

文章编号: 1008-2786-(2018)2-289-09

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000324

# 岩土体颗粒级配对滑坡碎屑流冲击作用的影响研究

李天话<sup>1</sup>, 樊晓一<sup>1\*</sup>, 姜元俊<sup>2</sup>

(1. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010; 2. 中国科学院 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

**摘 要:** 滑体的运动、堆积及冲击力等因素决定了滑坡碎屑流的致灾程度, 不同粒径大小及组成的颗粒在运动过程中, 产生碰撞、摩擦、跳跃等作用, 影响着滑坡碎屑流的致灾程度。运用三维离散元素法, 对比模型试验, 以控制粒径为参数, 探讨岩土体不同级配对滑体的堆积形态、运动速度及冲击力等动力学特征的影响。研究结果表明: 各滑体模型运移堆积过程中均呈现出显著的反序分离特性; 对于控制粒径相同, 而颗粒级配不同的初始滑体, 虽然堆积形态基本一致, 但细小碎屑颗粒增大了滑体的运动速度, 大粒径块石增加了滑体冲击力; 在不同的控制粒径下, 控制粒径越大, 滑体流动性越强, 滑体平均速度峰值和冲击力峰值越大; 细小碎屑物质的反序现象会增大滑体动能, 其显著的摩擦耗能作用会缩减滑体冲击能, 粗大块石促进了滑体内部能量传递, 增大滑体冲击力。

**关键词:** 滑坡碎屑流; 颗粒级配; 反序现象; 冲击力

**中图分类号:** P 642.22

**文献标志码:** A

我国西南地区山高坡陡, 地质构造复杂, 在汶川大地震后, 山体松散破碎, 滑坡、碎屑流等次生地质灾害极易发生, 对山区交通系统、工程构筑物、农房建筑物等造成威胁。滑坡、崩塌体的物质组成对堆积体的颗粒级配具有重要影响, 硬质岩类滑坡(崩塌)在运动过程中, 破碎程度低, 常形成粒径较大的滑坡堆积体; 软质岩类和土质滑坡(崩塌)较易产生粒径分布较为均匀或粒径较小的堆积体。因此, 确定颗粒级配对滑坡碎屑流冲击作用的影响, 对山区建筑结构设计及滑坡碎屑流的规划防治工作具有重要的科学意义。

已有研究表明, 滑体颗粒粒径大小影响着滑体内部的能量传递机制, 造成了不同级配滑坡岩土体运动速度和运动距离的差异<sup>[1,2]</sup>; 大、小颗粒含量、粒径差等因素确定了滑坡碎屑流运动过程中的颗粒

分选程度<sup>[3]</sup>, 影响着滑体的堆积形态<sup>[4,5]</sup>。不同粒径大小及组成的颗粒在运动过程中, 产生碰撞、摩擦、跳跃等作用, 制约着滑坡碎屑流的运动速度、距离及堆积形态等运动特征。作为滑坡碎屑流致灾强度的直观体现, 滑体冲击力不仅与其规模、运动场地条件有关<sup>[6,7]</sup>; 还受到滑体运动特征及内部能量传递机制的显著影响<sup>[8,9]</sup>。

综上, 滑坡碎屑流岩土体颗粒级配制制约着滑体的内部能量传递机制及运动特征, 影响了滑体的冲击作用, 决定了滑坡碎屑流的致灾程度。不同颗粒级配滑坡岩土体运动过程中的速度-时程分布与演化、堆积形态及深度分布特征、冲击力等因素关系到滑坡碎屑流的致灾机制研究。

尽管颗粒流、能量传递等理论模型<sup>[1,2]</sup>, 前后部相互作用机制、运动筛分和颗粒分选等作用效

**收稿日期** (Received date): 2017-07-23; **改回日期** (Accepted): 2018-04-26。

**基金项目** (Foundation item): 国家自然科学基金项目(41272297; 41502334); 绵阳市科技计划项目(16S-02-4); 中国科学院“率先行动”百人计划资助。[National Natural Science Foundation of China (41272297; 41502334); Science and Technology Program of Mianyang, China (16S-02-4); The Program of “One Hundred Talented People” of Chinese Academy of Sciences.]

**作者简介** (Biography): 李天话(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程及地质灾害方面的研究。[LI Tianhua (1992-), male, M. Sc. candidate, research on geotechnical engineering and geological hazard.] E-mail: 345527238@qq.com

\* **通讯作者** (Corresponding author): 樊晓一(1974-), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程及地质灾害方面的教学与研究工作。[FAN Xiaoyi (1974-), male, professor, Ph. D., research on geological engineering and geological hazard.] E-mail: xyfan1003@126.com

应<sup>[3~5]</sup>能较好的实现滑坡实例的反演,理论分析<sup>[9,10]</sup>、模型试验<sup>[6,8]</sup>及数值模拟<sup>[7,8]</sup>等研究方法能够对滑坡碎屑流的冲击作用影响因素做出合理分析,然而现有研究缺乏对不同颗粒级配滑坡岩土体从颗粒间相互作用机制到滑体运动特征乃至冲击作用的系统分析,在颗粒级配对滑体冲击作用影响机制上未获得一致的解释。本文以模型试验的资料和数据为依据,运用三维颗粒离散元素法(Discrete Element Method, DEM)分析软件 EDEM,建立滑坡碎屑流冲击挡墙的颗粒数值模型,并与试验结果进行对比,研究颗粒级配对滑坡碎屑流运动堆积特性及冲击作用的影响,为山区建筑结构设计及滑坡碎屑流的规划防治工作提供理论依据。

