

文章编号: 0451-0712(2020)03-0036-07

中图分类号: TU535

文献标识码: A

沥青混合料抗车辙性能的灰色理论分析

刘正伟¹, 郭 瑞¹, 李 萍², 唐郝斌¹, 牛 磊¹, 肖瑞康¹, 曾现恩¹

(1. 陕西理工大学土木工程与建筑学院 汉中市 723001; 2. 兰州理工大学土木工程学院 兰州市 730050)

摘 要: 基于对秦巴山区内公路沥青路面车辙病害成因的调查与分析,通过室内模型试验和对已有研究成果的总结,利用灰色理论分析了不同影响因素对沥青混合料抗车辙性能的影响程度,并建立了以沥青用量、碾压次数及级配类型等因素为参数的沥青混合料抗车辙性能预估模型。研究表明:沥青混合料的集料粗细程度与分形维数成反比,集料越细,其分形维数越大,反之越小;沥青用量对沥青混合料抗车辙性能的影响程度最大,级配类型和温度次之,碾压次数的影响最小;沥青混合料抗车辙性能的主要影响因素为沥青用量、集料级配类型及温度;基于材料组成和外界环境因素建立的沥青混合料抗车辙性能预估模型为沥青路面抗车辙设计提供了依据和手段。

关键词: 道路工程; 灰色理论; 沥青混合料; 抗车辙性能

影响沥青路面使用功能和寿命的因素较多,其中车辙是常见因素之一。车辙是沥青路面面层和基层受车辆轮载反复碾压作用而产生的永久性压缩和侧向流动变形的累积结果^[1]。其不但引起路面结构层发生破坏,且对路面上来往行驶车辆的安全构成严重威胁。近年来,随着交通量和车辆轴载的增大,以及受高温极端天气和渠道化交通等影响,沥青路面车辙病害问题日益严重。而引起沥青路面产生车辙的因素较多,境内外研究人员对其进行了相应研究。刘俊清、张倩、王选仓等分别通过有限元软件和室内模型试验分析了路面温度、车载和速度对沥青路面车辙的影响^[2-5];李丽民等采用室内模型试验和数值模拟研究了空隙率和级配组成对柔性基层沥青路面车辙性能的影响^[6];李萍、郭瑞等研究了不同结构类型沥青混合料抗车辙性能影响因素,对沥青路面车辙主要影响因素及不同影响因素下沥青混合料动稳定度变化规律进行了分析^[7-8]。综上所述可知,影响沥青路面抗车辙性能的因素较多,但主要影响因素有混合料中沥青掺量、压实功、外界环境温度及集料结构类型等。已有研究表明,各因素的影响程度差异较大,但目前有关该方面的研究较少。为探明不同因素对沥青路面抗车辙性能影响程度,本文基于对已有研究成果的总结,通过模型试验

和理论相结合方法研究了沥青混合料抗车辙性能与不同影响因素间关联度,为沥青路面抗车辙性能设计提供依据和手段。

1 灰色理论原理与试验方法

1.1 灰色理论原理

1.1.1 灰色关联度原理

灰色关联分析的基本思想是根据各参数几何曲线的相似程度来判断其联系的密切程度,曲线的形状越接近,相应序列之间的关联度就越大,反之就越小。相似程度应用关联系数和关联度描述^[9]。灰色关联度分析法一般分为以下几个步骤:(1)确定系统行为特征的参考数列和比较数列;(2)对参考数列和比较数列进行均值化处理;(3)求参考数列与比较数列的关联系数;(4)求关联度;(5)对关联度排序。

1.1.2 灰色建模原理

灰色模型是揭示系统内部事物连续发展变化的一种预测模型,其建立一般是针对符合光滑离散函数的数列而言^[10]。灰色预估模型不但能够较真实地反映系统内部事物连续发展变化规律,且具有较高精度和简单实用等特点,其建模主要过程如下所述:(1) $X^{(0)} = \{x_i^{(0)}(k) \mid k = 1, 2, \dots, n; i = 0, 1, 2, \dots, n\}$ 为所要预测试样的原始数据数列,对原始数

