

DOI: 10.11779/CJGE201809015

基于混合量热原理的冻土比热容测试方法

李顺群^{1, 2}, 王杏杏^{1, 2}, 夏锦红³, 申道明³

(1. 天津城建大学土木工程学院, 天津 300384; 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系, 河南 新乡 453003)

摘要: 土的比热容是冻结法施工中的重要参数, 但既有混合量热法得到比热容是某一负温到平衡正温这一阶段的平均比热容而不是该负温点的比热容。根据黏土在冻结过程中孔隙水的相变随负温增加逐渐发生的客观事实, 基于传统混合量热法建立了冻土比热容的递推算法。首先, 待测试冻土试样分别由某一负温的左右两个微小增量开始, 经混合量热法各个步骤后到达热平衡状态。则由负温开始至热平衡状态, 试样吸收的热量 Q , 必然等于负温至 0°C 和 0°C 至平衡温度这两个阶段热量交换 Q_1 和 Q_2 的代数和。由于不存在相变, 试样从 0°C 至热交换平衡温度需要的热量可以由常规的混合量热法获得。因此, 试样由负温开始至 0°C 的热量可以通过两者相减得到, 并可进一步得到试样由该负温左侧增量升温至该负温右侧增量需要的热量。最终, 试样在该负温点的比热容可以根据比热容的定义得到。本文建立的冻土比热容递推算法能得到某温度点的比热容而非某温度段的平均比热容, 且包含了潜热的贡献, 因而更为合理有效。

关键词: 比热容; 未冻水含量; 混合量热原理; 潜热; 递推方法

中图分类号: TU411.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)09-1684-06

作者简介: 李顺群(1971-), 男, 博士, 博士后, 教授, 从事土力学和基础工程方面的教学和研究工作。E-mail: lishunqun@sina.com。

Test methods for specific heat capacity of frozen soil based on principles of mixing calorimetry

LI Shun-qun^{1,2}, WANG Xing-xing^{1,2}, XIA Jin-hong³, SHEN Dao-ming³

(1. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil

Characteristics and Engineering Environment, Tianjin 300384, China; 3. Department of Civil Engineering and Architecture, Xinxiang
University, Xinxiang 453003, China)

Abstract: The specific heat capacity of soil is an important parameter in the ground freezing method. However, the specific heat capacity obtained by the exiting mixed calorimetric methods is the average specific heat capacity from a negative temperature to the equilibrium positive temperature rather than that at the negative temperature. According to the fact that the phase transition of pore water occurs gradually with temperature change in freezing process, a recursive formula to the specific heat capacity of obtain frozen soil is established based on the exiting mixing calorimetry methods. First of all, two small equal temperature increments, a negative and a positive, are set for the negative temperature of the frozen soil. Then, two samples are prepared respectively at the two temperatures and the mixing calorimetry method is performed in order to arrive at each thermal equilibrium state. From the negative temperature state to the thermal equilibrium one, the heat absorbed by the sample, Q , will be equal to the total aequum of the two stages, Q_1 for negative temperature to 0°C and Q_2 for 0°C to equilibrium temperature. Since there is no phase change and latent heat, the heat required by the sample from 0°C to the equilibrium temperature can be obtained by the conventional mixing calorimetry. Therefore, the required heat for the sample from negative temperature to 0°C can be obtained by subtracting Q_2 from Q . And Further more, the required heat can be obtained for the given temperature from the negative increment to the positive increment. Finally, the specific heat capacity of the sample at the negative temperature can be obtained according to the definition of the specific heat capacity. From the proposed method, the capacity at any temperature, other than an average over a temperature range, can be calculated. And the proposed method can take latent heat into account. Therefore, it is more reasonable and effective.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41472253); 天津市自然科学基金重点项目(16JCZDJC39000); 天津市建设系统科学技术项目发展计划项目(2016-25); 天津市建设工程技术研究所 2017 年财政资金项目(JGY18-01)

收稿日期: 2017-04-01

*通讯作者 (E-mail: lishunqun@sina.com)

Key words: specific heat capacity; unfrozen water content; principle of mixing calorimetry; latent heat; recursive formula

