

不同路面和幅宽条件下冻土路基传热过程研究*

俞祁浩 程国栋 何乃武 潘喜才

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, 兰州 730000

摘要 随着我国多年冻土区高速和高等级公路建设的发展, 冻土路基稳定性成为工程建设的关键科学问题. 应用有限元计算分析发现, 沥青路面下路堤底面的年均热流量为砂砾路面下的3倍; 高等级公路在路面宽度较普通公路增加1倍的时候, 底面年平均热流量增加60%, 且增加的热流主要集中在路堤底面的中心部位, 并产生“聚热效应”, 导致多年冻土的退化进程加快0.6倍; 这种关系不会因路堤高度增加而减弱. 因此, 在多年冻土区修建高等级公路, 会带来更为严重的工程病害, 在工程建设中必须充分重视, 并采取积极的防治措施, 才能确保工程的长期稳定.

关键词 宽幅路面 冻土路基 传热过程 热流密度 地温场

在多年冻土区, 通过长期的演化和发展, 会形成厚达几米、甚至十几米、各具形态的厚层地下冰^[1]. 随着我国国民经济持续高速发展, 在多年冻土区修建以宽幅路面为特征的高等级公路逐渐提到议事日程上来, 而如何应对与冻土路基密切相关的关键工程问题, 则向人们提出更大的挑战. 而对于这种挑战程度的科学评估, 则更多来源于对黑色、宽幅路面修建后地中热量变化程度的正确认识. 在以往研究中, 人们主要围绕普通公路中, 环境变迁、病害机理、沉降变形等展开研究^[2-7], 但就路基内部热量传递过程, 尤其是路堤加宽之后的热量传递过程则很少涉及. 本文正是紧密结合我国公路工程发展的需要, 从传热学的角度, 对不同路堤结构下的热流场进行分析研究, 这将有利于人们从根本上认识人类工程活动影响下冻土上限、冻土地温的长远变化规律, 有利于我国宽幅高等级公路的科学设计、施工和病害防治.

1 地温场热量传递过程分析

多年冻土的温度场是大气圈和下伏土层以及地壳内部热源之间热交换的影响下形成的. 三维无内

热源的非稳态导热的微分方程为

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right),$$

式中 ρ 为密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; c 为比热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; t 为温度, $^{\circ}\text{C}$; τ 为时间, s ; q 为热流密度, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[8]. 由公式可见, 温度梯度是驱动路基内部热流的直接动力, 通过热量的传递, 其直接结果导致土体温度的变化. 在该过程中, 温度梯度是产生热流的充要条件, 热量传递是过程, 土体温度变化是最终结果, 三者互为有机的反馈过程. 其中热流密度是热量传递过程的直接体现, 其大小和特性对整个温度场未来的发展趋势起到重要控制作用. 因此通过热流场的研究, 有利于从根本上把握研究对象温度场的变化过程. 同样, 具体到路堤作用后路基温度场的变化过程, 也可以从热流场找到较好的答案.

Marc 商用软件用于计算分析, 计算模型和物性参数均根据青藏铁路、青藏公路北麓河多年冻土试验场的钻孔资料进行构建和设定, 路基结构、土层类型及物性参数见表1. 天然地表、路堤坡面和路面边界条件均以表面以下0.5 m深度的温度实测

2006-01-05 收稿, 2006-04-11 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号: 40225001)、中国科学院知识创新工程重大项目(编号: KZCX1-SW-04)和中国科学院“西部之光”资助项目
E-mail: yuqh@lzb.ac.cn

