

沥青面层的车辙等效温度

吁新华^{1,2}, 谈至明¹, 胡洪龙¹, 王力¹

(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: 分析了沥青面层车辙寿命与面层温度的均值和梯度的相互关系, 讨论了沥青面层压应力分布规律. 根据全国 90 个地区多年的路面温度场数据, 对沥青面层车辙等效温度进行了计算和分析, 总结了沥青面层车辙等效温度与年均气温、月均气温的年极差之间的回归关系, 据此推算得到了全国 738 个地区的沥青面层基准车辙等效温度值, 并绘制了可供设计采用的全国沥青面层基准车辙等效温度等值图, 归纳了非基准条件的各因素对沥青面层车辙等效温度的影响规律, 给出了它们的近似计算式. 最后, 通过对比分析, 验证了沥青面层车辙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; 面层车辙; 等效温度

中图分类号: U416

文献标志码: A

Rutting Equivalent Temperature for Asphalt Pavement

YU Xinhua^{1,2}, TAN Zhiming¹, HU Honglong¹, WANG Li¹

(1. 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 rutting life of asphalt pavement and its average temperature, temperature gradient were analyzed. The distribution of compression stresses for asphalt surface layer was discussed. Based on the pavement temperature field data collected at 90 areas in China over the years, the corresponding rutting equivalent temperatures were calculated and analyzed, the correlation between the standard rutting equivalent temperature and annual average temperature and difference of the highest and lowest monthly average temperature were summarized. Hence, the standard rutting equivalent temperatures for asphalt pavement at 738 areas in China were calculated, for design purpose, a contour map of the standard rutting equivalent temperatures was initially proposed. Moreover, the influences of various factors in the non-standard conditions on the rutting equivalent temperature for asphalt pavement were analyzed, and a set of

approximate formulas were given accordingly. At last, through a comparative study, the reliability of the calculation method and corresponding results were validated.

Key words: pavement engineering; asphalt pavement; pavement rutting; equivalent temperature

众所周知, 沥青混合料的力学性能随温度的变化而变化, 因而沥青路面温度场的分布情况对沥青路面抗车辙能力有显著影响, 车辙的产生和发展过程都与沥青路面的温度场分布状况密切相关^[1-3]. 关于路面温度场对沥青路面抗车辙性能的影响, 国内外很多机构和学者做了大量的研究, 技术路线可分为 3 类: 第 1 类是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 叠加原理进行车辙深度的预估, 如美国各州公路和运输工作者协会(AASHTO), 采用该方法制定了力学-经验路面设计指南(MEPDG)^[4]; 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, 如同济大学的孙立军、长安大学的栗培龙等^[5-6]; 第 3 类是经验法, 即根据大量、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等效温度, 然后再根据等效温度进行相应的沥青路面车辙深度计算, 如美国的 Witczak、美国公路战略研究计划(SHRP)以及 Shell 设计方法等^[7-9]. 第 1 类方法计算繁琐且需要获得精确的路面温度场资料, 而我国目前沥青路面温度场数据库尚未建立, 采用此方法较困难; 第 2 类方法较第 1 类简单, 但因面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 类方法概念明晰, 使用简单, 但

收稿日期: 2013-06-19

基金项目: 国家交通运输部西部交通建设科技项目(200831800099)

第一作者: 吁新华(1983—), 男, 工学博士, 主要研究方向为道路工程. E-mail: shike914@163.com

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才具有较好的可靠性和适用性,难以在我国直接推广。

本文根据我国路面温度场的研究成果^[10],在第 1 类方法的基础上,采用第 3 类方法中的沥青面层车辙等效温度概念,总结归纳了全国不同地区、不同路面结构条件的沥青面层车辙等效温度规律,给出了它们的回归关系式,为沥青路面设计时考虑温度对沥青路面车辙的影响提供了精确且简便的依据。

