

DOI: 10.11779/CJGE201502011

透壁式通风管-块石复合路基降温效果模型试验及数值模拟

刘 戈¹, 汪双杰¹, 孙 红², 袁 塑¹, 李金平¹

(1. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075; 2. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 为研究透壁式通风管-块石复合气冷路基的降温效果, 针对年均气温-3.5℃, 平均风速2.5 m/s, 主导风向为西北方向的高原环境条件开展了室内模型试验, 对比分析了单一块石路基和透壁式通风管-块石复合路基的孔隙空气对流速度、特征点地温及模型整体温度场变化过程。试验结果表明: 在透壁式通风管的疏导作用下, 通风管与块石层复合结构能够起到强化路基体对流的效果, 复合路基块石孔隙中的空气流速比单一块石路基提高约20%, 使得复合路基模型底部的降温幅度是单一块石路基模型的2.2倍。建立了透壁式通风管-块石复合路基数值计算模型, 对通风管内空气流速分布、路基温度场变化进行了预测分析。结果表明: 空气流速在通风管中心达到最大值4.06 m/s, 在管壁处流速出现跃变陡降, 在块石介质区域里速度的数量级为 10^{-1} , 与室内试验的结果较为一致。模型试验和数值计算结果均表明复合路基能够起到储存冷量、降低下伏多年冻土地温的作用。

关键词: 降温效果; 模型试验; 数值模拟; 透壁式通风管-块石复合路基; 多年冻土

中图分类号: U416.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2015)02-0284-08

作者简介: 刘 戈(1979-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事公路工程及冻土工程科研工作。E-mail: liuge1994@sohu.com。

Model test and numerical simulation of cooling effect of ventilated duct-crashed rock composite embankment

LIU Ge¹, WANG Shuang-jie¹, SUN Hong², YUAN Kun¹, LI Jin-ping¹

(1. CCCC First Highway Consultants Co., LTD, Xi'an 710075, China; 2. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to study the cooling effect of ventilated duct-crashed rock composite embankment, a series of model tests are carried out under plateau environment conditions. The average annual temperature is -3.5℃, the average wind speed is 2.5 m/s, and the dominant wind direction is northwest. The air convection velocity in crashed rock, the change process of temperature at feature points and the temperature field of model are analyzed. The results indicate that an enhanced convection effect in embankment can be generated by the ventilated duct-crashed rock composite embankment. Under the effect of grooming by the ventilated duct, the air convection velocity in the composite embankment is 20% higher than that in a single crashed rock embankment, and the cooling rate at the bottom of the model of the composite embankment is 2.2 times that of the single crashed rock embankment. A numerical model for the ventilated duct-crashed rock composite embankment is established. The velocity distribution in the ventilated duct-embankment temperature field is analyzed. Numerical calculations show that the air flow rate which reaches a maximum at the center vent pipe is 4.06 m/s. A rapid decline in velocity occurs at the wall of the ventilated duct. The magnitude of the air flow in the crashed rock is 10^{-1} . The calculated results are consistent with those of laboratory tests. The model test and numerical simulation show that the composite embankments can deposit cold quantity and cool down the permafrost.

Key words: cooling effect; model test; numerical simulation; ventilated duct-crashed rock composite embankment; permafrost

0 引言

融沉是多年冻土地区路基的主要病害^[1-2], 为控制厚层地下冰融化, 在多年冻土地区道路建设中, 开展

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目
(2012CB026106); 国家科技支撑计划项目(2014BAG05B03); 中交集团重大科技项目(2007-ZJKJ-07)

收稿日期: 2014-05-20

了一系列以主动降温、冷却地基和保护冻土为原则的工程措施研究^[3-6], 通风管路基和块石路基都是多年冻土区公路工程中比较常用的调控措施^[7], 通风管路基可直接将外界冷空气导入路基体内, 相比普通路基可进一步降低下伏多年冻土的温度, 但由于它是利用空气在管内对流与管壁发生热传导, 从而影响到管壁及周围土体的温度场, 导致其实际传热效率不是太高^[8-10]; 块石路基虽然能够缓慢降低下伏多年冻土的温度, 但是块石层内的对流范围和强度都十分有限^[11-12]。目前相关的研究主要是针对通风管路基及块石路基单独使用开展的, 并且通风管主要采用普通的混凝土预制管, 通风效果较差。本文综合考虑管道通风路基强对流和块石路基影响范围广的优点, 提出将透壁式通风管(以下简称通风管)与块石相结合的一种复合通风路基, 空气可以透过管壁的孔眼穿到管周围块石中去, 与块石中的气体进行对流热交换, 充分利用了多孔介质与空气的热对流与热传导, 达到了主动冷却路基的目的^[13-14]。由于目前有关通风管-块石复合路基的联合作用机理研究较少, 工程上也鲜有这方面的应用, 本文主要从室内模型试验及数值模拟等方面对该复合措施开展研究, 为后期工程应用提供参考。

