

# 考虑水分迁移及相变对温度场影响的渠道冻胀模型

刘月<sup>1</sup>, 王正中<sup>1,2\*</sup>, 王羿<sup>1</sup>, 刘铨鸿<sup>1</sup>, 郭瑞<sup>1</sup>, 肖旻<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100;  
2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000)

**摘要:** 冬季渠基冻土中水分迁移及相变产生的巨大潜热对温度场影响显著, 由此, 该文建立了考虑水分迁移与相变潜热的渠基土体冻胀模型。模型将冻土视为低温膨胀性材料, 将相变潜热作为材料的等效热容加入热传导方程中; 根据 Clapeyron 方程和达西定律建立饱和冻土冻结锋面处水分迁移表达式, 并以迁移水相变潜热作为热传导方程热源项; 采用 COMSOL 对模型算例求解, 与不考虑相变和水分迁移的模型比较发现: 相变作用对渠道温度场和变形场影响较大, 考虑相变后, 冻深推进缓慢, 且冻深减小, 衬砌板变形整体减小, 较不考虑相变的模拟结果更接近实际情况, 验证了本模型的合理性, 为寒区工程冻胀设计提供参考。

**关键词:** 渠道; 冻土; 水分; 冻胀模型; 相变; 水分迁移

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.012

中图分类号: S277; TV67

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-17-0083-06

刘月, 王正中, 王羿, 刘铨鸿, 郭瑞, 肖旻. 考虑水分迁移及相变对温度场影响的渠道冻胀模型[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 83-88. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.012 <http://www.tcsae.org>  
Liu Yue, Wang Zhengzhong, Wang Yi, Liu Quanhong, Guo Rui, Xiao Min. Frost heave model of canal considering influence of moisture migration and phase transformation on temperature field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(17): 83-88. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.012 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

寒区土体的冻胀、融沉问题本质上是多孔多相介质在温度、土水势等因素下相互作用、迁移并伴随相变的过程<sup>[1-3]</sup>。近年来, 对含相变的冻土冻融问题的研究已取得一些进展, 郭利娜等<sup>[4-5]</sup>基于热力学原理和分凝势理论, 对伴随相变的冻土水热耦合的有限元计算方法进行了改进, 使其能够适用于复杂多变边界条件下土体的冻融计算。王正中等<sup>[6]</sup>、张玉芝等<sup>[7]</sup>在求解含相变的冻土热传导问题时通过引入变量焓来考虑冰水相变过程中材料的潜热。毛雪松等<sup>[8]</sup>、霍晓龙等<sup>[9]</sup>基于冻土路基, 考虑了相变作用对冻土变形的影响, 分析了相变引起的路基应力、变形分布规律。

目前, 对伴随相变的冻土冻融问题的研究大多基于路基基础、埋管管道等, 关于衬砌渠道的冻胀问题研究相对较少, 而渠道在长期输水过程中, 渠基土含水率逐渐增高, 且挖方渠道更易成为地下水汇聚处从而形成高地下水位。在以上特殊地质条件下, 渠基土低温冻结过程中, 不仅原位水发生相变, 且未冻水在温度梯度作用

下, 向冻结锋面迁移并发生相变, 由此产生的相变潜热巨大, 对渠道温度场和位移场会产生影响<sup>[10-11]</sup>。以往大多关于渠道热力耦合的计算中虽涉及土体中水分相变潜热的计算, 但是对发生相变的水分来源考虑不全, 温度场计算结果不够精确, 材料的本构方程中线膨胀系数与温度相关, 所以温度场的不准确会造成热力耦合模型中冻胀变形量的计算误差, 不能有效指导渠道防冻胀措施的设计工作。

本文以寒区混凝土衬砌渠道为对象, 将渠基土体的冻胀视为“冷胀热缩”, 对其进行热力耦合数值模拟。在冻土温度场求解时考虑冻土与未冻土的相变潜热, 并在温度场热扩散方程中加入了考虑迁移水相变的热源项, 以此建立较为符合实际的渠道冻胀模型, 以求更加真实地反映寒区渠道低温条件下的温度场与位移场的变化规律。