1 沥青面层的车辙预估与车辙寿命

在 Shell 设计方法中,1 次轴载作用下的车辙深度预估公式为^[9]

$$\Delta R = C_m \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_i}{S_i} \cdot \delta h_i \quad (1)$$

式中: ΔR 为 1 次轴载作用下的车辙深度,mm; C_m 为动态修正系数; σ_i 为第 i 层内竖向平均压应力,MPa; S_i 为第 i 层沥青混合料的黏滞劲度,MPa; δh_i 为第 i 层厚度,mm。

当考虑路面深度 z 处、时刻 t 时的温度场分布 $T(z, t)$ 时,引入沥青面层内竖向压应力分布函数 $\sigma(z)$ 及与温度场分布对应的动态弹性模量 $E(T(z, t))$,上述车辙深度预估公式可改写成^[11]

$$\Delta R = C_m \int_0^{h_1} \frac{\sigma(z)}{E(T(z, t))} dz \quad (2)$$

与温度场分布对应的动态弹性模量 $E(T(z, t))$ 采用 BELLS 修正模型表示

$$E(T(z, t)) = E_{20} \times 10^{\alpha(20-T(z, t))} \quad (3)$$

式中: E_{20} 为 20 °C 时沥青混合料的模量,MPa; α 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, α 值在 0.015~0.030 之间^[12]。

重复轴载作用下的车辙总深度 R 为

$$R = \Delta R \cdot N^r \quad (4)$$

式中: N 为重复轴载作用次数; r 为回归系数,一般在 0.3~0.5 之间^[9]。

车辙寿命的定义为沥青路面在荷载重复作用下达到给定临界车辙深度时,荷载重复的作用次数。则给定容许车辙深度 R_0 条件下,某一应力状态和动态弹性模量下的允许轴载作用次数 N_{rt} 为

$$N_{rt} = f(\Delta R) = \left(\frac{R_0}{\Delta R}\right)^{1/r} \quad (5)$$

道路等级为高速公路和一级公路时,车辙容许深度 R_0 取 5~10 mm^[13]。

2 沥青面层压应力分布规律

先研究面层模量均匀的双层路面结构在双圆荷载作用下面层竖向压应力沿层厚的分布规律。路面结构及外荷载的示意图见图 1。图中, q 为均布荷载; δ 为荷载圆半径; E_1, E_0 分别为面层和地基模量; μ_1, μ_0 分别为面层和地基泊松比; h_1 为面层厚度; z 为面层厚度坐标,原点设于面层层底。

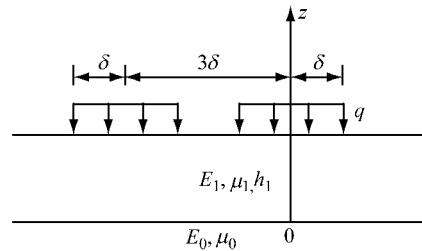


图 1 双层路面结构及外荷载示意图

Fig.1 Two-layer pavement structure and loads

在上述诸多物理量中,对面层竖向压应力沿层厚的分布规律有较大影响的可合并为 2 个参数:面层厚度与荷载圆半径之比 h_1/δ ,面层与地基的“广义”模量比 $\lambda = \hat{E}_1/\hat{E}_0$,其中 $\hat{E}_i = E_i/(1-\mu_i^2)$ 。在面层厚度与荷载圆半径之比 h_1/δ 相同的条件下,不同模量比 λ 的面层内压应力 $\sigma(z)$ 分布曲线的形状相似,压应力随深度增加而下降的速率在层中部较快,靠近层顶和层底处较慢,层底压应力随模量比的增大而减小,如图 2 所示,图中面层与地基层间光滑, $h_1/\delta=2$ 。

