

DOI : 10.16285/j.rsm.2017.S2.009

基于未冻水含量的冻土热参数计算分析

陈之祥^{1,2}, 李顺群^{1,2}, 夏锦红³, 张勋程², 桂超³

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384; 3. 新乡学院 土木工程与建筑学院, 河南 新乡 453003)

摘 要: 为提升冻土温度场预测精度和减少热参数测试工作量, 根据饱和冻土的土、水、冰三相组成, 对基于导热系数的冻土未冻水含量反演公式进行了推导。根据干土和饱和土体的二相构成, 推导了适用于土体矿物导热系数预估的计算公式。实测了粉质黏土在不同负温下的比热和导热系数值, 分别结合比热确定未冻水含量的递推方法和基于导热系数建立的冻土未冻水含量反演公式, 计算得到了粉质黏土在不同负温下的未冻水含量。基于实测和反演获取的未冻水含量, 确定了随不同负温变化的冻土导热系数、比热和潜热。将基于冻土未冻水含量确定的热参数代入数值计算软件 ABAQUS, 获取不同计算热参数下的冻土瞬态温度场计算值。分别将各温度场计算值与模型试验实测值进行了比较, 结果表明, 从未冻水含量角度出发对冻土温度场计算用热参数的测试工作量进行缩减是可行的; 基于 Johansen 法反演获取未冻水含量, 进而确定的热参数能够较好地预测冻土温度场。

关键词: 冻土; 热参数; 导热系数; 比热; 未冻水

中图分类号: TU445

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2017) 增 2 - 0067 - 08

Calculation of frozen soil thermal parameters considering unfrozen water content

CHEN Zhi-xiang^{1,2}, LI Shun-qun^{1,2}, XIA Jin-hong³, ZHANG Xun-cheng², GUI Chao³

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei, 430071, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin 300384, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Xinxiang University, Xinxiang, Henan 453003, China)

Abstract: In order to improve the prediction accuracy of frozen soil temperature field and reduce the testing work load of thermal parameter, the inversion formula of unfrozen water content is deduced based on the thermal conductivity and the three-phase composition of soil, water and ice in saturated frozen soil. According to the two-phase structure of dry soil or saturated soil, a formula for predicting thermal conductivity of soil minerals is derived. The specific heat and thermal conductivity of silty clay are measured at different negative temperatures; and the unfrozen water contents of silty clay under different negative temperatures are calculated respectively through the recurrence method for unfrozen water content by specific heat and the inversion formula for unfrozen water content by thermal conductivity established in this paper. The thermal conductivity, specific heat and latent heat of frozen soil at different negative temperatures are determined based on the measured and inversed values of unfrozen water content. The thermal parameters calculated by the unfrozen water content are entered into ABAQUS; and the calculated values of frozen soil temperature field with different thermal parameters are obtained. The calculated values of each temperature field are compared with the measured values of the model test. The results show that the reducing testing work load of thermal parameters is feasible from the viewpoint of the unfrozen water content of frozen soil; and the thermal parameters obtained from the inversion of unfrozen water content based on the Johansen method can better predict the frozen soil temperature field.

Keywords: frozen soil; thermal parameters; thermal conductivity; specific heat; unfrozen water

1 引 言

冻土的导热系数、比热等热参数和潜热都是冻土温度场计算的基础性指标^[1]。工程上一般依据实测法或经验法获取冻土的热参数, 随后按照一定的

收稿日期: 2017-06-15

基金项目: 岩土力学与工程国家重点实验室资助课题(No. z013002); 国家自然科学基金(No. 41472253); 天津市自然科学基金重点项目(No. 16JCZDJC39000); 天津市建设系统科学技术项目发展计划(No. 2016-25)。

This work was supported by the Open Research Fund of State Key Laboratory Geomechanics and Geotechnical Engineering Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences(z013002) the National Natural Science Foundation of China(41472253), Key Project of Natural Science Foundation of Tianjin City (16JCZDJC39000), and Tianjin Construction System Science and Technology Project Development Plan(2016-25).

第一作者简介: 陈之祥, 男, 1990 年生, 硕士研究生, 主要从事环境岩土工程方面的研究。E-mail: chen_zhixiang@126.com

通讯作者: 李顺群, 男, 1971 年生, 博士后, 教授, 主要从事岩土力学和基础工程领域的教学和研究工作。E-mail: lishunqun@yeah.net

基本假设和热参数取值方式进行冻土温度场的预测^[2-3]。冻土是由土颗粒、未冻水、冰体和气组成的多相体,冻土热参数随不同负温的变化与其各相组成尤其是冻土未冻水含量相关^[1,4]。界定未冻水与冻土温度场计算用热参数之间的关联度,对于提升寒区工程建设和人工冻结法施工中的温度场预测精度具有重要作用。

