

国外岩体裂隙面形态特征评价方法综述

吴继敏 陈志坚

(河海大学土木工程学院 南京 210098)

摘要 岩体裂隙面形态特征评价方法有立体评价法、垂直剖面法、迷向均匀随机线法、角分布法、余纬度分布法等。评价的主要内容集中在裂隙面粗糙度和线粗糙度方面,并建立了一系列的理论模型。实践证明,这些方法的评价结果均较接近,均能较为真实地反映裂隙面的形态特征。然而基本资料的获得以及评价方法的可操作性都有一定的难度,尤其是对实现设备的要求较高。

关键词 岩体 裂隙面 粗糙度 评价方法 数学模型

随着现代工业建设及科学技术的迅速发展,裂隙面形态特征的研究越来越受到重视。在确定裂隙面的导水性质及力学性质方面,其作用越来越大。如深埋地下的管道的外水压力研究,核工业设施的外渗研究,边坡及地下洞室的稳定研究等。近几十年来,国外许多地学工作者在从事这方面的研究,应用了很多方法,积累了大量经验,如立体评价方法^[1,2],垂直剖面法^[3],迷向均匀随机线,即IUR(Isotropic Uniform Random)方法^[4,5],角分布法^[6,7],余纬度分布法^[8]等。而评价的手段也各种各样,如概率统计、地质统计^[9]、分数维^[10,11]、光谱^[12]等手段。本文主要介绍国外地学工作者在评价方法方面所做的工作。

1 立体评价方法

裂隙面的形态特征参数主要包括裂隙面两壁对参考坐标的相对高差(粗糙情况)以及两壁所包围的空间(裂隙孔隙),裂隙曲面的曲率,或者是裂隙面与垂直平面交线与水平面的夹角等。在研究相对高差方面,理论上较为成熟,研究的成果也较多。

1.1 基本原理

应用立体学方法评价裂隙面形态特征的基本公式有^[13]

$$S_v = K(\Omega) B_A \quad (1)$$

$$S = R_A A'(n) \quad (2)$$

式(1)为典型的立体公式,式(2)具有一般广义性,反映几何概率。式中 S_v 为裂隙面密度; $K(\Omega)$ 为裂隙定向函数; B_A 代表裂隙边界线密度; S 为裂隙面的实际面积; R_A 代表裂隙面粗糙度; $A'(n)$ 为给定样本内裂隙面的投影面积。

由公式(1)和(2)以及模型样本,不难推导出裂隙线粗糙度^[14]

$$R_L = \frac{R_A}{K(\Omega)} = \frac{L_t}{L} \quad (3)$$

式中 L_t 为裂隙面在剖面的实际长度; L 为 L_t 的投影长度。

因此, R_L 定义为给定样本裂隙的实际长度与其投影长度之比,为大于1的无量纲系数。

式(1)~(3)是应用立体学方法评价裂隙面形态特征的主要模型。

1.2 经验模型

Gentier等^[14]对法国 Guéret 花岗岩样本

第一作者简介:吴继敏,男,博士、副教授,从事图像处理的地学应用、地下洞室稳定评价及地学统计及模型等研究,曾发表《圆形洞室顶部楔形体稳定性的概率评价》等论文。

裂隙进行实测, 得到其线粗糙度 (R_L) 为 1.021。根据 6 个不同的模型, 计算得到特征参数。

a. El Soudani 模型^[15]:

$$\frac{1}{R_L} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n (2 - R_A)^n}{(2n+1) R_A^{n+1}} \quad (4)$$

b. Coster 等模型^[16]:

$$R_A = \frac{\bar{R}_L + \pi/2 - 2}{\pi/2 - 1} \quad (5)$$

c. Wright 等 A 模型^[14]:

$$R_A = \frac{\pi}{2} (\bar{R}_L - 1) + 1 \quad (6)$$

d. Wright 等 B 模型^[14]:

$$R_A = \frac{\pi}{2} \sqrt{\bar{R}_L^2 - 1 + \frac{4}{\pi^2}} \quad (7)$$

e. Underwood 模型^[17]:

$$K(\Omega) = \frac{4}{\pi} - \frac{4/\pi - 1}{\bar{R}_L} \quad (8)$$

f. Gentier 和 Riss 模型^[14]:

$$K(\Omega) = \frac{4}{\pi} - \frac{4/\pi - 1}{\bar{R}_L} + 0.304749(\bar{R}_L - 1) \quad (9)$$

