

青藏铁路碎石路基最佳粒径的数值试验研究

全晓娟¹, 李 宁^{1,2}, 李国玉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. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘要: 冻土地区铁路碎石路基内的换热问题可以看成是多孔介质中的对流传导问题。本文假设碎石与路基内部的空气处于热平衡状态, 且 Boussinesque 假定成立。依据多孔介质的质量守恒方程、能量方程及动量方程, 并用有限元法离散, 建立了碎石路基的数值模型。利用该模型对目前碎石路基设计所关心的几种主要粒径的降温效果进行了数值模拟。结果表明: 9 cm 粒径的碎石路基降温效果最好, 空气对流在整个碎石层内发生, 碎石层上部温度场呈现非线性特征, 路基底部的降温幅度可达 1.18, 空气流速为 0.73 m/h; 而 6 cm 粒径的降温效果次之, 路基底部降温 0.78, 空气流速为 0.21 m/h; 3 cm 与 15 cm 粒径的降温效果较差, 对流基本上在路基上部发生, 路基底部的对流很弱, 降温幅度分别为 0.21 和 0.28, 空气流速接近于 0。初步的研究表明, 9 cm 粒径的碎石在碎石路基设计中可优先采用。

关键词: 道路工程; 碎石路基; 多年冻土; 多孔介质; 青藏铁路; 降温效果

中图分类号: TU 41

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)11-1947-07

NUMERICAL STUDY ON OPTIMUM GRAIN-DIAMETER FOR THE CRUSHED ROCK EMBANKMENT OF QINGHAI—TIBET RAILWAY

QUAN Xiao-juan¹, LI Ning^{1,2}, LI Guo-yu¹

(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. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The crushed rock embankment can provide cool energy for the permafrost beneath it and guarantee the stability of permafrost without thawing. The cooling effects of the crushed rock embankment are already seen to be verified by in-situ data. However, the mechanism is still to be explored and the design parameters also need to be optimized. The heat transfer in crushed rock railway embankment could be treated as the air convection problem in porous media. Here, the local thermal equilibrium is assumed to exist between the air and the grains; and the air is expressed by the Boussinesque approximation. The heat transfer equations, the motion equation, and the conservation equation are achieved with finite element formulas of Galerkin's method; and then, a program 3G2003 to simulate the heat transfer in crushed rock embankment is developed. Simulations are performed on the crushed rock roadbeds composed of crushed rock with diameters of 3, 6, 9 and 15 cm, respectively. The results shows that the 9 cm-crushed rock embankment has the best cooling effect, which will cause a decrease of 1.18 in the temperature at the base of embankment; and air convection occurs in entire interior embankment. The temperature field shows prominent nonlinear characteristics, and the average air speed at the bottom of

收稿日期: 2004-08-09; **修回日期:** 2004-11-10

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目资助项目(KZCX1-SW-04)

作者简介: 全晓娟(1976-), 女, 1999年毕业于兰州大学资源环境学院, 现为博士研究生, 主要从事寒区岩土工程数值仿真方面的研究工作。E-mail: xiaojuan@lzb.ac.cn, quanxj@msn.com.

embankment is 0.73 m/h. The embankment composed of crushed rock of 6 cm in diameter will induce a decrease of 0.78 in temperature, accompanied by weak air convection with air speed of 0.21 m/h at the base of embankment. The embankments consisting of 3 cm and 15 cm diameter crushed rock have poor cooling effect, which will have 0.21 and 0.28 decrease in temperature, respectively, where air speed at the bottom approximate zero. Therefore, the 9 cm diameter crushed rock is recommended for the construction of Qinghai—Tibet railway so that permafrost embankment can be protected.

Key words :road engineering ;crushed rock embankment ;permafrost ;porous medium ;Qinghai—Tibet railway ;cooling effect

1 引言

青藏公路多年冻土段出现了大量的路基沉陷病害^[1,2],正在进行的青藏铁路面临的主要难题就是冻土的融沉问题。目前解决冻土路基融沉问题采用的方法以主动冷却地基为主,如通风管路基^[3]、抛片石路基和护坡^[4,5]、遮阳棚^[6]、热桩等^[7-9]。

