

文章编号:1009-3087(2016)04-0038-07

DOI:10.15961/j.jsuese.2016.04.006

## 堰塞坝溃口下切过程试验研究

蒋先刚<sup>1,2</sup>, 崔鹏<sup>1\*</sup>, 王兆印<sup>3</sup>, 衡武浩<sup>4</sup>

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041;

2. 四川农业大学 土木工程学院, 四川 成都 610000; 3. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084;

4. 中建钢构有限责任公司, 广东 深圳 518040)

**摘要:**针对堰塞坝溃口下切过程和不同因素对过程影响的问题,开展室内水槽试验。结果表明:溃口下切过程分3个阶段:Ⅰ为溃口缓慢发展阶段,即水流缓慢溢出溃口阶段,侵蚀速率较小,泥沙输移主要以悬移质运动为主,溃口下切缓慢;Ⅱ为溃口迅速发展阶段,表现为溯源侵蚀强烈,溃口底部变化迅速,推移质运动占主导地位;Ⅲ为稳定河床形成阶段,水流速度和流深减小,水流携沙力减弱,河床形成粗化层,最终达到新的水沙平衡。溃口流量与侵蚀的关系表现为:来水流量的加大增加了相应时刻的溃决流量,增大了侵蚀率,缩短了溃决时间,溃口底部趋于平滑;来水流量的加大提高侵蚀率曲线斜率,使侵蚀率曲线向瘦高型发展;随背水坡坡度的增加,溃决流量增大,侵蚀率增加,坝体残留高度降低。另外,因背水坡坡度增加导致坡面土颗粒稳定性的降低可采用水槽坡度与背水坡坡度之和正切值的3次方这一因子反映。考虑堰塞坝材料性质差异性的溃决过程是下一步研究的重点。

**关键词:**溃口发展;下切侵蚀;溯源侵蚀;溃坝流量

中图分类号:TD235.1

文献标志码:A

### Experiments Investigation on Longitudinal Breaching of Natural Dam

JIANG Xiangang<sup>1,2</sup>, CUI Peng<sup>1\*</sup>, WANG Zhaoyin<sup>3</sup>, HENG Wuhao<sup>4</sup>

(1. Key Lab. of Mountain Hazards and Earth Surface Progress, Inst. of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China;

2. College of Civil Eng., Sichuan Agricultural Univ., Chengdu 610000, China;

3. State Key Lab. of Hydrosience and Eng., Tsinghua Univ., Beijing 100084, China; 4. China Construction Steel Structure Co., Shenzhen 518040, China)

**Abstract:** In order to obtain the progress of longitudinal erosion and effects of different factors, 6 flume tests were conducted. The results indicated that the longitudinal erosion process included 3 stages. At stage I, the outflow was slow, and the suspended load was transports to downstream mainly during the process. At stage II, the depth of the breach changed rapidly. The bed load was transports fiercely due to backward erosion. At stage III, the velocity and rate of outflow decreases, armor layer is formed which protects the sediment under the armor layer from eroding. At last, dynamic equilibrium was achieved between the water phase and sediment phase. With inflow rate increasing, the breach time decreases and outflow discharge increased, leading to greater stream power and higher erosion rate. And the bottom of the breach become smoothly due to large inflow rate. The slope of the erosive characteristics curve become larger with the outflow discharge increasing. The shape of erosive curve changed from multi-peak curve to mono-peak curve with downstream slope increasing. The steep slope of downstream also increased the outflow discharge and erosion rate, and decreased the residual height of the dam. The factor  $J_3$  which was equal to the third power of tangent values of the bed slope and downstream slope's summation, could reflect the stability of soil particles in different downstream slopes.

**Key words:** breach; longitudinal erosion; headward erosion; discharge

堰塞坝是一定量的固体物质堵塞河道或沟道形 成具有一定蓄水能力的天然坝体<sup>[1]</sup>。随着坝前水

收稿日期:2015-12-14

基金项目:中国科学院重点部署项目资助(KZZD-EW-05-01);国家自然科学基金重大项目资助(41190084);国家自然科学基金国际合作重点项目资助(41520104002)

作者简介:蒋先刚(1987—),男,博士。研究方向:滑坡、泥石流、堰塞湖等灾害的研究和治理。

\*通信联系人 E-mail: pengcui@imde.ac.cn

网络出版时间:2016-7-11 12:46:23 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/51.1596.T.20160711.1246.004.html>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

位的升高,坝体极易溃决。据统计,41%的堰塞坝只维持了一周或更少时间,1年之内溃决的堰塞坝占80%左右<sup>[2-3]</sup>。堰塞湖溃决后,对下游的城镇、村庄、道路和水利水电基础设施产生灾难性影响,造成惨重人员伤亡和财产损失<sup>[4]</sup>。Morris<sup>[5]</sup>指出对溃决过程的研究有利于提前预测溃决洪水所造成的危害,降低损失。

