

DOI: 10.11779/CJGE201707014

# 不规则颗粒及其集合体三维离散元建模方法的改进

金 磊<sup>1, 2</sup>, 曾亚武<sup>\*1</sup>, 叶 阳<sup>1</sup>, 李晶晶<sup>3</sup>

(1. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉轻工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430023;  
3. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘 要:** 以土石混合物中的不规则块石和含石量为 40% 的土石混合体室内大三轴试样为例, 研究了如何针对当前岩土材料建模方法的不足进行改进以建立尽可能真实的不规则颗粒及其集合体的三维离散元模型。为了模拟块石的真实形态特征, 明确了块石几何模型建模方法的控制参数及其确定方法, 建立了与真实块石球度相同、棱角度相似的三维半真实离散元模型。为了计算模型的体积以用于模型密度优化及颗粒集合体孔隙率的计算, 提出了一种三维离散元模型虚拟切片技术, 结合数字图像处理技术可快速准确计算块石三维半真实离散元模型的体积。为了使得土石混合体大三轴试样三维离散元模型的密实度与室内试样保持一致并兼顾建模效率, 提出了基于拟振动压实法和分层复制法的土石混合体大三轴试样三维离散元建模方法。研究表明: 所提出的不规则块石几何模型建模方法控制参数较少且可分别对球度和棱角度进行单独控制; 当块石离散元模型填充球体数较少时, 其体积与对应几何模型体积相差较大, 不能直接采用对应几何模型的体积; 所建立的土石混合体数值试样与室内试样的微观结构特征基本相同, 即块石随机散布于土体基质中。

**关键词:** 不规则颗粒; 颗粒集合体; 三维离散元建模; 土石混合体; 半真实离散元模型; 虚拟切片技术

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2017)07 - 1273 - 09

**作者简介:** 金 磊(1989 - ), 男, 博士, 讲师, 主要从事复杂岩土体三维颗粒离散元建模及其变形破坏机理等方面的研究。E-mail: whujinlei@whu.edu.cn。

## Improving three-dimensional DEM modeling methods for irregularly shaped particles and their assembly

JIN Lei<sup>1, 2</sup>, ZENG Ya-wu<sup>1</sup>, YE Yang<sup>1</sup>, LI Jing-jing<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Based on the irregularly shaped rock blocks in soil-rock mixture (SRM) and the large-scale triaxial specimens of SRM with rock block proportion of 40% prepared indoor, this study aims at constructing three-dimensional DEM models for the irregularly shaped particles and their assembly as realistic as possible by improving the current modeling methods. To simulate the morphological characteristics of rock blocks, the controlling parameters of the proposed modeling methods for the geometric model for rock blocks and their evaluation methods are identified, and then the three-dimensional semi-real-shaped DEM models of rock blocks with identical sphericity and similar angularity are constructed. To obtain the volume of the rock block model for subsequent density optimization of rock block model and porosity calculation of particle assembly, a virtual slicing technique for three-dimensional DEM model is developed and adopted to evaluate the volume of the semi-real-shaped DEM models for rock blocks in combination with the digital image processing (DIP) technique. To efficiently build a SRM model whose relative density is consistent with the corresponding experimental specimens, a three-dimensional DEM modeling method for the large-scale triaxial specimens of SRM based on the quasi vibration and the compaction method and layered duplication method is proposed. The results show that the required sphericity and angularity can be simulated readily with fewer controlling parameters of the proposed modeling method for geometric model of rock blocks. When a rock block DEM model composed of a small number of packing spheres, a great deviation in the volume from the corresponding geometric model occurs. The numerical and experimental SRM specimens share a common mesoscopic structural characteristic that the

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41272342)

收稿日期: 2016 - 03 - 31

\*通讯作者 (E-mail: zengyw@whu.edu.cn)

rock blocks randomly scatter in the soil matrix.

**Key words:** irregularly shaped particle; particle assembly; three-dimensional DEM modeling method; soil-rock mixture; semi-real-shaped DEM model; virtual slicing technique

## 0 引言

颗粒离散单元法 (DEM) 已成为研究岩土等散粒体材料力学特性的重要手段之一, 在岩石、土体、铁路道砟及土石混合体等岩土工程领域有着广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。采用颗粒离散单元法进行数值模拟和力学分析的第一步也是最关键的一步就是要建立尽可能真实的岩土颗粒及其集合体的离散元模型。

岩土材料的宏观力学行为取决于微细观水平上颗粒之间的相互作用, 而颗粒形状是影响颗粒间相互作用的一个非常重要的因素。因此, 在颗粒离散元数值模拟中应尽可能考虑岩土颗粒的真实形状特征。经典的球体颗粒模型由于接触搜索简单而得到广泛运用, 著名的颗粒离散元商业软件 PFC<sup>2D/3D</sup> 即是采用了圆盘/圆球颗粒单元<sup>[5]</sup>。但球体颗粒与真实岩土颗粒形状相差甚远, 颗粒间因无法形成抗转动力矩, 在力学过程中极易发生过度旋转, 导致模型抗剪强度过低。为此, 许多学者提出不同的方法对此进行改进, 主要分为两种: ① 抗转动模型; ② 非球颗粒模型。Iwashita 等<sup>[6]</sup>采用方法①来限制颗粒间的转动, 但该方法存在抗转动模型中参数难以确定等问题。更多的学者则试图采用方法②来直接模拟颗粒的凹凸等不规则形态特征及由此产生的颗粒间相互嵌入、咬合作用。

