

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2020.05.005

寒区隧道围岩水热耦合数值分析

张 泽, 王述红, 杨天娇, 张雨浓

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 寒区隧道土体中的水分迁移和相变是冻害问题的主要诱因。基于混合物理论,建立考虑水分迁移和水冰相变的联合求解微分方程对水热耦合问题进行求解,并使用 COMSOL Multi-physics 软件进行模块开发,实现渗流-温度耦合数值模拟,进而将模拟结果与土柱冻结实验的结果进行对比,证明水热耦合模型是正确的。最后以西藏自治区米林隧道为例,对温度场、水分场模拟分析并对是否考虑水分迁移的温度场进行对比。结果表明:随着时间的增加,隧道顶部边界气温由 $-0.82\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低到 $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$,隧道内部边界温度由 $-0.74\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低到 $-11.11\text{ }^{\circ}\text{C}$,并在3月份隧道温度回升;含冰量峰值出现在1月份,在3月份含冰量开始下降。同时,未考虑水分迁移的温度场中热传导速度较快,证明相变潜热对隧道中温度场的分布影响远大于液态水靠重力迁移造成的热对流传热。研究成果直观反映富水寒区隧道的冻害发生过程,具有一定的参考价值。

关键词: 寒区隧道;水冰相变;水分迁移;水热耦合;COMSOL 软件

中图分类号: TU 45 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2020)05-0635-07

Numerical Analysis on Hydro Thermal Coupling of Surrounding Rocks in Cold Region Tunnels

ZHANG Ze, WANG Shu-hong, YANG Tian-jiao, ZHANG Yu-nong

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: WANG Shu-hong, E-mail: shwangneu@126.com)

Abstract: The mechanism of freezing damage of tunnels in the cold regions is complicated. These freezing damages are mostly related to water migration and phase transition in the soil. Based on the theory of mixture, a joint differential equation for the hydrothermal coupling problem of cold region tunnels considering water migration and water ice phase transition was established. The numerical simulation of temperature field and water field coupling was carried out by further development of COMSOL Multi-physics software, and the numerical simulation results were compared with the results of soil column freezing experiment to verify the effectiveness of the hydrothermal coupled numerical simulation model. Finally, taking the Milin Tunnel in Tibet Autonomous Region as an example, the temperature field and water field were simulated and analyzed, and the temperature field considering water migration was compared. The results show that with the increase of time, the temperature at the top boundary of the tunnel reduces from $-0.82\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$, the internal boundary temperature of the tunnel decreases from $-0.74\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $-11.11\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the tunnel temperature rises in March; the peak of ice content appears in January, and the ice content begins to decline in March. At the same time, the heat conduction velocity in the temperature field without considering moisture migration is faster, which proves that the influence of latent heat of phase transition on the distribution of temperature field in the tunnel is greater than that of liquid convection caused by gravity migration. The research results can reflect the occurrence process of freezing damage in the rich water tunnel in cold area, which has certain reference value.

Key words: tunnel in the cold regions; water ice phase change; moisture transfer; hydro thermal coupling; COMSOL software

收稿日期: 2019-04-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474050, U1602232); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N17010829); 辽宁省自然科学基金资助项目(20170540304, 20170520341); 硅酸盐建筑材料国家重点实验室(武汉理工大学)开放基金资助项目(SYSJJ2017-08); 中建股份科技研发项目(CSCEC-2016-Z-20-8)。

作者简介: 张 泽(1995-),男,山西大同人,东北大学博士研究生;王述红(1969-),男,江苏泰州人,东北大学教授,博士生导师。

我国东北部以及西部这些高纬度或高海拔地区有一半以上的国土属于寒区^[1]. 寒区隧道在修建过程中由于温度降低围岩会受到冻胀的影响,除了岩土体孔(裂)隙中的原位水发生冻结外,岩土体中的水分迁移使得水分不断向冻结锋面迁移,促使冻胀更加明显. 因此,隧道岩体中的冻胀问题归根结底为土体中的温度水分迁移问题. 冻融状态转变过程中水分迁移导致土体中水分占比变化引起土体热参数发生改变;融化界面的冰晶会对周围的水分产生吸引作用从而导致界面水头的产生;由于水冰相变土体中水分含量降低而冰含量相应升高因此阻碍水的扩散,这些会对冻结过程造成深远影响;同时相变释放的热量也会对冻结产生较大影响;即使在冻结温度时土体中仍然存在一部分未冻水,且其含量与负温保持动态平衡关系.

