

# 基于三维扫描和球谐分析的骨料和再生骨料 颗粒形状表征

苏 栋<sup>1,2</sup>, 吴 炯<sup>1</sup>, 肖政健<sup>1</sup>, 黄 聪<sup>1</sup>

(1. 深圳大学土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060;

2. 滨海城市韧性基础设施教育部重点实验室(深圳大学), 广东 深圳 518060)

**摘 要** 目的 探讨骨料颗粒的表征方法, 研究点云数据的点数对表征参数的影响, 以及普通混凝土骨料颗粒和再生混凝土骨料颗粒几何特性的异同. 方法 利用数字光学投影(Digital Light Projection, DLP)成像技术对混凝土骨料颗粒进行三维扫描, 获取颗粒表面点的三维几何坐标, 基于球谐函数分析(Spherical Harmonic Analyses)对不规则颗粒进行三维重构和表征分析. 结果 重构的普通和再生骨料颗粒的最优点数分别是30 000和50 000, 两种骨料的球形度指标基本相同, 但再生骨料的凸性较小; 两种骨料的轴比指标接近, 大部分骨料都属于球体形. 结论 数字光学三维扫描结合球谐函数计算可以对骨料颗粒进行精确重构和表征分析.

**关键词** 骨料颗粒; 形状表征; 三维扫描; 球谐函数; 最优点数

中图分类号 TU52

文献标志码 A

## Geometrical Characterization of Natural and Recycled Aggregate Particles Based on 3D Scanning and Spherical Harmonic Analyses

SU Dong<sup>1,2</sup>, WU Jiong<sup>1</sup>, XIAO Zhengjian<sup>1</sup>, HUANG Cong<sup>1</sup>

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, China, 518060;

2. Underground Polis Academy, Shenzhen University, Shenzhen, China, 518060)

**Abstract:** 3D scanning of concrete aggregate particles was performed by using Digital Light Projection technology, and 3D geometric coordinates of the particle surface points were obtained. Spherical harmonic function was used to conduct accurate three-dimensional reconstruction and characterization of irregular particles. Geometric parameters of reconstructed particles, the influence of the number of cloud points on particle characterization, as well as the similarities and differences in geometric features of ordinary and recycled aggregates are discussed. The results show that the

收稿日期: 2020-04-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51938008, 51878416)

作者简介: 苏栋(1978—), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要从事颗粒几何形态表征、土与结构相互作用等方面研究.

optimal number of points are 30 000 and 50 000 for ordinary and recycled aggregates, respectively. There is no significant difference in the sphericity of the two types of aggregates, but the convexity of recycled aggregates is generally smaller. The aspect ratios of the two types of aggregates are close and most of the particles belong to spheroid.

**Key words:** concrete aggregate; geometric characterization; three-dimensional scanning; spherical harmonic function; the optimal number

骨料颗粒是建造行业重要的原材料,需求量大且质量要求较高,再生骨料的使用对绿色建筑的发展有重大意义,是混凝土行业实现可持续发展的重要途径<sup>[1-2]</sup>. 骨料在混凝土中主要起骨架和填充作用,同时可以减少混凝土硬化过程中因干缩湿胀引起的体积变化,而在硬化后,混凝土骨料颗粒的三维几何特征对混凝土的力学性能起重要作用<sup>[3-4]</sup>.

目前,国内外对混凝土骨料颗粒的几何特性研究虽然为数不少,但是很长一段时间都集中在混凝土骨料颗粒的二维几何特性方面,在三维层面上的研究的方法较为局限,研究手段单一,研究成果也较少. J. M. R. Fernlund 等<sup>[5]</sup>提出了一种基于图像分析的粗骨料颗粒形状测定方法,该方法通过颗粒平躺和站立姿态的两张图像分析颗粒的长厚比、长宽比和宽厚比,其结果与片状和形状指数试验的测试结果接近. D. ASAHINA 等<sup>[6]</sup>利用三维激光扫描仪(LS)经典投影面积法(PAM)和现代 X 射线计算机断层扫描(CT),对同一套岩石进行扫描,获得岩石表面点的坐标,并估算出其体积、比表面积和密度. D. SU 等<sup>[7]</sup>和付茹等<sup>[8]</sup>通过  $\mu$ XCT 试验,获取砂土颗粒的三维像素信息,并基于球谐函数对砂土颗粒的几何形态进行了分析和表征. 研究表明,通过 CT 试验获取颗粒几何形态数据的成本较高,且适用的粒径范围较窄;而基于球谐函数分析,可准确表征三维颗粒不同层级的几何特性.

