

# 冰滑坡涌浪下冰碛坝溃决机理试验研究

李慧斌<sup>1,2</sup>, 陈华勇<sup>1,3</sup>, Robin Neupane<sup>1,2</sup>, 阮合春<sup>1,2</sup>, 李霄<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室/中国科学院水利部 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2.中国科学院大学, 北京 100000; 3.中国科学院 青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101)

**摘要:** [目的] 对冰滑坡涌浪导致的冰碛坝溃决过程与溃决机理进行试验研究, 为冰川区重大工程建设和冰湖冰碛坝溃决灾害防治提供科技支撑。[方法] 开展不同滑块体积、滑动角度、滑动距离、坝体物质组成和坝体几何形态的水槽模型试验。基于试验现象、试验数据与理论推导, 对涌浪过程、坝体物质启动和坝体溃决临界条件进行分析。[结果] ①冰滑坡涌浪随时间和距离不断衰减, 其随时间衰减显著。②将涌浪作用下的溃决过程分为坡面侵蚀、陡坎侵蚀、侧向侵蚀和衰退4个阶段, 其中侧向侵蚀阶段的溃决流量最大, 流速最快, 侵蚀能力最强。③从颗粒启动机理的角度给出了颗粒启动流速, 与沙莫夫公式进行对比分析, 对比结果较为吻合。④基于能量守恒原理得到了冰湖溃决事件发生的临界条件, 通过西藏自治区林芝市波密县米堆沟光谢错冰湖溃决事件进行验证, 验证结果良好。[结论] 冰湖库容越大、坝前水深越深、涌浪高度越高, 坝体越易发生溃决; 冰碛坝堆积物中细颗粒含量越高, 坝体颗粒间黏附力越强, 坝体越稳定; 冰碛坝坝宽及下游坡脚越大, 坝体越稳定, 溃决所需时间越长。

**关键词:** 冰湖溃决; 冰滑坡涌浪; 冰碛坝; 洪峰流量; 启动机理; 溃决临界条件

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2021)02-0025-10

**中图分类号:** P642.23

**文献参数:** 李慧斌, 陈华勇, Robin Neupane, 等. 冰滑坡涌浪下冰碛坝溃决机理试验研究[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 25-34. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.02.004; Li Huibin, Chen Huayong, Robin Neupane, et al. Experimental study on mechanism of moraine dam failure due to surge wave of glacier avalanches [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 25-34.

## Experimental Study on Mechanism of Moraine Dam Failure Due to Surge Wave of Glacier Avalanches

Li Huibin<sup>1,2</sup>, Chen Huayong<sup>1,3</sup>, Robin Neupane<sup>1,2</sup>, Ruan Hechun<sup>1,2</sup>, Li Xiao<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, CAS/ Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100000, China; 3. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** [Objective] The process and outburst mechanism of moraine dam failure caused by glacier avalanches were studied, in order to provide scientific support for major engineering construction in glacial areas and disaster prevention of glacier lake outburst. [Methods] The model test in flume was carried out with the different volumes of blocks, sliding angle, sliding distance, composition materials and geometric morphology of the dam body. Based on the experimental phenomena, experimental data and theoretical derivation, the process of the surge, the starting mechanism of dam body materials, and the critical condition of outbursts was analyzed. [Results] ① The surge of glacier avalanches decreased with time and distance, and the attenuation was significant with time. ② The outburst process under the surge could be divided into four stages: slope surface erosion, scarp erosion, lateral erosion, and decline. The lateral erosion stage had the largest outburst discharge, the fastest velocity, and the strongest erosion capacity. ③ The starting velocity of particles was given from the perspective of the particle starting mechanism, and the results were in good agreement with that of the Shamov formula. ④ It was verified by the outburst event of Guangxiecuo ice-lake breach in Midui gully, in Bomi County, Linzhi City, Tibet Autonomous Region, and the

收稿日期: 2020-10-08

修回日期: 2020-12-08

资助项目: 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDY-SSW-DQC006); 国家自然科学基金项目(41731283; 41771045); 中科院创新促进会(2017425); 中国科学院“西部之光”人才培养计划项目

第一作者: 李慧斌(1995—), 男(汉族), 河南省焦作市人, 硕士研究生, 研究方向为堰塞湖溃决机理与防治。Email: 15690671979@163.com。

通讯作者: 陈华勇(1982—), 男(汉族), 四川省广汉市人, 博士, 研究员, 主要从事堰塞湖溃决机理及泥石流工程防治等方面的研究。Email: hychen@imde.ac.cn。

result is reasonable. [Conclusion] The larger the ice lake storage capacity, the deeper the water depth in front of the dam, the higher the water level rise caused by a glacial landslide, and the more likely the dam body is to outburst. The higher the content of the fine particles in the accumulation of the moraine dam, the stronger the adhesion between the particles, and the more stable the dam body is. The wider the moraine dam and the lower slope foot are, the more stable the dam body is, and the longer the outburst time is.

**Keywords:** glacial lake outburst; ice landslide surge; moraine dam; peak discharge; starting mechanism; critical condition of outburst

冰湖是由冰川挖蚀作用形成的湖泊,以冰川融水为主要补给,通常位于冰川口和冰碛末端之间<sup>[1]</sup>。近年来,全球气候变暖导致冰川强烈消融退化,冰湖也因此变得异常不稳定,冰湖溃决灾害发生的频率明显增加<sup>[2]</sup>。西藏东南部地区分布有我国最大规模的海洋性冰川群分布区(帕隆藏布流域),在气候持续变暖的环境条件下,该区域特大冰川泥石流灾害及其链生灾害多发、突发,其规模、破坏能力、危害程度往往数倍于普通灾害,导致大面积成灾,不仅造成巨大的人员伤亡,并危及重大工程安全<sup>[3]</sup>。例如,1988年7月15日西藏波密境内米堆沟光谢错冰湖溃决,溃决洪水卷走了沟内的米堆村,形成堵溃泥石流堵塞帕隆藏布,对沿帕隆藏布的川藏公路造成严重水毁,交通中断达半年之久<sup>[4]</sup>。2013年7月15日,嘉黎县然则日阿错冰湖溃决,造成下游村落人员失踪,房屋、桥梁和道路等基础设施严重受损,直接经济损失达2.7亿元<sup>[5]</sup>。2016年,聂拉木县章藏布次仁玛错右侧支沟冰湖溃决导致樟木口岸受淹,冲毁下游尼泊尔 Kodari 和 Tato-pani 镇的水电设施、公路和房屋等,引起国际广泛关注<sup>[6]</sup>。

目前,国内外学者已对一般土石类堰塞坝的溃决机理开展了大量研究,邓明枫<sup>[7]</sup>分析了颗粒级配特征对堆积坝溃决速率及溃口发展的影响,认为级配越粗,坝体溃决越慢。张大伟<sup>[8]</sup>分析了无黏性均质土石坝坝体组成成分对其稳定性和溃决过程的影响,提出坝体溃决过程分为3个阶段。柴贺军<sup>[9]</sup>对滑坡坝漫顶溢流进行了受力分析,研究了坝体溃决特征与坝体内部孔隙水压力及土体粒度对坝体稳定性的影响,得出了坝体稳定性与物质组成的关系。赵万玉<sup>[10]</sup>以水槽试验的方法,分析了粒径与堰塞坝溃决特征之间的关系。Schmocker<sup>[11]</sup>以坝体材料为变量进行分析,研究了溃口发展及溃决流量的变化规律。而冰碛坝不同于一般土石类堰塞坝,坝体由固结和分选较差的松散沉积物组成<sup>[12]</sup>,溃决原因多数为冰舌末端断裂形成冰滑坡或冰崩,进而造成冰湖溃决灾害<sup>[13]</sup>。1960年至今于西藏地区发生27次冰湖溃决灾害事件,明确灾害成因的22次中,有20次均由此原因造成。加之在全球气候逐渐暖化的背景下,坝体内死冰消融<sup>[14]</sup>,给坝体稳定性带来了诸多不确定因素<sup>[15]</sup>。而目前在冰碛坝溃决方面的研究较少,大多集中在冰碛

