

模拟月壤颗粒形状特征及其对抗剪强度影响分析

林呈祥, 钟世英, 凌道盛

(浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058)

摘 要: 为研究颗粒形状特征对抗剪强度的影响, 对模拟月壤颗粒进行体视显微镜扫描拍照, 并利用图形处理软件对各粒径组颗粒的形状特征进行量化统计. 结果表明: 模拟月壤颗粒的主要形状有圆形、类椭圆形、类三角形和类正方形等. 利用 PFC 3D 软件中的“Clump”命令构造出不同形状的模拟月壤颗粒并通过三轴试验数值模型研究其抗剪强度指标值, 模拟结果表明: 颗粒形状对模拟月壤的抗剪强度指标值有着明显的影响, 其中构造出的类椭圆体颗粒试样抗剪强度最大, 而规则的球体颗粒试样的抗剪强度最小; 当颗粒形状都是类三角体时, 凹凸度越大, 试样的抗剪强度指标值也越大.

关 键 词: 模拟月壤; 颗粒形状; 三轴压缩试验; 抗剪强度; PFC 3D 数值模拟

中图分类号: TU 443

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2016)11-1640-05

Analysis of Particle Shape Characteristics of Lunar Soil Simulant and Its Effect on Shear Strength

LIN Cheng-xiang, ZHONG Shi-ying, LING Dao-sheng

(MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geo-environmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China. Corresponding author: LIN Cheng-xiang, E-mail: tonylin1988@163.com)

Abstract: In order to study the effect of particle shape characteristics on shear strength, particles of lunar soil simulant are scanned and photographed with a stereo microscope. Then, a digital imaging processing software is used to statistically analyze the geometric characteristics of the particles. It shows that the particles of lunar soil simulant mainly are of four shapes: sphere, quasi-ellipsoid shape, quasi-trigonal shape and quasi-cube shape. Particles with the three irregular shapes are simulated as clumps in PFC 3D, and the numerical model of tri-axial test is obtained to study their shear strength. The numerical results show that: the particle shape has a noticeable effect on shear strength; the shear strength of particles of quasi-ellipsoid shape is the greatest of all, while the sphere particles has the minimum shear strength. For particles of the same quasi-trigonal shape, the greater ruggedness it is, the stronger shear strength the sample has.

Key words: lunar soil simulant; shape of particle; tri-axial compression test; shear strength; PFC 3D numerical simulation

颗粒大小及形状特征等细观参数是颗粒材料宏观力学性质的重要影响因素, 对砂土材料的研究表明: 颗粒形状的不规则性对砂土的内摩擦角有着重要影响^[1-2]; 砂土的压缩性及颗粒间接触力的传递模式也与其颗粒的形状特征密切相关^[3]. 用离散元法来研究颗粒形状对颗粒材料力学性质的影响在国内外已取得很大的进展: Saba 等^[4]构造出 3 种不同棱角度的颗粒作为双轴试验

的离散元模拟试样, 研究了颗粒形状和抗剪强度间的关系; Hosseininia^[5]在对双轴压缩试验进行离散元模拟时, 采用二维凸面多边形颗粒试样, 研究了颗粒形状对抗剪强度和体变机制的影响; 曾远等^[6]对砂土的双轴试验进行了模拟, 研究了颗粒形状等细观参数的变化对宏观力学特性的影响; 孔亮等^[7]对类砂土材料的堆积试验、双轴试验和直剪试验进行了 PFC 2D 模拟, 探讨了颗粒

收稿日期: 2015-06-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278451); 浙江省自然科学基金资助项目(LZ12E09001).

作者简介: 林呈祥(1988-), 男, 浙江台州人, 浙江大学博士研究生; 凌道盛(1968-), 男, 安徽黄山人, 浙江大学教授, 博士生导师.

形状和宏观力学性质间的关联. 刘清秉等^[8]定义了颗粒形状参数,对砂土颗粒的形状进行量化,并通过 PFC 2D 模拟探讨了颗粒形状对于堆积密实度、剪切特性等力学指标的影响.

