

# 沥青混合料集料接触特性切片图像评价方法

魏 鸿<sup>1</sup>, 英 红<sup>1</sup>, 凌天清<sup>2</sup>

(同济大学 交通运输工程学院, 上海, 201804; 重庆交通大学 土木建筑学院, 重庆 400074)

**摘要:**为了评价沥青混合料集料的接触特性,提出了一种较能准确有效评价沥青混合料集料接触特性的新方法。研究中建立了表征集料接触特性的量化指标——接触对,以AC20型沥青混合料为例,对车辙板试件的72幅切片图像进行了分析,通过对所有切片的集料接触数据进行统计分析,得到了集料接触对数目的分布规律。在此基础上,还进行了集料接触特性的影响因素分析,并提出了影响集料接触特性的3个主要因子:4.75 mm以上集料含量 $C_{>4.75}$ 、细度指数 $FI$ 和离析指数 $SI$ 。结果表明这3个因子与集料接触对之间有较好的关联度,集料接触特性变化受3个因子共同作用的影响,单因素或双因素都不能正确反映样本的接触对数目。

**关键词:**道路工程; 沥青混合料; 数字图像处理; 集料; 接触特性; 影响因子

**中图分类号:**U414 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)03-0069-06

## Aggregates Contact Characteristics Evaluation of Asphalt Mixtures by Analyzing Cut Images

WEI Hong<sup>1</sup>, YING Hong<sup>1</sup>, LING Tian-qing<sup>2</sup>

(1. School of transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, P. R. China;

2. School of Civil Engineering & Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China)

**Abstract:** In order to evaluate the aggregates contact characteristics of asphalt mixtures, an effective method of evaluating the aggregates contact characteristics of asphalt mixtures was proposed. The “contact couple” was established as a quantitative index of aggregates contact characteristics and 72 digital images of mixtures’ cut sections were obtained from the rutting test samples of AC20 HMA. Thus a statistical analysis of contact couples was made from the digital images. It is indicated that the contact couples are with normal distribution. Besides, the scale ratio of aggregates above 4.75mm ( $C_{>4.75}$ ), the fine index ( $FI$ ) and the segregation index ( $SI$ ) were presented as main impact factors of aggregates contact characteristics. And further investigation of the relationship between impact factors and aggregates’ contact characteristics was carried out. It is revealed that the impact factors have good correlation with the contact couples, the interaction of impact factors is the main reason that influenced the aggregates contact characteristics, neither single factor nor dual factors can reflect the samples’ contact numbers exactly.

**Key words:** road engineering; digital image processing; asphalt mixtures; aggregates; contact characteristics; impact factor;

随着中国道路建设的快速发展,陆续引进和开发了多种级配类型的混合料。由于混合料性能受到

集料组成的直接影响,集料之间的颗粒分布及接触状况影响着混合料颗粒间作用力的大小及传递路

收稿日期:2009-11-27

作者简介:魏鸿(1981-),男,博士,主要从事道路工程研究,(E-mail)whcq12@tom.com。

径,因此不同级配混合料的集料颗粒分布特征及其相互作用的细观机理一直是道路工程界关注的问题。

近年来,借助于计算机技术、图像采集及处理技术的飞速发展,国内外研究者相继对这一问题展开了深入研究。Mora C F<sup>[1]</sup>、Eyad Masad<sup>[2]</sup>、汪海年<sup>[3]</sup>、吴文亮<sup>[4]</sup>和彭勇<sup>[5]</sup>等分别提出了基于数字图像的集料形状、棱角和纹理,混合料中集料颗粒的空间分布特点,沥青混合料离析和级配等问题的分析方法;Zhong Q Y<sup>[6]</sup>、Zhanping You<sup>[7]</sup>、Hyunwook Kim<sup>[8]</sup>等提出了基于图像的有限元、离散元建模方法。

