

高速远程滑坡启动机制及基底铲刮试验研究*

Experimental Study on Start-up Mechanism and Basement Scraping of High-speed and Long-distance Landslide

李津玮

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043)

摘要: 为探究高速远程滑坡碎屑流运动特征及机理, 以丹扎木村试验田滑坡为工程依托, 采用物理模型试验, 通过滑坡碎屑流在运动过程中铲刮基底松散堆积物的过程来研究滑坡动力铲刮行为, 并基于摩擦学基本理论对模型试验观测结果进行讨论。结果表明: 滑坡碎屑流对基底物质存在“高速冲击剪切侵蚀行为”和“运动基底剪切行为”两种铲刮侵蚀模式; 当坡度较陡时, 碎屑流的运动距离更远; 当铲刮量更大时, 碎屑流的能量随着铲刮体积的增大而增加。所得结论为西南山区高位滑坡碎屑流的动力侵蚀模式提供了研究支撑。

关键词: 高速远程滑坡; 碎屑流; 物理模型试验; 铲刮效应; 运动机制

中图分类号: P642.22 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2023) 04-0008-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.04.002

LI Jinwei

(China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: In order to explore the movement characteristics and mechanism of debris flow in high-speed and long-distance landslide, the physical model test was used to study the dynamic shoveling behavior of landslide through the process of scraping the loose accumulation of base during the movement of landslide debris flow. the observation results of model test are discussed based on the basic theory of tribology. The results show that there are two scraping erosion modes of landslide debris flow, “high speed impact shear erosion behavior” and “moving basement shear behavior”; when the slope is steeper, the movement distance of debris flow is longer; when the amount of scraping is larger, the energy of debris flow increases with the increase of scraping volume. The conclusions provide support for the research on the dynamic erosion model of high landslide debris flow in southwestern mountainous area.

Keywords: high-speed long-distance landslide; debris flow; physical model test; scraping effect; movement mechanism

0 引言

滑坡是由岩石、碎屑或土壤组成的物质在自

重作用下沿软弱结构面或结构带移动, 是一种典型的重大自然地质灾害, 降雨入渗是导致滑坡灾害最主要的因素^[1-2]。我国是滑坡灾害最严重的国家之一, 滑坡碎屑流的发生将对人民财产安全造成不可挽回的严重影响^[3]。姚依凡等^[4]采用F-V模型控制下的数值模型准确描述尼续村高速远程滑坡碎屑流运动特性; 陈古华等^[5]采用离散元软件定量分析碎屑流颗粒级配、桩群拦挡距离双因子对碎屑流冲击桩群过程影响; 崔杰等^[6]通过对

* 基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC1505003)。

作者简介: 李津玮 (1989—), 男, 硕士, 工程师, 从事岩土工程相关工作。

收稿日期: 2022-03-28

尼续滑坡及其堆积区各组成部分开展了详细地面调查,结合地球物理方法揭示了源区斜坡破坏基本特征与破坏机理,通过高分辨遥感解译与堆积物颗分试验揭示了滑体演化各阶段碎屑物质的空间展布规律;郜颖超等^[7]采用数值流形方法对牛圈沟强震诱发滑坡所形成的高速碎屑流运动过程进行模拟,分析其堆积状态及运动特性;张志东等^[8]在物理模型试验的基础上,运用三维离散元软件 PFC 3D,探究滑源区粒序分布及颗粒粒径对滑体运动速度、堆积形态、冲击力的影响;赵海鑫等^[9]设计了振动台造波模型试验,开展了地震作用下堰塞湖涌浪动水压力试验,建立了复合动水压力的计算公式;郑光等^[10]通过逐步拟合回归,建立了基于势能的岩质滑坡-碎屑流最大水平运动距离的计算公式。最后采用实例数据对计算公式进行了验证,证明了考虑该运动距离计算公式具有较好的可靠性,能够为山区滑坡-碎屑流灾害预警工作提供理论指导;张睿骁等^[11]采用三维离散元模拟方法,研究了刚性挡板与坡脚的距离和坡角对滑坡碎屑流冲击力的影响。

