

文章编号:1671-8879(2014)06-0027-07

# AC-25 级配离析的分形评价标准及预测方法

韩立志<sup>1,2</sup>, 梁增洁<sup>1</sup>, 彭余华<sup>1</sup>, 秦 超<sup>3</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088;

3. 新疆机场(集团)有限责任公司 乌鲁木齐国际机场分公司, 新疆 乌鲁木齐 830016)

**摘 要:**为探究沥青混合料设计过程中的级配离析控制问题,选取沥青混合料 AC-25 中具有代表性的 7 种级配类型,对不同级配类型的沥青混合料在摊铺后碾压前,选取 3 个典型点位进行取样,分析其级配变化状况,计算其级配离析变异指标,并对成型路面的构造深度进行了测试;从沥青混合料集料级配的自相似性出发,利用分形理论计算了 7 种级配的分形维值;采用 SPSS 统计软件对不同级配分维值、级配离析指标与路面构造深度之间的关系进行了回归分析。研究结果表明:密级配沥青混合料 AC-25 的级配分维值与级配离析指标间存在较强的线性关系,采用级配分维值建立的级配离析指标线性回归模型可用作对设计级配的评价;级配离析指标与路面构造深度比之间存在显著的指数相关关系,验证了级配离析指标在反映已建路面质量均匀性上的合理性。同时借鉴 NCHRP 441 相关标准,提出了基于级配设计阶段的 AC-25 离析评价标准和预测方法,为沥青混合料设计阶段有效控制路面离析提供了参考。

**关键词:**道路工程;沥青混合料;级配离析;分维值;离析指标;路面构造深度

**中图分类号:**U411

**文献标志码:**A

## Fractal evaluation criteria and prediction method of AC-25 gradation segregation

HAN Li-zhi<sup>1,2</sup>, LIANG Zeng-jie<sup>1</sup>, PENG Yu-hua<sup>1</sup>, QIN Chao<sup>3</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China; 3. Xinjiang Airport Group Co Ltd, Urumqi International Airport Branch Company, Urumqi 830016, Xinjiang, China)

**Abstract:** To inspect the segregation control question in asphalt mixture design process, this paper selected 7 kinds of representative gradation types of AC-25. After paving and before rolling different types of graded asphalt, three typical sampling points were selected to analyze the change of gradation, calculate variation index of gradation segregation, and test structure depth on the formed pavement. Beginning from the self-similarity of asphalt aggregate gradation, 7 kinds of graded fractal dimension were calculated based on fractal theory. The relationship between fractal dimension of different gradation, gradation segregation index and the pavement structure depth of AC-25 were analyzed in regression analysis with the statistics software SPSS. The results show that there is a strong linear relationship between the graded fractal dimension of

收稿日期:2014-06-10

基金项目:交通运输部交通应用基础研究项目(2011-319-812-410);陕西省自然科学基金研究计划项目(S2010JC3247)

作者简介:韩立志(1981-),男,河北内丘人,交通运输部公路科学研究院工程师,长安大学工学博士研究生,E-mail:lz.han@rioh.cn。

dense graded asphalt mixture AC-25 and the segregation index, and the gradation segregation indicators linear regression model based on fractal dimension can be used to evaluate the gradation design; there is a significant exponential correlation between the gradation segregation index and the pavement structure depth ratio of AC-25, verifying the reasonableness of using the gradation segregation index to reflect the uniformity of quality of the built pavement. Simultaneously, learning from the NCHRP 441 related standard, it proposes segregation evaluation criteria and prediction method of AC-25 based on the gradation design stage, which provides reference for the control of pavement segregation on asphalt mixture design stage. 12 tabs, 2 figs, 18 refs.

