

# 浙江某水库大坝渗流安全综合分析<sup>\*</sup>

娄一青<sup>1,2</sup>, 丁丽<sup>3</sup>, 何鲜峰<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学 水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098; 3. 长江勘测规划设计研究院上海分院, 上海 200439)

**摘 要:** 对浙江省某水库大坝的测压管观测资料进行了分析, 建立了用来预报测点水位并能反映大坝实际渗流性态的统计模型。在此基础上结合观测资料采用有限元方法反演了坝体、坝基各分区的渗透系数, 预测未来高水位时大坝的渗流性态, 并建立了物理概念明确、预报效果较好的渗压确定性模型。

**关键词:** 渗流; 统计模型; 参数反演; 确定性模型; 安全分析

**中图分类号:** TV698.1<sup>+</sup>2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2008)01-0032-05

土石坝的渗流性态是影响大坝安全的重要因素之一, 因此, 渗流监测是土石坝运行监控的一项主要内容。通过对测压管观测资料的综合分析, 建立物理概念明确的测压管水位预报模型, 对于正确监控大坝的渗流状态具有重要意义, 同时对降低大坝风险、提高大坝安全水平<sup>[1]</sup>也具有借鉴作用。

## 1 概述

浙江省某水库大坝为砂砾壳粘土心墙坝, 最大坝高 34 m, 坝顶高程 74.0 m, 坝顶长 460 m, 坝顶宽 5 m。上下游坝坡均采用干砌石护坡; 下游坝脚采用棱体排水。

该坝共布置了 24 处测压管, 用以观测大坝的浸润线, 进而分析坝体的渗流状态。测压管布置在沿平行坝轴线方向的 5 个截面上 (0+005.00、0+007.50、0+020.20、0+042.20 和 0+072.00), 其中 5 处分布在坝体的迎水坡, 其余分布在坝轴线下游的背水坡 (图 1)。

本次对测压管观测资料的分析从 2001 年开始, 分析中不考虑已坏的 4 个测点。在所布置的 24 处测压管中, 除靠近左岸的 4 处外, 其余 20 处分别沿平行和垂直坝轴线方向呈 5 行 4 列的分布, 因此, 在对各个测压管观测资料进行单独分析的同时, 对这些资料进行横向和纵向的对比分析。

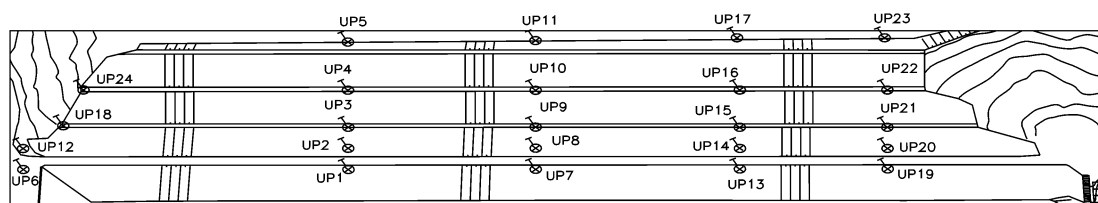


图1 坝体测压管平面布置图

## 2 渗流观测资料分析

### 2.1 测压管观测资料定性分析

从降雨、库水位和测压管水位的过程线图以及测压管水位与库水位关系散点图可以看出:

(1) 垂直坝轴线方向 4 个横断面从上游往下, 测压管水位依次下降。上游迎水坡处的测压管水位接近于库水位; 第二排测压管水位比迎水坡观测点处下降了 10.00 m 左右; 心墙下游 3 排测点的测压管水位大致相当, 相互之间水位差在 1.00 m 左右,

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2007-07-14

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2006BAC14B03); 国家自然科学基金项目(50539030); 国家自然科学基金雅砻江水电开发联合研究基金重点项目(50539110); 973 计划课题(2002CB412707)

