

DOI: 10.11779/CJGE2015S1023

砂土颗粒三维形状模拟离散元算法研究

张程林^{1,2}, 周小文¹

(1. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510641; 2. 广州市建筑科学研究院有限公司, 广东 广州 510440)

摘 要: 砂土颗粒形状对砂土宏观性质具有重要的影响。砂土颗粒形状的量化和构造是本文研究的主要内容。在离散元重叠颗粒族 ODEC (overlapping discrete element cluster) 方法的基础上提出了一种新的基于加权圆度的处理方法。首先是利用颗粒三视图提取二维圆度信息并对其进行加权平均, 得到反映颗粒三维形状特性的加权圆度; 然后在 Matlab 中创建具有指定加权圆度的三维凸包, 对凸包进行体素化和骨架化处理后提取颗粒的三维空间信息; 再利用 PFC^{3D} 重建具有指定形状的 clump 块体, 生成不同外轮廓特性的颗粒组, 以此模拟各种形状的砂土颗粒。

关键词: 颗粒形状; 加权圆度; 离散元法; 数值模拟

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2015)S1 - 0115 - 05

作者简介: 张程林(1983 -), 男, 博士, 主要从事桩基检测, 地基基础设计施工等。E-mail: zck9000@qq.com。

Algorithm for modelling three-dimensional shape of sand based on discrete element method

ZHANG Cheng-lin^{1,2}, ZHOU Xiao-wen¹

(1. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Guangzhou Institute of Building Science Co., Ltd., Guangzhou 510440, China)

Abstract: The mechanical properties and characteristics of sand are significantly affected by particle shape. This paper is mainly aimed to quantify and build the grain shape. A new method based on ODEC (overlapping discrete element cluster) method is proposed. Firstly, the two-dimensional roundness of a particle in three projection planes is extracted through photography, and the weighted average roundness is calculated. Then the weighted average roundness is employed of particles to generate particles with various irregular shapes in numerical model through Matlab code and clump block function of PFC^{3D}.

Key words: particle shape; weighted roundness; discrete element method; numerical simulation

0 引 言

砂土颗粒形状对砂砾土宏观性质如密实度、剪切特性, 压缩性及颗粒破碎特性等具有重要的影响, 砂土颗粒的形状量化和形状构造是研究的难点^[1-2]。近年来, 离散元方法在颗粒形状研究领域取得了重大进展, 如 2003 年 Ashmawy 等^[3]提出一种精确的二维颗粒块体方法 (ODEC, overlapping discrete element cluster) 来模拟实际砂颗粒的不规则形状。ODEC 技术的核心思路是在颗粒形状的轮廓内, 相互重叠一系列二维圆盘, 用最终得到的圆盘外轮廓代表颗粒的形状。其优点在于, 内置的颗粒块体算法允许对属于同一个颗粒块体内的圆盘之间的接触不参与迭代计算, 从而减小了计算量。Sallam 等^[4]利用 ODEC 技术模拟不规则形状的力学行为, 数值模拟结果与室内试验结果具有很好的吻合度。然而, 尽管利用 ODEC 技术研究堆积颗粒取得了众多成果, 但大部分模拟局限于二维建模, 对于三维技术应用则相对很少。相对于二维模拟, 三

维颗粒形状的模拟能更好的了解颗粒体自然现象的力学特性^[5-7]。由于图像的采集、海量信息的处理和三维颗粒的重建等技术难题尚未能很好解决, 使得三维颗粒模拟的广泛应用受到限制。

2005 年 Tian 等^[8]提出了一种基于三维形状骨架并通过开发 ODEC3D 算法模拟三维不规则颗粒形状的新方法。其主要思路是提取某个形状的骨架后, 沿着这些骨架点放置相互重叠的最大内切球, 当所有内切球的外表面能较好模拟出颗粒的形状时, 可将颗粒模拟成一个高仿真的块体^[9]。ODEC3D 技术的发展为三维颗粒形状模拟提供了一种新的研究手段。本文在前人的基础上, 引入颗粒形状加权圆度的概念, 采用 PFC Cluster 算法, 基于 ODEC3D 技术生成不规则的颗粒。其具体方法是: 首先是利用颗粒三视图提取二维圆度