**Key words:** road engineering; asphalt mixture; gradation segregation; fractal dimension; segregation index; depth pavement structure

## 0 引言

分形理论是定量描述几何形体复杂程度及空间填充能力的一门新兴边缘科学<sup>[1]</sup>。目前,分形理论已经被广泛应用于研究自然界中常见的、不稳定的、不规则的现象<sup>[2]</sup>。对于材料科学试验中经常出现的那些凹凸而不圆润、破碎而不连续、粗糙而不光滑的形状(即无序系统),传统的几何语言常常难以描述,而分形理论却弥补了它们的不足,揭示了无标度性(自相似性),给出了自然界中复杂几何形态的一种定量描述<sup>[3-4]</sup>。沥青混合料具有复杂的微观结构,是一种多级、多层次的复合材料体系,尤其是其骨料的级配具有突出的自相似性,因此可以采用分形科学分析评价沥青混合料的机理。

沥青混合料级配离析直接影响路面材料各项性能的变化,是造成路面早期损坏的主要诱因之一<sup>[5-7]</sup>。目前国内外研究级配离析的判定指标和方法对混合料设计过程中的离析控制问题缺乏明确的评价方法和改进手段,而只能用于成型路面的评价和定级,因而不能从源头上控制离析的发生。因此,有必要提出基于级配设计阶段的离析评价方法和指标。为此,本文拟从沥青混合料骨料级配的自相似性出发,结合现场试验,借助分形理论分析沥青混合料级配离析试验数据,研究基于级配设计阶段的离析评价标准和预测方法,从而减少沥青混合料的级配离析。

## 1 沥青混合料分形评价

### 1.1 分形理论简介

分形理论(fractal theory)由科学家曼德尔罗布(Mandelbrot B B)创立于20世纪70年代,其研究对象为自然界和社会活动中广泛存在的无序而有自相似性(self similarity)的系统<sup>[8-9]</sup>。它借助相似性原理洞察隐藏于混乱现象中的精细结构,为人们

从局部到整体、从有限到无限的认识提供新的方法,为不同学科发现的规律性提供崭新的语言和定量描述,为科学技术提供新思想、新方法<sup>[10-12]</sup>。沥青混合料集料破碎从表面上看具有较大的不确定性、模糊性、非线性,这些性质充分反映了材料的复杂性,可采用分形理论对集料破碎进行研究。

### 1.2 沥青混合料级配的分形评价

对于某一粒径为 $r$ 的集料,采用 $N(r)$ 表示粒径不大于 $r$ 的集料颗粒数目,用 $N_0$ 表示集料颗粒总数,则其粒径分布函数 $F(r)$ 可以表示为

$$F(r) = \frac{N(r)}{N_0} \quad (1)$$

实际工程中常采用筛孔的质量通过百分率表示矿料的级配特征,因此需要将集料的颗粒分布转化为质量分布的形式。定义 $M(r)$ 为粒径不大于 $r$ 的集料质量,用 $M_0$ 表示集料总质量,则沥青混合料的质量分布函数 $P(r)$ 为

$$P(r) = \frac{M(r)}{M_0} \quad (2)$$

沥青混合料集料质量分布的分形函数为

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

式中: $D$ 为级配分维值。

根据式(3), $P(r)$ 与 $r$ 的关系可简化为

$$P(r) \propto \left( \frac{r}{r_{\max}} \right)^{3-D} \quad (4)$$

可以看出简化式(4)与富勒(Fuller)及泰波(Talbot)根据试验提出的公式具有相同的表达形式,从而揭示了分形维数和传统确定级配的方法具有统一的内涵,可从微观层面上解释级配的分布特征。

将以上推导的集料粒径分布的分形特征函数式(4)两边进行对数求解后,在双对数坐标图中绘出 $\lg(P(r)) \sim \lg(r/r_{\max})$ 的回归曲线,可得到沥青混合料集料级配双对数曲线的斜率 $K$ 和级配分维值 $D$ 之间的关系为

$$K=3-D \tag{5}$$

因此,只要在  $\lg(P(r)) \sim \lg(r/r_{\max})$  的双对数回归曲线上,利用最小二乘法进行最佳线性拟合,求出斜率  $K$  就可得到沥青混合料集料的级配分维数。

## 2 试验方案设计及结果

### 2.1 试验材料

试验以下面层粗粒式沥青混合料 AC-25 为研究对象,原材料采用韩国 SK-70<sup>#</sup> A 级重交通道路石油沥青,粗集料采用 10~25、5~15、5~10 mm 这 3 种规格的石灰岩碎石,细集料为石灰岩石屑,矿粉为石灰岩磨细石粉,原沥青混合料的设计油石比为 3.9%。

