

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.05.009

基于BP神经网络的重塑黄土冻融过程渗透特性研究

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: 冻融循环导致黄土渗透特性的变化规律十分复杂,传统单一因素评价方法难以确定冻融过程黄土渗透系数与多因素之间的量化统计关系。基于此,首先对西安 Q₃ 重塑黄土进行冻融过程三轴渗透试验,得到不同干密度、含水率、围压及冻融次数下的渗透系数;然后采用 BP 神经网络算法对试验数据进行学习训练,建立各因素与渗透系数间的预测模型。研究表明:重塑黄土渗透系数变化规律,随围压增大,其值逐渐减小,且减小幅度先快后慢;随干密度和初始含水率增大,其值先增大后减小;随冻融次数增加,其值逐渐增大,且上升幅度先急后缓。冻融过程黄土渗透系数神经网络模型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渗透系数的量化关系。

关键词: 重塑黄土;冻融作用;渗透系数;BP神经网络

中图分类号: TU411.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)05-0051-06

Permeability 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 variation regularity of loess permeability caused by freezing and thawing cycles is very complicated. However, the traditional method based on only one factor is difficult to determine the quantitatively statistical relationship between the permeability coefficient and multi factors. This paper firstly carried out triaxial permeability test to get the permeability coefficient index data of Xi'an Q₃ remolded loess under different dry density, moisture content, confining pressure and freeze – thaw times. Then a prediction model for the relationship between permeability coefficient and multi factors was obtained by training testing data by using BP neural network. The results show that the loess permeability variation coefficient decrease with the increasing of confining pressure, and decreases soon after the first slow; with the dry density and initial water content increased, the value increased first and then decreased; with the freeze – thaw cycles increases, its value increases gradually, and rise after the first emergency relief. The relative error of prediction value of permeability coefficient compared with experimental data is little, which indicates that BP neutral network forecasting method has better accuracy and can describe the quantitative relationship between permeability coefficient and factors.

Keywords: remolded loess; freezing – thawing action; permeability coefficient; BP neural network

黄土多分布于我国中西部,作为诱发土体劣化的一种自然因素,冻融循环作用严重影响黄土在作用期间的物理力学性质及其结构,尤其是季节性冻土地区。研究表明,冻融作用是导致黄土工程力学性质劣化的重要因素之一^[1]。冻融作用强烈改变了

土体结构性^[2-3],不仅会诱发土体冻融病害,也会引起土体物理力学性质^[4-7]发生很大变化。基于黄土渗透特性的增强能较好的表现其冻融劣化特性,利用该指标的变化来定量描述黄土劣化特性是一种较好的研究方式,大多学者开展了有关冻融循环作用

收稿日期:2017-05-12

修稿日期:2017-06-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51478385;51208409)

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工作。E-mail:xujian@lzb.ac.cn

对土质渗透特性变化规律的研究工作,并取得较好的科研成果。王红雨等^[8]以宽级配砾质土样为研究对象,得到冻融循环作用下,其渗透系数会逐渐增大的结论;肖东辉等^[9]通过对经历过冻融循环的原状黄土和重塑黄土进行颗粒质量和孔隙体积积分形计算,认为土体渗透性与土颗粒粒径大小有高度相关,而与孔隙孔径的关系弱于颗粒粒径;安鹏等^[10]研究重塑饱合黄土在长期渗流条件下的劣化机制,得到渗透系数随着渗透时间持续减小,与时间符合幂函数关系;穆彦虎等^[11]对冻融作用下压实黄土结构进行了定量分析,结果表明冻融作用后土颗粒之间的原有结构被破坏而形成新的结构,渗透性亦有所增强;文杰等^[12]研究黄土的非饱和渗透系数与体积含水率之间的变化关系,并引入 θ 法;Chamberlain E J 等^[13],Viklander P^[14]对土体经历冻融循环后的渗透系数进行研究,发现土体渗透系数会在一定范围内变动。黄土渗透特性在冻融循环作用下,其变化机理及规律受多种因素的影响,传统统计方法一般研究渗透系数与冻融次数、含水率等单一变量之间的统计关系,而实际黄土渗透系数是同时受到多因素共同影响,因此以单一因素来评价冻融循环后黄土渗透系数,则会与实际结果存在较大误差。基于此, BP 神经网络作为具有多元非线性拟合功能的新方

