

重冻区沥青路面永久变形影响因素分析\*

张金萌<sup>1</sup>, 戎密仁<sup>1</sup>, 赵存宝<sup>1</sup>, 焦彦利<sup>2</sup>, 王联芳<sup>2</sup>

(1.石家庄铁道大学 交通运输学院, 河北 石家庄 050043;

2.河北省道路结构与材料工程技术研究中心, 河北 石家庄 050000)

**摘要:** 针对河北省重冻区张承(张家口—承德)高速公路主线沥青路面,借助 ABAQUS 分析软件构建考虑沥青面层粘弹性的二维模型,同时考虑当地特殊环境温度场对路面应力的影响,分析不同荷载作用轴次、速度及超载工况下重冻区沥青路面结构的永久变形。结果表明,在高速公路通车前期,车辙的产生及深度增加主要与荷载作用频次成正相关;随着行车速度的增大,车辙深度减小;车辆轴重对重冻区沥青路面永久变形的影响较明显,随着载重的增加,车辙加深。

**关键词:** 公路;重冻区;沥青路面;永久变形;有限元分析

中图分类号:U418.6

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2019)03-0091-06

车辙是路面结构在行车荷载及温度场等环境因素共同长期作用下产生的一种永久变形,它既是评价路面服务性能的主要指标,也是评价行车安全性的主要参数。彭妙娟等借助有限元计算模型分析层间接触对沥青路面结构车辙和剪应力的影响,得到层间接触条件是影响路面车辙的主要因素;罗要飞等指出,路面结构内剪应力极值的产生部位主要集中在中上面层,层间接触条件越差,车辙的影响范围越深;陈嘉祺等基于传热学原理确定路面温度场的主要影响因素,建立了路面温度场理论经验预估模型;刘兴东等通过有限元分析和车辙试验得出温度是影响沥青砼路用性能的重要因素。上述研究主要从理论、现场调查等方面对沥青路面车辙进行分析,样本选取存在局限性,导致研究结果不具有普遍适应性。有限元法不但能解决层状理论分析、预测车辙的不足,同时能反映路面应力状态,得到车辙的产生过程。该文基于沥青材料的粘弹性,考虑重冻区温度变化规律,利用 ABAQUS 有限元软件对沥青路面永久变形的影响因素进行分析。

1 重冻区路面结构设计 with 材料选取

1.1 路面结构设计

张承(张家口—承德)高速公路主线沥青路面结构组合为上面层 4 cm 细粒式 AC-13C 改性沥青砼 + 中面层 6 cm AC-20C 中粒式改性沥青砼 + 中面层 6 cm AC-20C 中粒式改性沥青砼 + 下面层 8 cm ATB-25 沥青稳定碎石(见图 1)。

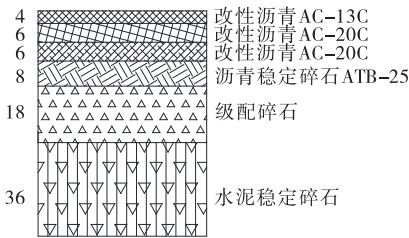


图 1 张承高速公路主线路面结构示意图(单位:cm)

1.2 材料参数

模拟分析时,沥青混合料应变蠕变硬化模型通过定义材料蠕变特性参数来体现其粘弹性。表 1 为沥青混合料蠕变参数试验结果,弹性参数见表 2。

表 1 沥青面层非线性模型参数

材料类型	温度/℃	弹性参数		蠕变参数			
		回弹模量 $E$	泊松比 $\mu$	$A$	$n$	$m$	$R^2$
AC-13C	20	1 400	0.30	$6.546 \times 10^{-11}$	0.936	-0.591	0.932 7
	30	870	0.30	$3.332 \times 10^{-9}$	0.864	-0.584	0.946 1
	40	620	0.35	$1.445 \times 10^{-8}$	0.794	-0.573	0.942 2

\* 基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0802207);石家庄铁道大学研究生资助项目(Z672201301);重冻区级配碎石混合料设计与施工技术(Y-201607)

