

溪洛渡水电站拱坝坝基渗压统计模型研究

张超萍，冯宇强，代乔亨

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司,四川 成都 610072)

摘要:为了掌握溪洛渡水电站拱坝的真实运行状态,对大坝坝基渗压进行了分析,研究了影响坝基渗压各主要因素的作用规律。所采用的统计模型的温度分量选用周期函数和实测温度,分别拟定了坝基渗压安全监控指标,并将其与实测值进行对比,研究表明:统计模型的温度分量采用实测温度时,其预测值与实测值更接近,具有更高的预报精度。

关键词:溪洛渡水电站;拱坝;坝基渗压;监控指标;统计模型

中图分类号:TV7;TV223.6;TV222;[TV221.2];TV698.1 **文献标识码:** B **文章编号:**1001-2184(2022)01-0005-05

Study on Statistical Model of Seepage Pressure of Arch Dam Foundation of Xiluodu Hydropower Station

ZHANG Chaoping, FENG Yuqiang, DAI Qiaoheng

(PowerChina Chengdu Engineering Co., LTD, Chengdu, Sichuan, 610072)

Abstract: In order to grasp the real operation status of the arch dam of Xiluodu Hydropower Station, seepage pressure of dam foundation of Xiluodu Hydropower Station is analyzed and the law of the main factors affecting seepage pressure of dam foundation is studied in this paper. The periodic function and the measured temperature are selected as the temperature components of the statistical model, the safety monitoring indexes of seepage pressure of dam foundation are proposed respectively, and compared with the measured values of seepage pressure. The study shows that when the temperature component of the statistical model adopts the measured temperature, the predicted value is closer to the measured value and has a higher prediction accuracy.

Key words: Xiluodu Hydropower Station; arch dam; seepage pressure of dam foundation; monitoring indexes; statistical model

1 概 述

溪洛渡水电站位于四川省雷波县和云南省永善县境内的金沙江干流上,以发电为主,枢纽工程由混凝土双曲拱坝、坝身泄洪孔口、坝后水垫塘和二道坝、左右岸各 2 条泄洪洞、左右岸引水发电系统及送出工程组成。混凝土双曲拱坝坝顶高程为 610 m,建基面开挖高程为 324.5 m,最大坝高 285.5 m,坝顶长度中心线弧长 681.51 m,共有 31 个坝段。电站正常蓄水位高程为 600 m。

从 2013 年 5 月大坝导流底孔下闸蓄水至 2020 年 6 月,溪洛渡水电站拱坝已经历了 6 个完整的水库蓄水-消落的加载和卸载过程,监测成果表明:拱坝处于正常工作状态。

众所周知:坝基渗压对大坝的稳定、变形和应力都有一定的影响。由于影响渗流的因素复杂,一般理论计算值与实测值差异较大,给分析大坝

的工作状态带来了困难^[1]。因此,整理并分析坝基渗压的观测资料对于验证大坝的稳定性、了解坝基的防渗情况等具有重要意义。为了掌握大坝的真实运行状态,应对坝基渗压实测值进行分析,研究并建立监控模型以了解大坝的渗流状态,预测大坝的运行情况。

因此,科学选择统计模型的因子及其表达式、拟定监控指标对判断大坝的运行性态、准确识别异常情况意义重大。坝基渗压受地基裂隙变化的影响,而裂隙变化则受基岩温度的作用。大坝在稳定运行期基岩的温度变化较小,在无实测基岩温度时,可直接采用正弦波周期函数作为温度分量。溪洛渡水电站拱坝坝基埋设的渗压计带温度传感器,可以测量基岩温度,因此也可以采用实测基岩温度作为温度分量。此次研究针对溪洛渡水电站拱坝的具体情况,在建立统计模型时,对温度分量选用了周期函数和实测温度两种方法,分别

