

# 碗窑水库大坝渗漏分析

范海平<sup>1</sup>, 石素美<sup>2</sup>, 周 杰<sup>2</sup>, 王 明<sup>3</sup>, 鲁文妍<sup>4</sup>, 顾正聪<sup>5</sup>

(1. 淮安市水利工程安全质量监督站, 江苏 淮安 223010; 2. 苏源检测有限公司, 江苏 淮安 223300;  
3. 河海大学, 江苏 南京 211100; 4. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210017; 5. 南京大学, 江苏 南京 210008)

**摘要:**以碗窑水库大坝为研究对象,结合大坝坝体和坝基结构,分析了大坝的渗漏不仅与库区和坝址区地质条件相关,还与蓄水后地下水的动态类型联系密切,重点讨论了水库运行期间影响因素如库水位、气温、降雨和时效等。采用偏最小二乘法回归分析法和统计模型对大坝渗漏的影响进行了定量分析,结果显示坝体和坝基渗漏受库水位影响较大,而U3部位渗漏受气温因素影响最大,研究结果为大坝渗漏防渗处理提供了科学依据。

**关键词:**碗窑水库; 大坝渗漏; 偏最小二乘法; 回归分析; 统计模型

**中图分类号:**TV213.4      **文献标识码:**B      **文章编号:**1007-7839(2023)07-0068-0005

## Analysis of leakage in the dam of Wanyao Reservoir

FAN Haiping<sup>1</sup>, SHI Sumei<sup>2</sup>, ZHOU Jie<sup>2</sup>, WANG Ming<sup>3</sup>, LU Wenyan<sup>4</sup>, GU Zhengcong<sup>5</sup>

(1. Huai'an Water Conservancy Engineering Safety and Quality Supervision Station, Huai'an 223010, China;  
2. Suyuan Testing Co., Ltd., Huai'an 223300, China; 3. Hohai University, Nanjing 211100, China;  
4. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210017, China;  
5. Nanjing University, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** Taking the Wanyao Reservoir Dam as the research object, combined with the dam body and foundation structure, the leakage of the dam is analyzed, which is not only related to the geological conditions of the reservoir and dam site area, but also closely related to the dynamic type of groundwater after water storage. The focus is on discussing the influencing factors during the operation of the reservoir, such as reservoir water level, temperature, rainfall, and hysteresis. The partial least squares regression analysis method and statistical model were used to quantitatively analyze the impact of dam leakage. The results showed that the leakage of the dam body and foundation is greatly affected by the reservoir water level, while the leakage of U3 is most affected by the temperature factor. The research results provide a scientific basis for the anti-seepage treatment of dam leakage.

**Key words:** Wanyao Reservoir; dam leakage; partial least squares method; regression analysis; statistical model

碗窑水库大坝是一座碾压混凝土重力坝,该工程以防洪灌溉为主,供水、发电为辅,是一座综合多种功能的大(2)型水利水电工程,同时对当地农业发展总体规划产生重要作用。但因当时的设计和施工技术不完善,水库建成运行以来不仅存在着老

化问题,而且渗漏问题频发,20多年来经过多次的检查以及封堵,水库渗漏情况依然存在,严重影响水库的运行安全与稳定。

大坝渗漏分析方法有很多,如使用多元线性回归对监测数据进行拟合,得到自变量和因变量之间

收稿日期: 2023-02-08

作者简介: 范海平(1964—),男,高级工程师,主要从事水利工程建设管理和质量监督工作。E-mail:2977600980@qq.com

的关系<sup>[1]</sup>;使用多项式回归分析大坝监测资料<sup>[2]</sup>。随着数学方法和计算机的进步,发展出了包括模糊数学、神经网络、灰色系统理论等分析方法被逐渐应用于监测资料分析,并取得了一定的成果,监测模型也获得了更全面的发展。我国监测资料分析发展得较晚,20世纪60年代使用了最小二乘法对大坝位移数据进行拟合,20世纪80年代,有专家<sup>[3-4]</sup>推导了时效位移表达式,利用周期函数表示温度因素,提出了大坝伸缩缝变化统计模型,取得了显著的成效。

