

碎屑集合体撞击与停积过程的运动学特征研究

刘世涛, 程谦恭, 林棋文, 姚志勇, 孙先锋, 邓凯丰, 刘道胜, 王进华

Study on kinetic characteristics of the collision and emplacement of grains aggregation

LIU Shitao, CHENG Qiangong, LIN Qiwen, YAO Zhiyong, SUN Xianfeng, DENG Kaifeng, LIU Daosheng, and WANG Jinhua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202009025>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

巫溪县西溪河北岸高位高危碎屑流滑坡特征与机理研究

A study of the characteristics and mechanism of high-risk debris flow landslide on the northern bank of the Xixi River in Wuxi county
李浩, 乐琪浪, 孙向东, 杨秀元, 李刚, 李兴虎 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 13-13

泥石流容重的时空变化特征及影响因素研究

A study of the characteristics and influencing factors of spatial-temporal changes in the debris flow density
黄海, 刘建康, 杨东旭 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 161-168

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

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

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

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

Particle sequence distribution and the effect of particle size on the impact effect in a fluidized landslide-debris flow
张志东, 樊晓一, 姜元俊 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 49-59



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202009025

碎屑集合体撞击与停积过程的运动学特征研究

刘世涛¹, 程谦恭^{1,2}, 林棋文¹, 姚志勇³, 孙先锋³, 邓凯丰¹, 刘道胜³, 王进华³

(1. 西南交通大学地质工程系, 四川 成都 611756; 2. 西南交通大学高速铁路运营安全空间信息技术国家地方联合工程实验室, 四川 成都 611756; 3. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043)

摘要: 青藏高原高山峡谷区常发育崩滑碎屑流, 这种灾害具有发育边坡高陡、碎屑流高能且坡脚撞击剧烈等特点。为了解这种碎屑流的运动规律及其堆积特征, 设计并建立了自由下落的碎屑集合体撞击与停积过程的模型实验装置。考虑撞击过程对碎屑流运动和堆积的影响, 获取不同粒径大小、体积、下落高度条件下, 碎屑集合体的运动与堆积图像和量化数据, 并据此观察分析碎屑流的运动规律和堆积特征。主要结论如下: (1) 碎屑集合体底部首先撞击地面, 随后颗粒挤压形成剪切面, 颗粒在剪切面上进行扩散运动并最终堆积。(2) 撞击阶段, 颗粒之间显著的动量传递作用致使碎屑集合体前缘颗粒运动速度较快、距离更远, 并产生离散堆积现象。(3) 自堆积重心至边缘, 碎屑集合体的堆积厚度逐渐减小; 堆积形态在运动初期呈近圆形, 最终形态呈近菱形; 运动中的力学过程导致出现横向脊和 X 型共轭脊现象。(4) 碎屑集合体的粒径越小, 体积越大, 其主体运动距离、主体覆盖面积越大以及运动速度越快; 体积与最大堆积厚度呈正相关关系; 下落高度越小, 其最大堆积厚度越大, 运动速度越慢, 与主体覆盖面积大体上呈负相关关系。(5) 体积条件对碎屑集合体的堆积特征影响最大, 粒径大小其次, 下落高度影响最小。该研究可为川藏铁路沿线的工程结构设计及碎屑流的防治工作提供理论基础。

关键词: 碎屑流; 模型实验; 运动特征; 堆积特征; 川藏铁路

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)06-0140-11

Study on kinetic characteristics of the collision and emplacement of grains aggregation

LIU Shitao¹, CHENG Qiangong^{1,2}, LIN Qiwen¹, YAO Zhiyong³, SUN Xianfeng³,
DENG Kaifeng¹, LIU Daosheng³, WANG Jinhua³

(1. Department of Geological Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China; 2. State-Province Joint Engineering Laboratory of Spatial Information Technology for High-Speed Railway Safety, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China; 3. China Railway First Survey and Design Institute Group Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710043, China)

Abstract: Debris avalanches are frequently occurred in the mountainous region along the Sichuan-Tibet Railway in the Tibetan Plateau. These disasters are characterized by high and steep slope, huge energy and intense impact at the slope toe. In order to study the propagation behaviours and dynamic mechanisms of the debris avalanche, a series of laboratory experiments that grains aggregation freefall and impact on the horizontal plane then settle on it was conducted. In laboratory experiments, we consider the influences of the collision on the propagation and deposition features of debris avalanches. Images and quantitative data of the propagation and deposit features of

收稿日期: 2020-09-13; 修订日期: 2020-12-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1501000); 第二次青藏高原综合科学考察(Grant No.2019QZKK0905); 国家自然科学基金项目(41877226; 41877237; 41530639; 41761144080); 中铁第一勘察设计院集团有限公司科研项目(院科 19-09-01)

第一作者: 刘世涛(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事高速远程滑坡研究。E-mail: shitaoliu4716@my.swjtu.edu.cn

通讯作者: 程谦恭(1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事高速远程滑坡方面的科研与教学工作。E-mail: chengqiangong@swjtu.edu.cn

the grains aggregation under the conditions of different particle sizes, volumes and falling height are obtained. The results show that (1) the bottom of the grains aggregation first hits the ground, then the particles are squeezed to form a shear surface. The particles move along the shear surface, spread and eventually deposit; (2) During the collision phase, the significant momentum transfer between the particles cause the particles at the front edge of the grains mass to move faster and farther, resulting in dispersive deposit; (3) From the center of the mass to the frontal edge of the deposit, the thickness gradually decreases; the shape is nearly circular at the beginning of the movement, and the final form is nearly diamond. The mechanical process leads to the occurrence of stress ridges; (4) The smaller the particle size of the grains aggregation is and the larger the volume is, the larger the maximum deposit thickness, the farther the travel distance of the main body, and the larger the main body cover area, the faster the spreading speed; the smaller the falling height is, the larger the maximum deposit thickness, the slower the spreading speed, which leading to a decreasing trend of the main body cover area; (5) Volume have the greatest influences on the deposit features of debris avalanches, followed by particle size, and the falling height has the least influence.

Keywords: debris avalanche; laboratory experiment; propagation characteristics; deposit features; Sichuan-Tibet Railway

川藏铁路途径地区地质条件特殊,高山峡谷地貌纵横遍布,这一地质背景导致川藏铁路沿线崩塌、滑坡等地质灾害极其发育^[1-3]。崩塌灾害解体后加速运动引发具有高破碎度、高离散性和流动特性的碎屑集合体,称为碎屑流^[4-7]。这种高位崩塌或者滑坡引发的碎屑流具有难以预测性、高隐蔽性、强烈的破坏性、运移距离远、运动速度快等特征,危害性巨大^[8-10],如2000年发生的西藏易贡滑坡,其运动过程先是高陡山体处巨大体积的岩体崩滑随后崩滑体激发流动区内大量堆积的块石碎屑物,形成块石碎屑流,碎屑流运移8~10 km并完全堵塞雅鲁藏布江,从而引发了极具危害的一系列次生灾害^[11-13]。