上述的这些措施中,抛石路基及护坡的冷却效果已得到广泛的认可。Harris 在加拿大阿尔波特西南的高原山,对气温观测发现:块石堆内的年平均气温较之相邻的矿物土低 4 ~ 7 ^[10]。文[11]通过室内试验得出封闭条件下碎石的降温效果比较好。文[12,13]的室内试验也证明碎石中存在比较明显的对流效果。根据铁科院西北分院的观测资料^[14]显示:冬季的碎石层有效导热系数是夏季的 12.2 倍。在美国的阿拉斯加,文[15]经过试验和数值计算证明碎石路基有很好的冷却效果,并能使多年冻土的上限处于缓慢抬升的状态,碎石路基现已广泛推广使用。

然而,对于碎石层的降温效果或机制大多只是定性或从宏观上加以描述,如碎石层的最佳厚度,最佳粒径等问题还未见有系统的量化研究。对大孔隙碎石路基的不可逆调温机理数值仿真研究尚少见报道。本文将多孔介质空气对流理论应用于解决碎石路基冷却机理研究,通过系统的数值仿真试验,定量研究不同粒径的碎石对路基冷却效果的影响,为优化设计与施工提供科学依据和技术平台。

2 数值分析平台及其验证

2.1 理论模型

碎石路基中的空气流动可看作是多孔介质中的空气流动,其理论模型涉及非稳态的质量平衡方程、流体的运动方程、能量方程。在建立模型之前需要

以下 3 个基本假定:

- (1) 研究对象仅是多孔介质和其中的空气;
- (2) 多孔介质与层内空气处于局部热平衡状态;
- (3) 碎石层内气体符合 Boussinesq 假定。

在这种情况下,流体的连续方程和动量方程,以及能量方程分别表示为

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (\text{质量平衡方程}) \quad (1)$$

$$\frac{\mu}{K} \mathbf{v} = -\nabla \bar{P} + \rho \mathbf{g} \quad (\text{动量方程}) \quad (2)$$

$$\bar{C} \frac{\partial T}{\partial t} + C_f \mathbf{v} \nabla T = \bar{\lambda} \nabla^2 T \quad (\text{能量方程}) \quad (3)$$

其状态方程可表示为

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \quad (4)$$

式(1)~(4)中: \mathbf{v} 为空气的平均流速; K 为多孔介质的渗透系数; μ 为空气的动力粘滞系数; \bar{P} 为空气压力; \mathbf{g} 是重力加速度; ρ 为空气密度; T 为温度; $\bar{\lambda}$ 为介质的导热系数; \bar{C} 为介质的容积热容量; C_f 为空气的容积热容量; β 为空气的热膨胀系数; ρ_0 , T_0 分别为平衡状态的密度和温度。

将式(4)代入式(2)中,可以得到

$$\mathbf{v} = -\frac{K}{\mu} [\nabla P' + \rho \mathbf{g} \beta (T - T_0)] \quad (5)$$

式中: P' 为气压力与静水压力的差,且

$$P' = \bar{P} - \rho \mathbf{g} y \quad (6)$$

式(5)中右端的第二项为流体的净浮力。式(5)的意义很明确,即:空气流速是由压力差和流体的浮力所决定。

式(5)还可进一步简化为

$$\mathbf{v} = -\frac{K}{\mu} (\nabla P + \rho \mathbf{g} \beta T) \quad (7)$$

其中,

$$P = P' - \rho \mathbf{g} \beta T_0 \quad (8)$$

由式(7)可写出控制微分方程为

$$-\frac{K}{\mu} \nabla \cdot (\nabla P + \rho g \beta T) = 0 \quad (9)$$

由式(3), (7), (9), 可得到速度与温度的变化规律。本文的理论模型是属于强非线性的问题, 只能通过数值方法得到问题的解答, 具体解析过程如下。

2.2 有限元解析

应用伽辽金法对式(3), (9)进行有限元离散, 可得到

$$[K_p]\{P\} = \{F_v\} + [K_{PT}]\{T\} \quad (10)$$

$$[C]\left\{\frac{\partial T_j}{\partial t}\right\} + [K]\{T_j\} = \{F_q\} \quad (11)$$