在方法②中, 早期研究使用较多的是椭圆或椭球颗粒模型<sup>[7]</sup>。近十年来, 逐步发展了两个球体、三个球体等若干球体按一定几何规则排列组成的非球颗粒模型<sup>[8-12]</sup>, 这种方法也是目前模拟颗粒形状的主要方法。然而, 这些颗粒模型与真实岩土颗粒形状差异仍较大, 文献[12]中也指出采用少数球体规则排列形成的团颗粒 (Clump) 仍未能达到道砟室内三轴试验的抗剪强度。Lu 等<sup>[3]</sup>提出了一个简单的道砟不规则团颗粒模型生成算法并通过道砟模型箱试验说明了在离散元分析中模拟道砟颗粒形状的重要性, 但该算法中的控制参数难以根据实际情况确定。Stahl 等<sup>[13]</sup>测量了室内试验所用碎石的三向尺寸 (长、宽、高) 并采用长宽之比作为颗粒形状系数, 建立了考虑碎石真实长宽比的团颗粒模型。金磊等<sup>[14]</sup>进一步提出了一种不规则块石三维离散元模型生成技术, 但并未与真实块石进行对比建模。

关于颗粒集合体的建模方法大致可分为 4 种: ① 纯几何法; ② 自重沉积法<sup>[2, 8, 14]</sup>; ③ 膨胀法<sup>[1, 4, 9, 10, 11]</sup>; ④ 其他方法<sup>[15]</sup>。第 4 种方法是指不同学者根据各自需要对前 3 种方法进行的一些改进, 如 Jiang 等<sup>[15]</sup>提

出的针对二维圆盘颗粒集合体的分层欠压法等。很显然, 纯几何法、膨胀法和分层欠压法对于简单的圆盘或球体等颗粒模型是适用的, 但对于复杂的不规则颗粒模型则难以运用。这时, 将不得不采用自重沉积法, 通常的做法是直接将所有颗粒在较高空间中生成后统一下落堆积产生颗粒集合体。这种做法主要有 4 点缺陷: ① 与室内三轴试验等制样程序有一定差别, 不便进行室内试验的数值模拟与对比; ② 无法生成特定密实度的颗粒集合体; ③ 对于大型模型如大型三轴试样很耗时; ④ 生成的颗粒集合体存在非均质性 (上疏下密) 和各向异性 (颗粒长轴趋向于水平方向)。

从上述分析可以看到, 尽管国内外学者对不规则颗粒及其集合体的离散元建模提出了许多方法并在多种岩土材料研究中进行了应用, 但已有建模方法仍存在若干亟待解决的问题。为此, 本文以土石混合体 (soil-rock mixture, 简称 SRM) 中的块石和含石量为 40% 的土石混合体室内大三轴试样为例, 在笔者已开发的不规则块石及土石混合体大三轴试样三维离散元建模方法<sup>[14]</sup>的基础上针对其不足进行改进, 以建立一套既能反映室内试验条件又适合当前离散元计算能力的不规则颗粒及其集合体三维离散元建模方法。

## 1 室内试验概况

### 1.1 块石三向尺寸

试验所用土料为采自金沙江乌东德水电站下游金坪子滑坡某处的碎石土, 其中的碎石主要为白云岩, 呈灰白色, 致密坚硬, 棱角较分明。为了后续碎石的三维离散元建模, 在 20~40 mm 和 40~60 mm 粒径范围内各取 200 个不规则碎石并对三向尺寸进行了测量, 如图 1 所示。三向尺寸具体是指颗粒的长、宽和高, 其中颗粒的长 ( $L$ ) 定义为颗粒的最大尺寸; 宽 ( $W$ ) 定义为与长垂直的平面上的最大尺寸; 高 ( $H$ ) 则定义为与长、宽垂直的平面上的最大尺寸。理论上, 颗粒的宽等于由筛分试验所得的粒径<sup>[13]</sup>。



图 1 40~60 mm 碎石三向尺寸测量

Fig. 1 Size measurement for gravels of 40~60 mm

颗粒长与高的比值 ( $L/H$ ) 一定程度上反映了颗粒三向尺寸间的差异, 即球度特征。图 2 给出了 40~60 mm 碎石  $L/H$  的统计直方图并利用对数正态分布函数进行了拟合。可以看到, 40~60 mm 粒组碎石的  $L/H$  值近似服从对数正态分布。采用同样的分析方法可得 20~40 mm 粒组碎石的  $L/H$  值也近似服从对数正态分布。

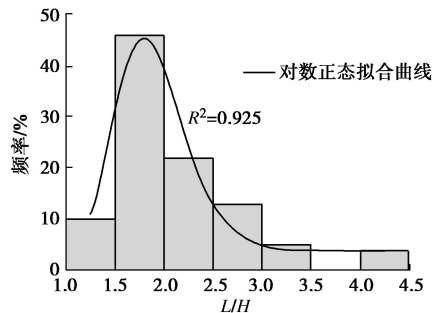


图 2 40~60 mm 碎石  $L/H$  值的统计直方图

Fig. 2 Histogram of  $L/H$  of gravels of 40~60 mm

## 1.2 室内大三轴试样

试验仪器为长江科学院 YLSZ30-3 型应力式大型三轴试验机, 试样直径为 300 mm, 高度为 600 mm。根据 Xu 等<sup>[16]</sup>建议的土/石阈值计算公式将本文的土/石阈值定为 20 mm, 结合试样尺寸所允许的最大粒径, 本文研究中所指的“块石”表示粒径为 20~60 mm 的碎石, 粒径小于 20 mm 部分为“土体”。块石质量与块石和土体总质量的比值即为含石量 (mass block proportion, 简称 MBP)。室内试验中分别制备了含石量为 0, 40% 和 70% 的土石混合体试样, 各自的颗粒级配曲线如图 3。

