基于离散元模型的聚合型滑坡碎屑流聚合角度影响研究

杨锟，叶永*，谢旋

三峡大学水利与环境学院，湖北 宜昌 443002

第一作者，E-mail：736120345@qq.com

* 通信作者，E-mail：yeyong@ctgu.edu.cn

2023-10-10 收稿；2024-02-06 修回；2024-02-19 接受

基金项目：国家重点研发计划课题(2021YFC3001903)

中图分类号：P642.22　　文章编号：2096-8523(2025)02-0116-14　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230564

摘　要：滑坡碎屑流是一种常见的地质灾害，它有着规模宏大、滑动距离远、速度快的特征，而山坡沟谷等地形会影响滑坡碎屑流的运动轨迹，进而对其产生阻拦、转向、堆积等一系列影响，所以滑坡碎屑流不仅仅只有简单的直线路径，受到地形因素的影响，其运动路径复杂多样。本研究主要基于滑坡碎屑流不同运动轨迹中的聚合行为，采用 EDEM 软件，分析对称聚合型滑坡碎屑流在不同聚合角度中的运动冲击和堆积特性。研究结果表明：①聚合角度对于运动速度的影响：聚合角度越大，颗粒到达聚合点时沿主坡道的速度分量 v_y 越小，滑坡碎屑流分离程度越高，滑坡滑动时间越长；②聚合角度对于堆积形态的影响：聚合角度越大，滑坡稳定在坡脚处，其堆积区的形态，在滑道一侧的长度越长，而在拦挡结构处的高度越小；③聚合角度对于冲击性能的影响：聚合角度越大，对拦挡结构的冲击力峰值越低且越晚出现峰值；在停止运动形成静态堆积区后的残余冲击力也越低，残余冲击力的值也与冲击力峰值越接近。研究成果为滑坡碎屑流复杂路径运动深入研究提供了基础作用，为滑坡碎屑流防治结构优化提供了理论参考。

关键词：滑坡碎屑流；聚合角度；运动特性；冲击力；离散元；EDEM

在强降水、地震等自然灾害及人为因素的作用下，滑坡、泥石流等地质灾害频发。根据中国地质灾害资料显示，在中国，滑坡是最常见的一种地质灾害，每年约 70% 的地质灾害是由滑坡引起的。

滑坡碎屑流是高位滑坡中一种普遍存在的运动方式，会形成一种高破碎度、高离散性和高流动性的集合体[1-2]，其移动过程中，由于速度快、距离长、冲击力大，对山区道路桥梁以及山区住宅建设进行碰撞冲击，造成灾难性的损毁，对人民的生命和财产造成巨大的威胁[3-13]。

关于滑坡碎屑流这种地质灾害，国内外的科研人员已经开展了大量的研究工作，由于自然环境的特殊性，滑坡碎屑流难以预测，现场监控的数据也不具有代表性，所以数值模拟[14-18]和模型试验[19-23]成为了多数学者的研究手段，并取得了一定的研究成果。在数值模拟方面，张睿骁等[24-25]采用离散元法，对不同挡墙距离以及不同场地条件下滑坡碎屑流碰撞冲击作用进行了数值模拟并对结果进行分析；孙立娟等[26]通过 PFC 软件模拟，验证了滑带土强度衰减是诱发滑坡失稳的重要因素；王飞等[27]基于 MatDEM 软件，研究了针对黄泥扁滑坡的 3 种不同支护方案的支护效果；可以看出数值模拟从滑坡的失稳、滑动、冲击到最后的防护方案等方面都可以做出针对性研究。在模型试验方面，张玉洁等[28]采

著录信息：杨锟，叶永，谢旋. 基于离散元模型的聚合型滑坡碎屑流聚合角度影响研究［J］. 地质科技通报，2025，44(2)：116-129.
YANG Kun, YE Yong, XIE Xuan. Influence of aggregation angle of aggregated landslide debris flows based on discrete element model［J］. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(2): 116-129.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjqb.cug.edu.cn

用正交试验设计法展开了 54 组滑坡涌浪室内模型试验，试验结果得出的结论可以为预测滑坡涌浪提供理论依据；任雨欣等[29] 通过室内物理模型试验对高速远程滑坡碎屑流堆积特征进行分析，得到不同的停积条件对堆积体的表面特征和内部特征均有影响，堆积体的形态特征与堆积体内部颗粒的剪切作用有关等结论；YANG 等[30]、赵运会等[31] 以及雷先顺等[32]，在前人研究的基础上，以滑坡碎屑流的粒度、体积和地形因素等变量为影响因子，开展了滑坡碎屑流的模型试验，研究了各类因子对于滑坡碎屑流运动的影响。当然 2 种研究手段也可以相互补充，进一步优化研究，JIANG 等[33] 用室内模型试验进行了一系列的滑坡颗粒对于挡土墙的冲击试验，而 SHEN 等[34] 在此试验的基础上，用离散元软件进行了更深入研究，有利于设计出更好的挡土结构。

然而，滑坡碎屑流的路径并不是单一简单的，其具有复杂性，李朗平等[35] 对滑坡路径进行综述，认为滑坡路径体现在 6 种不同的复杂行为，即侧散、交织、分叉、聚合、并联和转向，而滑坡也因为其复杂的运动路径而具有更大的危险性。对于滑坡运动路径中的侧散问题，龙艳梅等[36] 开展了物理模型实验，得出无侧限条件下颗粒横向扩散的程度明显大于半侧限，且无侧限条件下颗粒流堆积体是呈向运动方向发散分布的扇形堆积等结论。对于滑坡运动路径中的转向问题，袁锦涛等[37] 基于不同偏转角度的地形影响，对于滑坡碎屑流运动堆积过程进行了离散元数值模拟，发现滑坡颗粒的速度、动能的衰减变化与颗粒级配和偏转角度大小的关联较大，且偏转角度大小对于滑坡颗粒的动能衰减产生的影响最大；胡晓波等[38] 对四川都江堰三溪村发生的崩塌滑坡进行了研究，通过离散元软件 PFC3D，探究了滑坡初始沉积体不同部位失稳后，沿着偏转的沟壑地形向下滑动，其运动速度变化和堆积特征；杨海龙等[39] 基于室内滑坡模型试验，也对于偏转地形中的不同偏转角度对滑坡运动的影响进行了大量试验，对于不同工况的运动堆积特征进行了分析研究。

上述研究在滑坡运动路径中的侧散和偏转等场地因素方面取得了较好的研究成果，极大地丰富了人们对于滑坡路径复杂性的认知。但对于 6 种复杂的滑坡运动路径[35] 中的聚合行为研究甚少，也鲜有报道。因此，为了研究碎屑流的聚合行为，笔者在已有的简单路径的研究基础上建立聚合型滑坡碎屑流三维离散元模型，研究不同的聚合角度对碎屑流的运动特性、堆积形态和滑坡整体冲击力大小的影响，以此来对滑坡碎屑流复杂运动路径中的聚合行为进行深入研究。

1 工程概况

李朗平等[35] 在对滑坡运动路径的复杂性研究中指出，滑坡的危险程度中很大一部分是由于它本身的运动路径是复杂的而不是单一的造成的。受到场地因素的影响，滑坡会发生包括聚合行为在内的 6 种不同的行为。正是由于滑坡存在着多种不同行为这一属性，导致其路径变幻莫测，难以捉摸，具有不确定性，从而对滑坡运动的预测和后续的防控工作带来极大的困难。所以，这种复杂、不单一、不确定的属性，使其比之前一些简单路径的滑坡预测更具有难度。

而实际生活中，确实存在着不少可以反映出 6 种不同滑坡行为的案例，如图 1 所示：位于福建南平地区发生的滑坡，具有聚合行为在内的多种复杂行为（图 1a）；汶川大地震所造成的山体滑坡中，也有不少存在多种复杂行为共存的滑坡案例（图 1b）；交织行为的滑坡可分为上半部分的分叉行为、下半部分的聚合行为（图 1c）。

2 数值模拟

2.1 研究思路

以数值模拟作为研究手段，在已有的研究成果的基础上开展聚合角度对聚合型滑坡碎屑流运动冲击与堆积的影响研究，从模型建立、模型验证、工况设计以及结果分析几个方面来展开研究，研究流程如图 2。

