

文章编号:1671-6833(2014)02-0001-05

热—结构耦合作用下沥青路面动态弯沉温度修正研究

郑元勋, 杨培冰

(郑州大学 水利与环境学院交通系, 郑州 河南 450001)

摘 要: 为了研究沥青路面温度对路面弯沉的影响, 考虑道路材料参数的温度敏感性, 建立沥青路面有限元耦合模型. 基于所建数值模型, 分析了 FWD 动态加载作用下路面弯沉在不同温度条件下的变化情况, 以及不同厚度沥青路面最大弯沉受温度的影响. 同时分析了沥青路面结构及材料参数对动态弯沉温度修正系数的影响, 最后基于耦合模型对沥青路面动态弯沉温度修正系数进行了研究, 并与试验结果进行了对比. 研究表明, 路面厚度及基层模量对温度修正系数影响较大, 基于有限元模型建立的沥青路面弯沉的温度修正系数与通过试验研究建立的温度修正系数吻合程度较高, 可以作为试验研究的有效补充.

关键词: 沥青路面; 动态弯沉; 热—结构耦合; 数值分析; 温度修正

中图分类号: U416.2 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.02.001

0 引言

沥青路面弯沉是评价路面结构力学性能的重要参考指标, 考虑到混合沥青是一种感温性材料, 其弯沉值受温度影响较大, 研究路面弯沉与路面温度之间的相关性进而进行路面弯沉温度修正是研究路面力学性能及其服务质量的前提, 鉴于此, 针对路面弯沉与路面温度相关性的研究相续开展, 大部分集中在试验研究方面, 不足之处是具有一定的区域性且花费较高. 数值方法由于建模时涉及到热—结构耦合, 以及沥青面层的材料特性, 如弹性模量、温度收缩系数和泊松比等的选取, 导致计算精度不够理想^[1-3]. 鉴于此, 考虑沥青路面材料参数受温度的影响, 建立热—结构耦合作用下沥青路面数值模型并对其有效性进行验证, 分析不同温度下沥青路面动态弯沉的变化规律, 以及沥青路面及材料参数对沥青路面弯沉温度修正系数的影响, 并对沥青路面弯沉温度修正系数进行了研究与分析.

1 热—结构耦合数值模型的建立

1.1 沥青路面材料参数的选取

沥青混合料材料参数函数关系归纳如下^[4-5]:

$$E(T) = 2\,865.89 \times 10^{-0.019\,847T}; \quad (1)$$

$$\mu(T) = 0.07 + \frac{1.96 \times 10^{0.05T}}{117.49 + 10^{0.05T}}; \quad (2)$$

$$\alpha(T) = 35.28e^{-\left(\frac{T+6.004}{36.07}\right)^2} \times 10^6. \quad (3)$$

式中: $E(T)$ 为材料弹性模量, MPA; $\mu(T)$ 为材料泊松比; $\alpha(T)$ 为材料温度收缩系数; T 为路面材料温度, $^{\circ}\text{C}$.

实验路段结构如表 1. 导温系数 α 、导热系数 λ 、比热容 c 、密度 ρ 以及导温系数 $\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p}$ (m^2/s) 的取值详见表 2.

1.2 沥青路面结构热—结构耦合过程分析

热分析采用采用 SOLID70 单元, 结构分析采用 SOLID45 单元. 采用顺序耦合法^[5-8], 既首先基于道路结构瞬态温度场计算温度应力, 然后将热分析得到的节点温度应力作为“体荷载”施加在结构分析中进行耦合, 进而实现沥青路面结构热—结构耦合作用下的动力分析.

2 热—结构耦合作用下沥青路面动态弯沉研究

2.1 热—结构耦合作用下路面沿纵向动态弯沉分析

几例模型如图 1 所示. 基于所建模型计算不

收稿日期: 2014-01-01; 修订日期: 2014-02-09

项目资助: 中国博士后面上基金资助项目(79439); 港口海岸及近海工程国家重点实验室开放基金(LP1113).

作者简介: 郑元勋(1978-), 男, 郑州大学讲师, 博士, 博士后, 主要从事道桥方向的教学及科研工作, E-mail: yxzheng@zzu.edu.cn.

同温度条件下沥青路面在 FWD 动态加载下纵向路面弯沉的变化情况,如图 2 所示^[7-9].

