

青藏铁路块石路基结构的冷却效果监测分析

吴青柏¹, 赵世运^{1, 2}, 马巍¹, 刘永智¹, 张鲁新^{1, 2}

(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. 青藏铁路建设总指挥部, 青海 格尔木 8610000)

摘要: 块石路基是青藏铁路积极保护多年冻土极为重要工程措施之一, 60%的高温高含冰量路段采用了这种工程措施。通过对青藏铁路沿线块石路基下部土体温度监测分析, 块石路基正在积极地发挥冷却路基的工程效应, 极大地促进了多年冻土上限的抬升, 但也引起了多年冻土温度升高。多年冻土温度升高随着工程热扰动的降低和块石路基“冷量”积累, 已逐渐被抑制。然而, 对于低温多年冻土来说, 块石路基下部多年冻土上限附近温度有了较大的“冷量”积累, 多年冻土正在朝着有利于热稳定方向发展。对于高温多年冻土来说, 尽管多年冻土上限也得到了较大幅度的抬升, 但升温过程和土体年收支的不平衡都在朝着不利于多年冻土热稳定方向发展。块石路基结构在高温多年冻土区适应性问题仍值得讨论, 应采取相对应的补强措施, 确保高温多年冻土区路基稳定性。

关键词: 青藏铁路; 多年冻土; 块石路基; 冷却效果; 监测分析

中图分类号: TU 445

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2005)12-1386-05

作者简介: 吴青柏(1964-), 男, 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所研究员, 博士生导师, 主要从事冻土工程与环境研究。

Monitoring and analysis of cooling effect of block-stone embankment for Qinghai-Tibet Railway

WU Qing-bai¹, ZHAO Shi-yun^{1, 2}, MA Wei¹, LIU Yong-zhi¹, ZHANG Lu-xin^{1, 2}

(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. Management Center of Qinghai-Tibet Railway, Germu 816000, China)

Abstract: Block-stone embankment is one of the most important engineering measure for protecting permafrost of Qinghai-Tibet Railway which has been used in about 60% sections of warm permafrost with high ice content. After monitoring analysis of soil temperature beneath the block-stone embankment of Qinghai-Tibet Railway, it can be concluded that the block-stone embankment is working positively for cooling the roadbed and making the great rise of permafrost table, but also causing a temperature rise of permafrost. The trend of permafrost temperature rise will be gradually restrained by reducing engineering thermal disturbances and soil temperature drop beneath the block-stone embankment. And, for cold permafrost, a better thermal stability situation will be developed under the condition that the temperature near the permafrost table beneath the block-stone embankment has largely dropped. But, even the permafrost table has highly raised the annual thermal imbalance of soil and the process of temperature rise, it is disadvantageous for the thermal stability of permafrost. Thus, the applicability of block-stone embankment structure is worth to be discussed in order to take corresponding measures to solve the stability problems of embankment in warm permafrost regions.

Key words: Qinghai-Tibet Railway; permafrost; block stone embankment; cooling effect; monitoring analysis

0 前言

青藏铁路穿越 550 km 多年冻土区, 其中年平均地温高于 -1.0°C 的高温多年冻土路段为 275 km, 高含冰量冻土类型路段长为 221 km, 高温、高含冰量冻土重叠路段长为 124 km。在气候和工程作用下高温高含冰量冻土极易发生融化而产生融化下沉变形^[1-3], 因此高温高含冰量冻土路基稳定性成为青藏铁路建设的关键问题。为了解决高温高含冰量多年冻土热稳定性, 避

免多年冻土上限处地下冰发生融化, 使路基产生融化下沉, 青藏铁路采用了冷却路基、积极保护多年冻土思路^[4, 5], 通过调控对流、辐射和传导来有效地降低多年冻土体温度, 抬高路基下部多年冻土上限^[6]。

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

收稿日期: 2005-03-28

块石路基结构是一个最典型的冷却路基工程措施。夏季块石层内空气起隔热作用, 冬季块石层内产生冷热空气对流^[7], 较好地控制了多年冻土热稳定性。美国阿拉斯加费尔班克斯地区沥青路面下就采用这种技术开展了试验研究, 研究表明, 块石路基结构 5 年间使路基下部土体温度降低了 4.4℃^[7, 8]。