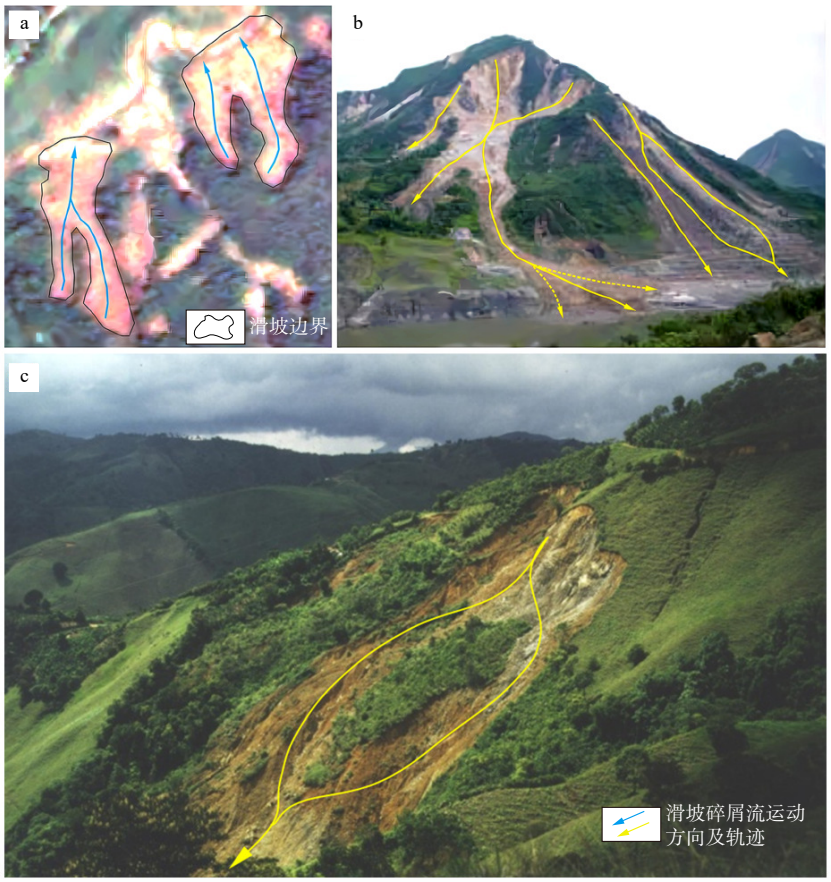
2.2 EDEM 基本原理

采用三维离散元软件 EDEM，选择无黏性颗粒的赫兹–明德林无滑动接触模型，图 3 即为此接触模型的示意图。该接触模型可以很好模拟颗粒的运动情况，被大量学者用于滑坡碎屑流的仿真，该接触模型主要包括颗粒间的法向力 F_n，法向阻尼力 F_n^d，切向力 F_t，切向阻尼力 F_t^d，切向摩擦力 f，滚动摩擦力 τ_i 6 个接触参数[40-41]。其表达式分别为：

$$F_n = \frac{4}{3}E^*(R^*)^{1/2}\alpha^{3/2}, \tag{1}$$

$$F_n^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_n m^*}v_n^{rel}, \tag{2}$$

$$F_t = -S_t\delta, \tag{3}$$



a. 福建南平滑坡；b. 汶川地震引发的滑坡；c. 交织滑坡（据文献 [35] 修改）

图 1　滑坡 6 种复杂行为的部分案例

Fig. 1　Selected cases of six complex behaviors of landslides

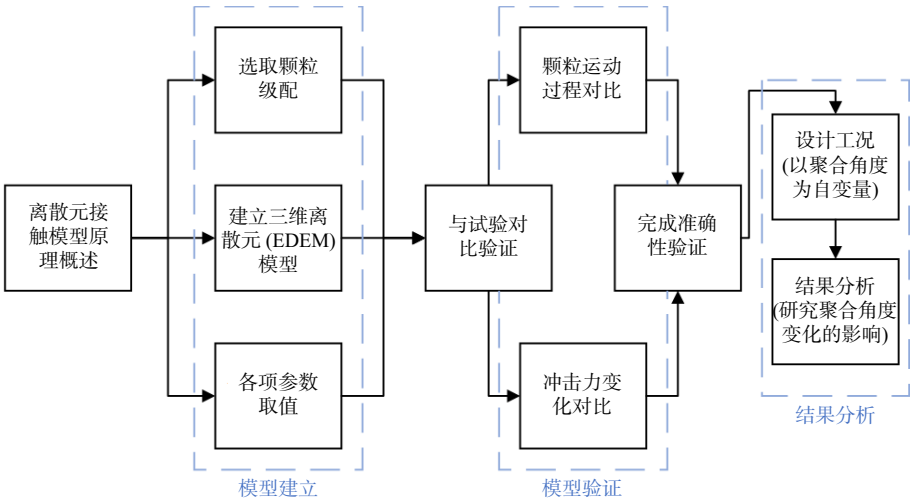


图 2　聚合角度对聚合型滑坡碎屑流运动冲击与影响研究流程图

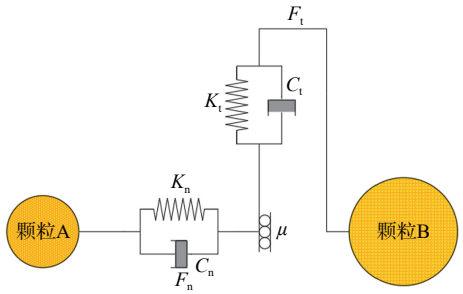
Fig. 2　Flow chart of the study on the impact and influence of the aggregation angle on the movement of aggregated landslide debris flows

$$F_{\mathrm{t}}^{\mathrm{d}} = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_{\mathrm{t}}m^{*}}v_{\mathrm{t}}^{\mathrm{rel}}, \tag{4}$$

$$f = \mu_{s}F_{n}, \tag{5}$$

$$\tau_{i} = -\mu_{\mathrm{r}}F_{\mathrm{n}}R_{i}\omega_{i}, \tag{6}$$

式中：E^{*}为等效弹性模量；R^{*}为等效颗粒半径；α 为颗粒间发生作用的法向重叠量；β 为法向阻尼力系数；S_{n} 为法向刚度；m^{*} 为等效质量；$v_{\mathrm{n}}^{\mathrm{rel}}$ 为颗粒间相对速度的法向分量值；S_{t} 为切向刚度；δ 为切



F_t. 颗粒间的切向力; F_n. 颗粒间的法向力; K_t. 切向弹性系数; K_n. 法向弹性系数; C_t. 切向阻尼系数; C_n. 法向阻尼系数; μ. 摩擦系数; 下同

图 3　EDEM 中颗粒间接触模型示意图

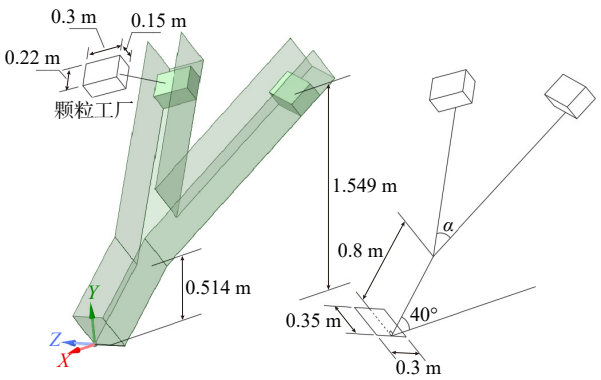
Fig. 3　Schematic diagram of the interparticle contact model in EDEM

向重叠量; v_t^{rel} 为切向相对速度; μ_s 为静摩擦系数; μ_r 为滚动摩擦系数; R_i 为质心到接触点 i 间的距离; ω_i 为接触点 i 处物体的单位角速度矢量; 下同。

2.3　模型建立和参数选取

目前, 针对滑坡碎屑流的模型试验研究, 张睿骁等[24-25] 建立三维离散元模型研究了滑坡碎屑流的冲击特性, 袁锦涛等[37] 建立滑坡碎屑流冲击堆积模型研究了地形偏转下滑坡碎屑流的冲击特性和堆积效果, JIANG 等[33] 开展室内试验研究了滑坡碎屑流对于拦挡结构的冲击特性。由于 JIANG 等[33] 的室内模型试验规模小且得到的规律较为明显, 常用来校核数值模型的有效性。本研究以 JIANG 等[33] 的室内试验模型的尺寸和各项参数为主要参考, 设计数值模型, 开展聚合型滑坡碎屑流的运动特征研究。

本模型由滑道、颗粒工厂、拦挡结构和颗粒构成(图 4): 滑道底槽宽 0.3 m, 滑道侧槽宽 0.35 m, 颗粒工厂为长方体, 长 0.22 m、宽 0.3 m、高 0.15 m, 聚合点高度 0.514 m, 释放高度 1.549 m。其中, α 为聚合角度, 聚合后滑坡坡度为 40°。滑坡数值模型材料参数如表 1 所示。



α. 聚合角度

图 4　滑坡模型示意图

Fig. 4　Schematic diagram of the landslide model

根据实际滑坡中碎屑流颗粒级配(PSD)分布, JIANG 等[33] 室内试验采用的物质组成中粒径为 10 ~ 20 mm 的颗粒占比在 95% 左右, SHEN 等[34]、潘青等[42] 的研究也与 JIANG 等[33] 的室内试验进行对比, 并对碎屑流级配进行了研究, 认为粒径小于 10 mm 的颗粒质量分数相对较低, 粒径小于 10 mm 的颗粒部分对于数值模拟结果的偏差可以忽略不计, 因此本研究也依照 SHEN 等[34]、潘青等[42] 对于颗粒级配的选取, 即颗粒粒径为 10 ~ 20 mm 线性分布的颗粒级配作为 EDEM 中滑坡体的颗粒级配, 如图 5 所示。

