

DOI: 10.11779/CJGE20230304

# 基于离心试验与离散元模拟的滑坡碎屑流冲击效应研究

张 贝<sup>1,2</sup>, 黄 雨<sup>\*2</sup>

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘 要:** 滑坡碎屑流物质组成的复杂性造成其对工程结构的冲击效应尚未被完全理解, 特别是粒径大小与级配特征如何影响冲击力及其组成, 以及拦挡结构设计中如何考虑粒径特征的影响, 当前仍缺乏深入的研究。针对这些问题, 开展了一系列离心试验与离散元模拟分析, 研究结果表明滑坡碎屑流的颗粒粒径控制着冲击力的波动行为, 即随着粒径的增大, 总冲击力的峰值越来越明显, 且伴随着显著的离散冲击力值。小粒径颗粒对大粒径颗粒存在明显缓冲效应, 且小颗粒在冲击过程中更容易进入大颗粒的孔隙, 进而贡献作用力, 因此粒径和级配特征同时控制着冲击力的绝对值。不同粒径特征控制着颗粒尺度上动量传递机制, 进而改变了滑坡碎屑流的冲击效应, 由此造成冲击动压力系数 $\alpha$ 随着Savage数的增大基本上呈现出递增的关系, 因此建议采用Froude数与Savage数作为双控指标, 辅助确定冲击动压力系数 $\alpha$ 。此外, 通过分析冲击力合力作用位置, 发现工程设计中可按总冲击力峰值及矩形分布荷载进行考虑。

**关键词:** 滑坡碎屑流; 冲击效应; 拦挡结构; 离心模拟; 离散元模拟

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)07-1498-12

作者简介: 张 贝(1994—), 男, 主要从事滑坡碎屑流致灾效应方面的研究工作。E-mail: beizhang@chd.edu.cn。

## Impact effects of debris avalanches based on centrifuge modeling and DEM simulation

ZHANG Bei<sup>1,2</sup>, HUANG Yu<sup>2</sup>

(1. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The complexity of the material composition of debris avalanches results in the impact effects on engineering structures not being completely understood. In particular, how the particle size and distribution characteristics affect the impact force and its composition and how to consider the influences of characteristics of particle size in the design of barrier structures still lack in-depth researches. To answer these questions, a series of centrifuge modeling tests and DEM simulation tests are conducted. The results indicate that the particle size dominates the fluctuation behaviors of the impact force of the debris avalanche, and with the increasing particle size, the peaks become increasingly obvious, accompanied by a significant discrete impact force. The smaller particles show an obvious cushion-effect to larger particles, and they more easily enter into the void formed by larger particles and interact with the barrier, thus contributing to the total impact force. Therefore, both the particle size and the distribution characteristics control the absolute value of the impact force. The particle characteristics determine the momentum transfer mechanism at the particle scale and thus the impact effects. For this reason, it is found that the dynamic impact pressure coefficient $\alpha$  shows an increasing trend with the increasing Savage number of debris avalanches. Thus, it is suggested that the Froude number and Savage number should be jointly used to select appropriate $\alpha$ . In addition, based on the analysis of the acting point of the resultant impact force, we suggest that in engineering design, the total impact force combined with the rectangular distribution mode can be adopted for safety.

**Key words:** debris avalanche; impact effect; barrier structure; centrifuge modeling; DEM simulation

## 0 引 言

滑坡碎屑流灾害是指大规模岩土体在地震、降雨、工程活动等外力作用下发生突发性失稳, 然后在运动过程中逐渐碎裂、解体以致形成复杂的岩土碎屑流动, 最终表现为超高的运动速度(>5 m/s)、超远的搬运距

离以及超强的冲击致灾效应<sup>[1-3]</sup>。未来很长一段时间内, 随着全球气候变暖, 极端气候事件频发, 加上巨

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41831291)

收稿日期: 2023-04-09

\*通信作者(E-mail: yhuang@tongji.edu.cn)

震的长期效应, 滑坡碎屑流灾害风险依然不容小觑<sup>[4-5]</sup>。因此, 加强高速滑坡碎屑流灾害防灾减灾研究具有重要意义。

冲击破坏是滑坡碎屑流最显著的致灾形式之一, 因此研究滑坡碎屑流对各种工程结构的冲击效应是近年来科学界重点关注的内容之一。基于此, 众多研究者开展了一些非常有意义的研究, 涉及到对滑坡碎屑流冲击机制的分析<sup>[6-9]</sup>, 冲击作用力的计算<sup>[10-16]</sup>以及拦挡结构形式的优化<sup>[17-20]</sup>等方面。

滑坡碎屑流物质特征的复杂性导致其冲击特性尚未被完全理解。在这一方面, Jiang 等<sup>[21]</sup>发现粒径特征影响了滑坡碎屑流的流动特征, 进而影响了其冲击特性; 并且颗粒分选效应进一步造成了冲击效应的复杂性<sup>[22]</sup>。Cui 等<sup>[23]</sup>分析了不同粒径影响下滑坡碎屑流的冲击力特征, 并讨论了冲击作用力的估算问题。Zhang 等<sup>[24]</sup>利用离散元模拟研究了具有不同颗粒粒径滑坡碎屑流的非稳态流动特征对其冲击作用力估算的影响。

以上研究结论多基于常规重力条件下的物理模拟研究, 考虑到滑坡碎屑流的高速特性, 有必要借助土工离心机开展高速滑坡碎屑流的冲击效应研究<sup>[25-26]</sup>, 这有助于充分还原滑坡碎屑流的动力特性。针对滑坡碎屑流物质组成对冲击效应的影响, 当前也缺乏从颗粒尺度对冲击力的组成部分进行详细分析, 从而给出冲击力估算的建议。

本文开展了一系列滑坡碎屑流冲击效应的离心模拟试验, 考虑不同粒径大小以及双分散粒径特征对滑坡碎屑流冲击效应的影响, 同时本文开展了一系列离散元模拟研究, 对进一步分析了单分散和双分散粒径组成特征对冲击效应的影响。本文研究结果有助于发展更为完善的拦挡结构设计策略。

## 1 土工离心模拟与离散元模拟方法

### 1.1 土工离心模拟

本文所述离心试验基于同济大学 TLJ-150 型离心机完成, 离心试验模型的整体构造如图 1 (a) 所示, 尺寸信息如图 1 (b) 所示。所用模型箱尺寸为高 700

mm、宽 300 mm、长 900 mm, 拦挡结构宽度 300 mm, 滑面倾角 30°, 长度 540 mm。拦挡结构的位置处于模型箱中部, 尽量降低离心加速度环向的不均匀性对滑坡碎屑流冲击过程的影响。拦挡结构底部采用螺栓固定, 形成类似悬臂梁的受力模式。滑坡碎屑流的流动方向与离心机旋转方向相反, 且保持准平面应变条件。初始时, 将 10 kg 试验材料充填入料箱并适当压实, 形成尺寸为长 150 mm、宽 300 mm、高 100 mm 的颗粒柱。关于离心试验装置的细节以及科氏效应影响的评估与说明, 可参照笔者前期相关工作<sup>[27]</sup>。科氏效应影响下, 本文试验配置得出的结果是偏大的, 但这对于工程设计而言是安全的<sup>[27]</sup>。

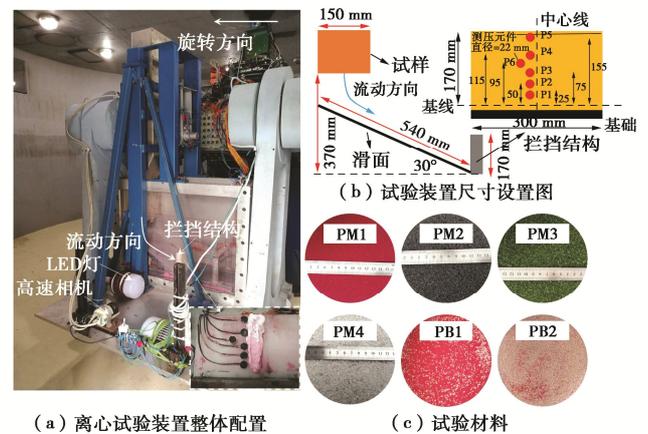


图 1 离心试验装置整体配置图、试验装置尺寸设置图及试验材料

Fig. 1 (a) Configuration of centrifuge model; (b) dimension of centrifuge model; (c) testing materials