其中,

$$[K_p] = \sum_{\Omega} \int \frac{k}{\mu} \nabla N_i \nabla N_j d\Omega \quad (12)$$

$$F_v = -\sum_{\Gamma} \int N_i v_n d\Gamma \quad (13)$$

$$[K_{PT}] = \sum_{\Omega} \int \frac{k}{\mu} \rho_0 \beta N_i g \nabla N_j d\Omega \quad (14)$$

$$[C] = \sum_{\Omega} \int N_i N_j d\Omega \quad (15)$$

$$[K] = \sum_{\Omega} \int (\nabla N_i \nabla N_j + \nabla N_i N_j) d\Omega \quad (16)$$

$$F_q = \sum_{\Gamma} \int N_i \lambda \nabla T d\Gamma \quad (17)$$

式中: N_i, N_j 为单元的形函数。

应用 Crank-Nicolson 方法, 在每一个时间间隔 Δt , 求解式(10), (11), 则可获得本问题的数值解。

2.3 数值分析平台及其验证

本文所用程序是基于冻土工程三场耦合模型的系统 3G2001^[16, 17]开发的解决多孔介质温度场流速场的专用软件 3G2003(如图 1 所示)。

3G2003 的程序验证是以室内实验为基准, 这里以文[15]的室内试验条件和相关参数为依据进行验证, 试验的主要参数见表 1, 试验结果见表 2。

本文的模拟的碎石模型的温度场与文[15]的试验结果进行对比(如图 2 所示)。可以看出, 试验点与本文计算的温度曲线分布规律基本吻合。从验证对比的情况看, 本文所开发的程序是可靠、稳定的。

3 数值仿真试验研究

3.1 数值试验方案

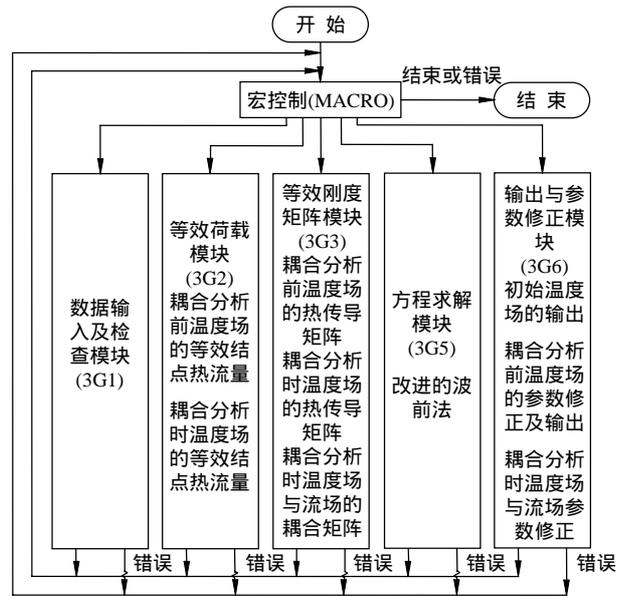


图 1 3G2003 程序的整体控制框图

Fig.1 Flow chart of program 3G2003

表 1 物理参数列表

Table 1 Physical parameters of crushed rock

参数	导热系数 λ ($J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$)	容积热容量 C_f ($J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$)	渗透率 K/m^2
碎石层	1.01×10^6	0.79	7.7×10^{-7}

表 2 Goering 试验^[15]结果

Table 2 Results of Goering experiment^[15]

位置	底部点	距底部 0.25 m	距底部 0.5 m	顶部点
底部加热	41.5	35.5	30.5	18.5

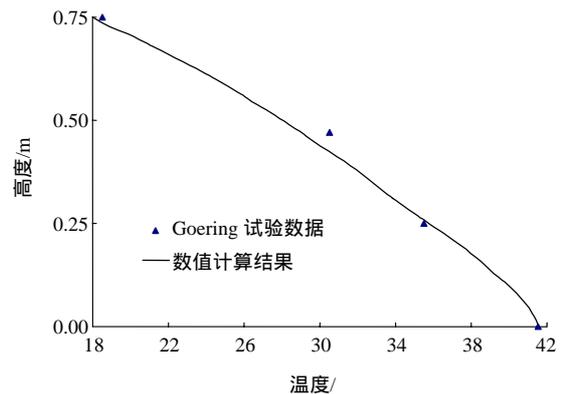


图 2 中心剖面的温度场对比

Fig.2 Comparison of the temperature field for the center plane of the model

将碎石的粒径对其降温效果的影响作为主要因素考虑, 拟进行平均粒径分别为 3, 6, 9, 15 cm 的碎石层(层厚 1.50 m, 宽 1.65 m)的冷却效果数值试验, 平均粒径是颗粒中某种粒径的累计百分比超过

