

基于有限体积法的冻土水热耦合程序开发及验证

胡田飞^{1,2}, 王天亮^{1,2}, 常 键³, 刘建勇^{1,2}, 卢玉婷^{1,2}

(1. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北 石家庄 050043;
2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 3. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘 要: 土体冻结和融化时的水分迁移、相变与传热是一个相互影响的耦合过程。采用基于有限体积法的开源软件 OpenFOAM, 编制描述土体冻融过程的水热耦合计算程序。首先, 基于土体水分和热量迁移基本方程、水分相变与温度的平衡方程, 同时考虑相变对水分特征参数和热特性参数的影响以及相变潜热对传热过程的影响, 建立冻土水热耦合数学模型。然后, 采用基于多面体网格的有限体积方法对水热耦合控制方程进行空间离散, 采用全隐式向后差分对方程进行时间离散, 由此编制冻土水热耦合计算程序。该程序具有良好的几何适应性、质量和能量守恒性, 具备面向复杂问题的并行计算功能。最后, 采用该程序对两组不同温度边界条件的室内土体冻结试验进行数值模拟, 并与试验结果进行对比, 结果表明该程序可以较为准确地模拟土体冻结过程中温度场和水分场的演化特征。

关 键 词: 冻土; 水热耦合; OpenFOAM; 有限体积法; 温度; 未冻水含量; 含冰量

中图分类号: TU 445

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2020) 05-1781-09

Code development and verification for coupled process of water migration and heat transfer of frozen soil based on finite volume method

HU Tian-fei^{1,2}, WANG Tian-liang^{1,2}, CHANG Jian³, LIU Jian-yong^{1,2}, LU Yu-ting^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;
3. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstracts: During soil freezing and thawing, water migration, phase transition and heat transfer are a multi-field coupled process in which these factors affect each other. In this study, a mathematical model for the coupling process of water migration and heat transfer was constructed by solving a simultaneous equation group, which contains the basic equations of water migration and heat transfer, and the equilibrium equation of water phase change and temperature. In the mathematical model, the effects of water phase change on hydraulic and thermal parameters were considered, so was the effect of latent heat in water phase change. Also, a code for the coupled heat transfer and water migration simulation was developed based on the finite volume method for the spatial discretization and fully implicit backward difference scheme for the time discretization. The code supporting unstructured mesh can ensure the conservation of mass and energy. It also has a parallel function, which can be used for the calculation of complex problems. Furthermore, an indoor soil freezing tests with two different temperature boundary conditions were conducted, and the corresponding numerical calculations were subsequently conducted. The experimental results generally matched the calculated ones, so the developed numerical simulation program can well simulate the evolution characteristics of the temperature field and water field during the soil freezing process. Hence, the established OpenFOAM program is an effective method to simulate the coupling process of water migration and heat transfer for the frozen soil.

Keywords: freezing soil; coupled process of water migration and heat transfer; OpenFOAM; finite volume method; temperature; unfrozen moisture content; ice content

收稿日期: 2019-07-20

修回日期: 2019-09-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 41731281), 河北省高等学校科学技术研究项目 (No. QN2020180)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41731281) and the Science and Technology Research Project of Hebei Education Department, China (QN2020180).

第一作者简介: 胡田飞, 男, 1988 年生, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事冻土力学与寒区路基工程方面的研究工作。E-mail: hutianfei@stdu.edu.cn

通讯作者: 王天亮, 男, 1981 年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事路基工程方面的教学和科研工作。E-mail: wangtl@stdu.edu.cn

1 引言

对于寒区岩土工程,岩土体在季节性气候变化影响下会出现反复的冻结和融化现象,进而引起工程性质的不可逆变化^[1]。土的冻结和融化实质上是热质交换和迁移现象,主要包括热量的传输、水分的迁移和相变以及溶质含量 3 个方面的改变。其中,水分迁移会导致土体热特性变化,冻融界面的相变水头和固态冰会影响水分迁移,相变潜热会影响热量传输,三者是相互影响的耦合变化过程^[2-4]。因此,水热耦合数值分析是揭示土体冻融现象和内部水热迁移特征的基本方法之一。

Harlan^[5]在大量土体冻结和融化试验数据的基础上,以未冻水含量为变量将温度场和水分场分别用各自的基本方程进行表述,建立了第 1 个水热耦合迁移模型。在此基础上,诸多学者对这一模型进行了修正及二维、三维扩展。其中,Taylor 等^[6]指出冰的存在降低了土体导水能力,通过引入一个阻抗系数来减小冻结区土壤的非饱和导水率。Zhao 等^[7]认为非饱和冻土中的水分迁移包括瞬态和准稳态两种,土中水的相变潜热将会提供土体达到准稳态渗流后温度变化所需的热量,以此建立了考虑相变潜热的水热模型。此外,Liu 等^[8]以土体的状态焓为变量模拟了相变潜热对冻土温度场的影响。李东庆^[9]和明锋^[10]等采用 Clapeyron 方程考虑温度对基质势和压力势的影响,建立了考虑温度对水分迁移影响的水热模型。徐学祖^[11]、Kevin^[12]、Vlodek^[13]等先后给出了冻土未冻水含量、渗透系数、导热系数及比热容等热学参数与温度和土性关系的多种函数表达式。

