

文章编号:1671-6833(2007)02-0023-04

沥青路面多孔混凝土基层温度应力数值分析

锁利军,王秉纲,陈拴发

(长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室,陕西 西安 710064)

摘 要:为分析沥青路面多孔混凝土基层温度应力,建立多孔混凝土基层沥青路面三维有限元模型.通过数值计算方法,分析多孔混凝土基层沥青路面的温度场,提出各自然区划内的最大温度梯度变化范围.研究了面层厚度、多孔混凝土基层厚度及模量、地基模量对温度应力的影响.对条件相同的计算结果进行了对比分析,结果表明:基层温度应力随着面层厚度的增大而减小,随着基层与地基模量比的增大而增大,随着基层厚度的增大而增大.

关键词:多孔混凝土基层;沥青路面;温度场;温度应力;三维有限元;数值分析

中图分类号: U 416.01

文献标识码: A

0 引言

目前我国高等级公路以沥青混凝土路面为主.然而近几年来,相当多的沥青路面在远未达到设计年限就发生不同程度的早期破坏.究其原因,一是重载车辆的大幅度增加,二是常用的半刚性基层材料排水能力差,大气降水进入并留存于路面内部,造成沥青路面水损坏,最终导致沥青路面破坏.由此可见,基层的优劣将直接影响沥青路面的强度与稳定性.

多孔混凝土是一种少砂或无砂、空隙率较大的贫混凝土.研究表明^[1-2],多孔混凝土作为沥青路面的基层,与一般半刚性基层相比,其强度高、排水能力强、抗冲刷性能好.多孔混凝土孔洞多、空隙率大,实际应用过程中,多孔混凝土的有效空隙率一般达25%以上,此时对应的渗透系数为3.49 cm/s,说明多孔混凝土具有良好的排水性能.因此修筑多孔混凝土基层,结合其它排水设施,可以形成性能良好的内部排水系统,从而有效地缓解沥青路面的水损坏.

国内外道路学者对沥青路面的温度场和温度应力进行了广泛的研究^[3-10].文献[3]采用有限元法求解RCC-AC(碾压混凝土与沥青混凝土)复合式路面的温度场,在充分考虑各种因素的基础上,研制出温度应力计算诺模图.文献[4]利用有限元法、断裂力学理论对旧水泥混凝土路面加

铺沥青层的温度场和温度应力做了系统分析.文献[5]建立预估沥青路面温度的三维有限元模型,并通过实测证明模型的有效性和准确性;文献[6]研究全厚式沥青路面的瞬态温度变化,提出温度计算的数值模型.但以往的研究工作中未考虑多孔混凝土基层结构及其材料特性,特别是多孔混凝土基层沥青路面是一种新型路面结构,其结构设计方法目前尚属空白.因此,有必要对沥青路面多孔混凝土基层的温度场和温度应力进行分析研究,为建立这种路面的结构设计方法提供理论依据.

1 温度场分析

多孔混凝土基层沥青路面温度场的研究是进行温度应力计算的首要工作.通过三维有限元的数值方法,采用有限元软件ANSYS分两步进行分析计算:第一步为有沥青层时多孔混凝土基层的温度场分析;第二步进行结构温度应力计算,将温度场分析结果作为体荷载加到模型结构中,以求解多孔混凝土基层的温度应力.

1.1 基本理论

设路面各层接触条件良好,则在层间接触上、下两层的温度 T_i, T_{i+1} 及热流 q_i, q_{i+1} 是连续的,则在层间边界上温度函数 T 满足热传学的第四类边界条件;对于半无限空间而言,在足够深处,由于地热的作用,其温度场随时间、深度的变化均不

收稿日期:2006-12-11;修订日期:2007-03-11

作者简介:锁利军(1975-),男,河北徐水人,长安大学博士研究生,主要从事路面工程方面的研究.

明显.在沥青面层表面 $Z=0$ 处,温度函数 T_1 还应满足路表边界条件.

根据相关气象的资料分析,可以得到我国各地区正常天气时气温周期性日变化规律:气温在下午 2 点左右达到最高,在清晨 5~6 点时降至最低.气温变化的周期性和非对称性,可用三角函数的线性组合来拟合.文献[7]对此作了深入研究,得出了气温日变化规律.路表瞬时热流为:

$$q = q_1 + q_2 \tag{1}$$

$$q_1 = B \left\{ T_1 + T_2 \left[0.96 \sin \left(\frac{2\pi}{24}(t-9) \right) + 0.14 \sin \left(\frac{2\pi}{12}(t-9) \right) \right] - T_{r(z=0)} \right\} \tag{2}$$

$$q_2 = 0.021 Q_d \left(\frac{\bar{t}}{\bar{t}_{\max}} \right)^5 + Q_d \varepsilon^2 \left[0.078 \sin \left(\frac{2\pi}{24}(t-6) \right) + 0.034 \sin \left(\frac{2\pi}{12}(t-9) \right) \right] \tag{3}$$

