

DOI:10.11918/202312041

粗集料数字化三维实形特征及其分布

刘济玮¹, 纪伦¹, 郭宏斌², 程邳策^{1,3}, 邬金麒¹, 谭忆秋¹

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 吉林省路桥工程(集团)有限公司, 长春 130062;
3. 中国五冶集团有限公司, 成都 610011)

摘要: 为准确分析混合料中集料的形貌特征及其分布属性, 更全面、深入和具体地认识集料, 采用 CT 扫描、数字图像处理和三维几何重构技术相关数字化技术对集料颗粒进行实形重构, 提出集料的 5 种形貌特征参数, 针对 3 种集料的形貌特征进行数字化评价与试验分析, 验证数字化重构方法的准确性, 分析集料颗粒形貌分布特征, 基于 Pearson 相关性方法分析形貌参数的相关性。结果表明: 采用 CT 扫描技术和数字化实形重构技术, 可以准确地还原集料颗粒的形貌特征, 准确获得形貌参数; 同种集料的不同粒径的形貌特征存在显著的分布特征; 不同粒径的三维针片状指数和三维纹理指数相差不大; 不同粒径范围的集料颗粒的形貌参数值随着粒径的增大离散性降低; 三维纹理指数整体服从幂律分布, 随粒径的增大, 复杂程度逐渐降低; 随粒径的增大, 三维棱角度逐渐趋于稳定; 三维棱角度与实形矩体度、实球形度存在较强的负相关性; 而实球形度与三维纹理指数存在较强的正相关关系。数字化三维重构能准确、完整地描述和分析集料形貌及其分布特征。

关键词: 混合料; 集料; 数字化技术; 实形重构; 形貌参数; 道路工程; 特征分布

中图分类号: U415 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2025)07-0001-11

Digital 3D morphological features and distribution of asphalt coarse aggregate

LIU Jiwei¹, JI Lun¹, GUO Hongbin², CHENG Zhice^{1,3}, WU Jinqi¹, TAN Yiqiu¹

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;
2. Jilin Road and Bridge Engineering (Group) Co., Ltd., Changchun 130062, China;
3. China MCC5 Group Corp. Ltd., Chengdu 610011, China)

Abstract: In order to accurately analyze the morphological characteristics and distribution properties of aggregates in the mixture, and to have a more comprehensive, in-depth, and specific understanding of aggregates, CT scanning, digital image processing, and three-dimensional geometric reconstruction technologies were used to reconstruct the real shape of aggregate particles. Five morphological characteristic parameters of aggregates were proposed, and a digital evaluation and experimental analysis were conducted on the morphological characteristics of three aggregates. The accuracy of the digital reconstruction method was validated and the morphological distribution characteristics of aggregate particles were analyzed. Additionally, the Pearson correlation method was utilized to analyze the correlations among the morphological parameters. The study demonstrates that the use of CT scanning technology and digital reconstruction technology can accurately restore the morphological characteristics of aggregate particles and obtain morphological parameters. There are significant distribution characteristics of the morphology of different particle sizes of the same aggregate. The three-dimensional needle-like index and three-dimensional texture index show little variation across different particle sizes. As the particle size increases, the variability of the morphology parameter values for aggregates decreases. The overall three-dimensional texture index follows a power-law distribution, and the complexity gradually decreases with the increase of particle size. Additionally, as the particle size increases, the three-dimensional edge angle gradually stabilizes. There is a strong negative correlation between three-dimensional edge angle and solid moment degree, as well as between solid sphericity and three-dimensional edge angle. Conversely, there is a strong positive correlation between sphericity of the actual shape and the three-dimensional texture index. Digital 3D reconstruction can accurately and comprehensively describes and analyzes the morphology and distribution characteristics of aggregates.

Keywords: asphalt mixture; coarse aggregate; digital technology; geometric reconstruction; morphological feature parameters; road engineering; characteristic distribution

收稿日期: 2023-12-15; 录用日期: 2024-03-29; 网络首发日期: 2025-02-25

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250224.1818.002>

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(TD2022E001)

作者简介: 刘济玮(2000—), 男, 硕士研究生; 纪伦(1973—), 男, 副教授, 硕士生导师; 谭忆秋(1968—), 女, 教授, 博士生导师

通信作者: 纪伦, jilun@hit.edu.cn

沥青混合料由集料与沥青砂浆组成,集料作为体系中的主分散相^[1],其形貌特征与沥青混合料微观结构之间密切关联,即优良的形貌特征决定了混合料更好的力学性能、强度和路用性能^[2-4]。

鉴于图像处理技术的可靠性和精确性,目前研究人员着重从图像识别角度出发,借助工业 CT 扫描及激光识别技术,直接扫描提取集料的信息,进而对集料的形貌特征进行研究^[5]。例如:张磊^[6]利用工业 CT 技术对不同级配沥青混凝土断面进行扫描,结合图像处理技术获取集料的部分二维形貌参数;陈国明等^[7]采用激光轮廓仪测量了不同集料的表面纹理曲线,研究了粗糙度对沥青混合料性能的影响。多数研究均集中于分析集料形貌特性对沥青混合料性能的影响,缺乏不同集料形貌特征差异及其分布方面深入细致的研究。

由于激光识别对人工操作经验和环境等的要求更高,因此,本文运用工业 CT 扫描、CT 图降噪处理及三维几何重构技术还原集料颗粒的三维形貌特征,再对该方法进行有效性验证,描述其三维形貌特征和表面构造,探究样品三维实形特征的分布和不同形貌特征参数的相关性。基于此研究,可以更好地了解集料的微观结构和分布特征,掌握集料形貌数据特性,以便进一步深入探究集料形貌特征参数与其构成的沥青混合料路用性能之间的关系,为后

续数字化仿真试件的构建提供技术支持。

1 集料颗粒三维形貌特征获取技术

1.1 基于工业 CT 技术的集料图像扫描

本研究选择使用工业 CT 设备对集料颗粒形貌进行还原及表征,形成一种集料三维实形形貌特征表征分析方法,如图 1 所示。

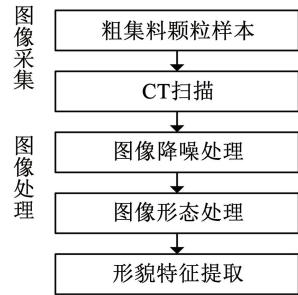


图 1 集料三维实形形貌特征表征分析方法

Fig. 1 Characterization and analysis methods for three-dimensional morphological features of aggregates

1.1.1 集料颗粒取样及试件的制备

分别选择黑龙江省哈尔滨市、鸡西市、巴彦县 3 个产地的集料颗粒分别命名为 P1 集料、P2 集料、P3 集料,依据 JTG E42—2005《公路工程集料试验规程》^[8]进行基础性能测试,结果见表 1 和表 2。3 种集料的性能参数见表 3。

表 1 3 种集料各档粒径范围内集料密度

Tab. 1 Aggregate density within various particle size ranges for three types of coarse aggregates