在数值模拟分析方面,主要包括基于语言程序独立编程和商业软件二次开发两种手段。数值原理包括有限元法、有限差分法、有限体积法等。其中,李述训^[4]和尚松浩^[14]等采用自动调节时间步长的全隐式有限差分计算格式建立水热耦合计算程序,以此验证土柱的室内冻结试验。毛卫南等^[15]基于 Fortran 语言编制了分别基于有限差分法和有限元法的一维水热耦合计算程序,并对比了两种数值方法的优缺点。白青波等^[16]基于 COMSOL Multiphysics 软件进行二次开发,采用系数型偏微分方程模块求解水、热迁移基本方程及相变平衡关系,通过软件先进的处理功能可以方便地进行工程案例的水热耦合模拟。上述分析方法中,有限差分法直接采用差商代替导数对方程进行离散,数学概念直观,表达形式简单,但是几何适用性比较差,一般只能

应用于规则几何问题,并且数值解的守恒性难以保证;有限元法基于变分原理和加权余量法,对不规则几何适应性好,但一般计算工作量较大^[17-19]。此外,目前部分基于商业软件二次开发和 Fortran 语言开发的程序还存在可维护性差及计算效率低等不足。因此,有必要进一步选择合理的数值方法和平台,并改进适合不同需求的水热耦合模型。

OpenFOAM 是一个由 C++ 语言编写的开源软件包,预先编译了诸多求解器、辅助工具和库文件,在数值算法、边界设置、求解器定制、物理模型库扩展等多方面的针对性开发极大地提高了用户的自由度和工作效率^[20-21]。OpenFOAM 的核心代码为使用基于多面体网格单元的有限体积法,对根据不同问题构造的偏微分方程进行离散和求解,可以保证守恒性及良好的几何适应性。有限体积法采用积分形式的控制方程,具有易于处理复杂网格、计算程序易作修改等优势。但是,目前有限体积法在冻土工程数值模拟中尚未见应用。

在上述研究基础上,本文基于含相变潜热项的热传导方程、含相变项的 Richard 渗流方程、温度与相变的动态平衡方程,建立水热耦合计算模型。同时,考虑相变对土体热特性参数和水分特征参数的影响,采用以未冻水含量和含冰量为因子的双变量表达式计算体积比热容、导热系数和水力扩散率。以 OpenFOAM 为平台,通过有限体积法将控制方程进行数值离散化,建立水热耦合数值计算程序。最后,通过室内单向冻胀试验对计算程序进行验证。

2 水热耦合模型

2.1 温度控制方程

土体从非冻结状态到冻结状态以及再次融化的过程,伴随着水分相变的导热。根据热传导和质量迁移理论,通过将相变潜热作为热源来考虑水分迁移和冰水相变的影响。采用显热容法描述相变,则冻土的平面非稳态热传导微分方程为

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + L \rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t} \quad (1)$$

式中: ρ_i 为冰的密度 (kg/m^3),取值为 909.1 kg/m^3 ; T 为土的瞬态温度 ($^{\circ}\text{C}$); t 为时间 (s); C 和 λ 分别为土的体积比热容 ($\text{J}/(\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$) 和导热系数 ($\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$); ∇ 为微分算子,对于二维问题为 $[\partial/\partial_x, \partial/\partial_z]$, x 和 z 为直角坐标 (m); L 为水的相变潜热 (J/kg),取值为 $3.35 \times 10^5 \text{ J/kg}$; θ_i 为冻土中孔隙冰的体积含量 (%)。

温度的变化会引起冻土中未冻水和冰的体积分

量变化, 冻土的比热容和导热系数也会随之发生改变。体积比热容是土体的一种广度性质, 具有可叠加性, 其中孔隙空气对土体热特性的影响可以忽略, 因此冻土的比热容参数是土骨架、未冻水和冰的比热容之和, 计算公式为^[11]

$$C = \theta_s C_s + \theta_i C_i + \theta_u C_u \quad (2)$$

式中: C_s 、 C_i 、 C_u 分别为土骨架、冰及水的体积比热容 ($\text{J}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$); θ_s 和 θ_u 分别为土骨架和未冻水的体积含量 (%)。

冻土的导热系数 λ 采用几何平均公式计算^[11]:

$$\lambda = \lambda_s^{\theta_s} \lambda_i^{\theta_i} \lambda_u^{\theta_u} \quad (3)$$

式中: λ_s 、 λ_i 、 λ_u 分别为土骨架、冰、水的导热系数 ($\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$)。

土中水由孔隙冰和孔隙水组成, 由于冰和水的密度不同, 则冻土的体积含水率 θ 为

$$\theta = \theta_u + \frac{\rho_i}{\rho_w} \theta_i \quad (4)$$

式中: ρ_w 为水的密度 (kg/m^3)。

体积含水率 θ 与质量含水率 w 的换算关系式为

$$\theta = \frac{\rho_d}{\rho_w} w \quad (5)$$

式中: ρ_d 为土的干密度 (kg/m^3)。

2.2 水分控制方程

土体中未冻水的迁移遵循达西定律, 根据有相变项的 Richard 方程, 非饱和冻土中未冻水迁移的微分方程为

$$\frac{\partial \theta_u}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\rho_w} \cdot \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \nabla [D(\theta_u) \nabla \theta_u + K_g(\theta_u)] \quad (6)$$

