

多年冻土区宽幅公路路基降温效果研究—— 一种 L 型热管 - 块碎石护坡复合路基

董元宏^{1,2}, 赖远明¹, 陈 武¹

(1. 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, 甘肃 兰州 730000; 2. 中交第一公路勘察设计院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘 要: 为维护多年冻土区宽幅高等级公路的热稳定性及保护下伏冻土, 提出了一种 L 型热管 - 块碎石护坡保温板复合路基。为研究这种新型路基的降温效果, 进行了室内模型试验, 试验结果初步证明了这种路基的有效降温能力。为研究这种新型路基的长期效果, 采用相关理论, 结合室内模型试验的结果, 依据青藏高原多年冻土区宽幅高等级公路的气温和地质条件, 利用数值方法对有无 L 型热管的块碎石护坡保温板复合路基的温度特征进行了分析和比较。结果表明: 在年平均气温为 -4.0°C 的青藏高原多年冻土区, 考虑未来 50 a 气温上升 2.6°C 的条件下, 新的复合路基能够从整体上有效降低路基下土体的温度, 确保高温多年冻土区宽幅高等级公路路基的热稳定性。

关键词: 高等级公路; L 型热管; 块碎石护坡; 降温效果

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2012)06 - 1043 - 07

作者简介: 董元宏(1983 -), 男, 甘肃庆阳人, 博士, 主要从事寒区岩土工程方面的研究工作。E-mail: dyhvic@gmail.com。

Cooling effect of combined L-shaped thermosyphon, crushed-rock revetment and insulation for high-grade highways in permafrost regions

DONG Yuan-hong^{1,2}, LAI Yuan-ming¹, CHEN Wu¹

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: In order to keep the thermal stability of large-width highway embankment in permafrost regions, a new type of cooling measure of combined L-shaped thermosyphon, crushed-rock revetment and insulation is presented. To examine its cooling effect, laboratory tests are carried out. The test results have preliminarily proved the effectiveness of the new cooling measure. To further validate its effectiveness in the service life of the highways in permafrost regions, based on relative theories and the laboratory test results, a numerical model for the highway embankment is established, and the temperature characteristics of the embankment in its service life are analyzed. The numerical results show that the combination of the L-shaped thermosyphon, crushed-rock revetment and insulation is effective to keep the thermal stability of the large-width embankment in its service life under the condition that the air temperature is warmed up by 2.6°C . Based on this, the new combined cooling measure is suggested to be used in the construction of large-width embankment in permafrost regions.

Key words: high-grade highway; L-shaped thermosyphon; crushed-rock revetment; cooling effect

0 引 言

为解决青藏高原多年冻土区道路工程的冻土问题, 国内学者进行了大量研究^[1-8], 对于尤为复杂的高温高含冰量冻土区的冻土问题, 提出了多种主动冷却路基的工程措施, 如块碎石路基、通风管路基和热棒路基等。这些工程措施在青藏铁路和青藏公路等工程中的成功应用已取得了显著的经济社会效益。

随着西部大开发的不断深入和相关地区经济社会

的发展, 在青藏高原修建高等级公路已十分必要, 已进入了国家规划。高等级公路的路面宽度一般大于 20 m, 幅面较普通道路更宽, 且采用沥青路面。相关资料表明^[9], 多年冻土区公路沥青路面的年平均温度一般要比气温高 6°C 以上, 比普通公路采用的砂砾路面

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40730736, 41101068); 中交寒区道路实验室开放基金资助项目; 中央高校基本科研业务专项基金项目 (CHD2009JV172); 交通运输部应用基础研究重点项目
收稿日期: 2010 - 09 - 06

高 3~4℃; 再加上路基宽度大幅增加带来的影响, 相比普通路基而言, 这两个新的因素均大大增加了宽幅路基下多年冻土的吸热量。另外, 高等级公路对沉降和不均匀变形的要求更为严格。因此, 以上传统工程措施, 如块碎石层等的适用条件发生了很大的变化, 在全球气候变暖的条件下, 它们将难以确保宽幅高等级公路路基的热稳定性。因此解决宽幅高等级公路的冻土问题就成为一个工程上所面临的新问题。

