

季冻区 OGFC 沥青混合料车辙预估模型研究

于保阳¹,刘云亮²,齐琳³

(1. 沈阳建筑大学交通与测绘工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司,浙江 杭州 311122;3. 沈阳城市建设学院土木工程学院,辽宁 沈阳 110167)

摘要 目的 研究季冻区 OGFC 沥青混合料的高温抗车辙能力,建立车辙预估模型,推广 OGFC 沥青混合料在季冻区的应用。**方法** 采用车辙试验系统进行车辙试验,分析轴载作用次数、试件高度、温度、抗剪强度、冻融循环次数对 OGFC 沥青混合料车辙深度的影响;基于经验法建立季冻区 OGFC 沥青混合料车辙预估模型,通过最小二乘法拟合模型参数,对建立的预估模型进行室内试验验证以及有限元对比分析。**结果** 各影响因素与车辙深度呈现幂函数关系,冻融循环作用加速车辙形成,室内试验实测车辙深度与模型预估的车辙深度相对误差为 0.11%~9.81%。**结论** 经验法建立的季冻区 OGFC 沥青混合料车辙预估模型预估精度较高,预估模型误差受试验条件和材料参数影响,其中材料参数影响较明显。

关键词 季冻区;OGFC 沥青混合料;经验法;车辙预估模型;有限元

中图分类号 TU528.42;U416

文献标志码 A

引用格式:于保阳,刘云亮,齐琳.季冻区 OGFC 沥青混合料车辙预估模型研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(3):521-528.(YU Baoyang,LIU Yunliang,QI Lin. Research on rutting prediction model of OGFC asphalt mixture in seasonally frozen zone[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2024,40(3):521-528.)

Research on Rutting Prediction Model of OGFC Asphalt Mixture in Seasonally Frozen Zone

YU Baoyang¹,LIU Yunliang²,QI Lin³

(1. School of Transportation and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou, China, 311122; 3. School of Civil Engineering, Shenyang Urban Construction University, Shenyang, China, 110167)

Abstract: In order to promote the application of OGFC asphalt mixture in seasonal frozen area, the high temperature rutting resistance of OGFC asphalt mixture in seasonal frozen area is studied, and the rutting prediction model is established, then a rutting test system was used to conduct rutting tests, analyzing the effects of axle load cycles, specimen height, temperature, shear strength, and

收稿日期:2023-07-12

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52278454);辽宁省教育厅重点攻关项目(JYTZD2023170);大学生创新创业训练计划项目(202310153002)

作者简介:于保阳(1980—),男,正高级实验师,主要从事路面结构与路面新型材料等方面研究。

freeze-thaw cycles on the rutting depth of OGFC asphalt mixture. Based on the empirical method, the rutting prediction model of OGFC asphalt mixture in seasonal freezing zone was established. The parameters of the model are fitted by the least square method, and the established prediction model was verified by indoor tests and compared with the finite element analysis. There is a power function relationship between the influencing factors and the rutting depth. The freeze-thaw cycle accelerates the formation of rutting. The relative error between the measured rutting depth and the predicted rutting depth of the model is 0.11%~9.81%. The rutting prediction model of OGFC asphalt mixture in seasonal frozen zone established by the empirical method has high prediction accuracy. The rutting prediction model of OGFC asphalt mixture in seasonal frozen area established by the empirical method has high prediction accuracy. The error of the prediction model is affected by the test conditions and material parameters, among which the material parameters are more obvious.