随着冻土温度场计算理论的发展,国内外学者对冻土热参数测试和冻结温度场计算进行了相应的研究,周家作等^[4]研究了线热源法对冻土热参数测试的适用性,王丽霞等^[5]对青藏铁路沿线路基冻土的未冻水含量和热参数进行了试验测定,李顺群等^[6]基于混合量热法提出一种直接测定冻土比热的方法。在冻土温度场计算方面,胡俊等^[7]运用有限元软件 ADINA 建立了三维数值模型,研究了大直径杯型冻土壁温度场的发展与分布规律。胡向东等^[8]运用有限元软件 ANSYS 对上海长江隧道盾构掘进中的冻结法施工温度场进行了三维有限元数值分析。蔡海兵等^[9]运用有限元软件 ABAQUS 对地铁联络通道的冻结温度场进行了数值计算。王彦洋等^[10-11]运用 FLAC^{3D} 和 Midas/GTS 对天津地铁 2 号线联络通道的冻结法施工进行了数值模拟,夏锦红等^[12]基于 MATLAB PDE 工具箱对冻土温度场的一维热传导进行了计算。

实际工程中冻土温度场的数值计算依赖于对冻土性质的各向同性假设^[7-12],即将导热系数由矢量假定为标量,虽然与冻土在传热学上的各向异性存在差别,但预测的温度场仍能满足工程需求,因此,基于等效的各向同性热参数预测各向异性的冻土温度场是可行的。温度场预测中首先需要确定冻土在不同负温下的导热系数、比热和未冻水含量,测试工作量极大^[2,13]。受土体特性和测试仪器影响,采用平行试样方法获取的冻土各热参数间存在一定相对误差,主要表现为测试获取的各热参数反演出同一时刻的冻土未冻水含量存在较大差别^[14],将此热参数用于冻土温度场数值预测不能满足精度要求。研究表明,土中固体矿物的导热系数、比热随不同负温的变化极小,冻土导热系数等热参数随不同负温变化主要依据冻土中未冻水含量的变化^[13],因此,依据导热系数、比热与未冻水含量之间的计算关系,建立某一实测热参数与冻土其他热参数之间的计算关系具有理论可行性,利用实测参数推导的计算热参数进行冻土温度场预测,一定程度上减少了热参数的测试工作量,缩小了人为因素对冻土温

度场预测误差的影响。

本文根据饱和冻土的土、水、冰三相组成,对基于导热系数的冻土未冻水含量反演公式进行了推导。根据干土和饱和土体的二相构成,推导了适用于土体矿物导热系数预估的计算公式。实测了粉质黏土在不同负温下的比热和导热系数值,结合比热确定未冻水含量的递推方法和基于导热系数建立的未冻水含量反演公式,计算得到粉质黏土在不同负温下的未冻水含量。基于实测和反演获取的未冻水含量,确定了随不同负温变化的冻土导热系数、比热和潜热。将基于冻土未冻水含量确定的热参数代入数值计算软件 ABAQUS,获取不同计算热参数下的冻土瞬态温度场计算值,并分别比较了各温度场计算值与模型试验实测值。

2 冻土热参数和未冻水含量测试

试验用土为取自天津地铁 2 号线机场延长线沿线的粉质黏土。将土体烘干碾碎并重塑成干密度为 1.8 g/cm^3 的饱和粉质黏土土样,实测其在不同温度下的导热系数、比热及未冻水含量。

2.1 冻土导热系数测试

采用探针法对不同温度下饱和粉质黏土的导热系数进行测试,采用的试验装置和土样见图 1。

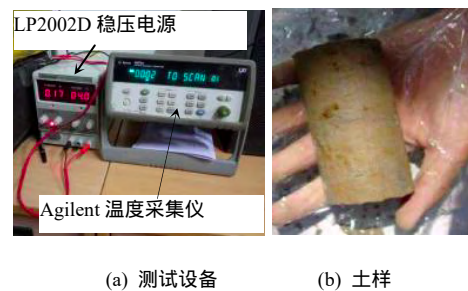


图 1 探针法导热系数测试

Fig.1 Thermal conductivity test by probe method

使用压样法制备(直径 $d \times$ 高度 h)为 $61.8 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 的圆柱试样,在试样外部缠绕透明胶带,模拟温度场冻结试验中模型箱土体的侧向约束。用钢丝在试样圆面的轴心插孔即形成探针孔洞,再将与探针直径相同的 PVC 塑料杆插入探针孔洞。将试样置于恒温试验箱中冻结 60 h,待土样内外温度一致后把 PVC 塑料杆抽出,将长度为 10 cm 的探针插入土样预留的测试孔洞中并开启 Agilent 温度采集仪。约 2 min 后采集仪读取的温度稳定后开启 LP2002D 直流稳压电源,待温度再次稳定后关闭直

