

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.06.003

基于BP神经网络的重塑黄土冻融过程 抗剪强度劣化特性研究

许健,冯灿,王掌权

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 冻融循环导致黄土强度的损伤规律十分复杂,传统单一因素评价方法难以确定冻融过程黄土抗剪强度指标损伤规律与多因素之间的量化统计关系。基于此,首先针对西安 Q₃ 重塑黄土进行室内冻融试验,得到不同干密度、含水率及冻融次数下的抗剪强度指标数据;然后采用 BP 神经网络算法对试验数据进行学习训练,得到各因素与抗剪强度指标间的预测模型。研究发现:黄土试样黏聚力随冻融次数增加呈指数衰减趋势;黏聚力随含水率和干密度增加分别表现出线性衰减和增加特征且冻融后黏聚力与含水率和干密度的变化曲线近似重合;内摩擦角呈波浪形变化趋势且波动范围较小,无明显变化。冻融过程黄土黏聚力神经网络模型的预测值和试验值之间相对误差较小,表明该方法具有较好的预测精度,能够综合描述诸因素与黏聚力的量化关系。

关键词: 重塑黄土;冻融作用;抗剪强度;BP神经网络;预测模型

中图分类号: TU444

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)06-0013-05

Shear Strength Deterioration of Remolded Loess During Freezing-thawing Process Based on BP Neural Network

XU Jian, FENG Can, WANG Zhangquan

(Xi'an University of Architecture and Technology, School of Civil Engineering, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: The damage law of loess strength caused by freezing and thawing cycles is very complicated. However, the traditional method based on only one factor is difficult to quantitatively determine the statistical relationship between the damage law of shear strength and many factors. Based on that, freeze-thaw test was firstly carried out to get the shear strength index data of Xi'an Q₃ remolded loess under different dry density, moisture content and freeze-thaw times. Then a prediction model was developed using testing data based on BP neural network. The results show that the cohesion of loess decreases exponentially with freezing and thawing times. With the increase of water content and dry density, the cohesion decreases and increases linearly respectively, and has approximately same variation after freezing and thawing. The internal friction angle changes undulate with a small amplitude and has no obvious variation during the whole freezing-thawing process. The relative error of prediction value of cohesion compared with experimental data is little, indicating that BP neural network forecasting method has good accuracy and can describe the quantitative relationship between factors and cohesion.

Keywords: remolded loess; freezing-thawing; shear strength; BP neural network; prediction model

黄土多分布于我国中西部季节性冻土地区,土坝、堤防、路基、边坡等黄土构筑物受季节冻融作用的影响显著^[1]。冻融循环作为强风化过程,强烈改变着土体结构性,是导致黄土劣化的重要因素^[2-4]。

黄土冻融劣化的主要表现之一就是抗剪强度的下降,应用冻融过程抗剪强度指标的变化实现对黄土劣化的定量描述是重要的研究途径。基于此,研究者针对冻融过程黄土抗剪强度劣化机理及规律开展

收稿日期:2016-07-17

修稿日期:2016-08-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51478385,51208409);陕西省教育厅专项科研项目(12JK0914)

作者简介:许健(1980—),男,山东泰安人,博士,副教授,主要从事寒区岩土工程研究。E-mail:xujian@lzb.ac.cn

了部分研究工作,积累了一定科研成果。王铁行等^[5]以非饱和原状黄土为试验对象,研究冻融循环对其剪切强度特性的影响。宋春霞等^[6]对兰州黄土的试验研究结果表明,冻融作用对不同于密度土体产生强化和弱化双重作用,并由此导致其力学性质发生相应变化。倪万魁等^[7]对不同冻融次数的洛川黄土进行三轴剪切试验,研究了冻融循环作用对黄土三轴剪切强度的影响规律。董晓宏等^[8]针对重塑黄土冻融过程强度劣化规律,开展了部分研究工作。叶万军等^[9]研究了冻融作用对超固结黄土和正常固结黄土物理力学性质的影响,揭示了冻融循环导致黄土边坡剥落病害产生的机制。李国玉等^[10]研究了冻融循环作用对压实黄土水分分布、变形及干密度等工程力学性质的影响规律。

