

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.S2.012

粗粒料多边形表征及二维 FEM/DEM 分析

严成增^{1,2}, 郑宏², 孙冠华², 葛修润²

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 2. 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: 考虑到颗粒形状对粗粒料的力学特性有重大影响, 提出了一种新的表征颗粒形状的方法, 即在椭圆上随机选取一系列点连接成多边形颗粒, 表征狭长扁平的颗粒。新方法较圆上取点的方法能代表更多类型的颗粒形状, 适用范围更广。提出了一种新的粗粒料投放算法, 即先缩小颗粒, 然采用随机算法将缩小的颗粒投放至给定区域, 对颗粒划分好网格后, 将颗粒放大到原来的大小, 然后采用有限元-离散元(FEM/DEM)方法计算稳定后即生成了相应的试样。通过将上述颗粒生成及投放算法与 FEM/DEM 结合, 应用于粗粒料的数值模拟。分析表明, FEM/DEM 是研究粗粒料力学性质的较好方法, 对复杂的颗粒形状也可简单建模, 且因在颗粒内部划分了有限元网格, 复杂的接触判断及接触力计算转化为标准统一的三角形和三角形之间的接触判断及接触力计算, 所有的计算均可标准化、统一化。同时因为颗粒是可以变形的, 依然保留了连续介质力学中应力和应变的概念, 无须像 PFC 那样需通过测量圆来间接表示某点的应力、应变。最后, 通过粗粒料的侧限压缩试验的数值模拟, 展现了文中提出的一整套解决方案在模拟粗粒料方面的巨大潜力。

关 键 词: 有限元-离散元; 粗粒料; 颗粒投放; 多边形颗粒

中图分类号: O 319.56

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 - (2015) 增 2 - 0095 - 09

Polygon characterization of coarse aggregate and two-dimensional combined finite discrete element method analysis

YAN Cheng-zeng^{1,2}, ZHENG Hong², SUN Guan-hua², GE Xiu-run²

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Considering that the shapes of particles have an important impact on the mechanical properties of the coarse aggregate, this paper proposes a new method for characterizing particle shapes. The method randomly selects a series of points on ellipse; then those points are connected to form polygon particles. The new method can represent more types of particle shapes than old method that access points on the circle, applies more broadly, can characterize the narrow flat particles. In addition, a new algorithm of particle delivery is proposed, which is to reduce the particle; then the reduced particles are put to the given area randomly. After the particle was meshed by triangular element, the reduced particles was enlarge to the original size. Afterwards, using finite combined finite-discrete element method(FEM/DEM) to calculating equilibrium state, a sample that meet given void ratio was generated. Then the particle generation algorithm above and FEM/DEM was combined, the FEM/DEM method is applied to coarse aggregate numerical simulation, the analysis shows, FEM/DEM is a great way to study the mechanical properties of coarse aggregate. The complex particle shape can also be modeling simply, because the particles was meshed into the triangle finite element, complex contact judgments and the contact force calculation can be transformed into a standard uniform contact judgments and contact force calculations between triangles, all calculations can be standardization and unification. At the same time, particles can be deformed, the concept of stress and strain that belong to the continuum mechanics was still retains, rather than PFC which stress and strain of a point was expressed indirectly by the measuring circle. Finally, by confined compression test numerical simulations of coarse aggregate show enormous potential of the proposed set of solutions in the simulation coarse aggregate.

Keywords: finite element method/discrete element method(FEM/DEM); coarse grained materials; particle delivery; polygon particles

收稿日期: 2014-12-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)(No.2011CB013505, No.2014CB047100); 国家自然科学基金青年基金(No.11202223)

第一作者简介: 严成增, 男, 1986年生, 博士, 主要从事离散元有限元耦合、离散元、颗粒物质物理与力学、多物理场耦合、DDA、高性能并行计算及软件工程。E-mail: yanchengzheng86@gmail.com

1 引 言

粗粒料在自然界分布广泛、储量丰富,具有压实性能好、透水性强、抗剪强度高、地震荷载作用下不易产生液化等优良特性,在工程建设中得到了广泛的应用^[1]。粗粒料是一定级配的岩石单粒、集粒或凝块等单元共同组成的集合体,是一种特殊的材料^[2],其浑圆度较差,因局部棱角处易产生应力集中,即便在较低的围压下也会出现颗粒破碎现象。在高应力作用下粗粒料的棱角破碎现象更加严重。颗粒的破碎会使材料的级配发生改变,相应的其物理力学性质也会发生改变^[3]。