法,便是解决传统统计方法缺陷的新途径之一,用其建立多种影响因素对冻融循环后黄土渗透系数共同作用的预测模型^[15]。唐晓松等^[16]、王双等^[17]利用人工神经网络方法研究了碎石土级配对其渗透特性的影响。然而将 BP 神经网络预测模型应用到冻融循环过程中渗透系数变化特性研究上的相关文献很少且不够统一。

基于此,本文通过重塑黄土在冻融循环过程中的渗透试验,分析其受多因素影响的变化规律。同时为了综合评价多因素耦合作用对重塑黄土在冻融过程中渗透系数的影响,本文采用 BP 神经网络建立预测模型,对室内三轴渗透数据进行训练和预测。

1 重塑黄土冻融过程三轴渗透特性试验研究

本次以陕西省西安市长安区 Q₃ 黄土为研究对象,通过参考大量试验及文献可见^[18-19],冻融次数 N 、含水率 ω 、干密度 ρ_d 及围压 σ_3 是影响重塑黄土在冻融过程中渗透特性发生变化的 4 个主要因素。因此,本文通过三轴渗透试验(见表 1)研究 4 个主要影响因素对重塑黄土渗透特性的变化规律,并得到试验数据 320 组。

表 1 试样安排

$\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\omega_1 / \%$	$\omega_2 / \%$	$\omega_3 / \%$	$\omega_4 / \%$	$\omega_5 / \%$	σ_3 / kPa	$N / \text{次}$	冻结温度 / °C	融化温度 / °C
1.4	15	18	21	28	33.6				
1.5	15	18	21	—	28.9	100、200、	0.2、5、	-20	20
1.6	15	18	21	—	24.7	300、400	10、20		
1.7	15	18	—	—	21.0				

注:冻结与融化时间均为 12 h,表中符号“—”表示试样不存在。

1.1 围压

图 1 所示为黄土渗透系数随围压变化的衰减曲线,由图 1 变化规律发现:随围压增大,黄土渗透系数以不同幅度下降,且下降幅度逐渐变小,最终保持在一个稳定的范围内变化。这是因为随着围压增大,土体固结度增大,密实度增大,土颗粒间孔隙减小,黄土渗透系数随之减小。由图 1 可见,在高围压(如 400 kPa 时)作用下,土体固结度较高,渗透系数可变范围受到较大限制,因此当土体在高围压作用下,不同冻融循环次数作用对黄土体渗透系数差异较小。

1.2 冻融次数

图 2 所示为黄土渗透系数随冻融循环次数变化的递增曲线。由图 2 可见,随冻融循环次数增加,黄土体渗透系数逐渐增大,且增大幅度逐渐减小。冻融循环 20 次后,渗透系数趋于稳定,其主要原因在于黄土体内部水分,在经历冻融循环作用时,不断经历低温冻结,高温融化的循环过程。水分冻结时,体积膨胀,破坏土颗粒间的联结,冰晶融化时,土颗粒重新排列,不断的循环致使土体孔隙率逐渐增大,为渗流提供了良好通道,土体渗透系数也会因此逐渐变大,直至趋于稳定。