Key words: seasonal freezing area; OGFC asphalt mixture; empirical method; rut prediction model; finite element

开级配磨耗层(Open Graded Friction Course, OGFC)沥青混合料是典型的骨架空隙结构,通过骨架结构及沥青黏聚力抵抗荷载作用下的塑性变形和剪切变形^[1-2],其铺筑的路面具有缓解城市内涝、增加行车安全等优点。OGFC 沥青路面在我国北方季冻区应用还不够广泛,冻融循环是影响沥青混合料路用性能的重要因素^[3-4],在经受冻融循环、行车荷载与高温共同作用下 OGFC 沥青混合料的抗车辙性能研究不足。为此,建立合理的车辙预估模型有助于 OGFC 沥青混合料在季冻区的应用。

在沥青混合料的车辙预估模型研究方面,国内外相关学者做了大量研究工作。H. Zhu 等^[5]基于两阶段粘弹塑性损伤模型和荷载等效法建立了沥青路面车辙预测方法。胡朋等^[6]在加速加载设备下对常温和 42℃ 的路面进行车辙试验,通过温度、车辙和应变数据变化规律建立了车辙预估模型。任华^[7]基于实测的力学相应数据,研究足尺试验道沥青面层力学响应演变规律,建立了温度、速度、轴重的力学响应预估方程。黄晓明等^[8]基于室内环道试验建立了车辙预估模型。Y. Deng 等^[9]基于移动荷载作用下的应变和应力以及沥青混合料的屈服准则建立车辙预

测模型。纪小平等^[10]采用加速加载装置,基于沥青混合料剪切强度、荷载重复加载次数、路面结构剪应力、路表温度和行车速度,建立了车辙预估模型。

综上所述,笔者研究 OGFC 沥青混合料应用于北方季冻区的车辙问题,在 OGFC 沥青混合料级配及沥青确定的情况下,考虑试验温度 T 、轴载累计作用次数 N 、沥青混合料抗剪强度 τ 、沥青层厚度 D 以及季冻区冻融循环次数 F_t 对车辙深度的影响,以经验法为基础建立季冻区沥青混合料车辙预估模型,并通过室内试验及有限元对比分析预估模型精确度;研究表明:预估模型相对车辙深度误差不超过 10%,误差受材料参数影响较大。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料及配合比设计

基质沥青采用辽河 90# 沥青,矿料采用玄武岩,矿粉采用石灰岩磨细制成。在基质沥青中加入 13% 的国产 OLB-1 型高黏改性剂,采用湿法工艺制备高粘改沥青,与玄武岩集料拌和制成 OGFC-13 沥青混合料,确定最佳油石比为 4.8%。OLB-1 改性沥青技术指标和沥青混合料级配如表 1、表 2 所示。

表 1 OLB-1 改性沥青技术指标

Table 1 The technical indexes of OLB-1 modified asphalt

项目	软化点/℃	25℃针入度/0.1 mm	5℃延度/cm	15℃延度/cm	135℃黏度/(Pa·s)	60℃黏度/(Pa·s)
混合料参数值	94.5	55.6	34	128.4	2.2	30 256
规范要求值 ^[11]	> 80	> 40	≥ 30	≥ 80	< 3.0	> 20 000

表 2 OGFC-13 沥青混合料级配

Table 2 OGFC-13 asphalt mixture gradation

筛孔直径/mm	集料通过率/%	筛孔直径/mm	集料通过率/%
16	100	1.18	17
13.2	95	0.6	9
9.5	60	0.3	7
4.75	20	0.15	5
2.36	18	0.075	3

1.2 车辙试验方法

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)^[11]要求及车辙试验模具高度,研究试件厚度分别为 30 mm、40 mm、50 mm 的车辙变形情况。以沈阳市高温气温情况为依据,进行 40℃、50℃、60℃时的车辙试验,并记录车辙深度。在混合料级配确定的情况下,抗剪强度主要受温度影响,研究与试验温度对应的抗剪强度在 1.3 MPa、1.2 MPa、1.1 MPa 变化时对混合料车辙深度的影响。考虑到冻融循环时间及次数的影响,研究未冻融以及冻融循环 5 次和 10 次下的混合料车辙变形规律。