综上所述,目前对于滑坡危害及运动特征已有相当的研究,多针对于优化模型进行数值模拟影响因素分析或运动公式研究,但由于不同地质条件的巨大差异,导致滑坡发生机制不一,且采用试验手段对滑坡基底铲刮动力机制研究较少,因此本文以丹扎木村试验田滑坡为工程依托,采用物理模型试验开展高速远程滑坡启动机制及基底铲刮研究,以期补充完善此类工程研究热点,为今后类似工程的灾害预警及防护措施提供科学依据。

1 工程概况

1.1 地质灾害概况

丹扎木村试验田滑坡位于金川县沙耳乡丹扎木村,东经 $102^{\circ}4'2''$,北纬 $31^{\circ}29'57''$ 。2018年8月24日23时50分,发生山体滑坡,至8月27日滑1坡区仍不时有局部滑塌现象,造成滑坡前缘民房局部掩埋、损坏等,电杆被埋、通电线路中断,并掩埋了原省道 S211 公路共 116 m 长。

丹扎木村试验田滑坡呈西~东向展布,平面上形态略呈“圈椅状”,滑坡目前变形明显,左侧剪切裂缝明显,已产生4条裂缝,延伸长度20~60 m;后缘以滑动形成的圈椅状陡坎为界,下错高度一般为1.5~3.0 m,局部达到4.0 m;滑坡前缘从 S211 公路内侧剪出。现滑坡剪出口已被滑坡松散堆积物覆盖,滑坡堆积体对滑坡起到了削方反压的作用,增加了滑坡整体稳定性。滑坡为覆盖层滑坡,滑动面位于基覆界面位置,滑体厚度4.0~12 m,平均厚度约8 m,滑体物质主要由碎石、块石、砂岩和板岩碎(块)石组成,滑床为三叠系上统西康群朱倭组(T3zh)变质砂岩,为逆向坡。滑坡纵向长约150 m,横向宽约150 m,面积约 $1.8 \times 10^4 \text{ m}^2$,体积约 $14.4 \times 10^4 \text{ m}^3$,主滑方向 84° ,滑体坡脚高程约为2153 m,坡顶高程约为2282 m,相对高差约为129 m。按厚度分类为中层滑坡,按体积分类为中型滑坡,按滑坡物质组成成分分为覆盖层土质滑坡。滑坡全景照片见图1。



图1 滑坡地质灾害现场图

Fig. 1 Site map of landslide geological hazard

1.2 滑坡变形破坏机制

该滑坡位于陡倾斜单面山斜坡底部,相对高差约129 m,处于河流切割沟谷地带,上部为厚度较大松散堆积物,前缘形成高陡临空面,为滑坡形成提供了有利的地形地貌条件;覆盖层为坡残积碎块石土,结构松散,土体物理力学性质较差,覆盖于高陡斜坡地表,为滑坡提供了物质条件;滑坡两侧为冲沟,土体结构松散,地面裂缝发育,暴雨时,地表水下渗至滑体内,致使滑体长期处于饱水状态,使滑体土物理力学参数大大降低;滑坡区处于河谷岸坡地带,处于地下水集中排泄

岩土力学

区域, 地下基岩裂隙水、上层空隙潜水丰富, 进一步软化了基覆界面部位岩土体物理力学性质; 地震对滑坡体结构造成了一定程度的破坏, 导致滑体结构更加松散, 利于地表水下渗, 加剧了斜坡体朝不稳定方向发展。因此, 在强降雨条件下, 滑体土重度增加, 滑体土物理力学性质降低, 在静水压力及动水压力的共同作用下, 诱发了滑坡体沿临空面发生滑动。总体来讲, 该滑坡是由于地表水入渗、强降雨等外界因素的触发下, 在后部静水压力及基岩裂隙动水压力的共同作用下发生的崩滑体, 滑坡整体以牵引式滑坡变形为主, 浅表层以崩滑为主的变形破坏特征。

