

# 块石路堤上覆砂砾石厚度对冻土路基 冷却效果的影响研究

王爱国<sup>1,2</sup>, 马 巍<sup>1</sup>, 吴志坚<sup>1,2</sup>

(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. 中国地震局 兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 用数值模拟的方法得到不同上覆砂砾石厚度的块石路堤及普通路堤作用下铁路路基的温度场, 通过对比分析显示: 块石路堤相对于普通路堤能明显提高路基下多年冻土上限, 降低多年冻土地温, 有较强的主动制冷作用; 块石上覆砂砾石厚度的增加, 会减弱块石的制冷作用, 降低路基多年冻土上限; 当砂砾石大于某一厚度时, 中部一定范围的块石几乎丧失主动制冷能力, 多年冻土地温逐渐升高, 这对路基稳定及冻土保护极为不利。考虑全球气候变暖趋势及高路堤带来的高荷载影响, 建议块石路堤上覆砂砾石不要太厚, 应寻求制冷与多年冻土上限抬升两者兼得的最优厚度。

**关键词:** 土力学; 块石路堤; 冷却效果; 青藏铁路; 数值模拟

**中图分类号:** TU 445

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2005)13-2333-09

## STUDY ON INFLUENCE OF SAND-AND-GRAVEL LAYER THICKNESS UP BLOCK-STONE RAILWAY EMBANKMENT ON COOLING EFFECT OF FROZEN-SOIL FOUNDATION

WANG Ai-guo<sup>1,2</sup>, MA Wei<sup>1</sup>, WU Zhi-jian<sup>1,2</sup>

(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. Lanzhou Seismological Institute, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** In block-stone embankment construction of Qinghai—Tibet railway, different thicknesses of upper sand-and-gravel layer and same thickness of block-stone layer were used in different railway segment due to the uneven landform. By numerical stimulation, the temperature distribution were obtained in common embankment and block-stone embankment with upper sand-and-gravel layer in different thicknesses. The comparative analyses show that block-stone embankment has well active cooling effect on the railway foundation by raising the permafrost table and decreasing the permafrost temperature, and the variation of upper sand-and-gravel layer thickness has also great influence on the active cooling effect. The thicker the upper sand-and-gravel layer is, the smaller the temperature variation magnitude on the top of block-stone layer conducted from the embankment surface is, which will slow down the convection speed of the air in block stone and weaken the cooling ability of block stone. Although the permafrost table under the center of the embankment lifts up with thicker upper

**收稿日期:** 2004-03-15; **修回日期:** 2004-06-07

**基金项目:** 国家重点基础研究发展规划 973 项目(2002CB412704); 国家自然科学基金重大项目(90102006); 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-04)

**作者简介:** 王爱国(1972-), 男, 1994 年毕业于兰州大学地质系, 现任副研究员, 主要从事寒区工程、冻土力学和工程地震等方面的研究工作。E-mail: waguo@lzb.ac.cn.

sand-and-gravel layer , the cost is the frozen intensity decreasing of the permafrost and the dissipation of cold generated by the block stone near the embankment foot. On the conditions given by the model , the cooling ability of block stone is stronger than that of heat disturbance caused by embankment construction when the thickness of upper sand-and-gravel layer is less than 6 m or larger than 9.5 m. The cooling of block stone near the embankment foot and the cold supplying of around permafrost can not counterweigh the heat effect of embankment anymore and the permafrost table under the center of the embankment will go down gradually. In sum , the increase in the thickness of upper sand-and-gravel layer will weaken the active cooling ability of block stone and lower the permafrost table beneath the railway embankment , and while the thickness exceeds a certain number the middle zone of block stone will almost loss the cooling capability and thus lead to an increase of permafrost temperature , which is disadvantageous to the stability of railway embankment and the protection of cold ground. Considering the warm tendency of global climate and the heavy load of high embankment , we suggest the discussion of thick sand-and-gravel layer up the block-stone embankment and seeking an optimal thickness of upper sand-and-gravel layer and block stone layer in construction.

**Key words** :soil mechanics ;block-stone railway embankment ;cooling effect ;Qinghai—Tibet railway ;numerical simulation

### 1 引言

国内外许多施工实例及试验<sup>[1-7]</sup>、数值模拟<sup>[8-11]</sup>均表明块(碎)石为一种价格低廉、施工方便的路基材料。由于其大孔隙中空气的 Balch 效应<sup>[12]</sup>，由该种材料组成的各种结构路堤均能在不同程度上抬升多年冻土上限，降低地温。在我国，长 1 118 km 的青藏铁路有 632 km 将穿越多年冻土地段<sup>[13]</sup>，面对高温冻土及全球气候转暖导致的青藏高原年平均气温升高的严峻挑战，文[13~15]提出了“主动冷却路基”的设计思想及手段来积极保护冻土。块(碎)石结构路堤自然也就成为青藏铁路应用最为广泛的主要技术手段之一。由于铁路对路面坡度的严格要求，在青藏铁路施工过程中对不同坡度地段采用了不同高度的路堤。对于块石路堤结构，这种路堤高度的增加，主要通过改变块石路堤块石层上覆砂砾石层的厚度来实现。本文采用数值模拟的方法，对砂砾石层厚度变化在冻土路基温度分布中的影响进行定性分析，以期为青藏铁路的设计及施工提供一定理论参考。

### 2 计算模型

这里采用的块石路堤结构如图 1 所示，从下至上共分 5 个区。在计算中，I 区为弱风化岩层，II 区为亚粘土层，III 区为块石层，IV 区为砂砾石层，V 区为道渣层。计算范围取天然地表以下 30.0 m 深度，路堤中心以外 41.0 m 范围，并假设天然地表以下

