

DOI:10.11918/202001037

交通量非均匀分布的沥青路面疲劳等效温度

石志勇¹, 李倩倩¹, 王旭东^{2,3}, 周兴业^{2,3}

(1.重庆交通大学 材料科学与工程学院,重庆 400074;2.交通运输部公路科学研究院,北京 100088;
3 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院,哈尔滨 150090)

摘 要: 针对现有沥青路面疲劳等效温度理论未考虑交通量非均匀分布和沥青路面温度取值不合理等问题,为更加准确科学地计算等效温度,提出沥青层当量温度和深度概念并推导其计算方法,建立大气日当量温度与沥青层当量温度的关系,采用沥青层当量深度处的当量温度作为沥青层代表温度并划分温度区间,开展沥青混合料动态模量和疲劳试验,统计各个温度区间内的交通量分布频率,基于 Miner 线性累积原理提出一种考虑交通量非均匀分布的沥青路面疲劳等效温度计算方法,计算两种交通量分布方式的等效温度值,最后与其他方法进行对比分析.结果表明:沥青层当量温度可作为沥青层代表温度来划分温度区间;考虑交通量非均匀分布的沥青路面疲劳等效温度计算方法在理论上改进了现有方法的不足,使等效温度的计算更加科学和可靠,两种交通量分布方式的等效温度实际计算结果相差 1.6 ℃,与其他方法相比具有一定的优越性,后期应当加强观测,进一步完善计算方法的精确性.

关键词: 沥青层疲劳;交通量分布;Miner 原理;等效温度;计算方法

中图分类号: U416.217 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2021)03-0158-06

Fatigue equivalent temperature of asphalt pavement with nonuniform traffic volume distribution

SHI Zhiyong¹, LI Qianqian¹, WANG Xudong^{2,3}, ZHOU Xingye^{2,3}

(1.School of Materials Science and Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China;
3. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: The existing theory on fatigue equivalent temperature of asphalt pavement does not take account of the nonuniform traffic volume distribution and the values of asphalt pavement temperature are unreasonable. To calculate the equivalent temperature in a more accurate and scientific way, the concepts of equivalent temperature and depth of asphalt layer were proposed and corresponding calculation methods were deduced. The relationship between the daily equivalent temperature of atmosphere and the equivalent temperature of asphalt layer was established. Taking the equivalent temperature at the equivalent depth of the asphalt layer as the representative temperature and dividing the temperature into different ranges, the dynamic modulus and fatigue tests on asphalt mixtures were carried out, and the frequency of traffic volume distribution in different temperature ranges was classified. Based on the Miner linear cumulative principle, a method was proposed for calculating fatigue equivalent temperature of asphalt pavement that takes the nonuniform distribution of traffic volume into consideration. The equivalent temperature values of two traffic volume distribution modes were calculated and comparative analysis was carried out. Results show that the equivalent temperature of asphalt layer could be used as representative temperature to divide temperature ranges. The proposed calculation method for the fatigue equivalent temperature of asphalt pavement could overcome the shortcomings of the existing methods theoretically by taking the nonuniform distribution of traffic volume into consideration, which makes the calculation of equivalent temperature more scientific and reliable. The calculated temperature of two traffic volume distributions had a difference of 1.6 ℃. Compared with other methods, the proposed method had certain advantages. To further improve the accuracy of the calculation method, more intensified observation should be made in the future.

