

# 溃坝洪水在下游水库的演进及坝前爬高

谭 箐<sup>1,2</sup>, 王晓刚<sup>1</sup>, 刘火箭<sup>3</sup>, 王小东<sup>1</sup>, 罗仕成<sup>4</sup>

(1. 南京水利科学研究院水工水力学研究所, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;  
3. 长江水利委员会长江科学院, 湖北 武汉 430010; 4. 南昌大学附属中学, 江西 南昌 330000)

**摘要:** 基于物理模型试验, 探讨上游坝体溃决时间  $T_1$ 、上游坝前水深  $H_1$ 、上游水库面积  $S_1$ 、下游坝前水深  $H_2$  及下游水库面积  $S_2$  等因素对溃坝洪水在下游水库演进、初始波高及下游坝前初始波浪爬高的影响。结果表明: 溃坝洪水在下游水库的演进过程可分为洪水波、洪水涌浪、反射叠加、振荡衰减 4 个阶段。下游坝前初始波浪爬高随  $T_1$ 、 $H_2$ 、 $S_2$  的增大而减小, 随  $H_1$  的增加而增大, 与上游水库面积  $S_1$  无明显相关关系。拟合出下游坝前初始波浪爬高值经验公式, 并得出各因素对波浪初始爬高影响程度从大到小的次序为:  $T_1$ 、 $S_2$ 、 $H_1$ 、 $H_2$ 。

**关键词:** 梯级水库; 溃坝洪水; 波浪爬高; 模型试验

中图分类号: TV122.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2019)02-0026-05

**Dam-break flood evolution in downstream reservoir and runup in front of dam**//TAN Qing<sup>1,2</sup>, WANG Xiaogang<sup>1</sup>, LIU Huojian<sup>3</sup>, WANG Xiaodong<sup>1</sup>, LUO Shicheng<sup>4</sup> (1. *Hydraulic Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China*; 4. *High School Affiliated To Nanchang University, Nanchang 330000, China*)

**Abstract:** Factors including the upstream dam breaking time  $T_1$ , water depths in front of the upstream dam  $H_1$  and downstream dam  $H_2$ , upstream reservoir area  $S_1$  and downstream reservoir area  $S_2$  that can influence the dam-break flood evolution in the downstream reservoir, the initial flood wave height and the initial runup height in front of the downstream dam, are discussed based on physical model tests. The results show that, the evolution process of a dam break flood in the downstream reservoir can be divided into four stages: flood wave forming, flood surging, reflection superposition and oscillation attenuation. The initial runup height of the flood wave in front of the downstream dam decreases with the increase of  $T_1$ ,  $H_2$ , and  $S_2$ , while increases with  $H_1$ , but it has no obvious correlation with the upstream reservoir area  $S_1$ . In addition, the empirical formula of the initial wave height in front of the downstream dam is proposed, and the influence degree of each factor on the initial wave runup height from high to low is obtained in the following order:  $T_1$ ,  $S_2$ ,  $H_1$ , and  $H_2$ .

**Key words:** cascade reservoirs; dam-break flood; wave runup; model test

我国已建成各类水库 9 万多座, 水库总库容超过 8000 亿  $m^3$ , 大坝数量及库容均居世界首位<sup>[1]</sup>, 还将在乌江干流<sup>[2]</sup>、牡丹江莲花以下河段<sup>[3]</sup>、金沙江下游<sup>[4]</sup>等流域继续开展梯级水库群建设。水库大坝在促进社会 and 经济发展方面起到巨大作用的同时也存在着溃决的风险, 严重威胁水库大坝下游人身和财产安全。例如, 1959 年法国 Malpasset 拱坝、1963 年意大利 Vajont 拱坝、1975 年中国板桥以及上游元门水库大坝、1976 年美国 Teton 坝等大坝的失事均给下游造成了灾难性的后果<sup>[5]</sup>。