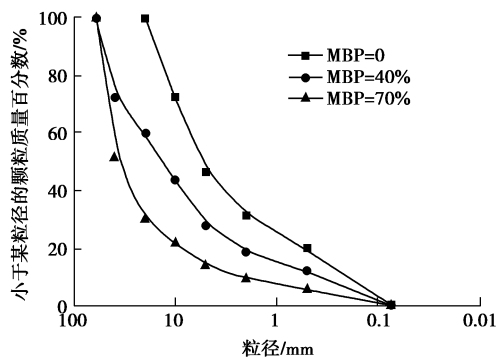


图 3 土石混合体试样颗粒级配曲线

Fig. 3 Grading curves of SRM specimens

制样前对各级配土料进行最小和最大干密度试验, 制样时由相对密度为 0.5 来控制, 由此得到含石量为 0, 40% 和 70% 的土石混合体大三轴试样控制干密度分别为 2.161, 2.176 和 2.066 g/cm<sup>3</sup>。制样时, 首先按照确定的配比将各粒组土料掺和, 搅拌均匀,

分 4 层装入制样筒并击实至预定密度。试样击实后采用真空饱和, 固结后进行排水剪切试验, 剪切速率为 0.45 mm/min。本文旨在研究室内试验中所用不规则块石及土石混合体试样的三维离散元建模方法, 具体室内试验结果将另文研究。

## 2 块石数值模型

### 2.1 块石几何模型

文献[14]从不规则颗粒 3 个尺度的形态特征即球度、棱角度 (或凹凸度) 及表面粗糙度出发提出了一种基于 APDL (ANSYS 参数化设计语言) 的不规则块石几何模型建模新技术, 但其在具体建模时球度和棱角度控制参数都是随机的。本文根据第 1 节中室内块石三向尺寸的测量结果及其棱角特征将该技术进行适当改进以明确该建模方法的控制参数及其确定方法, 具体步骤包括:

#### (1) 一定球度的基面

根据所测量块石的长、宽和高 ( $L, W, H$ ) 建立一个中心在笛卡尔坐标系原点的长方体, 其长、宽、高分别与  $x, y, z$  轴相平行。删除长方体, 但保留组成长方体的 6 个面, 这 6 个面即组成了规定球度的基面。

#### (2) 一定棱角度 (凹凸度) 的表面

将步骤 (1) 获得的基面划分网格, 单元形状选择三角形壳单元, 单元尺寸由各边的分段数  $N_d$  确定,  $N_d$  越大, 则单元数越多。  $N_d$  可根据颗粒表面棱角 (凹凸) 点数量近似确定, 如较少 (4 个左右) 则可将各边的分段个数设为 1, 以此类推。划分网格后记录各三角形面单元的组成节点信息, 得到各个节点的球坐标, 然后对各节点球坐标中的第一个分量  $r$  (该节点到原点的距离) 进行随机比例的缩放变换, 用公式可以表示为

$$\gamma = r * \text{RAND}(S_l, S_u) \quad (1)$$

式中,  $S_l$  为缩放比例值的下限,  $S_u$  为缩放比例值的上限。根据记录的三角形面单元与其组成节点的关系及变换后的新节点坐标重新生成面, 即可得到一定棱角度的表面。

#### (3) 不规则几何模型

由步骤 (2) 获得的表面所围成的空间建立不规则几何体模型, 将单元类型改为四面体单元, 对生成的几何体进行体网格划分, 即可得到满足后续离散元建模要求的几何模型。

通过上述步骤可以看出该建模方法对不规则颗粒几何模型的控制参数有 6 个:  $L, W, H, N_d, S_l, S_u$ 。其中,  $L, W, H$  组合可控制颗粒的球度特征,  $N_d, S_l,$

$S_u$  组合可控制颗粒的棱角度（凹凸度）特征。图 4 示出了几何模型控制参数变化时的颗粒形态特征，各子图的图名含义为这个 6 个控制参数的取值，如图 4(a) 名 60-60-60-2-0.8-1.2 表示颗粒的长  $L$  为 60，宽  $W$  为 60，高  $H$  为 60，基面划分网格时各边等分数  $N_d$  为 2，节点球坐标第一分量的缩放比例下限值  $S_l$  为 0.8，上限值  $S_u$  为 1.2。

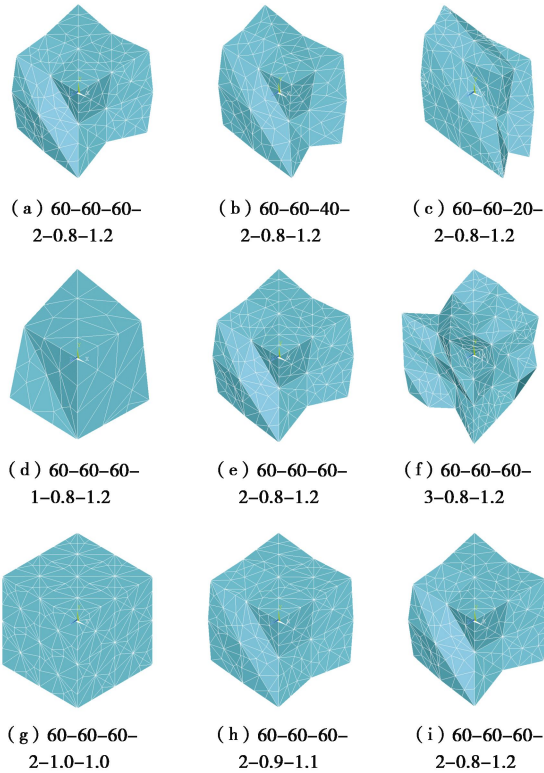


图 4 几何模型控制参数变化时颗粒形态特征

Fig. 4 Particle morphology with varying controlling parameters of geometrical model