青藏铁路采用的块石路基结构上部有一定厚度路堤填料层, 属于开放体系。阿拉斯加使用的结构上部是用保温材料代替路基填料, 且完全密封。完全封闭状态块石层结构冷却效果已经得到了室内模型试验验证^[9]。青藏铁路块石路基结构是否具有空气对流效应, 能否有效地降低土体的温度, 块石路基上覆填土高度是否影响冷却效应等问题是青藏铁路块石路基修筑迫切需要回答的。

本文针对这些问题, 在青藏铁路多年冻土区布设了监测断面, 以监测块石路基冷却效果, 为青藏铁路高温高含冰量多年冻土区工程措施补强设计提供科学依据。利用青藏铁路多年冻土区 6 个块石路基监测场地对全线块石路基下部土体温度状态、多年冻土上限变化和“冷量”积累监测结果进行分析, 以评价块石路基结构对多年冻土降温作用和趋势的影响。

1 块石路基下多年冻土上限变化

从表 1 可以看出, 块石路基施工后多年冻土上限

得到了较大幅度的抬升, 上限抬升幅度一般在 1.7~2.6 m 左右, 多年冻土上限抬升极大地降低了多年冻土上限附近地下冰融化。促使多年冻土上限抬升有几种原因, 一是多年冻土存在自下而上的冻结过程, 但是自下而上冻结过程最大每年仅能冻结 5 cm^[10]; 二是由于填筑路基后引起上限抬升。但与一般路基下多年冻土上限抬升幅度相比, 引起上限上抬的因素都不足以导致上限产生如此大幅度抬升, 因此我们可以判定块石路基结构正在起着积极而良好的作用。

表 1 可以看出, 多年冻土上限抬升幅度与年平均地温并没有必然联系。通天河阶地、乌丽盆地和斜水河等高温多年冻土区, 多年冻土上限抬升幅度可达 1.8~2.6 m, 而楚玛尔河高原、北麓河盆地等低温基本稳定多年冻土区, 多年冻土上限上升幅度为 1.8~1.9 m, 可可西里和风火山地段等低温稳定多年冻土区, 多年冻土上限抬升幅度在 1.7~1.8 m 左右。然而, 有一个值得注意的问题是, 尽管块石路基下部多年冻土上限得到了较大幅度的抬升, 但块石路基下部多年冻土温度处于升温过程 (如图 1 所示), 这种升温过程可能与工程作用有关, 随着块石路基降温作用的发挥, 多年冻土上限以下土体的升温过程会逐渐被抑制。但是否所有的块石路基结构都能够正常发挥作用, 有效地抑制下部土体的升温过程。

表 1 块石路基工程多年冻土上限抬升

Table 1 Rising of permafrost table beneath block stone embankment

地点	多年冻土年平均地温/℃	多年冻土上限/m	工程设计参数/m		路基下人为多年冻土上限/m	上限变化/m
			填土高度	路基高度		
楚玛尔河	-1.48	2.60	2.1	3.1	3.90	+1.80
斜水河	-0.72	2.45	5.1	6.30	6.15	+2.60
可可西里	-2.64	1.60	2.4	4.0	3.40	+1.60
北麓河盆地	-1.48	1.90	2.3	4.50	4.50	+1.90
风火山区	-2.23	1.50	3.5	5.7	6.45	+1.70
乌丽盆地	-0.50	2.80	2.5	3.7	4.60	+1.90
布曲河阶地	-0.34	2.40	1.8	3.0	3.60	+1.80

