

DOI: 10.11779/CJGE201506021

路基温度场长期模拟中的地表热边界条件研究

白青波, 李 旭*, 田亚护

(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘 要: 在路基温度场模拟中, 地表热边界常基于“附面层原理”确定, 即假设一定深度(附面层厚度)的土体温度函数等于大气日平均温度函数加上一个温度增量。目前, 附面层厚度和温度增量一般通过实际观测值回归分析得到, 尚未建立起相应的理论和参数确定方法, 无法定量分析路面材质、路面结构、太阳辐射、路面辐射对附面层厚度和温度增量的影响。首先通过理论分析, 建立了附面层厚度的确定方法; 然后建立了一维路面路基结构温度场模拟模型, 并通过路基温度场反演分析, 验证了数值模型的正确性; 进而通过数值分析, 研究了太阳辐射、路面辐射、对流换热和路面结构等因素对附面层底部温度增量的影响, 给出了温度增量的确定方法和相应的设计图表和计算公式。

关键词: 温度场; 附面层; 路基; 等效热扩散率

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)06-1142-08

作者简介: 白青波(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事冻土水热耦合特性和路基稳定性的研究。E-mail: ceXuLi2012@gmail.com。

Upper boundary conditions in long-term thermal simulation of subgrade

BAI Qing-bo, LI Xu, TIAN Ya-hu

(School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In the numerical simulation of a long-term temperature field in subgrade, the upper thermal boundaries are often determined by the boundary-layer theory, in which the temperature at a certain depth, i.e., the thickness of boundary layer, can be used as a temperature increment plus an average temperature of atmosphere. Because of the lack of a model, the boundary-layer thickness and the temperature increment are usually extracted from the monitored data of subgrade temperature in field. The objective of this study is to develop a model for the determination of the boundary-layer thickness and temperature increment. A theoretical derivation is carried out and leads to a solution of the thickness of boundary layer. Then a numerical model is established to simulate the temperature field in pavement and subgrade. The numerical model is verified through the back analysis of a case study. Furthermore, a sensitive study is carried out to study the impact of solar radiation, pavement materials, pavement structure and pavement radiation on the temperature increment, resulting in an empirical equation and a design chart.

Key words: temperature field; boundary layer; subgrade; equivalent thermal diffusivity

0 引 言

路基温度场模拟是研究路基热稳定性的基础。尤其是冻土路基, 其温度场和冻胀融沉等病害密切相关, 深刻影响着冻土路基的稳定性。在进行路基温度场长期模拟(几年到几十年)中, 难以精确模拟太阳辐射和大气气温的日波动。为此, 朱林楠^[1]经过长期连续观测提出了路基温度场计算的“附面层原理”, 对附面层底部的实测温度进行拟合得出温度函数作为路基表面的热边界条件。

附面层原理假设在附面层底部, 太阳辐射和大气温度日变化影响消失。考虑路面的吸热效应, 附面层底部土体日平均温度等于大气日平均温度加上一个温度增量。附面层厚度和温度增量的选用对路基温度场

模拟结果有着非常关键的影响。

然而, 目前在路基温度场问题中, 学界缺少有关“附面层原理”的理论分析和参数确定方法的讨论, 附面层厚度和温度增量的参数选用缺少科学的依据。由于缺乏相应的模型, 无法基于实际的路面材料、路面结构、大气环境温度、太阳辐射等条件, 选用合适的附面层厚度及温度增量。

本文通过理论分析和一维路基路面数值模拟, 考察路面路基材料、大气环境温度、太阳辐射对路基表

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2012CB026104); 国家自然科学基金项目(51479001, 41271072)

收稿日期: 2014-06-11

*通讯作者

层温度场的影响。选用合适的判据,用以确定附面层厚度和温度增量参数。进而给出了附面层厚度的计算方法和不同条件下温度增量取值的设计图表和公式。本文研究能够为路基温度场模拟中地表热边界条件的参数选用提供依据。

1 附面层解析分析

1.1 附面层原理及附面层厚度定义

附面层(boundary layer theory)起源于流体力学^[2],本来是用于指代:水、空气或其它低黏滞性流体沿固体表面流动或固体在流体中运动时,在高雷诺数情况下,附于固体表面的一层流体。岩土工程中,在确定路基温度场的上部热边界时,引入附面层概念^[1]。朱林楠^[1]提出路基表面及浅部地层可由上而下分为对流热交换层、辐射热交换层以及热传导热交换层。其中辐射热交换层也称为“附面层”,包括地表以上部分(上附面层)和路面及以下部分(下附面层)。上附面层厚度随路面结构材质不同,其厚度会有一定变化,对沥青路面来说,一般为5 cm。下附面层是地表以下受太阳辐射日变化影响的土层。

本文针对下附面层进行研究。定义附面层厚度(实际上是下附面层厚度)为太阳辐射和大气气温日变化影响消失的土层深度^[1,3]。一般来说,附面层底部(深度 δ_u 处)的温度可以用下式描述:

$$T(\delta_u, t) = T_a + T_i + \varepsilon_d \sin(\omega_d t + \varphi) \quad (1)$$

式中 T_a 为气温均值,可以简化为以年为周期的函数(℃); T_i 为附面层底部温度相对大气平均气温的增值; ε_d 为附面层底部温度的日振幅; ω_d 为角频率,对于日波动问题, ω_d 一般取为 $\frac{2\pi}{24h}$; φ 为初相。

