

文章编号:1000-4939(2009)01-0001-07

# 碎石料直剪实验的组合颗粒单元数值模拟\*

严 颖<sup>1</sup> 季顺迎<sup>2</sup>

(大连交通大学 116028 大连)<sup>1</sup> (大连理工大学 116023 大连)<sup>2</sup>

**摘要:** 通过构造三维组合颗粒单元来描述颗粒间的互锁效应,对非规则颗粒材料的力学行为进行了离散元数值模拟,并通过碎石料的直剪实验进行了验证。该组合颗粒的质量与碎石块具有相同的概率分布特性,其几何形态则由不同数目、镶嵌尺寸、组合方位和粒径的球形颗粒进行随机构造。组合颗粒单元在局部与整体坐标之间的转动、力矩和方位关系通过四元素方法进行确定;颗粒之间的作用力采用具有 Mohr-Coulomb 摩擦定律的 Hertz-Mindlin 非线性接触模型,并考虑了非线性法向粘滞力的影响。在不同的法向应力下,对碎石料在直剪实验中的剪切应力和剪胀现象进行了离散元模拟,计算结果与实测结果相吻合;此外,在不同的法向应力和接触摩擦系数下,对碎石料的有效摩擦系数进行了计算和讨论。本文工作验证了组合颗粒单元在非规则颗粒材料的离散元模拟中的可行性。

**关键词:** 直剪实验; 离散元方法; 组合颗粒单元; 非规则碎石; 四元素法

**中图分类号:** TU458; O347. 7

**文献标识码:** A

## 1 引 言

离散元方法(Discrete Element Method, DEM)从上世纪 70 年代建立并最早应用于岩土力学以来,目前已广泛应用于地球物理、化学过程、自然灾害、农业生产和生命科学等诸多研究领域<sup>[1-2]</sup>。由于规则颗粒单元的相互作用和运动规律易于描述,因此在颗粒介质的离散元模拟中,大多采用二维圆盘和三维球体单元。然而,在自然条件下,颗粒介质一般具有不同离散程度的尺寸和形态各异的几何形态,而规则颗粒在单元排列、动力过程等方面与非规则颗粒有很大的差异,为了更加合理地描述具有普遍意义的颗粒介质,球体颗粒外的其它颗粒单元也已相继发展起来,如椭球、柱体和多面体单元等<sup>[3-4]</sup>。另外,如果采用规则单元来描述非规则颗粒的几何

形态,组合单元则是有效的方法<sup>[5-6]</sup>。

在颗粒介质的 DEM 模拟中,具有 Mohr-Coulomb 摩擦准则的线粘弹性接触模型应用非常广泛。实际上,对于绝大多数颗粒材料,非线性接触模型能更加准确地反映颗粒间的作用力与变形、碰撞速度的对应关系<sup>[7-8]</sup>。颗粒之间的非线性接触模型主要包括如下四部分,即 Hertz 法向弹性力、Mindlin 切向弹性力、非线性法向粘滞力和非线性切向粘滞力。目前颗粒介质 DEM 计算中的 Hertz-Mindlin 非线性弹性接触模型已经得到了广泛的应用;非线性法向粘滞力模型目前已经逐步完善,并得到了实验验证<sup>[9]</sup>;对于切向粘滞力,尽管目前已建立了一些非线性模型,但均未得到实验验证。另外,由于切向粘滞力对颗粒介质动力过程的影响非常小,因此,DEM 计算中一般忽略切向粘滞力<sup>[10-11]</sup>。本文的离散元模拟采用非线性颗粒接触模型来计算颗粒的动力过程。

\* 基金项目:国家自然科学基金(10772041, 50808027);兰州大学西部灾害与环境力学教育部重点实验室开放基金(200708)

来稿日期:2007-10-12 修回日期:2008-09-22

第一作者简介:严颖,女,1973 年生,博士,大连交通大学土木与安全工程学院,讲师;研究方向——离散单元法的基本原理及工程应用。

E-mail: yyan@djtu.edu.cn

直剪实验一般用于测量岩土、碎石、粉体等颗粒材料的剪切强度和剪胀性质<sup>[12-14]</sup>,该实验的最大优点是其简便的实验仪器和操作过程。在直剪实验的数值模拟中,最早采用具有强化效应的弹塑性有限元方法(FEM)<sup>[15-16]</sup>。由于基于连续介质理论的FEM不能反映出粒径、颗粒形态、孔隙比、粗糙度等材料参数对模拟结果的影响,因此,近几年DEM方法在颗粒介质的直剪实验,以及其它剪切实验中得到了广泛的应用<sup>[17-18]</sup>。