资料为基准, 经过正弦曲线拟合后设定, 由此综合环境温度、辐射、降水、刮风等各种复杂条件的作用和影响, 并简化边界条件. 计算模型为对称的半幅路基, 上边界温度拟合公式为

$$T = T_0 + \alpha t + A \sin\left(\frac{2\pi t}{8760} + \frac{\pi}{2}\right),$$

其中 T_0 为年平均温度, 天然地表为 -0.5°C , 路堤边坡和砂砾路面为 1.0°C , 沥青路面为 3.5°C ; α 环境年升温速率为 $0.02^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$; t 为计算时间 h ; A 为温度年振幅, 天然地表为 11.5°C , 路堤表面为 14.5°C , 起始计算时间为一年中边界温度最高时刻. 计算模型 30m 深度底面边界条件, 根据实测地温梯度 $0.03^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$ 设定热流 $196.56\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 计算区域的两个侧面为绝热边界. 天然土体的初始条件为 $\alpha=0$ 时 100a 的计算结果, 然后叠加路堤, 并取一年中天然地表最高温度为路堤初始温度. 青藏铁路北麓河试验段路堤成形后第3年的实测资料与计算结果对比如图1所示. 由对比结果可见, 该计算模型所得计算值与实测值基本吻合.

表1 路基结构中各介质的物性参数

| 岩性 | 深度/m | 干容重/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) | | 比热/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) | |
|-------|---------|---|---|------|--|-------|
| | | | 冻结 | 非冻结 | 冻结 | 非冻结 |
| 卵石土 | 路堤填土 | 2060 | 1.40 | 1.15 | 706.6 | 861.7 |
| 碎石亚砂土 | 0—0.5 | 1800 | 1.98 | 1.60 | 977.2 | 1266 |
| 砾砂 | 0.5—2.0 | 1900 | 2.61 | 1.92 | 810 | 1044 |
| 亚粘土 | 2.0—8.0 | 1600 | 2.12 | 1.42 | 1222 | 1608 |
| 风化泥岩 | 8.0—30 | 1800 | 1.82 | 1.47 | 981.8 | 1272 |

青藏公路经过多次整治改建后其路堤高度基本保持在 $2.5\text{—}3\text{m}$. 实测资料表明, 多年冻土在年平均 -3.5°C 环境温度下, 多年冻土对应的年平均地温基本为 -1.0°C ^[9,10], 而此时冻土的力学性质和工程性质均基本以此为界限, 均表现出不同的特征^[11—14]. 因此, 在模拟计算中, 重点考虑 3m 路堤高度、 -3.5°C 环境温度条件. 分析计算结果发现, 在路堤底面及浅层土体中, 路基中的年均热流密度从路堤实施后的第2年就基本达到稳定, 而地温则一直处于不同程度的变化过程中. 因此, 从热流的角度认识地温的变化过程具有非常好的先决条件. 地中热流垂向分量的正向为上, 即正值表示放热,

反之为吸热.

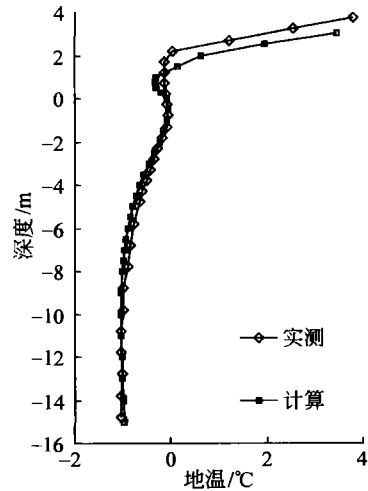


图1 路堤成形后第3年实测资料与计算结果对比

2 不同路面条件对路堤底面热流的影响

砂砾、沥青路面条件下, 路堤底面垂向年平均热流密度(以下简称年均热流密度)计算结果如图2所示, 图中横坐标为路堤底面的水平坐标, 从坡脚指向底面中心. 计算结果表明两种路面条件下, 路堤底面热流表现出完全不同的特征.