30.0 m 处于热平衡状态，即没有热量的流入流出，同时假设路堤的修建对路堤中心 41.0 m 以外几乎无影响。块石路堤结构示意图见图 1。在对比分析中，计算了砂砾石厚度 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.5, 4.5, 5.5, 6.0, 6.5, 7.5, 8.5, 9.5, 10.5 m 共 13 种情况，同时计算了与砂砾石厚度 3.5 m 情况等同路堤高度的普通路堤下温度场的变化作为对比。

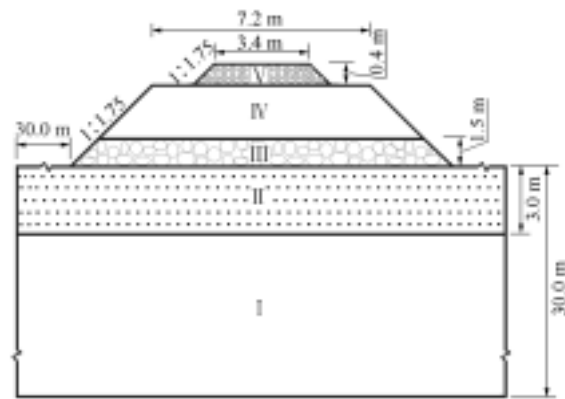


图 1 块石路堤结构示意图

Fig.1 Structure of block-stone embankment

由于是理论上分析砂砾石厚度的影响，计算中忽略了路堤阴阳坡面的热差异，采用了对称模型。除块石层及道渣层考虑传导及空气的热对流外，其他层均只考虑传导导热。

#### 2.1 块石及道渣层控制方程

渗流力学理论给出流体的渗流雷诺数为

$$Re = \frac{\rho dV}{\psi\mu} \tag{1}$$

式中： $\rho$  为流体密度， $d$  为固体颗粒粒径， $V$  为流速， $\psi$  为孔隙度， $\mu$  为流体粘滞系数。

当  $Re < 5$  时，达西定律是适用的；反之，当  $Re > 5$  时，达西定律就不再适用渗流流体<sup>[16]</sup>。对于块石路堤中的空气，以青藏高原为例，取空气密度  $\rho_0 = 0.641 \text{ kg/m}^3$ ，流体粘滞系数  $\mu = 1.75 \times 10^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$ ，孔隙度  $\psi = 0.4$ 。Goering 和 Kumar 对于 3 cm 碎石组成的路堤通过模拟计算给出  $V_{\max} = 4 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ，颗粒尺寸越大，速度值也相应增大<sup>[8]</sup>。当取  $d = 3 \text{ cm}$  时， $Re = 110$ ，该值远大于达西定律的适用范围，而实际采用的块石路堤，颗粒粒径一般大于 3 cm，其雷诺数更大。因此，块石路堤中的空气流动不能当达西流看待。

另外，对于空气最大流速的估计，在假定空气为达西流条件下，垂直速度  $V_y$  为

$$V_y = -\frac{k}{\mu} \left\{ \frac{\partial p}{\partial y} + \rho_0 g [1 - \beta(T - T_0)] \right\} \quad (2)$$

式中： $p$  为空气压力， $\beta$  为空气热膨胀系数。

按青藏高原一般情形，估算得出的  $V$  值量级为  $10^{-2} \text{ m/s}$ ，由此得出的  $Re$  值更是远大于 5。因此，达西流的假设是不成立的。

对于边长为  $L$  的方块孔隙，其内空气的状况决定于空气的瑞利数  $Ra$ ， $Ra$  定义为

$$Ra = \frac{\rho^2 C_p \beta g L^3 \Delta T}{\lambda \mu} \quad (3)$$

式中： $\Delta T$  为上下表面温度差， $\lambda$  为空气热传导系数。

当  $Ra < Rac_1$  (临界值) 时，空气是静止不动的；当  $Ra > Rac_1$  时，空气开始发生对流，其对流的分叉数决定于不同的临界值  $Rac_n$ 。文<sup>[17]</sup>通过计算得到  $Rac_n$  的解析解，其中  $Rac_1 = 39.48$ ，即当  $Ra > 39.48$  时，孔隙内空气就能产生自然对流。

对于青藏高原块石路堤孔隙中的空气，以一般情况下单个孔隙来研究时，有

$$Ra = 4.231 \times 10^7 L^3 \Delta T \quad (4)$$

使空气发生自然对流的最低温度差为： $L = 1 \text{ cm}$  时， $\Delta T_{1\text{cm}} = 0.933$ ，温度梯度为  $93.3 \text{ /m}$ ； $L = 2 \text{ cm}$  时， $\Delta T_{2\text{cm}} = 0.117$ ，温度梯度为  $5.85 \text{ /m}$ ； $L = 3 \text{ cm}$  时， $\Delta T_{3\text{cm}} = 0.035$ ，温度梯度为  $1.155 \text{ /m}$ ； $L = 4 \text{ cm}$  时， $\Delta T_{4\text{cm}} = 0.015$ ，温度梯度为  $0.375 \text{ /m}$ ； $L = 5 \text{ cm}$  时， $\Delta T_{5\text{cm}} = 0.0075$ ，温度梯度为  $0.15 \text{ /m}$ 。

可以看出，在无外力驱动情况下，孔隙直径小于 2 cm 时，发生空气的自然对流是很困难的，所以

块石路堤设计时也要考虑块石的最小粒径。对于青藏高原日气温变化在十几甚至几十摄氏度的情况下，青藏铁路所采用的大粒径块石孔隙内的空气都能产生自然对流。

考虑块石的烟囱效应<sup>[12]</sup>，在计算中对块石及道渣层进行垂直分区，限制各分区在水平方向速度的传递，并将空气流动简化为自然对流，同时设空气和相邻块石骨架之间能瞬间达到局部热平衡，对空气作 Boussinesq 近似，即把流体看成是不可压缩的，因此，其控制方程为

