

引用格式: 樊晓一, 夏贵平, 温翔, 徐奕梓, 刘浩南. 偏转地形约束条件下滑坡-碎屑流运动速度与颗粒分布的试验研究[J]. 山地学报, 2024, 42(3): 389-400.

FAN Xiaoyi, XIA Guiping, WEN Xiang, XU Yizi, LIU Haonan. An experimental study on the velocity and particle distribution of landslide-debris flow motion under deflected terrain constraints [J]. Mountain Research, 2024, 42(3): 389-400.

偏转地形约束条件下滑坡-碎屑流运动速度与颗粒分布的试验研究

樊晓一^{a,b}, 夏贵平^{a,c}, 温翔^a, 徐奕梓^a, 刘浩南^a

(西南石油大学 a. 土木工程与测绘学院; b. 工程安全评估与防护研究院; c. 机电工程学院, 成都 610500)

摘要: 滑坡-碎屑流在行进中受到侧向地形约束与挤压, 运动方向发生偏转, 侧蚀、侧向冲击或掩埋原低风险分区内的建筑结构。偏转地形约束条件下滑坡-碎屑流致灾参数分布演化特征及过程, 包括运动速度、堆积分布、颗粒分选等的分析与反演是有效防控此类地质灾害的前提与基础。前期滑坡-碎屑流模型试验较少考虑其在受地形偏转作用影响下的运动特征, 结果与实际观测不符。本文以典型滑坡碎屑流为原型, 改进模型试验装置, 采用物理模型试验, 探究偏转点前后碎屑流运动速度和颗粒分布变化。研究结果表明: (1) 碎屑流的运动速度在偏转点显著下降, 并在偏转点后急剧增加并达到峰值, 呈现出急加速、波动加速、地形偏转作用导致的速度剧烈下降、运动堆积区的逐渐下降、堆积停滞区的快速下降五个变化阶段。(2) 滑坡碎屑流最大堆积厚度位于偏转点之后。(3) 碎屑流大、小颗粒在堆积体表层、下层的质量占比分别为 50.7%、65.1%, 呈现明显的颗粒分选特征。在沿碎屑流运动的纵向和横向方向上, 不同粒径的质量占比在偏转点附近与初始状态一致。沿纵向方向上, 大颗粒质量占比呈现短距离减小分布, 而后随运动距离的增加, 质量占比增大, 由初始状态的 28.3% 增大到 49.6%; 而小颗粒的质量占比则呈现先增加后减小的分布特征, 由初始状态的 44.0% 减小到 23.5%; 在横向方向上, 两侧大颗粒的质量占比大于中部, 而小颗粒则相反。研究结果可以为受偏转地形作用的滑坡-碎屑流致灾参数演化和灾害防御提供参考。

关键词: 偏转地形; 滑坡-碎屑流; 模型试验; 运动速度; 颗粒分布

中图分类号: P642

文献标志码: A

受侧向地形的挤压, 高速远程滑坡-碎屑流的运动方向会偏离滑坡初始动能方向, 发生侧蚀、侧向冲击, 掩埋或损毁原山前低风险坡区内的建筑结构, 导致人员伤亡和财产损失。例如: 2009 年 6 月 5 日, 重庆武隆鸡尾山滑坡崩滑失稳, 转化为高速碎屑流, 受侧向山体阻挡, 运动方向由原 N5°E 偏转为 N64°E, 掩埋下游 12 户民房和矿井入口, 造成 10 人死亡、64 人失踪、8 人受伤^[1]; 2010 年 6 月 28 日, 贵州关岭发生高速远程滑坡, 滑坡运动方向由滑源区 N22°W 偏转为碎屑流区 N64°W, 造成永窝村民组 21 户村民遇难, 后再次偏转为 S80°W, 造成大寨村

民组 16 户村民遇难^[2]; 2013 年 1 月 11 日, 云南省昭通市镇雄县赵家沟村发生滑坡, 碎屑流运动方向先由 N31°E 偏转为 N61°E, 后偏转为 N27°E, 导致赵家沟 60 多间房屋被毁、46 人遇难^[3]; 2013 年 7 月 10 日, 四川省都江堰三溪村滑坡沿 N57°E 方向顺层高位滑动后, 受侧向山体引导, 偏转为 N10°W 方向的碎屑流, 致使下游 11 户 116 人死亡^[4]。

滑坡-碎屑流在偏转地形条件下的致灾作用, 具有突发性、隐蔽性和随机性, 临灾监测和前期预警存在技术难度。滑坡-碎屑流致灾参数分布特征及演化过程的分析与反演是有效防控此类地质灾害的前

收稿日期 (Received date): 2024-04-02; 改回日期 (Accepted date): 2024-06-19

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (41877524)。[National Natural Science Foundation of China (41877524)]

作者简介 (Biography): 樊晓一 (1974-), 男, 博士, 教授。主要研究方向: 地质灾害防治减灾。[FAN Xiaoyi (1974-), male, Ph. D., professor, research on prevention and reduction of geological disaster] E-mail: fxy@swpu.edu.cn

提与基础。已有研究^[5-6]采用室内物理模型试验,研究了滑坡-碎屑流运动过程、致灾机制、颗粒特征等。例如,以物质组成和配比、单位试块数量、体积、滑坡高度、运动场地条件等变量组合控制室内模型参数,模拟岩质滑坡的冲击破碎过程^[7],分析碎屑物的前缘速度及其影响因素^[8],研究滑坡-碎屑流体积效应和启滑高度对运动堆积特征的影响,总结滑坡-碎屑流能量耗散及转化规律等^[9]。研究表明^[10]:颗粒尺寸、固体体积分数和基底粗糙度影响碎屑流的流动深度、质量、体积密度、前沿速度和前沿形状;固体体积分数不同以及基底粗糙度变化,碎屑流流态及沿程演变会发生显著变化;颗粒大小对流速和前沿形状产生显著影响。模型试验证实^[11]:滑坡-碎屑流的运动距离随着坡角的增加而线性减小,颗粒与地面碰撞时的能量耗散率与其冲击角呈幂律增加,这说明摩擦系数与倾斜角之间存在统计关系。

已有研究中的滑坡-碎屑流模型试验,多使用直板滑槽,主要考虑滑槽倾角、滑槽体积、颗粒级配等变量因素,并不能反映滑坡-碎屑流的流道特征^[12-13],尤其在地形偏转条件下,试验结果往往不具有现实意义。本文改进并加工物理模型装置,试验研究偏转地形约束条件下滑坡-碎屑流的致灾参数及颗粒特征,探究滑坡-碎屑流的堆积特征及致灾规律,可为滑坡-碎屑流防控提供设计参数。