Keywords: fatigue of asphalt layer; traffic volume distribution; Miner principle; equivalent temperature; calculation method

收稿日期: 2020-01-07
基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0840201)
作者简介: 石志勇(1991—),男,硕士;
王旭东(1968—),男,研究员,博士生导师
通信作者: 王旭东,xd.wang@rioh.cn

沥青混合料是典型的温敏性材料,其力学性能具有显著的温度依赖性^[1-2],沥青面层的疲劳开裂作为在役沥青路面使用性能最为常见的衰减形式之

—^[3],研究环境温度对其作用的重要性不言而喻.根据 Miner 线性累积原理,1 a 中沥青路面结构受到的累计损伤等于恒定温度下相同交通量对路面造成的总损伤,该恒定温度即为沥青路面的疲劳等效温度^[4].沥青路面结构设计是在一定的温度下进行的,因此疲劳等效温度的准确计算对沥青路面结构的安全性与其使用寿命具有决定性作用.文献[5]在总结美国的 MEPDG 和 Shell 设计方法的基础上分析全国各地不同结构形式的沥青面层疲劳等效温度的规律,但交通量分布均匀的假设并不符合实际路况.文献[6]认为路面温度越高,该时刻对应的交通量越大,因此交通量均匀分布的假设将使路面结构设计偏安全对后续的结构寿命带来巨大影响.文献[7]以路表温度为各地区的代表温度得到相应沥青混合料的疲劳方程来计算沥青路面的疲劳等效温度,此方法中的路面温度不能代表沥青层内部的温度场变化规律,产生的误差较大.文献[8]从日疲劳温度应力系数的角度出发,提出了水泥混凝土路面疲劳等效温度应力系数,但计算过程繁琐,不宜推广.本文在总结上述方法的优缺点的基础上,基于 Miner 线性累积原理提出一种考虑交通量非均匀分布的沥青路面疲劳等效温度的计算方法,该方法符合实际路况,更加科学可靠.

1 沥青层当量温度的计算

温度场的复杂分布对沥青路面的使用性能具有显著影响^[9].一般来说,用于评价沥青路面使用性能的环境温度指标有路面结构内部温度、路面路表温度和大气温度等.但是在实际工程中,同一时段的这3个温度数值并不相等,有时甚至相差很大,由于不同路面结构使用性能指标各自本身的特点,不同的路面使用性能指标有不同的最密切的温度指标,因此确定与疲劳性能最密切的代表温度是探讨沥青路面疲劳性能问题的关键.疲劳开裂自上而下或者自下而上整个过程贯穿沥青层结构^[10],路表温度和沥青层层底温度既无法避免偶然误差更不能表征整个沥青层对路面疲劳性能的影响,沥青层平均温度则无法体现温度在路面结构内部的梯度分布、滞后性和累积性^[11]等特点.路面结构存在一定厚度,为了获取结构层内部不同深度的温度,需要在路面结构不同深度位置埋设温度传感器,但各处的温度并不相等,因此需要找到一个具有代表性的温度,来反映路面结构整体温度状态,前期研究发现沥青层的当量温度可代表沥青层层内复杂的温度场,弥补上述温度指标存在的不足,充分反映沥青层温度场变化趋势,下面介绍沥青层当量温度的计算方法.

以位于北京的交通运输部公路科学研究院足尺环道试验路面(下称 RIOHTrack)为例,选取强基薄面型半刚性基层结构 STR1、中国常用沥青路面结构形式 STR9 和沥青混凝土与半刚性基层组合形式 STR16 3 种典型沥青路面结构^[12],3 种沥青路面具体的结构与材料组成设计见表 1,其中 STR4、STR9、STR19 沥青层的总厚度分别为 12、18、36 cm. RIOHTrack 所处的北京通州地区四季节气分明,温度浮动范围较大,利于开展沥青路面温度场的研究.

表 1 3 种路面结构的沥青层材料与结构组成
Tab.1 Asphalt layer materials and structure compositions of three pavement structures

层位	STR4	STR9	STR16
1	4cm SBS-AC13	4cm SBS-PAC13	4cm SBS-SMA13
2	防水层 1	防水层 1	防水层 1
3	6cmA30-AC20	6cmSBS-AC20	8cm SBS-AC20
4	黏层	黏层	黏层
5	2cmSBS-AC10	8cm A70-AC25	12cm A70-AC25