表 1 试验路段结构
Tab.1 The structures of expeliment pavement

材料参数		厚度/ cm	弹性模量/ MPa	泊松比	内摩擦角/ (°)	黏聚力 /MPa	密度/ (kg·m ⁻³)
面层	细粒式沥青混凝土	5	1 400	0.25	60	350	2 500
	中粒式沥青混凝土	10	1 200	0.25	60	350	2 500
上基层	50% 水泥稳定碎石	15	1 800	0.25	40	250	2400
下基层	3% 水泥稳定碎石	15	1 500	0.25	40	250	2400
底基层	水泥石灰砂砾土	20	700	0.25	40	250	2300
路基	土基	300	60	0.40	22	55	1 900

表 2 沥青路面热物理参数推荐值
Tab.2 The recommeded values of thermal parameters for asphalt pavement

材料类型		导热系数 λ/ (w·m ⁻¹ ·k ⁻¹)	比热容 c/ (kg·kg ⁻¹ ·k ⁻¹)	材料密度 ρ/ (kg·m ⁻³)	导阻系数 α/ (m ² ·h ⁻¹)
沥青	粗粒式	1.2~1.4	0.05~1.01	2 050	0.002 8
混凝	中粒式	0.9~1.2	0.90~0.95	2 100	0.002 4
土	细粒式	0.8~1.0	0.80~0.90	2 000	0.002 0
石灰水泥稳定碎石		1.1~1.3	0.75~0.89	1 800	0.002 9
二次碎石		1.0~1.1	0.79~0.87	1 800	0.002 5
二灰土		0.9~1.2	0.69~0.92	1 550	0.003 0
石灰土		1.0~1.2	0.80~0.96	1 600	0.002 8
黏土		1.30	0.86	1 700	0.003 2

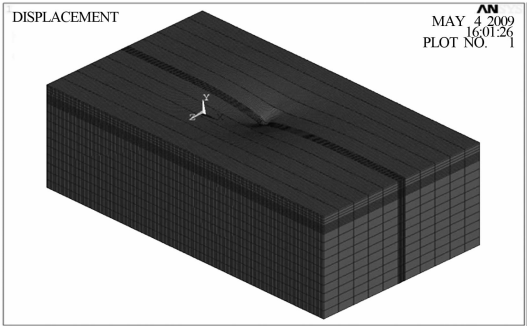


图 1 几何模型
Fig.1 Modeling

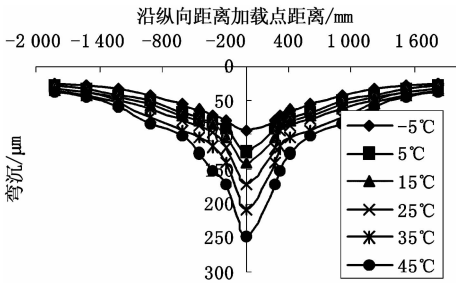


图 2 不同温度下沥青路面沿纵向计算弯沉
Fig.2 The deflections along longitudinal direction of AC pavement with different temperature

图 2 显示,沥青路面动态弯沉受温度影响明显,45℃下的动态弯沉明显大于-5℃时的弯沉

值.加载点附近温度对弯沉的影响尤为明显,随着距离的增加,影响逐渐减弱.

如图 3 为不同温度下计算弯沉与实测弯沉的比较:两者变化曲线吻合较好,误差基本在 10% 以内.

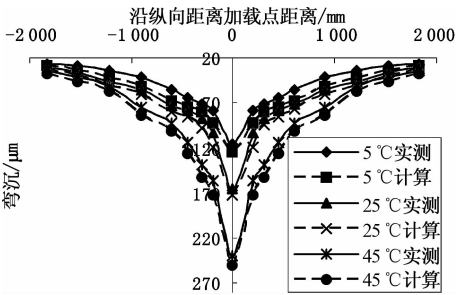


图 3 路面弯沉实测值和计算对比
Fig.3 The comparison of deflections between field measure and calculation

2.2 路面最大弯沉时程曲线受温度影响研究

FWD 加载作用下的路面最大弯沉 d_0 不同温度下时程变化曲线见图 4.

由图 4 发现, d_0 的时程曲线受温度影响显著,其随路面温度的升高呈增大的趋势,峰值增加尤其明显,且滞后时间逐渐增加.