1 三溪村滑坡概述

1.1 滑坡的基本特征

三溪村滑坡(E48°30'54", N55°68'1")位于四川省都江堰市中兴镇三溪村,平面形态呈“U”状,平均宽度为120 m,总体积约为 $1.5 \times 10^6 \text{ m}^3$,滑坡运动距离1240 m,山区建筑主要分布于自后缘710 m至1050 m处,滑坡-碎屑流损毁和掩埋该区域内的山区建筑,导致52人死亡、109人失踪、11栋房屋损毁^[14]。该滑坡受“5·12”汶川地震的影响,滑源区上部岩土出现贯通性裂缝,2013年7月9至10日发生强降雨,大量地表水流入山体裂缝,产生巨大静水压力,推动滑源区的岩体失稳滑动,沿着N30°E方向运动。滑坡体在运动过程中受坠落、撞击、挤压的作用,破碎解体形成碎屑流,在距滑坡后缘500 m处,受前方凸出山体的阻止作用,导致其运动方向偏转约40°,转向N10°W方向运动(图1、图2)。

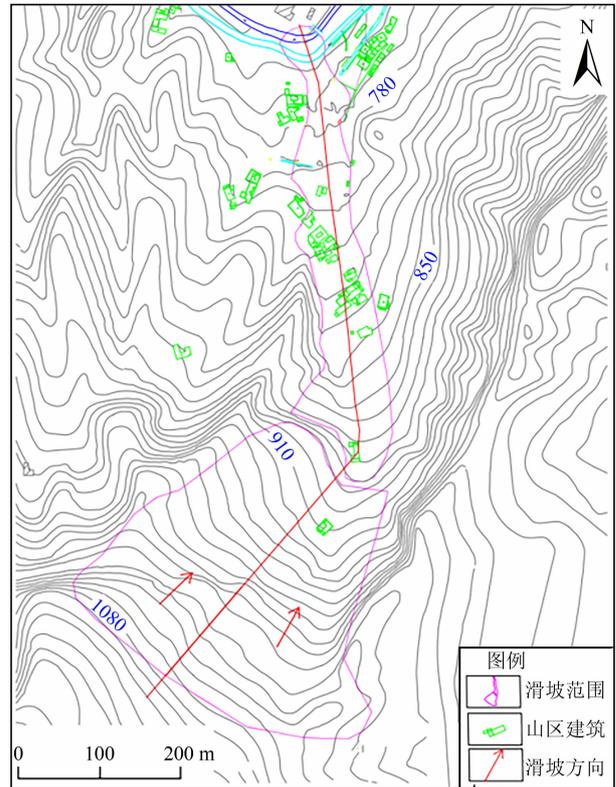


图1 三溪村滑坡平面图

Fig. 1 Planar graph of Sanxi village landslide in Sichuan province, China

1.2 三溪村滑坡地层岩性

三溪村滑坡区域出露主要地层为第四系(Q)和白垩系灌口组(Kg)地层。其中,滑坡上部主要为红色粉砂岩和泥岩,中下部主要为棕红色块状砾岩。滑坡的堆积区为新近泥石流堆积层(Q₄^{sed})的褐黄色粉质粘土,土体呈饱和、软塑流塑状态,土体中碎石含量为20%~25%^[14],主要为粉砂岩和强风化砂岩,分选性和磨圆度差,直径为5~20 cm,个别巨粒直径可达80 cm甚至数米。滑流区主要残留物质为粉质粘土和砾石土,土体呈塑性、软塑性。滑源区斜坡表层分布为第四系残坡积层的粉质粘土夹碎石土(Q₄^{el+dl})。

2 试验方案

2.1 试验装置

本试验根据三溪村滑坡的运动路径、规模大小和堆积形态以缩尺比例1/120设计并制作滑槽试验装置,滑坡-碎屑流分为四个区域,即滑源区、滑流区、偏转区和堆积区(图3)。试验装置中滑槽