从图 4 (a) ~ (c) 可以看到，当其他控制参数保持不变时，随着  $H$  的减小，颗粒三向尺寸差异变大，球度减小，而棱角度保持不变。因此， $L, W, H$  组合可有效控制颗粒的球度特征且不影响棱角度特征。从图 4 (d) ~ (f) 和图 4 (g) ~ (i) 可以看到，当其他控制参数保持不变时，随着  $N_d$  的增加，颗粒表面凹凸点逐渐变多；随着  $(S_l, S_u)$  范围的增大，颗粒表面凹凸程度逐渐增加。因此， $N_d, S_l, S_u$  组合可有效控制颗粒的棱角度（凹凸度）特征且不影响球度特征。

接下来就说明如何应用上述建模方法建立室内所测量天然块石的几何模型。以某一个块石为例，其长、宽、高分别为 75.1, 58.0, 49.8 mm，由此可按步骤 (1) 建立该球度的基面，如图 5 (a) 所示。对于步骤 (2) 中的控制参数  $N_d, S_l$  和  $S_u$  则不易直接测量，为简单起见，本文采用的方法是根据实际块石的棱角特征经过试算对比确定，此处分别为 2, 0.8 和 1.2，如图 5

(b) 所示。将图 5 (b) 与图 1 中的碎石形态对比可以看到，几何模型的棱角（凹凸）特征与天然碎石颇为相似。

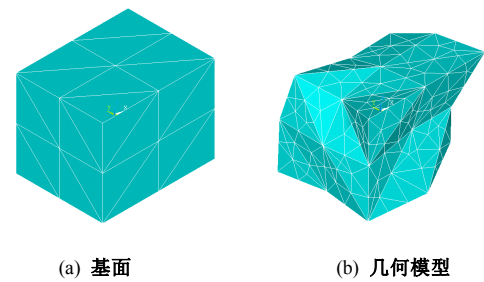


图 5 典型不规则块石几何模型

Fig. 5 Typical geometrical model for irregularly shaped rock block

从上述不规则颗粒几何模型建模方法和应用实例可以看到，该建模方法较之其他方法<sup>[3, 13]</sup>原理更简单，控制参数较少且可分别对球度和棱角度进行单独控制，易于实现且效果较好。

### 2.2 块石离散元模型

不规则颗粒几何模型需进一步转化为离散元模型才能用于颗粒离散元计算分析，这可以利用不规则颗粒三维离散元精细模拟技术实现，具体可参考文献 [17]。在转化为离散元模型时可由最小球体半径  $R_{lim}$  和有效空间系数  $K$  来对填充球体的数量进行优化，以节省计算资源。图 6 示出了图 5 (b) 对应的不同填充球体数的块石离散元模型，其中图 6 (a) 模型生成时  $R_{lim}$  设为 2 mm、 $K$  设为 1.15，模型由 344 个球体组成；图 6 (b) 模型生成时  $R_{lim}$  设为 5 mm， $K$  设为 1.3，模型由 93 个球体组成；图 6 (c) 模型生成时  $R_{lim}$  设为 7 mm， $K$  设为 1.3，模型由 47 个球体组成。可以看到，填充球体数越多，颗粒形态尤其是边角越接近于几何模型。

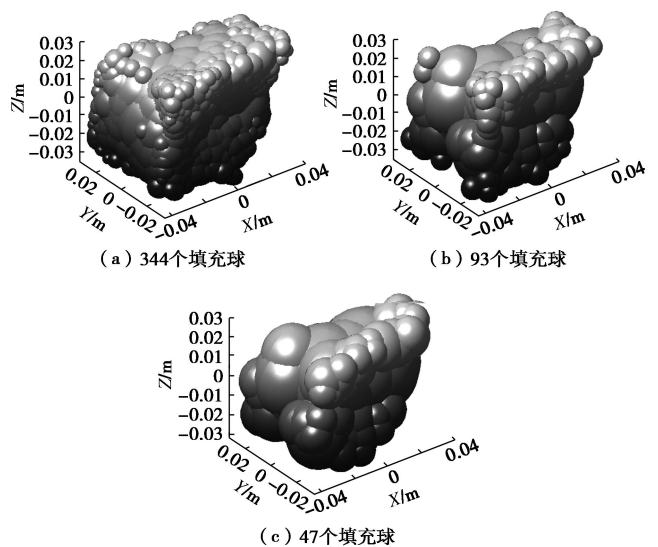


图 6 典型不规则块石离散元模型

Fig. 6 Typical DEM models for rock block

当离散元模型中总的颗粒数量超过 10 万个计算效率就会很低, 尤其是动力过程的计算 (如自重沉积法制样)。考虑到计算效率, 单个块石的填充球体数宜较少, 如图 6 (c) 所示模型, 尽管填充球体数较少, 但模型球度仍与实际块石一致, 边角虽有所损失, 但总体上还是比较接近于真实颗粒形状的。因此, 本文将这种与真实块石颗粒相比球度相同, 棱角度相似的模型称为块石半真实离散元模型。实际上, 正如文献 [3] 所指出的, 这种三维半真实离散元模型已能较好地模拟颗粒材料宏观力学特性和微细观颗粒运动规律。

文献 [3, 13, 14] 都指出所建立的块石离散元模型需要进行密度优化并给出了考虑质量等效的模型密度优化方法。在优化时, 需要计算三维离散元模型 (clump) 的体积, 文献 [13] 中不规则颗粒模型组成球体数很少 (5 个) 可直接由解析法求出其体积; 文献 [3] 指出计算不规则颗粒模型的体积比较困难因而采用了直径为 36.25 mm 的球体体积来近似代替, 但并未说明这种方法的误差; 文献 [14] 中单个块石模型填充球体数较多 (几百个), 因而直接采用了对应的几何模型的体积。对于如图 6 (c) 所示块石三维半真实离散元模型, 其体积即难以直接由解析法求出也不能贸然采用图 5 (b) 所示几何模型的体积。不规则颗粒三维离散元模型的体积不仅关系到模型密度的优化, 而且还是后续颗粒集合体 (如大三轴试样) 建模时密度控制 (如计算孔隙率) 所必需的, 因此有必要专门开发一套方法来准确地计算其体积。

