

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.01.01

基于水槽试验的冰碛土泥石流启动机理分析 ——以中巴公路艾尔库然沟为例

樊圆圆^{1,2}, 宋 玲¹, 魏学利²

(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000;
2. 新疆维吾尔自治区交通规划勘察设计研究院, 新疆 乌鲁木齐 830006)

摘要:冰碛土启动形成泥石流在中巴公路沿线十分常见。前人对冰碛土特征变化及影响冰川泥石流形成的研究较少。为进一步探索泥石流暴发的原因,此次基于水槽试验,结合研究区的冰碛土物理力学特性进而探究冰碛土体形成泥石流的过程与机制。结果表明:(1)融水流量分别为 8 L/min、12 L/min、16 L/min 和 56 L/min 的情况下,冰碛土内部结构发生变化,其被冲刷时的破坏形式和启动过程具有差异性;(2)泥沙含量随融水流量和时间的不同而发生波动变化,泥石流冲刷启动和土体坍塌淤堵反复循环;(3)综合冰碛土特征变化及实验现象,将冰碛土泥石流的启动机理分为渗透饱和、侵蚀坍塌、冲刷启动三个部分;(4)冰碛土泥石流的稳定系数与水流流量呈幂函数关系。

关键词:艾尔库然沟;冰碛土;泥石流;细粒含量;启动机理

中图分类号: P642.23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2021)01-0001-09

Analysis of the start-up mechanism of moraine debris flow based on flume test:A case study of the Aierkuran Gully along the Sino-Pakistan highway

FAN Yuanyuan^{1,2}, SONG Ling¹, WEI Xueli²

(1. College of Water Conservancy and Construction Engineering Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China;
2. Academy of Transportation Planning Surveying and Design, Urumqi, Xinjiang 830006, China)

Abstract: Debris flow caused by moraine soil starting is very common along the Sino-Pakistan Highway, but in previous studies, the characteristics of moraine soil and its influence on the formation of glacier debris flow is lacking. In order to further explore the causes of debris flow burst, based on flume test, the process and mechanism of debris flow caused by moraine soil starting in the study area are discussed in connection with the characteristics of moraine soil in the study area. The results show: (1) when the flow rate of molten water is 8 L/min, 12 L/min, 16 L/min and 56 L/min, the internal structure of moraine soil changes, and the failure form and starting process of moraine soil are different. (2) The sediment charge content fluctuates with the change of melt water flow and time, and the debris flow scour start and the soil collapse silt in repeated circulation. (3) Based on the characteristics of moraine soil and experimental phenomena, the starting mechanism of glacier debris flow is divided into three parts: osmotic saturation, erosion collapse and scour starting. (4) The stability coefficient of the ice-and-soil debris flow is a power-function relation with the flow of water.

Keywords: the Aierkuran Gully; moraine soil; glacier debris flow; fine particle content; start-up mechanism

收稿日期: 2020-01-21; 修订日期: 2020-02-29

基金项目: 国家自然科学基金(51669031)

第一作者: 樊圆圆(1996-), 女, 河南驻马店人, 硕士研究生在读, 主要从事岩土工程研究。E-mail: 810234250@qq.com

通讯作者: 宋 玲(1971-), 女, 新疆人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程研究和教学工作。E-mail: xjsdsl0514@163.com

0 引言

本次研究选取中巴公路奥依塔克镇布伦口段 K1598 处典型冰川泥石流沟道内的冰碛土。奥布段公路地形起伏大, 紧邻盖孜河, 又加上高山区冰川覆盖, 局部暴雨频发, 为泥石流发育提供良好的地形条件和水动力条件^[1-2]。中巴公路沿线发生过多地地质灾害, 常见地质灾害有泥石流、滑坡等。其中, 冰川泥石流最为常见, 危害性也较大。泥石流的形成主要原因是降水和融雪, 故其与土体的颗粒组构、含水率和细粒含量都紧密相关^[3-4]。

冰碛土是冰川泥石流的主要固体物质来源, 其和冰川泥石流堆积类似但又有所不同^[5]。冰碛土是经过冰川搬运和改造作用形成的, 其颗粒粗细变化较大, 在降雨和融雪的作用下, 冰碛土内部易发生迁移, 进而形成滑坡泥石流^[6-7]。例如郭朝旭等^[8]研究了宽级配弱固结土体内细颗粒迁移规律; 王保亮等^[9]探讨了降雨作用下土体细颗粒迁移特征及其对崩塌的影响; 矫滨田等人^[10]研究了土体降雨滑坡中细颗粒运移及效应。

冰碛土对冰川泥石流的形成起到重要影响作用。蔡祥兴等^[11]很早就对帕尔提巴尔沟冰川泥石流的成因和发展趋势做了研究; 陈晓清等^[12-14]以宽级配砾石土为研究对象, 通过人工降雨试验和室内特体特征参数试验, 初步探究在暴雨作用下, 宽级配砾石土滑坡转化泥石流启动的机理; 铁永波等^[15]主要探索了冰碛补给——暴雨型泥石流的形成条件及形成过程机制, 提出了这类泥石流形成过程有清水汇流、单颗粒固体物质启动、掏蚀和侧蚀、泥石流形成 4 个阶段。此外铁永波还考虑了冻融作用的影响, 对冻融条件下冰碛补给型泥石流物源汇集过程进行了初探。

近年来, 前人学者对国内冰川泥石流的成因、分布特征及形成机制等已有了较深入的研究^[16-20], 例如有中国西藏地区冰湖溃决型泥石流灾害的研究、西藏林芝地区冰川降雨型泥石流的研究等。此外, 土的强度特性受水流的作用, 与滑坡和泥石流的形成具有紧密联系, 有学者^[21-22]将土体的特性和斜坡稳定相联系, 并从微观的角度研究其失稳机理。土体结构的变化和泥石流形成的联系, 也已有了大量的研究^[23-24]。然而大多数都集中在砂土类的黏性泥石流和水力类泥石流的研究, 对冰碛土的特性及其对冰川泥石流的形成研究较少。因此, 本文基于水槽试验和前文对冰碛土特性的研究成果, 对冰碛土启动形成泥石流的机理进行分析。此次的研究探讨了公路沿线冰碛土泥石流的启动, 可以为