本研究基于渗漏监测资料,采用偏最小二乘法回归分析方法,对坝体渗漏原因及影响因素进行分析,旨在为大坝渗漏防渗处理提供参考。

## 1 偏最小二乘法回归分析和统计模型

偏最小二乘法的基本原理是从原变量中提取潜在有效成分,通过解释潜在自变量成分和因变量成分中建立起的回归模型间接反映原自变量和因变量之间的关系<sup>[5-6]</sup>。偏最小二乘回归提取成分的方法是通过不断的迭代逐步提取主成分(图1)。首先提取第一组成分,对提取的潜在自变量成分和因变量成分进行回归分析,如回归方程满足精度要求则可停止,否则逐步提取被提取过后剩余信息中第二组成分,再重新分析,判断精度,如此重复以上步骤,直到满足要求,最后还原成原变量的回归方程即可。

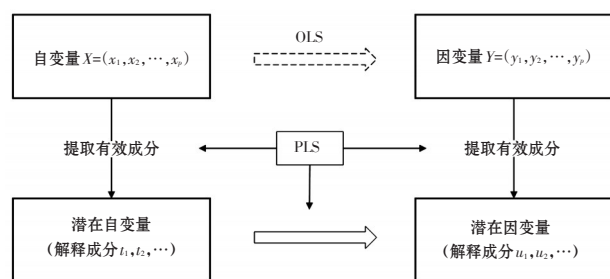


图1 偏最小二乘法(PLS)建模示意

本次统计模型主要考虑库水位、气温、降雨、时效等4个因子进行回归分析<sup>[7-9]</sup>,分析过程中采用的统计模型为

$$\delta = \delta_H + \delta_T + \delta_P + \delta_\theta \quad (1)$$

式中: $\delta$ 为统计模型拟合值; $\delta_H$ 为水位分量; $\delta_T$ 为温度分量; $\delta_P$ 为降雨分量; $\delta_\theta$ 为时效分量。

库水位是决定坝体渗流场的主要因素之一,并且考虑到库水位对坝体渗流存在着滞后性的问

题,因此选取观测日当天、前5、10、20 d的平均水位作为库水位因子,其水位分量表达式可记为

$$\delta_H = a_1(H_{u0} - H_{u0,0}) + a_2(H_{u5} - H_{u0,5}) + a_3(H_{u10} - H_{u0,10}) + a_4(H_{u20} - H_{u0,20}) \quad (2)$$

式中: $a_i(i=1,2,3,4)$ 为水位分量回归系数; $H_{uj}(j=0,5,10,20)$ 为观测日当天以及前5、10、20 d的平均库水位; $H_{u0,j}(j=0,5,10,20)$ 为观测日以及第前5、10、20 d的平均水位。

气温不仅对坝体等含水介质存在热胀冷缩的影响,也对坝体内部水渗流场产生不同程度的影响,由于气温对大坝的影响存在周期性的关系,于是温度分量的表达式为

$$\delta_T = a_5(T - T_0) + a_6 \sin \frac{2\pi t}{365} + a_7 \cos \frac{2\pi t}{365} \quad (3)$$

式中: $a_i(i=5,6,7)$ 为温度分量回归系数; $T$ 、 $T_0$ 分别为观测日当天和观测起始日的气温; $t$ 为自观测起始日起的累计天数。由于降雨会导致地下水径流和库水位发生变化,并且这种影响会产生滞后性问题,因此降雨分量表达式可表示为

$$\delta_P = a_8(R_{u0} - R_{u0,0}) + a_9(R_{u5} - R_{u0,5}) + a_{10}(R_{u10} - R_{u0,10}) \quad (4)$$

