

开放条件下粒径对块石和碎石护坡降温效果影响的试验研究

张明义, 赖远明, 高志华, 李东庆

(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)

摘 要: 对开放条件下, 粒径对块、碎石护坡降温效果的影响进行了一系列试验研究, 试验中选择的粒径范围为: 6~8、14~16、21~23、28~30 cm。结果表明: 迎风与背风两种条件下, 4种粒径块、碎石护坡均具有较好的降温效果, 均可在第2个试验周期将其下部土坡表面平均温度迅速降至0℃以下, 有效地对其下部土体进行降温。在迎风条件下, 粒径在6~30 cm内, 块、碎石护坡降温效果随粒径的增大而加强; 背风条件下, 块、碎石护坡降温效果在粒径为21~23 cm时最好。在外界气温等同的条件下, 块、碎石护坡底部温度周期变化幅值主要受到迎风与背风条件的影响, 块、碎石粒径的作用并不十分明显, 即在迎风条件下, 块、碎石护坡底部温度变化幅值远大于背风条件, 并且每个试验周期中迎风护坡底部的正温高于背风护坡, 且维持时间较长, 这不利于冻土路基的稳定。

关键词: 粒径; 迎风; 背风; 块、碎石护坡; 降温效果; 开放条件

中图分类号: TU521

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)11-1986-05

作者简介: 张明义(1974-), 男, 吉林梨树人, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事寒区岩土工程方面的科研工作。

Experimental investigation on influence of grain-diameter on cooling effect of crushed rock revetment with permeable boundary

ZHANG Ming-yi, LAI Yuan-ming, GAO Zhi-hua, LI Dong-qing

(State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: A series of experiments were constructed for the cooling effect of crushed rock revetments with different grain diameters under permeable boundary condition. The grain-diameters of crushed rock included four kinds: 6~8, 14~16, 21~23, 28~30 cm. The experimental results indicated that, under the windward and leeward conditions, the cooling effect of crushed rock revetments with all these four grain-diameters was good and could effectively reduce the temperatures of the underlying soil layers; furthermore, the mean periodic temperatures of soil slope surfaces under crushed rock revetments could be lowered down below 0 °C after two experimental cycles. Under windward condition, with the increase of grain diameter, the cooling effect of crushed rock revetment became better when its grain diameter ranged between 6 and 30 cm; under leeward condition, the cooling effect of crushed rock revetment with a grain diameter range of 21~23 cm was best. Besides, It was found that, under the experimental condition, the periodic temperature at the bottom of crushed rock revetment was mainly dominated by windward/leeward condition, and not by grain-diameter of crushed rock. Namely, the periodic temperature at the bottom of windward crushed rock revetment was far larger than that at leeward one, and the positive temperature range at the bottom of crushed rock revetment under windward condition in every cycle was far higher than that under leeward condition. Furthermore, the duration of the positive temperature was longer under windward condition. Therefore, it would be disadvantageous to the stability of permafrost embankment.

Key words: grain-diameter; windward; leeward; crushed rock revetment; cooling effect; permeable boundary condition

0 引 言

在青藏铁路建设中, 为了确保路基的稳定, 大量的主动冷却路基的方法和措施被采用, 其中块、碎石

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(40225001); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-351, KZCX1-SW-04); 中国科学院寒旱所人才引进基金资助项目(2004122)

收稿日期: 2005-09-01

已在路基中得到广泛的应用^[1]。大量的国内外试验研究^[2-7]和数值模拟计算^[8-12]表明, 块、碎石铺层在满足一定条件下可对其下部冻土起到积极的冷却降温和保护作用。

为了最大限度发挥块、碎石铺层的降温效果, 目前针对于其粒径问题也展开了一些研究。喻文兵等^[2]在室内对顶部开放的方形块、碎石层进行了试验研究, 发现碎石层的降温效果优于块石层的降温效果; 孙志忠等^[4]通过野外块、碎石护坡试验得出块石护坡的冷却效果优于碎石护坡; 全晓娟等^[12]对青藏铁路块、碎石路基最佳粒径进行了数值模拟研究, 结果表明块、碎石层在封闭边界下存在最佳粒径问题。

