

刘泽俊, 费庆升, 周杰, 等. 气温对水库大坝渗漏量的影响[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(3): 455-461. LIU Z J, FEI Q S, ZHOU J, et al. The influence of temperature on the leakage of a reservoir dam[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(3): 455-461. (in Chinese)

气温对水库大坝渗漏量的影响

刘泽俊¹, 费庆升², 周杰³, 朱兵², 黄勇⁴

(1. 淮阴工学院建筑工程学院, 江苏 淮安 223001; 2. 江苏润邮水利建设集团有限公司, 江苏 高邮 225600;
3. 苏源检测有限公司, 江苏 淮安 223300; 4. 河海大学地球科学与工程学院, 南京 211100)

摘要:以碗窑水库大坝为研究对象, 针对Ⅲ坝段的 U3 部位渗漏情况展开研究。分析渗漏量和气温的观测资料, 得到气温和渗漏量呈现明显线性负相关的结果, 而 U3 部位渗漏存在明显的裂缝, 可通过立方体定律建立 U3 部位渗漏通道大小与气温的解析表达式。基于 COMSOL 软件建立研究区坝体和坝基的三维地下水数值模型, 并利用实测数据对模型参数进行反演分析。根据校正后的模型模拟预测不同温度和不同库水位条件下 U3 部位和坝基的渗漏量。模拟结果显示, 防渗修复能明显减少水库的渗漏量, 从而保证水库的正常、安全运行。研究结果为 U3 渗漏通道的防渗补强提供了重要参考。

关键词: 气温; 大坝; 渗漏量; COMSOL 软件

中图分类号: TV223.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0047

大坝渗漏严重影响坝体安全, 也是影响水库效益的重要因素之一^[1-2]。已有资料^[3-5]表明, 在大坝渗漏中, 温度与渗漏量成反比, 温度越高渗漏量越小, 反之亦然。气温在宏观上对坝体的较大裂隙和裂缝的影响较大: 高温使坝体混凝土膨胀、伸缩缝和裂隙闭合, 进而使得坝体渗漏量降低; 而低温则使坝体收缩, 缝隙张开, 渗漏量也随之增加。根据邢林生等^[6]对岩滩大坝遭遇 2008 年冰冻低温天气影响的研究, 低温使混凝土和岩体体积收缩、坝体伸缩缝和裂隙张开, 导致坝体渗漏量激增 50 多倍, 持续了 20 多天才有所缓解, 直到气温回升 4 个月后渗漏量才逐渐恢复正常。许多研究^[7-10]指出, 气温因素对大坝影响存在周期性, 气温总是在每一年中循环往复波动, 因此可以适当调整滞后性, 将气温和渗漏量进行错开对应。

碗窑水库渗漏主要发生在 U3 部位, 经过多次处理防渗效果并不明显。观测资料显示 U3 部位渗漏情况受到气温影响较大, 其权重占比达到了 59.14%。碗窑地区最高气温发生在 2003 年 7 月 31 日和

2007 年 7 月 30 日, 其气温值为 39.8 °C; 最低气温发生在 2003 年 1 月 6 日, 其气温值为 -0.4 °C, 变幅约 40 °C, 因此, 研究极端气温对渗漏量的影响具有重要意义。由于 U3 部位渗漏主要是坝前直接渗漏到廊道, 与库水位联系较为紧密, 因而可以认为当天的库水位对 U3 部位渗漏的影响最大, 即可以忽略库水位对渗漏量的滞后性影响。

因此, 考虑到近年来极端气候事件频发, 夏季高温和冬季冰冻容易对坝体已有的渗漏通道产生巨大影响, 甚至产生安全隐患。为保障水库安全运行需要, 有必要对碗窑水库高水位低温情况下渗漏量进行研究。

1 研究区概况

碗窑水库位于浙江省江山市碗窑乡碗窑村, 坝址距江山市区 10 km, 是一座以灌溉为主, 结合供水、发电、防洪等综合利用的大(2)型水利工程。水库能保证下游 2.14 万 hm² 农田的灌溉用水量, 能向江山市市区日供水 10 万 t。坝址以上控制流域面积

收稿日期: 2023-07-20 修回日期: 2024-03-10 网络出版时间: 2024-03-15

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240315.1402.002>

基金项目: 长江水科学研究联合基金项目“长江上游流域水文循环机理与基于气陆耦合的暴雨洪水预报”(U2240217); 2024 国家级大学生创新创业训练计划项目“基于新型混凝土改良材料的保温墙材及专用砂浆研发及适宜性研究”

