

## 沥青面层的疲劳等效温度

谈至明<sup>1</sup>, 吁新华<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804;

2. 江西赣粤高速公路股份有限公司, 江西 南昌 330025)

**摘要:** 分析了沥青面层疲劳寿命与面层温度的均值和梯度的相互关系。基于疲劳损伤等效原则, 给出了沥青路面面层疲劳等效温度的计算方法。根据全国 95 个地区多年的路面温度场数据, 对沥青面层疲劳等效温度进行了计算和分析, 总结了沥青面层基准疲劳等效温度与地区海拔、路表温度特征值(多年路表温度均值和标准差)之间的回归关系, 据此推算得到了全国 738 个地区的沥青面层基准疲劳等效温度值, 并绘制了可供设计采用的全国沥青面层基准疲劳等效温度等值线图, 归纳了非基准条件下各因素对沥青面层疲劳等效温度的影响规律, 给出了各因素修正计算式。最后通过对比分析, 验证了沥青面层疲劳等效温度计算方法和结果的可靠性。

**关键词:** 路面工程; 沥青路面; 面层疲劳; 等效温度

**中图分类号:** U416

**文献标志码:** A

### Fatigue Equivalent Temperature for Asphalt Pavements

TAN Zhiming<sup>1</sup>, YU Xinhua<sup>1,2</sup>

(1. The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Jiangxi Ganyue Expressway Co. Ltd., Nanchang 330025, China)

**Abstract:** The relationship between the fatigue life of an asphalt pavement and its average temperature, temperature gradients was discussed. Based on the equivalency principal of cumulative fatigue damage, a method for calculating the fatigue equivalent temperature for asphalt pavement was put forward, with reference to the pavement temperature field data collected from 95 regions of China over the years, the corresponding fatigue equivalent temperatures were calculated and analyzed, the correlation between the standard fatigue equivalent temperature and the altitude of asphalt pavement located, the characteristic asphalt pavement temperature (pavement surface average temperature over years and its standard deviation) were summarized. Hence, the standard fatigue equivalent temperatures for asphalt pavements in 738

regions of China were calculated, for design purpose, a contour map of the standard fatigue equivalent temperatures was initially proposed. Moreover, the influences of various factors in the non-standard conditions on the fatigue equivalent temperature for asphalt pavement were analyzed, and a set of approximate formulas were given accordingly. At last, the reliability of the calculation method and corresponding results were validated by a comparative study.

**Key words:** pavement engineering; asphalt pavement; structure fatigue; fatigue equivalent temperature

沥青面层疲劳开裂是柔性基层沥青路面的主要损坏形式之一。沥青面层的力学性能与其温度状况密切相关, 在沥青路面设计时, 如何考虑路面结构使用期内时刻变化着的温度状况的影响, 国内外的对策有 3 类: 第 1 类是将路面结构使用期内的实时沥青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 叠加原理进行沥青面层疲劳寿命预估, 如 AASHTO (american association of state highway and transportation officials) 设计方法 MEPDG (力学—经验路面设计指南) 和 Shell 设计方法等<sup>[1-2]</sup>, 此方法计算繁琐且需要获得精确的路面温度场资料; 第 2 类是选用沥青层内某深度范围内的平均温度或某特定位置的温度作为沥青层的代表温度, 然后进行轴载作用下的力学响应计算, 进而得到沥青面层疲劳寿命<sup>[3-4]</sup>, 该方法较第 1 类方法稍简单些, 但因层平均温度或某特定位置的温度不能很好地反映路面温度实际分布状况, 产生的偏差难以估计; 第 3 类是基于疲劳损耗等效概念得到沥青面层疲劳等效温度与气候参数、沥青路面结构参数等之间的关系, 如 SHRP (strategic highway research program) 设计方法<sup>[5-6]</sup>, 此方法概念明晰, 使用简单,

但其适用性受到限制,难以推广。

本文根据我国路面温度场的研究成果<sup>[7]</sup>,在第1类方法的基础上,采用第3类方法中的沥青面层疲劳等效温度概念,总结归纳了全国不同地区、不同路面结构条件的沥青面层疲劳等效温度规律,给出了它们的回归关系式,为沥青路面设计时考虑温度对面层疲劳寿命的影响提供了较为精确且简便的依据。

