

# 基于离散元法研究颗粒球度对粗粒土抗剪强度的影响

李远征, 魏玉峰, 雷壮, 何亮

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

**摘要:** 粗粒土颗粒形状是决定其宏观力学性质的主要影响因素之一。为探究粗粒土颗粒形状对其抗剪强度特性的影响规律,以不同颗粒形状的3种粗颗粒土为研究对象,利用离散元数值分析手段,以球度指标为量化参数,研究了颗粒形状对粗粒土直剪试验过程中应力、位移变化及宏观抗剪强度的影响,并分析了抗剪强度参数的变化规律。同时通过室内直剪试验双向验证所揭示规律的可靠性。研究表明:法向荷载相同时,随着球度的减小剪应力越过峰值应力后的应变软化现象越明显,同时其峰值应力、位移及残余强度均逐渐增加;球度相同时,随着法向荷载的增大其峰值应力、位移和残余强度均呈规律性递增。黏聚力和内摩擦角随着球度的减小而增加,球形颗粒的黏聚力明显小于其它两种球度的颗粒。

**关键词:** 粗粒土; 颗粒形状; 球度; 直剪试验; 离散元; 抗剪强度

中图分类号:TV41 文献标识码:A 文章编号:1672-643X(2019)04-0225-08

## Research on the influence of particle sphericity on shear strength of coarse grained soil based on discrete element

LI Yuanzheng, WEI Yufeng, LEI Zhuang, HE Liang

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,  
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** The particle shape of coarse soil is one of the main influencing factors to determine its macroscopic mechanical properties. To explore the laws of coarse grained soil particle shape on the shear strength characteristics influence, three kinds of coarse granular soils with different particle shape were taken as the research object, the discrete element numerical analysis method was used, with sphericity index for quantitative parameters, we studied the particle shape of coarse grained soil direct shear test stress and displacement in the process of change and the influence of the macro shear strength, and the change rule of shear strength parameters. In addition, the reliability of the revealed law was verified by the laboratory direct shear test. The results showed that with the same normal load, the strain softening phenomenon became more obvious after the shear stress crosses the peak stress with the decrease of sphericity, and the peak stress, displacement and residual strength all increased gradually. With the same sphericity, the peak stress, displacement and residual strength increased regularly with the increase of normal load. The cohesive force and the angle of internal friction increased with the decrease of sphericity. The cohesive force of spherical particle was obviously smaller than that of the other two kinds.

**Key words:** coarse grained soil; particle shape; sphericity; direct shear test; discrete element; shear strength

## 1 研究背景

粗粒土是一种松散的颗粒集合体,由不同粒径,

不同性质的颗粒互相充填而成,作为一种散体材料,粗粒土粒间作用力、几何排列方式与组成等对其宏观力学性质有重要影响<sup>[1-2]</sup>。土的结构性被誉为

收稿日期:2018-12-26; 修回日期:2019-04-08

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC1501000); 四川省教育厅科研计划重点项目(18ZA0045)

作者简介:李远征(1993-),男,安徽宿州人,硕士研究生,主要从事岩土体特性及其稳定性研究。

通讯作者:魏玉峰(1979-),男,内蒙古赤峰人,博士后,副教授,硕士生导师,主要从事岩土体特性及其稳定性研究。

21世纪土力学的核心问题。众多学者从宏、细、微观等不同尺度在粗粒土结构、强度、整体稳定性等方面开展了深入研究<sup>[3]</sup>,颗粒形态、排列、破碎等因素与宏观强度特性的联系也已经被研究者所关注。常规的室内试验只能从宏观层面反映粗粒土应力与应变的关系,而无法从颗粒层面探究其细观机理。且由于试验设备的限制,试验过程中颗粒的破裂、旋转、位移和重排列等都难以直接观测。自20世纪70年代提出了离散元法后,随着该理论的发展,越来越多的国内外学者运用离散元法模拟室内三轴试验和直剪试验,研究粗粒土组构与其宏观力学之间的关系<sup>[4-7]</sup>,颗粒形状是影响最直接的因素之一。

为了研究颗粒形状对粗粒土各种宏观力学特性的影响,首先要探讨如何对颗粒形状进行量化。有关颗粒形状量化方面的研究方法较多,刘广等<sup>[8]</sup>定义球度作为颗粒形状的量化指标,证明了球度指标的简便和可行性。刘清秉等<sup>[9]</sup>提出可以从3个层次对不规则颗粒形状进行描述:球形度、磨圆度、粗糙度。石崇等<sup>[10]</sup>和Mattrand等<sup>[11]</sup>提出应用数学方法对颗粒形状进行描述,如分形理论、傅里叶分析等。同时一些学者通过数值模拟和室内试验探究颗粒形状对不同材料力学特性的影响。史旦达等<sup>[12-13]</sup>通过模拟砂土直剪试验研究了颗粒形状对砂土强度和变形的影响以及与剪切带厚度的关系。杨贵等<sup>[14]</sup>采用水泥净浆浇筑方法制备试样,通过三轴剪切试验研究了不同围压条件下颗粒形状对材料强度和变形特性的影响,揭示了随着颗粒形状的变化其内摩擦角、极限应力比等的变化规律。以往的研究很大程度上表明了颗粒形状对材料力学性质有很大影响,但由于颗粒形状的复杂性,很多学者对颗粒形状

$$S = \frac{F_1 \cdot \alpha_1 + F_2 \cdot \alpha_2 + F_3 \cdot \beta_1 + F_4 \cdot \beta_2 + F_5 \cdot \gamma_1 + F_6 \cdot \gamma_2}{\alpha_1 + \alpha_2 + \beta_1 + \beta_2 + \gamma_1 + \gamma_2} \quad (2)$$

