

## 基于多孔介质理论的渠道基土温度场特性研究

唐少容, 王红雨

(宁夏大学, 银川 750021)

**摘要:**视冻土为均匀各向同性的多孔介质,确定了不同冻结状况下的土壤热参数。根据热传导方程,建立了土壤冻结过程的二维变系数数学模型,通过全隐式差分方法,并采用交替方向差分格式,得到了随时间和空间变化的温度分布场的求解方法。利用土柱冻结解析解验证了数值模型。以整体式小型U形渠道为对象,研究了不同位置及深度的基土温度分布状况,并与野外观测结果进行了对比。结果表明,基于多孔介质理论确定土壤热参数可以简化非线性方程的求解,全隐式交替差分格式对于小型渠道基土求解温度场比较适用;由于渠道区域形状的不规则及其二维边界,导致地下水位、热流对渠道不同部位的温度分布具有不同的作用,阴坡温度普遍低于渠底,已冻区逐渐扩大,温度分布较均匀,正冻区渠道基土温度呈非均匀分布状态。

**关键词:**冻结;温度场;多孔介质理论;整体式小型U形渠道

**中图分类号:**TV314

**文献标志码:**A

**doi:**10.13522/j.cnki.ggps.2017.02.014

唐少容,王红雨. 基于多孔介质理论的渠道基土温度场特性研究[J]. 灌溉排水学报,2017,36(2):87-92.

## 0 引言

冻土是自然界中与温度密切相关的地质体<sup>[1]</sup>,冻土的一切物理、力学、水力性质及土壤冻结和融化过程伴生的各种现象都取决于冻土体的温度变化过程,对冻土温度状况预测是冻土学研究的重要内容之一<sup>[2]</sup>。土体的温度变化将引起水分的迁移与土体冻胀<sup>[3-4]</sup>,并直接影响冻土地区结构的变形和稳定<sup>[5]</sup>。许多工程都借助于温度场的分布针对性地提出了对抗结构冻胀破坏的措施<sup>[6-8]</sup>。地温现场监测和数值模拟是目前研究冻土地区温度场的主要方法<sup>[9-12]</sup>。文献[13-14]通过对地温现场监测,研究了渠道基土冻深及水分迁移特性。冻土的温度场是时间和空间的函数,一般都使用各种数值解法进行求解<sup>[15]</sup>。由于土体冻融过程中存在相变现象,因此,许多学者致力于处理相变热传导温度场问题<sup>[16-18]</sup>;通过建立含损伤的冻土弹性本构模型对渠道的温度场进行了研究<sup>[19]</sup>;在渠道基土温度场研究方面,依据温度梯度理论,论述了大型U形混凝土衬砌渠道的冻胀机理,并建立了水热耦合二维模型<sup>[20]</sup>;研究了基土温度梯度驱动下渠道的冻胀破坏机理<sup>[21]</sup>。但大多都是基于土壤热参数不随温度改变的假设,而事实上,土壤的热参数与温度变化密切相关,极大影响冻土热传导能力。因此,以宁夏地区常见的整体式小型U形渠道为对象,针对其受季节性冻土影响致使渠道混凝土衬砌结构极易发生破坏的现状,从确定不同冻结状态下土壤的热参数入手,研究渠道基土温度场分布状况,为整体式小型U形渠道的冻胀破坏机理及抗冻胀设计提供一定科学依据。

## 1 冻土温度场数学模型

## 1.1 基本假定

1)视土体为均匀各向同性的多孔介质;2)假定土体为饱和状态;3)忽略冻土中的空气,冻土由土颗粒、水、冰颗粒组成,满足混合物理理论的基本假定;4)冻结过程中水分迁移主要以液态形式进行,且符合Darcy定律;5)土体冻结时,不计对流引起的热量变化,忽略土中溶质迁移及其影响<sup>[22]</sup>。