由于粗粒料原位试验工作量大,试验条件不好控制^[4],而数值模拟试验可以避免上述问题,对试件尺寸没有限制,是粗粒料力学特性研究的有效工具。由于粗粒料的散粒体特性,传统的连续介质力学方法并不适用,目前对粗粒料的力学特性研究较多的是采用颗粒程序 PFC,但这种方法也存在一些问题,例如,由于其基本颗粒形状为圆形或者圆球,粗粒料的颗粒形状对粗粒料的力学特性有重大影响,为了较好模拟颗粒形状,有两种处理方法^[5],方法 1 是通过将不同大小的颗粒粘结在一起形成颗粒集合体,也即 BPM 模型,内部颗粒之间相互独立,颗粒之间因彼此嵌入而产生接触力,且颗粒间的黏结可以破碎。方法 2 是将多个圆球胶结在一起模拟非规则形状颗粒或块体 (clump 单元),clump 单元内部的圆球可以任意重叠,内部的圆球之间不产生接触力,整个 clump 单元作为一个完整的刚性体而存在。以上两种对颗粒形状建模的方法,均存在生成颗粒集合体的算法复杂,建模不够直观,组合颗粒存在很多凹凸等问题,同时对于 clump 单元无法模拟颗粒的破碎。许多学者用其各种数值方法对该粗粒料问题进行了研究,郭培玺等^[6]用 DDA 对粗粒料的力学特性进行研究,用多面体来表征颗粒的形状,克服了 PFC 在建模颗粒形状方面所存在的困难,但也存在无法模拟颗粒破碎,接触判断复杂,计算效率低等问题,不适用于大规模颗粒问题的模拟。由以上论述可知,现有的这些数值方法用于粗粒料的模拟均存在一些问题。值得指出的是,周伟等^[7-8]从细观角度建立堆石体的随机散粒体不连续变形(SGDD)模型,基于修正的增广 Lagrangian 算法的非线性接触算法模拟颗粒间的相互接触作用,可以有效模拟颗粒相互作用及尖端破坏等因素,研究了堆石体在三向不等应力状态下的强度和变形特性。马刚等^[9-10]基于随机颗粒不连续变形模型,在

颗粒的细观单元之间插入界面单元,采用黏聚力裂缝模型模拟界面单元的起裂、扩展和失效,研究颗粒破碎对堆石体强度和变形的影响,并用该方法对锚杆加固散粒体的作用机制进行了研究。李长圣等^[11]等用 CT 扫描技术并结合逆向工程软件重构砾石的三维模型,对颗粒形状进行精确建模。杨冰等^[12]利用三维颗粒程序(PFC3D)对土石混合体试样的侧限压缩试验进行了数值模拟,比较了不同级配条件下土石混合体模型的微观结构及基本力学性能。

为了对岩体的变形、破坏的全过程进行模拟,Munjiza^[13]提出用有限元-离散元(FEM/DEM)方法模拟粗粒料的力学特性非常合适,对于颗粒的形状可采用三角形有限元网格对其剖分,不规则颗粒之间的复杂接触关系转化为三角形单元之间的接触判断,接触判断计算效率高。对于颗粒形状的建模,只需要知道颗粒的外轮廓边界信息,然后采用三角形有限元网格对其剖分,建模过程简单直接。由于 FEM/DEM 对颗粒内部的三角形单元的公共边上插入了起粘结作用的无厚度节理单元^[14],故可通过节理单元的断裂来模拟颗粒的破碎。综上所述,FEM/DEM 可以很好地模拟粗粒料的颗粒形状进行建模和模拟颗粒的破碎,是研究粗粒料的较好方法。

鉴于 FEM/DEM 的上述突出优点,本文对粗粒料的生成、投放及如何与 FEM/DEM 结合进行了详细地研究,力图为粗粒料的力学特性模拟提供一整套解决方案。

2 粗粒料的颗粒生成及投放

不规则多边形颗粒的生成及投放在混凝土骨料领域有很多的研究^[15-16],但骨料在混凝土中只起骨架作用,骨料之间不要求相互接触,因为骨料之间空隙有水泥等填充,而在粗粒料中的研究中,颗粒之间是相互接触的,因此混凝土骨料生成及投放算法不能直接用于粗粒料建模。

2.1 粗粒料的粒径

首先根据粗粒料的室内试验确定粗粒料的级配曲线,根据颗粒级配曲线将颗粒分为几个粒组,获得各个粒组所占的百分比,然后根据试验颗粒的孔隙率,表观体积,换算得到试验颗粒的实际体积,最后获得各个粒组的体积,在二维情形,最终获得是各个粒组的体积。设待生成试样的表观体积为 V ,孔隙率为 n ,则待生成试样的总重量:

$$W = \rho(1 - n)V \quad (1)$$

由级配曲线得到某一粒组的重量百分比为 w_i ，则该粒组的重量为

$$W_i = w_i W \quad (2)$$

结合式 (1) (2) 可得到待生成试样中某一粒组的总体积：

$$V_i = (W_i / \rho) = w_i (1 - n) V \quad (3)$$

据以式 (1)~(3)，即可求出各个粒组颗粒所占的体积。粒径分别在各粒组的上下限范围内随机选取，当该粒组颗粒体积（二维情形下为面积）达到所需体积（面积）时，进行下一粒组颗粒的生成。

2.2 多边形颗粒的生成

文献[7 - 10]采用不规则多边形来反映颗粒的实际形状，不过颗粒多边形是在外接圆上生成的，本文在其基础作了相应的改进，考虑到颗粒有可能狭长或者圆度较好，因此采用外接椭圆来表征一个颗粒，也就是说多边形的各个顶点位于椭圆上，采用这种方法较采用外接圆而言要更为合理，因为便于表示狭长的颗粒，适用性更广。如图 1 所示，多边形由边数、极角、长轴半径，短轴半径确定。