## 1 沥青面层的疲劳寿命

沥青面层的疲劳寿命  $N_{\text{pf}}$  通常可表示为沥青面层层底应变  $\epsilon_{\text{lb}}$  及与层底弹性模量  $E_{\text{lb}}$  的函数<sup>[2]</sup>

$$N_{\text{pf}} = A_N \left( \frac{1}{\epsilon_{\text{lb}}} \right)^{B_N} \left( \frac{1}{E_{\text{lb}}} \right)^{C_N} \quad (1)$$

式中:  $A_N, B_N, C_N$  为材料参数,与沥青混合料类型、加载条件等因素有关,其中,  $B_N \approx 4$ ; 常应变加载时  $C_N = 1.60$ , 常应力加载时  $C_N = 1.15$ <sup>[8]</sup>。

由于沥青混合料的热敏感性,沥青混合料的弹性模量  $E$  (或劲度) 与温度有关,两者之间的关系采用 BELLS 修正模型表示

$$E(T) = E_{20} \times 10^{\alpha(20-T)} \quad (2)$$

式中:  $T$  为沥青混合料温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $E_{20}$  为  $20^{\circ}\text{C}$  时沥青混合料的模量,  $\text{MPa}$ ;  $\alpha$  为沥青混合料的热敏系数,与沥青混合料的配合比及材料热力学性质有关,据 Lukanen 等人研究和我国弯沉盆实测数据反算,  $\alpha$  值在  $0.015 \sim 0.030$  之间<sup>[9]</sup>。

温度沿层厚非均匀分布时的沥青面层层底应变  $\epsilon_{\text{lb}}$ , 可通过细分面层 (分层的温度视为均匀, 并用中点温度近似) 之后用多层弹性层状体系程序计算得到, 也可按文献<sup>[10]</sup>提出的等弯曲刚度近似法求得。

温度对沥青面层疲劳寿命  $N_{\text{pf}}$  的影响通过定义2个相对比  $\theta_T, \theta_{T_g}$  来考察。  $\theta_T$  为层温度梯度  $T_g = 0^{\circ}\text{C}$  条件下, 不同层均温度  $\bar{T}$  的面层疲劳寿命与温度  $\bar{T} = 20^{\circ}\text{C}$  的面层疲劳寿命之比;  $\theta_{T_g}$  为温度沿层厚线性分布且层均温度  $\bar{T} = 20^{\circ}\text{C}$  条件下, 不同层温度梯度  $T_g$  的面层疲劳寿命与层温度梯度  $T_g = 0^{\circ}\text{C}$  的面层疲劳寿命之比, 即

$$\theta_T = \frac{N_{\text{pf}}}{N_{\text{pf}}|_{\bar{T}=20^{\circ}\text{C}}}, \theta_{T_g} = \frac{N_{\text{pf}}}{N_{\text{pf}}|_{T_g=0^{\circ}\text{C}}} \quad (3)$$

相对比  $\theta_T$  用于考察层均温度对沥青面层疲劳寿命的影响, 相对比  $\theta_{T_g}$  用于考察层温度梯度对沥青面层疲劳寿命的影响。图1给出了层均温度  $\bar{T} = 20^{\circ}\text{C}$ , 沥青模量  $E_{20}$  与地基模量  $E_0$  之比  $\lambda_{20} = 40$ , 沥青

混合料的热敏系数  $\alpha = 0.02$ , 沥青泊松比  $\mu_1 = 0.25$ , 土基泊松比  $\mu_0 = 0.35$ , 加载条件为常应变, 以及标准轴载 (轴重  $100 \text{ kN}$ ) 作用下, 3种面层厚度  $h_1$  ( $0.12, 0.18, 0.24 \text{ m}$ ) 时疲劳寿命相对比  $\theta_T - \bar{T}, \theta_{T_g} - T_g$  关系图。

由图1a可知, 面层厚度  $h_1 = 0.12 \sim 0.24 \text{ m}$  时, 面层疲劳寿命相对比  $\theta_T$  随着层均温度  $\bar{T}$  的升高而迅速减小, 即面层疲劳寿命  $N_{\text{pf}}$  是随层均温度  $\bar{T}$  的升高而迅速降低。这说明沥青面层在高温状态比低温状态更易发生疲劳破坏, 这与过去大多研究认为沥青路面在中、低温状态时更易发生疲劳破坏有所不同。从图1b可以看到, 层温度梯度  $T_g$  对面层疲劳寿命的影响较小,  $T_g$  在  $-100 \sim 200^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$  变化时, 面层疲劳寿命  $N_{\text{pf}}$  随面层温度梯度  $T_g$  的增大而降低, 但其影响程度不足  $50\%$ 。

