

文章编号: 1673-3363-(2015)06-0996-08

人工冻土融沉试验及融沉系数预测研究

陶祥令^{1,2,3}, 马金荣^{1,2}, 黄凌¹

- (1. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116;
2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
3. 江苏省建筑安全与减灾工程技术研发中心, 江苏 徐州 221116)

摘要 为了研究人工凿井冻结法施工中冻结壁解冻融沉效应的产生而导致井筒壁后附加力的变化, 以徐州黏土冻融为研究对象, 通过人工冻结土融沉特性试验, 分别开展了人工冻土不同含水率、不同单向冻结温度梯度、不同外荷载的冻融特性分析。结果表明: 试验系统补水情形下, 相同干密度的黏土单向冻结温度梯度为 1.4 °C/cm 时融沉量值为 0.98 mm, 大于 2.0 °C/cm 融沉量值 0.61 mm, 增大幅度值约 60.6%; 相同单向冻结温度梯度下, 随着外荷载的增大融沉量随之增大, 两者增长趋势一致, 但幅度不一致。基于对冻土融沉特性受多因素综合影响的认识, 采用改进的人工神经网络方法, 建立了多样本、多因素影响下的融沉系数关系数据库, 误差分析表明, 改进的预测算法具有较好的精度。

关键词 人工冻土; 温度梯度; 融沉系数; 神经网络

中图分类号 TD 445 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2015.06.021

A study of the prediction of artificial frozen soil thaw settlement test and thaw settlement coefficient

TAO Xiangling^{1,2,3}, MA Jinrong^{1,2}, HUANG Ling¹

- (1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China;
3. Jiangsu Research & Development Centre of Construction Safety and Disaster Mitigation, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract In order to investigate the changes of the additional force in the back of the shaft lining wall, which is caused by the thawing effect of the frozen wall in the construction of the special sinking shaft with freezing method, indoor freeze-thaw cycle tests have been carried out under different moisture contents, unidirectional temperature gradients and external loads, taking Xuzhou clay as the object of study. The results show that: when the test system was under water replenishment, the clay under 1.4 °C/cm unidirectional freezing gradient has 0.98 mm settlement, which is 60.6% larger than the clay with the same dry density but under 2.0 °C/cm freezing gradient (with 0.61 mm in settlement). Under the same unidirectional freezing temperature gradient, the thawing settlement increases with the increment of load, of which the increasing trend of is similar while the increasing magnitude is not consistent. Based on the fact that the thawing character of freezing soil is effected by multiple factors, a relational

收稿日期: 2015-04-24

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2012CB026103); 冻土工程国家重点实验室开放基金项目(SKLFSE201305)

作者简介: 陶祥令(1984—), 男, 山东省菏泽市人, 博士, 从事深部土与冻土物理力学特性方面的研究。

通信作者: 马金荣

E-mail: karlma@cumt.edu.cn

Tel: 0516-83995078

database about thaw settlement coefficient with multi-sample and multi-factor has been built by utilizing the improved artificial neural network. The error analysis certifies that the improved prediction algorithm has greater accuracy.

Key words artificial frozen soil; temperature gradient; thaw settlement coefficient; neural network

井工矿井建设成功与否的关键是井筒的安全设计与施工，近十年我国煤炭、铁矿石等固体矿产资源开发加速促使向深部进军，比较普遍地遇到了深厚表土层或深厚孔隙-裂隙富水岩层，以及两者互叠地层^[1-2]。冻结法凿井施工方法作为特殊凿井施工技术的一种，较常用于了深厚富水岩层及超深富水岩层中的立井和斜井施工^[3]。但随着开挖表土层厚度及深厚富水岩层的增大，冻结深度和地压随之加大，冻结壁径向变形量过大以及解冻后井壁破裂漏水等事故屡屡发生。

国内外众多学者已对冻土融沉特性进行了一定的探索和研究，取得诸多成果。试验方面：付厚利^[4]、马巍^[5]、王大雁^[6]、周国庆^[7]、杨维好^[8]等通过室内物理模型试验及小试样试验分析，揭示了人工冻结壁解冻过程冻土物理力学特性及正融土机制过程；梁波等^[9]针对青藏铁路路基土通过室内冻融试验研究了循环融沉系数与融沉系数的关系式；Zou 等^[10]通过封闭系统试验研究了细粒土的冻胀、融沉的压缩特性，对分凝冰融化消散过程进行揭示；G. I. Klinova 等^[11]通过室内试验研究了含水率、孔隙率等对土体融沉特性的影响；K. Hansson 等^[12]通过对比高含冰冻土路基解冻过程实验室和现场数据，分析了适用的计算模型；杨平等^[13]开展了水平冻结方式人工冻土融沉特性试验及数值模拟。理论计算方面：国内姚晓亮、齐吉琳等^[14]基于 R. E. Gibson^[15-16]饱和黏土一维固结理论引入温度场和大变形理论，研究了路基冻土解冻状态的三维固结大变形计算方法；姚晓亮^[17]、王效宾等^[18]基于 BP 人