基于上述分析,笔者通过数字光学投影(Digital Light Projection, DLP)成像技术对混凝土骨料颗粒和再生骨料颗粒进行非接触式三维扫描,获取颗粒表面的点云数据;利用基于球谐函数的计算几何分析,得到颗粒三

维几何特性参数,包括表面积、体积、球形度、凸性和主要尺寸(长轴、中轴和短轴)等;基于计算结果,对混凝土骨料和再生骨料颗粒的几何形态进行了对比研究. 结果表明:两种骨料颗粒的球形度指标基本相同,但再生骨料的凸性较小;两种骨料的轴比指标接近,大部分颗粒都属于球形.

# 1 骨料颗粒三维扫描和颗粒表面点云模型的建立

## 1.1 骨料颗粒预处理及三维扫描

从某建筑材料堆放场随机选取 100 个普通骨料颗粒(颗粒编号 1 ~ 100)和 100 个再生混凝土骨料颗粒(颗粒编号 101 ~ 200)进行三维扫描以获取颗粒表面的点云数据. 首先浸泡、洗净混凝土骨料颗粒,保持样本混凝土骨料颗粒表面的洁净和真实,再将混凝土骨料颗粒烘干;由于 DLP 技术对所扫描的混凝土骨料亮度有一定的要求,因此扫描前利用着色剂对混凝土骨料颗粒进行着色处理,如图 1 所示.



图 1 着色处理后的混凝土骨料颗粒

Fig. 1 A concrete aggregate particle after coloring treatment

笔者采用华朗三维扫描仪(型号:HL-3DX+)对混凝土骨料颗粒进行三维扫描,该扫描仪基于数字光学投影原理,并配备了两种模式的摄像头和高质量的投影仪,确保了云点的高分辨率.基于三角测量原理,三维扫描仪放映机对扫描对象发出格栅光线,经过物体反射后通过立体相机接收其反射光束,将获得的两条光线信息建立立体投影关系,通过两个摄像头的和投影扫描点构成了一个三角形,运用三角测距原理来对被测物体进行坐标点的解算,最后得到了被测点的三维坐标.该扫描仪可以扫描几毫米到几十米大小的物体,通过扫描软件的全自动智能拼接功能可实现骨料颗粒表面三维点云模型的建立(见图2).

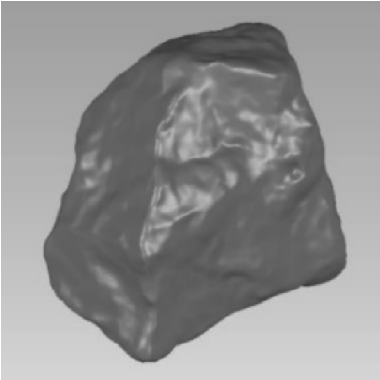


图2  颗粒三维点云模型

Fig. 2  3D point cloud model of a particle

1.2  骨料颗粒三维点云模型的精简

通过三维扫描得到各颗粒的点云数据一

般超过200 000个点,这些点云数据虽然精度高,但数据密度也比较大,存在大量的冗余数据,且不同颗粒的点云数据存在一定差异,在使用程序处理和计算不同数量点的颗粒表面特征时,运行的时间有较大的区别.因此,在保留点云数据特征点的情况下,对这些点云数据进行数据精简处理,以提高计算效率,减少存储空间.笔者把1~100号混凝土骨料颗粒的点云精简成100 000、80 000、50 000、30 000、20 000、10 000、8 000、5 000、3 000个点,把101~200号再生混凝土骨料颗粒的点云精简成150 000、100 000、80 000、50 000、30 000、20 000、10 000个点进行分析计算,以找到能表征骨料颗粒三维几何特性最适合的点云数量.图3给出了一颗普通混凝土骨料在点云精简过程中的模型变化.

2  骨料颗粒三维形态的重构

获得骨料颗粒的精简模型后,提取各个精简模型数据点的三维几何坐标,再基于球谐函数重构颗粒的三维形态.三维颗粒表面形态的重构包括以下步骤:1)确定颗粒中心的坐标和主惯性轴的方向;2)将坐标系的原点移至颗粒中心,旋转颗粒,使颗粒的三个主惯性轴方向分别与坐标系的 $x$ 轴、 $y$ 轴和 $z$ 轴一致;3)计算颗粒表面每个数据点的在坐标系中的极角和方位角;4)利用颗粒点云的极