式中: $S$ 为颗粒的球度; $F_1 \sim F_6$ 分别为颗粒6种方向(前后左右上下)的投影圆度; $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, \gamma_1, \gamma_2$ 分别为颗粒6种方向投影图中两正交轴长轴 $L$ 与短轴 $l$ 的比值。

## 2.2 簇单元的建立和模型的生成

卵状石英砂岩颗粒表面光滑,颗粒局部并无棱角变化,本文基于选取并处理后的3种真实颗粒(分别为:I型颗粒为表面光滑无棱角近似圆形;II型颗粒为表面光滑无棱角呈长条型;III型颗粒表面光滑无棱角呈椭圆型),利用公式(2)计算出3种颗粒的球度后,再通过PFC3D中的“clump”命令,让基

的量化指标缺乏科学的定义。

鉴于离散元法在粗粒土细观力学机理研究上的巨大优势,本文基于PFC3D程序的簇单元(clump),由基本圆球型颗粒按不同排列方式组成其余两种不规则颗粒并生成试样,对3种不同形状的颗粒单元进行量化,模拟室内直剪试验,探究颗粒形状的变化对粗粒土抗剪强度特性的影响及其细观机理,同时揭示黏聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 的变化规律。最后根据室内常规直剪试验得出的物理结果进行双向验证。

## 2 数值直剪试验

### 2.1 颗粒形状指标量化

颗粒形状的量化分析,目前主要为采用分形理论和傅里叶分析等数学方法进行描述以及对颗粒形状参数进行定义。以往研究中,或者涉及的数学计算异常繁杂,或者对颗粒形状量化指标缺乏科学的定义。为此作者在前人研究的基础上,从二维层面描述颗粒形状的指标圆度出发,在三维层面上定义颗粒的球度,最大程度来描述颗粒整体外形与圆球的相似度以及颗粒表面的凹凸程度。

二维层面颗粒圆度 $F$ 的定义如下<sup>[15]</sup>:

$$F = F_s / F_p \quad (1)$$

式中: $F_p$ 为与实际颗粒等周长的圆面积; $F_s$ 为实际颗粒面积; $F$ 为颗粒的圆度。

基于二维层面对圆度的定义,首先对颗粒从空间六种方向(前后左右上下)进行拍摄,运用Matlab软件对拍摄的二维图像进行处理后提取圆度尺寸信息,对提取到的数据进行加权平均,得出在三维层面定义颗粒形状的指标球度公式。

本圆球型颗粒通过一定的排列方式黏结成其余2种球度的颗粒(分别为类长条型和类椭圆型),生成的颗粒表面粗糙度均相同,如图1所示。通过clump命令生成的颗粒都可视为刚性体。

球度数值由Matlab软件处理图像信息并通过公式(2)得到,真实颗粒与数值模型球度值见表1。因篇幅有限,具体求解过程在此不再赘述。

本文生成颗粒试样的顺序,先生成圆球型试样,然后按照“体积相等”、“质量中心等效”、“任意旋转”原则<sup>[16]</sup>将基本圆球型颗粒单元替换成类长条型和类椭圆型颗粒单元,最后生成其余两种试样。

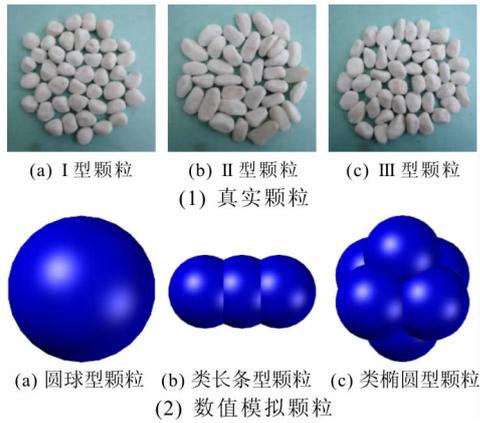


图 1 真实颗粒与数值模型颗粒

表 1 不同颗粒单元球度 S 值

数值模型			真实颗粒		
圆球型颗粒	类椭圆型颗粒	类长条型颗粒	圆球型颗粒	类椭圆型颗粒	类长条型颗粒
1.0	0.726	0.446	0.967	0.743	0.435

(1) 体积相等。即在替换过程中保持类长条型和类椭圆型颗粒的体积与圆球型颗粒相等。需要计算出缩放系数  $\zeta$ , 通过  $\zeta$  对组成两种不规则颗粒的各个从属球体的大小进行缩放。

$$\zeta = \sqrt[3]{V_1/V_2} \quad (3)$$

式中:  $V_1$  为不规则颗粒的体积;  $V_2$  为被替换的圆球体积。

(2) 质量中心等效。不同形状颗粒替换时保持两种不规则颗粒的质量中心与基本圆球型颗粒的质量中心一致。不规则颗粒单元的质量中心由组成其从属颗粒的质量中心经计算得到。

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (m_i x_i)}{\sum_{i=1}^{i=n} m_i} \quad (4)$$

式中:  $m_i$  为不规则颗粒中第  $i$  个附属颗粒的质量;  $x_i$  为不规则颗粒中第  $i$  个附属颗粒的质心坐标;  $x_c$  为质量中心坐标。