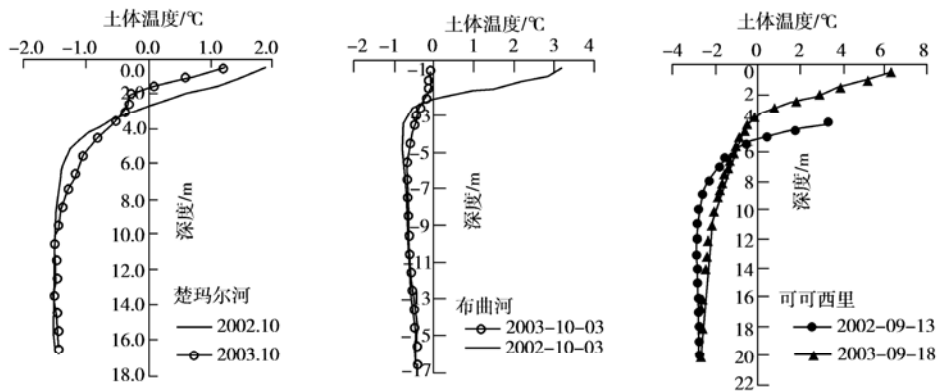


图 1 块石路基下土体的热状态

Fig. 1 Thermal regime of soil beneath block stone embankment

2 块石路基下多年冻土上限温度变化

多年冻土上限温度是多年冻土是否发育的一个重要能量标志,因此分析多年冻土上限附近温度变化成为评价块石路基降温效果的一个重要因素。图2给出了不同年平均地温条件下多年冻土上限附近温度的变化。

图2可以看出,多年冻土上限附近温度变化明显地划分出了三个层次,恰好与年平均地温层次划分一致。第一层次是低温极稳定型多年冻土,上限温度降温趋势最强,其次是低温基本稳定型多年冻土,最后是高温不稳定型多年冻土,说明年平均地温越低降温趋势越显著,多年冻土上限附近“冷量”积累最大,随着年平均地温升高,多年冻土上限附近“冷量”基本无积累过程。上述这种特征说明了块石路基对于低温多年冻土作用是明显的,而对于高温多年冻土来说,多年冻土上限附近温度基本上就是维持一个热平衡状态,块石路基基本尚没有很好地发挥冷却路基、降低多年冻土温度的作用。当多年冻土上限以下土体温度升温接近上限附近温度时,多年冻土上限将会发生下移,接近原天然上限,甚至会超过原天然上限深度。块石路基下部多年冻土一旦形成这样热状态,原天然多年冻土上限附近处的地下冰就会发生融化,导致路基产生融化下沉破坏。因此,对于高温多年冻土来说,仅依靠块石路基结构尚不能够完全确保路基稳定性,必须采取补强措施来应对工程作用和气候变化给多年冻土带来的消极影响,如采取热棒措施和遮阳板措施等。

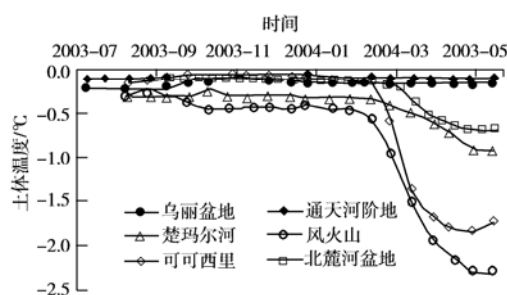


图2 块石路基下多年冻土上限附近温度变化

Fig. 2 Variation of soil temperature near permafrost table beneath block stone embankment

3 块石路基降温效果分析

块石路基结构利用了冬季空气对流效应和夏季空气隔热作用来有效地降低土体温度。夏季块石层顶底板温差大说明起隔热作用,冬季顶底板温差小说明块石层产生了自然对流强化传热作用。因此我们可以从

块石层顶底板间温差来分析块石路基降温效果。图3分别给出了乌丽盆地、可可西里盆地和风火山地段块石层顶底板温差变化。图3可以看出,在夏季温差均较大,相差2~3℃,说明块石层夏季产生了一定隔热作用。冬季大约11月初到2月初低温多年冻土区温差均较小,高温多年冻土区小温差仅维持到了12月中旬,说明块石层底板温度较高,在1个半月左右块石层底板温度低于顶板温度,使块石层下部土体维持在传导过程中。而对于低温多年冻土来说,小温差过程维持时间较高温多年冻土要多一个月左右,这样可使块石层下部土体维持较长时间的降温过程,产生更多“冷量”的积累。图3说明块石路基顶底板温差在地表开始冻结前温差较大,一般大于2.0℃,且随时间逐渐减小,而当地表冻结后,顶底板温差非常小,仅为0.5℃左右。这一变化特点与Saboundjian和Goering在阿拉斯加块石路基试验段监测资料的结论基本一致。

