

文章编号: 0451-0712(2006)06-0060-05

中图分类号: U416.168

文献标识码: B

青藏高原多年冻土区 站场路基温度场的有限元模拟

邹泽雄¹, 娄瑜²

(1. 中交公路规划设计院 北京市 100010; 2. 中国农业大学水利与土木工程学院 北京市 100083)

摘 要: 在多年冻土区修建铁路站场路基, 打破了原来天然地表与外界的热力平衡, 地下温度场将重新分布。根据此特征可以推断多年冻土的发展演化趋势以及评定路基的稳定状况, 结合实际监测数据, 利用 ANSYS 软件对路基下温度场进行有限元数值模拟。模拟计算结果表明: 路基下冻土上限发生了上移, 多年冻土得到了保护; 试验段内冻土人为上限和未受路基影响的冻土天然上限均逐年下降; 同时, 路基阳坡、阴坡两侧地下的温度场分布特征的差异构成了路基不均匀变形和路面裂缝的潜在威胁。

关键词: 青藏高原; 多年冻土; 站场路基; 温度场

青藏铁路格尔木至拉萨段, 穿越有“世界屋脊”和“地球第三级”之称的青藏高原, 海拔高、气候条件恶劣, 该线全长 1 118 km, 百分之九十区段均在海拔 4 000 m 以上。其中, 北起西大滩, 南至安多路南 10 km 红岭附近, 长约 562 km 的沿线均属于青藏高原多年冻土地区, 冻土是高原铁路建设中所面临的主要难题之一。一般来说, 冻土路基下有一层约 1~5 m 厚的季节性冻融层, 其下为对温度极为敏感的多年冻土层, 极易受到天然因素或人为因素影响而产生融化作用, 即天然冻土上限下降, 从而导致其上的铁路路基沉降变形。为了保护路基的稳定性, 要求铁路路基修建后多年冻土天然上限不下降或有所上升^[1,2]。

青藏铁路的设计中广泛借鉴了这一设计原则, 通过适当加高路基高度这一措施来确保多年冻土天然上限不下降。但是, 青藏铁路建成后, 铁路路基对其下伏多年冻土层热状况将产生何种影响, 以及路基内部的温度场如何分布, 目前关于这些方面的研究很少。因此, 加强对多年冻土路基温度场的研究不仅有利于揭示影响高原冻土的热力学因子, 而且对青藏铁路的工程建设、运营和维护也具有一定的指导意义。

前苏联、美国、加拿大等国家从 20 世纪 30 年代开始围绕冻土区工程建设进行了大量的冻土工程特

性及环境方面的研究, 对各种应力状态下冻土蠕变和长期强度实验进行了深入研究, 在冻融土特征、冻结过程和冻胀现象等领域也开展了大量的工作。很多研究成果在俄罗斯西伯利亚、美国阿拉斯加和加拿大多年冻土地带的铁路建设和高速公路、输油管道等工程中得到应用, 同时这些地区的设计、施工和建设经验对我国青藏铁路建设也有借鉴意义。

本文利用有限元方法, 考虑相变和路基坡向对路基热状况影响等因素, 在实际监测数据的基础上, 对青藏铁路多年冻土区站场路基试验段的温度场进行数值模拟, 以期分析和预测已经建成的青藏铁路站场路基温度场的变化规律。

1 计算模型的建立

该试验段位于青藏高原楚玛河高平原上, 平均海拔 4 520 m, 属高温细粒多年冻土区, 地形平坦开阔, 地表植被覆盖率为 10%, 地温为 $-0.5 \sim -1.0^{\circ}\text{C}$, 多年冻土上限埋深 2~3 m, 地下水主要为暖季分布的冻结层上水, 由大气补给, 水位不稳定。试验段长 100 m, 路堤设计高度 5.0~5.5 m, 路堤较高, 路基面宽 16.0 m。

1.1 计算模型

站场路基的宽度为单线普通路基宽度的两倍左右, 整个路基断面形式、尺寸都和普通路基有所不

同,因此路基整体的传热性能和传热特点都和普通路基有区别。因此了解在气候变化的条件下,站场路基在修筑后的地温响应过程及特点是我们分析站场路基的变形特征及其稳定性问题的基础。

