

基于BP神经网络模型的硅灰 - 电石渣协同固化黏土强度仿真与预测

邢 磊

上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2024年12月20日; 录用日期: 2025年1月13日; 发布日期: 2025年1月17日

摘 要

硅灰 - 电石渣协同加固黏土是一种新型的工业固废再利用在土体加固的方式, 为了减少室内试验工作量以及预测固化土的无侧限抗压强度, 本研究通过构建BP神经网络模型对其进行预测。通过测试, 模型的最佳均方误差为0.116, 训练组、验证组和测试组的相关拟合系数R都在0.9以上, 附加预测值和真实值较为接近, 由此说明神经网络模型可靠, 对预测硅灰 - 电石渣固化土的无侧限抗压强度较为精准, 是一种可以降低成本减少试验工作量的预测方法。

关键词

抗压强度预测, BP神经网络, Matlab

Simulation and Prediction of Strength of Silica Fume-Carbide Slag Synergistically Stabilizing Clay Based on BP Neural Network Model

Lei Xing

School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Dec. 20th, 2024; accepted: Jan. 13th, 2025; published: Jan. 17th, 2025

Abstract

The synergistic reinforcement of clay using silica fume and carbide slag is a novel approach for the reuse of industrial waste in soil stabilization. To reduce the laboratory testing workload and predict

the unconfined compressive strength of the stabilized soil, this study constructs a BP neural network model for prediction. The testing results show that the model's optimal mean square error is 0.116, with the correlation coefficients (R) for the training, validation, and testing sets all exceeding 0.9. The predicted values are close to the actual values, demonstrating that the neural network model is reliable and provides accurate predictions for the unconfined compressive strength of silica fume-carbide slag stabilized soil. This approach offers a cost-effective and efficient method for reducing experimental workload.

Keywords

Prediction of Compressive Strength, BP Neural Network, Matlab

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

黏土作为一种广泛存在的土壤，具有低强度、高吸水性和高压缩性等特征，由于黏土的这些不良工程特性，导致其稳定性、承载力和抗变形能力往往很难满足实际工程的需要，因此往往通过加入一些外加剂来改性黏土，其中最常见的外加剂是水泥。近些年，国家大力倡导绿色土木工程，各种绿色环保材料被应用到岩土领域中，工业固废的再利用也是其中一种重要的方式。常见的工业固废有粉煤灰、矿渣、钢渣、电石渣、硅灰等，大多数工业固废加固土体的机理表现为填充土颗粒孔隙以及相互结合生成如水化硅酸钙凝胶(calcium silicate hydrate, C-S-H)等物质加固土体。在绿色固土方式越来越多、理论越来越丰富的情况下，也给工程人员带来了更多冗繁且重复的工作内容，例如土体的抗压强度多通过室内土工试验获得，试验中的每个部分出现一点变化，试验结果都将随之改变。如果通过已有数据去预测未进行室内试验的数据，将大大节省工作时间。BP神经网络是一种多层前馈神经网络，由于其具有较强的学习及自适应能力，非线性映射能力及泛化能力，被广泛应用在各种领域。王硕等[1]基于BP神经网络，预测了材料和掺量对红土抗压强度的影响，提高了效率。王雨萌等[2]运用BP与GA-BP神经网络模型预测了土体的力学指标，改善了传统方法时耗长的缺点，同时提升了预测精度。盛昊等[3]建立GA-BP神经网络模型，高效且准确预测出钢筋混凝土搭接-滑移曲线。张学鹏等[4]通过构建GA-BP神经网络模型，研究了长期服役期内混凝土结构的强度演变规律预测。蒋佳彤等[5]基于卷积循环神经网络，利用GUN-GRU模型实现对混凝土坝的变形预测。韩建军等[6]建立BP神经网络模型，精准预测垃圾飞灰代替水泥制备高性能混凝土的抗压强度。李云峰等[7]用遗传算法改进BP神经网络模型，实现对横向受荷载桩承载力的准确预测。

目前使用硅灰和电石渣共同加固土体的研究较少，将其与神经网络结合的研究仍存在空白，因此本文拟使用Matlab软件，构建基于BP神经网络的硅灰-电石渣固化黏土的强度模型，根据不同硅灰-电石渣总掺量、硅灰和电石渣的比例以及试样养护天数等条件，预测黏土的抗压强度值，为相关工程实践的应用提供一定依据。

2. 试验数据

硅灰-电石渣协同固化上海黏土的无侧限抗压强度试验，按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)[7]实施，制备圆柱状试样($\Phi 39.1 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$)，随后放入密封袋中养护14 d、45 d和90 d。采用电子