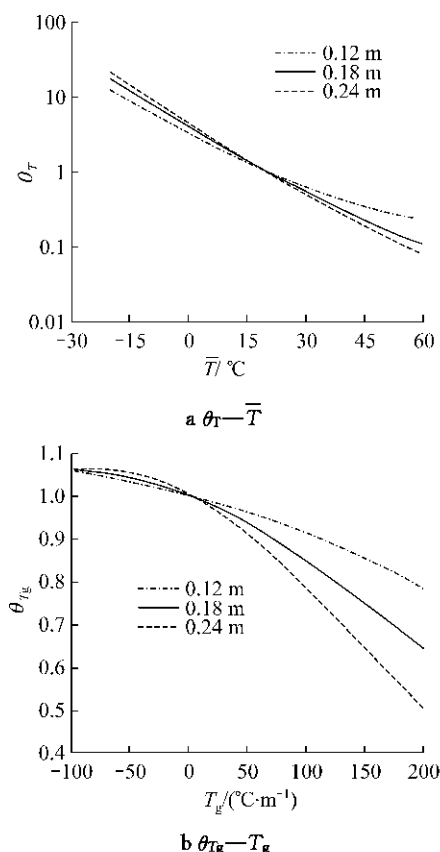


图1 面层温度对其疲劳寿命的影响

Fig.1 Influence of pavement temperature on pavement fatigue life

## 2 疲劳等效温度的计算方法

任一时刻的沥青面层温度状况采用层均温度  $\bar{T}$

和层温度梯度  $T_g$  两个参数表征,因此,沥青面层层底应变  $\epsilon_{1b}$ 、层底弹性模量  $E_{1b}$  可表示为该时刻的  $\bar{T}$ ,  $T_g$  的函数. 按照疲劳损伤线性叠加的 Miner 原理,在路面整个使用期内,沥青面层的疲劳总损伤  $D_{pf}$  可近似为

$$D_{pf} = \sum_i \sum_j \frac{n_{ij}}{N_{pf,ij}} \quad (4)$$

式中:  $m_i, m_j$  分别为层均温度  $\bar{T}$  和层温度梯度  $T_g$  的分级数;  $n_{ij}, N_{pf,ij}$  分别为对应于  $\bar{T}_i$  和  $T_{g,j}$  时间段内的标准轴载作用次数和疲劳寿命.

根据积分中值定理,可找到一沿面层厚度均匀分布的温度  $T_{pef}$ , 其沥青面层的疲劳寿命  $N_{pef}$  对应累计标准轴载作用次数的疲劳损伤与式(4)中  $D_{pf}$  的相等,即

$$N_{pef} = \sum_i \sum_j n_{ij} / D_{pf} \quad (5)$$

满足式(5)的沥青面层均布温度  $T_{pef}$  可称为沥青面层疲劳等效温度. 从上述分析可知,面层疲劳等效温度  $T_{pef}$  的影响因素众多,除了复杂的路面温度场之外,还有沥青混合料弯曲疲劳方程的回归系数( $B_N, C_N$ )、BELLS 模型中的热敏系数  $\alpha$ 、路面结构参数(沥青面层厚度  $h_1$ 、面层与地基的模量比  $\lambda$  等)以及与温度状况对应的车辆荷载分布等. 但目前要明确车辆荷载在对应于  $\bar{T}_i$  和  $T_{g,j}$  时间段内的分布情况是较难实现的,因此,假设标准轴载在所有时间段内分布是均匀的,则式(4), (5)中的  $n_{ij}$  可改为对应于  $\bar{T}_i$  和  $T_{g,j}$  的时间频率,而沥青面层多年温度状况则可表征为关于  $\bar{T}_i, T_g$  的分布频谱.

### 3 全国基准疲劳等效温度

由于影响因素众多,先研究基准状况的沥青面层疲劳等效温度  $\tilde{T}_{pef}$ . 基准状态设定为:沥青面层厚度  $h_1=0.18$  m; 20 °C 的面层与地基的模量比  $\lambda_{20}=40$ ; 沥青泊松比  $\mu_1=0.25$ , 土基泊松比  $\mu_0=0.35$ ; 沥青混合料热敏系数  $\alpha=0.02$ ; 疲劳方程参数取常应变加载条件值,  $B_N=4.0, C_N=1.6$ .

