

颗粒形态对离散介质剪切强度的影响

严 颖¹, 季顺迎²

(1. 大连交通大学土木与安全工程学院, 大连 116028; 2. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116023)

摘 要: 自然条件下, 颗粒介质大多以非规则单元形态存在。非规则几何形态对颗粒介质的宏观力学性能有很大影响。针对颗粒单元的不同几何形态, 采用团颗粒单元对离散介质的直剪试验过程进行了离散元数值计算, 详细地讨论了颗粒形态对离散介质剪切强度的影响。该非规则颗粒由不同形态、不同数目、镶嵌尺寸、组合方位和颗粒大小的球形颗粒进行随机构造, 其在局部与整体坐标之间的转动、力矩和方位关系通过 4 元素方法进行确定, 基本球体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。通过构造 7 种具有相同的质量概率分布的不同形态的团颗粒, 在不同法向应力下, 对团颗粒的直剪试验进行了离散元模拟, 分析了不同形态颗粒的剪切强度。通过对不同形态颗粒介质剪切强度的数值分析, 进一步揭示了非规则颗粒间的咬合互锁效应, 为分析非规则颗粒的宏观动力特性提供了依据。

关 键 词: 离散介质; 颗粒形态; 剪切强度; 直剪试验; 离散元

中图分类号: O 24

文献标识码: A

Effects of particle shape on shear strength of discrete media

YAN Ying¹, JI Shun-ying²

(1. School of Civil and Safety Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China;

2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: Granular materials exhibit irregular shapes under natural conditions, and the particle shape has great effects on its macro mechanical behaviors. Direct shear tests are simulated by using discrete element model (DEM) with clumps of spheres resembling the real shapes of granular materials, and the effects of different particle shapes on the shear strength are discussed. A clump is constructed by clumping spheres with different numbers, diameters, orientations and overlaps. The quaternion method is introduced to transform the rotation, the resultant force and the moment acting on a clump in global and local coordinates. The interactions between particles are described by Hertz-Mindlin contact model incorporated with the nonlinear normal viscous force and Mohr-Coulomb friction law. Seven different clumps with the same mass probability distribution are generated and used to simulate direct shear tests under different normal stresses. For each clump, the shear strength is analyzed. With the simulated results, it is shown that the interlocking among particles can be simulated well with the clumps of spheres. The presented model provides a foundation for analyzing the macro behaviors of irregularly shaped granular materials.

Key words: discrete media; particle shape; shear strength; direct shear test; discrete element

1 前 言

自然条件下, 颗粒单元一般具有不同离散程度的尺寸和形态各异的几何形状。规则与非规则颗粒在单元排列、动力过程和运动形态等方面均有很大差异。在离散单元法数值模拟中, 通常采用二维圆盘或三维球体来模拟颗粒的几何形态。然而, 这种

规则颗粒并不能很好地模拟真实离散介质的力学性质^[1-2]。为了更加合理地描述颗粒介质的非规则几何形态和颗粒间的互锁现象, 通常采用 3 种方法。一是直接定义法, 如椭球、柱体和多面体单元等, 通过一定的方程进行非圆/球形颗粒的描述^[3-4]。二是具有粘接破碎功能的团颗粒单元^[5-6]。它通过规则颗粒的粘接构造非规则单元, 基本颗粒单元间没有

收稿日期: 2009-05-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 50808027, 10772041); 教育部留学回国人员科研启动基金(No. 2007-1108, 2008-890)。

第一作者简介: 严颖, 女, 1973 年生, 副教授。主要从事计算固体力学方面的研究。E-mail: yyan@djtu.edu.cn

重叠量,并且在一定的作用力下发生破碎。三是通过规则颗粒的镶嵌构造非规则组合单元^[7-9]。这种组合颗粒的基本单元间没有作用力,可以视为一个刚体。它通过采用不同大小、数量和镶嵌程度的规则颗粒单元精确地构造不同形态的组合颗粒,且颗粒单元的接触计算是基于规则颗粒的,计算简单,得到了较广泛的应用。