1 研究方法

1.1 离散元素法

离散元素法是分析与求解复杂离散系统的动力学问题的一种新型数值方法,该方法由 Peter Cundall 于 1971 年首次提出并应用于岩土力学的研究,经过 40 多年的不断深入与发展,DEM 已被地球物理、矿物工程、土木工程和化学工程等领域的学者和工程师广泛运用<sup>[11]</sup>。

离散元素法利用牛顿第二定律和力-位移法则确定颗粒的运动及受力情况,其核心是颗粒接触特性,即接触本构模型<sup>[12]</sup>。接触模型的分析计算直接决定了颗粒所受力和力矩的大小,对不同的仿真对象,需建立不同接触模型,以提高仿真结果的准确性<sup>[13]</sup>。由于室内滑槽模型试验材料为无粘连的类球状碎石,具有散粒物料特性,颗粒表面黏附力很小,因此本研究采用 Hertz - Mindlin (no slip) 接触模型。

1.2 模型尺寸

模型示意图如图 1 所示。滑槽底板长 2.19 m,宽 0.3 m,侧板高 0.35 m,滑槽倾斜角度  $\alpha$  可调整;模型料槽长 0.44 m,高 0.2 m,宽 0.3 m,用于装填滑体物料;总高度 0.4 m 的刚性挡墙垂直于底板安置在斜滑槽底端,以便直接监测滑坡碎屑流法向冲击力。

1.3 岩土样级配组成

高速滑坡堆积体中碎屑粒径变化范围较大,从粘土级颗粒到数米长大块石均有分布<sup>[21]</sup>。滑坡碎屑流运动过程中,粗大颗粒的碰撞分离有利于块体之间的能量传递,对滑体冲击作用影响显著;而高速

流动的细粒组分,在上部滑体物质的压力下有利于滑动面颗粒液化效应的形成,大大减小碎屑流受到地面的摩擦力,使滑体动能增加,破坏性增强<sup>[21,22]</sup>。因此,分析大粒径块石、小粒径碎屑颗粒含量及其分选性对滑坡碎屑流冲击作用有重要的意义。以控制粒径  $d_{60}$  作为表示粒度特性的指标,结合各粒组颗粒的分配比率,可以反映岩土体粒径分布的均匀程度,体现岩土体的级配情况。为了分析不同级配条件下滑体堆积形态、运动速度及冲击力等动力学特征,本研究以  $d_{60}$  为参数指标,建立了如表 1 所示的 5 种相同质量,不同级配的滑体模型,级配曲线见图 2。

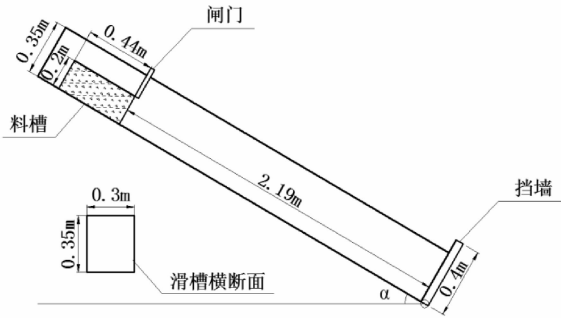


图 1 滑槽模型示意图

Fig. 1 Sketch of the flume model

表 1 试验岩土样级配组成表

Tab. 1 Particle size distributions of the samples (%)

滑体模型	控制粒径 $d_{60}/\text{mm}$	颗粒粒径/mm			
		1 ~ 2	2 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 40
M1	5	2	90	5	3
M2	14	2	5	90	3
M3	14	2	5	70	23
M4	14	25	30	20	25
M5	30	2	3	5	90

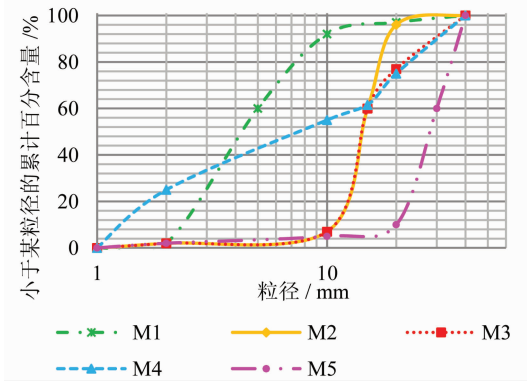


图 2 滑体模型材料级配曲线

Fig. 2 Grading curve of the samples

其中滑体模型 M1、M2 和 M5 控制粒径  $d_{60}$  分别为 5 mm、14 mm 和 30 mm,通过对比 M1、M2 和 M5 的试验结果以分析控制粒径对接坡碎屑流运动特征及冲击作用的影响。M2 ~ M4 控制粒径  $d_{60}$  相同,均为 14 mm,通过对比 M2 ~ M4 的试验结果以分析  $d_{60}$  相同时,大、小颗粒含量对接坡碎屑流运动特征及冲击作用的影响。模型 M2 和 M3 中 10 mm 以下小粒径颗粒含量较少,20 mm 以上大粒径颗粒含量差异显著,滑坡碎屑流对接构筑物的冲击破坏,常常是由滑体中的大块石冲击所致,因此大块石冲击力的评估在滑坡碎屑流防治工作中便显得非常重要,分析 M2 和 M3 试验结果以研究  $d_{60}$  一定的情况下,大粒径块石对接坡碎屑流运动特征及冲击作用的影响;M4 中 10 mm 以下小粒径颗粒含量较多,通过对比 M4 与 M2、M3 的试验结果以研究滑体运移碰撞产生的大量碎屑物质对接坡碎屑流运动特征及冲击作用的影响。