## 1 数学模型

### 1.1 基本假定

渠基土冻结过程中伴随着物理化学现象和力学作用, 且冰晶体的微观形成机理更是复杂, 要想详细研究各组分之间的热量传递及温度水分迁移变化规律很困难, 目前很难从数值上完全准确模拟。为便于分析, 对实际情况进行适当简化, 假定如下<sup>[12-13]</sup>:

1) 冻土、未冻土均为各向同性弹性材料。

2) 相变在一定范围内完成, 假设相变范围不受荷载影响, 取值为  $0 \sim -2^{\circ}\text{C}$ , 相变速率在  $-1^{\circ}\text{C}$  达到最大, 在

收稿日期: 2016-03-03 修订日期: 2016-05-31

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51279168); 国家科技支撑计划项目 (2012BAD10B02); 冻土工程国家重点实验室项目 (SKLFSE-201105)

作者简介: 刘月, 女, 主要从事冻土工程及渠道冻胀方面研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。Email: 361426493@qq.com  
\*通信作者: 王正中, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水工结构工程及冻土工程研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。Email: wangzz0910@163.com

0 °C 和 -2 °C 为零。

3) 忽略沿渠长方向的温度差异, 将衬砌渠道的冻胀问题作为平面应变问题处理。

4) 冻结过程中, 冻土与混凝土之间冻结强度足够大, 即不会发生脱离现象。

5) 不考虑土壤盐分对冻结温度的影响。

## 1.2 伴随相变的非稳态热扩散方程

由于土颗粒孔隙微小, 可忽略土体热对流传热, 则在冻结过程中, 平面内考虑相变的非稳态热传导方程为

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (1)$$

式中  $\rho$  为材料相密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $C_p$  为材料相比热容,  $\text{J/(kg} \cdot \text{K)}$ ;  $\lambda$  为材料导热系数,  $\text{W/(m} \cdot \text{K)}$ ;  $T$  为温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t$  为时间,  $\text{s}$ 。

本文主要对饱和土体的冻结过程进行研究, 饱和冻土是由土颗粒、未冻水和冰三相组成, 未冻土主要由土颗粒和水两相组成, 冻土和未冻土之间的相变并不是在冻结点全部完成, 而是在一个温度区间内逐步缓慢进行。因此, 引入一个相变温度区间  $\Delta T$  和一个光滑函数  $\alpha$ 。假设相变只发生在  $\Delta T$  范围内,  $\alpha$  的表达式如式 (2),  $T_m$  为开始发生相变的温度,  $T_m + \Delta T/2$  为冻结温度, 当温度小于  $T_m - \Delta T/2$  时, 为冻土相, 温度大于  $T_m + \Delta T/2$  时, 为融土相。

$$\alpha = \begin{cases} 1 & T < T_m - \frac{\Delta T}{2} \\ f(T) & T_m - \frac{\Delta T}{2} \leq T \leq T_m + \frac{\Delta T}{2} \\ 0 & T > T_m + \frac{\Delta T}{2} \end{cases} \quad (2)$$

$\rho$ 、 $C_p$  和  $\lambda$  的表达式如下

$$\rho = \alpha \rho_f + (1 - \alpha) \rho_u \quad (3)$$

$$C_p = \frac{1}{\rho} (\alpha \rho_f C_{p,f} + (1 - \alpha) \rho_u C_{p,u}) + L \frac{\partial \alpha_m}{\partial T} \quad (4)$$

$$\lambda = \alpha \lambda_f + (1 - \alpha) \lambda_u \quad (5)$$

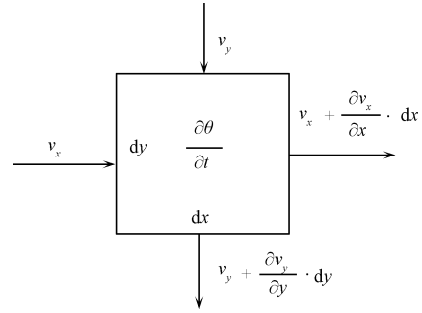
$$L = L_f \frac{\theta_w \rho_w}{\theta_w \rho_w + \theta_s \rho_s} \quad (6)$$