(1) 连续性方程：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

(2) 动量方程：

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (6)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dy} - g + \mu \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} =$$

$$\beta g (T - T_\infty) + \mu \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad (7)$$

(3) 能量方程：

块石路基中能量方程应将固体和气体分开考虑，然后合并。考虑到两者的体积百分比，可得路基中固体导热的能量方程为

$$(1 - \phi)(\rho c)_s \frac{\partial T}{\partial t} = (1 - \phi)k_s \nabla^2 T \quad (8)$$

路基中气体导热的能量方程为

$$\phi(\rho c)_f \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c)_f (\mathbf{V} \cdot \nabla) T = \phi k_f \nabla^2 T \quad (9)$$

总体能量方程为

$$(\rho c)_t \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c)_f (\mathbf{V} \cdot \nabla) T = k_t \nabla^2 T \quad (10)$$

式中： $(\rho c)_t$  为等效容积热容量，且  $(\rho c)_t = \phi(\rho c)_f + (1 - \phi)(\rho c)_s$ ； $k_t$  为等效热传导系数，且  $k_t = \phi k_f + (1 - \phi)k_s$ 。

## 2.2 介质参数及边界条件、初始条件<sup>[10, 11]</sup>

### 2.2.1 介质传导系数及容积热容量的确定

应用显热容法，可假设相变发生在温度区间  $[T_m - \Delta T^*, T_m + \Delta T^*]$ ，当建立等效比热时，应考虑温度间隔  $\Delta T^*$  的效应，假设介质在正冻、未冻时的容积热容量分别为  $C_f$  和  $C_u$ ，热传导系数分别为  $\lambda_f$  和  $\lambda_u$ ，而且都不取决于温度，则  $C^*$  和  $\lambda^*$  的表达式为

$$C^* = \begin{cases} C_f & (T < (T_m - \Delta T^*)) \\ \frac{L}{2\Delta T^*} + \frac{C_f + C_u}{2} & ((T_m - \Delta T^*) < T < (T_m + \Delta T^*)) \\ C_u & (T > (T_m + \Delta T^*)) \end{cases} \quad (11)$$

$$\lambda^* = \begin{cases} \lambda_f & (T < (T_m - \Delta T^*)) \\ \lambda_f + \frac{\lambda_u - \lambda_f}{2\Delta T^*} [T - (T_m - \Delta T^*)] & ((T_m - \Delta T^*) < T < (T_m + \Delta T^*)) \\ \lambda_u & (T > (T_m + \Delta T^*)) \end{cases} \quad (12)$$

各介质热力学参数见表 1。

表 1 块石路基结构中各介质的热力学参数

Table 1 Thermodynamic parameters of various media

介质	$\lambda_f$ /(W·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	$\lambda_u$ /(W·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	$C_f$ (J·m <sup>-3</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	$C_u$ (J·m <sup>-3</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	$L$ (J·m <sup>-3</sup> )
道渣	0.346	0.346	1.006 × 10 <sup>6</sup>	1.006 × 10 <sup>6</sup>	
砂砾石	1.980	1.919	1.913 × 10 <sup>6</sup>	2.227 × 10 <sup>6</sup>	20.4 × 10 <sup>6</sup>
块石层	0.387	0.387	1.015 × 10 <sup>6</sup>	1.015 × 10 <sup>6</sup>	
亚粘土	1.351	1.125	1.879 × 10 <sup>6</sup>	2.357 × 10 <sup>6</sup>	60.3 × 10 <sup>6</sup>
弱风化岩	1.824	1.474	1.846 × 10 <sup>6</sup>	2.099 × 10 <sup>6</sup>	37.7 × 10 <sup>6</sup>

### 2.2.2 空气性质的确定

在海拔 4 500 多米高度,空气定压比热  $C_a = 1.004$  kJ/(kg·°C),热传导系数  $\lambda_a = 2.0 \times 10^{-2}$  W/(m·°C),动力粘滞系数  $\mu = 1.75 \times 10^{-5}$  kg/(m·s)。由于密度  $\rho$  随温度变化,控制热对流的方向性,这里取研究区温度变化范围内的 2 个温度点对应的密度确定空气密度的变化,即  $\rho_{-15} = 0.677$  kg/m<sup>3</sup>,  $\rho_{15} = 0.605$  kg/m<sup>3</sup>,其他温度时的空气密度根据 2 个点确定的  $\rho - T$  线性关系确定。

### 2.2.3 边界条件及初始条件的确定

模拟以海拔 4 500 m 处的路基结构为计算模型,假设路基于 8 月 1 日完成。忽略气候变暖及日气温变化的影响,对于天然地表年平均气温为 -4 的情况,根据附面层理论,天然地表的温度变化规律为

$$T_1 = -1.5 + 12 \sin\left(\frac{2\pi}{8760 \times 3600} t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (13)$$

路堤和道床斜坡的温度变化规律为

$$T_2 = 0.7 + 13 \sin\left(\frac{2\pi}{8760 \times 3600} t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (14)$$

路基中路面 EF 的温度变化规律为

$$T_3 = 1.5 + 15 \sin\left(\frac{2\pi}{8760 \times 3600} t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (15)$$

根据模型简化条件,模型侧边水平向绝热。地基初始温度确定时,对无路堤模型在地表施加温度  $T_1$  进行  $n$  年计算,直到地温场逐年几乎无变化,此时的最终地温场作为初始模拟地温场。对路堤整体加初始温度 8 。