1.4 数值模型参数

根据滑槽模型试验具体数据设置相应仿真模型与参数如下:

1) 离散元数值模拟中,泊松比、剪切模量和密度为材料的本征参数,表示各种材料的自身属性,与外界条件无关,改变滑体粒径或级配,不会影响材料属性。基于模型试验实测及计算结果,确定颗粒与几何体的材料属性见表 2。

表 2 材料属性表  
Tab. 2 Material properties

材料	泊松比	剪切模量/Pa	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
滑体材料	0.25	$8 \times 10^8$	1969
滑槽钢材	0.3	$1.23 \times 10^9$	7900
挡墙钢材	0.3	$3.85 \times 10^9$	7900

2) EDEM 提供的材料接触属性参数包括碰撞恢复系数、静摩擦系数和滚动摩擦系数,恢复系数是反映碰撞时物体变形恢复能力的参数,以碰撞前后两物体接触点的法向相对分离速度与法向相对接近速度之比定义;摩擦系数是指两表面间的摩擦力和作用在其一表面上的垂直力之比,和表面的粗糙度有关,可分为静摩擦系数和滚动摩擦系数。根据试验实测结果,得到单个材料的法向恢复系数为 0.6。由于物理模型试验中的滑体材料并不是标准的球形颗粒,岩土体多为棱角分明,所以颗粒在整个运动过程中主要以平面滑动为主,仅在颗粒流表面存在滚动现象,而数值模拟的滑体颗粒为球体,故扩

大其摩擦系数,以保证模拟更接近实际运动状态。

在离散元素法中,材料宏观的运动行为取决于颗粒间接触的微观力学参数。然而物理模型试验中,滑体颗粒的运动是多因素、多参数共同作用的复杂力学过程,数值模拟不能完全复原实际模型试验中的所有影响因素,因此,将数值模拟软件中有限的微观力学参数进行实测标定,会导致得到的模拟运动过程与试验原型产生较大差异。对数值模拟材料参数的选择尚未形成一个完善成熟的理论方法,较多的方式是通过物理模型和数值模型结果的对比验证,来确定相关力学参数。基于此,表 3 给出了本研究中颗粒与颗粒、颗粒与几何体之间的接触属性。

表 3 接触属性表  
Tab. 3 Interaction properties of the model

相互作用	颗粒 - 颗粒	颗粒 - 滑槽底板	颗粒 - 挡墙
恢复系数	0.6	0.6	0.6
静摩擦系数	1.33	0.453	0.453
滚动摩擦系数	0.15	0.05	0.05
接触模型	Hertz-Mindlin (no slip)	Hertz-Mindlin (no slip)	Hertz-Mindlin (no slip)

2 模拟运动与模型试验验证

滑坡坡度作为地形因素对接坡运动堆积形态影响显著<sup>[23]</sup>,以数值模型参数为基础,以滑槽试验中 M2 组别的堆积形态为参照,图 3 分别列举了滑槽坡度为 30°、35°及 45°时数值模拟与模型试验堆积状态的比较,从堆积形态来看,滑槽坡度为 30°、35°及 45°时模型试验所得堆积体垂直于滑槽方向最大堆积高度  $H_{\max}$  与沿滑槽方向最大堆积长度  $L_{\max}$  之比分别为 0.14、0.5、0.96,数值模拟所得三种坡度下堆积体  $H_{\max}$  与  $L_{\max}$  之比分别为 0.19、0.74、0.85,数值模拟和滑槽模型试验的堆积状态比较为吻合。

模型试验和数值模拟所得试验结果的比较表明,DEM 可以在某种程度上代替物理模型试验。由于仪器设备以及技术手段的局限性,物理模型试验难以对一些研究对象进行合理设置和监测。因此,本研究采用数值模拟的手段来分析颗粒级对接坡碎屑流动力学特性的影响。

滑坡碎屑流运动过程中大小颗粒会发生分离现象<sup>[4]</sup>,该现象会减少颗粒之间的有效摩擦,导致滑体流动性增加<sup>[1,14~17]</sup>,同时,滑体前缘的颗粒分离

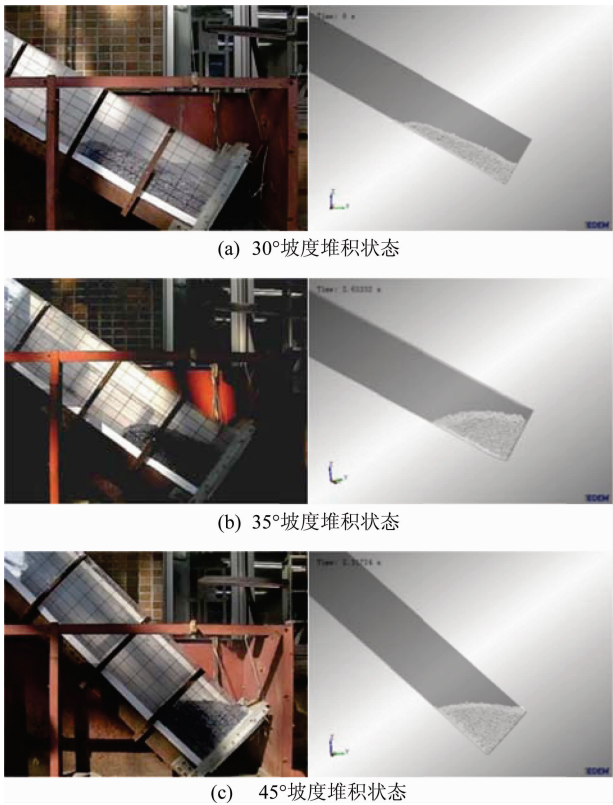


图3 不同坡度下模型试验和数值模拟所得堆积状态对比  
Fig.3 Deposition forms in numerical simulations and model tests for different angles

