

# 利用岩石结构面网络模拟计算岩体带宽 连通率及岩体强度参数

张斌, 聂德新

(成都理工大学 环境与土木工程学院 四川 成都 610059)

**摘要:** 岩体中存在的结构面对岩体的力学特性有很大的影响, 研究岩体的强度参数, 必须弄清结构面在岩体中的分布情况, 了解结构面对岩体强度的影响程度。岩体结构面的研究起初是靠人工进行现场测量, 不仅耗费人力物力, 而且获取的数据代表性不强, 还略显粗糙。在计算机应用飞速发展的背景下, 利用计算机进行结构面网络模拟的方法浮出水面, 并成为现在国内外研究结构面的主要方法之一。此方法在众多的科学研究以及工程建筑领域得到了应用, 并在应用之中得到了不断的完善和发展, 取得了一定的成果。

文章在对计算机结构面网络模拟原理分析的基础上, 主要讨论了利用结构面网络模拟计算岩体连通率和岩体强度的方法, 其中着重研究了带宽投影法的原理及带宽连通率的计算过程, 介绍了利用带宽连通率计算岩体强度参数的方法。利用西北某水电站实际研究中应用此方法的工程实例对成果做了评价, 成果与实际情况大体相符。对结构面网络模拟方法做了综合评价: 简单易行, 省时省力, 效果良好。

**关键词:** 岩体结构面; 网络模拟; 带宽连通率; 岩体强度

文章编号: 1003-8035 (2003) 04-0090-04

中图分类号: TU452

文献标识码: A

## 1 结构面网络模拟原理及其研究现状

自然界中的岩体, 通常都包含有大量不连续分布的结构面, 其分布状况对岩体的宏观力学特性起着重要的控制作用。在工程实际中, 岩体结构面的分布情况是极为复杂的, 但从统计意义上讲, 反映岩体结构面分布特征的几何参数(倾向、倾角、迹长、间距等)都是服从一定的统计规律的。因此我们可以通过在现场一定范围内对结构面做野外实测, 通过分析整理得出结构面各几何参数的分布函数形式及其相应的平均值、标准差, 再通过计算机程序对结构面进行网络模拟。总体说来, 计算机结构面网络模拟就是根据现场量测到的结构面的各种几何参数的概率分布函数, 来推求服从这些分布规律的结构面网络几何图形。实现计算机网络模拟过程所采用的方法为蒙特·卡洛(Monte Carlo)方法。

自上世纪50年代开始, 就有人致力于结构面网络模拟的研究, 并得出了各种模型及方法。国内的汪小刚、陈祖煜教授在岩石结构面网络模拟方面做了大量的工作, 陈剑平教授在三维网络模拟方面取得了一定的成果。利用这些方法均可以获得岩体的连通率, 进而根据岩石、结构面的强度得到岩体的强度参数。现今, 结构面网络模拟已被广泛应用于

多项生产实际之中。

## 2 带宽连通率的计算

对于岩体连通率的计算, 国内现在所采用的方法主要有路径搜索法和带宽投影法。路径搜索法是根据岩石强度理论在结构面网络模拟成果图中搜索岩石发生剪切破坏时所形成的破坏路径中结构面所占的比例, 即:

$$k = \frac{\sum JL}{\sum JL + RBR} \quad (1)$$

式中:  $\sum JL$  和  $\sum RBR$  分别代表剪切路径上结构面和岩桥的总长度。汪小刚、陈祖煜教授等对连通率的计算采用的就是这种方法。

当前使用较多的另一种连通率计算方法, 是带宽投影法。它是指在一定带宽范围内与剪切破坏方向夹角小于允许值的所有结构面占有的比例, 即

收稿日期: 2003-06-12; 修回日期: 2003-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40072090)

作者简介: 张斌(1978—), 男, 硕士研究生, 岩土工程专业。

$$k = \frac{\sum TL}{L} \quad (2)$$

式中:  $\sum TL$  指剪切方向上结构面的投影总长度;  $L$  为剪切方向总长度。具体投影方法可参照图 1 所示。图中, 在剪切方向上长为  $L$ 、带宽为  $b$  的条带范围内, 节理  $A$ 、 $E$  全部在限定范围内并满足与剪切方向角度差的要求, 对其进行投影; 节理  $B$ 、 $C$  满足与剪切方向角度差的要求, 取其在限定范围内的一段节理进行投影; 由于  $D$  不满足与剪切方向角度差的要求、 $F$  不处于限定范围内, 从而舍掉。所以此