在目前直剪实验的DEM模拟中,采用的均是规则球形或圆盘形颗粒单元,其模拟结果不能充分反映规则颗粒的剪切性质。为此,本文采用基于组合颗粒单元的离散元方法,对不规则碎石料的直剪实验进行数值模拟,并通过与实验结果的对比分析来检验组合颗粒单元对不规则颗粒介质数值模拟的可行性。

## 2 基于组合颗粒的离散元模型

为模拟不规则颗粒体的力学行为,可采用不同粒径和重叠长度的规则颗粒来构造组合颗粒单元。该方法在目前 Itasca 公司的 PFC 计算软件中得到了应用<sup>[5]</sup>。由于它是在整体坐标下计算组合颗粒单元的动力过程,在每个时间步都要重新计算组合颗粒单元在整体坐标下的转动惯量,计算过程繁琐;此外,在目前颗粒非线性碰撞模型中,非线性粘滞力还尚未很好地与 Hertz-Mindlin 模型相结合。

为此,本文首先采用有限分割法计算组合颗粒的质量、质心和转动惯量;分别采用整体和局部坐标来计算组合颗粒的作用力、力矩和转动分量(如图1所示),并采用四元素法进行坐标转换矩阵的计算,其中局部坐标的原点位于组合颗粒单元的质心处;在 Hertz-Mindline 弹性接触的基础上,进一步考虑非线性法向粘滞力的影响,建立一个计算简捷、精度较高的基于组合颗粒单元的离散元模型。

### 2.1 组合颗粒单元的几何参数

采用有限分割法,将组合颗粒剖分为若干个体积为  $V$  的立方体单元。对于任意一个单元,只有当

其包含于某一个基本颗粒之内时才考虑其对组合颗粒的贡献,并由此确定出组合颗粒单元的质量、质心和局部坐标下的转动惯量。基于以上有限分割法,组合颗粒单元的质量、质心和转动惯量分别为

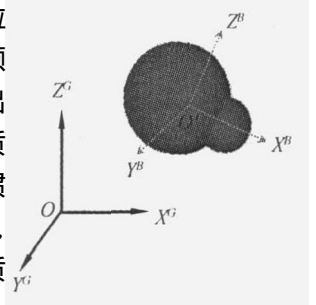


图1 组合颗粒单元的整体与局部坐标示意图

$$M = \sum_{k=1}^K V_k \quad (1)$$

$$x_c = \frac{\sum_{k=1}^K x_k V_k}{M} \quad (2)$$

$$I_{xx} = \sum_{k=1}^K [I_{xx}^k - x_{kj}^2 V_k] \quad (3)$$

式中,  $M$ 、 $x_c$  和  $I_{xx}$  分别为组合颗粒介质的质量、质心和局部坐标下的转动惯量,  $\rho$  为颗粒密度,  $K$  为有效的立方体单元数,  $V_k$  和  $x_k$  分别为立方体单元体积和形心坐标。以上三个几何参数的计算精度在很大程度上依赖于剖分单元的尺寸。本文计算表明,当取  $x = y = z = D_{min}/20$  时,计算结果接近于真实值,精度在 97% 以上。

### 2.2 组合颗粒运动的四元素方法

为对组合颗粒单元的力矩、转动速度等动力学分量在整体坐标和局部坐标之间进行自由转换,本文采用四元素法进行计算。四元素方法已广泛地应用于分子动力学、固体力学和刚体动力学等诸多研究领域<sup>[19]</sup>。对于组合颗粒单元,设有整体(固定)坐标系  $e^G$  和局部(移动)坐标系  $e^B$ ,并通过坐标转换矩阵  $A$  相联系,即

$$e^B = A \cdot e^G \quad (4)$$

$$e^G = A^T \cdot e^B \quad (5)$$

这里转换矩阵有性质  $A^{-1} = A^T$ 。该矩阵  $A$  可以由四元素方法确定。在四元素方法中,主要有四个标量,即<sup>[19]</sup>

$$Q = (q_0, q_1, q_2, q_3) \quad (6)$$

且有性质

$$q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1 \quad (7)$$

采用四元素方法,该坐标转换矩阵可写为

$$A = \begin{pmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

在局部坐标下,组合颗粒单元的转动加速度为

$$\ddot{\alpha}_x^B = \frac{M_x^B}{I_{xx}} + \left( \frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} \right) \ddot{\alpha}_y^B \ddot{\alpha}_z^B \quad (9)$$

$$\dot{\omega}_y^B = \frac{M_x^B}{I_{yy}} + \left(\frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}}\right) \omega_z^B \omega_x^B \quad (10)$$

$$\dot{\omega}_z^B = \frac{M_z^B}{I_{zz}} + \left(\frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}}\right) \omega_x^B \omega_y^B \quad (11)$$

