

# 岩土介质在冻融过程中的温度场研究及工程应用

谭贤君<sup>1</sup>, 余祥宏<sup>2</sup>, 陈卫忠<sup>1,3</sup>, 伍国军<sup>1</sup>, 于洪丹<sup>1</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056; 3. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

**摘要:** 基于“三区域”(已冻区、正冻区和未冻区)理论, 建立岩土介质在冻融过程中的温度场数学模型, 并将利用有限元数值计算方法得到的结果与 V. J. Lunardini 等得到的经典解析解结果进行对比, 验证该数学模型的正确性和可靠性。在此基础上, 探讨岩土介质在冻融过程中相变潜热和正冻区的大小对温度场分布的影响, 并对西藏嘎隆拉隧道围岩温度场以及保温层保温效果进行数值仿真分析。研究表明: 采用二衬表面附设保温材料方法对隧道衬砌及围岩温度影响效果明显, 在二衬表面施作 6 cm 厚的福利凯保温层后, 衬砌和围岩不会承受冻融破坏。该研究成果对于寒区隧道冻融圈大小的确定及防寒保温措施的选用具有重要的理论和现实意义。

**关键词:** 土力学; 寒区隧道; 冻融; 相变; 温度场

**中图分类号:** TU 43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2012)增 1 - 2867 - 08

## STUDY OF TEMPERATURE FIELD IN PROCESS OF FREEZING-THAWING IN GEOTECHNICAL MEDIUM AND ITS APPLICATION

TAN Xianjun<sup>1</sup>, YU Xianghong<sup>2</sup>, CHEN Weizhong<sup>1,3</sup>, WU Guojun<sup>1</sup>, YU Hongdan<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430056, China; 3. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China)

**Abstract:** Basing on the “three-zone” (frozen zone, freezing zone and unfrozen zone) theory, a mathematical model considering the process of freezing-thawing is presented to calculate the temperature field in geotechnical media, the model is verified by correctly simulating the V. J. Lunardini analytical solution for ice formation in a porous medium. Based on this, the influence of heat latent and range of freezing zone on the distribution of temperature in the process of freezing-thawing is studied, and a numerical simulation about a tunnel in Tibet is done to discuss the effect of insulation material. From the numerical results, it is found that the temperature of lining and surrounding rock are greatly changed by building insulation material at the surface of tunnel lining, after constructing a 6 cm thickness poly phenolic insulation, the lining and surrounding rock will not be affected by freezing-thawing damage. The results can give some references for design and construction of tunnel in cold regions.

**Key words:** soil mechanics ; tunnel in cold region ; freezing-thawing ; phase change ; temperature field

**收稿日期:** 2011 - 03 - 30; **修回日期:** 2011 - 04 - 26

**作者简介:** 谭贤君(1984 -), 男, 博士, 2005 年毕业于石家庄铁道学院土木工程专业, 现任助理研究员, 主要从事寒区隧道及地下空间方面的研究工作。E-mail: xjtian@139.com

## 1 引言

随着我国改革开放的深入,经济的迅速发展以及西部大开发战略的进一步实施,已迫切需要交通基础设施延伸至自然条件恶劣、过去人迹罕至的高纬度或高海拔的寒冷地区,多年冻土区的工程实践和科学研究使人们逐渐深刻认识到,冻土的温度场是冻土工程、冻土环境、冻土改造和冻土预报的基础,无论是研究冻土的区域分布规律、物理力学性质,还是选择冻土地区工程建筑物设计的原则、确定具体的设计参数,都需要了解并掌握冻土的温度场分布情况,而根据已有的寒区岩土工程经验,有冻土问题存在的地方一般都存在冻岩的问题,因此,对寒区岩土介质温度场的研究是寒区岩土工程的主要内容之一。

岩土介质在冻融过程中的温度场变化机制很复杂,到目前为止已经有 160 多年的研究历史了,但到 20 世纪前期,冻土及其温度场的研究基本上都只是处于前期探索阶段,只得到了一些大为简化的经验公式和计算一些经过近似处理的均质一维、二维线性稳定问题及一维非稳定线性问题,20 世纪 70 年代以来,随着计算技术的发展,数值计算方法在冻土温度场研究中得到了广泛应用,使以前由于几何形状复杂、地质条件特殊而难以解决的有关冻土温度场的一些难题都得到了不同程度的解决,尤其是非稳定相变温度场理论的问世以及在数值分析中的成功实现,使得冻土温度场的研究更趋完善和符合实际。这期间的主要研究成果有: C. Bonacina 等<sup>[1]</sup>提出了相变热传导温度场的数值求解方法; G. Comini 等<sup>[2]</sup>对相变热传导温度场的非线性问题进行了有限元分析; E. D. Ershov 等<sup>[3-4]</sup>先后研究了相变潜热对温度场的影响; L. Bronfenbrener<sup>[5]</sup>利用经典的 Stefan 问题求解方法,得出了土在冻结过程中温度场的解析解。我国冻土研究起步较晚,但成果显著。20 世纪 90 年代,李述训<sup>[6]</sup>在立井冻结法凿井工程中,对不同的温度场进行了计算;何春雄等<sup>[7]</sup>就壁面温度随气温周期性变化的情况,分析计算了隧道围岩的温度场;赖远明等<sup>[8]</sup>运用量纲一的量和摄动技术求出了寒区圆形截面隧道温度场的解析解;张学富等<sup>[9]</sup>对寒区隧道进行了三维有限元数值分析。徐教祖等<sup>[10-11]</sup>也从不同侧面论述了有关冻土温度场的