首先,计算各个沥青层底处传感器的代表温度,即日当量平均温度.以表 1 中 STR4 为例,分别计算 4、10、12 cm 处传感器的代表温度,以每个月 5 d 为单元平均温度,以减小由传感器测量、温度骤变带来的误差. RIOHTrack 温度传感器数据采样周期为 1/6 h,以此为步长,采用 Bigaussian 函数^[13]拟合得到 24 h 内沥青层某一深度处的时间温度曲线,由于该模型积分较困难,将此曲线与时间轴围成的图形分割为 144 个近似梯形见图 1.加权计算几何图形面积为

$$A = \sum_{i=1}^{144} \frac{(T_i + T_{i-1})(t_i - t_{i-1})}{2}, \tag{1}$$

除以 24 即得到某一传感器深度 H 处的日当量平均温度为

$$\bar{T} = \frac{A}{24}. \tag{2}$$

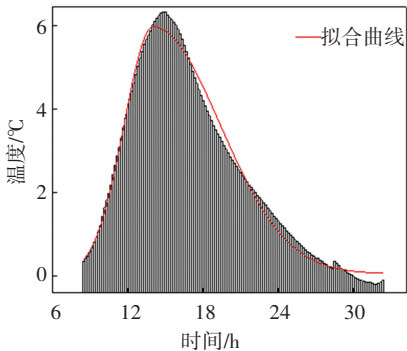


图 1 沥青层某一深度处的时间与温度曲线
Fig.1 Time and temperature curve at a certain depth of asphalt layer

式中: A 为时间曲线围成的面积, t_i 与 t_{i-1} 为传感器相邻温度采集时刻, T_i 与 T_{i-1} 分别为 t_i 与 t_{i-1} 时刻对应的温度沥青层某一深度处的温度。

其次, 计算整个沥青层的代表温度, 即沥青层当量温度。把 STR4 沥青层 4、10、12 cm 深度处传感器的日当量平均温度, 绘制深度温度曲线, 如图 2 所示, 按照沥青层分层数将深度温度曲线分割成 3 个梯形, 计算每个梯形的质心坐标 (x_i, y_i) , 再以各个梯形的面积 S_1 、 S_2 、 S_3 为加权值, 计算整个沥青层温度与深度轴围成的几何图形的质心见图 2, 得到 STR4 沥青层当量温度为

$$T_r = \frac{\sum_{i=3}^n x_i S_i}{\sum_{i=3}^n S_i}, \quad (3)$$

STR4 沥青层当量温度对应的当量深度为

$$H_r = \frac{\sum_{i=3}^n y_i S_i}{\sum_{i=3}^n S_i}. \quad (4)$$

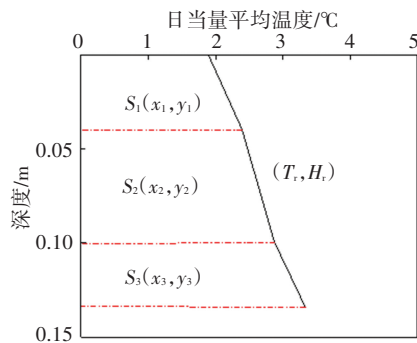


图 2 沥青层结构内部深度与温度曲线

Fig.2 Internal depth and temperature curve of asphalt layer structure

RIOHTrack 设置有气象站, 采用式(1)、(2)计算出大气日当量平均温度 T_s , 引入沥青层厚度变量 H , 建立大气日当量平均温度与沥青层的当量温度关系模型为

