

文章编号: 1008-2786-(2017)3-316-07

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000227

# 偏转角度对滑坡-碎屑流运动影响的模型试验

杨海龙 樊晓一\* 赵运会 王海瓜

(西南科技大学 土木工程与建筑学院 四川 绵阳 621010)

**摘 要:** 本文基于模型试验,对不同偏转角度( $\theta$ )作用下的碎屑流运动堆积特征进行初步研究。试验结果表明,在偏转作用下,碎屑流的运动经历了加速、持速和减速三个阶段。碎屑流的前缘速度在持速阶段表现出明显的波动性,偏转角度越大,碎屑流前缘速度波的动性越显著;但偏转角度对碎屑流的运动时间的影响并不显著。对碎屑流受偏转作用后的水平运动距离进行分析表明较小的偏转角度更有利于碎屑流的运动。偏转作用下碎屑流的堆积过程表现出“多次叠加堆积”特征,偏转角度越大“多次叠加堆积”的现象越明显。同时,碎屑流的堆积厚度分布也明显受控于偏转角度的影响。横断面上,堆积厚度沿受冲击碰撞一侧向对侧减小,两侧堆积厚度的差异随偏转角度的增大呈抛物线变化, $\theta=20^\circ$ 时最大。纵断面上,碎屑流在坡脚附近的堆积厚度随偏转角度的增大而增大。

**关键词:** 滑坡-碎屑流; 偏转角度; 运动参数; 模型试验

**中图分类号:** P642.22

**文献标志码:** A

滑坡碎屑流是高位滑坡的一种常见运动形式,在运动过程中一般具有大规模、远程、高速的特点<sup>[1]</sup>。通过野外调查发现,滑坡-碎屑流受到沟谷地形的影响,其运动路径发生变化,从而导致偏离滑坡起始运动方向上的人员伤亡和建筑损毁。如2010年贵州关岭大寨高速远程滑坡-碎屑流,受沟谷地形作用,偏离原运动方向 $40^\circ$ ,造成大寨村被掩埋<sup>[2]</sup>。2010年四川汉源二蛮山高速滑坡-碎屑流,大部分碎屑流沿沟谷偏转约 $25^\circ$ ,导致万工新集镇房屋损毁<sup>[3]</sup>。2013年云南镇雄滑坡,碎屑流受沟谷地形作用,运动路径发生偏转,致使偏离滑坡起始方向的赵家沟村60多间房屋被毁,46人遇难<sup>[4]</sup>。因此,研究偏转地形对滑坡碎屑流运动的作用机制对指导山区建设场地选址、工程安全措施的制定具有重要意义。

室内滑坡物理模型试验作为研究滑坡碎屑流运

动的有效手段之一,不仅可以再现滑坡碎屑流运动的全过程;更因在实验条件上的可控性而受到许多学者的重视。如K. Hutter等<sup>[5]</sup>以球形玻璃珠和聚苯乙烯颗粒为实验材料,通过室内模型试验获取碎屑流前缘和后缘速度的演化曲线,探讨了碎屑流的运动演化过程。Kokelaara等<sup>[6]</sup>以细砂和玻璃球组成的材料在粗糙斜坡上进行模型试验,并得出导致碎屑流长距离运动的主要因素。樊晓一等<sup>[7]</sup>通过模型试验,探讨了坡脚坡度和颗粒级配对碎屑流前缘速度的影响,并提出了改进的能量线模型能更全面的解释碎屑流运动全程。Yang等<sup>[8]</sup>、赵运会<sup>[9]</sup>、雷先顺等<sup>[10]</sup>等通过模型试验从碎屑流的粒径、规模和场地条件入手,分析各影响因素对滑坡碎屑流运动参数的作用。S. P. Pudasaini等<sup>[11]</sup>、Chen等<sup>[12]</sup>以干砂为实验材料进行碎屑流模型试验,运用PIV摄影技术对碎屑流的运动特征进行探讨。郝明辉

收稿日期(Received date): 2016-06-15; 改回日期(Accepted date): 2016-11-22。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41272297); 四川省科技厅项目(2014JY0121); 四川省教育厅重点项目(14ZA0095)。

[National Natural Science Foundation of China(41272297); Science and Technology Department of Sichuan Province(2014JY0121) and Education Department of Sichuan Province(14ZA0095).]

