

大水位变幅对抽水蓄能电站大坝工作性态影响分析

周顺田¹, 林兴铖¹, 卢雨欣¹, 王振红², 汪娟², 张凯恒², 侯文倩²

(1. 华电福新周宁抽水蓄能有限公司, 福建 宁德 352100; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要:【目的】抽水蓄能电站大坝水位处于放水-蓄水循环变化过程, 大水位变幅致使大坝温度和应力等边界条件不断变化, 直接影响到大坝工作性态。为保障大坝的安全运行, 开展大水位变幅对抽水蓄能电站大坝工作性态影响研究。【方法】以福建周宁抽水蓄能电站下水库大坝为研究对象, 通过分析蓄水运行初期的大坝监测数据, 采用三维有限单元法, 探讨了大水位变幅下大坝的温度场、变形场及应力场的变化规律。【结果】①库水温度与多年平均气温有明显相关性。②同一高度的混凝土坝体内部温度较高, 两侧温度略低; 水库蓄水后, 水位以下的混凝土表面温度基本与水库水温一致。③在蓄水运行初期, 大水位变幅下, 大坝的变形和应力变化量较小, 最大变形变化量为 0.15~0.17 mm/m。【结论】研究结果为大坝的安全运行提供了技术支持, 并对类似抽水蓄能电站大坝的建设和安全运行具有一定的推广应用价值。

关键词:抽水蓄能电站大坝; 大水位变幅; 蓄水运行初期; 工作性态; 安全分析

中图分类号:TV315

文献标识码:A

文章编号:2096-6792(2025)05-0043-10

清洁能源越来越受到国家的重视, 近年来, 太阳能、风能和水能等清洁能源的基础设施建设取得了显著成效^[1]。抽水蓄能电站水库蓄水后, 运行水位升降变化幅度大, 致使大坝温度和应力等边界条件不断变化, 水位大变幅下的大坝真实工作性态值得深入研究。

目前, 国内对混凝土坝工作性态问题研究较多, 主要从监测资料分析和仿真计算分析方面进行了大坝工作性态评价^[2-11]。苗强等^[12]通过研究丰满重建工程蓄水初期坝体及坝基的变形、渗流、应力等时空分布规律, 评价了大坝的整体工作性态。徐小蓉等^[13]结合堆石混凝土重力坝的温度、渗透压、位移监测数据和有限元分析, 研究了不同荷载条件下大坝工作性态的演变。程恒等^[14-15]依托贵州省仁怀市石坝河水库堆石混凝土重力坝, 基于大坝设计资料与温度监测数据, 通过有限元仿真方法分析了大坝施工期的工作性态。袁平等^[16]对运行期混凝土坝的位移、应力和稳定性进行了相关研究。刘毅等^[17]结合 QBT 拱坝工程系统, 探讨了高寒区与气候温和区混凝土拱坝的性能差异, 揭示了高寒区高拱坝在施工和运行过程中的开裂风险。

康志亮等^[18]模拟了混凝土重力坝建设期的温度和应力变化情况, 探究了库水位变化对大坝应力和位移的影响。李金洋等^[19]通过分析溪洛渡拱坝蓄水初期不同水位的监测数据, 对拱坝的工作性态进行了安全鉴定、反馈和预测分析。

抽水蓄能电站大坝库水位处于放水和蓄水循环变化过程, 水位大变幅直接影响到大坝工作性态。周宁抽水蓄能电站最大坝高 108.0 m, 正常蓄水位 299.0 m。坝址区域属中亚热带海洋性气候, 多年平均气温 19.3℃。本文依托该工程, 结合蓄水运行初期大坝监测资料分析和三维有限元仿真计算分析^[20], 研究水位大变幅下大坝温度场、变形场及应力场变化规律, 评价大坝工作性态。

1 蓄水运行初期监测资料分析

1.1 水库水温

下水库于 2021 年 7 月 1 日开始蓄水(见图 1), 在坝右 0+041.0 m 断面沿高程 226.0、251.0、269.0、283.0、293.0、298.0 m 共布置了 6 支温度传感器(编号 KTdb5-1—KTdb5-6)用于监测库水温度变化。监测曲线显示, 库水位处于放水和蓄水循环变

收稿日期/Received: 2024-06-19

修回日期/Revised: 2024-08-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3090102, 2021YFC3090104); 国家自然科学基金项目(52192672)。

第一作者: 周顺田(1972—), 男, 高级工程师, 从事水工结构方面的研究。E-mail: zhou_shunt_16311@163.com。

通信作者: 汪娟(1991—), 女, 工程师, 硕士, 从事水工结构方面的研究。E-mail: 1584354558@qq.com。

化过程,高程越低库水温度相对较低,水位反复变化的相关性,随多年平均气温的变化而变化。
化影响库水温值,库水温度与多年平均气温有明显

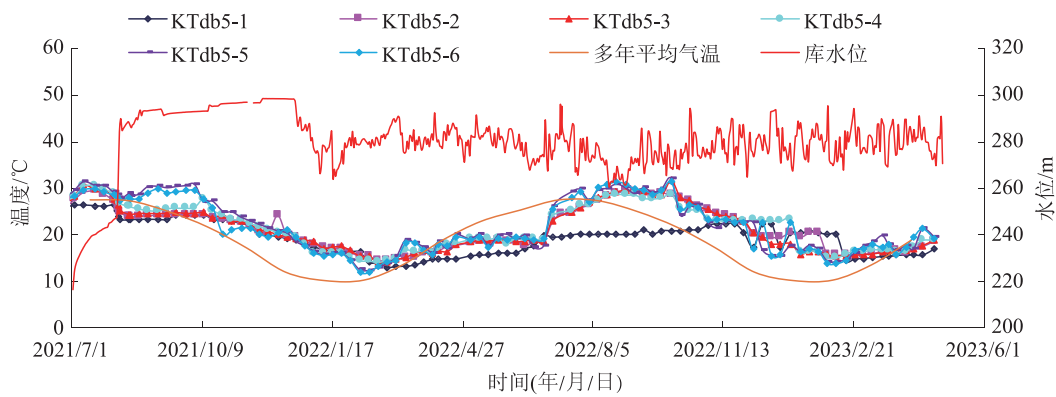


图 1 水库水温监测曲线

Fig.1 Reservoir water temperature monitoring curve

1.2 基岩及坝体温度

下水库大坝在桩号坝 0+000.0 m 断面沿高程 195.0、190.0、185.0 m 共布置了 3 支温度传感器 (编号 Tb-1—Tb-3)用于监测基岩温度变化;在桩

