

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.06.013

半刚性基层沥青路面车辙有限元模拟及灰关联分析

冯伟¹, 刘朝晖^{1,2*}, 柳力¹, 李盛¹

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.长沙理工大学 公路养护技术国家工程实验室)

摘要:车辙是高温地区半刚性基层沥青路面典型破坏形式之一,基于足尺路面试验环道(RIOHTRACK)路面结构的特点,利用实测温度场和累计标准轴载作用次数对足尺路面结构进行车辙仿真计算,采用Abaqus有限元软件建立模型并与实测车辙值进行对比,实测值与计算值都表现出了相同规律且具有较高的一致性。分析了不同温度、行车速度、荷载水平以及荷载作用次数对车辙的影响,并采用灰关联分析的方法对沥青路面车辙深度的影响因素进行比较。结果表明:温度与荷载水平对车辙的影响较大,关联度最大的为温度,其次是荷载水平,而行车速度与荷载作用次数对其影响较小。

关键词:道路工程; 沥青路面; 车辙; 有限元; 灰关联分析

车辙作为沥青混凝土路面特有的一种破坏形式,近年来已成为沥青路面的严重病害。目前,中国高速公路绝大多数为沥青路面。因此,对于沥青路面车辙形成规律及其影响因素的研究非常重要。车辙实质上是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,主要是沥青路面结构、沥青混合料性能以及交通状况、气候和温度的共同作用而形成的。在内部因素中,沥青混合料的黏弹性能很大程度影响到车辙量的大小;对于外部因素,交通条件通过荷载水平以及荷载作用次数来体现,在实际路面内部自上而下是一个变化的温度场,沥青混合料在不同的温度下,其黏弹性能有很大变化。所以温度也是车辙的重要影响因素。

目前对沥青路面车辙的研究较多,但都是通过控制变量法来研究沥青路面车辙的影响因素,该文依托中国第1条足尺路面试验环道(RIOHTRACK)的大量观测数据为基础开展研究,利用Abaqus有限元建立二维模型与实测车辙值对比,以验证两者的拟合度。并在此基础上增加不同因素的不同应变水平,利用数值模拟得到的结果,通过正交试验与灰关联分析方法分析沥青路面的车辙影响因素,以车辙变形量作为灰关联分析中的参考序列,进行各影响因素的灰关联排序。

1 有限元分析模型的建立

模型采用典型的半刚性基层沥青路面结构,以北京足尺路面试验环道(RIOHTRACK)STR1和STR8两结构段为模型,如表1所示。模拟夏季高温试验条件下的车辙发展规律,模拟所需参数尽量与试验环道

表1 两种沥青路面结构示意图

结构	STR1	STR8	
面层	上面层	4 cm SBS-AC13 沥青混合料	4 cm SBS-AC13 沥青混合料
	中面层	—	6 cm A30-AC20 沥青混合料
基层	下面层	8 cm A30-AC20 沥青混合料	8 cm A70-AC25 沥青混合料
		20 cm 水泥稳定 级配碎石	18 cm 水泥稳定 级配碎石
底基层		20 cm 水泥稳定 级配碎石	20 cm 水泥稳定 级配碎石
		20 cm 水泥稳定土	20 cm 水泥稳定土
土基	20 cm 水泥稳定土	—	
	土基	土基	

收稿日期:2020-12-03(修改稿)

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2018YFB1600200);国家自然科学基金资助项目(编号:51678078);长沙理工大学公路养护技术国家工程实验室开放基金资助项目(编号:kfj180101)

作者简介:冯伟,男,硕士研究生。E-mail:fw17872345611@163.com

*通信作者:刘朝晖,男,博士,教授。E-mail:zh2309471@yahoo.com

条件一致。采用 Abaqus 建立非线性二维有限元模型,模型尺寸为 $3.75\text{ m}\times 3\text{ m}$ 。在加载时采用 CPE8R (四边形八节点的二次缩减积分平面应变单元)。约束模型底面取为固定端约束,左右边界均为没有 X 方向位移和绕 Y 轴和 Z 轴的转动。研究表明:基层和土基在实际的路面结构中由于荷载的作用会表现出一定的非线性和塑性响应特性。但其应力较小,对路面的变形影响可以忽略不计,所以在进行有限元分析时,基层及土基视为弹性材料,只考虑二者的弹性性质;采用有限元分析软件中的蠕变模型和弹性模量表征沥青混合料的非线性特征。假设各结构层之间完全连续,不计路面结构体自重。通过改变材料参数模拟路面在不同温度下的车辙。

