

DOI: 10.7511/jslx20221119001

颗粒材料柱体崩塌物质点法数值模拟

吴凤元, 秦鹏飞, 李鑫超, 赵子豪*

(沈阳建筑大学 土木工程学院, 沈阳 110168)

摘要:为了研究颗粒材料崩塌的运动规律和堆积特性,采用物质点法对颗粒材料柱体崩塌试验进行数值模拟,并将模拟结果与试验结果进行对比验证。对颗粒材料柱体崩塌过程中颗粒的流动特性(滑动距离、堆积高度、速度、能量和动能通量的演化)进行了分析。进一步探究了颗粒材料柱体高宽比对颗粒流动能通量的影响,从而反应颗粒材料柱体崩塌过程中颗粒流的破坏能力。颗粒材料柱体高宽比越大,颗粒材料柱体外侧边缘颗粒速度越大,其溃散的程度更加强烈,并且滑动距离和动能均在增大。对于动能通量的分布,水平方向越靠近初始颗粒材料柱体,动能通量越大。

关键词:颗粒柱体;崩塌过程;物质点法;数值模拟

中图分类号:P642.21; O347.7

文献标志码:A

文章编号:1007-4708(2024)03-0445-07

1 引言

通过对颗粒材料柱体崩塌过程的研究,分析颗粒材料的崩塌特性、运动规律和堆积状态。颗粒材料的自身性质以及表现出来的运动特性对于常见自然灾害滑坡、雪崩和泥石流等研究能够提供一定的理论基础。针对颗粒柱体崩塌相关问题,已有大量学者开展了理论研究、物理试验和数值模拟分析。

颗粒材料平面崩塌试验,常用来探究颗粒流的流变特性与颗粒的反序特性。Huang 等^[1]通过坍塌沉积物的定量表征及运动过程的能量转换显示小颗粒含量的提升会增加颗粒柱坍塌的流动性。Sarlin 等^[2]探究了颗粒柱长宽比以及颗粒初始释放速度,对准二维干颗粒柱在重力作用下坍塌过程的影响。Lai 等^[3]通过离散单元法对颗粒柱塌陷进行了数值模拟,并研究了颗粒粒径分布分形维数对干颗粒流运动性能的影响。谢恩发^[4]基于离散单元法重点研究了非球形颗粒对柱坍塌特性的影响。崔激等^[5]采用离散元法对二元颗粒系统柱体坍塌模型试验过程进行了数值模拟。王健等^[6]研究结果显示颗粒柱体初始堆积高宽比是柱体崩塌堆积试验失稳形式和最终堆积状态的决定性因素。

赵海林等^[7]针对颗粒柱体崩塌并由此产生涌浪同时开展了物理试验和数值模拟研究。姜润昱^[8]以塔合曼滑坡案例边界条件特点为基础,进行了颗粒柱体坍塌的物理模型试验和数值模拟研究分析。综上,模型试验仍是颗粒材料的作用机理、动力过程、作用范围及程度的有效研究手段之一。

最初,Harlow^[9]提出的质点网格(PIC)方法本用于解决流体动力学问题,而 Sulsky 等^[10]将质点网格法拓展到固体力学领域,并将其命名为物质点法。物质点方法对物质材料使用两种离散化方法,一种基于拉格朗日质点,另一种基于欧拉网格。其是将连续体离散为承载质量、应力、应变等信息的物质点,计算网格不携带任何参数信息,仅用于求解控制方程和确定速度增量,然后将速度的增量映射到物质点。通过物质点的运动来表现出连续介质的变形,通过函数实现物质点与网格节点之间的映射,克服了有限元法中经常出现的网格畸变问题,因此其既有欧拉法的优点,也具备了拉格朗日法的优点。Wieckowski^[11]已经证明了物质点法处理颗粒状物质的流体行为的能力。Bardenhagen 等^[12]基于物质点法在微观尺度上模拟了质点间的接触和力链。Andersen^[13]表明,物质点法能够用

收稿日期:2022-11-19; 修改稿收到日期:2023-04-05。

基金项目:国家自然科学基金(42202319;52008268);中国博士后科学基金(2019M651211);辽宁省教育厅基本科研项目(LJKMZ20220944)资助。
作者简介:赵子豪*(1991-),男,博士,副教授(E-mail:ayzihaozhao@163.com)。

引用本文:吴凤元,秦鹏飞,李鑫超,等.颗粒材料柱体崩塌物质点法数值模拟[J].计算力学学报,2024,41(3):445-451.