号坝 0+000.0 m 断面沿高程 199.5、215.0、230.0、245.0、260.0、275.0 m 等共布置了 39 支温度传感器 (编号 T1—T39)用于监测坝体温度变化(见图 2)。

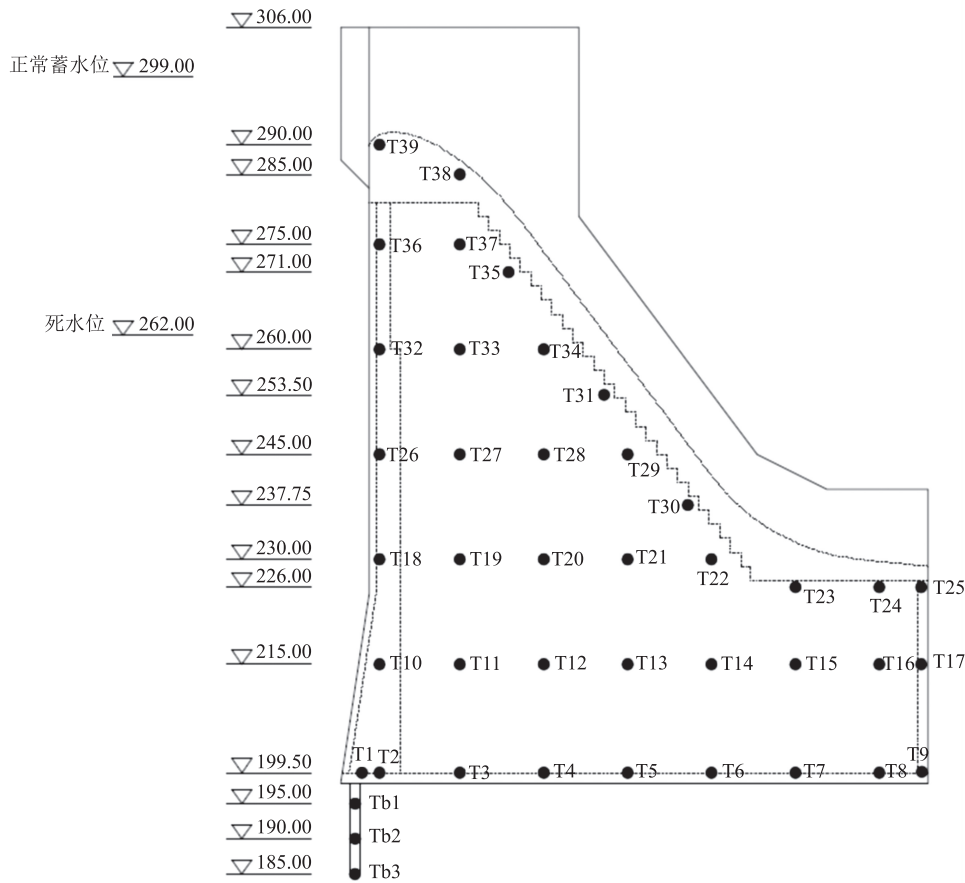


图 2 基岩和坝体温度监测布置图(单位:m)

Fig.2 Layout of temperature monitoring for bedrock and dam body

监测数据显示(见图 3):①在基岩 195.0 m 高程处,温度计由于靠近建基面,其温度过程受外界温度和太阳辐射热影响较大,最高温度达 29.5℃;随着埋设深度的增加,基岩温度变化幅度减小;蓄

水后,基岩温度无明显变化,基本平稳,接近于多年平均气温。②温度传感器埋设后,温度逐渐上升,上游防渗、基础垫层和坝顶等部位混凝土最高温度较高,大坝上游面混凝土温度主要受气温和库水温

影响,大坝内部混凝土最高温度为 26.8~43.1℃,当达到最高温度后随混凝土冷却温度逐渐降低;混凝土坝体温度整体表现为同一高程,内部温度相对

较高,两侧温度稍低,蓄水后大坝内部温度变化较小,整体规律无异常。

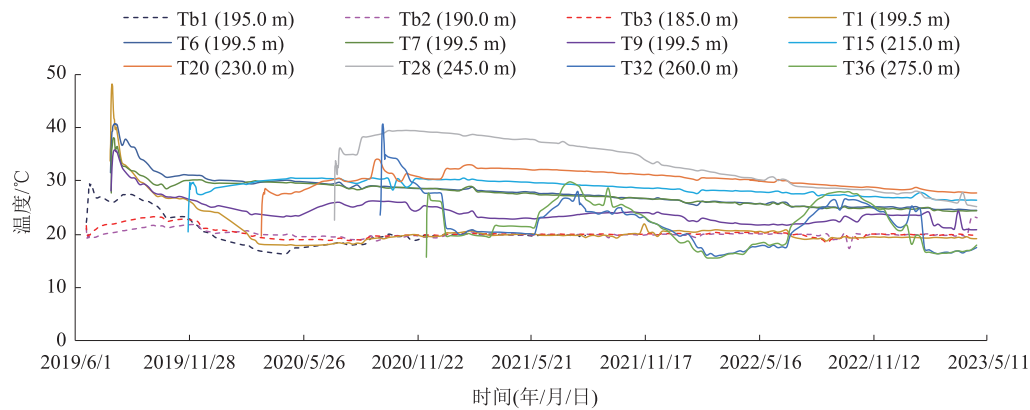


图 3 基岩及坝体温度计温度曲线图

Fig. 3 Temperature curve of bedrock and dam body thermometer

1.3 大坝变形和应力

为观测坝体、坝基水平位移,在最大坝高的 5#溢流坝段布置正倒垂线组,自坝顶从上而下依次布置 2 条正垂线(编号 PL1 和 PL2)和 1 条倒垂线(编号 IP1),测点相接于坝体 255.0 m 高程廊道和坝基 202.0 m 高程廊道。在下水库大坝的坝 0+000.0 m 和坝右 0+041.0 m 监测断面最大主应力集中的坝踵部位各布置 1 支单向应变计(编号 S5-1 和 S7-1)。