堰塞坝溃口下切过程是溃决过程的主要研究内容之一。对堰塞坝溃口发展过程的研究主要采用室内试验的方法,通过在水槽内堆砌堰塞体,并设定不同条件,研究溃决过程中的主要特征。前人虽然对溃决过程进行试验研究,但重点主要集中在溃决洪水水文过程和溃口宽度变化规律,缺少溃口下切过程,尤其是不同影响因素下的溃口下切规律的研究。如Coleman等<sup>[6]</sup>对不同材料和来水流量条件下的坝体溃决规律进行试验研究,探讨溃决过程中溃口宽度与深度间的关系,并基于此建立溃决流量的计算公式,但试验中的坝体条件单一,忽略了坝体迎、背水坡坡度的变化,不能了解坝体坡度改变对溃口发展的影响;Höeg等<sup>[7]</sup>和Morris<sup>[8]</sup>以IMPACT项目为依托,进行大量的现场和室内试验,分析不同材料条件下,溃决流量的变化规律和溃口展宽横向扩展规律,但缺少对溃口下切演化纵向发展规律的研究;牛志攀等<sup>[9]</sup>采用群桩定位法测定漫顶溢流条件下溃决时堰塞体形态的变化特征,该方法能够记录下不同时刻溃口深度值,但群桩的加入影响了原始溃口的发展规律;张婧等<sup>[10]</sup>通过试验分析了溃决过程中

溃口底部的变化规律,但忽略了不同因素的影响;Cao等<sup>[11]</sup>进行了室内水槽试验,重点研究了堰塞坝下切和展宽过程中溃决洪水的变化特征,但缺少对溃口下切规律的研究;杨阳<sup>[12]</sup>、张大伟<sup>[13]</sup>等虽对堰塞坝溃口下切过程进行研究,并划分了不同阶段,但缺少对下切过程影响因素的分析。侵蚀是造成溃口发展的主要原因,其作用的强弱与水流流量、材料性质、坡降条件有直接关系<sup>[14-15]</sup>。针对不同材料、恒定水流、固定坡降条件下的侵蚀率已进行了大量的试验研究<sup>[15-19]</sup>,但非恒定水流作用下堰塞坝溃口的侵蚀研究较少<sup>[20]</sup>。通过分析溃决过程中不同时刻的溃决流量及其对应的侵蚀率,对非恒定条件下侵蚀规律的认识有重要意义。来水流量和坝体坡度作为溃决过程主要影响因素,直接影响溃决流量<sup>[21]</sup>,继而影响侵蚀率的变化及整个下切进程。

通过开展不同来水流量、不同坝体形状条件下的堰塞坝溃决试验,归纳提出溃口下切过程的主要阶段,分析各阶段的主要特征,研究不同来水流量和坝体形状对侵蚀规律的影响。

## 1 试验设置

### 1.1 试验仪器

试验水槽长15 m,宽0.3 m,高0.4 m,可调坡度为0~20°。水槽两侧为有刻度的钢化玻璃,便于试验过程中对不同时刻的溃口底部进行记录,试验装置如图1所示。

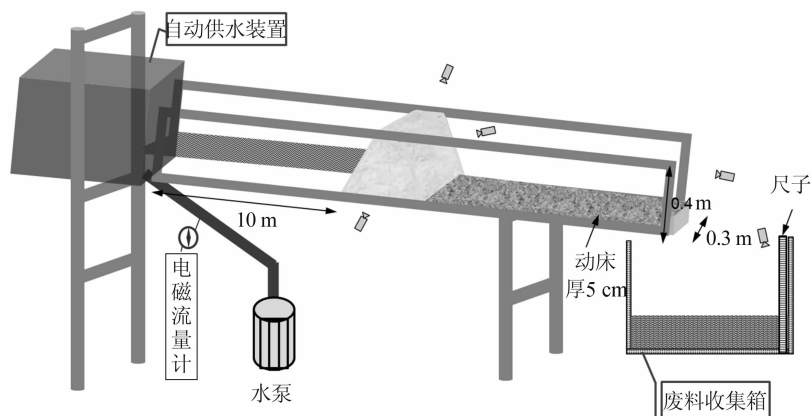


图1 试验装置布置图

Fig.1 Experimental setup

堰塞坝设置在距水槽前端10 m处。堰塞坝下游铺设与坝体相同材料的动床,动床厚5 cm,水槽末端设置与动床平齐的挡板。堰塞坝顶、堰塞坝侧面、堰塞坝前、水槽末端和废料收集箱上方架设摄像机,记录整个过程的变化情况。试验过程中,通过电磁流量计控制上游来水条件。