隧道冻害过程是温度-渗流耦合问题,长期以来,各国学者建立了不同的温度-渗流耦合模型对寒区隧道的冻融进行研究^[2-4]. Liu 等^[5]采用热力学、流体力学、弹塑性力学基本理论,建立了非饱和和多孔介质材料低温 THM 耦合模型,对冻胀量的分布、冻胀深度以及应力场、温度场的分布进行模拟计算分析. 谭贤君等^[6]通过数值模拟对提出的“三区域”理论进行分析,但是对于水分迁移以及水冰相变的阻碍作用没有做出解释. Yamabe 等^[7-8]对饱和的砂岩和凝灰岩进行了实验并对低温水冰相变下的饱和岩石多次耦合过程进行了研究. 徐光苗等^[9]首次对低温岩石进行研究,建立了低温岩石的 THM 三场耦合方程,并采用有限元程序进行模拟.

本文基于混合物理论,考虑水分迁移以及水冰相变的影响,以及土体孔隙冰对未冻水的阻滞作用对原有模型进行改进并应用于非饱和土的低温水热耦合问题中,并使用 COMSOL 软件^[10]进行模块开发与文献[11]中经典实验进行数值验证,证明本文所建立的温度-渗流耦合数学模型的适用性. 然后以西藏自治区米林隧道为工程实例,对考虑水分迁移与不考虑水分迁移的温度场、水分场进行了模拟分析,研究成果能较真实地反映寒区富水隧道冻害现象发生过程,具有一定的参考价值.

1 寒区隧道水热耦合

为了建立更符合寒区隧道冻胀问题的温度-渗流耦合模型,在现有经典 Harlar 水热模型基础

上,将水分迁移和水冰相变考虑其中建立更为全面的岩土介质冻结过程的温度-渗流耦合模型,为寒区隧道的冻害问题提供参考.

1.1 基本假设

1) 土介质为均质各向同性孔隙介质,由未冻水、冰、岩体骨架组成,冻结过程中不发生变形.

2) 岩土介质中水分迁移,忽略空气对水分迁移的贡献.

3) 只考虑水冰相变的潜热和热传导过程.

4) 不考虑由于冰透镜体等冰体形成造成的上部已冻土克服下部水分重力对水分的抽吸作用.

1.2 温度场控制方程

根据傅里叶定律和能量守恒定律,在温度场控制方程中的比热容、导热系数都为含水率的函数,结合冻土的相变条件,单元体内的体积热容可描述为单元体的冰水相变所产生或吸收的相变热,由此可得

$$q_v = L \cdot \rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t}. \quad (1)$$

从而可得温度场的控制方程:

$$C_a \frac{\partial t}{\partial \tau} = \nabla[\lambda \nabla t] + L \rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t} - \rho_w c_w v \nabla t. \quad (2)$$

式中: C_a 为等效体积热容量, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; t 为土体瞬态温度, $^\circ\text{C}$; τ 为时间, s ; λ 为热传导系数 [$\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$]; ρ_w, ρ_i 分别为水、冰密度, kg/m^3 ; θ_i 为冰体积含量; L 为相变释放潜热,取值 $334 \text{ kJ}/\text{kg}$; ∇ 为哈密顿算子.

1.3 水分场控制方程

在寒区隧道工程围岩中即使在冻结点温度以下仍然存在没有冻结的水分,其遵循达西定律进行迁移;在单元体内考虑孔隙冰对未冻水的阻滞作用,非饱和土中的未冻水迁移微分方程即为水分场耦合温度控制方程:

$$\frac{\partial \theta_u}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\rho_w} \cdot \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \nabla[D(\theta_u) \nabla \theta_u - K(\theta_u)]. \quad (3)$$

式中, $D(\theta_u), K(\theta_u)$ 分别为非饱和土扩散系数和导水率,可见其都是随着未冻水含量发生变化.

冻土中水的扩散率 $D(\theta)$ 计算:

$$D(\theta) = \frac{k(\theta)}{c(\theta)} \cdot I. \quad (4)$$

式中: $k(\theta)$ 为非饱和土的渗透率, m/s ; $c(\theta)$ 为比水容量, $1/\text{m}$,可由滞水模型确定.