湖溃决后泥石流的形成以及冰滑坡涌浪对冰碛坝的水压力激增特性,而关于冰滑坡涌浪作用下冰碛坝的溃决过程及机理的认识尚不够深入。如党超<sup>[16]</sup>用水槽试验的方法,从单宽流量和库容、沟道纵坡、堆积物粒径3个方面探讨了冰湖溃决泥石流形成的影响因素和临界条件,游勇<sup>[17]</sup>以西藏波密米堆沟为原型进行模型试验,研究了不同类型、不同规模泥石流与主河不同频率洪水遭遇情况下,泥石流堵塞主河及溃决的可能性。崔鹏<sup>[18]</sup>分析了冰崩、冰滑坡入湖所致冰湖溃决的机制与条件,归纳了冰湖溃决泥石流演化的6种模式。陈晓清<sup>[19]</sup>推导了冰湖溃决泥石流的峰值流量及其最大高度,并通过实例进行了验证。陈华勇<sup>[20][21]</sup>通过物理模型试验研究了冰滑坡涌浪作用于冰碛坝上的压力荷载特性,预测了作用在大坝上的最大压力荷载经验方程。刘晶晶<sup>[22]</sup>采用土力学及水力学理论研究冰碛坝溃决的力学机理,黄金辉<sup>[23]</sup>通过模型试验的方法,研究了涌浪导致冰湖溃决过程及溃决流量特征。为了更好地了解冰滑坡涌浪作用下冰碛坝稳定性的影响因素,探究冰滑坡涌浪引发的冰碛坝溃决过程及物理机制,本文通过室内水槽模拟实验针对冰滑坡涌浪导致的冰碛坝溃决这一特定过程进行研究,为进一步研究冰滑坡涌浪导致的冰碛坝溃决机理提供参考。

## 1 冰湖溃决试验

### 1.1 试验装置

试验装置由滑板、蓄水池、试验水槽和尾料池组成(图1),滑板宽0.65 m,长2.50 m,坡度可调范围为 $0^{\circ}\sim 85^{\circ}$ ,堰塞湖长1.50 m,宽1.00 m,下游沟道长4.50 m,宽0.40 m,水槽高0.40 m。为便于观察阻塞冲击后的浪涌波,水槽两侧均采用有机玻璃。在坝前水槽底部设置了一系列水压力传感器( $P_1-P_6$ ),监测由冰滑坡入水引起涌浪造成的坝前水位变化,其位置如图1所示,以测量不同位置处的水压力。大坝与渠道前端保持25 cm的距离。试验采用4台摄像机,分别记录大坝在溃坝过程中的正面视角和侧面视角,以及拍摄滑块入水过程和尾料池内水位的变化。虽然模型尺寸较小,但实验能较好地揭示冰滑坡—涌浪—冰碛坝溃决过程中的各个物理现象。

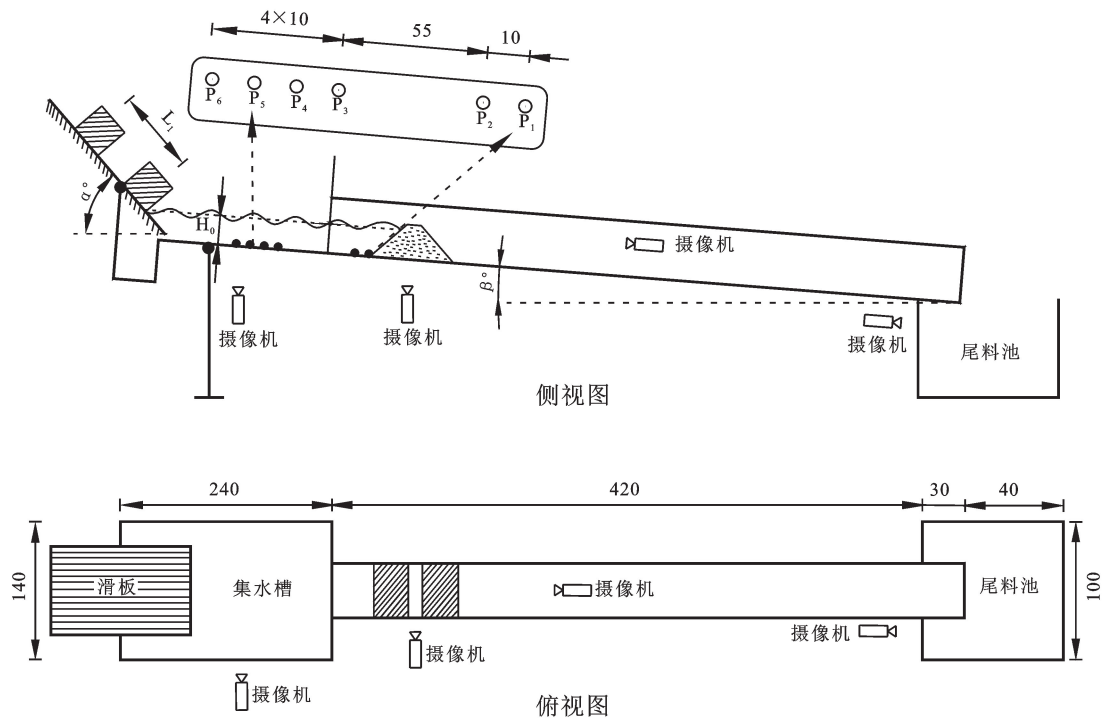


图 1 冰滑坡涌浪下冰碛坝溃决机理试验装置示意图(单位为 cm)

1.2 试验工况设计

本研究分别于 2019 年 8,10,12 月在西藏自治区林芝市波密县计划修建川藏铁路的沿线地区进行了野外考察,并于 2020 年 3—6 月进行室内模拟试验。在野外勘察和文献分析的基础上,采用 7 种不同类型的滑块(图 2),通过控制滑块滑动的距离、角度以及库区水深改变冰碛坝坝前的静水位高度与波浪壅高。选取坝体下游坡脚、坝宽、坝高、材料级配等坝体自身特征,分析其对坝体溃决的影响,试验参数取值详见表 1。滑块 B<sub>3</sub>,B<sub>5</sub>,B<sub>7</sub> 为松散块体,均由 8 个小正方体滑块堆积而成。为模拟冰崩特性,滑块的密度均为 0.91 g/cm<sup>3</sup>,与冰的密度相等。

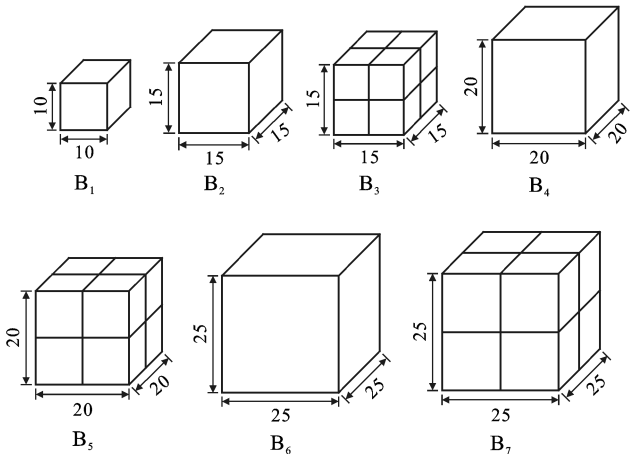


图 2 滑块尺寸示意图(单位为 cm)

为使试验成果能够更好地反映实际情况,试验材料根据波密地区米堆沟野外样品的颗粒情况,人工配置石英砂,石英砂粒径分为:10~20,5~10,2~5,1~2,0.5~1,0.2~0.5,0.1~0.2,<0.1 mm 8 个粒组。根据试验需要,将不同粒组的石英砂颗粒按照预先设置好的级配进行混合。试验中配置了 3 种材料,分别为正常沉积混合物(NS, normal sediment mixture)、粗料混合物(CS, coarse material)、极细泥砂混合物(VFS, very fine sand),其中值粒径 D<sub>50</sub> 分别为 0.85, 2 和 0.35 cm。3 种不同坝料的颗粒级配如图 3 所示,坝体含水量限制在 5%。

