

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2019.04.005

# 路基宽度对多年冻土区透壁式通风管-块石复合路基降温效应的影响

李越<sup>1,2</sup>, 孙红<sup>1,2</sup>, 葛修润<sup>1</sup>, 朱东鹏<sup>2</sup>, 陈建兵<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240;

2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

**摘要:**多年冻土区公路路基大多属高温冻土、极易受工程的影响产生融化下沉,多年冻土区宽幅公路聚热效应尤明显,路基宽度的增加会导致路基病害加重,路基稳定性问题已成为青藏道路工程建设亟待解决的关键问题。透壁式通风管-块石复合路基是一种主动降温措施。为研究其在宽幅公路的冷却效果及路基宽度的变化对路基降温效应的影响,基于块石层和通风管中空气的流速场和多孔介质传热的温度场的特征,采用两相物理场耦合关系,在考虑全球气候变暖以及路基两侧阴阳坡的条件下对宽幅公路透壁式通风管-块石复合路基的温度场进行数值模拟,分析路基施工后10年间的降温效应。研究结果表明:相较于素土路基,透壁式通风管-块石复合路基在路基下侧形成稳定冰核,对宽幅公路的冷却效果更为显著,宽度对路基的流速场和温度场影响明显。路基宽度增大,透壁式通风管风速减小,块石层风速增加,冰核面积及其下移深度增长速率变小,路基稳定时间加长,透壁式通风管-块石复合路基的降温效应逐渐减弱。当路基宽度大于32 m时,块石层风速增长速率明显放缓,低温区域面积增长速率及边缘深度下移增长速率下降,路基稳定时间延长,零温线上升高度减小。

**关键词:**道路工程;降温效应;数值分析;复合路基;宽幅公路;透壁式通风管

中图分类号:U416.1<sup>+</sup>68

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2019)04-0028-08

## Cooling Effect of Perforated Ventilation Duct-crashed Rock Composite Roadbed in Permafrost Region Influenced by Roadbed Width

LI Yue<sup>1,2</sup>, SUN Hong<sup>1,2</sup>, GE Xiu-run<sup>1</sup>, ZHU Dong-peng<sup>2</sup>, CHEN Jian-bing<sup>2</sup>

(1. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710075, China)

**Abstract:** The roadbeds in permafrost regions are mostly high-temperature frozen soils, which are highly susceptible to melting by engineering. The wide-area highways in permafrost regions have obvious heat-collecting effect, the increase of roadbed width will lead to aggravation of roadbed diseases. The stability of subgrade has become a key problem to be solved in the construction of Qinghai-Tibet road project. The composite roadbed which is composed of perforated ventilation ducts and crushed-rock layers is an active cooling measure. To study the cooling effect of wide highway and the influence of roadbed width on the cooling effect of roadbed, based on the characteristics of velocity field of air flow in the crushed-rock layer and the ventilation duct as well as temperature field in heat transfer of porous media, adopting the two-phase physical field coupling relations, the numerical analysis on the temperature field of the composite roadbed with ventilated crashed rock layer of wide highway is carried out under sunny-shady slope boundaries and

收稿日期:2018-01-22

基金项目:国家自然科学基金项目(41572255)

作者简介:李越(1992-),女,重庆人,硕士。(liyue-1992@sjtu.edu.cn)

global warming condition to analyze the cooling effect of the roadbed after 10 years of construction. The result shows that (1) compared with the plain soil roadbed, the abovementioned composite roadbed forms a stable ice core on the lower side of the roadbed, the cooling effect on the wide highway is more significant, and the width has an obvious effect on the wind speed field and temperature field of the roadbed; (2) as the width increases, the wind speed in perforated ventilation duct decreases, the wind speed in crushed-rock layer increases, the growth rates of ice core area and its depth become slower, the stabilization time of roadbed becomes longer, and the cooling effect of the composite roadbed is gradually weakened; (3) when the roadbed width is greater than 32 m, the wind speed growth rate of crushed-rock layer is obviously slowed down, the growth rates of the low temperature area and the edge depth decrease, the roadbed stabilization time is prolonged, and the 0 °C line rise height is reduced.

**Key words:** road engineering; cooling effect; numerical analysis; composite roadbed; wide highway; perforated ventilation duct

## 0 引言

青藏高原的多年冻土大多属高温冻土、极易受工程的影响产生融化下沉<sup>[1-2]</sup>。多年冻土路基稳定性问题已成为青藏道路工程建设亟待解决的关键问题<sup>[3]</sup>。国内一些学者近年来在保护冻土路基方面做了较多研究,例如:采用通风管路基、块石路基,路基侧设置热棒及设置旱桥跨越冻土等<sup>[4-7]</sup>。随着国家对西部地区的大力开发,在青藏高原修建高等级公路具有重要的经济效益、社会效益,高等级公路的路面宽度一般大于 20 m,幅面远宽于普通公路。尽管用于普通路基降温方法的调温效果已被实际工程所证实,但宽幅公路路基的工程条件与普通路基存在一定差异,上述降温措施一般不能直接应用于宽幅公路。

