

块碎石夹层结构冻土路基温度分布数值分析

张世民

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000)

摘要:为研究青藏铁路普通道碴路基和本文提出的块碎石夹层路基的温度场分布, 本文将铁路道碴和块碎石夹层的对流换热简化为多孔介质的热传导问题, 根据多孔介质中流体热对流的连续性方程、动量方程和能量方程, 应用伽辽金法导出了多孔介质对流换热的有限元公式, 并对普通道碴路基和抛石路基在未来50年的十月份温度场进行数值分析与比较。计算结果表明: 在普通道碴路基中, 路基下冻土的温度升高和退化, 路基阴阳坡下温度的不对称性极为发育, 阳坡有明显贯穿路基高温区且坡脚高温聚集, 其路基结构很难保持路基及冻土的稳定性和路基的温度对称性; 而在块碎石夹层路基中, 路基下冻土上缓慢抬升且冻土地温保持良好的对称性, 阴阳坡下路基温度差异较小且对称分布, 坡脚没有温度聚集现象, 其路基温度分布有利于保持路基及冻土的稳定, 同时说明了块碎石路基具有良好的调节路基温度的能力。

关键词:块碎石夹层路基; 温度场; 数值分析

中图分类号: TU445

文献标志码: A

文章编号: 1674-4764(2012)S1-0007-06

Numerical Analyses on Temperature Distribution of Ballast Roadbed with Crushed Rock Interlayer in Permafrost Regions

ZHANG Shimin

(State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, P. R. China)

Abstract: In order to investigate the temperature distribution of Qinghai-Tibet railway roadbed, based on the governing equations used to study forced convection for incompressible fluids porous media, the finite element formulae for heat convection in porous media are derived by using Galerkin's method and taking air streamline function and temperature in porous media as basic variables. The temperature fields in October of the common ballast roadbed and the special ballast roadbed with crushed rock underlayer, constructed on July 15, have been analyzed and compared as they would have been used for 50 a under climatic and geological conditions on Qinghai-Tibet railway. The calculated results indicate that the common ballast roadbed will raise permafrost temperature under the roadbed base as well as lead to unsymmetrical temperature field distribution of roadbed and high temperature thawing zone under the sunny side, consequently it causes the permafrost roadbed thermal instability. The special ballast roadbed with crushed rock interlayer will reduce permafrost temperature under the roadbed and provide cold energy for the roadbeds, also it can lead to symmetrical distribution of roadbed temperature field, which can eliminate the disasters that result in uneven settlement with longitudinal cracks within the roadbed. Therefore, it is highly recommended that the roadbed with crushed rock underlayer may be taken as Qinghai-Tibet railway embankment structure in high temperature permafrost regions so that permafrost embankment can be protected as possible as it should be.

Key words: roadbed with crushed rock interlayer; temperature field; numeric analysis

1 前言

多孔介质传热传质研究具有重要的理论和现实意义, 但是多孔介质中的热质迁移是一个非常复杂的过程。Trevisan等^[1]研究了具有边界热质迁移的多孔介质内部的自然对流现象, Poulikakos等^[2]应用差分法探讨了不均匀的渗透系数和热扩散系数对多孔介质自然对流的影响规律, Royer等^[3]研究了一充满单相流体的各向异性的矩形多孔介质内的自然热传导规律。Amiri等^[4]应用显式差分法分析了不可压缩

流体通过多孔介质的强迫对流效果和相应的热质运输过程。Lee等^[5]通过理论分析和实验确定了多孔介质的热质迁移系数, Sahraoui等^[6]通过界面松弛和非松弛温度条件探讨了边界条件对多孔介质传热传质的影响特征。Lai等^[7]提出了埋置在饱和多孔介质内垂直平板热质传播诱导浮力的简单解法。Nield^[8]提出了饱和多孔介质的热传导系数的估算方法。Hsu等^[9]提出了多孔介质热传导系数 Zehner-Schlunder 的改进模型。Bauer^[10]给出了确定多孔介质热传导系数的一般分析方法。米隆等^[11]应用有限元方法对通风路基的温度特性

