

文章编号:1671-6833(2010)03-0077-05

隔热板埋深对冻土路基温度场的影响分析

莫石秀^{1,3}, 郭月芹²

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 广东省公路勘察规划设计院, 广东 广州 510507; 3. 广东省路桥建设发展有限公司, 广东 广州 510635)

摘要: 采用焓模型, 建立含相变的冻土路基温度场, 利用非线性有限元方法对隔热板路基温度场进行数值模拟, 并结合考虑近期及远期冻土保护效果, 采用冻土年最大融深及路基内融土核高度两个评价指标综合分析了路基高度、路基施工季节等因素对隔热板最佳埋深的影响。有限元计算表明, 当施工季节向冷季推迟3个月时, 隔热板的冻土保护效果显著增强, 路基在运营20年内无融土核出现。在确定隔热板最佳埋深时需综合考虑施工季节、路基高度等因素的影响, 若路基较低, 宜浅埋, 路基高度较高, 暖季施工宜中埋, 冷季施工宜浅埋。

关键词: 道路工程; 多年冻土; 隔热板; 路基温度场; 埋深; 有限元

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

0 引言

我国的多年冻土面积约215万 km^2 , 是世界第三冻土大国, 其中青藏高原多年冻土区面积约149万平方公里, 约占我国多年冻土面积的70%^[1]。近些年来, 全球气候持续变暖, 据预测, 至2050年, 青藏高原将升温2.2~2.6 $^{\circ}\text{C}$ ^[2]。由于多年冻土是对温度变化极其敏感的土类, 气候变暖对多年冻土的存在环境产生严峻影响。在多年冻土地区修筑道路后, 原有的地气热交换条件也发生了变化, 使得路基及基底多年冻土吸热量进一步增加, 从而引起下部土体升温、冻土融化和路基失稳变形^[3-5]。

保温法是各种冻土保护措施中较为常用的一种。20世纪50年代, 挪威开始尝试在冻土路基中铺设隔热板, 60~70年代美国、前苏联、加拿大等国家开始采用聚苯乙烯作为路基保温材料, 取得了显著的效果^[6]。我国1992年在青藏公路昆仑山铺设保温材料对冻土路基热状况作用进行试验研究, 得出隔热材料可降低基底多年冻土上限下降速率的初步结论^[7]。

为了分析隔热板最佳埋深, 笔者采用伴有相变的热传导方程的有限元数值解法, 建立隔热板

路基温度场有限元分析模型, 对隔热板路基温度场状况进行非线性数值模拟。

1 有限元模型的建立

1.1 控制方程的建立

根据热力学理论, 平面二维问题的非稳态温度场的导热偏微分方程为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

式中: T 为物体的瞬态温度, $^{\circ}\text{C}$; t 为过程进行的时间, s ; λ 为材料导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$; ρ 为材料密度, kg/m^3 ; c_p 为材料定压比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; x , y 为直角坐标, m 。

受外部环境气温变化的影响, 路基区域内存在随时间变化而移动的冻融交界面, 在此交界面上存在强烈的放热或吸热过程, 此类问题属强非线性数学问题。为此, 笔者采用焓模型以期在整个区域(包括固、液两相界面)建立一个统一的能量方程。焓模型采用焓场与温度场相同作为待求函数, 不需跟踪两相界面, 从而使液相区和固相区统一处理成为可能。焓场的定义如下:

$$H = \int \rho \cdot c_p(T) dT \quad (2)$$

收稿日期: 2010-01-01; 修订日期: 2010-03-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50178010); 西部交通建设科技项目资助项目(200231881203)

作者简介: 莫石秀(1978-), 男, 湖南永州人, 长安大学博士研究生, 主要从事高速公路建设管理及路面工程新技术应用研究。

式中: H 为物体的焓值, J/m^3 。

将式(2)求微分后代入式(1),可得到用焓模型求解的伴有相变的路基非稳态温度场的控制方程:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