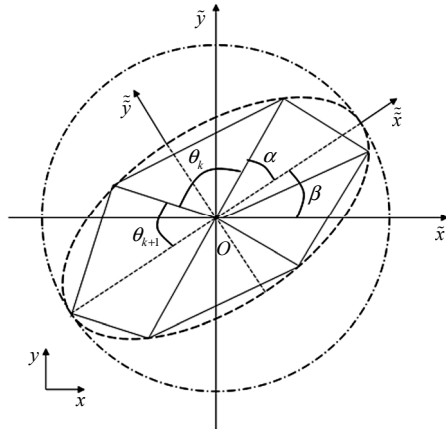


图 1 多边形颗粒的表征

Fig.1 Characterization of polygon particles

考虑到大多数的粗粒料为凸的，本文只考虑凸体颗粒的情形。颗粒的生成方法是，在某一粒径的圆上取一个内接椭圆，椭圆的中心与圆心重合，椭圆的长轴与圆的直径相等（见图 1）。

首先生成的颗粒的半径：

$$R = R_1 + (R_2 - R_1) R_{\text{and}} \quad (4)$$

式中： R 为外接圆的半径，即椭圆的长轴半径 a ； R_1 为该粒组粒径的下限； R_2 为该粒组粒径的上限； R_{and} 为区间为 (0, 1) 的随机数。

根据图 1 的关系可得椭圆的长轴半径：

$$a = R_1 + (R_2 - R_1) R_{\text{and}} \quad (5)$$

而椭圆的短轴半径 b ，可表示为

$$b = ea + a(1 - e) R_{\text{and}} \quad (6)$$

式中： e 为颗粒椭圆率的最小值。

采用极坐标确定多边形的顶点，首先确定多边形的各个顶点的角度坐标：

$$\bar{\theta}_k = 2\pi(1 + (2R_{\text{and}} - 1)\delta) / n \quad (7)$$

式中： $\bar{\theta}_k$ 为第 k 边的对角； δ 为小于 1 的常数； n 为多边形的边数。

由于 $\bar{\theta}_k$ 之和一般不等于 2π ，为了使得多边形是闭合的，对 $\bar{\theta}_k$ 进行修正^[7]：

$$\theta_k = \bar{\theta}_k \left(2\pi / \sum_{i=1}^n \bar{\theta}_i \right) \quad (8)$$

这样多边形顶点相对于长轴的角度为

$$\tilde{\theta}_k = \alpha + \sum_{i=1}^k \theta_i \quad (9)$$

式中： α 为多边形颗粒第一个顶点的坐标相对于椭圆长轴的角度，取为 0 到 $\pi/6$ 的随机数，因为第一个点不宜离长轴顶点太远，否则将无法很好地表征扁平状颗粒，故此处取 $\pi/6$ 。

在以椭圆为长轴和短轴的构成局部坐标系，如图 1 所示 $\tilde{x}O\tilde{y}$ 坐标系中椭圆上的任意一点可表示为

$$\left. \begin{aligned} \tilde{x} &= a \cos \tilde{\theta} \\ \tilde{y} &= b \sin \tilde{\theta} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

将其变换到与整体坐标系平行的 $\tilde{x}O\tilde{y}$ 局部坐标系上来，已知两个坐标系的夹角为 β ：

$$\begin{pmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (11)$$

多边形顶点的整体坐标为

$$\begin{pmatrix} x_k \\ y_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{O_k} \\ y_{O_k} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a \cos \tilde{\theta}_k \\ b \sin \tilde{\theta}_k \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中： x_{O_k} 、 y_{O_k} 为第 k 颗粒圆心的整体坐标，在投放时随机给定； β 为长轴与 \tilde{x} 轴方向的夹角，表示颗粒长轴的排布方向，取为 0 到 2π 之间的随机数。至此就完成了粗粒料的多边形表征。

2.3 粗粒料的投放

要在给定的区域内投放给定量的粗粒料并非一件容易的事，因为颗粒之间不能相互嵌入，颗粒排

布顺序的不同会导致能够投放的量的不同，也就是说给定量粗粒料并不总能完全投放进给定的区域。为此，可在借鉴 PFC 的半径扩大法的基础上^[5]采用了另一种策略，先将生成的粗粒料按同样的比例缩小，然后将其随机投放到给定的区域，粗粒料缩小到足够小时投放到给定区域总是可以成功的。投放时，对某一颗粒需要判断是否与已经投放的颗粒的接触，若接触则继续随机选择新的投放点坐标，直到不与其他颗粒接触时，成功投放该颗粒。由于粗粒料进行了缩小，在进行颗粒接触判断时，直接用图 1 中的圆来进行粗略的判断，也即用颗粒外接椭圆的包络圆来进行接触判断，这样极大的简化的接触判断，提高了投放效率，避免了多边形之间的复杂的接触判断。

具体投放过程：依据章节 2.2 的内容，在局部坐标系下(令 $x_{O_{ki}} = 0, y_{O_{ki}} = 0$)，根据各粒径组所占的面积，生成所需的粗粒料，也记录下各颗粒长轴半径 a 、圆心的半径 R 、多边形的顶点坐标；然后对粗粒料按同等比例进行缩小，即将获得圆半径、椭圆长短轴半径均乘以一个缩放系数 ω ，相应的多边形的顶点坐标也均乘以 ω ，其中 $0 < \omega < 1$ ，具体取值可取较小的数，只要能够达到成功投放的目的即可，本文取 0.2，获得缩放后的颗粒多边形相关数据：

$$\left. \begin{aligned} R' &= \omega R \\ x'_k &= \omega x_k; \quad y'_k = \omega y_k \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

进行上述缩放之后，采用均匀分布的随机数，并依据外接椭圆的包络圆进行接触判断，将颗粒投放至指定区域，如图 2 所示，即按包络圆进行缩小颗粒的投放。投放完毕后可以获得图 2 的多边形粗粒料。对这些多边形颗粒划分有限元网格，即可获

