

DOI:10.16356/j.1005-2615.2019.04.019

道面宽度对机场跑道多年冻土地基温度场的影响

张润峰 戚春香 张献民 杨 简 程国勇

(中国民航大学机场学院,天津,300300)

摘要: 基于 ABAQUS 有限元及其二次开发平台,建立了多年冻土地区机场沥青道面地基温度场分析模型,对不同宽度道面地基温度场进行对比分析,同时对地基温度场影响范围、地基最大融化深度进行研究。结果表明:机场道面宽度对地基温度场影响明显,在相同时间条件下,随着道面宽度的增加,地基融土核最高温度不断上升融土核面积不断扩大,且椭圆形融土核中部越来越饱满;外界温度对 5 m 深度内地基温度影响显著,随着深度的增加影响越来越小,达到一定深度后地基温度基本保持不变;不同道面宽度地温沿水平方向温度变化呈“Z”形分布,越接近道肩处温度变化越明显,同时道面对天然冻土的影响范围约为距道肩 20 m 内;道面中心处融深随宽度的增加呈现两个阶段上升趋势,且道中融深明显大于道肩融深,道肩融深受机场道面宽度影响很小。基于此建立了道中地基融深受道面宽度影响的变化规律,为多年冻土区机场建设提供相应的理论依据。

关键词: 多年冻土;温度场;有限元分析;机场道面;融深

中图分类号: U416 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2019)04-0568-09

Influence of Pavement Width on Temperature Field of Permafrost Subgrade in Airfield Runway

ZHANG Runfeng, QI Chunxiang, ZHANG Xianmin, YANG Jian, CHENG Guoyong

(College of Airport Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300, China)

Abstract: Finite element models of temperature field of permafrost asphalt airport pavement subgrade are constructed based on ABAQUS and the secondary development platform. The temperature fields of airport pavement under different widths are compared and analyzed by the model, while the influence of ground temperature field and the change rules of melting depth are studied. The results show that the width of airport pavement has a great impact on the temperature of subgrade. After the same time duration, the highest temperature of subgrade melt nuclear will keep rising constantly with the increase of width, the melt nuclear area is expanding continuously, and the central nucleus will grow fuller. The ambient temperature will influence the subgrade temperature within 5 m significantly, and the influence will be increasingly less along with the increase of the depth when the temperature of the subgrade is kept constant after reaching a certain depth. The geothermal temperature of different pavement width changes along with the horizontal changes of direction via the distribution of “Z” type, and the closer to the road shoulder, the more obvious the change. The impact area of airport pavement on natural permafrost is within 20 m from the shoulder. There are two phases of rising trend in the melting depth at the center when the width increases. The melting depth at the center is deeper than the one at the shoulder, and the width of airport pavement has little impact on the

基金项目: 中央高校基本科研业务费(3122017B004)资助项目。

收稿日期: 2017-12-14; **修订日期:** 2018-03-20

通信作者: 张润峰,男,博士,讲师, E-mail: cauczrf@126.com。

引用格式: 张润峰,戚春香,张献民,等. 道面宽度对机场跑道多年冻土地基温度场的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(4): 568-576. ZHANG Runfeng, QI Chunxiang, ZHANG Xianmin, et al. Influence of Pavement Width on Temperature Field of Permafrost Subgrade in Airfield Runway[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(4): 568-576.

melting depth at the shoulder. Therefore, the change rule between the width of airport pavement and melting depth at the center is established base on the above statement which can provide a theoretical basis for airport construction in field of permafrost.

Key words: permafrost; temperature field; finite element analysis; airport pavement; melting depth

根据中国机场建设的发展规划,中国将在多年冻土地区开展机场建设。以东北三省为例,到2030年,将陆续新增40个小型支线机场;另外内蒙古自治区东北部的兴安盟和呼伦贝尔盟也提出了加快推进航空短途运输机场建设的申请。上述规划建设机场所在地多为多年冻土地区。因此在今后相当长的一段时期内,我国的机场建设将面临诸多永冻土机场建设的新课题。

冻土是一种对温度特别敏感的特殊性土质,冻土地基的热稳定性决定着道路的强度及耐久性^[1-4]。而地基温度场的变化规律是研究地基热稳定性的前提。国内外学者针对冻土温度场进行了大量研究,文献[5]首次用共扼变量法解出了含相变一维初值问题的动态解,开创了寒区冻土热动力学的研究。Harlan^[6]提出了考虑水分迁移和冰水相变问题的一维非线性水热耦合 Harlan 模型,为研究冻土内部水热耦合效应提供了新的方法。Ling等^[7]对冻土季节活动层的温度状况进行了一维非线性数值模拟。Tam^[8]分析了气候影响下加拿大北极区域永冻土的温度场。Claire^[9]研究了气候变化及扰动条件下泥炭土质永冻土的稳定模型。我国对冻土温度场的研究相对较晚,赖远明等^[10-13]针对青藏铁路及寒区隧道的温度场做了大量工作。汪海年^[14]建立了考虑诸多气象因素叠加含相变的路基非稳态温度场有限元分析模型,分析了路基高度、路线走向、路面类型对路基温度场及基底冻土温度状况的影响。马巍等^[15]对青藏铁路块石气冷结构路堤下冻土的温度场变化进行了分析。司伟等^[16]采用有限元方法,建立多年冻土地区路基与沥青路面结构温度场模型,分析了结构层厚度、结构组合变化对路基顶面温度的影响。李金平等^[17]分析了路面结构对多年冻土区路基温度场的影响。张万辉等^[18]借助有限元模拟和现场实测对多年冻土区天然地面温度场进行了验证分析。马勤国等^[19]在全球变暖的背景下,利用有限元对多年冻土区高等级公路路基温度场进行数值模拟研究,给出了多年冻土区路基合理高度,同时提出路基分幅这一新的保护措施。