## 1.2 土体冻结参数的确定

视冻土为包含土颗粒、水、冰的三相物质,总体积为 $V$ ,其中土颗粒、水、冰的体积分别为 $V_s$ 、 $V_w$ 、 $V_i$ ,体积含

收稿日期:2016-06-03

基金项目:国家自然科学基金项目(51269023)

作者简介:唐少容(1982-),讲师,博士研究生,主要从事结构设计及理论研究。E-mail:tangsrong@126.com

水率分别为 $\theta_s$ 、 $\theta_w$ 、 $\theta_i$ ,孔隙体积为 $V_v$ ,被水和冰填充,初始孔隙度为 $n$ ,并假定 $n$ 为定值,不随温度、时间和空间发生变化。则有:

$$\theta_s = V_s/V, \theta_w = V_w/V, \theta_i = V_i/V, \quad (1)$$

$$n = V_v/V = (V_w + V_i)/V. \quad (2)$$

引入未冻水体积与孔隙体积之比 $\zeta$ 用以表征土壤的冻结状态,即:

$$\zeta = V_w/V_v. \quad (3)$$

根据式(3),当土体尚未冻结时, $\zeta=1$ 。当土体尚冻结时, $\zeta$ 确定计算式<sup>[23]</sup>为:

$$\zeta = \zeta^* + (1 - \zeta^*) e^{a(T - T_f)}, \quad (4)$$

式中: $\zeta^*$ 为已冻区的未冻水体积含水率; $a$ 为材料参数; $T_f$ 为土体相变温度。

试验表明,土的比热具有按各物质成分的质量加权平均的性质(土中气相充填物的量及比热均很小,可忽略不计),则 $\lambda$ 及 $C$ 可以表示为<sup>[24]</sup>:

$$\lambda = n\lambda_w\zeta + n\lambda_i(1 - \zeta) + (1 - n)\lambda_s, \quad (5)$$

$$C = n\rho_w c_w \zeta + n\rho_i c_i (1 - \zeta) + (1 - n)\rho_s c_s, \quad (6)$$

式中: $\lambda$ 和 $C$ 分别为土体的热传导系数( $W/(m \cdot K)$ )及体积热容( $J/(m^3 \cdot K)$ ); $\lambda_s$ 、 $\lambda_w$ 、 $\lambda_i$ 和 $\rho_s$ 、 $\rho_w$ 、 $\rho_i$ 及 $c_s$ 、 $c_w$ 、 $c_i$ 分别为土颗粒、水和冰的导热系数( $W/(m \cdot K)$ )、密度( $kg/m^3$ )及比热容( $J/(kg \cdot K)$ )。

### 1.3 热传导方程

描述土体冻结的二维热传导方程<sup>[25]</sup>为:

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + L_f \rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t}, \quad (7)$$

式中: $T$ 为温度( $^{\circ}C$ ); $x$ 、 $z$ 为空间坐标; $t$ 为时间(h); $L_f$ 为水-冰相变潜热( $J/kg$ )。

## 2 数学模型的求解

由于冻结过程中土壤的温度场受土壤导热性能、温度及水分的共同影响,方程具有非线性问题,初始条件和边界条件比较复杂,用解析法或半解析法求解困难,目前常用数值计算方法求解,兹采用有限差分法。根据不同差分格式的比较认为,具有二阶精度的中心差分(Crank-Nicholson)格式虽然在理论上是绝对稳定的,但对于非线性问题在时间步长较大时,仍会出现严重的数值振荡,引起求得的解在物理上不真实;而全隐式格式对于较大的时间步长仍能得到物理上真实的解。因此,在差分离散中采用全隐式格式。以 $T_{j,k}^n$ 表示 $x$ 、 $z$ 方向上的节点为 $j$ 和 $k$ 。上角标为时间 $t$ ,其节点用 $n$ 表示。令:

