

含相变低温岩体水热耦合模型研究

谭贤君, 陈卫忠, 贾善坡, 吕森鹏

(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)

摘要: 根据冻融循环条件下岩体水分运动和热量迁移的基本规律, 基于连续介质力学、热力学以及分凝势理论, 建立低温岩体温度场和渗流场耦合控制方程, 该耦合方程不仅考虑了热传导、相变潜热和渗流速度对温度分布的影响, 而且分析了由分凝势引起的孔隙水流动对渗流速度以及渗透压力分布的影响, 实现了温度场和渗流场的双向全耦合。并将研究成果与 M. Smith 等的模型试验和现场试验进行对比分析, 结果表明, 所建立的耦合控制方程计算结果与实测结果吻合较好。在此基础上, 应用此耦合模型数值仿真寒区隧道, 对隧道温度场分布规律和冻融圈大小进行分析, 该计算结果能为寒区隧道的设计和施工提供一定的参考。

关键词: 岩石力学; 冻岩; 相变; 水热耦合; 耦合模型

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)07 - 1455 - 07

A COUPLED HYDRO-THERMAL MODEL FOR LOW TEMPERATURE ROCK INCLUDING PHASE CHANGE

TAN Xianjun, CHEN Weizhong, JIA Shanpo, LU Senpeng

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: According to the basic laws of water movement and heat migration about rock mass under the freezing-thawing cycle condition, based on the theory of continuum mechanics, thermodynamics and segregation potential, the coupled equations of seepage field and temperature field are established. This model can not only consider the influence of thermal conduction, latent heat and seepage velocity on the distribution of temperature, but also analyze the effect of water flow induced by segregation potential on the seepage velocity and seepage pressure. To verify the reliability and rationality of the equations, the comparison is done by using the same conditions between the model test which was done by M. Smith and the finite element analysis using this coupled mathematical model. Then the model is applied to a cold regional tunnel, and the distribution of temperature and active ring of permafrost are obtained. The results can give some references for design and construction of tunnel in cold regions.

Key words: rock mechanics; frozen rock; phase change; hydro-thermal coupling; coupled model

1 引言

地球上多年冻岩(土)、季节冻岩(土)和瞬时冻岩

(土)区的面积约占陆地面积的 50%。我国是寒区面积分布最多的国家之一, 永久性冻岩(土)和季节性冻岩(土)面积约占全国陆地总面积的 75%。随着我国在寒区建设工程日益增多, 出现了大量的冻岩

收稿日期: 2008 - 01 - 08; **修回日期:** 2008 - 02 - 27

基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作项目(50720135906); 中国科学院“西部行动计划”高新技术资助项目

作者简介: 谭贤君(1984 -), 男, 2005年毕业于石家庄铁道学院地下工程专业, 现为博士研究生, 主要从事隧道及地下空间方面的研究工作。E-mail: txj137@sina.com

(土)问题。

岩体的冻胀除受原位水冻结膨胀外，水分不断向冻结锋面迁移、聚集并结晶成冰透镜体，是造成岩体冻胀的主要来源^[1]。因此，体的冻胀问题归根结底为冻岩中的水热迁移问题。从 20 世纪 50 年代后期至今，众多学者^[2~6]对水热迁移问题进行了比较深入的分析研究，并提出了多个水、热耦合计算模型^[7~10]，成功地解决了寒区岩体工程水、热耦合问题。但现有模型中仅考虑了土体水分迁移携带热量对温度场的影响，而对更为重要的水分迁移对热物理参数的影响、相变潜热以及温度梯度引起的分凝势等问题还考虑不足^[11~13]。基于此，针对现有方法的不足，本文将对含相变低温岩体水热耦合数学模型进行了研究。

2 水热耦合模型控制方程

对于低温岩体，其一般由岩石骨架、孔隙水(或裂隙水)、冰以及空气组成，而本文不考虑空气影响，即假定岩体为饱和状态。为便于研究，进行如下简化假定：

- (1) 岩体为均质、各向同性孔隙介质，并由骨架、水和冰组成，满足混合物理论的基本假定。
- (2) 岩体中的孔隙率(裂隙率)为恒定值，不随温度、时间及空间的变化而变化，且在介质中均匀分布。
- (3) 不考虑水分的蒸发过程，只考虑水变为冰的相变并释放(吸收)潜热的过程。