不难看出,上述针对温度场的研究都是基于公路与铁路的。然而由于机场跑道具有道面幅度宽、无路堤、荷载应力高等特点。公路与铁路中现有的研究成果还不能照搬到机场跑道中来。目前,我国

多年冻土地区机场建设刚刚起步,国内还未见有关多年冻土环境条件下机场跑道建设技术的系统研究报告。为此本文通过建立多年冻土地区机场沥青道面地基温度场有限元分析模型,对不同道面宽度地基温度场变化规律及其地基融化深度进行对比分析,为我国多年冻土地区机场跑道建设提供一定的理论指导。

1 有限元模型概述

1.1 温度场控制方程

根据热传导和质量迁移理论^[6,20],若不考虑土中水汽蒸发耗热,仅考虑水分迁移和冰水相变问题,忽略对流传热则非稳态热传导的数学表达式为

$$C(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\beta_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\beta_y(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] \quad (1)$$

$$C(T) = c\rho + L\rho_w \frac{\partial w_u}{\partial T} \quad (2)$$

$$\beta_x(T) = k_x + L\rho_w D_x \frac{\partial w_u}{\partial T} \quad (3)$$

$$\beta_y(T) = k_y + L\rho_w D_y \frac{\partial w_u}{\partial T} \quad (4)$$

在移动的相变界面 $\xi(t)$ 上,还必须满足温度的连续条件和能量守恒条件

$$T_u(\xi(t)) = T_f(\xi(t)) = T_0 \quad (5)$$

$$k_f \frac{\partial T_f}{\partial x} - k_u \frac{\partial T_u}{\partial x} = L\epsilon n \frac{d\xi}{dt} \quad (6)$$

式中: T 为温度; t 为时间; k_x 、 k_y 分别为导热系数的分量; c 为土体的质量热容; ρ 为土体的密度; ρ_w 为水的密度; L 为冻融潜热; D_x 、 D_y 分别为水分扩散系数的分量; w_u 为未冻水体积含量; $C(T)$ 为等效容积热容量; β_x 、 β_y 分别为等效热传导系数的分量。 T_u 、 T_f 和 k_u 、 k_f 分别表示相变界面 $\xi(x, t)$ 上下融、冻土的温度和导热系数; T_0 为冻结温度; n 为土的孔隙率; ϵ 为考虑土中保持未冻水并集中在冻结温度的量纲因子。

1.2 计算模型

机场跑道沿纵向可以认为是无限延伸的,因此可以将模型简化成二维。本文将研究不同沥青道面宽度下温度场变化规律,选取青藏高原低冻冻土区地基典型断面为研究模型,考虑尺寸效应的影响,模型沿道面道肩向外延伸 40 m,土体深度取

20 m。参考青藏高原低温冻土区典型断面土层分部,将计算土体简化成 3 层土体 4 个区域(见图 1),其中 II 区为含卵石中细砂层,III 区为含砾亚粘土层,IV 区为为强风化泥岩层。土层从上到下厚度分别为 2.3,1.6,16.1 m。I 区为道面结构层,其面层厚度取 0.05 m,基层和垫层厚度为 0.3 m,道面基层和垫层分别采用水泥稳定碎石和级配沙砾。根据民用机场道面相关设计规范,计算中取道面宽度为 18,25,30,35,40,45,50,55,60 m 这 9 个工况进行计算。

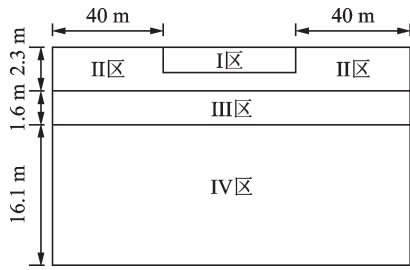


图 1 计算模型

Fig.1 Calculation model

1.3 模型计算参数选取

土体热参数的选取采用等效热参数法^[21],等效热参数表达式如下

$$c(T) = \begin{cases} (c_{su} + \omega c_w) \rho_d & T > -\theta_f \\ \rho_d c_{sf} + \rho_d c_i \omega_0 + \rho_d (c_w - c_i) \cdot \omega_0 \theta_f^b (-T)^{-b} + (7) \\ L \omega_0 \theta_f^b b (-T)^{-(b+1)} & T < -\theta_f \end{cases}$$

$$\beta_x(T) = \beta_y(T) = \begin{cases} \lambda_a & T > -\theta_f \\ \lambda_f + LD \cdot \omega_0 \theta_f^b \cdot b (-T)^{-(b+1)} & T < -\theta_f \end{cases} \quad (8)$$