表 1 试验设计参数取值

滑块类型	滑动距离/m	滑动角度/(°)	下游坡脚/(°)	坝高/cm	坝宽/cm	材料
B <sub>1</sub>	0.75	30	30	15	5	NS
B <sub>2</sub>	1.00	35	35	20	10	CS
B <sub>3</sub>	1.25	40	40	25	15	VFS
B <sub>4</sub>	1.5	45	45	30	—	—
B <sub>5</sub>	—	—	—	—	—	—
B <sub>6</sub>	—	—	—	—	—	—
B <sub>7</sub>	—	—	—	—	—	—

2 涌浪演进特性

滑块滑入湖中时具有较大的迎水面积与动能,以 Exp25 为例,滑块入水过程产生明显的水体飞溅现象

(图 4)。与水面接触的过程中,对水体产生向左的推挤,使得水体向左运动,在滑块左端附近形成初始涌浪。涌浪向下游堆砌坝及四周传播,传至侧岸的涌浪被反射回来,传至堆砌坝处的涌浪由于水位较高,一部分涌浪满溢过坝顶产生泄流,一部分被反射回来。被侧岸及堆积坝反射回的涌浪在滑块附近相遇后产生第二波涌浪。0.335 s 时第一波涌浪淹没滑块,0.402 s 时,第一波涌浪达到最大并开始向下游堆砌坝及四周侧岸传播,此时水位高度较初始静水位上升了 5.8 cm。由于受到河岸反射,很快产生第二波涌浪,第二波涌浪波峰的到达时间为 0.871 s,由于水体的飞溅和下游大坝漫顶泄流损失大量水体的原因,第二波涌浪较初始静水位仅上升了 3.1 cm。

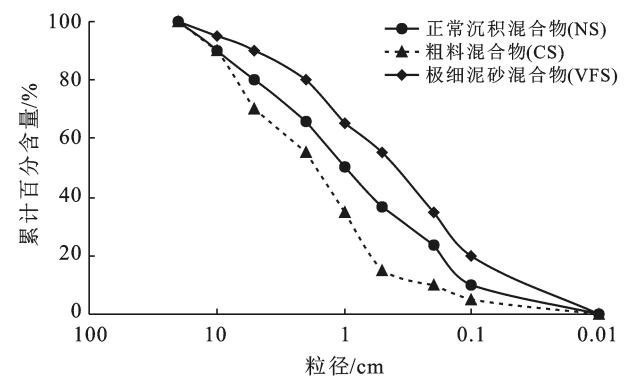


图 3 试验材料颗粒级配特



图 4 滑块入水瞬间的水体飞溅现象

冰滑坡涌浪传播过程中,由于水的黏性、水与固体边界(堆砌坝和水槽侧壁)的相互作用以及涌浪波与固体边界反射波之间的相互作用,使得涌浪较为紊乱,涌浪能量耗散大。图 5 为水位高度随距滑块入水距离的变化图,由于坝前壅水与爬高,涌浪由入水点传播至坝址位置(100 cm 处)的过程中,涌浪高度先减小后增大,由于冰碛坝距离滑块入水位置较近,涌浪高度随距离的衰减不明显。图 6 为涌浪高度随时

间的变化, $P_1$ — $P_6$  6 个位置处的水压力传感器数据具有相同的衰减趋势,通过对试验数据的拟合,涌浪波幅随时间的变化呈幂函数关系衰减:

$$h=\frac{h_1}{t^{0.75}} \tag{1}$$

式中: $h$  为某位置  $t$  时刻的涌浪波幅(cm);  $h_1$  为该位置处第一波涌浪波幅;  $t$  为时间(s)。

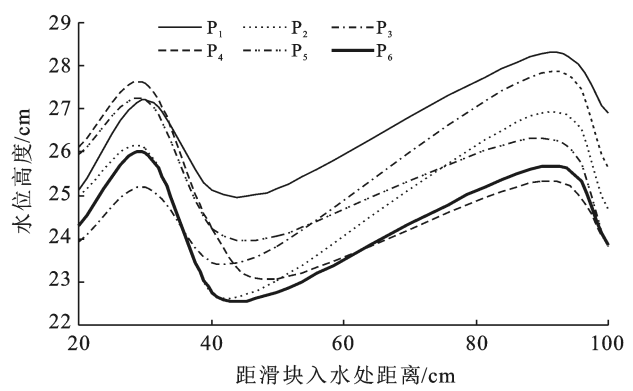


图 5 涌浪随距滑变化

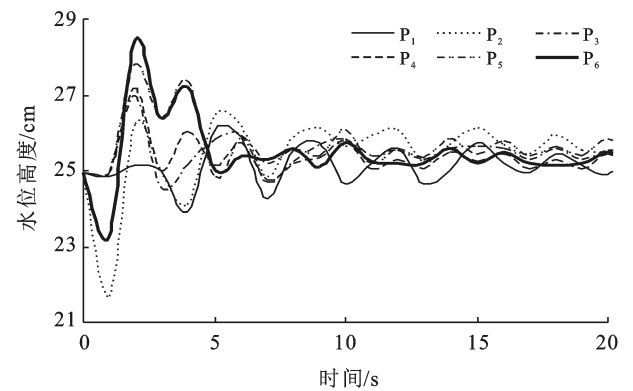


图 6 涌浪随时间变化

以 Exp18 中不同位置涌浪随时间的衰减数据为例,取式(1)中第一波涌浪高度  $h_1$  为 3.5 cm 进行拟合(图 7),拟合结果较好。

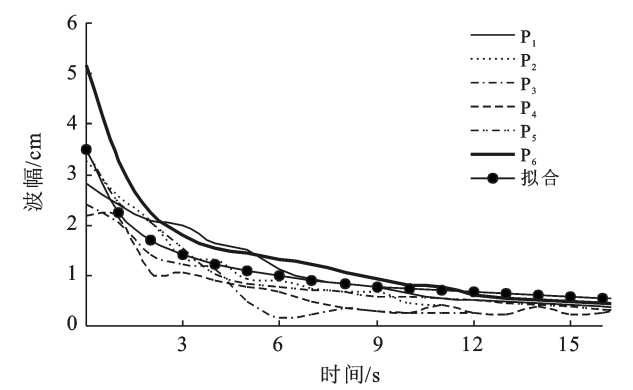


图 7 涌浪随时间衰减拟合结果



3 冰碛坝溃决过程

冰崩入湖激起涌浪,致使坝前水位瞬间高于坝体高度,水流漫溢侵蚀坝体。在试验中,通过对冰崩涌

浪作用下冰碛坝溃决过程的观察,发现不同条件下的溃决过程基本一致,总体来看,整个溃决过程大致分为 4 个阶段,现在以试验 15 为例进行分析,4 个阶段的主要特征如图 8 所示。