热管作为一种高效的热传导装置, 通过管内工质在蒸发段受热蒸发吸收热量—冷凝段遇冷凝结释放热量这样的循环过程将蒸发段的热量不断带到冷凝段。这种高效传热的特性被广泛应用于冻土工程中来降低冻土的温度, 保护冻土。为解决多年冻土区宽幅高等级公路的冻土问题, 本文将热管外形改进成 L 型, 以方便地将它的降温能力延伸至宽幅路基的中心部位。在此基础上, 提出了一种 L 型热管、保温板与块碎石护坡结合使用的复合路基型式。就其降温效果进行了室内模型试验, 试验初步证明了这种复合措施的有效性。为研究这种路基型式在全球气候变暖的条件下, 能否确保高等级公路运行期限内的路基热稳定性, 本文进一步采用多空介质中流体流动的连续性方程、动量方程和能量方程, 结合室内模型试验的结果, 通过有限元方法对青藏高原气温和地质条件下该种路基的温度场进行了数值研究, 并对有无 L 型热管两种情况下的路基温度场进行了对比分析。

1 室内模型试验及结果分析

1.1 试验条件

为研究这种 L 型热管、碎石护坡保温板复合路基的降温效果, 在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模型试验厅进行了室内模型试验。考虑到路基的对称性, 只取一半路基作为试验对象。路基填土干密度和含水率分别为 1.92 g/cm³ 和 9.8%。路基高度 1.50 m, 宽度 3.25 m, 碎石护坡水平方向厚度为 1.20 m, 碎石粒径为 8~12 cm, 铺设于路基内的保温板厚度为 10 cm。共埋设了 2 支 L 型热管, 热管蒸发段和冷凝段长度分别为 2.50 m 和 1.10 m, 二者之间夹角为 132°; 纵向间距为 40 cm。试验路基如图 1 所示。

为监测路基内的温度场, 在路基的中间断面 (2 个 L 型热管的中间断面, 以下简称中间断面) 布设了温度探头 (精度: $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$); 为监测 L 型热管的工作状态, 在其上安装了热流密度探头 (精度: $\pm 0.06\text{W m}^{-2}$)。试验模型箱内的空气温度取为 $T = -3.5 \sim 12\sin(2\pi t/15)^{\circ}\text{C}$, 即: 一个周期为 15 d, 周期平均气温为 -3.5°C 。在模型箱内安装浴霸灯泡模拟太阳辐射,

根据附面层原理的要求^[9], 使得路基表面的温度和碎石护坡表面温度分别比箱内空气温度高 6.5℃ 和 4.0℃。试验时模型箱内风速控制在 2.8 m/s。本次试验共进行了 4 个周期。

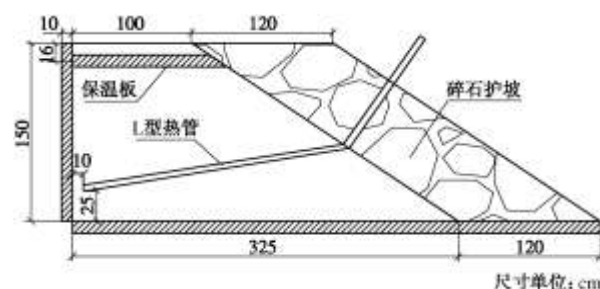


图1 试验路基断面示意图

Fig. 1 Section of test embankment

1.2 试验结果

试验路基中间断面在第 4 周期气温负温期结束和正温期结束时的等温线如图 2 (a)、(b) 所示。由图 2 (a) 可以看出, 气温负温结束时, 即路基内冻结达到最大时, 除保温板以上小部分外, 路基大部分已全部冻结。路基边坡附近最低温度为 -4°C , 路基中心处也出现了 -0.5°C 等温线。可见, 碎石护坡和 L 型热管的共同作用向路基存储了大量冷能。经过接下来的气温正温期的融化作用后, 路基内融化达到最大时, 该断面的等温线如图 2 (b) 所示。由图 2 (b) 可见, 此时路基温度有所回升, 但路基大部分仍然在 0°C 以下, 为 -0.4°C 左右。由此说明, 尽管气温正温期时外界不断向路基注入热量, 但是碎石和 L 型热管在负温期时的降温效应足以抵抗这些热量。

