

滑源区粒序分布及颗粒粒径对碎屑流冲击作用的影响研究

张志东, 樊晓一, 姜元俊

Particle sequence distribution and the effect of particle size on the impact effect in a fluidized landslide-debris flow

ZHANG Zhidong, FAN Xiaoyi, and JIANG Yuanjun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202001005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

滑坡碎屑流冲击拦挡结构的离散元模拟

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

张睿骁, 樊晓一, 姜元俊 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 148-148

滑坡-碎屑流冲击导引结构的离散元模拟

Discrete element simulation of the landslide-debris flow impact guiding structure

张睿骁, 樊晓一, 姜元俊, 杨海龙 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 161-168

基于颗粒识别分析系统的碎屑流堆积物颗粒识别和统计方法研究

Particle identification and statistical methods of a rock avalanche accumulation body based on the particle analysis system

陈达, 许强, 郑光, 彭双麒, 王卓, 何攀 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 60-69

颗粒形状对粗粒土剪切变形影响的细观研究

A meso-scale study of the influence of particle shape on shear deformation of coarse-grained soil

魏婕, 魏玉峰, 黄鑫 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 114-122

四川茂县新磨村高位滑坡铲刮作用分析

An analysis of the entrainment of the Xinmo high-position landslide in Maoxian county, Sichuan

张涛, 杨志华, 张永双, 陈亮, 吴瑞安 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 138-138

地形因子对偏转型滑坡-碎屑流运动参数的影响

Influence of terrain factors on the motion parameters of the turning-type landslide-debris flow

杨海龙, 樊晓一, 裴向军, 裴钻 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 129-129



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202001005

滑源区粒序分布及颗粒粒径对碎屑流冲击作用的影响研究

张志东¹, 樊晓一^{1,2}, 姜元俊³

(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: 滑体的运动速度、堆积形态、冲击力等因素决定了碎屑流的致灾程度。滑源区不同岩性特征和结构分布的差异导致了滑体粒序分布和颗粒粒径的差异。在运动过程中产生的碰撞、摩擦、跳跃, 影响着滑坡碎屑流的致灾程度。在物理模型试验的基础上, 运用三维离散元软件 PFC^{3D}, 探究滑源区粒序分布及颗粒粒径对滑体运动速度、堆积形态、冲击力的影响。研究表明: 碎屑流中各粒径颗粒的平均速度受颗粒粒径及滑源区初始粒序的共同影响, 且初始粒序对各颗粒平均速度影响更大; 在堆积形态方面, 粒径大小对厚度方向上的粒序排布影响较大, 而滑源区粒序分布对单颗粒的堆积形态影响较大; 在颗粒分选作用下, 颗粒粒径成为控制峰值冲击力的主要因素, 而滑源区粒序分布则通过决定滑体堆积形态控制了准静态堆积阶段碎屑流的冲击力。

关键词: 滑坡碎屑流; 粒序分布; 粒径; 冲击力; PFC^{3D}

中图分类号: P646.22; TU432

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)01-0049-11

Particle sequence distribution and the effect of particle size on the impact effect in a fluidized landslide-debris flow

ZHANG Zhidong¹, FAN Xiaoyi^{1,2}, JIANG Yuanjun³

(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 621000, China; 3. Institute of Mountain Hazard and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: The severity of a landslide-debris flow is determined by such factors as the speed, deposition morphology and impact force of the sliding body. Differences in the lithological characteristics and structural distribution of the sliding source area lead to differences in the particle order distribution and particle size of the sliding body. During the movement, the collision, friction, and jumping between the particles affect the degree of hazard of the landslide-debris flow. Based on the physical model test, the dimensional discrete element software PFC^{3D} is used to explore the influence of the particle order distribution and particle size on the speed, stacking morphology and impact force. The results show that the average velocity of particles in the debris flow is affected by both the particle size and the initial particle order in the slip source region, and the initial particle order has a greater effect on the average velocity of particles. The particle size has a greater effect on the particle order

收稿日期: 2020-01-02; 修订日期: 2020-06-02

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(41877524); 工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室开放基金项目资助(18kfjk10)

第一作者: 张志东(1994-), 男, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程、地质灾害防治。E-mail: 591013567@qq.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教学与研究工作。E-mail: xyfan1003@126.com

arrangement in the thickness direction, while the particle order distribution in the slip source area has a greater effect on the deposition morphology. Under the effect of particle-size segregation, the particle size becomes the main factor controlling the peak impact force and the slip source. The particle sequence distribution in the slip source area determines the accumulation morphology, which controls the impact force of the debris flow in the quasi-static accumulation stage.

Keywords: landslide-debris flow; particle order distribution; particle-size; impact force; PFC^{3D}

滑坡碎屑流是我国山区常见的地质灾害,具有突发性高、破坏性强的特点,严重威胁着山区的交通工程、建筑安全,其致灾机制和防治措施是山区工程建及设防灾减灾需要解决的关键问题。滑坡碎屑流的颗粒粒序分布和粒径是影响其致灾速度、拦挡堆积和冲击力分布的重要因素。滑源区岩体性质的差异及结构分布控制了滑坡碎屑流运动过程中的粒径大小和运动分布。一般而言,强度高的坚硬岩体在运动过程中,破碎程度较低,易形成大粒径块体;强度低的软岩体在运动过程中颗粒破碎程度高,易形成小粒径块体;而介于之间的较硬岩体易形成中等粒径的块体。此外,处于不同地层的岩体,其内部结构的差异同样会造成破碎程度的差异。因此,明确滑源区粒序分布及颗粒粒径对滑坡碎屑流冲击作用的影响,对滑坡碎屑流的预防与治理及建筑结构的设计与规划具有重要的科学意义。

由于碎屑流内部不同粒径大小的颗粒其物理力学性质存在差异,粗大颗粒的碰撞分离有利于块体之间的能量传递^[1-3],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,并使得碎屑流速度进一步提升^[4]。此外,大、小粒径颗粒的含量、粒径差还会影响颗粒的分选程度及堆积形态^[5-7];碎屑流的粒序排布可分为正粒序、反粒序和混杂粒序 3 种,部分研究结果表明,不同的初始粒序排布会通过不同颗粒分选模式造成不同的冲击效应,并塑造出不同的反粒序堆积形态^[8]。因此滑坡碎屑流岩土体粒径大小及粒序分布制约着滑体的运动特征,影响了滑体的冲击作用,决定了碎屑流的致灾程度。不同粒径大小及粒序分布的岩土体,其运动过程中的速度-时程分布与演化、堆积形态及长度、深度分布特征和冲击力等因素关系到碎屑流致灾机制的研究。