基金项目: 亚热带建筑科学国家重点实验室自主研究项目 (2014ZA03)

收稿日期: 2015 - 03 - 26

信息并对其进行加权平均,得到反映颗粒三维形状特性的加权圆度;其次在 Matlab 中创建具有指定加权圆度的三维凸包,对凸包进行体素化和骨架化处理提取颗粒的三维空间信息;然后利用 PFC3D 重建具有指定形状量化指标的 clump 块体,生成不同外轮廓特性的颗粒组,利用生成的各种形状颗粒块体可进行砂土形状对宏观性质影响的研究工作。上述方法希望能为砂土数值研究提供一种新的颗粒形状模拟技术。

1 基于图像分析的量化颗粒形状

1932年 Wadell^[10]定义了颗粒圆度的概念,即与实际颗粒具有相同体积的球颗粒的表面积与实际颗粒的表面积之间的比值。当考虑二维情况时,圆度公式为

$$C = \frac{A_c}{A} = \frac{L^2}{4\pi A}, \quad (1)$$

式中, L 为二维形状轮廓周长, A 为面积, A_c 为与该形状具有相同周长的圆的面积。

对于三维颗粒,为确定其加权圆度,需要对颗粒进行3个角度(正视图,俯视图和侧视图)进行二维图形拍摄,并从二维图像中提取特征信息。计算采用的圆度由3个视图的平均加权圆度获得,如下式:

$$R = \frac{C_{\text{front}} \cdot A_{\text{front}} + C_{\text{side}} \cdot A_{\text{side}} + C_{\text{top}} \cdot A_{\text{top}}}{A_{\text{front}} + A_{\text{side}} + A_{\text{top}}}, \quad (2)$$

式中, R 为颗粒的加权圆度, C_{front} , C_{side} 和 C_{top} 分别为颗粒正面视图、侧面视图和顶面视图的二维圆度, A_{front} , A_{side} 和 A_{top} 分别为颗粒三视图的面积。

一般物体的加权圆度 R 的取值大于1或等于1,扁平形状的物体加权圆度比较大,而球状的加权圆度则为1。

本次研究利用 Matlab 软件进行二维图像分析。选取5个粒径为10 mm左右的风化砂颗粒作为研究对象。图1为风化砂在RGB图像类型下的三视图,图2是由图1经过转换、去噪、填充等处理后得到的二值图像。显然,一幅二值图像是一幅数字图像,也是一组取值只有0和1的逻辑数组。在图像中对象使用的颜色为前景颜色,而其余的对象则采用背景颜色。因此,可以根据二值图像的对象面积估计图像中像素的总数,进而推求各视图面积。在二进制中,计算物体的周长使用 Koplowitz 等^[11]的算法得到,最后通过加权圆度式(1)、(2)得到各组颗粒的加权圆度。

图1,2所示风化砂的RGB图像中,经过三视图计算得出5个颗粒的加权圆度分别为1.3745,1.1744,1.1717,1.2694和1.2544,算术平均加权圆度为1.2489。

