

LD 河床式水电站厂房坝段变形研究

司政¹, 吴艳兵¹, 段彬², 胡兴伟², 汤荣平³, 张会员³

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 3. 华能澜沧江水电股份有限公司, 云南 昆明 650200)

摘要: LD 水电站蓄水后厂房坝段坝顶变形持续增大,且最大变形超过原计算值。为分析其原因,利用有限元软件对 LD 水电站厂房坝段进行仿真计算。从外荷载分量、温度分量、时效分量 3 个方面开展厂房坝段变形计算。将变形叠加后与实测变形相比较,分析坝顶变形持续增大的原因。结果表明:坝顶变形中外荷载分量占比最大,为总变形的 50%,其次为时效分量和温度分量,分别占总变形的 27% 和 23%。坝前水位稳定之后坝顶变形增量主要由时效和温度引起,其中时效变形占后期变形增量的 86%,温度变形占 14%。随着时间的推移,混凝土徐变逐渐收敛,温度场逐渐稳定,时效变形和温度变形趋于稳定,因此坝顶变形不会持续增大。原变形计算对温度及时效影响的考虑不足,导致监测值大于原计算值。建议类似工程变形计算应充分考虑温度与时效对结构变形的影响。研究成果可为河床式电站厂房坝段变形复核及预测提供参考,为解决类似工程问题提供了一种思路。

关键词: 河床式厂房; 大坝变形; 三维有限元; 温度场; 混凝土徐变

中图分类号:TV731.2

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2022)04-0156-08

Deformation of powerhouse dam section of LD Riverbed Hydropower Station

SI Zheng¹, WU Yanbing¹, DUAN Bin², HU Xingwei², TANG Rongping³, ZHANG Huiyuan³

(1. School of Water Resources and Hydropower, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China;

3. Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Kunming 650200, China)

Abstract: After the impoundment of the LD Hydropower Station, the dam crest deformation of its powerhouse dam section continued to increase, and the maximum deformation exceeded the original calculated value. In view of this situation, a finite element software is used for the simulation calculation of the section from three aspects, namely, external load component, temperature component and aging component. The reason for the continuous increase of dam crest deformation is analyzed by comparing the superimposed deformation with the measured deformation. The calculation results show that the external load component accounted for the largest proportion of the dam crest deformation, which was 50% of the total deformation, followed by the aging component and temperature component, accounting for 27% and 23% of the total deformation respectively. After the water level in front of the dam reached the stable state, the deformation increment of the dam crest was mainly caused by aging and temperature, of which aging deformation accounted for 86% and temperature deformation accounted for 14%. With the passage of time, the concrete creep gradually converged, the temperature field gradually stabilized, and the aging deformation and temperature deformation tended to stabilize as well. Therefore, the dam crest deformation did not continue to increase. The original deformation calculation method did not consider the influence of temperature and aging, resulting in the monitoring value being greater than the original calculated value. It is suggested that the influence of temperature and aging on structural deformation should be fully considered in the deformation calculation of similar projects. The research results can provide a reference for the deformation review and prediction of the powerhouse dam section of riverbed hydropower stations, and pro-

收稿日期:2021-12-25; 修回日期:2022-05-23

基金项目:华能集团总部科技项目(HNKJ21-HF239)

作者简介:司政(1981-),男,湖北浠水人,博士,教授,研究方向为水工结构应力及温控防裂。

vide a new idea for solving similar engineering problems.

Key words: riverbed powerhouse; dam deformation; three-dimensional finite element; temperature field; concrete creep

1 研究背景

LD水电站采用河床式电站厂房,2018年9月该电站下闸蓄水。根据监测资料,蓄水后厂房坝段坝顶变形持续增大,与左、右岸相邻坝段呈现出明显的变形差。截止2021年6月15日,9#厂房坝段垂线测得坝顶向下游累计变形最大值达到25.00 mm,超过原计算值。大坝变形一般由水压、温度、时效3个分量组成。同类型的太平湾水电站大坝过渡区及左岸挡水坝段也曾出现水平变形差,主要原因为不同坝段所受水压荷载不同及温度作用下不同坝段变形机制存在差异^[1-2]。文正花^[3]将班多水电站变形数据同坝前水位与环境温度进行了对比分析,总结了该河床式水电站大坝变形与坝前水位及温度变化之间的规律,结果表明在蓄水阶段大坝变形随库水位升高向下游增大,蓄水后大坝变形主要随温度做年周期性变化。华倩宇等^[4]提出的位移统计模型从温度分量中分离出了水化热分量,其计算结果表明残余水化热对大坝总位移的影响随时间逐渐明显,不可忽视。除水压与温度之外,时效对大坝变形的影响同样重要,在众多经典的徐变计算模型中,朱伯芳^[5]提出的多项指数函数模型对大体积水工混凝土的适用性较好。国内外学者在基岩蠕变计算模型方面也取得了大量的研究成果,主要分为3类:经验模型、理论模型、元件模型^[6]。赵梦瑶等^[7]利用FLAC3D中的Cvisc蠕变模型模拟基岩蠕变,在考虑基岩蠕变情况下对某重力坝深层抗滑稳定进行了分析,结果表明当基岩较软时,考虑基岩蠕变对大坝特征点变形及坝体深层稳定均会产生影响。除水压、温度、时效3个主要因素之外,国内部分学者研究了河床式电站厂房坝段与溢流坝段之间横缝止水的布设形式对坝体变形的影响,为类似工程优化横缝止水布置提供了参考^[8-9];岳晨雨^[10]研究了深厚覆盖层软土地基上的厂房沉降,采用卸载-再加载模量代替原始变形模量,提高了变形计算精度,并对该类地基不同处理方式下的厂房沉降进行了计算分析。在大坝变形预测相关研究中,国内大量学者利用统计模型对各变形分量进行了描述^[11-13]。针对LD水电站厂房坝段变形问题的特殊性,为厘清各分量在总变形中的占比,了解变形持续增大的原因,预测坝顶变形趋势,本文在充分考虑厂房坝段各种荷载