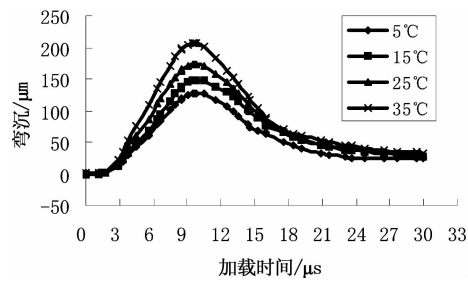


图 4 最大弯沉时程曲线与路面温度关系

Fig.4 The relation between maximum time – curve and pavement temperature

2.3 不同厚度沥青路面热—结构分析下动态弯沉分析

研究表明^[7],路面厚度是影响路面弯沉的主要原因之一,基于数值模型重点分析了 3 种厚度沥青路面弯沉的变化情况^[7-11]。

由图 5 发现,路面弯沉随温度增加而增加,一定温度下,弯沉随路面厚度增加呈逐渐减小趋势;在较低温度条件下,不同厚度路面最大弯沉间差异较大,但随路面温度的增加,差异呈减少趋势。

图 6 显示,计算最大弯沉值与实测值变化趋势具有相近的变化趋势,误差控制在 10% 之内。

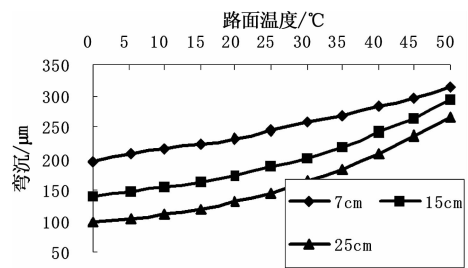


图 5 路面温度与不同厚度沥青路面最大弯沉值关系

Fig.5 The maximum deflection changing trend of different thickness AC pavement under different temperature condition

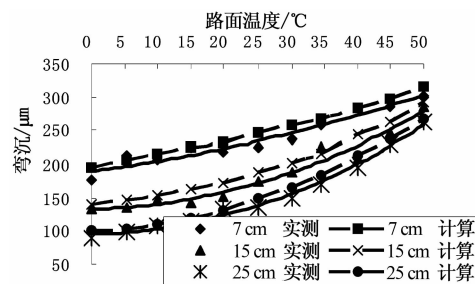


图 6 不同厚度沥青路面不同温度实测最大弯沉和计算弯沉对比

Fig.6 The comparison of max. deflections o between field measure and calculation values

3 路面温度对弯沉修正影响分析

3.1 路面参数对弯沉温度修正敏感性分析

为了研究路面结构层厚度、模量、泊松比等参数对路面弯沉温度修正的影响,分别在保持其它参数不变的情况下让某一参数在一定区间内变动,研究其对路面弯沉温度修正影响的敏感性。

图 7、图 8 显示,对路面弯沉温度修正影响较为显著的是路面厚度及土基强度。

如图 9 所示,路面厚度由 5 cm 增加到 30 cm 时,在 45 °C 温度条件下, k (温度修正系数) 的最大变幅达到 42% 左右。如图 10 所示,当路基强度由 30 MPa 增加到 100 MPa 时,在 45 °C 条件下 k 变幅高达 28% 左右。

综上,路面弯沉温度修正受面层厚度及土基模量影响较大,在实际工程中,相对路基强度路面厚度变化较大,因此,实际工程中对沥青路面弯沉进行温度修正时必须考虑路面厚度的影响。

图 12 显示:基于数值模型建立的沥青路面弯沉温度修正曲线与基于现场试验研究建立的温度修正曲线吻合程度较高,可以作试验研究的有益补充。

表 3 试验路段结构图

Fig.3 The structure of test road

路段	1	面层			44.0	路段	2	ModifiedAK13			15.0	路段	3	ModifiedAK13			25.0
		AC - 16F	3 cm	7.0				AC20	5 cm	AC20				9 cm			
		6% 水稳碎石	14 cm					AC25	6 cm					AC25	12 cm		
	基层	5% 水稳碎石	14 cm			基层	5% 水稳碎石	30 cm			基层	5% 水稳碎石	34 cm				
		4% 水稳碎石	16 cm				3% 水稳碎石	20 cm				3% 水稳碎石	20 cm				
	土基	土基				土基	soil				土基	soil					