作者简介: 刘泽俊(1970—), 男, 江苏淮安人, 教授, 主要从事土木水利、工程地质研究。E-mail: 1422436690@qq.com

通信作者: 黄勇(1974—), 男, 重庆人, 教授, 主要从事水文地质、工程地质和环境地质研究。E-mail: hyong@hhu.edu.cn

212.5 km², 库区多年平均降雨量 1 835 mm, 多年平均径流深 1 103 mm, 多年平均径流量 2.34 亿 m³, 多年平均流量 7.43 m³/s, 水库发电最低死水位 158.24 m, 灌溉死水位 149.24 m。水库枢纽工程由拦河主坝、右岸副坝、溢洪道、坝后电站、放水设施和灌溉渠

等建筑物组成, 其中, 主坝由碾压混凝土重力坝构成, 坝顶高程 196.24 m, 坝顶长 390 m, 宽 8.5 m。全坝共分 11 个坝段, 坝段为溢流段, 其余为非溢流坝段, 主坝水工建筑物平面布置见图 1。

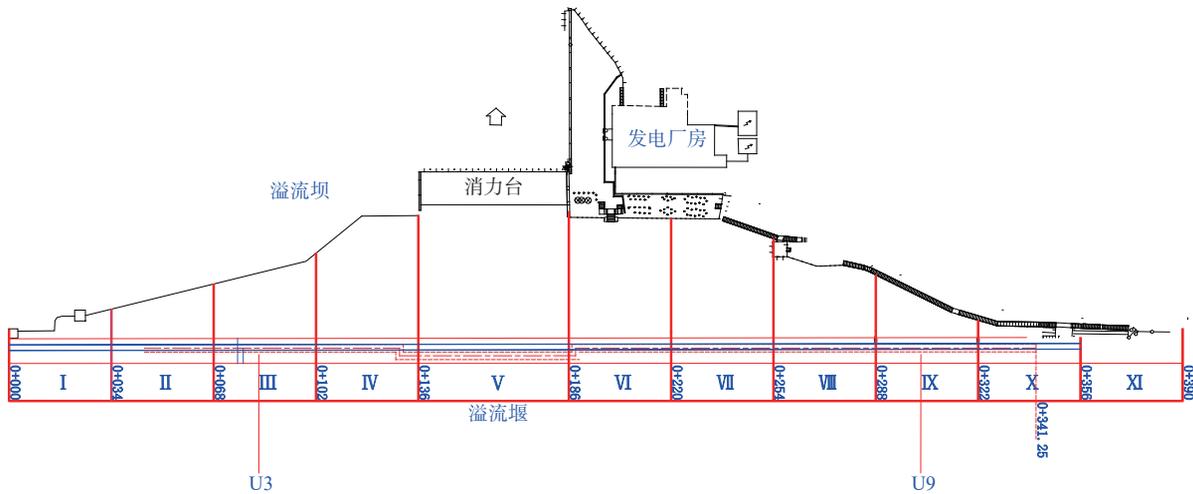


图 1 主坝水工建筑物平面布置

Fig. 1 Layout plan of hydraulic structures in the main dam

Ⅲ坝段坝高 79 m, 正常蓄水位 194.24 m, 设计洪水水位 195.29 m, 校核洪水水位 195.50 m。U3 典型剖面见图 2。由于本文主要考虑坝体渗漏, 在建立渗

