

基于 ANFIS 神经网络的红黏土蠕变模型

朱世民^{1,2}, 陈昌富^{1,2†}, 高傑^{1,2}

(1. 湖南大学 建筑安全与节能教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:为更好地评价红黏土边坡的蠕变特性和长期稳定性,必须建立合理的红黏土蠕变模型. 首先利用自行设计改装的红黏土三轴蠕变试验装置,采用分级加载,对在不同围压下固结完成的红黏土试样进行室内排水三轴蠕变试验,获得了不同围压下的红黏土蠕变全过程曲线. 然后采用“陈氏加载法”将分级加载曲线转化为不同偏应力水平下的分别加载曲线,利用等时曲线法获得红黏土的长期抗剪强度. 选用不同围压、不同偏应力水平下的部分蠕变试验结果进行样本训练,建立了基于 ANFIS 神经网络且考虑围压及偏应力影响的红黏土蠕变模型. 最后,利用训练完成的本文模型对其他蠕变试验结果进行预测,结果表明本文模型的拟合及预测精度均较高.

关键词:红黏土;蠕变;长期强度;ANFIS 神经网络

中图分类号:TU411.5

文献标志码:A

Creep Model of Red Clay Based on ANFIS Neural Network

ZHU Shimin^{1,2}, CHEN Changfu^{1,2†}, GAO Jie^{1,2}

(1. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Long-term stability assessment of slope characterized by the presence of red clays depends essentially on the creep model of red clay adopted. A specially designed device was used to conduct the tri-axial creep tests on red clay specimens. Deviatoric stresses were imposed on the specimens by stepwise loading, which were consolidated under varying confining stresses. The full-process creep curve of axial strains with increasing deviatoric stress was transformed equivalently to a cluster of creep curves under each stress levels by using "Chen's method". Furthermore, the ultimate deviatoric stress of red clay specimens before yielding in creep tests under varying confining stresses was determined using isochronal curve method, and used to establish the long-term shear strength criterion. A creep model of red clay in terms of axial strain accounting for the deviatoric stress and confining stress was established in the framework of ANFIS neural network. In this framework, a part of test data were used in training the creep model, while the remaining test data were used to examine its capability of predicting the creep response of red clay. A good agreement between the measurements and predictions validates the effectiveness and accuracy of this presented creep model.

Key words: red clay; creep; long-term shear strength; ANFIS neural network

* 收稿日期:2018-08-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41572298), National Natural Science Foundation of China(41572298)

作者简介:朱世民(1994—),男,山东日照人,湖南大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: cfchen@163.com

红黏土是指碳酸盐类岩石(或富含铁、铝氧化物类岩石)经红土化作用而形成的褐红色黏土,它在我国湿润多雨的南方地区广泛分布.由于红黏土中富含亲水矿物,遇水易软化,易蠕变,水理致灾作用突出,因此,在红黏土地区进行工程建设,很有必要深入了解红黏土的蠕变特性.

国内外普遍采用元件蠕变模型^[1-4]和经验蠕变模型^[5-8]来描述岩土材料的蠕变特性.比如:赵明华等^[9]用改进的西原模型较好地描述了软黏土蠕变变形的3个阶段;杨圣奇等^[2]建立了能描述岩石蠕变3阶段的非线性损伤流变模型;夏才初等^[3]建立了统一的流变力学模型,并对模型参数的确定方法进行了研究;曹文贵等^[4]引入损伤理论建立了岩石蠕变模型;卢萍珍等^[7]建立了幂函数形式的经验蠕变本构方程;陈昌富等^[8-11]利用自行研发的试验装置进行膨胀土-锚固体界面剪切蠕变试验,并建立了经验蠕变模型.此外,李江腾等^[12]还进行了板岩在饱水与干燥状态下的蠕变试验.

研究表明,元件或经验蠕变模型在用于描述单因素(如应力水平)作用下的岩土材料的蠕变特性时,其效果较好.但实际情况中,岩土材料通常是在多个因素共同作用下产生非线性变形,而这些模型却不能很好地综合考虑这些因素,因此很难建立一个考虑多因素共同作用且具备较高拟合和预测精度的流变模型.

人工神经网络由于具备强大的非线性拟合、逼近和预测的能力,能够较好地弥补传统的元件和经验模型所存在的一些缺陷,受到国内外学者的广泛关注.易达等^[13]利用改进后的PSO神经网络,建立了大理岩的围压与峰值应力、应变的关系;陈昌富等^[14]则基于海相软土的室内直剪蠕变试验结果,建立了改进的BP神经网络蠕变本构模型.

Jang^[15]将模糊推理系统与神经网络融合,提出自适应神经模糊推理系统(Adaptive Network based Fuzzy Inference System,简称ANFIS).相比于BP神经网络等传统的神经网络,ANFIS兼具神经网络学

习能力强与模糊推理系统模糊信息处理能力强的优点,同时又克服了两者的缺点,因而不易陷入局部最优,且收敛速度快,在岩土工程中得到了成功的应用^[16-17].

由于ANFIS神经网络特别适合解决多变量、非线性系统的建模问题,因此本文尝试采用ANFIS神经网络来建立同时考虑偏应力和围压影响的红黏土蠕变模型.而目前有关采用ANFIS神经网络建立多因素耦合下岩土材料蠕变模型的研究成果尚未见文献报道.