2.1 热量的传输迁移过程

在冻融环境中，热量的迁移不仅仅受温度梯度的影响，孔隙水的流动也会对能量的迁移有很大影响。根据孔隙介质的对流换热原理，低温岩体介质热传导问题的微分方程为

$$C_{ef} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_L L \frac{\partial \theta_L}{\partial t} + \nabla[-\lambda_{ef} \nabla T + \rho_L C_L \bar{u} T] = Q_T \quad (1)$$

式中： C_{ef} 为等效热容， T 为温度， ρ_L 为液态水的密度， L 为单位质量的水变为冰时释放的潜热值， θ_L 为液态水的含量， λ_{ef} 为岩体等效导热系数， C_L 为水的比热容， \bar{u} 为流体的相对速度矢量， Q_T 为热源或汇。

为了便于收敛，在进行数值分析时，式(1)一般改写为

$$C_a \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla[-\lambda_{ef} \nabla T + \rho_L C_L \bar{u} T] = Q_T \quad (2)$$

式中： C_a 为显热容，且有 $C_a = C_{ef} + \rho_L L \frac{\partial \theta_L}{\partial T}$ 。

2.2 水的渗流输运过程

孔隙水的渗流过程不仅受水力梯度的影响，还受分凝势(指温度变化引起水的密度变化并产生一定的压差，而这将导致孔隙水向密度降低方向流动)、溶质势等影响^[14, 15]。

低温岩体修正后的 Darcy 渗透方程可用压力形式表示为

$$S \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \left[-\frac{k}{\eta} \nabla \left(p + \rho_L g H_g + \frac{SP_0}{k} T \right) \right] = Q_H \quad (3)$$

$$\bar{u} = -\frac{k}{\eta} \nabla \left(p + \rho_L g H_g + \frac{SP_0}{k} T \right) \quad (4)$$

式中： S 为比贮水系数，取常数； p 为渗透压力； k 为渗透率； η 为水的黏滞系数(0.001 kg/(m·s))； H_g 为重力水头高度； SP_0 为分凝势，其在温度低于冰点时为正的常数，在高于冰点温度时为 0； Q_H 为渗流场的源或汇。

式(2)~(4)给出的温度场与渗流场耦合的控制方程实际上描述了低温岩体冻融区满足的一般形式。由于式(2)，(3)中的各项基本物理参数在冻结区和融区不连续，并均随温度和坐标的变化而变化，本文主要通过引入 Heaviside 二阶阶跃平滑函数，使得各项热力学参数在方程中有一致的表示形式。

2.3 相关热力学参数和渗流参数描述

对于低温岩体，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。设岩体的总体积为 V ，基质、水、冰各组分的体积分别为 V_s, V_L, V_i ，则 3 项的体积含量 $\theta_s, \theta_L, \theta_i$ 可分别表示为

$$\left. \begin{aligned} \theta_s &= \frac{V_s}{V} \\ \theta_L &= \frac{V_L}{V} \\ \theta_i &= \frac{V_i}{V} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

且满足：

$$\theta_s + \theta_L + \theta_i = 1 \quad (6)$$

式中：下标“s”，“L”，“i”分别表示基质、液态水和冰。

(1) 等效热容

热容 C_v 表示的是单位体积的介质温度改变 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 所需要的热量, 单位为 $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$, 对于低温岩体, 其热容可以用混合物各种介质按体积加权平均数来表示, 即等效热容 C_{ef} 可表示为

$$C_{ef} = \frac{\theta_s \rho_s C_s + \theta_L \rho_L C_L + \theta_i \rho_i C_i}{\theta_s + \theta_L + \theta_i} \quad (7)$$

(2) 等效导热系数

导热系数 λ 是指每单位温度梯度下单位时间内通过单位面积岩土体的热量, 单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. 关于岩体类孔隙介质, 导热系数的取值有多种加权方法, 如指数加权、体积加权平均等. 本文采用指数加权方法, 可用公式表示为

$$\lambda_{ef} = (\lambda_s)^{\theta_s} (\lambda_L)^{\theta_L} (\lambda_i)^{\theta_i} \quad (8)$$

式中: λ_s , λ_L , λ_i 分别为基质、液态水和冰的导热系数.

