

岩石节理力学参数的非线性估计^{*}

Nonlinear estimation of rock joint mechanical parameters

冯夏庭

(东北大学, 沈阳, 110006)

Masayuki Kosugi

(资源环境综合研究所, 日本 305)

王泳嘉

(东北大学, 沈阳, 110006)

文 摘 通过建立一个多层神经网络模型 $NN(n, h_1, h_2, 1)$, 探讨了描述节理开度与剪切位移之间的非线性关系和尺度效应的新方法, 由小尺度试件节理的实测数据建立的非线性模型可以推广地预测出较大一些尺度试件的节理开度值。对 37 条现场实测的节理进行了分形特征研究, 建立了分形维数与 JRC 关系式, 该关系式可用于 JRC 值的近似分形预测。

关键词 岩石节理, 开度, 粗糙度, JRC, 分形维数, 神经网络, 尺度效应, 剪切位移

中图法分类号 TU 45

作者简介 冯夏庭, 男, 1964 年生。1986 年毕业于东北工学院, 1992 年 4 月获博士学位后留校任教。1993 年破格晋升副教授, 1996 年破格晋升教授。一直从事智能岩石力学研究。

Feng Xiating

(Northeastern University, Shenyang, 110006)

Masayuki Kosugi

(National Institute for Resources and Environment, Tsukuba 305, Japan)

Wang Yongjia

(Northeastern University, Shenyang, 110006)

Abstract Aperture and roughness are two of the most important parameters in jointed rockmass mechanics and joint seepage mechanics. In this paper, a new method is proposed to establish nonlinear relationship between normal aperture and shear displacement in joint shear tests, which is described by a BP neural network $NN(n, h_1, h_2, 1)$. The model built from measured data of the shorter specimens obtained by cutting the longer specimens in the same length can be generalized to predict normal aperture of joints in the longer specimens. Fractal analysis was conducted for 37 joint profiles measured in site. A regressive formula was built for describing relationship between fractal dimensions and JRC values. The results indicate that these joints have fractal structure and the obtained formula can be used to fractal estimation for JRC values.

Key words rock joint, aperture, roughness, JRC, fractal dimension, neural network, scale effect, shear displacement

1 前 言^{*}

岩石节理的开度 (aperture) 和粗糙度 (roughness) 对节理本身的性质, 岩体的质量与稳定性、裂隙渗流等有十分重要的影响。Witherpoon 等^[1]和 杨太华、孙钧^[2]等研究发现裂隙的渗流量与裂隙的开度的立方成正比, 与节理的粗糙度影响因子成正比。有关研究表明, 在中等法向力作用下, 岩石节理的变形与抗剪强度在很大程度上受节理粗糙度的影响^[3, 4]。不同的粗糙度使岩石节理的破坏机制发生转变, 从而有不同形式的剪切强度包络线^[5]。Barton 等人^[6]提出的岩石节理抗剪强度准则, 反映了节理粗糙度 JRC 的影响。Tse 和 Gruden^[7]通过对 8 种表面几何参数的研究, 发现节理面一阶导数均平方根 Z_2 (拟粗糙度坡度) 和结构方程 (SF) (拟粗糙点高差) 与 JRC 有较好的相关性。近几年, 许多研究者运用分形几何研究岩石节理粗糙度, 并试图建立分形维数与 JRC 的量化关系^[8~13]。一般认为, JRC 越大, 分形维数也越大, 即节理面越粗糙。文献^[14]还对剪切过程中岩石节理粗糙度分形演化及力学特征进行了研究, 发现了分形维数 D 和截距 A 是描

述节理面粗糙性的两个重要的参数。

本文利用节理面的尺度效应 (scale effect), 探讨由小尺度试件的实测数据建立的非线性模型推广地预测出较大尺度试件的节理开度值的可能性, 采用的方法是基于神经网络模型。另一个工作是对现场量测获得的 37 条节理面进行分形特征研究, 探讨分形维数与剪切测试获得的粗糙度 JRC 值和由节理面估计的粗糙度 JRC 值的关系。

