

# 铺设保温材料的通风路基三维温度场数值分析

刘志强<sup>1,2</sup>, 赖远明<sup>1</sup>, 张学富<sup>1</sup>, 张淑娟<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000;  
2. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 通过瞬态温度场的导热微分方程, 采用伽辽金法推导出带相变的三维温度场有限元计算公式, 建立了通风路基温度场的空间计算模型。对青藏铁路中年平均气温在  $-4.3$  , 地表年平均温度  $-1$  的路段, 考虑气候变暖, 根据预测在未来 50 a 气温上升 2.6 的情况下, 对铺设与不铺设保温材料的通风路基温度场进行了数值计算和对比分析, 为设计、施工部门提供了理论参考。

**关键词:** 道路工程; 青藏铁路; 冻土; 温度场; 数值分析

**中图分类号:** U 213.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2005)14-2537-07

## NUMERICAL ANALYSIS OF THE VENTILATED EMBANKMENT WITH THERMAL INSULATION LAYER IN QINGHAI—TIBET RAILWAY

LIU Zhi-qiang<sup>1,2</sup>, LAI Yuan-ming<sup>1</sup>, ZHANG Xue-fu<sup>1</sup>, ZHANG Shu-juan<sup>1</sup>

(1. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** In order to prevent embankment from absorbing heat in hot season, the ventilated embankment with thermal insulation layer is proposed. The thickness of heat insulator is 20 mm and paved 20 cm above upper surface of ducts. The finite element formulae are derived from the differential equation of three-dimensional temperature fields involving phase change by Galekin method. The temperature distributions of the ventilated embankment with and without thermal insulation layer are calculated respectively under the case that the annual mean air temperature in Qinghai-Tibet Plateau will be warmed up by 2.6 in the future 50 years and the mean annual temperature at the native surface is about  $-1$ . The results indicated that the insulation layer reduces little absorption of heat for permafrost under embankment in the case and the effect of heat insulation is not so good. The conclusions are given in term of the results of analysis and comparison.

**Key words:** road engineering; Qinghai—Tibet railway; frozen soil; temperature fields; numerical analysis

## 1 引言

青藏铁路全长 1 118 km, 穿越多年冻土区范围 632 km(大片连续多年冻土区长度约 550 km, 其余 82 km 为岛状不连续多年冻土区), 其中 210 km 是

高温多年冻土区。冻土区筑路遇到的主要问题是冻胀和融沉。由于冻土对温度的极敏感性及其破坏的不可逆性, 同时考虑全球气候变暖, 在高温冻土区修筑铁路并保证路基的稳定性是个重大科技难题。因此必须改变以往一直沿用的消极保护冻土的措施, 采用积极的措施保护冻土, 即主动冷却地基的

**收稿日期:** 2004-02-12; **修回日期:** 2004-05-08

**基金项目:** 国家杰出青年科学基金资助项目(40225001); 中国科学院“百人计划”资助项目; 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-04); 中国科学院全国优秀百篇博士论文专项资金资助项目

**作者简介:** 刘志强(1968-), 男, 1991年毕业于西北工业大学工程力学系工程力学专业, 现为讲师、博士研究生, 主要从事寒区岩土工程方面的研究工作。E-mail: zq\_liu\_6@hotmail.com.

办法。青藏铁路施工中采取了多种积极主动的保护冻土的工程措施，如抛石路基、热棒路基、通风路基等。除现场观测外，对各种路基温度场进行数值计算<sup>[1,2]</sup>，尤其是理论预测，对科研人员和设计部门认识路基温度场特性都有重要的指导意义。

通风路基施工简单，工程造价较低，对路基下的冻土热稳定性保护明显，有必要进行更多的研究。在高温冻土区，路基高度加高后，路基吸收的热量也在增加，通风路基的使用受到限制。为了提高通风管对路基的制冷能力，减小传入到路基下的热量，提出了一些措施以增强通风管对路基下冻土的降温效果。在通风管上再铺设一层保温材料就是其中一种方法。本文对这种通风路基的温度场进行了计算和分析。