一些学者通过对高陡边坡区的碎屑流实例调查来分析其运动与堆积特征。如许强等^[14]针对四川汉源二蛮山高位碎屑流开展现场调查,根据其发生过程和动力特性将其主滑区域分为滑源区、斜卷滑塌区、主堆积区。郑光等^[15]、彭双麒等^[16]在对贵州普洒村高位崩塌碎屑流的现场调查基础之上,研究分析认为普洒村崩塌碎屑流总体可分为崩塌源区和崩塌影响区,并对主崩落体的动力特性进行初步分析。实例调查研究将这种高陡斜坡崩滑碎屑流分成不同区域,表明这种碎屑流的运动过程存在明显变化的阶段,但是现场调查研究很难直接观察到高位崩塌碎屑流的具体运动过程,对于探究不同初始条件对碎屑流的运动以及堆积特征的控制影响也存在着一定的局限性。

室内物理模型试验可以弥补这一缺点,故在碎屑流的相关研究中受到大量国内外学者的重视,如

Manzella等^[17]设计斜板试验装置,研究分析体积、下落高度、斜坡坡度、颗粒形状等对碎屑流运动特征的影响。郝明辉等^[18]通过开展室内斜槽模型试验,研究了碎屑体的粒径、滑床糙率等对碎屑流运动特性的影响。王忠福等^[19]设计了一种斜板试验装置来研究粒径大小对岩石碎屑流的运移距离以及堆积特性的影响。王玉峰等^[20]通过滑坡-碎屑流的三维物理模型试验装置来观察和分析碎屑流的流态化运动与堆积特征。当前对于碎屑流的室内模型试验研究主要是将其视为颗粒流,通过斜槽试验来进行其运动、堆积的全过程模拟研究。

川藏铁路沿线的高陡边坡常发育高能崩滑-碎屑流,这种崩滑碎屑流具有高角度、部分自由落体式运动、高能、崩滑体撞击坡脚等显著特征^[21],撞击坡脚交通干线,易造成人员伤亡、交通中断、线路设施损毁等。但是目前的室内模型试验研究没有突出撞击的影响。因此本文设计了自由下落的碎屑集合体室内模型试验装置,考虑撞击过程对碎屑流运动和堆积的影响,以期了解这种特殊碎屑流的运动规律和堆积特征,从而为川藏铁路沿线的工程结构设计以及碎屑流的防治工作提供理论基础。

1 试验方案

1.1 试验装置设计

为了模拟再现高能/高陡边坡碎屑流撞击坡脚并停积全过程的特征,将其考虑为“碎屑集合材料自由落体加速运动-高速撞击底板-扩散堆积”这一简化工

程地质模型,进行试验装置设计。模型试验装置主要由物料盒、抽滑释放装置、刚性固定框架、堆积底板以及监测系统组成,如图 1 所示。刚性固定框架主要是由钢管和卡扣组成,用来固定和支撑整个试验装置。抽滑释放装置主要是由 4 个亚克力板和 1 个亚克力圆柱棒粘接而成,具体包括:顶板、2 个侧板、抽滑板(可以通过阻尼导轨沿着侧板滑动)、圆柱棒(通过卡扣沿着固定装置上下移动从而可以改变碎屑集合体的下落高度)、前挡板。物料盒通过螺丝钉固定在前挡板上,方便拆卸。物料盒的尺寸有 6 种,全部由亚克力板粘接,在物料盒的底部分别安装有 2 片扇叶,当抽滑板滑过物料盒时,扇叶自动展开,碎屑集合体从物料盒中开始自由下落。底板是由 2 块尺寸为 2 m×1 m 的亚克力板组成。在底板下面设置钢肋以用来减小亚克力板的受力变形,并确保钢肋设置在碎屑集合体的落点重心处。监测系统主要是 1 台 850 帧率的高速摄影机和一台高清相机,用来记录碎屑体的运动过程和整体试验过程。此外在 Y 轴负方向一侧悬挂 1 块亚克力板,走向平行于 X 轴方向,用来辅助观察侧向高速摄影所记录的碎屑集合体的自由下落、撞击、运动等过程。

1.2 试验方案

本次试验主要考虑碎屑集合体的颗粒粒径大小、体积、下落高度对碎屑集合体撞击和停积过程运动学特征的影响。碎屑集合体为石英砂,本次试验共采用 5 种粒径大小的石英砂,分别是 0.1~0.25 mm、0.25~0.5 mm、0.5~1 mm、1~2 mm、2~5 mm(图 2)。物料盒为立方体,具有 6 种尺寸,用以控制不同体积的碎屑集合体,体积分别是 8, 27, 64, 125, 216, 512 cm³。

设置了 7 种下落高度,分别为 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2 m。本文具体试验方案见表 1。

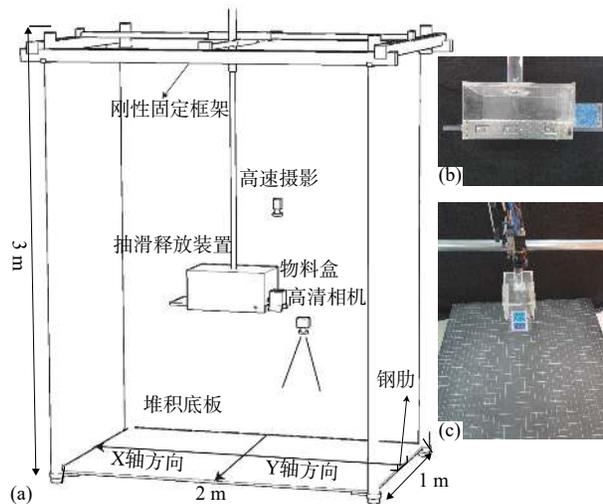


图 1 试验装置图

Fig. 1 Diagram of the experimental setup

(a) 装置示意图; (b) 释放装置图; (c) 整体实物图

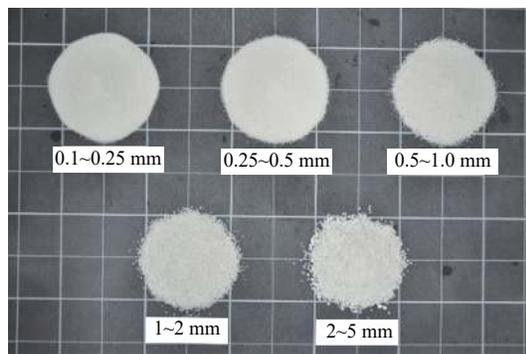


图 2 试验用碎屑集合体

Fig. 2 Grains aggregation used in test

表 1 试验方案

Table 1 Test plans

实验工况	集合体粒径大小/mm	集合体体积/cm ³	下落高度/m	实验工况	集合体粒径大小/mm	集合体体积/cm ³	下落高度/m	实验工况	集合体粒径大小/mm	集合体体积/cm ³	下落高度/m
F1/H4	0.1~0.25	64	0.9	G1	0.1~0.25	8	0.9	H1	0.1~0.25	64	0.6
F2	0.25~0.5	64	0.9	G2	0.1~0.25	27	0.9	H2	0.1~0.25	64	0.7
F3	0.5~1	64	0.9	G3/H4	0.1~0.25	64	0.9	H3	0.1~0.25	64	0.8
F4	1~2	64	0.9	G4	0.1~0.25	125	0.9	H5	0.1~0.25	64	1.0
F5	2~5	64	0.9	G5	0.1~0.25	216	0.9	H6	0.1~0.25	64	1.1
				G6	0.1~0.25	512	0.9	H7	0.1~0.25	64	1.2