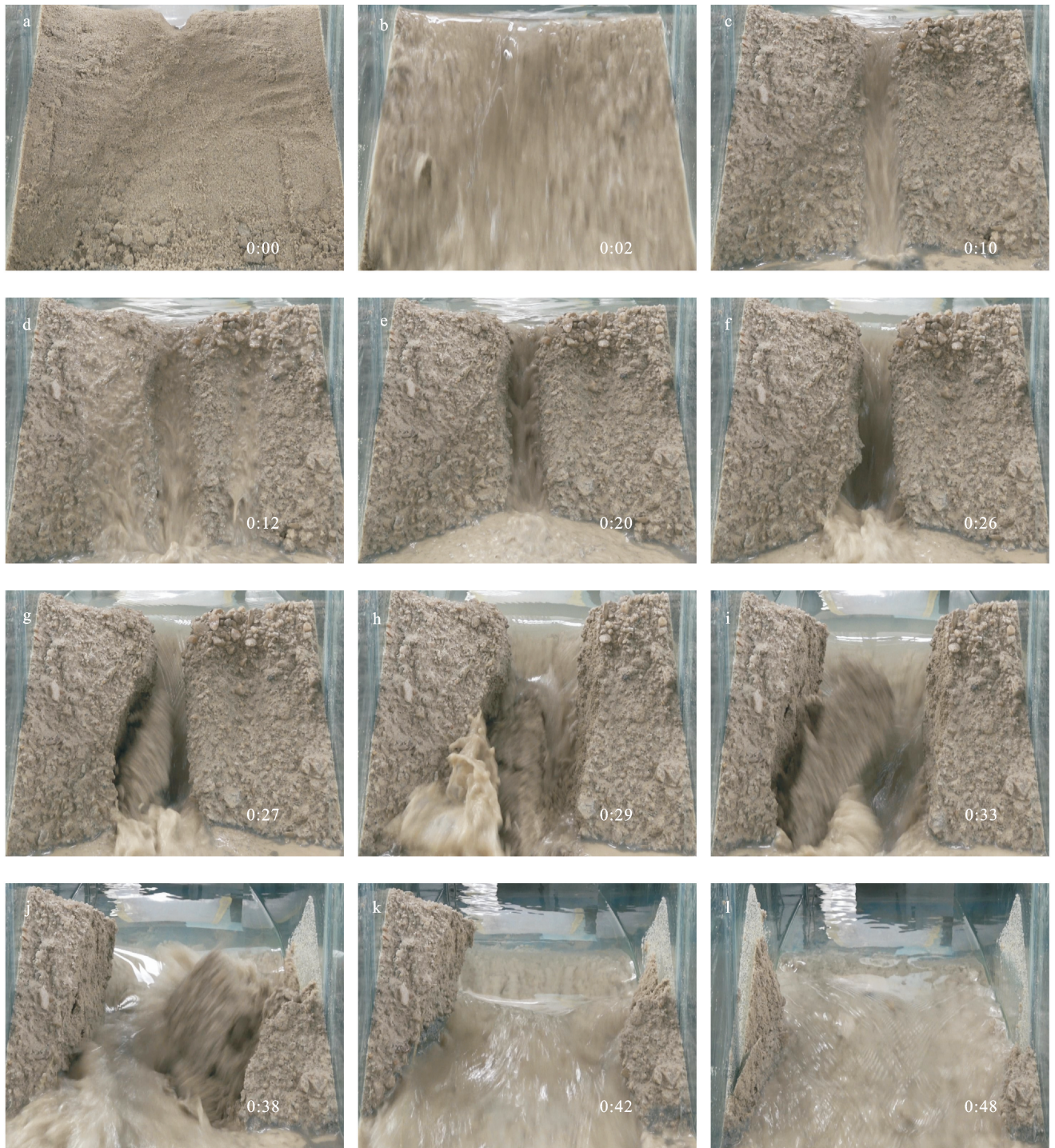


图 8 冰滑坡涌浪下冰碛坝溃决过程

(1) 坡面侵蚀阶段(第 0—6 s)。即溢流沿整个坝体下游坡面侵蚀的阶段。滑块入水后激起涌浪,涌浪传播至坝体位置处并与坝体相互作用,虽然坝体设

置有溃口,但初期涌浪较高,溢流沿整个下游坡面侵蚀并挟带坡面少量细小泥沙向下输移。此阶段溢流水量相对较少,水流深度较浅,流速缓慢,水流挟沙能



力较弱,此阶段坝体物质黏性较高,抗冲刷能力较强,因此侵蚀量很小,溢流含沙量较低。通常第一波涌浪浪高最大,之后逐渐减小,涌浪漫顶溢流后,库容减小,水位降低,溢流无法沿整个下游坡面溢流,开始通过初始溢流口溢流。

(2) 陡坎侵蚀阶段(第 6—23 s)。即溢流沿初始溃口不断掏刷、后退的过程。上游水位降低后,水流从初始溃口溢出,此时过流断面迅速减小,水流流速较大,侵蚀能力强,在背水坡面处迅速形成一条冲沟。由于陡坎的高差,溢流不断冲击陡坎底部,在陡坎底部形成冲坑,水流在冲坑处运动时产生旋流,掏蚀陡坎,在陡坎处产生较大的陡坎剪应力<sup>[24]</sup>,剪应力超过土体的抗剪强度,促使陡坎朝水流源头发展。

(3) 侧向侵蚀阶段(第 23—42 s)。即溃口快速扩展,溃决流量快速增加阶段。随着陡坎溯源侵蚀的快速发展,坝体在初始溃口形成的冲沟处被贯穿,下切侵蚀变得更加容易,溃口高度降低更加迅速,溃口处水流深度和流速迅速增大,侵蚀能力迅速增强,水流不断掏刷坝体两侧土体,致使两岸坝体出现临空,溃口两侧间歇性出现土体坍塌,致使溃口高度进一步降低,溃口迅速增大,29 s 时,溃口左岸出现大块坝体坍塌,对溃口产生一定的堵塞,堵塞土体逐渐被水流冲刷。该阶段溃口两岸斜坡物质以块状滑落进入溃口,溃口形状在梯形与倒梯形之间变化。

(4) 衰退阶段(第 42—52 s)。即溃决流量逐渐减小,流速逐渐降低,侵蚀趋于稳定阶段。溃口增大后,坝前水位快速下降,溃决流量逐渐减小,水流侵蚀能力也逐渐变弱,坝体中的细小颗粒和少量粗颗粒被水流挟带至下游,其余粗颗粒沉积下来。细小颗粒被挟带走后,粗颗粒在溃口处形成一层粗化层,保护下面颗粒物质不被继续冲刷。此时,水流的冲刷能力和粗化层的抗冲刷能力达到新的平衡,溃决过程结束。

## 4 冰碛坝溃决的影响因素

冰碛坝溃决是冰崩体特征、涌浪特性、坝体几何形态以及坝体物质结构等多种因素共同作用的结果。具体来说,包括冰崩体体积、形状、整体性、入湖速度、迎水面积、冰湖规模、水深、库容和坝体几何形状、结构与物质组成等各方面的参数。笔者结合试验结果,重点对影响冰碛坝溃决的冰湖库容、壅高、坝体几何形态、物质组成等因素进行分析。

### 4.1 冰湖库容与坝前水深

冰湖库容与坝前水深,是冰湖最重要的形态要素,也是控制冰湖溃决与溃坝洪水流量大小的关键因素。坝前水深  $H_0$  和冰湖蓄水量越大,水头越高,发

生漫顶溃决时,水流的冲蚀能力越强。冰湖库容越大,对下游铁路、公路、村庄构成的危险性越大。库容一定,湖面面积越小,水位越高,单位体积水的势能较高,在溃坝后转变为洪水的动能和流速越大,冲刷能力越强,溃口发育快,在达到冲刷平衡比降之前库区水下泄需要的时间相对较短,洪峰较大。

如图 9 所示,在保持其他变量不变的情况下,坝高为 15 cm 的坝体达到峰值流量所需的时间为 26 s,峰值流量为 7.53 L/s,坝高为 20 cm 的坝体达到峰值流量所需的时间为 23 s,峰值流量为 7.81 L/s,坝高为 25 cm 的坝体达到峰值流量所需的时间为 27 s,峰值流量为 10.72 L/s,坝高为 30 cm 的坝体达到峰值流量所需的时间为 23 s,峰值流量为 12.32 L/s。坝体高度由 15 cm 增长至 30 cm,峰值流量增长了 63.6%。在到达峰值流量的时间基本相等的情况下,坝体较高的冰碛坝溃决流量远高于较矮的坝体,且坝体较高的冰碛坝溃决流量过程线斜率较大,曲线较陡,溃决流量增长与下降速度更剧烈。