在离心模拟试验中, 主要采用了干颗粒模拟碎屑流。综合考虑到边界效应以及传感器的测量范围, 颗粒粒径分布在 0.1~4 mm, 如图 1 (c) 所示, 总计包含 6 种试验材料, 即为 PM1, PM2, PM3, PM4, PB1 以及 PB2。试验材料物理性质如表 1 所示, 其中最大、最小干密度基于标准土工测试获得, 界面摩擦角采用倾斜试验测得<sup>[22]</sup>。其中 PM1~PM4 视为单分散, PB1 与 PB2 由 PM1 和 PM4 按照不同的质量百分比混合形成, 可视为双分散。详细粒径组成特征见表 2。

表 1 离心试验滑体试样的粒径特征与物理性质

Table 1 Particle characteristics and physical properties of test materials used in centrifuge modeling

粒径级配	最小干密度 $\rho_{d\_min} / (g \cdot cm^{-3})$	最大干密度 $\rho_{d\_max} / (g \cdot cm^{-3})$	内摩擦角/(°)		界面摩擦角/(°)
			圆锥试验	溃坝试验	
PM1(0.1~0.5 mm)	1.28	1.63	31	28	20
PM2(0.5~1 mm)	1.34	1.62	30	27	20
PM3(1~2 mm)	1.37	1.60	31	27	19
PM4(2~4 mm)	1.37	1.56	31	30	18
PB1	1.29	1.64	30	29	19
PB2	1.35	1.55	31	30	18

表2 离散元模拟工况设置

Table 2 Programs of DEM simulations

滑槽坡度/(°)	粒径特征
20, 45	NM1 (4 mm); NM2 (8 mm); NM3 (16 mm)
20, 45	NB1 (90%), NB2 (80%), NB3 (60%), NB4 (40%), NB5 (20%), NB6 (10%)

本文主要考虑干燥条件下的滑坡碎屑流，其运动、冲击过程以及作用在防护结构上的冲击力是研究重点。主要用到的监测手段有高速摄像系统以及冲击力传感器。高速相机帧数选用 1200 fps，即每秒捕捉 1200 张图像，分辨率设为  $816 \times 600$ 。同时采用两个 150W 的单珠 LED 灯进行补光。冲击压力传感器采用国产的 CYY9 型动态冲击力传感器，响应频率达到 5 kHz，量程 2 MPa。试验中总计使用了 6 个传感器，布置方式如图 1 (b) 所示。

每组试验重复 3 次，以提高数据的可信度。试验中，离心加速度设置为 30g，仅改变不同的试验材料，总计开展 19 次离心试验 (PM4 重复测试 4 次)。

## 1.2 离散元模拟

为进一步严格控制粒径特征，本文继续开展了一系列离散元模拟研究。这里采用了笔者前期工作中建立并验证的数值模型<sup>[24]</sup>来开展相关研究。数值模型基于 1g 条件下的滑槽试验构建，如图 2 所示。试样初始堆积成长方体形状，长 400 mm、宽 300 mm、高 230 mm。前部采用挡板进行限制，模拟开始时移除挡板以形成颗粒流动。模拟中将侧壁采用周期性边界代替，即在主流线左右各 0.15 m 处引入周期性边界。所谓周期性边界为：当颗粒从某侧边界离开计算区域后，将立即以同样的状态从另一侧边界重新进入计算域。这样做的目的在于计算区域在横向上可认为是无限扩展的，消除了侧壁对碎屑流动的影响。拦挡结构放置在挡板下游 1.4 m 处，保证颗粒碎屑体具有足够运动空间。拦挡结构与滑槽底部垂直，保持刚性设置且位置固定。数值模拟的工况设置如表 2 所示，双分散颗粒以 8, 16 mm 颗粒混合而成，括号中给出了 8 mm 颗粒的质量百分比。总计开展 18 次数值模拟。

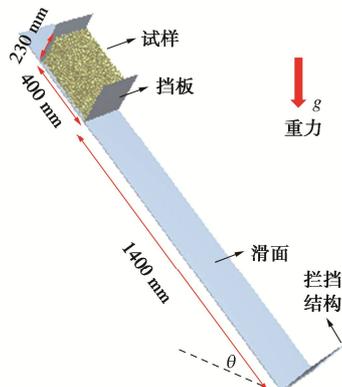


图2 离散元模型设置

Fig. 2 Setup of DEM model

本文采用商业软件 EDEM 完成相关数值计算，其提供了一种有效的颗粒接触模型—Hertz-Mindlin (no slip)模型<sup>[28]</sup>，详细的接触模型、计算参数的选取以及验证过程详见于笔者前期工作<sup>[24]</sup>，这里不再赘述。

## 2 结果分析

### 2.1 离心试验结果分析

表 3 给出了所有工况下的滑坡碎屑流在冲击前的流态特征，包括流速、流深、Froude 数 ( $N_{Fr}$ ) 以及 Savage 数 ( $N_s$ )。可以看出的是，在冲击前颗粒特征对流速的影响并不显著。因此后文研究的不同粒径特征滑坡碎屑流冲击特性的差异应当极大程度上归因于颗粒与拦挡结构接触特性的不同。

表3 离心试验中冲击前滑坡碎屑流的流态 (模型尺度)

Table 3 Flow regimes of debris avalanche before impact in centrifuge modeling tests (model scale)

工况	项目	$u_f / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$h_f / \text{mm}$	$N_{Fr}$	$N_s$
PM1	测试 1	12.55	12.16	7.13	0.03
	测试 2	13.12	12.02	7.50	0.03
	测试 3	12.80	12.66	7.13	0.02
	平均值	12.82	12.28	7.25	0.03
PM2	测试 1	12.51	11.36	7.35	0.20
	测试 2	13.42	12.99	7.37	0.16
	测试 3	14.28	13.56	7.68	0.16
	平均值	13.40	12.64	7.47	0.17
PM3	测试 1	12.73	13.32	6.91	0.52
	测试 2	12.07	13.06	6.62	0.50
	测试 3	11.94	12.77	6.62	0.52
	平均值	12.24	13.05	6.71	0.52
PM4	测试 1	13.85	14.64	7.17	1.87
	测试 2	13.25	15.23	6.72	1.52
	测试 3	13.43	16.08	6.63	1.33
	测试 4	12.92	15.94	6.41	1.26
	平均值	13.36	15.47	6.73	1.47
PB1	测试 2	13.43	12.04	7.67	0.03
	测试 3	13.93	12.97	7.67	0.03
	平均值	13.68	12.50	7.66	0.03
PB2	测试 2	13.35	14.23	7.01	1.89
	测试 3	12.99	13.83	6.92	1.95
	平均值	13.17	14.03	6.96	1.92

图 3 给出了 PM4 工况下滑坡碎屑流对拦挡结构的冲击过程，可以看出冲击过程整体上以堆积机制为主，相比于细颗粒滑坡碎屑流表现出的局部爬升冲击

机制<sup>[27]</sup>, 粗颗粒滑坡碎屑流由于流动性较弱, 造成局部爬升行为不明显。运动过程中, 颗粒的离散性较大, 尤其在碎屑流前缘, 明显可见飞溅的颗粒, 造成冲击过程中速度场存在突变, 即某个粒子的速度显著大于整体平均速度, 这是由滑坡碎屑流运动过程中颗粒的动量传递机制所决定的。

粒粒径的增大, 颗粒运动的随机飞溅性非常明显, 这导致其与拦挡结构的接触也是随机的, 进而造成冲击作用力的变异性。6 个测压元件采集到的不同粒径特征下滑坡碎屑流冲击压力峰值总结于表 4, 同时计算了每个测压元件采集到的冲击压力峰值的平均值和标准偏差。可以看出随着粒径的增大, 冲击压力平均值有略微增大的趋势, 同时变异性也显著增大。然而, 对于双分散工况而言, 冲击压力峰值受粒径特征的影响比较复杂, 这主要由于冲击过程中粒径分选效应造成拦挡结构不同部位受到不同粒径颗粒的冲击作用, 但是分选作用的影响是难以控制的。不过可以肯定的是, 对于细颗粒中裹挟粗颗粒时, 粗颗粒的含量影响着滑坡碎屑流的冲击效应, 这将通过离散元分析进一步阐述。