日后此类泥石流的灾害防治和预报提供指导。

1 研究区概况

艾尔库然沟位于中巴公路奥布段 K1601 处。经前人调查发现, 公路两侧冰碛物(冰水堆积物)共计 37 处, 总面积达到 101.95 km²。冰碛物在降雨和融雪条件下, 易被冲刷形成泥石流。该流域呈簸箕形, 流域面积为 1.88 km², 物源区沟道长度为 4.83 km, 坡面长度较短, 沟道纵坡降平均值为 290%, 该流域储存大量的冰雪, 汇水地形良好, 冰川覆盖层高且厚, 形成泥石流的水源多为冰帽冰川受日照融化所得。根据公格尔山地区水文气象资料显示, 夏季气温骤升, 日照时间加长, 导致大量冰雪快速融化, 在一年和一天内冰川融水流量与气温随时间变化均具有一致性^[25]。该流域的冰川融水量受夏季气温影响较大, 每年在 6 月末至 9 月初的流量急剧升高, 为冰碛土启动形成泥石流提供了良好的水源动力, 且泥石流多发生在下午的 3~6 点之间。众所周知, 流量增大对沟道内土体的内部组构、水动力条件和水土耦合机制有重要影响。流量和历时长度的不同, 泥石流形成过程和启动机制也存在较为明显的差异。因此, 研究不同融水流量冲刷冰碛土体启动形成泥石流的过程和机制具有重要理论意义和现实意义。又由于泥石流实际启动过程总是处于流量连续增大情况下, 故本次的研究是在了解冰碛土工程特征的基础上重点探讨持续增大流量冲刷冰碛土启动形成泥石流的过程与机理。

公路沿线冰碛土分布广泛, 2015—2016 年公路沿线泥石流现场调查期间, 对不同位置的冰碛土进行大量颗粒级配实验和分析, 发现该区域冰碛土类型多样, 粒度分布广, 且多为砾石和砂粒占比大, 砾石含量最高(33.4%~88.9%), 砂粒含量次之(9.17%~68.77%), 而细颗粒含量最低, 粉砂含量约占 1.69%~11.61%, 黏土含量约占 0.12%~12.17%。对公路两侧不同冰川泥石流堆积体随机取样进行颗分实验, 共取样 41 组, 冰碛土的岩土成分占比和级配状况如图 1 所示, 其中各岩土成分取值为 41 组样品的算术平均值。由冰碛土粒度组成可

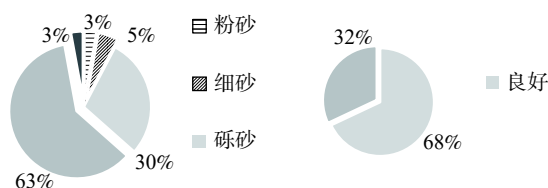


图 1 冰碛土中岩土成分占比图和冰碛土的级配状况图
Fig. 1 Proportion diagram of rock and soil composition in moraine soil and gradation diagram of moraine soil

反映其形成过程和沉积环境,在寒冷环境下,大量岩块经受寒冻物理风化作用形成粗颗粒岩屑,并在搬运过程中发生物理和化学风化作用形成少量粉沙和黏土。

2 冰碛土泥石流启动实验

2.1 启动实验模型

试验模型包括试验水槽、土体铺设及传感器布置(图2)。建立尺寸为350 cm×60 cm×50 cm的水槽模型,模型水槽的底端和一侧用钢板焊接,另一侧采用5 mm厚的有机玻璃板,底部每隔50 cm设置一处5 cm高的隔板以此增强土体与水槽之间的摩擦力。野外调查发现研究区沟谷平均坡度为26.8°,为近似模拟实际设定试验坡度 θ 为25°。调节供水箱出口处的阀门来改变水流量大小,进而研究冰碛土体在增大流量作用下冲刷启动形成泥石流的过程。

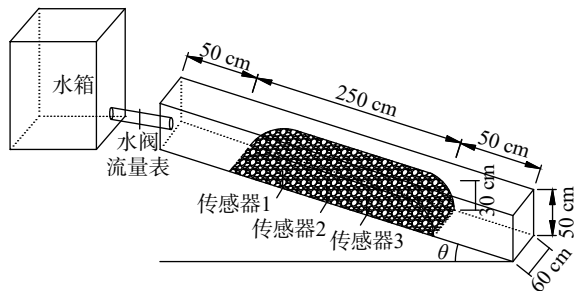


图2 试验水槽模型、土体铺设及传感器布置图

Fig. 2 Flume model and layout of experiment soil and sensors

2.2 启动试验方法

将原样土中粒径大于10 cm的块石剔除后晒干,原样土平均天然含水量为5.3%,为近似模拟实际土体情况,配置含水量为6%的土样作为试验土;将试验土均匀摊铺在底部已铺设卵石试验槽中,以增加土体底部摩擦阻力。矩形断面最佳泥石流排导尺寸为土体厚度与断面宽度比为1:2,槽宽60 cm,土样厚30 cm(图2)。土样长度为250 cm,试验槽前、后缘各50 cm不铺设土样,分别作为水流和泥石流的过渡段;将配置好的试验土体分三次填筑至试验槽中,每次填土厚度为10 cm,压实、平整后再完成下一次的填筑。将含水量传感器探头埋设在试验土中,每个剖面的探头各布置3个,深度均为25 cm,18 cm,10 cm,探头布置完成后,对扰动土样进行压实,静置12 h;冰碛土自然固结12 h后,一切准备就绪后,打开供水箱出口处阀门,调节流量,试验开始。