式中: $a_i(i=8,9,10)$ 为降雨分量回归系数; $R_{uj}(j=0,5,10)$ 为观测日当天以及前5、10 d的平均降水量; $R_{u0,j}(j=0,5,10)$ 为观测日以及第前5、10 d的平均降水量。

$$\delta_\theta = a_{11}\theta + a_{12} \ln \theta + a_0 \quad (5)$$

式中: $a_i(i=11,12)$ 为时效分量回归系数; $a_0$ 为常数项; $\theta$ 为 $t/100$ ,即每100 d增加0.01。

## 2 坝体及坝基概况

碗窑水库枢纽工程由拦河主坝、右岸副坝、溢洪道、坝后电站、放水设施、灌溉渠等建筑物组成。碗窑水库主坝碾压混凝土重力坝为典型的“金包银”式结构,外部、孔洞和防渗墙包裹着一层常态混凝土,内部区域为碾压混凝土。水库的拦河主坝由碾压混凝土重力坝构成,属Ⅱ等2级建筑物,坝顶高程196.24 m,最低坝基面高程117.24 m,最大坝高79 m,坝顶长390 m,宽8.5 m,全坝共分11个坝段,其中5#坝段为溢流段,其余为非溢流坝段。

碗窑水库坝址区和库区地层岩性均比较单一,左右两岸基岩裸露,其余地方少量分布有第四系的松散冲洪积层和堆积层,其中冲洪积层以卵石层、砂砾石层以及中粗砂为主,堆积层和坡积层主要以黄褐色的粉质黏土夹不规则磨圆度较低的碎石和滚石为主。坝址区分布有侏罗系上统火山碎屑石,

主要为流纹岩和凝灰岩等火山碎屑喷出沉积而成,介于岩浆岩和沉积岩两者之间。基岩主要为磨石山组白-灰色凝灰岩和流纹质凝灰岩,凝灰或流纹结构,块状构造,岩质坚硬,广泛分布于研究区内,坝体两岸山体均有分布,左岸坡度较陡,风化作用较为强烈,一般以弱风化为主,而右岸较缓,风化程度相对较低,一般以弱-微风化为主。

研究区地层整体稳定,区域内构造裂隙规模相对较小,岩体质量良好,无坝体整体稳定性和坝基不均匀沉降问题,对少量张性断层进行灌浆防渗处理后,没有永久性渗漏风险。

### 3 坝体和坝基渗漏分析

#### 3.1 大坝渗漏影响因素分析

大坝渗漏原因比较复杂,不仅与库区和坝址区

地质条件如岩性、结构构造、断层、裂隙等天然条件密切相关,还与蓄水后地下水的动态类型变化(岸坡浅部和深部的地下水位是否高于水库设计水位)等有关系。在水库运营期与库水位和气温关系较为密切,降雨有一定影响,不同部位滞后性影响不同,与库水位同步性高的滞后性表现低。分别对碗窑水库坝体、坝基以及渗漏比较严重的U3部位进行渗漏量的监测,记录了2013—2015年渗漏数据,见表1。在3年期间大坝总渗漏最大值为3.415 L/s(2013年1月22日),最小值为0.512 L/s(2013年12月10日);最大变幅为2.902 L/s(2013年),最小变幅为1.807 L/s(2014年);最大均值为1.863 L/s(2013年);最小均值为1.586 L/s(2014年);大坝渗漏量受到各因素影响而处于较为稳定的波动状态。