问题,在冻土温度场研究方面做出了重大贡献。

需要指出的是,以上绝大部分研究成果,都是基于将冻融过程中的岩土介质假设为 2 个部分——冻结区(frozen zone)和未冻区(unfrozen zone)的前提下得到的,然而,近些年来, J. M. Konrad 等<sup>[12-13]</sup>通过试验研究和 Y. Nakano 等<sup>[14-17]</sup>通过理论分析发现,“二区域”(已冻区和未冻区)模型没能准确反映岩土介质冻融过程中的温度状态,他们认为在已冻区和未冻区之间存在一个相变集中区——正冻区(freezing zone)或冻结缘(frozen fringe),该区域的大小主要取决于岩土介质的性质和温度条件,即所谓的“三区域”模型。虽然 V. J. Lunardini<sup>[18]</sup>给出了土在冻结过程 3 个区域的温度的解析解,但是要想进一步做该过程中水-热耦合及水-热-力耦合分析,解析方法就显得力不从心了,另外,解析法往往只能适用于简单工况,由于寒区岩土工程的复杂性和多变性,再加上具体条件的差异性,简单特定条件下得到的解析解,往往不能随意推广。在这种情况下,可以采用有限元分析方法进行数值模拟,这样,建立一组能够用于数值分析的准确可靠的数学模型就显得至关重要。

笔者在学习既有成果的基础上,基于“三区域”理论,建立了岩土介质在冻融过程中的温度场数学模型,并将利用有限元数值计算方法得到的结果与 V. J. Lunardini<sup>[18]</sup>得到的经典的解析解结果进行了对比,验证了本文所建立的数学模型正确性和可靠性,在此基础上,探讨了岩土介质在冻融过程中相变潜热和正冻区的大小对温度场分布的影响。

## 2 温度场数学模型

对于低温岩土介质,在饱和情况下,无论是冻结区、未冻区或冻结缘带,其各项物理参数均可假定由岩土骨架(下面统称为基质)、水和冰的性质按一定方式的组合。设岩土介质的总体积为  $V$ ,基质、水和冰各组分的体积分别为  $V_s$ ,  $V_w$  和  $V_i$ ,则 3 项的体积含量  $\theta_s$ ,  $\theta_w$  和  $\theta_i$  分别为

$$\theta_s = \frac{V_s}{V}, \quad \theta_w = \frac{V_w}{V}, \quad \theta_i = \frac{V_i}{V} \quad (1)$$

且满足:

$$\theta_s + \theta_w + \theta_i = 1 \quad (2)$$

若假定孔隙介质的初始孔隙度为  $n$ , 温度低于  $0^\circ\text{C}$  时,未冻水体积与孔隙体积比值为  $\chi$ , 则有

$$\theta_s = 1 - n, \quad \theta_w = n\chi, \quad \theta_i = n(1 - \chi) \quad (3)$$

$\chi$  可以用以下含有 3 个参数的表达式确定<sup>[19-20]</sup>：

$$\chi = \chi^* + (1 - \chi^*)e^{a(T - T_c)} \quad (4)$$

式中： $\chi^*$  为已冻区的未冻水的体积含量， $a$  为材料参数， $T_c$  为相变温度。

### 2.1 温度场控制方程

根据孔隙介质的热传导原理和“三区域”理论，岩土介质在冻融过程中 3 个区域的温度场控制方程如下：

(1) 已冻结区域，有

$$C_1 \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla[-k_1 \nabla T] = Q_{T_1} \quad (5)$$

(2) 正冻结区域，有

$$C_2 \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_w L_f \frac{\partial n\chi}{\partial t} + \nabla[-k_2 \nabla T] = Q_{T_2} \quad (6)$$

其中，

$$k_{1,2} = n\lambda_w \chi + n\lambda_i(1 - \chi) + (1 - n)\lambda_s \quad (7)$$

$$C_{1,2} = n\rho_w c_w \chi + n\rho_i c_i(1 - \chi) + (1 - n)\rho_s c_s \quad (8)$$

(3) 未冻结区域，有

$$C_3 \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla[-k_3 \nabla T] = Q_{T_3} \quad (9)$$