(3) 任意旋转。在替换过程中对颗粒进行任意旋转, 使生成的颗粒避免朝着同一个方向, 保证试样在各个方向的力学性质一致。

假设某一颗粒单元在三维中的坐标为  $(x, y, z)$ , 同时绕  $x, y, z$  坐标轴进行旋转, 旋转角度分别为  $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ , 旋转后的坐标为  $(x', y', z')$ , 其转换关系可用矩阵表示为:

$$\begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{Bmatrix} = [R_1 R_2 R_3] \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} \quad (5)$$

式中:  $R_1, R_2, R_3$  可表示为:

$$R_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_y \cos\theta_z - \sin\theta_x \sin\theta_y \sin\theta_z \\ \cos\theta_y \sin\theta_z - \sin\theta_x \sin\theta_y \cos\theta_z \\ -\cos\theta_x \sin\theta_y \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} -\cos\theta_x \sin\theta_z \\ \cos\theta_x \cos\theta_z \\ -\sin\theta_x \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} \sin\theta_y \cos\theta_z + \sin\theta_x \cos\theta_y \sin\theta_z \\ \sin\theta_y \sin\theta_z - \sin\theta_x \cos\theta_y \cos\theta_z \\ \cos\theta_x \cos\theta_y \end{bmatrix}$$

本试验中模拟的材料为无黏性粗粒土, 黏聚力应当按零考虑, 因此选用线性接触刚度模型。

数值模拟生成的 3 种试样尺寸均为  $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ , 其中圆球型颗粒的最大粒径为  $20 \text{ mm}$ , 最小粒径为  $15 \text{ mm}$ , 按指定级配生成试样, 试样如图 2 所示。

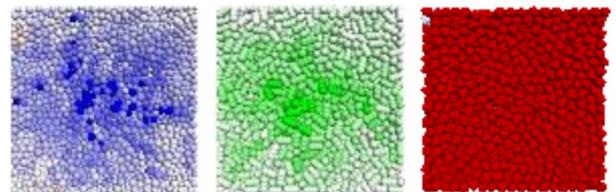


图 2 3 种不同类型颗粒试样

图 2 3 种不同类型颗粒试样

### 2.3 细观参数确定

目前通过室内试验方法很难直接获得 PFC3D 所使用的细观参数。通常情况下, 当室内试验结果与数值模拟结果相近时, 可以认为得到的细观参数是可行的, 数值模拟结果也是正确的。本文参考已有文献和前人研究成果, 经过反复计算、测试与调整, 选定了一组较为理想的 PFC3D 细观参数, 见表 2。

表 2 数值模拟颗粒力学参数

初始孔隙度	颗粒密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	法向刚度 $k_n / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	切向刚度 $k_s / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	摩擦系数 $\mu$	墙体刚度 $k^{wall} / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$
0.16	2643	$4 \times 10^7$	$3 \times 10^7$	0.6	$2 \times 10^8$

## 2.4 数值直剪试验

数值试验直剪仪尺寸为  $500\text{ mm} \times 500\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ , 由 10 面刚性墙和 2 面挡墙组成(图 3), 1, 2 墙分别构成顶板墙和底板墙, 3, 4, 5, 6 墙为上剪切盒的侧壁墙, 7, 8, 9, 10 墙为下剪切盒的侧壁墙, 11, 12 墙为防止颗粒溢出的挡墙。在剪切过程中, 设定垂直方向的压力分别为 100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa, 经过循环后达到了给定的法向应力状态。

试样在稳定的垂直压力下进行剪切, 下剪切盒不动, 上盒沿水平方向对试样进行剪切, 剪切速率设为  $0.1\text{ mm/s}$ , 剪切位移设置 200 mm。为获得剪切过程中的全面数据, 在试验过程中设定历史 (history) 进行了监测。剪切过程如图 4 所示。

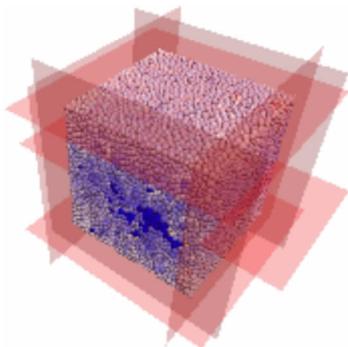


图 3 数值模型 ( $S = 1.0$ )

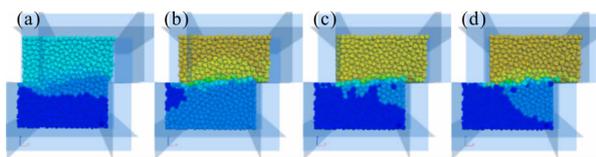


图 4 直剪试验的剪切过程 ( $S = 0.726$ )

## 3 颗粒形状对抗剪强度的影响

### 3.1 颗粒形状对粗粒土直剪试验应力应变的影响

如图 5 为数值模拟试验得到的 3 种球度的粗粒土试样在 4 种法向荷载作用下剪切位移 - 剪应力曲线图。

由图 5 可得出, 不同球度粗粒土数值试样的剪切位移 - 剪应力曲线规律相似, 均是先硬化后逐渐软化, 呈单峰曲线型, 且球度越小的粗粒土, 越过峰值应力后的软化现象愈明显, 随着法向荷载的增大, 这一现象更为突出。