鉴于溃坝带来的严重后果, 国内外学者在溃坝洪水模型试验方面进行了大量细致的研究, 研究内容主要包括溃坝波水力特性、溃坝坝址峰值流量、坝址水位流量过程以及洪水演进规律等<sup>[5]</sup>。相关研究大多针对单一水库溃坝洪水问题, 对于梯级水库溃坝研究偏少。梯级水库溃坝洪水的演进机制影响因素复杂, 不仅仅受单座溃决过程的影响, 还受梯级内相邻水库的制约。2010 年以来国内外学者开展了梯级水库物理模型试验研究, 试验结果揭示了梯级库群连锁溃坝的洪水递增效应<sup>[6-15]</sup>。岳志远<sup>[6]</sup>分

基金项目: 国家自然科学基金(51409123)

作者简介: 谭箐(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事水动力学研究。E-mail: 474159786@qq.com

通信作者: 王晓刚(1980—), 男, 教授, 博士, 主要从事水动力学研究。E-mail: xgwang@nhri.cn

析了不同来流量、溃口宽度对自然坝体连溃的影响,揭示了自然坝体溃决机制与洪水演进规律。Yang等<sup>[7-8]</sup>分析了上下游水深和坝间距离对瞬时连锁溃坝的影响,认为坝间距离的影响甚微,可忽略不计。Niu等<sup>[9]</sup>分析了不同来流量对梯级堰塞坝溃坝的影响,表明当流量大时,下游坝的变形形态与上游坝的变形规律相似,坝体在破坏过程中具有超覆冲刷的特征。当流入流量小的时候,上游的大坝主要通过纵向切口形成的泄水槽进行冲刷,下游坝的特征是覆盖的冲刷。陈树群等<sup>[10-11]</sup>分析了下游水库体积、形状对连溃的影响,认为水库蓄水阶段,水位上升速率受下游水库体积、形状影响;坝体溃坝阶段,水位下降速率受溃口发展的影响。Selahattin等<sup>[12]</sup>针对两个不同的尾水水平,通过溃坝洪水对下游端壁反流的反应,对上游方向的负波的形成和传播进行了详细研究,结果表明,溃坝波在下游的端壁引起了波浪反射,出现了往上游方向移动的负波并引起自由曲面的波动,且反射波的反射速度随尾水高度的增加而增快,波动程度随上下游水深比的减小而加剧。Khankandi等<sup>[13]</sup>研究了上游水库形状对溃坝洪水流量过程及溃坝洪水演进的影响。Oertel等<sup>[14]</sup>研究了不同的上游坝前水深条件下,初始溃决阶段溃坝波的洪水演进规律。戎贵文等<sup>[15]</sup>为研究局部断面收缩对溃坝水流传播的影响,建立了模拟三维局部断面收缩情况下溃坝洪水演进过程的数学模型,利用该模型研究了溃坝洪水负波的形成和传播过程,得到了负波形成和传播的规律以及溃坝水流的水位变化特征。

然而现有的连续溃决的试验研究较少,已经开展的相关研究基本只考虑一个或少量因素对连溃洪水叠加的影响,对一些因素的影响缺乏系统地分析。

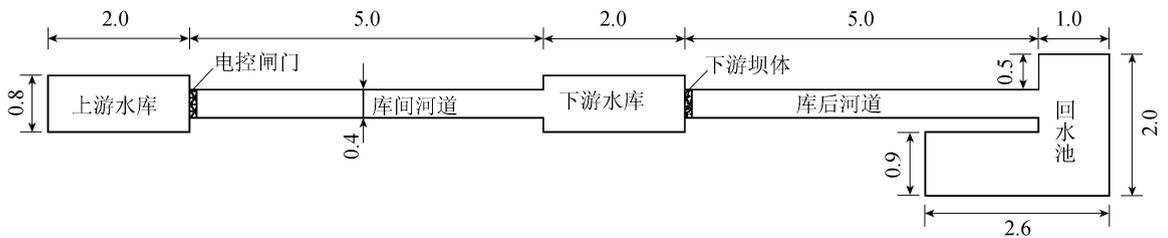


图1 试验模型布置俯视图(单位:m)