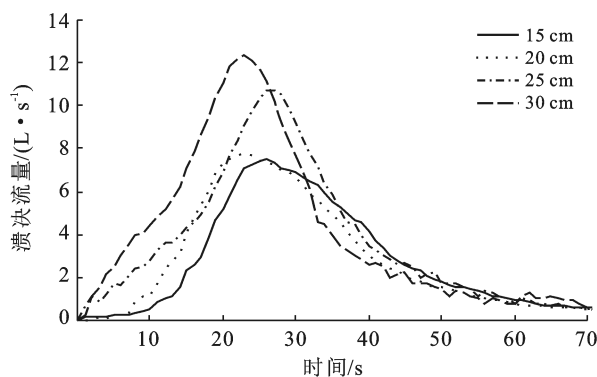


图 9 不同坝前水深下溃决流量过程特征

### 4.2 冰滑坡造成静水位升高与壅高

涌浪强度与冰崩体的体积、滑动距离、滑动角度、滑体完整程度、水域深度、冰湖面积以及水中障碍物等因素有关,由于室内模型试验所限,本文通过调整冰滑坡体的体积、滑动角度、滑动距离和滑体完整程度来改变坝前静水位与壅高。

图 10 中,边长为 10,15,20 和 25 cm 的立方体滑块产生的涌浪波最大波幅分别为 0.64,0.83,1.39 和 2.18 cm,随着滑块体积的增大,滑块入水后产生的涌浪波强度越大。图 11 中,滑块为边长 25 cm 的正方体(整体),其在滑动距离 1 m,滑动角度分别为 30°,35°,40°,45°时,涌浪波最大波幅分别为 1.16,1.64,1.86,2.18 cm。试验表明,随着滑动角度的增大,涌浪波强度逐渐增大。图 12 中,滑块为边长 20 cm 的立方体(整体),其在滑动角度为 20 cm,滑动距离分

别为:0.75,1.00,1.25,1.50 cm时,激起涌浪波最大波幅分别为:1.17,1.39,1.85,1.93 cm。试验表明,随着滑动距离的增大,涌浪波强度逐渐增大。图13中,边长为15,20,25,30 cm的立方体滑块,在整体状态下,产生涌浪波最大波幅为分别为0.83,1.49,2.17,2.93 cm,当其为松散状态时,激起的涌浪波最大波幅分别为0.67,1.45,1.76,1.93 cm。试验表明,滑块体积相同时,松散状态的滑块激起的涌浪波强度较整体状态滑块更弱。

冰滑坡体通过影响涌浪波的强度进而对冰碛坝

溃决产生影响。冰滑坡体入水体积越大,水位上涨越高,越利于漫顶溃决。冰滑坡体的滑动距离和滑动角度越大,其入湖时将携带较大的动能冲击水面,会产生较高的涌浪高度,提高溢流口水头,加速溃口冲刷侵蚀。冰滑坡体的破碎程度对冰碛坝溃决也有影响,若冰崩体较为完整,则以完整体滑入冰湖会激起更高的涌浪,利于溃决。若冰滑坡体处于破碎状态,以多次冰崩的方式入湖,则涌浪相对较小,且会相互抵消,对溃决不利。

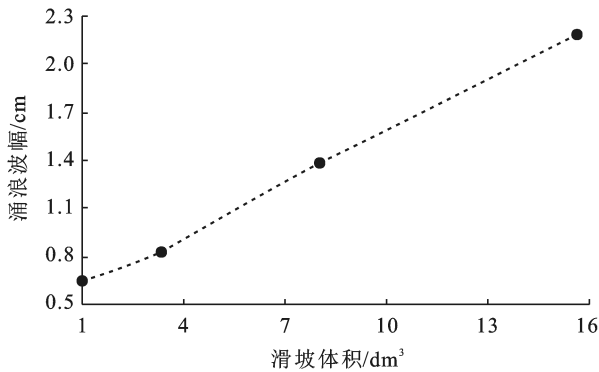


图10 滑块体积与涌浪强度关系

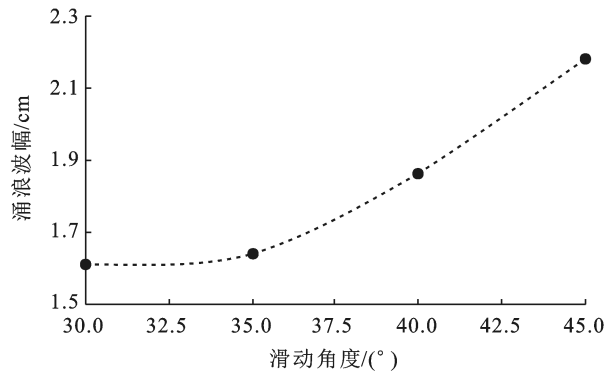


图11 滑动角度与涌浪强度关系

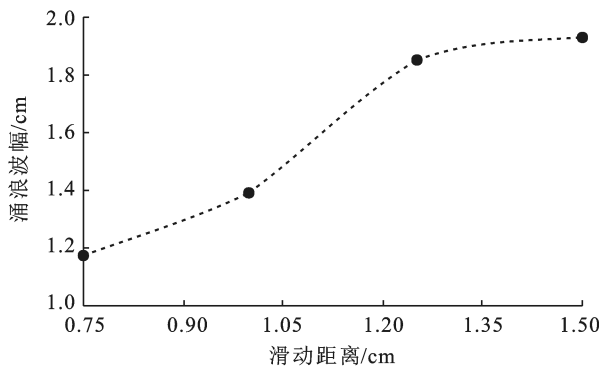


图12 滑动距离与涌浪强度关系

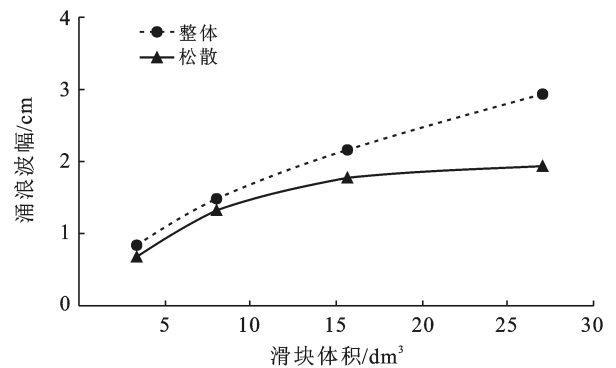


图13 滑块完整程度与涌浪强度关系

#### 4.3 冰碛坝堆积物组成

冰碛坝体颗粒级配分布范围广,涵盖粒径十几米的巨石以及几微米的黏粒且分选性极差,改变堆积体颗粒级配将改变坝体内部的黏聚力和内摩擦角,影响坝体抗水流冲刷以及渗透的能力,继而影响坝体稳定性和坝体强度。

颗粒级配对坝体溃决流量有显著影响(图14),粗颗粒级配坝体达到峰值流量的时间为14 s,峰值流量为6.89 L/s,正常颗粒级配的坝体达到峰值流量的时间为23 s,峰值流量为8.59 L/s,细颗粒级配的坝体达到峰值流量的时间为34 s,峰值流量为6.84 L/s。级配越粗的冰碛坝,孔隙度越大,坝体物质不能被牢固

附着,随着土体孔隙中水力梯度的增大,土体细颗粒沿着骨架颗粒形成的孔隙开始流动,由于骨架颗粒孔隙通道中水力梯度不断增大,细颗粒物质被冲刷带走,上游坝坡向下滑塌,在上游坡面和坝顶出现裂隙,水流从裂缝灌入,形成贯穿坝体的管涌通道(图15)。由于坝体内部形成管涌通道,导致结构物稳定性较差,滑块入水后,坝体在涌浪的作用下瞬间溃决,因此其达到峰值流量的时间最短。粗颗粒坝体因管涌作用,在滑块入水前泄水较多,上游水位降低,峰值流量也相应减小。细颗粒坝体黏粒含量较高,在涌浪作用初期,由于黏附性较强,坝体较难被水流冲蚀形成下切通道,大量水体沿坝体表面对整个坡面进行均匀冲