进行了三维数值分析. Lai 等^[13-16]对抛石路基和抛石护坡路基温度场也进行了数值分析和研究,表明抛石路基和抛石护坡具有良好的调节路基温度分布的能力,但是分析可发现,在抛石路基中的坡脚有明显温度积聚现象,这不利于路基及路基边坡的热稳定.为此我们在此研究基础上提出新的路基结构形式-块碎石夹层路基,并进一步探讨块碎石夹层路基结构对于调节路基的温度场的作用和效果.如图 3 所示,块碎石夹层路基,在阳坡延伸出路基本体 5 m,在阴坡延伸出路基本体 3 m,由于此块碎石夹层兼具路基功能结构层和路基坡脚保温护道的作用,也就有利于发挥块石层的路基温度场调控能力,并削弱坡脚的温度积聚效应,从而达到保护路基下冻土及保持路基内温度对称性与稳定性的功效,减弱路基由于温度的不对称性造成的路基病害的发生和发育.本文根据多孔介质中流体热对流的连续性方程,动量方程和能量方程,应用伽辽金法导出了多孔介质对流换热的有限元公式,针对青藏铁路的气温条件和地质条件,对 7 月份施工完成的传统道渣路基和抛石路基在未来 50 a 中的温度变化进行了分析比较.

2 控制方程及其有限元公式

由于冻土铁路路基中铺有道渣和片石,而道渣铺层和片石可以看作是多元介质.多元介质中的热对流是非稳态的非等温渗流,其方程组为连续性方程、动量方程和能量方程.考虑流体是不可压缩的,但其密度 ρ 是等温的函数,为了简化分析,使用所谓的 Boussinesq 近似,即在动量中包含有

$$C^* = \begin{cases} C_f & T < (T_m - \Delta T^*) \\ \frac{L}{2\Delta T^*} + \frac{C_f + C_u}{2} & (T_m - \Delta T^*) \leq T \leq (T_m + \Delta T^*) \\ C_u & T > (T_m + \Delta T^*) \end{cases} \quad (4)$$

$$\lambda^* = \begin{cases} \lambda_f & T < (T_m - \Delta T^*) \\ \lambda_f + \frac{\lambda_u - \lambda_f}{2\Delta T^*} [T - (T_m - \Delta T^*)] & (T_m - \Delta T^*) \leq T \leq (T_m + \Delta T^*) \\ \lambda_u & T > (T_m + \Delta T^*) \end{cases} \quad (5)$$

引进不包含静态水压力分量的空气压力 P :

$$P = p^* + \rho_0 g y. \quad (6)$$

则有:

$$p^* = P = \rho_0 g y. \quad (7)$$

将(7)式代入(2)式可得:

$$u = -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (8a)$$

$$v = -\frac{k}{\mu} \left[\frac{\partial P}{\partial y} - \beta \rho_0 (T - T_0) g \right]. \quad (8b)$$

将(8)代入(1)式可得:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} - \rho_0 \beta g \frac{\partial T}{\partial y} = 0. \quad (9)$$

由于本问题是一个强非线性问题,无法获得解析解,我们只能获得其数值解.应用伽辽金方法,可得到如下有限元公式:

$$[M] \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\} + [K] \{T\} = \{F\}, \quad (10)$$

$$[G] \{P\} = \{H\}, \quad (11)$$

式中:

$$K_{ij} = \sum_{\Omega^e} \int_{\Omega^e} \lambda^* \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) d\Omega + \sum_{\Gamma_2^e} \int_{\Gamma_2^e} \alpha N_i N_j d\Gamma$$

流体热膨胀系数 β 所表示的浮力外,固体介质和流体的所有特性均保持不变.因此有:

连续性方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

式中: u 、 v 分别为空气在 x 和 y 方向上的速度.

动量方程:

$$u = \frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial p^*}{\partial x}, \quad (2a)$$

$$v = -\frac{k}{\mu} \left[\frac{\partial p^*}{\partial y} + \rho_0 g \right], \quad (2b)$$

$$\rho_a = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)], \quad (2c)$$

式中: k 为多孔介质的渗透系数, μ 为空气的动力粘性系数, β 为空气的热膨胀系数, ρ_0 和 T_0 分别为空气密度和温度的参考值, p^* 为空气压力.

能量方程:

$$C^* \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda^* \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda^* \frac{\partial T}{\partial y} \right) - C_a \rho_a \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (3)$$

式中 C_a 为空气的比热.

