

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.04.007

一种考虑显热和潜热双重效应的冻土比热计算方法

夏锦红¹, 李顺群², 夏元友¹, 王杏杏²

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 2. 天津城建大学 土木工程学院, 天津 300384)

摘要: 对土在冻结过程中孔隙水的相态演变过程进行了分析, 并在研究显热、潜热物理本质的基础上, 将冻土进一步划分为冻结土和冻实土。根据潜热的物理意义指出, 随土温从一般地温逐渐降低至较大负温, 土的比热应该分段计算, 即分为融土阶段、冻结阶段和冻实阶段。在融土阶段, 孔隙水始终为液态; 在冻结阶段, 存在可以进一步冻结为冰的液态水; 在冻实阶段, 不再存在进一步可能冻结为冰的液态水。因此, 冻结土的进一步降温将同时伴有显热释放和潜热释放。而在冻实土中, 进一步的降温只伴有显热释放。在此基础上, 基于混合物比热容的加权叠加法则, 研究了冻土的比热构成, 给出了涵盖潜热的冻土比热计算方法。

关键词: 冻土; 比热; 潜热; 冻结土; 冻实土; 加权叠加

中图分类号: TU 445

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)04-0973-06

Specific heat of frozen soil considering sensible and latent heat of pore water

XIA Jin-hong¹, LI Shun-qun², XIA Yuan-you¹, WANG Xing-xing²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei, 430070 China;

2. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: The phase change evolution of pore water was analyzed in the freezing process. Based on the mechanism of sensible heat and latent heat, the frozen soil was divided into freezing soil and stable frozen soil. According to the physical meaning of latent heat, the specific heat of soil should be stepwisely calculated, namely melting stage, freezing state and frozen state as the temperature gradually drops from a general temperature to a larger negative temperature. In the melting stage, the pore water is always in the liquid phase. In the freezing stage, existing liquid water can be frozen into ice. In the frozen state, there exists no liquid water can be frozen into ice. Thus, the cooling of freezing soil would be accompanied by releasing of sensible heat and latent heat. In frozen soil, the further cooling was accompanied by releasing of sensible heat. Then, based on the weighted superposition of specific heat capacity of mixture, the specific heat of the frozen soil is investigated. A method is developed for calculating the specific heat capacity of frozen soil with consideration of latent heat.

Keywords: frozen soil; specific heat; latent heat; freezing soil; stable frozen soil; weighted superposition

1 引言

地下空间的开发利用是解决空间需求不断增长与现有空间资源相对有限之间矛盾的一个有效手段。与地上工程不同, 地下工程面临的岩土工程问题更为复杂。比如, 在我国经济活跃的沿海和沿江地区, 地下工程的开发建设经常面临软土强度和稳定性不足等挑战。

具有富含水率、低强度、高压缩和低渗透性的

软土, 对地下工程在开挖和构筑阶段的施工安全构成了严重威胁。为此, 工程界开发了多种适用于软土的地基处理方法, 其中人工冻结法是被广泛采用的有效方案之一。目前, 冻结法施工已被广泛应用于地下工程抢险和深部软土加固工程。但由于对土冻结的物理力学过程存在认识上的缺陷甚至不足, 这一施工方法在实际应用中经常遭遇冻结参数难以确定、力学模型含糊不清等问题。

热的传播方式包括传导、对流和辐射。在人工

收稿日期: 2016-06-07

基金项目: 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)。

This work was supported by National Natural Science Foundation of China (41472253) and Key Project of Natural Science Foundation of Tianjin City (16JCZDJC39000).

