

文章编号: 1001-1986(2008)05-0038-04

岩体冻融过程中水热耦合非线性分析

张慧梅¹, 杨更社², 周春华²

(1. 西安科技大学力学教研室, 陕西 西安 710054;
2. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 针对工程地质和岩土工程中所涉及到的冻害问题, 在质能平衡的基础上, 充分考虑冻结岩体的热传导、水和岩体存在的热交换以及水热梯度共同作用下水分的迁移与转化, 建立了水热耦合的非线性控制方程; 对寒区大阪山隧道围岩的温度场和水分场进行数值模拟, 并分析其水热耦合迁移规律。模拟结果表明: 隧道围岩水分受冻结抽吸力和温度梯度的作用发生迁移, 在隧道边墙处渗流速度最大; 在考虑水分场时, 隧道围岩的冻结圈将变薄, 而且随着水分场中渗流系数的增大将更加变薄, 水分场在很大程度上影响温度场的分布; 为了减少冻害对寒区工程的破坏, 应采取良好的保温措施。模拟结果与现有研究成果和工程经验类似。

关键词: 冻结岩体; 水热耦合; 控制方程; 数值模拟

中图分类号: P642.5 文献标识码: A

Nonlinear analysis on moisture-heat coupling for rocks during freezing-thawing process

ZHANG Hui-mei¹, YANG Geng-she², ZHOU Chun-hua²

(1. Mechanics Research Center, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The frozen disaster is a problem not to be ignored in geotechnique and engineering field. According to the balance of mass and energy, a nonlinear governing equation for the coupled problem of moisture-heat is established by considering the heat conduction, moisture and mass exchange, the heat and moisture gradient on the seepage. The temperature field and moisture field in the surrounding rock of Dabanshan tunnel in the cold region is numerically simulated, the law of moisture-heat coupling transfer in the rock tunnel is analyzed. The simulating result shows that the moisture transfer under frozen force and temperature gradient, it's velocity at the side wall is maximum; the frozen circle will be thinner when taking into account the moisture field and be much thinner if the seepage coefficient be increased, the moisture field influences the redistributing of temperature field greatly; The suitable heat preservation measures must be taken in order to reduce engineering damage under the frost and thaw condition in cold regions. The simulating result is similar to the current results and engineering experience.

Key words: frozen rock; moisture-heat coupling; governing equation; numerical simulation

随着西部大开发战略的实施, 已遇到越来越多的寒区工程地质和岩土工程问题。如: 新疆地区地下输油管线的冻裂; 青藏寒区公路、铁路隧道围岩的冻胀破裂、渗水、挂冰; 寒区建筑物基础、公路铁路路基的冻胀、融沉、泛浆; 寒区公路边坡的失稳等。这些工程冻害都会涉及到水热耦合问题。

寒区冻土的水热耦合研究在国内外已有不少的研究成果, 提出了多个水热耦合模型^[1-5]。但由于岩体和土体结构性的差异, 尤其在冻结温度下, 岩体受

内部裂隙水、结构面及温度等的影响, 使其物理、力学性质发生深刻变化。近年来, 国内外学者逐渐意识到, 采用一般冻土力学方法去研究冻岩问题, 已难以满足日益增长的工程需要。赖远明、Neupane K M、Yamabe T、徐光苗等学者都从不同的角度出发研究冻结岩体的水热耦合问题^[6-9]。实际上由于岩体介质中孔隙、裂隙以及节理等缺陷结构的存在, 为地下水提供了储存和运移的场所, 岩体冻结过程中水分迁移量一般较大, 水分迁移过程携带的热量对温度场产生的

收稿日期: 2007-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(40872177); 陕西省自然科学基金项目(SJ08A21); 陕西省教育厅专项基金项目(08JK359)

作者简介: 张慧梅(1968—), 女, 山西大同人, 副教授, 主要从事固体力学的教学与科研工作。

影响是主导因素；同时冻结岩体中，由于热量的差异和改变也会引起水分的迁移与转化，而传统的等温模型不能确切地反映温度变化条件下岩体中水分的迁移。

本文根据岩体中水热耦合的影响机理，充分考虑冻结岩体的热传导、水和岩体存在的热交换以及水热梯度共同作用下水分的迁移与转化，以质能平衡为基础建立水热迁移的理论模型，并以寒区岩体隧道为例进行水热耦合数值分析。

1 温度场与水分场耦合控制微分方程

在对寒区隧道岩体水热耦合研究中，对岩体系统作如下假定：

- a. 岩质是分层均质的；
- b. 水气蒸发的耗热量忽略不计，不计其他化学势及场的作用，如盐分的排析等；
- c. 忽略衬砌块的外荷载作用；
- d. 忽略冻结层下融岩层压密作用。

