

遮阳棚在寒区道路工程中的应用研究

Application of awning to roadway engineering in permafrost regions

冯文杰¹, 马巍¹, 张鲁新^{1,2}, 吴志坚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. 铁道部青藏铁路指挥部, 青海 格尔木 816000)

摘要: 基于室内试验资料结果, 结合数值模拟, 以及风火山地区地温资料和风火山实验场现场观测资料, 针对遮阳棚对公路铁路沿线路基底下多年冻土的保护作用以及对多年冻土上限的抬升效果进行了对比分析, 进一步证实了遮阳棚措施的优越性和可行性。遮阳棚能有效阻挡减少太阳对地面辐射, 使得冻土上限得以较大幅度抬升, 对保证道路安全与畅通起着至关重要的作用。

关键词: 遮阳棚; 多年冻土; 多年冻土上限; 道路工程

中图分类号: U 418.5; P 642.14

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)05-0567-04

作者简介: 冯文杰(1973-), 男, 重庆垫江人, 硕士, 助理研究员, 主要从事寒区工程与冻土力学研究。

FENG Wen-jie¹, MA Wei¹, ZHANG Lu-xin^{1,2}, WU Zhi-jian¹

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Qinghai-Tibet Railway Headquarters of Railways Ministry, Golmud 816000, China)

Abstract: Based on the model test data indoors, combined with the numerical calculations and the measured temperatures of air and permafrost, and the test data of roadbed in Fenghuoshan, the protecting effects of the awning on the permafrost table along the road and railway in permafrost regions are compared. The superiority and feasibility of the awning are confirmed. The awning can resist the solar radiation to land surface effectively, and the ground surface temperature can descend 8 °C~15 °C, with a maximum difference of 24 °C. The awning is very important to the safety of roadway.

Key words: awning; permafrost; permafrost table; roadway engineering

0 引言*

我国多年冻土与季节冻土区域面积占国土总面积的70%以上, 仅多年冻土面积约为 $2.15 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占全国陆地总面积的22.3%^[1,2]。其中青藏高原多年冻土面积约为 $1.5 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占整个多年冻土面积70%左右。近10年来, 在全球性气候转暖的背景下, 青藏高原气候也随之发生明显变化, 气候影响着青藏高原多年冻土的发育和分布。20世纪50年代到80年代来的40年里, 中国平均的年平均气温呈上升趋势, 气温倾向率为 $0.04 \text{ }^\circ\text{C}/(10\text{a})$, 而青藏高原平均气温倾向率为 $0.16 \text{ }^\circ\text{C}/(10\text{a})$, 远大于全国的平均值^[3]。而根据《中国西部环境演变评估》报告, 50年后, 青藏高原气温将升高 $2.2 \sim 2.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[4]。

随着青藏铁路格拉段的开工, 针对在多年冻土上加强路基的新方法被提到议事日程, 除了采用通风管、抛石护坡、增高路堤等外, 采用遮阳棚不失为一种有效的新方法, 这一技术目前在俄罗斯及美国阿拉斯加地区研究应用较多, 国内也正处于研究应用阶段, 铁科院西北所在风火山试验场有一定的研究, 为青藏铁路工程提供了不少的理论和实践基础^[5]。

青藏高原地处中低纬度、高海拔地区, 太阳辐射十分强烈是该地区的一个重要特征, 为此, 提出遮阳棚遮

挡路堤及道路边坡, 可以明显地减少太阳对路堤和道路边坡的有效辐射, 可以降低路面及路堤下土体的温度, 从而能够加强路基, 提高道路的安全性, 康德拉特耶夫(1996)提出了在富冰多年冻土上加强路基的新方法, 其中就明确提出采用遮阳棚的优越性^[6]。他对遮阳棚这一方法提出三种模式: 圆形、多边形和单一形。它们都能有效地保护路堤、边坡和邻近的区域。为了提高遮阳棚对太阳辐射的反射率, 增加遮阳棚的防辐射效果, 在遮阳棚外表面涂上具有高反射性质的涂料油漆, 例如涂上白色或银白色的油漆材料, 效果会更佳。刘建坤等(1996)对用遮阳避雨棚防护的路基和未经防保的暴露在外面的路基进行了数字热范围模拟, 计算结果表明, 防护棚能有效地防止太阳能辐射对路基的热影响。令锋(2002)在对青藏铁路格尔木-拉萨段冻土路基热状况变化趋势的数值分析中指出, 修筑遮阳棚可以有效地降低路基下多年冻土温度; 还对减少风火山冻土路基最大季节融深有非常显著的效果, 棚内外路基的最大季节融深之差可达0.90 m左右; 同时指出气候变暖对遮阳棚内的冻土路基最大季节融化