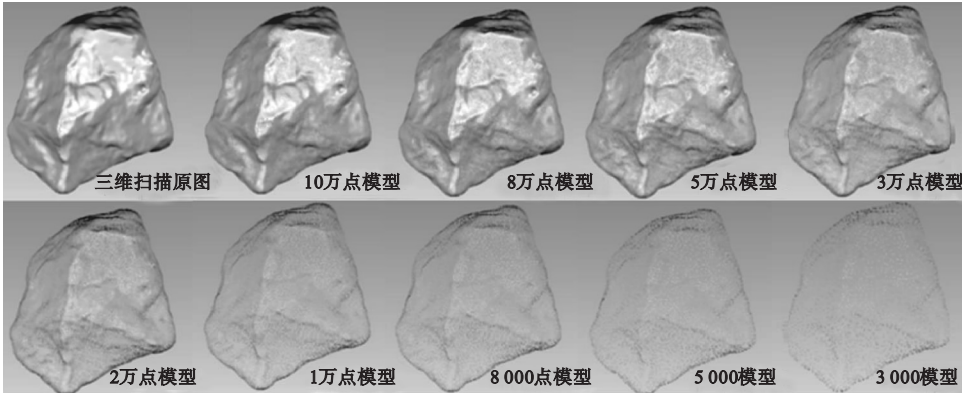


图3  普通混凝土骨料在点云精简过程中的模型变化

Fig. 3  Model evolution during the process of cloud point reduction

角和方位角和三维直角坐标进行球谐分析和颗粒表面形态重构. 重构颗粒表面的顶点坐标集表示为  $X = (x, y, z)$ , 通过球谐分析, 其将表示为相应极角和方位角的函数, 即:

$$X(\theta, \varphi) = (x(\theta, \varphi), y(\theta, \varphi), z(\theta, \varphi)). \tag{1}$$

式中:  $\theta$  和  $\varphi$  分别极角和方位角<sup>[7]</sup>.

对于三维星形颗粒, 由于颗粒表面任何一点到原点的距离(即半径)是  $\theta$  和  $\varphi$  的单值函数, 因此只需要对半径  $r$  进行球谐展开, 即:

$$r(\theta, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n c_m^m Y_n^m(\theta, \varphi). \tag{2}$$

式中:  $c_m^m$  为球谐函数系数;  $Y_n^m(\theta, \varphi)$  定义为  $m \geq 0$  时,

$$Y_n^m(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{(2n+1)(n-m)!}{4\pi(n+m)!}} P_n^m(\cos\theta) \cdot \cos(m\varphi). \tag{3}$$

$m < 0$  时,

$$Y_n^m(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{(2n+1)(n-|m|)!}{4\pi(n+|m|)!}} P_n^{|m|}(\cos\theta) \cos(|m|\varphi). \tag{4}$$

式中:  $P_n^m(\cos\theta)$  为与  $n$  度、 $m$  阶有关的勒让德函数(Legendre function), 勒让德函数的表达式为

$$P_n^m(x) = (-1)^m (1-x^2)^{\frac{m}{2}} \frac{d^m}{dx^m} P_n(x). \tag{5}$$

式中:  $P_n(x)$  是  $n$  次勒让德多项式.

需指出, 式(2)中  $n$  的取值决定了颗粒重构模型的精度<sup>[7]</sup>, 一般  $n$  值越大, 精度越高, 但重构过程中的计算量越大, 本研究取  $n = 15$  进行骨料颗粒表面的重构和几何形态分.

### 3 三维骨料颗粒几何形态表征分析

基于球谐函数和计算几何, 对重构骨料颗粒的三维几何形态进行表征, 计算并比较的几何特性参数包括表面积、体积、球形度、

凸性、主尺度(长轴、中轴和短轴)等. 对于天然骨料, 以 100 000 个数据点的颗粒模型的分析结果为基准, 其他精简模型的分析结果与其对比, 以找出能表征骨料颗粒三维几何特性最优(最少)的数据点个数.

#### 3.1 表面积

利用基于球谐重构的表面网格计算骨料颗粒的表面积, 其为所有微面元面积的总和<sup>[8]</sup>, 即

$$S_A = \sum_i \frac{1}{2} |\overrightarrow{a_i b_i} \times \overrightarrow{b_i c_i}|. \tag{6}$$

式中:  $S_A$  为骨料颗粒表面积;  $a_i$ 、 $b_i$  和  $c_i$  分别为第  $i$  个面元所包含的顶点.

对比基于各精简模型与基于 100 000 数据点模型计算出的表面积, 计算误差百分比, 以混凝土骨料颗粒的标号为横坐标, 表面积误差百分比为纵坐标, 结果如图 4 所示. 从图中可以看出, 3 000 个数据点模型所计算出的表面积中有个别骨料颗粒的误差较大, 最大的一个超过 3%, 这说明在该模型中, 颗粒较多局部特征已经丢失, 导致个别形状比较特殊的骨料颗粒在计算中出现较大的误差. 图 4 同时表明, 当数据点超过 5 000 时, 表面积计算误差基本低于 1.5%, 超过 30 000 点时, 计算误差已经基本小于 1%.