### 1.2 试验材料

试验采用材料的颗粒级配如图2所示。颗粒中值粒径 $D_{50}$ 为4.8 mm,不均匀系数为12.0。对于小于5 mm的颗粒采用比重瓶法测得比重,大于5 mm者采用浮称法测量比重,根据各自所占百分比获得材料的平均比重为2.704。材料含水率和密度分别

为 7.82% 和  $1.72 \text{ g/cm}^3$ 。

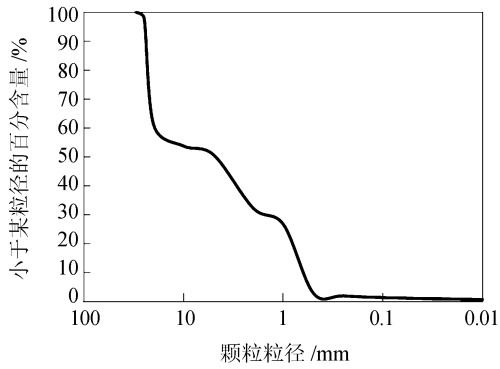


图2 试验所用材料颗粒级配曲线

Fig.2 Gradation curve of dam materials

### 1.3 试验条件

试验设定水槽坡度为  $1^\circ$ , 堰塞坝高度、坝顶长度和宽度均为 30 cm。在坝体一侧预设初始溃口, 形状为三角形, 高度和宽度均为 4 cm。试验采用 4 种来水流量, 3 种不同的坝型(根据迎水坡和背水坡

角度划分), 表 1 为具体设计参数。

表 1 试验组次和参数

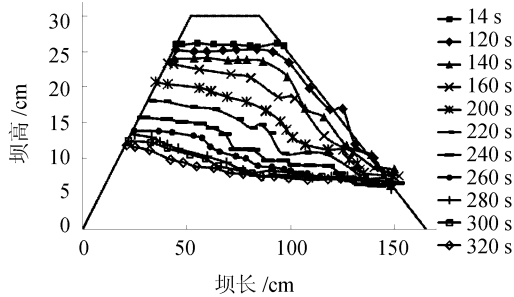
Tab.1 Summary of experimental conditions

| 试验组次 | 坝型  | 迎水坡坡度 $\alpha/(\circ)$ | 背水坡坡度 $\beta/(\circ)$ | 坝高 $H/\text{cm}$ | 坝顶宽 $W/\text{cm}$ | 来水流量 $(\text{L} \cdot \text{s}^{-1})$ |
|------|-----|------------------------|-----------------------|------------------|-------------------|---------------------------------------|
| F-1  | I   | 20                     | 15                    | 30               | 30                | 1                                     |
| F-2  | II  | 30                     | 20                    | 30               | 30                | 1                                     |
| F-3  |     |                        |                       |                  |                   | 2                                     |
| F-4  |     |                        |                       |                  |                   | 3                                     |
| F-5  |     |                        |                       |                  |                   | 4                                     |
| F-6  | III | 35                     | 30                    | 30               | 30                | 1                                     |

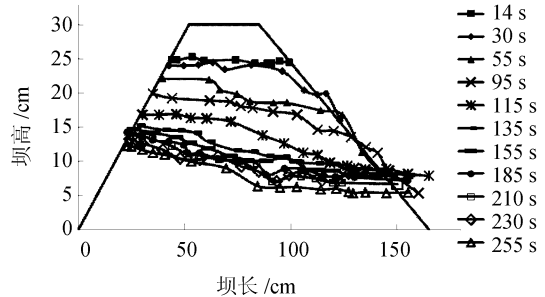
## 2 堰塞坝溃口下切过程

### 2.1 下切过程

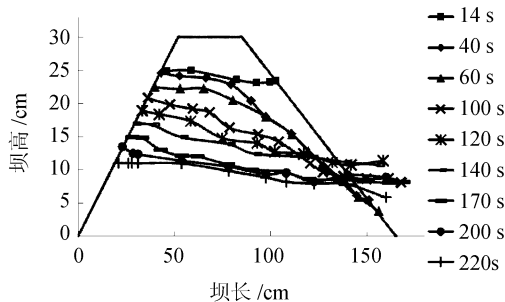
图 3(a) 为坝体纵剖面变化。通过分析可获得不同阶段的溃决特征。选取 F-2 组的试验结果作为代表进行分析, 可把整个溃决过程分为以下 3 个阶段。