虽然运用能量传递理论^[1-3]、振动筛分假说^[9-10]、颗粒分选效应^[11-13]的理论模型能较为合理地解释碎屑流运动特征及冲击作用,物理模型试验研究^[14-16]

及数值模拟研究^[17-20]也基本还原、验证了实际碎屑流的运动及冲击参数,但现有研究对不同岩性结构和组合控制的颗粒粒径及滑源区初始粒序分布对滑体运动和冲击作用影响的探讨较少。本文在物理模型试验^[14]的基础上。运用离散元软件 PFC^{3D} 建立颗粒、滑槽与挡墙的数值模型,在取得物理模型验证的基础上,探究滑源区粒序分布及颗粒粒径对碎屑流冲击作用的影响,为滑坡碎屑流预防与治理、建筑设计结构与规划提供理论参考。

1 三维离散元模型

1.1 模型建立

如图 1 所示,碎屑流底板长 2.7 m,滑槽宽 0.3 m,高 0.35 m,挡墙与滑槽等高,滑源区设置料槽,长 0.44 m,高 0.2 m,宽 0.3 m,料槽前设置激发门,距挡墙 2.19 m,滑槽倾角 30°。

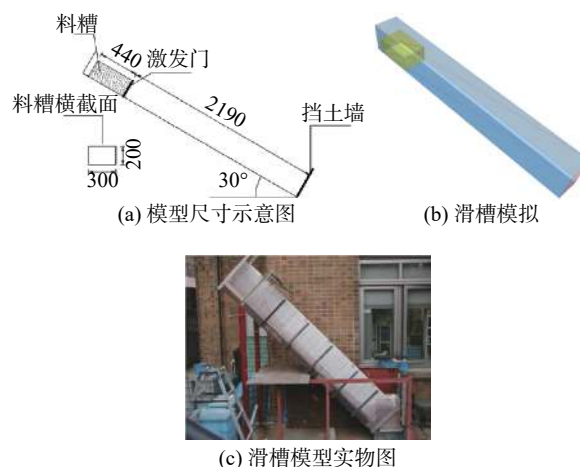


图 1 滑槽模型示意图(单位:mm)

Fig. 1 Sketch of the flume model (mm)

本文选用整体质量相等的 Large 颗粒、Mid 颗粒与 Small 颗粒,分别模拟粒径为 40 mm、20 mm 与 10 mm 的大、中、小碎屑流颗粒。结合实际滑坡中滑源区不同位置的不同岩性^[21-23](图 2)及同一岩性地层的不同内部构造(如整体状结构、块状结构、碎裂状结构、散

体状结构等), 考虑不同地层岩土体破碎时块体颗粒粒径大小(硬岩破碎时易形成大粒径颗粒、软岩易形成小粒径颗粒), 设置 7 组碎屑流初始堆积体的粒序分布(表 1), 设置不同粒序分布的初始堆积体(图 3)。

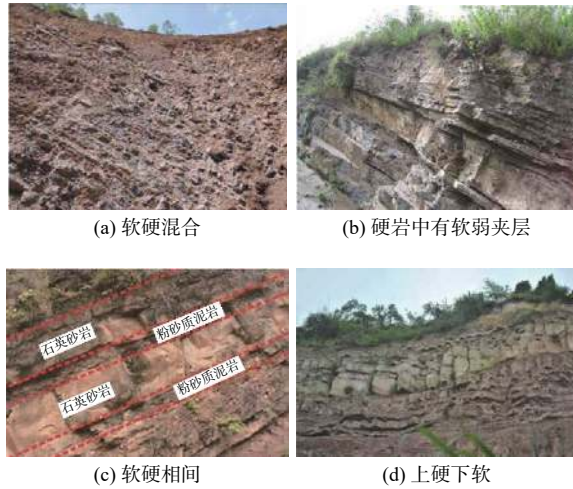


图 2 滑源区不同位置处的岩性

Fig. 2 Different lithologies in the slip source area

表 1 数值模拟中岩土样粒经分布

Table 1 Gradation composition of the samples in the numerical simulation

工况	粒径颗粒质量占比/%			初始粒序分布 (沿侧板自上而下)
	Large 10 mm	Mid 20 mm	Small 40 mm	
MIX				Mixture(混杂粒序)
LMS				L-M-S
LSM				L-S-M
MLS				M-L-S
MSL	33	33	34	M-S-L
SLM				S-L-M
SML				S-M-L

表 2 模拟参数

Table 2 Parameters used in the model

参数	颗粒	底板	挡板
密度/(kg·m ⁻³)	1969	-	-
泊松比	0.2	0.3	0.3
剪切模量/MPa	200	320	1 000
摩擦系数	1.327	0.453	0.364
法向黏性阻尼	0.60	-	-
切向黏性阻尼	0.07	-	-

基本本征参数主要包括: 剪切模量、泊松比、摩擦系数、密度和法向、切向黏性阻尼比。

离散元模拟中, 泊松比、剪切模量和密度(真实密度)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, 改变滑体粒序和粒径不会影响材料属性, 可直接用于数值模拟, 故基于模型试验及计算结果, 确定其参数(表 2)。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值, 和表面粗糙度有关, 由于实验中真实颗粒的不规则形状与数值模拟中球形外形存在差异, 使得通过实验测得的摩擦系数不能直接用于数值模拟中, 故需通过多次调试数值模拟中的摩擦系数, 以使模拟结果与模型试验结果吻合, 黏性阻尼相当于在颗粒法向上添加的弹簧, 切向上添加阻尼器, 其值主要反映颗粒碰撞、摩擦时引起的能量耗散。根据试验计算得到的法向黏性阻尼为 0.16, 切向黏性阻尼为 0.07。由于模拟颗粒为规则球形, 导致与实际颗粒相比碰撞较少, 能量损耗不足, 故通过适当增大黏性阻尼的方式增大颗粒流内部的耗能, 为此通过多次调试并对比模型试验结果确定法向阻尼为 0.60, 切向阻尼为 0.07。

2 模型验证

鉴于模型试验中的颗粒级配较为连续, 运用筛分的方式无法单独分离出粒径单一的 Large、Mid、Small 颗粒, 故在模型试验中以不同粒径范围内的颗粒分别表示 Large、Mid、Small 颗粒(以 1 ~ 10 mm 的颗粒为 Small 颗粒, 10 ~ 20 mm 的颗粒为 Mid 颗粒、20 ~ 40 mm 颗粒为 Large 颗粒)。表 3 及图 4 记录了模型试验中滑体的 3 组级配分布。在相同颗粒级配、滑槽坡度条件下, 通过还原模型试验全过程, 对模型试验与数值模拟的运动过程、冲击力变化规律进行比对分析, 验证数值模拟所取参数的可靠性, 为下一步运用数值模拟探究滑源区粒序分布对碎屑流不同粒径颗粒冲击作用机理研究提供依据。