续表 1

材料类型	温度/℃	弹性参数		蠕变参数			
		回弹模量 $E$	泊松比 $\mu$	$A$	$n$	$m$	$R^2$
AC—13C	50	554	0.40	$1.391 \times 10^{-6}$	0.414	—0.522	0.924 7
	60	526	0.45	$1.461 \times 10^{-5}$	0.326	—0.512	0.914 9
	20	1 200	0.30	$4.583 \times 10^{-11}$	0.945	—0.594	0.928 4
	30	910	0.30	$2.460 \times 10^{-9}$	0.798	—0.587	0.923 7
AC—20C	40	752	0.35	$3.683 \times 10^{-8}$	0.775	—0.572	0.938 4
	50	540	0.40	$4.812 \times 10^{-6}$	0.589	—0.530	0.849 6
	60	380	0.45	$7.779 \times 10^{-5}$	0.382	—0.439	0.913 5
	20	1 200	0.30	$4.591 \times 10^{-11}$	0.922	—0.581	0.937 2
ATB—25	30	900	0.30	$3.461 \times 10^{-9}$	0.849	—0.575	0.922 3
	40	710	0.35	$1.954 \times 10^{-8}$	0.831	—0.564	0.906 3
	50	500	0.40	$1.207 \times 10^{-6}$	0.322	—0.542	0.841 5
	60	390	0.45	$3.785 \times 10^{-5}$	0.211	—0.448	0.898 4

表 2 沥青面层的弹性参数

材料类型	层位	层厚/ mm	泊松比 $\mu$	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	阻尼 系数
AC—13C	上面层	40	0.3	2 300	0.9
AC—20C	中面层	120	0.3	2 400	0.5
ATB—25	下面层	80	0.3	2 500	0.5

根据相关研究成果,基层、土基均表现为非线性和非弹性,但对沥青路面车辙的影响有限,可忽略不计。为简化计算模型,假定其材料性质为弹性,参数取值见表 3。

表 3 路面结构层材料的弹性参数

材料类型	层位	层厚/ mm	弹性模 量/MPa	泊松 比 $\mu$	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	阻尼 系数
GM	上基层	180	450	0.2	2 100	0.8
CSM	底基层	360	1 500	0.3	2 300	0.4
SG	土基	—	450	0.4	1 850	0.4

### 1.3 荷载作用时间及参数

依据《公路沥青路面设计规范》选取标准轴载计算参数(见表 4)。

表 4 标准轴载计算参数

计算参数	取值
标准轴	BZ—100
标准轴载/kN	100
单轮荷载/kN	25
轮胎接地压强/MPa	0.70
单轮传压当量圆直径/cm	21.30
两轮中心距/cm	31.95

路面轮载累积作用时间  $t$  为:

$$t = \frac{0.36NP}{n_w p B v} \quad (1)$$

式中: $N$  为轮载作用次数; $P$  为车辆轴重(kN); $n_w$  为轴轮个数; $p$  为轮胎接地压力(MPa); $B$  为轮胎接地宽度(cm); $v$  为行车速度(km/h)。

1 d 中各时刻路面轮载累积作用次数所占比例见表 5,不同轴次下荷载累积作用时间见表 6。

表 5 1 d 中不同时段轴载累积作用次数所占比例

时刻	轴载累积 作用次数 占比/%	时刻	轴载累积 作用次数 占比/%	时刻	轴载累积 作用次数 占比/%
1	1.028 4	9	2.875 2	17	9.123 0
2	0.763 5	10	4.538 1	18	7.902 5
3	0.589 1	11	6.014 2	19	6.721 9
4	0.431 2	12	6.981 2	20	5.091 2
5	0.587 8	13	7.436 8	21	3.996 5
6	0.768 1	14	6.821 3	22	3.756 2
7	1.156 3	15	7.462 1	23	2.983 2
8	2.132 0	16	8.824 6	24	1.984 2

表 6 不同轴次下荷载累积作用时间

轴次/万次	累积作用时间/s	轴次/万次	累积作用时间/s
50	3 018	2 000	120 724
200	12 072	3 000	181 087
500	30 181	5 000	301 810
1 000	60 362	6 000	362 173