流稳压电源并保存温度数据。某试样导热系数测试过程中的温度变化，如图 2 所示。

根据直流稳压电源提供的电压和电流数据计算出加热器提供的功率（本测试的电流和电压分别为 0.16 A 和 3.1 V）和文献[10]提供的方法计算试样的导热系数，整理测试获取的 2 组代表性饱和试样的导热系数。饱和土样的导热系数测试完毕后将土样置于烘干箱烘干，测定干土试样在不同温度下的导热系数，2 组干土试样导热系数的测试平均值如图 3 所示。

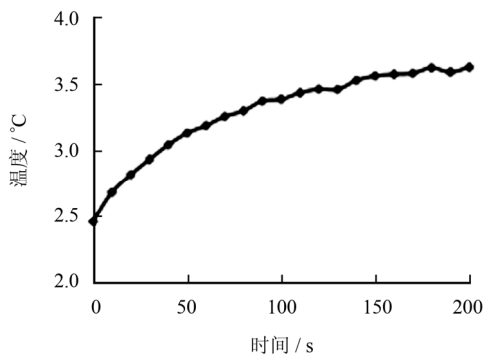


图 2 导热系数测试过程中土样的温度变化
Fig.2 Temperature changes of soil sample in thermal conductivity test

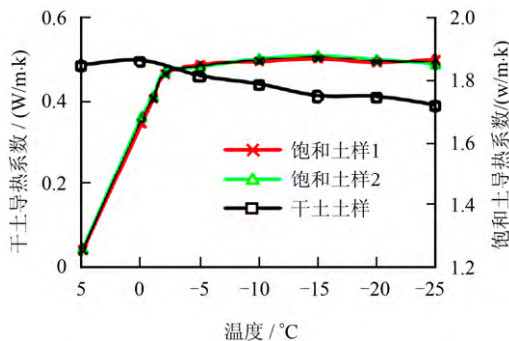


图 3 不同温度下土样的导热系数
Fig.3 Thermal conductivities of soil samples at different temperatures

2.2 冻土比热测试

常规的混合量热法是将具有稳定负温的土样置于温度已知的量热水中，经一定时间混合后土样温度与量热水温度达到一致。依据能量守恒定律，量热器内量热水的热量被量热器和土样共同吸收，由于量热器的比热可以通过量热试验测定，则土样比热可依据量热水释放的热量与量热器吸收热量之差计算获取。

饱和和冻土土样包括有土、水和冰三相，热交换完成后的量热器内的土样具有土水两相，常规的混合量热法测定的为土样从负温至热交换完成温度的

平均比热。测试中未考虑土中冰体的液化潜热，测定的比热与冻土的比热必然不相等^[16]。即使冻土骨架比热已经通过混合量热试验获取，由于水是冰比热的 2 倍，单次的混合量热试验并不能获取某试样中的未冻水含量，需要多次试验获取土骨架比热值和未冻水含量，才能最终确定冻土在某负温下的比热。

常规的量热法计算冻土比热，过程繁琐复杂且精度难以保证，为简化冻土比热测试流程，提升冻土比热测试精度，依据文献[6]提供的修正混合量热法测定干密度为 1.8 g/cm³ 的饱和粉质黏土在不同负温下的比热值。试样尺寸(d×h) = 20.4 mm×25 mm，待土样冻结 24 h 后对土样进行脱模，并将脱模后的试样继续冻结至 60 h 再进行混合量热试验。同时，依据常规的混合量热法测定烘干后的土样比热和饱和土体在常温下的比热，计算得到土体矿物的比热为 0.826 kJ/(kg·°C)。

依据文献[6]提供的方法获取的比热中含有土中水相变释放的潜热，在考虑冻土中相变潜热的温度场计算中应将该测试比热进行修正^[14]，即扣除测试比热中因水的相变而释放的热量。基于冻土比热的未冻水反演方法^[15]，获取不同负温下的未冻水含量，然后将冻土比热测试值扣除水相变成冰部分所释放的潜热^[16]，具体计算方法见章节 3.2，计算获取的冻土实际比热如图 4 所示。

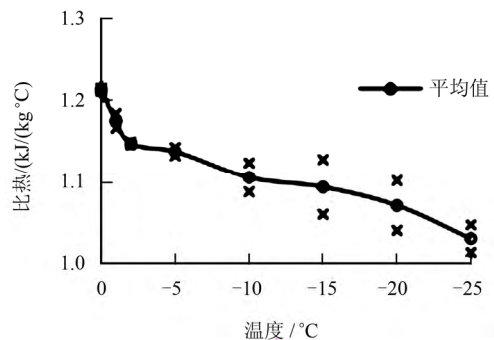


图 4 不同负温下饱和土样的比热
Fig.4 Specific heats of saturated soils samples at different negative temperatures