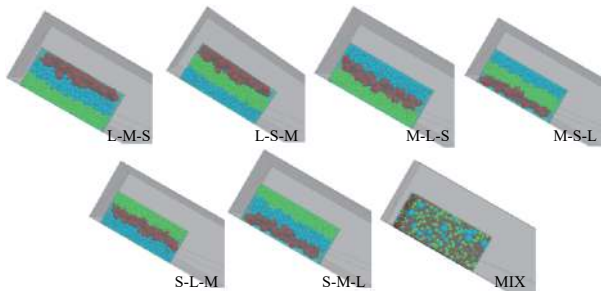


图 3 各工况初始堆积体粒序分布图

Fig. 3 Grain order distribution of the primary deposits under different working conditions

1.2 参数标定

本文采用 PFC^{3D} 软件中的 Hertz-Mindlin 模型对滑槽实验进行数值模拟, 在 Hertz-Mindlin 模型中材料的

表 3 模型试验岩土样级配组成

Table 3 Gradation compositions of the samples in the model test

滑体模型	颗粒粒径/mm		
	1 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 30
M1	90%	5%	5%
M2	5%	90%	5%
M3	5%	5%	90%

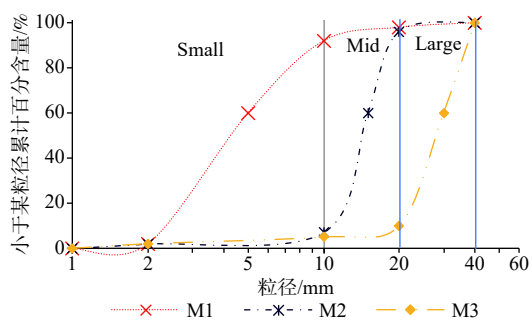


图 4 滑体模型试验级配曲线

Fig. 4 Curve of gradation of the samples

以滑体模型 M2(颗粒见图 5)为例,图 6 为坡度为 30°、35°、45°时数值模拟与模型试验的颗粒堆积形态的对比,可见模拟结果与实验结果吻合较好。数值模拟与模型试验的冲击力曲线(图 7)同样较为接近(最大误差不超过 8%)进一步证实了参数的可靠性。

3 颗粒粒径及滑源区粒序分布对碎屑流运动特征的影响

3.1 对碎屑流运动速度的影响

3.1.1 颗粒粒径对碎屑流平均速度的影响

在初始时刻, MIX 工况条件下 3 种颗粒在空间位置上的分布均服从高斯函数,这导致 3 种颗粒整体的重心位置相同,从而使得颗粒的不同初始粒序分布对速度造成的影响可以忽略不计,故可得到颗粒粒径这一单一因素对平均速度的影响。如图 8 所示,3 种颗粒平均速度的变化规律是一致的,均为先增大后减小,这反映出 3 种颗粒相似的运动过程,即颗粒先在



图 5 M2 级配颗粒材料

Fig. 5 Grain material of the M2 grade

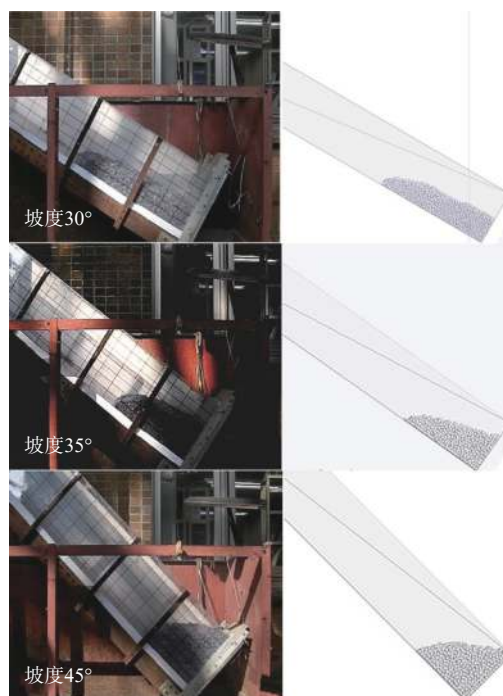


图 6 不同坡度模型试验与数值模拟的颗粒堆积形态对比

Fig. 6 Comparison of the deposition forms between the numerical simulation and model test under different slopes

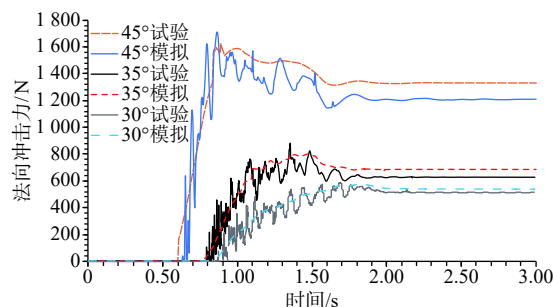


图 7 不同坡度下数值模拟与模型试验冲击力对比

Fig. 7 Comparison of impact force between the numerical simulation and model test under different slopes

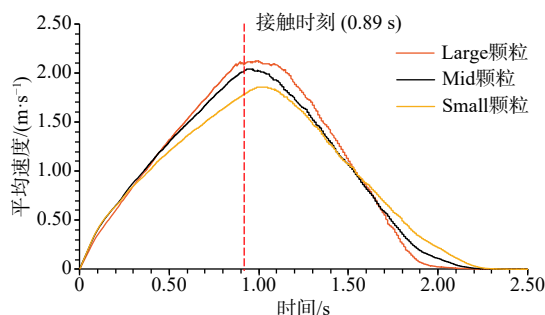


图 8 MIX 工况下不同粒径颗粒的平均速度历程曲线

Fig. 8 Time-history curve of the average speed of particles with different particle sizes under the MIX conditions

重力的作用下做加速运动, 随着颗粒在滑槽上充分展开(图 9a), 平均速度逐渐达到最大, 而当颗粒在受到挡墙拦挡作用后速度逐渐减小并趋向 0。然而, 在碎屑流前缘与挡板接触的时刻, 颗粒的平均速度并未达到最大值(平均速度最大时碎屑流的运动状态见图 9b), 这是因为虽然碎屑流前缘已经受到挡墙的拦挡作用, 但碎屑流的中后缘仍然在做加速运动, 所以碎屑流的整体速度仍在增大, 即平均速度的峰值时刻要略微滞后于颗粒与挡墙发生接触的时刻。图 8 中, MIX 工况下 3 种颗粒的平均速度峰值及达到峰值的时刻对比表明: 大粒径颗粒的平均速度和峰值速度最大, 到达峰值时刻的历时最短, 且随着峰值速度的增大, 达到峰值所需的时间减少。