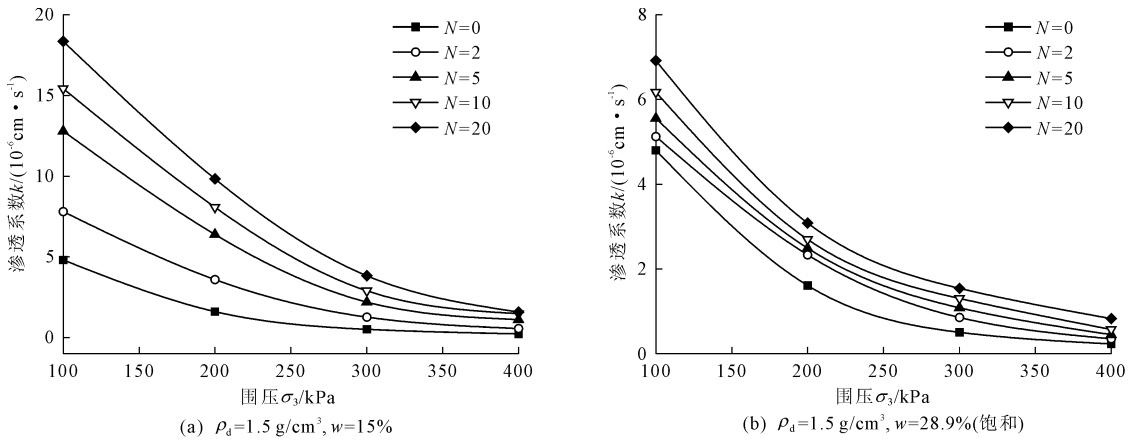


图 1 渗透系数与围压关系曲线

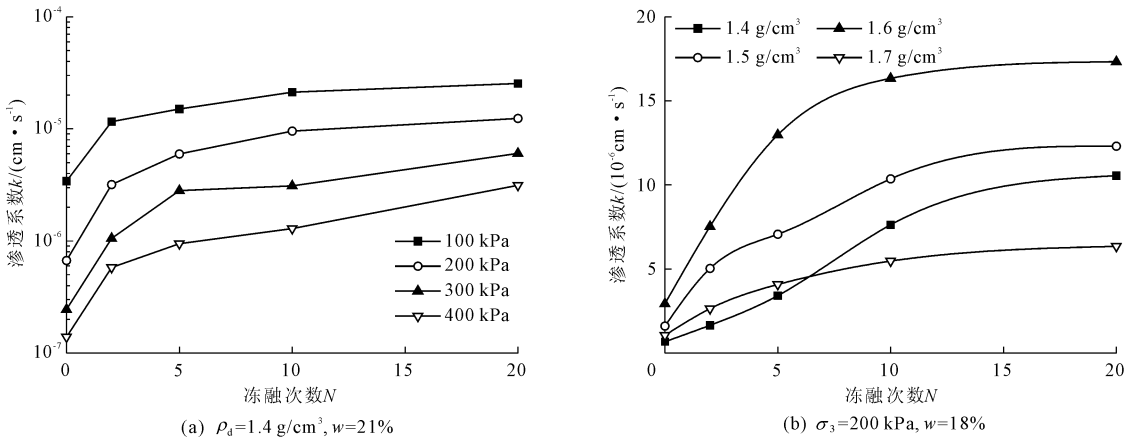


图 2 渗透系数与冻融次数关系曲线

1.3 干密度

图 3 给出渗透系数随干密度变化规律曲线。与常规渗透试验不同的是,渗透系数并未随着干密度增大而表现出单调减小特征,而是与干密度近似呈抛物线变化关系,且干密度约为 1.6 g/cm^3 时,渗透系数最大。分析其原因,干密度较大试样孔隙比较

小,在冻融循环过程中,土样内部产生的冻结劈裂作用较大,黄土体结构破坏较严重,因而初始阶段随着干密度增大,黄土体渗透系数增加;干密度很高时 ($\rho_d = 1.7 \text{ g/cm}^3$),黄土体初始孔隙比很小,黄土体渗透系数相应减小。