2.3 启动试验现象

本次实验为人工持续放水冲刷实验,控制流量分别

为8 L/min、12 L/min、16 L/min和56 L/min。融水量为8 L/min时(图3a),融水量较小,土体孔隙大、渗透性能好,冰碛土自然状态的细颗粒含量较少,水流沿着坡顶快速下渗,土体内部的细体颗粒沿粗颗粒缝隙随水流向坡脚处迁移,2 min时坡脚出现浑浊泥流,3 min时坡脚汇流变清,达到稳定状态,22 min之后传感器1的底部含水量逐渐增加,实验历时30 min。

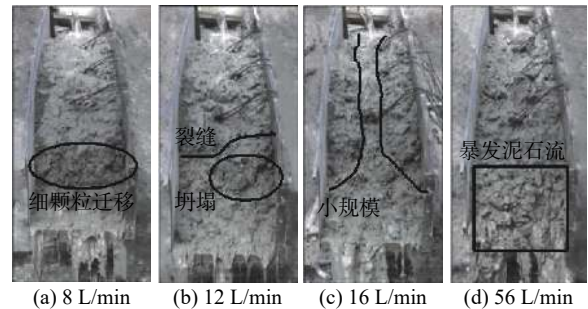


图3 试验过程图

Fig. 3 Test process diagram

融水量为12 L/min(图3b),水流入渗速率加快,土体内部含水量快速增加,土体中的细颗粒持续不断的向坡脚迁移,3.5 min时表面开始出现裂缝。10 min时坡脚细颗粒含量持续增加并堆积,水流被部分阻碍,传感器2的含水量快速上升。从侧面观察到土体内细颗粒的流失,在水槽底部形成了通道,并随着时间不断加长,最终贯通坡体形成水流稳定的渗流通道。水流持续冲刷22 min时,坡脚产流变清,在坡脚上方产生横向裂缝,坡脚处土体骨架出现部分坍塌,但整体未发生严重破坏,实验历时22 min,此时的水位和浸润线不断上升。

融水流量为16 L/min(图3c),流量加大,流速变快,土体含水量迅速增加且渗流加快,出现蓄满产流且径流快速冲刷土体表面,出现粗化。5 min时坡脚处土体堆积出现浑浊泥流,土体表面被冲刷形成一条沟道,细颗粒侵蚀下移,细颗粒的含量增加堵塞渗流通道。中下游横向裂缝的宽度不断发展,随后沿裂缝处发生坍塌。10 min时土体坍塌使土体颗粒发生重组孔隙率变小,渗透变弱,水流侧蚀冲沟两侧土体,使土体底部被掏空失稳坍塌堵塞冲沟,12 min时水流大量汇集在冲沟底部,随后溃决形成小规模泥石流,泥石流持续10 s后坡脚处出现高含沙水流,3号传感器探头被水流冲出。实验历时18 min。

融水量为56 L/min(图3d),此时在土体表面出现超渗产流,粗细颗粒都被水流迅速带走,堆积体坡脚不断后退,25 s时土体骨架坍塌,2 min时的水流和骨架从坡顶下泄冲刷坡底和沟道,使沟道内的下蚀和侧蚀加剧,

造成坡脚处坍塌体堵塞, 细颗粒在下游的大量堆积和前期在坡脚的坍塌物发生溃决形成更大规模的泥石流。实验历时 5 min。

2.4 细颗粒含量变化

在试验中观察水槽出口的细颗粒含量, 得到细颗粒含量随时间的变化图(图 4), 在不同融水流量作用下, 细颗粒含量都随时间都呈现波动式变化, 且随着时间的持续有先升后降的整体趋势。

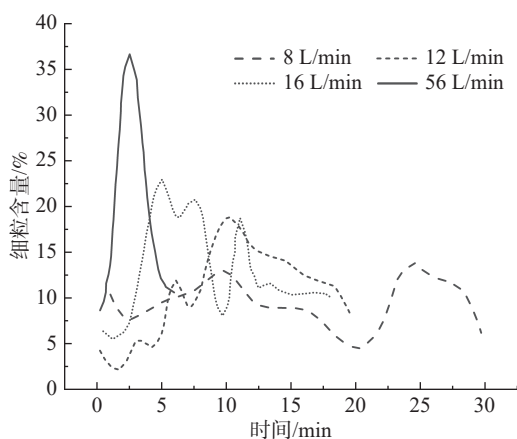


图 4 细颗粒含量随时间变化图

Fig. 4 Variation diagram of fine grain content with time

当融水流量为 8 L/min 时, 细颗粒含量的峰值有两个, 分别在 10 min 和 25 min 时刻, 原因是当水流流出接触坡体, 土体中部分细颗粒在冰碛土的粗颗粒大骨架中被水流带走, 在坡脚处有浑浊水流, 此时流速较小, 不足以破坏冰碛土内部结构, 在土体内部形成水流通道, 当水流持续作用, 水流通道加大, 又有部分细颗粒含量被水流带走, 即形成了第二次峰值, 30 min 后汇流变清并保持。

当融水流量为 12 L/min 时, 发现曲线有一个较明显的峰值, 水流刚开始作用, 由于流量较小, 流出的细颗粒含量也较少, 10 min 时细颗粒含量在坡脚处堆积堵塞了水流通道, 导致超渗产流, 水流主要变为地表径流, 携沙量达到峰值。随后携沙量不断减少, 坡脚处出现裂缝和部分坍塌, 22 min 后状态不变。

当融水流量增至到 16 L/min 时, 曲线波动较明显, 且峰值出现的时间提前至 5 min, 此时因为水流加大, 流速加大坡脚堆积土体坍塌, 使得水流通道顺畅, 不断有细颗粒持续随水流加速流出。10 min 时水流侧蚀使得坡脚堆积, 坡脚含沙量减少, 12 min 时土体逐渐失稳坍塌堵塞, 随后溃决形成小规模泥石流, 泥石流持续 10 s 后坡脚处出现高含沙水流, 随后含沙量减少并趋于稳定, 历时 18 min。