及边界条件的基础上,利用有限元软件ANSYS对LD水电站厂房坝段各变形分量进行了计算分析。研究成果可为保障电站后期安全运行提供技术支撑,同时为解决类似工程问题提供了一种思路。

2 工程概况

LD河床式水电站拦河坝共分16个坝段,从左到右依次为左副坝、溢流坝段、纵向导墙坝段、河床式厂房机组坝段(9#~11#)、底孔坝段、右副坝,坝顶总长度为351.9 m。单个机组段宽度为28.6 m,机组坝段总宽度为85.8 m,顺河向长度为76.0 m,厂房最大高度为76.6 m,建基面高程为1 743.90 m,坝顶高程为1 820.50 m。

坝址区所处地层岩性较为单一,为二叠系上统深黑色、墨绿色斜长石绢云母石英千枚岩夹少量微晶片岩及变质砂岩。厂房部位开挖揭露的岩体为微新岩体,总体上岩体结构呈层状,完整性较好。厂房基岩为千枚岩或千枚岩与变质砂岩互层,岩体等级为Ⅲ级。

LD水电站厂房坝段坝顶顺水流向变形明显,8#泄洪底孔坝段与9#厂房坝段间、12#纵向导墙坝段与11#厂房坝段间的坝体上游面顶部均可见明显错台,如图1所示。错台在每年3-4月份达到最大,之后逐渐减小,以年为周期往复变化。上游帷幕灌浆廊道内机组坝段与相邻坝段变形基本一致,结构缝面处无明显的错台,如图2所示。

3 监测资料分析

3.1 监测仪器布置

厂房坝段水平变形由垂线系统和引张线共同监测。垂线系统布置在9#厂房坝段,包括正垂线PL2和倒垂线IP2。垂线室位于9#坝段1 753.00 m高程、坝左0+010.400 m位置。倒垂线IP2从垂线室坝下0+009.625 m位置垂直向下延伸至1 706.00 m高程,正垂线PL2从垂线室坝下0+011.620 m位置垂直向上延伸至坝顶1 820.50 m高程。坝体垂直变形主要通过水准网监测。9#厂房坝段进水口顶部设有两个水准测点LD12和LDX11,LD12位于坝下0+0.050 m、坝左0+071.500 m位置;LDX11位于坝下0+023.000 m、坝左0+071.500 m位置;尾水平台设有一个水准测点LDW11,位于坝下0+077.700 m、坝左

0+071.500 m 位置。基岩变形由基岩变位计监测,9#厂房坝段坝踵和坝趾分别布设MD1-CF 和 MD2-CF

两个基岩变位计,监测深度为 15 m。9#厂房坝段监测仪器布置位置如图 3 所示。

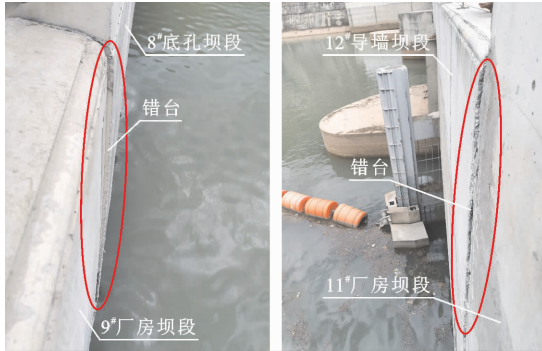


图 1 厂房坝段与相邻坝段上游面错台



图 2 坝体上游帷幕灌浆廊道结构缝

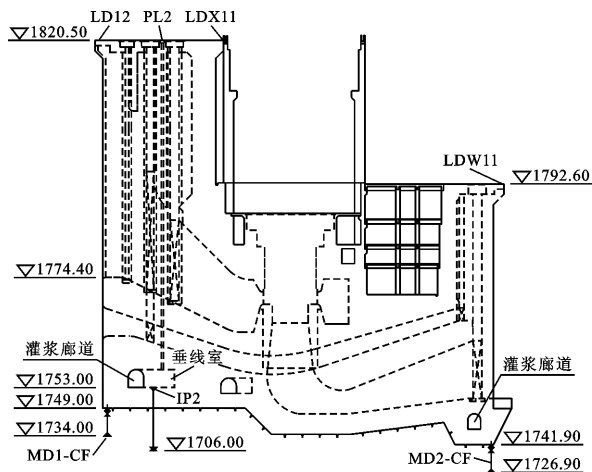


图 3 9#厂房坝段监测仪器布置图

3.2 监测数据分析

图 4 为 9#厂房坝段 LD12、LDX11 测点垂直变形量过程线(沉降为正,抬升为负)。由图 4 可以看出,截止 2021 年 6 月 15 日,9#厂房坝段进水口顶面上游侧 LD12 测点最大沉降量为 1.81 mm(2021 年 2 月 7 日),进水口顶面下游侧 LDX11 测点最大沉降量为 7.37 mm(2021 年 2 月 7 日)。变形曲线与温度相关性较强,表现为温度升高时坝体略微抬升,温度降低时坝体略微沉降。厂房坝段坝顶上游侧沉降量小于下游侧,总体表现为向下游倾斜。

