

# 轻集料颗粒群特征对混凝土力学性能的影响

张 雄<sup>1</sup>, 周 云<sup>1,2</sup>, 张永娟<sup>1</sup>, 郑 雯<sup>3</sup>

(1. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 上海建工(集团)总公司技术中心, 上海 200083;  
3. 同济建设工程质量检测站, 上海 200092)

**摘要:** 运用数字图像处理技术研究轻集料的颗粒群特征, 采用多种参数表征轻集料颗粒群的粒度和粒形特征. 在此基础上, 通过灰色关联分析, 研究轻集料颗粒群特征对混凝土力学性能的影响. 结果表明, 当轻集料颗粒群比表面积在  $520 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$  以上并且颗粒长宽比低于 1.34 时, 所配制的轻集料混凝土能同时达到较高的抗压强度和抗折强度. 这为高性能轻集料混凝土的配制提供了依据.

**关键词:** 轻集料; 颗粒群特征; 力学性能; 数字图像处理技术; 灰色关联分析

**中图分类号:** TU 528.2

**文献标识码:** A

## Effect of Characteristics of Particle Group of Lightweight Aggregate on Mechanical Properties of Lightweight Concrete

ZHANG Xiong<sup>1</sup>, ZHOU Yun<sup>1,2</sup>, ZHANG Yongjuan<sup>1</sup>, ZHENG Wen<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Construction (Group) General Co., Technology Center, Shanghai 200083, China; 3. Tongji Construction Engineering Quality Test Station, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Digital image processing was used to measure the characteristics of particle group of lightweight aggregate, and multiple parameters were adapted to characterize the characteristic sizes. The effect of characteristics of particle group of lightweight aggregates on mechanical properties of lightweight concrete was then analyzed with grey correlation analysis method. Lightweight concrete of both high compressive strength and high flexural strength could be made with lightweight aggregates of specific surface area higher than  $520 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$  and aspect of particle group lower than 1.34 as well. The results provide a scientific basis for choosing lightweight aggregates when making lightweight concrete.

**Key words:** lightweight aggregate; characteristics of particle

group; mechanical properties; digital image processing; grey correlation analysis method

近年来, 轻集料的研究和应用越来越广泛, 从墙体砌块到高层建筑乃至大型桥梁, 都可见到其身影. 轻集料配制的混凝土不但具有良好的性能, 而且有明显的经济效益<sup>[1]</sup>.

不过, 国内大量的研究都是针对轻集料在混凝土中的性能, 对轻集料自身的性质研究较少. 事实上, 高性能轻集料混凝土的性能在很大程度上仍然取决于轻集料自身的品质<sup>[2]</sup>, 其中, 轻集料的颗粒群特征(包括级配和粒形特征)是重要方面.

但是应该看到, 这方面研究的缺乏与测试手段和方法的局限不无关系. 对级配的测试仍然采用传统的筛分手段, 而集料的粒形特征主要还是依靠手工测量, 费时费力, 而且比较主观<sup>[3]</sup>, 能够测量的参数也很少, 不能全面表征集料的粒形. 测试手段和方法的局限性促使人们考虑采用新的技术进行研究, 其中, 数字图像处理技术以其高效和精确吸引了人们的注意力.

数字图像处理技术起源于 20 世纪 20 年代, 其后取得了很大的进展, 应用范围越来越广, 在多个领域都取得了巨大的成功和显著的经济效益. 20 世纪 90 年代, 数字图像处理技术应用于混凝土工艺, 尤其是用于研究集料的粒径及粒形的分析. 研究表明, 数字图像处理技术能够获得更丰富的集料特征数据, 这将有利于对于集料特征与混凝土性能的影响方面的后续研究. 国外采石工业在生产线上已配备了骨料的三维视察分类系统, 通过扫描器对取样颗粒的几何尺寸数据进行记录、数字化和分类, 对每粒粒形给予定量描述<sup>[4]</sup>.

