

考虑温度梯度和动态模量的全厚式车辙深度预估

胡贵华^{1,2}, 李彦伟^{1,5}, 张 倩³, 谢来斌⁴

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 湖南省交通建设质量安全监督管理局, 湖南 长沙 410116;
3. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 4. 陕西中霖集团路桥设计有限公司,
陕西 西安 710000; 5. 石家庄市交通运输局, 河北 石家庄 050001)

摘 要:针对室内车辙试验不能准确评价实际温度作用下全厚式路面结构抗变形性能的问题,建立有限元模型,对不同温度梯度下路面整体抗车辙性能进行研究。将温度梯度和动态模量引入车辙预估模型,分析了温度梯度、荷载水平和碾速对车辙模拟结果的影响规律,确定了模型预估因子,对单一温度梯度下的车辙深度进行了预估,并提出了多温度梯度下的车辙预估方法。研究表明:温度是车辙产生的直接环境因素,建模时将其体现在材料动态模量中,碾速水平可等效为荷载作用次数,将其与荷载水平等效为一个影响因子;单一温度梯度下车辙预估计算结果与试验值误差小于 0.5 mm,多温度梯度下进行车辙预估时需根据路面实际工况对模型参数进行修正,以提高车辙预估精度。

关键词:道路工程;车辙预估;温度梯度;动态模量;全厚式车辙试验

中图分类号:U416.224

文献标志码:A

Depth prediction of total thickness rutting considering temperature gradient and dynamic modulus

HU Gui-hua^{1,2}, LI Yan-wei^{1,5}, ZHANG Qian³, XIE Lai-bin⁴

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Quality and Safety Supervision Bureau of Transportation Construction in Hunan Province, Changsha 410116, Hunan, China;
3. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China;
4. Road and Bridge Design Ltd of Shaanxi Zhonglin Group, Xi'an 710000, Shaanxi, China;
5. Shijiazhuang Traffic Transport Bureau, Shijiazhuang 050001, Hebei, China)

Abstract: As indoor rutting test can't accurately evaluate the anti-deformation performance of thick type pavement structure under the condition of actual temperature, the finite element model is established, and synthetically anti-rutting performance of pavement is studied under different temperature gradients. The temperature gradient and dynamic modulus was introduced to the rut forecast model to analyze how the temperature gradient, load level and grinding speed influenced rut simulation results. The model forecast factors, were determined rut depth has been forecasted under single temperature gradient, and the rutting prediction method under multiple temperature gradients was put forward. The results show that the temperature is the direct environmental

收稿日期:2014-08-28

基金项目:交通运输部行业联合科技攻关项目(2010 353 343 270)

作者简介:胡贵华(1982-),男,湖南新田人,湖南省交通建设质量安全监督管理局工程师,长安大学工学博士研究生,

E-mail:21413656@qq.com.

factor of rutting, which can be embodied in dynamic modulus of materials in the modeling. Grinding speed level can be equivalent to times of load and the load level can be equivalent to an impact factor. The error between rutting prediction numerical results and experimental value is less than 0.5 mm under single temperature gradient, while the model parameters are modified under multiple temperature gradients according to the actual road conditions when a rut forecast is required, which can improve the rutting forecast precision. 2 tabs, 5 figs, 11 refs.

Key words: road engineering; rutting prediction; temperature gradient; dynamic modulus; total thickness rutting test

0 引言

对于车辙的研究,大多从室内车辙试验出发,与实际路面车辙联系寻求突破。目前常见的室内车辙试验仅是单一温度下单层沥青混合料性能试验,用于评价单层混合料的抗车辙性能,与2层或3层组合的路面面层在实际温度环境下整体抗车辙性能评价相关性不足相比较,全厚式车辙试验能够更好地反映路面整体抗变形性能^[1]。国内外已有一些学者通过全厚式或双层式车辙试验进行了车辙预估方法的研究。杨军等分析了上中面层对面层整体抗车辙性能的贡献率^[2];吴瑞麟等通过全厚式车辙试验分析了车辙影响因素^[3];关宏信等开发了带温度梯度的全厚式车辙试验,讨论了全厚式沥青面层车辙控制标准^[4-5]。目前针对全厚式路面结构的车辙试验都是一些探索性的尝试,由于沥青路面温度场时空分布非常复杂,再加上路面材料与结构组合的多样性,对于如何选取试验的代表温度梯度及如何实现较精准的温控,还需开展更加细致的研究。