1.3 试验数据处理方法

下面以任意一组试验过程为例说明试验结果的数据获取和参数计算。

图 3 为高速摄影机正面拍摄的碎屑体在刚接触底

板以及随后的一系列运动过程,利用 PIVlab 对这些正面高速摄影照片进行碎屑流运动速度的计算,观察碎屑流的运动变化过程^[22-23]。因为高速摄影的帧速率为 850 帧/s,故根据每一扩散范围与刚接触底板的帧

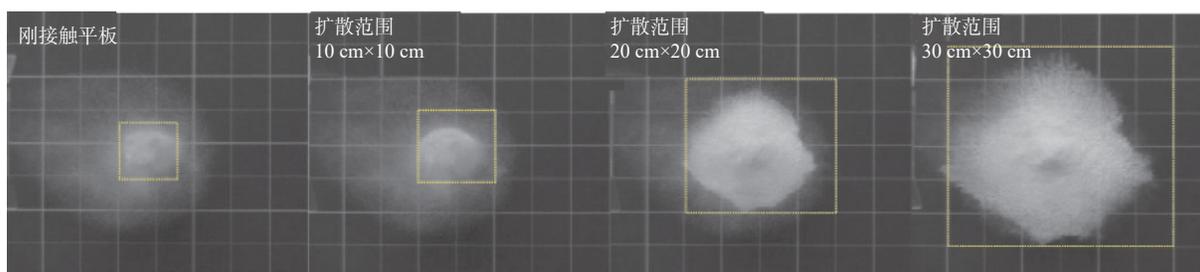


图3 碎屑集合体运动过程正视图

Fig. 3 Plan views of the motion of grains aggregation

数之差便可以得出扩散的时间,进而可以定量比较在相同扩散范围内的运动速度大小。

碎屑集合体运动停止之后,利用高清相机拍摄最终堆积的图像,通过倾斜摄影测量软件生成数字表面模型照片(以下简称为DSM)和正射影像照片,见图4。获取DSM后结合MATLAB程序获得最大堆积厚度点处沿Y轴方向剖面,见图5(a)。

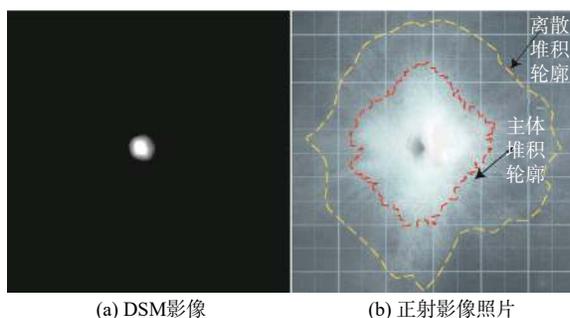


图4 倾斜摄影测量法获取的照片

Fig. 4 Photograph obtained by oblique photogrammetry

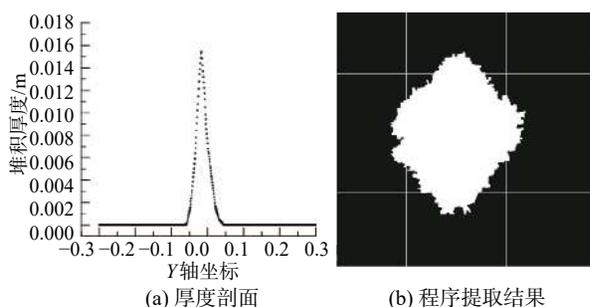


图5 数据处理获取的图像

Fig. 5 Photograph obtained by data processing

通过观察碎屑集合体的运动堆积过程,发现碎屑集合体存在不同堆积形态,故本文将碎屑集合体的堆积分为主体堆积与离散堆积。主体堆积是指颗粒之间相互接触在一起;离散堆积是指颗粒之间不存在相互接触,单独颗粒堆积或局部零星接触。对于每一组试验工况,利用图像处理软件将正射影像照片进行二值化处理^[24],再通过MATLAB程序提取主体运动距

离与主体覆盖面积,提取结果图像如图5(b)所示。为减小试验误差,所有工况的二值化处理过程采用统一阈值,提取在4个方向上白色像素值95%所能到达的距离,覆盖面积即是方向上运动距离所包围区域内白色像素值的大小;主体运动距离即是这方向上运动距离的平均值。

对于离散堆积,堆积不能连成一片,故在阈值处理中将离开碎屑流主体的颗粒过滤,因此本文所提的运动距离与覆盖面积皆是碎屑流主体堆积面积和主体运动距离,即颗粒能够堆叠、接触在一起的,不包括单独颗粒堆积,具体堆积现象如图4所示,红线表示主体堆积轮廓,红线与黄线之间则表示颗粒离散堆积,未能连成一片堆积,阈值处理过程中则可能被过滤。

2 试验结果

2.1 碎屑流运动与堆积过程基本特征

首先通过体积最大工况(G6工况)的侧面高速摄影图像来具体描述本文中碎屑集合体撞击底板、沿底板运动、堆积的全过程。碎屑集合体释放后,首先开始进行自由落体运动,底部最先撞击底板,见图6(a);由于较高处碎屑集合体还处于自由落体下落状态,故较高处颗粒与较低处颗粒挤压形成剪切面,较高处颗粒进行下沉运动,同时沿着剪切面运动,也会挤压推动较低处颗粒向前运动,见图6(b)。当碎屑集合体的下沉运动停止后,较高处颗粒在自由落体势能所转换的动能作用下继续沿着剪切面运动并挤压推动较低处颗粒向前运动,见图6(c),黄色箭头表示剪切面。当碎屑集合体在剪切面上的运动停止时,最前缘的颗粒仍会继续向前运动一段时间,见图6(d);直至运动停止,最后的堆积状态见图6(e)。碎屑集合体运动过程中颗粒会出现滚动、跳跃、滑动等运动方式,具体如图6(c)所示,红色线表示颗粒的跳跃运动,黄色线表示颗粒的滚动与滑动。