采用加权余量法并用 Galerkin 法选择函数,代入边界条件后,经推导可得矩阵形式的温度场有限元方程组:

$$[K] \cdot \{T\} + [N] \cdot \left\{ \frac{\partial H}{\partial t} \right\} = \{P\} \quad (4)$$

式中: $[K]$ 为温度刚度矩阵; $[N]$ 为非稳态焓场刚度矩阵; $\{P\}$ 为荷载合成列阵,其值取决于边界条件。

1.2 模型结构及尺寸

为了分析不同路基高度对隔热板最佳埋深的

影响,结合青藏公路沿线典型路段状况,计算路基高度分别取 2 m 与 4 m,边坡坡度取 1:1.5,路面计算宽度取 4 m,路面类型为沥青混凝土路面。为了考虑路基对下伏多年冻土层及邻近区域内冻土稳定性的影响,对路基下多年冻土计算深度取 10 m,边坡以外宽度取 10 m 的区域进行分析。

1.3 材料的热物理参数

1.3.1 土的热物理参数

考虑到温度对冻土导热系数及比热的影响,结合青藏公路沿线具有代表性的土质类型状况,数值模拟中的土质类型为天然砂砾土。根据现有实测资料并综合相关参考文献[8],土体的各项热物理参数如表 1 所示。

表 1 土体热物理参数
Tab.1 Thermal parameters of soil

热参数	-10℃	-5℃	-2℃	-1℃	0℃	15℃
$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 870	1 870	1 870	1 870	1 870	1 870
$\lambda/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{℃}^{-1})$	2.2	2.2	2.2	2.2	1.68	1.68
$c/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{℃}^{-1})$	856.5	856.5	856.5	856.5	1 102.5	1 102.5
$H/(10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3})$	0	8.88	15.59	19.53	71.13	102.06
$W_u/\%$	0.29	0.45	0.78	1.19	10	10

注:表中 ρ 为密度, λ 为导热系数, c 为比热, H 为焓值, W_u 为未冻水含量。

1.3.2 隔热板材料的热物理参数

结合青藏高原地区隔热板的运用状况,综合参考文献[9],隔热板类型为聚氨脂(PU)板,其热物理参数如表 2 所示。

表 2 隔热板材料的热物理参数
Tab.2 Thermal parameters of insulation materials

隔热板材料	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\lambda/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{℃}^{-1})$	$c/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{℃}^{-1})$
聚氨脂(PU)	50	0.025	1 300

2 计算结果及分析

目前,隔热板运用于冻土路基保护时,关于其最佳埋深存在不同的看法,主要分三类:一是深埋,二是浅埋,三是中埋。笔者认为在确定隔热板最佳埋深时应结合路基高度、施工季节等影响因素,采用多个评价指标,近期及远期的冻土保护结果相结合的方法进行综合确定。以下采用基底冻土最大融深(表征冻土稳定状况)及路基内融土核高度(表征路基本体稳定状况)两个评价指标,对暖热及冷季施工(8月20日、11月20日)、不同高度(2 m、4 m)、不同埋深(浅埋、中埋、深埋)

的隔热板路基温度场进行对比分析。

2.1 暖季施工隔热板埋深的影响

年均地温 -1℃ ,路基高度 2 m,路基完工日期为 8 月 20 日时,10 cm 厚度 PU 板处于不同埋深时,路基下年最大融深的逐年变化及融土核高度计算结果见图 1,2。

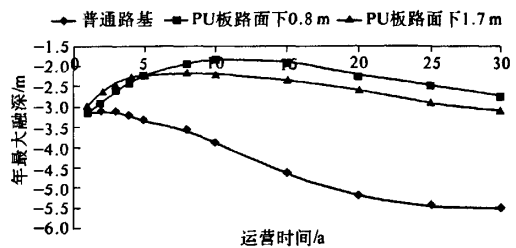


图 1 暖季施工埋深对最大融深的影响

Fig.1 Influence on permafrost max thaw depth by embedded depth constructed in warm seasons

当隔热板埋设于路基不同位置时,其冻土保护效果存在一定差异。由于在暖季施工,受新建路基初始状态的影响,浅埋隔热板(路面下 0.8 m)下有较多的高温填料,初期蓄热较大,隔热板的存

在又致使其热量无法迅速向外部释放,因而在公路建成初期,基底冻土年最大融深比深埋(路面下1.7 m)隔热板的要大,融土核高度也较大.随着公路运营年限的延长,浅埋隔热板的位置优势逐渐体现,由于浅埋隔热板所处位置的温度梯度较大,可有效地发挥其导热系数低的优点,冻土远期最大融深相对较小.