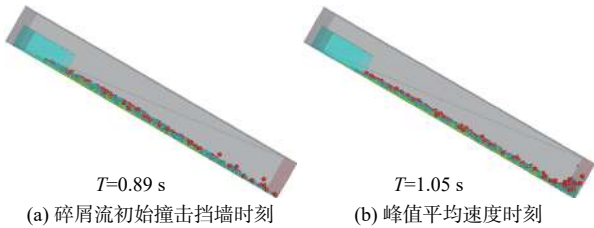


图 9 MIX 工况下不同时刻运动对比

Fig. 9 Movement comparison at different moments under the MIX conditions

3.1.2 初始粒序对碎屑流平均速度的影响

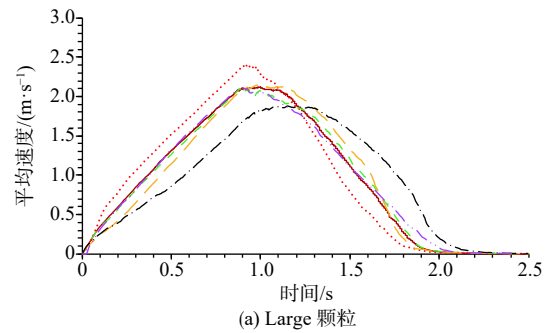
表 4、表 5 记录了 3 种不同颗粒在 7 种工况条件下颗粒平均速度峰值及达到峰值所需的时间。结合图 10, 对颗粒平均速度作对比可以发现: 颗粒初始空间分布会显著影响不同颗粒的平均速度峰值及其对应时间, 即某种颗粒初始分布位置越靠近堆积体的表层, 其平均速度的峰值越大, 达到峰值所需的时间越短。反之, 某种颗粒的初始分布位置越靠近底层, 平均速度的峰值越小, 达到峰值所需的时间越长。其原因在于: (1) 不同分布方式造成的重心位置不同(越靠近初始堆积体表层, 重心位置越高, 反之越低); (2) 位于表层的颗粒与内部颗粒接触面积较小, 使得其受到的摩擦力较小, 而位于底层的颗粒同时要与上部颗粒和下部滑道接触, 导致其受到的阻力较大。

表 4 不同工况下的平均速度峰值
Table 4 Average maximum speed
under different working conditions / (m·s⁻¹)

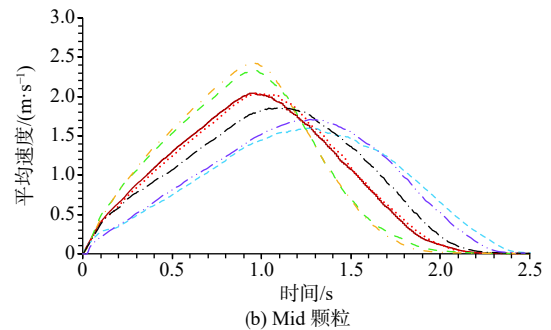
	MIX	LMS	LSM	MLS	MSL	SLM	SML
Large	2.12	2.40	2.37	2.14	2.11	2.13	1.88
Mid	2.04	2.04	1.60	2.33	2.42	1.71	1.85
Small	1.86	1.57	1.70	1.64	1.93	1.96	1.94

表 5 不同工况下平均速度峰值时刻
Table 5 Time of the average maximum speed
under different working conditions /s

	MIX	LMS	LSM	MLS	MSL	SLM	SML
Large	0.91	0.90	0.90	0.92	0.97	0.92	1.15
Mid	0.94	0.98	1.26	0.97	0.96	1.27	1.13
Small	1.01	1.19	1.08	1.25	1.11	1.01	0.99



(a) Large 颗粒



(b) Mid 颗粒

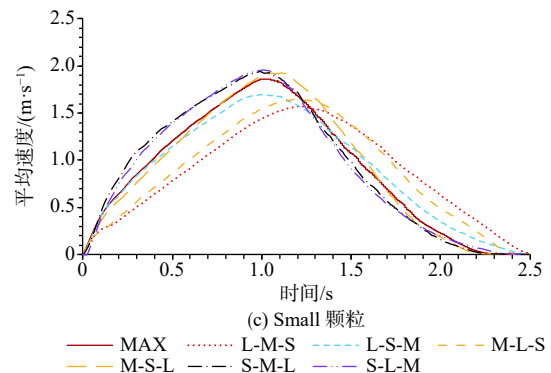


图 10 3 种颗粒在不同工况下的平均速度时程曲线

Fig. 10 Curve of the average speed vs time of three kinds of particles under different working conditions

3.1.3 初始粒序及颗粒粒径对碎屑流平均速度耦合影响

由前述可知, 3 种不同颗粒的平均速度受到颗粒粒径和滑源区粒序分布的共同作用。但两种因素的强弱关系仍需进一步讨论。如表 4 所示, 在非混合情况的 6 组工况条件下, LMS、LSM、MLS 工况中 3 种颗粒平均速度峰值与其相应的初始空间分布位置存在一一对应的关系。以 MLS 工况为例, 其初始粒序为:

Mid 颗粒在最上层, Small 颗粒位于最下层, Large 颗粒处在二者中间, 恰好与速度峰值的大小存在对应关系 ($V_{Mid} > V_{Large} > V_{Small}$); 而 MSL、SLM、SML 则不完全对应, 但仍然部分对应 (MSL 工况下 Mid 颗粒的平均速度峰值最大、SML 工况下 Small 颗粒的平均速度峰值最大, SLM 工况下 Small 颗粒的速度峰值仍然比 Mid 颗粒大)。而颗粒大小与最大平均速度的对应关系则较不明显 (除去工况 MIX)。

速度峰值的出现时刻如表 5 所示, LMS、LSM、MLS 3 组工况中 3 种颗粒平均速度峰值的出现时刻与其相应的初始空间分布位置也存在一一对应的关系, 以 LSM 工况为例, 其初始粒序为: Large 颗粒在最上层, Mid 颗粒位于最下层, Small 颗粒处在二者中间, 恰好与速度峰值出现时刻存在对应关系 ($T_{Mid} > T_{Small} > T_{Large}$)。而 MSL、SLM、SML 则不完全对应但仍部分对应。

综上, 碎屑流在运动过程中, 其速度峰值及峰值出现时间既受到颗粒粒径的控制, 又受滑源区粒径空间分布的影响, 且粒序分布起主要作用, 颗粒粒径起次要作用。故在碎屑流速度分析及相关研究方面, 应重点考虑粒序分布造成的影响。