本文首先利用自行设计改装的三轴蠕变试验装置,对不同围压下固结完成的红黏土试样进行室内排水三轴蠕变试验,获得红黏土蠕变全过程曲线及其长期强度;然后选用不同围压、不同偏应力水平下的部分蠕变试验结果作为样本进行训练,以此建立出基于ANFIS神经网络且考虑围压及偏应力影响的红黏土蠕变模型;最后利用建立的蠕变模型对红黏土蠕变曲线进行预测,以验证模型的精确度.

1 红黏土三轴蠕变试验

1.1 试验用料及装置

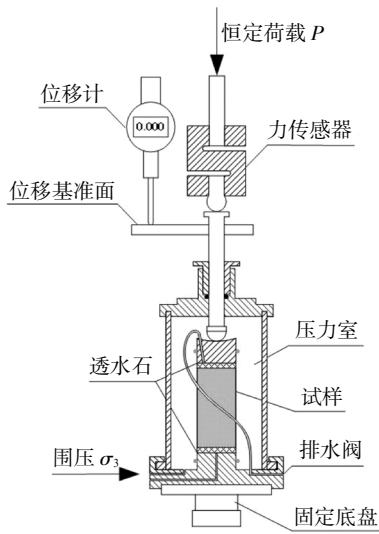
试验所用土料取自湖南省长沙市宁乡县某高速公路段,根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)^[18]确定其物理力学参数如表1所示.

试验装置采用自行设计改装后的TSZ应变控制式三轴仪,该装置主要由加载系统和数据采集系统构成(如图1).其加载系统主要依据杠杆加载原理进行设计,其杠杆比为1:6.5,对于直径为39.1 mm的标准土样,其应变范围为0~20%,可施加的最大偏应力为1 330 kPa.砝码加载后,荷载可依次经过杠杆梁、轴压杆以及力传感器作用在试样上;试样在受力后所产生的轴向变形可通过位移计测取,位移计与数据采集系统相连以实现实时位移自动采集.同时,为保证试验的精准性,作用于试样上的恒定荷载取力传感器所采集到的荷载值.

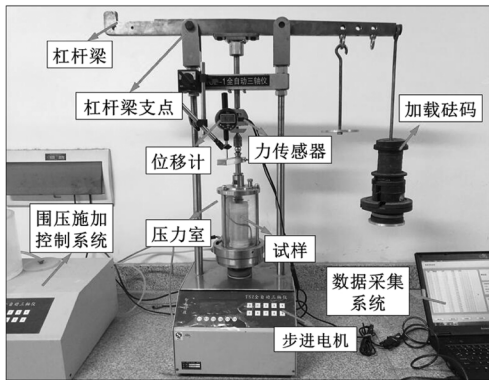
表1 红黏土的基本物理力学参数

Tab.1 Properties of red clay used in testing

液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 I_p	比重 d_s	最大干密度 $\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	颗粒组成/%		
							<0.002 mm	0.002 ~ 0.075 mm	>0.075 mm
36.8	20.9	15.9	2.687	1.72	38.7	24.5	49.5	17.5	33.0



(a) 试验装置原理图



(b) 试验装置实物图

图 1 三轴蠕变试验装置

Fig.1 Tri-axial creep testing device

1.2 试验方法

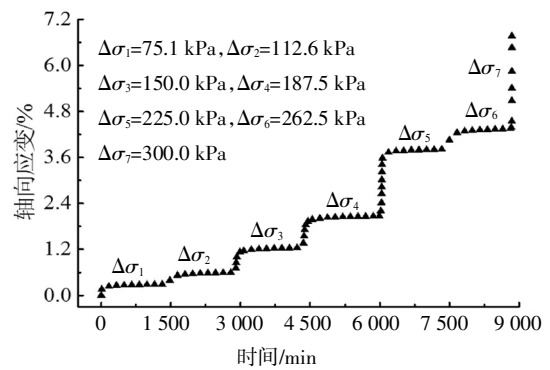
试验采用重塑土试样,其直径为 39.1 mm,高度为 80 mm. 试验条件为固结排水. 试验的具体步骤依次为:

- 1)采用分层击实法制样,击实后土样的干密度为 1.70 g/cm³,含水率为 0.18;
- 2)对土样进行抽气饱和,饱和后土样的饱和度不低于 95%;
- 3)对土样实施等压固结,固结的时间为 24 h,以保证土样中孔隙水压力完全消散;
- 4)蠕变加载. 试验采用分级加载的方式,即在同一个试样上逐级施加不同的荷载,待该级荷载作用下的变形稳定或者达到预定时间后再施加下一级荷载,直至试样产生破坏. 根据各平行试样固结不排水三轴压缩试验破坏偏应力的大小,将加载等级分成 6~9 级. 每级加载的增量设计为 37.5 kPa. 选用的蠕变稳定标准为 10 000 s 内变形量小于 0.01 mm^[19]. 由于试验用料为红黏土,击实后的土样受力后变形能

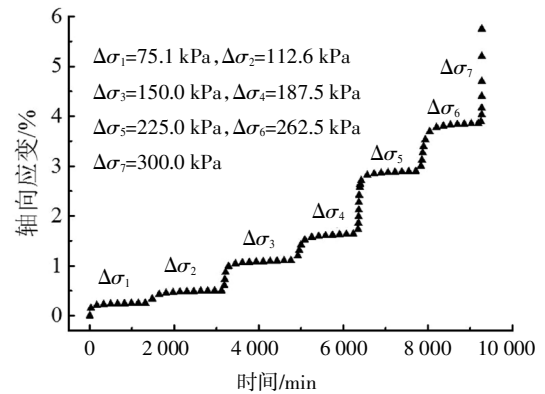
在 24 h 内达到稳定标准,鉴于此,每级荷载的施加时间为 24 h. 若土样的变形速率不断增大,土样发生急剧变形,最终出现明显的鼓胀破坏或形成明显的剪切破坏面,则判定土样破坏.