$$T_r = -1.9653 + 1.1004T_s + 8.3433H, R^2 = 0.9480. \quad (5)$$

这样可以计算任意厚度沥青层的当量温度, 弥补实际工程中没有布设足够传感器的局限, 提高了模型的实用性, 也为后续建立沥青路面的温度场提供了理论支撑。

2 交通量非均匀分布的沥青路面疲劳等效温度

在役沥青路面的沥青层结构内部温度和交通量

随时间均呈现非正弦波的周期性变化规律, 夜间温度低且交通量小, 白天温度高且交通量大。沥青层结构内部温度的高温区间一般集中在在 1 d 之中的 13:00—15:00, 若交通量峰值与沥青层结构内部温度峰值之间的滞后性很小将对沥青路面造成更大的损伤与破坏, 文献[14]统计了某高速公路 5 a 间的交通量, 得出交通量最大时 9 月份大约是最小时 2 月份的 1.5 倍。文献[6]通过对济南、西安、上海和广州 4 个地区交通量与温度分布研究发现, 沥青路面处于高温区间的交通量要高于均匀分布的交通量。因此将在役沥青路面承受的交通量均匀分布的假设来计算疲劳等效温度的方法将导致沥青路面的结构设计偏安全, 因而需寻求一种考虑交通量非均匀分布的沥青路面疲劳等效温度计算方法是必要的。根据前节所述, 本文得到了沥青层的日当量平均温度, 以 5 °C 为区间长度划分温度区间, 计算每个温度区间的年温度分布频率, 以时间轴为纽带统计每天对应的交通量, 即得出每个温度区间对应的年交通量分布频率。

2.1 沥青路面疲劳等效温度的基本计算原理

根据 Miner 线性累积原理和沥青路面疲劳等效温度的定义可得

$$\sum_i \frac{n(\theta_i)}{N(\theta_i)} = \frac{\sum_i n(\theta_i)}{N(\theta_{eq})}, \quad (6)$$

则沥青路面的基本损伤为

$$\frac{1}{N(\theta_{eq})} = \frac{\sum_i \frac{n(\theta_i)}{N(\theta_i)}}{\sum_i n(\theta_i)}. \quad (7)$$

式中: $N(\theta_i)$ 为车辆荷载随机作用下沥青路面产生疲劳破坏承受的标准轴载作用次数, $n(\theta_i)$ 为温度为 θ_i 条件下沥青路面产生疲劳破坏承受的交通量的轴载作用次数, $N(\theta_{eq})$ 为疲劳等效温度下沥青路面承受的标准轴载作用次数。

当式(6)的值等于 1 时, 沥青路面即发生疲劳破坏, 由式(7)计算等效温度 θ_{eq} 下的沥青路面基本损伤, 即可得到等效温度值。

2.2 沥青混合料疲劳方程推导等效温度的步骤

步骤 1 绘制沥青混合料的基本损伤值与温度关系曲线。开展不同温度 θ_i 和频率 f_i (一般为 25 Hz) 的沥青混合料室内疲劳实验, 得到沥青混合料疲劳方程为

$$N(\theta_i) = a\varepsilon(\theta_i)^b. \quad (8)$$

式中: $\varepsilon(\theta_i)$ 为初始弯拉应变, $N(\theta_i)$ 为沥青混合料的疲劳寿命次数, a 、 b 为依赖于沥青混合料特性的回归参数。

根据 $\varepsilon_6(\theta_i)$ 推导可得到温度 θ_i 和频率 f_i 下的沥青混合料基本损伤值为

$$\frac{1}{N(\theta_i)} = \left[\frac{\varepsilon_6(\theta_i)}{\varepsilon(\theta_i)} \right]^b \times 10^{-6}.$$

(9)

式中: $\varepsilon_6(\theta_i)$ 为温度 θ_i 、频率 f_i 和疲劳次数为 100 万次时试件的弯拉应变值, 由式(8) 的疲劳方程求出; $\varepsilon(\theta_i)$ 为温度 θ_i 下的沥青层层底最大拉应变; 轴载作用方式为 13 t 的双圆荷载, 荷载圆半径 $R = 10.65$ cm, 两荷载圆中心点距离为 3 倍半径. 通过对应的沥青混合料的模量值求得 $\varepsilon(\theta_i)$.

这样即可得到不同温度 θ_i 和频率 f_i 下的沥青混合料的基本损伤值并绘制与温度的关系曲线.