1 试验方法

1.1 试验设备

试验设备由模型试验箱(见图1)、控温系统、通风系统和观测系统4部分组成。模型试验箱为8 m×1.84 m×2.7 m的保温箱, 箱体采用10 cm厚的冷库保温板, 路基模型位于其中。为提高箱体抗侧向和垂向挤压的能力, 在箱体外围用槽钢进行了加固处理。控温系统由7.5 kW的SANYO双头压缩机组、电脑温控器(分辨率0.1℃, 精度±0.3℃)、氟利昂液体循环的管道、蒸发器及温度传感器组成。控温过程经人工设定后, 由电脑温控器自动控制, 系统控温范围为-60℃~50℃。通风系统由冷却风扇、加速风机、风速调节装置、回流风道等组成, 风速为2.5 m/s, 风向平行于箱体的长度方向, 与透壁式通风管的走向一致。观测系统由热敏电阻温度传感器(精度±0.05℃)、风速探头、CR3000数采仪及计算机组成, 数据采集频率为1次/30 min。

1.2 试验条件

根据青藏高原北麓河一带的气候特点, 同时考虑附面层温度增量^[12], 模型试验的上边界条件采用周期性波动的温度, 其变化函数为

$$T = -3.5 + 12 \sin\left(\frac{2\pi}{15}\tau\right) \quad . \quad (1)$$

平均温度-3.5℃, 一个周期15 d(冻结期: 8.9 d, 213.6 h; 融化期: 6.1 d, 146.4 h), 这是根据野外冻结期长, 融化期短的实际情况确定的。试验过程从负温开始, 然后向正温进行, 每隔12 h调一次温度, 调温曲线如图2所示, 路基模型周边及底部为隔热边界, 试验平均风速2.5 m/s。

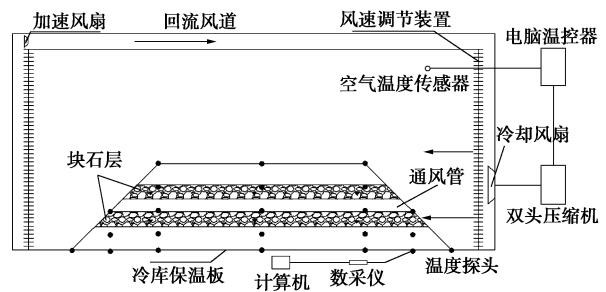


图1 模型试验箱

Fig. 1 Model chamber

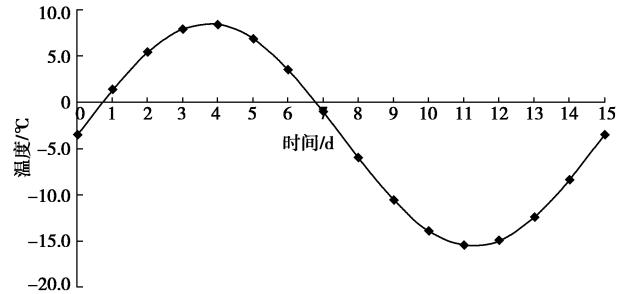


图2 试验温度变化曲线图

Fig. 2 Change curve of test temperature

1.3 试验模型

路基模型底部宽500 cm, 顶部宽260 cm, 路基长度为92 cm, 高度为180 cm。通风管共2根, 长360 cm, 内径10.0 cm, 外径11.8 cm, 位于路基块石层中部, 块石层厚80 cm, 为便于后期对比分析, 对复合路基模型及块石路基模型温度、风速均进行监测, 整个模型及测点布置如图3所示。

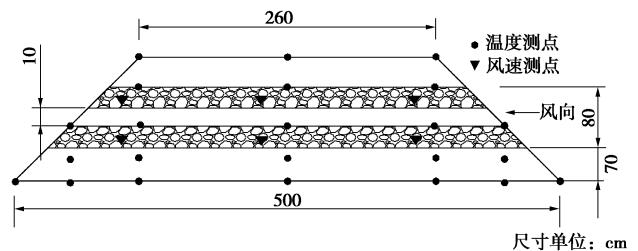


图3 试验路基模型及监测点

Fig. 3 Test model and monitoring points

1.4 试验材料

(1) 路基填土

路基填土采用防冻胀的砂砾, 其颗粒级配良好,

不均匀系数 $C_u > 5$, 粒径大于 2 mm 的颗粒含量在 35%与 42%之间, 压实后的含水率为 8.6%, 密度为 2.02 g/cm^3 , 干密度为 1.86 g/cm^3 。路基填土的热力学参数: $C_u = 2.23 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$, $C_f = 1.86 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$, $\lambda_u = 1.48 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $\lambda_f = 1.71 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $L = 2.2 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$ 。其中, C , λ 分别表示体积热容和导热系数, 下标 u, f 分别表示非冻结状态和冻结状态, L 表示相变潜热。

