

# 土石坝逐渐溃决溃口流量计算方法研究<sup>1</sup>

陈思翰, 田忠\*

(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 Email: [939923808@qq.com](mailto:939923808@qq.com))

**摘要:** 大坝溃决会造成巨大的生命财产损失, 溃口流量过程是进行溃坝分析的重要参数。本文通过理论分析, 建立了土石坝逐渐溃决过程中, 溃口瞬时流量的计算方法; 采用本研究提出的方法对某实际工程溃口流量进行了计算, 并与 HEC-RAS 软件计算的成果进行了对比, 两者吻合良好, 且本文提出的计算方法更为简便快捷; 对某实际工程溃坝洪水演进进行了计算分析, 讨论了主、副坝同时溃决与单独溃决情况下, 溃口流量及洪水演进过程的差异。

**关键词:** 溃口流量过程; 理论分析; 数值模拟; HEC-RAS; 主、副坝同时溃决

## 1 前言

大坝一旦溃决, 将给下游带来巨大的灾害。解家毕, 孙东亚<sup>[1]</sup>对我国 1954—2006 年之间的溃坝数据进行了统计, 我国共有 3498 座水库垮坝, 平均年垮坝数约为 64 座, 其中土石坝 3253 座, 占据了 93%, 过去的的数据表明, 漫顶和管涌是土石坝溃决的主要原因。就目前而言, 溃坝洪水演进的计算主要采用先求出溃口的流量过程作为边界条件再通过数值模型进行下游的洪水演进计算的方法, 因此, 溃口的流量过程对洪水的演进过程起着重要作用。自 20 世纪后期开始, 世界开始关注溃坝安全问题。美国国家大坝安全计划项目、美国土石坝洪水研究课题<sup>[2]</sup>、中国科学院的室内试验、欧共体的 CADAM 和 IMPACT 项目、美国国家大坝安全计划两家研究单位, 经过近几十年的研究, 提出了多个数学模型, 这些模型一般分为两类: 第一类模型是以观测、试验、经验得到溃决的总历时、溃口的最终底高程、底宽以及溃口的坡度, 假设溃口匀速发展并通过线性插值的方法模拟中间各个时刻的溃口形状; 第二类模型从力学的角度分析, 根据上游水库蓄水容积、大坝结构、泥沙动力冲刷等因素通过迭代计算解出溃口侵蚀过程, 如 BEED、BREACH、HW、OSMAN 等模型<sup>[3-5]</sup>, 但由于周边环境因素等一系列条件的限制, 难以获取准确的初始参数, 因此在第一类代表模型 DAMBRK<sup>6</sup>的基础上, 通过理论分析, 建立了土石坝逐渐溃决过程中, 溃口流量的计算方法。

基金项目: 四川省科技计划资助 (2019JDTD0007)

作者: 陈思翰, 男, 硕士研究生, 研究方向为水工水力学, E-mail: [939923808@qq.com](mailto:939923808@qq.com)

\*通讯作者: 田忠, 男, 博士, 副研究员, 研究方向为水工水力学, E-mail: [tianzhong@scu.edu.cn](mailto:tianzhong@scu.edu.cn)

## 2 溃口流量计算方法的建立

### 2.1 计算原理及基本方程

一般认为土石坝漫顶破坏溃口发展机理为水流冲刷导致底部和侧侵蚀，然后发生黏性土石坝的失稳、溃决<sup>7</sup>。在本研究的方法中，作者假定溃口形状为倒梯形，初始溃口底宽为  $b_1$ 、高为  $h_1$ ，溃口分别以速率  $v_1$ 、 $v_2$  由上至下以及由中间向两侧匀速发展，溃决的总历时为  $t$ 、溃口的最终高为  $hm$ 、最终底宽为  $bm$ （图 1）。计算基本方程包括堰流流量计算方程式（1）及水量平衡方程式（2）。

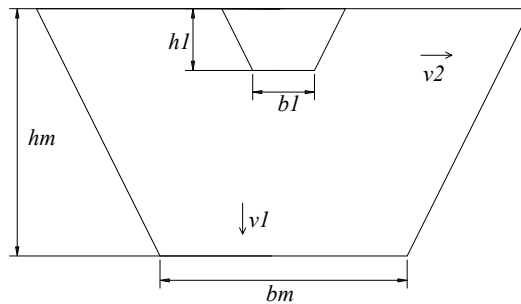


图 1 溃口基本形状假设

$$\begin{cases} Q_o(t) = m \cdot b(t) \cdot \sqrt{2g} \cdot H(t)^{\frac{3}{2}} & (1) \\ V_t + \int_t^{t+\Delta t} Q_i(t) dt = V_{t+\Delta t} + \int_t^{t+\Delta t} Q_o(t) dt & (2) \end{cases}$$

