

港区沥青铺面面层的等效温度

胡洪龙, 谈至明

(同济大学, 交通运输工程学院, 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 不同于常规公路路面结构所承受的车辆荷载, 港区铺面结构具有承受装运机械荷载类型多、荷载量大、运行速度低和重复作用次数少等特点。根据港区沥青铺面设计准则, 分别基于面层层底弯拉应变、半刚性基层层底弯拉应力、土基顶面压应变等3个设计指标和 Miner 损伤叠加原理, 介绍了港区沥青铺面面层等效温度概念及其计算方法; 建立了基准状况下面层等效温度与地区海拔、铺面表面温度年均值及其标准差之间的回归式; 为了简便实用, 又建立了基准面层等效温度与2个常见的气象参数即年平均气温和月平均气温年极差之间的回归关系式; 绘制了全国基准面层等效温度等值线图; 总结了非基准各因素对面层等效温度的影响规律, 给出了近似修正式。

关键词: 港区; 铺面工程; 面层等效温度; 疲劳寿命; 修正系数; Miner 叠加原理

中图分类号: U416

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2014)03-0037-05

沥青铺面是港区铺面结构的主要类型之一, 它主要用于港区道路、杂货堆场通道等场合。沥青面层混合料是感温材料, 其力学性能与温度状况有关。国内外学者都重视铺面结构温度状况及对沥青面层力学性能影响的研究。美国 AASHTO 2002 的路面设计方法中提供了一个温度场计算模块, 将分析周期内的实时沥青面层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^[1]。M. W. Witczak 等根据大量长期的试验数据, 给出了路面结构疲劳等效温度与相关的气候参数、沥青路面结构参数之间的经验公式, 并用于 SHRP 设计方法中^[2-3]。Shell 公司根据沥青层的有效黏度等效原则, 建立了平均气温与沥青层等效温度之间的关系, 据此提出了基于气温和沥青面层厚度的等效温度推算方法^[4]。E. O. Lukanen 等利用试验数据, 建立沥青层温度预估模型, 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^[5-6]。国内谈至明等人对沥青路面温度场进行了系统的研究, 总结了全国沥青路面温度场分布规律, 提出了公路沥青路面面层等效温度概念, 给出了基于不同等效原则的沥青路面面层等效温度的计算公式, 最后引入疲劳寿命修正系数, 直接预估路面的疲劳寿命, 研究结果将被新版《公路沥青路面设计规范》采用^[7-9]。

与公路路面结构所承受的车辆荷载相比, 港区铺面结构所承受的装运机械荷载具有类型多、荷载量大、运行速度低和重复作用次数少等特点, 因此, 不能照搬照抄公路沥青路面的研究成果, 有必要对其进行系统研究。

1 沥青面层等效温度概念和计算方法

柔性基层的沥青铺面结构设计采用控制沥青面层层底弯拉应变 ε_{1b} 以防止沥青面层疲劳开裂, 控制土基顶面压应变 ε_z 以避免土基出现过量的塑性变形。半刚性基层沥青铺面结构, 由于基层刚度较大, 沥青面层层底弯拉应变和土基顶面压应变均较小而不必考虑, 但半刚性基层容易因弯拉应力过大而造成结构断裂, 因

收稿日期: 2013-11-10

基金项目: 交通运输部水运工程建设项目

作者简介: 胡洪龙(1988-), 男, 安徽蚌埠人, 博士研究生, 主要从事铺面工程研究。E-mail: 2007weishenme@sina.com

此,在设计时需对基层底部弯拉应力 σ_{2b} 值加以控制。

上述3个结构设计指标的结构疲劳寿命 N_{pef} 按下式计算:

$$N_{\text{pef}} = A_{\varepsilon} \varepsilon_{1b}^{-\beta_{\varepsilon}} E_1^{-m} \quad (1)$$

$$N_{\text{pef}} = A_{\sigma} (\sigma_{2b})^{-\beta_{\sigma}} \quad (2)$$

$$N_{\text{pef}} = A_z \varepsilon_z^{-\beta_z} \quad (3)$$

式中: $A_i (i = \varepsilon, \sigma, z)$ 均为材料的回归系数; m 与疲劳方程回归模型的实验室加载条件有关,当加载条件为常应变控制时, $m = 1.60$,当加载条件为常应力控制时, $m = 1.15$,本文 m 取 1.15 ; $\beta_{\varepsilon}, \beta_{\sigma}, \beta_z$ 为疲劳指数。沥青混凝土疲劳指数 β_{ε} 变化范围约 $3.9 \sim 4.3$ ^[10]; 半刚性材料疲劳指数 β_{σ} 约 $8 \sim 16$,材料刚性越大则 β_{σ} 值越大^[11]; 土基塑性疲劳指数 β_z 一般约 $3.7 \sim 5.0$ ^[12],我国《公路沥青路面设计指南》中推荐 4.83 ^[13]。