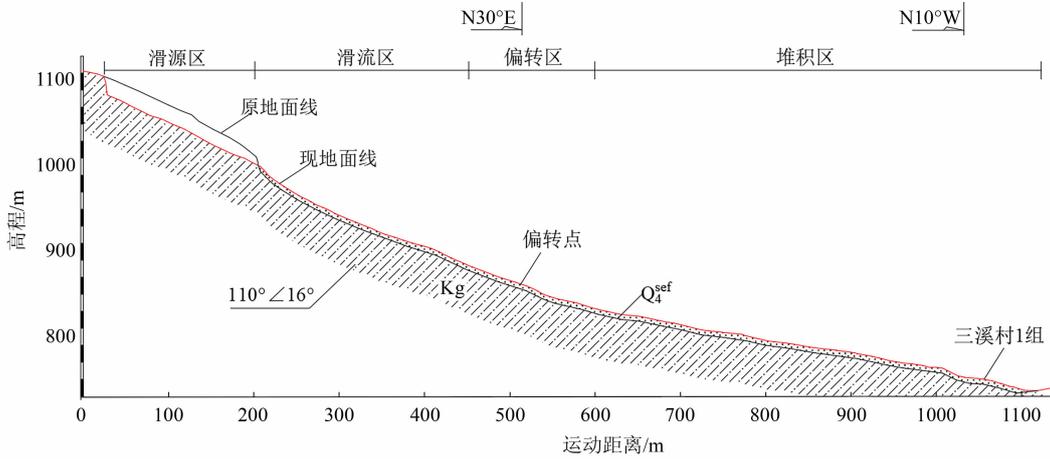


图2 三溪村滑坡剖面图

Fig. 2 Profile of Sanxi village landslide

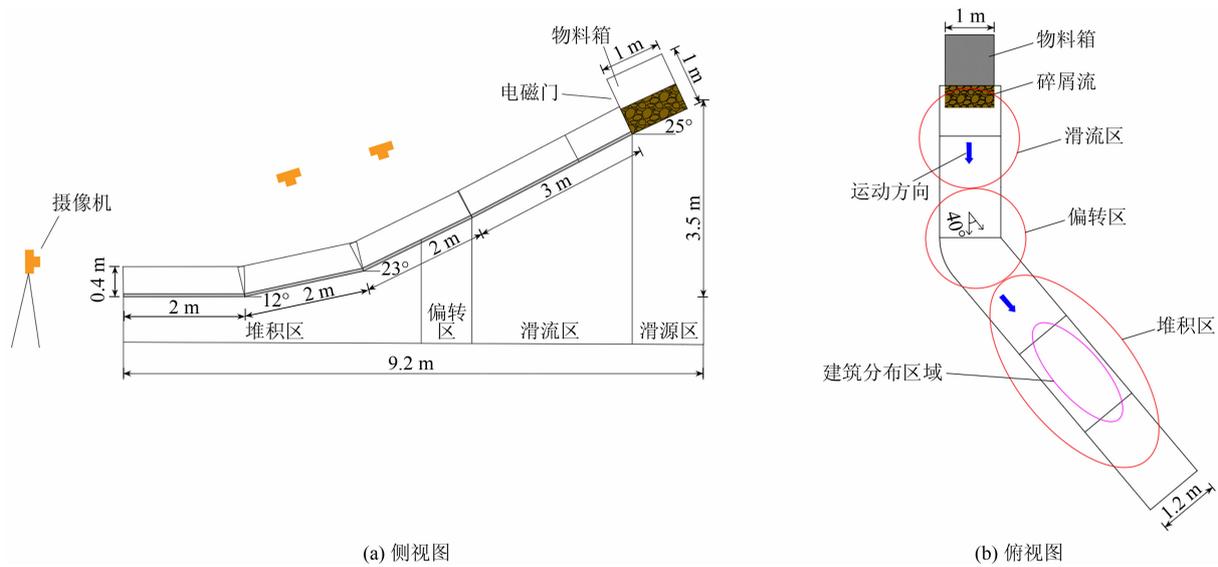


图3 模型试验结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the model test

水平长度约为9.2 m(含物料箱长度),宽1.2 m、高0.4 m,滑槽顶部装有边长1 m的立方体物料箱,并安装电磁门装置,其装置用于控制失稳滑体的运动,物料箱侧面有一个转动枢纽,用于改变滑源区的倾角,滑槽底板采用1.2 cm厚的PE板,滑槽侧面采用1 cm厚的透明有机玻璃板(亚克力板),用于减少碎屑颗粒与滑槽侧面的摩擦。当滑槽宽度与颗粒粒径的比值小于20时,颗粒的流动受到滑槽两侧约束,影响颗粒的运动速度^[15]。本试验中滑槽的宽度为1.2 m,滑坡平均粒径为16.23 mm,滑槽宽度约为粒径的74倍,因此本试验可以忽略边界条件对碎屑流颗粒运动的影响。

2.2 数据采集

试验过程中布置两台摄影机,其中一台布置在滑槽的正前方,记录滑坡-碎屑流的运动过程,另外一台通过脚手架布置在滑槽上方,用于测量滑坡-碎屑流的前缘运动速度,摄影机拍摄的运动过程间隔时间为1/100 s(图3)。

2.3 试验材料

2.3.1 试验颗粒材料级配

滑坡-碎屑流物质组成、颗粒大小、岩性等物理参数存在差异,不同大小颗粒对滑坡的致灾参数也会产生影响。根据表1,三溪村滑坡滑源区地层岩性为砾岩和泥岩,其密度约为2000~2300 kg·m⁻³^[16-17],

表 1 三溪村滑坡参数

Tab. 1 Parameters of the Sanxi village landslide

| 滑坡区 长度/m | 滑坡区 平均宽度/m | 滑源区失稳 体积/m ³ | 碎屑流堆积体 体积/m ³ | 滑源区滑体 平均密度/(kg·m ⁻³) | 滑源区 倾角/(°) | 滑坡偏转 角度/(°) |
|-------------|---------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|---------------|----------------|
| 1240 | 150 | 77 × 10 ⁴ | 200 × 10 ⁴ | 2000 ~ 2300 | 25° | 40° |

考虑碎屑流在运动过程中发生解体、破碎,导致碎屑流密度低于原有密度,且体积具有膨胀效应,本试验取密度为 1890 kg·m⁻³ 的无粘性的砾石材料作为滑源区材料。将砾石进行筛分,得到试验材料和颗粒材料级配曲线(图 4、图 5),试验颗粒级配组成如表 2 所示。



图 4 颗粒粒径

Fig. 4 Particle sizes

表 2 颗粒材料组成

Tab. 2 Grain distribution

| 粒径/mm | 颗粒质量分数/% |
|---------|----------|
| 1 ~ 5 | 9.9 |
| 5 ~ 10 | 34.1 |
| 10 ~ 20 | 27.7 |
| 20 ~ 40 | 28.3 |

2.3.2 滑槽及颗粒材料的摩擦角

滑槽材料采用 Mancarella^[18] 等提出的摩擦角计

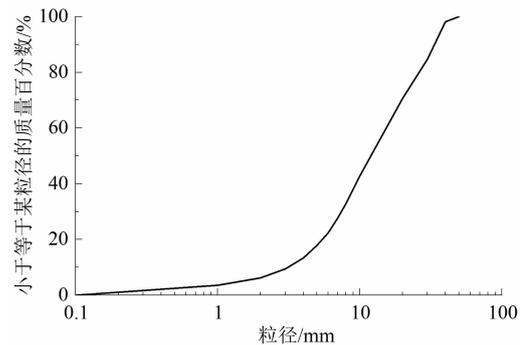


图 5 颗粒级配曲线

Fig. 5 Grading curve

算方法,如图 6a 所示。将滑槽材料放置在水平地面上,使用直径 20 cm、高 40 cm 的圆柱纸筒水平布置在滑槽材料上,圆柱纸筒装入高为 10 cm 的颗粒材料,然后将圆柱纸筒垂直向上提升一个颗粒粒径的高度并保持不动,最后,将滑槽材料的一端缓慢抬高,另一端离地面不动,直至圆柱纸筒中的颗粒材料开始向下滑动即刻停止,此时滑槽材料与水平地面的夹角作为摩擦角。采用上述的方法,将滑槽基底、滑槽侧板的摩擦角分别记作为 δ_1 、 δ_2 。

颗粒材料的摩擦角常用休止角的测量方法进行测定,如图 6b 所示,滑槽基底材料水平放置在地面上,将填满颗粒材料的圆柱纸筒垂直放置在滑槽基底材料上,缓慢地匀速向上提升圆柱纸筒,直至颗粒材料完全堆积在滑槽材料上,上述方法测定的休止角作为颗粒材料的摩擦角,记作为 θ 。材料的相关物理参数如表 3 所示。

2.4 试验工况

根据表 1,滑源区失稳体积为 $77 \times 10^4 \text{ m}^3$,碎屑流堆积体体积为 $200 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[15]。选取三溪村滑源区失稳体积作为参考,按照相似比理论换算,设计长度相似比 1:120,其试验体积约为 0.45 m^3 。滑坡滑源区的倾角为 $20^\circ \sim 40^\circ$ ^[15-16,19],基于不同的滑源区倾角开展模型试验,最终确定以 25° 作为滑源区倾角。