铁路站场路基为一线性工程,假定路堤无限延伸,路基和地基土土层分层均匀,截一路堤断面以二维平面问题来处理。参照实际的试验工程路基断面形式、尺寸以及地质资料,建立如下计算模型:计算中取路基宽度为16 m,路基高度为5 m,边坡坡度取1:1.5,地基计算宽度为60 m,从路基中心向路基左右各延伸30 m。路基计算深度为50 m,计算区域由4层介质组成:A1区域为路基本体,填料为砾砂土;A2区域为中砂,厚度为3 m;A3区域为含土冰层,厚度为2 m;A4区域为泥岩,厚度为40 m,计算模型如图1。

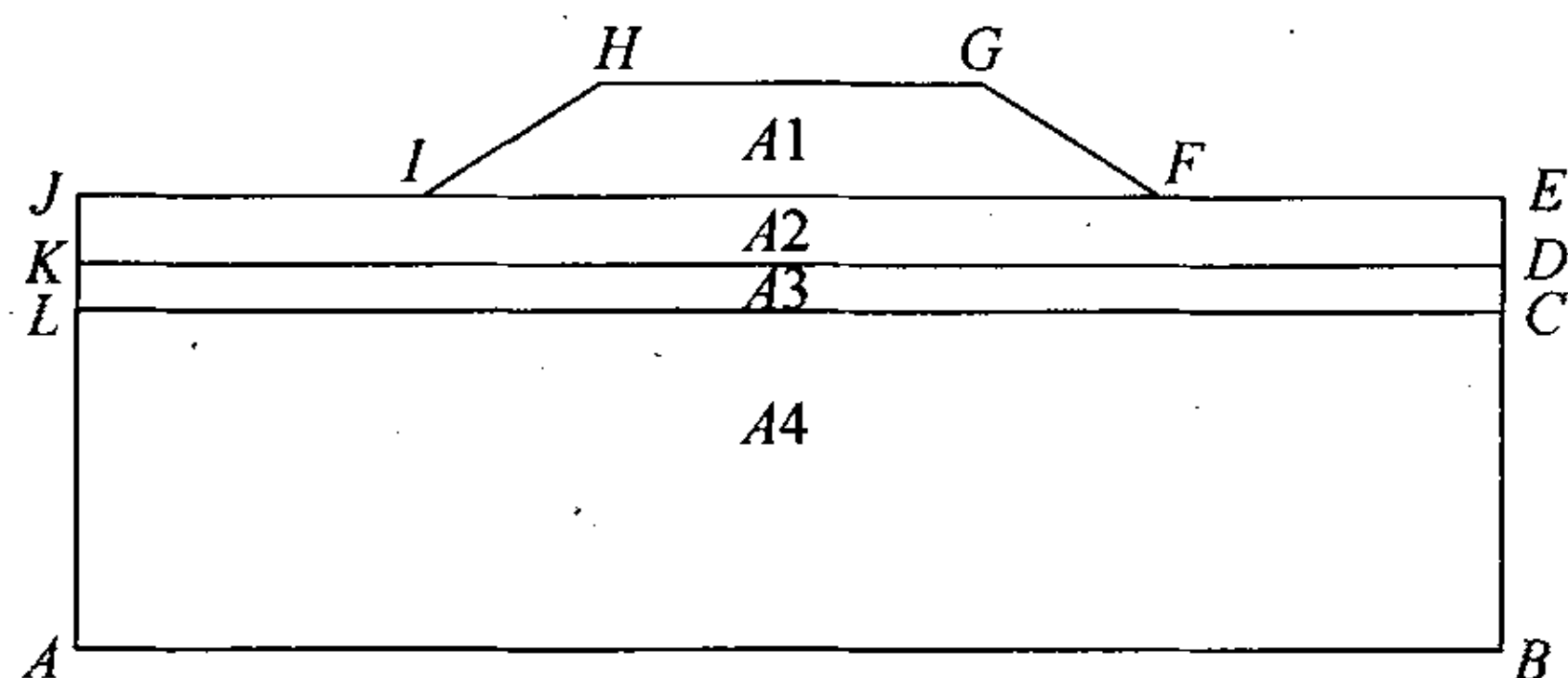


图1 站场路基温度场的计算模型

1.2 控制微分方程

土体在融化和冻结过程中,将发生热传导和冰—水的相变作用。冻土中的未冻水含量与温度之间保持着动态平衡关系,即温度降低,未冻水含量减少,反之亦然^[3]。同时假定无其他边界的水份补给和排水作用,截一断面为二维平面问题^[4]。一般情况下,忽略了对流项,只考虑热传导和相变作用且无内热源问题的土体温度 $T(x, y, t)$ 平衡控制微分方程为:

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) \quad (1)$$

式中: ρ 为材料密度; C 为材料比热; λ 为材料的导热系数; t 为时间。

对于含有相变的热传导问题,由于相变界面随时间的变化曲线是间断的,所以在计算中引入了焓。焓的单位是 J/m^3 ,是密度与比热的乘积对温度的积分,如式(2)所示:

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

式中: ρ 为土体材料的密度,为常数, $C(T)$ 为土体材料的比热对温度的函数。

由于焓随时间的变化 $H \sim t$ 曲线是连续的,因此用数值方法求解焓分布时不需要跟踪两相界面,从而使液相区和固相区统一处理成为可能^[5]。

冻土是由有机质、矿物骨架、水溶液、冰和气体组成的多相细碎介质。融土与冻土的区别在于不含冰。试验表明,土的比热具有按各种物质成分的质量加权平均的性质,土中的气体的含量和比热均很小,可以忽略不计,则可以得到冻土和融土比热的计算式,如式(3)及(4)所示:

$$C_{df} = \frac{C_{sf} + (W - W_u)C_i + W_u C_w}{1 + W} \quad (3)$$