式中: $D(\theta_u)$ 为非饱和冻土的水分扩散系数 (m^2/s), 其主要由于含水率的差异引起; $K_g(\theta_u)$ 为非饱和冻土重力方向的导水系数 (m/s), 表示单位水力梯度下的流量。冻土的水力扩散率 $D(\theta_u)$ 的计算方法为^[6]

$$D(\theta_u) = \frac{K(\theta_u)}{C(\theta_u)} \cdot I(\theta_i) \quad (7)$$

式中: $C(\theta_u)$ 为比水容量 (m/s), 表示基质势变化引起含水率变化, 由滞水模型确定; $K(\theta_u)$ 为非饱和土的渗透率 (m/s); $I(\theta_i)$ 为阻抗因子, 表示孔隙冰对未冻水迁移的阻滞作用, 即认为孔隙冰的存在使得相同未冻水含量的冻土与融土水分迁移的导水系数和扩散系数的比值为 I 。当含冰量为 0 时, $I = 1$, 方程 (6) 退化为未冻土的水分控制方程。

在冻土的非饱和渗流分析中, 选用 Van Genuchten (VG) 滞水模型和 Gardner 渗透系数模型确定水分运动参数 $C(\theta_u)$ 和 $K(\theta_u)$ ^[22], 计算公式分别为

$$K(\theta_u) = K_s \cdot S^l [1 - (1 - S^{1/m})^m]^2 \quad (8)$$

$$C(\theta_u) = [a_0 m / (1 - m)] S^{1/m} (1 - S^{1/m})^m \quad (9)$$

式中: K_s 为土的导水系数 (m/s); a_0 、 m 、 l 均为根据土体性质确定的本构参数 (无量纲); S 为冻土的相对饱和度。

VG 模型中相对饱和度 S 的计算方法为^[22]

$$S = \frac{\theta_u - \theta_r}{\theta_b - \theta_r} \quad (10)$$

式中: θ_r 和 θ_b 分别为未冻土的残余含水率 (%) 和饱和含水率 (%)。

孔隙冰的阻抗因子 $I(\theta_i)$ 的计算方法为^[6]

$$I(\theta_i) = 10^{-10\theta_i} \quad (11)$$

2.3 相变动态平衡方程

冻土温度场和水分场计算方程中包含温度 T 、孔隙冰体积含量 θ_i 和未冻水体积含量 θ_u , 共计 3 个未知量, 故须引入一个联系方程才能实现水热耦合模型求解, 即建立 θ_i 、 θ_u 和 T 三者间的关系。

冻土中的未冻水含量与温度保持动态平衡关系, 而干密度和总含水率对未冻水含量的影响不明显。对应这一关系, 目前有很多经验关系式^[11-13]。其中, 徐学祖等^[11]基于试验数据, 给出冻土中未冻水含量的经验关系表达式为

$$\frac{w_0}{w_u} = \left(\frac{T}{T_f} \right)^B, T < T_f \quad (12)$$

式中: w_0 为土的初始含水率 (%); w_u 为温度 T 时的未冻含水率 (%); T_f 为土的冻结温度 ($^\circ\text{C}$); B 为常数, 与土类和含盐量有关, 一般砂土取 0.61, 粉土取 0.47, 黏土取 0.56。

换算后的体积含水率比例为

$$\frac{\theta}{\theta_u} = \frac{w_0}{w_u} \quad (13)$$

联立式 (4)、(11)、(12), 求得冻土中孔隙冰、未冻水和温度的联系方程为

$$\theta_i = \begin{cases} 1.1\theta_u \left[\left(\frac{T}{T_f} \right)^B - 1 \right], & T < T_f \\ 0, & T \geq T_f \end{cases} \quad (14)$$

式中: 系数 1.1 为水与冰的密度之比 ρ_w / ρ_i 。

2.4 边界条件和初始条件

温度场微分方程 (1)、水分迁移微分方程 (6) 和相变动态平衡关系方程 (14) 组成一个偏微分方程组, 根据具体问题的边界条件和初始条件, 即可进行冻土水热耦合问题的求解。

水分和温度包括的边界条件和初始条件类型相同。温度边界条件包括第 1 类边界条件 (定值)、第 2 类边界条件 (梯度) 及其组合条件, 表达式为

$$T|_b = T_b, \quad \frac{\partial T}{\partial n}|_b = T_b, \quad \left[\frac{\partial T}{\partial n} + T \right]_b = T_b \quad (15)$$

式中: b 表示边界; n 表示边界的外法线方向; T_b 为边界温度 ($^{\circ}\text{C}$) 或者温度梯度 ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$)。

温度的初始条件表达式为

$$T|_{t=0} = T_0 \quad (16)$$

式中: T_0 为初始温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

3 水热耦合模型的 OpenFOAM 实现

3.1 数值方法

本文采用有限体积法对水热耦合模型进行数值离散^[23]。在水热耦合计算中, 对于温度和水分的控制方程可以统一为求解如下形式的方程:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} = \nabla \cdot \Gamma \nabla \phi + S_p \phi + S_c \quad (17)$$

式中: ρ 、 ϕ 、 Γ 、 S_p 、 S_c 等 5 个广义变量对应的具体参数如表 1 所示。

表 1 数值计算中广义变量的具体参数

Table 1 Specific parameters of generalized variables in numerical calculation

公式编号	ϕ	ρ	Γ	S_p	S_c
式 (1)	T	C	λ	0	$L\rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t}$
式 (6)	θ_u	$1 + \frac{\rho_i}{\rho_w} r$	$D(\theta_u)$	$\frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{dr}{dt}$	$\nabla \cdot K_g(\theta_u)$

表 1 中 r 的计算方法为

$$r = \begin{cases} 1.1 \left[\left(\frac{T}{T_f} \right)^B - 1 \right], & T < T_f \\ 0, & T \geq T_f \end{cases} \quad (18)$$