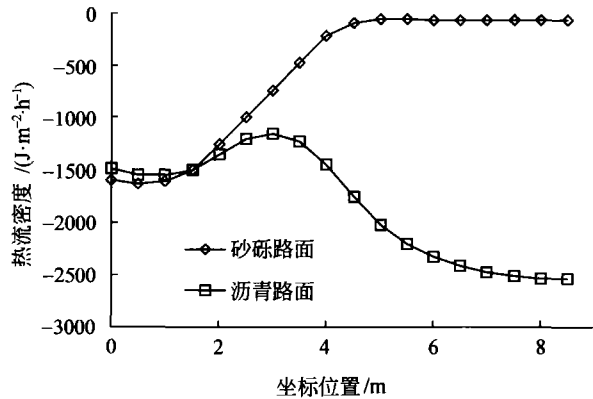


图2 两种路面条件下路堤底面热流密度对比

在热流密度分布方面, 沥青路面下, 从坡角到底面中心热流密度总体呈现不断增加的趋势, 并主要集中在路面对应部位, 在中心达到最大值, 坡脚位置为次一级的峰值, 与砂砾路面下基本相同. 而砂砾路面条件下的热流中心部位出现在底面的外侧, 对应于坡面位置, 中心部位则很小并接近于

零。

在热流密度量值方面,路堤底面的垂向热流均为负值,说明两者路面条件下,路堤均向下部土体传递热量,并导致冻土的不断升温。通过计算,沥青路面、砂砾路面下底面年平均热流分别为 -17559 和 $-5648\text{J}\cdot\text{h}^{-1}$,前者的热流强度为后者的3.1倍。因此,在相同路堤高度和环境条件下,沥青路面下传递的热量远高于砂砾路面下的,并主要集中在中心部位。由此增加内部热量向路基外侧冻土扩散的难度,使路基内部热量更易积累。

3 不同幅面宽度对热流场的影响

考虑高等级公路单向车道主要由超车道、行车道和应急车道3部分组成,其路面宽度一般接近20m,普通道路宽度一般约10m,在模拟计算中设定高等级公路对称的半幅路面宽度为9m,普通道路为5m,路堤坡面为1:1.5。图3为路堤成形后第4年8月至第5年8月路堤底面年均热流密度分布图,横坐标为路堤底面坐标,由路堤坡角指向底面中心,“垂向”“水平”为热流的垂直和水平分量。

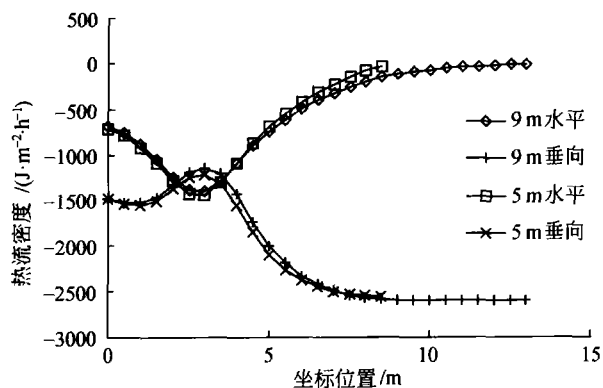


图3 随路面宽度变化沥青路面路堤底面水平和垂向年均热流密度

由图3可见,在不改变路堤高度的条件下,随着黑色路面宽度的增加,路堤底面边缘部位垂向热流密度基本没有大的变化,热流增加部分主要集中在路堤底面的中心部位,基本维持和延续底面的最大热流强度。对热流进行平均计算表明,在半幅路面宽度分别为5和9m条件下,虽然底面年均热流的平均值分别为 -1857 和 $-2052\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,两者差

别不大,但在热流量方面,5m的为 $-17645\text{J}\cdot\text{h}^{-1}$,9m的为 $-27698\text{J}\cdot\text{h}^{-1}$,后者约为前者的1.6倍。由此说明,当路堤路面宽度增加1倍、底面增加40%的时候,底面热流量要增加60%。

路堤底面边缘部位年均热流密度相对较为剧烈的变化说明,在底面边缘部位应存在较为强烈的热流向路基外侧土体扩散热量,并由此削弱垂向热流的向下传递。图3中水平热流负值表明其流向指向路堤外侧,由底面中心向外总体呈现逐渐增强的趋势。因而,较窄的路堤底面有利于路基热量的扩散。随着路面宽度的增加,底面的宽度和水平热阻随之增加,这样路堤中心部位的热流更难以向周围扩散。9m宽度对应的水平热流在底面中心部分基本为零正说明这一点。所以从这个意义上看,沥青路面下宽幅路基较窄幅路基而言具有“聚热效应”,使得加热热流的大部分集中到路堤的中心部位,加剧路基底部热量的积累。