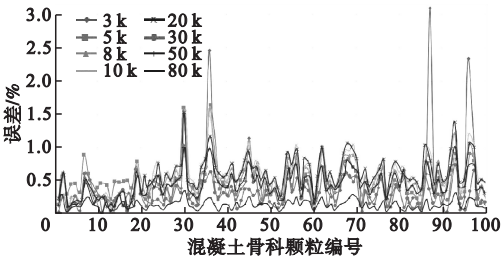


图4 各精简模型表面积计算误差

Fig. 4 Calculation error of surface area based on each simplified model

#### 3.2 体积

采用球谐函数的实数表达形式, 可通过式(7)计算重构骨料颗粒的体积<sup>[9]</sup>:

$$V = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi r^3(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi. \tag{7}$$



对比基于各精简模型与基于 100 000 数据点模型计算出的体积,计算误差百分比,结果如图 5 所示. 基于各精简模型计算的体积与 100 000 点模型体积的误差均低于 1%,当数据点超过 5 000 时,计算误差基本低于 0.8%,超过 30 000 点时,计算误差已经基本小于 0.4%. 对比图 4 和图 5,各精简模型的体积误差小于表面积误差,说明体积指标比表面积指标对精简点数量不同而产生误差的敏感度低.

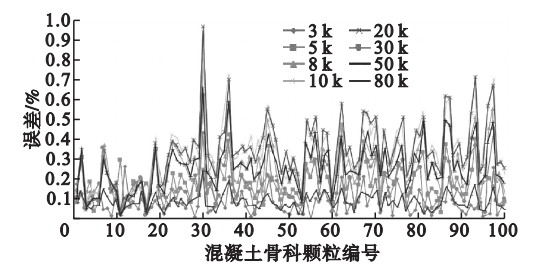


图 5 各精简模型体积计算误差

Fig. 5 Calculation error of volume based on each simplified model

3.3 主要尺寸

主要尺寸包括长轴  $a$ 、中轴  $b$  和短轴  $c$ , 它们是直接描述颗粒形状或评估其他形状描述指标的重要参数<sup>[10-12]</sup>. 为了评估主要尺寸,首先基于主成分分析确定重建颗粒表面的主轴的方向. 旋转重建骨料颗粒以使主轴与笛卡尔轴对齐,然后即可测量主尺寸  $a$ 、 $b$  和  $c$  <sup>[13-14]</sup>.

对比基于各重构模型与 100 000 数据点模型计算出的长轴、中轴和短轴,计算误差如图 6、图 7 和图 8 所示. 由图 6 可知,3 000 个数据点模型所计算出的长轴有个别骨料颗粒的误差较大,最大的一个超过 12%,这说明在该模型中,由于较多局部特征的丢失,颗粒形状与原形状已经出现较大的区别. 当模型数据点超过 30 000 时,计算误差基本低于 4%,80 000 数据点模型的长轴误差基本低于 1%. 由图 7 和图 8 可知,中轴和短轴的计算误差规律与长轴基本一致.

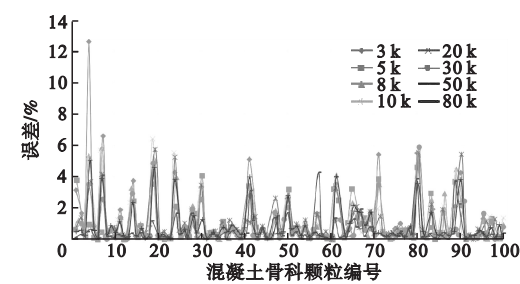


图 6 各精简模型长轴误差

Fig. 6 Calculation error of major axis

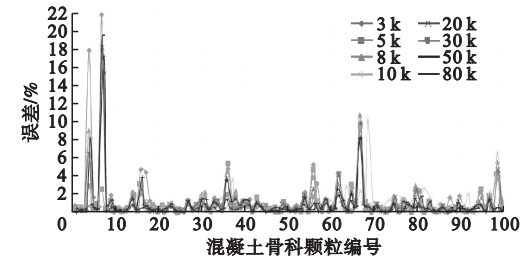


图 7 各精简模型中轴误差

Fig. 7 Calculation error of intermediate axis

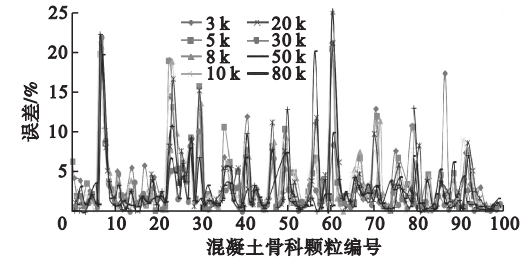


图 8 各精简模型短轴误差

Fig. 8 Calculation error of minor axis

3.4 球形度

球形度( $S$ )用来衡量颗粒与球体的接近程度. 将球形度定义为等同球体(具有与被研究颗粒相同体积)的表面积与颗粒表面积的比值<sup>[15]</sup>:

$$S = \frac{\sqrt[3]{36\pi V^2}}{S_A}.$$

(8)

对比基于各精简模型与基于 100 000 数据点模型计算出的球形度,计算误差百分比,结果如图 9 所示. 3 000 个数据点模型所计算出的球形度有个别骨料颗粒的误差较大,最大的一个接近 3%. 当数据点超过 5 000 时,误差基本低于 1.3%,超过 30 000 点时,球形度误差已经基本小于 0.5%. 可见,球形度指标相对于主要尺寸而言,对点云密度的敏感性较低.