作者简介(Biography): 杨海龙(1992-),男,硕士研究生,研究方向为地质灾害。[Yang Hailong(1992-), male, M.Sc. candidate, research on geological disaster. ]E-mail: 2402635703@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、地质灾害教学科研工作。[Fan Xiaoyi(1974-), male, professor, Ph.D., research on geological engineering and geological hazard. ]E-mail: xyfan1003@126.com

等<sup>[13]</sup>、陆鹏源<sup>[14]</sup>等以文家沟滑坡为依据,设计斜槽实验装置,分别探讨多因素条件下碎屑流的运动特征和碎屑流的“铲刮”效应。A. Dufresne 等<sup>[15]</sup>、FARINM 等<sup>[16]</sup>则通过斜槽实验装置,探讨了碎屑流运动路径上的下伏堆积物质对碎屑流运动特性的影响。

虽然已有的研究<sup>[5-16]</sup>已经取得了较好的研究成果,却忽视了沟谷偏转地形对碎屑流运动的影响。本文在已有的研究基础上,基于滑坡物理模型试验对偏转作用下的碎屑流运动堆积特征进行初步研究。

## 1 试验装置和方案

### 1.1 试验目的

本文试图通过设计模型试验,重点关注偏转角度对滑坡-碎屑流的运动堆积参数的影响,分别从滑坡-碎屑流前缘速度、运动时间以及堆积分布特征三个方面对偏转型滑坡-碎屑流运动过程进行研究,形成对偏转型滑坡-碎屑流运动机理的初步认识。为深入研究偏转地形对碎屑流运动参数的作用机制以及偏转地形条件下碎屑流致灾范围的预测奠定基础。

### 1.2 试验装置

利用已有的模型试验装置<sup>[9]</sup>,并对其进行相应的改装,使其满足试验要求(图1)。该试验装置上部斜坡固定( $\alpha = 45^\circ$ ),斜坡高度为3 m,为碎屑流的启动加速区。下部水平部分为运动堆积区,滑槽长度可依据试验要求相应增减。上、下部之间采用活动连接,可通过调整下部滑槽的水平位置使上下部

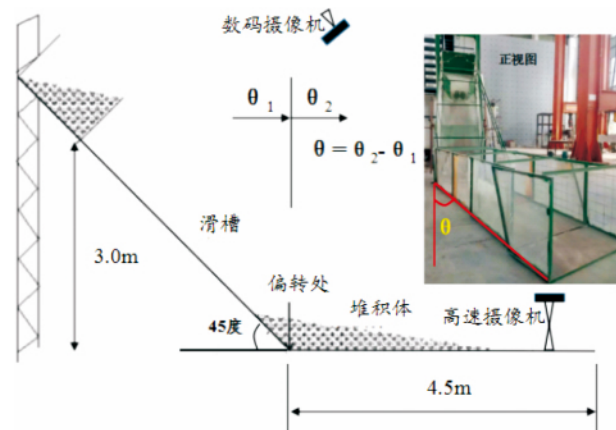


图1 试验装置简化模型

Fig. 1 Simplified model of experimental set-up

形成偏转角度( $\theta$ )。其中砂箱容积为 $0.75 \text{ m}^3$ ,砂箱前部设置两块挡板,并由插销控制挡板的启合,以此来模拟滑坡-碎屑流的启动。滑槽宽度为1 m,摩擦系数为 $f = 0.3$ <sup>[9]</sup>,滑槽两侧安装强度较高且透明的有机玻璃便于从侧面观察滑坡堆积体的形态特征。

### 1.3 试验材料

本文选取的天然土体和碎石按照四种不同的比例进行混合,得到四种不同颗粒级配的岩土体材料(图2)进行试验。岩土体材料的力学参数由直剪试验测得,该直剪试验采用粗粒土(岩石)力学参数测试系统,内径尺寸50 cm,高度50 cm,岩土试验量为 $0.098 \text{ m}^3$ ,岩土体参数见表1,颗粒级配曲线见图3。

