

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2010.05.001

堰塞坝溃坝洪水影响因素试验

罗利环,黄 尔,吕文翠,张 婧

(四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室,四川 成都 610065)

摘要 :针对影响堰塞坝溃坝洪水的主要因素制定室内水槽试验方案,分析入库流量、坝体物质组成、坝后坡度、坝顶长度及开槽宽度等 5 种因素对堰塞坝溃坝洪水的影响,采用水位计量测坝前库水位,根据水库水量动态平衡方程计算溃口下泄流量,通过对各种影响因素不同工况下的溃口流量过程线进行比较分析,得出规律如下:堰塞坝的入库流量和坝后坡度与最大洪峰流量正相关,与峰现时间反相关;坝体粗沙含量及坝顶长度与最大洪峰流量反相关,与峰现时间正相关;坝顶开槽宽度与最大洪峰流量及峰现时间反相关。

关键词 :堰塞坝;溃坝洪水;流量过程线;洪峰流量;峰现时间

中图分类号 :TV122⁺.4 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2010)05-0001-04

Experimental study on influence factors for dam-break flood of barrier dams//LUO Li-huan, HUANG Er, LÜ Wen-cui, ZHANG Jing(*State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China*)

Abstract :Schemes for the laboratory flume tests were prepared for the main influence factors for dam-break flood of barrier dams. The influences of 5 kinds of factors on the dam-break flood were analyzed, that is, incident discharge of reservoir, composition of dam materials, downstream slope of dam, length of dam crest and width of excavated channel. The water levels of the dam before dam-break were measured by use of water gauges, and the flow discharges through the breach were calculated by the dynamic balance equation for reservoir water. The hydrographs of flow discharges through the breach under working conditions of various factors were compared and analyzed. A conclusion is drawn as follows: the incident discharge and the downstream slope of barrier dam are positively related to the maximum peak discharge and are negatively to the peak time; the amount of coarse sand and the length of dam crest are negatively related to the maximum peak discharge and positively to the peak time; the width of excavated channel is negatively related to both the maximum peak discharge and the peak time.

Key words : barrier dam; dam-break flood; flow hydrograph; peak discharge; peak time

堰塞湖是由于地震活动、火山熔岩流、冰碛物等原因引起山体崩塌、滑坡堵截山谷或河谷后储水而形成的湖泊。历史上,四川 1786 年康定大地震、1933 年叠溪大地震形成的堰塞湖都发生了溃决洪水,溃坝惨剧造成的死亡人数数倍于地震直接死亡人数^[1-3]。四川“5.12”汶川大地震形成的 34 处主要堰塞湖,超过 50% 处于中危以上^[4]。由地震产生的堰塞湖问题时刻威胁着下游人民的安危,据统计资料^[5]显示,堰塞湖形成后,10 d 内溃决者超过 50%,2 个月内溃决者超过 60%,1 年内溃决者超过 90%。

“5.12”汶川大地震发生之后,许多学者纷纷利用各种模型进行以唐家山为代表的四川堰塞湖溃坝

洪水分析,其中主要有长江科学院朱勇辉等^[6]进行的唐家山堰塞湖溃坝洪水分析和泄流冲刷模拟。黄明海等^[7]、张细兵等^[8]以及其他学者都对唐家山堰塞湖的洪水演进问题进行了研究。

前人提出的方法使溃坝洪水的研究有了很大的进步。但由于溃坝洪水特性和堰塞湖的边界条件变化迅速,溃坝洪水的各种影响因素尚未认识清楚,针对此情况,笔者采用水位计测量坝前库区水位,对整个坝体形状及水流的变化进行全方位摄影,并进行各个影响因素的对比试验,总结了不同因素对溃坝洪水的影响规律,为进一步的科学研究提供基础资料,为工程实践提供参考。

基金项目 :国家重点基础研究发展规划“973”项目(2008CB425803)

作者简介 :罗利环(1984—),女(壮族),广西南宁人,硕士研究生,从事水力学及河流动力学研究。E-mail :luolihuan699@163.com

通讯作者 :黄尔(1972—),男,四川营山人,副教授,博士,从事水力学及河流动力学研究。E-mail :huang_er@tom.com

1 试验方法简介

1.1 设备及参数

试验水槽为玻璃水槽,长 20 m、宽 0.5 m、高 0.5 m,底坡为 0.3%,采用自循环水泵供水,可通过阀门调节供水量。堰塞体采用非均匀无黏性沙直接堆放在水槽指定位置。为便于观测,在水槽一侧对堰塞坝开槽,下游为单侧斜坡定床床面。

