

DOI: 10.11779/CJGE201602005

# 无黏性土滑动和堆积特性的模型试验研究

雷先顺<sup>1, 2</sup>, 谢 沃<sup>1</sup>, 卢坤林<sup>\*1, 2</sup>, 朱大勇<sup>1, 2</sup>, 陈菊香<sup>1, 2</sup>

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 土木工程结构与材料安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 采用室内模型试验, 研究了无黏性土堆积体在无侧限条件下沿斜面的滑动和堆积运动过程。探索了堆积体体积、粒径、形状, 坡高, 启动区坡度, 坡脚约束角, 滑面摩擦系数等指标对滑坡运动最终堆积参数(冲程, 宽度, 厚度, 面积)的影响。试验结果表明: 随着堆积体体积、颗粒粒径、坡高、启动区坡度、坡脚约束角变大和滑面摩擦系数减小, 滑坡的最终堆积范围均会变大。无黏性土在斜面上的横向扩展运动有两种形式: 一种是保持一定角度下滑, 直至到达坡底; 另一种是横向扩展到一定宽度后, 沿垂直于坡脚线的方向向下滑动。堆积体体积、滑面摩擦系数、颗粒形状、坡脚约束角对冲程和堆积面积的影响比较显著, 而坡高和体积对堆积宽度的影响比较显著。试验研究成果为深入研究滑坡冲程及堆积形态提供了初步的依据。

**关键词:** 滑坡; 模型试验; 冲程; 堆积形态

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)02-0226-11

作者简介: 雷先顺(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事边坡工程方面的研究工作。E-mail: leixianshun@162.com。

## Model tests of sliding and accumulation characteristics of cohesionless soil

LEI Xian-shun<sup>1, 2</sup>, XIE Wo<sup>1</sup>, LU Kun-lin<sup>1, 2</sup>, ZHU Da-yong<sup>1, 2</sup>, CHEN Ju-xiang<sup>1, 2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Key Laboratory of Civil Engineering and Materials, Hefei 230009, China)

**Abstract:** By using laboratory model tests, the unconstrained sliding and accumulation of gravel on an inclined board are studied. The influences of various parameters of volume, gravel size, shape of accumulation, height of slope, angle of initiation region, constraint angle of slope toe and friction coefficient of sliding surface on the characteristics of final accumulation (run-out, width, thickness, and area) are investigated. The results show that with the increase of volume of accumulation, grain size, height of slope, angle of initiation region and constrained angle of slope toe and the decrease of friction coefficient of sliding surface, the scope of the final accumulation is expanded. The lateral extension motion of gravel on the slope has two different mechanisms: sliding to the slope toe with a certain angle, and sliding downward along the direction perpendicular to the slope toe when the lateral extension reaches a certain width. It is confirmed that the volume of accumulation, friction coefficient of sliding surface, gravel shape and constrained angle of slope toe are the most significant factors to influence the run-out and accumulation area, and the height of slope and volume of accumulation have significant influences on the width. Finally, the test results may provide a preliminary basis for further studies on landslide run-out and accumulation characteristics.

**Key words:** landslide; model test; run-out; accumulation shape

## 0 引言

当斜坡上本来有松散堆积体, 或者在滑坡过程中滑坡体发生破碎、形成土石块等碎屑体, 在自身重力或其他外界因素的影响下, 这些松散堆积体就会沿斜坡快速向下运动, 产生很大的危害。这种现象叫滑坡—碎屑流<sup>[1]</sup>。与一般意义上的滑坡相比, 滑坡—碎屑流的冲程要大很多, 且滑动速度快, 遇障碍物会发生转向。为了解释该类地质灾害的特征, 国内外学者展开了比较深入的研究, 提出了一些相关的理论分析方

法。Dravies 等<sup>[2-3]</sup>根据摩擦规律和能量转化关系, 提出土力学的分析方法。Okura 等<sup>[4]</sup>根据颗粒间的接触和力学关系, 提出颗粒流的分析方法。Hung<sup>[5]</sup>, Cruden<sup>[6]</sup>, McDougall 等<sup>[7]</sup>, Hutter 等<sup>[8]</sup>根据体积流变特性, 提出流体力学的分析方法。另外, 很多学者提出了一些不同的运动理论。Kent<sup>[9]</sup>提出空气润滑模型,

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179043, 41402256)

收稿日期: 2015-02-03

\*通讯作者

认为碎屑流和地面存在大量封闭的空气, 碎屑流内颗粒间的作用被空气与颗粒间作用代替, 导致地面的摩擦力急剧减小, 从而造成高速运动。Scheiddege<sup>[10]</sup>通过理论分析, 得出一种预测滑坡冲程和速度的方法。

由于滑坡地质灾害的现场监测数据往往难以获得。同时, 针对此类问题的数值模拟<sup>[11-12]</sup>由于许多重要参数无法准确获得, 可靠性较差, 而在理论研究方面又还没有得到一致的观点。模型试验成为验证理论假设的重要方法, Okura 等<sup>[13]</sup>通过大比例实验, 研究了堆积体体积对碎屑运动状态的影响, 验证了能量传递模型的合理性。Dravies 等<sup>[14]</sup>通过室内小比例实验模拟实际的碎屑流运动, 并讨论了影响其冲程大小的因素。Manzella 等<sup>[15-16]</sup>使用砂子和碎石子为颗粒材料, 系统的研究了不同参数对堆积形态的影响。Mancarella<sup>[17]</sup>通过实验和理论研究, 提出一种动态模型, 来预测滑体遇到障碍后的冲程。吴越等<sup>[18]</sup>设计制作了滑体下滑和冲击测量模型, 基于试验分析, 提出了两种滑体冲击能计算方法。刘涌江等<sup>[19]</sup>通过碰撞试验研究了高速滑坡岩体碰撞解体后的加速运动效应, 得出了不同速度段岩体体积的分布规律, 并从理论上对其进行了分析。

本文采用室内模型试验的手段, 研究了无黏性土堆积体沿斜面下滑和堆积运动的特性。重点分析了材料粒径、材料形状、堆积体体积、启动区坡度、坡脚约束脚、滑面摩擦系数和坡高等指标对滑坡最终堆积参数的影响。为下一步研究滑坡运动过程及灾害评估提供试验数据支持。

## 1 模型试验

### 1.1 试验装置

试验装置由启动区、加速区、减速区3部分组成。用钢管拼装成上方倾斜的脚手架, 上面铺装上木板, 试验时在滑面两侧竖起木板, 防止砂石颗粒落出, 形成加速区滑面。加速区滑面宽度为1.7 m, 其坡度和坡高可以根据试验需要进行调整。启动区由一个可调节角度的钢架和木质模型槽组成, 钢架的坡度可以在0°~50°之间任意调节, 模型槽的尺寸为60 cm×40 cm×50 cm(长×宽×高)。为了让模型槽内的堆积体能够全部滑出, 模型槽的内表面采用十分光滑的木板。模型槽左右两侧密封, 后侧和上侧敞开, 方便装料。前侧有可向两边开合的挡板, 挡板前设一根铁链。铁链一端固定, 另一端连接在手动葫芦上, 通过控制手动葫芦, 可以调节铁链的松紧, 从而达到控制模型槽前侧挡板开合的目的。减速区由木板铺装组成, 上面画上10 cm×10 cm的方格, 便于观察最终堆积体的