## 3 结果对比分析

### 3.1 温度场特征对比分析

图 2 为普通路堤及块石路堤不同砂砾石厚度情况下路基运营到第 10 年(温度场基本稳定后)的 1 月 1 日、4 月 1 日、7 月 1 日、10 月 1 日地温场对比。从图 2 中可以看出,普通路堤的修筑在给定边界条件下,会给路基带来很大的热扰动,一方面使路基下多年冻土层地温比天然状况显著升高;另一方面使路基在冬季仍存在很大的融化盘。而块石路基的修筑,能在抑制多年冻土层地温升高和缩小融化盘范围这两方面起到很好的效果,表明了块石的制冷作用。

当砂砾石层厚度小于 2 m 时,路基下活动层中的融化盘基本被消除;当砂砾石层厚度等于 2 m 时,融化盘又开始出现,并随着砂砾石厚度的增加而扩大。当砂砾石厚度小于等于 4.5 m 时,在 10 月份路基中心多年冻土层中出现低温盘,并随砂砾石厚度的减小,低温盘温度也越低;而当砂砾石厚度大于 4.5 m 时,路基中心下多年冻土层的低温盘消失,同时,多年冻土层温度开始升高,低温盘开始偏离路基中心向路堤坡脚移动。这种现象随砂砾石厚度的增加而愈加明显,说明砂砾石厚度增加,降低了路基中心块石的降温效果。

表 2 给出了各种路堤状况下路堤中心与路堤坡脚两处天然地表下 1.5 和 5.0 m 不同深度点第 10 年(在普通路堤及不同砂砾石层厚度的块石路堤条件下年温度场基本达到稳定)的温度值。从表 2 中可以看出,地下温度变化的高温期相对于地表的高温期有相当长时间的滞后,深度越大,砂砾层厚度越大,滞后时间越长;路堤中心比路堤边坡下滞后时间长。砂砾石厚度的增加对地温的影响除 1.5 和 5.5 m 两个厚度有突变外,总体趋势是随砂砾石厚度的增加,地温非线性抬升;边坡附近变化幅值小,只有 0.5 左右,而路基中心变化幅值较大:砂砾石厚度从 1.0 m 变化到 10.5 m,路基中心天然地表下 1.5 m 的

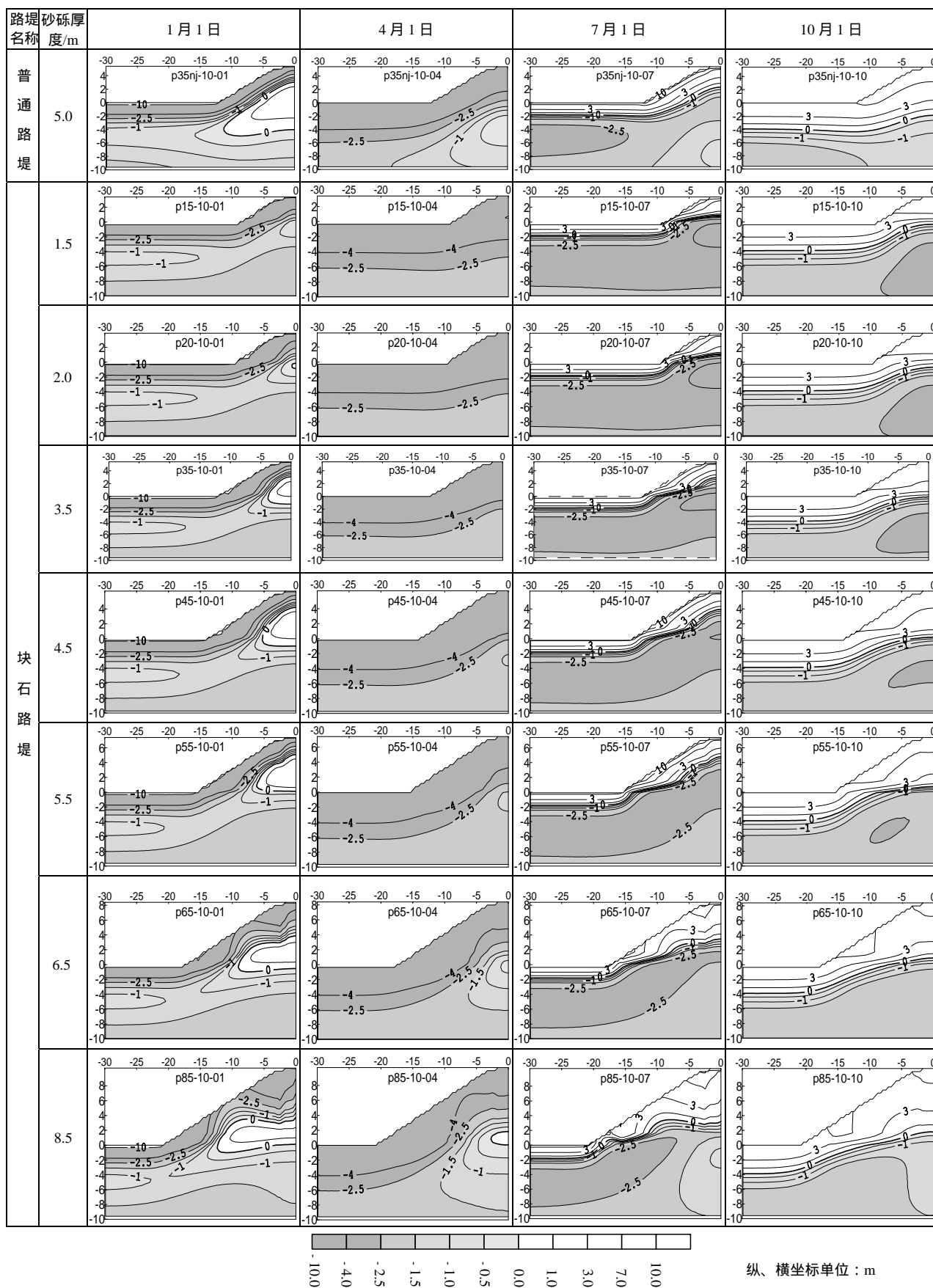


图 2 普通路堤及块石路堤不同砂砾石厚度情况下路基运营第 10 年的地温场对比

Fig.2 The 10th year's temperature distribution in common embankment and block-stone embankment with upper sand-and-gravel layer in different thicknesses