$$C_{du} = \frac{C_{su} + W C_w}{1 + W} \quad (4)$$

式中: C_{du} 、 C_{df} 分别为融土和冻土的比热; C_{su} 、 C_{sf} 分别为融土骨架和冻土骨架的比热; C_i 、 C_w 分别为冰和水的比热; W 、 W_u 分别为土体总的含水量和未冻水含量。

土冻结后,并非土中所有的液相水已全部转变成固态的冰,由于颗粒表面能的作用,始终保持一定数量的液态水称作未冻水。未冻水含量随温度降低而减少,随温度的升高而增大。未冻水的含量主要取决于3大因素:土质(包括土颗粒的矿物化学成分、分散度、含水量、密度、水溶液的成分和浓度)、外界条件(包括温度和压力)以及冻融历史。在给定的土质的情况之下,不考虑外界条件以及冻融历史,可以认为未冻水含量是温度的函数,因此使得比热也成为温度的函数。

一般热工计算中,未冻水量与温度的关系可以近似地按式(5)和式(6)计算:

$$\text{粘性土 } W_u(T) = K(T)W_p \quad (5)$$

$$\text{砂土 } W_u(T) = W(1 - i(T)) \quad (6)$$

式中: W_p 为塑限含水量,以小数计; $K(T)$ 为温度修正系数,以小数计; $i(T)$ 为结冰率(冰重与总水重之比),以小数计。

1.3 边界条件

根据青藏高原多年来的观测资料和土的附面层原理,将下附面层的温度即计算模型的上边界温度的变化可简化成三角函数形式^[6]。边界条件为以下情况。

(1)上边界。

$$T = T_s + g(t) + 12.2 \sin\left(\frac{2\pi}{8640}t + \frac{4\pi}{3}\right) \quad (7)$$

式中: $g(t) = At$, A 为气温逐年上升的速率; t 为时间,h。

$$A=0.25/8\ 640=0.3\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C/h}$$

T_s 为附面层底的初始年平均温度, $T_s=T_0+\Delta T$, T_0 为初始年平均气温, ΔT 为附面层总温度增量。

(2) 两侧边界及底边界。

参照图 1, 取计算模型左右边界 AJ 和 BE 的温度梯度为零, 即 $\frac{\partial T}{\partial x}=0$; 对于模型底部, 地温年变化深度以下地温变化幅度很小, 底部 AB 边界地温按温度梯度来取值。