分布范围。

在斜坡的上方和前方分别放置一台摄像机, 以记录滑坡运动的整个过程。试验装置如图1, 2。

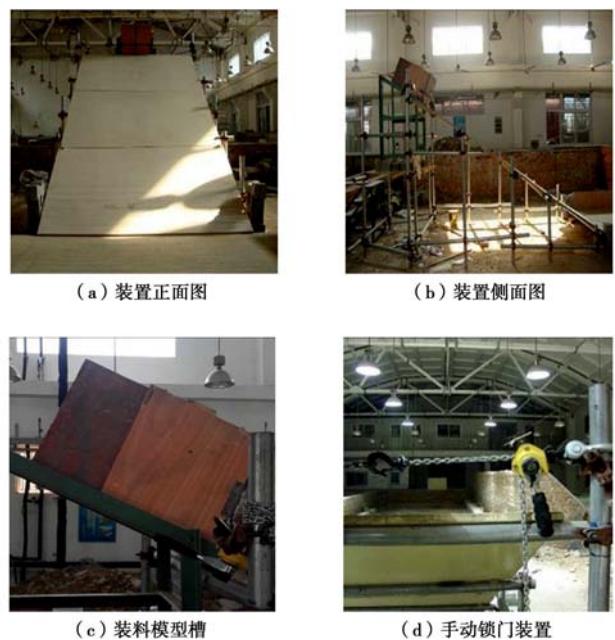


图1 试验装置实物图

Fig. 1 Photos of experimental set-up

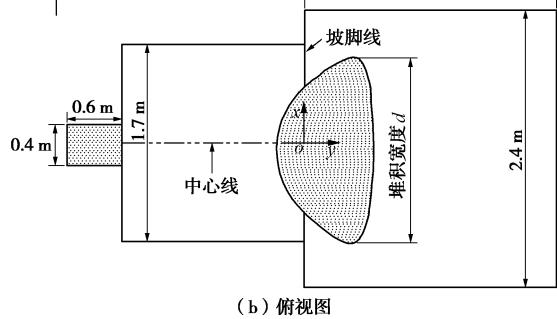
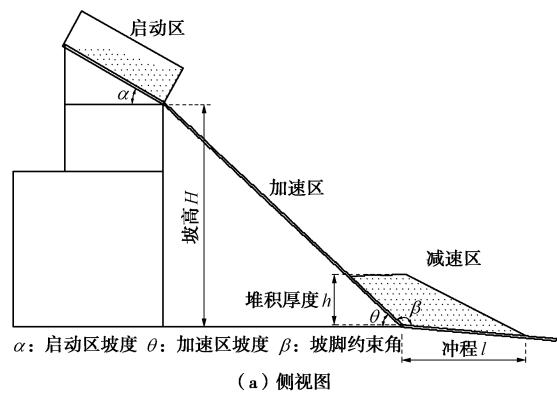


图2 试验装置示意图

Fig. 2 Sketch of experimental set-up

### 1.2 试验材料及试验数据测量计算过程

本试验采用了碎石子和砂子两种不同的颗粒材料。均取自工程中常见的砂石材料, 经过人工筛选得



表 1 不同试验材料的物理力学性质指标

Table 1 Physical and engineering properties of model materials

试验材料种类	粒径/mm	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	初始含水率/%	比重	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	和粗糙板的摩擦系数/(°)	和光滑板的摩擦系数/(°)
细砂	<1	14.9	1.5	2.70	31.52	0.01	33.34	30.67
中粗砂	1~3	14.5	1.2	2.67	33.56	0.02	31.78	28.76
粗砂	3~10	13.6	1.1	2.65	34.42	0.02	30.47	25.35
碎石子	10~20	13.2	1.4	2.49	40.28	0.01	34.78	31.67

表 2 试验方案一览表

Table 2 Programs of model tests

组号	材料	堆积体积/L					坡面材料	坡高/m	斜坡坡度/(°)			试验次数
		10	20	30	40	50			启动区	加速区	坡脚约束角	
A	细砂	★	★	★	★	★	粗糙板	1.2	30	30	158	18
	中粗砂	★	★	★	★	★						18
	粗砂	★	★	★	★	★						17
	细石子	★	★	★	★	★						21
B	中粗砂	★	★	★			光滑板	1.2	30	30	158	9
	粗砂	★	★	★								10
	细石子	★	★	★								10
C	中粗砂	★	★	★			光滑板	1.2	30	30	150	10
	粗砂	★	★	★								9
	细石子	★	★	★								10
D	中粗砂	★	★	★			光滑板	1.8	45	30	150	9
	粗砂	★	★	★								9
	细石子	★	★	★								10
E	中粗砂	★	★	★			光滑板	1.8	30	30	150	11
	粗砂	★	★	★								10
	细石子	★	★	★								9

到。碎石子多为不规则扁平状和针状，棱角分明。相比而言，砂子的形状则比较规则。试验土料的强度指标根据剪切试验获得，这里土料和板面的摩擦系数指土料从斜面上滑下所需要的斜面最小坡度值，具体方法同斜板试验<sup>[20]</sup>类似。相应的试验土石料物理力学性质见表 1，颗粒级配曲线见图 3，实物图见图 4。

本试验主要的测量参数是冲程  $l$ 、堆积宽度  $d$ 、纵向中心线处堆积厚度  $h$ 、减速区上的平面堆积面积  $S$ 。用以上指标来评价无黏性土崩滑运动的堆积特征及其危害范围。在滑坡灾害评价中，冲程  $l$  是十分重要的指标，关系到工程治理、灾害预测、搬迁范围等。同时，减速区上的平面堆积面积也是一个十分重要的参数，但以往试验少有对其进行研究。试验发现，纵向中心线处的堆积厚度大于两侧厚度，故只测量该处测点堆积厚度，比较后得到最大堆积厚度。

测量堆积体的冲程和宽度采用 5 m 长的卷尺，测量堆积体的厚度用量程为 20 cm 的游标卡尺，精度可

达到 0.02 mm。见图 5。通过减速区上的网格，可以获得堆积区域边缘和网格线交点处的坐标值，选取特殊交点的坐标，导入 Origin 软件中，可以得到平面堆积区域的简化图，再通过该软件内部的面积计算功能，即可得到需要的平面堆积面积值。减速区的平面堆积范围见图 6 所示。