其中式(9)是通过模型比较和回归分析后, 对式(8)的修正。

2 垂直剖面法

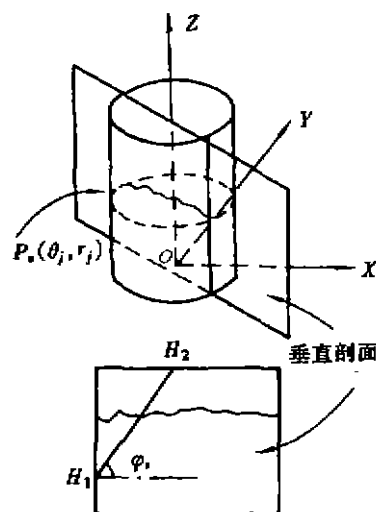
垂直剖面法的理论基础是 Baddeley^[3]于 1985 年提出的模型:

$$S(F) = \frac{B(E)}{\pi N} \sum_{j=1}^N W_j [F \cap P_v(\theta_j, r_j)] \quad (10)$$

式中 N 为垂直剖面数; $B(E)$ 等于样本底面的周长; N_j 为第 j 剖面内 IUR 线的分布数; φ_i 为第 i 条 IUR 线的倾角; A_j 为第 j 剖面的面积; Q_j 等于 OX 和 OY 的夹角; r_j 等于 $\parallel OY \parallel$; l_i 等于 $\parallel H_1 H_2 \parallel$; $H_1 H_2$ 为 IUR 线; 第 j 垂直剖面 A_j 的第 i 条 IUR 线(倾角为 φ_i) 相交于裂隙面的 n_i 点; $W_j [F \cap P_v(\theta_j, r_j)] =$

$$A_j [E \cap P_v(\theta_j, r_j)] \frac{2 \sum_{i=1}^N n_i |\cos \varphi_i|}{\sum_{i=1}^N l_i |\cos \varphi_i|}; \text{其概念}$$

见附图。



附图 垂直剖面法评价裂隙样本示意图

Gentier 和 Riss^[14, 18]应用这一方法, 对 Guéret 花岗岩某样本的实验研究, 由 34 个垂直剖面评价得到的结果为: R_A 为 1.041, S_v 为 0.867 mm^{-1} 。应用模型(式(4) ~ (9))得到的线粗糙度分别为 1.026, 1.023, 1.026, 1.017, 1.026 和 1.027。

3 迷向均匀随机线法

迷向均匀随机线法主要用来评价裂隙边界线密度 B_A 。这一方法最早的应用可追溯到 1954 年 Steinhans^[4]的研究, 原方法是利用通过裂隙面 Y 的等距离平行截面, 统计不同截面上的 B_A , 得出综合值。Moron^[19]在此基础上改变不同的角度重复操作, 又做了一定的工作。IUR 线的应用始于 Miles 等^[20]和 Sanfalo^[21]; 先假定裂隙面 Y 包含在凹面体 X (面积为 A) 中, 应用通过 X 的一系列 IUR 线(或 A 权重线)和相应的 IUR 非比例估计量, 或 IUR 线比率估计量来评价 B_A ; 也提出在已知几何分布特征的基础上, 用两个变量(方位角 θ 和位置 P)来代替 A 的权重分布 (θ, x, y) , 即通过 X 的 IUR 线来代替 B_A , 而 Riss 和 Gentier^[5]于 1987 年又做了进一步的研究, 他们利用随机过程中的数理统计方法(复式迭代法)寻找理想小样本的 IUR 线。结

果表明,这样的 IUR 线能同时满足准随机数的直观视觉均匀性条件。

迷向均匀随机线法的基本公式为

$$B_A = \frac{\pi}{2} I_L = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{EI(Y \cap \Delta)}{EL(X \cap \Delta)} \quad (11)$$

式中 Δ 为通过 X 的 IUR 线; I 是内截面的线数; L 表示测量长度; I_L 可用下式来迭代

$$I = \frac{\sum_{i=1}^N L_i(Y \cap \Delta_i)}{\sum_{i=1}^N L_i(X \cap \Delta_i)}$$