月壤颗粒属多棱角、多气孔结构,颗粒表面粗糙且凹凸不平;颗粒形态从球形到尖锐棱角状高度变化,一般为次棱角状和长条状^[9]. 颗粒形状与大小是月壤的一个重要物理指标,也是决定月壤力学性质、指导模拟月壤研制的重要因素. Matsushima 等^[10]利用 X 射线 CT 系统对模拟月壤 FSJ-1 的颗粒进行立体扫描,构造出颗粒实际形状的三维离散元模型,并对模拟月壤的流动试验进行了模拟,研究了颗粒间接触刚度、弹性系数、摩擦角等细观参数对休止角形成过程的影响. 而在国内,关于颗粒形状和模拟月壤力学性质间关系的研究还少有报道. 本文在分析模拟月壤颗粒形状特征的基础上,采用 PFC 3D 软件建立三轴试验模型,研究了颗粒形状特征对抗剪强度指标值的影响.

1 模拟月壤的颗粒形状特征

1.1 颗粒形状表征方法

颗粒的形状特征参数包括圆度 (circularity) c 、延伸度 (aspect ratio) a_r 和凹凸度 F . 表 1 列出了各参数及其定义描述.

表 1 颗粒形状特征参数
Table 1 Parameters for particle shape characteristics

形状参数	符号	定义描述
面积	A	颗粒在二维投影中所占的区域面积
颗粒周长	p'	颗粒在平面投影中所占区域的周长
周长	p	在二维投影中,颗粒轮廓边界线的长度
圆度	c	颗粒轮廓边界线接近圆形的程度
相似椭圆	f	和颗粒二维投影边界最为接近的椭圆
延伸度	a_r	颗粒在二维投影中的整体延伸程度
凹凸度	F	颗粒轮廓边界线的突起程度

圆度 c 表示颗粒与圆形的接近程度,定义为

$$c = 4\pi(A/p^2). \quad (1)$$

圆度值的范围为 $(0, 1]$, 值越大表示形状越接近圆形. 当形状为圆形时,圆度值最大,值为 1.

颗粒的延伸度 (a_r) 表示颗粒的整体延伸程度,其计算公式为

$$a_r = l_a/l_i. \quad (2)$$

其中, l_a, l_i 分别为其相似椭圆的长轴和短轴,相似

椭圆是和颗粒的二维投影边界最为接近的椭圆.

图 1 为各种形状的圆度及延伸度值统计,随着延伸度值的不断增加,圆度值则不断减小,两者成近似的反比关系.

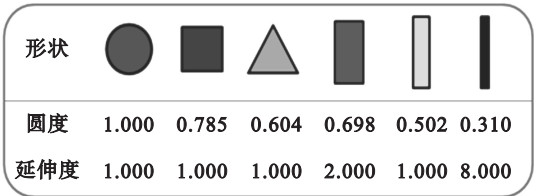


图 1 各种形状的圆度及延伸度值
Fig. 1 Values of circularity and aspect ratio in different shapes

颗粒表面的凸起程度可用凹凸度 F 来表示:

$$F = A_f/A_s. \quad (3)$$

其中: A_f 为颗粒最大内接椭圆 (圆) 的面积; A_s 为与投影轮廓同周长的圆面积. 凹凸度最大值为 1, 数值越小, 表示颗粒边缘凹凸程度越厉害, 形状越不规则.

1.2 模拟月壤颗粒形状特征

模拟月壤的配制原料采集于吉林省靖宇县龙岗火山群, 主要矿物组成有橄榄石、辉石和斜长石等, 其中玻璃体质量分数大于 30 %, 图 2 为模拟月壤的现场照片及颗粒粒径的对比图^[11]. 模拟月壤颗粒的粒径分布范围较广, 不同粒径的颗粒形状差别也较大, 根据颗粒粒径的大小把模拟月壤颗粒分为 7 组 (见表 2), 在每个粒径组中随机选取 100 个颗粒进行颗粒形状特征分析.