收稿日期: 2009-04-14

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAF02A00)

作者简介: 张 雄(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为建筑材料及其功能化. E-mail: xiong.zhang@vip.sina.com

笔者采用数字图像处理技术全面表征轻集料的颗粒群特征,旨在研究轻集料颗粒群特征对其混凝土性能的影响,为高性能轻集料混凝土的配制提供依据。

## 1 轻集料数字图像的采集、处理与测量

### 1.1 轻集料品种及其性能

所用轻集料为宜昌光大陶粒制品有限公司生产的900级高性能页岩陶粒,堆积密度为 $864\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,表观密度为 $1\,580\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,筒压强度为 $8.2\text{ MPa}$ ,1 h吸水率为 $1.6\%$ ,24 h吸水率为 $2.7\%$ 。

### 1.2 图像的采集和处理

采用高分辨率 CCD 数码相机采集轻集料数字图像。图1为轻集料的原始图像。

采用美国 Media Cybernetics 公司的 Image-Pro Plus 6.0 软件对轻集料图像进行处理。首先,增强原始图像(图2),改善图像视觉质量,突出图像中重要细节<sup>[5]</sup>;然后,分割图像(图3),把轻集料颗粒从背景中检测、分离出来;最后,标识图像(图4),对每个轻集料颗粒编号,以便测量和计算。

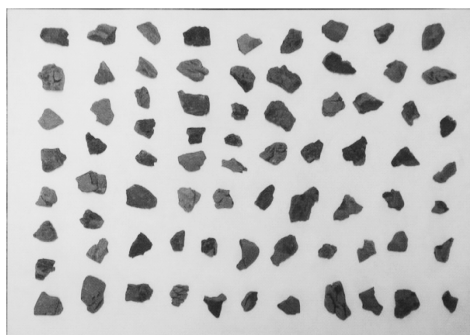


图1 原始图像  
Fig.1 Original image

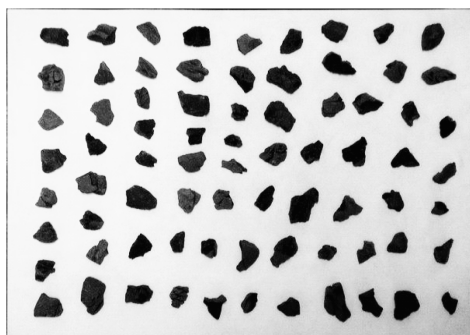


图2 图像增强  
Fig.2 Image enhancement

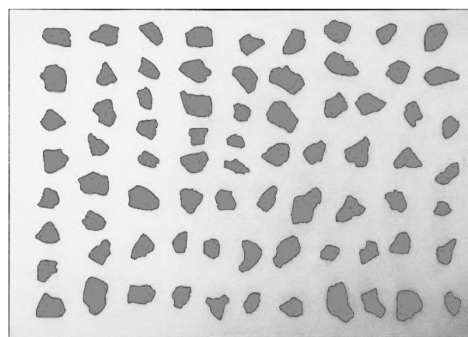


图3 图像分割  
Fig.3 Image segmentation

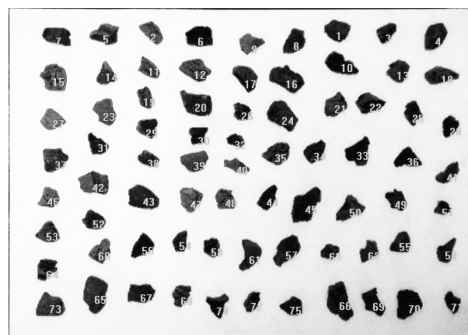


图4 图像标识  
Fig.4 Image recognition

### 1.3 轻集料颗粒的测量

Image-Pro Plus 6.0 软件提供了几十种测量参数类型,本实验选取了  $A$  (面积)、 $i$  (长宽比)、 $L$  (最小外接矩形长度)、 $W$  (最小外接矩形宽度)、 $P$  (周长)、 $P_e$  (等效椭圆周长) 和  $R$  (圆度) 等 7 个参数。

