

文章编号:1004-4574(2012)04-0033-07

考虑调洪的一维漫顶不溃与漫顶溃坝过程模拟

张社荣,张 婷

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300072)

摘 要:建立了一维数值模型,可模拟包括瞬时溃与逐渐溃的漫顶溃坝过程,同时可模拟对于混凝土坝失事来说最常见的漫顶不溃过程;可考虑泄水建筑物的调洪过程对溃坝过程的影响,且针对泄水建筑物不同的布置形式,能够分别模拟位于坝身与岸边的泄水建筑物。以土心墙堆石坝为例,模拟大坝的漫顶逐渐溃过程,分析了溃口流量、泄水建筑物流量的变化过程,可知溃坝发生后,溃口流量急剧增大,泄水建筑物泄量迅速降低;对比分析了不同漫顶原因、溃决形式以及溃决历时下的流量过程。以混凝土重力坝为例,模拟大坝的漫顶不溃与漫顶瞬时溃过程,分析了不同溃决形式下大坝下泄总流量的变化过程,可知溃坝发生后,大坝下泄总流量突增后降低,不同工况下,随着溃口尺寸越大,总流量峰值越大,流量下降的速度越快,稳定时间越短。

关键词:一维数值模型;漫顶;溃坝过程;调洪

中图分类号:TV131

文献标志码:A

One-dimensional simulation of only overtopping and overtopping breaking process

ZHANG Sherong, ZHANG Ting

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: This paper builds a 1D numerical model that can simulate instant and gradual dam break process due to overtopping as well as the only overtopping process, which is the most common process of concrete dam failure. The model can consider the influence of flood regulation process of water release structure on dam break process, and simulate the water release structure in dam or on both sides of dam for different layout forms of water release structures. The paper took a soil core wall rockfill dam as an example, simulated the gradual dam break process due to overtopping, analyzed the discharge curves of breach and water release structures. It is shown that after the break, the discharge of breach increases rapidly and water release in structures reduces rapidly. Then different reasons of overtopping, forms of breach and duration of break was analyzed and compared. With an example of a concrete gravity dam, only overtopping process and instant dam break process due to overtopping were simulated, the dam's total released discharge with different forms of breaches were analyzed. The result indicated that, after the dam break, the dam's total released discharge reduces after instant abrupt increase, and in all analysis cases, the larger the breach's size, the greater and faster the total released discharges, the faster the discharge speed declines, and

收稿日期:2011-09-16; 修回日期:2011-11-23

基金项目:国家自然科学基金项目(50809046)

作者简介:张社荣(1960-),男,教授,主要从事水工结构分析、水电工程安全技术研究. E-mail:tjuzsr@126.com

the shorter the stable time.

Key words: one-dimensional numerical model; overtopping; dam break process; flood regulation

大坝给人类带来巨大效益的同时,也给人类带来了潜在的危害,一旦发生超出控制的下泄洪水,必将对大坝本身及上、下游区域人类生命、经济、社会和环境造成巨大损失和深重灾难。历史上曾发生多起影响较大、损失严重的溃坝事件,如法国 Malpasset 拱坝(1955),意大利 Vajont 大坝(1963),我国河南省板桥、石漫滩水库两座大型水库(1975),美国 Teton 土坝(1976)等^[1-3]。近年来,虽溃坝事件有所减少,但人口集中程度、经济发展程度同时较往年增加,溃坝造成的损失有增无减,如 2003 年 8 月,中国、越南和菲律宾等地突降暴雨造成堤防溃坝^[4],成千上万的房屋被淹,经济损失 1.45 亿美元。因此,研究溃坝问题具有很重要的现实意义。造成溃坝的原因有很多,漫顶破坏是造成大坝溃决的主要原因之一^[5-6]。