据作一次累加生成处理,得到数列 $X_i^{(1)} = \{x_i^{(1)}(k) \mid k = 1, 2, \dots, n; i = 0, 1, 2, \dots, n\}$, 其中

$X_i^{(1)}(k) = \sum_{j=0}^k x_i^{(0)}(j)$; (2) 构造判断矩阵 $B =$

$$\begin{bmatrix} z_0^{(1)}(2) & x_1^{(1)}(2) & \cdots & x_n^{(1)}(2) \\ z_0^{(1)}(3) & x_1^{(1)}(3) & \cdots & x_n^{(1)}(3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_0^{(1)}(n) & x_1^{(1)}(n) & \cdots & x_n^{(1)}(n) \end{bmatrix}, Y_n = \begin{bmatrix} x_0^{(0)}(2) \\ x_0^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x_0^{(0)}(n) \end{bmatrix},$$

根据 $\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y = [a, b_1, b_2, \dots, b_n]^T$ 用最小二乘法求出辨识参数 a 和 b ; (3) 将新生成数列的变化趋势用微分方程近似表述为 $\frac{dx_1^{(1)}}{dt} + ax_1^{(1)} =$

$b_1 x_1^{(1)} + b_2 x_2^{(1)} + \dots + b_n x_n^{(1)}$; (4) 求出预估模型

$$\hat{x}_1^{(1)}(k+1) = (x_0^{(1)} - \frac{1}{a} \sum_{i=1}^n b_i x_i^{(1)}(k+1)) e^{-ak} +$$

$$\frac{1}{a} \sum_{i=1}^n b_i x_i^{(1)}(k+1); (5) \text{精度检验。}$$

1.2 试验方法

1.2.1 主要原材料性能

(1) 胶凝剂性能。

试验选用某公司生产的重交通石油沥青 AH-90 作为沥青混合料胶凝剂。经测定,其主要性能指标见表 1。

表 1 沥青胶凝剂主要性能指标

项目	测定值	
针入度(25℃, 100 g, 5 s)/0.1 mm	95	
蜡含量(蒸馏法)/%	2.52	
软化点/℃	47.6	
动力黏度(60℃)/(Pa·s)	165.2	
密度/(g·cm ⁻³)	0.996	
溶解度/%	99.59	
闪点/℃	332	
延度/cm	10℃	72
	15℃	>150

(2) 集料性能。

试验用矿料采用汉中地区某采石场生产的砂岩,按照规程(JTG E42-2005)中试验方法,经测定其主要技术性能见表 2,满足规范(JTJ 034-2000)强度要求。

1.2.2 试验方案

为进行对比分析,试验选取了 3 种类型沥青混合料,每种类型选取上、中、下 3 种矿料级配。首先,

表 2 集料的主要技术性能试验结果

项目	测定值	
吸水率/%	1.20	
与沥青黏附性等级/级	5.40	
洛杉矶磨耗损失/%	20.43	
针片状含量/%	9.50	
矿粉密度/(g·cm ⁻³)	2.81	
表观密度 g·cm ⁻³	10~20 cm	3.51
	5~10 cm	1.50
	石屑	1.43

通过马歇尔试验确定出不同油石比条件下沥青混合料的矿料间隙率、空隙率及沥青饱和度等体积参数,并绘制不同油石比与体积参数间关系曲线,确定出各沥青混合料马歇尔试验最佳沥青用量;其次,以马歇尔试验最佳沥青用量为依据,上下波动 0.1%~0.3% 拌和沥青混合料制作车辙试件(如图 1 所示),且车辙试件密实度应为马歇尔试验标准击实密度的(100±1)%;最后,将车辙试件在室温下冷却 12 h 后,放入内部温度为(60±0.5)℃的车辙仪(如图 2 所示)中恒温养护 5 h 后进行车辙试验,测定其动稳定度值。