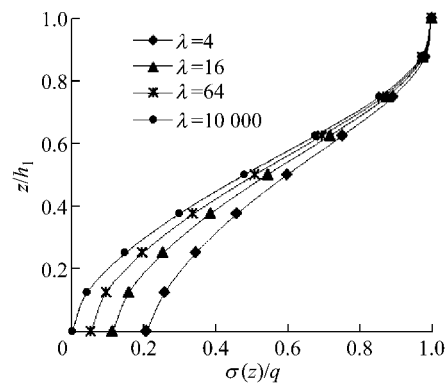


图 2 面层压应力的分布规律

Fig.2 Distribution of compressive stresses for asphalt surface layer

为了消去层底压应力大小对压应力分布的影响,将面层压应力分布函数 $\sigma(z)$ 进行如下处理:

$$\left. \begin{aligned} \sigma(z) &= q[\hat{\sigma}(z)(1-\xi) + \xi] \\ \xi &= \frac{\sigma_b}{q} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: $\hat{\sigma}(z) \in [0, 1]$ 为消去层底压应力影响的压应力分布函数,可称之为面层压应力分布形状函数; $\xi \in (0, 1)$ 为面层底部压应力与表面压应力的比值,可称之为层底压应力折减系数; σ_b 为面层层底压应力。

经上述处理后,不同模量比 λ 的面层压应力分布形状函数 $\hat{\sigma}(z)$ 基本重叠在一起,其微小差距可予以忽略,见图 3。 $\hat{\sigma}(z)$ 沿层厚的分布规律可统一用一个三次多项式来近似

$$\hat{\sigma}(z) = \left(\frac{A(z/h_1)^2 + (z/h_1) + B}{A + B + 1} \right) \frac{z}{h_1} \quad (7)$$

式中: A, B 均为回归系数。

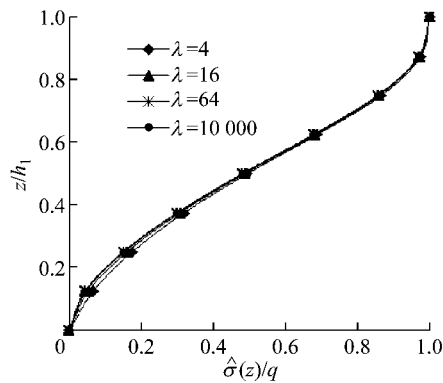


图 3 $\hat{\sigma}(z)$ 的分布规律

Fig. 3 Distribution of $\hat{\sigma}(z)$

式(7)中的回归系数 A, B 与面层厚度同荷载圆半径之比 h_1/δ 有关。当 $h_1/\delta=0.5 \sim 4.0$,面层与基层层间连续或光滑时, A, B 与 h_1/δ 关系见下式:

$$\left. \begin{aligned} A &= 0.132 \frac{h_1}{\delta} - 0.931 \\ B &= -0.061 \frac{h_1}{\delta} + 0.064 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

层底压应力折减系数 ξ 与路面结构的刚度半径 l_x 和荷载圆半径 δ 有关。当 $\lambda=5 \sim 150, h_1/\delta=0.5 \sim 4.0$ 时,折减系数 ξ 和 l_x/δ 之间存在良好的相关关系,其表达式为

$$\xi = \alpha_z \left(\frac{l_x}{\delta} + \beta_z \right)^{-2.11} \quad (9a)$$

$$l_x = \sqrt[3]{\frac{2D_1(1-\mu_0^2)}{E_0}} \quad (9b)$$

式中: α_z, β_z 均为回归系数,层间光滑时 $\alpha_z=1.48, \beta_z=1.23$,层间连续时 $\alpha_z=2.17, \beta_z=1.24$; D_1 为面层的弯曲刚度。

路面结构有基层时,基层对面层压应力分布形

状函数 $\hat{\sigma}(z)$ 的影响较小,因此,3层结构时的 $\hat{\sigma}(z)$ 仍可用2层结构的回归式(7)和式(8)近似。基层对面层层底压应力折减系数 ξ_T 的影响明显,基层的存在会使面层压应力随层厚而衰减速率减小,基层刚性越大,衰减速率越小。