应用显热容法,假设相变发生在温度区间 $(T_m \pm \Delta T^*)$, 当建立等效的体积比热时,应考虑温度间隔 ΔT^* 的效应,假设介质在正冻、未冻时的体积比热分别为 C_f 和 C_u . 热传导系数分别为 λ_f 和 λ_u , 而且它们都不取决于温度.因此在温度间隔 $T_m - \Delta T^* \leq T \leq T_m + \Delta T^*$ 内, C^* 和 λ^* 的表达式如下:

$$+ \sum_{\Omega^e} \int_{\Omega^e} C_a \rho_a \left(u \frac{\partial N_i}{\partial x} + v \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) N_i d\Omega, \quad (12)$$

$$M_{ij} = \sum_{\Omega^e} \int_{\Omega^e} C^* N_i N_j d\Omega, \quad (13)$$

$$F_i = \sum_{\Gamma_2^e} \int_{\Gamma_2^e} \alpha T_a N_i d\Gamma, \quad (14)$$

$$G_{ij} = \sum_{\Omega^e} \int_{\Omega^e} k \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) d\Omega, \quad (15)$$

$$H_i = - \sum_{\Omega^e} \int_{\Omega^e} N_i \delta \frac{\partial T}{\partial y} d\Omega + \oint k N_i \cdot \frac{\partial P}{\partial n} \cdot ds, \quad (16)$$

$$\delta = k \rho_0 \beta g. \quad (17)$$

式中 N_i 和 N_j 为单元的形函数.

应用 Crank-Nicolson 方法,对于每一个时间间隔 Δt ,求解方程(10)和(11),便得到本问题的数值解.

3 具有阴阳坡的普通路基和块碎石夹层路基结构的温度特性分析

3.1 具有阴阳坡的传统道渣路基的温度特性分析

本文以海拔 4 000 m 处的路基结构为计算模型,计算域如图 1 所示,天然地表 AB 和 IJ 边的温度按下式变化:

$$T_n = -1 + 12 \sin\left(\frac{2\pi}{8760}t_h + \frac{7\pi}{12} + \alpha_0\right) \quad (18)$$

路堤阳坡 BCDE 边的温度按如下正弦规律变化:

$$T_{es} = 2.1 + 13 \sin\left(\frac{2\pi}{8760}t_h + \frac{7\pi}{12} + \alpha_0\right) \quad (19)$$

路堤阴坡 FGHI 边的温度按如下正弦规律变化:

$$T_{ws} = 0.3 + 13 \sin\left(\frac{2\pi}{8760}t_h + \frac{7\pi}{12} + \alpha_0\right) \quad (20)$$

路基中路面 EF 的温度变化规律为:

$$T_p = 2.0 + 15 \sin\left(\frac{2\pi}{8760}t_h + \frac{7\pi}{12} + \alpha_0\right) \quad (21)$$

地热通过 LM 边的热流密度为 $q = 0.06 \text{ W/m}^2$ 。

空气的流体边界条件为没有流体通过计算域的边界,即通过各边界的法向流速为零,由(8b)式可得到边 BCDEFGHI

上的气压边界条件为

$$P_b = p_0^* + \rho_0 \beta (T_b - T_0) g y \quad (22)$$

式中: p_0^* 和 T_0 分别为初始压力和温度, T_b 为边界 BCDEF-GHI 上的温度,其值由(19)、(20)和(21)式确定。

在海拔 4 000 多米高度处,空气的定压比热 $C_a = 1.004 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$,热传导系数为 $\lambda = 2.0 \times 10^{-2} \text{ w}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$,密度为 $\rho_a = 0.641 \text{ kg/m}^3$ 。动力粘性系数为 $\mu = 1.75 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。

为了研究阴阳坡的温度差对路基温度场的影响,对图 1 所示传统道渣路基结构的温度特性进行了分析。在图 1 所示路基结构中,区域 I 为直径约 5 厘米的道渣,区域 II 为碎石与砂砾,区域 III 为亚粘土,区域 IV 为弱风化基岩,它们的热学参数见表 1。它们的空气渗透系数见表 2。

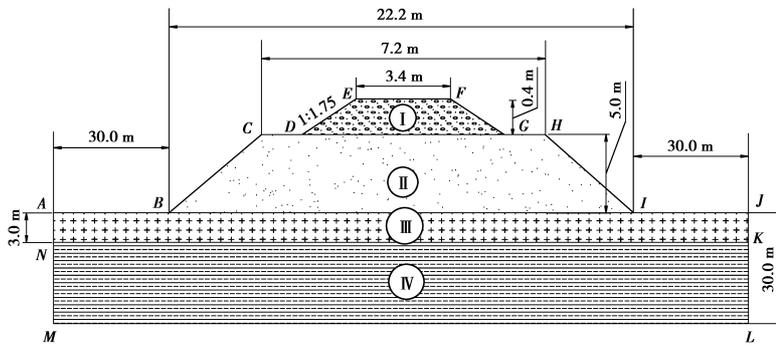


图 1 传统道渣路基结构

表 1 路基结构中各介质的热力学参数

物理量	$\lambda_t / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C})$	$C_t / (\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C})$	$\lambda_u / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C})$	$C_u / (\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	$L / (\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3})$
道渣	0.346	1.006	0.346	1.006	0.0
砂砾	1.980	1.913	1.919	2.227	20.4
亚粘土	1.351	1.879	1.125	2.357	60.3
弱风化岩	1.824	1.846	1.474	2.099	37.7