2 OGFC-13 沥青混合料车辙影响因素分析

2.1 轴载作用次数与车辙深度的关系

研究不同轴载及作用次数下车辙深度变化情况,建立与车辙深度的函数关系。其中,0.70 MPa 为标准轴载,0.84 MPa 为超载轴载。车辙深度 R_v 随轴载及作用次数 N 的变化规律如图 1 所示,标准轴载与超载轴载的车辙深度表达式为

$$R_{v0.70} = 4.54N^{0.463}, R^2 = 0.988. \tag{1}$$

$$R_{v0.84} = 5.58N^{0.426}, R^2 = 0.986. \tag{2}$$

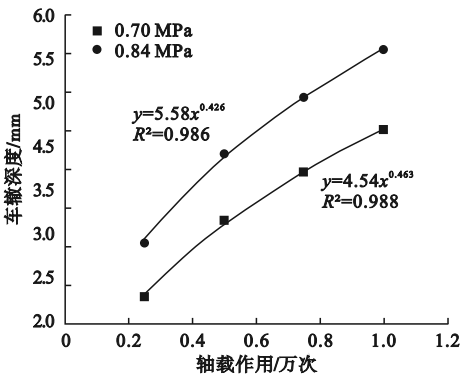


图 1 车辙深度随轴载及作用次数的变化规律
Fig. 1 The variation trend of rutting depth with axle load and action times

考虑到轴载作用次数对车辙深度的影响,笔者以标准轴载作用次数为次影响因素建立其他影响因素与车辙深度的三维变化规律。

2.2 试件厚度与车辙深度的关系

沥青混合料层厚要大于或者等于混合料公称最大粒径的 2.5 倍^[11],对高度为 30 mm、40 mm、50 mm 的车辙试件进行试验,车辙深度随试件高度 D 变化规律如图 2 所示,表达式为

$$R_v = 5.79D^{-0.232}, R^2 = 0.986. \tag{3}$$

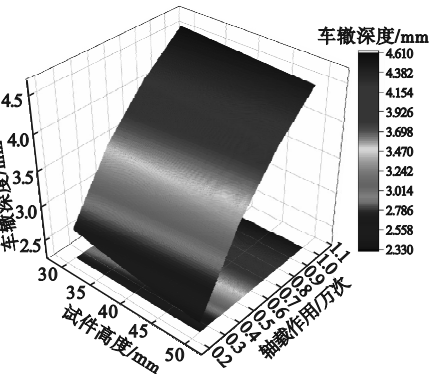


图2 车辙深度随试件高度变化规律

Fig. 2 The variation trend of rutting depth with specimen height

2.3 环境温度与车辙深度的关系

沥青混合料在温度升高时其弹性逐渐减弱,黏性逐渐增强,在荷载作用下容易产生车辙。进行40℃、50℃、60℃时的车辙试验,车辙深度随温度*T*的变化规律如图3所示,车辙深度与温度的关系表达式为

$$R_v = 0.004\,03T^{1.55}, R^2 = 0.988. \tag{4}$$

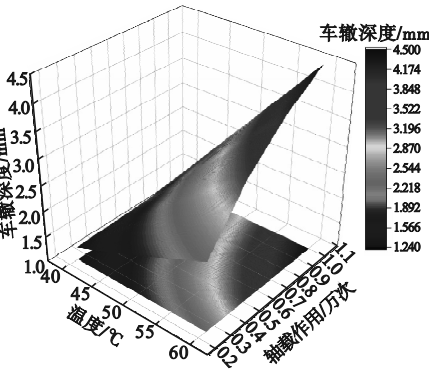


图3 车辙深度随温度的变化规律

Fig. 3 The variation trend of rutting depth with temperature

2.4 抗剪强度与车辙深度的关系

沥青混合料车辙的产生很大程度上是由于其抗剪强度不足所致。笔者通过单轴贯入试验与无侧限抗压强度试验测定不同温度下混合料的抗剪强度^[12-13],研究抗剪强度为1.1~1.3 MPa的车辙变形情况,试验结果如