$$\begin{aligned} C \frac{\partial T}{\partial t} &= C_{j,k}^{n+1} \frac{T_{j,k}^{n+1} - T_{j,k}^n}{\Delta t}, \\ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) &= \frac{\lambda_{j+\frac{1}{2},k}^{n+1} (T_{j+1,k}^{n+1} - T_{j,k}^{n+1}) - \lambda_{j-\frac{1}{2},k}^{n+1} (T_{j,k}^{n+1} - T_{j-1,k}^{n+1})}{(\Delta x)^2}, \\ \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) &= \frac{\lambda_{j,k+\frac{1}{2}}^{n+1} (T_{j,k+1}^{n+1} - T_{j,k}^{n+1}) - \lambda_{j,k-\frac{1}{2}}^{n+1} (T_{j,k}^{n+1} - T_{j,k-1}^{n+1})}{(\Delta z)^2}, \\ L_f \rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t} &= L_f \rho_i \frac{(\theta_i)_{j,k}^{n+1} - (\theta_i)_{j,k}^n}{\Delta t}. \end{aligned}$$

整理后式(7)的全隐式差分方程可写为:

$$a_{j,k} T_{j+1,k}^{n+1} + b1_{j,k} T_{j,k}^{n+1} + c_{j,k} T_{j-1,k}^{n+1} + b2_{j,k} T_{j,k}^{n+1} + d_{j,k} T_{j,k+1}^{n+1} + e_{j,k} T_{j,k-1}^{n+1} = -C_{j,k}^{n+1} T_{j,k}^n - L_f \rho_i \frac{(\theta_i)_{j,k}^{n+1} - (\theta_i)_{j,k}^n}{\Delta t}. \quad (8)$$

式(8)的系数矩阵是严格主对角占优的五对角元稀疏矩阵,带宽较大,因此利用2个空间方向交替隐式格式(ADI)进行求解,利用一维方法来求解二维问题。首先,在 $z$ 方向隐式为:

$$a_{j,k} T_{j+1,k}^{n+1} + b1_{j,k} T_{j,k}^{n+1} + c_{j,k} T_{j-1,k}^{n+1} = -C_{j,k}^{n+1} T_{j,k}^n - d_{j,k} T_{j,k+1}^{n+1} - e_{j,k} T_{j,k-1}^{n+1} - b2_{j,k} T_{j,k}^{n+1} - L_f \rho_i \frac{(\theta_i)_{j,k}^{n+1} - (\theta_i)_{j,k}^n}{\Delta t}. \quad (9)$$

再在 $x$ 方向隐式:

$$b2_{j,k} T_{j,k}^{n+1} + d_{j,k} T_{j,k+1}^{n+1} + e_{j,k} T_{j,k-1}^{n+1} = -C_{j,k}^{n+1} T_{j,k}^n - a_{j,k} T_{j+1,k}^{n+1} - b1_{j,k} T_{j,k}^{n+1} - c_{j,k} T_{j-1,k}^{n+1}, \quad (10)$$

式中:  $b1_{j,k} = -\left[\lambda_{j+\frac{1}{2},k}^{n+1} + \lambda_{j-\frac{1}{2},k}^{n+1}\right]r_1 - \left[\lambda_{j,k+\frac{1}{2}}^{n+1} + \lambda_{j,k-\frac{1}{2}}^{n+1}\right]r_1$ ;  $b2_{j,k} = -C_{j,k}^{n+1}$ ;  $c_{j,k} = \lambda_{j-\frac{1}{2},k}^{n+1}r_1$ ;  $d_{j,k} = \lambda_{j,k+\frac{1}{2}}^{n+1}r_1$ ;  $e_{j,k} = \lambda_{j,k-\frac{1}{2}}^{n+1}r_1$ 。