拟定了坝基渗压安全监控指标并比较了两种方法的拟定结果,以期为大坝的安全运行提供及时的反馈信息^[2]。

2 坝基渗压监测分析

2.1 监测仪器布置情况

在大坝2号、5号、7号(386 m高程)、12号、14号(332 m高程)、15号、16号(322.5 m高程)、17号(332 m高程)、18号(332 m高程)、19号、24号、28号和29号坝段分别布置了3支、7支、3支、3支、1支、8支、3支、1支、1支、3支、7支、3支、3支渗压计进行观测。在大坝10号、22号坝段沿河流方向分别布置了4支渗压计。坝基渗压观测共计布置了54支渗压计,其中坝基帷幕后的第一排渗压计共有12支。

2.2 监测成果分析

2020年6月20日,库水位第六次卸载至高程545 m时,各坝段坝基帷幕后的渗压水头在0~57.11 m之间,折减系数在0~0.26之间,小于设计允许值0.4。河床坝段的坝基渗压与库水位的相关性好,相关系数在0.8~0.99之间。

整个蓄水期间,坝基帷幕后建基面测点的折减系数均在0.3范围内,小于设计控制值0.4。蓄水以来,帷幕后各渗压测点折减系数的变化总体较小,且各测点折减系数均小于设计允许值,坝基帷幕防渗效果较好。

3 采用置信区间法拟定坝基渗压监控指标

3.1 坝基渗压统计模型的建立

对实测资料进行分析表明:坝基渗压主要受上游水位的影响;降雨对岸坡坝段坝基渗压也有一定的影响;另外,由于基岩温度的变化引起节理裂隙的宽度变化,进而引起坝基渗压的变化;考虑到坝前淤积、坝基帷幕防渗和排水效应等随时间的变化,还需选入时效因子^[3]。

(1)水压分量。上游水位变化对坝基渗压具有较大的影响。因为坝基渗压是逐渐上升和下降的过程,故上游水位对坝基渗压的影响具有一定的滞后效应。因此,研究时选择监测日前期水位平均值作为水压分量因子^[4]。水压分量 C_H 可以表示为:

$$C_H = \sum_{i=1}^7 a_i H_{ui} \tag{1}$$

式中 H_{ui} 为监测日、监测日前1 d、前2至4 d、

前5至15 d、前16至30 d、前31至60 d、前61至90 d的上游平均水位($i = 1 \sim 7$); a_i 为水压分量的回归系数。

(2)温度分量。

①坝基渗压受到地基裂隙变化的影响,而裂隙变化则受到基岩温度的作用。基岩温度变化较小且基本上呈年周期变化。故在无实测基岩温度时,可直接采用正弦波周期函数作为温度分量 C_T 。

$$C_T = \sum_{i=1}^m \left[b_{1i} \left(\sin \frac{2\pi it}{365} - \sin \frac{2\pi it_0}{365} \right) + b_{2i} \left(\cos \frac{2\pi it}{365} - \cos \frac{2\pi it_0}{365} \right) \right] \tag{2}$$

式中 t 为监测日到起始监测日的累计天数; t_0 为建模资料系列第一个监测日到始测日的累计天数; b_{1i} 、 b_{2i} 为温度分量的回归系数。

②溪洛渡水电站埋设的坝基渗压计带温度传感器,可以测量基岩温度,鉴于该电站的基岩温度变化较小,因此选择实测基岩温度作为温度分量。温度分量 C_T 可以表示为:

$$C_T = b_i T_i \tag{3}$$

式中 T 为渗压计温度传感器的实测温度; b_i 为温度分量的回归系数。

(3)降雨分量。分析得知:两岸坝段坝基扬压力受两岸地下水的影 响,而地下水除受库水位影响外,降雨也是其主要因素,降雨量与地下水水位的关系复杂,其与降雨量和雨型、入渗条件、地形和地质条件等因素有关且存在一定的滞后。一般采用前 i d降雨量的平均值作为因子,如将前1 d、前2至4 d、前5至8 d等的平均降雨量作为因子^[5]。降雨分量 C_P 可以表示为:

$$C_P = \sum_{i=1}^4 c_i P_i \tag{4}$$

式中 P_i 为监测日、监测日前1 d、前2至4 d、前5至8 d的平均降雨量均值($i = 1 \sim 4$); c_i 为降雨分量的回归系数。

(4)时效分量。时效分量是坝基渗压的一个重要分量,也是评价渗流状况的一个重要依据。坝前淤积、坝基裂隙的缓慢变化以及防渗体防渗效应的变化等因素都将影响坝基的渗流状况,其一般规律是在蓄水初期或某一工程措施实施后初期变化较快,然后,随着时间的延伸而逐渐趋向平稳。时效分量 C_θ 可以表示为:

$$C_{\theta}=d_1(\theta-\theta_0)+d_2(\theta-\theta_0)$$

(5)

式中 θ 为监测日至始测日的累计天数 t 除以 100; θ_0 为建模资料系列第一个测值日到始测日的累计天数 t_0 除以 100; d_1 、 d_2 为时效分量的回归系数。

(5)坝基渗压统计模型。由 $C=C_H+C_T+C_P+C_{\theta}$ 建立的坝基渗压统计模型为:

①温度分量采用周期函数

$$C=\sum_{i=1}^7[a_{1i}(H_{ui}-H_{u0i})]+\sum_{i=1}^m\left[b_{1i}(\sin\frac{2\pi it}{365}-\sin\frac{2\pi it_0}{365})+b_{2i}(\cos\frac{2\pi it}{365}-\cos\frac{2\pi it_0}{365})\right]+\sum_{i=1}^4[c_{1i}(P_i-P_0)]+d_1(\theta-\theta_0)+d_2(\theta-\theta_0)+Con$$

(6)

②温度分量采用实测温度

$$C=\sum_{i=1}^7[a_{1i}(H_{ui}-H_{u0i})]+b_iT_i+\sum_{i=1}^4[c_{1i}(P_i-P_0)]+d_1(\theta-\theta_0)+d_2(\theta-\theta_0)+Con$$

(7)

式中 Con 为常数项。

3.2 坝基渗压统计成果

目前,溪洛渡水电站拱坝坝基渗压观测共计布置了 54 支渗压计。考虑到坝基渗压监测的重点是关注帷幕对水头的折减效果,因此,统计模型研究选择坝基帷幕后第一支渗压计(共 12 支)作为

分析对象。统计回归样本选择最近三年的数据,即 2016 年 5 月 1 日(基准值)至 2019 年 10 月 23 日。

(1)统计模型及精度分析。统计模型的温度分量分别采用周期函数和实测温度作为回归因子,采用逐步回归分析法求得溪洛渡水电站坝基帷幕后渗压测点的渗压统计模型,并由统计模型得到以下几点认识:

①各坝基渗压测点统计模型精度均维持在较高水平,大部分测点复相关系数处于 0.95 以上,大部分测点的剩余标准差亦在 0.6 m 以内,说明统计模型对拱坝坝基渗压的回归效果比较理想。

②水压分量表现为库水位升高,坝基渗压水位升高;库水位下降,坝基渗压水位降低。渗压水位的变化基本同步于库水位的变化。

③水压和时效对坝基渗压水头的影响显著。

(2)各分量的影响分析。各分量权重计算的方法和时段的选择不一样,所得到的结果也存在较大的差异。本次研究以各测点所经历的荷载范围为计算边界,以各分量的绝对值为计算单位,求各分量的权重,即:

$$\omega_i=\frac{|C_i|}{|C_H|+|C_T|+|C_{\theta}|}$$

(8)

式中 ω 为各分量的权重; i 代表水压、温度、降雨和时效; $|\cdot|$ 为绝对值。

采用典型测点统计模型计算得到的各分量的权重见表 1,由表 1 可以得到以下认识:

表 1 统计模型各分量权重表

分 量		测 点							
		温度分量采用周期函数				温度分量采用实测值			
		P7-1	P14-1	P17-1	P22-2	P7-1	P14-1	P17-1	P22-2
分离值 /m	水压分量	5.92	3.31	2.6	5.42	6.25	3.56	2.76	5.86
	温度分量	0.37	0.32	0.24	1.98	0.31	0	0.12	0.62
	时效分量	2.82	0.45	0.68	0.96	2.82	0.47	0.68	1.07
	降雨分量	0.23	0	0.17	0	0.2	0.14	0.17	0
比重	水压分量	0.63	0.81	0.7	0.65	0.65	0.85	0.74	0.78
	温度分量	0.04	0.08	0.06	0.24	0.03	0	0.03	0.08
	时效分量	0.3	0.11	0.18	0.11	0.29	0.11	0.18	0.14
	降雨分量	0.02	0	0.05	0	0.02	0.03	0.05	0

注:统计回归样本选择最近三年的数据,即 2016 年 5 月 1 日(基准值)至 2019 年 10 月 23 日。

(1)溪洛渡水电站坝基渗压受水压作用较为显著:库水位升高,坝基渗压水位升高;库水位下降,则坝基渗压水位降低,坝基渗压水位的变化基

本同步于库水位的变化。温度采用周期函数时,水压分量约占 60% 以上;温度采用实测温度时,水压分量约占 65% 以上。整体而言,统计模型的

水压分量可以较好地反映水压对坝基渗压的影响。

(2)时效也是影响溪洛渡水电站大坝坝体位移的因素之一,因此,研究时将大部分测点选中了时效因子,说明时效对坝基渗压具有一定的影响。大部分坝基渗压有逐渐减小或已基本稳定的趋势,部分孔虽略有上升,但每年的上升量逐渐减小并已基本趋于收敛。整体而言,统计模型的时效分量可以较好地反映时效对坝基渗压的影响。

(3)温度对坝基渗压具有一定的影响,但其影响较库水位及时效要小,温度分量采用周期函数相比采用实测温度的温度分量占比要大一些。

(4)从统计模型取得的成果看:各测点的降雨分量均很小,有些测点的降雨分量成果为零,说明降雨对坝基渗压影响很小。

3.3 基于统计模型的安全监控指标拟定

根据安全监控统计模型对坝基渗压的模型描述研究了拱坝坝基渗压警戒值与置信区间的关系,确定了安全监控指标,拟定了2020年第六次卸载坝基渗压安全控制值。

采用置信区间法拟定的溪洛渡水电站安全监

表 2 统计模型预测值与实测值对比(库水位为高程 545 m)表

测点	安装高程 /m	温度分量采用周期函数					温度分量采用实测温度					实测值 /m
		拟合值 /m	残差	监控指标 $P\pm 2S$		拟合值 /m	残差	监控指标 $P\pm 2S$				
				下限(P-2S)	上限(P+2S)			下限(P-2S)	上限(P+2S)			
P7-1	387.25	7.21	0.87	6.76	7.66	7.27	0.81	6.81	7.74	8.08		
P14-1	322.5	25.72	0.2	25.39	26.06	25.84	0.08	25.29	25.99	25.92		
P17-1	323.52	22.32	0.11	21.98	22.66	22.4	0.03	21.95	22.65	22.43		
P22-2	383.75	24.27	0.97	23.53	25.01	24.41	0.83	23.12	25.43	25.24		