图4所示,车辙深度与抗剪强度的表达式为

$$R_v = 2.43\tau^{-2.487\,2}, R^2 = 0.977. \tag{5}$$

式中: τ 为混合料抗剪强度,MPa。

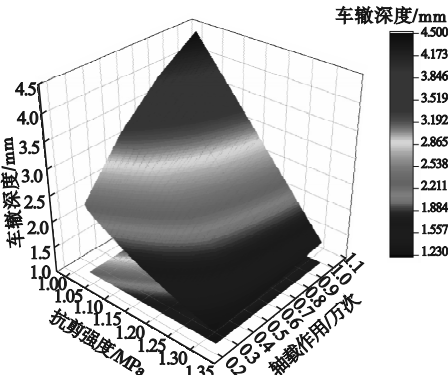


图4 车辙深度随抗剪强度的变化规律

Fig. 4 The variation trend of rutting depth with shear strength

2.5 冻融循环作用与车辙深度的关系

季冻区冬季气温在0℃以下、夏季最高气温可达40℃。笔者以季节性冰冻地区沈阳为例,研究冬季低温及雨雪作用下路面经受冻融,再经受夏季高温作用后OGFC沥青混合料的车辙深度变化情况。将饱水试件在-18℃条件下放置16 h,然后在60℃恒温水箱中放置24 h,即完成1次冻融。季冻区OGFC沥青混合料车辙深度随冻融循环次数的变化规律如图5所示,车辙深度与冻融循环次数的表达式为

$$R_v = 2.818F_t^{0.075}, R^2 = 0.989. \tag{6}$$

式中: F_t 为冻融循环次数。

3 经验法车辙预估模型

3.1 经验法车辙预估模型架构

考虑OGFC-13沥青混合料车辙深度与试验温度、荷载作用次数、混合料抗剪强度、沥青混合料层厚度及季冻区冻融循环的关系(见图5),采用经验法构建沥青混合料车辙预估模型框架,如式(7)所示。

$$R_v = aN^b \times D^c \times T^d \times F_t^e \times \tau^f. \tag{7}$$

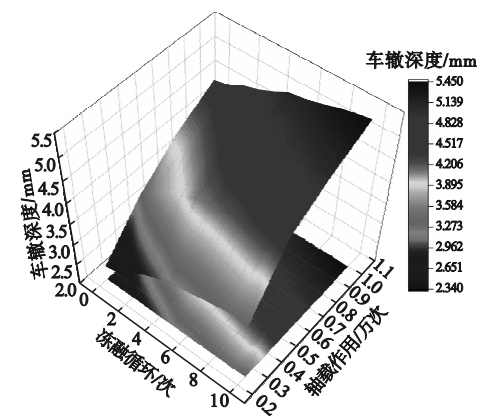


图5 车辙深度随冻融循环次数的变化规律

Fig. 5 The variation trend of rutting depth with freeze-thaw cycles

3.2 经验法车辙预估模型建立

通过最小二乘法对式(7)所示的车辙预

估模型进行模型参数回归,建立车辙预估模型。对于式(7)中6个模型参数及5个自变量因素,两边同时取对数,得到:

$$\ln R_v = \ln a + b \ln N + c \ln D + d \ln T + e \ln F_t + f \ln \tau. \tag{8}$$

令 $y = \ln R_v$, $a_0 = \ln a$, $x_1 = \ln N$, $x_2 = \ln D$, $x_3 = \ln T$, $x_4 = \ln F_t$, $x_5 = \ln \tau$, 得到一次多项式函数及数据序列的均方误差。

$$y = a_0 + bx_1 + cx_2 + dx_3 + ex_4 + fx_5$$
$$Q(a_0, b, c, d, e, f) = \sum_{i=1}^m (y - y_i)^2. \tag{9}$$

