

# 基于 BP 神经网络的草根加筋土本构模型

陈昌富, 彭钊, 刘怀星

(湖南大学 岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 用室内三轴试验方法得到了草根加筋土的应力—应变关系, 并基于试验结果建立了素土和混和草根加筋土的 BP 神经网络本构模型。模型计算结果与试验结果对比分析表明, 该神经网络本构模型具有很高的拟和精度和良好的泛化能力, 能充分体现岩土材料的非线性关系。利用莫尔—库仑准则拟合得到的加筋土的强度指标分析了草根加筋土的护坡机理。研究结果对于合理建立草根土的本构关系和深入认识植被护坡机理具有指导意义。

**关键词:** 草根加筋土; BP 神经网络; 本构模型; 莫尔—库仑准则

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2008) 03—0093—04

中图分类号: TU 411.7

## A Constitutive Model of Grassroots reinforced Soil Based on BP Neural Network

CHEN Chang-fu, PENG Zhao, LIU Huaixing

(Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

**Abstract:** Laboratory triaxial tests were carried out to obtain the stress-strain relationship of grassroots reinforced soil (GRS). BP neural network constitutive models of soil and GRS reinforcement in mixing were established based on test data. The result from comparing predicted values and measured values shows that the network constitutive model has good fitting precision and good generalization ability and can fully describe the non-linear relationship of geo-materials. The shear strength indexes of GRS fitted by Mohr-Coulomb criterion may be used to analyze the mechanism of GRS protection of slope. The research results are of importance for establishing the constitutive model of GRS and understanding the mechanism of vegetation protection of slope.

**Keywords:** grassroots reinforced soil; BP neural network; constitutive model; Mohr-Coulomb criterion

在铁路、公路、水电等工程设施建设中经常要大量填方、挖方, 形成了大量的裸露边坡。裸露边坡的形成使地表植被遭到破坏, 原有生态平衡失调, 裸露的土层或岩层表面的抗蚀能力减弱, 在雨滴和风蚀作用下水土极易流失, 严重时造成滑坡、泥石流等危害。因此为保持与自然环境的协调, 保护和美化环境, 恢复生态平衡, 对边坡采取植被护坡是非常有必要的。为了深入认识植被护坡机理, Manbeian(1973)<sup>[1]</sup> 采用室内直剪试验分别研究了大麦、苜蓿、向日葵的根系对土体抗剪强度的增强作用; Endo 等(1969)<sup>[2]</sup> 和 Wu(1988)<sup>[3]</sup> 分别研究了植物垂直和水平根系对土体抗剪强度的增强作用。含植物根系土体的本构模型研究对于深入认识植被护坡机理也具有重要意义。

Roscoe 等(1958—1963)<sup>[4-5]</sup> 提出了土的临界状态概念, 并建立了著名的剑桥模型(Cam-Clay 模

型)。在非线性模型中最具有代表性的当属 Duncan-Chang 双曲线模型(1970, 1980)<sup>[6]</sup>。沈珠江(1983, 1998)<sup>[7]</sup> 等人定义了能考虑土体颗粒之间胶结破坏过程的结构模型。岩土材料是极其复杂的, 它很难用一种固定程式或算法来解答或描述。利用神经网络与数值计算方法相结合已成为一个新的趋势。Ghassem Habibagahi 和 Alireza Bamdad(2003)<sup>[8]</sup> 用神经网络研究非饱和土的力学特性, M. Banimahd, S. S. Yasrobi, P. K. Woodward(2003)<sup>[9]</sup> 将神经网络用于砂土应力—应变关系的研究。本文通过室内三轴试验得到了以狗尾草草根为筋材加筋土的应力—应变关系, 基于试验结果建立了素土和混和草根加筋土的 BP 神经网络本构模型, 并利用莫尔—库仑准则拟合得到的加筋土的强度指标分析了草根加筋土的护坡机理。

收稿日期: 2007-11-15

修回日期: 2008-01-09

资助项目: 教育部高校博士点基金(20050532021); 湖南省科技攻关项目(03GKY3129)

作者简介: 陈昌富(1963—), 男(汉族), 湖南省祁东县人, 教授, 博士生导师, 主要从事边坡与支挡工程, 地基处理等研究工作。E-mail: cfchen@163.com。

