

基于随机-模糊处理理论的岩体力学参数研究

张玉香^{1,2}

(1 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100; 2 河南农业大学 经济与管理学院,河南 郑州 450002)

[摘要] 讨论了随机-模糊处理方法在岩石力学指标统计分析中的应用,并对计算中诸如迭代精度、隶属函数的取值等关键问题进行了较深入地研究。结果表明,基于岩石样本力学参数的离散性中既包含随机不确定性,又包含模糊不确定性,采用随机-模糊处理方法优于其他常规的统计方法,从而为该方法在工程实践中的应用奠定了基础。

[关键词] 岩土力学;力学参数;随机模糊不确定性;3 σ 法则;Grubbs 准则

[中图分类号] TU452

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2007)12-0231-04

Research on parameters of rock and soil mechanics based on random-fuzzy theory

ZHANG Yu-xiang^{1,2}

(1 College of Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 College of Economics and Management, He'nan Agricultural University, Zhengzhou, He'nan 450002, China)

Abstract: In this paper, the application of random-fuzzy method to statistic analysis of mechanical parameters of rock samples was discussed, and some computation questions such as subordinate function's choice are studied deeply. The result indicates that the characteristic of rock and soil mechanic parameter not only has random character, but also shows ambiguity; random-fuzzy method is proved superior to other common methods, and therefore establishes the base of application to engineerings.

Key word: rock and soil mechanics; mechanics parameters; undefinitude of random-fuzzy; 3 σ rule; Grubbs rule

岩体力学参数的测定是岩土工程分析、设计的前期工作,是进行岩体工程稳定性分析的基础性工作^[1-5]。岩体力学参数的求取与应用技术,引起了国内外专家的广泛关注,并对其求取技术进行了大量研究^[6],研究成果已应用于各个方面。岩体样本的力学参数往往离散性很大,其中既包含随机不确定性,又显著地包含模糊不确定性。传统的随机方法用于这种既有随机性同时又带有模糊性的岩体力学参数的分析存在不足,如最小二乘法只考虑了样本的随机性,而随机-模糊处理方法为解决这一问题提供了一条较好的途径^[7]。本研究即采用随机-模糊处理方法处理离散性大的试验结果,这将更优于点

群中心法、优定斜率法等常规的统计方法。

1 力学参数的随机-模糊处理方法

1.1 岩石样本力学参数的不确定性

岩体的力学参数指标应按工程地质岩组分别统计。岩组的划分一般是依据现场调查及一些简单测试后凭个人经验确定的。由于岩体空间分布的不确定性,使得岩组的划分带有很大的模糊性,并由此带来了岩体力学试验参数的模糊性。显然,岩石样本力学参数的模糊性是一种比其随机性更重要的不确定性,所以如何处理这种带显著模糊性的数据就显得非常重要。一方面,可以通过分析测试指标对某

* [收稿日期] 2006-12-12

[作者简介] 张玉香(1972-),女,天津蓟县人,讲师,在职硕士,主要从事岩土工程研究。zhangyuxiang66@163.com

一岩组的隶属度来合理调整岩组的划分;另一方面,应通过足够数量的试验结果对每一岩组的力学指标进行可靠性估计。

1.2 随机-模糊方法的计算过程

设 x_1, x_2, \dots, x_n 为划定的工程岩组中某力学指标的样本值,如 R, E, c, φ 等。现以随机-模糊处理方法求样本的均值 \bar{x} 和方差等。文献[1]推导了其计算公式,现简述如下:

取论域为 $u = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, A 为 u 上的一个模糊子集,论域 u 中元素 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 对于 A 的隶属度为 $u_A(x_i)$, 所求的 A 的核为:

$$A = \{\bar{x} | u_A(\bar{x}) = 1\}。 \quad (1)$$

如将上式中 \bar{x} 表示成:

$$\bar{x} = f(x_i)。 \quad (2)$$

则式(2)就是给定的工程岩组某力学参数所具有的统计特征。根据所讨论问题的性质,可采用如下形式的隶属函数:

$$u_A(x_i) = \exp[-D_{ii}(x_i, \bar{x})]。 \quad (3)$$

式中: D_{ii} 是 x_i 关于模糊集合 A 的核点 \bar{x} 的马氏距离。其表达式为:

$$D_{ii} = (x_i - \bar{x})^2 \cdot \omega_i。 \quad (4)$$

这里 ω_i 称为权重。一般取常数:

$$\omega_i = \text{const} = \omega_{01}。 \quad (5)$$

可以看出, x_i 距核点 \bar{x} 的马氏距离 D_{ii} 越小,则其对 A 的隶属度越大,在核点处,隶属度最大为 1,以实际样本值整体上隶属于样本模糊子集 A 的程度最大为原则,可寻找到 \bar{x} 所具有的统计特征。为此,组成目标函数:

$$J_1 = \sum_{i=1}^n u_A(x_i) = \max。 \quad (6)$$

当 ω_{01} 为常数时,可解得:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n \exp[(x_i - x)^2 - \omega_{01}] x_i}{\sum_{i=1}^n \exp(x_i - \bar{x})^2}。 \quad (7)$$