在一定深度 δ_u (即附面层厚度)处, ε_d 为一个可以忽略的小量,即无须考虑太阳辐射和大气气温的日波动。因此在中长期路基温度场模拟(数月到数十年)中,就可以以深度 δ_u 处的温度条件作为路基温度场模拟的上边界条件,将式(1)中的 ε_d 取为0,简化了上部热边界条件。

因此路基温度场模拟中的附面层理论应用关键在于如何得到准确的附面层厚度 δ_u 和附面层底部温度增量 T_i 。

1.2 附面层的主要影响因素

大气温度和太阳辐射都随时间做周期变化,可以简化为关于时间的周期函数^[3]。其中大气温度日波动可以用正弦函数描述,即

$$T(t) = T_d + A_d \sin(\omega_d t + \varphi) \quad (2)$$

式中 T_d 为大气温度日均值; A_d 为大气温度日振幅;

ω_d 为角频率,对于日波动问题, ω_d 一般取为 $\frac{2\pi}{24h}$; φ 为初相。而太阳辐射日变化可等效为12 h日照,为

$$q(t) = \begin{cases} q_s \sin(\omega_d t + \varphi) & ((\omega_d t + \varphi) \in [0, \pi]) \\ 0 & ((\omega_d t + \varphi) \in [\pi, 2\pi]) \end{cases} \quad (3)$$

式中 $q(t)$ 为太阳辐射函数(W/m^2); q_s 为辐射的强度峰值。由式(3)可知,太阳白昼辐射会导致路面温度波动具有日夜不对称性,会导致路面温度日振幅 A_s 高于大气温度日振幅 A_d 。附面层底部,即深度 δ_u 处地温还需满足不对称性可以忽略的要求^[1]。

式(1)中,地温日波动 ε_d 会随着 δ 增加而减小,但是并不会真正消失,因此需要选取一定的标准。一方面 ε_d 应为小量,另一方面附面层底部温度函数受下部边界条件的影响可忽略。

(1)在附面层底部,土体温度受太阳辐射和大气气温日变化影响可以忽略。为此,本文选用以下标准:

$$\frac{\varepsilon_d}{A_s} \leq 5\% \quad (4)$$

式中, A_s 为路面温度日振幅, ε_d 为附面层底部温度日振幅。

(2)在给定太阳辐射和大气气温日变化条件下,路基下部温度改变 ΔT_b 时,附面层底部平均温度 $T_a + T_i$ 的改变量应可忽略。为此,本文选用以下标准:

$$\frac{\Delta T_i}{\Delta T_b} < 1\% \quad (5)$$

1.3 附面层热传导微分方程

路面是线形构造物,为简化计算可以假设路基路面为层状土体。建立一维热传导模型,其非稳态温度场的导热偏微分方程如下:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \delta} \left(k \frac{\partial T}{\partial \delta} \right) \quad (6)$$

式中 T 为土体的瞬态温度(℃); t 为过程进行的时间(s); k 为土体的导热系数($W/(m \cdot ^\circ C)$); ρ 为土体的密度(kg/m^3); C 为土体的定压比热容($J/(kg \cdot ^\circ C)$); δ 为土体的深度(m)。

1.4 周期性边界条件下的一维热传导问题解析解

在周期性变化热边界条件下,如果时间无限长,域内任意一点温度也将处于周期性的变化中,不受初始条件影响。考虑均质的半无限大物体,上边界作用路面温度日波动函数取为式(2),暂不考虑路面温度的日夜不对称性,用大气温度日振幅 A_d 代替路面温度波动日振幅 A_s 。应用分离变量法解得半无限体在边界温度做周期性变化的温度场解析解^[4]:

$$T(\delta, t) = T_d + A_d \exp \left(-\delta \sqrt{\frac{\omega_d}{2\alpha}} \right) \sin \left(\omega_d t - \delta \sqrt{\frac{\omega_d}{2\alpha}} + \varphi \right) \quad (7)$$

式中, $\alpha=k/(C\rho)$, 称为热扩散率 (m^2/s)。显然, 深度 δ 处的温度日变化幅值 ε_d 为 $A_d \exp\left(-\delta\sqrt{\frac{\omega_d}{2\alpha}}\right)$ 。引入一个无量纲的热传导衰减指数 ξ

$$\xi = \delta\sqrt{\frac{\omega_d}{2\alpha}} \quad (8)$$

则该土体的温度振幅衰减度 ν 为

$$\nu = \frac{A_d}{\varepsilon_d} = \exp(\xi) \quad (9)$$

温度振幅衰减度随热传导衰减指数的增大而迅速增加。

1.5 层状路基热传导衰减指数及等效热扩散率计算

假设路面结构共分为 m 层, 每层材料作为均质体, 厚度为 δ_i , 则每层土体的温度场可根据该层土体上边界作用周期性热干扰 $t_m + \theta \cdot \sin(\omega_d t + \varphi)$ 来求解。设第 i 层土体温度振幅的衰减度为