表1 大坝渗漏观测资料特征统计

测点	年份	最大值日期	最大值/(L·s <sup>-1</sup> )	最小值日期	最小值/(L·s <sup>-1</sup> )	年均值/(L·s <sup>-1</sup> )	年变幅/(L·s <sup>-1</sup> )
U3 部位	2013	2013-03-19	0.569	2013-09-17	0.061	0.271	0.508
	2014	2014-03-18	0.635	2014-11-11	0.070	0.266	0.566
	2015	2015-12-22	0.558	2015-01-06	0.138	0.316	0.420
坝体	2013	2013-01-22	1.483	2013-12-10	0.071	0.603	1.412
	2014	2014-06-28	0.748	2014-12-09	0.166	0.464	0.582
	2015	2015-06-30	0.945	2015-01-06	0.181	0.581	0.764
坝基	2013	2013-03-26	2.313	2013-12-10	0.441	1.294	1.871
	2014	2014-06-28	1.754	2014-12-23	0.264	1.114	1.490
	2015	2015-06-18	1.982	2015-01-06	0.620	1.063	0.362
总渗漏量	2013	2013-01-22	3.415	2013-12-10	0.512	1.863	2.902
	2014	2014-06-28	2.501	2014-12-23	0.694	1.586	1.807
	2015	2015-06-23	2.846	2015-01-06	0.801	1.644	2.046

由图2可以看出,各个部位渗漏量与库水位都有一定的相关性,渗漏量的变化趋势与库水位的趋势基本相同,上游库水位上升时,渗漏量随之增大;反之水位下降时,渗漏量也随之下降,从各个部位渗漏量与库水位的关系来看,坝体渗漏量与库水位有较好的相关性(图2),坝基渗漏相关性较小,U3部位处渗漏量的相关性很小,但是也存在一定的影响。

其次对渗漏量影响最大的因素为温度。渗漏量一般来说与气温成反比,但是由于其他因素(库水位,降雨和滞后性)等共同影响(图3),导致温度与渗漏量的相关性并不明显,需要对渗漏量进行统

计分析后才能更好地对其影响权重进行分析。

降雨对渗漏量影响很小,且难以根据监测资料直接定性分析,同样需要进行统计分析来评价其具体的影响程度。大坝的3个部位都存在滞后性问题,渗漏量明显与库水位、气温和降雨完全不同步,是各个外部影响因素、地质条件和大坝防渗情况共同作用的结果,需要进一步统计分析其具体影响。