第一作者简介: 夏锦红, 女, 1966年生, 教授, 主要从事岩土工程和结构工程方面的研究工作。E-mail: 115993299@qq.com

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

冻结法施工中, 对流和辐射两种传热方式的作用极其有限。因此, 研究土的冻结过程一般着重于热传导及与热传导有关的物理力学过程研究。

冻结法施工是伴随有相变、内冷源和移动边界条件的瞬态热-力耦合过程。随着地层温度的下降和热交换过程的进行, 土颗粒和孔隙水的温度逐步降低。当温度达到冰点后, 土中水将发生相变并释放潜热。在一个较宽的温度范围内, 冻土中一直存在未冻液态水, 即土中水并不是在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下突然完全凝结成冰, 而是随负温的降低逐渐结冰。由于冻土的表观比热取决于土颗粒、孔隙水、孔隙冰以及水冰相变速率, 因此, 冻土的比热显热并不是一个常数, 而是一个依赖于温度的变量。

目前, 对土比热的研究已经取得了很多成果。王铁行等^[1]认为, 在含水率相同的条件下, 土比热随密度的增大而增大; 在密度相同的条件下, 土比热随含水率的增大而增大; 且相对于密度, 含水率变化对黄土比热的影响较为显著。徐学祖等^[2]认为, 冻土的比热等于土颗粒、孔隙水和孔隙冰三者比热的质量加权之和。刘宏伟等^[3]的研究发现, 随着颗粒变细、塑性增强以及有机质含量增加, 冻土骨架比热增大。Kozłowski 等^[4]通过差示扫描量热法研究了低温条件下黏土中水的比热以及干土的比热。王丽霞等^[5]通过测量比热, 研究了冻土的体积热容量。王海波等^[6]研究了粉土的孔隙率与饱和度对其体积比热容的影响。苏天明等^[7]分析了影响土比热的因素, 提出了利用含水率计算比热的经验公式。Abu-Hamdeh^[8]研究了密度与含水率对热导率的影响, 并且在分析砂土和黏土比热理论值与试验值关系的基础上, 导出了土比热的经验公式。

本文在总结前人研究成果的基础上, 根据冻结过程和孔隙水存在相态, 首先将土的比热计算分为 3 个阶段, 即①只有液态水存在的未冻阶段; ②液态水和固态水共存, 且液态水可进一步凝结为冰的冻结阶段; ③不再有液态水进一步冻结为冰的冻实阶段。随后, 基于土在冻结过程中孔隙水在一个较宽温度范围内存在持续相变的客观现实, 给出了考虑孔隙水相变潜热的冻土比热计算方法。

2 显热与潜热

物质存在的形态包括固态、液态和气态。某种物质从一种形态变为另一种形态且其化学成分不发生改变时, 称为相态变化即相变。比如, 液态水变为固态冰或液态水变为气态水蒸汽的现象均属于相变现象。

根据物质相态和该物质温度的变化特点, 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改变时, 吸收或放出的热量称为潜热。

如 1 mol 水在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 全部蒸发为相同温度的水蒸汽时需要吸收 40.62 kJ 热量, 这部分热量就是潜热; 而 1 mol 水由 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升温至 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且无水蒸汽生成时, 需要吸收的热量约为 3.014 kJ , 这部分热量则被称为显热。

可见, 显热是物质不发生相变时吸收或放出的热量。显热的产生有一个显著特点, 即热量的转移必然伴有温度的变化。而潜热是物质发生相变过程中吸收或放出的热量, 在这个过程中虽然有热量交换, 但相变前、后的温度是相同的。

物质由低能状态转变为高能状态时吸收潜热, 反之则放出潜热。潜热的量值用单位质量或单位摩尔的物质在相变时吸收或放出的热量表示。相变潜热与发生相变的温度有关, 单位质量的某种物质, 在一定温度下的相变潜热是一个定值。冰的融解需要吸热, 水的结冰需要放热, 两个可逆过程的潜热是相等的。在标准大气压下, 冰的融解或水的结冰潜热 L 约为 335 kJ/kg 。

既有研究表明, 土中孔隙水的冻结是逐步进行的, 即在温度降低至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下一个相当长的负温区间内, 孔隙水是逐渐冻结为冰的, 而不是仅仅在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 结冰。也就是说, 在该负温区间内, 不断有液态水转化为固态冰并释放潜热。