对路基温度场进行有限元计算，是求解一个带相变的非线性方程，边界条件考虑了随时间变化的气温、通风管和空气之间的对流、地热边界。对相变的处理直接影响到结果的可靠度<sup>[3]</sup>。在计算热容矩阵时，用数值积分计算比热在积分点的比热值是问题的关键。本文采用了文[4]等提出的方法计算热容，用焓处理相变。焓定义为比热容对温度的积分，因此焓对温度的变化是个连续函数，积分点的热容由焓的插值平均计算。该法能有效地避免直接构造比热容时带来的数值积分时相变潜热丢失的问题<sup>[4-6]</sup>。

## 2 控制微分方程及其有限元公式

瞬时温度场导热微分方程为

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

边界条件为

$$T = T_w \quad (\text{在 } \Gamma_1 \text{ 上}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha(T_a - T) \quad (\text{在 } \Gamma_2 \text{ 上}) \quad (3)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q_v \quad (\text{在 } \Gamma_3 \text{ 上}) \quad (4)$$

式中： $\alpha$  为常数， $T_a$  为环境温度， $q_v$  为地热源项。

初始条件为

$$T|_{t=0} = T_0 \quad (5)$$

构造温度的插值函数：

$$T = \sum_{i=1}^n N_i(x, y, z) T_i(t) \quad (6)$$

式中： $N_i$  为单元型函数， $T_i$  为单元各节点的温度值。

采用伽辽金法得到问题的有限元计算公式为

$$C \dot{T} + K T = F \quad (7)$$

其中，

$$C_{ij} = \sum_{\Omega^e} C N_i N_j d\Omega \quad (8)$$

$K_{ij} =$

$$\sum_{\Omega^e} \int \lambda \left( \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) d\Omega + \sum_{\Gamma_3^e} \int \alpha N_i N_j d\Gamma \quad (9)$$

$$F_i = \sum \left( \int_{\Gamma_2^e} \alpha T_a N_i d\Gamma + \int_{\Gamma_3^e} N_i q_v d\Gamma \right) \quad (10)$$

由于  $\lambda$ ， $C$  都是温度  $T$  的函数，式(7)是高度非线性的。Euler 向后差分格式简单易行，且有一定精度，故本文采用这种方法对式(7)进行时间域的离散，可以得到迭代公式：

$$(C + \Delta t K) T_t = C T_{t-\Delta t} + \Delta t F \quad (11)$$

或

$$T_t = (C + \Delta t K)^{-1} (C T_{t-\Delta t} + \Delta t F) \quad (12)$$

式中： $\Delta t$  为时间间隔； $T_t$ ， $T_{t-\Delta t}$  分别为在  $t$  和  $t - \Delta t$  时间的温度。

定义焓为热容对温度的积分<sup>[4]</sup>：

$$H = \int_{T_0}^T C(T) dT \quad (13)$$

或等效的微分形式

$$C(T) = \frac{dH}{dT} \quad (14)$$

按下式构造热容<sup>[5-7]</sup>：

$$C = \frac{\frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z}}{\left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)^2} \quad (15)$$

对空间问题采用八节点等参元，焓的插值函数为

$$H = \sum_{i=1}^n N_i(x, y, z) H_i \quad (16)$$

其中，

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial x} &= \sum_i \frac{\partial N_i}{\partial x} H_i \\ \frac{\partial H}{\partial y} &= \sum_i \frac{\partial N_i}{\partial y} H_i \\ \frac{\partial H}{\partial z} &= \sum_i \frac{\partial N_i}{\partial z} H_i \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中： $H_i$  为单元各节点的焓值。

### 3 数值计算及结果分析

本文以海拔 4 500 m 处的通风路基为对象，图 1 为计算模型结构简图。区域 I 为道碴层，区域 II 为碎石砂砾，区域 III 为亚粘土，区域 IV 为弱风化岩，它们的热力学参数见表 1。通风管在区域 I 中，管中心线距地面为  $h = 1$  m，管直径  $d = 0.4$  m。通风管之间距离为 2 m。保温材料层厚度为 20 mm，铺设在通风管上方 20 cm 处。青藏高原年平均风速为 4 m/s，因此假定通风管内空气流速也为 4 m/s，管壁和空气发生强迫对流。通风管内空气和管壁的对流换热系数  $\alpha = 15.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ }^{-1}$  [1, 8]。