其中，

$$k_3 = n\lambda_w + (1 - n)\lambda_s \quad (10)$$

$$C_3 = n\rho_w c_w + (1 - n)\rho_s c_s \quad (11)$$

式(5)~(11)中： $n$  为孔隙度； $\rho_w$ 、 $\rho_i$  和  $\rho_s$  分别为水、冰和固体颗粒的密度； $Q_{T_1}$ 、 $Q_{T_2}$  和  $Q_{T_3}$  分别为 3 个区域内的热源项； $k_1$ 、 $k_2$  和  $k_3$  分别为已冻区、正冻区和未冻区的热传导系数； $C_1$ 、 $C_2$  和  $C_3$  分别为已冻区、正冻区和未冻区的体积热容； $L_f$  为相变潜热； $\lambda_w$ 、 $\lambda_i$  和  $\lambda_s$  分别为水、冰和固体颗粒的导热系数； $c_w$ 、 $c_i$  和  $c_s$  分别为水、冰和固体颗粒的比热容。

未冻水体积含量与温度的关系如图 1 所示。

### 2.2 数学模型定解条件确定

通过以上得出的岩土介质冻结过程中的温度场控制方程，对于特定的问题，加上定解条件就构成了完整的数学模型。温度场的定解条件包括：

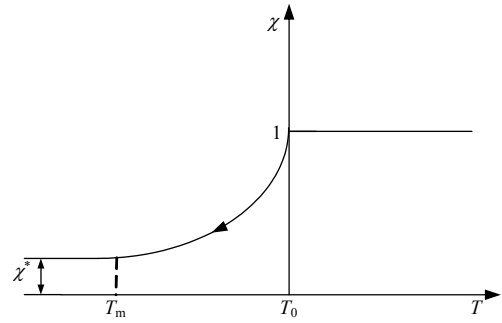


图 1 未冻水体积含量与温度的关系

Fig.1 Relationship between unfrozen water content and temperature

(1) 初始条件为

$$T|_{t=0} = T_0 \quad (12)$$

(2) Dirichlet 边界条件为

$$T = T_0 \quad (13)$$

(3) Neumann 边界条件为

$$-n(-k_1 \nabla T) = q_0 + h(T - T_0) \quad (14)$$

### 2.3 数学模型的求解

本文将上述模型概化为二维平面问题的 Galerkin 有限元进行求解：利用变分原理求出其泛函后，对泛函的表达式进行四边形单元离散，并进行线性插值，即得到了相应的离散方程。

对于温度场数学方程(1)~(3)，采用 Galerkin 有限元离散后所得矩阵形式为

$$[N] \frac{d\{T\}}{dt} + [K]\{T\} = [F] \quad (15)$$

$$[N] = \int_A CN_i N_j dA \quad (16)$$

$$[K] = \int_A \nabla N_i k \nabla N_j dA \quad (17)$$

$$[F] = \int_A N_i Q_T dA \quad (18)$$

式中： $[N]$  为容量矩阵， $[K]$  为传导矩阵， $\{T\}$  为温度向量， $[F]$  为源汇项向量。

本文基于 Matlab 技术基础上编制有限元程序进行数值求解，对于具体区域可以精细剖分，直至满足所求的精度为止。

## 3 数学模型验证

### 3.1 经典解析解

V. J. Lunardini<sup>[18]</sup>给出了基于“三区域”理论的经典解析解。计算模型与边界条件如图 2 所示。

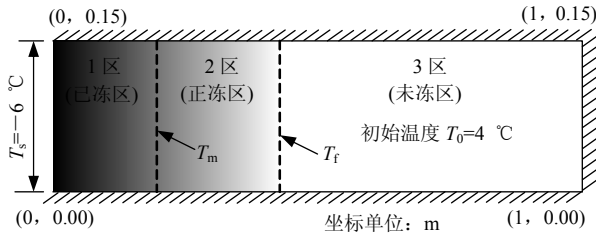


图 2 计算模型与边界条件

Fig.2 Calculation model and boundary condition

3 个区域的温度场的解析解<sup>[18]</sup>为

$$T_1 = (T_m - T_s) \frac{\text{erf}[x/(2\sqrt{\alpha_1 t})]}{\text{erf}(j)} + T_s \quad (19)$$

$$T_2 = (T_m - T_f) \frac{\text{erf}[x/(2\sqrt{\alpha_2 t})] - \text{erf}(\gamma)}{\text{erf}(\gamma) - \text{erf}(\phi\sqrt{\alpha_1/\alpha_2})} + T_f \quad (20)$$

$$T_3 = (T_0 - T_f) \frac{-\text{erfc}[x/(2\sqrt{\alpha_3 t})]}{\text{erfc}(\gamma\sqrt{\alpha_2/\alpha_3})} + T_0 \quad (21)$$