监测数据显示(见图 4 和图 5):①蓄水运行初期,随着水位的升高,位移逐渐增大,坝体不同部位测点上下游方向位移变化最大值为 5.00 mm,左右岸位移变化最大值为 4.18 mm;库水位放水-蓄水循环变化过程中,位移变化量值较小,变化趋势无异常。②应变过程与温度过程呈现明显的相关性,随着温度的变化而变化;水库蓄水后,大坝运行初期应变计表现为受压状态,混凝土应变变化不明显。

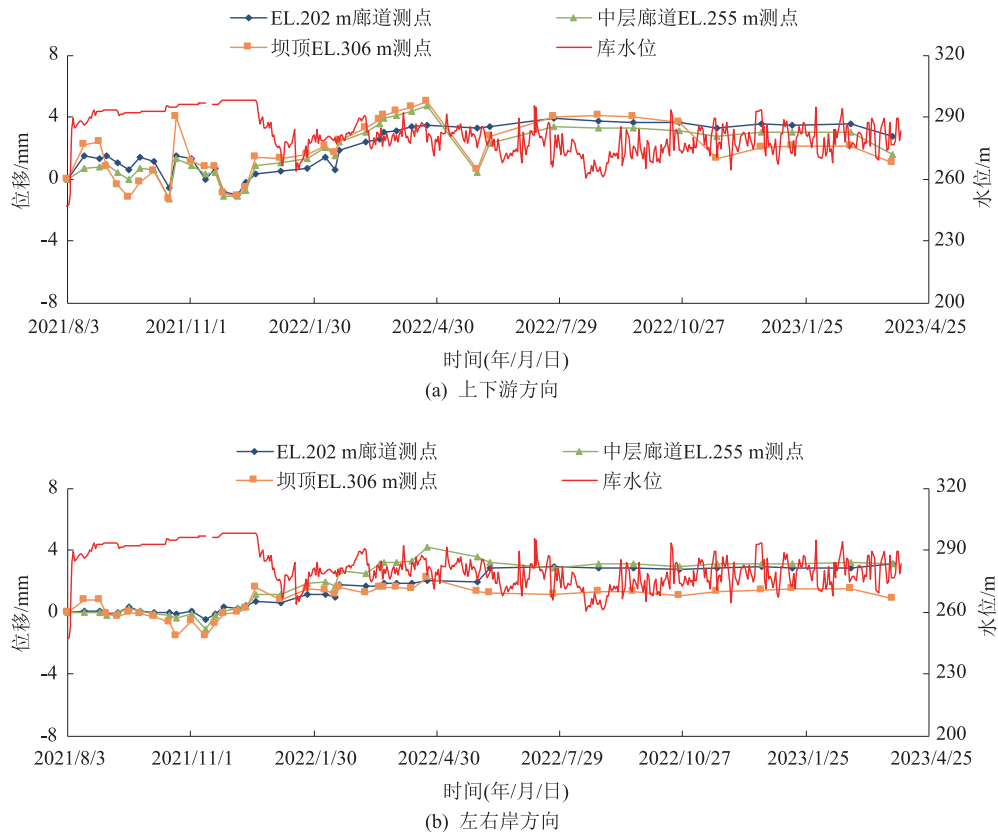


图 4 下水库坝体不同位置测点位移监测曲线

Fig. 4 Displacement monitoring curve of measurement points at different positions of the reservoir dam

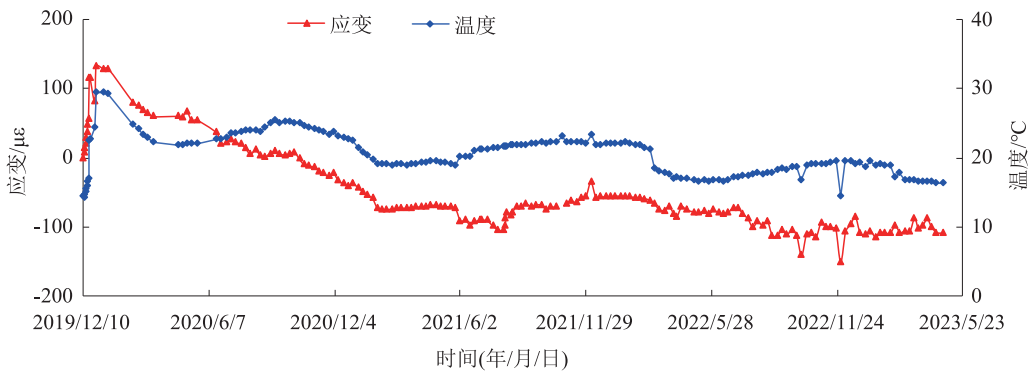


图 5 下水库坝体应变计应变监测曲线

Fig. 5 Strain monitoring curve of S7-1 strain gauge for lower reservoir dam

2 有限元模型验证

2.1 有限元模型和材料参数

本次计算考虑大坝实际体型及不同部位材料分区,模型考虑坝体周围一定范围坝基,坝基底部和左右两侧基岩取 2~3 倍最大坝高。将重力坝坝体及坝基进行三维有限元网格划分,考虑岩体岩性分区及与坝体相交的断层结构面。采用节理单元模拟岩体主要断层、结构面的非连续特性。有限元网格中单元数 355 797 个,节点数 357 418 个。大

坝及基岩网格划分模型及坝体网格浇筑模型如图 6 所示,其中坐标系按: X 向,横河向,向右岸为正; Y 向,顺河向,向下游为正; Z 向,沿坝体高程方向。

模型计算边界:温度场计算时,除基岩的侧面和底面边界绝热外,其他表面边界均与外界进行热交换,且在有蓄水的坝面上,水位以上为气温边界,以下设定为水温边界,同时气温边界需考虑 2℃ 的太阳辐射热。计算考虑蓄水过程中水温、气温的交替变化情况。大坝各部位混凝土性能参数见表 1 和表 2。