50%的成分构成，选取这样的模型是结合室内与野外试验考虑的^[11, 12, 15]，简单示意图如图 3 所示。

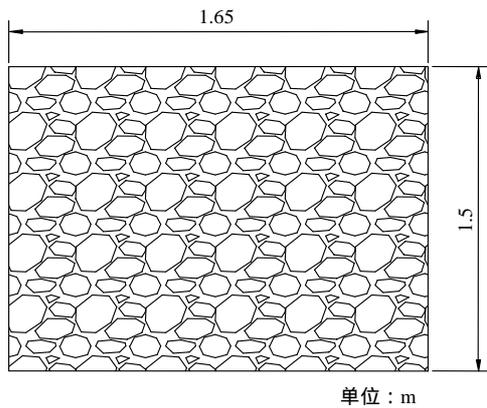


图 3 碎石层模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of the crushed rock model

3.2 数值试验的参数

本文参考青藏铁路沿线最新实测资料与冻土工程的实际特点^[18-20]，得出计算所需物理参数，见表 3。

表 3 各种粒径的热学参数和渗透率

Table 3 Parameters of thermology and permeability of the crushed rock

平均粒径/cm	$\lambda/(J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1})$	$C/(J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1})$	K/m^2
3	0.297	1.00×10^6	2.75×10^{-7}
6	0.346	1.01×10^6	2.02×10^{-6}
9	0.420	1.22×10^6	8.01×10^{-6}
15	0.500	1.32×10^6	3.62×10^{-7}

3.3 边界条件模拟

上部温度边界是按照野外观测数据回归得到的正弦函数^[16]，即

$$T = -4.2 + 12.2 \sin\left(\frac{2\pi}{8640}t + \frac{4\pi}{3}\right) \quad (18)$$

本文中模拟一个周期为 1 a，共计算 4 个周期。考虑到地中热流的影响，下边界给定温度梯度： $\frac{\partial T}{\partial n} = 0.018$ /m，侧面两边绝热。

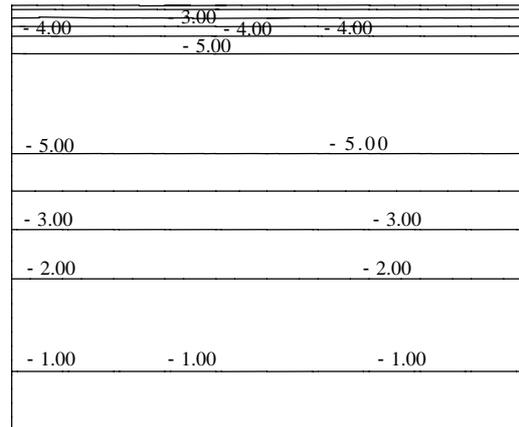
3.4 结果与分析

3.4.1 温度场和流速场分布

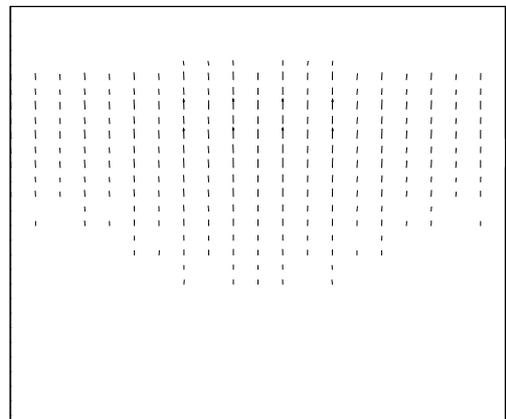
本文选取边界条件为正温即将结束时刻的温度场和流速场进行对比分析。这时路基的情形，相当于夏季路基吸收热量后温度场，即高原每年九月到十月的左右。下面分别介绍这 4 种粒径的计算结果。

图 4 是第一周期正温结束时粒径为 3 cm 的碎石

的温度场和流速场，从图 4(a)可以看到，温度场的分布比较均匀，温度场为线性分布，可近似认为是处于热传导状态。图 4(b)是流速场，碎石层底部空白的地方表示流速很小近似为零的状态，即在仅在上部碎石层中空气存在微弱的流动，底部的空气对流几乎不存在。这主要是平均粒径为 3 cm 的碎石中，孔隙较小，不利于空气在其间发生强烈的对流，而上部所产生的空气对流还远不能达到下部，即上部的空气对流对底部的影响很小。