路基宽度是多年冻土区路基温度场改变的关键因素之一<sup>[8]</sup>。路基宽度增加使冻土路基融深增加,冻土上限降低<sup>[9]</sup>。宽幅路基基底吸热能力大于基底放热,导致基底每年都要吸收一定量的热量<sup>[10]</sup>,路基宽度增加,净吸收热量相应增加,这对多年冻土地区修建宽幅的高等级公路是极为不利的<sup>[11]</sup>。已有学者在宽幅公路路基的冷却措施研究方面进行过一些探索,例如采用 L-型热棒和碎石护坡及绝缘层的组合结构作为宽路堤的降温系统<sup>[12]</sup>,设计碎石护坡及通风管组合的路堤<sup>[13]</sup>。研究表明,这两种方案都能保证路堤具有较好的热稳定性。本文研究的透壁式通风管与块石组合的复合路基是一种主动保护冻土的措施,利用管壁透风及块石的大孔隙率,充分发挥多孔介质与空气的热对流与热传导,达到主动降温目的,是一种通风效果加强的复合路基<sup>[14-16]</sup>。目前,透壁式通风管-块石复合路基还没有推广应

用于宽幅公路上,有必要研究其在宽幅公路上的降温效应及路基宽度对路基温度场的影响。

本研究对宽幅公路透壁式通风管-块石复合路基温度场和流速场的两相物理场进行数值分析,研究路基温度场的变化规律、降温效果及温度调控规律以及路基宽度对复合路基降温效应的影响,期望对工程实际有指导意义。

## 1 数值模型及求解方法

### 1.1 控制方程及求解方法

透壁式通风管-块石复合路基分为 3 个部分,分别为上部填土层、透壁式通风管及下部块石层,见图 1。空气的流动分为两个区域:①为流体在多孔介质块石层中流动的区域,采用 Brinkman 方程,如式(1)所示;②为透壁式通风管纯流体的流动区域,采用简化的 N-S 方程,如式(2)所示。多孔介质区域的连续性方程采用质量守恒微分方程,气相质量守恒微分方程如式(3)所示。对于固相来说,由于  $\rho_s$  为常数,  $U_s = V_s = 0$ ,故无需列出固相质量守恒方程。

$$\begin{cases} \frac{\eta}{k}U = F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\eta}{k}V = F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \\ U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \end{cases}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

式中,  $\rho$  为流体密度;  $F_x$  和  $F_y$  分别为  $x$  和  $y$  方向的

体积力;  $p$  为压力;  $U$  和  $V$  分别为  $x$  和  $y$  方向的气体平均化流速;  $\eta$  为气体的动黏滞系数;  $k$  为渗透系数。

透壁式通风管和路基土体接触面的温度是连续的, 通风管内部传热和路基土体的传热依据各自的能量守恒微分方程进行, 对冻土的相变采用显热容法处理<sup>[14]</sup>。采用伽辽金法对上述方程进行有限元方程的推导。

## 1.2 路基几何模型

路堤为对称结构, 路基高度为 3 m, 坡度 1:1.5, 透壁通风管直径为 0.4 m, 埋设高度为 0.4 m, 管壁下侧开孔, 通风管下侧铺设 0.4 m 厚块石层, 通风管上侧为普通填土。为研究路基调温效果与路基宽度的关联性, 参考《公路工程技术标准》(JTG B01—2014) 的一般值规定<sup>[17]</sup>, 设定 7 个路基顶部宽度, 分别为 10.0, 24.5, 26.0, 32.0, 34.5, 40.5, 45.0 m。路基两侧地基计算宽度为路基顶部宽度的 5 倍。地基的计算深度为 40 m。土层信息和 24.5 m 透壁式通风管—块石复合路基计算区域示意图见图 1。

表 1 模型计算参数

Tab. 1 Calculation parameters of model

| 土性   | $\lambda_f / [J \cdot (m \cdot ^\circ C \cdot s)^{-1}]$ | $C_f / [kJ \cdot (kg \cdot ^\circ C)]$ | $\lambda_a / [J \cdot (m \cdot ^\circ C \cdot s)^{-1}]$ | $C_a / [kJ \cdot (kg \cdot ^\circ C)^{-1}]$ | $\gamma / (kg \cdot m^{-3})$ |
|------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------|
| 填土   | 2.200                                                   | 0.857                                  | 1.680                                                   | 1.103                                       | 1 870                        |
| 块石   | 0.378                                                   | 0.508                                  | 0.378                                                   | 0.508                                       | 2 000                        |
| 粉质黏土 | 1.224                                                   | 1.070                                  | 0.883                                                   | 1.370                                       | 1 708                        |
| 泥岩   | 2.033                                                   | 0.785                                  | 1.662                                                   | 0.890                                       | 1 962                        |
| 混凝土管 | 1.770                                                   | 1.000                                  | 1.770                                                   | 1.000                                       | 2 400                        |

