

文章编号: 1002-0268 (2009) 11-0026-05

抛石护坡保护公路下退化性多年冻土效果现场监测研究

温智¹, 盛煜¹, 马巍¹, 房建宏², 黄波², 许安花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. 青海省公路科研勘测设计院, 青海 西宁 810008)

摘要: 为了验证抛碎石护坡保护退化性多年冻土区公路下多年冻土效果, 2003 年在 214 国道建立了抛碎石护坡试验路, 并建立了系统的地温监测断面。监测结果表明, 抛碎石护坡可以在夏季对路基土体起到保温作用, 在冬季可以降低路基土体温度; 采用抛碎石护坡措施断面各孔位多年冻土地温保持稳定, 多年冻土人为上限也比较稳定; 采取抛碎石护坡措施以后, 可以降低路基周边温度, 增强路基的热稳定性, 有利于保护或延缓多年冻土退化, 减轻公路路基病害程度。

关键词: 道路工程; 多年冻土保护; 现场监测; 抛碎石护坡; 退化性多年冻土; 地温

中图分类号: U419.92

文献标识码: A

Study on In-situ Monitoring of Effect of Degenerative Permafrost Protected by Crushed Rock Revetment

WEN Zhi¹, SHENG Yu¹, MA Wei¹, FANG Jianhong², HUANG Bo², XU Anhua²

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

2. Qinghai Provincial Highway Research and Survey Institute, Xining Qinghai 810008, China)

Abstract: To validate the permafrost protection effect by crushed rock revetment in degenerative permafrost regions, a 2 km long test road with crushed rock revetment was constructed along national road 214 in 2003, and ground temperature monitoring sections were also constructed. The monitoring result shows that (1) the crushed rock revetment has the thermal insulation effect on the embankment soils in summer and could lower the temperature of the embankment soils in winter; (2) the ground temperature of positions on different sections of roadbed with crushed rock revetment and the artificial permafrost table could be kept stable; (3) the crushed rock revetment could lower the roadbed surrounding temperature and improve the roadbed thermal stability. Thus the crushed rock revetment could benefit the permafrost protection and decrease the roadbed diseases.

Key words: road engineering; permafrost protection; in situ experiment; crushed rock revetment; degenerative permafrost; ground temperature

收稿日期: 2008-12-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40801026 和 40801024); 交通部西部交通建设科技项目 (200231879502); 中国科学院西部行动计划项目 (KZCX2-XB2-10); 国家基金委杰出青年基金项目 (40625004)

作者简介: 温智 (1976-), 男, 内蒙古武川人, 副研究员, 博士, 从事冻土物理学与寒区工程研究. (Wenzi@lzb.ac.cn)

0 引言

青康公路(214 国道)位于青藏高原东南部,是沟通青海、西藏等省区的重要运输干线公路之一,公路穿越多年冻土地区约 300 km。由于全球气候转暖,以及铺筑黑色沥青路面等人为活动的影响,公路沿线多年冻土已发生明显退化^[1]。214 国道沿线多年冻土类型大多为高温冻土,高温多年冻土区修筑公路路基以后,往往路基病害发生率高并且病害程度严重,高温冻土段及冻土、融土相间段病害相对严重,主要表现为沥青混凝土路面的横向、纵向裂缝和水泥混凝土路面的横向裂缝及断裂板等。

青藏高原多年冻土地区修筑公路主要采取保护冻土的原则,即确保路基下多年冻土不退化的原则,特别是在高含冰量的多年冻土区,采用这一原则具有更加重要而积极的意义。目前较多采用被动保护冻土的方法,即加高路基、铺设保温层等。这些方法可以明显地减小热量的传入,在保护多年冻土方面起了良好的作用。但这些方法都有一些不尽人意的地方,如隔热层虽然减小了下伏冻土在夏季摄入的热量,同时也妨碍了下伏冻土在冬季释放热量。

抛碎石护坡是一种新型的主动冷却保护多年冻土的措施,暖季时抛碎石护坡表现为热的不良导体,冷季时抛碎石护坡的热传输不仅包括传导机制,还包括重要的 Balch 效应所产生的对流机制^[2]。在块石层冬季和夏季不同的热量传输机制作用下,块石层内一个年度周期中所释放的热量要大于吸收的热量,使得块石层下的路基和多年冻土表现为降温的趋势,有利于保护路基下的多年冻土,自然也就提高了公路路基的稳定性。抛碎石护坡可以避免被动保护多年冻土措施的缺点,成为保护路基下多年冻土、防止多年冻土退化、提高多年冻土路基稳定性的新方法。抛碎石护坡还具有施工方便,可以在路基修筑后施工的特点,成为公路路基病害处治和路基加固的理想方法之一。