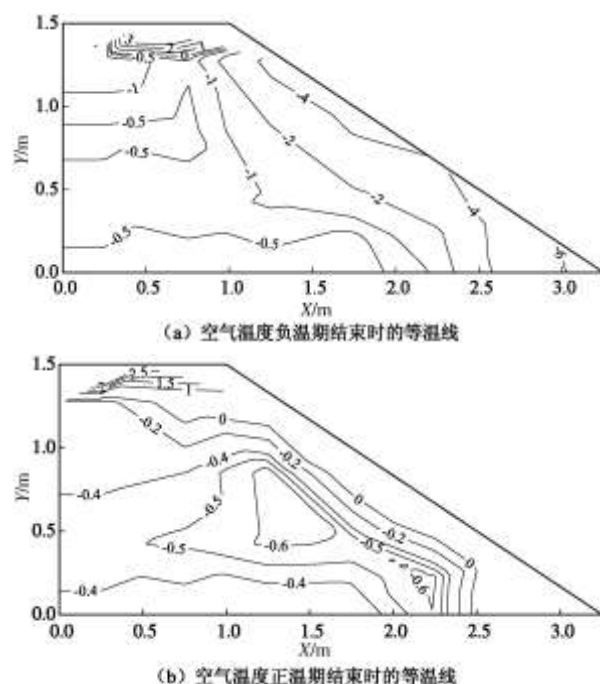


图2 路基中间断面在空气温度负温期结束和正温期结束时的等温线

Fig. 2 Temperature contours of mid-cross section of test

embankment at the end of negative and positive air temperature periods

由上述分析可以看出, 碎石护坡、保温板与 L 型热管的协同工作, 使得路基在整个气温冻融周期内都能保持冻结, 这将有利于维护路基的热稳定性和保护下部冻土。因此, 这种复合路基具有较好的降温效果。

位于热管蒸发段底部的热流密度探头测得的密度第 4 周期随时间的变化如图 3 所示。图 3 表明, 在气温的正温期, 热管的热流密度几乎接近于 0 W/m^2 , 表明热管停止工作; 在气温的负温期, 热管热流密度随时间大致成正弦规律变化, 热流密度峰值为 -34.47 W/m^2 , 负号表明热流的方向为由土体进入热管。

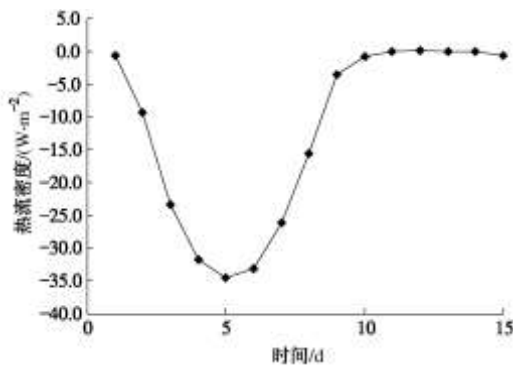


图 3 第 4 周期热管底部热流密度随时间的变化曲线

Fig. 3 Variation of heat flux at bottom of thermosyphon with time during test cycle No. 4

2 数值模拟

上述室内模型试验的结果初步证明了 L 型热管 - 碎石护坡保温板复合路基良好的降温效果。为研究这种路基在全球气候变暖背景下的长期热稳定性, 下面根据相关理论及室内试验的结果, 通过数值手段来研究这种新型路基应用于宽幅高等级公路的长期热稳定性。

2.1 理论模型

块碎石层可看作高渗透率的多孔介质, 内部自然对流为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^[10-12]。

连续性方程:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

式中, v_x , v_y 和 v_z 分别为空气在 x , y 和 z 方向上的速度分量 (m s^{-1})。

动量方程:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\mu}{k} v_x, \quad (2a)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = -\frac{\mu}{k} [v_y - \rho_a g], \quad (2b)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\frac{\mu}{k} v_z. \quad (2c)$$

式中 k 为多孔介质的渗透率 (m^2); μ 为空气的动力黏滞系数 ($\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$); p 为空气压强 (Pa)。 y 方向为重力方向。

为简化分析, 忽略空气的可压缩性, 使用 Boussinesq 近似, 即: 仅动量方程中与体积力有关的项中密度为温度的函数, 其余各项中的密度均作为常数。 ρ_a 可表示为

$$\rho_a = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \quad (3)$$

式中 β 为空气的热膨胀系数 (K^{-1}); ρ_0 和 T_0 分别为空气密度 (kg m^{-3}) 和温度 ($^{\circ}\text{C}$) 的参考值。

能量方程:

$$C_e^* \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_e^* \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_e^* \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_e^* \frac{\partial T}{\partial z} \right) - C_a \rho \left(\frac{\partial (v_x T)}{\partial x} + \frac{\partial (v_y T)}{\partial y} + \frac{\partial (v_z T)}{\partial z} \right) \quad (4)$$

式中 C_a 为空气的定压比热 ($\text{J kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); C_e^* , λ_e^* 分别是介质等效体积热容 ($\text{J m}^{-3} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$) 和等效导热系数 ($\text{W m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)。