有限体积法的基本原理是: 首先, 将计算对象的几何模型划分为有限不重叠的空间离散网格; 然后, 将偏微分方程在每一个空间网格上进行积分, 核心方法为利用散度定理将控制体的体积分转变为

表面的面积分。由于每一个空间网格都是由有限个面围成的, 面心的物理量可以由体心的物理量插值得到, 因此可以将偏微分方程组离散为代数方程组, 通过求解这一代数方程组即可得到变量在此区域的分布。离散过程中的参数如图 1 所示, 其中 P 和 N 为两个相邻的控制体单元, 它们共享面 f , 向量 $\mathbf{S}_f$ 为面 f 的法向量, d 为 P 和 N 之间的距离^[24]。

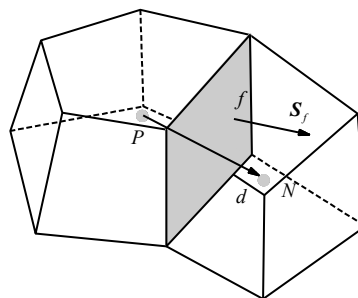


图 1 有限体积离散参数^[24]

Fig.1 Parameters in finite volume discretization^[24]

对于式 (17) 中的扩散项 $\nabla \cdot \Gamma \nabla \phi$, 首先针对每一个控制体做积分, 可得

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV = \int_V \nabla \cdot \Gamma \nabla \phi dV + \int_V S_p \phi dV + \int_V S_c dV \quad (19)$$

式中: V 为控制体单元的体积。

然后, 应用高斯定理, 将式 (19) 中的体积分转化为面积分, 结果表示为

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV = \int_{\partial V} \Gamma \nabla \phi d\mathbf{S}_f + \int_V S_p \phi dV + \int_V S_c dV \quad (20)$$

之后, 将式 (20) 中的积分采用求和近似代替, 可得

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} V = \sum_{f=1}^k \Gamma_f \nabla \phi \cdot \mathbf{S}_f + S_p V \phi + S_c V \quad (21)$$

式中: k 为控制体界面个数。

对于式 (21) 中控制体面上变量的梯度, 可以直接通过相邻两个控制体的体心变量计算得到。因此, 式 (21) 中面积法向量和变量在控制体面上的内积可以离散为

$$\mathbf{S}_f \cdot (\nabla \phi)_f = |\mathbf{S}_f| \frac{\phi_N - \phi_P}{|d|} \quad (22)$$

式中: ϕ_N 、 ϕ_P 为控制体单元 N 、 P 的体心变量 ϕ 值。

对于控制面 f 上的扩散系数 Γ_f , 可以采用调合平均的方法进行计算:

$$\Gamma_f = \frac{\overline{PN}}{\frac{\overline{Pf}}{\Gamma_P} + \frac{\overline{fN}}{\Gamma_N}} \quad (23)$$

式中： Γ_P 、 Γ_N 分别为控制体单元 P 、 N 的扩散系数； $\overline{PN}$ 为控制体单元 P 、 N 的体心之间的距离； $\overline{Pf}$ 为控制体单元 P 的体心到面 f 的距离； $\overline{fN}$ 为控制体单元 N 的体心到面 f 的距离。

式(21)还需要时间步进行求解，可以简写为

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} V = F(\phi) \quad (24)$$

$$F(\phi) = \sum_{f=1}^N \Gamma_f \nabla \phi \cdot \mathbf{S}_f + S_p V \phi + S_c V \quad (25)$$

考虑到方程收敛性和稳定性的要求，本文采用全隐式向后差分格式，对式(24)中的时间导数项进行离散。首先，对时间变量进行离散，如图2所示，得到离散时间集合及相应的一系列时间间隔 $[t_{m-1}, t_m]$ ， $m=0, 1, \dots, M$ ，其中时间步长为

$$\Delta t_m = t_m - t_{m-1} \quad (26)$$

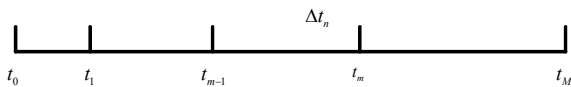


图2 时间参数离散
Fig.2 Discretization of time

在 t_m 时刻，时间导数可以近似表示为

$$\left. \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} \right|_{t_m} = \frac{\rho \phi|_{t_m} - \rho \phi|_{t_{m-1}}}{\Delta t_m} \quad (27)$$

则方程可以表示为

$$\frac{\rho \phi|_{t_m} - \rho \phi|_{t_{m-1}}}{\Delta t_m} V = F(\phi|_{t_m}) \quad (28)$$

通过以上离散过程，可以将偏微分方程转化为一组代数方程组，通过求解该代数方程组即可以得到温度、未冻水含量和含冰量等变量的分布。

3.2 计算流程

数值计算中，每一时间步的迭代流程为：

(1) 预测时段末的温度 T_i^{k+1} ，近似取时段初的温度值 T_i^k ；通过相变动态平衡方程(14)，得出本时段末时以未冻水含量 $(\theta_u)_i^{k+1}$ 为未知量的体积含冰量 $(\theta_i)_i^{k+1}$ 表达式。

(2) 基于水分扩散系数 D_i^k 和步骤(1)得到的 $(\theta_i)_i^{k+1}$ 表达式，求解水分控制方程(6)，得出本时

段末各结点的 $(\theta_u)_i^{k+1}$ ；进而通过方程(14)得到以 T_i^{k+1} 为未知量的 $(\theta_i)_i^{k+1}$ 表达式。