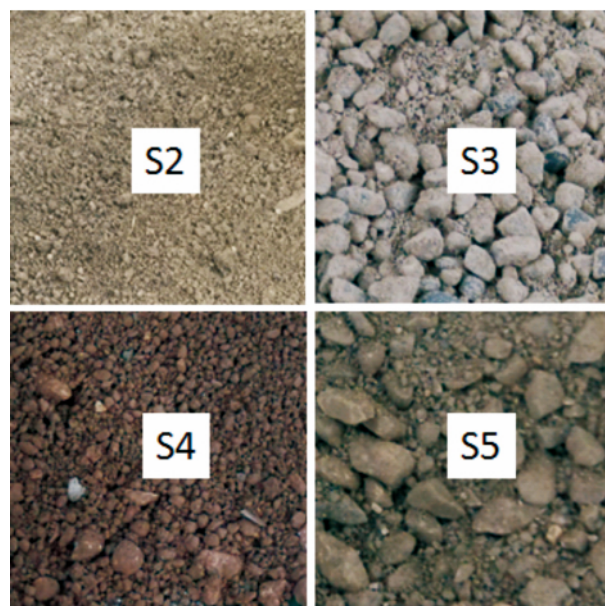


图2 试验采用的土体

Fig. 2 Materials employed

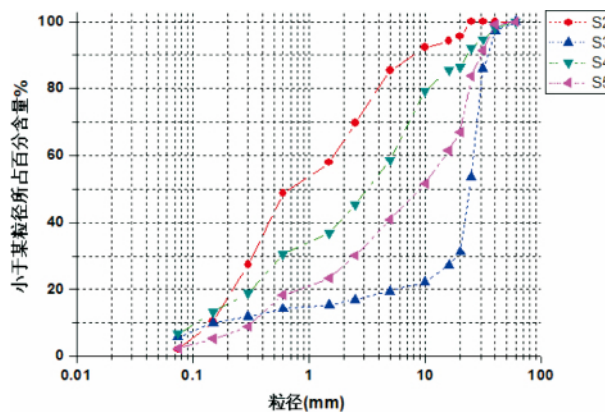


图3 土体的颗粒级配

Fig. 3 Grading curve of materials

表 1 土体的物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of materials employed

试样编号	不均匀系数	曲率系数	$d_{50}$ (mm)	内摩擦角( $^{\circ}$ )	粘聚力/咬合力(KPa)	干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
S2	10.60	0.40	0.68	40.60	0.81	1.76
S3	152.90	81.70	24.85	41.00	0.87	2.09
S4	47.30	0.60	3.21	35.30	0.71	1.93
S5	33.10	1.80	8.94	39.40	0.82	2.10

表 2 试验安排表

Tab. 2 Test schedule

试验编号	岩土样	$\theta(^{\circ})$	$V/\text{m}^3$	含水率/%
1	S2	0	0.20	20
2	S2	20	0.20	20
3	S2	40	0.20	20
4	S2	60	0.20	20
5	S3	0	0.20	20
6	S3	20	0.20	20
7	S3	40	0.20	20
8	S3	60	0.20	20
9	S4	0	0.20	20
10	S4	20	0.20	20
11	S4	40	0.20	20
12	S4	60	0.20	20
13	S5	0	0.20	20
14	S5	20	0.20	20
15	S5	40	0.20	20
16	S5	60	0.20	20

1.4 试验方案

本次试验共进行 16 组试验,其中试验 1、5、9、13 为对照实验组,试验安排见表 2。

1.5 试验数据获取

为了获取试验数据,在正前方放置一台帧速为 500 帧/秒的高速摄像机,正上方放置一台帧速为 30 帧/秒的数码摄像机,全程记录碎屑流的运动过程(图 1)。其中,数码摄像机主要用于记录碎屑流在启动加速区的运动;高速摄像机主要记录碎屑流受偏转地形作用在运动堆积区的运动(以  $S_5$  在  $\theta = 20^{\circ}$  时为例,见图 4)。试验前,在滑道上每隔 10 cm 画出标志线,并标注数字,作为滑坡-碎屑流运动距离的标识。实验结束后对摄像机记录的图像进行分析,由于拍摄每一帧图像的时间是已知的,再通过相邻几帧图像上滑坡-碎屑流前缘的运动距离变化,便可以计算出相应的前缘速度。通过滑道上的距离标识可以统计出不同偏转角度下的运水平运动距离。堆积厚度可以通过在堆积体上布置测量点,对