本文采用组合颗粒单元来模拟颗粒介质的非规则几何形态。该组合颗粒又可称为团颗粒^[7-8]。对于团颗粒单元的转动、力和力矩在整体和局部坐标系之间的转换,采用四元素法来计算。四元素法具有计算速度快,不出现奇异等优点,被广泛应用于分子动力学、量子力学和刚体动力学等领域。

直剪试验具有仪器设备简单、操作过程方便、适用范围广等优点,是测定岩土、碎石、粉体等颗粒材料剪切强度常用的一种试验方法^[10-12]。对直剪试验的数值模拟,分为两类:即基于连续介质力学的有限单元法和基于离散介质力学的离散单元法^[13-15]。由于连续介质理论不涉及颗粒材料的粒径大小、几何形态、孔隙比等微观特征,而这些因素又恰恰是影响数值模拟结果的重要因素。因此,近几年离散单元法在颗粒介质的直剪试验,以及其它剪切试验中得到了广泛的应用^[6-7]。

本文采用团颗粒单元模拟颗粒介质的非规则几何形态,对颗粒介质的直剪试验进行离散元数值模拟,并重点讨论颗粒形态对颗粒介质剪切强度的影响。

2 非规则颗粒直剪试验离散元模型

2.1 非规则颗粒单元的离散元模型^[9]

在非规则颗粒的离散元模拟中,非规则团颗粒单元是由若干个基本球形颗粒在不同方位和重叠量下组合而成的。由于基本颗粒间组合方位和重叠量的任意性,团颗粒的体积、形心不宜由基本单元直接推算。此时,采用有限分割法可合理、快速地计算团颗粒的体积和形心。

在团颗粒单元的运动过程中,团颗粒所受的力是其所有基本规则单元的合力,即各基本单元首先参与接触计算,并将其受到的集中力、力矩传递给团颗粒,并由此计算团颗粒在计算域内的动力过程。这时,团颗粒与基本颗粒间需要力、位移和速度的相互传递。在 PFC^{3D} 程序中,组合团颗粒与基本颗粒的运动均是在整体坐标下求解计算,并最终转化为求解一个线性方程组。该方法计算量大,也易出现病态方程。为此,本文对团颗粒和基本单元

分别建立整体坐标系(X^G, Y^G, Z^G)和局部坐标系(x^B, y^B, z^B),如图 1 所示。采用 4 元素方法对两个坐标系间的参量进行转换。该方法计算简单、稳定性强。

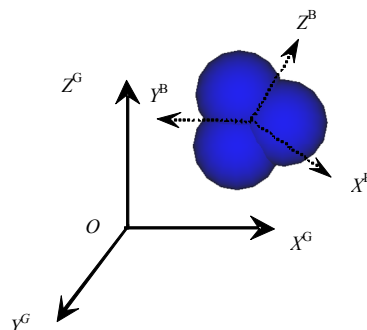


图 1 非规则团颗粒单元的整体与局部坐标系示意图
Fig.1 Global and local coordinates in DEM simulation of a clump

对于非规则团颗粒单元,团颗粒间的接触模拟是建立在基本规则球体单元间相互作用的基础上,因此可采用球体颗粒的接触模型进行计算。本文采用基于 Hertz-Mindlin 的非线性接触模型,并考虑法向的非线性粘滞力,忽略切向粘滞力的影响。

2.2 直剪试验的离散元数值模型

直剪试验是将试样放于直剪盒内,并在一定的法向力和剪切速率下测量试样的剪切强度。直剪盒主要由上剪切盒和下剪切盒两部分构成。在上剪切盒的顶盖上施加向下的竖向载荷,下剪切盒在水平方向上按给定的剪切速率移动。同时,上剪切盒在水平方向固定,在竖直方向可自由运动,下剪切盒在竖直方向上固定。

在离散元数值模拟中,颗粒单元首先被随机放置于剪切盒内。为获得较为密集的初始排列状态,初始颗粒大小设为其实际大小的一半,然后缓慢增长到所需粒径。在这一过程中,颗粒间因相互碰撞达到新的平衡位置。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,使颗粒在法向力作用下获得更为密实的排列。当达到稳定平衡状态后,再以剪切速率 U 推动下剪切盒,进行直剪试验,直至进入临界状态。本文采用的非规则颗粒样本的总质量为 0.9 kg,每个颗粒按质量的概率分布随机生成,其质量符合对数正态分布,且概率分布参数 $\mu = -1.09$, $\sigma = 0.56$,最大团颗粒的质量在 0.6g~1.8 g 之间取值。直剪试验的部分计算参数列于表 1 中。