车辙预估模型方面,目前提出的预估方法可大致分为4类,即经验模型、理论模型、力学经验模型和基于数值模拟建立的模型。经验模型一般不考虑路面结构的整体效应,模型中结构类型少,有的甚至未考虑沥青混合料的力学参数,不能对混合料的力学性能有较深入的概括,且预估公式外延性差,应用局限性较大,例如 Archilla(2002年)根据 AASH-TO 路面试验数据提出考虑累积荷载重复作用的统计车辙模型。理论法方面,SHRP 研究者建立了沥青路面永久变形粘弹性模型,但该模型不能充分描述力学响应,后来模型增加了弹塑性部分,目前仍在完善中。力学-经验法认为车辙是由沥青混合料剪切变形引起的,曾被用来描述美国西部环道车辙,优点是可考虑轮胎边缘处的剪切变形,但该法还是基于沥青混合料的线弹性假设,其合理性有待验证。随着数值计算方法不断进步,越来越多的学者开始

偏重于粘弹性理论数值计算方法。就应用广泛性而言,现在国内外主要采用有限元算法对沥青混合料在复杂荷载条件下的力学响应进行研究。这方面成果较多,文献[6-10]进行了车辙预估模型研究。但已有模型有的参数过多、模型复杂、推广应用存在很大困难;有的建立在静态特性假设基础上,仅能在特定环境下进行车辙预估,与沥青混合料动态力学响应存在很大差异,缺乏普遍适用性;有些模型应力计算非常复杂,实际应用过程中不太容易实现;还有相当一部分模型的车辙试验仅采用较薄的单层试件,与实际路面结构相差较大。为此,本文结合沥青路面工程的研究趋势,依托设温度梯度的全厚式车辙试验及混合料动态模量试验结果,引入沥青混合料动态设计参数,考虑路面温度场分布、耦合温度场和动态模量等参数,运用有限元法对全厚式路面车辙进行建模计算,建立单一温度梯度下的车辙预估模型,提出多个代表温度梯度下车辙变形预估建模方法。

1 全厚式车辙试验及有限元模拟

为实现车辙深度计算,从全厚式车辙试验出发,利用 Abaqus 软件建模,采用粘弹性材料本构,材料参数由沥青混合料动态模量试验数据拟合得到,采用二维车辙板横截面模型,荷载通过静载等效替代移动荷载的方法简化计算^[11]。

1.1 全厚式车辙试验

全厚式车辙试验仪是对普通车辙仪加以改装,增大碾轮升降的竖向距离以满足全厚式车辙板的放入,碾速及其上部重物质量可调,以模拟不同车速和不同轴载。选取的路面结构为 4 cmSMA-13 + 6 cmAC-20 + 14 cmATB-30,试验条件分别选取 20℃~50℃、20℃~60℃、20℃~70℃这3个温度梯度,0.7 MPa和1.3 MPa这2个轮压,21次/min和42次/min这2个碾速,限于篇幅,具体试验设备另文详述,部分试验结果如下页图1所示。图中:A

