

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.01.20

## 滑坡碎屑流冲击拦挡结构的离散元模拟

张睿骁<sup>1</sup>, 樊晓一<sup>1,2</sup>, 姜元俊<sup>3</sup>

(1. 西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010; 2. 工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室, 四川 绵阳 621010; 3. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

**摘要:** 拦挡结构可以有效减小滑坡致灾范围、减弱致灾强度。文章以滑坡碎屑流为研究对象, 通过对比模型试验和数值模拟结果, 校正三维离散元模拟参数, 进而研究不同坡脚角度和挡板高度对冲击力、最大水平运动距离的影响。研究表明: 三个坡脚角度碎屑流冲击力的变化过程存在明显区别, 坡脚角度为 35° 和 45° 时, 冲击力时程曲线经历了两个显著的变化阶段: 线性增大、线性减小。而坡脚角度为 55° 时, 碎屑流冲击力时程曲线出现三个变化阶段: 线性增加、恒力阶段、线性减小。挡板高度越高, 恒力阶段的持续时间越短, 冲击力线性减小阶段时间越长。小颗粒 (2.5 ~ 10 mm) 对挡板的冲击效应显著; 中等颗粒 (10 ~ 25 mm) 随着挡板高度的增加, 对挡板的冲击效应逐渐增大; 而大颗粒 (25 ~ 60 mm) 作用在挡板上的冲击效应出现突变, 与其他两种颗粒对比, 整个运动过程冲击效应不显著。碎屑流的运程随着挡板高度的增加逐渐减小。对比三个坡脚角度下挡板的拦挡效果, 坡脚角度  $\alpha \leq 45^\circ$  时, 拦挡效果显著。

**关键词:** 滑坡; 碎屑流; 拦挡结构; 冲击力; 最大水平运动距离

中图分类号: P642.22; U213.1<sup>+</sup>57

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)01-0148-08

## Discrete element simulation of the impact of landslide debris flow on resistive structures

ZHANG Ruixiao<sup>1</sup>, FAN Xiaoyi<sup>1,2</sup>, JIANG Yuanjun<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China; 2. Shock and Vibration of Engineering Materials and Structures Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang, Sichuan 621010, China; 3. Institute of Mountain Hazard and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China)

**Abstract:** Construction of resistive structures can effectively reduce the deposit area of landslides and weaken the intensity of hazard. In this study, the landslide-debris flow is examined by using the 3D discrete element method, whose parameters are calibrated by comparing the results of the model tests and those of the numerical simulations. The influence of different slope gradients and the height of barrier on the impact force and the maximum of the horizontal running distance are further studied. The results indicate that for the three experiments with different slope gradients there are obvious differences in the impact force variation processes. When the slope gradient is 35° or 45°, the magnitude of the landslide-debris flow impact force undergoes two significant stages: linear increase and linear decrease. When the gradient is 55°, there are three stages of change in the time-history curve: linear increase, constant force stage and linear decrease. The higher the height of barrier is, the shorter the time duration of the constant force stage, and the longer the linear decrease stage is. Small particles (2.5 ~ 10 mm) have significant impact effects on the barrier. With the increasing

收稿日期: 2018-06-14; 修订日期: 2018-09-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877524); 西南科技大学研究生创新基金资助(18yex097)

第一作者: 张睿骁(1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程、地质灾害防治工作。E-mail: zhangruix1212@163.com

通讯作者: 樊晓一(1974-), 男, 教授, 博士, 主要从事岩土工程及地质灾害方面的教学与研究工作。E-mail: xyfan1003@126.com

height of barrier, the impact effect of the medium particles (10 ~ 25 mm) on the barrier gradually increases. The impact effect of large particles (25 ~ 60 mm) on the barrier has an abrupt change. Compared with other two kinds of particles, this impact effect is not significant during the whole motion. The running distance of the landslide-debris flow gradually decreases with the increasing height of barrier. Comparison of the resistance effects of the barrier under three slope gradients shows that the resistance effect is significant when the slope gradient  $\alpha \leq 45^\circ$ .

**Keywords:** landslide; debris flow; resistive structure; impact force; maximum horizontal displacement

滑坡碎屑流是高位滑坡的一种常见运动形式,具有高破碎度、高离散性和流动特性。在运动过程中一般具有大规模、远程、高速的特点,对沿程的基础设施和居民建筑带来毁灭性的破坏,造成巨大的灾害损失和人员伤亡<sup>[1-3]</sup>。例如,2015年5月20日贵阳市海马冲发生山体滑坡,总量大约为 $6 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,造成16人遇难,1 092人受灾<sup>[4]</sup>;2016年9月28日浙江省遂昌县苏村近 $40 \times 10^4 \text{ m}^3$ 山体发生滑动,导致19人遇难,8人失联,20余户房屋损坏等<sup>[5]</sup>。此类中小型滑坡,滑坡方量虽然不大,但是由于场地条件的影响,其致灾强度、致灾范围不亚于一次大型滑坡,对山区人民生命财产造成巨大的威胁。