1.1 确定有限元分析参数

有限元软件中的蠕变模型有两种描述方式:时间硬化蠕变模型和应变硬化蠕变模型,采用 Abaqus 软件分析常用的 Bailey-Norton 蠕变规律进行蠕变变形的分析,即时间硬化模型。这种模型在模拟路面结构过程中,假设路面所受应力 q 保持不变。可以表示为温度 T 、应力 q 和时间 t 的函数,时间硬化蠕变模型的表达式为:

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

式中: $\dot{\epsilon}$ 为单轴等效蠕变应变率; q 和 t 分别为偏应力和作用时间; A 、 n 、 m 为模型参数, $A > 0$ 、 $n > 0$ 、 $-1 < m \leq 0$ 。

沥青混合料的弹性参数采用抗压回弹试验确定,测定不同温度下($20\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$)的抗压回弹模量,蠕变参数通过动三轴蠕变试验确定,各参数如表 2~4 所示。泊松比的选取(随温度变化)参考 AASHTO 设计指南。

表 2 沥青混合料蠕变参数

混合料类型	温度/ $^\circ\text{C}$	A	n	m
AC-13	20	6.536×10^{-11}	0.937	-0.592
	30	3.325×10^{-9}	0.862	-0.587
	40	1.446×10^{-8}	0.792	-0.577
	50	1.390×10^{-6}	0.414	-0.525
	60	1.464×10^{-5}	0.336	-0.502
AC-20	20	4.580×10^{-11}	0.944	-0.596
	30	2.461×10^{-9}	0.796	-0.585
	40	3.673×10^{-8}	0.773	-0.570
	50	4.802×10^{-6}	0.595	-0.532
	60	7.778×10^{-5}	0.384	-0.441

续表 2

混合料类型	温度/ $^\circ\text{C}$	A	n	m
AC-25	20	4.590×10^{-11}	0.922	-0.581
	30	3.461×10^{-9}	0.859	-0.576
	40	1.956×10^{-8}	0.830	-0.562
	50	1.200×10^{-6}	0.322	-0.522
	60	3.755×10^{-5}	0.210	-0.418

注:3种沥青分别为 SBS 改性沥青、AH-30[#]、AH-70[#]。

表 3 沥青混合料弹性参数

混合料类型	温度/ $^\circ\text{C}$	抗压回弹模量/MPa	泊松比
AC-13	20	820	0.25
	40	550	0.35
	60	525	0.45
AC-20	20	910	0.25
	40	600	0.35
	60	380	0.45
AC-25	20	1031	0.25
	40	710	0.35
	60	390	0.45

表 4 基层和土基材料弹性参数

材料	抗压回弹模量/MPa	泊松比
水泥稳定级配碎石 CTB	1 250	0.25
水泥稳定土 CS	310	0.30
土基 SG	45	0.40

1.2 荷载作用时间计算

中国现行规范中,将车轮荷载简化为双轮圆形均布荷载,但实际车辆轮胎对路面的作用为非圆形均布荷载。轮胎与路面的接触面实际上是矩形与两个类似半圆组成,可以等效为一个矩形。在数值模拟计算时,将动态荷载作用简化为静态荷载作用,采用荷载作用时间累加的原则。计算公式如下:

$$t = \frac{0.36NP}{n_w p B v} \quad (2)$$

式中: t 为轮载累积作用时间(s); N 为轮载作用次数(次); P 为车辆轴重(kN); n_w 为轴的轮数(个); 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)。

选取足尺环道实际运行第 7 加载周期轴载,共累计运行 20 125 km,以设计弯沉值和沥青层层底拉应

力为设计指标,按照式(3)换算成标准轴载的当量作用次数:

$$N = \sum_{i=1}^K C_1 C_2 n_1 \left(\frac{P_i}{P} \right)^{4.35} \quad (3)$$

式中: N 为标准轴载的当量轴次(次/d); n_1 为换算汽车的作用次数(次/d); P 为标准轴载(kN); P_i 为换算车型的轴载(kN); C_1 为轮组系数,双轮组为 1,单轮组

为 6.4,四轮组为 0.38; C_2 为轴数系数。

通过式(3)按弯沉等效原理的 4.35 次方计算,第 7 加载周期相当于 10 t 标准轴载累积作用次数 1 290 578 次。根据式(2),环道加载车辆行驶速度为 40 km/h,可得轴载一次作用时间为 0.021 87 s,计算 1 290 578 次轴载作用后的累积作用时间为 28 225 s,如表 5 所示。