### 1.4 轻集料数字图像处理的最小样本数

轻集料数字图像分析方法建立在统计学原理的基础上。通常,样本数越多,测试数据越趋精确,但实验量也相应增加。这种要求在实验室中可尽量满足,施工现场采样则难于满足。因此,最小样本数的确定有其现实意义:在满足实验精度要求的前提下,尽可能地减少实验量。不同样品的最小样本数可能存在差异,一般都得通过一定方法确定样品的最小样本数后才能保证统计结果的可靠性。实验通过  $t$  检验和  $\chi^2$  检验得到最小样本数,按统计学规律,对轻集料颗粒群作如下两个假设:①轻集料颗粒群的级配为正态分布;②20个样本(编号NG1~NG20)的平均值  $\mu_0$  及标准差  $\sigma_0$  达到总体  $N(\mu_0, \sigma_0^2)$  的水平。

那么,如果取  $n$  个样本检验,其面积分数平均值为  $\bar{X}$ ,样本标准差为  $S$ ,修正标准差为  $S^*$ 。采集20组轻集料数字图像数据,选用粒径范围中面积分数标准差最大(5~10 mm)的数据来检验,见表1。

表1 轻集料颗粒群粒径范围为5~10 mm的面积分数

Tab.1 Area percentage of lightweight aggregate in the range of 5~10 mm size

NG1	NG2	NG3	NG4	NG5	NG6	NG7	NG8	NG9	NG10
0.095	0.093	0.118	0.123	0.206	0.207	0.209	0.225	0.206	0.290
NG11	NG12	NG13	NG14	NG15	NG16	NG17	NG18	NG19	NG20
0.285	0.278	0.363	0.374	0.370	0.439	0.447	0.426	0.537	0.562
$\mu_0 = 0.293$					$\sigma_0 = 0.142$				

先用  $t$  检验法. 假设  $\bar{X} = \mu_0$ , 以  $\alpha = 0.05$  水平, 由于数据具有均等性, 取前 15 个数据时, 得  $\bar{X}_{15} = 0.229$ ,  $S_{15}^* = 0.096$ , 则

$$T_{15} = \sqrt{15} |\bar{X}_{15} - \mu_0| / S_{15}^* = 2.582 > t_{0.975}(15-1) = 2.14479$$

故, 拒绝  $\bar{X}_{15} = \mu_0$ .

当取前 16 个数据时, 得  $\bar{X}_{16} = 0.243$ ,  $S_{16}^* = 0.107$ , 则

$$T_{16} = \sqrt{16} |\bar{X}_{16} - \mu_0| / S_{16}^* = 1.869 < t_{0.975}(16-1) = 2.13145$$

故, 接受  $\bar{X}_{16} = \mu_0$ .

也就是说, 满足  $t$  检验的最小样本数为 16.

再用  $\chi^2$  检验法检验数据的方差. 由于希望在最大方差情况下求出满足  $\sigma^2 = \sigma_0^2$  的最小样本数, 则将数据按从小到大排定, 并列成最大、最小、次大、次小……的序列数据.

对于序列数据 0.562, 0.093, 0.537, 0.095, 0.447, 0.118, 0.439, 0.123, 0.426…以  $\alpha = 0.05$  水平, 取前 16 个数据, 得  $S_{16} = 0.154$ , 则

$$\chi^2 = (n-1)S_{16}^2 / \sigma_0^2 = 15 \times 0.154^2 / 0.142^2 =$$

$$17.642 < \chi_{0.975}^2(15) = 27.48839$$

$$\chi^2 > \chi_{0.025}^2(15) = 6.26214$$

故, 接受  $\sigma_{16}^2 = \sigma_0^2$ .

由此得出, 粒径范围为 5~10 mm 时, 同时满足  $t$  检验和  $\chi^2$  检验的最小样本数为 16.

由于最小样本数为 16 的结论是在粒径范围面积分数方差为最大时得出的, 根据数理统计原理和方法, 在同一个大样本的情况下, 对于方差较小的其他粒径范围的面积分数, 均能推出此结论. 因此, 采用 20 组样本的后续实验, 满足实验精度的需要.