集料	粒径/mm	表观密度/(g·cm ⁻³)	表干密度/(g·cm ⁻³)	毛体积密度/(g·cm ⁻³)
P1	16.00 ~ 19.00	2.706	2.695	2.682
	13.20 ~ <16.00	2.681	2.664	2.653
	9.50 ~ <13.20	2.679	2.669	2.663
	4.75 ~ <9.50	2.681	2.664	2.653
	2.36 ~ <4.75	2.668	2.596	2.579
	>0 ~ <2.36	2.658	—	—
P2	19.00 ~ 26.50	2.753	2.701	2.674
	16.00 ~ <19.00	2.749	2.698	2.689
	13.20 ~ <16.00	2.756	2.695	2.679
	9.50 ~ <13.20	2.763	2.702	2.684
	4.75 ~ <9.50	2.742	2.682	2.664
	2.36 ~ <4.75	2.720	2.669	2.647
>0 ~ <2.36	2.715	—	—	
P3	13.20 ~ 16.00	2.759	2.644	2.623
	9.50 ~ <13.20	2.776	2.638	2.615
	4.75 ~ <9.50	2.703	2.621	2.604
	2.36 ~ <4.75	2.677	2.594	2.587
	>0 ~ <2.36	2.696	—	—

表 2 3 种集料性能测试结果

Tab. 2 Performance test results for three types of aggregates

集料	细集料砂当量/%	不同针片状颗粒质量分数/%				
		19.00 ~ 26.5 mm	16.00 ~ <19.00 mm	13.20 ~ <16.00 mm	9.50 ~ <13.20 mm	4.75 ~ <9.50 mm
P1	67	—	7.1	6.2	5.6	4.7
P2	64	6.0	8.2	6.5	7.4	5.9
P3	62	—	—	8.2	9.6	7.6

表 3 3 种集料情况及取样要求

Tab. 3 Aggregate parameters and sampling requirements for three types of coarse aggregates

集料	最大粒径/ mm	最小粒径/ mm	最少取样 颗粒数	取样质量/ kg
P1	19.00	2.36	100	0.5 ~ 0.8
P2	26.50	2.36	100	1.0 ~ 1.5
P3	16.00	2.36	100	0.5 ~ 0.8

集料取样后需要进行 CT 扫描前的准备, 步骤如下:

步骤 1 依据表 3 要求, 对各档集料颗粒进行取样, 每种集料按颗粒粒径大小分为多档分别装袋

保存。其中 P1 集料分为 2.36、4.75、9.50、13.20、16.00 mm 档集料, P2 集料在 P1 集料分档基础上增加 19.00 mm 档集料, P3 集料则在 P1 集料分档基础上减少 16.00 mm 档集料。

步骤 2 对 3 种集料的每档集料的颗粒测量长宽高的最大值, 分别挑选出尺寸变异性较大的 15 颗以及变异性较小的 15 颗, 同时记录每个颗粒所归属的集料具体档。

步骤 3 从步骤 2 中第 1 次挑选出 30 颗颗粒。利用密度与集料差异较大的轻型黏土作为集料颗粒的承载体, 构建如图 2 所示的 3 个 CT 扫描模型。其中, P3 集料 CT 扫描模型展示了每一层颗粒排放的效果。



图 2 集料 CT 扫描模型实物照片

Fig. 2 Coarse aggregate CT scanning model physical image

1.1.2 集料工业 CT 扫描与降噪技术

工业 CT 扫描技术^[9-10] 又称计算机断层扫描技术, 几十年来一直用于高精度检测, 其原理主要是利用 X 射线的穿透和吸收特性, 从多个角度投射置于射线源与探测器之间的试件并计算吸收的 X 射线剂量, 从而获取试件的构造。在工业 CT 扫描过程中, X 射线的射线强度满足的关系遵循:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (1)$$

式中: I 为穿过物体后的射线强度, I_0 为穿过物体前的射线强度, x 为射线通过的物体厚度, μ 为吸收系数。

扫描试验样品所用的工业 CT 设备是由美国 GE SENSING & INSPECTION 公司生产的 Phoenix s240 紧凑型 300kVCT 设备。使用该设备扫描, 并采用三维可视化软件 VGStudio MAX 2.0 对 CT 图进行降噪处理以识别颗粒图像, 便于后续的颗粒实形

重构。

1.2 集料颗粒实形重构技术

三维几何重构技术是一种将二维图像组合分析还原出三维图像的计算机技术。采用 Materialise 公司的 Mimics 软件对集料颗粒的三维结构进行重构, 同时搭配 3-matic 软件可以将颗粒分类并模拟计算基础的尺寸参数, 并能将颗粒扫描图片导出为适用于离散元软件的模式格式文件。以 P1 集料颗粒为例, 在 Mimics 软件中进行三维重构的具体操作步骤如下:

步骤 1 将 CT 二维图像 tif 文件导入 Mimics 软件, 在导入时对 x, y, z 轴的精度赋值 0.1, 同时手动选择该组图片在三维空间中的方向。

步骤 2 在识别集料颗粒之前需要选择一条纵断面线, 并且以该纵断面线所在位置的颜色调整阈

值,使所有颗粒的断层图像部分均能被选中。

步骤 3 样品每层的所有颗粒用不同颜色模型表示。

步骤 4 按照上述方法重构每一个颗粒的三维模型,将 Mimics 重构的三维集料颗粒模型导入 3-matic 软件,给每个颗粒进行编号并记录其三维尺

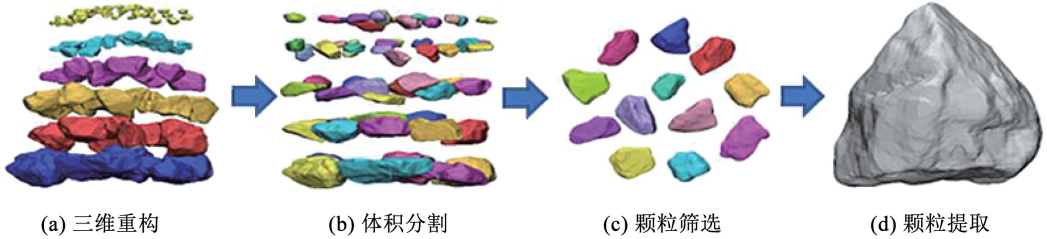


图 3 重构集料颗粒实形模型流程

Fig. 3 Process for reconstructing solid models of aggregate particles

1.3 集料表面积及体积的有效性验证

对于颗粒的形状、棱角及表面纹理的研究是建立在集料颗粒表面积及体积数值准确性良好的基础上,因此,需要对 3-matic 模拟计算得到的集料颗粒表面积及体积的准确性进行验证。

1.3.1 集料颗粒表面积有效性验证

为了验证 3-matic 模拟的集料颗粒表面积的准确性,参考蜡封法^[11]进行计算测量,该方法假设石蜡均匀覆盖在集料表层而且忽略集料开口孔隙对石蜡的吸附作用,即覆盖的石蜡质量与集料颗粒表面积满足线性关系。试验及计算步骤如下:

步骤 1 在 70 °C ± 2 °C 的温度条件下,将固体石蜡融化为液体石蜡,将所测集料颗粒置于石蜡液体中浸泡 4 s 左右,取出后常温放置,冷却至石蜡凝固,称取其重量为 m_1 ,该步骤是为防止集料对石蜡的吸附性导致后续计算产生误差。