(3) 渗透率

在渗流力学中, 当采用式(3)用压力形式表示时, 一般渗透常数采用渗透率, 其单位为 m^2 . 根据前面的假设, 岩体在冻结区和未冻区的渗透率均为常数, 可以用 Heaviside 二阶阶跃函数表示为

$$k = k_f + (k_u - k_f)H(T - T_{ref}, \Delta T) \quad (9)$$

式中: k_f , k_u 分别为完全冻结区和未冻区的渗透率.

3 水热耦合模型的试验验证

3.1 试验概况

M. Smith 等^[16, 17]通过模型试验及现场试验, 对寒冷地区粉土中修建输气管道温度及冻胀变形进行了观测和分析. 考虑其计算实例的典型性, 本文运用前面所建立的低温岩体温度场与渗流场耦合控制方程, 对该问题进行相同条件下的温度场与渗流场耦合有限元分析, 从而验证本文模型的可靠性.

M. Smith 所进行的模型试验为一粉土中埋置长 16 m, 直径 273 mm 的输气管道, 输气管道埋深 0.43 m. 由于管道较长, 可以近似作为平面问题处理. 另外, 再根据模型的对称性, 本文选用模型的 1/2 作为有限元计算区域(见图 1).

热力学边界条件: AB , DE , FG 段为对称边界, 即 $\bar{q} = 0$; AG 和 BCD 段为固定边界, 有 $T_{AG} = 0.75\text{ }^\circ\text{C}$, $T_{BCD} = 0.75\text{ }^\circ\text{C}$; EF 段为流量边界, 即 $\bar{q} = 3.33\text{ W}/\text{m}^2$. 土中的初始温度场均匀分布, 即 $T|_{t=0} = 4\text{ }^\circ\text{C}$.

渗流边界条件为: AB , BCD , DE , FG 为对称

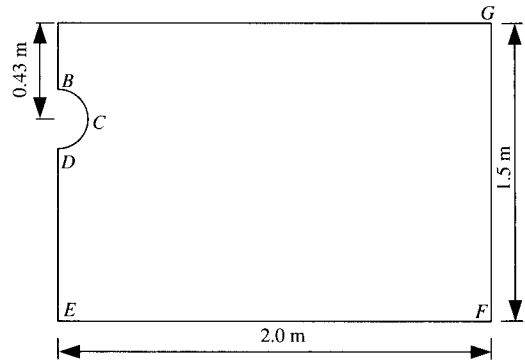


图 1 有限元分析模型

Fig.1 Finite element analysis model

边界, 即流量 $-\bar{n} \frac{K}{\eta} \nabla(p + \rho_L g H_g) = 0$; AG 段为液

体自由面, 即 $P_{AB} = 0\text{ MPa}$; EF 段为透水边界, 即 $p_{EF} = \rho_L g H_{EF}$, $H_{GF} = 1.5\text{ m}$. 主要计算物理参数取值列于表 1.

表 1 主要计算物理参数取值

Table 1 Main parameters for computation

介质	含水量 w/%	渗透率 k/m^2	导热系数 $\lambda/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	比热容 C $/(J \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1})$
混凝土	2.0	2×10^{-17}	1.000	993
围岩(碎石土)	24.0	1×10^{-14}	3.000	850
保温材料	1.2	1×10^{-18}	0.027	5 000
粉土	38.0	1×10^{-13}	3.000	850
水	-	-	0.560	4 180
冰	-	-	2.240	2 090

3.2 耦合模型计算结果与经典试验结果的对比分析

M. Smith 和 S. D. R. Kettle^[16]通过模型试验及现场试验所得到的管道铺设 1 a 时间里 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 等温线如图 2 所示; 利用本文推导的水热耦合方程, 通过相同条件下的有限元分析, 得到的 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 等温线如图 3 所示. 对比图 2 和 3 可得: 不论是从最大冻深还是从温度分布发展趋势来讲, 本文所建立的模型与 M. Smith 等得到的结果都非常相似. 图 2, 3 的最大冻深相差很小, 图 2 最大冻深为 139 cm, 图 3 的则为 135 cm, 温度分布均是随着时间的增长, 逐渐向外扩展, 且温度梯度越来越小.