## 2 轻集料颗粒群特征表征

### 2.1 轻集料颗粒粒度的表征

表征颗粒粒度有多种参数. 李珊珊<sup>[6]</sup>的研究表明, 使用数字图像处理技术研究混凝土粗集料颗粒群特征, 选用最短 Feret 径来表征单颗粒粒度最为适合. 因此, 选用最短 Feret 径来表征轻集料单颗粒的粒度, 采用加权平均径表征轻集料颗粒群的粒度.

颗粒群比表面积也可用来表征颗粒粒度. 比表面积定义为每一单位数量颗粒的全部外表面积, 可以是单位质量或单位绝对体积, 单位分别为  $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$  或  $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ . 一般可假设颗粒为球体, 但本实验使用的是碎石型轻集料, 对此, 可以使用数字图像处理技术结合定量体视学测量, 窦竞已经在其研究中推导出计算公式<sup>[7]</sup>. 本实验直接引用此公式计算

$$S_v = 4000 \sum_{i=1}^n P / \pi \sum_{i=1}^n A \quad (1)$$

式中:  $P$  为轻集料颗粒投影的周长;  $A$  为轻集料颗粒投影的面积.

### 2.2 轻集料粒形的表征

描述集料粒形特征的参数很多, 包括  $I_f$  (形状指数)、 $S$  (球度)、 $R$  (圆度)、 $i$  (长宽比)、 $r$  (凸率)、 $I_a$  (棱角性指数) 等<sup>[8~11]</sup>. 现采用  $S$ ,  $i$ ,  $I_a$  和  $R$  来表征轻集料的粒形特征. 公式如下:

$$S = (wt/l^2)^{1/3} \quad (2)$$

式中:  $w$  为轻集料颗粒的宽度;  $t$  为轻集料颗粒的厚度;  $l$  为轻集料颗粒的长度.

式(2)中的  $t$  可按 C. F. Mora, A. K. H. Kwan 和 H. C. Chan 等人提出的方法<sup>[12]</sup>得到, 此处不详述.

$$I = l_s / w_s \quad (3)$$

式中:  $l_s$  为轻集料颗粒投影的长轴;  $w_s$  为轻集料颗粒投影的短轴.

$$I_a(P) = \left( \frac{P}{P_e} \right)^2 \quad (4)$$

式中,  $P_e$  为轻集料颗粒投影的等效椭圆的周长.

$$R = P^2 / 4\pi A \quad (5)$$

这 4 个指标中,  $i$  和  $R$  可直接由 Image-Pro Plus 6.0 软件测出,  $S$  和  $I_a$  可利用测出的参数计算得出.

表 2 列出了 20 组样本的颗粒群特征参数.

表 2 20 组轻集料颗粒群特征参数  
Tab.2 Parameters of characteristics of particle groups of lightweight aggregates(20 groups)

编号	平均直径/mm	$S_v/(\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3})$	$S$	$i$	$I_a$	$R$
NG1	17.97	397.2	0.697 9	1.326 2	1.140 2	1.258 7
NG2	16.03	417.3	0.693 4	1.347 0	1.131 2	1.248 2
NG3	15.98	454.9	0.691 1	1.335 5	1.131 1	1.249 3
NG4	13.97	478.4	0.686 6	1.356 2	1.122 2	1.238 8
NG5	15.53	495.8	0.687 4	1.330 8	1.128 0	1.246 8
NG6	13.64	508.2	0.682 8	1.351 6	1.119 1	1.236 4
NG7	12.82	516.2	0.679 8	1.365 4	1.113 1	1.229 4
NG8	12.62	509.5	0.679 1	1.368 9	1.111 6	1.227 6
NG9	12.19	520.1	0.678 3	1.372 3	1.110 1	1.225 9
NG10	11.94	539.4	0.676 1	1.360 8	1.110 0	1.226 9
NG11	11.80	535.4	0.675 3	1.364 2	1.108 5	1.225 2
NG12	11.84	531.7	0.674 6	1.367 7	1.107 0	1.223 4
NG13	11.57	563.4	0.672 3	1.356 2	1.106 9	1.224 5
NG14	11.18	554.8	0.671 5	1.359 6	1.105 4	1.222 7
NG15	10.83	569.5	0.670 8	1.363 1	1.103 9	1.221 0
NG16	11.02	581.4	0.668 5	1.351 6	1.103 8	1.222 0
NG17	10.20	586.6	0.667 7	1.355 0	1.102 3	1.220 3
NG18	10.50	583.6	0.667 0	1.358 5	1.100 8	1.218 5
NG19	10.30	612.4	0.664 7	1.346 9	1.100 7	1.219 6
NG20	9.83	633.7	0.660 9	1.342 3	1.097 6	1.217 2