国内外学者针对滑坡运动冲击开展了大量工作。吴越等<sup>[6-7]</sup>采用室内模型试验测试滑体运动对构筑物的冲击,并利用试验结果研究了构筑物在滑坡冲击下的易损度和冲击能耗散规律。段晓冬等<sup>[8]</sup>利用PFC模拟方法和模型试验的数据资料,探讨了冲击力拱的形成特征以及对冲击力分布变化的影响。Ng等<sup>[9]</sup>通过室内模型试验研究了滑道中不同位置处的挡墙对滑坡流动性的影响。樊赟赟等<sup>[10]</sup>讨论了底摩擦角和地形曲率对滑坡运动过程中能量的影响,研究成果表明碎屑流的能量主要被底摩擦角控制,而碎屑流的摩擦阻力被地形曲率的向心作用改变。Salciarini等<sup>[11]</sup>利用离散元(DEM)模拟了崩塌产生的碎屑流对刚性填土壁和刚性挡墙的影响,分析了崩塌体的形状、坡面角度、颗粒性质等对碎屑流溢出比率以及结构物冲击力的影响。孙新坡等<sup>[12]</sup>采用基于离散元方法对崩塌灾害进行数值模拟,并开展了崩塌体与拦石墙动力冲击响应研究,进而优化防护结构。姜元俊等<sup>[13-15]</sup>通过实验研究了碎屑流冲击挡墙的物理机制和力学模型。袁小一等<sup>[16]</sup>利用流体力学软件Fluent模拟了碎屑流超前冲击气浪的速度和相对压力分布,并对其产生机理进行了分析。

以上研究成果主要集中在碎屑流颗粒对加速区挡板上的冲击效应上,而山区建筑的建设主要是集

中在堆积区上,目前还缺乏碎屑流颗粒对堆积区拦挡结构的冲击效应的研究。本文以室内模型试验结果为依据,运用三维离散元软件建立数值模拟模型,与试验数据进行对比,探究碎屑流颗粒在不同坡脚角度下,对不同高度挡板的冲击效应,为拦挡结构设计以及碎屑流的防治提供理论依据,达到更好的减小滑坡致灾范围、减弱致灾强度的效果,保障山区人民生命财产安全。

## 1 三维离散元模型

### 1.1 模型建立

本模型由斜坡、侧板、底板、刚性挡板和碎屑物源组成(图1),其中,碎屑物源距离底面垂直高度固定为1 250 mm,斜坡坡度为 $\alpha$ ,刚性挡板高度为 $h$ ,滑坡体纵向长度250 mm,颗粒密度 $2\ 100 \text{ kg/m}^3$ ,总质量52.5 kg。滑槽宽度为50 mm。图2为含有棱角的单个颗粒大样,模型中最小颗粒单元为刚性体。

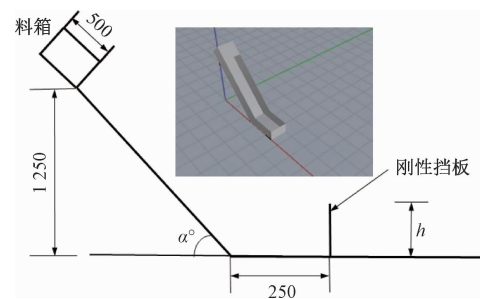


图1 滑槽模型示意图(单位:mm)

Fig.1 Diagram showing the chute model (mm)

### 1.2 颗粒级配

模型试验采用实验室配制岩质碎屑流颗粒级配进行模拟,得到颗粒级配曲线(图3)。由曲线获取二者限制粒径、平均粒径、中值粒径和有效粒径:实际级配特征粒径 $d_{60} = 15.8 \text{ mm}$ ,  $d_{50} = 9.72 \text{ mm}$ ,  $d_{30} = 2.48 \text{ mm}$ ,  $d_{10} = 0.33 \text{ mm}$ ;模拟级配特征粒径 $d_{60}^* = 16.01 \text{ mm}$ ,  $d_{50}^* = 9.74 \text{ mm}$ ,  $d_{30}^* = 3.75 \text{ mm}$ ,  $d_{10}^* = 2.1 \text{ mm}$ 。对比级配特征粒径发现:模拟级配的限制

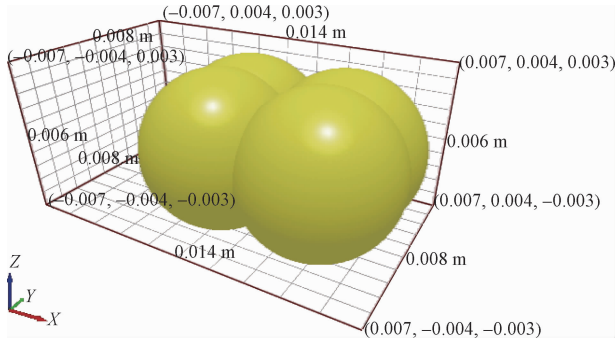


图2 单个颗粒大样

Fig. 2 Single particle sample

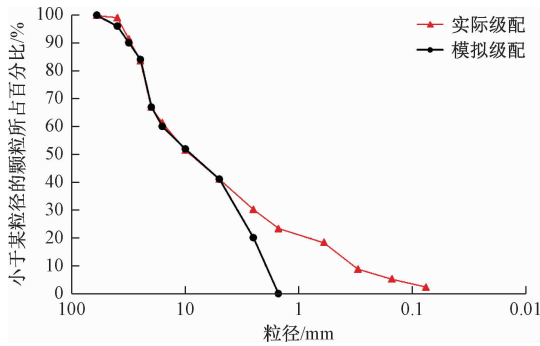


图3 颗粒级配曲线

Fig. 3 Particle gradation curve

粒径、平均粒径与实际级配相近,中值粒径和有效粒径较实际级配偏小。这是因为受模型运算效率、计算机硬件的限制,很难完全真实反应岩土体颗粒的级配,需要对颗粒级配进行简化处理。以控制限制粒径和平均粒径为指标,两者相近,认为模拟级配可以较好模拟实际级配。最终碎屑流离散元颗粒模型如图4所示。

