

# 基于图像的 AC20 型混合料集料接触分布变异性

英红<sup>1</sup>, 王锦河<sup>2</sup>, 张宏<sup>2</sup>, 魏宏<sup>1</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 西藏自治区交通厅重点公路建设项目管理中心, 西藏 拉萨 850001)

**摘要:** 为量化集料之间的接触关系, 提出了一种基于数字图像的沥青混合料集料接触分析方法, 以 AC20 型沥青混合料为例, 对 72 个车辙板试件切片图像进行处理, 得到每个切片上集料接触数量及集料特征; 通过统计分析, 得到 AC20 型沥青混合料接触对总体分布规律, 各档集料的接触对分布规律及单颗集料接触数分布规律; 并分析了大于 2.36 mm 集料含量  $C_{>2.36}$ , 集料级配的细度指数  $F_1$  和离析指数  $S_1$  对样本接触对数量变异性的影响规律及这三个指标的内在联系. 通过对 AC20 型沥青混合料接触状况的量化分析, 可将接触特征作为混合料级配设计的参考因素, 指导级配设计.

**关键词:** 道路工程; 沥青混合料; 接触; 数字图像; 大样本; 变异性

**中图分类号:** U 416

**文献标识码:** A

## Variation of Aggregate Contacts Distribution in AC20 HMA Based on Digital Image Processing

YING Hong<sup>1</sup>, WANG Jinhe<sup>2</sup>, ZHANG Hong<sup>2</sup>, WEI Hong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. The Highway Construction Project Management Center, Transport Department of the Tibet Autonomous Region, Lhasa 850001, China)

**Abstract:** In order to quantify the contacts between the aggregates, a new method based on digital image processing was put forward. For AC20 HMA, the amount of aggregate contacts and the features of the aggregates on all sample images acquired from 72 cut sections of rutting test samples were obtained through this method, and then the global contacts distribution rules of all aggregates, the local contacts distribution rules of each grades aggregates and the single particle contacts number distribution rules of each grades aggregates were acquired from statistical analysis. The variation of contacts amount on each images and influence factors including the content of aggregates above 2.36 mm ( $C_{>2.36}$ ), the fine index of aggregates above 2.36 mm ( $F_1$ )

and the segregation index ( $S_1$ ) were discussed. The internal relations of these three factors were as well analyzed. Contact features can be used for hot-mixture asphalt (HMA) gradation design as a referenced factor through these quantified analysis.

**Key words:** road engineering; hot-mixture asphalt (HMA); contacts; digital image processing; large sample; variation

随着我国道路建设的快速发展, 陆续开发和引进了多种级配类型的混合料, 这些级配类型基于各种各样的设计理念, 以前限于探测手段, 只能通过工程实践以及路用性能加以印证和完善, 对于组成混合料的集料颗粒分布特征及它们之间相互作用的细观机理仍停留在感性认识阶段. 近年来, 借助于计算机及图像传感器的飞速发展, 国内外研究者陆续加深了对沥青混合料细观结构的认识, Mora C F, Eyad Masad, 张婧娜, 李智和彭勇等分别提出了基于数字图像的集料针片状含量, 集料的形状、棱角和纹理, 混合料中集料颗粒长轴方向分布规律, 沥青混合料离析等问题的分析方法<sup>[1-5]</sup>; Zhong Q Y, You 等提出了基于图像的有限元、离散元建模方法<sup>[6-7]</sup>. 这些研究深化了人们对沥青混合料细观机理认识, 并在一定程度上对沥青混合料的某些细观特征做到了量化分析.

集料之间的接触数量及接触分布特征是混合料级配组成的重要特征, 它影响着集料颗粒之间作用力大小及传递路径, 继而对混合料的性能有着重要影响, 通过混合料切片图像, 可以较为准确地得到颗粒之间的接触数量, 尽管每个切片的接触数量变异性很大, 但通过大样本分析可以统计该类型混合料的接触数量总体分布特征. 以 AC20 型沥青混合料为例, 通过对 72 个样本统计得到了集料接触分布特征及其变异性, 旨在为级配估计接触情况和由设计

收稿日期: 2009-11-18

第一作者: 英红(1978—), 男, 博士生, 主要研究方向为道路工程. E-mail: yinghongcq@tom.com

的接触情况反推级配奠定基础.