(2) 块石

路基所用块石为花岗岩, 粒径 $10\sim25 \text{ cm}$, 主要集中在 20 cm 附近, 孔隙率约 40%。

(3) 透壁通风管

通风管采用 PVC 管, 内径为 10 cm , 长 380 cm , 位于路基块石层中部, 管间距为 2 倍管径。

2 模型试验结果分析

2.1 块石层内的空气流速

气冷路基对多年冻土的冷却效果主要来源于块石层及通风管内的空气对流换热, 因此将单一块石路基模型和通风管-块石复合路基模型的块石孔隙间风速变化曲线进行了对比分析, 如图 4 所示。图中表明在单一块石路基模型中, 块石层内部空气流速约 0.25 m/s , 通风管-块石复合路基模型中, 管道内部风速约 2.3 m/s , 在管道的疏导及强化作用下, 块石层内风速为 0.3 m/s , 比单纯块石层内空气流速提高约 20%, 表明在通风管的疏导作用下, 块石层孔隙中的空气流动得到了明显加强, 通风管-块石复合路基能够起到强化路基体对流的效果。实际应用路段一般地处高原地区, 低温期长且风速较大, 这种强化对流作用效果将会更加显著。

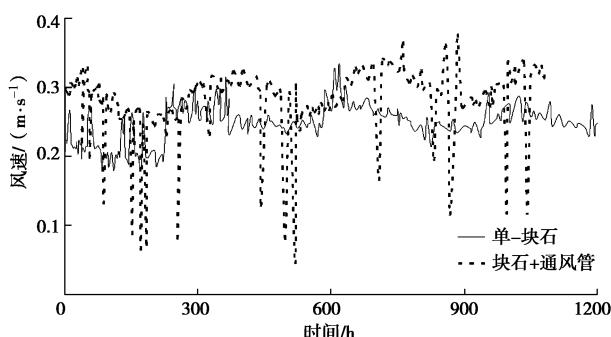


图 4 块石孔隙间风速

Fig. 4 Wind velocities in crashed rock

2.2 模型底部温度

模型底部的温度对保护冻土路基的稳定十分关键, 图 5 为单一块石路基与通风管-块石路基模型底部温度变化对比状况。图中表明在块石层冷却效果的作用下, 单一块石路基模型底部温度在第一个试验周期

后降低至 0°C , 之后两个周期分别降低至 -1.3°C 和 -1.5°C 。在通风管-块石复合路基模型底部, 温度降低更为明显, 第三周期最低温度已降至 -3.3°C , 该温度是同期单一块石路基模型的 2.2 倍, 表明通风管-块石复合路基能更加有效地冷却多年冻土层, 增加路基的热稳定性。

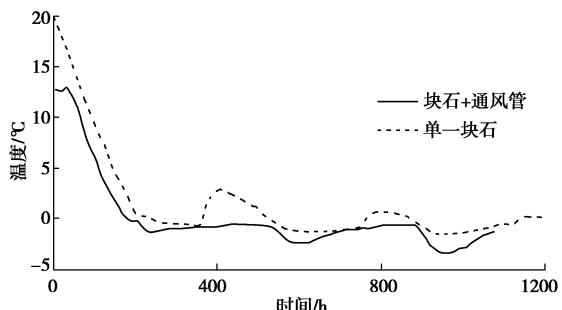
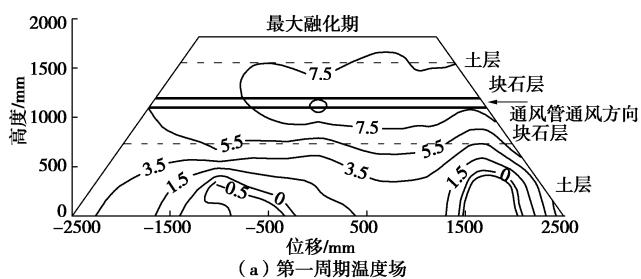
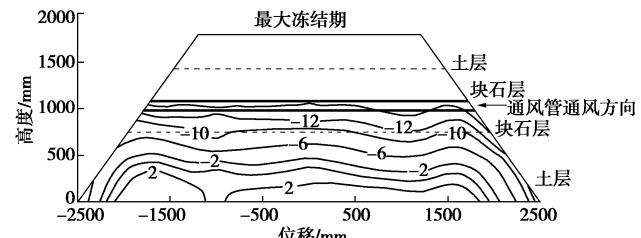