步骤 2 将预处理的颗粒放置液体石蜡中浸泡 8 s 左右,同样放置冷却,石蜡凝固后称取其重量为 m_2 ,则表面石蜡质量 $\Delta m = m_2 - m_1$ 。

步骤 3 选择 3 个表面积已知的小塑料圆柱作为参考标准,按上述步骤测试 Δm 值,并与相同圆柱的表面积值线性拟合,根据拟合方程计算得到颗粒表面积。

选择 P1 集料中 16.00 mm 档 5 颗颗粒进行测试,计算得到 P1-16.00-01 ~ P1-16.00-05 颗粒的表面积并与 3-matic 模拟颗粒的表面积对比,结果见表 4。图 4 为 5 颗集料 3-matic 模拟表面积和蜡封法测量表面积的分析图,通过观察可以发现,蜡封法测试颗粒表面积值较模拟表面积值整体偏大,主要是无法满足石蜡在颗粒表面覆盖厚度均匀和厚度足够薄的要求,同时集料开口孔隙的吸附因素,因此测

寸参数指标,例如 P1 集料的 9.50 档的第 2 颗颗粒编号为“P1-9.50-02”。

按照上述步骤分别重构 3 种集料颗粒的实形模型,图 3(d)展示了 P1 集料模型的效果,可以观察到该重构方法可以准确还原集料颗粒的三维形貌,说明该技术是可行的。

试值偏高是正常的。而且两者线性关系十分明显 ($R^2 = 0.99$),因此可以认为 3-matic 模拟的集料颗粒表面积值可以较好地还原实际集料颗粒的表面积。

表 4 颗粒模拟、测试值及偏差

Tab. 4 Particle simulation, testing surface area values and deviations

颗粒编号	3-matic 模拟表 面积/mm ²	蜡封法测量表 面积/mm ²	相对平均 偏差/%
P1-16.00-01	686.53	726.43	2.82
P1-16.00-02	695.38	743.88	3.37
P1-16.00-03	822.06	864.54	2.52
P1-16.00-04	878.27	934.02	3.08
P1-16.00-05	890.68	936.79	2.52

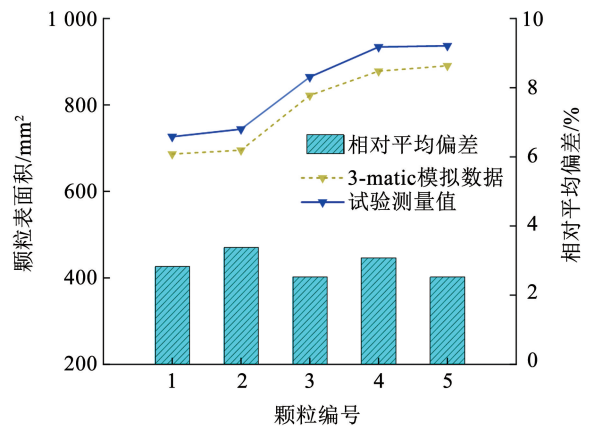


图 4 集料 3-matic 模拟和蜡封法测量表面积分析图

Fig. 4 Surface area analysis diagram of 3-matic simulation vs. wax-sealing method

1.3.2 集料颗粒体积有效性验证

采用容量瓶法^[10]验证 3-matic 对集料颗粒体积

计算的准确性。首先,选择 P1 集料 13.20 档的 10 颗集料颗粒,提前放入水中浸水 5 min 后记录表干重 m_0 ;然后,利用量杯加水至刻度为 V_0 ,记录量杯与水的总重 m_1 ;之后,加入集料颗粒,使用胶头滴管吸水使水位刻度仍保持 V_0 ,记录此时量杯、水和颗粒的总重 m_2 ;最后,计算集料颗粒的体积为

$$V = \frac{m_1 - m_2 - m_0}{\rho_w} \quad (2)$$

式中: ρ_w 为水温为 T 时水的密度; T 为测量时环境的温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

实测 P1 集料 13.20 档的 10 颗集料颗粒的体积并与 3-matic 模拟颗粒的体积进行对比,结果见表 5。

表 5 颗粒模拟、测试体积值及偏差

Tab.5 Particle simulation, testing volume values and deviations

颗粒编号	3-matic 模拟 体积/ mm^3	容量瓶法测量 体积/ mm^3	相对平均 偏差/%
P1-13.20-01	549.93	556.49	1.19
P1-13.20-02	596.29	599.62	0.56
P1-13.20-03	575.87	571.12	0.83
P1-13.20-04	606.41	603.10	0.55
P1-13.20-05	549.93	542.22	1.41
P1-13.20-06	535.83	533.53	0.43
P1-13.20-07	528.73	534.25	1.04
P1-13.20-08	599.71	596.22	0.58
P1-13.20-09	633.40	639.56	0.97
P1-13.20-10	605.02	608.62	0.59

图 5 为 3-matic 模拟体积与测量体积对比图。由图 5 可以看出,3-matic 模拟计算的集料颗粒体积与容量瓶法实测体积值较接近,两者的相对平均偏差最大为 1.41% 左右,同时两者之间有很好的线性关系($R^2 = 0.98$),说明 3-matic 模拟的集料颗粒体积值能够很好地反映真实集料颗粒的体积值。

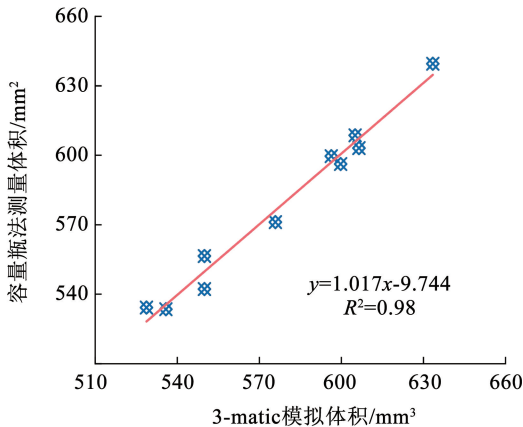


图 5 模拟体积值与试验体积值对比图

Fig.5 Fitting diagram of simulated volume values and experimental volume values

2 集料颗粒实形形貌形状及其分布特征分析

2.1 集料颗粒实形形貌特征基础参数分析

利用 3-matic 软件计算集料颗粒外接长方体的尺寸,用于后续分析集料颗粒的三维形貌特征。图 6 为集料颗粒外接长方体示例,表 6 为 P1 集料 9.50 mm 档 12 颗颗粒的外接长方体尺寸信息。

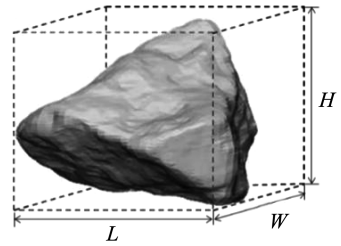


图 6 集料颗粒外接长方体示例

Fig.6 Example of coarse aggregate particles connected with rectangular cuboid

表 6 P1 集料 9.50 mm 档颗粒外接长方体尺寸

Tab.6 Dimensions of bounding rectangular cuboid for P1 aggregate particles in 9.50 mm size range