作者简介: 娄一青(1981-), 男, 浙江仙居人, 博士研究生, 主要从事水工结构安全方面的研究. E-mail: qing0903@hhu.edu.cn

与上游迎水坡处的管水位相差 25.00 m 左右。这说明粘土心墙在降低坝体内部浸润面的作用明显。

(2) 从上游往下, 沿平行坝轴线方向第一个截面上, 坝体左右两端水位较中间的高; 第二到四截面上, 靠近坝体左端的测点水位值较高, 高出相应截面上其它测点 10.00 ~ 20.00 m 左右; 第五个截面上, 几个测点的水位从左到右依次降低, 相互之间的差值在 0.50 m 左右。总的来说, 坝体靠近左岸处的测压管水位较高, 对坝体的防渗以及稳定不利。

(3) 坝体上游坡处测点的测压管水位受库水位影响大, 其测压管水位的变化与库水位的变化大致相当; 沿平行坝轴线方向第二个截面上测压管水位受上游库水位的影响也较大; 其余截面处测点的测压管水位的变化受上游库水位的影响较小, 水位随时间变化的幅度也较小。

(4) 粘土心墙下游测压管水位与库水位关系散点接近一根水平线, 这反映了粘土心墙的总体防渗效果较好, 库水位的变化反映不到心墙下游的坝体部分; 心墙上游及心墙内测压管水位与库水位关系略微倾斜的曲线, 并且散点图具有一定的宽度, 这说明以上位置测点的测压管水位除与上游库水位有关外, 还与其它因素有关, 如受前期库水位及降雨等因素的影响。

(5) 心墙上游坝体、靠左岸处坝体以及坝下游第五个截面上的测压管水位受降雨影响比较明显: 降雨强度大、历时短, 则管水位有明显升高, 且有峰值现象; 降雨强度中等, 但历时较长, 则管水位也有一定幅度的上升, 且缓涨缓落。粘土心墙下游坝体内部测压管水位受降雨的影响不太明显。

## 2.2 统计模型分析

由以上对测压管观测资料的分析可知, 坝体

测压管水位主要受水压、降雨和时效等因素的影响。因此, 测压管水位的统计模型主要由水压分量、降雨分量和时效分量组成<sup>[2]</sup>:

$$\delta = \delta_H + \delta_U + \delta_\theta = a_0 + \sum_{i=1}^5 [a_i(H_i - H_{0i})] + \sum_{i=1}^5 [b_i(U_i - U_{0i})] + [c_1(\theta - \theta_0) + c_2(\ln\theta - \ln\theta_0)], \quad (1)$$

式中:  $a_0$  为常数项;  $H_i$  为观测日当天、观测日前 1 d、前 2 ~ 5 d、前 6 ~ 15 d、前 16 ~ 30 d 的平均上游水位;  $H_{0i}$  为初始观测日上述各时段对应的上游水位平均值;  $U_i$  为观测日当天、观测日前 1 d、前 2 ~ 5 d、前 6 ~ 15 d、前 16 ~ 30 d 的降雨量平均值;  $U_{0i}$  为初始观测日上述各时段对应的降雨量平均值;  $\theta$  为观测日至始测日的累计天数  $t$  除以 100;  $\theta_0$  为建模资料序列第一个测值日至始测日的累计天数  $t_0$  除以 100;  $a_i$  为水压因子回归系数;  $b_i$  为降雨因子回归系数;  $c_1$ 、 $c_2$  为时效因子回归系数。

根据式(1), 采用逐步回归分析法, 对上述测压管观测资料进行优化分析, 建立了统计模型, 其回归系数(仅列出沿平行坝轴线方向 0 - 005.00 和 0 + 007.50 两截面上的 9 个测点)见表 1, 拟合情况(以 UP1 测点为例)见图 2, 各测点的回归精度均较高。表中所列两个截面上的测点都选入了当天或前期水位因子, 且水位分量值普遍较大, 说明库水位变化对坝体靠上游处测压管水位的影响较大, 库水位升高, 坝体测压管水位也相应上升; 大多数的测点都选入了降雨因子, 说明降雨对土石坝坝体测压管水位也有一定的影响。其它截面上测点受水位和降雨的影响较小, 而受时效的影响较大。