表 2 各种路堤状况下路堤中心与路堤坡脚两处天然地表下 1.5 和 5.0 m 不同深度点第 10 年的温度值

Table 2 The 10th year's temperatures of different points at center and toe of embankment with different depths beneath the natural ground surface

路堤名称	块石路堤上 覆砂砾石厚 /m	路堤中心天然地表下 1.5 m				路堤中心天然地表下 5.0 m				路堤坡脚天然地表下 1.5 m				路堤坡脚天然地表下 5.0 m			
		1 月	4 月	7 月	10 月	1 月	4 月	7 月	10 月	1 月	4 月	7 月	10 月	1 月	4 月	7 月	10 月
块石路堤	1.0	-0.87	-5.88	-4.40	-1.12	-1.79	-2.51	-3.49	-2.82	-4.13	-6.90	0.04	3.05	-1.35	-2.97	-3.200	-1.71
	1.5	-0.80	-5.34	-4.55	-1.54	-1.96	-2.43	-3.43	-2.96	-4.15	-6.89	0.03	3.00	-1.37	-2.98	-3.200	-1.72
	2.0	-0.26	-5.18	-4.70	-1.16	-1.81	-2.29	-3.42	-2.92	-4.28	-7.02	0.20	3.30	-1.30	-2.96	-3.200	-1.68
	2.5	-0.14	-4.49	-4.69	-1.35	-1.86	-2.13	-3.27	-2.94	-4.24	-7.01	0.19	3.31	-1.27	-2.98	-3.190	-1.63
	3.5	-0.25	-2.87	-4.28	-1.80	-1.95	-1.85	-2.82	-2.83	-4.27	-7.01	0.23	3.31	-1.23	-2.98	-3.150	-1.56
	4.5	-0.41	-1.64	-3.49	-2.00	-1.73	-1.63	-2.33	-2.56	-4.22	-6.99	0.28	3.35	-1.18	-2.89	-3.105	-1.54
	5.5	-1.20	-1.38	-2.71	-2.31	-2.12	-1.82	-2.12	-2.41	-4.1	-6.86	0.14	3.10	-1.24	-2.89	-3.090	-1.56
	6.0	-0.34	-1.00	-2.71	-1.95	-1.78	-1.41	-1.88	-2.22	-4.18	-6.96	0.38	3.48	-1.09	-2.84	-3.030	-1.43
	6.5	-0.64	-0.58	-1.82	-1.75	-1.67	-1.33	-1.53	-1.86	-4.18	-6.93	0.32	3.37	-1.10	-2.83	-3.010	-1.43
	7.5	-0.72	-0.45	-1.29	-1.53	-1.51	-1.23	-1.29	-1.57	-4.16	-6.95	0.34	3.43	-1.06	-2.80	-3.000	-1.41
普通路堤	8.5	-0.78	-0.44	-0.93	-1.29	-1.37	-1.16	-1.14	-1.35	-4.18	-6.95	0.32	3.44	-1.06	-2.80	-3.000	-1.41
	9.5	-0.78	-0.44	-0.70	-1.06	-1.21	-1.08	-1.01	-1.15	-4.04	-6.83	0.55	3.64	-0.96	-2.88	-2.940	-1.20
	10.5	-0.69	-0.39	-0.50	-0.81	-1.03	-0.95	-0.87	-0.95	-4.01	-6.81	0.54	3.64	-0.94	-2.85	-2.920	-1.18
	5.0	1.57	-0.71	-1.83	0.35	-0.35	-0.27	-1.06	-1.05	-3.75	-6.44	1.75	4.77	-0.26	-2.14	-2.260	-0.34

低温抬升幅值可达 5℃，高温抬升幅值可达 0.5℃；天然地表下 5.0 m 的低温抬升幅值可达 2.5℃，高温抬升幅值为 1℃左右。砂砾石厚度增加对冻土高温与低温值的这种差异影响正体现了其对块石制冷效果的影响，低温抬升幅度大，说明块石层制冷能力减弱。

图 3 为路基中心天然地表以下 1.5 和 5.0 m 两点在不同计算模型下的温度随时间变化曲线(由于版面限制，只显示前 5 a)，可以看出，普通路基浅部在运行后的 1 a 内，温度基本达到年平衡状态，在深部则表现升温的趋势；而块石路基地温达到平衡则需要很长一段时间(甚至 7~8 a)，且其年均温度及年最高温度均呈逐年下降趋势，初始幅度大，后逐渐减弱，显示了块石的持续制冷作用。不同砂砾石厚度情况下，路基中心的降温过程随砂砾石厚度增大而愈加缓慢，达到平稳所需时间愈长。

从图 3 中 1.5 m 深度点可以看出，同一深度点在不同砂砾石厚度下，一方面其温度年变化幅值随砂砾石厚度增大而减小；另一方面其年平均温度随厚度的增加而升高，相对天然状况的降温幅度也相对减小。这种变化主要表现在冬季低温的升高及夏

