

引用格式:白艺彤,宋东日.泥石流造床运动的实验研究[J].山地学报,2021,39(3):346-355.

BAI Yitong, SONG Dongri. Experimental study on paving process of debris flow [J]. Mountain Research, 2021, 39(3):346-355.

泥石流造床运动的实验研究

白艺彤^{1,2}, 宋东日^{1,2*}

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100392)

摘要:“泥石流铺床现象”常被用来定性地解释黏性泥石流(特指高固相含量)运动的减阻效应。目前,铺床现象对泥石流运动的影响研究仍处于定性阶段,定量化的机理研究非常匮乏。本研究设计了中尺度水槽模型实验,对泥石流铺床作用的动力学过程开展了系统观测。以云南蒋家沟泥石流堆积为材料,配置了40%、50%、55%三种固相浓度对比组;实验观测了泥石流流动过程中运动特征,采集了基底正应力、剪应力、孔隙水压力及流动深度参数。实验结果表明:(1)稀性泥石流运动过程中存在微弱的铺床现象,铺床现象并非独属于黏性泥石流;(2)铺床所形成的残留层不一定是单阵泥石流贡献的,而可能是经连续过程逐步形成的。残留层的厚度随泥石流固相浓度的增加而增加。当后继泥石流流经残留层时,由于残留层的液化状态和较低的基底阻力,后继泥石流的作用力可以透过残留层传递至基底,残留层极易被后继泥石流裹挟运动;(3)铺床过程显著改变了后继泥石流运动的边界条件,因而铺床作用能够提高泥石流流动速度、流动深度及相应的冲击力,且铺床效应随泥石流固相浓度升高而愈发显著。本研究不仅明确了泥石流造床运动的物理过程,并基于实测参数对铺床过程进行了机理阐述,填充了泥石流铺床研究的实验空白,对深入理解泥石流动力学具有重要意义。

关键词: 泥石流;铺床作用;流动状态;流动速度;流动深度

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

泥石流是常见的山区地质灾害,具有流动性高、多阵性、破坏力强的特点^[1-2]。按照固相浓度的不同,山区水沙灾害由低到高可分为高含沙水流、泥流、水石流、稀性(低固相含量)泥石流、黏性(高固相含量)泥石流五类^[3-4],其中危害最大的是黏性泥石流^[5]。黏性泥石流在运动过程中具有复杂的减阻效应,导致其能够保持高速运动^[6-7]。研究发现,30%的减阻可能是由铺床作用减小沟床的粗糙度所造成的^[8]。所谓铺床,是指泥石流在阵性流动过程中,由于沿程损失、阵流变薄、流速变慢最终呈叶片状停淤在沟床中,在沟床表面形成一定厚度的残留

层;后续阵流沿着残留层运动,继而黏附在前面的沟床上,直至铺展到沟口,且一阵比一阵向前推进更远、速度更快的物理现象^[9]。云南蒋家沟泥石流观测表明^[7],残留层存在使得沟床面变得光滑平顺,其厚度一般为0.15~0.50 m,有时候可达1 m左右。残留层对泥石流的运动速度、流动状态等方面具有重要影响作用^[10]。残留层的形成不仅增加了泥石流运动时的流动高度,而且降低了泥石流所受到的运动阻力^[11]。

云南蒋家沟观测结果表明^[12-13],当后继泥石流通过残留层时,其冲淤行为与流量高度相关,或表现

收稿日期 (Received date): 2021-04-05; **改回日期** (Accepted date): 2021-06-10

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金(42077256, 51809261); 四川省科技计划资助项目(2020YJ0002)。[National Natural Science Foundation of China (42077256, 51809261); Sichuan Science and Technology Program (2020YJ0002)]

作者简介 (Biography): 白艺彤(1996-), 男, 河北邯郸人, 硕士研究生, 主要研究方向: 山地灾害防灾减灾工程。[BAI Yitong (1996-), male, born in Handan, Hebei province, M. Sc. candidate, research on debris flow hazard mitigation] E-mail: baiyitong18@mails.ucas.ac.cn.

* **通讯作者** (Corresponding author): 宋东日(1987-), 男, 山东莱阳人, 博士, 研究员, 主要研究方向: 泥石流冲击动力学及工程防护。[SONG Dongri (1987-), male, born in Laiyang, Shandong province, Ph. D., professor, research on debris flow impact dynamics and engineering mitigation] E-mail: drsong@imde.ac.cn

出沿残留层“溜滑而过”,无明显冲淤,或表现为大幅度的冲刷作用。甘肃武都火烧沟和四川西昌黑沙河观测结果表明^[14-15],实际泥石流运动中,残留层通常是大部分随后继泥石流运动的,其不动层仅为残留层厚度的 $1/3 \sim 1/5$ 或 $1/5 \sim 1/10$ 。然而,上述结论仅为对野外观测现象的定性描述,缺乏定量的实验验证。

现有关于泥石流铺床作用的研究,主要存在以下三方面的问题:一是现有的对于铺床现象的描述和理解基本来源于野外观测或简易实验,对于这一特殊现象鲜有完整实验研究,无法从完整物理过程和内在机理层面进行验证和解释;二是铺床现象常见于黏性泥石流的描述分析中,其是否是黏性泥石流的特有现象,是否存在于稀性泥石流中,目前也尚无定论;三是铺床现象的产生、发展过程及其对泥石流的运动速度、流动状态、冲击力等方面的实际影响,尚缺乏系统性的阐述。

针对这一现状,本研究进行泥石流铺床作用的中尺度实验研究,采用多通道实时数据采集系统,利用三轴测力传感器、孔隙水压传感器和超声波测距传感器分别测量泥石流流体流动过程中正应力、剪应力、孔隙水压和流动深度信息。设置 40%、50% 和 55% 的不同固相浓度泥石流实验组,单组实验通过两次释放来模拟阵性泥石流,并对比铺床作用前后泥石流体的流态及运动差异,探究铺床导致的残留层的形成和发展的物理过程,并基于实验测量结果对铺床作用对泥石流流动特性的影响进行定量分析。