## 1 试验仪器、材料和试验方法

### 1.1 试验仪器

试验采用 GDS 应变控制式三轴仪。三轴试样的直径为 50 mm, 截面积为  $1963.5 \text{ mm}^2$ , 试样的高度为 100 mm。

### 1.2 试验材料

试验采用狗尾草的草根, 并通过草根的直径、长度和质量来控制加筋数量。试验时草根采用统一的长度 40 mm, 直径为 0.1~0.6 mm, 试验用土为粉质黏土, 其物理力学性质指标如表 1。

表 1 黏土的主要力学性质指标

相对密度	液限/%	塑限/%	最大干密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	最佳含水量/ %
2.61	30.4	17.8	2.01	9.3

### 1.3 试验方法

试验土样按照《公路土工试验规程》<sup>[10]</sup> 扰动土样的制备程序处理。试验用草根, 先用剪刀剪成同一长度 4 cm, 然后用游标卡尺测量其直径, 由于草根的直径沿长度方向是变化的, 因此测量直径时采用两端和中间 3 者的平均值。为保持同一性, 测质量时先用吸水纸把草根表面的水吸干然后再称量。

试验试件为重塑土, 控制干密度  $\rho_d = 1.72 \text{ g/cm}^3$ 。试验分加筋土和素土两种情况, 对于加筋土草根全部为混合均匀加入, 分别为 2, 4 和 6 g/个。为了保证试验的准确性, 每组取 7 个相同的试件, 分别在围压 0, 10, 20, 30, 50, 70 和 90 kPa 下进行不固结不排水试验。加载速率为 0.1 mm/min, 当试件的轴向应变达到 20% 时结束试验。

## 2 BP 神经网络本构模型的建立

### 2.1 BP 神经网络基本原理

BP 算法<sup>[8]</sup>由正向传播和反向传播组成。在正向传播过程中, 输入信息从输入层经隐层单元处理后, 传至输出层。如果在输出层得不到期望输出, 就转为反向传播, 即把误差信号沿连接路径返回, 并通过修改各层神经元之间的连接权值, 使误差信号达到最小。采用 BP 神经网络方法确定材料的本构模型时, BP 神经网络只是作为一种计算工具, 它不需了解过程的输入与输出之间的变化规律, 只需通过对给定的样本数据进行学习, 直接从中提取规则, 以一组权重形式形成一种网络的稳定状态, 然后通过联想记忆和泛化推广能力来获取所需要的数据。如果把神经网络

看成是输入到输出的映射, 则这个映射是一个高度非线性映射。

### 2.2 BP 神经网络建模

非线性是土应力—应变关系的主要特征之一, 现将土在三轴实验下的应力—应变关系用下面的非线性函数来表达, 即

$$\sigma = f(q, \varepsilon) \quad (1)$$

式中:  $\sigma$ ——轴向应力;  $q$ ——围压;  $\varepsilon$ ——轴向应变。

本文利用神经网络技术, 建立了双隐层 BP 模型。BP 网络的基本结构如图 1 所示, 输入层的节点数为 2, 输出层的节点数为 1, 输入量为轴向应变  $\varepsilon$  和围压  $q$ , 输出量为轴向应力  $\sigma$ 。隐层单元数介于 10~40 之间, 需要根据训练和拟合结果加以确定。隐层中的神经元采用 Sigmoid 型变换函数, 输出层的神经元采用纯线性变换函数, 网络训练采用 LM 算法。

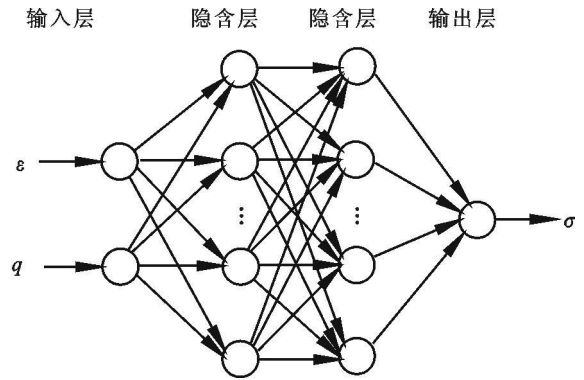


图 1 BP 神经网络结构

BP 神经网络学习已知的输入输出样本, 从而训练出函数的非线性关系。当计算误差值在预定的误差以内时, 停止训练, 此时每层神经细胞获得相应的权值和阈值。再用训练好的神经网络本构模型计算素土和草根加筋土的应力—应变曲线。图 2—5 为各模型的计算结果。