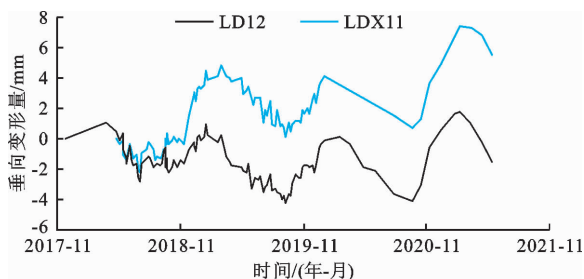


图 4 9#厂房坝段 LD12、LDX11 测点垂直变形量过程线

图 5 为 9#厂房坝段基岩变位计变形量过程线(拉伸变形为正,压缩变形为负)。由图 5 可知,坝基深部岩体随坝体混凝土浇筑重量的增加呈压缩变形趋势,混凝土浇筑完成后,基岩变形基本无变化。2018 年 9 月下闸蓄水后坝踵基岩压缩量稍有减小,水库蓄水稳定后坝踵和坝趾基岩压缩量均处于稳定状态。监测开始以来,9#厂房坝段坝踵 MD1-CF 深部变形量介于 $-0.73 \sim 0.48$ mm 之间,而坝趾 MD2-CF 深部变形量介于 $-0.13 \sim 0.13$ mm 之间,坝基深部变形很小。

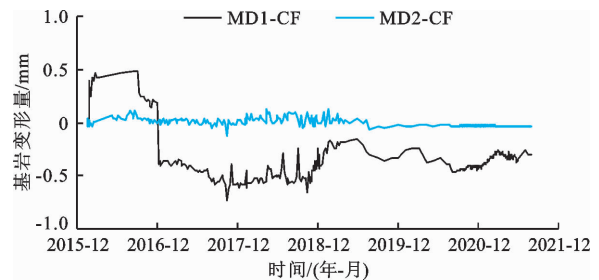


图 5 9#厂房坝段基岩变位计变形量过程线

图 6 为 9#厂房坝段垂线顺河向变形量过程线(向下游为正)。由图 6 可以看出,垂线室倒垂线 IP2 顺河向变形量介于 $1.87 \sim 5.27$ mm 之间,倒垂线各测点变形量的变化较小,表明坝基变形趋于稳定。坝顶正垂线 PL2 顺河向变形量介于 $16.24 \sim 25.00$ mm 之间,其中最大顺河向累计变形量为 25.00 mm,发生在 2021 年 4 月 27 日。蓄水阶段,正垂线 PL2 测值变化和库水位变化呈现正相关,库水位抬升,则垂线变形量向下游增大,库水位稳定后,则垂线变形量随温度呈现年周期性变化。2020 年 8 月 15 日-2020 年 10 月 27 日垂线系统仪器出现故障,因此该时段内无读数。监测时段内引张线与垂线变化趋势一致。

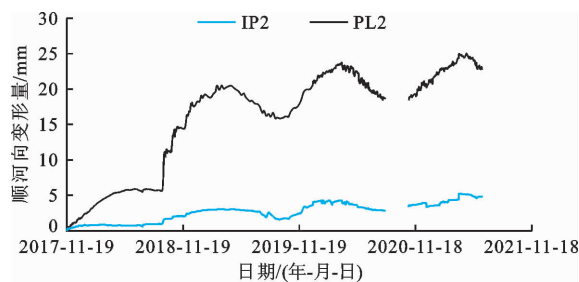


图6 9#厂房坝段垂线顺河向变形量过程线

4 厂房坝段变形计算

4.1 计算模型

本文选取 LD 水电站 9# 厂房坝段进行三维有限元仿真计算,计算模型及网格划分如图 7 所示。坐标系原点位于发电机及蜗壳中轴线 1 770.40 m 高程(水轮机安装高程)处,横河向为 X 轴方向,指向右岸为正;顺河向为 Y 轴方向,指向下游为正;铅直方向为 Z 轴方向,向上为正。

4.2 外荷载作用下厂房坝段变形计算

在影响坝体变形的各种荷载中,水压力为主要因素^[14-15]。为研究坝前水位变化对厂房坝段变形的影响,在考虑坝体混凝土自重、永久设备重量等不变荷

载的同时,还需考虑上游水位变化,分别计算各蓄水时段不同的水压力、扬压力、浪压力等作用下坝体的变形。根据施工期试验数据,C25 混凝土弹性模量为 28.72 GPa,泊松比为 0.167。厂房建基岩体变形模量为 6 GPa,泊松比为 0.25。上、下游灌浆廊道处均设有坝基排水孔,在排水孔处对扬压力进行折减,上、下游折减系数按实测值分别取 0.17、0.31。