## 1.4 初始条件

路基的初始温度根据天然地基的实测值, 现场实测地基温度不连续, 且存在实测误差, 所以在本模型中, 采用测得路基的初始温度, 采用瞬态计算, 计算总时间为 50 a, 将地基温度恢复成天然状态。

## 1.5 边界条件

透壁式通风管入口风速为 4 m/s<sup>[4]</sup>, 块石层边界考虑风压的作用<sup>[18]</sup>, 入口处风压 75 436 Pa。透壁式通风管与块石层出口处风压均为大气压力 (青藏高原为 75 430 Pa)。管口预设风门, 夏季 5—10 月份关闭, 冬季 11—4 月份开放。风门关闭时, 假设整个透壁式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<sup>2</sup>, 侧面 AH, FG 为绝热边界。路基所在区域, 年平均温度 -3.6 °C, 气温年平均差 24 °C。考虑到全球及局部气候变化和各地增温率不同等因素, 又该地区位于多年冻土区, 故取平均增温率为 0.03 °C/a。同时考虑阴阳坡, 由附面层

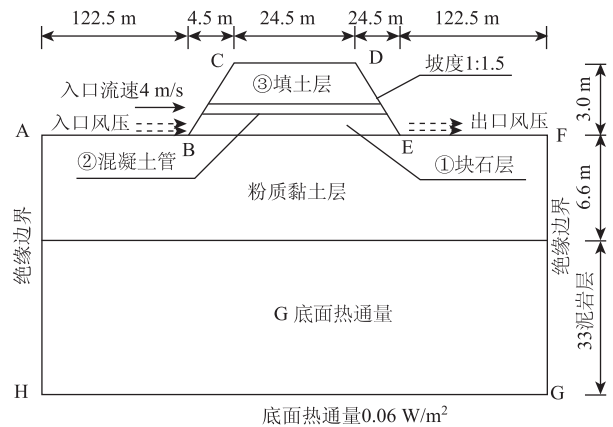


图 1 24.5 m 复合路基计算区域

Fig. 1 Calculation area of 24.5 m composite roadbed

## 1.3 材料物理参数

高原空气密度为 0.641 kg/m<sup>3</sup>, 传热系数为 0.025 J/(m · °C · s), 比热容 1.004 kJ/(kg · °C), 动黏滞系数  $\eta$  为  $1.75 \times 10^{-5}$  kg/(m · s), 相变潜热为 334.56 kJ/kg,  $\Delta T$  为 0.3 °C。块石的孔隙比为 0.4, 渗透系数为  $3.48 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>, 模型计算参数见表 1。

理论假定路基模型的边界条件分别为:

天然地表 AB 和 EF 的温度变化按下式计算:

$$T = -0.3 + 12 \sin\left(\frac{2\pi}{8760 \times 3600}t + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{0.03}{8760 \times 3600}t_0 \quad (4)$$

路堤斜坡阳坡侧 BC 的温度变化规律为:

$$T = -1.9 + 13 \sin\left(\frac{2\pi}{8760 \times 3600}t + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{0.03}{8760 \times 3600}t_0 \quad (5)$$

路堤斜坡阴坡侧 DE 的温度变化规律为:

$$T = -3.7 + 13 \sin\left(\frac{2\pi}{8760 \times 3600}t + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{0.03}{8760 \times 3600}t_0 \quad (6)$$

路基顶面 CD 的温度为:

$$T = 1.9 +$$

$$14\sin\left(\frac{2\pi}{8760 \times 3600}t + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{0.03}{8760 \times 3600}t。(7)$$

空气(风门打开透壁式通风管管口)的温度为:

$$T = -3.6 +$$

$$12\sin\left(\frac{2\pi}{8760 \times 3600}t + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{0.03}{8760 \times 3600}t。(8)$$

## 1.6 网格剖分

建模初步完成后,对数值模型进行网格划分。使用三角形单元划分,并且着重对透壁式通风管、管壁和块石层以及浅层地基等做加密处理。以24.5 m路基为案例分析,整个模型计算区域的单元共364 898个,其中透壁式通风管、块石层区域单元101 390个,最小单元尺寸0.002 m,最大单元尺寸0.03 m;填土和路基粉质黏土区域单元66 656个。

## 2 数值模拟结果分析

建立宽幅公路透壁式通风管-块石合路基及素土路基模型后,对复合路基的流速场、温度场以及素土路基的温度场进行数值模拟,得到以下结果。

### 2.1 宽幅公路透壁式通风管-块石复合路基的流速场分布特征

图2为24.5 m透壁式通风管-块石复合路基中心剖面的流速场分布图。空气流速在通风管区域内最大,在通风管中心线上侧0.007 m处达到最大值5.068 m/s。管壁处流速出现跃变陡降,块石层区域空气流速很小,数量级为 $10^{-1}$ 。在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。