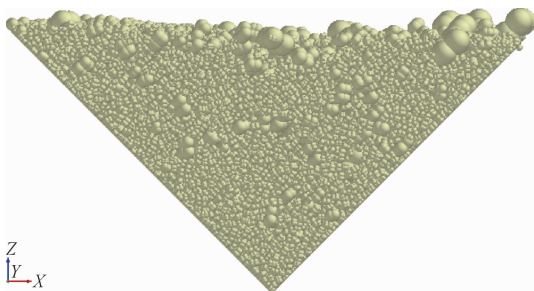


图4 碎屑流离散元颗粒模型

Fig. 4 Discrete element model of the debris flow

1.3 参数标定

由于碎屑流的运动特性会受到摩擦系数的显著影响,为获取可靠的碎屑流运动摩擦系数,选择漏斗模型来标定试验颗粒,如图5所示。

由于粒间没有黏聚力,堆积体的内摩擦角  $\varphi$  等于其安息角。在模拟时,将颗粒间摩擦系数取 0.57,碎屑体与山坡松散覆盖层之间的摩擦系数取 0.50<sup>[17]</sup>。在设置好接触面和颗粒间的摩擦系数后,反复调整滚动摩擦系数,使碎屑体安息角为  $30^\circ$  ( $\arctan 0.57 = \arctan H/R = 30^\circ$ ,  $H$  为堆积体中心高度,  $2R$  是堆积直径),最终计算参数见表1。

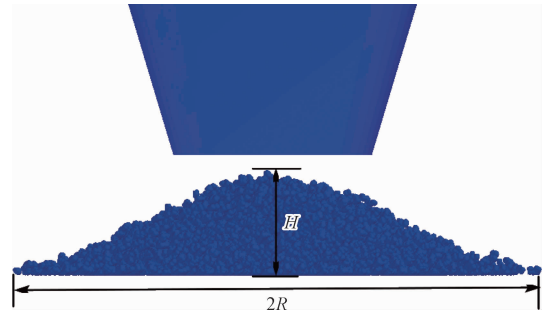


图5 离散元颗粒漏斗数值模型试验

Fig. 5 Numerical model test of the discrete elemental particle funnel

表1 模拟参数

Table 1 Parameters used with the model

物理参数	颗粒 - 颗粒	底板 - 颗粒	挡板 - 颗粒
密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	2 100	7 500	2 500
泊松比	0.21	0.30	0.25
剪切模量/Pa	$1 \times 10^8$	$7 \times 10^{10}$	$1.96 \times 10^9$
静摩擦系数	0.57	0.50	0.01
滚动摩擦系数	0.10	0.10	0.01
碰撞恢复系数	0.20	0.28	0.25

1.4 试验方案

试验中,利用碎屑流颗粒在滑槽中的运动来模拟滑坡碎屑流对刚性挡板的冲击效应,共进行 18 组模拟,其中试验 1、7、13 为实验对照组。在前期数值模拟研究下,发现挡板高度为 50 mm 时,大部分碎屑流颗粒已被拦挡在挡板前方,故本文挡板高度最大值为 50 mm,研究挡板高度  $\leq 50$  mm 时,不同高度挡板对碎屑流运动的影响,试验安排见表2。

1.5 模拟结果与模型试验对比

以表1中的材料参数为基础,以模型试验为参照。图6列举了坡度为  $45^\circ$ 、无挡板时,数值模拟与模型试验的比较,其中试验滑道两侧安装强度较高且透明的有机玻璃,每 10 cm 划分网格。从堆积体形态、运动距离来看,两者堆积形态相似度比较高,试验最大水平运动距离为 1.00 m,数值模拟所得最大水平运动距离为 0.99 m,其模拟结果与实验结果吻合较好。

表 2 滑坡试验设计

Table 2 Design of the landslide tests

试验编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
挡板高度 $h/\text{mm}$	0	10	20	30	40	50	0	10	20	30	40	50	0	10	20	30	40	50
坡角 $\alpha/(\text{°})$	35	35	35	35	35	35	45	45	45	45	45	45	55	55	55	55	55	55