根据文献[7]给出的全国 95 个地区 10 年的沥青路面温度的分布频谱,计算相应地区的面层基准疲劳等效温度. 统计分析发现,各地区的沥青层基准疲劳等效温度  $\tilde{T}_{pef}$  与该地的海拔  $H$ , 以及路表温度统计值——多年路表温度平均温度  $\mu_T$ 、路表温度标

准差  $\sigma_T$  之间具有很好的相关性,即各地区的沥青层基准疲劳等效温度  $\tilde{T}_{pef}$  可由相应地区多年路表平均温度  $\mu_T$  及面层基准状态的变温影响量  $\Delta T_p$  得到. 图 2 给出了面层基准状态的变温影响量  $\Delta T_p$  随路表温度标准差  $\sigma_T$  的变化趋势. 根据图 2, 沥青层基准疲劳等效温度  $\tilde{T}_{pef}$  回归方程式如下:

$$\begin{aligned} \tilde{T}_{pef} &= \mu_T + \Delta T_p, \\ \Delta T_p &= 0.64\sigma_T - 0.45H - 5.76 \end{aligned} \quad (6)$$

回归式(6)具有良好的精度,其近似回归残差的标准差为 0.49 °C.

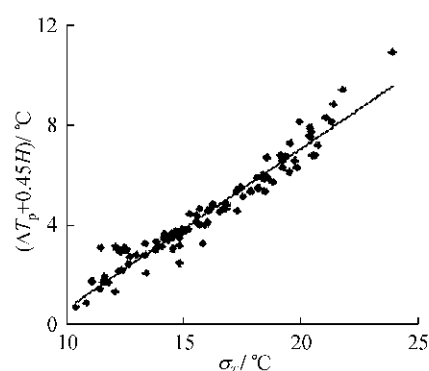


图 2  $\Delta T_p$  回归趋势线图

Fig.2  $\Delta T_p$  regression curves

根据全国 738 个地区的海拔、多年路表温度平均温度以及路表温度标准差资料[7], 采用式(6)计算全国的沥青面层基准疲劳等效温度, 并据此绘制了如图 3 所示的全国  $\tilde{T}_{pef}$  等值线图.



图 3 全国  $\tilde{T}_{pef}$  等值线图(单位: °C)

Fig.3  $\tilde{T}_{pef}$  contour map (Unit: °C)

### 4 非基准条件的修正

沥青混合料疲劳方程参数  $C_N$  取常应力加载条件值 1.6 时, 面层疲劳等效温度  $T_{pef}$  将有所降低. 全国 95 个地区的  $T_{pef}$  平均降幅约为 0.7 °C. 对不同地

区  $T_{\text{pef}}$  的影响量可通过修正面层基准状态变温影响量  $\Delta T_p$  获得

$$\begin{aligned}\Delta T_{C,p} &= k_{C,p} \Delta T_p, \\ k_{C,p} &= 5.24 - 2.65 C_N\end{aligned}\quad (7)$$

式中:  $\Delta T_{C,p}$  为考虑疲劳方程系数  $C_N$  影响的面层变温影响量,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $k_{C,p}$  为面层变温影响量的疲劳方程系数  $C_N$  的修正系数。

沥青混合料的热敏系数  $\alpha$  对面层疲劳等效温度  $T_{\text{pef}}$  影响显著,  $T_{\text{pef}}$  随着  $\alpha$  的增大而升高。就全国 95 个地区平均而言,  $\alpha$  取下限 0.015 时,  $T_{\text{pef}}$  较基准的  $\tilde{T}_{\text{pef}}$  降低 1.3  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\alpha$  取上限 0.03 时,  $T_{\text{pef}}$  较基准的  $\tilde{T}_{\text{pef}}$  升高 1.2  $^{\circ}\text{C}$ 。  $\alpha$  对  $\Delta T_p$  的修正式为

$$\begin{aligned}\Delta T_{C,\alpha,p} &= k_{\alpha,p} k_{C,p} \Delta T_p, \\ k_{\alpha,p} &= 53(\alpha - 0.02) + 1\end{aligned}\quad (8)$$