4 不同路堤高度下宽幅路面的热流特征分析

沥青路面条件下,不同路堤高度底面热流的计算结果如图4所示,图中“高”表示路堤高度,“宽、窄”分别表示半幅宽度为9m和5m的路面,如“高4m-宽”表示4m高度,9m路面。以下主要从路堤高度和宽度两个方面就其影响进行讨论。

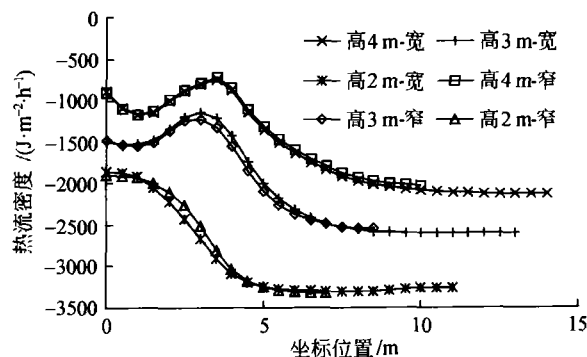


图4 不同高度和幅面的路堤底面年平均热流密度

路堤高度的影响主要反映在热流的分布和强度两个方面。在热流分布方面,相对而言,随着路堤高度增加,在以路面影响为主的同时,坡面的影响逐渐显现。在底面的边缘部位逐渐出现次级峰值,并不断增强,底面热流分布由底面中心集中传热方

式逐渐过渡到路面为主和坡面为次的传热方式。在热流强度方面，随着路堤高度的增加，路堤底面年均热流密度和热流量呈现较大程度的降低，但未能改变对下部冻土加热的本质。通过计算2, 3, 4 m路堤底面年均热流量分别为-19700, -16717, -13800 J·h⁻¹。当路堤高度小于2 m时，热流主要来自路面，且强度很大，热流密度是4 m高度路堤的2倍。从工程稳定性角度考虑，通过抬高路堤可以极大降低热流密度分布不均匀性和热流强度，减缓热扰动对下部多年冻土的影响。尤其对于路堤高度小于2 m的路堤，由于路堤底部的热流强度大而集中，其作用结果必然会对多年冻土产生强烈扰动，导致多年冻土的融化和上限快速下移。因此在多年冻土区宽幅路面结构形式的设计中，路堤高度问题是需要重点考虑的问题之一。同时在高路堤中，也要注重边坡的防护措施的采用，由此避免次级峰值的影响所导致的坡角和坡肩出现不均匀变形。

就路面宽度影响方面，由计算结果可见，对应不同路堤高度，路面宽度的增加导致路堤底面热流的变化，均具有第3部分分析的特征，即由于路面宽度变化导致热流增加部分均集中在路堤的中心部位，均存在“聚热效应”。

不同高度和幅面条件下，路堤底面年均热流量的统计结果如表2所示，表中5和9 m指半幅路面宽度。统计结果进一步反映路堤高度、路面宽度对底面热流量的影响。(1)路堤高度的影响。砂砾路面条件下，对应两种路面宽度，在路堤高度为3 m的时候路堤底面热流量均存在一个最小值，由此说明不同路面宽度条件下，砂砾路面均存在最佳路堤高度。而在黑色沥青路面条件下，热流量一直呈现减小的趋势，当路堤高度由2 m，增加到4 m时，底面热流量在两种宽度条件下均降低约33%。两种条件下，在计算范围内未见最佳路堤高度的存在。(2)路面宽度的影响。对应于不同路堤高度，砂砾路面条件下，随着路面宽度的增加，路堤底面的热流量略有增加，说明路堤宽度的变化对底面热流影响不大。而沥青路面条件下，随着宽度的增加，底面热流均有大幅提高，当路面宽度增加约1倍的时候，底面热流量均增加约60%。说明沥青路面的年均热流量与路基宽度密切相关，并且上述提到由于宽幅路面路堤结果形式产生的“聚热效应”不因路