因路基为南北走向(边界条件也对称)，由对称

性，将图 1 所示结构取左半作为计算模型，前后两截面也为对称面。对称面上为绝热边界条件。采用空间八节点等参元，将模型划分为 22 985 个单元，28 303 个节点。图 2 为有限单元划分模型图。为作对比分析，如果在计算中将保温材料的热力学参数改为区域 II 的碎石砂砾，计算的就是没有保温材料的通风路基温度场，这在程序中很容易实现 [9]。

根据气温统计资料，将气候的变化模拟为每年按正弦曲线变化 [1, 2]，气温年平均振幅 24  $^{\circ}\text{C}$ 。考虑气候变暖，在未来 50 a 气温上升 2.6  $^{\circ}\text{C}$  的情况下 [10]，对在年平均气温为 - 4.3  $^{\circ}\text{C}$  或年平均地表温度为 - 1  $^{\circ}\text{C}$  的冻土地区的通风路基，计算模型的边界条件为：

天然地表 AB 和 IJ 边的温度按下式变化：

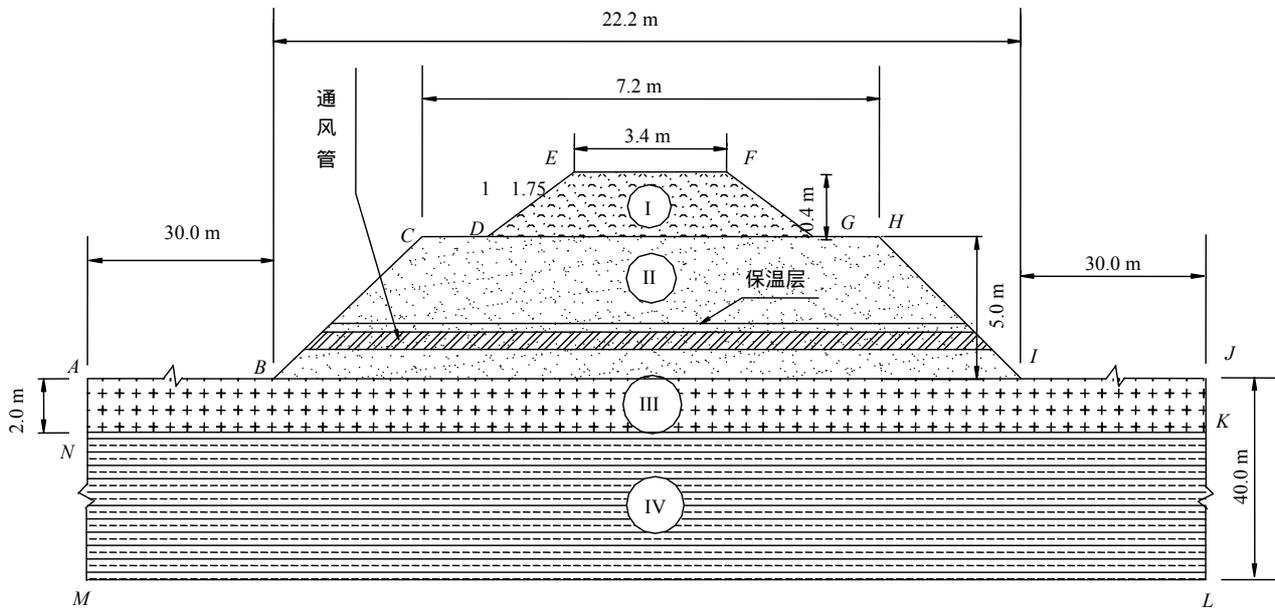


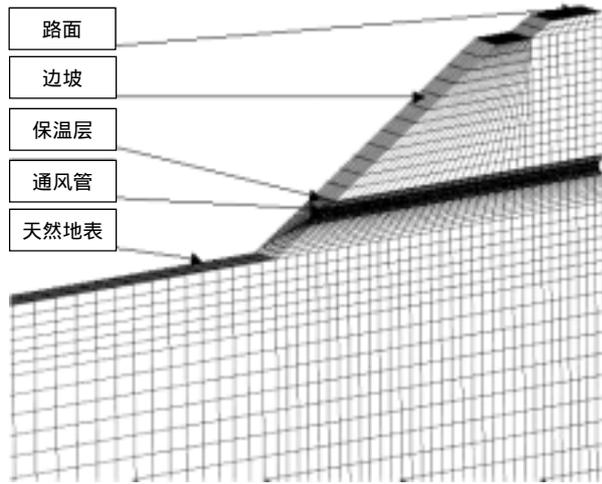
图 1 通风路基结构示意图

Fig.1 Computational model of ventilated embankment

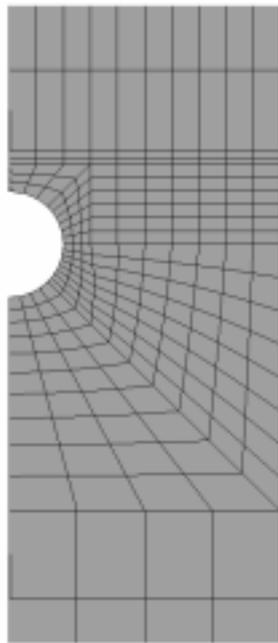
表 1 路基中各介质的热力学参数

Table 1 Thermal parameters of media in embankments

介质	$\lambda_f / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{ }^{-1})$	$C_f / (\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{ }^{-1})$	$\lambda_u / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{ }^{-1})$	$C_u / (\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{ }^{-1})$	$L / (\text{J} \cdot \text{m}^{-3})$