式中:  $\Delta T_{C,\alpha,p}$  为考虑疲劳方程系数  $C_N$  及热敏系数  $\alpha$  影响的面层变温影响量,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $k_{\alpha,p}$  为面层变温影响量的热敏系数  $\alpha$  的修正系数。

在沥青面层厚度  $h_1 = 0.12 \sim 0.24$  m 范围内, 面层疲劳等效温度  $T_{\text{pef}}$  随面层厚度  $h_1$  的增大先升高, 后趋于平缓。就全国 95 个地区平均而言,  $h_1 = 0.12$  m 的  $T_{\text{pef}}$  较基准的  $\tilde{T}_{\text{pef}}$  低 1.1  $^{\circ}\text{C}$ ,  $h_1 = 0.24$  m 的  $T_{\text{pef}}$  较基准的  $\tilde{T}_{\text{pef}}$  高 0.1  $^{\circ}\text{C}$ 。  $h_1$  对  $\Delta T_p$  的修正式为

$$\begin{aligned}\Delta T_{C,h,p} &= k_{h,p} k_{\alpha,p} k_{C,p} \Delta T_p, \\ k_{h,p} &= 1 + 0.4\theta_h - \theta_h^2\end{aligned}\quad (9)$$

式中:  $\Delta T_{C,h,p}$  为考虑疲劳方程系数  $C_N$ 、热敏系数  $\alpha$  及沥青层厚度  $h_1$  的面层变温影响量,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $k_{h,p}$  为面层变温影响量的面层厚度修正系数;  $\theta_h$  为面层厚度比,  $\theta_h = (h_1 - 0.18)/0.18$ 。

在面层 20  $^{\circ}\text{C}$  的模量与地基模量之比  $\lambda_{20} = 10 \sim 150$  范围内, 面层变温影响量随面层与地基模量比  $\lambda_{20}$  的增大, 呈对数增长。就全国 95 个地区平均而言,  $\lambda_{20} = 10$  的  $T_{\text{pef}}$  较基准的  $\tilde{T}_{\text{pef}}$  低 1.8  $^{\circ}\text{C}$ ,  $\lambda_{20} = 150$  的  $T_{\text{pef}}$  较基准的  $\tilde{T}_{\text{pef}}$  高 0.9  $^{\circ}\text{C}$ 。  $\lambda_{20}$  对  $\Delta T_p$  的修正式为

$$\begin{aligned}\Delta T_{C,\lambda,p} &= k_{\lambda,p} k_{h,p} k_{\alpha,p} k_{C,p} \Delta T_p + T_{\lambda,p}, \\ k_{\lambda,p}(T_{\lambda,p}) &= a_p \ln(\ln \lambda_{20}) + b_p, \\ \hat{\lambda}_{20} &= \frac{E_{20}(1 - \mu_0^2)}{E_0(1 - \mu_1^2)}\end{aligned}\quad (10)$$

式中:  $\Delta T_{C,\lambda,p}$  为考虑疲劳方程系数  $C_N$ 、热敏系数  $\alpha$ 、沥青层厚度  $h_1$ 、模量比  $\lambda_{20}$  的面层变温影响量,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $k_{\lambda,p}$  为面层变温影响量的模量比修正系数;  $T_{\lambda,p}$  为面层变温影响量的模量比修正量,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\mu_1, \mu_0$  分别为沥青面层和土基模量泊松比;  $a_p, b_p$  为回归系数, 当 10

$\leq \lambda_{20} \leq 150$  时,  $k_{\lambda,p}$  对应的回归系数  $a_p = 0.48, b_p = 1.43$ ;  $T_{\lambda,p}$  对应的回归系数  $a_p = 1.37, b_p = -1.86$ 。

综上所述, 综合考虑各影响因素的面层疲劳等效温度可通过对面层基准疲劳等效温度  $\tilde{T}_{\text{pef}}$  (查图 3) 修正得到, 修正式如下:

$$\begin{aligned}T_{\text{pef}} &= k\tilde{T}_{\text{pef}} + (1-k)\mu_T + T_{\lambda,p}, \\ k &= k_{\lambda,p} k_{h,p} k_{\alpha,p} k_{C,p}\end{aligned}\quad (11)$$

