

文章编号:1671-1637(2014)05-0001-07

## AC-25 粒度分布对级配离析的影响

彭余华, 胡佳寅, 胡顺峰

(长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘要:**在 AC-25 级配范围内,通过调整拌合楼各热料仓比例生产出 7 种级配的沥青混合料,采用贝雷法将 AC-25 级配组成划分为 0~0.3、0.3~1.18、1.18~4.75、4.75~13.2、13.2~31.5 mm 5 个区间,运用灰色关联法计算了不同级配的各区间集料含量与级配离析的灰色关联度。分析结果表明:灰色关联度可以较好地反映 AC-25 级配区间集料含量对级配离析的影响程度,5 个区间 4.75~13.2、0.3~1.18、0~0.3、1.18~4.75、13.2~31.5 mm 的关联度依次减小;4.75~13.2 mm 区间集料含量与级配离析的灰色关联度最大,该区间集料含量的变化对最终路面级配变异会产生较大影响,设计时可通过调整该种集料含量以获得较好的抗离析级配;1.18~4.75 mm 和 13.2~31.5 mm 粒径区间的集料含量与级配离析的灰色关联度偏小,说明粗集料和细集料中的较粗部分对级配离析的影响较小;各级配区间集料含量与级配变异程度的二次回归相关系数大于 0.6,说明集料间交互作用对最终离析程度影响较大,仅考虑单个筛孔通过率对沥青混合料性能的影响,有可能会削弱集料级配的离析特征,应从不同粒级组合角度分析沥青混合料级配的抗离析性能。

**关键词:**路面材料;AC-25;级配离析;灰色关联分析;关键区间

**中图分类号:**U414.1

**文献标志码:**A

## Influence of AC-25 particle size distribution on gradation segregation

PENG Yu-hua, HU Jia-yin, HU Shun-feng

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education,  
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** Seven kinds of asphalt mixtures with typical gradations were produced by adjusting the scale of hot bunker of mixing plant in AC-25 gradation range. By Bailey method, AC-25 aggregate was divided into five gradation intervals such as 0-0.3, 0.3-1.18, 1.18-4.75, 4.75-13.2 and 13.2-31.5 mm. The grey relation degree of aggregate content and gradation segregation in each interval was calculated by gray relation method. Analysis result shows that the grey relation degree reflects the influence of aggregate content on gradation segregation in AC-25 gradation range very well. The relation degrees decrease in the order of 4.75-13.2, 0.3-1.18, 0-0.3, 1.18-4.75 and 13.2-31.5 mm. The relation degree is maximal in 4.75-13.2 mm, which illustrates that the variation of aggregate content in the interval has great effect on the final gradation variability of pavement, so a good segregation resistance gradation is obtained by adjusting the aggregate content. The relation degrees are smaller in 1.18-4.75 and 13.2-31.5 mm, which shows that coarse aggregate and the coarse part of fine aggregate have less influence on gradation segregation. The quadratic regression relation coefficient of aggregate content and gradation segregation in each interval is more than 0.6, which shows that the interaction among

收稿日期:2014-07-21

基金项目:交通运输部科技项目(2011 319 812 410);陕西省自然科学基金研究计划项目(2010JM7005)

作者简介:彭余华(1973-),男,安徽池州人,长安大学教授,工学博士,从事路面材料研究。

aggregates has great influence on final gradation segregation, the segregation characteristic of aggregate gradation possibly weakens when the influence of single passing rate on the performance of asphalt mixture is considered only, so the segregation resistance performance of asphalt mixture gradation must be analyzed from different grain sizes' combination angle. 7 tabs, 23 refs.