水库蓄水过程中,下游水位基本稳定在 1 780.00 m 高程。不同坝前水位作用下厂房坝段顺河向变形计算结果如图 8 所示。

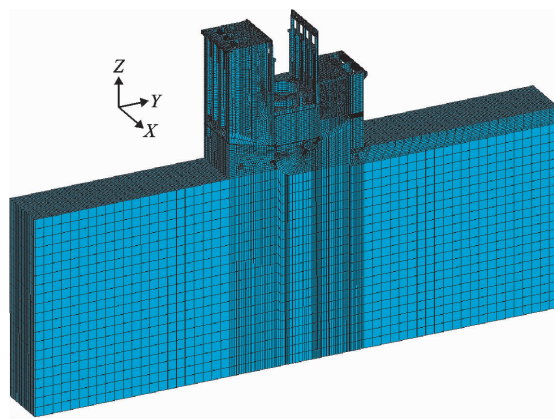


图7 9#厂房坝段变形计算有限元模型示意图

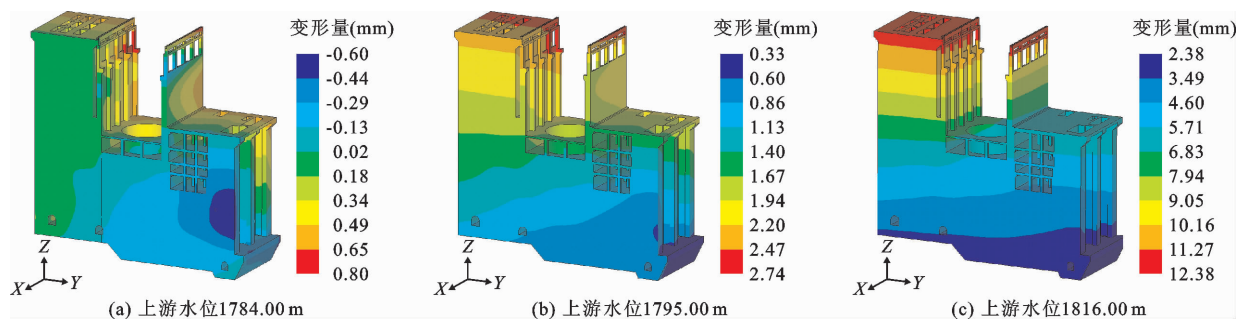


图8 不同上游水位时外荷载作用下9#厂房坝段顺河向变形云图

由图 8 中计算结果可知,当上游水位从库底蓄至 1 784.00 m 高程时,坝顶顺河向变形最大值变化很小,约为 0.80 mm;当上游水位蓄到 1 795.00 m 高程时,坝顶顺河向变形最大值增加到 2.70 mm;当上游水位蓄至 1 816.00 m 高程时,坝顶顺河向变形最大值增加到 12.33 mm。此时 PL2 测点顺河向变形为 12.02 mm,厂房坝段基底面最大变形为 3.49 mm。

在上下游水压力、自重及地基面扬压力作用下,厂房坝段顺河向变形整体向下游,垂直方向变形为上游坝顶略微抬升,尾水平台略微沉降,厂房坝段在外荷载作用下整体表现为向下游倾斜,与监测资料变形规律一致。当坝前水位在 1 784.00 m 高程以下变化时,坝顶顺河向变形变化较小,在 1 784.00 m 高程以上变化

时,坝顶顺河向变形变化较大。其主要原因有两点:(1)当水位在 1 780.00 m 高程以下时,坝前、坝后水位几乎同时抬升,此时水位变化对坝顶 PL2 点顺河向变形影响很小;当蓄水超过 1 780.00 m 高程时,坝前水位继续抬升,而坝后水位保持不变,因此在上、下游不平衡水压力作用下,厂房坝段顺河向变形逐渐向下游增大;(2)当坝前水位在 1 793.00 m 高程以下时,进水口下部结构掏空率低,刚度大,因此结构变形较小;当坝前水位超过 1 793.00 m 高程时,进水口上部结构掏空率高,刚度小,因此在水压力作用下,进水口上部产生了较大的顺河向变形。

4.3 温度作用下厂房坝段变形计算

LD 水电站在蓄水达到稳定之后,关键部位的变

形呈现出随季节周期性变化的规律,初步分析是温度变化所致^[16]。本文根据混凝土施工进度安排及热力学参数,对9#厂房坝段自施工期开始至2021年6月全过程温度场与温度应力场进行了仿真计算。LD水电站厂房坝段坝体混凝土于2015年8月中旬开仓浇筑,2017年6月浇至坝顶1 820.50 m高程,施工结束。2018年9月LD水电站下闸蓄水,同年

10月流道过水发电。根据LD水电站混凝土试验结果,得出厂房坝段C25混凝土的比热为0.971 kJ/(kg·℃),导温系数为0.003 731 4 m²/h,导热系数为8.696 kJ/(m·h·℃),线膨胀系数为5.7×10⁻⁶/℃。计算过程中考虑了气温、水温以及混凝土水化热对坝体混凝土温度的影响。气温和水温变化曲线如图9、10所示。