既有对冻土比热的研究往往忽略孔隙水转化为孔隙冰的潜热释放现象, 要么假设从常温到完全冻实, 土的比热是不变的; 要么仅着眼于比热随含水率、密度的变化关系, 而较少考虑相变尤其是较少考虑相变的持续性^[9]。还有文献认为, 冻结前、后土的比热分别为两个不同的常数^[10]。但土的冻结是在一个区间内完成的而不是某个温度点, 因此, 冻结后土的比热随温度的变化而变化。从潜热的定义看, 这些确定冻土比热的方法, 由于没有涵盖潜热或仅仅认为潜热发生在某个温度点, 因此, 存在瑕疵。只有遵循土中孔隙水的结冰是一个较大负温区间上的连续过程这一事实, 并考虑潜热释放存在于该区间上而不仅仅发生在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 才能合理估算土在冻结过程中的比热。

3 基于孔隙水相态的冻土分类

岩土类材料是一类化学、矿物成分复杂多变的

天然地质材料,而且饱和土中除了土颗粒之外,还有孔隙水存在;非饱和土中除了土颗粒和孔隙水之外,尚有孔隙气存在。与一般常温融土相比,冻土中除了常规的固、液、气三相之外,还有对温度变化极其敏感的冰体。

一般认为,水的存在形式有3种,即液态、固态和气态。根据温度的定义,一个标准大气压条件下,纯净水的冰水混合物温度定义为 0°C 。即 0°C 以上的水以液态形式存在; 0°C 以下的水以冰的形式存在。受化学、矿物成分和双电层影响,土中水的冻结过程与标准状态下水的冻结过程明显不同。主要表现在,在温度低于 0°C 的相当长的负温范围内,土中水同时以液态水和固态冰的形式存在。根据既有研究成果,即使温度降低至很低,土中仍然存在一定量的未冻水,如图1所示^[11]。

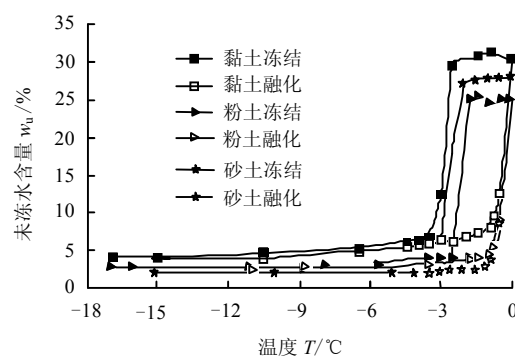


图1 未冻水含量与温度的关系

Fig.1 Relationships between the content of unfrozen water and temperature

远离土颗粒的水受颗粒化学、矿物成分和双电层的影响较小,故其冻结温度接近于 0°C 。靠近土颗粒的孔隙水,由于受土颗粒化学、矿物成分和双电层的影响较大,故其冻结温度较低。因此,土中未冻水常常存在于土颗粒附近,并成为水分迁移的通道。

随温度降低,土中水的相变过程可以划分为3个阶段,即剧烈相变区、过渡区和冻实区。在剧烈相变区,当温度变化 1°C 时,未冻水含量的变化量大于 1.0% ,此时自由水和一部分弱结合水由液态水变为固态冰;在过渡区,当温度变化 1°C 时,未冻水含量的变化量在 $0.1\%\sim 1.0\%$ 之间,此时相成分可变的弱结合水将全部凝结成冰;在冻实区温度范围内,温度每降低 1°C ,水相变成冰的数量小于 0.1% ^[12]。也有人认为,土体在冻实阶段的液态水只有强结合水。因此,随温度的继续降低,处于冻实阶段的冻土,其相成分的比例将逐渐趋于稳定。

由此可见,处于剧烈相变区和过渡区的冻土具有一个共同特点,即都存在相成分可变的孔隙水。此时总的热交换量包括两部分,一部分用以改变各组分的温度,另一部分用以改变孔隙水的相态。因此,依据是否存在相成分可变的孔隙水,剧烈相变区和过渡区可以合并为一类,并命名为冻结阶段。