$$\nu_i = \exp(\xi_i) \quad (10)$$

式中,

$$\xi_i = \delta_i\sqrt{\frac{\omega_d}{2\alpha_i}} \quad (11)$$

式中, δ_i 为第 i 层土体厚度, α_i 为第 i 层土体的热扩散率。

路表面的温度振幅经过 m 层土体的总衰减度为

$$\nu = \prod_{i=1}^m \nu_i = \exp\left(\sum_{i=1}^m \xi_i\right) \quad (12)$$

$$\xi_m = \sum_{i=1}^m \xi_i \quad (13)$$

本文将 ξ_m 定义为层状路基热传导衰减指数, 为一无量纲量。

以层状路基热传导衰减指数为等效量, 引入等效热扩散率的概念, 符号为 $\hat{\alpha}$, 根据式 (13) 推导如下

$$\xi_m = \sqrt{\frac{\omega_d}{2\hat{\alpha}}} \cdot \sum \delta_i = \sum_{i=1}^m \delta_i \sqrt{\frac{\omega_d}{2\alpha_i}} \quad (14)$$

$$\hat{\alpha} = \left(\frac{\sum \delta_i}{\sum (\delta_i / \sqrt{\alpha_i})} \right)^2 \quad (15)$$

式中, $\sum \delta_i$ 表示 m 层土体的厚度。

等效热扩散率可以反映路表的温度振幅经过 m 层土体后的衰减度, 也可以反映整个土体中热量传导的特性。

2 附面层厚度计算

2.1 附面层厚度计算

本文选用式 (4) 的 5% 标准, 相应温度振幅衰减度 $\nu=20$, 代入式 (9) 计算出附面层底部热传导衰减

指数应为 $\xi_b = 2.996$ 。

当路基中第 m 层的土体满足下式:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i < \xi_b \\ \sum_{i=1}^m \xi_i \geq \xi_b \end{cases} \quad (16)$$

则附面层底部选取位置在 m 层土体中, 距第 m 层的土体上边界厚度为

$$\hat{h} = (\xi_b - \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i) \cdot \sqrt{\frac{2\alpha_m}{\omega_d}} \quad (17)$$

附面层厚度 δ_u 计算公式如下:

$$\delta_u = \hat{h} + \sum_{i=1}^{m-1} \delta_i \quad (18)$$

2.2 附面层厚度影响分析

路基中各层材料的参数和各层的厚度可用等效热扩散率 $\hat{\alpha}$ 来反映, 路基中垫层和土体的等效热扩散率的取值范围为 $2.5 \times 10^{-7} \sim 1.05 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ [5], 沥青面层的等效热扩散率的取值范围为 $4.3 \times 10^{-7} \sim 8.7 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ [6-7]。将 $\xi_b=2.996$ 代入式 (11), 可得等效热扩散率 $\hat{\alpha}$ 与附面层厚度 δ_u 之间的关系, 见图 1。

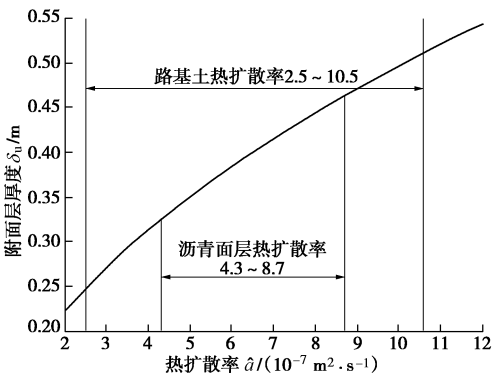


图 1 等效热扩散率与附面层厚度之间的关系

Fig. 1 Relationship between boundary-layer thickness and equivalent thermal diffusivity

由图 1 可知, 路基附面层厚度的取值范围大致在 $0.25 \sim 0.50 \text{ m}$ 之间。下面给出附面层厚度计算的案例。假设路基结构层包含面层和基层, 参数见表 1。初步判断, 附面层底部位于基层, m 为 2。根据式 (17), 代入参数, 计算得到 \hat{h} 。因此附面层总厚度 δ_u 为面层厚度和 \hat{h} 之和, 为 0.36 m 。按照式 15, 计算得到相应的等效热扩散率 $\hat{\alpha}$ 为 $5.3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, 符合图 1 的关系。

表 1 附面层厚度计算

Table 1 Calculation of boundary-layer thickness

材料	厚度 δ_i	α_i $/(10^{-7} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	m	\hat{h}	δ_u /m	$\hat{\alpha}$ $/(10^{-7} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
面层	0.2 m	4	2	0.16	0.36	5.3
基层	0.4 m	8				

3 一维层状路基热传导问题数值模型

3.1 数值模型

结合实际路基结构建立层状路基数值模型。高速公路路面结构组合如图 2 (a) 所示, 根据路面结构是用 Comsol 4.3 建立图 2 (b) 所示的一维有限元热传导模型。

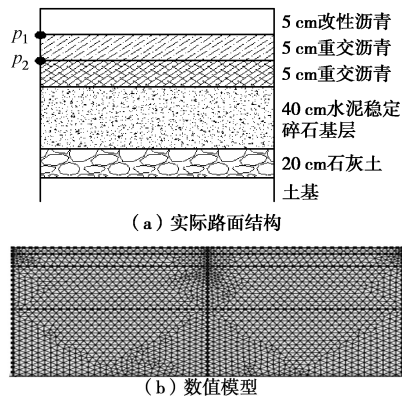


图 2 路面结构

Fig. 2 Structure of pavement

3.2 边界条件

附面层温度增量 T_i 与进入附面层顶部的热流有关, 主要由太阳辐射吸收量, 路面辐射, 和空气对流换热 3 个因素决定。为充分考虑太阳辐射和空气对流, 对于上部热边界条件, 需要叠加以下 3 个热边界条件:

(1) 太阳辐射边界条件 $q(t)$, 函数形式为式 (3)。其中辐射强度峰值 q_s (W/m^2) 通过太阳有效月辐射 Q_e (MJ/m^2) 换算得到, $q_s=1.21Q_e$ 。太阳有效辐射需综合考虑路面吸收率, 太阳入射角, 太阳直接辐射影响, 可用下式确定:

$$Q_e = Q \cdot a \cdot \eta \quad (19)$$

式中 a 为坡面系数, 与路面坡度、路基走向及太阳照射角有关, 其取值可根据实际路段情况参考文献[8]进行计算; η 为路面吸收率; Q 为太阳直接辐射。

(2) 对流换热边界条件, 包括大气温度日波动函数 (式 (2)) 和对流换热系数 B 。大气温度日波动函数和对流换热系数 B 根据当地气象决定。另外 B 还可以参考经验公式计算得到[9]

$$B = 5.5 + 1.6V \quad (20)$$

式中, V 表示风速 (m/s); B 的单位为 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$)。

(3) 地表热辐射边界条件。地表热辐射 R 和路面发射率以及地表温度有关[10-11]。在数值模拟时, 给定模型参数路面发射率, 根据实际地表温度计算地表热辐射 R 。

下边界按温度梯度处理[12], 温度梯度 ∇T ($^\circ\text{C}/\text{m}$) 乘以材料热传导系数, 可等同为热流 q_b (w/m^2) 边界条件, 作用于下边界。

考虑一维模型, 左右热边界取为绝热边界。

4 路基温度场日变化反演分析

4.1 材料参数与气象参数

根据武汉某高速公路的实测温度数据对计算模型进行校核。太阳辐射、风速和气温等气象数据均采取当地气象实测数据[13]。实测气象数据, 风速为 1.1 m/s , 最高气温为 23°C , 最低气温为 8°C 。各层材料热传导参数见表 2。沥青路面的太阳辐射吸收率 η 为 0.91 , 路面发射率为 0.93 。

表 2 路基结构各层材料热物参数

材料参数	沥青面层		碎石基层	石灰基层	土基
	上层	下层			
$k/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	0.83	1.47	1.11	1.11	1.25
$C/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	1000	700	800	900	900
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2300	2300	2200	2000	1900

4.2 边界条件参数

根据实测气象数据, 可选定气温和太阳辐射日变化参数, T_a 为 15.5°C , A_d 为 7.5°C , q_s 为 $16.5 \text{ W}/\text{m}^2$, q_b 为 $0.0375 \text{ W}/\text{m}^2$ 。下部热边界条件[14], 选用温度梯度 $0.03^\circ\text{C}/\text{m}$, 对应热流 q_b 为 $0.0375 \text{ W}/\text{m}^2$ 。对流换热系数 B 按照式 (20) 计算得到, 为 $7.26 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

4.3 模拟结果分析

将沥青中面层上部温度和下部温度的模拟值与实测值绘制在图 3, 4 中。其中图 3 (a) 为图 2 中 p_1 点处的温度值, 图 3 (b) 为图 3 中 p_2 点处的温度值。从图 3 可以看出: 温度场模拟结果与实测结果相吻合, 证明模型建立和参数选取与处理比较正确。

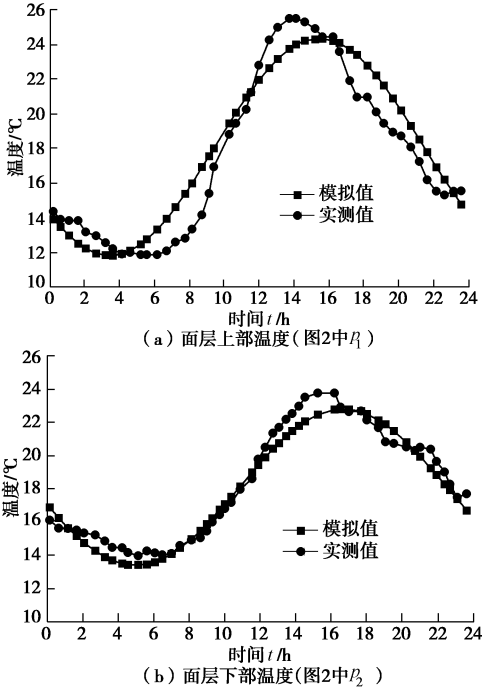


图 3 p_1 和 p_2 点的温度日变化规律

Fig. 3 Variation of temperatures at p_1 and p_2 in pavement

图 4 为数值模拟中不同深度的温度监测值。由图 4 可知,随着深度增加,地温日波动迅速衰减,深度 0.40 m 处的地温日波动相当微小。按 5% 的标准(式(4)和式(18)),计算得到附面层厚度 δ_0 约为 0.40 m,相应的温度增量 T_i 为 1.26℃。

