体稳定性评价的重要参数, 它完全不同于常规的与水文地质或岩体水力学相关的连通率。由于岩体中结构面发育的随机性, 采用一般的方法很难得到岩体结构面在空间的三维连通率。本文介绍的岩体结构面三维连通率是基于现场工程岩体结构面三维网络数值模拟的基础之上, 采用理想截面投影法来求取工程岩体关键部位、特定方向上的三维连通率, 并通过计算机编程来实现计算, 直接应用于工程中。

关键词: 岩石力学 岩体结构面 三维连通率 投影法

1. 引言

岩体连通率是一个被岩土工程师以及水文地质工程师广泛接受的一个重要概念, 从一般意义上理解, 工程师们更熟悉岩体连通率与地下水渗流之间的关系, 因此, 在一般意义上理解的连通率是一个只有数值的大小, 而没有方向的物理量, 并且连通率通常只与岩体的透水性能有关, 特别是在水文地质学中讨论岩体导水的双重性时, 连通率是裂隙岩体中基岩裂隙水导水的一个重要概念。从工程地质以及水文地质的角度, 国内外学者也在连通率的求解方面作过了许多有意义的探索。

由于岩体中结构面多呈随机分布, 所以其空间的组合特征极为复杂, 确定节理岩体的结构面连通率是很困难的。文^[1~5]均对岩体连通率的确定问题从结构面组合的几何关系方面进行了有益的探讨。另外, 根据连通率的一般定义, 二维连通率的计算归根到底就是结构面的平均迹长和平均间断距的计算。因此, 不少学者试图通过确定结构面的平均迹长和平均间断长来确定二维连通率。如文^[6]提出通过结构面的固有间距和平均间距之间的关系, 应用概率计算方法来求解连通率; 文^[7]等提出了基于迹长估计和间断长估计的连通率计算公式。

上述方法计算连通率时存在如下的不足之处。其一, 上述的连通率算法没有考虑岩体具体的破坏路径, 只是从连通率的几何定义出发。对岩体的稳定性评价不能起到很好的效果。其二, 通过确定平均迹长和平均间断长得到的连通率值, 从统计的角度来讲只是一个总体均值, 而实际测量窗口上每一条结构面迹线都有其特定的大小, 因此, 在进行岩体稳定性评价时, 用均值来替代样品值是不合适的。其三, 通过以上的方法获取的连通率通常是二维的线连通率, 而不是三维空间连通率, 显然三维空间连通率更具有理论意义和实际应用价值。

[◆]国家自然科学基金面上项目资助(40272117); 2002 年高等学校博士学科点专项科研基金项目(20020183061)

另外,文^[8, 9]从岩桥和结构面组合破坏的内在机制出发,采用动态规划法来确定连通率。这样得到的是具有力学意义的连通率并对应于具体的破坏路径,但动态规划法所获得的“破坏路径”只能是相对的,难以保证该路径具有最小的抗剪力,而且得到的是二维线连通率值。

为了求解岩体结构面的三维连通率,文^[10]提出采用遗传算法求算岩体三维连通率。

本文拟在岩体随机不连续面三维网络数值模拟技术^[11]的基础上,通过投影法,来计算工程岩体关键部分,特定方向上的空间三维岩体连通率。由此算出的岩体结构面三维连通率,具有显著的方向性,并且与岩体的稳定性有着十分密切的关系。

2. 基本思路

由于岩体结构面的随机性展布特征,为了获取每一个结构面在空间的展布特征,并求取实际结构面展布条件下的三维连通率,本文采用的重要基础是岩体随机不连续面三维网络数值模型,关于随机结构面三维网络数值模拟技术本文不再介绍,请参见文^[11]。

本文所作的工作都是在严格的岩体随机结构面三维网络地质模型的基础上进行的。这里假定每一个随机结构面都以薄的圆盘表示,每一个圆盘的空间表示方式均以圆盘圆心的空间坐标、圆盘的直径以及圆盘的产状,即倾向和倾角来唯一确定。

基本思路是:在工程岩体中设置一个理想截面,该理想截面正是工程设计中预计岩体可能破坏的危险面。将该理想截面附近与该理想平面产状相近的不连续面投影到该理想平面上,求得结构面投影面积之和与该理想截面面积之比,即为岩体三维连通率。显然,由这一基本思路定义的岩体三维连通率与岩体的稳定性评价是息息相关的。