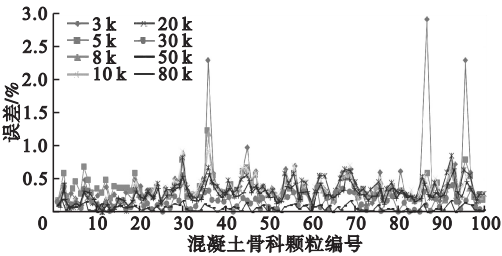


图9 各精简模型球形度计算误差  
Fig. 9 Calculation error of sphericity based on each simplified model

3.5 凸性

传统的二维图像分析中,凸性定义为包围粒子凸包的周长除以粒子的实际周长.据此定义的凸性是颗粒边缘粗糙度的度量<sup>[16]</sup>.随着颗粒表面变得粗糙,凸性增加.对于三维图像分析,凸性描述了紧凑性,即粒子与凸包的相似程度,但以这种方式定义的凸性仍受颗粒表面粗糙度的影响,凸性可以用颗粒体积与包围颗粒的凸包的体积之比<sup>[17-18]</sup>,即:

$$C_x = \frac{V}{V_{CH}} \tag{9}$$

式中: $V_{CH}$ 为凸包的体积.

各精简模型凸性计算误差百分比如图10所示.结果表明,3 000个数据点模型所计算出的误差较大,最大的超过5%.当数据点超过5 000时,误差基本低于1%,超过30 000点时,凸性误差已经基本小于0.5%.凸性的误差规律与球形度大体相同.

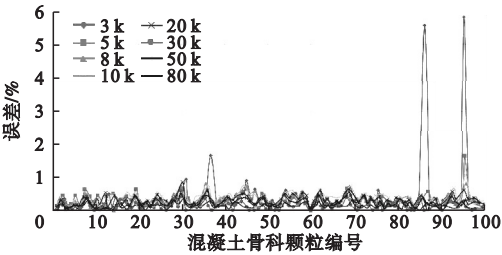


图10 各精简模型凸性计算误差  
Fig. 10 Calculation error of convexity based on each simplified model

综合各指标的误差分析,发现点数少于10 000时计算的误差较大,而30 000、50 000和80 000的误差相对较小,但点数多时计算

的效率明显降低.超过30 000点时,除主要尺寸外,各指标的计算误差均小于1%;综合考虑计算效率与计算精度,普通混凝土骨料颗粒精简点的数量取30 000点为优.采用同样的方法和原则对再生混凝土骨料颗粒的表征参数进行分析,确定出其最优精简点数为50 000.

3.6 骨料颗粒三维几何特性对比分析

分别采用30 000点和50 000点计算普通混凝土骨料颗粒和再生混凝土骨料颗粒的表面积、体积、球形度、凸性、主要尺寸以及轴比等指标,并对这些指标进行对比,以分析普通混凝土骨料颗粒和再生混凝土骨料颗粒几何特性的异同.

(1) 表面积与体积的关系

普通混凝土骨料颗粒和再生混凝土骨料颗粒的表面积与体积之间的关系如图11和图12所示,图中直线对应不同球形度颗粒表面积与体积的关系.球形度( $S$ )衡量了骨料颗粒与球体的接近程度,当 $S=1$ 时,表示为一个球体.图11表明普通混凝土骨料颗粒的数据几乎介于 $S=0.76$ 和 $S=0.91$ 之间.图12表明再生混凝土骨料颗粒的数据基本位于 $S=0.77$ 和 $S=0.90$ 之间.这说明两种骨料颗粒的球形度非常接近,都比较不圆整和不规则;而再生混凝土骨料颗粒的数据相对普通混凝土骨料颗粒的数据更加集中,说明其球形度相对来说会更加相近.