对于溃坝类型,根据溃坝过程时间长短,可分为瞬时溃和逐渐溃;根据溃口规模大小,可分为全部溃和局部溃。通常不同坝型的溃坝类型不同,对于混凝土坝,一般是瞬时溃而且多出现局部溃;对于土石坝,达到溃决有一个时间过程,属于逐渐溃类型,且随坝料、坝料组合及填筑质量的不同,溃决过程也是不同的^[7]。虽然溃坝可能造成的损失巨大,但不同坝型抗御洪水的的能力是不同的。土坝、堆石坝等没有胶结材料的土石坝,洪水漫顶极易引起溃坝事故;混凝土坝、浆砌石坝等有胶结材料的坝体抗御洪水漫顶的能力比土石坝强,在洪水适当漫顶时不会造成溃坝事故^[8],但漫顶洪水能量较大,不仅易造成坝基和两岸冲刷,且对下游的防洪安全也会产生极大影响。因此,对于混凝土坝,研究漫顶不溃更有实际意义。本文通过建立一维数值模型,针对漫顶不溃过程以及包括逐渐溃、瞬时溃的漫顶溃坝过程展开分析。

水库是控制洪水的有效工程措施,其调节洪水的作用在于拦蓄洪水、削减洪峰、延长泄洪时间,使下泄流量能安全通过下游通道^[9]。在溃坝发生后,水库仍然有一定的调蓄作用,大坝溃决是一个非恒定流过程,其库水位是变化的,水库的调蓄作用同样发生变化^[10]。水利枢纽中,泄水建筑物可以与坝体结合在一起,如各种溢流坝、坝身泄水孔;也可设在坝体以外,如各式岸边溢洪道和泄水隧洞等^[11]。混凝土坝一般适于经坝体泄洪,泄水建筑通常布置在坝身,当难于经坝身泄放全部洪水时,需要在坝体以外的岸边建造溢洪道或开挖泄洪洞。对于土石坝,一般不容许从坝身溢流或大量泄流,泄水建筑通常布置在岸边。而两种泄水建筑物由于布置形式的不同,溃坝发生后所起到的调洪作用是不同的。本文建立的一维数值模型,可考虑水库的调蓄作用,且能模拟不同泄水建筑布置形式下的溃坝过程,更为有效地模拟漫顶溃坝过程。

1 一维溃坝过程数值模型的建立

1.1 溃口水流计算

(1) 溃口参数定义方式

本文通过建立溃坝结构模块,用于定义坝体以及溃口形状参数。对于漫顶不溃,仅定义坝体形状参数;对于瞬时溃,定义溃口形状参数为常数;对于逐渐溃,目前对土石坝溃决机理及溃口发展过程的研究虽有很多有价值的结论^[12-13],但由于土石坝溃决机理的复杂性,研究尚不深入,本文根据经验公式、经验数据、类比工程等,采用人为假定的形式,定义溃口形状参数随时间发展的时间序列,初始溃口为一点,可随时间按任何规律发展变化为任意形状的溃口。溃口的形状参数通过定义相对原点的溃口控制点相对坐标来定义,原点设定为坝址横断面最低点,如图 1 所示的溃口发展过程模拟示意图。

(2) 坝址流量过程线推求

为实现漫顶不溃的模拟,本文将溃坝引起的溃坝流量概化为两种过程的结合,一为溢流堰过流,二为溃口过流,如图 1 所示为溃决水流的计算示意图,分别计算过堰顶的流量与溃口流量,当模拟漫顶不溃时,仅需要将坝顶当做溢流堰过流进行计算。分别计算同时为了区别溃口流量与一般的堰流,过溃口建筑物的流量计

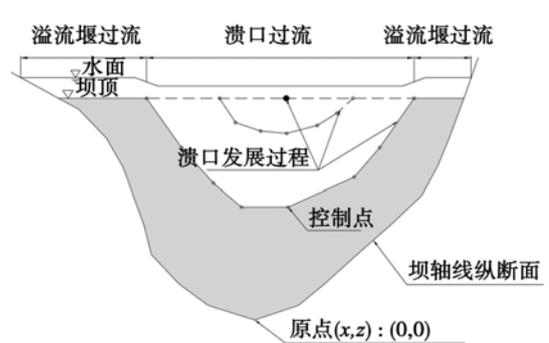


图 1 溃口发展过程及溃决水流计算示意图

Fig. 1 Schematic diagram of break developing process and dam break flow calculation