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、内部颗粒介质重量和施加于顶盖

的竖向力之和, 如图 2 所示。

表 1 DEM 模拟中直剪盒的部分计算参数
Table 1 Parameters of direct shear tests in DEM simulation

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、下剪切盒高度	H_1, H_2	cm	3.71
颗粒接触摩擦系数	μ_p		0.0~1.0
侧壁摩擦系数	μ_{ws}		0.2
上下盖摩擦系数	μ_{wb}		1.0
实验中的剪切速率	U	mm/min	15.0
最大剪切长度	S	mm	15
碎石料总质量	M	g	900
单颗粒质量	m	g	0.64~1.80
颗粒密度	ρ	kg/m ³	2.55
杨氏模量	E	GPa	0.5
泊松比	μ		0.25
团颗粒数目	N_c		1 008

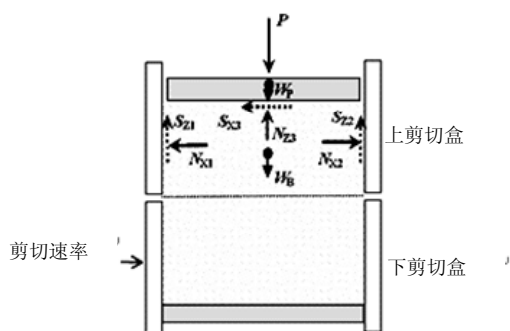


图 2 上剪切盒上的作用力
Fig.2 Forces acting on the upper shear box

剪切带处的法向力和剪切力的计算方程为

$$F_N = P + W_p + W_B \quad (1)$$

$$F_S = \sum_{iw=1}^{N_{wall}} (N_{x_{iw}} + S_{x_{iw}}) \quad (2)$$

式中: F_N 和 F_S 是剪切带上的法向力和切向力, P 为上剪切盒顶盖的法向外力, W_p 和 W_B 分别为上剪切盒内部颗粒的重量和上剪切盒重量。上剪切盒由 4 个侧壁和 1 个顶盖组成, 因此总墙数 $N_{wall} = 5$ 。 $N_{x_{iw}}$ 为颗粒同侧壁左右侧壁的法向作用力, $S_{x_{iw}}$ 为颗粒作用于上剪切盒的切向作用力。

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可由下式计算

$$\sigma_{zz} = \frac{F_N}{B(L - Ut)}, \quad \tau_{zx} = \frac{F_S}{B(L - Ut)} \quad (3)$$

式中: σ_{zz} 和 τ_{zx} 分别为剪切带处的法向和切向应力。

这样, 剪切带处的有效摩擦系数, 即剪切应力与法向应力的比值, 可以写作

$$\mu_b = \frac{\tau_{zx}}{\sigma_{zz}} = \frac{F_S}{F_N} \quad (4)$$

由此可见, 当法向力 F_N 给定后, 颗粒介质剪切强度主要由平均摩擦系数来表征, 并最终体现在最大剪切力 F_S 的大小。

3 非规则颗粒剪切强度离散元模拟

3.1 非规则颗粒形态的团颗粒单元模拟

针对自然条件下颗粒介质的不规则性, 本文采用具有镶嵌功能的团颗粒单元构造了 7 种不同形态的颗粒, 并列于表 2 中。本文设基本颗粒单元间的重叠率为 α 。当 $\alpha = 0$ 时, 表示基本颗粒单元间没有重叠量; 当 $\alpha = 1$ 时, 表示该团颗粒退化为规则颗粒。对于粒径不同的基本颗粒, 重叠率按最小颗粒的粒径确定。

在本文计算中, 将对每种不同形态的团颗粒分别设 $\alpha = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 和 1.0 , 6 个级别研究颗粒形态对剪切强度的影响。