本试验是以唐家山堰塞坝为原型的概化模型试验。模型保持与原型几何相似和重力相似,最终确定几何比尺为 1:400。由相似准则计算得到模型与原型之间物理量相似比尺:流速比尺 1:20,时间比尺 1:20,流量比尺 1:3 200 000,粒径比尺 1:400。模拟堰塞坝的高度为 30 cm,坝顶开槽深度为 10 cm,开槽宽度分别取 12.5 cm、15 cm 和 20 cm 共 3 种工况;坝顶长度是沿水流方向堰塞坝顶的长度,分别取 10 cm、20 cm 和 25 cm 共 3 种工况;上游入库流量分别取 1.2 L/s、0.8 L/s 和 0.6 L/s 共 3 种工况,其中 1.2 L/s 按原型汛期约 20 年一遇洪水流量 3 920 m³/s 考虑;泄流槽一侧边坡为水槽边壁,另一侧为 1:1 边坡,坝前坡度为 1:1,坝后坡度拟定 1:2、1:2.5、1:3 和 1:4 共 4 种工况;按起动流速相似原理选取坝体颗粒组成为定级配 1 cm 以下泥沙,中值粒径 $d_{50} = 1.45$ mm,拣选系数 $\varphi = 2.2$ 。通过添加 1~2 cm 粗沙调整,粗沙质量分数分别确定为 0、10%、20%、30% 共 4 种工况。

1.2 测量方法

水位计采用南京水利科学研究院制作的 WYG-II 型水位测量仪观测水位。将水位测量仪的探头置于坝上游库区中距坝址 3.1 m 处,每秒自动采集 5 次水位,分别在堰塞坝的正、侧面用 2 台数码摄像机对试验过程进行摄像,观察堰塞坝溃决全过程。

2 溃坝洪水水力计算

堰塞坝溃口流量根据水位计测得的堰塞湖动态水位计算库容变化,再采用水库水量动态平衡方程计算溃口下泄流量。

堰塞湖库容估算公式为

$$V = \int_0^h A_s(h) dh$$

水库水量动态平衡方程为

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in} - Q_c - Q_s$$

式中: V 为库容; $A_s(h)$ 为堰塞湖水面面积; dV 为单位时间步长内库容的变化; dt 为时间步长; Q_{in} 为入库流量; Q_c 为通过坝体和坝基渗漏的流量; Q_s 为通过泄流渠下泄的流量。

3 试验结果

3.1 上游入库流量与溃坝洪水的关系

在库容、坝后坡度、坝顶长度、开槽宽度、坝体含粗沙量及压实度等相同,上游入库流量不同的情况下进行试验。图 1 为试验得到的 3 组不同入库流量下的下泄流量过程线。

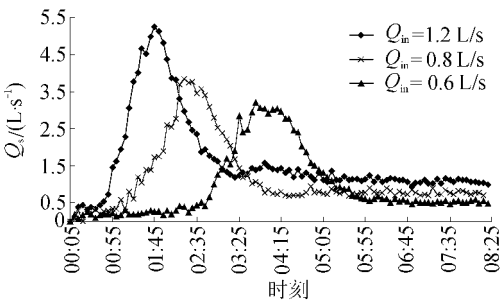


图 1 不同入库流量下的下泄流量过程线

从图 1 可知, $Q_{in} = 1.2$ L/s 的坝体溃决速度快,溃坝洪峰流量值较大,洪水最大值发生时间(峰现时间)较早。当入库流量减少 $Q_{in}/3$ 和 $Q_{in}/2$ 时,坝体溃决速度变慢,溃坝洪峰流量减小且减少量约占峰值流量的 20% 和 40%,峰现时间推迟约 35 s 和 120 s,推迟时长约为 $0.33T$ 和 $1.2T$ (T 为 $Q_{in} = 1.2$ L/s 时的峰现时间),入库流量与溃坝洪峰流量正相关,与峰现时间反相关。

堰塞坝溃决所形成的溃决洪水最大流量往往是入库流量的数百、数千倍,构成溃决洪水的决定性因素不是上游来流量,而与上游库区水的势能有密切的关系^[9-10]。在非汛期,上游来流量与溃决洪峰流量相比很小,是溃决洪峰流量的数百分之一、数千分之一。为安全计,本文上游来流量按汛期洪水考虑,最大一级流量接近 20 年一遇设计洪水。根据分析可能是入库流量通过影响溃决过程的速度来影响洪峰流量的大小。上游来流量大会提高溃决初期溃口发生的速度,进而使溃决过程加快,峰现时间提前,溃决洪峰流量较大。在其他条件相同的情况下,减小入库流量使得溃口纵向下切和横向展宽速度变慢,其峰现时间有所推后,溃决洪峰流量变小。