### 2.2 级配类型设计

试验考虑级配曲线分布特点等因素,在 AC-25 要求的级配范围内,通过调整拌和楼各热料仓比例生产出 7 种不同级配走向的沥青混合料。其中,原设计级配编号为 0<sup>#</sup> 级配;1<sup>#</sup> 级配按 0.45 次方最大密度曲线调整;2<sup>#</sup> 级配为具有一定间断特征的级配,其特点是粒径分布不连续,设计时刻意减少 4.75 mm 粒径集料;3<sup>#</sup> 级配为最大密度曲线之上

微弓型;4<sup>#</sup> 级配为反 S 型,其具有粗料偏粗,细料偏细的特征;5<sup>#</sup> 级配为最大密度曲线之下微弓型;6<sup>#</sup> 级配为含中间粒径集料较多的级配<sup>[13-14]</sup>。0<sup>#</sup>~6<sup>#</sup> 级配通过率见表 1。

### 2.3 试验方法

为消除其他因素对路面均匀性的影响,试验拟定在同一施工水平下进行。针对 7 种不同级配类型的沥青混合料在摊铺机摊铺后碾压前,对摊铺机中央(点位 a)、螺旋布料器 1/4 处(点位 b)与边缘(点位 c)3 个位置进行取样,分析级配变化程度,并采用合理的评价指标对各种级配混合料的离析程度进行对比分析。

### 2.4 试验结果汇总

#### 2.4.1 级配分计筛余偏离值

按照 0<sup>#</sup>~6<sup>#</sup> 级配调整热料仓比例生产出混合料,在相同的控制条件下进行路面现场摊铺,为便于比较几种级配沥青混合料在施工过程中产生级配离析的程度,分析各自级配走向的变化显著性,各方案的 a、b、c 点位处的级配各档集料分计筛余百分率偏离对应设计级配分计筛余百分率的偏差值见下页表 2。

表 1 试验选用级配  
Tab. 1 Graded selection of test

类别		不同筛孔(mm)的质量通过率/%												
		31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配 编号	0 <sup>#</sup>	100	99.2	86.8	80.7	72.2	59.5	34.5	22.4	17.7	11.5	7.3	4.7	3.8
	1 <sup>#</sup>	100	98.7	79.6	72.1	64.5	53.8	36.1	20.7	16.4	10.8	7.0	4.6	3.7
	2 <sup>#</sup>	100	98.6	78.8	70.3	61.4	50.0	44.4	27.1	21.2	13.4	8.2	4.9	3.8
	3 <sup>#</sup>	100	99.2	87.7	82.1	74.9	64.2	43.8	29.7	23.2	14.5	8.7	5.0	3.9
	4 <sup>#</sup>	100	98.5	77.2	68.8	60.6	49.3	36.2	26.8	21.1	13.4	8.2	4.9	3.8
	5 <sup>#</sup>	100	98.5	77.2	68.8	60.5	49.0	33.5	22.4	17.7	11.5	7.3	4.7	3.8
	6 <sup>#</sup>	100	99.4	90.0	83.5	72.6	56.4	29.4	19.6	15.7	10.4	6.8	4.6	3.7
规范上限		100	100	90.0	83.0	76.0	65.0	52.0	42.0	33.0	24.0	17.0	13.0	7.0
规范下限		100	90.0	75.0	65.0	57.0	45.0	24.0	16.0	12.0	8.0	5.0	4.0	3.0

#### 2.4.2 级配离析评价指标

当混合料级配发生离析时,离析混合料级配将偏离标准混合料级配,集料的离析程度可以通过统计离析级配和标准级配的差异来获得。丁银萍和包秀宁在研究中指出,对于由多种不同粒径组成的沥青混合料,因为混合料中矿料组分的质量分数不同,直接统计各粒径的含量增减不能体现含量权重的影响,而采用各档集料的变异系数之和表示混合料级配的变异更具合理性<sup>[15-16]</sup>。各档集料的变异系数和离析后级配的变异程度指标计算式为

$$C_{vi}^2 = \left( \frac{a_i - a_i^r}{a_i} \right)^2 \tag{6}$$

式中: $C_{vi}$  为第  $i$  级集料分计筛余百分率的变异系数; $a_i^r$  为级配离析试验后第  $i$  级集料分计筛余百分率; $a_i$  为标准级配中第  $i$  级集料分计筛余百分率。