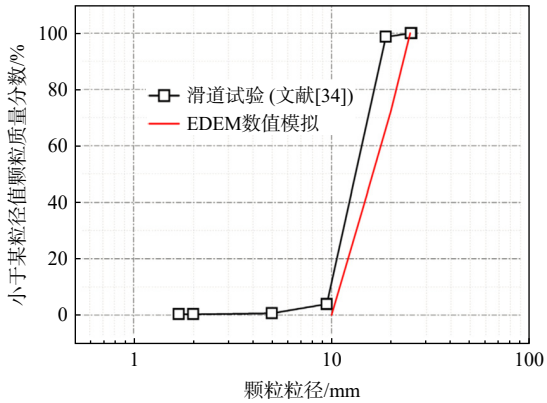


图 5　JIANG 等[33] 试验与 EDEM 的颗粒级配曲线（据文献[34] 修改）

Fig. 5　Particle size distribution of the test and EDEM

根据室内模型试验, 数值模型接触参数及固体颗粒参数如表 1 和表 2 所示[43-45]。对于接触参数, 由于数值模拟中的颗粒形状为规则的球体, 实际颗粒的形状为不规则的块状且表面没有球体光滑, 即规则的球体颗粒更易滑动也更易滚动, 所以基于大多数学者的接触参数上还需增大静摩擦系数和减少滚动摩擦系数, 所以本研究参照潘青等[42] 的来进行参数设定, 以尽可能贴近 JIANG 等[33] 的室内试验采用的颗粒情况。

2.4　模型验证

为了验证 EDEM 模型的有效性, 将 EDEM 数值

表 1　EDEM 中接触系数选取

Table 1　Value of contact coefficients in EDEM

接触参数	取值
恢复系数	0.5
颗粒静摩擦系数	1.330
颗粒滚动摩擦系数	0.080
滑道静摩擦系数	0.466
滑道滚动摩擦系数	0.010
拦挡结构静摩擦系数	0.384
拦挡结构滚动摩擦系数	0.010

表 2　EDEM 中模型与颗粒的属性取值

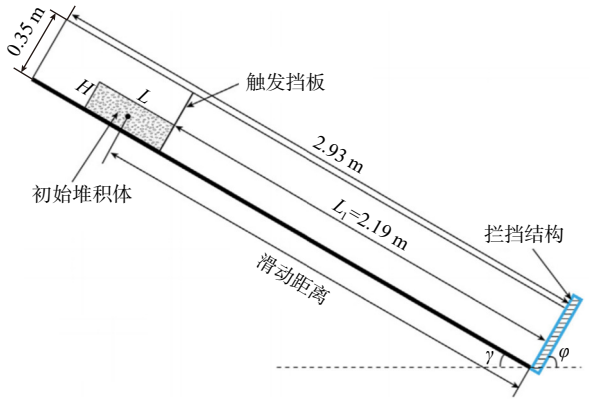
Table 2　Value of equipment material and bulk material in EDEM

模型与颗粒的属性	取值
滑道/拦挡结构泊松比	0.3
滑道/拦挡结构密度/(kg·m^{-3})	7900
滑道/拦挡结构杨氏模量/MPa	2×10^5
颗粒泊松比	0.25
颗粒密度/(kg·m^{-3})	2550
颗粒杨氏模量/MPa	100
颗粒粒径/mm	10 ~ 20

模拟结果与 JIANG 等[33] 室内试验结果进行比较。数值模拟结果与试验结果的对比包含 2 部分: ①运动过程的对比分析; ②冲击力过程的对比分析。

2.4.1　运动特征对比

JIANG 等[33] 滑坡室内试验装置如图 6 所示: 滑道由 1 个底板 2 个侧板构成的槽道, 侧板底板长度均为 2.93 m, 侧板高度为 0.35 m, 底板宽度为 0.3 m。滑道底板与水平面夹角 γ 为 40°, 底端的拦挡结构与水平面夹角 φ 为 50°, 滑坡体失稳前的初始形状为块体, 其长度为 0.44 m, 高度为 0.15 m, 宽度为 0.3 m。其中触发挡板是拦挡滑坡体, 使其在一开始处于稳定状态, 打开触发挡板, 滑坡失稳开始下滑直至堆积。



L_1. 触发挡板到拦挡结构的距离; L. 滑坡体长度; H.滑坡体高度; γ. 滑道底板与水平面夹角; φ. 拦挡结构与水平面夹角

图 6　滑道试验装置示意图 (据文献 [34] 修改)

Fig. 6　Schematic diagram of the slide test setup

按照 1 : 1 比例, 创建 EDEM 数值模型(图 7), 主要包括槽滑道、拦挡结构、颗粒工厂、触发挡板。这些模型除了触发挡板之外都静态固定放置, 对于触发挡板部分进行线性旋转设定来模拟室内模型试验中的触发挡板打开过程。

数值模型材料参数、颗粒级配、固体颗粒参数及接触参数都按室内模型试验设置。将数值模拟的结果与 JIANG 等[33] 试验的结果相对比, 见图 8, 9 所示, 图 8 为 JIANG 等[33] 的试验结果摄像图, 图 9 为数值模拟得到的滑坡碎屑流运动过程图。

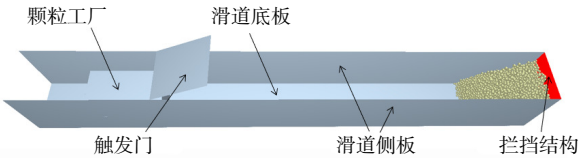
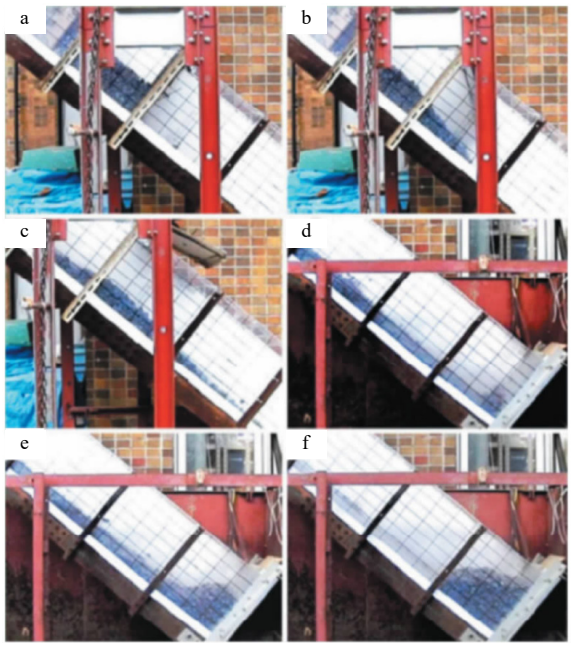


图 7　EDEM 中的模型构成

Fig. 7　Model composition in EDEM



a, b. 失稳阶段; c, d. 滑动阶段; e, f. 堆积阶段

图 8　滑坡试验中颗粒运动过程图 (据文献 [33] 修改)

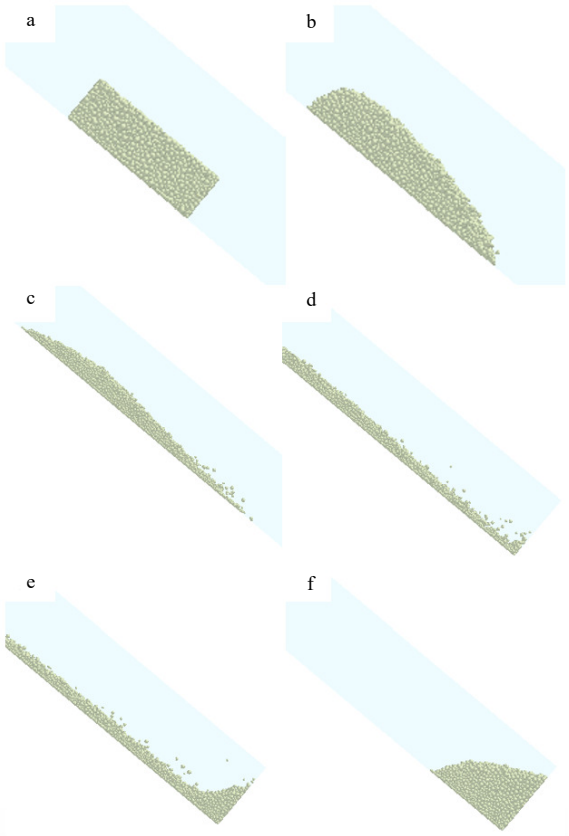
Fig. 8　Diagram of particle motion process in landslide test

如图 8, 9 所示, 可将滑动过程分为 3 个阶段: 第 1 阶段为失稳阶段, 当撤离触发挡板后, 颗粒体失稳, 从前缘开始崩塌, 中后缘变化不大, 见图 8a, b 和图 9a, b; 第 2 阶段为滑动阶段, 前缘颗粒加速下滑, 中后缘颗粒开始扰动, 随着颗粒滑动, 滑坡体较厚部分变薄, 滑道逐渐布满流动颗粒, 见图 8c, d 和图 9c, d; 第 3 阶段为堆积阶段, 滑道颗粒前端触碰到拦挡结构发生碰撞反弹, 阻挡后续颗粒滑动, 前端颗粒开始发生堆积, 随着颗粒间相互阻碍作用的传递, 堆积区越来越大, 直到所有颗粒静止堆积在拦挡结构堆积区为止, 见图 8e, f 和图 9e, f。

可以看出, 图 8 室内模型试验中的颗粒和图 9 数值模拟中的颗粒在每一阶段的运动特征基本一致, 说明上述的参数设计在 EDEM 软件中能够很好地模拟颗粒运动过程和堆积特征。