大量计算实践表明^[8-12], 权值 ω_{01} 取值对计算结果有一定影响,即:

$$\omega_{01} = \frac{1}{(d_{1\max} - d_{1\min})/2}, \quad (8)$$

$$D_{ii} = (x_i - \bar{x})^2, \quad (9)$$

是比较合理的,但是式(7)是在假定 ω_{01} 为常数条件下得到的,即认为 ω_{01} 不随 \bar{x} 变化而求导得到的,所以在运用式(7)进行迭代计算求 \bar{x} 时, ω_{01} 应固定不变,这样就给 ω_{01} 取值带来困难。为此,在计算时采用两步迭代计算方法以避开这一问题,其计算过程如下:

(1)取 $D_{ii} = (x_i - x_{\omega})^2$, 其中 x_{ω} 为第 1 次计算时随机得出的平均值,由此得到 1 个权值 ω_{01} , 运用(7)式迭代计算求 \bar{x} 时, x_{ω} 不变,直到求得满足要求的 \bar{x} ;

(2)变化 x_{ω} (可令 x_{ω} 为上一步求得的 \bar{x}), 重复第 1 步计算,可以得到新的 \bar{x} 。

(3)重复第(2)步的计算,直到 x_{ω} 与 \bar{x} 之间的差别可以忽略不计为止。取最终 \bar{x} 为所求均值。

类似地可推导出岩石样本方差的计算公式为:

$$\sigma^2 = \frac{n \sum_{i=1}^n \exp[(x_i - \bar{x})^2 - \sigma^2]^2 \cdot \omega_{02} (x_i - \bar{x})^2}{n-1 \sum_{i=1}^n \exp[(x_i - \bar{x})^2 - \sigma^2]^2}。 \quad (10)$$

式中: σ 为岩石样本方差, ω_{02} 为权值,

$$\omega_{02} = \frac{1}{(d_{2\max} - d_{2\min})/2}, \quad (11)$$

$$d_{2i} = [(x_i - \bar{x})^2 - \sigma^2]^2。 \quad (12)$$

由于是隐函数式,需用迭代法求解,具体计算步骤如下:

(1)取初值 $\sigma = \sigma_0 = \sigma_s$ 为样本的随机方差; $\bar{x} = \bar{x}_0$, 其中 \bar{x}_0 为样本随机-模糊均值;

(2)取 $\sigma_m = \sigma_s$, 代入式(11)和(12)计算 ω_{02} , σ_s 为样本的随机方差;

(3)将 $\sigma_0, \bar{x}_0, \omega_{02}$ 代入式(10)右端计算岩石样本的随机-模糊方差 σ ;

(4)判断: 如果 $|\sigma - \sigma_0| < \epsilon_2$ (ϵ_2 为指定精度, 应与所取结果的有效位数相适应), 则转入第(5)步, 否则, 令 $\sigma_0 = \sigma$, 再返回第(3)步, 直至满足精度要求为止;

(5)比较 σ_{ω} 与 σ , 如果 $|\sigma_{\omega} - \sigma| < \epsilon_3$, (ϵ_3 同样为指定精度, 且应与 σ 所取结果的有效位数相适应), 则 σ 即为最终所求, 反之, 令 $\sigma_{\omega} = \sigma$, 再返回第(2)步计算, 直至满足精度要求。运用公式(7)、公式(10)经迭代得到随机-模糊处理方法计算的均值和方差后, 再运用以下公式就可以得到岩石样本的标准差、变异系数、修正系数和标准值(这里仍引用概率方法中的概念):

标准差: 即为方差开平方;

$$\text{变异系数: } \delta = \frac{\sigma}{\bar{x}}; \quad (13)$$

统计修正系数:

$$r_s = 1 - \left(\frac{1.704}{\sqrt{n}} + \frac{4.678}{n^2} \right) \delta; \quad (14)$$

$$\text{标准值: } f_k = r_s \cdot f_m。 \quad (15)$$

式中： n 为自然数， f_m 为岩体参数 x 的平均值（即前面求得的 \bar{x} ）， r_s 为统计修正系数。

2 粗差数据的处理

岩体力学参数具有显著的不确定性，在概率分析中常作为随机变量来对待。工程技术上一般不可能占有大量的测试资料，如果在有限的测试资料中存在未消除的异常值，会严重影响统计结果的准确性，使概率特征值失去代表性和真实性，可能导致工程技术上的重大失误。因此，必须对测试资料中的异常值进行处理^[13]。