实现上述基本思路和定义是完全可能的,这种可能性的存在正是建立在前述岩体结构面三维网络数值模拟的基础之上。

为了获取上述定义的岩体三维连通率,需要通过以下的基本步骤来实现:

(1) 在已经建立的三维网络模型中确定理想截面

这一步骤是根据工程岩体的稳定性野外地质调查结果和工程总体规划设计来确定的。

(2) 搜索理想截面附近的结构面

自然界中岩体的破坏面并不总是平直光滑的,岩体的结构面极有可能是由若干个方向并不完全相同的结构面组合而成的。因此,在计算岩体结构面连通率时,要搜索在理想截面一定范围内与该平面的交角小于某值的结构面。这里暂规定,凡是与理想截面交角 $<15^\circ$ 的结构面都被视为搜索的对象。

但是根据实际工程的需要,在搜索结构面时要作适当的舍短。这是因为在三维网络模拟时用蒙特卡罗法生成数值模型是根据直径的概率分布密度生成的,一些圆盘直径很小的结构面也会生成,而这些很小的结构面对工程岩体的稳定性影响微不足道,同时为了减少运算量,

在计算时把很小的结构面舍去。

(3) 将搜索到的结构面投影到理想截面上

由于搜索到的结构面与理想截面有一定的夹角,这里计算结构面与理想截面的夹角小于 15° ,为了较准确地求出三维连通率,还要把不连续面投影到理想截面上。

(4) 剔除重叠的结构面

投影到理想截面上的结构面,如果没有重叠的现象,则直接将不连续面的面积除以理想截面的面积,就可以获得岩体的连通率。但一般情况下投影到理想截面上的结构面有重叠的现象是常见的,而重叠部分的结构面对岩体破坏贡献并不因重叠的越多而贡献越大。因此,有必要将投影到理想平面上结构面重叠的部分进行剔除。

(5) 计算连通率

通过上述4个步骤的处理,最后求出投影到理想平面上的不连续面面积总和与理想平面的面积之比率,就得到了空间三维的连通率。

$$\xi = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{S} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: ξ 为连通率, A_i 为搜索带宽范围内的圆盘投影到截面上的面积, S 为截面的面积, n 为搜索带宽范围内的圆盘的个数。

以上5个步骤每一个步骤的物理意义都很明确,计算式子也十分简单。但面对成百上千乃至数以万计的结构面,要实现上述的各个步骤,就绝不是一件简单的事情。为了实现上述各步的计算,同时使计算的结果可视化。就必须借助计算机编程的技能来实现上述的算法。

3. 程序编制

Digital Visual Fortran 90 的编程语言作为本次编程计算的语言,同时把开放图形库(OpenGL)技术应用于三维作图,使计算结果可视化。Persistence 程序就是用上述语言和图形库编写的可执行程序。该程序具有如下的主要功能:

- (1) 可以主动搜索模型中具有最大连通率的所在面,并给出该面的空间定位几何参数值;
- (2) 可以根据工程需要输入确定的理想截面位置,包括平面、铅直面和斜截面;
- (3) 可以根据工程需要搜索理想平面两侧不同条带宽度内不连续面;
- (4) 具有舍短功能;
- (5) 可以自动剔除重叠不连续面的面积,得出有效的不连续面面积;
- (6) 可以直接在屏幕上显示计算结果所对应三维图形。

编制程序的关键就是剔除结构面重叠的部分,由于空间的圆盘投影到某一个平面上时,

其投影的结果未必还是一个圆，而且其重叠部分也是随机的，即并不按照某一个具体的规则进行重叠，这就为编制程序时自动删除结构面的重叠部分，带来了困难。为了克服这一困难，本文采用如下的方法来处理。

式(1)获取的连通率 ξ 是没有考虑剔除重叠部分的连通率，但这个连通率不能真实反映岩体中连通率的实际情况。

三维岩体裂隙连通率的求解，有必要进行净化，图 1 中的阴影部分是两个圆投影重叠的部分。所谓净化就是将图 1 中阴影部分的面积只计算一次。这里采用一定尺寸的方格构成的网格来覆盖求解区域，凡是落入圆内的方格只计算一次，然后将这些小方格的面积累和，当方格的边长足够小时，可以得到较精确的近似值。