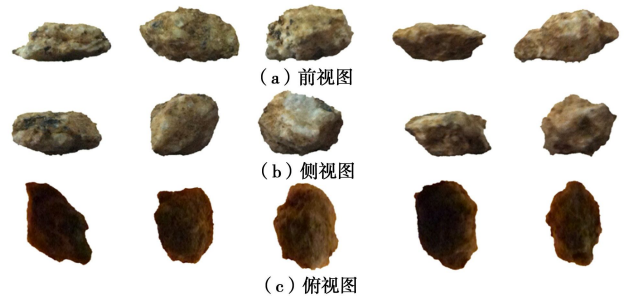


图1 风化砂的RGB图像

Fig. 1 RGB images of weathered sand

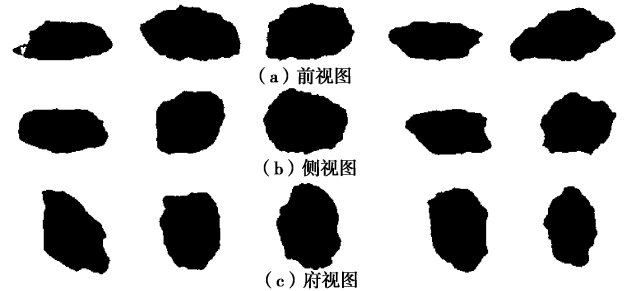


图2 风化砂的二值图像

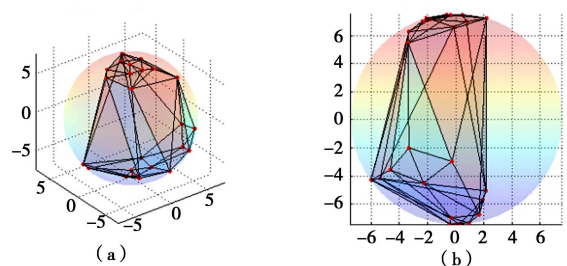
Fig. 2 Binary images of weathered sand

2 不规则形状颗粒的生成

对于不规则形状颗粒的生成与构建,使用 Matlab 软件对不同加权圆度的颗粒进行重构,生成的三维对象能较真实反映出土颗粒的特征,然后再通过骨架化方法和 ODEC3D 算法来实现不规则颗粒形状的模拟。

2.1 三维对象的生成

在获取风化砂的形状指标 R (加权圆度)后,利用 Matlab 随机生成具有特定指标范围的凸包来代表颗粒实体。所谓凸包,在数学的角度上解释为已知空间中的若干个点,确定包含这些已知点的最小凸多面体。首先在直径为 d 的球体表面生成 N 个随机点,球体半径 r 的确定依据实际颗粒料的大小,然后由这 N 个随机点连接成一个凸包。 N 个随机点重复生成,直至其构成的凸包满足加权圆度范围为止。颗粒形状的加权圆度由对应的三个视角的二维图像计算得出,如图3所示。



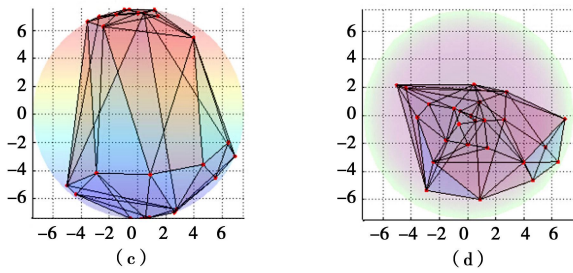


图 3 不规则形状颗粒及其三视图

Fig. 3 Irregularly shaped particle and three views

2.2 三维对象的骨架化和体素化

骨架是表示物体的一种自然形式, 三维模型的骨架可以看成是由物体中所有最大内接球中心所在位置点构成^[9]。三维形状的骨架化是提取形状信息的有效方法。对颗粒进行骨架化能获得骨架点的坐标位置及该点处最大内接球半径。根据骨架点的坐标、半径信息, 以骨架点为球心生成一系列相互重叠的球颗粒, 则最终所有球颗粒外表面轮廓代表了颗粒的形状轮廓。

在进行三维形状模型骨架提取前, 需要首先获取模型的体素信息。体素 (voxel) 是形态学中描述几何图元的最小基本单元。在本文中体素可以理解为二维像素在三维空间的推广, 是一组分布在正交网格中心的立方体单元。根据骨架算法剔除非骨架点的体素, 则剩下的体素就代表了该模型的骨架信息, 同时根据体素的相互位置关系可推出骨架在空间的坐标关系。由此推得, 体素化 (voxelization) 是将物体表面的几何表示形式转换成最接近该物体的体素表示形式, 同时产生体素数据集 (volume datasets)。这个体素数据集不仅包含模型的表面信息, 而且能描述模型的内部属性, 体素化后如图 4 所示。