道碴	0.346	$1.006 \times 10^6$	0.346	$1.006 \times 10^6$	0.0
砂砾	1.980	$1.913 \times 10^6$	1.919	$2.227 \times 10^6$	$20.4 \times 10^6$
保温层	0.028	$1.256 \times 10^5$	0.028	$1.256 \times 10^5$	0.0
亚粘土	1.351	$1.879 \times 10^6$	1.125	$2.357 \times 10^6$	$60.3 \times 10^6$
弱风化岩	1.824	$1.846 \times 10^6$	1.474	$2.099 \times 10^6$	$37.7 \times 10^6$



(a) 三维视图



(b) 通风管周围单元划分(侧视)

图2 有限单元划分模型

Fig.2 Finite element meshes

$$T_{w1} = -1.0 + 12 \sin\left(\frac{2\pi}{8760}t_h + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{2.6}{50 \times 365 \times 24}t_h \quad (18)$$

式中： $t_h$  为计算时间步长(h)。

路堤斜坡  $BCDE$  和  $FGHI$  的温度为

$$T_{w2} = 13 \sin\left(\frac{2\pi}{8760}t_h + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{2.6}{50 \times 365 \times 24}t_h \quad (19)$$

路基中面  $EF$  的温度

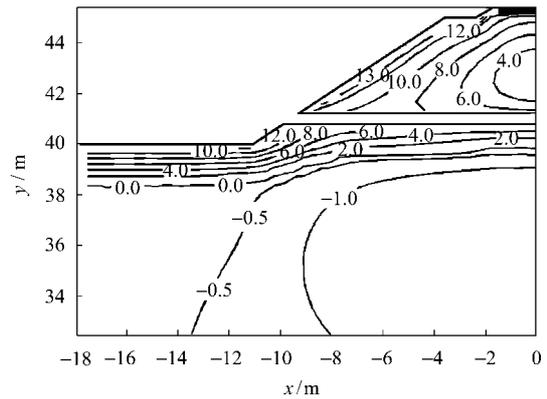
$$T_{w3} = 1.2 + 15 \sin\left(\frac{2\pi}{8760}t_h + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{2.6}{50 \times 365 \times 24}t_h \quad (20)$$