1.4 初始条件

在路基没有修筑以前, 原始土层的温度状况, 可以通过在地基土层的上边界 EJ 边施加变化的温度, 温度的变化仍采用式(7)的三角函数, 只是式中的 $g(t)=At=0$, 即温度逐年增长速率为零, 取计算模型整个 EJ 边上附面层的温度增量为 2.5°C 。则该函数如式(8)所示^[7]:

$$T=-4.5+12.2\sin\left(\frac{2\pi}{8\ 640}t+\frac{4\pi}{3}\right) \quad (8)$$

由于路堤为寒季填筑, 路基本体内的初始温度按寒季施工来确定。

1.5 网格划分及 ANSYS 荷载步

在利用 ANSYS 有限元分析软件进行划分网格时, 采用平面四边形 8 节点单元。定义不同土体单元的材料特性, 然后在计算区域的边界上施加边界条件, 在 ANSYS 中进行瞬态热传导问题计算的时候, 可以施加 5 种边界条件, 在我们的计算中只考虑温度条件和热流密度条件, 不考虑热流率条件、对流条件和热生成率条件。

由于温度荷载是随时间变化的, 在 ANSYS 中将温度—时间曲线离散为荷载步, 每一个荷载步又可分为多个子步, 每个子步内采用迭代法进行计算, 对于相同的时间, 荷载步越多, 子步越多, 计算时间就越长, 计算结果就越精确。在我们的计算中取 30 d 为一个荷载步, 其中每个荷载步又分成 10 个子步计算。

2 模型参数及计算结果分析

(1) 计算过程中所用的各项参数如表 1 所示。

表 1 计算模型土体参数取值

土体及参数		温度/ $^{\circ}\text{C}$						
		-10	-5	-2	-1	-0.5	0	15
砂砾土填料	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	1 980	1 980	1 980	1 980	1 980	1 980	1 980
	$\lambda_u/(\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$						1.91	1.91
	$\lambda_f/(\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$	2.61	2.61	2.61	2.61	2.61		
	$W_u/\%$	0	0.5	0.8	1.5	2.2	10	10
	$H/(\text{J}/\text{m}^3\cdot 10^6)$	0	9.10	14.87	16.99	18.26	19.99	52.60
细砂土	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800
	$\lambda_u/(\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$						1.09	1.09
	$\lambda_f/(\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22		
	$W_u/\%$	1	1.5	2.0	3.0	5.0	20	20
	$H/(\text{J}/\text{m}^3\cdot 10^6)$	0	10.56	16.52	18.77	20.26	23.07	51.38
圆砾土	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	1 938	1 938	1 938	1 938	1 938	1 938	1 938
	$\lambda_u/(\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$	2.48	2.48	2.48	2.48	2.48		
	$\lambda_f/(\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$						1.84	1.84
	$W_u/\%$	0	0.9	1.4	2.7	4.0	18	18
	$H/(\text{J}/\text{m}^3\cdot 10^6)$	0	9.46	16.10	18.63	20.26	22.41	61.74
泥灰岩	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	2 610	2 610	2 610	2 610	2 610	2 610	2 610
	$\lambda_u/(\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$						2.13	2.13
	$\lambda_f/(\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$	2.69	2.69	2.69	2.69	2.69		
	$C_u/(\text{J}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$						1 172	1 172
	$C_f/(\text{J}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	922	922	922	922	922		

注: ρ 为土体容重; λ_f 为冻结状态导热系数; λ_u 为融化状态导热系数; W 为重量含水量; W_u 为重量未冻水含水量; H 为土体的焓; C_f 为冻结状态比热; C_u 为融化状态比热。