## 1 基于图像的接触结构获取方法

沥青混合料的图像处理方法已比较成熟,杨宇亮,英红<sup>[8-9]</sup>等分别对沥青混合料图像处理方法做过较为系统的研究.接触结构的搜索算法依赖于清晰的集料边界,这对图像分割算法要求较高,本文采用Huang<sup>[10]</sup>提出的多分辨率自适应窗口分割算法.

### 1.1 多分辨率自适应窗口分割算法

基于混合料图像的集料接触分析,需要清晰的集料边界,多分辨率自适应分割方法,利用自适应机制采用多个分割阈值,优于传统基于灰度空间的分

割方法.从图 1a 中可以看出,传统的基于灰度空间的单阈值分割方法(如 Otsu 法)仅依靠集料与沥青砂的整体色差,集料的边缘不清晰,轮廓失真,并且集料内部存在很多的孔洞.本文算法在集料内部采用较大的窗口,突出集料整体的灰度信息;在集料与沥青接触的界面上采用较小的窗口,突出集料的边缘信息.自适应的窗口机制由信息论的 LIM(Lorenz Information Measure)<sup>[11]</sup>驱动,通过不停地迭代直到集料的边缘完全分割出来.如图 1b,迭代过程中,集料内部为大尺寸窗口,集料的边缘为大小不等的锯齿型窗口集合,不同的窗口采用不同的分割阈值,集料与沥青接触的边界清晰,如图 1c.

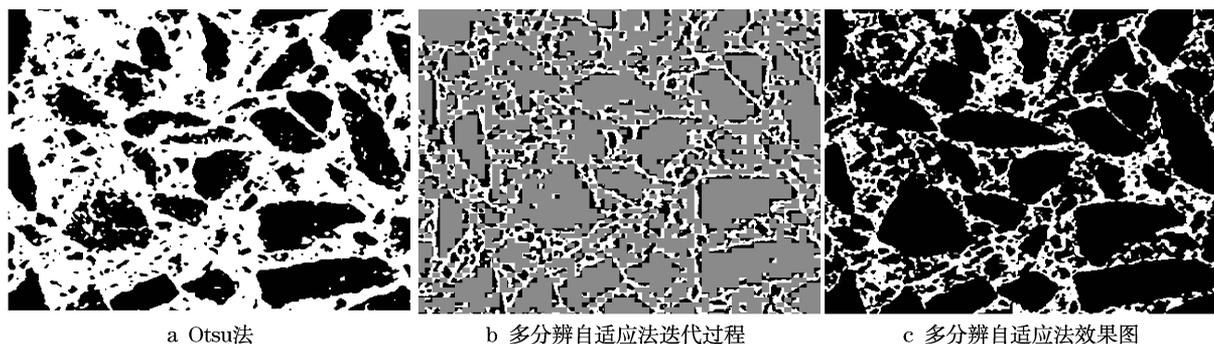


图 1 多分辨率自适应窗口分割算法及与传统算法的效果对比

Fig.1 Comparison between adaptive window thresholding algorithm and traditional algorithm

### 1.2 二维图像中“接触对”的定义

为描述集料颗粒之间的空间临近关系,定义了接触对:当两个集料 P、Q 的边界像素距离小于某个阈值(搜索窗半径)时,称这两个集料互相接触,该像素称为接触点,该接触存在两个接触对,分别为 P-Q 和 Q-P.如图 2 所示,沿 67 号集料颗粒边界搜索,共有 6 个接触对,分别为 67-55,67-60,67-62,67-65,67-66 和 67-68.沿 65 号颗粒边界搜索,分别与 60 号,67 号,78 号颗粒接触,记作 65-60,65-67 和 65-78,共有 3 个接触对.