2 岩石节理开度的尺度效应

Kosugi 对一个中间含有单一节理的大理岩长方形试件进行了 4 次剪切测试。起初, 试件的长度为 120 cm。然后将其截断为等长度的两个试件 (试件长度均为 60 cm), 再进行剪切测试。第 3 次是将这两个试件截断成等长度的 4 个试件 (试件长度均为 30 cm), 分别进行剪切测试。第 4 次是对这 4 个试件各一分为二, 截断成等长度的 8 个试件 (试件长度均为 15 cm), 分别进行

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (No. 59604001)

到稿日期: 1998-04-13

剪切测试。将这4次剪切测试获得的结果绘制在同一图上(图1),发现节理的开度随剪切位移增加有明显的尺度效应。即在同样实验手段测得的同等剪切位移下,大尺度试件的节理开度要大于等长度分割获得的小尺度试件的节理开度。这表明,岩石节理面具有与颗粒相关联的粗糙性和具有分形表面的粗糙性。

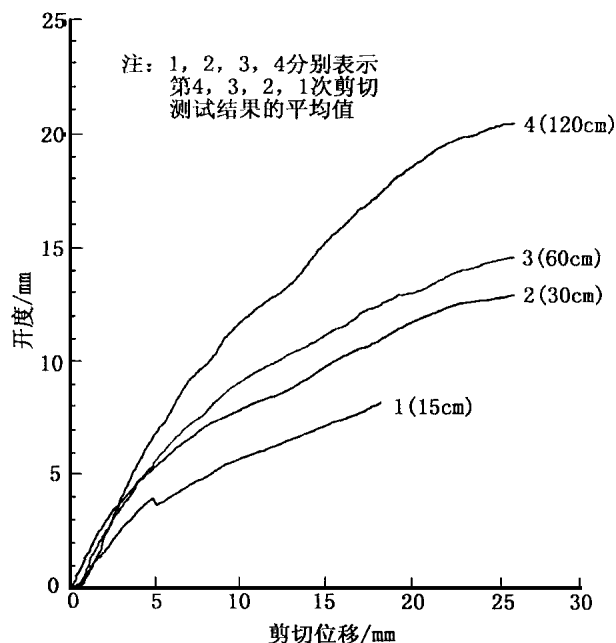


图1 岩石节理面的剪切测试结果

Fig. 1 Shear test results for rock joint profiles

3 岩石节理开度的神经网络估计模型

3.1 神经网络模型

模拟岩石节理在剪切过程中开度随剪切位移的变化,就是要建立一个模型 G ,去描述开度增量 NA_j 与先前的剪切位移 ($SD_{j-1}, SD_{j-2}, \dots, SD_{j-k}$) 和当前的剪切位移增量 SD_j 之间的关系。

$$\begin{aligned} G: R^n &\rightarrow R^m \\ NA_j &= G(NA_{j-1}, NA_{j-2}, \dots, NA_{j-k}, SD_{j-1}, \\ &\quad SD_{j-2}, \dots, SD_{j-k}, S, SD_j) \\ &\quad (j = k+1, k+2, \dots) \end{aligned} \quad (1)$$

式中 NA_{j-k}, SD_{j-k} 是第 $j-k$ 次测量单位测量获得的开度值和剪切位移; S 是试件的长度。

通常的建模方法是寻找一个数学模型去描述 G 。然而,关系 G 通常是非线性的,很难用数学方程进行准确的描述。本文采用目前广泛应用的 BP 神经网络^[15]进行描述。BP 神经网络具有高度非线性表达能力,而且具有很强的自学能力和推广能力。

用 BP 神经网络模型描述 G ,就是寻找一个多层网络模型 $NN(n, h_1, h_2, 1)$ (如图2示),以获得下列表达

式:

$$\begin{aligned} NN(n, h_1, h_2, 1) &: R^n \rightarrow R^m \\ NA_j &= NN(n, h_1, h_2, 1)(NA_{j-1}, NA_{j-2}, \dots, \\ &\quad NA_{j-k}, SD_{j-1}, SD_{j-2}, \dots, SD_{j-k}, S, SD_j) \\ &\quad (j = k+1, k+2, \dots) \end{aligned} \quad (2)$$

式中 NA_j 是模型的计算值,它近似于在第 j 次测量单位测得的实测值; n, h_1, h_2 分别是 BP 神经网络模型的输入节点、第 1 隐含层和第 2 隐含层的节点数,其中 $n = 2k+2$ 。