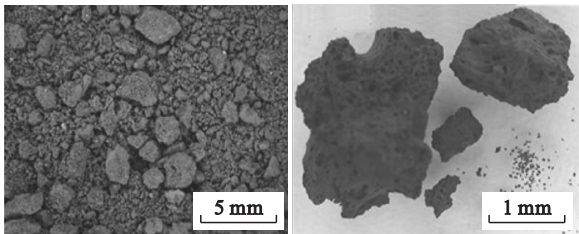


图 2 模拟月壤及颗粒粒径对比图
Fig. 2 Lunar soil simulant and its particle size comparison

表 2 模拟月壤颗粒粒径组及其质量分数
Table 2 Particle size groups of lunar soil simulant and their mass percent

粒组	一	二	三	四
粒径/mm	(2.00, 5.00)	(1.00, 2.00)	(0.50, 1.00)	(0.25, 0.50)
质量分数/%	15.00	10.00	11.50	16.00
粒组	五	六	七	-
粒径/mm	(0.10, 0.25)	(0.075, 0.10)	<0.075	-
质量分数/%	10.00	17.50	20.00	-

对模拟月壤颗粒的数值图像进行二值黑白处理,得到各颗粒形状的边缘轮廓图,接着用图形处理软件 Image J 中的“颗粒分析”功能,统计分析每个颗粒的形状特征参数值,各组颗粒的形状特征参数值均值见表 3^[12].

表 3 模拟月壤颗粒形状特征参数值均值					
Table 3 Geometric statistics of lunar soil simulant particles					
组别	长轴/mm	短轴/mm	圆度	延伸度	凹凸度
一	7.120	5.380	0.686	1.329	0.767
二	4.082	2.867	0.669	1.445	0.716
三	2.301	1.594	0.729	1.464	0.713
四	1.311	0.874	0.667	1.526	0.683
五	0.554	0.375	0.682	1.532	0.689
六	0.204	0.135	0.763	1.534	0.680
七	0.085	0.059	0.811	1.471	0.708

从表 3 可知,第七组颗粒的圆度均值为 0.811,其他组颗粒的圆度均值在 0.66 ~ 0.77 之间;各组颗粒的延伸度均值在 1.33 ~ 1.53 之间,颗粒整体呈类椭球体;各组颗粒的凹凸度均值都在 0.7 左右.对比图 1 可知;第七组的颗粒最为接近圆形,其他各组颗粒的形状处在正三角形和正四边形之间.

2 颗粒流数值模拟分析

离散元法(distinct element method,DEM)根据离散物质本身的不连续特性建立非连续介质数值模型,可以从细观层面上对颗粒材料的力学特性进行数值模拟研究.颗粒流(particle flow code,PFC)软件是美国 ITASCA 公司基于离散元法开发的程序,交替应用牛顿第二运动定律和接触力-位移法则实现循环迭代计算.

2.1 不同形状颗粒的三轴试验模型

基于颗粒形状特征的分析结果可知,模拟月壤颗粒的主要形状有圆形、类椭圆形、类三角形和类正方形等.在 PFC 3D 自带球体颗粒的基础上用“Clump”命令再构造出 3 种异形颗粒来模拟研究颗粒形状对抗剪强度的影响,4 种形状的颗粒立体图如图 3 所示,分别称为:球体、类椭球体、类三角体和类正方体.在类三角体的形状基础上再构造出两种不同凹凸度的颗粒(见图 4)来模拟研究颗粒凹凸度对抗剪强度的影响.各异形颗粒的圆度、延伸度、凹凸度值见表 4.

以实际三轴试验的基本参数为参考建立模拟

月壤三轴试验的 PFC 3D 模型,试样的初始尺寸为:高 10 cm,直径 5 cm;颗粒半径分布在 2 ~ 3 mm 之间,初始孔隙率为 0.4,生成颗粒总数为 2 400;各细观参数值见表 5.图 5 为加载前后三轴试验模型的对比图,其中图 5a 为球体颗粒模型,图 5c 为异形颗粒(以类椭球体颗粒为例)模型.