当融水流量为 56 L/min 时, 发现图中只有一个峰值, 总历时 5 min, 大水流泄出使得土体逐渐饱和, 内部结构遭到破坏, 土体的结构强度也急剧减弱, 在流量和流速都变大的情况下, 坡脚处土骨架瞬间崩塌, 在坡脚处发生溃决后大量的细颗粒随水流泻出, 最终形成泥石流。

泥沙含量随融水流量和时间的不同而发生波动变化, 波动原因如下, 一是流量较小时, 水流在土体内部形成渗流通道, 细颗粒从通道中被携带至坡脚, 形成高含沙水流, 后期由于无足够泥沙补给, 在稳定渗流通道内形成水流, 进而泥沙含量减少; 二是水流冲刷使土体失稳坍塌, 汇集在坡脚处抑制了水流的流通, 渗流通道被堵塞, 坡脚产沙量短暂减少, 后出现超渗产流, 坡脚表面细颗粒被带走; 三是土骨架大量坍塌, 随水流堵塞在坡脚, 土体发生溃决后大量泥沙随水流顺流而下, 产流量增大。因此, 泥石流冲刷启动和土体坍塌淤堵在反复循环。

融水流量对细颗粒含量的迁出有很大的影响, 在融水量较小时, 水流一部分进入土体内部被吸收, 大部分顺着坡度向坡脚泻出, 此时流速小, 流量稳定, 总细颗粒含量的排出较少; 融水量较大时, 细颗粒含量的产出随流量的增加而突增, 具有历时短峰值高的特征。

3 冰碛土泥石流形成机理

3.1 泥石流的启动机理分析

通过调查研究可知冰碛土呈现骨架结构, 粗颗粒的砂砾含量高, 细颗粒的粉砂含量较低, 孔隙度大, 透水性强。冰碛土堆积体受降雨和融雪的影响, 其含水率和细颗粒含量对土体强度的变化有决定性作用, 从而引发泥石流的启动。

3.1.1 渗透饱和

通过对天然重度 (2.0 g/cm^3) 下冰碛土的不固结快剪实验, 设置了 4 种含水量 (5%、10%、15%、20%) 得到冰碛土不同含水率下抗剪强度的变化曲线(图 5), 可知冰碛土体内含水率的不同是引起土体强度变化的重要因素, 当土体处于天然含水率 $\omega=2.1\% \sim 8.68\%$ 之内时, 冰碛土体的内摩擦角 ϕ_b 大于坡体坡度 θ , 其处于稳定状态。当打开水流, 水流逐渐渗透到冰碛土体内部, 使其含水率逐渐增大, 但此时并未达到饱和状态, 即土体含水率达到含水量区间 (10% ~ 15%), 土体内摩擦角 ϕ_b 值和凝聚力 C 值随含水率增加而下降, 从而引起抗剪强度变小, 同时由于水流的渗入导致土体的下滑力增大, 土体间的剪切力加大, 但部分细颗粒被水流带走堆积于

坡底, 坡底细粒含量增加(不超过 30%), 使得坡底的抗剪强度略微加大, 再有此时土体的渗透性也较弱, 冰碛土的抗滑力大于坡体的下滑力, 因此土体仍能保持稳定, 水流量较小时并不能使坡体大面积变形和发生破坏。

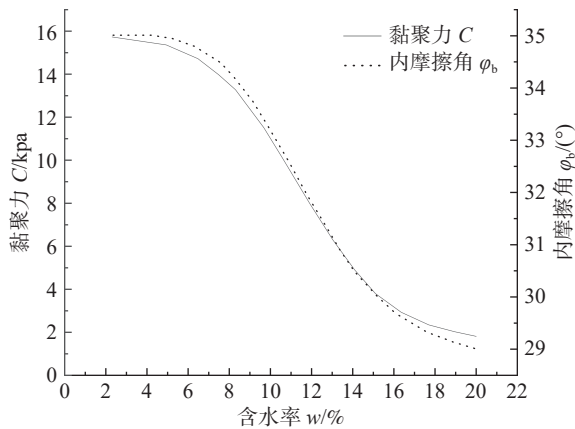


图 5 不同含水率下抗剪强度指标的变化曲线
Fig. 5 Variation curve of shear strength under different moisture content

随着水流量的增大, 水流入渗, 渗流沿大孔隙快速进入土体, 水流出现蓄满产流, 表面径流冲刷土体, 造成细颗粒侵蚀下移, 土体表面出现粗化, 孔隙率增大, 渗透能力增强, 加速土体渗流进入饱和状态, 土体内部含水率的饱和促使冰碛土体强度大幅度降低, 在外力的干扰和作用下逐渐失稳, 从而启动并加速向下滑动。

3.1.2 侵蚀坍塌

水流持续冲刷作用在冰碛土体上, 使得土体的含水率急剧增大(大于 15%), 渗透系数变大, 入渗较快, 水流入渗使包裹土颗粒的水膜厚度变大减小了土颗粒之间的摩擦力, 在渗透力的作用下水体楔入粒间孔隙带走大量的细颗粒。当水流入渗量稳定, 由于大量细体颗粒迁出土体内部形成了完整的渗流通道(图 6), 且通道尺寸随细颗粒的流失逐渐加宽, 水流沿渗流通道流动。随时