可见,采用数字图像处理技术表征轻集料的颗粒群特征,方便、快捷,而且能够测量多种参数,更全面更充实地反映颗粒群的性质,为进一步的研究奠定基础。

3 实验结果与分析

3.1 特征参数与混凝土力学性能的灰色关联

对 20 组轻集料按相同的配合比配制混凝土,并分别测试其 28 d 立方体抗压强度  $f_{cc}$  和 28 d 抗折强度  $f_t$ ,结果如表 3 所示。

以轻集料颗粒群加权平均直径、 $S_v$ ,  $S$ ,  $i$ ,  $I_a$  和  $R$  为子序列,分别记为  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$  和  $X_6$ ;以轻集料混凝土 28 d 立方体抗压强度和抗折强度为母序列,分别记为  $Y_1$  和  $Y_2$ 。对它们进行灰色关联分析,其结果见表 4。

表 3 轻集料混凝土力学性能  
Tab.3 Mechanical properties of lightweight concrete

	MPa									
力学强度参数	NG1	NG2	NG3	NG4	NG5	NG6	NG7	NG8	NG9	NG10
$f_{cc}$	65.4	58.3	53.3	50.5	52.1	48.1	59.7	56.2	54.5	64.9
$f_t$	6.6	5.7	5.2	5.2	5.4	5.0	6.2	5.8	5.5	6.1
力学强度参数	NG11	NG12	NG13	NG14	NG15	NG16	NG17	NG18	NG19	NG20
$f_{cc}$	53.6	61.8	65.4	58.2	62.3	60.6	56.7	61.2	58.2	59.4
$f_t$	5.5	5.7	6.4	5.9	6.1	5.9	5.6	5.9	5.6	5.8

表 4 中,各行求和的数值表明,轻集料颗粒群特征参数对其混凝土力学性能影响的关联度从大到小排列为: $X_2 > X_4 > X_6 > X_1, X_5 > X_3$ 。也就是说,对轻集料混凝土力学性能影响程度较大的 2 个参数,为轻集料颗粒群比表面积和  $I$ ,其他 4 个参数影响较小。

3.2 比表面积和长宽比对混凝土力学性能的影响

采用三次趋势面方程拟合轻集料混凝土 28d 立方体抗压强度及 28d 抗折强度对轻集料颗粒群比表面积和长宽比的关系,并分别画出其三维立体图和二维投影图,如图 5 和图 6 所示。

表4 颗粒群特征对混凝土力学性能影响的灰色关联  
Tab.4 Grey correlation analysis of the effect of characteristics of particle group of lightweight aggregates on mechanical properties of lightweight concrete

表征参数	子序列与母序列的关联度		
	$Y_1$	$Y_2$	$Y_1 + Y_2$
$X_1$	0.622	0.675	1.297
$X_2$	0.718	0.736	1.454
$X_3$	0.617	0.672	1.289
$X_4$	0.695	0.745	1.440
$X_5$	0.624	0.673	1.297
$X_6$	0.631	0.674	1.305