0 引言

比热容是指单位质量的某种物质温度改变1℃所需要的热量。冻土是复杂的多相体, 除了一般未冻土含有的固相、液相和气相外, 冰相是对其物理力学性质具有更大影响力相成分^[1-3]。而冰相的生成与融化, 取决于两个重要的热参数——比热容和导热系数。

在冻结法施工中, 冻土的比热容是设计、冷冻、开挖、构筑、解冻等环节的关键参数。同时, 研究冻土的比热容, 对寒冷地区的工程建设也具有重要的理论意义和工程价值。

在土的冻结和融化过程中, 孔隙水和孔隙冰的含量是不断变化的, 即土体在不同负温时的含冰量和未冻水含量是不同的。由于水比热容约是冰比热容的二倍, 且水冰相变潜热在宏观上也表现为一定量的热交换, 故不同冻结温度的土, 其比热容并不相等^[4-5]。常规的冻土比热容计算方法, 是基于各相成分的比热容按质量加权叠加得到的, 需要测量冻土骨架比热容和未冻水含量两个指标^[6]。由于目前未冻水含量的测试方法一般是间接方法, 测量方法和计算理论并不健全, 因此冻土的未冻水含量尚难以准确确定。所以, 根据未冻水含量变化, 来计算冻土比热容的方法存在理论上的不足。

目前, 测试冻土比热容的方法主要有混合量热法、绝热量热器法和加热冷却法等^[7-10]。比热容的常规混合量热方法具有原理简单、概念清晰等特点, 适用于比热容不随温度变化的材料。由于冻土比热容随温度的变化是变化的, 因此常规混合量热法在测试冻土比热容时存在概念模糊、系统误差大等弊病。对其进行必要改造以便适用于冻土的比热容测试, 对研究冻土的物理力学性质和温度场演变是必要的。

1 对常规混合量热法的辨析

混合量热法是基于热量守恒定律建立起来的。即能量在转化和转移过程中, 总量是保持不变的。

1.1 冻土比热容的常规混合量热法

常规的冻土比热容混合量热方法, 是在获得冻土骨架比热容和对应温度的未冻水含量后, 按照混合物比热容的可加性, 由各组分比热容根据其质量占比进行加权后得到的^[11-12]。未冻状态时土的比热容 C_{du} 为

$$C_{du} = \frac{C_{su} + wC_w}{1+w} , \quad (1)$$

式中, C_{su} 、 C_w 和 w 分别为未冻土骨架的比热容、水的比热容和含水率。冻结状态时的比热容 C_{df} 为

$$C_{df} = \frac{C_{af} + (w - w_u)C_i + w_u C_w}{1+w} , \quad (2)$$

式中, C_{af} 、 C_i 和 w_u 分别为冻土骨架的比热容、冰的比热容和未冻水含量。一般情况下, C_w 和 C_i 随温度的变化幅度很小, 常被视为常数。即 $C_w=4.18 \text{ kJ/kg}\cdot\text{C}$, $C_i=2.09 \text{ kJ/kg}\cdot\text{C}$ 。

混合量热法测试比热容的依据是能量守恒原理。在不考虑热量损失的情况下:

$$Q_{吸} = Q_{放} , \quad (3)$$

式中, $Q_{吸}$ 为待测试样吸收的热量, $Q_{放}$ 为量热水和量热器释放的热量。

首先, 在量热器中装入温度和质量均已知的量热水。然后, 将温度已知、质量确定的冻土骨架放入量热器中。由于量热水和冻土骨架之间存在温差, 两者之间必然发生热交换。第三, 测试平衡温度。经过一段时间后, 量热器内最初由冻土骨架和量热水组成的混合物, 将会达到一个平衡状态。此时, 组成混合物的各个组分其温度将不再发生变化, 并且各组分的温度是相等的。不考虑热量损失的情况下, 冻土骨架吸收的热量将等于量热水和量热器释放的热量之和, 即

$$C_{af}m(t'-t) = (CM + K)(T - t') , \quad (4)$$

式中, m 和 M 分别为冻土骨架和量热水的质量; K 表示量热器的热容量(kJ/C); t 、 T 和 t' 分别为冻土骨架的初始温度、量热水和量热器的初始温度、热交换平衡时的温度。