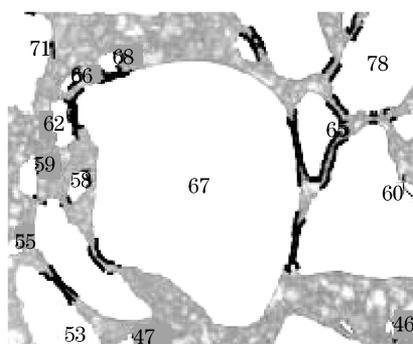


图 2 接触对

Fig.2 Contact couples

### 1.3 接触对的搜索方法

取  $(2N+1) \times (2N+1)$  大小的搜索窗,  $N$  为搜索窗半径,该窗中心点在集料 A 颗粒的边界上,搜索方向沿着 A 的边界循环一周,在循环过程中,如果有集料颗粒 B 的像素点落在搜索窗内,那么 A 边界上的这一点为接触点,颗粒 A 和 B 相互接触,记为接触对 A-B.依次在图像中所有集料颗粒的边界上使用该搜索窗进行搜索.由于采用了正方形的搜索窗,存在微小的误差,如当沿 B 颗粒边界搜索时,可能不存在接触对 B-A.

## 2 试验简介

油石比 4.3%;4.75 mm 是 AC20 的关键筛孔,该筛孔通过率 45%为 F 型级配和 C 型级配的分界点,本文设计级配 4.75 mm 的通过率定为 45%,其他筛孔渐进逼近 AC20 规范中值,组成列于表 1;采用车辙试验仪轮碾成型;车辙板切割成六块,由 12 块车辙板构成 72 个截面,在每个扫描图中部截取  $1\ 000 \times 2\ 200$  大小的图像,接触对搜索窗大小为  $11 \times 11$ .

表1 级配组成

Tab.1 Mineral gradation of mixture

筛孔尺寸/mm	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率/%	100	94.0	86.0	76.0	63.0	45.0	33.0	25.0	17.0	11.0	9.0	5.0

### 3 统计数据

获取图像后,考虑到较细集料图像分析精度差,在图像中过滤了小于2.36 mm的颗粒;计算得到每张图像中的接触信息;利用“电子筛”,由等效直径法<sup>[12]</sup>计算出图像中大于2.36 mm颗粒的级配,列于表2,计算时,VMA取值为13.2;接触对数目,集料颗粒数目,集料面积,接触代价等总体分布列于表3,各档集料接触对数目统计列于表4,单颗集料的接触对数目列于表5.

表2 由72个图像样本得到的2.36 mm以上集料颗粒通过率(VMA=13.2)

Tab.2 Passing ratio above 2.36 mm from 72 sample images (VMA = 13.2)

筛孔尺寸/mm	2.36	4.75	9.5	13.2	16	19	26.5
通过率/%	31.3	41.7	58.0	72.5	84.7	92.8	100.0

表3 集料面积、个数、接触对数目以及未接触个数分布

Tab.3 Collective distributions of area, particle number, contact couples number and noncontact number

筛孔尺寸/mm	接触对	集料面积/pixel	颗粒数目	未接触颗粒数目	接触代价/pixel
	①	②	③	④	②/①
2.36	7 776	14 334 180	8 276	2 930	1 843
4.75	2 653	22 430 608	1 521	214	8 455
9.5	1 326	19 953 147	506	28	15 048
13.2	785	16 807 483	251	8	21 411
16	447	11 136 819	119	2	24 915
19	279	9 842 287	62	0	35 277

表4 各档集料接触对分布

Tab.4 Local distributions of contact couples

筛孔尺寸/mm	各档集料接触对数目					
	2.36	4.75	9.5	13.2	16	19
2.36	4 427	1 594	810	470	292	183
4.75	1 616	495	256	150	90	46
9.5	825	258	110	69	33	31
13.2	480	149	69	60	19	8
16	296	89	33	19	4	6
19	184	46	29	8	6	6

表5 单颗集料接触对数目分布

Tab.5 Contact couple distributions of single aggregate particle

筛孔尺寸/mm	单颗集料接触对数目											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12
2.36	2 930	3 371	1 580	344	44	6		1				
4.75	214	470	481	233	96	24	3					
9.5	28	95	129	120	83	37	6	5	2	1		
13.2	8	26	57	62	53	29	13	1	1	1		
16	2	6	22	23	31	16	13	4	1		1	
19		1	7	16	8	13	9	4	1	1	1	1

### 4 接触关系的总体统计特征

混合料成型后,样本的接触数目存在很大的变异性,但对于一个样本数为72的大样本,集料接触关系的总体特征是接近该类混合料的真实情况的,如表2中由图像计算得到的级配组成与表1中的设计级配接近.