式中带下标  $f$  和  $u$  的分别表示冻土和未冻土相应的物理指标。(4) 式中的  $\alpha_m$  是一个质量分数, 用于衡量冻土中冰占总含水量的质量比, 可用冻土、未冻土的密度及  $\alpha$  表示。 $L$  为冻土相和未冻土相的等效相变潜热, 可用 (6) 式表示,  $L_f$  为水-冰相变潜热, 取  $333 \text{ kJ/kg}$ ,  $\rho_w$ 、 $\rho_s$ 、 $\theta_w$ 、 $\theta_s$  分别为水、土颗粒的密度和体积含量。

## 1.3 带源项的能量方程

大量试验证明<sup>[14-17]</sup>, 土壤中未冻水在负温梯度作用下由未冻区向冻结锋面迁移、积聚并冻结成冰释放潜热。本文将这部分相变潜热作为渠基冻土温度场的热源看待, 并根据 Clapeyron 方程、达西定律和质量守恒原理对其表达式进行推导。

在二维微元体内, 含水量的变化遵从质量守恒定律, 如图 1。



注:  $v$  为流水速度;  $\theta$  为含水量。

Note:  $v$  is velocity of water flow;  $\theta$  is moisture.

图 1 冻土微元体流速分布示意图

Fig.1 Schematic diagram of velocity distribution of frozen soil micro-unit

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} \cdot dx dy = [(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx) dy - v_x dy] + [(v_y + \frac{\partial v_y}{\partial y} dy) dx - v_y dx] \quad (7)$$

水流入微元体的速度沿  $x$  和  $y$  方向的分量分别是  $v_x$  和  $v_y$ , 流出微元体的速度分别是  $v_x + (\partial v_x / \partial x) dx$  和  $v_y + (\partial v_y / \partial y) dy$ , 同时, 通过徐学祖、邓友生<sup>[18]</sup>和 Harlan (1973) 水动力学模型的基本假定及水分迁移试验研究结果可知, 土体冻结过程中的水分迁移遵循达西定律:  $v_x = -k_x (\partial h / \partial x)$ ,  $v_y = -k_y (\partial h / \partial y)$ , 对于各向同性土体, 渗透系数  $k_x = k_y$ 。压力水头  $h$  可通过 Clapeyron 方程的变形形式计算

$$\frac{dh}{dT} = \frac{L_f}{\rho_w g T_m v_w} = \frac{L_f}{g T_m} \quad (8)$$

式中  $L_f$  为水冰相变潜热,  $g$  为重力加速度,  $v_w$  为水的比容,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ,  $T_m$  为相变点, 取  $273.15 \text{ K}$ 。

由达西定律和式 (7)、式 (8) 可得到冻结过程中微元体内的迁移水量

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -k \frac{L_f}{g T_m} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (9)$$

土壤中的水分迁移是一个缓慢的过程, 本文对水分迁移并冻结成冰的过程进行简化, 只关注最终状态, 所以可以认为在一定时间间隔内, 水分迁移量与冻结量近似相等。假设从未冻区向已冻区迁移的水全部冻结成冰, 并放出潜热。由此, 可以得到在已冻区单位时间内放出的热量

$$Q = \rho_w L_f \frac{\partial \theta}{\partial t} = -k \frac{\rho_w L_f^2}{g T_m} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (10)$$

若忽略体系内的外力做功, 并将迁移的水分在冻结区内放出的潜热  $Q$  作为热源项加入能量守恒方程中, 最终可得到饱和土体中考虑相变和迁移水放热的热传导方程

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - k \frac{\rho_w L_f^2}{g T_m} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (11)$$

## 1.4 应力、变形基本方程

渠基土体的冻胀变形是由土壤孔隙中的水分冻结成冰体积膨胀造成的。冻结的水分一部分为土壤原位水, 另一部分为未冻区迁移水。由此机理计算土体冻胀量的

过程比较复杂, 为便于工程应用, 本文将渠基土体视为低温膨胀材料, 其线膨胀系数在温度高于结冰点时为 0, 低于结冰点时根据当地土体的实测冻胀率和当前温度计算, 表达式如式 (15)。