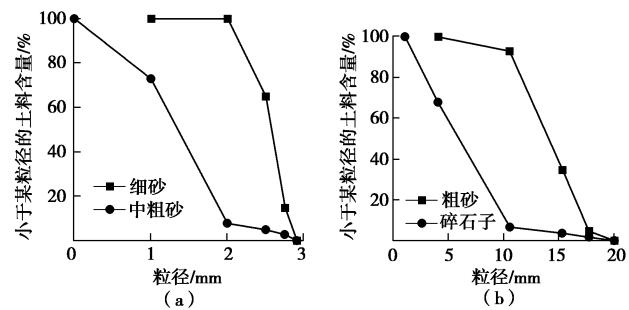


图 3 试验用土级配曲线

Fig. 3 Gradation curve for test materials

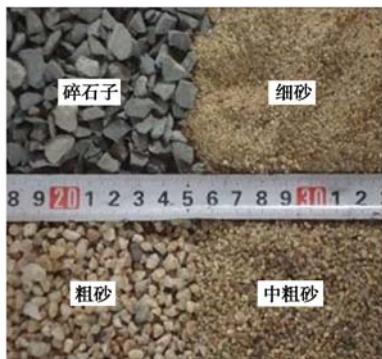


图 4 试验土石料

Fig. 4 Granular materials



图 5 堆积厚度测量图

Fig. 5 Thickness measurement of accumulation

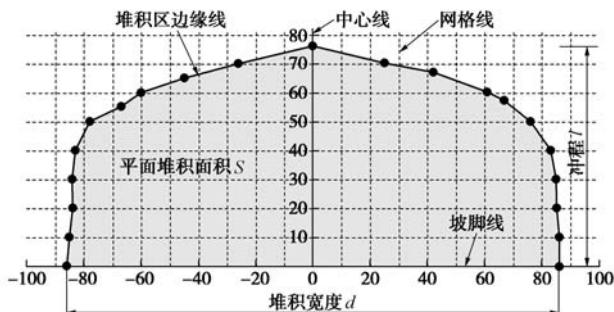


图 6 平面堆积范围示意图

Fig. 6 Sketch of plane slope of accumulation

### 1.3 试验方案

试验研究了坡高, 启动区坡度, 坡脚约束角, 滑面摩擦系数, 堆积体体积、颗粒粒径、形状对堆积体滑动过程和最终堆积形态的影响。共开展了 190 组试验。试验方案见表 2。

这里以堆积体的初始堆积体积为指标, 通过控制每次装料的质量, 保证堆积体的体积。每次根据需要的体积和相应颗粒材料的密度, 称取对应质量的材料, 放进模型槽中。然后将堆积体表面整平, 使上表面保持水平。接着, 将手动葫芦松开, 模型槽内的堆积体在自身重力的作用下, 自动将挡板推开, 冲出模型槽并开始沿斜坡下滑。通过调整模型槽下部的钢架角度, 可以调整崩滑启动区的角度, 从而使颗粒得到不同的初速度。通过调整脚手架的结构可以得到不同高度和

坡度的斜坡。本试验的斜坡面采用两种木板, 分别是三合板和免漆板, 后者的摩擦系数比前者小很多, 可以模拟两种不同摩擦系数的斜坡, 在后面的叙述中分别以粗糙板和光滑板指代。又因为在试验过程中, 板面上会产生灰尘, 需要经常性的进行清理, 以保证试验数据的准确性。相比粗糙板, 光滑板清洗起来非常方便, 而且表面的硬度比较大, 在砂石滑落的过程中不容易被刮伤, 可以保证实验中滑面性质的稳定。所以在其他的试验组次中均采用光滑板作为滑面。

## 2 试验结果分析

### 2.1 堆积体崩滑过程分析

无黏性土堆积体在斜面上的滑动过程不同于一般意义的滑坡, 通过实验发现, 其在运动的过程中表现出很明显的颗粒流动性。一般的, 把其运动过程分为启动过程、加速过程、堆积过程 3 个部分。这里, 主要研究其加速和堆积过程。无黏性土颗粒在斜面上的运动形式往往有好几种, 既有滑动, 也有滚动和跳动。相比而言, 石子由于形状不规则, 与滑面间的摩擦力大, 在斜面上大部分是滑动形式运动, 且速度缓慢。在运动过程中颗粒前后关系保持一致, 很少发生后面颗粒溅越前面颗粒的现象。而粗砂在斜面上多以滚动, 甚至是跳动形式运动, 在减速区上的分布比较分散。

同时, 对于在斜面上滑动的整个滑体而言, 前缘的颗粒运动快, 滚动和跳动明显, 而中间部分的颗粒由于颗粒间的相互阻碍作用, 多以滑动形式运动。当前方的颗粒开始堆积后, 后面的颗粒很少能够越过前方的堆积体, 而只能依次向后堆积, 最终停止滑动。最后的冲程在很大程度上取决于最先到达减速区的颗粒的运动距离。如图 7 为体积为 30 L 的细石子在斜坡上运动过程图, 其中斜坡参数为:  $H=1.2 \text{ m}$ ,  $\alpha=30^\circ$ ,  $\theta=30^\circ$ ,  $\beta=0^\circ$ 。

滑体在减速区上的最终堆积宽度由加速区上的展开宽度和减速区上的展开宽度两部分组成。在加速区上的展开宽度与颗粒材料性质、斜面摩擦系数、坡面长度等都有一定的关系, 并且在很大程度上决定了最终堆积体的堆积宽度。通过实验发现, 颗粒在加速区上的横向扩展过程有两种形式。一种是颗粒体两侧边缘夹角扩展到一定角度(约为  $46^\circ$ ), 达到其最大的横向宽度时, 就停止向两侧扩展, 而保持垂直于坡脚线向下的速度向坡底运动。当加速区斜面的长度足够长时(坡高  $H=1.8 \text{ m}$ ), 会出现这种现象。另一种是颗粒体两侧边缘夹角保持一定的角度(约为  $46^\circ$ )一直扩展开来, 直至到达坡底, 即并未在加速区斜面