工神经网络算法研究了融沉系数的影响，并指出多元非线性影射关系(含水量、液塑限等)与融沉系数间存在联系；杨凤学等^[19]根据季节性冻土融沉系数现场测试结果，分析融沉系数影响因素的统计学规律，提出经验公式。所述研究内容，大多结合试验中几种因素或单一土质开展冻土融沉试验，而未开展有压下融沉特性的多因素敏感度分析。

基于以上研究背景，本文采用冻融循环装置，对人工冻土单向冻结-融化、不同含水率等条件下的融沉体变系数进行试验，并结合冻土融沉影响因素敏感性分析，以改进的神经网络方法进行融沉系数预测，以期得到一个能够综合评价多因素影响融沉系数的经验方法。

1 试验内容及方法

1.1 试样及制备

试验土质为华东徐州矿区 Q₃ 黏土，颜色呈棕黄到棕红色，多呈硬塑状态，切面常有光泽反应，具有较高的干强度和较好的韧性，常含有包含物(如铁锰结核、高岭土等)，其物理指标参数见表 1，取土后进行室内重塑。土样按照试验方案的含水率加蒸馏水拌制后装入密封袋，放入保湿箱静置 10~12 h(或浸润 1 昼夜)；为保证试验精度，每组试验均进行平行试验。取出的土体放入制样机模具中，两头均压至设计高度，制备高度为 10 cm、直径为 10.1 cm 的试样；用保鲜膜将制备好的试样包裹密封待用，取样放入高度 18.5 cm、直径 10.1 cm 的有机玻璃筒内(壁厚 1 cm)。

表 1 土样基本物理指标
Table1 Basic physical property of soil samples

液限 w_L	塑限 w_p	塑性指数 I_p	各粒径颗粒含量/%			最大干密度/(g·cm ⁻³)	相对密度/%	最优含水率/%
			<0.075 mm	0.075~0.25 mm	0.25~0.5 mm			
46.8	25.1	21.7	40.60	56.35	3.05	1.87	2.74	26.3

1.2 试验方案设计

冻融试验在冻土工程国家重点实验室三端制冷冻融循环装置上进行，试验系统由冻融试验系统、加载系统及数据采集系统组成；试验系统包含

恒温箱、保温棉、有机玻璃筒(侧壁带温度传感器孔 10 个，间距约 1 cm)、3 个制冷端(上冷端、下冷端、箱体)及冷浴、补水系统、温度和位移传感器及相应的数据采集系统，如图 1a 所示。有机玻璃筒外包

裹保温棉, 试样上下分别安置冷源, 按既定温度控制冷源, 温度测点通过侧壁预留孔插入探头(温度传感器精度为 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$)到试样中(除温度测点布设侧壁预留孔, 还另布设于上冷端和下冷端处), 温度测点布设见图 1b 所示, 温度传感器外接数据采集仪; 上冷端顶部安装位移传感器(精度为 0.01 mm)外接数据采集仪, 采集冻融过程土样冻融体积变化值。加载系统竖向接触下冷端, 采取底部加载。补水系统为马氏补水瓶, 可模拟开放系统地下水的补给。冻融试验结束后, 立即拆样, 按照上下顺序等距取土, 并测量试样不同高度的含水率。

考虑井工建设冻结壁施工中冻土监测温度约 $-10\sim -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[5], 上冷端温度设置参考上述量值, 根据以往研究成果^[20], 方案设计含水率为 17%, 23%, 饱水(约 31%), 详细试验方案见表 2。

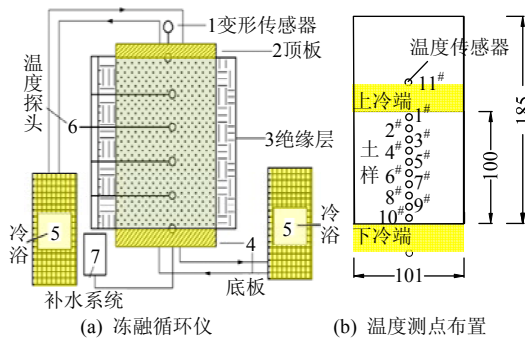


图 1 冻融循环仪和测点布置示意图 (mm)
Fig.1 Freeze-thaw cycles apparatus and schematic of testing sites