算虽类似于宽顶堰,但对于逐渐溃,由于坝的形状随着时间发生改变,溃口不断扩展,同时堰顶不断减小,因此与一般的堰流是有区别的。溃坝流量计算采用能量方程,一维恒定总流的能量方程为:

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_w, \quad (1)$$

式中: z_1, z_2 为上、下游断面处的水位, m; P_1, P_2 为上、下游断面处的水压, Pa; v_1, v_2 为上、下游断面处水的流速, m/s; γ 为水的重度, $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^2)$; g 为重力加速度, m/s^2 ; h_w 为水头损失, m; α_1, α_2 为动能修正系数。

1.2 泄水建筑物模拟

如图 2 所示,假定在坝身处布置泄水孔,并在岸边相同高程处布置同样开口大小的岸边泄水建筑,溃口由溃口 1 发展至溃口 2,至最终溃口 3。当溃口尚未发展到泄水孔处时(溃口 1),两种布置形式泄水建筑的泄流能力均未受到影响;当溃口发展至泄水孔中部位置时(溃口 2),泄水孔位于溃口内部的部分相应被冲毁,泄流能力受到影响,而岸边泄水建筑并未冲毁,泄流能力未受影响;当溃口发展至泄水孔底部以下时(溃口 3),泄水孔完全被冲毁,泄流能力为 0,而这时溃口底部以上仍有一定的水头,因此岸边泄洪建筑仍有一定的泄流能力。

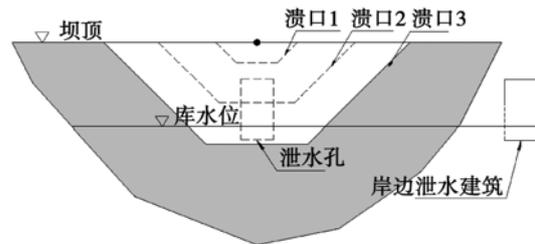


图 2 泄水建筑物位置对比图

Fig. 2 Comparison of position of water release structure

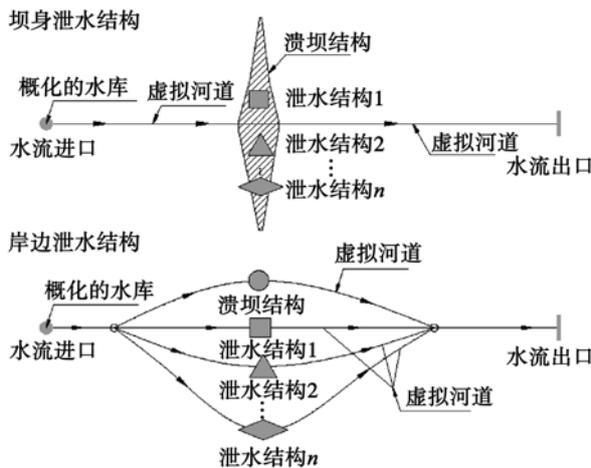


图 3 泄水结构模拟示意图

Fig. 3 Schematic diagram of simulation of water release structure

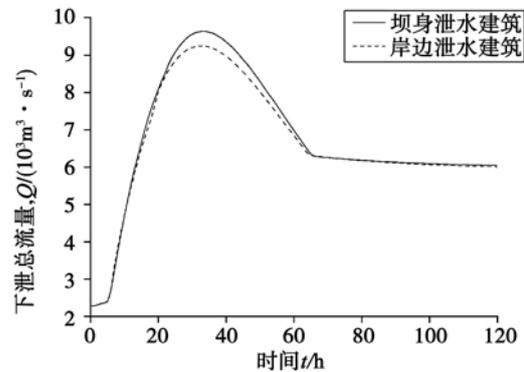


图 4 两种泄洪建筑布置形式下溃坝下泄总流量

Fig. 4 Dam's total released discharge for two position forms of water release structure

考虑调洪的溃坝过程模拟具体的实现方式是:将库区概化为一个蓄水节点,坝址上、下游附近河道采用虚拟手段,建立与溃坝结构模块相互独立的泄水结构模块,定义泄水结构的基本参数信息。若采用坝身泄水结构形式,将泄水结构模块与溃坝结构模块定义到相同河段的相同位置;若采用岸边泄水结构形式,将溃坝结构模块与各泄水结构模块分配在不同的虚拟河道上,呈并联关系,河道的起点、终点各自相交于一点。泄水结构模拟示意图见图 3。