会导致滑体具有更长的滑动距离和更强大的破坏能量<sup>[3,18]</sup>。Zhou<sup>[3]</sup>指出,当斜坡角度大于临界角( $\approx 35^\circ$ )时,颗粒的反序分离现象更为显著。因此,本文研究 $35^\circ$ 坡度时,岩土体颗粒级配对滑坡碎屑流冲击作用的影响。图4示出了斜坡倾角为 $35^\circ$ 时,滑体颗粒被释放后不同时刻的快照。观察发现部分大粒径颗粒在运动过程中,经过频繁的碰撞,飞跃分离

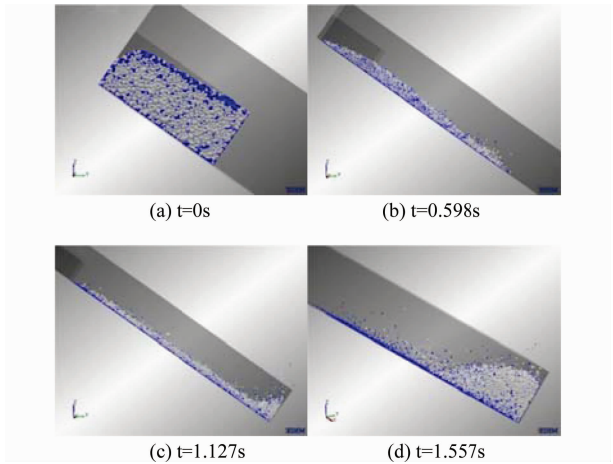


图4  $35^\circ$ 坡度下不同时刻细小颗粒位置分布  
Fig.4 Distribution of fine particles at different times for  $\alpha = 35^\circ$

到滑体顶部及前方;而部分粒径相对较小的颗粒(标记为蓝色)由于比表面积大,能量损失大,流动性差,伴随着滑动过程中的运动筛分,穿过大颗粒之间的缝隙运移到滑体中下部。滑体颗粒在运动过程中大小颗粒分离现象显著,最终形成上大下小的颗粒反序结构。

3 颗粒级配对碎屑流运动特征的影响

3.1 颗粒级配对堆积形态的影响

将粒径为 $20 \sim 40 \text{ mm}$ 的颗粒标记为红色, $10 \sim 20 \text{ mm}$ 的颗粒标记为白色, $1 \sim 2 \text{ mm}$ 以及 $2 \sim 10 \text{ mm}$ 的颗粒标记为淡蓝色。试验结果表明,滑体模型M1~M5的堆积体均表现出上粗下细的颗粒反序堆积特征(图5)。

堆积体沿滑槽方向的堆积长度和垂直于滑槽方向的堆积高度能直观的反映滑体的运动特征及流动性。M2~M4试验结果(表4)表明,控制粒径 $d_{60}$ 一定的情况下,各组滑体模型测得堆积长度与堆积高度相似,大块石及碎屑物质对滑体堆积形态影响较小。

M1、M2和M5的试验结果如表4及图5(a,b,e)所示,控制粒径 $d_{60}$ 不同的情况下,堆积体长度随着 $d_{60}$ 尺寸的增大而减小,堆积体高度随着 $d_{60}$ 尺寸的增大而增大。滑体模型M5控制粒径 $d_{60}$ 尺寸最大,运动过程中部分表层及前缘大粒径颗粒碰撞剧烈,在某个时刻脱离滑动主体,单独以较大的速度跳动,并且有抛射远离滑体的趋势,滑体前缘密实度降低,颗粒间有效摩擦减少,小粒径碎屑向下运移,促使滑动面流态效应形成,滑体流动性增强,其堆积体长度最小,挡墙前的堆积高度最大。

表4 各滑体模型堆积长度和堆积高度

Tab.4 Length and height of deposition forms

滑体模型	M1	M2	M3	M4	M5
堆积长度/mm	468	452	454	457	440
挡墙前的堆积高度/mm	260	334	332	336	375

3.2 颗粒级配对运动速度的影响

滑体下滑过程中,重力势能逐步转化为动能,动能逐渐增加,冲击过程中,冲击能等于受灾体开始受到冲击时刻滑体动能与滑体重力势能之和,根据动量守恒及冲量定律,冲击力在冲击过程中累计效应等价于冲击作用使滑体动量的减小量<sup>[24,25]</sup>。因此,滑体运动速度是滑坡碎屑流冲击作用的重要影响因