## 2 路面温度分布

沥青路面的承载能力和使用性能与其材料、所

处环境温度有关,是路面设计关键控制因素之一。为使模拟数据更准确,建模时充分考虑温度因素。

夏季太阳照射强烈,沥青吸热性能较好,路表温度较高,产生车辙的几率增加。冬季张家口因地形原因昼夜温差较大,产生温度裂缝。通过分析当地气象资料预估温度场分布规律,并引入有限元模型进行沥青路面车辙分析。

## 2.1 太阳辐射

太阳辐射周期性变化,借助相似边界条件进行模拟,公式如下:

$$q_0 = 0.131mQ \quad (2)$$

$$m = \frac{12}{c} \quad (3)$$

$$q(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < 12 - c/2 \\ q_0 \cos m\omega(t - 12) & 12 - c/2 \leq t < 12 + c/2 \\ 0 & 12 + c/2 \leq t \leq 24 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $q_0$  为中午最大辐射;  $Q$  为日太阳辐射总量 ( $\text{J}/\text{m}^2$ );  $c$  为实际有效日照时数 (h);  $\omega$  为角频率 (rad),  $\omega = 2\pi/24$ 。

## 2.2 气温及对流热交换

分析张家口地区的每日气温,发现从最低气温到最高气温所需时间最多不超过 10 h,从最高气温到最低气温所需时间在 14 h 以上,简单的正弦函数无法模拟其气温变化过程。故采用两个正弦函数的线性组合[见式(5)]来表征,日平均气温及变化幅度

分别按式(6)、式(7)计算。

$$T_a = \bar{T}_a + T_m [0.96 \sin \omega(t - t_0) + 0.14 \sin 2\omega(t - t_0)] \quad (5)$$

$$T_m = \frac{1}{2}(T_a^{\max} - T_a^{\min}) \quad (6)$$

$$\bar{T}_a = 1/2(T_a^{\max} + T_a^{\min}) \quad (7)$$

式中:  $\bar{T}_a$  为日平均气温 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_m$  为日气温变化幅度 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $t$  为时间,以小时计;  $t_0$  为初相位,为最大太阳辐射与最高气温出现时间差+7,一般情况下设时间差为 2 h,可取  $t_0 = 9$ ;  $T_a^{\max}$ 、 $T_a^{\min}$  分别为日最高气温和日最低气温 ( $^{\circ}\text{C}$ )。

路面表面与大气产生热交换的系数  $h_c$  为:

$$h_c = 3.7v_w + 9.4 \quad (8)$$

式中:  $h_c$  为热交换系数 [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ];  $v_w$  为日平均风速 (m/s)。

## 2.3 路面有效辐射

路面有效辐射边界条件为:

$$q_F = \varepsilon \sigma [(T_1 - T_z)^4 - (T_a - T_z)^4] \quad (9)$$

式中:  $q_F$  为路面有效辐射 [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ];  $\varepsilon$  为路面发射率,沥青路面取 0.81;  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数,  $\sigma = 5.6697 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;  $T_1$  为路表温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ),此时  $z=0$ ;  $T_z$  为绝对零度值,  $T_z = -273^{\circ}\text{C}$ ;  $T_a$  为大气温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )。

ABAQUS 模拟温度场分布过程中路面温度场的相关热属性参数见表 7,张家口夏季典型天气代表性气温见表 8。

表 7 路面温度场分析热属性参数

结构层	热传导率/ [ $\text{J} \cdot (\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$ ]	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	热容量/ [ $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$ ]	太阳辐 射率	路面发 射率	绝对零度 值/ $^{\circ}\text{C}$	Stefan-Boltzmann 常数 [ $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)^{-1}$ ]
面层	4 680	—	924.9	0.90	0.81	-273	$2.041 \times 10^{-4}$
基层	5 616	2 200	911.7	0.90	0.81	-273	$2.041 \times 10^{-4}$
垫层	5 148	2 100	942.9	0.90	0.81	-273	$2.041 \times 10^{-4}$
土基	5 616	1 800	1 040.0	0.90	0.81	-273	$2.041 \times 10^{-4}$