假设通风管内的年平均气温比管道外的年平均气温高 0.5，其变化规律为

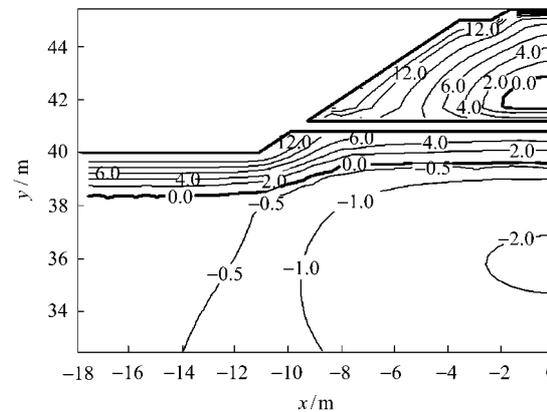
$$T_a = -3.8 + 12 \sin\left(\frac{2\pi}{8760}t_h + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{2.6}{50 \times 365 \times 24}t_h \quad (21)$$

在  $ML$  边界上，地热梯度为  $0.03 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}^{[1]}$ ， $AM$ ， $LJ$  边为绝热边界。计算起始时间为假定的施工完后的 7 月 15 日，包含通风管的路基横断面上温度场计算结果如图 3，4 所示。