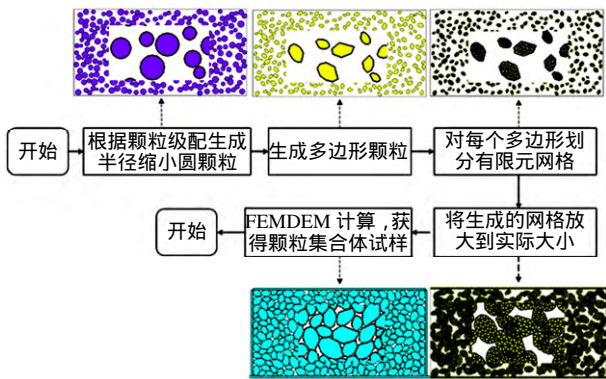


图 2 粗粒料的生成及投放过程

Fig.2 Generation and delivery process of coarse material

得图 2 中的第 4 个图的结果。

至此获得了缩小后的粗粒料的有限元网格数据，但由于是缩小后的，需要将得到的各个颗粒多边形放大到实际的大小。首先，需要知道如何放大，放大多少才能获得给定孔隙率的试样，本文采取的方法是沿着多边形的外接椭圆的包络圆的圆心作为中心，通过放大包络圆的半径来获得满足给定孔隙率的试样，设不同的包络圆均采用相同的放大系数 λ ，即 $R_i^{req} = \lambda R_i^{old}$ 。现在的关键是求 λ ，根据孔隙率的定义有

$$n = 1 - A_p / A \quad (14)$$

于是有

$$A_p = (1 - n)A \quad (15)$$

又因为颗粒的总面积各个颗粒的面积之和：

$$A_p = \sum_{i=1}^m S_i \quad (16)$$

联立式(12)、(13)可得

$$\sum_{i=1}^m S_i = (1 - n)A \quad (17)$$

设缩小生成的颗粒的总面积为 $\sum_{i=1}^m S_i^{old}$ ，孔隙率为 n_0 ，则其与放大后的颗粒有

$$\frac{\sum_{i=1}^m S_i^{req}}{\sum_{i=1}^m S_i^{old}} = \frac{1 - n}{1 - n_0} \quad (18)$$

又因为 $R_i^{req} = \lambda R_i^{old}$ ，放大后的颗粒面积与原有颗粒面积有如下关系式：

$$S_i^{req} = \lambda^2 S_i^{old} \quad (19)$$

根据式(15)、(16)可求出半径放大系数：

$$\lambda = \sqrt{\frac{1 - n}{1 - n_0}} \quad (20)$$

具体的实施过程：先求得缩小后的粗粒料的孔隙率 n_0 ，然后据式(17)即可求得半径放大系数 λ ，将各个颗粒多边形依据该多边形的外接椭圆的圆心为中心放大，如第 k 颗粒的第 i 顶点坐标为 (x_{ki}, y_{ki}) ，其放大到原来大小，其坐标为

$$\left. \begin{aligned} x'_{ki} &= x_{O_{ki}} + \lambda(x_{ki} - x_{O_{ki}}) \\ y'_{ki} &= y_{O_{ki}} + \lambda(y_{ki} - y_{O_{ki}}) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

式中： $(x_{O_{ki}}, y_{O_{ki}})$ 为第 k 颗粒的外接椭圆中心点的坐标，也为相应包络圆的圆心坐标。

通过上述处理方法，得到了实际大小的粗粒料的有限元网格数据，由于放大到实际位置以后颗粒之间可能会存在较大的嵌入，为了消除嵌入，采用 FEM/DEM 程序进行计算，由于嵌入的存在会导致颗粒存在接触力，会使得颗粒位置发生调整和彼此的嵌入减小，开始时嵌入可能很大，会导致颗粒间极大的接触力，使得颗粒速度很大，有可能发生穿透颗粒或者墙体，为了防止这种现象的发生，每计算几步就将所有颗粒的速度置为 0，再进行计算，如此往复直到所有颗粒都调整到合适的位置使得颗粒间几乎无嵌入，当然这样生成以后，试样内可能仍会存在一定的残余应力（尤其对于密实的试样）为了消除残余应力，可将上加载板放松，再次运算到平衡，就完成了基于多边形的密实颗粒的生成，最终生成的密实试样图 2 中的最后一个图。

3 FEM/DEM 方法基本原理

如图 2 中所示，FEM/DEM 方法在离散颗粒内部划分了有限元网格，离散颗粒之间的相互作用通过传统的 DEM 方法来加以处理，即通过颗粒受到的不平衡力按牛顿第二定律求解。由于颗粒内部划分了有限元网格，可以很自然的求解颗粒内部的应力、应变的量，这是较颗粒程序 PFC 的一个明显优势，因为在 PFC 中，没有直接的应力的概念，圆球是刚性的，其通过引入测量圆的概念求解出一个均值化的力来表征某一点的应力，则在概念上是不够自然的。由于对颗粒内划分了三角形有限元网格，多边形颗粒之间的复杂接触判断可全部转化为简单的三角形和三角形之间的接触判断，因此不论对于何种形状的颗粒（不论凸凹），都可采用统一的算法来加以处理 而不用对各种特殊情况作特别的处理，易于实现接触判断的标准化统一化。在计算接触力时采用了新颖的基于势的接触力计算方法^[17]，因为颗粒均划分为三角形单元，只需计算三角形和三角形单元之间的接触力，这也是 FEM/DEM 较传统 DEM 的一个独特优点。