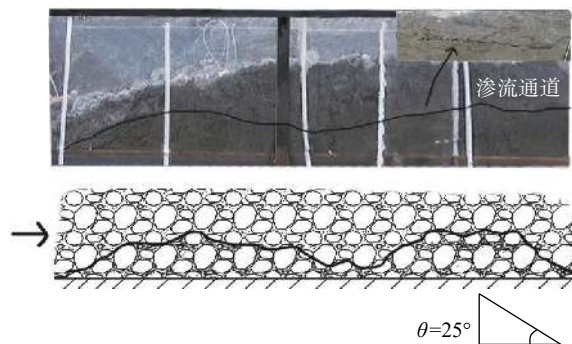


图 6 冰碛土层内的渗流通道
Fig. 6 Seepage channel inside the moraine soil

间的持续, 土体内部大量细颗粒被冲刷使土体骨架被架空甚至结构性丧失, 随后土颗粒重新排列, 在坡脚的细粒含量急增, 渗透系数变小, 堵塞渗流通道, 堆积土体的厚度和坡度增加使得坡体向下的运动摩擦力和重力向下的分量增大, 坡体的整体抗滑力减小, 稳定性变弱, 最终促使土体崩塌向下滑动破坏。土体粗颗粒骨架之间的摩擦力不足, 颗粒之间的黏聚力变小, 即颗粒间的接触应力骤降, 在持续的渗流侵蚀作用下, 坡底的土颗粒逐渐流失, 使土体抗剪强度降低, 土体加速蠕动, 进而土体局部失稳, 出现裂纹、蠕动、坍塌等现象。

3.1.3 冲刷启动

通过上述实验现象可知, 水流的持续冲刷侵蚀和土体坍塌使得堆积土体坡脚不断后退, 冰碛土的颗粒结构发生变化, 水流量不变时, 土体发生小型泥石流后归于稳定, 不会再进一步发生破坏。加大流量时, 在土体表层沿着抗冲刷能力弱的土体中形成多条细沟, 此时的细粒含量较实验前减少较多, 土体也处于饱和, 故其渗透能力变小, 水流会沿着细沟不断冲刷, 多条细沟在水流冲刷下逐渐汇集, 规模不断加大, 故坡脚处的土颗粒发生下切侵蚀和侧向侵蚀, 最终形成大规模的泥石流。

3.2 运动的受力稳定分析

水流在持续增大流量冲刷过程中, 试验前期流量较小时, 表现为渗流侵蚀阶段, 水在静止和运动过程中产生了孔隙水压力和渗透力; 试验后期流量较大时, 表现为径流侵蚀阶段, 快速流动的水流在土体表面产生了径流剪切力。

在融水量变化的实验过程中, 在流量较小的前期表现为渗透饱和阶段, 在逐渐增加水流量的后期表现为侵蚀坍塌和冲刷启动, 此过程中, 冰碛土体会沿运动方向对细沟的底面产生剪切作用, 即下滑力^[26] F_D 和抗滑力 F_R (图 7)。

单元体沿坡面滑动受力:

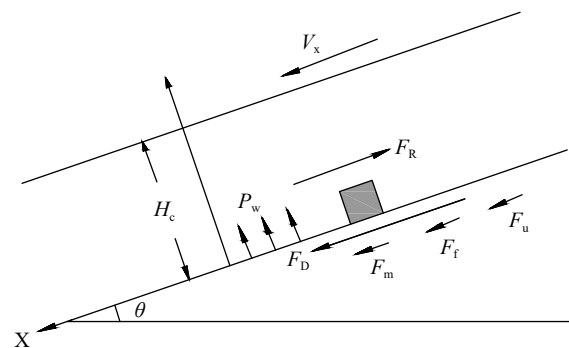


图 7 泥石流底部剪切力示意图
Fig. 7 Schematic diagram of shear force at the bottom of debris flow

$$F_m = H_c \rho_c g \sin \theta \quad (1)$$

$$F_f = H_c \rho_c g \cos \theta \tan \varphi_b \quad (2)$$

$$F_u = \alpha_2 \rho_c V_x^2 \quad (3)$$

式中: F_m ——地面以上泥石流重力朝 X 方向的分量/kN;

H_c ——土样的深度/m;

ρ_c ——土样密度/($g \cdot cm^{-3}$);

g ——重力加速度,取 $9.8 m \cdot s^{-2}$;

θ ——坡体角度,取值 25° ;

F_f ——底面的摩擦阻力/kN;

φ_b ——底面摩擦角($^\circ$);

F_u ——底面的运动摩擦阻力/kN;

α_2 ——泥石流运动碰撞摩擦阻力系数,为无量纲参数,取摩擦阻力系数 α_2 为 $0.06^{[27]}$;

V_x ——泥石流向下滑移的速度/($m \cdot s^{-1}$)。

下滑力 F_D 由 F_m 、 F_f 和 F_u 共同构成^[28]:

$$F_D = H_c \rho_c g \sin \theta + (H_c \rho_c g \cos \theta - P_w) \tan \varphi_b + \alpha_2 \rho_c V_x^2 \quad (4)$$

在坡面上的摩擦力不仅仅是由重力分量所提供,泥石流在水流的作用下会产生向上的孔隙水压力,根据吴永等^[29]所推导出堆积体受到的渗透静水压力 P_w :

$$P_w = \gamma_w h_i l \quad (5)$$

式中: γ_w ——水的重度/($g \cdot cm^{-3}$);

h_i ——土体中平均潜水位/m;

l ——土体的长度/m。

故泥石流的抗滑力 F_R 和冰碛土的稳定性系数 K_s :

$$F_R = (H_c \rho_c g \cos \theta - h_i \gamma_w l) \tan \varphi_b + Cl \quad (6)$$

$$K_s = \frac{F_R}{F_D} \quad (7)$$

式中: F_R ——作用在坡面上产生的摩擦力和土体颗粒之间的黏聚力之和/kN;