WU Feng-yuan, QIN Peng-fei, LI Xin-chao, et al. Numerical simulation of collapse of a granular material column using material point method[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2024, 41(3): 445-451.

一个简单的莫尔-库仑模型来模拟柱崩塌。Fern 等^[14]基于物质点法考虑了本构模型在颗粒坍塌触发机制和运动过程中的作用。Liang 等^[15]提出一个基于物质点法和离散单元法的三维多尺度框架用于颗粒材料建模，并进行了颗粒坍塌模拟验证。对于颗粒材料动力过程的研究，无论从试验角度，还是从数值模拟角度，国内外学者已经得到大量的相关研究成果。在物质点法数值模拟的发展及应用方面，由于物质点法在模拟颗粒材料变形运动方面的优势，越来越多的学者开始将其应用到颗粒运动领域。

本文主要采用自编物质点法计算程序对颗粒材料柱体崩塌试验进行数值模拟，在计算中考虑了剪胀角与累积塑性应变的变化关系，并将模拟结果与试验结果进行对比验证。对颗粒材料柱体崩塌过程中颗粒的流动特性（滑动距离、堆积高度、速度、能量和动能通量的演化）进行探究。

2 颗粒材料柱体崩塌试验

Lube 等^[16]开展了一系列的准二维颗粒材料柱体崩塌试验。将颗粒材料置于两片平行墙体之间，当迅速解除门闸后，颗粒材料柱体开始崩塌，并在水平方向上沿着固定宽度的通道运动。Lube 等^[16]共进行了两个系列的试验，如图 1 所示，系列 A 为颗粒材料柱体崩塌时，其颗粒材料沿水平方向在固定宽度为 10 cm 的通道内对称滑动；系列 B 为颗粒材料柱体崩塌时，其颗粒材料沿水平方向在固定宽度为 20 cm 的通道内单向滑动。

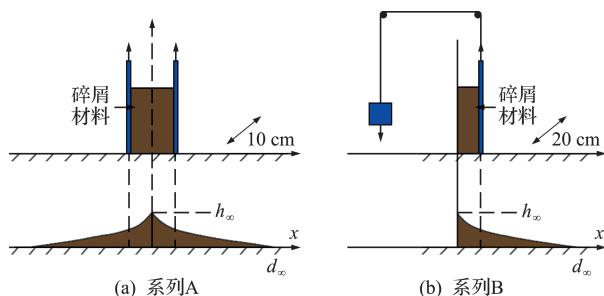


图 1 准二维颗粒材料柱体崩塌试验初始设置与最终状态
Fig. 1 Initial setting and final state of quasi-two-dimensional debris material column collapse experiment

根据系列 A 试验结果可得

$$\frac{d_{\infty} - d_i}{d_i} \approx \begin{cases} 1.2a & (a < 1.7) \\ \text{过渡区} & (1.8 \leq a < 2.8) \\ 1.9a^{2/3} & (a \geq 2.8) \end{cases} \quad (1)$$

根据系列 B 试验结果可得

$$\frac{d_{\infty} - d_i}{d_i} \approx \begin{cases} 1.6a & (a < 1.7) \\ \text{过渡区} & (1.8 \leq a < 2.8) \\ 2.2a^{2/3} & (a \geq 2.8) \end{cases} \quad (2)$$

式中 d_i 为颗粒材料柱体的初始宽度（即水平尺寸）， d_{∞} 为最终的滑动距离， a 为颗粒材料柱体初始高宽比。

两个系列的试验结果表明，在初始高宽比 a 值比较小时，颗粒材料柱体崩塌后的水平滑动距离与初始高宽比呈线性关系，在初始高宽比 a 值比较大时，颗粒材料柱体崩塌后水平滑动距离与初始高宽比呈幂指数关系。

3 物质点法数值模拟

为了验证物质点法的准确及可靠性，本次模拟主要针对 Lube 等^[16]采用粗粒石英砂作为试验材料得到 B 系列颗粒材料柱体崩塌试验结果，并做了大量的数值模拟。

在物质点理论框架中，为了再现膨胀向临界状态的演化，假定剪胀角 Ψ 与累积塑性应变 ϵ^p 的变化呈指数函数关系^[17]，即

$$\Psi = \Psi_0 e^{-s_f |\epsilon^p|} \quad (3)$$

式中 Ψ_0 为剪胀角初始值， e 为自然常数， s_f 为比例因子。式(3)意味着 $\Psi = \Psi_0$ 的初始状态随着塑性位移的增加逐渐接近 0，这对应于颗粒材料柱体的渐进性破坏。 Ψ 接近 0 的变化速率由比例因子 s_f 控制，本文将 s_f 设置为 1。材料模型参数列入表 1。