冻土经常被视为是由冻土骨架、固相冰、液体水和气组成的四相复合体系。与固相、冰相和液相相比, 气相的比热容相对较小。而且, 气相的质量也可以忽略不计。因此, 在热交换过程中, 可以忽略气相的质量热容。所以, 对于含有冻土骨架、固相冰和液相水的冻土, 热交换过程中吸收的能量等于这三相材料的吸热量之和, 即

$$Q_{吸} = Q_{固} + Q_{冰} + Q_{水} , \quad (5)$$

式中, $Q_{固}$ 、 $Q_{冰}$ 、 $Q_{水}$ 分别为冻土骨架、冰相和水相吸收的热量, 即

$$Q_{固} = C_{af}m(t' - t) , \quad (6)$$

$$Q_{冰} = C_i(wm - m_w)(t' - t) , \quad (7)$$

$$Q_{水} = c_w m_w(t' - t) , \quad (8)$$

式中, m_w 为未冻水质量。因此,

$$m_w = \frac{\frac{(CM + K)(T - t')}{(t' - t)} - C_{af}m - c_iwm}{c_w - c_i} . \quad (9)$$

则未冻水含量 w_u 为

$$w_u = \frac{m_w}{m} \times 100\% \quad . \quad (10)$$

所以, 通过冻土骨架的量热测试可以得到骨架的比热容 C_{af} , 即式(4); 通过冻土的量热测试可以得到未冻水含量 w_u , 即式(10)。将两个参数代入式(2), 即可得到冻土试样在某一待测负温时的比热容。

1.2 常规混合量热法的不足

上述测试冻土比热容的方法是国内外常用的方法之一, 但存在着比较明显的弊端, 主要表现在以下两个方面。

(1) 该方法适用于比热容为常数的理想材料, 很难应用于比热容随温度变化的复合材料。根据式(2), 传统混合量热法得到的比热容是从试样初始温度 t 到热平衡温度 t' 的平均比热容, 而不是某一温度点的比热容。如果材料的比热容不随温度的变化而变化, 则测试是可靠有效的; 如果待测材料的比热容随温度的变化而变化, 测试结果则是无效的。实际上, 即使处于未冻结状态, 作为复合材料的天然地质材料, 土的比热容也会随着温度的改变而变化。

(2) 该测试方法只考虑了热交换过程中的显热, 而没有考虑与相变相关联的潜热。根据物质相态的特点, 热量交换可分为显热和潜热两种形式。当物质的温度发生变化而其相态不发生改变时, 吸收或放出的热量称为显热。当物质的温度不发生变化而其相态发生相变时, 吸收或放出的热量称为潜热。比如, 1 kg 液态水温度升高 10°C, 需要吸收的热量为 41.8 kJ, 这部分热量称为显热。在一个标准大气压下, 冰融解为同温度的水或水冻结为同温度的冰, 需要的热量为 335 kJ/kg, 这部分热量称为潜热。可见, 相对于显热, 水的结冰潜热是相当大的。研究土冻结和融化过程中的热量交换, 不考虑潜热的作用是不对的。

2 递推算法的理论体系

即使不考虑土颗粒比热容随温度的变化, 冻土的比热容也会随温度的变化而变化。原因主要在于, 受矿物成分及其分布影响, 土中孔隙水的结冰是随着温度的降低逐步发生的, 而并非仅仅发生在 0°C^[13]。即未冻水含量随负温的变化是非线性的, 且即使降温至 -20°C, 冻土中仍然有一定量的未冻水。液态水的比热容约为 4.18 kJ/kg·°C, 而冰的比热容为 2.09 kJ/kg·°C。冻结过程导致的水/冰含量变化, 必然引起冻土比热容发生变化。另外, 冻结过程中, 不断有孔隙水相变为孔隙冰, 而水/冰的相变潜热是 335 kJ/kg。实际上, 这部分能量的最终表现形式也是热量。由于水相变为冰是一个基于温度的非线性过程, 因此进一步加剧了比热容在冻结过程中的变化幅度。

根据比热容的定义, 物质在某温度点的比热容应等于单位质量的该种物质其能量变化对温度的导数。因此, 冻土在温度 t 的比热容, 等于单位质量的冻土在温度 t 的能量变化率。为获得冻土在温度 t 的能量变化率, 在 t 的左右各取一个微小增量 $-\Delta t$ 和 Δt , 如图 1 所示。如果能得到冻土试样从温度 $(t-\Delta t)$ 到温度 $(t+\Delta t)$ 的能量变化量, 则将该变化量除以 $2\Delta t$ 即可得到温度 t 时的比热容近似值。且当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 可得到比热容的真值。