1 实验设计

1.1 相似性准则

考虑水槽模型实验与自然泥石流的相似性十分必要。由于天然泥石流频率低、河道地形复杂,很难在现场开展系统的泥石流研究。长期以来,中小尺度物理模型实验一直受到尺度效应的限制,与真实泥石流相比,模型实验中液相粘度的影响被放大,孔隙水压力消散得更快^[16-17]。但是,中小尺度物理模型实验的实验条件是可控的,测量仪器易于安装且实验结果复现性高,是目前研究泥石流运动机理的最常用的手段。

为了确保模型和原型泥石流事件之间的动力学

相似性,在泥石流模型实验设计中广泛使用了无量纲数^[17]。弗劳德数(Froude number) Fr 是最常用来量化不同尺度流体流态的无量纲参数之一,被广泛应用于评价各种具有自由表面流体的宏观流态,从宏观上表征流体惯性力和重力的相对重要性^[18]:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh \cos \theta}} \quad (1)$$

式中, v 为泥石流流动速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); g 为重力加速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$); h 为泥石流流动深度 (m); θ 为水槽倾角 ($^\circ$)。孔压消散时间比 (Inertial-diffusional time scale ratio) N_p 量化了泥石流在重力作用下沿坡面流动的特征时长和孔隙水压力的垂直消散时间的相对重要性^[19]:

$$N_p = \frac{\sqrt{l/g}}{\mu h^2 / kE} \quad (2)$$

式中, l 为流动特征长度 (m); μ 为液相的动态粘度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$); k 为泥石流固相固有渗透率 (m^2); E 为固相压缩模量 (Pa)。确保每次实验中泥石流各无量纲数在真实泥石流范围内,就可以保证其与真实泥石流的相似性。

1.2 实验装置

本研究采用中尺度的水槽模拟实验装置,实验地点位于中国科学院东川泥石流观测研究站的实验场。水槽中安装有手提闸门,下游为 10 m 长的流通段,闸门上游可堆积泥石流材料,作为泥石流释放前的储料箱(图 1)。距闸门下方 6 m 和 7 m 处分别安装有基底传感器模块,传感器模块上方分别对应安装超声波测距传感器(图 2)。水槽的宽度为 0.7 m,倾角为 12° 。

泥石流参数的有效测量是研究铺床现象对泥石流流动特性影响的关键^[20]。测量正应力、剪应力和孔隙水压的基底传感器模块安装在水槽底部,其表面与水槽底部齐平(图 2)。基底传感器模块由测量基底正应力和剪应力(沿流动方向)的三轴测力传感器和测量孔隙流体压力的孔压传感器组成。孔压传感器的开口端用 0.4 mm 钢丝网覆盖,避免粗颗粒进入。在每次实验开始前,使用注射器透过钢丝网将水注入到孔压传感器中直至饱和,以保证孔隙流体压力测量的准确性。超声波测距传感器安装于两个基底传感器模块的正上方来测量流动深度,以流动高度显著峰值持续时间内的平均值表征泥石流的流动高度(若单次释放存在多次峰值,均以第一

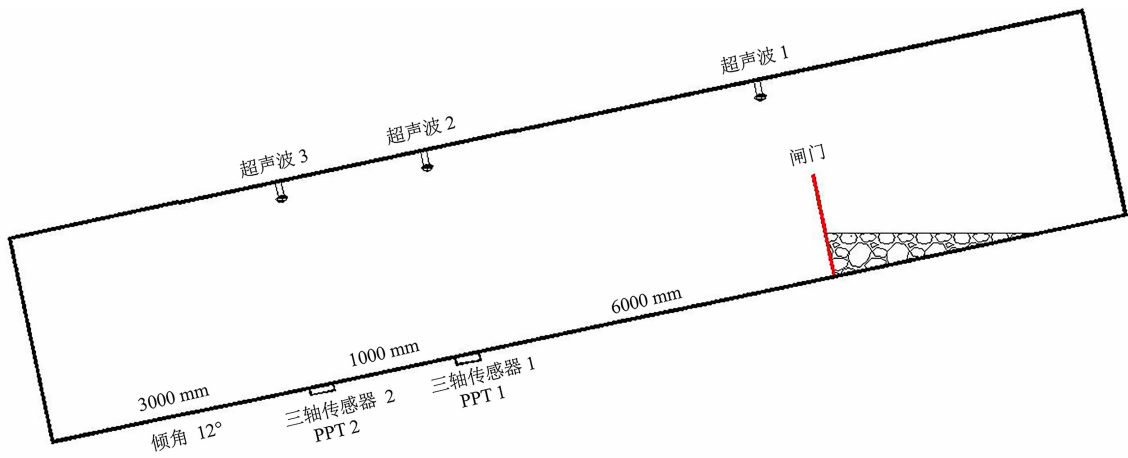


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Diagram of experimental installation