表 1 颗粒材料柱体崩塌物质点法数值模拟
材料参数

Tab. 1 Material parameters of debris material column collapse numerical simulation by material point method

参数	表示符号	数值
材料模型	—	D-P
弹性模量	E/Pa	4×10^7
泊松比	ν	0.3
粗粒石英砂	$\varphi/(\circ)$	31
内摩擦角	$\Psi/(\circ)$	0
剪胀角	c/Pa	0
黏聚力	σ_t/Pa	0
抗拉强度	$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2600
密度	μ	0.6
边界	摩擦系数	

采用物质点法模拟预测不同高宽比的颗粒材料柱体崩塌运动过程，其中获得 $a = 4.4, a = 6.0$ 和 $a = 9.0$ 的颗粒材料柱体的归一化滑动距离与归一化时间的关系如图 2 所示，将数值模拟结果与

Lube 的准二维颗粒材料柱体崩塌试验及 Utili 等^[18]的离散元模拟结果进行对比,物质点法模拟结果与颗粒材料柱体崩塌试验结果更加吻合。从图 2 可以看出,初始瞬态加速阶段(A)、持续加速阶段(B)、逐渐减速阶段(C)和最终静态堆积阶段(D)四种典型的不同状态。

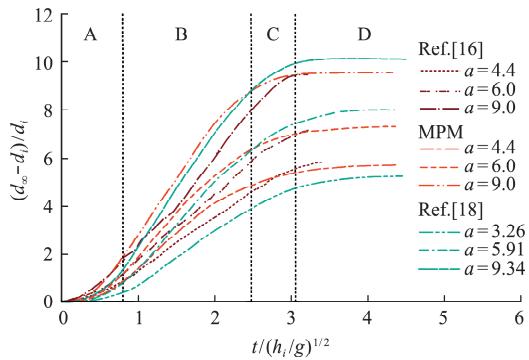


图 2 归一化滑动距离的试验和数值模拟比较

Fig2 Comparison between experiment and numerical simulation of normalized sliding distance

为了再次对物质点法的可行性进行验证,通过数值模拟获得初始高宽比与归一化滑动距离之间的关系,如图 3 所示,并观察到两种不同的流动状态,当 $a < 2$ 时,滑动距离和高宽比之间存在线性关系;当 $a \geq 2$ 时,滑动距离和高宽比之间存在幂律关系。

通过模拟计算获得的初始高宽比与归一化滑动距离的函数关系为

$$\frac{d_{\infty} - d_i}{d_i} \approx \begin{cases} 1.5a & (a < 2) \\ 1.9a^{0.75} & (a \geq 2) \end{cases} \quad (4)$$

而对于 Lube 的 B 系列颗粒材料柱体崩塌试验结果,得到

$$\frac{d_{\infty} - d_i}{d_i} \approx \begin{cases} 1.6a & (a < 1.7) \\ \text{过渡区} & (1.8 \leq a < 2.8) \\ 2.2a^{2/3} & (a \geq 2.8) \end{cases} \quad (5)$$

式中 d_i 为颗粒材料柱体的初始宽度(即水平尺寸), d_{∞} 为最终的滑动距离。

图 3 显示采用物质点法的数值模拟得到函数关系与 Lube 等^[16]试验得到函数关系大体吻合。对于具有不同初始高宽比 a (范围从 0.3 到 10)的颗粒材料柱体的崩塌过程,当 $a < 2$ 时,最终滑动距离与高宽比的线性关系与试验得到的关系几乎一致。当 $a \geq 2$ 时,最终的滑动距离与高宽比的幂律关系与试验相比,随着高宽比的增大,最终的滑动距离比试验得到的结果稍大,但总体相差不大。因此,采用物质点法可以较好地模拟颗粒材料柱体崩塌的全过程。

