

文章编号: 1008 - 2786 - (2014) 2 - 241 - 08

## 涌浪规模对冰碛湖溃决的影响实验

黄金辉<sup>1 2</sup>, 刘建康<sup>1 2</sup>, 程尊兰<sup>1</sup>, 张小刚<sup>1</sup>, 刘大翔<sup>1 2</sup>, 赵鑫<sup>1 2</sup>

(1. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所/中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川成都 610041;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 随着全球气候变暖, 冰碛湖溃决灾害频发, 冰碛湖溃决的触发机理研究成为关注点, 其中由于冰(雪)崩坠湖触发的涌浪冲蚀破坏是冰碛湖溃决的主要因素。为探索研究涌浪诱发冰湖溃决的动力过程, 设计了一套水槽系统进行模拟实验, 探讨冰(雪)崩塌入湖诱发涌浪溃坝的发展过程及溃决流量特征, 分析不同涌浪规模对溃坝形成机制的影响。结果表明: 1. 涌浪是冰碛湖坝体溃决的直接触发因素, 在首浪及后续周期性折返涌浪的作用下坝体溃口逐渐形成, 其后随着水势能增大, 在下蚀、溯源侵蚀和侧蚀的共同作用下, 坝体侵蚀率迅速加大, 洪峰流量出现在这个阶段; 2. 涌浪规模越大, 首浪对坝顶的侵蚀越充分, 涌浪对坝体的侵蚀越迅速, 坝体剖面形态线越稀疏。由于静水位不变条件下侧蚀作用更强烈, 溃口的最终宽度较静水位改变的情形大; 3. 静水位改变的情形下, 首浪漫溢形成极大规模的初始流量  $Q_0$ , 并且首浪规模越大, 初始流量  $Q_0$  也就越大。洪峰流量  $Q_m$  出现在坝体溃决初期, 涌浪规模越大, 洪峰流量  $Q_m$  出现时间越早。

**关键词:** 涌浪; 冰碛湖; 冰碛湖溃决; 实验研究

中图分类号: P694

文献标志码: A

冰碛湖是冰进冰退过程中形成的地质体, 是冰碛物堵塞冰川槽谷或河床形成的堰塞湖<sup>[1-2]</sup>。近年来, 全球气候持续变暖, 冰川不断后退, 高山冰川地区冰碛湖溃决事件频繁发生, 严重威胁下游百姓的生命财产安全。在喜马拉雅山区, 有记录的冰碛湖溃决灾害累计达 33 次<sup>[3]</sup>, 其中 1985 年尼泊尔的 Dig Tsho 冰碛湖溃决泥石流冲毁即将竣工的纳姆奇水电站, 直接经济损失达 5 亿美元<sup>[2, 4, 5-6]</sup>; 而在科迪勒拉山区, 上世纪以来发生了 21 次冰碛湖溃决<sup>[7-8]</sup>, 其中 1941 年秘鲁的 Cohup 冰碛湖溃决导致 6 000 多人死亡。我国是冰碛湖分布较多的国家之一, 冰碛湖溃决主要发生在西藏的喜马拉雅山脉和新疆的天山山脉地区, 所形成的洪水和泥石流在该地区造成严重的危害, 例如 1954 年的康马县桑旺错冰碛湖

溃决形成的特大洪水和泥石流造成约 400 人死亡, 2 万多人受灾; 1982 年的定结县金错冰碛湖溃决, 洪水淹没了 8 个村并冲毁大片农田<sup>[1]</sup>。

绝大多数冰碛湖位于高山冰川区, 观测资料少, 因此对于冰碛湖溃决形成机制的研究较少。根据成因可将冰碛湖溃决分为两类, 一类是气候变暖致使冰碛坝内埋藏冰融化导致的管涌破坏, 即管涌型溃决; 另一类是由于冰(雪)崩塌入湖使水位上涨并叠加涌浪, 使通过溢流口水位增高, 流速增大, 达到冰碛颗粒的启动速度后产生强烈冲刷导致溃坝, 即溢流型溃决<sup>[10-11]</sup>。Ripendra Awal 等人在研究了 20 个冰碛湖溃决事件之后发现, 80% 的冰碛湖溃决是冰(雪)崩激发的涌浪冲刷下蚀诱发的, 10% 是由于坝体内部冰水融化导致的管涌破坏, 10% 是由于冰

收稿日期(Received date): 2013 - 07 - 05; 修回日期(Accepted): 2014 - 01 - 15。

基金项目(Foundation item): 国家科技支撑计划项目(2012BAK10B02 - 4); 交通运输部科技项目(201231879210); 中交股份科技研发项目(2011 - ZJKJ - 04)。[This research was financially supported by National Key Technology R&D Program(Grant No. 2012BAK10B02 - 4); Science and Technology Program of Ministry of Transport(Grant No. 201231879210); The CCCC Technology R & D Projects(Grant No. 2011 - ZJKJ - 04).]