如图 3 所示，将接触的 2 个三角形分别称之为目标三角形 β_c 和靶三角形 β_t ，目标三角形嵌入到靶三角形的面积为 dA 时，所引起的接触力为

$$df = [\text{grad}\varphi_c(P_c) - \text{grad}\varphi_t(P_t)]dA \quad (22)$$

式中： $\varphi_c(P_c)$ 、 $\varphi_t(P_t)$ 分别为目标三角形和靶三角形中位于 P_c 、 P_t 点的势；grad 为梯度。

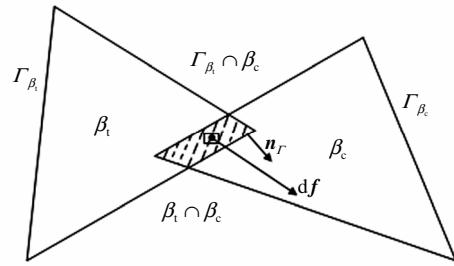


图 3 接触力计算示意图
Fig.3 Calculation sketch of contact forces

其总的接触力可对式（22）积分，并通过格林公式转化为边界积分公式：

$$f_c = \int_{\Gamma_{\beta_t \cap \beta_c}} n_r (\varphi_c - \varphi_t) d\Gamma \quad (23)$$

式中： $\Gamma_{\beta_t \cap \beta_c}$ 为 2 个三角形重叠区域的边界； n_r 为重叠区域边界的外法向向量。

采用上述方法，计算出的接触力为分布力，不会引起应力集中，同时对角-角接触无需做特殊处理，不像传统的 DEM 那样需要对角点进行圆角化^[15]。

对于接触判断则采用了高效的 NBS 算法，接触判断用时与单元的数量成线性关系^[18]。在章节 2 节中，颗粒放大到实际大小后，因为颗粒之间可能会存在较大的嵌入，为了使得颗粒之间的几乎没有嵌入，需要根据颗粒间的接触力调整颗粒之间的位置，其进行接触判断和接触力计算就是采用此处所述的方法，即接触判断采用 NBS 算法，采用基于势的接触力计算方法计算接触力。这么处理的一个好处是将颗粒试样的生成与后续的力学计算采用相同的算法加以处理，而无需像已有的方法那样，将计算和试样生成完全割裂开来，对试样的投放、接触判断采用其他特别的算法来加以处理，简化了前处理建模。类似于 PFC 中在生成模型所采用的半径扩大法，其思路也是扩大半径后，进行力学计算来调整颗粒的位置，使得颗粒之间相互接触，同时嵌入量又极小，同时满足相应的孔隙率的要求。

另外需要特别说明的是，若需考虑颗粒本身的破碎，则可以通过在颗粒内部划分的三角形网格的公共边插入起黏 结作用的节理单元，通过节理单元的断裂来模拟颗粒的破碎，有关插入的节理单元与三角形单元的拓扑连接关系见文献[14]。节理单元的断裂准则采用的是 Munjiza 提出的联合单一裂纹和弥散裂纹模型^[19]，有关该断裂模型的详细内容可见文献[20]。限于篇幅，这些内容在此不再详述。章节 4 中给出了不考虑颗粒破碎时的计算结果。

4 数值算例

4.1 试样的制备

根据实际试样的级配曲线,采用章节2中的方法生成多边形颗粒试样,模型的尺寸高为60 cm,宽为30 cm,孔隙率为0.15,粒径范围为60~5 mm。去掉了粒径小于5 mm的小颗粒,用较大粒径的颗粒等面积替代、减小颗粒的数量和降低计算用时。总共生成了907个颗粒,每个颗粒内部划分为三角形单元,共有19 887个三角形单元。最终生成的粗粒料的试样如图4所示,可见用本文的方法可以生成排列紧密的试样,效果很好。

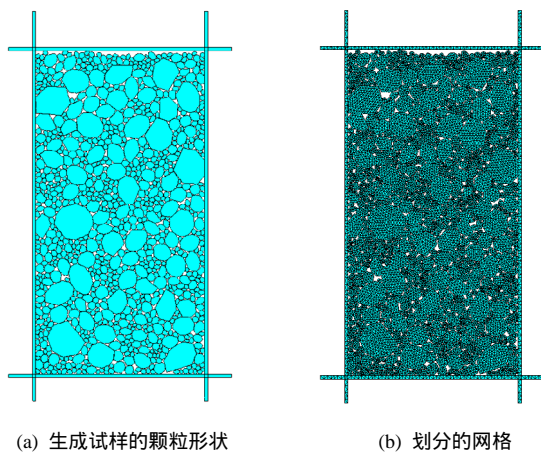


图4 生成的最终粗粒料试样

Fig.4 Ultimate coarse material samples

4.2 数值模拟和加载方式

本文仅对不考虑颗粒破碎的情况进行计算,若要考虑颗粒破碎,至需要在计算之前在颗粒内部的三角形单元的公共边上插入起黏结作用的节理单元。这是考虑颗粒破碎和不考虑颗粒破碎两种情况在前处理时惟一的不同之处。对生成的粗粒料进行侧限压缩试验的数值模拟,其加载方式为,底部及两侧均固定,顶部为加压板,以固定的速度向下移动。