其近似计算残差标准差不超过 0.71  $^{\circ}\text{C}$ 。

在沥青路面疲劳寿命计算与分析时, 面层疲劳等效温度可转换成面层疲劳等效温度当量系数  $\theta_p$  来表征, 其定义为面层疲劳等效温度对应的面层模量  $E(T_{\text{pef}})$  与标准温度为 20  $^{\circ}\text{C}$  时的面层模量  $E_{20}$  之比

$$\theta_p = \frac{E(T_{\text{pef}})}{E_{20}} = 10^{a(20 - T_{\text{pef}})} \quad (12)$$

## 5 与其他方法的对比

AASHTO 与 Shell 沥青路面设计方法中的沥青面层疲劳方程形式同式(1), 疲劳方程参数  $B_N, C_N$  分别为 3.95, 1.28 (AASHTO)<sup>[1]</sup> 和 5.0, 1.8 (Shell)<sup>[2]</sup>。按此两组参数和我国 30 个大中城市的 10 年温度场数据, 分别计算上述基准条件下, AASHTO 与 Shell 沥青路面设计方法对应的沥青面层疲劳等效温度  $T_{A,\text{pef}}, T_{S,\text{pef}}$ 。与本文的  $\tilde{T}_{\text{pef}}$  相比, AASHTO 的面层疲劳等效温度  $T_{A,\text{pef}}$  稍低 0.1 ~ 0.8  $^{\circ}\text{C}$ , 30 个城市的平均值低 0.4  $^{\circ}\text{C}$ ; Shell 的面层疲劳等效温度  $T_{S,\text{pef}}$  则约高 1  $^{\circ}\text{C}$  左右, 见图 4。

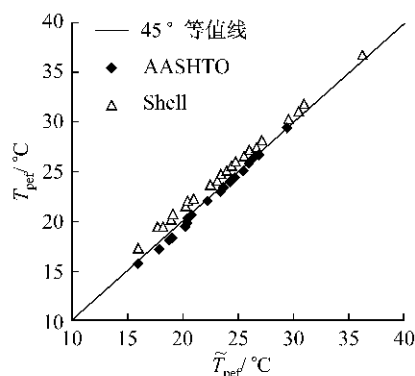


图4 与 AASHTO 法和 Shell 法结果的对比图

Fig.4 Comparative graphs among AASHTO, Shell and 45° line methods

SHRP 沥青路面设计方法直接给出了面层疲劳等效温度  $T_{\text{SH,pef}}$  的预估公式<sup>[6]</sup>

$$T_{\text{SH,pef}} = 0.8T_{\text{mmp}} - 2.7 \quad (13)$$

式中:  $T_{\text{mmp}}$  为面层 1/3 深度处的年均温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

根据式(13)计算上述我国 30 个城市的面层疲劳等效温度  $T_{SH,pef}$ ,  $T_{SH,pef}$  与本文  $\tilde{T}_{pef}$  的对比如图 5 所示,图中纵坐标为两者之差  $\tilde{T}_{pef} - T_{SH,pef}$ . 由图 5 可知,本研究得到的面层疲劳等效温度  $\tilde{T}_{pef}$  明显高于采用式(13)得到的面层疲劳等效温度  $T_{SH,pef}$ ,随着地域的不同,两者的差约在 15~22 °C 之间变化.

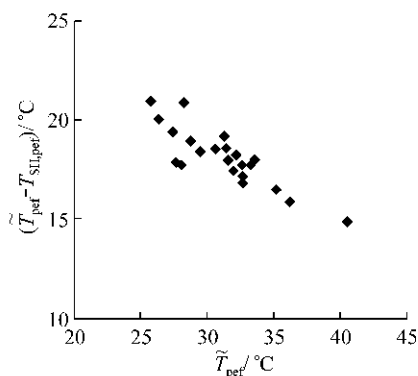


图 5  $\tilde{T}_{pef} - T_{SH,pef}$  关系图

Fig. 5  $\tilde{T}_{pef} - T_{SH,pef}$  graph

SHRP 设计方法中,沥青混合料的疲劳方程参数  $B_N=3.62$ ,  $C_N=2.72^{[11]}$ . 图 6 给出了根据该组参数计算得到的面层疲劳寿命与层均温度之间的关系. 由图 6 可知,层均温度越低,沥青面层疲劳寿命越小,在疲劳损伤等效时,低温段的权重就越大,最终得到的面层疲劳等效温度会明显低于面层年均温度,这一规律与图 1 的结果刚好相反.