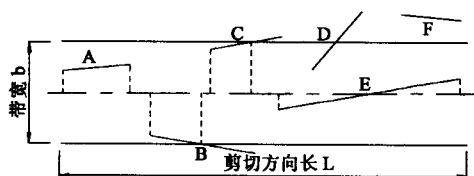


图 1 带宽投影法原理图

Fig. 1 The principle of bandwidth projection method

范围内带宽连通率:

$$k = \frac{\sum TL}{L} = \frac{(TL_A + TL_B + TL_C + TL_E)}{L} \quad (3)$$

式中,  $TL_A$ ,  $TL_B$ ,  $TL_C$ ,  $TL_E$  分别代表  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $E$  有效段投影在剪切方向上的长度。如果结构面投影线段存在重叠, 则重叠部分只计算一次。利用带宽投影法计算岩体连通率现在还没有已成型的软件可以利用, 笔者在对此方法进行研究之后, 自行编制软件进行结构面模拟, 进而进行带宽连通率及岩体强度参数计算的程序, 并在西北某水电站的研究中得到了应用, 其计算过程及应用成果将在后面的工程实例中做介绍。

### 3 岩体强度参数的计算

得到了岩体的带宽连通率, 我们迫切关心的还有岩体的强度参数, 因为这是表征岩体强度的重要参数。

利用路径搜索法计算岩体的连通率, 所得到的破坏路径是一条折线, 计算强度参数时就要根据岩体的破坏机理进行分析计算。而利用带宽投影法进行计算时, 剪切方向为一条直线, 计算得出的带宽连通率即是此方向上的连通率。据此我们可以很自然地想到利用此剪切方向上岩桥与结构面各自所占的比例进行岩体强度参数的计算, 即岩体的强度为

岩桥强度乘以其所占的比例与结构面强度乘以其所占的比例之和, 用式子可以表示为

$$\begin{aligned} f &= a\% * f_R + b\% * f_J \\ C &= a\% * C_R + b\% * C_J \end{aligned} \quad (4)$$

以上两式中,  $f_R$ 、 $f_J$  代表岩桥与结构面的摩擦系数,  $C_R$ 、 $C_J$  代表岩桥与结构面的内聚力,  $a\%$ 、 $b\%$  代表岩桥与结构面在各自剪切方向上所占的比例。

至于岩桥及结构面的强度参数, 可以通过剪切试验获得。

## 4 工程实例

此项研究成果在西北某水电站的实际工程中得到了应用。

### 4.1 岩体强度整体分析

在水电站现场对大量的裂隙进行了测量, 对其进行分组并经过分析整理后, 得到各组结构面各项几何参数的分布函数及其相应的平均值、标准差。在此取河流左岸谷坡深部结构面参数进行模拟, 整理后的资料如表 1 所示。

对表 1 中的各组结构面参数进行结构面网络模拟, 模拟成果列于表 2。从表 2 中可以看出, 在水电站左岸谷坡深部, 岩体带宽连通率平均值  $k = 0.194$ , 岩体强度参数平均值为  $f = 1.477$ ,  $c = 3.41\text{MPa}$ , 总体看来, 连通率在  $70^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $130^\circ$  3 个方向较高, 摩擦系数  $f$  均在 1.2 以上, 内聚力  $C$  均在 2.1MPa 以上。

在现场大剪试验中, 摩擦系数  $f = 1.2 \sim 1.6$ ,  $C = 0.8 \sim 4.1\text{MPa}$ 。上面利用网络模拟得出的岩体强度与现场试验结果很接近, 证明模拟结果是可信的。

### 4.2 岩体危险结构面强度分析

大坝建成后, 与拱坝坝肩大致垂直的结构面强度将是影响大坝稳定性的重要因素。在大坝建造之前的分析阶段, 此方面的研究也可以利用本文所述的方法进行计算。此次在该电站的实际研究中, 就运用了这种方法来分析坝址处危险结构面的强度。表 3 为坝区左、右岸危险结构面的参数, 图 2 为结构面网络模拟的结果图 (以左岸为例, 剖面方向  $325^\circ$ , 模拟区域  $50\text{m} \times 50\text{m}$ ), 图 3 为节理玫瑰花图。表 4 为危险结构面网络模拟成果表。表中岩桥和结构面的不同强度是不同试验段的试验数据, 根据表中的数据, 对此组结构面进行分析, 以确定在未来

