

连续变温下沥青路面车辙分析与高温预警

张久鹏, 裴建中, 王秉纲

(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: 以南京地区气候特征为例, 采用连续变温车辙分析方法模拟不同温度场、不同接地压力下沥青路面车辙的变化规律, 分析影响车辙的显著因素, 并据此建立考虑气候的日车辙预估模型. 结果表明, 利用连续变温的路面车辙模拟分析方法可更符合实际地进行车辙模拟分析; 车辙主要产生于平均气温高于 20℃ 的高温季节的高温时段, 且车辙日发展规律呈“S”曲线. 因此以 5 月份平均气象条件下车辙量为基准, 提出以车辙指数 I_{RD} 为依据的高温预警等级与防护措施.

关键词: 沥青路面; 车辙; 连续变温; 车辙指数; 高温预警
中图分类号: U 416.2 **文献标识码:** A

Analysis of Asphalt Pavement Rutting in Continuously Changing Temperature Field and Early Warning for High Temperature

ZHANG Jiupeng, PEI Jianzhong, WANG Binggang

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Through the statistical meteorological conditions of Nanjing area, the temperature filed of asphalt pavement was analyzed. Based on temperature field analysis and laboratory material tests, the reasonable simulation model considering consecutively variable temperature was developed to study the effect of exterior factors (temperature and load) on rutting. The remarkable influence factors were analyzed, and then the rutting prediction model considering the climate factors was established. It is indicated that the rutting analysis close to the field condition can be simulated using the simulation method considering continuously changing temperature field; rutting usually occurs at the average daily air temperature of 20 °C or hgher, and the variety of daily rutting is a typical S curve. The index of rutting depth is defined and early warning method for high temperature and corresponding protective measures are also put forward.

Key words: asphalt pavement; rutting; continuously changing temperature field; index of rutting depth; early warning for high temperature

作为沥青路面特有的一种破坏形式, 车辙主要是在内因(路面结构、沥青混合料性能)及外因(交通、气候等)的共同影响下使轮迹带处的路面材料出现固结变形和侧向剪切而产生的一种永久变形^[1-2]. 在内部因素, 即沥青混合料性能相同的情况下, 车辙产生及车辙量的大小主要由气候和交通条件决定. 气候条件主要决定路面结构的温度场状况, 进而影响路面结构的材料性能; 交通条件则决定路面结构承受的荷载大小及作用时间长短^[3]. 在外界环境因素影响下, 实际路面结构温度是随时间和空间而变化的一个量, 即为瞬态温度场. 而作为路面材料的沥青混合料, 其粘弹性性能受温度影响很大, 因此, 在进行路面车辙分析时, 不能忽略路面结构内部温度的连续变化. 但是目前一般以粘弹性理论为基础, 将不同季节的复杂温度变化简化为单一的车辙有效温度(即路面在这样的恒定温度条件下产生的车辙与在全年不同季节不同温度条件下发生的车辙量相当), 以车辙有效温度下的材料参数预测在设计使用期限内沥青路面车辙随累计荷载作用次数的关系^[4-8], 而不能考虑在具体的环境、荷载条件下, 尤其是持续高温、重载条件下的短期车辙规律. 因此, 对于沥青路面, 尤其是已建成通车的道路来说, 研究其车辙形成的规律与气候条件及交通条件的关系进行车辙预警及防治就显得尤为重要.

1 连续变温下沥青路面车辙数值模拟方法

沥青路面结构处于自然环境中, 由于环境条件

收稿日期: 2009-11-05

基金项目: 中国博士后科学基金(20100481312); 中央高校基本科研业务费专项资金(CHD2009JC069)

第一作者: 张久鹏(1983—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为路面结构和材料. E-mail: zhjiupeng@163.com

的变化,其沥青混合料面层处于非定常(温度随时间而变)和非均匀(温度随空间位置而变)复杂温度环境下工作.同时,作为一种热流变材料,沥青混合料的力学特性受到温度的显著影响.故在路面车辙分析时,不能忽略路面结构内温度的连续变化.笔者采用分析方法得到沥青路面的温度场,在更符合实际的沥青路面连续变温条件下进行车辙分析(如图 1)^[9],研究路面车辙与气候、荷载条件的关系.