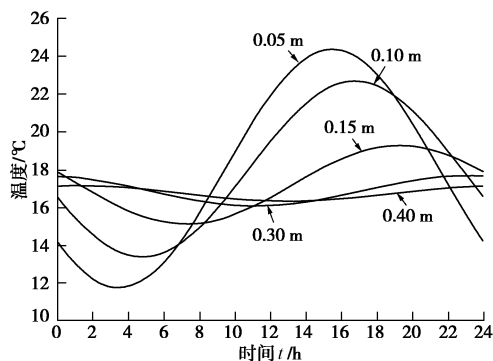


图 4 不同深度土体温度-时间关系图

Fig. 4 Variation of temperatures at different depths in subgrade

5 温度增量影响分析

根据 1.4 节的解析解,可知大气气温平均值及大气温度振幅对温度增量没有影响。影响温度增量的主要因素包括有效太阳辐射,空气对流冷却,路面发射率以及路面结构^[15]和材料特性。

本节基于第 3 节建立的数值模拟模型进行参数敏感性分析,分析有效太阳辐射,空气对流冷却,路面发射率对附面层底部温度增量的影响。假定路面结构(图 2)和热传导参数(表 2)不变,附面层厚度为 0.40 m。

需要说明的是,附面层厚度选取标准不同时,温度增量的具体数据也会发生变化。本节得到的温度增量是在式(4)的附面层厚度选取标准下得到的,二者需要同时使用。

5.1 太阳有效辐射影响

太阳有效辐射量直接决定进入路基内的热量的多少,也直接影响了路基温度场的变化。考虑到路基温度场长期模拟中,太阳辐射存在月变化。因此拟建立温度增量和太阳有效热辐射月总量之间的关系。根据式(19)可得,太阳有效辐射 Q_e 是综合不同路面材料和路面坡度的取值。综合文献资料^[16-18],中国各个地区太阳辐射月总量的范围为 100~1000 MJ/m²。太阳辐射强度与附面层底部温度的增值关系绘制如图 5。

从图 5 中可以看出,附面层底部温度增量 T_i 随月辐射总量 Q_e 的增加几乎呈线性增加关系。因此,附面层底部的温度增量可用下式计算:

$$T_i = \lambda Q_e, \quad (21)$$

式中, λ 是一个和路面结构及材料参数有关的温增系

数。在图 2 所示的路面结构,表 2 的材料参数条件下, λ 约为 0.0093。

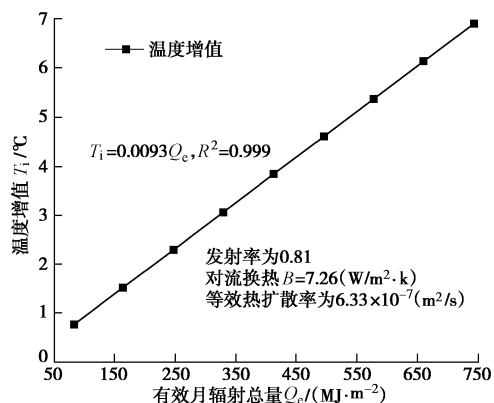


图 5 温度增值和有效月辐射总量的关系图

Fig. 5 Relationship between temperature increment and effective monthly radiation

5.2 路面热辐射影响

沥青路面材料的发射率变化范围为 0.93~0.96^[10-11],变化范围不大。发射率与附面层底部温度的升高值关系绘制如图 6。由模拟结果得出,温度增值随发射率的增加而减小,但减小的幅度不大。对于沥青路面或混凝土路面来说,发射率的取值范围较小,沥青路面发射率的变化导致温度增值的变化小于 0.1℃,故路面发射率对温度值的影响可以忽略不计。

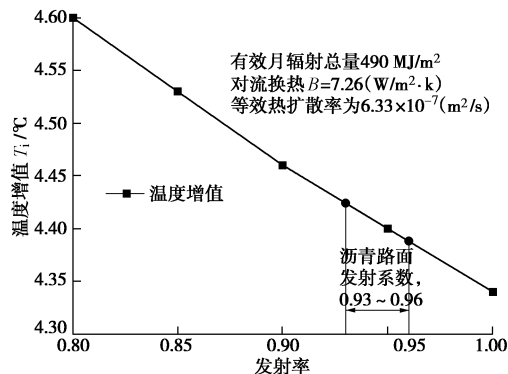


图 6 温度增值与发射率关系图

Fig. 6 Relationship between temperature increment and emissivity

5.3 空气对流影响

空气对流是影响路面温度的重要因素,综合文献[3, 9]和暖通设计手册,路面的对流换热系数 B 的平均值范围为 6~10 W/(m²·℃)。本文沿用文献[9, 19]中研究思路,将气温和对流换热综合为第三类热边界条件作用于数值模型的上边界,经数值模拟计算得出对流换热系数与附面层底部温度增值关系绘制如图 7。

由数值模拟结果得出,对流换热系数的变化会导致温度增值发生较大的变化,故对流换热系数是温度增值的重要影响因素。因此,需要针对不同的对流换

热条件, 对温度增值进行修正。

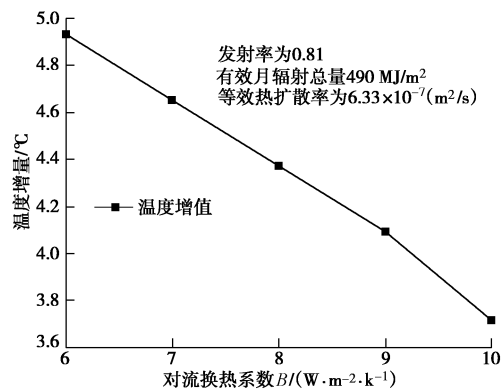


图7 温度增值与对流换热系数关系图

Fig. 7 Relationship between temperature increment and coefficient of convective heat transfer