将数值模拟得到的剪切位移 - 剪应力曲线进行数据整理, 提取 3 种球度的粗粒土在 4 种法向荷载下的峰值应力、残余强度以及峰值位移数值, 如表 3 所示。

表 3 数值模拟峰值应力 - 位移与残余强度表

颗粒球度	法向荷载/ kPa	峰值应力/ kPa	峰值位移/ mm	残余强度/ kPa
0.446	100	72.4	53.9	29.8
	200	120.7	72.5	52.4
	300	180.3	100.2	76.3
	400	245.6	130.8	103.8
0.726	100	48.7	45.3	22.0
	200	85.7	60.2	40.1
	300	130.7	80.4	61.3
	400	180.6	105.6	88.8
1.0	100	27.4	27.6	12.3
	200	50.3	38.4	23.1
	300	73.1	42.1	31.0
	400	96.6	49.8	47.7

由表 3 数据, 得到随着球度的变化不同法向荷载下, 粗粒土峰值应力、残余强度以及峰值位移三者的变化规律, 如图 6 所示。

图 6 可以看出, 在相同法向荷载下, 随着形状指标球度  $S$  的减小, 粗粒土峰值应力、残余强度和峰值位移均显著增加, 但增长趋势趋于平缓, 如在 400 kPa 法向荷载下, 球度  $S$  由 1.0 减小到 0.726 时, 峰值应力、残余强度和峰值位移分别增加 84.0、41.4 kPa 和 55.8 mm, 但由 0.726 减小到 0.446 时, 则三者分别增加 65.0、15.0 kPa 和 25.2 mm。同时, 随着法向荷载减小, 增长趋势也趋于平缓, 如在 400 kPa 法向荷载下, 当球度  $S$  由 1.0 减小到 0.446 时, 峰值应力、残余强度和峰值位移共分别增加 149.0、56.1 kPa 和 81.0 mm; 但在 100 kPa 法向荷载下, 则共分别增加 45.0、17.5 kPa 和 26.3 mm。

另外, 当球度相同时, 随着法向荷载的增加, 峰值应力、残余强度和峰值位移均逐渐增加, 增加趋势越来越明显且呈现出有规律的递增现象, 如图 7 所示。当球度  $S$  为 0.446, 法向荷载由 100 kPa 增加到 400 kPa 时, 峰值应力分别增加 48.3、59.6、65.3 kPa, 残余强度分别增加 22.6、23.9、27.5 kPa, 峰值位移分别增加 18.6、27.7、30.6 mm。但当球度为 1.0 时, 法向荷载对峰值应力、残余强度与峰值位移的影响均较小, 虽然随着法向荷载增大三者均增加, 但增加趋势较小且呈无规律递增。如  $S$  为 1.0 时, 当法向荷载由 100 kPa 增加到 400 kPa, 峰值应力分别增加 22.9、22.8、23.5 kPa, 残余强度分别增加 10.8、7.9、16.7 kPa, 峰值位移分别增加 10.8、3.7、7.7 mm, 增加趋势缺乏明显规律性。