沥青混合料的弹性模量 E 与温度 T 之间的关系采用 BELLS 模型形式^[5]表示:

$$E(T) = E_{20} \times 10^{-\alpha(T-20)} \quad (4)$$

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,与沥青混合料配合比及原材料的热力学性质有关, α 值约为 $0.015 \sim 0.03$ 。

沥青面层温度状况可用层均温度 \bar{T} 和层温度梯度 T_g 两个参数表征。由于温度分布不均匀,使得沥青面层模量沿厚度方向不均等,此时装运机械荷载作用下沥青铺面结构力学响应,即式(1)中的力学指标值可按下述2种方法得到,即将面层细划分成若干亚层,亚层模量用其中点温度对应的模量近似,然后应用弹性层状体系求解;或应用弯曲刚度等效原则将模量不均匀的面层换算成厚度相同、模量单一的等效均匀层,再按文献[8]和[9]中给出的沥青面层层底弯拉应变、半刚性基层层底弯拉应力和路基压应变近似公式计算得到。

对于铺面结构设计指标的疲劳极限状态而言,按照 Miner 损伤叠加原理,在整个铺面结构使用期内,结构疲劳总损伤 D_{pf} 可表示为

$$D_{\text{pf}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k \frac{n_{ij}}{N_{\text{pf},ij}} \quad (5)$$

式中: m, k 分别为沥青面层层均温度 \bar{T}_i 、层温度梯度 $T_{g,j}$ 的分级数; n_{ij} 为沥青面层层均温度为 \bar{T}_i 、层温度梯度为 $T_{g,j}$ 的分布频率; $N_{\text{pf},ij}$ 为沥青面层层均温度为 \bar{T}_i 、层温度梯度为 $T_{g,j}$ 所对应的结构疲劳寿命。

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} ,其结构疲劳寿命 N_{pef} 对应累计标准轴载作用次数的疲劳损伤与式(5)中的 D_{pf} 相等,即:

$$N_{\text{pef}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k n_{ij} / D_{\text{pf}} \quad (6)$$

满足式(6)的沥青面层均匀温度 T_{pef} 可称为沥青面层等效温度。

2 基准等效温度

影响沥青面层等效温度值大小的因素众多,有铺面结构各层厚度、各层材料力学参数和沥青混合料热力学参数。为此,先讨论“基准”条件下的沥青面层的基准等效温度。设定“基准”条件下各材料参数为:沥青面层厚度 $h_1 = 0.18 \text{ m}$; 基层厚度 $h_2 = 0.40 \text{ m}$; 沥青混合料热敏系数 $\alpha = 0.02$, 疲劳指数 $\beta_{\varepsilon} = 4$, 20°C 模量 $E_{20} = 4000 \text{ MPa}$, 泊松比 $\nu_a = 0.3$; 粒料基层的模量 $E_2 = 400 \text{ MPa}$, 泊松比 $\nu_2 = 0.3$; 半刚性基层疲劳指数 $\beta_{\sigma} = 12$, 模量 $E_2 = 7000 \text{ MPa}$, $\nu_a = 0.2$; 土基塑性疲劳指数 $\beta_z = 5$, 模量 $E_0 = 80 \text{ MPa}$; 泊松比 $\nu_2 = 0.35$; 沥青面层与粒料基层间光滑,与半刚性基层间连续; 基层与土基间光滑。

