

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20230412240498

文章编号: 1674-599X(2024)02-0108-08

引用格式: 王硕, 唐正光, 华伦. 基于BP神经网络的固化红土抗压强度预测[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(2): 108-115.

Citation: WANG Shuo, TANG Zhengguang, HUA Lun. Compressive strength prediction of solidified laterite based on BP neural network[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(2): 108-115.

## 基于BP神经网络的固化红土抗压强度预测

王硕, 唐正光, 华伦

(昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650500)

**摘要:** 为分析不同掺量的偏高岭土与石灰共同掺入玄武岩残积红土中对土体的改良效果, 本试验选取偏高岭土的掺量分别为0%、2%、4%、6%和8%, 石灰的掺量分别为0%、2.5%、5.0%、7.5%和10.0%, 同时掺入玄武岩残积红土中, 制作25组不同固化红土, 对其进行28 d无侧限抗压强度正交试验, 并用MATLAB软件建立神经网络预测模型, 预测固化红土养护28 d的抗压强度。研究表明: 本模型预测误差最大为4.56%, 拟合度为0.997, 且本方法比常规回归分析法更简单、更准确, 可预测不同固结材料和掺量的固化红土抗压强度, 提高试验效率。

**关键词:** 玄武岩残积红土; BP神经网络; 抗压强度; 强度预测模型; 预测误差

中图分类号: TU411

文献标志码: A

## Compressive strength prediction of solidified laterite based on BP neural network

WANG Shuo, TANG Zhengguang, HUA Lun

(Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kunming University of Science and Technology,  
Kunming 650500, China)

**Abstract:** In order to explore the improvement effect of different dosages of metakaolin and lime mixed with residual soil of basaltic weathered soil, this experiment selected kaolin dosages of 0%, 2%, 4%, 6%, and 8%, and lime dosages of 0%, 2.5%, 5.0%, 7.5%, and 10.0%, simultaneously mixed with basalt residual laterite to prepare 25 groups of differently solidified red soils. An orthogonal test on the unconfined compressive strength of the soils was conducted for 28 days, and a neural network prediction model was established by MATLAB to predict the 28-day compressive strength of solidified laterite. The results show that the maximum prediction error of the model is 4.56%, with a coefficient of determination of 0.997. Furthermore, this method offers simplicity, higher efficiency, and greater accuracy over conventional regression analysis techniques, which enables the prediction of the compressive strength of solidified laterite with different consolidation materials and dosages, thereby improving experimental efficiency.

**Key words:** basalt residual laterite; BP neural network; compressive strength; strength prediction model; prediction error

在道路工程建设中, 为降低建设成本和节约资源, 可就地取材, 但根据《公路路基设计规范》(JTG

D30—2015)<sup>[1]</sup>的规定, 红黏土和高液限土均不能直接作为路基填料, 需要对这些土体进行改良才能使

收稿日期: 2023-04-12

基金项目: 拉萨市设计院校企合作项目 (649320200038)

通信作者: 王硕 (1998—), 男, 硕士生, 主要从事路基路面工程方面的研究工作。E-mail: 2291272870@qq.com

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

用。一般的改良方法是向土中掺入石灰、砂砾、水泥、粉煤灰、纤维等材料<sup>[2-4]</sup>。

偏高岭土是高岭土在温度 600~900℃下煅烧后获得的一种地聚合物材料<sup>[5]</sup>。由于偏高岭土具有很高的火山灰活性,在碱性环境下更易生成水化物,充分呈现其胶凝性能,在汽车、航空、冶金、土木工程等领域被广泛应用<sup>[6]</sup>。偏高岭土在水泥砂浆、混凝土中的应用已取得了较好的效果<sup>[7]</sup>,且偏高岭土用于改良粉质黏土和红黏土的研究也取得了一些成果<sup>[8-11]</sup>。