图 5 模型底部温度变化曲线

Fig. 5 Temperature curves at bottom of model

2.3 模型整体温度场

图 6 为通风管-块石复合路基在 3 个冻融周期中温度场的变化图, 从图中可以看出随着冻融周期的增加, 路基冻结深度逐渐增加, 融化期的冻结核范围逐渐扩展且温度趋于降低。图 6 (a) 中最低温度时路基冻深发展至底板上 $30\sim40 \text{ cm}$ 处, 图 6 (b) 中最低温度时路基冻深已发展至底板上 $10\sim30 \text{ cm}$ 处, 图 6 (c) 中最低温度时路基冻深发展至底板上 $10\sim25 \text{ cm}$ 处, 且底板处左侧部分区域已经完全冻结。表明透壁式通风管与块石复合路基能够起到储存冷量、降低下伏土体地温的作用。此外, 从 3 个冻融循环总体上分析, 由于透壁式通风管对块石层孔隙中空气流动的促进, 块石层中左右侧的温度差异导致了路基温度场的不对称, 这主要是试验风向为自右向左, 但这种温度状况反过来也说明了通风管对块石层具有良好的强化对流效果。



(a) 第一周期温度场

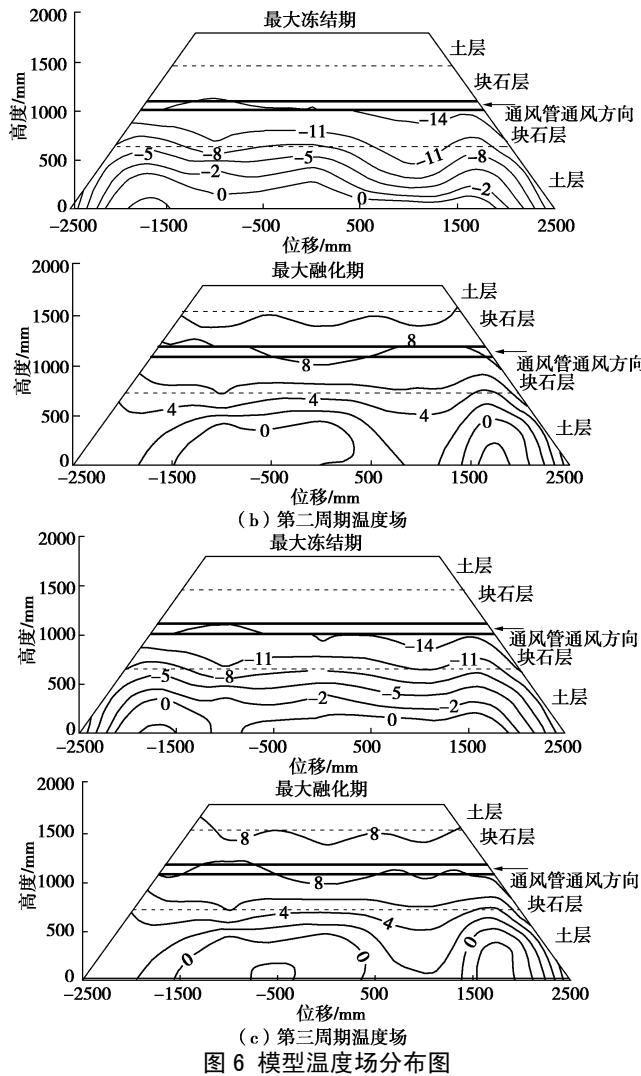


Fig. 6 Distribution of temperature fields

3 复合路基的数值模拟

3.1 控制微分方程

(1) 透壁通风管与块石复合路基的多孔介质质量守恒微分方程, 对于气相:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad . \quad (2)$$

对于固相来说, 由于 $\rho_s = \text{const}$, $U_s = V_s = W_s = 0$, 故无需列出固相质量守恒方程。

(2) 纯流体区域流动控制方程——N-S 方程

对于三维稳态流动, 反映惯性力、压力及黏性力平衡的奈维-斯托克斯方程:

$$\left. \begin{aligned} U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} &= F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right), \\ U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} &= F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right), \\ U \frac{\partial W}{\partial x} + V \frac{\partial W}{\partial y} + W \frac{\partial W}{\partial z} &= F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \eta \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, ρ 为流体密度, F_x , F_y 和 F_z 分别为体积力, p 为压力, U , V 和 W 分别为 x , y 和 z 方向的气体平均化流速, η 为气体的动黏滞系数。