3层结构中面层层底压应力折减系数 ξ_T 较2层结构中面层层底压应力的折减系数 ξ 要大一些,为此定义了一个小于1的参数 φ

$$\varphi = \frac{1-\xi}{1-\xi_T} \quad (10)$$

参数 φ 与面层和基层的厚度、模量等因素有关,在 $\hat{E}_1/\hat{E}_2=0.2 \sim 12.5, h_1=0.5 \sim 0.4 \text{ m}, h_2=0.2 \sim 0.6 \text{ m}$ 范围内,有近似回归式

$$\begin{aligned} \varphi &= A_\varphi \left[\frac{\hat{E}_1^{1/2}}{\hat{E}_2} \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^{1/2} \right]^{-B_\varphi} \\ A_\varphi &= 1 - 0.335 \left(\frac{h_1}{\delta} \right)^{-1.735} \\ B_\varphi &= 0.257 \left(\frac{h_1}{\delta} \right)^{-1.783} \end{aligned} \quad (11)$$

基层层底压应力的折减系数 ξ_s 仍可按式(9a)计算,但面层弯曲刚度 D_1 需改成面层和基层的总弯曲刚度 D_g ,然后求得面层和基层的总弯曲刚度半径 l_x ,代入式(9a)得到 ξ_s 。

3层或多层结构时,路面结构总的弯曲刚度 D_g 可按照文献[14]中的方法,按照弯曲刚度等效原则将3层或多层结构合并成2层结构,然后再通过式(9)~(11)确定层底压应力折减系数 ξ 。

3 温度分布对车辙寿命的影响

选取2层路面结构和3层路面结构,分析车辙寿命随沥青层平均温度 \bar{T} 以及温度梯度 T_g 的变化规律。

温度对沥青面层车辙寿命 N_{rt} 的影响通过定义二个相对比 $\theta_{\bar{T}}, \theta_{T_g}$ 来考察。 $\theta_{\bar{T}}$ 为层温度梯度 $T_g=0$ °C·m⁻¹条件下,不同层均温度 \bar{T} 的面层车辙寿命与 $\bar{T}=20$ °C的面层车辙寿命之比; θ_{T_g} 为温度沿层厚线性分布且层均温度 $\bar{T}=20$ °C条件下,不同层温度梯度 T_g 的面层车辙寿命与层温度梯度 $T_g=0$ °C·m⁻¹的面层车辙寿命之比,即

$$\theta_{\bar{T}} = \frac{N_{rt}}{N_{rt}|_{\bar{T}=20^\circ\text{C}}}, \quad \theta_{T_g} = \frac{N_{rt}}{N_{rt}|_{T_g=0^\circ\text{C}}} \quad (12)$$

$\theta_{\bar{T}}$ 用于考察层均温度对沥青面层车辙寿命的影响, θ_{T_g} 用于考察层温度梯度对沥青面层车辙寿命的影响, $\theta_{\bar{T}}$ 与 \bar{T} 的关系及 θ_{T_g} 与 T_g 的关系如图 4 所示. 图 4 计算条件为: 2 层路面结构时面层厚度 $h_1 = 0.12, 0.18, 0.24$ m, $\lambda_{20} = 40$ (λ_{20} 为 20 °C 时面层模量 E_{20} 与路基模量 E_0 之比), 沥青混合料的热敏系数 $\alpha = 0.02$, 沥青层泊松比 $\mu_1 = 0.15$, 路基泊松比 $\mu_0 = 0.25$, 面层与地基之间层间光滑, 荷载为标准轴载 (轴重 100 kN); 3 层路面结构时 $\eta_{20} = 1.8$ (η_{20} 为 20 °C 时面层模量 E_{20} 和基层模量 E_2 的比), 基层厚度 $h_2 = 0.3$ m, 基层泊松比 $\mu_2 = 0.2$, 面层与基层之间层间连续, 基层和地基之间层间光滑, 其他参数与 2 层路面结构相同.