表 2 试验设计方案
Table 2 Design of test schemes

因素	量值		
加载/kPa	0	50	100
含水率/%	17	23	饱和
冻结温度梯度/ $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1})$	1.4/2.0		

1.3 边界条件设置

试验设计初始土体温度为均匀分布的正温 $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 约 6 h。试验方案设计 2 种温度梯度进行单向冻结, 1 种温度梯度进行融化。经过多次试验发现冻结开始 10 h 后土体完全冻结, 设计 2 种冻结梯度分别为 1.4, $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$, 试样上冷端温度分别控制为 $-12, -18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (冻结温度), 下冷端温度控制恒温 $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$; 冻结约 10 h 后上冷端温度设置 $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (解冻温度)开始融化, 设计 1 种融化梯度为 $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$, 下冷端温度保持恒温 $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2 融沉过程及特性分析

2.1 融沉过程分析

土体冻胀、融沉过程是土体从不稳定态向动态稳定态的发展过程, 该过程受含水率、外荷载等因素影响, 从而进一步使土颗粒和水分分别重新分布, 土体冻融前后土体体积发生变化。不同含水率、不同外荷载、不同单向冻结温度梯度作用下冻土融沉量作用的部分时程曲线如图 2~5 所示。

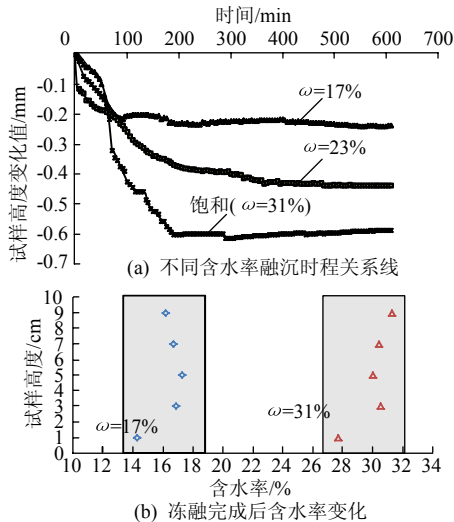


图 2 含水率对融沉量影响关系
Fig.2 The effect curve of different moisture content on thaw settlement

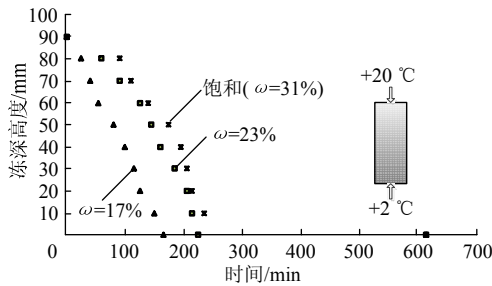


图 3 不同含水率下冻结深度时程关系线
Fig.3 The process line of frozen depth in different moisture contents

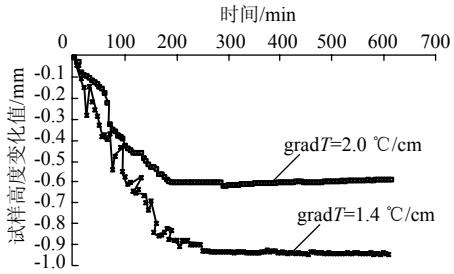


图 4 温度梯度对融沉量时程关系线
Fig.4 The effect curve of temperature gradients on thaw settlement

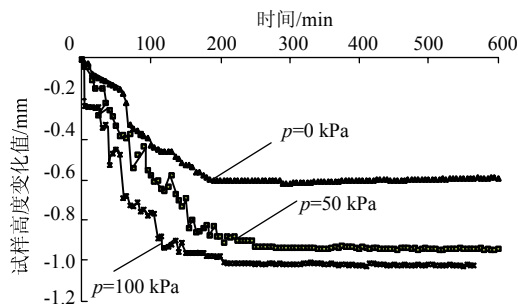


图5 荷载条件对融沉量影响关系
Fig.5 The effect curve of loading condition on thaw settlement

具体表现为:

1) 含水率对融沉量的影响关系

冻土融沉的实质是胶结的冰相变为水, 土中孔隙水在自重和外荷载作用下排出, 土体压缩。土体冻结过程水相态转变为冰相态, 开放环境下受冻胀作用土体积增大, 因此初始含水率大小直接影响冻胀量和融沉量。图2a为补水条件下温度梯度 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 时试样融沉量值变化时程曲线, 图中含水率较小的试样融化后样高变化也较小, 这也说明了非饱和土含水率较小时因冻结产生的冰晶量较少^[11], 少量的冰晶无法充分填充土颗粒孔隙, 且冻胀期的水分迁移造成试样发生一定的冷缩作用^[18], 试样融化冰晶逐渐变为水, 但量值较小, 融沉作用不明显。随着含水率的增大融沉量增大, 但含水率17%的试样融沉量值远小于含水率23%, 31%情形下的量值。