表 2 路基结构中各介质的空气渗透系数

介质名称	道渣	砂砾	亚粘土	弱风化岩
k/m^2	6.32×10^{-7}	3.0×10^{-10}	3.0×10^{-11}	3.0×10^{-11}

在整个计算过程中,将图 1 所示路基结构划分为 5 496 个三角形单元,2 865 个节点,并用本文推导出的有限元公式编成计算机程序,对传统道渣路基结构,在未来 50 a 的温度的变化进行了分析比较。

鉴于十月份路基内季节融化深度一般达到最大值,所以分析研究长期气候作用下路基内十月份的温度特征对于了解冻土路基的热稳定性有重要的意义。图 2 为 7 月 15 日施工完成的普通路基运营 1、24、35、45、50 a 后的十月份温度分布。图 2(A)是路基运营 1 年后在 10 月 15 日的温度分布,此时路基阳坡的最高温度为 4°C ,而阴坡的为 2.5°C ,突出的差别是阳坡下形成了最高温度为 4°C 的高温区,而这在阴坡是没有的,并且在路基中心下 0°C 等温线明显的偏向阴坡。路基运营 24 a 以后的温度场分布见图 2(B),可以看到 0°C 等温线由 24 a 前的偏向阴坡而变为向阳坡飘移,毗邻阳坡的天然地表下的 -0.5°C 等温线明显退化。路基运营 35 a

以后的温度场分布见图 2(C),路基阳坡下的最高温度为 4°C ,最低是 0°C ,而在阴坡下的最高温度为 2.5°C ,最低是 -0.5°C ,除了天然地表下 -1°C 等温线位置有下移外,其余跟图 2(B)的温度场分布差不多。

路基运营 45 a 以后的温度分布参见图 2(D),跟图 2(C)和图 2(B)所示的情况相同, 4°C 的高温融化盘总驻留在阳坡之下。路基经过 50 a 的运营后,我们发现其下温度场分布状况图 2(E)与图 2(C)的相比基本上定型,事实上当路基运营了 24 a 之后,随着时间的推移温度场分布只受气候和季节而发生轻微的变化,而且这些变化大都发生在与路基阴阳坡毗邻的天然地表下。

从以上分析可知,在阴阳坡效应下,普通路基的修建不但引起天然地表下的地温抬升,而且造成路基阴阳坡下温度场分布的极不对称性的发育和演变。依据计算结果,路基下十月份温度场分布总体特征表现为:遍及阳坡下形成了最高温度为 4°C 的融化盘,而这在阴坡是没有的,并且在路基中心下 0°C 等温线明显的偏向阴坡; 0°C 等温线由 24 a 前的偏向阴坡而变为向阳坡飘移,毗邻阳坡的天然地表下的 -0.5°C 等温线明显退化;路基及天然地表下的温度在缓慢抬升。