由于目前的研究主要集中于集料几何特征和空间分布特点方面,而这些成果尚不能有效评价和分析集料间的接触特性,因此有必要深入开展相关研究。通过分析混合料的切片图像,可以较为准确的得到颗粒间的接触信息,进而为混合料的性能评价提供依据。虽然单个切片的变异性较大,但对单一类型混合料而言,通过大样本统计分析仍可以掌握该类型混合料接触数量的总体分布特征及影响因素。该文以 AC20 沥青混合料为例,采用图像技术对 72 幅切片图像进行识别,总结了该类型混合料集料的接触数分布特征,并分析了集料接触特性的主要影响因素。

## 1 基于图像技术的接触特性分析方法

### 1.1 二维图像中“接触对”的定义

为了描述集料颗粒之间的空间临近关系,定义了接触对作为表征集料间接触特性的量化指标。在混合料的切片图像中,当任意 2 个相邻集料 A 和 B 的边界像素距离小于某个阈值(搜索窗半径)时,称这 2 个集料互相接触,该接触存在 2 个接触对,分别为 A→B 和 B→A。集料间的接触如图 1 所示,在图 1 中 67 号集料分别与 60 号、65 号、68 号、66 号、59 号和 55 号颗粒接触,共有 6 个接触对。对 68 号集料,它只与 67 号颗粒接触,所以只有 1 个接触对。

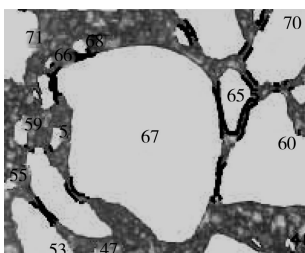
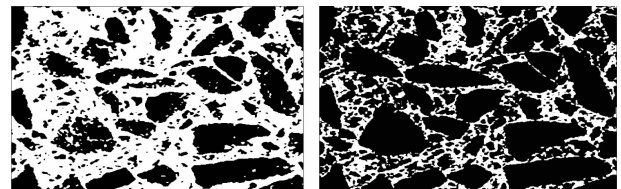


图 1 集料间的接触对

### 1.2 沥青混合料图像识别技术

准确的集料接触特性分析需要利用清晰的集料边界图像,这对沥青混合料的图像分割精度要求较高。目前,沥青混合料的图像处理技术已比较成熟,杨宇亮<sup>[9]</sup>、徐科<sup>[10]</sup>、英红<sup>[11]</sup>等分别对此做过较为系统的研究。传统的图像分割技术采用的是基于灰度空间的单阈值分割方法<sup>[12]</sup>,该方法仅依靠集料与沥青砂的整体色差进行辨别,分析得到的集料边缘模糊、轮廓失真,并且集料内部易出现孔洞(图 2a)。为了得到高质量的图像结果,采用多分辨率自适应窗口分割算法<sup>[13]</sup>,该方法在集料内部采用较大的窗口,在集料与沥青接触的界面上采用足够小的窗口,以保证集料的整体性和边界的清晰性。窗口的自适应功能采用信息论的 LIM 方法<sup>[14]</sup>实现,集料边缘采用迭代的方法完全分割出来。与传统分割方法相比,这种方法既保证了集料内部的整体性,又提高了集料边界的清晰度,因此其分析结果与实际情况吻合得更好十分利于集料的接触分析,2 种方法的结果对比如图 2 所示。



(a) 单阈值分割方法 (b) 多分辨率自适应分割方法

图 2 不同分割算法的效果对比

### 1.3 接触对的搜索方法

将混合料的切片图像转化为二值图像,用灰度识别方法对图像中的集料和结合料进行识别,并对集料颗粒编号。搜索接触对时设置边长为 $(2N+1)$ 的正方形搜索窗(窗口半径为 $N$ ),焦点在集料颗粒的边界上,搜索时窗口沿着集料边界逆时针方向循环一周。设有集料颗粒编号为 A,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 的所有接触记为接触对 A→B。依次对图像中所有集料颗粒的边界进行搜索,记录下各编号颗粒的接触对数目,并统计集粗颗粒的尺寸和面积。受图像分辨率和搜索窗形状的影响,部分位置的像素值是离散的,使得搜索结果存在微小的误差,经分析发现这种误差对计算接触对数目的影响十分轻微,完全可以忽略。