作者简介(Biography): 黄金辉(1989 -), 男(汉), 福建泉州人, 硕士研究生, 主要从事山地灾害研究。[Huang Jinhui(1989 -), male, Han nationality, born in Quanzhou of Fujian, Graduate, major in mountain hazards and prevention methods study.] Email: Huang. J. Hui@hotmail.com

\* 通信作者(Corresponding author): 程尊兰, 研究员。[Cheng Zunlan, Professor.] E-mail: czl@imde.ac.cn

溃坝内部渗流破坏引起的<sup>[12]</sup>。同时,国内学者统计我国西藏地区的冰碛湖溃决事件也发现,冰(雪)崩塌入湖是导致冰湖溃决最直接的诱发因素<sup>[10-11]</sup>。溢流型溃决分布广,成灾多,是本文研究对象。近几年,冰碛湖涌浪溃决形成机制问题引起了学者们的关注,例如,Ripendra Awal<sup>[12]</sup>、N. J. Balmforth<sup>[12-13]</sup>将涌浪导致冰碛湖溃决的成灾过程进行室内模拟实验,发现冰碛湖溃决与冰(雪)崩大小、坝体物质级配特征、坝体形状、湖区水位等相关。但是,对于冰碛湖溃决的初始涌浪高度、后续波浪循环次数及溃决洪水的流量过程等特征研究仍然处于探索阶段。

通过实验模拟不同涌浪条件,探究其对冰碛湖溃决的影响及冰碛湖溃决的洪水特征,为冰碛湖危险性评估和冰碛湖溃决灾害防治提供科学依据,并完善冰碛湖溃决机制的理论研究。

## 1 实验设计

### 1.1 实验材料

野外考察发现冰碛坝体颗粒具有粗细混杂、分选差、宽级配的组构特征,且粘粒成分含量较少,例如光谢错冰碛坝,如图1所示。为了更好地探索研究不同涌浪规模对坝体溃决的影响,根据实验目的和中科院成都山地灾害与环境研究所模拟实验大厅的场地条件,选取粒径 $<10\text{ mm}$ 、密度为 $1.44\text{ g/cm}^3$ 的砂粒作为坝体材料,其特征参数如表1所示,级配组成如图2所示。

### 1.2 实验装置

为了研究不同情况下涌浪对冰碛湖溃决的影响,设计了一个水槽系统来模拟涌浪引起的冰碛坝溃决动力过程,这个系统主要包括玻璃水槽、起浪装置、集水系统,如图3所示。涌浪溢流溃坝的发展过程及其水力特征因需考虑涌浪作用,是一种复杂的自然现象。鉴于冰湖溃决动力过程的复杂性,本次实验主要采用几何尺寸比例相似的简化模型进行模拟研究。以光谢错冰碛湖溃决为背景,确定本次模拟实验的几何比尺为1:1000。

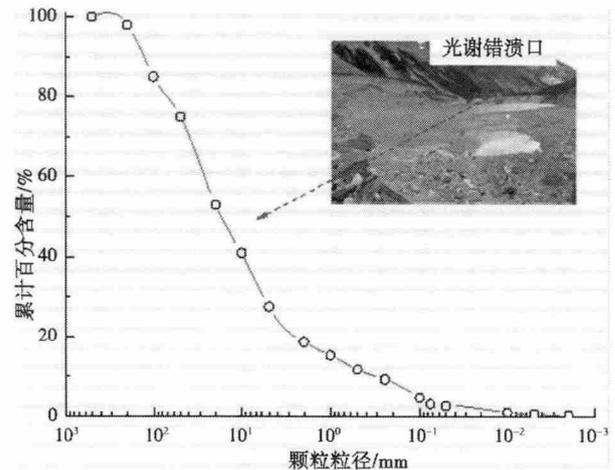


图1 光谢错冰碛坝的颗粒级配曲线

Fig.1 Grain size distribution of sediment mixes of Guangxiexuo moraine dam

#### 1.2.1 玻璃水槽

由于冰碛湖的面积大小不一、形状复杂多变,为了更好地研究涌浪对坝体溃决的影响,将冰碛湖形状概化为 $150\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 的长方形水槽。玻璃水槽主要由钢化玻璃组成,在玻璃墙外侧粘贴刻度纸,以便于摄像机记录涌浪溃坝过程中的浪高和库水位变化。坝体采用梯形堆放,迎水面和背水面的坡度采用自然休止角,且不对其进行额外的加压处理,尽量保持砂土天然堆积的状态。其中,坝高 $10\text{ cm}$ ,坝底宽 $40\text{ cm}$ ,坝顶宽 $5\text{ cm}$ ,如图3所示。

#### 1.2.2 起浪装置

冰崩的规模、形状不同,激发的初始涌浪高度就不同,忽略冰崩的形状、比重,用不同尺寸的试件来模拟冰崩诱发涌浪。其中,预制试件A尺寸: $30\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ ,体积约为水槽库容的 $1/4$ ,重 $5\text{ kg}$ ;预制试件B尺寸: $15\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ ,重 $3.5\text{ kg}$ ,体积约为水槽库容的 $1/8$ 。实验过程中,控制试件距离水面的自由高度来产生不同的初始涌浪高度。为了对比静水位不变的情况下涌浪对溃坝的影响,用木浆来起浪,浆叶尺寸: $30\text{ cm} \times 19\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ ,体积小可忽略不计,通过调整木浆的入水深度来激发不同的初始涌浪高度。

#### 1.2.3 集水系统

表1 实验用料的物理特征参数

Table1 Summary of experiments

项目	干容重/ ( $\text{g/cm}^3$ )	饱和容重/ ( $\text{g/cm}^3$ )	特征粒径/mm				$C_u$
			$D_{25}$	$D_{50}$	$D_{75}$	$D_{90}$	
砂土	1.44	1.85	0.29	0.55	1.10	2.21	1.94