3.3 温度 - 渗流耦合与只考虑温度场结果对比分析

众所周知, 只要涉及到冰 - 水相变, 就会有渗流问题, 那么渗流场的存在究竟在何种程度上影响温度场, 基于此, 笔者进行了相关探讨, 图 4 是只考虑温度场的计算结果.

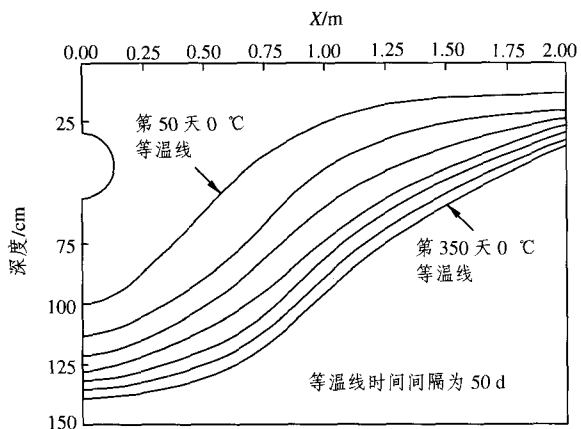


图 2 不同时刻 0 °C 等温线的实测值^[16]
Fig.2 0 °C isotherm in various times measured^[16]

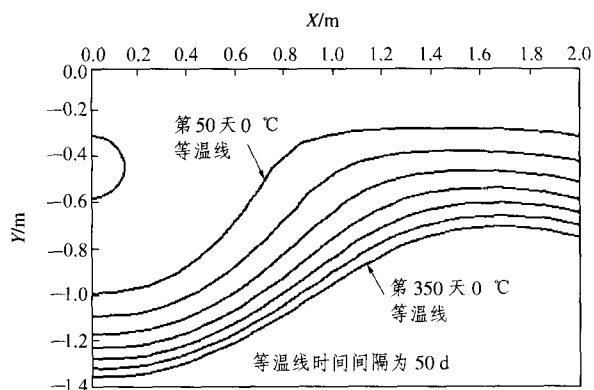


图 3 应用本文模型得到的不同时刻 0 °C 等温线
Fig.3 0 °C isotherm in various times applying coupled model

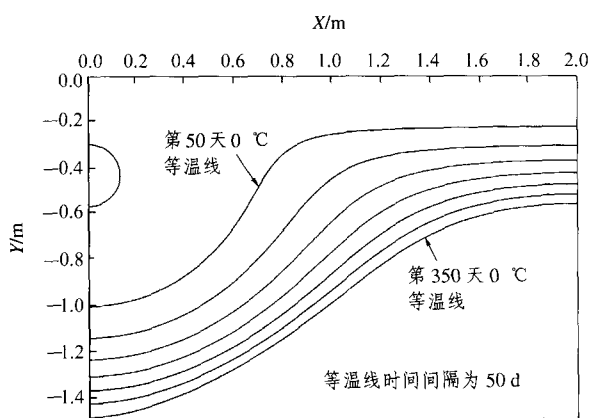


图 4 只考虑温度场得到的不同时刻 0 °C 等温线
Fig.4 0 °C isotherm in various times considering temperature field

对比图 3, 4 可以看出, 只考虑温度场的作用比水热耦合得到的最大冻融影响范围要大。只考虑温度场时, 管道周围 1 a 内的最大冻深为 149 cm, 比利用水热耦合模型得到的 135 cm 最大冻深大了近 10%; 另外, 图 3 显示, 管道周围经过 1 a 的温度

调整, 其温度分布已基本趋于稳定; 而图 4 显示, 管道周围温度处在进一步调整之中, 还有进一步扩大的趋势。主要原因是水热耦合模型考虑到了水流引起热对流, 对温度产生了影响。M. Smith 模型试验的水文条件是地下水在静水压力作用下向管道流动, 与温度的热传导方向相反, 所以阻碍了温度传播。

3.4 参数敏感性分析

通过前面的数学模型推导可以看出, 模型中的主要参数为等效热容、等效导热系数和渗透率。为了分析其对本文所建立的耦合数学模型的影响, 下面对这 3 个参数作敏感性分析。

(1) 等效热容

图 5 为等效热容变为原来的 1/2 后所得到的不同时刻 0 °C 等温线, 对比图 5 和 3 可以看出, 两图差别不大, 说明等效热容对整个温度场的影响很小。