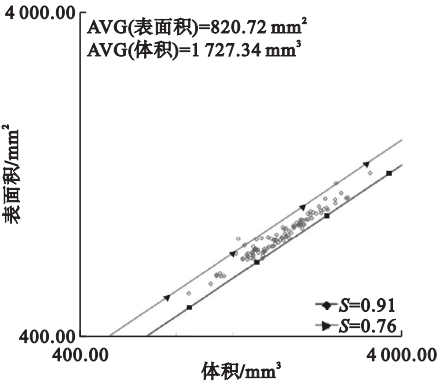


图11 普通骨料颗粒表面积与体积的关系  
Fig. 11 The relationship between volume and surface area of ordinary aggregates

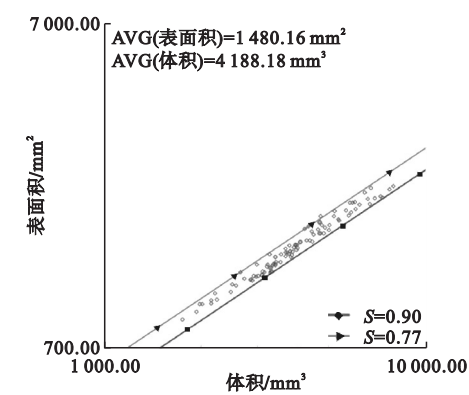


图 12 再生骨料颗粒表面积与体积的关系

Fig. 12 The relationship between volume and surface area of recycled aggregates

(2) 凸性与球形度的关系

球形度( $S$ )和凸性( $C_x$ )是描述颗粒不同层级紧凑度的两个参数<sup>[7]</sup>.图 13 和图 14 给出了普通混凝土骨料颗粒和再生混凝土骨料颗粒的球形度与凸性之间的关系.从图中可以看出,这两个参数之间存在一定的相关性.对于普通混凝土骨料,大多数颗粒的凸性和球形度之间的关系以  $C_x = 1.03 S$  和  $C_x = 1.16 S$  为界,凸性的平均值为 0.92,球形度的平均值为 0.84.对于再生混凝土骨料,大多数颗粒的凸性和球形度之间的关系则以  $C_x = 1.02 S$  和  $C_x = 1.14 S$  为界,凸性的平均值为 0.90,球形度的平均值为 0.84.对比发现,试验选用的普通混凝土骨料颗粒和再生混凝土骨料颗粒的凸性和球形度之间的关系

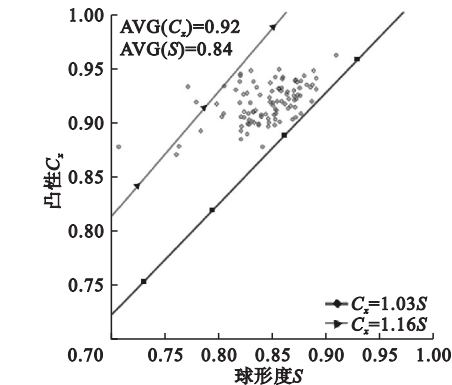


图 13 普通骨料凸性与球形度关系

Fig. 13 The relationship between convexity and sphericity of ordinary aggregates

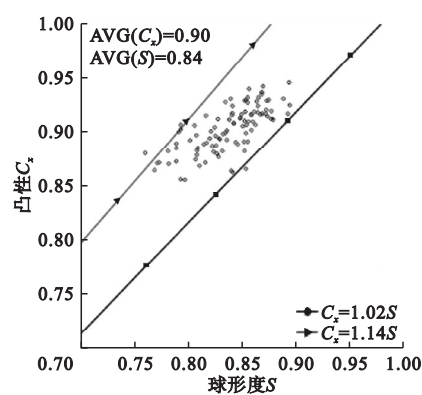


图 14 再生骨料凸性与球形度关系

Fig. 14 The relationship between convexity and sphericity of recycled aggregates

较为接近,再生混凝土骨料颗粒的球形度平均值和普通混凝土骨料的平均值相同,但是再生混凝土骨料颗粒的凸性较普通混凝土骨料颗粒的凸性要小一点,这说明其表面更凹凸不平.

(3) 主要尺寸的关系

两种混凝土骨料颗粒主要尺寸(长轴,中轴和短轴)之间的关系如图 15 和图 16 所示.

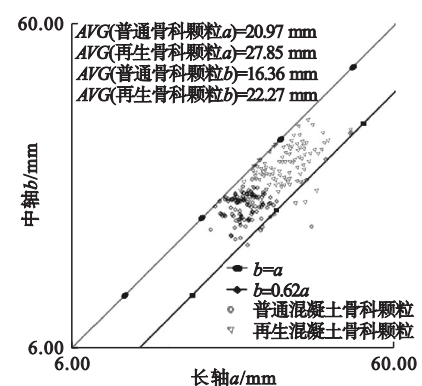


图 15 两种骨料颗粒长轴  $a$  和中轴  $b$  的关系  
Fig. 15 The relationship between the major axis,  $a$ , and the intermediate axis,  $b$ , of two types of aggregate particle

由图 15 可知:绝大部分的再生混凝土骨料颗粒的长轴  $a$  和中轴  $b$  均大于普通混凝土骨料颗粒的长轴  $a$  和中轴  $b$ ,再生混凝土骨料颗粒长轴  $a$  的平均值为 27.9 mm,普通混凝土骨料颗粒长轴  $a$  的平均值 21.0 mm,再

生混凝土骨料颗粒中轴  $b$  的平均值为 22.3 mm,普通混凝土骨料颗粒中轴  $b$  的平均值 16.4 mm;大部分普通骨料颗粒和再生骨料颗粒中轴  $b$  与长轴  $a$  的比值(轴比指标  $EI$ )介于 0.62 ~ 1.