C ——土颗粒之间的黏聚力/kPa。

通过式(1)~(6)的计算,得到泥石流的下滑力和抗滑力在不同流量下的关系曲线图(图8),可明显发现抗滑力和下滑力的交点发生在 $16 L/min$ 。

从图8可发现,在未放水($Q=0 L/min$)的初始状态,土体的下滑力主要有土体重力在 X 方向的分量提供,抗滑力中的坡面摩擦力和颗粒之间的黏聚力明显大于下滑力,此时整体稳定。当融水量为 $8 L/min$ 和 $12 L/min$ 时,水流持续渗透,径流不明显,此时随着流量的加大,土体间黏聚力随之减小,内摩擦角减小使得摩擦阻力 F_f 逐渐减小,此时的下滑力仍小于抗滑力,土体继续处

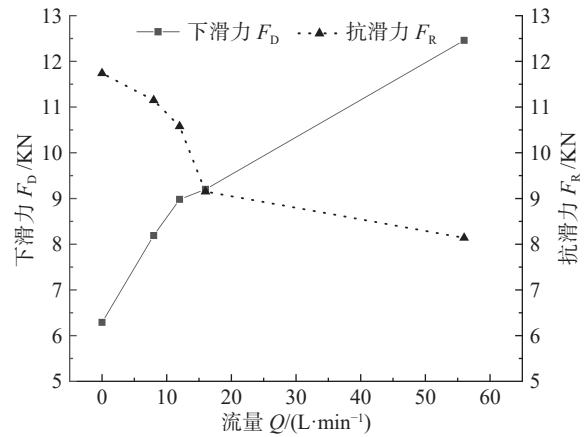


图 8 不同流量下下滑力 F_D 和抗滑力 F_R 的变化

Fig. 8 Variation of towing force and standing force under different flow rates

于稳定状态;融水量为 $16 L/min$ 和 $56 L/min$ 时,土体渐渐饱和,坡体出现径流侵蚀现象,土体细颗粒含量大量流失,黏聚力减少,土体的抗剪强度下降迅速,骨架失稳,坡前细颗粒被输移至坡脚而发生孔隙淤堵,致使孔隙水压力瞬间增大,土体内部结构和应力状态均随之发生改变,此时冰碛土会坍塌引发泥石流,即其产生的下滑力大于土体的抗滑力。

冰碛土体的稳定性系数 K_s 随不同流量的变化如图9所示,从图中可发现,对不同流量下冰碛土体稳定性系数进行拟合,其呈现较好的幂函数关系。当流量增加,稳定性系数下降明显,稳定性系数大于 1 发生在流量小于 $16 L/min$,此阶段主要以渗流饱和侵蚀为主,加大流量后发生坍塌启动,稳定性系数小于 1 且下降快速。

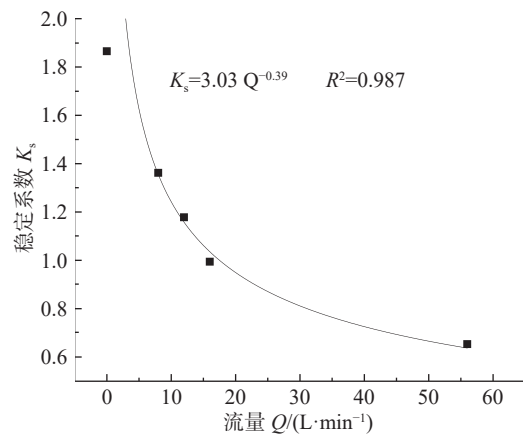


图 9 不同流量 Q 与稳定性系数 K_s 的拟合曲线

Fig. 9 Fitting curves of different flow rate and stability coefficient

3.3 泥石流启动机制

土体在稳定期间受到降雨和融雪作用,土体经过渗透饱和、上部颗粒向下部迁移,受含水率和细粒含量的

影响,土体内部的平衡被打破,在多力作用下致使坡体抗剪强度急剧减小,由于土体上部粗化,坡脚堆积明显,细沟数量变多,水流持续冲刷使得坡体中细沟逐渐集中并加深,土体发生侵蚀坍塌和冲刷启动,并形成深而大的沟道,含砂水流或泥石流在运动中逐渐获得较大的加速度,从而加快流体进入高速运动,不断进行向下侵蚀和侧向侵蚀,最终促使泥石流的形成。其演化机制见图10。

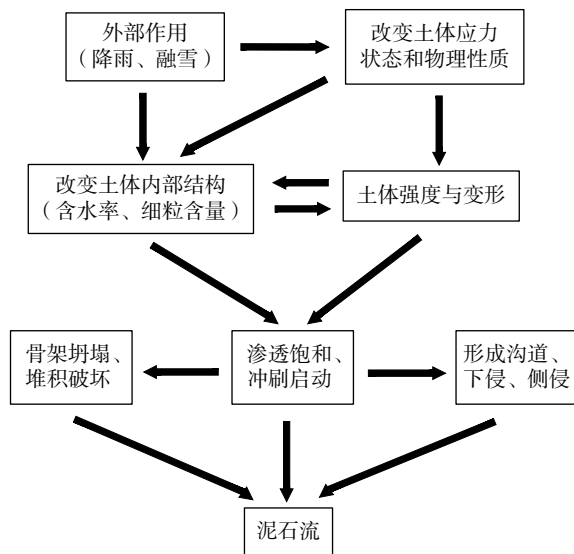


图10 泥石流形成过程示意图

Fig. 10 Schematic diagram of debris flow formation process

4 结论

(1)不同融水流量下,冰碛土的侵蚀破坏形式和泥石流启动过程具有一定的差异性。在融水流量较小(8 L/min)时,主要以水流持续渗透为主,部分细颗粒被水流带走堆积于坡底,此时冰碛土体的整体抗滑力大于下滑力,不会发生破坏。流量增大(12 L/min)时,此阶段以渗流侵蚀为主,坡面出现细小裂缝,坡脚土体小部分坍塌,但整体依旧稳定。流量加大(16 L/min),主要以侵蚀坍塌为主。冰碛土逐渐达到饱且上部粗化明显,坡脚处的细颗粒的含量增加堵塞渗流通道,坡脚处堆积的自重和剪切力相应增加,冰碛土发生侵蚀坍塌,并诱发小规模泥石流;融水流量较大(56 L/min)时发生冲刷启动,土体在冲刷的作用下径流沟道加深加宽,并整体向下滑移。土体的强度不足以抵抗土体自重产生的下滑力,进而发生下切侵蚀和侧向侵蚀,最终启动形成泥石流。