#### 4.1 接触对总体分布

从表3统计结果看,粒径越小,接触数量所占比例越高,2.36 mm集料与4.75 mm集料的接触对数目接近80%,从表1的级配组成看,两档石料质量百

分数仅占混合料的30%;而9.5 mm以上集料的质量超过混合料30%,接触对仅占2.36 mm以上集料接触对总数的20%;由此可见,细集料对接触数目的贡献要大于粗集料.接触对分布与颗粒数目分布曲线趋势较为一致,而与颗粒面积分布曲线差异较大,从而说明,各档集料的接触对受各档集料的颗粒数目控制.

表3中,超过35%的2.36 mm的集料颗粒没有与任何大于2.36 mm集料接触,由此可以看出,约有1/3的2.36 mm集料游离在粗集料构成的“孔洞”中,或者说过多的细集料将粗颗粒之间的距离撑大了,另外从大于4.75 mm的集料未接触统计情况

看,仍有一些粗集料处于“单独颗粒”的悬浮状态,骨架远未形成.

表 3 中,接触代价与颗粒尺寸近似为成正比关系.

#### 4.2 各档集料的接触对分布

各档集料接触对分布即每档集料颗粒与其自身和其它档集料的接触的比例,如表 4 所示,它是级配细微结构的反映,比如,SMA 中的粗集料,每个粗集料周围全是粗集料,AC 型混合料的粗集料周围大多是细集料,这都能在集料接触对分布中反映出来,用以考察级配中的微结构组成情况.它与各档集料颗粒数目及单颗集料接触对数目分布情况有关.

对 AC20 型混合料颗粒数目决定了接触分布走向,表 4 中,颗粒数目与各档集料接触对分布趋势是一致的,但在细集料端,颗粒数目分布要高于接触对分布,而在粗集料端,前者低于后者,这是由于 AC 型混合料较细集料中有一部分颗粒没有发生接触,而较粗的集料颗粒往往具有多个接触对.各档集料接触对分布趋势与接触对总体分布趋势基本是重合的,反映了连续型级配的特征.

#### 4.3 单颗粒接触数目分布

表 5 中,单个颗粒接触对数目由颗粒面积大小控制,另外,混合料的级配也是重要的影响因素,对 AC20 混合料,2.36 mm 和 4.75 mm 大部分颗粒只有 1 到 2 个接触对,在“1”和“2”处表现为峰值,其他粗集料峰值位置向右递增,峰值数值逐步降低,分布的范围也逐步加宽,表 5 中,粗体表示峰的位置及分布范围,其中 19 mm 集料曲线有两个峰值,这是由于该档集料总数最少,统计规律最弱,另外该档颗粒面积最大,图像切割时,其误差影响较大.

## 5 样本变异性及影响因素

### 5.1 样本接触对数目的变异性

样本的接触对数目分布列于表 6,绝大部分样本接触对数目在 100~160 范围内,近似为正态分布.其中,接触对最大值为 200,最小值为 99,平均值为 132.最大值是最小值的 2 倍,样本的接触对数目存在很大的变异性.

表 6 样本接触对数目分布

Tab.6 Contact couples distribution of samples

区间	100 以下	100~ 120	120~ 140	140~ 160	160~ 180	180 以上
频数	1	20	28	18	4	1

### 5.2 影响因素

影响样本接触数目主要因素包括图像中颗粒含量,颗粒的粗细搭配状况和粗细集料的空间分布状况;分别用  $C_{>2.36}$  以上颗粒的面积  $C_{>2.36}$ ,细度指数  $F_1$ ,离析指数  $S_1$  表示.

大于 2.36 mm 颗粒含量  $C_{>2.36}$  为

$$C_{>2.36} = \sum_{i=1}^6 C_i$$

细度指数  $F_1$  为

$$F_1 = \frac{\sum_{i=1}^6 iC_i}{\sum_{i=1}^6 C_i}$$

离析指数  $S_1$  为

$$S_1 = \frac{N_A + N_B}{N_C}$$

$$N_B = \sum_{j=3}^6 \sum_{i=3}^6 N_{i,j} \quad N_B = \sum_{j=3}^6 \sum_{i=3}^6 N_{i,j}$$

$$N_C = \sum_{j=1}^2 \sum_{i=3}^6 N_{i,j} + \sum_{j=3}^6 \sum_{i=1}^2 N_{i,j}$$

式中: $C_i$  为  $i$  档集料的含量; $N_{i,j}$  表示样本图像中第  $i$  档集料与第  $j$  档集料的接触对数目统计值, $i, j$  依次代表 2.36, 4.75, ..., 19 mm 筛孔.