三溪村滑坡-碎屑流剪出后,沿着 NE 方向滑

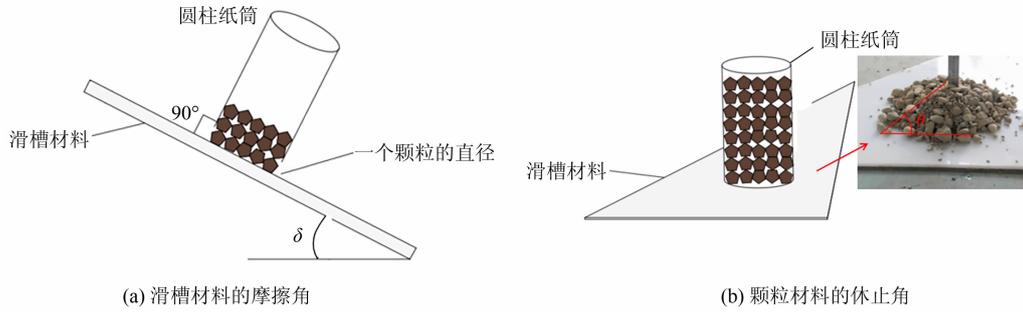


图 6 滑槽及颗粒材料摩擦角测量

Fig. 6 Measurement of the friction angle of the chute and particles

表 3 试验材料物理参数

Tab. 3 Physical parameters of the materials

| 材料 | 参数及单位 | 参数值 |
|----|---|-------|
| 颗粒 | 休止角 $\theta / (^{\circ})$ | 31 |
| | 平均粒径 d_{50} / mm | 22.36 |
| | 密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | 1890 |
| | 不均匀系数 C_u | 1.5 |
| 滑槽 | 基底摩擦角 $\delta_1 / (^{\circ})$ | 21 |
| | 基底厚度 h_1 / mm | 12 |
| | 侧边摩擦角 $\delta_2 / (^{\circ})$ | 17 |
| | 侧边厚度 h_2 / mm | 10 |

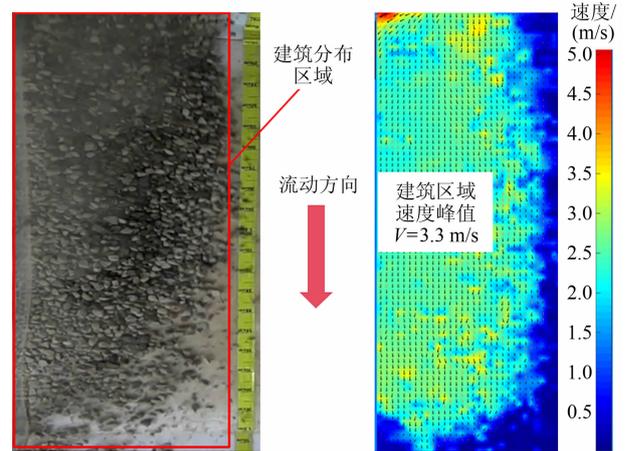


图 7 试验速度测量

Fig. 7 Velocity of the test

动,滑源区前缘运动约 300 m 后,受到前方凸出山体的影响,滑坡运动方向发生 40° 偏转近似正北方向运动。根据滑坡-碎屑流的实际堆积形态,本试验取偏转角度 40° 设计模型试验装置。按照上述试验工况设计,为确保试验的准确性和可靠性,共开展了四组重复性试验,获取滑坡-碎屑流的堆积形态图像和量化数据等,用于分析滑坡-碎屑流的堆积特征、冲击速度、冲击力等致灾参数。

3 碎屑流冲击速度特征分析

3.1 运动速度分布

利用 PIV (particle image velocimetry) 方法测量颗粒流的运动速度,通过 Adobe Premiere Pro 软件对每秒视频进行分帧分割提取,使用基于 Matlab 的 PIVlab 软件对图像进行处理,分析得到碎屑流冲击速度(图 7)。通过提取自剪出口 $5.2 \sim 8 \text{ m}$ 区域速度场,此区域为三溪村滑坡建筑分布集中区域,其速度峰值为 3.3 m/s 。其速度分布表明碎屑流颗粒速

度未受侧壁的影响,侧壁摩擦力对碎屑流颗粒并不产生阻滞作用。

本试验的设计长度相似比 $1:120$,密度和重力加速度相似比为 $1:1$,速度相似比为 $1:10.95$,通过速度相似比换算获取滑坡-碎屑流前缘的运动速度。碎屑流前缘运动速度主要分为以下阶段(图 8):滑坡-碎屑流启动后,碎屑流处于急加速阶段;当运动到约 100 m 后,碎屑流进入波动加速阶段;在距剪出口 400 m 处碎屑流前缘运动速度出现明显下降,考虑碎屑流受到地形条件的限制,其运动方向发生改变,前缘运动速度受到阻滞作用;在距剪出口 480 m 处速度达到峰值,随后碎屑流出现堆积且碎屑流的前缘速度出现快速下降;当碎屑流运动约 800 m 后,由于碎屑流颗粒之间存在动量传递作用,碎屑流出现持续稳定状态,之后进入快速下降阶段。

3.2 地形偏转对运动速度的影响

殷志强^[19]等根据滑坡的典型地貌及滑动特征,利用公式计算得到三溪村滑坡-碎屑流运动速度与

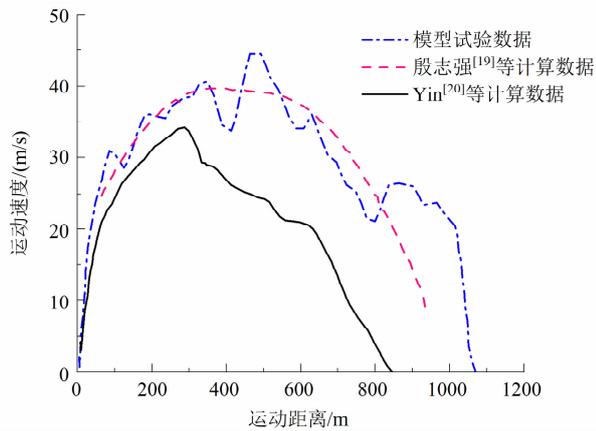


图8 本文模型试验结果与其他文献数据比较

Fig. 8 Comparison between the results of the model test in this paper and other references

水平距离的关系曲线,所得碎屑流运动速度峰值为 39.7 m/s,出现在碎屑流到达沟谷后的第一栋山区建筑,碎屑流进入建筑分布区域,运动速度呈下降趋势,到达三溪村一组后速度为 9.9 m/s。Yin^[20]等根据数值模拟得出,碎屑流运动约 300 m 后,速度达到峰值为 35 m/s。通过模型试验数据与上两组研究数据的对比分析表明(图 8):利用公式计算和数值模拟所得的碎屑流运动速度主要经历加速阶段和减速阶段。但采用偏转地形模型试验获得的碎屑流运动速度沿程分布不同于公式计算和数值模拟所得的运动速度与运动距离的关系曲线,本物理模拟试验中所得的碎屑运动速度主要经历急加速—波动加