2 高速远程滑坡启动机制研究

西南高山峡谷区由于受地质构造营力等作用下, 其海拔较高位置多有崩塌体形成, 这些都为滑坡碎屑流的形成提供了充足的物源。一旦这些崩塌堆积体失去稳定, 其在重力势能的作用下运动效能急剧升高, 将具有较大的破坏性。通过研究崩塌体失稳并启动的内在机制研究, 利用高速摄像机捕捉其失稳运动演化全过程, 为西南山区高位地质灾害启动机制研究提供支撑。

2.1 试验装置及方案

(1) 试验装置

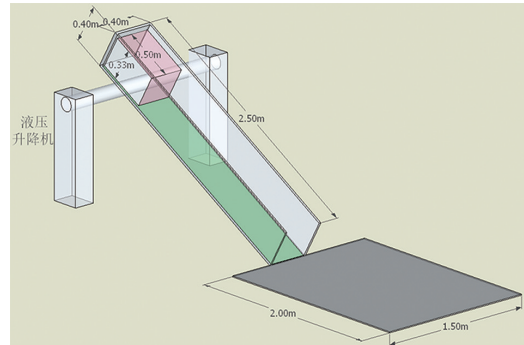
本物理模型试验主要采用多功能碎屑流模型试验槽中进行, 该段试验槽设计了陡坡加速度阶段及坡度相对较缓阶段两部分, 在缓坡段设置高度为 15 cm 的崩塌堆积体, 陡坡坡度与实际情况接近, 设置为 45° 。山区碎屑流持续崩塌压覆在原有崩塌堆积体上, 最后在雨水入渗的过程中, 坡体整体失稳, 形成滑源区的物源。试验模型如图 2 所示。

(2) 试验材料

根据野外地质现场调查发现, 工作区内的泥石流沟内粒径分布不均, 尺寸 20~30 mm 占优, 则本次物理模型试验所采用的滑坡碎屑流物质采用粒径为 20~30 mm 的碎屑石。根据野外高山区已有崩塌形状和尺寸, 由于室内边界条件受限, 设置高为 15 cm 的崩塌体堆积坝, 崩塌体堆积坝主要是由粒径小于 5 mm 的松散土组成。

(3) 试验方案

结合西南山区多起高位滑坡地质灾害发生原因, 多为降雨诱发等因素。本模型制定了如下的试验方案: 首先对高山峡谷区已有的崩塌体进行堆载, 然后进行雨水入渗试验, 来观测高位滑坡启动机制过程。



(a) 物理模型简化示意图



(b) 崩塌堆积体模型

图 2 高速远程滑坡物理试验模型

Fig. 2 Physical test model of high-speed long-distance landslide

2.2 试验过程

(1) 利用千斤顶将陡坡段坡度调整至 45° , 与真实的野外地质情况相接近。

(2) 在缓坡段上设置高为 15 cm 的崩塌堆积体坝。

(3) 在滑槽的右侧和正面分别放置高速摄像机, 准备进行视频监控。

(4) 将已称量好的滑体砾石放置在滑槽上部, 试验开始时人工打开闸门, 让碎砾石在重力的作用下自行滑落。滑坡碎屑流经过陡坡段的加速运动后对缓坡段的松散堆积物进行铲刮效应。试验