#### 3.2 大坝渗漏量的偏最小二乘法回归分析

##### 3.2.1 渗流量统计模型精度分析

将大坝各部位监测资料进行回归分析得到各个部位回归模型精度统计,见表2。从表2可知,各

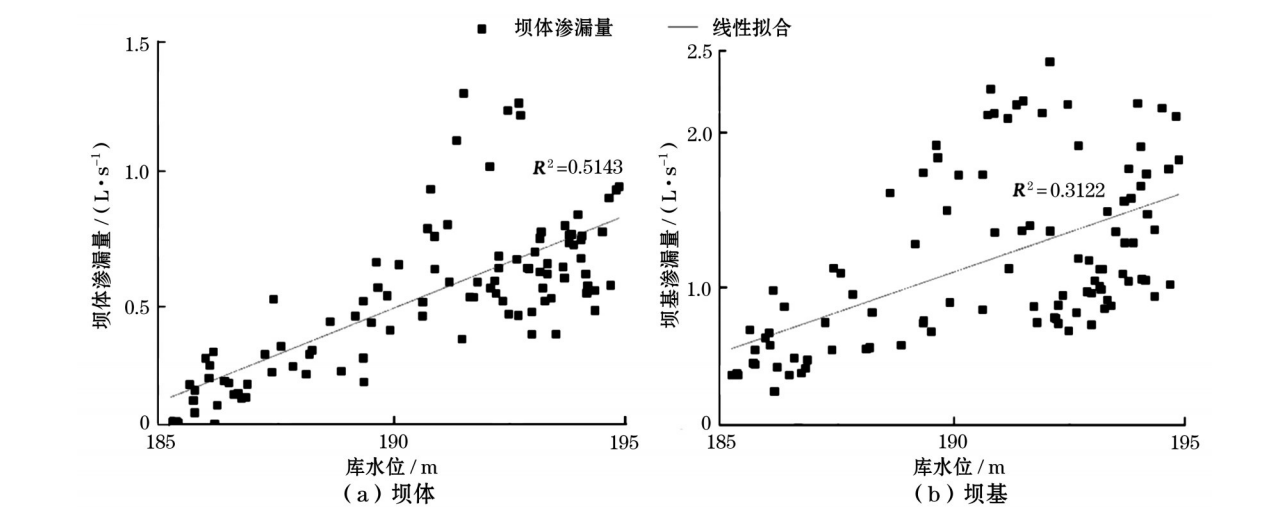


图2 坝体和坝基与库水位相关性

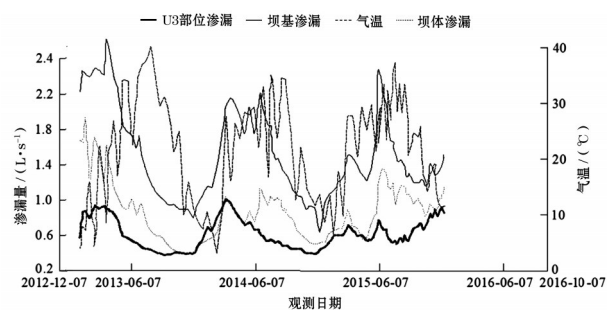


图3 各部位渗漏量统计

表2 各部位渗漏量回归分析精度统计

测孔编号	复相关系数	标准差S	F值	概率值
U3 渗漏部位	0.907	0.0640	418.47	$8.29 \times 10^{-29}$
坝体	0.940	0.0955	685.86	$2.32 \times 10^{-40}$
坝基	0.949	0.0804	819.09	$9.80 \times 10^{-37}$

个回归模型复相关系数都在0.9以上,标准差小, F值大,显著性水平极小,所建立的模型精度很高。

3.2.2 各因素影响权重分析

对3个部位的渗漏量进行回归分析,并整理得到不同因素对大坝渗漏量的影响,见表3,各个部位渗漏量拟合见图4。通过统计分析各个因素对大坝渗漏影响权重可知:

(1)库水位因素除U3部位的影响程度较低外,对坝体和坝基部位的影响占比分别达到了59.56%和44.33%,这两处渗漏量与库水位关系比较密切,同步性较高。而对U3部位的影响相对较小一些,

占比仅有28.93%。

(2)气温则与库水位相反,气温因素对U3部位的影响占比达到了59.14%,而坝体和坝基处气温占比仅有8.63%和13.83%。这说明U3部位受到气温影响较大,因此可以针对此情况对U3部位渗漏情况与气温之间的关系进一步分析。

(3)除U3部位降雨影响占比为10.78%外,坝基和坝体两处影响非常小,几乎可以忽略对其的影响。

(4)坝体和坝基受到时效因素影响较大,分别达到了30.87%和37.21%,说明受到坝前库底泥沙淤积、地质条件和防渗情况的影响。而U3部位因

表3 大坝渗漏量的影响统计

测孔编号	库水位		气温		降雨		时效	
	分量( $L \cdot s^{-1}$ )	占比/%	分量( $L \cdot s^{-1}$ )	占比/%	分量( $L \cdot s^{-1}$ )	占比/%	分量( $L \cdot s^{-1}$ )	占比/%
U3 部位	0.115	28.93	0.236	59.14	0.043	10.78	0.005	1.14
坝体	0.545	59.56	0.079	8.63	0.009	0.95	0.283	30.87
坝基	0.617	44.33	0.192	13.83	0.054	3.91	0.518	37.21