(2)不同流量作用下泥石流启动模式有所区别。流量小时,主要以渗透饱和和侵蚀为主,流量大时,主要以坍塌

冲刷启动为主。原因是流量较小,其水流动力不足,土体细颗粒迁移但不会流失,泥石流启动较难,后期水流量加大,流速加大,土体饱和且强度降低,泥石流随之暴发启动。

(3)泥沙含量随融水流量和时间的不同而发生波动变化。流量小时,细粒含量主要从渗流通道流出;流量大时,泥石流冲刷启动和土体坍塌淤堵在反复循环,进而含沙量处于波动状态。

(4)冰碛土在水流渗透作用下,其内部结构发生变化。综合土体强度和渗透性的变化特征及实验现象,将冰碛土泥石流形成机理为渗透饱和、侵蚀坍塌、冲刷启动三部分。

(5)冰碛土的稳定系数与水流流量呈幂函数关系。融水量的不断增加,冰碛土逐渐趋于饱和,内部含水率的增加和细粒含量的减少,使得土体的抗剪强度急剧减小,冰碛土泥石流随流量流速的加大快速向下滑动,土体中的剪切力增大,抗剪强度极速降低,使之下滑力逐渐超过冰碛土的抗滑力,稳定系数 K_s 快速降低。

参考文献 (References) :

- [1] 魏学利,李宾,赵怀义,等.中巴公路艾尔库然沟冰川泥石流发育特征与防治对策[J].水资源研究,2017,6(2):103-111. [WEI Xueli, LI Bin, ZHAO Huaiyi, et al. The development condition and prevention countermeasure of glacier debris flow in the Aierkuran gully along the Sino-Pakistan highway [J]. Journal of Water Resources Research, 2017, 6(2): 103-111. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 陆军,刘杰,王立波.中巴喀喇昆仑公路奥依塔格-布伦口段泥石流灾害及防治[J].防灾科技学院学报,2015(2):42-49. [LU Jun, LIU Jie, WANG Libo. Debris flow hazards and prevention along the Aoyitage-Bulunkou Section of the International Karakoram Highway [J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 2015(2): 42-49. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 朱磊,谢强,任新红,等.川藏线季节性粗颗粒冻土抗剪强度特性试验研究[J].铁道学报,2018,40(3):107-111. [ZHU Lei, XIE Qiang, REN Xinhong, et al. Experimental study on shear strength of seasonal coarse-grained frozen soil along Sichuan-Tibet Railway [J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(3): 107-111. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 程强,郭喜峰.泸定大渡河桥冰碛土的结构及现场剪切试验研究[J].水文地质工程地质,2019,46(4):126-133. [CHENG Qiang, GUO Xifeng. Soil structure and in-site shear test of moraine soil near the Xingkang Bridge over the Daduhe River in Luding [J]. Hydrogeology & Engineering

- Geology, 2019, 46(4): 126–133. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 邓养鑫. 冰碛与冰川泥石流堆积研究的若干新成果 [J] . 冰川冻土, 1996(增刊1): 250–256. [DENG Yangxin. New achievements of studies on the deposits of moraine and glacial debris flow [J] . Journal of Glaciology and Geocryology, 1996(Sup1): 250–256. (in Chinese with English abstract)]
- [6] WANG G, SASSA K. Pore-Pressure generation and movement of rainfall-induced landslides: effects of grain size and fine-particle content [J] . Engineering Geology, 2003, 69(1/2): 109–125.
- [7] 周小军, 崔鹏, 贾世涛, 等. 基于正交设计的土体细颗粒迁移积聚水槽实验研究 [J] . 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(增刊1): 83–88. [ZHOU Xiaojun, CUI Peng, JIA Shitao, et al. Flume test study on the movement of fine grains based on orthogonal design [J] . Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2012, 44(Sup1): 83–88. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 郭朝旭, 崔鹏. 宽级配弱固结土体内细颗粒迁移规律研究评述 [J] . 山地学报, 2017, 35(2): 179–186. [GUO Zhaoxu, CUI Peng. Fine particle migration in wide grading and poorly consolidated soil: an overview [J] . Journal of Mountain Science, 2017, 35(2): 179–186. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 王保亮, 李泳, 苟万春, 等. 降雨作用下土体细颗粒迁移特征及其对崩塌的影响 [J] . 工程科学与技术, 2017, 49(增刊2): 43–53. [WANG Baoliang, LI Yong, GOU Wan chun, et al. Fine grain migration and its impact on soil failures under rainfall infiltration [J] . Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(Sup2): 43–53. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 矫滨田, 鲁晓兵, 王淑云, 等. 土体降雨滑坡中细颗粒迁移及效应 [J] . 地下空间与工程学报, 2005, 1(7): 1014–1016. [JIAO Bintian, LU Xiaobing, WANG Shuyun, et al. The movement of fine grains and its effects on the landslide and debris flow caused by raining [J] . Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(7): 1014–1016. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 蔡祥兴, 李械, 李念杰. 帕尔提巴尔沟冰川泥石流的成因及其发展趋势 [J] . 冰川冻土, 1980(1): 22–25. [CAI Xiangxing, LI Jian, LI Nianjie. The causes and development trends of glacier debris flow in Partibar Gully [J] . Journal of Glaciology and Geocryology, 1980(1): 22–25. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 陈晓清. 滑坡转化泥石流起动机理试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006. [CHEN Xiaoqing. Experimental study on the starting mechanism of landslide transformation debris flow[D]. Chengdu: SouthWest JiaoTong University, 2006. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 陈晓清, 崔鹏, 冯自立, 等. 滑坡转化泥石流起动的人工降雨试验研究 [J] . 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 106–116. [CHEN Xiaoqing, CUI Peng, FENG Zili, et al. Artificial rainfall experimental study on landslide translation to debris flow [J] . Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 106–116. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 马超, 王玉杰, 王彬. 北京市密云区典型泥石流侵蚀过程分析 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(4): 10–16. [MA Chao, WANG Yujie, WANG Bing. Erosion process of a typical debris flow in Miyun County, Beijing [J] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(4): 10–16. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 铁永波, 李宗亮. 磨西河流域冰碛补给——暴雨型泥石流形成机制研究 [J] . 水土保持通报, 2011, 31(4): 195–199. [TIE Yongbo, LI Zongliang. Formation mechanism of moraine supplied: Rainstorm debris flow in Moxi Basin [J] . Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(4): 195–199. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 铁永波. 冻融条件下冰碛补给型泥石流物源汇集过程与灾变初探 [J] . 灾害学, 2012, 27(4): 12–16. [TIE Yongbo. Source converge process and hazards of moraine-supply debris flow under the condition of freezing and thawing [J] . Journal of Catastrophology, 2012, 27(4): 12–16. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 潘蕾, 魏学利, 张远芳, 等. 初始含水率对冰川泥石流的起动影响分析 [J] . 水土保持学报, 2017, 31(6): 116–122. [PAN Lei, WEI Xueli, ZHANG Yuanfang, et al. Influence of initial water content on glacial debris flow triggering process [J] . Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 31(6): 116–122. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 屈永平, 朱静, 卜祥航, 等. 西藏林芝地区冰川降雨型泥石流起动实验初步研究 [J] . 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊1): 3256–3266. [QU Yongping, ZHU Jing, PU Xianghang, et al. Preliminary starting experiment study of glacial-rainfall debris flow, in Nyingchi, Tibet [J] . Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Sup1): 3256–3266. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 江金涛. 冰碛补给型泥石流启动试验研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017. [JIANG Jintao. Study on experiment of moraine-supply debris flow initiation[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 童龙云, 张继, 孔应德. 西藏定日朋曲流域达仓沟冰湖溃决泥石流特征 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(6): 34–39. [TONG Longyun, ZHANG Ji, KONG Yingde. Characteristics of debris flow in Canggou Ice Lake in