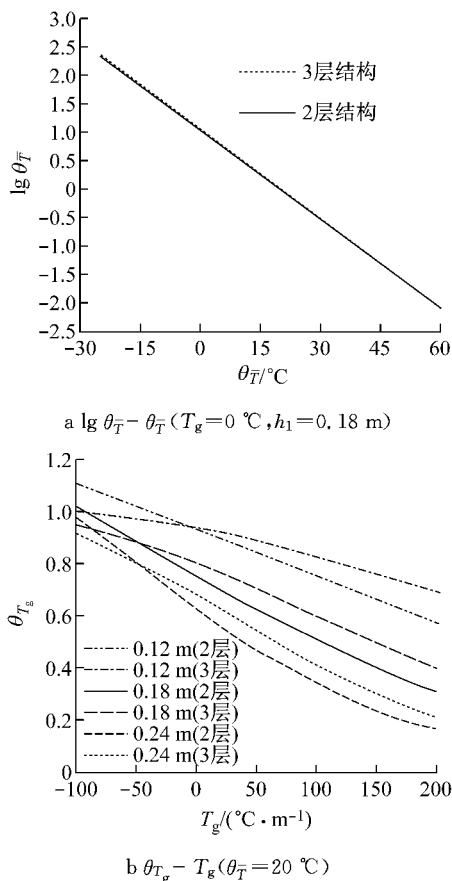


图 4 面层温度对其车辙寿命的影响

Fig. 4 Influence of pavement temperature on pavement rutting life

由图 4a 可知, 车辙寿命随着沥青层平均温度的升高而迅速降低 (不同厚度的趋势线之间的差异很小, 图中仅给出 $h_1 = 0.18$ m 的情况). 这是由于沥青层平均温度升高后, 沥青混合料的模量下降, 其抗车辙变形能力下降, 相同的荷载条件下, 荷载每次作用下的塑性变形增大, 达到临界车辙深度的荷载作用

次数迅速减小. 由图 4b 可知, 当 $h_1 = 0.12 \sim 0.24$ m 时, 车辙寿命随沥青层温度梯度 T_g 的增大而减小, 厚度越大, 减小幅度越大; 相同厚度条件下, 2 层路面结构的车辙寿命减小速率比 3 层路面结构的快. 当 $T_g = -100 \sim 200$ °C \cdot m $^{-1}$, 温度梯度对车辙寿命的影响幅度在 80% 以内. 总体而言, 沥青层平均温度和温度梯度均会给沥青路面的抗车辙性能带来影响, 但沥青层平均温度的影响更为显著.

4 全国基准车辙等效温度

根据文献[15]中等效温度的概念和计算方法, 车辙等效温度可按照沥青面层的车辙寿命 N_{ref} 对对应累计标准轴载作用次数的车辙损伤与按照车辙损伤线性叠加的 Miner 原理计算得到的沥青面层的车辙总损伤 D_{r} 相等的原理得到. 面层车辙等效温度 T_{ref} 的影响因素众多, 除了复杂的路面温度场之外, 还有车辙方程指数 r 、热敏系数 α 、路面结构参数等. 可先研究一基准状况的沥青面层车辙等效温度 \tilde{T}_{ref} , 设定“基准”条件为: 沥青面层厚度 $h_1 = 0.18$ m, 基层厚度 $h_2 = 0.40$ m, 车辙方程指数 $r = 0.4$, 沥青混合料热敏系数 $\alpha = 0.02$, 20 °C 时沥青混合料模量 $E_{20} = 8$ GPa, 面层泊松比 $\mu_1 = 0.3$, 粒料基层的模量 $E_2 = 400$ MPa, 基层泊松比 $\mu_2 = 0.3$, 土基模量 $E_0 = 80$ MPa, 土基泊松比 $\mu_3 = 0.35$, 路面结构层层间光滑.