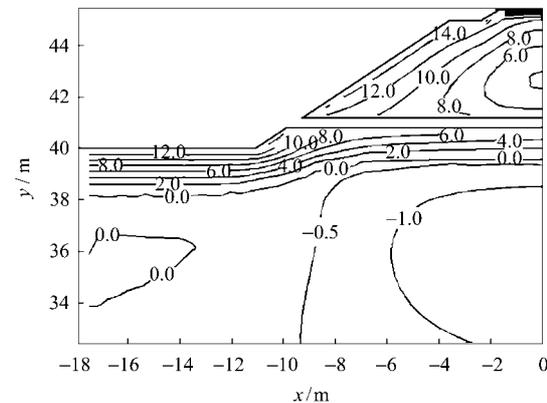
7 月 15 日是每年气温最高的时候，而季节活动



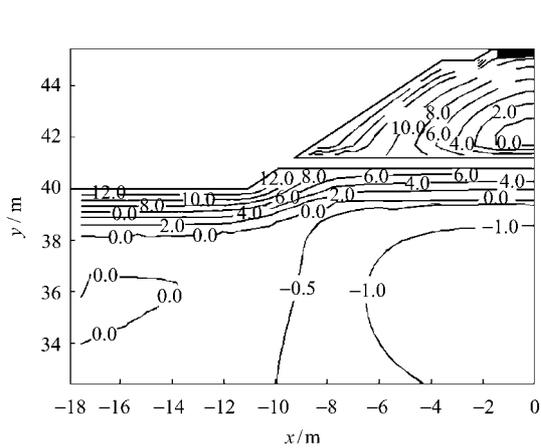
(a) 第 25 年 7 月 15 日，无保温层



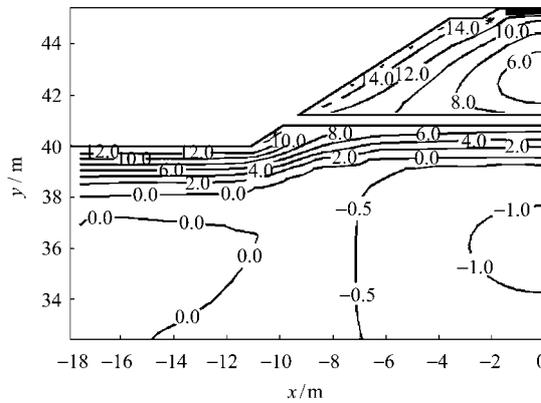
(b) 第 25 年 7 月 15 日，有保温层



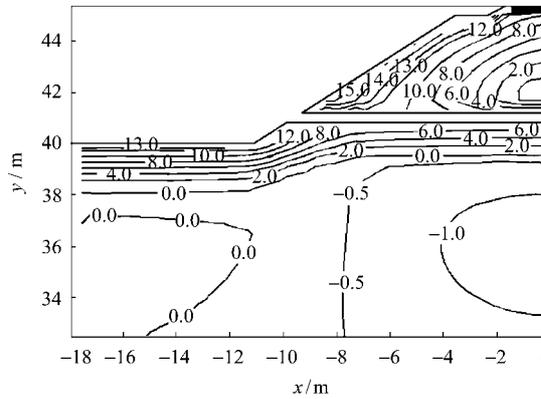
(c) 第 40 年 7 月 15 日，无保温层



(d) 第40年7月15日, 有保温层



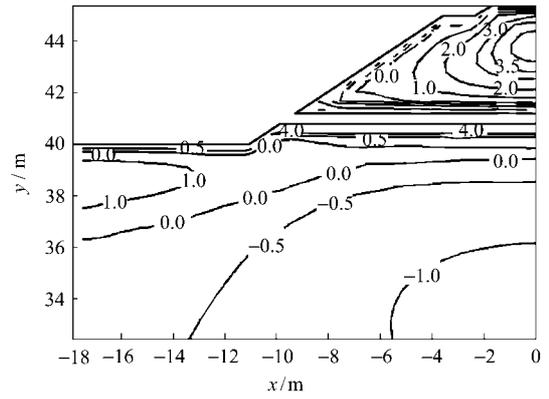
(e) 第50年7月15日, 无保温层



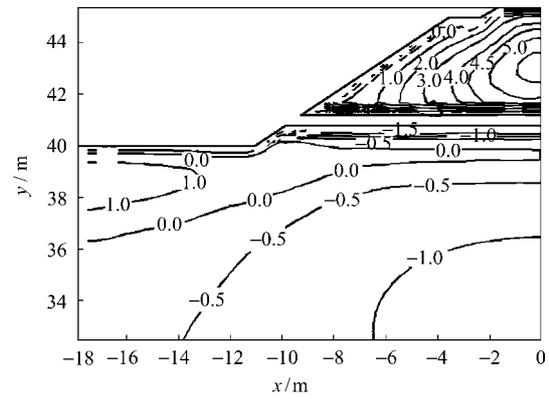
(f) 第50年7月15日, 有保温层

图3 两种路基分别在7月15日等温线分布(单位: )  
Fig.3 Isotherms of ventilated embankment with and without insulation layer on July 15th (unit: )

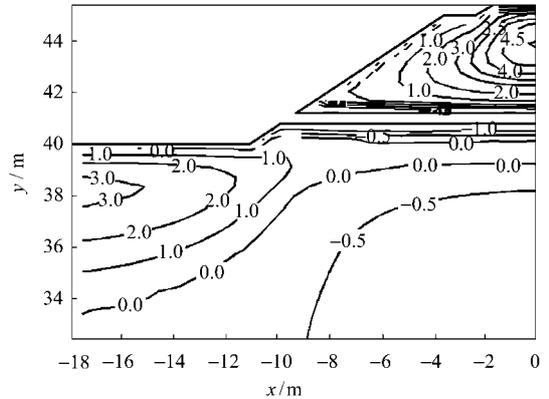
层最大融化深度出现在每年10月30日左右, 故选择这两个时刻的温度场进行对比。在图示情况下, 通风管将路基分为上、下两部分, 先分析通风管上部有无保温层的路基温度场。可以看出, 保温层对通风管上部的温度场影响明显。在图3所示7月15