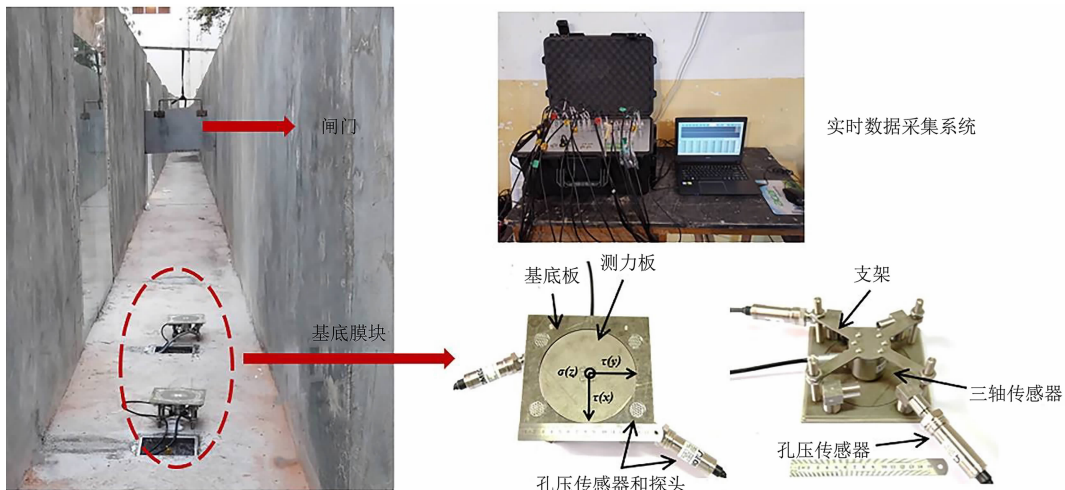


图 2 实验水槽及传感模块

Fig. 2 Flume and instrumentation of this research

次峰值为准)。同时本实验采用泥石流龙头流速表征泥石流流速,以两基底模块所在位置为不同断面,记录泥石流到达时基底模块和超声波测距传感器的响应时间(相互校正),根据两断面间的距离和到达不同断面的时间差计算泥石流龙头流动速度^[21]。所有传感器在实验开始之前和完成之后,均进行了校准操作,传感器工作状态合理可靠,确保了参数测量的准确性。

1.3 实验材料

本实验所用的固体颗粒材料取自东川泥石流观测研究站附近蒋家沟的泥石流堆积物。堆积物用 20 mm × 20 mm 筛网进行筛分。物料的粒径分布如图 3 所示,中值粒径为 2.84 mm,颗粒密度为 2650 kg · m⁻³。基于简化实验的目的,本研究中采用了单一颗粒级配的固体材料配置不同固相浓度的

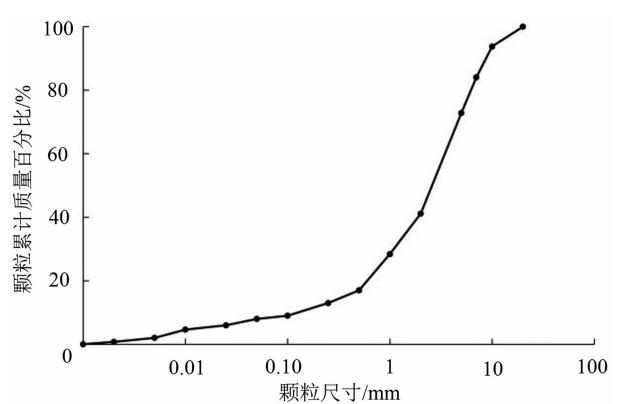


图 3 实验泥石流颗粒级配曲线

Fig. 3 Particle size distribution of debris flow material

泥石流。

1.4 实验方案及实验流程

为了充分研究不同固相浓度泥石流铺床现象的

形成和发展过程,以及铺床对泥石流流动特性的影响,本研究将实验组的固相浓度设置为 40%、50% 和 55%^[2],其容重分别为 1651、1817 和 1880 kg·m⁻³。所有混合物均在实验开始前 15 h 左右配置,保证其粘粒充分水化,排除误差。每个实验组设计为 2 次释放,单次释放的体积为 0.15 m³。两次释放可以分别模拟铺床前后泥石流流体的运动,第一次释放与第二次释放间的准备时间约为 30 min。实验方案的详细情况见表 1。

实验开始前,调试所需设备,将所配置的泥石流混合物装在闸门后,人工反复搅拌,确保混合良好。确保传感器正常工作后,闸门垂直于坡面抬升,泥石流迅速释放并通过流通段,传感器同步工作可以测得泥石流流体的流动深度、正应力、剪应力、孔隙水压等参数信息。闸门打开后,以靠近闸门的超声波 1 传感器(图 1)产生响应时刻作为泥石流释放起始时刻,保证不同组别泥石流运动在时间尺度上的相对统一。表 1 中及本文所分析的流深、残留层厚度、应力、孔隙水压力数据均为基底模块 1 位置处的实测值。以泥石流龙头通过两模块断面的平均速度来表征泥石流龙头流速,弗劳德数 Fr 为基于上述数据的计算值。实验的采样频率设置为 1000 Hz。

2 实验结果分析

2.1 残留层的形成和发展过程

图 4 展示了不同固相浓度的泥石流第一阵释放过程中流动深度随时间的演化。固相浓度为 40% (容重 1651 kg·m⁻³) 的泥石流第一次释放后,其较厚的“龙头”和“龙身”部分通过传感器模块,然后是较薄的“龙尾”。其整体呈现的流动深度起伏不大,较为平稳。固相浓度为 50% (容重 1817 kg·m⁻³)

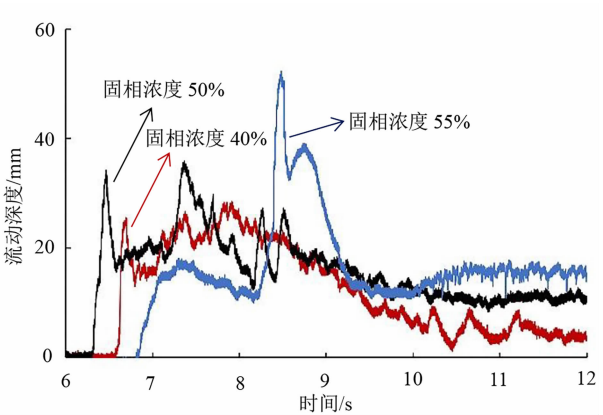


图 4 不同固相浓度泥石流流动深度对比
Fig.4 Comparison of flow depth of debris flow with different solid concentration