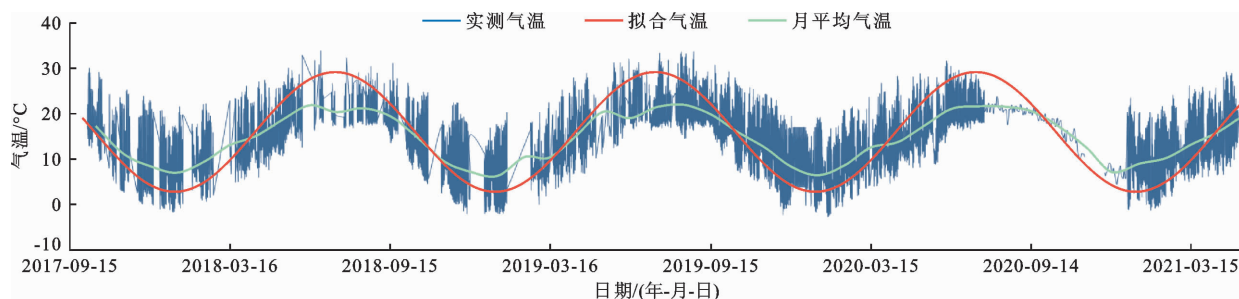


图9 LD水电站坝址区气温曲线

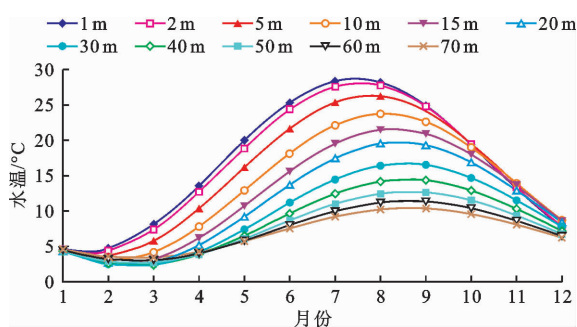


图10 LD水电站库区不同深度水温模拟曲线

采用气温余弦公式^[5]对该水电站坝址区气温进行拟合,拟合方程如下:

$$T_a = T_{am} + A_a \cos\left[\frac{\pi}{6}(t - t_0)\right] \quad (1)$$

式中: T_a 为气温,℃; T_{am} 为年平均气温,为17.5℃; A_a 为气温年变幅,为13.16℃; t 为时间,d; t_0 为年最高气温距1月1日的天数,为196 d。

任意深度的平均水温 $T_m(y)$ 可由下式^[5]进行拟合:

$$T_m(y) = c + (T_s - c)e^{-0.04y} \quad (2)$$

$$c = (T_b - T_s g)/(1 - g), g = e^{-0.04H} \quad (3)$$

式中: H 为水库深度,m; T_s 为库表年平均水温,为16.5℃; T_b 为库底年平均水温,为6.6℃。

混凝土绝热温升 $\theta(\tau)$ 随龄期的变化由双曲线公式表示如下^[5]:

$$\theta(\tau) = \theta_0 \tau / (n + \tau) \quad (4)$$

式中: θ_0 为混凝土最终绝热温升,为29.5℃; τ 为混凝土龄期,d; n 为常数,取值为5.0。

混凝土弹性模量 $E(\tau)$ 与龄期 τ 的关系如下^[5]:

$$E(\tau) = E_0 (1 - e^{-0.40\tau^{0.34}}) \quad (5)$$

式中: E_0 为最终弹性模量,GPa, $E_0 = 1.45E(28)$, $E(28)$ 取实测值28.72 GPa。经计算 $E_0 = 41.6$ GPa。

温度场计算模拟了从2015年8月15日混凝土开始浇筑到2021年6月15日时间段内混凝土水化热温升、水温、气温等的变化过程。混凝土浇筑及水位变化过程由APDL编程语言来实现,利用ANSYS中的单元生死功能,将所有单元“杀死”,然后根据浇筑进度分层激活,并加初始水化热及边界条件,蓄水后与水接触的所有混凝土表面由固-气边界变为固-水边界^[17]。

9#厂房坝段不同时间温度场如图11所示。混凝土浇筑块激活后分别经过水化热温升期、温降期,最终逐渐达到稳定温度场^[18]。稳定温度场即混凝土温度随环境温度周期变化,峰值不再明显变化。进水口胸墙、主厂房排架柱等单薄部位混凝土达到稳定温度所需时间较短,约为1 a时间。厂房坝段进口流道底部与尾水管上部大体积混凝土达到稳定温度需时较长,如进水口底部大体积混凝土内部在浇筑完成3~4 a以后才达到稳定温度。达到稳定温度场后,各部位混凝土温度年平均值接近同高程气温或库区水温年平均值。库底水温年平均值远小于环境气温,因此混凝土所处部位水深越大,则其温度受蓄水影响越大。混凝土温度稳定后,未蓄水部位边界温度随气温变化而变化,蓄水部位边界温度随水温变化而变化,厂房坝段于2018年10月过水发电,因此后期整个流道均为水边界,温度与水温相同。

