

文章编号:0559-9350(2006)02-0222-05

溃坝洪水的统一二维数学模型

黄金池,何晓燕

(中国水利水电科学研究院 防洪减灾研究所,北京 100038)

摘要:本文通过资料分析,在前人已有工作基础上,提出了通过统一的二维模型替代以往一维和二维模型嵌套方法的理论基础,探讨了基于此新的概念模式进行数值计算的网格剖分。利用作者以往的洪水冲刷试验研究成果模拟土石坝溃坝发展过程中的逐渐溃模式,探讨了土石坝逐渐溃的溃坝模式数值描述方法,溃坝洪水过程的数值模拟等。文中还介绍了一个实例计算。

关键词:溃坝;数值模拟;格尔木温泉水库

中图分类号:TV139.2

文献标识码:A

溃坝洪水是一种低概率、高危害的社会致灾因素。尤其是对于高坝大库,一旦失事其危害十分巨大。随着国家经济的发展,城市化进程的加快,低频率、高危害的灾害风险问题逐渐成为人们关注的重点,溃坝洪水就是这样一类问题。我国有各类水库大坝 8 万多座,其中库容超过 1 亿 m^3 的大型水库就有 400 多座。这些大坝一旦由于不同原因发生溃坝对于下游地区影响是可怕的。因此,研究大坝溃坝问题,探讨水库溃坝风险对于制定地区应急预案,加强区域防洪减灾是十分必要的。

正是由于溃坝洪水的巨大危害性,世界各国对溃坝洪水都有系统的研究,溃坝洪水计算模型是洪水风险评价的重要工具,长期以来受到国内外学者的广泛关注,许多学者对这一问题进行过专门探讨。如美国的 DAMBRK 模型,荷兰的 DELFT-3D 模型,丹麦的 DHI 等都对溃坝洪水计算问题进行了研究,欧洲在最近几年更是投入巨资专门对溃坝洪水模型进行了全面的比较研究,1998 年由欧盟支持启动的 ACDAM 项目历时 2 年,专门对目前世界上一些有影响的模型进行了比较分析,得出的结论是,目前所采用的各种模型仍然存在相当大的不确定性^[1]。在我国,系统研究溃坝数值模型始于 20 世纪 70 年代^[2],以后针对我国一些水库的实际问题开展了一些模型研究,其中一维模型的研究成果较多,平面二维数值溃坝洪水计算成果相对较少,且多为较理想的边界情况^[3]。我国很多水库建在山区,洪水传播过程往往具有一维特征,而淹没影响区则处于下游平原区,具有较强的平面二维特征。以往的做法大多是将分别开发的一、二维模型通过嵌套接口来解决这类问题^[4],往往使得计算模式复杂,数值处理工作量较大,接口附近的计算问题也存在不确定性。另一方面,现有溃坝模型对于土石坝逐渐溃模式采用的一些假定任意性较大,如何考虑溃口发展过程仍然是目前溃坝模型中没有得到很好解决的重要技术问题。

1 数学模型

1.1 水流运动基本方程 从水流运动方程的物理意义可知,一维水流运动方程只是平面二维流动的一种简化结果,主要简化内容就是忽略非主流方向的流动影响,因此溃坝洪水计算数学模型中的一维、二维模型方程应该可以统一起来。分别考虑一般溃坝洪水计算中采用的数值模型方法,一、二维模型所依据的基本方程的一种形式可表达如下。

收稿日期:2005-04-06

作者简介:黄金池(1956—),男,湖南澧县人,教授级高级工程师,博士,主要从事河流海岸动力学方面的研究。E-mail:hjc@iwhr.com

一维水流连续方程:

$$\frac{\partial HU}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

一维水流运动方程:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + g \frac{U^2}{C_0^2 R} = 0 \quad (2)$$

二维水流连续方程:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial HU}{\partial x} + \frac{\partial HV}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

二维水流运动方程:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial H}{\partial x} + gU \frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{C_0^2 H} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial H}{\partial y} + gV \frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{C_0^2 H} = 0 \quad (5)$$

上述各式中: B 为河宽; H 为断面平均水深; U 、 V 为 x 、 y 方向流速; g 为重力加速度; C_0 为谢才系数; $C_0 = (P n) \times R^{2/3}$; R 为水力半径,在一定条件下可用断面平均水深 H 代替; n 为糙率; t 为时间。