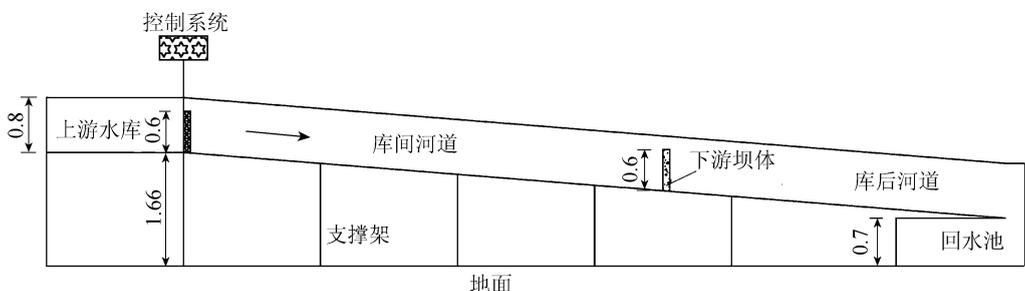


图2 试验模型布置侧视图(单位:m)

不仅如此,现有的梯级水库溃坝洪水试验都是建立在上游溃坝后下游也连续溃决的前提假设上,对下游水库溃坝前的情况缺乏深入研究。研究上游水库溃坝洪水在下游水库中的演进机制及其对下游坝体影响,对于有效避免下游水库的连续溃决,制定大坝安全应对措施等均具有重要意义。综合前人研究成果,本文选择上游坝前水深  $H_1$ 、坝体溃决时间  $T_1$ 、上游水库面积  $S_1$ 、下游坝前水深  $H_2$  及下游水库面积  $S_2$  作为主要控制变量,通过模型试验研究上游溃坝洪水在下游水库的演进规律及对下游坝体的影响。

## 1 模型试验设计

### 1.1 试验装置

模型水槽由上游水库,电控闸门(上游坝体)、下游水库、下游坝体、河道及回水池等部分组成,离地面的最小高度为0.7m。考虑壁面缩尺效应及试验空间的限制,设计的水槽上游水库长度2m、高0.8m,上游水库面积可在 $0.4\text{ m}^2$ 到 $1.6\text{ m}^2$ 之间变化。上下游水库间的河道水平长度为7m,矩形水槽水平方向长14m、高0.8m、宽0.4m,河道坡降1:12.5。下游水库宽度为0.8m,面积在 $0.8\text{ m}^2$ 到 $1.6\text{ m}^2$ 之间变化。下游河道长度为5m。试验模型布置见图1和图2。为了便于观测洪水波在下游水库演进过程,水槽、上下游坝体均采用厚度为2cm的有机玻璃板制作,下游回水池采用PVC板制作。其中上游闸门采用向上提升的方式溃决,提升的高度为24cm。

试验主要模拟溃坝洪水在下游水库的演进过程,因此无需设置循环供水系统,采用水泵向水库供水。国内外大量溃坝案例表明,占大坝数量比例最大的土石坝以逐渐溃坝为主,因此本文采用无极调速电

机控制上游坝体溃决时间,试验过程中闸门的提升高度为 24 cm,控制闸门的开启速度分别为 0.5 cm/s、1.0 cm/s、1.5 cm/s、2.0 cm/s、2.5 cm/s,坝体溃决时间  $T_1$  分别为 48.0 s、24.0 s、16.0 s、12.0 s、9.6 s。

### 1.2 测量仪器

测量仪器主要采用中国水利水电科学研究院生产的电阻式波高仪,量程为 0~0.8 m,精度为 1 mm,试验前需对其进行率定。采用 DJ800 数据采集系统采集数据,采集频率为 100 Hz,采集时间为 90 s。