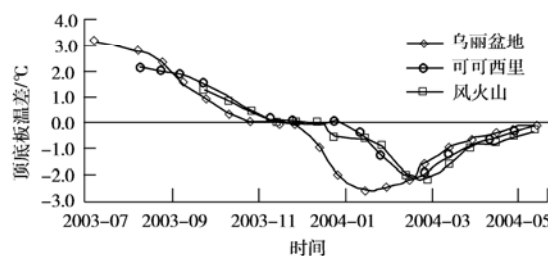


图3 块石层顶底板温差变化

Fig. 3 Variation of thermal offset between the top and bottom of block stone layer

4 块石路基下部多年冻土降温趋势分析

块石路基下部多年冻土上限得到了较大幅度的抬升,同时块石路基下部多年冻土是处在升温状态的,那么块石路基是否能够使多年冻土降温、确保多年冻土热稳定性,是青藏铁路块石路基措施和冷却路基思路的关键。为了更为准确地判断块石路基下部多年冻土降温趋势,我们结合热传导理论对进入块石层底部的0.5~1 m深度土体热流量进行近似分析,即

$$q = \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \approx \lambda \left(\frac{T_1 - T_{0.5}}{\Delta z} \right) \quad (1)$$

式中 q 为单位时间从传导介质上表面传导到下表面的热流量; λ 为导热系数 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); T 为温度, $T_{1.0}$ 和 $T_{0.5}$ 分别为块石路基下 1.0 m 和 0.5 m 深度处的温度; $\Delta z = 0.5$ 。计算中选取的导热系数如表2所示^[11]。

由2年来地温观测资料计算的块石路基下部土体的热流量结果如图4所示(正值代表吸热,负值代表放热)。将图4的热流量对时间积分就可得到块石

路基下部 0.5~1.0 m 深度处土体年收支情况, 结果整理于表 2。对于高低温多年冻土来说, 似乎吸热和放热过程有着极大的差别, 吸热期和放热期也有着较大的区别。楚玛尔河地段通过块石路基下 0.5~1.0 m 的土体在 1 月~7 月左右处于放热过程, 7 月~12 月处于吸热过程, 放热和吸热过程时间大致平衡, 且放热量要大于吸热量(图 4)。第二年的放热量比第一年增大 23%, 而第二年的吸热量仅比第一年增大 2.3%。可见, 楚玛尔河场地块石路基正在发挥着积极作用, 降温趋势较为明显(如图 5(a))。风火山场地块石路基由于在秋末修筑且放置了一个冬季未修筑上部填土, 因此第一年表现出了极强的放热过程, 放热量是吸热量的 2 倍多。在经过极强的放热过程后, 开始了较长期的吸热过程, 可能受到了上部填土过程中较强的热扰动影响, 吸热过程长达 10 个多月, 第二年的放热过程较短, 仅为 5 个月左右。吸热期远大于放热期, 年收支处于负平衡状态, 导致了多年冻土温度较大幅度的升温(如图 5(b))。布曲河阶地场地, 第一年吸热量小于放热量, 第二年放热量迅速减少了 96%, 吸热量基本不变。年收支极为不平衡, 吸热量远大于

放热量。但由于块石路基下部多年冻土地温极高, 通过 0.5~1.0 m 深度处土体的热流量几乎为 0(图 5(c)), 但这恰恰说明了多年冻土处于极限平衡状态, 无论是多年冻土上限还是多年冻土温度都将随着这种极限平衡的打破而发生较大的变化。