土体的抗压强度一般通过室内试验测得,但不同的试验设备、不同试验环境和人为操作误差等因素对试验结果产生诸多不确定的影响。在多水平、多指标的试验中,最终通过试验结果得到回归参数,掌握其发展趋势及变化规律,但传统回归方法通过试验数据进行回归曲线拟合,拟合程度存在一定局限性,在对抗压强度进行预测时,会产生较大误差。与传统回归方法相比,神经网络可以处理多因素非线性映射问题,拟合的效果更好。反向传播(back propagation network, BP)网络模型是人工神经网络中的一种,是前馈网络的核心部分。目前,已有许多学者将BP神经网络应用到普通混凝土强度预测中,并取得了较好的成效。李小雷等<sup>[12]</sup>通过高掺量粉煤灰混凝土各组分用量和养护龄期,预测混凝土的抗压强度。李红等<sup>[13]</sup>针对使用强制式搅拌机的混凝土,提出通过搅拌机参数预测混凝土 28 d 的抗压强度。BP算法在混凝土和岩土工程等领域的应用也取得了许多成果<sup>[14-17]</sup>。

在土体固化研究中,固化材料的掺量对土体强度参数的影响较大<sup>[18-19]</sup>,目前,针对偏高岭土与石灰

共同掺入土体的改良效果的研究,主要是通过试验获得改良土体强度参数的,这一过程不仅费时费力,而且对材料也造成许多浪费。而将神经网络模型用于改良红土抗压强度预测的研究更少。因此,本研究利用BP神经网络模型对不同石灰与偏高岭土掺量的复合固化玄武岩残积红土进行无侧限抗压强度预测,建立BP神经网络强度预测模型,并将其与传统回归曲线拟合结果进行对比,分析BP神经网络模型对玄武岩残积红土固化抗压强度试验的预测效果。

1 抗压强度试验

1.1 试验用土

本试验所用红土为云南省某高速公路旁玄武岩残积红土,其基本物理性能指标见表1。依据特殊土塑性图,可知该玄武岩残积土各指标位于A线以下红黏土(高液限粉土)区域,该区域内土的性质与红黏土的相似,属于高液限粉土。

表1 玄武岩残积红土的物理指标

Table 1 Physical properties of basalt residual laterite

最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	液限/%	塑限/%	塑性指数
1.70	57.52	35.24	22.28

1.2 固化材料及固化原理

本试验采用生石灰、偏高岭土作为固化材料。生石灰使用惠灰牌高纯度生石灰粉,白色粉末状;偏高岭土为巩义市辰义耐材磨料有限公司生产,细度为0.01 mm,活性指数≥110,化学组成见表2。

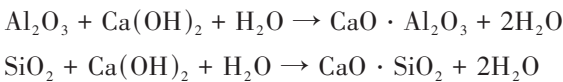
表2 偏高岭土的化学组成

Table 2 Chemical composition of metakaolin

%

w(SiO <sub>2</sub> )	w(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	w(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	w(TiO <sub>2</sub> )	w(CaO)	w(MgO)	w(K <sub>2</sub> O)	w(Na <sub>2</sub> O)	w(其他)
55.04	42.14	0.75	0.25	0.17	0.06	0.55	0.06	0.98

固化原理为偏高岭土中的氧化铝和氧化硅与生石灰遇水后生成的氢氧化钙反应生成铝酸钙和硅酸钙,反应方程式分别为



1.3 试验设计及试验结果

将两种固化材料掺量作为试验的两个因素,每

个因素选用5个水平进行两因素五水平正交试验。将偏高岭土(掺量分别为0%、2%、4%、6%和8%)和石灰(掺量分别为0%、2.5%、5.0%、7.5%和10.0%)同时掺入玄武岩残积红土中,制成共25组固化红土进行正交试验,每组试验测试3个试样,其抗压强度取3个试样的平均值。

按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规

程》(JTG E50—2009)中的规定,试验土体在最佳含水率的情况下,通过千斤顶和反力架,将其制成 50 mm(直径)×50 mm(高度)的圆柱体。千斤顶可提供压力 4.1 MPa,试件压实度控制在 90%。试件在温度 (20±2) °C、湿度≥95% 的条件下进行养护,养护 28 d 后,使用应变控制式无侧限抗压强度仪进行无侧限抗压强度试验,其结果见表 3。

表 3 复合固化红土 28 d 无侧限抗压强度试验结果

Table 3 The unconfined compressive strength test results of the composite solidified laterite at 28 days

试验编号	无侧限抗压强度/kPa	试验编号	无侧限抗压强度/kPa
1	288.94	14	2 419.59
2	344.67	15	2 634.01
3	1 255.50	16	129.99
4	1 680.58	17	277.81
5	1 968.32	18	1 496.66
6	161.72	19	2 467.26
7	353.53	20	3 065.26
8	1 322.32	21	153.03
9	1 961.79	22	333.49
10	2 212.32	23	1 561.46
11	122.50	24	2 606.39
12	315.30	25	2 996.30
13	1 579.84		