根据文献[7]给出的全国90个地区多年沥青面层温度年分布频谱,计算了基准沥青铺面结构和材料条件下的面层等效温度 \bar{T}_{pef} 值。 \bar{T}_{pef} 随着该地区的路表年均温 $\mu T_s (^{\circ}\text{C})$ 及其路表温度年标准差 $\sigma T_s (^{\circ}\text{C})$ 的增加而增加,随海拔高程 $H (\text{km})$ 的上升而下降。根据全国具有代表性的90个地区的气象、气候参数, \bar{T}_{pef} 与 $\mu T_s, \sigma T_s, H$ 之间的回归式如下:

$$\bar{T}_{\text{pef}} = a_{T1}x_{T1}^2 + b_{T1}x_{T1} + c_{T1}, \quad x_{T1} = \mu T_s + a_{x1}\sigma T_s - b_{x1}H \quad (7)$$

式中: $a_{T1}, b_{T1}, c_{T1}, a_{x1}, b_{x1}$ 均为回归系数, 其值见表 1。

按式(7)求出的基准等效温度 \bar{T}_{pef} , 精度虽高, 但由于式中的自变量: 路表温度的年均值 μT_s 、标准差 σT_s 需通过文献[7]中提供的以气象数据和海拔高度为自变量的近似回归式计算求得, 使用并不十分方便。为此, 对基准等效温度 \bar{T}_{pef} 进行重新回归, 自变量改为常年气象观测值: 年均气温 μT_a (°C), 月均气温的年极差 $\Delta T_{a, \text{mon}}$ (°C), 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:

$$\bar{T}_{\text{pef}} = a_{T2}x_{T2}^2 + b_{T2}x_{T2} + c_{T2}, \quad x_{T2} = \mu T_a + \alpha_{x2}\Delta T_{a, \text{mon}} \quad (8)$$

式中: $a_{T2}, b_{T2}, c_{T2}, \alpha_{x2}$ 均为回归系数, 其值见表 1。

表 1 回归系数

Tab. 1 Regression coefficients

参数	等效温度/°C		
	面层	基层	土基
a_{T1}/a_{T2}	0.005 96/0.012 3	0.012 04/0.018 6	0.004 54/0.011 4
b_{T1}/b_{T2}	0.618/0.681	0.404/0.500	0.654/0.663
c_{T1}/c_{T2}	4.19/6.63	6.29/8.07	1.96/7.24
a_{x1}/α_{x2}	0.15/0.033	-0.04/-0.051	0.55/0.144
b_{x1}	0.54	-0.25	0.52
回归残差标准差	0.36/0.60	0.44/0.57	0.29/0.75

3 全国基准等效温度等值线图

文献[7]根据全国 90 个地区的气象、气候参数给出了路表温度的年均值 μT_s 、标准差 σT_s 与气象、气候参数的近似关系式为

$$\mu T_s = 1.12\mu T_a + 0.56H + 4.0, \quad \sigma T_s = 0.95\sigma T_a + 0.44H + 6.3 \quad (9)$$

式中: μT_a 为多年平均气温 (°C); σT_a 为多年平均气温标准差 (°C)。

根据式(7)和(9)计算得到所收集到的多年平均气温和海拔高度的全国 738 个地区的基准面层等效温度 \bar{T}_{pef} , 据此绘制了如图 1 所示的全国 \bar{T}_{pef} 等值线图。在对基准面层等效温度 \bar{T}_{pef} 值精度要求不高时, 可直接查图取值。

由图 1(a) 可看出, 全国陆域面层疲劳寿命的基准面层等效温度 \bar{T}_{pef} 约 (7~31)°C, 呈南高北低之势, 长江以南、秦岭以东 \bar{T}_{pef} 高于 21°C, 东北地区 \bar{T}_{pef} 一般小于 17°C, 西部随着海拔高程增加而减小, 青藏高原的 \bar{T}_{pef} 值比同纬度的东部沿海地区小 (8~12)°C, 新疆中部沙漠地区的 \bar{T}_{pef} 值为局部高值区, 较周边高 2°C 左右。图 1 表明, 土基疲劳寿命的 \bar{T}_{pef} 最大, 面层疲劳寿命的 \bar{T}_{pef} 次之, 基层疲劳寿命的 \bar{T}_{pef} 最小, 它们之间的差异分别在 (1~5)°C 和 (0~2)°C 之间。



图 1 全国陆域面层、基层及土基疲劳寿命基准等效温度 \bar{T}_{pef} 等值线 (单位: °C)

Fig. 1 Contour maps of standard equivalent temperature of surface layer, base and subgrade fatigue life \bar{T}_{pef} in China (unit: °C)