式中，不同时刻的计算参数分别为： $Q_o(t)$ —溃口出流流量； $m$ —溃口流量系数； $b(t)$ —溃口宽度； $H(t)$ —溃口水头； $Q_i(t)$ —入库流量； $V_t$ —时间  $t$  时的库容； $V_{t+\Delta t}$ —时间  $t+\Delta t$  时的库容。

### 2.2 计算步骤

图 2 为计算流程图，具体计算步骤为：①考虑到土石坝溃决之后溃口宽度一般数倍于堰上水头，即  $(2.5 < \delta/H < 10)$ ，可以认为在逐渐溃决过程中溃口出流皆为宽顶堰出流，采用式（1）计算溃口流量。②得到溃口流量之后，即可算出  $\Delta t$  时间内的出库水量，根据水量平衡方程公式（2）得到水库库容。③根据水位—库容曲线拟合得到库水位，根据库水位及溃口参数得到溃口水头，重复迭代进行计算直至出库流量等于入库流量。

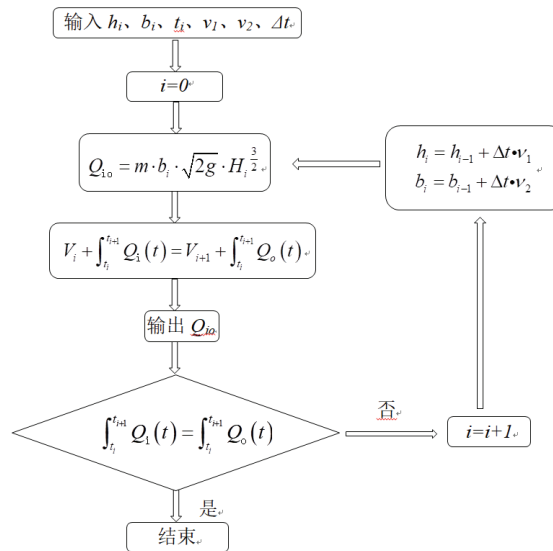


图2 计算流程

### 3 计算方法的对比验证

#### 3.1 计算实例

某实际工程已知库容为 2355 万  $m^3$ ，共设有主副坝各一座，主坝最大坝高 29.2m，坝长 192m，副坝最大坝高 19.2m，坝长 91m。以主坝为例，结合黄河水利委员会经验公式和铁道部科学研究院经验公式，设定溃口初始底宽为 0.7m，纵、恒向侵蚀速率分别为 0.0108m/s 及 0.0185m/s，左岸边坡系数 6.3，右岸边坡系数 2.2，溃决总历时 0.5h，溃口最终底高程 19.5m，最终底宽 34m。

采用本文提出的简易迭代方法和 HEC-RAS 软件对溃口流量过程分别进行计算，计算结果见图 3，从图中可以看出：根据本文提出的简易迭代计算方法进行计算得出在溃决 28min 后，溃口流量达到最大值（6790.8 $m^3/s$ ）；通过 HEC-RAS 计算，在大坝溃决之后 24min 溃口流量达到最大值（6403 $m^3/s$ ）。两者洪峰流量差 5.7%，峰现时间差 14.3%，两者吻合良好。出现差异的原因可能为，HEC-RAS 软件设置的边界条件（库容、河道断面）是通过 30m $\times$ 30m 的 DEM 数字高程数据提取的，所提取的断面数据与实测数据存在一定的差异，导致 HEC-RAS 计算的溃口洪峰到达时间提前。在相同的计算参数情况下，本研究方法只需库容曲线就能进行计算，且计算过程简便快捷。