流模型时, 也将坝基和坝体作为一个整体建立模型进行研究。根据钻孔压水试验结果, 坝址区坝基岩体透水性相对较差, 整体以弱透水为主。

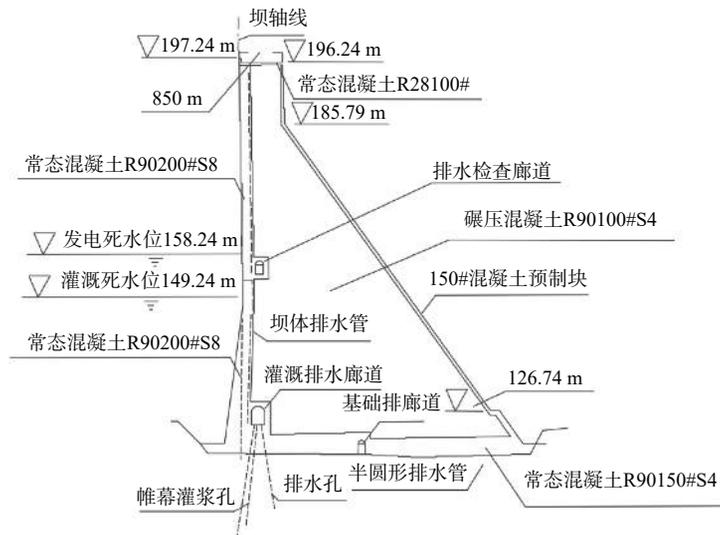


图 2 U3 典型剖面

Fig. 2 Typical profile at U3 site

2 渗漏量计算方法

2.1 大坝渗漏量与温度的关系

碗窑水库于 1993 年开始建造, 1997 年底基本完工。从 1999 年开始, Ⅲ坝段(U3)出现渗漏量增大的情况, 2006 年对Ⅲ坝段进行补强灌浆, U3 扬压力观测孔附近伸缩缝渗水及Ⅲ坝段下游坝坡的 2 个

集中渗水点的渗漏量均有所减少, 结合气温与 U3 渗漏量的关系展开研究。选取水库正常蓄水位 194.24 m 时的渗漏情况作为研究对象, 对坝体渗漏量与气温进行相关性分析, 拟合结果见图 3。从图 3 可以看出, 气温和渗漏量呈现明显的线性关系, 相关系数 R^2 达到了 0.822 4, 假设渗漏量 Q 和气温 T 的线性关系式为

$$Q = mT + n \quad (1)$$

式中: Q 为渗漏量, m^3/s ; m 和 n 分别为相关系数和常数; T 为气温, $^{\circ}\text{C}$ 。

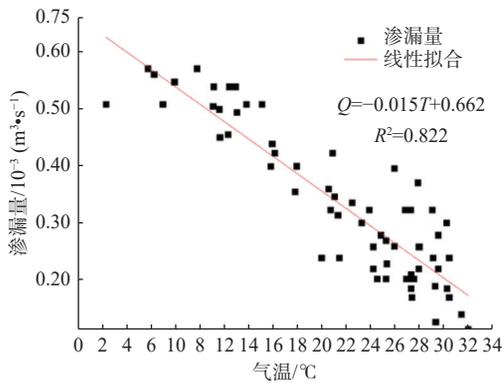


图3 U3 部位渗漏量与气温关系

Fig. 3 Relationship between leakage and temperature at U3 site

根据立方体定律^[11-13]可知,单位宽度流量 q 为

$$q = \frac{gb^3J}{12\nu_w} \quad (2)$$

式中: b 为渗漏通道的宽度, m ; g 为重力加速度, m/s^2 ; ν_w 为运动黏滞系数, m^2/s ; J 为渗漏通道的水力坡度。

由式(2)可知,温度对运动黏滞系数有着比较大的影响,由于缺少渗漏处温度监测资料,本着影响最大原则,用气温代替渗漏处的温度。根据文献和资料^[14-17],温度与运动黏滞系数的经验公式为

$$\nu_w = \frac{1.775 \times 10^{-6}}{1 + 0.033T + 0.000221T^2} \quad (3)$$

式(3)显示,运动黏滞系数受温度影响较大,温度为 0°C 时是 20°C 时的 1.7 倍,是 50°C 时的 3.2 倍。因此运动黏滞系数在不同温度下差异很大,对渗漏量的影响不容忽视。根据式(1)和式(2),得到等效隙宽 b 与气温 T 的关系为

$$b = \sqrt[3]{\frac{2.13(mT + n) \times 10^{-5}}{(1 + 0.033T + 0.000221T^2)gJ}} \quad (4)$$

根据式(4)计算得到不同气温下的隙宽,见表 1。

表 1 不同温度下隙宽计算结果

Tab. 1 Calculation results of equivalent width at different temperatures

日期	库水位/m	气温/ $^{\circ}\text{C}$	渗漏量/ $(\text{L}\cdot\text{s}^{-1})$	等效隙宽/mm
2013-02-19	191.55	3.60	0.57	0.27
2013-09-17	188.14	31.20	0.06	0.10
	194.24	0	0.66	0.28
预测	194.24	20.00	0.36	0.19
	194.24	40.00	0.05	0.09