季高温的降低，但低温期表现更明显，而高温期相对较弱，表现出明显的不对称性，显示砂砾石厚度的增加影响了块石冬季的降温作用。5.0 m 深度点在砂砾石厚度小于 6 m 时，也表现出类似的规律，但高温与低温均随砂砾石厚度增加而抬升，只是低温抬升幅度大；当砂砾石厚度大于 6 m 时，其温度表现了随砂砾石厚度增加而整体抬升的趋势。

另外，块石厚度为 1.5 和 5.5 m 两种情况时，其高温的降低较相邻情况出现变异，降低幅度较大，说明这两种情况下，块石中空气对热量的传入起到更强的抑制作用。

### 3.2 块石层空气流速分析

为分析块石的冷却效果，对块石层在不同上覆砂砾石厚度下的空气流速进行了分析，图 4 给出了砂砾石厚度为 3.5 和 6.5 m 两种情况下块石中空气的垂直流速分布(第 10 年)。从图 4 中可以看出，块石中空气产生强的对流始于每年的 11 月份中下旬，至 1 月份对流速度达到最大。对流最初产生于块石边坡，而后随时间推移，对流区逐渐向块石内部扩展，强对流中心也逐渐向路基中心移动，3 月份，强对流区移动深度达到最大，而后对流逐渐减弱，至 5

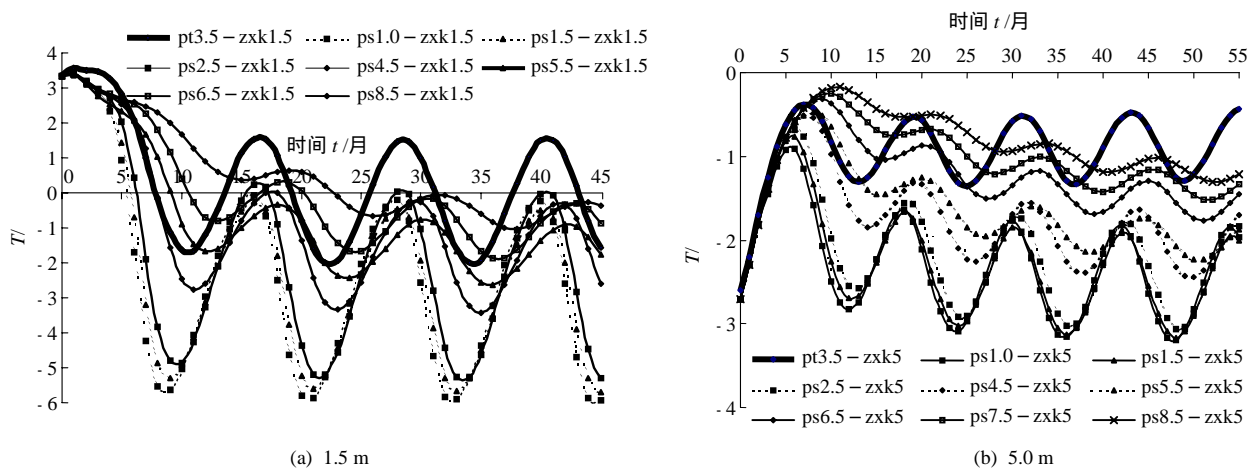


图 3 路基中心天然地表以下 1.5 和 5.0 m 两点在不同计算模型下的温度随时间变化曲线

Fig.3 T - t curves of 1.5 and 5.0 m under natural ground surface below the embankment center in different model

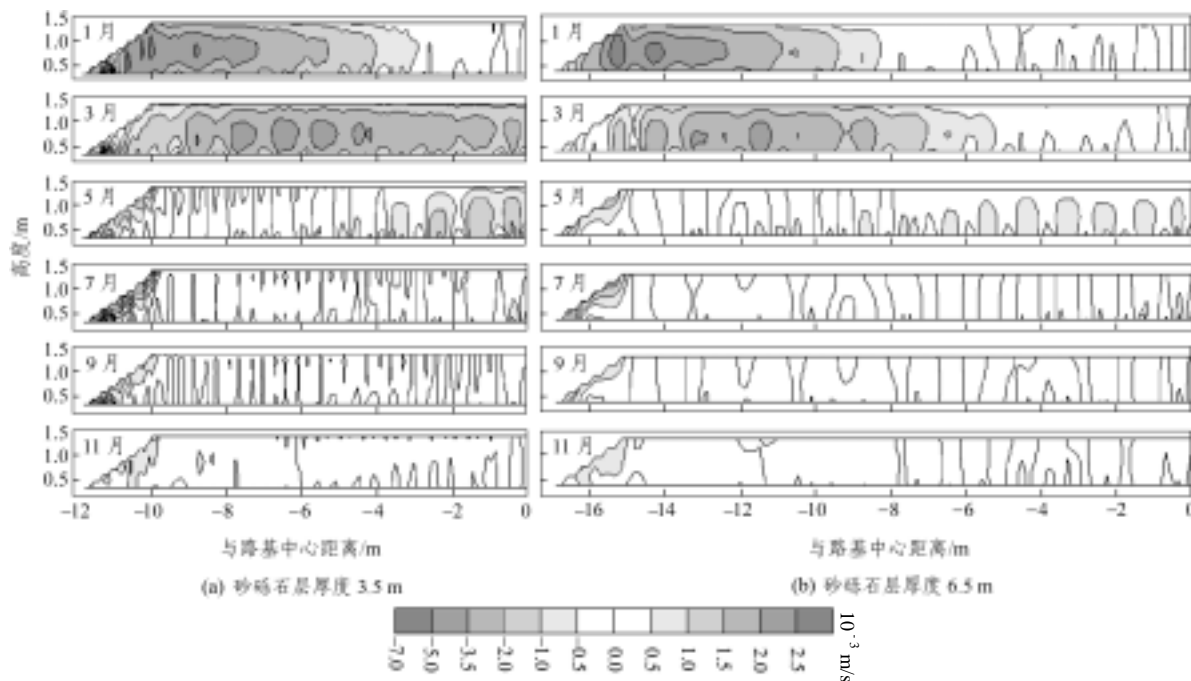


图 4 砂砾石厚度为 3.5 和 6.5 m 两种情况下块石中空气的垂直流速分布(第 10 年)