根据文献[10]给出的全国 90 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车辙等效温度. 统计分析发现, 各地区的沥青层基准车辙等效温度 \tilde{T}_{ref} 与该地的常年气象观测值——年均气温 \bar{T}_a 和月均气温的年极差 $\Delta T_{a, \text{mon}}$ (即最热月平均气温和最冷月平均气温之差, 通常为 7 月和 1 月平均气温之差) 之间具有很好的相关系数, 它们的回归方程式如下:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{T}_{\text{ref}} &= 0.0028x_T^2 + 0.952x_T + 6.853 \\ x_T &= \bar{T}_a + 0.3\Delta T_{a, \text{mon}} \end{aligned} \right\} (13)$$

回归式(13)具有良好的精度, 其近似回归残差的标准差为 0.36 °C.

根据全国 738 个地区的年均气温 \bar{T}_a , 月均气温的年极差资料, 采用式(13)计算全国的沥青面层车辙等效温度, 并据此绘制了如图 5 所示的全国 \tilde{T}_{ref} 等值线图.

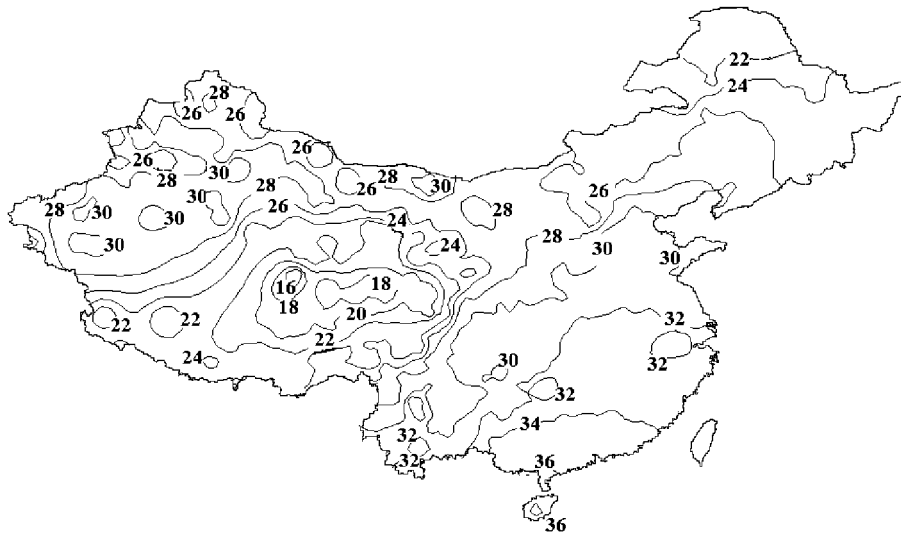


图 5 全国 \tilde{T}_{ref} 等值线图(单位:°C)

Fig.5 \tilde{T}_{ref} contour map in China(unit:°C)

5 非基准条件的修正

车辙方程指数 r 、沥青混合热敏系数 α 和路面结构参数对沥青面层车辙等效温度 T_{ref} 的影响均可采用下式近似:

$$T_{ref} = C \tilde{T}_{ref}^{1+D} \quad (14)$$

式中, C, D 均为回归系数。

大量的计算结果表明,车辙方程指数 r 、沥青混合料热敏系数 α 、弹性模量比 $\lambda_E (E_{20}/E_2)$ 和面层厚度 h_1 对等效温度的影响较大, r 在 0.30~0.50 变化, α 在 0.015~0.030 变化, λ_E 在 0.9~30.0 变化, h_1 在 0.12~0.24 m 范围内,等效温度 T_{ref} 变化幅度分别约为 6.0, 4.5, 1.0, 3.0 °C。基层厚度 h_2 对等效温度的影响较小,可以忽略。 T_{ref} 的影响可归为 4 个影响近似相互独立的参量:车辙方程指数 r 、热敏系数 α 、面层厚度 h_1 和模量比 λ_E 。因此,回归系数 C, D 可表示为

$$C = C_r C_\alpha C_{h_1} C_E$$

$$D = D_r + D_\alpha + D_{h_1} + D_E \quad (15)$$

式中: $C_r, D_r, C_\alpha, D_\alpha, C_{h_1}, D_{h_1}, C_E, D_E$ 是分别与 r, α, h_1 和 λ_E 有关的系数。