然而,冻融循环导致黄土强度的衰减过程是一个比较复杂的问题。以往对于冻融过程黄土抗剪强度指标的研究大多集中于研究抗剪强度指标同干密度、含水率及冻融次数等影响因素之间的单一经验统计关系。但使用单一因素评价黄土冻融过程抗剪强度指标劣化特性方法的预测结果往往与实际情况出现较大偏差。对于冻融过程黄土抗剪强度指标损伤规律的准确评价需综合考虑干密度、含水率及冻融条件等多个因素的影响。传统统计方法极难得到黄土冻融过程抗剪强度指标损伤规律与多因素之间的量化统计关系。基于此,需寻求新的途径来解决这个问题。BP神经网络作为信息处理的一种新方法,能够很好的完成多元非线性映射的拟合仿真功能,进而建立这些影响因素参数与黄土冻融抗剪强度指标

之间的定量关系^[11]。党维维等^[12]利用改进BP神经网络算法对黄土抗剪强度指标进行了预测;杨喆等^[13]运用BP神经网络工具箱建立了滑带黄土振陷系数的预测方法;李雯霞^[14]建立了判别黄土液化势及黄土液化危害程度的BP网络模型;高建勇^[15]基于改进的遗传神经网络模型对黄土高边坡的稳定性进行了预测研究。然而针对冻融过程黄土抗剪强度指标损伤规律的人工神经网络预测模型研究还相对较少且不够系统全面,不能很好地揭示冻融作用对黄土体强度劣化作用机理。

基于此,本文首先以西安Q₃重塑黄土为对象开展室内冻融强度试验,分析各因素对黄土冻融抗剪强度指标的影响规律。然后利用BP神经网络算法对室内试验数据进行学习和训练,进而得到各影响因素同抗剪强度指标间的经验数据库,以期得到一种能够综合评价多因素影响黄土冻融抗剪强度指标的预测方法。

1 重塑黄土冻融强度室内试验研究

本次试验所用土样取自陕西省西安市长安区某基坑工程现场,取土深度5 m~6 m,属于晚更新世Q₃黄土。已有研究成果表明^[16],重塑黄土冻融过程抗剪强度指标劣化特性主要取决于3大因素:干密度、含水率及冻融次数。基于此,试验设计4种干密度及7种含水率,分别进行不同冻融循环次数下的室内直剪试验(见表1),共完成80组黄土试样冻融抗剪强度试验。

表1 试样种类

干密度 /(g·cm ⁻³)	含水率 1 /%	含水率 2 /%	含水率 3 /%	含水率 4 /%	含水率 5 /%	冻融次数	温度/°C		时间/h	
							冻结	融化	冻结	融化
1.4	15	18	21	28	33.6(饱和)					
1.5	15	18	21	—	28.9(饱和)	0、2、5、 10、20	-20	20	12	12
1.6	15	18	21	—	24.7(饱和)					
1.7	15	18	—	—	21.0(饱和)					

注:表中符号“—”表示不存在此种试样。

1.1 黏聚力

图1给出黄土试样黏聚力与冻融次数变化规律曲线。从图1中可以看出,除了饱和试样的黏聚力有稍稍增大趋势,很快趋于稳定外,其它黄土试样的黏聚力均随冻融次数增加逐渐减小,但降低幅度逐渐减小。冻融循环5次后,试样黏聚力趋于一个稳定数值,呈指数衰减趋势。分析其原因,主要是由于土颗粒周围水膜在低温下冻结,孔隙水结晶对土颗

粒产生挤压作用力,破坏颗粒间联结作用,导致土体结构强度逐渐弱化,黏聚力降低。多次冻融后,黄土体结构强度趋于稳定的残余强度,黏聚力亦趋于稳定。此外,饱和试样水膜厚度增加,自由水增多,冻融后水分向土体表面迁移较明显,使得剪切面含水率减小,因而冻融后试样黏聚力呈稍稍增大趋势。