式中： $T_1$ 、 $T_2$ 和 $T_3$ 分别为已冻区、正冻区和未冻区的温度； $\text{erf}$ 和 $\text{erfc}$ 分别为误差函数和互补误差函数； $T_0$ 为初始温度； $T_m$ 为已冻区和正冻区的边界温度； $T_f$ 为正冻区和未冻区边界温度； $T_s$ 为左边界条件温度； $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 和 $\alpha_3$ 分别为 1、2 和 3 区的热扩散系数，它是热传导系数和体积热容得比率， $\alpha_2$ 与 $\alpha_1$ 和 $\alpha_3$ 的表达形式略有不同，是因为考虑了区域 2 中发生相变时相变潜热的影响，其表达式分别为

$$\alpha_1 = \frac{k_1}{C_1}, \quad \alpha_2 = \frac{k_2}{C_2 + \frac{\gamma_d L_f \Delta n}{T_f - T_m}}, \quad \alpha_3 = \frac{k_3}{C_3} \quad (22)$$

式中： $\gamma_d$ 为干密度， $\gamma_d = (1-n)\rho_s$ ； $\Delta n = n_0 - n_f$ ， $n_0$ 和 $n_f$ 分别为未冻区水含量与固体颗粒质量之比和已冻区水含量与固体颗粒质量之比，其表达式为

$$\left. \begin{aligned} n_0 &= \frac{n\rho_w}{(1-n)\rho_s} \\ n_f &= \frac{n\chi\rho_w}{(1-n)\rho_s} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

### 3.2 本文计算结果与经典试验结果对比与分析

#### (1) 计算参数

Lunardini 解析解所用参数及利用本文建立的数学模型进行有限元分析所需计算参数见表 1 所示。

#### (2) 计算结果与及对比分析

相同条件(计算参数相同，计算时间均为 1 d)下有限元计算结果与经典解析解结果对比见图 3。从图 3 可以看到，不论是从最大冻深还是从温度分布发展趋势来讲，利用本文所建立的模型与 Lunardini 等得到的结果都非常相似，说明该“三区域”温度场模型有效。

通过前面的分析可以看出，基于“三区域”理论得到的温度场模型比传统的“二区域”模型多了一个控制参数  $T_m$ ，该参数的取值主要取决于岩土介质本身的性质。那么，该参数取值在何种程度上影响温度场的分布？下面进行一个简单的对比分析。

图 4 给出了不同  $T_m$  值条件下温度场的分布(其他计算参数依然取自表 1，计算时间仍为 1 d)，从图 4 可以看出，取不同的  $T_m$  值时，温度的分布也会有所不同，其差别的最大位置在正冻区。主要原因是： $T_m$  值变化导致正冻区域的范围变化，从而引起整个温度场的改变。

另外，在岩土介质的冻融过程中，当温度降到冻结温度以下时，围岩中的水变成冰，发生相变，随着温度继续降低，液态水大部分变成固态冰，相变逐渐变慢直至消失，这个过程为相变导热过程(又称 Stefan 问题)。相变问题需要考虑相变潜热，为了简化研究对象，以往的数值计算要么忽略了相变潜热的影响，要么采用显热容法来近似处理相变潜

表 1 计算参数

Table 1 Computer parameters

$n$	$T_0 / ^\circ\text{C}$	$T_s / ^\circ\text{C}$	$T_f / ^\circ\text{C}$	$T_m / ^\circ\text{C}$	$n_f$	$c_w /$ ( $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ )	$c_i /$ ( $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ )	$c_s /$ ( $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ )	$\gamma_d /$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
0.05	4	-6	0	-4	0.078 2	4 187	2 108	840	1 680
$n_0$	$\lambda_w /$ ( $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ )	$\lambda_i /$ ( $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ )	$\lambda_s /$ ( $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ )	$\chi^*$	$L_f /$ ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$\rho_w /$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$\rho_i /$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$\rho_s /$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$a$
0.2	0.58	2.14	2.9	0.07	334 000	1 000	2.9	2 600	0.96

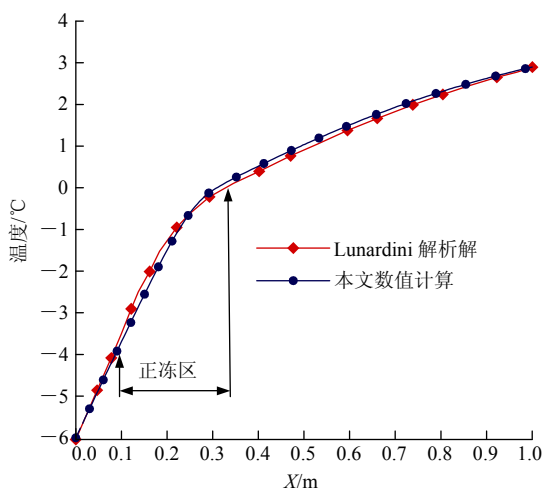


图 3 有限元计算结果与经典解析解结果对比

Fig.3 Comparison between numerical simulation results and classified analytical solution