相应的密度概率为

$$f(\theta, P) = \frac{d\theta dp}{\pi H(x)} \quad (12)$$

式中 $H(x)$ 表示迷向线上 X 的平均投影长度。

Weibel^[13]于 1981 年提出了 r_2^{-1} 系数, 和 $K(\Omega)$ 比较来描述裂隙面的结构。假定 Moriort 分布和 Fisher 分布近似, 则有

$$r_2^{-1} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1 - K/3}{1 - K/4} \quad (13)$$

该式适用于结构面方向和截面方向垂直的实例。 K 也称为面元素排列集中参数, 据此可将结构面分为管状结构 ($K < 0$)、迷向结构 ($K = 0$) 和板状结构 ($K > 0$)。

4 余纬度法

余纬度评价方法的理论基础是假定裂隙面为一非平面, 裂隙剖面为一不规则的、连续的不重叠曲线^[22]。二维余纬度的基本想法是对应水平微线段 Δx 的微曲段 Δp 来逼近真微裂隙剖面线 ΔL , Δx 和 Δp 所夹角 (或垂直的 Z 轴和曲线法线的夹角), 即为二维视纬度 θ , 因此有

$$R'_L(\Delta x) = \frac{1}{N} \frac{1}{\sum_{i=1}^N \cos \theta_i} \quad (14)$$

$$R''_L(\Delta p) = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \cos \theta_i} \quad (15)$$

R'_L 和 R''_L 均小于实际的 R_L 。因此, 其值由概率角密度 $f'(\theta)$ 和 $f''(\theta)$ 严格修正

$$R'_L = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} f'(\theta) \frac{1}{\cos \theta} d\theta \quad (16)$$

$$R''_L = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{f''(\theta) \cos \theta} d\theta \quad (17)$$

又由于 R'_L 和 R''_L 具有多解性, 故引进了另一个参数 z_2 (和 R_L 有直接关系) 反映二维严格分布的粗糙性。 z_2 称为第一导数的二阶动差平方根

$$z_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tan^2 \theta_i = \sqrt{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \tan^2 \theta f(\theta) d\theta} \quad (18)$$

例如, 和垂直剖面法同一样本, 测得 z_2 为 0.2436, 得到 R_L 为 1.027。

三维余纬度 θ' 的评价方法和二维视余纬度评价的原理相同, 用来评价 R_A 。而其概率角密度表达不一样, 二维视余纬度 θ 和三维余纬度 θ' 的关系由下式给出

$$f(\theta) = \frac{2}{\pi \cos^3 \theta} \int_0^\theta \frac{f(\theta') \cos \theta' d\theta'}{(\tan^2 \theta' - \tan^2 \theta)^{\frac{1}{2}}} \quad (19)$$

5 角分布法

角分布方法基本与余纬度方法相似, 是应用统计及概率方法来研究裂隙剖面线微分段的成角性质或裂隙微平面成角性的曲率半径^[6,7]。基本做法是: 裂隙面的走向为 OXY 平面, 高于 OXY 平面的点为 $z_u = f_u(x, y)$, 低于 OXY 平面的点为 $z_l = f_l(x, y)$; 然后用相互垂直的平面 AB 和 CD 平面 (间距为 $\Delta x = \Delta y = 0.5 \text{ mm}$) 去切割裂隙面, 得到一系列的点 (x, y, z_u) 和 (x, y, z_l) , 构成连续单调函数。裂隙面剖面线的成角性即为 $\tan \Phi = \Delta z / \Delta x$ 或 $\tan \Phi = \Delta z / \Delta y$ 。

对同一样本 (垂直剖面法) 的实测, 得到粗糙度系数为: CD 剖面 (上下部) $R_L = 1.032$; AB 剖面 (上下部) $R_L = 1.021$; 总的 $R_A = 1.054$ (Scriven 和 Williams 法^[6])。

6 地质统计方法

这里应用的地质统计方法的基础工具是

局域化变量的变化记录图 $r(h)^{[9]}$, 即

$$2r(h) = E[z(x) - z(x+h)]^2 \quad (20)$$

局域化变量具有区间性和台阶性。一些实例可用广义变化记录图 $\Gamma_k(h)$ 来代替 $r(h)$

$$\Gamma_k(h) = \frac{1}{M_k} \sum_{q=0}^{k+1} (-1)^q C_{k+1}^q z[x + h(k+1-q)] \quad (21)$$