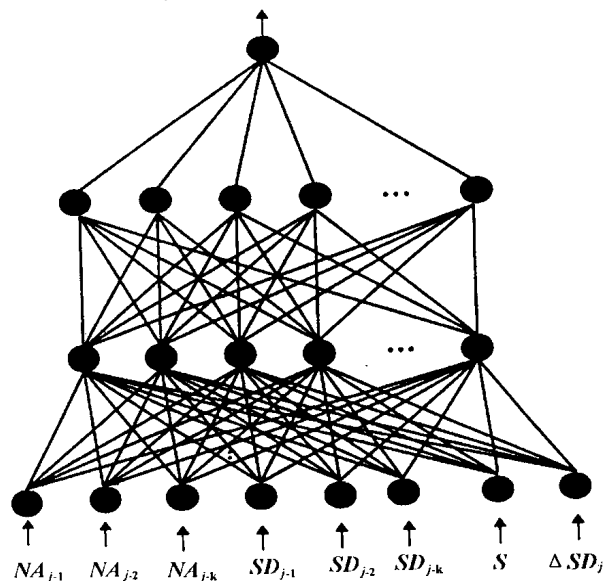


图2 用于表达剪切位移与开度之间非线性关系的 BP 神经网络模型

Fig. 2 A BP neural network model for representing nonlinear relationship between aperture and shear displacement of rock joints

3.2 神经网络学习

$NN(n, h_1, h_2, 1)$ 是将剪切测试中获得的剪切位移和开度值数据训练神经网络,采用自学习方法获得的。为了获得最优的模型,笔者提出了一种改进的 BP 算法^[16]。该算法是通过用学习模型对测试样本的预测误差来判断网络的学习行为的好坏。在网络学习的过程中,输入节点 n 、第 1 隐含层和第 2 隐含层的节点 h_1, h_2 都是基于遗传算法而自适应确定的。

将第 2 次、第 3 次和第 4 次剪切测试获得的 14 条剪切位移和开度曲线(第 2 次测试 2 条、第 3 次测试 4 条和第 4 次测试 8 条)随机地分为两组,第 1 组数据用作网络的学习样本,获得网络模型 $NN(n, h_1, h_2, 1)$ 。第 2 组数据用作测试样本,以检测模型的合理性。经过测试,获得的最佳神经网络为在学习 30 000 次后确定的三层模型为 $NN(8, 15, 1)$ 。

3.3 岩石节理开度的神经网络估计

这里探讨用第 2 次、第 3 次和第 4 次剪切测试获

得的剪切位移和开度作为学习样本建立的神经网络模型 $NN(n, h_1, h_2, 1)$ 预测稍大一些尺度(第1次测试)的节理开度的可能性。整个预测曲线是从剪切位移为0开始建立的。起初,获得前 k 个测试单位(本文 $k = 3$) 上测得的剪切位移和节理开度。将其构成输入系列,输入神经网络模型,预测出节理开度增量

$NA(j = k + 1)$ 。然后,这个预测出的节理开度将进行反馈,用于下一步的节理开度的预测。例如 $NA_j = NA_{j-1} + NA_j$ (当 $j = k + 1$) 或者 $NA_j = NA_{j-1} + NA_j$ (当 $j > k + 1$)。将预测值 NA_j 加到原输入系列的前头,并将原输入系列的最旧一个值删除,构成一个新的输入系列,用于下一步预测的输入。这样用于每一步预测的输入系列是逐步更新的,且是等长度的。

图3给出了模型预测的节理开度与实测值的比较。由该图可见,由小尺度试件节理的实测数据建立的神经网络模型可以推广地预测出较大一些尺度试件的节理开度值。

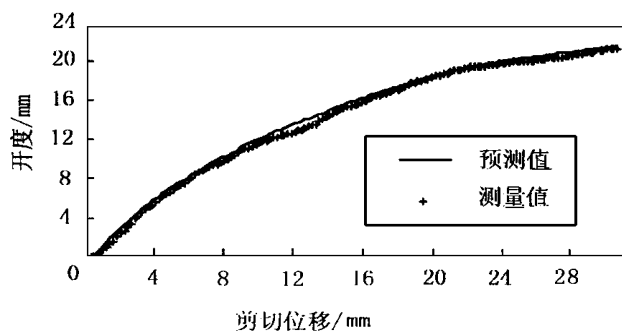


图3 神经网络预测的节理开度与剪切测试获得的节理开度的比较

Fig. 3 Comparison of predicted normal aperture of rock joints with those measured in shear tests