## 2 回归拟合

利用 Origin 软件,在偏高岭土的掺量一定时,将生石灰的掺量作为变量,对固化红土的无侧限抗压强度进行简单回归拟合。用不同偏高岭土掺量下相同生石灰掺量中的 5 个无侧限抗压强度数据分别作为未知量,而相同偏高岭土掺量下其他生石灰掺量的 4 个无侧限抗压强度数据作为已知量建立回归函数,对未知量进行预测,该组无侧限抗压强度预测值称为第一组无侧限抗压强度预测值。拟合方程与结果见表 4。其中,预测编号与试验编号相对应,方程中  $y$  为无侧限抗压强度,  $x$  为预测编号对应的石灰掺量。由表 4 可知,大多数  $R^2$  值为 0.8 ~ 1.0,拟合效果较好,拟合方程中多以指数方程与一

次线性方程为主,表明:生石灰对于素红土与掺入偏高岭土的红土均体现出增强效果且增幅较大。其中,无侧限抗压强度预测值相对误差的绝对值最小为 0.77%,最大为 99.34%,表明:生石灰对土体无侧限抗压强度的影响较大,导致预测误差变化幅度大。

表 4 石灰掺量为自变量的回归拟合结果

Table 4 Regression fitting results with lime dosage as independent variable

预测编号	方程	$R^2$	预测值/kPa	试验值/kPa	相对误差/%
1	$y=275.27e^{(0.2207x)}$	0.81	275.27	288.94	-4.73
2	$y=345.43e^{(0.1971x)}$	0.92	565.4	344.67	64.04
3	$y=187.79x+131.69$	0.95	1 070.64	1 255.50	-14.72
4	$y=181.87x+168.67$	0.94	1 532.7	1 680.58	-8.80
5	$y=203.43x+129.56$	0.91	2 163.86	1 968.32	9.93
6	$y=273.32e^{(0.2358x)}$	0.82	273.32	161.72	69.00
7	$y=213.94e^{(0.2708x)}$	0.90	421.03	353.53	19.09
8	$y=228.38x+30.449$	0.96	1 172.35	1 322.32	-11.34
9	$y=-9.0096x^3+129.73x^2-191.3x+161.72$	1.00	2 223.36	1 961.79	13.33
10	$y=254.76x-5.5083$	0.95	2 542.09	2 212.32	14.91
11	$y=244.19e^{(0.2718x)}$	0.79	244.19	122.50	99.34
12	$y=175.66e^{(0.3185x)}$	0.88	389.48	315.30	23.53
13	$y=285.09x-52.611$	0.95	1 372.84	1 579.84	-13.10
14	$y=-12.507x^3+179.54x^2-293.56x+122.5$	1.00	2 743.53	2 419.59	13.39
15	$y=326.23x-114.06$	0.94	3 148.24	2 634.01	19.52
16	$y=194.12e^{(0.3081x)}$	0.84	194.12	129.99	49.33
17	$y=176.19e^{(0.3258x)}$	0.91	397.85	277.81	43.21
18	$y=322.4x-126.92$	0.96	1 485.08	1 496.66	-0.77
19	$y=312.46x-124.6$	0.96	2 218.85	2 467.26	-10.07
20	$y=329.23x-141.67$	0.93	3 150.63	3 065.26	2.78
21	$y=240.75e^{(0.284x)}$	0.83	240.75	153.03	57.32
22	$y=205.98e^{(0.3086x)}$	0.91	445.54	333.49	33.60
23	$y=318.38x-69.583$	0.95	1 522.32	1 561.46	-2.51
24	$y=-11.103x^3+167.07x^2-276.1x+153.03$	1.00	2 795.89	2 606.39	7.27
25	$y=343.52x-124.61$	0.93	3 310.59	2 996.30	10.49