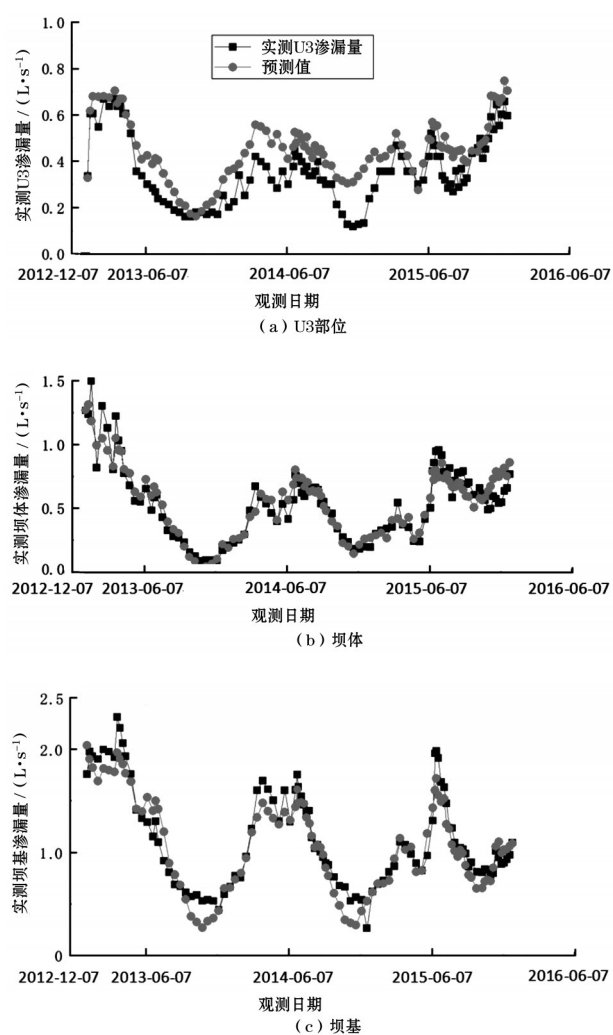


图4 大坝各部位渗漏量的预测值和实测值

为不受这些因素的影响,则几乎没有受到时效因素的影响。

## 4 结 语

(1)通过渗漏量监测资料,分析了大坝渗漏的

主要影响因素为库水位、气温、降雨和时效性,并重点讨论了U3部位的渗漏影响。

(2)采用偏最小二乘法回归分析对各影响因素的大小进行了计算和统计,结果显示:库水位对坝体和坝基部位的影响占比分别达到了59.56%和44.33%,对U3部位的影响占比为28.93%;气温因素对U3部位的影响为59.14%,而坝体和坝基处气温占比仅有8.63%和13.83%;降雨对U3部位的影响占比为10.78%,对坝基和坝体的影响可以忽略;坝体和坝基受到时效因素影响较大,分别达到了30.87%和37.21%。

### 参考文献:

- [1] 魏利刚. 荧光示踪剂法在坝体渗漏勘查中的应用[J]. 水利规划与设计, 2018(10):184-186.
- [2] 刁维杰,冯忠伦,刘希琛,等. 基于Visual MODFLOW的潍坊市北部地区水资源优化配置[J]. 水电能源科学, 2017,35(4):25-28.
- [3] 钮新强,谭界雄,田金章. 混凝土面板堆石坝病害特点及其除险加固[J]. 人民长江, 2016,47(13):1-5.
- [4] 贾海磊,马灿,李军,等. 高密度电法在土石坝坝肩渗漏检测中的应用[J]. 大坝与安全, 2019(1):54-59.
- [5] 邱辉阳,黄勇,王建平. 示踪技术和水化学分析在水库渗漏勘察中的综合应用[J]. 勘察科学技术, 2017(2):45-50.
- [6] 纪恒魁,孙佳梁,赵金双,等. 吉林市小型病险水库工程勘察分析[J]. 黑龙江科学, 2018,9(20):142-143.
- [7] 岑威钧. 土石坝防渗(复合)土工膜缺陷及其渗漏问题研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2016,36(1):16-22.
- [8] 和烁荣,辛卫东,康志强,等. 贺州市合宝地下河系统的定量示踪试验与分析[J]. 中国地质调查, 2019,6(1):81-85.
- [9] 李辉,陈大雷,贾璐. 基于COMSOL Multiphysics的土石坝边坡渗流稳定数值研究[J]. 水利技术监督, 2020(3):66-69.