计算渠道冻胀变形的应力场方程由平衡方程、应变—位移方程和本构方程组成, 如下

$$0 = \nabla \cdot \sigma + Fv, \quad (12)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2}(\nabla u + (\nabla u)^T), \quad (13)$$

$$\sigma = \sigma_0 + C : (\varepsilon - \varepsilon_{\text{inel}}), \quad (14)$$

$$\varepsilon_{\text{inel}} = \alpha_T (T - T_{\text{ref}}), \quad (15)$$

$$\alpha_T = \begin{cases} 0 & T > 0 \\ \eta/T & T \leq 0 \end{cases}.$$

式中  $\sigma$  为正应力,  $\varepsilon$  为正应变,  $u$ 、 $v$  为位移矢量,  $\sigma_0$  为初始应力,  $C$  为弹性矩阵,  $\varepsilon_{\text{inel}}$  为温度应变,  $T_{\text{ref}}$  为自由应变参考温度,  $\eta$  为冻胀率。

## 2 有限元模型及计算参数选取

### 2.1 原型渠道概况

本文以黑龙江省北安垦区某一输水支渠为背景进行渠道冻胀数值模拟, 渠道断面尺寸如图 2。该支渠属于现浇混凝土渠道, 且地处季节冻土区, 渠床土以粉质壤土为主。北安垦区冬季漫长寒冷, 封冻期从 11 月底至次年 3 月, 全年平均气温在  $0 \sim -0.5^\circ\text{C}$ , 极端气温可达  $-30^\circ\text{C}$ 。

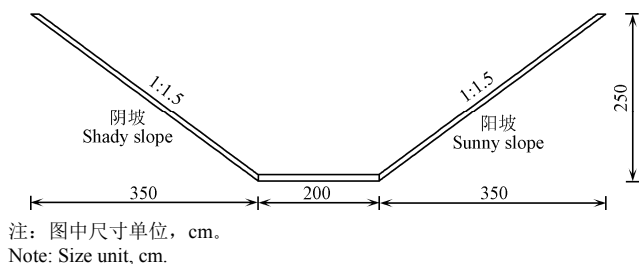


图 2 梯形渠道断面尺寸

Fig.2 Cross section dimension of trapezoidal canal

### 2.2 有限元模型与计算参数

根据恒温层厚度, 有限元模型渠道从渠顶向下取 10 m 作为下边界, 左右边界从衬砌板边缘分别向两边延伸 1.5 m, 混凝土衬砌板厚度各部位均取 10 cm, 应用 COMSOL 有限元软件对梯形衬砌渠道实现一体化建模, 有限元网格划分如图 3。

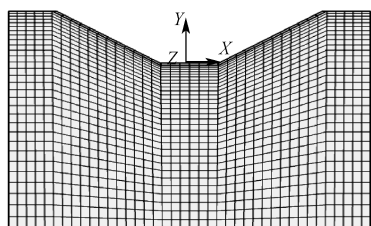


图 3 梯形渠道有限元网格划分图

Fig.3 Finite element meshing diagram of trapezoidal canal

将混凝土衬砌板看作各向同性材料, 弹性模量取  $2.4 \times 10^4 \text{ MPa}$ , 将冻土与非冻土视为各向同性弹性体, 未

冻土的弹性模量取 15 MPa, 冻土的弹性模量随温度改变<sup>[19]</sup>, 取值见表 1。假设渠基土含水量分布均匀, 体积含水量取 35%, 本文重点分析迁移水相变潜热对渠基冻土温度场的影响, 考虑到温度和含水量对渠基土体物理参数的影响, 综合资料和参考文献[20], 材料其他各项计算参数取值见表 2。

表 1 冻土弹性模量

Table 1 Elastic modulus of frozen soil	
温度 Temperature/ $^\circ\text{C}$	弹性模量 Elastic modulus/MPa
-1	19
-2	26
-3	33
-5	46