2.2 地下水流数学模型及计算方法

假设研究区为非均质各向异性,则三维地下水运动的数学模型^[18-19]为

$$\rho \left(\frac{C_m}{\rho g} + S_e S \right) \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \rho \left(-\frac{\kappa_s}{\eta} k_r (\nabla p + \rho g \nabla D) \right) = Q_m \quad (5)$$

式中: Q_m 为液体源汇项, m^3/d ; D 为位置水头, m ; ρ 为流体密度,即水的密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; η 为流体黏度, m^2/s ; C_m 为容水度, %; S_e 为饱和度, %; S 为储水系数; k_r 为相对渗透率, %; ∇ 表示微分算子; κ_s 为饱和透率, %; p 为压力, Pa ; 混合边界条件为

$$n \frac{\kappa_s}{\eta} k_r \nabla (p + \rho g z) = N_0 + R_b (H_b - H) \quad (6)$$

其中:

$$H_b = z_b + \frac{p_b}{\rho g} \quad (7)$$

$$H = z + \frac{p}{\rho g} \quad (8)$$

式中: R_b 为外部电导率, S/m ; 当 $R_b = 0$ 时,混合边界为第二类边界条件;当 R_b 趋于无穷时,混合边界为第一类边界条件; n 为边界面外法线方向; z 为位置水头, m ; N_0 为内向通量, S ; H_b 为外部总水头, m ; z_b 为外部高程, m ; p_b 为外部压强, Pa ; H 为总水头, m 。

采用三维数值模拟软件 COMSOL 进行计算,在 COMSOL 中,溢出边界属于第三类边界条件^[20],混合了流量边界和水头边界,见图 4。混合边界的含义为:将边界分割成两种边界计算,对于自由面以上的部位为第二类边界条件(零流量边界),出渗面处除了大气压强压力外无其他压力,因此出渗面位置的边界为第一类边界条件即仅有位置水头边界。

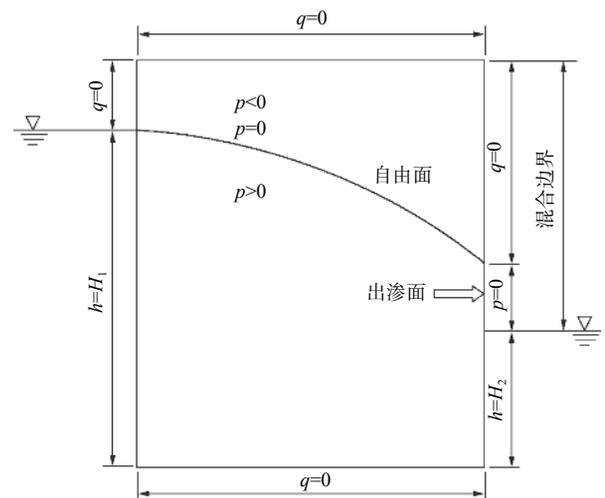


图4 溢出边界条件

Fig. 4 Schematic diagram of overflow boundary conditions

2.3 模型范围及边界条件

此次研究对象为坝体和坝基,因此模型以混凝土坝为中心向上下游方向分别延伸约 240 m、左右两岸主要分别向两侧延伸 50~70 m 作为模型范围区域。根据研究区域资料,将上游水库概化为第一类定水头边界条件,下游概化为第一类边界条件,坝体后坡设置为溢出边界条件,两侧边界基本与流线平行,可视为第二类边界条件(即零流量边界),廊道概化为混合边界条件,底部以弱透水的流纹质凝灰岩作为模型的隔水底板。

本次地下水流数值模拟采用四面体单元剖分,对不同区域采用不同程度加密或者稀疏,以满足模型计算要求和计算速度之间的平衡。模型包括 96 375 个顶点、546 826 个域单元、68 456 个边界单元和 5 795 个边单元。主要材料包括坝体(常态和碾压混凝土)、防渗墙和坝基。其中,坝基主要考虑了弱透水层岩体,U3 部位通过渗流量换算为渗流通道的等效宽度,从而得到其渗透系数。