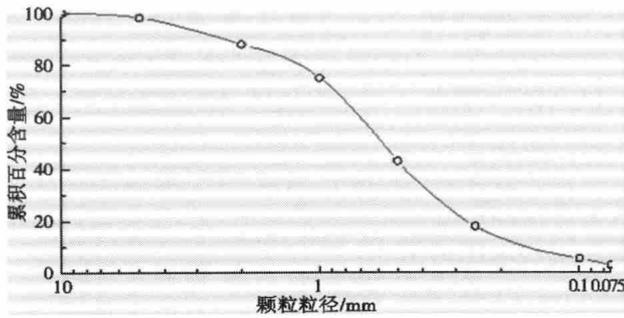


图 2 实验用料的颗粒级配曲线图

Fig.2 Grain size distribution of sediment mixes used in the experiment

集水系统由集水容器及其下垫的电子秤组成,如图 3 所示。其中,集水容器为钢化玻璃水箱,其尺寸为: 40 cm × 30 cm × 30 cm,外壁粘贴刻度尺。通过摄像机记录水箱水位以计算实时体积变化,同时通过数据线把电子秤与笔记本电脑相接,实时记录集水容器的质量变化从而得到溃决洪水的流量过程。

1.3 实验组次安排

本次实验主要研究不同规模涌浪对冰碛湖溃决的影响分析,采用单因子的实验方法,利用不同起浪

装置产生波浪,实验共 18 组,详见表 2。

2 实验结果与分析

2.1 涌浪溃坝过程

为了更好地记录溃坝过程,让靠近摄像机 1 一侧的坝顶高度稍微低点。实验过程前,往玻璃水槽加水直到 9 cm,比坝顶低 1 cm。先让库水在砂土坝中渗流,以确保坝体可以承受静水压力,而不会产生渗流破坏,保证实验结果的可靠性。

实验开始时用预制试件 A、B 或浆起浪,以试件 A 为例,在不同设计高度上,释放试件 A,当试件 A 到达水面时,重力势能转换为动能,激发波浪。例如 SY-2 波从振动点开始,迅速传递,能量在波的传播过程中逐渐衰减。但是,由于水深不断变浅,从坝体迎水坡前端开始,波浪剖面倾斜变陡,波能量集中,波浪沿着坝体迎水坡坡面迅速爬高,这个过程中波浪下层水体对坝体迎水坡一侧的表层砂土产生扰动,使其发生悬移、跃移,如图 4a 所示。最后波浪越过坝顶,并且冲刷坝顶部分砂土,使得坝高降低 1 ~

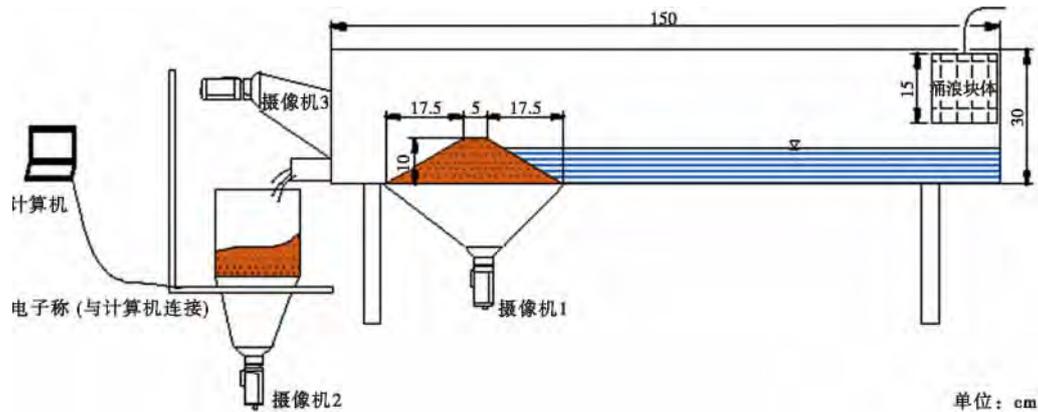


图 3 实验装置示意图

Fig.3 Experimental setup

表 2 实验组次设计表

Table 2 Summary of experiments

起浪装置	项目	内容					
预制试件 A (5.0kg)	实验编号	SY-1	SY-2	SY-3	SY-4	SY-5	SY-6
	自由高度/cm	0	1	2	3	4	5
预制试件 B (3.5kg)	实验编号	SY-7	SY-8	SY-9	SY-10	SY-11	SY-12
	自由高度/cm	0	1	2	3	4	5
浆叶 (30 cm × 19 cm × 1 cm)	实验编号	SY-13	SY-14	SY-15	SY-16	SY-17	SY-18
	入水深度/cm	10	9	8	7	6	5