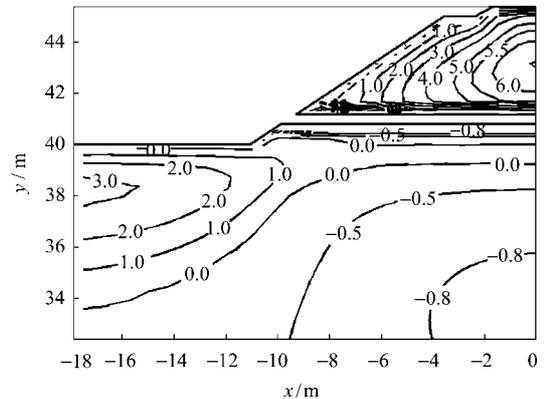
(a) 第25年10月30日, 无保温层



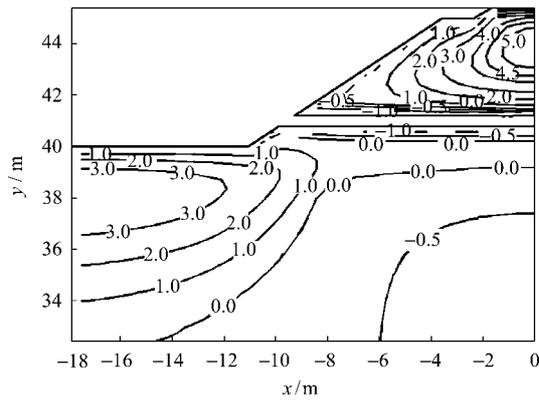
(b) 第25年10月30日, 有保温层



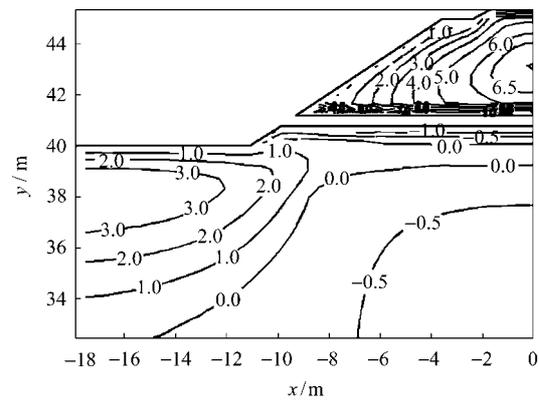
(c) 第40年10月30日, 无保温层



(d) 第40年10月30日, 有保温层



(e) 第50年10月30日, 无保温层



(f) 第50年10月30日, 有保温层

图4 两种路基分别在10月30日等温线分布(单位: )

Fig.4 Isotherms of ventilated embankment with and without insulation layer on October 30th(unit: )

日的温度分布中, 有保温层的路基中央有一个 0 等温线所围的区域, 而没有保温层的通风路基中央最低温度分别为 4 (第 25 a)、6 (第 40, 50 a), 即此时没有保温层的路基上部最低温度比有保温层的要高; 而在图 4 所示 10 月 30 日的温度分布中, 情况正好相反。没有保温层的通风路基中央最高温度比有保温层的路基的低, 两者的对比是: 第 25 年 3.5 对 5.0 , 第 40 年 4.5 对 6.0 , 第 50 年 5.0 对 6.5 。这是由于保温层隔热作用, 路基上部的热量不能向下传递, 下部的热量也不能向上传递, 造成有保温层的通风路基温度随气温变化有较大的振幅。7 月 15 日时, 有保温层的路基中央冻结核还未融化, 因为由通风管进来的热量被保温层阻隔, 不能传到通风管上部, 此时路基温度低; 10 月 30 日时, 有保温层的路基中央冻结核完全融化后, 热量不能向下传递, 热量的积累又造成此时路基温度又比没有保温层的通风路基中央温度高。

从通风管下部温度分布可以看出, 两种通风路基的温度场分布十分相似, 对应的 0 等温线(也指通风管下的)比较一致。但 0 等温线以下的等温线如 -1 和 -0.5 等温线的分别情况略有区别, 从等温线和 x 轴的交点坐标值很容易看出, 有保温层的温度场 -1 和 -0.5 等温线包围的面积略大一些。另外, 有保温层的温度场在第 25 年 7 月 15 日和第 40 年 10 月 30 日分别出现了 -2 和 -0.8 的低温区域, 而对应的无保温层的路基最低温度是 -1 和 -0.8 。这些现象表明, 保温层起到了一些隔热作用, 路基下冻土的温度比无保温层的路基低, 但降温不如预先设想的大。保温层的隔热时双向的, 虽然阻隔了部分热量由路基向下传递, 但由通风管在热季传入的热量也不能传递到路基中, 这部分热量只能传递到路基下。

### 4 结 论

在气温上升的情况下, 通风管下的 0 等温线位置比较稳定, 对保护路基下冻土的热稳定性有积极的作用。通风路基铺设保温层后, 对保温层上部的路基影响较大。在 10 月 30 日, 铺设保温材料的通风管上部路基储热比没铺的高, 下部要略低。保温层对热的阻隔是双向的, 路基上部的热量不能向下传递, 通风管中的部分热量也不能向路基上部传递。但总的来说, 铺设保温材料确实减小了热量向路基下的传递, 降低了冻土吸收的热量, 但效果在目前这种情况下不是十分明显。考虑到保温材料的工程造价和其使用效果, 建议在本文讨论的情况下不用铺设保温材料。如何提高通风路基的使用效果, 即减小通风管在热季对路基的加热作用, 采取更加有效的方法是有待进一步研究的问题。

### 参考文献(References) :

[1] Lai Y M, Zhang L X, Zhang S J. Cooling effect of ripped-stone embankments on Qing—Tibet railway under climatic warming[J]. Chinese Science Bulletin(SCI), 2003, 48(6) : 598—604.