所以,根据土中水存在的相态变化特点,随温度降低的黏土将经历3个阶段:即液态水不存在相态变化的融土阶段、部分液态水转变为固态水的冻结阶段、不再有液态水转化为固态冰的冻实阶段。

对应于上述3个阶段,可以从热学角度对冻土进行重新分类。随温度降低,可以将含水黏土划分为3种,即融土、冻结黏土和冻实黏土。

4 土颗粒、水和冰的比热

根据定义,土的比热等于温度升高或降低 1°C 所有组分吸收或放出热量的代数之和。可见,土在某温度 T 时的比热应该包括其在该温度附近发生 ΔT 微量变化时,部分孔隙水(孔隙冰)发生相变需要的热量。

随地域和颗粒粗细不同,土颗粒的比热将有所变化,但变化幅度非常有限,一般在 3% 之内^[13]。因此,土颗粒的比热可以认为是一个常数。

任何物质的比热都不是一个特定值,而是随着温度的变化而变化,纯净水和纯净冰也不例外。一个标准大气压条件下,不同温度纯水和纯冰的比热如图2所示。

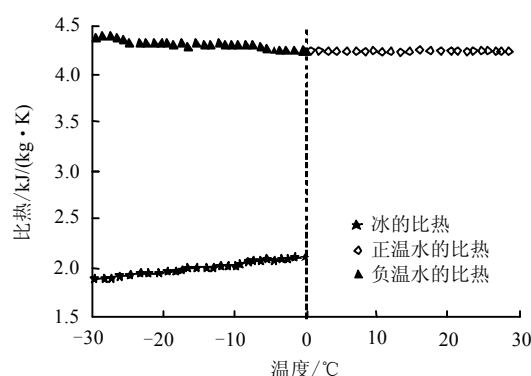


图2 水和冰在不同温度时的比热

Fig.2 Specific heat of water and ice at different temperatures

自然条件下,融土的温度一般小于 30°C 。在冻结法施工中,人工冻土的温度一般也在 -30°C 之内。可见,在 $(-30^{\circ}\text{C}, 30^{\circ}\text{C})$ 范围内,水和冰的比热可以认为是常数。这种假设能满足工程需要,也是一种常见的简化处理方法。

5 土在 3 个阶段的比热

鉴于土中水的相态在冻结前阶段、冻结阶段和冻实阶段是完全不同的, 因此, 分阶段研究土的比热是必要的。

5.1 温度变化时的热量组成

根据混合物热量交换原则, 当土的温度变化时, 总能量变化等于各组分能量交换之和, 即

$$N = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 \quad (1)$$

式中: N 为土的总能量变化; N_1 为土中水温度变化需要的能量; N_2 为土中水发生相变时吸收或释放的能量; N_3 为土中冰温度发生变化需要的能量; N_4 为土颗粒温度发生变化需要的能量。

5.2 融土的比热

比热定义为单位质量的某种物质温度升高或降低 1°C 吸收或放出的热量。融土是由土颗粒、孔隙水和孔隙气组成的混合体, 其比热由土颗粒比热、孔隙水比热和孔隙气比热及其含量决定。由于孔隙气的质量可以忽略不计, 因此, 融土的比热 C_1 取决于土颗粒和孔隙水, 即

$$C_1 = \frac{C_p + wC_w}{1 + w} \quad (2)$$

式中: C_p 和 C_w 分别为土颗粒和水的比热; w 为土的含水率。

5.3 冻实土的比热

在冻实土中, 随温度的进一步降低不再有相变发生。因此, 冻实土的比热由土颗粒比热、孔隙冰比热和孔隙气比热决定。同样, 在不计孔隙气比热的情况下, 冻实土的比热 C_2 取决于土颗粒和孔隙冰, 即