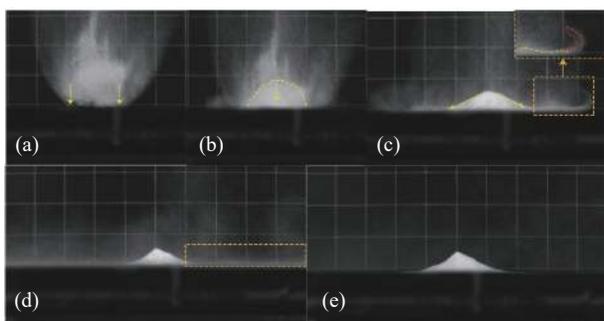


图 6 碎屑集合体运动过程侧视图
Fig. 6 Lateral views of the motion of grains aggregation

图 7 为碎屑集合体运动过程中表面形态的变化过程。碎屑集合体自由下落后撞击底板, 随后碎屑集合体一边下沉一边向四周进行较为均匀的扩散, 具体形态见图 7(a), 碎屑集合体在向四周扩散过程中会出现挤压横向脊这一流态运动特征, 如图 7(b) 中黄线所示, 随着扩散运动的进行, 这些横向脊会迅速变小, 从而在碎屑集合体的表面出现 X 型共轭脊, 具体见图 7(c), 这些 X 型共轭脊会随着扩散运动的进行逐渐变得不明显。随后碎屑集合体的扩散运动出现主体运动基本停止, 只有前缘的颗粒继续运动, 见图 7(d)。图 7(d) 中的红线轮廓表示主体运动所到达的范围, 在此后的扩散运动中, 碎屑集合体的主体运动基本停止, 堆积范围基本确定, 在随后的运动中, 主要以前缘零星颗粒的运动为主, 颗粒之间的接触不再紧密, 前缘发生零星堆积现象直至最终运动停止, 碎屑集合体的最终堆积表现形态见图 7(e)。

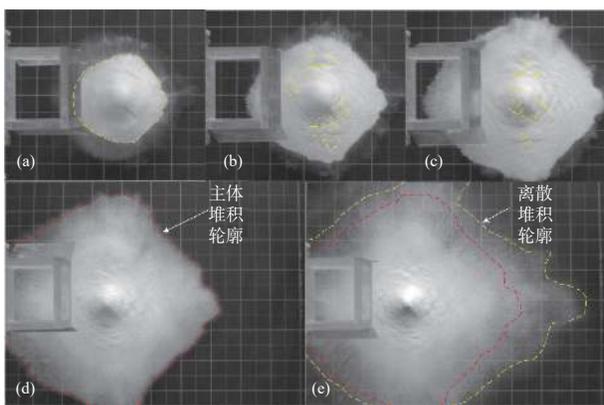


图 7 碎屑集合体表面形态变化过程
Fig. 7 The changing process of the grains aggregation's surface morphology

2.2 最大堆积厚度变化规律

图 8 为粒径大小、体积、下落高度与最大堆积厚度之间的变化规律误差棒图, 其中误差棒的大小可以反映重复试验数据之间的差异性。从图 8(a) 中可知

0.1 ~ 0.25 mm、0.25 ~ 0.5 mm、0.5 ~ 1 mm 这三个粒径大小中, 粒径越小, 最大堆积厚度越大; 但 0.5 ~ 1 mm、1 ~ 2 mm、2 ~ 5 mm 这 3 个粒径大小中, 粒径越大, 其最大堆积厚度越大, 且最大堆积厚度均小于 0.25 ~ 0.5 mm 粒径的最大堆积厚度。粒径大小与最大堆积厚度之间并没有存在完全的线性规律; 由图 8(b) 中可知随着体积的增大, 碎屑集合体的最大堆积厚度随之增大, 两者之间存在明显的线性关系; 图 8(c) 为下落高度与最大堆积厚度之间的关系图, 可以看出两者呈负相关关系。

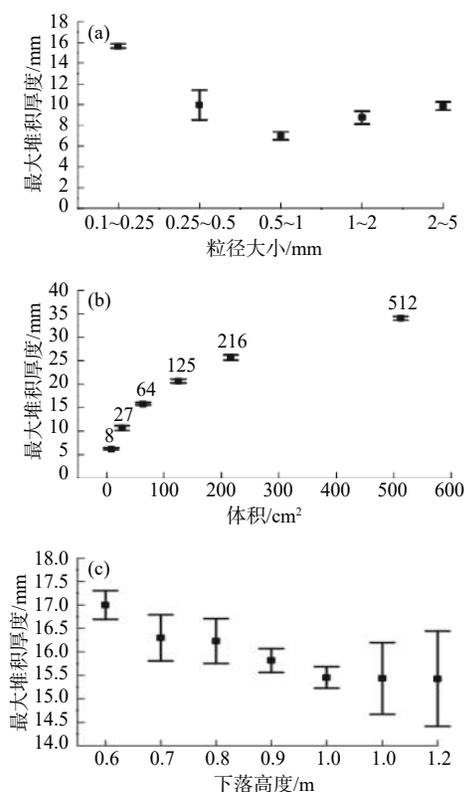


图 8 各试验工况下最大堆积厚度
Fig. 8 The maximum deposit thickness of every test condition

2.3 主体运动距离变化规律

图 9 为粒径大小、体积、下落高度与主体运动距离之间的变化规律。由图 9(a) 中可知粒径大小与主体运动距离之间存在明显的负相关规律。从图 9(b) 中可以发现, 随着体积的增大, 碎屑集合体的主体运动距离随之增大; 在图 9(c) 下落高度试验工况中, 可以看出在下落高度 $H=0.7$ m 时, 主体运动距离比 $H=0.6$ m 远, 但是随后碎屑集合体的主体运动距离又降低; 在 $H=1.0$ m 时主体运动距离又增加, 随后又降低; 在 $H=1.2$ m 时, 主体运动距离最小, 并没有发现下落高度与主体运动距离之间存在明显的线性变化规律。

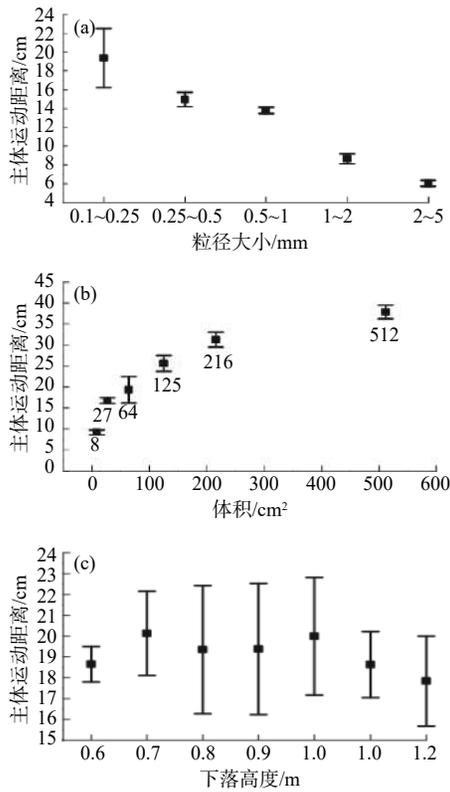


图 9 各试验工况下主体运动距离

Fig. 9 The main moving distance of every test condition

2.4 主体覆盖面积变化规律

图 10 为各个试验工况与主体覆盖面积之间的关系图。从图 10(a)中可以看出,随着粒径大小的增大,碎屑集合体的主体覆盖面积逐渐减小,这与主体运动规律一致,粒径大小与主体覆盖面积之间存在负相关规律;由图 10(b)可知,碎屑集合体体积与主体覆盖面积之间存在正相关线性规律。由图 10(c)可知,当下落高度 $H=0.6$ m 和 $H=0.7$ m 时,主体覆盖面积呈增大趋势,但随后随着下落高度的增加,主体覆盖面积呈下降趋势。碎屑集合体的下落高度与主体覆盖面积之间总体上呈负相关关系。