的泥石流第一次释放后,其“龙头”厚度高达 33 mm,随后“龙身”部分厚度迅速衰减至 17 mm,约 0.7 s 后出现第二个流动高峰,与龙头厚度基本相当,随后出现两次小幅流动深度变化,而后趋于平缓。固相浓度为 55% (容重 1880 kg·m⁻³) 的泥石流第一次释放后,其显示出了明显的双阵浪涌的特征,第一阵到达模块处后逐渐停止,紧接着第二阵达到,掺混后以更快的速度向下流动。流动深度图线也表现出了对应的双峰特征,且第二次峰值显著高于第一次(本研究取第一阵的峰值作为流动深度)。对比发现,随着泥石流固相浓度的增加,流动深度的变化更加明显,表现出更显著的“多峰(阵性流)”特征。不同固相浓度泥石流从释放到完全静止过程,其龙头流速逐渐变慢,阵流变薄,持续的沿程损失导致整个水槽底部(从闸门处到运动最远端)形成一定厚度的残留层,且残留层厚度随泥石流固相浓度的增加而增加。

不同固相浓度泥石流流体第一次释放流过传感器模块 1 后,其分别留下了 3.4、10.2 和 15.5 mm 厚的残留层(特指传感器模块 1 位置处,取泥石流流体运

表 1 实验方案
Tab.1 Experimental program of research

实验组别	固相浓度/%	密度/(kg·m ⁻³)	流速/(m·s ⁻¹)	流动深度/mm	弗劳德数	孔压消散时间比
40-1	40	1651	2.33	24	4.80	1.20×10 ⁻¹
40-2	40	1651	2.44	33	4.30	6.50×10 ⁻²
50-1	50	1817	2.00	33	3.50	2.40×10 ⁻³
50-2	50	1817	2.22	49	3.20	1.10×10 ⁻³
55-1	55	1880	0.41	17	1.00	1.80×10 ⁻³
55-2	55	1880	2.22	58	2.90	1.60×10 ⁻⁴

动完全停止后稳定厚度值)。固相浓度 55% (容重 $1880 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) 的泥石流第二阵释放完成后其残留层厚度增加至 25.6 mm (图 5), 出现了较大幅度的增长, 其他固相浓度泥石流完成第二阵释放后残留层厚度也有小幅度的增长。对比发现, 当泥石流固相浓度为 40%、50%、55% 时, 随着固相浓度增加, 铺床现象更加显著, 产生了更厚的残留层。值得注意的是, 稀性泥石流 (40% 固相浓度) 的铺床现象虽然并不显著 (3.4 mm 残留层), 但在本系列实验中明确测得其铺床现象的存在。这意味着铺床现象并非独属

于黏性泥石流, 稀性泥石流也存在铺床现象。正是由于稀性泥石流中铺床现象的微弱性, 导致了野外观测中对稀性泥石流铺床现象的忽略。稀性泥石流中铺床现象对流动特性的影响见 2.3 小节。固相浓度 55% (容重 $1880 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) 的泥石流的流动深度时程曲线 (图 5) 表明, 铺床所形成的残留层并不是单次完成的, 也不是一成不变的, 而是一个连续发展的过程。

2.2 残留层与后继泥石流的相互作用

不同固相浓度泥石流第二次释放过程中的流态信息如图 6 所示。正应力、剪应力、孔隙水压为实测

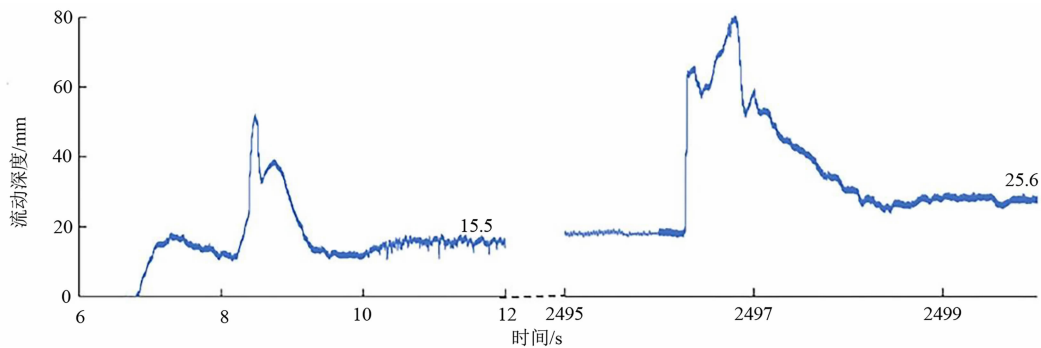


图 5 固相浓度 55% 泥石流流动深度时程曲线

Fig. 5 Time history curve of flow depth of debris flow with a solid concentration of 55%