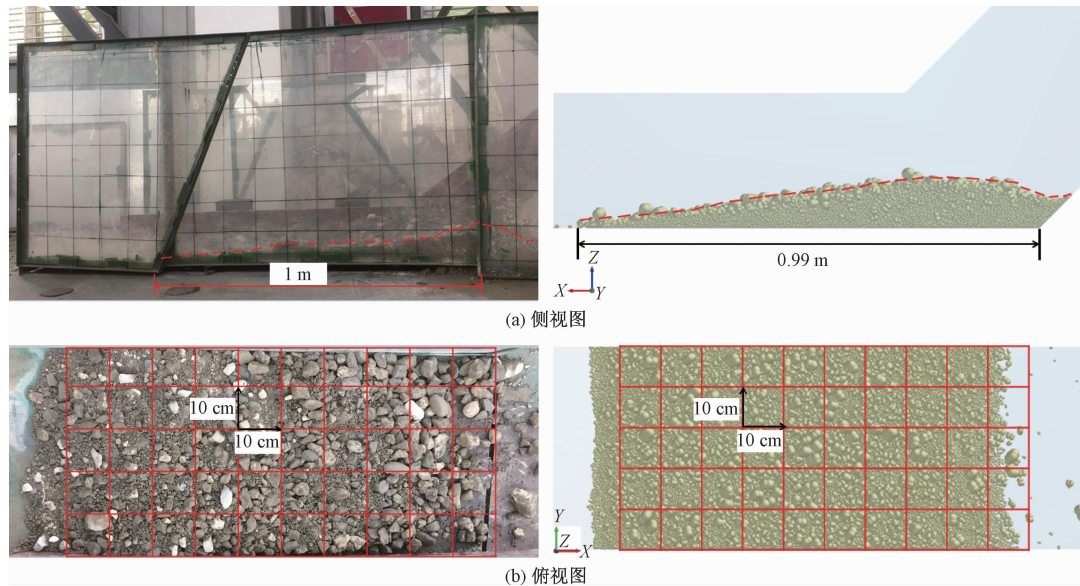


图 6 数值模拟和模型试验的碎屑流堆积特征

Fig. 6 Stacking characteristics of the debris flow of numerical simulations and model tests

## 2 模拟结果与讨论

### 2.1 冲击力

从图 7 可以发现,当坡脚角度为  $35^\circ$  和  $45^\circ$  时,冲击力时程曲线经历了两个显著的变化阶段:线性增大、线性减小。而当坡脚角度为  $55^\circ$  时,碎屑流冲击力的变化阶段较  $35^\circ$  和  $45^\circ$  有明显区别,即冲击力时程曲线出现三个变化阶段:线性增加、恒力阶段、线性减小。

碎屑流从加速区下滑到堆积区滑道,在加速区启动下滑,将自身的重力势能转化为动能,到达堆积区滑道时,碎屑流颗粒具有较大的能量,碰撞挡板,在挡板上产生冲击力。冲击力随后缘颗粒运动补偿给前缘颗粒而不断增加,达到峰值。坡脚角度越大,冲击力线性增大阶段曲线斜率越大,即增加得越快。

当坡脚角度为  $35^\circ$  和  $45^\circ$  时,碎屑流颗粒运动到堆积区时的速度较小,后缘颗粒对前缘颗粒的碰撞效应较小,冲击力时程曲线只经历了线性增大和线性减小两个阶段。当坡脚角度较为  $55^\circ$  时,碎屑流颗粒到达堆积区时速度较大,后缘颗粒对前缘颗粒的碰撞效应显著,冲击力并没有立即进入线性减小阶段,而是在获得后部颗粒能量补偿的一段时间内得以维持。最终在

摩擦力、颗粒间的碰撞作用下,冲击力开始逐渐减小,最终维持恒定的静压力。因此,将挡板上所受冲击力的时程曲线分为线性增加、恒力、线性减小三个阶段。

相同坡脚角度下,到达坡脚处碎屑流颗粒的整体能量是一致的,前缘碎屑流颗粒碰撞到挡板后回弹,后缘颗粒从加速区上不断下滑,对其作用推挤力,前缘颗粒堆积在挡板前方,后缘颗粒通过撞击前缘颗粒对挡板产生冲击力。随着挡板高度的增加,碎屑流颗粒堆积在挡板前方的颗粒增加,后缘颗粒撞击前缘颗粒所消耗的能量较大,导致冲击力到达峰值后,恒力阶段时间减小。

分析坡脚角度为  $55^\circ$  时冲击力时程曲线,发现冲击力时程曲线的三个阶段随挡板的高度变化而变化,挡板高度越高,恒力阶段的时间越小,冲击力线性减小阶段时间越长。用  $t_{10}$ 、 $t_{20}$ 、 $t_{30}$ 、 $t_{40}$ 、 $t_{50}$  分别表示不同高度挡板在坡脚  $\alpha = 55^\circ$  时恒力阶段的时间,其中  $t_{10} = 0.24$  s,  $t_{20} = 0.22$  s,  $t_{30} = 0.17$  s,  $t_{40} = 0.15$  s,  $t_{50} = 0.11$  s,  $t_{10}$  达到了  $t_{50}$  的两倍。表明碎屑流颗粒对挡板的冲击过程,恒力阶段的时间随挡板高度的变化差异显著。