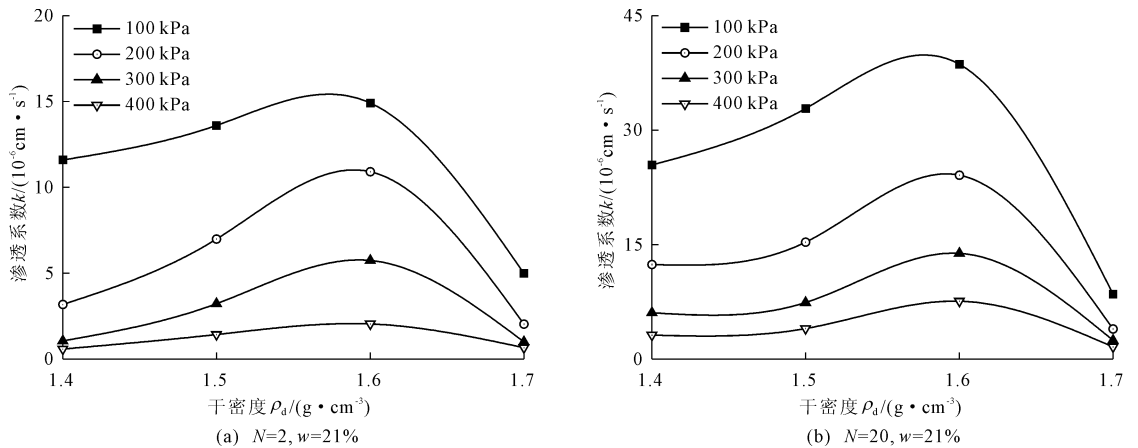


图 3 渗透系数与干密度关系曲线

1.4 初始含水率

图 4 所示为黄土渗透系数随初始含水率变化的抛物线型曲线。由图 4 可见,当干密度、围压一定时,随着初始含水率的增大,渗透系数先增大后减小。其原因如下:土体内部孔隙水在低温条件下冻结会形成冻结劈裂作用,并且会随着初始含水率的

增加,其冻结劈裂作用会不断增加,土颗粒间联结作用破坏程度就越大,进一步致使试样孔隙比增大,从而增加渗透系数。随着初始含水率的进一步提高,冻融作用对土颗粒间的联结作用破坏越严重,因此在给试样施加围压时,试样的固结程度很大,导致试样内部孔隙比减小,从而渗透系数减小。

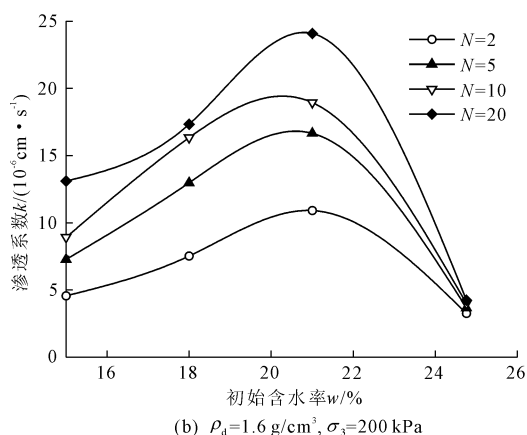
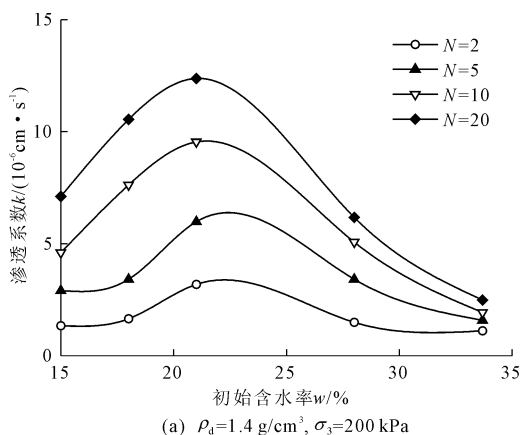