4 岩石节理粗糙度的分形估计

4.1 岩石节理的分形特征

岩石节理面的几何自相似性可以用分形分析方法确定。一种测量方法是,用不同的码尺 r 去量测节理,测得尺码的个数 N 就是被量测节理的长度。如果岩石节理具有分形自相似性,就可用下式进行分形描述:

$$N = ar^{1-D}$$

式中 D 是分形维数。

现场测得 37 条节理面 (joint profile) (图4列出了部分节理面的轮廓图)。用这种码尺方法对全部 37 条节理进行了分形测量。将每一尺码 r 下测得的节理长度 N 绘制在双对数图上(例如如图5),所有的数据几乎位于一条直线上,此直线的斜率就是要求的分形维数。

根据直线的斜率求得的分形维数列于表1中。每条节理分形的回归相关系数 R^2 均大于 0.99。由此说明,这些节理面具有明显的分形特征。

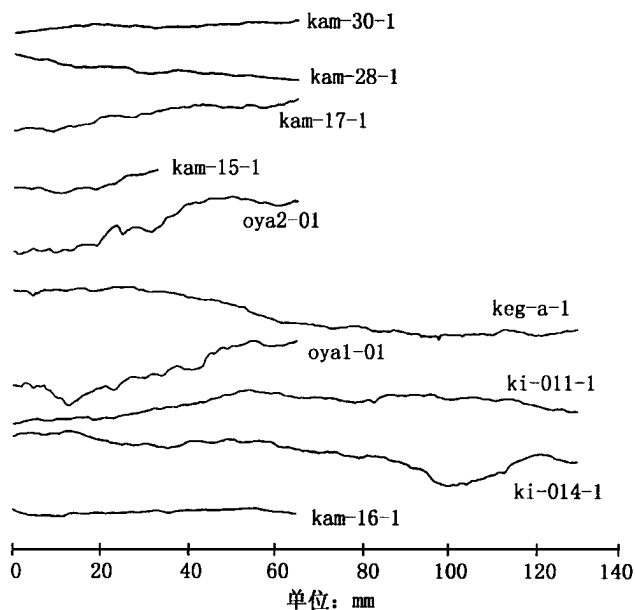


图4 现场量测获得的部分节理面轮廓图

Fig. 4 Profiles of rock joints measured in the field

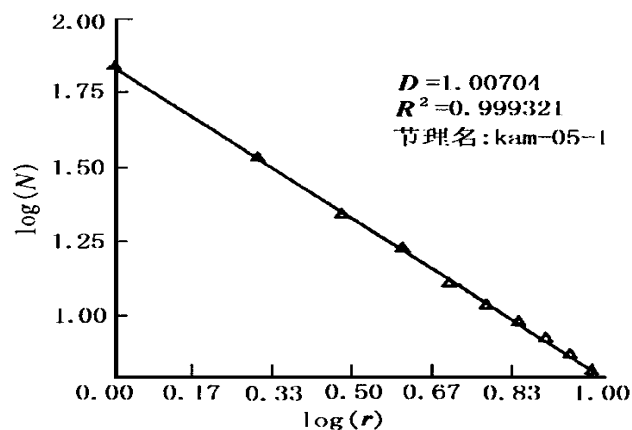


图5 确定节理表面分形维数的图例

Fig. 5 An example of calculating fractal dimension of rock joint profiles

利用文献[7]获得的节理面一阶导数均平方根 Z_2 (拟粗糙度坡度) 和结构方程 (SF) (拟粗糙点高差) 与 JRC 的关系式,估计出节理的 JRC 值(表1)。分形维数与由此估计的 JRC 值之间建立的回归方程为

$$JRC = 56.63(D - 1)^{0.4137} \quad (3)$$

4.2 岩石节理粗糙度的分形估计

根据分形维数与 JRC 值之间的近似关系,可以由分形维数近似估计节理的 JRC 值。用 Barton 建议的 10 条典型的 JRC 范围曲线来测试由方程(3)给出的 JRC 分形近似估计的准确性。表2给出了方程(3)和谢和平教授的方程(4)的分形近似估计结果的比较。

$$JRC = 85.267(D - 1)^{0.5679} \quad (4)$$

由图 6 可见,由方程(3)预测的JRC 值稍大于由方程(4)预测的JRC 值,并稍大于 Barton 的典型 JRC 范围的中间值。这种误差随着 JRC 值的增加而减小。在 Barton 的 JRC 范围(18~20)处,方程(3)预测的 JRC 值为 18.78361,而方程(4)预测的 JRC 值为 18.74,本文给出的分形维数($D = 1.071352$)与由方程(4)给出的分形维数($D = 1.069403257$)和 Mulalha & Charrua - Graca^[17]由盒子测量方法求出的分形维数($D = 1.0632$)几乎相等。