采用显热容法处理方程中的相变问题, 假设路基含水介质相变发生在温度区间 $(T_m \pm \Delta T)$, 相变潜热为 L , 同时假设介质在正冻、未冻时的体积热容 C_f 和 C_u 及导热系数 λ_f 和 λ_u 不随温度变化, 因此简化构造出 C_e^* 和 λ_e^* 的表达式如下^[13]:

$$C_e^* = \begin{cases} C_f & T < (T_m - \Delta T), \\ \frac{L}{2\Delta T} + \frac{C_f + C_u}{2} & (T_m - \Delta T) \leq T \leq (T_m + \Delta T), \\ C_u & T > (T_m + \Delta T), \end{cases} \quad (5a)$$

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

引入不包含静态水压力分量的空气压力:

$$P = p + \rho_0 g y, \quad (6)$$

则有

$$p = P - \rho_0 g y, \quad (7)$$

则由式 (7), 可将式 (2a)、(2b)、(2c) 简化为

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

表 1 计算模型中各介质的热学参数

Table 1 Thermal parameters of various media in embankment

物理量	λ_f /(W m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	C_f /(J m ⁻³ ·°C ⁻¹)	λ_u /(W m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	C_u /(J m ⁻³ ·°C ⁻¹)	L /(J m ⁻³)
路基填土	1.980	1.913×10 ⁶	1.919	2.227×10 ⁶	20.4×10 ⁶
亚黏土	1.351	1.879×10 ⁶	1.125	2.357×10 ⁶	60.3×10 ⁶
强风化泥岩	1.824	1.846×10 ⁶	1.474	2.099×10 ⁶	37.7×10 ⁶
碎石护坡	0.387	1.015×10 ⁶	0.387	1.015×10 ⁶	0
保温材料	0.030	5.6×10 ⁴	0.030	5.6×10 ⁴	0

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

$$v_z = -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} \quad . \quad (8c)$$

将式 (8a)、(8b)、(8c) 带入式 (1) 可得

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

联立式 (4)、(8a)、(8b)、(8c) 和 (9) 即可求得路基中任意时刻的温度场和速度场。由于该问题是一个强非线性问题，无法得到解析解，因此计算中采用数值方法。

2.2 计算结果

根据公路路基设计规范^[14]、公路工程技术标准^[15]及相关规范，取青藏高原多年冻土区高等级公路的路基高度为 2.5 m，路面宽度为 23 m，边坡坡度为 1：1.5，复合路基计算模型如图 4 所示。碎石护坡水平厚度为 1.2 m，碎石粒径为 8~12 cm。保温板厚 10 cm，埋设在路面以下 0.8 m 处。L 型热管埋设在路基填土内的蒸发段长度为 9.5 m，与水平方向的夹角为 10°，冷凝段长度为 5.4 m；两段之间夹角为 134°。为研究碎石护坡和 L 型热管在该路基中的作用，分无热管和有热管 2 种情况下的复合路基进行计算。

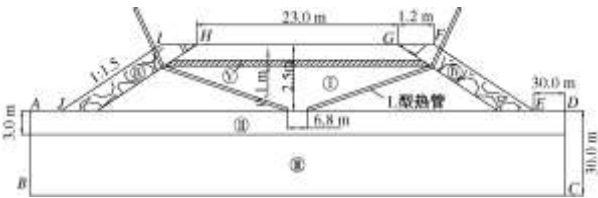


图 4 复合路基计算模型

Fig. 4 Computational model of combined L-shaped thermosyphon, crushed-rock revetment and insulation embankment

设初始年平均气温为-4.0℃，根据附面层理论^[9]及相关资料^[13, 16]，可确定计算的边界条件。考虑全球气候变暖的影响，取青藏高原未来 50 a 气温平均上升 2.6℃^[17]。由此，天然地表 AJ 和 ED 边的温度边界为

$$T_n = -1.5 + 12 \sin \left(\frac{2\pi}{8760} t_h + \frac{\pi}{2} + \alpha \right) + \frac{2.6 \times t_h}{365 \times 24 \times 50} \quad . \quad (10)$$

路堤边坡 JIH 和 EFG 边的温度边界为

$$T_s = 0.7 + 13 \sin \left(\frac{2\pi}{8760} t_h + \frac{\pi}{2} + \alpha \right) + \frac{2.6 \times t_h}{365 \times 24 \times 50} \quad . \quad (11)$$

路堤顶面 HG 边的温度边界为

$$T_p = 2.5 + 15 \sin \left(\frac{2\pi}{8760} t_h + \frac{\pi}{2} + \alpha \right) + \frac{2.6 \times t_h}{365 \times 24 \times 50} \quad . \quad (12)$$

上述各式中， t_h 以 h 为单位， α 为时间相位，可用来调整初始时间，比如若初始时间为 7 月 15 日，即气温最高时完成施工，则取 $\alpha = 0$ 。