表 8 张家口夏季典型高温天气 1 d 中各时刻的代表性气温

时刻	气温/ $^{\circ}\text{C}$	时刻	气温/ $^{\circ}\text{C}$	时刻	气温/ $^{\circ}\text{C}$
1	21.7	9	27.2	17	31.4
2	20.7	10	29.1	18	30.6
3	20.1	11	30.0	19	29.1
4	20.8	12	32.4	20	27.3
5	21.1	13	33.3	21	25.6
6	22.0	14	34.1	22	23.8
7	23.4	15	33.5	23	21.6
8	25.2	16	32.8	24	20.8

## 3 重冻区沥青路面永久变形模拟分析

### 3.1 建立模型

基于车辆双轮作用力完全一致的情况,选取路面长度的一半,采用 ABAQUS 分析软件建立有限元模型。模型的长度和深度分别取 2.5、3 m,在路基底面、各结构层左侧边界施加对称约束,右侧边界施加水平约束。施加荷载为重力荷载及标准行车荷载。模型见图 2。

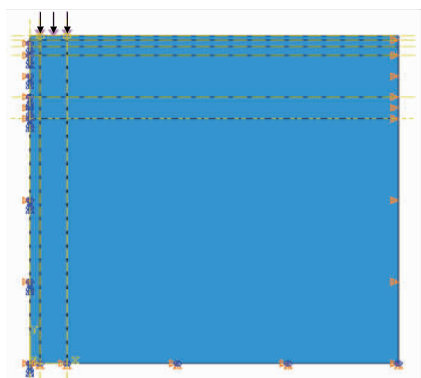


图2 有限元模型及加载方式

### 3.2 计算过程

(1) 温度场应力计算。温度场应力计算分为两步:1) 路面温度场求解。计算中,考虑到沥青材料高温下呈粘弹特性,选取夏季典型炎热天气1 d中各时刻的温度作为初始条件。2) 路表面施加太阳辐射、大气温度、对流及路面有效辐射等边界条件,计算温度场对路面的影响。

(2) 车辙计算。输入相关力学参数,施加荷载进行力学分析,并引入温度场结果,分析温度场与行车荷载共同作用下沥青路面永久变形的影响因素。

### 3.3 模拟结果与分析

#### 3.3.1 轴次对车辙深度的影响

50万轴次下沥青路面竖向位移及竖向蠕变应变分别见图3、图4,不同轴载次数作用下沥青路面的永久变形见表9,沥青路面车辙深度随加载作用次数的变化见图5。

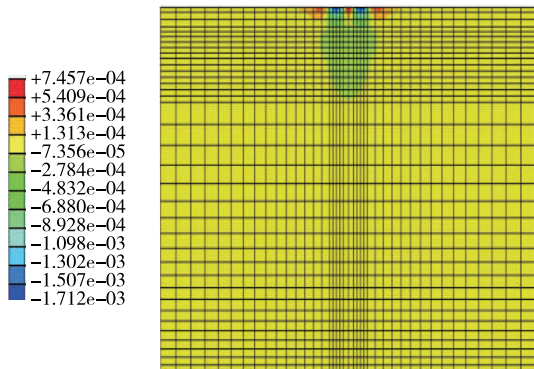


图3 50万轴次下沥青路面的竖向变形(单位:m)

由表9可知:1) 相对车辙的形成是路面隆起与凹陷共同造成的。2) 相对于路面隆起,相对车辙深度对绝对车辙深度的影响更大。3) 沥青路面永久变形的主要影响因素是绝对车辙,主要是由路面本身内部结构的弯曲压密所致。