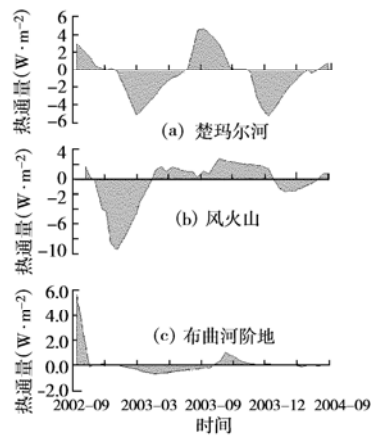


图 4 块石路基下 0.5~1.0 m 的土体的热流通
Fig. 4 Heat flux of soil at the depth of 0.5 m to 1.0 m beneath block stone embankment

表 2 块石路基下土体热通量计算结果

Table 2 Heat flux calculation of soil beneath block stone embankment								
地 点	计算中选取的导热系数		块石层下部土体热量/(kJ·m ²)				年变化量/% (相对于第一年)	
	/(W·m ⁻¹ ℃)							
	冻结	融化	放热		吸热		放热	吸热
			第一年	第二年	第一年	第二年		
楚玛尔河	2.23	1.71	45537	56017	21083	21578	23	2.30
风火山	1.93	1.71	61494	7169	24756	24830	-88	0.29
布曲河阶地	1.57	1.42	10922	485	9071	9014	-96	-0.63

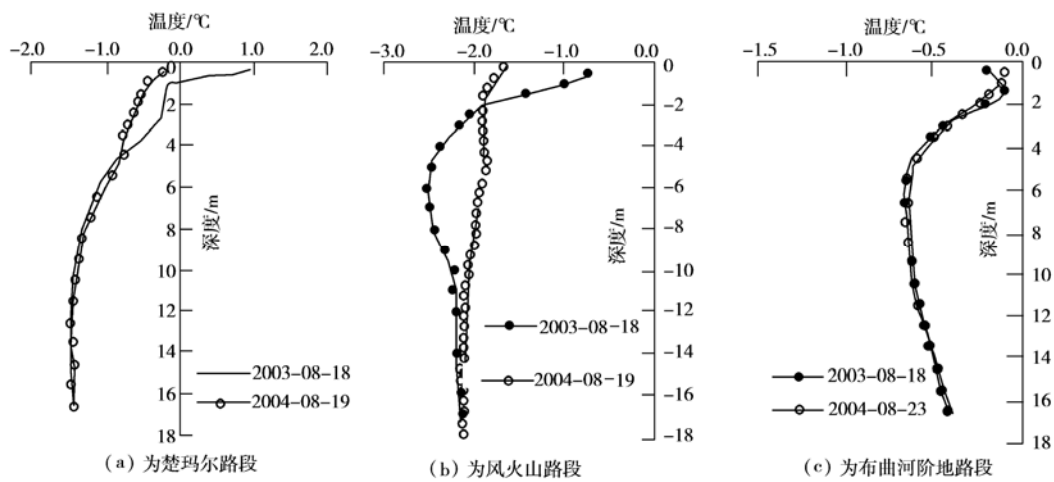


图 5 块石路基下部土体热状态对比
Fig. 5 Comparison of thermal regime of soil beneath block stone embankment

5 讨 论

高温多年冻土区, 块石路基并不能很好地发挥其降温作用。实际上块石路基上部填土减弱了块石层冬季空气对流效应, 导致块石路基不能起到有效的降温作用。风火山路段块石施工和上部填土施工是分离的, 大约在 10 月底块石开始施工, 然后在第二年的春季上部填土开始施工, 形成了大量“冷量”积累, 但第二年上限附近温度迅速升高, 上部填土减弱了块石层的冷却效应, 如图 6 所示。实际上块石层的冷却效应来源于大自然启示, 块石堆下的年平均地温比周围多年冻土中的地温要低 $5\sim 6^{\circ}\text{C}$, 在年平均气温为 $3\sim 4^{\circ}\text{C}$ 地区, 块石堆下部可以发现多年冻土^[12]。这充分说明了块石层冷却效应对多年冻土降温作用。块石路基结构能否适用于高温多年冻土区, 目前还需要进一步验证。

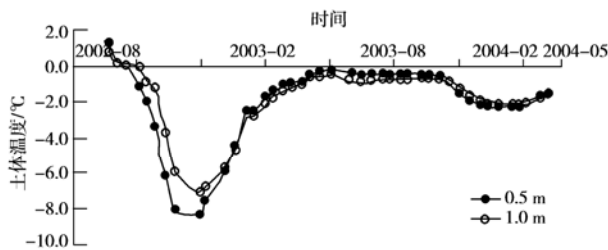


图 6 风火山地段多年冻土上限附近温度

Fig. 6 Temperatures near permafrost table in Fenghuo Mt.