$$S^2 = \sum C_{vi}^2 = \sum \left( \frac{a_i - a_i^r}{a_i} \right)^2 \tag{7}$$

沥青混合料的变异性采用式(7)表示,指标  $S$  表示试验完成后路面级配变异程度,并反映出设计级配的潜在离析特性,各级配类型的变异特征值如下页表 3 所示。

#### 2.4.3 沥青混合料路面实测构造深度试验

根据规范要求,考虑到铺砂法反映的是一定面积的平均构造深度,激光法反映的是一定长度内的

表 2 级配分计筛余偏离值  
Tab. 2 Gradation triage deviation

级配编号	点位	不同筛孔(mm)的分计筛余偏离值/%												
		31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
0 <sup>#</sup>	a	0.80	0.30	-1.30	-0.30	1.10	-1.20	-0.80	0.20	0.50	1.00	-0.50	-0.60	0.80
	b	0.80	-1.60	-1.00	1.20	-0.90	-2.20	0.90	0.60	0.90	1.20	0.00	-0.40	0.50
	c	-4.00	-3.20	-3.90	-1.70	-0.80	4.50	4.00	1.40	1.50	1.40	0.00	-0.30	1.10
1 <sup>#</sup>	a	1.30	8.70	-1.20	-2.10	-3.88	-7.02	5.00	-0.50	-0.50	0.50	-0.20	-0.50	0.40
	b	1.30	5.90	-6.80	0.70	-0.78	-5.22	5.10	0.00	0.00	0.40	0.10	-0.50	-0.20
	c	-5.80	6.10	1.80	2.50	-4.28	-4.62	4.40	-0.40	-0.10	0.70	0.00	-0.50	0.20
2 <sup>#</sup>	a	1.40	10.20	0.90	-0.20	-0.30	-14.90	2.20	-0.70	0.80	1.40	0.50	-0.60	-0.70
	b	-5.10	6.40	-2.90	2.90	-0.70	-11.20	6.90	1.00	1.60	1.30	0.40	-0.80	0.20
	c	-0.70	7.30	-4.50	-3.80	7.60	-12.40	4.60	0.10	0.70	0.80	0.20	-1.10	1.20
3 <sup>#</sup>	a	0.80	-3.80	0.10	0.70	-1.90	3.60	2.20	-1.60	-0.40	0.10	0.70	-0.50	0.00
	b	0.80	-3.50	-3.40	1.20	0.80	2.70	2.00	-0.50	0.10	-0.10	0.20	-0.20	-0.10
	c	0.80	-4.30	-2.30	-3.00	-0.70	6.00	1.50	-1.60	3.40	0.40	0.40	-0.80	0.20
4 <sup>#</sup>	a	1.50	2.80	-1.00	-1.60	0.20	-2.30	0.70	0.90	-0.60	0.40	-0.60	-1.00	0.60
	b	-0.60	6.10	-0.60	-2.30	-2.50	-3.20	1.30	1.00	1.10	0.80	-0.10	-1.00	0.00
	c	-1.70	7.40	-0.80	-5.30	-2.80	-0.20	1.90	1.80	1.30	0.60	-0.60	-1.10	-0.50
5 <sup>#</sup>	a	1.50	4.90	-0.10	-1.00	-2.00	-1.20	-0.50	-0.10	0.40	0.40	-0.50	-1.10	-0.70
	b	-0.80	4.90	-2.00	-3.80	-3.50	-0.60	3.40	0.80	1.00	0.90	0.10	-0.90	0.50
	c	-2.40	5.50	-0.20	-3.20	-3.10	-0.30	2.20	1.00	0.90	0.50	0.10	-1.00	0.00
6 <sup>#</sup>	a	0.60	5.30	-0.80	-1.50	-4.40	-1.20	-0.50	0.20	0.70	1.10	0.30	-0.20	0.40
	b	0.60	-5.50	-1.10	1.40	-0.40	0.80	1.40	0.50	0.80	1.20	0.40	-0.20	0.10
	c	0.60	0.60	-4.10	1.60	-1.60	-1.20	1.00	0.60	0.60	1.20	0.40	-0.20	0.50