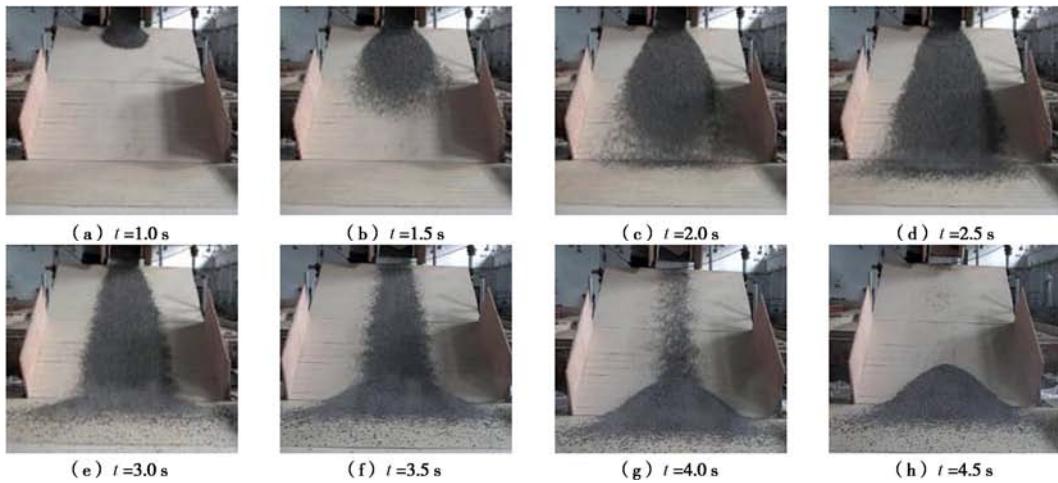


图 7 颗粒在斜坡上运动过程

Fig. 7 Motion process on slope of particles

上达到其最大的横向宽度，试验中大部分组的现象属于这种方式。如图 8 给出的是中粗砂在斜面上横向扩展运动的两种不同形态。Manzella 等<sup>[16]</sup>在实验中观察到颗粒还可以一直沿着垂直于坡脚线的方向运动，直至到达坡底，在斜坡面上没有出现横向扩展。但在本次试验中尚未观察到此种现象。当前端颗粒开始堆积后，减速区上的堆积体基本上不会再向前方运动，但还能完成一部分横向扩展。



图 8 颗粒在斜坡上的横向扩展运动

Fig. 8 Lateral extension motion on slope of gravel

在斜坡上运动时，滑体前端的颗粒速度明显比较大，且中间的速度大于两侧的速度，导致整体呈“梭状”快速向下运动，边缘的颗粒由于颗粒间的相互作用较中部弱很多，所以分布较稀疏。并且，颗粒的粒径越大，颗粒间的相互作用越弱，这种稀疏现象越加明显。如图 9。

## 2.2 不同试验参数对最终堆积范围的影响

模型试验设置了坡高，启动区坡度，坡脚约束脚，坡面材料，颗粒属性，堆积体体积 6 个变量，现分别分析其对试验结果 ( $l$ ,  $d$ ,  $S$ ,  $h$ ) 的影响。

### (1) 坡高的影响

试验中，设置 C 组和 E 组作为对比。坡高变大时，对应的坡长也变大，使得颗粒可以获得较长的加速时间，相应的冲程，堆积宽度，堆积面积都有一定的提

高。但是堆积的最大厚度反而变小。图 10 给出的是粗砂在两种实验条件下的滑坡堆积结果。

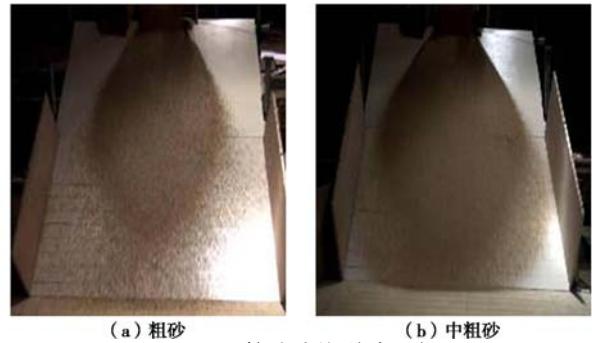
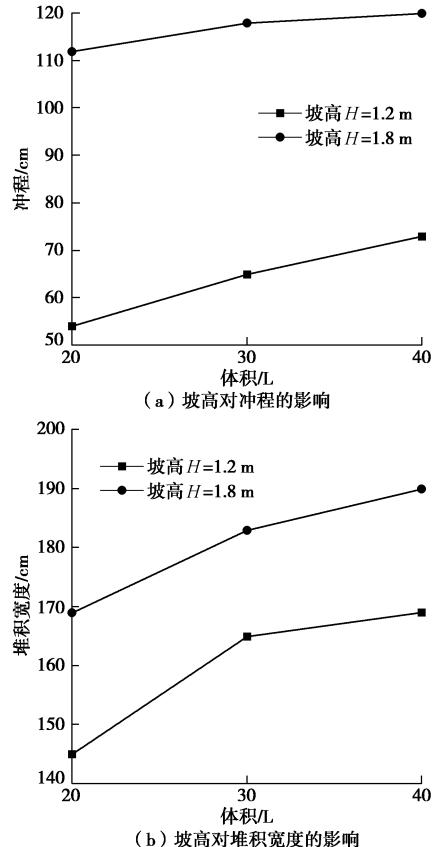


图 9 颗粒流边缘稀疏现象

Fig. 9 Phenomenon of few and scattered gravels on edge



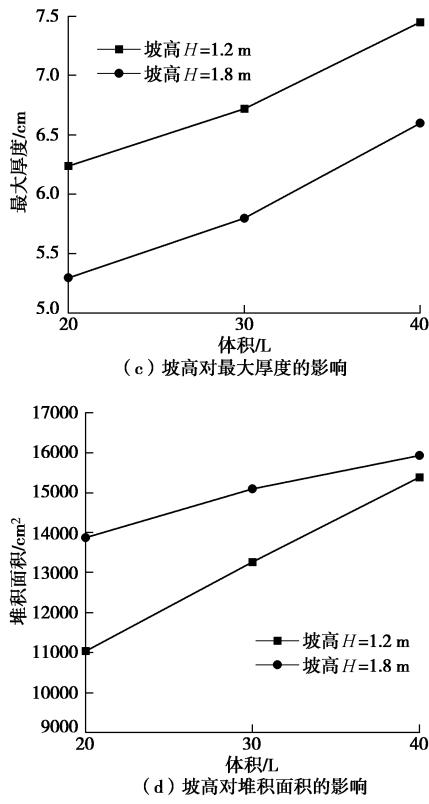


图 10 坡高对滑坡堆积范围的影响

Fig. 10 Influences of slope height on accumulation scope

另外,对于两组试验,当体积增大时,虽然堆积体的各项尺寸均变大,但变化的规律有所不同。这里,定义参数  $K_s$  为两组试验对应堆积参数的比值(E 组/C 组)。分析堆积面积的变化趋势,可以发现。当堆积体体积  $V=20\text{ L}, 30\text{ L}, 40\text{ L}$  时,  $K_s$  分别为 1.25, 1.13, 1.03, 即两种坡高下的堆积面积越来越接近。可以推测,随着堆积体体积的增加,斜坡高度对滑坡运动后的平面堆积面积影响越来越小,而主要是由初始堆积体积决定。最终的冲出距离也出现同样的规律,随着体积的变大,  $K_s$  分别为 2.07, 1.85, 1.64。