### 1.3 测点布置

下游水库水深变化过程采用波高仪测量,共设置 5 个测点,其中测点 bg1 距下游坝体 15 cm,测量的数据可近似作为下游坝前波浪爬高值。测点 bg2、bg3、bg4、bg5 沿水库中轴线布置,测点之间的距离为 0.4 m,具体测点布置见图 3。

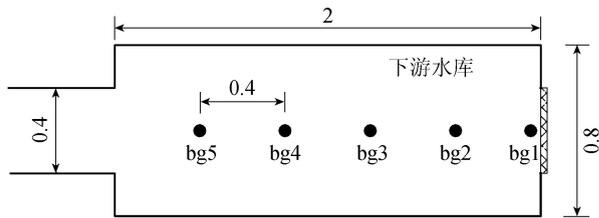


图 3 下游水库水深变化测点布置图(单位:m)

### 1.4 试验步骤

试验步骤如下:①采用水泵给上下游水库灌水,达到要求的水深后停止,准备好数据采集系统,设置采样频率,并进行调零,调整好同步电机的速度;②数据采集系统提前开始采集,10 s 后开启电机,上游坝体开始溃决,溃坝洪水向下游水库演进;③上游水库泄空,下游水库水面波动逐渐平稳,90 s 后采集系统停止采集,试验结束;④改变上游坝前水深,下游坝前水深、同步电机的速度等参数,重复上述试验步骤。

### 1.5 试验工况

为研究  $H_1$ 、 $H_2$  及  $T_1$  的影响,保持  $S_1 = S_2 = 0.8 \text{ m}^2$ ,河道宽度  $b = 0.4 \text{ m}$ ,设定上游坝前水深  $H_1 = 0.1 \text{ m}$ 、 $0.2 \text{ m}$ 、 $0.3 \text{ m}$ 、 $0.4 \text{ m}$ ,下游坝前水深  $H_2 = 0$ 、 $0.1 \text{ m}$ 、 $0.2 \text{ m}$ 、 $0.3 \text{ m}$ 、 $0.4 \text{ m}$ ,上游坝体溃决时间  $T_1 = 48.0 \text{ s}$ 、 $24.0 \text{ s}$ 、 $16.0 \text{ s}$ 、 $12.0 \text{ s}$ 、 $9.6 \text{ s}$ (相应的闸门提升速度为 0.5 cm/s、1.0 cm/s、1.5 cm/s、2.0 cm/s、2.5 cm/s),共开展 84 组试验,试验工况见表 1。

研究  $S_1$  和  $S_2$  的影响时,保持上游坝体溃决时间  $T_1 = 12.0 \text{ s}$  不变,考虑  $H_1 = 0.1 \text{ m}$ 、 $0.2 \text{ m}$ 、 $0.3 \text{ m}$ 、 $0.4 \text{ m}$ , $H_2 = 0.1 \text{ m}$ 、 $0.2 \text{ m}$ 、 $0.3 \text{ m}$ 、 $0.4 \text{ m}$ , $S_1 = 0.8 \text{ m}^2$ 、 $1.2 \text{ m}^2$ 、 $1.6 \text{ m}^2$ , $S_2 = 0.8 \text{ m}^2$ 、 $1.2 \text{ m}^2$ 、 $1.6 \text{ m}^2$ 。试验的组次为  $4 \times 4 \times 3 \times 2 = 96$  组。