2.4 模型参数反演

考虑到数值模拟的复杂程度和时间,并且区域内各个测孔的水位在 1 个水文年内是周期性变化的,因此采用稳定流进行模拟的结果与实际动态情况相差不大,可以认为其能较好地反映大坝和周围含水层的水力特性,选取平水期库水位长时间变动较小的某 1 天的水位进行拟合。观测孔包括大坝轴线的 U2、U3、U5、U6、U8、U10 以及 4 个横断面上的 U304、U504、U604、U804 等 10 个孔,水库水位为实测值 190 m。不断调整各部位的渗透系数以及其他参数,使概化模型整体水力特性不断接近研究区域的实际情况,直到模拟水位与实际水位误差满足一定精度为止,得到扬压力测孔实测水位和计算水位见图 5。相对误差计算公式为

$$Z = \frac{h_m - h_c}{h_m} \times 100\% \quad (9)$$

式中: Z 为相对误差; h_m 为测孔实测水位, m; h_c 为测孔计算水位, m。

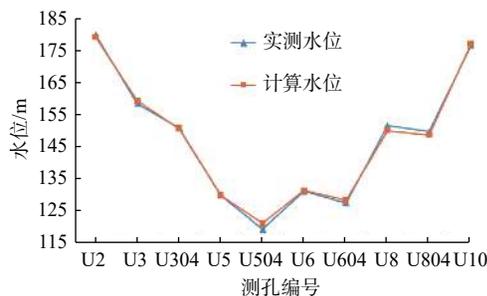


图 5 扬压力孔实测水位与计算水位对比

Fig. 5 Comparison of measured and calculated water levels of uplift pressure boreholes

由图 5 可知,除 U504 孔产生的相对误差为 1.53% 外,其余观测孔相对误差均小于 1%,各观测孔总体上拟合结果较好。渗透系数拟合结果见表 2。

表 2 各渗透性分区参数反演值
Tab. 2 Inversion values of permeability parameters

渗透性分区	渗透系数/(m·d ⁻¹)		
	K_x	K_y	K_z
坝基	0.24	0.31	0.18
常态混凝土	0.56×10^{-2}	0.56×10^{-2}	0.16×10^{-2}
碾压混凝土	0.12×10^{-2}	0.12×10^{-2}	0.08×10^{-2}
防渗墙	0.11×10^{-3}	0.17×10^{-3}	0.05×10^{-3}

3 渗流量计算结果分析

根据模型参数反演结果,设置好相关参数后,再根据不同的预测需要设置不同工况来模拟不同条件下渗流量变化情况,具体模拟工况条件设定见表 3,其中,工况 1~4 计算 U3 渗流通道在不同温度下因隙宽不同而造成的渗流量变化。在模型中,将温度对渗流量的影响根据公式(4)转化为对隙宽的影响,同时对不同隙宽下的渗透系数进行计算,以此来模拟气温对渗流量的影响。工况 5 和工况 6 用于模拟水库在遇到百年一遇洪水时渗流量的变化。

表 3 模拟工况汇总

Tab. 3 Summary of simulated working conditions

工况	上游水位/m	下游水位/m	气温/°C	防渗修复情况	备注
1	正常蓄水位194.24	119.87	0	无	
2	正常蓄水位194.24	119.87	20.00	无	预测不同情况下U3部位渗流量
3	正常蓄水位194.24	119.87	40.00	无	
4	正常蓄水位194.24	119.87	0	有	
5	设计洪水位195.29	123.94	20.00	有	
6	校核洪水位195.50	126.08	20.00	有	

各工况设置后,利用软件 COMSOL 对渗流面上的水流速度进行面积分运算,计算出相应的渗漏量,其中正常蓄水位 194.24 m 时,主要计算 U3 部位

渗漏通道因温度变化导致渗漏的变化,相应计算结果见表 4。对于防渗修复前后的渗流场模拟结果见图 6。

表 4 不同工况下各个部位渗漏量统计

Tab. 4 Statistics of leakage in various parts under different working conditions

单位: L/s

工况	U3部位渗漏量		坝体渗漏量	坝基渗漏量	总渗漏量
	数值法	解析法			
1	0.68	0.66	1.33		4.17
2	0.38	0.36	1.04		3.59
3	0.05	0.05	0.70	2.16	2.91
4	8.71×10^{-5}	-	0.65		2.82
5	9.34×10^{-5}	-	0.67	2.16	2.83
6	9.42×10^{-5}	-	0.67	2.14	2.81