根据多元函数的极值原理,满足如式(10)所示的函数关系,拟合方程如式(11)所示。各影响因素对数值如表3所示,组合影响因素下车辙深度对数值如表4所示。

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial a_0} = 2 \sum_{i=1}^m (a_0 + bx_{1i} + cx_{2i} + dx_{3i} + ex_{4i} + fx_{5i} - y_i) = 0; \\ \frac{\partial Q}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^m (a_0 + bx_{1i} + cx_{2i} + dx_{3i} + ex_{4i} + fx_{5i} - y_i) x_{1i} = 0; \\ \frac{\partial Q}{\partial c} = 2 \sum_{i=1}^m (a_0 + bx_{1i} + cx_{2i} + dx_{3i} + ex_{4i} + fx_{5i} - y_i) x_{2i} = 0; \\ \frac{\partial Q}{\partial d} = 2 \sum_{i=1}^m (a_0 + bx_{1i} + cx_{2i} + dx_{3i} + ex_{4i} + fx_{5i} - y_i) x_{3i} = 0; \\ \frac{\partial Q}{\partial e} = 2 \sum_{i=1}^m (a_0 + bx_{1i} + cx_{2i} + dx_{3i} + ex_{4i} + fx_{5i} - y_i) x_{4i} = 0; \\ \frac{\partial Q}{\partial f} = 2 \sum_{i=1}^m (a_0 + bx_{1i} + cx_{2i} + dx_{3i} + ex_{4i} + fx_{5i} - y_i) x_{5i} = 0. \end{cases} \tag{10}$$

$$\begin{pmatrix} m & \sum_{i=1}^m x_{1i} & \cdots & \sum_{i=1}^m x_{5i} \\ \sum_{i=1}^m x_{1i} & \sum_{i=1}^m x_{1i}^2 & \cdots & \sum_{i=1}^m x_{1i}x_{5i} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^m x_{5i} & \sum_{i=1}^m x_{1i}x_{5i} & \cdots & \sum_{i=1}^m x_{5i}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^m y_i \\ \sum_{i=1}^m x_{1i}y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^m x_{5i}y_i \end{pmatrix}. \tag{11}$$

表3 各影响因素对数值

Table 3 The logarithm of impact factors

组别	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1	-1.39	3.401	3.689	0	0.09
2	-0.69	3.689	3.912	1.069	0.18
3	-0.29	3.912	4.094	2.303	0.26

表4 组合影响因素下车辙深度对数值

Table 4 The logarithm of rut depth undering combined impact factors

组合因素	$x_{41}-x_{51}$	$x_{41}-x_{52}$	$x_{41}-x_{53}$	$x_{42}-x_{51}$	$x_{42}-x_{52}$	$x_{42}-x_{53}$	$x_{43}-x_{51}$	$x_{43}-x_{52}$	$x_{43}-x_{53}$
$x_{11}-x_{21}-x_{31}$	0.83	1.02	1.21	0.81	1.03	1.22	0.98	1.22	1.39
$x_{11}-x_{21}-x_{32}$	1.08	1.32	1.49	1.16	1.38	1.57	1.32	1.54	1.73
$x_{11}-x_{21}-x_{33}$	1.43	1.65	1.84	1.78	2.02	2.19	1.94	2.17	2.36
$x_{11}-x_{22}-x_{31}$	0.74	0.96	1.15	0.76	0.99	1.17	0.93	1.15	1.34
$x_{11}-x_{22}-x_{32}$	1.08	1.31	1.49	1.11	1.33	1.52	1.27	1.49	1.68
$x_{11}-x_{22}-x_{33}$	1.36	1.59	1.77	1.73	1.96	2.14	1.9	2.12	2.31
$x_{11}-x_{23}-x_{31}$	0.69	0.91	1.13	0.71	0.92	1.11	0.86	1.09	1.27
$x_{11}-x_{23}-x_{32}$	1.03	1.25	1.44	1.04	1.26	1.45	1.21	1.43	1.62
$x_{11}-x_{23}-x_{33}$	1.31	1.54	1.73	1.67	1.89	2.08	1.83	2.05	2.24
$x_{12}-x_{21}-x_{31}$	1.12	1.35	1.54	1.13	1.36	1.55	1.37	1.52	1.71
$x_{12}-x_{21}-x_{32}$	1.40	1.63	1.81	1.48	1.70	1.89	1.64	1.86	2.05
$x_{12}-x_{21}-x_{33}$	1.75	1.97	2.16	2.33	2.33	2.52	2.27	2.49	2.68
$x_{12}-x_{22}-x_{31}$	1.06	1.28	1.47	1.08	1.31	1.50	1.25	1.47	1.66
$x_{12}-x_{22}-x_{32}$	1.45	1.63	1.81	1.43	1.65	1.84	1.59	1.82	2.00
$x_{12}-x_{22}-x_{33}$	1.68	1.91	2.10	2.05	2.28	2.47	2.22	2.44	2.63
$x_{12}-x_{23}-x_{31}$	1.01	1.23	1.42	1.02	1.24	1.43	1.18	1.41	1.46
$x_{12}-x_{23}-x_{32}$	1.35	1.58	1.77	1.36	1.59	1.78	1.53	1.75	1.94
$x_{12}-x_{23}-x_{33}$	1.64	1.86	2.05	1.99	2.21	2.40	2.15	2.38	2.57
$x_{13}-x_{21}-x_{31}$	1.31	1.53	1.72	1.22	1.44	1.63	1.38	1.60	1.79
$x_{13}-x_{21}-x_{32}$	1.59	1.81	2.00	1.56	1.78	1.97	1.72	1.95	2.14
$x_{13}-x_{21}-x_{33}$	1.93	2.16	2.35	2.19	2.41	2.60	2.35	2.57	2.76
$x_{13}-x_{22}-x_{31}$	1.24	1.47	1.66	1.17	1.39	1.58	1.33	1.56	1.74
$x_{13}-x_{22}-x_{32}$	1.59	1.81	2.00	1.51	1.73	1.92	1.68	1.90	2.09
$x_{13}-x_{22}-x_{33}$	1.87	2.09	2.28	2.14	2.36	2.55	2.30	2.52	2.71
$x_{13}-x_{23}-x_{31}$	1.19	1.42	1.61	1.15	1.33	1.52	1.27	1.49	1.68
$x_{13}-x_{23}-x_{32}$	1.54	1.76	1.95	1.45	1.67	1.86	1.61	1.83	2.02
$x_{13}-x_{23}-x_{33}$	1.82	2.04	2.23	2.07	2.30	2.49	2.24	2.46	2.65