由  $C_{>2.36}$  和  $F_1$  基本可以确定混合料 2.36 mm 以上集料含量及其级配,但仅仅靠  $C_{>2.36}$  和  $F_1$  不能全部反映混合料的变异性,具有相近的  $C_{>2.36}$  和  $F_1$  值的样本,接触对数目及分布仍有很大差异,这是由于样本图像局部离析造成的,所谓局部离析,即在更细观的层次上出现的粗细集料聚团,实质为样本局部结构的不均匀性.  $S_1$  是反应了混合料集料接触时粗-粗接触,细-细接触以及粗-细接触的比例,分别对应  $S_1$  中的  $N_A, N_B$  和  $N_C$ ; 当粗细集料分别聚团时,  $N_A$  和  $N_B$  有增加趋势,而  $N_C$  有减少的趋势,  $S_1$  变大; 当  $S_1$  变大到一定程度会出现一个“离析带”,粗、细集料集团的界面越来越明显,如图 3 中两个样本,在表 7 中,它们具有相近的  $C_{>2.36}$  和  $F_1$  值,但  $S_1$  值差距很大,在 b 图中辅助线即为粗细聚团后造成的“交界面”,b 比 a 样本接触对数目约多 50%. 样本高度接近 5 cm,与实际工程结构厚度相近,因此有必要讨论讨论局部离析对接触状况的影响.

### 5.3 影响因素之间的相互关系

(1)  $C_{>2.36}$  与  $F_1$  的相关性图 4a 中,两者有较强的协同变化趋势,随着  $C_{>2.36}$  的增加,  $F_1$  呈增加的趋势.

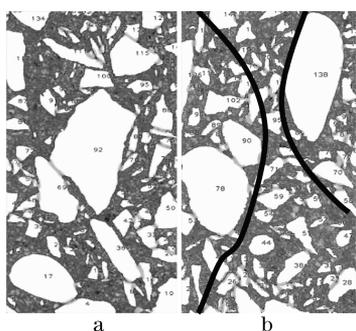


图3 不同  $S_1$  的样本对比

Fig.3 Comparison of samples with different  $S_1$

表7 图3中两个样本的参数  
Tab.7 Parameters in Fig.3

图像编号	接触对	$C_{>2.36}/\%$	$F_1$	$S_1$
a	108	57.3	3.78	1.28
b	142	57.5	3.69	3.36

(2)  $F_1$  与  $S_1$  的相关性

图4b中,随  $F_1$  增加,  $S_1$  有较弱的下降趋势;并且  $S_1$  的变异范围越来越窄,说明在一定范围内,混合料中较粗集料的比例增加,会减小混合料的离析程度.

(3)  $C_{>2.36}$  与  $S_1$  的相关性

图4c中,随  $C_{>2.36}$  值的增加,  $S_1$  也呈现较弱的下降趋势,且  $S_1$  变异范围也越来越窄.

5.4  $S_1$  对样本接触对数目的影响规律

由  $C_{>2.36}$  和  $F_1$  大体可以估算混合料 2.36 mm 以上集料的级配组成及集料颗粒数目. 不考虑离析时,由集料接触的总概率及单颗集料接触数分布规律大体推算混合料的接触数目. 由于离析的存在接触对数目及分布变得更加复杂,本文集中讨论  $S_1$  对接触对数目及分布的影响,将  $C_{>2.36}$  以 45 为分界点,  $F_1$  以 3.5 为分界点分段考察  $S_1$  对接触对以及  $N_A, N_B$  和  $N_C$  绘于图5.