2.5 扩散时间变化规律

通过分析各个工况的正面高速摄影照片,发现碎屑集合体撞击底板之后向四周扩散,而且扩散的趋势相同。为比较不同试验工况下的扩散运动速度,本文记录了碎屑集合体撞击底板后在 2 个方向上运动相同距离范围,包括 $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 、 $20\text{ cm}\times 20\text{ cm}$ 、 $30\text{ cm}\times 30\text{ cm}$ 等范围的照片帧数(观察发现当超过 $30\text{ cm}\times 30\text{ cm}$ 的范围时,粒径大小工况、下落高度工况以及体积工况中前三组体积较小的碎屑集合体颗粒之间的接触开始变得松散,有更多的颗粒单独堆积,无法统一确定界限,故只比较上述几个范围,这并不代表碎屑集

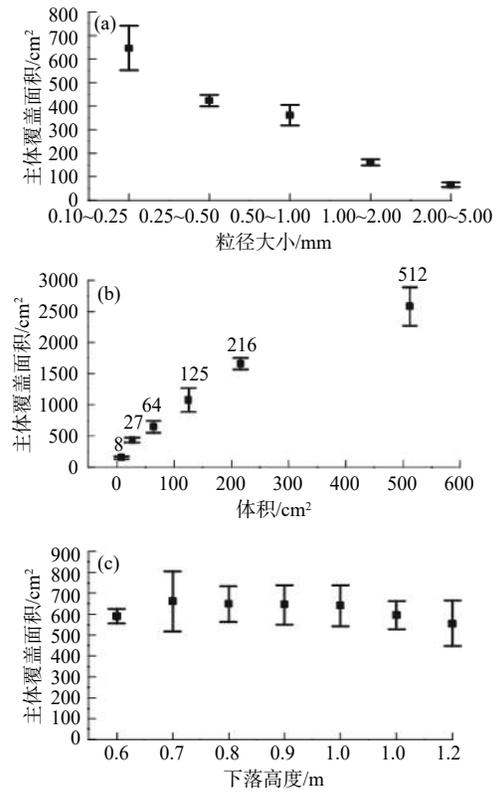


图 10 各试验工况下主体覆盖面积

Fig. 10 The main covered area of every test condition.

合体最后的堆积范围)。

从图 11 中可以看出,在粒径大小变化试验工况中,在相同的扩散范围中,随着粒径的增大,碎屑集合体的扩散时间随之增大,两者之间存在正相关规律;在体积变化试验工况中,随着体积的增大,碎屑集合体的扩散时间随之减小而且扩散范围随着体积的增大而增大。当体积大于等于 64 cm^3 (即边长为 4 cm) 时扩散时间明显减少,如当碎屑集合体的体积为 512 cm^3 (边长为 8 cm) 时,主体扩散范围可以达到 $60\text{ cm}\times 60\text{ cm}$,

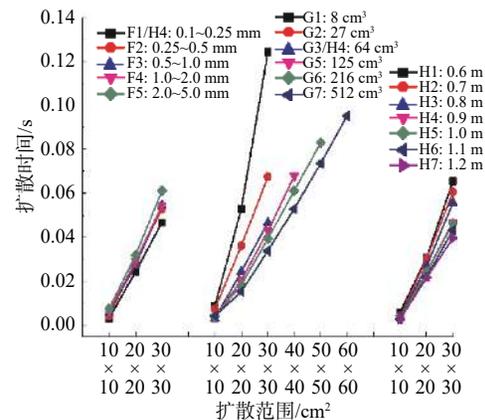


图 11 各试验工况下扩散时间

Fig. 11 The diffusion time of every test condition

而当碎屑集合体的体积小于 64 cm^3 时,主体扩散范围最大为 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$;同理,在下落高度变化试验工况中,下落高度与扩散时间存在负相关变化规律。

3 讨论

3.1 碎屑集合体运动规律分析

对碎屑集合体撞击底板后的运动扩散正面高速摄影图像进行 PIVlab 分析后(图 12),可以发现在运动

扩散过程中最前缘的颗粒速度最大,从前缘到重心位置速度呈减小趋势,我们认为这主要是因为动量传递的作用。结合 2.1 节中关于本试验中碎屑流的运动过程的描述,我们发现颗粒沿剪切面运动过程中,产生挤压推动作用导致颗粒之间发生相互碰撞,将部分动量传递给较前部颗粒致使运动前缘颗粒速度较快^[25-26],能够运动更远距离甚至在主体运动基本停止、主体覆盖面积基本确定时,前缘颗粒继续向前运动发生离散堆积。

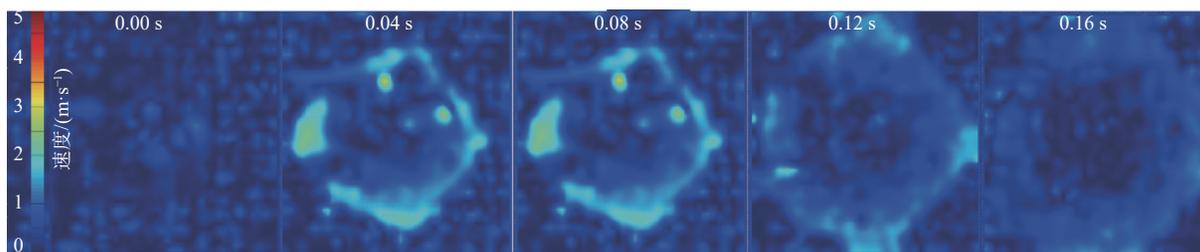


图 12 G6 工况扩散速度云图

Fig. 12 The velocity field diagrams of G6

3.2 碎屑集合体堆积特征与扩散运动规律分析

通过观察不同试验工况下碎屑集合体撞击底板、运动扩散后的堆积现象,我们发现其具有一些普遍堆积特征。下面以图 7 (G6 工况)为例来具体说明。

碎屑集合体的堆积包括主体堆积和离散堆积两部分,如图 7(e)中的红色和黄色轮廓。主体堆积中颗粒接触紧密,大部分颗粒处在主体堆积区;离散堆积中颗粒接触不紧密,相互不能连接在一起,只有少部分颗粒处于离散堆积区。碎屑集合体的堆积总体上呈中间厚、四周薄,从堆积重心到边缘,厚度逐渐减小,厚度具体如图 13 所示。碎屑集合体的堆积形态在撞击底板后的扩散运动初期呈近圆形,见图 7(a)(b);随着扩散运动的进行其形态呈近菱形,见图 7(c)

(d)(e)。这主要是由于颗粒之间的碰撞、摩擦以及与底板之间的摩擦等耗能过程导致。

通过图 7 正面高速摄影照片,可以发现其表面有横向脊, X 型共轭脊出现,见图 7(c)。王玉峰等^[27]在研究高速远程滑坡时发现过这种流态化堆积现象,并分析认为横向脊是由于挤压作用形成, X 型共轭脊是挤压作用与径向扩散共同作用的结果,并提出一种共轭剪切模型来解释这种现象。通过高速摄影发现挤压横向脊以及 X 型共轭脊出现在碎屑颗粒的运动扩散过程中。碎屑颗粒的运动扩散过程包括颗粒沿挤压所形成的剪切面运动、颗粒间相互碰撞挤压作用等,这些现象是碎屑集合体撞击底板扩散运动过程中的力学过程所导致。