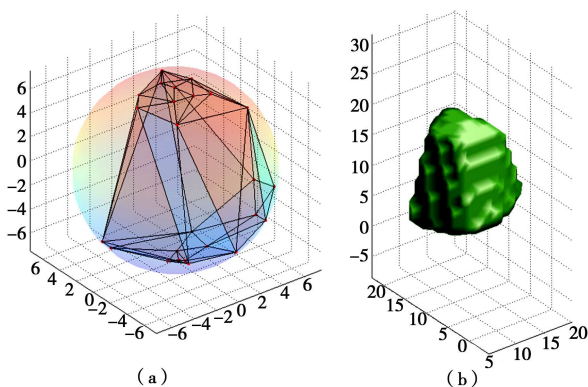


图 4 三维凸包体素化图

Fig. 4 3D object and corresponding voxels

在 Matlab 中对三维物体形状进行体素化后, 可以获得每个体素点的三维坐标。选取形心体素点作为第一个开始检测骨架的起点, 并把该体素点到所有表面体素点的最小距离记为 D_{min} , 对处于 D_{min} 和 D_{min+1} 距

离位置的表面体素点进行标记。如果标记的体素点是非连续的, 则处于形心处的体素点为骨架点; 如果是连续的, 则继续遍历该体素点的 26 个邻域点, 直到检测到第一个骨架点, 然后对当前骨架点的 26 邻域依次重复上述过程来检测是否为骨架点。当骨架点的一个分支到达边界或达到给定的阈值时, 则继续对其他的骨架分支进行检测, 直到所有骨架被提取出来为止。生成的体素体中, 最大内切球的半径和球心坐标都能较易获取。根据上述步骤, 使用骨架化算法获得的三维骨架如图 5 中所示。

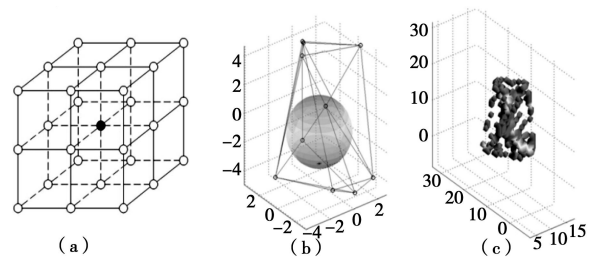


图 5 基于最大内切球的三维骨架提取

Fig. 5 Skeleton extraction based on maximally inscribed spheres

2.3 生成 Clump 单元

提取出三维凸包的骨架点后, 利用 PFC3D 中的 clump (集群) 块体生成技术在每个骨架点处覆盖最大内切球, 则所有内切球的外轮廓代表了凸包的形状。为了减少 clump 中相互重叠的球体数量, 需首先放置半径最大的内接球来覆盖尽可能大的体积, 而下一个内切球需尽可能覆盖上一个内切球没有覆盖的空间区域, 如此不断重复直到达到一个可接受的空间覆盖率。ODEC 算法的示意图如图 6 所示, 而图 7 则是通过 ODEC 技术获得的模拟颗粒, 图 8 则为形状颗粒生成的整个流程图。