在冻土中,孔隙冰含量和孔隙水含量存在动态变化,冰的增加必占据孔隙从而减少水分迁移的通道. 为了体现与常温下非饱和土水分迁移的

区别,考虑了负温下孔隙冰的阻抗作用,引入阻抗系数的概念。 I 为阻抗系数。

$$I = 10^{-10\theta_i}, \quad (5)$$

$$k(\theta) = k_s S^l (1 - (1 - S^{1/m})^m)^2, \quad (6)$$

$$c(\theta) = a_0 m / (1 - m) \cdot S^{1/m} \cdot (1 - S^{1/m})^m. \quad (7)$$

其中: l 为本构参数; S 为冻土相对饱和度,定义为

$$S = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}. \quad (8)$$

式中, θ_r 和 θ_s 分别代表土的剩余含水量和饱和含水量。

2 关键耦合参数描述

1) 等效热容:

$$c_a(\theta) = \frac{\theta \rho_s C_s + \theta_i \rho_i C_i + \theta_w \rho_w C_w}{\theta_s + \theta_i + \theta_w}. \quad (9)$$

2) 等效热传导系数. 导热系数的取值有多种加权方法,本文采用指数加权方法,可表示为

$$\lambda(\theta) = (\lambda_s)^{\theta_s} (\lambda_i)^{\theta_i} (\lambda_w)^{\theta_w}. \quad (10)$$

3) 未冻水含量. 为真正建立水分场与温度场的耦合方程,需要引入 θ, θ_i 与 t 之间的联系方程. 徐学祖等^[12] 基于试验数据,给出了冻土中未冻水含量与温度的经验关系式:

$$\frac{w_0}{w_u} = \left(\frac{t}{t_f} \right)^B, \quad t < t_f. \quad (11)$$

式中: t_f 为土体冻结温度,℃; w_0 为土体初始含水量,%; w_u 为负温度为 t 时的未冻水质量分数,%; B 是与土类和含盐量确定的常量. 按照徐学祖等^[12] 冻土中水分迁移的实验研究中的测定方法,砂土、粉土、黏土中的 B 值为 0.61, 0.47, 0.56.

4) 固液比. 冻土中孔隙冰体积与未冻水体积之比,记为 B_i :

$$B_i = \frac{\theta_i}{\theta_w} = \begin{cases} \frac{\rho_w}{\rho_i} \left(\frac{t}{t_f} \right)^B, & t < t_f; \\ 0, & t \geq t_f. \end{cases} \quad (12)$$

因此,冻土中孔隙冰、未冻水和温度的联系方程为

$$\theta_i = B_i(t) \cdot \theta_w. \quad (13)$$

3 水热力模型的试验验证

文献[11]中的一维土柱冻结试验可以对所建立的模型正确性和可行性进行验证,该试验为封闭系统,如图 1 所示。

土样由非饱和土组成,无外载冻结方式为从

上至下,试验参数见表 1.

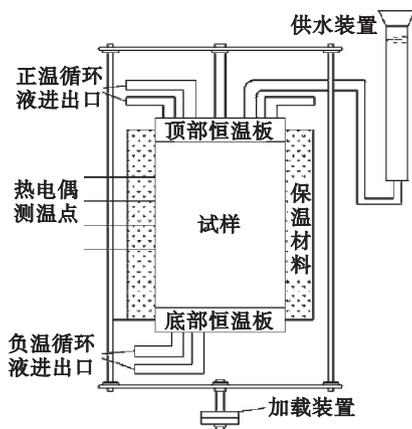


图 1 土柱试验所用装置示意图

Fig. 1 The diagram of soil column test device

表 1 试验参数
Table 1 Test parameters

方向	土类	柱高	干密度	初始含水量	孔隙比
		cm	kg·m ⁻³		
垂直冻结	张掖壤土	13.68	1500	0.2207	0.444

文献[11]中给出了试验的初始温度见图 2, 土柱上边界和下边界温度的变化值见表 2.