离散方程式(9)、式(10)均为三对角方程组,可用追赶法求解。由于 $C$ 、 $\lambda$ 是待求温度的函数,因此式(9)、式(10)为变系数方程组,求解时不同的温度节点系数取值不同。同时,将系数效应处理滞后一个时间步长,即对时间进行迭代时,以对应前一迭代步的温度方程系数作为确定后一迭代步的已知量<sup>[26]</sup>。直至前后2次迭代值之间的差别不超过给定的误差限。计算中,温度的误差限取0.01℃。

### 3 计算模型的验证

为验证数值模型的合理性,将其与Lunardini提出的三区域解析解<sup>[27]</sup>进行对比。Lunardini将土的冻结分为3个区域:已冻区、正冻区、未冻区。该解是针对具有初始温度的半无限多孔介质在负温下的热传导精确解析解,3个区域的解<sup>[27]</sup>为:

$$T_1 = (T_m - T_s) \frac{\operatorname{erf}\left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha_1 t}}\right]}{\operatorname{erf}(\psi)} + T_s, \quad (11)$$

$$T_2 = (T_f - T_m) \frac{\operatorname{erf}\left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha_1 t}}\right] - \operatorname{erf}(\gamma)}{\operatorname{erf}(\gamma) - \operatorname{erf}(\psi\sqrt{\alpha_1/\alpha_2})} + T_f, \quad (12)$$

$$T_3 = (T_0 - T_f) \frac{-\operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha_2 t}}\right]}{\operatorname{erf}(\gamma\sqrt{\alpha_2/\alpha_3})} + T_0, \quad (13)$$

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_1}{C_1}, \quad \alpha_2 = \frac{\lambda_2}{C_2 + \frac{\gamma_{dl}\Delta n}{T_f - T_m}}, \quad \alpha_3 = \frac{\lambda_3}{C_3}, \quad (14)$$

式中: $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 分别为已冻区、正冻区和未冻区的温度; $T_s$ 为冷端温度; $T_0$ 为初始温度; $T_m$ 是已冻区和正冻区的分界温度; $T_f$ 为正冻区和未冻区的分界温度,即土体相变温度; $\alpha$ 、 $\lambda$ 及 $C$ 分别为热扩散系数、热传导系数及体积热容,下脚标1、2、3分别代表已冻区、正冻区和未冻区。 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$ 及 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 根据不同的冻结状态,利用式(5)、式(6)计算; $\gamma_d$ 为土颗粒干密度; $\Delta n = n_0 - n_f$ ,  $n_0$ 、 $n_f$ 分别为未冻区含水率与固体颗粒质量之比和已冻区含水率与固体颗粒质量之比; $\gamma$ 及 $\psi$ 为式(11)~式(13)的求解参数; $x$ 为从边界到任一冻结区域的距离; $\operatorname{erf}$ 和 $\operatorname{erfc}$ 分别为误差函数和互补误差函数。

对长1 m、宽0.15 m的饱和封闭土柱进行数值计算。取 $T_s = -6^\circ\text{C}$ ,  $T_m = -1^\circ\text{C}$ ,其他计算参数如表1所示。

表1 计算参数

| $T_0/^\circ\text{C}$                                      | $T_f/^\circ\text{C}$                                      | $n$    | $n_0$                              | $n_f$                                 | $c_w(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$ | $c_i(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$ | $c_s(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$ | $\gamma_w(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | $\lambda_w(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$ |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 4                                                         | 0                                                         | 0.05   | 0.2                                | 0.0782                                | 4187                                                 | 2108                                                 | 840                                                  | 1680                                    | 0.58                                                      |
| $\lambda_i(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$ | $\lambda_w(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$ | $\xi'$ | $L_f(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$ | $\rho_w(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | $\rho_i(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$                | $\rho_s(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$                | $a$                                                  | $\gamma$                                | $\psi$                                                    |
| 2.14                                                      | 2.9                                                       | 0.07   | 334 720                            | 1 000                                 | 920                                                  | 2600                                                 | 0.16                                                 | 2.062                                   | 0.137 5                                                   |