式中: c_{su}, c_{sf} 为土骨架在融化和冻结状态下的质量热容; ω 为体积含水量; ω_0 为土体的初始含水量; c_i, c_w 为冰和水的的质量比热容; ρ_d 为土的干密度; b 为与土质有关的经验系数; λ_a, λ_f 分别为融土和冻土的导热系数; θ_f 为土体的冻结温度绝对值; D 为水分扩散系数。

计算模型中各土层材料的参数^[21]如表 1 所示。

沥青道面结构层为保水性较差的水泥稳定碎石和级配砂砾,因此该部分区域可以忽略水分迁移,其热参数如表 2 所示^[22]。

1.4 模型边界条件及初始条件

1.4.1 上边界条件

大气与道面接触面的温度是太阳辐射、蒸发、风速等各种外界因素综合作用的结果,土表温度不能作为模型的上边界条件,“附面层理论”^[23-25]提出

表 1 各土层物理参数

Tab. 1 Thermal physical parameters of soil

材料	含卵石中 细沙	含砾亚黏土	强风化泥岩
干密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 700	1 300	1 500
初始含水量容/%	30	30	30
融土骨架比热容/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)	840	840	840
冻土骨架比热容/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)	730	750	750
水的比热容/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)	4 182	4 182	4 182
冰的比热容/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)	2 090	2 090	2 090
融土导热系数/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	1.95	0.87	1.47
冻土导热系数/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	2.69	1.22	1.82
水分扩散系数/ ($\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	4.66E-05	3.73E-04	3.44E-06
冻结温度/ $^{\circ}\text{C}$	-0.1	-0.19	-0.05
水的冻结融化潜 热/($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	334 560	334 560	334 560
经验系数 b	0.732 5	0.574	0.473 5

表 2 结构层热参数

Tab. 2 Thermal parameters of structure layer

结构层	材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	质量热容/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)	导热系数/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
基层	水泥稳定 碎石	2 200	960	1.556
垫层	级配沙砾	2 000	1 100	1.676

用稳定的附面层代替干扰因素众多的土表层为上边界,提高了计算的精确性和可靠度。模型上边界条件可以表示成如下三角函数

$$T_1 = T_s + \alpha t + A \sin\left(\frac{2\pi}{8760} t + B\right) \quad (9)$$

$$T_s = T_a + \Delta T \quad (10)$$

式中: T_1 为下附面层的年平均地温; α 为未来 50 年内由全球升温引起的上边界年平均温度增长率; t 为道路运营时间(h); A 为上边界温度的物理振幅($^{\circ}\text{C}$)(气象振幅的一半); T_s 为下附面层底的年平均地温; T_a 为年平均气温; ΔT 为附面层增量; B 为初始计算相位。

根据实测结果和研究结果^[23-25]:对于沥青道面 $A=15.15^{\circ}\text{C}$,附面层增量取 6.5°C ;对于天然地面 $A=11.5^{\circ}\text{C}$,附面层增量取 2.5°C 。所在地区年平均气温取 -5.2°C , $\alpha=1.1 \times 10^{-4}^{\circ}\text{C}/\text{d}$, $B=5\pi/9$ (计算根据初始条件以 8 月为初始时间)。

1.4.2 左右边界及下边界

有文献报道当道面左右边界离道肩 40 m 时,道面对左右边界处天然冻土没有影响,左右边界无热交换,则左右边界为绝热条件^[26-27]。考虑地热影响及根据实测数据将下边界条件取为 -2 °C。

1.5 初始条件

本文采用典型断面处实测土温作为初始条件,如表 3 所示。

表 3 初始条件

Tab. 3 Initial conditions

深度/ m	温度/ °C	深度/ m	温度/ °C	深度/ m	温度/ °C	深度/ m	温度/ °C
0.5	6.11	3	-1.57	5.5	-2.12	8	-2.25
1	2.62	3.5	-1.86	6	-2.1	8.5	-2.25
1.5	0.55	4	-2.03	6.5	-2.15	9	-2
2	-0.4	4.5	-2.03	7	-2	9.5	-2.25
2.5	-1.35	5	-2.09	7.5	-2.25	10	-2

2 不同宽度机场道面温度场分析

2.1 温度场年变化规律分析

为得到宽幅道面与窄幅道面地基温度场变化规律及差别,本文将对道面宽度 45 m(宽幅)和 18 m(窄幅)两种工况的第 10 年 1 月、4 月、8 月、11 月温度场云图进行对比,如图 2—5 所示。

由图 2 可以看出 1 月外界气温达到最低,太阳辐射较少,同时计算模型上边界也接近最低温度。地基处于对外散热状态。此时地基表面向下冻结的同时最大融深处向上回冻形成双向冻结状态,但由于地基暖季集聚的大量热量未来得及排除,地基中可以明显的看到融土核(红色区域),且窄幅道面地基融土核面积及融土核最高温度明显小于宽幅道面。