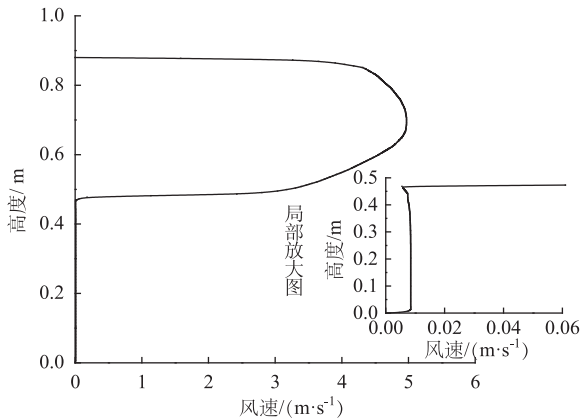


图2 24.5 m路基中心剖面的流速场分布图

Fig. 2 Air flow velocity field distribution at center section of 24.5 m roadbed

### 2.2 宽幅公路透壁式通风管-块石复合路基的聚热效应

素土路基因铺设高温沥青路面导致路基下部出现热核。图3为24.5 m素土路基高温期温度场。冻土初始天然上限为-1.772 m。素土路基吸收的热量向下部地基传递,导致施工后第1年左右坡脚下的零温线深度分别下移到-3.577 m和-3.330 m,左右路肩下的零温度线及路基中心下的零温线分别下移到-4.804 m、-4.766 m、-5.021 m,热核面积为164.4 m<sup>2</sup>;施工后第10年路基中部仍存在79.5 m<sup>2</sup>热核区域,必然会带来冻土融沉引发的路基病害。

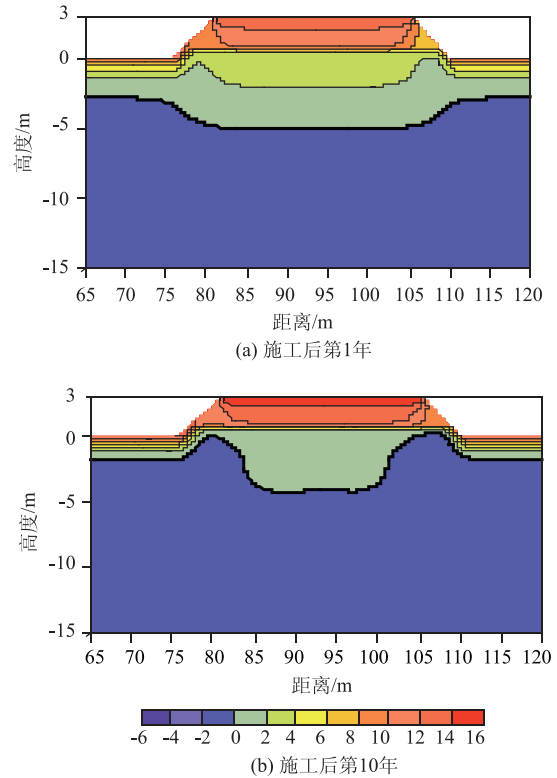


图3 素土路基高温期温度场(单位:℃)

Fig. 3 Temperature field of plain soil roadbed in high temperature period (unit:℃)

### 2.3 宽幅公路透壁式通风管-块石复合路基的调温效应

透壁式通风管-块石复合路基因通风管与块石层通风,路基下部出现稳定冻土核。图4为24.5 m透壁式通风管-块石复合路基高温期温度场。因块石层风速在距进风口水平距离5 m处达到峰值,施工后第1年路基左路肩下出现-2℃冰核。由于路基调温的时间效应,路基中心线下约4 m处仍有12.6 m<sup>2</sup>热核。第1年路基中心下的零温度线提高到0.446 m,左右路肩分别提高到0.527 m和0.495 m,左右坡脚分别为-1.373 m和-1.501 m。

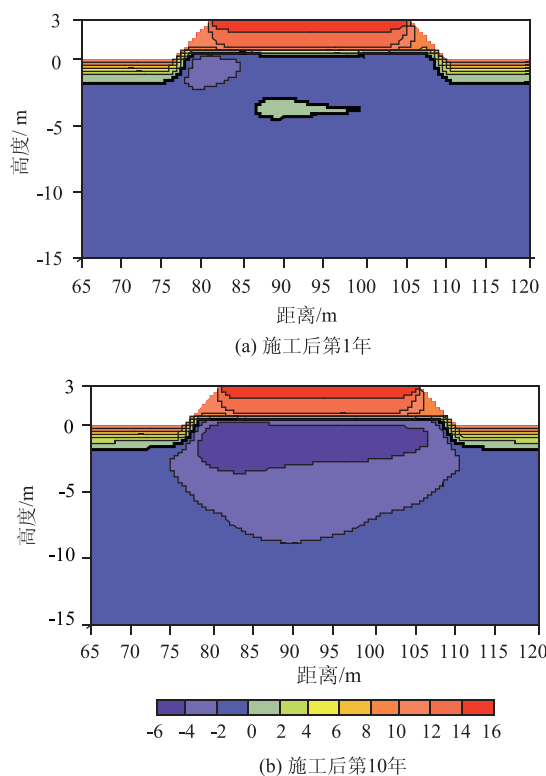


图4 复合路基高温期温度场 (单位:°C)