堤高度的增加而改变。

表2 不同高度和幅面路堤年平均热流量

| 路堤高度 /m | 年均热流量/(J·h ⁻¹) | | | | 热流量比值 | |
|------------|----------------------------|----------|---------|----------|-------|------|
| | 5 m | | 9 m | | 砂砾面 | 沥青面 |
| | 砂砾面 | 沥青面 | 砂砾面 | 沥青面 | | |
| 2 | -8547.3 | -21018.0 | -8441.5 | -34370.8 | 0.99 | 1.64 |
| 3 | -6386.8 | -17474.4 | -6726.6 | -28768.7 | 1.05 | 1.65 |
| 4 | -6661.6 | -14547.7 | -7461.5 | -23286.2 | 1.12 | 1.60 |

5 路面宽度对地温场的影响

沥青路面条件下，由于黑色路面的大量吸热，导致路堤整体温度上升，试验场观测资料表明黑色路面下0.5 m深度的年平均温度较天然地表高出4.5℃，较冻土高出5℃。在温差的驱动下，热量会不断向路基下部的冻土输送，导致冻土温度的升高、融化和上限的不断下降，即多年冻土的不断退化。由上述分析，随着路面宽度增加，路堤底面热流量呈现大幅增加的同时，宽幅路面下的“聚热效应”会使更多的热量，更为集中地聚集到下部的冻土中，会导致多年冻土退化的加剧，并带来更为严重的工程问题。由于地表以下-3 m深度多年冻土上限附近，多是厚层地下冰的蕴藏部位，并随外界和边界条件的改变，该部位受到的冲击和对工程影响最为直接、敏感和剧烈，且具冻土地温变化代表性。因此在冻土地温变化中，重点分析该深度的地温变化过程。

沥青路面路堤高度3 m条件下，路堤中心、地表以下-3 m深度的地温和多年冻土人为上限随时间变化过程的计算结果如图5所示。由计算结果可见，两种路面宽度下，地温在快速升高后，从第4年开始处于稳定的升温过程中，第4年至第30年的时间里，随着路面宽度的增加，升温幅度由半幅5 m宽度的0.6℃升高到9 m的1.0℃，升幅增加66%。在0℃水平坐标线上，半幅路面宽度为5 m时，历经约20a后-3 m深度温度高于0℃，冻土融化；而半幅路面宽度为9 m情况下，则只用了约12a，时间缩短60%。在图6多年冻土上限历经30a时间的退化过程中，半幅路面宽度在5 m条件下，融化深度增加约2, 9 m时达到约3 m，增加50%。