当生石灰的掺量固定时,将偏高岭土的掺量视为变量,对无侧限抗压强度数据进行简单回归拟合。用不同生石灰掺量下相同偏高岭土掺量中的5个无侧限抗压强度数据作为未知量,而相同生石灰掺量下其他偏高岭土掺量的4个无侧限抗压强度数据作为已知量建立回归函数,对未知无侧限抗压强度进行预测,将该组无侧限抗压强度预测值称为第二组无侧限抗压强度预测值。拟合方程与结果见表5。其中,预测编号与试验编号相对应,方程中 $y$ 为无侧限抗压强度, $x$ 为预测编号对应的偏高岭土的掺量。由表5可知,整体拟合情况较好,有个别方程的相关系数较小,且无侧限抗压强度预测误差也较小。拟合方程多为三次方程与二次方程,表明:偏高岭土对石灰土具有较稳定的增强效果。表中无侧限抗压强度预测值相对误差的绝对值最小为0.07%,最大为13.39%。

表5 偏高岭土掺量为自变量的回归拟合结果

Table 5 Regression fitting results with partial kaolin dosages independent variable

预测 编号	方程	$R^2$	预测值/ kPa	试验值/ kPa	相对误 差/ %
1	$y=-0.649\ 2x^3+13.63x^2-83.213x+278.82$	1.00	278.820	288.94	-3.50
6	$y=-0.701\ 9x^3+14.578x^2-88.69x+288.94$	1.00	164.260	161.72	1.57
11	$y=6.260\ 5x^2-65.261x+281.69$	0.97	120.810	122.5	-1.38
16	$y=-0.807\ 2x^3+15.842x^2-92.06x+288.94$	1.00	132.540	129.99	1.96
21	$y=-0.859\ 9x^3+16.158x^2-92.481x+288.94$	1.00	142.940	153.03	-6.59
2	$y=-4.879\ 2x+344.43$	0.15	344.430	344.67	-0.07
7	$y=1.693\ 3x^3-18.834x^2+40.899x+344.67$	1.00	364.680	353.53	3.15
12	$y=1.951\ 2x^2-20.513x+358.7$	0.43	307.870	315.30	-2.36
17	$y=1.228\ 5x^3-13.255x^2+26.023x+344.67$	1.00	288.980	277.81	4.02
22	$y=0.996x^3-11.861x^2+24.164x+344.67$	1.00	288.830	333.49	-13.39

表5 (续)

Table 5 (Continued)

预测 编号	方程	$R^2$	预测值/ kPa	试验值/ kPa	相对误 差/ %
3	$y=31.712x+1\ 331.5$	0.49	1\ 331.500	1\ 255.50	6.05
8	$y=1\ 305e^{(0.026\ 1x)}$	0.70	1\ 374.930	1\ 322.32	3.98
13	$y=-0.444\ 9x^3+5.254\ 6x^2+24.683x+1\ 255.5$	1.00	1\ 409.832	1\ 579.84	-10.76
18	$y=1\ 284.8e^{(0.029\ 1x)}$	0.73	1\ 529.900	1\ 496.66	2.22
23	$y=-9.375\ 2x^2+105.3x+1\ 228.9$	0.79	1\ 471.290	1\ 561.46	-5.77
4	$y=99.073x+1\ 868.4$	0.84	1\ 868.400	1\ 680.58	11.18
9	$y=1\ 764.5e^{(0.055\ 1x)}$	0.88	1\ 970.070	1\ 961.79	0.42
14	$y=-0.886\ 8x^3+4.721\ 7x^2+134.71x+1\ 680.6$	1.00	2\ 238.230	2\ 419.59	-7.50
19	$y=117.54x+1\ 755.7$	0.9	2\ 460.940	2\ 467.26	-0.26
24	$y=-14.596x^2+228.47x+1\ 651.2$	0.96	2\ 544.820	2\ 606.39	-2.36
5	$y=139.16x+2\ 031.2$	0.84	2\ 031.200	1\ 968.32	3.19
10	$y=2\ 034e^{(0.056\ 8x)}$	0.91	2\ 278.700	2\ 212.32	3.00
15	$y=-13.04x^2+249.76x+1\ 900.5$	0.95	2\ 690.900	2\ 634.01	2.16
20	$y=-5.282\ 4x^3+53.907x^2+35.313x+1\ 968.3$	1.00	2\ 979.830	3\ 065.26	-2.79
25	$y=-3.503\ 2x^3+43.232x^2+49.546x+1\ 968.3$	1.00	3\ 337.880	2\ 996.30	11.40