计算模型的底部 BC 边的热流密度为 $q = 0.06 \text{ W m}^{-2}$ ^[13]，其余边界均为绝热。

热管的热流密度按图 3 施加。

空气的流体边界条件为没有流体通过计算区域的边界，即通过各边界的法向流速为零。由式 (8b) 可得到边 JIH 和 GFE 的气压边界条件为

$$P_b = p_0^* + \rho_0 \beta (T_b - T_0) g y \quad , \quad (13)$$

式中， p_0^* 和 T_0 分别为初始压力和温度， T_b 为边界 JIH 和 EFG 上的温度，其值由式 (11) 确定。

在海拔 4000 多米处，空气的定压比热为 $C_p = 1004 \text{ J kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ ，导热系数为 $\lambda = 2.0 \times 10^{-2} \text{ W m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ ，动力黏滞系数为 $\mu = 1.75 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ，密度为 $\rho = 0.64 \text{ kg m}^{-3}$ 。

图 4 中，区域 I 为路基填土，为碎石与砂砾土；区域 II 为亚黏土；区域 III 为强风化泥岩；区域 IV 为块石护坡，块石粒径 8~12 cm，渗透率为 $k = 1.58 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ ；区域 V 为 EPS 保温板。上述各介质的热学参数见表 1，渗透率见表 2。

表 2 各介质的渗透率

Table 2 Permeabilities of various media in embankment

介质	路基填土	亚黏土	强风化泥岩
渗透率/m ²	3.0×10 ⁻¹⁰	3.0×10 ⁻¹¹	3.0×10 ⁻¹¹

将不考虑升温的天然地表温度，即去掉式 (10) 中的最后一项，作为 II、III 区的上边界条件进行反复多年计算，直到年变化层以下的温度场基本保持稳定

且相同节点温度在同一时刻逐年相同为止, 将此时获得的 7 月 15 日温度场作为该计算区域的初始条件; 路堤填土区域的初始温度取该时间浅地表土层温度。考虑到路基的对称性, 仅取一半路基进行计算。本文对 7 月 15 日完成施工的有无热管 2 种复合路基结构修筑完成后 50 a 的温度特性进行了分析对比。

(1) 块石护坡内的速度场分析

选取两个典型时间断面, 夏季的 7 月 15 日和冬季的 1 月 15 日分别对这两个时刻块石护坡内的速度场进行分析。这两个时间断面上块石护坡内的速度场分别如图 5 (a)、(b) 所示。图 5 (a) 所示的夏季的速度场表明, 块石护坡内部存在 1 个以护坡中部为核心的对流涡包, 空气流动方向为外侧向上内侧向下。内部空气的最大流速 $9.89 \times 10^{-3} \text{ m/s}$, 对流强度较弱。而图 5 (b) 所示的冬季的速度场特征则与夏季的明显不同: 块石护坡内部出现了 4 个对流涡包, 内部空气的最大流速为 $1.79 \times 10^{-2} \text{ m/s}$, 对流强度远大于夏季。而冬季较强的对流强度有利于外界冷能向路基内部传递。

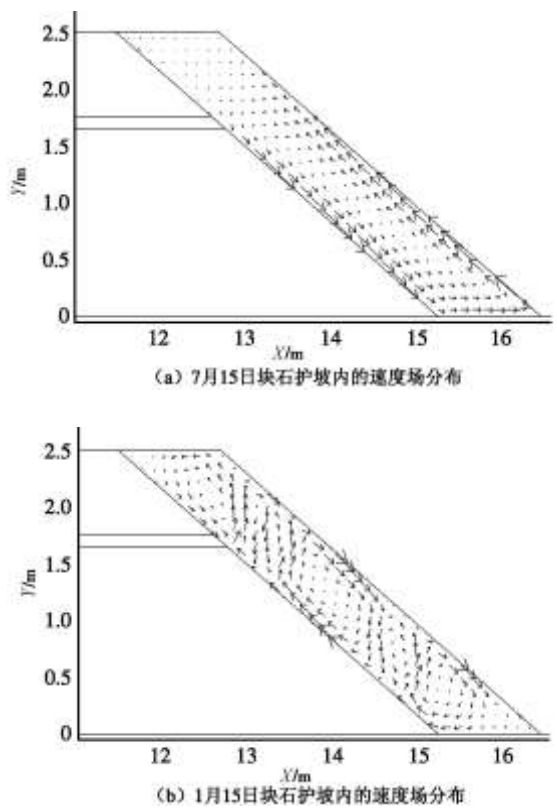


图 5 7 月 15 日和 1 月 15 日块石护坡内的速度场分布

Fig. 5 Distribution of velocity field in crushed-rock revetment on July 15 and Jan. 15