由图 8(b)可明显看出:同一粒径的碎屑集合体,从同一高度自由撞击底板后的最大堆积厚度随着体积的增大而增大。从 3.1 节的分析已知碎屑集合体撞击底板后的运动堆积主要是颗粒沿着剪切面运动并挤压较低处颗粒向前运动的结果,堆积厚度便从中心开始逐渐降低,本试验中碎屑集合体的体积越大,高度也就越大,所含的颗粒越多,在撞击一瞬间有更多的颗粒堆积在底板,形成剪切面的高度也就越大,故最大堆积厚度也就越大,见图 14 中最小体积与最大体积的主体堆积侧视高速照片。

从图 8(c)中可以发现:碎屑集合体的最大堆积厚度随着下落高度的增大而减小。Utili 等^[28]通过数值

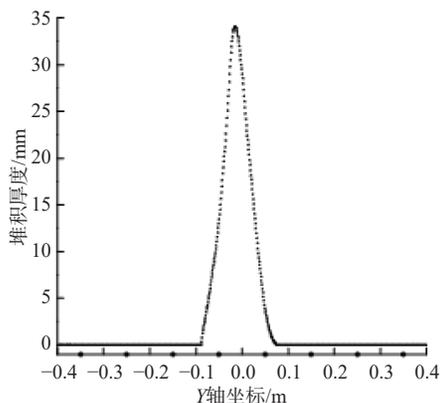


图 13 G6 工况沿 Y 轴剖面

Fig. 13 The profile along Y axis of G6

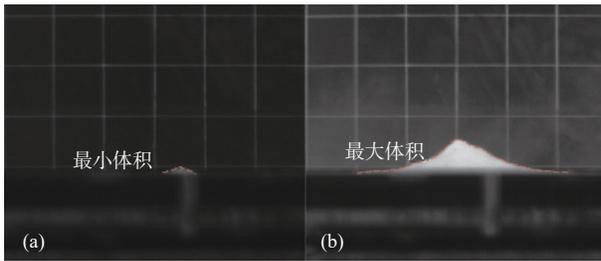


图 14 最小体积与最大体积工况主体堆积侧视图

Fig. 14 Lateral views of the main deposit in minimum and maximum volume

模拟柱状崩塌试验时发现势能损失主要是由于运动过程中动能变化造成的。De Blasio 等^[21]在研究岩崩能量转化时认为岩崩的势能约 80% 转化为动能;因此我们认为下落高度越大,碎屑集合体的重力势能越大,转化的动能越大,碎屑集合体中的颗粒可以运动得更远,有更多的颗粒发生离散堆积,碎屑颗粒所在的范围越大,故最大堆积厚度变小。

图 11 中通过记录扩散时间来定量比较在相同扩散范围内的运动速度大小。在相同的扩散范围内,扩散时间越长,表明碎屑集合体的运动速度越小。从图 11 可以发现,在 10 cm×10 cm 范围内各个工况的扩散时间很接近,观察研究发现碎屑集合体撞击底板时,碎屑集合体的覆盖范围接近 10 cm×10 cm,导致显示出来的扩散时间很短,各个试验工况下在 10 cm×10 cm 范围内各个粒径大小的扩散时间很接近,差异不是特别明显。

从图 9(a)、图 10(a)以及图 11(a)中可以看出随着粒径的增大,碎屑集合体的主体运动距离、主体覆盖面积以及运动速度均减小。通过观察 F1 工况以及 F5 工况的侧视高速摄影可以发现,见图 15。颗粒粒径越大,撞击底板之后,抛洒的碎屑颗粒占总颗粒数的比值越大,颗粒运动更加紊乱,最后离散堆积、不能够接触在一起的颗粒堆积得越多,主体堆积的运移距离减小,覆盖面积减小。不同粒径大小的碎屑集合

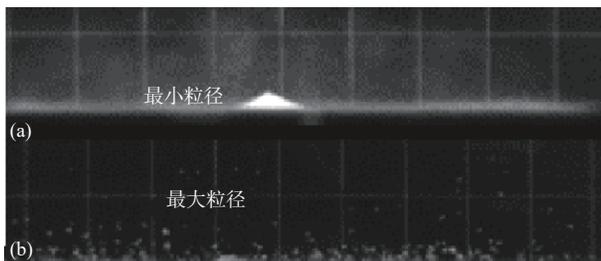


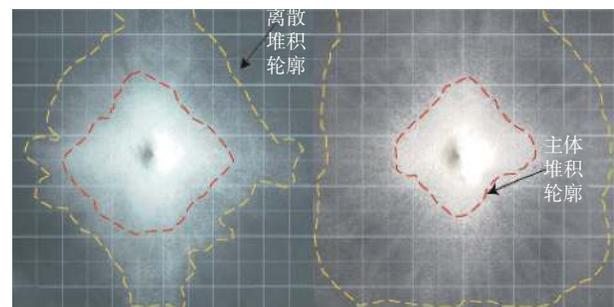
图 15 最小粒径与最大粒径工况侧向高速摄影图像

Fig. 15 Lateral high-speed photography of the minimum and maximum grain sizes

体,在相同体积和相同下落高度条件下撞击底板后,抛洒的碎屑颗粒占总颗粒数的比值越大,则抛洒的碎屑颗粒的动能占总动能的比值越大,碎屑集合体中紧密接触在一起的动能相应减小,运动速度减慢。

从图 9(b)、图 10(b)以及图 11(b)中可以看出,相同粒径大小的试验工况,随着体积的增大,碎屑集合体的主体运动距离和覆盖面积均增大,运动速度加快。碎屑集合体撞击底板以及运动、堆积过程中能量主要包括势能、撞击底板的振动信号能量、底板消耗的能量、运动过程中的摩擦耗能、动能^[29-31],其中动能的占比是最大的,因此在相同粒径大小、相同下落高度条件下,体积越大,势能转化的动能也就越大,碎屑集合体运动的越远,堆积的覆盖面积越大,运动速度越快。碎屑集合体的这一特征跟高速远程滑坡中的体积效应具有相似性^[32-33],即在高速远程滑坡中,体积越大,滑坡的运动速度越快,滑移距离越远。

在图 9(c)、图 10(c)以及图 11(c)中可以看出,碎屑集合体的下落高度与主体运动距离之间并没有呈现明显的线性规律,大体上呈随着下落高度增加主体覆盖面积减小的趋势,此外下落高度越大,运动速度越快。随着下落高度增加,碎屑集合体的动能相应增加,故运动速度增快,同时颗粒运动更加紊乱,有更多的颗粒会离散堆积,接触在一起的颗粒总数就会减小,主体堆积的面积会减小,故主体覆盖面积减小,如图 16 所示。主体运动距离是 4 个方向取平均值,随着下落高度增加,颗粒运动紊乱加剧,平均值的选取有可能出现较大偏差,故在此方法下主体运动距离与下落高度之间的规律不是特别明显。