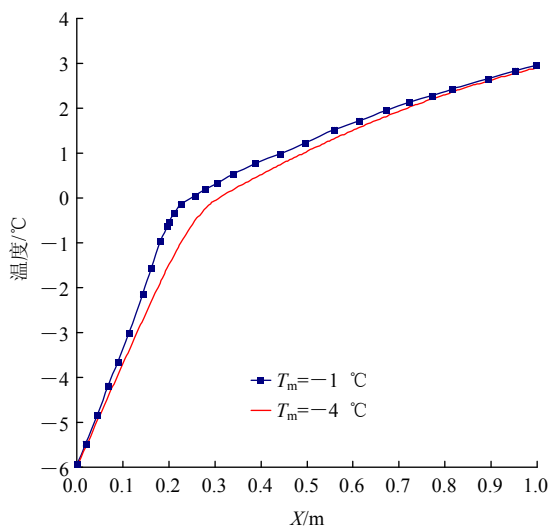


图 4 不同  $T_m$  值条件下的温度场的分布

Fig.4 Distributions of temperature at different values of  $T_m$

热，但大都是基于材料热物性参数不随温度而改变的假设。

为了反映水/冰相变过程中潜热对岩土介质温度场的影响，基于本文建立“三区域”温度场模型，得到了不同冻结时间考虑潜热和不考虑潜热 2 种工况下的温度分布(见图 5)。计算结果表明：与不考虑潜热情况相比较，考虑潜热时温度影响范围要小，两者的差别随着时间的增加而增大。

### 4 工程应用

西藏嘎隆拉隧道是“扎墨”公路(连接中国唯一一个不通公路的县：墨脱县)的控制性工程，也是

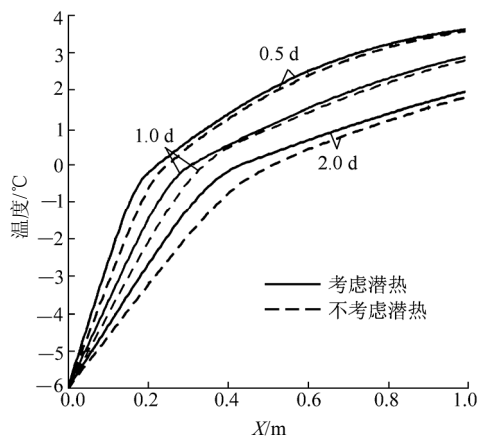


图 5 考虑潜热与不考虑潜热不同时刻温度分布

Fig.5 Distributions of temperature at different times in case of considering latent heat and not considering latent heat

目前国内在高寒(嘎隆拉隧道区域冰冻期长达 8 个月，冰冻层平均厚度 5~6 m，最厚达 15 m，冬季气温低至 -30 °C 以下)、高海拔(嘎隆拉隧道海拔 4 300 m，空气含氧量只有内地的 60%)地区修建的为数不多的公路隧道。其地质条件之复杂，施工难度之大，在国内外均属罕见，以至于被称为“高原隧道地质病害百科全书”。

根据工程概况，必须对隧道进出口两端采取适当的防寒保温措施，经综合研究决定：嘎隆拉隧道进出口采用在隧道二衬表面敷设 6 cm 厚的福利凯保温材料。下面利用前面推导的“三区域”温度场模型对防寒保温层效果作简单分析。本次选取嘎隆拉隧道进口段(波密端)为研究对象，具体位置为距隧道洞口深度 5 m。计算模型如图 6 所示；嘎隆拉隧道保温层安装在二衬表面(见图 7)，本文采用实体单元模拟。