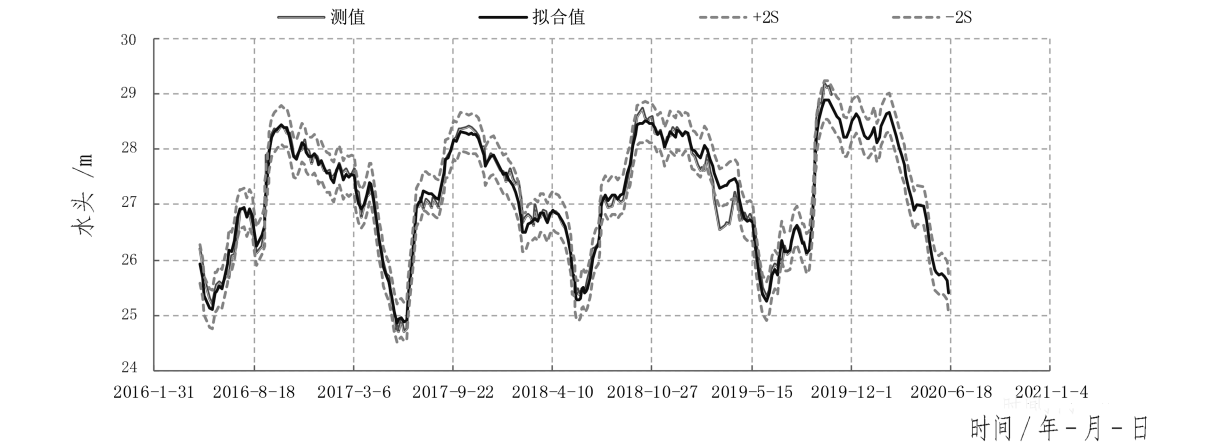


图 1 典型测点渗压水头监控置信区间示意图

4 结 语

采用坝基渗压统计模型回归效果理想,且其

控指标 C_m 的公式为:

$$C_m(H,T,P,\theta)=C(H,T,P,\theta)\pm\Delta \tag{9}$$

式中 $C(H,T,P,\theta)$ 为坝基渗压安全监控统计模型的预测值; $\Delta=i\sigma$; σ 为标准差。考虑到坝基渗压监测为自动化监测,误差相对较小,其预测成果具有较好的合理性和有效性。本次研究取 95% 的保证率,即 $i=2$ 拟定坝基渗压安全监控指标。根据统计模型结果和式(9)拟定出 2020 年溪洛渡水电站拱坝坝基渗压安全监控指标。

根据历史蓄水过程,假定 2020 年 6 月 15 日水位降至高程 545 m,根据所拟定的统计模型表达式对渗压进行预测,并将其与实测值进行比较,统计模型预测值与实测值对比情况(库水位为高程 545 m)见表 2。典型测点渗压水头监控置信区间见图 1。通过将统计模型预测值与实测值进行对比分析可知:温度分量采用周期函数和实测温度残差均较小。预测时温度分量采用实测温度比采用周期函数残差更小,预测值更接近实测值,说明渗压统计模型的温度分量采用实测温度预报精度更高,更具参考价值。

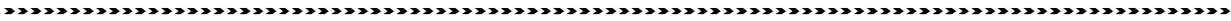
分离的分量总体符合实际情况,适宜用作溪洛渡水电站坝基渗压分析与监控。统计模型表明:溪

洛渡水电站坝基渗压受水压作用较为显著,库水位升高,坝基渗压水位升高;库水位下降,则坝基渗压水位降低,坝基渗压水位的变化基本同步于库水位的变化^[6]。研究表明:时效也是影响坝基渗压的因素之一,时效分量已逐渐趋于收敛。温度分量采用周期函数相比采用实测温度的温度分量占比要大一些。降雨分量均较小或几乎不产生影响。

由以上分析可知:温度分量采用实测温度,其统计模型的复相关系数较高,坝基渗压预测成果和监测实测值较接近,说明温度分量采用实测温度具有较强的预报精度,对大坝安全监测具有较强的实用性。

参考文献:

[1] 李雅静,张志诚,陈广洲. 渗压监测统计模型欠拟合问题及因子的扩充[J]. 长江科学院院报,2009,26(6):13-14.