图 4 渗透系数与初始含水率关系曲线

1.5 讨论

由以上试验结果可见:重塑黄土渗透系数在冻融循环过程中,冻融次数、含水率、干密度及围压对其存在较显著的影响,但是通过前人试验中所得到的定量公式计算其大小时,准确度难以达到预期的效果。而 BP 神经网络的最大优势就是能获得多因素耦合作用对渗透系数的影响规律,通过训练样本获得多因素与渗透系数之间的非线性映射关系,可靠度较明显。基于此,下文基于 BP 神经网络算法对上述三轴渗透试验数据进行学习和训练,最终建立一种能够综合评价多因素影响冻融过程黄土渗透系数的分析预测模型。

2 BP 神经网络算法

2.1 BP 神经网络训练

在冻融循环过程中,重塑黄土渗透系数受冻融次数、含水率、干密度及围压的影响较为显著,从而将其作为 BP 神经网络训练样本更具有代表性,较为合适。本文将试验所得 320 组数据(见表 2)一分为二:基于训练样本数越多,所得预测模型结果越精确,可取前 300 组试验数据作为训练样本,剩余 20 组用来检验该预测模型的精确性。由于试验数据数值上均存在大小差距过大情况,为避免较大值与较小值被淹没,对数据归一化处理则显得较重要。

归一化函数如下:

表 2 归一化黄土渗透系数试验数据

序号	围压 σ_3	冻融次数 N	含水率 w	干密度 ρ_d	渗透系数 k
1	0.0	0.00	0.000	0.000	0.0851
2	0.0	0.00	0.000	0.333	0.1211
3	0.0	0.00	0.000	0.667	0.1421
4	0.0	0.00	0.000	1.000	0.0712
5	0.0	0.10	0.000	0.000	0.1736
6	0.0	0.10	0.000	0.333	0.1992
7	0.0	0.10	0.000	0.667	0.2793
8	0.0	0.10	0.000	1.000	0.0924
9	0.0	0.25	0.000	0.000	0.2617
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
311	1.0	0.25	0.522	0.667	0.0138
312	1.0	0.25	0.323	1.000	0.0205
313	1.0	0.50	1.000	0.000	0.0077
314	1.0	0.50	0.747	0.333	0.0112
315	1.0	0.50	0.522	0.667	0.0171
316	1.0	0.50	0.323	1.000	0.0354
317	1.0	1.00	1.000	0.000	0.0144
318	1.0	1.00	0.747	0.333	0.0179
319	1.0	1.00	0.522	0.667	0.0204
320	1.0	1.00	0.323	1.000	0.0378

$$X_t = l_1 + (l_h - l_1) \times (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

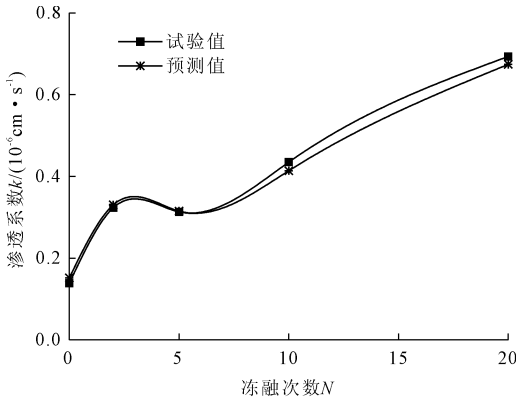
式中: X 为输入向量; X_{\min} 为变量 X 中的最小值; X_{\max} 为变量 X 中的最大值; l_1 和 l_h 分别是归一化的下限和上限; X_t 为归一化值。

