

特高拱坝施工期数字监控方法、系统与工程应用

刘 毅¹, 张国新¹, 王继敏², 周 钟³

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 2. 二滩水电开发有限公司, 四川 成都 610051; 3. 中国水电工程顾问集团成都勘测设计研究院, 四川 成都 610072)

摘 要: 依据混凝土坝数字监控的理论, 从主要目的、基本内容和工作模式 3 个方面论述了特高拱坝施工期数字监控方法, 介绍了特高拱坝施工期数字监控系统, 提出了利用该系统开展特高拱坝施工期数字监控的工程应用模式。特高拱坝施工期数字监控系统的工程应用表明, 运用该系统可以实时开展大坝工作性态评估, 降低事故风险, 同时可以为施工期动态设计提供决策支持。

关键词: 特高拱坝; 施工期; 混凝土坝数字监控

中图分类号: TV431

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2012)03-0033-05

Digital monitoring method and system for construction of super-high arch dam and its engineering application

LIU Yi¹, ZHANG Guoxin¹, WANG Jimin², ZHOU Zhong³

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Ertan Hydropower Development Company, Ltd., Chengdu 610051, Sichuan, China; 3. Hydrochina Chengdu Engineering Corporation, Chengdu 610072, Sichuan, China)

Abstract: Based on the theory of digital monitoring of concrete dam, the method of digital monitoring of super-high arch dam during construction period is discussed herein from the aspects of the main purpose, general content and working mode, and then the relevant system of the digital monitoring of the super-high arch is described as well, furthermore, the mode of the engineering application of this system during the construction period of the super-high arch dam is proposed. The relevant engineering practice shows that the real-time assessment on the working behavior of the dam can be carried out with this system, moreover, not only the risk of accident can be lowered, but the decision-making support can also be provided for the dynamic design during the construction period simultaneously.

Key words: super-high arch dam; construction period; digital monitoring of concrete dams

1 引 言

在近十年来的我国水电开发高峰期中, 特高拱坝的建设占据着显著而重要的位置。小湾拱坝(坝高 294.5 m)、拉西瓦拱坝(坝高 250 m)已经投产发电, 并即将接受正常蓄水位的考验; 锦屏一级拱坝(坝高 305 m)、溪洛渡拱坝(坝高 285.5 m)浇筑高程已经过半, 将于 2013 年投产发电; 白鹤滩拱坝(坝高 289 m)、乌东德拱坝(坝高 265 m)已经进入可行性研究阶段, 将陆续开工建设。在上述拱坝建设之前, 我国已经竣工投产的最高拱坝是 1998 年竣工的二滩拱坝(坝高

240 m), 这十多年的特高拱坝建设将我国的拱坝建设实践从 240 m 提升至 300 m 级。

在巨大的成绩面前, 我们也应该清醒地认识到 300 m 级特高拱坝与普通拱坝存在的显著差异, 以及

收稿日期: 2011-10-13

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2008BAB29B05); 国家自然科学基金项目(50909105); 水利部公益性行业科研专项经费项目资助(201201050); 中国水利水电科学研究院科研专项。

作者简介: 刘 毅(1979—), 男, 湖南安化人, 高级工程师, 结构材料所副所长。

由于这些差异而可能导致的工程风险。首先,300 m 级特高拱坝应力水平高,按照规范方法计算得到的压应力接近或达到 10 MPa,与普通拱坝主要受拉应力控制不同,特高拱坝的拉压应力均达到规范允许应力的临界值,整体安全裕度小于普通拱坝;其次,出于提前发电的需要,分期浇筑、封拱与蓄水,以及在施工过程中的诸多调整使得施工期的工作性态与初始设计状态出现较大差异,施工期拱坝工作性态十分复杂;再次,由于特高拱坝底宽较大,混凝土后期温度回升较大,温控防裂的难度加大,其对通水冷却时空间方面的梯度要求高,导致拱坝施工期悬臂高度增加,可能会导致施工期拱坝工作状态的恶化。为此,规范[1]和[2]特别指出:“应研究分期蓄水、分期施工、施工程序及蓄水过程对坝体应力的影响”,“对于 200 m 以上的高坝,其拉应力控制标准应做专门研究”。