冻胀、融沉过程都存在水分迁移作用, 由于开放系统补水作用, 冻胀后含水率成为了融沉含水率的基础。融化固结排水、融化吸水以及冻土冰晶融化造成的体缩三者相互作用引起了融沉后试样冻结锋面(分凝冰形成位置)含水率高于初始含水率(试验后土样含水率分布见图2b), 冻融过程后冻结锋面位置含水率最大; 通过对冻胀和融沉过程补水量的统计, 冻结过程补水量远大于融化过程的补水量, 说明了负温差对水分迁移作用大。

冻深消散速度快慢是解冻快慢的一个表现, 冻土中冰、水相变是引起土体融沉量值的一个主要因素, 单向冻结温度梯度影响下含水率较大的土体水迁移能够得到水分的持续补充, 土颗粒、冰包裹体的含量越多, 融化过程解冻该部分包裹体需要的时间越长, 这也是冻深消散时间变长的原因。图3为不同含水率土体温度梯度($2.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$)冻结后解冻作用下冻深高度变化, 土样含水率17%, 23%和31%相同温度梯度解冻时, 冻深消散时间相差约65, 35

min。

2) 单向冻结温度梯度对融沉量的影响关系

冻结梯度为 $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 和 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 的冻融作用, 试验结果选取了饱和含水率(约31%)下试样融沉量值的时程线对比见图4。由于温度梯度与冻结速率成正比, 冻结速率的大小与水分迁移、冻结锋面的快慢也直接相关; 温度梯度大时, 冻结锋面处的原位水分冻结快, 冻结锋面相对稳定时间变短, 水分迁移难以维持水、冰相变所需含水量, 依次递推冻结锋面加速移动; 温度梯度小时, 冻结锋面推进速度显著变慢, 水分迁移有充足的时间持续作用。所以土样相同干密度条件下较小温度梯度冻结作用时, 冻胀量较大, 此情形相同解冻温度梯度下融沉量值也较大, 这与文献[5]描述的开放系统作用下冻融试验融沉结果基本一致; 但单向冻结温度梯度对冻胀、融沉量值的影响还受土样密实度影响, 这点有待于进一步研究。本试验开展同密实度下黏土单向冻结梯度分别为 $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 和 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 且干密度为 $1.42\text{ g}/\text{cm}^3$ 的冻融试验, 结果表明 $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 融沉最大量值为 0.98 mm , 大于 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 融沉最大量值 0.61 mm , 增大幅值约60.6%。

3) 压力对融沉量的影响关系

冻融过程中, 荷载有效地抑制了土体的冻胀变形, 然而在一定程度上却加剧了土体的融沉变形, 究其原因外部压力会引起土体内水分重分布, 冻胀过程中外荷载作用会减少未冻土中水分向冻结锋面的迁移量值^[21], 冻结锋面中冰水界面抽吸力会相应降低。关于外部压力对土冻胀性影响试验有一些报道, 理论研究取得成果较多^[14,22]。荷载作用下孔隙水压的消散与未冻水迁移量一定程度相关, 孔隙水压消散融沉量急剧增大, 当消散到一定程度时融沉量基本趋于稳定。图5为饱和含水率土体相同单向冻结温度梯度($2.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$)、分别在荷载0, 50, 100 kPa作用下融沉量对比时程曲线。试验表明: 融沉过程可划为下沉阶段、稳定阶段和压密阶段, 外荷载作用时融沉量显著大于无荷载作用, 随着荷载的增大融沉量随之增大, 两者增长趋势一致, 但幅度不一致。因试验土为结构性较强的黏土^[20], 重塑土样骨架的有效应力依然很大, 土结构性一定程度上发挥了骨架支撑, 阻碍了融沉的发生。相对于青藏粉质砂土外荷载作用下的融沉试验^[21], 本试验融沉量增长趋势存在不同。

室内试验土样融沉系数测定受自重影响较小,

这与自然状态下土体融沉系数发生过程不符,甚至相差较大^[19],所以室内试验测定土体融沉系数需要根据土体所受真实荷载进行修正。

2.2 融沉特性分析

Tsytoich 根据试验规律最早提出冻土融化的变形总量计算方法,将冻土解冻融化后的沉降变形分为两部分,即自重融沉变形和有压融化压缩变形,其中融沉变形计算公式为

$$A_0 = \frac{\Delta h}{h_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: A_0 为冻土融沉系数, %; Δh 为冻土融化下沉量, mm; h_0 为冻土初始高度, mm。