平均构造深度,而级配离析通常是以一定面积形式出现的。因此,铺砂法更适合判断与评价沥青面层的级配离析状况,故本次试验在 0<sup>#</sup>~6<sup>#</sup>级配各试验段路面成型后对点位 a、b、c 采用铺砂法进行构造深度试验,试验结果见表 4。

表 3 不同级配走向路面变异特征值

Tab. 3 Road variation characteristics of different levels

级配编号	0 <sup>#</sup>	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>	6 <sup>#</sup>
级配离析指标 S	0.35	0.41	0.72	0.47	0.52	0.34	0.29

表 4 现场构造深度试验结果

Tab. 4 Results of field structural depth test

级配编号	各点位构造深度实测值/mm			点位 a-c 构造深度差值/mm
	点位 a	点位 b	点位 c	
0 <sup>#</sup>	0.729	0.759	1.070	0.341
1 <sup>#</sup>	0.816	0.758	1.050	0.292
2 <sup>#</sup>	0.567	0.535	0.930	0.395
3 <sup>#</sup>	0.410	0.416	0.624	0.214
4 <sup>#</sup>	0.493	0.497	0.873	0.380
5 <sup>#</sup>	1.002	1.065	1.112	0.110
6 <sup>#</sup>	1.072	0.992	1.315	0.323

### 3 沥青混合料分形特征与级配离析指标的相关性分析

集料级配的分维数可以全面诠释级配特点,是集料级配的综合指标,所以分维数与混合料级配离析指标 S 之间必然存在某种确定的关系,利用 SPSS 统计分析软件来分析这种变量间的确定关系。

#### 3.1 集料级配分形维数计算

结合式(5)对对数曲线拟合,得到各级配分形维数,见表 5。

表 5 AC-25 级配的分维值 D

Tab. 5 Fractal dimension D of AC-25

级配编号	0 <sup>#</sup>	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>	6 <sup>#</sup>
斜率 K	0.57	0.57	0.54	0.55	0.54	0.56	0.58
分维值 D	2.43	2.43	2.46	2.45	2.46	2.44	2.42

#### 3.2 级配分形维数与离析程度指标的相关性分析

在回归分析前需做散点图观察变量间的趋势,以初步确定回归分析的方法,同时也可利用散点图剔除异常点。本文利用 SPSS 软件分析 AC-25 级配分维值 D 与级配离析指标 S 之间的关系。分析表明,混合料的级配分维数与级配离析指标 S 存在较为明显的线性关系,所以可从线性相关的角度分析

变量之间的相关关系。

3.3 级配分形维数与离析程度指标的回归模型

采用 SPSS 软件分别对 AC-25 的级配离析特征指标与分维数  $D$  进行回归分析和模型的 F 检验,回归所得结果汇总见表 6。

表 6 级配离析特征指标与分维数  $D$  线性回归汇总

Tab. 6 Linear regression of gradation segregation characteristics with fractal dimension  $D$

级配类型	回归模型	Pearson 相关性系数 $R$	判定系数 $R^2$	F 检验 Sig. 值
AC-25	$S=6.902D-16.398$	0.784	0.614	0.037

由表 6 可以看出,对于 AC-25 的分维数  $D$  与级配离析指标之间为强相关,同时 F 检验 Sig. 值均小于 0.05,说明分维数  $D$  与级配离析指标值具有较强的线性关系且相关性显著。以上回归模型可以用作公称最大粒径为 26.5 mm 的密级配沥青混合料级配离析倾向特征的预测性方程。

4 沥青混合料构造深度与级配离析指标的关系

美国 NCHRP 441 报告中指出,良好的测试显示出路面构造深度(texture depth,简称 TD)与路面预期构造深度(predicted estimated texture depth,简称 PETD)的比值,TD/PETD(简称构造深度化,用  $V$  表示)与路面不均匀性之间有较好的相关关系<sup>[17]</sup>。

4.1 沥青混合料路面预期构造深度

美国 NCHRP 441 报告中提出的预期构造深度计算方法是目前比较成功的预测模型,相关验证试验表明,该模型在预估密级配沥青混合料表面构造深度时有较高的准确度。本文利用该模型,预测所采用试验沥青混合料预期构造深度,结果见表 7。