抛石在冻土保护方面的研究和应用在国内外都有很多尝试。早在 20 世纪 30 年代,前苏联就曾在铁路路基设计中用片石层作为多年冻土区保温工程措施。19 世纪 70 年代,前苏联还针对贝阿铁路干线采用保温护道工程效果不理想的情况下进行了路堤块碎石护坡试验。试验结果表明,碎块石护坡可以有效降低路基和基底冻土地温,提高路基稳定性^[3]。在国内,铁道部青藏铁路工程局高原科学技术研究所(中铁西北科学研究所的前身之一)于 20 世纪 60 年代在风火山试验路基上进行了碎石路堑护坡试验并取得成功,试

验证实碎石层可以起到冬季增加冷储量、暖季减少热储量的作用,从而有效地保护了多年冻土^[4]。1973~1974 年,中科院寒旱所在青海热水地区进行的块石通风路堤试验进一步证实了块石层加速冷却基底、增加地中冷储量的作用^[5]。我国学者徐学祖的室内试验也证实块石层中存在比较明显的对流效果^[6]。张建明等人^[7]在室内对碎石的导热特性进行了试验,结果表明,放热模式下(类似于冬季)的温度梯度较小而吸热模式下(类似于夏季)的温度梯度较大。孙志忠等^[8]根据青藏铁路抛石护坡试验路的野外观测结果,对两种石层下地温状况进行了研究,结果表明,暖季粒径为 5~8 cm 的碎石层的热屏蔽作用要好于块石层,而冷季粒径为 40~50 cm 的块石层对流作用要强于碎石层。赖远明、Douglas 等^[9-12]对碎石路基传热的数值计算则从理论上证实了块石路基和块石护坡对下伏多年冻土具有冷却作用。

为了验证抛碎石护坡保护退化性多年冻土区公路下多年冻土效果,2003 年在 214 国道 K367+900~DK369+900 段建立了抛碎石护坡试验路段,并建立了系统的地温监测断面,本文就获得的监测数据进行了分析,并对抛石护坡的降温效果及其在退化性多年冻土区的适用性进行了评价。

1 试验路段多年冻土及监测断面布设概况

214 国道抛碎石试验路位于 214 国道醉马滩,该区属河流相沉积地段,地势平坦,植被覆盖率较低,约 10%。工程地质钻探结果表明,路基下为黄色含砾粉土,砾石含量小于 10%,在原天然上限 2.5 m 深度以下分布 1~3 m 厚层状含土冰层,含土冰层下为黄色砂砾石土,砾石含量可达 30%~40%。该地段属于江河源不连续多年冻土地区,多年冻土年平均地温在 -0.7~ -1.1 °C 之间,冻土类型为含土冰层,为高温高含冰量多年冻土区,属于极不稳定冻土工程地质地段。

试验路总长约 2 km,具体里程为 K367+900~DK369+900,抛碎石厚度为 80 cm,抛石粒径为 6~8 cm。在 K369+210 和 K369+860 段布设了详细的地温观测断面,并在无护坡措施的 K369+100 布设对比观测断面(表 1),每个观测断面分别布设左右坡脚(15 m 深)、左右路肩(15 m 深)、中心孔(20 m 深)和天然孔(18 m 深)6 个,沿左右护坡基底 30 cm 深度处铺设两条坡面测温线。温度探头采用冻土工程国家重点实验室自行研制加工的热敏电阻,经室内测试标定,测温精度可保证在 ±0.05 °C 以内,地温每月

测试2次。

表1 抛碎石护坡试验段设计情况

Tab 1 Design parameters of crushed rock revetment on test road

| 里程号 | 观测断面 | 试验段类型 | 年平均地温/℃ |
|-----------------------|----------|--------------------|---------|
| K367+850~ K369+250 | K369+210 | 抛碎石护坡试验段 (沥青路面) | -1.10 |
| K369+250~ K369+900 | K369+860 | 抛碎石护坡试验段 (水泥路面) | -0.70 |
| K369+00~ K369+150 | K369+100 | 普通路基段 (沥青路面) | -0.80 |