基于温度场计算结果,对9#厂房坝段温度作用下的变形进行了计算。图12为9#厂房坝段顺河向温度变形云图。提取坝顶PL2测点温度作用下变

形数据,对所有数据减去2017年11月19日开始监测时的变形计算值,得到PL2测点温度分量变形曲线,如图13所示。

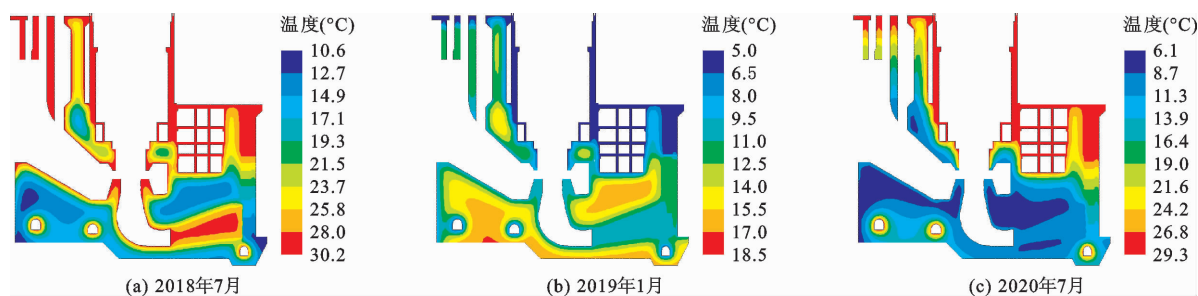


图11 9#厂房坝段不同时间温度场云图

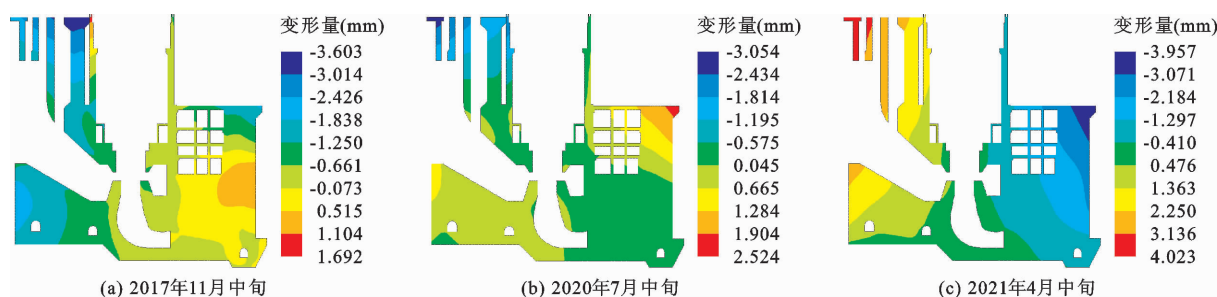


图12 9#厂房坝段不同时间顺河向温度变形云图

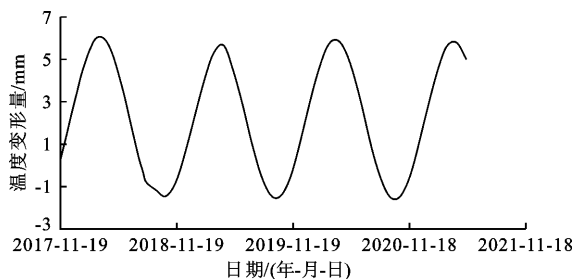


图13 PL2测点顺河向温度变形曲线(向下游为正)

图13中的计算结果表明,9#厂房坝段温度变形分量随环境温度呈年周期性变化,坝顶温度变形分量极值与库底水温极值出现时间基本相同。在空间上,厂房坝段变形呈现以下规律:低温导致坝顶向下游变形,高温导致坝顶向上游变形,且混凝土变形极值出现时间滞后于边界温度极值出现时间;厂房坝段底部温度变形小,顶部温度变形大;结构单薄部位温度变形大,大体积混凝土部位温度变形小;且由图12(b)、12(c)可以看出,厂房坝段坝顶与尾水平台变形方向相反,7月份厂房坝段变形呈现出向上、下游张开的态势,4月份则向中间收缩。分析以上变形规律的原因主要有以下几点:(1)混凝土材料导热性能差,坝段底部大体积混凝土内部感知外界温度能力弱^[19],内部混凝土温度变化滞后于边界温度,导致温度变形极值出现时间滞后于温度极值出现时间。在底部大体

积混凝土变形的影响下,坝顶变形同样滞后于温度变化,最低气温出现在1月份,而坝顶变形最大值出现在3~4月份,滞后约两个月。(2)不同深度水温随季节变幅不同,如图10所示,水深1m处水温年变幅约为24℃,而水深70m处水温年变幅约为7℃。坝踵部位水深为69.0m,尾水管出口处水深为29.1m,2020年7月~2021年3月间坝踵混凝土温度变形变化约为0.3mm,尾水管出口处混凝土温度变形变化约为-1.4mm,尾水管出口部位变幅大于坝踵部位,由此可见水深越大,温度变形变幅越小。(3)厂房内部混凝土边界温度与气温相同,气温变幅大于水温变幅,因此在高温时段,厂房内部高温使得厂房坝段混凝土从中间向上、下游膨胀,导致坝顶向上游变形,尾水平台向下游变形;低温时段水温高于气温,厂房内部低温使得厂房坝段混凝土向中间收缩,导致坝顶向下游变形,尾水平台向上游变形。通过以上计算分析,温度变形变化规律与极值出现时间均与监测数据相吻合。坝顶PL2点在温度作用下顺河向变形介于-1.55~6.07mm之间。

由上述分析可知,LD水电站厂房坝段温度作用下的变形规律与同类型的班多水电站基本一致^[3],坝顶变形皆表现出低温时向下游增大,高温时向上游回缩的规律。其次,不同结构形式的坝段在温度

作用下的变形机制不同,是导致河床式水电站厂房坝段与其他坝段变形存在差异的一个主要原因。

4.4 时效影响的厂房坝段变形计算

混凝土大坝的时效变形非常复杂,通常由以下 3 部分组成:(1)混凝土徐变;(2)基岩的软化及蠕变;(3)坝体材料的老化。由图 5 基岩变位计测值可知,蓄水稳定后基岩变形处于稳定状态,因此在计算时间段内可不考虑基岩的软化及蠕变;坝体混凝土也处于运行早期,可不考虑筑坝材料的老化^[20-21],因此时效变形仅考虑坝体混凝土徐变。