步骤 2 计算等效温度 θ_{eq} 下的沥青混合料基本损伤值. 将温度划分为 n 个区间, 假设等效温度下, 温度分布频率为 100% 对应的交通量分布频率为 b_j , 非等效温度下, 温度的分布频率为 a_i 对应的交通量分布频率为 b_i , 则等效温度下的基本损伤值推导过程为

$$b_1 \frac{1}{N(\theta_{eq})} = a_1 b_1 \frac{1}{N(\theta_1)} + \cdots + a_i b_i \frac{1}{N(\theta_i)} \cdots + a_n b_n \frac{1}{N(\theta_n)},$$

(10)

⋮

$$b_i \frac{1}{N(\theta_{eq})} = a_1 b_1 \frac{1}{N(\theta_1)} + \cdots + a_i b_i \frac{1}{N(\theta_i)} \cdots + a_n b_n \frac{1}{N(\theta_n)},$$

(11)

⋮

$$b_n \frac{1}{N(\theta_{eq})} = a_1 b_1 \frac{1}{N(\theta_1)} + \cdots + a_i b_i \frac{1}{N(\theta_i)} \cdots + a_n b_n \frac{1}{N(\theta_n)}.$$

(12)

将式(10)~(12)左右分别累加得到基本损伤值为

$$\frac{1}{N(\theta_{eq})} = n \left[a_1 b_1 \frac{1}{N(\theta_1)} + \cdots + a_i b_i \frac{1}{N(\theta_i)} \cdots + a_n b_n \frac{1}{N(\theta_n)} \right].$$

(13)

式中: a_1 、 a_n 为各个温度区间对应的温度分布频率, b_1 、 b_n 为各个温度区间对应的交通量分布频率, 两种

分布频率无直接联系并具有一定随机性.

从式(13)可以看出, 沥青层当量温度区间的划分, 各个温度区间对应的温度分布频率、交通量分布频率和沥青路面基本损伤值都对等效温度的计算结果产生影响.

3 不同交通量分布方式计算结果的对比与验证

基于式(13)计算交通量均匀和非均匀两种分布方式的沥青路面疲劳等效温度并进行验证对比, 依托某高速公路, 开展室内沥青混合料动态模量和疲劳实验并观测采集相应的温度场和交通量数据, 某高速公路沥青路面沥青层材料与结构参数见图汇总于表 2.

表 2 某高速公路沥青层材料与结构组成

Tab.2 Asphalt layer materials and structure compositions of a highway

层位	沥青混合料类型	厚度/cm	泊松比
1	BBSG	8	0.35
2	GB4	14	0.35
3	GB4	14	0.35

按照前节所述计算沥青路面疲劳等效温度所需参数, 采用法国梯形梁设备 M2F 开展 BBSG 和 GB4 两种沥青混合料在 10 Hz 下 -5、0、5、10、15、20、25、30 ℃ 的两点弯曲动态模量和 GB4 沥青混合料在 25 Hz 下 -5、0、5、10、15、20、25、30 ℃ 的两点弯曲疲劳试验, 得到 BBSG 和 GB4 两种沥青混合料在 10 Hz 下 -5、0、5、10、15、20、25、30 ℃ 的复模量和 GB4 沥青混合料在 25 Hz 下 -5、0、5、10、15、20、25、30 ℃ 的疲劳方程, 汇总 BBSG 和 GB4 两种沥青混合料的复模量值和与基本损伤值有关的 GB4 沥青混合料疲劳方程参数见表 3, 按照式(8)、(13)分别计算每个温度下的弯拉应变值和基本损伤值, 统计某高速公路的沥青层当量深度处的当量温度与交通量, 相关信息汇总于表 3, 其中 b 为疲劳方程回归参数.