* 基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(90102006); 中科院知识创新工程项目(KZCX1-SW-04, KZCX2-306); “973”国家重点基础研究发展规划项目(2002CB412704)

收稿日期: 2002-10-28

深度影响很小,这样可以有效地减缓和减少因气候变暖而带来的路基冻土融化问题^[7,8]。

1 遮阳棚的工作原理

遮阳棚技术从传热理论上讲,属于调控辐射以有效控制路基温度场,它一改以往消极被动保护冻土的方法,而是一种积极主动的保护措施。遮阳棚的主要优点是它既能遮蔽太阳对路面和路基边坡的辐射,又能有效防止夏季降水渗入路基和冬季降雪覆盖路面,且能保证路基的整个横断面利用年平均负温的外部空气进行自然和均匀通风。在正常排除地表水和地下水的条件下,若路堤及基底附近无积雪和太阳辐射,就可以完全消除路堤变形的主要根源——路堤基底多年冻土层退化,进而消除路堤产生的变形。当车辆通过搭建有遮阳棚的线路时,其下面的路堤受到大气自由和强制通风的影响,会增大涡流热交换和路面的蒸发作用,因而对土体起到冷却作用。采用遮阳棚这一方法措施来给路基土降温,是利用遮阳棚来预防路堤堤身与基底土免受直接太阳辐射和雨雪水的影响,因为这些都是造成路基底冻土层退化和线路沉陷的主要原因。实质上,遮阳棚对路堤堤身和基底土的冷却作用,类似于多年冻土地基上的房屋和建筑物地下室利用室外空气自然通风对地基实施冷却作用^[9]。为了提高遮阳棚对太阳辐射的反射率,增加遮阳棚防辐射效果,在遮阳棚外表面涂上具有高反射性质的涂料油漆,例如涂上白色或银白色油漆材料,效果会更佳。

在多年冻土区采用遮阳棚不但造价上相对比较便宜,而且技术上的优点也十分明显,因为在遮阳棚下面能可靠地保证路堤及整个基底处于多年冻结状态,而采用气液热装置的有效半径只有 1.5 m,只能冷却路堤坡脚的边缘地带,不能消除基底正中部分冻土融化的危险。这一结论在前苏联别尔卡基—托模特—雅库茨克的新建铁路线上和外贝加尔铁路上进行的遮阳棚实地效果试验中得到充分印证。用遮阳棚遮挡路面,阻止了太阳的直接辐射,对减少冻土的融化量起到不可估量的作用,从而有效地保护并加强路基。

2 遮阳棚措施应用效果分析

正是因为遮阳棚措施有诸多优越性,对路基底冻土影响十分明显,笔者进行了一系列室内实验,结合数值模拟结果,对比现场观测的结果,以便进一步了解遮阳棚对路基底冻土上限抬升的效果和程度。

2.1 遮阳棚措施室内实验分析

室内实验根据相似理论,结合实际道路工程,遮阳

棚按梯形设计,遮阳棚顶部距离地面(净空)高 30 cm,模拟实际情况约 6.0 m 高,梯形两肩也用棚盖着,肩的下部距离路堑边坡顶部 5 cm 露空(模拟实际 1 m),便于通风。试验土质是风火山亚黏土,土质初始干容重 $\rho_d = 1.5 \text{ g/cm}^3$,初始含水率 21%。试验分三种模式进行:天然状况、加抛石护坡、加抛石护坡及遮阳棚遮挡路面,以下分别简称为 BJ、JP 和 JPZ 模式。各测温探头在土中埋置深度及其相应的路基模型见图 1^[10]。