(a) 最小下落高度堆积体正射影像图
(b) 最大下落高度堆积体正射影像图

图 16 最小和最大下落高度堆积体正射影像图

Fig. 16 The orthophotos of deposit in minimum and maximum drop height

3.3 控制条件对碎屑集合体堆积特征的影响分析

陈陆望等^[34]、周辉等^[35]在研究各控制条件对相似

材料特性的影响程度时通过计算极差以及标准差来进行判断。各控制条件下堆积特征的标准差与极差越大,表明该控制条件对堆积特征的影响程度越大。分别计算极差与标准差可以相互验证结论,为使结论更加科学、准确,故在进行极差与标准差的分析中,粒径大小,体积,下落高度的变化范围均采用 5 个变化范围。

极差 R 以及标准差 σ 的具体数学表达式为:

$$R = X_{\max} - X_{\min} \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2} \quad (2)$$

式中: X_i ——各物理参数;

μ ——同一因素不同水平下各物理参数的均值。

各控制条件下堆积特征的标准差值和极差值如表 2 所示。

表 2 标准差和极差表

Table 2 Standard deviation and range of test

	控制条件	粒径大小	体积	下落高度
标准差值	最大堆积厚度/mm	3.32	9.00	0.35
	主体运动距离/cm	5.29	8.62	0.83
	主体覆盖面积/cm ²	227.37	591.23	27.32
极差值	最大堆积厚度/mm	8.82	23.33	0.80
	主体运动距离/cm	13.34	21.09	2.16
	主体覆盖面积/cm ²	580.20	1 510.95	70.69

通过观察表 2 可知,标准差与极差具有一致性,如在各控制条件对最大堆积特征的影响程度上,标准差值最大的控制条件为体积,同时体积控制条件下的极差值也最大。体积对最大堆积厚度、主体运动距离以及主体覆盖面积的标准差和极差都是最大的,其次是粒径大小,而下落高度对以上特征的标准差与极差都是最小的。故体积控制条件对最大堆积厚度、主体运动距离以及主体覆盖面积的影响是最大的,其次是粒径大小控制条件,下落高度控制条件的影响程度最小。此外还可以发现,体积控制条件下的最大堆积厚度的标准差约是下落高度控制条件下最大堆积厚度的 26 倍;在主体运动距离的对比中,体积控制条件的标准差约是下落高度的标准差的 10 倍,由此可见,体积对碎屑集合体堆积特征的影响显著大于下落高度对其的影响。

3.4 模型试验与真实高位碎屑流的联系

真实高位碎屑流一般都存在滑源区、流通区与堆积区^[14-16],本文中的碎屑集合体经自由落体下落,底部撞击底板运动后,挤压形成剪切面,较高处颗粒下

沉运动同时伴随着挤压推动较低处颗粒向前运动,随后碎屑集合体的下沉运动停止,这一阶段类似于真实高位碎屑流的滑源区;当下沉运动停止之后,较高处颗粒在势能所转化的动能作用下继续沿着剪切面运动并挤压推动较低处颗粒向前运动直至在剪切面上的运动停止,这一阶段类似于真实高位碎屑流的流通区;当颗粒在剪切面上的运动停止之后,最前缘颗粒仍会继续向前运动,这一阶段类似于真实高位碎屑流的堆积区。通过观察真实高位碎屑流的纵向剖面可以发现其厚度自源区至堆积区总体上呈减小趋势,这一现象与本文中得出的厚度剖面规律一致,即自堆积重心至边缘厚度逐渐减小。

4 结论

(1)碎屑集合体撞击底板后的运动扩散过程主要为:底部最先撞击底板,较高处颗粒与较低处颗粒挤压形成剪切面,随后较高处颗粒一边进行下沉运动,一边沿着剪切面运动。在颗粒沿着剪切面运动过程中,颗粒挤压推动较低处颗粒向前运动,从而导致碎屑集合体向四周进行扩散运动。

(2)在碎屑集合体撞击底板后的运动过程中,由于前缘颗粒与后缘颗粒之间存在动量传递,导致前部颗粒速度更快,运动距离更远从而产生离散堆积现象。

(3)自堆积重心至边缘,堆积厚度逐渐减小;堆积形态在运动初期呈近圆形,随着运动过程形态发生变化,最终形态呈近菱形。碎屑集合体运动扩散过程中的力学过程是产生横向脊、X 型共轭脊的原因。

(4)碎屑集合体的粒径越小,体积越大,其主体运动距离、主体覆盖面积越大、其运动速度越快;体积与最大堆积高度之间存在正相关关系,即体积越大,最大堆积高度越大;下落高度越小,其最大堆积厚度越大,运动速度越慢,下落高度与主体覆盖面积总体上呈负相关关系。

(5)在粒径大小、体积、下落高度控制条件中,体积控制条件对碎屑集合体的堆积特征(最大堆积厚度、主体运动距离、主体覆盖面积)影响最大,粒径大小其次,下落高度影响最小。

参考文献 (References):

- [1] 黄润秋. 中国西部地区典型岩质滑坡机理研究[J]. 地球科学进展, 2004, 19(3): 443 - 450. [HUANG Runqiu. Mechanism of large scale landslides in Western China[J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19(3): 443 - 450. (in Chinese with English abstract)]

