

河道型水库动库容分析方法

李光炽¹, 周晶晏²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学交通学院、海洋学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 提出附加调蓄量的概念, 采用附加滩地断面积的方法模拟附加调蓄量, 使河道水流系统的蓄量等价于水库的实际蓄量. 通过反分析方法确定区间入流过程, 应用具有附加滩地的河道水流系统模拟水库调洪系统. 通过四点线性隐格式求解河道水流方程, 建立水库动库容的分析方法, 并成功地应用于水口水库的洪水演进模拟, 得到了静库容方法与动库容方法推算入库流量的误差. 计算结果表明, 本文方法是可行的, 可以应用于工程实际.

关键词: 动库容; 水库洪水; 水口水库

中图分类号: TV697; TV133

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2005)05-0009-03

Backwater storage analytic method for river type reservoirs//LI Guang-chi¹, ZHOU Jing-yan² (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Traffic and College of Ocean, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A concept of additional storage capacity was introduced and simulated with the additional cross section area of river beach, so that the storage capacity of the river system is equal to the real storage capacity of the reservoir system. In this study, the reverse analysis method was used to determine the inflow process, and the river system with additional cross section area was applied to simulation of the reservoir flood routing system. By solution of the river flow equation with four-point linear implicit scheme, a reservoir backwater storage analytic method was established. The method was applied to flood routing for the Shuikou Reservoir, and the difference of inflow discharges calculated by backwater storage capacity and static storage capacity was obtained. The result shows that the method is reliable and can be applied to engineering.

Key words: backwater storage; reservoir flood; Shuikou Reservoir

1 问题的提出

对于水库防洪调度计算, 需要推求入库流量. 推求入库流量的传统方法是通过坝上水位和库容曲线推求水库的蓄量变化, 对水库运用水量平衡原理, 根据出库流量求得入库流量, 计算公式为

$$Q_1 = Q_0 + \frac{\partial V}{\partial t} \quad (1)$$

式中: Q_1 为入库流量; Q_0 为出库流量; V 为水库蓄量. 这种方法使用的是静态库容曲线, 无法反映回水产生的动库容的影响. 一般情况, 河道型水库的动库容所占比重较大, 且与入库流量有关, 不考虑动库容的影响会使推求的入库流量产生一定的误差. 文献[1, 2]采用近似函数和实测资料分析相关的方法考虑了动库容的影响, 进行水库的调洪演算. 但方法是近似的, 实测资料有限, 应用时会遇到外推的精度问题. 水库动库容的大小不仅与入库流量有关, 还与出库流量相联系, 这是非恒定流水库动库容计算问题.

这一问题理论上可以通过求解河道水流基本方程来解决. 由于求解比较复杂和困难, 以往应用很少. 随着技术的进步, 本文从求解河道水流基本方程出发, 探讨河道型水库考虑动库容推求入库流量的方法, 以入库站水位、坝上站水位和出库流量的实测资料为基础, 运用水库洪水演进模型来求解入库流量.

2 动库容求解方法

2.1 基本方程

对于河道型水库, 可以把水库库区概化为河道. 若在水库回水变动区末端设有入库水位代表站, 在坝址处设有库水位代表站, 则可以选取两水位站之间的库区河道为研究区域. 对于该区域的河道水流系统, 其控制方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + gA \frac{|Q|Q}{K^2} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

定解条件为

$$\begin{cases} Z_1 = f_z(t) & \text{上边界条件} \\ Z_L = f_z(t) & \text{下边界条件} \\ Q(x, 0) = f_q(x) & \text{流量初始条件} \\ Z(x, 0) = f_z(x) & \text{水位初始条件} \end{cases} \quad (3)$$

式中: q 为旁侧入流量; Q , A 和 Z 分别为河道断面流量、过水断面面积和水位; K 为流量模数; α 为动量校正系数. 该方程可采用四点线性隐格式^[3]求解.