1.3 试验结果

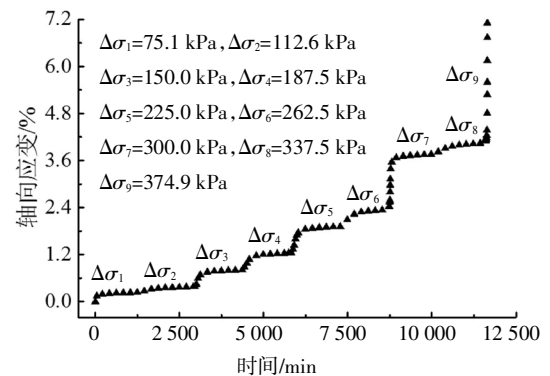
对在 100 kPa、150 kPa 和 200 kPa 围压下固结完成的红黏土试样(分别记为试样 A1、A2 和 A3)进行分级加载,得到分级加载全过程曲线如图 2 所示. 采用陈宗基提出的“陈氏加载法”(基本原理详见文献[7-8,20])对分级加载全过程曲线进行处理,可得到分别加载条件下的轴向应变-时间关系曲线,如图 3 所示.



(a) 试样 A1



(b) 试样 A2



(c) 试样 A3

图 2 红黏土三轴蠕变分级加载全过程曲线

Fig.2 Full-process creep curves of red clay specimens in stepwise loading

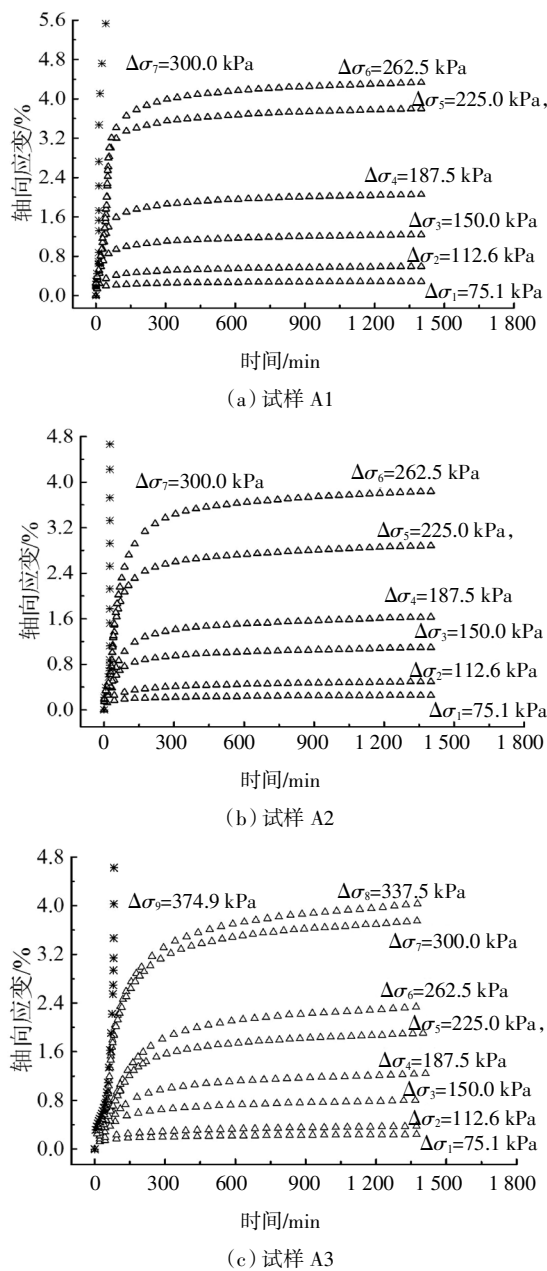


图3 红黏土三轴蠕变分别加载曲线

Fig.3 Individual creep curves under different stress levels

由图2、图3可知,偏应力较小时,蠕变处于衰减阶段,试样的轴向应变在初期增长很快,随后应变增长的速率变小,最终趋于稳定.偏应力较大时,加载初期一定时间范围内会出现应变增长迟滞的现象,分别加载曲线上存在两个较为明显的拐点,围压越大该现象也越明显,这与文献[21]所进行的三轴排水蠕变试验的结果相似,该文用“Mandel-Cryer”效应解释了这一现象.

1.4 长期抗剪强度的确定

在图3不同时间点处作平行于纵轴(轴向应变)

的直线与各级蠕变曲线相交,根据各交点的轴向应变和偏应力值绘出偏应力-轴向应变等时曲线如图4所示.同时,将各等时曲线屈服极限值的连线所组成的水平渐近线在偏应力轴上的截距定义为红黏土蠕变破坏阈值.