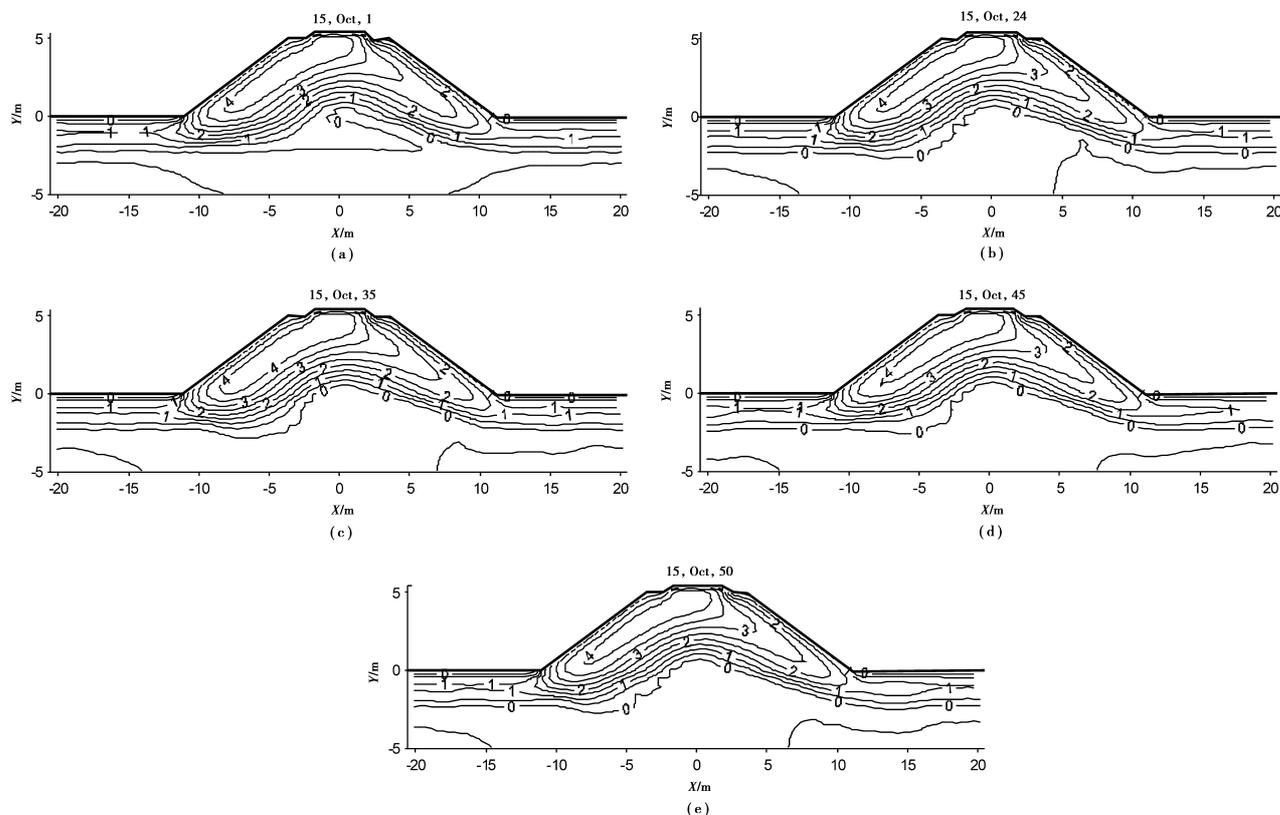


图2 普通路基运营1、24、35、45、50 a后10月份的温度分布

基于以上分析,可以得出:在阴阳坡效应下,传统道砟路基修建明显造就了其下地温的抬升趋势,并且显著得造就了阴阳坡下温度场分布的不对称性及大面积融化盘的存在,这些路基温度特征很容易引起路基的不均匀沉降,纵向裂缝等病害。

3.2 具有阴阳坡的块碎石夹层道渣路基的温度特性分析与同期普通路基的温度场对比分析

为了尽可能的解决上述问题,笔者采用块碎石夹层路基措施来调控阴阳坡下的温度,希望这种措施能够使路基的温度场分布趋于左右对称,并且能为路基下提供冷能和最大限

度的减少路基对天然地表地温平衡的破坏。

为此,我们提出了能消除阴阳坡效应的块碎石夹层路基结构,如图3所示,阳坡外伸5 m,阴坡外伸3 m,路堤阴阳坡 $FGHH'I'I$ 和 $EDCC'B'B$ 的温度边界条件和图1中对应的 $FGHI$ 和 $EDCB$ 相同。区域I为直径约5 cm的道砟,区域II为碎石与砂砾,区域III为亚粘土,区域IV为弱风化基岩,区域V为直径约10 cm片石,其热学参数为 $\lambda = 0.387 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{k})$, $C = 1.015 \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{k})$,渗透系数为 $k = 1.58 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ 。其它介质的热学参数及空气渗透系数分别见表1和表2。