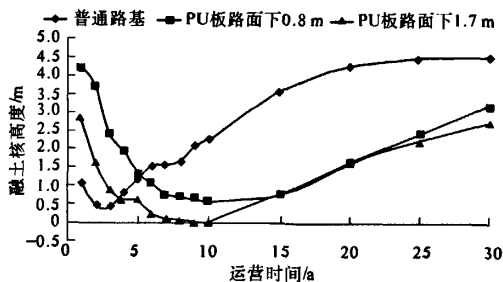


图2 暖季施工埋深对融土核高度的影响

Fig.2 Influence on thaw soil height by embedded depth constructed in warm seasons

2.2 冷季施工隔热板埋深的影响

年均地温 -1°C , 路基高度 2 m, 完工日期为 11 月 20 日, 10 cm 厚度 PU 板处于不同埋深时, 冻土年最大融深的逐年变化及融土核高度计算结果见图 3、4.

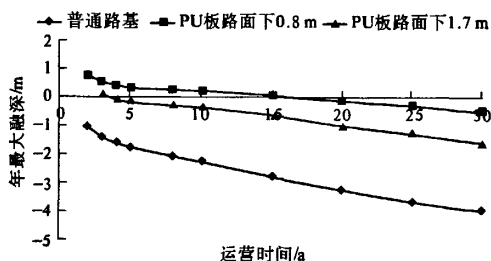


图3 冷季施工埋深对最大融深的影响

Fig.3 Influence on permafrost max thaw depth by embedded depth constructed in cold seasons

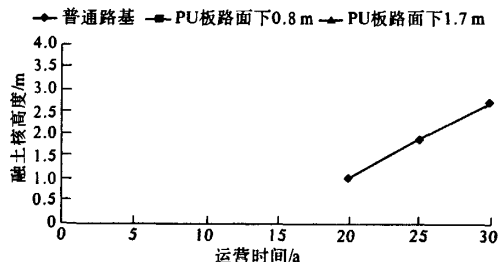


图4 冷季施工埋深对融土核高度的影响

Fig.4 Influence on thaw soil height by embedded depth constructed in cold seasons

由于在冷季施工, 浅埋隔热板下有较多的低温土体, 具有较多的冷能储蓄, 且浅埋隔热板具有很好的位置优势, 因而最大融深较小, 路基稳定性也相对较好. 当路基施工完成日期为 11 月 20 日时, 路基稳定性显著增强, PU 板处置后的路基在运营 30 a 内均无融土核出现.

2.3 高路堤暖季施工隔热板埋深的影响

年均地温 -1°C , 路基高度 4 m, 完工日期为 8 月 20 日, 10 cm 厚度 PU 板处于不同埋深时, 冻土年最大融深的逐年变化及融土核高度计算结果见图 5、6.

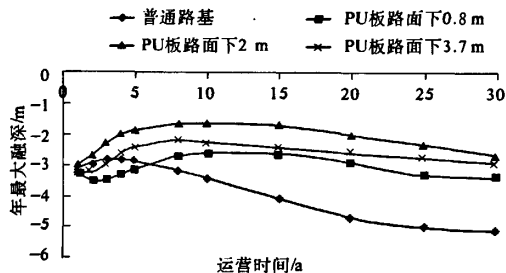


图5 高路堤暖季施工埋深对最大融深的影响

Fig.5 Influence on permafrost max thaw depth by embedded depth for high embankments constructed in warm seasons