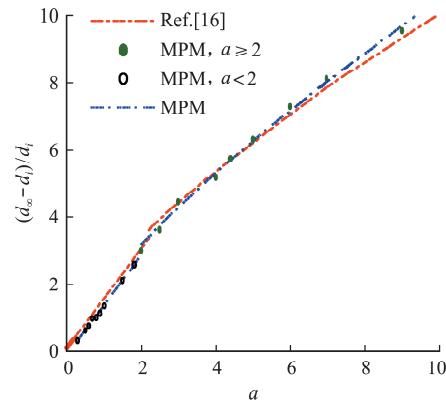


图 3 最终滑动距离与初始高宽比关系的试验与物质点法模拟结果比较

Fig. 3 Comparison of experimental and MPM simulation results on the relationship between final sliding distance and initial aspect ratio

4 颗粒材料柱体崩塌流动特性

4.1 颗粒材料柱体崩塌过程中高度和滑动距离的演化

采用物质点法对颗粒材料柱体的崩塌进行数值模拟,并对颗粒材料柱体崩塌过程中的流动特性进行探究。选取高宽比分别为 $a = 0.6, a = 0.9, a = 3, a = 5$ 和 $a = 7$ 的五组颗粒材料柱体进行模拟分析,并且得到一些研究成果和结论。

首先,通过模拟获得了颗粒材料柱体的归一化高度和归一化时间的关系(图 4(a))。发现对于小高宽比的颗粒材料,柱体的高度随着时间的变化而保持不变,说明颗粒材料柱体底面宽度大于高度时,颗粒材料柱体不会完全溃散,会有较大部分稳

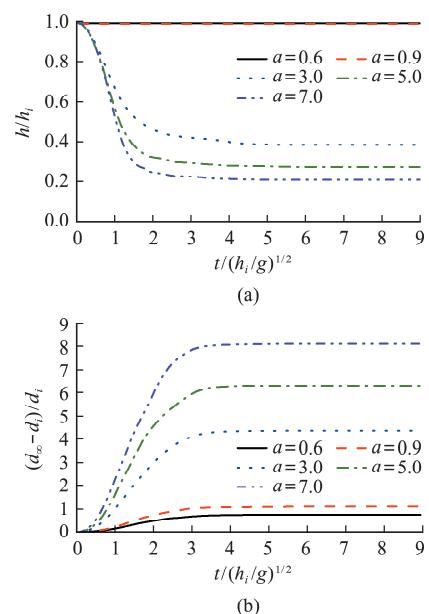


图 4 颗粒材料柱体崩塌的归一化高度、滑动距离与归一化时间的关系

Fig. 4 Relationship between normalized height, sliding distance and normalized time of debris material column collapse

定区域。对于颗粒材料柱体初始阶段,大高宽比的颗粒材料柱体的高度下降速度都非常接近,而当越接近颗粒材料柱体的最终状态时,大高宽比的颗粒材料柱体的高度下降开始放缓,由于颗粒材料柱体的高宽比越大,其最终的堆积高度越小。因此,大高宽比的颗粒材料柱体,其高宽比越大,高度下降最先放缓,也最先趋于稳定。

其次,为进一步探究颗粒材料柱体崩塌的滑动距离,选取一定范围高宽比的颗粒材料柱体进行模拟,图4(b)显示不同高宽比的颗粒材料柱体的归一化滑动距离和归一化时间的关系,可以看出,在颗粒材料柱体崩塌的初始阶段,归一化滑动距离随归一化时间近似线性增加。沿x轴方向的归一化时间从2.5变化到4.0,归一化滑动距离的增长率逐渐减小,颗粒最终达到静态状态。对应大高宽比的颗粒材料柱体的最终滑动距离相对于小高宽比的颗粒材料柱体差异比较明显。因此,无论在高度还是在滑动距离上,大高宽比颗粒材料柱体都比小高宽比颗粒材料柱体的大,并且在持续加速阶段速度变化更加明显。

4.2 颗粒材料柱体崩塌过程中速度分布

通过物质点法模拟不同时间的颗粒材料柱体崩塌的过程,并且分析其过程中速度的变化,这对于颗粒材料柱体崩塌的流动特性的探究也是十分必要的。因此,采用物质点法模拟获得了高宽比为 $a=7$ 的颗粒材料柱体在水平方向和垂直方向的速度分布,如图5和图6所示。当初始高宽比较大($a=7$),初始阶段时,颗粒材料柱体整体开始自由下落,而不是从颗粒材料柱体外侧边缘部分崩塌。随着更多的颗粒往下滑动,颗粒立即在水平面上迅速扩散,随后,圆柱的形状开始变平。