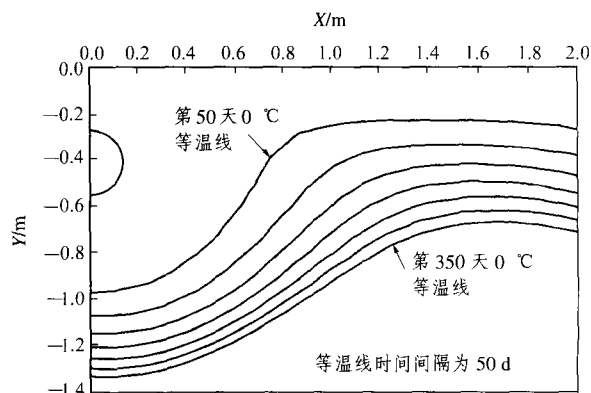


图 5 改变等效热容后不同时刻 0 °C 等温线
Fig.5 0 °C isotherm after changing the equivalent heat capacity

(2) 等效导热系数

图 6 为等效导热系数变为原来的 1/2 后所得到的

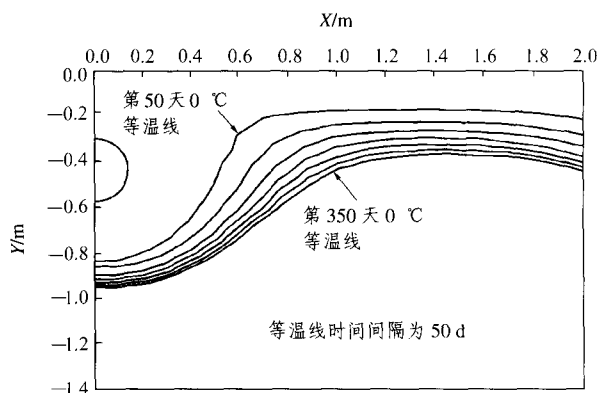


图 6 改变等效导热系数后不同时刻 0 °C 等温线
Fig.6 0 °C isotherm after changing the equivalent thermal conductivity

的不同时刻 0 °C 等温线, 对比图 6 和 3 可以看出: 温度场的分布发生了很大的变化, 减半等效导热系数后, 最大冻深从 135 cm 减小到了 94 cm, 减小了 30%, 说明等效导热系数对整个温度场的影响很大。

(3) 渗透率

图 7 为渗透率减小一个数量级, 即变为 10^{-14} m^2 后所得到的不同时刻 0 °C 等温线, 对比图 7 和 3 可以看出, 等效热容对整个温度场的影响有一定的影响, 但不是很大。

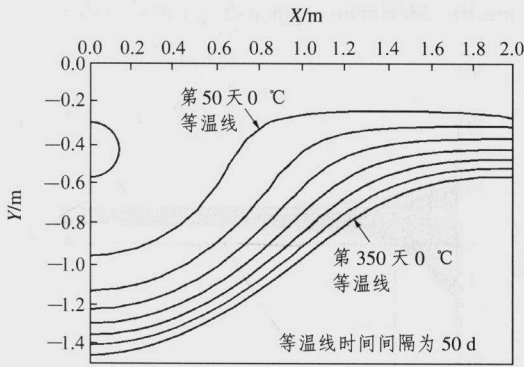


图 7 改变渗透率后不同时刻 0 °C 等温线
Fig.7 0 °C isotherm after changing the permeability

4 水热耦合模型的工程应用

4.1 工程概况及计算参数

拉脊山隧道位于青海省境内, 是在高海拔严寒地区修建的长大公路隧道。该地区属于半干旱型大陆气候, 日照时间长, 太阳辐射强, 春季干旱多风、秋季阴湿多雨。年平均气温 3.1 °C~7.2 °C, 1 月平均气温 -2.5 °C~-10 °C, 7 月平均气温 14.3 °C~25.3 °C; 极端最高温 28.7 °C, 极端最低温 -37 °C, 属于明显会产生冻害的高寒地区隧道。因此, 对本隧道开展冻融研究具有非常重要的意义。