(3) 多孔介质区域流动控制方程——Brinkman 模型

多孔介质宏观流动的动量方程采用 Brinkman 模型:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\eta}{k} U &= F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\eta}{k} V &= F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\eta}{k} W &= F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \eta \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, k 为渗透系数, 其他符号同上。

式(4)可以很好地满足多孔介质流动区域和纯流体区域交界面处的无滑移条件。

(4) 能量守恒微分方程

假设通风管壁与路基土体的接触面温度是连续的, 通风管内部传热和路基土体的传热依据各自的控制方程进行。考虑对流换热特点, 通风管内部的二维传热的控制方程如下:

$$\begin{aligned} C_L \frac{\partial T}{\partial t} &= K_L \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \\ &C_L \left(U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} + W \frac{\partial T}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

式中, C_L 为气体的体积热容, K_L 为气体的导热系数, T 为温度, t 为时间, 其他同上。

对于多孔介质区域, 考虑空气影响的传热控制方程为

$$\begin{aligned} C_{eq} \frac{\partial T}{\partial t} &= K_{eq} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \\ &C_L \left(U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} + W \frac{\partial T}{\partial z} \right) , \end{aligned} \quad (6)$$

式中, C_{eq} 为多孔介质的等效体积热容 (考虑固体和气体的综合影响)。 K_{eq} 为等效导热系数 (考虑固体和气体的综合影响), 其他符号同上。

对于非通风管和块石区域, 因没有气体的影响, 传热的控制方程为

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) , \quad (7)$$

式中, C 为冻土的体积热容, K 为冻土的导热系数, 其他符号同上。

寒区路基的冻害问题主要由土体的冻胀、融沉作用造成。土体冻胀、融沉过程存在相变问题, 对于含

表 1 土体计算参数

Table 1 Soil parameters

土性	λ_f ($J \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1} \cdot s^{-1}$)	C_f ($KJ \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)	λ_u ($J \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1} \cdot s^{-1}$)	C_u ($KJ \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)	γ ($kg \cdot m^{-3}$)
填土	2.200	0.857	1.680	1.103	1870
块石	0.378	0.508	0.378	0.508	2000
粉质黏土	1.224	1.070	0.883	1.370	1708
泥岩	2.033	0.785	1.662	0.890	1962
混凝土管	1.770	1.000	1.770	1.000	2400

有相变的热传导问题, 本文采用显热容法处理。考虑相变潜热的影响, 冻土的体积热容 C 和导热系数 K 分别表示为

$$C = \begin{cases} C_f(T) & (T < (T_f - \Delta T)) \\ \frac{L}{2\Delta T} + \frac{C_f + C_u}{2} & ((T_f - \Delta T) \leq T \leq (T_f + \Delta T)) \\ C_u(T) & (T > (T_f + \Delta T)) \end{cases}, \quad (8)$$

$$K = \begin{cases} K_f(T) & (T < (T_f - \Delta T)) \\ K_f + \frac{K_u - K_f}{2\Delta T} [T - (T_f - \Delta T)] & ((T_f - \Delta T) \leq T \leq (T_f + \Delta T)), \\ K_u(T) & (T > (T_f + \Delta T)) \end{cases}, \quad (9)$$

式中, 下标 u 表示未冻区, 下标 f 表示正冻区, ΔT 为发生相变的温度区间, L 为冰水的相变潜热, 其它符号同上。

本文采用 Galerkin 法对上述方程进行有限元方程的推导, 方程从略。

3.2 几何模型

路堤的路面宽度为 10 m, 高为 3 m, 路堤边坡为 1:1.5, 路堤为对称结构, 通风管距地表面 0.25 m, 直径为 0.4 m, 通风管净间距为 2 m, 通风管上下两侧开孔; 通风管布设于块石层中, 块石总厚度为 1.2 m, 下侧块石厚度为 0.25 m, 其它都为普通填土。计算地基的深度为 40 m, 计算模型在路堤走向上的厚度为 2.4 m, 路基外围两侧计算宽度均为 30 m。采用三角形单元, 通风管及块石区域单元细化, 计算区域的单元共 223406 个, 节点共 112114 个。

计算模型示意图见图 7 所示。

3.3 材料的物理参数

高原的空气密度为 0.641 kg/m^3 , 传热系数为 $0.025 \text{ J/(m} \cdot {^\circ}\text{C} \cdot \text{s)}$, 比热为 $1.004 \text{ KJ/(kg} \cdot {^\circ}\text{C)}$, 动黏滞系数 η 为 $1.75 \times 10^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$, 相变潜热为 334.56 kJ/kg , ΔT 为 0.3°C 。土层从上到下依次为 1.8 m 厚填土, 1.2 m 厚块石(孔隙比为 0.4, 渗透系数为 $3.48 \times 10^{-6} \text{ m}^2$), 6.6 m 厚粉质黏土、泥岩, 各种材料的土体参数见表 1。