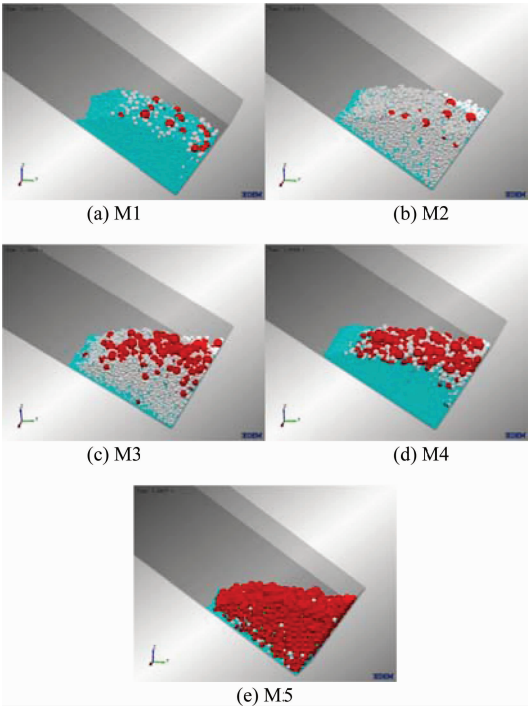


图5 各组滑体模型堆积状态  
Fig.5 Forms of deposition

素之一。

尽管滑体前缘部分颗粒在相互碰撞作用下获得较大速度飞跃分离,率先与挡墙发生碰撞接触,然而该部分颗粒离散性较强,数量相对较少,零星散射至挡墙,不能代表滑坡体整体的最大冲击力(图6),在中后部滑体颗粒的碰撞冲击及前缘堆积颗粒重力分量的共同作用下,滑体冲击力达到峰值。本文以各颗粒的平均速度  $v_{cl}$  代表滑体的运动速度

$$v_{cl} = \frac{\sum_{i=1}^n |v_n|}{N} \quad (1)$$

(1) 式中,  $v_n$  表示第  $n$  个颗粒的速度,  $N$  表示颗粒的总个数。

利用离散元数值模拟程序,表5给出了五组滑体模型中,颗粒的平均速度峰值及达到峰值平均速度所需的时间,图7为M2~M4三组滑体模型运动

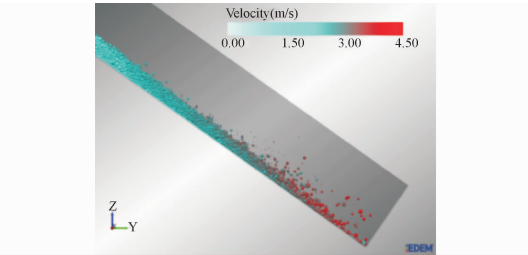


图6 滑体M2冲击挡墙前侧面图  
Fig.6 Side view of the impact moment of M2

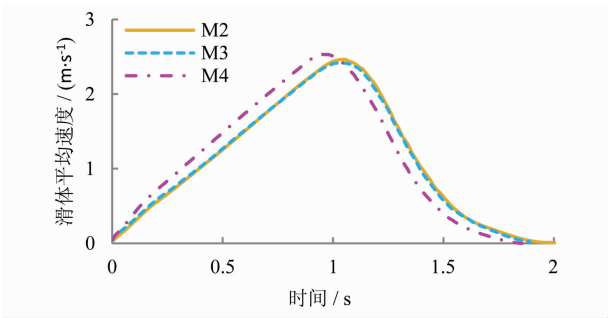


图7 控制粒径  $d_{60}$  一定时各滑体模型平均速度时程曲线  
Fig.7 Time histories of the average particle velocity for samples M2 – M4

速度随时间的变化曲线,0时刻为滑坡运动触发时刻。表5及图7表明,控制粒径  $d_{60}$  一定的情况下,各组滑体模型平均速度峰值及达到峰值的时间相近,M2与M3曲线重合度较高,然而对于细小碎屑颗粒含量较高的M4,其滑体平均速度峰值较大,且达到峰值速度所需时间短。表明细小碎屑颗粒会提高滑体的运移速度,大块石含量对滑体运动速度影响不大。

M1、M2和M5的试验结果如表5及图8所示,控制粒径  $d_{60}$  不同的情况下,滑体颗粒平均速度峰值随着  $d_{60}$  尺寸的增大而增大,达到峰值速度所需时间随着  $d_{60}$  尺寸的增大而减小。滑体模型M5控制粒径  $d_{60}$  尺寸最大,其滑体平均速度峰值最大,达到峰值平均速度用时最短。

表5 各组滑体模型最大平均速度及达到峰值所需时间  
Tab.5 Maximum average velocities of the samples

滑体模型	M1	M2	M3	M4	M5
平均速度峰值/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	2.098	2.464	2.418	2.531	2.623
达到峰值速度所需时间/s	1.089	1.048	1.043	0.976	1.008

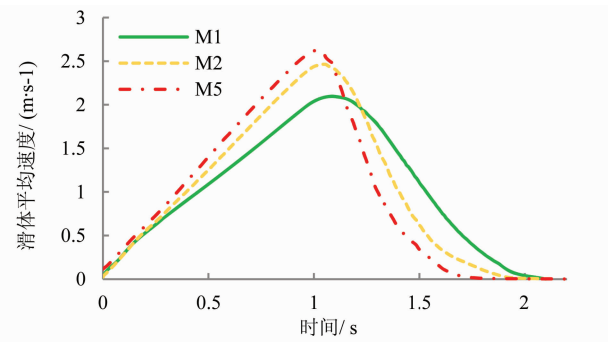


图8 控制粒径  $d_{60}$  不同时各滑体模型平均速度时程曲线  
Fig.8 Time histories of the average particle velocity for samples M1, M2 and M5