根据表4车辙深度对数值及式(11)计算模型参数,其结果如表5所示。

表5 模型参数

Table 5 The model parameters

a_0	b	c	d	e	f
0.03	0.271	-0.222	1.54	0.073	-2.59

以总偏差和回归检查对模型参数进行显著性检验,如式(12)所示。

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{243} (y - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^{243} (y_i - \bar{y})^2} \tag{12}$$

回归系数 $R^2=0.931\ 4$,回归方程的拟合优度较高,拟合参数有效。OGFC-13 沥青混合料车辙预估模型如式(13)所示。

$$R_v = 3.0 \times 10^{-2} \times N^{0.271} \times D^{-0.222} \times T^{1.54} \times F_t^{0.073} \times \tau^{-2.59} \tag{13}$$

3.2 预估模型试验验证

为验证笔者建立的经验法车辙预估模型的准确性,进行 OGFC-13 沥青混合料在标准轴载下冻融循环1次、3次、5次、7次,温度为45℃、55℃,试件高度为35 mm、45 mm,轴载作用630次、1 260次、2 520次的室内车

辙试验,以此对所建立预估模型进行验证。
试验结果如图 6 所示。

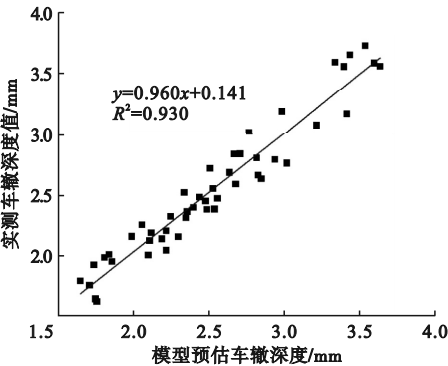


图 6 车辙深度值相关关系

Fig. 6 The correlation of rut depth value

经验法车辙模型预估深度值与实际试验车辙深度值相差较小,相对误差为 0.11% ~ 9.81%,二者存在较高的相关性,相关系数 $R^2=0.93$,建立的经验法车辙预估模型预测精度较高。