根据工程概况, 本次选取隧道出口段(洞内 10 m 左右)为研究对象, 该地段表层为第四系碎石土, 下部为第三系砂砾岩及少量泥岩, 砂砾岩胶结程度不高, 为泥质胶结, 含少量地下水。

山隧道的排水是按照“防、排、截和堵, 多道防线, 综合治理”, 以防和堵为主, 排和截为辅的原则进行设计的。设计中, 在隧道初衬和二衬之间铺设了 1.2 mm 厚的防水板。隧道横断面如图 8 所示,

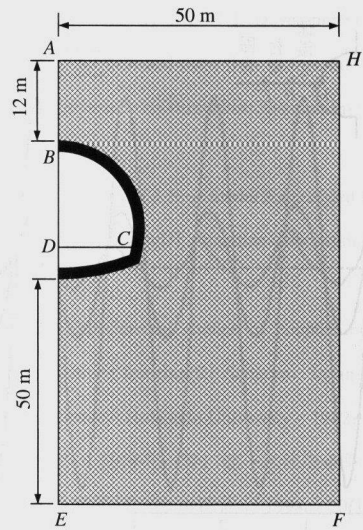


图 8 隧道横断面示意图
Fig.8 Cross section of tunnel

主要计算物理参数见表 1。

热力学边界条件: AB, DE, FG 段为对称边界, 即 $\bar{q}=0$; AG 和 BCD 边与大气相通。大气的温度变化取值为

$$T = 269 + 32.85 \times \sin(2\pi t / 360 / 86400 + \pi / 2) \quad (10)$$

式中: t 为时间(s)。

空气与围岩的对流换热系数 $\alpha = 15.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; EF 段为流量边界, 即 $q = 3.33 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。围岩初始温度 T_0 按多年冻岩下限 3% 的地热梯度确定。

渗流边界条件为: AB, DE 为对称边界, 即流量 $-\bar{n} \frac{K}{\eta} \nabla(p + \rho_L g H_g) = 0$; AG, BCD 段为液体自由面, 即 $P_{AG} = P_{BCD} = 0 \text{ MPa}$; GF, EF 段为透水边界, $p_{EF} = \rho_L g H_{EF}$ 。

4.2 计算结果

应用本文所建立的水热耦合模型, 对青海拉脊山隧道开展冻融研究, 其结果如下:

(1) 隧道温度场分布规律

为了便于分析, 选取几个典型的点加以说明, 即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)。其分布规律见图 9。

由图 9 可以看到: 点 A 温度 5 a 内呈周期性变化, 主要是点 A 代表的是环境温度, 为了保证工程质量, 选取了当地的极端温度(极端最高温 28.7 °C, 极端最低温 -37 °C)作为计算标准。经过 5 cm 厚的

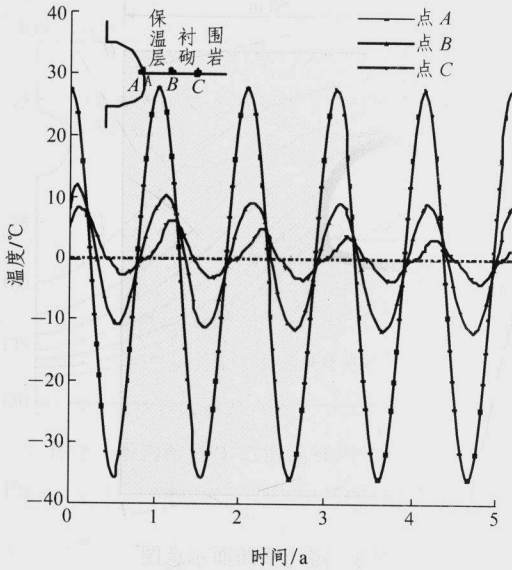


图9 典型位置温度变化图

Fig.9 Distribution of temperature at special location

保温层后, 点B 的温度的变化范围从环境温度 28.7 °C ~ -37 °C 变到了 10 °C ~ -10 °C, 明显减小, 说明保温层很好的发挥了其隔热保温效果。由于计算时选取的是加气混凝土, 其热传导系数相对较小, 所以也能起到一定的隔热保温效果, 从图上的反映即为: 经过 70 cm 厚的衬砌层后, 点C 的温度的变化范围从环境温度 10 °C ~ -10 °C 变到了 4 °C ~ -4 °C。