水库洪水调度计算方法为:

$$Q_i - Q_o - Q_k = \frac{dV}{dt}, \quad (2)$$

式中: Q_i 为入库洪水流量, m^3/s , 即为不同频率洪水过程线; Q_o 为泄水建筑物过流流量, m^3/s , 可通过泄水建筑物的水位泄量关系曲线确定; Q_k 为溃口流量, m^3/s ; V 为水库库容, m^3 ; t 为时间, s。

为比较泄水建筑物的布置形式对溃坝过程计算结果的影响,拟定图 2 所示的坝体,坝高 50 m,溃口发展如图所示,假设线性发展,在坝身以及岸边的泄水建筑具有相同的泄流能力。计算二者的溃口流量如图 4 所示。由图 4 可知,二者所求得的大坝下泄总流量,坝身泄水建筑较岸边泄水建筑的为大,这是由于坝身泄水建

筑泄流能力受溃坝影响较大。

1.3 溃坝模型计算程序及计算流程

一维溃坝过程数值模型计算程序界面见图5,图中给出溃坝结构模块的主界面。如图5所示,模型共分四个模块,分别为河网模块、溃坝结构模块、泄水结构模块与结果处理模块。通过在河段模块定义河网沿程与断面数据、入库洪水流量过程、水位-库面面积关系、模拟时间等,在溃坝模块定义坝体形状参数、溃口形状参数等,在泄水建筑物模块定义溢流堰以及导流洞的形状参数以及水位泄量关系等,便可进行考虑水库调蓄作用下的溃坝过程的计算,最终通过结果处理模块可得到库水位、各泄水建筑物的下泄流量、坝址处的溃口流量以及总的下泄流量关系等。溃坝过程计算流程见图6。

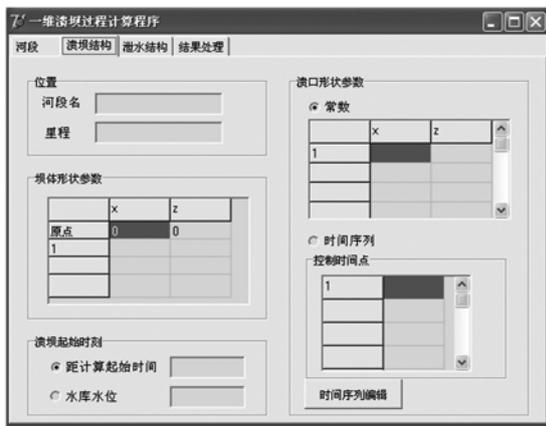


图5 溃坝结构模块主界面

Fig. 5 Main interface of dam break structure module

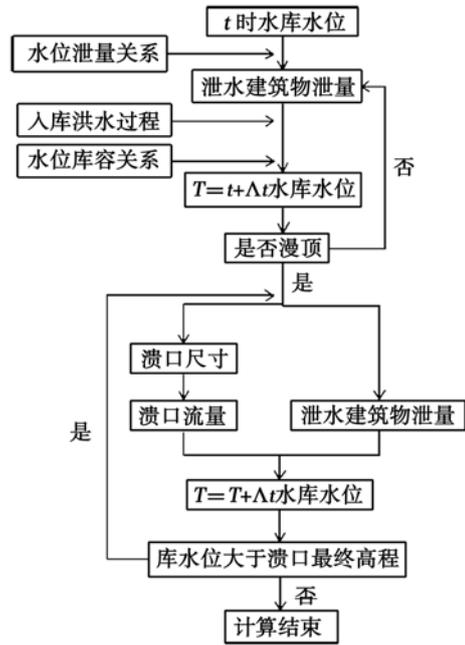


图6 溃坝过程计算流程图

Fig. 6 Flowchart of dam break calculation

2 土石坝漫顶溃坝过程模拟

2.1 工程基本资料

某水利枢纽,枢纽建筑物由土质心墙堆石坝、溢洪道、泄洪洞、竖井泄洪洞等建筑物组成。最大坝高295 m,防浪墙高1.2 m。挡水、泄水建筑物按千年一遇洪水设计,PMF校核。当电站遇千年一遇及以上洪水时,泄水建筑物均参与泄洪。经分析,考虑泄水建筑物单闸门打不开致使工程发生漫顶溃坝的工况,假设考虑