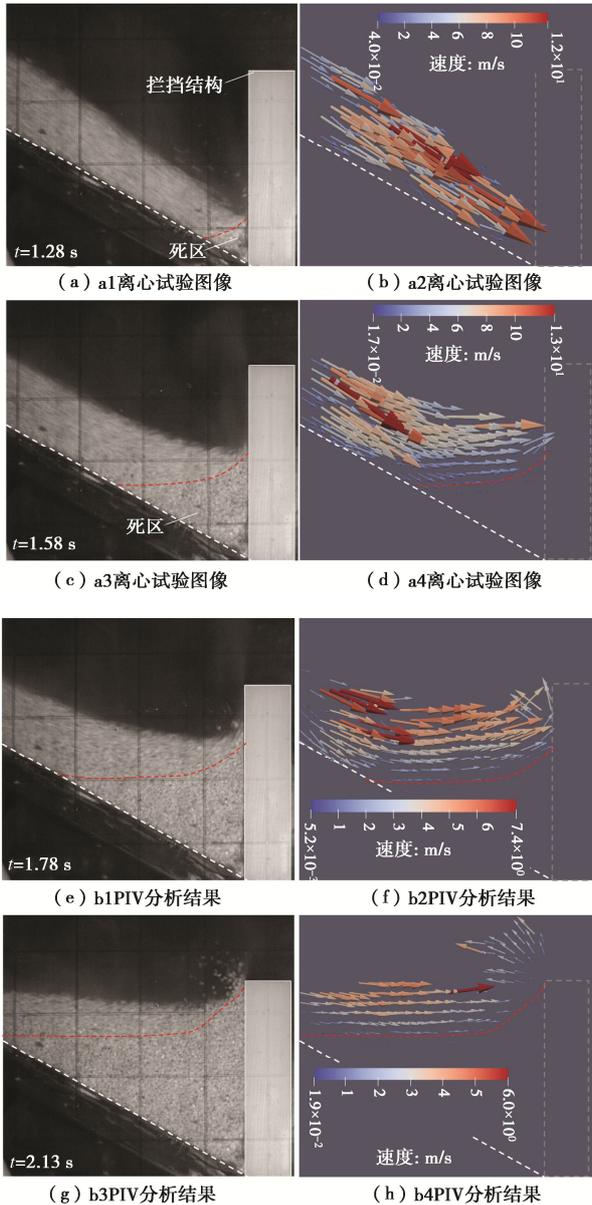
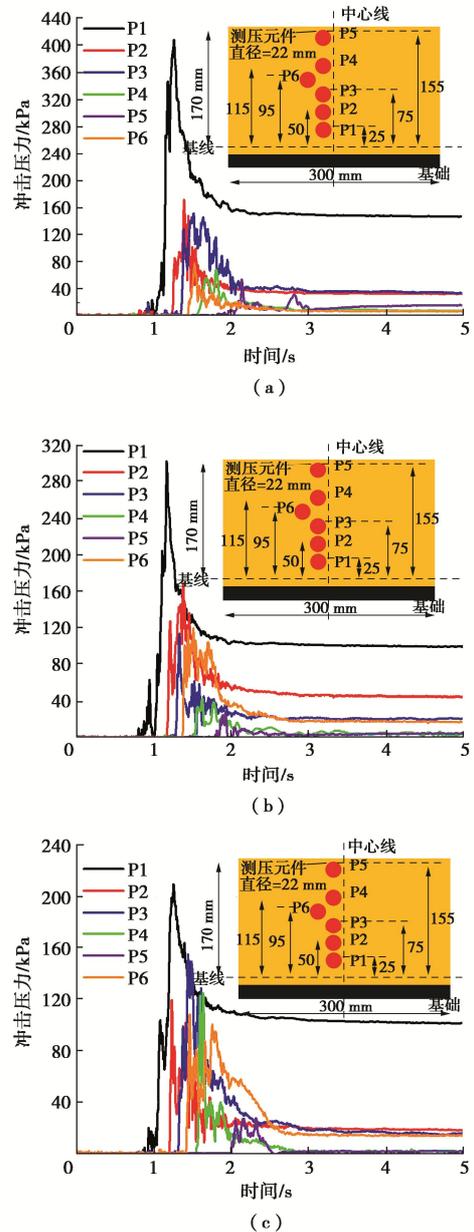


图 3 PM4 滑坡碎屑流的冲击过程: (a1~a4) 离心试验图像; (b1~b4) PIV 分析结果

Fig. 3 Impact process of PM4 case: (a1~a4) centrifuge results; (b1~b4) PIV analysis results

图 4 给出了 PM4 颗粒的冲击压力实测结果, 共包含 4 次重复试验。结果表明冲击压力的变异性非常显著, 特别是 P1 测压元件采集到的冲击压力, 样本标准差达到了 92.94 kPa。这与滑坡碎屑流运动过程的非稳态特征是相关的。如图 3 中所观察到的, 随着颗



(c)

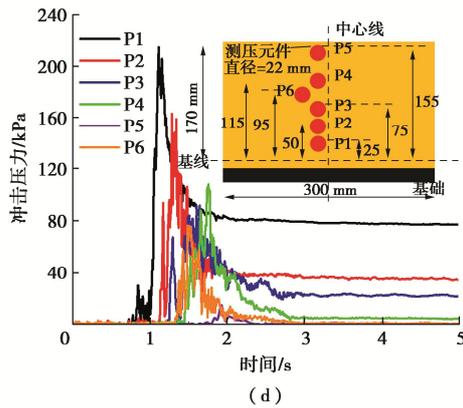


图 4 PM4 工况滑坡碎屑流冲击压力的 4 次重复试验结果  
Fig. 4 Impact pressure results of four repeated tests of debris avalanche of PM4 case

2.2 数值结果分析

图 2 所示的滑槽长度比离心试验中所用的要长一些, 这样可保证颗粒可以充分地流动, 这样颗粒特征对流动的影响也能充分体现出来, 因此冲击效应一方面是由于滑坡碎屑流流态改变造成的, 另一方面是不

同颗粒对拦挡结构的接触特性决定的。表 5 给出了不同粒径大小与级配特征的颗粒在自由流动(无拦挡)工况下, 通过拟设置拦挡结构的位置时的最大流速、该位置监测到的最大流深数据以及相应的 Froude 数与 Savage 数, 计算方式见笔者前期工作<sup>[28]</sup>。随着粒径的增大, 流速显著降低但流深增大, 因此计算得到的 Froude 数随之降低但 Savage 数呈上升趋势, 反映了滑坡碎屑流逐渐向以碰撞接触力主导的流态过渡。

对于粗粒土甚至含块石的颗粒物质而言, 粒径特征除了通过流速、接触特征影响冲击作用力以外, 单个颗粒造成的离散冲击作用也可能变得非常重要, 有可能造成拦挡结构的局部破坏。图 5 给出了不同粒径大小的滑坡碎屑流的总冲击力时程曲线, 冲击力值 ( $F_n$ ) 以冲击结束后的残余冲击力值 ( $F_{res}$ ) 进行归一化, 时间以颗粒体释放时为初始时刻, 并以  $\sqrt{L_B \sin \theta / g}$  (其中  $L_B = 1.4 \text{ m}$ ,  $\theta$  为滑槽倾角) 进行归一化处理。同时, 实时提取单个粒子冲击作用力的最大值, 以同样的方式进行归一化。如图 5 所示, 归

表 4 不同粒径特征下滑坡碎屑流冲击压力峰值的离心试验结果

Table 4 Peak values of impact pressure of debris avalanches with different particle characteristics obtained from centrifuge tests