以无压条件下冻融试验为例,根据前述冻土融沉试验样本对融沉系数 A_0 统计结果分析,相同温度梯度下(2.0 °C/cm) 融沉系数随不同含水率影响对比见图 6 所示,不同含水率试样的融沉系数有很好的统计关系,具体表现为: 2.0 °C/cm 温度梯度冻融作用下, A1-A5, B1-B5, C1-C5 分别代表含水率 17%, 23%, 31% 的样本, 3 种不同含水率与对应的融沉系数成正比关系,随含水率的增大融沉系数增加了 79.1%, 154.2%, 这与图 2 融沉量受含水率影响的原因是一致的。

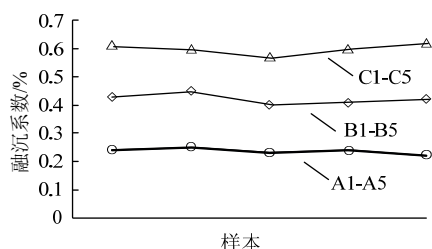


图 6 不同含水率融沉系数样本统计

Fig.6 The sample statistics of thaw settlement coefficients in different rates of water content

通过上述多因素、多样本的融沉过程及融沉特性初步分析,表明土的融沉系数受含水率等多种综合因素的影响,为进一步开展综合因素对融沉特性及融沉敏感性分析,后文将试验所得数据作为融沉系数预测的训练样本库开展进一步研究。

3 融沉系数预测分析

3.1 融沉系数影响因素分析

评判冻土融沉性的主要因素有土质、含水(冰)量、干密度,前人^[17,19]的研究成果基本上是基于饱和或准饱和土的条件,获取融沉系数与影响因素间的统计学关系。相同含水(冰)率前提下,粉土、黏

土、砂土 3 种土质中,粉土融沉系数最大,砂土最小;非饱和状态的同质土融沉系数随干密度增大而增大,而饱和状态的同质土融沉系数随干密度的增大却减小。含水(冰)量是引起冻土体融化沉降的重要因素,开放系统中的饱和或过饱和状态的冻土融化会加剧融沉量。

天然情况下土体多数处于非饱和的状态,土体的实际密度要小于理论密度,因此按照理论计算或推算获得的融沉系数同天然情形下相比,相差较大;因此学者根据工程中冻土融化下沉实际监测值总结了融沉系数的经验公式^[19],但确定经验公式中繁多的经验系数较为困难,在实际工程中很难广泛推广应用。需要将实际工程和理论计算结合,寻找更为有效便捷的方法来评价融沉系数。

3.2 改进人工神经网络算法设计

冻土融沉受多因素的影响,融沉系数使用单一因素进行评价显然会出现较大偏差。如何融合多因素影响性而准确地评价融沉系数,学者们^[17,22-23]成功地将人工神经网络算法应用于冻土融沉系数的预测,为研究提供了新的思路。人工神经网络方法可综合考虑干密度、含水率、土体液塑限、粉黏粒含量及冻结温度对融沉系数的影响,将人工神经网络算法的多元非线性映射的拟合仿真演算,应用于诸多因素同融沉系数间的经验数据库,并以获得的经验数据库为计算“准则”来推算新的因素下的融沉系数。

人工神经网络 BP 算法是一种单向传播的多层前向网络,通常包含输入层(如因素 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_N$)、运算层和输出层。本文在前人优秀的运算成果基础上,增加了输入层修正因素(α_{N+1}),该因素为融沉压缩过程中的压力值,可修正室内试验中荷载引起冻胀量值变化引起的融沉系数干扰;将实际工程监测值与实验室有压下融沉系数的试验数据进行误差修正,重新返回到运算层经新的修正运算后降低样本误差。

3.3 算法的训练及预测结果分析

采用改进的人工神经网络训练过程为:第 1 层为输入层,影响因素为干密度 ρ_d 、含水率 ω 、粉黏颗粒含量 θ 、液限 ω_L 、塑限 ω_p ,输入层修正因素为压力 p ;第 2 层为隐含层,该层作为运算层;第 3 层为输出层,融沉系数 A_0 为目标结果。

