

# 颗粒材料崩塌模拟与特征研究

樊赞赞, 吴凤元, 梁 力, 崔馨仍

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 颗粒材料所表现出的行为特征是许多工艺技术及自然现象研究的理论基础. 为对颗粒材料的崩塌特征进行深入研究, 应用离散单元数值方法对颗粒材料崩塌进行了数值模拟, 计算通过了试验数据的数值验证, 说明计算结果是正确而有效的. 在数值计算模拟的基础上, 对两类典型颗粒崩塌过程及特征进行了研究与分析, 最后利用数值计算结果得到不同崩塌条件下静止核心区的规律曲线并进行了分析.

**关 键 词:** 颗粒材料; 崩塌过程; 数值模拟; 试验验证; 特征研究

中图分类号: TB 126

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2018)06-0892-05

## Simulation on Granular Material Collapse and Research on Its Characteristics

FAN Yun-yun, WU Feng-yuan, LIANG Li, CUI Xin-reng

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: FAN Yun-yun, E-mail: yunyunfan@126.com)

**Abstract:** The behavioral characteristics of granular materials are the theoretical basis for many technologies and natural phenomena research. In order to study the characteristics of the collapse of granular material, the numerical simulation was realized by using the discrete element numerical method, and the results of which were verified through experimental data showing the correctness and effectiveness of the simulation. Based on the numerical simulation, the processes and characteristics of two typical granular collapses were studied and analyzed. At last, the regular curves of the static core area under different collapse conditions were obtained and analyzed.

**Key words:** granular material; collapse process; numerical simulation; experimental verification; characteristic research

近年来,散体颗粒材料在矿业工程、土木工程、化学工程、地球科学和基础物理等众多领域都扮演着重要角色,颗粒材料的自身性质及其表现出的行为特征是许多工艺技术和自然现象的理论基础.因此,针对颗粒材料的研究成为相关领域的热点问题.

崩塌是散体颗粒材料的一种基础而又典型的行为,国内外学者为揭示颗粒材料崩塌行为的规律与特征已进行了大量的崩塌试验<sup>[1-6]</sup>,该类试验主要研究初始时刻处于静止状态的颗粒材料在解除容器约束后的崩塌行为特征,而这些试验的主要区别则在于试验颗粒材料种类的选取与崩塌

试验形式的不同<sup>[1-6]</sup>.试验结果显示,采用不同类型材料进行试验所得到的规律与特征基本是一致的,说明颗粒材料崩塌行为具有一定的普遍特征<sup>[1-6]</sup>,因而引起了学者们的极大关注.

颗粒材料行为具有复杂性,描述其运动的理论主要有离散介质理论和连续介质理论两大类.离散介质理论用离散单元模拟颗粒材料中的颗粒体,在求解过程中要对每个颗粒个体进行求解,能够对仪器设备不易观测到的细观作用与特征进行深入考察与研究,但需对颗粒进行简化且计算量较大<sup>[7-9]</sup>.连续介质理论将颗粒材料看作连续体,采用连续方程和动量方程进行研究,从而实现较

收稿日期: 2017-01-07

基金项目: 国家科技支撑计划重点项目(2016YFC0801603); 国家自然科学基金资助项目(41201007,51474048); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N130401003); 辽宁省教育厅科学研究一般项目(L2013103).

作者简介: 樊赞赞(1982-),男,黑龙江哈尔滨人,东北大学副教授; 梁 力(1955-),男,辽宁丹东人,东北大学教授,博士生导师.

为快速的计算与分析<sup>[10-12]</sup>,但该理论难以分辨颗粒运动中静止与运动区域的分界,使其应用受到限制<sup>[10-12]</sup>,因而若要对该理论进行有效应用,需要掌握颗粒内部静止核心区的规律与特征.无论何种理论均利用假设条件进行了理论简化,因而在应用相关理论对颗粒材料行为特征进行深入研究之前,必须利用试验或工程实例对其计算结果的合理性和有效性进行检验<sup>[7-12]</sup>.

本文主要应用离散单元数值计算方法对颗粒材料崩塌进行计算模拟,利用典型崩塌试验进行数值验证,并在此基础上对崩塌的行为特征进行研究与分析,最后利用计算结果得到不同崩塌条件下静止核心区的规律曲线.