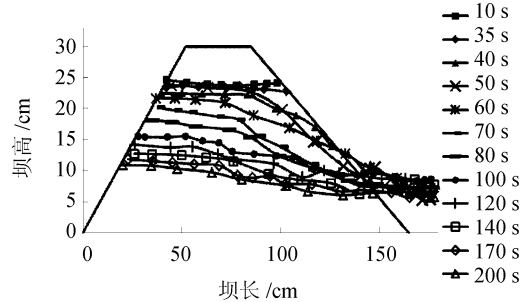
(a) 来水流量 1 L/s, 坝型 II



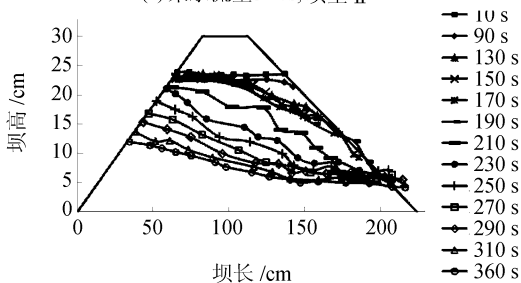
(b) 来水流量 2 L/s, 坝型 II



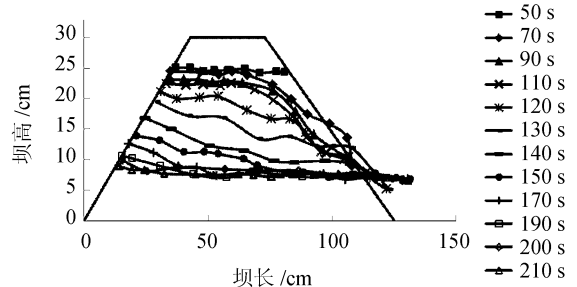
(c) 来水流量 3 L/s, 坝型 II



(d) 来水流量 4 L/s, 坝型 II



(e) 来水流量 1 L/s, 坝型 I



(f) 来水流量 1 L/s, 坝型 III

图3 坝体溃决过程

Fig.3 Temporal breach development of the dams at different times showing characteristic breach phases

阶段 I:溃口缓慢发展阶段(0~140 s)。水流初始过流后,开始侵蚀溃口底部,携带输移少量泥沙。由于过流量少、流深浅、流速慢,水流挟沙能力较弱,只有粒径较小泥沙能够被携带走,溃口处的泥沙主要以悬移质运动为主。当水流运动到背水面,由于变陡,水流的势能转化为动能,侵蚀能力增强,部分粒径较大的泥沙也被携带向下游输移,在背水坡形成较小冲沟。但由于水流流量较小,其携沙能力有限,较大颗粒在背水坡下方堆积,形成明显的坡折点。在上游不断来流的作用下,侵蚀较为发展的背水坡接近溃口的位置,形成坡度较大的饱水突出部位,产生间歇性小规模坍塌,促进溃口的发展,并为进一步溯源侵蚀的加剧创造了微地形条件。该阶段溃口形状近似于矩形,这与 Rozov 观测结果一致。

阶段 II:溃口迅速发展阶段(140~280 s)。随着溃口和背水坡物质的输移,坡折点处堆积的物质逐步累积并向上游推进,当堆积物质达到一定规模时,产生坍塌滑移,使得背水坡坡度变陡,流速增加,水流携沙能力增强并将坡面物质快速向下输移,从而在背水坡形成明显的“喇叭形”泄流槽,后续水流不断下切泄流槽使其进一步发展。由于侵蚀作用和携沙力的局部增强,背水坡的水流流线出现坡折点,坡折点下部坡度明显增加,导致坡折点下方流速和侵蚀能力进一步增强,坡折点不断向上游推移,造成溃口底部加深,最终达到迎水坡坡面,形成一个完整的溯源侵蚀过程。由图 3 可知,该阶段是溃口底部下切最为迅速的阶段。

阶段 III:稳定河床形成阶段(280~320 s)。坝前水位快速下降后,溃口流量逐渐减小,水深变浅,落差变小,水流携沙能力逐渐变弱,部分粗颗粒在背水坡脚处沉积下来,进一步减小了溃口坡降。随着流量和坡降的进一步减小,水流无法携带粗大颗粒,粗颗粒滞留在泄流槽沟床,形成粗化层,保护了下游颗粒物质不被冲刷。此时,溃口底部与河道坡度相当,下游背水坡坡折点消亡,坡度与溃口接近,并与下游河床平滑相接,水沙运动达到新的平衡,溃口下切过程结束。