图2给出黏聚力与含水率变化关系曲线。从图2中可以看出,随着含水率增加,黏聚力呈现出线性

衰减特征,且冻融后黏聚力与含水率的变化规律曲线近似重合。这主要是因为含水率增加,使得土颗粒之间结合水膜增厚,导致土体黏聚强度降低。此外,冻融作用对黄土体结构强度造成损伤,随着冻融

过程进行,土体强度趋于一个稳定的残余强度数值(图 1),因而冻融后黏聚力与含水率的变化规律曲线近似重合。

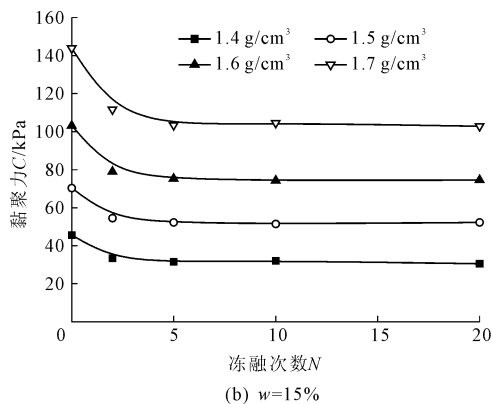
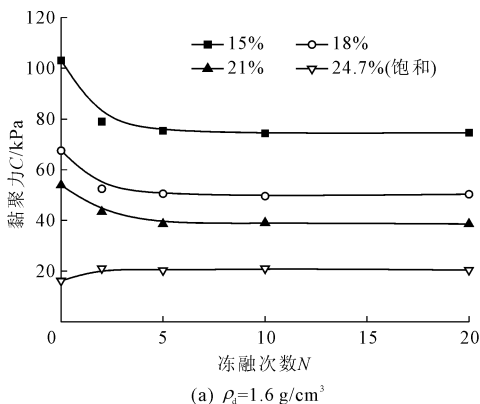


图 1 黏聚力与冻融次数关系曲线

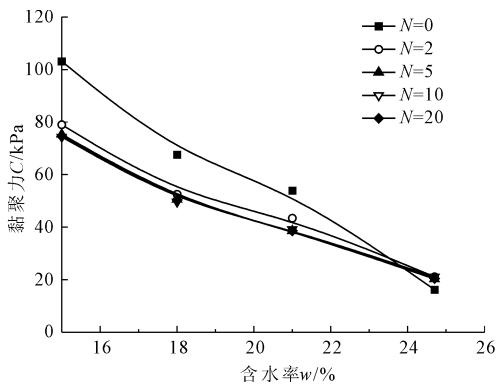


图 2 黏聚力与含水率关系曲线($\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$)

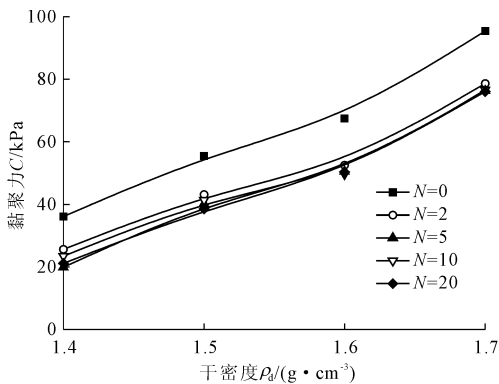


图 3 黏聚力与干密度关系曲线($w = 18\%$)

图 3 所示为黏聚力与干密度变化规律曲线。由图 3 可见,黏聚力随着干密度增大逐渐增加,呈现出较好的线性规律。分析其原因,主要是由于干密度越大,黄土体颗粒之间的距离越小,结合水膜越薄,因而黏聚强度越高。此外,由于冻融作用对黄土体结构强度造成损伤,土体强度趋于一个稳定的残余强度数值(图 1),因而冻融后黏聚力与干密度的变化规律曲线近似重合,这与前述黏聚力随含水率的变化规律是一致的。