### 1 颗粒材料崩塌试验

本文选用颗粒材料崩塌试验中最为典型的颗粒材料二维柱体崩塌试验进行研究<sup>[1]</sup>,该试验在初始时刻将颗粒材料放置在矩形容器箱内,通过迅速抽掉两侧竖直挡板来实现容器箱内颗粒材料的瞬间崩塌.崩塌后的颗粒材料沿着固定宽度的水平通道(本例试验中固定宽度为 10 cm)对称扩散,并最终堆积在水平面上,如图 1 所示.试验材料为石英砂、糖和稻米.本文选取粗颗粒石英砂崩塌试验进行数值模拟与研究,试验所采用的粗颗粒石英砂平均密度为 2.6 g/cm<sup>3</sup>;平均颗粒粒径为 0.15 cm;内摩擦角为 31°<sup>[1]</sup>.

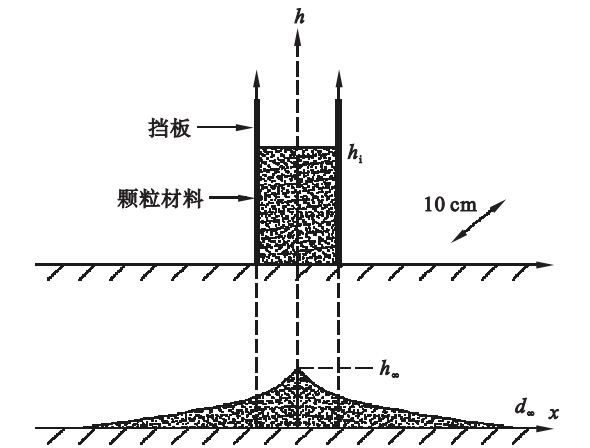


图 1 试验初始设置与最终堆积状态示意图  
Fig. 1 Initial experimental setting and final deposit diagram

为便于比较研究,定义初始颗粒材料柱体高宽比  $a$  为<sup>[1]</sup>

$$a = h_i/d_i. \tag{1}$$

式中: $h_i$  为初始时刻容器箱内颗粒材料堆放高

度; $d_i$  为竖直挡板与矩形箱中心线之间的距离,虽然  $d_i$  仅为整体宽度的一半,但由于试验具有对称性,采用  $d_i$  来计算高宽比是合适的<sup>[1]</sup>.同时,通过试验可得到在生产中最为人们所关注的崩塌最终堆积特征参数  $h_o$  和  $d_o$ ,如图 1 所示.在粗颗粒石英砂崩塌试验中, $d_i$  为 4.8 cm, $a$  值的变化范围为 0.6 ~ 8.6.

### 2 颗粒材料崩塌数值模拟与特征分析

#### 2.1 数值模型

如试验所述,采用 PFC<sup>2D</sup> 中的离散单元模拟试验中的粗颗粒石英砂,采用墙单元模拟试验中的挡板与底板,数值计算所用参数如表 1 所示.

表 1 数值模拟基本参数 Table 1 Parameters of materials in numerical simulation	
物理量	参数值
颗粒粒径/mm	1.5
颗粒密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	2 600
颗粒法向接触刚度/(N·m <sup>-1</sup> )	1 × 10 <sup>6</sup>
颗粒切向接触刚度/(N·m <sup>-1</sup> )	1 × 10 <sup>6</sup>
颗粒摩擦系数	0.6
墙法向接触刚度/(N·m <sup>-1</sup> )	1 × 10 <sup>8</sup>
墙切向接触刚度/(N·m <sup>-1</sup> )	1 × 10 <sup>8</sup>
墙摩擦系数	0.1

计算模拟中初始颗粒材料柱体高宽比  $a$  以 1 为计算间隔在设定范围 0.6 ~ 8.6 内取值.在计算时,首先令颗粒单元在自重作用下达平衡以作为颗粒崩塌的初始状态,如图 2 所示.