1.2 方程离散格式 可以看出,如果假定平面二维情况下 y 方向流速 V 为零,则方程(5)消失;式(3)、(4)简化得到与一维情况下的式(1)、式(2)完全相同的方程。这表明,数值模型计算中可以通过采用合适的数值离散方案,对式(3)、式(4)、式(5)构成的二维方程求解一二维混合离散问题。参照图1的网络结构^[5],流量定义在通道上,水位定义在节点上,按积分模式对式(3)、式(4)、式(5)进行数值离散可得到

$$H_i^{n+1} = H_i^n + \frac{\Delta t}{A_j} \sum_j Q_j^n \quad (6)$$

$$U_i^{n+1} = U_i^n + \left[U_i^n \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right)_i^n \pm g \left(\frac{U_x^2}{C^2 H} \right)_i^n - g \left(\frac{\partial h_y}{\partial y} \right)_i^n \right] \Delta t \quad (7)$$

$$V_i^{n+1} = V_i^n + \left[V_i^n \left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right)_i^n \pm g \left(\frac{V_x^2}{C^2 H} \right)_i^n - g \left(\frac{\partial h_x}{\partial x} \right)_i^n \right] \Delta t \quad (8)$$

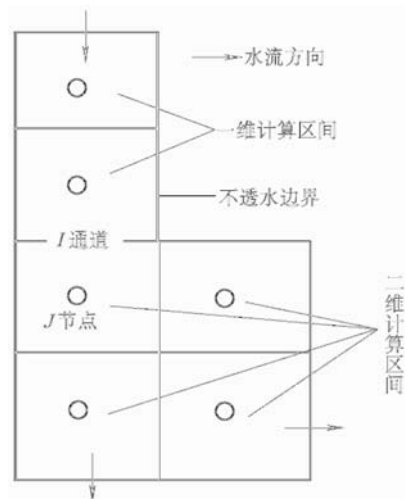


图1 计算网格

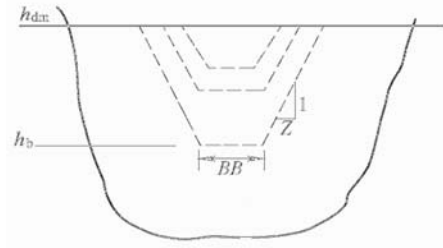
上式各式中: Δt 为计算时段步长; H_i 为网格节点平均水深; 上标 n 、 $n+1$ 分别表示时段始末相应值; I 为单元序号; j 为通道编号; Q_j^n 为通道上在计算时段内的平均流量; A_j 为通道断面面积。

对于一维问题,根据一维流动的基本假定,式(8)消失,式(7)中 y 方向偏导数为零,同时将网格垂直与流动方向的通道设置为不透水边界,则以通道和节点构成的二维计算格式就完全转化为一维计算问题,这样通过网格的数值处理就实现了由二维模型统一考虑溃坝洪水计算中经常出现的一二维嵌套计算,避免以往采用一二维模型分别开发,然后通过接口嵌套产生的一些技术问题。

2 溃坝流量过程计算

溃坝流量过程是一个长期受到人们关注的重要技术问题,有许多学者就这个问题进行过专门研究^[6]。根据不同的坝型和坝体材料,溃坝原因等,溃坝过程分为瞬间全溃,瞬间部分溃,逐渐溃等不同情况。在一些简化假定前提下,可以得到一些解析解,但这些解的表达形式一般都十分复杂,并且所遵循

的前提条件都是实际情况中很难见到的,与实际工程计算有一定差距。对于混凝土重力坝的溃坝模式一般采用瞬间部分溃或瞬间全溃,对于土石坝则有多种选择方案,大部分采用逐渐全溃模式。参考许多国际溃坝洪水模型的做法,假定溃坝发生时以一个特定形状的初始状态(本文采用梯形)在溃坝水流作用下首先沿垂直方向快速发展直至坝底(宽度保持不变),然后横向连续扩宽,溃口形状及其发展如图 2 所示。



h_{dm} 坝顶高程, h_b 溃口底部高程,
 BB 溃口初始宽度, Z 溃口边坡

图 2 土石坝溃坝模式

溃坝时出口流量由两部分组成:一部分是溃口流量,另一部分是水工建筑物的流量,一般有溢洪道泄流量,其他工程如发电、航道等的流量,溃口处瞬时流量采用一般溃坝流量通用计算公式:

$W = W_0 - \Delta t^* q_m$, $q_m = m\sqrt{g}B_0 H_0^{3/2}$, 式中: W_0 , W 为时段 Δt 前后的库容体积,可由水库水位~库容关系求得, H_0 为坝前溃口水深, q_m 为瞬时坝址处的溃坝流量; B_0 为溃口宽度; m 为流量系数。