混合量热法测量物质的比热容时, 采用的媒介是液态水, 即将待测物质放入装有液态水的量热器中, 以便两者进行热交换。在整个热交换过程中, 媒介水必须全部始终处于液态而不能冻结为冰, 否则不仅会对量热器造成损害, 还会因为结冰数量是未知数而无法计算最终的热交换量。因此, 采用混合量热法测试冻土的比热容时, 平衡时的温度一定要大于 0°C。

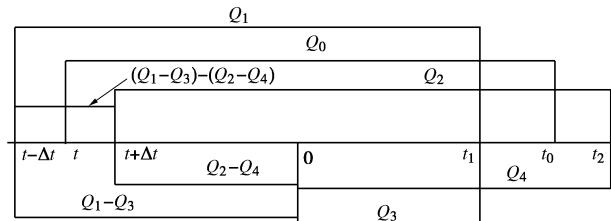


图 1 冻土比热容的递推算法示意图

Fig. 1 Sketch map of recursive algorithm for specific heat capacity of frozen soil

因此, 对于冻结土样的比热容测试, 热交换过程可以分成两个阶段, 即温度低于 0°C 的有冰阶段和温度大于 0°C 的无冰阶段。在无冰阶段, 土中液态水的质量是一个常数。此时, 作为固体颗粒和孔隙水两种材料混合物的土样, 其比热容也必然是一个常数。而在有冰阶段, 土中液态水的含量随温度是不断变化的, 相应的比热容也必然随着温度的变化而变化。

为了得到试样从温度 $(t-\Delta t)$ 到温度 $(t+\Delta t)$ 的能量变化, 需要两个平行冻土试样和一个常温试样。两个冻土平行试样分别进行从 $(t-\Delta t)$ 和从 $(t+\Delta t)$ 的混合量热测试。常温试样, 则需要进行从 0°C 开始的混合量热试验。由于无冰阶段土的比热容是常数, 则将从温度 $(t-\Delta t)$ 和从温度 $(t+\Delta t)$ 到平衡温度时试样吸收的热量减去从 0°C 到平衡温度时试样吸收的热量, 可以得到两个冻结平行试样在有冰阶段的热交换量。据此, 可以得到从温度 $(t-\Delta t)$ 到温度 $(t+\Delta t)$ 的能量变化, 并可以进一步得到冻土试样在温度 t 的比热容。

3 实施过程

欲求冻土在温度 t 时的比热容, 可以按照以下步

骤组织实施。

(1) 测试土的密度 ρ , 含水率 w 和质量 m 。

(2) 制备 3 个平行试样, 分别命名为土样 A, 土样 B、土样 C。

(3) 将土样 A 置于冷冻箱内冷冻 12 h 以上, 冷冻温度设置为 $(t - \Delta t)$ 。

(4) 将冷冻好的土样 A 置于量热器中进行混合量热试验, 量热器内水的温度为 T_1 , 水的质量为 M_1 。测试热平衡时的温度, 并记为 t_1 。

则冻土试样 A 从负温 $(t - \Delta t)$ 升温至 t_1 吸收的热量 Q_1 为

$$Q_1 = (CM_1 + K)(T_1 - t_1) \quad (11)$$

(5) 将土样 B 置于冷冻箱内冷冻 12 h 以上, 冷冻温度设置为 $(t + \Delta t)$ 。针对冻结试样 B 进行混合量热试验, 测试平衡时的温度并记为 t_2 。则试样 B 从负温 $(t + \Delta t)$ 升温至 t_2 吸收的热量 Q_2 为

$$Q_2 = (CM_1 + K)(T_1 - t_2) \quad (12)$$

(6) 将试样 C 置于冷冻箱内, 温度设置为 0°C , 之后进行混合量热试验, 计算其比热容并将该值作为未冻土即温度大于 0°C 时土的比热容 c' 。

(7) 根据未冻土的比热容 c' , 计算试样 A 和试样 B 从 0°C 分别升温至 t_1 和 t_2 需要的热量, 即

$$Q_3 = m_1 c' t_1 \quad (13)$$

$$Q_4 = m_2 c' t_2 \quad (14)$$

因此, 单位质量的冻土试样 A 和单位质量的冻土试样 B 分别从温度 $(t - \Delta t)$ 和温度 $(t + \Delta t)$ 升温至 0°C 时需要的热量为 $(Q_1 - Q_3)/m_1$ 和 $(Q_2 - Q_4)/m_2$ 。