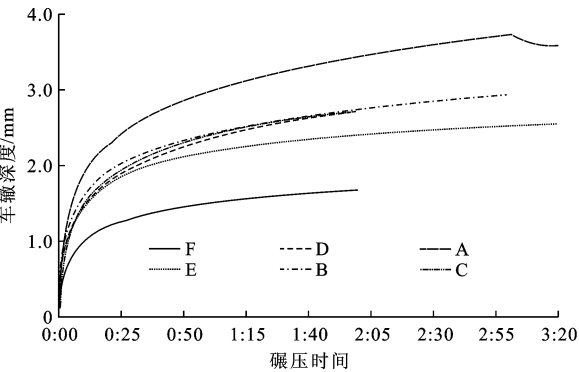


图 1 全厚式车辙试验车辙深度时程曲线

Fig. 1 Rutting curve of total thickness rutting test
曲线试验条件为 20 ℃~60 ℃, 轮压 1.3 MPa, 碾速 42 次/min; C 曲线 20 ℃~60 ℃, 1.3 MPa, 21 次/min; D 曲线 20 ℃~60 ℃, 0.7 MPa, 21 次/min; B 曲线 20 ℃~60 ℃, 0.7 MPa, 42 次/min; E 曲线 20 ℃~70 ℃, 0.7 MPa, 42 次/min; F 曲线 20 ℃~50 ℃, 0.7 MPa, 42 次/min。

1.2 模型参数

车辙是频繁加载和卸载共同作用下产生的,但多次加载-卸载循环不易实现,所以模拟中按近似处理方法,多次加载-卸载循环作用结果与单次长时间加载结果基本等效,其理念是引入等效时间,关键是进行等效时间的换算。计算时取轮子接地纵向长度 L 为 240 mm,轮子接触试件长度 l 为小矩形均布轮载, $l=20$ mm,小轮一次碾压时等效静载作用时间 $t_1=l/v=0.02/(0.24\times42/60)=0.119\ 05$ s,车辙试验碾压 1 h,对应的等效静载作用时间 $t_N=Nt_1=60\times42\times0.119\ 05=300$ s。其中: v 为小轮行驶速度(m/s); N 为荷载作用次数。

粘弹性模型输入参数包括表示时间依赖性的 Prony 级数及表示温度依赖性的 WLF 方程系数,由动态模量试验结果拟合得到。对上述 3 种混合料分别进行动态模量试验,施加的正弦荷载频率分别为 25、20、10、5、1、0.5、0.1 Hz,试验温度分别为 5.1 ℃、17.9 ℃、38.6 ℃、44.1 ℃和 55.7 ℃。由数学关系将频域内的动态模量转化为时域内的松弛模量,进而计算剪切模量拟合 Prony 级数及 WLF 方程系数,拟合结果见表 1。

为分析整体车辙形成,分别模拟不同温度梯度、不同荷载、不同碾压速度下车辙形成情形。对于 3 层板车辙试件,其温度沿深度方向分布并不均匀,按全厚式车辙试验温度梯度稳定后的观测记录,在有限元模型各层间及表面、底面赋予温度边界值,如表 2 所示。表中: G_1, G_2, \dots, G_5 为复合剪切模量; $C_1、$

C_2 为 WLF 方程的 2 个经验参数; R 为相关系数; E_0 为弹性模量; μ 为泊松比。

表 1 3 种混合料 Prony 级数及 WLF 方程参数
Tab. 1 Prony series and WLF equation parameters of three mixtures

SMA-13 Prony 级数				AC-20 Prony 级数			
参数	数值	参数	数值	参数	数值	参数	数值
G_1	0.416 1	t_1	1.13×10^{-5}	G_1	0.327 2	t_1	9.99×10^{-6}
G_2	0.263 3	t_2	3.93×10^{-4}	G_2	0.285 9	t_2	1.48×10^{-4}
G_3	0.181 1	t_3	6.02×10^{-3}	G_3	0.266 5	t_3	3.49×10^{-3}
G_4	0.093 3	t_4	0.127 7	G_4	0.077 1	t_4	0.115 6
G_5	0.035 4	t_5	12.477 0	G_5	0.033 1	t_5	6.793 2
ATB-30 Prony 级数				WLF 方程参数			
参数	数值	参数	数值	参数	SMA-13	AC-20	ATB-30
G_1	0.381 2	t_1	2.65×10^{-5}	C_1	9.626	12.564	18.574
G_2	0.240 2	t_2	6.68×10^{-4}	C_2	121.146	134.836	163.465
G_3	0.232 4	t_3	9.45×10^{-3}	R	0.998 23	0.997 48	0.996 61
G_4	0.105 9	t_4	0.195 6	E_0	15×10^6	11×10^6	5×10^6
G_5	0.030 7	t_5	10.881 0	μ	0.35	0.35	0.35