**Key words:** pavement material; AC-25; gradation segregation; grey relation analysis; key interval

**Author resume:** PENG Yu-hua(1973-), male, professor, PhD, +86-29-82334453, pyh@chd.edu.cn.

## 0 引 言

沥青混合料级配离析在中国沥青混和料路面施工过程中普遍存在<sup>[1-5]</sup>。由于级配离析的影响,沥青混和料路面的使用寿命大大缩短,级配离析严重的路面使用寿命会减少 50% 以上。路面大部分早期损坏类型都是起源于沥青混合料的不均匀,这已经成为影响沥青路面质量的重要因素之一<sup>[5-9]</sup>。混合料的设计级配对路面的均匀性有着重要的影响。目前,国内外关于设计级配对沥青混和料离析的影响研究主要集中在不同级配类型对级配离析影响差异程度方面,而针对级配区间集料含量对级配离析的影响,研究成果大多缺乏系统性和完整性<sup>[10-11]</sup>。颗粒物质的相关成果为研究和预测沥青混合料级配离析特性提供了新的启发,丁银萍借鉴工业领域散粒体离析的研究方法,设计滑板法和堆料法等试验方法研究沥青混合料的级配离析特性,发现了粒径相互干扰的规律<sup>[12]</sup>;包秀宁等指出颗粒的离析程度与设计级配的平均粒径和粒径分散系数等指标相关,级配平均粒径和粒径分散系数存在满足离析程度最小的临界值<sup>[13]</sup>;彭余华等从沥青混合料的颗粒物质特性出发,对不同级配走向的密级配沥青混合料抗离析特性进行评估,指出 4.75~9.5 mm 集料粒径区间是影响沥青混合料离析的关键区间<sup>[14]</sup>。

目前,国内已开展的研究对级配离析的特性、评价方法与指标等方面已有了初步认识,但要有效减少离析现象的发生,提高沥青路面的均匀性,还必须对混合料粒度分布对级配离析的影响进行更深入的研究,提出更合理的级配离析控制措施,减少路面离析现象。

作为离散态的沥青混合料,其系统模型具有不确定性,作用机理具有多样性,组分间耦合具有复杂性。由于试验研究手段与规模的限制,目前研究混合料组成与级配离析之间因果关系的试验成果较少,相关统计信息不够完全,不能确定是否具有典型

分布,难以适宜传统的数理统计研究方法。对于这种“信息不完全”的系统,灰色系统理论为进一步研究提供了理论基础。

本文结合现场试验,借助灰色关联分析方法分析 AC-25 沥青混合料级配离析试验数据,研究集料粒度分布对于路面离析特征的影响,提出合理减少级配离析的混合料设计技术。

## 1 试验方案设计与结果分析

### 1.1 试验材料

试验以粗粒式沥青混合料 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 3 种规格石灰岩碎石,细集料为石灰岩石屑,矿粉为石灰岩磨细石粉,原沥青混合料设计油石比为 3.9%。

### 1.2 级配类型设计

考虑级配曲线分布特点等因素,在 AC-25 要求的级配范围内,通过调整拌合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,设计时特意减少 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,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>[15]</sup>。0<sup>#</sup>~6<sup>#</sup> 级配质量通过百分率见表 1。

### 1.3 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后碾压前,对摊铺机中央(点位 a)、螺旋分料器 1/4 处(点位 b)与边缘(点位 c) 3 个位置每隔 10 m 进行取样,通过抽提试验分析级配变化程度与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。

表 1 试验级配  
Tab. 1 Test gradations

筛孔尺寸/mm	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	质量通过率/%												
0 <sup>#</sup>	100.0	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>	100.0	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>	100.0	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>	100.0	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>	100.0	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>	100.0	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>	100.0	99.4	90.0	83.5	72.6	56.4	29.4	19.6	15.7	10.4	6.8	4.6	3.7
AC-25 级配范围	质量通过率/%												
上限	100.0	100.0	90.0	83.0	76.0	65.0	52.0	42.0	33.0	24.0	17.0	13.0	7.0
下限	100.0	90.0	75.0	65.0	57.0	45.0	24.0	16.0	12.0	8.0	5.0	4.0	3.0