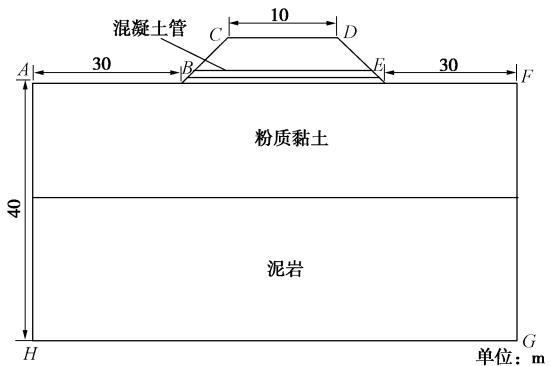


图 7 路基计算模型剖面示意图

Fig. 7 Profile of embankment

3.4 初始条件

路基的初始温度取天然地基的实测值, 见表 2 所示。

表 2 路基的初始温度

Table 2 Initial temperatures of embankment

深度/m	温度/°C	深度/m	温度/°C
0	8.99	-6	-0.92
-1	4.73	-7	-0.95
-2	-0.92	-8	-0.96
-3	-0.22	-9	-0.98
-4	-0.68	-10~40	-1.00
-5	-0.92		

3.5 边界条件

透壁通风管入口风速为 4 m/s, 出口边界的压力为大气压力, 块石层边界没有风压作用。为消除夏季热量的影响, 通风管管口预设风门, 夏季关闭, 冬天开放。风门关闭时, 假设整个透壁通风管多孔介质系统中风速为 0。模型底边界的热流密度为 0.06 W/m^2 , 其余为绝热边界。路基所在区域年平均温度为 -3.6°C , 气温年平均差为 24°C 。根据附面层理论假定路基模型的边界条件表示如下^[15]:

天然地表 AB 和 EF 的温度变化为

$$T = -0.3 + 12 \sin\left(\frac{2\pi}{8760 \times 3600} t + \frac{\pi}{2}\right); \quad (10)$$

路堤斜坡 BC 和 DE 的温度变化规律为

$$T = 0.7 + 13 \sin\left(\frac{2\pi}{8760 \times 3600} t + \frac{\pi}{2}\right); \quad (11)$$

路基中面 CD 的温度为

$$T = 1.9 + 14 \sin\left(\frac{2\pi}{8760 \times 3600} t + \frac{\pi}{2}\right); \quad (12)$$

空气(风门打开时通风管管口)的温度为

$$T = -3.6 + 12 \sin\left(\frac{2\pi}{8760 \times 3600} t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (13)$$

3.6 数值计算结果分析

(1) 模型合理性验证

为了验证数值计算结果的合理性, 采用通风管一块石路基模型底部实测地温数据与数值计算结果进行对比分析, 图 8 为实测地温值与数值模拟结果对比图。

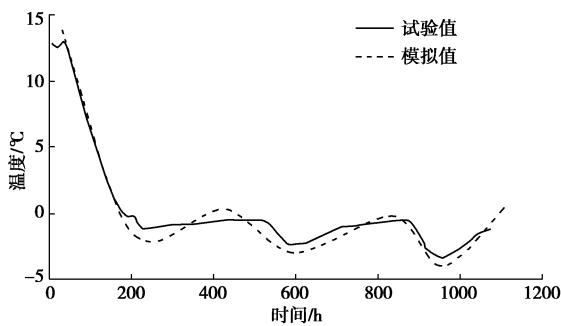


图 8 数值模拟合理性验证

Fig. 8 Rationality verification of numerical model

图 8 表明, 模拟值与模型实测值地温变化特征总体接近, 表明数值计算模型的计算方法、材料参数及边界条件合理。

(2) 管内空气流速

路基多孔介质内空气流速场的分布与通风路基的降温效果密切相关, 图 9 为复合路基沿路基中部竖直剖面空气流速分布。从图中可知, 空气流速在路基内的分布可划分为通风管及多孔介质两个区域, 通风管区域内空气流速最大, 中心位置达到最大值 4.06 m/s , 在管壁处流速出现跃变陡降; 块石介质区域流速的数量级为 10^{-1} , 与室内试验的结果一致; 路基介质内流速随着远离通风管呈现递减趋势, 离通风管越近递减速度越快, 而在同一介质区域里, 空气流速变化不大。