式中  $I_{xx}$ 、 $I_{yy}$ 、 $I_{zz}$  为绕三个局部坐标轴的转动惯量。组合颗粒在局部坐标下的力矩分量可由其在整体坐标下的力矩分量通过坐标转换确定,即

$$\begin{pmatrix} M_x^B \\ M_y^B \\ M_z^B \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} M_x^G \\ M_y^G \\ M_z^G \end{pmatrix} \quad (12)$$

这里  $M^B$ 、 $M^G$  分别为组合颗粒单元绕局部坐标轴和整体坐标轴的力矩,可由 DEM 模拟中颗粒间的作用力进行计算。

当各组合颗粒在局部坐标下的角速度确定后,其在整体坐标下的角速度为

$$\begin{pmatrix} \dot{\omega}_x^G \\ \dot{\omega}_y^G \\ \dot{\omega}_z^G \end{pmatrix} = A^T \begin{pmatrix} \dot{\omega}_x^B \\ \dot{\omega}_y^B \\ \dot{\omega}_z^B \end{pmatrix} \quad (13)$$

该四元素分量与组合颗粒的角速度满足如下微分方程<sup>[20]</sup>

$$\begin{pmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} W \begin{pmatrix} 0 \\ B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} \quad (14)$$

其中

$$W = \begin{pmatrix} q_0 & -q_1 & -q_2 & -q_3 \\ q_1 & q_0 & -q_3 & q_2 \\ q_2 & q_3 & q_0 & -q_1 \\ q_3 & -q_2 & q_1 & q_0 \end{pmatrix}$$

通过以上整体坐标与局部坐标之间的转换关系,组合颗粒的转动分量可以采用四元素方法在时域上进行迭代求解。

### 2.3 颗粒间的非线性接触模型

对于组合颗粒单元,由于颗粒间的接触是两个基础规则球体单元间的相互作用,因此可按球体颗粒之间的力学模型进行计算。颗粒之间的接触力主要由弹性力和粘滞力组成,同时考虑颗粒之间基于 Mohr-Coulomb 准则的滑动摩擦。对于弹性作用力,本文采用基于 Hertz-Mindline 的非线性接触模型。在法线方向,颗粒之间的作用力包括 Hertz 弹性力和非线性粘滞力,即<sup>[21]</sup>

$$F_n = K_n x_n^{3/2} + \frac{3}{2} A K_n x_n^{1/2} \dot{x}_n \quad (15)$$

式中:  $K_n$  为法向刚度系数;  $x_n$  和  $\dot{x}_n$  分别为颗粒的法

向变形和应变率;  $A$  为颗粒的材料特性,并依赖于弹性模量、粘性系数和泊松比等力学参数,可通过一定速度下颗粒碰撞的回弹系数确定<sup>[17]</sup>。

在颗粒接触的切线方向,基于 Mindline 理论和 Mohr-Coulomb 摩擦定律,并忽略粘滞力影响,该切向接触力为

$$F_s^* = K_s x_n^{1/2} x_t \quad (16)$$

$$F_s = \min(F_s^*, \text{sign}(F_s^*) \mu F_n) \quad (17)$$

其中法向刚度  $K_n$  和切向刚度  $K_s$  分别为<sup>[22]</sup>

$$K_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \quad (18)$$

$$K_s = 8 G^* \sqrt{R^*} \quad (19)$$

其中:  $E^* = \frac{E}{2(1-\nu^2)}$ ;  $R^* = \frac{R_A R_B}{R_A + R_B}$ ;  $G^* = \frac{G}{2(1-\nu)}$ ;  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ 。

对于非线性碰撞接触模型,最大时间步长为<sup>[23]</sup>

$$t_{\max} = \frac{R_{\min}}{0.163 + 0.8766 \sqrt{G}} \quad (20)$$

一般实际计算的时间步长要略小于最大时间步长,有

$$dt = t_{\max} \quad (21)$$

式中  $\alpha$  为经验系数。在高配位数 ( $> 4$ ) 情况下,可采用较小的时间步长,即取  $dt = 0.2 t_{\max}$ ; 在低配位数 ( $< 4$ ) 情况下,取为  $dt = 0.4 t_{\max}$ <sup>[23]</sup>。在本文计算中,由于颗粒单元密集排列,配位数较高,取系数  $\alpha = 0.2$ 。

## 3 碎石料直剪实验的离散元模拟

采用组合颗粒单元,在三种不同法向应力 (100、200 和 300kPa) 下对碎石料的直剪实验进行离散元模拟,以检验基于组合颗粒的离散元方法在模拟非规则颗粒力学行为中的可靠性。