3.2 对碎屑流堆积形态的影响

碎屑流的最终堆积形态可以从侧面反映出碎屑流在冲击挡墙过程中冲击作用的相关特性以及挡墙在承受冲击作用时的动力响应机制。表 6 记录了碎

屑流冲击挡墙后的侧面堆积形态。为避免二维视图造成的颗粒重叠, 对颗粒做半透明化处理 (透明度 70%), 并分别对 3 种颗粒进行单独监测, 从而更直观地显示 3 种颗粒在堆积体中的空间分布。从碎屑流的整体堆积形态看, LMS、LSM 工况下碎屑流堆积体的堆积长度较长, 堆积高度较低, 堆积体表面较平坦。相反, SLM、SML 工况条件下, 堆积体的堆积长度较短, 堆积高度较高, 堆积表面呈圆弧状。而 MLS、MSL 工况下堆积长度和高度与 SLM、SML 工况相似, 但其堆积表面轮廓呈不规则状, 即存在一个“偏转点” (图 11), 使得堆积体表面轮廓发生较大变化。而对某种单一颗粒在不同工况条件下的堆积形态进行对比观察发现: 碎屑流启动前, 若某种颗粒越靠近初始堆积体表面, 则冲击作用结束后其堆积形态越接近三角形 (图 12a), 平均堆积长度越短 (表 7)。相反, 若某种颗粒越靠近初始堆积体底面, 冲击完成后, 其堆积形态越接近长条形 (图 12b), 表面轮廓越接近拱形, 且平均堆积长度越长。这表明, 初始时刻不同粒径颗粒的分布位置和排布方式会造成不同的沿长度、高度方向的堆积粒序排布, 且区别于长度方向上堆积体粒序分布特征, 任何工况条件下, 不同颗粒在高度方向的分布皆严格遵循“上大下小”的反粒序分布规律 (表 8)。这表明沿高度 (厚度) 方向上的分选效应主要受粒径大小的影响, 而初始时刻堆积体的粒序分布对其影响较小。

表 6 碎屑流冲击挡墙后的侧面堆积形态 (侧视图)

Table 6 Side deposit shape after the impact on the parapet by the fluidized landslide-debris flow (side view)

	MIX	LMS	LSM	MLS	MSL	SLM	SML
全部颗粒							
Large 颗粒							
Mid 颗粒							
Small 颗粒							

3.3 对挡墙所受冲击力的影响

滑体冲击挡墙的过程可划分为动态冲击阶段和准静态堆积阶段^[8] (图 13、图 14)。

动态冲击过程中, 前缘滑体与挡墙直接碰撞接触

并堆积于挡墙底部, 后续滑体越过前缘堆积物继续冲击挡墙, 堆积体高度不断增加。准静态堆积阶段, 堆积体高度基本保持稳定, 挡墙所受冲击力主要为后续滑体颗粒重力分量的累积以及后续颗粒冲击能量的

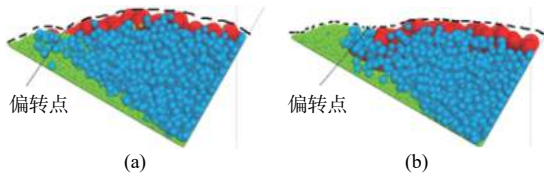


图 11 工况 MLS (a) 和 MSL (b) 下滑体堆积形态
Fig. 11 Deposit shape of the sample under the (a) MLS and (b) MSL working conditions

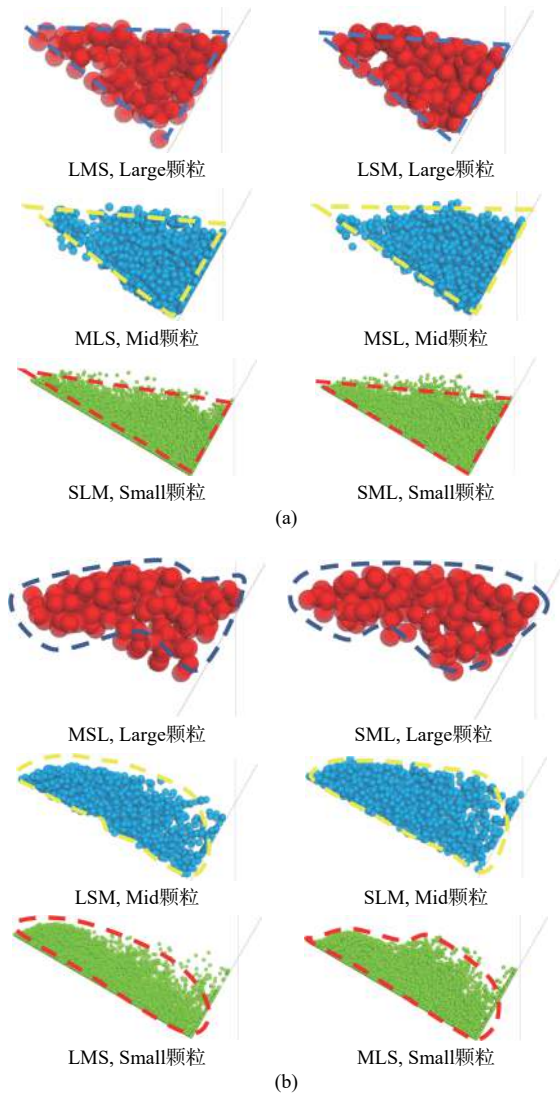


图 12 单颗粒靠近初始堆积体表面时 (a) 和底面时 (b) 不同工况下 3 组不同颗粒单粒的堆积形态
Fig. 12 Deposit shape of the three groups of different particles under different working conditions when the single particles close to (a) the surface and (b) the bottom of the initial accumulation body

碰撞传递。两种阶段冲击力的作用方式、挡墙的动力响应均有较大差异, 故应分开讨论。此外, 需要注意的是, 图 13 中数值模拟的冲击力曲线与图 7 中倾角 30° 的物理模型试验冲击力曲线有较大差异, 数值模拟

表 7 3 种颗粒的平均堆积长度
Table 7 Average deposit length of three kinds of particles /m

	MIX	LMS	LSM	MLS	MSL	SLM	SML
Large	0.214	0.180	0.167	0.210	0.219	0.205	0.231
Mid	0.193	0.184	0.266	0.150	0.160	0.253	0.202
Small	0.195	0.258	0.206	0.238	0.198	0.166	0.159

表 8 3 种颗粒的平均堆积高度
Table 8 Average deposit height of three kind of particles /m

	MIX	LMS	LSM	MLS	MSL	SLM	SML
Large	0.148	0.147	0.135	0.144	0.146	0.147	0.142
Mid	0.101	0.087	0.081	0.098	0.118	0.080	0.103
Small	0.043	0.037	0.041	0.037	0.040	0.048	0.053