4.3 材料参数的取值

粗粒料的物理力学参数见表1。

表1 粗粒料的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of coarse material

参数	量值	参数	量值
密度 $\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	2.18	法向罚参数 p_n / GPa	20
弹性模量 E / GPa	20	切向罚参数 p_s / GPa	10
泊松比 ν	0.2	阻尼 $damp / (\text{N}\cdot\text{m})$	4 078
内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	45		

表1中, p_n 、 p_s 分别法向罚参数、切向罚参数; ρ 为颗粒的干密度; E 为弹性模量; ν 为泊松比; $damp$ 为黏性阻尼; φ 为内摩擦角。

5 宏观力学响应分析

采用章节4中生成的试样,在保证加载方式加载速率不变的前提下对不考虑颗粒破碎的情形进行了侧限压缩试验的数值模拟,如图5所示。当竖向应变为0时,上加载板没有与颗粒接触,此时颗粒仅在重力的作用下堆积,最大主应力(为压应力)的较大值主要分布在试样的中下部;这是因为仅在重力作用下,上部承重小,下部承重大。同时从最大主应力云图中也可以看出,强力链分布,除红色以外的区域即黄颜色和绿颜色所在的区域即为强力链的分布区,主要位于试样的中下部,如图5(a)、6(a)所示。随着竖向应变的增大,最大主应力较大值的分布区域开始上移,也即强力链上移,主要分布在试样的上部、中上部区域,如图5(b)~5(d)所示。因为随着加载板的下移,上部的试样最先受压,上部的压应力相对较大。当上加载板继续向下移动,竖向应变进一步增大,此时,试样中形成了贯穿整个试样的较大的最大主应力分布,也即强力链贯穿试样上、下部,如图5(e)~5(j)及图6(b)所示。由于加载板的继续下移,将试样压密,颗粒之间形成较紧密的接触,向下传递上部加载板的压力。同时,从图中可以看出,力链主要以粗颗粒为骨架,局部穿过细颗粒,同时部分细颗粒(深红色的部分)处于架空状态或者受的压应力很小。可见对该试样而言,粗颗粒起到了骨架作用,对整个粗粒料试样的力学特性有重要影响。当竖向应变大于0.011时,虽然最大主应力的最大值在不断增大,但颗粒的应力分布状态不再发生明显的变化,力链结构趋于稳定,这是因为试样被压实紧密,颗粒再难发生大的位移或者转动,颗粒之间的接触关系不再发生明显的变化,故而应力状态、力链结构趋于稳定。

图7为试样侧限压缩时的应力-应变曲线(仅为加载初期的应力-应变曲线),当竖向应变小于0.005时,由于上加载板与颗粒之间有空隙,接触不紧密,上加载板的压应力几乎为0。随着加载板的继续下移,上加载板的压应力不断增大,增大的幅度先慢后快,当竖向应变大于0.01时,上加载板的压应力几乎保持直线增加,应力-应变曲线虽有很小幅度的波动,但总趋势是应力随应变直线增加;这是因为应变大于1%后颗粒之间接触紧密,接触状态、力

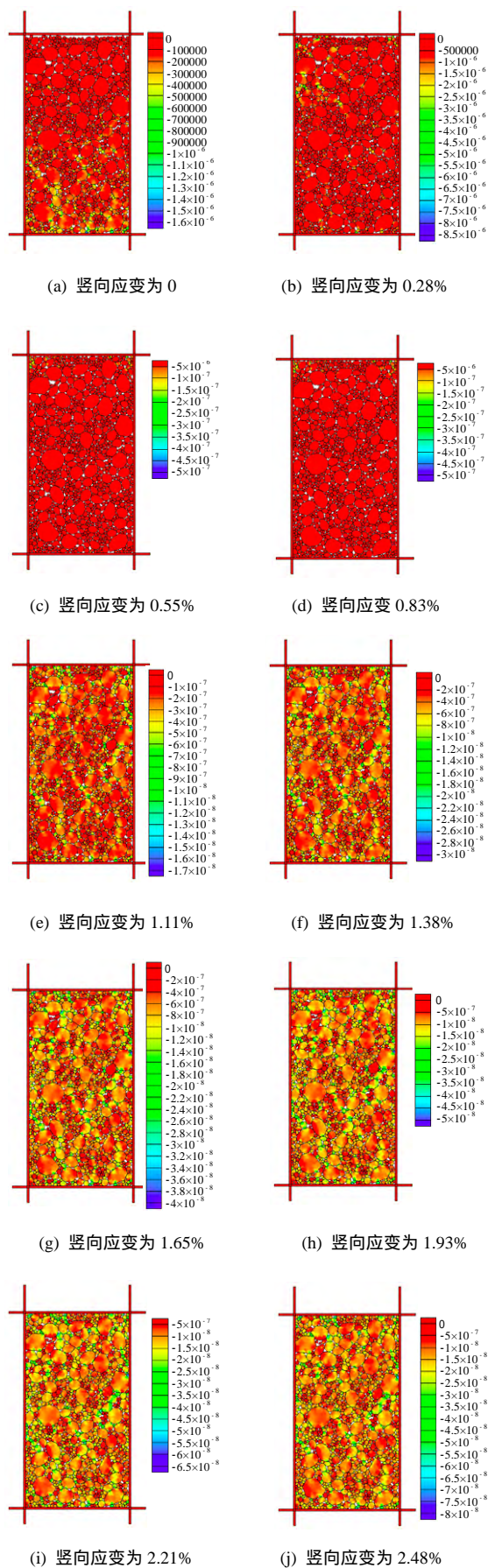


图 5 加载过程中试样最大主应力云图(单位: Pa)
Fig.5 Nephograms of maximum principal stress of samples in loading process(unit: Pa)