表 7 密级配 AC-25 预期构造深度

Tab. 7 Expected texture depth of gradation AC-25

级配编号	0#	1#	2#	3#	4#	5#	6#
PETD/mm	0.785 7	0.632 5	0.368 5	0.639 3	0.602 0	0.790 7	0.811 2

结合表 4 可计算出各级配在不同点位处的构造深度比,见表 8。

4.2 构造深度比与级配离析指标的相关性

构造深度比  $V$  在一定程度上反映出路面的不均匀性,路面出现粗集料离析时,构造深度比值一般较大,出现细集料离析时,构造深度比则偏小。级配离析指标  $S$  则体现出混合料级配各粒径区间集料的变异程度,离析指标越大则沥青混合料路面离析越严重。因此,沥青混合料构造深度比与级配离析指标存在一定相关性,本文拟采用 SPSS 软件建立二者的相关模型。

结合试验中级配分计筛余偏离值,利用式(7),可求得各级配在不同测量点位处的级配离析指标  $S$  值,见表 9。

表 8 不同点位处构造深度比

Tab. 8 Structure depth ratio at different points

级配编号	各点位构造深度比 $V$		
	点位 a	点位 b	点位 c
0#	0.927	0.966	1.361
1#	1.290	1.199	1.660
2#	1.538	1.451	1.573
3#	0.642	0.651	0.977
4#	0.820	0.826	1.449
5#	1.268	1.347	1.406
6#	1.322	1.223	1.443

表 9 各点位处的级配离析指标值

Tab. 9 Gradation segregation index at different points

级配编号	各点位级配离析指标 $S$		
	点位 a	点位 b	点位 c
0#	0.155	0.237	0.644
1#	0.487	0.349	0.403
2#	0.971	0.818	0.371
3#	0.065	0.137	0.273
4#	0.128	0.238	0.280
5#	0.372	0.361	0.300
6#	0.284	0.316	0.268

通过观察散点图,对表 8、表 9 中数据进行对数回归拟合,结果汇总见表 10。

表 10 级配离析特征指标与构造深度比回归结果汇总

Tab. 10 Regression of gradation segregation characteristics and structural depth ratio

回归模型	$V=0.386\ln(S)+1.673$
Pearson 相关性系数 $R$	0.789
判定系数 $R^2$	0.623
F 检验 Sig. 值	0.000
T 检验 Sig. 值( $\ln(S)$ )	0.000
T 检验 Sig. 值(常数)	0.000

回归结果显示,对数回归模型的显著性检验均显著,回归模型的相关性也较高(Pearson 相关性系数  $R=0.789$ ),说明级配离析特征指标与路面最终构造深度比有较强的相关性。观察回归图形(下页图 1)可以看出,随着构造深度比的增大,级配离析指标呈逐渐增大趋势,路面发生较严重的离析现象,这一结果与美国 NCHPR 441 结论相符。

5 基于分维值的密级配沥青混合料级配离析评价标准及预测方法

5.1 密级配沥青混合料级配离析的评价标准

美国 NCHRP 441 重点研究了沥青混合料离析

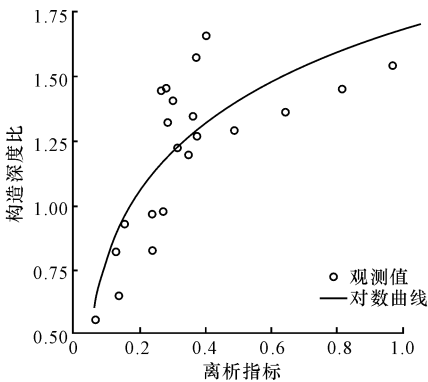


图 1 级配离析特征指标与构造深度比对数回归  
Fig. 1 Logarithmic regression of gradation segregation characteristics and structural depth ratio

的评价方法与评价指标,提出了以离析处的构造深度与均匀区域的构造深度比值作为评价指标,根据其离析评价标准建议值,可以将离析分成表 11 所示的 4 类。

表 11 NCHRP 441 离析评价标准建议值  
Tab. 11 Recommended segregation evaluation criteria of NCHRP 441