1.2 内摩擦角

图 4 所示为内摩擦角随冻融次数变化规律曲线。从图 4 中可以看出,内摩擦角随冻融次数变化呈波浪形变化趋势,且波动范围较小,波动幅度在 5° 以内,这样可以认为冻融过程内摩擦角无明显变化。分析其原因,主要是因为影响黄土体内摩擦强度的主要因素是黄土颗粒之间的接触面积和土颗粒形状,而冻融作用对以上因素并无明显影响。

1.3 讨论

通过试验结果可以发现,冻融过程黄土试样黏聚力受干密度、含水率及冻融次数的影响十分明显,现有定量公式难以准确计算其大小。而 BP 神经网络可以通过大量训练样本学习,获得输入与输出之间的高度非线性映射关系,这正是其优势所在。此外,内摩擦角呈波浪形变化规律,但波动范围较小,可认为冻融过程内摩擦角无明显变化。因此,下文分析评价冻融过程黄土体抗剪强度指标劣化规律时,仅针对黏聚力建立其相应 BP 神经网络预测模型。

2 BP 神经网络训练

前述冻融过程黄土抗剪强度试验涵盖不同含水率、干密度和冻融次数的抗剪强度指标数据,训练样本代表性较好。基于此,本文选择前述 80 组黄土试样冻融黏聚力试验数据,将前 64 组数据作为训练样

本,后 16 组数据用来检验预测结果可靠性。由于网络训练传递函数为 S 型函数,其输出量为 0 到 1 之间的连续量。此外,为减小输入量中由于数据大小差距过大而导致较小数被较大数淹没的现象以及加快网络收敛速度,需对数据进行归一化处理。采用

如下归一化函数对输入输出数据进行预处理:

$$(y, p_s) = \text{mapminmax}(p, y_{\min}, y_{\max}) \quad (1)$$

式中: y 为输出归一化数据; p_s 为数据结构; p 为输入向量; y_{\min} 为阵列每一行最小取值; y_{\max} 为阵列每一行最大取值。

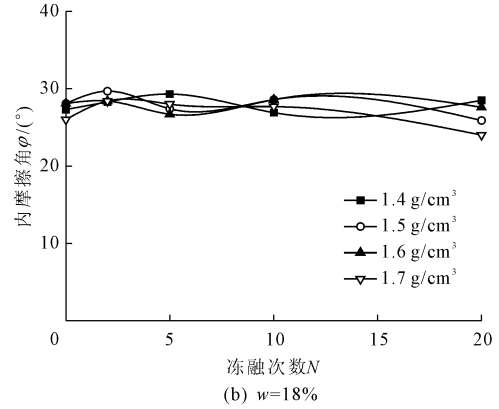
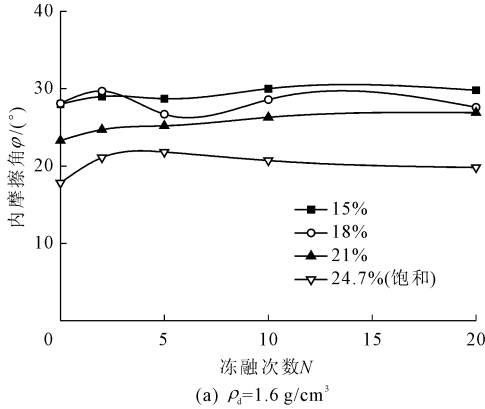


图 4 内摩擦角与冻融次数关系曲线

将 16 组预留的检验样本输入训练完成的神经网络预测模型,进行验证,预测结果如图 5 所示。预测结果表明,冻融过程黏聚力试验值与预测值之间相对误差较小,最大相对误差仅为 0.08724,试验值与预测值变化规律具有较好的一致性。说明利用神