表 2 材料计算参数

Table 2 Calculating parameters of materials				
材料 Material	导热系数 Thermal conductivity/ $(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$	比热容 Specific heat/ $(\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1})$	泊松比 Poisson ratio	线膨胀系数 Linear expansion coefficient/ $\text{K}^{-1}$
混凝土 Concrete	1.58	0.97	0.2	$1.1 \times 10^{-5}$
冻土 Frozen soil	2.04	1.32	0.33	$\alpha_T$
未冻土 Unfrozen soil	1.46	2.05	0.375	0

### 2.3 边界条件

有限元模型的温度边界条件: 上边界采用对流传热量温度边界, 热通量可用牛顿冷却定律表达<sup>[20]</sup>

$$n \cdot (\lambda \nabla T) = h_c (T_{\text{amb}} - T). \quad (16)$$

式中  $h_c$  为对流传热交换系数, 本文取  $28 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $T_{\text{amb}}$  为外部环境温度, 根据资料<sup>[21]</sup>取渠道各边界冬季平均气温, 阴坡、渠底、阳坡分别为  $-20$ 、 $-17$ 、 $-15^\circ\text{C}$ ;  $T$  为边界计算温度; 左右边界按绝热条件处理; 下边界取地面以下 15 m 处的地温  $8^\circ\text{C}$ 。

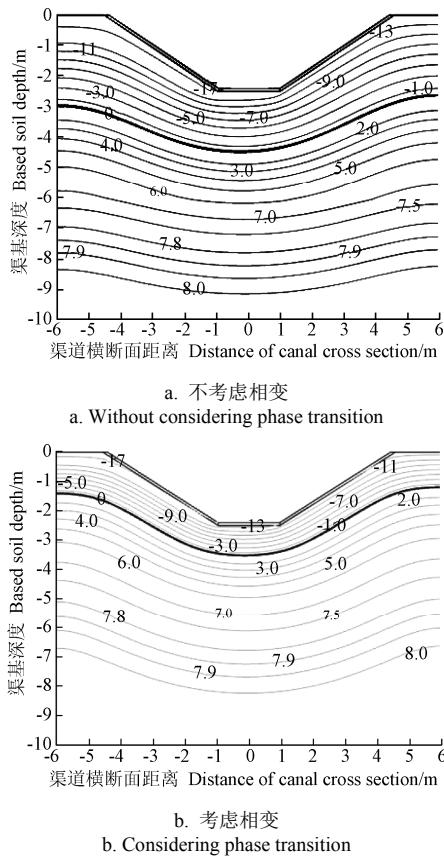
位移边界条件: 渠基左右边界及下边界均设为辊支承, 即左右边界水平位移为 0, 下边界竖向位移为 0。

## 3 结果与分析

### 3.1 基土温度场分析

以渠道温度场为模拟对象, 计算步长为 3 d, 共计算了 3 个月内的温度场。对考虑与不考虑相变时的模拟结果进行对比, 结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 混凝土衬砌渠道冻深及温度分布趋势基本相同, 渠道表层温度梯度大, 而渠道深部基本上不受边界温度的影响, 温度分布逐渐平缓直至趋近于平行的直线。从整体上看, 温度场渠坡冻深较大、渠底冻深较小, 阴坡冻深较大, 阳坡冻深较小。a、b 图比较可以看出, 考虑渠基冻土的相变及水热迁移后, 由于水冰相变放热及冻结过程中水分不断向冻结锋面迁移聚集, 结冰并放出潜热, 使得渠基冻结深度较不考虑冻土相变的渠基冻深而言相对较小, a 图中最大冻深为 3.0 m, b 图中最大冻深为 1.5 m, 根据相关资料可知, 北安地区多年平均冻深为 1.8 m, 可以看出考虑了冻土相变后的冻深更接近于实际冻深, 证明了本文考虑相变的合理性和准确性。



注: 图中等温线单位, °C。  
Note: Isotherm unit, °C.