表1 大坝漫顶溃坝计算工况

Table 1 Calculation conditions of dam break due to overtopping

工况组合	工况划分方式	造成漫顶原因	溃口形式	溃决历时, t/h
1	造成漫顶原因	溢洪道闸门打不开	顶部 1/4 溃	4
2		深孔泄洪洞闸门打不开		
3	溃口形式	溢洪道	顶部 1/3 溃	4
4		闸门打不开	1/2	
5			全溃	
6	溃决历时	溢洪道	顶部 1/4 溃	1
7		闸门打不开		2
8				3

风浪因素后,库水位漫过防浪墙时即发生漫顶溃坝。漫顶溃坝计算工况根据造成漫顶原因以及溃口大小、溃决历时来划分,按造成漫顶的原因划分,可分为溢洪道闸门打不开与泄洪洞闸门打不开的情况;按溃口形式划分,在溢洪道闸门打不开的前提下,分为顶部1/4溃、顶部1/3溃、1/2溃以及全溃4种情况;按溃决历时划分,在溢洪道闸门打不开的前提下,分为1 h,2 h,3 h,4 h四种情况。计算工况见表1。

2.2 计算结果分析

(1) 工况1结果分析

图7、图8分别为洪水历时100 h到150 h间的溃口流量过程线与泄水建筑物流量过程线。

由图7可知,溃坝发生于洪水到来后的107 h,溃坝发生后,溃口逐渐增大,溃口流量急剧增大,溃坝后4 h时,溃口形状稳定,溃口流量达到峰值,随后流量降低。由图8可知,溃坝发生后,泄水建筑物泄量迅速降低,这是由于大量库水释放,库水位突降的原因,随后泄水建筑物泄量趋于稳定。在整个洪水历内,深孔泄洪洞均参与泄洪;在溃坝后6.25 h时,竖井泄洪洞不再参与泄洪。

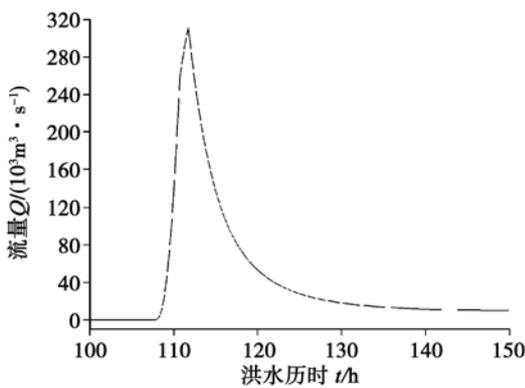


图7 洪水历时100 ~ 150 h间的溃口流量过程线
Fig.7 Discharge curves of breach from the flood duration of 100 - 150 h

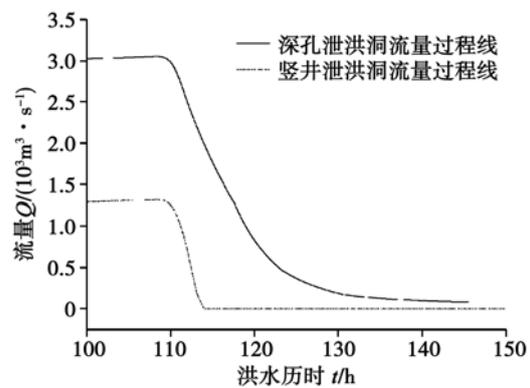


图8 洪水历时100 ~ 150 h间的泄水建筑物流量过程线
Fig.8 Discharge curves of water release structures from flood duration of 100 - 150 h