完成后对试验现象进行拍照并记录试验相关结果。

2.3 试验现象描述分析

如图 3 为试验结果正视图，据此可以看出：

(1) 当滑源区设置为 10 kg 粒径 20~30 mm 落下，堆载在崩塌坝体上时，崩塌坝体上面一层被铲刮掉，部分碎石会洒落，但是崩塌堆积体依然是稳定的。

(2) 当滑源区再设置为 10 kg 粒径 20~30 mm 运动落下，继续堆载在崩塌坝体上，崩塌坝体表表面继续被铲刮掉，并出现两条裂缝带。

(3) 当给滑源区持续注入水时，裂缝带被水冲击，裂缝带进一步扩张，逐步垮塌，最终碎屑流沿着裂缝带进行流动，从而整个崩塌堆积体失去稳定，形成滑坡碎屑流物源。



(a) 加载第一个 10 kg



(b) 加载第二个 10 kg



(c) 持续注水

图 3 试验现象正视图

Fig. 3 Face-to-face view of experimental phenomenon

2.4 试验机制分析

利用 Geostudio 中的 SLOPE 模块来研究崩塌体

的稳定性定性。由前述滑坡机理分析可知，由于堆积加载，雨雪入渗，坡体稳定性降低进而发生滑动，天然崩塌体堆积物的稳定性系数为 1.37，当第一次加载时稳定性系数降低为 1.28，当第二次加载时，稳定性系数降低为 1.14；当持续注水模拟降雨时，稳定性系数持续降低，直至安全系数小于 1，从而形成高速远程滑坡碎屑流物源。当高山峡谷区已形成天然崩塌堆积体时，应该持续关注其上方是否有不稳定坡体。当不稳定坡度持续崩落，堆载在天然崩塌体时，形成堆载效应，改变崩塌堆积中土体内力变化情况，当堆载量超过一定限度时，天然崩塌体的稳定性持续降低。若遇见强降雨时，则雨水入渗，坡体表面形成暂态孔压区，坡体强度进一步降低，最终失稳，形成高速远程滑坡碎屑流（泥石流）。

3 高速远程滑坡基底铲刮试验研究

通过滑坡碎屑流在运动过程中铲刮基底松散堆积物的过程来研究滑坡动力铲刮行为。同时为了更好的记录试验效果，模型试验采用高速摄像机来记录滑坡碎屑流撞击-铲刮-堆积的动力行为；利用三维激光扫描仪来研究铲刮前后坡体厚度变化情况。同时基于摩擦学基本理论对模型试验观测结果进行讨论。

3.1 试验装置及方案

(1) 试验装置

本物理模型试验主要采用多功能碎屑流模型试验槽中进行，该段试验槽设计了陡坡加速度阶段及坡度相对较缓阶段两部分，使滑坡碎屑流经过加速具有一定的速度，然后在缓坡段进行铲刮，试验槽结构示意图及实物照片如图 2 所示。

(2) 试验材料

根据野外地质现场调查发现，工作区内的泥石流沟内粒径分布不均，尺寸 20~30 mm 占优，则本次物理模型试验所采用的滑坡碎屑流物质采用粒径为 20~30 mm 的碎屑石。在试验过程中，为了体现滑坡碎屑流与基底物质颗粒物质组成之间的差异，同时结合野外实际情况，本次试验的基底物质用松散土进行模拟（粒径小于 2 mm）。

岩土力学

(3) 试验方案

根据团队在野外地质现场调查的过程中发现,碎屑流运动路径的坡度变化较大,同时沿途路径的堆积物的厚度(基底厚度)也不一致。本次模型试验主要考虑坡度和基底厚度的影响因素,具体试验工况见表1。其中1组和2组主要考虑基底厚度对碎屑流铲刮的影响。2组和3组主要考虑坡度对碎屑流铲刮作用的影响。

表1 滑坡碎屑流冲击铲刮试验方案
Table 1 Test scheme of impact shovel and scraping of debris flow of landslide

序号	滑体物质		基底厚度 /mm	坡度/ $^{\circ}$
	质量/kg	粒径/cm		
1	20	20~30	5	45
2	20	20~30	20	45
3	20	20~39	50	25

3.2 铲刮运动过程分析

由于滑坡碎屑流运动过程时间较短,无法通过肉眼来观测滑坡碎屑流铲刮松散堆积体的运动行为,因此在试验过程中通过高速摄像机拍摄滑坡碎屑流运动铲刮行为。由于各个工况的铲刮运动模式基本接近,限于篇幅,在此介绍工况1:基底厚度为5 mm,坡度为45 $^{\circ}$,粒径为20~30 mm,质量为20 kg的滑坡碎屑流运动铲刮行为。