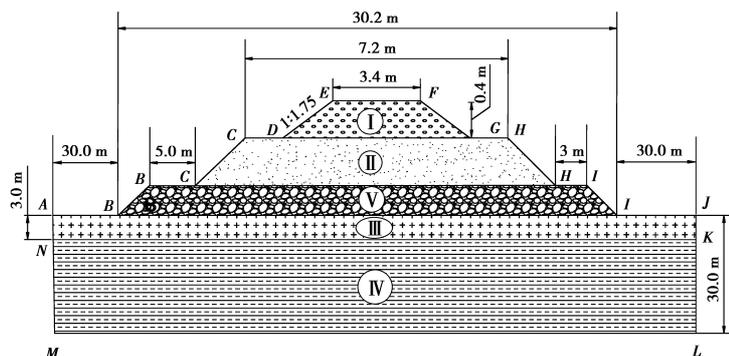


图3 块碎石夹层路基结构

图4是块碎石夹层路基运营1、24、35、45、50 a后的10月份温度分布。图4(A)是块碎石夹层路基运营到第1年10月15日的温度分布,该图表明在路基上部有1~4 °C融化

盘,路基下的最低温居于-1.5 °C之下,从整个温度场分布来看,温度分布基本上对称,但0 °C等温线仍旧没有达到天然地表,-1 °C等温线的坐标值为: $x = -10$ 时, $y = -4.11$; $x =$