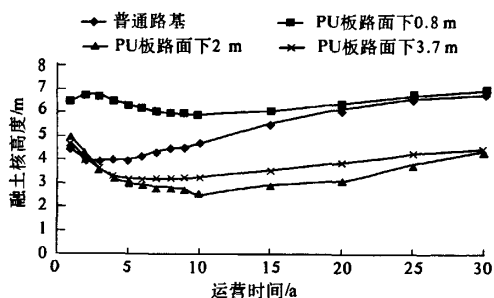


图6 高路堤暖季施工埋深对融土核高度的影响

Fig.6 Influence on thaw soil height by embedded depth for high embankments constructed in warm seasons

通过计算可以看出如下规律:

(1) 由于路基完工季节土体温度较高, 当 PU 板浅埋时(路面下 0.8 m), 板下较多的高温土体储蓄较大的热量, 而 PU 板的隔热作用使之无法顺利冷却. 故对于 4 m 的高路基, 浅埋 PU 板下冻土年最大融深较大, 在建成 30 a 内超过了普通路基, 其稳定性最差. 当 PU 板深埋时(路面下 3.7 m), PU 板下的高温土体虽然体积较小, 但土体对应的边坡面积也小, 同时板下路基横断面尺寸增

大,横向热传导距离增大,因而其效果要较中埋(路面下2 m)PU板的效果要差一些.中埋PU板在公路建成初期的蓄热量较小,且可以通过边坡向外散热,而且具有一定的位置优势,因而其冻土保护效果最好.

(2)路基高度对隔热板最佳埋深的确定有一定的影响.2 m高度路基浅埋效果优于深埋;而在相同条件下,对于4 m高度路基,隔热板路基冻土保护效果从优至劣排序为:中埋-深埋-浅埋.

2.4 高路堤冷季施工隔热板埋深的影响

年均地温 -1°C 、路基高度4 m、完工日期为11月20日时,10 cm厚度PU板处于不同埋深时,冻土年最大融深的逐年变化及融土核高度计算结果见图7,8.

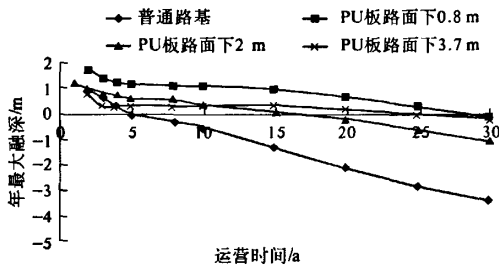


图7 高路堤冷季施工埋深对最大融深的影响

Fig.7 Influence on permafrost max thaw depth by embedded depth for high embankments constructed in cold seasons

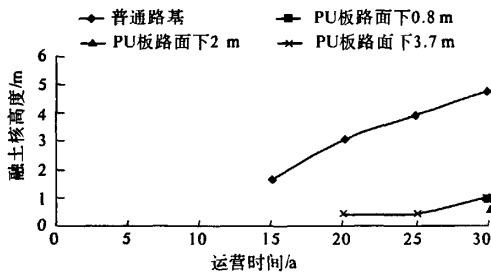


图8 高路堤冷季施工埋深对融土核高度的影响

Fig.8 Influence on thaw soil height by embedded depth for high embankments constructed in cold seasons

通过计算可以看出:

(1)由于在冷季施工,路基体处于较低的温度(0°C 以下).当PU板浅埋时,板下路基体储蓄了较多的冷能,有利于路基的稳定,且PU板处于路基体内温度梯度较大的区段,其保温作用得以充分发挥.故在公路建成前30 a内,浅埋及中埋PU板均起着较好的作用.随着公路运营年限的延长,深埋PU板有效地阻止了路基边坡的累积吸

热进入板下土体,故在后期深埋PU板的效果开始逐步体现,与中埋PU板、浅埋PU板间各指标的差异在减小.

(2)当路基完工日期推迟后,路基的热稳定性增强,深埋隔热板路基建成20 a后,才出现规模较小的融土核,中埋及浅埋隔热板路基在运营30 a内均无融土核出现.