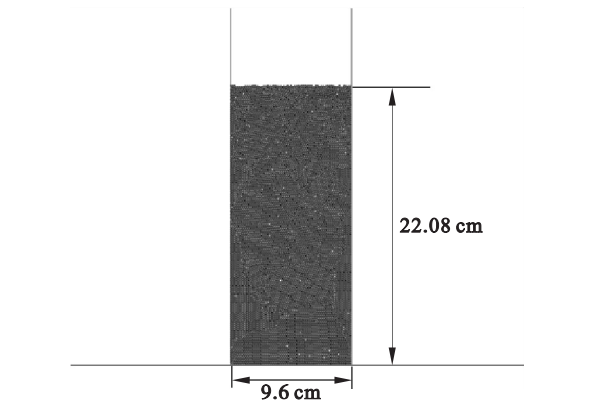


图 2 平衡状态下的模型图  
Fig. 2 Model under equilibrium state

然后删除两侧墙体单元以模拟迅速抽掉的挡板,则此时颗粒材料在自重作用下将发生崩塌运

动,并最终堆积在水平面上,如图 3 所示。

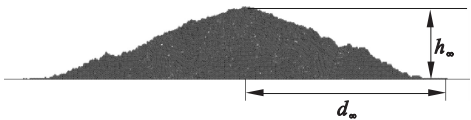


图 3 崩塌堆积状态下的模型图  
Fig. 3 Model after collapse

在计算模拟中,主要考察崩塌堆积特征参数  $h_\infty$  和  $d_\infty$ 。

2.2 计算结果与崩塌特征分析

将数值计算所得到的最终堆积特征参数  $h_\infty$  和  $d_\infty$  值进行无量纲化,可得到不同条件下无量纲特征参数  $\delta d/d_i = (d_\infty - d_i)/d_i$  和  $h_\infty/d_i$  随  $a$  值的变化规律。为便于比较分析,将计算所得无量纲化特征参数与试验数据拟合曲线进行对比,如图 4 和图 5 所示。

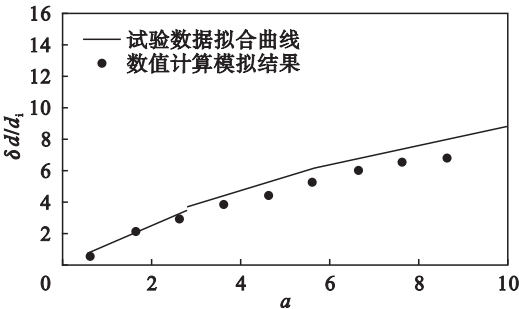


图 4  $\delta d/d_i - a$  关系曲线  
Fig. 4 Relation curve of  $\delta d/d_i$  vs.  $a$

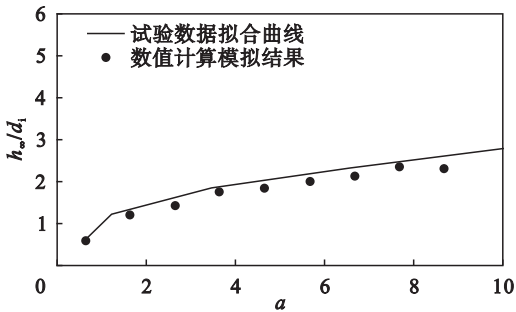


图 5  $h_\infty/d_i - a$  关系曲线  
Fig. 5 Relation curve of  $h_\infty/d_i$  vs.  $a$

从图 4 和图 5 中可以看出,计算模拟结果与试验数据拟合曲线吻合良好,从而说明本文的计算模拟是可靠而有效的。同时,还注意到在  $a$  值较小时堆积特征参数曲线表现为线性函数形式,而当  $a$  值较大时堆积特征参数曲线表现为幂函数形式<sup>[1]</sup>。而特征参数曲线的分段表现形式则必定对应着颗粒材料崩塌的两种主要类型。以下重点对这两类崩塌类型的特征进行研究。

以  $a=0.6$  的计算为例,考察当  $a$  值较小时颗粒崩塌的特征。图 6 展示了  $a=0.6$  时颗粒崩塌计

算所得到的最终堆积状态水平位移,图中的不同颜色表示不同的水平位移数值区间,从图中能够清楚看到,在颗粒材料柱体内部存在一个静止的核心区域,在该区域中的颗粒材料几乎没有发生运动,崩塌运动颗粒与静止核心区域间存在着崩塌破坏的滑动面。崩塌主要发生在颗粒材料柱体两侧位置,且崩塌的颗粒以沿滑动面的运动为主。显然,在这种情况下堆积特征参数  $d_\infty$  仅与初始高度  $h_i$  有关,而与初始特征宽度  $d_i$  无关。同时,由于颗粒材料柱体中心区域未发生崩塌,此时的  $h_\infty/d_i$  与  $a$  值相等。



