

用人工神经网络预测岩石节理的抗剪强度

戚国庆¹ 盛金昌² 速宝玉²

(1. 马鞍山矿山研究院,安徽 马鞍山 243004; 2. 河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 提出运用人工神经网络方法预测岩石节理抗剪强度,在该方法中应用相对作用强度 RSE 确定网络中各输入因素对抗剪强度的影响程度,并根据分形节理力学性质和光弹试验数据进行网络训练、参数预测。结果表明:该方法可以用来预测岩石节理抗剪强度并推广应用。
关键词 节理粗糙度;人工神经网络;非线性问题;相对作用强度
中图分类号 :TU459⁺.2 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2001)03-0107-04

岩石节理的抗剪强度受其表面粗糙程度的控制,因此,抗剪强度与描述节理面粗糙程度的统计量相关的概念引起学术界的广泛关注。由 Barton 等人^[1]提出的节理表面粗糙度系数(JRC)在岩石力学及工程界影响至深,并被国际岩石力学学会(ISRM)推荐和采纳。事实上,JRC 是一个反映节理粗糙程度对其抗剪强度影响的参数。但是,由于天然岩石节理面具有强烈的随机性和复杂性,JRC 值难以准确估计。近年来,大量的研究主要集中在建立节理面粗糙程度的描述及其与 JRC 的相关关系上。这些研究是基于 Barton 公式或是延用 Barton 公式的思路。金属摩擦学的研究则认为^[2]表面粗糙程度与摩擦力(对于节理为其抗剪强度)之间不是一种能用初等函数表达的简单关系。它涉及微分方程(雷诺方程、去掉惯性项的 N-S 方程等)及随机边界条件。因而笔者认为:在建立节理粗糙程度大小及结构的客观描述之后,考虑多因素,应用人工神经网络方法、直接建立表面粗糙度特征参数与抗剪强度的关系,将会更好地反映岩石节理形貌与其抗剪强度的关系。

1 人工神经网络方法原理^[3]

人工神经网络(Artificial Neural Networks,简称 ANN)是一种高度非线性映射处理系统。网络由许多计算单元(即神经元)相互连接构成,而这些连接的强度(权值)通过训练来自动调整。本文选用的 BP 网络是一种采用误差反传算法(error back-propagation)的前馈型神经网络。适宜用来进行参数预测,它不仅具有输入层单元、输出层单元,而且具有隐层单元。神经元作用函数为 Sigmoid 函数,即

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \tag{1}$$

其工作原理为:神经元将其接收到的信息 O_j ,用连接强度 W_{ij} (权重)以点积形式构成自己的输入 I^i ,即

$$I^i = \sum_j W_{ij} O_j \tag{2}$$

再经神经元作用函数 $f(x)$ 进行转换,便得到这个神经元的输出:

$$O^i = f(I^i) \tag{3}$$

将最终输出与期望输出作比较,据其误差调整网络神经元之间的连接权重 W_{ij} ,直至输出达到要求的精度为止。此即为“训练学习”过程。

神经网络的一个重要特点是可以过样本“训练学习”,无需人们事先给出特征和规律即可自己总结规律,完成模式识别、分类、参数预测等任务,而学到的规律分布于网络的连接权值之中。网络训练结束后,利用训练学习阶段得到的权值,由网络对未知模式进行内插,得到所需的预测值。

收稿日期 2000-09-04
基金项目:地质灾害防治与工程地质环境保护 国家专业实验室开放基金资助项目(500032)
作者简介:戚国庆(1967—)男,江苏泰兴人,高级工程师,硕士,主要从事岩土工程研究。

2 节理抗剪强度的神经网络预测

节理的粗糙程度^[4~6]、节理壁面岩块强度 JCS、节理的吻合程度 JMC^[7]是控制节理抗剪强度的主要因素。另外一些因素如节理岩体的受力状态,以及岩石的变形特性、饱水性对节理抗剪强度也有一定的影响,有时甚至影响很大。可以从一些相关文献论述中得到证实。因此,可以建立如图 1 所示的神经网络来预测节理抗剪强度。