图 4 渠基冻土温度场分布

Fig.4 Temperature field distribution of canal base permafrost

### 3.2 衬砌板位移场分析

根据数值模拟的位移场分布, 得到考虑相变的法向位移沿渠道衬砌板长的展开图, 并与不考虑相变的模拟结果进行对比, 如图 5。

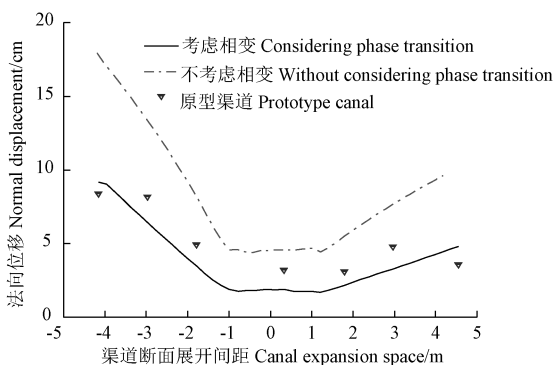


图 5 梯形断面法向位移展开图

Fig.5 Expanded view of trapezoidal section normal displacement

从图 5 可以看出, 考虑相变的衬砌渠道, 由于在冻结过程中产生相变潜热, 使冻深减小, 从而法向位移也相对较小。考虑相变的模拟结果阴坡、阳坡和渠底衬砌板最大法向位移分别为 9.65、4.81 和 2.0 cm, 与原型渠道衬砌板位移比较吻合。由于本文模拟时对模型进行了简化, 假设渠基土体饱和且水分分布均匀, 冻胀率取统一值, 而实际渠道渠顶处含水率与渠底处相比较小, 所

以模拟得到的渠顶处衬砌板法向位移要比实际大。而不考虑相变的渠道衬砌最大法向位移分别为 18.04、5.12 和 9.77 cm, 与实际偏差较大, 说明本文在渠道热力耦合计算中考虑相变潜热的影响是合理的。

## 4 结 语

1) 本文建立了饱和正冻土冻胀模型, 模型中将基土冻胀视为“冷胀热缩”, 同时考虑了水分迁移及相变对渠基温度场的影响, 通过数值模拟验证了本模型的合理性。

2) 利用 COMSOL 软件对梯形渠道衬砌及冻土采用一体化建模, 在温度场、力场耦合分析时考虑冻土相变潜热对渠道冻胀的影响, 进行热力耦合计算, 结果基本反映了梯形刚性衬砌渠道冻胀变形的规律。

3) 对渠基相变温度场进行计算, 并不考虑相变的温度场进行比较, 可以发现考虑了相变的渠基冻深较浅, 且更接近于实际冻深, 而不考虑相变的渠基冻深和实际有很大偏差。由于冻结过程中水冰相变不断释放潜热, 使得考虑相变的冻深推进速度相对缓慢。所以更符合工程实际, 在模拟计算时不能忽略相变对渠基温度场的影响。

4) 分析渠道衬砌板的变形场时发现, 考虑了相变潜热对渠道冻胀的影响后, 从数值结果上看, 衬砌板法向位移比不考虑相变的位移较小, 且更接近实际情况, 说明本文在渠道热力耦合计算中考虑相变是合理的。

## 【参 考 文 献】

- [1] 宋存牛. 冻融过程中土体水热力耦合作用理论和模型研究进展[J]. 冰川冻土, 2010, 32(5): 983—987.  
Song Cunniu. A Review on the Theory and models about coupled Heat-Moisture-Stress interaction during soil freezing and thawing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(5): 983—987. (in Chinese with English abstract)
- [2] 李宁, 陈波, 陈飞熊. 寒区复合地基的温度场、水分场与变形场三场耦合模型[J]. 土木工程学报, 2003, 36(10): 66—71.  
Li Ning, Chen Bo, Chen Feixiong. Heat Moisture Deformation coupled model for composite foundation in cold zone[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(10): 66—71. (in Chinese with English abstract)
- [3] 朱志武, 宁建国, 马巍. 土体冻融过程中水、热、力三场耦合本构问题及数值分析[J]. 工程力学, 2007, 24(5): 138—144.  
Zhu Zhiwu, Ning Jianguo, Ma Wei. Constitutive model and numerical analysis for the coupled problem of water, temperature and stress fields in the process of soil freeze-thaw[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(5): 138—144. (in Chinese with English abstract)
- [4] 郭利娜, 李同春, 刘晓青, 等. 考虑冻土相变的非稳定温度场—渗流场耦合有限元分析研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2011, 43(6): 98—104.  
Guo Lina, Li Tongchun, Liu Xiaoqing, et al. FEM analysis