Fig. 4 Temperature field of composite roadbed in high temperature period (unit:°C)

对比素土路基第1年高温期温度场,透壁式通风管-块石复合路基下部热核明显减小,零温线大幅度提升。随着调温的时间增长,温度场在施工后第6年基本稳定,第10年路基中心的零温度线上移至0.588 m,左右路肩零温线分别为0.594 m和0.596 m,左右坡脚零温线分别为-1.148 m和-1.690 m。地基温度较天然地温明显降低,低温区出现逐年扩大趋势,深度分布较浅,范围较大,温度下降快。

透壁式通风管-块石复合路基使路基中心下部冻土的上限提升了2.36 m,10年内冻土上限一直高于初始上限位置。透壁式通风管在寒季开风门强迫冷空气对流,将外界冷量带入土体中,路基中的低温核向周围逐渐扩散。宽幅公路虽然有较大聚热效应,但由于透壁式通风管的降温作用,路基下侧依旧能形成稳定的冻土核。表明透壁式通风管-块石复合路基对宽幅公路的降温效果十分明显。

## 2.4 宽度对透壁式通风管-块石复合路基降温效应的影响

(1) 宽度对透壁式通风管-块石复合路基降温效应的影响

宽度对透壁式通风管-块石复合路基的流速场影响非常明显。图5为透壁式通风管中心线最大风速与路基宽度关系曲线,图6为块石层风速与路基宽度关系曲线。宽度增加,透壁式通风管中心线流速明显减小,与路基宽度基本呈线性负相关。每加宽10 m,透壁式通风管风速约减小0.117 m/s。块石区域风速与宽度呈现非线性正相关,宽度小于32 m时,每加宽10 m,块石区域风速增大0.001 62 m/s;宽度大于32 m,块石层风速增速变缓,每加宽10 m,增大0.000 35 m/s,32 m为最优宽度。

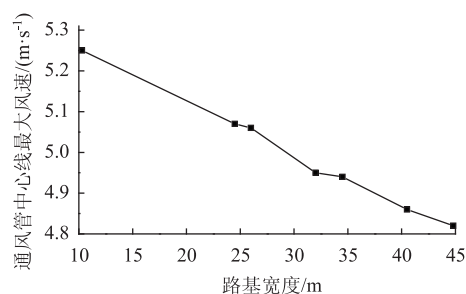


图5 透壁式通风管风速与路基宽度关系曲线

Fig. 5 Curve of wind velocity in perforated ventilation duct vs. roadbed width

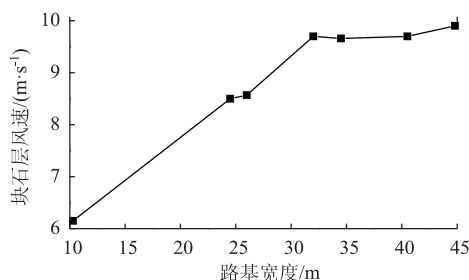


图6 块石层风速与路基宽度关系曲线

Fig. 6 Curve of wind velocity in crashed rock layer vs. roadbed width

不同宽度透壁式通风管-块石复合路基施工后第1年均出现不同程度冰核。宽度小于32 m时,施工后第1年-2℃冰核面积为9~10 m<sup>2</sup>,宽度大于32 m,冰核面积为7~8 m<sup>2</sup>。宽度增加,聚热效应增大,而第1年路基的降温作用刚开始发挥,所以宽度越大,冰核面积越小。

施工后第10年,冰核面积与路基宽度关系见图7。宽度小于32 m的路基-2℃冰核面积与宽度基本呈线性正相关,宽度每增加5 m,冰核面积扩大68 m<sup>2</sup>。宽度大于32 m时,34.5 m路基10年后稳定的冰核较32 m路基略缩小8 m<sup>2</sup>。这是因为路基宽度大于32 m时透壁式通风管管中风速降低,且块石层风速增长速率明显放缓造成的。

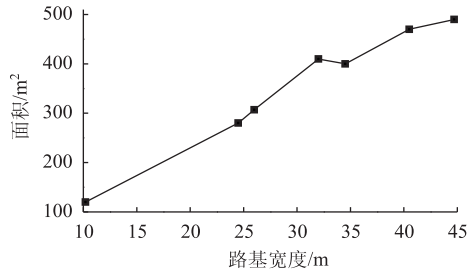


图7 施工后第10年冰核面积与路基宽度关系

Fig. 7 Curve of ice core area vs. roadbed width in the 10th year after construction