(2) 隧道冻融圈大小分析

由于隧道并不是标准的圆形断面, 再加上上表面边界条件的影响, 导致隧道各部位的冻深并不相同, 为了便于分析, 现选取 3 个部位加以说明, 即拱顶、拱腰和底板中心点。图 10 为拱顶位置从洞室表面垂直向上 12 m 范围内, 5 a 里温度分布图(每隔 10 d 画一条温度曲线), 从图 10 可以看出, 顶部最大冻深为 2.01 m; 图 11 为拱腰位置从洞室表面水平向右 12 m 范围内, 5 a 里温度分布图(每隔 10 d 画一条温度曲线), 从图 11 可以看出, 拱腰最大冻深为 1.98 m; 图 12 为拱腰位置从洞室表面垂直向下 12 m 范围内, 5 a 里温度分布图(每隔 10 d 画一条温度曲线), 从图 12 以看出, 底板最大冻深为 5.78 m。从数值上看, 底板冻深明显大于拱顶和拱腰, 主要原因底板没有铺设保温层; 拱顶和拱腰的冻深差不多, 拱顶略大, 可能是上表面边界条件的影响; 从图形上看, 靠近隧道外表面的温度变化梯度相当大, 主要是由于保温层的作用。

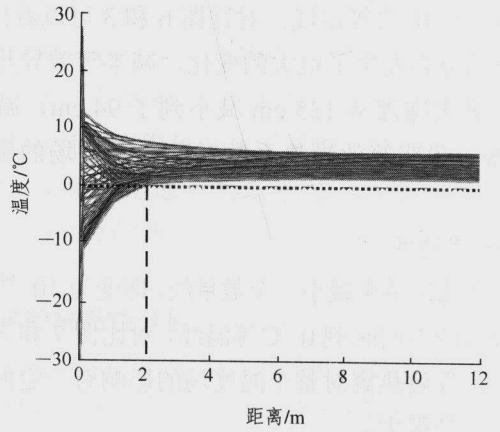


图 10 拱顶部位最大冻深

Fig.10 Maximum depth at the position of dome

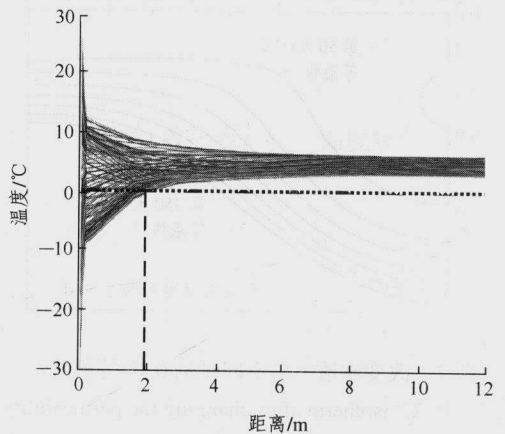


图 11 拱腰部位最大冻深

Fig.11 Maximum depth at the position of hance

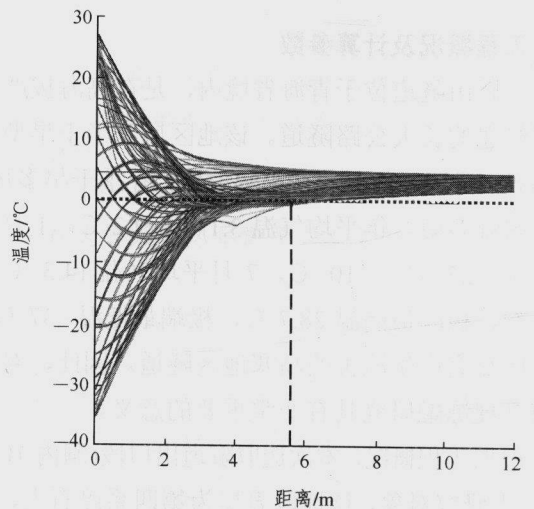


图 12 底板部位最大冻深

Fig.12 Maximum depth at the position of bottom

5 结 论

通过对 M. Smith 等^[16, 17]建立的试验模型进行相同条件的有限元对比分析, 可以得到如下结论:

(1) 本文基于连续介质力学、热力学以及分凝势理论所建立的含相变低温岩(土)体水热耦合数学模型可靠、合理。

(2) 冻融环境下, 地下洞室渗流对周围岩石(土)温度分布有较大影响。因此, 地下洞室的防渗治水工作非常重要。

(3) 通过对模型中的主要参数等效热容、等效导热系数和渗透率进行敏感性分析发现, 等效导热系数对温度传播影响最大, 其次是渗透率, 等效热容对温度分布影响最小。

(4) 通过将本文所建立的水热耦合模型应用于青海拉脊山隧道, 计算结果显示保温层对隧道防寒保暖作用效果明显。

参考文献(References):

- [1] 何平, 程国栋, 朱元林. 土体冻结过程中的热质迁移研究进展[J]. 冰川冻土, 2001, 23(1): 92 - 98.(HE Ping, CHENG Guodong, ZHU Yuanlin. The progress of study on heat and mass transfer in freezing soils[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(1): 92 - 98.(in Chinese))
- [2] MILLER R D. Freezing and heaving of saturated and unsaturated soils[J]. Highway Research Record, 1972, 39(1): 1 - 11.
- [3] TAKEDA K, OKAMURA A. Microstructure of freezing front in freezing soils[C]// Ground Freezing 97. Netherlands: Lulea University of Technology, 1997: 171 - 178.
- [4] KONRAD J M, DUQUENNOI C A. A model for water transport and ice lensing in freezing soil[J]. Water Resources Research, 1993, 29(9): 3 109 - 3 123.
- [5] 李萍, 徐敦祖, 蒲毅彬, 等. 利用图像数字化技术分析冻结缘特征[J]. 冰川冻土, 1999, 21(2): 175.(LI Ping, XU Xiaozu, PU Yibin, et al. Analysis of characteristics of frozen fringe by using the digital technique of picture[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1999, 21(2): 175.(in Chinese))
- [6] LAI Y M, WU Z, ZHU Y, et al. Nonlinear analysis for the coupled problem of temperature and seepage fields in cold region tunnels[J]. Cold Regions Science and Technology, 1999, 29(1): 89 - 96.
- [7] HARLAN R L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil[J]. Water Resources Research, 1973, 9(5): 1 314 - 1 323.
- [8] SHEPPARD M, KAY B, LOCH J. Development and testing of a computer model for heat and mass flow in freezing soils[C]// The 3rd International Conference on Permafrost. Edmonton: Alberta, 1978: 76 - 81.
- [9] 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.
- [10] FUKUDA M. Experimental studies of coupled heat and moisture transfer in soils during freezing[R]. Sapporo, Japan: Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, 1982: 35 - 91.
- [11] 雷志栋, 尚松浩, 杨诗秀, 等. 地下水浅埋条件下越冬期土壤水热迁移的数值模拟[J]. 冰川冻土, 1998, 20(1): 52 - 54.(LEI Zhidong, SHANG Songhao, YANG Shixiu, et al. Numerical simulation on simultaneous soil moisture and heat transfer under shallow ground water table in winter[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, 20(1): 52 - 54.(in Chinese))
- [12] 张树光, 屈小民. 非等温条件下道路水分迁移的数值模拟[J]. 岩土力学, 2004, 25(增 2): 231 - 234.(ZHANG Shuguang, QU Xiaomin. Numerical simulation of moisture migration in roadway under condition of transient temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(Supp.2): 231 - 234.(in Chinese))
- [13] 王铁行, 陆海红. 温度影响下的非饱和黄土水分迁移问题探讨[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1 081 - 1 122.(WANG Tiexing, LU Haihong. Moisture migration in unsaturated loess considering temperature effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(7): 1 081 - 1 122.(in Chinese))
- [14] KONRAD J M, MORGENSTERN N R. Segregation potential of a freezing soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1981, 18(4): 482 - 491.
- [15] KONRAD J M. Procedure for determining the segregation potential of freezing soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 1987, 10(2): 51 - 58.
- [16] SMITH M, KETTLE S D R. Observations and prediction of frost heave of an experimental pipe line[C]// Proceedings of the International Symposium on Ground Freezing and Frost Action in Soils. Rotterdam: [s. n.], 1985: 297 - 304.
- [17] SMITH M D P. Detailed observations on the nature of frost heaving at a field scale[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1989, 26(2): 306 - 312.