2 地温观测数据分析

抛碎石护坡通过调控传导使得碎石层下的路基和多年冻土表现为降温的趋势，有利于保护路基下的多年冻土，强化边坡和坡角下土体强度，提高了公路路基的稳定性。因此，抛碎石护坡的主要作用首先表现在降低边坡下地温，以及冷却边坡下多年冻土。

2.1 边坡浅部地温比较

图1是2003—2004年各断面边坡基底30cm深度处地温对比图。从图1可以看出，K369+100普通路基段左坡面下地温要明显高于其他断面同等深度处的地温值，不仅在夏季地温值最高，在冬季地温值也最高。相比而言，采取抛碎石护坡措施的断面，不论是冬季还是夏季，其同等深度处地温均低于对比路基段，这初步显示了抛碎石护坡的作用和功效，其在夏季起到保温作用，在冬季对流冷却发挥了作用。

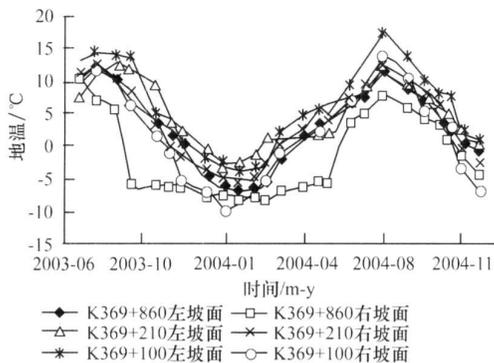


图1 各断面边坡下30cm深度处地温对比

Fig. 1 Comparison of ground temperatures of different sections at the depth of 30 cm under roadbed slope

表2为各断面边坡下30cm深度处年平均地温比较。如表2所示，除K369+210右坡面外，采用抛碎石护坡的断面其年平均地温均低于对比段。总体而

言，抛碎石护坡下30cm深度处地温要比同等深度对比断面处地温低2~3℃。这说明采取抛碎石护坡措施可以降低路基周边温度，增强路基的热稳定性，有利于保护或延缓多年冻土退化，间接减小多年冻土区公路路基病害发生，减轻公路路基病害。

表2 各断面边坡下30cm深度处年平均地温比较(单位:℃)

Tab 2 Mean annual ground temperatures of different sections at the depth of 30 cm under roadbed slope (unit: °C)

| 左坡面 | | | 差值 | 右坡面 | | |
|----------|----------|----------|------|----------|-------|--|
| K369+100 | K369+210 | K369+100 | | K369+210 | 差值 | |
| 4.63 | 3.20 | 1.43 | 0.69 | 2.62 | -1.93 | |
| 4.63 | 1.39 | 3.24 | 0.69 | -2.04 | 2.73 | |

2.2 不同时间断面地温曲线对比

图2是K369+100断面各位置钻孔地温-深度2003和2004年度对比曲线。从图上均可以看出，较2003年，普通路基段地温2004年同期地温均有较大范围的升高，特别是浅层地温，地温升幅更加明显，测温资料显示，普通路基段多年冻土呈明显的退化趋势，总体上讲，普通路基段多年冻土在工程作用和气候变暖双重作用下地温有升高的趋势，路基下多年冻土人为上限也发生了下移。

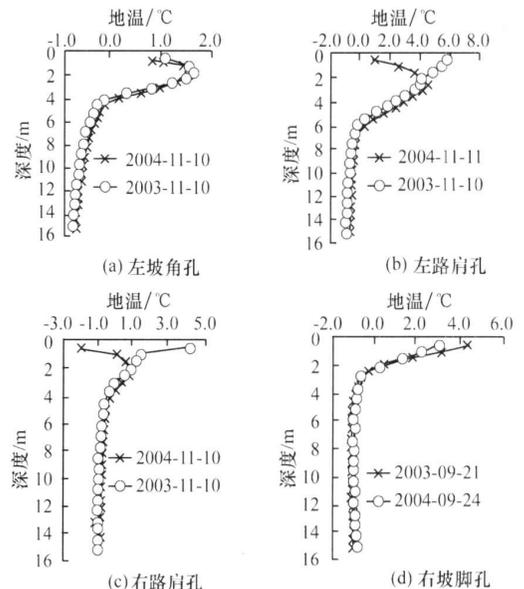


图2 K369+100地温年度比较

Fig. 2 Comparison of annual ground temperatures of K269+100

图3是K369+210断面各位置钻孔地温-深度2003和2004年度对比曲线。从图上均可以看出，较2003年，采取抛碎石护坡的路基段地温2004年同期地温没有明显的变化，不论是深层地温还是浅层地