3.2 堰塞坝坝体物质组成与溃坝洪水的关系

在库容、入库流量、坝顶长度、开槽宽度、坝体压实度、坝后坡度等相同但坝体粗沙含量不同的情况下进行试验。图 2 为试验得到的 4 组不同粗沙含量下的溃口流量过程线。

从图 2 可知,在其他条件相同的情况下,与无粗沙含量相比,坝体粗沙质量分数增加 10%、20% 和 30% 时,其峰现时间推迟约 40 s、80 s 和 140 s,推迟时长约占无粗沙含量峰现时间的 28%、55% 和 96%。

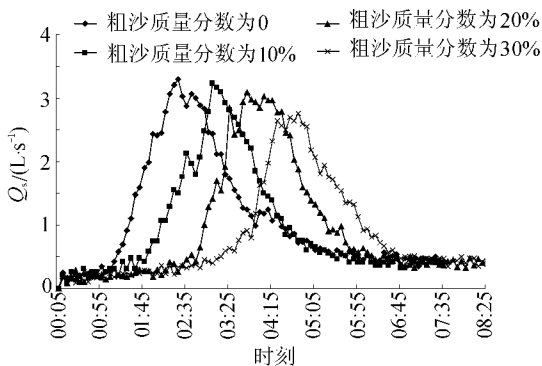


图2 不同粗沙含量下的下泄流量过程线

其溃口峰值流量逐渐减小且减小流量约占无粗沙溃口峰值流量的 5%、10% 和 20%。堰塞坝的粗沙含量对峰现时间的影响较大,峰现时间与坝体粗沙含量正相关,而对溃坝洪峰流量的影响相对较小,溃坝洪峰流量与坝体粗沙含量反相关。

无粗沙含量的坝体抗冲性差,纵向下切速度及横向展宽速度快,形成溃口的速度快,库区水位降低速度快,相应的峰现时间靠前,产生的溃坝洪峰流量大。溃口最大流量主要取决于溃口尺寸和库区水位。当增加坝体粗沙含量时,坝体稳定性增强使得溃决速度变慢,库区水位降低速度慢,峰现时间延长,溃坝洪峰流量减小。堰塞坝的粗沙含量主要影响溃坝峰现时间,间接影响溃坝洪峰流量。

3.3 堰塞坝坝后坡度与溃坝洪水的关系

在库容、入库流量、坝顶长度、开槽宽度、坝体物质组成及压实度等相同但坝后坡度不同的情况下进行试验。图3为试验得到的4组不同坝后坡度下的溃口流量过程线。

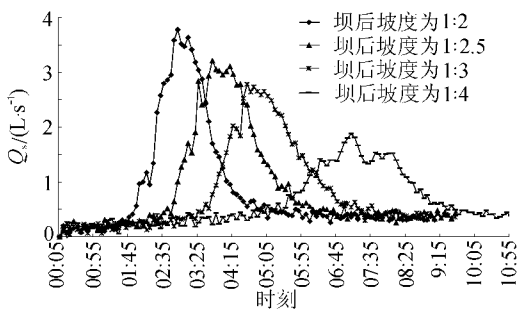


图3 不同坝后坡度下的溃口流量过程线

从图3可知,坝后坡度为1:2的堰塞坝溃坝洪峰流量较大,峰现时间较早。逐渐将坝后坡度减缓为1:2.5、1:3和1:4时,其洪峰流量逐渐减小且减小量约占1:2坝后坡度峰值的20%、25%和50%。其峰现时间逐渐推迟约50s、100s和250s,推迟时长约占1:2坝后坡度峰现时间的30%、60%和150%。堰塞坝坝后坡度与溃坝洪峰流量正相关,与峰现时间反相关。

当坝前蓄水位超过泄流槽顶部高程时,水流通

过泄流槽表面较低位置流动,由于坝体坝后坡度变陡,水流由缓流转变为急流,开始冲刷坝体下游坡面,在坡面上产生冲沟,冲沟拉通泄流槽底部,形成溃口,坝顶水位急剧降低,流量增加,伴随着流量的增加,堰塞坝溃决,大量泥沙向下游移动。当坝后坡度逐渐减缓时,坝体稳定性逐渐增强,坝下游坡面冲刷速度变慢,形成溃口的速度变慢,使得坝体溃决速度减慢,相应的峰现时间也就越靠后,产生的溃坝最大流量就越小。