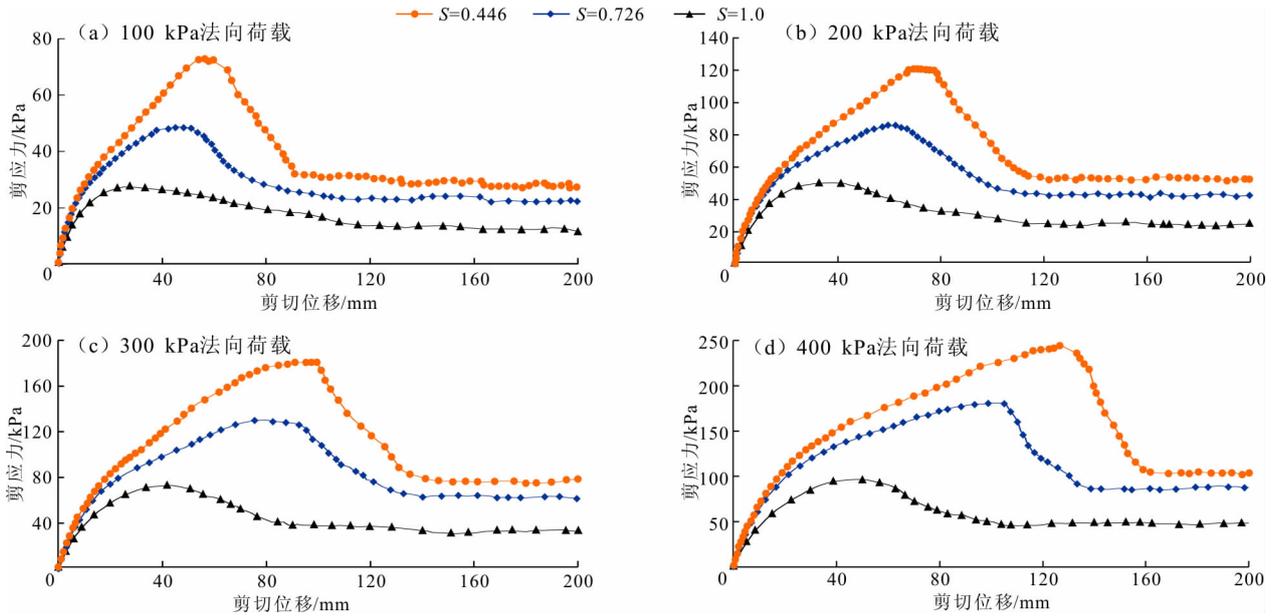


图 5 不同法向荷载下 3 种球度试样的剪切位移 - 剪应力曲线

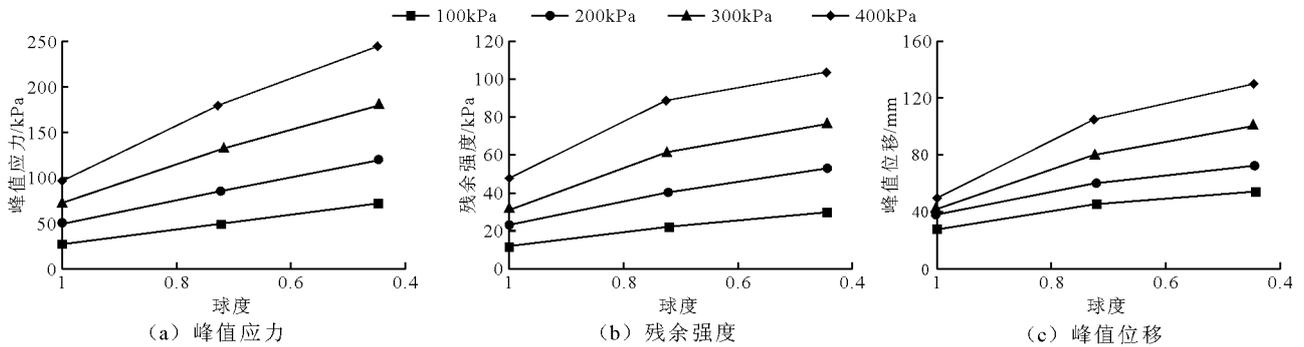


图 6 不同法向荷载下 3 种球度试样的峰值应力、残余强度和峰值位移变化规律

以上分析说明法向荷载和球度均对粗粒土抗剪强度特性有一定的影响,且随着球度和法向荷载的变化,峰值应力和残余强度以及峰值位移均呈现出有规律的变化。

### 3.2 颗粒形状对粗粒土黏聚力和内摩擦角的影响

由上述结论,得到 3 种不同球度的粗粒土峰值应力和法向荷载的强度拟合直线,如图 8 所示。由图 8 可以看出,不同球度粗粒土峰值应力和法向荷载之间存在很好的线性关系,结合摩尔 - 库伦定律,并应用直线拟合方法,可以得到试样的内摩擦角  $\varphi$  和黏聚力  $c$ ,其中  $\varphi$  和  $c$  的值为通过拟合直线的截距  $y$  和斜率  $\alpha$  得到,如表 4。黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  与球度  $S$  的关系曲线见图 9。

表 4 不同球度的内摩擦角和黏聚力

球度	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
0.446	29.23	12.35
0.726	20.39	11.88
1.0	12.57	4.31

从图 9 可以看出,随着球度的变化,黏聚力和内摩擦角都呈现出有规律的变化。当颗粒球度减小时,内摩擦角  $\varphi$  和黏聚力  $c$  均增加,内摩擦角  $\varphi$  增加速度较均匀,如球度从 1.0 到 0.726,内摩擦角增加  $7.82^\circ$ ;从 0.726 到 0.446,增加  $8.84^\circ$ ,两者递增幅度相差较小。但黏聚力  $c$  随着球度的减小而递增的趋势趋于平缓,球度从 1.0 到 0.726,黏聚力增加  $7.57 \text{ kPa}$ ;但从 0.726 到 0.446,黏聚力增加  $0.47 \text{ kPa}$ ,类长条型和类椭圆型颗粒试样的  $c$  值与圆球型颗粒试样的  $c$  值相比相差较大。

## 4 室内直剪试验

在进行数值模拟的同时,设置了 4 种法向荷载下 3 种球度的粗粒土室内直剪试验,进行双向验证。

### 4.1 试验材料及试验方法

为明确反应颗粒形状对粗粒土抗剪强度的影响,并同时数值模拟结果进行验证,基于上文中选取的

3种真实颗粒(图1),通过抛光打磨,并筛分后选取粒径为15~20mm的石英砂岩颗粒。为了更好地与数值模拟结果进行对比,自制了尺寸大小为500mm×500mm×500mm的可视化剪切盒,并按数值模拟指定的级配制作试样。试验过程中,下剪切盒固定不动,上剪切盒在水平面内移动,试验剪切速度控制在0.1mm/s,剪切至200mm停止。通过对真实粗粒土的颗粒大小、形状、岩性及级配以及剪切盒大小、剪切速率、位移等进行一系列选取,保证室内试验中颗粒表面粗糙度、试样大小和密度以及试样空隙度等和数

值模拟基本一致,球度虽然会存在差异,但平均差值在0.02以内,对整体结论无任何影响。本文设置了3组不同颗粒形状的室内直剪试验,每组试验包含的法向荷载为100、200、300、400kPa。

4.2 试验结果与数值模拟结果对比

如图10所示为室内试验得到的剪切位移-剪应力曲线与数值模拟结果两者之间的对比。由图10可知,在4种不同法向荷载下,室内试验曲线达到峰值时的剪切位移较模拟试验均有所提前,且室内试验得到的强度也均略低于模拟试验得到的结果。