单位: kPa

工况	测试编号	P1	P2	P3	P4	P5	P6
PM1	测试 1	182.41	164.82	86.85	56.01	3.03	85.42
	测试 2	178.71	136.06	85.03	33.71	5.95	65.00
	测试 3	176.22	150.16	84.51	32.19	5.88	60.60
	平均值	179.11	150.35	85.46	40.64	4.96	70.34
	标准偏差	2.55	11.74	1.01	10.89	1.36	10.81
PM2	测试 1	210.68	196.95	140.39	72.89	17.18	108.72
	测试 2	232.51	187.69	148.07	68.77	20.25	105.82
	测试 3	261.75	220.33	139.42	56.86	20.22	105.35
	平均值	234.98	201.66	142.63	66.17	19.22	106.63
	标准偏差	25.62	16.82	4.74	8.33	1.77	1.82
PM3	测试 1	255.91	203.04	106.48	79.37	27.71	98.19
	测试 2	249.64	180.80	143.98	74.75	25.18	126.92
	测试 3	204.24	241.77	189.94	65.03	20.10	92.44
	平均值	236.59	208.54	146.80	73.05	24.33	105.85
	标准偏差	28.20	30.85	41.80	7.32	3.88	18.48
PM4	测试 1	407.69	170.97	150.82	67.48	54.09	78.07
	测试 2	302.82	168.89	112.81	41.65	28.71	118.84
	测试 3	209.72	119.67	154.94	124.91	27.28	108.62
	测试 4	215.13	163.51	92.38	108.80	14.93	76.95
	平均值	283.84	155.76	127.74	85.71	31.25	95.62
标准偏差	92.94	24.27	30.25	38.05	16.43	21.33	
PB1	测试 1	308.58	204.48	99.83	52.58	13.66	82.36
	测试 2	232.76	194.12	117.92	51.26	13.49	90.93
	测试 3	262.68	188.72	120.89	59.22	12.63	77.57
	平均值	268.01	195.77	112.88	54.35	13.26	83.62
	标准偏差	38.19	8.01	11.40	4.27	0.55	6.77
PB2	测试 1	229.09	262.83	180.65	46.14	16.53	142.13
	测试 2	215.84	140.17	179.31	69.56	10.12	154.71
	测试 3	234.75	160.28	144.93	53.00	12.43	183.99
	平均值	226.56	187.76	168.30	56.23	13.03	160.27
	标准偏差	9.70	65.78	20.25	12.04	3.25	21.48

表 5 不同粒径特征下滑坡碎屑流流态及冲击力峰值的离散元模拟结果

Table 5 Peak impact forces and flow regimes of debris avalanches with different particle characteristics obtained from DEM simulations

测试编号	$u_{f\_max}/(m \cdot s^{-1})$	$h_{f\_max}/m$	$N_{Fr}$	$N_s$	$F_{n\_max}/N$	$F_{m\_max}/N$
NM1_25°	2.661	0.040	6.469	0.187	135.57	30.63
NM1_45°	4.255	0.068	5.862	0.092	519.21	408.07
NM2_25°	2.489	0.043	5.821	0.519	159.83	101.46
NM2_45°	4.150	0.071	5.620	0.317	515.45	474.38
NM3_45°	2.364	0.049	5.186	1.274	248.61	243.31
NM3_25°	4.091	0.080	5.224	0.866	627.51	589.40
NB1_25°	2.360	0.036	6.012	0.779	149.61	104.51
NB1_45°	4.060	0.058	6.094	0.563	547.82	492.77
NB2_25°	2.520	0.040	6.090	0.647	155.41	111.33
NB2_45°	4.090	0.076	5.345	0.249	593.21	560.64
NB3_25°	2.440	0.050	5.274	0.311	168.54	123.92
NB3_45°	4.050	0.080	5.159	0.209	591.19	525.95
NB4_25°	2.340	0.050	5.058	1.143	161.90	127.75
NB4_45°	4.030	0.080	5.133	0.828	580.51	545.18
NB5_25°	2.320	0.050	5.015	1.124	156.31	130.42
NB5_45°	4.080	0.082	5.133	0.788	600.89	573.09
NB6_25°	2.312	0.050	4.998	1.116	159.07	133.42
NB6_45°	4.020	0.081	5.089	0.794	576.32	565.95

一化冲击力值呈现出峰值和残余特征；但对于小颗粒较低速冲击过程（25°）却不是很明显，不过随着粒径的增大，总冲击力的峰值越来越明显，且伴随着显著的离散冲击力值，这主要是由颗粒运动过程中速度波动造成的；当颗粒粒径小于 8 mm 时，低速和高速冲击过程，单个粒子冲击作用力的最大值都处于较低的水平；随着粒径的进一步增大，单个粒子冲击作用力的最大值变得十分显著，特别是低速冲击过程，但主要集中在冲击力开始发展的初期阶段，且该值几乎与总冲击力保持相近的水平。结合表 5 给出的滑坡碎屑流流态数据，表明以碰撞接触为主的流态具备更强的冲击效应，尽管 Froude 数是相近的。

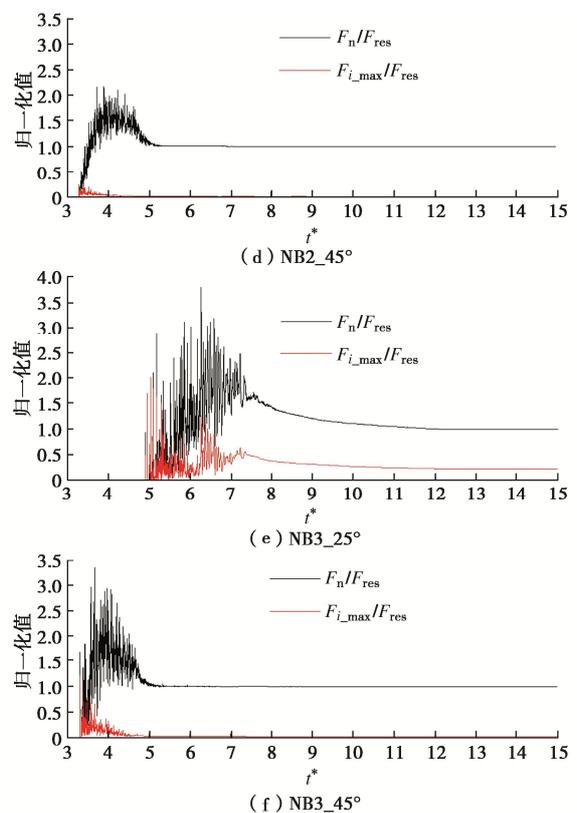
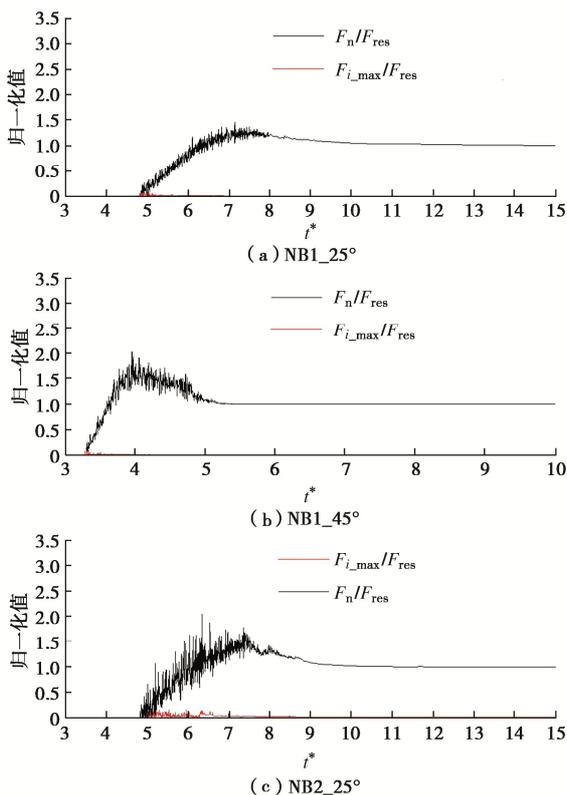


图 5 单分散滑坡碎屑流总冲击力以及单个粒子冲击力最大值

Fig. 5 Total impact forces and maximum forces generated by single particle within debris avalanches with monodisperse particle characteristics

拦挡结构上的总冲击力会由两部分组成，一部分为死区直接作用在拦挡结构上的力，可记为静态力分量  $F_d$ ；另一部分为运动的粒子直接冲击作用在拦挡上的力，可记为动态力分量  $F_m$ 。在 DEM 模拟中，可通过区分与拦挡结构接触粒子的类型（是属于死区粒子还是运动粒子），从而对拦挡结构上的动态力分量  $F_m$  和静态力分量  $F_d$  进行直接计算。本文遵循这样的方

法, 计算了  $F_d$  和  $F_m$ , 并以冲击力残余值 ( $F_{res}$ ) 进行归一化 ( $F_m$  绝对值的峰值总结于表 5 中), 结果如图 6 所示。可以得出两方面结论: ①低速冲击过程与高速冲击过程, 动态分量 ( $F_m$ ) 和静态分量 ( $F_d$ ) 占比是不相同的, 例如 4 mm 在 25° 条件下的冲击作用主要以静态分量 ( $F_m$ ) 占主导, 而在 45° 条件下, 在冲击力峰值时刻, 静态分量 ( $F_d$ ) 却微乎其微, 这一点与离心模拟试验的反演结果是吻合的<sup>[27]</sup>; ②粒径大小对于动态分量 ( $F_m$ ) 和静态分量 ( $F_d$ ) 占比也有着显著的影响, 例如对于在 25° 条件下, 随着粒径的增大, 动态分量 ( $F_m$ ) 的占比越来越显著, 以至于在 16 mm 时, 动态分量 ( $F_m$ ) 几乎占主导地位, 这说明粒径对冲击效应的影响还应包含通过影响冲击力组分进而影响对拦挡结构的破坏作用, 这对拦挡结构设计而言是至关重要的。