## 2.2 溃口下切过程的影响因素

### 2.2.1 上游来流的影响

不同的上游来水流量对溃口下切过程的影响如图 3(a)~(d)所示(迎、背水坡坡度分别为  $30^\circ$  和  $20^\circ$ )。可知上游来水流量的不同并未改变溃口下切的主要特征:下切过程仍主要为上述 3 个阶段,且均以溯源侵蚀为主。溯源侵蚀主要在材料粒径小于 2

cm 时出现;当材料粒径大于 6 cm 时,以颗粒互锁机制产生的连锁反应为主<sup>[22]</sup>,溯源侵蚀受到制约。当流量较小时(1、2 和 3 L/s),溃口和泄流槽底部出现不同的波动;流量较大时(4 L/s),溃口和泄流槽底部波动现象不明显,尤其是在溃口下切速率较快的时刻,溃口和泄流槽底部呈平滑状。此外,4 种流量条件下的坝体残留高度与来水流量呈负相关,说明随着来水流量的增加,总的侵蚀搬运能力增加,导致同样材料坝体的总侵蚀量增加,坝体残留高度降低。

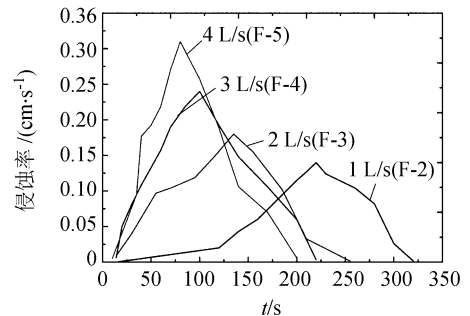
### 2.2.2 坝体形状的影响

不同坝体形状对溃决过程的影响如图 3(a)、(e)、(f)所示。坝体背水坡坡度影响到背水坡水流速度,导致侵蚀速率的差异,继而影响到整个下切过程。就试验中的 3 个坝型而言,坝型 I、II、III 的下切速率依次增大,但坝体溃决特征基本相同。对于溃决结束后的残留坝高,坝型 I 最大,坝型 II 次之,坝型 III 最小,说明随着背水坡坡度的增加,水动力强度增大,总侵蚀量加大,残留坝高降低。

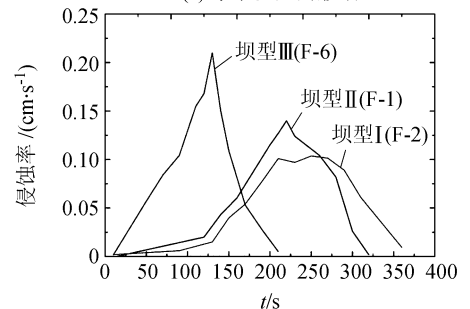
## 3 溃口下切速率分析

### 3.1 溃口下切速率影响因素

以坝顶中轴线为基准,监测该位置的高程变化,计算溃决过程中的侵蚀率,并绘制侵蚀率曲线,其中坝体迎、背水坡度均为  $30^\circ$  和  $20^\circ$ (图 4)。



(a) 来水流量的影响



(b) 坝型的影响

图 4 侵蚀率随时间变化关系曲线

Fig. 4 Erosion graphs

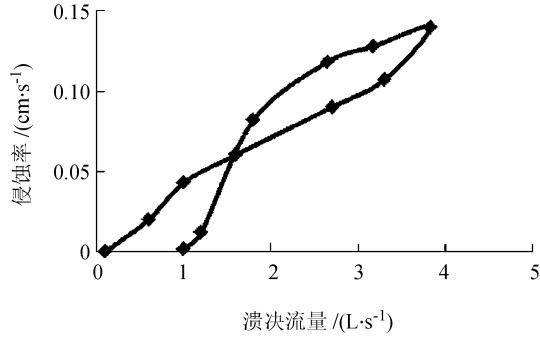
图4表明不同条件下的侵蚀率过程曲线呈现先增加后减小的趋势。对比不同来流条件下的侵蚀率变化发现,流量较小时,曲线为“矮胖型”,侵蚀率的峰值低,到达晚;流量较大时,曲线呈“高瘦型”,侵蚀率的峰值高,到达早(F-4和F-5)。这说明来水流量的加大增长了侵蚀率,缩短溃决时间,使得溃决风险大幅度增加。