表 1 试验工况

$H_1/\text{m}$	$H_2/\text{m}$	$T_1/\text{s}$
0.1	0	24.0
	0.1	48.0, 24.0, 16.0, 12.0, 9.6
	0.2	48.0, 24.0, 16.0, 12.0, 9.6
	0.3	48.0, 24.0, 16.0, 12.0, 9.6
	0.4	48.0, 24.0, 16.0, 12.0, 9.6
0.2	0	24.0
	0.1	48.0, 24.0, 16.0, 12.0, 9.6
	0.2	48.0, 24.0, 16.0, 12.0, 9.6
	0.3	48.0, 24.0, 16.0, 12.0, 9.6
	0.4	48.0, 24.0, 16.0, 12.0, 9.6
0.3	0	24.0
	0.1	48.0, 24.0, 16.0, 12.0, 9.6
	0.2	48.0, 24.0, 16.0, 12.0, 9.6
	0.3	48.0, 24.0, 16.0, 12.0, 9.6
	0.4	48.0, 24.0, 16.0, 12.0, 9.6
0.4	0	24.0
	0.1	48.0, 24.0, 16.0, 12.0, 9.6
	0.2	48.0, 24.0, 16.0, 12.0, 9.6
	0.3	48.0, 24.0, 16.0, 12.0, 9.6
	0.4	48.0, 24.0, 16.0, 12.0, 9.6

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 下游水库及坝前水深增幅时变规律

溃坝洪水向下游水库演进过程依次可分为洪水波、洪水涌浪、反射叠加、振动衰减 4 个阶段。下游水库水深增幅随  $T_1$  变化规律见图 4(其中  $H_1/b = 0.50$ 、 $H_2/b = 1.0$ 、 $S_1/b^2 = 5.0$ 、 $S_2/b^2 = 5.0$ 、 $b = 0.4 \text{ m}$ ,并定义  $m = T_1(g/b)^{0.5}$ ,其中  $g$  为重力加速度)。由图 4 可见,溃坝洪水波到达下游坝前的时间随着  $m$  的减小而缩短,主要是因为  $m$  越小,溃坝洪水初期下泄流量越大,演进到下游水库尾水的能量越大,推动下游水库水体形成的涌浪越高,涌浪在水库传播的波速越快。

测点 bg1 位于坝前,由图 4(a)(b)可见, $m$  与初始波浪爬高呈负相关,主要是因为  $m$  越小,溃坝洪水初始下泄流量越大,形成的初始涌浪波幅越大,与下游大坝碰撞后沿坝面爬升高度越大。 $m = 237.7$  时,初始波浪爬高值稍小于最终库水位增加值,坝前水深在初始波浪爬高后无明显变化,波浪爬高以正弦波的形式随时间衰减,随着上游溃坝来流量的增加,坝前再次出现涌浪爬高峰值。 $m = 79.2$ 、 $47.5$  时,初始波浪爬高值大于最终库水位增加值;坝前水深在初始波浪爬高后有明显的回落过程,且回落差随着  $m$  的减小而增大,与此同时波浪爬高以正弦波的方式随时间衰减,主要是受波浪爬高的反射波与溃坝洪水波浪的叠加作用所致。