施工后第10年,  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 核深度与路基宽度关系见图8。宽度小于32 m时,  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 核下边缘深度与宽度基本呈线性正相关, 宽度每增加5 m, 深度约下降1.18 m。宽度大于32 m时, 冰核不再随宽度增加而下移。

表2为不同宽度宽幅公路复合路基的零温线变化。从某一年开始, 路基中心零温度线的深度与下1年相差不超过3 mm时, 认为从这1年起, 路基温度

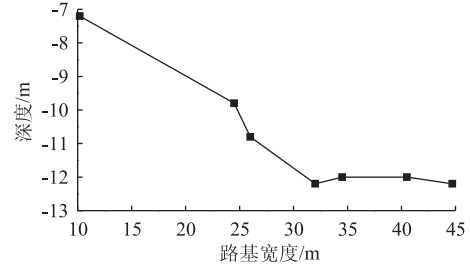


图8 施工后第10年冰核深度与路基宽关系

Fig. 8 Curve of ice core depth and roadbed width in the 10th year after construction

场达到稳定。宽度越大, 路基第1年的零温线上升程度越小, 零温线上升越慢, 零温线稳定时间越晚。24.5 m路基比45 m路基第1年路基中心线下的零温线高0.008 m, 10 m路基稳定时间最短, 需4年即可稳定。宽度24.5, 26, 32 m路基均在第6年达到稳定。宽度34.5, 40.5, 45 m路基在第7年达到稳定。

表2 不同宽度复合路基高温期零温线深度

Tab. 2 Zero temperature line depths of composite roadbed with different widths in high temperature period

| 零温线<br>深度/m | 施工后第1年/m      |             |          | 温度场稳定当年/m     |             |          | 施工后第10年/m     |             |          | 稳定<br>时间/a |
|-------------|---------------|-------------|----------|---------------|-------------|----------|---------------|-------------|----------|------------|
|             | 左/右坡脚         | 左/右路肩       | 路基<br>中心 | 左/右坡脚         | 左/右路肩       | 路基<br>中心 | 左/右坡脚         | 左/右路肩       | 路基<br>中心 |            |
| 10          | -1.373/-0.791 | 0.523/0.620 | 0.597    | -1.168/-0.680 | 0.567/0.693 | 0.675    | -1.150/-0.652 | 0.571/0.693 | 0.680    | 4 a        |
| 24.5        | -1.373/-1.501 | 0.527/0.495 | 0.446    | -1.151/-1.179 | 0.593/0.592 | 0.583    | -1.148/-1.169 | 0.594/0.596 | 0.588    | 6 a        |
| 26          | -1.378/-1.537 | 0.523/0.496 | 0.445    | -1.148/-1.178 | 0.573/0.572 | 0.563    | -1.146/-1.163 | 0.574/0.575 | 0.568    | 6 a        |
| 32          | -1.370/-1.545 | 0.524/0.523 | 0.443    | -1.144/-1.168 | 0.574/0.576 | 0.567    | -1.142/-1.155 | 0.575/0.575 | 0.566    | 6 a        |
| 34.5        | -1.475/-1.542 | 0.522/0.493 | 0.443    | -1.242/-1.175 | 0.573/0.573 | 0.563    | -1.241/-1.170 | 0.574/0.575 | 0.567    | 7 a        |
| 40.5        | -1.377/-1.553 | 0.522/0.493 | 0.443    | -1.148/-1.173 | 0.573/0.574 | 0.563    | -1.148/-1.170 | 0.573/0.575 | 0.567    | 7 a        |
| 45          | -1.370/-1.545 | 0.522/0.492 | 0.438    | -1.143/-1.170 | 0.574/0.574 | 0.563    | -1.147/-1.170 | 0.574/0.575 | 0.566    | 7 a        |

### (2) 宽幅公路透壁式通风管-块石复合路基降温效应随时间的变化规律

路基的温度场随着时间发生规律性变化。图9为24.5 m素土路基中心线不同深度的温度变化曲线。图10为24.5 m宽幅公路透壁式通风管-块石复合路基中心线不同深度的温度变化曲线。两种路基的温度与时间均呈正弦曲线关系, 深度为 $-0.5$ ,  $-1.0$ ,  $-2.0$ 的地基高温度均在8月至10月之间, 素土路基在上述3个位置深度的温度经过5年后仍然高于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 而复合路基在这3点的温度经过第1年就降低到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下, 并随着时间推移具有整体稳步降低的趋势。宽幅公路透壁式通风管-块石复合路基确实具有良好的调温效果。