4 车辙预估模型有限元分析

运用 ABAQUS 有限元分析软件建立车辙板三维模型,以车辙试验试件尺寸为准,长×宽×高为 0.3 m×0.3 m×0.05 m。有限元模型无荷载作用区域网格划分 0.01 m×0.005 m,荷载作用区域网格划分为 0.005 m×0.005 m,计算单元采用 C3D8R。对计算模型边界进行约束,模型前后无 Z 方向水平位移,左右无 X 方向水平位移,底面无 Y 方向竖向位移,并设定各方向旋转角度为零。载荷大小为 0.7 MPa,载荷作用设定为试件中心处 0.05 m 的矩形区域,利用载荷累积作用时间计算车辙变形。

输入模型参数,取荷载作用时间 1 h、冻融循环 15 次,在 40 ℃、60 ℃ 下对厚度 5 cm 的试件进行有限元计算,获取车辙深度云图如图 7 所示。

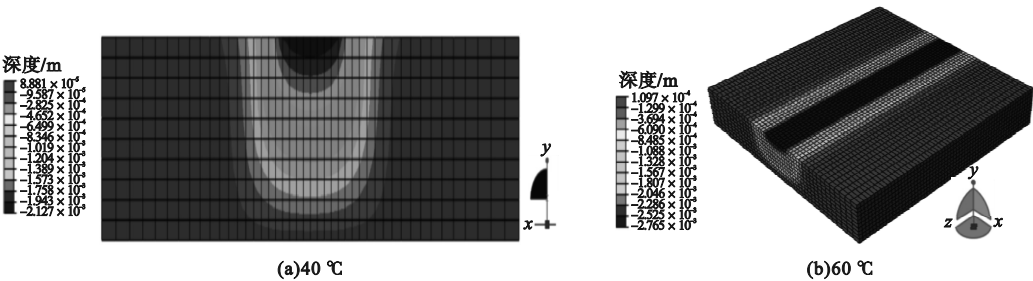


图 7 车辙深度云图

Fig. 7 The nephogram of rutting depth

对比车辙预估模型与有限元计算模型在 40 ℃、60 ℃ 车辙变形情况,提取有限元计算车辙深度变化曲线,如图 8 所示。

由图 8 可知,40 ℃ 时有限元计算的车辙深度随时间的增长速度快于经验法预估模型。经验法预估模型的车辙深度曲线在 2 000 s 后近似水平,这是因为经过加载初期的压密抵抗变形能力变强,在载荷大小没有变化的情况下,车辙深度增加缓慢。而有限元模拟过程中,模型的材料属性不会发生变化,因此车辙会随时间变化继续增长。

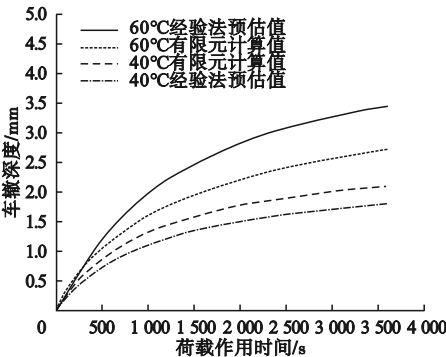


图 8 车辙 - 时间变化曲线

Fig. 8 The variation curves of rutting-time

在 60 ℃ 时,有限元计算的车辙深度曲线变化趋势相对缓慢,其原因是相较于 40 ℃ 时混合料弹性减弱黏性增强。此外,受材料属性影响,造成有限元计算结果在加载初期与预估值有所差别,在大约 1 000 s 以后,有限元计算值与预估值的差距逐渐变大,在 3 600 s 附近车辙深度相对误差约为 20%。