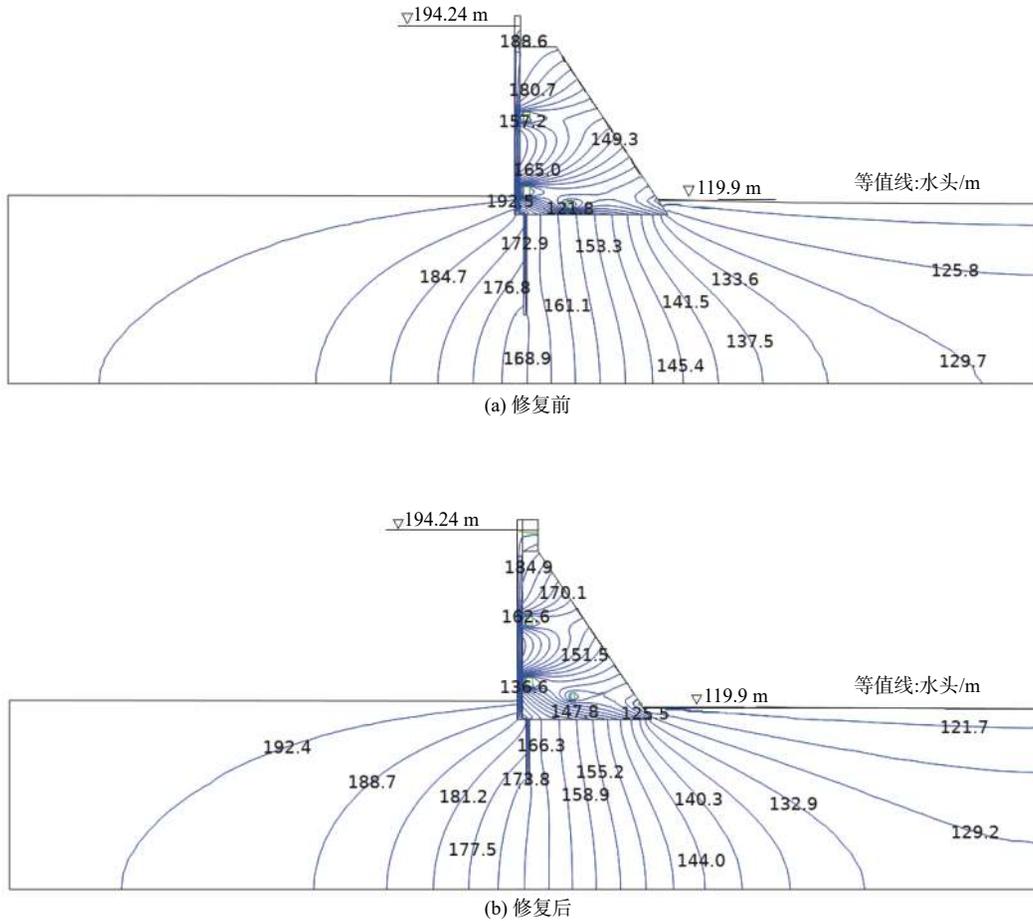


图 6 防渗修复前后的渗流场模拟结果

Fig. 6 Simulation results of seepage field before and after anti-seepage restoration

从表 4 可知,气温变化导致隙宽和运动黏滞系数变化,最后影响 U3 部位渗漏量。当正常蓄水位、下游水位相同以及均未修复渗漏通道时,U3 部位、坝体渗漏量以及总渗漏量随着气温的升高而减小。在低温 0 °C 未修复渗漏通道时,渗漏量达到了最大 0.68 L/s,此时渗漏通道等效宽度约 0.3 mm,在低温 0 °C 采用混凝土灌浆修复了渗漏通道之后渗漏量直接下降至 8.71×10^{-5} L/s,此时渗漏通道等

效宽度约 0.03 mm,修复前后渗漏通道宽度相差约 10 倍。因此,查明渗漏通道位置并及时进行修补等工作非常重要。U3 渗漏量的解析法计算和数值模拟计算值相差不大,说明渗漏量计算结果较为可靠。在防渗修复之后模拟了百年一遇洪水,即设计洪水位 195.29 m 和校核洪水位 195.50 m,20 °C 时 U3 部位渗漏量依然很小,分别为 9.34×10^{-5} L/s 和 9.42×10^{-5} L/s,坝体渗漏量为 0.67 L/s,但坝基渗漏量