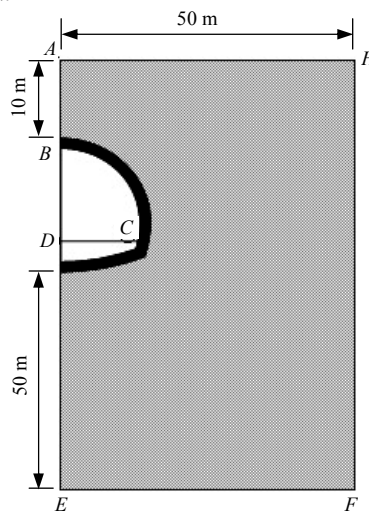


图 6 计算模型示意图

Fig.6 Sketch map of calculation model

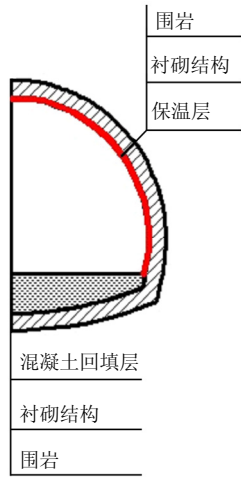


图 7 保温层位置

Fig.7 Install position of insulation

根据以往的研究成果可以大致认定：在 1 a 内，大气的温度是周期性地按正弦(或余弦)规律随时间变化的，根据地勘报告，嘎隆拉隧道区域大气的极端温度变化取值为

$$T = -4.15 + 32.85 \sin(2\pi t / 31\ 104\ 000 + \pi/2) \quad (24)$$

式中： $t$  为时间(s)， $T$  为大气温度(K)。

空气与围岩的对流换热系数  $\alpha = 15.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ；围岩初始温度  $T_0$  按多年冻岩下限 1.5% 的地热梯度确定；根据地勘报告，温度垂直变化明显，本文所取规律为：每升高 100 m，气温下降  $0.74 \text{ }^\circ\text{C}$ ，取  $T_m = -4 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

根据工程报告，围岩主要计算物理参数取值见表 2。

图 8, 9 分别为隧道未加保温层和加保温层 2 种工况下，运行 1 a 后，围岩 1 和 7 月份温度场分

表 2 围岩主要计算物理参数取值

Table 2 Main calculation physical parameters for surrounding rock

介质	含水量 w/%	导热系数 $\lambda/(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K}^{-1}))$	比热容 $(\text{J} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{K}^{-1}))$
围岩	30	1.580	850
水	-	0.560	4 180
冰	-	2.240	2 090
福利凯	-	0.025	230

布。从图 8, 9 可以清楚的看到，保温层对阻止围岩温度受隧洞内环境温度的影响发挥了很大作用，另外，通过图 8 可以看到，未加保温层工况下，围岩的最大冻结深度达到了 2.6 m，而在二衬表面施作 6 cm 厚的福利凯保温层后，最大冻结深度则被控制在衬砌以内，这就意味着施作 6 cm 厚的福利凯保温层后，围岩不会承受冻融破坏。

为了进一步分析保温层对围岩温度场的影响，下面选取几个典型点的温度值加以对比分析，它们是：隧道保温层外表面温度点 A、保温层与衬砌接触层温度点 B 和衬砌与围岩接触点温度点 C。本次计算时间起始点为 7 月，为了便于对比和分析，在不施作保温层工况下，点 A 和 B 之间用 6 cm 厚的衬砌混凝土代替。图 10 为典型点温度随时间变化图。从图 10 可以更清楚地看到：保温层对于阻止衬砌和围岩随着洞内环境温度的变化发挥了巨大作用。未加保温层点 B 和 C 在 1 a 内的最低温度为分别为  $-29.9 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $-21 \text{ }^\circ\text{C}$ ，而加保温层后，其 1 a 内的最低温度则分别提高到了  $0.04 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $2.40 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

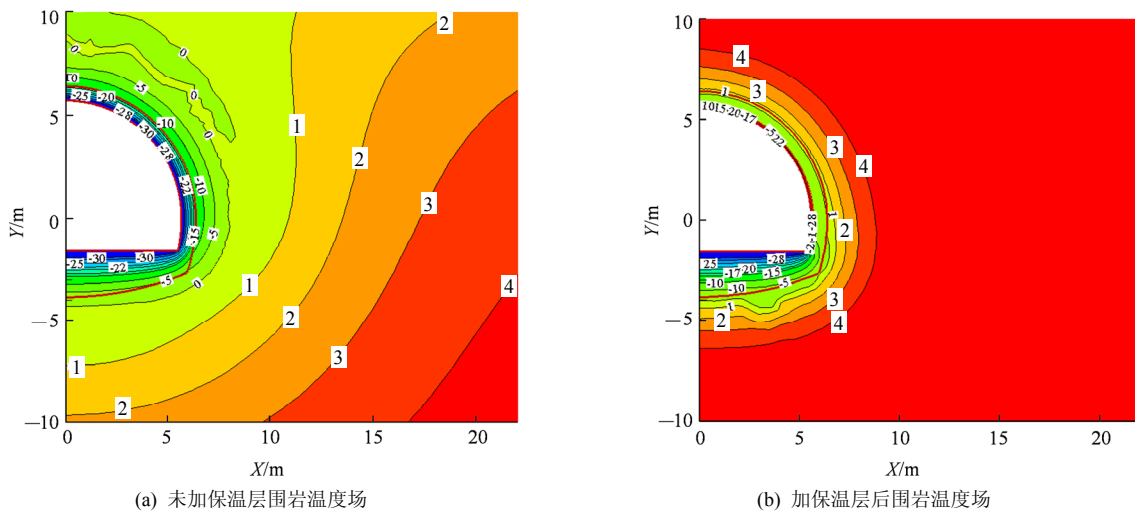


图 8 围岩 1 月份温度场分布(单位:  $^\circ\text{C}$ )