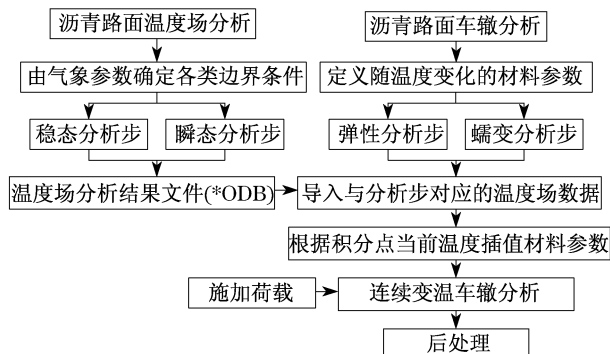


图 1 沥青路面连续变温车辙数值模拟方法

Fig.1 Numerical method for asphalt pavement rutting under continuous changing temperature field

采用 ABAQUS 有限元软件进行数值模拟,具体实现过程如下:①将 1 d 分为 24 个时间段,假定每个时间段内温度不变,采用 0.5 h 的固定时间增量步进行温度场数值模拟,为连续变温车辙分析提供温度数据;②将 1 d 分为 24 个蠕变分析步,假定每个蠕变分析步温度场恒定,导入由前期温度场分析得到的 *.ODB 文件,根据对应时刻模型积分点温度插值材料参数进行沥青路面结构连续变温的车辙模拟.

2 沥青路面结构温度场分析

2.1 连续变化气象条件下温度场数值模拟

选择典型的半刚性基层沥青路面结构进行研究分析,上面层为 4 cm SMA-13,中面层为 6 cm AC-20,下面层为 8 cm AC-25,基层为 40 cm 水稳碎石,底基层为 20 cm 二灰土.沥青路面有限元模型的水平宽度为 4.0 m,土基以上各层厚度采用结构层的实际厚度,土基深度 1.0 m 以上采用有限元单元,1.0 m 以下采用无限元单元,车轮荷载作用区域采用局部细化的网格.根据路面结构和荷载作用的对称特性,取 1/2 模型进行分析.

在路面材料热特性确定的情况下,路面结构的温度场由气象条件决定.以连续 7 d 实测气象数据为

依据进行沥青路面温度场分析.路面材料热力学参数见表 1.各边界条件实现如下:沥青路面结构与外界的热交换主要集中在上表面,包括吸收太阳辐射、空气对流换热及空气辐射换热;路面结构水平方向假定不存在温度梯度,侧面边界不予考虑;土基较深处温度波动非常小,可以视为恒温边界^[9].实测太阳辐射强度如图 2,沥青路表对太阳辐射的吸收率 $\alpha_s = 0.85$;气温变化如图 2,大气与路表的发射率 $\epsilon = 0.9$;根据实测日平均风速确定对流换热系数 h_{ap} ;路面结构底部边界视为 20 °C 恒温边界.

表 1 路面结构材料的热力学参数

Tab.1 Thermodynamics parameters of asphalt pavement materials

材料	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	比热容/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)
SMA-13	2.05	1 168.0	2 100
AC-20	1.25	894.0	2 400
AC-25	1.16	921.1	2 600
水稳碎石	1.10	810.0	2 077
二灰土	1.05	805.0	1 550
土基	1.30	860.0	1 700