刷,难以形成大块垮塌,因此其达到峰值流量的时间较长,且坝体通过坡面漫流方式泄去大量水体,因此峰值流量相应减小。

4.4 冰碛坝几何形态

(1) 冰碛坝宽度与溃口比值对冰碛坝溃决过程的影响。冰碛坝越宽,水流下切冲刷所需的输沙量和总流量越大,下切过程所需时间较长,因此不利于冰湖的溃决。

如图 16 所示,在其他变量保持不变的情况下,坝顶宽度为 5 cm 的坝体到达峰值流量耗时 25 s,峰值流量为 10.4 L/s,坝顶宽度为 10 cm 的坝体到达峰值流量耗时 30 s,峰值流量为 10.7 L/s,坝顶宽度为 15 cm 的坝体达到峰值流量耗时 34 s,峰值流量 9.38 L/s,坝顶宽度由 5 cm 增大到 15 cm,洪峰流量到达时间相差 36.0%,峰值流量相差 9.8%。在峰值流量基本相等的

情况下,坝顶宽度较窄的坝体更快速的到达洪峰,表明坝顶宽度较窄的坝体的稳定性更差,溃决较快。

(2) 坝体下游坡脚对冰碛坝溃决过程的影响。堰塞坝下游坡面的坡角是控制坝体稳定性的重要结构因素。而上游坡角与河道上游流速以及坝体物质性质有关,一般稍大于下游坡角,对溃坝过程影响不如下游坡角大。坝体的宽高比越大,坝坡越小,坝体抵抗水流冲蚀的能力越强,越有利于坝体的稳定。

上述分析中,涌浪波的强度随滑块滑动角度的增大而增大。如图 17 所示,当滑块滑动角度分别为 45°,40°,35°,30°,坡脚分别为 30°,35°,40°,45°时,试验到达峰值流量的时间分别为 17,26,28,34 s。在涌浪强度逐渐增大的情况下,到达峰值流量的时间在逐渐变大,由此可判断,坝体下游坡角越小,坝体的稳定性越强,坝体溃决的越慢。

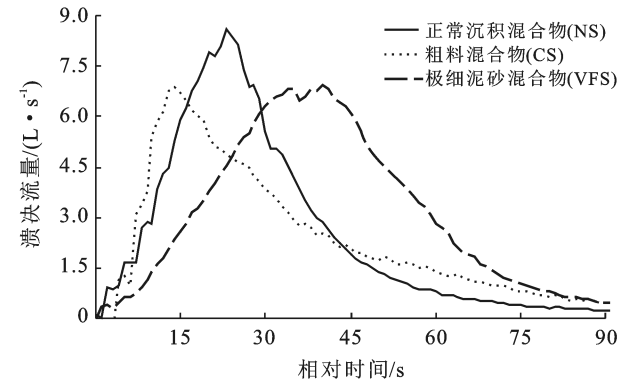


图 14 不同坝体材料下溃决流量过程特征

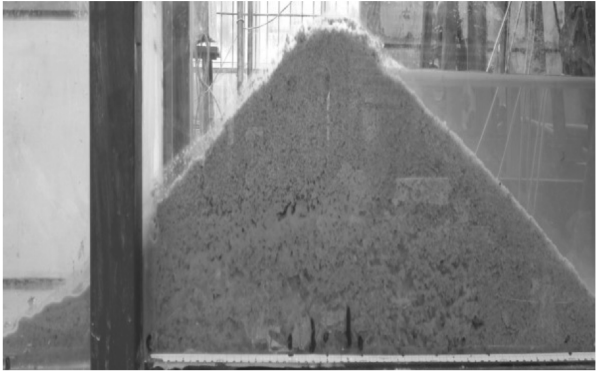


图 15 坝坡滑塌形成的管涌现象

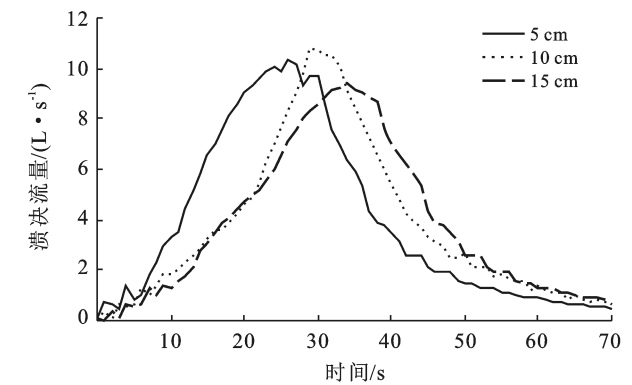


图 16 不同坝宽下溃决流量过程特征

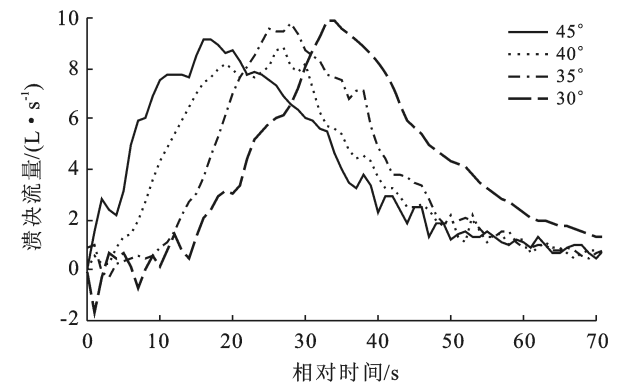


图 17 不同坡脚下溃决流量过程特征

5 冰碛坝溃决机理

5.1 下游坡面起动机理

坝体溃决是水流对土体进行冲刷、侵蚀的过程,作者从颗粒起动角度说明坝体溃决机理。坝体采用无黏性材料石英砂堆砌而成,土体颗粒间黏性较差,

抗剪强度公式  $\tau_f = \sigma \tan \varphi + c$  中黏聚力项  $c$  相比摩擦强度项  $\sigma \tan \varphi$  小得多,结合试验观察分析,坝体以颗粒为单位进行侵蚀。颗粒在侵蚀过程中受到水流运动产生的拖曳力和上举力、颗粒自身的重力和颗粒间的黏结力,其受力状态如图 18 所示。

水流拖曳力  $F_D$  :



$$F_D = C_D A \frac{\rho u_0^2}{2} \quad (2)$$

式中:  $C_D$  为阻力系数;  $u_0$  为作用在坡面颗粒上的流速;  $A$  为颗粒最大截面积;  $\rho$  为水的密度。

上举力  $F_L$ :

$$F_L = C_L A \frac{\rho u_0^2}{2} \quad (3)$$

式中:  $C_L$  为上举力系数。

颗粒浮重力  $W'$ :

$$W' = \frac{1}{6} (\gamma_s - \gamma) \pi D^3 \quad (4)$$

式中:  $\gamma_s$  为颗粒的重度;  $\gamma$  为水的重度;  $D$  为颗粒直径。

摩擦阻力  $F_s$ :

$$F_s = (W' \cos \alpha - F_L) \tan \varphi \quad (5)$$

式中:  $\alpha$  为背水坡面角度;  $\varphi$  为颗粒水下休止角。

建立颗粒在水流方向上的平衡方程:

$$F_D = W' \sin \alpha = (W' \cos \alpha - F_L) \tan \varphi \quad (6)$$

则下游坡面颗粒粒径为  $D$  的颗粒的起动流速:

$$u_0 = \sqrt{\frac{D(\gamma_s - \gamma)(\cos \alpha \tan \varphi - \sin \alpha)}{0.75 \rho (C_D + C_L \tan \varphi)}} \quad (7)$$