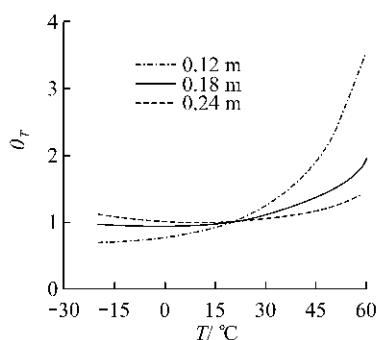


图 6 SHRP 方法的  $\theta_T - T$  关系图

Fig. 6  $\theta_T - T$  graph based on SHRP method

若按照 SHRP 疲劳方程参数,采用第 2 节中的方法计算全国 30 个典型地区的沥青面层基准疲劳等效温度  $\tilde{T}_{SH,pef}$ ,与式(13)得到的  $T_{SH,pef}$  相比,两者相差非常小,平均偏差为 0.12 °C,偏差的均方差为 1.1 °C,见图 7. 这说明,本文与 SHRP 方法得到的面层疲劳等效温度之间的差异是由于面层疲劳预估方

程参数取值不同造成的,而等效温度计算方法是可靠的.

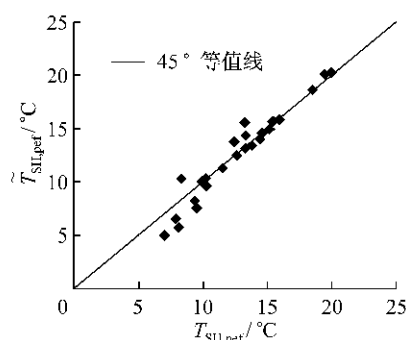


图 7  $\tilde{T}_{SH,pef} - T_{SH,pef}$  对比图

Fig. 7  $\tilde{T}_{SH,pef} - T_{SH,pef}$  graph

## 6 结论

(1) 沥青面层疲劳寿命随沥青面层的层均温度  $\bar{T}$  升高而迅速降低,沥青面层在高温状态比低温状态更易发生疲劳破坏;沥青面层的温度梯度对沥青面层疲劳寿命的影响较小.

(2) 根据疲劳损伤等效原则,提出了沥青面层疲劳等效温度的计算方法.

(3) 设定了一“基准”状态的沥青路面结构,根据全国 95 个地区的沥青面层温度分布频谱数据,建立了沥青面层基准疲劳等效温度  $\tilde{T}_{pef}$  与地区的海拔  $H$ 、多年路表温度均值  $\mu_T$ 、标准差  $\sigma_T$  之间的回归关系,据此推算得到了全国 738 个地区的沥青面层基准疲劳等效温度值  $\tilde{T}_{pef}$ ,进而绘制了可供设计采用的全国沥青面层基准疲劳等效温度  $\tilde{T}_{pef}$  等值图.

(4) 通过引入沥青混合料疲劳方程参数修正系数  $k_{C,p}$ 、热敏系数修正系数  $k_{a,p}$ 、模量比修正系数  $k_{\lambda,p}$ ,以及沥青面层层厚修正系数  $k_{h,p}$ ,并总结和归纳了沥青面层疲劳等效温度随它们的变化规律,从而建立了各种情况下的沥青面层疲劳等效温度近似计算式.

(5) 通过与 AASHTO, Shell, SHRP 设计方法中温度对沥青疲劳寿命影响的处理方式和结果的对比分析,验证了本文面层疲劳等效温度计算方法和结果的可靠性.