当前真正应用于青藏铁路的块、碎石铺层主要以开放为主, 尤其是块、碎石护坡。有两个边界(上顶面和一个侧面)开放, 在多风的青藏高原其降温效果受风的影响非常大。护坡分为迎风和背风两种情况, 受到的风压、风向等的影响也是不同的。这些在以上研究中均未得到充分考虑, 导致研究结果上存在一定差异。本文对开放条件下粒径对块、碎石护坡降温效果的影响进行了系统的试验研究, 试验分为迎风和背风两种情况, 石块粒径选用 6~8 cm、14~16 cm、21~23 cm、28~30 cm 四种。

1 试验方案

1.1 试验装置

试验装置由模型试验箱、控温系统、通风系统和观测系统 4 部分组成(见图 1)。模型试验箱为 8.0 m × 1.84 m × 2.7 m 的保温箱, 箱体由冷库保温板组成; 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 °C, 精度 ±0.3 °C)、氟利昂液体循环管道、蒸发器及温度传感器组成; 控温过程经人工设定后, 由电脑控制器自动控制, 系统控温范围为 -60~50 °C; 通风系统由冷却风扇、加速风扇、风速调节装置

置、回流风道等组成, 风向平行于箱体的长度方向; 观测系统由温度传感器、DT500 型数采仪及计算机组成, 每 20 min 数据采集 1 次。

1.2 试验设计

为了研究开放条件下粒径及迎风与背风条件对块、碎石护坡冷却效果的影响, 本研究分为迎风与背风两种情况, 每种情况进行 4 组粒径试验, 试验中采用的块、碎石为云母石英岩, 粒径分别为 6~8 cm、14~16 cm、21~23 cm、28~30 cm 四种。为了便于比较, 模型尺寸及探头布设方法相同(图 2)。模型高度 1.5 m, 块、碎石护坡水平厚度 1.6 m, 坡度 1:1.5, 土坡顶部宽度 1.0 m, 底部宽度 3.25 m。石块以随机抛掷并适当挤压的方式填筑, 由于受石块尺寸的影响, 测温传感器不易埋设, 因此在装样过程中将传感器缚于石块之上, 通过调整石块位置和方向来调整传感器的位置, 误差可控制在 1 cm 之内。图中 30 号为空气温度探头; 块、碎石层中探头水平间距 40 cm, 垂直间距 37.5 cm; 土层中探头布设根据需要而定, 27~29 号探头测量护坡表面温度, 各探头具体位置见图 2 所示。模型底部及土层外侧加设 10 cm 厚保温板(厚度通过计算热阻来确定)^[13]来代替土层, 同时也可减少外界干扰。

模型箱内空气温度按 $T = -3.5 + 12\sin(2\pi t/144 + \pi/2)$ 进行调控, 即模型箱内空气平均温度为 -3.5 °C, 温度周期变化幅值为 24 °C, 周期 6 d。试验中为了模拟太阳辐射对路堤表面造成的影响, 在块、碎石护坡顶部及侧面上方布设浴霸灯泡进行增温, 与空气相比增温值控制在 4~5 °C^[14], 即块、碎石护坡表面周期平均温度约 0.5~1.5 °C, 由于块、碎石护坡表面温度分布不均, 以 27、28、29 三个探头的平均温度进行控制。图 3 为模型箱内空气与护坡表面典型温度变化曲线。模型顶部平均风速为 2.8 m/s。模型装好后在室温(约 20 °C)条件下放置 72 h, 然后试验从最高温开始, 每