颗粒编号	L/mm	W/mm	H/mm
P1-9.50-01	15.245	12.282	5.401
P1-9.50-02	17.092	16.303	8.401
P1-9.50-03	13.932	13.826	8.701
P1-9.50-04	14.104	11.325	8.900
P1-9.50-05	14.771	12.955	8.401
P1-9.50-06	14.006	12.922	8.801
P1-9.50-07	15.464	13.225	7.101
P1-9.50-08	15.227	14.421	9.001
P1-9.50-09	16.043	13.679	9.000
P1-9.50-10	11.164	10.040	7.801
P1-9.50-11	15.205	13.625	11.100
P1-9.50-12	16.919	10.677	7.400

形貌展开分析之前,提出一种用于评价粒径的方式。对于集料中某一档集料,找到颗粒中体积最小的颗粒(体积为 V_{\min}),默认其等效粒径为该档粒径范围的下限 a ;找到体积最大的颗粒(体积为 V_{\max}),默认其等效粒径为该档粒径范围的上限 b 。则该档其他粒径(体积为 V)的等效粒径 δ 为

$$\delta = \frac{aV_{\max} - bV_{\min} + (b - a)V}{V_{\max} - V_{\min}} \quad (3)$$

在本次分析中,往往需要颗粒粒径作为横轴,用这种等效粒径的方法更便于将集料颗粒的形貌特征分布在分析图中,后文均采用该方法计算等效粒径。

2.2 实形矩体度分析

实形矩体度主要用于评价颗粒形状的大体规则

度,根据二维矩体度公式扩展提出实形矩体度公式为

$$G = \frac{V_{3D}}{V_{\min}} \quad (4)$$

式中: V_{3D} 为集料颗粒实形重构体积, V_{\min} 为颗粒最小外接矩体的体积。

2.2.1 不同粒径下集料颗粒形状特征对比

根据式(4),不同粒径下 3 种集料的实形矩体度分布见图 7。实形矩体度用来评价颗粒在外接矩体空间中所占的体积比,其取值为 0~1,矩体度越接近 1 说明颗粒形状越规整,越偏于矩体形状。由图 7 可知,随着粒径的增大,3 种集料颗粒的实形矩体度整体趋于平缓,离散性降低;但平均来看,3 种集料颗粒粒径在 2.36~<4.75 mm 之间时形状更规整。

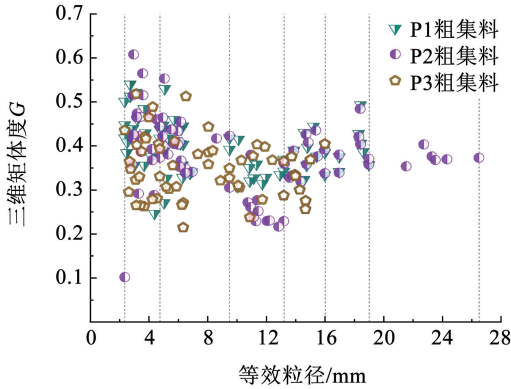


图 7 不同粒径集料实形矩体度分布

Fig. 7 Distribution of shape rectangularity of coarse aggregates with different particle sizes

2.2.2 不同类型集料颗粒形状特征及其分布对比

为了便于分析对比,本节通过颗粒体积加权平均的方法定义一个复合矩体度 G_C :

$$G_C = \frac{\sum_{i=1}^{n_t} V_i G_{(i)}}{\sum_{i=1}^{n_t} V_i} \quad (5)$$

式中: V_i 、 $G_{(i)}$ 分别为第 t 个粒径范围内第 i 个颗粒的体积和实形矩体度值, t 为集料颗粒粒径范围的序号, n_t 为第 t 个粒径范围内集料颗粒的总数。

由于 3 种集料的最大粒径不同,因此只对 3 种共有的粒径范围进行计算。根据式(4)绘制出不同类型集料复合矩体度的对比见图 8。由图 8 可以看出,P3 集料的复合矩体度在每一个粒径范围内均最小,说明其颗粒规则程度最低,而 P1 与 P2 集料的复合矩体度相差不大。观察实形矩体度的标准偏差发现,随粒径的增大,相应粒径范围内颗粒间规整程度的差距越来越低,可见,2.36 mm 档集料在同一粒径范围颗粒差异大,应该是质量控制的重点。

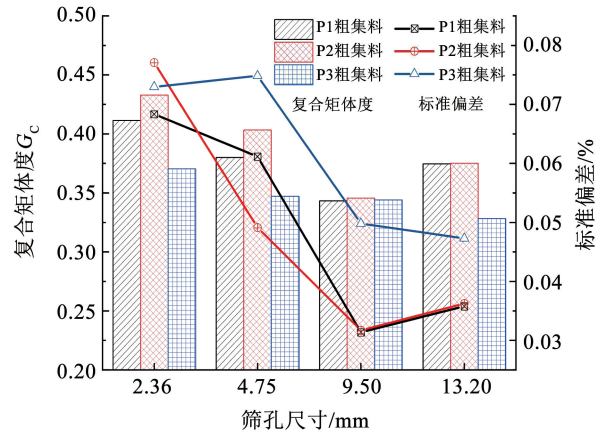


图 8 不同类型集料复合矩体度对比

Fig. 8 Comparison of composite rectangularity for different types of aggregates

2.3 实形球形度分析

通常还使利用球形度参数研究形状参数。实形球形度的计算是由二维球形度公式推广至三维而导出的,取值为 0~1,用于描述颗粒形状接近球体的程度,值越接近 1,说明该颗粒形状越接近于球体。具体公式^[12]为

$$K_{3D} = \frac{\pi}{A_{3D}} \left(\sqrt{\frac{3}{\pi} V_{3D}} \right)^2 \quad (6)$$

式中:

$$V_{3D} = \iiint_{\Omega} dx dy dz \quad (7)$$

$$A_{3D} = \iint_{D_{xy}} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)^2} dx dy, x, y \in D_{xy} \quad (8)$$

其中: V_{3D} 、 A_{3D} 分别为集料颗粒的体积和表面积, Ω 为集料颗粒所占据的空间域。

2.3.1 不同粒径下集料颗粒形状特征对比

图 9 展示了不同粒径下集料实形球形度的分布情况。由图 9 可知,随着颗粒粒径的增大,P1、P3 集料颗粒的实形球形度值变化不大,但是离散程度逐渐减小。P2 集料最明显的特征为 9.50~<13.20 mm 的实形球形度值比其他粒径范围小很多,说明该档集料轮廓不太规整,同时 13.20~<19.00 mm 的集料颗粒的实形球形度值离散性最小。整体来看,在 4.75~<9.50 mm 的集料颗粒 K_{3D} 平均值为 0.83,是所有粒径范围内三维平均值最高值且接近 1,说明该粒径范围内集料颗粒形状最为规整,实际观察到的 4.75 mm 档集料颗粒的整体形状同样比较规整,从而也间接验证了 3-matic 实形重构方法的有效性。

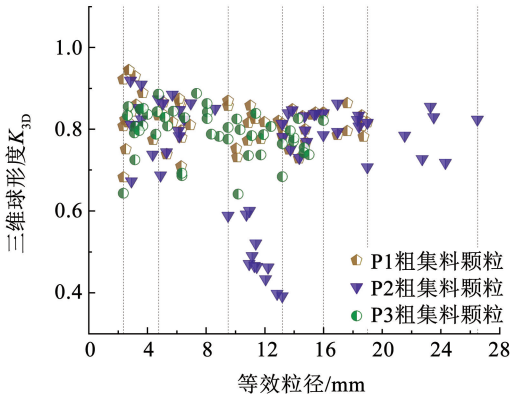


图9 不同粒径集料实形球形度分布

Fig. 9 Distribution of solid sphericity of coarse aggregates with different particle sizes