由上面各式可以看出,需要 H_0 和 B_0 两个参数才能确定溃坝流量,显然这两个参数的确定取决于水库水位的变化和坝体冲刷特征。对于有效水深 H_0 ,一般预先给定溃口宽度,然后根据具体情况和工程要求可以采用两种方法,一种是简化处理,认为坝前水位 $H(H = z + H_0, z$ 为坝前平均河床高程)一直满足: $H = f(W)$ 。显然,这种假定与水库溃坝发展时的实际情况有一定出入;另一种方法是将水库上游来水流量过程进行动态计算,即水位由模型的连续计算给出,此时将坝址溃口控制作为一个内边界条件联立求解得到 H_0 后直接解出溃口流量过程,模型实际运用中可以根据研究的具体情况和精度要求采用不同的溃坝流量计算方法。

对于土石坝围堰的溃坝流量计算,假定为逐渐全溃的模式,计算时给定一个初始溃口宽度和初始水深,采用一个适当地冲刷扩展计算公式计算溃口发展过程。文献[7]通过收集大量野外资料和室内试验,研究了河道洪水过程的清水冲刷问题,得到了一个洪水冲刷深度计算模型

$$S_r = 132000 S_f V H_0^3 D^4 (S_f^2 V^3 H_0^3 - 0.66 D^3) \quad (9)$$

$$\Delta H = \Delta T S_r^2 B \gamma_s^2 \rho_0 \quad (10)$$

上述各式中: S_r 为水库溃坝开始后的坝体冲刷率; S_f 为溃口处的糙率系数; V 为流速; H 为任意时刻溃口处流动的有效水深; D 为坝体材料特征粒径; B 为溃口发展任一时刻的平均宽度; γ_s 为土石物质的干容重; ρ_0 为土坝物质空隙率。

计算中,给出一个初始溃口形态(本文假定这个初始形态为梯形,参见图 2),溃口的发展过程中该形态一直保持不变,以上述方程计算的溃口冲刷率计算溃口垂直方向发展过程,在溃口深度和宽度上均匀发展,一般情况下,冲刷深度方向很快到达河底高程,此时,垂向冲刷发展停止,横向上由水流强度和河道断面宽度控制溃口冲刷扩宽参数。该模式在国际上一些溃坝模型中得到广泛应用,本文采用这一模式利用国外某坝的试验资料计算验证土石坝的溃口冲扩,与实测的溃口发展过程还是比较一致的。

3 工程算例

格尔木温泉水库位于青海省格尔木市南 137km,柴达木盆地南缘格尔木河支流上。大坝为复合土工膜砂砾石坝,坝高 17.5m,长 880m,库容 2.55 亿 m^3 ,属大(2)型工程。由于大坝与格尔木市之间的河道大多为峡谷型河道,一旦溃坝,洪水将直接影响到格尔木市的安全。格尔木市现有人口 20 万,耕地 5.7 万 hm^2 ,随着国家西部大开发战略的实施,格尔木市作为建设西藏的重要中间站发挥着越来越重要的作用。温泉水库除径流调节、保证下游电站出力外、保证格尔木市人民生命财产安全和下游沿线工程的防洪重要性日益上升。

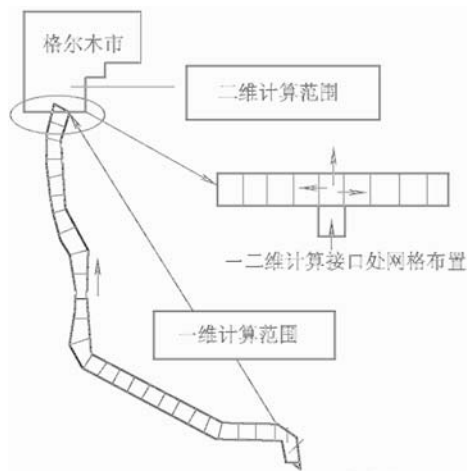


图3 模型计算范围及网格布置(热水库)