速—地形偏转作用导致的速度剧烈下降—运动堆积区的稳定下降—堆积停滞区的快速下降五个阶段。结果表明在偏转地形条件下,滑坡-碎屑流运动速度会受到阻滞作用以及碎屑流颗粒之间的动量传递作用,对碎屑流运动速度产生影响。

4 偏转作用下的碎屑流堆积机制

4.1 碎屑流堆积体厚度分布

碎屑流最终堆积形态的全貌图和部分堆积形态放大特征如图 9 所示,当碎屑流从物料箱(即滑源区)自剪出口启动后,在重力势能的作用下,碎屑流加速运动 3 m 后,受到偏转地形的限制与右侧滑槽壁发生碰撞,碎屑流运动方向偏转 40°,偏转处的最大堆积厚度为 10.5 cm。由于偏转地形的阻滞作用,导致部分碎屑流停留在偏转区和上部区域,经过偏转区的碎屑流则继续滑动,受地形坡度的降低和部分碎屑流的能量耗散,碎屑颗粒减速进入堆积阶段,堆积区长为 4.6 m,宽度为 0.3~0.9 m,堆积区平均坡度为 14°,堆积区最大堆积厚度为 14.5 cm,分布于偏转点的下部(图 10)。

4.2 碎屑流颗粒堆积机制

为揭示受偏转地形作用的碎屑流颗粒堆积特征,采用图 11 所示的方法分析颗粒在纵向和横向方向上的堆积分布。按照从上到下、从左到右等间距的布置采样点,取碎屑流偏转前后各自 12 个采样点



图9 碎屑流堆积形态

Fig. 9 Accumulation of landslide-debris flow

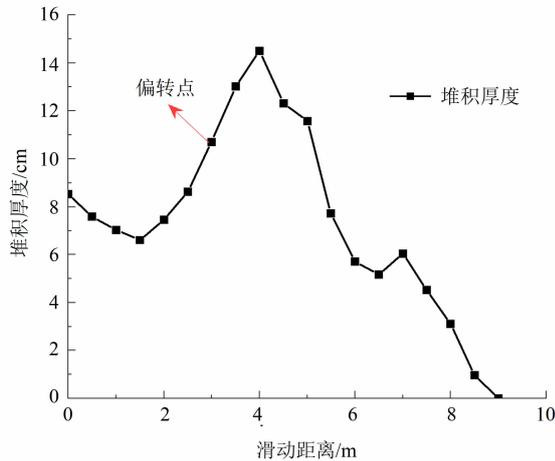


图 10 碎屑流堆积厚度分布

Fig. 10 Accumulation thickness of the test

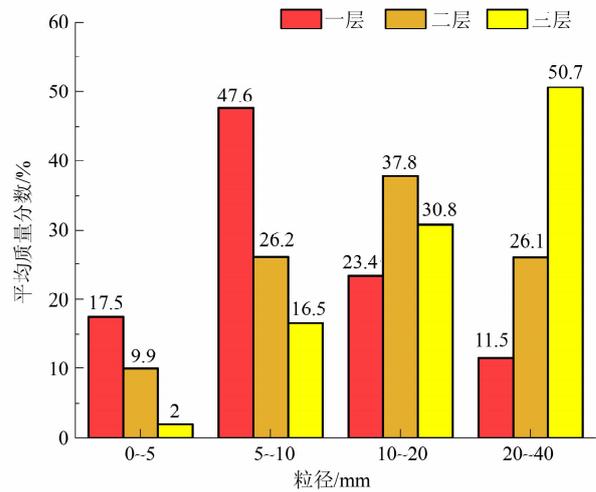


图 12 堆积分层颗粒质量占比

Fig. 12 Mass ratio of different particle sizes in layers

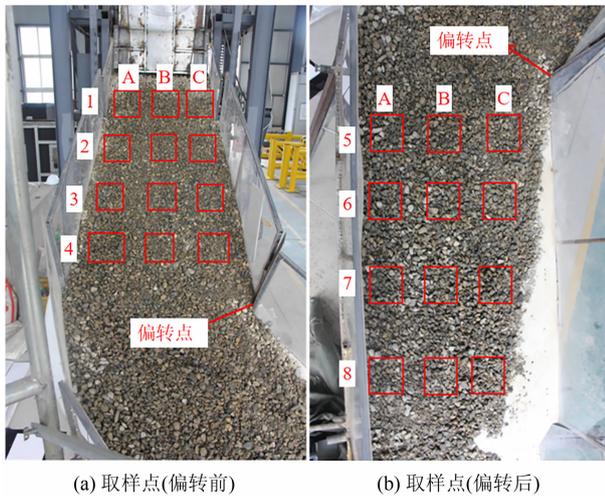


图 11 滑坡-碎屑流采样点

Fig. 11 Sampling points of landslide-debris flow

的碎屑流颗粒,每个采样点按照从下往上分为三层,统计每个采样点不同分层下的颗粒粒径质量占比。

4.2.1 颗粒反序分布

如图 12 所示,总计 24 个采样点按照从下往上分为三层,统计每一层的不同颗粒的质量占比,试验分析表明,粒径为 0~5 mm 和 5~10 mm 的小颗粒在最下层的质量占比最大,随着层数的增加依次递减。而最上层的粒径为 20~40 mm 大颗粒的质量占比超过了 50%,且随着层数的增加质量占比依次递增。粒径为 10~20 mm 的中颗粒在第二层的质量占比为最大,总体上分布较为均匀,由于在碎屑流高速运动过程中,小颗粒在大颗粒的间隙中向下渗透,小颗粒在下方对大颗粒起到支撑作用。使得大

颗粒主要分布于堆积体的表面,而小颗粒主要堆积在下方。

4.2.2 颗粒在碎屑流运动纵向方向上的分布

试验过程中,为分析大、中、小颗粒的堆积分布,将粒径小于 10 mm 的颗粒划分为小粒径,粒径为 10~20 mm 颗粒划分为中粒径,粒径为 20~40 mm 颗粒划分为大粒径。在碎屑流纵向运动方向上的颗粒分布特征如图 13 所示。

在 A1~A2 位置即堆积体后部,大颗粒分布呈现短距离减小的分布特征,但随着运动距离的增加,大颗粒质量占比逐渐增加,并在偏转点附近达到与初始质量占比(28.3%)一致。大颗粒在偏转点前的质量占比小于初始质量占比,而在偏转点后的则相反,且最前缘的质量占比超过了 50%(图 13a)。

中等颗粒的质量占比在偏转点之前,随运动距离的增加呈现出先减小后增加特征;在偏转点之后,虽呈缓慢减小的趋势,但其与初始质量占比(27.7%)基本一致。表明中等粒径颗粒虽然在偏转点前发生剧烈的分布变化,但在偏转点后的质量占比基本稳定并趋于保持初始质量分布(图 13b)。