(8) 根据比热容的定义, 冻结土样在负温 t 时的比热容 c 为

$$c = \frac{\frac{(Q_1 - Q_3)}{m_1} - \frac{(Q_2 - Q_4)}{m_2}}{2\Delta t} \quad (15)$$

式 (15) 即为根据比热容定义得到的基于混合量热法的冻土比热容递推算法。可见, 该式得到的不再是某温度阶段比热容的平均值, 而是某温度点的比热容。

4 对某黏土的测试和计算

测试用土取自天津曹庄, 其密度 ρ 为 1.91 g/cm^3 , 含水率 w 为 23.37% , 土粒相对密度 G_s 为 2.72 、液限 w_L 为 29.7% , 塑限 w_p 为 18.4% 。根据颗粒曲线和物理指标, 该土最终被定名为粉质黏土。

4.1 冻结温度点的设置

混合量热试验用到的仪器主要包括 TDR 冻融试验箱、自制量热器、安捷伦温度采集仪(型号 34970A)、K 型热电偶(精度等级为 $\pm 0.4\%|t|$, t 为测定温度)和

计算机等。图 2 为整个试验系统的构成。

制备 3 个圆柱土样, 高为 60 mm , 直径为 20 mm 。将土样放置在冻融箱中, 设置冻融箱的温度为 -30°C 。随着时间的持续, 数据采集系统将记录土样内部温度的变化情况。试样的冻结温度曲线如图 3 所示。

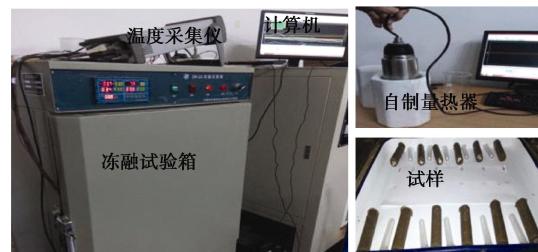


图 2 试验系统的构成
Fig. 2 Composition of test system

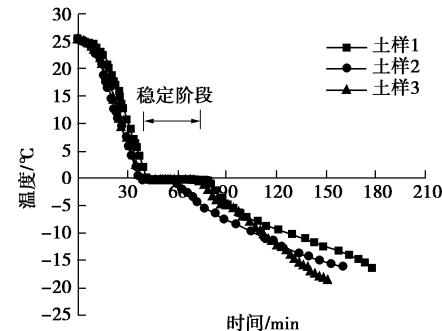


图 3 试样的冻结温度曲线
Fig. 3 Freezing temperature curve of samples

分析图 3 中 3 个试样的冻结温度曲线发现, 冻结温度都略低于 0°C 且三者非常相近。取 3 个试样冻结温度的平均值作为土样的冻结温度。经计算, 冻结温度近似于 -0.38°C 。即在 -0.38°C 以上, 土体中不会有孔隙冰存在。为了研究冻土比热容随负温的变化规律, 这里设置了 -0.5°C , -1°C , -1.5°C , -2°C , -2.5°C , -3°C , -5°C , -7°C , -10°C 等不同的试样冻结温度。为了减小偶然误差的影响, 每个温度点均进行了 3 个平行试样的冻结和测试。

4.2 常规混合量热法的比热容计算结果

事先测得自制量热器的热容量 $K=0.279 \text{ kJ}/\text{°C}$ 。同时, 利用混合量热试验测试冻土骨架的比热容和未冻水含量。其中, 未冻土骨架比热容和冻土骨架比热容的测试结果分别为 $0.828 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{°C}$ 和 $0.762 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{°C}$ 。根据式 (10), 可以计算得到基于常规混合量热法的未冻水含量。为提高测试精度, 取 3 个土样的未冻水含量平均值作为该温度点的未冻水含量, 结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 未冻水含量随温度的降低而减少且逐渐趋于平缓。在 -0.5°C 附近, 冻土中的未冻水含量发生骤降。主要原因在于, 当温度低于冻结温度 -0.38°C 时, 孔隙水中的大部分自由水和弱结合水将相变为冰。