2.3.2 不同类型集料颗粒形状特征及其分布对比

为了便于分析对比,本节通过颗粒体积加权平均的方法定义一个复合球形度 K_{3DC} ,其计算公式为

$$K_{3DC} = \frac{\sum_{i=1}^{n_t} V_i K_{3D(i)}}{\sum_{i=1}^{n_t} V_i} \quad (9)$$

式中 $K_{3D(i)}$ 为第 t 个粒径范围内第 i 个颗粒实形球形度值。

图10统计了不同类型的3种集料复合球形度的分布情况,右侧 y 轴的标准偏差指在该档粒径范围内所有粗颗粒实形球形度值之间的标准偏差。由图10可以发现,9.50 mm档P2集料的复合球形度比其他所有的复合球形度值低很多,最少相差0.4。但在整体上3种集料的复合球形度值相差不大,但P2档集料的复合球形度比其他两种集料更加稳定。同时发现P1集料粒径为2.36 ~ <13.20 mm时的复合球形度值标准偏差均较低,而P2、P3集料的2.36 mm档集料颗粒标准偏差较高。

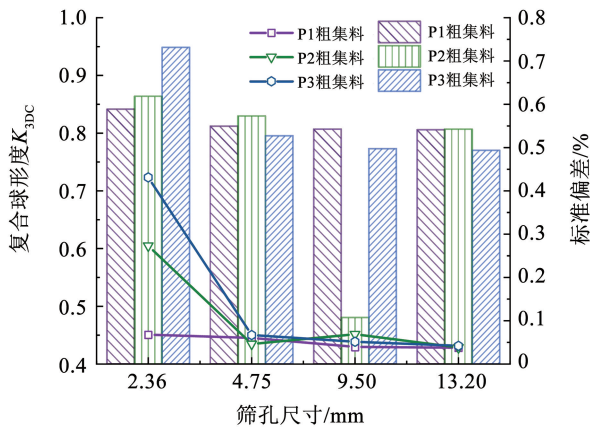


图10 不同类型集料复合球形度对比

Fig. 10 Comparison of composite sphericity of different types of coarse aggregates

2.4 三维针片状指数分析

针片状指数是用于表征集料颗粒形状的重要指标,通过集料颗粒外接最小长方体的长宽高数据,针对每颗集料筛选出 A 、 B 、 C (满足 $A > B, A > C$),根据集料颗粒针片状性质的描述提出一个针片状指数 F_z ,计算公式为

$$F_z = \frac{A}{\min(B, C)} \quad (10)$$

针片状指数 F_z 越大,集料颗粒形状越趋近于针片状,本文认为当 $F_z > 3$ 时,该集料颗粒为针片状颗粒^[13-15]。

2.4.1 不同粒径下集料颗粒形状特征对比

在不同的等效粒径中集料的针片状指数 F_z 的对比及变化情况见图11。由图11可以发现,3种集料的针片状指数 F_z 分布较散,但在所研究的粒径范围内仅有2.36 mm档与4.75 mm档的颗粒存在针片状颗粒,而其他粒径区间内针片状指数与粒径并不存在明显的关系。

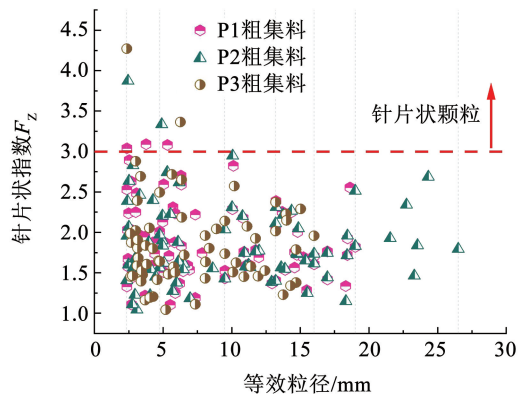


图11 不同粒径集料针片状指数分布

Fig. 11 Distribution of needle flakiness index of aggregates with different particle sizes

2.4.2 不同类型集料颗粒形状特征及其分布对比

为了方便比较分析不同集料间针片状指数,本节通过颗粒体积加权平均的方法复合针片状指数 F_{zC} :

$$F_{zC} = \frac{\sum_{i=1}^{n_t} V_i F_{z(i)}}{\sum_{i=1}^{n_t} V_i} \quad (11)$$

式中 $F_{z(i)}$ 为第 t 个粒径范围第 i 个颗粒的三维针片状指数。

图12为不同类型集料的各粒径范围内的复合针片状指数。由图12可以看出,不同粒径间集料的针片状指数相差不大,其中P2集料各档粒径的针片状程度相差最小,同时其三维针片状指数的标准偏差随粒径的增大近乎线性减小。针片状指数此趋势主要是因为碎石厂对P2集料的生产破碎要求更高。

同时 P1 和 P2 集料的三维针片状指数的标准偏差都随粒径的增大而减小, P3 集料也仅仅在 13.20 mm 档出现差异, 说明生产破碎过程中往往所需破碎达到的粒径越小, 其针片状指数差异越大, 这一点与实形矩体度是一致的。

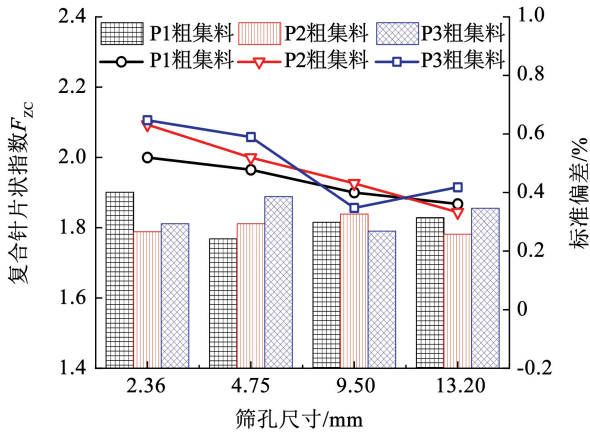


图 12 不同类型集料复合针片状指数对比

Fig. 12 Comparison of composite needle flakiness index of different types of coarse aggregates

3 集料颗粒三维纹理指数及其分布分析

在数学形态学图像处理领域, 腐蚀与膨胀是数学形态学中的基本算子之一, 进而有了开运算概念, 开运算一般通过先腐蚀后膨胀操作得到, 常用于图像处理中物体分割以及边缘检测, 一般对图像运行开运算后可以消除图像边缘部分模糊的像素点^[15]。因此利用开运算能使图像轮廓更加平滑。开运算处理前后 CT 断层对比见图 13。