(a) 高速冲击剪切侵蚀行为



(b) 运动基底侵蚀行为

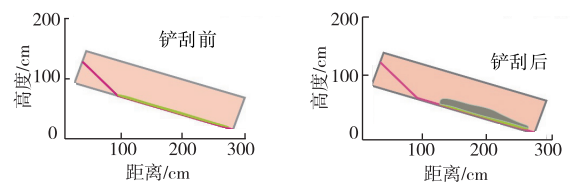
图4 滑坡基底铲刮侵蚀模式

Fig. 4 Scraping erosion model of landslide basement

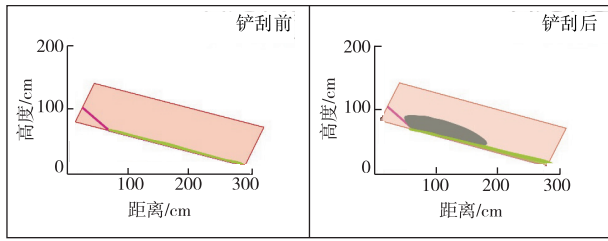
根据高速摄像机观察,滑坡碎屑流对基底物质存在“高速冲击剪切侵蚀行为(如图4(a)所示)”和“运动基底剪切行为(如图4(b)所示)”两种铲刮侵蚀模式。试验开始后,滑坡碎屑流在陡坡段进行加速后,运动至缓坡段。滑坡碎屑流运动以一定的角度冲击基底物质的高速飞溅,这些就可以解释高速碎屑流前端出现尘浪及岩土浪现象。随着滑坡碎屑流的运动继续,铲刮深度随之加深。滑坡碎屑流前端剪切基底松散土,并裹挟其继续运动,成为新的碎屑流继续铲刮基底松散土,这就可以解释碎屑流体积增大的原因。

3.3 铲刮效应影响因素分析

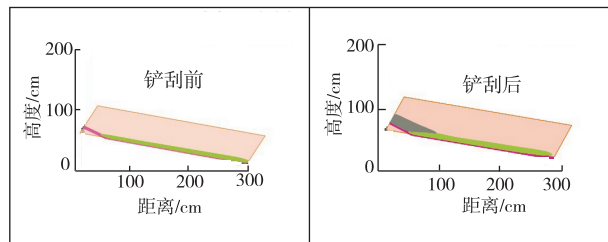
滑坡碎屑流在不同的坡度、不同的基底物质厚度的情况下,其铲刮运动行为有所区别。为了研究不同基底物质厚度、不同坡度情况下其对铲刮作用的影响,设计了3组试验,试验结果如图5所示。试验结果显示:当坡度较陡时,碎屑流的运动距离更远。坡度为45 $^{\circ}$ 时的第1组和第2组,其最远运动距离分别接近水平3 m、1.7 m处。坡度为25 $^{\circ}$ 时的第3组,由于坡度较缓,其运动距离较近,其大多数碎屑流物质停积在缓坡区与陡坡区相接处。当基础物质厚度不同时,其滑坡碎屑流的铲刮运动行为也是不同的,如第1组其基底物质厚度为5 mm,其缓坡区的前端基本被铲刮殆尽;第2组的基底物质厚度为20 mm,其缓坡区的前端的铲刮深度达到7 mm;这两组的其他控制性参数是相同的,其铲刮深度不同,这是由于当铲刮量更大时,碎屑流的能量随着铲刮体积的增大而增加。



(a) 基底厚度为5 mm, 坡度45 $^{\circ}$



(b) 基底厚度为 20 mm，坡度 45°



(c) 基底厚度为 50 mm，坡度 25°

图 5 不同影响因素滑坡碎屑流铲刮运动试验现象

Fig. 5 Experimental phenomena of debris flow shoveling and scraping movement of landslides with different influencing factors