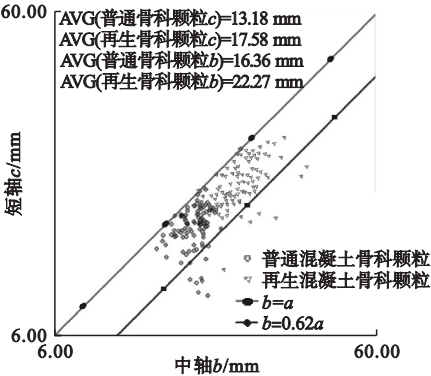


图 16 两种骨料颗粒中轴  $b$  和短轴  $c$  的关系

Fig. 16 The relationship between the intermediate axis,  $b$ , and the minor axis,  $c$ , of two types of aggregate particle

由图 16 可知,绝大部分的再生骨料颗粒的短轴  $c$  和中轴  $b$  均大于普通骨料颗粒的短轴  $c$  和中轴  $b$ ;大部分普通骨料颗粒和再生骨料颗粒短轴  $c$  与中轴  $b$  的比值(轴比指标  $FI$ )介于 0.64 ~ 1,  $FI$  数值总体上比  $EI$  略大.

(4)轴比的关系

两种混凝土骨料颗粒的轴比指标  $EI$  和  $FI$ <sup>[12]</sup> 之间的关系如图 17 和图 18 所示.普通混凝土骨料颗粒  $EI$  的平均值为 0.79,  $FI$  的平均值为 0.81,这说明短轴  $c$  的值比长轴  $a$  的值更接近中轴  $b$  的值;再生混凝土骨料颗粒  $EI$  的平均值为 0.81,  $FI$  的平均值为 0.79,这说明长轴  $a$  的值比短轴  $c$  的值更接近中轴  $b$  的值.基于  $EI$  和  $FI$  的数值,试验选取的普通混凝土骨料颗粒中,约 81% 可以归类为球形体(Spheroid),约 9% 的骨料可以归类为扁圆形(Oblate),约 9% 的骨料可以归类为扁长形(Prolate),约 1% 的骨料可以被归类为刀片形(Blade);而再生混凝土骨料颗粒中,约 86% 的骨料可以归类为球形体(Spheroid),约 6% 的骨料可以归类为扁圆形,约 8% 的骨

料可以归类为扁长形,可以被归类为刀片形的为 0%.以上结果表明,大部分再生混凝土骨料颗粒和普通混凝土骨料颗粒形状都归属于球形体,小部分为扁长形和扁圆形,两种骨料颗粒的形状特性相近.

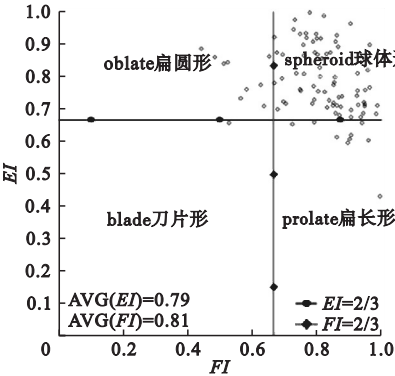


图 17 普通骨料轴比指标关系图

Fig. 17 The relationship between  $EI$  and  $FI$  of ordinary aggregates

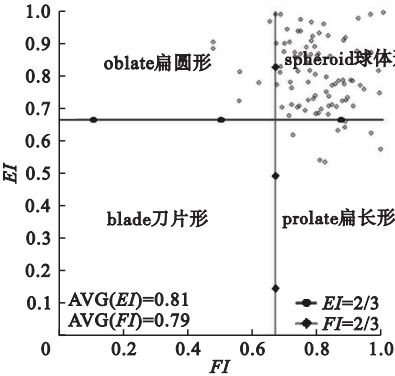


图 18 再生骨料轴比指标关系图

Fig. 18 The relationship between  $EI$  and  $FI$  of recycled aggregates

4 结 论

(1)利用 DPL 成像技术对混凝土骨料颗粒进行非接触式三维扫描,结合球谐函数和计算几何可以对不规则颗粒进行三维形态的重构和表征分析.