- research on unsteady temperature-seepage coupling system of frozen soil phase changing[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science edition), 2011, 43(6): 98—104. (in Chinese with English abstract)
- [5] Tan Xianjun, Chen Weizhong. Water flow and heat transport including ice/water phase change in porous media: Numerical simulation and application[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 68(7): 74—84.
- [6] 王正中, 卢琴, 郭丽霞, 等. 基于昼夜温度变化的混凝土衬砌渠道冻胀有限元分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 1—6.
- Wang Zhengzhong, Lu Qin, Guo Lixia, et al. Finite element analysis of the concrete lining channel frost heaving based on the changing temperature of the whole day[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(7): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [7] 张玉芝, 杜彦良, 孙宝臣, 等. 季节性冻土地区高速铁路路基冻融变形规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12): 2547—2552.
- Zhang Yuzhi, Du Yanliang, Sun Baochen, et al. Roadbed deformation of high-speed railway due to freezing thawing process in seasonally frozen regions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(12): 2547—2552. (in Chinese with English abstract)
- [8] 毛雪松, 李宁, 王秉纲, 等. 考虑相变作用的冻土路基应力与变形分析模型[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(1): 59—62.
- Mao Xuesong, Li Ning, Wang Binggang, et al. Analysis model of stress and deformation of permafrost subgrade with phase changing[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(1): 59—62. (in Chinese with English abstract)
- [9] 霍晓龙, 陈寿根, 卫苗苗, 等. 考虑相变作用的季节冻土路基冻融稳定性研究[J]. 施工技术, 2013, 42(17): 93—96.
- Huo Xiaolong, Chen Shougen, Wei Miaomiao, et al. Study on frozen-thaw stability of subgrade in seasonal frozen soil with phase changing[J]. Construction Technology, 2013, 42(17): 93—96. (in Chinese with English abstract)
- [10] 刘文生, 姚静波. 高地下水位区混凝土防渗渠道抗冻害初探[J]. 防渗技术, 1998, 1(4): 33—35.
- [11] 徐敦祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [12] 王正中, 刘旭东, 陈立杰, 等. 刚性衬砌渠道不同纵缝削减冻胀效果的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 1—7.
- Wang Zhengzhong, Liu Xudong, Chen Lijie, et al. Computer simulation of frost heave for concrete lining canal with different longitudinal joints[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(11): 1—7. (in Chinese with English abstract)
- [13] 郭丽霞, 王正中, 李甲林, 等. 梯形与准梯形渠道冻胀有限元分析[J]. 节水灌溉, 2007(4): 44—47.
- Guo Lixia, Wang Zhengzhong, Li Jialin, et al. Finite element analysis on frost-heaving of channel with trapezoidal or quasi-trapezoidal cross section based on ANSYS software[J]. Water Saving Irrigation, 2007(4): 44—47. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王铁行, 王娟娟, 张龙党. 冻结作用下非饱和黄土水分迁移试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2012, 1(44): 7—13.
- Wang Tiehang, Wang Juanjuan, Zhang Longdang. Experimental research on moisture migration in freezing unsaturated loess[J]. Xi'an University of Architecture. & Technology (Natural Science Edition), 2012, 1(44): 7—13. (in Chinese with English abstract)
- [15] 姜海波, 田艳. 季节冻土区刚柔混合衬砌梯形渠道冻胀机理试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 145—151.
- Jiang Haibo, Tian Yan. Test for frost heaving damage mechanism of rigid-soften composite trapezoidal canal in seasonally frozen ground region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(16): 145—151. (in Chinese with English abstract)
- [16] Akagawa S. Experimental study of frozen fringe characteristics[J]. Cold Regions Science and Technology, 1988, 15(6): 209—223.
- [17] Li Zhuo, Liu Sihong. Numerical study on the effect of frost heave prevention with different canal lining structures in seasonally frozen ground regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 85(12): 242—249.
- [18] 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.
- [19] 王正中, 沙际德, 蒋允静, 等. 正交各向异性冻土与建筑物相互作用的非线性有限元分析[J]. 土木工程学报, 1999, 32(3): 56—59.
- Wang Zhengzhong, Sha Jide, Jiang Yunjing, et al. Nonlinear finite element analysis of interaction of orthotropic frozen ground and construction[J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(3): 56—59. (in Chinese with English abstract)
- [20] Liu Zhen, Yu Xiong. Coupled thermo-hydro- mechanical model for porous materials under frost action: theory and implementation[J]. Acta Geotechnica, 2011, 42(6): 51—65.
- [21] 葛建锐. 北方寒区灌渠衬砌基体土冻胀性能研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2015.
- Ge Jianrui. Study on frost heaving of soil matrix at canal lining in the north cold area[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2015.