## 2 试样制备及组成

用于切片分析的试样由 AC20 混合料组成,主

要材料及参数为:沥青采用壳牌 70A 道路石油沥青;油石比 4.3%;集料为玄武岩,压碎值为 16.2%,针片状含量为 6.7%。

考虑到 4.75 mm 是该类混合料的关键筛孔,并以该筛孔通过率 45% 为 F 型级配和 C 型级配的分界点。因此,设计级配的 4.75 mm 筛孔通过率为 45%,其他筛孔渐进逼近规范中值<sup>[15]</sup>,混合料的级

配组成见表 1。混合料采用车辙试验仪轮碾成型,碾成型后,将车辙板等距切割成 3 块,并对每块试件表面进行扫描(分辨率为 200 dpi)获取切片图像。在每个扫描图中部截取 1 000×2 200 大小的图像进行分析,接触对的搜索窗大小为 11×11,整个研究共对 72 个切片图像进行了分析。

表 1 集料的级配组成

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 图像处理方法有效性分析

图像处理时,采用等效直径法<sup>[16]</sup>计算各切片的颗粒大小。由于 2.36 mm 以下集料颗粒的图像分析精度差,处理时利用“电子筛”过滤掉这部分颗粒信息。最后通过计算得到每张图像中的接触信息,主要包括 2.36 mm 以上颗粒的编号、颗粒的接触对数目、接触颗粒的尺寸及面积等。

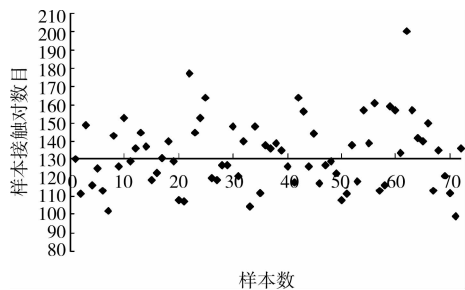


图 3 样本接触对分布范围

对试样的集料颗粒尺寸进行了统计,通过分析得到了所有样本的实际级配组成,如表 2 所示。对比表 1 和表 2 不难发现,图像分析得到的集料样本级配与原设计级配非常吻合,说明采用的图像分析方法能真实有效地反应混合料中的集料组成和分布情况。通过统计样本的接触对数目发现,绝大部分样本的接触对数目集中在 100~160 范围内,可近似为服从正态分布,样本接触对数目的分布范围详见图 3。从图 3 和表 3 中可以共同看出分析数据能较准确有效地反映集料的接触情况。

表 2 2.36 mm 以上集料的样本级配

筛孔尺寸/mm	2.36	4.75	9.5	13.2	16	19	26.5
筛孔通过率/%	31.3	41.7	58	72.5	84.7	92.8	100

表 3 样本接触对数目分布

分布范围	100 以下	100~120	120~140	140~160	160~180	180 以上
频数	1	18	35	18	4	1

### 4 集料接触特性的影响因素分析

#### 4.1 主要影响因子

1)集料的粗细比例  $C_{>4.75}$ 。沥青混合料中,荷载作用主要靠集料和结合料以及粗集料间的相互接触得以传递和分散。进行 AC20 混合料的级配设计时,通常以 4.75 mm 筛孔作为集料的粗细分界点。因此,为了分析集料粗细组成对其接触特性的影响,采用  $C_{>4.75}$  来表征实际的集料粗细组成。 $C_{>4.75}$  指图像中 4.75 mm 以上的集料面积之和占整幅图像面积的百分数, $C_{>4.75}$  越大说明粗集料在混合料中的比例越大。

2)细度指数  $FI$ 。为了进一步分析级配组成对集料接触特性的影响,定义了细度指数  $FI$  作为反映级配组成的一个指标。 $FI$  的计算类似于砂的细度模数,首先对 2.36 mm 以上集料的筛余量进行权重分配,然后采用加权含量总和与实际含量总和之间的比值来反映集料的级配组成情况。

$$FI = \frac{\sum_{i=1}^6 n_i C_i}{\sum_{i=1}^6 C_i} \quad (1)$$

其中,  $C_i$  为 2.36 mm, 4.75 mm, ……19 mm 尺寸筛孔的集料含量;