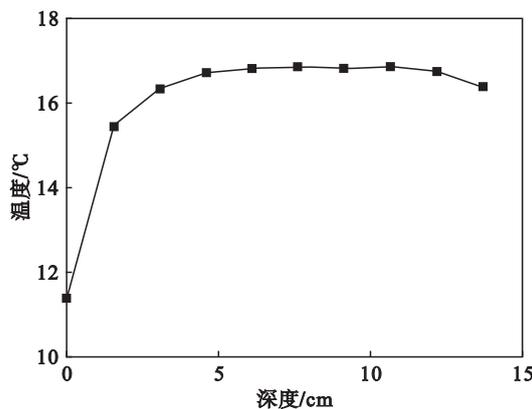


图 2 初始温度值

Fig. 2 Test initial temperatures

表 2 试验上下边界温度变化

Table 2 Test upper and lower boundaries temperature changes

时间 τ /min	0	34	55	367	401	445
上边界/℃	11.4	1.0	-0.7	-1.3	-2.3	-2.9
下边界/℃	16.4	15.6	6.8	4.8	4.5	4.0
时间 τ /min	528	767	1595	1837	2177	2830
上边界/℃	-3.4	-4.2	-4.8	-4.9	-4.9	-4.9
下边界/℃	3.9	3.8	3.6	3.6	3.6	3.7

本文计算的物理参数如表 3 所示。

表3 计算物理参数
Table 3 Physical parameters

参数	值
a	2.60
m	0.20
l	0.50
t_s	0.50
t_r	0.02
k_s/m^2	1.3E-13
$\rho_s/(kg \cdot m^{-3})$	1830
$\rho_l/(kg \cdot m^{-3})$	1000
$\rho_i/(kg \cdot m^{-3})$	917
$c_s/(J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	1600
$c_l/(J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	4179
$c_i/(J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	2052
$L/(J \cdot kg^{-1})$	333.5E+3
$\lambda_l/(W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	0.56
$\lambda_i/(W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	2.31
$\lambda_s/(W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	1.60

根据文献中的实验结果分别对 528 min 和 2830 min 的温度变化进行计算,与文献[11]中的试验数值进行了对比,如图3所示,验证结果基本吻合,证明了模型的正确性。

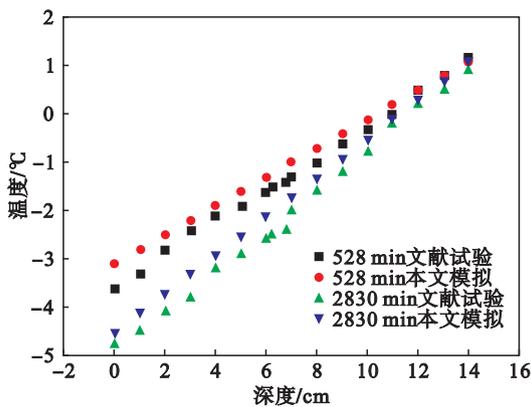


图3 温度场变化对比图

Fig. 3 Contrast diagram of temperature field change

4 工程实例

4.1 工程概况及计算参数

米林隧道址山势雄伟,区内高点位于隧道轴线左侧山脉,海拔高度为4230 m,最低点位于隧道出口宽谷地带,标高为2940 m,典型的高海拔隧道,最大埋深为1200 m。项目所在地区历年年平均气温4.3℃,历年极端最高气温为21℃,历年极端最低气温为-25℃,历年最冷月平均气温为-7.6℃,按对隧道工程影响的气候分区,属寒

冷地区。米林隧道为高海拔富水寒区大长隧道。

根据地质勘查资料,选取隧道的上覆山体和隧道下一部分山体进行计算,取其洞深10 m处的断面为研究对象,该断面处的地质条件为:地质成分主要为块石土、粉土。根据隧道的埋深以及断面尺寸,建立隧道均匀孔隙介质简化计算模型,如图4所示。

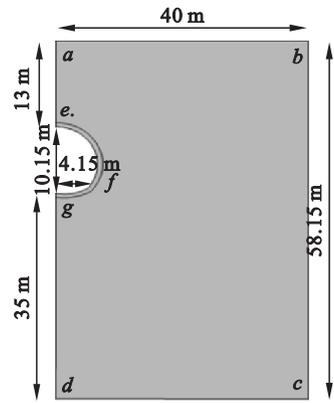


图4 均匀孔隙介质模型

Fig. 4 Uniform pore media model

1) 米林隧道温度场初始条件和边界条件。

林芝县近五年月平均气温的变化情况:林芝县全年的平均气温为2.3℃,最冷月为一月,平均气温为-9.8℃,最热月为七月,平均气温为11.8℃;极端最高气温为27℃,极端最低气温为-13℃,由于海拔高,温度垂直变化明显,海拔每升高100 m温度下降0.6℃。