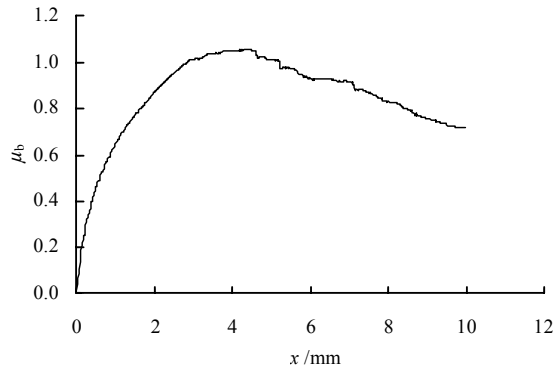
表 2 DEM 模拟中构造的不同形态团颗粒
Table 2 Different clumps in DEM simulation

颗粒形态	$\alpha = 0$	$\alpha = 0.5$
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		

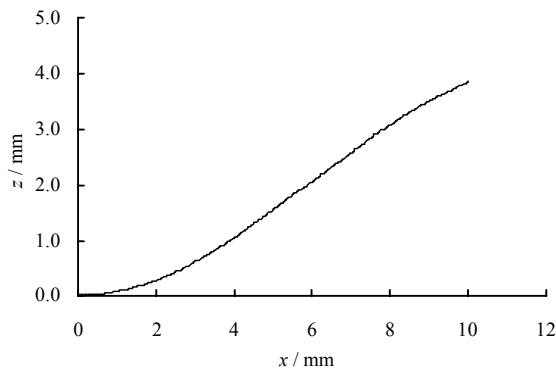
3.2 非规则团颗粒直剪试验的基本过程

采用以上构造的团颗粒单元, 对不同形态颗粒的直剪试验进行了离散元模拟。取用表 1 中所列计算参数, 对于表 2 中形态 6 的团颗粒单元, 在重叠率 $\alpha = 0.5$ 时的有效摩擦系数-位移曲线如图 3(a)所示。该直剪过程中的上剪切盒顶盖的竖向位移如图 3(b) 所示。计算中的法向力为 2 000 N, 颗粒间的接触摩擦系数为 $\mu_p = 0.50$ 。从计算结果来看, 剪切力开始随着剪切位移的增加而不断增大, 当达到最

大值($F_{s_max} = 2\ 120\ \text{N}$, $\mu_{b_max} = 1.06$)后开始下降,即进入塑性软化阶段。从计算的竖向位移来看,颗粒介质的体积膨胀非常显著,且在整体剪切过程中均表现出膨胀现象。



(a) 有效摩擦系数-剪切位移曲线



(b) 竖向位移-剪切位移曲线

图3 直剪试验的数值模拟结果

Fig.3 Simulated results of direct shear test

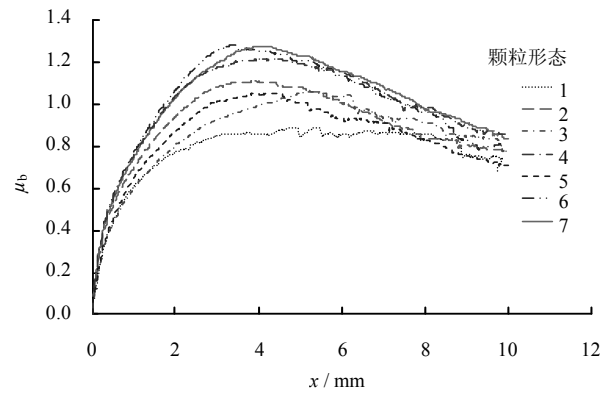
3.3 不同团颗粒形态对剪切强度的影响

针对以上7种不同形态的团颗粒单元,对其直剪过程进行了数值分析。计算参数如表1所示,其中接触摩擦系数 $\mu_p = 0.50$,基本颗粒的重叠率为 $\alpha=0.6$ 。计算结果如图4所示。在计算中,颗粒试样的总质量不变,从而随机生成的每个团颗粒的质量具有相同的概率分布特性。

