

测压管水位的混合模型研究

郑东健¹, 顾冲时¹, 张 涛², 沈洪俊¹

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 古田溪水力发电厂, 福建 古田 352258)

摘要: 为了考虑库水位对测压管水位的滞后效应, 引入了库水位滞后影响函数和等效水位, 结合三维渗流有限元计算成果, 建立了考虑滞后效应的测压管水位混合模型. 计算实例表明, 该模型能较好地反映库水位对测压管水位的滞后效应, 且精度较高.

关键词: 测压管水位; 滞后效应; 滞后影响函数; 混合模型

中图分类号: TV139.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2001)06-0061-04

为了分析和监控大坝的渗流状态, 需要建立大坝的渗流监控模型. 由于水位对渗流的滞后效应, 模型中水位因子选择较为复杂. 以测压管水位为例, 测压管水位的变化往往要滞后于库水位的变化, 管水位出现峰谷值的时刻比库水位达到峰谷值的时刻要晚. 然而, 由于渗流滞后的机理较复杂, 通常难以用数学模型方法求得测压管水位的滞后时间, 进而难以建立测压管水位混合模型. 本文针对这一问题, 在常规分析方法的基础上, 提出水位滞后影响函数, 由测压管水位实测资料进行优化分析, 得出前期水位对渗流的滞后天数和影响天数及对测压管无滞后效应的等效水位. 利用三维稳定渗流有限元计算成果, 建立考虑滞后效应的测压管水位混合监控模型.

1 滞后影响函数

大坝在实际运行中, 库水位 H 是随时间 t 变化的函数. 由渗流规律可知, 测压管水位 $h(t)$ 是库水位 H 的伴随函数, 同时又滞后于 H 的变化, 即

$$h(t) = f\{t, H(t)(t - \tau_1(t)), H(t - \tau_2(t)), \dots, H(t - \tau_n(t))\} \tag{1}$$

式中: τ ——滞后时间, $\tau_k(t) \geq 0, k = 1, 2, \dots, n$; $H(t), H(t - \tau_k(t))$ ——对应时刻的库水位.

显然, $h(t)$ 是带有时滞变元的函数, 它反映了库水位的峰谷变化与管水位滞后的相关关系, 表明 t 时刻管水位 $h(t)$ 是此时刻以前库水位连续变化影响的瞬态结果.

然而, 要较实际地确定滞后时间并不容易, 以前, 一般选用前期水位的平均值作为因子进行考虑, 如前 5 d 平均水位, 前 10 d 平均水位等等; 而在回归分析时, 有时甚至会选入前一个月的平均水位, 最后难以解释. 实际上, 平均的概念是较笼统的. 设库水位对渗流的作用在第 i 天时产生最大效应, 则在这之前已经开始有一定作用, 在这之后也不会马上失去作用. 因此, 应该是逐渐上升, 然后逐渐下降的过程, 而不应该是平均的过程. 为此, 有必要引入反映水位连续变化和作用的水位滞后影响函数的概念.

设某渗流测点测值受观测日前 n 个水位($i = 1, 2, \dots, n$)的影响, H_d 为某等效水位, 在其作用下该测点在同一观测日有相同测值, 则

$$H_d = \varphi(H_1, H_2, \dots, H_n, P_1, P_2, \dots, P_n) \tag{2}$$

式中: P_i ——第 i 个水位对等效水位的影响权数, 则得权向量 $P = [P_1, P_2, \dots, P_n]$, 并有 $\sum_{i=1}^n P_i = 1, k \leq n$. 则

$$H_d = \sum_{i=1}^n P_i H_i \tag{3}$$

实际工程中,水位和渗流观测量是随时间变化的连续函数,因此,等效水位也是时间 t 的连续函数.设相应的权分布函数为 $P(t)$,且呈正态分布,则其滞后影响函数为

$$P(t) = \frac{1}{\alpha} \frac{1}{x_2 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t - x_1)^2}{2x_2^2}\right) \quad (4)$$

设测点在 $t = t_0$ 时刻对应的等效水位为 $H_d(t)$, $t = t_b$ 时刻起前期水位对其产生影响,则

$$H_d(t) = \int_{t_b}^{t_0} P(t) H(t) dt = \int_{t_b}^{t_0} \frac{1}{\alpha} \frac{1}{x_2 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t - x_1)^2}{2x_2^2}\right) H(t) dt \quad (5)$$

式中: $H(t)$ —— t 时刻的水位; $H_d(t)$ ——等效水位; x_1 ——待定的水位滞后天数 ($x_1 = t_0 - t_m$, 其中 t_m 为前期水位影响最大时刻); x_2 ——待定的水位影响正态分布标准差 (影响天数 = $(2 \sim 3)x_2$). 其中 x_1, x_2 需通过优化计算求得. 经优化可找到实际的滞后天数和影响天数. 通常, 每天都有水位测值, 因此可把连续型积分改成离散型积分. 积分区间只需取 x_2 的 $2 \sim 3$ 倍即可满足要求.