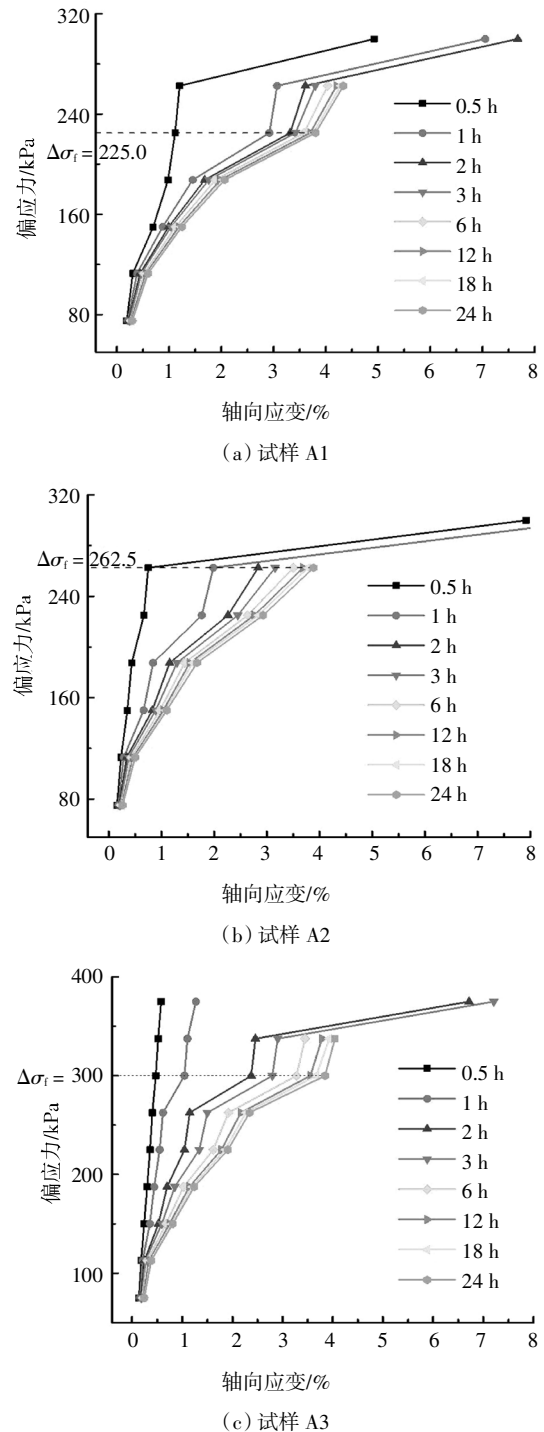


图4 偏应力-轴向应变等时曲线

Fig.4 Isochronal curves for deviatoric stress-axial strain

根据不同围压下的红黏土蠕变破坏阈值绘出长期抗剪强度包线,如图 5 所示.由图 5 可知,红黏土在排水条件下的长期抗剪强度指标为: $c_1 = 56.7$ kPa, $\varphi_1 = 15.8^\circ$.该强度指标即为在荷载长期作用下红黏土的结构不发生破坏并能够维持长期稳定所具有的强度.根据 $\tau = c + \sigma \tan \varphi$,红黏土的最大抗剪强度要下降约 25%.

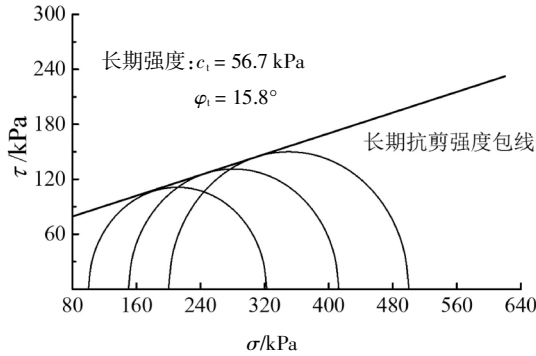


图 5 红黏土长期抗剪强度
Fig.5 Long-term shear strength of red clay

2 ANFIS 神经网络基本原理及结构

2.1 基本原理

ANFIS 采用的是 Sugeno 型模型系统,该系统由前件和后件组成,其典型的模糊规则为 if-then 规则:if X is A and Y is B , then $Z = f(x, y)$,其中, A, B 是前件中的模糊集合, $Z = f(x, y)$ 是后件中的精确函数.若 $f(x, y)$ 为线性函数,则产生的系统为 1 阶 Sugeno 型模糊系统.

以 1 阶 Sugeno 型模糊系统的推理过程(图 6)为例,假定其具有两个输入: x 和 y ,一个输出: z ,同时,假定其具有两条模糊 if-then 规则:

- 规则 1: If x is A_1 and y is B_1 , then $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$;
- 规则 2: If x is A_2 and y is B_2 , then $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$.