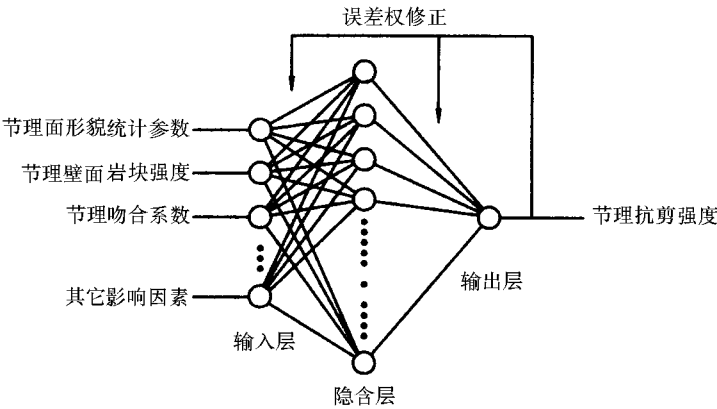


图 1 节理抗剪强度预测神经网络结构示意图

Fig.1 Structure of ANN for the prediction shear strength of rock joints

以聚碳酸脂板构造一个人工贯通的分形节理,对其力学性质进行单向压缩光弹试验^[8],测得其在各种压力下具有不同分维数节理的最大剪应力值见表 1。

表 1 单向压缩试验测得最大剪应力的最大值

分维数 D	压力 P/MPa								MPa
	0.30	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80	2.10	2.40	
1.05	4.2791	5.5316	9.8107	11.1675	12.0025	13.4673	15.8642	19.6215	24.1094
1.10	8.6627	12.0025	13.4637	15.4467	17.9516	18.8909	21.1871	22.5437	24.4225
1.15	12.0026	12.6288	15.7599	17.9516	19.2041	20.1434	22.0221	23.7964	24.9444
1.25	12.9418	14.4030	17.9516	21.1871	22.4395	22.8570	25.5706	26.4056	27.0318
1.30	13.2549	13.7768	14.7161	18.8909	20.4565	22.7526	24.1095	25.7594	26.9275

根据表 1 数据,采用三层 BP 网络(理论证明,三层 BP 网络可以映射任何复杂函数^[3])。以压力值 P 、节理面分维值 D 作为网络输入,以最大剪应力值作为期望输出。经过 1 万次网络训练,误差 $< 5\%$,训练中误差变化见图 2。网络训练达到精度后,即进行参数预测,对节理分维值 $D = 1.20$ 时最大剪应力的预测结果见表 2。由表 2 可以看出,训练好的 BP 网络的预测值与试验值非常接近,误差很小。

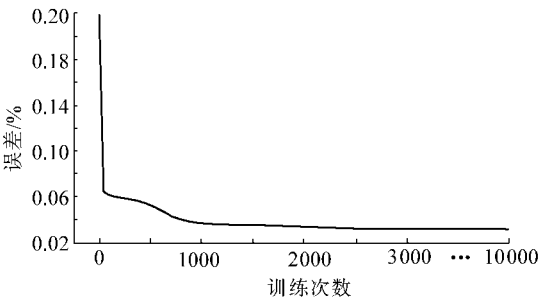


图 2 误差变化曲线

Fig.2 Variation of network error

表 2 分形节理最大剪应力 BP 网络预测值

压力 P/MPa	0.30	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80	2.10	2.40	2.70
预测值	12.29	13.46	16.52	19.08	20.69	21.80	23.10	24.67	25.94
试验值	12.42	12.94	16.59	18.58	19.93	21.40	22.54	23.90	25.15
误差 $e/\%$	-1.0	4.0	-0.4	2.7	3.8	1.9	2.5	3.2	3.1

3 节理抗剪强度影响因素的相对作用强度 $RSE^{[9]}$

对于训练达到精度要求的 BP 网络,网络任意节点 j_n 与其临层节点 j_{n-1} 连接强度为 $W_{j_{n-1}j_n}$, e_{j_n} 为节点 j_n 上所接收的前层节点的加权输入,其输入和输出之间相对作用强度 RSE 为

$$RSE_{ki} = C \sum_{j_n} \sum_{j_{n-1}} \dots \sum_{j_1} W_{j_n} k f'(e_k) \cdot W_{j_{n-1}j_n} f'(e_{j_n})$$
$$W_{j_{n-2}j_{n-1}} f'(e_{j_{n-1}}) \cdot W_{j_{n-3}j_{n-2}} f'(e_{j_{n-2}}) \dots W_{i_1} f'(e_{j_1})$$

(4)

式中 C 为规范化系数,其值为各 RSE 值与最大 RSE 值之比值。

RSE 是网络各输入单元对某一个输出单元相对影响与作用的一种度量, RSE 的绝对值越大,则相应的输入单元在决定这个输出单元的状态时所起的作用也越大; RSE 的符号则表示相应的输入单元对输出单元的影响的方向。正号表示输出单元的增值方向与输入单元相同,即输入单元上值的增加将导致输出单元在其所定义的正方向上也增加,而负号则表示输出单元的增值方向与输入单元相反。由此,我们就可以根据 RSE 值来区分不同的输入对某一输出的相对影响与作用的大小和方向。

对表 1 数据的分析显示:节理面分维 D 对最大剪应力的相对作用强度 $RSE = 0.4760$,压力 P 对最大剪应力的相对作用强度 $RSE = 1.0$,这证实了节理面粗糙形貌是节理抗剪强度的控制因素之一。

4 讨 论

对于 Barton 节理峰值抗剪强度公式:

$$\tau = \sigma_n \tan [JRC \cdot \log (JCS / \sigma_n) + \phi_r]$$

(5)