图 6  $a=0.6$  时最终堆积水平位移(单位:m)  
Fig. 6 Final horizontal displacement of deposit when  $a=0.6$  (unit:m)

以  $a=4.6$  的计算为例,考察当  $a$  值较大时颗粒崩塌的特征。当  $a$  值较大时颗粒材料崩塌不再仅表现为两侧边界的局部运动,而是表现为明显的两个不同阶段。如图 7 所示,在崩塌的初期阶段,由于  $a$  值较大,当去掉边界约束后,在重力的作用下,上部颗粒材料产生整体向下的快速运动,此时下部边界颗粒材料的水平扩散运动相对较弱。当整体向下运动基本完成后,则进入以水平扩散运动为主的后期阶段,在该阶段中,具有一定速度的颗粒材料顺着坡面向下运动,并在运动中带动途经的颗粒形成沿程侵蚀,在整体上表现为颗粒向两侧的水平扩散运动,并最终形成崩塌的堆积形态。从图 7 中明显看到在崩塌过程中颗粒材料下部存在静止的核心区域。图 8 展示了  $a=4.6$  时颗粒崩塌计算所得到的最终堆积状态水平位移,图中不同颜色表示不同的水平位移数值区间,在该图中能够清楚看到崩塌中的静止核心区。

值得指出的是,尽管上述两种崩塌类型具有典型性,但在两种典型崩塌类型间存在一个过渡的崩塌类型,其对应一个较小的  $a$  值区间<sup>[1]</sup>,该过渡崩塌类型兼具两种典型崩塌的特征,其过程较为复杂,本文尚未对其进行深入研究。然而,试验与计算表明,在各类型崩塌条件下,颗粒材料中总存在一个静止的核心区域,区域中的颗粒在崩塌中并不发生运动,该静止核心区域由颗粒材料性质与约束条件所确定。目前,受到计算机能力所

限,颗粒离散元方法更多被应用于机理研究方面<sup>[7-9]</sup>,而大规模颗粒崩塌过程仍需借助于连续介质理论方法.然而,静止核心区域的存在使连续介质理论中的边界(即核心区域的位置)难以有效确定,为使连续介质理论得到更广泛的应用,就必须加强对颗粒崩塌静止核心区特征与规律的研究<sup>[10-12]</sup>.本文利用离散单元数值计算结果中颗粒崩塌最终堆积状态的位移分布图,得到不同崩塌条件下的颗粒静止核心区,并进一步考察静止核心区面积与材料总面积的比值  $A_s/A_i$  随  $a$  值的变化规律,如图 9 所示.

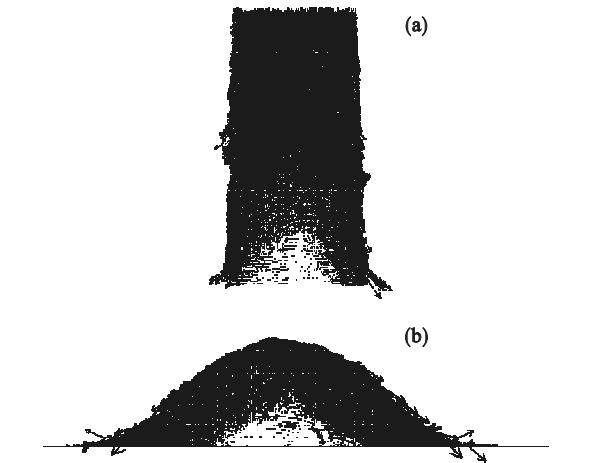


图 7  $a=4.6$  时颗粒崩塌主要阶段速度矢量图  
Fig. 7 Velocity vectors of granular collapse in the main phases when  $a=4.6$   
(a)—初期阶段;(b)—后期阶段.