(a) 温度场



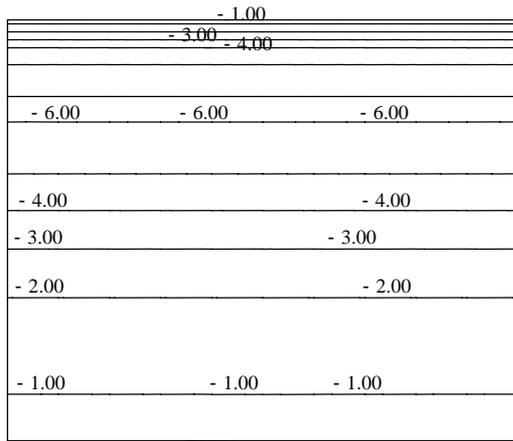
(b) 流速场

图 4 第一周期正温结束时粒径为 3 cm 碎石层的温度场及流速场

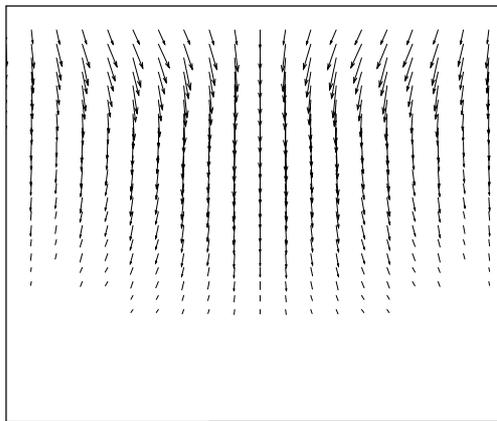
Fig.4 Temperature and velocity fields at the end of positive temperature stage in the cycle No.1 ($D = 3$ cm)

图 5 是第一周期正温结束时粒径为 6 cm 的碎石的温度场和流速场，同直径为 3 cm 的碎石的温度场和流速场分布特征很相似。图 5(a)显示，此时温度场的分布近似为热传导状态，而图 5(b)空气在碎石层中存在比较微弱的流动，但是比图 4 中的流场强烈，在碎石层上部空气对流基本还未形成规模，对流在碎石层的下部几乎不存在，但是对比图 4 可看

出, 图 5 的对流影响深度和范围都有所增大。



(a) 温度场



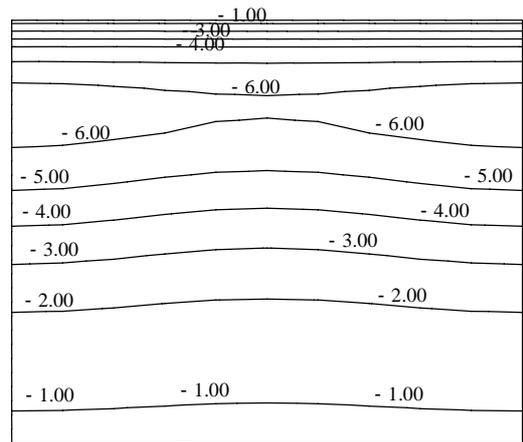
(b) 流速场

图 5 第一周期正温结束时粒径为 6 cm 碎石层的温度场及流速场

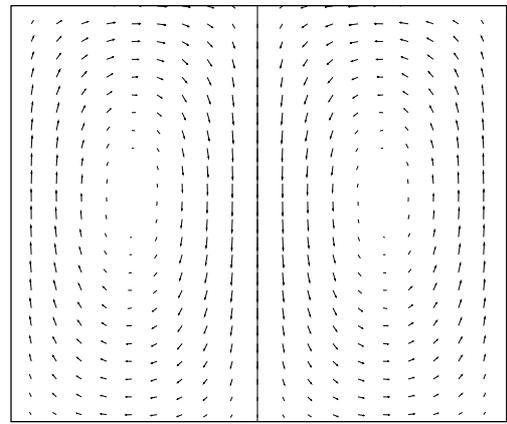
Fig.5 Temperature and velocity fields at the end of positive temperature stage in the cycle No.1($D = 6$ cm)

图 6 是第一周期正温结束时粒径为 9 cm 的碎石层的温度场和流速场。可以看出, 温度等值线图呈现出明显的非线性特征, 由此可推断碎石层中发生了比较强烈的对流作用, 图 6(b)证明了这一点。从图 6(b)的流速场分布可以看到很强的对流趋势, 尤其是在模型的顶部, 对流在整个模型中都比较明显, 存在对流, 并且对流呈明显的双旋涡状分布, 很显然直径为 9 cm 的碎石层比 3, 6 cm 的, 对流效果明显强烈, 这也同时说明空气对流可以影响到碎石层的底部, 冷空气也就能下沉到底部。