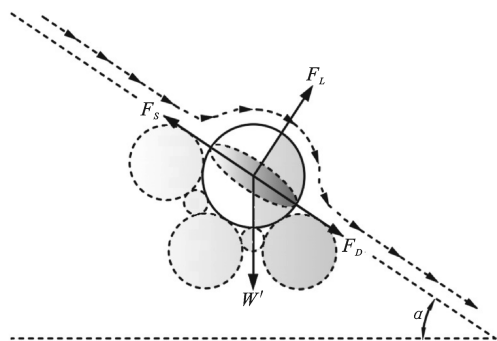


图 18 坡面颗粒物受力分析图

以试验 15 中参数设置分析粒径与流速之间的关系,测得试验材料中石英砂的重度  $\gamma_s = 2.53 \times 10^4 \text{ N/m}^3$ ,水的重度  $\gamma = 1.00 \times 10^4 \text{ N/m}^3$ ,水的密度  $\rho = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,背水坡坡度  $\alpha = 45^\circ$ ,根据孟震等<sup>[25]</sup>对泥沙颗粒的研究,取泥沙颗粒水下休止角  $\varphi = 44.52^\circ$ ,上举力系数  $C_L = 0.1$ ,阻力系数  $C_D = 4C_L = 0.4$ ,采用式(7)计算几个控制粒径( $d_{10} = 0.1 \text{ mm}$ ,  $d_{30} = 0.3 \text{ mm}$ ,  $d_{60} = 1.5 \text{ mm}$ ,  $d_{80} = 5 \text{ mm}$ ,  $d_{90} = 10 \text{ mm}$ )对应的起动流速并将计算结果描绘见图 19。

颗粒起动流速的计算通常采用国际较流行的沙莫夫公式:

$$U_C = 1.14 \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}} g d \left( \frac{h}{d} \right)^{1/6} \quad (8)$$

式中:  $U_C$  为颗粒的起动流速;  $\gamma_s$  和  $\gamma$  分别为颗粒和水流的重度;  $h$  为颗粒位置的水流深度;  $d$  为颗粒直径;  $g$  为重力加速度。

相比于公式(7),沙莫夫公式(8)考虑了颗粒位置处的水流深度,试验中,观察到坝坡下游颗粒处的水流深度约为 5 mm,因此采用几个控制粒径( $d_{10} = 0.1 \text{ mm}$ ,  $d_{30} = 0.3 \text{ mm}$ ,  $d_{60} = 1.5 \text{ mm}$ ,  $d_{80} = 5 \text{ mm}$ ,  $d_{90} = 10 \text{ mm}$ )和特征水位 5 mm 带入公式(8)对公式(7)进行验证,计算结果如图 19 所示。公式(7)与国际较流行的沙莫夫公式(8)的计算结果具有相同的趋势,且计算结果相差较小。

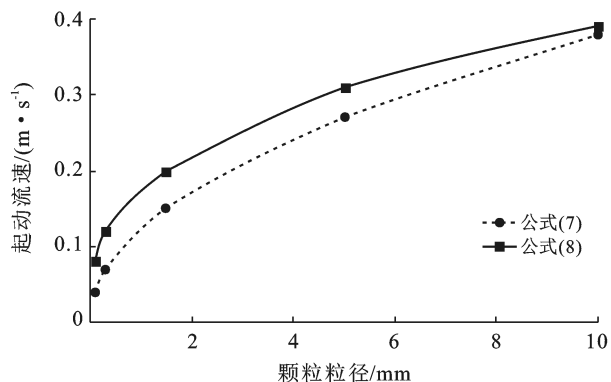


图 19 颗粒起动流速计算对比图

## 5.2 溃决临界条件

冰碛坝溃决主要是水流的冲刷拖拽力的作用,由于冰碛坝内的黏粒物质含量很少,绝大部分颗粒都以推移质的方式运动。要想使坝体坡面颗粒物以一定的速度运动,必须消耗水流的势能。因此把上游来流的输沙率和水流在单位时间内溃决洪水所提供的能量结合。由于水沙混合物中悬浮颗粒很少,因此,浆体容重可以用水体容重代替,则单位宽度、单位长度的水体在单位时间内所提供的能量  $W_0$  可以表示为:

$$W_0 = \gamma H J U \quad (9)$$

式中:  $q$  为单宽流量;  $J$  为能坡;  $U$  为平均流速;  $H$  为水深。

试验中,发生溃决的试验组次均为瞬间一溃到底,因此,溃口处流速可借用肖克利契瞬间局部堤段一溃到底公式计算:

$$V_{c1} = 0.9 \times 10^{(0.3b/B)} (B/b)^{0.25} / H_0^{0.5} \quad (10)$$

式中:  $B$  为坝长,对溃决冰湖为堵湖终碛堤长度(m);  $b$  为矩形溃口宽度,对溃决冰湖为漫溢宽度(m);  $H_0$  为坝前水深,对于漫溢溃决之始,为漫堤水头(m)。

将公式(10)带入公式(9)得到溃口处水体所提供的功率  $P$  为:

$$P = 0.9 \times 10^{(0.3b/B)} \gamma H J (B/b)^{0.25} / H_0^{0.5} \quad (11)$$

本文采用国际较流行的沙漠夫公式计算颗粒启动流速,将公式(8)带入公式(9)得到直径为  $d$  的颗粒的启动临界功率  $P_d$  为:

$$P_d = 1.14\gamma HJ \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}} g d \left(\frac{h}{d}\right)^{1/6} \quad (12)$$

冰碛坝粒度曲线一般为双峰型或多峰型,可近似选取  $d_{90}$  代表最大粒径作为启动粒径计算冰碛坝的临界溃决功率  $P_0$ :

$$P_0 = 1.14\gamma HJ \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}} g d_{90} \left(\frac{h}{d_{90}}\right)^{1/6} \quad (13)$$

联立公式(11),(13),由  $P = P_0$ ,得到冰碛坝溃决临界方程:

$$10^{(0.3b/B)} (B/b)^{0.25} \geq 1.27 \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}} g d_{90} \left(\frac{h}{d_{90}}\right)^{1/6} H_0^{0.5} \quad (14)$$

### 5.3 案例分析

米堆沟流域位于  $29^\circ 23' 18'' - 29^\circ 32' 10'' \text{N}$ ,  $96^\circ 27' 45'' - 96^\circ 35' 05'' \text{E}$ ,波密以东 94 km,是帕隆藏布南岸的一级支沟。流域最高海拔 6 595 m,沟口高程 3 595 m,上游发育有季风海洋性贡扎冰川,冰舌末端为冰川终碛湖光谢错,冰湖发生溃决前,湖面呈长方形,最长约 950 m,最宽约 550 m,最大水深 31.0 m,库容约  $6.40 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。冰碛坝高 45 m,长 320 m,坝顶宽度 30~80 m。冰碛坝顶部溢流口处有常流水,溢流水头最高约 0.5 m。1988 年 7 月 15 日,贡扎冰川冰舌前缘体积约  $3.62 \times 10^5 \text{ m}^3$  的冰体崩落,冰崩体沿约  $6^\circ$  的坡面滑入光谢错冰湖内,致使湖内平均静水位上升 1.4 m,强大的涌浪冲击使本已渗水的冰碛坝瞬间延时溃决。

根据资料记载,光谢错参数为:终碛堤长度  $B = 320 \text{ m}$ ,溃口平均宽度  $b = 21.8 \text{ m}$ ,根据野外样品数据,取冰碛坝物质容重  $\gamma_s = 2.53 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $\gamma = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $d_{95} = 0.1 \text{ m}$ ,  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ,  $h = 0.5 \text{ m}$ ,  $H_0 = 0.5 \text{ m}$  带入公式(14)得:  $2.05 > 1.44$  符合冰碛坝溃决临界方程。

## 6 结论

通过水槽模型试验分析了冰滑坡涌浪导致的冰碛坝溃决过程及机理,得到以下结论:

(1) 根据试验现象将冰碛坝溃决过程分为:坡面侵蚀、陡坎侵蚀、侧向侵蚀、衰退 4 个阶段。

(2) 溃决流量受到坝前水位高度、坝体颗粒级配、坝体几何形态(坝宽、下游坡脚)的影响。坝前水位越高,洪峰流量越大,溃决流量变化速率越快。坝体堆积物中细颗粒含量越高,黏聚力越大,发生溃决

所需要的时间越长。坝体越宽、下游坡脚越小,坝体抵抗水流冲蚀的能力越强,越有利于坝体的稳定。

(3) 冰碛坝坝体下游坡面颗粒物受到水流拖曳力  $F_D$ ,上举力  $F_L$ ,颗粒浮重力  $W'$ ,摩擦阻力  $F_S$ ,通过建立平衡方程,得到了下游坡面粒径为  $D$  的颗粒的启动流速:

$$u_0 = \sqrt{\frac{D(\gamma_s - \gamma)(\cos\alpha \tan\varphi - \sin\alpha)}{0.75\rho(C_D = C_L \tan\varphi)}}$$