现实中, 滑坡碎屑流、泥石流等物质组成极为复杂, 上文将其简化为单分散滑坡碎屑流, 讨论粒径大小的影响。为讨论颗粒级配对其冲击效应的影响, 这里为简单起见, 仅考虑了 8 mm 和 16 mm 粒径的混合, 研究结论具有一定的局限性, 仅适用于具有类似流态和物质组成的例子, 但也能提供一定的基础见解。

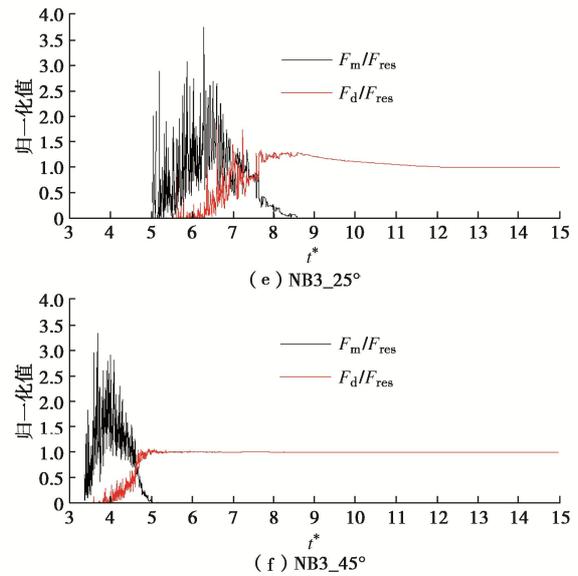
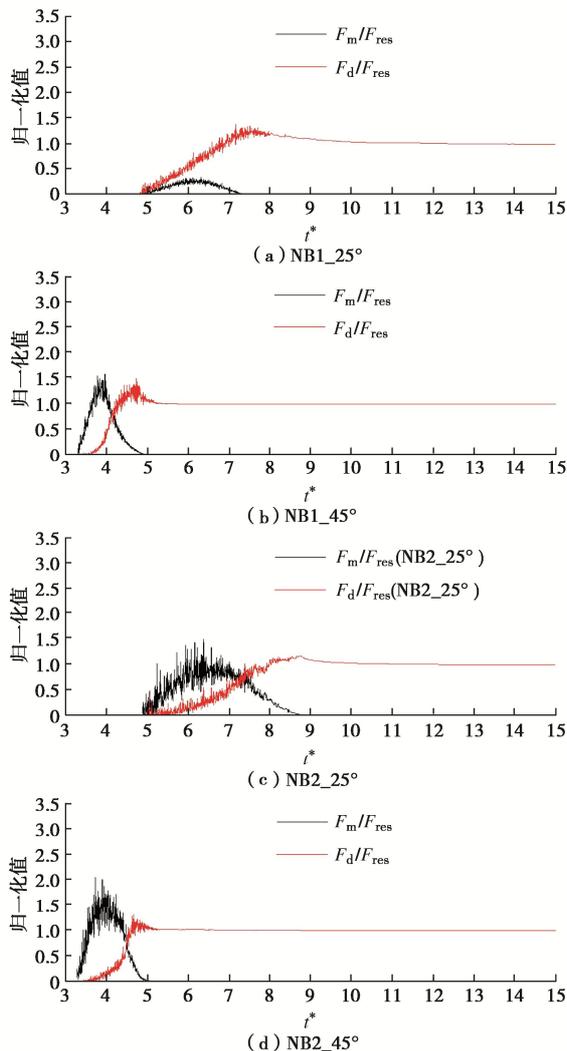


图 6 单分散滑坡碎屑流冲击力动态和静态分量

Fig. 6 Dynamic and static components of impact force of debris avalanches with monodisperse particle characteristic

双分散颗粒的分选对其流动性的影响上文已经讨论过, 流动性的改变进一步还会造成冲击效应的变化。此外, 不同粒径组成的滑坡碎屑流在冲击过程中与拦挡结构接触的颗粒大小不同, 将进一步改变其冲击效应。这里主要讨论后者。

图 7 给出了双分散滑坡碎屑流总冲击力以及单个粒子冲击力最大值, 结果处理方式与前述单分散滑坡碎屑流相同。结果表明, 尽管双分散滑坡碎屑流中仅包含少量的大颗粒 (NB1), 冲击力依然表现出极其显著的离散脉冲现象; 同时还应注意到单粒子冲击力同样仅在冲击初期比较显著 (可能与滑坡碎屑流前部离散性较大有关), 且受控于滑坡碎屑流的粒径组成, 例如对于 NB1, 8 mm 粒子的冲击力最大值要明显比 16 mm 粒子更占据主导地位。这说明, 块石冲击作用力并不一定取决于碎屑物中粒径最大的颗粒, 同时也应当根据其含量进行确定。进一步对不同粒径产生的冲击作用力进行分析, 结果如图 8 所示, 小粒径颗粒对大粒径颗粒存在明显缓冲效应。例如 NB1 颗粒 (细粒占比 90%) 冲击力中, 主体上以 8 mm 颗粒的冲击力占主导地位, 16 mm 颗粒的冲击作用极为微乎其微; 但 NB6 (细粒占比 10%) 颗粒的冲击作用力中, 8 mm 颗粒的冲击作用力可达 16 mm 颗粒冲击力的 1/5 水平, 不容忽视。特别地, 对于 NB4 工况的滑坡碎屑流, 尽管 8 mm 粒径的颗粒占比仅有 40%, 但是其冲击作用力对总冲击作用力的贡献却是主导的, 这又说明颗粒含量是一个关键因素, 但同时由于受到分选等作用的影响, 比如小颗粒能够更容易穿过大颗粒空隙从而对拦挡结构产生作用力。从本文结果来看, 当粗颗粒

质量百分比达到 80% (NB5) 时, 其冲击力才占主导。

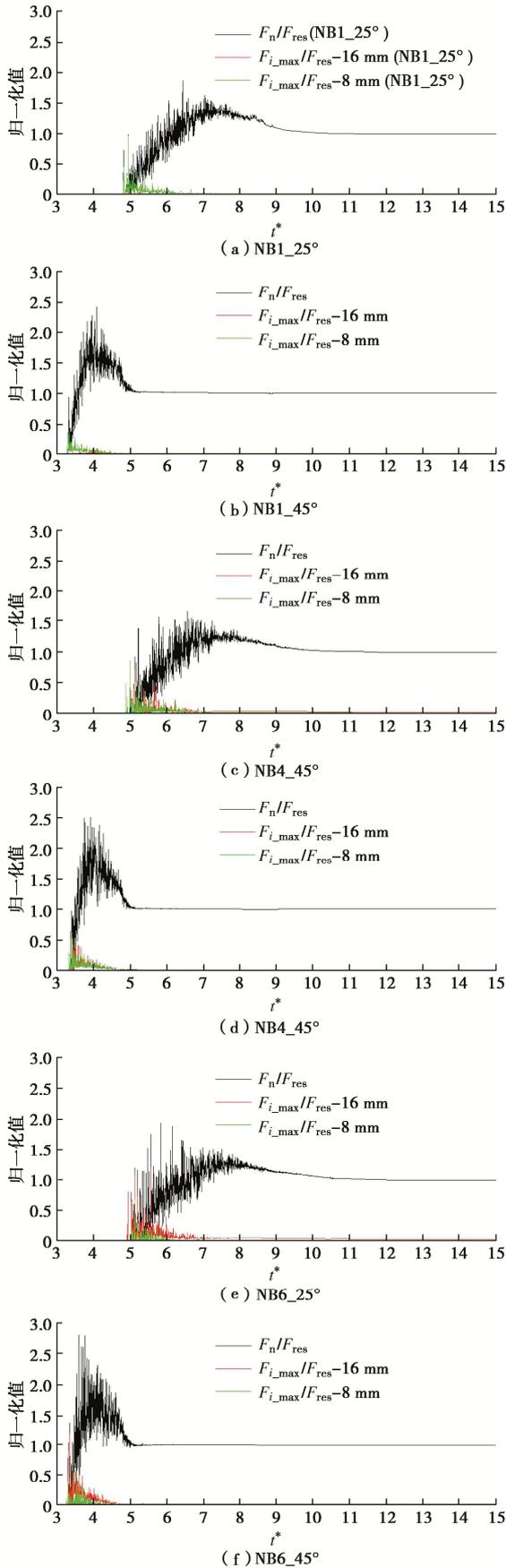


图 7 双分散滑坡碎屑流总冲击力以及单个粒子冲击力最大值  
 Fig. 7 Dynamic and static components of impact force of debris avalanches with bidisperse particle characteristics