2.4.2　冲击力对比

JIANG 等[33] 的室内试验在拦挡结构处设置了



a, b. 失稳阶段; c, d. 滑动阶段; e, f. 堆积阶段

图 9　EDEM 中碎屑流运动过程图

Fig. 9　Diagram of debris flow motion process in EDEM

冲击力监测板，得出了冲击力的时程曲线图，利用 EDEM 中颗粒与模型接触力计算模块，计算数值模拟的冲击力时程曲线图，将 2 个曲线图进行对比，如图 10 所示。

利用离散单元法进行数值模拟时，与拦挡结构初始接触的颗粒处在复杂且长时间相互作用的力链中，某个时刻会达到最大峰值，同时也导致冲击力时程曲线发生明显波动[42]。采用快速傅立叶变换函数

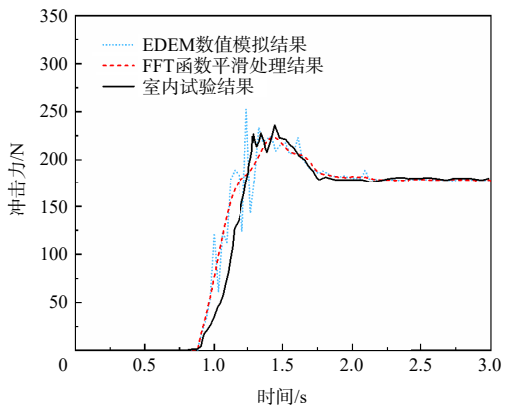


图 10　试验与 EDEM 的冲击力变化图

Fig. 10　Plot of impact force variation in the test and EDEM

(the fast fourier transformation, 简称 FFT) 对冲击力曲线作平滑处理，将平滑处理的时程曲线与试验结果对比，可以看到冲击力变化过程和最大值结果基本一致，包括动态过程中的冲击力峰值与静态堆积的残余冲击力，以及发生的时间节点基本吻合，即上述的参数设计在 EDEM 软件中能够很好地模拟颗粒流的冲击性能。

2.5　工况设计

为研究聚合型碎屑流的运动过程特征及冲击性能，选取 4 个聚合角度开展研究。工况设计如表 3，颗粒级配分布采用图 5 中级配曲线。

表 3　4 组 EDEM 工况设计

Table 3　Four groups condition design in EDEM

工况	聚合角度α/(°)	颗粒级配分布
J1-1	30	总质量27 kg 10 ~ 20 mm 颗粒线性分布
J1-2	40	
J1-3	50	
J1-4	60	

3　结果分析

3.1　运动过程分析

EDEM 中的模拟结果显示，4 种不同聚合角度的滑坡碎屑流运动规律基本一致，4 种工况的运动过程均可分为以下 4 个阶段(以工况 J1-2 为例)。

(1)第 1 阶段（*启动*）　如图 11a, b 所示，撤离挡板后，滑坡整体失稳，滑坡的前缘和顶部 (上三角区) 颗粒速度增大，整体的后缘和底部 (下三角区) 颗粒受到前方颗粒的约束，速度保持不变。随着滑坡整体逐渐分离，前缘颗粒迅速向下滑动，后方颗粒受到的约束变少，速度开始增长。受到重力影响，滑道向内侧板的颗粒向滑道向外侧板发生失稳崩塌，及滑道外侧高程低于滑道内侧，滑坡整体在运动过程中逐步向滑道外侧进行滑动。后缘下端靠近外端挡板的颗粒最后发生位移，完成失稳阶段。

(2)第 2 阶段（*滑动*）　如图 11c, d 所示，失稳后，越前缘的颗粒速度增长越快，中后缘颗粒受到前方颗粒的约束，速度增长慢，前缘颗粒速度>整体中部颗粒速度>后缘颗粒速度，导致滑坡体随着滑动逐渐分离拉长，且前中缘碎屑流变为薄层，中后缘碎屑流相较于前缘碎屑流较厚，随着滑动，碎屑流逐渐向外端侧板移动。

(3)第 3 阶段（*聚合*）　如图 11e, f 所示，前缘颗粒最先到达聚合区域，由于前缘颗粒少，两侧颗粒

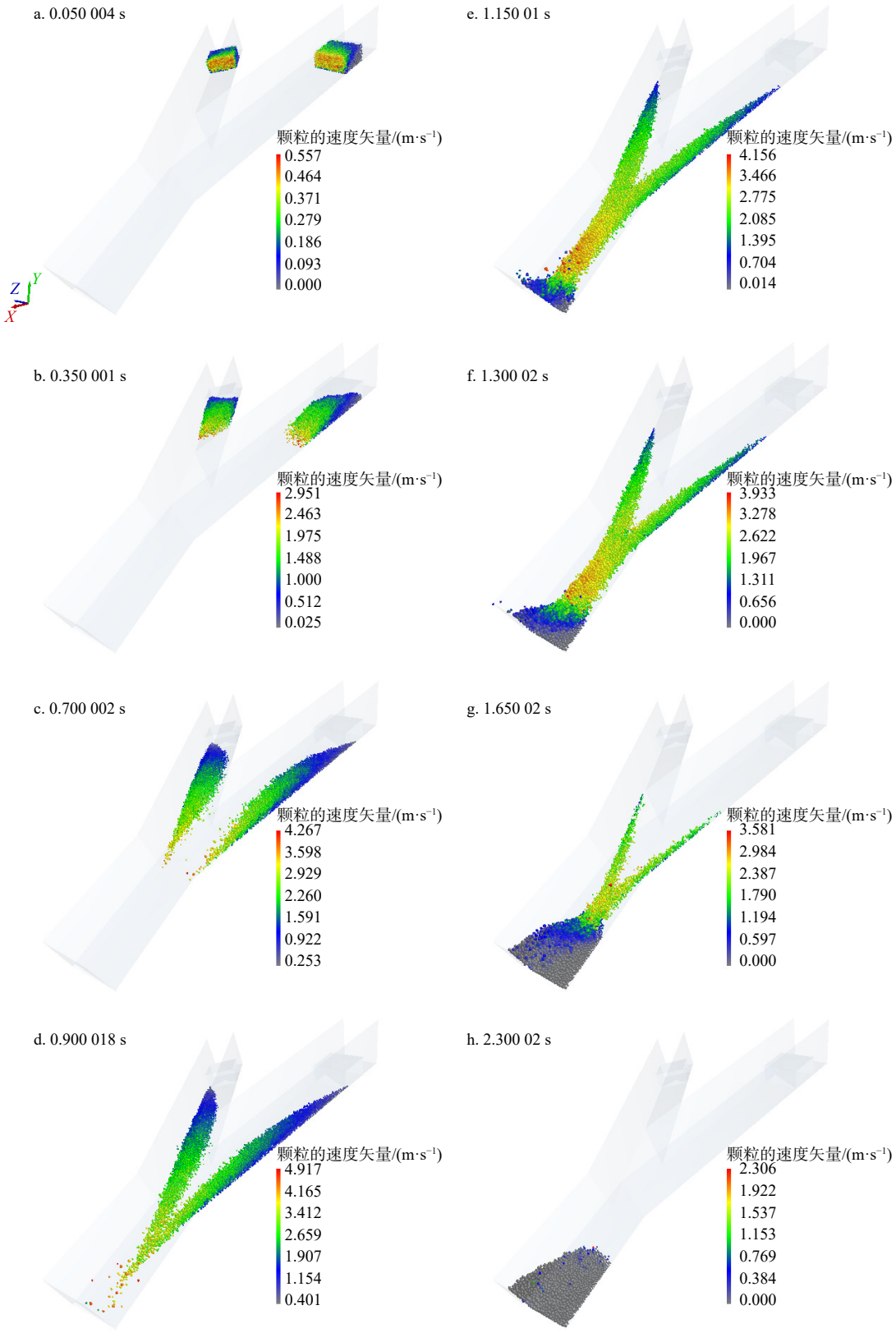


图 11　颗粒运动过程 (J1-2 工况)

Fig. 11　Movement process of particles

发生碰撞的几率小, 没有发生碰撞或者碰撞较小的颗粒在两侧挡板的偏转作用下, 速度方向变为随着坡道方向运动; 而发生聚合行为的颗粒, 在对侧颗粒碰撞的作用下, 并没有与两侧挡板接触, 其速度方向也变为随着坡道方向, 运动聚合后的碎屑流较细; 随着滑动, 中缘颗粒到达聚合区域后, 两侧颗粒发生碰

撞的几率大，在碰撞作用下，速度方向变为随着坡道方向运动，聚合后的碎屑流变粗；最后，后缘颗粒到达聚合区域，两侧颗粒发生碰撞的几率小，没有发生碰撞或者碰撞较小的颗粒，在两侧挡板的偏转作用下，速度方向变为随着坡道方向运动，聚合后的碎屑流较细。

（4）第 4 阶段（堆积） 如图 11g, h 所示，前缘颗粒到达拦挡结构，发生碰撞后反弹，由于与后续颗粒的作用，发生碰撞颗粒并没有向后运动，而是在拦挡结构底部发生堆积，随着堆积区颗粒的增多，后续的颗粒到达底部，与前端堆积颗粒发生碰撞后逐步爬升，向拦挡结构的高处移动且速度变小，最终堆积。