1.4 试验结果分析

1.4.1 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,以比较

几种级配沥青混合料在施工过程中产生级配离析的程度,分析各级配走向的变化显著性,各方案的 a、b、c 三个点位处级配的各种集料分计筛余百分率对应设计级配分计筛余百分率的偏离值见表 2。

表 2 级配分计筛余偏离值  
Tab. 2 Sieving deviations of gradations

筛孔尺寸/mm		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	点位	分计筛余偏离值/%												
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

从表 2 可以看出,虽然 7 种级配中各粒径对应的分计筛余百分率的变化量存在明显差别,但是 4.75 mm 以下的粒径集料分计筛余通过率偏离值普遍较小,多数小于 2%,说明该粒径以下的集料在装料、运输、卸料、摊铺过程中比较稳定;同时观察各点位级配分计筛余的变化情况可以发现,不同级配类型的 4.75 mm 以上粗集料摊铺出的路面在 a、b、c 三个点位之间分计筛余离差值相差较大,而细集料筛孔在各点位之间的偏离值则较平均,这说明螺旋分料器横向分布距离对粗集料离析影响较大,细集料在螺旋横向布料过程中的稳定性较好。

#### 1.4.2 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<sup>[16-17]</sup>。陈静云等在

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,而采用各种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>[18-20]</sup>。各种集料的变异系数和离析后级配的变异程度指标分别为

$$C_j^2 = \left( \frac{b_j - a_j}{b_j} \right)^2 \quad (1)$$

$$S^2 = \sum C_j^2 \quad (2)$$

式中: $C_j$  为第  $j$  种集料分计筛余百分率的变异系数; $a_j$  为级配离析试验后第  $j$  种集料分计筛余百分率; $b_j$  为标准级配中第  $j$  种集料分计筛余百分率; $S$  为路面级配变异程度。

沥青混合料的变异性采用式(2)表示,指标  $S$  表示试验完成后路面级配变异程度,并反映设计级配的潜在离析特性,各种级配类型的变异特征见表 3。

表 3 不同级配的离析指标

Tab. 3 Segregation indexes of different gradations

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

## 2 AC-25 沥青混合料关键级配影响区间的划分

沥青混合料是一种由多粒级集料组合的复杂系统,集料间交互作用对最终离析影响较大,在进行离析分析时不宜单独研究某一种集料,应从若干粒级组合角度分析沥青混合料级配的抗离析性能<sup>[16]</sup>。在选择级配分界范围的粒径时,考虑到贝雷法在某种意义上能够反映级配的变异与沥青混合料性能之间的联系,因此,本文参考贝雷法的模型确定关键控制筛孔,可以在确保每个级配区间由相邻 2 种或 3 种集料组成的同时,又可概括不同粒径含量变化可能引起的级配变异。各种关键分界筛孔的计算如下

$$D = 0.5N$$

$$P = 0.22N$$

$$s = 0.22P$$

$$T = 0.22s$$

式中: $N$  为级配的公称最大粒径; $P$  为主控筛孔尺寸; $D$  为半筛孔尺寸; $s$  为细集料第 1 主控筛孔尺寸; $T$  为第 2 主控筛孔尺寸。

由以上方法可计算出沥青混合料各关键分界筛孔的理论计算值,结合《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)提出沥青混合料各关键分界

筛孔的实际取值,见表 4。按照贝雷法关键分界筛孔划分方法,可将 AC-25 级配分为 0~0.3、0.3~1.18、1.18~4.75、4.75~13.2、13.2~31.5 mm 5 个区间。

## 3 AC-25 集料粒度分布对级配离析影响的灰色关联分析

### 3.1 灰色关联度计算方法

灰色关联分析是用来定量描述系统因素间关系密切程度的一种分析方法,是对系统变化态势的一种度量<sup>[21]</sup>。但现有研究表明,常用的邓氏灰色关联度模型、广义绝对关联度模型、T 型关联度模型、B 型关联度模型、改进关联度模型、灰色斜率关联度模型等 6 种灰色关联度模型还存在以下不完善的地方。