(2) 计算结果分析。

通过温度场模拟分析,我们发现计算人为上限与实测上限有如下关系图(见图2)。

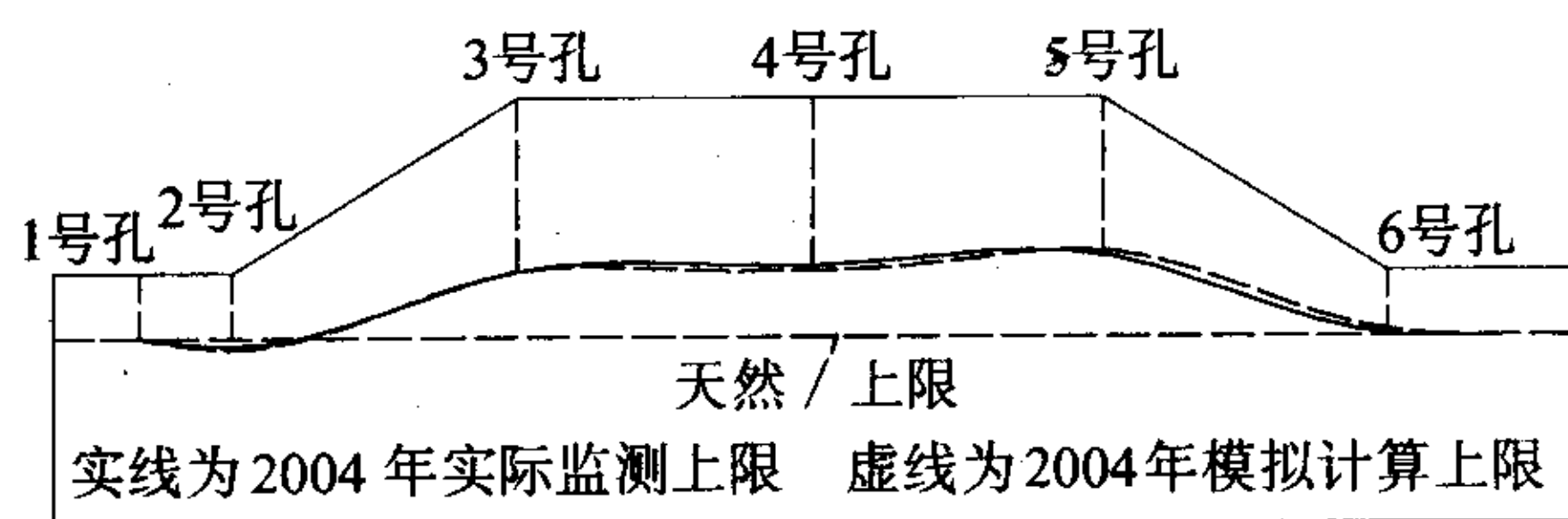


图2 计算人为上限与实测上限的对比

图2为2004年实测人为上限与计算人为上限的对比图,从图2中可以看出通过数值模拟计算出的人为上限与试验实测上限吻合得较好,这说明了我们的计算模型以及选取的边界条件是合理的,利用该模型进行温度场模拟所得结果是可靠的。

根据计算结果绘制天然孔、阳坡坡脚、阳坡路肩、路基中心、阴坡路肩、阴坡坡脚等6个位置冻土人为上限所对应的高程随时间变化曲线,见图3。其中,各点高程以路基修建前的天然地表为基准零点。

通过模拟分析可以看出:由于受青藏高原气温逐年升高 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{年}$ 的气候条件影响下,试验段冻土天然上限及冻土人为上限逐年下降。在未来20年中冻土人为上限形状与2004年基本相同,路基下的冻土人为上限总体上高于同期的冻土天然上限,同时仍旧是阳坡低、阴坡高。地温场的变化会使高原多年冻土的工程地质条件和工程地质性质发生越来越明显的变化,因而对以多年冻土为工程介质的铁路路基的稳定性将产生至关重要的影响^[8]。路基温度场的不对称现象将会引起路基不均匀的冻胀与融沉病害。