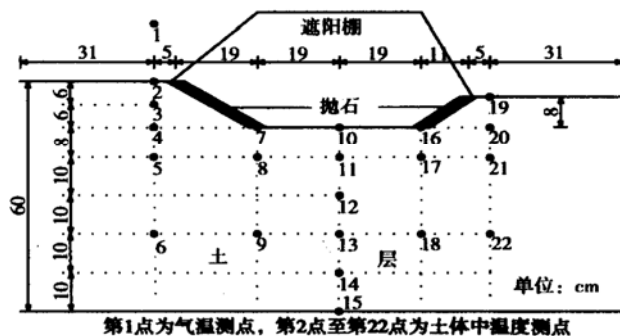


图 1 JPZ 模式

Fig. 1 Model JPZ

实验结果表明,采用抛石护坡和遮阳棚措施对抬升冻土上限,降低路基土温度的效果十分理想,但遮阳棚遮挡路面措施效果更甚(见图 2)。

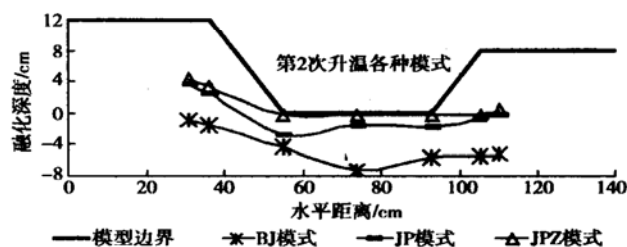


图 2 控温 4.3 °C 下三种模式融化深度曲线对比

Fig. 2 A comparison of thaw depth curves under temperature controlled at 4.3 °C

以路堑中心为例来看,在控温 4.3 °C 下加抛石使冻土上限抬高了近 6 cm,相当于实际 1.2 m(与天然状况相比),加抛石与遮阳棚使冻土上限上升了 6.5 cm 左右,相当于实际 1.3 m。对仅加抛石的情况来看,随着气温的增加,冻土上限虽然在上升,但上升幅度逐渐减缓;而对加抛石和遮阳棚的情况来看,随升温的增加,冻土上限上升很明显,最大抬升量达 86%。这说明这两种措施在全球升温的背景下均能暂时抬升冻土上限,而后者加遮阳棚的效果更为显著。室内实验结果与理论对多年冻土上限抬升的一致性,更进一步说明遮阳棚措施的优越性,在太阳辐射较强的冻土地区,它不失为一种保护冻土的有效方法^[9]。

2.2 数值模拟遮阳棚的影响效果

为了更进一步弄清遮阳棚的防护效果,对在天然

路堑和在路堑的上方加盖避雨遮阳棚进行对比模拟分析,以1999年8月份加盖遮阳棚前风火山地温资料统计结果为初始边界温度条件,分别模拟计算了加盖遮阳棚后1年、2年和5年路堑底下温度场的分布情况,与室内实验进行对比,分析遮阳棚对冻土保护作用的程度,以便提出更好的设计参数、方案等。

计算要求地表面边界按边输入计算边界条件,结合风火山实验场的观测结果:在冬季棚内地表均温较棚外低出5℃左右;在夏季棚内地表均温较棚外低出15~20℃。经过对风火山地区1975年1月至2000年2月每日气温回归分析,得出风火山地区的日平均气温随时间变化过程线可用正弦函数表示:

$$T_a(t) = -6.30 + 12.05 \sin \left[\frac{2\pi}{365}t - \frac{5}{9}\pi \right] \quad (1)$$

经过对修筑遮阳棚后的1999年9月至2000年8月遮阳棚内外地表平均温度回归分析,得出风火山试验场棚内路基表面温度可以拟合为如下正弦曲线:

$$T_i(t) = -4.58 + gt + 9.98 \sin \left[\frac{2\pi}{365}t + \frac{7}{10}\pi \right] \quad (2)$$

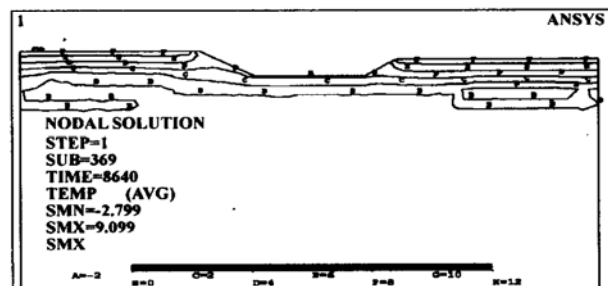
风火山天然地表路基表面的温度可以拟合为如下正弦曲线变化形式:

$$T_i(t) = -1.55 + gt + 12.05 \sin \left[\frac{2\pi}{365}t - \frac{7}{10}\pi \right] \quad (3)$$

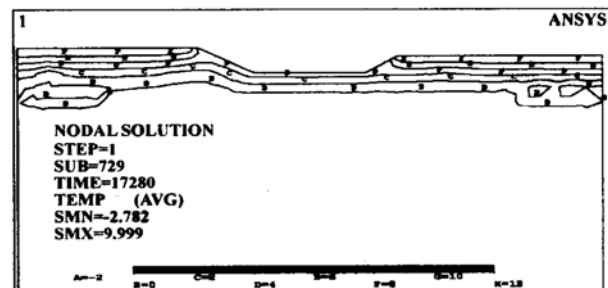
从上面函数关系式可以看出,大气年平均温度和地表年平均温度相差5℃左右,遮阳棚内外地表年平均温度大约相差3℃左右, g 表示年升温幅度。