0 时, $y = -1.58$; $x = 10$ 时, $y = -3.21$ 。对比同期普通路基图 2(A), 发现块碎石夹层路基下温度场分布对称性比普通

路基要好很多, 同时阴阳坡效应造成的温度差异很小, 并且明显发现路基下冻土地温退化不明显。

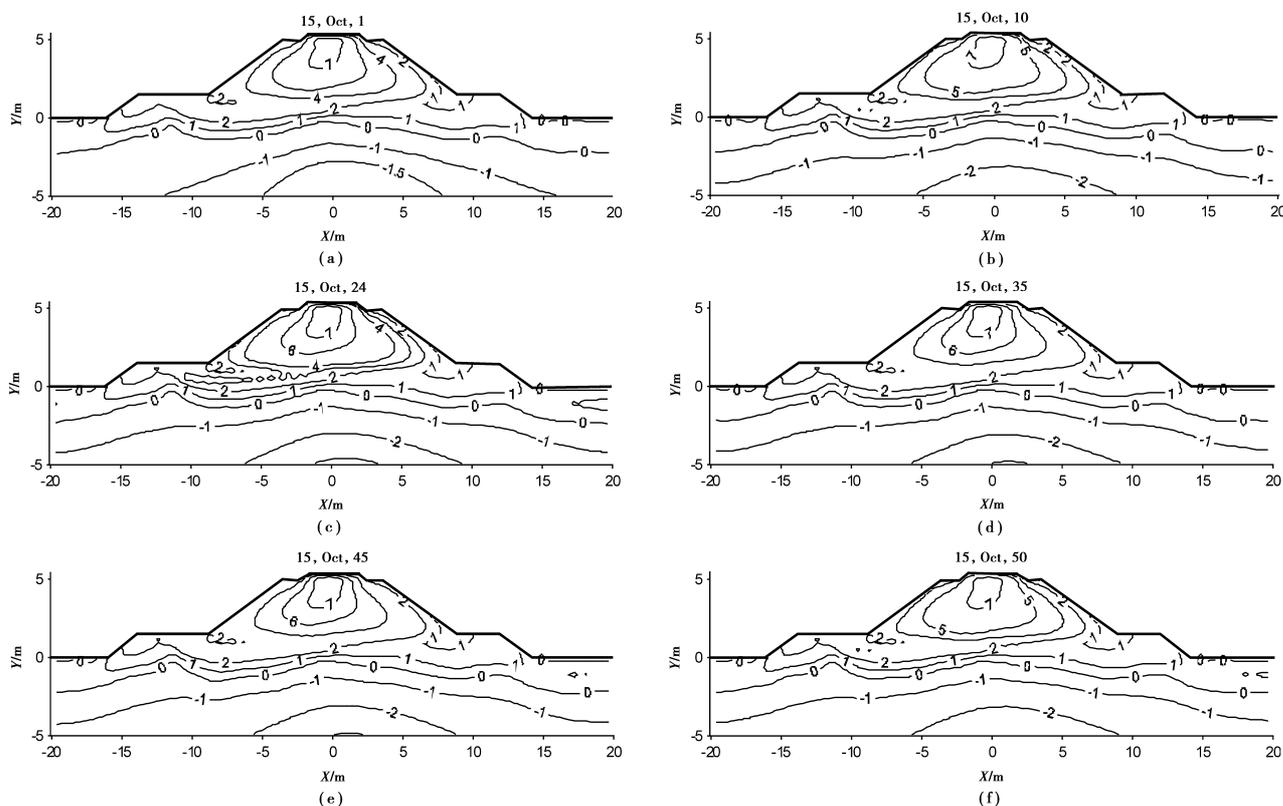


图 4 块碎石夹层路基运营 1、10、24、35、45、50 a 后 10 月份的温度分布

图 4(B)是块碎石夹层路基运营 10 a 后的温度场分布, 图 4(A)相比, 相同之处是整个温度场分布的对称性比较好, 如果以 $y=0$ 为界限的话, 那么, 当 $y \geq 0$ 时两图(图 4(A)和图 4(B))的温度场分布完全相同。当 $y \leq 0$ 时, 就完全不同了, 在图 4(B)中, -1°C 等温线的坐标值为: $x = -10$ 时, $y = -2.62$; $x = 0$ 时, $y = -1.28$; $x = 10$ 时, $y = -2.47$, 与图 4(A)中的对应值比较, 显见 -1°C 等温线抬升了, 突出表现在阴阳坡及与之毗邻的天然地表下。

块碎石夹层路基运营 24 a 后的温度分布见图 4(C), 此时路基的最高温度为 7°C , 0°C 等温线保持在天然地表之下, 路基下的最低温度低于 -2°C , 跟图 4(B)相比, 除了 -2°C 等温线有很小的抬升值外, 两温度场的分布情况相同。与同期普通路基图 2(B)相互比较发现, 普通路基下冻土的有负温等温线退化的趋势和阴阳坡更明显加剧发展的态势; 而块碎石夹层路基的负温等温线有逐步小幅抬升趋势, 但路基温度场有逐步向对称分布发育的趋势, 并且路基阴阳坡温度相对差异逐渐减少。

块碎石夹层路基经过 35 a 运营后的温度场分布见图 4(D), 路基的最高温度为 7°C , 最低为 -2.5°C , 与图 4(C)比较, 当 $x \geq 0$ 时, 两图的温度场分布完全相同; 当 $x < 0$ 时, 两图中 -1°C 和 -2°C 等温线的位置也相同, 即 -1°C 等温线的坐标值为: $x = -10$ 时, $y = -2.62$; $x = 0$ 时, $y = -1.28$; $x = 10$ 时, $y = -2.47$, -2°C 的为: $x = -5$ 时, $y = -4.40$; $x = 0$ 时, $y = -3.07$; $x = 5$ 时, $y = -3.51$, 不同的是在图 4(D)中,

-2.5°C 等温线抬升范围要小于图 4(C)中的。和同期普通路基 2(C)相比, 块碎石夹层路基温度场分布仍旧相对比较对称和稳定, 而普通路基的阴阳坡效应继续发育, 造成路基中和路基下地温的不对称性, 同时伴随有路基下地温逐步升高。

块碎石夹层路基运营到 45 a 后的温度场分布见图 4(E), 与该路基运营到第 35 年 10 月 15 日的温度分布完全相同, 有 7°C 的最高温度和 -2.5°C 的最低温度, 从整个温度场分布看, 阳坡下的温度要高于阴坡下的。和同期普通相比, 两路基的温度差异性相对比较恒定。

图 4(F)是块碎石夹层路基运营 50 a 后的温度场分布, 路基下的最高温度为 7°C , 最低为 $-2.5 \sim -2^\circ\text{C}$ 之间, 0°C 等温线也在天然地表之下。与同期普通路基图 3(D)相比发现, 块碎石夹层路基和普通路基的温度场都基本稳定, 但是总体上看, 块碎石夹层路基的温度场比较对称和稳定。

通过以上对比分析可知, 普通路基和块碎石夹层路基的修建都会对路基下的温度场发生影响, 但影响的效果不同: 在 24 a 内, 普通路基对路基的扰动相对比较大, 并且伴随路基内部温度的非对称性剧烈调整, 尤其以 0°C 等温线和 0.5°C 等温线抬升和偏移表现显著, 同时路基冻土的退化趋势明显, 路基本体内部条带状非均匀融化核长期发育, 而块碎石路基, 尽管也扰动了天然地表下的地温分布, 但整体上来看, 路基温度扰动幅度比较小且扰动后地温具有较好的对称性, 同时路基下负温等温线逐渐向平缓方式凸显, 而路基

本体内温度一直保持着良好的稳定性和对称性。修建 24 a 以后,路基下的温度分布基本能趋于相对稳定,但是块碎石夹层路基的温度分布相对比较对称和稳定,有利于路基的结构稳定性,而普通路基中明显存在由于阴阳坡效应所造成的温度不对称性发育和融化核的发育,非常不利于路基下冻土和路基本体的热稳定。