是否会对大坝的稳定性产生影响。

表 1 左岸谷坡深部各组结构面基本参数

Tab. 1 The basic parameter of left bank discontinuities

组号	间距 (m)		倾向 (°)		倾角 (°)		迹长 (m)	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
1	4.18	0.76	253.36	2.94	67.86	10.53	3.91	0.48
2	1.75	0.23	283.51	9.36	73.46	11.31	3.66	0.46
3	3.64	0.97	191.11	11.43	70.49	10.13	3.60	0.49
4	2.02	0.83	328.70	10.51	62.85	10.64	4.39	0.61
5	4.06	0.68	37.19	7.52	22.36	8.76	5.41	0.62
6	2.64	0.78	212.51	6.25	24.36	9.69	4.99	0.79

注：表中分布均为正态分布

表 2 结构面网络模拟成果表

Tab. 2 The result data of discontinuities network simulation

旋转角度 (°)	带宽连通率	摩擦系数 $f$	内聚力 $c$
0	0.071	1.618	3.913
10	0.037	1.658	4.051
20	0.058	1.633	3.964
30	0.114	1.569	3.740
40	0.096	1.590	3.812
50	0.068	1.622	3.927
60	0.165	1.511	3.533
70	0.435	1.200	2.438
80	0.258	1.403	3.155
90	0.056	1.635	3.972
100	0.123	1.559	3.702
110	0.314	1.339	2.928
120	0.500	1.125	2.174
130	0.436	1.199	2.434
140	0.319	1.334	2.910
150	0.331	1.319	2.858
160	0.074	1.615	3.900
170	0.037	1.657	4.049
平均值	0.194	1.477	3.414

### 5 结语

计算机结构面网络模拟是一种比较先进的研究方法，它不仅大大节省工作量，而且可以比较“真实”的在需要的任意范围内对岩体结构面进行模拟，所得到的结果也非常直观。另外，还可以根据模拟出的结果进一步分析岩体的连通率、岩体强度参数等数据。在实际工程中，亦可以根据需要分析得出其他一些资料，使用非常方便。

表 3 坝区左、右岸危险结构面基本参数

Tab. 3 The basic parameter of dangerous discontinuities

	间距 (m)			倾向 (°)			倾角 (°)			迹长 (m)		
	分布	均值	方差	分布	均值	方差	分布	均值	方差	分布	均值	方差
左岸	正态	0.701	0.69	正态	211	15.4	正态	72	7.7	正态	2.22	1.12
右岸	正态	0.682	0.397	正态	316	10.9	正态	76	7.6	正态	3.52	2.22