6 结 论

(1) 所有的监测断面中, 块石路基下部多年冻土上限均得到了有效地抬升, 且抬升幅度在 $1.7\sim 2.4\text{ m}$ 。块石路基正在起着积极的降温作用。然而值得重视的是, 多年冻土上限抬升同时, 块石路基下部多年冻土温度升高。对于低温多年冻土来说, 多年冻土温度升高可以得到控制, 高温多年冻土温度升高会导致抬升的多年冻土上限下移。

(2) 块石路基有效地降低多年冻土附近温度, 获得了一定的“冷量”积累。这种“冷量”积累是确保多年冻土上限稳定的基础。多年冻土上限附近温度降低幅度与多年冻土年平均地温有着密切的关系, 且随着多年冻土年平均温度降低, 块石层下部冷量积累越强, 越有利于降温趋势的发展。

(3) 块石路基顶底板温差在冬季和夏季有较大的差异, 夏季温差大, 冬季温差小。说明了块石层正在起着较好的冷却作用。但块石层下热通量的计算结果显示, 低温多年冻土区块石路基正在起着较好的降温效果。高温多年冻土区, 特别是高温极不稳定多年冻土区, 块石路基上部填土减弱了冬季空气对流效应,

降低了多年冻土的降温效果。

(4) 低温多年冻土区, 块石路基正在积极地起着良好的降温作用, 高温多年冻土区块石路基不能够较好地保护多年冻土, 多年冻土正在朝着不利于热稳定性的方向发展。对于高温多年冻土区, 必须采取相应的预案来应对高温多年冻土区的路基稳定性问题。

参考文献:

- [1] Wu Qingbai, Liu Yongzhi. Ground temperature monitoring and its recent change in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Cold Region Science and Technology, 2004, **38**: 85 - 92.
- [2] Wu Qingbai Shi Bin, Liu Yongzhi. Interaction study of permafrost and highway along Qinghai-Xizang Highway[J]. Science in China, 2003, **46**(2): 97 - 105.
- [3] Qingbai Wu, Shi Bin, Fang Hsai-Yang. Engineering geological characteristics and processes of permafrost along the Qinghai-Xiang (Tibet) Highway[J]. Engineering Geology, 2003, **68**(3-4): 387 - 396.
- [4] 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.
- [5] 程国栋. 青藏高原多年冻土区路基工程地质研究[J]. 第四纪研究, 2003, **23**(2): 134 - 141.
- [6] 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.
- [7] Goering D J. Experimental investigation of air convection embankments for permafrost-resistant roadway design [A]. Proceedings of the 7th International Conference on Permafrost[C]. Yellowknife, NWT, 1998: 319 - 316.
- [8] Saboundjian S, Goering D J. Air convection embankment for Roadways: A field experimental study in Alaska[A]. Publication at the 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board[C]. Washington D C, 2003.
- [9] Yu Wenbing, Lai Yuanming, Zhang Xuefu, et al. Laboratory Investigation on cooling effect of coarse stone layer and fine stone layer in permafrost regions[J]. Cold regions science and technology. 2003, **38**(1): 31 - 42.
- [10] 程国栋. 多年冻土自下而上冻结的若干规律[A]. 青藏冻土研究论文集[C]. 北京: 科学出版社, 1983: 49 - 51.
- [11] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 75 - 97.
- [12] Gorbunov A P, Seversky E V. Influence of coarsely fragmental deposits on permafrost formation[A]. Extended Abstracts, International Symposium on Mountain and Arid Land Permafrost[C]. Ulaanbaatar: Ulaanbaatar Publish, 2001: 24 - 25.