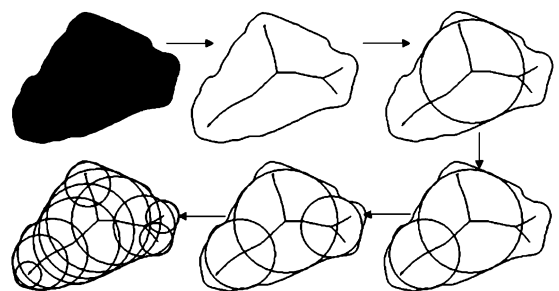


图 6 ODEC 算法示意图

Fig. 6 ODEC algorithm

为更好的说明该算法的可行性, 现对不同加权圆度的块体重建进行列举, 见图 9~11。

从图 9~11 可以看出, 随着加权圆度的增大, 颗粒形状逐渐扁平。在砂土颗粒的形状构造中, 通过拍照、图像处理获得砂土颗粒加权圆度指标后, 便可随机构

造出指定加权圆度范围内的离散元块体，从一定程度上反映砂土颗粒的形状特性。

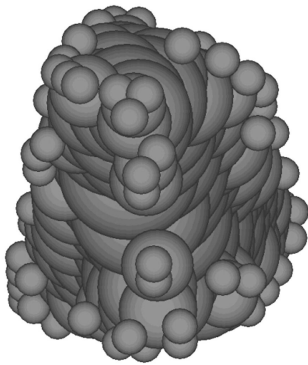


图 7 相互重叠的离散单元块体图

Fig. 7 Overlapping discrete element cluster for 3D object

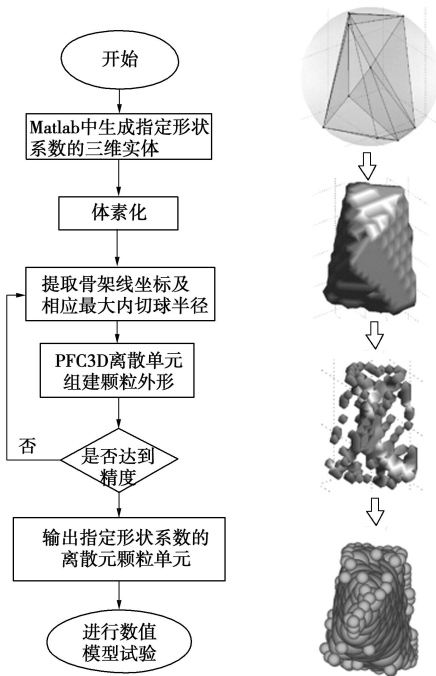


图 8 形状颗粒生成流程图

Fig. 8 Flow chart of generating of particles

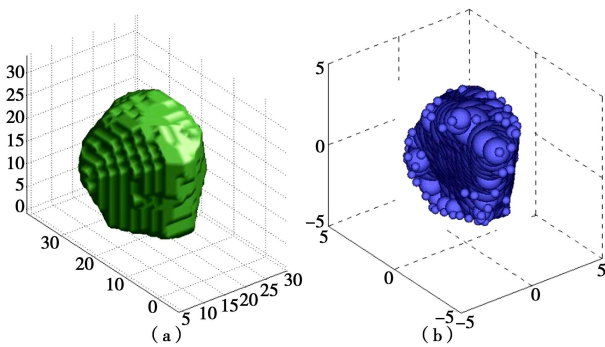


图 9 加权圆度 1.1~1.2 的体素化块体和 clump 块体

Fig. 9 Voxels and clump under weighted roundness of 1.1~1.2

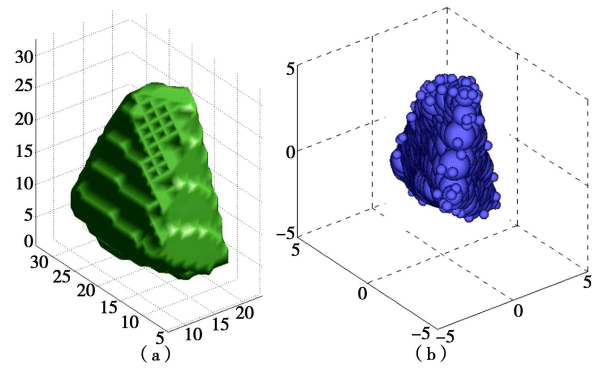


图 10 加权圆度为 1.2~1.4 的体素化块体和 clump 块体

Fig. 10 Voxels and clump under weighted roundness of 1.2~1.4

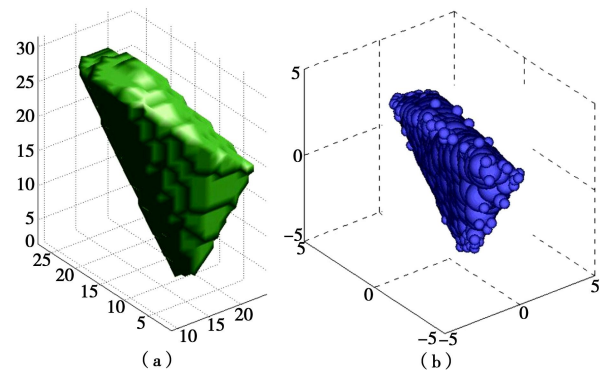


图 11 加权圆度为 1.4~1.6 的体素化块体和 clump 块体

Fig. 11 Voxels and clump under weighted roundness of 1.4~1.6

3 结论与建议

本文采用 PFC 中的 Cluster 技术，基于颗粒的二维视图图像，根据颗粒加权圆度对颗粒形状进行特征量化，通过 ODEC3D 算法中体素化和骨架化技术，实现了对三维不规则颗粒形状的模拟。在进行砂土颗粒的细观模拟研究中，可采用本文提出的形状量化参数和形状构造方法，得到较为真实的反映砂土形状特性的细观模型，为离散元研究砂土颗粒宏观特性提供良好的基础。

仍应注意到，本文提出的加权圆度仅是反映颗粒形状的一个指标，同时限于计算机软硬件技术，模拟的颗粒形状仅是根据某一特定加权圆度生成的随机形状，并不是真实砂土颗粒形状的精细逼近，但从理论上，获取完备的砂土颗粒形状三维空间信息后（如采用 CT 扫描），本文提供的思路可以实现真实砂土颗粒形状的精细模拟。

ODEC3D 算法的发展在当前岩土工程领域的研究中被认为是一种突破性发展，其对三维离散单元法的应用具有重大意义。受计算容量的限制，还难以展开大规模的精细形状颗粒试验研究，但相信硬件技术的发展，这一状况有望得到较快的改善。

参考文献:

- [1] 刘清秉, 项 伟, BUDHU M, 等. 砂土颗粒形状量化及其对力学指标的影响分析[J]. 岩土力学, 2011, **32**(增刊 1). (LIU Qing-bing, XIANG Wei, BUDHU M, et al. Study of particle shape quantification and effect on mechanical property of sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(S1). (in Chinese))