5.4 路面结构影响

路面结构的不同在传热学中的本质是各层材料的 k , C 和 ρ 不同以及各层结构的厚度 δ_i 不同。在计算附面层厚度 δ_u 时, 需通过式 (18) 考虑这些因素。当附面层厚度 δ_u 确定后, 可以通过等效热扩散率 $\hat{\alpha}$ (式 (15)) 来综合反映附面层内不同结构层的 k , C 和 ρ 对附面层底部温度增量 T_i 的影响。

通过数值模拟, 计算得到不同等效热扩散率 $\hat{\alpha}$ 条件下温度增值 T_i 的值, 汇总在图 8 中。由图 8 可知, 等效热扩散率 $\hat{\alpha}$ 是温度增值存在重要影响。因此, 需要根据实际路基的情况计算不同路面结构下的等效热扩散率 $\hat{\alpha}$, 然后对温度增值 T_i 进行修正。

5.5 温度增量确定方法

根据第 5 节的分析, 可以建立温增系数的经验关系表达式,

$$\lambda = \eta_B \eta_\alpha \lambda_c, \quad (22)$$

式中, λ_c 为一个常数; η_B , η_α 分别为对流换热和等效热扩散率的修正系数。

图 7 反映了对流换热条件对温度增量的影响, 二者呈线性关系。采用线性关系, 用最小二乘法回归可得到流换热条件的修正系数, 如图 9 (a) 所示, 相应的经验关系式为

$$\eta_B = 1 - 0.064(B - 8), \quad (23)$$

式中, B 的单位取为 $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。

图 8 为等效热扩散率对温度增量的影响, 通过最小二乘回归分析 (如图 9 (b) 所示), 可得等效热扩散率的修正系数为

$$\eta_\alpha = 1 + 0.26 \times \lg\left(\frac{\hat{\alpha}}{0.68}\right), \quad (24)$$

式中, $\hat{\alpha}$ 的单位取为 $10^{-6} m^2/s$ 。

将式 (23)、(24) 代入式 (22), 通过最小二乘法回归分析, 可以确定 λ_c 的取值为 $0.0090 ^\circ C/MJ$ 。最终

得到 λ 的取值可用图 10 表示。

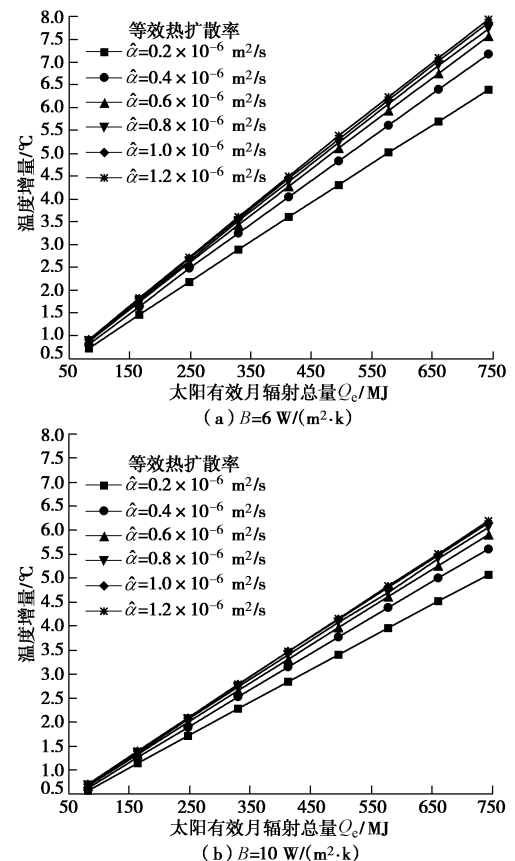
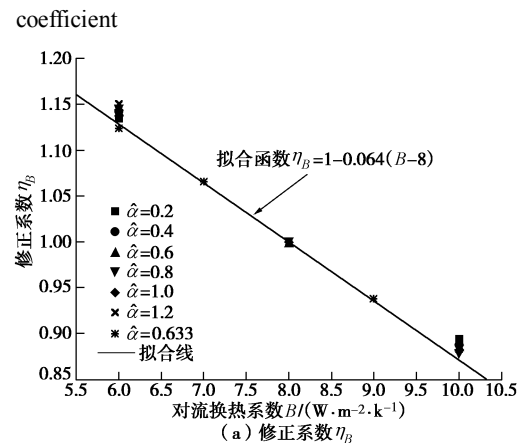
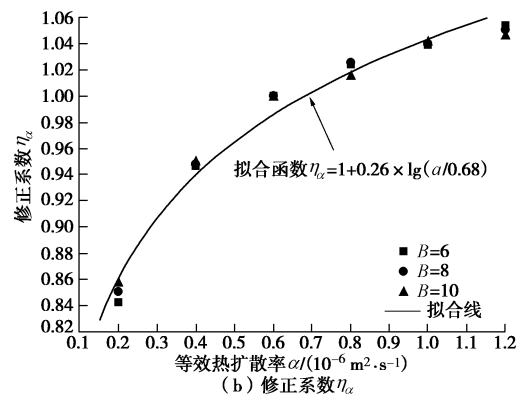