小颗粒质量占比随碎屑流运动呈现先增加后减小的分布特征,并在偏转点附近达到与初始质量占比(44.0%)一致。小颗粒在偏转点前的质量占比大于初始质量占比,而在偏转点后的则相反(图 13c)。

4.2.3 颗粒在碎屑流运动横向方向上的分布

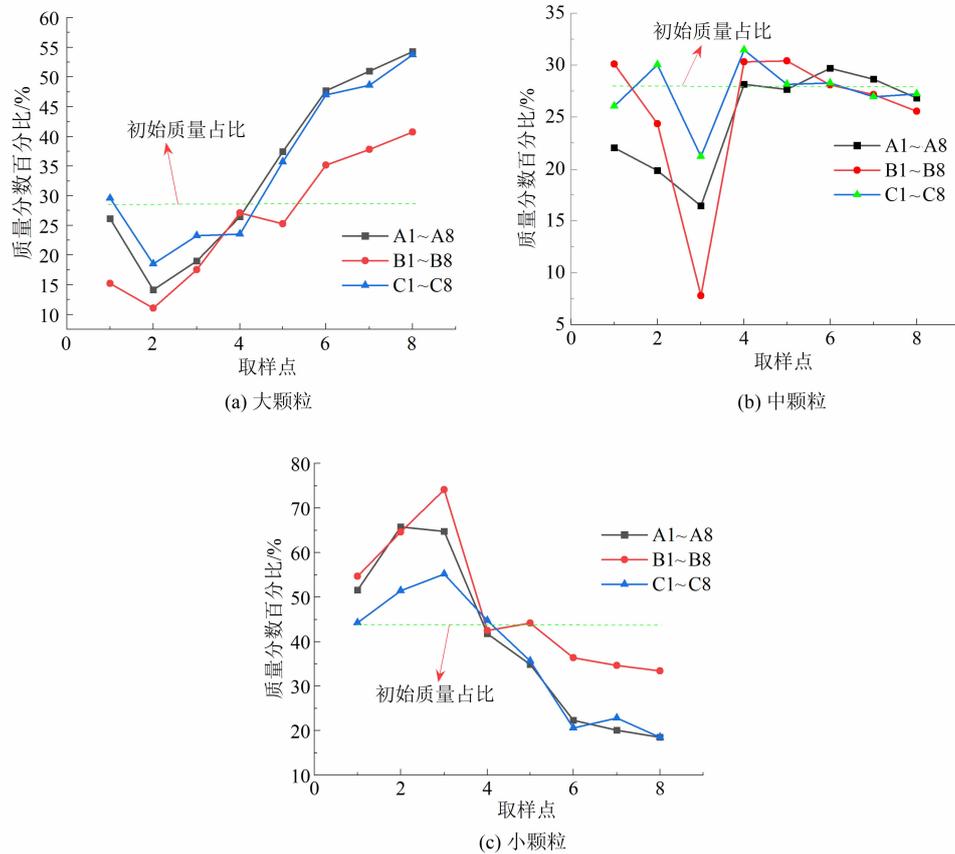


图 13 碎屑流运动纵向方向上颗粒分布变化

Fig. 13 Particle distribution in the longitudinal direction along landslide-debris flow movement

颗粒在碎屑流运动横向方向上的分布如图 14 所示,总体上,大颗粒两侧的质量占比大于中部,小颗粒中部的质量占比大于两侧,而中等粒径颗粒在偏转前的变化大,而在偏转点及之后的质量占比变化小。

大颗粒在偏转点前后呈现明显的分布差异,即在偏转点之前,虽然总体上两侧的质量占比大于中部,但差异较小;而在偏转点之后,其两侧的质量占比显著大于中部。中等颗粒在偏转点之前的 A3 ~ C3 呈现出显著的两侧大于中部的质量占比。

5 讨论和展望

本文以都江堰三溪村滑坡-碎屑流为原型,通过模型试验研究了地形偏转作用下碎屑流运动速度、厚度的分布演化和颗粒分布特征,并与已有研究成果的比较分析,揭示了考虑偏转作用影响碎屑流运动速度、厚度分布,以及纵向、横向方向上的颗粒分选特征,可为偏转型滑坡-碎屑流的防灾减灾研究提

供参考和借鉴。

通过数值模拟研究可以获得滑坡-碎屑流运动速度随运动距离的分布演化关系,但不同研究获得的结果存在一定的差异^[19-20]。其原因在于数值模拟很大程度上依赖于滑源区体积估计、破裂面分布、岩土体特性和运动路径上的简化地形等可靠的初始条件。由于未考虑地形偏转作用对滑坡-碎屑流运动速度的影响,数值模拟研究仅获得了加速、减速两个运动阶段。虽然研究结果也获得偏转点前的速度突降,但未能呈现受碎屑流连续运动能量传递作用影响而导致速度短程增大的特征。因此,由于滑坡运动路径上不同地形条件的运动速度-距离的关系不同,将地形条件作为滑坡运动过程中的边界条件而不是作用因素,不能充分揭示滑坡-碎屑流运动参数的分布演化。

滑坡-碎屑流受地形偏转作用,在偏转点发生速度突降,导致部分颗粒停滞运动而产生堆积。在初始阶段,后续运动的碎屑流颗粒具备较大的运动能力,可越过或铲刮堆积体而继续运动,但随碎屑流后