### 3 块石三维离散元模型体积计算

#### 3.1 三维离散元模型虚拟切片技术

Evans 等<sup>[18]</sup>用多面体来近似球体并将其三角网格化开发了一套三维离散元数值模型虚拟切片技术, 但该算法较为复杂且不易编程实现, 本文提出了一种通俗易懂并易于实现的且适用于上述不规则颗粒三维半真实离散元模型及其组成的颗粒集合体模型的虚拟切片技术, 下面详细说明该技术的基本原理和实现方法。

无论是不规则颗粒三维半真实离散元模型还是由其组成的颗粒集合体模型都是由一系列球体所构成的, 而球体与某一平面的交叠部分必是一个圆。在三维直角坐标系中, 设某一球体的球心坐标为  $(x_0, y_0, z_0)$ , 半径为  $R$ , 考虑一种简单情形即切面为平行于  $xoy$  面的一个平面且竖坐标为  $z_{cp}$ 。若它们相交, 则相交部分是位于该平面上的一个圆, 其圆心坐标为  $(x_0, y_0, z_{cp})$ , 半径为

$$R' = \sqrt{R^2 - (z_{cp} - z_0)^2} \quad (2)$$

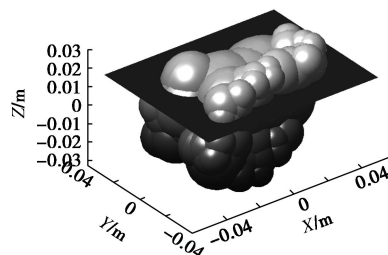
据此, 可以得到该切面与模型中各球体相交的一系列圆, 这些圆组合后的边界就是该平面切割三维离散元模型后得到的剖面。根据上述基本原理, 基于 Matlab 强大的绘图可视化及图像处理功能可实现三维离散元模型虚拟切片技术, 具体步骤包括:

(1) 在 PFC<sup>3D</sup> 中生成不规则颗粒三维离散元模型 (clump), 根据切面位置搜索与该切面相交的球体, 计算得各相交圆的圆心坐标和半径并导出。

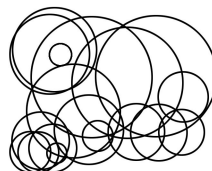
(2) 将切面上各圆的圆心坐标和半径数据导入 Matlab, 绘制各个圆并填充相同颜色 (与背景颜色区分), 该颜色所确定的区域即为所需切片。

(3) 将所得切片保存为图片并进行二值化, 以供后续处理。

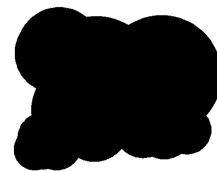
以图 6 (c) 所示块石三维半真实离散元模型为例, 现要得到竖坐标为 13 mm 处 (图 7 (a)) 模型的切片, 经上述虚拟切片技术所得的切片如图 7 (b) 和图 7 (c) 所示。



(a) 切片位置



(b) 未填充切片



(c) 填充切片

图 7 三维离散元模型虚拟切片

Fig. 7 Virtual slice of DEM model

#### 3.2 基于虚拟切片及数字图像处理的体积计算

利用 3.1 节中所提出的三维离散元模型虚拟切片技术并借鉴微积分的基本思想, 可以用一系列间隔很小的水平切片去切割块石三维半真实离散元模型, 将模型离散化为一系列“薄板”, 这些“薄板”的体积之和即为整个块石模型的体积, 而薄板的体积可由切片的面积乘以其厚度得到。假设切片是等间距的即这些“薄板”的厚度相同, 则块石模型的体积即为所有切片面积之和与切片间距的乘积。于是, 问题就转化为求所有切片的面积即图 7 (c) 所示黑色区域的面积, 而这可以采用数字图像处理技术 (Digital image processing, 简称 DIP)。




数字图像在计算机中是由一系列矩形排列的方形像素点构成,在图7(c)所示的二值化图像中,黑色部分像素值为0,其他白色部分像素值为1,因此只要统计像素值为0的像素个数并经比例转换即可获得相应黑色区域的面积。本文基于Matlab编制了集虚拟切片批量生成与批量处理的程序,可快速批量生成不规则颗粒三维离散元模型的一系列虚拟切片并计算其体积。

值得注意的是,模型切片上的各个圆之间可能存在孔隙,具体有两种情况:①靠近模型边界处切片上的孔隙,此时为开孔隙,不属于该块石模型自身的一部分,在颗粒集合体中能为其他颗粒所填充,故在切片面积计算时不用考虑在内;②模型中部切片上的孔隙,此时对应着三维情形下块石模型自身的内部孔隙,故在切片面积计算时应考虑在内。根据本文采用的块石离散元建模方法的基本原理<sup>[17]</sup>,所建立的块石离散元模型中部为较大球体填充,边缘为小球体填充,这种填充方式使得第②种孔隙不易出现。在进行大量的测试后发现当块石离散元模型由40个以上球体填充时并未出现内部孔隙的情况,故而上述的直接计算切片上黑色区域的面积即不考虑内部孔隙在模型填充颗粒数量不是太少的情况下是可行的。当然,内部孔隙的影响也可以通过一定的图像处理技术考虑进去,这里不再深究。