(2) 各工况计算结果

各工况溃口峰值流量、大坝下泄总峰值流量以及溃坝后泄水建筑物失效时间见表2。

表2 各工况计算结果汇总

Table 2 Calculation results of all conditions

工况组合	溃口峰值 流量($Q/10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	下泄总峰值 流量($Q/10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	泄水建筑物泄量为零的时间 t/h (距溃坝后)		
			溢洪道	深孔泄洪洞	竖井泄洪洞
1	312.2	315.3	—	整个历内均参与泄洪	6.3
2	310.9	312.9	5.57	—	5.6
3	421.8	424.3	—	9.9	4.7
4	601.3	602.9	—	5.6	3.6
5	1 056.4	1 056.4	—	3.5	2.8
6	398.3	402.2	—	整个历内均参与泄洪	4.0
7	369.1	372.2	—	整个历内均参与泄洪	4.8
8	342.7	346.3	—	整个历内均参与泄洪	5.5

由表2可知,工况1与工况2相比,溢洪道闸门打不开造成的溃口峰值流量与下泄总峰值流量更大,这是由于溢洪道泄流能力较深孔泄洪洞的更大;工况1与工况3,4,相比,不同的溃口形式下,溃口尺寸越大,溃口峰值流量与下泄总峰值流量越大,泄水建筑物越快失效,1/3溃较1/4溃峰值流量增加35%,1/2溃峰值流量增加近一倍,全溃峰值流量增加2.35倍;工况1与工况6,7,8相比,不同的溃决历时下,溃决历时越小,溃口峰值流量与下泄总峰值流量越大,泄水建筑物越快失效,溃决历时3 h较4 h峰值流量增加了近10%,溃决历时2 h较4 h峰值流量增加18%,溃决历时1 h较4 h峰值流量增加27%。

3 混凝土坝漫顶不溃与漫顶溃坝过程模拟

3.1 工程基本资料

某电站水库,总库容 7.597 亿 m^3 ,枢纽建筑物由挡水建筑物、泄洪消能建筑物等组成,其中拦河大坝为碾压混凝土重力坝,最大坝高 168 m,泄洪建筑物由 5 个溢流表孔和两个泄洪中孔组成,最大泄流量为 15 500 m^3/s 。电站按 500 a 一遇洪水设计,5 000 a 一遇洪水校核。电站的洪水调节采用敞泄方式,为安全起见,调洪计算中校核洪水时仅考虑泄洪建筑物的泄洪能力,不考虑机组参与泄洪。

计算工况考虑特殊原因,如库内滑坡造成上游水位突升至 1344 m 时,导致漫顶不溃以及不同溃决形式的漫顶溃坝的工况,设上游来水流量恒为 4 000 m^3/s ,具体工况组合见表 3。

表 3 大坝失事过程计算工况

Table 3 Calculation conditions of dam failure process

工况组合	溃决形式	溃口尺寸宽 B/m × 最大溃口高 L/m
1	漫顶不溃	—
2	中部单溢流坝段溃决	20.0 × 168.0
3	5 个溢流坝段全溃决	103.0 × 168.0
4	泄水坝段全溃决	183.0 × 168.0

3.2 计算结果分析

图 9 为大坝下泄总流量过程线。由图可知,溃坝发生后,各工况大坝下泄总流量突增,漫顶工况的总流量峰值最小,为 50 426.48 m^3/s ,其余各溃坝工况,溃口尺寸越大,总流量峰值越大;随后各工况流量均迅速降低直至稳定,且各溃坝工况,随着溃口尺寸的增大,降低的速度越快,工况 2 下泄总流量稳定时间较长,工况 3 下泄总流量稳定时间在溃坝后 75 min 左右,工况 4 下泄总流量稳定时间在溃坝后 50 min 左右。

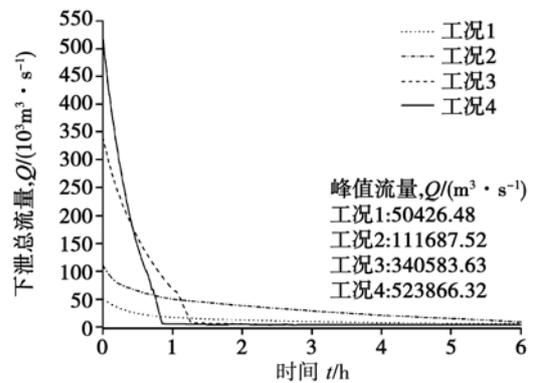


图 9 失事发生后 6h 内各工况大坝下泄总流量过程线

Fig. 9 Curves of dam's total released discharge for all conditions in 6h after failure happened