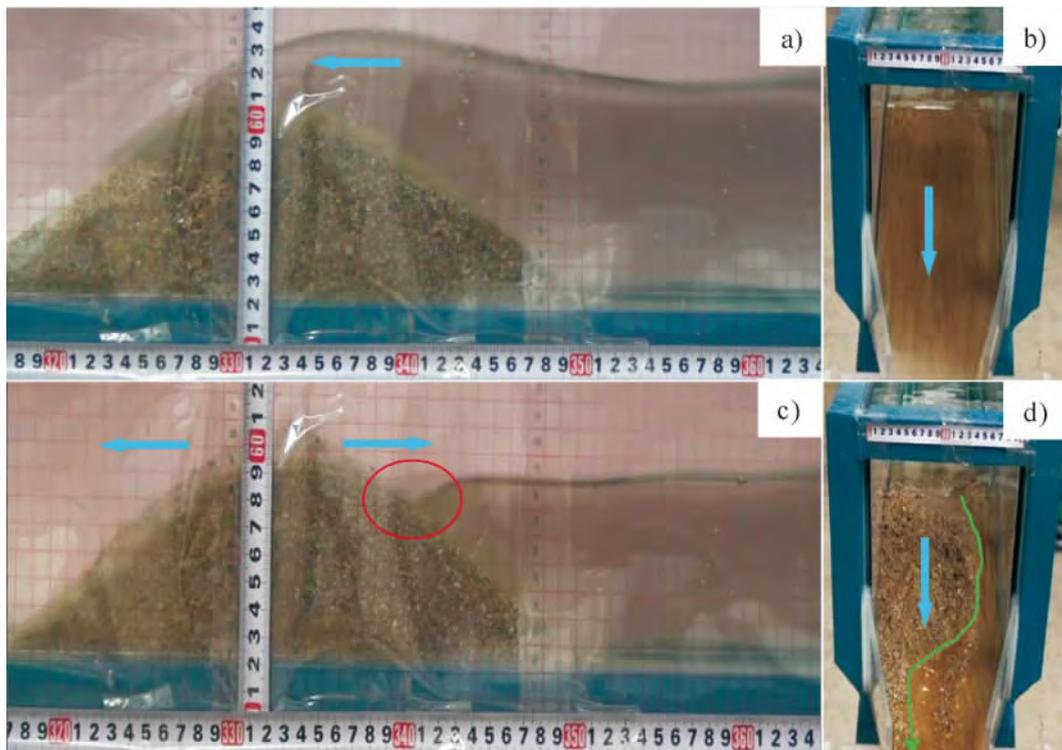
2 mm。实验发现,首浪漫顶溢流冲蚀坝顶,但不会形成明显的溃口,如图4b所示。在波浪爬高到达至高点时,一部分浪越过坝顶,把迎水坡一侧的少量砂土顺势携带到背水坡,同时过溢水体冲刷背水坡坡面;而残余浪由于缺乏后续波浪的助推,沿程迅速回落到湖区,并携带少量砂土堆积在坝体迎水坡表面,同时产生向湖区方向传播的波浪。这个过程中,在迎水面前端水位回落,形成一个“类陡坎”的形状,如图4c所示。新产生的波浪朝着湖区一侧传播,撞击水槽尾部的玻璃后反射回来。当波浪折返到达坝体前端,“类陡坎”消失,波浪再次爬高,进一步冲蚀坝顶。后续波浪间隔短,对坝顶连续冲刷,在多次重复折返涌浪的叠加作用下,在坝顶较低的位置形成明显的泄流溃口,如图4d所示。SY-2坝体出现明显泄洪通道所需涌浪次数为4次,且此时“类陡坎”消失。坝体溃口形成后,产生溃决洪水,由于水势能的释放,水流对坝顶的下切侵蚀加快,坝体背水坡坡面的溯源侵蚀速率急剧增大,同时溃口两侧的砂土由于下部的侧蚀掏空而发生坍塌。随着溃口逐渐加

大,湖水加速泄流,输砂量也陡增,溃决洪峰流量多出现在此阶段。当溯源侵蚀至坝体迎水坡时,由于湖区水体库容降低,湖水对坝体侵蚀率逐渐减小,直至湖区水体排空,整个过程持续约1 min。

由于缺少湖区以外水源的补给,涌浪溢流是坝体被侵蚀形成溃口的直接触发因素。为分析涌浪在溃口过程中的作用,定义 $T_0$ 为涌浪终止时间界限,其中 $0 \sim T_0$ 表示溃口形成阶段(即涌浪阶段), $T_0 \sim$ 溃决结束表示洪水溃决阶段。涌浪阶段溃口处的过溢水流具有不稳定和不连续的特点,重现周期与湖区涌浪的传播保持一致,例如图5所示SY-2,周期为4次与前文描述一致。从初始涌浪开始至涌浪结束阶段,坝体高度降低速度缓慢,与溃口形成之后的侵蚀速率形成鲜明对比。其中,SY-2实验溃口形成耗时 $T_0$ 约6 s,坝顶侵蚀速率 $|dH/dT| \approx 0.150$  cm/s。

## 2.2 不同涌浪规模对溃坝的影响分析

### 2.2.1 静水位改变条件下的不同涌浪规模对溃坝的影响



a) 波浪爬高,携带少量砂土颗粒; b) 波浪漫流过顶; c) 波浪回落形成“类陡坎”; d) 坝体形成明显溃口; 蓝色箭头表示水流方向,红色圈圈内为出现的“类陡坎”,绿色线表示溃口形态边界 a) wave with bits of sand run-up on slope; b) waves overtop over the dam; c) a graben appears when waves retreat; d) an incision forms; the blue arrow stands for the water flow; the red circle represents the graben; green line stands for the boundary of the incision