模拟计算时,天然地表温度和遮阳棚内地表温度条件分别取上面的正弦函数为边界条件进行计算, g 取0.0194。根据风火山地区深孔地温观测资料,在9~10 m深度,温度始终保持在-3.0℃左右,而风火山多年冻土厚度最大可达120 m,所以模型下边界35 m深处温度值取为恒温-3.0℃。模拟升温从9月份开始,所以在开始地表温度设初始温度8℃,在模型下边界设初始温度为-3.0℃,以后随着地表温度的变化,下边界温度保持不变。图3为加遮阳棚后1年、2年和5年的地温曲线^[9]。

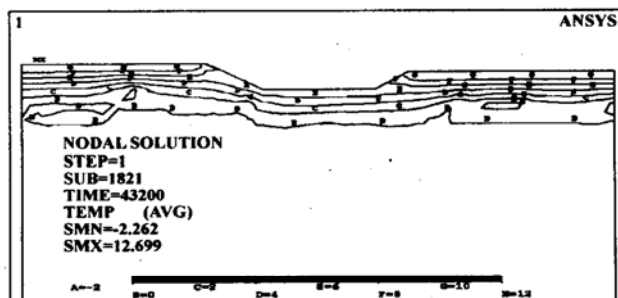
从计算结果看,在加遮阳棚后5年时间里,遮阳棚对多年冻土上限抬升十分明显,相对于天然地表来说,最大抬升值达180 cm,最小也有150 cm,可以说明遮阳棚对路基地下多年冻土的保护作用。在修筑遮阳棚后的第1年,遮阳棚可使多年冻土上限抬升近150 cm,第2年在相同时间里(最大融深时间)抬升近156 cm,在修筑好的第5年,上限可以抬升180 cm。虽然气温在升高,遮阳棚内外多年冻土上限都在下降,但相比较而言,修筑遮阳棚后,上限下降值还是小得多。并且从以上图中可以发现随着温度的升高,遮阳棚对多年冻土



(a) 加遮阳棚12个月(即次年9月)



(b) 加遮阳棚24个月(即第3年9月)



(c) 加遮阳棚60个月(即第6年9月)

图3 加遮阳棚后的地温曲线

Fig. 3 The ground temperature curves

上限相对抬升值也越大,这说明越是在高温冻土区越应该考虑采用遮阳棚这一工程措施。

2.3 风火山现场观测结果分析

中铁西北科学研究院为了进一步研究保护冻土措施问题,分别于1999年7~8月和2000年7月在该路基试验工程上修筑了碎石层护坡和遮阳棚遮挡路面及道路边坡试验段,并且一直观测至今。

现场观测结果表明,遮阳棚效果与理论和室内实验结果相一致。图4为加遮阳棚后观测半年和1年的棚内外地面在14点(下午2点)温度对比曲线。

从图4可见:遮阳棚内地表平均温度一般比遮阳棚外地表平均温度低8~20℃,最大达24℃,且在低温季节(冬季)二者相差较少,高温季节(夏季)二者相差较大,但棚内地表年均低温始终保持在0℃左右。这表明在日照强烈的高温多年冻土区,采用遮阳棚对路基地下多年冻土的保护就目前来说相对于其他措施具有独一无二的作用。遮阳棚对路基下多年冻土不论在高温季节还是低温季节都有很好的保护作用。

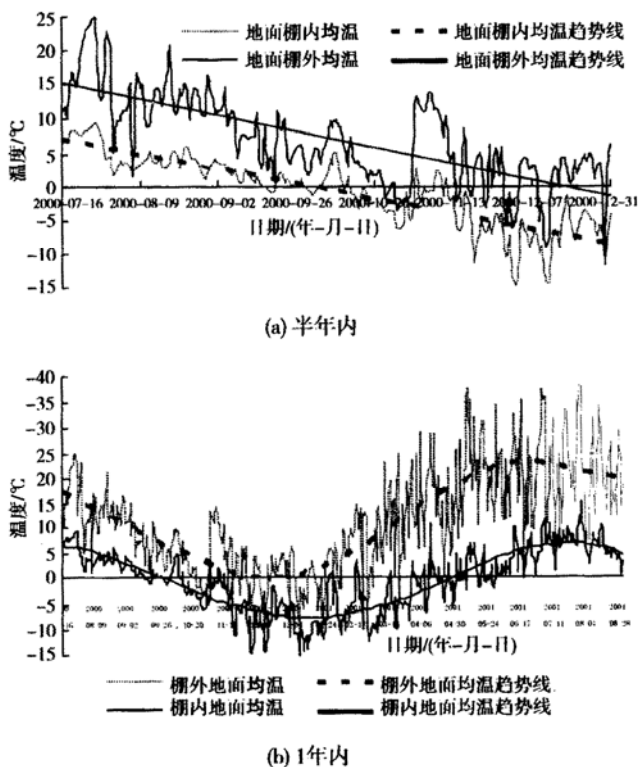


图4 遮阳棚内外地面 14:00 温度对比曲线

Fig. 4 Comparison between the temperature curves inside and outside awning at 14:00