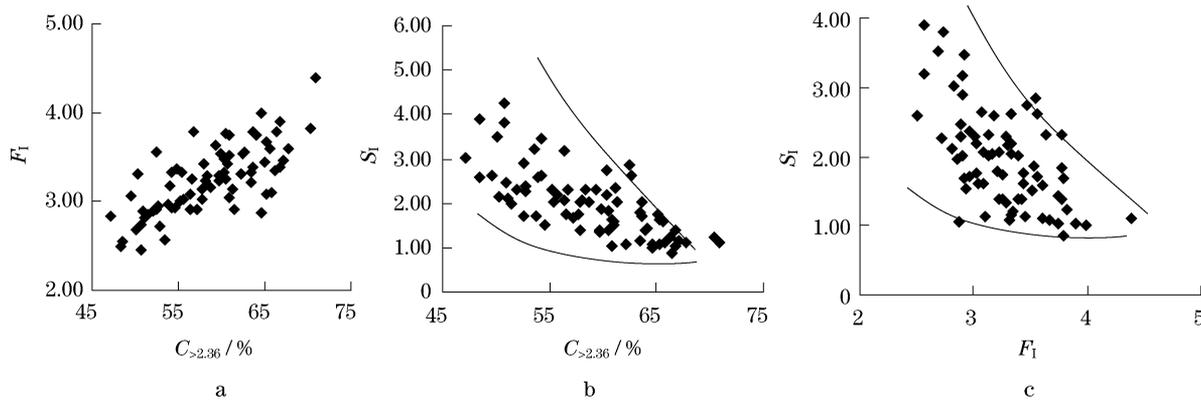


图4  $C_{>2.36}, F_1$  及  $S_1$  的相互关系

Fig.4 Relationship among  $C_{>2.36}, F_1$  and  $S_1$

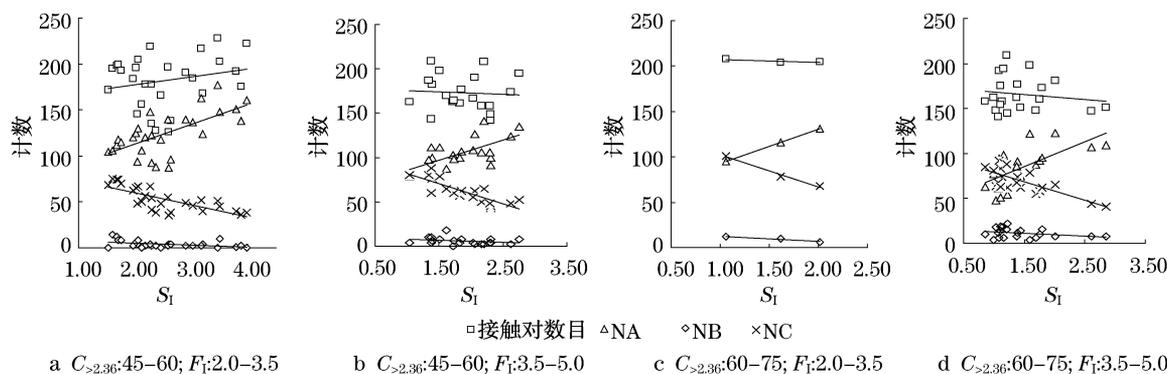


图5  $S_1$  对样本接触对数目的影响规律

Fig.5 Influence rule of  $S_1$  on contact couples of samples

图5a和5d样本点最多,而5c次之,5b图样本点最少,说明  $C_{>2.36}$  和  $F_1$  有较强的协同变化趋势.

随  $S_1$  的增加,5a中的接触数目有增加趋势;而5b和5c基本保持不变;5d有下降趋势.

说明离析时,较细级配接触数目会增加,而较粗级配的接触数目会降低。

图 5 的四幅图中,随着离析的增加,所有的  $N_A$  和  $N_B$  都增加,而  $N_C$  减少,这正是  $S_I$  所描述的粗细集料分别聚团,粗、细集料集团的自接触增加,而粗-细相互接触减少,粗-细界面减少。

图 5 的四幅图中  $N_A$ ,  $N_B$  和  $N_C$  随  $S_I$  变化的总体趋势一致,但在数值上仍有差别. 表现为:图 5a 中  $N_A$  与  $N_C$  数量上差距最大;且随  $S_I$  增大,  $N_A$  增加数目大于  $N_C$  减少数目;图 5d 中,  $N_A$  与  $N_C$  数值上差距最小;且随  $S_I$  增大,  $N_A$  增加数目小于  $N_C$  减少数目;图 5b 和 5c 情况相近,  $N_A$  与  $N_C$  数值上差距适中,且随  $S_I$  增大,  $N_A$  增加数目与  $N_C$  减少数目基本持平。