图4 SY-2中的涌浪溃坝过程图

Fig. 4 A sequence of photographs showing the incision of a dam by initiated waves

根据野外考察结果,用大小不同的试件A和B模拟冰(雪)崩,通过调整释放高度来改变涌浪规模。理论上,试件重量越大、试件距离湖面的自由高度越高,重力势能就越大,下落激起的首浪高度就越大。为了研究不同涌浪规模对溃坝的影响,选取同一试件A不同高度的3组实验SY-1、SY-3、SY-4和同一高度下不同试件的实验2组SY-3、SY-9做对比分析。其中,SY-1、SY-3、SY-4、SY-9的首浪高度分别为130 mm、137 mm、138 mm、130 mm。同一试件情形下,SY-1较SY-3、SY-4的涌浪规模小,因此溃口形成所需时间多,周期性折返涌浪持续时间较长,如图6所示。其中,SY-1波浪持续时间最长,约为10 s,期间有4个涌浪爬高冲蚀坝顶。从图4可以看出,前期曲线波动明显,波幅呈衰减趋势,这个阶段溃口雏形不断发展最终形成泄洪通道;后期由于坝体溃口的形成,涌浪消散,过溢水流下切冲蚀坝体,侵蚀速率明显加快。 $T_0$ 之后,湖区水位迅速降低,SY-1、SY-3、SY-4曲线斜率越来越大,如图4所示。水体对坝顶的侵蚀度越大,溃口宽度就越大,泄洪速率越快,因此曲线越陡。从图7可以看出,同SY-3、SY-4相比,SY-1的剖面形态线较为密集,因此溯源侵蚀较缓慢;然而SY-1的侵蚀度较小,洪水溃决历时长。在同一高度释放,质量越大的试件重力势能越大,入湖激发的涌浪规模越大,对坝体溃决的贡献就越多。在同一释放高度的情形下,SY-3的试件较SY-9重,形成的涌浪规模较大,因此涌浪时间短、溃口的侵蚀较快,如图6、7所示。这个结果与同一试件下不同高度所触发的涌浪规模对坝体溃决的影响相一致。

### 2.2.2 静水位是否改变对溃坝的影响

试件下落入水过程中,会使得湖面静水位上升并叠加涌浪,这其中体积排水也起了一定作用。因此,为了对比静水位不变情况下涌浪规模对溃坝的影响,通过划桨起浪,改变桨入水深度来产生不同规模的涌浪,这种情形下,湖水水位不会出现明显上涨。桨叶入水深度越大,划桨所做的功越多,形成的波浪规模越大,选取入水深度分别为7 cm、5 cm的SY-16、SY-18做对比分析,另外选取静水位改变条件下的SY-12。实验发现,划桨起浪触发的波浪高度较低,但是波浪持续时间长,如图8所示。其中,SY-16、SY-18分别有9个、12个波浪,涌浪传播持续时间 $T_0$ 分别为18 s、24 s,二者都远比静水位改变条件的SY-12大得多。相比于SY-12,静水位不

变条件下的SY-16、SY-18的首浪波幅小,对坝顶的冲刷侵蚀较弱,因此溃口是在后续周期性波浪作用下不断发展的。静水位不变条件下,涌浪规模较小,涌浪的侵蚀能力较弱、波能量耗散较慢,因此前几个波浪的波幅变化不大,直到后期溃口即将形成时,波幅才迅速变小,如图8所示。纵观整个溃坝过程,静水位不变情形下,坝体剖面形态线比静水位改变的情形下更密集,涌浪对坝体的侵蚀度相对较均匀。静水位不变条件下坝体的侧蚀更为强烈,因此溃口最终宽度比静水位改变条件下的要大,例如SY-16的溃口比SY-12宽约1.5 cm。

### 2.3 不同涌浪规模的溃决洪水特征

在静水位改变的情形中,从集水系统解译得到的洪水流量过程曲线可以看出,初始涌浪漫顶溢流形成极大规模的挟砂洪水,形成初始流量 $Q_0$ 。以SY-4为例, $Q_0$ 达到1 500 cm<sup>3</sup>/s,甚至大于后期的洪峰流量 $Q_m$ (约900 cm<sup>3</sup>/s),如图7所示。对比SY-1、SY-3、SY-4(或者SY-3和SY-9),发现涌浪规模越大,初始流量 $Q_0$ 越大,二者呈正相关关系。这是因为涌浪规模越大,首浪冲蚀能力越强,一次冲出的固体物质越多,这与图5坝体剖面侵蚀形态线相符。当坝体溃口形成之后,湖区水体通过溃口泄流,反过来也拓宽了溃口,此时洪水流量达到峰值 $Q_m$ ,之后随着湖区水位的降低,洪水流量逐渐减少,如图9所示。涌浪规模越大,洪峰流量出现的时间越早,例如SY-4所需时间约10 s,距离涌浪结束时间(即溃口形成时间) $T_0$ 约2.5 s,因此洪峰流量出现在坝体溃决后的一小段时间内。从图9可以看出,洪峰流量 $Q_m$ 的大小与涌浪规模呈正相关关系,但是由于湖区库容降低影响了水势能,洪峰流量并没有明显增加。不同涌浪规模形成的溃决洪水流量曲线形态不一样,涌浪规模较大的SY-3、SY-4洪水流量过程曲线呈尖瘦峰形,而规模较小的SY-1呈平缓峰形。