图 12 进一步展示了滑坡碎屑流在堆积区的运动轨迹变化过程。在 t=1.05 s 附近，颗粒正面撞击拦挡结构，在拦挡结构前形成一个很小的堆积区，该堆积区由于重力影响，侧视图为三角形。在 t=1.20 s 到 t=1.35 s 期间，堆积区阻碍后续颗粒的运动，导致后续的颗粒减速并且速度方向发生偏转，沿着堆积区向上爬升，堆积区在拦挡结构处的高度不断增加。坡脚拦挡结构处的堆积区的高度，在一开始会随着后方颗粒沿着拦挡结构的爬升而增高；t=1.35 s 到 t=2.10 s 期间，随着堆积区的颗粒变多，静态堆积区体积增大，不断阻止后方颗粒的运动，后方颗粒无法继续越过堆积区进行爬升，此时堆积区的高度达到峰值不再增加，后方颗粒逐渐在堆积区的后方发生堆积，此时堆积区沿着滑坡坡道方向发生堆积且长度增加，沿着拦挡结构方向的堆积高度不再增长。可以看出，整个堆积过程，颗粒沿滑道堆积的长度不断增加，而颗粒沿着拦挡结构的爬升在某个节点到达峰值便不再增加，撞击拦挡结构后形成的静态堆积区，正是后续颗粒能量耗散的主要原因。

3.2 聚合角度 α 对运动速度影响

3.2.1 能量公式分析

$$\overline{E}_{\mathrm{K}}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{2}m_i v_i^2}{\sum_{i=1}^{n} i}, \tag{7}$$

$$\overline{E}_{\mathrm{P}}=\frac{\sum_{i=1}^{n} m_i g h_i}{\sum_{i=1}^{n} i}, \tag{8}$$

式中：$\bar{E}_{\mathrm{K}}$ 为颗粒平均功能；$\bar{E}_{\mathrm{p}}$ 为颗粒平均势能；m_i 为颗粒 i 的质量；v_i 为颗粒 i 的速度；g 为重力加速度；h_i 为颗粒 i 从释放高度到坡角处的高程差。

由公式 (7), (8) 可知，颗粒的重量和释放高度决定着速度，而初始设置的颗粒级配相同，总体质量也相同，释放高度也相同。所以影响速度的主要因素为摩擦损耗和坡度。图 13a 为滑坡模型简化图，其中聚合角度为 2θ，支流段（即从释放点到聚合点这一段）有效坡度为 β，到达聚合点时沿主坡道的速度为 v_y。

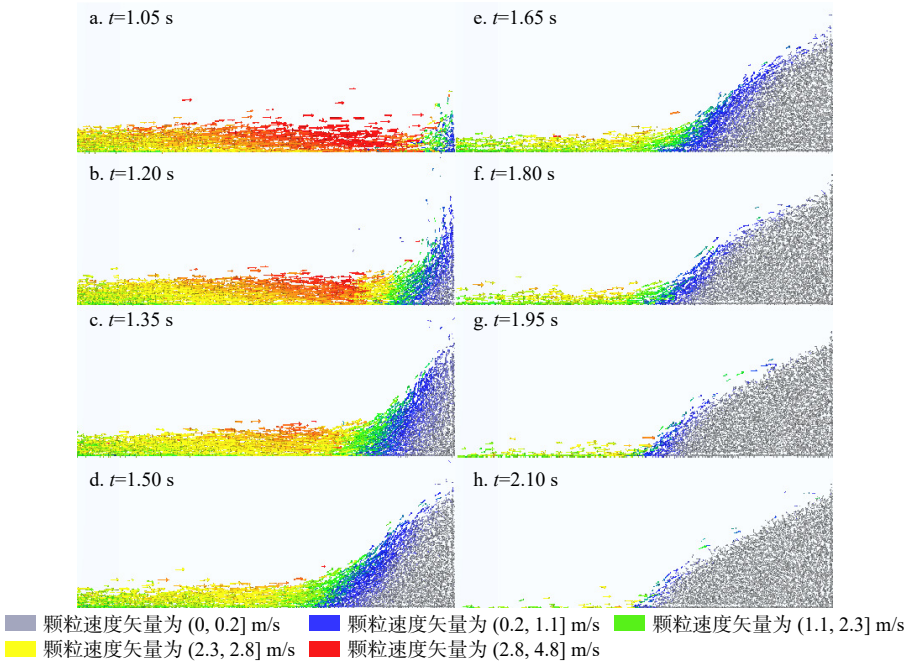
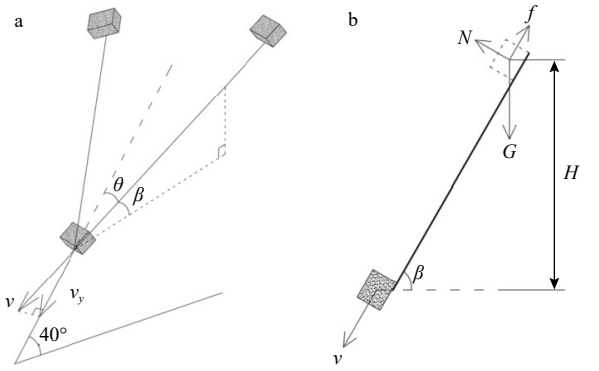


图 12 滑坡碎屑流颗粒速度场变化 (J1-2 工况)

Fig. 12 Changes in velocity field of landslide debris flow particles (J1-2)

为更方便分析支流段滑坡体受力，将支流段简化为图 13b，其中释放高度到聚合点高度为 H，将颗粒工厂中的颗粒看作一个整体，忽略整体内部即颗粒之间接触发生剪切摩擦和碰撞所造成的能量损失，打开触发挡板，颗粒整体开始失稳下滑，此时颗粒整体的受力情况如图 13b 所示：支持力 N、摩擦力 f、重力 G。摩擦力 f 的大小为摩擦因数与重力 G 的乘积。



a. 滑坡模型简化图；b.支流段简化图；θ. 聚合角度的 1/2；β. 支流段有效坡度；v. 到达聚合区域颗粒的速度；v_y. 颗粒到达聚合点时沿主坡道的速度；N. 支持力；f. 摩擦力；G. 重力；H. 颗粒释放高度到聚合点高度；下同

图 13　滑块受力示意图

Fig. 13　Schematic diagram of the force on the slider

颗粒聚合后，在对侧颗粒碰撞和滑道侧板偏转影响下，颗粒最终沿着聚合后的主坡道向下滑动，颗粒对拦挡结构冲击力主要影响因素为到达底部的颗粒速度，求出颗粒到达聚合点的速度分量 v_y，即可反映颗粒到达底部的速度大小规律。根据力的平衡条件，垂直于滑道方向的受力有支持力 N 和重力 G 的分量 $G\cos\beta$，这 2 个力始终相等即此方向处于平衡，所以只考虑平行于滑道面方向的受力，即重力 G 的分量 $G\sin\beta$ 和摩擦力 f。此时到达聚合区域颗粒的速度为：

$$v = \sqrt{2gH}\sqrt{1-\frac{\mu}{\tan\beta}}, \tag{9}$$

式中：μ 为摩擦系数。

而根据图 13a 中，β，θ，主坡坡度(40°)关系可得，$\tan\beta$ 的值为：

$$\tan\beta = \frac{1}{\sqrt{\dfrac{1}{\sin^2 40°\cos^2\theta}-1}}。 \tag{10}$$

根据图 13a 中，v 与 v_y 关系可得，v_y 的值为：

$$v_y = v\cos\theta。 \tag{11}$$

由式(9)可知，g，H，μ 均为常数，则 v 的值与 $\tan\beta$ 的值成正比，由式(10)中可推出，在工况的聚合角度即 2θ 的范围 30°～60°里，θ 越大，$\cos\theta$ 越小，则 $\tan\beta$ 越小，即 $\tan\beta$ 的值与 θ 的值成反比。联立式(9)可得，v 的值与 θ 成反比，最终联立式(11)得出，v_y 的值与 θ 的值成反比。所以在忽略颗粒间的剪切摩擦和碰撞所造成的能量损失时，聚合角度与 v_y 成反比，即从工况 J1-1 到 J1-4，聚合角度不断增大，v_y 变小，则作用在拦挡结构的冲击力越小。

3.2.2　模拟结果分析

颗粒聚合后，在对侧颗粒碰撞和滑道侧板偏转影响下，颗粒最终沿着聚合后的主坡道向下滑动，无拦挡结构时，在其原处的颗粒平均速度时程曲线如图 14 所示。可以看出聚合角度 α 越大，颗粒通过底部的平均速度越小，所有颗粒全部通过时间越长，根据上节分析可知，聚合角度 α 越大，v_y 越小，则从释放点到底部所需时间越长，颗粒分离度越高，所以通过底部时间跨度越大。当聚合角度 α 从 0°(试验工况)分别增加到 30°，40°，50°，60°(对应 JH，J1-2，J1-3，J1-4 工况)时，所有颗粒通过底部时的平均速度分别减少了 7.32%，11.37%，17.89%，24.47%，所有颗粒全部通过底部区域的时间跨度为 1，1.3，1.57，1.88，2.3 s。可以看出，模拟结果下聚合角度与 v_y 的关系与上节公式分析的相同。