表 3 沥青路面疲劳等效温度计算所需参数

Tab.3 Parameters required for calculating the fatigue equivalent temperature of asphalt pavement

温度/℃	$E_{BBSG}/$ MPa	$E_{GB4_12}/$ MPa	$E_{GB4_13}/$ MPa	$\varepsilon(\theta_i)/10^{-6}$	$\varepsilon_6(\theta_i)/10^{-6}$	b	基本损伤	温度分布 频率/%	交通量分布 频率/%
-5	14 000	24 500	24 500	24	95	-0.161	0.002	10	9
0	12 000	20 900	20 900	27	95	—	—	12	12
5	9 800	17 200	17 200	32	94	-0.234	0.010	18	20
10	7 200	13 500	13 500	40	92	-0.23	0.027	14	15
15	5 300	10 200	10 200	51	96	-0.225	0.060	18	20
20	3 400	7 100	7 100	68	100	-0.232	0.190	18	19
25	2 100	4 600	4 600	98	110	-0.242	0.620	8	3
30	1 300	2 700	2 700	149	121	-0.23	2.470	2	2

由表 3 可知 $n = 8$, 假设交通量均匀分布, 则 $b_1 = b_i = b_n$, 按式 (13) 计算沥青路面基本损伤值为 0.15, 假设交通量按表 3 中非均匀分布则为 0.1. 表 3 中沥青路面 -5、0、5、10、15、20、25、30 °C 时的基本损伤值与对应的试验温度关系模型为

$$\frac{1}{N(\theta_i)} = 7.36 \times 10^{-4} e^{0.276T}, R^2 = 0.999\ 6. \quad (14)$$

其中 T 为试验温度.

由模型可知相关系数非常高, 拟合结果良好, 由该模型计算等效温度正确可靠. 将上述两种基本损伤值代入式 (14) 得到交通量均匀分布的沥青路面疲劳等效温度为 19.6 °C, 考虑交通量非均匀分布的沥青路面疲劳等效温度为 18.0 °C, 两者相差 1.6 °C, 可见交通量的非均匀分布对沥青路面疲劳等效温度的计算结果是有一定影响的, 在今后的沥青路面疲劳等效温度计算中将交通量视为变量是有必要的.

需要说明的是: 1) 沥青层日当量平均温度与大气日当量平均温度的关系是基于 RIOHTrack 提出的, 由于客观因素算例中某高速沥青路面沥青层的日当量平均温度是根据式 (5) 计算得到的, 后续应埋设传感器验证式 (5) 的准确性并对利用式 (5) 计算得到的沥青层日当量平均温度进行修正; 2) 交通量非均匀分布的假设前提是某一温度区间内车辆轴载比列是不变的, 后续应当加强观测, 得出更细化的计算理论.

4 与其他方法的对比

目前国际上主流的沥青路面疲劳等效温度的计算方法主要有 AASHTO、Shell 和 SHRP 3 种, 但都有需要进一步完善之处.

美国各州公路和运输工作者协会 AASHTO 制定的沥青路面设计规范力学-经验路面设计指南 MEPDG 将分析周期内的实时路面温度场分布与轴载作用下的路面力学响应一一对应, 然后采用 Miner 叠加原理进行疲劳寿命的预估^[15], 首先以标准正态分布来表示基本分析周期内路面内的某深度 z 处的温度 T_z 并求出 z 处的代表温度, 其次按照一定规则将路面结构分层, 以路表、路表以下 0.5 英寸以及沥青层层底为疲劳损坏计算点, 分别计算上述各计算点在每个基本分析周期内的力学响应以及疲劳寿命, 最后再根据 Miner 叠加原理, 得到整个设计年限内的路面疲劳寿命并反算出等效温度. 该方法更准确地考虑路面温度对疲劳寿命的影响, 但需要大量、长期的气象数据库, 至少提供相应或相近地区 2 a 每小时的相关气象数据^[15-16], 而中国高速公路发展起步较晚, 缺乏全面的路面温度场观测数据.