基于以上假定，按综合传热传质理论，冻结过程可归结为如下水热耦合问题的方程组：

$$\begin{aligned} c\rho \frac{\partial T}{\partial t} &= \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad}T) - c_{\text{w}}\rho_{\text{w}} \operatorname{div}(T\vec{v}) + \\ L\rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t} + q_v , \end{aligned} \quad (1)$$

式中 T 为岩体温度； c 、 λ 分别为岩体容积比热和导热系数； ρ 、 ρ_{w} 、 ρ_i 分别为岩体、液相水和冰的密度； L 为相变潜热； θ_i 为体积含冰量； q_v 为内热源强度。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_{\text{w}}}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\rho_{\text{w}}} \frac{\partial \theta_i}{\partial t} &= \operatorname{div}(D \operatorname{grad} \theta_{\text{w}}) + \\ \operatorname{div}(D_T \operatorname{grad} T) - \frac{\partial K}{\partial z} , \end{aligned} \quad (2)$$

式中 θ_{w} 为液相水的体积含量； D 为岩水扩散系数； D_T 为温度梯度水分扩散系数； K 为导水系数。

冻结岩体内水分的迁移服从达西定律^[10]，其液相流速度为：

$$\vec{v} = K(\operatorname{grad} P_{\text{w}}) . \quad (3)$$

负温条件下的能量状况和未冻水含量对于冻结岩体的物理、化学和力学特性是至关重要的。岩水压力的计算可采用 Clapeyron 方程(Kay,B.D. and Grootenhuis,P. H.,1974)

$$P_{\text{w}} = \frac{\rho_{\text{w}}}{\rho_i} P_i + L \rho_{\text{w}} \ln \frac{T}{T_0} , \quad (4)$$

式中 P_{w} 为液相水压力； P_i 为液相冰压力； T_0 为大气压下岩体中水的冰点。

为使式(1)—式(4)封闭，需确定未冻水含量和温度的关系，一般通过试验方法经曲线拟合处理，得关系式

$$\theta_{\text{w}} = f(T) , \quad (5)$$

初始条件为：

$$\theta_i(x, z, 0) = \varphi_1(x, z) ; \quad (6)$$

$$T(x, z, 0) = \varphi_2(x, z) . \quad (7)$$

边界条件为：

$$T(x, 0, t) = F_1(t) ; \quad (8)$$

$$T(x, L_1, t) = F_2(t) ; \quad (9)$$

$$\frac{\partial T(0, z, t)}{\partial x} = F_3(t, z) ; \quad (10)$$

$$\frac{\partial T(L_2, z, t)}{\partial x} = F_4(t, z) ; \quad (11)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_a) , \quad (12)$$

式中 α 为常数； T_a 为环境温度。

式(6)—式(12)给出了初始条件和边界条件。在质能平衡基础上建立的水热耦合方程是非线性偏微分方程，很难用解析的方法求解。采用伽辽金法，可得到方程(1)的有限元表达形式

$$[\mathbf{K}]\{\mathbf{T}\}_t + [\mathbf{N}]\{\partial \mathbf{T} / \partial t\}_t = \{\mathbf{P}\}_t , \quad (13)$$

式中 $[\mathbf{K}]$ 称为温度刚度矩阵； $[\mathbf{N}]$ 为非稳态变温矩阵； $\{\mathbf{T}\}$ 为未知温度值的列向量； $\{\mathbf{P}\}$ 为边界条件、渗流和相变引起的列向量。

同理，可得到水分场控制方程(2)的有限元表达形式：

$$[\mathbf{K}]\{\boldsymbol{\theta}\}_t + [\mathbf{N}]\{\partial \boldsymbol{\theta} / \partial t\}_t = \{\mathbf{P}\}_t , \quad (14)$$

式中 $[\mathbf{K}]$ 称为水分场刚度矩阵； $[\mathbf{N}]$ 为非稳态水分场矩阵； $\{\boldsymbol{\theta}\}$ 为未知含水量值的列向量； $\{\mathbf{P}\}$ 为边界条件、温度梯度引起的水分迁移和相变引起的列向量。

2 数值计算与分析

以青海省祁连山的大坂山公路隧道为对象进行计算与分析。该隧道海拔高度 3 754.58~3 801.23 m，全长 1 530 m。年平均气温为-3℃，取隧道出口段 k106+025 处的截面作为计算模型(图 1)。

2.1 网格划分及求解

空间域按三角形单元划分网格，分析过程中采用智能网格划分及人为细划相结合，单元长度设置为 0.5 m，划分后有 642 个单元，自由度为 2 718。由于大气温度变化是以 h 为时间段，时间系数 δ 应输入 1/3 600，并设置时间步长为 360 s。

2.2 边界条件与参数

该截面附近地段地下水较丰富，洞内流量在 200 m³/d 以上。在该截面处，隧道顶点位于多年冻土下限 100 m。 $\overline{OD} = 74.55$ m，即 \overline{DE} 位于冻土下限 20