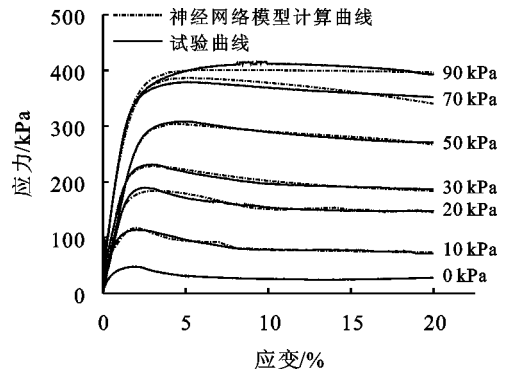


图 2 素土试验曲线与模型曲线比较

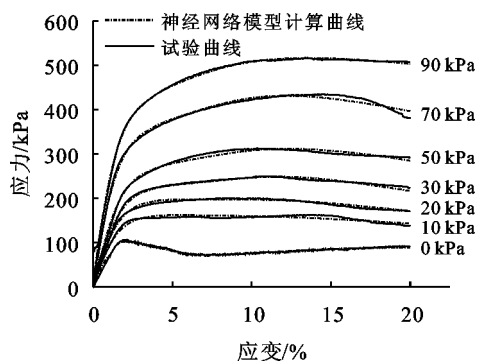


图 3 草根含量 2 g/个加筋土曲线比较

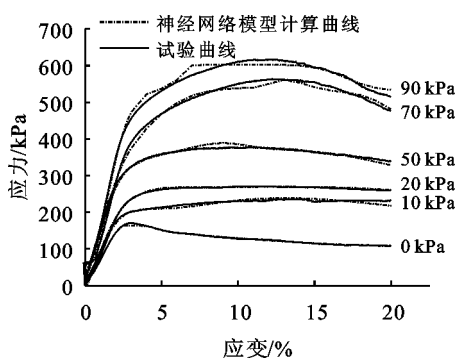


图 4 草根含量 4 g/个加筋土曲线比较

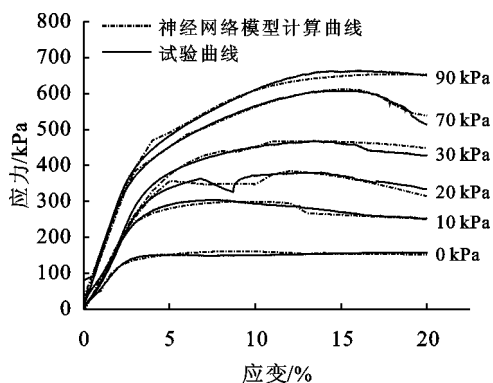


图 5 草根含量 6 g/个加筋土曲线比较

由图 2—5 可知,神经网络本构模型计算曲线与试验曲线吻合较好,可以用做素土和混和草根加筋土的本构模型。

### 3 草根加筋土的护坡机理

采用文献[11]中的方法来求  $c$  和  $\varphi$ 。

在图 6 中,由几何关系可得:

$$\sin \varphi = \tan \theta \quad (2)$$

$$c / \tan \varphi = \alpha / \tan \theta \quad (3)$$

整理式(2)和式(3)可得库仑公式强度指标

$$\varphi = \arcsin(\tan \theta) \quad (4)$$

$$c = \alpha / \cos \varphi \quad (5)$$

将由式(4)和式(5)计算得到的强度指标代入库仑公式就可得到强度包线方程。

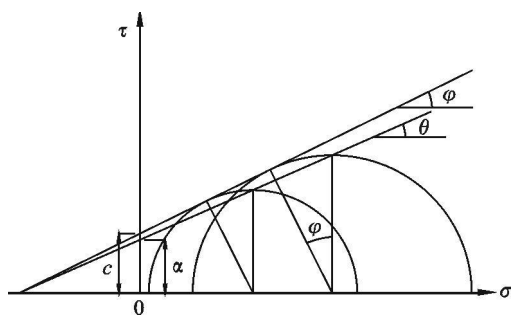


图 6 强度指标与拟和参数的关系

表 2 线性拟合参数及相关系数

拟合参数	素土	加筋土		
		2 g/个	4 g/个	6 g/个
$\alpha / \text{kPa}$	15.369 99	19.715 10	25.656 61	35.086 76
$\tan \theta$	0.613 77	0.637 76	0.677 84	0.690 54
拟合度 $R$	0.994 76	0.999 44	0.997 57	0.993 51

表 3 素土和混合草根加筋土强度指标

强度指标	素土	加筋土		
		2 g/个	4 g/个	6 g/个
黏聚力 $c / \text{kPa}$	19.48	25.59	34.90	48.51
内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	37.86	39.62	42.68	43.67
相关系数 $R$	0.9867	0.9984	0.9836	0.9968

将常规三轴压缩试验过程中每组试样 7 个摩尔应力圆顶点的纵横坐标值,即  $\alpha = (\sigma_1 + \sigma_3) / 2$ ,  $\tau = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2$  分别绘在  $\sigma - \tau$  坐标图中,进行线性拟合,求其线性化方程参数  $a$  和  $\theta$ ,然后通过  $a$  和  $\theta$  求  $c$  和  $\varphi$ 。所有拟合参数  $a$  和  $\theta$  的值见表 2。由表 2 可以看出,拟合度最小的为 0.993 51,最高可达 0.999 44,这说明用库仑强度公式来拟合强度包线效果良好,将拟合得到的参数  $a$  和  $\theta$  代入式(4)和式(5)求得库仑公式强度指标  $c$  和  $\varphi$ ,其结果见表 3。由表 3 可知,加筋土黏聚力内摩擦角相对素土都有较大增长,且都随加筋量的增大而增大,尤其黏聚力增长较快,这是由于草根与土相互作用时,在受拉处草根的抗拉强度转化为了土的黏聚力,使土颗粒之间不易被拉开。加筋量越大混合草根加筋土强度增长越大,是由于有更多的草根的抗拉强度转化为了根土复合体的抗剪强度。草根混合加入比分层加入能更好地模拟草根在土中的实际分布和受力状态,实验结果更具现实意义。

### 4 结论

(1) 本文基于三轴实验数据训练草根加筋土 BP 神经网络本构模型,自动生成网络参数,避免了数

学建模确定函数参数的困难。

(2) BP 神经网络本构模型计算结果与试验结果对比表明, 该模型具有较高的学习精度和良好的泛化能力, 能充分体现岩土材料的非线性关系。

(3) 用莫尔—库仑准则拟合得到的混合草根加筋土的强度指标  $c$  和  $\varphi$  值, 较素土有较大增长, 并用之分析了草根加筋土的护坡机理。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] Manbeian T. The influence of soil moisture suction, cyclic wetting and drying, and plant roots on shear strength of cohesive soil [ R ]. Berkeley: University of California, 1973.
- [ 2 ] Endo T, Tsuruta T. The effect of tree roots upon the shearing strength of soil [ C ] // Annual report of the Hokkaido Branch, Tokyo: Japan Tokyo Forest Experiment Station, 1969: 168—179.
- [ 3 ] Wu T H, Beal P E, Lan C. In situ test of soil root systems [ J ]. Journal of Geotechnical Engineering ASCE, 1988, 114(12): 1376—1394.
- [ 4 ] Roscoe K H, Schofield A N, Wroth C P. On the yielding

of soil [ J ]. Geotechnique, 1958, 8 ( 1 ): 22—53.