图 1 沥青混合料车辙试件



图 2 车辙试验仪

2 结果分析与讨论

2.1 集料分形特性

沥青混合料级配组成对其抗车辙性能影响较大,而组成级配的集料由不同粒径的粗细集料颗粒组成。由于集料加工破碎的随机性,致使通过同一筛孔的矿料颗粒的几何形状、特征尺寸不完全相同,集料的粒径表现出随机和不规则性,很难用常规的数学语言准确描述^[11]。而利用分形理论,可以用较少的参数定量地描述沥青混合料的级配特征。根据已有研究成果,沥青混合料集料级配分形维数与质量分数间满足下列关系:

$$P(x) = \frac{r_{\min}^{3-D} - r^{3-D}}{r_{\min}^{3-D} - r_{\max}^{3-D}}$$

式中: r_{\min} 为集料中最小颗粒的粒径; r_{\max} 为集料中最大颗粒的粒径; r 为集料中某颗粒粒径尺寸; D 为表征集料粒径分布的分形维数。

基于对已有研究成果的归纳总结和分析,选取了 AC、SMA 及 GAM 等 3 种类型沥青混合料,每种类型混合料分别选取 3 种级配类型进行对比分析。所选沥青混合料集料级配数据见表 3。以表 3 中不同沥青混合料级配为依据,运用上述沥青混合料集料级配分形维数计算方法分别计算不同类型沥青混合料的分形维数(D)和相关系数(R),以此来反映不同混合料的级配类型。计算结果见表 4。

表 3 不同类型沥青混合料的级配组成

沥青混合料类型	级配类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%										
		19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
AC	上限	100	99	91	80	63	49	35	27	18	14	8
	中值	100	95	84	70	48	32	21	18	13	10	6
	下限	100	90	76	60	34	20	13	9	7	5	4
SMA	上限	100	96	84	64	29	23	21	17	14	13	12
	中值	100	94	75	55	25	19	18	15	13	12	10
	下限	100	91	66	46	21	16	15	13	11	10	9
GAM	上限	100	94	82	62	32	21	18	18	15	13	11
	中值	100	92	77	55	26	18	16.5	16.5	13.7	12.2	10
	下限	100	88	70	48	23	15	14	14	12.4	11	9

表 4 不同级配类型沥青混合料的分形维数数计算

沥青混合料类型	编号	级配类型	分形维数 D	相关系数 R	沥青混合料类型
AC	1	上限	2.56	0.994 2	悬浮密实型
	2	中值	2.50	0.989 0	骨架密实型
	3	下限	2.40	0.982 1	骨架空隙型
SMA	4	上限	2.60	0.896 3	悬浮密实型
	5	中值	2.59	0.877 7	骨架密实型
	6	下限	2.57	0.854 4	骨架空隙型
GAM	7	上限	2.59	0.898 1	悬浮密实型
	8	中值	2.57	0.869 1	骨架密实型
	9	下限	2.56	0.844 3	骨架空隙型

由表 4 可以看出,相同级配类型条件下,SMA 沥青混合料的分形维数值最大,GAM 的次之,AC 的最小。究其原因为:与表 3 沥青混合料级配组成对比可知,反映沥青混合料级配组成粗细程度的分形维数与集料中矿粉含量成正比关系,矿粉含量越

多分形维数越大,反之越小。其与文献[12]中的研究成果相符合。对于同种类型沥青混合料,级配上限(悬浮密实型)沥青混合料的分形维数最大,级配中值(骨架密实型)的次之,级配下限(骨架空隙型)的最小。究其原因为:与骨架密实型级配相比,悬浮

密实型级配中细集料含量多,故其分形维数较大;而与骨架空隙型级配相比,骨架密实型级配中细集料含量较多,故其分形维数比骨架空隙型大。所选3种类型沥青混合料的分形维数与级配相关系数最小值为0.8443,表明二者相关性较好,分形维数可用