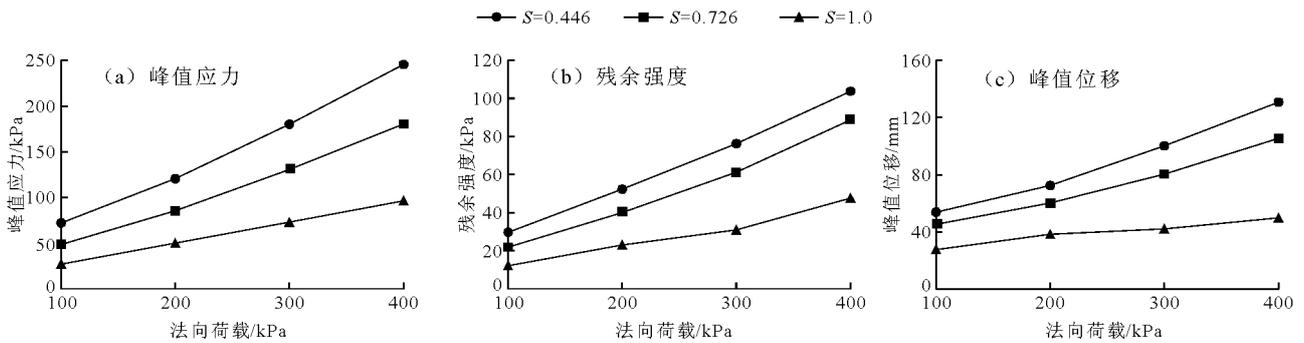


图7 球度相同时不同法向荷载下的峰值应力、残余强度和峰值位移变化规律

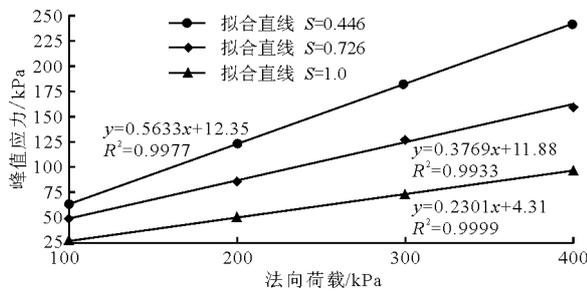


图8 不同球度粗粒土的强度拟合直线

这主要是由于粗粒土在室内试验的剪切过程中会产生破碎,且试样的夯填密度和均匀度都不如模拟状态好,因此与数值模拟结果对比有一定的偏差。但整体而言,室内试验曲线在形态上与模拟曲线拟合度较好,尤其是在应力上升及应力下降阶段,其上升与下降幅度相当,证明数值模型与试样在抗剪强度的形成和破坏上具有相同的变化规律,验证了模型的正确性,由此也说明了数值模拟采用的细观参数是合理的,生成3种不同类型的颗粒单元来模拟粗粒土形状的模拟方法也是可行的。表5为不同法向荷载下室内试验得到的抗剪强度参数。

由表5得到室内试验中随着球度的变化粗粒土峰值应力、残余强度和峰值位移的变化规律,以及球度一定时,法向荷载发生变化时三者的变化规律,同时得出内摩擦角 $\varphi$ 和黏聚力 $c$ 的变化规律,并和数值模拟得到的结果进行对比。如图11~13所示,具

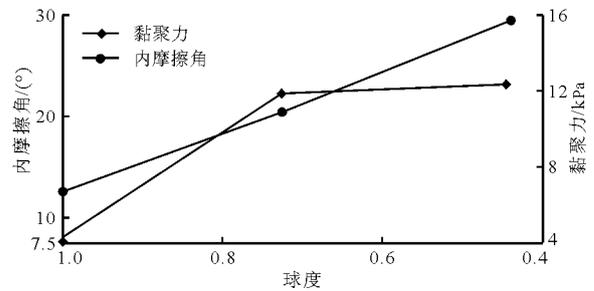


图9 粗粒土黏聚力、内摩擦角和球度的关系

体过程前面已有描述,在此不再赘述。

表5 室内试验峰值应力-位移与残余强度表

颗粒球度	法向荷载/kPa	峰值应力/kPa	峰值位移/mm	残余强度/kPa
0.435	100	61.6	45.8	25.3
	200	102.6	61.6	44.5
	300	153.3	85.2	64.9
	400	208.8	111.2	88.2
0.743	100	41.4	38.5	18.7
	200	72.6	51.2	34.1
	300	105.1	68.3	52.1
0.967	100	23.3	23.5	11.0
	200	42.8	32.6	19.4
	300	62.1	35.8	26.3
	400	82.1	42.3	40.6