$$C_2 = \frac{C_p + wC_i}{1 + w} \quad (3)$$

式中: C_i 为冰的比热; w 为含冰量且等于对应融土的含水率。由于冰的比热远远小于水的比热, 所以冻实土的比热小于对应融土的比热。

5.4 冻结土的比热

如前所述, 冻结土是由固体颗粒、孔隙冰、孔隙水和孔隙气组成的多相混合体系。既有研究成果认为, 冻结土的比热取决于冻土中各成分的比热及其对应含量^[2]。基于混合物理论, 冻土的比热应该是土颗粒、孔隙冰、孔隙水和孔隙气比热的加权平均值。在忽略冻土中气相成分的情况下, 冻结土的比热常常被表示为

$$C_0 = \frac{C_p + (w - w_u)C_i + w_uC_w}{1 + w} \quad (4)$$

式中: w_u 为某负温时未冻水含量, 可以通过核磁共振等方法获得。式 (4) 即为目前被普遍接受的用于计算冻土比热的方法。实际上, 式 (4) 只涵盖了温度变化时土中的显热而没有包括潜热。当冻结土的温度发生 ΔT 微小改变时, 对应的显热为

$$\Delta Q_1 = C_0 \times \Delta T \quad (5)$$

由比热的定义知, 冻土的比热是单位质量的该种物质, 其温度升高或降低 1°C 时需要吸收或放出的热量。对于冻结土, 当温度发生变化时, 即使总的含水率不变, 固态冰和液态水的含量也会由于冻结或融化而发生变化。由于存在水的相变, 冻结或融化必然伴随着潜热的吸收或释放。与液态水和固态冰的比热相比, 水的相变潜热是一个很大的数值。标准状态下, 水的潜热 L 是 335 kJ/kg 。其值约是水比热的 80 倍, 是冰比热的 160 倍。因此, 水的潜热在冻土的比热计算中理应占有重要作用。但遗憾的是, 在既有冻土的比热计算公式中, 即式 (4) 中, 并没有涵盖水的潜热, 因而不合理的。

假设在某负温 T_1 时, 土中的未冻水含量为 w_{u1} ; 温度降低至 T_2 时, 土中的未冻水含量为 w_{u2} 。则未冻水含量在温度变化 $\Delta T = T_2 - T_1$ 时对应的减少量为

$$\Delta w_u = w_{u1} - w_{u2} \quad (6)$$

设 T_1 时不考虑潜热时的比热为 C_0 ; 当温度降低至 T_2 时, 不考虑潜热时的比热为

$$C'_0 = \frac{C_p + (w - w_u + \Delta w_u)C_i + (w_u - \Delta w_u)C_w}{1 + w} \quad (7)$$

因此, 在 $T_1 \sim T_2$ 范围内, 不考虑潜热时的比热平均值为

$$C_\alpha = \frac{C_p + \left(w - w_u + \frac{\Delta w_u}{2}\right)C_i + \left(w_u - \frac{\Delta w_u}{2}\right)C_w}{1 + w} \quad (8)$$

另外, 未冻水含量变化对应的潜热为

$$\Delta Q_2 = L \times \Delta w_u \quad (9)$$

因此, 当冻结土的温度变化时, 热量由两部分组成, 即温度变化需要的显热和相变需要的潜热, 即

$$\Delta Q = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 \quad (10)$$

根据定义, 冻结土的比热 C_β 为

$$C_{\beta} = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (11)$$

即

$$C_{\beta} = C_{\alpha} + \frac{L \times \Delta w_u}{\Delta T} \quad (12)$$

式(12)即为同时考虑显热和潜热两个热量组成部分时冻结土比热的表达式。

6 试验验证

试验用土为取自地表以下 10 m 处的黏土, 原状土的有关指标包括: 液限为 41%、塑限为 19%、塑性指数为 22、干密度为 1.71 g/cm³、含水率为 40%。