表 2 温度梯度边界值
Tab. 2 Temperature gradient boundary values ℃

温度梯度	表面	上中层间	中下层间	底面
20~50	50	40	30	20
20~60	60	50	40	20
20~70	70	55	45	20

2 车辙预估模型因子选取及分析

为选取车辙模型参数,对选定的路面结构,考虑温度梯度水平、荷载水平和碾速水平的变化,进行单因素变化的车辙模拟计算,结果如图 2~下页图 4 所示。

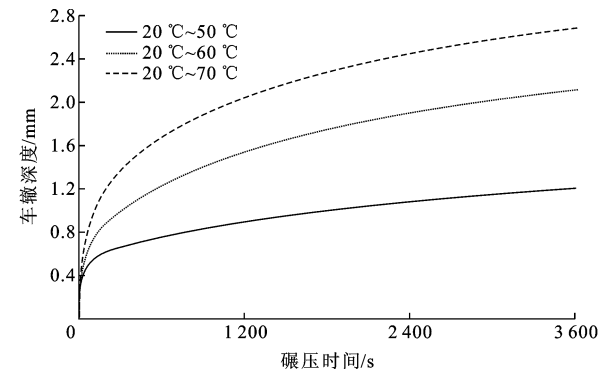


图 2 不同温度梯度下全厚式车辙模拟计算结果比较
Fig. 2 Comparison of total thickness rut at different temperature gradients

(1) 温度梯度水平对车辙深度的影响 (荷载 0.7 MPa、碾速 42 次/min)。从图 2 可看出,温度梯

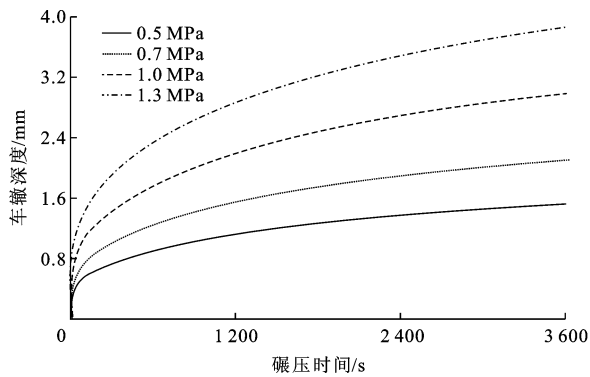


图 3 不同荷载水平下全厚式车辙模拟计算结果比较

Fig. 3 Comparison of total thickness rut at different load levels

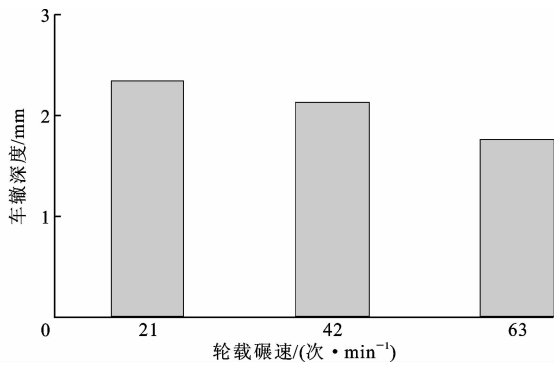


图 4 不同碾速水平下全厚式车辙模拟计算比较

Fig. 4 Comparison of total thickness rut at different load speeds

度变化直接影响车辙深度发展,其通过影响沥青材料性质而改变混合料的整体模量,在荷载作用下引起混合料变形量变化。高温环境下沥青路面的温度沿深度递减,高温集中在中、上面层,此时中、上面层混合料模量降低导致变形量的增加,所以温度是车辙产生的直接环境因素之一,对材料性能影响很大,在模型构建时将其体现在材料参数动态模量中。

(2) 荷载水平对车辙深度的影响(温度梯度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、碾速 42 次/min)。从图 3 可看出,荷载水平越大,车辙就越深,且荷载是车辙产生的直接因素,其他因素只能与荷载耦合作用,间接影响车辙的形成。