4 月外界气温逐渐由负温变成正温,太阳辐射也逐渐增加,地基逐渐由向外放热状态转为吸热状

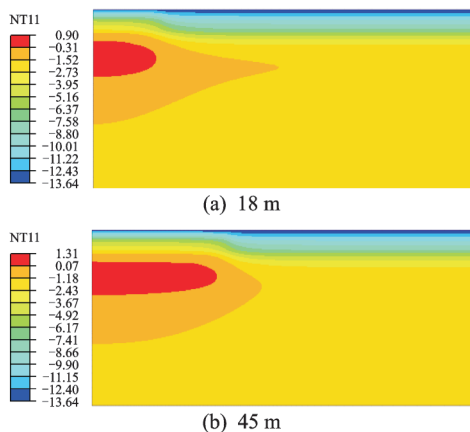


图 2 第 10 年 1 月温度场云图

Fig.2 Temperature field cloud in January of the 10th year

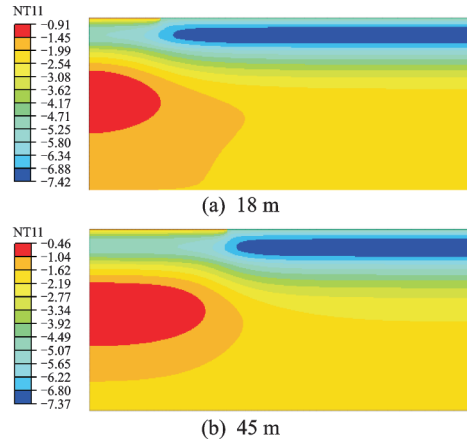


图 3 第 10 年 4 月温度场云图

Fig.3 Temperature field cloud in April of the 10th year

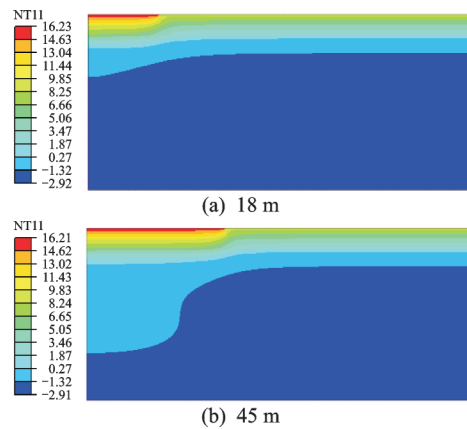


图 4 第 10 年 8 月温度场云图

Fig.4 Temperature field cloud in August of the 10th year

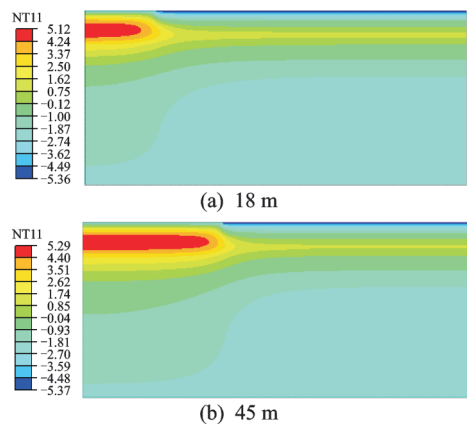


图 5 第 10 年 11 月温度场云图

Fig.5 Temperature field cloud in November of the 10th year

态。经历过冬季的冻结路基已全部处于冻结状态,窄幅道面路基中最高温度略低于宽幅道面。

8 月是一年气温最高的月份,外界太阳辐射较高,路基上边界也达到年温度最高值。窄幅路基与宽幅路基温度场分布相似,都呈规则的层状分布。

11 月随着气温的不断降低,路基逐渐由吸热转为放热状态。由于经过夏季温度的积累,地基温

度场中形成了高温融土核,窄幅道面融土核面积明显小于宽幅道面,且融土核最高温度也低于宽幅道面。随着时间的推移融土核不断下移,直到1月完成一次冻融循环周期。

2.2 温度场随宽度变化规律分析

为得到温度场随宽度变化规律,本文对宽度为18,25,30,35,40,45,50,55,60 m第30年1月温度场(图6)进行对比分析。1月是一年中气温最低的月份。但通过温度场云图对比分析可以看出,地基中存在明显的融土核(图中红色区域)。融土核呈

扁平的椭圆形分布,随着道面宽度的增加椭圆形融土核长度明显增加,融土核中心高度缓慢增高。当路基宽度由18 m增加到60 m,融土核下边界位置逐渐下移。由图6可以看出,18,25,30,35,40,45,50,55,60 m宽度道面融土核最高温度分别为1.51 °C,1.72 °C,1.79 °C,1.85 °C,1.88 °C,1.90 °C,1.92 °C,1.94 °C,融土核最高温度随着宽度的增加而增加。由此可以看出机场宽幅道面与窄幅道面相比,融化面积广,热稳定性差对多年冻土的扰动性更大,对实际工程实施将造成更大影响。