2 考虑滞后效应的混合模型

由文献 [1] 可知, 通过稳定渗流的三维有限元计算分析, 结合实测资料, 可以建立稳定渗流的渗流观测量混合模型. 由于库水位对测压管水位有滞后效应, 因此测压管水位的变化属非稳定渗流问题, 须用非稳定渗流三维有限元建立渗流观测量的数值模型. 本文应用水位滞后影响曲线模拟非稳定渗流的影响, 建立测压管水位混合模型, 较为简单实用, 且易于进行预报.

2.1 基本原理

由文献 [1] 可知, 测压管水位主要受库水位、降雨、时效以及温度等影响, 因而测压管水位

$$Y = Y_H + Y_P + Y_T + Y_\theta \quad (6)$$

式中: Y ——测压管水位; Y_H, Y_P, Y_T, Y_θ ——测压管水位的水压分量、降雨分量、温度分量和时效分量.

2.1.1 水压分量 Y_H

通过实测资料可以得到各测压孔的水位影响函数式 (4), 从而由式 (5) 计算出相应的等效水位. 用三维稳定渗流有限元计算对应等效水位时的各测压孔的水位, 即考虑了非稳定渗流的影响.

假设测压管观测区域的渗透系数为 k , 用三维稳定渗流有限元计算不同上游水深 H_d 对应的测压管水位 Y_H' , 则 Y_H' 与 H_d 之间可用多项式表示:

$$Y_H' = \sum_{i=0}^m a_i H_d^i \quad (7)$$

式中: Y_H' ——测压管水位的计算值; a_i ——系数, 考虑滞后作用时, H_d 取为上游等效水位; m 可根据计算区渗透特性取值, 简化计算可取 $m = 1$.

由于 a_i 是在假设渗透系数下求得的, 因而由三维渗流有限元法求得的渗流观测量与实际测值有差异, 为此对式 (7) 根据实测渗流观测量进行调整, 即:

$$Y_H = XY_H' = X \sum_{i=0}^m a_i H_d^i \quad (8)$$

式中: X ——渗流观测量的调整参数.

2.1.2 混合模型

降雨分量、温度分量和时效分量表达式仍采用统计模型一样的表达式^[1], 则测压管水位的混合模型为

$$Y = XaH_d + \sum_{j=1}^{m_1} b_j \bar{p}_j + \sum_{i=1}^6 (b_{1i} \sin \frac{2\pi it}{365} + b_{2i} \cos \frac{2\pi it}{365}) + c_1 \theta + c_2 \ln \theta + A_0 \quad (9)$$

式中: $\bar{p}_j$ ——前 j 天平均降雨量; b_j, b_{1i}, b_{2i} ——系数; t ——观测天数; c_1, c_2 ——系数; A_0 待定常数; $\theta = t/100$.

2.2 滞后效应的计算方法

a. 计算原理

利用最优化原理可求得式 (9) 中的参数 $\{X, b_j, b_{1i}, b_{2i}, c_1, c_2, A_0\} = B$ ($i = 1 \sim 6, j = 1 \sim m_1$) 其求解步骤为:

令

$$Q = \sum_{t=1}^n (Y_t - Y)^2$$

式中： Y_t ——实测测压管水位； Y ——孔水位计算值。

若 Q 有最小值，则必有

$$\frac{\partial Q}{\partial \mathbf{B}} = 0 \tag{10}$$

利用式(9)(10)，结合实测资料，由最小二乘法可求得一组对应上下游水位及降雨的滞后天数，并以复相关系数 R 为衡量标准，通过对库水位的滞后天数及影响天数的假定和修正，逐次迭代逼近，最后找到一组使复相关系数最大的滞后天数及影响天数，同时也得到一组回归系数及其他回归参数。

b. 程序框图

根据计算原理，编制了渗流优化滞后影响分析的程序，其流程如图 1 所示。

3 计算实例

某坝为混凝土宽缝重力坝，坝顶高程 384.5 m，坝底高程 313.5 m，最大坝高 71.0 m，坝顶全长 412.0 m，由 21 个坝段组成。正常高水位 382.0 m，设计洪水位 382.8 m，校核水位 384.0 m，死水位 354.0 m。渗流观测是该坝原型观测的主要内容之一，每个坝段布置有一个测压孔。下面以地质条件较好的 6[#] 坝段和地质条件薄弱的 16[#] ~ 17[#] 坝段为例进行分析。