6.1 未冻水含量

为验证式(12)的有效性及其准确性, 需要测定冻土在不同温度时的未冻水含量。测量未冻水含量的方法众多, 其中脉冲核磁共振法(NMR)操作简单快捷, 结果较为准确。故此次试验采用 NMR 法测定不同温度时土样中的未冻水含量。试验仪器主要有 DR-2A 冻融试验箱(温度-25~100 ℃, 控制精度±1.5 ℃), 脉冲核磁共振仪(型号 Praxis-PR-103), K 型热电偶, 玻璃试管(直径为 20 mm, 高度为 10 cm)。试验的详细步骤表述如下:

(1) 将取得的原状土烘干, 加入蒸馏水充分搅拌均匀, 制备成含水率为 40%、干密度为 1.71 g/cm³的试样。切取小块试样样品置入试管中(装样高度 5 cm)。同时将热电偶埋入试样中心, 试管置入冻融试验箱中。

(2) 试验开始后, 将冻融试验箱温度设置为 6 ℃。为使试样内、外温度达到恒定, 4 h 后记录温度采集仪的读数; 迅速将试管从冻融箱取出, 快速插入探针, 记录信号强度; 再将试管放入冻融箱内重新设定温度, 恒温 4 h 进行第 2 个温度测点的测量, 同样记录其信号强度。按照此方法依次测量温度测点的信号强度。温度测点设置为 6.0、3.0、0、-0.2、-0.3、-0.7、-1.0、-2.0、-3.0、-5.0、-8.0、-10.0、-15.0 ℃。

(3) 试验结束后, 结合下式计算不同负温时的未冻水含量:

$$w_u = w_0 \frac{y}{y_1} \quad (13)$$

$$y_1 = a + bT \quad (14)$$

式中: w_0 为试样的初始含水率; y 为信号强度; y_1 为计算的信号强度; T 为负温; a 和 b 为经验系数。不同温度时试样的未冻水含量测试结果如表 1 所

示。

表 1 不同温度时的未冻水含量
Table 1 Unfrozen water contents at different temperatures

$T/^\circ\text{C}$	0	-0.5	-1.0	-2.0	-3.0	-5.0	-8.0	-10.0	-15.0
$w_u/\%$	40.0	21.9	17.5	13.7	12.2	10.0	8.6	8.2	7.9

6.2 比热的计算值

从未冻水含量的测试数据可以发现, 该黏土的剧烈相变区为 0~-5 ℃, 过渡区为 -5~-10 ℃, 冻实区则为 -10 ℃ 以下。从热学角度对黏土进行分类, 可得 0 ℃ 以上为融土, 0~-10 ℃ 为冻结黏土, 而低于 -10 ℃ 时则为冻实黏土。

由表 1 所示的未冻水含量, 结合式(2)可求得融土的比热; 结合式(3)可求得冻实土的比热; 结合式(8)、(12)可求得冻结土的比热。其中黏土土颗粒的比热 $C_p=0.845$ kJ/(kg·K), 水的比热 $C_w=4.18$ kJ/(kg·K), 冰的比热 $C_i=2.09$ kJ/(kg·K), 相变潜热 $L=335$ kJ/kg。得到的不同负温时该黏土的比热如表 2 和图 3 所示。

6.3 比热的试验值

采用混合量热法, 测定不同温度点的比热。该方法采用热平衡原理, 是普通物理试验中测量比热的常用方法。测试数据也表示在图 3 中。

可见, 在融土阶段和冻实阶段, 比热的计算值与实测值吻合较好; 而在冻结阶段, 比热的计算值与实测值差别较大。其原因主要在于: ①剧烈相变区的温度范围较小; ②混合量热法难以避免热量损失; ③混合量热法采用的试样太小等。尽管如此, 该试验依然测到了在冻实区黏土比热显著增大这一物理现象, 与本文给出的计算方法是一致的。

表 2 冻结土比热计算值
Table 2 Computational special heat of freezing soil

温度/℃	比热/(kJ/(kg·K))			
	向后差分	中心差分	向前差分	平均值
6.0			1.80	1.80
3.0	1.80	1.80	1.80	1.80
0.0	1.80	19.03	123.2	48.01
-0.5	122.66	76.79	31.04	76.83
-1.0	30.91	19.73	14.22	21.62
-2.0	14.11	10.26	6.44	10.27
-3.0	6.40	5.50	5.08	5.66
-5.0	5.02	3.74	2.92	3.90
-8.0	2.88	2.53	2.00	2.47
-10.0	1.99	1.65	1.52	1.72
-15.0	1.51			1.51