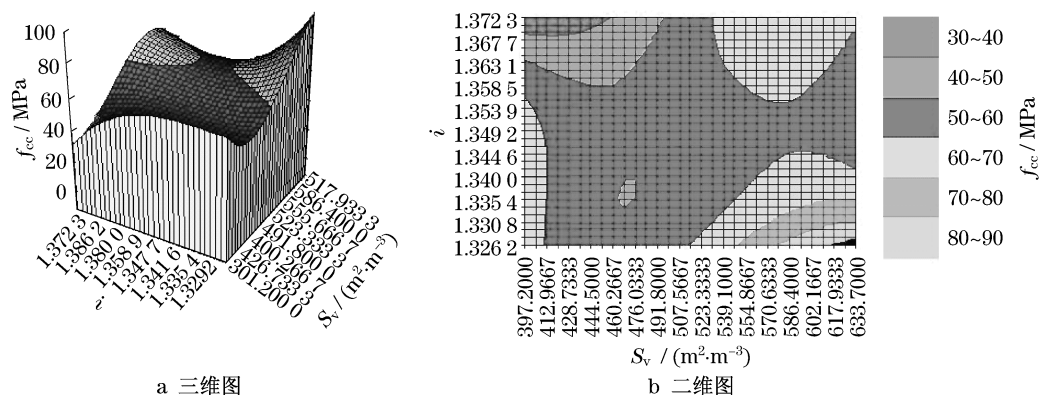


图5  $S_v$  和  $i$  与  $f_{cc}$  之间的三维、二维关系图

Fig.5 Three-dimensional and planar relation chart of  $S_v$  with  $i$  and  $f_{cc}$

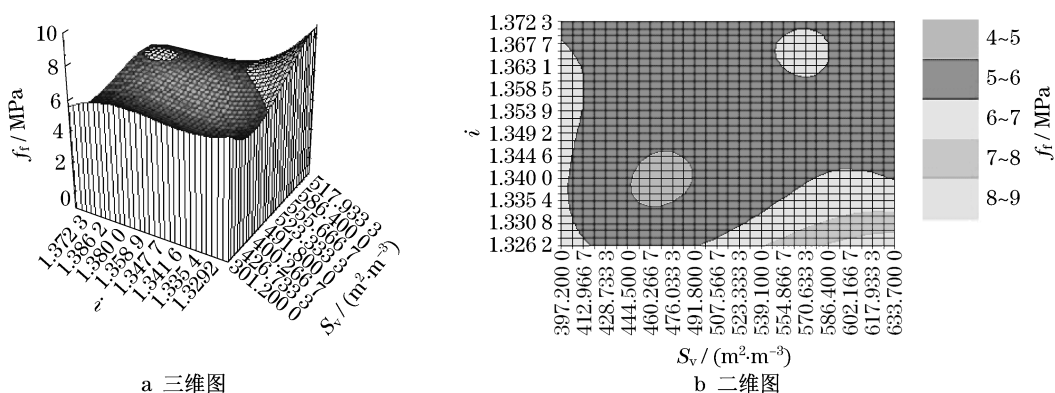


图6  $S_v$  和  $i$  与  $f_t$  之间的三维、二维关系图

Fig.6 Three-dimensional and planar relation chart of  $S_v$  with  $i$  and  $f_t$

同 28d 立方体抗压强度的情况相似,图 6 中当轻集料颗粒群比表面积在  $500 \sim 630 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$  时,28d 抗折强度可达到或超过 6 MPa。需要注意的是,当轻集料的颗粒长宽比大于 1.34 时会对 28d 抗折强度产生非常不利的影响。图 6 中,28d 抗折强度最大值超过 8 MPa,这在实际条件下也是很难达到的。

需要注意的一点是,从图 5,6 所显示的数据来看,当轻集料的颗粒群比表面积小于  $400 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$  并且颗粒长宽比在较大范围内变动时,轻集料混凝土

图 5 表明,当轻集料颗粒群比表面积在  $520 \sim 630 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$  时,其混凝土 28d 立方体抗压强度均可达到或超过 60 MPa,而与颗粒长宽比没有太大关系;只有当颗粒群的  $S_v$  小于  $460 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$  时,28d 立方体抗压强度才会随着颗粒长宽比的增大而降低。在三维趋势图上,28d 的立方体抗压强度最大值甚至达到 90 MPa。但由专业知识可知,这基本上很难实现。事实上,超过 60 MPa 已经属于非常高的强度了,这是受轻集料自身强度的限制造成的。