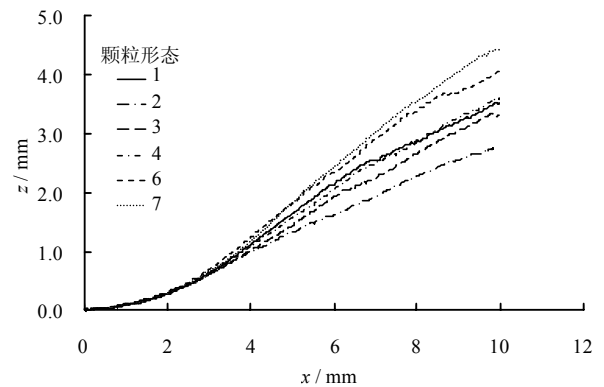
从图4(a)中可以看出,不同形态颗粒在直剪中的有效摩擦系数(即剪切强度)有很大的差别。团颗粒形态中的7、6和4的有效摩擦系数较大,也比较接近,分别为1.28、1.28、1.22。随后依次为形态2、3、5和1,其有效摩擦系数分别为1.11、1.06、1.05和0.89。

从图4(b)中可以看出,在直剪过程中的竖向位移,即剪胀现象也有很大的差异,其中竖向位移由大到小变化的团颗粒形态是7、6、4、2、3和1。以上结果表明,有棱角(形态7、6)或细长(形态4)

的团颗粒形态具有较高的剪切强度,且其剪胀特性更为突出。而对于规则颗粒(形态1),其剪切强度最低,剪胀现象最不明显。



(a) 有效摩擦系数-剪切位移曲线



(b) 竖向位移-剪切位移曲线

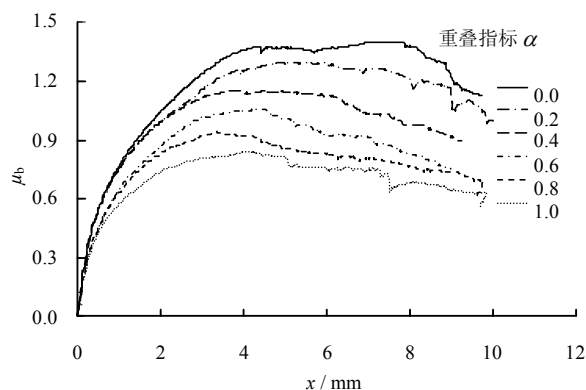
图4 不同团颗粒形态的直剪试验模拟结果

Fig.4 Simulated results of direct shear test with various clumps

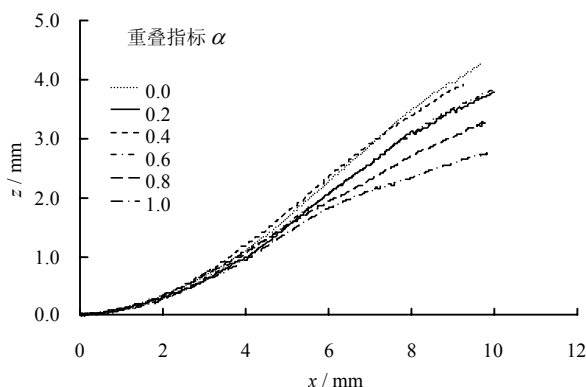
3.4 重叠率对剪切强度的影响

为研究基本颗粒重叠量对团颗粒剪切强度的影响,这里选用团颗粒形态5在不同重叠率下进行直剪数值模拟,其中接触摩擦系数 $\mu_p = 0.50$,其它计算参数取表1中的数值。当分别取重叠率 $\alpha = 0.0$ 、0.2、0.4、0.6、0.8和1.0情况下,计算的有效摩擦系数和竖向位移如图5所示。

从图5(a)可以看出,重叠率 α 对有效摩擦系数 μ_b (即剪切强度)有很大的影响。当 $\alpha = 0.0$ 时,基本颗粒间没有重叠,此时剪切强度最高,试样顶层的竖向位移最大,剪胀现象最突出(如图5(b)所示);当 $\alpha = 1.0$ 时,团颗粒退化为规则球形颗粒,此时的剪切强度最低,剪胀现象最不明显。由此可以看出,随着重叠率的增加,团颗粒形态趋向规则,颗粒间的互锁现象减弱,从而导致剪切强度和剪胀现象的降低。