3 BP神经网络预测模型

3.1 模型的建立

用 MATLAB 软件建立神经网络预测模型, MATLAB 软件在神经网络模拟中可以提供各种函数模型对数据进行拟合,还可以根据使用者的需求绘出各种函数图形。预测模型的建立主要分为参数设置、训练和仿真。

BP神经网络主要由输入层、隐藏层、输出层构



成,由于研究两种固化材料的不同掺量对红土改良效果的影响,故选取石灰的掺量和偏高岭土的掺量为因子作为神经网络的输入量,固化红土28 d的无侧限抗压强度为输出量。隐藏层节点数对神经网络模型模拟结果的准确性影响较大,因此隐藏层节点数过少,神经网络中映射关系简单,无法对规律性较弱的数据进行拟合,导致误差较大。隐藏层节点数过多,不仅会导致计算时间增加,还会使网络出现“过拟合”现象,即对训练样本拟合较好,对其他样本拟合较差。目前,对确定隐藏层节点数并没有明确的方法,隐藏层节点数的确定主要通过经验公式计算出大致范围,其经验公式为:

$$l = \sqrt{n + m} + a \quad (1)$$

$$l = \log_2 n \quad (2)$$

$$l = \sqrt{mn} \quad (3)$$

式中: $n$ 为输出层节点数; $m$ 为输入层节点数; $a$ 为0~10之间任意常数; $l$ 为隐藏层节点数。

本研究通过经验公式和试错法的不断尝试,最终确定隐藏层节点数为7个。

神经网络训练参数的选择对网络模型的拟合十分重要。传递函数、输出函数、训练误差目标值、训练次数、学习速率设置等都会影响神经网络的学习时间与收敛速度。由于输入层、输出层向量数值差异较大,故选择MATLAB中的mapminmax函数对数据进行归一化处理,具体计算式为:

$$y = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (4)$$

式中: $x$ 为归一化之前的数据; $y$ 为归一化之后的数据; $x_{\min}$ 为本组所有数据中的最小值; $x_{\max}$ 为本组所有数据中的最大值。

通过对数据进行归一化处理,将不同量纲的特征放在同一量纲下进行比较,以此减小由于数据量级的不同而产生的误差,同时避免了由于净输入绝对值过大而引起的神经元输出饱和现象。

### 3.2 模拟结果分析

为了检验预测模型的准确性,将数据样本划分为训练样本和测试样本,并在确定的网络结构及参数下进行模型训练。本试验无侧限抗压强度的试验值共25组数据,随机选择21组数据作为训练样本进行模型训练,剩余4组作为测试样本。神经网络随机选取编号为9、15、18、22的无侧限抗压强度

试验值作为神经网络测试集,其余数据作为神经网络训练集,训练后试验值、预测值、相对误差见表6。预测值与试验值结果对比如图1所示。从图1可以看出,BP神经网络预测值的变化规律同试验值的变化规律相同,拟合度 $R^2$ 为0.997,接近1.00,表明:拟合程度较好,且模型预测值结果输出与试验值十分接近。表明:经过训练的BP神经网络模型的预测结果可达到预期的效果。

表6 预测值与试验值

Table 6 Predicted values vs. experimental values

试验编号	预测值/kPa	试验值/kPa	误差/%
9	2 010.41	1 961.79	2.48
15	2 798.03	2 631.01	6.35
18	1 471.69	1 496.66	-1.67
22	336.45	333.49	0.89

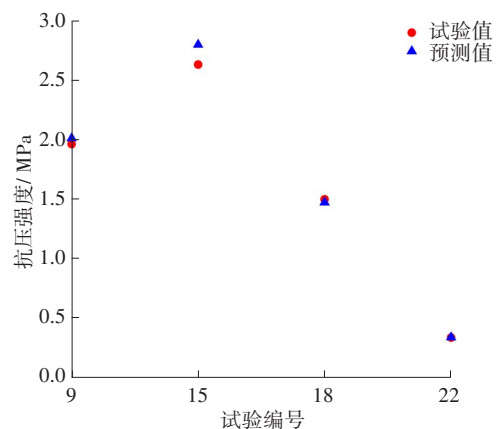


图1 神经网络预测值与试验值对比

Fig. 1 Comparison between neural network predicted values and experimental values