表 1 各节理面的 JRC 值与分形维数

Table 1 JRC values and fractal dimension of rock joint profiles					
节理面名称	JRC 值			Z_2 拟粗糙度坡度	码尺法测得的 D
	Barton 法	标准长度法	Tse 公式法		
kuji1 - 1~3	11.3	10.6	13.3	0.274	1.00978
kuji2 - 1~3	15.7	15.8	8.0	0.192	1.00373
kuji3 - 1~3	15.0	15.5	7.8	0.189	1.005213
ki - 011 - 1~3	5.9	6.7	7.9	0.191	1.00564
ki - o12 - 1~3	12.0	11.0	11.5	0.246	1.008023
ki - o14 - 1~3	13.4	16.3	9.7	0.218	1.006243
ki - c15 - 1~3	9.0	9.2	15.7	0.312	1.011847
ki - c26 - 1~3	13.6	14.2	14.7	0.297	1.01296
keg - e - 1~5	12.1	14.1	5.5	0.154	1.003082
keg - c - 1~5	11.8	14.2	6.6	0.170	1.006345
keg - d - 1~5	15.1	21.1	7.7	0.188	1.005284
keg - a - 1~2	12.9	14.6	10.2	0.216	1.0092
keg - f - 1~4	16.0	18.9	19.5	0.371	1.01535
oya1 - 01~11	17.6	17.5	19.4	0.369	1.016745
oya2 - 01~11	17.4	17.3	18.4	0.354	1.020407
kam - j1 - 1~5	12.6	12.9	11.1	0.295	1.042314
kam - j4 - 1~5	15.6	15.0	9.1	0.210	1.016396
kam - k5 - 1~5	17.2	15.5	15.2	0.304	1.014794
kam - k8 - 1~5	10.0	9.9	3.8	0.127	1.002663
kam - s5 - 1~2	10.7	10.3	3.6	0.124	1.00468
kam - s1 - 1~3	12.4	11.4	7.5	0.185	1.00433
kam - s6 - 1~3	6.7	6.4	6.6	0.171	1.013043
kam - s8 - 1~2	5.2	5.1	6.3	0.167	1.016615
kam - 04 - 1~3	8.0	7.6	3.5	0.123	1.008107
kam - 08 - 1~3	9.4	8.8	8.3	0.197	1.003613
kam - 10 - 1~3	14.7	13.6	6.3	0.167	1.00729
kam - 11 - 1~3	11.6	11.1	4.5	0.138	1.005327
kam - 16 - 1~3	6.7	6.4	3.5	0.123	1.00791
kam - 27 - 1~3	11.3	11.1	5.2	0.150	1.00332
kam - s9 - 1~3	9.8	10.2	6.0	0.161	1.022717
kam - s11 - 1~3	8.5	8.0	9.3	0.213	1.010665
kam - 05 - 1~3	9.8	9.3	4.0	0.130	1.006743
kam - 15 - 1~3	14.7	14.6	7.0	0.177	1.007813
kam - 17 - 1~3	9.3	9.2	6.7	0.172	1.00525
kam - 28 - 1~3	11.5	10.6	7.1	0.171	1.00349
kam - 30 - 1~3	12.3	11.5	2.7	0.105	1.006857

为了进一步说明 JRC 的分形估计的可能性,对 Barton^[3]和 Barla^[18]分别给出的具有典型 JRC 值的三条节理(图 7)进行了 JRC 值的分形估计。由方程(3)预测的 JRC 值和由方程(4)预测的 JRC 值列于表 3 中。

由该表可以看出,方程(3)估计的 JRC 值相对于典型的 JRC 值的平均相对误差为 6.227%,而方程(4)估计的平均相对误差为 6%。图 8 给出了这两个方程预测的 JRC 值与典型的 JRC 值的比较。