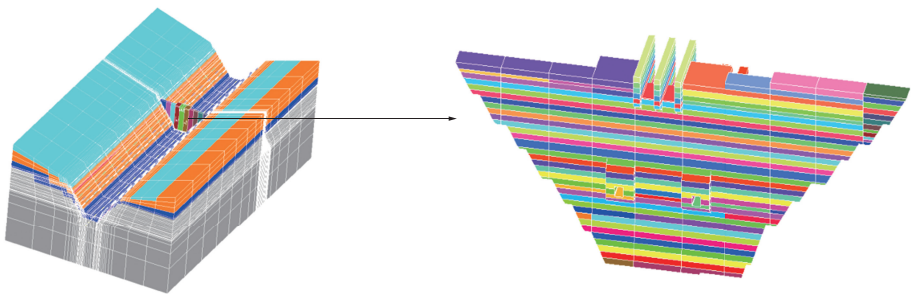


图 6 整体三维有限元计算模型及大坝浇筑分层示意图

Fig. 6 Overall 3D finite element calculation model and schematic diagram of dam pouring layer by layer

表 1 大坝混凝土热学性能参数

Tab. 1 Performance parameters of dam concrete

混凝土	导热系数/ ($\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$)	比热/ ($\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$)	线膨胀系数/ ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)	重度/ (kN/m^3)	绝热温升/ $^\circ\text{C}$
上游防渗 R_{90} C25	5.88	0.92	8.50	23.60	$23.0t/(t+2.95)$
坝体内部 R_{90} C15	6.12	0.90	8.50	24.00	$18.6t/(t+3.23)$
坝顶及基础 R_{90} C20	5.88	0.92	8.50	24.00	$28.0t/(t+2.50)$

表 2 大坝混凝土力学性能参数

Tab. 2 Mechanical performance parameters of dam concrete

混凝土	弹性模量/GPa				抗拉强度/MPa			
	7 d	28 d	90 d	180 d	7 d	28 d	90 d	180 d
上游防渗 R_{90} C25	17.40	22.20	29.40	31.20	1.03	1.67	2.41	2.81
坝体内部 R_{90} C15	16.00	21.60	29.10	31.00	0.80	1.49	2.18	2.57
坝顶及基础 R_{90} C20	16.30	20.80	27.80	29.20	1.14	1.66	2.50	2.77

2.2 模型验证

2.2.1 模型验证方法

蓄水运行初期的监测资料分析是有限元模型验证的基础。根据监测点位置和监测资料可得相关监测温度,依据温度传感器测点的位置建立计算模式,以参数为基本值,采用回归分析的最小二乘法,以各测点监测温度与计算温度差值平方和的平方根为目标函数,得出反映工程实际情况的绝热温升值。

绝热温升的计算式如下:

$$\theta = \theta_0 \tau / (n + \tau)。$$
 (1)

式中: τ 为混凝土的发展龄期,d; n 为半熟龄期,d; θ_0 为终值,℃。

在回归分析中,如果使用最小二乘法来确定模型参数,通常会将误差的平方和作为优化目标函数,即:

$$\varphi = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (T_{ij_{测}} - T_{ij_{计}})^2。$$
 (2)

式中: i 为某测点序号; j 为某一时刻; m 为监测位置数; n 为监测时刻数; $T_{ij_{测}}$ 为测点混凝土温度监测值; $T_{ij_{计}}$ 为测点温度仿真计算值。

2.2.2 模型验证结果

通过反演得到的 C15 三级配碾压混凝土和 C25 二级配碾压混凝土的水化热温升函数模型如下:

C15 三级配碾压混凝土:
$$\theta = 21.6\tau / (3.23 + \tau);$$
 (3)

C25 二级配碾压混凝土:
$$\theta = 28.0\tau / (2.95 + \tau)。$$
 (4)

式中, τ 为龄期,d。

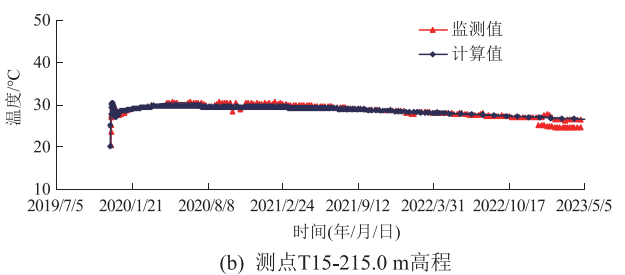
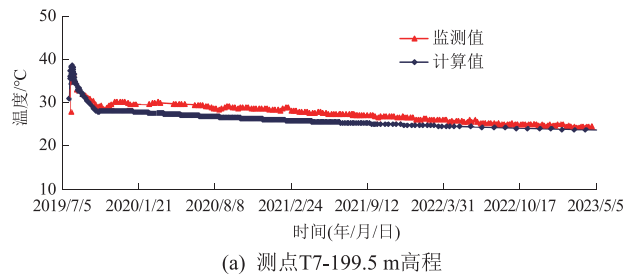
仿真计算中模拟了各坝段现场混凝土实际浇筑进度、混凝土材料性能、施工措施(分层厚度、浇筑温度、间歇时间、仓面及表面保护等)、水管冷却等,结合监测温度和计算温度对比结果(表 3 和图 7)可以看出,监测最高温度误差不大,基本控制在 $\pm 0.70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,误差平方和均小于 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。以 T7 点为例,仿真计算的最高温度和监测值出现时间相同,最高温度出现时间拟合得较好。仿真计算温度变化过程与实际监测温度变化过程基本吻合,验证了有限元模型计算结果的可靠性,在此基础上计算得到的变形和应力更准确。

表 3 坝体最高温度监测值与计算值对比及误差计算

Tab. 3 Comparison of the monitored and calculated maximum temperature values of the dam body and error calculation

仪器编号	现场监测成果		C15 三级配碾压混凝土 $\theta = 21.6\tau / (3.23 + \tau)$		C25 二级配碾压混凝土 $\theta = 28.0\tau / (2.95 + \tau)$	
	高程/m	监测最高温度/℃	计算最高温度/℃	误差/℃	计算最高温度/℃	误差/℃
T6	199.5	40.75	40.05	0.70		
T7	199.5	38.10	38.56	-0.46		
T15	215.0	30.60	30.70	0.13		
T16	215.0	30.95	30.70	0.48		
T20	230.0	28.6	28.55	0.05		
T21	230.0	28.5	28.31	0.19		
T32	260.0	40.7			40.51	0.19
T36	275.0	30.8			30.95	-0.15
误差平方和				0.98		0.06