- [ 5 ] Roscoe K H, Schofield A N, Thuraairajah A. Yielding of clays in states wetter than critical [ J ]. Geotechnique, 1963, 13(3): 211—240.
- [ 6 ] Duncan J M, Chang C Y. Nonlinear analysis of stress-strain in soil [ J ]. Proc. ASCE, 1970, 96 ( SM5 ): 1629—1653.
- [ 7 ] 沈珠江. 土的重屈服面应力应变模型 [ J ]. 固体力学学报, 1984(2): 51—57.
- [ 8 ] Ghassem Habibagahi, Alireza Bamdad. A neural network framework for mechanical behavior of unsaturated soils [ J ]. Can. Geotech, 2003, 40: 684—693.
- [ 9 ] Banimahd M, Yasrobi S S, Woodward P K. Artificial neural network for stress-strain behavior of sandy soils: Knowledge based verification [ J ]. Computers and Geotechnics, 2005, 32: 377—386.
- [ 10 ] 中华人民共和国行业标准. 公路土工试验规程 (JTJ051—93) [ S ]. 1993.
- [ 11 ] 陈昌富, 刘怀星, 李亚平. 草根加筋土的护坡机理及强度准则试验研究 [ J ]. 中南公路工程, 2006, 31 ( 2 ): 14—17.

(上接第 84 页)

(3) 风是吉林省西部沙地产生风蚀的主要源动力, 当风速超过临界起沙风速时, 土壤侵蚀量与风速的 3 次方成正比。在风速相同的情况下, 挟沙风比净风更能引起土壤风蚀。经风洞试验和实际观测可知, 在挟沙气流的作用下, 虽然风速没有达到临界风速, 但土壤已经发生了风蚀, 并且在风速相同的条件下, 挟沙风作用下的土壤风蚀量远远大于净风作用下的土壤风蚀量, 一般都是几倍至几十倍, 这是由于挟沙风的能量远远大于净风能量的结果。

(4) 风蚀性气候因子为 155.2, 春季最大 (76.2)。在空间分布上, 该区风蚀性气候因子和侵蚀性能均自东向西递增, 西北部的通榆县为最大。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] 崔海山, 张柏, 刘湘南. 吉林西部土地荒漠化预测研究 [ J ]. 中国沙漠, 2004, 24(2): 235—239.
- [ 2 ] 刘明义, 戴全厚, 张黎辉, 等. 沙地土壤风蚀动力因子分析 [ J ]. 中国水土保持, 2000(7): 28—30.
- [ 3 ] 董光荣, 李长治, 高尚玉, 等. 关于土壤风蚀风洞模拟实验的某些结果 [ J ]. 科学通报, 1987(4): 297—301.
- [ 4 ] Arao K, Ishizaka Y. Volume and mass of yellow sand dust in the air over Japan: An estimated from atmospheric turbidity [ J ]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 1986, 64(1): 311—325.
- [ 5 ] FAO. A Provisional Methodology for Soil Degradation

Assessment [ M ]. Rome: 1979.

- [ 6 ] 海春兴. 中国北方农牧交错区夏季土壤风蚀研究 [ J ]. 干旱区资源与环境, 2002, 16(2): 6—9.
- [ 7 ] Chipil W S. Properties of soil which influence wind erosion: State of dry aggregate structure [ J ]. Soil Science, 1951, 72: 387—401.
- [ 8 ] Bisal F, Hsieh J. Influence of moisture on the erodibility of soil by wind [ J ]. Soil Science, 1966, 102: 143—146.
- [ 9 ] 胡孟春, 刘玉璋, 乌兰, 等. 科尔沁沙地土壤风蚀的风洞实验研究 [ J ]. 中国沙漠, 1991, 11 ( 1 ): 22—29.
- [ 10 ] Woodruff N P, Siddoway F H. A wind erosion equation [ J ]. Soil Science Society of American Proceedings, 1965, 29: 602—608.
- [ 11 ] 孙显科. 风沙运动理论体系的创建与研究 [ J ]. 中国沙漠, 2004, 24(2): 129—135.
- [ 12 ] 申向东, 邹春霞. 裸露耕地风沙运动特性试验研究 [ J ]. 农业环境科学学报, 2005, 24(5): 909—912.
- [ 13 ] 董玉祥. 沙漠化灾害危险度评价的初步研究 [ J ]. 自然灾害学报, 1993, 2(3): 103—109.
- [ 14 ] 黄宁, 郑晓静. 风沙跃移运动中的 Magnus 效应 [ J ]. 兰州大学学报, 2001, 37(3): 19—25.
- [ 15 ] 移小勇, 赵哈林, 张铜会, 等. 挟沙风对土壤风蚀的影响研究 [ J ]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 59—61.