$n_i$  为 2.36 mm, 4.75 mm, ……19 mm 尺寸筛孔的筛余量权重。

3)离析指数  $SI$ 。对试样接触对数目的分析发现,即使混合料总体上具有相近的级配组成,部分样本的接触对数目依然存在着较大差异。通过对比这些样本的图像结果,发现差异的产生主要是由于这些样本在结构组成上存在局部离析现象。为此,定义了离析指数  $SI$  来表征局部离析现象。

$$SI = \frac{N_A + N_B}{N_C} \quad (2)$$

$$N_A = \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 N_{i,j} \quad (3)$$

$$N_B = \sum_{j=3}^6 \sum_{i=3}^6 N_{i,j} \quad (4)$$

$$N_C = \sum_{j=1}^2 \sum_{i=3}^6 N_{i,j} + \sum_{j=3}^6 \sum_{i=1}^2 N_{i,j} \quad (5)$$

其中,  $N_A$  为较细集料间的“自接触”;  $N_B$  为较粗集料间的“自接触”;  $N_C$  为较粗集料与细集料的“界面接触”;  $N_{i,j}$  为样本图像中第  $i$  档集料与第  $j$  档集料的接触对数目统计值;  $i, j$  依次为 2.36 mm, 4.75 mm, ……19 mm 尺寸筛孔;

为得到合理有效的  $SI$  分布范围, 同时考虑到 2.36 mm 与 4.75 mm 两档集料与 9.5 mm 以上集料在质量上大体相当, 这里选用了 9.5 mm 筛孔作为粗细集料的分界线。

#### 4.2 单因素对集料接触对的影响

通过统计分析, 得到了单方面因素与集料接触对之间的相互关系, 如图 4 所示。图 4(a) 显示的是混合料中粗集料比例  $C_{>4.75}$  与接触对数目间的关

系。从图中可以看到,  $C_{>4.75}$  的分布范围为 35%~60%, 整个样本的接触对数目变异性较大。随着  $C_{>4.75}$  的变化, 接触对数目并没有明显的变化趋势, 这说明集料的粗细比例不能显著地影响混合料的接触特性。从图中还可以发现, 即使是同一粗集料比例(图 4(a)中竖线位置), 接触对数目的差异也十分明显, 这说明采用控制单一筛孔通过率的方法并不能改变混合料的细微结构。

图 4(b) 和图 4(c) 分别是细度指数  $FI$  和离析指数  $SI$  与接触对数目之间的相互关系, 图中竖线标示的是单一  $FI$  和  $SI$  值对应的接触对数目。从图中可以看到,  $FI$  和  $SI$  的变化范围主要位于 0.5~4.0 之间。就单水平  $FI$  和  $SI$  而言, 二者与接触对数目之间没有形成对应的线性或非线性关系。由此不难看出, 单因素与接触对数目之间没有形成明显的对应关系; 采取单因素或单指标的控制方法难以有效地改善混合料的微观结构, 集料的接触特性应是受到多因素相互作用的影响。