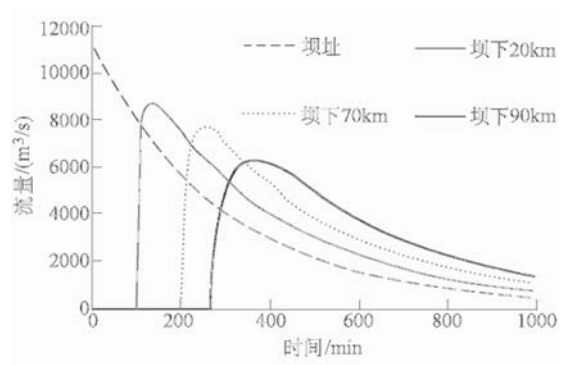


图4 模型计算范围及网格布置

采用上述模型对温泉水库溃坝洪水及影响范围进行了计算^[8]。计算范围包括100km左右的一维河道和格尔木市约220km²面积的城市及周边区域,全部计算区域采用二维网格离散,一、二维网格布置及接口如图3。一维网格部分的河道地形由实测资料通过内插给出(相当于二维网格的通道参数),二维网格地形由1/5万地形图给出。在给定库水位(校核水位)情况下计算得到的溃坝流量一维演进过程和二维淹没区域范围如图4、图5。从图中可以看出,坝址最大溃坝流量约为11500m³/s左右,对比了国内外一些常用经验和一般理论计算公式的估计结果,其数值十分相近。特别是约100km左右的一维计算,从洪水传播时间、洪水传播过程中的坦化等水文现象都在模型计算结果中得到了较为真实的反映,表明一二维模型在整体二维模型中的衔接非常成功。计算中也发现,在一二维网格衔接处,当溃坝洪水波到达的初始阶段,水流有较大的不稳定现象,实际上,天然情况下断面突变处也会出现这种不稳定,从数值上如何解决类似问题有待于今后进一步探讨。



图5 平面二维区域淹没水深等值线

4 结论

通过数值分析建立的一种统一二维模型避免了以往采用两个模型嵌套中引起的一些问题,简化了计算程序,模型中还引用前人的研究成果,对土石坝溃口冲刷发展过程进行了探讨。新的溃口发展模式计算结果较好地反映了溃口实际变化发展过程。实际工程算例表明,用一个适当数值离散的二维模型替代以往的一二维嵌套模式具有一定的理论基础,实际应用中简单可靠。由于计算过程大大简化,对于今后水库安全风险评估中大面积推广使用提供了可能性。计算过程中也发现,一二维网格衔接处在溃坝洪水波到达的初期存在不稳定现象,这是下一步模型完善过程中需要重点关注的问题。

参 考 文 献:

- [1] Morris M.W. CADAM: A European Concerted Action Project on Dam Break Modeling [C]. *Biennial Conference Proceedings, British Dam Society*. Thomas Telford, 2000.

- [2] 林秉南,龚振瀛,王连祥.突泄坝址过程线简化分析[J].清华大学学报,1980,20(1):17—31.
- [3] 魏文礼,等.二维溃坝洪水波演进的数值模拟[J].水利学报,2003,(9):43—47.
- [4] 裴爱国,等.岭澳核电站岭下水库溃坝洪水的数值模拟[J].人民珠江,2004,(4):15—17.
- [5] 黄金池,万兆惠.多沙河流平面二维数学模型研究[J].水科学进展,1997,8(3):253—258.
- [6] 谢任之编著.溃坝水力学[M].济南:山东科学技术出版社,1989.
- [7] 黄金池,王兆印,等.水流冲刷与管道埋设[M].北京:中国建材工业出版社,1998.
- [8] 黄金池.温泉水库溃坝洪水风险分析报告[R].北京:中国水利水电科学研究院.2003.

Unified 2-D numerical model for simulating dam break wave propagation

HUANG Jin-chi, HE Xiao-yan

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: A new approach to mesh generation is proposed to integrate the conventional 1-D and 2-D calculation method of dam break wave propagation into a single unified 2-D model under the same controlling equation. By this approach the problems of connecting the 1-D model with 2-D model can be avoided. On this basis a model for describing the dam break wave with gradually breaking process is established. The application of this model is used to predict the flooding in the downstream of a reservoir due to dam break.

Key words: dam break wave; unified 2-D numerical model; gradually breaking; Golmud Reservoir

(责任编辑:李福田)

(上接第 221 页)

Study on dynamic load of hydraulic oscillation in stepped low pressurized piping system

QIN Liang, LIAN Ji-jian

(Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The theory of structural dynamics is introduced to deal with the hydraulic oscillation of stepped low pressurized piping system. The oscillation mechanism of water surface and discharge in the system during unsteady regulation is analyzed. The numerical simulation of the dynamic process of the system reveals that the income water flow is corresponding to the dynamic load of the structural system. On this basis, the effect of income water variation process on the hydraulic oscillation of system is studied by applying the signal analysis theory. It is found that if the income water flow is controlled following a trigonometric function mode the oscillation of the system can be reduced.

Key words: stepped low pressurized piping system; hydraulic oscillation; structural dynamics; dynamic load; signal analysis; flow control

(责任编辑:李福田)