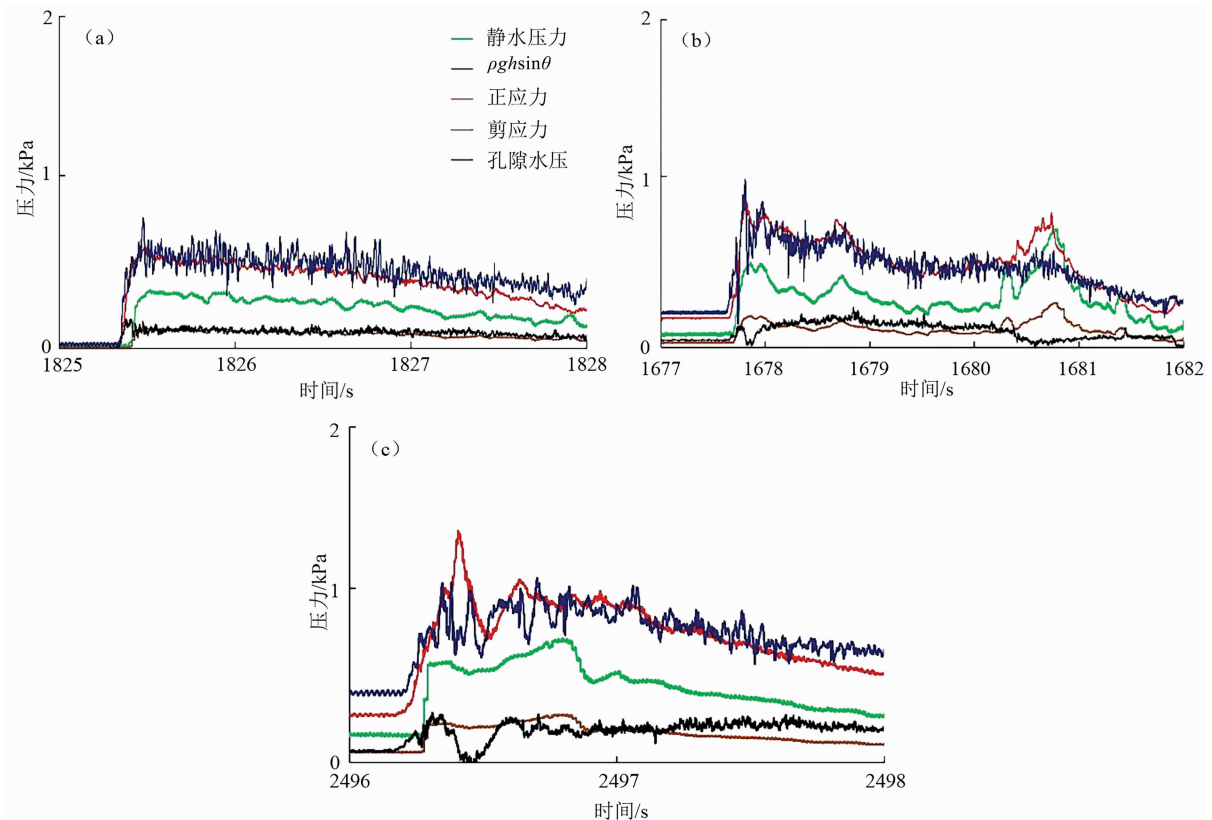


图 6 泥石流流体参数演化 (第二次释放): (a) 40-2; (b) 50-2; (c) 55-2

Fig. 6 Evolution of debris flow parameter (the second release): (a) 40-2; (b) 50-2; (c) 55-2

值,静水压力、 $\rho gh \cos \theta$ 为根据实测流动深度得到的计算值。孔隙水压(蓝色)值波动较大,这反映出泥石流中固体颗粒与液相频繁的相互作用,正应力(红色)与剪应力(黑色)的波动则反映了泥石流中固体颗粒的相互碰撞。随着固相浓度的增加,泥石流的正应力、剪应力、孔隙水压均有小幅增加,而正应力与孔隙水压基本吻合,孔隙水压显著高于静水压力(绿色)这一规律则保持不变,这意味着当泥石流流体固相浓度处于 40% (容重 $1651 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) ~ 55% (容重 $1880 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) 时,泥石流处于完全液化状态,流体内部出现超孔隙水压,且在流动过程中始终未能实现有效耗散,泥石流流体内部不存在有效应力。表 1 中孔压消散时间比 N_p 值也印证了以上描述,泥石流流体孔隙水压的垂直消散时间远高于其沿坡面流动的特征时间,这意味着在泥石流运动过程中,超孔隙水压消散非常缓慢,将贯穿于整个泥石流流动过程,泥石流流体始终处于完全液化状态。基底测量的剪应力与通过流动深度推算出的宏观剪应力

$\rho gh \cos \theta$ (棕色)的良好拟合表明,当后继泥石流流过残留层时,可将其作用力(剪切力)透过残留层顺利传递至基底。鉴于残留层的液化状态以及实测到的基底剪应力(图 6),残留层将被后继泥石流裹挟运动。这也验证了文献中所记录的实际泥石流运动中,残留层通常是大部分随后继泥石流运动,其不动层很稀薄这一野外观测结果。

2.3 铺床作用对泥石流运动特性的影响

流动速度、流动深度和弗劳德数常用来表征泥石流运动。泥石流流动速度是表征泥石流运动的关键参数之一,同时也是泥石流防治工程设计的核心参数。流动深度是泥石流观测中相对容易获得的关键参数之一,也是用于描述泥石流规模的关键参数。

图 7 详细展示了铺床前后泥石流流速、流深、弗劳德数的对比。图中直观显示,不论稀性还是黏性泥石流,铺床作用提高了泥石流的流速和流深,且随着泥石流固相浓度的增加,这一效应更加显著,本实验中铺床作用对于泥石流流速的增幅分别达到了

