

非均匀分布随机结构面连通率的概率模型研究*

黄润秋 范留明

成都理工大学工程地质研究所, 成都 610059

摘要 对实际工程中常见的非均匀分布结构面情形, 采用等效均匀的处理方法, 将其转化为等效均匀分布区和空白区, 从而建立了对非均匀分布结构面连通率的描述, 提出了广义连通率的算法. 通过实际工程的检验, 证明这种处理方法的合理性和其工程意义. 结果表明, 考虑非均匀分布特征后, 结构面的连通率会有大幅度的降低.

关键词 非均匀分布 结构面 连通率 概率模型

连通率是反映断续结构面在其延伸方向上连通特性的重要岩体结构指标, 其定义为岩体结构面在延伸方向上的连通段长度之和与其延伸总长度的比值^[1]. 对于断续延伸的结构面而言, 通常情况下其抗剪强度特性是采用其“连通段”的结构面强度与非连通段的“岩桥”强度在长度(或面积)上的加权平均来评价的^[2], 即: $\phi = k \cdot \phi_j + (1 - k) \phi_r$, 其中: ϕ 为断续结构面的综合强度, ϕ_j 为连通段的结构面强度, ϕ_r 为岩桥部分的岩石强度, k 为结构面连通率. 可见, 当控制工程岩体稳定性的边界条件不是贯通性的断层, 而是由若干断续延伸的裂隙型结构面(称之为“基体裂隙”^[1])所组成时, 结构面的连通率在工程岩体稳定性分析与评价中将起重要的作用.

正因为如此, 对断续结构面连通率的研究, 一直是工程地质和岩石力学领域研究的重点和难点之一. 许多学者在这方面所提出的研究途径与解决方法可概括为三种类型: 一类为现场调查的方法, 即从连通率的定义及工程意义出发, 通过地质勘探揭露直接进行现场连通率测量^[2,3]; 另一类为概率模型估计的方法^[4~6], 如 Jennis 提出的基于结构面固有间距的连通率估计; 第三类为网络模拟方法^[7,8], 即在对裂隙网络进行计算机模拟的基础上, 根据定义对结构面连通率进行计算. 上述方法中, 除了现场直接测量外, 其他方法实际上都包含了对裂隙空间分布均匀性的假定. 实际工程中, 结构面的空间

分布往往具有相当程度的非均匀性, 可能出现局部的集中. 由于不连续面在空间发育具有很强的不确定性, 不均匀性, 所以寻求一种计算连通率的普适性解析算法仍然是一个难题. 除了随机结构面三维网络计算机模拟外, 目前对结构面连通率的理论研究仍限于线连通率, 专门针对不均匀随机结构面连通率的研究尚不多见.

本文根据不均匀随机结构面的分布特点, 建立了与之等价的均匀随机结构面等效模型, 在此基础上, 提出了一种具有普适性的广义连通率计算方法. 通过实际工程的检验, 证明了这种处理方法的合理性和结果的可靠性.

1 随机结构面等效模型及其广义连通率算法

1.1 随机结构面空间分布均匀程度的数学描述

裂隙密度或间距是表征随机结构面分布均匀程度的主要参数, 理论上, 如果随机结构面是严格均匀分布的, 那么其密度是与空间坐标无关的常数. 事实上, 这种理想化情形并不存在, 为了正确判断结构面分布的性质, 首先应对结构面均匀性进行数学描述.