对比图 7 中的三个图,可以发现:坡脚角度  $\alpha$  为  $35^\circ$  的挡板,在冲击力增加阶段出现突变,为此对三个

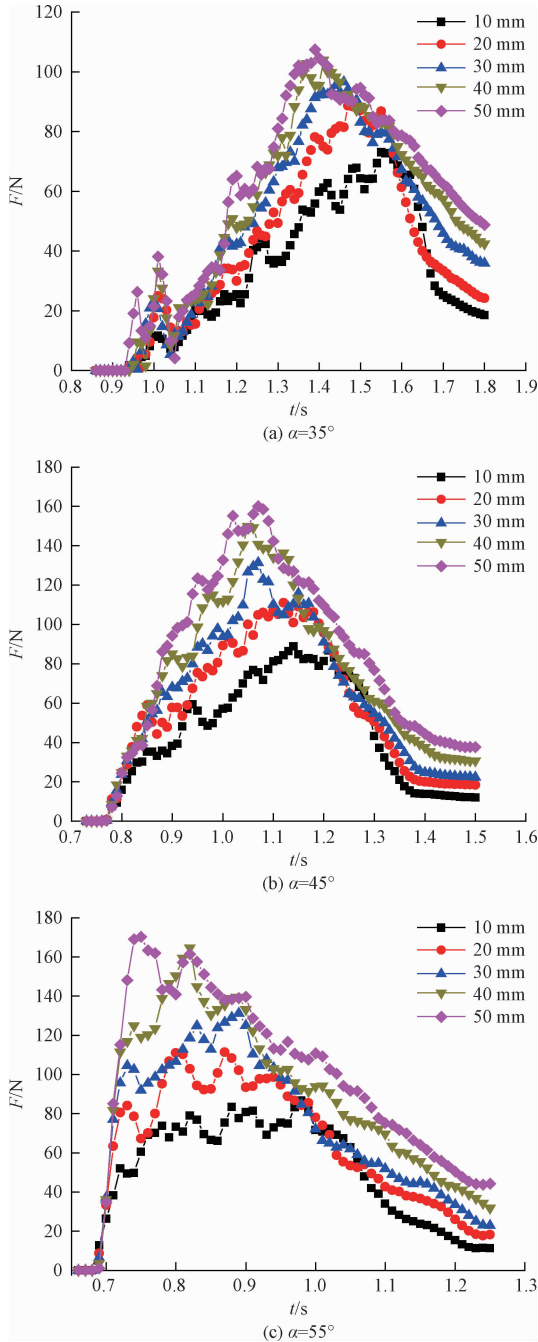


图7 挡板所受冲击力随时间的变化关系曲线

Fig.7 Curve of the impact force of the baffle with time

坡度数值模拟过程进行分析。对比三个坡度下碎屑流颗粒前缘运动速度(图8),发现:35°坡脚大小颗粒出现明显的分离情况,对比45°和55°坡脚的前缘颗粒运动图,大小颗粒整体沿着滑道运动,整体性比较好。出现这一情况在于:当坡度为35°时,坡度较缓,碎屑流颗粒运动受底板摩擦效应明显,大小颗粒出现分离,大颗粒运动到挡板前方,少部分大颗粒对挡板产生冲击作用,导致冲击力突变;随着时间的推移,后缘颗粒继

续运动,滑体材料整体对挡板持续作用。当坡度为45°和55°时,底板对颗粒的摩擦效应作用较小,大小颗粒整体运动,冲击到挡板上,大小颗粒整体作用,挡板所受冲击力随时间的变化关系曲线没有出现突变。

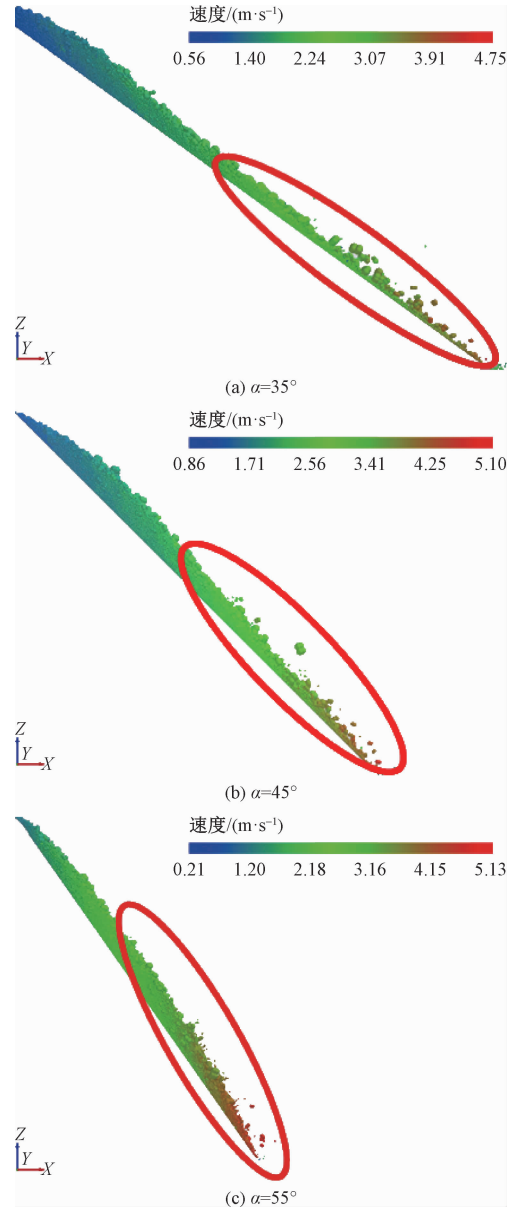


图8 碎屑流颗粒前缘运动速度图

Fig.8 Velocity of the debris flow front

### 2.2 不同颗粒对挡板的冲击效应

为进一步分析颗粒对挡板的冲击作用,以坡脚角度  $\alpha = 35^\circ$  为研究对象,以粒径范围划分三种颗粒:小颗粒(2.5 ~ 10 mm)、中等颗粒(10 ~ 25 mm)、大颗粒(25 ~ 60 mm),分别提取三种颗粒对挡板的冲击力大小,并绘制时程曲线(图9)。