(1)除斜率关联度模型外,其余都不满足灰色关联计算中无量纲化后的保序性。

(2)上述 6 种模型均不满足灰色关联中规范性公理的要求。

(3)大部分模型无法反映系统因素之间的正负相关关系。

针对上述各关联度计算模型的缺点和灰色关联度的缺陷,本文采用一种改进的灰色斜率关联度模

表 4 计算和实际选取的筛孔尺寸

Tab. 4 Computational and actual selected sieve sizes

最大公称尺寸/mm		37.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75
D	理论计算值	18.75	13.25	9.50	8.00	6.25	4.75	2.38
	实际取值	19.00	13.20	9.50	9.50	4.75	4.75	2.36
P	理论计算值	8.25	5.83	4.18	3.52	2.90	2.10	1.05
	实际取值	9.50	4.75	4.75	4.75	2.36	2.36	1.18
s	理论计算值	2.10	1.05	1.05	1.05	0.52	0.52	0.26
	实际取值	2.36	1.18	1.18	1.18	0.60	0.60	0.30
T	理论计算值	0.52	0.26	0.26	0.26	0.13	0.13	0.07
	实际取值	0.60	0.30	0.30	0.30	0.15	0.15	0.08

型,能够正确反映序列的正负关系,具有对称性、唯一性、可比性和无量纲化后的保序性,能够真实地反映序列曲线的关联程度,所得关联分析结果较为客观、可靠<sup>[22-23]</sup>。

设  $X_i$  为指标序列,  $i$  为序列编号,  $i=0,1,2,\dots,m$ ;  $k$  为方案序号(对应级配编号),  $k=1,2,3,\dots,n$ ;  $t_k$  为方案  $k$  的指标区间长度;  $x_i(k)$  为  $X_i$  在方案  $k$  上的观测数据。指标序列  $X_i$  为

$$X_i = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)\} \quad (3)$$

$X_0$  与  $X_i$  在方案  $k-1$  到  $k$  的灰色关联系数  $\xi_i(k)$  为

$$\xi_i(k) = \frac{2\text{sgn}(C)}{3+A-B} \quad (4)$$

$$A = \left\| \frac{\Delta x_0(k)}{\bar{x}_0 \Delta t_k} \right\| - \left\| \frac{\Delta x_i(k)}{\bar{x}_i \Delta t_k} \right\| \quad (5)$$

$$B = \frac{\min \left\{ \left| \frac{\Delta x_0(k)}{\bar{x}_0 \Delta t_k} \right|, \left| \frac{\Delta x_i(k)}{\bar{x}_i \Delta t_k} \right| \right\}}{\max \left\{ \left| \frac{\Delta x_0(k)}{\bar{x}_0 \Delta t_k} \right|, \left| \frac{\Delta x_i(k)}{\bar{x}_i \Delta t_k} \right| \right\}} \quad (6)$$

$$C = \Delta x_0(k) \Delta x_i(k) \quad (7)$$

$$\text{sgn}(C) = \begin{cases} 1 & C \geq 0 \\ -1 & C < 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\bar{x}_0 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_0(k)$$

$$\Delta x_0(k) = x_0(k) - x_0(k-1)$$

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_i(k)$$

$$\Delta x_i(k) = x_i(k) - x_i(k-1)$$

$$\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$$

设系统特征序列  $X_0$  与系统行为序列  $X_i (i \geq 1)$  改进的灰色关联度为

$$\gamma_i = \frac{1}{n-1} \sum_{k=2}^n \xi_i(k) \quad (9)$$

当  $-1 \leq \gamma_i < 0$  时,  $X_0$  与  $X_i$  为负相关,  $|\gamma_i|$  越大, 负相关程度越强; 当  $0 < \gamma_i < 1$  时,  $X_0$  与  $X_i$  为正相关,  $\gamma_i$  越大, 正相关程度越强; 当  $\gamma_i = 0$  时,  $X_0$  与  $X_i$  无关联。