如果随机结构面密度 ρ 为随机变量, ρ_0 为一结构面密度常数, $\Delta\rho$ 为较小的结构面密度增量值, α 为显著性水平, P 为事件 $|\rho - \rho_0| > \Delta\rho$ (简记为事件 A) 发生概率, 则根据数理统计中假设检验理论, 我们对结构面均匀性作如下定义^[9]:

2002-10-28 收稿, 2003-01-27 收修改稿

* 国家杰出青年科学基金后续项目资助(编号: 49525204)

E-mail: hrq@cdu.edu.cn

$$P(|\rho - \rho_0| > \Delta\rho) \leq \alpha \quad (1)$$

如果式(1)成立, 就称结构面分布是均匀的, 否则就是不均匀的。

(1)式的物理意义是: 如果结构面是均匀分布的, 那么其密度值主要集中在以 ρ_0 为中心的 $\Delta\rho$ 范围内, 超过此范围的事件 A 为小概率事件, 其概率 P 应该小于 α 。如果 P 大于 α , 说明小概率事件 A 在一次试验中真的发生了, 据此推断结构面是非均匀分布的。

1.2 H-H 算法的局限性

黄润秋等根据结构面在测量窗口内的交切关系, 建立了结构面迹长与窗口尺度之间的关系(H-H1 公式)^[10,11]:

$$l = \frac{n_1 + 2n_0}{2N} \frac{\pi wh}{w+h}, \quad (2)$$

并在此基础上, 导出了连通率估算公式:

$$k = \frac{n_1 + 2n_0}{2N + n_2}. \quad (3)$$

(2)和(3)式中, l 是结构面平均迹长, w 和 h 分别为测网的宽度和高度, k 是结构面连通率, n_0 是两端均不可见的连续面数; n_1 是一端可见另一端不可见的连续面数, n_2 是两端可见的连续面数, N 是连续面的总数:

$$N = n_0 + n_1 + n_2, \quad (4)$$

(3)式我们称之为 H-H2 公式, 其成立前提是迹长中点服从均匀分布, 这表明在结构面迹长变化范围不大的情况下, 此前提实质等价于结构面在空间均匀分布, 也就是说, H-H2 公式只在结构面呈均匀分布的情形下才适用。

1.3 随机结构面的等效模型

结构面空间分布的不均匀性必然导致“锁固段”或“岩桥”长度分布的不均匀性, 在这种情形下, 可能存在两种长度不同的岩桥段: 一种是长度较短的岩桥, 其长度可以通过 H-H1 公式计算获得(一般不超过 6 m), 并且已包含于连通率计算公式 H-H2 中; 另一种是长度较长的岩桥, 其长度已经超过了算法的预测极限, 因此在连通率计算公式 H-H2 中未被包含进来。长岩桥的存在很可能给

H-H2 公式的连通率计算带来很大的误差。

为了使 H-H 公式能够在结构面非均匀分布条件下成立, 则必须消除长“岩桥”的不利影响, 为此我们建立与均匀分布等价的随机结构面等效模型。理论上, 可以通过对随机结构面进行空间位置调整(如坐标平移), 将非均匀分布的结构面转变为均匀分布的结构面, 这一处理方法称之为结构面的均匀化处理。

以二维平切面为例, 在图 1 中, 裂隙疏密不均, 呈“集群”状出现, “集群”与“集群”之间有一定距离, 这是不均匀性裂隙典型特征。通过对结构面位置进行调整后, 得到如图 2 所示的均匀化处理结果: 结构面被划分为两大区域, 即裂隙相对均匀分布的等效裂隙区和无裂隙等效空白区。这里所说的“等效”, 是因为这种理想模型并不真实, 只是几何意义上的等价。于是通过均匀化处理, 长锁固段被截短为短锁固段, 并放之于等效裂隙区; 被截掉部分置之于等效空白区中。