图 7 是 15 cm 粒径的碎石层的温度场和流速场的分布, 与 3 和 6 cm 的碎石层情况相近。图 7(a)显示出比较均匀的温度场分布, 而图 7(b)则是在路基上部的对流较明显, 下部则相对比较弱, 从图 7(a)的流场图可以看到微弱的单旋涡流动。从这 4 种粒



(a) 温度场



(b) 流速场

图 6 第一周期正温结束时粒径为 9 cm 碎石层的温度场及流速场

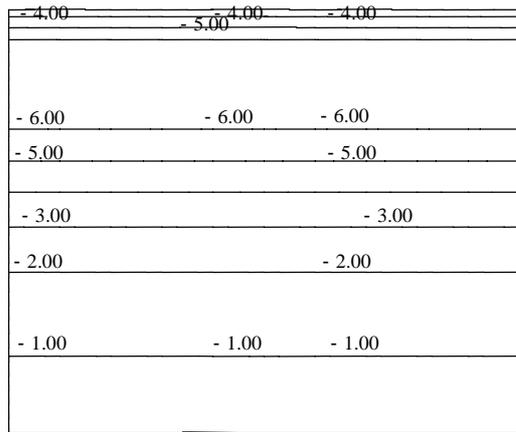
Fig.6 Temperature and velocity fields at the end of positive temperature stage in the cycle No.1($D = 9$ cm)

径的温度场和流速场的对比情况, 可以看到粒径为 9 cm 的碎石的温度场对流速场变化比较明显。

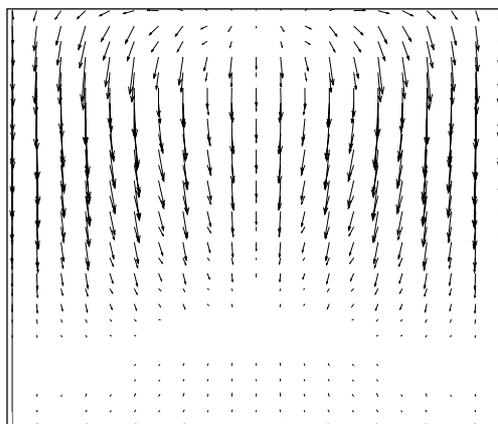
3.4.2 4 种粒径的温度和空气流速对比

下面的内容将逐个比较 4 种粒径在每个周期内边界条件为最低负温时的温度值变化情况, 进行对比的关键点是碎石层中心剖面底部点的温度和空气平均流速。

从表 4 中可看出, 从第 1~4 周期的时间里, 6, 9 cm 碎石层底部温度值持续下降, 而 3, 15 cm 的温度值则变化没有规律。6, 9 cm 的碎石层都保持一定的降温速率, 9 cm 降温效果相对较好, 底部的温度从第一周期的 -0.5 降到了第 4 周期的 -1.68, 降了 1.18。从表 4 中还可看出: 3, 15 cm 碎石层底部的空气流速非常小, 近似为 0; 而粒径为 6 cm 的碎石底部的空气流速为 0.21 m/h, 粒径为 9 cm 的碎石层底部的流速为 0.73 m/h, 是粒径为



(a) 温度场



(b) 流速场

图7 第一周期正温结束时粒径为 15 cm 碎石层的温度场及流速场

Fig.7 Temperature and velocity fields at the end of positive temperature stage in the cycle No.1(D = 15 cm)

表4 碎石底部点在边界条件为最低负温时的温度()与平均流速(m/h)

Table 4 Temperature and velocity at the bottom of model at the end of the lowest negative temperature stage

粒径 /cm	第一周期	第二周期	第三周期	第四周期	温差 /	流速 /(m · h ⁻¹)
3	- 0.5	- 1.0	- 0.83	- 0.71	- 0.21	0.00
6	- 0.5	- 1.24	- 1.27	- 1.28	- 0.78	0.21
9	- 0.5	- 1.41	- 1.58	- 1.68	- 1.18	0.73
15	- 0.5	- 1.03	- 0.87	- 0.77	- 0.27	0.00