另外,对比 3 种不同的颗粒材料,当坡高变大时,碎石子和中粗砂的堆积宽度变化不是很明显,而粗砂的变化则比较大。这是因为粗砂在斜坡上的最大扩展宽度大,同时,也需要较远的斜坡距离进行横向展开。当坡高变大时,斜坡坡长变长,使得粗砂能够尽可能的扩大其宽度。而其他两种颗粒材料,只需要较小的斜坡距离就可以扩展到最大宽度,所以斜坡长度的影响就不是那么明显。

## (2) 启动区坡度的影响

改变启动区的坡度,滑体的初始堆积坡度发生变化,当打开挡板后,滑体将获得不同的初始动能。设置 D 组和 E 组来分析启动区坡度对其运动的影响。实验表明,当启动区的坡度变大时,滑体最终的冲程、堆积宽度、堆积面积均变大,堆积厚度也变大。说明

启动区坡度的增加有利于滑坡运动,导致其最终危害范围变大。如图 11 所示是 3 种不同体积的中粗砂,在不同启动区坡度条件下,最终的堆积范围的变化情况,其中  $K_s$  为对应堆积参数的比值(D 组/E 组)。

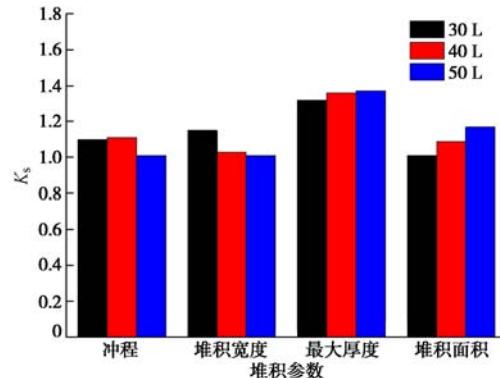


图 11 启动区坡度对滑坡堆积范围的影响

Fig. 11 Influences of angle of initiation region on accumulation scope

相应的,最终的堆积形态也会发生变化。图 12 给出的是 40 L 的中粗砂在两种条件下的堆积形态。可以看出当启动区坡度增加至  $45^\circ$  时,在距坡脚前后 20 cm 范围内出现了明显的堆积隆起区,厚度变化大致可以分为 3 段。此外,其堆积区边缘厚度和堆积区中部差别不是很大,整体形状比较规则,分布比较集中,可以比较明显的分辨出其堆积区域。而初速度较小时,堆积区中部厚度变化比较均匀,并未出现明显的隆起区,只在坡脚处转折,厚度变化可以分为两段。另外,其堆积区厚度从中间到边缘逐渐变小,边缘厚度和堆积区中部差别比较大,整体形状不规则。说明初速度变大时,颗粒间的相互作用比较强烈,容易出现溅越、堆积隆起现象,还会导致其最后的堆积区域相对集中。

## (3) 滑面摩擦系数的影响

无黏性土堆积体发生崩滑后,随着其崩解下滑,重力势能将逐渐转化成动能。但是与整体下滑不同的是,碎屑体在下滑运动的过程中,自身会发生解体,内部的碎屑之间会发生碰撞,这也会消耗一定的能量。在本实验中,只分析碎屑体和地面的摩擦耗能,设置 A 组和 B 组作为对照,用来考查滑面摩擦系数的影响。

相比而言,当滑面为光滑板时,滑体最终的冲程、堆积面积、堆积宽度和堆积厚度都变大,但是几种堆积参数的增加程度有差异。其中,冲程和堆积面积增加幅度明显,而堆积宽度的变化幅度却不是很大,尤其是石子,在两种情况下的堆积宽度几乎差不多。由此可以得出,当滑面的摩擦系数变小时,可以极大的增强颗粒的纵向运动能力,导致滑体最终的破坏影响范围扩大,但是对其横向运动影响较小,堆积宽度变



图 12 启动区坡度对堆积厚度的影响规律

Fig. 12 Influences of angle of initiation region on accumulation thickness

化较小。如图 13 所示是中粗砂在不同滑面条件下, 最终的堆积范围的变化情况, 其中  $K_s$  为对应堆积参数的比值 (B 组/A 组)。

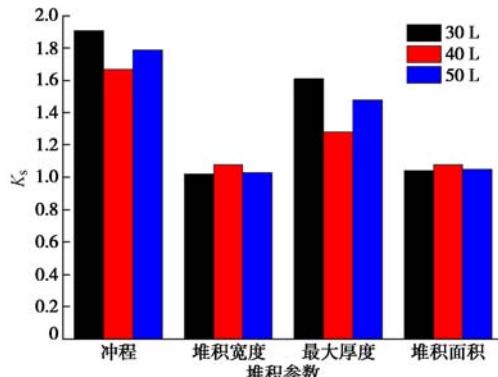


图 13 滑面摩擦系数对滑坡堆积范围的影响

Fig. 13 Influences of friction coefficient of sliding surface on accumulation scope

对比 A, B 两组粗砂和石子的堆积现象。相较于 A 组, B 组粗砂和石子对应测量参数值的差距变小, 即颗粒形状对其堆积范围的影响变小, 堆积范围主要由体积决定。如图 14 所示, 是 30 L 的两种颗粒材料在两种滑面下对应参数的  $K_s$  值 (粗砂/石子) 比较图。

另外, 通过试验发现, 减小斜面的摩擦系数, 滑坡体最终的堆积形态发生了很大的变化。如图 15, 左侧为 A 组、右侧为 B 组。A 组中, 颗粒材料大多数堆积在加速区斜坡上, 只有少量的颗粒在减速区堆积。B 组中, 颗粒材料大多数都集中在减速堆积区。另外, A 组中, 最终堆积体前缘形态大致是弧形, 而 B 组中, 堆积体前缘弧形形态并不明显, 粗砂甚至出现了前缘呈凹形的现象。

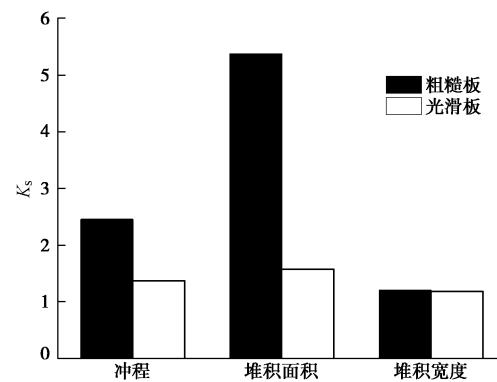


图 14 滑面摩擦系数对不同颗粒材料堆积范围影响

Fig. 14 Influences of friction coefficient of sliding surface on accumulation scope of different gravel materials