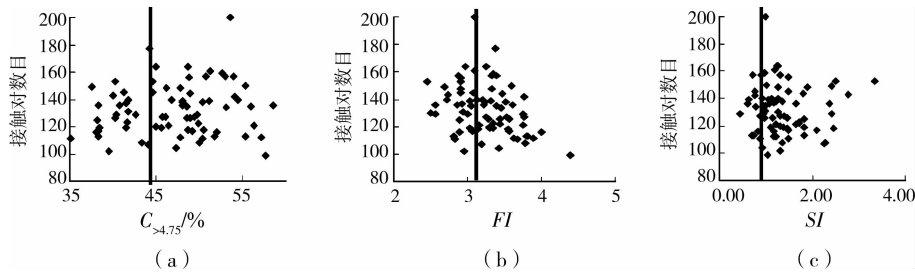


图 4 单因素与接触对数目的关系

#### 4.3 多因素对集料接触对数目的交互作用

##### 4.3.1 多因素间的相互关系分析

为进一步研究各影响因素与混合料集料接触特

性之间的相互联系, 对上述各项指标间的相互关系进行了分析, 各因素间的相互关系如图 5 所示。

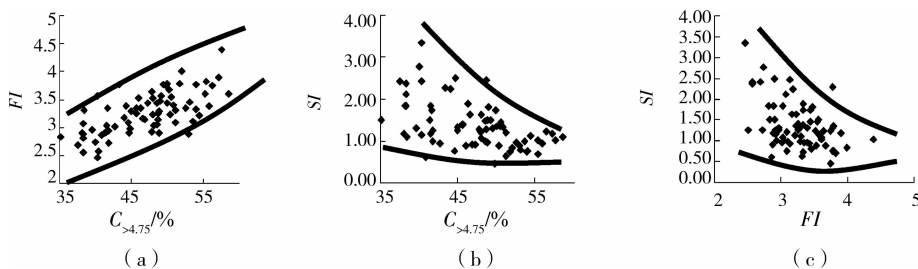


图 5  $C_{>4.75}$ 、 $FI$  及  $SI$  的相互关系

##### 1) $C_{>4.75}$ 与 $FI$ 的相关性

从图 5(a) 中可以看出两者有着清楚的协同变化趋势, 随着  $C_{>4.75}$  的增加,  $FI$  总体上呈增加的趋势。尽管  $FI$  与  $C_{>4.75}$  在描述集料粗细组成方面有

相似之处, 但仍有着较大的区别: 对于相同的  $C_{>4.75}$ ,  $FI$  的波动范围较为恒定; 而对于相同的  $FI$  而言,  $C_{>4.75}$  的变化幅度则显得极不规则, 与  $FI$  的大小有着一定的关系。这说明在合理的级配范围内,

存在一个稳定的粗集料比例。

## 2) $C_{>4.75}$ 或 $FI$ 与 $SI$ 的相关性

从图 5b 和图 5c 中可以看到,  $C_{>4.75}$ 、 $FI$  与  $SI$  之间有着相似的关系和变化趋势。随着  $C_{>4.75}$  和  $FI$  的增加,  $SI$  在初期呈现较弱的下降趋势, 其后逐渐趋于稳定。在  $C_{>4.75}$  和  $FI$  的低值范围内 ( $C_{>4.75} < 47\%$ 、 $FI < 3.2$ ),  $SI$  变异性较大; 其后随着  $C_{>4.75}$  和  $FI$  的增加,  $SI$  逐渐趋于稳定。图 5(b) 和图 5(c) 说明, 对于 AC20 沥青混合料而言, 增加粗集料的含量或采用较粗的级配组成能适当地改善混合料的离

析情况。

## 4.3.2 多因素对接触特性的交互作用分析

通过上述分析可知, 沥青混合料的集料接触对数目受  $C_{>4.75}$ 、 $FI$  和  $SI$  3 个因素的共同作用, 单独考虑某个因素得不到正确的结果, 应考虑 3 个因素的“合力”。由于 3 个因素之间有很强的依赖性, 使得描述单因素对集料接触特性的影响变得十分困难。为了清晰揭示多因素对集料接触对数目的联合作用, 该文示例性地采用了 4 个样本图像和集料接触参数进行说明, 分别见图 6 和表 4。