式中: q 为路表瞬时热流, kJ ; q_1 为单位面积的路表面与空气之间的对流换热量, kJ ; q_2 为路表面获得净辐射热量(太阳日总辐射量与路表面辐射换热的差值), kJ ; B 为放热系数,取值为 $83.736 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$; T_r 为路表温度, $^\circ\text{C}$; Q_d 为太阳日总辐射量^[7], kJ ; \bar{t} 为当地计算日所在的月份的最大日照时数, h ,取多年平均值; \bar{t}_{\max} 为当地日照时间最长月份的最大日照时数, h ,取多年平均值; ε 为路表面对太阳辐射的吸收率,沥青混凝土路面取值为 0.80,多孔混凝土基层取值为 0.60; T_1 为日平均气温, $^\circ\text{C}$, $T_1 = (T_{\max} + T_{\min})/2$; T_2 为日气温振幅, $^\circ\text{C}$, $T_2 = (T_{\max} - T_{\min})/2$; T_{\max} 为日最高气温, $^\circ\text{C}$; T_{\min} 为日最低气温, $^\circ\text{C}$; t 为时间变量.

1.2 温度场分析

1.2.1 计算模型

计算模型根据结构的材料和受力特性分为 3 个层次,分别为沥青面层、多孔混凝土基层和地基.其中地基的弹性模量为路面的底基层、垫层和路基的当量值.为确定计算模型尺寸,取温度梯度为 $1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{cm}$,计算多孔混凝土基层的温度应力.三维有限元数值计算及误差分析表明,多孔混凝土基层宽度在 $5 \text{ m} \sim 6 \text{ m}$ 范围内变化对基层的最大温度应力影响微小;随着多孔混凝土基层长度增大,基层内应力的增加幅度逐渐减小,基层长度大于 6 m 时,基层内温度应力基本保持不变.据此取多孔混凝土基层的平面计算尺寸为 $5.5 \text{ m} \times 6 \text{ m}$.沥青面层平面尺寸与基层相同,地基扩大尺寸(长 \times 宽 \times 深)为 $5.5 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times 6 \text{ m}$.温度场计算

模型如图 1 所示.为满足计算精度要求,对路面结构进行网格细化,采用适当的网格梯度.

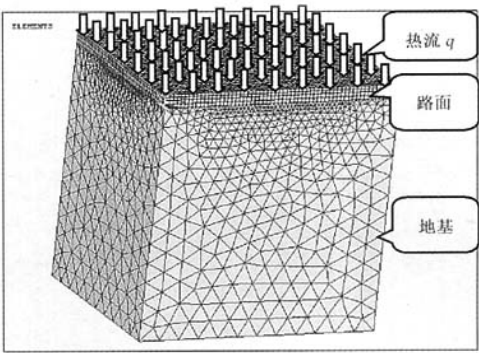


图 1 温度场计算时路面结构三维模型

Fig.1 3D finite element pavement model for calculating temperature field

1.2.2 计算参数

导热系数 ($\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$): 沥青面层取 1.2, 多孔混凝土基层取 1.1,地基取 1.0;

泊松比: 沥青面层取 0.25, 多孔混凝土基层取 0.15,地基取 0.35;

模量 (MPa): 沥青面层取 1 200, 多孔混凝土基层取 8 000~14 000,地基取 40~100;

热膨胀系数 ($^\circ\text{C}^{-1}$): 沥青面层取 21×10^{-6} , 多孔混凝土基层取 5×10^{-6} ,地基取 5×10^{-6} ;

厚度 (cm): 沥青面层取 0~20, 多孔混凝土基层取 16~30

1.2.3 温度场计算结果

参考文献[8]查得各地 6 月份日最高气温和日最低气温作为最大温度梯度的气温资料.通过三维有限元的数值方法,利用软件 ANSYS 对模型进行分析,计算多孔混凝土基层沥青路面的温度梯度.表 1 列出了沥青层厚度 0~20 cm,基层厚度 24 cm 时,各自然区划内的最大温度梯度变化范围推荐值.当基层厚度变化时,计算最大温度梯度,将其同基层厚度(24 cm)的最大温度梯度相比,得到不同基层厚度最大温度梯度修正系数.当基层厚度不等于 24 cm 时,可按表 2 进行修正.