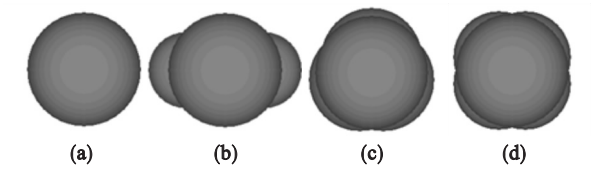


图 3 不同形状颗粒
Fig. 3 Particles of different shapes
(a)—球体;(b)—类椭球体;
(c)—类三角体;(d)—类正方体.

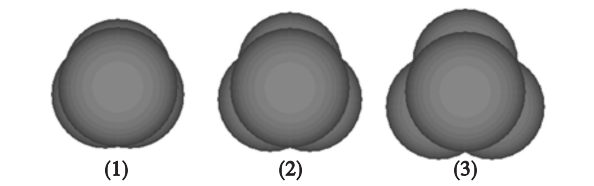


图 4 不同凹凸度的类三角体颗粒
Fig. 4 Quasi- trigonal particles of different ruggedness

表 4 颗粒形状特征参数值			
Table 4 Characteristic parameter values of particle shape			
颗粒形状	圆度	延伸度	凹凸度
球体	1.000 0	1.000 0	1.000 0
类椭球体	0.924 3	1.445 8	0.801 3
类三角体(1)	0.981 2	1.000 0	0.820 9
类三角体(2)	0.962 7	1.000 0	0.699 5
类三角体(3)	0.911 7	1.000 0	0.592 6
类正方体	0.970 4	1.000 0	0.821 8

表 5 三轴试验模型基本参数			
Table 5 Basic parameters in tri-axial test model			
参数	数值	参数	数值
颗粒总数	2 400	墙体刚度	1×10^6
		$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	
颗粒半径分布/mm (2,3)		摩擦系数	1.25
半径乘子	1.6	试样高度/cm	10
颗粒密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	2.7	试样直径/cm	5
初始孔隙率	0.4	围压/ kPa	60,80,100
接触刚度	1×10^6	加载速率	0.1
$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$		$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	

2.2 模拟结果及分析

2.2.1 应力-应变关系曲线及抗剪强度指标值
图 6 为不同围压下模拟月壤的应力-应变关系曲线模拟图,以类椭球体颗粒试样为例.从图

中可看出：在三轴加载过程中，试样存在明显的应变软化现象，并且随着试样所加围压的增大应变软化现象愈加明显；围压越大，试样所能达到的峰值偏应力也越大，即试样的峰值强度也越大；在试样破坏时，偏应力基本保持在一个稳定的残余强度，这 and 实际试验结果得到的应力 - 应变曲线对比相吻合。

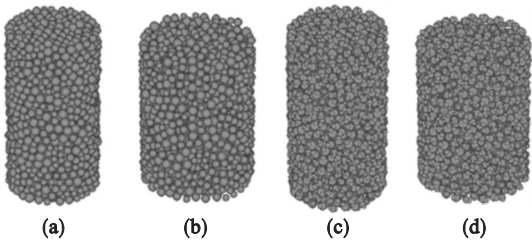


图 5 三轴试验 PFC 3D 模型
Fig. 5 PFC 3D model of tri-axial test

(a) — 球体颗粒, 加载前; (b) — 球体颗粒, 加载后;
(c) — 异形颗粒, 加载前; (d) — 异形颗粒, 加载后.