同静水位改变条件下的实验相比,划桨激发的首浪规模小,不会强烈冲刷坝顶,因此初始流量 $Q_0$ 小,且远小于洪峰流量 $Q_m$ ,如图10所示。同样地,洪峰流量出现在溃口形成后的一小段时间之内,且 $Q_m$ 相差不大。但是明显地,静水位不变条件下的SY-16、SY-18的洪峰流量出现时间比静水位改变时的SY-12滞后约20 s,这与 $T_0$ 是相关的,SY-12的 $T_0$ 小于SY-16、SY-18,如图10所示。由于静水位不变情形下激发的涌浪规模较小,因此溃决

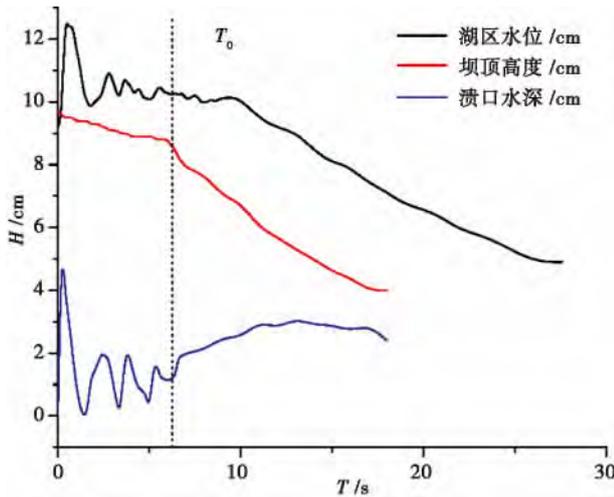


图5 SY-2 湖区水位、坝体高度与溃口水深演变过程  
Fig.5 Table of lake , height of dam and depth in front of the dam varies in the experiment SY-2

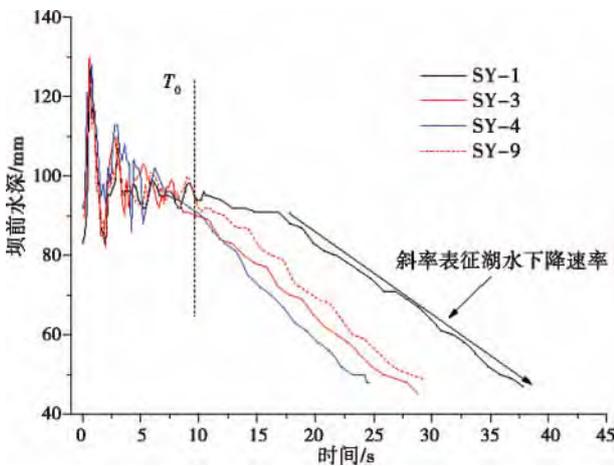


图6 坝前水深—时间关系曲线

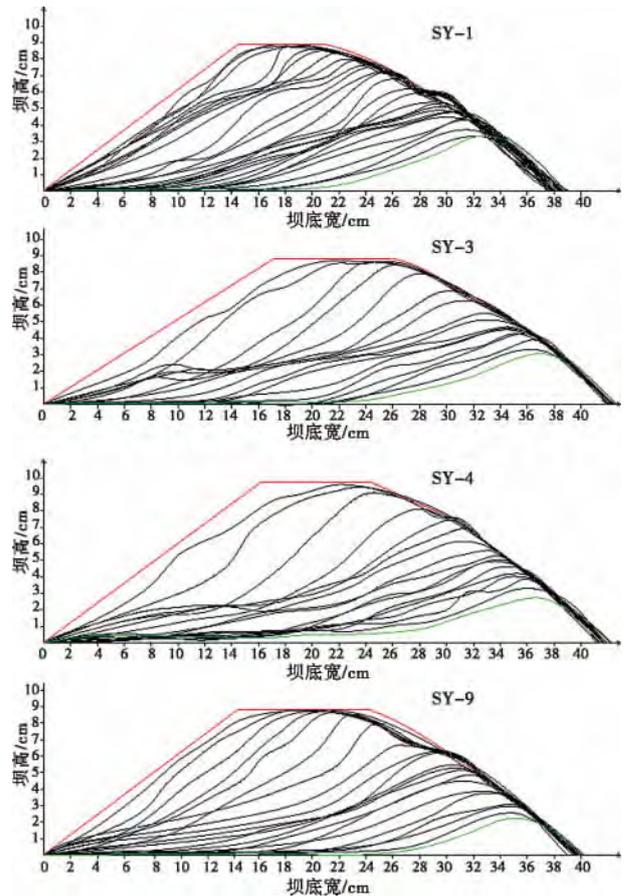
Fig.6 Depth in front of the dam varies in the experiments

洪水流量曲线多呈平缓峰形。

### 3 结论

在全球极端气候的背景下,冰碛湖溃决事件频繁发生,造成巨大灾害。本文在野外考察的基础上,通过自制简易实验装置探究不同涌浪条件对冰碛坝溃决的影响及其洪水特征。实验研究表明:

1. 涌浪是坝体溃决的直接原因,首浪规模越大,对坝顶及背水坡一侧的冲刷越强烈,更有利于坝体溃口锥形的发展,对冰碛湖溃决的贡献越大。但是首浪并不会冲刷形成明显的溃口,在后续周期性折返涌浪的冲蚀作用下,坝体溃口才逐渐形成,此时



线条表示坝体瞬时剖面形态线,两条形态线时间间隔为1 s,两条形态线间面积反应了刚过去1 s的坝体侵蚀度,红色线条表示坝体初始形态,绿色表示最终形态。Lines represent instant profiles of the dam every 1 seconds; the area between 2 lines represents the degree of incision by waves in the last 1 second; red line represents the initial profile, green line represents the finished

图7 SY-1、SY-3、SY-4、SY-9 的坝体剖面侵蚀过程图  
Fig.7 A sequence of curves plotting the dam height every 1 seconds in experiment SY-1、SY-3、SY-4、SY-9

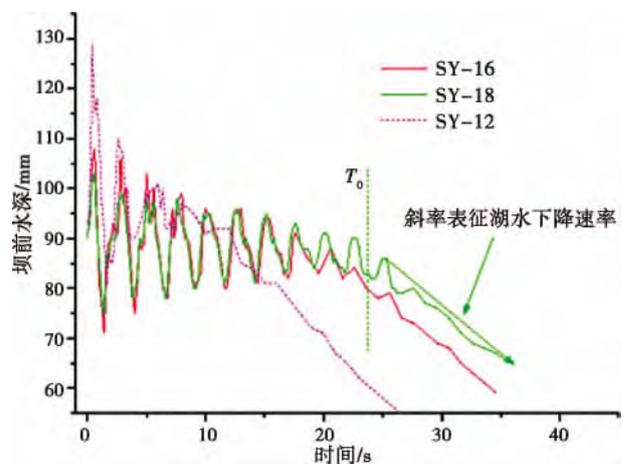


图8 坝前水深—时间关系曲线

Fig.8 Depth in front of the dam varies in the experiments

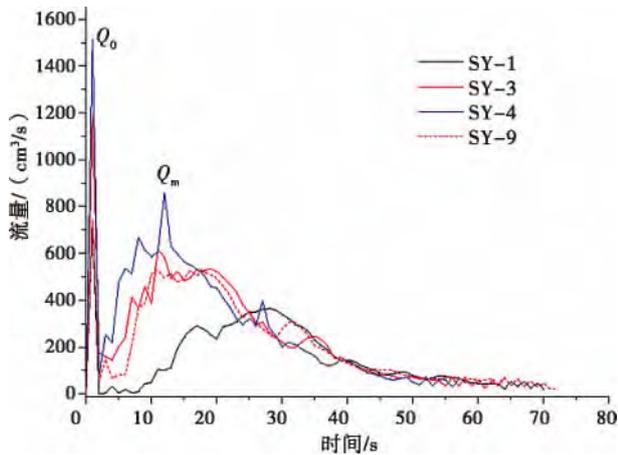


图9 SY-1、SY-3、SY-4、SY-9的流量过程曲线

Fig. 9 Outflow hydrographs in the experiments SY-1, SY-3, SY-4, SY-9

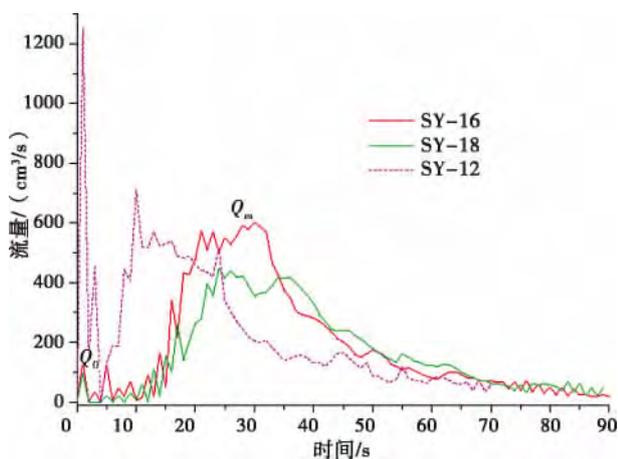


图10 SY-12、SY-16、SY-18的流量过程曲线

Fig. 10 Outflow hydrographs in the experiments SY-12, SY-16, SY-18

“类陡坎”消失。坝体溃口形成后,由于洪水下切、溯源侵蚀、侧蚀的共同作用,输砂量剧增,这个阶段溃决洪水容重较大,容易演化成冰碛湖溃决泥石流。

2. 坝体溃决多数是瞬时发生的,这个过程大约十几秒,涌浪规模越大,溃口形成所需时间越短。涌浪规模越小,水体对坝顶的侵蚀度越小,坝体剖面形态线越密集,溃决洪水历时越长。相比于静水位改变的情形,静水位不变条件下,涌浪规模较小,涌浪的侵蚀能力较弱、波能量耗散较慢,但是静水位不变条件下坝体的侧蚀更为强烈,因此溃口的最终宽度较大。

3. 静水位改变的情形下,初始涌浪漫顶溢流形成极大规模的初始流量  $Q_0$ ,甚至大于后期的洪峰流量  $Q_m$ ,并且首浪规模越大,一次性溢出的湖水体积越大,一次性冲出的固体物质越多,初始流量  $Q_0$  也