4 结论

本文通过建立一维数值模型,针对不同坝型不同的失事形式,可模拟漫顶不溃、漫顶溃坝过程,针对不同布置形式泄水建筑物对溃坝过程的不同影响,能够分别模拟坝身与岸边泄水建筑物的调洪过程。主要有以下结论:

(1) 通过分别计算坝顶溢流与溃口过流,可区分溃口过流与一般溢流的区别,从而实现了漫顶不溃的模拟。通过不同的溃口发展定义方式,可模拟瞬时溃过程、逐渐溃过程,且可人为设定任意形状的溃口。通过概化蓄水节点、虚拟河段,并构建相互独立的溃坝结构以及泄水结构模块的方法实现了坝身与岸边泄水建筑物调洪过程的模拟。最后,采用建立的一维溃坝过程数值模型对土石坝漫顶溃坝过程进行了分析,并得到溃口流量、下泄总流量等随漫顶原因、溃口形式与溃决历时的变化规律;对混凝土坝漫顶不溃与漫顶溃坝过程进行了分析,并得到下泄总流量随溃决形式的变化规律。

(2) 本文所建立的一维溃坝过程数值模型,对于土石坝溃口大小以及溃口发展过程,采用人为假定的方式,虽可根据经验公式、经验数据、类比工程等方式确定,但未涉及复杂的溃决机理,未从溃决机理上分析溃口发展过程。今后应针对土石坝漫顶破坏机理、溃决过程开展大量研究工作,从而进一步验证和完善本模型。

参考文献:

- [1] 张大伟,程晓陶,黄金池. 大坝瞬时溃决水流数值模拟—以 Malpasset 水库为例[J]. 水利水电科技进展,2009,29(5):1-4.
ZHANG Dawei, CHENG Xiaotao, HUANG Jinchi. Numerical flow modeling of instant dam failure: a case study of the malpasset reservoir [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(5): 1-4. (in Chinese)
- [2] 宋恩来. 国内几座大坝事故原因分析[J]. 大坝与安全, 2000, 14(2): 41-44.
- [3] Lou W C. Mathematical Modeling of Earth Dam Breaches[D]. Fort Collins: Colorado State University, 1981.
- [4] 秦年秀,姜彤. 2003年重大自然灾害回顾[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(1): 38-44.
QIN Nianxiu, JIANG Tong. A review on global natural disasters in 2003[J]. Journal of Natural Disasters, 2005, 14(1): 38-44. (in Chinese)
- [5] Macdonald T C, Monopolis J L. Breaching characteristics of dam failures[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1984, 110(5): 567-86.
- [6] Singh V P, Scarlators P D. Analysis of gradual earth-dam failure[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1988, 114(1): 21-42.
- [7] 李雷. 大坝风险评价与风险管理[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2006: 1-182.
- [8] SL252-2000 水利水电工程等级划分及洪水标准[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2000.
- [9] 叶守泽. 水文水利计算[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2006: 1-324.
- [10] 李洋. GIS支持下的黑河金盆水库溃坝洪水数值模拟[D]. 西安:西安理工大学, 2007.
LI Yang. The Numerical Simulation of Dam-break Floods Based on GIS in Jinpen Reservoir[D]. Xi An: Xi An University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [11] 林继铺. 水工建筑物[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2006: 1-555.
- [12] 何秉顺,丁留谦,刘昌军. 面板砂砾石坝异常渗流及破坏机制探讨[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(6): 141-145.
HE Bingshun, DING Liuqian, LIU Changjun. Research on abnormal seepage and failure mechanism of faced rockfill dam [J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(6): 141-145. (in Chinese)
- [13] 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]. 水利水运工程学报, 2009, 4: 53-58.
CHEN Shengshui, ZHONG Qiming, REN Qiang. Numerical model study on break development due to overtopping failure for earth-rock dam [J]. Hydro-Science and Engineering, 2009, 4: 53-58.