2.3 冻土未冻水含量测试

采用脉冲核磁共振法测定冻土的未冻水含量，具体操作方法见文献[5]，测试获取的冻土在不同负温下的未冻水含量如图 5 所示。

3 基于未冻水含量的冻土热参数计算

建立了未冻水含量与导热系数、比热之间的计

算关系, 据此对冻土的热参数进行计算和分析。

3.1 基于导热系数反演未冻水含量

Johansen^[17]和 wiener^[18]分别依据多孔介质中各

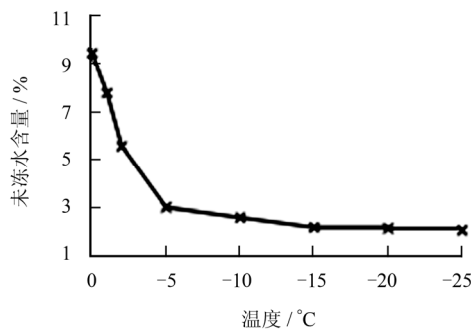


图5 不同负温下土体的未冻水含量

Fig.5 Unfrozen water contents of soil at different negative temperatures

相所占的体积比, 建立了导热系数的理论计算方法。Johansen 提出的饱和冻土导热系数 λ 计算式为

$$\lambda = k_i^{p_i} k_w^{p_w} k_s^{p_s} \quad (1)$$

式中: p_s 、 p_w 、 p_i 分别为冻土中的土颗粒、未冻水、冰体占总体积的相对密变; k_s 、 k_w 、 k_i 分别为土体矿物、水、冰的导热系数。

Wiener 提出了多孔介质的导热系数存在最大最小值, 即

最小值 Wiener_{min} :

$$\lambda = \left[\sum \frac{p_j}{k_j} \right]^{-1} \quad (2)$$

最大值 Wiener_{max} :

$$\lambda = \sum p_j k_j \quad (3)$$

式中: p_j 为第 j 相的体积分数; k_j 为第 j 相的导热系数。由该类计算方法可知, 土体总含水率一定的情况下冻土中的未冻水含量与冰体发育之间总是保持着一定的动态平衡关系, 即冻土中的未冻水含量与其热参数之间具有一定的映射关系。

依据 Johansen、Wiener 提出的冻土导热系数理论计算方法, 结合导热系数测试结果, 可以反演出不同负温下的冻土未冻水含量。由式(1)~(3)推导的基于冻土导热系数的未冻水反演公式为

Johansen :

$$p_w = \frac{\ln \lambda - p_s \ln k_s - (1 - p_s) \ln k_i}{\ln k_i - \ln k_w} \quad (4)$$

Wiener_{min} :

$$p_w = \frac{(k_i / \lambda - p_s k_i / k_s + p_s - 1)}{k_i - k_w} \quad (5)$$

Wiener_{max} :

$$p_w = \frac{\lambda - p_s k_s - (1 - p_s) k_i}{k_w - k_i} \quad (6)$$

未冻水体积含量 p_w 与未冻水含量 W_u 之间可由式(7)计算。

$$W_u = \left(\frac{m_i}{\rho_i} + \frac{m_s}{d_s} \right) \frac{p_w}{1 - p_w} \quad (7)$$

式中: m_s 、 m_i 分别为冻土中的土颗粒、冰体占总质量的比重; ρ_i 、 d_s 分别为冰的密度和土体的相对密度。

构成土骨架的矿物导热系数一般依据其微观组成预估获取^[19], 为了获取土体矿物的导热系数值 k_s , 依据干土的土气二相组成和饱和常温土体的土水二相组成, 结合 Johansen 的导热系数预估方法^[17], 推导的土体矿物导热系数计算公式为

$$k_s = 10^{\frac{\lg \lambda - V_p \lg k_p}{V_s}} \quad (8)$$

式中: V_s 、 V_p 分别为饱和土试样中土体矿物和孔隙(水)的体积。

根据图3的干土导热系数及饱和土样在正温阶段的导热系数, 结合式(8)计算得到土体矿物的导热系数均值为 1.904 W/m·°C。对图3的2组饱和土样导热系数取均值, 依据式(4)~(7)对冻土中的未冻水含量进行反演, 计算结果见表1。

表1 不同计算方法获取的冻土未冻水含量
Table 1 Unfrozen water contents of frozen soil by different calculation methods

| 温度 / °C | 不同计算方法获得冻土未冻水含量/% | | | |
|---------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|
| | Johansen | Wiener _{max} | Wiener _{min} | Wiener 均值 |
| 0 | 6.85 | 10.51 | 4.64 | 7.57 |
| -1 | 5.04 | 7.76 | 3.63 | 5.70 |
| -2 | 3.16 | 4.77 | 2.64 | 3.71 |
| -5 | 2.60 | 3.85 | 2.35 | 3.10 |
| -10 | 2.41 | 3.16 | 2.14 | 2.65 |
| -15 | 1.98 | 2.81 | 2.04 | 2.43 |
| -20 | 2.15 | 3.27 | 2.18 | 2.73 |