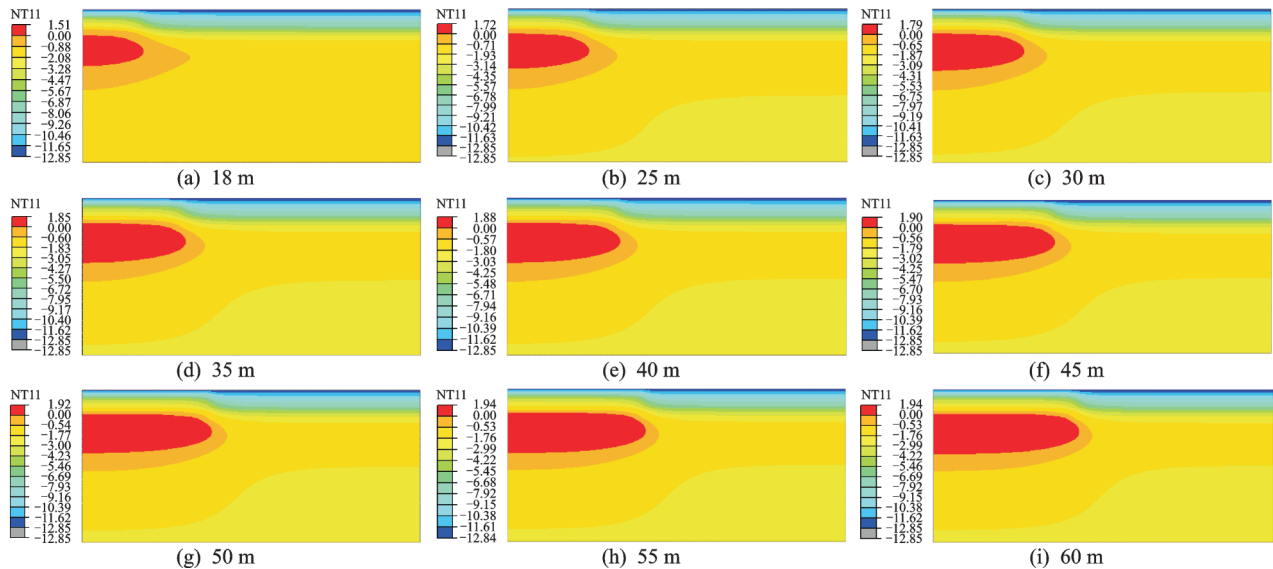


图6 不同宽度第30年1月温度场

Fig.6 Different width temperature fields in January of the 30th year

3 道面温度场影响范围

3.1 地温沿深度变化规律

本文通过对不同宽度道面地基温度沿深度变化规律进行对比分析,其变化规律大致相同。现由于篇幅只取机场道面常用宽度50 m作为示例,分别提取道面板中心、道肩、距道肩4 m处天然地面沿地基深度温度分布(图7—10)进行说明。

通过对图7—10中1月、4月、8月、11月温度变化曲线对比分析,可以看出一年中道中温度变化幅

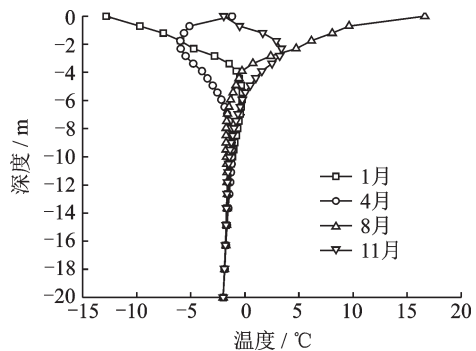


图8 道肩温度沿深度分布

Fig.8 Temperature distribution along the depth at the shoulder

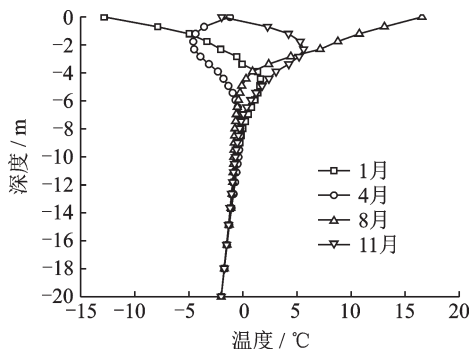


图7 道中温度沿深度分布

Fig.7 Temperature distribution along the depth at the center

度明显大于道肩与天然地面温度变化幅度。同一时间温度从高到低分别为道中温度、道肩温度、天然地面温度。这主要是由于沥青道面较强的吸热能力导致。外界温度对0~5 m范围内冻土扰动巨大,当深度在8~10 m时随着深度的增加,外界温度对冻土温度场的影响越来越小。当深度大于10 m,各月温度基本重合温度变化几乎无波动,表

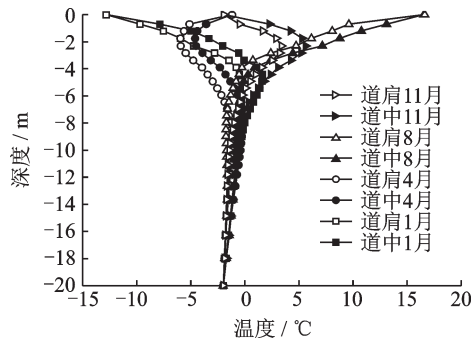


图 9 道中与道肩温度对比

Fig.9 Temperature contrast between the runway center and the shoulder

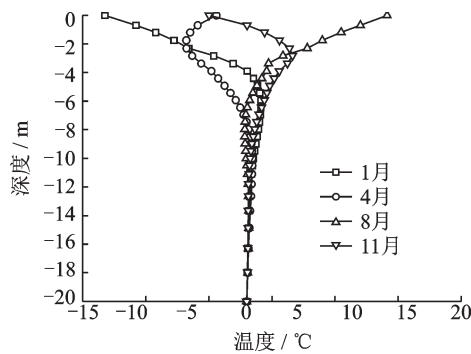


图 10 天然地面温度分布

Fig.10 Temperature distribution along the depth at the natural ground

明道面的铺筑对 10 m 深度下温度场几乎无影响。

3.2 地温沿水平方向变化规律

提取宽度分别为 18, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 m, 地温年变化幅度较大 4 m 深处 4 月地温沿水平方向温度变化(路基中点水平坐标取为 0), 如图 11 所示。