表 4 道路结构参数变化区间
Tab.4 The change scope of pavement structures parameters

参数	路段		
	最小值	最大值	增量步
路面温度/℃	-5	45	5
沥青路面厚度/cm	5	30	5
基层模量/MPa	1 300	2 800	250
底基层模量/MPa	400	1 000	100
土基模量/MPa	30	100	10
基层厚度/cm	20	60	10
底基层厚度/cm	10	50	10
面层泊松比	0.25	0.6	0.05
基层泊松比	0.25	0.5	0.05
底基层泊松比	0.3	0.6	0.05
土基中自松比	0.3	0.6	0.05

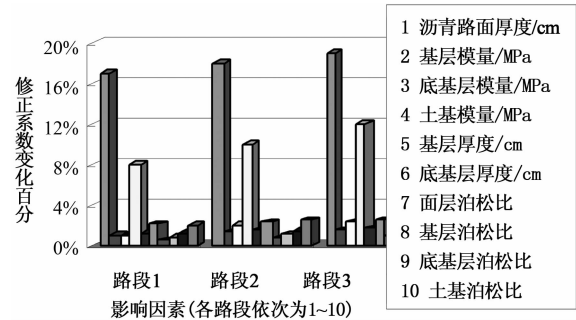


图 7 -5 °C 时路面结构参数对敏感性分析
Fig.7 The effects of parameters on temperature correction for pavement temperature is -5 °C

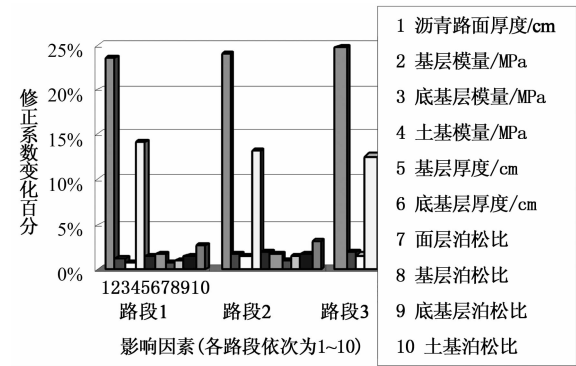


图 8 45 °C 时各参数对弯沉温度修正影响敏感性分析
Fig.8 The study of parameters temperature sensibility for at 45 °C

3.2 不同面层厚度沥青路面弯沉温度修正系数分析

基于数值模型建立的路面弯沉温度修正关系如图 11 所示. 图 12 验证了数值计算结果的有效性.

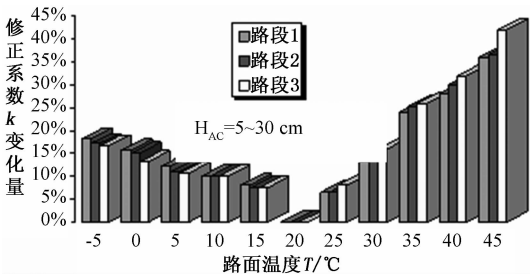


图 9 路面弯沉温度修正受面层厚度影响分析
Fig.9 The effect study of pavement thickness on deflection temperature correction

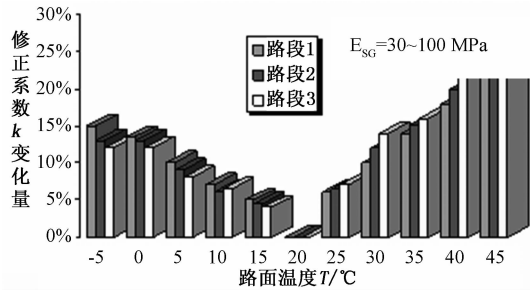


图 10 沥青弯沉温度修正受土基模量影响分析
Fig.10 The effect study of subgrade modulus on deflection temperature correction

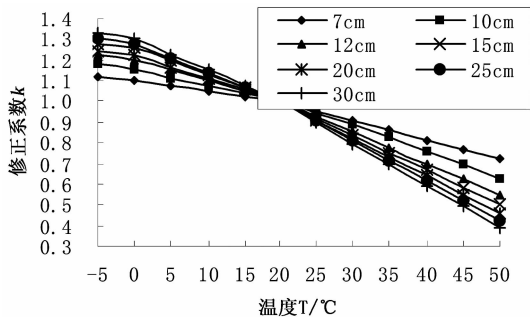


图 11 不同厚度沥青路面动态弯沉温度修正曲线
Fig.11 The temperature correction coefficients for different thickness AC pavement