### 3 结论

考虑了阴阳坡两侧、全球变暖等影响, 基于块

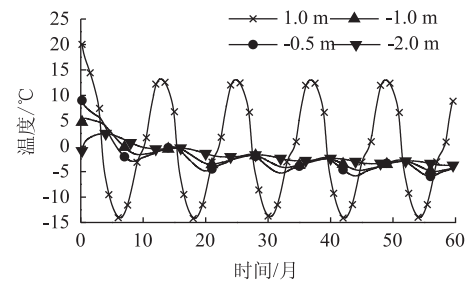


图9 素土路基中心线不同深度的温度变化曲线

Fig. 9 Temperature curves of soil plain roadbed's central line in different depths

石层和通风管中空气的流速场和多孔介质传热的温度场的特征, 以及两相物理场耦合关系, 采用宽幅公路透壁式通风管-块石复合路基数值模型分析路基施工后10年间的降温效应, 得出以下几点结论:

(1) 宽幅公路素土路基吸收大量热量, 热量在

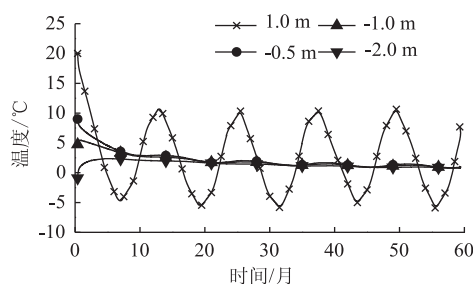


图10 复合路基中心线不同深度的温度变化图

Fig. 10 Temperature curves of composite roadbed's central line in different depths

施工后逐渐向下部地基传递,地基中部形成热核。而宽幅公路透壁式通风管-块石复合路基在寒季开风门强迫冷空气对流,将外界冷量带入土体,路基下侧形成稳定冰核,宽幅公路透壁式通风管-块石复合路基调温效应良好。

(2) 宽幅公路透壁式通风管-块石复合路基施工后第一年在路基下部左侧形成局部冻土核,随着调温时间延长,复合路基储存的冷量不断下移,下部地基中逐渐形成深度较浅的条状低温区域。低温区域发展到施工后第6~7年基本形成稳定冻土核,此后冻土区域逐年缓慢发展,施工后第10年冻土核几乎不再发展。

(3) 透壁式通风管-块石复合路基宽度加大,透壁式通风管流速减小,块石层风速增加,但当路基宽度大于32 m时,块石层风速增长速率明显放缓。流速场的最优路基宽度应控制在32 m内。

(4) 透壁式通风管-块石复合路基的降温效应随着路基宽度的增加而逐渐减弱。路基宽度增加,低温区域面积增长速率及边缘深度下移增长速率在宽度32 m处下降,路基稳定时间延长,零温线上升高度减小。地基高温基本上在8月至10月,地基中心线以下的深度温度经过第1年就降低到0℃以下,并且随着时间的增长,具有整体稳步降低趋势。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] WU Q B, LIU Y Z, ZHANG J M. A Review of Recent Frozen Soil Engineering in Permafrost Regions along Qinghai - Tibet Highway, China [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2002, 13 (3): 199 - 205.
- [2] 高宝林, 孙志忠, 董添春, 等. 青藏铁路路基下融化夹层特征及其对路基沉降变形的影响 [J]. 冰川冻土, 2015, 37 (1): 126 - 131.
- GAO Bao-lin, SUN Zhi-zhong, DONG Tian-chun, et al.

Characteristics of Thawed Interlayer beneath Embankment of the Qinghai - Tibet Railway in Permafrost Regions and Its Effect on Embankment Settlement Deformation [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37 (1): 126 - 131.

- [3] 孙志忠, 马巍, 李东庆. 青藏铁路北麓河试验段块石路基与普通路基的地温特征 [J]. 岩土工程学报, 2008, 30 (2): 303 - 308.
- SUN Zhi-zhong, MA Wei, LI Dong-qing. Ground Temperature Characteristics of Block Stone Embankment and Traditional Embankment at Beiluhe along Qinghai - Tibet Railway [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30 (2): 303 - 308.
- [4] 牛富俊, 程国栋, 李建军, 等. 多年冻土区管道通风路基温度边界条件及温度场实测研究 [J]. 冰川冻土, 2006, 28 (3): 386 - 389.
- NIU Jun-fu, CHENG Guo-dong, LI Jian-jun, et al. Experimental Study on the Thermal Boundary Conditions and Temperature Fields of Duct-ventilated Embankment in Permafrost Regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28 (3): 386 - 389.
- [5] 李国玉, 李宁, 康佳梅. 青藏铁路冻土区块石护坡路基热传递特性 [J]. 冰川冻土, 2007, 29 (2): 315 - 321.
- LI Guo-yu, LI Ning, KANG Jia-mei. Heat Transfer Characteristics of the Embankment with Crushed-block Slope Protection in Permafrost Regions along the Qinghai - Tibet Railway [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29 (2): 315 - 321.
- [6] 田亚护, 刘建坤, 沈宇鹏. 青藏铁路多年冻土区热棒路基的冷却效果三维有限元分析 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35 (增2): 113 - 119.
- TIAN Ya-hu, LIU Jian-kun, SHEN Yu-peng. 3-D Finite Element Analysis of Cooling Effect of Qinghai - Tibet Railway Embankment with Thermosyphons in Permafrost Regions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35 (S2): 113 - 119.
- [7] 肖建章, 赖远明, 张学富, 等. 青藏铁路旱桥的三维温度特性分析 [J]. 冰川冻土, 2004, 26 (4): 426 - 434.
- XIAO Jian-zhang, LAI Yuan-ming, ZHANG Xue-fu, et al. Three-dimensional Temperature Character Analysis of the Land Bridge on the Qinghai - Tibet Railway [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26 (4): 426 - 434.
- [8] LAI Y M, WANG Q S, NIU F J, et al. Three-dimensional Nonlinear Analysis for Temperature Characteristic of Ventilated Embankment in Permafrost Regions [J]. Cold Regions Science and Technology,