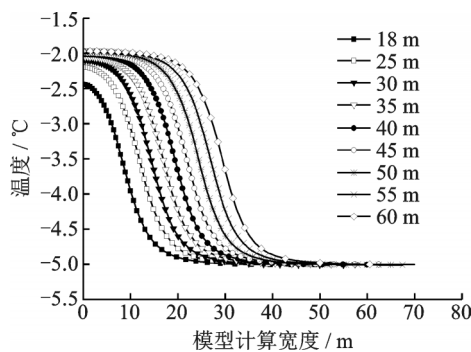


图 11 地温沿水平方向分布

Fig.11 Temperature distribution along the horizontal

通过对图 11 进行分析,可以看出不同道面宽度下水平温度变化规律大致相同呈“Z”形分布。温度曲线从路基中部开始,先是保持水平状态,随着距离逐渐远离地基温度开始缓慢下降;当水平距离达到道肩时温度急剧下降;随着水平距离进一步

的加大温度变化又趋于平缓,直至温度曲线趋于水平。但是随着道面宽度的增加,“Z”形曲线的上半水平部分逐渐增长,且温度逐渐升高,说明道面宽度对地基水平方向温度影响剧烈。此外不同宽度道面“Z”形曲线最后都趋于一个定值可见道面板对天然冻土影响具有一定的范围性,由图看出不同宽度道面下当距离道肩 20 m 时道面板对天然冻土几乎无影响,同时也证明计算模型左右边界选择 40 m 的合理。

4 道面宽度对地基融深变化影响分析

对不同道面宽度道面中心处,第 5, 10, 15, 20, 25, 30 年最大融深进行计算,结果如图 12 所示。

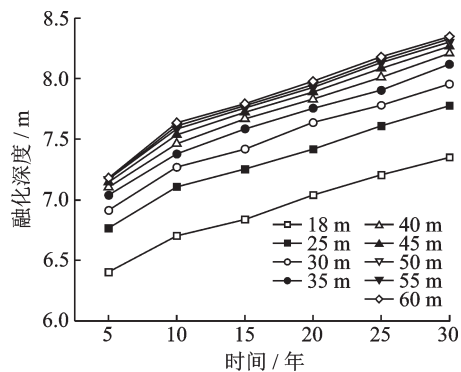


图 12 道中最大融深图

Fig.12 Melting depth at the center

通过计算结果可知,机场道面最大融深一般在 12 月至次年 1 月,公路最大融深月份为 10 月。机场道面最大融深远迟于公路。主要是由于机场道面较宽同时多年冻土缺少了路堤保护导致地基夏季吸热较多冬季散热面相对公路较少,地基中积累了大量的热量融化深度增加,最大融化深度时间后移。

由图 12 可知,随着时间的增加冻土地基融化深度逐渐增加,前 10 年融深相对变化较大且路面宽度越宽越明显。主要是由于道面的铺筑打破了原有的热平衡状态,导致地基冻土快速融化。随着时间的增长,地基热状态逐渐趋于动态稳定状态,由于气候变暖因素的施加道面中部最大融深变化缓慢增加。同时可以发现,同一时间,随着道面宽度的增加,道面中心最大融深曲线距离逐渐接近。为研究道面宽度对地基最大融深的影响,提取第 10, 20, 30 年道面中部与道肩最大融深曲线,如图 13—14 所示。

通过对图 13—14 分析,可以看出道面中心线处融深分 2 个阶段:(1)融深快速增加阶段;(2)融

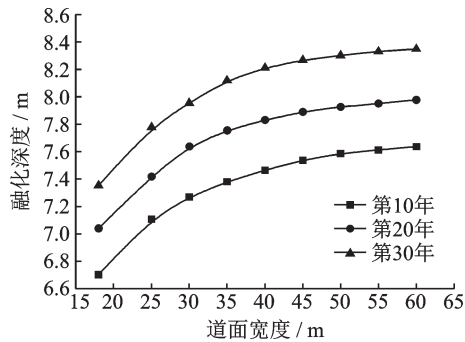


图13 道中融深随道面宽度变化图

Fig.13 Melting depth at the center with the runway width change

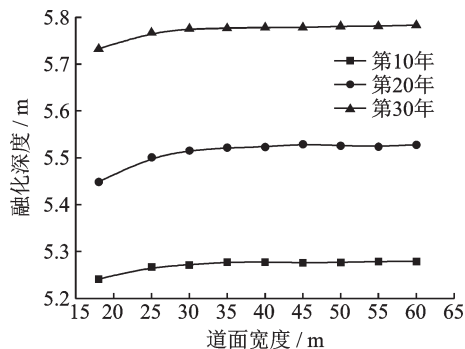


图14 道肩融深随道面宽度变化图

Fig.14 Melting depth at the shoulder with runway width change

深的增加趋于平缓阶段。当道面宽度处于18~35 m时,天然地面处热流对道面中部影响较小,道面中心处主要受沥青道面吸热作用,故融深随道面宽度快速增加处于第1阶段,随着道面宽度的继续增加,由于增加的道面离道面中部越来越远,则增加部分对道面中心处温度影响越来越小,故融深的增加趋于平缓,变为第2阶段。而道路道中融化深度分为3个阶段,道路中后两阶段与机场类似,但机场道面融深少了融深缓慢增加的第1阶段,主要是机场道面要求宽跳过了第1阶段。