### 3.1 组合颗粒单元的计算参数

在 DEM 模拟中,碎石料为混凝土石灰石骨料,其样本如图 2 所示。通过随机选取 300 个碎石颗粒,测量统计发现其质量符合对数正态分布,其概率分布参数  $\mu = -0.117$ ,  $\sigma = 0.432$ 。

针对碎石颗粒在形态上的不规则性,这里采用四种不同组合颗粒单元的混合体来模拟 (如图 3 所示)。在该组合颗粒单元设置中,颗粒间的重叠量在  $[0, 0, 0.5 D_{\min}]$  内随机分布,其中  $D_{\min}$  为组合颗粒体中最小的颗粒直径。如图 3 所示,组合颗粒单元 (a)、(c)、(d) 中的各基本颗粒具有相同的半径,而颗粒单元 (b) 中的大颗粒直径是小颗粒的 2 倍。本文

力求通过以上四种组合颗粒单元的混合方式来探索组合颗粒单元在描述不规则颗粒介质宏观力学行为的可行性。除碎石料的质量分布外,本文还对其密度、孔隙比等基本计算参数进行了测量,部分参数列于表 1 中。

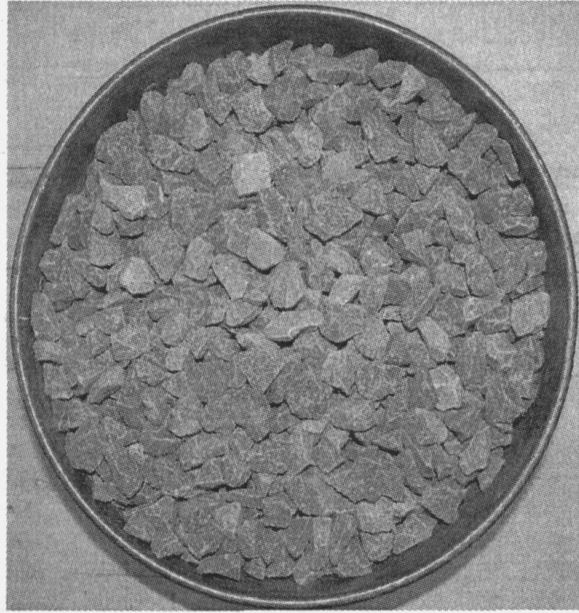


图 2 直剪实验中碎石料颗粒示意图

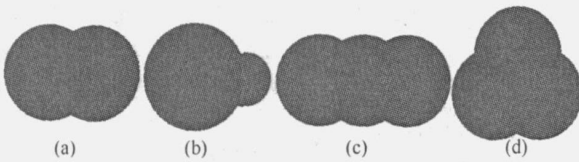


图 3 DEM 模拟直剪实验中采用的组合颗粒单元

表 1 碎石料的部分力学参数

参数名称	符号	单位	数值
碎石料总质量	$M$	g	973.6
单颗粒质量	$m$	g	0.4 ~ 2.0
规则颗粒直径	$D$	mm	1.30 ~ 2.42
颗粒比重			2.55
孔隙度	$e$		0.46
杨氏模量	$E$	GPa	58.54
泊松比			0.221

组合颗粒单元尺寸由其质量来确定,而质量又按以上实测颗粒质量的对数正态分布函数通过 Monte-Carlo 方法随机生成。采用以上四种组合颗粒单元的随机混合模式,颗粒间的互锁现象可以较为理想的实现。如果采用规则圆形颗粒,即便是模拟几何形态相对规则的砂土介质,颗粒间的互锁现象也很难实现。这时可通过增加颗粒间接触摩擦系数的方法来提高其在宏观尺度上的剪切特性。该接触摩擦系数只有增加到  $\mu_p = 60$  或  $80$  时,才能得到理想的计算结果<sup>[24]</sup>。这时的接触摩擦系数已远远超过

其实际值。为此,本文希望通过采用组合颗粒单元合理地描述不规则颗粒间的互锁现象,准确地模拟颗粒介质的剪切特性。

### 3.2 离散元模拟中直剪盒的参数设置

直剪盒主要由上剪切盒和下剪切盒两部分构成,且两剪切盒之间设置高度为半个平均粒径的剪切缝。类似于实际的剪切实验过程,在上剪切盒的顶盖上施加向下竖向载荷;上剪切盒在水平方向固定,在竖直方向可自由运动;下剪切盒在水平方向上按给定的剪切速率移动,在竖直方向上固定。在 DEM 模拟中,剪切盒设置及其内部颗粒介质如图 4 所示,图中组合颗粒体的颜色用于区分不同的颗粒单元。