注:误差=监测值-计算值。



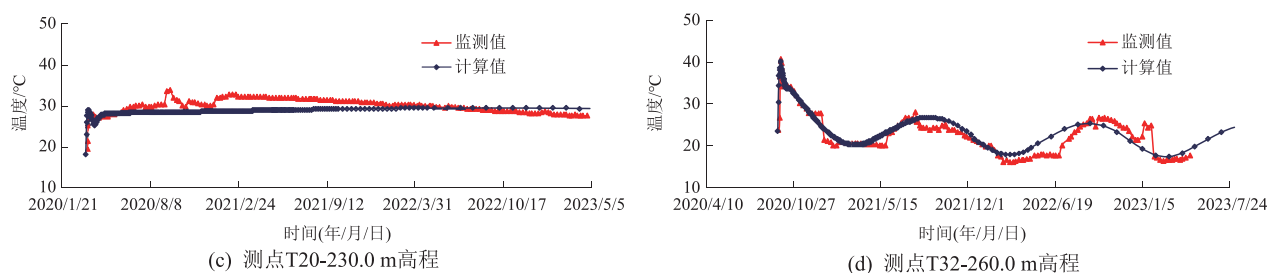


图7 坝体监测温度变化曲线与仿真计算温度变化曲线对比

Fig. 7 Comparison of the temperature change curve monitored by the dam body and the temperature change curve calculated by simulation

3 大水位变幅对大坝工作性态影响分析

基于蓄水运行初期监测资料分析和有限元模型验证结果,考虑大坝浇筑过程、蓄水过程,对大坝-基岩耦合体系进行仿真模拟;结合工程实际(库水位处于放水 and 蓄水循环变化过程),研究大坝在自重、温度、水压等条件下的坝体温度、变形和应力,分析大水位变幅对大坝工作性态的影响。

计算方案:夏季施工,浇筑温度考虑当月气温加3℃,但需高于6℃,强约束区在18℃以内,弱约束区和非约束区在20℃以内;混凝土浇筑层厚约3.0 m;大坝基础约束区冷却水管按1.5 m×1.5 m(水平×竖直)方式进行布置,非约束区或弱约束区按2.0 m×2.0 m(水平×竖直)进行布置,冷

却水管采用一期通水水温13℃,冷却时间15~25 d,冷却流量1.5~2.5 m³/h,通水方向每天换向;中期通水水温20℃,冷却流量0.6~1.0 m³/h,中期通水结束后,混凝土目标温度22℃;同时,对上下游表面混凝土进行保温,表面放热系数的取值为 $\beta=5 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$,仓面保温取 $\beta=15 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

3.1 大坝温度场

水库蓄水后,随着水位的升高,水位变化区的混凝土上游表面温度在不同库水位下的温度云图如图8所示。大坝典型高程处温度变化过程如图9所示。水库蓄水后,水位以下混凝土表面的温度基本与水库水温相等。随着库水温度周期性变化,仿真计算的大坝温度场与监测温度场基本吻合,水位以上的混凝土表面温度随着环境气温的变化而变化。

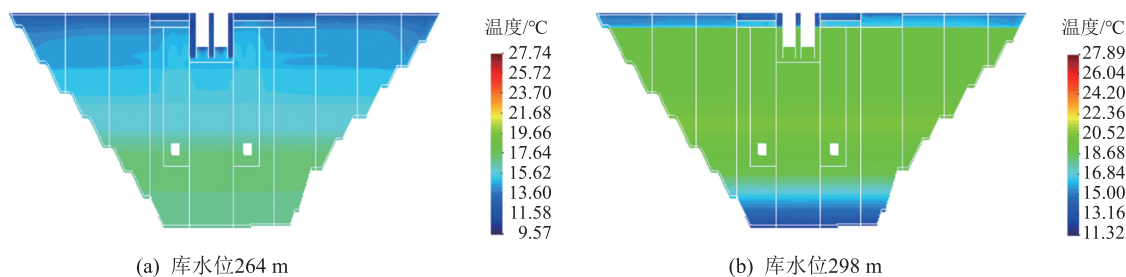
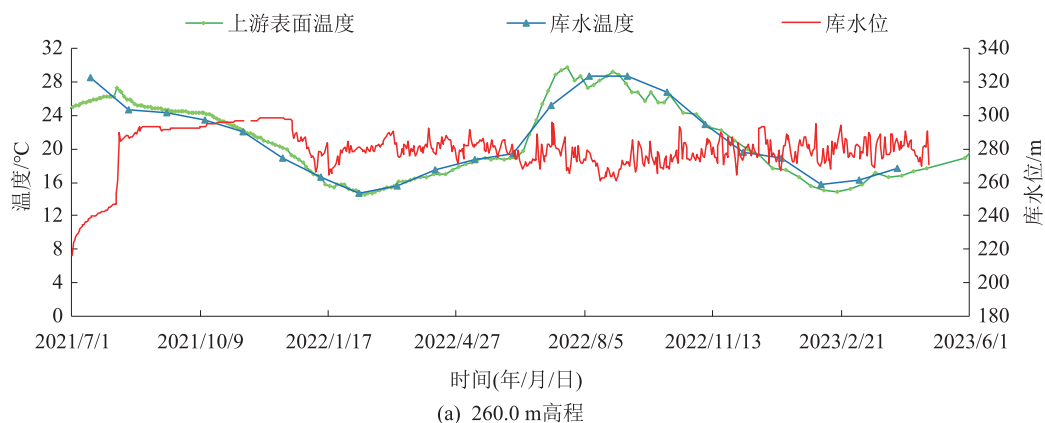