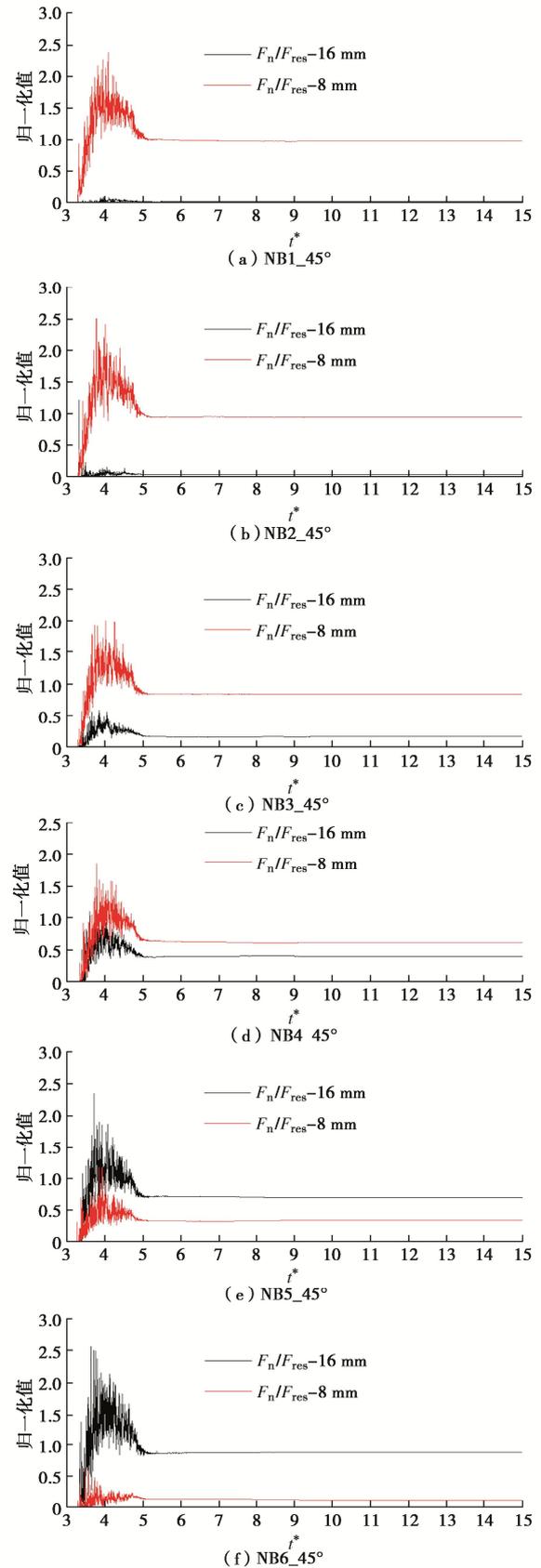


图 8 双分散滑坡碎屑流不同粒径组分的总冲击力 (坡度为 45°)

Fig. 8 Total impact forces of component with different particle sizes (slope angle of 45°)

本文在 DEM 模拟中实时计算了滑坡碎屑流冲击

力合力的作用位置 ( $h_{\text{force}}$ )。对于单分散滑坡碎屑流冲击作用力合力位置 ( $h_{\text{dep}}$ ) 对  $h_{\text{force}}$  进行归一化, 其中  $h_{\text{dep}}$  是基于墙后堆积粒子的坐标进行确定的; 对于双分散滑坡碎屑流冲击作用力合力位置, 本节以冲击过程中自由流动的最大流深 ( $h_{\text{f\_max}}$ ) 对  $h_{\text{force}}$  进行归一化。前者结果如图 9 所示, 后者结果如图 10 所示。并在图 9 中标出了最大总冲击力出现的时刻 (虚线给出)。结果表明, 冲击力合力作用位置也是非稳态的, 随着时间不断的变化, 呈现出显著的峰值和残余值特征; 对于单分散颗粒而言, 如前所述颗粒堆积体的最大高度时刻与总冲击力最大时刻并不一致, 因此, 对于低速过程, 总冲击力出现时, 其合力作用位置已趋于稳定; 但对于高速冲击过程, 总冲击力出现时刻, 其合力作用位置还在不断波动; 尽管如此, 在总冲击力出现时刻, 其合力作用位置大致处于堆积体高度的 30%~40% 位置处, 大致可视作为三角形分布模式。

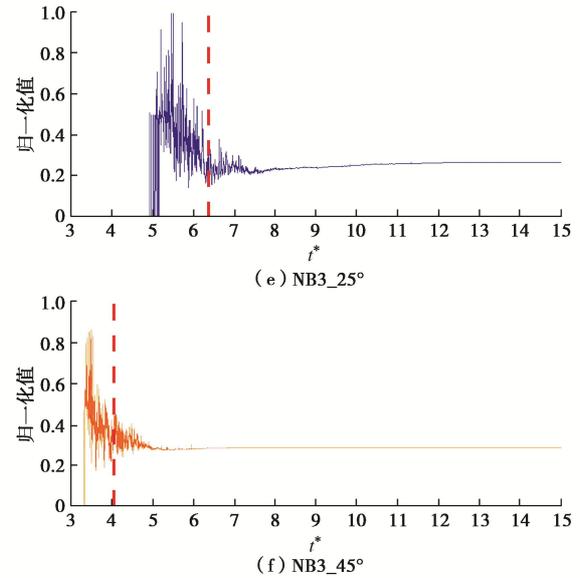
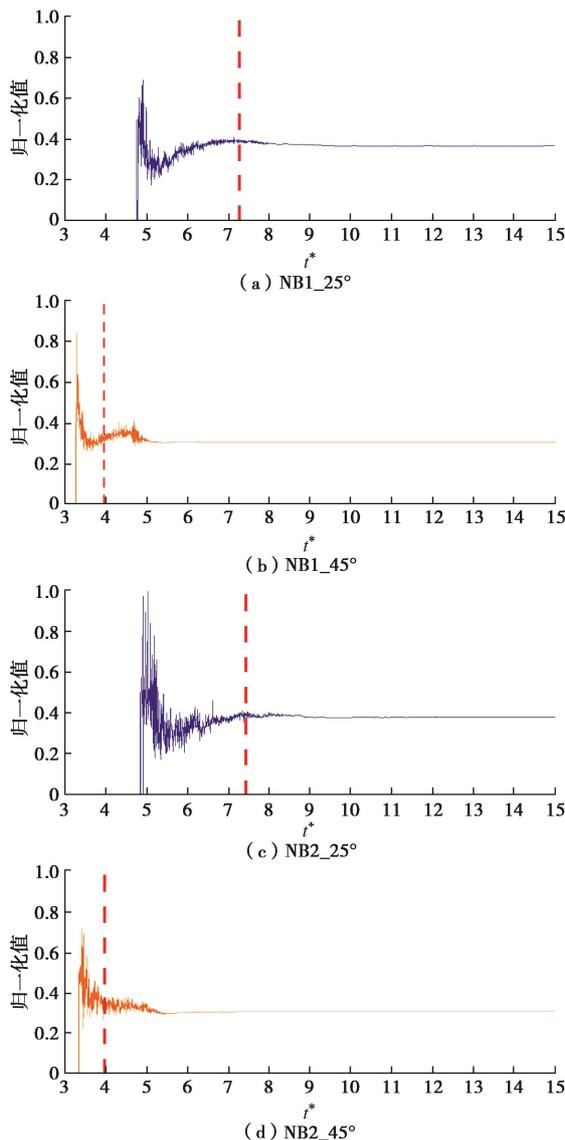


图 9 单分散滑坡碎屑流冲击力合力作用位置

Fig. 9 Acting point of resultant impact force of debris avalanches with monodisperse particle characteristic