3.2 比热反演未冻水含量

考虑冻土中水相变释放的潜热, 结合比热加权计算方法^[4, 15], 负温阶段的冻土测试比热与冻土各相满足公式:

$$C_t = m_i C_i + m_s C_s + m_w C_w + \Delta m_i L \quad (9)$$

式中: C_t 为冻土试样的混合量热测试值; C_i 、 C_s 、 C_w 分别为冰体、土颗粒、水的比热; Δm_i 为测量前一阶段至该阶段的冰体增量的质量占比; L 为水的

结冰和融化潜热。由于冻土中各相在冻结前后满足质量守恒定律，即

$$m_i + m_s + m_w = 1 \quad (10)$$

将式 (10) 代入式 (9) 进一步推导，可得

$$m_w = \frac{C_t - (1 - m_s)C_i + m_s C_s - m'_w L}{C_w - C_i - L} \quad (11)$$

式中： m'_w 为冻结前一阶段的未冻水质量占比。由式 (11) 可从正温时土体初始含水率占土样的质量比，递推计算出负温下的冻土未冻水质量占土样的质量比 m_w 。在此基础上，依据式 (12) 可计算出不同负温下的冻土未冻水含量。

$$W_u = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% \quad (12)$$

根据测试比热值，结合式(11)、(12)反演得到不同负温下的冻土未冻水含量，见表 2，不同负温下的冻土实际比热见图 4。

表 2 基于冻土比热反演未冻水含量

Table 2 Unfrozen water contents calculated by frozen heat inversion

| 温度 /°C | 测试比热 /((kJ/(kg·°C))) | 未冻水含量 /% | 实际比热 /((kJ/(kg·°C))) |
|--------|----------------------|----------|----------------------|
| 0 | 34.68 | 8.80 | 1.212 |
| -1 | 7.28 | 6.98 | 1.174 |
| -2 | 5.71 | 5.62 | 1.146 |
| -5 | 2.68 | 5.16 | 1.136 |
| -10 | 6.14 | 3.66 | 1.104 |
| -15 | 3.14 | 3.05 | 1.092 |
| -20 | 4.66 | 1.98 | 1.069 |

3.3 未冻水实测值与计算值对比

将图 5 实测获取的饱和粉质黏土在不同负温下的未冻水含量与表 1、2 中计算获取的未冻水含量进行对比，结果如图 6 所示。从图中可以看出，实测获取的未冻水含量与反演计算值并不相同，与既有的研究是吻合的^[14]。在一定范围内未冻水测试误差较大，产生的原因从以下几方面分析，(1) 操作误差和仪器精度不足；(2) 平行试样制作存在误差；(3) 计算值依据的计算公式精度不够，主要表现为比热反演公式是将某阶段的冰体相变质量等价至某一时

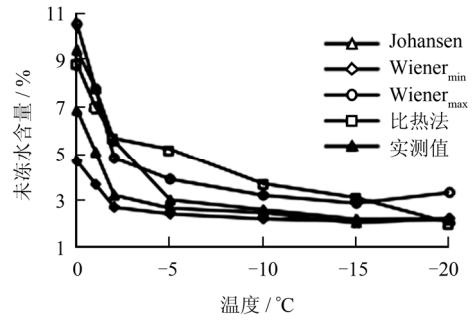


图 6 不同负温度下未冻水实测值与计算值

Fig.6 Measured values and calculated values of unfrozen water at different negative temperatures

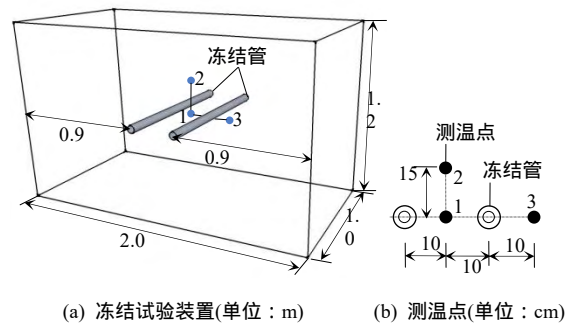
刻，同时导热系数计算公式存在微量误差，并不能精确预估冻土未冻水含量。

4 土体温度场冻结试验与数值计算

为评估基于未冻水含量获取的计算热参数，对冻土温度场预测精度的影响。进行了模型箱冻结试验，同时采用数值计算软件 ABAQUS，对模型箱冻结试验中土体温度场的演变进行了预测。

4.1 土体温度场冻结试验

采用的模型箱净尺寸为 2.0 m×1.0 m×1.2 m，模型箱采用钢板和槽钢组装而成。将取自天津地铁 2 号线机场延长线沿线的粉质黏土分层填入模型槽，并进行土体的固结和饱和，确定其干密度约为 1.8 g/cm³。随后采用冻结管对模型箱中土体进行冻结，模型槽中特征点埋设有 K 型测温探头。模型槽试验装置及温度测点布置如图 7 所示，其中测点 1 位于两根冻结管之间，测点 2、3 位于冻结管外侧。



(a) 冻结试验装置(单位: m) (b) 测温点(单位: cm)