(3) 碾速水平对车辙深度的影响(温度梯度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、荷载 0.7 MPa)。从图 4 可看出,一定作用次数下,碾速水平越高,轮载与路面作用时间越短,对应的车辙量越小,而较慢的车速对应于较大的车辙深度,验证了车辆在长大坡路段行驶缓慢引起路面较大车辙的现象。另外不同碾速水平可等效为一定荷载作用次数,因而将碾速水平同荷载作用次数归结为一个影响因子。

3 车辙预估模型的提出

3.1 单一温度梯度车辙预估

在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度梯度下,对上述路面结构进行 0.5 、 0.7 、 1.0 、 1.3 MPa 荷载水平下的有限元模拟,与车辙试验时间对应,取 1 h 计算结果为样本,建立车辙深度预估模型。

第 1 步:选取荷载大小 P 及荷载作用次数 N 作为预估外因因子,选取各层混合料动态模量作为内因因子,温度 T 通过动态模量 $E^*(T)$ 引入模型,由于全厚式车辙试验为多层板试件,故其预估函数可表示为

$$I_{\text{RD}} = \sum_i^n I_{\text{RD}i} = \sum_i^n F_i(P, N, E_i^*(T_i)) \quad (1)$$

式中:RD 为车辙深度; I_{RD} 为 RD 的计算参数; $E_i^*(T_i)$ 为第 i 层的动态模量函数; T_i 为该层代表温度,各层代表温度的不同体现了沿深度方向的路面温度梯度。

对于一个面层厚度而言,单一代表温度 T 对该层上下两面的温度差别表现不足,所以借鉴分层思想,将各面层再分为多个亚层,对每个亚层做永久变形预估后求和,得到以下形式的预估方程

$$I_{\text{RD}} = \sum_i^n I_{\text{RD}i} = \sum_i^n \sum_j^l F(P, N, E_i^*(T_{ij})) \quad (2)$$

对比单层板车辙深度预估模型,多层板的重点在于根据路面整体温度梯度分布进行分层选择并确定各层代表温度 T_{ij} ,温度梯度参考实际路面温度分布观测结果设定。以本文结构为例,在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度梯度下,各面层代表温度取其上下表面均值,由表 2 可知分别为 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

第 2 步:结合车辙实测和模拟计算数据,从相关性出发分层做回归分析。同时在由 3 种混合料动态模量测试结果拟合的函数模型中,将其时域换算至车辙试验荷载作用时程内,对同一时间内车辙深度与动态模量值对应做相关性分析。

采用幂函数模型,分层将上述数据做回归分析得到各因子影响系数,得到各层车辙深度预估模型。

上面层 SMA-13

$$I_{\text{RD}1} = 2.477 \times 10^{-19} N^{1.219} P^{0.987} \cdot E_1^*(T_1)^{5.893}, R^2 = 0.9973 \quad (3)$$

中面层 AC-20

$$I_{\text{RD}2} = 1.039 \times 10^{-15} N^{-1.039} P^{0.979} \cdot E_2^*(T_2)^{4.351}, R^2 = 0.9932 \quad (4)$$

下面层 ATB-30

$$I_{RD3} = 1.468 \times 10^{-19} N^{-1.051} P^{0.984} \cdot E_3^* (T_3)^{5.124}, R^2 = 0.9889 \quad (5)$$

将各层变形量求和即得到全厚式车辙预估模型。当温度梯度为 $20^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 、荷载为 0.7 MPa 、碾速为 42 次/min 时,将预估值与试验结果比较如图 5 所示。可以看出预估值与试验值误差小于 0.5 mm ,预估结果有一定参考意义。由于预估模型总是建立在有限的试验和计算结果上,所以预估值与试验结果之间存在一定误差,随着预估样本数增加,模型参数可得到进一步修正,预估精度会进一步提高。需要说明的是,一个温度梯度下的预估不足以计算其他代表温度梯度下的车辙变形,下面提出多个温度梯度下的车辙预估方法。