2008 年初,朱伯芳院士提出了混凝土坝数字监控的理论^[3-5],其基本思想是:考虑到目前大坝仪器监控测点少且不能给出大坝应力场和安全系数等缺点,在仪器监控的基础上增加数字监控,基于仪器观测资料进行反分析,利用全坝全过程仿真分析,在施工期即可给出当时温度场和应力场,并可预报运行期的温度场、应力场及安全系数,如发现问题可及时采取对策;在运行期可以充分反映施工中各种因素的影响,对大坝作出比较符合实际的安全评估。

本文结合在建特高拱坝工程,从主要目的、基本内容和工作模式 3 个方面论述了特高拱坝施工期数字监控方法,介绍了特高拱坝施工期数字监控系统,提出了利用该系统开展特高拱坝施工期数字监控的工程应用模式,即:利用数字监控系统跟踪分析大坝施工期的工作性态,评估其与设计工作性态的差异与风险,在施工条件变更时,分析变更对大坝工作性态的影响,提出相应的应对措施。

2 特高拱坝施工期数字监控方法

本节从特高拱坝施工期数字监控的主要目的、基本内容和工作模式 3 个方面来论述特高拱坝施工期数字监控方法。

2.1 基本目的

结合在建高拱坝的实际情况,特高拱坝施工期数字监控的目的包括以下两个方面:

第一,评估施工期大坝工作性态与设计工作状态的差异及其风险。在大坝施工前,设计会针对特高拱坝可能存在的各种工况进行分析。尽管如此,由于水电工程的复杂性,施工后的各种条件会与设计状况存

在一定差异,施工状态与设计状态会存在一定差别。此外,由于受限于我们对大坝工作性态认知水平的限制,在大坝施工前我们对大坝工作性态的认知与实际状况肯定会有一定偏差,对于中低坝而言这一偏差可能涵盖在较大的安全系数内,对于特高拱坝而言这一偏差可能导致工程风险,因此,运用数字监控在仪器监控的基础上进行反分析,进而真正把握特高拱坝施工期的工作性态,评估其与设计工作状态的差异,降低风险。

第二,评估施工方案调整的可行性与相应对策。在大坝浇筑过程中,由于施工条件发生的变化,往往需要调整施工进度和施工方式,比如浇筑层厚度、浇筑层间歇期等等,这些施工措施调整会带来哪些影响,需要进行符合实际的评估。在大坝施工过程中,由于施工进度落后于设计进度,渡汛形象面貌达不到设计要求,为此需要对悬臂挡水等各种情况进行分析研究,提出渡汛安全的相应措施。

2.2 主要内容

特高拱坝施工期面临的主要荷载是自重和温度,为避免拱坝在自重和温度荷载作用下的开裂风险,数字监控的主要内容包括温度状态监控和应力状态监控。

2.2.1 大坝温度状态监控

根据其他高拱坝工程的经验,目前各工程对于高拱坝施工期温度控制的设计要求都非常详细,对每个浇筑仓从出机口温度到封拱温度的全过程以及各浇筑仓在空间上的温度梯度均作出了规定。大坝温度状态监控的第一项内容就是:按照设计要求全面评估出机口温度、浇筑温度、最高温度、各期冷却目标温度是否符合设计要求以及符合的比例;在高度方向是否按照要求设置了同冷区、过渡区和盖重区,对超出设计要求项进行报警。大坝温度状态监控的第二项内容是对大坝的温度过程作出预测,对可能超标现象提出预警,并提出相应的应对措施。

2.2.2 大坝应力状态监控

按照大坝实际浇筑过程和实测气温资料,对大坝浇筑全过程进行跟踪仿真,在仪器监控资料的支持下,开展关键热力学参数的反演分析,进而得到符合实际情况的大坝应力状态。考虑设计拟定的进度,通过仿真分析对大坝未来一段时间的应力状态进行预测,如应力超标,则提出应对措施。