将前述徐州黏土融沉系数的试验结果(见表 3 中 1~3 号数据)及其他土质的工程监测数据(见表 3

中 4~9 号数据)^[19]作为训练样本。为增加训练样本的代表性,本文引用了国外学者 Watson 等^[24](见表 3 中 10~20 号数据)及国内学者姚晓亮^[17](见表 3 中 21~30 号数据)的文献数据作为训练样本,作为已有经验数据库进行验证。通过表 3 中的计算结果与实

测结果对比表明:网络模型的预测能力良好,预测值与实测值二者接近度高,说明计算精度较好,可以利用改进人工神经网络技术对人工冻土融化解冻系数测量有效预测。

表 3 融沉系数影响因素及预测对比

Table 3 Comparison and prediction of influencing factors of thaw settlement coefficient

编号	$\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\omega/\%$	$\theta/\%$	$\omega_L/\%$	$\omega_P/\%$	$\text{grad}T/(\text{°C}\cdot\text{cm}^{-1})$	实测值	预测值
1	1.47	17.0	96	46.8	25.1	1.4	0.25	0.254 476 0
2	1.47	23.0	96	46.8	25.1	1.4	0.43	0.447 120 1
3	1.47	31.0	96	46.8	25.1	1.4	0.61	0.620 012 8
4	1.71	22.0	85	46.8	21.7	2.0	7.70	7.865 967 8
5	1.48	17.0	88	46.8	21.7	2.0	5.60	5.167 903 5
6	1.49	17.0	85	46.8	21.7	2.0	7.70	7.673 484 0
7	1.46	17.0	88	46.8	21.7	2.0	6.00	6.073 662 9
8	1.52	25.0	88	46.8	21.7	2.0	4.60	4.651 597 2
9	1.50	29.0	88	46.8	21.7	2.0	6.50	6.331 995 7
10	0.38	196.0	90	55.2	30.2	0	65.00	65.087 687 0
11	0.56	125.0	90	55.2	30.2	0	55.00	54.050 911 0
12	0.62	106.9	90	50.4	32.3	0	46.00	46.841 396 0
13	0.65	98.8	90	50.4	32.3	0	46.00	44.960 122 0
14	0.67	100.2	90	55.2	30.2	0	49.00	49.351 296 0
15	0.74	85.1	90	63.0	28.8	0	45.00	44.811 677 0
16	0.79	78.8	90	50.4	32.3	0	36.00	36.136 101 0
17	0.93	63.2	90	63.0	28.8	0	32.00	30.988 127 0
18	0.96	59.6	90	63	28.8	0	26.00	26.941 185 0
19	0.57	117.5	90	55.2	30.2	0	53.00	53.640 841 0
20	0.38	196.0	90	63.0	28.8	0	43.00	43.196 395 0
21	1.70	20.8	86	26.9	15.1	1.1	0.76	0.548 629 6
22	1.70	20.8	97	37.8	18.2	1.1	1.45	1.516 817 3
23	1.61	23.1	97	37.8	18.2	1.1	3.98	3.781 031 3
24	1.60	24.3	86	26.9	15.1	1.1	1.65	1.769 380 2
25	1.57	24.3	86	26.9	15.1	1.1	2.40	2.297 737 3
26	1.55	23.1	97	37.8	18.2	1.1	3.72	4.635 446 0
27	1.54	26.8	97	37.8	18.2	1.1	5.57	5.609 983 0
28	1.53	24.9	97	37.8	18.2	1.1	6.31	5.278 376 0
29	1.51	24.9	97	37.8	18.2	1.1	5.68	5.477 168 3
30	1.70	20.8	86	26.9	15.1	1.1	0.49	0.548 629 6

3.4 预测结果影响因素误差分析

为进一步开展算法预测值受单因素或多因素干扰情况,运用样本数据库进行了缺单因素(ρ_d , ω , θ , ω_L , ω_P)或缺多因素(θ , ω_L , ω_P)的融沉系数预测,其预测结果受因素影响值对比特征见图 7 所示。

实际工程中影响冻土融沉系数的因素复杂繁多,许多因素为工程固有属性(土质等)。综合分析

数据库随机抽取样本预测值,土质是影响融沉系数变化的首要因素,同因素下粉土融沉敏感性最佳,远大于粉质黏土、黏土,首先定性判断土质因素对融沉系数影响敏感性最大。这也说明了天然土体结构、原生构造的土质特性都是影响冻土融化自沉大小的首要因素,土的胶结强度、颗粒级分的相互作用都减弱了融沉趋势。根据极差分析法(极差用 R_j