表 5 车辙计算模型荷载参数

轮胎接地宽度 B/cm	轮胎接地压力 p/MPa	轴的轮数	车轴重 P/kN	轮胎接地长度 L/cm	两轮中心距/cm	行车速度 $v/(km \cdot h^{-1})$	一次加载作用时间/s	轮载作用次数 $N/万次$	累计荷载作用时间 t/s
21.6	0.7	4	100	24.3	40	0.021 87	129	28 225	31.95

1.3 足尺路面试验环道温度场分布规律

北京足尺路面试验环道(RIOHTRACK)的建设期间,在不同路面结构内部深度都埋设了温度传感器,最浅测点距路表 4 cm,最深测点距路表 250 cm。关于传感器的布设与沥青路面的应力应变响应已有研究。至今环道的结构内部温度与大气已连续观测近 4 年,基于这些观测数据,研究路面结构温度场的分布规律。

首先,选取环道两结构 2016 年 5 月至 2017 年 7 月的内部温度,找出路面结构温度随时间变化的一般规律,研究得到:其日温度随着大气温度变化呈现周期性波动,波动曲线呈现非对称波的特点。基于这个特点以及路面温度随深度变化的规律,研究了路面温度随深度变化曲线的拟合方法,建立了路面温度随深度变化的函数模型。为反映不同季节气候因素对路面结构温度状况的影响,采用不同的回归参数表征低温和高温季节路面结构的温度计算模型。温度随深度变化函数模型如下:

$$T = ah + \frac{b}{h+0.5} + c \quad (4)$$

式中: T 为距路表 h 处的温度; h 为深度; a 、 b 、 c 为回归系数。

采用式(4)的模型对两结构内部温度数据进行回归分析(表 6)。由表 6 可以看出:路面结构内部温度随深度变化曲线采用该模型的回归系数达 0.95 以上,具有十分良好的拟合效果。

由式(4)可以确定高温和低温季节路面结构内部连续变化的温度场,并且可知任一深度处的温度值,以此路面温度计算模型进行数值模拟计算。

表 6 两组结构回归系数

结构	a	b	c	R^2	
高温季节	STR1	-0.043	1.675	34.27	0.969 2
	STR8	-0.052	2.24	35.82	0.958 4
低温季节	STR1	0.067	2.336	-3.25	0.979 4
	STR8	0.065	0.974	-4.18	0.982 8

2 有限元计算与实测对比分析

沥青路面车辙是由路面结构各层位的永久变形累积而成,现以足尺路面试验环道 STR1、STR8 两种结构为例进行有限元分析计算,选取足尺路面试验环道第 3~7 加载周期轴载进行模拟计算。图 1 为 0.7 MPa 压力下,累计轴载作用次数为 129 万次的有限元模拟 STR1 结构车辙变形云图。STR1、STR8 结构计算结果与足尺试验环道相应加载轴载产生的实测车辙对比如图 2 所示。

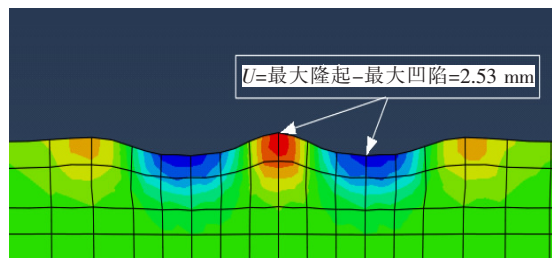


图 1 车辙变形云图(作用 129 万次)

由图 2 可以看出:两种路面结构的实测值与计算

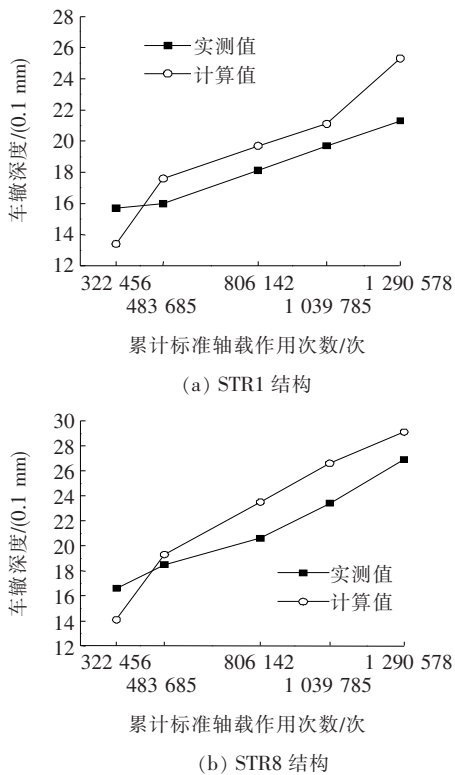


图2 结构STR1和STR8车辙深度计算与实测对比图

值较为接近。可以发现:

(1) 在大约50万次标准轴载作用以前,实测值与计算值均出现了相交的现象,考虑到两点因素:①从轴载方面分析:为了检测不同轴重对路面结构响应的影 响,足尺环道在实际加载前期分别采用载重轴单轴重10 t和13 t进行对比预压。②因为加载前期,实际路面施工碾压密实度不足,存在压密型车辙,路面的二次压实导致实测值比计算值大。此阶段的车辙以压密型车辙占主导。

(2) 而在50万次标准轴载作用之后,实际路面在车辆的剪切应力作用下,沥青混合料发生横向剪切流动以及高温下的压密变形,使得轮迹带处凹陷,两侧隆起,此阶段为失稳型车辙占主导。此阶段有限元模拟计算比实测值大,从温度方面分析:原因在于模拟计算温度模型为足尺试验环道一年中大气温度与大地温度共同作用的分析拟合模型,拟合精度较高。但实际环道加载时间为2016年11月到2017年03月,属于冬季较低温度时间段,而在低温下,沥青混合料更大程度上体现出线弹性的材料性质,所以由于车辆荷载而产生的变形部分会以弹性变形的方式恢复;当温度升高以后,沥青混合料黏度降低,抗剪切强度变弱,其蠕变

效应占主要因素,在长期行车荷载累积作用下车辙变形逐渐增大。由此判断:11、12、1、2、3月份温度较低,产生的累积变形较小,导致实测值比计算值小。此次模拟是以试验环道实测温度场、连续恒定标准轴载作用条件下的车辙发展情况开展,条件较为单一。而实际上考虑安全因素,目前试验环道在07:00—18:00时间段内进行加载,实际路面受到不断变化的温度和荷载的耦合作用,路面情况更为复杂,所以计算值与实测值存在误差。

(3) 数值模拟采用常规的有限元计算方法——时间硬化蠕变模型,由于足尺环道车辆加载过程中,实际道路伴随着应力状态的变化;而时间硬化模型分析过程中假设应力状态 q 保持不变,这一因素导致误差出现,但误差较小。

(4) 总体上,两种路面结构采用有限元进行模拟后,计算结果与实测值差异性较小;从车辙变化曲线看,随着累计轴次增加,计算值与实测值同时呈现逐渐增大的演变趋势。

通过表7可以看出:在32.2万次、48.4万次、80.6万次、104万次、129万次累计标准轴载作用下,两种路面结构的有限元车辙预测精度较高,平均相对误差为5%~6%,说明利用此有限元参数模型可以较好地模拟计算,得出的数值模拟计算结果误差小,精度高,与实际车辙值具有很好的一致性。由此说明利用仿真计算可以对加速加载试验条件下两种结构车辙的发展变化规律进行模拟。

表7 有限元模拟计算精度

结构	平均 误差/ mm	平均 绝对误 差/mm	平均相 对误 差/%	误差的 方差	误差的 标准差
STR1	0.126	0.218	6.015	0.057	0.238
STR8	0.132	0.232	5.039	0.061	0.246

3 车辙影响因素灰色关联分析

3.1 灰色关联分析方法

灰色系统理论是一种系统科学的理论方法,而灰色关联分析方法是灰色系统理论的重要方法之一,近年来已经在道路工程中有了很多的应用。灰关联分析

求解的主要步骤为:

(1) 确定分析序列:假设与车辙相关的因素有 m 个,总共有 n 组试验,那么比较序列可以表示为:

$$X'_1 = [x'_1(1), x'_2(2), \dots, x'_1(n)]$$

⋮

$$X'_m = [x'_m(1), x'_m(2), \dots, x'_m(n)]$$

系统的参考序列可以表示为:

$$X'_0 = [x'_0(1), x'_0(2), \dots, x'_0(n)]$$

(2) 数据无量纲化:由于每个数据单元的单位 and 数量级都是不同的,如果不进行无量纲化,将会导致计算结果不准确或计算波动强度过大。

$$x_i(k) = \frac{x'_i(k)}{x'_i(1)}$$

式中: $i=0, 1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, n$ 。

(3) 计算灰关联系数和灰关联度:

$$\zeta_i(k) =$$

$$\frac{\min |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \cdot \max |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \cdot \max |x_0(k) - x_i(k)|}$$

式中: ρ 为分辨系数,通常取 0.5。

最后得到灰色关联度:

$$\gamma_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \zeta_i(k)$$

γ_i 值越接近 1,相关性越好。

(4) 关联度排序:各试验因素与车辙深度之间的关联程度,通过计算关联度值的大小排序来反映,通过比较关联度的大小来判断各影响因素对研究对象(车辙深度)的影响程度。

3.2 正交试验方案设计

已有研究表明:温度、行车速度、荷载作用大小、以及荷载作用次数是车辙深度的主要影响因素,其中,荷载作用大小通过接地应力来实现。该文共设计了以上 4 个因素,分别选取 3 个试验水平进行正交试验设计。其中包括:温度水平为:20、40 和 60 °C [均为路表温度,根据各材料在路面结构中的位置,以各结构层中间位置为代表值,由式(3)温度模型确定各结构层温度,并选取相应温度下的参数值进行计算];行车速度水平为:40、80 和 120 km/h;荷载作用大小水平为:100、140 和 220 kN;荷载作用次数水平为:1 万次、10 万次和 100 万次。该文基于以上研究,选取足尺路面环道 STR8 结构进行有限元模拟,采用 $L_9(3^4)$ 正交表进行试验方案设计,正交试验方案设计及计算结果见表 8。

表 8 正交试验方案及计算结果

试验 编号	温度/ °C	荷载作用 大小/kN	行车速度/ (km · h ⁻¹)	荷载作用 次数/次	车辙深 度/mm
1	20	100	40	1.0 × 10 ⁴	0.58
2	20	140	80	1.0 × 10 ⁵	0.65
3	20	220	120	1.0 × 10 ⁶	0.86
4	40	100	80	1.0 × 10 ⁶	4.30
5	40	140	120	1.0 × 10 ⁴	1.02
6	40	220	40	1.0 × 10 ⁵	1.68
7	60	100	120	1.0 × 10 ⁵	9.80
8	60	140	40	1.0 × 10 ⁶	14.0
9	60	220	80	1.0 × 10 ⁴	10.8

4 灰关联度计算及因素分析

将车辙深度作为灰色系统的参考序列,则该系统的比较序列为温度、荷载作用大小、行车速度以及荷载作用次数。分别计算各序列的灰关联度系数和各个影响因素的灰关联度。计算结果见表 9。

表 9 灰关联度计算结果

试验 编号	4 个因素下灰关联系数			
	温度	荷载作用大小	行车速度	荷载作用次数
1	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
2	0.997 6	0.994 4	0.982 5	0.847 3
3	0.990 3	0.985 6	0.970 1	0.333 3
4	0.901 0	0.884 8	0.901 0	0.347 3
5	0.995 1	0.992 8	0.975 4	0.984 8
6	0.982 1	0.986 1	0.962 9	0.874 0
7	0.780 0	0.756 0	0.780 0	0.877 2
8	0.699 7	0.684 2	0.680 4	0.393 7
9	0.759 2	0.750 0	0.747 7	0.736 5
γ_i	0.900 6	0.892 6	0.888 9	0.710 5

由表 9 可知:各影响因素灰关联度大小排序为 $\gamma_{\text{温度}} > \gamma_{\text{荷载作用大小}} > \gamma_{\text{行车速度}} > \gamma_{\text{荷载作用次数}}$ 。可以看出:温度对车辙深度的影响最大,荷载作用大小次之,行车速度和荷载作用次数对车辙深度影响较小。

由上述试验结果可知:温度和轴载是沥青路面产生车辙的主要影响因素。所以在纬度较低且高温频发的地区路段,要重点考虑沥青混合料的高温性能,防止其由于长时间处于高温状态而使弹性模量降低,路面

产生较大变形,要提前做好预防性养护;其次,在中国道路运输中,车辆超载现象已非常严重和普遍,超载会使路面车辙深度过大直接导致路面破坏,要加大对严重超载车辆的运输管理。