(a) 有效摩擦系数-剪切位移曲线



(b) 竖向位移-剪切位移曲线

图5 团颗粒不同重叠率的直剪试验模拟结果

Fig.5 Simulated results of direct shear test with various overlaps

为进一步分析重叠量对不同形态团颗粒剪切强度的影响,这里进行了较全面的数值分析,计算结果如图6所示。由图可以看出,随着重叠率的增加,团颗粒形态均趋于规则,其剪切强度都不断降低。然而,对于团颗粒形态2和7,其计算结果在重叠率增加过程中有一定波动性。这主要是由于在直剪过程中颗粒团的初始排列、运动过程等的随机

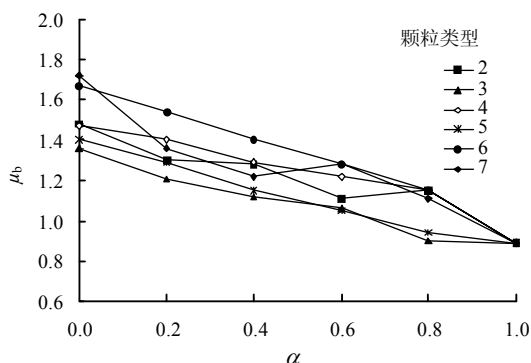


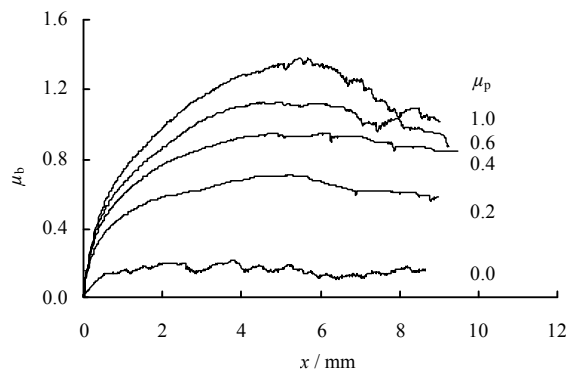
图6 不同形态团颗粒在不同重叠率下的有效摩擦系数

Fig.6 Simulated friction coefficients of various clumps with different overlaps

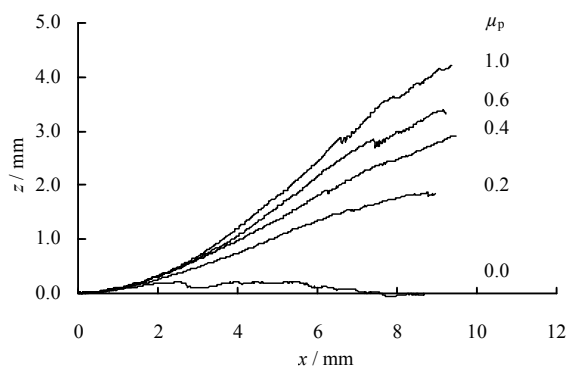
性造成的。如果在不同初始排列条件进行多次计算,将会消弱这种随机性,从而得到更明显的变化规律。这里的计算结果也能够较好地显示出颗粒团内部基本单元重叠量对剪切强度的影响。

3.5 接触摩擦系数对剪切强度的影响

在非规则团颗粒的直剪试验数值模拟中,颗粒间的接触摩擦系数对试样的剪切强度和剪胀特性有重要影响。为此,本文对不同形态团颗粒在接触摩擦系数 $\mu_p = 0.0$ 、0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0 时的直剪试验进行了数值模拟。对于团颗粒形态3计算得到的结果如图7所示。从中可以发现,随着接触摩擦系数的增加,有效摩擦系数从 $\mu_p = 0.0$ 的 0.20 增加到 $\mu_p = 1.0$ 的 1.37。此时,试样顶部的竖向位移也有明显的差别。特别是对于 $\mu_p = 0.0$ 的情况,剪胀现象极不明显,并在剪切过程中又出现剪缩现象。



(a) 有效摩擦系数-剪切位移曲线



(b) 竖向位移-剪切位移曲线

图7 不同接触摩擦系数下的直剪试验模拟结果

Fig.7 Simulated results of direct shear test with various contact friction coefficients

对其它形态团颗粒在不同接触摩擦系数下的直剪试验也进行了数值模拟,得到的有效摩擦系数如图8所示。其中图8是基本颗粒重叠率分别为 0.0 和 0.5 时的计算结果。由图可见,无论是哪种形态的团颗粒,其剪切强度都随着接触摩擦系数的增加而增强,但增长趋势趋于平缓。