3.4 坝顶长度与溃坝洪水的关系

在库容、入库流量、坝后坡度、开槽宽度、坝体含粗沙量及压实度等相同但坝顶长度不同的情况下进行试验。图4为试验得到的3组不同坝顶长度下的溃口流量过程线。

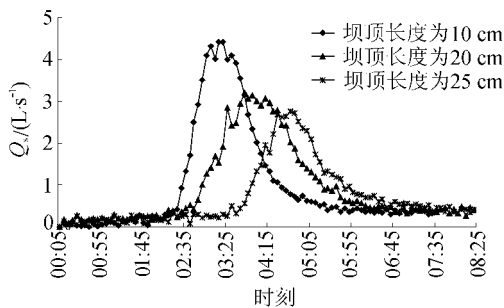


图4 不同坝顶长度下的溃口流量过程线

从图4可知,坝顶长度为10cm的溃口最大洪峰流量较大,峰现时间较早,当坝顶长度增长为2倍和2.5倍时,其最大洪峰流量减小且减小量约为25%和40%,其峰现时间推迟约40s和80s,推迟时长约为20%和45%。堰塞坝的坝顶长度与溃坝洪峰流量反相关,与峰现时间正相关。

坝体前、后坡度不变,坝顶长度较小,顺着河流的坝体长度也相应减少,水流通过泄流槽下泄经过的路程较短,坝体的整体抗冲性较差,从而形成溃口的速度快,相应的峰现时间也就越靠前,洪峰流量变大。在其他条件相同的情况下增加坝顶长度,水流通过泄流槽下泄的流速变慢,坝体溃决速度变慢,相应的峰现时间靠后,库区水位下降速度变慢,溃决洪峰流量变小。堰塞坝的坝顶长度主要影响坝体初期溃口形成的速度,从而影响溃口溃坝洪峰流量及峰现时间。

3.5 堰塞坝坝顶开槽宽度与溃坝洪峰流量的关系

在库容、入库流量、坝顶长度、坝体含粗沙量及压实度、坝后坡度等相同但开槽宽度不同的情况下进行试验。图5为试验得到的3组不同开槽宽度下的溃口流量过程线。

从图5可知,坝顶开槽宽度为20cm的堰塞坝溃坝洪峰流量较小,峰现时间较早。当坝顶开槽宽度

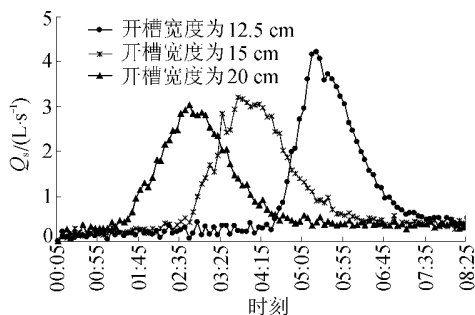


图5 不同开槽宽度下的溃口流量过程线

减少 $1/4$ 和 $3/8$ 时,其溃坝洪峰流量增加,增加量约占洪峰流量的 5% 和 40% 。其峰现时间有所推迟,推迟时长约 45% 和 100% 。坝顶开槽宽度与溃坝洪峰流量、峰现时间反相关。

泄流槽边坡相同,坝顶开槽宽度不一样则其断面尺寸就不一样,溃口最大流量主要取决于当时的溃口尺寸和库区水位,而泄流槽的尺寸影响溃口尺寸和库区水位。在其他条件相同的情况下,泄流槽尺寸变小,水流刚开始经过泄流槽时下泄速度较慢,随着时间的推移,其纵向下切速度很快,但横向展宽速度相对缓慢,使得库区积蓄大量来不及下泄的水量,库区水位消落速度慢,溃决洪峰流量变大。而开槽宽度大的相应库区水位较低,溃决洪峰流量较小。