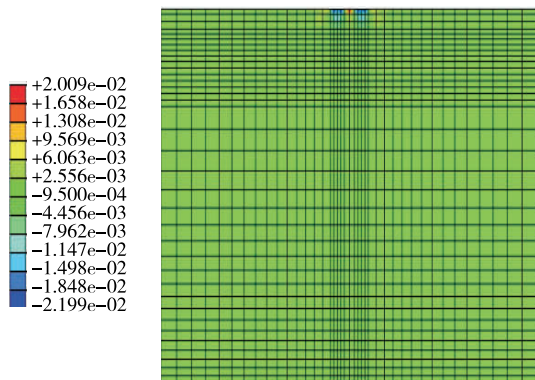


图4 50万轴次下沥青路面的竖向蠕变应变(单位:Pa)

表9 不同轴载作用次数下沥青路面的永久变形量

轴次/ 万次	最大隆 起/mm	绝对车 辙/mm	最大相对 车辙/mm	绝对车辙 比例/%
50	0.75	1.71	2.46	69.51
200	1.70	3.55	5.25	67.62
500	2.41	4.48	6.89	65.02
1 000	3.39	6.02	9.41	63.97
2 000	4.76	8.07	12.83	62.90
3 000	5.81	9.55	15.36	62.17
5 000	7.59	12.05	20.09	59.98
6 000	8.20	12.75	20.95	60.86

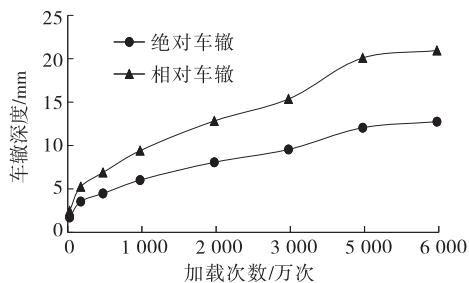


图5 沥青路面车辙深度随加载作用次数的变化

由图5可知:1) 轴载作用次数小于1 000万次时,路面竖向位移发展速度呈指数增长,远快于1 000万次以后的发展速度,且累积的车辙深度也较大。2) 当车辙深度累积到一定数值时,深度的增加速度逐渐变缓,表明荷载作用次数对路面变形的作用逐渐减弱。3) 路面开始运营后的一小段时间内产生的车辙深度占设计年限内总车辙量的1/2左右,运营早期轴次是路面永久变形的主要作用因素;运营后期增长速率逐渐变慢,交通渠化是车辙深度进一步发展的主要原因。

#### 3.3.2 行车速度对车辙深度的影响

根据式(1),车辙深度不仅与轴载作用次数有

关,还与车辆速度有关。固定车辆轴载作用次数为 50 万次,分析车辆速度对沥青路面永久变形的影响。表 10 为不同速度下荷载累积作用时间,图 6 为速度 60 km/h 时沥青路面结构表面变形,不同速度沥青路面的永久变形见表 11,沥青路面永久变形随车辆速度的变化见图 7。

表 10 不同速度下荷载累积作用时间

车辆速度/ (km · h <sup>-1</sup> )	累积作用 时间/s	车辆速度/ (km · h <sup>-1</sup> )	累积作用 时间/s
60	5 030	105	2 874
75	4 024	120	2 515
90	3 353		

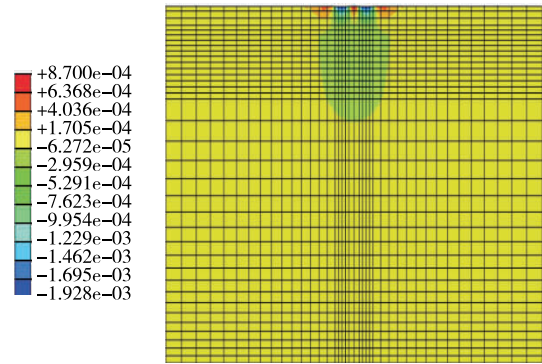


图 6 60 km/h 速度下沥青路面表面变形(单位:m)

表 11 不同速度下沥青路面的永久变形

车辆速度/ (km · h <sup>-1</sup> )	最大隆 起/mm	绝对车 辙/mm	最大相对 车辙/mm	绝对车辙 比例/%
60	0.87	1.93	2.80	68.93
75	0.71	1.76	2.47	71.26
90	0.70	1.63	2.33	69.96
105	0.64	1.53	2.17	70.51
120	0.60	1.45	2.05	70.73