由图9可以发现,小颗粒对挡板的冲击效应显著;

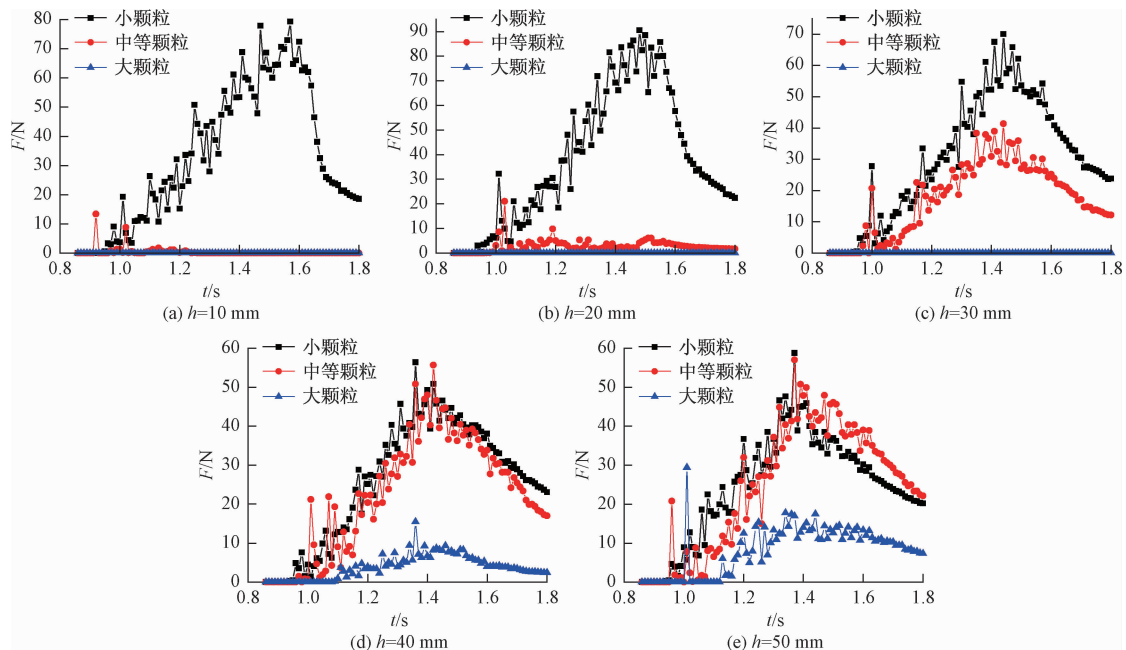


图 9 不同颗粒对挡板的冲击力时程曲线

Fig. 9 Curve of the impact force of different particles on the baffle

中等颗粒随着挡板高度的增加,对挡板的冲击效应逐渐增大;而大颗粒作用在挡板上的冲击效应不显著。产生这一现象的原因在于,碎屑流颗粒运动过程当中出现颗粒分选效应<sup>[18]</sup>,即大颗粒运动到碎屑流整体的上方,而小颗粒则分布在碎屑流整体的下方。经过加速区加速之后,碎屑流颗粒运动到堆积区滑道上,小颗粒在碎屑流整体的底部,冲击在挡板上,随着后缘颗粒的不断下滑,小颗粒受到大颗粒的碰撞作用,持续冲击挡板,冲击力不断增加,并有部分小颗粒堆积在挡板前方,后缘颗粒的下滑通过碰撞、挤压前方堆积的小颗粒对挡板产生冲击力,小颗粒对挡板的冲击效应显著。

当挡板高度为  $h=10, 20$  mm 时,由于挡板高度较低,小颗粒碰撞到挡板时,被拦挡在挡板前方,并铺在滑道上;前缘的中等颗粒和大颗粒,运动到挡板前方时,挡板前方堆积有小颗粒,通过碰撞、挤压小颗粒对挡板产生冲击力,此时中等颗粒和大颗粒对挡板基本没有冲击效应。随着挡板高度的增加,部分中等颗粒随着前缘的小颗粒一起碰撞到挡板上,堆积在挡板前方,挡板高度的越高,中等颗粒碰撞在挡板上的颗粒数量越多,随着后缘颗粒的滑动,碰撞、挤压前方堆积的颗粒对挡板产生冲击力。

与小颗粒和中等颗粒相比,大颗粒对挡板的冲击效应不显著,主要通过碰撞、挤压小颗粒和中等颗粒对挡板产生作用力。碎屑流颗粒下滑到滑道上时,大颗

粒分布在碎屑流颗粒的上方,当挡板高度小于 30 mm 时,碎屑流颗粒下部的小颗粒和中等颗粒碰撞到挡板后,堆积在挡板前方,随着后缘颗粒的碰撞、挤压作用,堆积高度上升到挡板高度,大颗粒从底下堆积的颗粒滑动过去,没有直接作用到挡板上。当挡板高度达到 40 mm 时,运动在前缘的大颗粒碰撞到挡板上,对挡板直接产生冲击力,由于小颗粒和中等颗粒堆积在挡板前方,挡板的接触面被覆盖,大颗粒对挡板产生的冲击效应并不明显。当中部和后缘的大颗粒运动到挡板前方时,此时与挡板直接接触的面被小颗粒和中等颗粒覆盖,大颗粒基本上从挡板上方越过,堆积在挡板后方。