### 3.2 灰色关联度计算

以 AC-25 各级配区间的分计筛余量作为比较序列, 以现场离析试验的级配离析评价指标作为参考序列, 进行沥青混合料级配区间的灰色关联分析。AC-25 各粒级区间与级配变异程度比较序列见表 5, 参考序列为

$$X_0 = \{0.35, 0.41, 0.72, 0.47, 0.52, 0.34, 0.29\}$$

根据改进的灰色斜率关联算法对表 5 序列进行关联度计算, 所得各种粒径的灰色关联系数见表 6。可以看出, 按照关联度大小排序有

$$\gamma_2 > \gamma_4 > \gamma_5 > \gamma_3 > \gamma_1$$

表 5 比较序列

Tab. 5 Comparative sequences

比较序列	级配区间/mm	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>
$X_1$	13.2~31.5	27.8	35.5	38.6	25.1	39.4	39.5	27.4
$X_2$	4.75~13.2	37.7	28.4	17.0	31.1	24.4	27.0	43.2
$X_3$	1.18~4.75	16.8	19.7	23.2	20.6	15.1	15.8	13.7
$X_4$	0.3~1.18	10.4	9.4	13.0	14.5	12.9	10.4	8.9
$X_5$	0~0.3	7.3	7.0	8.2	8.7	8.2	7.3	6.8

以级配变异特征值  $S$  为纵坐标  $y$ , 各级配区间为横坐标  $x$ , 进行二次回归分析, 根据试验数据计算

出各设计级配的粒径区间含量与级配变异特征值的二次回归关系见表 7。

表 6 灰色关联度

Tab. 6 Gray correlation degrees

级配区间/mm	关联系数						关联度
13.2~31.5	0.576	0.639	-0.691	0.656	-0.588	0.681	0.212
4.75~13.2	-0.722	-0.861	-0.893	-0.768	-0.643	-0.621	-0.751
1.18~4.75	0.620	0.655	0.878	-0.708	-0.611	0.981	0.303
0.3~1.18	0.683	0.599	0.857	-0.901	0.754	0.927	0.487
0~0.3	0.603	0.558	0.827	-0.809	0.666	0.809	0.442

表 7 回归分析方程

Tab. 7 Regression analysis equations

级配区间/mm	回归分析方程	决定系数 $r^2$	相关系数值域解释	关联度(绝对值)
13.2~31.5	$y = 0.002x^2 - 0.123x + 2.217$	0.248	$0.4 <  r  < 0.6$ , 属中等程度相关	0.212
4.75~13.2	$y = 0.006x^2 - 0.052x + 1.415$	0.835	$ r  > 0.9$ , 属极强相关	0.751
1.18~4.75	$y = 0.006x^2 - 0.190x + 1.857$	0.710	$ r  > 0.8$ , 属极强相关	0.303
0.3~1.18	$y = -0.013x^2 + 0.368x - 1.915$	0.569	$0.7 <  r  < 0.8$ , 属强相关	0.487
0~0.3	$y = -0.129x^2 + 2.141x - 8.321$	0.587	$0.7 <  r  < 0.8$ , 属强相关	0.442

由计算结果可以发现,  $\gamma_2$  最大, 其二次回归模型的相关系数也较大, 因而与  $\gamma_2$  对应的 4.75~13.2 mm 粒径区间集料含量的变化对最终路面级配变异特征会产生较大影响。同时从灰色关联和数理统计分析可以看出 0~0.3 mm 和 0.3~1.18 mm 这 2 种细集料对于路面离析特征也有着重要作用。1.18~4.75 mm 和 13.2~31.5 mm 粒径区间的集料与级配离析特征的灰色关联度偏小, 说明这 2 个筛孔区间较其他级配区间影响度较小。