图8 不同库水位下大坝温度云图

Fig. 8 Temperature cloud map of dam at different water storage levels



(a) 260.0 m高程

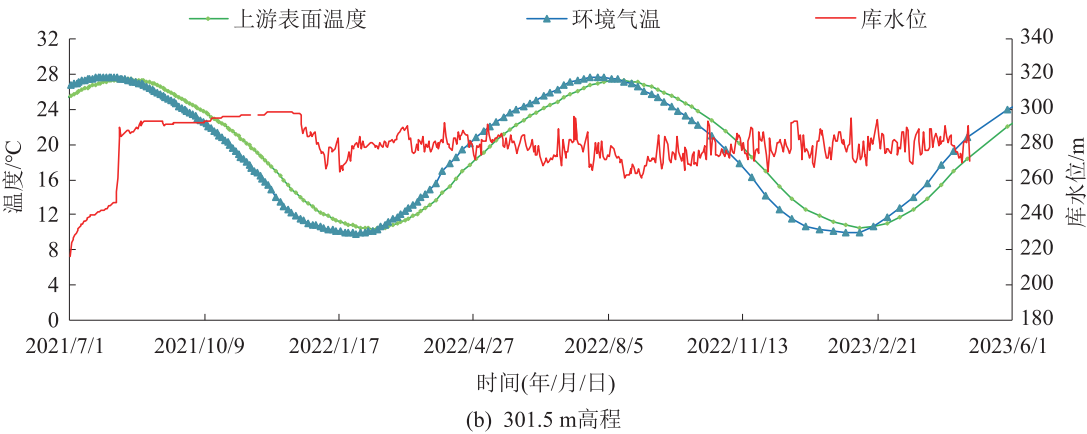


图 9 大坝典型高程混凝土上游表面温度曲线

Fig. 9 Typical elevation concrete upstream surface temperature curve of dam

3.2 大坝变形场

水库蓄水后,随着水位的升高,坝体整体向下

游变形,如图 10 和图 11 所示。

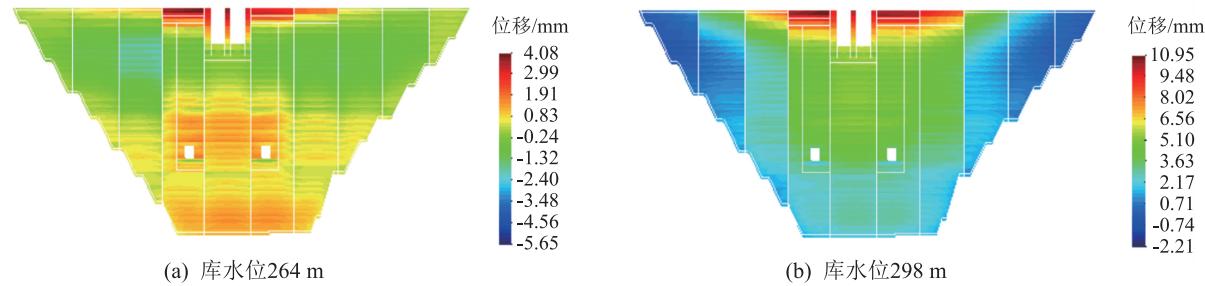


图 10 不同库水位下大坝上下游变形云图

Fig. 10 Deformation cloud map of dam upstream and downstream under different water storage levels

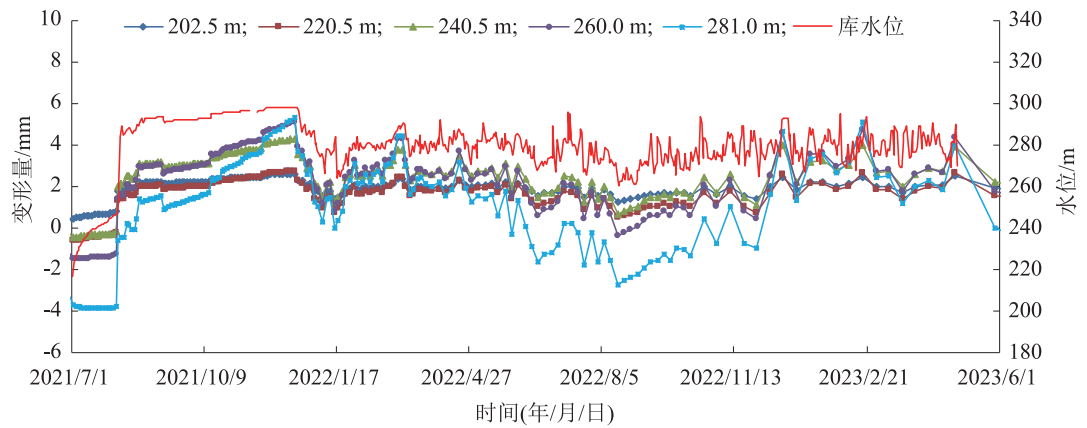


图 11 大坝典型高程混凝土不同部位变形曲线

Fig. 11 Deformation curve of different parts of concrete at typical elevations of dams

由图 10 和图 11 可知:水位越高,坝体向下游变形量越大;高程越高,大坝上下游变形量越大。表 4 为蓄水运行期大水位变幅条件下混凝土变形的变化情况。由表 4 可知:考虑库水位放水-蓄水循环变化过程,当水位由 298 m 降至 264 m 时,由于库水位的下降,大坝向下游变形量减小,随着高程的增高其减小幅度增大,减幅为 1.11~5.80 mm;

当水位由 264 m 升至 284 m,由于库水位的升高,大坝向下游变形量增大,随着高程的增高变形量增加幅度增大,增幅为 0.52~3.09 mm。水位大变幅引起的大坝上下游变形量与最大监测值基本吻合。计算结果显示,蓄水运行初期水位变幅条件下大坝变形变化量较小,水位变幅引起的坝体最大变形变化量为 0.15~0.17 mm/m。

表 4 蓄水运行期大水位变幅条件下混凝土变形变化值统计

Tab. 4 Statistics of concrete deformation changes under large water level variations during water storage operation period

变形点		典型高程/m					mm
		202.5	220.5	240.5	260.0	281.0	
水位下降 (298 m→264 m)	上游表面点	-1.20	-1.99	-3.09	-4.27	-5.38	
	内部点	-1.13	-1.78	-2.87	-4.19	-5.45	
	下游表面点	-1.11	-1.97	-2.72	-4.34	-5.80	
水位上升 (264 m→284 m)	上游表面点	0.68	1.19	1.78	2.42	3.09	
	内部点	0.61	0.94	1.57	2.28	3.02	
	下游表面点	0.52	0.83	1.21	2.03	2.86	

注:①“-”值代表向上游变形,“+”值代表向下游变形;②未考虑昼夜温差影响。

3.3 大坝应力场

从整体上看,大坝大应力区出现在基础强约束区、孔口周边及陡坡坝段靠近基岩部位,主要受基岩约束作用及混凝土级配影响。蓄水后,大坝上游面混凝土最大拉应力约为 1.2 MPa(见图 12)。随着水位的升高,水位变化区的混凝土应力随着温度