5 结论

(1) 依托中国第1条足尺路面试验环道(RIOHTRACK)的大量观测数据,得出结构内部温度随路面深度的变化规律。利用实测温度场和累计标准轴载作用次数对足尺路面试验环道结构STR1和STR8进行车辙仿真计算,数值模拟的计算结果与实际车辙深度值具有很好的一致性。

(2) 将有限元模拟计算结果与实测值对比分析,得出大约50万次标准轴载作用以前,沥青路面以压密型车辙占主导;而在大约50万次标准轴载作用之后,实际路面车辙以剪切应力作用下的失稳型车辙占主导。

(3) 通过Abaqus有限元和正交试验设计方法,增加试验因素和试验水平,运用灰关联分析方法研究影响沥青路面车辙深度的影响因素。

(4) 各因素的影响由大到小的排序为:温度>荷载>行车速度>作用次数。对于实际路面,温度和轴载是影响沥青路面车辙深度的两个主要因素。为减少沥青路面的车辙病害,应采取有效措施适时降低路面温度,并加强对重载、超载车辆的运输管理。

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.

[2] 邵腊庚,张仕. 沥青结合料高温性能指标的研究[J]. 中外公路,2018(6).

[3] 张争奇. 高速公路沥青路面维修养护技术[M]. 北京:人民交通出版社,2010.

[4] 杜荣耀,林有贵. 汉堡车辙和APA车辙试验适用范围研究[J]. 中外公路,2019(5).

[5] 张起森,李雪连. 70年来中国沥青路面结构设计方法发展沿革[J]. 中外公路,2019(6).

[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] 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(5).

[8] 周岚,倪富健,赵岩荆. 环境温度及荷载对沥青路面车辙发展的影响性分析[J]. 公路交通科技,2011(3).

[9] 李强,黄葵阳. 沥青路面内部温度预估方法与预估模型[J]. 中外公路,2017(5).

[10] 彭妙娟,许志鸿. 沥青路面车辙预估方法[J]. 同济大学学报(自然科学版),2004(11).

[11] 王旭东,张蕾,周兴业. RIOHTRACK足尺路面试验环道2017年试验研究概况[J]. 公路交通科技,2018(4).

[12] 李辉,黄晓明,张久鹏,等. 基于连续变温的沥青路面车辙模拟分析[J]. 东南大学学报(自然科学版),2007(5).

[13] 廖公云,黄晓明. ABAQUS有限元软件在道路工程中的应用[M]. 南京:东南大学出版社,2008.

[14] 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.

[15] JTG D50—2017 公路沥青路面设计规范[S].

[16] 黄仰贤. 路面分析与设计[M]. 北京:人民交通出版社,1998.

[17] 刘兴东,范植昱. 基于蠕变参数的路面车辙有限元预估模型[J]. 中外公路,2015(1).

[18] 肖倩,王旭东. 足尺路面试验环道路面温度曲线特征及拟合研究[J]. 公路交通科技,2019(3).

[19] 杨毅,刘忠. 动载作用下半刚性基层沥青路面应变响应的演化规律[J]. 中外公路,2017(2).

[20] 冯振刚,李爽. 基于美国足尺路面经验的沥青路面传感器布设方案研究[J]. 中外公路,2017(1).

[21] 朱洪洲,黄晓明. 沥青混合料高温稳定性影响因素分析[J]. 公路交通科技,2004(4).

[22] 葛折圣,黄晓明. 沥青混合料疲劳性能影响因素的灰关联分析[J]. 交通运输工程学报,2002(2).

[23] 杜宇兵,邹晓翎,阮鹿鸣,等. 基于灰色关联理论的沥青薄层罩面层间剪应力影响因素研究[J]. 中外公路,2018(3).

[24] 吴栋,田小革,董凡荣. 基于灰色理论的沥青路面使用性能预测模型[J]. 中外公路,2017(5).

[25] 傅立. 灰色系统理论[M]. 北京:科学技术文献出版社,2000.

[26] 郑南翔,牛思胜,许新权. 重载沥青路面车辙预估的温度-轴载-轴次模型[J]. 中国公路学报,2009(3).

[27] 王浩,陈华鑫. 基于正交试验的沥青路面结构力学响应参数敏感性分析[J]. 中外公路,2017(5).

[28] 董昕,于秀山. 正交试验方法在软件测试中的应用[J]. 北京化工大学学报(自然科学版),2007(1).