Fig.4 Vertical velocity distribution of air in the block stone with upper sand-and-gravel layer thickness of 3.5 and 6.5 m

月份, 靠近边坡块石内部对流已变得很弱, 只在路堤中心附近还存在相对较强的对流。7 月份以后, 整个块石层对流几乎停滞。块石中空气的这种冬季强对流、夏季几乎不对流的特性, 正是块石能对路基产生主动冷却效果的原因。

对比图 4(a), (b)可以看出, 在砂砾石厚度为 6.5 m 的情况下, 靠近路基中心有将近 4 m 宽度的块石区, 其空气流速全年都很微弱, 说明这部分区域的块石几乎已失去了制冷的作用, 而只起到了低导隔热作用; 而靠近边坡的块石, 其空气冬季对流夏季隔热的作用仍然存在。说明砂砾石增厚降低了块石的制冷强度, 特别是靠近路基中心一定范围的

块石几乎丧失了制冷作用。根据计算分析, 在给定边界条件下, 当砂砾石厚度大于 5.5 m 的时候, 块石中部就开始出现丧失制冷作用区。

块石层中的空气水平流动速率随时间的变化及水平空间上的大小分布表现出与垂直速度相似的特征, 但速率高值区位于块石顶底面附近, 而非块石层中心, 显示了空气的对流循环。

### 3.3 不同模型下路基多年冻土上限位置变化

路基多年冻土上限的确定用 1 a 中不同时间地下零温线的下包络线确定。

图 5 为以路堤坡脚为基准点画出的不同砂砾石层厚度块石路堤及普通路堤下多年冻土上限位置对

比图。从图 5 可以看出，普通路堤下的多年冻土上限相对于天然条件有所下降，在路堤坡脚附近最明显；相对于普通路堤，块石路堤均能很大程度地提高多年冻土的上限，总体表现为随砂砾石厚度的增加，路基中心多年冻土上限上升(见图 6)，而坡脚多年冻土上限下降(见图 7)，但存在 1.0~1.5 及 5.5 m 两个突变点，在这两种情况下，多年冻土上限明显高于其他厚度情况。从图 5 中还可以看出，除两种突变情况外，砂砾石越厚，多年冻土上限位置曲线越低，说明砂砾石厚度的增加降低了块石的总体制

冷效果；虽然路基中心多年冻土上限位置随砂砾石厚度增大而逐渐抬升，但这种情况的发生是由于路堤高度的增加而导致的，其代价为路基多年冻土层的冻结强度降低及边部块石制冷的冷能散失，前面温度场特征及块石中空气流速分布特征能很好地说明这一点。

随砂砾石厚度的增加，路基中心多年冻土上限位置不可能一直抬升，图 5, 6 也显示了在模拟所给定条件下，当砂砾石厚度达到 9.5 m 后，路基中部多年冻土上限基本趋于平缓。另外，考虑全球气候变暖<sup>[10]</sup>的因素及路堤厚度增加所产生的高荷载，要保证铁路的安全运行，保护路基下的冻土，砂砾石厚度最好不要超过一定限度，如本模拟所得到的块石 1.5 m 厚度下，砂砾石厚度最好不要超过 6 m，这样，块石的整体制冷能力能保证路堤下冻土不升温甚至降温，同时保证路基下多年冻土上限位置的最大抬升。

### 4 结 论

块石路堤的修建能很好地保护冻土，起到主动冷却路基、抬升路基多年冻土上限的作用，但块石上覆砂砾石厚度的变化对块石路基的冷却效果也存在很大影响。一方面，块石上覆砂砾石越厚，地表温度变化传到块石层顶的幅值将相应减小，从而降低块石中空气的对流速率，减弱块石的制冷能力，多年冻土层温度相对抬升，冻结强度相对减弱；另一方面，虽然随块石上覆砂砾石层厚度的增加，路基中心多年冻土上限位置一直抬升，但边坡附近多年冻土上限位置却一直下降，多年冻土顶板至路堤表面间的冻融层厚度也一直增加，而且当砂砾石层厚度达到 9.5 m 后，路基中心多年冻土上限位置基本趋于平缓。

综合考虑铁路路堤下多年冻土强度、地温、冻融层厚度、时间效应、路堤荷载、全球气候变暖等因素，要保证青藏铁路的安全运行，保护路基下的冻土，砂砾石层厚度最好控制在一定限度。设计砂砾石厚度与块石厚度的关系时要兼顾多年冻土上限抬升及多年冻土冻结强度两方面，如能通过模拟得到的两个突变厚度，这样既能大幅抬升多年冻土上限位置，又能增加多年冻土的冻结强度。

以上结论是在理论模型下得到的，由于还没有

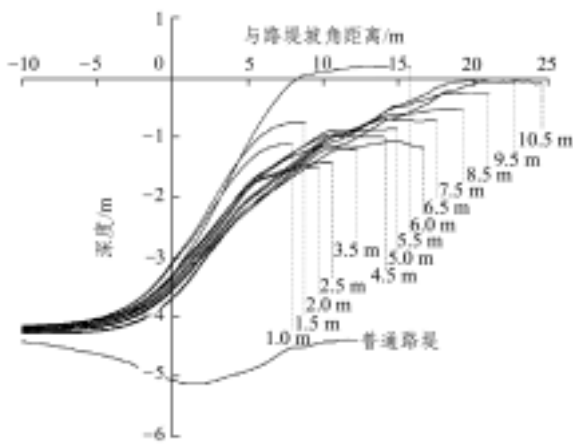


图 5 不同砂砾石层厚度块石路堤及普通路堤下多年冻土上限位置对比图

Fig.5 Permafrost table under common embankment and block-stone embankment with different thicknesses of sand-and-gravel layers