Fig.8 Temperature distributions of surrounding rock at January(unit:  $^\circ\text{C}$ )

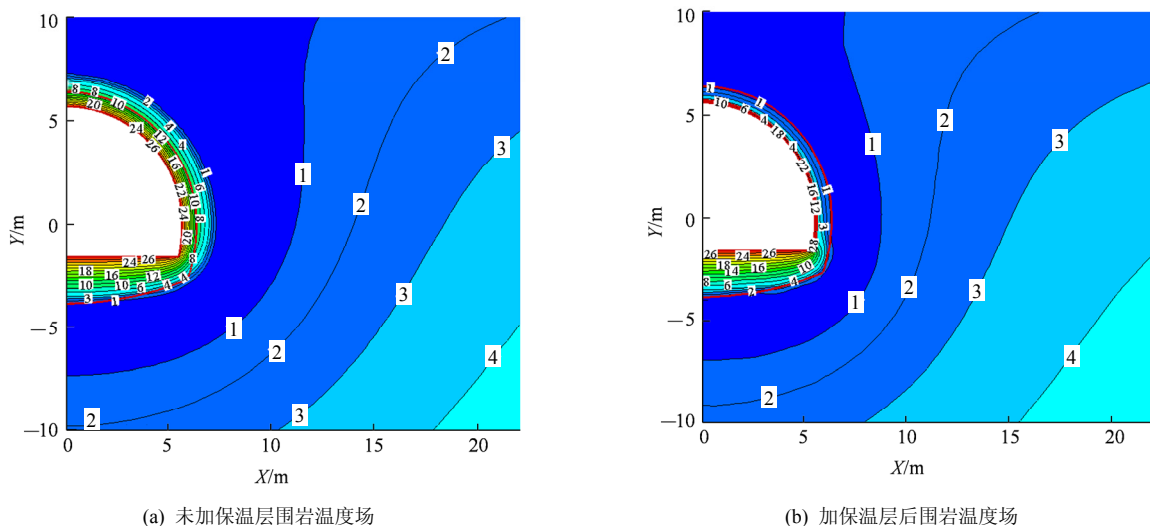


图 9 围岩 7 月份温度场分布(单位: °C)  
Fig.9 Temperature distributions of surrounding rock at July(unit: °C)

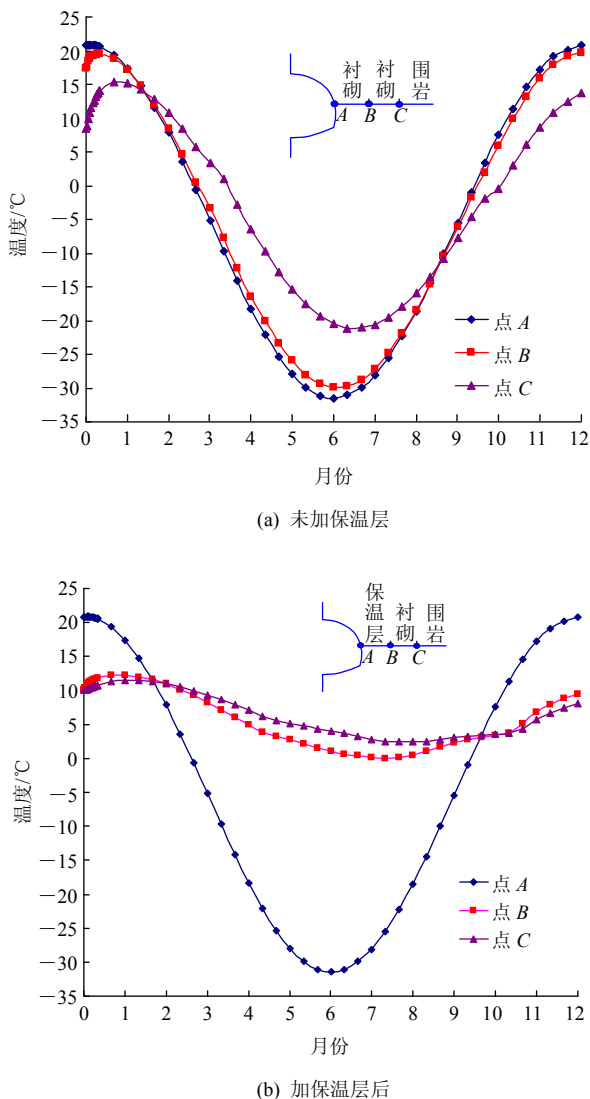


图 10 典型点温度随时间变化图  
Fig.10 Temperature change with time at special position

### 5 结 论

(1) 基于“三区域”理论，建立了岩土介质在冻融过程中的温度场数学模型，并将利用有限元数值计算方法得到的结果与 V. J. Lunardini<sup>[18]</sup>得到的经典的解析解结果进行了对比，验证了该数学模型的正确性和可靠性。

(2) 岩土介质在冻融过程中相变潜热和正冻区的大小对温度场分布具有重要影响，计算过程中必须认真考虑。

(3) 采用二衬表面附设保温材料方法对隧道衬砌及围岩温度影响效果明显，在二衬表面施作 6 cm 后的福利凯保温层后，衬砌和围岩不会承受冻融破坏。

### 参考文献(References):

[1] BONACINA C, COMINI G, FASANO A, et al. Numerical solution of phase-change problems[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1973, 16(6): 1 852 - 1 832.