### 3.3 预测结果分析

用MATLAB软件建立的神经网络模型对所有样本值进行预测。将需预测的样本数据作为测试集,其余样本数据作为训练集,再用经过训练的BP神经网络模型对数据进行预测,预测值、试验值、相对误差见表7。将该组无侧限抗压强度的预测值称为第三组无侧限抗压强度的预测值。表7中相对误差绝对值最大为4.56%,所有数据集的相对误差绝

对值均在5%范围以内,预测结果与试验结果之间具有较高的相关性。这表明:BP神经网络预测模型的可靠性较高,可将其应用于复合固化红土无侧限抗压强度的预测中,为复合固化红土抗压强度的研究提供一种简单、有效的预测方法。

表7 25组固结材料抗压强度预测值和试验值

Table 7 Predicted and experimental values of compressive strength for 25 groups of consolidated materials

试验 编号	预测值/ kPa	试验值/ kPa	相对误 差/%	试验 编号	预测值/ kPa	试验值/ kPa	相对误 差/%
1	292.26	288.94	1.15	14	2 326.83	2 419.59	-3.83
2	347.00	344.67	0.68	15	2 734.82	2 634.01	3.83
3	1 251.21	1 255.50	-0.34	16	133.09	129.99	2.38
4	1 692.85	1 680.58	0.73	17	274.41	277.81	-1.22
5	2 044.56	1 968.32	3.87	18	1 462.59	1 496.66	-2.28
6	158.82	161.72	-1.80	19	2 489.14	2 467.26	0.89
7	346.71	353.53	-1.93	20	2 966.79	3 065.26	-3.21
8	1 342.01	1 322.32	1.49	21	159.76	153.03	4.4
9	1 952.79	1 961.79	-0.46	22	318.3	333.49	-4.56
10	2 148.39	2 212.32	-2.89	23	1 595.05	1 561.46	2.15
11	124.84	122.50	1.91	24	2 678.01	2 606.39	2.75
12	316.90	315.30	0.51	25	3 117.06	2 996.30	4.03
13	1 643.88	1 579.84	4.05				

4 拟合结果对比

图2~4为各组预测值与试验值拟合曲线图,从图2~4可以看出,神经网络预测值与试验值拟合程度较好。通过计算,图2中预测值与试验值曲线拟合度 $R^2$ 为0.959;图3中预测值与试验值曲线拟合度 $R^2$ 为0.990;图4中预测值与试验值曲线拟合度 $R^2$ 为0.997,其中神经网络预测结果拟合曲线的拟合度最接近1.00,拟合程度最高。

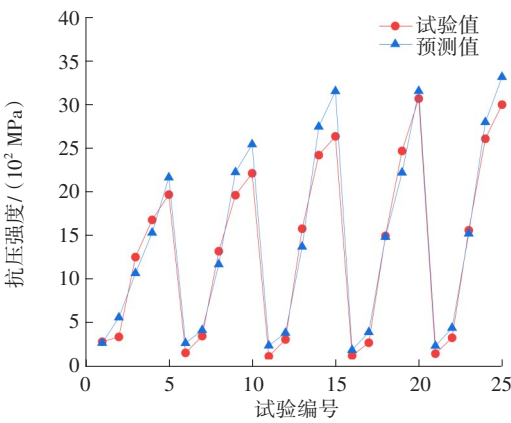


图2 第一组预测值与试验值拟合曲线

Fig. 2 Fitting curve between predicted value and experimental value for the first group

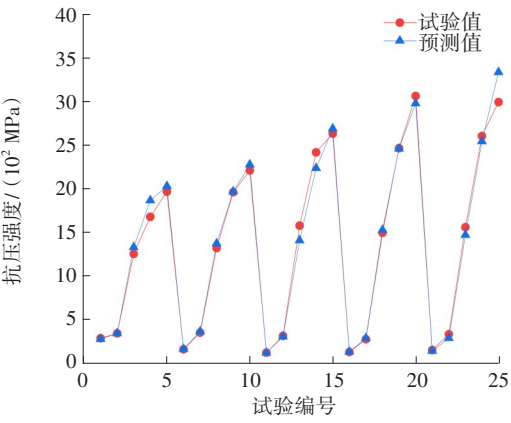


图3 第二组预测值与试验值拟合曲线

Fig. 3 Fitting curve between predicted value and experimental value for the second group