2.3 工作模式

混凝土坝的数字监控是一项新的工作模式,要最大限度地发挥数字监控的作用,必须要将数字监控融入现有的由业主、设计、施工和监理各方组成的工作模式。本文提出了一套混凝土坝数字监控的工作模式

与流程如图 1 所示。

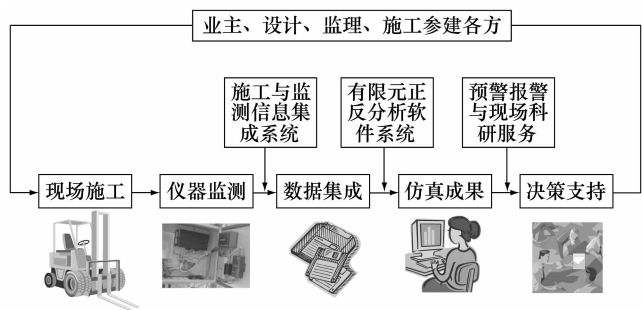


图 1 混凝土坝数字监控的工作模式与流程

工作模式流程如下：(1)在业主的统一领导下，建立由业主、设计、监理、施工和科研参建各方组成的工作小组；(2)按照设计文件，进行现场施工，并埋设监测仪器；(3)利用专门开发的施工与监测信息集成系统将施工信息、监测信息统一纳入数据库；(4)在现场实测数据的基础上，利用有限元正反分析软件系统进行跟踪反演仿真分析；(5)基于仿真成果，进行现场预警报警和科研服务，提供评估意见和应对措施，为参建各方提供决策支持。

3 特高拱坝施工期数字监控系统

在二滩水电开发有限公司和成都勘测设计研究院的支持下，中国水科院和天津大学合作开发了锦屏一级水电站高拱坝施工实时控制系统，其中中国水科院承担了温控信息集成与预警系统。本节介绍这一系统的主要功能和模块。

3.1 系统主要功能

该系统的功能包括以下几个方面：(1)施工与监测信息集成。采取尽可能方便的方式，将施工和监测信息录入进数据库，并进行高效管理。主要信息包括，环境信息(气温、水温、上下游水位、气象信息等)、浇筑仓信息(浇筑高程、开仓时间、收仓时间、混凝土方量、浇筑方式、浇筑温度等)、通水冷却信息(冷却水管布置、通水流量、进水口水温、出水口水温等)、封拱信息(封拱高程、封拱时间、封拱温度等)、浇筑仓温控信息等。(2)施工与监测信息管理。海量信息进入数据库后，需用图表等直观的形式对信息进行高效的管理。图形包括实测温度过程线图、浇筑仓综合信息曲线图、上游面综合信息立视图、沿高程温度分布图等。表格包括出机口温度统计表、入仓温度统计表、浇筑温度统计表、通水冷却统计表等。(3)有限元实时跟踪反演仿真分析。利用数据库中的信息，按需要形成仿真计算文件，提交后台

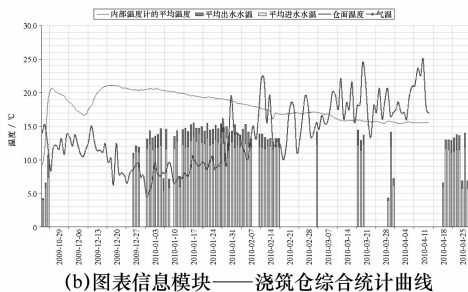
服务器进行有限元仿真分析，并依据实测温度数据，反演有关参数，确保计算符合实际情况。(4)混凝土开裂风险预测预报。依据设计要求，对超出设计要求的部分进行报警，包括最高温度报警、间歇期超标报警、超冷报警、冷却速率超标报警等。依据有限元计算成果对一段时间以后的大坝混凝土温度和应力状况进行预测，对开裂风险进行预测，提出应对措施。

3.2 系统的主要模块

如图 2 所示，本系统包括以下 3 个主要模块：(1)温控信息管理模块，该模块实现施工与监测信息数据集成与查询功能；(2)图表信息模块，该模块实现数据的统计表格与图形表示功能；(3)预警报警模块，该模块实现根据数据进行预警和报警的功能；(4)仿真分析模块，该模块实现有限元仿真分析和反演分析的功能。