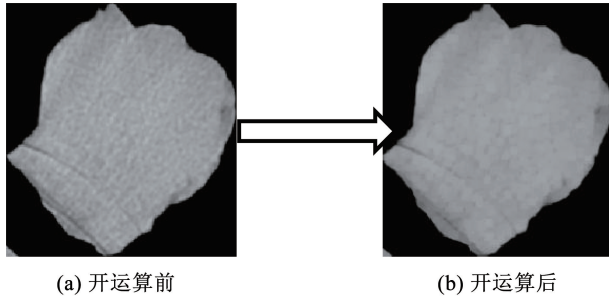


图 13 开运算前后集料颗粒图像对比

Fig. 13 Comparison of aggregate particle images before and after operation

依据现有对颗粒的纹理性研究发现^[15], 运行开运算后, 像素点的损失与颗粒表面的纹理性质为正相关关系。基于该关系, 引入三维纹理指数 W_{3D} :

$$W_{3D} = \frac{V_{3D} - V_{operation}}{V_{3D}} \times 100\% \quad (12)$$

式中: V_{3D} 为前文 3-matic 模拟的颗粒体积, $V_{operation}$ 为开运算后 3-matic 模拟的颗粒体积。

三维纹理指数可以评价颗粒表面的纹理丰富程度, 其值越大颗粒表面纹理越丰富, 即表面更粗糙。而集料颗粒形貌及表面粗糙度对黏附性能有一定的

影响^[16]。

3.1 不同粒径集料颗粒纹理特征对比

图 14 为不同粒径集料三维纹理指数分布。由图 14 可以发现, 3 种集料颗粒的三维纹理指数与粒径之间的相关关系接近, 整体基本服从幂律分布 ($W_{3D} = 80.75\delta^{-0.64}$); 从整体上来看, 随着粒径的增大, 集料颗粒的纹理指数经历了大致 3 个变化阶段, 在等效粒径为 2.30 ~ 6.00 mm 时, 三维纹理指数随着粒径的增大急剧下降, 除了 3 种集料小粒径颗粒的纹理更加丰富的事实外, 原因还可能是由于粒径过小, 出现数据失真; 在 6.00 ~ 11.50 mm 等效粒径时, 纹理指数的衰减趋势与幂律分布更加接近; 在 11.50 ~ 26.00 mm 时, 三维纹理指数的衰减趋势放缓, 逐渐趋于平稳。

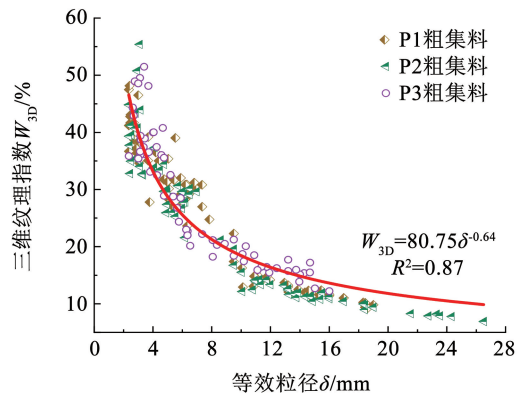


图 14 不同粒径集料三维纹理指数分布

Fig. 14 Distribution of three-dimensional texture index of aggregates with different particle sizes

3.2 不同类型集料颗粒纹理特征对比

对于不同类型的集料的纹理特征, 本节通过颗粒体积加权平均的方法定义复合纹理指数参数 W_{3DC} :

$$W_{3DC} = \frac{\sum_{i=1}^{n_t} V_i W_{3D(i)}}{\sum_{i=1}^{n_t} V_i} \quad (13)$$

式中 $W_{3D(i)}$ 为第 t 个粒径范围第 i 个颗粒的三维纹理指数。

不同类型的集料的复合纹理指数对比见图 15, 分析发现, 除 4.75 档 P3 集料在其他各档复合纹理指数明显大于 P1、P2 集料, 说明 P3 集料纹理更丰富; 从 3 种集料的三维纹理指数的标准偏差来看, P1 集料各档标准偏差更小, 说明 P1 集料各档颗粒纹理丰富程度较均匀。3 种集料纹理特征总体差异相对较小; 随着粒径的增大, 3 种集料的复合纹理指数变小。图 16 为同种粗集料不同粒径与复合纹理指数的拟合对比, 可见, 同种粗集料复合纹理指数与粒径之间整体基本服从幂律分布。例如, P1 粗集料复合纹理指数与粒径基本服从 $W_{3DC} = 66.49\delta^{-0.63}$, P2 粗集料复

合纹理指数与粒径基本服从 $W_{3DC} = 68.21\delta^{-0.67}$, P3 粗集料复合纹理指数与粒径基本服从 $W_{3DC} = 65.04\delta^{-0.61}$ 。

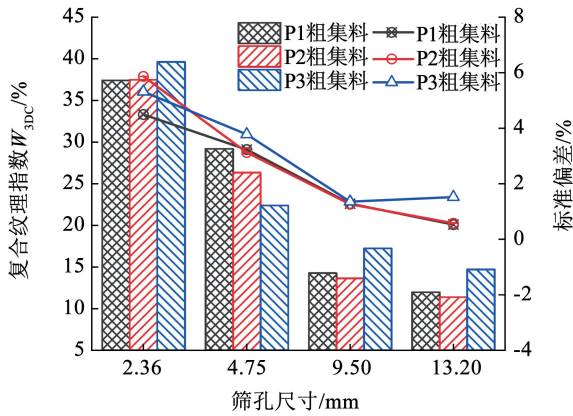
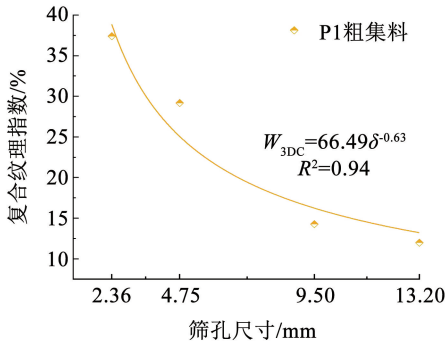
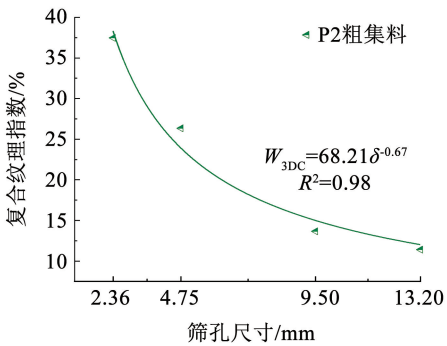


图 15 不同类型集料复合纹理指数对比

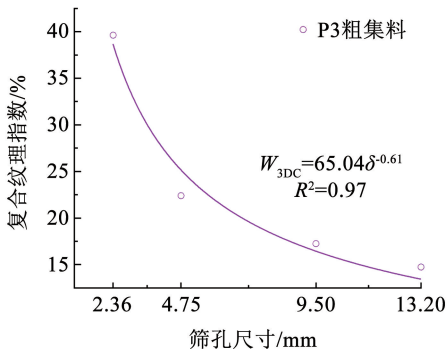
Fig. 15 Comparison of composite texture index of different types of coarse aggregates



(a) P1粗集料



(b) P2粗集料



(c) P3粗集料

图 16 同种粗集料不同粒径与复合纹理指数的拟合对比

Fig. 16 Comparison of fitting different particle sizes and composite texture index of the same coarse aggregate