## 参考文献:

- [1] ARA Inc. ERES Division. Guide for mechanistic-empirical

- design of new and rehabilitated pavement structures [R]. Washington D C: Transportation Research Board, National Research Council, 2004.
- [2] Shell International Ltd. Shell pavement design manual: asphalt pavements and overlays for road traffic [R]. London: Shell International Ltd., 1981.
- [3] 孙立军. 沥青路面结构行为理论 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.  
SUN Lijun. Asphalt pavement structural behavior theory [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [4] 栗培龙, 张争奇, 王秉刚. 考虑有效温度及荷载的沥青混凝土路面车辙等效温度研究 [J]. 公路, 2011(2): 6.  
LI Peilong, ZHANG Zhengqi, WANG Binggang. Research on rutting equivalent temperature of asphalt concrete Pavement considering effective temperature and load [J]. Highway, 2011, (2): 6.
- [5] M W Witczak. Effective temperature analysis for permanent deformation of asphaltic mixtures. SHRP A-401 MIDAS study [R]. Washington D C: National Research Council, 1992.
- [6] SHRP. The Superpave mix design manual for new construction and overlays [R]. Washington D C: National Research Council, 1994.
- [7] 邹晓翎. 基于标准气象数据的路面温度场研究 [D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2010.  
ZOU Xiaolin. Study on pavement temperature field based on standard meteorological data [D]. Shanghai: College of Transportation Engineering of Tongji University, 2010.
- [8] 姚祖康. 沥青路面设计指标和参数研究 [R]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2008.  
YAO Zhukang. Study on designing indexes and parameters for asphalt pavement [R]. Shanghai: College of Transportation Engineering of Tongji university, 2008.
- [9] Erland O L, Stubspad R, Briggs R, et al. Temperature predictions and adjustment factors for asphalt pavement [M]. Washington D C: Federal Highway Administration, 2000.
- [10] 吁新华. 沥青路面等效温度研究 [D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2011.  
YU Xinhua. Study on equivalent temperatures of asphalt pavement [D]. Shanghai: College of Transportation Engineering of Tongji University, 2011.
- [11] Witczak M W, Von Quintus H L, Schwartz C W. Super support and performance model management: evaluation of the SHRP performance models system [R]. Seattle: University of Washington, 1997.

#### (上接第 190 页)

- [7] 黄宏伟, 陈龙, 胡群芳, 等. 隧道及地下工程的全寿命风险管理 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
HUANG Hongwei, CHEN Long, HU Qunfang, et al. Life-cycle risk management of tunnel and underground engineering [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [8] Xue J. On multistate system analysis [J]. IEEE Transactions on Reliability, 1985, R-34(4): 329.
- [9] 曾亮, 郭欣. 多状态系统故障树的一种生成方法 [J]. 系统工程学报, 1998, 13(4): 74.  
ZENG Liang, GUO Xin. Method of fault tree construction for multistate system [J]. Journal of Systems Engineering, 1998, 13(4): 74.
- [10] Tang Z, McCabe B. Construction of Bayesian belief networks for decision making in engineering [C]// 6th Construction Specialty Conference, Toronto: [s. n.], 2005: 1-10.
- [11] 汪涛, 廖彬超, 马昕, 等. 基于贝叶斯网络的施工安全风险概率评估方法 [J]. 土木工程学报, 2010, 43: 384.  
WANG Tao, LIAO Binchao, MA Xin, et al. Using Bayesian Network to develop a probability assessment approach for construction safety risk [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43: 384.
- [12] 周建方, 唐椿炎, 许智勇. 贝叶斯网络在大坝风险分析中的应用 [J]. 水利发电学报, 2001, 29(1): 192.  
ZHOU Jianfang, TANG Chunyan, XU Zhiyong. Application of Bayesian Networks to dam risk analysis [J]. Journal of hydroelectric Engineering, 2001, 29(1): 192.
- [13] 周红波. 基于贝叶斯网络的深基坑风险模糊综合评估方法 [J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(9): 1473.  
ZHOU Hongbo. Risk assessment of deep foundation pit by using fuzzy comprehensive evaluation method based on Bayesian Networks [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009, 43(9): 1473.
- [14] 周忠宝. 基于贝叶斯网络的概率安全评估方法及应用研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学信息系统与管理学院, 2006.  
ZHOU Zhongbao. Research on methods and application of probabilistic safety assessment based on Bayesian Networks [D]. Changsha: School of Information System & Management of National University of Defense Technology, 2006.
- [15] Murphy K P. The Bayes net toolbox for matlab [J]. Computing Science and Statistics, 2001 (33): 331.
- [16] WANG Jie, GUO Liangjie, LI Yanqing. Risk analysis of a subway tunnel shield based on a fuzzy synthetic approach [C]// 2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering, [S. L.]: IEEE, 2011: 4438.
- [17] 赵延喜, 徐卫亚. 基于 AHP 和模糊综合评判的 TBM 施工风险评估 [J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 793.  
ZHAO Yanxi, XU Weiya. Risk assessment of TBM construction for tunnels based on AHP and fuzzy synthetic evaluation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 793.
- [18] Kevin Murphy. Bayes net toolbox for Matlab [EB/OL]. [2007-08-19]. <http://code.google.com/p/bnt/>.