Shell 设计方法则是根据沥青层的有效粘度等效原则, 建立了大气平均温度与沥青层等效温度之间的关系^[17], 该方法的关键在于给出了沥青面层有效粘度与沥青层温度的经验关系图, 并以此为依据, 提出了基于气温和沥青面层厚度的疲劳等效温度推算方法, 国外发达国家高速公路发展起步较早, 与路面温度场相关的气象数据库也相对较为完备, 根据大量、长期的试验数据, 建立路面等效温度与相关的气候参数、沥青路面结构参数等之间的关系, 直接推算沥青路面的疲劳等效温度, 因此采用经验法预估沥青路面等效温度较为简单、方便和可靠. 然而经验法的不足之处在于其适用性受到限制, 仅在交通条件、气候条件、路面结构、材料性能等相关因素处于相似的状态具有较好的可靠性和适用性.

美国公路战略研究计划 SHRP 采用了 Witczak 对沥青路面疲劳等效温度的研究成果, 考虑了地理位置、路面有效深度、路面结构、材料类型及轮胎胎压 5 个主要因素^[18-19], 通过分析发现, 疲劳等效温度与沥青面层 1/3 深度处的年均温度 MAPT 有很好的相关性, 可直接计算疲劳等效温度, 但采用面层某特定位置处的温度作用代表温度进行路面疲劳寿命计算是不合理的, 某特定位置处的温度并不能反映路面内的实际分布状况, 忽略了路面温度场分布梯度的影响, 该处温度下的路面力学相应与真正温度场分布条件下路面力学响应往往会存在较大差别, 最终导致疲劳寿命计算出现较大偏差.

由此可知, 上述国际主流的 3 种沥青路面疲劳等效温度计算方法均有一定的缺点, 本文以沥青层当量温度为沥青层代表温度, 基于室内沥青混合料疲劳实验与室外为期 1 a 的温度和交通量观测数据, 通过理论推导计算出疲劳等效温度, 弥补了上述方法的不足, 并推进了交通量不均匀分布问题的解决, 后续需要加强观测以验证和完善计算方法.

5 结 论

1) 沥青层当量温度充分考虑温度在沥青层结构内部的梯度分度, 更加密切地体现温度场在结构内部分复杂分布, 可以作为沥青层的代表温度. 构建的大气 5 d 日当量度、沥青层厚度和沥青层结构内部当量温度的关系模型, 提高了模型的实用性, 为后续建立沥青路面温度场和当量温度在实际工程的应用提供理论依据.

2) 利用 Miner 线性累积原理并在考虑交通量非均匀分布的基础上提出了沥青路面疲劳等效温度计算方法, 在理论上改进了现有方法的不足. 基于沥青混合料动室内试验与室外温度和交通量实测数据验

证了模型的有效性和实用性.同等条件下,考虑交通量非均匀分布计算的沥青路面疲劳等效温度同比减小了 $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,这对沥青路面的结构设计会产生一定的影响,利用该等效温度值将使沥青路面的结构设计更加合理、科学.沥青路面交通量的非均匀分布,沥青层日当量温度区间的划分,各个温度区间的温度频率分布、交通量频率分布和基本损伤值都会对沥青路面的疲劳等效温度的计算结果产生影响.

3) 与国际上主流的沥青路面疲劳等效温度计算方法对比,考虑交通量非均匀分布的沥青路面疲劳等效温度计算方法具有一定的创新性与优越性,但后续还应加强温度与交通量的观测与统计,以便得到更加精确的计算结果.