- 2004, 38 (2): 165-184.
- [9] 沈宇鹏, 许兆义, 王连俊, 等. 路基宽度对多年冻土区站场路基温度场的影响 [J]. 北京交通大学学报, 2008, 32 (1): 20-23.  
SHEN Yu-peng, XU Zhao-yi, WANG Lian-jun, et al. Influence of the Width of Station Embankment on Temperature Field in Permafrost Area [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2008, 32 (1): 20-23.
- [10] YU W B, LAI Y M, ZHANG X F. Laboratory Investigation on Cooling Effect of Coarse Rock Layer and Fine Rock layer in Permafrost Regions [J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, 38 (3): 31-42.
- [11] 汪双杰, 陈建兵. 青藏高原多年冻土路基温度场公路空间效应的非线性分析 [J]. 岩土工程学报, 2008, 30 (10): 1544-1549.  
WANG Shuang-jie, CHEN Jian-bing. Nonlinear Analysis for Dimensional Effects of Temperature Field of Highway Embankment in Permafrost Regions on Qinghai-Tibet Plateau [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30 (10): 1544-1549.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 刘戈, 汪双杰, 孙红, 等. 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 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37 (2): 284-291.  
LIU Ge, WANG Shuang-jie, SUN Hong, et al. Model Test and Numerical Simulation of Cooling Effect of Ventilated Duct-crashed Rock Composite Embankment [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37 (2): 284-291.
- [15] NIU F J, SUN H, GE X R, et al. Temperature Adjustment Mechanism of Composite Embankment with Perforated Ventilation Pipe and Blocky Stone [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Science, 2013, 18 (6): 729-732.
- [16] 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.
- [17] JTG B01—2014, 公路工程技术标准 [S].  
JTG B01—2014, Technical Standard of Highway Engineering [S].
- [18] 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.
- (上接第27页)
- [14] 秦会来, 王玉杰, 唐志丹, 等. 非均质各向异性黏土光滑条基承载力上限解 [J]. 岩土力学, 2011, 32 (2): 611-616.  
QIN Hui-lai, WANG Yu-jie, TANG Zhi-dan, et al. Upper Bound Solutions for Bearing Capacity of Smooth Rigid Strip Foundations on Anisotropic and Non-homogeneous Clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (2): 611-616.
- [15] LUMB P, SCHMERTMANN J H. Stability of Slopes in Anisotropic Soils [J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Division, 1965, 91 (4): 85-106.
- [16] 胡卫东, 曹文贵. 基于非对称破坏模式的临坡地基承载力上限极限分析方法 [J]. 中国公路学报, 2014, 27 (6): 1-9.  
HU Wei-dong, CAO Wen-gui. Upper Limit Analysis Method for Ultimate Bearing Capacity of Ground Foundation Adjacent to Slope Based on Asymmetry Failure Mode [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27 (6): 1-9.
- [17] 陈希有, 龚晓南, 曾国熙. 具有各向异性和非均质性的  $c-\varphi$  土上条形基础的极限承载力 [J]. 土木工程学报, 1987, 20 (4): 74-82.  
CHEN Xi-you, GONG Xiao-nan, ZENG Guo-xi. Bearing Capacity of Strip Footing on  $c-\varphi$  Soils Exhibiting Anisotropy and Nonhomogeneity in Cohesion [J]. China Civil Engineering Journal, 1987, 20 (4): 74-82.
- [18] 杨峰, 阳军生, 张学民, 等. 斜坡地基单侧滑移破坏模式及承载力上限解 [J]. 工程力学, 2010, 27 (6): 162-168.  
YANG Feng, YANG Jun-sheng, ZHANG Xue-min, et al. One-side Slip Failure Mechanism and Upper Bound Solution for Bearing Capacity of Foundation on Slope [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27 (6): 162-168.