图8 不同对流换热系数下附面层底部温度增值

Fig. 8 Temperature increment affected by convective heat transfer coefficient



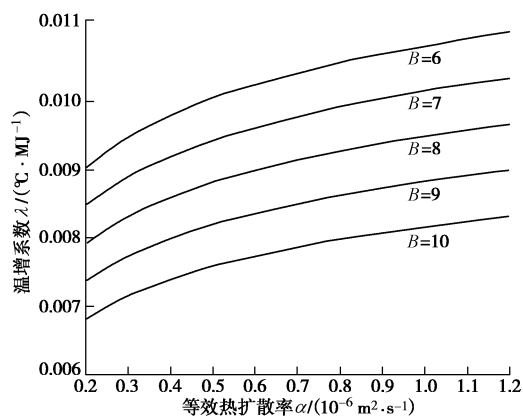
(a) 修正系数 η_B



(b) 修正系数 η_α

图9 对流换热和等效热扩散率的修正系数

Fig. 9 Correction factor

图 10 温增系数 λ 的取值Fig. 10 Values of λ

6 中长期路基温度场模拟方法总结

根据前面的分析, 总结附面层热边界条件确定方法如下: ①根据不同路面结构, 通过式 (16) ~ (18) 计算路基的附面层厚度 δ_u ; ②根据风速决定的对流换热系数 B 、太阳有效月辐射总量 Q_e 和等效热扩散率 $\hat{\alpha}$, 查图 10 或者由式 (22) ~ (24) 计算, 得到路面温增系数 λ ; ③将温度增值 λ 和 Q_e 代入式 (21), 计算得到附面层底部的温度增量 T_i 。

在中长期路基温度场模拟 (数月到数十年) 中, 就可以以深度 δ_u 处的温度条件 (附面层热边界条件式 (1)) 作为路基温度场模拟的上边界条件。将式 (21) 代入式 (1); 并考虑大气平均气温 T_a 为年波动函数, 通常可表达为以年为周期的正弦函数; 忽略气温日振幅影响, ε_d 取为 0, 则附面层热边界条件表达式为

$$T = T_0 + \varepsilon_n \cdot \sin(\omega_a t + \varphi_1) + \lambda Q_e \quad (25)$$

式中 T_0 为年平均温度; ε_n 为气温年振幅; ω_a 为角频率, 对于年波动问题, ω_a 一般取为 $\frac{2\pi}{365 \text{ d}}$; 其中 Q_e 为每月太阳有效辐射总量 (MJ/m^2)。

由于存在地区差异性, 当一年内太阳辐射趋于均匀时, Q_e 可以取为常数; 当太阳辐射随季节变化波动较大时, 可以将 Q_e 假设为波动函数^[16, 20]。太阳有效辐射的函数可表示为

$$Q_e = a \cdot \eta \cdot [Q_0 + Q_a \cdot \sin(\omega_a t + \varphi_2)] \quad (26)$$

式中 Q_0 为一年内太阳辐射月总量的平均值; Q_a 为太阳辐射月总量的年振幅; Q_0 和 Q_a 根据实测的太阳月辐射量, 使用最小二乘法回归拟合得到。

除了路基以下土体可以采用以上方法计算外, 其他情况也可以借用本文的方法。例如路基坡面的附面层效应也可以用本文的方法予以计算, 但是需要做以下修正: ①使用真实的坡面吸收率。路基坡面的热吸收率和路基路面吸收率不同, 和坡面本身材质和植被情况有关, 一般小于 0.5。②采用合适的坡面系数。路

基边坡是倾斜的, 其接收的太阳有效辐射量与坡角、路基走向和太阳照射角有关, 需要引入坡面系数 a 来计算太阳有效辐射量^[8]。③路基坡面的附面层层面方向平行于路基坡面。附面层厚度为附面层底部平面和路基坡面之间的垂向距离。

7 结 语

本文对路基温度场模拟中的上部热边界条件进行了研究, 根据理论分析, 提出了等效热扩散率的概念, 给出了附面层厚度的确定方法。在给定附面层厚度条件下, 通过数值模拟分析, 得到了附面层底部温度增量的计算公式和设计图表。

数值模拟表明, 太阳辐射是影响附面层底部温度增值的决定因素, 附面层底部温度增量和月太阳有效辐射量呈线性关系。空气的对流换热和路面路基等效热扩散率对温度增值有重要影响, 需要根据具体的空气对流换热条件和等效热扩散率, 对温增系数进行修正。对于沥青路面或混凝土路面来说, 发射率的取值范围较小, 对温度增值影响可以忽略。

本研究为附面层理论提供了理论支持和参数取值依据, 能够为中长期路基温度场模拟提供参考。

参考文献:

- [1] 朱林楠. 高原冻土区不同下垫面的附面层研究[J]. 冰川冻土, 1988, 10(1): 8 - 14. (ZHU Lin-nan. Study of the adherent layer on different types of ground in permafrost regions on the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1988, 10(1): 8 - 14. (in Chinese))
- [2] HERRMANN S, KLAUS G, KRAUSE E, et al. Boundary-Layer theory[M]. Springer-Verlag, 2000, 8th, ed.
- [3] 严作人. 层状路面体系的温度场分析[J]. 同济大学学报, 1984(3): 76 - 85. (YAN Zuo-ren. Analysis of the temperature field in layered pavement system[J]. Journal of Tongji University, 1984(3): 76 - 85. (in Chinese))
- [4] 王厚华. 传热学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2006: 71 - 74. (WANG Hou-hua. Heat transfer[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2006: 71 - 74. (in Chinese))
- [5] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 75 - 98. (XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin. Permafrost physics[M]. Beijing: Science Press, 2001: 75 - 98. (in Chinese))
- [6] 雷向前. 青藏高原路基材料 (沥青、混凝土) 比热容的测定 [J]. 理工, 2010(3): 67 - 68. (LEI Xiang-qian. Determination of specific heat capacity of material (asphalt, concrete) for plateau roadbed[J]. Science and Technology,

- 2010(3): 67 - 68. (in Chinese))
- [7] 张慧斌, 邹玲, 纪小平. 沥青混合料导热系数的试验研究[J]. 公路, 2011(10): 50 - 51. (ZHANG Hui-biao, ZOU Ling, JI Xiao-ping. Experimental study on the thermal conductivity of asphalt mixtures[J]. Highway, 2011(10): 50 - 51. (in Chinese))
- [8] 王铁行. 多年冻土地区路基计算原理及临界高度研究[D]. 西安: 长安大学, 2000. (WANG Tie-xing. Research on calculation principle and critical height of subgrade in permafrost regions[D]. Xi'an: Chang'an University, 2000. (in Chinese))
- [9] 毛雪松, 陆鹿, 侯仲杰, 等. 水泥混凝土路面的路基温度场测试及数值模拟[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2011, 31(2): 1 - 5. (MAO Xue-song, LU Lu, HOU Zhong-jie, et al. Text and numerical simulation on subgrade temperature field of cement concrete pavement structure[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2011, 31(2): 1 - 5. (in Chinese))
- [10] 钱滨江, 伍贻文, 常家芳, 等. 简明传热手册[M]. 北京: 高等教育出版社, 1983: 364 - 399. (QIAN Bin-jiang, WU Yi-wen, CHANG Jia-fang, et al. Heat concise manual[M]. Beijing: China Higher Education Press, 1983: 364 - 399. (in Chinese))
- [11] 李源渊, 李艳春, 孙建勇. 沥青路面对城市热岛效应的影响分析[J]. 公路交通科技, 2009(4): 36-38. (LI Yuan-yuan, LI Yan-chun, SUN Jian-yong. Impact of asphalt road on the heat island in city[J]. Municipal and Public Construction, 2009(4): 36 - 38. (in Chinese))
- [12] 毛雪松, 马翥. 基于水热耦合效应的冻土路基稳定性研究[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011: 76 - 85. (MAO Xue-song, MA Biao. Studies on the stability of permafrost subgrade based on coupled water and heat transfer[M]. Beijing: China Communications Press, 2011: 76 - 85. (in Chinese))
- [13] 冯德成, 胡伟超, 于飞, 等. 沥青路面材料热物性参数对温度场的影响及敏感性分析[J]. 公路交通科技, 2011, 28(11): 12 - 19. (FENG De-cheng, HU Wei-chao, YU Fei, et al. Impact of asphalt pavement thermophysical property on temperature field and sensitivity analysis[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(11): 12 - 19. (in Chinese))
- [14] 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 Zhi-wu, SONG Shun-cheng. Numerical analysis of subgrade temperature field in permafrost region[J]. Subgrade Engineering, 2008(2): 18 - 19. (in Chinese))
- [15] JTG D40—2002 公路水泥混凝土路面设计规范[S]. 2003. (JTG D40 — 2002 Specifications of cement concrete pavement design for highway[S]. 2003. (in Chinese))
- [16] 翁笃鸣. 中国太阳直接辐射的气候计算及其分布特征[J]. 太阳能学报, 1986, 7(2): 121 - 130. (WENG Du-ming. Climatological method for direct solar radiation calculation and its distribution over China[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 1986, 7(2): 121 - 130. (in Chinese))
- [17] 马有哲, 刘小宁, 许松. 中国太阳辐射数据集及其质量检测分析[J]. 气象科技, 1998(2): 53 - 56. (MA You-zhe, LIU Xiao-ning, XU Song. Analysis of data set and quality inspection of solar radiation in China[J]. Meteorological Science and Technology, 1998(2): 53 - 56. (in Chinese))
- [18] 吴其重, 王自发, 崔应杰. 我国近20年太阳辐射时空分布状况模式评估[J]. 应用气象学报, 2010, 21(3): 343 - 351. (WU Qi-zhong, WANG Zi-fa, CUI Ying-jie. Evaluating the solar radiation Resources of China in recent 20 years by meteorological model[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2010, 21(3): 343 - 351. (in Chinese))
- [19] 汪海年, 窦明健, 吴敏慧. 青藏高原冻土区路面类型对路基温度场影响的非线性分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(2): 169 - 175. (WANG Hai-nian, DOU Ming-jian, WU Min-hui. Nonlinear analysis of the influence of pavement types on embankment thermal regime in permafrost regions on the tibetan plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(2): 169 - 175. (in Chinese))
- [20] 查良松. 我国地面太阳辐射量的时空变化研究[J]. 地理科学, 1996, 16(3): 223 - 237. (CHA Liang-song. A study on spatial and temporal variation of solar radiation in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 1996, 16(3): 223 - 237. (in Chinese))