评价指标	离析处的构造深度与均匀区域的构造深度比值			
	无	轻度离析	中度离析	重度离析
上限	0.75	1.15	1.56	>2.09
下限	<1.15	1.56	2.09	

由于在研究中,尚难以采用充分数据对沥青混合料路面离析程度进行较细致的划分,同时有部分学者研究认为,轻度离析对混合料性能危害程度较小,中度和重度的离析对混合料性能的影响较大<sup>[18]</sup>。所以本文在借鉴 NCHRP 441 的标准划分方法的基础上,将标准中无离析和轻度离析合并为无离析区间,中等离析和重度离析合并为离析区间。结合级配离析指标-分维值回归模型和级配离析指标-构造深度比回归模型,并考虑规范中 AC-25 级配分维值的实际上下限,建议在公称粒径最大为 26.5 mm 的条件下,级配离析分维评价标准见表 12。

表 12 密级配 AC-25 级配离析分维评价标准  
Tab. 12 Fractal dimension evaluation criteria of AC-25

判别指标	无离析	离析
级配离析指标 $S$	$0.146 \leq S < 0.746$	$0.746 \leq S < 1.464$
分形维数 $D$	$2.397 \leq D < 2.484$	$2.484 \leq D < 2.588$

5.2 密级配沥青混合料级配离析的评估预测方法

综上,级配分维值  $D$  和级配离析指标  $S$  能够充分反映设计级配的组成特点和潜在离析特性,因此可根据研究成果提出利用级配分维值  $D$  和级配离析指标  $S$  来评价设计级配的方法,具体步骤如下:

(1)根据设计级配的集料质量分布函数,结合沥

青混合料集料级配的分形通用评价模型计算设计级配的分维特征值;

(2)根据级配分形维数与离析程度指标的回归模型计算级配的离析指标  $S$ ;

(3)将计算得到的级配分维特征值和离析指标  $S$  与离析评价标准进行比较,当二者同时满足非离析指标时可以初定设计集料级配不离析;如果有一个指标不满足非离析指标要求,则初步判定集料离析。

级配的评估与离析的预测,流程如图 2 所示。

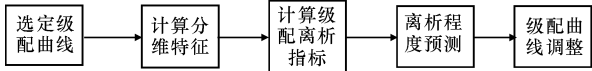


图 2 离析程度预测流程  
Fig. 2 Prediction flow of segregation

6 结 语

(1)从 SPSS 统计软件分析结果可知,密级配沥青混合料 AC-25 的级配分维值  $D$  与级配离析指标  $S$  间存在较强的线性关系,采用级配分维值  $D$  建立的级配离析指标线性回归模型可用作对设计级配的评价。

(2)通过对级配离析指标与路面构造深度的相关性分析可知,级配离析指标  $S$  与路面构造深度之间存在显著的指数相关关系;随着路面构造深度比的增加,级配离析指标值呈现逐渐增加趋势,说明级配含量的变化与路表特征之间有着密切关系,也验证了级配离析指标在反映已建路面质量均匀性上的合理性。

(3)结合级配离析指标-分维值和级配离析指标-构造深度比的回归模型,在借鉴美国 NCHRP 441 研究的基础上,提出了密级配沥青混合料 AC-25 集料在级配设计阶段的级配离析分形评价标准和预测方法。

(4)本文提出了基于分维值的密级配沥青混合料级配离析评价标准及预测方法,为粗粒式沥青混合料设计阶段有效控制路面离析提供了参考。对于其他公称粒径或间断级配的沥青混合料的离析评价标准,可参照本文方法开展相关研究,以更好地指导沥青混合料的材料组成设计。

参考文献:  
References:

[1] 龙起易,龙期威,穆在勤.理想的分形模型和实际的嵌套结构[J].物理,1994,23(3):158-164.  
LONG Qi-yi, LONG Qi-wei, MU Zai-qin. Idealized