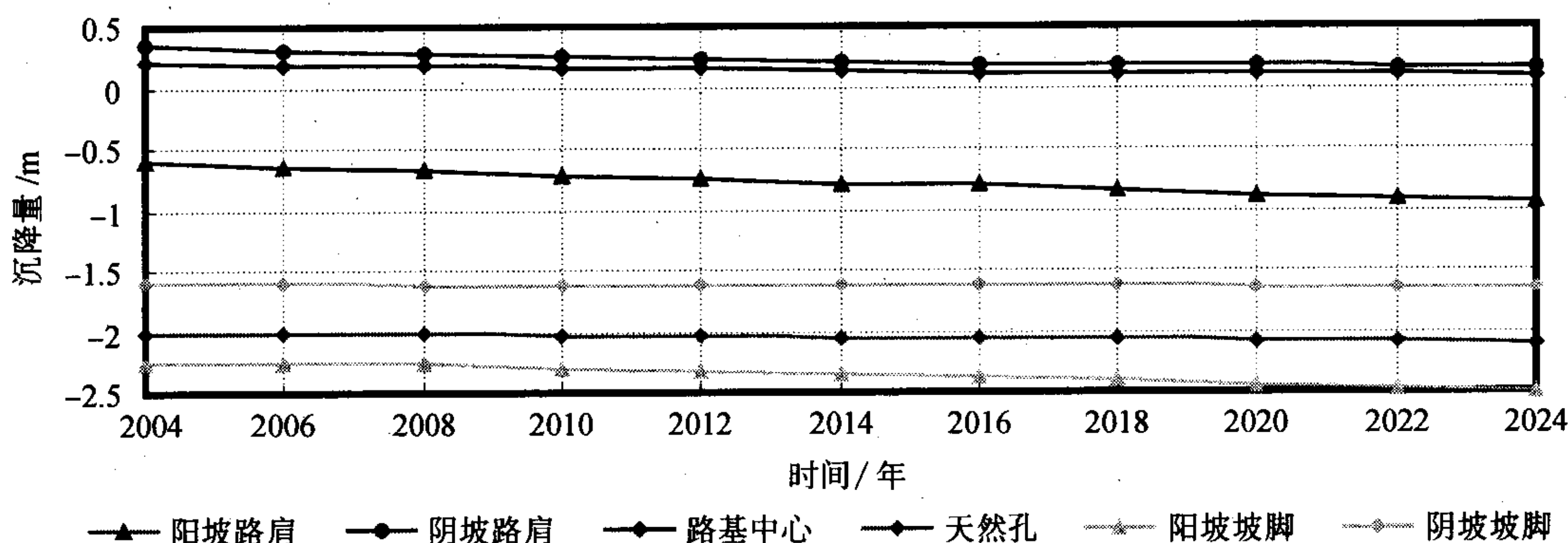


图3 路基下各部分冻土人为上限对应的高程随时间变化曲线

图4为2020年温度等值线,从图中可以看出,在气温逐年升高的气候背景和路基在外界作用之下,路基下同深度位置在同时期温度有升高的趋势,这样就导致随着路基运营年限的增加,路基下各部位融深会增大,而且不同部位融深增大不均匀,容易造成路基的不均匀沉降。路基阴、阳坡土体接受太阳辐

射的不同导致了路基阴、阳坡土体温度场关于路基中心线的不对称现象,路基阳坡土体的融化起始时间早于阴坡土体,而回冻时间却晚于阴坡土体。为了减弱路基温度场的不对称现象,建议采取一些适当的措施,如采用通风管、片石路基等等。