图 7 冻结试验装置和测点布置

Fig.7 Freezing test equipment and arrangement of measuring points

4.2 冻土温度场数值计算

采用 ABAQUS 软件进行冻土温度场的数值计算，依据模型箱尺寸及冻结装置建立三维数值计算模型。冻结管提供的冷端温度为 -25 °C，模型箱外围布置有 4 cm 厚保温棉，底面与室内地面直接接

触。冻结箱周围温度约为 $6.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，冻结箱上表面与空气对流换热系数取 $10\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

假定土中水的相变温度在 $0\sim-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间，其他阶段潜热转换为冻土比热进行温度场的计算。采用导热系数、比热随不同负温变化而变化的热参数代入方式，不考虑土体冻胀力对模型温度场的影响，各计算热参数的取值方法见表 3。

计算 1 的未冻水含量、导热系数和比热均采用实测值，计算 2~4 采用实测的未冻水含量，分别基于 Johansen 法、Wiener 最大值法和 Wiener 最小值法计算得到导热系数值，并基于冻土未冻水含量，

表 3 各计算热参数的取值方法

| 计算 | 实测参数 | 推导方法 | 推导参数 |
|----|-------------------|--------------------------------|----------------|
| 1 | W_u, λ, C | | |
| 2 | W_u | Johansen、加权平均法 | λ, C |
| 3 | W_u | Wiener _{max} 、加权平均法 | λ, C |
| 4 | W_u | Wiener _{min} 、加权平均法 | λ, C |
| 5 | λ | Johansen 反演、加权平均法 | W_u, C |
| 6 | λ | Wiener _{max} 反演、加权平均法 | W_u, C |
| 7 | λ | Wiener _{min} 反演、加权平均法 | W_u, C |
| 8 | C | 加权平均法反演、Johansen | W_u, λ |
| 9 | C | 加权平均法反演、Wiener _{max} | W_u, λ |
| 10 | C | 加权平均法反演、Wiener _{min} | W_u, λ |

注： W_u, λ, C 分别为冻土的未冻水含量、导热系数、比热。

结合加权计算原理获取其比热值。计算 5~7 采用实测获取的导热系数，分别依据 Johansen 法、Wiener 最大值法和 Wiener 最小值法反演冻土的未冻水含量，进而依据冻土的未冻水含量计算其比热值。计算 8~10 用实测获取的比热，采用考虑潜热的冻土比热计算方法，反演获取冻土的未冻水含量，进而基于冻土未冻水含量从 Johansen 法、Wiener 最大值法和 Wiener 最小值法的角度计算冻土的导热系数。

5 结果分析

将模型箱冻结试验获取的冻土温度场实测值与数值计算值进行整理，各测点的温度场计算结果如图 8 所示。计算 1 在不同冻结阶段的温度场误差值见表 4。由图 8 结合表 4 可知，2 根冻结管之间的测点 1 在冻结初期误差较大，随着冻结时间的深入，温度场计算误差逐渐缩小。测点 1 位于冻结管之间，冷源使得水分迁移剧烈发生，不考虑水分迁移的冻土温度场计算无法较好地预估土体的温度场演变。测点 1 在冻结 30 h 内的误差较大，测点 2、3 位于冻结管外侧，降温幅度较慢，在冻结 30 h 内的误差较测点 1 小，其主要原因为水分迁移在远离冷源的测点不显著和冷源对测点的影响较晚，导致了

其误差在冻结 60 h 内均较大，各温度场计算值与实测值的误差见表 5。

由表 5 可知，冻结 30 h 内冻土温度场的计算误差均较大，随着冻结时间的持续，各冻土温度场计算误差均逐渐缩小。在冻土温度场计算中，基于实测导热系数依据 Johansen 法反演未冻水含量，进而推导的热参数在温度场计算中精度最高（计算 5），冻结过程中的温度场平均误差为 $0.75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。基于 Wiener_{min} 反演未冻水含量，进而推导获取的热参数在温度场计算中精度仍能满足要求（计算 7），其在冻结过程中的平均误差为 $0.83\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。基于实测比热