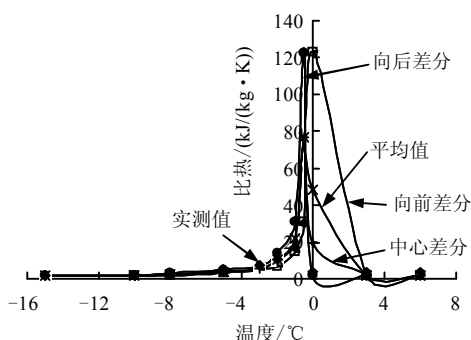


图3 不同温度时的比热计算值和实测值
Fig.3 Computational and experimental special heat at different temperatures

7 结 论

(1) 基于混合物比热容的加权叠加法则, 建立了涵盖潜热的冻土比热计算方法。根据孔隙水状态及其变化趋势, 将冻土进一步划分为冻结土和冻实土。

(2) 将土的比热随温度的变化划分为三个阶段, 即融土阶段、冻结阶段和冻实阶段。在融土阶段, 孔隙水为液态; 在冻结阶段, 存在可以进一步冻结为冰的液态水; 在冻实阶段, 不再存在进一步可能冻结为冰的液态水。

(3) 由于存在进一步凝结为冰的液态水, 冻结土的进一步降温同时伴有显热和潜热两种能量交换现象。在融土阶段和冻实阶段, 温度变化只伴有显热现象发生。

(4) 在全温度范围内, 建立了冻土比热连续、可导的函数表达式。

参 考 文 献

- [1] 王铁行, 刘自成, 卢靖. 黄土导热系数和比热容的实验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 655—658.
WANG Tie-hang, LIU Zi-cheng, LU Jing. Experimental study of coefficient of thermal conductivity and specific volume heat of loess[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(4): 655—658.
- [2] 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. frozen soil physics[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [3] 刘宏伟, 张喜发, 冷毅飞. 大兴安岭多年冻土骨架比热测定及经验值[J]. 低温建筑技术, 2009, 31(8): 96—97.
LIU Hong-wei, ZHANG Xi-fa, LENG Yi-fei. Measurement and empirical value of specific heat of the frozen soil skeleton in Greater Khingan Range[J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2009, 31(8): 96—97.
- [4] KOZLOWSKI TOMASZ. Modulated differential scanning calorimetry (MDSC) studies on low-temperature freezing of water adsorbed on clays, apparent specific heat of soil water and specific heat of dry soil[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 78: 89—96.
- [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-zhang, 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] 王海波, 杨平, 何忠意. 孔隙率与饱和度对粉土导热特性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2012, 36(2): 42—46.
WANG Hai-bo, YANG Ping, HE Zhong-yi. Influence of porosity and saturation on thermal properties of silty soils[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2012, 36(2): 42—46.
- [7] 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.
- [8] ABU-HAMDEH N H. Thermal properties of soils as affected by density and water content[J]. *Biosystems Engineering*, 2003, 86(1): 97—102.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] NUSIER O K, ABU-HAMDEH N H. Laboratory techniques to evaluate thermal conductivity for some soils[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2003, 39(2): 119—123.
- [12] 谭龙, 韦昌富, 田慧会, 等. 冻土未冻水含量的低场核磁共振试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1566—1572.
TAN Long, WEI Chang-fu, TIAN Hui-hui, et al. Experimental study of unfrozen water content of frozen soils by low-field nuclear magnetic resonance[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(6): 1566—1572.
- [13] 李东阳. 冻土未冻水含量测试新方法的试验和理论研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2011.
LI Dong-yang. The experiment and theoretical research on a new test method to measure unfrozen water content in frozen soil[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2011.