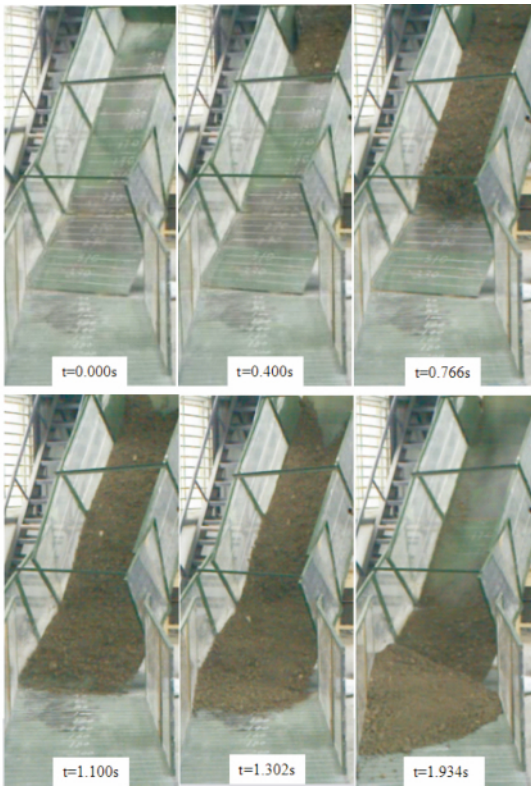


图 4 碎屑流运动过程示意图( $S_5$ 、 $\theta = 20^{\circ}$ )

Fig. 4 Schematic diagram of landslide-debris avalanches( $S_5$ 、 $\theta = 20^{\circ}$ )

待测点的堆积厚度进行测量。

2 结果与讨论

试验完成后,按照上述的试验数据获取方法对滑坡-碎屑流的前缘速度进行提取,并绘制碎屑流的前缘速度-时间曲线,探讨受偏转作用下碎屑流前缘速度、运动时间演化规律。同时,提取堆积体上各测量点的堆积厚度并绘制纵横断面堆积厚度曲线,分析碎屑流受偏转作用后的堆积分布特征。

2.1 运动参数特征分析

2.1.1 前缘速度

碎屑流前缘速度在偏转作用下随时间经历了三



个显著的变化阶段(图5):碎屑流在斜坡段启动下滑过程中将自身的势能部分转化为动能,在偏转前获得峰值速度,完成加速阶段。受偏转作用,前缘速度突然减小到某一数值,却并没有立即进入减速阶段,而是在获得后部物质的能量补偿在一段时间内呈现波动变化,最终在摩擦力的作用下开始逐渐减小。因此,将偏转作用下的碎屑流运动分为加速、持速和减速三个阶段,图5中分别用AB、BC、CD表示。

在偏转作用下,碎屑流的前缘速度在持速阶段表现出明显的波动性特征:偏转角度越大,碎屑流前缘速度波动性越显著(图5)。其原因在于:偏转角度越大,碎屑流前缘物质在偏转处受到的阻止效应越显著,更容易在偏转处形成暂时的堆积体,后部的碎屑流物质运动到坡脚后受摩擦作用和前部堆积体的阻止,覆盖在前部碎屑流堆积体的上部,不能将能量有效地传递给前缘物质,因此前缘速度的波动性更明显。

综上所述,碎屑流的前缘速度变化受控偏转角度。

## 2.1.2 运动时间

由图5可以得出,不同颗粒级配的碎屑流,在偏转作用下的运动时间均表现出随着偏转角度的增大而呈减小趋势。其原因在于随着偏转角度的增大,碎屑流的运动空间受限,碎屑流物质与偏转地形的相互作用以及颗粒间的相互作用加强,能量的消耗增加,导致运动时间减少。

用 $t_{s2}$ 、 $t_{s3}$ 、 $t_{s4}$ 、 $t_{s5}$ 分别表示不同颗粒级配的岩土体在偏转角度为 $\theta = 0^\circ$ 、 $60^\circ$ 时的运动时间差值,其中 $t_{s2} = 0.042\text{s}$ , $t_{s3} = 0.044\text{s}$ , $t_{s4} = 0.034\text{s}$ , $t_{s5} = 0.036\text{s}$ 且 $t_{s3}$ 与 $t_{s2}$ 的差值仅为 $0.010\text{s}$ 。表明相同颗粒级配的岩土体,在不同偏转角度下的运动时间差异不显著。

综上所述,偏转角度对碎屑流运动时间的影响较小。

## 2.1.3 水平运动距离

对碎屑流受偏转作用后运动的水平运动距离进行统计分析(表3),结果表明:偏转角度较小时,碎屑流的运程相比无偏转时更远。这是因为偏转角度较小时,碎屑流受到的偏转阻止效应不显著,碎屑流