- [2] 孔 亮, 彭 仁. 颗粒形状对类砂土力学性质影响的颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(10): 2112 - 2119. (KONG Liang, PENG Ren. Particle flow simulation of influence of particle shape on mechanical properties of quasi-sand[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(10): 2112 - 2119. (in Chinese))
- [3] ASHMAWY A K, SUKUMARAN B, HOANG A V. Evaluating the influence of particle shape on liquefaction behavior using discrete element method[C]// Proceeding of the Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. Hawaii, 2003: 542 - 549.
- [4] SALLAM A M. Studies on modeling angular soil particles using the discrete element method tampa[D]. Florida: University of South Florida, 2004.
- [5] GHABOUSSI J, BARBOSA R. Three-dimensional discrete element method for granular materials[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1990(14): 451 - 472.
- [6] LIN X, NG T T. A three-dimensional discrete element model using arrays of ellipsoids[J]. Géotechnique, 1997, **47**(2): 319 - 329.
- [7] MATSUSHIMA T. 3-D image-based discrete element modeling for irregularly-shaped grains[C]// 2nd International PFC Symposium. Kyoto, 2004.
- [8] TIAN X, HAN G, LI Z, et al. 3D skeletonization and its application in plant root image analysis[J]. Journal of Computational Information Systems, 2005, **1**(2): 241 - 246.
- [9] YI Dingrong, VINCENT H. Skeletonization of volumetric angiorams for display[J]. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 2002, **5**(5): 329 - 341.
- [10] WADELL H. shape & roundness of rock particles[J]. The Journal of Geology, 1932, **40**(5): 443 - 451.
- [11] KOPLOWITZ J, BRUCKSTEIN A M. Design of perimeter estimators for digitized planar shapes[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, **11**(6): 611 - 622.

(本文责编 黄贤沙)