4 非基准状态的修正

为研究铺面结构及材料参数对面层等效温度的影响,铺面结构及材料参数范围取为: $\alpha=0.015 \sim 0.030$; $\beta_e=3.9 \sim 4.3$, $\beta_\sigma=8 \sim 16$, $\beta_z=3.5 \sim 7$, $E_{20}=2\ 000 \sim 10\ 000$ MPa, $h_1=0.12 \sim 0.24$ m, $h_2=0.2 \sim 0.6$ m, 粒料基层模量 $E_2=300 \sim 600$ MPa, 半刚性基层模量 $E_2=5\ 000 \sim 9\ 000$ MPa, $E_0=40 \sim 120$ MPa。

大量计算结果表明:面层等效温度 T_{pef} 随着热敏系数 α , 疲劳指数 β , 面层厚度 h_1 和 20°C 的沥青模量 E_{20} 的增加而增大, 随着基层厚度 h_2 和模量 E_2 的增大而减小, 土基模量 E_0 对 T_{pef} 影响很小, 可予忽略。研究发现, 可通过引入 4 个近似相互独立比值: 热敏系数 α , 疲劳指数 β , 面层和基层的厚度比 $\lambda_h (h_1/h_2)$ 和弹性模量比 $\lambda_E (E_{20}/E_2)$ 来表征铺面结构及材料参数对等效温度的影响, 等效温度 T_{pef} 与它们之间的关系可用式 (10) 来表示:

$$T_{\text{pef}} = C_\alpha C_\beta C_{\lambda_h} C_{\lambda_E} \bar{T}^{1+D_\alpha+D_\beta+D_{\lambda_h}+D_{\lambda_E}} \quad (10)$$

式中: $C_\alpha, D_\alpha, C_\beta, D_\beta, C_{\lambda_h}, D_{\lambda_h}, C_{\lambda_E}, D_{\lambda_E}$ 为分别与 α, β, λ_h 和 λ_E 有关的系数。

$C_i (i = \alpha, \beta, \lambda_h \text{ 和 } \lambda_E)$ 随着热敏系数 α , 疲劳指数 β , 厚度比 λ_h 和模量比 λ_E 的增大而增大, D_i 随着热敏系数 α , 疲劳指数 β , 厚度比 λ_h 和模量比 λ_E 的增大而减小。 C_i 和 D_i 值可按表 2 给出的表达式及回归系数计算。基层与土基层间接触状态对面层等效温度的影响较小, 可予忽略。

表 2 C_i 和 D_i 表达式及回归系数

Tab. 2 Expression form of C_i, D_i and regression coefficients

等效对象	C_i				D_i					
	表达式	a_α	a_β	a_{λ_E}	a_{λ_h}	表达式	b_α	b_β	b_{λ_E}	b_{λ_h}
面层弯拉应变	$C_i = a_i \ln\left(\frac{i}{\bar{i}}\right) + 1$	1.83	3.28	0.88	1.11	$D_i = b_i \ln\left(\frac{i}{\bar{i}}\right)$	-0.53	-0.89	-0.18	-0.26
土基压应变		1.89	1.66	0.69	1.54		-0.49	-0.47	-0.15	-0.52
基层弯拉应力	$C_i = \left(\frac{i}{\bar{i}}\right)^a$	2.27	1.89	1.87	5.14		-0.76	-0.59	-0.55	-1.55

注: \bar{i} 为标准状态时 α, β, λ_h 和 λ_E 取值。

5 结 语

(1) 根据疲劳损伤等效原则, 分别提出了基于面层层底弯拉应变、半刚性基层层底弯拉应力及土基顶面压应变指标的港口沥青铺面面层等效温度概念及计算方法。

(2) 按照简便实用原则, 回归分析了基准面层等效温度 \bar{T}_{pef} 与年均气温 μT_a , 月均气温的年极差 $\Delta T_{a, \text{mon}}$ 之间近似关系式。不同等效原则时的 \bar{T}_{pef} 之间有较好的线性关系。

(3) 根据基准等效温度 \bar{T}_{pef} 与 $H, \mu T_s$ 及 σT_s 之间的回归式推算得到全国 738 个地区的 \bar{T}_{pef} , 并据此绘制了全国 \bar{T}_{pef} 等值线图。在对 \bar{T}_{pef} 值精度要求不高时, 可直接查图取值。

(4) 总结了非基准状况下各因素对面层等效温度 \bar{T}_{pef} 的影响规律, 给出了非基准状况下 \bar{T}_{pef} 的近似计算式。

参 考 文 献:

- [1] ERES Division of ARA, Inc. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures [R]. Washington D C: Transportation Research Board, 2004.
- [2] WITCZAK M W. Effective temperature analysis for permanent deformation of asphaltic mixtures [R]. Washington D C: Strategic Highway Research Program of National Research Council, 1992.
- [3] SHRP. The superpave mix design manual for new construction and overlays [R]. Washington D C: Strategic Highway Research Program of National Research Council, 1994.