略微减少,分别为 2.16 L/s 和 2.14 L/s,出现这种现象的原因可能是下游水位因洪水排放而提高,导致水力坡度较正常蓄水位低,因而坝基渗漏量减小。

4 结论

通过分析气温与实测渗漏量的关系,基于立方体定律,推导了 U3 部位渗漏通道大小与气温的解析表达式,采用软件 COMSOL 建立了三维地下水流数值模型,利用实测水位对模型参数进行识别验证,并对不同工况下的大坝渗漏量进行预测,得到如下结论:

气温和渗漏量呈现明显的负相关,随着气温升高,大坝的渗漏量明显减少,将大坝渗漏通道当做裂隙,利用立方体定律计算了裂隙等效宽度的大小,为数值模拟提供了参数。

基于坝址地质条件和坝体结构,利用 COMSOL 软件计算了不同温度和不同水位下的坝体和坝基渗漏量。结果显示,U3 部位渗漏量随气温的增加而减小,在 0 ℃ 未修复渗漏通道时渗漏量为 0.68 L/s,40 ℃ 时为 0.05 L/s,相差 12.6 倍,表明低温高水位环境对渗漏量的影响很大。

当防渗补强后渗漏量明显减少(对比工况 1 与工况 4,修复渗漏通道后总渗漏量减少了 1.35 L/s)。因此,需要及时对渗漏通道进行截渗灌浆,以减少水库的渗漏量,从而保证水库的正常、安全运行。

参考文献:

- [1] 马宏新,李卓,范光亚,等.某水库大坝防渗加固效果综合物探检测与分析评价[J].*南水北调与水利科技*,2019,17(6):193-200. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2020.0151.
- [2] 谭磊,胡雄武,张平松,等.坝体浸润特征的并行电法连续监测技术[J].*南水北调与水利科技*,2015,13(5):926-930. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2015.05.023.
- [3] 张玉平,李清华,王得,等.白市大坝廊道渗漏量资料分析与安全评价[J].*水科学与工程*,2020(6):39-44. DOI: 10.19733/j.cnki.1672-9900.2020.06.11.
- [4] 范海平,石素美,周杰,等.碗窑水库大坝渗漏分析[J].*江苏水利*,2023(7):68-72. DOI: 10.16310/j.cnki.jssl.2023.07.003.
- [5] 吴舅槐.黄龙带水库浆砌石重力坝扬压力变化与渗漏规律研究[D].广州:华南理工大学,2020. DOI: 10.27151/d.cnki.ghnl.2019.003963.
- [6] 邢林生,杜雪珍,朱锦杰.2008年初南方冰冻低温对岩滩坝体渗漏量影响机理分析[J].*水力发电*,2010,36(12):20-22. DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2010.12.006.
- [7] 宋汉周.大坝环境水文地质研究[M].北京:中国水利水电出版社,2007.
- [8] 盛小平,魏海云,徐刚,等.沙畈水库除险加固工程安全监测资料分析[J].*浙江水利科技*,2017,45(4):60-64. DOI: 10.13641/j.cnki.33-1162/tv.2017.04.017.
- [9] 张楠.沙坪坝库区气温和降水变化特性研究[J].*科学技术创新*,2020(26):161-164. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1328.2020.26.072.
- [10] 刘刚,童富果,习念念,等.坡体渗流与气温变化相关性分析[J].*南水北调与水利科技*.2017(3):158-163. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2017.03.026.
- [11] 王亚维.基于空间网络连通性的非均质含水层渗流机理研究[D].贵阳:贵州大学,2021. DOI: 10.27047/d.cnki.ggudu.2020.001061
- [12] 包劲青,杨晨旭,许建国,等.基于有限元方法的水力压裂全三维全耦合数值模型及其物理实验验证[J].*清华大学学报(自然科学版)*,2021,61(8):833-841. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2021.26.019.
- [13] 周志芳,王锦国,黄勇,等.裂隙介质水动力学原理[M].2版.北京:地质出版社,2019.7.
- [14] 陈璐.基于天然示踪法的土石坝渗漏模型研究[D].西安:西安理工大学,2021. DOI: 10.27398/d.cnki.gxalu.2020.000128
- [15] 陈雪彬,周军,蓝家程,等.基于在线示踪技术的岩溶地下河流场反演与水文地质参数估算[J].*中国岩溶*,2013,32(2):148-152. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4810.2013.02.004.
- [16] 刘明,章青,刘仲秋,等.考虑渗透系数变化的地下结构温度-渗流耦合分析[J].*力学季刊*,2011,32(2):183-188. DOI:10.15959/j.cnki.0254-0053.2011.02.004.
- [17] 李斌,解建仓,胡彦华,等.西安市近60年降水量和气温变化趋势及突变分析[J].*南水北调与水利科技*,2016,14(2):55-61. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2016.02.011.
- [18] 徐增辉,刘光廷,叶源新,等.温度对软岩渗透系数影响的试验研究[J].*三峡大学学报(自然科学版)*,2006(4):301-304. DOI: 10.3969/j.issn.1672-948X.2006.04.004.
- [19] 张春海.气温骤降下大坝抗裂性能及保温措施效果分析[J].*吉林水利*,2018(1):7-10,29. DOI: 10.15920/j.cnki.22-1179/tv.2018.01.002.
- [20] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1305.2020.03.020.