注：表中的温度差是第一周期与第四周期的温差。

6 cm 流速的 3.5 倍左右，从这项对比也可以得出粒径为 9 cm 的碎石利于空气在孔隙中的对流。

3.4.3 典型断面的温度沿深度的对比

图8是取自模型中心剖面0.6~1.5 m深的断面，可看到在图中4条温度曲线的差别非常明显，粒径

为 9 cm 的曲线最靠左，温度最低，而粒径为 3 cm 和 15 cm 的温度曲线最靠右边，粒径为 6 cm 的曲线位于中间，在底部粒径 9 cm 的温度值比粒径为 15 cm 的温度值高出 1.5 左右，从这个图的对比可以看到粒径为 9 cm 的降温效果是最好的。

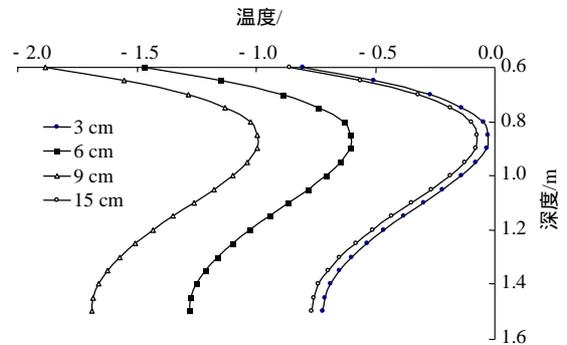


图8 第4周期负温结束时刻各粒径的温度曲线

Fig.8 Temperature curves at the end of negative temperature stage during the cycle No.4

4 结 语

本文对碎石路基中人们最关心的碎石最佳粒径的降温效果进行了数值模拟，并得出以下结论：

(1) 在模拟的4个周期中，粒径为9 cm的碎石层底部温度从第一周期的 -0.5 降到了第四周期的 -1.68 ，降了 1.18 ，降温值明显大于其他3种粒径；

(2) 从4种粒径流速场分布特性来看，粒径为9 cm的碎石层底部的空气平均流速达0.73 m/h，其他3种粒径的流速则相对很小甚至接近于0；

(3) 从典型断面对比情况来看，粒径为9 cm的碎石降温效果最好，在碎石层底部粒径9 cm的温度值比粒径为15 cm的温度值高出1.5左右。

(4) 在所研究的四种粒径(3, 6, 9, 15 cm)的碎石当中，粒径为9 cm的碎石降温效果是最好的，建议可以在这几种粒径范围内的铁路路基中考虑使用9 cm 粒径的碎石。

参考文献(References)：

[1] 铁道部第三勘测设计院. 冻土工程(第二版)[M]. 北京：中国铁道出版社，2002.(Third Survey and Design Institute of Ministry of Railway. Frozen Soil Engineering(Second Edition)[M]. Beijing：China Railway Publishing House，2002.(in Chinese))

[2] 吴紫汪，程国栋，朱林楠，等. 冻土路基工程[M]. 兰州：兰州大学出版社，1988.(Wu Ziwan, Cheng Guodong, Zhu Linnan, et al.