表示)分析剩余几种影响因素(含水率、干密度、液塑限)的敏感性极差值,获得因素对融沉系数的影响。含水率、干密度、液塑限对应的 R_j 值分别为 48.307 92, 47.469 51, 46.808 037。根据极差大小,可判定各影响因素的主次顺序,极差 R_j 越大,表示该参数的水平变化对试验指标的影响越大,该参数为主要因素,若极差很小,则说明该参数为次要因素,对实验结果影响较小。预测结果对影响因素敏感性排序依次为:土质、含水率、干密度、液塑限。

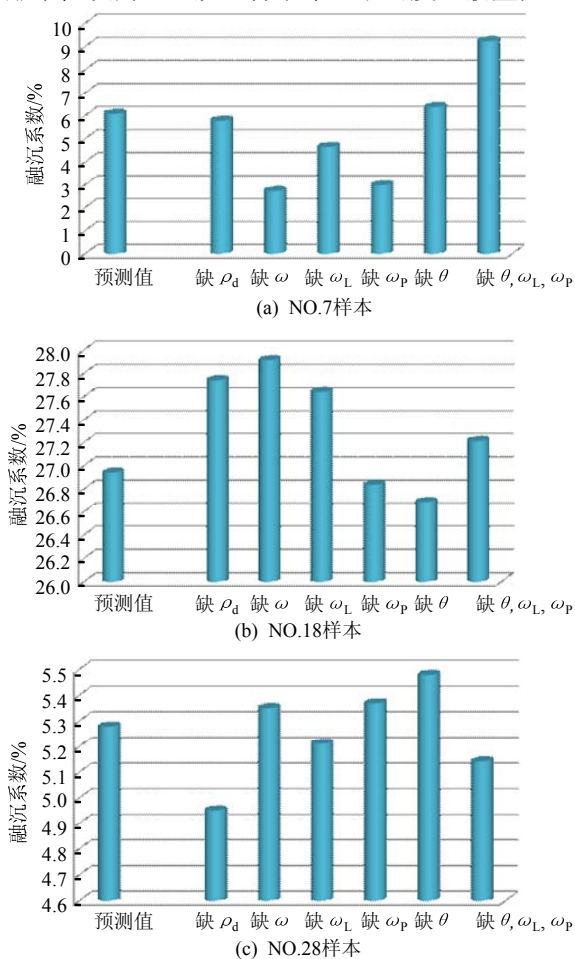


图 7 受因素影响的随机样本融沉系数计算值
Fig.7 The influencing factors of a random sample of thaw settlement coefficient's calculated values

4 结 论

1) 试验系统在补水情形下,相同干密度、相同密实度的黏土进行单向冻结梯度为 1.4, 2.0 $^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 的冻融试验,结果表明 1.4 $^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 融沉最大量值为 0.98 mm,大于 2.0 $^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 融沉最大量值 0.61 mm,增大幅值约 60.6%。

2) 随着含水率的增大融沉量增大,融沉系数也随之增大。相同单向冻结温度梯度下,随着外载荷

0, 50, 100 kPa 的增大试验结果中融沉量随之增大,两者增长趋势一致,但幅度不一致。外荷载对融沉量影响会对融沉系数的测算产生误差。室内试验中土样融沉系数测定受自重影响较小,这与自然状态下融沉系数测定过程不完全符合。室内试验测定土体融沉系数需要根据工程现场融沉系数经验公式进行修正。

3) 改进人工神经网络算法得到的运算关系数据库,能够综合反映(土质、干密度、含水率、液塑限等因素)对融沉系数和融化压缩量的影响。预测结果对影响因素敏感性排序依次为:土质、含水率、干密度、液塑限。随着选取多类型土质、多影响因素的训练样本增多,可以将算法推广到寒区工程的融沉系数预测。

冻土冻融试验其根本是水分迁移的过程,如何量化描述融化固结排水量、融化吸水量以及冻土中冰晶融化体缩量三者之间的关系,也是本文后续研究的内容。

参考文献:

- [1] 杨维好. 十年来中国冻结法凿井技术的发展与展望[C]// 中国煤炭学会成立五十周年高层学术论坛论文集. 北京: 中国煤炭学会, 2012: 1-7.
- [2] 马金荣. 深层土的力学特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 1999.
- [3] 崔广心. 深土冻土力学: 冻土力学发展的新领域[J]. 冰川冻土, 1998, 20(2): 1-4.
CUI Guangxin. Mechanics of frozen soil for deep alluvium: a new field of frozen soil mechanics[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, 20(2): 1-4.
- [4] 付厚利. 深厚表土中冻结壁解冻并壁数值附加力变化规律的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2000.
- [5] 马巍, 王大雁. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 21-45.
- [6] 王大雁, 马巍, 常小晓, 等. 冻融循环作用对青藏黏土物理力学性质的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4313-4319.
WANG Dayan, MA Wei, CHANG Xiaoxiao, et al. Physico-mechanical properties changes of Qinghai-Tibet clay due to cyclic freezing and thawing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4313-4319.
- [7] 周国庆, 赵晓东, 李生生. 不同温度梯度两种应力路径冻结中砂应力-应变特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 338-343.
ZHOU Guoqing, ZHAO Xiaodong, LI Shengsheng. Stress-strain properties for the frozen media sand at dif-