- Dingripengqu Basin, Tibet [J] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(6): 34 - 39. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 尹赛华. 滑带土强度特性研究与边坡稳定分析[D]. 广州: 暨南大学, 2010. [YI Saihua. Study on soil strength characteristics and slope stability analysis in slide zone[D]. Guangzhou: Jinan University, 2010. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 铁永波, 徐如阁, 巴仁基. 典型冰碛补给型泥石流物源补给过程与机制研究——以泸定县干沟为例 [J] . 水土保持通报, 2013, 33(1): 77 - 80. [TIE Yongbo, XURuge, BARenji. Source supply process and mechanisms of moraine-supplied debris flow: Take Gangou Valley in Luding County as an example [J] . Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(1): 77 - 80. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 赵宏亮. 基于SPH方法的粘性泥石流运动过程模拟研究 [D] . 北京: 中国地质大学(北京), 2018. [ZHAO Hongliang. Study on the simulation of viscous debris flow based on SPH[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 宋兵, 沈军辉, 阮壮, 等. 九—绵高速公路鲁家沟泥石流形成机制与数值模拟分析 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(3): 25 - 30. [SONG Bing, SHEN Junhui, RUAN Zhuang, et al. Formation mechanism and simulation analysis of debris flow at Lujiagou of Jiuzhaogou-Mianyuan Expressway [J] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(3): 25 - 30. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 王景荣. 中巴公路喀什至塔什库尔干路段冰川泥石流 [J] . 冰川冻土, 1987(1): 87 - 94. [WANG Jingrong. Glacial debris flow along the China-Pakistan highway from Kashi to Tashikuergan [J] . Journal of Glaciology and Geocryology, 1987(1): 87 - 94. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 中国科学院-水利部成都山地灾害与环境研究所. 中国泥石流[M]. 北京: 商务印书馆, 2000. [Chinese Academy of Sciences-Chengdu Mountain Disaster and Environment Research Institute, Ministry of Water Resources. China debris flow[M]. Beijing: Commercial Press, 2000. (in Chinese)]
- [27] 魏厚振. 蒋家沟泥石流砾石土力学性状与起动过程分析研究 [D] . 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2008. [WEI Houzhen. Analysis and study on mechanical properties and starting process of debris flow gravel soil in Jiangjiagou[D]. Wuhan: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences (Wuhan Institute of Geotechnical Mechanics), 2008. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 陈精日, 章书成, 叶明富. 泥石流地声特性及NJ-2型无线遥测泥石流报警器的研制[C]//第二届全国泥石流学术会议论文集. 北京: 科学出版社, 1991: 36 - 41. [CHEN Jingri, ZHANG Shucheng, YE Mingfu. Debris flow ground acoustic characteristics and development of NJ-2 wireless telemetry debris flow alarm[C]//Proceedings of the second national conference on debris flow. Beijing: Science Press, 1991: 36 - 41. (in Chinese)]
- [29] 吴永, 何思明, 裴向军, 等. 震后沟道泥石流启动条件——松散堆积体雨中失稳的水力学机制分析 [J] . 岩土力学, 2012, 33(10): 3043 - 3050. [WU Yong, HE Siming, PEI Xiangjun, et al. Analysis of condition of startup of gully debris flow after earthquake—the hydraulic mechanism of instability of loose deposits in rainfall [J] . Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 3043 - 3050. (in Chinese with English abstract)]