### 3.3 灰色关联结果分析

参考贝雷法将 AC-25 级配划分为 0~0.3、0.3~1.18、1.18~4.75、4.75~13.2、13.2~31.5 mm 5 个级配区间, 对各级配区间含量与级配变异程度特征值相关性进行二次回归分析, 回归分析结果表明, 各级配区间含量与级配变异程度特征值的二次回归相关系数多在 0.6 以上; 而以单一粒径集料粒度分布与级配变异的相关系数普遍较低, 说明集料间交互作用对最终离析程度影响更大。如果仅考虑单个筛孔通过率对沥青混合料性能的影响, 则很有可能会削弱集料级配的离析特征, 故在进行离析分析时, 宜把不同粒级的集料进行组合来分析沥青混合料级配的抗离析性能。

AC-25 各级配区间回归方程的常数值在级配离析指标中所占比例较大, 说明在集料级配类型与公称最大粒径一定的情况下, 集料自身性质(常数项)对级配均匀性有较大影响, 因此, 在设计混合料过程中, 既

要重视集料级配, 又要重视原材料质量。

沥青混合料关键筛孔  $P$  到  $D$  区间粒料含量的变化对路面最终均匀程度有较大影响, 对于 AC-25 混合料, 这一区间为 4.75~13.2 mm, 该区间集料属粗集料部分的亚骨架结构, 最易对粗集料级配发生干涉, 含量太多会干涉粗集料级配, 易导致级配中粗集料不均衡, 路面难以压实。含量太少, 混合料易发生级配离析。同时, 随着该区间集料含量的变化, 级配变异程度存在极值, 在设计沥青混合料过程中可以通过控制该区间部分集料含量接近极值, 以达到较好的抗离析效果。

灰色关联度大小排序结果表明, AC-25 混合料 1.18~4.75 mm 和 13.2~31.5 mm 粒径区间的集料与级配离析特征的灰色关联度偏小, 说明粗集料和细集料中的较粗部分对级配离析的影响较小, 因此, 在级配设计中不能仅重视对粗集料含量的控制, 更需要重视整个级配颗粒之间的平衡。

## 4 结 语

(1) 性能试验固然是检验级配的最有效的方法, 但盲目拟定级配开展试验不仅增加了工作量, 也造成了不必要的材料浪费。灰色理论在分析“小样本”、“贫信息”不确定性系统的影响因素中具有较强的优势, 在研究因素多、数据离散的级配组成与级配离析相关性时推荐使用。

(2) 通过对不同粒级区间的研究发现, 相邻几

种集料组合的含量变化对离析影响较单一粒级影响更大,在进行离析研究时为减小集料交互作用的影响,不宜单独研究某一种集料的影响,建议把集料划分为合理的粒级组合,系统研究抗离析性能更好的集料级配,应充分考虑集料自身性质对离析的较大影响。

(3)灰色关联和数理统计分析发现,混合料中 $P \sim D$ 区间的集料含量变化对设计级配的潜在离析性能影响较大,该种集料与级配离析指标之间有良好的二次相关性,设计时可调整该种集料含量接近最佳值来获得较好的抗离析级配。