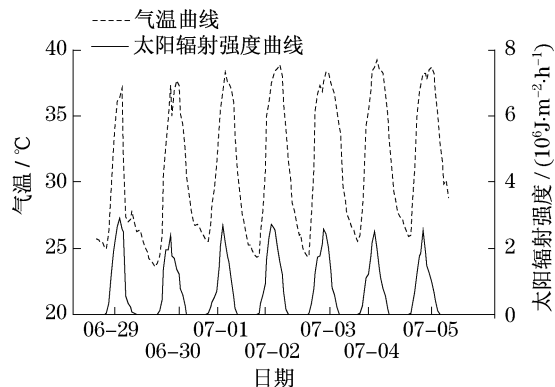


图 2 气温与太阳辐射强度曲线

Fig.2 Curve of air temperature and radiant intensity

2.2 温度场模拟结果及验证

根据前述热物理参数、边界条件及温度场分析方法建立有限元模型,通过数值模拟,可以得出路面结构在不同气象条件下的日温度变化过程,部分计算结果如图 3 所示.可以看出,数值计算温度值与实测温度值规律一致,相对误差分别为 9.00%, 8.05%,说明采用数值方法进行沥青路面结构温度场规律性研究完全适用.可以通过数值模拟得出路面结构在连续变化气象条件下日温度变化过程,为后续连续变温车辙模拟提供温度数据.

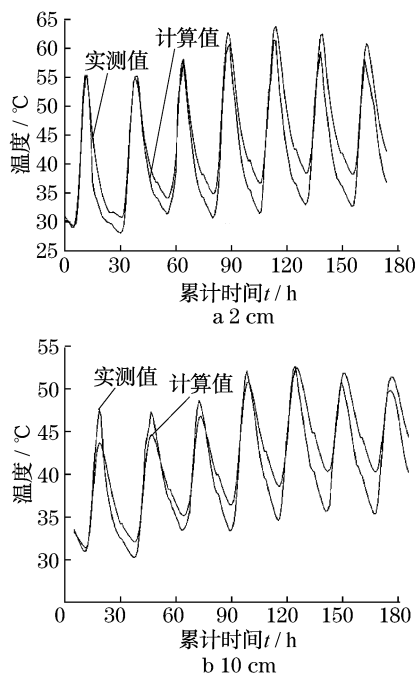


图3 路表不同深度下实测及计算温度值对比
Fig.3 Actual and calculated temperature at different depths

3 连续变温车辙计算与结果分析

3.1 车辙计算模型及参数

进行变温车辙分析,需要保持沥青路面结构温度场分析模型及车辙计算模型的几何尺寸、网格尺寸相一致.因此,参考2.1节建立的沥青路面结构温度场分析模型建立车辙分析的几何模型.由于车辙主要发生在沥青混合料面层,基层以下的贡献相对很小,因此采用ABAQUS软件的时间硬化 Creep 模型描述沥青混合料的蠕变特性^[10]. Creep 模型可以表征如下:

$$\dot{\epsilon}_{cr} = A\sigma^m t^n \quad (1)$$

式中: $\dot{\epsilon}_{cr}$ 为蠕变应变率; σ 为等效应力; t 为累计荷载作用时间; A, m, n 为回归系数.

通过不同温度下(20~60℃,间隔10℃)动态三轴蠕变试验和抗压回弹试验确定沥青混合料面层材料的蠕变和弹性参数.泊松比随温度变化参考AASHTO设计指南^[5],数值见表2.基层和路基材料采用弹性假定,各层材料的弹性参数如表3.

轮胎与路面的实际接触面的大致形状由1个矩形和2个半圆组成,黄仰贤^[11]认为可以等效为1个矩形.因此,将双圆荷载简化为双矩形均布荷载,其宽度 $B = 18.6$ cm,长度 $L = 19.2$ cm,两轮中心距

31.4 cm.考虑到现今高速公路上重载现象日益严重,车辆的轴重变化必然会导致轮胎与路面间接触压力和面积的变化.根据车辆轴载调查情况^[12],取标准荷载为100 kN,轮胎接地压强为0.70 MPa,对于重载,轴载取140 kN和200 kN,轮胎接地压强分别为0.88 MPa和1.11 MPa.而理想的有限元分析应该考虑实际行车荷载的动载作用,文献[6]认为可以采用荷载作用时间累计的原则,将动态荷载作用简化为静态荷载作用,如式(2):

$$T_t = T_0 N \quad (2)$$

式中: T_t 为累计时间; T_0 为荷载加载一次的时间, $T_0 = L/v$, v 为平均车速; N 为荷载作用次数.参考车辆轴载调查结果^[12],设定日轴载作用次数为6 000次,平均车速为120 km·h⁻¹,即可根据式(2)计算不同轴载的累计时间.