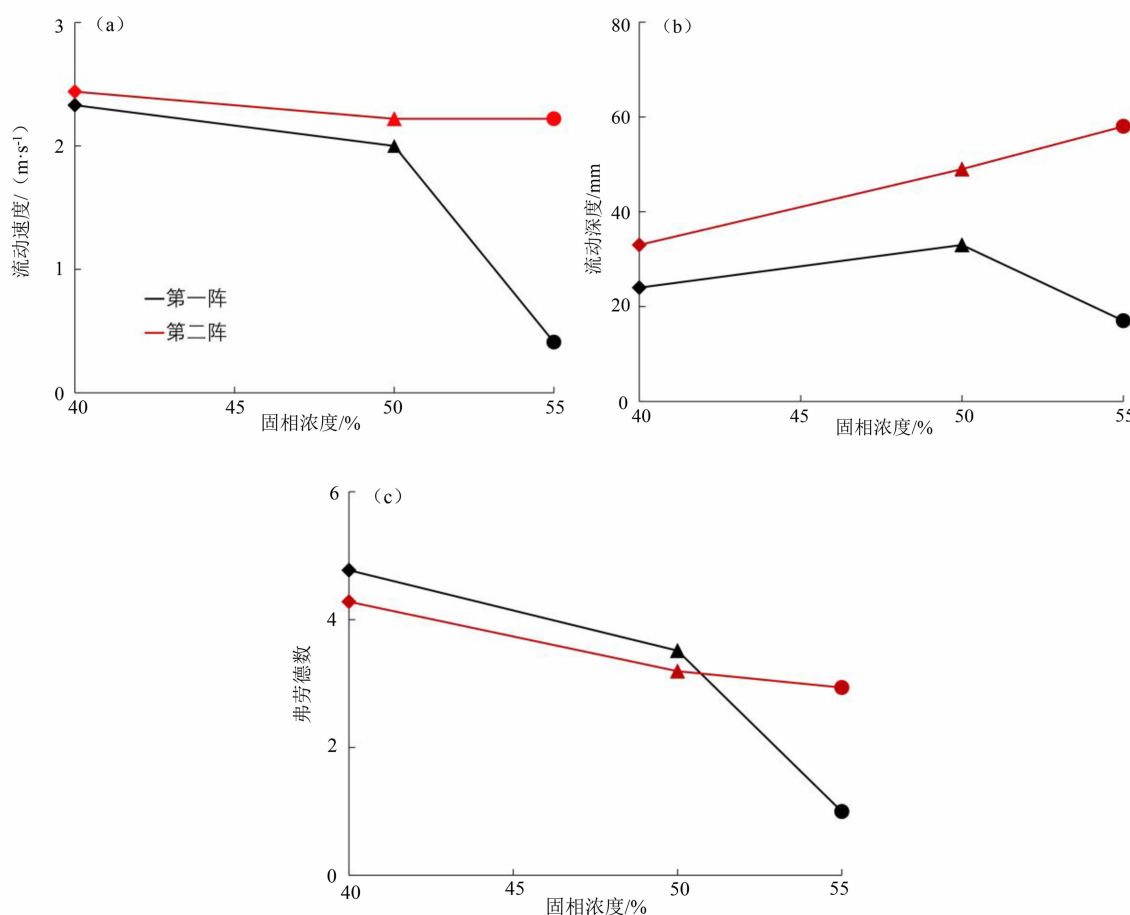


图 7 铺床作用前后泥石流参数对比:(a)流动速度;(b)流动深度;(c)弗劳德数

Fig. 7 Comparison of parameter before and after paving process: (a) flow velocity; (b) flow depth; (c) Froude number

5%、11% 和 441% (图 7)。泥石流流速的增加主要得益于残留层的减阻效应,这种减阻效应对不同固相浓度泥石流的重要性也是不同的,其随着固相浓度的增加而增强。铺床过程形成的残留层显著减小了沟床糙率,同时使泥石流的运动边界由粗糙的固态边界(实验中为混凝土边界)变为液相流体边界(2.2 小节中分析表明残留层处于液化状态),这显著地降低了后继泥石流的基底阻力,提高了后继泥石流的流动速度。铺床作用对泥石流流动深度的增幅分别达到了 38%、48% 和 241% (图 7),流动深度的增加一方面是因为铺床所形成的残留层(液化状态,易被裹挟运动)丰富了后继泥石流体的物量,另一方面是由于边界条件的改变(更多体积的泥石流可以流向下游),导致更多的泥石流材料可以顺利流通过基底模块,使流动深度显著提高。尽管野外观测中鲜有对于稀性泥石流的铺床作用描述,但本实验结果表明,对于 40% 固相浓度(容重 $1651 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)的稀性泥石流而言,铺床作用明确对流动过程中的流速、流深等产生了放大效应,而对于高黏性泥石流流体,铺床作用对于流速、流深的放大则更加显著,是研究泥石流运动不可忽视的重要因素。

本实验研究中,对于固相浓度为 40% (容重 $1651 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)、50% (容重 $1817 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) 的泥石流而言,铺床作用前后泥石流体的弗劳德数略有减小(图 7)。基于弗劳德数的定义(式 1),铺床作用同时提高了后继泥石流的流动速度与流动深度,即同时提高了后续泥石流体的惯性力与重力,且其对重力的放大效应高于对惯性力的放大,合理地解释了最终体现出来的弗劳德数在铺床作用前后略有下降。对于固相浓度为 55% (容重 $1880 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) 的泥石流而言,铺床作用前后泥石流体的弗劳德数从 1.0 升至 2.9。铺床前后其流动速度、流动深度分别增幅 441%、241%,对惯性力的放大效应显著高于对重力的放大,因而导致了弗劳德数的显著提高。

2.4 铺床作用对泥石流冲击特性的影响

泥石流冲击载荷是防护工程设计中的关键参数。目前有多种荷载模型来估计泥石流对工程防护结构的冲击力。为了方便工程设计,水动力学模型因其计算公式的简洁而被广泛采用^[22]。其荷载计算公式为:

$$F = \alpha \rho v^2 h w \quad (3)$$

式中, F 为泥石流冲击力(N); α 为动力冲击压力系数; w 为泥石流宽度(m)。

根据图 7 结果,铺床作用提高了后继泥石流的流动速度和流动深度,导致 $v^2 h$ 显著提高,因此冲击力 F 相应显著增加,且该效应随固相浓度的增加而愈加显著。铺床现象的存在,显著地提高了泥石流的冲击破坏力,对防护工程的设计提出了更高要求,也是工程设计需要重点考虑的因素。

3 结论与讨论

3.1 结论

通过中尺度水槽实验对不同固相浓度泥石流铺床作用的研究,明确了铺床导致的残留层的形成和发展的物理过程,同时基于正应力、剪应力、孔隙水压和流动深度测量结果分析了铺床作用对泥石流运动特性、冲击力的影响。主要结论如下:

(1) 铺床现象并非独属于黏性泥石流,稀性泥石流也存在较微弱的铺床现象。当泥石流固相浓度为 40%、50%、55% (容重分别为 1651 、 1817 和 $1880 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) 时,随着固相浓度增加,铺床现象更加显著,产生了更厚的残留层。此外,铺床所形成的残留层并不一定是单次完成的,也不是一成不变的,而是一个连续发展的过程。

(2) 本实验研究范围内(泥石流固相浓度 40%、50%、55%),泥石流处于完全液化状态,后继泥石流流过残留层时,可将其作用力(剪切力)顺利透过残留层传递至基底。鉴于残留层的液化状态以及实测到的基底剪切力,残留层将被后继泥石流裹挟运动。

(3) 铺床作用能够通过其形成的液化的残留层,降低基底糙率,改变后继泥石流的运动边界条件,有效降低基底阻力,提高后继泥石流的流动速度。同时,残留层还能够丰富后继泥石流体的物量,改变其运动边界条件致使更多泥石流材料被裹挟运动,显著增加了后继泥石流的流动深度。上述效应均随泥石流固相浓度的增加而愈发显著。