同时观察各挡板高度下,中等颗粒和大颗粒在  $t=1.0$  s 左右的冲击力,可以发现中等颗粒和大颗粒对挡板具有较大的冲击力,这正好解释图 9 碎屑流颗粒前缘运动速度图,大小颗粒分离之后,运动到挡板处,大颗粒对挡板具有较大的冲击力。

### 2.3 碎屑流最大水平运动距离

对碎屑流受挡板拦挡作用后运动的最大水平运动距离进行统计分析(表 3),结合图 10,结果表明:随着挡板高度的增加,碎屑流的运程逐渐减小,降幅越大;不同坡脚角度下,挡板的拦挡效果存在较大差异,挡板高度一定时,坡脚角度越小,挡板的拦挡作用越显著。

表3 碎屑流的水平运动距离

Table 3 Horizontal movement distance of the debris flow

试验编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$h/mm$	0	10	20	30	40	50	0	10	20	30	40	50	0	10	20	30	40	50
最大水平位移/mm	0.96	0.5	0.41	0.35	0.34	0.25	0.99	0.6	0.57	0.51	0.48	0.43	0.86	0.73	0.68	0.65	0.61	0.56
降幅/%	—	47.9	57.3	63.5	64.6	74.0	—	39.4	42.4	48.5	51.5	56.6	—	15.1	20.9	24.4	29.1	34.9

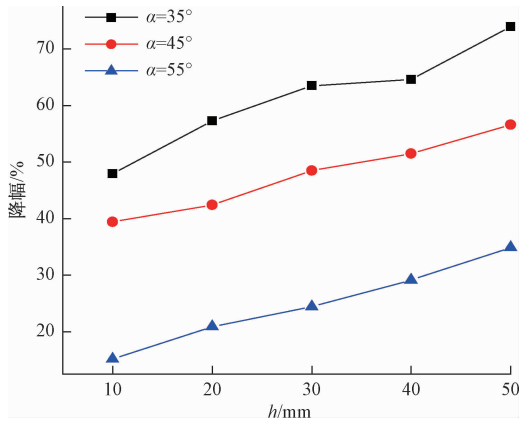


图10 碎屑流的水平运动距离降幅

Fig. 10 Drop of the horizontal movement distance of the debris flow

当坡脚角度一定时,碎屑流的最大水平运动距离随着挡板高度的增加而逐渐减小,不同坡脚角度的水平运动距离降幅随着挡板高度的增加走势相同,呈现逐渐增加。这是因为随着挡板越高,碎屑流颗粒被挡板所拦截下来的颗粒越多;同时碎屑流颗粒前缘受到挡板的阻挡作用回弹,挡板高度越高,回弹的颗粒数量越多,与后缘颗粒发生碰撞产生的反作用力越大,后缘颗粒所携带的能量被消耗的越多。随后回弹颗粒与后缘颗粒一起运动,逐渐堆积在挡板前方,后续逐渐下滑的颗粒通过碰撞堆积在挡板前方的颗粒向前运动,而挡板高度越高,堆积在挡板前方的颗粒所要爬升的高度越高,越过挡板的颗粒则越少,颗粒在爬升过程消耗的动能消耗也越多,导致碎屑流颗粒运程更近。

对比坡脚角度  $\alpha = 35^\circ$  和  $\alpha = 55^\circ$ ,挡板的阻挡作用效果相差近 3 ~ 4 倍。当坡脚角度  $\alpha = 35^\circ$ 、挡板高度 10 mm 时,水平运动距离降幅达到了 47.9%,减小了近一半,说明坡脚角度较小时碎屑流颗粒运动到挡板前方的速度较小,阻挡结构的建设,可以有效减小碎屑流的运动距离,减小碎屑流的致灾范围。对比三个坡脚角度下的阻挡效果,建设阻挡工程时,可以以坡脚角度  $\alpha = 45^\circ$  为参考依据,坡脚角度  $\alpha > 45^\circ$  时,阻挡工程的效果不显著,应该采用其他措施;坡脚角度  $\alpha \leq 45^\circ$  时,阻挡工程效果显著,可以通过建设阻挡工程减小碎

屑流的致灾范围。

### 3 结论

(1)当坡脚角度为  $35^\circ$  和  $45^\circ$  时,碎屑流冲击力时程曲线经历了两个显著的变化阶段:线性增大、线性减小。而当坡脚角度为  $55^\circ$  时,碎屑流冲击力时程曲线出现三个变化阶段:线性增加、恒力阶段、线性减小。挡板高度越高,恒力阶段的时间越小,冲击力线性减小阶段时间越长。

(2)对比三个坡脚角度下冲击力时程曲线图,当坡脚角度为  $35^\circ$  时,碎屑流颗粒运动受底板摩擦效应明显,大小颗粒出现分离,冲击力时程曲线出现突变。