表2 沥青混合料材料参数

Tab.2 Material parameters of asphalt mixtures

混合料类型	温度/℃	A	m	n	弹性模量/MPa	泊松比
SMA-13	20	6.536×10^{-11}	0.937	-0.592	870	0.25
	30	3.325×10^{-9}	0.862	-0.587	620	0.30
	40	1.446×10^{-8}	0.792	-0.577	554	0.35
	50	1.390×10^{-6}	0.414	-0.525	530	0.40
	60	1.464×10^{-5}	0.336	-0.502	526	0.45
AC-20	20	4.580×10^{-11}	0.944	-0.596	910	0.25
	30	2.461×10^{-9}	0.796	-0.585	752	0.30
	40	3.673×10^{-8}	0.773	-0.570	600	0.35
	50	4.802×10^{-6}	0.595	-0.532	440	0.40
	60	7.778×10^{-5}	0.384	-0.441	380	0.45
AC-25	20	4.590×10^{-11}	0.922	-0.581	1 031	0.25
	30	3.461×10^{-9}	0.859	-0.576	900	0.30
	40	1.956×10^{-8}	0.830	-0.562	710	0.35
	50	1.200×10^{-6}	0.322	-0.522	500	0.40
	60	3.755×10^{-5}	0.210	-0.418	390	0.45

表3 其他材料的参数

Tab.3 Parameters of other materials

材料	弹性模量/MPa	泊松比
水稳碎石	1 200	0.20
二灰土	300	0.30
路基土	60	0.40

3.2 计算结果与分析

利用变温车辙分析方法,针对上述7 d气象因素水平、3种轴载水平进行组合建模分析.计算结果如表4和图4.可以看出,轮胎压力越大,日车辙量越大;车辙日变化曲线呈倾斜的“S”型.从午夜至清晨(0:00~6:00)没有太阳辐射,路面结构向外界环境散热,温度下降,故车辙曲线变化很平缓;随着太

阳辐射的出现并逐渐增强(6:00~13:30),路面结构整体升温,故车辙曲线开始逐渐上升;之后,虽然太阳辐射强度逐渐减弱(13:30~18:30),路表温度逐渐降低,但是路面结构内部温度仍上升,故车辙

曲线急剧上升;到了晚间(18:30~24:00)没有太阳辐射,路面结构整体向外界散热降温,故车辙曲线又逐渐变为平缓.

表4 不同因素组合下沥青路面日车辙深度
Tab.4 Daily rut depth of asphalt pavement under different factors

组合	日期	轮胎压力/MPa	车辙深度/ 10 ⁻² mm	组合	日期	轮胎压力/MPa	车辙深度/ 10 ⁻² mm	组合	日期	轮胎压力/MPa	车辙深度/ 10 ⁻² mm
1	06-29	0.70	0.895	8	07-01	0.88	1.299	15	07-03	1.11	1.614
2	06-29	0.88	1.291	9	07-01	1.11	1.742	16	07-04	0.70	1.069
3	06-29	1.11	1.731	10	07-02	0.70	1.003	17	07-04	0.88	1.543
4	06-30	0.70	0.628	11	07-02	0.88	1.448	18	07-04	1.11	2.068
5	06-30	0.88	0.907	12	07-02	1.11	1.941	19	07-05	0.70	0.856
6	06-30	1.11	1.215	13	07-03	0.70	0.835	20	07-05	0.88	1.236
7	07-01	0.70	0.900	14	07-03	0.88	1.204	21	07-05	1.11	1.656