将数值计算结果与解析解对比,结果如图1所示。从图1可以看出,二者吻合较好,尤其是当土体达到相变温度附近时,2种解的最大冻深近乎相等。

图2为沿长度方向0.2 m处不同冻结时刻的土体温度值。由图2可知,土体温度逐渐下降。初始时刻的冻结速度远大于后续时刻。表2为土体冻结锋面位置、土体沿长度方向0.2 m处未冻水、冰体含水率随时间的分布。随着冻结时间的增长,冻结锋面向土体内部逐渐推移,当冻结时间相当长后,冻结锋面基本停留,不再变化,说明热量传递基本完成。由于假定初始孔隙度不变,因此同一时刻体积含水率与体积含冰率的和不变。体积含水率和体积含冰率在冻结初始时刻,即正冻区变化最为迅速。随冻结时间的增长,体积含水率逐渐降低,但不会为0。由于兹针对的是不补水状况,因此,在冻结后期,即未冻土中的水分保持恒定。

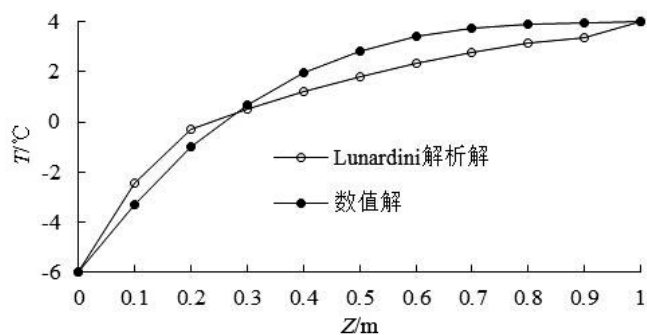


图1 解析解与数值模拟结果对比

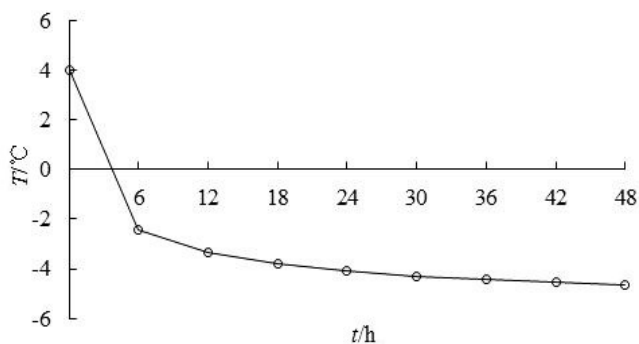


图2 不同时刻温度的变化( $x=0.2\text{ m}$ )

表2  $x=0.2\text{ m}$ 处不同时刻的冻结锋面位置及体积含水率、体积含冰率

| 时间 $t/\text{h}$ | 0     | 6     | 12    | 18    | 24    | 30    | 36    | 42    | 48    |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 冻结锋面位置/m        | 0.000 | 0.191 | 0.259 | 0.309 | 0.360 | 0.399 | 0.433 | 0.464 | 0.489 |
| 体积含水率           | 0.050 | 0.034 | 0.030 | 0.029 | 0.028 | 0.027 | 0.026 | 0.026 | 0.026 |
| 体积含冰率           | 0.000 | 0.016 | 0.020 | 0.021 | 0.022 | 0.023 | 0.024 | 0.024 | 0.024 |

通过封闭土柱的数值模型解与解析解相对比,说明采用的基于多孔介质理论的计算模型是可靠的,能够合理地模拟土壤温度场变化过程和特征,可以用于土体冻结温度场的模拟与预测工作。

#### 4 季冻区整体式小型U形渠道基土冻结温度场模拟

宁夏地处季节性冻土地区,某整体式小型U形渠道横断面如图3所示。其原型观测方案及结果见文献[28]。

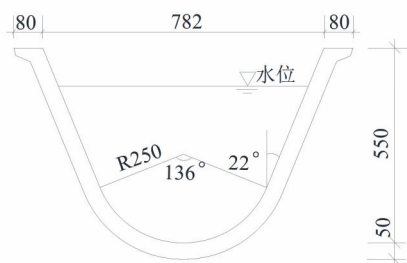


图3 整体式小型U形渠道断面图(单位:mm)