(2) 块碎石护坡保温板复合路基的温度场分析

根据以往野外观测经验以及数值计算结果, 路基下冻土的融化深度在 10 月中旬左右达到最大, 因此以下分析均选取 10 月 15 日的路基温度场来进行分析。

块石护坡保温板复合路基修筑完成后第 2 年 10 月 15 日的温度分布如图 6 所示。从图 6 可以看出, 路基坡脚附近一个有限范围内的冻土上限 (0°C 等温线) 略有小幅抬升, 这表明, 经过路基完成施工后第一年的冻融循环, 块石护坡的降温作用已得到了初步显现。而路基下的人为冻土上限, 尚未出现明显下降。

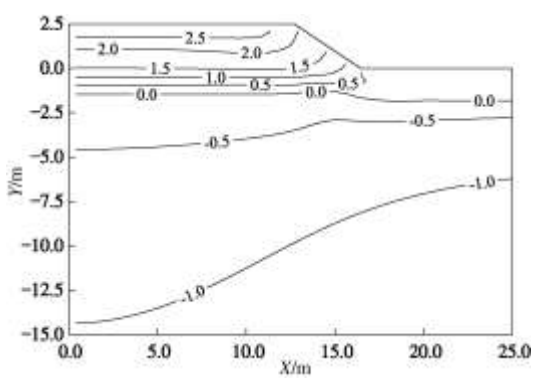


图 6 块石护坡保温板复合路基修筑完成后第 2 年 10 月 15 日的温度分布

Fig. 6 Distribution of temperature of embankment with crushed-rock revetment and thermal insulation on Oct. 15 after 1 year of construction completion

块石护坡保温板复合路基修筑完成后第 50 年 10 月 15 日的温度分布如图 7 所示。图 7 表明, 一方面, 块石护坡在路基坡脚附近发挥的降温作用十分有限, 无法抵挡全球气候变暖的影响; 另一方面, 路基中心下的大部分冻土上限出现明显的大幅下降, 此时的天然最大融深为 2.48 m, 路基中心线下的最大融化深度为 11.76 m, 相对于天然上限, 下降幅度为 9.28 m; 另外, 冻土的年平均地温升高, 第 50 年时的年平均地温为 -0.2°C , 比第 2 年时的 -1.0°C 上升了 0.8°C 。路基下人为上限的下降和冻土年平均地温的升高均表明宽幅路基下伏冻土已出现严重退化。原因在于, 沥青路面的高吸热特性以及全球气候变暖的共同影响大大增加了路基的吸热量, 尽管铺设在路面下的保温板发挥了一定的保温隔热作用, 但它对冻土的升温只能起到延缓作用, 而不能完全阻止; 长期作用下, 路基下冻土的热量积累随时间不断增加, 最终导致了冻土的大幅升温。路基坡脚下和路基中心线下的温度差别充分说明了保温板与块石护坡路基对宽幅路基降温隔热作用的局限性, 即这二者的组合对于路基下绝大部分冻土无法发挥有效的保护作用。综合以上分析可见, 块石护坡保温板复合路基由于其自身降温特性的原因, 对宽幅路基的降温作用十分有限, 无法阻止宽幅路基下多年冻土的退化, 因而也无法保证宽幅路基的热稳定性。

(3) L 型热管 - 块碎石护坡保温板复合路基的温

度场分析

为解决上述问题,在路基中增设 L 型热管(见图 1),以期利用 L 型热管可方便地将其降温影响范围延伸至路基中心处的这一特征来消除该处的热量积累。和前面一样,依然对该种路基修筑完成后第 2 年和第 50 年 10 月 15 日的温度分布分别分析。

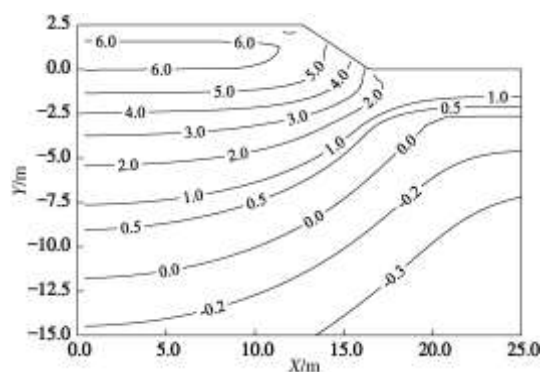


图 7 块石护坡保温板复合路基修筑完成后第 50 年 10 月 15 日的温度分布

Fig. 7 Distribution of temperatures of embankment with crushed-rock revetment and thermal insulation on Oct. 15 after construction completion for 50 years