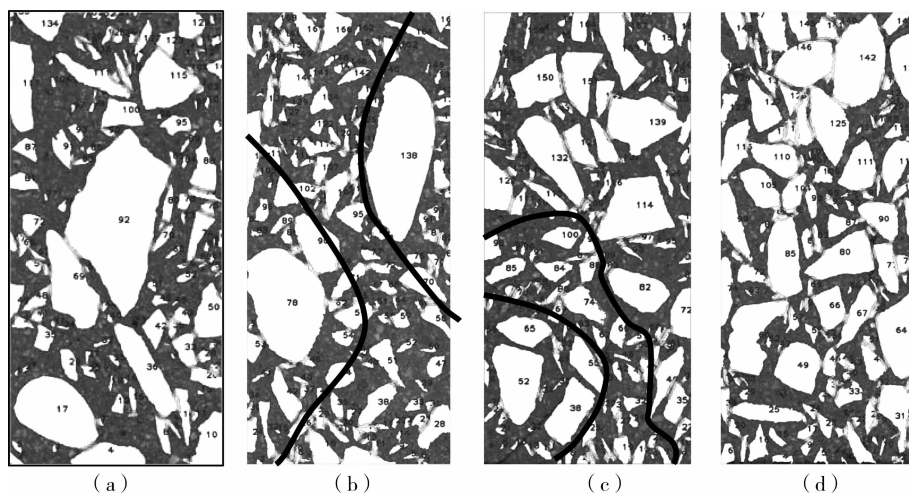


图 6  $C_{>4.75}$ 、 $FI$  及  $SI$  对样本接触对数目的影响

表 4 样本图像的基本参数统计

样本编号	接触对/个	$C_{>4.75}/\%$	$FI$	$SI$
a	108	44.3	3.78	1.28
b	142	44.5	3.69	3.36
c	153	44.7	2.8	2.8
d	200	53.5	3.42	0.98

图 6(a) 与图 6(b) 相比, 可以明显看到后者比前者的接触对数目要多。从表 4 中看, 样本 a 与 b 相比,  $C_{>4.75}$  和  $FI$  的变化较小,  $SI$  的变化较大。由此可见, 在确定了  $C_{>4.75}$  与  $FI$  的情况下, 混合料的集料接触对数目主要受局部离析的影响。

样本 b 与 c 比较, 它们有相近的  $C_{>4.75}$  值,  $SI$  偏大, 即均存在较重的离析 (如图 6(b) 和 6(c) 辅助线所示); 对于  $FI$ , 前者大于后者, 接触数目前者小于后者。由此说明, 当  $C_{>4.75}$  相近时,  $FI$  决定了颗粒数目及颗粒级配。一般来说, 颗粒数目大且颗粒较粗时, 接触数目会较大,  $FI$  越小, 接触对数目越大。但同样应该看到, 由于两者的  $SI$  值仍有一定差距, 使得样本 b 和 c 的接触对数目相差不大。

样本 a 与 d 的比较, 由于  $C_{>4.75}$  值差异较大, 虽然  $FI$  在数值上相近, 但从图 6(a) 与图 6(d) 看, 级配差异仍是较大的;  $SI$  在数值上也相近, 从  $SI$  值上也不能判断它们的离析差异;  $C_{>4.75}$  值这时产生了主要影响, 较大  $C_{>4.75}$  值使得集料颗粒数目增加, 且集料之间相互接触更为紧密, 因而样本 d 接触对数目较大。因此, 3 个因素共同作用的结果使得 2 个样本的接触对数目几乎相差一倍。

通过对 4 个样本的图像和数据进行简要分析发现, 样本接触对数目受到 3 个因素共同作用的影响, 只确定其中 1 个或 2 个因素都不能完整描述样本的接触数目。由此可见, 在设计混合料级配时, 应综合考虑 3 个因素的影响。其中,  $SI$  的随机性较大, 但受到  $C_{>4.75}$  和  $FI$  的影响, 可以通过设计合适的  $C_{>4.75}$  和  $FI$  来减少  $SI$  的随机性。

## 5 结论

通过对 72 个 AC20 型沥青混合料车辙试件的切片图像进行接触特性分析, 初步取得了以下认识:

1) 数字图像方法可以定量描述混合料切片的

接触情况,文中建立的接触对参数能有效地反映集料间的直接接触行为。大样本条件下,各档集料含量的平均值与设计值是吻合的,说明采用的方法准确可靠。

2) 统计分析表明,集料接触对数量的分布接近正态分布,但样本数据存在较大差异性,接触对数目的最大值能够达到最小值的 2 倍。

3) 定义了 4.75 mm 以上颗粒的含量  $C_{>4.75}$ 、细度指数  $FI$  和离析指数  $SI$  作为阐释集料接触特性的主要影响因子。分析发现这 3 个因子与集料接触对之间有较好的关联度,并且 3 者是有内在联系的,其中, $C_{>4.75}$  和  $FI$  具有协同变化趋势,对于 AC20 型混合料来说, $SI$  随  $C_{>4.75}$  和  $FI$  的增大而减小。