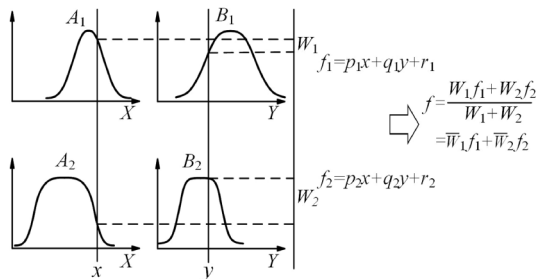


图 6 1 阶 Sugeno 型模糊系统推理过程

Fig.6 Reasoning process of first-order Sugeno fuzzy system

与该系统等效的 ANFIS 结构如图 7 所示.该结构可分为 5 层,各层的功能如下:

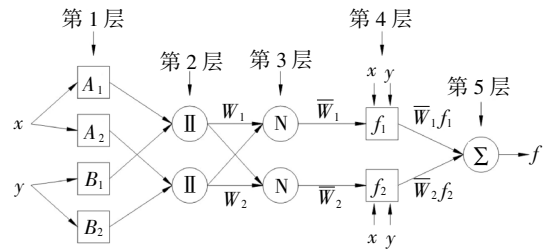


图 7 ANFIS 神经网络结构

Fig.7 Structure of ANFIS neural network

第 1 层为输入层,该层中的每一个节点均是有结点函数的自适应结点:

$$\begin{aligned} O_i^1 &= u_{A_i}(x), i = 1, 2 \\ O_{i-2}^1 &= u_{B_i}(y), i = 3, 4 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: O_i^1 表示第 1 层第 i 个结点的输出; x, y 为各结点的输入; A_i, B_i 分别为描述输入量 x, y 满足程度的隶属度函数,其最大值为 1,最小值为 0,以双 S 和型隶属度函数为例:

$$u_{A_i}(x) = \text{disgmf}(x, \{a_i, b_i, c_i, d_i\}) = \frac{1}{1 + e^{-\frac{x-a_i}{b_i}}} + \frac{1}{1 + e^{-\frac{c_i-x}{d_i}}} \quad (2)$$

式中: $\{a_i, b_i, c_i, d_i\}$ 为双 S 和型隶属度函数的可调特征参数.

第 2 层的每个结点为以 II 表示的固定结点,其输出为所有输入信号的乘积,表示第 i 条模糊规则的激励强度:

$$O_i^2 = w_i = u_{A_i}(x) \times u_{B_i}(y), i = 1, 2 \quad (3)$$

第 3 层的每个结点为以 N 表示的固定结点,其输出为第 i 条模糊规则的激励强度与所有激励强度之和的比值,以此实现每个结点激励强度的归一化.

$$O_i^3 = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, i = 1, 2 \quad (4)$$

第 4 层中的每个结点均是一个有结点函数的自适应结点:

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i), i = 1, 2 \quad (5)$$

式中: \bar{w}_i 为第 3 层传来的第 i 个结点的归一化激励强度; f_i 为输出变量的隶属度函数; $\{p_i, q_i, r_i\}$ 为该结点的参数集,称为结论参数.

第 5 层为标以 Σ 的固定单结点,其功能在于将第 4 层传来的所有信号求和并进行输出:

$$O_i^s = \sum w_i f_i = \frac{w_1 f_1 + w_2 f_2}{w_1 + w_2} \quad (6)$$

ANFIS神经网络中包含了隶属度函数的特征参数 $\{a_i, b_i, c_i, d_i\}$ 和结论参数 $\{p_i, q_i, r_i\}$. 训练过程中, 这些参数均可以不断地进行调整, 以此实现自适应学习.

2.2 训练结构及学习算法

ANFIS神经网络的训练结构有2种: 网格分类法(Grid partition)和减法聚类法(Subtractive clustering). 网格分类法是对输入到系统中的数据通过“网格”进行分割, 然后基于模糊C-均值聚类法建立起来的模糊系统. 网格分类法中, 操作者可根据输入变量的实际情况选取隶属度函数的类型、数目及输出变量的函数形式. 减法聚类法是一种用来估计数据中聚类个数以及聚类中心位置的快速单次数据类算法. 它可以快速地计算每个点周围点的密度, 然后根据密度的大小衡量该点成为聚类中心的可能性, 取密度最大的点作为聚类的中心.

ANFIS的学习算法有2种: 误差反传学习算法和混合学习算法. 误差反传学习算法中误差信号是由输出层反向传播至输入层, 反向传播过程中, 误差信号将分摊至各层神经元中, 然后系统根据各层误差的实际情况进行权值调整. 该算法中误差信号的传播路径与函数信号相反. 混合学习算法分为前向与后向两个过程. 前向过程中, 先将隶属度函数的特征参数 $\{a_i, b_i, c_i, d_i\}$ 进行固定, 然后将输入量 $\{x, y\}$ 的函数描述传递至第4层, 最后通过最小二乘法对结论参数 $\{p_i, q_i, r_i\}$ 进行辨识, 从而获得最优的结论参数并进行系统输出; 反向过程中, 先由前进过程计算出误差信号, 然后将误差信号反向传播至第1层, 然后采用梯度下降法对隶属度函数的特征参数 $\{a_i, b_i, c_i, d_i\}$ 进行辨识, 从而不断更新隶属度函数, 以实现系统性能的不断改善. 混合学习算法是最小二乘法与梯度下降法相结合的算法, 与误差反传算法相比, 它具有收敛速度快且不易陷入局部极小等优点.