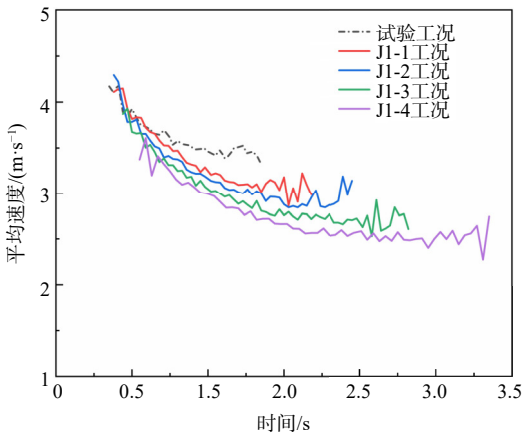
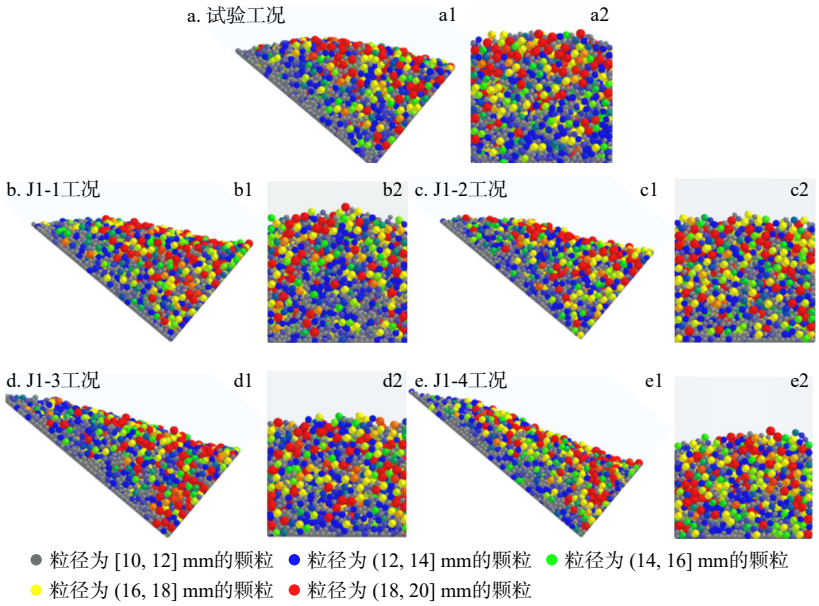


图 14　不同工况下平均速度时程曲线图

Fig. 14　Evolution of solid particles velocity with different working conditions

3.3　聚合角度 α 对堆积区形态分析

对比试验工况 (可看成聚合角度 α=0°) 和聚合角度 α 分别为 30°，40°，50°，60°的工况 (即 J1-1，J1-2，J1-3，J1-4)，由上节模拟情况分析可知，到达坡脚接触到拦挡结构之前，4 种工况颗粒的运动速度随着聚合角度 α 变大而减小，分离程度更大，失稳到堆积所用时间更长，而接触到拦挡结构，颗粒发生堆积直至停止运动之后的静止形态如图 15 所示。



a1, b1, c1, d1, e1 为侧视图; a2, b2, c2, d2, e2 为颗粒在拦挡结构面的堆积图

图 15　滑坡碎屑流颗粒堆积形态

Fig. 15　Accumulation pattern of landslide debris flow particles

在滑坡模型下端形成的静止的三角形区域, 也就是在拦挡结构拦挡下形成的堆积区, 被广大学者称为 dead zone, 滑坡的坡度很大程度上影响着该区域的长度。而对于聚合型滑坡碎屑流, 进一步观察可以发现在相同主坡坡度下, 聚合角度很大程度上影响着该区域的两边长度(沿拦挡结构面堆积的高度和沿滑道面堆积的长度), 随着聚合角度的增大, 堆积区沿拦挡结构面的高度减小, 沿滑道面堆积的长度增加。测量各工况下堆积区两边长度的值, 做出各工况下堆积区对照表(表 4), 可以发现各工况沿拦挡结构堆积的高度对比于试验工况, 分别下降 0.9%, 3.2%, 11.4%, 18.2%; 各工况沿滑道面堆积的长度对比于试验工况, 分别上升 7.2%, 14%, 28%, 44%。这是由于 5 种工况释放高度都相同, 此时聚合角度越大的工况, 滑道相对来说更长, 颗粒移动的距离更远, 所以分离程度更大, 且颗粒速度越小, 所以到达拦挡结构时, 与拦挡结构冲击力更小, 颗粒的爬升能力会更小, 更难越过前方已经发生堆积的颗粒堆, 所以造成堆积区长度增加、高度减小。

分别用灰色、蓝色、绿色、黄色、红色标记粒径为 [10, 12] mm, (12, 14] mm, (14, 16] mm, (16, 18] mm, (18, 20] mm 的颗粒, 以此来区分不同粒径颗粒在堆积区的分布情况(图 15), 可以看出不同工况都存在颗粒反序现象, 即细颗粒主要分布在堆积区的底部, 粗颗粒主要分布在堆积区的顶部, 且细颗粒更靠近滑坡一侧, 粗颗粒更靠近拦挡结构一侧。从失稳滑动阶段和坡脚堆积阶段分别分析, 在失稳滑动时, 细颗粒体积小, 更容易顺着颗粒之间的缝隙移动至整体底部, 而且细颗粒比表面积较大, 所以相对于粗颗粒的能量损失会更大, 所以速度也会更慢, 所以逐渐会移动至整体的底部和中后部; 而粗颗粒速度更快, 且由于体积大不会顺着缝隙向下, 反而随着细颗粒下沉, 粗颗粒逐渐占据整体上部和前部。而在到达坡脚堆积时, 颗粒会有爬升现象, 由于粗颗粒位于整体前部和上部, 所以粗颗粒率先接触拦挡结构并随之爬升, 而细颗粒在整体底部, 在爬升时遭到上方粗颗粒阻拦, 所以多数会在下方发生沉积。

表 4　各工况下堆积区对照表

Table 4　Comparison table of stacking area under each working condition

	试验工况	J1-1 工况	J1-2 工况	J1-3 工况	J1-4 工况
沿拦挡结构面堆积的高度/mm	287.19	284.56	278.05	254.55	234.95
沿滑道面堆积的长度/mm	388.9	416.94	443.38	497.78	560.04

3.4　聚合角度 α 对冲击性能的影响

图 16 为不同聚合角度 α 下滑坡碎屑流颗粒对拦挡结构的冲击力时程曲线图, 根据图 16 中 4 个工况的数据和试验工况的数据, 做出各工况下冲击力对照表(表 5)。可以观察到, 聚合角度 α 越小, 滑坡碎屑流冲击力则越快达到峰值, 且峰值越大(由 J1-1→J1-4, 冲击力峰值分别为 217.01, 191.84, 172.20,

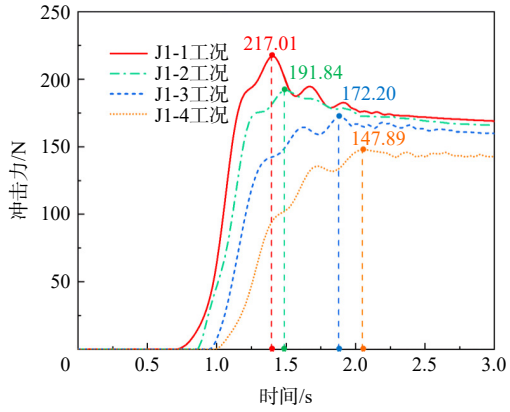


图 16　滑坡碎屑流颗粒冲击力变化图

Fig. 16　Plot of impact force variation of landslide debris flow

表 5　各工况下冲击力对照表

Table 5　Comparison table of impact force under each working condition

	试验工况	J1-1工况	J1-2工况	J1-3工况	J1-4工况
冲击力峰值/N	223.61	217.01	191.84	172.20	147.89
残余冲击力/N	177.16	169.08	165.94	160.12	141.13
（峰值/残余）/%	126	128	115	107	104

147.89 N, 出现冲击力峰值的时间点分别 1.39, 1.48, 1.88, 2.05 s), 冲击力也越快减小至残余冲击力(图中最后趋于的冲击力值), 即颗粒堆积达到静态稳定后对于拦挡结构的压力。而同时, 聚合角度 α 越大, 冲击力峰值越接近最后的残余冲击力, 即表 5 中峰值/残余的百分比越小, 这是由于上节分析到, 聚合角度 α 越大, 堆积区长度越长而高度越小, 此时后续的颗粒更难越过堆积区到达拦挡结构, 只会对堆积区末端的颗粒造成碰撞, 此时通过堆积区传导到拦挡结构的力更小, 且此时堆积区高度越小, 所以残余冲击力会更小。

4　结论

(1)运动特征　在支流段, 受到重力影响, 颗粒在向下移动的同时, 会沿滑道底部向外侧侧板方向发生偏移, 并且滑坡整体形态逐渐分离拉长, 且聚合角度越大, 分离程度越大。前缘颗粒到达聚合点时, 没有发生碰撞的颗粒受到两侧侧板约束偏转向下移动; 中部颗粒全部发生聚合行为, 由两侧颗粒间的碰撞偏转向下移动; 后缘颗粒, 没有发生碰撞的受两侧侧板约束偏转向下移动。