表 1 测压管水位统计模型回归系数及模型特征值表

系数	UP1	UP2	UP6	UP7	UP8	UP12	UP13	UP14	UP19
$a_0$	62.291	51.776	64.239	62.216	53.298	64.044	62.223	52.523	62.059
$a_1$	0.525	0.000	0.256	0.477	0.000	0.000	0.431	0.000	0.000
$a_2$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$a_3$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.066	0.000	0.000	0.000	0.213
$a_4$	0.241	0.000	0.000	0.255	0.000	0.447	0.000	0.000	0.244
$a_5$	0.000	0.220	0.000	0.000	0.102	-0.140	0.301	0.149	0.000
$b_1$	0.000	0.000	0.032	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$b_2$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$b_3$	0.000	0.037	0.000	0.000	0.012	0.000	0.000	0.000	0.027
$b_4$	0.053	0.037	0.044	0.038	0.016	0.049	0.000	0.031	0.057
$b_5$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.056
$c_1$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$c_2$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$R$	0.974	0.832	0.854	0.977	0.950	0.899	0.969	0.851	0.964
$S$	1.032	0.851	1.058	0.919	0.319	0.943	1.024	0.536	0.819

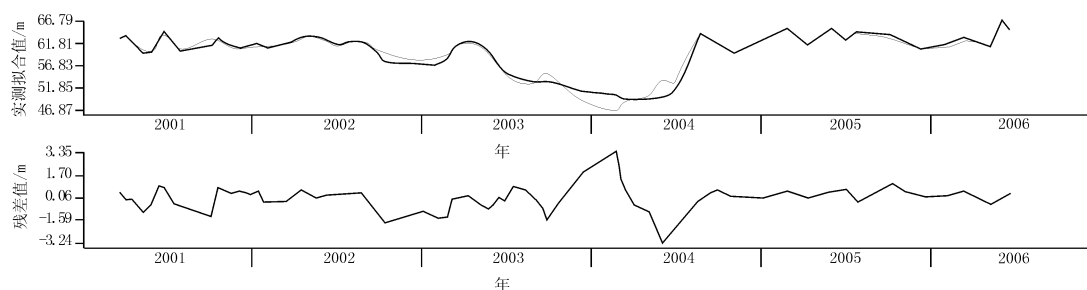


图2 UP1 测压管水位统计模型拟合曲线

从统计模型的计算成果看,坝体心墙及其上游部位测压管水位主要受当天和前期平均库水位变化的影响,部分测点也受到降雨因素的影响;心墙下游部位测压管水位主要受时效的影响,受上游库水位和降雨的影响均较小。大部分测点测压管水位变化平稳,时效呈逐渐收敛或下降趋势;部分测点测压管水位虽有波动,但无明显的趋势性变化。总体看来,所建立的统计模型能够较好地反映测压管水位的变化规律。

### 3 有限元计算分析

#### 3.1 渗流基本原理

根据广义达西定律,各向异性连续介质中三维稳定渗流的控制方程和边界条件为<sup>[3]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) = 0, & x_i \in \Omega; \\ h|_{\Gamma_1} = h_0, & x_i \in \Gamma_1; \\ -k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i = q_0, & x_i \in \Gamma_2; \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\Omega$  为渗流计算域;  $\Gamma_1$  为已知水头边界;  $h_0$

为已知水头;  $\Gamma_2$  为已知流量边界;  $q_0$  为已知流量;  $k_{ij}$  为二阶渗透张量;  $n_i$  为边界外法向方向余弦;  $x_i$  为直角坐标系。