3 基于ANFIS神经网络的红黏土蠕变模型

3.1 ANFIS神经网络蠕变模型建立

在恒载作用下, 红黏土试样将产生变形, 其轴向应变 ε_v 与围压 σ_3 、偏应力 $\Delta\sigma$ 以及时间 t 存在一定的函数关系, 可表示为:

$$\varepsilon_v = f(\sigma_3, \Delta\sigma, t) \quad (7)$$

本文所提出的基于ANFIS神经网络的红黏土蠕变模型可综合考虑围压 σ_3 和偏应力 $\Delta\sigma$ 这两个因素对红黏土蠕变变形的影响. 模型的输入变量有3个, 分别为: 围压 σ_3 、偏应力 $\Delta\sigma$ 和时间 t , 输出变量为轴向应变 ε_v . 模型的训练结构为网格分类法, 输入变量围压 σ_3 、偏应力 $\Delta\sigma$ 和时间 t 分别赋予2、3、19个隶属度函数, 其类型均为双S和型, 输出变量轴向应变 ε_v 的函数类型设置为线性函数. 模型的学习算法为混合学习算法. 具体结构如图8所示.

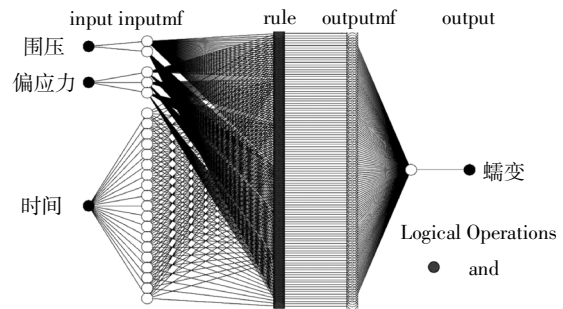
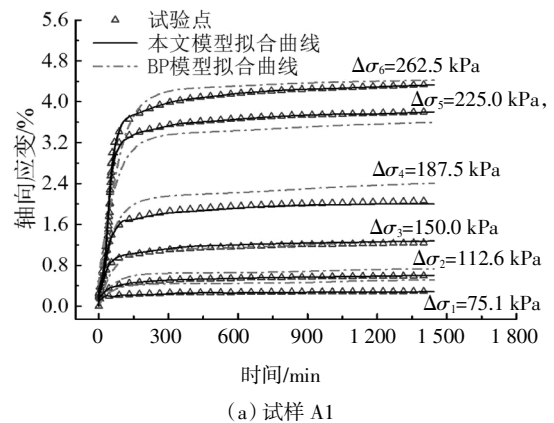


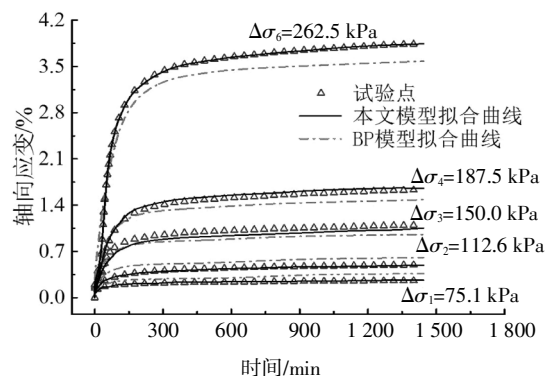
图8 本文模型的ANFIS神经网络结构

Fig.8 ANFIS neural network structure of the purposed model

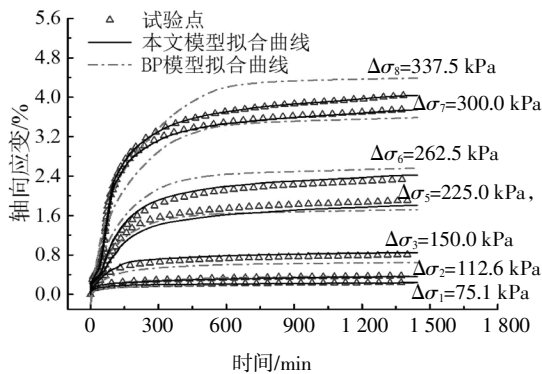
利用该模型对不同围压、不同偏应力水平下的部分红黏土蠕变试验结果集中进行训练. 蠕变曲线的拟合效果如图9所示.



(a) 试样 A1



(b) 试样 A2



(c) 试样 A3

图 9 本文模型与 BP 模型的蠕变拟合效果对比

Fig.9 Comparison of predicted creep response between the presented model and BP model

由图 9 可知,本文模型对不同围压、不同偏应力水平下的红黏土蠕变曲线拟合效果良好,尤其是对红黏土蠕变曲线的形态描述效果更好.

3.2 基于本文模型的蠕变曲线预测

利用训练完成的 ANFIS 神经网络蠕变模型对其他未参与训练的蠕变曲线进行预测,其蠕变预测效果如图 10 所示.

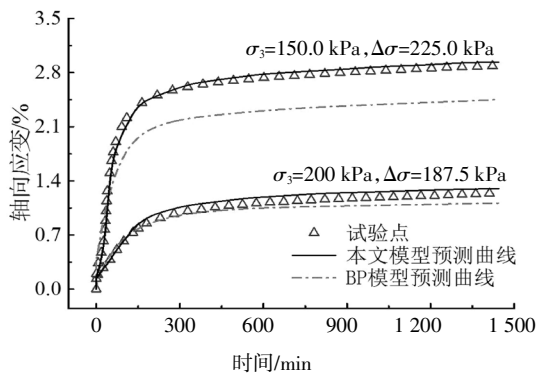


图 10 基于本文模型及 BP 模型的蠕变预测

Fig.10 Predicted creep response by using the presented model and BP model

由图 10 可知,本文模型对红黏土蠕变曲线的预测效果良好.围压较大、偏应力较高情况下的红黏土蠕变曲线将出现两个较为明显的拐点(图 2、图 3),本文模型也能较为准确地预测出这两个拐点的位置.