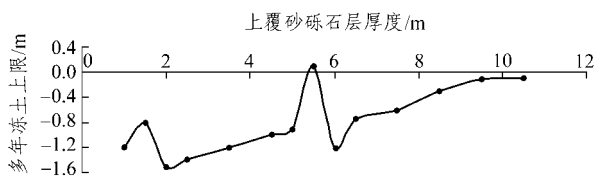


图 6 上覆砂砾石层厚度与路基中心多年冻土上限的关系

Fig.6 Relation between the permafrost table under the embankment center and the sand-and-gravel layer thickness

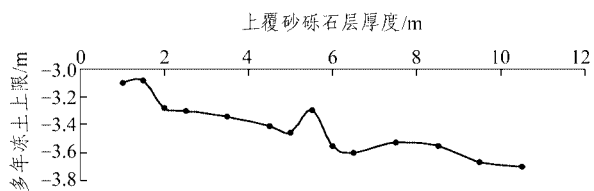


图 7 上覆砂砾石层厚度与路堤坡脚多年冻土上限的关系

Fig.7 Relation between the permafrost table under the embankment toe and the sand-and-gravel layer thickness



实际资料验证, 没有针对具体场地, 因此在定量数值上可能存在偏差, 但定性结论还是可靠的, 仅供建设者参考。

### 参考文献(References):

- [1] Mikhailov G P. Temperature regime of embankment consisting of coarse rock on permafrost[J]. *Transportation Construction*, 1971, 12: 32–33.
- [2] Cheng K T, Tung P L. Experimental research on an embankment in an area with massive ground ice at the lower limit of alpine permafrost[A]. In: *Proceedings of the Third International Conference on Permafrost*[C]. Ottawa: National Research Council of Canada, 1978. 199–222.
- [3] 程国栋, 童伯良, 罗学波. 厚层地下冰地段路堤建筑中的两个重要问题[J]. *冰川冻土*, 1981, 3(2): 6–11.(Cheng Guodong, Tong Boliang, Luo Xuebo. Two important problems of embankment constructions in thick underground ice regions[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1981, 3(2): 6–11.(in Chinese))
- [4] Goering D J. Parks ridge air convection embankment experimental feature[R]. Washington, D. C.: Federal Highway Administration, 2001.
- [5] 孙志忠, 马巍. 青藏铁路北麓河试验段抛石护坡工程措施初步分析[J]. *冻土工程国家重点实验室年报*, 2002, 12: 132–139.(Sun Zhizhong, Ma Wei. Preliminary analysis of ballast revetment experimental engineering[J]. *Annual of State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering*, 2002, 12: 132–139.(in Chinese))
- [6] 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))
- [7] 冯文杰, 李冬庆, 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 studied with different models and temperatures[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, 23(4): 353–359.(in Chinese))
- [8] Goering D J, Instanes A, Knudsen S. Winter-time convection in open-graded embankments[J]. *Cold Region Science and Technology*, 1996, 24: 57–74.
- [9] Goering D J, Kumar P. Convection heat transfer in railway embankment ballast[A]. In: *Ground Freezing 2000*[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 2000. 31–36.
- [10] 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.(Lai Yuanming, Zhang Luxin, Zhang Shujuan, et al. The cooling effect of broken rock mass embankment of Qinghai—Tibet railway on condition of climate warming[J]. *Science Bulletin*, 2003, 48(3): 292–297.(in Chinese))
- [11] 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.(Lai Yuanming, Zhang Luxin, Xu Weize, et al. Temperature features of broken rock mass embankment in the Qinghai—Tibet railway[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(3): 291–295.(in Chinese))
- [12] 程国栋. 局地因素对多年冻土分布的影响及其对青藏铁路设计的启示[J]. *中国科学(D 辑)*, 2003, 33(6): 602–607.(Cheng Guodong. The effects of local factors on the distribution of permafrost and the inspiration to the construction of Qinghai—Tibet railway[J]. *Science in China(Series D)*, 2003, 33(6): 602–607.(in Chinese))
- [13] 程国栋. 青藏铁路工程与多年冻土相互作用及环境效应[J]. *中国科学院院刊*, 2002, (1): 21–25.(Cheng Guodong. The interacting of Qinghai—Tibet railway and permafrost and the environmental effect[J]. *Publication of Chinese Academy of Sciences*, 2002, (1): 21–25.(in Chinese))
- [14] 程国栋. 用冷却路基的方法修建青藏铁路[J]. *冻土工程国家重点实验室年报*, 2002, 12: 102–105.(Cheng Guodong. Construct the Qinghai—Tibet railway using the methods of cooling the roadbed actively[J]. *Annual of State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering*, 2002, 12: 102–105.(in Chinese))
- [15] 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))
- [16] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999. 32–35.(Kong Xiangyan. *Advanced Fluid Mechanics in Porous Media*[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1999. 32–35.(in Chinese))
- [17] 张涵信. 多孔介质中热对流的分叉机理研究[J]. *力学学报*, 1994, 26(2): 129–137.(Zhang Hanxin. Study on the divaricating mechanics of heat convection in porous media[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1994, 26(2): 129–137.(in Chinese))