具有自由面渗流场的数值模拟,由于在计算中自由面边界是未知的,使得渗流计算变得复杂和困难,通常需要用迭代逼近的方法来求解。目前求解自由面的算法有变网格迭代法和固定网格迭代法两种。本文采用固定网格的初流量法<sup>[4]</sup>来迭代计算求解自由面,其基本原理为在达西定律中增加一初流量项,通过对初流量值的调整,将非线性分析化为一列线性分析。经离散后的有限元方程如下

$$[K]\{h\} = \{Q\} + \{Q_0\}; \quad (3)$$

式中:  $[K]$ 、 $\{Q\}$  为总体传导矩阵和等效结点流量矩阵;  $\{Q_0\}$  为增加的初流量引起的结点流量列阵。

#### 3.2 渗流计算模型

根据坝体、坝基的实际情况,选取4个典型横剖面进行准三维有限元渗流计算分析。限于篇幅,本文仅对0+080.00剖面进行分析,其有限元网格如图3所示,共有结点10396个,单元5062个。坝体材料分区以及各测点布置位置示意如图4所示。

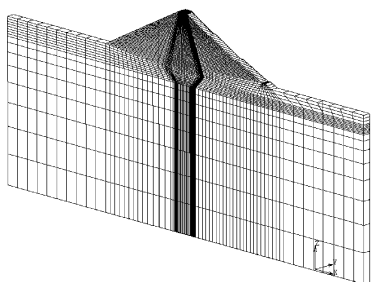


图3 计算剖面准三维有限元模型

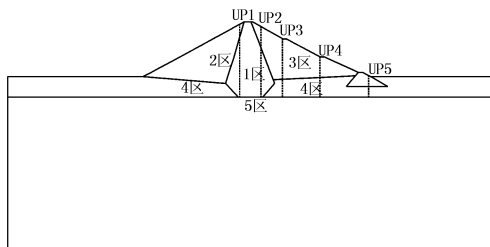


图4 计算剖面基本信息示意图

#### 3.3 计算参数反演

结合测压管实测资料,采用BP神经网络来反演心墙、坝壳和坝基等分区材料的渗透系数<sup>[5,6]</sup>。当只有水位资料而无流量观测数据时,反演结果是不唯一的<sup>[7]</sup>,而只能反演得到各个分区材料渗透系数的相对值。此时,只要确定其中一个材料区的渗透系数,另外材料区的渗透系数也随之而定。

反分析过程中,选取库水位稳定、降雨量较少、各测压管水位变化较平稳时段的测值来进行分析。本次反演计算中选取2005年12月15日的观测资料,上游库水位为60.41 m。根据钻孔试验成果,取迎水坡坝壳土体渗透系数为  $1.21 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ ,则各个分区材料的渗透系数反演结果见表2,5个测压管水位的观测值与计算值的对比见表3。

表 2 各分区材料渗透系数反演值

编号	材料区域	渗透系数 (cm/s)
1	粘土心墙	$9.72 \times 10^{-6}$
2	迎水坡坝壳土	$1.21 \times 10^{-2}$
3	背水坡坝壳土	$1.94 \times 10^{-2}$
4	坝基强透水层	$3.05 \times 10^{-3}$
5	坝基弱透水层	$3.03 \times 10^{-5}$

表 3 各测孔水位实测值与计算值比较 (m)

测孔	实测值	计算值	差值	误差 (%)
UP1	60.40	59.40	1.00	1.66
UP2	52.84	52.88	-0.04	0.08
UP3	37.31	37.16	0.15	0.40
UP4	36.85	36.65	0.20	0.54
UP5	36.22	36.20	0.02	0.06

### 3.4 有限元计算结果分析

参照库水位的实测资料, 将上游水位从 42.00 m 变化到 74.00 m, 计算了在各种库水位下坝体的渗流场, 其中正常蓄水位 (68.60 m) 下坝体的渗流场如图 5 所示, 校核洪水位 (74.00 m) 下坝体的渗流场如图 6 所示。