表 2 典型的 10 个 JRC 范围的 JRC 值的分形估计

Table 2 Fractal estimation of 10 joint profiles with typical JRC values given by Barton				
编号	Barton 的典型 JRC 值范围	分形维数 ^[13]	由方程(3)估计的 JRC 值	由方程(4)估计的 JRC 值 ^[13]
1	0~2	1.0020596	4.383411	2.5
2	2~4	1.0045686	6.094703	3.995
3	4~6	1.010969	8.756234	6.573
4	6~8	1.0181337	10.78043	8.7453
5	8~10	1.0250134	12.31471	10.4979
6	10~12	1.0359008	14.30035	12.88918
7	12~14	1.0432832	15.45061	14.3333
8	14~16	1.0505344	16.47563	15.6512
9	16~18	1.0623758	17.97208	17.6388
10	18~20	1.0694032	18.78361	18.74

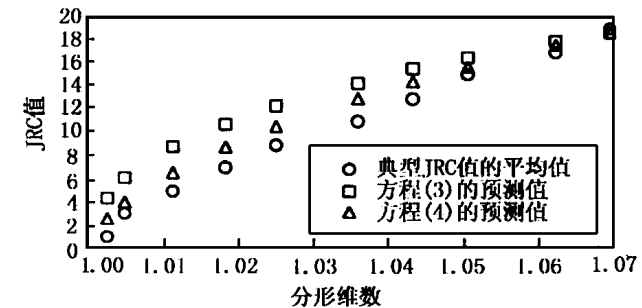


图 6 预测的 JRC 值的比较

Fig. 6 Comparison of predicted JRC values from different methods

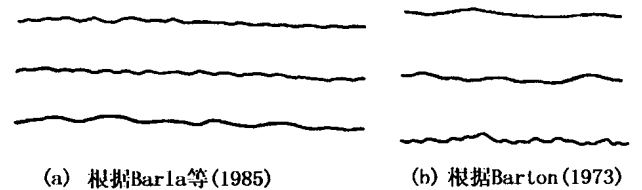


图 7 有典型 JRC 值的节理轮廓图

Fig. 7 Profiles of rock joints with typical JRC values

表 3 Barton^[3]和 Barla^[18]给出的 6 条节理的 JRC 值的分形估计

Table 3 Fractal estimation for six joint profiles given by Barton ^[3] and Barla ^[18]				
编号	典型的 JRC 值	分形维数 ^[13]	由方程(3)估计的 JRC 值	由方程(4)估计的 JRC 值 ^[13]
1	5	1.004772273	5.516082	4.690
2	10	1.019108466	10.09778	9.00927
3	20	1.077341775	18.56873	19.9302
4	11.6	71.0273865	11.81231	11.05245
5	13.78	1.040970907	14.07848	13.893333
6	18.87	1.05449547	15.94162	16.336558

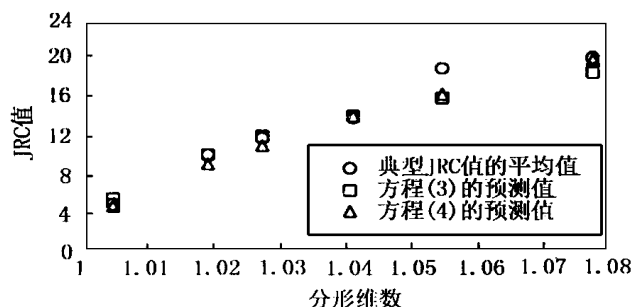


图8 预测的JRC值的比较

Fig. 8 Comparison of predicted JRC values

5 结 论

通过对岩石节理的剪切测试、开度的神经网络建模和节理面的分形特征研究,可获得下面的一些认识。

(1) 在剪切测试的过程中,岩石节理的尺度效应(scale effect)是存在的,即在同样实验手段测得的同等剪切位移下,大尺度试件的节理开度要大于等长度分割获得的小尺度试件的节理开度。

(2) 利用神经网络的非线性动态处理和自学习能力,建立的岩石节理开度与剪切位移之间关系的模型,可以推广地对较大一点尺度节理的开度值进行预测。

(3) 现场测得的37条岩石节理面均具有分形特征。表明这些节理面具有几何自相似性。

(4) 在这些现场测量获得的岩石节理中,用尺码方法量测的分形维数与由Tse公式估计的JRC值之间存在一个回归关系。这个关系式与文献[13]的关系式相近,同样可用于岩石节理面的JRC值近似分形估计。