2.2 附加蓄量

对于河道水流系统, 可以计算出水库的蓄量. 由于水库库区的地形变化, 存在山坳、山沟和小支流等情况, 一般说来, 由河道水流系统计算的蓄量小于水库实际的蓄量. 为了正确模拟水库的实际蓄量, 在河道水流系统模拟中必须考虑附加蓄量. 具有附加蓄量的河道水流系统可采用类似于 Abbott 处理的方程^[4,5]:

$$\begin{cases} \frac{\partial(A + A_s)}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + gA \frac{|Q|Q}{K^2} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: A_s 为附加调蓄断面面积, 或称为滩地断面面积. 该面积只起水量的调蓄作用, 不起动量输运作用. 这个面积可由河道水流系统的蓄量等于水库的实际蓄量来确定.

2.3 河道旁侧入流反问题

对于式(3)和式(4)构成的定解问题, 当旁侧入流量 q 已知时的定解问题是众所周知的正问题. 若要同时求解未知的旁侧入流量 q , 则必须有附加条件, 比如下边界的出流已知时有

$$Q_L = f_q(t) \quad (5)$$

该附加条件和原定解问题构成求解旁侧入流反问题. 将该旁侧入流反问题表达为分布参数系统的最优控制问题, 则最优控制问题的实现准则为

$$J(q) = \int_0^T (Q_L - f_q(t))^2 dt \quad (6)$$

该分布参数系统源项控制反问题可表达为: 寻求允许控制旁侧入流量 q , 在它的作用下, 系统的控制方程(4)和定解条件(3)所得到的解, 使式(6)的泛函 J 有最小值. 目前, 解析求解该问题还有一定困难, 可采用文献[3]提出的迭代方法求解.

3 计算实例

3.1 基本情况

水口电站位于福建省闽清县上游 14 km 的闽江干流上, 坝址以上集水面积 52 438 km². 该电站是以

发电为主, 兼有航运、防洪等效益的大型水电站. 建库前水面宽 400 m 左右, 平均坡降 0.055%, 库区两岸多为高 100 ~ 500 m 的丘陵、高山. 建库后水库水面面积约 101 km², 平均河宽约 1 000 m, 平均水深 23 m.

根据设计资料, 水口水库的回水末端在延福门附近, 延福门又是北源建溪的汇入口, 建有水文观测站, 具有可供利用的水文资料, 因此选用延福门站为上边界. 研究目的是水库的洪水演进模拟, 选坝上站为下边界. 从延福门到坝址的河段概化为一维河道, 把河床地形概化为 408 个计算断面. 在计算区域内的河道调蓄曲线及水库设计的库容曲线如图 1 所示, 它们两者之差应为河段的附加调蓄能力, 假设河段的附加调蓄能力与河槽调蓄能力成正比, 由此确定断面附加调蓄面积.

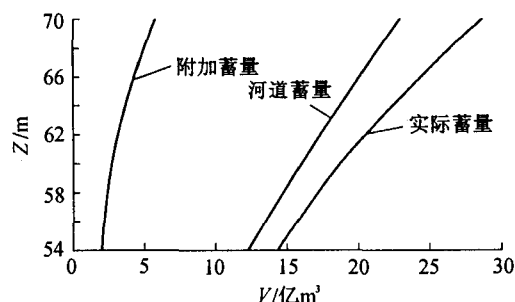


图1 水口水库库容曲线

3.2 计算条件

1998 年 6 月中下旬, 福建闽江支流建溪、富屯溪流域出现持续性暴雨, 致使闽江流域发生了百年难遇的特大洪水. 闽江干流水口水库最大入库流量 36 300 m³/s, 水库在防洪调度中发挥了重要作用. 洪水经水口水库调蓄后, 下游干流竹岐水文站最高水位 16.95 m, 最大流量 33 800 m³/s, 为 20 世纪最大洪水. 在“98·6”洪水期间, 库区有完善的水文观测资料, 沿程实测洪水水位过程的有延福门、夏道、太平、樟湖坂、黄田、雄江和坝上水文站, 它们的位置分别为 14.52 km, 28.65 km, 50.21 km, 60.76 km, 78.24 km, 105.55 km 和 112.13 km; 它们两站间的距离分别为 14.13 km, 21.56 km, 10.55 km, 17.48 km, 27.31 km 和 6.58 km.