温, 甚至部分孔位部分深度 2004 年地温较 2003 年有下降的趋势。测温结果显示, 多年冻土区公路采用抛碎石护坡措施以后, 遏制了多年冻土退化的趋势, 保护了路基下多年冻土, 增强了路基的热稳定性。图 4

温保持稳定, 多年冻土人为上限也比较稳定, 两断面的测温结果均证实, 抛碎石护坡起到了降低路基边坡温度, 可以达到保护路基下伏多年冻土的作用。

3 结论

(1) 监测结果表明, 普通路基段左坡面下地温要明显高于其他断面同等深度处的地温值, 不仅在夏季地温值最高, 在冬季地温值也最高。相比而言, 采取抛碎石护坡措施的断面, 不论是沥青混凝土还是水泥混凝土路面, 也不论是冬季还是夏季, 其同等深度处地温均低于对比路基段, 这初步显示了抛碎石护坡的作用和功效, 抛碎石护坡可以在夏季起到保温作用, 冬季其对流冷却发挥了作用。

(2) 总体而言, 抛碎石护坡下 30 cm 处地温要比同等深度处对比断面处地温低 2~3 °C。这说明采取抛碎石护坡措施以后, 可以降低路基周边温度, 增强路基的热稳定性, 有利于保护或延缓多年冻土退化, 间接地减小多年冻土区公路路基病害发生, 减轻公路路基病害。

(3) 现场试验工程监测数据表明, 测温资料显示, 普通路基段多年冻土呈明显的退化趋势, 总体上讲, 普通路基段多年冻土在工程作用和气候变暖双重作用下地温有升高的趋势, 路基下多年冻土人为上限也发生了下移。采用抛碎石护坡措施断面各孔位多年冻土地温保持稳定, 多年冻土人为上限也比较稳定。这说明抛碎石护坡起到了降低路基边坡温度, 可以起到保护路基下伏多年冻土的作用, 适用于退化性多年冻土地区。

参考文献:

References:

[1] 朱林楠, 吴紫汪, 刘永智, 等. 多年冻土退化对 214 国道路基稳定性的影响 [J]. 公路, 1995 (4): 4-7.
 ZHU Linnan, WU Ziwan, LIU Yongzhi, et al. The Influence of Permafrost Degradation on Embankment Stability of National Road 214 [J]. Highway, 1995 (4): 4-7.

[2] 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): 578-587.
 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): 578-587.

[3] ROONEY J W. Rock Fill Embankment Applications for Convective Foundation Cooling on the BAM Railway System [C] // Proceeding of the Fifth International Symposium on Cold Region