- [2] 薛翊国,孔凡猛,杨为民,等. 川藏铁路沿线主要不良地质条件与工程地质问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(3): 445 – 468. [XUE Yiguo, KONG Fanmeng, YANG Weimin, et al. Main unfavorable geological conditions and engineering geological problems along Sichuan—Tibet railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(3): 445 – 468. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 解明礼,巨能攀,刘蕴琨,等. 崩塌滑坡地质灾害风险排序方法研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 184 – 192. [XIE Mingli, JU Nengpan, LIU Yunkun, et al. A study of the risk ranking method of landslides and collapses[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5): 184 – 192. (in Chinese with English abstract)]
- [4] EVANS S G, GUTHRIE R H, ROBERTS N J, et al. The disastrous 17 February 2006 rockslide-debris avalanche on Leyte Island, Philippines: a catastrophic landslide in tropical mountain terrain[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2007, 7(1): 89 – 101.
- [5] 李祥龙,唐辉明,熊承仁,等. 岩石碎屑流运移堆积过程数值模拟[J]. 工程地质学报, 2011, 19(2): 168 – 175. [LI Xianglong, TANG Huiming, XIONG Chengren, et al. Numerical simulation of flow and depositoin process of rock avalanche[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(2): 168 – 175. (in Chinese with English abstract)]
- [6] MANZELLA I, LABIOUSE V. Empirical and analytical analyses of laboratory granular flows to investigate rock avalanche propagation[J]. Landslides, 2013, 10(1): 23 – 36.
- [7] DAVIES T R, MCSAVENEY M J. Runout of dry granular avalanches[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(2): 313 – 320.
- [8] 程谦恭,张倬元,黄润秋. 高速远程崩滑动力学的研究现状及发展趋势[J]. 山地学报, 2007, 25(1): 72 – 84. [CHENG Qiangong, ZHANG Zhuoyuan, HUANG Runqiu. Study on dynamics of rock avalanches: state of the art report[J]. Journal of Mountain Science, 2007, 25(1): 72 – 84. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 刘玲霞,李向全,周志超,等. 强震条件下谢家店滑坡碎屑流发生机制试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(3): 104 – 109. [LIU Lingxia, LI Xiangquan, ZHOU Zhichao, et al. An experimental study of the initiation mechanism of landslide debris flow under a strong earthquake[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(3): 104 – 109. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 刘传正. 论崩塌滑坡—碎屑流高速远程问题[J]. 地质论评, 2017, 63(6): 1563 – 1575. [LIU Chuazheng. Research on high speed and long-distance of the avalanches or landslide—debris streams[J]. Geological Review, 2017, 63(6): 1563 – 1575. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 殷跃平. 西藏波密贡高速巨型滑坡特征及减灾研究[J]. 水文地质工程地质, 2000, 27(4): 8 – 11. [YIN Yueping. Study on characteristics and disaster reduction of giant high-speed landslide in Bomi Yigong of Tibet[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2000, 27(4): 8 – 11. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 吕杰堂,王治华,周成虎. 西藏易贡大滑坡成因探讨[J]. 地球科学, 2003, 28(1): 107 – 110. [LV Jietang, WANG Zhihua, ZHOU Chenghu. Discussion on the occurrence of Yigong landslide in Tibet[J]. Earth Science, 2003, 28(1): 107 – 110. (in Chinese with English abstract)]
- [13] XU Q, SHANG Y J, VAN ASCH T, et al. Observations from the large, rapid Yigong rock slide-debris avalanche, southeast Tibet[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49(5): 589 – 606.
- [14] 许强,董秀军,邓茂林,等. 2010年7·27四川汉源二蛮山滑坡-碎屑流特征与成因机理研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 609 – 622. [XU Qiang, DONG Xiujun, DENG Maolin, et al. The ermanshan rock slide-debris flow of junly 27, 2010 in Hanyuan, Sichuan: characteristics and failure mechanism[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(5): 609 – 622. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 郑光,许强,巨袁臻,等. 2017年8月28日贵州纳雍县张家湾镇普洒村崩塌特征与成因机理研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(1): 223 – 240. [ZHENG Guang, XU Qiang, JU Yuanzhen, et al. The pusacun rockavalanche on August 28, 2017 in zhangjiawan nayongxian, Guizhou: characteristics and failure mechanism[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(1): 223 – 240. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 彭双麒,许强,郑光,等. 碎屑流堆积物粒度分布与运动特性的关系——以贵州纳雍普洒村崩塌为例[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(4): 129 – 136. [PENG Shuangqi, XU Qiang, ZHENG Guang, et al. Relationship between particle size distribution and movement characteristics of rock avalanche deposits: A case study of the Pusa village rock avalanche in Nayong of Guizhou[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(4): 129 – 136. (in Chinese with English abstract)]
- [17] MANZELLA I, LABIOUSE V. Qualitative analysis of rock avalanches propagation by means of physical modelling of non-constrained gravel flows[J]. Rock

- Mechanics and Rock Engineering, 2008, 41(1): 133 – 151.
- [18] 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(增刊1): 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(Sup1): 127 – 132. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 王忠福, 何思明, 刘汉东, 等. 不同岩崩碎屑颗粒尺寸运移堆积特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊2): 3652 – 3657. [WANG Zhongfu, HE Siming, LIU Handong, et al. Experimental study on accumulation characteristic of different rock avalanche debris particles size[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Sup2): 3652 – 3657. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 王玉峰, 许强, 程谦恭, 等. 复杂三维地形条件下滑坡-碎屑流运动与堆积特征物理模拟实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(9): 1776 – 1791. [WANG Yufeng, XU Qiang, CHENG Qiangong, et al. Experimental study on the propagation and deposit features of rock avalanche along 3D complex topography[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(9): 1776 – 1791. (in Chinese with English abstract)]
- [21] DE BLASIO F V, DATTOLA G, CROSTA G B. Extremely energetic rockfalls[J]. Journal of Geophysical Research:Earth Surface, 2018, 123(10): 2392 – 2421.
- [22] THIELICKE W, STAMHUIS E J. PIVlab – towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB[J]. Journal of Open Research Software, 2014, 2: 30.
- [23] LIN Q W, CHENG Q G, LI K, et al. Contributions of rock mass structure to the emplacement of fragmenting rockfalls and rockslides: insights from laboratory experiments[J]. Journal of Geophysical Research:Solid Earth, 2020, 125(4): e2019JB019296.
- [24] 孙水发, 董方敏. ImageJ图像处理与实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 93-108. [SUN Shuifa, DONG Fangmin. Image processing and practice of ImageJ [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 93-108. (in Chinese)]
- [25] HSÜ K J. Catastrophic debris streams (sturzstroms) generated by rockfalls[J]. Geological Society of America Bulletin, 1975, 86(1): 129 – 140.
- [26] MANZELLA I, LABIOUSE V. Flow experiments with gravel and blocks at small scale to investigate parameters and mechanisms involved in rock avalanches[J]. Engineering Geology, 2009, 109(1/2): 146 – 158.
- [27] WANG Y F, CHENG Q G, LIN Q W, et al. Insights into the kinematics and dynamics of the Luanshibao rock avalanche (Tibetan Plateau, China) based on its complex surface landforms[J]. Geomorphology, 2018, 317: 170 – 183.
- [28] UTILI S, ZHAO T, HOULSBY G T. 3D DEM investigation of granular column collapse: Evaluation of debris motion and its destructive power[J]. Engineering Geology, 2015, 186: 3 – 16.
- [29] HIBERT C, MALET J P, BOURRIER F, et al. Single-block rockfall dynamics inferred from seismic signal analysis[J]. Earth Surface Dynamics, 2017, 5(2): 283 – 292.
- [30] LE ROY G, HELMSTETTER A, AMITRANO D, et al. Seismic analysis of the detachment and impact phases of a rockfall and application for estimating rockfall volume and free-fall height[J]. Journal of Geophysical Research:Earth Surface, 2019, 124(11): 2602 – 2622.
- [31] SALÓ L, COROMINAS J, LANTADA N, et al. Seismic energy analysis as generated by impact and fragmentation of single-block experimental rockfalls[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2018, 123(6): 1450 – 1478.
- [32] HEIM A. Landslides and human lives[M]. 7st Vancouver: Bergsturz and Menschenleben Press, 1932.
- [33] MANZELLA I, LABIOUSE V. Flow experiments with gravel and blocks at small scale to investigate parameters and mechanisms involved in rock avalanches[J]. Engineering Geology, 2009, 109: 146 – 158.
- [34] 陈陆望, 白世伟. 脆性岩体岩爆倾向性的相似材料配比试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(增刊2): 1050 – 1054. [CHEN Luwang, BAI Shiwei. Proportioning test study on similar material of rockburst tendency of brittle rockmass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(Sup2): 1050 – 1054. (in Chinese with English abstract)]
- [35] 周辉, 陈珺, 张传庆, 等. 低强高脆岩爆模型材料配比试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(6): 2039 – 2049. [ZHOU Hui, CHEN Jun, ZHANG Chuanqing, et al. Experimental study of the rockburst model material with low-strength and high-brittleness[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(6): 2039 – 2049. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华