式中 $M_k = C_{k+1}^{k+1}$; $\Gamma_k(h)$ 表示某一偏差, 即标准因子 M_k 的 k 阶增量的变化, 并能用最小二乘法评价 k 阶多项式的偏差函数。变化记录图还可通过实测资料的线性回归来计算相对高差 $z(x)$ 的方差, 并用优化内插, 评价线性回归的权数, 使得方差最小。利用基本模型(理论变化记录图)有球状的、高斯的、立方体状的、幂指数状的等来调节实测变化记录图^[21]。

利用地质统计方法可以得到这样的结论: 纯数量描述分析可确定裂隙面颗粒粒径、曲率、高差等结构特征, 同时还可以进行变化记录图中不同族分类, 得到变化记录图后, 可以通过模拟条件和 Krigage 方法来建立裂隙面的不同模型^[22]。

7 光谱分析及分数维分析

高度、成角性、曲率的光谱分析是分析频率特征(自频、振幅、相等)在方向上的空间分布规律。光谱分析和地质统计分析可以得到相同的结论。

Myer^[23]于 1962 年提出了用参数 α 来衡量光谱的宽度

$$\alpha = (z_1 z_3)^2 / z_2^4 \quad (22)$$

式中 z_1 为中心动差; $z_3 = (\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\Delta^2 y_i}{\Delta x^2})^{\frac{1}{2}}$ 。 α 越小, 光谱越窄, α 越大, 光谱越宽。

在研究不规则现象和粗糙现象时, Mandebrot^[24,25]于 1977 年首先提出分数维的概念, 用以定量描述自同类物体的复杂性。如对二维物体, 直线的低界分数维为 1, 随物体复杂程度的增加, 分数维逐渐变大, 达到高界值 2。量测分数维的方法很多, 如步长扩大

法, 等步长导线测量法, 图像分析中的香肠法, 面积周长关系法, 变化记录图法, 富里叶方法等^[26]。

8 结 语

综上所述, 各种方法都有一定的理论基础, 实践上也较接近实测值, 有一定的应用价值。目前, 广大地学工作者致力于裂隙面形态特征的各种复杂模型的建立, 进行更详细的定量描述。在方法上, 分数维、图像分析等在这方面的研究正在深入, 如 Gervais 等^[27]正应用图像处理方法研究裂隙岩体、裂隙面的特征, 在应用上, 已开始建立裂隙面形态特征与各种不同岩类物理力学性质的关系, 如日本学者 Wakabayashi 等^[28]通过实验室研究已确定了花岗岩、安山岩体内裂隙面形态特征、分数维、抗剪强度三者之间的关系。可以预见, 在裂隙面形态特征定量描述研究方面, 将会有更系统的、更有实用价值的成果出现。

参考文献

- 1 Riss J, Gentier S. Linear and areal roughness of non planar rock surface of fracture. ACTA STEREOLOG, 1989, 8(2): 677 ~ 682
- 2 Underwood E E. The analysis of non planar surfaces using stereological and other methods. ACTA STEREOLOG, 1987, 6(3): 855 ~ 876
- 3 Baddeley A J. An anisotropic sampling design. In: Geobuild '85 Workshop on Problems of Image Processing, 1985, Friedrich-Schiller Jena: 9 ~ 97
- 4 Steinhilber H. Length, shape and area. Colloquium Mathematicum, 1954, 3: 1 ~ 43
- 5 Riss J, Gentier S. Length of planar curves: stereological estimation with ideal samples of IUR lines. ACTA STEREOLOG, 1987, 6(1): 149 ~ 154
- 6 Scriven, Williams. The derivation of angular distribution of planes by sectioning methods. Trans of the Metallurgical of Scine, 1965, 233: 1953 ~ 1602
- 7 Riss J, Gentier S. Angularity of a natural rock fracture mechanics of jointed and faulted rock. Reesmanuth Balkema Rotterdam, 1990
- 8 Riss J, Gentier S. Description quantitative et modél-