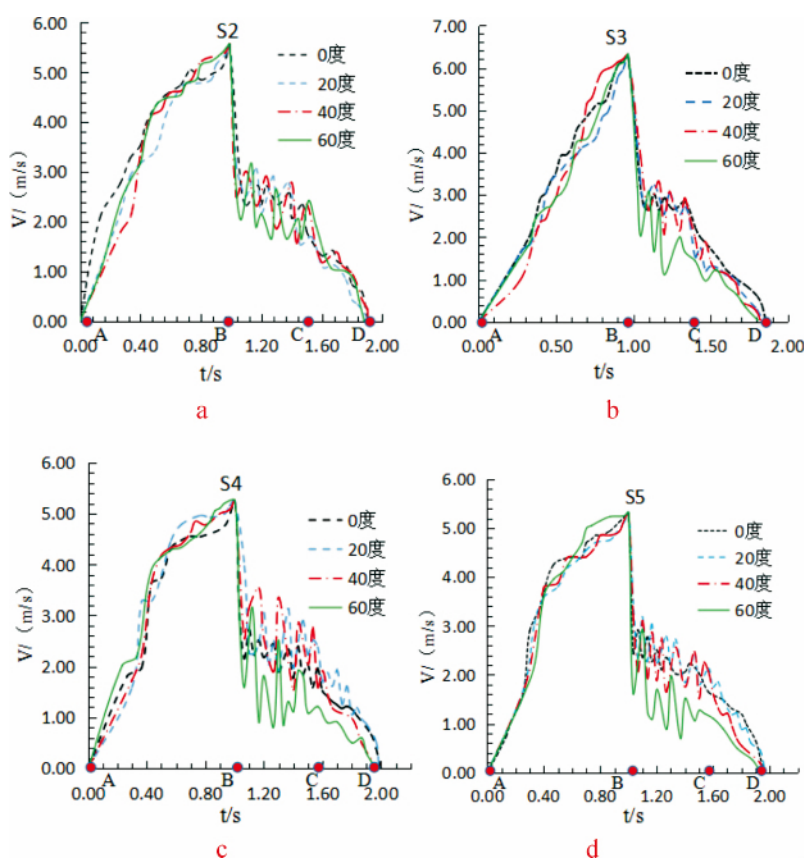


图5 碎屑流前缘速度随时间的变化关系曲线

Fig. 5 Relation curves between front-velocity of debris avalanches and time

前缘物质在偏转处损失的能量与无偏转作用时损失的能量差异并不显著。同时,受偏转作用使得前缘部分的岩土体颗粒停积,剩余的岩土体颗粒获得后部物质传递的全部能量,运程更远。

表 3 碎屑流的水平运动距离(单位:米)

Tab.3 Horizontal movement distance of debris avalanches

	0 度	20 度	40 度	60 度
S2	1.35	1.65	1.50	1.45
S3	1.80	1.92	1.74	1.55
S4	1.79	2.10	1.95	1.79
S5	2.00	2.09	1.81	1.71

2.2 堆积分布特征分析

2.2.1 堆积方式

对碎屑流的堆积过程进行回放分析发现:碎屑流在受偏转作用下的堆积方式与未受偏转作用的堆积方式具有显著差异。未受偏转作用的碎屑流的堆积方式主要表现为推移式,堆积过程一次完成。受到偏转作用的碎屑流的堆积过程则表现出“多次叠加堆积”特征,并随偏转角度的增大“多次叠加堆积”的现象越明显。产生这一现象的原因在于:无偏转时,碎屑流在坡脚处有充足的运动空间,运动未受阻挡,因此堆积过程一次完成;随着偏转角度的增大,碎屑流在坡脚处的运动空间越小,碎屑流的前缘物质与偏转地形相互作用加剧,碎屑流前缘物质受偏转的阻止效应越显著,损失的能量越大,在偏转处更容易停积;后部的物质在前缘碎屑流堆积体继续运动,并逐渐停积,完成“多次叠加堆积”并在堆积区前缘形成明显的扇形堆积区(图6)。