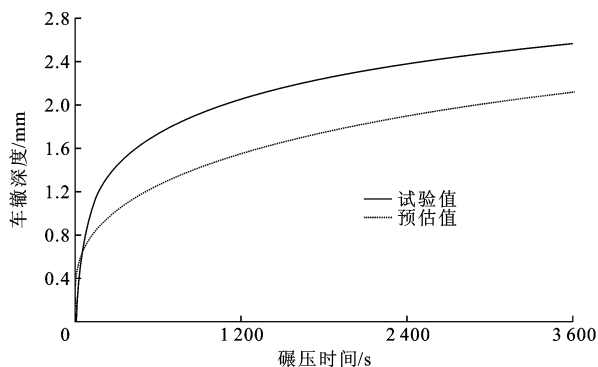


图 5 $20^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 温度梯度下车辙预估值与试验值比较

Fig. 5 Comparison of test and simulation results of total thickness rut at $20^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ temperature gradient

3.2 多个温度梯度下车辙预估方法

根据单一温度梯度车辙预估方法,可结合实际路面工作状态,对多个代表温度梯度进行车辙预估,评价具体路面结构的高温性能。

(1)选取温度梯度、荷载及动态模量为车辙预估因子,初步选取预估函数模型。

(2)将面层结构分为 i 层,选取车辙形成的 j 个代表性路面温度梯度,在每个温度梯度下建立车辙预估模型,用一组方程来预估不同温度梯度和荷载条件下的车辙,预估方程组表示为在第 j 个温度梯度水平下,有

$$I_{RDj} = \sum_i^n I_{RD_i} = \sum_i^n F_i(P, N, E^*(T_i)) \quad (6)$$

(3)对选定路面结构进行不同温度梯度水平、不同荷载水平的全厚式车辙试验,同时对各层混合料进行不同温度、多个频率的动态模量试验,以试验数据为基础,对函数进行相关性回归计算得到各因子影响系数。

(4)结合实际路面车辙调查对预估模型进行验

证及必要的修正。

4 结 语

(1)车辙预估建模思路是选取荷载及动态模量作为预估因子,结合动态模量的感温性反映温度梯度的影响,以动态模量的时域性与车辙形成时间统一为相关点建立车辙预估模型,通过试验及模拟数据回归得到模型因子系数。可以多组温度梯度下的多个车辙预估方程,评价预估某一类型结构路面的整体性车辙。

(2)根据模拟计算结果,可知荷载大小及作用次数是车辙主要成因,碾速水平可等效体现为荷载作用次数的不同,温度则通过改变混合料模量等性质影响车辙发展。

(3)与实际路面车辙发生的环境相比,室内车辙试验环境单调且保持不变,因而对复杂的实际路面车辙计算,应建立室内试验与实际路面车辙之间的联系,如参考极限设计法建立某一合理代表温度梯度下室内车辙预估与实际车辙间的相关关系,并进行系数修正,使车辙预估指导路面结构设计。

(4)本文所用沥青混合料种类及试验数量有限,对于车辙模拟计算建立在等效简化基础上,仅对室内车辙试验车辙变形预估进行了讨论,模型选取变量因子较少,但在一定范围内有指导作用。为能有效控制实际车辙,还需进一步系统分析各类型混合料室内车辙试验,对模型进行修正,提出更为合理的室内车辙试验车辙变形预估模型。

参考文献:

References:

- [1] 沈金安. 沥青与沥青混合料路用性能[M]. 北京:人民交通出版社,1998.
SHEN Jin-an, Asphalt and asphalt mixture road performance[M]. Beijing: China Communications Press, 1998. (in Chinese)
- [2] 杨 军,崔 娟,万 军,等. 基于结构层贡献率的沥青路面抗车辙措施[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2007, 37(2): 350-354.
YANG Jun, CUI Juan, WAN Jun, et al. Strategy of improving rutting resistance based on contribution rate of different layers[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2007, 37(2): 350-354. (in Chinese)
- [3] 吴瑞麟,石立万,余海洋,等. 影响沥青路面全厚度车