### 3.3 颗粒级配对冲击力的影响

控制粒径  $d_{60}$  一定的情况下,虽然小粒径碎屑有利于降低滑体与地面间的有效正应力,大大减小碎屑流受到地面的摩擦力,导致 M4 滑体运动速度略大于 M2 和 M3,但小粒径颗粒比表面积大,滑体颗粒之间的有效摩擦增加,导致颗粒之间的能量耗散严重,颗粒间的能量传递效应减小<sup>[22]</sup>。控制粒径  $d_{60}$  一定时,提取挡墙所受冲击力数值模拟结果如表 6 及图 9 所示。对比 M2 和 M3 试验结果可知,由于 M3 中大粒径块石含量较 M2 多,导致 M3 曲线波动性大,滑体冲击力峰值大。而滑体 M4 在运动过程中,大粒径块石被大量碎屑颗粒包裹,仅在运动触发不久时有少量大块石飞跃分离,对应其时程曲线中的一次剧烈波动,滑体所得冲击力峰值最小,曲线波动性小。试验结果表明,滑坡碎屑流中大粒径块石会增加滑体冲击力,而小粒径碎屑物会加剧滑体内部能量耗损,限制滑体离散性,削弱滑体冲击力。

M1、M2 和 M5 的试验结果如表 6 及图 10 所示,控制粒径  $d_{60}$  不同的情况下,滑体最大冲击力随着  $d_{60}$  尺寸的增大而显著增大。滑体模型 M5 控制粒径  $d_{60}$  尺寸最大,其冲击力时程曲线波动剧烈,形象地描述了前缘粗大块石不断撞击挡墙以及后续颗粒碰撞前缘堆积体而间接冲击挡墙的能量传递行为,在前缘堆积体重力分量及滑体内部充分的能量传递作用下,该组滑体峰值冲击力最大。滑体模型 M1 控制粒径  $d_{60}$  尺寸最小,颗粒间摩擦耗能严重,滑体对挡墙的冲击作用更多地表现为挡墙前堆积颗粒的重力分量积累作用,颗粒间的碰撞作用相对小,其冲击力时程曲线波动性小,峰值冲击力最小。

表 6 组滑体模型最大冲击力

Tab. 6 Maximum impact forces of the samples

滑体模型	M1	M2	M3	M4	M5
最大冲击力/N	151.591	221.661	336.637	188.061	479.209

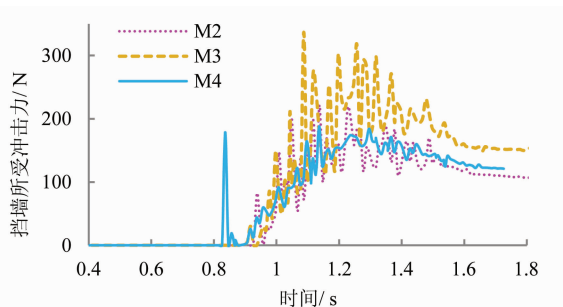


图 9 控制粒径  $d_{60}$  一定时各滑体模型冲击力时程曲线

Fig. 9 Time histories of the impact force for samples M2 - M4

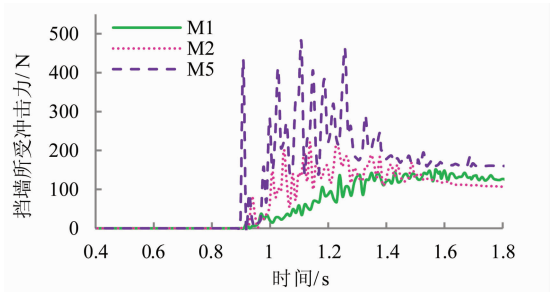


图 10 控制粒径  $d_{60}$  不同时各滑体模型冲击力时程曲线

Fig. 10 Time histories of the impact force for samples M1, M2 and M5

## 4 岩土体颗粒级配影响机制讨论

通过对 5 种不同颗粒级配的滑体模型进行数值模拟试验,探讨岩土体颗粒级配对滑坡碎屑流运动堆积特征及冲击作用的影响机制如下:

对于控制粒径相同,而颗粒级配不同的初始滑体,细小碎屑颗粒作为流体在运动筛分的过程中运移至滑体底部,导致滑坡碎屑流与地面的有效正应力减小,摩擦阻力降低,故细小碎屑颗粒会增大滑体动能,滑体动能最终将转化为对挡墙的冲击能和内部能量的耗散,然而细小碎屑颗粒比表面积大,显著增大了颗粒之间的接触面积,导致滑体内部能量耗散严重,颗粒间的能量传递效应减小。而大粒径块石动能大,比表面积小,摩擦耗能少,在内部能量传递的显著作用下,在与挡墙接触碰撞的过程中,将动能转化为冲击能释放给挡墙,故大粒径块石会增大滑体冲击力。

对于控制粒径不同的滑体模型,初始滑体质量相同,控制粒径尺寸越小,颗粒数量越多,在运动过程中相互接触的次数越多,碎屑颗粒之间相互摩擦碰撞消耗的能量越大,在宏观上表现为流动性减小,平均速度峰值及冲击力峰值减小。反之均增大。