### 参考文献:

### References:

- [1] 李艳春,孟 岩,周骊巍,等. 沥青混合料空隙率影响因素的灰关联分析[J]. 中国公路学报, 2007, 20(1): 30-34.  
LI Yan-chun, MENG Yan, ZHOU Li-wei, et al. Grey relation degree analysis of influence factors on asphalt mixtures voids[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(1): 30-34. (in Chinese)
- [2] 董泽蛟,李生龙,温佳宇,等. 基于光纤光栅测试技术的沥青路面温度场实测[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(2): 1-6, 13.  
DONG Ze-jiao, LI Sheng-long, WEN Jia-yu, et al. Real-time temperature field measurement of asphalt pavement based on fiber bragg grating measuring technology [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(2): 1-6, 13. (in Chinese)
- [3] CHANG Ting-cheng, WEN Kun-li, CHEN Hung-shi. The selection model of pavement material via grey relational grade[C]// IEEE. 2000 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Nashville: IEEE, 2000: 3388-3391.
- [4] JORET A, SUBHI AL-BATAH M, ALI A N, et al. Ashac: an alternative towards classifying the shape of aggregate[C]// IEEE. 2007 International Conference on Intelligent and Advanced Systems. Kuala Lumpur: IEEE, 2007: 239-243.
- [5] GEDIK A, LAV A H. Sulphur utilization in asphaltic concrete pavements[C]// AL-QADI I L. Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements. Los Angeles: American Society of Civil Engineers, 2013: 1175-1191.
- [6] LORIA L, HAJJ E Y, SEBAALY P E. Assessment of reflective cracking model for asphalt pavements[C]// STEYN W J, LIU Xue-yan, MEHTA Y, et al. Road Pavement and Material Characterization, Modeling, and Maintenance. Changsha: American Society of Civil Engineers, 2011: 72-79.
- [7] ULLOA A, HAJJ E Y, SIDDHARTHAN R, et al. Equivalent loading frequencies for dynamic analysis of asphalt pavements[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(9): 1162-1170.
- [8] TAO Zhuo-hui, NI Fu-jian, YAN Jin-hai, et al. Evotherm warm mix asphalt technology applied on ultra-thin pavement in China[C]// CHEN Dar-hao, ESTAKHRI C, ZHA Xu-dong, et al. Material Design, Construction, Maintenance, and Testing of Pavements. Changsha: American Society of Civil Engineers, 2009: 171-176.
- [9] ZHOU H P, HOLIKATTI S, VACURA P. Caltrans use of scrap tires in asphalt rubber products: a comprehensive review[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(1): 39-48.
- [10] ZHENG Yuan-xun, CAI Ying-chun, ZHANG Ya-min. Study on temperature field of asphalt concrete pavement[C]// CHEN Dar-hao, CHANG Jia-ruey, ZAMAN M, et al. Emerging Technologies for Material, Design, Rehabilitation, and Inspection of Roadway Pavements. Changsha: American Society of Civil Engineers, 2011: 266-273.
- [11] WU Zhong. Structural performance of thin asphalt pavement under accelerated pavement testing[C]// HUANG Bao-shan, BOWERS B F, MEI Guo-xiong, et al. Pavement and Geotechnical Engineering for Transportation. Nanchang: American Society of Civil Engineers, 2013: 1-18.
- [12] 丁银萍. HMA 级配离析特性的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.  
DING Yin-ping. Research on the graded segregation characteristics of HMA[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [13] 包秀宁,张肖宁,吴旷怀,等. 级配矿质颗粒体离析的影响研究及应用[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2009, 48(6): 48-53.  
BAO Xiu-ning, ZHANG Xiao-ning, WU Kuang-huai, et al. Research and application of the gradation impact on mineral granular masses segregation[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2009, 48(6): 48-53. (in Chinese)
- [14] 彭余华,沙爱民,罗志华,等. 沥青混合料温度离析特性[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(6): 5-10.  
PENG Yu-hua, SHA Ai-min, LUO Zhi-hua, et al. Characteristics of the temperature segregation in asphalt mixture[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(6): 5-10. (in Chinese)
- [15] 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)
- [16] 麻旭荣,李立寒. 沥青混合料级配离析判别指标的探讨[J]. 公路交通科技, 2006, 23(2): 48-51.  
MA Xu-rong, LI Li-han. Study of index evaluating gradation segregation of hot mix asphalt[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(2): 48-51. (in Chinese)
- [17] 彭 勇,孙立军,董瑞琨. 沥青混合料均匀性评价新方法的