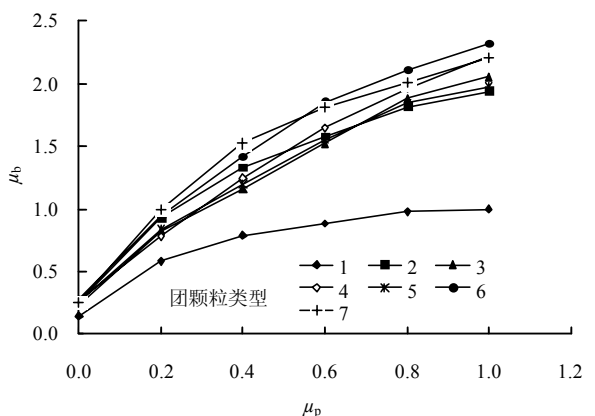
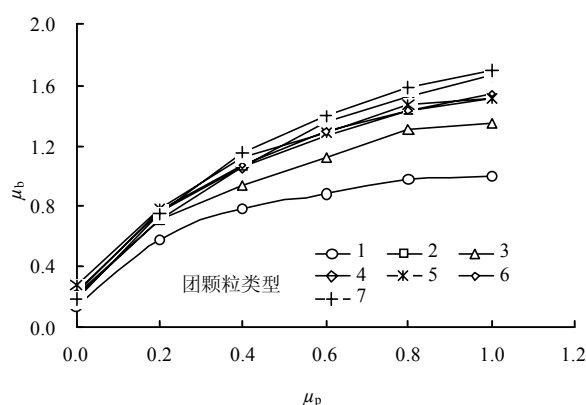
(a) 重叠率 $\alpha=0.0$ (b) 重叠率 $\alpha=0.5$

图8 不同形态的团颗粒在不同接触摩擦系数下的有效摩擦系数

Fig.8 Simulated friction coefficients of various clumps with different overlaps

在以上计算中,法向力 $F_N = 2\,000\text{ N}$, 为常值。当法向力不同时,有效摩擦系数会随着法向应力的增加而降低^[9]。此外,在团颗粒的直剪试验数值模拟中,颗粒的初始排列状态对计算结果有很大的影响。本文将颗粒生成、排列过程中的初始接触摩擦系数均设为 $\mu_{p0} = 0.1$ (对于图7和图8计算中接触摩擦系数 $\mu_p = 0.0$ 的情况,则设 $\mu_{p0} = 0.0$), 由此可得到较密集的初始排列。此外,由于颗粒的生成、初始排列条件和运动过程有一定的随机性,导致数值模拟结果也存在一定的随机性。对其进行不同条件下的数值计算,并分析其统计特性有助于明确其变化规律。

本文计算中取弹性模量 $E = 0.5\text{ GPa}$, 要明显低于常规材料,例如岩石的弹性模量一般在 50 GPa 左右。降低弹性模量的目的主要是为了提高离散元数值模拟的计算效率。本文通过对不同弹性模量下团颗粒直剪试验的数值模拟,结果表明剪切强度随弹性模量的增加而稍微降低,但变化不明显。

4 结 语

本文构造了7种不同形态的团颗粒单元。该团颗粒单元通过基本球体单元在不同组合方位和重叠率下进行镶嵌组合。团颗粒的质量和形心通过有限分割法进行确定;团颗粒和基本颗粒分别在整体和局部坐标系下的运动和作用力通过4元素法进行转换计算;颗粒间的作用力通过非线性粘弹性模型进行确定。在直剪试验条件下,对不同基本单元重叠率和接触摩擦系数影响下的剪切强度进行了离散元数值模拟。结果表明:具有明显角点和细长的团颗粒,其剪切强度和剪胀特性要明显优于其它相对较规则的团颗粒;接触摩擦系数对不同形态团颗粒的剪切强度也有显著影响。本文通过不同团颗粒单元的合理描述,对非规则颗粒间的互锁现象及其剪切特性进行了全面的数值分析,并有助于对非规则颗粒介质动力特性的深入理解。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] LU M, MCDOWELL G R. The importance of modeling ballast particle shape in the discrete element method[J]. *Granular Matter*, 2007, 9: 69—80.
- [3] 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.
- [4] NOUGUIER-LEHON C, CAMBOU B, VINCENS E. Influence of particle shape and angularity on the behaviour of granular materials: A numerical analysis[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2003, 27: 1207—1226.
- [5] 李凡. 岩土材料破损特性的颗粒流研究. 土木工程学报, 2007, 40(9): 78—81.
- [6] 张家铭, 汪稔, 张阳明, 等. 土体颗粒破碎研究进展. 岩土力学, 2003, 24(s): 661—665.
- [7] 史旦达, 周健, 刘文白, 等. 循环荷载作用下砂土液化特性的非圆颗粒数值模拟. 水利学报, 2008, 39(9):