将五年的每月平均温度绘制如图5所示,大致认为一年内的温度变化规律大致呈现周期性变化,可写成正弦或余弦函数的形式:

$$t = 0.85 + 10.6 \cos\left(\frac{2\pi\tau}{365} + \pi\right). \quad (14)$$

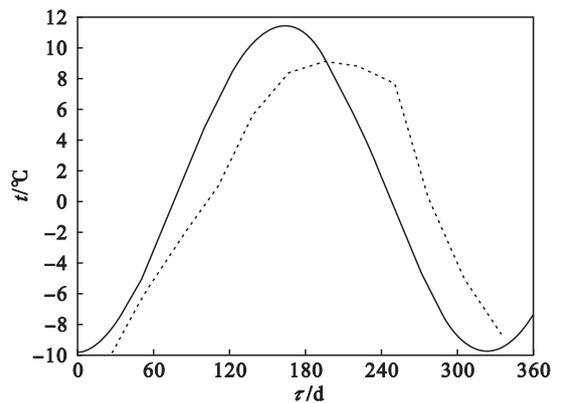


图5 林芝县一年温度变化图

Fig. 5 Annual temperature change in Nyingchi county

实际中隧道顶部和隧道内部的大气温度变化会引起围岩中的温度-渗流变化。因此选取隧道

断面施工期的地面 (*ab* 边) 及内部 (*efg* 边) 温度为大气温度变化, 见式 (14). 根据对称性 *ae*, *gd* 边为绝热边界, 同样 *bc*, *cd* 边也为绝热边界. 由于为高海拔隧道, 需要考虑高度对于温度的影响, 隧道顶部温度要低于隧道围岩温度如图 6 所示. 根据施工现场提供的隧道施工阶段温度值, 隧道围岩初始温度为 $-0.98\text{ }^{\circ}\text{C}$.

本文主要研究低温状态下隧道中水热耦合效应, 因此选取本年 11 月到次年 4 月这六个月进行研究, 温度取值变化趋势如图 6 所示.

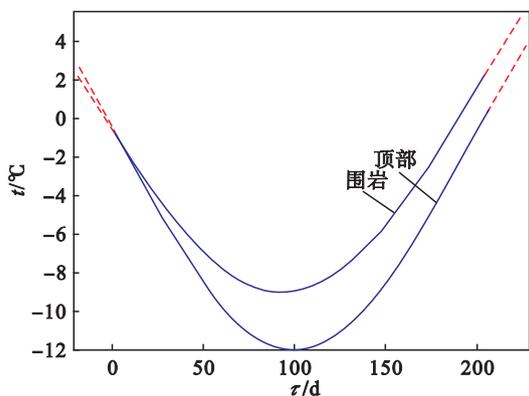


图 6 隧道初始温度场
Fig. 6 Initial tunnel temperature

2) 渗流场初始边界条件与边界条件.

bc 边为水头压力边界, 若将 *d* 点作为原点进行计算, 水压力在竖直方向上呈线性变化, 总水头等于基质吸力水头与位置水头之和, 因此取压力水头为式 (15) 所示, 初始含水量根据现场提供数据取值为 12%.

$$p = \begin{cases} (58.15 - h)pg, & 0 \leq h < 58.15; \\ 0, & h \geq 58.15. \end{cases} \quad (15)$$

式中: *p* 为水头压力, Pa; *h* 为高度, m.

根据对称性 *ae*, *gd* 为不透水边界, 衬砌与围岩的接触边 *efg* 压力水头取值为 0, *cd* 边为固定边界, 压力为 0, 忽略衬砌的渗透性, 初始水压力取值为 0.

由地质条件可知, 米林隧道计算所取断面主要为粉土, 并喷射 60 cm 厚的 C25 混凝土衬砌. 主要计算物理参数如表 4 所示, 其他参数如表 3 所示.

表 4 模型计算主要参数

Table 4 Main parameters calculated by the model

参数	围岩	衬砌
$\rho_s / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 300	2 500
$c_s / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1})$	850	816.43
$\lambda_s / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1})$	1.60	—
<i>n</i>	0.15	—

4.2 米林隧道水热耦合模型分析

1) 温度场时空分布. 林芝地区在 11 月份开始进入零下温度, 并持续降温. 图 7 显示了隧道整体由 11 月份到次年 4 月份经历的温度变化状况. 根据当地的气温变化规律, 隧道边界气温持续降低, 隧道顶部边界气温由 $-0.82\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低到 $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$, 隧道内部边界温度由 $-0.74\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低到 $-11.11\text{ }^{\circ}\text{C}$, 导致隧道整体温度的下降, 下降趋势为由顶部向底部, 由洞口向内部延伸扩展.