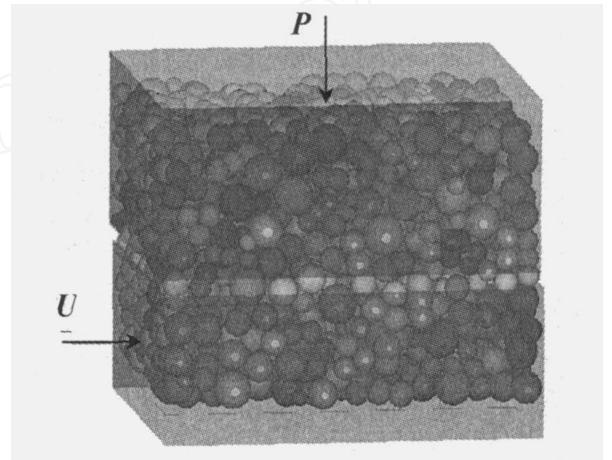


图 4 组合颗粒单元在直剪实验 DEM 模拟中的示意图

对于上、下剪切盒之间的剪切带,所承受的总竖向力为上剪切盒重量  $W_B$ 、内部颗粒介质重量  $W_P$  和顶盖施加竖向力  $P$  的总和,剪力可由剪切盒在水平方向上的静力平衡方程来确定。由此,剪切带上的法向力和剪切力分别为

$$F_N = P + W_P + W_B,$$

$$F_S = \sum_{iw=1}^{N_{wall}} (N_{X_{iw}} + S_{X_{iw}}) \quad (22)$$

式中:  $N_{X_{iw}}$  为颗粒与上剪切盒左右侧壁之间的法向作用力;  $S_{X_{iw}}$  为颗粒作用于上剪切盒的切向作用力。上剪切盒由 4 个侧壁和 1 个顶盖组成,因此总墙数  $N_{wall} = 5$ 。

若剪切盒的长度和宽度分别为  $L$  和  $B$ ,剪切速率为  $U$ ,则  $t$  时刻的剪切带面积为  $B(L - Ut)$ ,此时的正应力和切应力分别为

$$\sigma_z = \frac{F_N}{B(L - Ut)}, \quad \tau_x = \frac{F_S}{B(L - Ut)} \quad (23)$$

剪切带处的平均摩擦系数(即剪切应力与法向应力的比值)可以写为

$$\mu_b = \frac{-\dot{x}}{\dot{z}} = \frac{F_s}{F_N} \quad (24)$$

在 DEM 模拟中,颗粒单元被随机放置于剪切盒内。为获得较为密集的初始排列状态,初始颗粒大小可设为其实际大小的一半,然后再缓慢增长到所需粒径。在颗粒生长过程中,颗粒之间因相互碰撞而达到新的平衡位置。采用颗粒介质随机放置 - 生长方式的初始排列是目前颗粒介质离散元模拟常用的方法之一<sup>[11]</sup>。当颗粒生长到其设计粒径后,再施加竖向外力于上顶盖之上,从而使颗粒在法向力作用下更为密实的排列。当颗粒材料达到稳定平衡状态后,再以剪切速度  $U$  推动下剪切盒,进行颗粒介质的直剪实验,直至进入临界状态。因此,整个颗粒介质直剪实验的 DEM 模拟过程由颗粒随机放置、生长、加载和剪切等四部分组成。部分计算参数列于表 2 中。

表 2 DEM 模拟中直剪盒的部分计算参数

参数名称	符号	单位	数值
剪切盒长度	$L$	cm	10
剪切盒宽度	$B$	cm	10
上、下剪切盒的高度	$H_1, H_2$	cm	3.71
颗粒间的接触摩擦系数	$\mu_p$		0.7
颗粒与剪切盒侧壁摩擦系数	$\mu_{ws}$		0.2
颗粒与剪切盒上下盖摩擦系数	$\mu_{wb}$		1.0
实验中的剪切速率	$U$	mm/min	3.0
最大剪切长度	$S$	mm	15
球体颗粒数目	$N_p$		2300
组合颗粒数目	$N_c$		926

### 3.3 直剪实验及其数值模拟结果

本文选用图 2 所示的碎石料进行了相关的直剪实验测试,其参数与表 1 和表 2 中相一致,并通过振动捣实方获得碎石料的初始密集排列。试验中测试了不同法向力作用下,碎石料剪切过程中竖向位移和水平力的变化过程。在法向应力分别为 100、200 和 300kPa 时,得到的竖向位移和剪切应力示于图 5 中。结果表明,离散元模拟结果与实验结果非常吻合。