3.3 模型对比和精度分析

为对比分析本文建立的基于 ANFIS 神经网络红黏土蠕变模型的合理性和精确性,同时采用 BP神经网络(Back Propagation Neural Network)建立红黏

土蠕变模型,其拟合和预测结果分别见图 9、和图 10.

由图 9、图 10 可知,BP 神经网络模型对红黏土蠕变曲线的拟合和预测效果均不如本文提出的 ANFIS 神经网络蠕变模型.而且,采用 BP 神经网络蠕变模型进行样本的集中训练时,试样 A3 中(围压 $\sigma_3 = 200$ kPa)的部分偏应力水平下的蠕变曲线在时间 $t=0\sim 10$ min 时出现蠕变拟合值为负数的现象(图 9(c)),偏应力水平越高这一现象越明显.这与 BP 神经网络待定参数多、容易陷入局部极小等缺陷有关.

为进一步对比说明本文模型和 BP 神经网络模型对红黏土蠕变曲线拟合和预测的准确度,将以上两个模型对不同围压、不同偏应力水平下的红黏土蠕变曲线拟合和预测的均方根误差(RMSE)列表如表 2 所示.

表 2 模型误差分析

Tab.2 Error of the presented model and BP model

围压 σ_3/kPa	编号	偏应力 $\Delta\sigma/\text{kPa}$	用途	本文模型 均方根误差	BP 模型 均方根误差
100	1	75.1	训练	0.012	0.138
	2	112.5	训练	0.009	0.113
	3	150.0	训练	0.027	0.145
	4	187.5	训练	0.048	0.213
	5	225.0	训练	0.088	0.359
	6	262.5	训练	0.079	0.267
150	1	75.1	训练	0.011	0.057
	2	112.5	训练	0.013	0.093
	3	150.0	训练	0.063	0.106
	4	187.5	训练	0.044	0.119
	5	225.0	预测	0.066	0.356
	6	262.5	训练	0.029	0.237
200	1	75.1	训练	0.006	0.037
	2	112.5	训练	0.014	0.038
	3	150.0	训练	0.041	0.097
	4	187.5	预测	0.048	0.067
	5	225.0	训练	0.096	0.116
	6	262.5	训练	0.068	0.243
	7	300.0	训练	0.043	0.260
	8	337.5	训练	0.042	0.338

由表2可以看出,本文建立的 ANFIS 神经网络模型对所有红黏土蠕变曲线拟合及预测的均方根误差均低于 0.1,其最大值为 0.096,而 BP 神经网络模型拟合及预测的均方根误差最大为 0.359;同时,BP 神经网络模型拟合及预测的均方根误差普遍高于本文模型的误差,偏应力水平越高,误差越大,这更加体现出本文模型对红黏土蠕变曲线的拟合及预测精度均较高,即本文所提出的基于 ANFIS 神经网络的蠕变模型适合描述红黏土的蠕变特性。

4 结论

1)为深入研究红黏土的蠕变特性,本文在原有的 TSZ 全自动应变控制式三轴仪的基础上,设计改装了一套红黏土三轴蠕变试验装置,并对不同围压下固结完成的红黏土试样采用分级加载进行排水三轴蠕变试验,获得不同围压、不同偏应力水平下的蠕变曲线。

2)利用等时曲线法获得不同围压下的红黏土蠕变破坏阈值,并计算出红黏土的长期抗剪强度。

3)建立了基于 ANFIS 神经网络的红黏土蠕变模型,该模型综合考虑了围压和偏应力对红黏土蠕变特性的影响,可用于预测周围压力为 100~200 kPa 的红黏土的蠕变特性。结果表明,该模型具有较高的拟合精度和良好的蠕变预测能力。

4)影响红黏土长期强度以及蠕变特性的因素还有很多,如含水率、干湿循环的次数、土体的干密度以及应力路径等,这些因素对红黏土长期强度及蠕变特性的影响规律将在后期开展进一步的研究。