5 结 论

(1)OGFC-13 沥青混合料车辙深度与荷载作用次数、试件高度、环境温度、抗剪强度和冻融循环次数均呈现幂函数关系。

(2)在 OGFC-13 沥青混合料车辙深度影响因素中,随冻融循环次数的增加,车辙深度逐渐增加,且动稳定度呈现减小趋势,季冻区气候环境加剧车辙形成。

(3)室内车辙试验验证经验法预估模型预估车辙深度的相对误差在 0.11% ~ 9.81%;通过有限元分析,造成预估模型误差的因素为材料参数及试验条件。

参考文献

- [1] YEE T S, HAMZAH M O. Asphalt mixture workability and effects of long-term conditioning methods on moisture damage susceptibility and performance of warm mix asphalt [J]. Construction and building materials, 2019, 207: 316 – 328.
- [2] 李恒楠. 基于辽宁地区沥青路面的预防性养护技术适用性研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.
(LI Hengnan. Research on applicability of preventive maintenance based on asphalt pavement in Liaoning province [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2018.)
- [3] ZHANG Q, HUNG Z. Investigation of the microcharacteristics of asphalt mastics under dry-wet and freeze-thaw cycles in a coastal salt environment [J]. Materials, 2019, 12 (16): 2627.
- [4] YOU L, YOU Z, DAI Q, et al. Investigation of adhesion and interface bond strength for pavements underlying chip-seal: effect of asphalt-aggregate combinations and freeze-thaw cycles on chip-seal [J]. Construction and building materials, 2019, 203 (10): 322 – 330.
- [5] ZHU H, SUN L. Mechanistic rutting prediction using a two-stage viscoelastic-viscoplastic damage constitutive model of asphalt mixtures

- [J]. Journal of engineering mechanics, 2013, 139 (11): 1577 – 1591.
- [6] 胡朋, 张小宁. 基于双轴加速加载试验的沥青路面车辙预测模型[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2017, 36 (7): 33 – 38.
(HU Peng, ZHANG Xiaoning. Rutting prediction model of asphalt pavement based on acceleration loading tests by tandem axles [J]. Journal of Chongqing jiaotong university (natural science), 2017, 36 (7): 33 – 38.)
- [7] 任华. 基于加速加载试验的沥青路面车辙发展规律及预估方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.
(REN Hua. Research on the development law and prediction method of rutting on asphalt pavement based on accelerated loading test [D]. Nanjing: Southeast University, 2022.)
- [8] 黄晓明, 张晓冰, 邓学钧. 沥青路面车辙形成规律环道试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2000, 30 (5): 96 – 101.
(HUANG Xiaoming, ZHANG Xiaobing, DENG Xuejun. Asphalt pavement rutting prediction of high-grade highway [J]. Journal of southeast university (natural science edition), 2000, 30 (5): 96 – 101.)
- [9] DENG Y, ZHANG Y, SHI X, et al. Stress-strain dependent rutting prediction models for multi-layer structures of asphalt mixtures [J]. The international journal of pavement engineering, 2022, 23 (8): 2728 – 2745.
- [10] JI X P, XU Q L, ZHENG N X, et al. Application of asphalt mixture shear strength to evaluate pavement rutting with accelerated loading facility (ALF) [J]. Construction and building materials, 2013, 41: 1 – 8.
- [11] 交通运输部公路科学研究院. 公路工程沥青与沥青混合料试验规程: JTG E20—2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
(Research Institute of Highway Ministry of Transport. Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG E20—2011 [S]. Beijing: China Communications Press, 2011.)
- [12] 郭庆林, 李晓旭, 李懿明, 等. 干湿循环作用下沥青混合料损伤开裂机制分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2023, 42 (1): 61 – 67.
(GUO Qinglin, LI Xiaoxu, LI Yiming, et al. Damage and cracking mechanism of asphalt mixture under dry-wet cycles [J]. Journal of Liaoning technical university (natural science), 2023, 42 (1): 61 – 67.)
- [13] 毕玉峰, 孙立军. 沥青混合料抗剪试验方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005 (8): 1036 – 1040.
(BI Yufeng, SUN Lijun. Research on test method of asphalt mixture's shearing properties [J]. Journal of tongji university (natural science edition), 2005 (8): 1036 – 1040.)
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)