冰湖能否溃决取决于溃口处水流所能提供的功率与坝体堆积物颗粒粒径组成。溃决洪水所能提供的功率为:

$$P = 0.9 \times 10^{(0.3b/B)} \gamma HJ (B/b)^{0.25} / H_0^{0.5}$$

坝体溃决所需要的临界功率为:

$$P_0 = 1.14\gamma HJ \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}} g d_{90} \left(\frac{h}{d_{90}}\right)^{1/6}$$

当  $P_0 > P$ ,即  $10^{(0.3b/B)} (B/b)^{0.25} \geq 1.27 \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}} g d_{90} \left(\frac{h}{d_{90}}\right)^{1/6} H_0^{0.5}$  时,坝体会发生溃决。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 姚晓军,刘时银,韩磊,等.冰湖的界定与分类体系:面向冰湖编目和冰湖灾害研究[J].地理学报,2017,72(7): 1173-1183.
- [2] 党超,褚娜娜.冰碛湖溃决型泥石流演化过程试验研究[J].水土保持通报,2015,35(4):29-33.
- [3] 崔鹏,陈容,向灵芝,等.气候变暖背景下青藏高原山地灾害及其风险分析[J].气候变化研究进展,2014,10(2): 103-109.
- [4] 刘建康,张佳佳,高波,等.我国西藏地区冰湖溃决灾害综述[J].冰川冻土,2019,41(6):1335-1347.
- [5] 孙美平,刘时银,姚晓军,等.2013 年西藏嘉黎县“7·5”冰湖溃决洪水成因及潜在危害[J].冰川冻土,2014,36(1):158-165.
- [6] Cook K L, Andermann C, Gimbert F, et al. Glacial lake outburst floods as drivers of fluvial erosion in the Himalaya [J]. Science,2018,362(6410).
- [7] 邓明枫,陈宁生,廖世春,等.堰塞坝漫顶溃决过程及其受组成结构的影响[J].人民长江,2012,43(2):30-35.
- [8] 张大伟,黄金池,何晓燕.无黏性均质土石坝漫顶溃决试验研究[J].水科学进展,2011,22(2):222-228.
- [9] 柴贺军,刘汉超,张倬元,等.天然土石坝稳定性初步研究[J].地质科技情报,2001(1):77-81.
- [10] 赵万玉,陈晓清,高全,等.不同横断面泄流槽的地震堰塞湖溃决实验研究[J].泥沙研究,2011(4):29-37.
- [11] Schmocker L, Hager W H. Modelling dike breaching due to overtopping [J]. Journal of Hydraulic Research, 2009,48(4):547-549.

(下转第 42 页)

- [20] 王涛. 基于 RUSLE 模型的土壤侵蚀影响因素定量评估: 以陕北洛河流域为例[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(8): 170-177.
- [21] 李天宏, 郑丽娜. 基于 RUSLE 模型的延河流域 2001—2010 年土壤侵蚀动态变化[J]. 自然资源学报, 2012, 27(7): 1164-1175.
- [22] 顾朝军, 穆兴民, 孙文义, 等. 极端暴雨洪水及侵蚀产沙对延河流域植被恢复响应的比较研究[J]. 自然资源学报, 2017, 32(10): 1755-1767.
- [23] 谢红霞, 李锐, 杨勤科, 等. 退耕还林(草)和降雨变化对延河流域土壤侵蚀的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(2): 569-576.
- [24] Yu B, Rosewell C J. A robust estimator of the R-factor for the universal soil loss equation [J]. Transactions of the ASAE, 1996, 39(2): 559-561.
- [25] 张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算[J]. 土壤学报, 2007, 44(1): 7-13.
- [26] Sharpley A N, Williams J R. EPIC-erosion/productivity impact calculator (I): model documentation [J]. Technical Bulletin-Usda, 1990, 4(4): 206-207.
- [27] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes [J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37(6): 1835-1840.
- [28] 雷婉宁, 温仲明. 基于植物群落结构的水土流失植被因子指数研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(5): 68-72, 77.
- [29] 雷婉宁, 温仲明. 基于 TM 遥感影像的陕北黄土区结构植被因子指数提取[J]. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2736-2742.
- [30] 水利部水土保持监测中心. 西北黄土高原区土壤侵蚀预报模型开发项目研究成果报告[R]. 北京: 水土保持监测中心, 2006.
- [31] 王志杰, 柳书俊, 苏嫄. 喀斯特高原山地贵阳市 2008—2018 年土壤侵蚀时空特征与侵蚀热点变化分析[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 94-102.
- [32] 徐学选, 高朝侠, 赵娇娜. 1956—2009 年延河水沙变化特征及其驱动力研究[J]. 泥沙研究, 2012(2): 12-18.
- [33] Zhao Guangju, Mu Xingmin, Jiao Juying, et al. Assessing response of sediment load variation to climate change and human activities with six different approaches [J]. Science of the Total Environment, 2018, 639: 773-784.
- [34] 王涛. 陕北洛河流域降水和植被变化对土壤侵蚀的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(20): 295-300.
- [35] 钟莉娜, 王军, 赵文武, 等. 多流域降雨和土地利用格局对土壤侵蚀影响的比较分析: 以陕北黄土丘陵沟壑区为例[J]. 地理学报, 2017, 72(3): 432-443.

(上接第 34 页)

- [12] Novotný J, Klimeš J. Grain size distribution of soils within the Cordillera Blanca, Peru: An indicator of basic mechanical properties for slope stability evaluation [J]. Journal of Mountain Science, 2014, 11(3): 563-577.
- [13] 贾洋, 崔鹏. 西藏冰湖溃决灾害事件极端气候特征[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(4): 395-404.
- [14] 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.
- [15] 吕士展, 汪稔, 胡明鉴, 等. 冰碛土工程特性研究的状态、问题及展望[C]//中国地质学会. 2011 年全国工程地质学术年会论文集, 2011.
- [16] 党超, 褚娜娜, 丁瑜. 冰湖溃决泥石流形成的临界条件[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1176-1183.
- [17] 游勇, 程尊兰. 西藏波密米堆沟泥石流堵河模型试验[J]. 山地学报, 2005, 23(3): 288-293.
- [18] 崔鹏, 马东涛, 陈宁生, 等. 冰湖溃决泥石流的形成、演化与减灾对策[J]. 第四纪研究, 2003, 23(6): 621-628.
- [19] Chen Xiaoqing, Cui Peng, Chen Ningsheng, et al. Calculation of discharge of debris flows caused by moraine-dam failure at Midui gully, Tibet, China [J]. Iranian Journal of Science & Technology Transaction B(Engineering), 2007, 31(B2): 195-207.
- [20] Chen Huanyong, Xu Weilin, Deng Jun, et al. Experimental investigation of pressure load exerted on a downstream dam by dam-break flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 140(2): 199-207.
- [21] Chen Huayong, Cui Peng, Chen Xiaoqing, et al. Study on the surge wave induced by glacier avalanches and its effects on dam failure process [J]. International Journal of Erosion Control Engineering, 2017, 10(1): 9-15.
- [22] 刘晶晶, 程尊兰, 李泳, 等. 西藏终碛湖溃决形式研究[J]. 地学前缘, 2009, 16(4): 372-380.
- [23] 黄金辉, 刘建康, 程尊兰, 等. 涌浪规模对冰碛湖溃决的影响实验[J]. 山地学报, 2014, 32(2): 241-248.
- [24] Hanson G J, Robinson K M, Cook K R. Prediction of headcut migration using a deterministic approach [J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(4): 525-531.
- [25] 孟震, 杨文俊. 泥沙颗粒水下休止角与内摩擦角差异化初步探索[J]. 泥沙研究, 2012(4): 76-80.