地基最大融深决定着地基强度以及道面的耐久性,为此本文借助MATLAB将第10,20,30年道面宽度与地基最大融深相关关系进行拟合如式(10)~(12),且3条曲线的相关性都达到0.99。

第10年

$$H = -0.0008B^2 + 0.0813B + 6.1925 \quad (11)$$

第20年

$$H = -0.0007B^2 + 0.0754B + 5.9712 \quad (12)$$

第30年

$$H = -0.0006B^2 + 0.0704B + 5.7152 \quad (13)$$

式中: B 表示道面宽度; H 表示融化深度。

道肩处融深同样随着宽度的增加而增加,与道

面中部融深相比道肩融深明显偏小且变化幅度平稳,当道面宽度由18 m增加到25 m时,融深稍有增加,但当道面宽度超过30 m以后道肩融深几乎不变。主要由于随着道面宽度的不断增加,道面增加部分距离道肩越来越远,从而对道肩融深影响越来越小。由图14可以看出,第10,20,30年最大融深分别保持在5.2,5.4,5.7 m左右。

5 结 论

本文通过建立多年冻土区机场道面地基温度场有限元分析模型,对不同道面宽度下地基温度场、地基温度场影响范围、地基融化深度变化规律进行对比分析,得到如下结论:

(1)不同道面宽度随时间均呈冻融循环的周期性变化。且在相同的时间条件下,随着道面宽度的增加,温度不断上升,多年冻土地区宽幅道面与窄幅道面相比,温度升高更快热稳定性更差,对天然冻土的扰动更大。

(2)机场道面的铺筑对0~5 m地基温度影响剧烈,其温度年变化较大。随着深度的增加,地温年变化幅度逐渐减小,对10 m下地基温度场几乎无影响。

(3)机场道面下冻土融土核呈椭圆形分布,随着道面宽度的增加融土核面积逐渐增大,与此同时椭圆形融土核中部也更加饱满。

(4)不同道面宽度一定深度处水平方向地温呈“Z”形分布,随着道面宽度增加水平影响范围逐渐增加。道面板水平方向影响范围为距道肩20 m范围内。

(5)道面宽度对道中融深影响显著,且随宽度增加而增加,并随着使用年限的增加而增大。

参考文献:

- [1] 李金平,章金钊,盛煜.冻土区水泥和沥青路面病害分布规律探讨[J].公路交通科技,2010,27(7):18-24.
LI Jinping, ZHANG Jinzhao, SHENG Yu. Study on distribution patterns of distresses in cement concrete pavement and asphalt pavement in permafrost regions [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(7): 18-24.
- [2] 窦明健,胡长顺,多吉罗布,等.青藏公路路面病害成因分析[J].冰川冻土,2003,25(4):439-444.
DOU Mingjian, HU Changshun, DUOJI Luobu, et al. Analyzed Qinghai Tibet highway road diseases [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(4): 439-444.
- [3] 刘永智,吴青柏,张建明,等.青藏高原多年冻土地区公路路基变形[J].冰川冻土,2002,24(1):10-15.