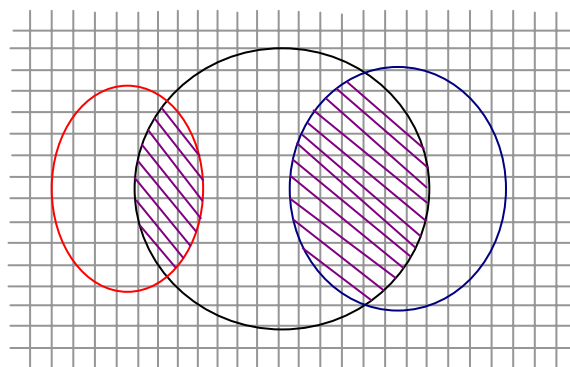


图 1 净化重叠部分的图示

Fig.1 Purge overlapped part of disks

为了使计算的精度足够，通常采用 1cm 或 10cm 作为小方格的边长，这对一般的工程来说精度是足够的了。通过这种方法净化后，还要重新计算岩体结构面的三维连通率，这一连通率就被称之为净化后的连通率，其表达式为

$$\xi_c = \frac{S_f \sum_{i=1}^n i}{S} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中： S_f 为小方格的面积； S 为截面的有效面积； i 为当方格落入圆的投影区内时，记录一次 i 值，每个方格最多记录一次； n 为被记录方格的总数； ξ_c 为净化后的连通率值。

以上过程均可通过自编的计算机程序来实现。

4. 工程实例

拟建的溪洛渡电站坝型为拱坝，考虑到未来坝肩岩体的整体稳定性，对坝肩岩体的结构面进行了详细的调查，经初步研究，认为影响该拱坝坝肩岩体整体稳定性的结构面，主要是陡倾坡外的，左岸为走向 160° 或 340° 、倾角一般在 70° 以上的结构面构成；右岸为走向 90° 或 270° 、倾角由 70° 以上的结构面构成。这 2 个主要方向的结构面又被分别称作拱坝左、右

两岸坝肩侧裂面。

拱坝工程左右两岸，还同时考虑到3个不同高程中不同平硐的地质特征，分别进行了结构面三维网络数值模拟，还分别进行了拱坝坝肩岩体侧裂面连通率的计算。本文只介绍结果中的一部分，即只介绍左岸低高程的计算结果。

从结构面的大小看，有如下的主要特征。观测迹长普遍较短，观测平均迹长没有大于1.4 m，最短的平均迹长为0.834 m，最长的平均迹长为1.394 m，最短的迹长0.3 m，最长的迹长3.1 m，陡倾角的迹长相对比右岸多些。两端可见的迹长最高可达24%，一端可见的迹长在测量窗口中所占的比率一般在40%以上居多。因此，模拟出的校正迹长相对比观测迹长长些。根据观测迹长的概率分布规律来看，其概率分布密度函数一般都服从伽玛分布。

三维圆盘平均直径模拟的结果通常比平均观测迹长稍大些，为1.7 m左右，三维结构面平均直径的概率分布也基本上服从伽玛分布。

结构面空间密度的模拟的结果是，单位体积中不连续面的密度为0.05~0.26，变化较大。左岸低高程拱坝坝肩侧裂面的三维网络数值模型如图2所示。

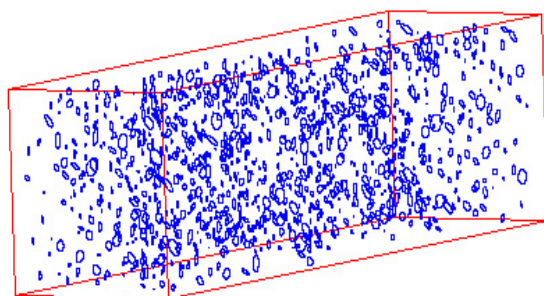


图2 左岸低高程三维网络数值模型

Fig.2 3D network numerical model of lower elevation on left bank

根据工程的要求，布置理想的截面为走向 90° 或 270° 倾向河心、倾角为 70° 左右。为了搜索出不同倾角时结构面的连通率特征，截面的倾角变化由 $60^\circ\sim 90^\circ$ 每隔 5° 设计一个截面。截面的带宽分别为1~5 m，间隔1 m。截面及其附近结构面的投影如图3所示。