2.2 BP 网络检验及结果分析

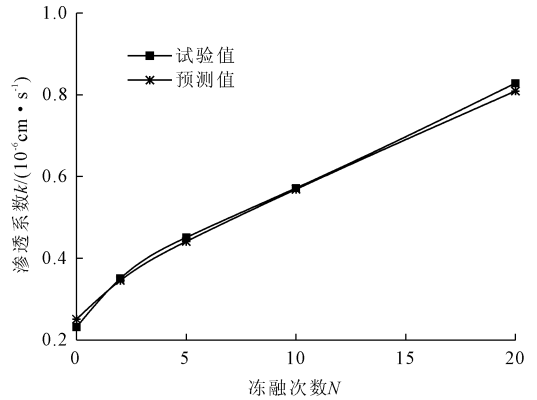
预测模型通过训练与学习后,需对该模型进行验证。验证方式就是通过提前保存的 20 组同类型数据作为输入层导入该模型,预测结果见表 3 和图 5。预测结果显示,在冻融过程中黄土渗透系数预测值与其试验值变化趋势较吻合,两者之间存在误差范围均保持在 10% 以内,符合误差允许的范围,因此利用 BP 神经网络预测模型预测冻融过程重塑黄土渗透系数较为可靠,具有很好的泛化能力。通过比较预测模型的预测结果,可以发现,该模型能够较准确的预测冻融条件、土性参数及围压对黄土渗透系数的影响规律。

表 3 渗透系数预测结果

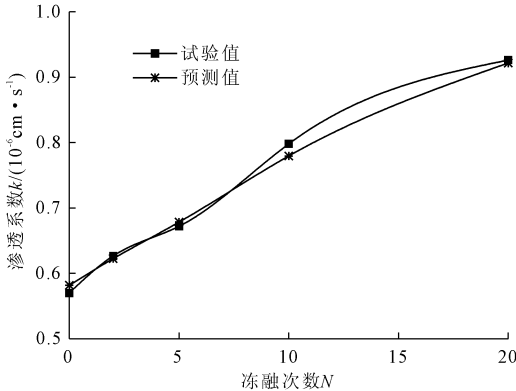
围压 σ_3 /kPa	冻融次数 N /次	含水率 w /%	干密度 ρ_d /(g·cm ⁻³)	渗透系数 k / (10 ⁻⁶ cm·s ⁻¹)		渗透系数相对误差
				试验值	预测值	
400	0	33.6	1.4	0.1389	0.1517	0.09255
400	0	28.9	1.5	0.2314	0.2508	0.08384
400	0	24.7	1.6	0.5700	0.5818	0.02070
400	0	21.0	1.7	0.3600	0.3528	0.02001
400	2	33.6	1.4	0.3230	0.3304	0.02291
400	2	28.9	1.5	0.3505	0.3455	0.01427
400	2	24.7	1.6	0.6267	0.6225	0.00670
400	2	21.0	1.7	0.6602	0.6714	0.01704
400	5	33.6	1.4	0.3133	0.3152	0.00606
400	5	28.9	1.5	0.4510	0.4407	0.02273
400	5	24.7	1.6	0.6720	0.6783	0.00938
400	5	21.0	1.7	0.9290	0.9417	0.01367
400	10	33.6	1.4	0.4349	0.4140	0.04806
400	10	28.9	1.5	0.5716	0.5686	0.00516
400	10	24.7	1.6	0.7980	0.7796	0.02306
400	10	21.0	1.7	1.5000	1.4187	0.05420
400	20	33.6	1.4	0.6935	0.6741	0.02797
400	20	28.9	1.5	0.8284	0.8089	0.02348
400	20	24.7	1.6	0.9261	0.9217	0.00470
400	20	21.0	1.7	1.5924	1.7114	0.07476



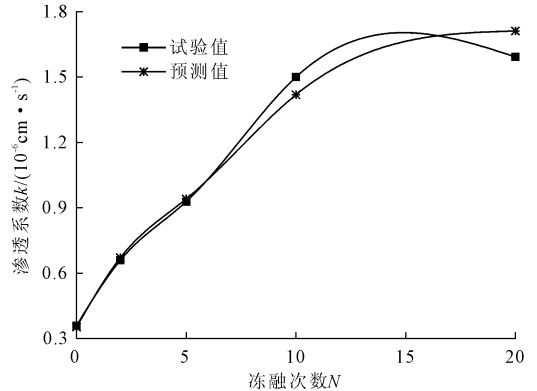
(a) $\sigma_3=400$ kPa, $w=33.6\%$, $\rho_d=1.4$ g/cm³