(4) 铺床现象的存在有效地放大了后继泥石流的流动速度和流动深度,显著地提高了泥石流的冲击能力,对防护工程的设计提出了更高要求。

3.2 讨论

本研究获得了宝贵的实验数据和相关系统性结

论,但考虑到泥石流物理模拟实验的复杂性,本研究尚存在许多不足,亦需在未来进行更多拓展研究。

(1)出于简化的目的,本研究中采用了单一颗粒级配的固体材料配置不同固相浓度的泥石流。对真实泥石流而言,不同固相浓度流体呈现不同的颗粒级配分布,因而采用单一颗粒级配材料并不能合理代表不同固相浓度的泥石流。未来研究中需要强化该认知,进一步规范化实验泥石流材料的配置方式,更好地还原真实泥石流。

(2)本研究中,由于水槽的坡度为 12° ,在实验设置方量下可实现运动的泥石流上限固相浓度为 55% (容重 $1880 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,因而将泥石流固相浓度设定为 40% ~ 55%。该范围较窄,不足以代表真实的泥石流固相浓度范围,特别是忽视了典型的密度大于 $2000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的黏性泥石流。未来研究应进一步探究铺床作用对高固相浓度泥石流运动特性的影响。

(3)本研究中单组实验设计了两阵泥石流释放,单组泥石流材料体积达 0.3 m^3 ,最高质量达 572 kg。由于现有实验场地及实验材料的限制,导致无法进行更多阵次、更大规模的泥石流模拟实验。然而,实际沟道爆发的泥石流可能是高频次的,因而本研究忽视了对高频次下泥石流铺床作用的探究。同时,较小规模的泥石流模拟中可能会存在较大的尺度效应,限制了对真实泥石流的还原。未来研究中,期待进行更大规模的泥石流模拟实验。

参考文献 (References)

- [1] RICKENMANN D. Empirical relationships for debris flows [J]. *Natural Hazards*, 1999, **19** (1): 47 - 77. DOI: 10.1023/A:1008064220727
- [2] IVERSON R M. The physics of debris flows [J]. *Reviews of Geophysics*, 1997, **35** (3): 245 - 296. DOI: 10.1029/97RG00426
- [3] 田连权,吴积善,康志成,等. 泥石流侵蚀搬运与堆积[M]. 成都: 成都地图出版社, 1993: 34 - 114. [TIAN Lianquan, WU Jishan, KANG Zhicheng, et al. Erosion, transportation and deposition of debris flow [M]. Chengdu: Chengdu Cartographic Publishing House, 1993: 34 - 114]
- [4] 吴积善,田连权,康志成,等. 泥石流及其综合治理[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 17 - 191. [WU Jishan, TIAN Lianquan, KANG Zhicheng, et al. Debris flow and its comprehensive control [M]. Beijing: Science Press, 1993: 17 - 191]
- [5] 康志成,李焯芬,马蔼乃,等. 中国泥石流研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 139 - 185. [KANG Zhicheng, LEE Chackfan, MA Ainai, et al. Debris flow research in China [M]. Beijing: Science Press, 2004: 139 - 185]
- [6] 吴积善,康志成,田连权,等. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 99 - 139. [WU Jishan, KANG Zhicheng, TIAN Lianquan, et al. Observation and research of debris flow in Jiangjia Valley in Yunnan province [M]. Beijing: Science Press, 1990: 99 - 139]
- [7] 张军,吴积善,游勇,等. 黏性泥石流残留层的形成及减阻作用 - 以云南蒋家沟泥石流为例[J]. 山地学报, 2003, **21** (2): 223 - 227. [ZHANG Jun, WU Jishan, YOU Yong, et al. Formation of residue layer of debris flow and the reduction of resistance [J]. *Mountain Research*, 2003, **21** (2): 223 - 227] DOI: 10.3969/j.issn.1008-2786.2003.02.014
- [8] 王兆印,崔鹏,余斌. 泥石流的运动机理和减阻[J]. 自然灾害学报, 2001, **10** (3): 37 - 43. [WANG Zhaoyin, CUI Peng, YU Bin. The mechanism of debris flow and drag reduction [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2001, **10** (3): 37 - 43] DOI: 10.3969/j.issn.1004-4574.2001.03.007
- [9] 吴积善,张军,程尊兰,等. 黏性泥石流的泥深与残留层关系及其确定[J]. 泥沙研究, 2003 (6): 7 - 12. [WU Jishan, ZHANG Jun, CHENG Zunlan, et al. Relation and its determination of residual layer and depth of viscous debris flow [J]. *Journal of Sediment Research*, 2003 (6): 7 - 12] DOI: 10.3321/j.issn:0468-155X.2003.06.002
- [10] 胡凯衡,韦方强,李泳,等. 泥石流的阵性波状运动[J]. 山地学报, 2004, **22** (6): 707 - 712. [HU Kaiheng, WEI Fangqiang, LI Yong, et al. Characteristics of debris - flow surge [J]. *Mountain Research*, 2004, **22** (6): 707 - 712] DOI: 10.3969/j.issn.1008-2786.2004.06.012
- [11] 康志成. 云南东川蒋家沟黏性泥石流流速的初步分析[G]//中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊(4), 北京: 科学出版社, 1985: 119 - 123. [KANG Zhicheng. Preliminary analysis of the velocity of viscous debris flow in Jiangjiagou, Dongchuan, Yunnan [G]// Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences. Proceedings (4) of Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences, Beijing: Science Press, 1985: 119 - 123]
- [12] 刘晶晶,李泳. 黏性泥石流残留层的床面减阻研究综述[J]. 泥沙研究, 2016 (3): 72 - 80. [LIU Jingjing, LI Yong. A review of study on drag reduction of viscous debris - flow residual layer [J]. *Journal of Sediment Research*, 2016 (3): 72 - 80] DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2016.03.011
- [13] 张军,熊刚. 云南蒋家沟泥石流运动观测资料集[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 1 - 44. [ZHANG Jun, XIONG Gang. Data collection of kinematic observation of debris flows in Jiangjia