于反映沥青混合料的级配特征。

2.2 影响因素灰关联度

根据上述试验方案,选取沥青用量、碾压次数、级配类型及试验温度等主要影响因素进行沥青混合料高温稳定性车辙试验。不同条件下的试验结果见表5。

表5 不同级配类型沥青混合料的试验结果

编号	影响因素					
	动稳定度(DS) 次·mm ⁻¹	分形维数 (D)	相关系数 (R)	沥青用量 (C)/%	温度 (T)/℃	碾压次数 (N)/次
1	2 956	2.56	0.994 2	4.9	59.5	12
2	3 457	2.50	0.989 0	4.7	60.0	18
3	2 635	2.40	0.982 1	4.5	60.5	24
4	5 002	2.60	0.896 3	6.2	60.0	18
5	6 220	2.59	0.877 7	6.1	60.0	18
6	5 583	2.57	0.854 4	6.0	60.5	18
7	2 021	2.59	0.898 1	5.9	60.0	24
8	2 334	2.57	0.869 1	5.4	60.0	24
9	1 605	2.56	0.844 3	5.3	59.5	24

以表5中动稳定度作为参考数列,以分形维数、相关系数、沥青用量、温度及碾压次数等作为比较数

列,形成原始数列(见表6),并对其进行均值化处理,生成新参考数列和比较数列(见表7)。

表6 沥青混合料原始数列

编号	X ₀₁	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
1	2 956	2.56	0.994 2	4.9	59.5	12
2	3 457	2.50	0.989 0	4.7	60.0	18
3	2 635	2.40	0.982 1	4.5	60.5	24
4	5 002	2.60	0.896 3	6.2	60.0	18
5	6 220	2.59	0.877 7	6.1	60.0	18
6	5 583	2.57	0.854 4	6.0	60.5	18
7	2 021	2.59	0.898 1	5.9	60.0	24
8	2 334	2.57	0.869 1	5.4	60.0	24
9	1 605	2.56	0.844 3	5.3	59.5	24

表7 沥青混合料生成数列

编号	X ₀₁	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
1	0.845	1.004	1.091	0.900	0.992	0.600
2	0.989	0.981	1.085	0.863	1.000	0.900
3	0.754	0.942	1.077	0.827	1.008	1.200
4	1.430	1.020	0.983	1.139	1.000	0.900
5	1.779	1.016	0.963	1.120	1.000	0.900
6	1.597	1.008	0.937	1.102	1.008	0.900
7	0.480	1.016	0.985	1.084	1.000	1.200
8	0.667	1.008	0.953	0.992	1.000	1.200
9	0.459	1.004	0.926	0.973	0.992	1.200

基于灰色关联法计算思路,即均值化、计算序列差、求关联系数、计算关联度及排序,对生成数列进行计算,得各因子比较数列与参考数列间关联度值

$$\begin{aligned} \gamma_{01} &= \frac{1}{9} \sum_{k=1}^9 \xi_{01}(k) = 0.59; \gamma_{02} = \frac{1}{9} \sum_{k=1}^9 \xi_{02}(k) \\ &= 0.55; \gamma_{03} = \frac{1}{9} \sum_{k=1}^9 \xi_{03}(k) = 0.62; \gamma_{04} = \\ &\frac{1}{9} \sum_{k=1}^9 \xi_{04}(k) = 0.58; \gamma_{05} = \frac{1}{9} \sum_{k=1}^9 \xi_{05}(k) = 0.49。 \end{aligned}$$

由上述计算结果知,沥青混合料抗车辙性能与各影响因素间相关性程度由大到小的顺序为:沥青用量 $\gamma_{03} >$ 分形维数 $\gamma_{01} >$ 温度 $\gamma_{04} >$ 相关系数 $\gamma_{02} >$ 碾压次数 γ_{05} 。由以上结果可知,沥青用量与沥青混合料抗车辙性能的相关程度最大,其对沥青混合料抗车辙性能的影响最为显著;集料分形维数和试验温度与沥青混合料抗车辙性能的关联

度值较接近,二者与沥青混合料抗车辙性能相关程度较高,其对沥青混合料抗车辙性能的影响较为显著;碾压往返次数与沥青混合料抗车辙性能的相关程度最小,其对沥青混合料抗车辙性能的影响最小。故影响沥青混合料抗车辙性能的主要因素为沥青用量、集料级配类型及试验温度,其与室内试验结果相吻合。