(b) $\sigma_3=400$ kPa, $w=28.9\%$, $\rho_d=1.5$ g/cm³



(c) $\sigma_3=400$ kPa, $w=24.7\%$, $\rho_d=1.6$ g/cm³



(d) $\sigma_3=400$ kPa, $w=21.0\%$, $\rho_d=1.7$ g/cm³

图 5 典型数据样本渗透系数预测结果

3 结 论

基于试验数据结果,冻融次数、含水率、干密度及围压均对重塑黄土渗透系数影响显著。通过建立冻融次数、含水率、干密度及围压各因素与渗透系数之间的关系预测模型,试验结论如下:

(1) 重塑黄土渗透系数变化规律:随围压增大,其值逐渐减小,且减小幅度先快后慢;随干密度和初始含水率增大,其值先增大后减小;随冻融次数增加,其值逐渐增大,且上升幅度先急后缓。

(2) 由预测结果可见,通过 BP 神经网络所建立的黄土渗透系数预测模型,得到的试验值与预测值之间存在较小误差,能够较准确的预测冻融条件、土性参数及围压对黄土渗透系数的影响规律。

基于此,可以通过建立 BP 神经网络预测模型,利用收集的有关在冻融循环过程中黄土渗透系数的数据进行培训,从而为季节冻土区黄土渗透系数取值提供参考。

参考文献:

- [1] 沈珠江. 抗风化设计 - 未来岩土工程设计的一个重要内容[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 866-869.
- [2] 方丽莉, 齐吉琳, 马 巍. 冻融作用对土结构性的影响及其导致的强度变化[J]. 冰川冻土, 2012, 34(2): 435-440.
- [3] QI J L, Vermeer P A, CHENG Guodong. A review of the influence of freeze-thaw cycles on soil geotechnical properties [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2006, 17(3): 245-252.
- [4] 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.
- [5] 张 辉, 王铁行, 罗 扬. 非饱和和原状黄土冻融强度研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(4): 210-214.
- [6] 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.

- [7] 房江锋, 李 楠. 冻融作用对不同覆土厚度黄土窑洞灾害的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(6): 124-127.
- [8] 王红雨, 唐少荣, 邢毓航, 等. 冻融循环作用下宽级配砾质土的渗透特性[J]. 工程地质学报, 2015, 23(3): 498-504.
- [9] 肖东辉, 冯文杰, 张 泽, 等. 冻融循环作用下黄土渗透性与其结构特征关系研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(4): 43-49.
- [10] 安 鹏, 张爱军, 刘宏泰, 等. 重塑饱和黄土长期渗流劣化机制及其渗透性分析[J]. 岩土力学, 2013, 43(7): 1965-1971.
- [11] 穆彦虎, 马 巍, 李国玉, 等. 冻融作用对压实黄土结构影响的微观定量研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1919-1925.
- [12] 文 杰, 韩金良, 姚磊华, 等. 原位非饱和黄土渗透系数研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2599-2606.
- [13] Chamberlain E J, Iskandar I, Hunsikert S E. Effect of freeze-thaw cycles on the permeability and macrostructure of soils[C]//Proceedings of International Symposium on Frozen Soil Impacts on Agricultural, Range and Forest Lands, Spokane: Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1990: 145-155.
- [14] Viklander P. Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze/thaw [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(3): 471-477.
- [15] 胡伍生. 神经网络理论及其工程[M]. 北京: 测绘出版社, 2006.
- [16] 唐晓松, 郑颖人, 董 诚. 应用神经网络预估粗粒土的渗透系数[J]. 岩土力学, 2007, 28(S1): 133-136.
- [17] 王 双, 李小春, 王少泉, 等. 碎石土级配特征对渗透系数的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增 2): 4394-4402.
- [18] 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.
- [19] 王铁行, 杨 涛, 鲁 洁. 干密度及冻融循环对黄土渗透性的各向异性影响[J]. 岩土力学, 2016, 37(S1): 72-78.