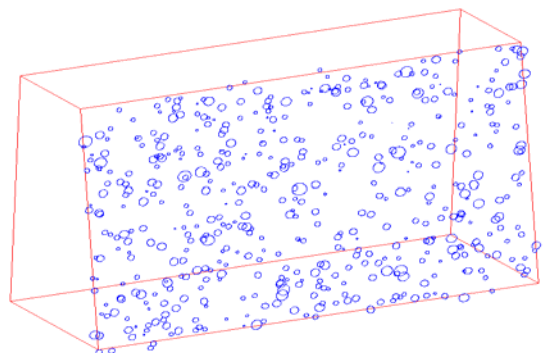


图3 理想截面上的结构面投影

Fig.3 fractures projection on the ideal section plane

采用程序分别计算了左岸低高程分别考虑未净化和净化后的连通率, 仅将部分结果列于表 1 中。

表 1 净化前后的侧裂面三维连通率

Table 1 3D persistence of fractures before and after the purge of overlapped

	倾向 /(°)	倾角 /(°)	搜索带宽 /m	结构面三维连通率/%					
				净化前			净化后		
				最小	最大	平均	最小	最大	平均
截面 1	250	70	1	2.90	4.89	3.69	2.90	4.89	3.69
			2	6.31	8.76	7.40	5.70	7.91	6.80
			3	9.89	12.88	11.07	8.82	11.48	10.48
			4	13.18	17.41	14.75	11.57	15.28	13.42
			5	16.77	21.29	18.42	14.22	18.05	16.13
截面 2	250	75	1	3.31	6.05	4.71	3.07	5.62	4.35
			2	7.48	11.77	9.39	6.94	10.55	8.74
			3	12.03	16.92	14.07	10.57	14.87	12.72
			4	16.46	21.95	18.74	14.18	18.92	16.55
			5	20.71	27.15	23.49	17.25	22.61	19.93

通过计算得通过计算得出的结果可以看出, 当理想截面的倾角为 75°时, 得出的结构面连通率的计算结果要比倾角为 70°时计算结果要大些。而且净化前与净化后的连通率相比也可以看出, 随着理想截面搜索带范围的加宽, 净化率呈较明显的增加。随着宽度的增加, 连通率亦有稳定的上升趋势。

考虑到岩体中的结构面的平均直径仅为 1.7 m 左右, 所以取截面的宽带为 2 m 是较符合实际的。在理想倾角为 70°~75°取连通率较大者, 即认为连通率仅 8.74。这一计算结果已被实际工程所采纳。

5 结 论

(1) 岩体结构面三维连通率是一个新的概念, 它完全不同与水文地质学或岩体水力学中所使用的概念, 其内涵直接涉及到工程岩体在某个关键部位或某个特定方向上的稳定性评价;

(2) 基于本文的思路计算出的岩体结构面三维连通率, 物理意义十分明确, 而且简洁明了, 容易理解, 但其应用的基础是结构面的三维网络计算模拟技术, 因此, 对三维网络数值模型的可靠性要求较高, 建议采用作者提出的三维网络数值模拟技术, 可以达到较高的精度;

(3) 在这个方法中涉及到的连通率净化研究是一项重要的研究, 本文所建议采用的小方格法是一种有效的方法, 但必须计算机编程才能实现;

(4) 投影法求取岩体结构面三维连通率是一种较简单易行的方法, 能够较好地反映岩体结构面的连通率特点, 工程应用效果也较好。但仍然有较大的空间可供进一步和探索和研究。