各组滑体模型运动过程中颗粒反序分离现象显著,大粒径颗粒在消散压力<sup>[3,4,19]</sup>的作用下向滑体表层运动,细小碎屑颗粒在运动筛分过程中向底板运移。颗粒反序分离导致颗粒之间的有效应力减小,滑体流动性增加;运移至滑体底部的小粒径碎屑物质导致滑体与底板间的摩擦阻力降低<sup>[20]</sup>,促使滑体动能增加,同时,滑体获得更大的冲击破坏能量。

## 5 结论

本文以控制粒径  $d_{60}$  为参数指标,在进行了模型

试验与数值模拟的对比验证之后,通过三维离散元素法研究了颗粒级配对滑坡碎屑流堆积形态、运动速度及冲击力等动力学特征的影响,得出主要结论如下:

1)不同颗粒级配的滑体模型运移堆积过程中均呈现出显著的颗粒反序特性,粒径较大的块石主要分布在堆积物的表面及前缘,而粒径较小的滑体颗粒等分布于堆积体的中下部位;

2)对于控制粒径相同,而颗粒级配不同的初始滑体,各组滑体模型测得堆积长度与堆积高度相似,大块石及碎屑物质对滑体堆积形态影响较小。对于控制粒径不同的初始滑体,堆积体长度随着  $d_{60}$  尺寸的增大而减小,堆积体高度随着  $d_{60}$  尺寸的增大而增大,  $d_{60}$  尺寸越大,滑体流动性越强;

3)对于控制粒径相同,而颗粒级配不同的初始滑体,细小碎屑颗粒会提高滑体的运移速度,大块石含量对滑体运动速度影响不大。对于控制粒径不同的初始滑体,滑体平均速度峰值随着  $d_{60}$  尺寸的增大而增大,达到峰值速度所需时间随着  $d_{60}$  尺寸的增大而减小;

4)对于控制粒径相同,而颗粒级配不同的初始滑体,大粒径块石会增大滑体冲击力,而小粒径碎屑物会限制滑体离散性,削弱滑体冲击力。对于控制粒径不同的初始滑体,滑体最大冲击力随着  $d_{60}$  尺寸的增大而显著增大。

5)岩土体颗粒级配对滑坡碎屑流冲击作用的影响机制在于:细小碎屑物质的反序现象会减小碎屑流滑动面的摩擦力,增大滑体冲击挡墙前的动能,而其显著的摩擦耗能作用加剧了滑体内部的能量耗损,缩减了滑体的冲击能量;粗大块石促进了滑体内部的能量传递,在与挡墙接触碰撞的过程中,将动能转化为冲击能释放给挡墙,增大滑体冲击力。

## 参考文献 (References)

- [1] FAN Xiaoyi, TIAN Shujun, ZHANG Youyi. Mass-front velocity of dry granular flows influenced by the angle of the slope to the runout plane and particle size gradation[J]. Journal of Mountain Science, 2016, **13**(2): 234–245.
- [2] 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): 249–260.
- [3] ZHOU G G D, NG C W W. Numerical investigation of reverse segregation in debris flows by DEM[J]. Granular Matter, 2010, **12**(5): 507–516.
- [4] 郝明辉,许强,杨国兴,等. 高速滑坡-碎屑流颗粒反序试验及其成因机制探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(3):

- 472–479. [HAO Minghui, XU Qiang, YANG Xingguo, et al. Physical modeling tests on inverse grading of particles in high speed landslide debris[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(3): 472–479.]
- [5] 郝明辉,许强,杨磊,等. 滑坡-碎屑流物理模型试验及运动机制探讨[J]. 岩土力学, 2014, **35**(S1): 127–132. [HAO Minghui, XU Qiang, YANG Lei, et al. Physical modeling and movement mechanism of landslide-debris avalanches[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(S1): 127–132.]
- [6] JIANG Yuanjun, 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.
- [7] SALCIARINI D, TAMAGNINI C, CONVERSINI P. Discrete element modeling of debris-avalanche impact on earthfill barriers[J]. Physics & Chemistry of the Earth, 2010, **35**(3–5): 172–181.
- [8] MORIGUCHI S, BORJA R I, YASHIMA A, et al. Estimating the impact force generated by granular flow on a rigid obstruction[J]. Acta Geotechnica, 2009, **4**(1): 57–71.
- [9] WANG Shengnian, SHI Chong, XU Weiya, et al. Estimation of Landslide Impact Disaster by Discrete Element Method: Jiangping Hydropower Station, Hubei, China[M]// Landslide science for a safer geoenvironment. Springer International Publishing, 2014: 669–678.
- [10] 程谦恭,胡厚田,胡广韬等. 高速岩质滑坡撞击弹落冲击夯实成坝的动力学机理[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, **19**(1): 43–46. [CHENG Qiangong, HU Houtian, HU Guangtao, et al. On the dynamic mechanism of disintegration colliding and shock damming by highspeed rocky landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, **19**(1): 43–46.]
- [11] 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2010: 1–10. [HU Guoming. Analysis and simulation of granular system by discrete element method using EDEM[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2010: 1–10.]
- [12] 徐小敏,凌道盛,陈云敏,等. 基于线性接触模型的颗粒材料细-宏观弹性常数相关关系研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(7): 991–998. [XU Xiaomin, LING Daosheng, CHEN Yunmin, et al. Correlation of microscopic and macroscopic elastic constants of granular materials based on linear contact model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **32**(7): 991–998.]
- [13] 韩燕龙,贾富国,唐玉荣,等. 颗粒滚动摩擦系数对堆积特性的影响[J]. 物理学报, 2014, **63**(17): 165–171. [HAN Yanlong, JIA Fuguo, TANG Yurong, et al. Influence of granular coefficient of rolling friction on accumulation characteristics[J]. Acta Physica Sinica, 2014, **63**(17): 165–171.]
- [14] BENJY M, PIERRE R, ITAI E. Grainsize dynamics of polydisperse granular segregation down inclined planes[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2012, **690**(1): 499–511.
- [15] PHILLIPS J C, HOGG A J, KERSWELL R R, et al. Enhanced mobility of granular mixtures of fine and coarse particles[J]. Earth & Planetary Science Letters, 2006, **246**(3–4): 466–480.