对比不同坝型的侵蚀率曲线可以发现,坡度较陡时,侵蚀率增加快,最大值出现时间早,侵蚀速率曲线呈现“尖瘦型”(F-6);反之,坡度较缓时的侵

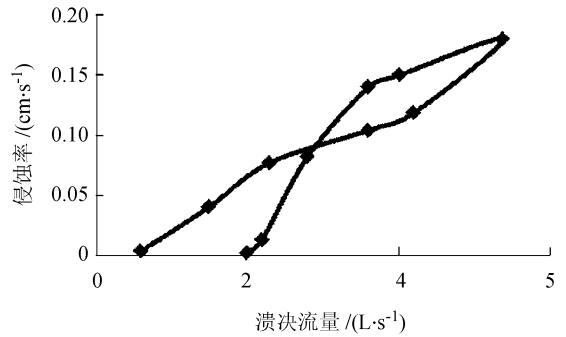
蚀速率曲线呈“矮胖型”(F-1和F-2)。此外,堰塞坝背水坡较缓时,侵蚀率曲线具有多峰的特点。在侵蚀率最大值出现后的一段时间内,侵蚀率恒定不变,持续一段时间后快速下降(F-2);当坡度较大时,侵蚀率曲线为单峰型。随着坡度的增加,侵蚀率曲线由多峰向单峰曲线转变。

### 3.2 溃决流量对溃口下切速率的影响

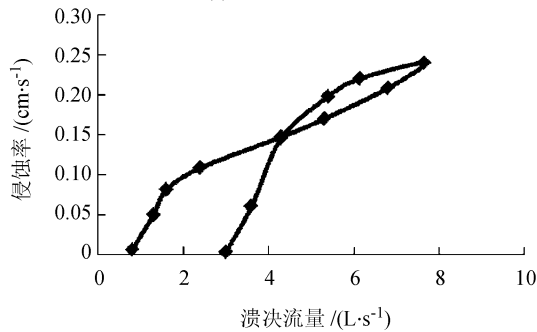
分析溃决过程可知,侵蚀率的大小与溃决流量互为消涨,试验数据表明了二者之间的正相关关系,曲线呈逆时针“绳套”型(图5),形成“涨水—退水”循环。



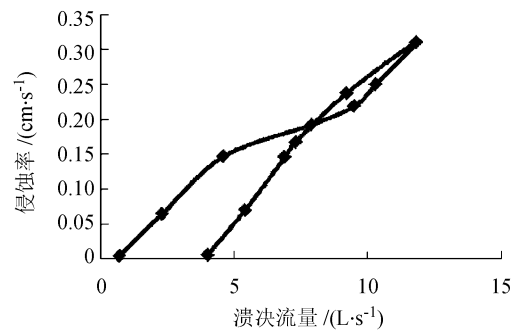
(a) 来水流量1 L/s, 坝型 II



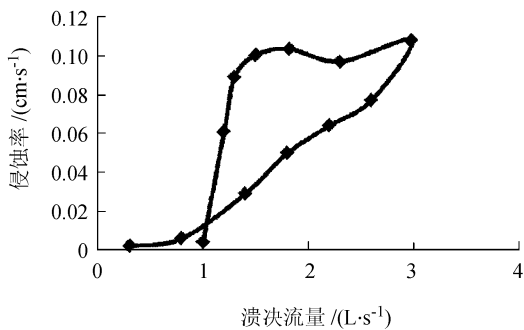
(b) 来水流量2 L/s, 坝型 II



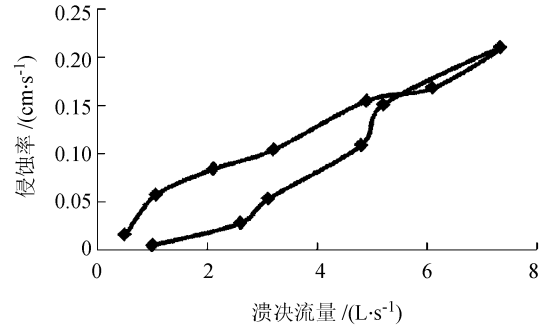
(c) 来水流量3 L/s, 坝型 II



(d) 来水流量4 L/s, 坝型 II



(e) 来水流量1 L/s, 坝型 I



(f) 来水流量1 L/s, 坝型 III

图5 侵蚀率与溃决流量之间的关系

Fig. 5 Relationships between erosion rate and outburst discharge

图5表明,涨水阶段,溃决流量较小时,曲线斜率较小;随着溃决流量的增大,曲线斜率增加,表明随溃决流量的增大侵蚀率变化率逐渐提高。退水阶段,在流量较大时,侵蚀率变化幅度较小,随出流量的继续减小,曲线斜率增大,表明侵蚀率降低迅速。

此外,来水流量减小或背水坡坡度降低,均导致曲线交点向溃决流量较小值方向发展,交点对应的侵蚀率也减小。虽然上游来水流量和坝体坡度是2个不同的影响因素,但从结果来看,来水流量和坡度增加后均增加了溃决流量和侵蚀率。