- Ravine, Dongchuan, Yunnan [M]. Beijing: Science Press, 1997: 1 – 44]
- [14] 甘肃省交通科学研究所, 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 泥石流地区公路工程 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1981: 64 – 143. [Gansu Transportation Research Institute, Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences. Highway engineering in debris flow area [M]. Beijing: People's Communications Press, 1981: 64 – 143]
- [15] 杜榕桓, 康志成, 陈循谦, 等. 云南小江泥石流综合考察与防治规划研究 [M]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1987: 94 – 175. [DU Ronghuan, KANG Zhicheng, CHEN Xunqian, et al. Research on comprehensive investigation and prevention and control planning of debris flow in Xiaojiang, Yunnan [M]. Chongqing: Science and Technology Literature Publishing House Chongqing Branch, 1987: 94 – 175]
- [16] IVERSON R M, GEORGE D L. A depth-averaged debris-flow model that includes the effects of evolving dilatancy. I. Physical basis [J]. *Proceedings of the Royal Society A*, 2014, **470**: 20130819. DOI: 10.1098/rspa.2013.0820
- [17] IVERSON R M. Scaling and design of landslide and debris-flow experiments [J]. *Geomorphology*, 2015, **244**: 9 – 20. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.02.033
- [18] CHOI C E, Ng CWW, Au – Yeung SCH, Goodwin G. Froude characteristics of both dense granular and water flows in flume modelling [J]. *Landslides*, 2015, **12**(6): 1197 – 1206. DOI: 10.1007/s10346-015-0628-8
- [19] IVERSON R M, LOGAN M, DENLINGER R P. Granular avalanches across irregular three – dimensional terrain: 2. Experimental tests [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, **109**: F01015. DOI: 10.1029/2003JF000084
- [20] 宋东日, 周公旦, CHOI Clarence Edward, 等. 土工离心机模拟泥石流问题的相似性考虑 [J]. *岩土工程学报*, 2019, **41**(12): 2262 – 2271. [SONG Dongri, ZHOU Gongdan, CHOI C E, et al. Scaling principles of debris flow modeling using geotechnical centrifuge [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, **41**(12): 2262 – 2271] DOI: 10.11779/CJGE201912011
- [21] 韦方强, 胡凯衡. 泥石流流速研究现状与发展方向 [J]. *山地学报*, 2009, **27**(5): 545 – 550. [WEI Fangqiang, HU Kaiheng. Review and trends on debris flow velocity research [J]. *Mountain Research*, 2009, **27**(5): 545 – 550] DOI: 10.3969/j.issn.1008-2786.2009.05.005
- [22] ARATTANO M, FRANZI L. On the evaluation of debris flows dynamics by means of mathematical models [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2003, **3**(6): 539 – 544. DOI: 10.5194/nhess-3-539-2003

Experimental Study on Paving Process of Debris Flow

BAI Yitong^{1, 2}, SONG Dongri^{1, 2*}

(1. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: “Paving process of debris flow” is often used to explain the reduction in flow resistance of dense (high solid concentration) debris flows. Current research on this paving process is mostly qualitative, and only a handful of works provide a quantitative definition to its underlying mechanisms. In this study, mesoscale flume model experiments were designed to systematically investigate the dynamic paving process in debris flows. Debris flows with volumetric solid concentrations of 40%, 50%, and 55% were modelled using aggregates from debris flow deposits in the Jiangjia Gulley, Yunnan province, China. The kinetics of debris flows were observed and the measurements of their normal stress, shear stress, pore water pressure, and flow depth were collected. Experimental results reveal that: (1) The paving process was not unique to dense debris flows but could also be observed, although to a lesser extent, in dilute flows. (2) The paving process left a residual layer which was formed, not necessarily by a single debris flow surge, but gradually following successive debris flow surges. The thickness of residual layer increased with the solid concentration. The residual layer was highly liquefied and thus was characterized with a low flow resistance. Forces from subsequent flows were transmitted to the residual layer,

leading to its subsequent entrainment and transport. (3) The paving process significantly changed the boundary conditions of the subsequent debris flow movement, and then increased the flow velocity, and flow depth, as well as the impact force experienced by countermeasures. The paving effect became more significant as the solid concentration increased. This research not only clarifies the physical process, but also explains the mechanisms of the paving process based on the measured parameters, filling the experimental gaps in the study of debris flow paving process, and could be of great significance for in-depth understanding of debris flow dynamics.

Key words: debris flow; paving effect; flow regime; flow velocity; flow depth

2020 年 9 月 20 日雅西高速姚河坝崩塌

(李为乐 成都理工大学)

近年来中国高速公路建设不断向西部高山峡谷区延伸,地质小灾害导致公路大灾害事件呈现多发趋势。雅西高速公路被公认为国内乃至全世界自然环境最恶劣、工程难度最大的山区高速公路之一,通车以来已发生了 10 余起因地质灾害导致交通中断的灾害事件。2020 年 9 月 20 日,四川省石棉县境内雅西高速姚河坝大桥右侧山体发生了体积约 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的崩塌,砸塌姚河坝大桥右幅两孔桥梁,造成全线交通中断,这是该高速公路运营以来最严重的地质灾害事件。该崩塌是典型的拉裂式花岗岩崩塌,高陡的临空面、中部凹腔和上部悬臂梁式突出岩体为崩塌孕育提供了有利的地形条件;强风化花岗岩岩性、构造挤压导致岩体破碎,为崩塌的形成提供了有利的地质条件;顺坡向、反坡向和斜切坡向的 3 组节理裂隙为崩塌的孕育提供了有利的坡体结构条件;高速公路切坡进一步加剧了崩塌的变形,前期降雨是此次崩塌失稳的直接诱发因素。

详见本期《2020 年 9 月 20 日雅西高速姚河坝崩塌调查》一文。