2.3 抗车辙性能预估模型

基于上述研究结果,选取集料分形维数 D 、相关系数 R 、沥青用量 C 、碾压次数 N 及温度 T 等作为参数,建立沥青混合料抗车辙性能预估模型。

采集归纳和整理原始试验数据(见表 5),并进行初值化处理得数列 $x^{(0)}$ (见表 8)。对表 8 中经初值化处理后的数列 $x^{(0)}$ 进行一次累加处理生成得数列 $x^{(1)}$ (见表 9)。

表 8 沥青混合料原始数据初值化处理结果

参数		$X_i^{(0)}(1)$	$X_i^{(0)}(2)$	$X_i^{(0)}(3)$	$X_i^{(0)}(4)$	$X_i^{(0)}(5)$	$X_i^{(0)}(6)$	$X_i^{(0)}(7)$	$X_i^{(0)}(8)$	$X_i^{(0)}(9)$
Ri_{DS}	$X_1^{(0)}$	1	1.169	0.891	1.692	2.104	1.889	0.568	0.790	0.543
D	$X_2^{(0)}$	1	0.977	0.938	1.016	1.012	1.004	1.012	1.004	1.000
R	$X_3^{(0)}$	1	0.995	0.988	0.902	0.883	0.859	0.903	0.874	0.849
C	$X_4^{(0)}$	1	0.959	0.918	1.265	1.245	1.224	1.204	1.102	1.082
T	$X_5^{(0)}$	1	1.008	1.017	1.008	1.008	1.017	1.008	1.008	1.000
N	$X_6^{(0)}$	1	1.500	2.000	1.500	1.500	1.500	2.000	2.000	2.000

表 9 一次累加处理结果

参数		$X_i^{(1)}(1)$	$X_i^{(1)}(2)$	$X_i^{(1)}(3)$	$X_i^{(1)}(4)$	$X_i^{(1)}(5)$	$X_i^{(1)}(6)$	$X_i^{(1)}(7)$	$X_i^{(1)}(8)$	$X_i^{(1)}(9)$
Ri_{DS}	$X_1^{(1)}$	1	2.169	3.061	4.753	6.857	8.746	9.314	10.104	10.647
D	$X_2^{(1)}$	1	1.977	2.914	3.930	4.941	5.945	6.957	7.961	8.961
R	$X_3^{(1)}$	1	1.995	2.983	3.884	4.767	5.626	6.530	7.404	8.253
C	$X_4^{(1)}$	1	1.959	2.878	4.143	5.388	6.612	7.816	8.918	10.000
T	$X_5^{(1)}$	1	2.008	3.025	4.034	5.042	6.059	7.067	8.076	9.076
N	$X_6^{(1)}$	1	2.500	4.500	6.000	7.500	9.000	11.000	13.000	15.000

设 $Z_1^{(1)}$ 为 $X_1^{(1)}$ 相邻数据均值的生成序列,即: $z_1^{(1)}(k) = -0.5[x_1^{(1)}(k-1) + x_1^{(1)}(k)]$ (其中 $k=2,3,\dots,n$),则有: $Z_1^{(1)} = (z_1^{(1)}(2), z_1^{(1)}(3), z_1^{(1)}(4), z_1^{(1)}(5), z_1^{(1)}(6), z_1^{(1)}(7), z_1^{(1)}(8), z_1^{(1)}(9)) = (-1.585, -2.615, -3.907, -5.805, -7.802, -9.030, -9.709, -10.375)$ 。故有:

$$B = \begin{bmatrix} z_1^{(1)}(2) & x_2^{(1)}(2) & \cdots & x_6^1(2) \\ z_1^{(1)}(3) & x_2^{(1)}(3) & \cdots & x_6^1(3) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ z_1^{(1)}(9) & x_2^{(1)}(9) & \cdots & x_6^1(9) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -1.585 & 1.977 & 1.995 & 1.959 & 2.008 & 2.500 \\ -2.615 & 2.914 & 2.983 & 2.878 & 3.025 & 4.500 \\ -3.907 & 3.930 & 3.884 & 4.143 & 4.034 & 6.000 \\ -5.805 & 4.941 & 4.767 & 5.388 & 5.042 & 7.500 \\ -7.802 & 5.945 & 5.626 & 6.612 & 6.059 & 9.000 \\ -9.030 & 6.957 & 6.530 & 7.816 & 7.067 & 11.000 \\ -9.709 & 7.961 & 7.404 & 8.918 & 8.076 & 13.000 \\ -10.375 & 8.961 & 8.253 & 10.000 & 9.076 & 15.000 \end{bmatrix}$$

$Y_N = [x_1^{(0)}(2), x_1^{(0)}(3), x_1^{(0)}(4), x_1^{(0)}(5), x_1^{(0)}(6), x_1^{(0)}(7), x_1^{(0)}(8), x_1^{(0)}(9)]^T = [1.169, 0.891, 1.692, 2.104, 1.889, 0.568, 0.790, 0.543]^T$, 故有:
 $\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y_N = [a, u]^T = (2.532, -44.610, -9.872, 9.488, -51.866, 3.841)^T$.

综上所述可知,当已知沥青混合料的分形维数、相关系数、沥青用量、碾压次数及温度时,可建立如下式所示动稳定度预测模型。

$$\hat{x}_1^{(1)}(k+1) = \left[1 - \frac{1}{a} \sum_{i=2}^6 b_i x_i^{(1)}(k+1) \right] e^{-ak} + \frac{1}{a} \sum_{i=2}^6 b_i x_i^{(1)}(k+1)$$

$$\hat{x}_1^{(0)}(k+1) = [\hat{x}_1^{(1)}(k+1) - \hat{x}_1^{(1)}(k)] \times 2.956$$

其中, $k \geq 9$, $\hat{a} = (2.532, -44.610, -9.872, 9.488, -51.866, 3.841)^T$ 。

对建立的预测模型进行残差大小和后验差检验,经计算知车辙试验预测数据的平均相对误差为 9.94%、最大相对误差为 18.3%,其均小于 20%,满足要求^[13]。原始序列和残差序列的均方差比值为 0.29,介于 0~0.35 之间;小误差概率为 1,大于 0.95。故所建沥青混合料抗车辙性能预测模型的精度等级为一级(优)。

由建立的沥青混合料抗车辙性能预估模型可知,分形维数和相关系数均负相关于动稳定度,说明集料粒径偏粗沥青混合料的抗车辙性能优于集料粒径偏细沥青混合料,这与所选 3 种类型沥青混合料抗车辙性能室内试验结果相一致;沥青用量和碾压次数正相关于动稳定度,分析其原因为适当增加沥青用量和碾压次数提高了集料颗粒相互间的黏附力和密实度,有利于沥青混合料抵抗车辙变形;试验温度负相关于动稳定,即随着温度升高沥青混合料的动稳定度降低,其与室内模型试验结果相吻合。综上所述可知,进行沥青路面抗车辙性能设计时,应适当增加混合料中的沥青用量和碾压次数,集料应尽

可能采用几何特性优良和优化级配的碎石以提高集料间密实程度,严格控制试验温度,以提高沥青路面抗车辙性能。但当无法用级配优化方法改善路面抗车辙性能时可适当添加外加剂,其对提高沥青混合料抗车辙性能有帮助。

3 结语

(1) 沥青混合料集料粗细程度与分形维数成反比,集料越细分形维数越大,反之越小;分形维数反映了沥青混合料的级配组成特点,悬浮密实型的分形维数最大,骨架密实型次之,骨架空隙型最小。

(2) 沥青用量与沥青混合料抗车辙性能关联程度最高,其影响最为显著,级配类型和温度的影响次之,碾压次数的影响最小;沥青混合料抗车辙性能的主要影响因素为沥青用量、集料级配类型及试验温度,其与室内模型试验结果相一致。