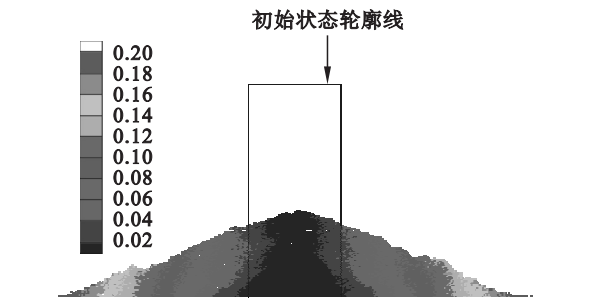


图 8  $a=4.6$  时最终堆积水平位移(单位:m)  
Fig. 8 Final horizontal displacement of deposit when  $a=4.6$  (unit:m)

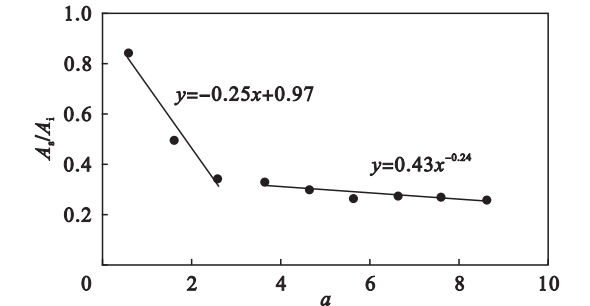


图 9  $A_s/A_i - a$  关系曲线  
Fig. 9 Relation curve of  $A_s/A_i$  vs.  $a$

在图 9 中, $A_s/A_i$  值随着  $a$  值的增大而减小,将图中  $A_s/A_i$  值随  $a$  值变化规律的数据进行拟合,可得到  $A_s/A_i - a$  关系为

$$A_s/A_i = \begin{cases} -0.25a + 0.97, & a < 2.8; \\ 0.43a^{-0.24}, & a \geq 2.8. \end{cases} \quad (2)$$

需要特别说明的是  $a$  值较小情况下的数据点较少,但所得结果仍然有效,这是因为在  $a$  值较小情况下,静止核心区起始于颗粒柱脚,并以近似固定的角度向上延伸(本例中  $\theta$  近似为  $61.6^\circ$ <sup>[1]</sup>),因而静止核心区面积比  $A_s/A_i = (h_i \cdot d_i - 0.5h_i \cdot h_i/\tan\theta)/h_i \cdot d_i = -0.27a + 1$ ,与拟合公式基本相符,拟合参数的差异可能来自试验或计算.而当  $a$  值较大时崩塌变得复杂,此时不能再通过分析得到静止核心区的规律,但从拟合曲线中可以看出,当  $a$  值较大时拟合结果仍较为良好.本文得到的不同颗粒材料崩塌条件下静止核心区的规律曲线可为进一步的研究与计算提供参考.

### 3 结 论

- 1) 采用离散单元数值计算方法对颗粒材料崩塌进行了计算模拟,计算结果与试验结果吻合良好,表明了本文的计算模拟是正确有效的.
- 2) 数值计算模拟可以有效表现颗粒材料崩塌试验中不易观测的现象与特征,进而实现对崩塌特征更深入的研究,本文结合计算对两类典型颗粒崩塌过程及特征进行了研究.
- 3) 利用数值计算得到了不同颗粒崩塌条件下堆积静止核心区的规律曲线,该曲线可为颗粒崩塌特征研究及连续介质理论边界确定提供参考.

### 参考文献:

- [1] Lube G,Huppert H E,Sparks R S J,et al. Collapses of two-dimensional granular columns[J]. *Physical Review E*,2005,72(4):041301.
- [2] Girolami L,Wachs A,Vinay G. Unchannelized dam-break flows; Effects of the lateral spreading on the flow dynamics [J]. *Physics of Fluids*,2013,25(4):043306.
- [3] Montserrat S,Tamburrino A,Roche O,et al. Enhanced run-out of dam-break granular flows caused by initial fluidization and initial material expansion[J]. *Granular Matter*,2016,18(1):1-9.
- [4] Degaetano M,Lacaze L,Phillips J C. The influence of localised size reorganisation on short-duration bidispersed granular flows[J]. *The European Physical Journal E*,2013,36(4):1-9.
- [5] Warnett J M,Denissenko P,Thomas P J,et al. Collapse of a granular column under rotation [J]. *Powder Technology*,2014,262:249-256.