上述不规则颗粒三维离散元模型体积计算方法实际上是用一系列小长方体单元的体积之和来逼近模型的体积,这些小长方体单元的高为切片间距,底面为切片黑色区域的一个像素点。这种近似计算方法的精度很显然与切片的间隔或数量有关,对于图6(c)所示块石三维半真实离散元模型可用最小填充球体(半径为7 mm)的切片数来控制。为了验证该方法的可靠性,这里分别对1个半径为7 mm的球、2个相互重叠的球(最小半径为7 mm)、3个相互重叠的球(最小半径为7 mm)按最小球体切100张切片来对模型进行等间距切割,利用编制的程序计算它们的体积并与解析解进行对比,结果如表1所示。

表1 三维离散元模型体积计算方法验证

Table 1 Validation of volume calculation method for DEM model

模型示意图			
体积解析解/cm <sup>3</sup>	1.4367	5.0961	9.2326
体积计算值/cm <sup>3</sup>	1.4755	5.1864	9.3786
百分比误差/%	2.7	1.8	1.6

从表1可以看到,本文提出的基于虚拟切片及数字图像处理技术的三维离散元模型体积计算方法以最

小填充球体切100张切片进行控制时误差很小,均小于3%,且随着填充球体数的逐渐增多,误差越来越小,精度越来越高。因此,可以认为该方法是能较准确地计算三维离散元模型的体积的。进一步地,将该方法应用于计算图6所示的3个块石三维半真实离散元模型的体积,计算时仍以最小填充球体切100张切片来控制切片间距,结果列于表2。

从表2可以看到,随着模型中填充球体数的减少,离散元模型的体积也不断减小,与相应几何模型体积偏差越来越大,当填充球体数为47时,相差已达到23.7%。正如2.2节所述,为了考虑计算效率,在大型试样数值模型中往往要采用如这种47个球甚至更少球体填充的不规则颗粒离散元模型,由计算结果可知这时采用对应几何模型的体积误差较大。采用本文提出的基于虚拟切片及数字图像处理技术的不规则颗粒三维离散元模型体积计算方法可快速准确地计算模型的体积,从而可以进行块石三维半真实离散元模型密度的优化及颗粒集合体生成时孔隙率的控制。

表2 块石三维半真实离散元模型体积计算

Table 2 Volume calculation for semi-real-shaped DEM model for rock block

模型填充球数	对应几何模型体积/cm <sup>3</sup>	离散元模型体积计算值/cm <sup>3</sup>	两模型偏差/%
344	235.27	220.68	6.2
93	235.27	192.26	18.3
47	235.27	179.48	23.7

## 4 土石混合体三维离散元建模

文献[14]提出了一种简单高效的块石无重叠随机投放方法并采用自重沉积法生成了不同含石量的土石混合体大三轴数值试样,为了节约下落时间及生成较密实的颗粒集合体,在下落过程中将重力加速度设为4g,显然这种方法无法获得任意给定密实度下的颗粒集合体。Salot等<sup>[11]</sup>研究指出由于离散元模型与室内试验中颗粒形状和级配等的差异而很难达到相同的孔隙率,为了使模型密实度与室内试样尽可能一致,采用相同的相对密实度是比较合适的。黄青富等<sup>[19]</sup>指出土体的松密状态对其强度变形性质影响很大,孔隙率虽在一定程度上反映了土体的松密状态,但实际工程上常采用相对密实度来衡量无黏性土的松密程度。接下来以含石率为40%的土石混合体室内大三轴试样为例,将文献[19]提出的拟振动压实法与文献[14]提出的不规则块石投放方法结合起来并对其进行改进以建立与室内试样尽可能一致的土石混合体大三轴试样三维离散元模型。

#### 4.1 拟振动压实法

本文研究所要建立的土石混合体数值试样与室内试样尺寸相同, 颗粒级配也与室内试样保持一致。为了提高计算效率, 在建模时将土体颗粒简化为球体, 粒径小于 5 mm 的土颗粒由 5~10 mm 粒组的土颗粒进行等量替代。在建立数值试样之前, 首先根据第 2 节所提出的块石三维半真实离散元模型建模方法生成所测量的 20~40 mm 和 40~60 mm 粒径范围内各 200 个不规则碎石的模型, 作为建立土石混合体数值试样的块石模型库。其中, 每个块石三维半真实离散元模型的填充球体数均在 25~50 个之间。

为了节约计算时间, 用室内试样各粒组用料的 1/3 即建立大三轴试样的 1/3 模型来探讨上述拟振动压实法对于不规则颗粒集合体的适用性。首先生成直径为 300 mm, 高度较高(能容纳所有颗粒)的圆筒; 接着可由文献[14]中所提出的不规则颗粒无重叠随机投放方法在圆筒空间中投放块石颗粒; 然后在块石颗粒之间的孔隙中按级配生成土颗粒即可获得初始的疏松无重叠的颗粒集合体; 接下来便可采用拟振动压实法获得最大、最小孔隙率及孔隙率与颗粒间摩擦系数的关系。初始状态下, 土颗粒的密度为  $2700 \text{ kg/m}^3$ , 块石颗粒密度为  $2870 \text{ kg/m}^3$ , 法向刚度、切向刚度都暂设为  $1 \times 10^6 \text{ N/m}$ , 颗粒间摩擦系数为 0.8。结果表明自重沉积后的孔隙率即最大孔隙率为 0.4160, 对应颗粒堆积高度为 259.3 mm; 最小孔隙率为 0.3492, 对应颗粒堆积高度为 232.6 mm; 孔隙率和拟振动压实过程中颗粒间摩擦系数的关系如图 8 所示。

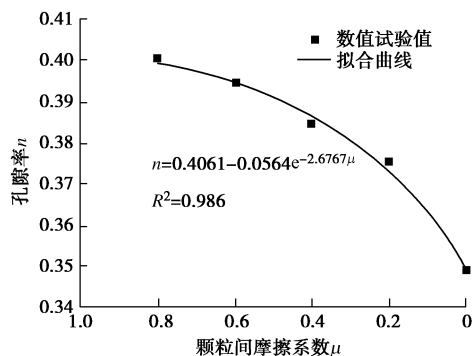


图 8 孔隙率与拟振动压实过程中摩擦系数的关系

Fig. 8 Relationship between porosity and friction coefficient during quasi vibration and compaction processes