3.4 碎屑流铲刮机制分析

碎屑流的铲刮机制主要分为两部分，实际上按照碎屑流的顺序应该为刮铲机制。因为碎屑流在运动的过程中首先对基底产生的是“刮”的效应，而后为铲。

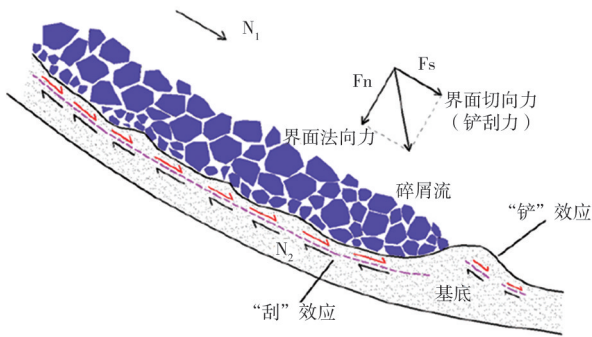


图 6 滑坡碎屑流对基底物质的作用力机制

Fig. 6 The mechanical mechanism of scraping effect

根据图 6 可知，“刮”效应的产生是因为碎屑流首次与基底接触，在与基底界面平行的相反方向产生了一定的摩擦力，随着碎屑流与基底接触面的不断增加，底部的摩擦力越来越大，同时碎屑流底部与基底的反作用力也越来越大，碎屑流和基底在同一平面的位置相互产生了作用力与反作用力，而体现在碎屑流与地基作用上的力即为剪应力。随着碎屑流的不断运动，且在阻力的影

响下，碎屑流在基底的末端会产生积聚现象，这种条件下，在基底末端会产生类似于“小山丘”一样的砂砾鼓包，称之为“土堆”。

在碎屑流不断的冲击下会对基底末端的“土堆”产生一定的冲击作用，在频繁的冲击作用下，碎屑流会对底部的小土堆产生“铲”作用，铲的作用来势相对于“刮”的作用要猛烈，具有一定的破坏作用。

根据上述研究结果，分别对碎屑流的力学效应及碎屑流与基底界面接触时的切向应力和刮铲力进行综合分析，分别得到图 7 碎屑流铲刮效应细观力学机制和图 8 铲刮区界面切向力和铲刮力演化曲线。