bg2 距离下游坝面 0.4 m,由图 4(c)(d)可见, $m$  与初始波浪爬高呈负相关,测点水深在初始波浪来

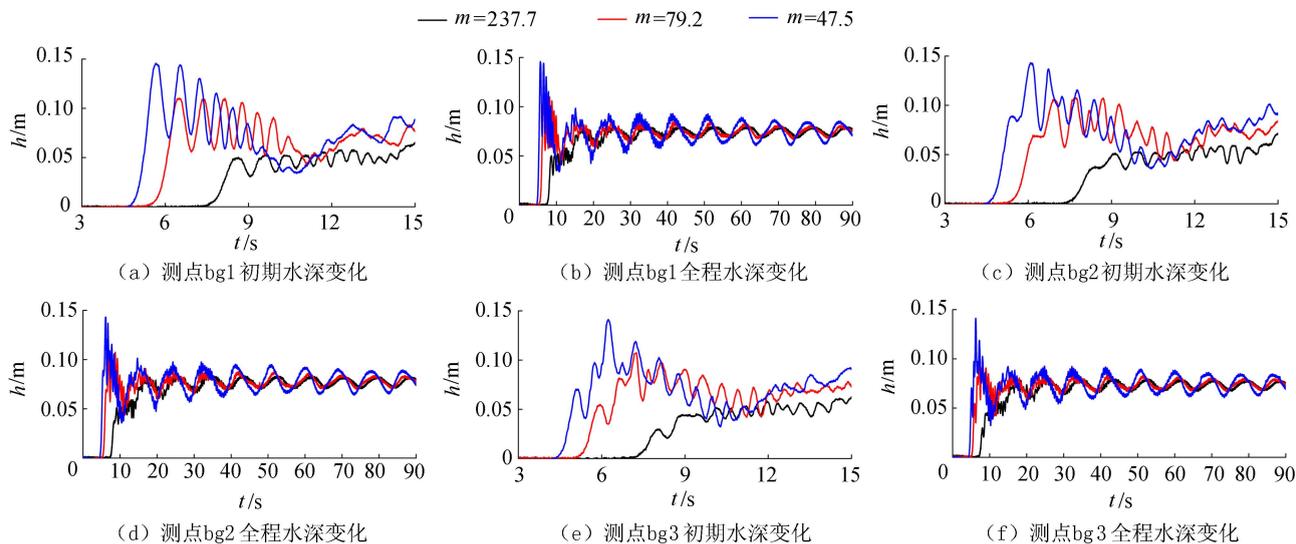


图4 不同坝体溃决时间水库测点水深变化过程

不及回落就在反射波与洪水波浪的叠加作用下再次出现波浪峰值,随后测点的水深随  $t$  与  $m$  的变化规律与 bg1 基本一致。

bg3、bg4、bg5 的水深在初始波浪后,水面波动剧烈,同时水深随时间逐渐增大(图4(e)(f))。受溃坝洪水波浪与反射波叠加的影响,在初始波峰后再次出现波浪峰值,随后测点水深随  $t$  与  $m$  变化的规律与 bg1 基本一致。

## 2.2 下游水库初始波高沿程变化规律

下游水库初始波高沿程的变化见图5(图中横坐标  $L/b$  为水库测点到下游大坝的相对距离,  $L/b=0$  表示坝址,该处波浪高度即为坝前波浪爬高;纵坐标  $a/b$  为初始波高相对值,其中  $a$  为初始波高;相关参数  $H_1/b=0.25$ 、 $H_2/b=1.0$ 、 $S_1/b^2=5.0$ 、 $S_2/b^2=5.0$ )。由 bg3 ~ bg5 的初始波浪波高值可以看出波浪在向下游坝址运动过程中基本无衰减,主要是因为试验中测点之间的距离较短,传播过程能量衰减较少,且溃坝洪水持续冲击下游水库水体,能量不断的随着涌浪向前传播,抑制了波浪的衰减。bg2 的波浪高度略大于 bg3,主要是因为该点离下游坝体较近,受下游坝体反射波的影响较大。下游坝前初始波浪爬高约是下游水库内初始波浪波高的2倍,