神经网络预估冻融过程重塑黄土的黏聚力其精度是符合要求的,能充分反映土性参数及冻融条件对黏聚力的影响规律,从而较好描述重塑黄土冻融过程黏聚强度劣化特性。

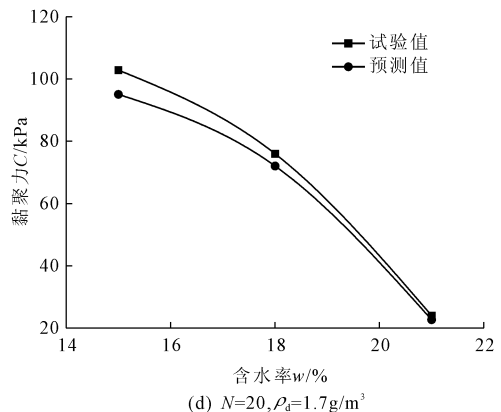
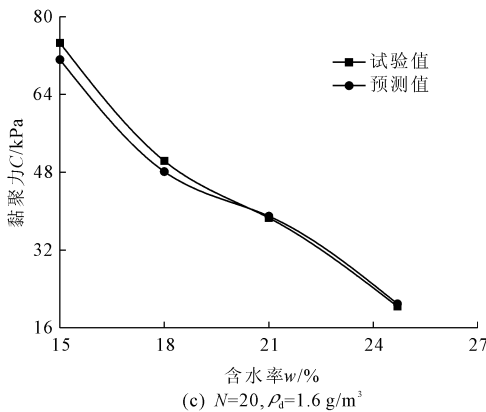
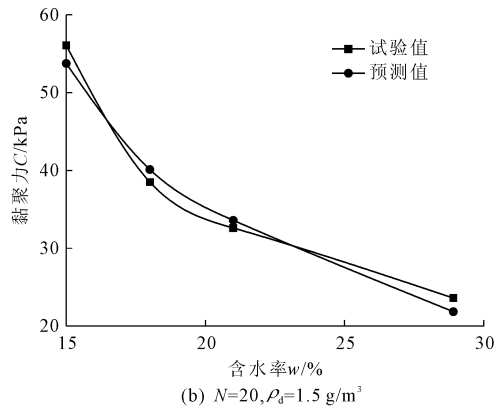
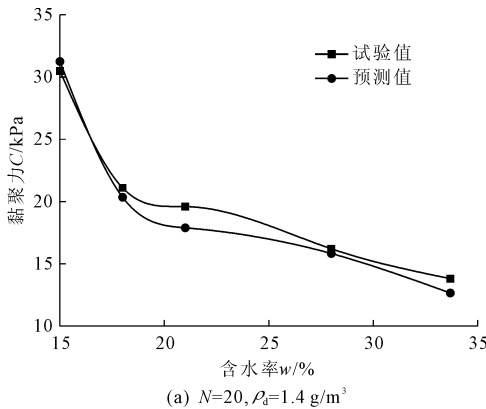


图 5 典型试验数据样本黏聚力预测结果

为进一步验证上述BP神经网络模型的泛化能力,采用已有研究学者黄土冻融强度试验数据^[17]对上述模型进行验证分析,预测结果如表2所示。从表中可以看出,前人已有研究成果黏聚力冻融过程试验值与预测值之间相对误差亦较小,最大相对误差为0.1123,这充分说明上述神经网络模型具有很好的泛化能力和可靠度。

表2 前人数据样本黏聚力预测结果

序号	冻融次数 N /次	干密度 ρ_d /($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	含水率 w /%	黏聚力 C/kPa		相对误差
				试验值	预测值	
1	1	1.3	16.5	21.65	21.319	0.0153
2	3	1.3	16.5	21.37	19.781	0.0744
3	5	1.3	16.5	21.10	20.887	0.0101
4	7	1.3	16.5	21.13	19.372	0.0832
5	1	1.3	16.5	21.56	21.319	0.0112
6	3	1.3	16.5	21.23	19.684	0.0728
7	5	1.3	16.5	21.10	20.587	0.0243
8	7	1.3	16.5	21.04	19.972	0.0508
9	1	1.3	20.5	15.31	13.591	0.1123
10	3	1.3	20.5	14.23	12.835	0.0980
11	5	1.3	20.5	14.00	13.531	0.0335
12	7	1.3	20.5	13.80	12.863	0.0679
13	1	1.3	20.5	15.07	14.591	0.0318
14	3	1.3	20.5	14.05	13.435	0.0438
15	5	1.3	20.5	13.85	12.531	0.0952