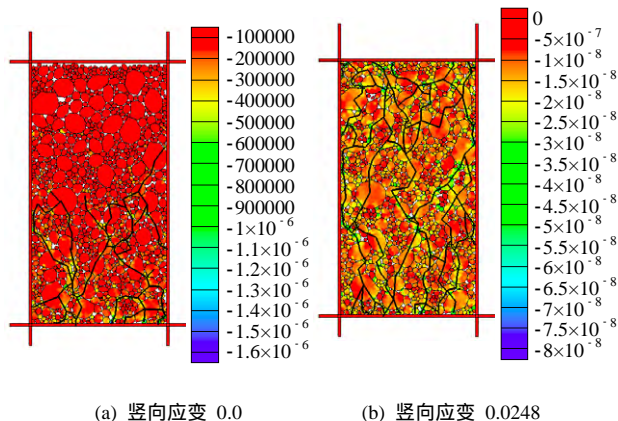


图 6 不同应变状态下强力链的分布(单位: Pa)
Fig.6 Force chain distribution under different strain state(unit: Pa)

链结构不再发生显著变化,整体呈现线弹性的特性,但因局部颗粒仍可发生移动和调整,故应力-应变曲线整体呈现线弹性特性的同时,曲线又有小幅波动。

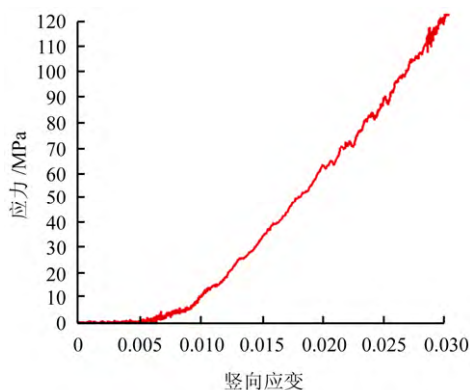


图 7 试样侧限压缩试验应力-应变曲线
Fig.7 Stress-strain curve of coarse aggregate through confined compression test

由图 7 可计算出应力线性增加的直线段的侧限压缩模量为 5.0 GPa,图 7 与图 5 是对应的。图 7 中,当应变大于 1%时,应力-应变曲线呈直线状态,而图 5(e)~5(j)应力状态、力链结构均不再发生显著的变化。为了更清楚的看出加载过程中强力链的分布,将竖向应变为 0 和 2.48%时的强力链结构图见图 6。从图 6(a)可以看出,当竖向应变为 0 时,颗粒处于重力堆积状态,鉴于自由堆积的高度有限,故强力链主要分布在试样的中下部。从图 6(b)可以看出,当竖向应变较大时,因为颗粒被压密,颗粒之间接触紧密,形成贯穿上部和下部的强力链来传递上加载板的压力,强力链主要分布在粗颗粒构成的骨架上,位于粗颗粒之间的少数细颗粒被强力链穿越,部分的细颗粒处于架空状态或者只受到很小

的压力作用,可见该试样中粗颗粒对整个试样的力学特性起控制作用。

6 结 论

(1) 本文提出一种新的粗粒料的表征及生成算法,通过在椭圆上选取一系列点连接成多边形颗粒,其较圆上取点的方法可以更好地表示狭长扁平的颗粒,能表征更多的颗粒形状类型,适用范围更广。

(2) 提出了一种适用于 FEM/DEM 方法的粗粒料投放算法,即先缩小颗粒,然后根据颗粒的外接包围圆判断颗粒之间的接触关系,采用蒙特卡洛随机算法将缩小后的颗粒投放至指定区域,并对投放后的颗粒划分网格,最后将颗粒扩大至原来的大小,并采用 FEM/DEM 计算稳定获得相应的试样。

(3) 将 FEM/DEM 应用于粗粒料的模拟,拥有独特的优势,对复杂的颗粒形状也可简单建模,直接在颗粒内部划分有限元网格,复杂的接触判断转化为统一的三角形单元之间的接触判断,计算效率高,无需对特殊形状的颗粒作特殊处理,所有的计算均可标准化、统一化。解决了传统颗粒离散元方法在表征颗粒形状所存在的困难。

(4) 通过在颗粒内划分的三角形单元的公共边上插入无厚度的节理单元,可自然模拟颗粒的破碎。不考虑颗粒破碎时,可不插入节理单元,该方法具有广泛的适用性和灵活性。在未插入节理单元时,可通过颗粒内部各个单元的应力直观显示颗粒之间的力链。

(5) 将 FEM/DEM 应用于粗粒料的力学分析,保留了连续介质力学中的应力、应变的概念,可直观地获得颗粒内的应力、应变,不像 PFC 那样,颗粒本身是刚性的,应力、应变的概念不复存在,需要引入测量圆的概念,来表征某点的应力,具有很大的人为性、随机性,概念本身不够自然直接。

(6) 提出的粗粒料表征、生成及投放这一整套算法不仅可用于粗粒料,还可用于混凝土粗骨料的表征、生成及投放,适用性强。

参 考 文 献

- [1] 郭庆国. 粗粒料的工程特性及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998.
- [2] 张超, 展旭财, 杨春和. 粗粒料强度及变形特性的细观模拟[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 2077 - 2083.
ZHANG Chao, ZHAN Xu-cai, YANG Chun-he. Pic

simulation of strength and deformation characteristics of coarse grained materials[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(7): 2077 - 2083.