因此，综合上述路面宽度由半幅5 m增加到9 m时，-3 m深度升温幅度增加66%、冻土消融时间

缩短60%、多年冻土上限融化深度增加50%有关冻土退化的重要参数,当路面宽度增加1倍时,多年冻土的退化进程将加快0.6倍。

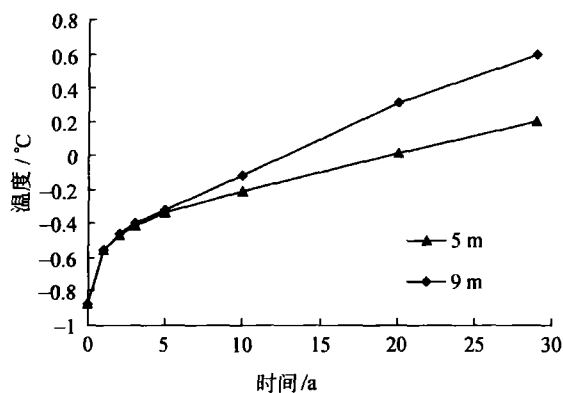


图5 -3m 深度年平均温度随时间变化过程

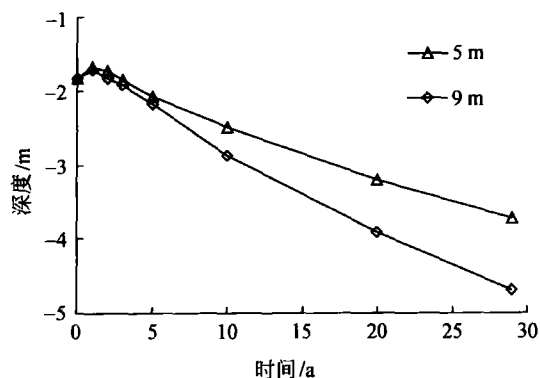


图6 多年冻土人为上限随时间变化过程

6 结论

(1) 在不同路面条件下,沥青路面路堤底面的年平均热流量约为砂砾路面的3.1倍。在路堤底面热流密度分布方面,砂砾路面主要分布在边缘区域,而沥青路面则更主要集中在路堤底面的中心部位。

(2) 沥青路面条件下,路面宽度增加约1倍的时候,针对不同路堤高度,路堤底面年平均热流量均改变为原来的约1.6倍。由此增加的热流主要集中在路堤底面的中心部位,并产生聚热效应,从而更加剧路基底部热量的积累。在砂砾路面条件下,路面宽度的增加不对底面热流量产生大的影响。

(3) 沥青路面条件下,针对不同路面宽度,随路堤高度增加,路堤底面热流量均呈现较大程度的

降低,但未能改变对下部冻土加热的本质。底面热流分布由底面中心集中传热方式逐渐过渡到路面为主和坡面为次的作用方式。砂砾路面条件下,针对不同路面宽度,均存在最佳路堤高度。

(4) 沥青路面条件下,路面宽度增加1倍导致路堤底面热流量增量达到60%,也将多年冻土的退化过程加快0.6倍。

参 考 文 献

- 周幼吾,郭东信,邱国庆,等. 中国冻土. 北京: 科学出版社, 2000, 92—106
- Khrustal'ov L N. Selection of principles for the use of permafrost materials as a foundation for buildings and structures. In: Proceedings of 4th International Conference on Permafrost. Washington D C: National Academy Press, 1983, 606—609
- Ladanyi B. Design and construction of deep foundations in permafrost. In: Proceedings of 4th International Conference on Permafrost. Washington D C: National Academy Press, 1983, 43—50
- 王绍令,赵林,李述训,等. 青藏公路多年冻土段沥青路面热量平衡及路基稳定性研究. 冰川冻土, 2001, 23(2): 111—118
- 吴青柏,施斌,刘永智. 青藏公路沿线多年冻土与公路相互作用研究. 中国科学, D辑, 2002, 32(6): 514—520
- 俞祁浩,刘永智,童长江. 青藏公路路基变形分析. 冰川冻土, 2002, 24(5): 623—627
- Cheng G D, Zhang J M, Sheng Y, et al. Principle of thermal insulation for permafrost protection. Cold Regions Science and Technology, 2004, 40(1): 71—79
- 姚仲鹏,王端君. 传热学. 北京: 北京理工大学出版社, 2003, 18—20
- 盛煜,刘永智,张建明,等. 青藏公路多年冻土路基内部的热状况. 自然科学进展, 2002, 12(8): 839—844
- Lai Y M, Wang Q S, Niu F J, et al. Three-dimensional nonlinear analysis for temperature characteristic of ventilated embankment in permafrost regions. Cold Regions Science and Technology, 2004, 38(2): 165—184
- 吴紫汪,程国栋,朱林楠,等. 冻土路基工程. 兰州: 兰州大学出版社, 1988, 48—57
- 汪双杰,霍明,周文锦. 青藏公路多年冻土路基病害. 公路, 2004, (4): 22—26
- 朱元林,张家懿. 冻土的弹性变形及压缩变形. 冰川冻土, 1982, 4(3): 29—40
- 李东庆,吴紫汪,朱林楠. 花石峡长石头山多年冻土及其退化预测. 自然科学进展, 1994, 9(4): 346—350