从水平速度的角度观察,水平速度决定了颗粒向水平方向扩散的能力,可以看出,颗粒材料柱体

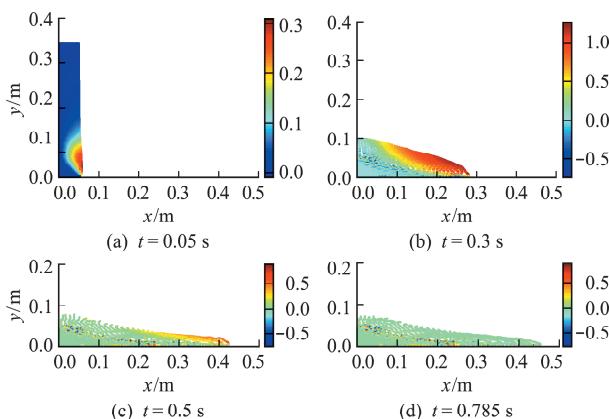


图5 高宽比 $a=7.0$ 颗粒材料柱体崩塌过程的水平速度分布
Fig. 5 Horizontal velocity distribution in the collapse process of debris material column with aspect ratio $a=7.0$

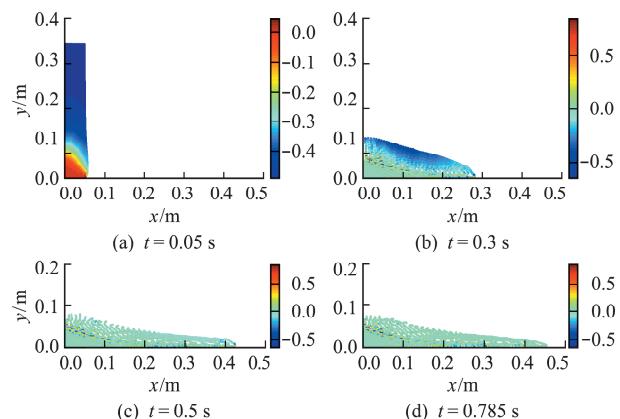


图6 高宽比 $a=7.0$ 颗粒材料柱体崩塌过程的垂直速度分布
Fig. 6 Vertical velocity distribution in the collapse process of debris material column with aspect ratio $a=7.0$

的速度变化是从外到内依次减小,即颗粒材料柱体外侧边缘颗粒速度越大,并且速度都在起始加速阶段使其达到速度峰值后,随即进入减速阶段直至颗粒停止在水平方向上。从垂直速度角度观察,垂直速度受竖直方向的重力影响比较大,由于 $a=7$ 颗粒材料柱体的高度比较高,使其颗粒向下运动趋势比较明显,导致颗粒获得更大的速度,颗粒材料柱体溃散的程度更加强烈。

当初始高宽比较大时,准静态区域初始局限在靠近底部的中心,由流动区域包围,当颗粒材料柱体完全崩塌时,准静态区域逐渐增大并暴露于自由表面上。

4.3 颗粒材料柱体崩塌过程中能量演化

能量演化可以为进一步分析颗粒的运动过程提供一种有效的途径。为了对颗粒材料柱体崩塌过程中的能量演化更加细致地分析,图7分别绘制了高宽比为4的颗粒材料柱体从开始崩塌到结束的整个过程中归一化动能、势能和归一化能量耗散随时间和归一化滑动距离的演变。

$t=0$ s,当闸门打开时,颗粒材料柱体开始迅速崩塌。同时,颗粒的势能也逐渐转化为动能。动能随着时间的增加而迅速增加,并在0.135 s时达到峰值,此时滑动距离约为0.11 m,随后动能开始减小,在0.385 s颗粒滑动到0.28 m处时颗粒崩塌结束,此时动能为0。可以看出,颗粒材料柱体在动能达到峰值用时0.135 s,滑动0.11 m,从动能峰值到动能为0其用时0.25 s,滑动0.17 m。能量耗散在开始的0 s~0.125 s期间由开始的缓慢增加转变为快速增加直至达到最大,并随着时间的推移,势能损失率和能量耗散增长率达到峰值(曲线的斜率)。 $t=0.19$ s时,颗粒材料柱体滑动0.15 m,能量耗散百分比与势能百分比大体相同,约占总能量的42%。