4 集料颗粒三维棱角度及其分布分析

棱角特性是反映颗粒表面突起程度的指标。考虑到计算的难易程度,本次分析应用的三维等效椭球法^[17],该方法的计算核心为等效椭球与颗粒体积相等,尺寸长度比值与集料颗粒的最小外接长方体尺寸比值相同。用该方法评价颗粒的棱角特性,可排除颗粒表面纹理的影响,使用开运算处理后的颗粒图像进行模拟分析,引入三维棱角度参数 L_{3D} :

$$L_{3D} = \frac{A_{3D}}{A_{operation}} \times 100\% \quad (14)$$

式中: $A_{operation}$ 为开运算后 3-matic 模拟的颗粒等效椭球的表面积, A_{3D} 为开运算后 3-matic 模拟的颗粒表面积。

三维棱角度值越大,表面颗粒的棱角性表现越好。

4.1 不同粒径集料颗粒棱角特征对比

图 17 为不同粒径集料三维棱角指数分布。由图 17 发现,整体上 3 种集料的三维棱角度随粒径的增大由开始的变化幅度较大逐渐维持稳定到 1.2% ~ 1.3%;同时 3 种集料粒径为 2.30 ~ 8.00 mm 时棱角指数离散性十分显著,说明在粒径较小时,3 种集料颗粒的三维棱角度极差较大。

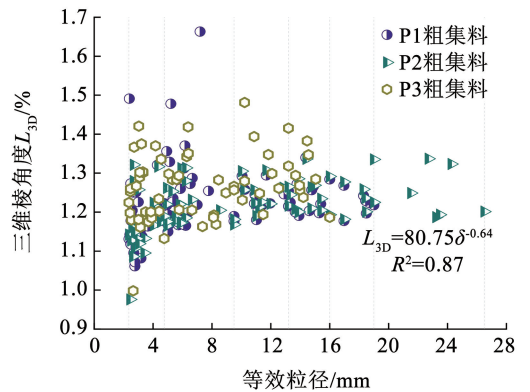


图 17 不同粒径集料三维棱角指数分布

Fig. 17 Distribution of three-dimensional corner index of aggregates with different particle sizes

4.2 不同类型集料颗粒棱角性对比

为了便于分析对比,本节通过颗粒体积加权平均的方法定义一个复合棱角度参数 L_{3DC} :

$$L_{3DC} = \frac{\sum_{i=1}^{n_t} V_i L_{3D(i)}}{\sum_{i=1}^{n_t} V_i} \quad (15)$$

式中 $L_{3D(i)}$ 为第 t 个粒径范围第 i 个颗粒的三维棱角度。

图 18 为不同类型集料复合棱角度对比。由图 18 发现,粒径不同的集料三维棱角度相差不大。P3 集料的复合棱角度在各档粒径范围都是最大的,说明其棱角性较 P1、P2 集料较优。但对比各档粒径范围内,P3 集料三维棱角度的标准偏差整体偏大,说明较其整体棱角度不稳定。P2 集料是棱角度其稳定性最优。随粒径增大,三维棱角度的标准偏差值均有变小的趋势。

5 集料颗粒三维形貌特征相关性分析

将 P1、P2 和 P3 集料中所有的 5 种形貌参数利用 SPSS 软件进行 Pearson 相关性分析。图 19 展示了 3 种集料 5 种形貌参数之间的相关性矩阵散点图。其中,散点部分为形貌参数的分布图,数字表示两个指标之间的 Pearson 相关系数。

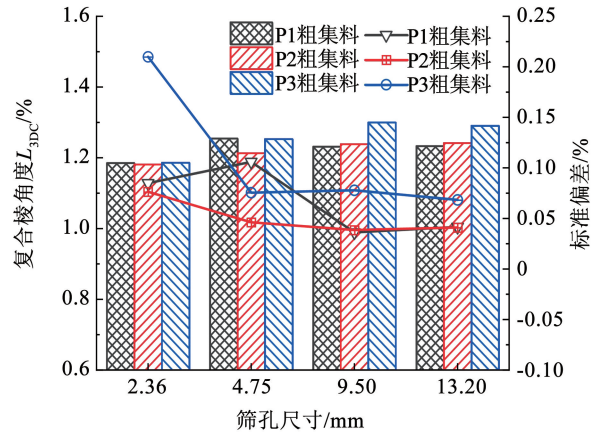


图 18 不同类型集料复合棱角度对比

Fig. 18 Comparison of composite edge angles of different types of coarse aggregates

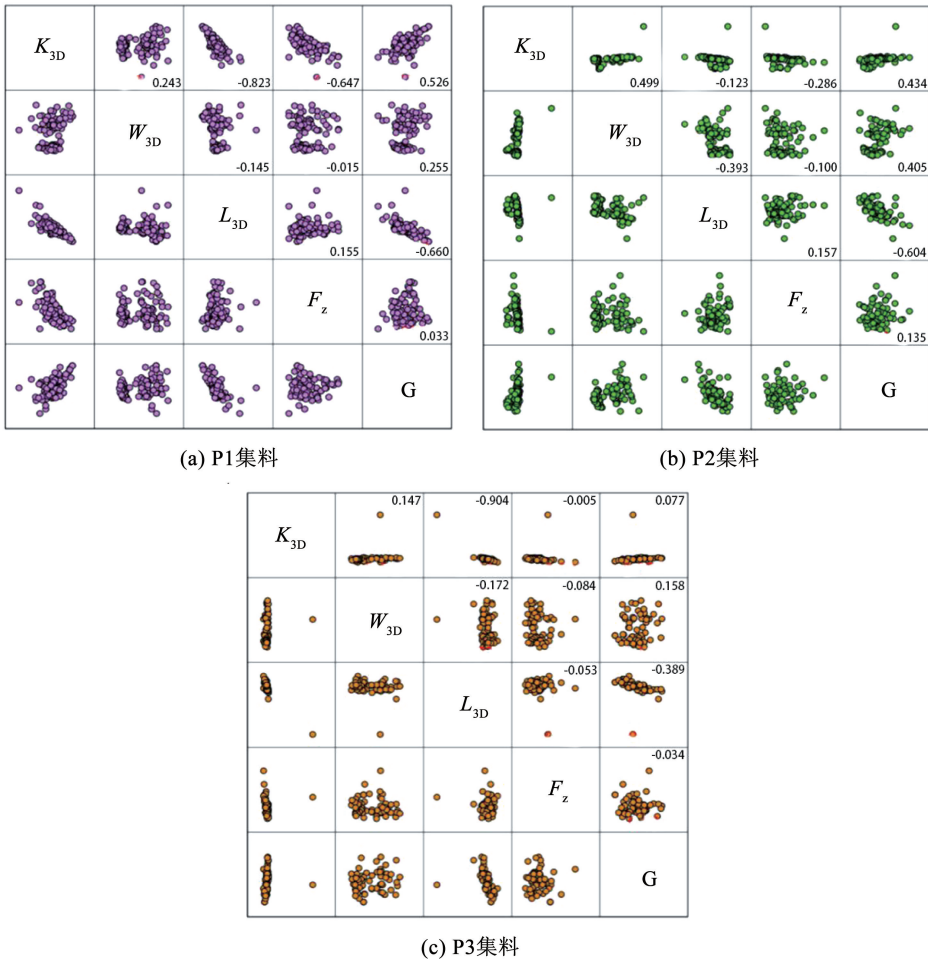


图 19 集料不同形貌参数的相关性分析

Fig. 19 Correlation analysis of different morphological parameters of coarse aggregate