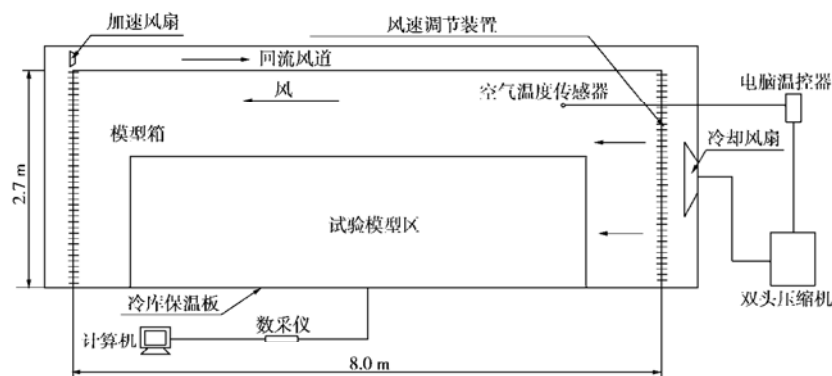


图 1 模型箱示意图

Fig. 1 Experimental equipment

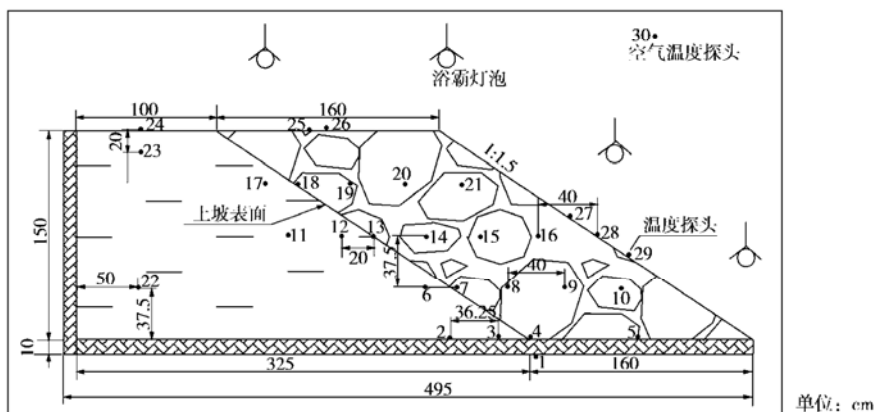


图2 块、碎石护坡剖面图

Fig. 2 Cross section of crushed rock revetment

6 h 调温一次, 重复进行 7 个周期。

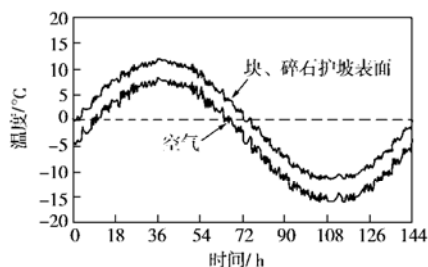


图3 气温与块、碎石护坡表面温度变化典型曲线

Fig. 3 Variation of air temperature and surface temperature of Crushed rock revetment with time

2 试验结果与分析

由于块、碎石护坡下部土坡表面的温度变化存在时间上的差异和空间上的不均一性, 为减少试验的随机性, 首先计算位于土坡表面的测温点 4、7、13、18 (图2) 的周期平均温度, 再将这 4 点周期平均温度按照空间分布(测温点的间距)进行加权平均, 作为块、碎石护坡下部土坡表面的周期平均温度, 用以衡量块、碎石护坡的降温效果。

图4、5 分别为迎风与背风土坡表面的周期平均温度变化曲线。由于块、碎石粒径的不同, 块、碎石护坡下部土坡表面的温度变化也是不同的。

图4显示了在迎风条件下土坡表面在4种粒径块、碎石护坡下周期平均温度变化曲线。从图中可以看出在迎风条件下, 4 种粒径块、碎石护坡具有相同的降温趋势: 在本试验条件下, 从第2个试验周期开始, 土坡表面周期平均温度就都已经降至 0 °C 以下, 从第3个周期以后, 降温趋势明显减缓, 到达第7个周期时均已趋于稳定。同时还可看出, 块、碎石粒径越大, 护坡的降温效果越好, 降温速度越快, 护坡下部的土坡表面周期平均温度越低。