- [16] LINARESGUERRERO E, GOUJON C, ZENIT R. Increased mobility of bidisperse granular avalanches [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2007, **593**: 475 – 504.
- [17] MORO F, FAUG T, BELLOT H, et al. Large mobility of dry snow avalanches: Insights from small-scale laboratory tests on granular avalanches of bidisperse materials [J]. *Cold Regions Science & Technology*, 2010, **62**(1): 55 – 66.
- [18] KOKELAAR B P, GRAHAMA R L, GRAY J M N T, et al. Fine-grained linings of leveed channels facilitate runout of granular flows [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2014, **385**(1): 172 – 180.
- [19] 王玉峰, 程谦恭, 朱圻. 汶川地震触发高速远程滑坡 – 碎屑流堆积反粒序特征及机制分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, **31**(6): 1089 – 1106. [WANG Yufeng, CHENG Qiangong, ZHU Qi. Inverse grading analysis of deposit from rock avalanches triggered by Wenchuan earthquake [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, **31**(6): 1089 – 1106.]
- [20] 张明, 王正波, 孙琳. 滑坡碎屑流高速远程机制环剪试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, **35**(S1): 2673 – 2681. [ZHANG Ming, WANG Zhengbo, SUN Lin. Research on rapid and long-runout mechanisms of rockslide debris using ring shear tests [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, **35**(S1): 2673 – 2681.]
- [21] 王品, 徐则民. 头寨大型高速远程滑坡碎屑流堆积体的粒度组成[J]. *山地学报*, 2013, **31**(6): 745 – 752. [WANG Pin, XU Zemin. The grain size composition of Touzhai rock—avalanche deposits[J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, **31**(6): 745 – 752.]
- [22] 樊晓一, 李天话, 田述军, 等. 未完全受阻地震滑坡运动距离的影响因素及机制分析[J]. *地震地质*, 2017, **39**(4): 754 – 767. [FAN Xiaoyi, LI Tianhua, TIAN Shujun, et al. Controlling factors and mechanisms of incomplete obstruction seismic landslide mobility[J]. *Seismology and Geology*, 2017, **39**(4): 754 – 767.]
- [23] 樊晓一, 田述军, 段晓冬, 等. 地形因子对坡脚型地震滑坡运动参数的影响研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, **33**(S2): 4056 – 4066. [FAN Xiaoyi, TIAN Shujun, DUAN Xiaodong, et al. Study of topography factors influence on motion parameters for seismic slope-toe landslides[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, **33**(S2): 4056 – 4066.]
- [24] 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 Yue, LIU Dongsheng, LI Mingjun. 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.]
- [25] 吴越, 刘东升, 李硕洋. 基于滑体与受灾体共同作用的冲击能计算模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, **31**(S1): 2636 – 2643. [WU Yue, LIU Dongsheng, LI Shuoyang. Calculation model of impact energy based on interaction of landslide mass and disaster-affected bodies[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, **31**(S1): 2636 – 2643.]

## Influence of Gradation on the Impact Effect of Landslide Debris Flow

LI Tianhua<sup>1</sup>, FAN Xiaoyi<sup>1</sup>, JIANG Yuanjun<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

2. Institute of Mountain Hazard and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** The movement, accumulation, impact of a mobilized landslide debris flow associated with other factors would determine the degree of damage, and its component particles with varied sizes and compositions during the movement involve internal collision, friction, and jumping, etc., therefore governing the geohazard potential level. Accordingly, it is of great scientific significance to determine the dynamic characteristics and impact force of landslide debris flow in different gradation for structural design of architecture in mountainous area and the planning and prevention work of landslide disaster. By using a three-dimensional discrete element method and comparing with model tests, in this research it took the control grain size ( $d_{60}$ ) as input and investigated the influence of rock-soil mass with varied grading on the dynamic characteristics such as deposition form, velocity and impact force of landslide debris flow. The results of existing studies suggested that all the processes of migration and accumulation of landslide debris flows simulated by sliding models exhibited significant particle segregation phenomenon, which eventually led to the inverse grading form of landslide deposits. For the initial sliding body with the same control particle size but different grain compositions, although the deposition forms were generally similar, the fine particles



actually increased the velocity of the sliding body while the large grains increased the impact force of the sliding body; Under different control particle sizes, the larger the control particle size for a sliding body, it had the stronger flowability, and similarly the greater the average velocity, the higher the peak impact force. It can conclude that the segregation of fine particles compositions would increase the kinetic energy of a sliding body, while its frictional energy dissipation would significantly reduce the impact energy of landslide debris flow. The collision and segregation of coarse grains compositions could promote the energy transfer inside the sliding body and increase the impact force of landslide debris flow.

**Key words:** landslide debris flow; particle gradation; inverse grading; impact force