在应力 - 应变关系曲线中可求得每种试样在 3 种不同围压下的峰值偏应力值以及相应的应变值 (见表 6), 根据摩尔 - 库伦强度理论, 绘制出相应的莫尔圆包络线即可求得不同形状颗粒模拟月壤的抗剪强度指标值, 包括黏聚力 (c) 和内摩擦角 (ψ). 表 6 对 4 种颗粒形状的模拟月壤抗剪强度指标值进行了统计。

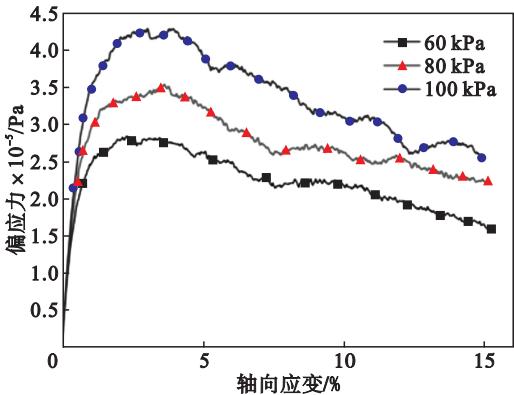


图 6 应力 - 应变关系曲线模拟图
Fig. 6 Relation curves between deviatoric stress and axial strain

2. 2. 2 颗粒形状特征对抗剪强度的影响

分析表 6 可知, 不同颗粒形状的模拟月壤均具有不可忽略的表现黏聚力作用, 颗粒形状对试样的抗剪强度指标值有着明显的影响, 尤其是内摩擦角的大小随颗粒形状的变化较大. 当试样是异形颗粒 (类椭球体、类三角体、类正方体) 时, 试样的抗剪强度指标都比形状规则的球体颗粒试样要大, 其中类椭球体颗粒试样的抗剪强度最大, 其

内摩擦角的值比颗粒是球体形状时要大 7° 左右, 黏聚力的值则大 2 kPa 左右; 而类三角体和类正方体颗粒试样的内摩擦角与黏聚力值比类椭球体颗粒试样的值相对小一些。

表 6 抗剪强度指标值统计
Table 6 Parameter values of shear strength

颗粒形状	围压 kPa	峰值 偏应力 kPa	应变 %	内摩擦角 ($^{\circ}$)	黏聚力 kPa
球体	60	199.46	3.27	33.38	13.28
	80	236.96	4.51		
	100	293.95	4.42		
类椭球体	60	284.04	2.29	40.05	15.71
	80	353.38	3.62		
	100	428.44	3.02		
类三角体	60	237.64	1.95	39.13	14.60
	80	302.61	3.01		
	100	374.46	3.21		
类正方体	60	266.28	3.76	37.17	14.13
	80	327.35	3.35		
	100	369.01	4.03		

结合各颗粒的形状特征参数值 (见表 4) 分析可知, 相比其他 3 种形状颗粒, 类椭圆体颗粒的圆度和凹凸度的值要相对偏小一点, 而延伸度的值则更大, 颗粒形状整体更不规则, 从而导致最后试样的抗剪强度指标比其他颗粒的值都要大, 尤其是内摩擦角的值. 类三角体 (1) 颗粒和类正方体颗粒的形状特征参数值比较接近, 相应试样的抗剪强度指标值也相差不大。

当颗粒形状都是类三角体时, 不同凹凸度对试样的抗剪强度指标值影响见图 7, 其中横坐标 (1), (2), (3) 分别对应图 4 中 3 个不同凹凸度的

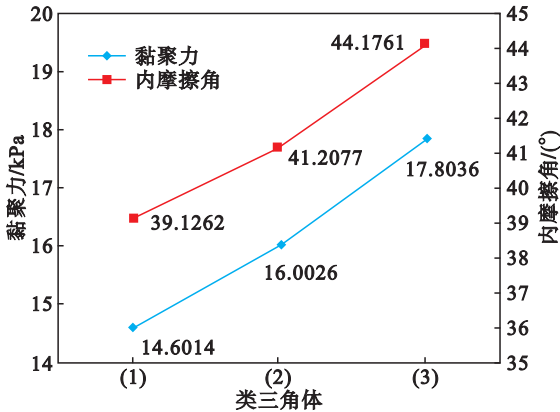


图 7 不同凹凸度类三角体颗粒模拟月壤抗剪强度指标值

Fig. 7 Shear strength of lunar soil simulant with quasi-trigonal particles of different ruggedness

颗粒试样.从图中可以看出:随着颗粒凹凸度的增加,试样的抗剪强度指标值也越来越大.对此可解释为:当试样的颗粒形状不规则(非球体颗粒)时,在三轴加载过程中颗粒间会存在一定程度的咬合作用;当颗粒的凹凸度越大时,颗粒间的咬合作用也越强,颗粒滑动产生相对位移时需要克服的阻力也就越大,从而使得试样的抗剪强度也越大.