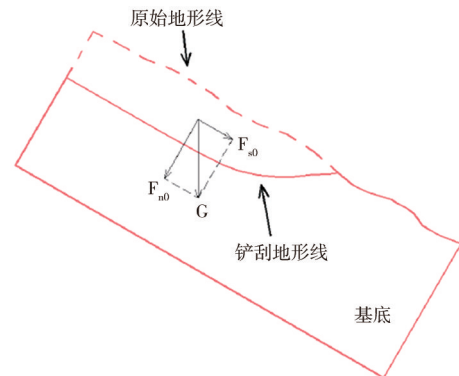


图 7 碎屑流铲刮效应细观力学机制

Fig. 7 Meso-mechanical mechanism of scraping effect of clastic flow

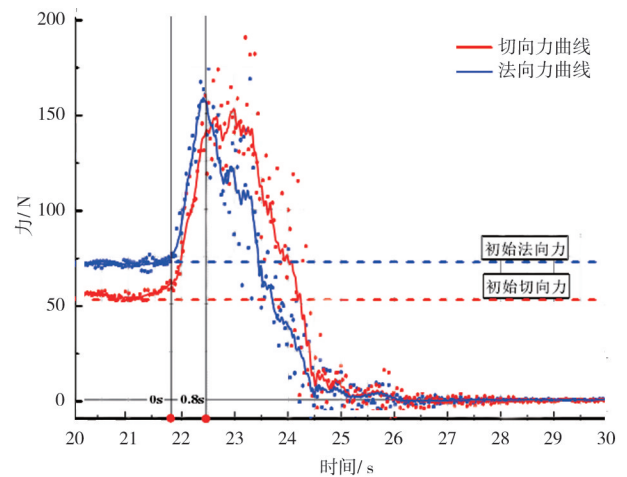


图 8 铲刮区界面切向力和铲刮力演化曲线

Fig. 8 Evolution of erosion force in the experimental

从一开始接触基底的时候在重力作用下，存在向下的初始作用力，该初始作用力与基底界面

岩土力学

相切,为切向应力。同时根据图7可以看出,重力作用下,初始切向应力与重力的另一垂直分力的大小相同。

由图8可知,随着时间的增加,法向应力与切向应力的趋势相同,均为随着时间的增加出现先增加后降低的趋势,同时可以看出切向应力相对于法向应力相对较大,因此碎屑流会沿着基底界面进行流动,且随着时间的发展会在基底末端的某处停下来。图8中的时程曲线反映了碎屑流在动态流动时力的变化和分解,且法向应力的峰值会先于切向应力的峰值出现,这充分表明了,碎屑流的动态发展机制,即初始速度很慢,随着时间的增加,切向应力逐渐高于法向应力,碎屑流的速度在一瞬间突然提升,随后法向应力与切向应力相互抵消,最终碎屑流会在基底的末端停留下来。这说明碎屑流的分力随着时间的推移会逐渐转化,使得碎屑流的速度显著降低。

4 结论

本文采用滑坡物理模型试验的方法,研究高速远程滑坡从启动、运动铲刮的全过程运动状态,主要得到以下结论:

(1) 当高山峡谷区已形成天然崩塌堆积体时,应该持续关注其上方是否有不稳定坡体。当不稳定坡度持续崩落,堆载在天然崩塌体时,形成堆载效应,改变崩塌堆积中土体内力变化情况,当堆载量超过一定限度时,天然崩塌体的稳定性持续降低。若遇见强降雨时,则雨水入渗,坡体表面形成暂态孔压区,坡体强度进一步降低,最终失稳,形成高速远程滑坡碎屑流(泥石流)。

(2) 滑坡碎屑流对基底物质存在“高速冲击剪切侵蚀行为”和“运动基底剪切行为”两种铲刮侵蚀模式。试验开始后,滑坡碎屑流在陡坡段进行加速后,运动至缓坡段。滑坡碎屑流运动以

一定的角度冲击基底物质的高速飞溅,这些就可以解释高速碎屑流前端出现尘浪及岩土浪现象。随着滑坡碎屑流的运动继续,铲刮深度随之加深。滑坡碎屑流前端剪切基底松散土,并裹挟其继续运动,成为新的碎屑流继续铲刮基底松散土,这就可以解释碎屑流体积增大的原因。

参 考 文 献

- [1] 刘红岩,张小趁,李俊峰,等. 基于突发地质灾害应急防治的边(滑)坡分类方法[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(2): 193-202+237.
- [2] 董浩阳,苏晓军,窦晓东,等. 甘肃舟曲县2019年“7·19”牙豁口滑坡复活成因及机理[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2021, 57(6): 760-766.
- [3] 文宝萍,王凡. 1965年烂泥沟滑坡前兆、高速远程运动及后期演化特征[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(06): 72-80.
- [4] 姚依凡,高春玉,崔杰,等. 尼续村高速远程滑坡碎屑流运动特征数值研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2021, 57(6): 767-774+782.
- [5] 陈古华,韩培锋,王月明,等. 拦挡桩群对滑坡碎屑流挡流效果的离散元模拟[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(1): 129-140.
- [6] 崔杰,高春玉,张志龙,等. 平敞型高速远程滑坡碎屑流运动与堆积演化规律研究[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(6): 22-29.
- [7] 郜颖超,位伟,姜清辉. 基于流形元模型的高速远程滑坡碎屑流运动规律与拦挡结构减灾效果研究[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(6): 40-48.
- [8] 张志东,樊晓一,姜元俊. 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[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(1): 49-59.
- [9] 赵海鑫,姚令侃,黄艺丹,等. 地震与滑坡碎屑流引发堰塞湖涌浪动水压力研究[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(3): 558-563+1-3.
- [10] 郑光,许强,彭双麒. 岩质滑坡-碎屑流的运动距离计算公式研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(12): 4897-4906.
- [11] 张睿骁,樊晓一,姜元俊. 滑坡碎屑流冲击力影响因素的离散元模拟[J]. 铁道建筑, 2019, 59(4): 108-111.