(3) 沥青混合料动稳定度与沥青用量和碾压次数正相关,与分形维数、相关性系数及温度负相关;进行沥青路面抗车辙性能设计时,应适当增加混合料中沥青含量和碾压遍数,选用几何特性优良和级配良好集料,严格控制混合料拌和温度。

参考文献:

- [1] Tyler M, Khaled K, Mike F. Using georgia loaded-wheel tester to predict rutting [J]. TRB, 1995, (1473): 17-24.
- [2] Liu J, Liu H, Qian L I. Pavement rutting analysis based on vehicle-road interaction under thermal effects [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2017, 38(2): 170-180
- [3] 张倩,张尚龙,李彦伟,等. 考虑温度场和可变荷载的沥青面层全厚式车辙试验[J]. 公路交通科技, 2013, 30(10): 18-22
- [4] 王辉,李雪连,张起森. 高温重载作用下沥青路面车辙研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(5): 139-144.
- [5] 李喜,王选仓,房娜仁,等. 基于温度场与荷载实际耦合的沥青路面车辙预估[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2018, 38(5): 67-75.
- [6] 李丽民,何兆益,冯浩雄,等. 柔性基层沥青路面车辙性能的影响因素[J]. 材料科学与工程学报, 2017, 35(4): 575-581.
- [7] Li P, Wang X L, Li H S, et al. Influence factors and anti-rutting agent of high-temperature stability of asphalt mixture[C]//Proceeding of the 7th International Conference on Traffic and Transportation Studies.

- Kunming, China; American Society of Civil Engineers, 2010: 1293—1302.
- [8] 郭瑞,冯忠居,洪刚,等. SMA抗车辙性能影响因素的试验分析[J]. 广西大学学报:自然科学版,2013,38(1):55—61.
- [9] 颜可珍,蒋智禹,林峰. 沥青混合料低温性能影响因素的灰色关联分析[J]. 广西大学学报:自然科学版,2012,37(1):115—119.
- [10] 刘建威,钟泽湘. 基于改进灰色GM(1,1)模型的高速公路路基沉降预测[J]. 铁道科学与工程学报,2015,12(6):1369—1373.
- [11] 杨瑞华,许志鸿,张超,等. 沥青混合料分形级配理论[J]. 同济大学学报:自然科学版,2008,36(12):1642—1646.
- [12] 蔺瑞玉,沙爱民. 基于灰色理论的水稳碎石抗拉强度预估模型[J]. 武汉理工大学学报,2012,34(11):41—47.
- [13] 盛燕萍,李海滨,陈拴发,等. 基于灰色理论的水泥稳定碎石冲刷量模型[J]. 长安大学学报:自然科学版,2012,32(2):22—28.

Grey Theory Analysis on Anti-rutting Property of Asphalt Mixture

*LIU Zheng-wei¹, GUO Rui¹, LI Ping², TANG Hao-bin¹,
NIU Lei¹, XIAO Rui-kang¹, ZENG Xian-en¹*

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China;

2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Science & Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Based on the investigations and analysis of the causes for asphalt road surface rutting in Qinbashan mountainous areas, through indoor models test and conclusions for existing studies, the impact of different influence factors on anti-rutting performance of asphalt mixture is analyzed by means of grey theory in the paper. Then the prediction model of asphalt mixture rutting resistancy is established with asphalt contents, rolling times and gradation composition being the parameters. The results show that the aggregate thickness of asphalt mixture is inversely proportional to the fractal dimension, the finer the aggregate, the greater the fractal dimension, otherwise the opposite change. Content of asphalt imposes the largest impact on the rut resistance of asphalt mixture, then gradation types and temperature, and the rolling times has the smallest impact. The main influence factors on rutting resistance of asphalt mixture are asphalt content, aggregate gradation type and test temperature. The predication model for rut resistance based on the materials composition and environmental factors provide basis and means for design of anti-rutting of asphalt pavement.

Key words: road engineering; Grey Theory; asphalt mixture; anti-rutting performance