C_i 随着 α, h_1 和 λ_E 的增加或 r 的减小而增大。 D_i 随着 α, h_1 和 λ_E 的增加或 r 的减小而减小。 $R, \alpha, h_1, \lambda_E$ 变化范围分别为 0.3~0.5, 0.015~0.030, 0.12~0.24 m, 0.9~30.0。与此对应的 C_i 变化范围分别为: C_r (1.64~0.67), C_α (0.58~2.02), C_{h_1} (0.84~1.02), C_E (0.83~1.29)。 D_i 变化范围分别

为: D_r (-0.12~0.10), D_α (0.14~-0.17), D_{h_1} (0.05~-0.01), D_E (0.05~-0.07)。在一般情况下,可采用三点插值方法估计 C_i, D_i 。在精度要求较高时,可按下式计算 C_i, D_i :

$$C_E = \left(\frac{\lambda_E}{20}\right)^{0.058}, \quad D_E = -0.015 \ln\left(\frac{\lambda_E}{20}\right)$$

$$C_{h_1} = 0.57\left(\frac{\lambda_{h_1}}{0.18}\right)^2 - 0.44\left(\frac{\lambda_{h_1}}{0.18}\right) + 0.87,$$

$$D_{h_1} = 0.17\left(1 - \frac{\lambda_{h_1}}{0.18}\right)$$

$$C_\alpha = \left(\frac{\lambda_\alpha}{0.02}\right)^{1.80}, \quad D_\alpha = -0.447 \ln\left(\frac{\lambda_\alpha}{0.02}\right)$$

$$C_r = \left(\frac{\lambda_r}{0.4}\right)^{0.44}, \quad D_r = 0.437 \ln\left(\frac{\lambda_r}{0.4}\right)$$

6 与其他方法的对比

AASHTO 采用的车辙深度预估公式为

$$R = \sum_1^n \epsilon_{p_i} \delta h_i$$

$$\epsilon_{p_i} = 10^{-3.1552(1.8T_i + 32)^{1.734} N^{0.39937} \epsilon_{zi}} \quad (16)$$

式中: ϵ_{p_i} 为亚层 i 的塑形变形; ϵ_{zi} 为亚层 i 的弹性变形,用多层弹性层状体系程序计算; T_i 为亚层 i 的温度, °C; N 为荷载作用次数^[4]。

根据式(16)得到车辙深度后,同样可根据中值定律,由式(16)反算出 AASHTO 计算方法的车辙等效温度 $T_{A,ref}$ 。

Shell 设计方法根据沥青层的有效黏度等效原则和长期观测结果,建立了平均气温与沥青层等效

温度之间的关系图, Shell 车辙等效温度 $T_{S,ref}$ 预估可根据气温查图得到^[9].

SHRP 采用的车辙等效温度 $T_{AH,ref}$ 预估方程为^[7-8]

$$T_{AH,ref} = 30.8 - 0.12z_{cr} + 0.92\bar{T}_a \quad (17)$$

式中: \bar{T}_a 为根据历史资料计算的年平均气温设计值, °C; z_{cr} 为沥青混合料面层临界计算深度, mm.

式(17)也是基于车辙损伤等效原则得出的, 但 SHRP 采用永久剪切应变来预估车辙深度, 而本文是采用通过压缩应变来计算车辙深度, 两者计算方法存在本质差别.