4 结论

通过普通路基和块碎石夹层路基在未来 50 a 的温度特性分析可知,在阴阳坡作用下,普通路基的修筑很难保障路基温度的对称性分布,且路基下的负温等值线有退化的趋势,路基内形成明显的条带状不对称高温区,同时不对称的等温线缓慢的发育并抬升。而块碎石夹层路基的温度分布相对以比较对称的形态缓慢发育,负温曲线也缓慢的抬升和发育,这有利冻土的热稳定和路基的热稳定性。

所以依据本文的提出的块碎石夹层路基,即在路基地部铺设厚度 150 cm,直径 10 cm 以上的块碎石结构层,并且分别在阴阳坡侧延伸出路基 3 m 和 5 m,作为青藏铁路冻土区有阴阳坡路段的路基结构,就达到能使路基的温度对称分布的目的,同时能消除由于阴阳坡温度的差异造成的路基冻土下限的不对称分布、引起的路基不均匀的沉降和变形、形成路基纵向裂缝的病害,以便最大限度的保护冻土区的铁路。

参考文献:

- [1] Trevisan O V, Bejan A. Natural convection with combined heat and mass transfer buoyancy effects in a porous medium[J]. Journal of International Heat Mass Transfer, 1985, 28(8): 1597-1611.
- [2] Poulikakos D, Bejan A. Natural convection in vertically and horizontally layered porous media heated from the side[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1983, 26(12): 1805-1814.
- [3] Royer J J, Flores L. Two dimensional natural convection in anisotropic and heterogeneous porous medium with internal heat generation[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1994, 37(9):1387-1399.
- [4] Amiri A, Vafai K. Analysis of dispersion effects and nonthermalequilibrium, non Darcian, variable porosity incompressible flowthrough porous media[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1994,37(6):939-954.
- [5] Lee K B, Howell J R. Theoretical and experimental heat and mass transfer in highly porous media[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1991, 34(8): 2123-2132.
- [6] Sahraoui M, Kaviany M. Slip and no-slip temperature boundary conditions at the interface of porous, plain media convection [J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1994, 37(6): 1029-1044.
- [7] Lai F C, Kulacki F A. Coupled heat and mass transfer by natural convection from vertical surfaces in porous media[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1991, 34(4): 1189-1194.
- [8] Nield D A. Estimation of the stagnant thermal conductivity of saturated porous media[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1991, 34(6): 1575-1576.
- [9] Hsu C T, Cheng P, Wong K W. Modified Zehner-Schlunder models for stagnant thermal conductivity of porous media[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1994, 37(17): 2751-2759.
- [10] Bauer T H. A general analytical approach toward the thermal conductivity of porous media[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1993, 36(17): 4181-4191.
- [11] 米隆, 赖远明, 张克华. 冻土通风路基温度场的三维非线性分析[J]. 冰川冻土, 2002, 24(6): 765-769.
MI Long, LAI Yuanming, ZHANG Kehua. 3D nonlinear analysis for temperature field of ventilative embankment in cold regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(6): 765-769.
- [12] Lai Y, Wu Z, Zhu Y, et al. Nonlinear analysis for the coupled problem of temperature and seepage fields in cold regions tunnels[J]. Cold Regions Science and Technology, 1999, 29(1): 89-96.
- [13] 赖远明, 张鲁新, 张淑娟, 等. 气候变暖条件下青藏铁路抛石路基的降温效果[J]. 科学通报, 2003, 48(3): 292-297.
- [14] 赖远明, 张鲁新, 张淑娟, 等. 利用抛石护坡调节冻土路基阴阳坡的温度分布[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4212-4220.
LAI Yuanming, ZHANG Luxin, ZHANG Shujuan, et al. Adjusting temperature distribution under the north and south slopes of roadbed by the ripped-rock revetment in permafrost regions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4212-4220.
- [15] 赖远明, 张鲁新, 徐伟泽, 等. 青藏铁路抛石路基的温度特性研究[J]. 冰川冻土, 2003, 25(3): 291-295.
- [16] 米隆, 赖远明, 吴紫汪, 等. 高原冻土铁路路基温度特性的有限元分析[J]. 铁道学报, 2003, 25(2): 62-67.
MI Long, LAI Yuanming, WU Ziwan, et al. The finite element analysis for temperature property of railway embankments in cold regions[J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(2): 62-67.

(编辑 罗敏)