计算条件: 以延福门和坝上水文站的水位为计算边界条件, 夏道、太平、樟湖坂、黄田、雄江水文站水位作为验证水位, 出库流量过程作为旁侧入流分析的附加条件.

3.3 计算结果

在洪峰时刻, 计算的库区回水水面线如图 2 所示. 从图 2 可以看出, 太平站以下水面线变化平缓, 太平站以上水面线变化比较陡峭, 说明水库的动库

容特性比较显著.

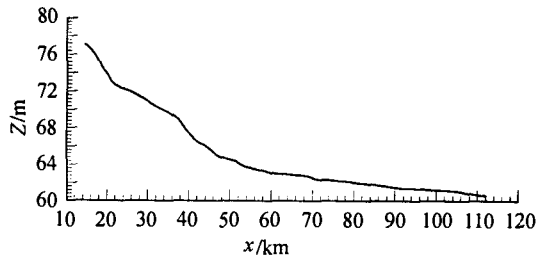


图2 库区回水曲线

库区各站的计算水位过程与实测水位过程比较如图3所示.从图3可以看出,计算的水位过程与实测水位过程吻合很好,说明模拟计算的库区水面曲线变化过程与实际的变化过程相同,由计算的库区水面曲线推求水库动库容的变化能够反映实际的动库容变化.

动库容的变化过程与静库容的变化过程比较如图4所示.从图4可以看出,动库容的变化过程与静库容的变化过程有较大差别.静库容明显小于动库容,特别是在洪峰附近,由于受水库开闸放水的影响,坝上水位下降,据此计算的静库容变小,而实际的动库容是增加的,两者的变化规律不一致.动库容的变化幅度大于静库容的变化幅度,说明依据静库容考虑的蓄量小于实际的水库蓄量.从图中的库容变化过程统计可知,动库容的最大蓄量为23.68亿 m^3 ,而静库容的最大蓄量为17.28亿 m^3 ,两者相差达27%,对于防洪调度来说,这是值得考虑的.

采用动库容计算的入库流量、采用静库容计算的入库流量和实测的出库流量过程如图5所示.从图5可以看出,两种方法计算的入库流量的谷值比较接近,而峰值有一定差别.采用动库容计算的入库流量

过程比采用静库容计算的入库流量过程相位提前,峰值较大.由静库容计算的最大入库流量为35600 m^3/s ,而由动库容计算的最大入库流量为36300 m^3/s ,两者相差达到2%.从图中的入库流量过程与出库流量过程比较可以看出,出库的峰值为33600 m^3/s ,小于入库的峰值,这正是水库的调洪效果.