The influence of temperature on the leakage of a reservoir dam

LIU Zejun¹, FEI Qingsheng², ZHOU Jie³, ZHU Bing², HUANG Yong⁴

(1. Faculty of Architecture and Civil Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 223001, China; 2. Runyou Water Conservancy Construction Group Co., Ltd, Gaoyou 225600, China; 3. Suyuan Testing Co., Ltd, Huai'an 223300, China; 4. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Existing data has indicated that the seepage amount in the dam is inversely proportional to the temperature. Higher temperatures result in less seepage, while lower temperatures lead to more seepage. Seepage mainly occurs in the U3 section of the Wanyao Reservoir, and the effects of several anti-seepage measures have not been very significant. Since the seepage channel in the U3 section directly leads to the gallery in the front of the dam and is closely related to the reservoir water level, the impact of the current water level on seepage can be considered significant, and the lag effect of the water level on seepage can be ignored. Therefore, considering the frequent occurrence of extreme weather in recent years, such as high temperatures in summer and freezing conditions in winter, which can have a significant impact on existing seepage channels in the dam and even pose safety hazards, it is necessary to study the seepage amount of the Wanyao Reservoir under conditions of high water level and low temperature.

Temperature was calculated using the Cubic Law, an analytical expression for the size of the seepage channel in the U3 section, and the relationship between temperature and measured seepage amount. A three-dimensional groundwater flow numerical model was established using COMSOL software. The model parameters were identified and validated using the measured water level data, and the seepage amount of the dam under different operating conditions was predicted.

The model parameter inversion results show that, with the exception of a relative error of 1.53% in the U504 hole, the relative errors in the other observation holes are all less than 1%, indicating that the model has a good overall fit to the observation data. The model's predictions show that: (1) At a low temperature of 0 °C, the seepage amount reaches its maximum at 0.68 L/s, which decreases to 0.38 L/s at a high temperature of 20 °C, and further reduces to 8.71×10^{-5} L/s after repairing the seepage channel at 0 °C. (2) The analytical and numerical simulation calculations of the U3 seepage amount are in good agreement, demonstrating the reliability of the seepage amount calculation. (3) After anti-seepage repairs, a simulated flood with a return period of one hundred years, i.e., a design flood level of 195.29 m and a check flood level of 195.5 m, results in a dam seepage amount of 0.67 L/s, with a slightly reduced dam foundation seepage amount of 2.16 L/s and 2.14 L/s, respectively.

In conclusion: (1) Temperature and seepage have a clear negative correlation, with rising temperatures significantly decreasing dam seepage. The equivalent width of the dam seepage channel was calculated using the Cubic Law and the dam as a fracture, providing parameters for numerical simulations. (2) COMSOL software was used to calculate dam foundation seepage under different temperatures and water levels based on the geological conditions and dam structure at the dam site. The results show that seepage in the U3 section decreases with increasing temperature, with 0.68 L/s at 0 °C and 0.05 L/s at 40 °C, a difference of 12.6 times, indicating that low-temperature and high-water-level environments have a significant influence on seepage. (3) Seepage significantly decreases after anti-seepage reinforcement, therefore, it is necessary to promptly grout and seal the seepage channels to reduce the reservoir's seepage and ensure its normal and safe operation.

Key words: temperature; dam; leakage; COMSOL software