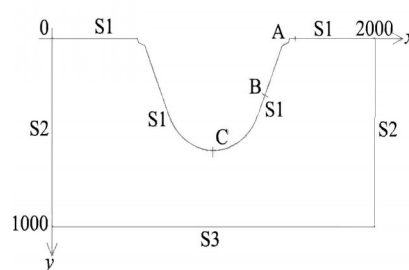


图4 计算模型(单位:mm)

在以往有关土壤水热耦合及温度场的研究中,求解多数是矩形的。由于U形渠道的边界呈非直线状,更为复杂。若边界节点正好落在边界上,可以直接进行边界条件的转移;若边界节点与边界相距较远,需要利用线性差值进行处理,以期获得最为接近的解。计算模型和边界条件如图4所示。

宁夏地区的冻融期一般为12月初至次年3月,取2013年12月19日为第一天,即 $t=1$ ,此时原型观测土体的冻结活动已经发展得较为稳定。对于天然水平地面及渠底、渠坡边界S1,偏于简单地取 $T(t)=-7.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;左右边界S2认为是绝热的;根据原型观测结果,渠底1 m处的平均温度约为 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,故取边界S3为 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

通过土工试验确定的土壤干密度和含水率与表1中的相应值相差不大,为便于计算,其他相关参数暂按表1取值。根据式(5)和式(6)计算不同冻结状态的土壤热参数。

野外观测表明,2013年12月19日至2014年1月29日土体温度逐步下降。图5为该冻结期内渠道截面不同位置处 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线与时间的关系曲线。 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线将土体区分为已冻区与未冻区,由图5可见,数值模拟与野外实测结果基本吻合。随冻结时间的推移,土体内部逐步受到负温影响, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线亦呈下降趋势,已冻区范围逐渐扩大;初始时刻的冻结速度大于冻结后期。为了便于计算,取天然水平地面、渠底、渠坡的边界条件为定值,与实际地温随时间变化的状况有所不同,是造成模拟值与实测值差异的主要原因。图5中2014年1月11日之前,冻结尚未全面开始,致使模拟冻深值大于野外观测值;而该日期之后模拟冻深值小于野外观测值,原因应该是在冻结后期,土体进入正冻状态,而模拟过程中表征水分的 $\zeta$ 未能及时调整所形成的。