根据全国 30 个大中城市 10 年温度场数据, 分别计算基准条件下, 上述 3 种不同计算方法的车辙等效温度, 并与本文的 \tilde{T}_{ref} 进行对比, 对比结果见图 6. 从图中可以看出, 虽然 4 种计算车辙等效温度过程或方法存在较大差别, 但 4 种方法得到车辙等效温度非常接近. 图中 AASHTO 车辙等效温度 $T_{A,ref}$ 、Shell 车辙等效温度 $T_{S,ref}$ 、SHRP 车辙等效温度 $T_{SH,ref}$ 与本文车辙等效温度 \tilde{T}_{ref} 之差的均值分别为 0.22, 0.50, -0.25 °C; AASHTO 车辙等效温度 $T_{A,ref}$ 、Shell 车辙等效温度 $T_{S,ref}$ 、SHRP 车辙等效温度 $T_{SH,ref}$ 与本文车辙等效温度 \tilde{T}_{ref} 之差的均方差分别为 0.75, 0.25, 1.40 °C.

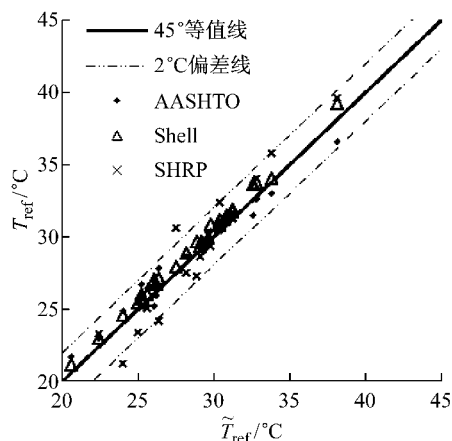


图 6 与 AASHTO 法、Shell 法和 SHRP 法结果的对比图
Fig.6 Comparative graphs among AASHTO, Shell, SHRP and 45° line methods

7 结论

(1) 车辙寿命随着沥青层平均温度 \bar{T} 的升高而迅速降低; 车辙寿命随沥青层温度梯度 T_g 的增大

而减小, 一般来说, 温度梯度对车辙寿命的影响幅度在 80% 以内. 总体而言, 沥青层平均温度和温度梯度均会给沥青路面车的抗车辙性能带来影响, 但沥青层平均温度的影响更为显著.

(2) 总结了沥青面层压应力分布规律, 根据车辙损伤等效原则, 提出了沥青面层车辙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 90 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车辙等效温度 \tilde{T}_{ref} 与年均气温 \bar{T}_a 、月均气温的年极差 $\Delta T_{a,mon}$ 之间的回归关系, 据此推算得到全国 738 个地区的沥青面层基准疲劳等效温度值 \tilde{T}_{ref} , 进而绘制了可供设计采用的全国沥青面层基准车辙等效温度 \tilde{T}_{ref} 等值图.

(4) 总结了非基准状态下各因素对沥青面层车辙等效温度的影响规律, 建立了非基准状态下沥青面层车辙等效温度的近似计算式.

(5) 通过与 AASHTO, Shell, SHRP 设计方法得到的车辙等效温度的对比分析, 验证了本文的沥青面层车辙等效温度计算方法和结果的可靠性.

参考文献:

- [1] AASHTO. AASHTO guide for design of pavement structures [R]. Washington D C: AASHTO, 1993.
- [2] NCHRP. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures [R]. Washington D C: NCHRP, 2004.
- [3] 俞方英. 基于沥青路面温度场的车辙标准研究[D]. 西安: 长安大学, 2007.
YU Fangying. Research on rutting standard based on asphalt pavement temperature field [D]. Xi'an: Chang'an University, 2007.
- [4] ERES Division of ARA Inc. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures [R]. Washington D C: National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, 2004.
- [5] 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.
- [6] 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. Rutting equivalent temperature of asphalt concrete pavement consideration on effective temperature and load [J]. Highway, 2011(2): 6.