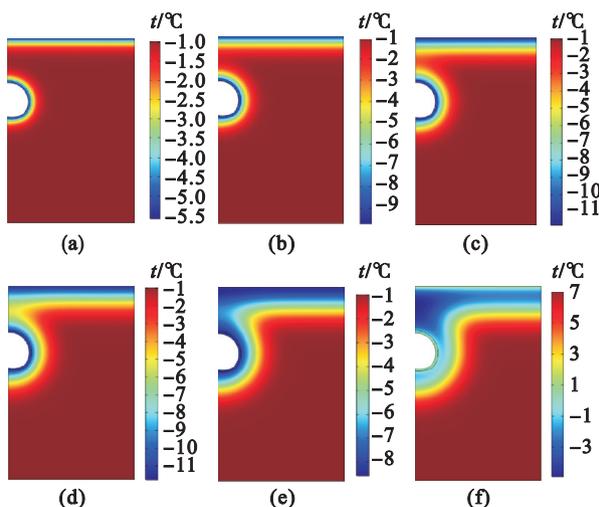


图 7 11 月、12 月、1 月、2 月、3 月、4 月温度场
Fig. 7 Temperature field in November, December, January, February, March, April

(a)—11 月; (b)—12 月; (c)—1 月;
(d)—2 月; (e)—3 月; (f)—4 月.

距离边界越近的岩体温度下降越快, 这是因为边界带范围内的温度梯度大, 在导热系数相同的情况下, 热量传递量大; 此外再考虑冻结状态下水冰相变的情况, 水相变为冰时比热容会降低而导热系数会增大, 由此也增加热量的传输速率. 在 3 月和 4 月温度有明显的回升.

2) 未冻水含量时空分布. 由上述温度时空分布的分析知, 在 11 月到次年 2 月的 120 d 中隧道顶部及隧道内部经历降温的过程, 隧道岩体存在局部降温, 降温范围可以从图 8a ~ 图 8d 观察得出, 红色区域持续减小, 说明此区域存在持续降温状态.

由图 8e, 图 8f 分析可得, 由于隧道顶部及内部温度升高导致低温时已经冻结成冰的固态水转化为液态水, 显示了隧道顶部边界和隧道边界由模拟三月时逐渐转变为正温, 说明边界进入了融化状态, 导致隧道顶部边界和隧道内部边界未冻水含量升高. 在隧道顶部和隧道内部未冻水含量由 120 d 时的 5.3% 迅速增加到 180 d 时的 9.8%, 这对隧道的稳定性是十分不利的.

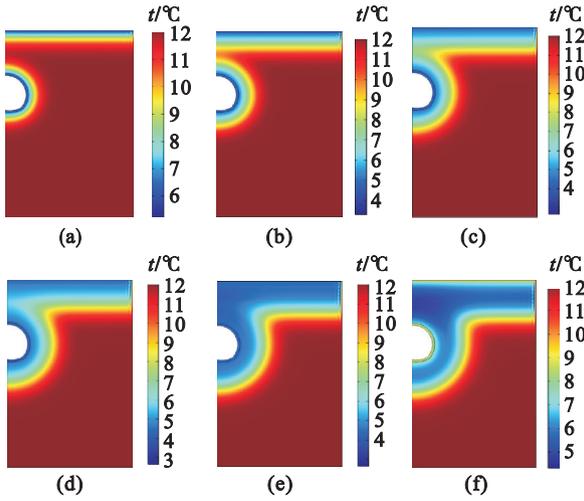


图 8 11 月、12 月、1 月、2 月、3 月、4 月未冻水含量

Fig. 8 Unfrozen water content in November, December, January, February, March, April

(a)—11 月; (b)—12 月; (c)—1 月;
(d)—2 月; (e)—3 月; (f)—4 月.

3) 冰含量时空分布. 由图 9a ~ 图 9d 可以看出,隧道岩体的固态冰含量持续升高,这是因为隧道岩体持续降温,液态水被冻结为固态水,从而升高了固态冰的含量,由上述温度时空分布的分析知,在 11 月至 2 月隧道顶部以及隧道内部经历降温过程,隧道岩体中存在局部降温,降温的范围可以从图 9a ~ 图 9d 观察出来,蓝色区域(固态冰含量 5% ~ 10%)持续减小,由蓝绿色区域的扩张代替(固态冰含量 10% ~ 25%),说明此区域经历着持续降温状态,并且含冰量峰值出现在 1 月份.