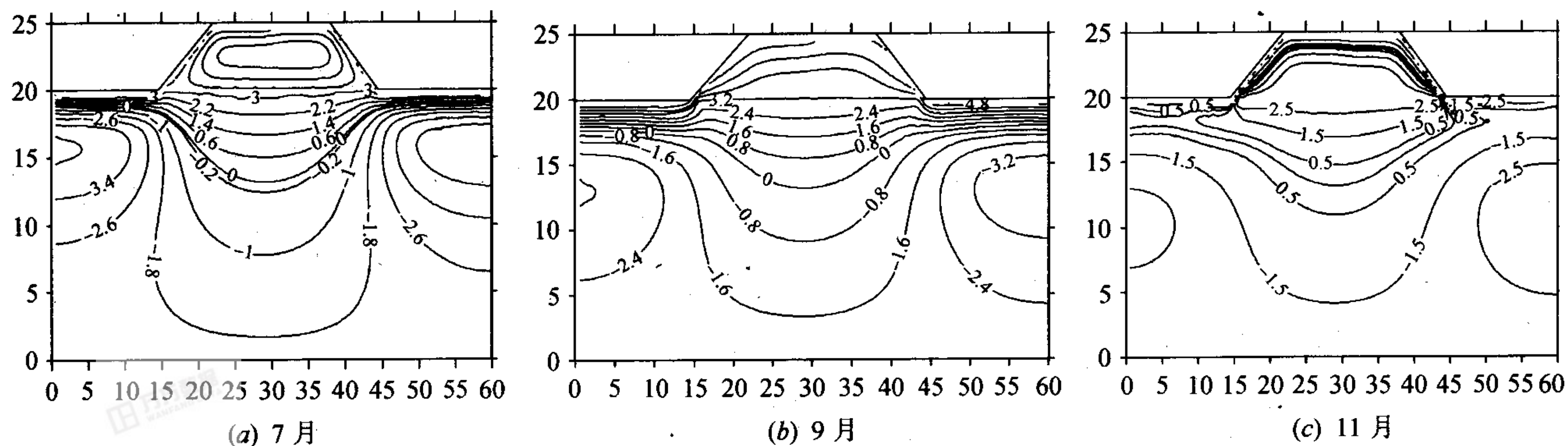


图4 2020年温度等值线

路基在修筑后一段时间,其自重应力下的压密变形已经基本完成,路基的变形主要是在荷载的作用下,随着路基人为上限的变化而引起路基沉降变形。我们将路基下温度场模拟数据带入沉降变形,通过对路基加载后的变形计算分析,得出如表 2 所示计算结果。

表 2 站场路基各部分沉降变形计算结果

	融化深度 m	路堤土的变形 m	融化层的变形 m	总的变形 m
天然孔	2.04	—	0.004 3	0.0043
阳坡坡脚	2.44	—	0.020 5	0.020 5
阳坡路肩	4.66	0.010 9	0.012 6	0.023 6
路基中心	5.35	0.007 1	0.024 4	0.031 4
阴坡路肩	4.38	0.004 2	0.012 6	0.016 8
阴坡坡脚	1.68	—	0.003 3	0.003 3

注:对于天然孔、左坡脚和右坡脚,融化深度指的是地基表面以下的深度;对于左坡肩、路基中心和右坡脚,融化深度指的是路基表面以下的深度。

可以看出因为路基中心的附加应力最大,并且路基中心融深也是最大的,因此路基中心的沉降变形也是最大的。由于站场路基温度场在时间上的不一致和在空间上的不对称将引起路基不均匀的冻胀与融沉,就造成了路基下各部分沉降变形的不均匀,也是站场路基阳坡路肩裂缝形成的重要因素,影响路基的稳定和铁路的运营。建议采用适当的措施对路基土体进行加固,如在路基内铺设土工格栅等,以防止路基裂缝的发生或减小裂缝的发展规模。

3 结论

通过对模拟结果的分析,可以得到以下结论。

(1)铁路站场路基的修建,打破了多年冻土原来的热力平衡,地下温度场重新分布,多年冻土上限发生变化。

(2)由于坡面热流的影响和路基顶面宽度的影响,从模拟分析来看,站场路基中心最大季节融化深度比路肩下的最大季节融化深度略大,阳坡路肩下的最大季节融化深度比阴坡路肩下的最大季节融化

深度大。最大季节融化深度的差异能够引起路基的不均匀沉降变形,会对路基的稳定性产生较大的影响。

(3)路基阴、阳坡土体接受太阳辐射的不同导致了路基阴、阳坡土体温度场关于路基中心线的不对称现象,路基阳坡土体的融化起始时间早于阴坡土体,而回冻时间却晚于阴坡土体。

(4)在气温每年升高的情况下,在模拟计算结果内,试验段路基下的冻土人为上限以及未受人为因素影响的冻土天然上限均逐年下降。但路基下的冻土人为上限总体上始终高于同时期的冻土天然上限,说明路基对多年冻土起到了保护作用。

(5)试验段站场路基温度场在时间上的不一致和在空间上的不对称将会引起该路基不均匀的冻胀与融沉病害,是造成试验段站场路基阳坡路肩裂缝形成的重要因素。可以采用适当措施对路基土体进行加固,以防止路基裂缝的发生或减少裂缝的发展规模。