徐变度 $C(\tau, \tau_p)$ 采用经验公式(6)^[5] 进行计算:

$$C(\tau, \tau_p) = C_1(1 + 9.20\tau_p^{-0.45})[1 - e^{-0.30(\tau - \tau_p)}] + C_2(1 + 1.70\tau_p^{-0.45})[1 - e^{-0.0050(\tau - \tau_p)}] \quad (6)$$

式中: τ 为龄期,d; τ_p 为加荷龄期,d; $C_1 = 0.23/E_0$, $C_2 = 0.52/E_0$ 。

混凝土徐变与加荷龄期呈反比关系,与瞬时弹性变形呈正相关^[22]。电站下闸蓄水时,进水口上部混凝土龄期小,而底部浇筑较早的混凝土龄期大,且进水口上部掏空率大,顺河向刚度小,坝顶所产生的瞬时弹性变形较大,坝底瞬时弹性变形较小,因此进水口上部混凝土徐变较大。经计算,截至 2021 年 6 月 15 日,9#厂房坝段顶部 PL2 顺河向混凝土徐变变形增量为 6.68 mm。蓄水后的第 1 年内,坝顶混凝土徐变变形增长 4.33 mm,第 2 年内增长 1.75 mm,第 3 年仅增长 0.65 mm。由此可见,与大部分工程类似,LD 水电站厂房坝段坝顶混凝土徐变变形在蓄水后 3 年内基本趋于收敛^[23]。PL2 测点顺河向混凝土徐变变形过程线见图 14。

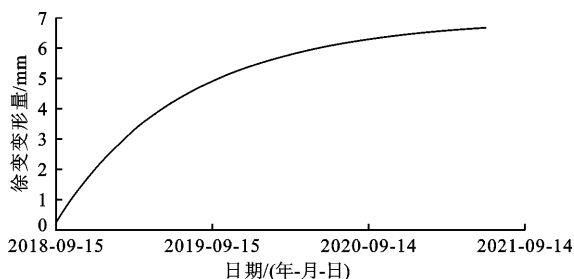


图 14 9#厂房坝段 PL2 测点顺河向混凝土徐变变形过程线(向下游为正)

4.5 坝顶总变形计算分析

将 9#厂房坝段 PL2 测点由外荷载、温度以及时效 3 个因素引起的变形进行叠加,得到该点顺河向的总变形过程线,计算结果与实测值对比如图 15 所示。PL2 测点计算最大值为 24.41 mm,出现在 2021 年 4 月 15 日,与监测值最大值 25.00 mm 比较接近。

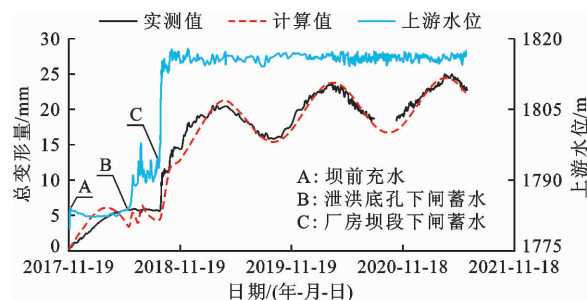


图 15 9#厂房坝段 PL2 测点顺河向变形计算值与实测值对比

图 15 中计算结果表明,在水位上升阶段,PL2 测点顺河向变形随水压变化而逐渐增大,当坝前水位稳定后,PL2 测点顺河向变形随温度变化而呈周期性变化,每年 3-4 月变形最大,9 月变形最小,由于温度变形峰值的变化及混凝土徐变的发展,PL2 测点顺河向变形最大值每年有一定的增长,随着混凝土温度场渐趋稳定以及混凝土徐变发展平缓,PL2 测点变形增长幅度减小,逐渐趋于稳定。PL2 测点顺河向变形计算曲线与监测得到的变形曲线基本吻合,厂房坝段顺河向变形趋于稳定。

坝顶 PL2 测点顺河向计算变形最大值组成分量中,外荷载分量占比最大,约占总变形量的 50%;其次为时效分量和温度分量,分别占总变形量的 27% 和 23%。蓄水完成后,坝顶 PL2 测点顺河向变形峰值增大了 3.83 mm,其中混凝土徐变变形增量为 3.31 mm,占该阶段变形增量的 86%;温度变形增量为 0.52 mm,占该阶段变形增量的 14%。由此可见坝顶 PL2 测点变形峰值增长的主要原因为混凝土徐变,次要原因为温度作用。

经计算分析,当混凝土结构体积较大、掏空率小、刚度较大时,温度与时效对结构变形的影响较小。当结构掏空率大、受力部位较单薄、刚度较小时,温度与时效对结构变形影响较大。蓄水之前进行的变形计算对温度及时效作用的考虑不足,导致监测值大于原设计值。因此,对于河床式水电站厂房坝段等掏空率较大的混凝土结构而言,变形计算过程应充分考虑温度及时效的影响。

5 讨论

如上所述,温度、时效作用对河床式水电站厂房变形的影响显著,设计时应充分考虑。不同工程随着结构尺寸及型式、坝址区气温条件、蓄水时混凝土龄期等的变化,其变形组成中各分量的占比也会随之变化。如班多水电站厂房坝段尺寸及结构型式与 LD 水电站非常相似,由其变形监测资料分析可