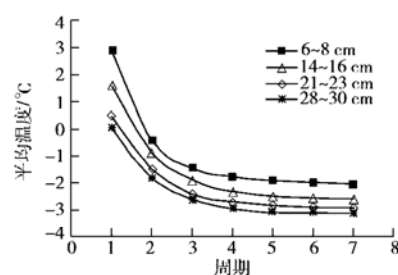


图4 迎风土坡表面周期平均温度变化曲线

Fig. 4 Variation of the mean periodic temperatures at windward soil slope surfaces with time

图5显示了在背风条件下土坡表面在4种粒径块、碎石护坡下周期平均温度变化曲线。同图4相比, 各种粒径条件下, 块、碎石护坡的降温趋势与迎风条件下基本一致, 前两个周期降温速度很快, 从第3个周期开始减缓, 第7个周期达到稳定, 但粒径对块、碎石护坡降温效果的影响表现出了另一种趋势, 不再是粒径越大, 降温效果越好, 而是大粒径 28~30 cm 的降温效果弱于较小粒径 21~23 cm。

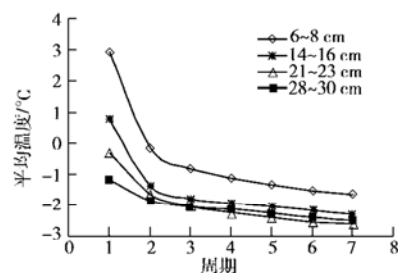


图5 背风土坡表面周期平均温度变化曲线

Fig. 5 Variation of the mean periodic temperatures at leeward soil slope surfaces with time

由于试验在第7个周期土坡表面温度已趋于稳定, 所以为了更好的研究在迎风与背风条件下粒径对块、碎石护坡降温效果的影响程度, 将两种试验条件下4种粒径范围的块、碎石护坡下部土坡表面的最后

试验周期（第 7 个周期）的平均温度列于表 1。根据表 1 绘制土坡表面周期平均温度与块、碎石护坡平均粒径关系曲线，见图 6。

表 1 迎风与背风土坡表面周期平均温度对比表（第 7 个周期）
Table 1 Mean periodic temperatures at windward and leeward soil slope surfaces (in the 7th cycle)

粒径范围/cm	迎风土坡表面/℃	背风土坡表面/℃
6~8	-2.01	-1.64
14~16	-2.57	-2.28
21~23	-2.90	-2.60
28~30	-3.11	-2.48

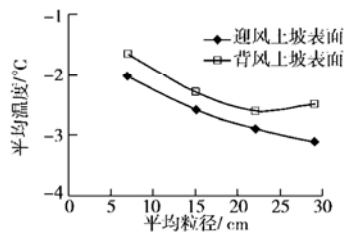


图 6 土坡表面周期平均温度与块、碎石护坡平均粒径关系曲线
Fig. 6 Relations between the mean periodic temperatures at soil slope surfaces and grain diameters of crushed rock

从表 1 和图 6 可以发现，等粒径条件下，迎风土坡表面周期平均温度明显低于背风土坡表面。在迎风条件下，随着粒径的增大，块、碎石护坡降温效果增强，块、碎石粒径为 28~30 cm 时土坡表面温度在第 7 个周期降至 -3.11℃，为最低，虽高于空气温度（-3.5℃），但比块、碎石护坡表面（比空气温度高 4~5℃）至少低 3.60℃。在背风条件下，粒径与块、碎石护坡的降温效果不再完全成正比，在粒径为 21~23 cm 时土坡表面温度最低，其值为 -2.60℃，虽比迎风土坡同等条件下（-2.90℃）要高，但仍比块、碎石护坡表面（比空气温度高 4~5℃）至少低 3.10℃，而当粒径增加到 28~30 cm 时，土坡表面平均温度升高为 -2.48℃，表明块、碎石护坡在背风条件下粒径为 21~23 cm 时，降温效果最好。