L 型热管-块石护坡保温板复合路基修筑完成后第 2 年 10 月 15 日的温度分布如图 8 所示。比较图 8 和图 6 可以看出,增设了 L 型热管的复合路基修筑完成 1 年后,路基中心线下的最大融深较没有热管的块石护坡保温板复合路基略有抬升,表明此时热管已经开始发挥作用,带来的冷能主要用以平衡路基施工带来的热量。

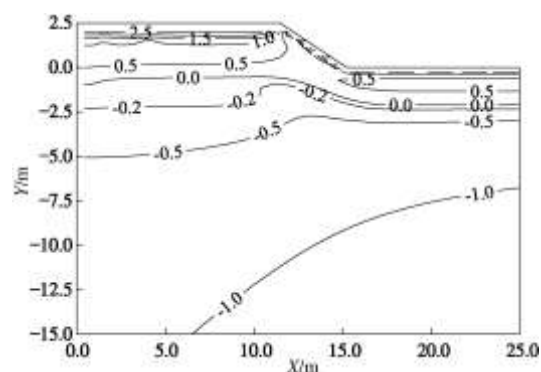


图 8 L 型热管-块石护坡保温板复合路基修筑完成后第 2 年 10 月 15 日的温度分布

Fig. 8 Distribution of temperatures of embankment with L-shaped thermosyphon, crushed-rock revetment and thermal insulation on Oct. 15 after construction completion for 1 year

L 型热管-块石护坡保温板复合路基修筑完成后第 50 年 10 月 15 日的温度分布如图 9 所示。图 9 表明,修筑完成 50 年后路基下的人为冻土上限较天然上限

得到了大幅抬升,这将有利于避免路基融沉病害的发生。比较图 9 和图 7 可以看出,在路基内增设了 L 型热管后,路基下冻土人为上限得到了大幅抬升,部分人为上限已抬升至路基本底附近。此时,路基中心线下的最大融深为 0.43 m,与天然地表下的相比,上升了 2.05 m,与图 7 中块石护坡保温板复合路基中心线下的最大融深相比,抬升了 11.33 m;另外,路基冻土的年平均地温由未增设 L 型热管时的 -0.2°C 降低至 -0.4°C 。由此可见,新的复合路基不仅抬升了冻土上限,而且降低了冻土年平均低温,为路基下伏冻土储存了更多的冷能,这将有利于维护宽幅公路的热稳定性。上述分析表明 L 型热管与块碎石护坡保温板的组合,能够在全球气候变暖的条件下,有效保护宽幅路基下的冻土,维护宽幅路基运行期限内的热稳定性。

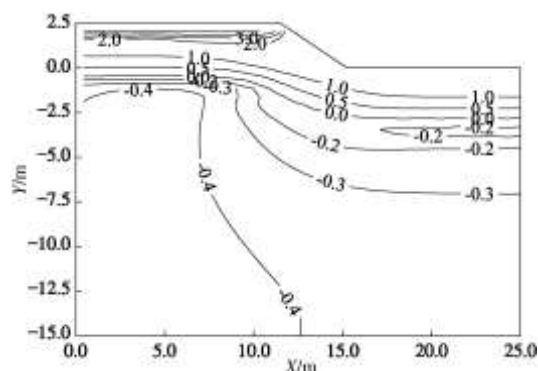


图 9 L 型热管-块石护坡保温板复合路基修筑完成后第 50 年 10 月 15 日的温度分布

Fig. 9 Distribution of temperatures of embankment with L-shaped thermosyphon, crushed-rock revetment and thermal insulation on Oct. 15 after construction completion for 50 years

3 结 语

本文将 L 型热管与块碎石护坡和保温板组合,应用于宽幅路基。室内模型试验初步证明这种复合路基具有良好的组合降温效果。在此基础上,对这种新型宽幅路基在全球气候变暖的背景下的长期热稳定性进行了数值模拟。数值结果表明,这一新型的复合措施能够在全球气候变暖的背景下,使路基修筑完成 50 a 后中心线下的的人为冻土上限与天然地表下的相比抬升 2.05 m,发挥了良好的降温隔热效果,能够有效保护宽幅路基下的冻土,确保宽幅路基运行期限内的热稳定性。基于本文的分析结果,推荐将本文提出的 L 型热管-块碎石护坡保温板复合降温隔热措施应用于多年冻土区宽幅高等级公路工程中。

参考文献:

[1] 赖远明,张明义,李双洋.寒区工程理论与应用[M].北京:

- 科学出版社, 2009. (LAI Yuan-ming, ZHANG Ming-yi, LI Shuang-yang. Theory and application of cold regions engineering[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))
- [2] 马巍, 程国栋, 吴青柏. 多年冻土地区主动冷却地基方法研究[J]. 冰川冻土, 2002, 24(5): 579 - 587. (MA Wei, CHENG Guo-dong, WU Qing-bai. Preliminary study on technology of cooling foundation in permafrost regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(5): 579 - 587. (in Chinese))
- [3] 孙志忠, 马巍, 李东庆. 青藏高原多年冻土区碎石护坡降温作用及效果分析[J]. 冰川冻土, 2007, 29(2): 292 - 299. (SUN Zhi-zhong, MA Wei, LI Dong-qing. Cooling effect of crushed rock revetment in permafrost regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(2): 292 - 299. (in Chinese))
- [4] 牛富俊, 马巍, 赖远明. 青藏铁路北麓河试验段通风管路基工程效果初步分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003(增刊 2): 2652 - 2658. (NIU Fu-jun, MA Wei, LAI Yuan-ming. Preliminary analysis on engineering effect of ventilation embankment at Beiluhe test section of Qinghai-Tibet Railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003(S2): 2652 - 2658. (in Chinese))
- [5] 吴志坚, 马巍, 盛煜, 等. 通风管、抛碎石和保温材料保护冻土路基的工程效果分析[J]. 岩石力学, 2005, 26(8): 1288 - 1294. (WU Zhi-jian, MA Wei, SHENG Yu, et al. Cooling effectiveness analysis of the vent-pipe, cast-detritus and heat preservation materials on protecting embankment in permafrost regions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1288 - 1294. (in Chinese))
- [6] 马巍, 余邵水, 吴青柏, 等. 青藏高原多年冻土区冷却路基技术现场实效监测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 563 - 571. (MA Wei, YU Shao-shui, WU Qing-bai, et al. Study on in-situ monitoring technology of cooling roadbed in permafrost regions of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 563 - 571. (in Chinese))
- [7] 潘卫东, 赵肃菖, 徐伟泽, 等. 热棒技术加强高原冻土区路基热稳定性的应用研究[J]. 冰川冻土, 2003, 25(4): 433 - 439. (PAN Wei-dong, ZHAO Su-chang, XU Wei-ze, et al. Application of thermal probe to enhance thermal stability of roadbed in plateau permafrost areas[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(4): 433 - 439. (in Chinese))
- [8] 全晓娟, 李宁, 李国玉. 冻土地区一种新型抛石护坡路基的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1645 - 1651. (QUAN Xiao-juan, LI Ning, LI Guo-yu. Study on embankment with new-type rock revetment in permafrost regions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1645 - 1651. (in Chinese))
- [9] 朱林楠. 高原冻土区不同下垫面的附面层研究[J]. 冰川冻土, 1988, 10(1): 8 - 14. (ZHU Lin-nan. Study of the adherent layer on different types of ground in permafrost regions on the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1988, 10(1): 8 - 14. (in Chinese))
- [10] NIELD D A, BEJAN A. Convection in porous media[M]. New York: Springer Verlag, 1992.
- [11] 孔祥言, 吴建兵. 多孔介质中的非达西自然对流的分岔研究[J]. 力学学报, 2002, 34(2): 177 - 185. (KONG Xiang-yan, WU Jian-bing. A bifurcation study of non-Darcy free convection in porous media[J]. Acta Mechanica Sinica, 2002, 34(2): 177 - 185. (in Chinese))
- [12] LAI Yuan-ming, LI Jian-jun, NIU Fu-jun, et al. Nonlinear thermal analysis for Qinghai-Tibet Railway embankments in cold regions[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2003, 17(4): 171 - 184.
- [13] LAI Yuan-ming, ZHANG Lu-xin, ZHANG Shu-juan, et al. Cooling effect ripped-stone embankments on Qinghai-Tibet Railway under climatic warming[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(6): 598 - 604.
- [14] JTGD30—2004 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004. (JTGD30—2004 Specifications for design of highway subgrades[S]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))
- [15] JTG B01—2003 公路工程技术标准[S]. 北京: 人民交通出版社, 2003. (JTG B01—2003 Technical standard of highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))
- [16] 程国栋, 江灏, 王可丽, 等. 冻土路基表面的融化指数与冻结指数[J]. 冰川冻土, 2003, 25(6): 603 - 607. (CHENG Guo-dong, JIANG Hao, WANG Ke-li, et al. Thawing index and freezing index on the embankment surface in permafrost regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(6): 603 - 607. (in Chinese))
- [17] 秦大河. 中国西部环境演变评估综合报告[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (QIN Da-he. Assessment on the environmental in west China[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))