- ferent temperature gradients during two stress paths[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 338-343.
- [8] 杨维好, 杜子博, 杨志江, 等. 基于与围岩相互作用的冻结壁塑性设计理论[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1857-1862.
YANG Weihao, DU Zibo, YANG Zhijiang, et al. Plastic design theory of frozen soil wall based on interaction between frozen soil wall and surrounding rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1857-1862.
- [9] 梁波, 张贵生, 刘德仁. 冻融循环条件下土的融沉性质试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(10): 1213-1217.
LIANG Bo, ZHANG Guisheng, LIU Deren. Experimental study on thawing subsidence characters of permafrost under frost heaving and thawing circulation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(10): 1213-1217.
- [10] ZOU Y Z, BOLEY C. Compressibility of finegrained soils subjected to closed-system freezing and thaw consolidation[J]. Mining Science and Technology, 2009, 19(5): 631-635.
- [11] KLINOVA G I, AKSENOV V, DZHAKHAN GIROVA N. Thaw-induced deformation properties of frozen soils [J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2010, 47(3): 102-107.
- [12] HANSSON K, LUNDIN L N. Equifinality and sensitivity in freezing and thawing simulations of laboratory and in situ data[J]. Cold Regions Science and Technology, 2006, 44(1): 20-37.
- [13] 杨平, 陈明华, 张维敏, 等. 冻结壁形成及解冻规律实测研究[J]. 冰川冻土, 1998, 20(2): 128-132.
YANG Ping, CHEN Minghua, ZHANG Weimin, et al. Observation of the forming and thawing of frozen walls [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, 20(2): 128-132.
- [14] YAO Xiaoliang, QI Jilin, WU Wei. Three dimensional analysis of large strain thaw consolidation in permafrost [J]. Acta Geotechnica, 2012, 7(3): 193-202.
- [15] GIBSON R E, ENGLAND G L, HUSSEY M L. The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: I. Finite non-linear consolidation of thin homogeneous layers[J]. Geotechnique, 1967, 17(2): 261-273.
- [16] GIBSON R E, SCHIFFMAN R L, CARGILL K W. The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: II. Finite non-linear consolidation of thick homogeneous layers[J]. Geotechnique, 1981, 18(2): 280-293.
- [17] 姚晓亮, 齐吉琳. 融沉系数的人工神经网络预测方法[J]. 冰川冻土, 2011, 33(4): 891-896.
YAO Xiaoliang, QI Jilin. Artificial neural network forecasting method for thaw-settlement coefficient[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(4): 891-896.
- [18] 王效宾, 杨平, 张婷. 人工冻土融沉特性试验研究[J]. 南京林业大学学报, 2008, 32(4): 108-112.
WANG Xiaobin, YANG Ping, ZHANG Ting. Study on thaw settlement behaviour of artificial freezing soil[J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2008, 32(4): 108-112.
- [19] 杨凤学, 张喜发, 冷毅飞, 等. 冻土融化体积压缩系数的经验确定方法[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3432-3436.
YANG Fengxue, ZHANG Xifa, LENG Yifei, et al. Empirical method for determining thawing volume compression coefficient of frozen soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3432-3436.
- [20] TAO X L, MA J R, LIU M, et al. Test on clay structural properties quantitative parameters and frost heave characteristics[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 19(6): 8949-8964.
- [21] 王天亮, 卜建清, 王扬, 等. 多次冻融条件下土体的融沉性质研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 625-632.
WANG Tianliang, BU Jianqing, WANG Yang, et al. Thaw subsidence properties of soils under repeated freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(4): 625-632.
- [22] DALAI D, JAMTS A. Research on consolidation of frozen soils upon thawing[C]// The 6th International Forum on Strategic Technology, 2011: 1295-1300.
- [23] SARTAJ S S, PRAVIN C. Interval based weight initialization method for sigmoidal feedforward artificial neural networks[C]// 2013 2nd AASRI Conference on Computational Intelligence and Bioinformatics, 2014: 19-25.
- [24] WATSON G H, SLUSARCHUK W A, ROWLEY R K. Determination of some frozen and thawed properties of permafrost soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1973, 10: 592-606.