由图 19 发现:实形矩体度 G 与三维棱角度 L_{3D} 、实形球形体 K_{3D} 与三维棱角度 L_{3D} 存在较强的负相关性;P1 和 P2 集料的实形球形体 K_{3D} 与三维纹理指数 W_{3D} 和三维针片状指数 F_z 间 Pearson 相关系数较大,其中,实形球形体 K_{3D} 与三维纹理指数 W_{3D} 存在

较强的正相关关系,而实形球形体 K_{3D} 与三维针片状指数 F_z 有一定的负相关关系。

6 结 论

1) 借助工业 CT 扫描、数值图像处理 and 三维几

何重构技术,设计一种适用于集料形貌特性收集、提取和重构的三维实形重构技术,重构模型与实测数据的表面积相对平均偏差在3%左右,体积相对平均偏差在1%左右,试验验证了技术的有效性和准确性。

2)应用构建的数字实形集料模型,利用基础形貌尺寸计算出所定义或引用的集料颗粒的实形矩体度 G 、实形球形度 K_{3D} 、三维针片状指数 F_z 、三维纹理指数 W_{3D} 、三维棱角度 L_{3D} 5种形貌参数,可全面地评价与比较不同的集料形貌特征。

3)同种集料不同粒径的三维针片状指数 F_z 和三维纹理指数 W_{3D} 相差不大,最大相差均小于0.1%;整体上,三维纹理指数 W_{3D} 与粒径服从幂律分布,最大相差达到25%,且同种粗集料复合纹理指数 W_{3DC} 与粒径之间也服从幂律分布。

4)各种形貌特征参数标准偏差整体上随着粒径的增大而减小,说明不同粒径范围的集料颗粒整体的形貌参数值随着粒径的增大离散性降低,复杂程度逐渐降低,形状整体更加趋于规整。因此,为了更好地实现质量控制,需关注细集料。

5)对于P1与P2集料,三维棱角度 L_{3D} 与实形矩体度 G 间存在较强的负相关性,相关系数最小为-0.660;对于P1与P3集料,实形球形度 K_{3D} 与三维棱角度 L_{3D} 有较强的负相关关系,相关系数最小为-0.904;对于P2集料,实形球形度 K_{3D} 与三维纹理指数 W_{3D} 存在一定的正相关关系。

参考文献

- [1] SAISAI Z, RUI L, PEI Jianzhong. Evaluation methods and indexes of morphological characteristics of coarse aggregates for road materials: a comprehensive review [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2019, 6(3): 256
- [2] GAO Junfeng, WANG Hainian, YIN Bu, et al. Effects of coarse aggregate angularity on the microstructure of asphalt mixture [J]. Construction and Building Materials, 2018, 183: 472. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.170
- [3] 袁正兵, 刘志胜, 王朝辉. 细集料沥青混合料的微观形貌及界面黏附性能[J]. 筑路机械与施工机械化, 2020, 37(6): 27
YUAN Zhengbing, LIU Zhisheng, WANG Chaohui. Micro-morphology and interface adhesion properties of fine-graded asphalt mixture [J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2020, 37(6): 27. DOI:1000-033X(2020)06-0026-07
- [4] PAN T, TUTUMLUER E, CARPENTER S H. Effect of coarse aggregate morphology on permanent deformation behavior of hot mix asphalt [J]. Journal of Transportation Engineering, 2006, 132(7): 580
- [5] 肖倩, 张蕾. 路用粗集料形态可视化识别及其评价方法综述 [J]. 公路交通科技, 2016, 33(5): 47
XIAO Qian, ZHANG Lei. A review of visual identification and evaluation of coarse aggregate of road pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(5): 47. DOI:10.3969/j.issn.1002-0268.016.05.008
- [6] 张磊. 集料级配及形貌对沥青混合料结构和性能的影响研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017
ZHANG Lei. Investigation about impacts of coarse aggregate gradation and morphology asphalt mixture structure and performance [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017
- [7] 陈国明, 周纯秀, 谭忆秋. 粗集料表面纹理的分形评定及沥青混合料性能试验 [J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(4): 2
CHEN Guoming, ZHOU Chunxiu, TAN Yiqiu. Fractal evaluation of surface texture for coarse aggregate and performance test of asphalt mixture [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(4): 2
- [8] 交通部公路科学研究所. 公路工程集料试验规程: JTG E42—2005 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2005
Highway Science Research Institute of the Ministry of Transport. Test methods of aggregate for highway engineering: JTG E42—2005 [S]. Beijing: China Communication Press, 2005
- [9] 李云梦. 道路集料三维形貌旋转扫描线结构光测量系统 [D]. 西安: 长安大学, 2022
LI Yunmeng. Road aggregate three-dimensional shape rotation scan line structure light measurement system [D]. Xi'an: Chang'an University, 2022
- [10] 纪伦, 李俊, 张磊, 等. 沥青混凝土中粗集料形貌特征分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(3): 62
JI Lun, LI Jun, ZHANG Lei, et al. Analysis of the morphology characteristics of coarse aggregate in asphalt concrete [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(3): 62. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201709105
- [11] 郑冬. 基于集料形貌特性的多孔沥青混合料空隙演变机理研究 [D]. 南京: 东南大学, 2021
ZHENG Dong. Research on evolution mechanism of pore structure in porous asphalt mixture based on aggregate morphological characteristics [D]. Nanjing: Southeast University, 2021
- [12] LIU Pengfei, HU Jing, WANG Dawei, et al. Modelling and evaluation of aggregate morphology on asphalt compression behavior [J]. Construction & Building Materials, 2017, 133: 196
- [13] 周建昆, 曾晟, 梁乃兴, 等. 基于数字图像处理技术的粗集料针片状评价与实例验证 [J]. 公路交通技术, 2021, 37(3): 7
ZHOU Jiankun, ZENG Sheng, LIANG Naixing, et al. Evaluation method and example verification of coarse aggregate needle and flake based on digital image technology [J]. Technology of Highway and Transport, 2021, 37(3): 7. DOI:10.13607/j.cnki.gjt.2021.03.008
- [14] 纪伦, 刘海权, 张磊, 等. 粗集料针片状含量对沥青混合料结构影响 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(9): 43
JI Lun, LIU Haiquan, ZHANG Lei, et al. Effects of flat and elongated particles content in coarse aggregate on asphalt mixture structure [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(9): 43. DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201706035
- [15] 曲元魁. 集料形貌对沥青混合料微观结构及力学特性的影响研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020
QU Yuankui. Study on the influence of aggregate morphology on the microstructure and mechanical properties of asphalt mixtures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020
- [16] 李杰, 刘春阳. 集料三维形貌特征对粘附性影响研究 [J]. 新型建筑材料, 2023, 50(6): 30
LI Jie, LIU Chunyang. Study on the effect of three-dimensional morphology of aggregate on adhesion [J]. New Building Materials, 2023, 50(6): 30
- [17] FONSECA J, OSULLIVAN C, COOP M R, et al. Non-invasive characterization of particle morphology of natural sands [J]. Soils and Foundations, 2012, 52(4): 712. DOI: 10.1016/j.sandf.2012.07.011