在认识了上述单一因素对侵蚀率的影响后,还需要分析多因素综合作用对侵蚀率的影响。在河道冲刷计算中,常将单宽流量与底床坡度的乘积作为衡量水流携沙能力的指标。虽然来水流量与背水坡坡度增加均能引起平均侵蚀率的增大,但深入来看,来水流量增大后,仅影响水流自身的冲刷能力;而背水坡坡度增加后,不仅增加了水流的携带能力,而且降低坡面土颗粒的稳定性,间接增强了水流的侵蚀能力,加大了侵蚀率。王兆印<sup>[15]</sup>认为水流侵蚀条件下,坡降的增大可用坡降的幂函数因子来反映,令

$$w = qJ \cdot J^3 \quad (1)$$

式中:  $q$  为单宽来水流量,  $L/s$ ;  $J$  为背水坡和水槽坡度之和的正切值。

$w$  既反映了来水流量和背水坡坡度增大对水流冲刷能力的影响,同时也反映了坡降增大后对土颗粒自身稳定性的影响。图6为平均侵蚀率与  $w$  间的关系。可以看出,平均侵蚀率随  $w$  的增大而增大,且两者符合较好的线性关系,说明在其他条件不变时,综合考虑水流自身冲刷能力和颗粒稳定性的影响后,平均侵蚀率变化规律趋于一致。

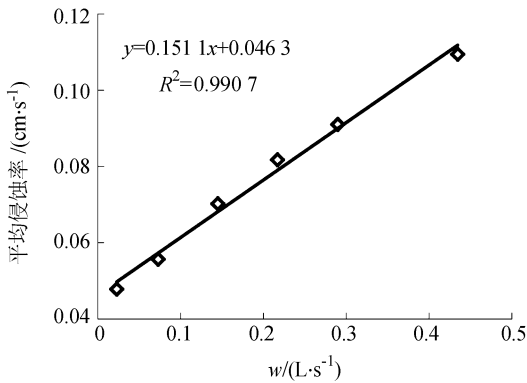


图6 平均侵蚀率与  $w$  的关系

Fig. 6 Relationship between erosion rate and  $w$

## 4 结论

通过堰塞坝漫顶冲刷试验,分析了堰塞湖溃决下切过程及其影响因素,把堰塞坝溃口下切过程分为溃口缓慢发展阶段(阶段 I)、溃口迅速发展阶段(阶段 II)和稳定河床形成阶段(阶段 III)。从开始阶段的缓慢侵蚀引起背水坡的局部坍塌,坍塌发展到溃口形成强烈的溯源侵蚀,最后随着库水量的减少,侵蚀能力降低,导致床面粗化层的形成,完成一个完整的溃决过程。来水流量和背水坡坡度均影响溃口下切,较大的来流和较陡的背水坡坡度,均会增加侵蚀速率,使得侵蚀率峰值较大,峰值出现较早,退却较快,曲线为“高瘦型”;反之,曲线呈“矮胖

型”。此外,来水流量增大不仅会提高溃口下切速率,而且能增大总侵蚀量,降低坝体残留高度。侵蚀率与溃决流量变化具有时间上的一致性,两者呈正相关。上游来水流量的增大,加大了相应时刻的冲刷能力,促使溃决流量增加,且侵蚀绝对值相比来水流量较小条件时要大。随来水流量的加大,侵蚀率曲线的斜率增加,导致曲线从“矮胖型”向“瘦高型”发展。背水坡坡度的增加,在增大侵蚀率的同时,引起侵蚀率曲线形态由多峰向单峰转变。

堰塞坝溃决过程的平均侵蚀率受水流冲刷能力和土颗粒稳定性综合影响。来水流量的增大仅能增大水流冲刷能力,而背水坡坡度的增大不仅增强了水流冲刷能力,且降低土颗粒的稳定性,引起平均侵蚀率增加。单宽流量和坡降之积与坡降3次方的乘积能够较好地反映背水坡坡度对土体稳定性降低和水流侵蚀能力增加对侵蚀率贡献的综合作用。

堰塞坝下切过程较复杂,水流的非恒定性是造成过程复杂的重要原因,同时坝体材料性质的差异对溃决过程也有影响。细颗粒含量较多或较少时,产生不同的溃决机理,必定影响溃口下切过程。本文考虑了来水流量和坝体坡度对溃决过程的影响,而坝体材料如何影响下切过程、材料与侵蚀率间的关系等仍需进一步研究。