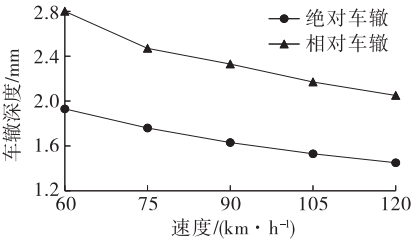


图 7 沥青路面永久变形随车辆速度的变化

由表 11 可以看出:沥青路面的永久变形同样由隆起和凹陷两部分组成,造成车辙的主要因素依然是绝对车辙;速度 60 km/h 下产生的变形深度与速度 90 km/h 下产生的变形深度的差值大于 90 与

120 km/h 下的变形深度差值,行车速度增大,荷载对路面的作用时间缩短,对路面产生的影响减小。

由图 7 可知:在相同的标准行车荷载重复作用下,行车速度越快,路面产生的车辙越小。

3.3.3 超载对车辙深度的影响

设在轮胎充气压力不变的情况下车辆超载,超载轮压分别为 0.7、0.84、0.98、1.12 MPa,对应轴载见表 12;车速恒为 100 km/h,轮载作用次数均为 500 万次。不同轴重下荷载累积作用时间见表 12,0.7 MPa 下车辙模拟结果见图 8,不同轴载下沥青路面永久变形见表 13,沥青路面永久变形随轴重的变化见图 9。

表 12 不同轴重下累积作用时间

轴重/kN	轮压/MPa	单次加载时间/s	累积作用时间/s
100	0.70	0.006 0	301 81
120	0.84	0.007 6	380 00
150	0.98	0.008 4	420 00
180	1.12	0.009 5	475 00

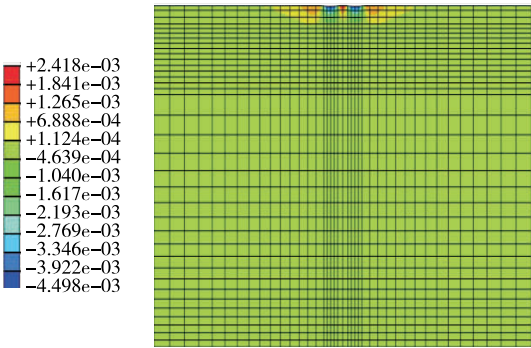


图 8 0.7 MPa 下沥青路面表面变形(单位:m)

表 13 不同轴载下沥青路面的永久变形

轴载/ MPa	最大隆 起/mm	绝对车 辙/mm	最大相对 车辙/mm	绝对车 辙比例/%
0.70	2.41	4.48	6.89	65.02
0.84	2.42	4.50	6.92	65.03
0.98	2.54	4.69	7.23	64.87
1.12	2.70	4.69	7.39	63.46

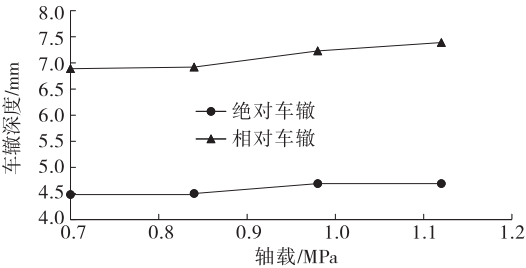


图 9 沥青路面永久变形随轴载的变化

由图9可知:相同轴载作用次数下,随着荷载增加,相对车辙深度增大,超载对路面的影响不可小觑。超载对路面造成破坏的原因主要有:1) 超载车辆速度较慢时,停留在路面某一点的时间长,在路面结构层厚度较小时,路面可承受的强度较小,难以长期承受车辆荷载作用,导致路面产生较大应变;2) 超载会导致路面产生较大剪切应力,在路面持续高温影响下,沥青表面层产生裂缝。

#### 4 结论

基于沥青材料粘弹性理论建立路面二维有限元模型,分析沥青路面在环境温度周期变化下永久变形的影响因素,得出以下主要结论:

(1) 对于重冻区高速公路,通过调查、采集当地温度数据建立路面温度场模型,计算不同交通荷载累计轴次作用下沥青路面的永久变形,计算结果与现场调查结果相近,可通过数值模拟预测路面车辙发展规律。

(2) 沥青路面车辙产生前期是由荷载作用次数增加所致,随着荷载作用次数的增加,沥青路面的永久变形在开始一个阶段内快速增长,后续增长速度则减缓。

(3) 行车速度对车辙深度存在一定影响,速度较小时,车辆轴载停留在路面的时间长,造成沥青混合料受到荷载的压力时间增加,引起车辙深度增加。

(4) 车辆超载情况下,车辙深度随着车辆轴重的增加而增大。超载是沥青路面产生永久变形的重要原因之一,路面设计中需慎重考虑。

#### 参考文献:

- [1] 李保红,朱毅军.高速公路沥青混凝土路面病害调查与分析[J].公路,2006(8).
- [2] 高联斌.沥青路面车辙类型及影响因素[J].山西建筑,2017,43(3).
- [3] 彭妙娟,赵文宣.层间接触对沥青路面抗车辙性能的影响[J].公路交通科技,2016,33(7).
- [4] 罗要飞,张争奇,张苛.车辆超载作用下层间接触条件变化对沥青路面性能的影响[J].武汉大学学报:工学版,2016,49(4).
- [5] 陈嘉祺,罗苏平,李亮,等.沥青路面温度场分布规律与理论经验预估模型[J].中南大学学报:自然科学版,2013,44(4).
- [6] 刘兴东,杨锡武.温度对于沥青路面车辙的影响分析[J].公路交通技术,2007(3).
- [7] 冉武平,邹益强,孔二春.基于加速加载的 SMA 沥青路面轮辙特性分析[J].公路工程,2016,41(4).
- [8] 汤祖杰.沥青路面抗永久变形设计方程研究[D].西安:长安大学,2009.
- [9] 居浩.沥青路面车辙计算模型及参数研究[J].石油沥青,2008,22(5).
- [10] 谢可.季冻区沥青路面车辙预估模型方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [11] 王巍.浅析碾压复合式路面结构的温度应力[J].黑龙江科技信息,2011(19).
- [12] 朱厚江,杨三强,张冲,等.新疆路面沥青混合料疲劳寿命预估分析[J].公路工程,2017,42(1).
- [13] 涂义鹏.考虑温度场的沥青路面车辙变化特征分析研究[D].长沙:长沙理工大学,2014.
- [14] 单景松,杜贝贝.沥青路面温度场分析及全时域受力特性[J].公路工程,2014,39(1).

收稿日期:2018-12-06

(上接第85页)

- [5] Zhi-chao Zhang, Yu-min Chen, Han-long Liu. Numerical investigation on the impact resistance of road barriers of micropile-MSE wall for subgrade[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 82.
- [6] 贺永强,杨仕教,罗辉,等.基岩滑坡治理中钢管微型桩简化计算方法研究[J].岩土工程学报,2014,36(增刊2).
- [7] 周群华.基于桩土相互作用的抗滑桩改进模式三维数值模拟研究[D].天津:天津大学,2014.
- [8] 杜庆者.板连式微型桩群加固土质边坡机理与计算方法研究[D].成都:西南交通大学,2017.
- [9] 胡田飞,梁龙龙,朱本珍.微型桩—锚组合新结构抗滑

特性的数值分析[J].地下空间与工程学报,2016,12(5).

- [10] 李昌龙,姬同旭.承台微型桩系统加固土质滑坡设计计算方法研究[J].中外公路,2017,37(4).
- [11] 李志雨,何晖,郭智.基于桩间土拱效应的微型桩间距的分析[J].山地学报,2015,33(3).
- [12] 吴永珍,宋享桦,陆瑶.基于协同响应的微型桩复合土钉合理桩间距的有限元分析[J].施工技术,2017,46(增刊1).
- [13] 赖鹏晖,黄如发,张志祥,等.微型桩—加筋土挡墙应力变形特性和加固机理分析[J].福建建设科技,2016(1).

收稿日期:2018-11-19