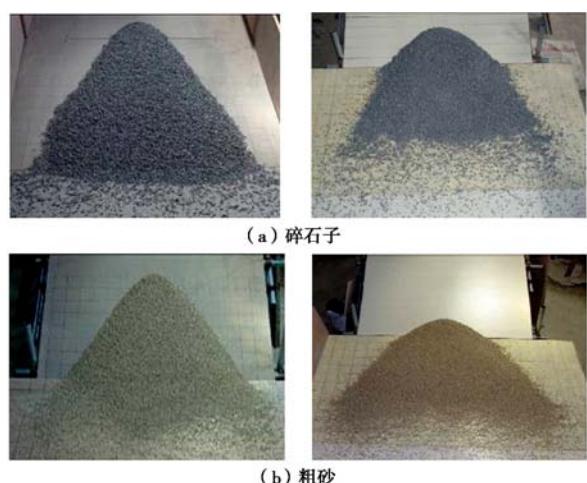


图 15 滑面摩擦系数对堆积形态的影响

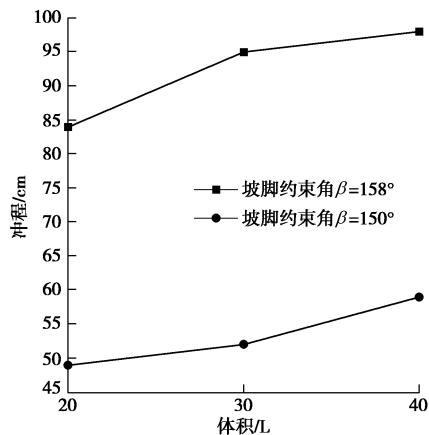
Fig. 15 Influences of friction coefficient of sliding surface on accumulation

在研究导致碎屑流的高速、远程原因时, 很多学者关注滑坡碎屑流过程中底部碎屑与滑面的接触问

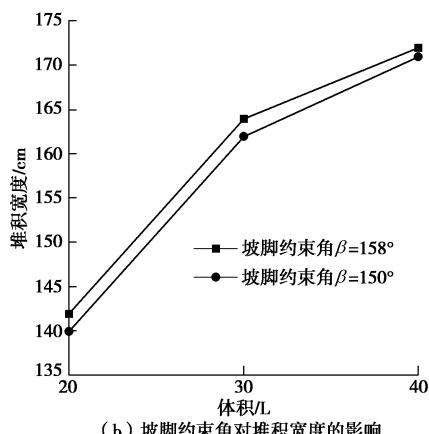
题, 提出各种理论, 来解释在碎屑流运动过程中, 滑面摩擦阻碍效果大大减弱的现象。但是由于实际崩滑过程中, 滑面摩擦性受到诸如岩土体物理力学性质、含水情况、滑面走向等诸多因素的影响, 同时, 在滑坡—碎屑流运动过程中, 滑面的摩擦效应还在动态变化着。而要准确获取滑面的相关参数, 是十分困难的, 这也导致研究这一问题的难度加大。本试验使用两种滑面, 只能简单的比较滑面摩擦阻碍作用对碎屑流的影响。

#### (4) 坡脚约束角的影响

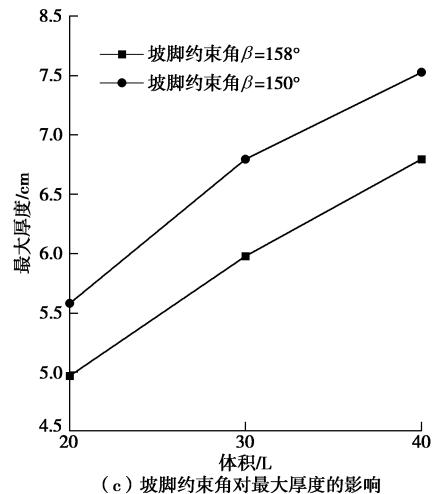
设置B组和C组, 分析坡脚约束角的影响。两组的滑坡坡脚约束角 $\beta$ 分别为 $158^\circ$ 和 $150^\circ$ 。坡脚约束角越大, 说明坡脚对滑体的阻碍作用越小<sup>[21]</sup>。图16给出的是中粗砂在两种条件下的堆积情况。试验得出, 当坡脚约束角变大时, 最终的堆积范围也变大。尤其是对其冲程和堆积面积影响显著, 当约束作用变小时, 3种颗粒材料的冲程和堆积面积都增加了将近一倍。而堆积宽度的增大幅度不是很明显, 堆积厚度变小, 说明坡脚的约束作用对碎屑流的纵向运动有比较大的影响。当滑坡体到达坡脚时会与堆积区平面发生碰撞, 坡脚约束角越小, 坡脚约束导致滑坡体运动方向的改变量就越大, 在碰撞的过程中就会损失更多的能量, 导致滑坡的影响范围减小。



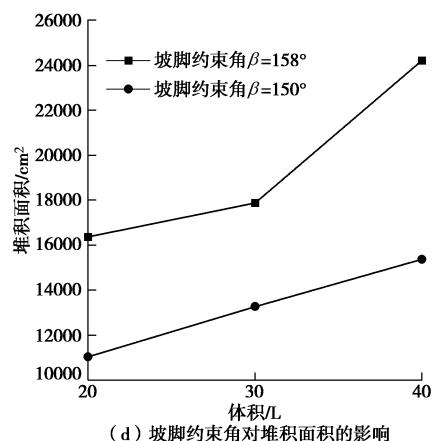
(a) 坡脚约束角对冲程的影响



(b) 坡脚约束角对堆积宽度的影响



(c) 坡脚约束角对最大厚度的影响



(d) 坡脚约束角对堆积面积的影响

图16 坡脚约束角对堆积范围的影响规律

Fig. 16 Influences of constraint angle of slope toe on accumulation scope

#### (5) 堆积体体积和材料种类的影响

受实验滑槽尺寸的影响, 当堆积体体积超过50 L后, 其在滑面上的运动受滑槽侧挡板的影响较大, 而本试验讨论的是没有侧边界约束的情况。所以在试验中, 对于粗糙板每种颗粒材料设置10 L, 20 L, 30 L, 40 L, 50 L共5种情况。对于光滑滑面, 则设置20 L, 30 L, 40 L共3种情况。

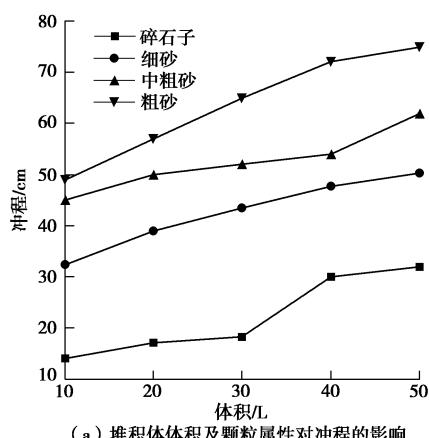
通过图17可以看出, 当砂子的粒径变大时, 堆积厚度减小, 冲程和堆积面积增加明显。堆积宽度虽然也变大, 但是当堆积体积大于30 L后, 3种砂子的堆积宽度差别不大, 说明当体积增加时, 颗粒粒径大小对最终堆积宽度影响减小, 堆积宽度大小主要由堆积体体积决定。