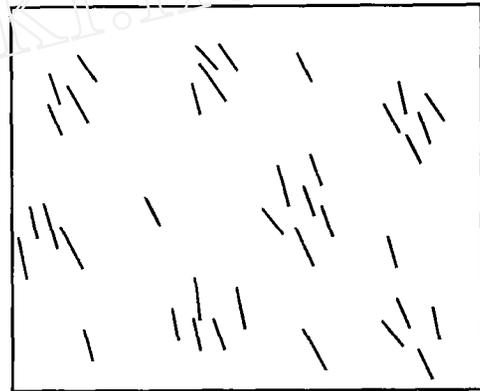


图 1 不均匀随机结构面分布示意图

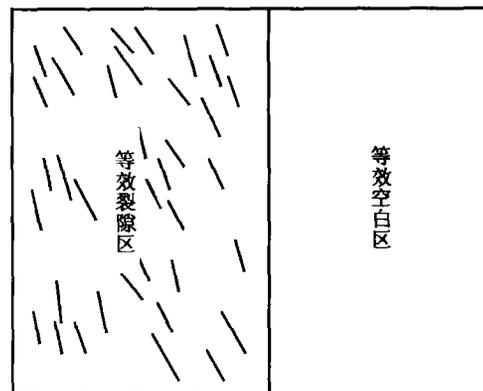


图 2 均匀随机结构面等效模型型

当然, 等效模型的建立是有前提的, 那就是结构面在间距和两个断距方向上具有相似的分布形式. 按照随机结构面圆盘模型(如图3所示), 走向X和倾向方向Z具有大致相同的几何尺度, 故可以认为结构面在两个断距方向上具有相似的分布, 所以只需要分析其中一个断距方向和间距方向是否具有相似的分布即可. 如果两者具有相同的分布形式, 而且分布函数中的参数值相差不大, 则可以认为在空间上结构面具有图2所示分布特征, 在这种情况下, 结构面等效模型成立; 否则等效模型失效.

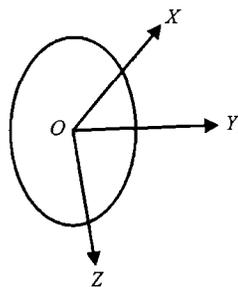


图3 结构面圆盘模型

1.4 广义连通率算法

通过均匀化处理, 建立均匀随机结构面等效模型之后, 就可以很容易得到随机结构面连通率计算公式

$$k = B_s k_c = (1 - B_1) k_c, \quad (5)$$

上式中, k_c , k 分别为等效裂隙区结构面连通率及其总体连通率, B_s 为等效裂隙区中短岩桥所占的长度比例, B_1 为空白区中被截掉部分长岩桥段所占的长度比例, 称为等效参数. 其中 k_c 可以利用结构面在均匀分布条件下的任何算法求得, 不依赖于某一具体算法, 因此称此算法为广义连通率算法.

将(3)式代入, 得到基于 H-H 算法的结构面连通率计算公式为

$$k = (1 - B_1) \frac{n_1 + 2n_0}{2N + n_2}. \quad (6)$$

上式实际上是对 H-H 连通率计算方法的推广, 所以称之为广义 H-H 连通率计算公式. 其中, 确定等效参数 B_1 是关键. 如果结构面间距和断距具有相同的分布特征, 则可以计算等效参数 B_1 , 具体算法如下:

$$B_1 = \frac{1}{L} \sum_i l_i, \quad (7)$$

式中, L 代表测段的总长度, l_i 是第 i 个空白段长度. 理论上, 随机分布结构面经过均匀处理后, 等效裂隙区中结构面平均断距不应超过 H-H 迹长估计的极限值^[10].

1.5 等效参数计算

如果间距和断距分布具有相似性, 则广义连通率计算(5)式成立. 等效参数 B_1 可按如下方法进行计算:

$$B_1 = \frac{1}{L} \sum_i n_i l_0, \quad \text{其中: } n_i = \frac{l_i}{l_0} \quad n_i = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

上式中, l_0 是长锁固段长度下限值, l_i 是第 i 个空白区样本长度, n_i 是第 i 个空白区样本所包含 l_0 的个数. (9)式实质上反映一个以 l_0 为单位对空白区样本进行二次采样. 通过二次采样, 小于 l_0 的空白区样本被过滤掉, 大于 l_0 的空白区样本被分为两种情况: 其中, l_0 整数倍的空白长度被选取出来, 用于计算等效参数 B_1 , 其他部分空白段长度被过滤掉.