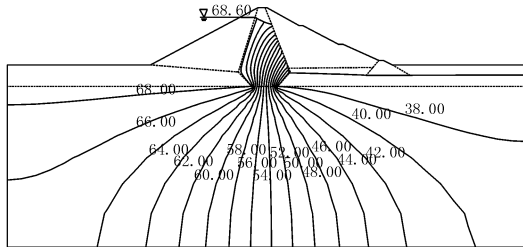


图 5 正常蓄水位下坝体渗流场分布图

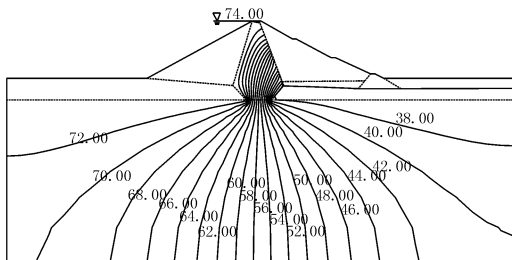


图 6 校核洪水位下坝体渗流场分布图

在心墙部位等水头线高度密集, 大部分水头都

表 4 水位因子关系式以及确定性模型回归系数和特征值

系数	水位因子关系式 $f(H)$	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$b_1$	$b_2$	$R$	$S$
UP1	$3.801 + 0.759X + 0.003X^2$	62.630	0.473	0.000	0.270	0.000	0.000	0.000	0.000	0.975	1.022
UP2	$-11.729 + 1.340X - 0.005X^2$	52.127	0.000	0.000	0.000	0.260	0.000	0.000	0.000	0.787	0.930
UP3	$34.143 + 0.064X - 0.0002X^2$	37.279	0.000	0.000	0.000	0.000	0.120	-0.132	5.711	0.630	0.061
UP4	$35.398 + 0.023X - 0.00004X^2$	36.796	0.000	0.000	0.621	0.000	0.000	-0.165	7.187	0.541	0.091

消耗在心墙内; 心墙内及心墙基础部位渗透坡降较大; 在心墙下游坝体自由面较低, 且受库水位的影响较小; 在高水位运行时, UP1 和 UP2 测孔的测压管水位较高, 而心墙下游的测压管维持在一个较低的水位。由此可见, 心墙明显地降低了坝体内的自由面, 起到了较好的阻水作用。

## 4 渗压的确定性模型

根据土石坝渗压的统计分析, 渗压主要受水位和时效的影响。因此, 渗压确定性模型由水位分量和时效分量组成:

$$P = P_H + P_\theta = a_0 + \sum_{i=1}^5 [a_i f(H_i - H_{i0})] + [b_1(\theta - \theta_0) + b_2(\ln \theta - \ln \theta_0)], \quad (4)$$

式中:  $a_0$  为常数项;  $H_i$  为观测日当天、观测日前 1 d、前 2~5 d、前 6~15 d、前 16~30 d 的平均上游水位;  $H_{i0}$  为初始观测日上述各时段对应的上游水位平均值;  $\theta$  为观测日至始测日的累计天数  $t$  除以 100;  $\theta_0$  为建模资料序列第一个测值日至始测日的累计天数  $t_0$  除以 100;  $a_i$  为水压因子回归系数;  $b_1$ 、 $b_2$  为时效因子回归系数。

建立渗压确定性模型的核心是用有限元法计算水位分量  $f(H)$ 。根据前面对 0+080.00 剖面的准三维渗流有限元计算, 得到各种库水位下 UP1~UP4 测压管处水位的计算值。由下式拟合渗压同库水位的关系, 得到水位分量  $f(H)$ , 结果见表 4。

$$f(H) = \sum_{i=0}^2 c_i H^i, \quad (5)$$

根据式 (4), 采用逐步回归分析法, 得到渗压的确定性模型, 其回归系数和特征值见表 4, 拟合情况 (以 UP1 为例) 见图 7。

由表 4 中看出, 复相关系数和剩余标准差与统计模型较接近, 各测压管水位过程线的拟合总体是令人满意的。由于 2003 年水库放空大修, 水位变化剧烈, 对拟合精度的影响比较显著。靠上游的测压管, 上游水位的作用大; 靠下游的测压管, 时效的作用显著。与统计模型相比, 确定性模型的物理概念明确, 预报效果较好, 更适于大坝的安全监控。