表 2 不同基层厚度最大温度梯度修正系数

Tab.2 Corrective coefficients of maximum temperature gradient with different base thickness

h_c/cm	16	18	20	22	24	26	28	30
修正系数	1.32	1.24	1.15	1.08	1.00	0.93	0.88	0.82

表 1 不同自然区划最大温度梯度推荐值

Tab. 1 Range of maximum temperature gradient for highway's natural zoning							℃/cm
h_a /cm	II	III	IV	V	VI	VII	
0	0.81 ~ 0.86	0.87 ~ 0.92	0.86 ~ 0.90	0.83 ~ 0.88	0.85 ~ 0.89	0.90 ~ 0.96	
4	0.57 ~ 0.61	0.60 ~ 0.65	0.59 ~ 0.64	0.58 ~ 0.63	0.59 ~ 0.63	0.63 ~ 0.68	
8	0.40 ~ 0.42	0.44 ~ 0.47	0.42 ~ 0.46	0.40 ~ 0.43	0.41 ~ 0.45	0.46 ~ 0.49	
12	0.28 ~ 0.29	0.29 ~ 0.31	0.29 ~ 0.30	0.28 ~ 0.29	0.28 ~ 0.30	0.30 ~ 0.32	
16	0.28 ~ 0.29	0.29 ~ 0.30	0.29 ~ 0.30	0.28 ~ 0.29	0.28 ~ 0.29	0.30 ~ 0.31	
20	0.28	0.29	0.29	0.28	0.28	0.30	

2 温度应力计算与影响因素分析

将前述温度场分析结果作为体荷载加到模型中进行结构分析,以求解多孔混凝土基层的温度应力.温度应力计算模型及有限元网格划分与温度场分析时相同.温度应力分析时材料参数见表 3.

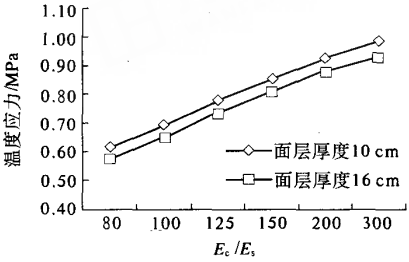
表 3 温度应力分析时材料参数

Tab. 3 Mechanical parameters for analyzing thermal stress			
材料种类	沥青面层	多孔混凝土基层	地基
泊松比	0.25	0.15	0.35
模量/MPa	1 200	8 000 ~ 14 000	40 ~ 100
厚度/cm	0 ~ 16	16 ~ 30	—

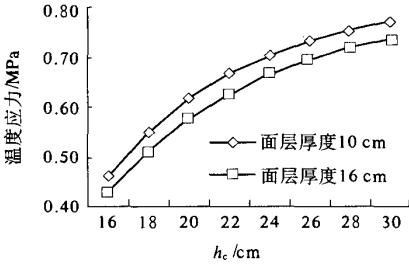
说明:地基的弹性模量为路面的底基层、垫层和路基的当量值,多孔混凝土基层与地基模量比为 80 ~ 300.

影响多孔混凝土基层温度应力的因素主要有沥青面层厚度 h_a ,多孔混凝土基层厚度 h_c ,多孔混凝土基层模量 E_c 及地基模量 E_s . 以下分析各因素对基层温度应力的影响.

从图 2 可知,当 h_c 和 E_c/E_s 一定时,多孔混凝土基层温度应力随 h_a 的增大而减小,原因是加铺沥青面层厚度增大后,基层的温度梯度大大降低,因而最终温度应力也随着沥青面层厚度的增大而有所降低.图 2(a) 还表明,当 $h_a=16$ cm, E_c/E_s 在 80 ~ 300 之间变化时对应的基层温度应力呈升高趋势变化.当 E_c/E_s 和 h_a 一定时,多孔混凝土基层的温度应力随基层厚度的增大而增大,如图 2(b) 所示.从图 3 可以看出,当 $h_a=16$ cm、 $E_c/E_s=150$ 时,多孔混凝土基层温度应力随 h_c 的增大而增大.当 $h_a=16$ cm, h_c 分别为 16、18、20、22、24、26、28、30 cm 时,随着 E_c/E_s 分别取值 80、100、125、150、200 时,多孔混凝土基层温度应力的变化趋势如图 4 所示.此时,基层温度应力随 E_c/E_s 的增大而增大.