- [3] 杨光, 张丙印, 于玉贞, 等. 不同应力路径下粗粒料的颗粒破碎试验研究[J]. 水利学报, 2010, 65(3): 338 - 342.
YANG Guang, ZHANG Bing-yin, YU Yu-zheng, et al. An experimental study on particle breakage of coarse-grained materials under various stress path[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2010, 65(3): 338 - 342.
- [4] 朱俊高, 翁厚洋, 吴晓铭, 等. 粗粒料级配缩尺后压实密度试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2394 - 2398.
ZHU Jun-gao, WENG Hou-yang, WU Xiao-ming, et al. Experimental study of compact density of scaled coarse-grained soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(8): 2394 - 2398.
- [5] Itasca Consulting Group Ltd. User manual of PFC2D code[M]. Minneapolis, USA: Itasca Consulting Group Ltd., 2000.
- [6] 郭培玺, 林绍忠. 粗粒料颗粒随机分布的数值模拟[J]. 长江科学院院报, 2007, 24(4): 50 - 52.
GUO Pei-xi, Lin Shao-zhong. Numerical simulation on random distribution of coarse granular material particles[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2007, 24(4): 50 - 52.
- [7] 周伟, 常晓林, 周创兵, 等. 堆石体应力变形细观模拟的随机散粒体不连续变形模型及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 491 - 499.
ZHOU Wei, CHANG Xiao-lin, ZHOU Chuang-bing, et al. Stochastic granule discontinuous deformation model of rockfill and its application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(3): 491 - 499.
- [8] 周伟, 刘东, 马刚, 等. 基于随机散粒体模型的堆石体真三轴数值试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 748 - 755.
ZHOU Wei, LIU Dong, MA Gang, et al. Numerical simulation of true triaxial tests on mechanical behaviors of rockfill based on stochastic granule model[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(4): 748 - 755.
- [9] 马刚, 周伟, 常晓林, 等. 考虑颗粒破碎的堆石体三维随机多面体细观数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1671 - 1682.
MA Gang, ZHOU Wei, CHANG Xiao-lin, et al. Mesoscopic numerical simulation of rockfill considering particle breakage by using three-dimensional stochastic[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(8): 1671 - 1682.

- [10] 马刚, 周伟, 常晓林, 等. 锚杆加固散粒体的作用机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1577 - 1584.
MA Gang, ZHOU Wei, CHANG Xiao-lin, et al. Study of anchorage mechanism of granular mixture[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(8): 1577 - 1584.
- [11] 李长圣, 张丹, 王宏宪, 等. 基于 CT 扫描的土石混合体三维数值网格的建立[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2731 - 2736.
LI Chang-sheng, ZHANG Dan, WANG Hong-xian, et al. 3D mesh generation for soil-rock mixture based on CT scanning[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(9): 2731 - 2736.
- [12] 杨冰, 杨军, 常在, 等. 土石混合体压缩性的三维颗粒力学研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1645 - 1650.
YANG Bing, YANG Jun, CHANG Zai, et al. 3 D granular simulation for compressibility of soil-aggregate mixture[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(5): 1645 - 1650.
- [13] MUNJIZA A. The combined finite-discrete element method[M]. London: John Wiley and Sons Ltd., 2004: 29 - 32.
- [14] 严成增, 郑宏, 孙冠华, 等. 基于数字图像技术的岩土材料有限元-离散元分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(8): 2408 - 2414.
YAN Cheng-zeng, ZHENG Hong, SUN Guan-hua, et al. FDEM of geomaterials based on digital image technology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(8): 2408 - 2414.
- [15] 杜成斌, 孙立国. 任意形状混凝土骨料的数值模拟及其应用[J]. 水利学报, 2006, 37(6): 662 - 667, 673.
DU Cheng-bin, SUN Li-guo. Numerical simulation of concrete aggregates with arbitrary shapes and its application[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2006, 37(6): 662 - 667, 673.
- [16] 程伟峰. 混凝土三维随机凸型骨料模型生成方法研究[J]. 水利学报, 2011, 42(5): 609 - 615.
CHENG Wei-feng. Study on 3-D random packing of convex polyhedron aggregates for concrete[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2011, 42(5): 609 - 615.
- [17] MUNJIZA A, ANDREWS K R F. Penalty function method for combined finite-discrete element systems comprising large number of separate bodies[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 2000, 49(11): 1377 - 1369.
- [18] MUNJIZA A, ANDREWS K R F. NBS contact detection algorithm for bodies of similar size[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 1998, 43(1): 131 - 149.
- [19] MUNJIZA A, ANDREWS K R F, WHITE J K. Combined single and smeared crack model in combined finite-discrete element analysis[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 1999, 44(1): 41 - 57.
- [20] 严成增, 孙冠华, 郑宏, 等. 基于局部单元劈裂的 FEM/DEM 自适应分析方法[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 2064 - 2070.
YAN Cheng-zeng, SUN Guan-hua, ZHENG Hong, et al. Adaptive FEM/DEM analysis method based on the local splitting elements[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(7): 2064 - 2070.