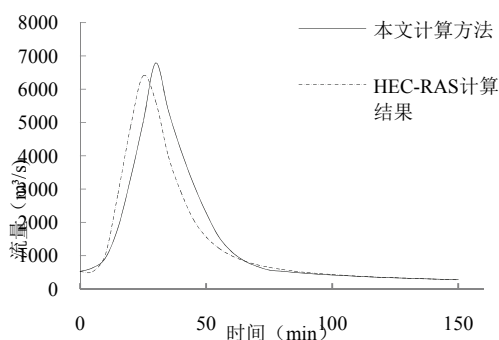


图3 溃口流量结果对比

### 3.2 主副坝溃决差异

为了研究该工程溃坝可能造成最大危害的情况，我们假设主副坝同时溃决、主坝单独溃决、副坝单独溃决3种工况。计算结果见图4至图6所示。

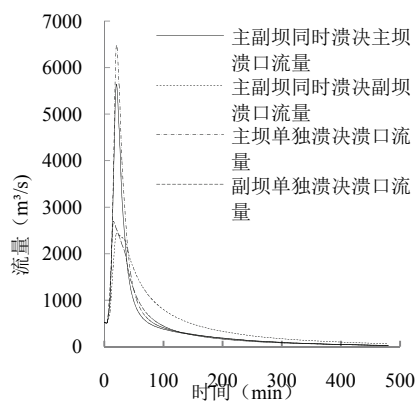


图4 不同工况溃口流量

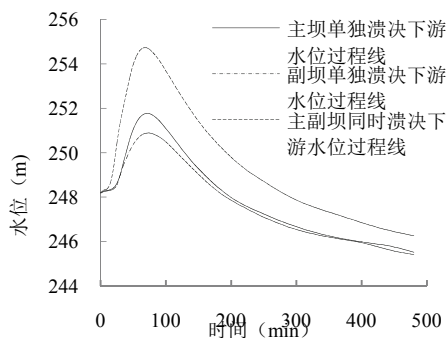


图5 下游10km断面水位过程

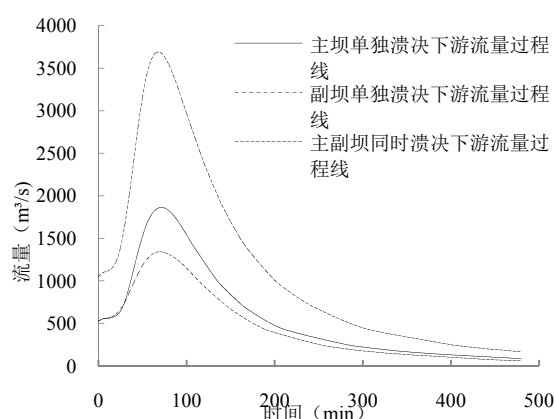


图 6 下游 10km 断面流量过程

由计算结果可知：①主副坝同时溃决，水库库容由于分流会对单个溃口流量过程产生一定的滞缓作用，但是洪峰削减作用不明显，且对峰现时间几乎无影响；②在下游 10km 断面处，由于溃坝洪水的叠加效应，主副坝同时溃决时远远超过单独溃决时的洪水流量；③不同溃口大小、形状导致了流量过程线的差异，在溃决时间一致的情况下，副坝的最终溃口更小、形状更狭窄，峰现时间基本一致，但在达到洪峰之后，副坝的流量过程线更为平缓

## 4 结论

本研究以宽顶堰流计算公式及水量平衡方程为基础，建立了土石坝漫顶逐渐溃决时，溃口流量过程的简易迭代计算方法。结合实际工程，采用本研究方法和 HEC-RAS 软件对溃口流量过程分别进行了计算，结果表明两者的计算结果吻合良好，计算过程更为简便快捷。又对主副坝同时溃决进行了计算，结果表明同时溃决对溃口流量有一定的滞缓，但会对下游造成更大的影响。

## 参 考 文 献

- 1 解家毕, 孙东亚. 全国水库溃坝统计及溃坝原因分析[J]. 水利水电技术, 2009, 40(12):124-128.
- 2 郭军. 欧美国家近期溃坝研究及发展动向[J]. 中国水利, 2005,(4):23-26,29. DOI:10.3969/j.issn.1000-1123.2005.04.007.
- 3 Osman A M, Thorne C R. Riverbank Stability Analysis. I: Theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 114(2):134-140.

- 4 Thorne C R , Osman A M . Riverbank Stability Analysis. II: Applications[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 114(2):151-172.
- 5 Darby S E , Thorne C R . Development and Testing of Riverbank-Stability Analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 122(8):443-454.
- 6 FREAD D L.DAMBRK:The NWS dam break flood forecasting model[R].Silver Spring:National Weather Service(NWS) Report,NOAA,1984.1-32.
- 7 陈生水,钟启明,任强.土石坝漫顶破坏溃口发展数值模型研究[J].水利水电工程学报,2009,(4):53-58. DOI:10.3969/j.issn.1009-640X.2009.04.007.
- 8 邓刚,赵博超,温彦锋,等.土石坝漫顶溃口洪水过程概化计算模型[C]//高坝建设与运行管理的技术进展——中国大坝协会2014学术年会.

## **Study on calculation method of discharge at gradual breach of earth-rock dam**

CHEN Si-han, TIAN Zhong

(State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering|Sichuan University Chengdu 610065

Email:[939923808@qq.com](mailto:939923808@qq.com))

**Abstract:** Dam outburst is dangerous and can cause huge loss of property, and the flow process of broken mouth is an important parameter for dam break analysis. In this paper, through theoretical analysis, the calculation method of instantaneous flow of the broken mouth in the process of gradual outburst of Earth-Rock Dam is established. The method proposed in this paper is used to calculate the flow rate of a real project, and compared with the results calculated by the HEC-RAS, the two are in good agreement, and the former is more brief. This paper calculates and analyzes the evolution of a dam break in a practical project, and discusses the difference of the flow rate and the evolution process of the flood under the condition of simultaneous outburst and individual outburst of the main and secondary dams.

**Key words:** flow process of broken mouth; theoretical analysis; numerical simulation; HEC-RAS; simultaneous outburst outburst of the main and secondary dams.