《岩土工程勘察规范》(GB50021-94) 规定，在求得平均值和标准差后，即可用来检验统计数据中应当舍弃的带有粗差的数据，并推荐了 3 种常用的剔除粗差的方法。对于岩石力学指标，规范虽未具体规定检验标准，但在实际中常采用的方法有以下几种：

(1) 全部数据参加统计的随机方法。选取这种方法进行统计的观点认为，试验输出的所有信息都来自工程地质岩组，因此不应剔除任何试验值^[14]。但这种方法会使统计结果受少数异常信息的干扰而产生偏差。

(2) 3σ 法则。即在 99.7% 的置信水平上，舍弃范围 $[u-3\sigma, u+3\sigma]$ 以外的点。在实际使用该方法时，时常不能检验出异常值，主要原因之一是因为该准则的显著性水平较小 ($\alpha=0.3\%$)；另一方面，由于岩体样本试验值较离散，样本容量又较小，其标准差较大，可以证明当样本容量 $N \leq 10$ 时，即使含有异常值，用该方法也检验不出来^[15]。

(3) 格拉布斯 (Grubbs) 准则。格拉布斯方法是

对异常数据进行统计判别的一种方法。其基本思想为：给定一危险率（如 $\alpha=0.05$ ），确定相应的置信限，凡超过这个界限的误差，就认为是不容许误差，它不属于随机误差范畴，应予剔除。该方法使用的显著性水平较大，且不受样本大小限制，可适用于较小样本。但对于给定的不同 α 值，则会得出不同的结果， α 越小，犯第一类错误的可能性越小（错把正常值判为异常值），但反过来，却增加了将异常值错判为正常值（第二类错误）的可能性。对岩体这种高度不均匀性介质，如何选用合适的 α 值是一个复杂的问题，目前尚无明确定论^[16]。

(4) 随机-模糊处理方法。使用该方法统计计算时，按照使实际样本整体上隶属于样本模糊子集程度最大的原则，计算结果对呈一定规律的数据取得较大权值，而对个别异常数据则得到较小权值。该法既保留了全部试验信息，又不致于使计算结果受少数异常值的干扰而产生过大偏差。

3 计算实例与计算结果比较

现以某工程厂房处的室内岩石资料为例，对强风化花岗岩组、中风化花岗岩组和微风化花岗岩组 3 种岩样进行分析，各组内按一定间隔取样进行单轴饱和抗压强度试验，对试验数据分别采用 3σ 法则、Grubbs 准则和随机-模糊处理方法求统计参数，计算结果见表 1。表 1 表明，采用 3σ 法则未检验出任何异常值，而运用随机-模糊处理方法与 Grubbs 准则（取 $\alpha=0.05$ ）的计算结果较为接近。可见，将传统随机方法应用于岩石样本力学参数统计时，采用不同的剔除准则计算结果差别很大。

表 1 某工程厂房处室内岩石试验值的统计计算

Table 1 Statistic results of the inner rock testing values in a workshop of one engineering

处理方法 Handling method	岩石名称 Name of rock	单轴抗压强度/MPa Strength of single axle resisiting pressure		变异系数 Coefficient of variation	修正系数 Coefficient of amendment	标准值/MPa Standard value
		平均值 Mean value	标准差 Standard deviation			
3σ 法则 3σ principle	强风化花岗岩组 Strong weathering granite mass	7.71	3.85	0.50	0.80	6.19
	中风化花岗岩组 Medium weathering granite mass	10.90	7.91	0.73	0.66	7.20
	微风化花岗岩组 Feeble weathering granite mass	38.00	21.20	0.56	0.83	31.50
Grubbs 准则 (α=0.05) Grubbs rule	强风化花岗岩组 Strong weathering granite mass	7.12	2.98	0.42	0.83	5.90
	中风化花岗岩组 Medium weathering granite mass	9.50	5.34	0.56	0.73	7.10
	微风化花岗岩组 Feeble weathering granite mass	36.00(34.30)	18.10(16.10)	0.50(0.47)	0.85(0.86)	30.60(29.50)

续表 1 Continmaed of the table 1

处理方法 Handling method	岩石名称 Name of rock	单轴抗压强度/MPa Strength of single axle resisiting pressure		变异系数 Coefficient of variation	修正系数 Coefficient of amendment	标准值/MPa Standard value
		平均值 Mean value	标准差 Standard deviation			
		随机-模糊统计 Random-fuzzy method	强风化花岗岩组 Strong weathering granite mass			
	中风化花岗岩组 Medium weathering granite mass	9.70	5.50	0.57	0.74	7.20
	微风化花岗岩组 Feeble weathering granite mass	34.50	18.20	0.53	0.84	30.00

注:表中微风化花岗岩组运用 Grubbs 方法检验时,每次剔除 104.9,每隔 1 次剔除 88.8,表中括号内的数字为第 2 次剔除后的统计结果。
Note: In this table, when using Grubbs Rule to test the feeble weathering granite mass, we reject 104.9 each time and reject 88.8 every other time. The numbers in bracket of the table are the statistic results after the second rejecting.