参考文献

- [1] 宋小金,樊亮.沥青路面结构温度随深度变化规律研究[J].土木工程学报,2017,50(9):110
SONG Xiaojin, FAN Liang. Study on the variation rules of temperature with depth for asphalt pavement structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(9): 110. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2017.09.011
- [2] 张肖宁.沥青与沥青混合料的粘弹力学原理及应用[M].北京:人民交通出版社,2006
ZHANG Xiaoning. Principle and application of viscoelastic mechanics of asphalt and asphalt mixture[M]. Beijing: China Communications Press, 2006
- [3] 栾利强.半刚性基层沥青路面疲劳裂缝扩展与寿命预估研究[J].土木工程学报,2017,50(9):118
LUAN Liqiang. Research on fatigue crack propagation and fatigue life prediction of semi-rigid base asphalt pavement[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(9): 118. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2017.09.012
- [4] 孟岩,潘峰嵘,李艳春.疲劳当量温度计算方法研究[J].公路交通科技,2009,26(5):6
MENG Yan, PAN Zhengrong, LI Yanchun. Research on fatigue equivalent temperature calculation method[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(5): 6
- [5] 谈至明,吁新华.沥青面层的疲劳等效温度[J].同济大学学报(自然科学版),2013,41(2):197
TAN Zhiming, YU Xinhua. Fatigue equivalent temperature for asphalt pavements[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(2): 197. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2013.02.007
- [6] 王健.基于影响因素非线性特性的沥青路面永久变形预估研究[D].西安:长安大学,2011
WANG Jian. Research on prediction of permanent deformation of asphalt pavement based on nonlinear characteristics of influencing factors[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011
- [7] 李静,戴经梁.沥青混合料有效温度的计算和应用[J].重庆交通学院学报,2004,23(3):32
LI Jing, DAI Jingliang. Calculation and application of effective temperature of asphalt mixture[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2004, 23(3): 32. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2004.03.009
- [8] 牛开民,田波.水泥混凝土路面等效疲劳温度应力系数[J].中国公路学报,2006,19(5):23
NIU Kaimin, TIAN Bo. Equivalent fatigue thermal stress coefficient of cement concrete pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(5): 23. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2006.05.006
- [9] 秦健,孙立军.沥青路面温度场的分布规律[J].公路交通科技,2006,23(8):18
QIN Jian, SUN Lijun. Study on asphalt pavement temperature field distribution pattern[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(8): 18. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2006.08.005
- [10] 姚祖康.沥青路面结构设计[M].北京:人民交通出版社,2011
YAO Zukang. Asphalt pavement structure design[M]. Beijing: China Communications Press, 2011
- [11] 顾兴宇,袁青泉,倪富健.基于实测荷载和温度梯度的沥青路面车辙发展影响因素分析[J].中国公路学报,2012,25(6):30
GU Xingyu, YUAN Qingquan, NI Fujian. Analysis of factors on asphalt pavement rut development based on measured load and temperature gradient[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(6): 30. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2012.06.005
- [12] 王旭东.足尺路面试验环道路面结构与材料设计[J].公路交通科技,2017,34(6):30
WANG Xudong. Design of pavement structure and material for full-scale test track[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(6): 30. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2017.06.005
- [13] 肖倩,许兵,王旭东,等.足尺路面试验环道路面温度曲线特征及拟合研究[J].公路交通科技,2019,36(3):1
XIAO Qian, XU Bing, WANG Xudong, et al. Study on feature and fitting of RIOHTrack pavement temperature curve[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(3): 1. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2019.03.001
- [14] 黄大喜,赵延庆.昼夜温度及交通量变化对沥青路面响应及性能的影响[J].内蒙古公路与运输,2008,10(3):8
HUANG Daxi, ZHAO Yanqing. Influence of day and night temperature and traffic volume on the response and performance of asphalt pavement[J]. Highways and Transportation in Inner Mongolia, 2008, 10(3): 8
- [15] ARA Inc.. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures[R]. Washington DC: National Research Council, 2004.
- [16] 东南大学交通学院.AASHTO2002设计方法中文解释[R].南京:东南大学,2005
School of Transportation, Southeast University. Chinese interpretation of AASHTO2002 design method[R]. Nanjing: Southeast University, 2005
- [17] Shell International Ltd.. Shell pavement design manual: asphalt pavements and overlays for road traffic[R]. London: Shell International Ltd., 1981
- [18] WITCZAK M W. Effective temperature analysis for permanent deformation of asphaltic mixtures[R]. Washington DC: National Research Council, 1992
- [19] SHRP. Superpave mix design manual for new construction and overlays[R]. Washington DC: National Research Council, 1994