4) 集料接触特性变化是 3 者共同影响的结果,1 个或 2 个因素都不能正确反映样本的接触对数目。一般而言, $C_{>4.75}$  和  $FI$  相近时,影响接触特性的因素为  $SI$ ,当  $C_{>4.75}$  和  $FI$  均较大时,接触对数目随  $SI$  增大而减小,当  $C_{>4.75}$  和  $FI$  均较小时,接触对数目随  $SI$  的增大而增大; $C_{>4.75}$  相近, $SI$  也相似时, $FI$  增大,颗粒数目一般会减少,接触对将减少;当  $C_{>4.75}$  不同时, $FI$  和  $SI$  失去了比较的基础,此时决定接触对数目的是颗粒数和集料的紧密程度,一般而言,颗粒数目和集料之间紧密程度增加,接触对数目也会增加。

#### 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, 29: 1403-1410.
- [2] EYAD M, DANA O. Correlation of imaging shape indices of fine aggregate with asphalt mixture performance [C]//TRB 80th Annual Meeting, Washington D C, 2001, Paper No. 01-2132.
- [3] 汪海年, 郝培文. 粗集料二维形状特征的图像描述[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(6): 747-751.  
WANG HAI-NIAN, HAO PEI-WEN. Digital description of two-dimensional shape characteristics of coarse aggregate[J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(6): 747-751.
- [4] 吴文亮, 王端宜, 张肖宁, 等. 沥青混合料级配的体视学推测方法[J]. 中国公路学报, 2009, 22(5): 29-33.  
WU WEN-LIANG, WANG DUAN-YI, ZHANG XIAO-NING, et al. Stereology method of estimating gradation of asphalt mixtures[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(5): 29-33.
- [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): 166-170.
- 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): 166-170.
- [6] ZHONG Q Y, CHEN S, THAM L. Finite element modeling of geomaterials using digital image processing [J]. Computers and Geotechnics, 2003: 375-397.
- [7] YOU ZHAN-PING, WILLIAM G. BUTTLAR. Micromechanical modeling approach to predict compressive dynamic moduli of asphalt mixture using the distinct element method[C]//TRB, 2006.
- [8] HUNWOOK KIM, MICHAEL P WAGONER, WILLIAM G BUTTLAR. Simulation of fracture behavior in asphalt concrete using a heterogeneous cohesive zone discrete element model [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2008, 8: 552-563.
- [9] 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.
- [10] 徐科, 张肖宁, 王端宜. 基于数字图像处理技术的 VCA\_(mix)量测方法[J]. 公路, 2005(11): 151-154.  
XU KE, ZHANG XIAO-NING, WANG DUAN-YI. Measurement method of percent voids in coarse mineral aggregates in asphalt mixtures based on digital image processing technique[J]. Highway, 2005(11): 151-154.
- [11] 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.
- [12] 孙朝云, 沙爱民, 姚秋玲, 等. 沥青混合料图像阈值分割算法的实现[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25(6): 34-38.  
SUN ZHAO-YUN, SHA AI-MIN, YAO QIU-LING, et al. Realization of threshold segmentation algorithm in asphalt mixture [J]. Journal of Changan University: Natural Science Edition, 2005, 25(6): 34-38.
- [13] YAN FEI-XIANG, ZHANG HONG, C RONALD KUBE. A multistage adaptive thresholding method[J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26: 1183-1191.
- [14] 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.
- [15] JTG D50-2006 公路沥青路面设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [16] E MASAD B, MUHUNTHAN N, SHSSHIDHAR, et al. Internal structure characterization asphalt concrete using image analysis[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 1999, 13(2): 88-96.

(编辑 王秀玲)