参考文献

- [1] 赵明华,肖燕,陈昌富. 软土流变特性的室内试验与改进的西原模型[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2004,31(1):48—51.
ZHAO M H, XIAO Y, CHEN C F. Laboratory experiment of the rheological property of soft clay and the improved Xiyuan model [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2004, 31(1): 48—51. (In Chinese)
- [2] 杨圣奇,徐鹏. 一种新的岩石非线性流变损伤模型研究[J]. 岩土工程学报,2014,36(10):1846—1854.
YANG S Q, XU P. A new nonlinear rheological damage model for rock [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(10):1846—1854. (In Chinese)
- [3] 夏才初,许崇帮,王晓东,等. 统一流变力学模型参数的确定方法[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(2):425—432.
XIA C C, XU C B, WANG X D, *et al.* Method for parameters determination with unified rheological mechanical model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2):425—432. (In Chinese)
- [4] 曹文贵,袁靖周,王江营,等. 考虑加速蠕变的岩石蠕变过程损伤模拟方法 [J]. 湖南大学学报(自然科学版),2013,40(2):15—20.
CAO W G, YUAN J Z, WANG J Y, *et al.* A damage simulation technique of the full rock creep process considering accelerated creep [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2013, 40(2):15—20. (In Chinese)
- [5] SINGH A, MITCHELL J K. General stress-strain-time function for soils [J]. Geotechnical Special Publication, ASCE, 1968, 94(1):21—46.
- [6] MESRI G, FEBRES-CORDERO E, SHIELDS D R, *et al.* Shear stress-strain-time behaviour of clays [J]. Geotechnique, 1981, 31(4):537—552.
- [7] 卢萍珍,曾静,盛谦. 软黏土蠕变试验及其经验模型研究[J]. 岩土力学,2008,29(4):1041—1044,1052.
LU P Z, ZENG J, SHENG Q. Creep tests on soft clay and its empirical models [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4):1041—1044,1052. (In Chinese)
- [8] 陈昌富,刘俊斌,徐优林,等. 锚-土界面剪切蠕变试验及其经验模型研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(10):1762—1768.
CHEN C F, LIU J B, XU Y L, *et al.* Tests on shearing creep of anchor-soil interface and its empirical model [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(10):1762—1768. (In Chinese)
- [9] 陈昌富,梁冠亭,汤宇,等. 锚杆锚固体与土体界面特性室内测试新方法[J]. 岩土工程学报,2015,37(6):1115—1122.
CHEN C F, LIANG G T, TANG Y, *et al.* Anchoring solid-soil interface behavior using a novel laboratory testing technique [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6):1115—1122. (In Chinese)
- [10] 陈昌富,梁冠亭,刘晓明,等. 一种用于锚或桩与土界面摩擦性能试验的样坯制作装置及方法:中国,10176979.8[P]. 2014-07-23.
CHEN C F, LIANG G T, LIU X M, *et al.* A apparatus and method for producing adobe used to test frictional behavior of anchoring or pile solid-soil interface: China, 10176979.8 [P]. 2014-07-23. (In Chinese)
- [11] 梁冠亭,陈昌富,罗宏,等. 一种用于锚或桩与土界面摩擦性能试验的试样制作装置及方法:中国,10176977.9 [P]. 2014-08-06.
LIANG G T, CHEN C F, LUO H, *et al.* A apparatus and method for

- producing sample used to test frictional behavior of anchoring or pile solid-soil interface:China, 10176977.9 [P]. 2014-08-06. (In Chinese)
- [12] 李江腾,常瑞芹,黄旻鹏. 饱水与干燥状态下横观各向同性板岩蠕变特性[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2018,45(5):143—148.
- LI J T, CHANG R Q, HUANG M P. Creep properties of transversely isotropic slate under water-saturated and dry conditions [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(5): 143—148. (In Chinese)
- [13] 易达,刘洁荣,葛修润. 三轴压缩围压与峰值应力、应变关系的改进粒子群神经网络研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(12): 2639—2642, 2648.
- YI D, LIU J R, GE X R. Research on relationship between confining pressure, peak strength and strain in triaxial compression with improved PSO-based ANN[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(12): 2639—2642, 2648. (In Chinese)
- [14] 陈昌富,刘辉,肖燕. 海相沉积软土蠕变 BP 神经网络本构模型[J]. 工程地质学报, 2008, 16(4): 507—511.
- CHEN C F, LIU H, XIAO Y. Ann based creep constitutive model for marine sediment clay [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(4): 507—511. (In Chinese)
- [15] JANG J-S R. ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system [J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, 1993, 23(3): 665—685.
- [16] 肖治宇,陈昌富,季永新. 基于自适应神经-模糊推理系统的软土路基沉降预测模型 [J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(6): 61—65.
- XIAO Z Y, CHEN C F, JI Y X. Settlement prediction of soft clay roadbed based on adaptive neuro-fuzzy inference system model[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(6): 61—65. (In Chinese)
- [17] 吕海波,赵艳林,孔令伟,等. 自适应模糊神经网络在膨胀土胀缩等级分类中的应用[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 908—912.
- LÜ H B, ZHAO Y L, KONG L W, *et al.* Application of adaptive-network-based fuzzy inference systems to classification of swelling-shrinkage grade of expansive soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(6): 908—912. (In Chinese)
- [18] 南京水利科学研究所. GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京:中国计划出版社, 1999: 22—52.
- Nanjing hydraulic research institute. GB/T 50123—1999 Standard for soil test method [S]. Beijing: China Planning Press, 1999: 22—52. (In Chinese)
- [19] 孙钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1999: 60—61.
- SUN J. Rheological behavior of geomaterials and its engineering applications [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999: 60—61. (In Chinese)
- [20] 陈宗基,康文法. 岩石的封闭应力、蠕变和扩容及本构方程[J]. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(4): 299—312.
- CHEN Z J, KANG W F. On the locked in stress, creep and dilatation of rocks, and the constitutive equations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1991, 10(4): 299—312. (In Chinese)
- [21] 杨超,汪稔,孟庆山. 软土三轴剪切蠕变试验研究及模型分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(S1): 105—111.
- YANG C, WANG R, MENG Q S. Study of soft soil triaxial shear creep test and model analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(S1): 105—111. (In Chinese)