[2] Li D Q, Wu Z W, Zhu L M. Heat stability analysis of embankment of the degrading permafrost district in the East of Tibetan Plateau, China[J]. Cold Regions Science and Technology, 1998, 28(3) : 183—188.

[3] Bonacina C, Comini G, Fasano, et al. Numerical solution of phase-change problems[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1973, 16 : 1 825—1 832.

- [4] Comini G, Del Giudice S, Lewis R W, et al. Finite element solution of non-linear heat conduction problems with special reference to phase change[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1974, 8(3): 613-624.
- [5] Del Giudice S, Comini G, Lewis R W. Finite element simulation of freezing processes in soils[J]. International Journal for Numerical Analytical Methods in Geomechanics, 1978, 2(3): 223-235.
- [6] Dalhuijsen A J, Segal A. Comparison of finite element techniques for solidification problems[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1986, 23(10): 1 807-1 829.
- [7] Tamma K K, Namburu R R. Recent advances, trends and new perspectives via enthalpy-based finite element formulations for applications to solidification problems[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1990, 30(4): 803-820.
- [8] Qin D H. The Comprehensive Evaluating Report on the Environment Evolvement in West China[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [9] Lai Y M, Wang Q S, Niu F J. Three-dimensional nonlinear analysis for temperature characteristic of ventilated embankment in permafrost regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, 38(2/3): 165-184.
- [10] 孔祥谦. 有限单元法在传热学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.(Kong Xiangqian. The Application of Finite Element Method for Heat Transfer[M]. Beijing: Science Press, 1998.(in Chinese))

## 新书简介

《自然保护区建设工程关键技术研究》一书由王兵、崔向慧、崔国发、李迪强著，科学出版社2005年5月出版，209千字，170页，定价35.00元。

该书在综述国内外自然保护区建设工程关键技术研究发展的基础上，结合我国典型自然保护区的实际需求和条件，针对自然保护区的管理和物种保护等关键技术难点进行了分析研究，提出了典型自然保护区的综合管理模式和目标物种的成套保护技术，为我国自然保护区建设提供了先进、可行的技术体系和管理模式，对我国自然保护区的管理和保护具有重要的指导意义和应用价值。

该书可供生命科学、环境保护、农业和林业等领域的科研、教学和管理人员，自然保护区的行政管理者及理论、技术研究者，保护区规划、开发人员和高层机构的立法与决策者，以及大专院校师生参考。

《超临界流体技术在环境科学中的应用》一书由漆新华、庄源益著，科学出版社2005年5月出版，260千字，212页，定价35.00元。

该书是《环境科学高科技特色丛书》之一，论述了超临界流体技术在环境科学中不同方面的应用。该书共分为9章。第1章为绪论，主要介绍了超临界流体的一些基本性质和超临界流体技术发展的历史过程；第2章论述了超临界流体萃取技术的基本原理及其在大气、土壤、水等不同环境样品分析中的应用；第3章论述了超临界流体主要是超临界CO<sub>2</sub>萃取技术在废物处理中的应用；第4章阐述了超临界水氧化技术在废物处理中的应用，包括超临界水的特性、超临界水氧化原理、超临界水氧化反应动力学、反应机理等；第5章论述了超临界流体在绿色化学上的应用，包括超临界流体反应的理论基础、超临界流体中的均相催化、多相催化、高分子合成、酶催化等；第6、7章分别论述了超临界流体在绿色喷涂技术和绿色印染技术上的应用；第8章阐述了超临界流体干燥法、超临界流体快速干燥法等5种超临界流体技术在纳米微粒制备中的应用；第9章论述了超临界流体技术在资源综合利用及环境科学其他方面的应用。

该书可供化工、材料、食品、药物制备、轻工、分析和环保部门的工程技术和研究人员使用，也可作为大专院校相关专业的教师、研究生和本科生的参考书。