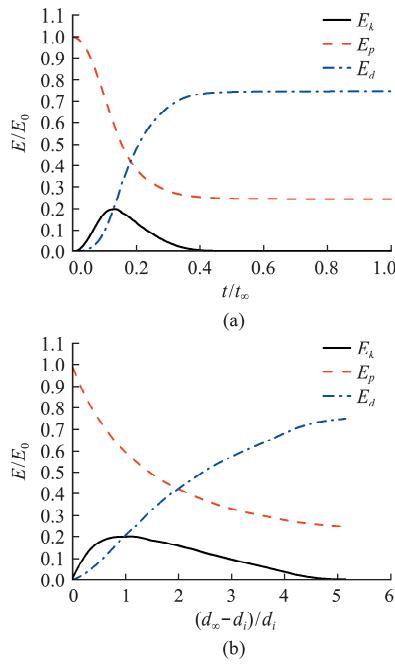


图 7 $a=4.0$ 的颗粒材料柱体崩塌过程归一化动能、势能和能量耗散随归一化时间和滑动距离的演变

Fig. 7 Evolution of normalized kinetic energy, potential energy and energy dissipation in the collapse process of $a=4.0$ debris material column with normalized time and sliding distance

4.4 颗粒材料柱体崩塌过程中动能通量

为了评估现有拦挡结构在颗粒流冲击下的脆弱性,以及设计保护现有结构工程,需要多角度考虑能量变化。颗粒流的动能可以看作是颗粒流冲击的结构释放的破坏能量的上限。从颗粒流转移到结构上的动能大小取决于在结构受到颗粒流影响的时候,颗粒流和结构是如何相互作用的。选取距离颗粒材料柱体初始状态不同的位置,并在不同位置处假想垂直于颗粒流水平方向的垂直截面(图 8 所示的垂直平面),测量颗粒材料柱体在崩塌过程中颗粒通过假想垂直截面动能的变化并进行分析,以确定可能颗粒流冲击结构的最大能量的上限(在不考虑任何结构-颗粒流相互作用影响的简化假设下)。

图 8 显示沿着颗粒流动路径的四个位置,相邻位置之间的距离为 0.05 m,并且每个位置分别由一个字母标识(A,B,C 和 D)。通过这种方法测量单位时间内流经四个不同位置截面的动能,在这里称之为动能通量,这是一种方便测量从颗粒流转移到受冲击结构的最大能量的方法。其中做法如下,对于一个给定位置的假想截面,颗粒流在指定时间间隔 Δt 内流过垂直截面的总动能为 ΔE_k ,则动能通过平面的通量由比值 $\Delta E_k/\Delta t$ 表示,这是一个以功率为维度的量,并且 $\Delta E_k/\Delta t$ 表示能从颗粒流转移到受冲击结构的最大能量。如果所有的能量都

从颗粒流中转移出去,颗粒流会突然失去所有的动能,因此其会停止,这显然是一个不现实的场景。事实上,在与结构的相互作用中,只有一部分能量会损失,这将导致流动减慢而不是停止。因此, $\Delta E_k/\Delta t$ 可以认为是颗粒流对冲击结构的最大破坏力的上限。

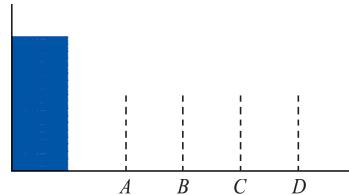


图 8 颗粒材料柱体崩塌过程中颗粒流经不同位置的假想截面
Fig. 8 Debris flow through imaginary cross sections at different locations during the debris material column collapse

由于本文采用物质方法模拟时始终保持时间间隔 Δt 不变,即 Δt 为固定值。因此为了方便,只讨论 Δt 内流过垂直截面的总动能 ΔE_k 与时间 t 的关系。图 9 呈现颗粒材料柱体的高宽比对 Δt 内颗粒流经不同位置的总动能 ΔE_k 的影响。