由图 9e, 图 9f 分析可得,由于隧道顶部以及隧道内部的升温导致已经冻结成冰的固态水转为液态水,因此隧道在 3 月份开始内部的冻结冰开始融化,在 4 月份时随着温度的持续升高,其含冰量也随之降低,由冻结时的 25% 降低到 15%,可以推测随着温度的持续升高,隧道岩体中的冰含量将一直减小直到全部融化为液态水. 岩体中的水冰相变和冰体的冻结融化对于隧道整体的稳定性产生重要的影响.

4) 水分迁移对温度场的影响分析. 为与上述已经考虑水分迁移的模型对比,应用式(16)建立不考虑水分迁移的数值模型,只考虑隧道岩体整体的热迁移,不考虑冰水相变.

$$c_v \frac{\partial t}{\partial \tau} + \Delta[-\lambda_e \Delta T + \rho_1 c_1 \vec{u}t] = Q_L. \quad (16)$$

其密度、导热系数及比热容等参数都使用与上述模型相同的数值, \vec{u} 为土壤中水分迁移速度矢量,其中图 10 是不考虑水分迁移的隧道在 11 月、1 月、3 月的温度场分布图,图 11 是考虑水分

迁移的对应时间的温度场分布图.

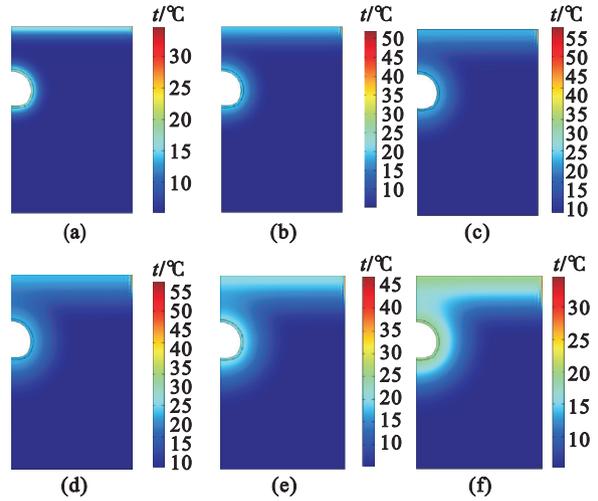


图 9 11 月、12 月、1 月、2 月、3 月、4 月体积冰含量
Fig. 9 Ice content by volume in November, December, January, February, March, April

(a)—11 月; (b)—12 月; (c)—1 月;
(d)—2 月; (e)—3 月; (f)—4 月.

通过对比图 10 和图 11 可见,未考虑水分迁移的温度场中热传导速度较快,图 10 的红色区域较图 11 的红色区域减小的速率大,其黄绿色区域($-4\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -7\text{ }^{\circ}\text{C}$)扩张速度大,这是因为考虑水分迁移的热传导过程受到的水相变成冰释放潜热的影响,相变潜热提供的热量阻止了低温的传递,而且水的比热容一般是岩体的比热容的 4 倍左右,说明岩石升高同等温度要消耗 4 倍的热量,也在一定程度上阻碍了隧道岩体中的温度升高过程.