2.2.2 堆积厚度分布

在堆积体上沿滑道每隔 20 cm 布置测量点进行厚度测量(图7)。分别以距坡脚 90 cm 处的横断面(图8)、距偏转一侧 20 cm 处的纵断面(图9)为例,对滑坡-碎屑流受偏转作用后的堆积厚度分布规律进行分析。

在横断面上,偏转角度对不同颗粒级配的岩土体在偏转处附近的堆积厚度分布的影响相同:堆积厚度沿受冲击碰撞一侧的沟谷向对侧减小。无偏转作用时,碎屑流未受偏转角度的阻止作用,因此两侧的堆积厚度差异不显著。随着偏转角度增大,碎屑流受偏转角度的阻止效应越显著,碎屑流主要沿偏转一侧堆积,因此两侧的堆积厚度差异逐渐变大。当偏转角度达到某一数值后,随着偏转角度的增大

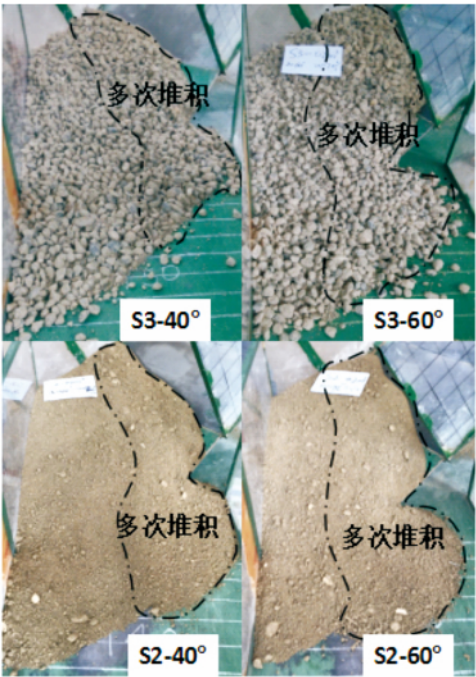


图 6 “多次叠加堆积”现象

Fig.6 Multiple stacking phenomenon



图 7 堆积体厚度测量点布置图

Fig.7 Measurement point layout of deposit thickness

岩土体的“多次叠加堆积”现象越明显,使得沟谷两侧的堆积厚度差异减小(见图8)。

在纵断面上,碎屑流在坡脚处的堆积厚度分布明显受控于偏转角度的影响,表现为不同颗粒级配的碎屑流在偏转处的堆积厚度分布均表现出随偏转

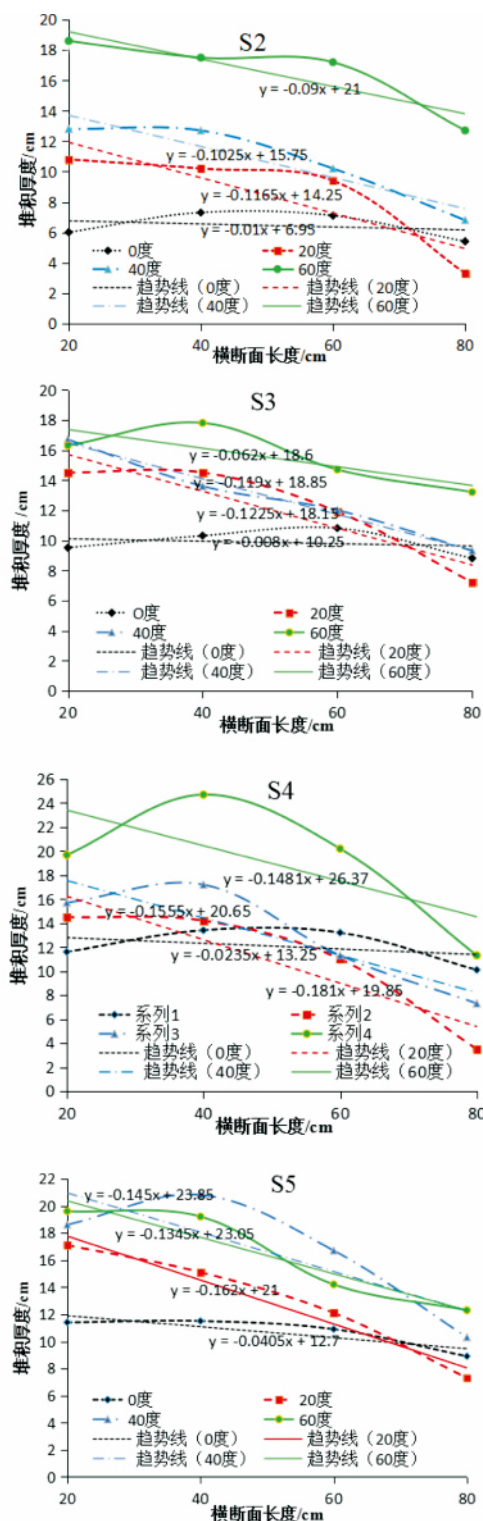
图8 碎屑流堆积体横断面图( $L=90\text{cm}$ )