(3) 基于 C_i^k 、 λ_i^k 和步骤(2)得到的 $(\theta_i)_i^{k+1}$ 表达式，求解温度控制方程(1)，得出时段末各结点真实的 T_i^{k+1} 。此即本次迭代计算的校正值，下一次迭代计算的预报值。

(4) 重复步骤(1)~(3)，直至前后两次计算得到的未冻水含量之差和温度之差均小于规定的允许误差为止。通过不同允许误差的试算来对比程序的计算时间和精度，并结合已有文献[16, 25]，最终将允许误差取值为 10^{-4} 。

在计算过程中，得到下一个时间步的未冻水含量和温度值后，分别计算水分扩散系数 D_i^{k+1} 、体积比热容 C_i^{k+1} 及导热系数 λ_i^{k+1} ，然后重复进行步骤(1)~(4)，直至得到设定的最终时间点为止，具体计算流程如图3所示。

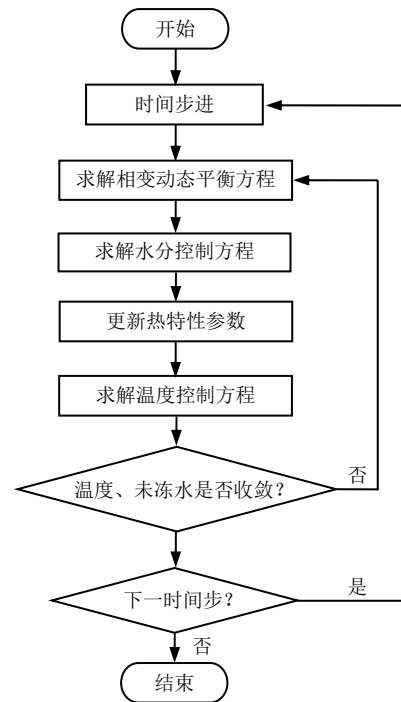


图3 计算流程图

Fig.3 Flowchart of calculation

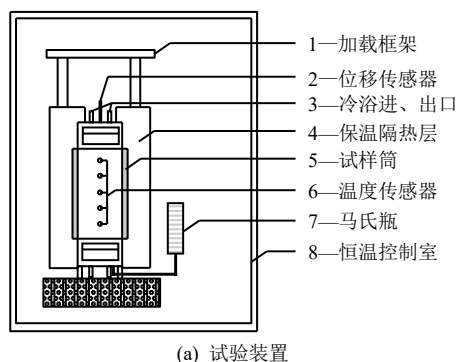
4 水热耦合计算程序的验证

4.1 试验方案

通过室内单向冻结试验来验证本文所提冻土水热耦合计算程序的准确性。试验土料取自京包铁路某处，颗粒级配为：细砾含量为0.74%，砂粒含量为39.87%，粉粒含量为45.74%，黏粒含量为13.65%。土料的其他物性指标包括：最大干密度为1.89 g/cm³，最优含水率为13.0%，相对密度为2.74，

液限为 26.6%，塑限为 13.4%，属于低液限粉质黏土。试样制备为高度 $H = 10\text{ cm}$ 、直径 $D = 15\text{ cm}$ 的圆柱体，制样标准为压实度取 90%，含水率取 17.5%，相应的冻结温度为 -0.27°C 。

试样的试验条件为，在封闭、无荷载环境下进行自上而下的冻结试验，试验前试样以 $+1^\circ\text{C}$ 预冷，温度稳定后将底板温度恒定控制为 $+1^\circ\text{C}$ ，调节冷端温度分别控制为 -0.75°C 和 -3.00°C ，试验总时长为 48 h。试验仪器采用北京交通大学冻土工程实验室的两端制冷冻融试验系统，如图 4 所示^[26]。



(a) 试验装置



(b) 试验土柱

图 4 土体冻结试验示意图
Fig.4 Sketch of soil freezing test

数值计算中，试样的土性参数和渗流模型参数分别如表 2 和表 3 所示。计算模型采用 BlockMesh 生成的结构化网格，网格数目为 3 750 个，径向网格数为 75 个，轴向网格数为 50 个。计算时间步长为 1 min。温度边界条件为：顶端和底端温度为第 1 类边界条件，即 $T(t, y = 0.1) = -0.75^\circ\text{C} / -3.00^\circ\text{C}$ ， $T(t, y = 0) = 1^\circ\text{C}$ ；两端为第 2 类边界条件，即 $\partial T / \partial n(t, x = 0, 0.15) = 0$ 。含水率在四周均为第 2 类边界条件，即 $\partial \theta / \partial n = 0$ 。

表 2 试样的热学参数
Table 2 Thermal properties of samples

C_s	C_i	C_u	λ_s	λ_i	λ_u
1.4×10^6	4.2×10^6	2.1×10^6	1.3	2.2	0.55

表 3 试样的渗流模型参数取值
Table 3 Parameter values of seepage model of samples

a_0	M	l	θ_r	$\theta_s / \%$	k_s
2.65	0.26	0.5	0	19	5×10^6

4.2 试验与数值计算结果的对比分析

在冷端温度 -0.75°C 和 -3.00°C 条件下，室内试验和数值计算得到的含水率分布特征对比结果分别如图 5 和图 6 所示。可以看出，模型计算值和试验实测值基本吻合。当冷端温度为 -0.75°C 时，未冻区水分向冻结区迁移，由于冻结锋面移动速度慢，水分迁移量较大，且试样顶端含水率的增加幅度最大。当冷端温度为 -3.00°C 时，冻结锋面移动速度相对较快，由于水分迁移速度最大发生在冻结锋面处，且其迁移受到冰的阻滞作用，因此试验结束时在土表层和冻结缘位置形成两个含水率峰值区。