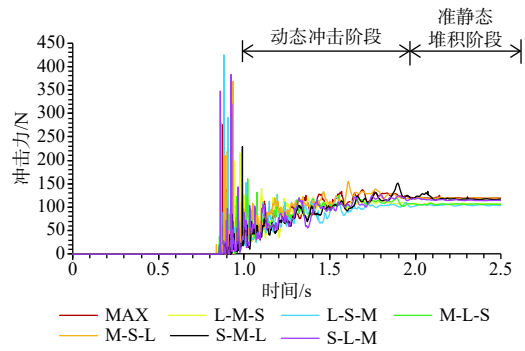


图 13 冲击挡墙阶段各工况冲击力时程曲线
Fig. 13 Time-history curves of the impact force under various working conditions during the impact retaining wall

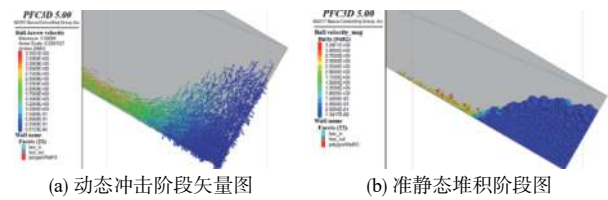


图 14 冲击力不同阶段示意图
Fig. 14 Schematic diagram of the impact force at different stages

的冲击力明显偏小, 这是因为数值模拟中的颗粒为 3 种单一粒径颗粒的有序排列。其相同粒径颗粒较多导致颗粒间的空隙较大, 滑体松散程度较高。相反, 模型试验采用连续的粒径级配曲线, 颗粒间的空隙较少, 滑体较密实。故而在同等体积下, 模型试验中较密实的滑体对挡墙造成了较大的冲击力。

3.3.1 动态冲击阶段

在动态冲击阶段, 衡量冲击力最重要的指标是冲击力峰值, 不同工况条件下各种颗粒的冲击力峰值及峰值对应的时刻如表 9、表 10 所示(图 15 为 3 种颗粒在不同工况条件下对挡墙的冲击力作用)。对比每组工况内 3 种颗粒整体冲击力峰值可知, 在颗粒质量相

同的条件下(表 1), 粒径较大的 Large 颗粒整体对挡墙的冲击力峰值明显高于其他两种颗粒。而对于 Mid 颗粒和 Small 颗粒, 二者整体冲击力峰值的大小关系则决于二者初始空间位置的相对分布(初始位置更靠近堆积体表面的颗粒, 其整体冲击力峰值更大)。这反映了颗粒粒径和初始堆积体粒序对碎屑流冲击力的共同作用, 且颗粒粒径的影响更大, 因为通过对 Large 颗粒和所有颗粒的整体峰值冲击力及峰值冲击力的出现时刻作对比可以发现, Large 颗粒与全部颗粒的整体峰值冲击力非常接近, 且出现时刻基本一致, 这体现了 Large 颗粒的整体峰值冲击力对碎屑流整体峰值冲击力的贡献。此外, 在不同工况条件之间, Large 颗粒和 Mid 颗粒的整体冲击力峰值未显示出明显的规律(表 9), 表明粒径较大的颗粒在不同初始粒序分布条件下, 其整体冲击力峰值具有一定随机性。而 Small 颗粒则仍然具备一定规律, 即初始分布位置越接近堆积体表面, 其整体冲击力峰值越大。

表 9 各颗粒的整体峰值冲击力
Table 9 The maximum impact force of each kind of particles /N

	MIX	LMS	LSM	MLS	MSL	SLM	SML
全部	276	216	425	161	370	383	229
Large	256	189	424	117	326	357	168
Mid	98	118	60	87	81	75	22
Small	84	55	75	32	65	121	107

表 10 各颗粒整体峰值冲击力作用时刻
Table 10 Time of the maximum impact force of each kind of particles /s

	MIX	LMS	LSM	MLS	MSL	SLM	SML
全部	0.8	0.97	0.88	1.02	0.93	0.92	0.91
Large	0.876	0.94	0.88	0.89	0.93	0.92	0.98
Mid	0.937	1.10	0.97	1.41	1.62	0.96	0.92
Small	1.69	0.92	1.31	1.21	1.61	0.96	1.89

为进一步量化分析颗粒粒径对碎屑流峰值冲击力的影响。对碎屑流峰值冲击力的贡献率进行统计(即碎屑流最大冲击力时刻, 各颗粒整体冲击力占总冲击力的百分比)。表 11 记录了各工况条件下不同粒径的粒组对碎屑流整体峰值冲击力的贡献率。Large 颗粒对碎屑流整体冲击力峰值的贡献率占据明显优势(均在 50% 以上, 且有 3 组超过 90%), 这表明粗大颗粒的瞬时撞击是造成峰值冲击力的主要原因, 而初始粒序对碎屑流峰值冲击力的影响较小, 且只能在中小颗粒中起作用(Mid 和 Small 颗粒中越靠近初始堆积体表面者, 其对峰值冲击力的贡献率越高)。

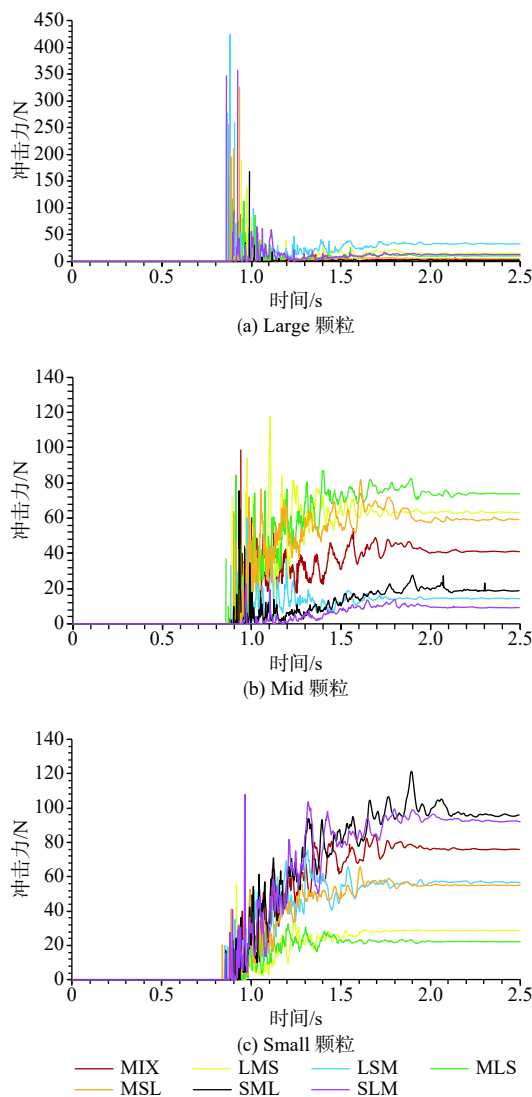


图 15 3 种颗粒在不同工况下的整体冲击力时程曲线
Fig. 15 Time-history curves of the impact force of three kinds of particles under different working conditions