同时, 几种颗粒材料的堆积形态也不同。细砂在减速区堆积比较集中, 边缘光滑, 可以十分明显的看出其堆积范围, 并且在其堆积表面有明显的“堆积痕迹”。而随着粒径的变大, 颗粒在减速区的堆积区域越来越分散, 尤其是粗砂, 甚至难以划分其堆积范围。说明随着颗粒粒径的增加, 碎屑的运动越来越有随机

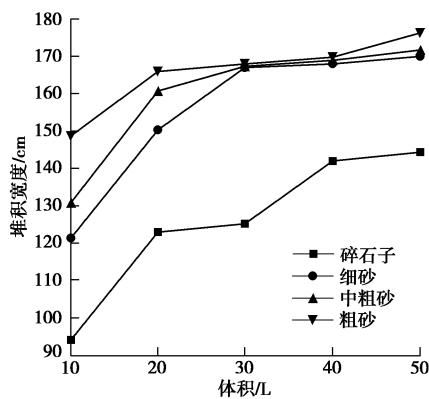
性，所以不能简单的用其堆积范围来评价其现象，而更应该考虑它的影响范围，掌握其影响范围的统计规律。对于碎石子，虽然其粒径最大，但是由于形状不规则，最终堆积范围是最小的。绝大部分都堆积在加速区斜面上，只有很少部分在减速区堆积，并且在其堆积区的周围也有很多零星的碎石子，说明其运动影响范围要远大于其堆积范围。

如图 18，给出的是 A 组粗砂体积变化时，在减速堆积区上的最终堆积平面示意图。试验结果证明，对于所有的试验颗粒材料，当堆积体的体积增加时，其最终堆积范围逐渐变大，且变化规律比较一致。这和许多其他学者所做试验得出的结果相同。说明体积是影响碎屑流运动的一个十分重要的因素。

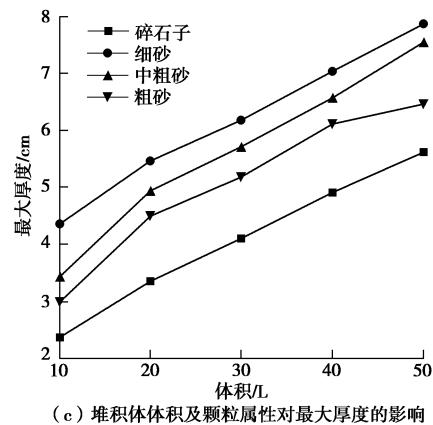
Davies<sup>[3]</sup>根据统计学方法对一定数量的滑坡—碎屑流进行了分析，得出堆积体体积是影响滑坡—碎屑流影响距离的关键因素，并提出关于两者的统计关系式。由于滑坡—碎屑流具有明显的“尺寸效应”<sup>[22]</sup>，常规的模型实验无法反应真实的现象，而只能得出简单的影响规律，这也是研究该问题的难点之一。试验采用了 3 种粒径的砂子和一种碎石子，图 19 是堆积体体积为 50 L 时，4 种颗粒堆积体在减速区上的堆积平面示意图。



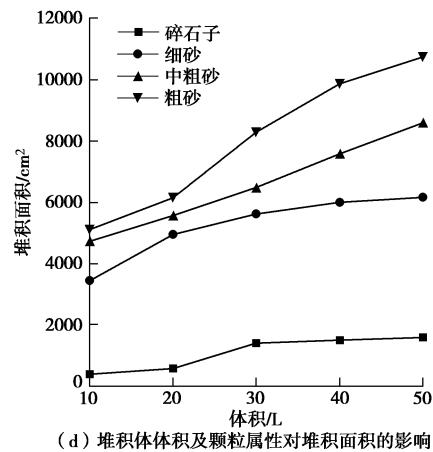
(a) 堆积体体积及颗粒属性对冲程的影响



(b) 堆积体体积及颗粒属性对堆积宽度的影响



(c) 堆积体体积及颗粒属性对最大厚度的影响



(d) 堆积体体积及颗粒属性对堆积面积的影响

图 17 堆积体体积和颗粒属性对堆积范围的影响

Fig. 17 Influences of gravel materials and volume on accumulation scope

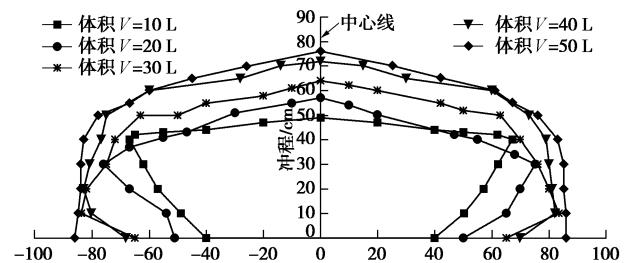


图 18 堆积体体积对堆积范围的影响

Fig. 18 Influences of volume on accumulation scope

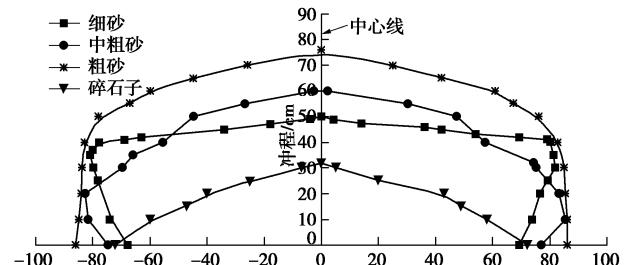


图 19 颗粒材料对堆积范围的影响

Fig. 19 Influences of gravel material on accumulation scope

另外，由于碎石子与粗糙板的摩擦力大，导致其

横向扩展能力有限。即使坡高  $H=1.2\text{ m}$  时, 也能够在加速区斜面上完成横向扩展过程。观察其厚度分布情况, 在粗糙板上, 碎石子的最大堆积厚度大致位于加速区离坡脚 40 cm 处, 而砂子的最大堆积厚度均位于坡脚处。说明当滑面不利于碎石滑动时, 其运动过程类似物体受力后出现的“挤压”现象。此外, 观察其最后的堆积形态, 当体积  $V=50\text{ L}$  时, 可以明显看出其堆积形态的不规则性, 出现下面“宽短”, 上面“长窄”的形态, 边缘十分不光滑, 如图 20。试验现象说明了颗粒材料的形状对其运动影响较大。