从图 8 可以看到, 随着颗粒间摩擦系数的减小, 拟振动压实后颗粒集合体的孔隙率也逐渐减小且减小幅度逐渐变大。将该结果与文献[19]中针对球体颗粒集合体所得结果进行对比会发现: 以本文颗粒级配和块石三维半真实离散元模型建立的土石混合体的最大、最小孔隙率均稍大, 但其差值基本相同, 且孔隙

率随颗粒间摩擦系数的变化规律也是一致的, 可由相同类型的函数进行拟合。因此, 可以认为文献[19]提出的拟振动压实法也同样适用于获取任意相对密度下的不规则颗粒集合体。

#### 4.2 土石混合体数值模型

在 4.1 节中用含石量为 40% 的土石混合体室内试样各粒组用料的 1/3 来建模, 理论上当孔隙率与室内试样相同时, 颗粒集合体的高度应为 200 mm 即试样高度的 1/3。但结果表明即使是达到了最密实状态, 其对应堆积高度 232.6 mm 仍偏高。其原因就是 Salot 等<sup>[11]</sup>研究所指出的由于数值模型与物理试验中颗粒形状和级配等的差异, 一般无法达到相同的孔隙率。

由前述拟振动压实结果计算可得, 要获得该级配和颗粒形状下相对密度为 0.5 的颗粒集合体, 对应的孔隙率应为 0.3844, 拟振动压实过程中颗粒间摩擦系数需设为 0.4。为了获得 200 mm 高的颗粒集合体, 按照该孔隙率(0.3844)计算可得新的各粒组颗粒体积, 重新按拟振动压实法制备数值试样。结果表明, 生成的颗粒集合体高度为 200.7 mm, 与目标高度相差仅为 0.35%, 孔隙率为 0.3904。这也进一步验证了拟振动压实法的可靠性, 同时也表明该建模方法具有较好的可重复性。

在上述土石混合体大三轴数值试样 1/3 模型的基础上, 本文提出采用分层复制法来制备整个土石混合体大三轴数值试样, 具体方法是:

(1) 以所建 1/3 模型作为第一层, 然后遍历第一层的所有土颗粒(balls)和块石颗粒(clumps), 将它们的竖坐标(试样高度方向)都加上第一层的高度(这里为 200.7 mm), 横、纵坐标和半径均保持不变。

(2) 以新的坐标为球心可在第二层对应位置上生成新的球体并将原球体的密度、法向刚度、切向刚度和摩擦系数等参数赋值给新的球体, 此时需要注意更新球体的 id 号及将属于一个块石的 balls 设为 clump, 这样就实现了第一层到第二层的复制。

(3) 将第一层颗粒竖坐标增加两倍的层高(这里为 401.4 mm), 重复步骤(1)、(2)即可实现第一层到第三层的复制, 循环至平衡, 即可得整个土石混合体数值试样。

基于拟振动压实法与分层复制法建立土石混合体大三轴试样三维离散元模型的具体过程如图 9 所示。分层复制法使建模的效率大大提高, 而且这种方法也与室内制样时采用的分层填装、分层击实的方法相类似, 因而颗粒组构也应更接近于室内试样。因此, 采用上述的基于拟振动压实及分层复制法的土石混合体三维离散元建模方法克服了已有下落法的诸多缺陷, 具有建模过程与室内制样相似、效率较高且能有效控

制密实度的优点。

第3节中已介绍了三维离散元模型虚拟切片技术并将该技术成功地应用于块石三维半真实离散元模型的体积计算中,利用该技术还可以进一步分析土石混合体三维离散元模型的细观结构特征。针对所建立的含石量为40%的土石混合体大三轴数值试样,采用虚拟切片技术可获得其不同高度处的水平切片。图10(a)给出了数值试样高180 mm处的切片,图中块石填充为红色,土颗粒为蓝色,图10(b)所示为室内试样的顶面。

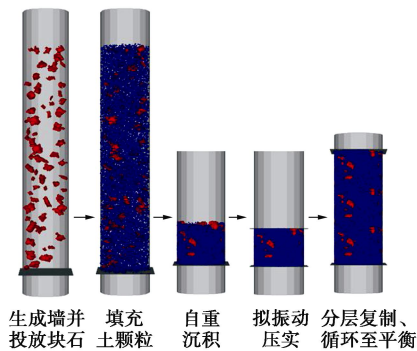
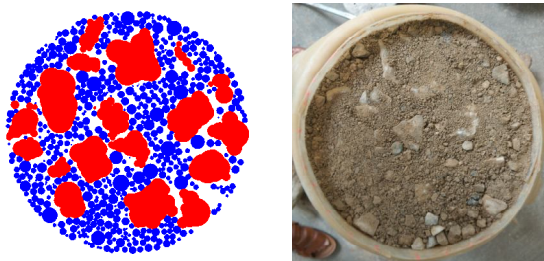


图9 土石混合体大三轴试样三维离散元建模过程

Fig. 9 Modeling processes for DEM model for large-scale triaxial specimen of SRM



(a) 数值试样切片

(b) 室内试样顶面

图10 土石混合体细观结构特征

Fig. 10 Meso-structural characteristics of SRM specimens

从图10可以看到,土石混合体数值试样与室内试样具有相同的细观结构特征:块石均随机散布于土体基质中,绝大部分块石并未相互接触,此时外荷载由块石和土体共同承担,两者共同决定了土石混合体的强度变形特性<sup>[4, 14, 16]</sup>。这在一定程度上表明本文所建立的土石混合体三维离散元模型能再现室内试样的主要细观结构特征。