- LIU Yongzhi, WU Qingbo, ZHANG Jianming, et al. Deformation of highway roadbed in permafrost regions of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(1): 10-15.
- [4] 雍国武才,李东庆,张坤青,等. 青康公路水泥混凝土路面和沥青混凝土路面病害调查与分析[J]. *公路*, 2009(12): 158-163.
- YONG Guowucui, LI Dongqing, ZHANG Kunqing, et al. Disease investigation and analysis of cement concrete pavement and asphalt concrete pavement of Qing-Kang Highway[J]. *Highway*, 2009(12): 158-163.
- [5] 王劲峰. 土冻结动态温度场计算公式[J]. *科学通报*, 1989, 13: 1002-1005.
- WANG Jinfeng. Calculation formula of dynamic thermal regime in freezing soil[J]. *Science Bulletin* 1989, 13: 1002-1005
- [6] HARLAN R L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil [J]. *Water Resource Research*, 1973, 9(5): 1314-1323.
- [7] LING Feng, ZHANG Tingjun. A numerical model for surface energy balance and thermal regime of the active layer and permafrost containing unfrozen soil [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2004, 38: 1-15.
- [8] TAM A. Permafrost in Canada's subarctic region of Northern Ontario [D]. Toronto, Canada: Geography University of Toronto, 2009.
- [9] CLAIRE T. Modeling permafrost stability in peat lands with climate change and disturbance [D]. New Hampshire, USA: The University of New Hampshire, 2010.
- [10] 赖远明,吴紫汪,朱元林,等. 寒区隧道温度场、渗流场和应力场耦合问题的非线性分析[J]. *岩土工程学报*, 1999, 21(5): 529-533.
- LAI Yuanming, WU Ziwang, ZHU Yuanlin, et al. Nonlinear analyses for the couple problem of temperature, seepage and stress fields in cold region tunnels [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(5): 529-533.
- [11] 赖远明,刘松玉, KONRAD J M. 寒区大坝温度场和渗流场耦合问题的非线性数值模拟[J]. *水利学报*, 2001(8): 26-31.
- LAI Yuanming, LIU Songyu, KONRAD J M. Numerical simulation for the coupled problem of temperature and seepage fields in dams located in cold area[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001(8): 26-31.
- [12] 赖远明,刘松玉,吴紫汪. 寒区挡土墙温度场、渗流场和应力场耦合问题的非线性分析[J]. *土木工程学报*, 2003, 36(6): 88-95.
- LAI Yuanming, LIU Songyu, WU Ziwang. Nonlinear analyses for retaining walls in frigid zone: A coupled problem of temperature, seepage, and stress fields [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2003, 36(6): 88-95.
- [13] 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. Open boundary conditions the ripped-rock embankment of Qinghai: Tibet railway is analysis of the cooling effect [J]. *Science in China (Series D)*, 2005, 35(6): 578-585.
- [14] 汪海年. 青藏高原多年冻土地区路基温度场研究 [D]. 西安: 长安大学, 2004.
- Wang Hainian. Research Qinghai-tibet plateau permafrost area embankment temperature field [D]. Xi'an: Chang'an University, 2004.
- [15] 马巍,吴青柏. 青藏铁路块石气冷结构路堤下冻土温度场变化分析[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(4): 586-595.
- MA Wei, WU Qingbo. Analysis of the Qinghai-Tibet railway block stone air-cooled structure temperature field in permafrost under the embankment [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(4): 586-595.
- [16] 司伟,马磊. 基于路基顶面温度的多年冻土区沥青路面结构 [J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2012, 32(6): 16-22.
- SI Wei, MA Biao. Subgrade top temperature of asphalt pavement structure in permafrost areas [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2012, 32(6): 16-22.
- [17] 李金平,陈春燕. 多年冻土区沥青和水泥路面下路基的热稳定性特征 [J]. *公路交通科技*, 2013, 30(3): 17-24.
- LI Jinping, CHEN Chunyan. Heat stability characteristics of embankment of asphalt pavement and cement pavement in permafrost regions [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2013, 30(3): 17-24.
- [18] 张万辉,秦添. 多年冻土区天然温度场数值模拟及验证分析 [J]. *中国水运*, 2016, 16(6): 114-119.
- ZHANG Wanhui, QIN Tian. In permafrost regions of natural temperature field numerical simulation and verification analysis [J]. *China Water Transport*, 2016, 16(6): 114-119.
- [19] 马勤国,赖远明,吴道国. 多年冻土区高等级公路路基温度场研究 [J]. *中南大学学报*, 2016, 47(7): 2415-2423.
- MA Qinguo, LAI Yuanming, WU Daoguo. Analysis of temperature field of high grade highway embankment in permafrost regions [J]. *Journal of Central South University*, 2016, 47(7): 2415-2423.
- [20] Taylor G S, LUTHIN J N. A model for coupled

- heat and misture transfer during soll freezing[J]. Canadian Geotech,1976, 15: 548-555.
- [21] 汪双杰. 高原多年冻土区公路路基稳定及预测技术研究[D]. 南京:东南大学交通学院,2005.
WANG Shuangjie. Study on highway subgrade stabilization and prediction technique in plateau permafrost region[D]. Nanjing : Traffic Institute of Southeast University, 2005.
- [22] 汤涛,马涛,黄晓明,等. 青藏高原高速公路宽幅路基温度场模拟分析[J]. 东南大学学报(自然科学版),2015, 45(4): 799-804.
TANG Tao, MA Tao, HUANG Xiaoming, et al. Simulation analysis of temperature field of wide subgrade of Qinghai-Tibet highway[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2015, 45(4):799-804.
- [23] 金龙,汪双杰,陈建兵,等. 基于变形分析的多年冻土地区路基高度效应研究[J]. 中外公路,2016, 33(3): 22-29.
JIN Long, WANG Shuangjie, CHEN Jianbing, et al. Based on the analysis of the deformation area of permafrost subgrade height effect research[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2016, 33(3): 22-29.
- [24] 刘伟. 青藏高原黑色宽幅路基温度场分布规律及路基变形研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.
LIU Wei. Temperature field distribution and subgrade deformation of asphaltand wide embankment in Qinghai-Tibet plateau[D].Beijing: Beijing Jiaotong University, 2004.
- [25] 朱林楠. 高原冻土区不同下垫面的附面层研究[J]. 冰川冻土,1998,10(1): 8-14.
ZHU Linnan. Study on boundary layers of different underlying surface on plateau frost soil zone[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, 10(1): 8-14.
- [26] 朱志武,宋顺成. 冻土地区路基温度场数值分析[J]. 路基工程,2008(2): 18-19.
ZHU Zhiwu, SONG Shuncheng. Permafrost embankment temperature field in numerical analysis[J]. Subgrade Engineering, 2008(2): 18-19.
- [27] 陈昌龙,刘建坤,房建宏. 路基的开挖与填筑对多年冻土上限的影响[J]. 青海交通科技,2003(1): 7, 14-15.
CHEN Changlong, LIU Jiankun, FANG Jianhong. Influence of excavation and filling of subgrade on the upper limit of permafrost[J]. Qinghai Jiaotong Technology, 2003(1): 7, 14-15.

(编辑:张蓓)