总的来说,遮阳棚对路基底下冻土的降温效果非常明显,对路基下冻土的保护起着至关重要的作用。

3 边坡遮阳板的应用推广设想

遮阳棚有许多优点,与其他措施比较对于冻土的保护占较大优势,但是就目前已有的资料来看,青藏高原的风向、风速对它来讲,都具有一定的威胁。

从风向来看:青藏高原春夏季节,特别是春季,以西风为主;而秋冬季节,特别是冬季,风向以北风为主;全年的主导风向为西北向。

从风速来看:青藏高原年平均风速为 4~8 m/s,最大可达 40 m/s,个别地方远大于 40 m/s。

青藏铁路格拉段走向为东北—西南向,风向与铁路线大角度相交,甚至垂直相交,并且风速又较大,势必导致遮阳棚很大受力的不均,提高工程技术难度,增加工程费用。并且遮阳棚在维修的时候,还可能阻碍交通,特别是在列车运行期间。

如果采用边坡遮阳板情况就完全不一样:遮阳板同样兼顾了遮阳棚的诸多优点:靠近地表,所受风力较小,工程费用较低,施工技术含量较低,施工也方便快捷;遮阳板的维修也特别方便,在遮阳板维修时,对于交通也丝毫不会影响。因此,边坡遮阳板是今后首选的保护冻土的积极主动措施之一,应广泛推广使用。

4 结 论

(1) 加遮阳棚会明显抬升冻土上限,在温度较高季节(夏季)时,加遮阳棚抬升多年冻土上限,降低路基土体温度效果更为显著。

(2) 遮阳棚对路基土的降温效果明显,从观测看,棚内地表均温比棚外低出最大达 24 °C,使得多年冻土上限抬升剧烈,能够完全保证路基的稳定。遮阳棚对路基地下土降温在高温季节明显,相比较之下,低温季节效果稍差一些,但均比其他措施效果好。

(3) 从数值模拟结果来看,加盖遮阳棚能够明显抬升多年冻土上限,降低路基地下土体的温度,对保护多年冻土起到积极作用。在加盖遮阳棚后的第 1 年、第 2 年和第 5 年最大融深时(9 月份)多年冻土上限比天然情况下同时间的多年冻土上限分别抬升了 150, 156, 180 cm,修筑遮阳棚对减少路基最大季节融化深度,降低路基地下土体的温度和抬升冻土上限都有非常显著的效果。

(4) 建议在太阳辐射较强的多年冻土地区道路工程设计与施工中,特别是在夏季气温较高的高温多年冻土地区,从经济角度出发,采用遮阳棚保护路面,可以有效地减少道路的冻胀与融沉灾害发生,最大限度确保道路安全与畅通。

参考文献:

- [1] 金会军,李述训,等.气候变化对中国多年冻土和寒区环境的影响[J].地理学报,2000,55(2):161-173.
- [2] Jin Huijun, Li Shuxun, et al. Permafrost and climatic change in China[J]. Global and Planetary Change, 2000, 26: 387-404.
- [3] 汤懋苍,程国栋,林振耀.青藏高原近代气候变化及对环境的影响[M].广州:广东科技出版社,1998.
- [4] 丁一汇.中国西部环境变化的预测[A].中国西部环境演变评估(第2卷)[M].北京:科学出版社,2002.38-44.
- [5] 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.
- [6] Kondratjev, V G. Strengthening railroad base constructed on icy permafrost soil[A]. Proceedings of the Eighth International Conference on Cold Region Engineering[C]. Fairbanks, 1996. 688-699.
- [7] 令锋.冻土路基热状况动态特征的数值模拟与预报研究[D].兰州:中国科学院,1999.
- [8] 令锋.青藏铁路格尔木—拉萨段冻土路基热状况变化趋势的数值分析[R].北京:中国铁道科学研究院,2002.
- [9] 冯文杰.抛石及遮阳棚技术在多年冻土地区路基工程中的应用研究[D].兰州:中国科学院,2002.
- [10] 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试验研究[J].冰川冻土,2001,23(4):353-359.