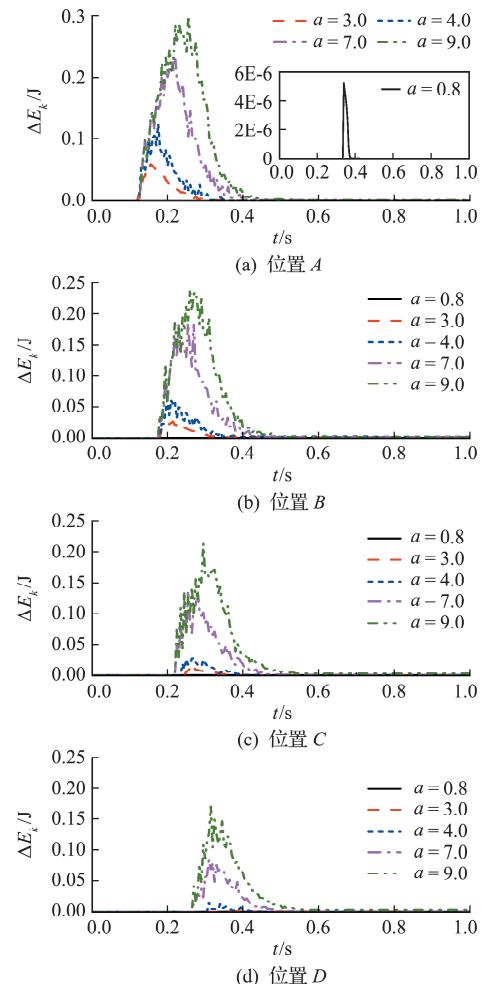


图 9 颗粒材料柱体的高宽比对 Δt 内颗粒流经不同位置的总动能 ΔE_k 的影响

Fig. 9 Influence of different aspect ratio on total kinetic energy ΔE_k of debris flowing through different positions in Δt

可以看出,颗粒在流经 A,B,C 和 D 四个位置时,其总动能 ΔE_k 都经历了先快速增大,达到峰值后开始缓慢减小。也可以看出,总动能 ΔE_k 最高的是位置 A 的截面,B,C 和 D 的动能通量依次降低。小高宽比的颗粒材料柱体由于不会完全崩塌,滑动距离比较短,因此图 9(a)中 $a=0.8$ 的颗粒材料柱体崩塌过程流经截面 A 处的动能通量很小,并且颗粒流前缘滑动不到 B,C 和 D 位置。同时对于大高宽比的颗粒材料柱体,其高宽比对各个位置的动能通量均有较大影响,随着颗粒材料柱体高宽比的增大,各个位置的动能通量也随着增大,并且高宽比对各个位置达到动能通量峰值的时间也产生了较大影响,高宽比越大,达到各个位置动能通量的峰值也依次延后。

5 结 论

本文采用物质点法模拟颗粒材料柱体崩塌的过程。在物质点法计算中考虑了剪胀角与累积塑性应变的变化关系。首先,将物质点法模拟结果与 Utili 等^[18]的离散元模拟的结果进行对比,发现物质点法模拟结果与颗粒材料柱体崩塌试验结果更加吻合。其次,探究颗粒材料柱体崩塌过程中颗粒的流动特性,结论如下。

(1) 在模拟颗粒材料柱体崩塌试验中,可以发现小高宽比的颗粒材料柱体不会完全溃散,会有较大部分稳定区域。颗粒材料柱体的高宽比越大,其最终的堆积高度越小。因此,大高宽比的颗粒材料柱体,其高宽比越大,高度下降最先放缓,也最先趋于稳定。

(2) 颗粒材料柱体高宽比越大,颗粒材料柱体外侧边缘颗粒速度越大,其溃散的程度更加强烈,并且滑动距离、动能均在增大。

(3) 探究了颗粒材料柱体的高宽比对颗粒流动能通量的影响,从而反映颗粒材料柱体崩塌过程中颗粒流的破坏能力。通过对沿着颗粒流动路径的四个假想垂直截面位置(A,B,C 和 D)进行动能通量模拟监测,发现随着颗粒材料柱体高宽比的增加,流经四个位置的动能通量也都增加,并且越靠近初始颗粒材料柱体,动能通量越大。

参考文献(References) :