万能材料试验机，将试样放置压力台中心，以 1 mm/min 的加载速率对试样加载，直至出现峰值后停止加载。

3. BP 神经网络模型的构建及预测

3.1. BP 神经网络的概述

BP 神经网络是一种多层前馈神经网络，其通过反向传播算法进行训练。这种网络结构由输入层、一个或多个隐藏层以及输出层组成，具有强大的非线性映射能力。

3.2. BP 神经网络的结构

(1) 输入层：

输入层是 BP 神经网络的初始阶段，主要功能是接收外部输入的数据。每个神经元对应一个特征值，这些数据通过神经元进入网络。输入层本身不进行任何计算，它仅仅作为数据传递的中介。

(2) 隐藏层：

隐藏层是 BP 神经网络的关键部分，主要负责从输入数据中提取特征并执行非线性映射。每个隐藏层由多个神经元构成，每个神经元对前一层的输出进行加权求和，并通过激活函数进行转换。激活函数的选取对于网络的性能有着至关重要的影响。设隐藏层的输入为 α_j ，其计算公式为：

$$\alpha_j = \sum_{i=1}^n \omega_{ji} x_i + b_j$$

(1)

其中， ω_{ji} 是连接输入层第 i 个神经元和隐藏层第 j 个神经元的权重， x_i 是输入层第 i 个神经元的输出， b_j 是隐藏层第 j 个神经元的偏置项。

(3) 输出层

输出层是 BP 神经网络的终结部分，负责生成最终的预测结果。在处理分类问题时，输出层通常采用 Softmax 激活函数；而对于回归问题，通常不使用激活函数，或者使用线性激活函数。

3.2. BP 神经网络的构建

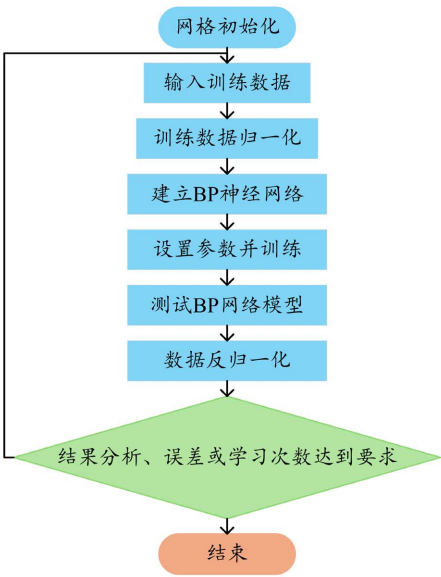


Figure 1. Workflow diagram of BP neural network model
图 1. BP 神经网络模型工作流程图

确定输入层和输出层，本模型以硅灰 - 电石渣总掺量、硅灰和电石渣的比例以及试样养护天数三种影响作为输入层，试样的无侧限抗压强度值为输出层，隐含层节点数量设为 4；读取数据，设置训练数据和预测数据。将训练样本数据归一化处理；建立模型，采用梯度下降法训练，训练次数设为 1000 次，学习速率设为 0.01，训练目标最小误差设置为 0.00001，随后开始训练；将用于测试的样本数据进行归一化，用训练好的模型进行仿真。具体流程图如图 1 所示。

本文中用于进行 BP 神经网络建模的试验数据如表 1 所示，输入层为硅灰 - 电石渣总掺量、硅灰掺量：电石渣掺量和试样养护龄期，输出层为试样无侧限抗压强度。

Table 1. Experimental data
表 1. 试验数据

硅灰 - 电石渣总掺量(%)	硅灰掺量(%)：电石渣掺量(%)	试样养护龄期(d)	无侧限抗压强度(MPa)
5	0.5	14	0.113
5	0.5	45	0.403
5	1	14	0.14
5	1	45	0.58
5	1	90	1.29
5	2	14	0.253
5	2	45	0.55
5	2	90	1.72
5	4	14	0.353
5	4	45	0.635
10	0.5	14	0.423
10	0.5	45	1.293
10	1	14	0.495
10	1	45	1.987
10	1	90	3.35
10	2	14	1.792
10	2	45	3.235
10	2	90	5.477
10	4	14	1.494
10	4	45	2.33
15	0.5	14	0.981
15	0.5	45	3.056
15	1	14	1.231
15	1	45	3.505
15	1	90	5.8
15	2	14	3.859
15	2	45	5.827
15	2	90	7.4
15	4	14	3.035
15	4	45	3.766
20	0.5	14	2.12
20	0.5	45	4.316
20	1	14	2.459

续表

20	1	45	5.209
20	1	90	6.9
20	2	14	4.989
20	2	45	8.628
20	2	90	10.872
20	4	14	4.028
20	4	45	6.09

3.3. 预测结果

图 2 为 BP 神经网络模型训练过程曲线，从图中可以看出模型最佳的训练误差为 0.0116；图 3 分别为训练集、验证集、测试集和总体的相关性分析，从图中可以看出各个样本集的相关系数 R 都在 0.9 以上，说明拟合度很高，模型具有较高的精度，结果具有可信度。