的变化而变化(见图 13)。考虑库水位放水-蓄水循环变化过程,当水位由 298 m 降至 264 m,大坝上游表面横河向应力最大变化值为 0.78 MPa;当水位由 264 m 升至 284 m,大坝上游表面横河向应力最大变化值为 0.41 MPa。计算结果显示,蓄水运行初期水位变幅条件下大坝应力变化量较小。

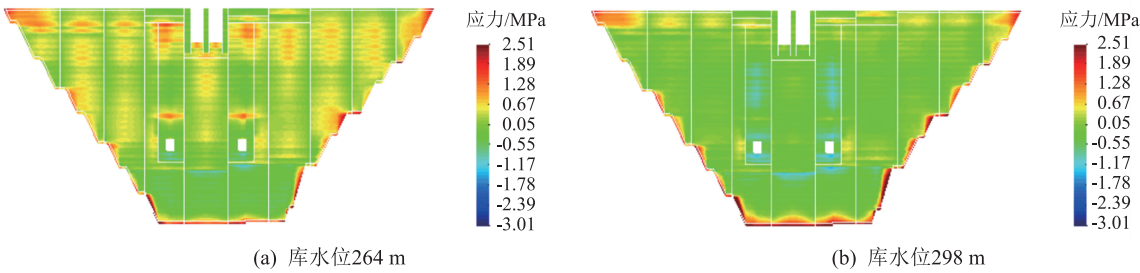


图 12 不同库水位下大坝横河向应力云图

Fig. 12 Cross river stress cloud map of dam at different water storage levels

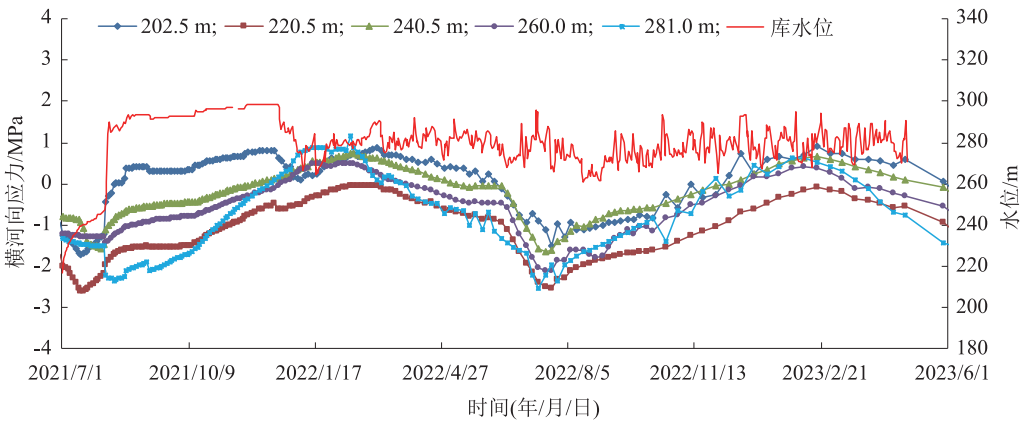


图 13 大坝典型高程混凝土上游表面应力曲线

Fig. 13 Stress curve of upstream surface of concrete at typical elevations of dams

4 结论

基于蓄水运行初期大坝监测资料分析,采用三维有限元法研究了水位大变幅下大坝温度场、变形场及应力场时空变化规律,得出以下主要结论:

1)库水温度监测值与多年平均气温呈明显的

相关性,随多年平均气温周期性变化;蓄水运行初期,混凝土坝体内部降温缓慢,大坝监测变形和应力变化量较小,大坝运行情况良好。

2)抽水蓄能电站大坝蓄水后,水位以下的混凝土表面温度与库水温度基本一致,随着库水温度周期性变化;蓄水运行初期大水位变幅条件下,大坝

变形变化量为0.15~0.17 mm/m,上游面混凝土最大拉应力约为1.2 MPa,变形和应力变化量均较小。模拟结果与监测资料基本吻合。

3)基岩和坝体在水压与水温的频繁变化作用下,可能导致材料属性改变,因此对材料非线性行为和长期服役条件下的性能研究是未来的重要研究方向。

参 考 文 献

- [1] 彭才德. 助力“碳达峰、碳中和”目标实现加快发展抽水蓄能电站[J]. 水电与抽水蓄能, 2021, 7(6): 4-6. [PENG C D. Contribute to the realization of the goal of "carbon peak and carbon neutrality" speed up the development of pumped storage power plants[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2021, 7(6): 4-6.]
- [2] 郭锦华, 刘晓青, 李同春, 等. 变形分离法与数据驱动下的拱坝工作性态评价[J]. 水力发电学报, 2023, 42(1): 9-18. [GUO J H, LIU X Q, LI T C, et al. Deformation separation method and data-driven evaluation of arch dam performance[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(1): 9-18.]
- [3] WANG Z H, ZHANG G X, LIU Y, et al. Sensitivity analysis of temperature control parameters and study on simultaneous cooling zone during dam constructions in high altitude regions[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 3: 1-12.
- [4] 郭大海. 西域砾岩区沥青心墙砂砾石坝工作性态分析[J]. 水利规划与设计, 2023, (6): 123-128, 134. [GUO D H. Analysis of working characteristics of gravel dams with asphalt core walls in the conglomerate area of the western regions[J]. Water Conservancy Planning and Design, 2023, (6): 123-128, 134.]
- [5] WANG Z H, LIU Y, YU S P. Surface thermal insulation and pipe cooling of spillways during concrete construction period[J]. Mathematical Problems In Engineering, 2014, 7: 1-7.
- [6] 罗丹旒, 林鹏, 李庆斌, 等. 溪洛渡特高拱坝初期蓄水工作性态分析研究[J]. 水利学报, 2014, 45(1): 18-26. [LUO D N, LIN P, LI Q B, et al. Performance analysis of Xiluodu super-high arch dam in impounding period[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(1): 18-26.]
- [7] 胡蕾, 李波, 田亚岭. 溪洛渡水电站初蓄-运行期大坝渗流监测成果分析[J]. 大坝与安全, 2017(4): 30-35. [HU L, LI B, TIAN Y L. Analysis on seepage monitoring data of Xiluodu hydropower dam during initial impoundment and operation[J]. Dams and Safety, 2017(4): 30-35.]
- [8] 樊启祥, 张超然, 陈文斌, 等. 乌东德及白鹤滩特高拱坝智能建造关键技术[J]. 水力发电学报, 2019, 38(2): 22-35. [FAN Q X, ZHANG C R, CHEN W B, et al. Key technologies of intelligent construction of Wudongde and Baihetan super high arch dams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(2): 22-35.]
- [9] 周明. 何家沟水库大坝施工期及运行期监测成果分析[J]. 水利水电技术, 2022, 53(增刊): 372-379. [ZHOU M. Analysis of monitoring results of Hejiagou Reservoir dam during construction and operation period[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(增刊): 372-379.]
- [10] 刘毅, 辛建达, 张国新, 等. 大体积混凝土温控防裂智能监控技术[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(5): 1228-1233. [LIU Y, XIN J D, ZHANG G X, et al. Intelligent monitoring technology of anti-thermal cracking for mass concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2023, 51(5): 1228-1233.]
- [11] 耿峻, 程恒, 张国新, 等. 施工期分层浇筑与温度荷载对重力坝踵应力影响研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(5): 84-92. [GENG J, CHENG H, ZHANG G X, et al. Study on influence of layered placement and temperature load on heel stress of gravity dam during construction period[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(5): 84-92.]
- [12] 苗强, 宿磊, 商玉洁, 等. 丰满重建工程蓄水初期大坝工作性态分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(增刊1): 170-175. [MIAO Q, SU L, SHANG Y J, et al. Analysis of dam performance of Fengman reconstruction project during initial impoundment period[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(S1): 170-175.]
- [13] 徐小蓉, 何涛洪, 雷峥琦, 等. 超长坝段堆石混凝土重力坝蓄水运行安全评价[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(9): 1375-1387. [XU X R, HE T H, LEI Z Q, et al. Safety evaluation of rock-filled concrete gravity dam with long section during the impoundment operation period[J]. Journal of Tsinghua University(Sci & Technol), 2022, 62(9): 1375-1387.]
- [14] 程恒, 周秋景, 娄诗建, 等. 石坝河水库堆石混凝土重力坝施工期工作性态仿真[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(9): 1408-1416. [CHENG H, ZHOU Q J, LOU S J, et al. Simulation of the working behavior of Shibaher reservoir rock-filled concrete gravity dam during construction[J]. Journal of Tsinghua University(Sci & Technol), 2022, 62(9): 1408-1416.]
- [15] 张国新. SPTIS: 结构多场仿真与非线性分析软件开发及应用(之一)[J]. 水利水电技术, 2013, 44(1): 31-35, 44. [ZHANG G X. Development and application of SPTIS-a software of multi-field simulation and nonlinear analysis of complex structures (Part1)[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(1): 31-35, 44.]
- [16] 袁平, 熊谦, 方超, 等. 小麻柳尾矿库2号拦泥坝工作性态及稳定安全性分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2022, 55(2): 123-130, 152. [YUAN P, XIONG Q, FANG C, et al. Analysis of the working state and stability safety of No. 2 mud dam in Xiaomaliu tailing pond[J]. Journal of Wuhan University (Engineering Science Edition), 2022, 55(2): 123-130, 152.]

- [17] 刘毅,杨波,程恒,等. 高寒大温差对高拱坝工作性态影响及应对措施[J]. 水力发电, 2021, 47(10): 37-44. [LIU Y, YANG B, CHENG H, et al. Study on the influence of severe cold and high temperature differences on the working behavior of high arch dams and the preliminary solution [J]. Hydroelectric Power Generation, 2021, 47(10): 37-44.]
- [18] 康志亮,李龙龙,刘东旭,等. 变化水位下碾压混凝土重力坝温度应力研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42(4): 92-98. [KANG Z L, LI L L, LIU D X, et al. Research on temperature stress of roller compacted concrete gravity dams under varying water levels[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2021, 42(4): 92-98.]
- [19] 李金洋,张冲. 溪洛渡拱坝初期不同特征水位工作性态分析与安全评价[J]. 水电站设计, 2018, 34(1): 60-66. [LI J Y, ZHANG C. Analysis of working behavior and safety evaluation of different characteristic water levels in the initial stage of Xiluodu arch dam[J]. Hydropower Station Design, 2018, 34(1): 60-66.]
- [20] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012. [ZHU B F. Temperature stress and temperature control of mass concrete[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2012.]

Analysis of Impact of Large Water Level Variations on Working Performance of Pumped Storage Power Station Dams

ZHOU Shuntian¹, LIN Xingcheng¹, LU Yuxin¹, WANG Zhenhong², WANG Juan²,
ZHANG Kaiheng², HOU Wenqian²

(1. Huadian Fuxin Zhouning Pumped Storage Co., Ltd., Ningde 352100, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: [Objective] The water level of the reservoir dam in a pumped storage power station undergoes cyclic fluctuations of release and storage. Large water level variations cause continuous changes in boundary conditions such as dam temperature and stress, directly affecting the dam's working performance. To ensure the safe operation of the dam, this study investigates the impact of large water level variations on the dam's working performance in pumped storage power stations. **[Methods]** Taking the lower reservoir dam of the Zhouning Pumped Storage Power Station in Fujian Province as the research object, monitoring data during the initial stage of impoundment were analyzed. Using a three-dimensional finite element method, the variation patterns of the temperature field, deformation field, and stress field of the dam under large water level variations were investigated. **[Results]** (1) Reservoir water temperature showed a significant correlation with the multi-year average air temperature. (2) At the same elevation, the internal temperature of the concrete dam body was higher than at the sides, and after impoundment, the surface temperature of the concrete below the water level was essentially consistent with the reservoir water temperature. (3) During the initial stage of impoundment, under large water level variations, the deformation and stress changes of the dam were relatively small, with the maximum deformation ranging from 0.15 to 0.17 mm/m. **[Conclusion]** The results provide technical support for the safe operation of the dam and have reference value for the construction and safe operation of similar pumped storage power station dams.

Keywords: pumped storage power station dam; large water level variations; initial impoundment stage; working performance; safety analysis

(编辑:韩小燕)