3 结论

通过试验结果发现,冻融过程黄土黏聚力受干密度、含水率及冻融次数的影响十分明显。基于BP神经网络算法,建立了干密度、含水率及冻融次数同黏聚力的预测模型,得出以下结论:

(1) 黄土试样黏聚力随冻融次数增加呈指数衰减趋势;黏聚力随含水率和干密度增加分别表现出线性衰减和增加特征,且冻融后黏聚力与含水率和干密度的变化规律近似重合。内摩擦角随冻融次数变化呈波浪形变化趋势且波动范围较小,无明显变化。

(2) 基于BP神经网络模型的预测值和试验值之间相对误差较小,能够综合反映干密度、含水率及冻融次数对黏聚力的影响,较好描述重塑黄土冻融过程黏聚强度劣化特性。

建立BP神经网络平台,收集黄土冻融过程抗剪强度试验数据进行训练和学习,可以为季节冻融条件下黄土抗剪强度指标取值提供较准确参考。

参考文献:

- [1] 连江波.冻融循环作用下黄土物理性质变化规律[D].杨凌:西北农林科技大学,2010.
- [2] 周泓,张泽,秦琦,等.冻融循环作用下黄土基本物理性质变异性研究[J].冰川冻土,2015,37(1):162-168.
- [3] 胡再强,刘寅,李宏儒.冻融循环作用对黄土强度影响的试验研究[J].水利学报,2014,45(S2):14-18.
- [4] 马世雄.冻融作用对黄土边坡剥落影响的试验研究[D].西安:西安科技大学,2012.
- [5] 王铁行,罗少锋,刘小军.考虑含水率影响的非饱和原状黄土冻融强度试验研究[J].岩土力学,2010,31(8):2378-2382.
- [6] 宋春霞,齐吉琳,刘奉银.冻融作用对兰州黄土力学性质的影响[J].岩土力学,2008,29(4):1077-1086.
- [7] 倪万魁,师华强.冻融循环作用对黄土微结构和强度的影响[J].冰川冻土,2014,36(4):922-927.
- [8] 董晓宏,张爱军,连江波,等.长期冻融循环引起黄土强度劣化的试验研究[J].工程地质学报,2010,18(6):887-893.
- [9] 叶万军,杨更社,彭建兵,等.冻融循环导致洛川黄土边坡剥落病害产生机制的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(1):199-205.
- [10] 李国玉,马巍,李宁,等.冻融对压实黄土工程地质特性影响的试验研究[J].水利与建筑工程学报,2010,8(4):5-7,20.
- [11] 胡伍生.神经网络理论及其工程[M].北京:测绘出版社,2006.
- [12] 党维维,高闯洲,党发宁,等.基于改进的BP神经网络对西安黄土抗剪强度指标的研究[J].水利与建筑工程学报,2009,7(2):1-4,13.
- [13] 杨喆,王家鼎,谷天峰.滑带黄土振陷预测中的BP神经网络方法[J].西北大学学报(自然科学版),2007,37(5):815-818.
- [14] 李雯霞.基于Matlab的BP神经网络在黄土液化评价中的应用[D].兰州:兰州理工大学,2006.
- [15] 高建勇,邢义川,陈艳霞.黄土高边坡稳定性预测模型研究[J].岩土工程学报,2011,33(S1):163-169.
- [16] 董晓宏.冻融作用下黄土工程性质劣化特性研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2010.
- [17] 张辉.冻融作用下黄土水分迁移及强度问题研究[D].西安:西安建筑科技大学,2014.