图 7、8 分别为迎风与背风条件下 4 种粒径块、碎石护坡底部（测温点 4）温度随时间变化，测温点 4 位于块、碎石护坡底部拐角处（见图 2）。从两图可以看出粒径对于块、碎石护坡底部温度周期变化幅值的影响并不十分明显，只有粒径为 6~8 cm 时较小，但迎风与背风条件对于块、碎石护坡底部温度周期变化幅值的影响却十分显著：在迎风条件下，4 种粒径块、碎石护坡底部温度周期变化幅值最大可达 22℃，每个周期最高温度均超过 5.0℃（图 7）；而背风条件下块、碎石护坡底部温度周期变化幅值最大不超过 10℃，而且每个周期最高温均在 0℃附近（图 8）。另外，迎风条件下块、碎石护坡底部温度正温存在时间在每个周

期中均超过 50 h，远远大于背风条件。综合对图 7、8 的分析，得到以下结论：在外界气温等同的条件下，块、碎石护坡底部温度周期变化幅值主要受到迎风与背风条件的作用，块、碎石粒径的影响并不大；另外，迎风与背风块、碎石护坡底部温度变化幅度不一致，并且迎风护坡底部正温较高且维持时间较长，可能导致路基的左右变形不一致，引起纵向开裂。

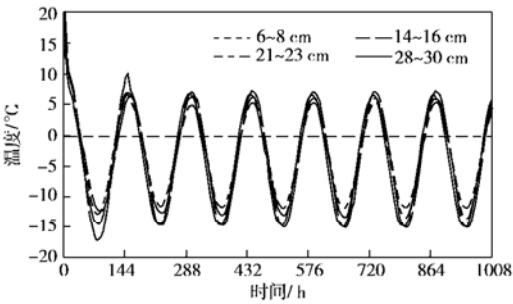


图 7 迎风块、碎石护坡底部温度随时间变化
Fig. 7 Variation of temperatures at the bottom of windward crushed rock revetments with time

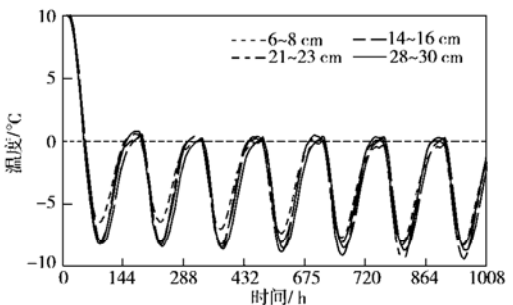


图 8 背风块、碎石护坡底部温度随时间变化
Fig. 8 Variation of temperatures at the bottom of leeward crushed rock revetments with time

3 结论与建议

通过以上对开放、迎风与背风不同条件下，不同粒径块、碎石护坡降温效果的研究与分析，可得到初步结论：

- (1) 在本试验条件下，迎风与背风块、碎石护坡下部土坡表面周期平均温度均可在第 2 个试验周期迅速降至 0℃以下，并且在以后的周期里逐步降低，最后趋于稳定，可积极的对其下部土体进行降温。
- (2) 在迎风条件下，粒径为 6~30 cm，块、碎石护坡降温效果随粒径的增大而加强；背风条件下，块、碎石护坡降温效果在粒径为 21~23 cm 时最好。
- (3) 在外界气温等同的条件下，块、碎石护坡底部温度周期变化幅值主要受到迎风与背风条件的作用，块、碎石粒径的影响并不十分明显；另外由于迎风与背风块、碎石护坡底部温度变化幅值不一致，导