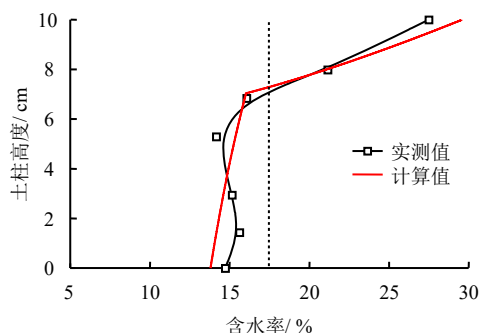


图 5 冻结试验后的试样含水率分布特征 (-0.75°C)
Fig.5 Distribution characteristics of moisture content of samples after the freezing test (-0.75°C)

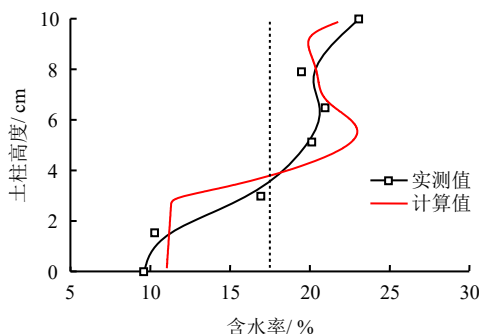


图 6 冻结试验后的试样含水率分布特征 (-3.00°C)
Fig.6 Distribution characteristics of moisture content of samples after the freezing test (-3.00°C)

图 7 为室内试验和数值计算得到的试样温度随深度的分布特征。可以看出，试验结束时试样实测温度沿深度近似以线性规律逐渐降低，与数值计算结果一致。由此可以得出，基于 OpenFOAM 的水

热耦合计算程序可以较为准确地模拟土体在冻结过程中温度场和水分场的重分布特征。

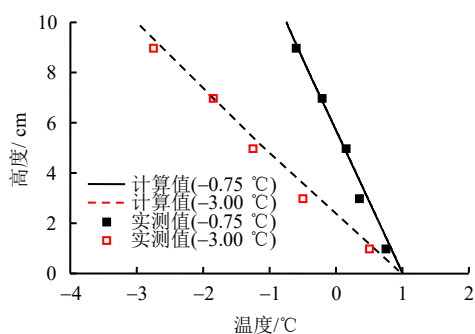


图7 冻结试验后试样温度分布特征

Fig.7 Distribution characteristics of temperature of the samples after freezing test

在计算程序验证基础上, 进一步预测不同冷端温度条件下试样中总含水率、未冻水含量和含冰量的分布特征。图8为不同冷端温度条件下试样总含水率的分布特征。可以看出, 随着冷端温度的降低, 试样内部均存在含水率的双峰值现象, 且第二峰值区位置逐渐向下移动, 与冻结缘分布位置一致, 冻结缘以下土体含水率急剧减小。对于未冻水含量, 冷端温度为 -0.75°C 时, 由于冻结缘位置靠上, 水分持续向试样表层迁移, 因此表层未冻水含量较大; 随着冷端温度降低, 不同高度处的未冻水含量逐渐减小, 且未冻水含量峰值区位置也逐渐向下移动, 如图9所示。对于含冰量, 冻结深度以下为0; 冻结深度以上, 试样顶部出现分凝冰现象, 从上到下含冰量呈逐渐减小趋势, 但由于冻结区内不再发生水分迁移, 冻结区内含冰量差异不大, 且在冻结缘附近有一定的增大现象, 如图10所示。

综上所述, 上述数值计算结果与既有研究结论基本一致, 温度计算值与实测值极为接近, 含水率

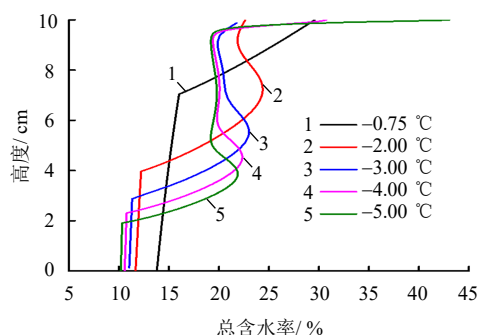


图8 不同冷端温度条件下试样总含水率分布特征

Fig.8 Distribution characteristics of total moisture content of samples under different cold-end temperatures

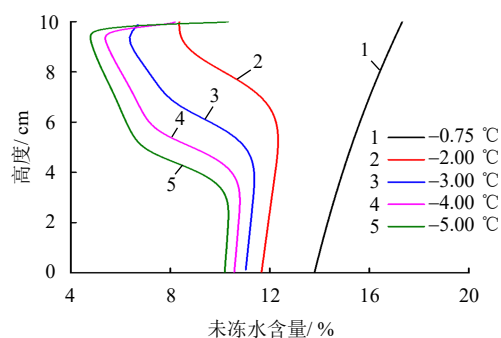


图9 不同冷端温度条件下试样未冻水含量分布特征

Fig.9 Distribution characteristics of unfrozen moisture content of samples under different cold-end temperatures