(8)式表明: 小于 l_0 的空白区与等效模型中的短锁固段相对应, 大于 l_0 空白区与等效模型中的长锁固段相对应, 其中 l_0 整数倍的空白长度构成了等效空白区. l_0 的大小与测量窗口尺度和 k_c 的算法有关, 可以由对锁固段最大极限长度的预测而定.

2 广义连通率计算模型的有效性检验

为了验证连通率概率计算模型(6)式的合理性, 我们采用将概率模型估计结果与确定性模型计算结果相互对比的方法, 对其合理性进行了检验.

用于检验的地段选择在某大型水电工程坝址的地下厂房区. 在这个区段内, 施工了与 NNW(左岸)和近 EW(右岸)向结构面平行的勘探平洞, 可以在这些平洞洞顶对这两组结构面进行全迹长的追索, 采用“投影法”确定侧裂结构面的连通率, 它对应于“确定性模型”的结果. 而在这些平洞中, 同时也施工了分别与两组结构面走向相垂直的平洞, 在这些平洞里, 可以采用上述的概率模型进行结构面连通率的概率模型估计.

首先进行了结构面连通率的确定性模型评价。在平硐顶对结构面进行全迹长的追索和编录后,采用“投影法”,取2m的投影带宽,计算得到NNW和近EW两组侧裂结构面的连通率如表1所列。然后,在与厂房轴线垂直的平硐内采用(6)式的概率估计模型进行连通率的评价。按照上述非均匀结构面连通率概率模型估计的原理,首先需要判断能否将非均匀分布的结构面进行等效模型的处理。

平硐中侧裂结构面间距和断距概率分布统计结果表明,两者均服从负指数分布,且分布参数非常接近,表明等效模型成立,即在上述平硐中,(6)式的连通率概率估计模型是适用的。对厂房区平硐的结构面进行系统测量后,根据(6)式的概率模型估计公式,计算出它们的连通率值如表1所列。

由表1可见,两种模型评价的连通率值是比较接近的,两者相差小于5%。如果以确定性模型的结果作为参考,则概率模型估计的结果平均误差约为15%。这表明,本文提出的非均匀分布结构面连

通率概率模型估计公式((6)式)是合理的,且具有较高的评价准确度。

3 工程应用

拟建西南某大型电站为一个高拱坝,是一巨型规模的水力发电枢纽工程,坝肩抗滑稳定性是坝区关键的工程地质问题之一。其中,侧裂面的特性是影响该问题最为重要的边界条件,对其进行合理评价是坝肩抗滑稳定性分析中的一个难题。

前期地质调查表明,可能构成侧裂面的岩体结构面是陡倾基体裂隙,左右两岸分别为NNW向和EW向,我们称之为侧裂结构面。连通率是描述结构面几何特征的重要参数,也是工程设计和坝肩抗滑稳定分析中最为关心的岩体结构参数之一。坝区内大多数勘探平硐与侧裂结构面走向近于垂直,与侧裂面走向平行的平硐很少,而且结构面的空间分布具有明显的不均匀性,给计算连通率带来了不利的影响,为此采用了广义连通率估计方法,取得了良好的应用效果。分析过程如下:

表1 两种方法结构面连通率评价对照表

岸别	概率模型				确定模型			
	硐号	地层岩性	测段范围/m	连通率/%	硐号	地层岩性(侧裂面数)	测段范围/m	连通率/%
左岸	PD87-3	P2 β 6 斑状玄武岩	0~120	15.9	PD87-1	P2 β 6 斑状玄武岩	0~120	18.8
	PD87-2	P2 β 6 斑状玄武岩			PD87-2	P2 β 6 斑状玄武岩	0~140	
右岸	PD08-3	P2 β 8 玄武岩	0~85	6.3	PD08-2	P2 β 8 玄武岩	0~122	9.9
	PD18-5	P2 β 6 玄武岩	0~92	31.8	PD18-3	P2 β 6 玄武岩	150~350	29.1
	PD18-6	P2 β 6 玄武岩	0~140					
	PD76	P2 β 6 玄武岩	0~142	20.5	PD76 交	P2 β 6 玄武岩	0~148	25.4