参考文献

- [1] Einstein H H, Veneziano D, Baecher G B, et al. The effect of discontinuity persistence on rock slope stability[J]. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr*, 1983, 20: 227-236;
- [2] 黄建安, 王思敬. 断续结构岩体失稳破坏的分离面[J]. *水文地质工程地质*, 1984, (3): 21 - 25.(Huang Jianan, Wang Sijing, Separation plane of instability failure in the fractured structured rock mass[J], *Chinese Journal of Hydrogeology and Engineering Geology*, 1984, (3): 21-25(in Chinese))
- [3] Zhang X. A two dimensional model of en-echelon jointed rock masses with multi-discontinuity geometry parameters[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1989, 22: 231-242;
- [4] 姚家健, 王秋明, 冯承树. 缓倾结构面连通系数的研究[J]. *工程地质学报*, 1989, 3(1): 43 - 51.(Yao Jiajian, Wang Qiumin, Fen Chengshu. A study on the connection ratio of lower dip structure plane[J]. *Chinese Journal of Engineering Geology*, 1989, 3(1): 43 - 51.(in Chinese))
- [5] 李义连, 满作武, 薛果夫. 三峡工程岩体破坏分析中面连通率研究[J]. *地质科技情报*, 1998, 17(Supp.2): 69 - 72.(Li Yilian, Man Zuowu, Xue Guofu. Study on connection rate of discontinuity on plane in rock mass failure analysis of Three Gorges Project[J]. *Geological Science And Technology Information*, 1998, 17(Supp.2): 69 - 72.(in Chinese))
- [6] 张倬元, 王兰生, 王士天. 工程地质分析原理(第一版)[M]. 北京: 地质出版社, 1983, 38 - 41.(Zhang Zhuoyuan, Wang Lansheng, Wang Shitian, *The principle of engineering geological analysis(first edition)*[J]. Beijing: Geological Publishing House, 1983, 38 - 41.(in Chinese))
- [7] 黄国明, 黄润秋. 用窗口法估计不连续面的连通率[J]. *水文地质工程地质*, 1998, (6): 27 - 30.(Huang Guomin, Huang Runqiu. Evaluation of discontinuities connection by sampling window[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1998, (6): 27 - 30.(in Chinese))
- [8] 汪小刚, 陈祖煜, 刘文松. 应用蒙特卡罗法确定节理岩体的连通率和综合抗剪强度指标[J]. *岩石力学与工程学报*, 1992, (4): 345 - 355.(Wang Xiaogang, Chen Zhuyu, Liu Wensong. Determination of connection ratio of jointed rock mass and synthesis shear strength index by means of Monte Carlo[J], *Chinese Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1992, (4): 345 - 355.(in Chinese))
- [9] 汪小刚, 贾志欣, 陈祖煜. 岩石结构面网络模拟原理在节理岩体连通率研究中的应用[J]. *水利水电技术*, 1998, (10): 43 - 47.(Wang Xiaogang, Jia Zixing, Chen Zhuyu. An application of discontinuities network modeling principle in the research of discontinuities connection ratio of jointed rock mass[J]. *Irrigation Works and Power Technique*, 1998, (10): 43 - 47.(in Chinese))
- [10] 卢波, 陈剑平, 石丙飞等. 用遗传算法求解节理岩体三维连通率[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, (Lu Bo, Chen Jianping, Shi Binfei, et al. Application genetic algorithm to the determination of 3D persistence of jointed rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(20): 3 470 - 3 474.(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 Jianping. 3D network numerical modeling technique for random discontinuities of rock mass[J]. *Chinese of geotechnical engineering*, 2001, 23(4): 397 - 402.(in Chinese))

Obtaining Three Dimensional Persistence of Rock Mass Fractures by Projection

CHEN Jian-ping¹, LU Bo^{1, 2}, GU Xian-min¹, FAN Jian-hua¹

1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China

1. Abstract

Three dimensional persistence of rock mass fractures is an important parameter which has the connotation of evaluating rock mass stability in three dimension, the concept of three dimensional persistence of rock mass fracture has the meaning of hydro rock mechanics which is totally different from the meaning of persistence related to the hydro-geology. Because of the randomness of fractures in the rock mass, it is very difficult to obtain the three dimensional persistence of rock mass fractures by general method.

A new method to obtain the three dimensional persistence of rock mass fractures in this paper is based on the in-situ engineering rock mass fractures three dimension network numerical modeling, to obtaining the three dimensional persistence in special dip direction and key section of engineering rock mass by ideal section plane projection. The ideal section plane is determined by the demand of engineer who is concerned the stability of engineering rock mass, and select a thickness of projection zone which is including and parallel to the ideal section plane, and then just consider the fractures inside the projection zone, keep the fractures which have a small angle to the ideal section plane, and all of the kept fractures are projected to the ideal section plane, finally the three dimensional persistence of rock mass is calculated by the ratio of total area of projected fractures to the ideal section plane, a computer programming is written by author to realize the calculation, and its result is directly applied in real engineering.

Keywords: rock mechanics; rock mass fractures; three dimensional persistence; projection

作者简介: 陈剑平(1957 -), 男, 1982年毕业于长春地质学院水文地质与工程地质系, 工程地质专业, 现任教授、博士生导师; 主要从事环境工程地质、岩体力学的教学与科研。
E-mail: Chenjp@jlu.edu.cn