表 11 3 种颗粒峰值冲击力在滑体峰值冲击力中的占比
Table 11 The maximum impact force of three kinds of particles as a percentage of the maximum impact force of the sliding body /%

	MIX	LMS	LSM	MLS	MSL	SLM	SML
Large	92.7	63.8	99.76	53.35	88.35	93.21	73.29
Mid	4.75	27.0	0.00	31.86	2.56	1.24	9.11
Small	2.50	9.2	0.24	14.78	9.09	5.55	17.60

3.3.2 准静态堆积阶段

在准静态堆积阶段, 碎屑流颗粒对挡墙的冲击力远小于峰值冲击力, 并基本保持稳定, 只在一定范围内作微小的上下波动。表 12 记录了碎屑流完全停积后(2.5 s)挡墙的受力情况, 能较好反映准静态堆积阶段挡墙的受力情况。

表 12 3 种颗粒准静态冲击力
Table 12 Quasi-static impact force of three kinds of particles /N

	MIX	LMS	LSM	MLS	MSL	SLM	SML
Large	2.3	14.9	32.8	10.3	4.8	13.3	2.4
Mid	41.0	63.2	14.3	73.8	59.1	8.8	18.7
Small	75.9	28.7	56.7	22.2	55.0	92.2	95.7

如表 12 和图 15 所示,不同工况之间同种颗粒的准静态冲击力呈现明显的规律性,即某种颗粒越靠近初始堆积体表面,其整体准静态冲击力越大。而在单一工况条件下,3 种颗粒间的准静态冲击力规律性不够明显,但总体呈现 Small 颗粒的整体静态冲击力较大, Large 颗粒的整体静态冲击力较小的规律,并且从 MIX 工况下静态冲击力的统计结果表明,颗粒粒径越小,其整体的准静态冲击力越大。

综上,在动态冲击阶段,控制峰值冲击力的主要因素为颗粒粒径,次要因素为初始堆积体粒序。相反,在准静态冲击阶段,控制某种粒径颗粒冲击力的主要因素为初始堆积体粒序,次要因素为颗粒的粒径。

4 讨论

通过对 7 种工况条件下的滑体模型进行数值模拟试验,探讨滑源区粒序分布及颗粒粒径对滑坡碎屑流运动堆积特征及冲击作用的影响机制。

对于滑源区粒序分布为混合粒序(MIX 工况)的初始滑体,碎屑流在运动过程中,大粒径颗粒整体在消散压力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,即颗粒分选效应。颗粒的分选效应使得顶部的大颗粒基本不与滑槽底面接触,而只在其底部与下部颗粒部分接触,导致大颗粒受到的摩擦阻力较小,运动速度较大,而较大的运动速度又结合较大的单位质量使得单个大颗粒获得极大的动能,进而在与挡墙碰撞时转化为碎屑流的峰值冲击力。相反,由于底部的细小颗粒既要与上部的较大颗粒接触,又与底面的滑槽接触,导致其受到的摩擦阻力较大,动能损耗较大,使得其对峰值冲击力的贡献较小。

对于滑源区粒序分布为规则粒序的初始滑体(内部颗粒存在明显分层现象的滑体)。不同的初始粒序起到了与颗粒分选相似的作用机制,即在颗粒运动初期,位于表层的颗粒由于受到的阻力较小,导致其达到的平均速度峰值较大;而位于底层的颗粒由于受到的阻力较大,导致其达到的平均速度峰值较小,这表

明滑源区上部的细小颗粒的平均速度峰值可能大于下部粗大颗粒(SML 工况、SLM 工况),但由于颗粒分选效应仍然存在,使大颗粒仍然有向碎屑流表层运动、小颗粒仍然有向碎屑流底层运动的趋势,即颗粒分选效应仍然会作用于滑体,并减弱滑源区粒序分布造成的“表层加速、底层减速”的效果,从而减小了大小颗粒之间的峰值速度差。因而导致了在不同滑源区粒序分布条件下,峰值冲击力仍由大粒径颗粒控制的现象,即在大小颗粒速度相差不大的情况下,颗粒粒径成为了峰值冲击力的主要控制条件。

由于滑源区初始粒序造成的速度差异,使得各种颗粒的堆积形态存在明显区别,即,处于滑源区上层的颗粒整体上由于平均速度较大,导致其在运动过程中处于碎屑流前端,并在冲击挡墙过程中受到后部其他颗粒的推挤、抬升,最终形成较为形状规则且长度较短的三角形。相反,处于滑源区下层的颗粒,由于平均速度较小,使得其在冲击挡墙过程中不断受到前缘颗粒的阻碍,使其速度进一步降低,动能减小,停积长度增加,最终形成表面存在一定弧度的拱形。而不同的堆积形态,又造成了不同的传力机制:三角形形状规则,长度较短,有利于冲击力的传递,导致位于滑源区表层的颗粒在准静态冲击阶段具有较大的冲击力。相反,拱形作为典型的承压结构,有利于冲击力的耗散,导致位于滑源区底层的颗粒在准静态冲击阶段具有较小的冲击力。

5 结论与建议

(1) 碎屑流中各粒径颗粒的平均速度受颗粒粒径及滑源区初始粒序的共同影响,且初始粒序对各颗粒平均速度影响更大。在初始粒序为混合分布条件下,受颗粒分选效应影响,粒径越大的颗粒其峰值平均速度越大,而在非混合粒序条件下,由于初始粒序对颗粒分选效应的影响,导致颗粒越靠近初始堆积体表面,其峰值速度越大。

(2) 碎屑流的最终堆积形态受初始堆积体粒序分布和粒径的共同影响。由于颗粒分选现象的存在,导致在厚度方向,粒径对堆积体堆积形状影响较大。而在长度方向,滑源区粒序分布通过控制碎屑流的速度大小,决定了堆积体的形状。

(3) 碎屑流对挡墙的冲击可分为动态冲击和准静态堆积两部分,在动态冲击阶段,受颗粒分选效应的影响,颗粒粒径是峰值冲击力的主要控制因素,即粒径越大,峰值冲击力越大。在准静态堆积阶段,初始

粒序起到了与颗粒分选相似的作用机制:促进了表层颗粒速度的增加而抑制了底层颗粒速度的增加,同时通过塑造堆积体形状,控制了准静态冲击力的大小。

(4)对于混合粒序的初始滑体,颗粒分选效应使得大粒径颗粒升至滑体表面,获得较大的速度和动能,最终转化为峰值冲击力;较小粒径颗粒沉至滑体底部,在内部剧烈摩擦作用下,获得较小速度和动能,使其对峰值冲击力的贡献较小。