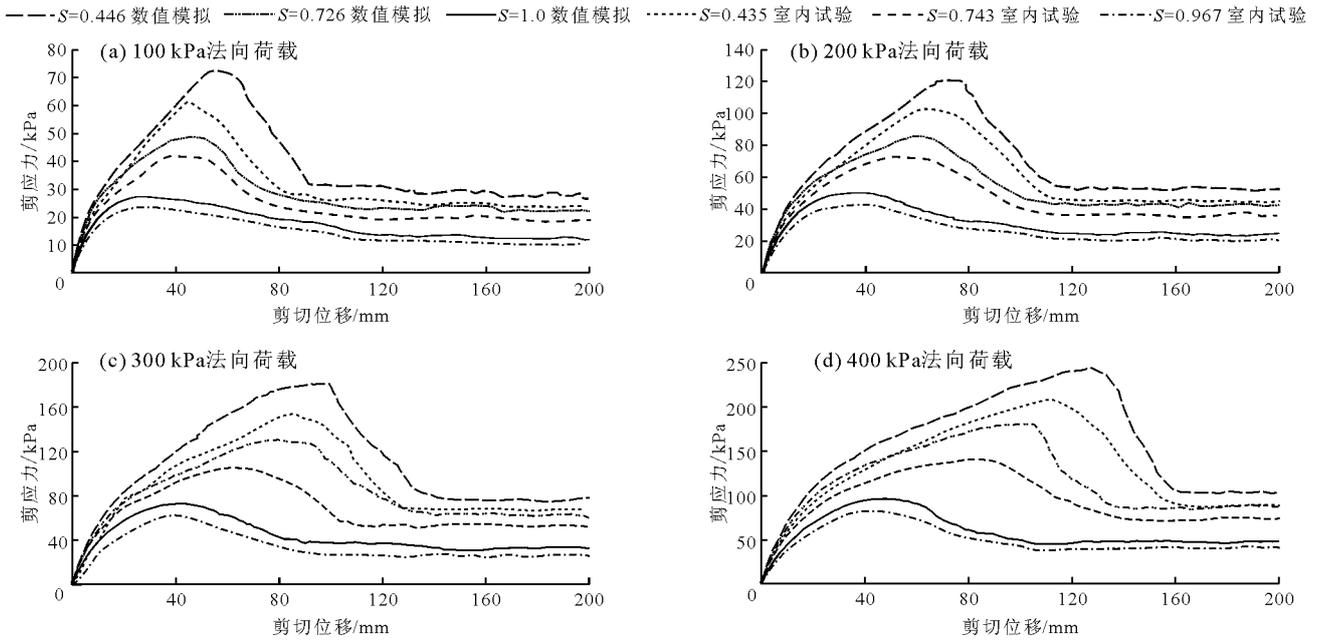


图 10 不同法向荷载下 3 种球度粗粒土室内试验剪切位移 - 剪应力曲线和数值模拟对比图

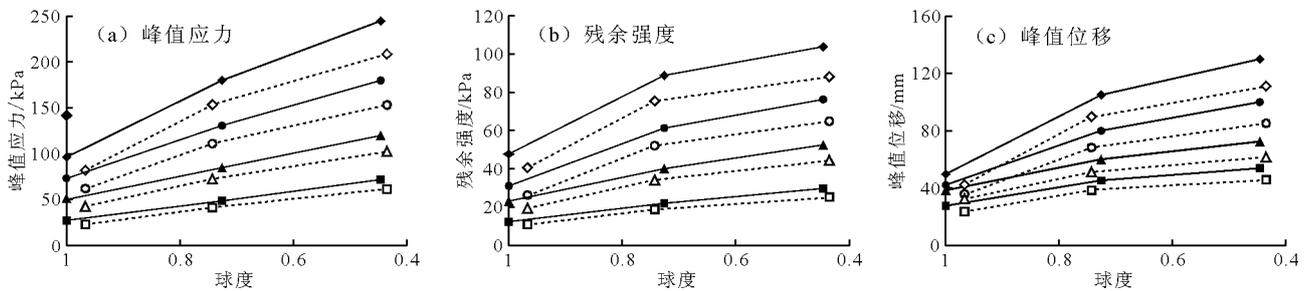
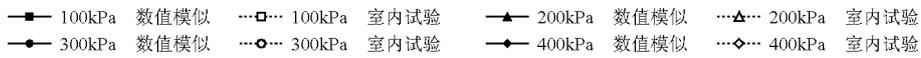


图 11 室内试验和数值模拟峰值应力、残余强度和峰值位移变化规律对比图

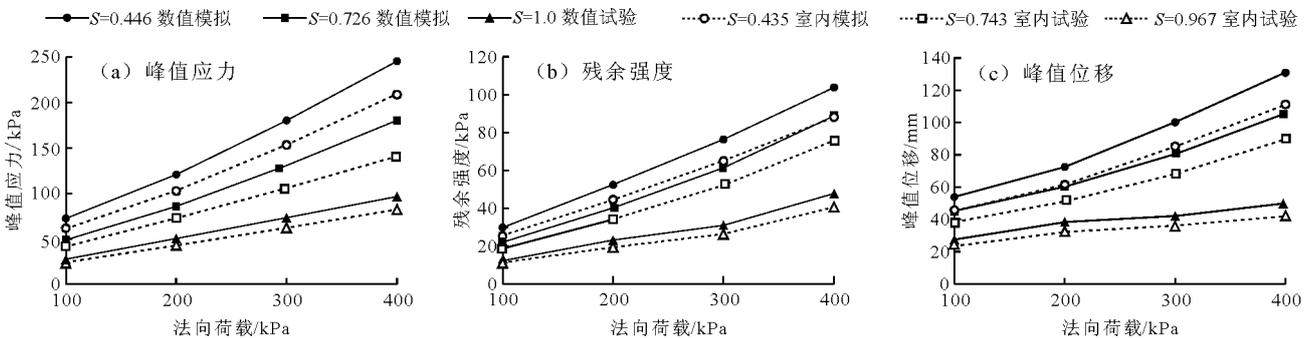


图 12 球度相同时不同法向荷载下峰值应力、残余强度和峰值位移变化规律对比

由图 11 ~ 13 可以看出,随着球度以及法向荷载的变化,由室内试验得出的参数变化趋势与数值模拟的结果基本相同,均呈现出有规律的变化:当粗粒土球度减小时,其抗剪强度参数(峰值应力、峰值位移和残余强度)和细观力学参数(黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$ )均增大,且增大趋势和相互之间的差异与数值模拟的结果基本相似。同时,随着法向荷载的变