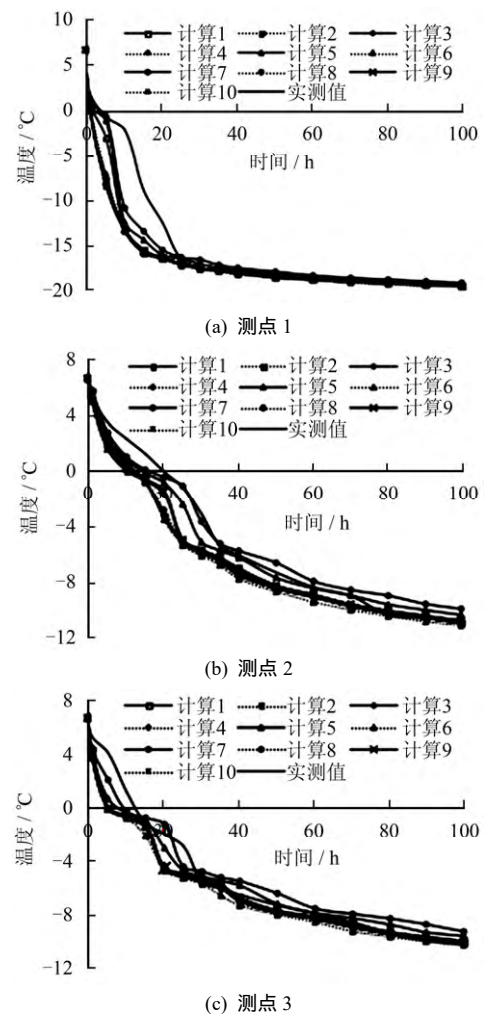


图 8 冻土温度场实测值与计算值

Fig.8 Measured values and calculated values of frozen soil temperature field

表 4 各测点在不同时段的温度场误差

| 测点 | 不同时刻(h)温度场误差/ $^{\circ}\text{C}$ | | | 平均误差/ $^{\circ}\text{C}$ |
|----|----------------------------------|------|------|--------------------------|
| | 30 | 60 | 90 | |
| 1 | 2.98 | 0.11 | 0.23 | 1.25 |
| 2 | 1.38 | 1.11 | 0.37 | 0.93 |
| 3 | 1.23 | 0.38 | 0.18 | 0.63 |

表 5 不同时段温度场计算误差
Table 5 Calculation errors of temperature field within different duration

| 计算 | 不同时段(h)温度场计算误差/°C | | | 平均误差 /°C |
|----|-------------------|------|------|-------------|
| | 30 | 60 | 90 | |
| 1 | 1.87 | 0.53 | 0.26 | 0.94 |
| 2 | 2.23 | 0.57 | 0.27 | 1.09 |
| 3 | 2.24 | 0.56 | 0.27 | 1.10 |
| 4 | 2.20 | 0.58 | 0.27 | 1.09 |
| 5 | 1.47 | 0.27 | 0.30 | 0.75 |
| 6 | 2.17 | 0.78 | 0.43 | 1.17 |
| 7 | 1.13 | 0.59 | 0.66 | 0.83 |
| 8 | 2.10 | 0.45 | 0.23 | 1.00 |
| 9 | 2.11 | 0.45 | 0.23 | 1.00 |
| 10 | 2.07 | 0.47 | 0.24 | 1.00 |

反演未冻水含量，进而确定的冻土热参数在温度场计算中的平均误差为 1 °C。计算 5、7 基于导热系数反演的未冻水含量，推导热参数并预测的温度场精度均高于计算 1 的基于实测热参数预测的温度场。因此，从冻土未冻水含量角度出发，对用于冻土温度场计算的热参数进行计算是可行的，该类计算和推导在保证温度场计算精度前提下将温度场计算用热参数的测试工作量由导热系数、比热和未冻水简化为导热系数 1 项。

6 结 论

(1) 依据饱和冻土的三相组成，推导了基于导热系数的冻土未冻水含量反演公式，建立了一种适用于土中固体矿物导热系数预估的计算公式。

(2) 实测热参数和计算获取的热参数在冻土温度场预测中均存在误差，基于计算热参数得到的冻土温度场最大平均误差保持在可控范围内。

(3) 通过 Johansen 法反演获取未冻水含量，进而依据反演的未冻水含量获取冻土比热和潜热，可将温度场计算热参数测试工作量由导热系数、比热和未冻水简化为导热系数 1 项，且能较好地预测冻土温度场。

(4) 从热参数反演冻土未冻水含量的角度出发，建立某一实测热参数与冻土其他热参数之间的计算关系是可行的。

参 考 文 献

[1] 张楠, 夏胜全, 侯新宇, 等. 土热传导系数及模型的研究现状和展望[J]. 岩土力学, 2016, 37(6): 1550 - 1562.
ZHANG Nan, XIA Sheng-quan, HOU Xin-yu, et al. Review on soil thermal conductivity and prediction

model[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(6): 1550 - 1562.