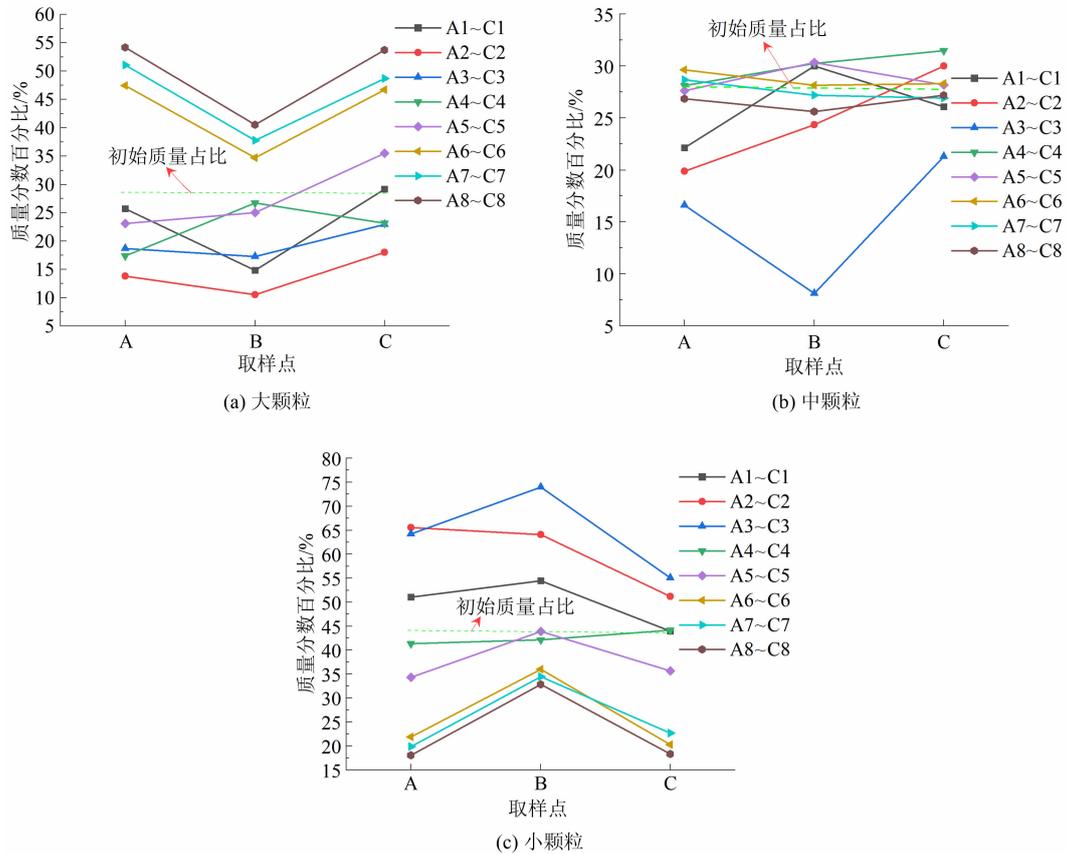


图 14 碎屑流运动横向方向上颗粒分布变化

Fig. 14 Particle distribution in the transverse direction along landslide-debris flow movement

续运动颗粒的运动能力减小,其越过或铲刮原有堆积体的能力减弱,导致进一步的停滞堆积,增加了偏转点后的堆积厚度。由此,受地形偏转作用的碎屑流堆积体最大厚度分布于偏转点后。

碎屑流颗粒产生分选的机制为:颗粒运动过程中,底部的颗粒会受到地面的强烈剪切,由剪切运动产生的向上碰撞力可以施加到上部粒子,随着颗粒尺寸的增加,正应力和剪切力的增加降低了上部颗粒重量的影响,并显著降低了摩擦力^[21]。在碎屑流运动的初始阶段,大颗粒比小颗粒具备更强的运动能力,导致偏转点前的小颗粒质量占比显著大于大颗粒。在偏转点位置出现颗粒级配的混合,不同粒径的质量占比与初始状态趋于一致;偏转点后,颗粒分选重新发展,并随运动距离的增加,其分选程度越高。

偏转地形对滑坡-碎屑流运动性和颗粒分选的作用,还受到颗粒形状、偏转角度、沟谷形态、运动场地坡度、地面覆盖物等因素的影响。以后的研究可考虑颗粒磨圆度、偏转区地形参数、地面覆盖物所确

定的摩擦和铲刮效应对碎屑流运动性、堆积特征和颗粒分选的影响,进一步揭示地形偏转作用下碎屑流致灾参数分布演化规律。

6 结论

(1) 滑坡-碎屑流的运动速度在偏转点呈现显著下降,而后急剧增加并出现速度峰值。受地形偏转作用的滑坡-碎屑流运动速度分为急加速、波动加速、地形偏转作用导致的速度剧烈下降、运动堆积区的稳定下降、堆积停滞区的快速下降五个阶段。结果表明偏转地形对滑坡-碎屑流运动的阻滞作用以及碎屑流颗粒之间动量传递影响了运动速度的分布演化。

(2) 滑坡-碎屑流偏转处的最大堆积厚度为 10.5 cm,堆积区最大堆积厚度为 14.5 cm,分布于偏转点的下部。

(3) 碎屑流大颗粒在堆积体表层的质量占比为 50.7%,小颗粒在堆积体下层的质量占比为

65.1%, 颗粒分布呈现明显的颗粒分选特征。在沿碎屑流运动的纵向和横向方向上, 不同粒径的颗粒的质量占比在偏转点附近都与初始状态一致。在纵向方向上, 大颗粒质量占比呈现短距离减小分布, 而后随运动距离的增加, 质量占比增大, 分别从最小值 14.1%、11.1%、18.5% 增大为 54.3%、53.8%、40.7%; 而小颗粒的质量占比则呈现先增加后减小的分布特征, 分别从最大值 65.8%、64.6%、51.4% 减小为 18.5%、33.4%、18.5%。在横向方向上, 两侧大颗粒的质量占比大于中部, 而小颗粒则相反。

参考文献 (References)