(a)信息管理模块



(b)图表信息模块——浇筑仓综合统计曲线



(c)报警预警模块——降温速率超标界面

图 2 系统典型界面

4 特高拱坝施工期数字监控工程应用

自 2009 年 3 月起，中国水科院的科研团队在锦屏一级拱坝现场开展施工期数字监控科研工作。工作

的主要内容包括两个方面:一是评估大坝实际工作性态及其开裂风险,每月提交一次评估报告;二是条件变化时进行跟踪仿真分析,并提供专题报告,为动态反馈设计提供技术支持。本节举例说明数字监控在特高拱坝施工中发挥的作用。

4.1 实际工作性态评估

图3所示为截至2011年7月的大坝浇筑状态。按照大坝实际浇筑过程进行仿真模拟^[6],通过实测温度过程反馈混凝土热学参数,确保计算温度过程与实测吻合。图4为计算温度与实测温度过程对比。

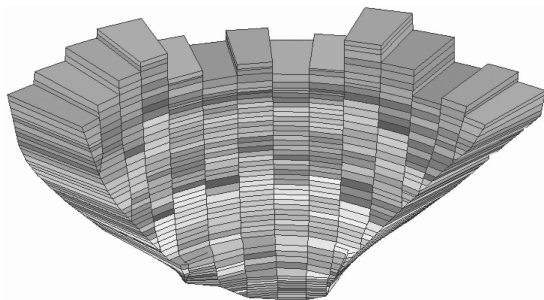


图3 2011年7月锦屏一级大坝浇筑状态
(不同深浅色表示不同浇筑层)

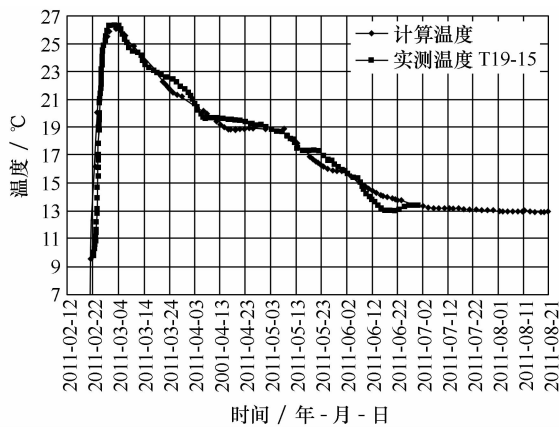


图4 典型测点实测温度过程与计算温度过程对比

从坝体应力、位移和横缝开度3个方面评估大坝实际工作性态,基本结论如下。

首先,坝体最上部由于刚浇筑,位移为0,下部受自重的影响,向下变形,坝踵向下竖向位移大于坝趾;顺河向,底部高程受降温影响上游面向下游变形,下游面向上游变形,中部高程由于自重的影响大坝整体倾向上游。

第二,竖向向应力:竖向应力主要由自重决定,主要为压应力。由于拱坝体型倒悬的影响,河床坝段上游面坝踵部位有较大压应力,坝踵部位最大压应力

为5.5 MPa,坝趾部位压应力约为0.6 MPa,受温度应力影响,上部高程内部区域存在一定的拉应力,拉应力值一般小于0.5 MPa;边坡坝段由于浇筑高程较低,压应力相对较小,最大压应力为1.0~5.0 MPa,上部区域最大拉应力约为0.6 MPa。竖向应力如图5(a)所示。

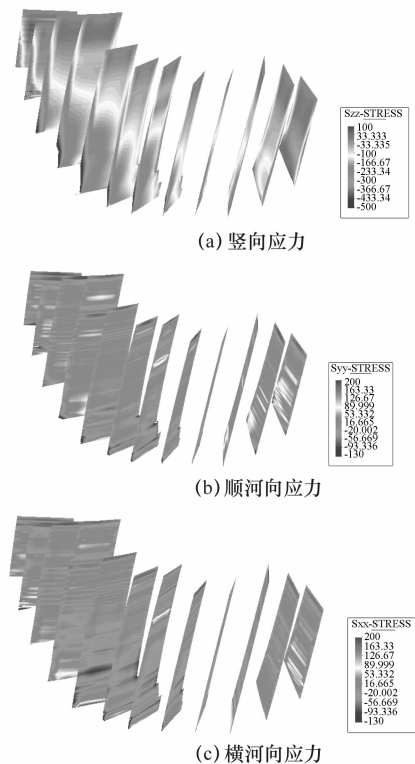


图5 2011年7月坝体应力(单位:0.01 MPa)