(1) 非均匀性检验: 结构面分布是否均匀应该通过假设检验才能下结论,不能仅仅靠经验来作主观判断,检验方法可通过(1)式来实现。统计结果表明,侧裂结构面密度服从几何分布(如图4),其中左岸分布函数参数 p 为0.44,右岸分布函数参数 p 为0.31,取 α 为0.1, ρ_0 , $\Delta\rho$ 分别为2,1,则左右两岸均不满足式(1),所以侧裂结构面是非均匀分布的。

(2) 相似性检验: 空白区空间分布在各个方向上是否相似是等效模型能否成立的关键。为此我们对间距空白区和断距空白区分别进行统计,结果表明,左右两岸空白区近似均服从负指数,如图5(a)和(b)。

$$p(x) = e^{-\lambda x} \quad (9)$$

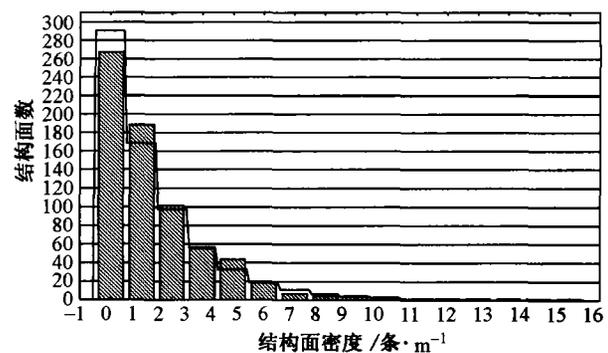


图4 左岩侧裂面密度直方图及其分布函数

间距空白区和断距空白区分布函数相同,参数也比较接近,故可认为两者具有相似性,等效模型成立。

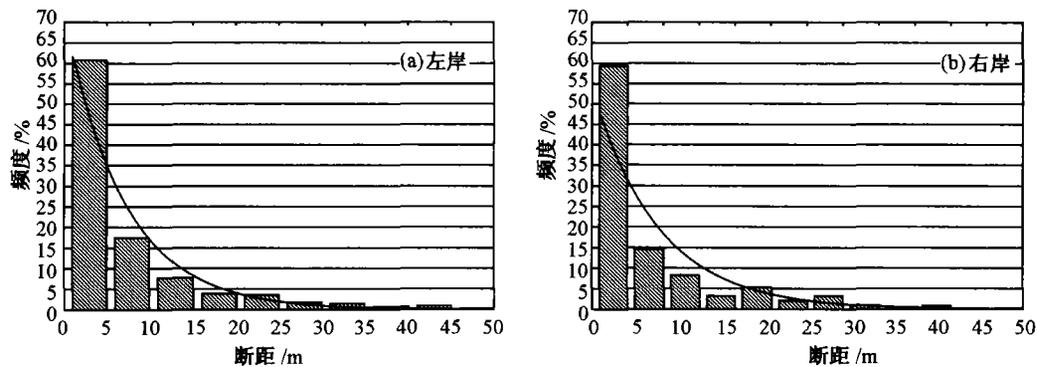


图5 左、右岸裂隙断距直方图及概率密度函数

(3) 计算等效参数 B_1 : 等效模型成立, 就可利用(7)式计算等效参数 B_1 , 对于洞高为 2 m 的平洞, H-H 模型对迹长估计的最大长度约为 6 m^[10,11], 岩桥的估计与迹长估计的最大长度相同, 并考虑到实际地质情况, 故取 l_0 为 10 m. 计算得到的 B_1 列于表 2 中.