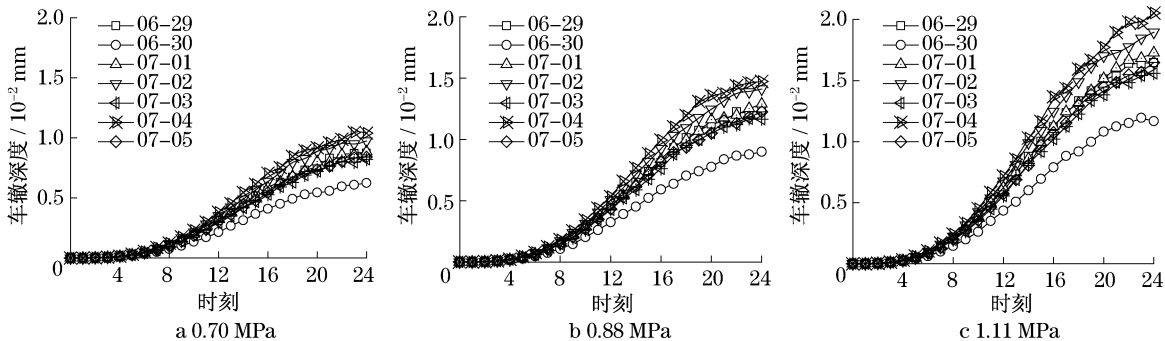


图4 沥青路面车辙日变化曲线
Fig.4 Curves of daily rutting in asphalt pavements

4 沥青路面车辙的高温预警机制

4.1 考虑气候的日车辙预估模型

采用统计学方差分析进行显著性分析,车辙量与各因素之间假设为简单的线性模型.结果表明,影响车辙的显著因素有轮胎压力 p 、日最高气温 $T_{a,max}$ 、日太阳辐射总量 Q 和日最低气温 $T_{a,min}$,而日照时数 c 和日均风速 v_w 影响不太显著.针对显著因素,构建日车辙预估模型,如式(3):

$$R_D = B(\alpha + T_{a,max} + \beta T_{a,min} + \gamma Q) p^\lambda (1 - e^{-(k\tau)^\theta})$$
 (3)

式中: R_D 为每天随时刻变化的车辙量,0.01 mm; τ 为对应小时数, h; $B, \alpha, \beta, \gamma, k, \lambda, \theta$ 为回归系数.在本文研究设定的路面结构和交通量下,通过 SAS 软件非线性回归分析,得到 $R_D = 0.060 \times (-77.630 + T_{a,max} + 1.374 T_{a,min} + 1.361 Q) \times p^{1.43} (1 -$

$e^{-(0.063\tau)^{3.031}})$ $R^2 = 91.5\%$,其中 R 为相关性系数.

4.2 高温车辙预警

以南京地区气候特征为例,利用多年统计月平均气象资料和日车辙预估模型,采用前文的路面结构和标准轴载作用次数,得到不同气候条件下日车辙总深度如表5所示,其中气候数据来源于中国自然资源数据库.空白表示在此气象条件下基本不产生车辙,这验证了车辙一般产生于气温高于20℃的高温季节[2].

5~9月中,5月份的月平均气温最低,所产生的日车辙深度最小.因此,以5月份平均气象条件下的车辙量 R_{D5} 为基准,定义车辙指数(index of rutting depth) I_{RD} 如式(4):

$$I_{RD} = R_D / R_{D5}$$
 (4)

经计算, I_{RD} 为1~5.借鉴气象部门的气温预警等级,提出沥青路面车辙高温预警等级,如表6.可以根据车辙预警等级采取相应措施,以防止车辙大量

迅速产生. 具体措施包括: 宣传引导车辆尤其是速度相对较低的重载货车避开高温时段; 在高温时段适当提高道路通行费用, 而在温度较低的晚间适当降低通行收费. 采取这种分时段的收费方式既尊重

了道路使用者的权力及不可拖延的必要通行需求, 又在经济杠杆作用下使交通的时间分布自动得到调节.