从竖向位移来看,随着剪切位移的增加,颗粒介质的体积膨胀现象非常明显。特别是在较低的法向应力下,剪胀效应更为突出。另外,实验和数值结果均表明试样顶部在剪切初始阶段有一个下的竖向位移,即剪缩现象。从图 5(a) 中可以看出,向下的竖向位移一般很小 ( $< 2\text{mm}$ ),且随竖向载荷的增加而增加,表明颗粒介质,特别是剪切面附近的颗粒介质,在剪切过程中同时存在滚动和平动现象。滚动过程在剪切初期首先使颗粒介质趋向密集排列,竖向荷载越大,这种密集排列的效果越明显。随着剪切位移

的进一步增加,滚动过程又进一步使颗粒介质发生明显的膨胀特性。颗粒介质的这种剪缩 - 剪胀特性是其典型的剪切特性之一,并已在其它碎石料剪切实验中得到验证<sup>[25-26]</sup>。

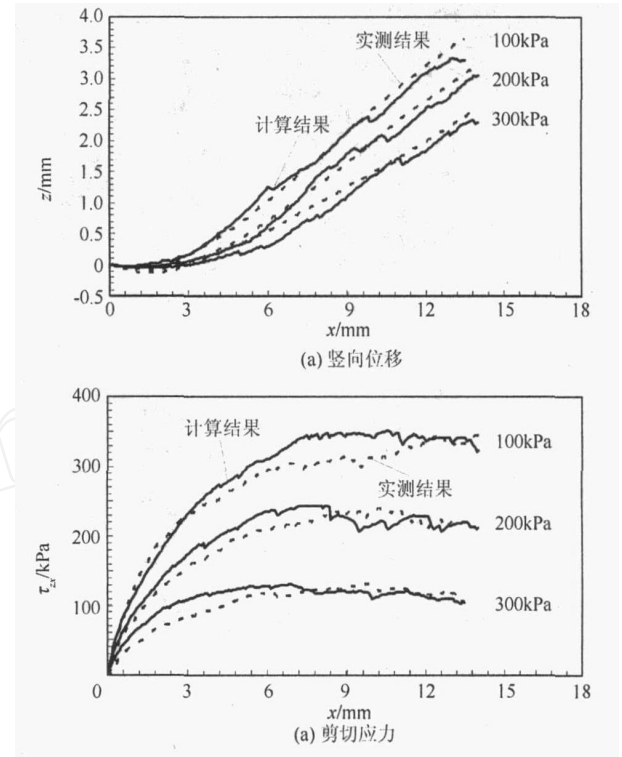


图 5 三种不同应力下直剪实验的实测和计算结果

在直剪过程中的临界状态下,颗粒排列及其内部力链分布如图 6 所示。力链由两接触颗粒中心的连线构成,力链宽度表示法向拉触力的大小。从力链主方向和大小分布来看,剪切盒内颗粒间的作用力表现为强烈的各向异性,并主要通过颗粒介质在上、下盒的斜对角线方向承担剪切应力和法向应力。颗粒介质直剪实验中的各向异性现象,无论在 DEM 模拟中,还是力学实验中,均表现得非常明显<sup>[17,27]</sup>。

采用以上组合颗粒单元和计算参数,在不同的法向应力和接触摩擦系数下,进一步对直剪实验进行了一系列数值模拟。由此确定的有效摩擦系数如图 7 所示。从图 7(a) 可以看出,有效摩擦系数随着法向应力的增加而减小。这一现象可以通过散体材料剪切强度的 Mohr 包络线理论很好地解释<sup>[12,14]</sup>。从图 7(b) 可以看出,碎石料的有效摩擦系数随着接触摩擦系数的增加而增大,但其增长速率随着接触摩擦系数的增加而不断减小。这主要是由于在剪切过程中颗粒同时会发生滑动和滚动现象,接触摩擦系数的增加将进一步激发颗粒滚动效应的发生,从而使有效摩擦系数的增长要低于接触摩擦系数的增