- Permafrost Embankment Engineering[M]. Lanzhou : Lanzhou University Press , 1988.(in Chinese)
- [3] Su B , Li N , Quan X J. The numerical study on the ventilated embankment in permafrost regions in Qinghai—Tibet railway[J]. Cold Regions Science and Technology , 2004 , 38(2/3) : 229 – 238.
- [4] 冯文杰. 抛石及遮阳棚技术在多年地区冻土路基中的应用研究[硕士学位论文][D]. 兰州 : 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 , 2002.(Feng Wenjie. An application study of the riprap and awning for the roadbed in Qinghai—Tibet plateau permafrost regions[M. S. Thesis][D]. Lanzhou : Cold and Arid Region Environmental and Engineering Research Institute , Chinese Academy of Sciences , 2002.(in Chinese))
- [5] 喻文兵, 赖远明, 张学富, 等. 块石层与碎石层降温效果室内试验研究[J]. 冰川冻土, 2003, 25(6) : 638 – 643.(Yu Wenbing , Lai Yuanming , Zhang Xuefu , et al. Experimental study on the cooling effect of block stone and crushed stone[J]. Journal of Glaciology and Geocryology , 2003 , 25(6) : 638 – 643.(in Chinese))
- [6] 冯文杰, 李东庆, 马巍, 等. 不同边界条件对多年冻土上限影响的模型试验研究[J]. 冰川冻土, 2001, 23(4) : 353 – 359.(Feng Wenjie , Li Dongqing , Ma Wei , et al. Influence of climate warming on permafrost table studies with different models and temperature[J]. Journal of Glaciology and Geocryology , 2001 , 23(4) : 353 – 359.(in Chinese))
- [7] 窦明健, 胡长顺, 何子文, 等. 青藏公路多年冻土段路基病害分布规律[J]. 冰川冻土, 2002, 24(6) : 780 – 783.(Dou Mingjian , Hu Changshun , He Ziwei , et al. Distribution regularities of subgrade diseases in permafrost section of the Qinghai—Tibet highway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology , 2002 , 24(6) : 780 – 783.(in Chinese))
- [8] 程国栋, 何平. 多年冻土地区线性工程建设[J]. 冰川冻土, 2001, 23(3) : 213 – 217.(Cheng Guodong , He Ping. Linearity engineering in permafrost areas[J]. Journal of Glaciology and Geocryology , 2001 , 23(3) : 213 – 217.(in Chinese))
- [9] 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 Guodong , Wu Qingbai. Preliminary study on technology of cooling foundation in permafrost regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology , 2002 , 24(5) : 579 – 587.(in Chinese))
- [10] Harris S A , Pedersen D E. Thermal regimes beneath coarse blocky materials[J]. Permafrost and Periglacial Process , 1998 , 9(2) : 107 – 120.
- [11] 喻文兵. 青藏铁路多年冻土区特殊结构路基研究[博士学位论文][D]. 兰州 : 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2003.(Yu Wenbing. Special embankment in permafrost regions of Qinghai—Tibet Railway[Ph. D. Thesis][D]. Lanzhou : Cold and Arid Region Environmental and Engineering Research Institute , Chinese Academy of Sciences , 2003.(in Chinese))
- [12] 徐学祖, 孙斌祥, 李东庆, 等. 边界温度周期波动下块石的温度变化规律[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1) : 91 – 95.(Xu Xuezu , Sun Binxiang , Li Dongqing , et al. Variation of temperature in ballasts under periodic fluctuation of boundary temperature[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 2003 , 25(1) : 91 – 95.(in Chinese))
- [13] 孙斌祥, 徐学祖, 赖远明, 等. 块石的热扩散系数和导热系数确定方法[J]. 冰川冻土, 2002, 24(6) : 790 – 795.(Sun Binxiang , Xu Xuezu , Lai Yuanming , et al. Determination of thermal diffusivity and conductivity on ballast[J]. Journal of Glaciology and Geocryology , 2002 , 24(6) : 790 – 795.(in Chinese))
- [14] He Guisheng , Zhang Luxin .Analysis of climate change and thermal stability of experimental railway embankment in Fenghuoshan region of Qinghai—Tibet plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology , 2000 , 22(Supp.) : 20 – 25.
- [15] Goering D J , Instanes A , Kundsens S. Convective Heat Transfer in Railway Embankment Ballast of Ground Freezing[M]. [s. l.] : A. A. Balkema , 2000. 31 – 36.
- [16] 陈飞熊. 饱和正冻土温度场、水分场和变形场三场耦合理论构架[博士学位论文][D]. 西安 : 西安理工大学, 2001.(Chen Feixiong. The fully coupled modeling of the thermal-moisture-deformation behavior for the saturated freezing soils[Ph. D. Thesis][D]. Xi'an : Xi'an University of Technology , 2001.(in Chinese))
- [17] Li Ning , Chen Feixiong , Su Bo , et al. Theoretical frame of the saturated freezing soil[J]. Cold Regions Science and Technology , 2002 , 35(2) : 73 – 80.
- [18] 徐敦祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京 : 科学出版社, 2001.(Xu Xuezu , Wang Jiacheng , Zhang Lixin. Thermo-physics of Frozen Soil[M]. Beijing : Science Press , 2001.(in Chinese))
- [19] 温智, 盛煜, 吴青柏. 青藏铁路浅地表热状态监测初步分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增2) : 2664 – 2668.(Wen Zhi , Sheng Yu , Wu Qingbai. Dynamic monitoring of thermal state for shallow ground in Qinghai-Tibet railway embankment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2003 , 22(Supp.2) : 2664 – 2668. (in Chinese))
- [20] 中华人民共和国行业标准编写组. 冻土地区建筑地基基础设计规范(JGJ118 – 98)[S]. 北京 : 中国建筑工业出版社, 1998.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. The Designing Criterion of the Foundations in Permafrost Regions(JGJ118 – 98)[S]. Beijing : China Architecture and Building Press , 1998.(in Chinese))