(2)运动速度的影响　聚合角度越大, 颗粒越晚到达聚合区域发生聚合行为, 且处于整体各位置的颗粒到达拦挡结构时的速度都越小。聚合角度 α 从 0°(试验工况)分别增加到 30°, 40°, 50°, 60°时, 所有颗粒通过底部时的平均速度分别减少了 7.32%, 11.37%, 17.89%, 24.47%, 所有颗粒全部通过底部区域的时间跨度为 1, 1.3, 1.57, 1.88, 2.3 s。

(3)堆积形态的影响　聚合角度越大, 颗粒动态堆积的爬升能力越弱, 所以滑坡稳定在坡脚处, 其堆积区的形态, 在拦挡结构处的高度减小, 由 J1-1 到 J1-4 工况下堆积区高度分别为 284.56, 278.05, 254.55, 234.95 mm; 而沿滑道面的长度增加, 由 J1-1 到 J1-4 工况下堆积区长度分别为 416.94, 443.38, 497.78, 560.04 mm。且堆积区也存在颗粒反序现象, 粗颗粒在上, 细颗粒在下, 且粗颗粒靠近拦挡结构, 细颗粒更靠近滑道底部。

(4)冲击性能的影响　聚合角度越大, 对拦挡结构的冲击力峰值越低, J1-1 到 J1-4 工况下冲击力峰值分别为 217.01, 191.84, 172.20, 147.89 N, 且越晚出现峰值, J1-1 到 J1-4 工况下冲击力峰值的时间点分别为 1.39, 1.48, 1.88, 2.05 s; 在停止运动形成静态堆积区后的残余冲击力也越低, J1-1 到 J1-4 工况下残余冲击力的值分别为 169.08, 165.94, 160.12, 141.13 N; 残余冲击力的值也与冲击力峰值更加接近, J1-1 到 J1-4 工况下冲击力峰值与残余冲击力的比值分别为 128%, 115%, 107%, 104%。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献:

[1] 程谦恭, 张倬元, 黄润秋. 高速远程崩滑动力学的研究现状及发展趋势 [J]. 山地学报, 2007, 25(1): 72-84.
CHENG Q G, ZHANG Z Y, HUANG R Q. Study on dynamics of rock avalanches: State of the art report[J]. Journal of Mountain Science, 2007, 25(1): 72-84. (in Chinese with English abstract)

[2] CUI Y F, CHOI C E, LIU L H D, et al. Effects of particle size of mono-disperse granular flows impacting a rigid barrier[J]. Natural Hazards, 2018, 91(3): 1179-1201.

[3] MANZELLA I, LABIOUSE V. Empirical and analytical analyses of laboratory granular flows to investigate rock avalanche propagation[J]. Landslides, 2013, 10(1): 23-36.

[4] 马东涛, 张金山, 冯自立, 等. 2004.7. 20 云南盈江滑坡泥石流山洪灾害成因及减灾对策 [J]. 灾害学, 2005, 20(1): 67-71.
MA D T, ZHANG J S, FENG Z L, et al. Main causes of the landslide, debris flow and torrential flood disasters on July 20, 2004 in Yingjiang of Yunnan and the disaster reduction measures[J]. Journal of Catastrophology, 2005, 20(1): 67-71. (in Chinese with English abstract)

[5] 余峙丹, 张辉, 郭荣芬. 云南楚雄特大滑坡泥石流气象成因 [J]. 气象科技, 2010, 38(1): 136-140.

YU Z D, ZHANG H, GUO R F. Analysis of meteorological causes of an exceptional landslide and debris flow event in Chuxiong[J]. Meteorological Science and Technology, 2010, 38(1): 136-140. (in Chinese with English abstract)

[6] 解超, 赵叶江, 高福兴. 贵州镇远小云盘滑坡特征及成因分析 [J]. 四川地质学报, 2024, 44(4): 671-676.
XIE C, ZHAO Y J, GAO F X. Analysis on characteristics and genesis of Xiaoyunpan landslide in Zhenyuan, Guizhou Province[J]. Acta Geologica Sichuan, 2024, 44(4): 671-676. (in Chinese with English abstract)

[7] 王兴菊, 杨忠明, 陈贞红. 安顺市一次特大暴雨过程分析评估 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39(4): 2015-2019.
WANG X J, YANG Z M, CHEN Z H. Analysis evaluation of a severe storm process in Anshun City[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(4): 2015-2019. (in Chinese with English abstract)

[8] 梁京涛, 成余粮, 王军, 等. 2013 年 7 月 10 日四川省都江堰三溪村五里坡特大滑坡灾害遥感调查及成因机制浅析 [J]. 工程地质学报, 2014, 22(6): 1194-1203.
LIANG J T, CHENG Y L, WANG J, et al. Remote sensing investigation and formation mechanism on Wulipo landslide of July 10, 2013 in Sanxi Village, Dujiangyan, Sichuan Province[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(6): 1194-1203. (in Chinese with English abstract)

[9] 温铭生, 方志伟, 王阳谷. 都江堰市五里坡特大滑坡灾害特征与致灾成因 [J]. 现代地质, 2015, 29(2): 448-453.
WEN M S, FANG Z W, WANG Y G. Characteristics and disaster causes of Wulipo landslide in Dujiangyan City[J]. Geoscience, 2015, 29(2): 448-453. (in Chinese with English abstract)

[10] YIN Y P, LI B, WANG W P, et al. Mechanism of the December 2015 catastrophic landslide at the Shenzhen landfill and controlling geotechnical risks of urbanization[J]. Engineering, 2016, 2(2): 230-249.

[11] 甘建军, 樊俊辉, 唐春, 等. 浙江遂昌苏村滑坡基本特征与成因机理分析 [J]. 灾害学, 2017, 32(4): 73-78.
GAN J J, FAN J H, TANG C, et al. Sucun landslide in Suichang County of Zhejiang Province: Characteristices and failure mechanism[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(4): 73-78. (in Chinese with English abstract)

[12] 邵崇建, 李芃宇, 李勇, 等. 茂县滑坡的滑动机制与震后滑坡形成的地质条件 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2017, 44(4): 385-402.
SHAO C J, LI P Y, LI Y, et al. Sliding mechanism of Maoxian landslide and geological condition analysis of formation of post-earthquake landslide[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2017, 44(4): 385-402. (in Chinese with English abstract)

[13] 薛智文, 许冲, 付登文, 等. 2024 年 1 月 22 日云南镇雄滑坡灾害成因分析 [J]. 地震研究, 2025, 48(1): 80-88.
XUE Z W, XU C, FU D W, et al. Analysis of the causes of the landslide disaster in Zhenxiong, Yunnan on January 22, 2024[J]. Journal of Seismological Research, 2025, 48(1): 80-88. (in Chinese with English abstract)

[14] 朱晨光, 刘春, 许强, 等. 滑坡滑带摩擦热离散元数值模拟研究 [J]. 工程地质学报, 2019, 27(3): 651-658.
ZHU C G, LIU C, XU Q, et al. Discrete element numerical simulation research on friction heat in sliding zone of the landslide[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(3): 651-658. (in Chinese with English abstract)

[15] LUO H, XING A G, JIN K P, et al. Discrete element modeling of the Nayong rock avalanche, Guizhou, China constrained by dynamic parameters from seismic signal inversion[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(4): 1629-1645.

[16] SCARINGI G, FAN X M, XU Q, et al. Some considerations on the use of numerical methods to simulate past landslides and possible new failures: The case of the recent Xinmo landslide (Sichuan, China)[J]. Landslides, 2018, 15(7): 1359-1375.

[17] 汪志林, 叶海旺, 李子旋, 等. 含双裂隙组灰岩边坡渐进失稳过程分析 [J]. 矿冶工程, 2021, 41(2): 20-23.
WANG Z L, YE H W, LI Z X, et al. Analysis of progressive instability process of limestone slope with two groups of fissures[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021, 41(2): 20-23. (in Chinese with English abstract)

[18] XUE Y D, ZHOU J, HUANG H W, et al. Analysis of large soil rock mixture slope based on DEM[J]. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 27(3): 651-658.

[19] FANG K, TANG H M, LI C D, et al. Centrifuge modelling of landslides and landslide hazard mitigation: A review[J]. Geoscience Frontiers, 2023, 14(1): 101493.

[20] GONG Y F, YAO A J, LI Y L, et al. Model test study on sliding-toppling composite deformation evolution of anti-dip layered rock slope[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(5): 194.