4 结 论

本研究表明,将传统随机方法应用于岩石样本力学参数统计时,选用不同的剔除准则计算结果差别很大,考虑试验值同时包含随机性和模糊性这一特点,运用随机-模糊方法处理更切合实际,该方法优于传统方法。岩石力学参数在岩石工程中起着重要的作用,但试验数据同时存在随机性和模糊性,用随机-模糊统计新模型处理岩石力学参数,其能从模糊隶属函数的角度出发,给出数据在分析中起作用的大小,防止了对数据不加区别地对待,又防止了盲目地删除试验数据,从分析可以看出,其实质上是一种以隶属函数为权重因子的、对所设随机变量的一种加权均值。

[参考文献]

[1] 熊文林,李胡生. 岩石样本力学参数值的随机-模糊处理方法[J]. 岩土工程学报,1992,14(6):101-108.
 [2] 李华喆,汤学立. 基岩抗剪参数随机模糊法和小浪底工程 C 值计算[J]. 岩石力学与工程学报,1997,116(2):155-161.
 [3] 李小勇. 土工测试数据的可靠性检验[J]. 岩土工程师,2000,12(1):11-13.
 [4] 黄修云,魏利萍. 隧道岩石力学参数的随机-模糊统计分析[J].

北方交通大学学报,1999,23(1):38-41.
 [5] 李胡生. 岩石力学参数概率分布的随机-模糊估计方法[J]. 固体力学学报,1993,14(4):347-351.
 [6] 路保平,鲍洪志. 岩石力学参数求取方法进展[J]. 石油钻探技术,2005,23(5):44-47.
 [7] 黄志全,王思敬. 宝泉抽水蓄能电站岩体抗剪参数的选取[J]. 工程地质学报,1998,6(2):145-149.
 [8] 张世其. 测量误差及数据处理[M]. 北京:机械工业出版社,1996.
 [9] 姜晨光,姜祖彬,刘 华,等. 花岗岩岩石力学参数与岩体赋存深度关系的研究[J]. 石材,2004(7):4-6.
 [10] 刘世君,徐卫亚,王春红. 不确定性岩石力学参数的区间反分析[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(6):885-888.
 [11] 李金柱,李双林. 岩石力学参数的计算及应用[J]. 测井技术,2003,27(B04):15-18.
 [12] 姜 平,孟 伟. 基于岩体质量分级的岩石力学参数研究[J]. 三峡大学学报:自然科学版,2004,26(5):424-427.
 [13] 邓 建,李夕兵. 岩石力学参数概率分布的信息熵推断[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(13):2177-2181.
 [14] 刘 春. 边坡工程中岩石力学参数随机模糊选取研究[J]. 岩石力学,2004,25(8):1327-1329.
 [15] 徐卫亚,刘世君. 岩石力学参数的非线性随机反分析[J]. 岩石力学,2001,22(4):432-435.
 [16] 周火明,孔祥辉. 水利水电工程岩石力学参数取值问题与对策[J]. 长江科学院院报,2006,23(4):36-40.

(上接第 230 页)

[4] 崔锦泰. 小波分析导论[M]. 程正兴,译. 西安:西安交通大学出版社,1995.
 [5] 秦前清,张军波,夏 军,等. 基于 MATLAB 的系统分析与设计——小波分析[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
 [6] 马世纪. 基于小波分析的水轮机故障诊断研究[D]. 武汉:武汉大学,2004.
 [7] 王 海,郑莉媛. 水轮发电机组故障信号检测及小波去噪研究[J]. 水利水电技术,2002,33(9):30-33,75.
 [8] 蒋 鹏. 小波理论在信号去噪和数据压缩中的应用研究[D]. 杭州:浙江大学,2004.
 [9] 程正军,张运陶. 基于 MATLAB 的小波包分析在信号降噪中的应用[J]. 西北师范大学学报,2004,25(1):53-57.
 [10] 洪 治,李国宏,蔡维由. 基于小波包分析的水轮发电机组振动的故障诊断[J]. 武汉大学学报,2002,35(1):43-47.
 [11] 刘献栋,李其汉. 小波变换在转子系统动静件早期碰摩故障诊断中的应用[J]. 航空学报,1999,20(3):220-223.