(5)受限于试验材料和检测手段等客观因素,在模型验证方面未能通过模型试验完全还原数值模拟的相关内容,且未能将数值模拟所得的相关结论与同等模型试验的结论相印证。此外本次研究未能充分考虑滑动距离、更大颗粒粒径范围、实际地形条件等客观因素对颗粒分选机制的影响。

(6)进一步的工作已渐次开展,包括设计与数值模拟一致的模型试验、扩大滑体材料的粒径范围、在滑槽试验的基础上模拟实际地形条件下滑源区粒序分布及颗粒粒径对碎屑流冲击特性的影响等。

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 Qingqing, CAI Fei, UGAI Keizo, 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.
- [3] 葛云峰,周婷,霍少磊,等. 高速远程滑坡运动堆积过程中的能量传递机制[J]. *地球科学*, 2019, 44(11): 3939 - 3949. [GE Yunfeng, ZHOU Ting, HUO Shaolei, et al. Energy Transfer Mechanism during Movement and Accumulation of Rockslide Avalanche[J]. *Chinese Journal of Earth Science*, 2019, 44(11): 3939 - 3949. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 姚鑫,余凯,张永双,等. “1·11”镇雄灾难性滑坡滑动机制——高孔隙度土流活化启动与滑动液化[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(5): 1047 - 1054. [YAO Xin, YU Kai, ZHANG Yongshuang, et al. Mechanisms of catastrophic landslide on January 11, 2013, in Zhenxiong County: fluidization initiation and movement liquefaction of high porosity soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(5): 1047 - 1054. (in Chinese with English abstract)]
- [5] WANG Yufeng, CHENG Qiangong, SHI Anwen, et al. Sedimentary deformation structures in the Nyixoi Chongco rock avalanche: implications on rock avalanche transport mechanisms[J]. *Landslides*, 2019, 16(3): 523 - 532.
- [6] WANG Yufeng, CHENG Qiangong, YUAN Yunqiang, et al. Emplacement mechanisms of the Tagarma rock avalanche on the Pamir-western Himalayan syntaxis of the Tibetan Plateau, China[J]. *Landslides*, 2020, 17(3): 527 - 542.
- [7] 张涛,杨志华,张永双,等. 四川茂县新磨村高位滑坡铲刮作用分析[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(3): 138 - 145. [ZHANG Tao, YANG Zhihua, ZHANG Yongshuang, et al. An analysis of the entrainment of the Xinmo high-position landslide in Maoxian County, Sichuan[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2019, 46(3): 138 - 145. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 李天话. 不同颗粒级配滑坡岩土体运动分选机制及冲击作用研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2019. [LI Tianhua. Movement segregation mechanism and impact effect of landslide in different gradation grades[D]. Mianyang, China: Southwest University of Science and Technology, 2019.]
- [9] 郑光,许强,彭双麒. 滑坡-碎屑流的堆积特征及机理分析[J]. *工程地质学报*, 2019, 27(4): 842 - 852. [ZHENG Guang, XU Qiang, PENG Shuangqi. Mechanism analysis of the accumulation characteristics of rock avalanche[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(4): 842 - 852. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 周公旦,孙其诚,崔鹏. 泥石流颗粒物质分选机理和效应[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2013, 45(1): 28 - 36. [ZHOU Gongdan, SUN Qicheng, CUI Peng. Study on the mechanisms of solids segregation in granular debris flows[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2013, 45(1): 28 - 36. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 李天话,樊晓一,姜元俊. 滑坡碎屑流颗粒分选效应的数值模拟[J]. *西南科技大学学报*, 2019, 34(1): 26 - 33. [LI Tianhua, FAN Xiaoyi, JIANG Yuanjun. Numerical simulation study of solids segregation in landslide debris flow[J]. *Journal of Southwest University of Science and Technology*, 2019, 34(1): 26 - 33. (in Chinese with English abstract)]
- [12] DI LUZIO E, BIANCHI-FASANI G, ESPOSITO C, et al. Massive rock-slope failure in the Central Apennines

- (Italy): the case of the Campo di Giove rock avalanche[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2004, 63(1): 1 – 12.
- [13] ZHOU Jiawen, CUI Peng, YANG Xingguo. Dynamic process analysis for the initiation and movement of the Donghekou landslide-debris flow triggered by the Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 76: 70 – 84.
- [14] JIANG Yuanjun TOWHATA Ikuo. 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.
- [15] 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.
- [16] 宋跃,姜元俊,王萌. 碎石垫层对碎屑流冲击棚洞的缓冲效应研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(10): 2359 – 2369. [SONG Yue, JIANG Yuanjun, WANG Meng. Buffering effect of gravel cushion layer on the impact of dry granular flow against a rock shed[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(10): 2359 – 2369. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 肖思友,苏立君,姜元俊. 碎屑流冲击柔性网的离散元仿真研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(3): 526 – 533. [XIAO Siyou, SU Lijun, JIANG Yuanjun. Numerical investigation on flexible barriers impacted by dry granular flows using DEM modeling[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(3): 526 – 533. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 张睿骁,樊晓一,姜元俊. 滑坡碎屑流冲击拦挡结构的离散元模拟[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(1): 148 – 155. [ZHANG Ruixiao, FAN Xiaoyi, JIANG Yuanjun. Discrete element simulation of the impact of landslide debris flow on resistive structures[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(1): 148 – 155. (in Chinese with English abstract)]
- [19] BI Yuzhang, HE Siming LI Xinpo, et al. Effects of segregation in binary granular mixture avalanches down inclined chutes impinging on defending structures[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(3): 263.
- [20] ALBABA A, LAMBERT S, NICOT F, et al. Relation between microstructure and loading applied by a granular flow to a rigid wall using DEM modeling[J]. *Granular Matter*, 2015, 17(5): 603 – 616.
- [21] 王智德. 云南普宜高速公路顺层岩质边坡稳定性分析与开挖控制[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015. [WANG Zhide Stability Analysis and Excavation Control of Bedding Rock Slope of Puli-Xuanwei Expressway in Yunnan Province[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 张玉明. 水库运行条件下马家沟滑坡—抗滑桩体系多场特征与演化机理研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018. [ZHANG Yuming. Multi-field characteristics and evolution mechanism of Majiagou landslide-stablizing piles system under reservoir operations[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 岳建军. 缓倾外软硬互层型滑坡基本特征及失稳机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016. [YUE Jianjun. Study on basic Characteristics and instability mechanism of the landslide with inter bedded soft and hard rock beddings of low dip angles [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张明霞