- [1] 许强, 黄润秋, 殷跃平, 等. 2009 年 6·5 重庆武隆鸡尾山崩塌灾害基本特征与成因机理初步研究[J]. 工程地质学报, 2009, 17(4): 433-444. [XU Qiang, HUANG Runqiu, YIN Yueping, et al. The Jiweishan landslide of June 5, 2009 in Wulong, Chongqing: Characteristics and failure mechanism [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(4): 433-444] DOI: 10.3969/j.issn.1004-9665.2009.04.001
- [2] 孔纪名, 田述军, 阿发友, 等. 贵州关岭“6.28”特大滑坡特征和成因[J]. 山地学报, 2010, 28(6): 725-731. [KONG Jiming, TIAN Shujun, A Fayou, et al. Guizhou Guanling landslide formation mechanism and its characteristics [J]. Mountain Research, 2010, 28(6): 725-731] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2010.06.011
- [3] 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): 6-15. [YIN Yueping, LIU Chuanzheng, CHEN Hongqi, et al. Investigation on catastrophic landslide of January 11, 2013 at Zhaojiagou, Zhenxiang county, Yunnan province [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(1): 6-15] DOI: 1004-9665/2013/21(1)-0006-10
- [4] PEI Xiangjun, CUI Shenghua, ZHU Ling, et al. Sanxicun landslide: An investigation of progressive failure of a gentle bedding slope [J]. Natural Hazards, 2021, 111: 51-78. DOI: 10.1007/s11069-021-05044-6
- [5] GE Yunfeng, ZHOU Ting, TANG Huiming, et al. Influence of the impact angle on the motion and deposition of granular flows [J]. Engineering Geology, 2020, 275: 105746. DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105746
- [6] LI Yan, HU Wei, ZHOU Li, et al. Influence of soil density on the solid-to-fluid phase transition in flowslide flume experiments [J]. Engineering Geology, 2023, 313: 106964. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106964
- [7] 周月, 廖海梅, 甘滨蕊, 等. 滑坡运动冲击破碎物理模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(4): 726-735. [ZHOU Yue, LIAO Haimei, GAN Binrui, et al. Physical modeling test on impacting fragmentation during landslide moving [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(4): 726-735] DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0850
- [8] YANG Hailong, PEI Xiangjun, FAN Xiaoyi, et al. Experimental investigation of the mobility and deposit characteristics of laterally confined rock avalanches [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82: 192-203. DOI: 10.1007/s10064-023-03191-7
- [9] 王佳佳, 陈浩军, 肖莉丽, 等. 滑坡碎屑流运动堆积特征与能量耗散规律[J/OL]. 哈尔滨工业大学学报, 2024: 1-11. [WANG Jiajia, CHEN Haojun, XIAO Lili, et al. Motion and accumulation characteristics and energy dissipation law of landslide-debris flow [J/OL]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024: 1-11] DOI: 10.11918/202310045
- [10] BASELT I, OLIVEIRA G Q, FISCHER J T, et al. Evolution of stony debris flows in laboratory experiments [J]. Geomorphology, 2021, 372: 107431. DOI: 10.1016/j.geomorph.2020.107431
- [11] WU Yanbin, DUAN Zhao, PENG Jianbing, et al. Implications of sand grains mobility and inundating area to landslides at different slope angles [J]. Granular Matter, 2024, 26: 18-29. DOI: 10.1007/s10035-023-01387-y
- [12] 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] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000105
- [13] SCHEIDL C, MCADELL B W, RICKENMANN D. Debris-flow velocities and superelevation in a curved laboratory channel [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(3): 305-317. DOI: 10.1139/cgj-2014-0081
- [14] 杜国梁, 张永双, 姚鑫, 等. 都江堰市五里坡高位滑坡-碎屑流成因机制分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(S2): 493-501. [DU Guoliang, ZHANG Yongshuang, YAO Xin, et al. Formation mechanism analysis of Wulipo landslide-debris flow in Dujiangyan city [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2): 493-501] DOI: 10.16285/j.rsm.2016.S2.064
- [15] VALENTINO R, BARLA G, MONTRASIO L. Experimental analysis and micromechanical modelling of dry granular flow and impacts in laboratory flume tests [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2008, 41: 153-177. DOI: 10.1007/s00603-006-0126-3
- [16] 梁京涛, 成余粮, 王军, 等. 2013 年 7 月 10 日四川省都江堰三溪村五里坡特大滑坡灾害遥感调查及成因机制浅析[J]. 工程地质学报, 2014, 22(6): 1194-1203. [LIANG Jingtao, CHENG Yuliang, WANG Jun, et al. Remote sensing investigation and formation mechanism on Wulipo landslide of July 10, 2013 in Sanxi village, Dujiangyan, Sichuan province [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(6): 1194-1203] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2014.06.025

- [17] 温铭生, 方志伟, 王阳谷. 都江堰市五里坡特大滑坡灾害特征与致灾成因[J]. 现代地质, 2015, **29**(2): 448 – 453. [WEN Mingsheng, FANG Zhiwei, WANG Yanggu. Characteristics and disaster causes of Wulipo landslide in Dujiangyan city [J]. Geoscience, 2015, **29**(2): 448 – 453] DOI: 10.3969/j.issn.1000 – 8527.2015.02.032
- [18] 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. DOI: 10.1139/T09 – 143
- [19] 殷志强, 徐永强, 赵无忌. 四川都江堰三溪村“7·10”高位山体滑坡研究[J]. 工程地质学报, 2014, **22**(2): 309 – 318. [YIN Zhiqiang, XU Yongqiang, ZHAO Wuji. Sanxi viliage landslide in Dujiangyan, Sichuan province on July 10, 2013 [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, **22**(2): 309 – 318] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2014.02.018
- [20] YIN Yueping, CHENG Yuliang, LIANG Jingtao, et al. Heavy-rainfall-induced catastrophic rockslide-debris flow at Sanxicun, Dujiangyan, after the Wenchuan Ms 8.0 earthquake [J]. Landslides, 2016, **13**: 9 – 23. DOI: 10.1007/s10346 – 015 – 0554 – 9
- [21] 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. DOI: 10.1007/s11629 – 014 – 3396 – 3

An Experimental Study on the Velocity and Particle Distribution of Landslide-Debris Flow Motion under Deflected Terrain Constraints

FAN Xiaoyi^{a,b}, XIA Guiping^{a,c}, WEN Xiang^a, XU Yizi^a, LIU Haonan^a

(a. School of Civil Engineering and Geomatics; b. Institute of Engineering Safety Assessment and Protection; c. School of Mechanical and Electrical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: Constrained and squeezed by lateral protruding terrain during traveling, landslide-debris flows veer off initial kinetic energy direction, occurring lateral eroding, striking or burying the building structures previously evaluated as in the original low-risk zone. This kind of geo-hazard needs to be comprehensively investigated for key geophysical parameter evolutions during the movement, including velocity, composition and gradation, and it is prerequisite for a proper geotechnical control of the geo-disaster.

Preceding research on landslide-debris flows seldom addressed the movement behaviors under the influence of topographic deflection, quite possibly due to the big challenge of experimental modeling; therefore, these previous research outputs were without practical significance.

In this study, it conducted an improved geo-physical model test to mimic a typical landslide-debris flow. The changes of particle velocity and gradation of landslide-debris were tracked before and after a topographic deflection point and the influence of deflected terrain on the particle movement and accumulation was examined.

(1) The velocity of landslide-debris flows decreased significantly at the topographic deflection point and increased sharply to the peak immediately after the point. The movement process of landslide-debris flows consisted of five stages, including rapid accelerating, fluctuated accelerating, intense decelerating due to the deflection topography, gradual decreasing in the moving-accumulation area, and rapid decreasing in the stagnation area.

(2) Landslide-debris flow occurred the maximum deposition after arriving at the topographic deflection point.

(3) In the accumulation area, the mass ratio of large particles and small particles of landslide-debris flow was 50.7% at the upper layer and 65.1% at the bottom layer, respectively, indicating an obvious particle sorting

phenomenon. In the longitudinal and transverse profile along the movement of landslide-debris flow, the mass share of different particle sizes was consistent with the initial state near the deflection point. In the longitudinal profile, the mass share of large particles decreased in a short distance, and then increased with the increase of movement distance, from 28.3% in the initial state to 49.6% in the final; Comparatively, the mass share of small particles increased first and then decreased, from 44.0% in the initial state to 23.5% in the final; along the transverse profile, the mass share of large particles on the two sides was greater than those in the middle, whereas the opposite was true for small particles.

The study provides an insight into the evolution of key geophysical parameter of landslide-debris flow under the action of deflection terrain, and provides a reference to geo-hazard control.

Key words: deflection terrain; landslide-debris flow; model test; velocity; gradation

(责任编辑 钟雨倩)