- [1] Huang B L, Wang J, Zhang Q, et al. Energy conversion and deposition behaviour in gravitational collapse of granular columns[J]. *Journal of Mountain Science*, 2020, **17**(1):216-229.
- [2] Sarlin W, Morize C, Sauret A, et al. Collapse dynamics of dry granular columns: From free-fall to quasistatic flow[J]. *Physical Review E*, 2021, **104**(6):064904.
- [3] Lai Z Q, Pan L M, Wang Z M, et al. Numerical simulation of granular column collapse with fractal particle size distribution using discrete element method [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, **2068**(1): 012009.
- [4] 谢恩发. 非球形颗粒对二元颗粒柱坍塌特性影响的离散元研究[D]. 天津大学, 2019. (XIE En-fa. Study on the Influence of Aspheric Particles on the Collapse Characteristics of Binary Particle Columns by Discrete Element Method [D]. Tianjin University, 2019. (in Chinese))
- [5] 崔 濑,魏 杰,张贵科,等. 基于离散元模拟的二元颗粒柱坍塌特性研究[J]. 岩土力学, 2021, **42**(1): 280-290. (CUI Wei, WEI Jie, ZAHNG Gui-ke, et al. Research on collapse characteristics of binary particle column based on discrete element simulation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, **42**(1): 280-290. (in Chinese))
- [6] 王 健,黄波林,张 全,等. 碎裂化柱状危岩体崩塌-堆积特征概化模型研究[J]. 水利水电技术, 2020, **51**(2): 136-143. (WANG Jian, HUANG Bo-lin, ZHANG Quan, et al. Study on generalized model of collapse-deposit characteristics of cataclastic and columnar dangerous rock mass [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, **51**(2): 136-143. (in Chinese))
- [7] 赵海林,黄波林,张 全,等. 柱状危岩体崩塌产生涌浪的物理试验与数值模拟分析[J]. 地质力学学报, 2020, **26**(4):500-509. (ZHAO Hai-lin, HUANG Bo-lin, ZHANG Quan, et al. Physical experiment and numerical model analysis of surge caused by collapse of columnar dangerous rock mass [J]. *Journal of Geomechanics*, 2020, **26**(4):500-509. (in Chinese))
- [8] 姜润昱. 基于颗粒柱体坍塌试验的碎屑流运动及堆积特征研究[D]. 西南交通大学, 2021. (JIANG Run-yu. Study on Debris Flow Movement and Accumulation Characteristics Based on Particle Cylinder Collapse Experiment [D]. Southwest Jiaotong University, 2021. (in Chinese))
- [9] Harlow F H. The particle-in-cell computing method for fluid dynamics [J]. *Methods in Computational Physics*, 1964, **3**:319-343.
- [10] Sulsky D, Chen Z, Schreyer H L. A particle method for history-dependent materials[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1994, **118**(1-2):179-196.

- [11] Wieckowski Z. The material point method in large strain engineering problems [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2004, **193**(39-41):4417-4438.
- [12] Bardenhagen S G, Kober E M. The generalized interpolation material point method [J]. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2004, **5**(6):477-496.
- [13] Andersen S. Material-Point Analysis of Large-Strain Problems Modelling of Landslides [D]. Aalborg University, 2009.
- [14] Fern E J, Soga K. The role of constitutive models in MPM simulations of granular column collapses [J]. *Acta Geotechnica*, 2016, **11**(3):659-678.
- [15] Liang W J, Wu H R, Zhao S W, et al. Scalable three-dimensional hybrid continuum-discrete multiscale modeling of granular media [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2022, **123**(12): 2872-2893.
- [16] 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.
- [17] Nguyen N H T, Bui H H, Nguyen G D. Effects of material properties on the mobility of granular flow [J]. *Granular Matter*, 2020, **22**(3):59.
- [18] Utili S, Zhao T, Housby G T. 3D DEM investigation of granular column collapse: Evaluation of debris motion and its destructive power [J]. *Engineering Geology*, 2015, **186**:3-16.

Numerical simulation of collapse of a granular material column using material point method

WU Feng-yuan, QIN Peng-fei, LI Xin-chao, ZHAO Zi-hao*

(College of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: In order to study the movement and accumulation characteristics of granular material collapses, the material point method was used to simulate a granular material column collapse experiment. The simulation results were compared with the experimental results. Investigations were made on the flow properties of the particles (evolution of sliding distance, accumulation height, velocity, energy, and kinetic energy flux). In order to reflect the granular flow's destructive potential during the collapse of the granular material column, the impact of the aspect ratio of the granular material column on the kinetic energy flux of the granular flow was further examined. The larger the aspect ratio of the granular material column, the larger the particle velocity at the outer edge of the granular material column and the stronger the degree of collapse. At the same time, the sliding distance and kinetic energy are increasing. For the distribution of kinetic energy flux, the closer the horizontal direction is to the initial granular material column, the greater the kinetic energy flux.

Key words: granular column; collapse process; material point method; numerical simulation