4 结 语

在模型试验中分别就 5 个主要影响因素对堰塞坝溃坝洪水进行研究,分析比较发现如下规律:

a. 当入库流量为 Q_{in} , $Q_{in}/3$ 和 $Q_{in}/2$ ($Q_{in} = 1.2 \text{ L/s}$) 时,相应的溃坝洪峰流量分别为 Q , $4/5Q$ 和 $3/5Q$ ($Q = 5.5 \text{ L/s}$),峰现时间约为 T , $1.33T$ 和 $2.2T$ ($T = 200 \text{ s}$)。上游入库流量与溃坝洪峰流量正相关,与峰现时间反相关。构成溃决洪水的决定因素不是上游来水量,但上游来水量通过影响溃决初期溃口发生的速度来影响溃坝洪水。

b. 当坝体粗沙含量增加 10% , 20% 和 30% 时,相应的溃口峰值流量减小,流量约占无粗沙溃口峰值流量的 5% , 10% 和 20% ,推迟时长约占无粗沙含量峰现时间的 28% , 55% 和 96% 。堰塞坝的粗沙含量对溃坝峰现时间的影响较大,峰现时间与粗沙含量正相关。而对溃坝洪峰流量的影响相对较小,溃坝洪峰流量与粗沙含量反相关。堰塞坝的粗沙含量主要影响峰现时间,间接影响溃坝洪峰流量。

c. 堰塞坝坝后坡度为 $1:2$, $1:2.5$, $1:3$ 和 $1:4$ 时,相应的最大洪峰流量分别约为 Q , $4Q/5$, $3Q/4$ 和 $Q/2$ ($Q = 3.8 \text{ L/s}$),峰现时间分别为 T , $1.3T$, $1.6T$ 和 $2.5T$ ($T = 280 \text{ s}$)。堰塞坝坝后坡度与溃坝洪峰流量正相关,与峰现时间反相关。坝后坡度主

要通过坝下游坡面冲刷速度影响峰现时间,进而影响溃决洪峰流量。

d. 当坝顶长度增长 2 倍和 2.5 倍时,其最大洪峰流量减小且减小量约为 25% 和 40% ,推迟时长约为 20% 和 45% 。堰塞坝的坝顶长度与溃坝洪峰流量反相关,与峰现时间正相关。堰塞坝的坝顶长度主要影响坝体初期溃决速度,进而影响溃口溃坝洪峰流量、峰现时间。

e. 当坝顶开槽宽度减少 $1/4$ 和 $3/8$ 时,其溃坝洪峰流量增加量约占洪峰流量的 5% 和 40% 。其峰现时间推迟时长约为 45% 和 100% 。堰塞坝开槽宽度与溃坝洪峰流量、峰现时间反相关。堰塞坝开槽宽度主要通过溃口尺寸影响坝体溃决速度及库区水位,进而影响溃决洪峰流量。

f. 堰塞坝的入库流量、坝体粗沙含量、坝后坡度、坝顶宽度及开槽宽度等是堰塞坝溃坝洪水的主要影响因素,在堰塞坝防灾减灾对策上,可以通过减小入库流量、增加坝体粗沙含量、减缓坝后坡度、加宽坝顶长度和泄流槽宽度等手段来削减溃坝洪水峰值流量。

参考文献:

- [1] 柴贺军,刘汉超.一九三三年叠溪地震滑坡堵江事件及其环境效应[J].地质灾害与环境保护,1995,(1):7-17.
- [2] 周魁一,苏克忠.十四世纪以来我国地震次生水灾的研究[J].自然灾害学报,1992,(3):83-91.
- [3] 晏鄂川,郑万模,唐辉明,等.滑坡堵江坝溃决洪水及其演进的理论分析[J].水文地质工程地质,2001,28(6):15-17,22.
- [4] 王光谦,傅旭东,李铁建,等.汶川地震灾区堰塞湖应急处置中的计算分析[J].中国水土保持科学,2008,6(22):1-2.
- [5] 聂高众,高建国,邓砚.地震诱发的堰塞湖初步研究[J].第四纪研究,2004,24(3):293-301.
- [6] 朱勇辉,范北林,卢金友,等.唐家山堰塞湖溃坝洪水分析及泄流冲刷模拟[J].人民长江,2008,39(22):79-82.
- [7] 黄明海,金峰,杨文俊.唐家山堰塞坝溃决洪水计算分析研究[C]/中国水利学会.中国水利学会2008学术年会论文集(下册).北京:中国水利水电出版社,2008:961-966.
- [8] 张细兵,卢金友,范北林,等.唐家山堰塞湖溃坝洪水演进及下泄过程复演[J].人民长江,2008,39(22):76-79.
- [9] CASSANDRA R F, ROBERT H W, THURE E C. Peak discharge of a Pleistocene lava-dam outburst floods in Grand Canyon, Arizona, USA[J]. Quaternary Research, 2006(7):324-335.
- [10] DANIEL A C, ELLEN E W. Peak discharge estimates of glacia-lake outburst floods and "normal" climatic floods in the Mount Everest region, Nepa[J]. Geomorphology, 2001(1):57-90.

(收稿日期 2010-01-08 编辑 高建群)