致在每个试验周期中迎风护坡底部正温较高且维持时间较长,这些问题应引起设计与施工部门的足够重视。

参考文献:

- [1] 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 Guo-dong, WU Qing-bai. Preliminary study on technology of cooling foundation in permafrost regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002,**24**(5):579 - 587.)
- [2] 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 Wen-bing, LAI Yuan-ming, ZHANG Xue-fu, 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.)
- [3] 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 Xue-zu, SUN Bin-xiang, LI Dong-qing, et al. Variation of temperature in ballasts under periodic fluctuation of boundary temperature [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003,**25**(1):91 - 95.)
- [4] 孙志忠,马巍,李东庆. 多年冻土区块、碎石护坡冷却作用的对比研究[J]. 冰川冻土, 2004, **26**(4): 435 - 439.(SUN Zhi-zhong, MA Wei, LI Dong-qing. Experimental study on cooling effect air convection embankment with crushed rock slope protection in permafrost regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004,**26**(4):435 - 439.)
- [5] 赖远明,张明义,喻文兵,等. 边界条件对碎石层降温效果及机理的影响[J]. 冰川冻土, 2005,**27**(2):163 - 168.(LAI Yuan-ming, ZHANG Ming-yi, YU Wen-bing, et al. The influence of boundary conditions on the cooling effect and mechanism of ripped-rock layers[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005,**27**(2):163 - 168.)
- [6] 张明义,赖远明,喻文兵,等. 封闭与开放抛石路堤降温效果及机理对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(15):2671 - 2677.(ZHANG Ming-yi, LAI Yuan-ming, YU Wen-bing, et al. Contrast experimental study on cooling effect and mechanism between closed and open ripped-embankments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,**24**(15):2671 - 2677.)
- [7] GOERING D J. Experimental investigation of air convection embankments for permafrost-resistant roadway design [C]// Proceedings of 7th International Conference on Permafrost. Quebec: Collection Nordicana, 1998:319 - 326.
- [8] GOERING D J, KUMAR P. Winter-time convection in open-graded embankments [J]. Cold Regions Science and Technology, 1996,**24**(1):57 - 74.
- [9] LAI Y M, ZHANG S J, ZHANG L X, et al. Adjusting temperature distribution under the south and north slopes of embankment in permafrost regions by the ripped-rock revetment [J]. Cold Regions Science and Technology, 2004,**39**(1):67 - 79.
- [10] 赖远明,张明义,刘志强,喻文兵. 开放边界条件下青藏铁路抛石路基的降温效果分析[J]. 中国科学(D 辑), 2005,**35**(6):578 - 585.(LAI Yuan-ming, ZHANG Ming-yi, LIU Zhi-qiang, YU Wen-bing. Numerical analysis for cooling effect of open boundary ripped-rock embankment on Qinghai-Tibetan railway[J]. Science in China (Series D), 2005,**35**(6):578 - 585.)
- [11] 姜凡,刘石,王海刚,等. 冻土块石路基的保冷效果数值计算研究[J]. 铁道学报, 2004, **26**(4):109 - 115.(JIANG Fan, LIU Shi, WAN G Hai-gang, et al. Numerical simulation on the cooling effect of gravels embankment in permafrost areas[J]. Journal of the China Railway Society, 2004,**26**(4):109 - 115.)
- [12] 全小娟,李宁,李国玉. 青藏铁路碎石路基最佳粒径的数值试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005,**24**(11):1947 - 1953.(QUAN Xiao-juan, LI Ning, LI Guo-yu. Numerical study on optimum grain-diameter for the crushed rock embankment of Qinghai-Tibet Railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,**24**(11):1947 - 1953.)
- [13] WEN Z, SHENG Y, et al. Evaluation of EPS application to embankment of Qinghai-Tibetan Railway [J]. Cold Regions Science and Technology, 2005,**41**:235 - 247.
- [14] 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.)