(3)小颗粒 (2.5 ~ 10 mm) 对挡板的冲击效应显著;中等颗粒 (10 ~ 25 mm) 随挡板高度的增加,对挡板的冲击效应逐渐增大;而大颗粒 (25 ~ 60 mm) 作用在挡板上的冲击效应出现突变,与其他两种颗粒对比,整个运动过程冲击效应不显著。

(4)碎屑流的运程随着挡板高度的增加逐渐减小。不同坡脚角度下,挡板的阻挡效果存在较大差异,挡板高度一定时,坡脚角度越小,挡板的阻挡作用越显著。对比三个坡脚角度下的阻挡效果,建设阻挡工程时,可以以坡脚角度  $\alpha = 45^\circ$  为参考依据,坡脚角度  $\alpha > 45^\circ$  时,阻挡工程的效果不显著,应该采用其他措施;坡脚角度  $\alpha \leq 45^\circ$  时,阻挡工程效果显著,可以通过建设阻挡工程减小碎屑流的致灾范围。

### 参考文献:

[ 1 ] 曾庆利,魏荣强,薛鑫宇,等.茂县新磨特大滑坡-碎屑流的发育特征与运移机理[J].工程地质学报,2018,26(1):193-206. [ ZENG Q L, WEI R Q, XUE X Y, et al. Characteristics and runout mechanism of super-large Xinmo rock avalanche-debris flow in Diexi, Sichuan province[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(1): 193 - 206. (in Chinese) ]

[ 2 ] 刘传正.深圳红坳弃土场滑坡灾难成因分析[J].中国地质灾害与防治学报,2016,27(1):1-5. [ LIU C Z. Genetic mechanism of landslide tragedy

- happened in Hong'ao dumping place in Shenzhen, China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(1): 1-5. (in Chinese) ]
- [ 3 ] 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) ]
- [ 4 ] 宋东峰, 程兴军. 贵阳海马冲“5·20”山体滑坡排险[J]. 人民长江, 2016, 47(11): 5-9. [ SONG D F, CHENG X J. Danger removal of “5. 20” mountainous landslide at Mahaichong, Guiyang [J]. Yangtze River, 2016, 47(11): 5-9. (in Chinese) ]
- [ 5 ] 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: characteristics and failure mechanism[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(4): 73-78. (in Chinese) ]
- [ 6 ] 吴越, 刘东升, 李明军. 岩体滑坡冲击能计算及受灾体易损性定量评估[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 901-909. [ WU Y, LIU D S, LI M J. Impact energy calculation for rock slope and quantitative assessment of vulnerability for element at risk[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5): 901-909. (in Chinese) ]
- [ 7 ] 吴越, 刘东升, 李明军. 滑体下滑及冲击受灾体过程中的能耗规律模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 693-701. [ WU Y, LIU D S, LI M J. Landslide model experiment for energy dissipation law in sliding and impact processes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4): 693-701. (in Chinese) ]
- [ 8 ] 段晓冬, 樊晓一, 姜元俊, 等. 碎屑流冲击挡墙的土拱效应研究[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(5): 92-102. [ DUAN X D, FAN X Y, JIANG Y J, *et al.* Study on soil arch effect of dry debris flow for impact barricade wall [J]. Journal of natural disasters, 2015, 24(5): 92-102. (in Chinese) ]
- [ 9 ] C W W NG, C E CHOI. Physical modeling of baffles influence on landslide debris mobility [J]. Original Paper, 2014: 1-18.
- [ 10 ] 樊赟赟, 王恩志, 王思敬. 碎屑流运动模拟及能量过程研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2011, 32(9): 1344-1347. [ FAN Y Y, WANG E Z, WANG S J. Motion simulation of debris flow and research on energy process [J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2011, 32(9): 1344-1347. (in Chinese) ]
- [ 11 ] 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.
- [ 12 ] 孙新坡, 何思明, 樊晓一, 等. 崩塌体与拦石墙冲击力演化过程及参数敏感性[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2017, 44(2): 232-238. [ SUN X P, HE S M, FAN X Y, *et al.* The impact dynamic evolution process and parameter sensitivity study on collapse and buttress [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2017, 44(2): 232-238. (in Chinese) ]
- [ 13 ] JIANG Y J, TOWHATA I. Experimental study of dry granular flow and impact behavior against a rigid retaining wall [J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2013, 46(4): 713-729.
- [ 14 ] JIANG Y J, ZHAO Y. Experimental investigation of dry granular flow impact via both normal and tangential force measurements [J]. Geotechnique Letters, 2015, 5(January-March): 33-38.
- [ 15 ] 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.
- [ 16 ] 袁小一, 许强, 程谦恭, 等. 高速远程滑坡-碎屑流超前冲击气浪分析[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(6): 113-119. [ YUAN X Y, XU Q, CHENG Q G, *et al.* An analysis of air-blasts induced by rock avalanche [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(6): 113-119. (in Chinese) ]
- [ 17 ] 杨海龙. 沟谷偏转型滑坡-碎屑流运动机理研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2018. [ YANG H L. Movement mechanism of turning-type landslide debris flow in valley topography [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2018. (in Chinese) ]
- [ 18 ] JIANG Y J, WANG Z Z, SONG Y, *et al.* Cushion layer effect on the impact of a dry granular flow against a curved rock shed [J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2018, 51(7): 2191-2205.