(a) 不同基层与地基模量比



(b) 不同基层厚度

图 2 面层厚度变化对温度应力的影响

Fig. 2 Effect of surface's thickness on thermal stress

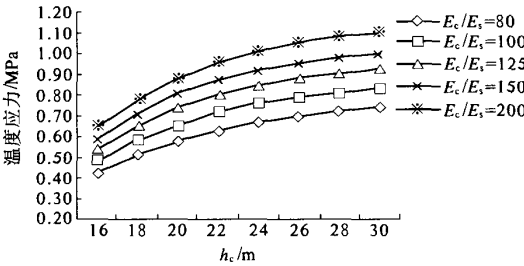


图 3 基层厚度变化对温度应力的影响

Fig. 3 Effect of base's thickness on thermal stress

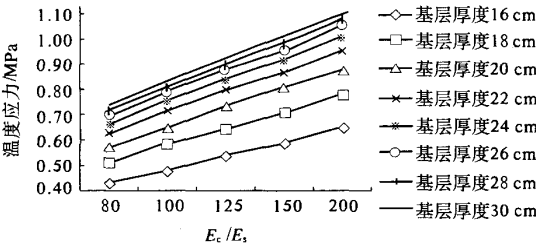


图 4 基层与地基模量比变化对温度应力的影响

Fig. 4 Effect of modulus ratio of between base and foundation on thermal stress

3 结论

(1)建立多孔混凝土基层沥青路面三维有限元模型.通过三维有限元的数值方法,利用软件 ANSYS 对模型的温度场进行分析,计算多孔混凝土基层沥青路面的温度梯度.提出各自然区划内的最大温度梯度变化范围.

(2)将温度场分析结果作为体荷载加到模型中进行结构分析,求解多孔混凝土基层的温度应力.温度应力分析表明,当面层厚度 h_a 和基层与地基模量比 E_c/E_s 一定时,基层温度应力随其厚度 h_c 的增大而增大;当基层厚度 h_c 和基层与地基模量比 E_c/E_s 一定时,随着面层厚度 h_a 的增大,基层的温度梯度大大降低,因而最终温度应力也随之有所降低;当面层厚度 h_a 、基层厚度 h_c 一定时,基层温度应力随基层与地基的模量比 E_c/E_s 的增大而增大.因此,适当地增加面层厚度 h_a 或提高地基的强度,可以降低多孔混凝土基层的温度应力;但基层厚度 h_c 增大会导致多孔混凝土基层温度应力的增大,因此在温度变化较大的地区,在设计基层厚度时,要特别考虑其对基层温度应力的影响.

参考文献:

- [1] 郑木莲.多孔混凝土排水基层研究[D].西安:长安大学,2004:20~30.
- [2] 锁利军.多孔混凝土基层沥青路面结构设计方法研究[D].西安:长安大学,2005:10~30.
- [3] 胡长顺,王秉纲.复合式路面设计原理和施工技术[M].北京:人民交通出版社,1999.
- [4] 杨斌.旧水泥混凝土路面沥青加铺层结构研究[D].西安:长安大学,2005:58~79.
- [5] MINHOTO MANUEL J C, PAIS J C. Predicting asphalt pavement temperature with a three-dimensional finite element method[J]. Transportation Research Record, 2005(1919):96~110.
- [6] MRAWIRA D M, LUCA J. Thermal properties and transient temperature response of full-depth asphalt-pavement[J]. Transportation Research Record, 2002(1809):160~169.
- [7] 韩子东.道路结构温度场研究[D].西安:长安大学,2001:30~35.
- [8] 中央气象局.中华人民共和国气候图集[M].北京:气象出版社,1988.
- [9] 仰建岗,王秉纲.沥青路面贫混凝土基层应力计算[J].郑州大学学报(工学版),2006,27(1):59~62.
- [10] 郑恒祥.钢性路面接缝间隔的模型[J].郑州大学学报(理学版),2002,34(3):60~64.

Numerical Analysis of Thermal Stress for Porous Concrete Base in Asphalt Pavement

SUO Li-jun, WANG Bing-gang, CHEN Shuan-fa

(Key laboratory of Highway Engineering in Special Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to analyze thermal stress of porous concrete base for asphalt pavement, three-dimension (3D) finite element model of asphalt pavement with porous concrete base is established by 3D finite element method in the paper. Numerical analysis, as a kind of method, is used to calculate and analyze temperature field and thermal stress of porous concrete base. As a result, range of maximum temperature gradient for highway's natural zoning was put forward. Especially, correlated factors' effect on base's thermal stress are analyzed, and correlated factors include surface course's thickness, base's thickness and modulus, foundation's modulus. Finally, calculation results with the same factors are compared, and the results indicate that thermal stress of porous concrete base increase, decrease and increase respectively with increase of base's thickness, the surface's thickness and modulus ratio of between base and foundation.

Key words: porous concrete base; asphalt pavement; temperature field; thermal stress; three-dimensional finite element; numerical analysis