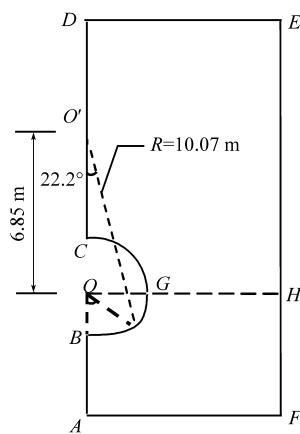


图 1 计算结构模型示意图

Fig. 1 The structural model for calculation

m , $\overline{OA} = 40 \text{ m}$, $\overline{AF} = \overline{DE} = 40 \text{ m}$ 。根据对称性, \overline{CD} 、 \overline{AB} 为绝热边界, \overline{BC} 边和大气相通。围岩含水量为 9%, 计算时采用平均未冻含水量 1.5%, 其热物理学参数见表 1, 其中 C_u 、 C_f 分别为融化区、冻结区岩体热容量, λ_u 、 λ_f 分别为融化区、冻结区岩体导热系数, L 为相变潜热。

表 1 围岩热物理学参数

Table 1 The physical parameters of surrounding rock

物理量	C_u $/\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{C}^{-1}$	C_f $/\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{C}^{-1}$	λ_u $/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$	λ_f $/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$	L $/\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$
数 值	1.929×10^6	1.617×10^6	1.4338	1.8247	40.25×10^6

由大坂山的气象资料可得气温变化曲线为:

$$T_a = -3 + 12 \sin \left[\frac{2\pi}{8760} t_h + \frac{\pi}{6} \right], \quad (15)$$

其中 t_h 单位为 h。

空气和围岩的对流换热系数为 $a = 15.0 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ^[11]。在边界 DE 、 EF 、 AF 上和计算域内的初始温度按冻土下限(温度为 0 °C)3% 的地热梯度确定。

渗流计算时边界条件: AF 、 AB 、 BC 、 CD 为渗水边界。 EF 边上水头为 $H_0 = 74.55 \text{ m}$, 在 E 点有一水源, 给水量 $Q = 0.15 \text{ m}^3/\text{h}$, 在 B 点下方 5 m 处有一排水孔, 实测排水量为 $0.1 \text{ m}^3/\text{h}$, 围岩的孔隙率为 18%, 渗透系数为 $7.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 。由于模型的对称性, 故取其一半。

2.3 计算结果分析

在进行水热耦合模拟前, 可以从单一温度场模拟的冻深数据(表 2)看出冻深的大致分布规律: 拱顶处(CD)冻结深度最大, 仰拱(AB)次之, 边墙处(GH)最小, 这主要是由于隧道围岩的拱顶距离冻土下限较近, 而且地温也较低。在地温梯度的作用下, 上部热量向下滑传, 在热传导的过程中, 下部地温的升高或

降低使热能不断散失而达到热平衡状态。

表 2 单一温度场下不同时间的模拟冻深

Table 2 The simulating frozen depth after different times in the single temperature field

剖面线	模拟冻深/m					
	5 d	10 d	15 d	20 d	25 d	30 d
BA	0.73	1.05	1.30	1.49	1.65	1.78
GH	0.71	1.02	1.24	1.41	1.56	1.69
CD	0.75	1.07	1.31	1.51	1.69	1.83

同理, 根据水分场与温度场耦合模拟的冻深数据(表 3)及其结果云图(图 2)也可以看出冻深分布规律与此一致, 并且, 有渗流和不计渗流时的冻深相比较薄。这主要是由于在考虑渗流场时, 除了热传导, 岩体介质水分迁移的过程中也会携带热量, 在很大程度上影响了温度场的分布, 致使围岩冻深变薄。同时也可验证本文所建立模型的合理性。

表 3 考虑渗流不同时间后的冻深

Table 3 The frozen depth after different times considering the influence of seepage

剖面线	冻深/m					
	5 d	10 d	15 d	20 d	25 d	30 d
BA	0.72	1.04	1.27	1.47	1.63	1.77
GH	0.70	1.02	1.23	1.41	1.55	1.69
CD	0.74	1.06	1.29	1.49	1.65	1.81

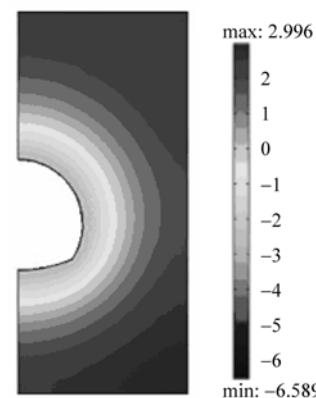


图 2 考虑渗流时经历 90 d 后的温度场云图

Fig. 2 The temperature field nephogram after 90 d considering the influence of seepage