Fig. 8 Accumulation thickness distribution of debris avalanches along the cross section

角度的增大而增大,以 $S_5$ 为例(图9)。这主要与偏转角度对碎屑流的阻止效应有关,偏转角度越大,碎屑流受阻止效应越显著,越容易在偏转处停积,堆积厚度也就越大。

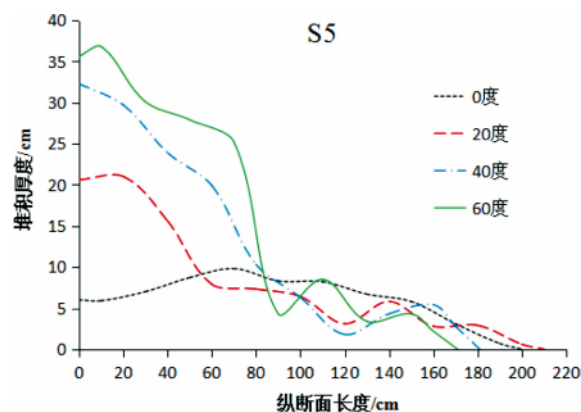


图9 碎屑流堆积体沿纵断面的堆积厚度分布

Fig. 9 Accumulation thickness distribution of debris avalanches along the vertical section

### 3 结论

本文基于滑坡物理模型试验,研究偏转角度( $\theta$ )对碎屑流运动堆积特征的影响,有以下结论:

1. 偏转角度作用下,碎屑流的运动经历了加速、持速和减速三个运动阶段。同时,偏转作用对前缘物质的阻止效应实现了加速运动向持速运动阶段的瞬时过渡。

2. 受偏转作用,碎屑流的前缘速度在持速阶段表现出明显的波动性。偏转角度越大,碎屑流前缘速度的波动性越显著,但偏转角度对碎屑流运动时间的影响并不显著。在偏转作用下,较小的偏转角更有利于碎屑流的运动。

3. 受偏转作用的影响,碎屑流的堆积过程不能一次完成,表现出“多次叠加堆积”特征。偏转角度越大“多次叠加堆积”的现象越明显。

4. 碎屑流在坡脚处的堆积厚度分布明显受控于偏转角度的影响。在横断面上,堆积厚度沿受冲击碰撞一侧的沟谷向对侧减小;两侧堆积厚度的差异随偏转角度的增大呈抛物线变化, $\theta=20^\circ$ 时最大。在纵断面上,碎屑流的堆积厚度分布表现为随偏转角度的增大而增大。