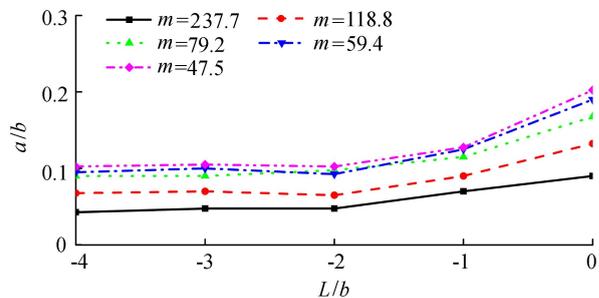


图5 不同坝体溃决时间各测点最大波高

这与波浪爬高相关理论基本吻合,初始涌浪波高及爬高均随  $m$  的增加而减小。

## 2.3 下游坝前初始波浪爬高值经验公式

在分析下游坝前波浪爬高时,需重点关注初始时刻的爬高值。试验数据表明初始波浪爬高值随  $T_1$ 、 $H_2$ 、 $S_2$  的增大而减小,随  $H_1$  的增大而增大,与上游水库面积  $S_1$  关系不大。从能量的角度解释,  $H_1$  越大,上游溃坝初始下泄流量越大,推动下游水库水体形成的波浪越高,洪水波浪在下游坝前的爬高越大;  $T_1$  越大,溃坝洪水初始下泄流量越小,推动下游水库水体形成的波浪越小,洪水波浪在下游坝前的爬高越小;  $H_2$  越大,溃坝洪水垂向演进距离越短,到达下游尾水的能量越小,推动下游水库水体形成的波浪越小,与此同时下游水深增加,导致波浪向坝址运动过程衰减越厉害,洪水波浪在下游坝前的爬高越小;  $S_2$  越大,波浪在向下游坝前运动过程中沿着水库两侧衰减越厉害,因此到达下游坝前的爬高越小;上游水库面积  $S_1$  的改变,溃坝洪水初期下泄流量基本不变,因此形成的洪水波浪及波浪爬高差异不大。

下面拟基于量纲分析,获得初始波浪爬高与上述各变量的定量关系。

### 2.3.1 上游水库溃坝边界条件与初始坝前波浪爬高的关系

上述分析发现,上游水库溃坝初始下泄流量是影响初始波浪爬高的重要因素,而初始下泄流量主要与上游坝体溃决时间  $T_1$ 、上游坝前水深  $H_1$  等溃坝边界条件有关,首先建立初始波浪爬高  $R'$  与坝体溃决时间  $T_1$ 、上游坝前水深  $H_1$ 、重力加速度  $g$  之间的关系:

$$\frac{R'}{D_1} = f\left(\sqrt{\frac{H_1}{T_1^2 g}}\right) \quad (1)$$

式中:  $D_1$  为模型上游闸门提升高度,  $D_1 = 0.24 \text{ m}$ 。

当  $H_2/b = 1.0$ 、 $S_2/b = 5.0$  时, 拟合  $R'/D_1$  与  $H_1/(T_1^2 g)$  之间的关系得:

$$\frac{R'}{D_1} = 29.75 \left( \sqrt{\frac{H_1}{T_1^2 g}} \right)^{0.885} \quad (2)$$

### 2.3.2 下游坝前水深与初始坝前波浪爬高的关系

将  $H_2/b = 1.0$  时的初始波浪爬高作为不变值 ( $H_2 = 0.4 \text{ m}$ ),  $S_1/b^2 = 5.0$ 、 $S_2/b^2 = 5.0$ 、 $b = 0.4 \text{ m}$  条件下,  $H_2/0.4$  分别为 0.25、0.50、0.75 和 1.00 时的波浪爬高  $R$  与  $R'$  的比值分别为 1.39、1.26、1.16 和 1.00, 据此拟合得到  $H_2/0.4$  与  $R/R'$  之间的关系式为

$$\frac{R}{R'} = 1.047 \left( \frac{H_2/b}{0.4/b} \right)^{-0.221} \quad (3)$$

### 2.3.3 下游水库面积与初始坝前波浪爬高的关系

下游水库面积越大, 溃坝洪水波扩散衰减越明显, 将  $S_2/b^2 = 5.0$  作为不变值 ( $S_2 = 0.8 \text{ m}^2$ ),  $S_2/0.8$  分别为 1.0、1.5、2.0 时,  $R/R'$  分别为 1.00、0.79、0.67, 据此拟合得到  $S_2/b^2$  与  $R/R'$  之间的关系为

$$\frac{R}{R'} = \left( \frac{S_2/b^2}{0.8/b^2} \right)^{-0.573} \quad (4)$$

### 2.3.4 下游坝前初始波浪爬高值经验公式

将式(2)代入式(3)后再代入式(4), 最终得到初始涌浪爬高经验公式为

$$R = \frac{9.58 H_1^{0.443}}{g^{0.443} H_2^{0.221} S_2^{0.573} T_1^{0.885}} \quad (5)$$