图 3 是经历不同时间后的模拟冻结圈, 其中的 3 个冻结圈分别为经历 5 d、30 d、90 d 后的冻结圈, 从图中还能直观地看出在前 5 d 内有一冻融圈。与文献[12]所得冻结圈的分布规律基本一致, 表明本文所采用的计算方法是可靠的。

图 4 是渗透系数增大为 $7 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, 经历不同时间后的模拟冻结圈。可以看出, 随着渗透系数的增大, 冻深将逐渐变薄, 同样是由于岩体透水能力增强, 介

质中孔隙、裂隙水分的迁移量进一步增大，热量可较快地传输到周围区域中，对温度场产生影响。

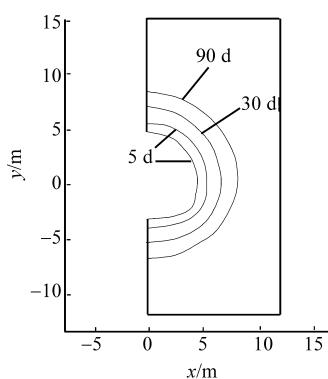


图3 经历不同时间后的模拟冻结圈

Fig. 3 The simulating frozen circles after different times

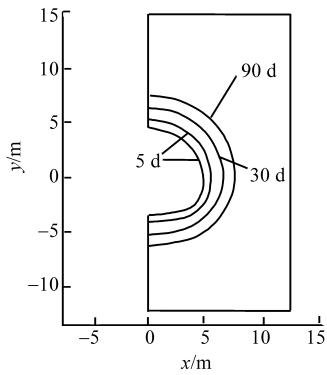


图4 渗透系数增大为 7×10^{-5} m/s, 经历不同时间后的模拟冻结圈

Fig. 4 The simulating circles after different times with the seepage coefficient 7×10^{-5} m/s

3 结论

a. 在寒区岩体隧道施工过程中，水分场与温度场的相互影响不可忽视，在工程设计中必须考虑。考虑渗流场时，除了热传导，岩体介质水分迁移的过程中也会携带热量，影响温度场的分布；同时隧道围岩水分受冻结抽吸力和温度梯度的作用发生迁移，产生分凝冻胀；处于拱顶处的冻深最大，其次是仰拱处，最薄处是边墙。

b. 随着渗透系数的增大，水在围岩中活动加强，水分迁移的过程中携带更多的热量，并与围岩进行对流换热，从而导致温度降低缓慢，冻结圈有所变薄。

由于冻结岩体的渗透系数随着季节的变化而变化，所以隧道冻害的防护措施应随季节的变化而不同。

c. 为了减少冻害对寒区工程的破坏，应采取良好的保温措施。在考虑水分场时冻结圈有所变薄，这对施工时节约材料有很好的参考价值。

参考文献

- [1] 安维东. 冻土的温度水分应力及其相互作用[M]. 兰州：兰州大学出版社，1990.
- [2] 李述训，程国栋. 冻融土中的水热输运问题[M]. 兰州：兰州大学出版社，1995.
- [3] HARLAN R L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil[J]. Water Resources Research, 1973, 9(5) : 1314–1323.
- [4] MILLY C P. Moisture and heat transfer in hysteretic, in homogeneous porous media: A matrix heat-based formulation and a numerical model[J]. Water Resources res., 1982, 18(3) : 489–498.
- [5] 李宁，程国栋，徐学祖，等. 冻土力学的研究进展与思考[J]. 力学进展，2001，31(1) : 95–102.
- [6] 赖远明，刘松玉，邓学军，等. 寒区大坝温度场和渗流场耦合问题的非线性数值模拟[J]. 水利学报，2001(8) : 26–31.
- [7] NEAUPANE K M ,YAMABE T O. Simulation of a fully coupled thermo-hydro-mechanical system in freezing and thawing rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 1999 , 36(5) : 563–580.
- [8] YAMABE T , NEAAUPANE K M. Determination of some thermo-mechanical properties of Sirahama sandstone under sub-zero temperature condition [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 2001 , 38(7) : 1029–1034.
- [9] 徐光苗. 寒区岩体低温、冻融损力学特性及多场耦合研究[D]. 中国科学院博士学位论文, 2006.
- [10] 李洪升，张斌，刘增利，等. 一维冻结土体冻胀量的水热力耦合计算[J]. 大连理工大学学报, 1999, 39(5): 621–624.
- [11] TAYOR G S, LUTHIN J N. A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing [J]. Canadian Geotechnical Journal , 1978, 15(3): 548–555.
- [12] 赖远明. 寒区隧道温度场、渗流场和应力场耦合问题的非线性分析[D]. 中国科学院博士学位论文, 1999.