- fractal model and practical nested structure[J]. Physics, 1994, 23(3): 158-164. (in Chinese)
- [2] 刘适大, 刘适式. 分形和分形引论[M]. 北京: 气象出版社, 1993.  
LIU Shi-da, LIU Shi-shi. An introduction to fractal and fractal dimension[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1993. (in Chinese)
- [3] 唐明, 巴恒静. 混凝土材料的拓扑学特征及分形特征的评价[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002, 35(1): 86-89.  
TANG Ming, BA Heng-jing. Evaluation of topologic and fractal characteristics of concrete[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 2002, 35(1): 86-89. (in Chinese)
- [4] 林鸿溢, 李映雪. 分形论: 奇异性探索[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1992.  
LIN Hong-yi, LI Ying-xue. Fractal theory: singularity exploration[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1992. (in Chinese)
- [5] 沈金安. 关于沥青混合料的均匀性和离析问题[J]. 公路交通科技, 2001, 18(6): 20-24.  
SHEN Jin-an. On issues of homogeneity and separation of bitumen mixtures[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2001, 18(6): 20-24. (in Chinese)
- [6] Maggiore C, Airey G, Marsac P. A dissipated energy comparison to evaluate fatigue resistance using 2-point bending[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, English Edition, 2014, 1(1): 49-54.
- [7] 沙庆林. 高速公路沥青路面早期破坏现象及预防[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.  
SHA Qing-lin. Premature damage and precaution in asphalt pavement of expressway [M]. Beijing: China Communications Press, 2001. (in Chinese)
- [8] Mandelbrot B B, Passoja D E, Paullay A J. Fractal character of fracture of metals[J]. Nature, 1984, 308(19): 721-722.
- [9] 伯努瓦·B·曼德布罗特. 大自然的分形几何学(最新修订本)[M]. 陈守吉, 凌复华, 译. 上海: 上海远东出版社, 1998.  
Benoit B Mandelbrot. The fractal geometry of nature (the latest revised edition)[M]. Translated by CHEN Shou-ji, LING Fu-hua. Shanghai: Shanghai Yuan-dong Press, 1998. (in Chinese)
- [10] 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.  
YANG Rui-hua, XU Zhi-hong, ZHANG Chao, et al. Fractal gradation theory of asphalt mixture[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(12): 1642-1646. (in Chinese)
- [11] 李国强, 邓学钧. 级配骨料的分形效应[J]. 混凝土, 1995(1): 3-7.  
LI Guo-qiang, DENG Xue-jun. The fractal effect of gradation aggregate[J]. Concrete, 1995(1): 3-7. (in Chinese)
- [12] 杨群, 郭忠印, 陈立平, 等. 级配碎石分形特征分析及其在路面工程中的应用[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(4): 418-422.  
YANG Qun, GUO Zhong-yin, CHEN Li-ping, et al. Fractal analysis of gradation aggregate and its applications in pavement engineering[J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(4): 418-422. (in Chinese)
- [13] 彭余华, 沙爱民. 沥青路面不均匀的影响因素分析[J]. 公路交通科技, 2006, 23(6): 9-13.  
PENG Yu-hua, SHA Ai-min. Analysis of influence factors on non-homogeneity of bituminous pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(6): 9-13. (in Chinese)
- [14] 彭余华. 沥青混合料离析特征判别与控制方法的研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.  
PENG Yu-hua. Research on characteristics distinguishing and controlling means of the segregation in asphalt mixture [D]. Xi'an: Chang'an University, 2006. (in Chinese)
- [15] 陈静云, 丁银萍, 周长红. 基于料堆试验的沥青混合料离析影响因素分析[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2009, 39(1): 117-120.  
CHEN Jing-yun, DING Yin-ping, ZHOU Chang-hong. Analysis on influence factors for hot mix asphalt segregation using heap test [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2009, 39(1): 117-120. (in Chinese)
- [16] 包秀宁, 张肖宁. 路面颗粒材料离析性的评价方法[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2010, 38(3): 31-36.  
BAO Xiu-ning, ZHANG Xiao-ning. Segregability evaluation of granular pavement materials[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2010, 38(3): 31-36. (in Chinese)
- [17] Stroup-Gardimer M, Brown E R. Segregation in hot-mix asphalt pavements[M]. Washington DC: National Academy Press, 2000.
- [18] 丛林, 郑晓光, 郭忠印. 施工离析对沥青混合料性能的影响分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(4): 477-480, 500.  
CONG Lin, ZHENG Xiao-guang, GUO Zhong-yin. Influence of segregation in construction on asphalt mixture performance[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(4): 477-480, 500. (in Chinese)