(3) 复合路基温度场

图 10 为复合路基施工完成后五年内的温度场变化过程。图中表明, 复合路基施工后第一年温度场已经发生变化, 路基下零温度线开始提高, 路基温度等值线分布均匀对称, 第三年路基下零温度线上升明显, 温度等值线分布有些起伏, 第五年, 路基下零温度线分布没有明显变化, 但在路基下 $3\sim9 \text{ m}$ 处, 出现了低于 -2°C 的低温分布区, 较天然地表下该位置处的温度明显降低, 并且该低温区出现逐年扩大趋势, 说明通风管一块石复合路基降温效果逐年累积, 路基热

稳定性不断增强。

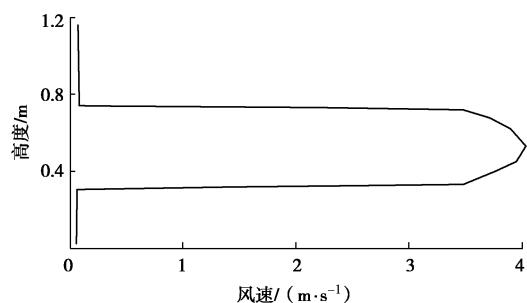
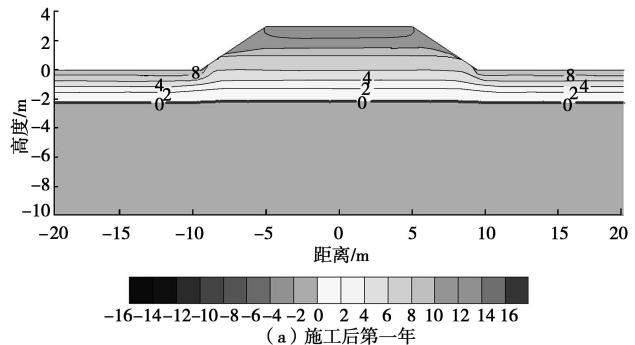
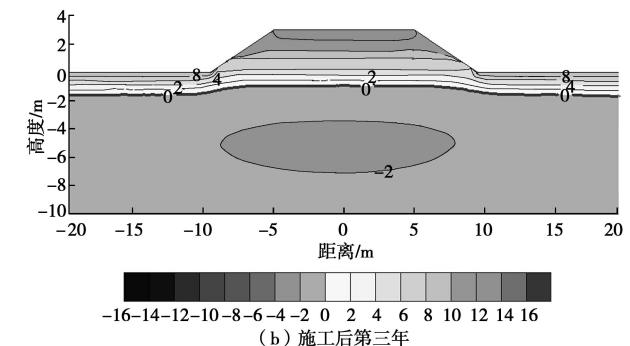


图 9 复合路基沿路基中部剖面空气流速

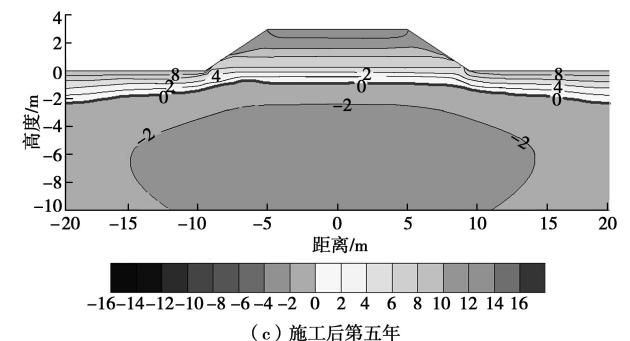
Fig. 9 Air flow rate along middle of embankment



(a) 施工后第一年



(b) 施工后第三年



(c) 施工后第五年

图 10 复合路基温度场变化过程

Fig. 10 Chang process of temperature fields in composite embankment

4 结 论

本文通过室内试验对通风管-块石复合路基的降

温效果进行了模拟分析，并建立数值模型对复合路基的长期应用效果进行了预测，研究得出如下结论：

(1) 单一块石路基模型在风速接近 4 m/s 的条件下，块石层孔隙中空气流速为 0.25 m/s，在复合路基模型试验中，管道内部风速约 2.3 m/s，在管道的疏导及强化作用下，块石层内风速达到 0.3 m/s，高于单一块石层内空气流速，表明复合路基降温效果优于单一块石路基。

(2) 模型试验是在底板和侧向都为隔热边界的条件下进行的，这与现场实际情况有些差异，但从试验结果来看，经多次冻融循环后，通风管-块石复合路基对其下冻土可以起到保护甚至主动降温的作用，可作为今后工程中一种有效保护冻土的路基结构形式。

(3) 数值计算结果表明块石层内的空气流速数量级为 10^{-1} ，与室内试验的结果一致，复合路基下冻土上限抬升量为 0.5~1.1 m，低温冻土区域逐年增大，进一步说明复合路基对多年冻土的长期降温效果十分显著。