- [4] Shell International Ltd. Shell pavement design manual; asphalt pavements and overlays for road traffic [R]. London: Shell International Ltd, 1981.
- [5] LUKANEN E O, STUBSTAD R, BRIGGS R C. Temperature predictions and adjustment factors for asphalt pavements [R]. Washington D C: The Federal Highway Administration, 2000.
- [6] PARK D-Y, BUCH N, CHATTI K. Effective layer temperature prediction model and temperature correction via falling weight deflectometer deflections [J]. Journal of the Transportation Research Board, 2001, 1764: 97-111.
- [7] 邹晓翎, 谈至明. 《基于多指标的沥青路面结构设计方法研究》报告: 路面温度场研究 [R]. 上海: 同济大学, 2011. (ZOU Xiao-ling, TAN Zhi-ming. Report on a study of structural design procedure of asphalt pavements: research on pavement temperature field [R]. Shanghai: Tongji University, 2011. (in Chinese))
- [8] 吁新华. 沥青路面等效温度的研究 [D]. 上海: 同济大学, 2011. (YU Xin-hua. A study of equivalent temperatures of asphalt pavement [D]. Shanghai: Tongji University, 2011. (in Chinese))
- [9] 胡洪龙, 谈至明. 路面结构的土基应力应变近似计算 [J]. 同济大学学报, 2013, 41(4): 542-546. (HU Hong-long, TAN Zhi-ming. Approximate calculation of subgrade stresses and strains of pavement structure [J]. Journal of Tongji University, 2013, 41(4): 542-546. (in Chinese))
- [10] 虞将苗. 《基于多指标的沥青路面结构设计方法研究》报告: 沥青层疲劳开裂预估模型研究 [R]. 广州: 华南理工大学, 2010. (YU Jiang-miao. Report on a study on structural design procedure of asphalt pavements: research on prediction model of fatigue crack of asphalt layer [R]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [11] The Portland Cement Association. Thickness design for concrete highway and street pavements [M]. Skokie: The Portland Cement Association, 1984.
- [12] 姚祖康. 沥青路面结构设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2011. (YAO Zu-kang. Structural design of asphalt pavements [M]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese))
- [13] 中交路桥技术有限公司. 公路沥青路面设计指南 [R]. 北京: 中交路桥技术有限公司, 2012. (China Communication Road and Bridge Technology Limited Company. Highway asphalt pavement design guide [R]. Beijing: China Communication Road and Bridge Technology Limited Company, 2012. (in Chinese))

Equivalent temperature for the port asphalt pavement surface course

HU Hong-long, TAN Zhi-ming

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Unlike the vehicle loading upon the conventional road pavement structure, the port pavement structure is characterized by many types of shipping mechanical loads, heavy load carrying capacity, low operating speed and having no more repetition frequency of the vehicle loading. According to the port asphalt pavement design criteria, based on the tensile strain at the bottom of the surface course, the tensile stress at the bottom of the semi-rigid course, the compression strain on the top of the subgrade and Miner damage superimposed principle, conception and calculation method of the equivalent temperature for the port asphalt pavement surface course are introduced in this study. Regression formulas among the standard equivalent temperatures for the surface course, the altitude of the asphalt pavement located, pavement surface average temperature and its standard deviation over the years are established. To be simple and practical, the regression formulas between the equivalent temperature for the surface course and two common meteorological parameters, annual average temperature and difference of the highest and lowest monthly average temperature, are established. The contour maps in China of the equivalent temperatures for the surface course are drawn. Finally, the influence rules of various factors on the equivalent temperatures for the surface course are summarized and an approximate modified formula is given.

Key words: harbor district; pavement engineering; equivalent temperature for surface course; fatigue life; modified coefficient; Miner superimposed principle