(3)施工季节对确定隔热板的最佳埋深有一定影响.暖季施工时,在年均地温 -1°C 地区,隔热板路基冻土保护效果从优至劣排序为:中埋、深埋、浅埋;而在冷季施工时,排序则变为:浅埋、中埋、深埋.

2.5 隔热板最佳埋深的选择方案

通过对算例进行分析,综合考虑冻土最大融深及路基内融土核高度两个评价指标,结合隔热板路基温度场调控的近期及远期效果,隔热板最佳埋深的确定流程图如下:

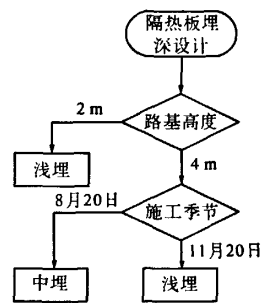


图9 最佳埋深确定流程图

Fig.9 Flow diagram for determination of the optimal embedded depth

3 结论

(1)从长期来看,对于处于升温状态的青藏高原地区,各类隔热板路基均具有保护路基下伏多年冻土、延缓多年冻土上限下降的功能,但其工程效果随隔热板埋深及施工季节的不同呈现一定的差异性.

(2)施工季节的选择对隔热板路堤的工程效果起着极其重要的影响,为了达到最佳冻土保护效果,在实际施工时应结合当地气温变化状况,宜将隔热板铺设日期尽可能地往后推迟.

(3)隔热板最佳埋深需考虑施工季节、路基高度等因素的影响.若路基较为低矮,宜浅埋;路基高度较高,暖季施工宜中埋,冷季施工宜浅埋.

参考文献:

[1] 周幼吾,郭东信,邱国庆,等.中国冻土[M].北京:

- 科学出版社.
- [2] 秦大河. 中国西部环境演变评估[M]. 北京: 科学出版社.
- [3] 毛雪松, 胡长顺, 侯仲杰. 冻土路基温度场室内足尺模型试验[J]. 长安大学学报, 2004, 21(1): 30 - 33.
- [4] 蒋鑫, 魏永幸, 邱延峻. 斜坡软弱地基路堤填筑全过程稳定性交通运输工程学报 2003, 3(1): 30 - 34.
- [5] 汪双杰, 孙斌祥, 徐学祖, 等. 路堤块石自然对流机理的室内模拟试验研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(2): 18 - 23.
- [6] JOHNSON C H. Performance of an insulated roadway on permafrost[C] // Proceedings of the 4th International Conference on Permafrost. USA Fairbanks; 1983: 548 - 553.
- [7] 盛煜, 温智, 马巍. 青藏铁路北麓河试验段路基保温材料处理措施初步分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增2): 2659 - 2663.
- [8] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [9] 中华人民共和国铁道部标准. 青藏铁路高原多年冻土地区工程设计暂行规定[S]. 北京: 中华人民共和国铁道部.

Influence of Thermal Regime in Permafrost Embankment by Embedded depth of Insulation

MO Shi - xiu², GUO Yue - qin²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Guangdong Highway Design Institute, Guangzhou 510507, China; 3. Guangdong Road and Bridge Construction Development Co. Ltd., Guangzhou 510635, China)

Abstract: Enthalpy model and nonlinear finite element method (FEM) were adopted to simulate the thermal regime of embankments with insulations. Short-term and long-term permafrost protection effect were considered, and two index of annual max thaw depth and thawing soil height in embankments were adopted to analyze the influence on the optimal insulation depth by such factors as embankment height and construction seasons. FEM results show that if insulation embedding date is put 3 months off to cold seasons, the protection effect of insulation will increase significantly, and there is no thaw soil in embankments in their 20 years' service. In determining the optimal embedded depth of insulations, many factors such as construction seasons and embankments heights should be taken into account. For low embankments, insulations should be embedded shallowly. For high embankments, insulations should be embedded moderately if constructed in warm seasons, and shallowly if constructed in cold seasons.

Key words: highway engineering; permafrost; insulation; embankment thermal regime; embedded depth; FEM