- [2] 孙立强, 任宇晓, 闫澍旺, 等. 人工冻土冻结过程中热-力耦合的数值模拟方法研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增刊 2): 137 - 142.
SUN Li-qiang, REN Yu-xiao, YAN Shun-wang, et al. Numerical simulation method for thermal-stress coupling in artificial freezing process[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(Supp.2): 137 - 142.
- [3] 李宁, 徐彬, 陈飞熊. 冻土路基温度场、变形场和应力场的耦合分析[J]. 中国公路学报, 2006, 19(3): 1 - 7.
LI Ning, XU Bin, CHEN Fei-xiong. Coupling analysis of temperature, deformation and stress field for frozen soil roadbed[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2006, 19(3): 1 - 7.
- [4] 周家作, 韦昌富, 魏厚振, 等. 线热源法测量冻土热参数的适用性分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 681 - 687.
ZHOU Jia-zuo, WEI Chang-fu, WEI Hou-zhen, et al. Applicability of line heat source method in measuring thermal parameters of frozen soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(4): 681 - 687.
- [5] 王丽霞, 胡庆立, 凌贤长, 等. 青藏铁路冻土未冻水含量与热参数试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(10): 1660 - 1663.
WANG Li-xia, HU Qing-li, LING Xian-chang, et al. Test study on unfrozen water content and thermal parameters of qinghai-tibet railway frozen silty clay[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2007, 39(10): 1660 - 1663.
- [6] 李顺群, 王杏杏, 王彦洋, 等. 基于混合量热法的冻土比热计算方法[P]. 中国, ZL201610995394, 2016-11-12.
LI Shun-qun, WANG Xing-xing, WANG Yan-yang, et al. The calculation method of frozen soil specific heat based on mixing calorimetry[P]. China, ZL201610995394, 2016-11-12.

- [7] 胡俊, 杨平. 大直径杯型冻土壁温度场数值分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 523 - 531.
HU Jun, YANG Ping. Numerical analysis of temperature field within large-diameter cup-shaped frozen soil wall[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(2): 523 - 531.
- [8] 胡向东, 陈锦, 汪洋, 等. 环形单圈管冻结稳态温度场解析解[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 874 - 880.
HU Xiang-dong, CHEN Jin, WANG Yang, et al. Analytical solution to steady-state temperature field of single-circle-pipe freezing[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(3): 874 - 880.
- [9] 蔡海兵, 黄以春, 庞涛. 地铁联络通道三维冻结温度场有限元分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(6): 1436 - 1443.
CAI Hai-bing, HUANG Yi-chun, PANG Tao. Finite element analysis on 3D freezing temperature field in metro connected aisle construction[J]. **Journal of Railway Science and Engineering**, 2015, 12(6): 1436 - 1443.
- [10] 王彦洋. 冻土的热参数与土冻结过程的热力耦合分析[D]. 天津: 天津城建大学, 2015.
WANG Yan-yang. The analysis of thermal parameters for frozen soil and coupled thermal-stress for the process of soil freezing[D]. Tianjin: Tianjin Chengjian University, 2015.
- [11] 王彦洋, 唐华瑞, 李顺群, 等. 考虑温度梯度变化的地铁联络通道冻结法施工三维数值模拟[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(6): 135 - 140.
WANG Yan-yang, TANG Hua-rui, LI Shun-qun, et al. Temperature gradient based 3D numerical simulation for freezing construction of a metro tunnel cross passage[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2015, 52(6): 135 - 140.
- [12] 夏锦红, 张勋程, 夏元友, 等. 基于 MATLAB PDE 工具箱的土体冻结温度场模拟[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2017, 42(1): 190 - 195.
XIA Jin-hong, ZHANG Xun-cheng, XIA Yuan-you, et al. Simulation of freezing temperature field of soil based on MATLAB PDE Toolbox[J]. **Journal of Guangxi University(Natural Science Edition)**, 2017, 42(1): 190 - 195.
- [13] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
XU Xiao-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin. Physics of frozen soil[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [14] 陈之祥, 李顺群, 王杏杏, 等. 热参数对冻土温度场的敏感性分析[J]. 水利水电技术, 2017, 48(5): 139 - 144.
CHEN Zhi-xiang, LI Shun-qun, WANG Xing-xing, et al. Analysis on impact and sensitivity of thermal parameters on frozen soil temperature field[J]. **Water Resources and Hydropower Engineering**, 2017, 48(5): 139 - 144.
- [15] 李顺群, 王杏杏, 张少峰, 等. 利用比热计算确定土冻结过程中未冻水含量的方法[P]. 中国, ZL2015107491-738, 2016-01-13.
LI Shun-qun, WANG Xingxing, ZHANG Shaofeng, et al. Determination of unfrozen water content in soil freezing process by using specific heat calculation[P]. China, ZL2015107491738, 2016-01-13.
- [16] 夏锦红, 李顺群, 夏元友, 等. 一种考虑显热和潜热双重效应的冻土比热计算方法[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 973 - 978.
XIA Jin-hong, LI Shun-qun, XIA Yuan-you, et al. Specific heat of frozen soil considering sensible and latent heat of pore water[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(4): 973 - 978.
- [17] JOHANSEN O. Thermal conductivity of soils[D]. Trondheim, Norway: University of Trondheim, 1975.
- [18] WIENER O. Abhandl math-phys[M]. Leipzig: [s. n.], 1912: 509.
- [19] 谈云志, 喻波, 胡新江, 等. 非饱和土热导率预估模型研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 1): 129 - 133.
TAN Yun-zhi, YU Bo, HU Xin-jiang, et al. Prediction model for thermal conductivity of unsaturated soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(Supp.1): 129 - 133.