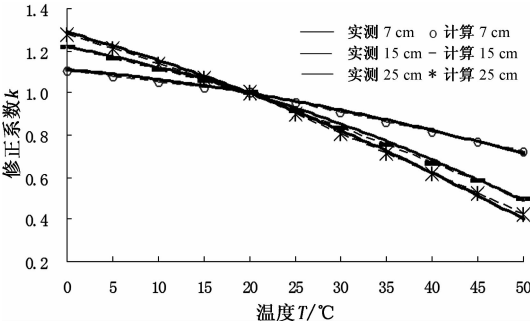


图 12 不同厚度沥青路面动态弯沉温度修正曲线比较
Fig.12 The comparison for temperature correction coefficient of different thickness AC pavement

4 结论

(1) 基于热—结构耦合有限元模型计算结果

发现,路面温度对路面动态弯沉尤其是最大弯沉值影响较为显著,且计算值和实测弯沉具有相近的变化趋势,误差基本控制在10%之内。

(2) 通过灵敏度分析发现路面弯沉温度修正受路面厚度及土基强度影响较明显。路面厚度由5 cm增加到30 cm时,在45℃温度下,温度修正系数 k 的最大变幅达到42%。当路基强度由30 MPa增加到100 MPa时,在45℃条件下 k 最大变幅达到28%。

(3) 基于数值模型建立了不同厚度沥青路面弯沉的温度修正系数,通过与试验结果比较发现,计算结果与实测结果变化趋势吻合较好,可以作为试验研究的有效补充。

参考文献:

- [1] 邵显智,邵敏华,毕玉峰,等. 沥青混合料泊松比的测试方法[J]. 同济大学学报:自然科学版,2006,34(11):1470-1474.
- [2] CORDON W A. Properties evaluation and control of engineering materials [M]. New York: McGraw - Hill, 1797.
- [3] THOMPSON M R, DEMPSEY B J. Quantitative characterization of cyclic freezing and thawing in stabilized pavement materials [J]. Highway Research Record. 1970(304):38-44.
- [4] 笠井芳夫著,张绶庆译. 材料科学概论[M]. 北京:中国建筑出版社,1981.
- [5] 周生金. 沥青路面荷载与温耦合作用疲劳特性研究[D]. 西安:长安大学交通学院,2005.
- [6] 任瑞波,谭忆秋,张肖宁. FWD 动荷载作用下沥青路面层状粘弹路表弯沉的求解[J]. 中国公路学报,2001,14(2):9-17.
- [7] ZHENG Yuan-xun, KANG Hai-gui, CAI Ying-chun, et al. Effects of temperature on the dynamic properties of asphalt mixtures [J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. E, 2010, 25(3): 533-537.
- [8] ZHENG Yuan-xun, CAI Ying-chun, ZHANG Ya-min. Study on temperature field of asphalt concrete pavement [C]. ASCE 2011 Changsha, 218:266-273.
- [9] 郑元勋. 沥青路面动态弯沉及其反算模量的温度修正研究[D]. 大连:大连理工大学土木水利学院,2010.
- [10] 康海贵,郑元勋. 实测沥青路面温度场统计规律分析[J]. 中国公路学报,2007,20(6):13-18.
- [11] 郑元勋,蔡迎春,张亚敏. 沥青路面动力特性数值模拟研究[J]. 公路,2012(3):84-88.

The Study of Dynamic Deflection Temperature Correction of Asphalt Pavement under Effect of Thermal-structure Coupling Field

ZHENG Yuan-xun, YANG Pei-bing

(School of Hydraulics and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to study the effect of asphalt pavement temperature on pavement deflection, the 3D thermal - structural coupling finite element model was established in consideration of function relation between asphalt pavement material parameters such as pavement modulus, temperature shrinkage coefficient, Poisson's ratio and pavement temperature. On the basis of this model, the changing regularity of pavement deflection under FWD dynamic loading in different temperature conditions of pavement and the temperature effect on maximum deflection of different thickness of asphalt pavement were researched. At the same time, the influence of asphalt pavement structure and material parameters on the dynamic deflection temperature correction coefficients were analyzed. Finally, deflection temperature correction coefficient of asphalt pavement was studied based on the coupled model, and the comparison with the experiment results was also done. Research shows that, the pavement thickness and modulus of base are important influence factors on the temperature correction of asphalt pavement deflection, the temperature correction coefficients calculated based on the finite element model is close to experiment value, and numerical methods can be used as the effective supplement of experimental research.

Key words: asphalt pavement, dynamic deflection, thermal-structure coupling, numerical analysis, temperature correction