3 结 论

- 1) 模拟月壤颗粒形状差异很大,其主要形状特征为:第七组的颗粒最为接近圆形,其圆度均值为 0.811;其他组颗粒的圆度均值则在 0.66 ~ 0.77 之间,颗粒形状介于正三角形和正四边形之间;各组颗粒的延伸度均值在 1.33 ~ 1.53 之间,凹凸度均值在 0.7 左右.
- 2) 对模拟月壤的三轴试验进行模拟研究,结果表明:颗粒形状对试样的抗剪强度指标值有明显的影响,其中构造出的类椭球体颗粒的内摩擦角和黏聚力值最大,类三角体和类正方体颗粒的抗剪强度次之,球体颗粒的抗剪强度指标值则最小.
- 3) 在三轴试验的加载过程中,异形颗粒间会存在一定程度的咬合作用;颗粒外表轮廓越凹凸,咬合作用越明显,试样的抗剪强度指标值也就相对越大.当颗粒形状都是类三角体时,随着凹凸度的增大,试样的黏聚力和内摩擦角值也增大.

参考文献:

[1] Kunio S,Mikihiro O,Boris G. Effect of particle shape on angle of internal friction by tri-axial compression test [J]. *Powder Technology*,2000,107(1/2):131 – 136.

[2] Fridrun P,Yasmin M. The influence of particle size and shape on the angle of internal friction and the flow factor of un-lubricated and lubricated powders [J]. *International Journal of Pharmaceutics*,1996,144(2):187 – 194.

[3] Joseph A,Matthew K. Influence of particle shape on granular contact signatures and shear strength: new insights from simulations [J]. *International Journal of Solids and Structures*,2004,41(21):5863 – 5870.

[4] Abedi S,Mirghasemi A A. Particle shape consideration in numerical simulation of assemblies of irregularly shaped particles [J]. *Particuology*,2011,9(4):387 – 397.

[5] Hosseininia E S. Discrete element modeling of inherently anisotropic granular assemblies with polygonal particles [J]. *Particuology*,2012,10(5):542 – 552.

[6] 曾远,周健. 砂土的细观参数对宏观特性的影响研究[J]. *地下空间与工程学报*,2008,4(3):499 – 503.
(Zeng Yuan,Zhou Jian. Influence of micro parameters of sandy on its macro properties [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*,2008,4(3):499 – 503.)

[7] 孔亮,彭仁. 颗粒形状对砂类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.)

[8] 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(sup1):190 – 197.
(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(sup1):190 – 197.)

[9] Carrier W D. Particle size distribution of lunar soil [J]. *Journal of Geo-technical and Geo-environmental Engineering*,2003,129(10):956 – 959.

[10] Matsushima T,Katagiri J,Uesugi K,et al. 3D shape characterization and image-based DEM simulation of the lunar soil simulant FJS – 1 [J]. *Journal of Aerospace Engineering*,2009,22(1):15 – 23.

[11] 钟世英. 模拟月壤力学特性及软着陆足垫动力响应研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.
(Zhong Shi-ying. Study on mechanical behaviors of lunar soil simulant and footpad dynamic response in soft landing [D]. Hangzhou:Zhejiang University,2012.)

[12] 林呈祥,凌道盛,钟世英,等. TJ – 1 模拟月壤颗粒几何特性[J]. *东北大学学报(自然科学版)*,2016,37(3):451 – 456.
(Lin Cheng-xiang,Ling Dao-sheng,Zhong Shi-ying,et al. Geometric characteristics of TJ-1 lunar soil simulant particles [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*,2016,37(3):451 – 456.)