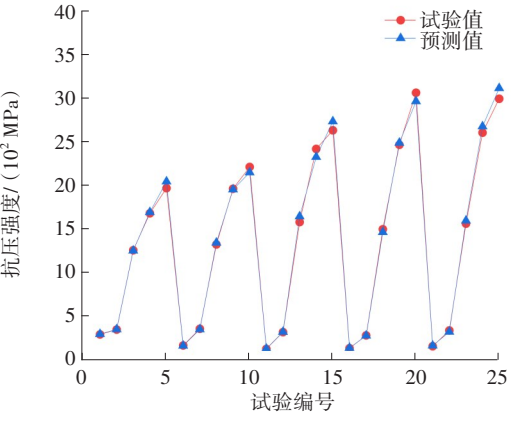


图4 第三组预测值与试验值拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve between predicted value and experimental value for the third group

## 5 结论

1) 由试验结果可知,玄武岩红土的抗压强度在同时掺入石灰和偏高岭土后有显著提升。随着石灰和偏高岭土掺量的增加,玄武岩红土的抗压强度呈不断增大的趋势,表明:石灰和偏高岭土对玄武岩红土有较好的固化效果,可以使用石灰和偏高岭土对红土进行固化,改善红土的抗压强度性能。

2) 通过建立以石灰、偏高岭土的掺量为变量的BP神经网络预测模型,对玄武岩红土的无侧限抗压强度进行预测,其预测值相对误差的绝对值最大为4.56%,最小为0.34%,拟合度为0.997。对于固化红土的无侧限抗压强度预测值相对误差的绝对值均在5%以内,且拟合度接近1.00,与传统的回归拟合预测结果相比,BP神经网络预测结果比回归拟合预测结果更加准确。

3) 在固化红土的力学参数与路用性能的研究中,通过试验获得部分数据集,利用BP神经网络模型不仅可对已得到的数据进行检测,还可对不同固结材料及不同掺量的试验结果进行预测,提高试验研究效率。

## 参考文献(References):

- [1] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司.公路路基设计规范: JTG D30—2015[S].北京:人民交通出版社,2015.  
CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd.. Specifications for design of highway subgrades: JTG D30—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [2] 盘霞,黄强.红黏土改良研究现状综述[J].科技视界,2018(25):83-84. DOI: 10.19694/j.cnki.issn2095-2457.2018.25.036.  
PAN Xia, HUANG Qiang. Review of research on improvement of red clay [J]. Science & Technology Vision, 2018 (25): 83-84. DOI: 10.19694/j.cnki.issn2095-2457.2018.25.036.
- [3] ZHANG X W, KONG L W, LI J J. Influence of dry and wet seasons on disintegration characteristics of basalt residual soil from the Leizhou Peninsula, China [J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2018, 51 (4): 450-460. DOI: 10.1144/qjegh2016-128.
- [4] 唐凛,杨晓松,查旭东,等.基于含水率的重塑低液限黏土抗剪强度关系模型试验[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2021,18(2):26-32. DOI: 10.19951/j.cnki.csldxxbzk.2021.02.004.  
TANG Lin, YANG Xiaosong, ZHA Xudong, et al. Experiment on shear strength relation model of remolded low liquid limit clay based on water content [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18(2): 26-32. DOI: 10.19951/j.cnki.csldxxbzk.2021.02.004.
- [5] 郑娟荣,覃维祖.高活性偏高岭土:新一代混凝土矿物掺合料[J].混凝土与水泥制品,2001(5):13-14. DOI: 10.19761/j.1000-4637.2001.05.004.  
ZHENG Juanrong, QIN Weizu. High activity metakaolin: a new generation of concrete mineral admixture [J]. China Concrete and Cement Products, 2001 (5): 13-14. DOI: 10.19761/j. 1000-4637.2001. 05.004.
- [6] 陆秋艳.偏高岭土在我国的使用前景[J].矿业快报,2004,20(7):7-10.  
LU Qiuyan. Development and application prospect of metakaolin in China [J]. Express Information of Mining Industry, 2004, 20(7): 7-10.
- [7] 王子嘉.偏高岭土在水泥基材料中应用的研究进展[J].硅酸盐通报,2013,32(7):1323-1329. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2013.07.002.  
WANG Zijia. Research progress on application of metakaolin in the field of cement-based materials [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32(7): 1323-1329. DOI: 10.16552/j. cnki. issn1001-1625.2013. 07.002.
- [8] 刘剑平,白晓红,王林浩,等.偏高岭土及龄期对水泥土强度影响的试验研究[J].四川建筑科学研究,2017,43(3):62-66.  
LIU Jianping, BAI Xiaohong, WANG Linhao, et al. Experimental study of metakaolin and age on the strength of mixed cemented soil [J]. Sichuan Building Science, 2017, 43(3): 62-66.
- [9] 谈云志,胡焱,邓永锋,等.偏高岭土协同石灰抑制红黏土收缩的行为与机制[J].岩土力学,2019,40(11):4213-4219. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1744.