## Frost heave model of canal considering influence of moisture migration and phase transformation on temperature field

Liu Yue<sup>1</sup>, Wang Zhengzhong<sup>1,2\*</sup>, Wang Yi<sup>1</sup>, Liu Quanhong<sup>1</sup>, Guo Rui<sup>1</sup>, Xiao Min<sup>1</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAS, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The great latent heat of the water transfer and phase transformation in the winter has a significant effect on the temperature field of the canal base soil. The researches on the freezing-thawing of frozen soil with moisture phase change are mostly based on the road foundation, buried pipe, and so on. The study on frost heave damage of lining canal is relatively less. As the canal is in water-carrying condition for a long time, the moisture content of canal foundation soil is high, especially in excavation canal because of the high groundwater table caused by moisture convergence. Under the preceding special geological conditions, as the canal foundation soil is freezing, not only is the water frozen in situ, but also the unfrozen water migrates to the freezing front and changes phase, and then the temperature field and displacement field in canal foundation are influenced by reason of tremendous latent heat of phase change. Although in some past thermal-mechanics coupling calculations the latent heat of moisture phase change is in consideration, the source of moisture with phase change is not completely considered, the computed results of temperature field are not precise enough, and the inaccuracy of the results can lead to the error of frost heave deformation calculated by thermal-mechanics coupling models. So the article established a frost heave model for canal foundation frozen soil, and the water migration and phase change were taken into account in this model. The model regarded the permafrost as cryogenic expansion material, in which the latent heat was added to the conduction equation, and the latent heat is equivalent heat capacity. According to Clapeyron equation and Darcy's law, the article established the expression of moisture migration of freezing fronts in saturated freezing soil, and the latent heat of moisture migration was as the source term of conduction equation. In order to verify the reasonableness of the model, the COMSOL was used, which is a kind of large-scale software for multi-physics fields coupling for numerical calculation. Results showed that in the temperature and displacement field the phase change produced a great influence. After considering the phase change, the freezing depth of the soil advanced slowly, the maximum frozen depth was 1.5 m, and it was near to the actual value which was 1.8 m. But if the moisture phase change was not in consideration, the calculation value of maximum frozen depth was 3 m, and it was much greater than the actual value. As the moisture phase change was in consideration, the maximum normal displacements on the shady slope, sunny slope and canal bottom were 9.65, 4.81 and 2.0 cm, respectively. Compared with the model not considering phase change, the frost heave model proposed in this article is more in line with the actual situation. So in order to make the calculation results accord well with actual value, the influence of moisture phase change on temperature fields and displacement fields can't be neglected. The present results can provide reference to engineering design for frost heave resistance in cold region.

**Keywords:** canals; frozen soils; moisture; frost heaving model; phase transition; moisture migration