(5) 用尺码方法量测的分形维数与由剪切测试获得的JRC值之间的关系不象上述关系那样的明显。这是因为,用尺码方法量测的分形维数是节理面的“纯”几何自相似的描述,而通过剪切测试获得的JRC除了与节理面几何参数有关,而且与岩石性质、载荷条件、岩石节理面结构异向和不均匀等因素有关。前后两者有质的区别。这种结果与文献[19,20]的相一致。

(6) 鉴于这两者质的区别,除了研究节理面的几何自相似性,在某些情况下,研究岩石节理的信息自相似性或用其它指标讨论粗糙度也是很重要的。

参 考 文 献

- 1 Witherpoon P A, Wang J S, Iwai K, Gale J E. Validity of cubic law for flow in a deformable rock fracture. *Water Resources Res*, 1980, **16**:1016 ~ 1024
- 2 杨太华,孙 钧. 岩体裂隙非规则几何水力学特性研究. *岩*

土工程学报,1997, **19**(4):10 ~ 14

- 3 Barton N. Review of a new shear strength criterion for rock joints. *Engineering Geology*, 1973, **7**:287 ~ 322
- 4 Byelee J D. Friction of rocks. *Pure Appl Geophys*, 1978, **116**: 615 ~ 626
- 5 Patton P C. Multiple modes of shear failure in rock and relative material:[Ph.D. thesis]. Urbana: University of Illinois, 1966
- 6 Barton N, Choubey V. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*, 1977, **10**(2):1 ~ 54
- 7 Tse R, Gruden D M. Estimating joint roughness coefficient. *Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr*, 1979, **16**:303 ~ 307
- 8 Lee Y H, Barr D J, Hass C J. The fractal dimension as a measure of the roughness of rock discontinuity profile. *Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr*, 1990, **27**:453 ~ 464
- 9 Maerz N H, Franklin J A. Roughness scale effect and fractal dimension. In: *scale effect in rock masses*. 1990, 121 ~ 126.
- 10 Turk N, Grieg M, Dearman W R, Ami F F. Characterization of rock joint surface by fractal dimension. In: *Proc 28th US Symp: In Rock Mechanics*. Tucson: 1987. 1223 ~ 1236
- 11 Muralha J. Fractal dimension of jointed roughness surface. *ISRM Symp of Fractured and Jointed Rock Masses*, Lake Taboee, 1992
- 12 Xie H, Pariseau G. Fractal estimation of joint roughness coefficients. *Sciences in China (B)*, 1994, **37**(12):1516 ~ 1524
- 13 Xie H. *Fractals in rock mechanics*. Rotterdam: Balkema, 1993
- 14 王金安,谢和平. 剪切过程中岩石节理粗糙度分形演化及力学特征. *岩土工程学报*,1997, **19**(4):2 ~ 9
- 15 Rumelhart D E, Hinton G E, William R J. Learning internal representations by error propagation. In: Rumelhart D E and McClelland J L eds. *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructures of Cognition*. Vol1 Foundations. Cambridge, MA: MIT Press,1986
- 16 Feng Xiating, Wang Yongjia. A new direction - intelligent rock mechanics and rock engineering. *Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr*, 1997, **34**(1):135 ~ 141
- 17 Muralha J, Charrua-Graca J G. An experience on the application of fractal theory to basic shear strength studies. In: Barton N ed. *Rock Joints*. Rotterdam: Balkema,1990. 667 ~ 671
- 18 Barla G, Forlati F, Zaninetti A. Shear behavior of filled discontinuities. *Proc of Int Symp on Fundamentals of Rock Joints*. Rotterdam: Balkema, 1985. 163 ~ 172
- 19 Miller S M, Newilliams P C, Kerkerling J C. Ambiguities in estimations rock fracture surfaces. In: *Proc 31th US Symp. Rock Mech*. Rotterdam: Balkema, 1990. 471 ~ 482
- 20 Odiling N E. Natural fracture profiles, fractal dimension and joint roughness coefficients. *Rock Mech Rock Eng*, 1994, **27**(3):135 ~ 153