的整体思路。

(2) 针对于三峰谷雨流计数模型的不足,提出了改进方案。改进后的计数模型融等值点压缩、峰谷值检测以及循环计数为一体,简化了计数过程。

(3) 运用改进的计数模型分析了爆破震动应力谱,得出了各种循环的频数分布规律。统计结果表明,单次爆破中绝大部分为小幅疲劳循环,而且拉压循环所占的比例比较大。因此,从疲劳损伤累积的角度来考虑爆破载荷作用下岩石结构的稳定性问题,可以得到更为精确的结论。

参考文献

- [1] BAGDE M N, PETROS V. Fatigue properties of intact sandstone samples subjected to dynamic uniaxial loading[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2005, 42(2): 237—250.
- [2] GATELIER N, PELLET F, LORET B. Mechanical damage of an anisotropic porous rock in cyclic triaxial tests[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39(3): 335—354.
- [3] 章清叙, 葛修润, 黄铭, 等. 周期荷载作用下红砂岩三轴疲劳变形特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(3): 473—478.
- [4] 席道瑛, 陈运平, 陶月赞, 等. 岩石的非线性弹性滞后特征[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(6): 1086—1093.
- [5] 许江, 杨秀贵, 王鸿, 等. 周期性载荷作用下岩石滞回曲线的演化规律[J]. *西南交通大学学报*, 2005, 40(6): 754—758.
- [6] XIAO J Q, DING D X, XU G, et al. Waveform effect on quasi-dynamic loading condition and the mechanical properties of brittle materials[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2008, 45(4): 621—626.
- [7] XIAO J Q, DING D X, XU G, et al. Inverted S-shaped model for nonlinear fatigue damage of rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2009, 46(3): 643—648.
- [8] 董乐义, 罗俊, 程礼. 雨流计数法及其在程序中的具体实现[J]. *计算机技术与应用*, 2004, 24(3): 38—40.
- [9] 何秀然, 谢寿生, 孙冬. 航空发动机载荷谱雨流计数的一种改进算法[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2005, 18(2): 27—30.
- [10] 过玉卿, 龙靖宇. 改进雨流计数法及其统计处理程序[J]. *武汉科技大学学报(自然科学版)*, 1987, 30(1): 22—28.
- [11] DOWNING S D, SOCIE D F. Simple rainflow counting algorithms[J]. *International Journal of Fatigue*, 1982, 4(1): 31—40.
- [12] 金德新. 改进的雨流计数法应用于随机载荷下的寿命预测[J]. *鞍钢技术*, 2000, (5): 55—57.
- [13] 阎楚良, 卓宁生, 高镇同. 雨流法实时计数模型[J]. *北京航空航天大学学报*, 1998, 24(5): 623—624.
- [14] 史旦达, 周健, 刘文白, 等. 砂土单调剪切特性的非圆颗粒模拟. *岩土工程学报*, 2008, 30(9): 1361—1366.
- [15] 严颖, 季顺迎. 碎石料直剪实验的组合颗粒单元数值模拟[J]. *应用力学学报*, 2009, 26(1): 1—7.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] TEJCHMAN J. FE analysis of shearing of granular bodies in a direct shear box[J]. *Particulate Science and Technology*, 2005, 23: 229—248.
- [20] THORNTON C, ZHANG L. Numerical simulation of the direct shear test[J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2003, 26(2): 153—156.
- [21] LIU S H. Simulating a direct shear box test by DEM[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2006, 43: 155—168.

上接第 230 页

1074—1082.