[21] 肖捷夫, 李云安, 蔡浚明. 水位涨落作用下藕塘滑坡响应特征模型试验研究 [J]. 工程地质学报, 2020, 28(5): 1049-1056.
XIAO J F, LI Y A, CAI J M. Model test research on response characteristics of outang landslide under water level fluctuation[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(5): 1049-1056. (in Chinese with English abstract)

[22] 詹志发, 贺建先, 郑博文, 等. 边坡模型相似材料配比试验研究 [J]. 地球物理学进展, 2019, 34(3): 1236-1243.
ZHAN Z F, HE J X, ZHENG B W, et al. Experimental study on similar material proportion of slope model[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(3): 1236-1243. (in Chinese with English abstract)

[23] 许强, 刘汉香, 邹威, 等. 斜坡加速度动力响应特性的大型振动台试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(12): 2420-2428.
XU Q, LIU H X, ZOU W, et al. Large-scale shaking table test study of acceleration dynamic responses characteristics of slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(12): 2420-2428. (in Chinese with English abstract)

[24] 张睿骁, 樊晓一, 杨海龙, 等. 不同拦挡距离对滑坡碎屑流冲击效应影响的离散元模拟 [J]. 西南科技大学学报, 2018, 33(3): 37-42.
ZHANG R X, FAN X Y, YANG H L, et al. Discrete element simulation of the effects of different baffle distances on the impact of landslide-debris flow[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2018, 33(3): 37-42. (in Chinese with Eng-

lish abstract)

[25] 张睿骁, 苏栋, 樊晓一, 等. 场地条件对滑坡−碎屑流运动冲击特征的影响研究 [J]. 振动与冲击, 2022, 41(2): 229-239.
ZHANG R X, SU D, FAN X Y, et al. Influence of site conditions on the motion and impact effect of rock avalanches[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(2): 229-239. (in Chinese with English abstract)

[26] 孙立娟, 沈方铭, 张互助. 基于滑带土强度劣化的库水复活型滑坡渐进失稳机理研究 [J]. 吉林建筑大学学报, 2022, 39(4): 18-22.
SUN L J, SHEN F M, ZHANG H Z. Study on progressive instability mechanism of reservoir water resurrection laudslide based on strength deterioration of sliding zone soil[J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2022, 39(4): 18-22. (in Chinese with English abstract)

[27] 王飞, 徐楚, 黎伟. 基于 MatDEM 的黄泥扁滑坡支护效果分析 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(5): 52-60.
WANG F, XU C, LI W. Supporting effect analysis of the Huangnibian landslide based on MatDEM[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(5): 52-60. (in Chinese with English abstract)

[28] 张玉洁, 许国庆, 汪洋, 等. 约束条件对滑坡涌浪特征影响的室内试验研究 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(2): 309-314.
ZHANG Y J, XU G Q, WANG Y, et al. Laboratory experiment on the influence of constraint conditions on landslide-generated waves[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(2): 309-314. (in Chinese with English abstract)

[29] 任雨欣, 喻志鹏. 基于物理模型实验的高速远程滑坡碎屑流堆积特征分析 [J]. 四川建筑, 2023, 43(2): 144-146.
REN Y X, YU Z P. Analysis of debris flow accumulation characteristics of high-speed remote landslide based on physical model experiment[J]. Sichuan Architecture, 2023, 43(2): 144-146. (in Chinese)

[30] YANG Q Q, CAI F, UGAI K, et al. Some factors affecting mass-front velocity of rapid dry granular flows in a large flume[J]. Engineering Geology, 2011, 122(3/4): 249-260.

[31] 赵运会, 樊晓一. 基于正交设计的滑坡运动参数模型试验 [J]. 山地学报, 2016, 34(1): 92-99.
ZHAO Y H, FAN X Y. Model test of movement parameters of landslide based on orthogonal design[J]. Mountain Research, 2016, 34(1): 92-99. (in Chinese with English abstract)

[32] 雷先顺, 谢沃, 卢坤林, 等. 无黏性土滑动和堆积特性的模型试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2016, 38(2): 226-236.
LEI X S, XIE W, LU K L, et al. Model tests of sliding and accumulation characteristics of cohesionless soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(2): 226-236. (in Chinese with English abstract)

[33] JIANG Y J, TOWHATA I. Experimental study of dry granular flow and impact behavior against a rigid retaining wall[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013, 46(4): 713-729.

[34] SHEN W G, ZHAO T, ZHAO J D, et al. Quantifying the impact of dry debris flow against a rigid barrier by DEM analyses[J]. Engineering Geology, 2018, 241: 86-96.

[35] 李郎平, 兰恒星. 滑坡运动路径复杂度研究: 综述与展望 [J]. 地球科学, 2022, 47(12): 4663-4680.
LI L P, LAN H X. Complexities of landslide moving path: A review and perspective[J]. Earth Science, 2022, 47(12): 4663-4680. (in Chinese with English abstract)

[36] 龙艳梅. 侧向约束对碎屑流运动与堆积特征的影响分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
LONG Y M. Effects of lateral confinement on the propagation and depositional characteristics of granular flow[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021. (in Chinese with English abstract)

[37] 袁锦涛, 韩培锋, 田述军, 等. 滑坡碎屑流颗粒级配及地形偏转对其冲击和堆积过程的影响研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(5): 1319-1330.
YUAN J T, HAN P F, TIAN S J, et al. Impact of landslide debris flow particle gradation and terrain deflection on its impact and accumulation process[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(5): 1319-1330. (in Chinese with English abstract)

[38] 胡晓波, 樊晓一, 田述军. 沟道偏转地形对滑坡碎屑流运动的影响研究 [J]. 山地学报, 2019, 37(3): 371-381.
HU X B, FAN X Y, TIAN S J. Influence of channel deflection on the movement of a flowing landslide[J]. Mountain Research, 2019, 37(3): 371-381. (in Chinese with English abstract)

[39] 杨海龙, 樊晓一, 赵运会, 等. 偏转角度对滑坡-碎屑流运动影响的模型试验 [J]. 山地学报, 2017, 35(3): 316-322.
YANG H L, FAN X Y, ZHAO Y H, et al. Model tests on influence of deflection angle on the movement of landslide-debris avalanches[J]. Mountain Research, 2017, 35(3): 316-322. (in Chinese with English abstract)

[40] 成浩, 韩培锋, 苏有文. 基于离散元方法的松散体滑动堆积特性及影响因素分析 [J]. 物理学报, 2020, 69(16): 165-180.
CHENG H, HAN P F, SU Y W. Sliding and accumulation characteristics of loose materials and its influencing factors based on discrete element method[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(16): 165-180. (in Chinese with English abstract)

[41] MINDLIN R D. Compliance of elastic bodies in contact[J]. Journal of Applied Mechanics, 1949, 16(3): 259-268.

[42] 潘青, 张清照, 李艺灵. 基于 EDEM 的碎屑流运动规律及冲击性能研究 [J]. 工程地质学报, 2020, 28(5): 1057-1065.
PAN Q, ZHANG Q Z, LI Y L. Discrete element simulation study of debris flow movement law and impact performance[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(5): 1057-1065. (in Chinese with English abstract)

[43] SALCIARINI D, TAMAGNINI C, CONVERSINI P. Discrete element modeling of debris-avalanche impact on earthfill barriers[J]. Physics and Chemistry of the Earth(Parts A/B/C), 2010, 35(3/4/5): 172-181.

[44] 刘清, 甘建军, 陈浩, 等. 赣东小型土质滑坡形成机理及降雨因子稳定性评价 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(6): 235-243.
LIU Q, GAN J J, CHEN H, et al. Failure mechanism of small-scale soil landslide and quantitative evaluation of rain-induced disaster factors in eastern Jiangxi[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(6): 235-243. (in Chinese with English abstract)

[45] 漆芍见, 范宣梅, 夏明垚, 等. 跨逆断层岩质边坡上下盘动力响应

和破坏模式振动台试验 [J]. 地质科技通报, 2025, 44(1): 138-149.
QI S J, FAN X M, XIA M Y, et al. Shaking table test of dynamic responses and failure mechanism of hanging wall and footwall on rock slope across reverse faults[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(1): 138-149. (in Chinese with English abstract)

Summary for “基于离散元模型的聚合型滑坡碎屑流聚合角度影响研究”

Influence of aggregation angle of aggregated landslide debris flows based on discrete element model

YANG Kun，YE Yong*，XIE Xuan

College of Hydralic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang Hubei 443002, China

First author，E-mail：736120345@qq.com

* Corresponding author， E-mail：yeyong@ctgu.edu.cn

Abstract：[**Objective**] Landslide debris flows are common geological disasters characterized by large scale, long sliding distances, and high speeds. The terrain of hillside ravines and valleys significantly influences the trajectory of these flows, causing them to block, turn, pile up, and exhibit a series of complex behaviors. Therefore, the movement path of landslide debris flows is not a simple straight line but is influenced by various terrain factors, resulting in complex and varied trajectories. [**Methods**] This study focuses on the aggregation behavior of landslide debris flows along different motion trajectories. Using EDEM software, we analyzed the impact and accumulation characteristics of symmetrically aggregated landslide debris flows at various aggregation angles. [**Results**] This study has reached results in three aspects. 1) Effect of the aggregation angle on movement velocity: Larger aggregation angles result in lower v_y values, higher degrees of separation of the landslide debris flow, and longer sliding times. 2) Effect of the aggregation angle on accumulation morphology: Larger aggregation angles cause the landslide to stabilize at the foot of the slope, with the accumulation zone lengthening on the slide side and decreasing in height at the blocking structure. 3) Effect on impact performance: Larger aggregation angles lead to lower and later peak impact forces on the barrier structure. Additionally, the residual impact force after the formation of a static accumulation area is lower and closer to the peak impact force. [**Conclusion**] These findings provide a fundamental basis for the in-depth study of the complex movement paths of landslide debris flows and offer theoretical references for optimizing landslide debris flow control structures.

Key words: landslide debris flow；aggregation angle；kinematic properties；force of impact；discrete element；EDEM

Received：2023-10-10；Revised：2024-02-06；Accepted：2024-02-19

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230564