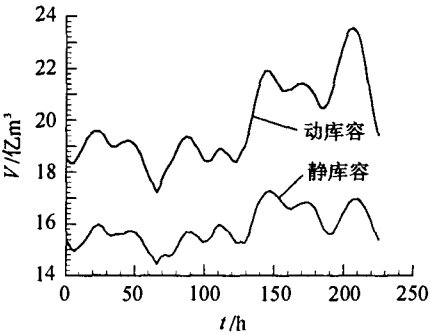


图4 库容变化过程线

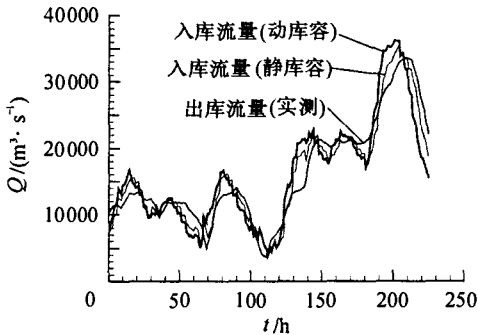


图5 入库、出库流量过程线

4 结 语

a.对于河道型水库,静库容与动库容相差较大.水口水库采用静库容计算的水库蓄量与实际蓄量

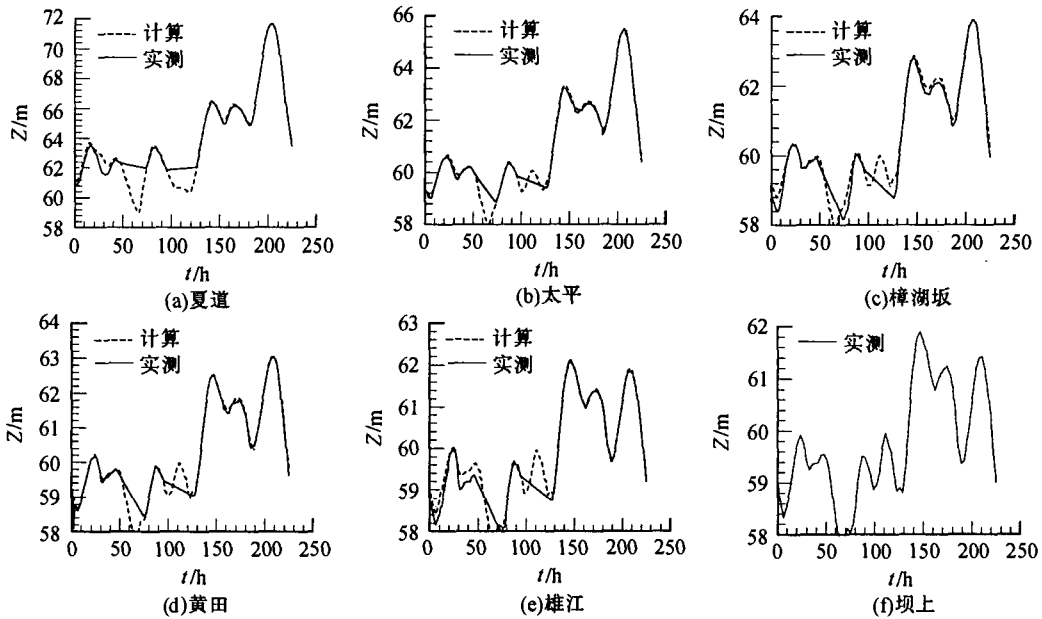


图3 库区水位过程

(下转第67页)

和补浆处理一起作为一种被动的补救措施不可能成为保证后张法预应力混凝土桥梁孔道压浆质量的有力手段。所以,普通压浆工艺在国内桥梁界还将长期使用,而从改进压浆材料和施工工艺着手提高普通压浆质量的工程研究具有实际应用价值。

当有新的灌浆材料拟使用时,必须先经过试验,确定其具有满足要求的新特性,估计外加剂在抗腐蚀方面的特性以及外加剂之间可能存在的副作用后方可用于实际结构。

参考文献:

[1] Woodward R J. Collapse of a segmental post-tensioned concrete

(上接第 8 页)