[2] COMINI G, GUIDICE S D I, EWIS 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(6): 613 - 624.

[3] ERSHOV E D. Phase composition in the frozen rocks[M]. Moscow: [s.n.], 1979: 36 - 37.

[4] MOTTAGY D, RATH V. Latent heat effects in subsurface heat transport modeling and their impact on palaeo temperature

- reconstruction[J]. *Geophysical Journal International*, 2006, 164(1): 236 - 245.
- [5] BRONFENBRENER L. The modeling of the freezing process in fine-grained porous media: application to the frost heave estimation[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2009, 56(2): 130 - 134.
- [6] 李述训. 立井冻结法凿井工程中的热工计算[J]. *冰川冻土*, 1994, 16(1): 20 - 30.(LI Shuxun. Approximate calculating method of some design parameters in drilling shaft of artificial freezing[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1994, 16(1): 20 - 30.(in Chinese))
- [7] 何春雄, 吴紫汪, 朱林楠. 祁连山区大坂山隧道围岩的冻融状况分析[J]. *冰川冻土*, 2000, 22(2): 17 - 24.(HE Chunxiong, WU Ziwan, ZHU Linnan. Analysis of freeze-thaw condition in the surrounding rock wall of the Dabanshan tunnel in the Qilian Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(2): 17 - 24.(in Chinese))
- [8] 赖远明, 喻文兵, 吴紫汪. 寒区圆形截面隧道温度场的解析解[J]. *冰川冻土*, 2001, 23(2): 126 - 130.(LAI Yuanming, YU Wenbing, WU Ziwan. Approximate analytical solution for the temperature fields of a circular tunnel in cold regions[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, 23(2): 126 - 130.(in Chinese))
- [9] 张学富, 赖远明, 喻文兵. 寒区隧道三维温度场数值分析[J]. *铁道学报*, 2003, 25(3): 84 - 90.(ZHANG Xuefu, LAI Yuanming, YU Wenbing. Numerical analysis for the three-dimension temperature fields in cold region tunnels[J]. *Journal of the China railway Society*, 2003, 25(3): 84 - 90.(in Chinese))
- [10] 徐敦祖, 邓友生. 冻土中水分迁移的实验研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 83 - 85.(XU Xiaozu, DENG Yousheng. Experiment study on water migration in freezing and frozen soil[M]. Beijing: Science Press, 1991: 83 - 85.(in Chinese))
- [11] 李述训, 程国栋. 冻融土中的温度-渗流输运问题[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1995: 103 - 104.(LI Shuxun, CHENG Guodong. The temperature seepage transport problems in Freeze-thaw soils[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1995: 103 - 104.(in Chinese))
- [12] KONRAD J M, MORGENSTERN N R. Effects of applied pressure on freezing soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1982, 19(4): 494 - 505.
- [13] DANIELIAN, YU S, YANITCKY P A, et al. Experimental and theoretical heat and mass transfer research in frozen soils[J]. *Engineering Geology*, 1983, 3 (1): 77-83.
- [14] NAKANO Y. Quasi-steady problems in freezing soils(I): analysis of the steady growth of an ice layer[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1990, 17(3): 207 - 226.
- [15] FURUKAWA Y, SHIMADA W. Three-dimensional pattern-formation during growth of ice dendrites, its relation to universal law of dendritic growth[J]. *Journal of Crystal Growth*, 1993, 128(1): 234 - 249.
- [16] BRONFENBRENER L, KORIN E. Kinetic model for crystallization in porous media[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997, 40(5): 1 053 - 1 059.
- [17] LUNARDINI V J. Heat transfer with freezing and thawing[M]. New York: Elsevier Science Publishers B.V., 1991: 134 - 144.
- [18] LUNARDINI V J. Freezing of soil with phase change occurring over a finite temperature difference[C]// *Proceedings of the 4th International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium*. [S.l.]: [s.n.]: 1985: 12 - 15.
- [19] ANDERSON D M, TICE A R. Low temperature phases of interfacial water in clay-water systems[J]. *Soil Science Society of America*, 1971, 290 (35): 47 - 54.
- [20] ANDERSON D M, TICE A R. The unfrozen interfacial phase in frozen soil water systems[J]. *Ecological Studies*, 1973, (4): 107 - 125.