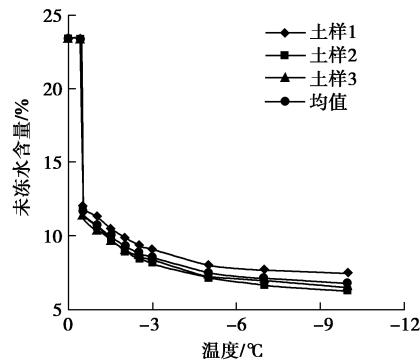


图 4 未冻水含量与温度关系

Fig. 4 Content & temperature of unfrozen water

在 $-0.38^{\circ}\text{C} \sim -2^{\circ}\text{C}$ 范围内, 未冻水含量的递减趋势显著, 此阶段即为剧烈相变区。在 $-2^{\circ}\text{C} \sim -5^{\circ}\text{C}$ 范围内, 未冻水含量递减的趋势明显弱于前一个阶段, 且逐渐趋于平缓, 这个阶段即为冻土力学上所说的过渡区。当温度低于 -5°C 时, 未冻水含量趋于稳定, 土样进入冻结稳定区。由冻土骨架比热容和冻土的未冻水含量, 根据式(2)给出的常规混合量热算法, 可以得到冻土的比热容, 结果如图5所示。

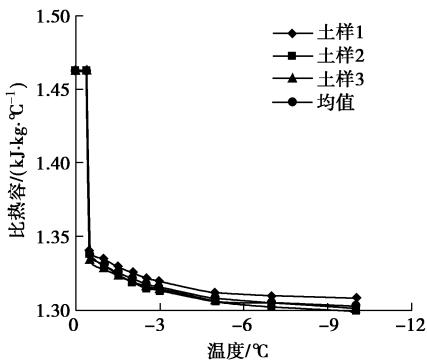


图 5 由常规混合量热法得到的冻土比热容

Fig. 5 Specific heat capacities of frozen soil obtained by conventional mixing calorimetry

从图5可以看出, 融土比热容与冻土比热容相差较大, 相同温度下融土比热容始终大于对应冻土的比热容。当土样温度低于冻结温度后, 冻土比热容随着温度的降低逐渐减小, 且降低幅度逐渐减小。实际上, 冻土在剧烈相变区的比热容很大。在图3的冻结曲线中, 冻结温度附近有一段较长的稳定阶段, 这种现象就是冻结温度附近比热容突然增大的有力证明。可见, 常规的混合量热法无法反映这一现象, 主要原因在于该方法忽略了潜热的作用。

4.3 基于本文递推算法的比热容计算结果

按照笔者们给出的冻土比热容递推算法, 得到的冻土比热容随温度的变化过程如图6所示。

将常规算法的计算结果与本文递推算法的计算结果进行比较后发现, 它们之间存在一些明显差别: ①常规算法得到的比热容随温度降低是单调的; 而本文

递推算法得到的曲线在冻结温度附近有一个明显的峰值。②在峰值后, 两种方法的计算结果都随温度的降低而减小, 但常规方法计算结果的减小速度明显小于本文递推算法结果的减小速度。其原因在于, 冻结前期潜热释放较多而冻结后期潜热释放明显减少。③常规算法在任意温度点的比热容均小于本文递推算法的计算结果。其原因在于, 常规算法是基于冻土相成分比热容的质量加权得到的, 并未考虑孔隙水冻结为冰时的相变潜热; 而本文给出的递推算法将冻土作为一个整体进行研究, 算法中考虑了相变潜热的贡献。

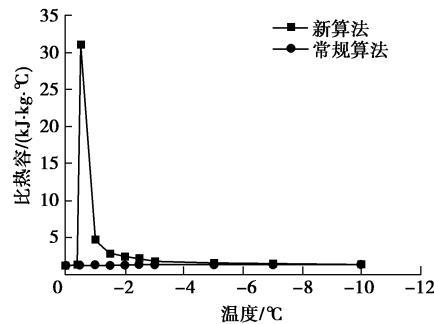


图 6 由本文递推算法得到的冻土比热容

Fig. 6 Specific heat capacities of frozen soil obtained by proposed recursive method