## 5 结 论

(1)对所取天然土石混合体中块石三向尺寸的测量统计结果表明块石的长高比近似服从对数正态分布。

(2)改进的块石几何模型建模方法只有6个控制

参数且可分别对球度和棱角度进行单独控制,应用效果较好。

(3)基于改进的块石几何模型建模方法及不规则颗粒三维离散元精细模拟技术可建立与实际块石球度相同、棱角度相似的块石三维半真实离散元模型。

(4)基于虚拟切片及数字图像处理技术可快速计算块石三维半真实离散元模型的体积,且可以分析颗粒集合体三维离散元模型的细观结构特征。

(5)基于拟振动压实法及分层复制法的土石混合体三维离散元建模过程与室内制样过程相似、效率高且能有效控制相对密实度。

本文提出的一整套建模方法对岩土材料及其他颗粒材料的三维离散元建模具有一定的参考价值,虚拟切片结合数字图像处理技术也可为颗粒材料三维离散元模型的微细观结构分析带来便利。当然,本文所建立的土石混合体大三轴数值试样还需进一步开展数值试验以与室内试验结果进行对比验证,限于篇幅,这些内容将另文研究。

## 参考文献:

- [1] CHO N, MARTIN C D, SEGO D C. A clumped particle model for rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, **44**(7): 997 - 1010.
- [2] 史旦达, 周 健, 刘文白, 等. 砂土单调剪切特性的非圆颗粒模拟[J]. *岩土工程学报*, 2008, **30**(9): 1361 - 1366. (SHI Dan-da, ZHOU Jian, LIU Wen-bai, et al. Numerical simulation for behaviors of sand with non-circular particles under monotonic shear loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, **30**(9): 1361 - 1366. (in Chinese))
- [3] LU M, MCDOWELL G R. The importance of modelling ballast particle shape in the discrete element method[J]. *Granular Matter*, 2007, **9**(1/2): 69 - 80.
- [4] 贾学明, 柴贺军, 郑颖人. 土石混合料大型直剪试验的颗粒离散元细观力学模拟研究[J]. *岩土力学*, 2010, **31**(9): 2695 - 2703. (JIA Xue-ming, CHAI He-jun, ZHENG Ying-ren. Mesomechanics research of large direct shear test on soil and rock aggregate mixture with particle flow code simulation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(9): 2695 - 2703. (in Chinese))
- [5] Itasca Consulting Group, Inc. Universal distinct element code version 3.1[M]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, 2006.
- [6] IWASHITA K, ODA M. Micro-deformation mechanism of shear banding process based on modified distinct element method[J]. *Powder Technology*, 2000, **109**(1/2/3): 192 - 205.



- [7] NG T T. Numerical simulations of granular soil using elliptical particles[J]. *Computers and Geotechnics*, 1994, **16**(2): 153 - 169
- [8] HARTL J, JIN Y O. Numerical investigation of particle shape and particle friction on limiting bulk friction in direct shear tests and comparison with experiments[J]. *Powder Technology*, 2011, **212**(1): 231 - 239.
- [9] 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-sands[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, **30**(10): 2112 - 2119. (in Chinese))
- [10] 刘广, 荣冠, 彭俊, 等. 矿物颗粒形状的岩石力学特性效应分析[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(3): 540 - 550. (LIU Guang, RONG Guan, PENG Jun, et al. Mechanical behaviors of rock affected by mineral particle shapes[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(3): 540 - 550. (in Chinese))
- [11] SALOT C, GOTTELAND P, VILLARD P. Influence of relative density on granular materials behavior: DEM simulations of triaxial tests[J]. *Granular Matter*, 2009, **11**(4): 221 - 236.
- [12] LU M, MCDOWELL G R. Discrete element modelling of railway ballast under triaxial conditions[J]. *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, 2008, **3**(4): 257 - 270.
- [13] STAHL M, KONIETZKY H. Discrete element simulation of ballast and gravel under special consideration of grain-shape, grain-size and relative density[J]. *Granular Matter*, 2011, **13**(4): 417 - 428.
- [14] 金磊, 曾亚武, 李欢, 等. 基于不规则颗粒离散元的土石混合体大三轴数值模拟[J]. *岩土工程学报*, 2015, **37**(5): 829 - 838. (JIN Lei, ZENG Ya-wu, LI Huan, et al. Numerical simulation of large-scale triaxial tests on soil-rock mixture based on DEM of irregularly shaped particles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, **37**(5): 829 - 838. (in Chinese))
- [15] JIANG M J, KONRAD J M, LEROUEIL S. An efficient technique for generating homogeneous specimens for DEM studies[J]. *Computers & Geotechnics*, 2003, **30**(7): 579 - 597.
- [16] XU W J, YUE Z Q, HU R L. Study on the mesostructure and mesomechanical characteristics of the soil-rock mixture using digital image processing based finite element method[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, **45**(5): 749 - 762.
- [17] ZENG Y W, JIN L, DU X, et al. Refined modeling and movement characteristics analyses of irregularly shaped particles[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2015, **39**(4): 388 - 408.
- [18] EVANS T M, CHALL S, ZHAO X, RHYNE T. Visualization and analysis of microstructure in three-dimensional discrete numerical models[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2009, **23**(5): 277 - 287.
- [19] 黄青富, 詹美礼, 盛金昌, 等. 基于颗粒离散单元法的获取任意相对密实度下级配颗粒堆积体的数值方法[J]. *岩土工程学报*, 2015, **37**(3): 537 - 543. (HUANG Qing-fu, ZHAN Mei-li, SHENG Jin-chang, et al. Numerical method to generate granular assemble with any desired relative density based on DEM[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, **37**(3): 537 - 543. (in Chinese))