## 参考文献:

- [1] Casagli N, Ermini L, Rosati G. Determining grain size distribution of the material composing landslide dams in the Northern Apennines: Sampling and processing methods [J]. *Engineering Geology*, 2003, 69(1): 83-97.
- [2] Chai Hejun, Liu Hanchao, Zhang Zhuoyuan, et al. Preliminary stability analysis of natural rock field dam resulting from damming landslide [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2001, 20(1): 77-81. [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, 20(1): 77-81.]
- [3] Ermini L, Casagli N. Prediction of the behaviour of landslide dams using a geomorphological dimensionless index [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003, 28(1): 31-47.
- [4] Cui P, Zhu Y Y, Han Y S, et al. The 12 May Wenchuan earthquake-induced landslide lakes: Distribution and preliminary risk evaluation [J]. *Landslides*, 2009, 6(3): 209-

- 223.
- [5] Morris M W. Concerted action on dambreak modelling—CADAM[R]. England:HR Wallingford Ltd,2000.
- [6] Coleman S E, Jack R C, Melville B W. Overtopping breaching of noncohesive embankment dams [C]//Energy and Waters Sustainable Development. Minneapolis:ASCE,1997:42-47.
- [7] Höeg K, Lövoll A, Vaskinn K A. Stability and breaching of embankment dams:Field tests on 6 m high dams[J]. International Journal on Hydropower & Dams,2004,11(1):88-92.
- [8] Morris M W. Breach formation: Field test and laboratory experiments[J]. Journal of Hydraulic Research,2007,45(1):9-17.
- [9] Niu Zhipan, Xu Weilin, Zhang Jianmin, et al. Experimental investigation of scour and dam break of landslide dam[J]. Journal of Sichuan University:Engineering Science Edition,2009,41(3):90-95. [牛志攀,许唯临,张建民,等.堰塞湖冲刷及溃决试验研究[J].四川大学学报:工程科学版,2009,41(3):90-95.]
- [10] Zhang Jing, Cao Shuyou, Yang Fengguang, et al. Experimental study on outlet and scour of blocked dam[J]. Journal of Sichuan University :Engineering Science edition,2010,42(5):191-196. [张婧,曹叔尤,杨奉广,等.堰塞坝泄流冲刷试验研究[J].四川大学学报:工程科学版,2010,42(5):191-196.]
- [11] Cao Z, Yue Z, Pender G. Landslide dam failure and flood hydraulics. Part I: Experimental investigation [J]. Natural Hazards,2011,59(2):1003-1019.
- [12] Yang Yang, Cao Shuyou. Experimental study on breach growth mechanisms of natural barrier dams [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2012,43(S2):60-67. [杨阳,曹叔尤.堰塞坝溃决机理试验研究[J].水利学报,2012,43(增刊2):60-67.]
- [13] Zhang Dawei, Quan Jin, He Xiaoyan, et al. Experimental and numerical investigation on overtopping breaching of barrier dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2012,43(8):979-986. [张大伟,权锦,何晓燕,等.堰塞坝漫顶溃决试验及相关数学模型研究[J].水利学报,2012,43(8):979-986.]
- [14] Fu Xudong, Liu Fan, Ma Hongbo, et al. Physically based simulation of the breaching of the Tangjiashan Quake Lake [J]. Journal of Tsinghua University:Science and Technology Edition,2010,50(12):1910-1914. [傅旭东,刘帆,马宏博,等.基于物理模型的唐家山堰塞湖溃决过程模拟[J].清华大学学报:自然科学版,2010,50(12):1910-1914.]
- [15] Wang Zhaoyin, Huang Jinchi, Su Dehui. River channel scour and scour rate of clear water flow[J]. Journal of Sediment Research,1998(1):1-11. [王兆印,黄金池,苏德惠.河道冲刷和清水水流河床冲刷率[J].泥沙研究,1998(1):1-11.]
- [16] Osman A M, Thorne C R. Riverbank stability analysis. I: Theory [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1988,114(2):134-150.
- [17] Briaud J L, Ting F C K, Chen H C, et al. Erosion function apparatus for scour rate predictions[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2001,127(2):105-113.
- [18] Zhang K, Li S, Peng W, et al. Erodibility of agricultural soils on the Loess Plateau of China[J]. Soil and Tillage Research,2004,76(2):157-165.
- [19] Ali M, Seeger M, Sterk G, et al. A unit stream power based sediment transport function for overland flow [J]. Catena,2013,101(3):197-204.
- [20] Pickert G, Weitbrecht V, Bieberstein A. Breaching of overtopped river embankments controlled by apparent cohesion [J]. Journal of Hydraulic Research,2011,49(2):143-156.
- [21] Macdonald T C, Langridge-Monopolis J. Breaching characteristics of dam failures[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1984,110(5):567-586.
- [22] Morris M, Hanson G, Hassan M. Improving the accuracy of breach modelling: Why are we not progressing faster? [J]. Journal of Flood Risk Management,2008,1(3):150-161.