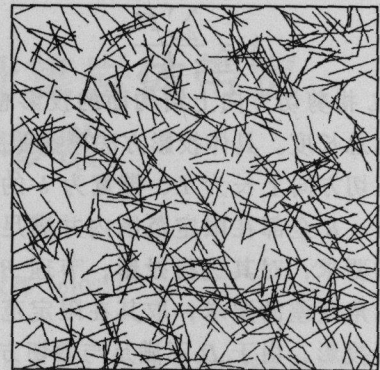


图 2 结构面网络模拟结果图

Fig. 2 The result figure of discontinuities network simulation

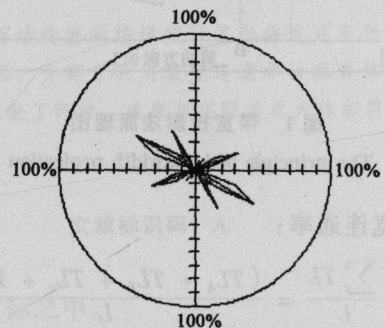


图 3 结构面网络模拟节理玫瑰花图

Fig. 3 The joint rosette figure of discontinuities network simulation

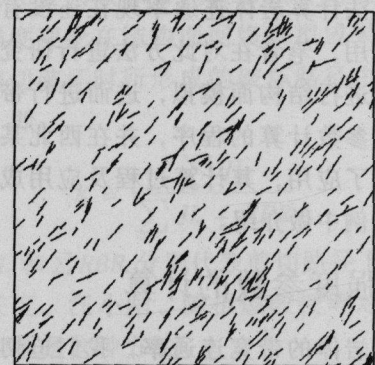


图 4 危险结构面网络模拟结果图

Fig. 4 The result figure of dangerous discontinuities network simulation

带宽投影法是现在国内采用较多的一种方法, 数, 为实际的工程研究提供一定的数据资料。在计算中运用此方法可以很方便的计算各项岩体参

表 4 危险结构面网络模拟成果表

Tab. 4 The result data of dangerous discontinuities network simulation

	岩桥		结构面		连通率	强度	
	C	$\phi$	C	$\phi$		C	$\phi$
左岸	8.2	1.8	0.07	0.46	0.58	3.485	1.023
	7	1.6	0.07	0.46		2.981	0.939
	3.5	1.5	0.07	0.46		1.511	0.897
右岸	8.2	1.8	0.07	0.46	0.55	3.729	1.063
	3.2	1.5	0.07	0.46		1.479	0.928
	4.1	1.2	0.07	0.46		1.884	0.793

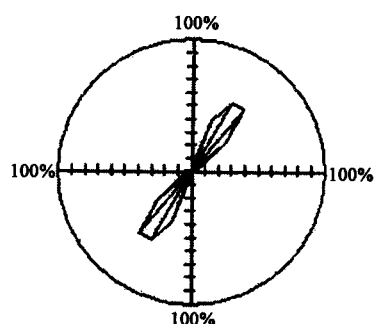


图 5 危险结构面网络模拟节理玫瑰花图  
Fig. 5 The joint rosette figure of dangerous discontinuities network simulation

参考文献:

[1] 潘别桐, 徐光黎. 岩体节理几何特征的研究现状及趋向 [J]. 工程勘察, 1989, (5).  
[2] 潘别桐, 徐光黎. 用统计窗法确定岩石节理规模 [J]. 工程勘察, 1990, (5).  
[3] 徐光黎. 岩体结构模型与应用 [M]. 中国地质大学出版社, 1993.

[4] 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).  
[5] 汪小刚, 陈祖煜. 应用蒙特卡洛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, (12): 345-355.  
[6] 贾洪彪, 唐辉明, 刘佑荣. 岩体结构面网络模拟技术研究进展 [J]. 地质科技情报, 2001. 3.  
[7] 赵文, 林韵梅. 结构面岩体的网络模拟研究 [J]. 东北大学学报, 1994, (4).  
[8] 唐绍辉. 岩体结构面几何特征的分形研究 [J]. 矿业研究与开发, 1996, (3).  
[9] 峰青, 卢兰萍. 岩体结构面的概率模型 [J]. 河北建筑科技学院学报, 1997. 9.  
[10] 文彬. 三维结构面网络模拟在岩体变形特性中的应用 [J]. 长沙铁道学院学报, 1998, (3).  
[11] 金曲生, 范建军, 王思敬. 结构面密度算法及其应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 1998, (6).  
[12] 赵文, 唐春安. 结构面间距和迹长的测量理论 [J]. 中国矿业, 1998, 7 (3).

### Computing joint persistence ratio and strength of rock mass by using rock discontinuity network simulation

ZHONG Bin, NIE De-xin

(Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** The discontinuity in rock mass has great influence on its mechanical properties. In order to study the strength parameters of rock mass, we must know the distribution of discontinuity and discontinuity's influence degree. In the

(下转第 97 页)

(上接第 93 页)

beginning, studying discontinuity is depend on manpower. It is not only wasting source, but also can not acquire representational data. With the background of computer application developing at fast sped, the computer discontinuity network simulation is appeared. And it has become the one of the primary means. This method has been applied widely, and gain development and much success.

Based on analyzing the principle of computer discontinuity network simulation, the article discusses how to work out joint persistence ratio and strength of rock mass by using discontinuity network simulation. Mostly, it studies the principle of bandwidth projection method and process of computing the bandwidth joint persitence ratio. Then, the paper introduces method of computing strength parameters of rock mass by using bandwidth joint persistence ratio. Being applied to the practical hydroelectric station in Northwest China, the simulation result is about the same as the reality on the whole, this method was proved having practical value. At last, the authors evaluate this joint persistence ratio method.<sup>4</sup> It has many advantage, such as simpleness, saving time, good effection Then, This method is advanced and useful.

**Key words:** Discontinuity in rock mass; network simulation; bandwidth joint persistence ratio; strength of rock mass