### 参考文献(References)

- [1] 陈自生. 高位滑坡的运动转化形式[J]. 山地研究, 1992, 10(4): 225-228 [CHENG Zisheng. Motion transformation of high-locality landslide[J]. Mountain Research, 1992, 10(4): 225-228]
- [2] 殷跃平, 朱继良, 杨胜元. 贵州关岭大寨高远程滑坡-碎屑流研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(4): 445-454 [YIN Yueping, ZHU Jiliang, YANG Shengyuan. Investigation of a high speed and long runout rock slide flow at Dazhai in Guanling of Gui Zhou Province[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(4): 445-454]
- [3] 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 ER MAN SHAN Rock Slide-debris flow of Junly 27, 2010 in Hanyuan, Sichuan: characteristics and failure mechanism [J]. 2010, 18(5): 609–622]
- [4] 殷跃平, 刘传正, 陈红旗, 等. 2013年1月11日云南镇雄赵家沟特大滑坡灾害研究[J], 工程地质学报, 2013, 21(1): 06–15 [YIN Yueping, LIU Chuansheng, CHEN Hongqi, et al. Investigation on catastrophic landslide of January 11, 2013 at Zhao Jigou, ZhenXiong Country, Yunnan Province [J], Journal of Engineering Geology 2010, 18(5): 06–15]
- [5] 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, 1991, 334(1633): 93–138
- [6] KOKELAARA B P, GRAHAMA R L, JMNT GRAY, VAL-LANCEC J W. Fine-grained linings of leveed channels facilitate runoff of granular flows. Earth and Planetary Science Letters, 2014, 385(1): 172–180
- [7] FAN Xiaoyi, TIAN Shujun, ZHANG Youyi. Mass-front velocity of dry granular flows influenced by the angle of the slope to runoff plane and particle size gradation. Journal of Mountain Science, 2016, 13(2): 234–245
- [8] YANG Q Q, CAI F, JGAI K, et al. Some factors affecting mass-front velocity of rapid dry granular flows in a large flume. Engineering Geology 2011, 122(3): 249–260
- [9] 赵运会, 樊晓一. 基于正交设计的滑坡运动参数模型试验[J]. 山地学报, 2016, 34(1): 92–99 [ZHAO Yunhui, FAN Xiaoyi. Model test of movement parameters of landslide based on orthogonal design [J]. Mountain Research, 2016, 34(1): 92–99]
- [10] 雷先顺, 谢沃, 卢坤林, 等. 无黏性土滑动和堆积特性的模型试验[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(2): 226–236 [LEI Xianshun, XIE Wo, LI Kunlin, et al. Model test of sliding and accumulation characteristic of cohesionless soil [J]. Chinese Journal of geotechnical engineering, 2016, 38(2): 226–236]
- [11] PUDASAINI S P, HSIAU S S, WANG Y Q, et al. Velocity measurements in dry granular avalanches using particle image velocimetry technique and comparison with theoretical predictions [J]. Physics of Fluids 2005, 17(9): 1–10
- [12] CHEN Rongher, KUO Kwojane, CHEN Yinung, et al. Model tests for studying the failure mechanism of dry granular soil slopes [J]. Engineering Geology 2011, 119(1): 51–63
- [13] 郝明辉, 许强, 杨兴国, 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 [HHO Minghui, XU Qiang, YANG Xingguo, et al. Physical model tests on inverse grading of particles in high speed landslide debris [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(3): 472–479]
- [14] 陆鹏源, 侯天兴, 杨兴国, 等. 滑坡冲击铲刮效应物理模型试验及机制探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(6): 1225–1232 [LU Pengyuan, HOU Tianxing, YANG Xinguo, et al. Physical modeling test for entrainment effect of landslides and the related mechanism discussion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2016, 35(6): 472–479]
- [15] DUFRESNE A. Granular flow experiments on the interaction with stationary run-out path materials and comparison to rock avalanche events [J]. Earth Surface Process and Landforms 2012, 37(14): 1527–1541
- [16] FARIN M, MANGENEY A, ROCHE O. Fundamental changes of granular flow dynamics deposition, and erosion processes at high slope angles: insights from laboratory experiments [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2014, 119(3): 504–532

## Model Tests on Influence of Deflection Angle on the Movement of Landslide – Debris Avalanches

YANG Hailong, FAN Xiaoyi, ZHAO Yunhui, WANG Haiguo

(School of civil engineering and architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 621010, China)

**Abstract:** The deflection angle ( $\theta$ ) were considered as an influence factor to study the movement and deposit characteristics of landslide-debris avalanches based on model tests. The test results showed the movement of landslide-debris avalanches included three stages: acceleration, constant-speed and deceleration. The front velocity of landslide-debris avalanches showed obvious fluctuation at stage of constant-speed. The larger the deflection angle was, the more obvious fluctuation of front velocity was. However, the deflection angle had no significant influence on the movement time of landslide-debris avalanches. Smaller deflection angle was more favorable to the movement of landslide-debris avalanches through statistical analysis. The depositing process of debris avalanches under the action of deflection showed the characteristics of multiple depositing, and the phenomenon was more obvious with the increase of deflection angle. Meanwhile, the stacked thickness distribution of debris avalanches was also controlled by the deflection angle. In the cross section, the stacked thickness decreased along the impact side to the other side, and the difference in accumulation thickness between the two sides was greatest at  $\theta = 20^\circ$ . On the vertical section, the accumulation thickness of debris avalanches near the slope toe increased with the deflection angle.

**Key words:** Landslide-debris avalanches; deflection angle; movement parameter; model test