## 6 结论

(1) 通过大样本分析,借助试验得到的体积指标 VMA 值,由图像估计得到的级配组成与设计级配组成接近,二维图像分析结果与三维情况是接近的;并通过变异性分析,为从级配推断混合料的接触状况或从设计的接触状况推算级配组成奠定基础,从而为混合料级配设计提供参考。

(2) 对于 AC20 型混合料,较细集料对接触对的贡献占主导地位,接触对总体分布与集料的颗粒数目分布趋势一致,而与集料的面积分布相关性差;接触代价与颗粒尺寸成正比关系。

(3) 各档集料的接触对分布曲线与颗粒数目分布曲线的走势相同,而与接触对总体分布曲线基本重合,说明悬浮密实型混合料的各档集料颗粒接触情况由混合料中各档集料颗粒的数目控制,单颗集料接触对数目对其影响较弱;单颗集料接触数分布来看,峰值位置随集料粒径变大而缓慢右移,即单颗集料接触数增加,峰值数值降低,峰值分布区间变宽。

(4) 样本存在很大离析,接触对数目的最大值能够达到最小值的 2 倍,影响样本接触数目变异性的主要因素为大于 2.36 mm 含量  $C_{>2.36}$ , 细度指数  $F_1$  和离析指数  $S_I$ 。

### 参考文献:

[1] Kwan A, Mora C, Chan H. Particle shape analysis of coarse

- aggregate using digital image processing [J]. Cement and Concrete Research, 1999.
- [2] Eyad Masad, Dana Olcott. Correlation of imaging shape indices of fine aggregate with asphalt mixture performance[C/CD]// the 80th Annual Meeting of TRB, Washington, D C: Transportation Research Board, 2001.
- [3] 张婧娜. 基于数字图像处理技术的沥青混合料微观结构分析方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2000.
- ZHANG Jingna. Study of microstructure analysis methodology for asphalt concrete based on digital image processing [D]. Shanghai: Tongji University, 2000.
- [4] 李智. 沥青混合料体积组成及其数字图像处理技术[J]. 华南理工大学学报. 2002, 38(11): 113.
- LI Zhi. Evaluating the volumetric properties of asphalt mixtures with digital image processing technique [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition. 2002, 38(11): 113.
- [5] 彭勇, 孙立军, 董瑞琨. 沥青混合料均匀性评价新方法的探讨 [J]. 同济大学学报(自然科学版). 2005, 33(2): 166.
- PENG Yong, SUN Lijun, DONG Ruikun. Discussion about new method for evaluating homogeneity of hot-mix asphalt [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2005, 33(2): 166.
- [6] Yue Q, Chen S, Tham L. Finite element modeling of geomaterials using digital image processing [J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(5): 375.
- [7] YOU Zhanping, William G. Micromechanical modeling approach to predict compressive dynamic moduli of asphalt mixture using the distinct element method[C/CD]// the 85th Annual Meeting of TRB, Washington, D C: Transportation Research Board, 2006.
- [8] 杨宇亮. 沥青混合料微观结构的分析方法[D], 上海: 同济大学, 2003.
- YANG Yuliang. Analytical method of microstructure of asphalt concrete [D]. Shanghai: Tongji University, 2003.
- [9] 英红. 数字图像在沥青混合料中的应用及研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2008.
- YING Hong. Study and application of digital image processing technique on asphalt concrete [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2008.
- [10] HUANG Qingming, GAO Wen, CAI Wenjian. Thresholding technique with adaptive window selection for uneven lighting image [J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26(1): 801.
- [11] 焦李成, 张向荣, 侯彪, 等. 智能 SAR 图像处理与解译 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- JIAO Licheng, ZHANG Xiangrong, HOU Biao, et al. Intelligent SAR image processing and interpretation [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [12] E Masad, B Muhunthan, N Shashidhar, et al. Internal structure characterization asphalt concrete using image analysis [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 1999, 13(2): 88