的 28d 立方体抗压强度和 28d 抗折强度仍可分别达到 60 MPa 和 6 MPa。这实际上跟试验方法有很大关系。混凝土的力学性能测试的对象是一定尺寸的试块,每个试块的体积都是一定的。当轻集料颗粒群比表面积减小到一定程度时,轻集料的级配中必然存在大量粒度较大的颗粒,这样在有限体积的试块中就形成了若干大颗粒和砂浆组成的系统,造成了轻集料颗粒与砂浆相接触面积的局部增大,从而增大了界面粘结强度,表现为力学性能提高。这与实际情

况是不一致的。

综上所述,就轻集料颗粒群特征而言,配制高抗压强度和高抗折强度轻集料混凝土的关键是要提高轻集料颗粒群比表面积  $S_v$ ,使其达到或超过  $520 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ ,同时控制轻集料颗粒长宽比在 1.34 以下。

## 4 结论

(1) 采用数字图像处理技术表征了轻集料的颗粒群特征参数. 相对于传统方法,该方法更加方便快捷,而且能够更全面地反映轻集料颗粒群的数据,为进一步的研究奠定了基础。

(2) 通过灰色关联分析,研究了轻集料颗粒群特征对混凝土力学性能的影响. 研究表明,轻集料颗粒群比表面积和长宽比对混凝土力学性能影响最大;配制高强轻集料混凝土的关键是想方设法提高轻集料颗粒群比表面积,使其达到或超过  $520 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ ,同时必须控制颗粒长宽比,使其值不超过 1.34。

## 参考文献:

- [1] 杨秋玲,马可栓. 轻骨料混凝土的现状与发展[J]. 铁道建筑, 2006(6):104.  
YANG Qiuling, MA Keshuan. Present status and development of lightweight concrete[J]. Railway Engineering, 2006(6):104.
- [2] 钱慧丽,杨宗华,梁会忠. 轻集料的发展状况综述[J]. 商品混凝土, 2007(1):5.  
QIAN Huili, YANG Zonghua, LIANG Huizhong. Development of lightweight aggregate[J]. Ready-Mixed Concrete, 2007(1):5.
- [3] Fernlund J M R. Image analysis method for determining 3-D shape of coarse aggregate[J]. Cement and Concrete Research, 2005,35:1629.
- [4] 徐定华,冯文元. 混凝土材料实用指南[M]. 北京:中国建材工业出版社, 2004.  
XU Dinghua, FENG Wenyuan. Practical guideline of concrete materials [M]. Beijing: China Building Material Industry Publishing House, 2004.
- [5] Rafael C Gonzalez, Richard E Woods. Digital image processing [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007:147.
- [6] 李珊珊. 混凝土中粗骨料特征的定量体视学研究方法[D]. 上海:同济大学材料科学与工程学院, 1999.  
LI Shanshan. Quantitative stereology method for the research on characteristics of coarse aggregate in concrete [D]. Shanghai: Tongji University. College of Material Science and Engineering, 1999.
- [7] 窦竞. 矿渣微粉颗粒群特征图像分析方法及其特性神经网络模型[D]. 上海:同济大学材料科学与工程学院, 2003.  
DOU Jing. Image analysis method and neural network model of the characteristics of particle group of slag powder [D]. Shanghai: Tongji University. College of Material Science and Engineering, 2003.
- [8] Masad E, Olcott D, White T, et al. Correlation of fine aggregate imaging shape indices with asphalt mixture performance[R]. Transportation Research Record 1757. Washington, D C: Transportation Research Board, National Research Council, 2001:148-156.
- [9] Masad E. Review of imaging techniques for characterizing the shape of aggregates used in asphalt mixes [C] // ICAR. 9th Annual International Center for Aggregate Research Symposium. Austin: [s. n.], 2001.
- [10] Taleb Al-Rousan, Masad Eyad, Tutumluer Erol, et al. Evaluation of image analysis techniques for quantifying aggregate shape characteristics[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21:978.
- [11] KUO Chunyi. Correlating permanent deformation characteristics of hot mix with aggregate geometric irregularities[J]. Journal of Testing Asphalt and Evaluation, 2002, 30(2):136.
- [12] Mora C F, Kwan A K H, Chan H C. Particle size distribution analysis of coarse aggregate using digital image process[J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(6):921.