表 1 库水位对测压孔孔水位的滞后效应

Table 1 Hysteresis effect of reservoir level on piezometric level

坝段	滞后天数 x_1 /d	影响天数(2 ~ 3) x_2 /d	滞后模式
6 [#]	4	16	$H_K(t) \int_{t_0-16}^{t_0} \frac{1}{4\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-t_0)^2}{32}} H(t) dt$
16 [#]	1	7	$H_K(t) \int_{t_0-7}^{t_0} \frac{1}{2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-t_0)^2}{8}} H(t) dt$
17 [#]	0	3	$H_K(t) \int_{t_0-3}^{t_0} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} H(t) dt$

表 2 测压管水位混合统计模型的复相关系数 R 、剩余均方差 S

Table 2 Multiple correlation coefficient R and standard deviation S of hybrid statistical model of piezometric level

坝段	常规混合模型		考虑滞后的混合模型	
	R	S	R	S
6 [#]	0.583	1.335	0.782	0.978
16 [#]	0.635	2.034	0.805	1.048
17 [#]	0.704	2.548	0.861	1.357

3.1 库水位对测压孔孔水位滞后效应分析

采用式(9)，结合孔水位原型观测资料进行优化计算，得到库水位对测压管水位的滞后效应(滞后天数、影响天数)和分布见表 1。

由表 1 可看出，地质条件较好的 6[#] 坝段，库水位对测压管水位的滞后效应相对较大，滞后时间约为 4 d，滞后影响天数约为 7 d；地质条件相对薄弱的 16[#] ~ 17[#] 坝段，库水位对相应坝段测压管水位的滞后作用相对较小，测压管水位主要受观测日当天以及前 1 天水位影响。因此，若考虑 2 ~ 3 倍的滞后影响天数，则库水位对测压孔水位的滞后效应约为 3 ~ 16 d。

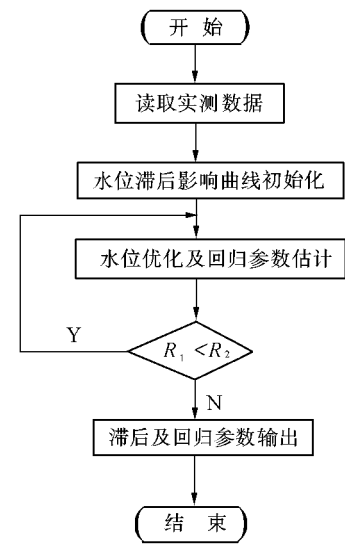


图 1 渗流的水位滞后影响分析流程

Fig.1 Flow chart of analysis of the effect of water level lag on seepage

3.2 模型精度分析

采用逐步回归分析法 ,对 3 个观测孔孔水位进行优化分析 ,得到最佳回归方程 ,其复相关系数 R 、剩余均方差 S 见表 2. 由表 2 看出 3 个测压管水位滞后混合模型的拟合精度有明显提高.

4 结 语

- a. 利用实测资料和水位滞后影响函数 ,可以得出前期水位对测压管水位的滞后天数和影响天数 ,有利于进一步分析和评价大坝防渗排水效应.
- b. 考虑滞后效应的测压管水位混合模型能够比较符合实际地反映库水位的滞后效应 .计算实例表明 ,考虑滞后效应的混合模型 ,拟合效果明显提高.

参考文献 :

[1] 吴中如 . 水工建筑物安全监控理论及其应用 [M]. 南京 : 河海大学出版社 ,1990. 121150.
[2] 毛昶熙 . 渗流计算分析与控制 [M]. 北京 : 水利电力出版社 ,1990. 53 ~ 61 , 515 ~ 519.
[3] 毛昶熙 . 渗流数值计算与程序应用 [M]. 南京 : 河海大学出版社 ,1999. 162 ~ 178.

Study on Hybrid Model of Piezometric Level

ZHENG Dong-jian¹ ,GU Chong-shi¹ ,ZHANG Tao² ,SHEN Hong-jun¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China ;
2. Gutianxi Water Power Station ,Gutian ,Fujian 352258 ,China)

Abstract : The hysteresis function and equivalent level are introduced for discussion on the hysteresis effect of reservoir level on piezomtric level. In consideration of the seepage calculation result of 3-D FEM , a hybrid model of piezometric level is developed , in which the hysteresis effect of piezomtric level is taken into account. Examples show that the result calculated with the model is in good agreement with the observed data.

Key words : piezomtric level ; hysteresis effect ; hysteresis function ; hybrid model