5 结语

本文在研究常规混合量热法及其不足的基础上, 给出了基于混合量热原理的递推算法。通过测试待测试样在负温 t 两侧从 $(t-\Delta t)$ 和 $(t+\Delta t)$ 分别升温至平衡状态转移的热量, 和自 0°C 升温至平衡状态转移的热量, 可以得到试样从温度 $(t-\Delta t)$ 到温度 $(t+\Delta t)$ 需要的热量。根据比热容的定义, 可以得到试样在负温 t 的比热容近似值。与常规的混合量热算法相比, 本文给出的算法考虑了相变潜热对土体宏观比热容的影响, 从机理上解释了黏土在冷冻过程中其温度曲线存在稳定阶段的物理本质。

参考文献:

- [1] 齐吉琳, 马巍. 冻土的力学性质及研究现状[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 133–143. (QI Ji-lin, MA Wei. State-of-art of research on mechanical properties of frozen soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 133–143. (in Chinese))
- [2] 孙振华. 多年冻土原状样热学性质研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008. (SUN Zhen-hua. Research on the thermal character of undisturbed permafrost sample[D]. Changchun: Jinlin University, 2008. (in Chinese))
- [3] 刘世伟, 张建明. 高温冻土物理力学特性研究现状[J]. 冰川冻土, 2012, 34(1): 120–129. (LIU Shi-wei, ZHANG

- Jian-ming. Review on physic-mechanical properties of warm frozen soil[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(1): 120 - 129. (in Chinese))
- [4] ABU-HAMDEH N H. Thermal properties of soils as affected by density and water content[J]. *Biosystems Engineering*, 2003, **86**(1): 97 - 102.
- [5] RANKINEN K, KARVONEN T, BUTTERFIELD D. A simple model for predicting soil temperature in snow-covered and seasonally frozen soil: model description and testing[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2004, **8**(4): 706 - 716.
- [6] OCHSNER T E, HORTON R, REN T. A new perspective on soil thermal properties[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, **65**: 1641 - 1647.
- [7] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001. (XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin. *Physics of frozen soil*[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese))
- [8] 赵小明, 赵冠春. 绝热量热法测量比热容的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 1995, **29**(5): 12 - 17. (ZHAO Xiao-ming, ZHAO Guan-chun. Experimental study for specific heat capacity with adiabatic calorimetry[J]. *Journal of Xi An Jiaotong University*, 1995, **29**(5): 12 - 17. (in Chinese))
- [9] 苏天明, 刘彤, 李晓昭, 等. 南京地区土体热物理性质测试与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(6): 1278 - 1283. (SU Tian-ming, LIU Tong, LI Xiao-zhao, et al. Test and analysis of thermal properties of soil in Nanjing district[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, **25**(6): 1278 - 1283. (in Chinese))
- [10] 王补宣, 江亿. 利用热探针在现场同时测定松散介质 α 和 λ 的“加热-冷却法”[J]. 工程热物理学报, 1985, **6**(3): 49 - 54. (WANG Bu-xuan, JIANG Yi. The “heating-cooling method” for measuring thermal diffusivity and conductivity of dispersed medium in the scene with a probe[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 1985, **6**(3): 49 - 54. (in Chinese))
- [11] 刘宏伟, 张喜发, 冷毅飞. 大兴安岭多年冻土骨架比热容测定及经验值[J]. 低温建筑技术, 2009, **31**(8): 96 - 97. (LIU Hong-wei, ZHANG Xi-fa, LENG Yi-fei. Determination and empirical value on specific heat of permafrost skeleton in Da Hinggan Mountains[J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2009, **31**(8): 96 - 97. (in Chinese))
- [12] 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. (in Chinese))
- [13] 冷毅飞, 张喜发, 杨凤学, 等. 冻土未冻水含量的量热法试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(12): 3758 - 3764. (LENG Yi-fei, ZHANG Xi-fa, YANG Feng-xue, et al. Experimental research on unfrozen water content of frozen soils by calorimetry[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(12): 3758 - 3764. (in Chinese))