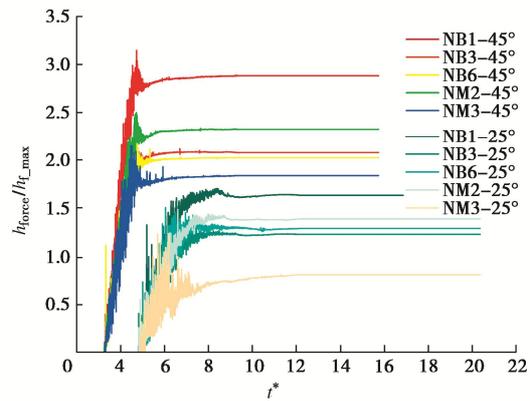


图 10 双分散滑坡碎屑流冲击力合力作用位置

Fig. 10 Acting points of resultant impact force of debris avalanches with bidisperse particle characteristics

本文同时对比了双分散和单分散滑坡碎屑流冲击时冲击力合力作用位置的分布。结果表明: 双分散滑坡碎屑流冲击力合力作用位置比单分散时更为复杂, 难以按照单分散颗粒进行简单处理。例如 NB1 颗粒, 尽管 8 mm 颗粒占比达 90%, 冲击力合力作用位置比 8 mm 的单分散滑坡碎屑流高差不多  $0.5 h_{\text{f\_max}}$ ; NB6 (16 mm 颗粒占比达 90%) 也比 16 mm 单分散碎屑流略高。这应当不完全是由流动性的改变所造成的 (表 5)。此外, 还应注意到, 随着大粒径组分变大, 归一化冲击力合力的作用位置是降低的, 这可能受其流动性控制。经计算, 在总冲击力峰值时刻, 双分散滑坡碎屑流的  $h_{\text{force}}/h_{\text{f\_max}}$  在 3~4 (25°) 与 6~8 (45°) 范围内, 该结果换算为  $h_{\text{force}}/h_{\text{dep}}$  时也不超过 50%。

由于滑坡碎屑流冲击过程中死区的影响极为显著, 导致拦挡结构下部往往承受着较大的冲击作用力。

但当考虑滑坡碎屑流高速冲击过程时, 冲击压力分布可能呈现出双线性<sup>[27]</sup>。综合来看, 矩形分布模式更合适, 尽管可能是保守的, 但对工程设计而言是安全的。

### 3 讨 论

冲击动压力系数  $\alpha$  是描述计算值与实测值偏差的无量纲数, 通常通过匹配实测值而确定。在计算  $\alpha$  之前, 本文先对冲击力动态分量进行处理, 忽略离散脉冲作用力 (这部分力不能采用动水压力模型计算, 可单独讨论, 详见 Goodwin 等<sup>[29]</sup>)。处理方法详见图 11 的内插图, 即采用 5 个点的 FFT 进行平滑处理<sup>[7, 30]</sup>。采用平滑处理后的冲击力动态分量峰值计算动力冲击压力系数 (这里忽略静态分量, 因为一般静态分量按死区作用力进行单独计算)。计算结果如图 11 所示, 给出了冲击动压力系数  $\alpha$  与 Savage 数的关系。图 11 同时包含了离心试验的结果, 由于离心试验中, 难以将总冲击力进行分解, 这里直接采用总冲击力计算的冲击动压力系数  $\alpha$ 。

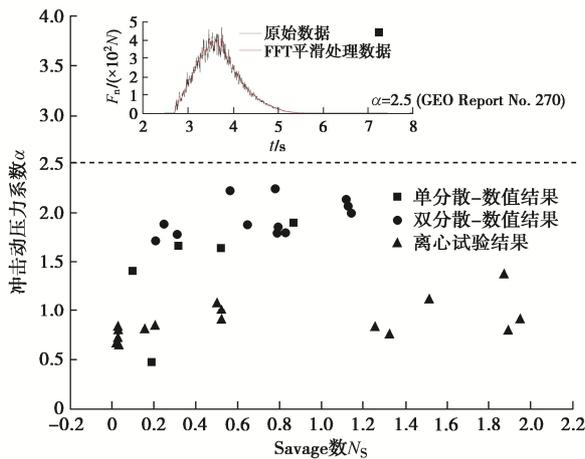


图 11 冲击动压力系数  $\alpha$  与 Savage 数的关系

Fig. 11 Relationship between dynamic impact pressure coefficient  $\alpha$  and Savage number

尽管双分散滑坡碎屑流冲击动压力系数较为复杂, 但整体上  $\alpha$  值与  $N_s$  呈现正相关的趋势, 且与离心试验结果较为一致。因此, 单独的 Froude 数难以描述流态对冲击效应的影响, 建议引入 Savage 数作为辅助参考指标。Kwan<sup>[31]</sup>建议对于含有块石的滑坡碎屑流, 冲击动压力系数  $\alpha$  取 2.5 (GEO Report No. 270)。从图 11 可以看出,  $\alpha$  等于 2.5 适用于大部分的工况, 特别是当 Savage 数小于 1~1.2。考虑到实际中高速远程滑坡的 Savage 数多小于 0.1<sup>[32]</sup>, 因此冲击动压力系数  $\alpha$  取 2.5 大多数情况应该是合适的, 但应特别注意分选效应造成的滑坡碎屑流前部粗颗粒以及块石聚集, 在这样的情况下应着重考虑采用 Froude 数与 Savage

数作为双控指标, 辅助冲击动压力系数  $\alpha$ 。

注意到本文研究的 Savage 数范围还不够宽, 因此对于处于临界值 ( $N_s = 1 \sim 1.2$ ) 以上的工况, 未来还需要进一步加强研究。此外, 本文考虑的粒径范围也有限, 研究结论更适用于具有类似流态与粒径特征的工况。由于滑坡碎屑流冲击效应的复杂性, 进一步研究还应多注意更宽的流态范围和更多的粒径特征, 以期得到适用性更广的设计建议。

### 4 结 论

本文围绕干燥滑坡碎屑流物质组成特征对冲击效应的影响机制这一问题, 开展了土工离心试验与离散元模拟, 详细研究了不同粒径大小与级配特征的滑坡碎屑流对刚性拦挡结构的冲击效应, 分析了冲击作用力的变化特征以及组成特征, 并探讨了相关设计建议, 可为干燥滑坡碎屑流工程防灾设计提供一定参考。

(1) 随着颗粒粒径的增大, 总冲击力的峰值越来越明显, 且伴随着显著的离散冲击力值; 随着粒径的进一步增大, 单个粒子冲击作用力的最大值变得十分显著, 特别是低速冲击过程, 但主要集中在冲击力开始发展的初期阶段, 且该值几乎与总冲击力保持相近的水平。

(2) 当冲击速度较低时, 随着粒径的增大, 动态冲击力分量的占比越来越显著, 但对于冲击速度较高的情况, 粒径对冲击力分量的占比影响不大, 这说明粒径对冲击效应的影响还应包含通过影响冲击力组分进而影响对拦挡结构的破坏作用。

(3) 块石冲击作用力并不一定取决于碎屑物中粒径最大的颗粒, 同时也应当根据其含量进行确定, 因为小粒径颗粒对大粒径颗粒存在明显缓冲效应, 且小颗粒在冲击过程中更容易进入大颗粒的孔隙, 进而贡献作用力。

(4) 冲击动压力系数  $\alpha$  随着 Savage 数的增大基本上呈现出递增的关系, 临界值在 1~1.2 左右, 低于临界值, 冲击动压力系数  $\alpha$  取 2.5 是合适的, 但对于分选效应造成的滑坡碎屑流前部粗颗粒以及块石聚集, 应着重考虑采用 Froude 数与 Savage 数作为双控指标, 辅助确定冲击动压力系数  $\alpha$ 。此外, 设计荷载可按总冲击力峰值及矩形分布荷载进行考虑。

#### 参考文献:

- [1] HUNGR O, LEROUEIL S, PICARELLI L. The Varnes classification of landslide types, an update[J]. Landslides, 2014, 11(2): 167-194.