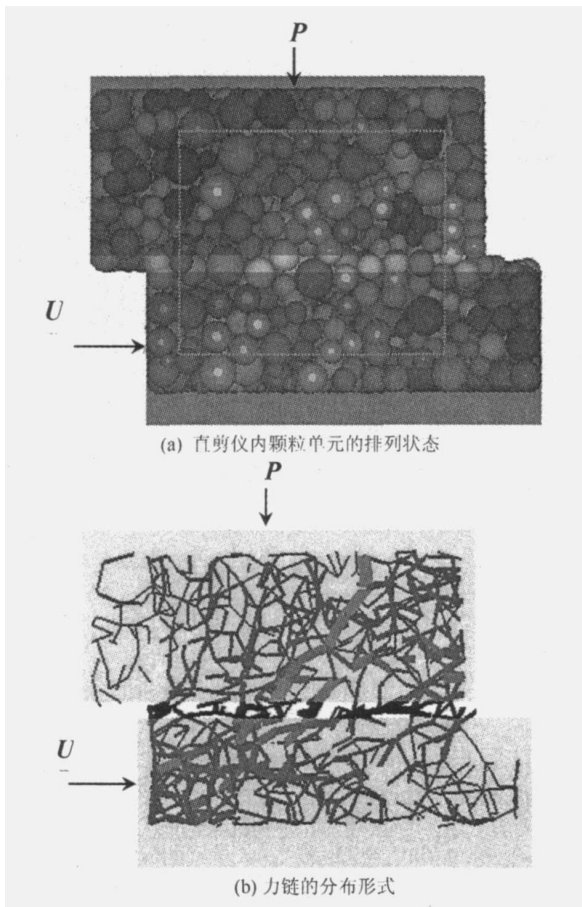


图 6 直剪仪内颗粒单元的排列状态和力链的分布形式

长。目前,有关颗粒介质滑动摩擦和滚动摩擦的竞争转变机制研究是提高颗粒介质数值模拟精度的一个重要研究内容。

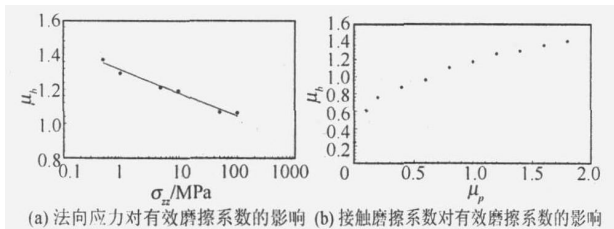


图 7 法向应力和接触摩擦系数对有效摩擦系数的影响

## 4 结 语

本文采用组合颗粒单元,对碎石料的直剪实验进行了离散元数值模拟。组合颗粒单元由不同颗粒数目、粒径和重叠长度的规则球体单元构成,采用有限分割法计算了组合颗粒单元的质量、质心和转动惯量,采用四元素法计算了组合颗粒单元在整体和局部坐标下的坐标转换关系,颗粒间的碰撞作用采用 Hertz-Mindlin 非线性弹性模型,同时又考虑了法向非线性粘滞力的影响。通过对不同法向应力下碎

石料直剪实验的数值模拟,计算的剪切应力和竖向位移与实验结果相吻合,表明组合颗粒单元能够更好地模拟碎石料的剪胀效应和互锁现象。较好地验证了组合颗粒单元对碎石料进行离散元模拟的有效性。此外,在不同的法向应力和接触摩擦系数下,对碎石料的有效摩擦系数的计算结果表明,有效摩擦系数随法向应力的增加而降低,随接触摩擦系数的增加而升高。

## 参 考 文 献

- [1] Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, 29(1):47-65.
- [2] 徐泳,孙其诚,张凌,等. 颗粒离散元法研究进展[J]. 力学进展, 2003, 33(2):251-260.
- [3] Cleary P W, Sawley M L. DEM modelling of industrial granular flows: 3D case studies and the effect of particle shape on hopper discharge[J]. Applied Mathematical Modelling, 2002, 26: 89-111.
- [4] Ting J M, Khwaja M, Meachum L, et al. An ellipse-based discrete element model for granular materials[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1993, 17: 603-623.
- [5] Itasca Consulting Group Inc. Online manual of particle flow code in 3 dimensions (PFC3D) [R], 2003.
- [6] 刘凯欣,高凌天. 离散元研究的评述[J]. 力学进展, 2003, 33(4):483-490.
- [7] Ji S, Shen H. Effect of contact force models on granular flow dynamics[J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 2006, 132(11):1252-1259.
- [8] Mishra B K, Murty C V R. On the determination of contact parameters for realistic DEM simulations of ball mills[J]. Powder Technology, 2001, 115:290-297.
- [9] Schager T, Poschel T. Coefficient of restitution of viscous particles and cooling rate of granular gases[J]. Physical Review E, 1998, 57(1):650-654.
- [10] Campbell C. Granular shear flows at the elastic limit[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2002, 465: 261-291.
- [11] 季顺迎. 非均匀颗粒介质的类固-液相变行为及其本构模型[J]. 力学学报, 2007, 39(2):223-237.
- [12] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州:黄河水利出版社, 1999: 162-169.
- [13] 闵弘,刘小丽,魏进兵,等. 现场室内两用大型直剪仪研制(I):结构设计[J]. 岩土力学, 2006, 27(1):168-172.
- [14] 刘小丽,罗锦添,闵弘,等. 大型现场室内两用直剪仪研制(II):试验测试[J]. 岩土力学, 2006, 27(2):336-340.
- [15] Tejchman J. FE analysis of shearing of granular bodies in a direct shear box[J]. Particulate science and Technology, 2005, 23:229-248.
- [16] Cividini A, Goda G. A finite element analysis of direct shear