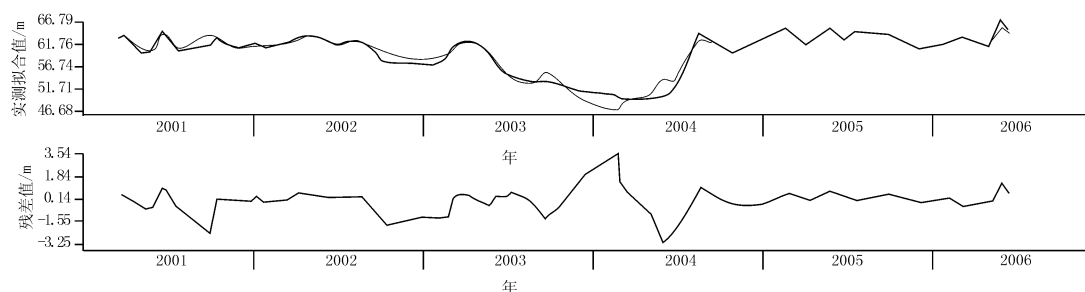


图7 UPI 测压管水位确定性模型拟合曲线

波动,但无明显的趋势性变化,时效变化基本正常。

## 5 结语

本文结合浙江省某水库大坝测压管实测资料,综合地分析了该大坝的渗流工作性态。文中所建立的统计模型,能较好地反映坝体、坝基的渗流状态,预报检验测点的测压管水位。在此基础上,采用有限元法反演了坝体、坝基各个区域的渗透系数,计算分析了各种不同工况下坝体的渗流场,并建立了物理概念明确、预报效果较好的渗压确定性模型。

分析表明,左岸绕坝渗流较严重,靠近左岸处测压管水位较高,应加强观测并采取相应的工程防渗措施;心墙及其上游部位坝体渗压主要受当天和前期平均库水位的影响,而心墙下游部位坝体渗压则受时效的影响显著;坝体测压管水位的时效变化平稳,呈逐渐收敛或下降趋势,部分测点水位虽有

## 参考文献:

- [1] 李清富,龙少江. 大坝风险研究综述[J]. 灾害学, 2006, 21(2): 35-39.
- [2] 顾冲时,吴中如. 大坝与坝基安全监控理论和方法及其应用[M]. 南京:河海大学出版社, 2006: 74-76.
- [3] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1990: 323-330.
- [4] 王媛. 求解有自由面渗流问题的初流量法的改进[J]. 水利学报, 1998, (3): 68-73.
- [5] 张乾飞,王健,吴中如. 基于人工神经网络的大坝渗透系数分区反演分析[J]. 水电能源科学, 2001, 19(4): 4-7.
- [6] 李守巨,刘迎曦,王登刚,等. 基于神经网络的岩体渗透系数反演方法及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 479-483.
- [7] 李守巨,刘迎曦. 含水层参数识别的唯一性和稳定性问题[J]. 中国有色金属学报, 1998, 8(S2): 722-725.

## Analysis of the Seepage Safety of an Earth-rockfilled Dam in Zhejiang

Lou Yiqing<sup>1,2</sup>, Ding Li<sup>3</sup> and He Xianfeng<sup>1,2</sup>

(1. College of Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
2. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety,  
Nanjing 210098, China; 3. Changjiang Institute of Survey Planning Design Research  
Shanghai Branch Institute, Shanghai 200441, China)

**Abstract:** The observation data of the piezometric level of an earth-rockfilled dam in Zhejiang Province is analyzed. A statistic model, which can forecast and check the water level of observation points and show the situation of the factual seepage flow of the dam, is established. Based on the observation data, by the finite element method the coefficient of percolation of each zone of the dam and foundation is reversed. The running condition of the dam is predicted in the future high water level. A deterministic model which has definite physical concept and good prediction effect is set up.

**Key words:** seepage; statistic model; parameter inversion; deterministic model; safety analysis