(上接第 4 页)

结覆盖层现场渗透变形试验成果,所得出的允许坡降较原经验值有较大幅度的提高,已成功应用于冶勒、太平驿、瀑布沟、长河坝等工程,尤其对坝基覆盖层现场渗透变形试验进行了研究论证,在太平驿工程设计中将全封闭式防渗墙改为悬挂式,所取得的工程效益十分显著。

(3)太平驿水电站是中国电建成都院在岷江流域深厚覆盖层上通过现场原状样渗透变形试验论证后、对渗透变形和渗漏量进行充分计算、论证分析后建成的第一个悬挂式防渗墙(原方案为插入基岩全封闭),建成后几乎滴水不漏,经历了2008年“5·12”地震至今运行良好。

参考文献:

[1] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册(第五版)[M]. 北

[2] 李姝昱,张伟,姚远,顾伊娜. 丰满大坝坝基扬压力安全监控指标拟定[J]. 人民黄河,2011,33(4):124-126.
[3] 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.
[4] 刘天祥,包腾飞,宋锦焘,沈寿亮,梁睿斌,姜彦作. 基于遗传算法的 LIBSVM 模型大坝扬压力预测研究[J]. 三峡大学学报,2013,35(6):24-28.
[5] 包腾飞,吴中如. 新安江大坝岸坡坝段扬压力偏高成因及其影响[J]. 水力发电,2003,29(2):103-106.
[6] 於三大,陈绪春,冯兴常. 三峡工程大坝混凝土施工及监测成果分析[J]. 水力发电,2009,35(12):40-42,69.

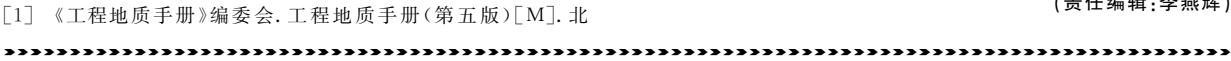
作者简介:

张超萍(1988-),女,湖南邵阳人,工程师,硕士,从事工程安全监测设计与评价研究工作;
冯宇强(1984-),男,四川成都人,高级工程师,硕士,从事工程安全监测设计与评价研究工作;
代乔亨(1997-),男,四川乐山人,助理工程师,学士,从事水利水电工程安全监测工作. (责任编辑:李燕辉)

京:中国建筑工业出版社,2007.
[2] 吕衡. 太平驿水电站闸基覆盖层渗透及渗透变形试验研究[J]. 水电站设计,1995,11(3):111-112.
[3] 许强,陈伟,张倬元. 对我国西南地区河谷深厚覆盖层成因吉利的新认识[J]. 地球科学进展,2008,23(5):449-450.
[4] 余挺. 深厚覆盖层工程勘察研究与实践[M]. 北京:中国电力出版社,2019.
[5] 陈生水,凌华,米占宽. 大石峡砂砾石坝料渗透性及其影响因素研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(1):26-31.

作者简介:

葛明明(1982-),男,甘肃平凉人,工程师,学士,从事岩土工程试验研究工作;
李小泉(1965-),男,重庆万州人,教授级高级工程师,副专业总工程师,学士,从事岩土工程试验研究工作;
鲁涛(1987-),男,湖北宜昌人,工程师,硕士,从事岩土工程试验研究工作. (责任编辑:李燕辉)



由电建成都院参建的郑州地铁 8 号线一期工程土建施工 01 标首台盾构机顺利掘进贯通

2021 年 9 月 22 日,由成都院工程测试科学研究院负责施工监测及控制测量的郑州地铁 8 号线一期工程土建施工 01 标首台盾构机在梧桐街入场线成功接收,标志着郑州地铁 8 号线一期首台盾构圆满完成掘进任务,平安到达梧桐街入场线。

梧桐街入场线右线盾构区间长度为 907.553 m,区间隧道侧穿加油站,距离油库水平距离约为 16.4 m,隧道上覆土层厚度约为 7.4 m,施工监测及控制测量项目部沿盾构区间线路共布设了地表沉降、地下水位、建筑物沉降、洞内收敛等各类监测点 260 个,全方位对盾构区间地表及周边建筑进行监测和控制测量。特别是在郑州“7·20”特大洪水受灾过程中,施工监测及控制测量项目部克服重重困难,对失效损坏的监测点进行及时恢复并加密观测,为盾构的顺利掘进贯通保驾护航。

(供稿:朱厚耀 朱德华)