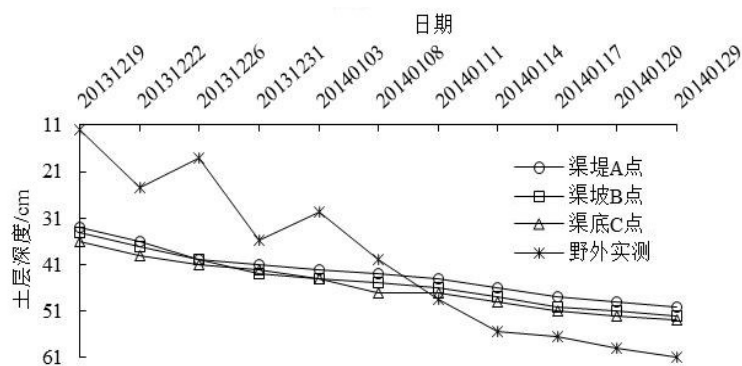


图5 截面不同位置0℃等温线与时间关系曲线

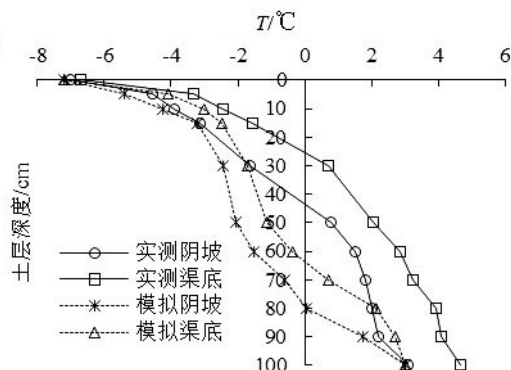


图6 不同位置温度分布图

图6为2014年1月17日的野外观测与数值模拟冻结过程的对比结果。总体而言,渠基土深处的温度高于表层,已冻结区温度比较均匀,且与深度间基本呈线性关系,0℃附近为正冻区,则稍稍偏离线性规律,呈非均匀状态;同一深度处,渠底及阴坡的实测温度值均高于模拟值,且无论是实测值还是模拟值,阴坡温度值普遍低于渠底,说明由于区域形状的不规则及其二维边界,导致地下水位、热流对不同位置温度分布具有不同的作用。渠道表面以下30 cm深度范围内的模拟效果好于30 cm以下,原因应当归结为土壤深处的水分量高于较浅处,从而影响土壤冻结状态。

## 5 结论

基于多孔介质理论,建立了土壤冻结的二变系数数学模型,利用一维土柱的解析解进行了验证,说明了数值模拟方法的合理性;模拟了整体式小型U形渠道基土的冻结过程,在冻深、温度分布等方面与野外实测结果吻合较好。得到的结论主要包括:

- 1)基于多孔介质理论确定土壤不同冻结状态的热参数,极大简化了非线性方程组系数矩阵的求解;
- 2)全隐式差分格式的绝对稳定性极大地方便了土壤冻结过程模拟中时间步长和空间步长的确定,对于空间小且受冻时间不短的小型渠道基土冻结模拟较为适用;
- 3)渠道结构的截面形状及二维边界对其温度分布有显著的影响。

土壤冻结过程中的水分状况和热状况的变化并不是独立的,而是相互影响,耦合变化的过程,因此,应结合水分方程进一步讨论小型渠道在温度梯度下的水分迁移特征。

## 参考文献:

- [1] 汪双杰,陈建兵. 青藏高原多年冻土路基温度场公路空间效应的非线性分析[J]. 岩土工程学报,2008,30(10):1 544-1 549.
- [2] 李述训,吴通华. 冻土温度状况研究方法和应用分析[J]. 冰川冻土,2004,26(4):377-383.
- [3] 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):1 085-1 092.
- [4] 徐学祖,王家澄,张立新,等. 温度梯度诱导薄膜水迁移的冻胀机理[J]. 科学通报,1997,42(9):956-958.
- [5] 梁波,刘德仁,张贵生. 基于温度场的冻土路基变形数值分析及对比[J]. 地下空间与工程学报,2010,6(2):276-282.
- [6] 许健,牛富俊,李爱敏,等. 季节冻土区保温法抑制铁路路基冻胀效果研究[J]. 铁道学报,2010,32(6):124-131.
- [7] 郭婧,娄宗科,郭启胜. 苯板保温在混凝土衬砌渠道中的应用及数值模拟[J]. 人民长江,2013,44(5):57-60.
- [8] 宋清林,何武全,李根,等. 混凝土衬砌渠道保温防冻胀技术研究[J]. 灌溉排水学报,2015,34(4):43-48.
- [9] 张玉芝,杜彦良,孙宝臣. 季节性冻土地区高速铁路路基地温分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(6):1 286-1 296.
- [10] LI SHUANGYANG, LAI YUANMING, PEI WANSHEG, et al. Moisture-temperature changes and freeze-thaw hazards on a canal in seasonally frozen regions[J]. Nat Hazards, 2014, 72(2):287-308.
- [11] 高靖,田军仓,王斌. 不同U型结构混凝土渠道冻胀数值模拟分析[J]. 灌溉排水学报,2015,34(4):38-42.
- [12] 王英浩,陈泓宇. 内蒙古河套灌区冻融周期内渠道水热耦合数值模拟[J]. 灌溉排水学报,2016,35(6):48-53.
- [13] 陈涛,王正中,张爱军. 大U型渠道冻胀试验研究[J]. 灌溉排水学报,2006,25(2):8-11.
- [14] 李学军,费良军,任之忠. 大型U型渠道渠基季节性冻融水分迁移特性研究[J]. 水利学报,2007,38(11):1 383-1 387.
- [15] 张钊,吴紫汪. 渠道基土冻结时温度场和应力场的数值模拟[J]. 冰川冻土,1993,15(2):331-338.
- [16] BONACINA C, COMINI G, FASANO A, et al. Numerical solution of phase-change problems[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1973, 16(10):1 825-1 832.
- [17] COMINI G, GUIDICE S D, LEWIS R W, et al. Finite element solution of nonlinear heat conduction problems with special reference to phase