化,其参数的变化规律,相互之间的差异,与数值模拟得到的结果拟合度也较好。整体而言,由室内试验得到的一系列结果充分证明了数值模拟方法的可行性以及结论的正确性。

### 4.3 细观机制探讨

通过数值模拟和室内试验得出的结果以及相互之间的对比,从细观机理角度对以上现象进行分析:形状

不规则的粗粒土,在直剪试验中当剪应力越过峰值后,由于颗粒发生移动、转动甚至翻越相接触的颗粒都比较强烈,所以应变软化现象较明显。随着球度 $S$ 的减小,粗粒土的颗粒形状越不规则,颗粒间的咬合自锁作用越强烈,颗粒运动所需克服的阻力也越大,从而粗粒土可以获得更高的峰值应力和更大的峰值位移。同时,因为球度的减小使颗粒之间的相互运动比较困难,导致颗粒之间的咬合承担了部分能量,所以残余强度也较大。当法向荷载增大时,由于外力作用使颗粒间得咬合更加强烈,颗粒运动需要克服更大的外在阻力,所以上述现象更加明显。

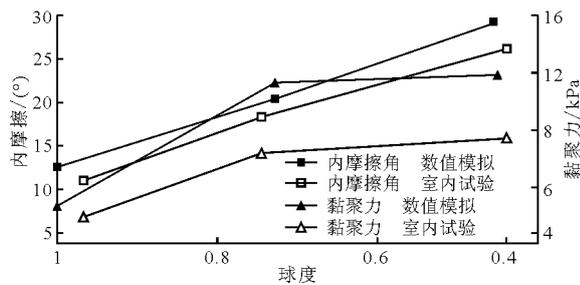


图 13 室内试验和数值模拟黏聚力、内摩擦角变化规律对比

内摩擦角反映的是粗粒土的摩擦特性与抗剪强度,粗粒土颗粒之间严格来讲并没有黏聚力 $c$ 的存在,这里的 $c$ 值更多的是反映颗粒之间的咬合自锁作用。随着球度的减小,颗粒形状变的更加不规则,颗粒之间相互咬合自锁作用愈彻底,因此内摩擦角和黏聚力愈大。

## 5 结 论

(1) 粗粒土的颗粒形状对其抗剪强度特性有很大影响。相同法向荷载下,球度越小的粗粒土,剪应力越过峰值应力后的应变软化现象越明显。同时随着球度的减小,粗粒土的峰值应力和残余强度以及峰值位移均逐渐增加,但增长趋势趋于平缓。

(2) 颗粒形状对粗粒土抗剪强度的影响与法向荷载有关。球度相同时,随着法向荷载的增大,粗粒土的峰值应力和残余强度以及峰值位移均呈规律性递增,而球度为 1.0 时增加趋势无明显规律。

(3) 颗粒形状对粗粒土的黏聚力和内摩擦角有重要影响。随着球度的减小,内摩擦角和黏聚力均显著增加,内摩擦角增长速度较为均匀,而黏聚力增长速度越来越小并趋向于平缓,圆球型颗粒的黏聚力明显小于其他两种不规则颗粒。

(4) 总的来说,3 种颗粒试样中,2 种非圆球型颗粒由于其形状不规则,在其他细观参数相同的前

提下,比圆球型颗粒展现出了更强的咬合自锁作用,从而使其抗剪强度增大,参数变化规律最明显,其中长条型颗粒的表现最为显著。

## 参考文献:

- [1] 姜景山,程展林,姜小兰. 粗粒土二维模型试验研究[J]. 长江科学院院报,2008,25(2):38-41.
- [2] BAGHERZADEH - KHALKHALI A, MIRGHASEMI A A. Numerical and experimental direct shear tests for coarse-grained soils[J]. Particuology,2009,7(1):83-91.
- [3] WEI Yufeng, XIA Min, YE Fei, et al. Effect of drag force on stability of residual soil slopes under surface runoff[J]. Geomatics, Natural Hazards & Risk,2018,9(1):488-500.
- [4] 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):2112-2118.
- [5] INDRARATNA B, NGO N T, RUJIKIATKAMJORN C, et al. Behavior of fresh and fouled railway ballast subjected to direct shear testing: discrete element simulation[J]. International Journal of Geomechanics, 2012, 14(1):34-44.
- [6] CUI L, O'SULLIVAN C. Exploring the macro- and micro-scale response of an idealized granular material in the direct shear apparatus[J]. Geotechnique, 2006,56(7):455-468.
- [7] 张翀,舒赣平. 颗粒形状对颗粒流模拟双轴压缩试验的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2009,31(8):1281-1286.
- [8] 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.
- [9] 刘清秉,项伟,LEHANE B M,等. 颗粒形状对砂土抗剪强度及桩端阻力影响机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011,30(2):400-410.
- [10] 石崇,白金州,于士彦,等. 基于复数傅里叶分析的岩土颗粒细观特征识别与随机重构方法[J]. 岩土力学, 2016,37(10):2781-2786.
- [11] MATTRAND C, BEAKOU A, CHARLET K. Fourier based methodology for simulating 2D - random shapes in heterogeneous materials [J]. Computational Mechanics, 2015,56(2):371-388.
- [12] 史旦达,周健,刘文白,等. 砂土直剪力学性状的非圆颗粒模拟与宏观机理研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(10):1557-1565.
- [13] 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.
- [14] 杨贵,许建宝,孙欣,等. 颗粒形状对人工模拟堆石料强度和变形特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2017,38(11):3113-3118+3153.
- [15] 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(S1):190-197.
- [16] ITASCA CONSULTING GROUP, Inc. PFC3D (particle flow code), Version 4.0[M]. Minneapolis, Minnesota, 2008.