140 多组试验中经验公式计算值与试验值的对比见图 6, 可以看出二者吻合较好, 说明推导的经验公式具有一定的合理性。由经验公式可以看出, 各因素的影响程度从大到小的次序为:  $T_1$ 、 $S_2$ 、 $H_1$ 、 $H_2$ 。需要说明的是当  $H_2 = 0$  或者较小时, 坝前波浪一般是以破碎波的形式存在, 涌浪爬高数据具有一定的离散性, 因此这里不做分析, 公式不含相关试验数据。

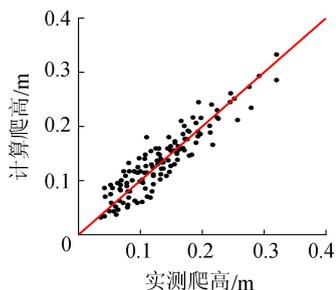


图 6 初始坝前波浪爬高试验值与式(5)计算值对比

## 3 结论

a. 溃坝洪水在下游水库的演进过程可分为洪水波、洪水涌浪、反射叠加、振荡衰减 4 个阶段。受

初始波浪爬高的反射波与溃坝洪水波浪的叠加作用, 下游坝前初始波浪爬高以正弦波的方式随时间衰减。

b. 坝前初始波浪爬高约为库区初始波高的 2 倍, 与波浪爬高相关理论基本吻合。

c. 下游坝前初始波浪爬高值随  $T_1$ 、 $H_2$ 、 $S_2$  的增大或  $H_1$  的减小而减小, 与上游水库面积  $S_1$  无明显相关关系, 通过对拟合的经验公式进行分析, 各因素对波浪初始爬高影响程度从大到小的次序为:  $T_1$ 、 $S_2$ 、 $H_1$ 、 $H_2$ 。

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部, 中华人民共和国国家统计局. 第一次全国水利普查公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [2] 胡莲, 陈晓彬. 积极开发乌江水电资源[J]. 中国水利, 2001(2): 43. (HU Lian, CHEN Xiaobin. Actively developing Wujiang hydropower resources [J]. China Water Resources, 2001(2): 43. (in Chinese))
- [3] 郭长江, 郝淑霞, 王艳芳. 牡丹江莲花以下河段水电梯级开发规划修编[J]. 黑龙江水利科技, 2010, 38(6): 177-178. (GUO Changjiang, HAO Shuxia, WANG Yanfang. Development planning of hydropower cascade development in the lower reaches of Mudanjiang River [J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2010, 38(6): 177-178. (in Chinese))
- [4] 周双超. 国家发改委同意乌东德和白鹤滩水电站开展前期工作[J]. 四川水力发电, 2010, 29(6): 248. (ZHOU Shuangchao. The national development and reform commission (NDRC) has agreed to work in the early stage of the development of the east German and baihetan hydropower stations [J]. Sichuan Water Power, 2010, 29(6): 248. (in Chinese))
- [5] 李云, 李君. 溃坝模型试验研究综述[J]. 水科学进展, 2009, 20(2): 304-310. (LI Yun, LI Jun. A review on the experimental study of dam break [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(2): 304-310. (in Chinese))
- [6] 岳志远. 自然坝体溃决机理与水沙动力学过程[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.
- [7] YANG X, XU W, LUO S, et al. Experimental study of dam-break flow in cascade reservoirs with steep bottom slope [J]. Journal of Hydrodynamics; Ser B, 2011, 23(4): 491-497.
- [8] 薛阳. 梯级库群连锁溃决的溃坝洪水演进规律研究[D]. 成都: 四川大学, 2011.
- [9] NIU Z P, XU W, LI N, et al. Experimental investigation of the failure of cascade landslide dams [J]. Journal of Hydrodynamics; Ser B, 2012(3): 430-441.

(下转第 50 页)