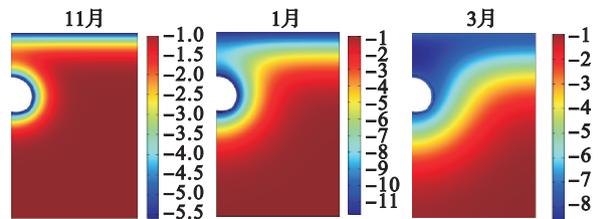


图 10 不考虑水分迁移温度场

Fig. 10 Does not consider the moisture migration temperature field

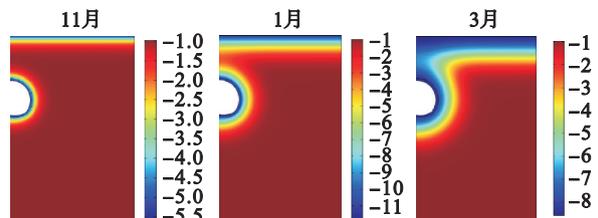


图 11 考虑水分迁移温度场

Fig. 11 Consider the moisture migration temperature field

由 3 月份温度场对比分析可以看出,考虑水

分迁移的隧道顶部以及隧道内部温度场与不考虑水分迁移的温度场相比,前者升温过程也比较缓慢,分析原因,导致这种情况主要有两点:一是由于水的比热容较大,升高相同温度消耗的热量较岩体的多;二是随着温度周期性变化,由于岩体升温导致岩体内的冰含量减少,而冰融化成水是吸收热量的过程,要消耗热能,相对的水成冰要放热,冰成水要吸热,所以考虑水分迁移的隧道岩体在升温过程中的传热较慢。

5 结 论

1) 在原有水热耦合模型基础上,推导出考虑水冰相变和水分迁移的水热耦合方程,从而建立了更全面更符合实际的水热耦合模型。利用COMSOL 软件开发新的模块与一维土柱冻结实验进行反演验证,数值模拟得到的温度场与实验结果基本吻合较好,进而验证了模型的正确性。

2) 利用水热耦合模型对米林隧道11月到次年4月的温度场和水分场进行模拟分析。结果表明:隧道顶部边界气温由 $-0.82\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低到 $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$,隧道内部边界温度由 $-0.74\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低到 $-11.11\text{ }^{\circ}\text{C}$,并在3月份隧道温度回升;同时隧道中冰含量在1月份达到峰值,在3月份开始减小,表明在隧道中存在明显的冻融现象,极易产生冻害问题。

3) 对比分析水分迁移对温度场的影响,考虑水分迁移的隧道顶部以及隧道内部温度场升温过程比较缓慢,证明固态冰的形成或融解时所产生的相变潜热对隧道中温度场的分布影响远远大于液态水靠重力迁移造成的热对流传热。

参考文献:

[1] 贺永年,刘志强.隧道工程[M].徐州:中国矿业大学出版社,2002.
(He Yong-nian, Liu Zhi-qiang. Tunnel engineering [M]. Xuzhou:China University of Mining and Technology Press,

2002.)
[2] Harlan R L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil[J]. *Water Resources Research*,1973,9(5):1314-1323.
[3] 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. Mechanical properties and research status of frozen soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*,2010,31(1):133-143.)
[4] 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.
[5] Liu Z, Yu X. Coupled thermo-hydro-mechanical model for porous materials under frost action: theory and implementation[J]. *Acta Geotechnica*,2011,6(2):51-65.
[6] 谭贤君,余祥宏,陈卫忠,等.岩土介质在冻融过程中的温度场研究及工程应用[J]. *岩土工程学报*,2012,31(sup1):2867-2874.
(Tan Xian-jun, Yu Xiang-hong, Chen Wei-zhong, et al. Temperature field research and engineering application of geotechnical media during freezing and thawing process[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 31(sup1):2867-2874.)
[7] Yamabe T, Neaupane K M. Determination of some thermo-mechanical properties of Sirahama sandstone under subzero temperature condition [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*,2001,38(7):1029-1034.
[8] Neaupane K M, Yamabe T. A fully coupled thermo-hydro-mechanical nonlinear model for a frozen medium [J]. *Computers and Geotechnics*,2001,28(8):613-637.
[9] 徐光苗,刘泉声,张秀丽.冻结温度下岩体 THM 完全耦合的理论初步分析[J]. *岩石力学与工程学报*,2004,23(21):3709-3713.
(Xu Guang-miao, Liu Quan-sheng, Zhang Xiu-li. Preliminary analysis of the theory of full coupling of rock mass THM under freezing temperature [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2004,23(21):3709-3713.)
[10] COMSOL A B. COMSOL multiphysics user's guide[R]. Version:4.3b. Stockholm:COMSOL,2012.
[11] 胡和平,杨诗秀,雷志栋.土壤冻结时水热迁移规律的数值模拟[J]. *水利学报*,1992(7):1-8.
(Hu He-ping, Yang Shi-xiu, Lei Zhi-dong. Numerical simulation of hydrothermal migration in soil freezing [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*,1992(7):1-8.)
[12] 徐学祖,王家澄,张立新.冻土物理学[M].北京:科学出版社,2010.
(Xu Xue-zu, Wang Jia-cheng, Zhang Li-xin. Frozen soil physics[M]. Beijing:Science Press,2010.)