e. 病险水库风险指数的计算。按式(3)计算病险水库风险指数 R

$$R = P_f L \quad (3)$$

式中: P_f 为溃坝概率。由于溃坝概率 P_f 往往比较小,而 L 在 0.1~1 之间,两者的乘积更小。为直观起见,将其放大 1 000 倍,则式(3)变为

$$R = 1000 P_f L \quad (4)$$

f. 按上述方法计算诸多病险水库的风险指数,然后依风险指数大小排序,决定除险加固顺序。

6.2 计算实例

以沙河集水库为例,按上述方法计算得水库除险加固前后风险指数 R 分别为 0.7180 和 0.0285^①,说明加固后比加固前风险指数降低了 96%。

如果多座大坝作类似分析,则可以得到各坝的风险指数,即可排出风险的大小顺序,供排序决策参考。

7 结 语

本研究在常规的大坝安全鉴定(评价)的基础上,引入和采用目前国际上先进的大坝风险分析概念和技术,首次建立了我国病险水库风险判别标准体系。应用表明,该体系所研究和建议的方法基本可行,并可首先用于病险水库除险加固排序;然而它又是初步的,鉴于大坝安全的重要性及其影响因素众多,以及风险评价仍处于发展阶段,还需对体系中的一些环节做专门的深入调查研究,使该体系得到完善和提高。

参考文献:

- [1] Guidelines on Risk Assessment[S]. Australian National Committee on Large Dams (ANCOLD), 2003.
- [2] Vick S G. Degrees of belief-subjective probability and engineer-

bridge[R]. Concrete Bridge Design and Maintenance: Steel Corrosion in Concrete, 1989. 38—60.

- [2] 朱方容. 后张法中的灌浆技术——真空吸浆法[J]. 湖南交通科技, 2002, 28(2): 54—55.
- [3] 冯大斌, 栾贵臣. 后张法预应力混凝土施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. 89—92.
- [4] 夏涛. 我省大型桥梁若干典型病害处治技术探讨[J]. 湖南交通科技, 2003, 29(3): 56—59.
- [5] Schokker A J, Breen J E, Kreger M E. Simulate field testing of high performance grouts for post-tensioning[J]. Journal of Bridge Engineering, 2002, 7(2): 127—133.

(收稿日期: 2004-07-17 编辑: 高建群)

ing judgment[M]. Reston: ASCE Press, 2002.

- [3] Guidelines for Failure Impact Assessment of Water Dams[S]. Queensland Government Natural Resources and Mines, 2002.
- [4] Dekay M L, McClelland G H. Predicting loss of life in case of dam failure and flash flood[J]. Risk Analysis, 1993(2): 193—205.
- [5] Graham W J. A simple procedure for estimating loss of life from dam failure[R]. D-8540, Bureau of Reclamation, USA, 1999.
- [6] 朱淮宁. 溃坝经济分析研究[D]. 南京: 河海大学, 1997.

(收稿日期: 2004-11-30 编辑: 熊水斌)

(上接第 11 页)差别最大可达 30%。河道型水库的洪水调度应该考虑动库容的影响。

b. 对于河道型水库,采用静库容推算入库流量过程较采用动库容推算入库流量过程滞后,峰值较小,峰值相差可达 2%。

c. 对于河道型水库的洪水调度,可以采用入库站洪水预报和库区的旁侧人流预报作为边界条件,应用水力学洪水演进模型,通过控制坝上水位过程,直接模拟计算出库流量,进行水库洪水调洪演算。

d. 对于河道型水库的历史洪水整编,采用动库容方法推算入库流量过程比较符合实际,建议采用动库容方法推算入库流量。

参考文献:

- [1] 许海军, 陈守煜. 水库动库容调洪计算的数值-解析解法[J]. 水利学报, 2002(3): 69—73.
- [2] 许海军, 陈守煜. 基于实测资料的水库动库容调洪数值解法[J]. 大连理工大学学报, 2003(6): 837—840.
- [3] 李光炽. 流域洪水演进模型及其参数反问题研究[D]. 南京: 河海大学, 2001.
- [4] 阿包特 M B. 计算水力学[M]. 王绍文, 魏启宇译. 北京: 海洋出版社, 1985. 46—79.
- [5] 汪德耀. 计算水力学理论与应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 1989. 152—157.

(收稿日期: 2004-01-06 编辑: 高建群)

①王仁钟, 李雷, 王昭升, 等. 病险水库除险加固排序实用方法研究. 南京水利科学研究院, 2004.