参考文献：

- [1] 刘永智, 吴青柏, 张建明, 等. 青藏高原多年冻土地区公路路基变形[J]. 冰川冻土, 2002, 24(1): 10~15. (LIU Yong-zhi, WU Qing-bai, ZHANG Jian-ming, et al. Deformation of highway roadbed in permafrost regions of the Tibetan plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(1): 10~15. (in Chinese))
- [2] 原喜忠. 大兴安岭北部多年冻土地区路基沉陷研究[J]. 冰川冻土, 1999, 21(2): 155~158. (YUAN Xi-zhong. Study on thaw settlement of subgrade in permafrost regions in the northern part of da hinggan mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1999, 21(2): 155~158. (in Chinese))
- [3] LAI Y M, GUO H X, DONG Y H. Laboratory investigation on the cooling effect of the embankment with L - shaped thermosyphon and crushed rock revetment in permafrost regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 58(3): 143~150.
- [4] ZHANG M Y, LAI Y M, DONG Y H. Numerical study on temperature characteristics of expressway embankment with crushed rock revetment and ventilated ducts in warm permafrost regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 59(1): 19~24.
- [5] CHENG G D, SUN Z Z, NIU F J. Application of the roadbed cooling approach in Qinghai-Tibet Railway engineering[J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 53(3): 241~258.
- [6] 汪双杰, 黄晓明, 陈建兵, 等. 无动力热棒冷却冻土路基研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(3): 1~4. (WANG Shuang-jie, HUANG Xiao-ming, CHEN Jian-bing, et al. Research on frozen soil subgrade cooling by non-power heat pipe[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(3): 1~4. (in Chinese))
- [7] 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, 22(增刊 2): 2652~2658. (NIU Fu-jun, MA Wei, LAI Yuan-ming. Preliminary analysis on engineering effect of ventilation embankment at beiluhe testing section of QingHai-Tibet railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(S2): 2652~2658. (in Chinese))
- [8] 喻文兵, 赖远明, 张学富, 等. 多年冻土区道碴、通风管结构铁路路基室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 436~440. (YU Wen-bing, LAI Yuan-ming, ZHANG Xue-fu, et al. Laboratory experiment study on the ballast and ventilated railway embankment in permafrost regions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(4): 436~440. (in Chinese))
- [9] 胡明鉴, 汪稔, 葛修润, 等. 透壁通风管对青藏铁路路基的冷却效果试验初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4195~4199. (HU Ming-jian, WANG Ren, GE Xiu-run, et al. An experimental study on cooling effect of the perforated ventilation pipes on Qinghai-Tibet railway roadbed[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4195~4199. (in Chinese))
- [10] 孙斌祥, 杨丽君, 王伟, 等. 水平透壁通风管增强封闭碎石路堤降温的累积效应[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(2): 289~295. (SUN Bin-xiang, YANG Li-jun, WANG Wei, et al. Accumulative effect of cooling capability in air-tight crushed rock layer with horizontally embedded perforated ventilation pipes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(2): 289~295. (in Chinese))
- [11] 何平, 程国栋, 马巍, 等. 块石通风性能实验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(6): 789~792. (HE Ping, CHENG Guo-dong, MA Wei, et al. Researches on ventilation properties of block stones layer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(6): 789~792. (in Chinese))
- [12] 吴青柏, 赵世运, 马巍, 等. 青藏铁路块石路基结构的冷却效果监测分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(12): 1386

- 1390. (WU Qing-bai, ZHAO Shi-yun, MA Wei, et al. Monitoring and analysis of cooling effect of block-stone embankment for Qinghai-Tibet Railway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(12): 1386 - 1390. (in Chinese))
- [13] 章金钊, 孙斌祥, 刘琦, 等. 透壁通风管路堤土体蒸发降温的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1813 - 1818. (ZHANG Jin-zhao, SUN Bin-xiang, LIU Qi, et al. Laboratory investigation on water evaporative cooling effect in embankment with perforated ventilation pipe[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1813 - 1818. (in Chinese))
- [14] 张坤, 李东庆, 童刚强. 通风管-块石复合路基降温效
- 果的数值分析[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(1): 35 - 42. (ZHANG Kun, LI Dong-qing, TONG Gang-qiang. Numerical analysis of the cooling effect of an embankment with ventilated ducts and closed block stones[J]. Journal of China University of Mining & technology, 2011, 40(1): 35 - 42. (in Chinese))
- [15] 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))

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创刊于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学的研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先利用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 (www.cgejournal.com) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 25 元, 全年 300 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)