(下转第 18 页)

2007. Chengdu: ASCE, 2007: 1615-1620.
- [10] 王生俊. 化学加固法在黄土地区高速公路中的应用[J]. 中外公路, 2003, 23(4): 93-95.  
WANG Sheng-jun. Application of chemical reinforcement method in loess area highway[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2003, 23(4): 93-95. (in Chinese)
- [11] 芮勇勤, 袁海利, 袁 臻, 等. 岩溶地区地下洞河诱发路基失稳处治分析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(7): 1100-1103, 1108.  
RUI Yong-qin, YUAN Hai-li, YUAN Zhen, et al. Processing analysis on roadbed and subgrade instability caused by underground cavity and river in Karst area[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(7): 1100-1103, 1108. (in Chinese)
- [12] 杨世基, 郝中海, 吴立坚, 等. 公路填石路堤的压实[J]. 公路交通科技, 1999, 16(4): 1-4.  
YANG Shi-ji, HAO Zhong-hai, WU Li-jian, et al. Improvement on compaction techniques of highway stone fill embankment[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 1999, 16(4): 1-4. (in Chinese)
- [13] 李 宁, 张 平, 闫建文. 灌浆的数值仿真分析模型探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 326-330.  
LI Ning, ZHANG Ping, YAN Jian-wen. Numerical modeling of grouting in geoenvironment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(3): 326-330. (in Chinese)
- [14] 李连崇, 杨天鸿, 唐春安, 等. 岩石水压致裂过程的耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1060-1066.  
LI Lian-chong, YANG Tian-hong, TANG Chun-an, et al. Coupling analysis on hydraulic fracturing process of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1060-1066. (in Chinese)
- [15] 唐智伟, 赵成刚. 注浆抬升地层的机制、解析解及数值模拟分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1512-1516.  
TANG Zhi-wei, ZHAO Cheng-gang. Mechanisms of ground heave by grouting and analytical solutions & numerical modeling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1512-1516. (in Chinese)
- [16] VAUGHAN P R. The use of hydraulic fracturing tests to detect crack formation in embankment dam cores[R]. London: Imperial College, 1971.
- [17] BRADY B H G, BROWN E T. Rock Mechanics for Underground Mining[M]. London: Chapman & Hall, 1993.
- [18] 闫常赫. 路基土体注浆离心模型试验研究及数值模拟分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.  
YAN Chang-he. Centrifugal model test study of subgrade soil grouting and numerical simulation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008. (in Chinese)

#### (上接第 7 页)

- 探讨[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005, 33(2): 166-168, 173.  
PENG Yong, SUN Li-jun, DONG Rui-kun. Discussion about new method for evaluating homogeneity of hot mix asphalt[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2005, 33(2): 166-168, 173. (in Chinese)
- [18] 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)
- [19] 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)
- [20] 刘曙光. AC-13 粗集料离析评价方法及指标研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2009.  
LIU Shu-guang. Researching on evaluation method and index of segregation in AC-13 coarse aggregate[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)
- [21] 张久鹏, 黄晓明, 高 英. 沥青混合料非线性蠕变模型及其参数确定[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(2): 24-27, 55.  
ZHANG Jiu-peng, HUANG Xiao-ming, GAO Ying. Nonlinear creep model of asphalt mixture and parameter determination[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(2): 24-27, 55. (in Chinese)
- [22] 孙玉刚. 灰色关联分析及其应用的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.  
SUN Yu-gang. Research on gray incidence analysis and its application[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [23] 党耀国, 刘思峰, 刘 斌, 等. 灰色斜率关联度的改进[J]. 中国工程科学, 2004, 6(3): 41-44.  
DANG Yao-guo, LIU Si-feng, LIU Bin, et al. Improvement on degree of gray slope incidence[J]. Engineering Science, 2004, 6(3): 41-44. (in Chinese)