- tests on stiff clays[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1992, 16:869-886.
- [17] Thornton C, Zhang L. Numerical simulation of the direct shear test[J]. Chemical Engineering & Technology, 2003, 26(2): 153-156.
- [18] Liu S H. Simulating a direct shear box test by DEM[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43:155-168.
- [19] Fritzer H P. Molecular symmetry with quaternions [J]. Apectrochimica Acta part A, 2001, 57: 1919-1930.
- [20] Allen M P, Tildesley D J. Computer simulation of liquids [M]. London: Oxford University Press, 1987:30-90.
- [21] Ramirez R, Poschel T, Brilliantov N V, et al. Coefficient of restitution of colliding visco-elastic sphere[J]. Physical Review E, 1999, 60(4):4465-4472.
- [22] Di Renzo A, Di Maio F P. An improvedinte gral non-linear model for the contact of particles in distinct element simulations [J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60: 1303-1312.
- [23] Kremmer M, Favier J F. A method for representing boundaries in discrete element modelling - Part II: Kinematics[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001, 51:1423-1436.
- [24] 周健, 池永. 土的工程力学性质的颗粒流模拟[J]. 固体力学学报, 2004, 25(4):377-382.
- [25] Dittes M, Labuz J F. Field and laboratory testing of St. Peter Sandstone[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(5): 372-380.
- [26] 周健, 池永. 砂土力学性质的细观模拟[J]. 岩土力学, 2003, 24(6):901-906.
- [27] Fannin R J, Eliadorani A, Wilkinson M T. Shear strength of cohesionless soils at low stress[J]. Geotechnique, 2005, 55(6): 467-478.

www.cnki.net

## Numerical Simulation of Direct Shear Test for Rubbles with Clumped Particles

Yan Ying<sup>1</sup> Ji Shunying<sup>2</sup>

(Dalian Jiaotong University, School of Traffic and Transportation, 116028, Dalian, China)<sup>1</sup>

(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, 116023, Dalian, China)<sup>2</sup>

**Abstract :** The discrete element model (DEM) was applied to simulate the direct shear tests of irregular limestone rubbles by constructing clump particles, where the mass of clumped-particle has the same probability distribution with that of the real rocks, and their shapes are constructed with various particle number, overlap, orientation and size of regular particles. With these clumped particles, the interlock of rocks in the direct shear test can be modeled. The nonlinear contact force model with Mohr-Coulomb yielding criteria is adopted to model the viscous-elastic interaction among clumped particles. The quaternion method is introduced to model the motion and orientation of the clumped particles between local and global coordinates. With different normal loads, the simulated shear force and the volume dilation in the direct shear test are compared well with that of laboratory measurements. The influences of normal stresses and contact friction on the bulk friction coefficient are discussed based on the DEM results. The reliability of clumped-particles for DEM simulation is validated in modeling the mechanical behaviors of irregular particles.

**Keywords:** *direct shear test, discrete element method (DEM), clumped particle, irregular rubble, quaternion method.*

## Bubble Motion in Submerged Abrasive Water Jets

Lu Yiyu<sup>1</sup> Xiang Wenying<sup>2</sup> Li Xiaohong<sup>1</sup>

(College of Resources and Environmental Science, Chongqing University, 400044, Chongqing, China)<sup>1</sup>

(College of Urban Construction & Environmental Engineering, Chongqing University, 400045, Chongqing, China)<sup>2</sup>

**Abstract :** Based on the analysis of bubble motion in the submerged abrasive water jet, a bubble motion equation of the submerged abrasive water jet was set up and the characteristics of bubble collapse were investigated. The effects of the abrasive concentration and ambient pressure on the time of bubble collapse were simulated. It is shown that the viscosity coefficient of fluid increases with the abrasive concentration of the submerged abrasive water jet, and the time of bubble collapse becomes longer and cavitaing erosion ability is weakened, while the time of bubble collapse becomes shorter as the ambient pressure increases.

**Keywords:** *submerged abrasive water jets, bubble, collapse.*

## Steady State Response of Circular Tunnel in Saturated Soil Based on Porous Medium Theory

Liu Linchao<sup>1</sup> Yang Xiao<sup>2</sup>

(Institute of Applied Mathematics and Mechanics, 200072, Shanghai, China)<sup>1</sup>

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, 200072, Shanghai, China)<sup>2</sup>

**Abstract :** Based on porous medium theory, the steady state response of a liquid-saturated circular tunnel is investi-