- [2] 许强, 李为乐, 董秀军, 等. 四川茂县叠溪镇新磨村滑坡特征与成因机制初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(11): 2612-2628. (XU Qiang, LI Weile, DONG Xiujun, et al. The Xinmocun landslide on June 24, 2017 in Maoxian, Sichuan: characteristics and failure mechanism[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(11): 2612-2628. (in Chinese))
- [3] 李坤, 程谦恭, 林棋文, 等. 高速远程滑坡颗粒流研究进展[J]. 地球科学, 2022(3): 893-912. (LI Kun, CHENG Qiangong, LIN Qiwen, et al. State of the art on rock avalanche dynamics from granular flow mechanics[J]. Earth Science, 2022(3): 893-912. (in Chinese))
- [4] GARIANO S L, GUZZETTI F. Landslides in a changing climate[J]. Earth Science Reviews, 2016, **162**: 227-252.
- [5] THOURET J C, ANTOINE S, MAGILL C, et al. Lahars and debris flows: characteristics and impacts[J]. Earth Science Reviews, 2020, **201**: 103003.
- [6] ZHOU G G D, SONG D, CHOI C E, et al. Surge impact behavior of granular flows: effects of water content[J]. Landslides, 2018, **15**(4): 695-709.
- [7] 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.
- [8] NG C W W, MAJEED U, CHOI C E. Effects of solid fraction of saturated granular flows on overflow and landing mechanisms of rigid barriers[J]. Géotechnique, 2024, **74**(1): 27-41.
- [9] FAUG T, LACHAMP P, NAAIM M. Experimental investigation on steady granular flows interacting with an obstacle down an inclined channel: study of the dead zone upstream from the obstacle. Application to interaction between dense snow avalanches and defence structures[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2002, **2**: 187-191.
- [10] 王友彪, 姚昌荣, 刘赛智, 等. 泥石流对桥墩冲击力的试验研究[J]. 岩土力学, 2019, **40**(2): 616-623. (WANG Youbiao, YAO Changrong, LIU Saizhi, et al. Experimental study of debris flow impact forces on bridge piers[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(2): 616-623. (in Chinese))
- [11] 何思明, 李新坡, 吴永. 考虑弹塑性变形的泥石流大块石冲击力计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(8): 1664-1669. (HE Siming, LI Xinpo, WU Yong. Calculation of impact force of outrunner blocks in debris flow considering elastoplastic deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(8): 1664-1669. (in Chinese))
- [12] WANG L P, SONG D R, ZHOU G G D, et al. Debris flow overflowing flexible barrier: physical process and drag load characteristics[J]. Landslides, 2022, **19**(8): 1881-1896.
- [13] ARMANINI A, ROSSI G, LARCHER M. Dynamic impact of a water and sediments surge against a rigid wall[J]. Journal of Hydraulic Research, 2020, **58**(2): 314-325.
- [14] SONG D R, CHEN X Q, ZHOU G G D, et al. Impact dynamics of debris flow against rigid obstacle in laboratory experiments[J]. Engineering Geology, 2021, **291**: 106211.
- [15] FAUG T. Impact force of granular flows on walls normal to the bottom: slow versus fast impact dynamics[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2021, **58**(1): 114-124.
- [16] ALBABA A, LAMBERT S, FAUG T. Dry granular avalanche impact force on a rigid wall: analytic shock solution versus discrete element simulations[J]. Physical Review E, 2018, **97**(): 052903.
- [17] 王东坡, 张小梅. 泥石流冲击弧形拦挡坝动力响应研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(12): 3851-3861. (WANG Dongpo, ZHANG Xiaomei. Study on dynamic response of debris flow impact arc-shaped dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(12): 3851-3861. (in Chinese))
- [18] BI Y Z, DU Y J, HE S M, et al. Numerical analysis of effect of baffle configuration on impact force exerted from rock avalanches[J]. Landslides, 2018, **15**(5): 1029-1043.
- [19] GOODWIN G R, CHOI C E, YUNE C Y. Towards rational use of baffle arrays on sloped and horizontal terrain for filtering boulders[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2021, **58**(10): 1571-1589.
- [20] WANG D P, LI Q Z, BI Y Z, et al. Effects of new baffles system under the impact of rock avalanches[J]. Engineering Geology, 2020, **264**: 105261.
- [21] JIANG Y J, ZHAO Y, TOWHATA I, et al. Influence of particle characteristics on impact event of dry granular flow[J]. Powder Technology, 2015, **270**: 53-67.
- [22] JIANG Y J, FAN X Y, LI T H, et al. Influence of particle-size segregation on the impact of dry granular flow[J]. Powder Technology, 2018, **340**: 39-51.

- [9] 李 宁, 李 骞, 宋 玲. 基于回转切削的岩石力学参数获取新思路[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(2): 323-329. (LI Ning, LI Qian, SONG Ling. Acquiring mechanical parameters of rock based on rotational cutting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(2): 323-329. (in Chinese))
- [10] 王 琦, 高红科, 蒋振华, 等. 地下工程围岩数字钻探测试系统研发与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, **39**(2): 301-310. (WANG Qi, GAO Hongke, JIANG Zhenhua, et al. Development and application of a surrounding rock digital drilling test system of underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, **39**(2): 301-310. (in Chinese))
- [11] LAKSHMINARAYANA C R, TRIPATHI A K, PAL S K. Experimental investigation on potential use of drilling parameters to quantify rock strength[J]. International Journal of Geo-Engineering, 2021, **12**(1): 23.
- [12] RAJESH KUMAR B, VARDHAN H, GOVINDARAJ M. Prediction of uniaxial compressive strength, tensile strength and porosity of sedimentary rocks using sound level produced during rotary drilling[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2011, **44**(5): 613-620.
- [13] KALANTARI S, BAGHBANAN A, HASHEMALHOSSEINI H. An analytical model for estimating rock strength parameters from small-scale drilling data[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019, **11**(1): 135-145.
- [14] 郭 勇, 周振华. 潜孔钻机的应用现状与发展趋势[J]. 矿业快报, 2008(4): 13-15. (GUO Yong, ZHOU Zhenhua. Application actualities and development trend of down-the-hole drill[J]. Express Information of Mining Industry, 2008(4): 13-15. (in Chinese))
- [15] 徐小荷, 余 静. 岩石破碎学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984. (XU Xiaohe, YU Jing. Rock Fragmentation[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1984. (in Chinese))
- [16] 赵宏强, 李美香, 高 斌, 等. 潜孔钻机凿岩过程自动防卡钻理论与方案研究[J]. 机械科学与技术, 2008, **27**(6): 739-743. (ZHAO Hongqiang, LI Meixiang, GAO Bin, et al. On automatic anti-jamming control in the rock drilling process for a down the hole drill[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2008, **27**(6): 739-743. (in Chinese))
- ~~~~~
- (上接 1508 页)
- [23] 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.
- [24] ZHANG B, HUANG Y. Effect of unsteady flow dynamics on the impact of monodisperse and bidisperse granular flow[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, **81**(2): 77.
- [25] 宋东日, 周公旦, CHOI C E, 等. 土工离心机模拟泥石流问题的相似性考虑[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(12): 2262-2271. (SONG Dongri, ZHOU Gongdan, CHOI C E, et al. Scaling principles of debris flow modeling using geotechnical centrifuge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(12): 2262-2271. (in Chinese))
- [26] SONG D, CHOI C E, ZHOU G G D, et al. Impulse load characteristics of bouldery debris flow impact[J]. Géotechnique Letters, 2018, **8**(2): 111-117.
- [27] ZHANG B, HUANG Y. Impact behavior of superspeed granular flow: insights from centrifuge modeling and DEM simulation[J]. Engineering Geology, 2022, **299**: 106569.
- [28] DEM solutions, EDEM 2020.1 document[Z]. Edinburgh: Altair, 2020: 1-100 [April 9, 2023]. <https://www.altair.com.cn/edem/>.
- [29] GOODWIN S R, CHOI C E. Translational inertial effects and scaling considerations for coarse granular flows impacting landslide-resisting barriers[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2021, **147**(12): 04021153.
- [30] LAM H W K, WONG A L. Experimental and numerical study of dynamic soil debris impact load on reinforced concrete debris-resisting barriers[J]. Landslides, 2021, **18**(3): 955-966.
- [31] KWAN J. Supplementary technical guidance on design of rigid debris-resisting barriers [R]. Hong Kong: Geotechnical Engineering Office, 2012:1-88. [https://www.cedd.gov.hk/eng/publications/geo\\_reports/geo\\_rpt270.html](https://www.cedd.gov.hk/eng/publications/geo_reports/geo_rpt270.html).
- [32] LI K, WANG Y F, LIN Q W, et al. Experiments on granular flow behavior and deposit characteristics: implications for rock avalanche kinematics[J]. Landslides, 2021, **18**(5): 1779-1799.