参考文献:

- [1] 丁靖康,赫贵生. 年平均气温临界值——设计青藏高原多年冻土区陆地临街高度的一个重要因素[J]. 冰川冻土,2000,22(4).
- [2] 王引生,贾海峰. 青藏铁路清水河实验段路基裂缝初步分析[J]. 铁路工程学报,2003(3).
- [3] 许学祖,王家澄,张立新. 冻土物理学[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [4] 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 冻土的温度水分应力及其相互作用[M]. 兰州:兰州大学出版社,1989.
- [5] 孔祥谦. 有限单元法在传热学中的应用[M]. 北京:科学出版社,1998.
- [6] 李东庆,马巍,李述训. 修筑铁路路基对冻土条件变化的影响分析[A]. 青藏铁路学术研讨会论文集[C]. 兰州:兰州大学出版社,2001.
- [7] 蒋富强. 高原多年冻土区铁路路基合理结构问题[A]. 青藏铁路学术研讨会论文集[C]. 兰州:兰州大学出版社,2001.
- [8] 张鲁新. 青藏铁路高原冻土区地温变化规律及其对路基稳定性影响[J]. 中国铁道科学. 2000,21(1).

文章编号: 0451—0712(2006)06—0065—05

中图分类号:U415.521:U214.75

文献标识码: B

沥青混凝土路面大功率摊铺机 施工离析控制

舒翔¹, 姚怀新², 孙圣杰³, 邱子敬⁴, 李国维⁵

(1. 广东粤赣高速公路有限公司 河源市 517000; 2. 长安大学 西安市 710064; 3. 中铁十二局集团 临汾市 041000;
4. 广东冠粤路桥有限公司 广州市 510000; 5. 河海大学岩土所 南京市 210098)

摘 要: 通过分析沥青混凝土路面的施工过程,提出了不规则离析和规则离析的概念,指出不规则离析是施工工艺造成的,规则离析是由摊铺机的性能决定的。通过分析摊铺机的机械原理,指出了常规摊铺机在抗离析方面的缺陷,说明了大型摊铺机为控制离析在原理上进行的改进。根据粤赣高速公路应用大型摊铺机施工的沥青混凝土路面的检测资料,说明了应用大型改进型摊铺机进行沥青混凝土路面摊铺时控制离析的可行性,同时进行了单、双机摊铺工艺的经济性比较。

关键词: 沥青混凝土路面; 离析; 控制

沥青混凝土路面施工离析,使沥青混合料偏离最佳设计配合比,其力学性能和使用性能发生很大变化,以至于使路面薄弱点产生早期破坏,从而诱发路面大面积损坏。路面早期破坏很多时候是因为路

面材料离析而造成的,例如:路槽、车辙、结构松散、泛油。而离析是施工中最难控制的现象,它与材料、施工工艺,尤其是施工设备密切相关。解决路面离析问题,是很多路面工程师、机械工程师共同的希望,

收稿日期:2006-02-21

Finite Element Simulation of Temperature Field of Station Roadbed in Permafrost Regions of Qinghai-Xizang Plateau

ZOU Ze-xiong¹, LOU Yu²

(1. China Highway Planning and Design Institute (HPDI) Consultants, INC., Beijing 100010, China;

2. College of Water Conservancy & Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Railway embankment construction in permafrost regions will substantially disturb the heat and mass transfer balance between the ground surface and the atmosphere and cause redistribution of temperature field underneath. Trend of permafrost evolution can be deduced and stability of railway embankment can be evaluated according to distribution of temperature field underneath. On the basis of monitoring data, ANSYS is used to simulate temperature fields underneath. The computation results indicate that permafrost can be protected under the condition of adoption of enough height of roadbed and insulation protection. Whereas, the curve of artificial permafrost table in the roadbed and natural permafrost table in the ground that is not disturbed declines year by year. At the same time, difference of temperature field distribution between the sun-slope and the shade-slope will cause non-uniform deformation of roadbed and cracking on the surface.

Key words: Qinghai-Xizang Plateau; permafrost; station roadbed; temperature field