就越大。而静水位不变情形下由于涌浪规模小,没有表现出这种特征。洪峰流量  $Q_m$  出现在坝体溃决初期,涌浪规模越大,洪峰流量  $Q_m$  出现时间越早。当涌浪规模大时,洪水溃决曲线呈尖瘦峰形;当涌浪规模小时,洪水溃决曲线呈平缓峰形。

### 参考文献(References)

- [1] Xu Daoming, Feng Qinghua. Dangerous glacial lake and outburst features in Tibet Himalayas[J]. Acta Geographica Sinica, 1989, 44(03): 343-352 [徐道明,冯清华. 西藏喜马拉雅山区危险冰碛湖及其溃决特征[J]. 地理学报, 1989, 44(03): 343-352]
- [2] Cui Peng, Ma Dongtao, Chen Ningsheng, et al. The initiation, motion and mitigation of debris flow caused by glacial lake outburst[J]. Quaternary Sciences, 2003, 4(06): 621-628 [崔鹏, 马东涛, 陈宁生, 等. 冰碛湖溃决泥石流的形成、演化与减灾对策[J]. 第四纪研究, 2003, 4(06): 621-628]
- [3] Richardson SD, Reynolds JM. An overview of glacial hazards in the Himalayas[J]. Quaternary International, 2000, 65/66: 31-47
- [4] Richardson SD. Remote sensing approaches for early warning of GLOF hazards in the Hindu Kush Himalayan region[R]. Prepared for the 22nd United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UN/ISDR), June 2010.
- [5] Vuichard D, M Zimmermann. The 1985 catastrophic rainage of a moraine-dammed lake, Khumbu Himal, Nepal: cause and consequences[J]. Mountain Research and Development, 1987, 7(2): 91-110
- [6] Iturrizaga L. Historical glacier-dammed lakes and outburst floods in the Karambar valley (Hindukush - Karakoram) [J]. Geo Journal, 2005, 63: 1-47
- [7] Clague JJ and Evans SG. A review of catastrophic drainage of moraine dammed lakes in British Columbia [J]. Quaternary Science Reviews, 2000, 19: 1763-1783
- [8] Lliboutry L, Arnao BM, Pautre A, Schneider B. Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru [J]. Journal of Glaciology, 1977, 18: 239-254
- [9] Awal R, Nakagawa H, Kawaike K, Baba Y, and Zhang H. Study on moraine dam failure and resulting flood/debris flow hydrograph due to waves overtopping and erosion [G]//R. Genevois, D. L. Hamilton & A. Prestininzi (Eds), 5th International Conference on Debris - Flow Hazards Mitigation, Mechanics, Prediction and Assessment, Padua 2001: 3-12
- [10] Liu Jingjing, Cheng Zunlan, Li Yong et al. A study of the outburst form of the end-moraine lake in Tibet [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 04: 372-380 [刘晶晶, 程尊兰, 李泳. 西藏终碛湖溃决形式研究[J]. 地学前缘, 2009, 04: 372-380]
- [11] Jiang Zhongxin, Cui Peng, Jiang Liangwei. Critical hydrologic condition for overflow burst of moraine lake [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2004, 04: 21-26 [蒋忠信, 崔鹏, 蒋良潍. 冰碛湖漫溢型溃决临界水文条件[J]. 铁道工程学报, 2004, 04: 21-26]

[12] Balmforth, N. J, von Hardenberg, et al. Dam breaking by wave-induced erosional incision [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2008, 113( F1): F01020.

[13] Balmforth, N. J, von Hardenberg, et al. Dam-breaking seiches [J]. *Journal of Fluid Mechanics* 2008, 628( 1): 1 - 21

## An Experiment of the Effects of Waves on Glacial Lake Outburst Induced by Waves Overtopping

HUANG Jinhui<sup>1 2</sup>, LIU Jiankang<sup>1 2</sup>, CHENG Zunlan<sup>1</sup>, ZHANG Xiaogang,  
LIU Daxiang<sup>1 2</sup>, ZHAO Xin<sup>1 2</sup>

(1 Key Lab of Mountain Hazards and Surface Processes, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** As a result of recent climate warming, GLOFs become more frequently. More and more researchers focus on the mechanism of GLOFs, and find most of GLOFs are initiated by waves from ice avalanches that collapse into lakes. Under laboratory conditions, this paper studies the development and characteristics of dam failure caused by waves and focuses upon the effects of the different scales of waves on dam failure. Conclusions as followed: 1. Waves overtopping and erosion result in dam failure, and the breach gradually forms in the wake of the initial wave and the following waves. With the interaction of incision, lateral erosion and retrogressive erosion, the erosion rate increases and peak discharge emerges. 2. The larger the waves, the more the initial wave erodes dam crest, the higher the dam erosion rate, the thinner the instant profiles of dam every 1 second. Due to the higher rate of lateral erosion on the condition of static water level, the breach is wider than the dynamic one. 3. Under the condition of static water level, the first wave overtopping forms the initial discharge  $Q_0$ , and the larger the waves, the larger the initial discharge  $Q_0$ . Peak discharge  $Q_m$  appears at the beginning of the dam failure,  $Q_m$  forms earlier when the waves are larger.

**Key words:** waves overtopping; glacial lake; GLOF; laboratory experiment