表 5 不同气象条件下沥青路面日车辙深度
Tab.5 Daily rut depth of asphalt pavement under different weather conditions

月份	平均气温/℃	最高气温/℃	最低气温/℃	太阳辐射总量/(MJ·m ⁻²)	日车辙总深度/(10 ⁻² mm)	月份	平均气温/℃	最高气温/℃	最低气温/℃	太阳辐射总量/(MJ·m ⁻²)	日车辙总深度/(10 ⁻² mm)
1	2.5	10.9	-5.9	10.4		7	29.2	35.6	22.8	26.3	0.904
2	4.4	13.4	-4.6	13.9		8	28.8	35.3	22.3	25.1	0.810
3	9.1	19.1	-0.8	16.5		9	23.9	29.6	18.3	24.3	0.367
4	16.0	24.7	7.2	23.3		10	18.0	23.2	12.7	18.0	
5	21.5	27.8	15.2	25.7	0.217	11	10.9	17.7	4.1	13.2	
6	25.6	31.2	20.1	22.9	0.445	12	4.7	12.7	-3.3	10.4	

表 6 车辙预警等级及防护措施
Tab.6 Early warning of rutting for high temperature and protective measures

等级	车辙指数	具体措施
红色	>4	用经济手段并严格限制重载超载车辆的通行
橙色	2~4	采用经济手段
黄色	1~2	宣传引导
蓝色	<1	可不采取防护措施

5 结语

(1) 沥青路面结构温度随时间和空间连续变化, 进而影响沥青混合料的材料特性; 在 ABAQUS 有限元软件中, 通过路面温度场的引入和定义随温度场变化的材料参数, 利用此种连续变温的路面车辙模拟分析方法可以更加符合实际地进行车辙模拟分析, 且方便可行.

(2) 沥青路面车辙一般产生于气温高于 20 ℃ 的高温季节, 车辙日变化曲线呈倾斜的“S”型, 其显著影响因素有轮胎压力、日最高气温、日太阳辐射总量和日最低气温. 针对显著因素, 建立了考虑气候的日车辙预估模型.

(3) 以南京地区气候特征为例, 利用多年统计月平均气象资料和日车辙预估模型建立了以车辙指数 I_{RD} 为依据的高温预警等级, 提出通过宣传引导或必要时分时段征收不同通行费的方法调节交通的时间分布, 避免车辙大量产生.

(4) 有关车辙发生的时段预估等问题有待进一步研究, 需要搜集更丰富的气象资料和采用更多路面结构类型进行车辙预警的分析或相应修正.

参考文献:

[1] 黄晓明, 吴少鹏, 赵永利. 沥青与沥青混合料[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
HUANG Xiaoming, WU Shaopeng, ZHAO Yongli. Asphalt and asphalt mixture [M]. Beijing: China Communications Press, 2002.

[2] 沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
SHEN Jin'an. Road performance of asphalt and asphalt mixture [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.

[3] 张肖宁. 沥青与沥青混合料的粘弹力学原理及应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
ZHANG Xiaoning. Viscoelastic mechanics principle of asphalt and asphalt mixture and its application [M]. Beijing: China Communications Press, 2006.

[4] 张登良, 李俊. 高等级道路沥青路面车辙研究[J]. 中国公路学报, 1995, 8(1): 23.
ZHANG Dengliang, LI Jun. Prediction of rutting in asphalt pavement [J]. China Journal of Highway and Transportation, 1995, 8(1): 23.

[5] American Association of State Highway and Transportation Officials. Guide for pavement design of pavement structures [S]. Washington D C: American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993.

[6] Hua J. Finite element modeling and analysis of accelerated pavement testing devices and phenomenon [D]. West Lafayette: Purdue University, 2000.

[7] 封基良, 许爱华, 席晓波. 沥青路面车辙预测的粘弹性分析方法[J]. 公路交通科技, 2004, 21(5): 12.