(2)结合各几何参数的计算误差和计算效率,建议普通混凝土骨料颗粒点云数据的最优点数为 30 000 点,再生混凝土骨料颗粒的最优点数为 50 000 点.



(3)普通混凝土骨料颗粒和再生混凝土骨料颗粒在球形度指标上基本相同,但再生混凝土骨料颗粒的凸性较普通混凝土骨料颗粒的凸性要小一些。

(4)大部分普通混凝土骨料颗粒和再生混凝土骨料颗粒的轴比指标  $EI$  介于  $0.62 \sim 1$ ,  $FI$  介于  $0.64 \sim 1$ ,  $FI$  数值总体上比  $EI$  略大。

(5)大部分再生混凝土骨料颗粒和普通混凝土骨料颗粒形状都归属于球体形,小部分为扁长形和扁圆形,两种骨料颗粒的形状特性相近。

## 参考文献

- [1] 侯永利,郑刚. 再生骨料混凝土不同龄期的力学性能[J]. 建筑材料学报,2013,16(4):683-687.  
(HOU Yongli, ZHENG Gang, Mechanical properties of recycled aggregate concrete in different age[J]. Journal of building materials, 2013,16(4):683-687.)
- [2] 郭磊,薛志龙,陈守开,等. 基于预拌浓浆法的再生骨料混凝土性能试验研究[J]. 建筑材料学报,2017,20(6):950-955.  
(GUO Lei, XUE Zhilong, CHEN Shoukai, et al. Experimental study on the performance of recycled based on pre-mixing thick cement paste aggregate concrete method[J]. Journal of building materials,2017,20(6):950-955.)
- [3] RICHARDSON A, ALLAIN P, VEUILLE M. Concrete with crushed, graded and washed recycled construction demolition waste as a coarse aggregate replacement [J]. Structural survey,2010,28(2/3):142-148.
- [4] AL GAHTANI K S, ALSULAIHI I, ALI M R, et al. Production of green concrete using recycled waste aggregate and byproducts[J]. Built environment project and asset management,2017,7(4):413-425.
- [5] FERNLUND J M R. Image analysis method for determining 3-D shape of coarse aggregate[J]. Cement & concrete research, 2005, 35(8):1629-1637.
- [6] ASAHINA D, TAYLOR M A. Geometry of irregular particles: direct surface measurements by 3-D laser scanner[J]. Powder technology, 2011,213(1):70-78.
- [7] SU D, YAN W M. 3D characterization of

general-shape sand particles using microfocus X-ray computed tomography and spherical harmonic functions, and particle regeneration using multivariate random vector [J]. Powder technology,2017,323(1):8-23.

- [8] 付茹,胡新丽,周博,等. 砂土颗粒三维形态的定量表征方法[J]. 岩土力学,2018(2):483-490.  
(FU Ru, HU Xinli, ZHOU Bo, et al. Quantitative characterization of three-dimensional morphology of sand particles[J]. Rock and soil mechanics, 2018(2):483-490.)
- [9] ZHOU B, WANG J, ZHOU B. Micromorphology characterization and reconstruction of sand particles using micro X-ray tomography and spherical harmonics [J]. Engineering geology, 2015,184(14):126-137.
- [10] BARRETT P J. The shape of rock particles, a critical review [J]. Sedimentology, 2010, 27(3):291-303.
- [11] BLOTT S J, PYE K. Particle shape: a review and new methods of characterization and classification [J]. Sedimentology, 2010, 55(1):31-63.
- [12] DIEWALD G, KRESI C M. Einübereinzeln sprachliches kontrastives beschreibungsmodell für partikelbedeutungen [J]. Linguistik online, 2010,44(4):1-19.
- [13] ZHOU B, WANG J. 3D quantitative shape analysis on form, roundness, and compactness with  $\mu$ CT[J]. Powder technology,2016,291:262-275.
- [14] ERDOGAN S T, GARBOCZI E J, FOWLER D W. Shape and size of microfine aggregates: X-ray microcomputed tomography vs. laser diffraction [J]. Powder technology, 2007, 177(2):53-63.
- [15] FANG Hongwei, ZHAO Huiming, CHEN Zhihe, et al. 3D shape and morphology characterization of sediment particles [J]. Granular matter,2015,17(1):135-143.
- [16] OLSON E. Particle shape factors and their use in image analysis-part I: theory [J]. GXP compliance,2010,15(3):85-96.
- [17] ROSIN P L, MUMFORD C L. A symmetric convexity measure [J]. Computer vision & image understanding, 2006, 103(2):101-111.
- [18] GARBOCZI E J, BULLARD J W. Contact function, uniform-thickness shell volume, and convexity measure for 3D star-shaped random particles [J]. Powder technology, 2013, 237(3):191.

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)