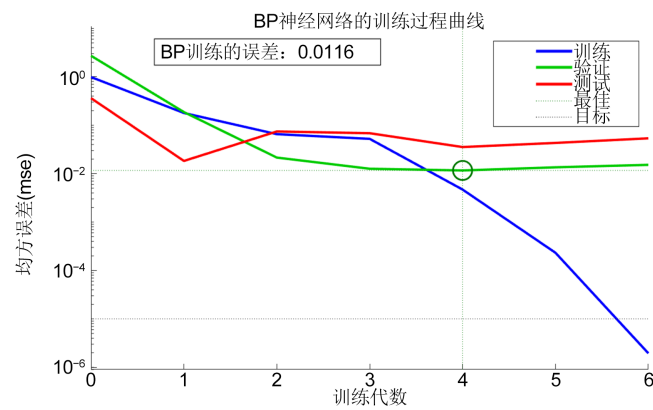


Figure 2. Training process curve of BP neural network
图 2. BP 神经网络的训练过程曲线

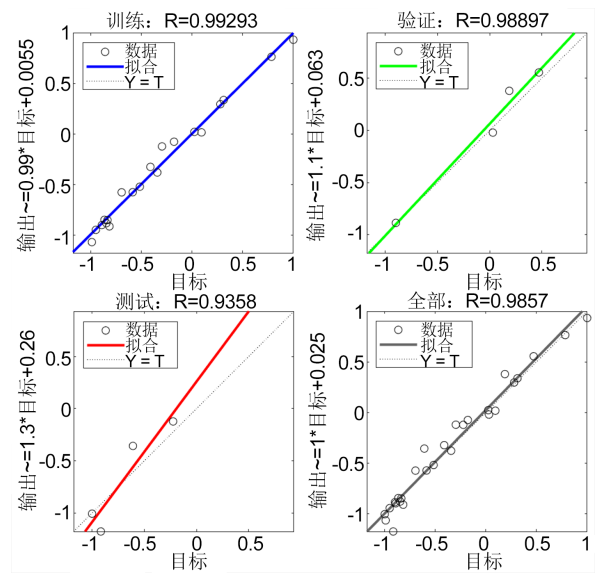


Figure 3. Correlation analysis diagram of each sample set
图 3. 各样本集相关性分析图像

为了再次检验模型精准度，额外选取了几组数据作为附加组进行再次验证，结果如表 2 所示。从表中可以看出 BP 神经网络模型预测的试样无侧限抗压强度的预测值和真实值较为接近，并且没有较大的偏差，说明模型预测的准确性较高，可参考性较高。

Table 2. Additional prediction group results
表 2. 附加预测组结果

硅灰 - 电石渣总掺量(%)	硅灰掺量(%): 电石渣掺量(%)	试样养护龄期(d)	预测值(MPa)	真实值(MPa)
5	0.5	90	1.19	1.27
5	4	90	1.53	1.49
10	0.5	90	3.389	3.3
10	4	90	4.65	4.738
15	0.5	90	5.029	5.1
15	4	90	6.882	6.74
20	0.5	90	6.134	5.7
20	4	90	8.217	8.43

4. 结论

(1) 本文针对硅灰 - 电石渣协同固化黏土所需室内试验量过大，提出考虑硅灰 - 电石渣总掺量、硅灰和电石渣的比例以及试样养护天数三种影响因素的 BP 神经网络模型预测强度，通过室内土工试验所得数据进行模型的建立以及强度的预测。

(2) 预测结果表明，该模型的均方误差较低，训练组、验证组和测试组拟合度较好，拟合系数 R 均大于 0.9，拟合度较高说明模型的精度高，结果具有可信度。使用建立的模型额外预测附加组的无侧限强度，通过与实际值相比较，误差最高均未超过实际值的 10%，再次验证模型的精度，为后续其他室内试验提供参考，在进行其他大量室内试验时，可以通过构建神经网络模型进行相关指标的预测，从而减少工作量，提高效率。

参考文献

[1] 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.

[2] 王雨萌, 吴佳, 张潮, 等. 基于神经网络的黄石市区岩土力学参数预测研究[J/OL]. 资源环境与工程: 1-12. <https://link.cnki.net/urlid/42.1736.P.20241118.0948.002>, 2024-11-18.

[3] 盛昊, 郭进, 孙昭彭. 基于 GA-BP 神经网络的钢筋与混凝土搭接-滑移力学模型[J/OL]. 哈尔滨工程大学学报: 1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1390.U.20240930.1125.004.html>, 2024-09-30.

[4] 张学鹏, 张戎令, 陈心亮, 等. 基于 GA-BP 神经网络长服役期内结构混凝土的强度演变预测[J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2024, 55(2): 836-850.

[5] 蒋佳彤, 李明伟, 尚宪朝, 等. 基于卷积循环神经网络的混凝土坝变形预报[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44(8): 1270-1274.

[6] 韩建军, 赵道松, 李建平. 基于 BP 神经网络的垃圾飞灰混凝土抗压强度预测模型[J]. 混凝土, 2022(9): 78-81.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50123-2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.