式中: τ ——节理峰值抗剪强度; σ_n ——作用于节理面的法向应力; ϕ_r ——节理面残余摩擦强度; JRC ——粗糙度系数; JCS ——节理面壁岩块强度。

以节理面形貌分维值 D (Barton 公式中的 JRC 值被转换成分维值 $D^{[4,6]}$)、法向压力 σ_n 、最大剪应力 τ 为坐标,分别作出 Barton 公式及光弹试验结果(表 1)在笛卡尔三维坐标系中的曲面图,见图 3。

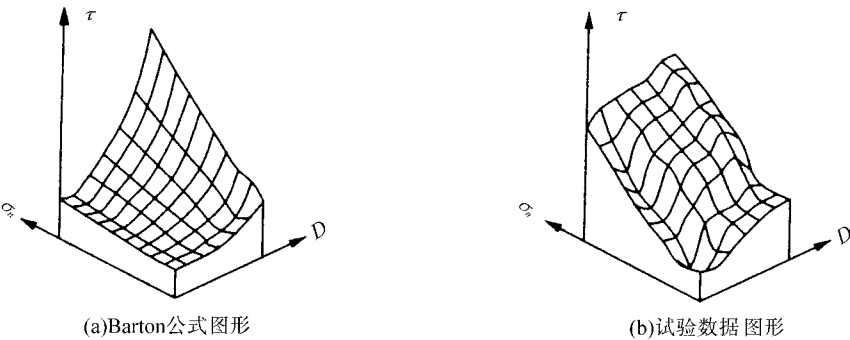


图 3 Barton 公式及试验数据的空间图形

Fig.3 Spatial figures of Barton's formula and test data

由图 3 可以看出,Barton 公式的图形与试验数据的图形差别较大,因此采用 Barton 公式将无法很好地拟合试验数据,而运用人工神经网络(只要网络结构合理)则可以精确地映射试验数据。

5 结 论

a. 对于节理抗剪强度的研究具有重大的工程意义,且早在 1973 年就开始了。Barton 公式是在当时人们无法对节理形貌定量描述的情况下提出的。由于其中的 JRC 参数无法准确确定,使 Barton 公式的推广应用及工程验证受到限制。随着科技的飞速发展,尤其是分形理论及人工神经网络理论的问世对于这一问题的解决不应再局限于以往思路。

b. 本文研究运用人工神经网络预测节理抗剪强度的方法,通过对分形节理光弹试验数据分析研究表明:人工神经网络方法具有很强的非线性映射功能及很高的预测精度,非常适用于节理抗剪强度的研究。

c. 节理的粗糙程度是影响其抗剪强度的重要因素,据文中对分形节理光弹试验数据分析,其相对作用

强度 RSE 为 0.4760.

参考文献：

[1] Barton N. Review of a new shear strength criterion for rock joint[J]. Eng Geol , 1973 , 7 : 287 ~ 322.
[2] 孙大成. 润滑力学讲义[M]. 北京 : 中国友谊出版公司 , 1991. 282 ~ 309.
[3] 王耀南. 智能控制系统——模糊逻辑·专家系统·神经网络控制[M]. 长沙 : 湖南大学出版社 , 1996. 46 ~ 185.
[4] Reeves M J. Rock surface roughness and frictional strength[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech , Abstra , 1985 , 22 (6) : 429 ~ 442.
[5] 谢和平. 岩石节理的分形描述[J]. 岩土工程学报 , 1995 , 17 : 18 ~ 23.
[6] Tse N , Cruden D M. Estimating joint roughness coefficient[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech , 1979 , 16 : 303 ~ 307.
[7] 赵坚. 岩石节理吻合系数及其对节理特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报 , 1997 , 16 (6) : 514 ~ 521.
[8] 谢卫红 , 谢和平 , 赵鹏. 分形节理粗糙度对应力状态影响的研究[J]. 岩石力学与工程学报 , 1998 , 17 (3) : 253 ~ 258.
[9] 杨英杰 , 张清. 岩石工程稳定性控制参数的直觉分析[J]. 岩石力学与工程学报 , 1998 , 17 (3) : 336 ~ 349.

Prediction of Shear Strength
of Rock Joints with Artificial Neural Networks

QI Guo-qing¹ SHENG Jin-chang² SU Bao-yu²

(1. Ma'anshan Institute of Mining Research , Ma'anshan 243004 , China ;
2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China)

Abstract : In this paper , a method for predicting the shear strength of rock joints with Artificial Neural Networks (ANN) and determining the influence of input factors in neural networks on the shear strength with Relative Strength of Effect (RSE) is presented. ANN training and parameter prediction are conducted according to the data of photoelastic tests and mechanical properties of the fractal joint. The result indicates that the ANN method is a powerful tool for the study of the shear strength of rock joints.

Key words : roughness of rock joint ; artificial neural networks ; non-linear problem ; relative strength of effect