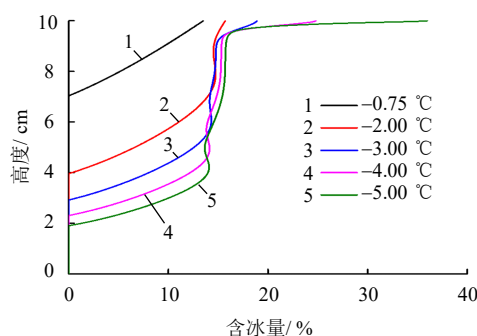


图10 不同冷端温度条件下试样含冰量分布特征

Fig.10 Distribution characteristics of ice content of samples under different cold-end temperatures

计算值与实测值存在一定误差, 但平均误差值均在2%以内, 两者的分布趋势一致, 符合土体冻结的一般规律^[1-2]。同时, 在土体的冻结过程中, 温度、水分之间的相互作用是复杂的热力学、物理化学和力学综合问题。

5 结 论

(1) 在现有冻土水热耦合模型基础上, 引入孔隙冰含量和土体温度、水分迁移之间的动态平衡关系, 通过考虑冰相对水分场的影响, 可以更为合理地确定比热容、导热系数、水分扩散系数等热学和水力特性参数随土体冻结过程的动态变化特征。

(2) 基于 OpenFOAM 编制冻土水热耦合过程的计算程序。编制步骤为: 首先, 定义变量和建立水热耦合控制方程; 然后, 采用基于多面体网格的有限体积对方程进行空间离散, 并通过散度定理实现偏微分方程由体积分向面积分的转化, 进而实现方程的代数化求解, 同时采用全隐式向后差分对方程进行时间离散; 之后, 设置具体的迭代求解流程和计算收敛标准。在此基础上, 就可以针对不同的案例, 通过设置材料属性、边界条件及初

始条件对冻土水热耦合过程进行数值模拟。

(3) 通过一个室内土体单向冻结试验验证了计算程序的合理性。结果表明, 该计算程序可以较为准确地反映不同温度边界条件下土体的水分迁移量、相变量及冻结深度、冻结速率等各类指标的变化特征, 该程序是一个有效的冻土水热耦合计算平台。

参考文献

- [1] 陈肖柏, 刘建坤, 刘鸿绪, 等. 土的冻结作用与地基[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
CHEN Xiao-bai, LIU Jian-kun, LIU Hong-xu, et al. Frost action of soil and foundation engineering[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [2] 徐学祖, 邓友生. 冻土中水分迁移的实验研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
XU Xue-zu, DENG You-sheng. Experimental research of moisture migration in permafrost[M]. Beijing: Science Press, 1991.
- [3] 王铁行, 胡长顺. 多年冻土地区路基温度场和水分迁移场耦合问题研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(12): 93-97.
WANG Tie-hang, HU Chang-shun. Study on the problem of coupled temperature field and moisture migration field of subgrade in permafrost region[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2003, 36(12): 93-97.
- [4] 李述训, 程国栋. 冻融土中的水热输送问题[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1995.
LI Shu-xun, CHENG Guo-dong. Problem of heat and moisture transfer in freezing and thawing soils[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1995.
- [5] HARLAN R L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil[J]. **Journal Water Resources Research**, 1973, 19(5): 1314-1323.
- [6] TAYLOR G S, LUTHIN J N. A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1978, 15(4): 548-555.
- [7] ZHAO L T, DONALD M G, DAVID H M. Numerical analysis of simultaneous heat and mass transfer during infiltration into frozen ground[J]. **Journal of Hydrology**, 1997, 200(1-4): 345-363.
- [8] LIU J K, TIAN Y H. Numerical studies for the temperature regime of roadbed with thermal-isolation layer on permafrost[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2002, 35(1): 1-13.
- [9] 李东庆, 周家作, 张坤, 等. 季节性冻土的水-热-力建模与数值分析[J]. 中国公路学报, 2012, 25(1): 1-7.
LI Dong-qing, ZHOU Jia-zuo, ZHANG Kun, et al. Modelling and numerical analysis of moisture, heat and stress in seasonal frozen soil[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2012, 25(1): 1-7.
- [10] 明锋, 李东庆. 非饱和正冻土一维水热耦合模型与试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(3): 889-894.
MING Feng, LI Dong-qing. Modeling and experimental investigation of one dimension coupled moisture and heat in unsaturated freezing soil[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2014, 45(3): 889-894.
- [11] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 43-63.
XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin. Frozen ground physics[M]. Beijing: Science Press, 2001: 43-63.
- [12] KEVIN O N, ROBERT D M. Exploration of a rigid ice model of frost heave[J]. **Water Resources Research**, 1985, 21(3): 281-296.
- [13] VLODEK R T, BERNHARD W. On the prediction of hydraulic conductivity of frozen soils[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2011, 33(1): 176-180.
- [14] 尚松浩, 毛晓敏, 需志栋, 等. 土壤水分动态模拟模型及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
SHANG Song-hao, MAO Xiao-min, XU Zhi-dong, et al. Dynamic simulation model of soil moisture and its application[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [15] 毛卫南, 刘建坤. 不同离散化方法在正冻土水热耦合模型中的应用[J]. 工程力学, 2013, 30(10): 128-132.
MAO Wei-nan, LIU Jian-kun. Different discretization method using in coupled water and heat transport mode for soil under freezing conditions[J]. **Engineering Mechanics**, 2013, 30(10): 128-132.
- [16] 白青波, 李旭, 田亚护. 冻土水热耦合方程及数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增刊 2): 131-136.
BAI Qing-bo, LI Xu, TIAN Ya-hu. Equations and numerical simulation for coupled water and heat transfer in frozen soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(Suppl.2): 131-136.
- [17] 李杨, 王清, 王坛华. 冻土水热耦合模型数值求解及结果检验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(1): 207-213.
LI Yang, WANG Qing, WANG Tan-hua. Numerical solution and test of results for a hydrothermal coupled