- change[J].International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1974, 8(3):613-624.
- [18] BAO HUIYI, TOSHIO KOIKE, KUN YANG, et al. Development of an enthalpy-based frozen soil model and its validation in a cold region in China: An enthalpy-based frozen soil model[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, 121(10):5 259-5 280.
- [19] 刘雄, 宁建国, 马巍. 冻土地区水渠的温度场和应力场数值分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(6):932-938.
- [20] 李学军, 费良军, 李改琴. 大型U形混凝土衬砌渠道季节性冻融水热耦合模型研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1):13-17.
- [21] LI SHUANGYANG, ZHANG MINGYI, TIAN YIBIN, et al. Experimental and numerical investigations on frost damage mechanism of a canal in cold regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 116:1-11.
- [22] 宋存牛, 王选仓. 季节冻土区风积沙土路基冻结过程中水热迁移数值分析[J]. 冰川冻土, 2007, 29(6):997-1 003.
- [23] 谭贤君, 余祥宏, 陈卫忠. 岩土介质在冻融过程中的温度场研究及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(suppl):2 867-2 874.
- [24] 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.
- [25] 尚松浩, 雷志栋, 杨诗秀. 冻结条件下水热耦合迁移数值模拟的改进[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1997, 37(8):62-64.
- [26] 李南生, 孙焕纯, 柴山. 渠系基础冻结过程中水热耦合问题数值分析[J]. 水利学报, 1997(3):43-48.
- [27] MCKENZIE J M, VOSS C I, SIEGEL D I. Groundwater flow with energy transport and water - ice phase change: Numerical simulations, benchmarks, and application to freezing in peat bogs[J]. Advances in Water Resources, 2007, 30(4):966-983.
- [28] 李存云. 小型U形混凝土衬砌渠道冻胀变形试验研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2015.

## Characteristics of Soil Temperature Field of Canal Based on Porous Media Theory

TANG Shaorong, WANG Hongyu  
(Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** Considering the frozen soil as uniform and isotropous material, the porous media theory was used to determine thermal parameters of soil under different freezing situation. A two-dimensional variable coefficient mathematical model of soil temperature was established based on the heat conduction equation, and the temperature field which varied with time and position was obtained by means of the fully implicit difference scheme and the alternating direction implicit method(ADI), then, the numerical modeling method was verified by the analytical solution of soil column. The soil temperature under an small integral U-shaped canal was simulated and accorded with in-site observation well. The results showed that porous media theory could simplify the solution of nonlinear equation, the fully implicit difference scheme and ADI were suited for small canal; Because of irregularity of the shape of canal and two-dimensional boundary, the underground water level and heat flux had different influences on temperature under different position. The temperature of shady slope was lower than bottom of canal generally, the frozen area was enlarged gradually and the temperature field was uniform, meanwhile, the freezing zone was non-uniform distribution.

**Key words:** frozen; temperature field; porous media theory; small integral U-shaped canal

责任编辑: 刘春成