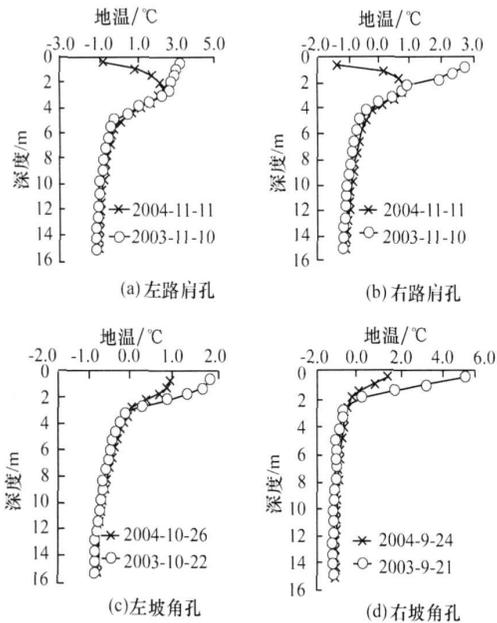


图 3 K369+210 地温年度比较

Fig. 3 Comparison of annual ground temperatures of K369+210

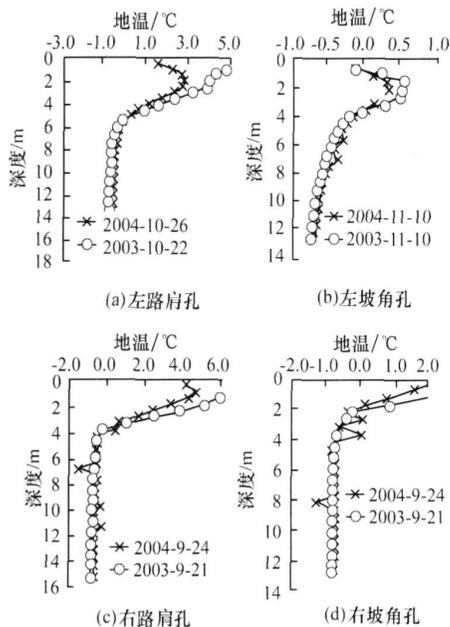


图 4 K369+860 地温年度比较

Fig. 4 Comparison of annual ground temperatures of K369+860

是 K369+860 断面各位置钻孔地温-深度 2003 和 2004 年度对比曲线。从图上可以看出, 各孔位多年冻土地

- Development Alaska: [s n], 1997, 399-402.
- [4] HE Guisheng, ZHANG Luxin. Analysis on Climate Change and Thermal Stability of Experimental Railway Embankment in Fenghuoshan Region of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, 22 (sup): 20-25.
- [5] 王国尚, 林清, 金会军. 寒区道路块片石通风路堤试验研究 [C] // 中国地理学会冰川冻土分会第五届全国冰川冻土学大会论文集 (上). 兰州: 甘肃文化出版社, 1996: 377-382.
- WANG Guoshang, LIN Qing, JIN Huijun. Experimental Research on the Block Stone Embankment in Cold Regions [C] // Chinese Society of Glaciology and Geocryology. Proceedings of the 5th Chinese Conference on Glaciology and Geocryology (Vol. 1). Lanzhou: Gansu Culture Press, 1996: 377-382.
- [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.
- [7] 张建明, 盛煜, 赖远明. 铁路碎石道碴层导热系数测试研究 [J]. 冰川冻土, 2003, 25 (6): 628-630.
- ZHANG Jianning, SHENG Yu, LAI Yuanming. Experimental Study on Thermal Conductivity of Railway Ballast [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25 (6): 628-631.
- [8] SUN Zhizhong, MA Wei, LI Dongqing. In Situ Test on Cooling Effectiveness of Air Convection Embankment with Crushed Rock Slope Protection in Permafrost Regions [J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2005, 19 (2): 38-51.
- [9] GOERING D J, KUMAR P. Convective Heat Transfer in Railway Embankment Ballast [C] // Ground Freezing 2000. Rotterdam: Balkema Publishers 2000: 31-36.
- [10] GOERING D J, KUMAR P. Winter-time Convection in Open-graded Embankments [J]. Cold Regions Science and Technology, 1996, 24 (1): 57-74.
- [11] LAI Yuanming, ZHANG Luxin, ZHANG Shujuan, et al. Cooling Effect of Rippled-stone Embankments on Qing-Tibet Railway under Climatic Warming [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48 (6): 598-604.
- [12] 赖远明, 张明义, 刘志强, 等. 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 Yuanming, ZHANG Mingyi, LIU Zhiqiang, et al. Numerical Analysis for Cooling Effect of Open Boundary Rippled-rock Embankment on Qinghai-Tibetan Railway [J]. Science in China (Series D), 2005, 35 (6): 578-585.

《公路交通科技》编辑部稿件远程处理系统正式启用暨网站开通

为适应当今期刊网络化、数字化的发展趋势,更好地为广大作者、读者提供高质量的服务,2008年1月,本刊已正式启用稿件远程处理系统,同时开通网站,网址为 www.gljtkj.com。

该系统包括在线投稿系统、作者在线查稿系统、专家在线审稿系统、编委在线审稿系统、主编办公系统、远程编辑系统六个子系统,通过网上投稿、网上查稿、网上审稿,实现了作者、编辑、审稿专家的一体化在线协作处理,从而构建成为一个协作化、网络化、角色化的编辑稿件业务处理平台。对于广大作者而言,该系统最大的优点是支持在线投稿、查稿。

作者投稿请直接登录 www.gljtkj.com, 点击“作者在线投稿”, 进行注册后, 即可通过用户名、密码登陆系统进行投稿。投稿成功后, 系统自动发送回执邮件。作者可随时点击“在线查稿”, 使用注册的用户名和口令登录查稿系统, 即可获知所投稿件的处理进展、审稿意见等; 有关稿件处理的最终结果也将直接发送到作者的电子信箱中, 不再另行通知。

该系统已经正式启用, 编辑部只接受网络在线投稿。作者如有任何问题请与编辑部联系, 联系电话: 010-62079198-801, E-mail: editor@rioh.cn