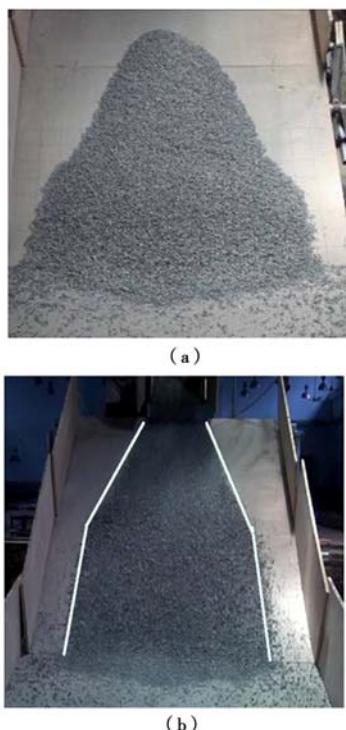


图 20 碎石子的运动形态

Fig. 20 Motion shape of gravel

### 2.3 小结

将上述所有试验变量对试验结果的影响规律汇总成表 3。

表 3 试验结果汇总表

Table 3 Summary of test results

试验变量	冲程	宽度	面积	最大厚度
体积	↗	↗	↗	↗
粒径	↗	↗(很小)	↗	↘
形状 (砂→石)	↘↘	↘	↘↘	↘
斜坡坡高	↗	↗↗	↗	↘
启动区坡度	↗	↗	↗	↗
坡脚约束角	↗↗	↗(很小)	↗↗	↘
坡面摩擦系数	↘↘	↘(很小)	↘↘	↘

注: 1. 表中考虑的都是试验变量数值变大对试验结果的影响; 2. “↗”表示试验结果增加, “↘”表示试验结果减小, “↗↗”表示试验结果明显增加, “↘↘”表示试验结果明显减小。“↗(很小)”表示试验结果小幅度增加, “↘(很小)”表示试验结果小幅度减小。

## 3 结 论

(1) 随着坡高、颗粒粒径、初速度、坡脚约束角、堆积体体积增加和滑面摩擦系数减小, 滑坡最终的堆积范围均会变大, 但影响规律不同。

(2) 堆积体体积、滑面摩擦因素对堆积范围的所有参数的影响都比较大; 颗粒粒径和形状对冲程、堆积面积影响明显, 但对堆积宽度的影响较小; 坡高对最终堆积宽度影响显著。

(3) 启动区坡度增加会使堆积体的最终堆积形态发生变化, 中间部位形成明显的堆积隆起区, 厚度变化大致可以分为 3 段。

(4) 颗粒在斜面上的横向扩展有两种形式, 受到坡长、颗粒形状等因素影响。一种是保持一定角度下滑, 直至到达坡底; 另一种是横向扩展到一定宽度后, 沿垂直于坡脚线的方向向下滑动。

(5) 对冲程和堆积面积影响最大的是体积、滑面摩擦系数; 对堆积宽度影响最大的是坡高和堆积体体积。

## 参考文献:

- [1] HSÜ K J. Catastrophic debris streams (sturzstroms) generated by rockfalls[J]. Geological Society of America Bulletin, 1975, **86**(1): 129 - 140.
- [2] DAVIES T R, MCSAVENY M J, HODGSON K A. A fragmentation-spreading model for long-runout rock avalanches[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, **36**(6): 1096 - 1110.
- [3] DAVIES T R H. Spreading of rock avalanche debris by mechanical fluidization[J]. Rock Mechanics, 1982, **15**(1): 9 - 24.
- [4] OKURA Y, KITAHARA H, SAMMORI T. Fluidization in dry landslides[J]. Engineering Geology, 2000, **56**(3): 347 - 360.
- [5] HUNGR O. A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1995, **32**(4): 610 - 623.
- [6] CRUDEN D M, HUNGR O. The debris of the Frank Slide and theories of rockslide-avalanche mobility[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1986, **23**(3): 425 - 432.
- [7] MCDOUGALL S, HUNGR O. A model for the analysis of rapid landslide motion across three-dimensional terrain[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, **41**(6): 1084 - 1097.
- [8] HUTTER K, KOCH T. Motion of a granular avalanche in an exponentially curved chute: experiments and theoretical predictions[J]. Philosophical Transactions of the Royal

- Society of London. Series A: Physical and Engineering Sciences, 1991, **334**(1633): 93 - 138.
- [9] KENT P E. The Transport mechanism in catastrophic rock falls[J]. Journal of Geology, 1966, **74**(1): 79 - 83.
- [10] SCHEIDDEGER A E. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides[J]. Rock Mechanics, 1973, **5**(4): 231 - 236.
- [11] ZHOU Jia-wen, CUI Peng, FANG Hua. Dynamic process analysis for the formation of Yangjiagou landslide-dammed lake triggered by the Wenchuan earthquake China[J]. Landslides, 2013, **10**(3): 331 - 342.
- [12] 鲁晓兵, 张旭辉, 崔 鹏. 碎屑流沿坡面运动的数值模拟 [J]. 岩土力学, 2009, **30**(增刊 2): 524 - 527. (LU Xiao-bing, ZHANG Xu-hui, CUI Peng. Numerical simulation of clastic grain flow along a slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(S2) : 524 - 527. (in Chinese))
- [13] OKURA Y, KITAHARA H, SAMMORI T, et al. The effects of rock fall volume on runout distance[J]. Engineering Geology, 2000, **58**(2): 109 - 124.
- [14] DAVIES T R, MCSAVENY M J. Runout of dry granular avalanches[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, **36**(2): 313 - 320.
- [15] MANZELLA I, LABIOUSE V. Qualitative analysis of rock avalanches propagation by means of physical modelling of not constrained gravel flows[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2008, **41**(1): 133 - 151.
- [16] 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): 146 - 158.
- [17] MANCARELLA D, HUNGR O. Analysis of run-up of granular avalanches against steep, adverse slopes and protective barriers[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, **47**(8): 827 - 841.
- [18] 吴 越, 刘东升, 李明军. 滑体下滑及冲击受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 Yue, LIU Dong-sheng, LI Ming-jun. 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))
- [19] 刘涌江, 胡厚田, 赵晓颜. 高速滑坡岩体碰撞效应的试验研究[J]. 岩土力学, 2004, **25**(2): 255 - 260. (LIU Yong-jiang, HU Hou-tian, ZHAO Xiao-yan. Experimental study of impact effect of high-speed landslide[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(2): 255 - 260. (in Chinese))
- [20] 徐 超, 廖星樾, 叶观宝, 等. HDPE 膜界面摩擦特性的斜板仪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(8): 989 - 993. (XU Chao, LIAO Xing-yue, YE Guan-bao, et al. Researches on frictional properties of HDPE geomembrane using tilt table device[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(8): 989 - 993. (in Chinese))
- [21] 樊晓一, 乔建平. “坡”、“场”因素对大型滑坡运动特征的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(11): 2337 - 2348. (FAN Xiao-yi, QIAO Jian-ping. Influence of landslide and ground factors on large-scale landslide movement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(11): 2337 - 2348. (in Chinese))
- [22] MELOSH H J. Giant rock avalanches[J]. Nature, 1990, **348**(6301): 483 - 484.