- TAN Yunzhi, HU Yan, DENG Yongfeng, et al. Behavior and mechanism of laterite shrinkage inhibition with lime and meta-Kaolin mixture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(11): 4213-4219. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1744.
- [10] 唐正光, 王成望, 王奕博, 等. 固化改良玄武岩残积红土试验研究[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(3): 1-10, 18. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.03.014.
- TANG Zhengguang, WANG Chengwang, WANG Yibo, et al. Experimental study on solidified and improved basalt residual laterite[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38(3): 1-10, 18. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.03.014.
- [11] 华伦, 唐正光, 王奕博. 固化改良玄武岩红土浸水抗剪特性研究[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(4): 53-59. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.04.014.
- HUA Lun, TANG Zhengguang, WANG Yibo. Shear performance of solidified improved basalt laterite after immersion in water[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38(4): 53-59. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.04.014.
- [12] 李小雷, 邓寅生, 何小芳, 等. 应用人工神经网络预测高掺量粉煤灰混凝土的强度[J]. 混凝土, 2008(5): 20-22. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2008.05.007.
- LI Xiaolei, DENG Yinsheng, HE Xiaofang, et al. Strength prediction of HFCC by the method of artificial neural network[J]. Concrete, 2008(5): 20-22. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2008.05.007.
- [13] 李红, 彭涛. 基于BP、RBF神经网络混凝土抗压强度预测[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(8): 33-36.
- LI Hong, PENG Tao. Prediction of concrete compression strength based on BP and PBF neural network theories[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(8): 33-36.
- [14] 张玉平, 马超, 李传习, 等. 基于改进BP算法的混凝土热学参数反演与预测[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(1): 42-50. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.01.007.
- ZHANG Yuping, MA Chao, LI Chuanxi, et al. Back analysis and prediction of thermal parameters of concrete based on improved BP algorithm[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(1): 42-50. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.01.007.
- [15] 张玉平, 马超, 李传习, 等. 基于均匀设计及BP神经网络的大体积混凝土热学参数反分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(2): 148-157. DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.035.
- ZHANG Yuping, MA Chao, LI Chuanxi, et al. Inverse analysis on thermal parameters of mass concrete based on uniform design and BP neural network[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(2): 148-157. DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.035.
- [16] 江长通, 王红肖, 王银梅, 等. 基于BP神经网络的改良黄土强度参数预测[J]. 人民黄河, 2018, 40(1): 115-117. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2018.01.027.
- JIANG Changtong, WANG Hongxiao, WANG Yinmei, et al. Strength parameter prediction of stabilized soil based on BP neural network[J]. Yellow River, 2018, 40(1): 115-117. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2018.01.027.
- [17] 胡庆国, 蔡孟龙, 何忠明. 基于GA-BP神经网络的综合管廊投资估算研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, 17(2): 68-74. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.02.011.
- HU Qingguo, CAI Menglong, HE Zhongming. Research on investment estimation of comprehensive pipe gallery based on GA-BP neural network[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020, 17(2): 68-74. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.02.011.
- [18] 邱豪杰, 姚佳良, 陈鑫, 等. 地聚合物在软土地基加固中的应用研究[J]. 公路与汽运, 2021(2): 64-69. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2021.02.016.
- QIU Haojie, YAO Jialiang, CHEN Xin, et al. Study on application of geopolymers in soft soil foundation reinforcement[J]. Highways & Automotive Applications, 2021(2): 64-69. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2021.02.016.
- [19] GUPTA A, BISWAS S, ARORA V K. Ranking of stabilizers to stabilize/solidify dredged soil as highway construction material[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 43: 1694-1699. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.037.

(责任编辑:欧兆虎;英文编辑:陈成)