(4) 计算连通率 k : 采用(5), (6)式对连通率进行计算, 结果如表 2 所列. 其中 k_c 是假定结构面为均匀分布, 计算得到的连通率值; B_s 为等效参数, k 为实际结构面非均匀分布时的连通率值.

表2 各拱圈高程侧壁面连通率估计值

高程	左岸 NNW 向组			右岸近 EW 向组		
	k_c	$1-B_s$	k	K_c	$1-B_1$	K
低高程	32.75	0.374	12.25	28.94	0.523	15.12
中高程	26.62	0.434	11.38	27.45	0.661	18.14
高高程	29.38	0.501	14.72	33.43	0.577	19.29
平均值	29.58	0.436	12.78	29.94	0.789	17.51

比较表 2 中的 k 与 k_c 后发现, 通过非均匀校正后的结构面实际连通率远远低于按均匀分布计算得到的结构面连通率; 反映到结构面的抗剪强度特性评价上, 按前者的值进行评价将会得到更为有利的结果, 这表明, 结构面分布的非均匀性对连通率和抗剪强度的影响是显著的, 应给予充分的考虑. 对本文的实例而言, 结构面的连通率在 12%~18% 之间, 左岸低于右岸, 表明结构面总体上连通程度较低, 连通段短, 岩桥段长, 这对坝肩抗滑稳定是非常有利的.

4 结论

本研究得到以下认识:

(1) 结构面的连通率可以通过概率模型的方式来表达. 这里, 基于结构面与窗口交切关系建立的概率模型具有简便实用的特点, 特别适合在有限露头上开展.

(2) 实际工程中, 结构面往往表现为非均匀分

布. 本文在基于均匀分布结构面连通率估计模型基础上, 采用等效均匀模型的方法, 提出了非均匀分布结构面的连通率估计模型, 即“广义 H-H 连通率估计模型”. 这种处理方法概念清晰, 模型表达直观简单, 便于使用.

(3) 对本文所提出模型的检验表明, 该模型对结构面连通率的估计具有较高的精度.

(4) 本文对模型应用中的实际问题, 尤其是非均匀性检验和相似性检验问题进行了深入的讨论, 提出了检验的方法和程序. 本文的模型已应用于工程实际.

参 考 文 献

- 张倬元, 等. 工程地质分析原理. 北京: 地质出版社, 1981
- 黄润秋, 等. 高边坡稳定性的系统工程地质研究. 成都: 成都科技大学出版社, 1991
- Priest S D, et al. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline. Int J Rock Mech Min Sci and Geomech Abstr, 1981, 18: 183
- Jennings J E. A mathematical theory for the calculation of the stability of slopes in open cast mines. In Proc Symp on the Theoretical Background to the Planning of Open Pit Mines. Johannesburg, 1970. 87
- Kulatilake P H S W. State of the art in stochastic joint geometry modeling. In: Proc 29th U S Symp on Rock Mech, Rotterdam: Balkema, 1988. 215
- Hudson J A, et al. Discontinuity frequency in rock masses. Int J Rock Mech Min Sci and Geomech Abstr, 1983, 20: 73
- Einstein H H. Modern development in discontinuity analysis—The persistence-conductivity-connectivity problem. In: Comprehensive Rock Mechanics. London: Pergamon Press, 1995, 193
- 陈剑平, 等. 随机不连续面三维网络计算机模拟原理. 长春: 东北师范大学出版社, 1995
- 吴 翊, 等. 应用数理统计. 北京: 国防科技大学出版社, 1995
- 黄国明, 等. 基于交切条件的不连续面平均迹长的估算方法. 地质科技情报, 1999, 18(1): 105
- 黄润秋, 等. 节理岩体不连续面广义 H-H 迹长估计. 自然科学进展, 2002, 12(12): 1321