- model about frozen soil[J]. **Journal of Jilin University (Earth Science Edition)**, 2015, 45(1): 207-213.
- [18] 何敏, 冯孝鹏, 李宁. 准饱和正冻土水热力耦合模型的扩展有限元程序研发[J]. **岩石力学与工程学报**, 2017, 36(11): 2799-2809.
- HE Min, FENG Xiao-peng, LI Ning. Development of the extended finite element program for the thermo-hydro-mechanical coupling model of quasi-saturated freezing soil[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(11): 2799-2809.
- [19] 曾桂军, 张明义, 李振萍, 等. 饱和正冻土水分迁移及冻胀模型研究[J]. **岩土力学**, 2015, 36(4): 1085-1092.
- ZENG Gui-jun, ZHANG Ming-yi, LI Zhen-ping, et al. Study of moisture migration and frost heave model of freezing saturated soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(4): 1085-1092.
- [20] GREENSHEILDS C J. OpenFOAM- The open source CFD toolbox user guide version2.4.0[M]. Berkshire: OpenFOAM Foundation Ltd., 2015.
- [21] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. **Soil Science Society of America Journal**, 1980, 44(5): 892-898.
- [22] 卢宁, LIKOS W J. 非饱和土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- LU Ning, LIKOS W J. *Unsaturated soil mechanics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012.
- [23] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- TAO Wen-quan. *Numerical heat transfer*[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001.
- [24] GREENSHEILDS C J. OpenFOAM programmer's guide[R]. San Francisco: OpenFOAM Foundation, 2011.
- [25] 刘畅, 陈晓飞, 付默菡, 等. 回融过程中土壤水热耦合迁移的数值模拟[J]. **水电能源科学**, 2011, 29(9): 115-120.
- LIU Chang, CHEN Xiao-fei, FU Mo-han, et al. Numerical simulation of coupled water and heat migration of soil water during melting process[J]. **Water Resources and Power**, 2011, 29(9): 115-120.
- [26] 田亚护. 动、静荷载作用下细粒土冻结时水分迁移与冻胀特性实验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- TIAN Ya-hu. *The water migration and frost susceptibility of fine-grained soils during freezing under dynamic and static loading*[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007.

《岩土力学》2019 年第 1 期被 EI 收录论文 (42 篇, 收录率 100 %) (1)

序号	论文题名	作者	页码
1	非饱和土与特殊土力学及工程应用研究的新进展	陈正汉, 郭楠	1—54
2	盐岩损伤自愈合特性研究综述	康燕飞, 陈结, 姜德义, 等	55—69
3	能量桩单桩工作特性简化分析方法	费康, 戴迪, 洪伟	70—80
4	黏性土压缩过程临界孔径现象及固有分形特征	陶高梁, 朱学良, 胡其志, 等	81—90
5	基于岩石破坏全过程能量特征改进的能量跌落系数	宋洪强, 左建平, 陈岩, 等	91—98
6	强震作用下陡倾顺层斜坡倾倒变形机制离心振动台试验	巨能攀, 邓天鑫, 李龙起, 等	99—108
7	砂土颗粒级配对格栅-土界面静、动力直剪特性的影响	王军, 施静, 刘飞禹, 等	109—117
8	基于 3D 雕刻技术的岩体结构面剪切各向异性研究	周辉, 程广坦, 朱勇, 等	118—126
9	基于振动台试验的抗滑桩加固斜坡桥基研究	雷达, 蒋关鲁, 孙圣杰, 等	127—134
10	不同高度花岗岩岩爆试验的声发射特征	赵菲, 王洪建, 何满潮, 等	135—146
11	地震动时压缩比对可液化地基地震反应影响的振动台试验	许成顺, 豆鹏飞, 高岙成, 等	147—155
12	土体稳定性计算中地下水作用力探讨	尹晓萌, 晏鄂川, 刘旭耀, 等	156—164
13	层状盐岩双井流场浓度场试验及数值计算	姜德义, 李晓康, 陈结, 等	165—172
14	考虑循环围压与振动频率影响的饱和软黏土动力特性试验研究	黄珏皓, 陈健, 孔令智, 等	173—182
15	南沙群岛珊瑚礁灰岩的动态力学性能试验	孟庆山, 范超, 曾卫星, 等	183—190
16	钙质砂一维冲击响应及吸能特性试验	魏久淇, 吕亚茹, 刘国权, 等	191—198
17	砂土中桶形基础静压沉贯过程桶-土受力分析	朱小军, 李文帅, 费康, 等	199—206
18	盐岩单轴蠕变声发射特征及损伤演化研究	曾寅, 刘建锋, 周志威, 等	207—215
19	非饱和和原状黄土弹塑性损伤流固耦合模型及其初步应用	姚志华, 陈正汉, 方祥位, 等	216—226
20	水-盐作用下红层砂岩声波特性劣化试验	原鹏博, 杨烜宇, 赵天宇	227—234

(未完, 见第 1798 页)