- lisation de la morphologie de fractures rocheuses. GEO-PROBA, GBMS - GBMR, GBGM - BVRM, 1989
- 9 Chile J P. Géostatistique des phénomènes non stationnaires: [Thèse Doc Ing]. Nancy 1, France, 1977
 - 10 Berry M V, Lirris Z W. On the Weierstrass-Mandelbrot fractale fonction. In: Proc R Soc, Lond, 1980, A370:459 ~ 484
 - 11 Gentier S. Morphologie et comportement hydro-mécanique d'une fracture naturelle dans le granite sous contrainte normale: étude expérimentale et théorique: [Thèse de doctorat de] Université d'Orléans and BRGM document, No. 134, 1987
 - 12 Brown S R, Schoy C H. Broad bandwidth study of the topography of natural rock surface. J of Geology, 1985 (Research 90): 14 ~ 19
 - 13 Weibel E R. Stereological methods: theoretical foundations V2. London: Academic Press, 1981
 - 14 Gentier S, Riss J. Natural fractures in rocks: stereological estimation of areas by systematic sections. ACTA STEREOLOG, 1987, 6(1): 223 ~ 228
 - 15 El Soudani S M. Profilometric analysis of fractures. Metallography, 1987(11): 247 ~ 336
 - 16 Coster M, Cherman J L. Recent development in quantitative fractography. Int Metals, 1985, Rw28:46
 - 17 Underwood E E. Statistical analysis of facet characteristics in a computer simulated fracture surface. ACTA STEREOLOG, 1983, 2(Supp 1): 75 ~ 80
 - 18 Gentier S, Riss J. Spherical distribution of fracture surface elements from linear and/or areal roughness. ACTA STEREOLOG, 1987, 6(3): 877 ~ 882
 - 19 Moron P O P. Measuring the length of a curve. Biometrika, 1966, 53: 59 ~ 64
 - 20 Miles R E, Davey D. Precise and general condition for the validity of a comprehensive set of stereological fundamental formulae. J of Micro, 1976, 107: 211 ~ 236
 - 21 Snialo L A. Integral geometry and geometric probability. London: Addison Wesley Publishing Company, 1976
 - 22 Gentier S, et al. Reconstitution d'une surface de fracture recherche par krigeage. J Microsc Spectrosc Elec, 1987, 12: 169 ~ 172
 - 23 Myers N O. Characterization of surface roughness. Wear, 1962, 182 ~ 189
 - 24 Mandelbrot B B. Fractals form; chance and dimension. San Francisco: Freeman, 1977
 - 25 Mandelbrot B B. Self affine fractals and fractal dimension. Physica, 1985, scripta 32: 257 ~ 260
 - 26 Cherbit C. Fractals dimensions non entiers et application. Paris: Masson, 1991
 - 27 Gervais F, et al. Caractérisation stéréologique de la géométrie d'un massif rocheux fracturé: application aux carrières de Comblanchien. Bull Soc Géol, France, 1993, 164(32): 459 ~ 471
 - 28 Wakabayashi N, Fukushima I. Experimental study on the relation between fractal dimension and shear strength. Granlibakken Conference Center, 1992. 126 ~ 131
- (收稿日期: 1996 - 06 - 28 编辑: 熊水斌)

(上接第 15 页)

- 4 Jardine R J, Fourie A, Maswoswe J, et al. Field and laboratory measurement of soil stiffness. In: Proc 11th Int Conf Soil Mech Fudn Engng, San Francisco, 1985. 511 ~ 514
 - 5 Al Tabbaa A. Permeability and stress strain response of speeswhite kaolin: [PHD thesis]. London: University of Cambridge, 1987
 - 6 Stallehrass S A. Modelling the effect of recent stress history on the deformation of overconsolidated soils: [PHD thesis]. London: City university, 1990
 - 7 Seed H B, Idriss I M. Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis. EERC Report No. 70 ~ 10, Berkeley, California, USA, 1970
 - 8 Simpson B. Retaining structure: displacement and design. Geotechnique, 1992, 42(4): 541 ~ 576
 - 9 Housley G T, Wroth C P. The variation of shear modulus of a clay with pressure and overconsolidation ratio. Soils 1991, 31(3): 138 ~ 143
 - 10 Shi Q. Effect of ground deformation on structures due to tunnelling. In: 2nd International Symposium on Structures and Foundations in Civil Engineering. Hong Kong, 1997
- (收稿日期: 1996 - 11 - 20 编辑: 张志琴)