知,其变形占比中水压分量占比与LD水电站相近,但其坝址区日均气温年变幅大于LD水电站,导致温度分量在总变形中占比较大^[3]。不同阶段导致坝体变形增长的原因也会有所差别,如LD水电站在运行初期因时效作用导致大坝变形最大值出现持续增长。而太平湾^[1]、柘溪^[24]等运行时间较长的大坝,其变形异常或变形增大则主要与温度或水位变化有关。在没有进行徐变试验的前提下,设计阶段无法准确考虑时效分量,因此对于新建工程,时效变形往往是最大的不确定因素。尤其是河床式厂房等尺寸大、掏空率大的工程结构。由于混凝土徐变往往是时效变形的主要部分,因此建议规模较大的工程进行徐变试验,然后结合有限元计算分析,可以在设计阶段达到对工程结构变形较为准确的预测。

6 结 论

本文从外荷载、温度、时效3个方面开展研究,对LD河床式水电站厂房坝段变形进行有限元仿真计算,将计算得到的变形分量进行叠加,然后与实测变形相比较分析,总结坝顶变形持续增大的原因。得出以下结论:

(1)厂房坝段变形主要由外荷载变形、温度变形、时效变形3部分组成。坝顶最大变形中,外荷载分量占比最大,约占总变形量的50%;其次为时效分量和温度分量,分别约占总变形量的27%和23%。

(2)厂房坝段坝顶变形增大的主要原因为混凝土早期徐变较大,且持续时间长。该阶段厂房坝段大体积混凝土温度场还未完全稳定,致使温度变形分量最大值小幅增加。随着温度场趋于稳定及混凝土徐变发展平缓,坝顶顺河向变形最大值逐渐趋于稳定,不会持续增长。

(3)在进行河床式水电站厂房坝段变形计算时,若忽略温度与时效的影响,将导致计算值与实测值差异偏大。建议在同类工程变形计算过程中,应充分考虑温度与时效的影响。

参考文献:

- [1] 王建,徐琼,荆凯. 太平湾重力坝坝体水平位移异常变化成因分析[J]. 中国农村水利水电,2018(8):145-148.
- [2] 房国忠,曲洪钧,张雪源,等. 太平湾大坝过渡区及左岸挡水坝段水平变形差分析[J]. 水电能源科学,2018,36(2):101-103.
- [3] 文正花. 班多水电站大坝安全监测中上游水位和气温对大坝水平位移的影响简析[J]. 青海水力发电,2018(2):49-53+57.
- [4] 华倩宇,苏怀智,杨立夫. 考虑水化热影响的混凝土坝位移监测统计分析模型及其解析[J]. 水利水电科技进步,2021,41(5):62-70.
- [5] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制(第二版)[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.
- [6] 顾冲时,苏怀智,王少伟. 高混凝土坝长期变形特性计算模型及监控方法研究进展[J]. 水力发电学报,2016,35(5):1-14.
- [7] 赵梦瑶,李同春,林潮宁. 考虑基岩蠕变特性的重力坝深层抗滑稳定性分析[J]. 中国农村水利水电,2019(2):131-134+138.
- [8] 杜威,王志宏,王占军. 河床式水电站厂泄连接坝段横缝止水布置研究[J]. 水利规划与设计,2021(4):101-105.
- [9] 程帅. 横缝止水布设对轴流式机组厂房结构的影响研究[D]. 西安:西安理工大学,2017.
- [10] 岳晨雨. 深厚覆盖层上水电站厂房沉降和地震反应数值分析[D]. 大连:大连理工大学,2015.
- [11] 张梦溪,任秋兵,李明超. 考虑等几何分析的混凝土重力坝变形安全预测分析[C]//中国力学大会(CCTAM 2019),杭州,2019.
- [12] 曹建伟. 长洲水利枢纽混凝土重力坝坝顶垂直位移变量分离研究[J]. 科技资讯,2019,17(33):64-65+67.
- [13] 王仁超,马钰明. 基于PCA和CS-KELM的重力坝变形预测模型[J]. 水利水运工程学报,2021(4):10-18.
- [14] 李镇惠,骆建宇,马奕仁,等. 三峡大坝水平位移回归监测建模分析[J]. 长江科学院院报,2013,30(11):109-112.
- [15] 方晗,陶兴阳. 功果桥水电站坝顶引张线统计资料模型计算分析[J]. 云南水力发电,2018,34(6):67-70.
- [16] 徐宝松,刘贝贝,郑东健,等. 大坝变形温变效应分析方法研究[J]. 中国科学:技术科学,2012,42(6):704-712.
- [17] 司政,李守义,陈培培,等. 基于ANSYS的大体积混凝土温度场计算程序开发[J]. 长江科学院院报,2011,28(9):53-56.
- [18] 朱伯芳,吴龙坤,李玥,等. 混凝土坝施工期坝块越冬温度应力及表面保温计算方法[J]. 水利水电技术,2007,38(8):34-37.
- [19] 钱春香,何智海. 混凝土体积稳定性和抗裂性理论与技术[M]. 南京:东南大学出版社,2015.
- [20] 朱伯芳. 论混凝土坝的使用寿命及实现混凝土坝超长期服役的可能性[J]. 水利学报,2012,43(1):1-9.
- [21] 宋恩来. 混凝土坝老化过程及“预期寿命”的探讨[J]. 大坝与安全,2010(1):5-10.
- [22] 黄国兴,惠荣炎,王秀军. 混凝土徐变与收缩[M]. 北京:中国电力出版社,2011.
- [23] 苟廷仙. 黄河班多水电站坝顶垂直位移监测资料简析[J]. 青海水力发电,2015(2):42-45.
- [24] 张志超. 柘溪大坝坝顶水平位移略超历史最大值分析[J]. 通讯世界,2017(22):345-346.