第三,顺河向应力:顺河向应力主要受施工期温度荷载影响,约束区温度应力较大,且陡坡坝段约束区的温度应力大于河床坝段;第一个灌区(1580~1589 m)封拱灌浆时,11#~16#坝段温度应力相对较大,最大值为1.7 MPa;2011年7月15日,约束区最大应力为2.0 MPa,脱离约束区后温度应力小于1.3 MPa,内部温度应力均小于允许拉应力。顺河向应力图如图5(b)所示。

第四,横河向应力:横河向应力主要受施工期温度荷载影响,约束区温度应力较大,且陡坡坝段约束区的温度应力大于河床坝段;第一个灌区(1580~1589 m)封拱灌浆时,11#~16#坝段温度应力相对较大,最大值为1.9 MPa;2011年7月15日,约束区最大应力为1.9 MPa,脱离约束区后温度应力小于1.0 MPa,内部温度应力均小于允许拉应力。横向应力图如图5(c)所示。

第五,底部强约束区横缝最大开度较小,沿高程方向随着地基约束力的减弱横缝最大开度逐渐增大,

二期冷却结束后脱离强约束区的横缝最大开度一般可达到 1 mm 以上;顶部新浇筑块由于尚未达到封拱温度,横缝开度较小,随着温降幅度的增加横缝开度仍会有所增加。2011 年 7 月 15 日横缝最大开度监测值中约 78% ≥ 0.5 mm,最大缝开度平均值约为 1.51 mm,计算所得缝开度平均值为 1.42 mm,计算结果与监测结果基本吻合。当日各横缝开度沿高程的计算分布如图 6 所示。

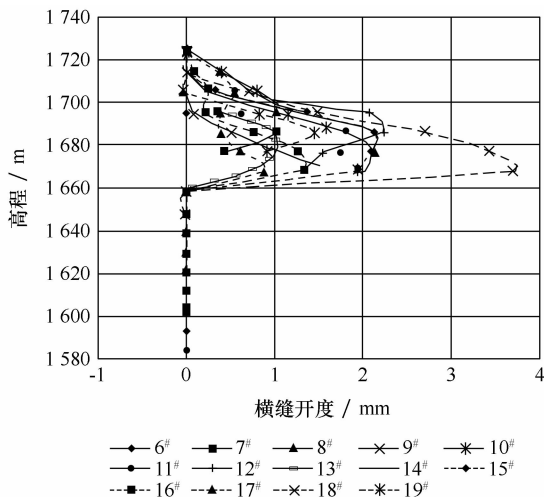


图6 2011年7月15日各坝段横缝开度沿高程的分布

4.2 辅助反馈设计

冬季浇筑薄层混凝土长间歇存在较大的开裂风险,2009年过冬前,中国水科院对固结灌浆长间歇对混凝土开裂风险的影响进行了研究。分别考虑了“三进三出”和“一进一出”两种固结灌浆方式和是否保温两种情况,典型计算结果如图 7 所示。研究表明:在不保温情况下,固结灌浆面上超过 20 d 的长间歇时,长短周期温度荷载叠加都会使得最大应力远远超过容许拉应力,安全系数为 1.05,开裂风险较大;设计保温条件下,20 d 间歇时,长短周期温度荷载叠加后的温度应力小于容许拉应力,满足要求;设计保温条件下,50 d 间歇时,超过 30 d 间歇期后,长短周期温度荷载叠加,应力有所超标,安全系数为 1.35,有一定的开裂风险。

根据这一研究成果,设计院将原设计中的盖重固结灌浆方式改为下部盖重灌浆加表层引管灌浆的方式,避开了冬季长间歇问题。2010 年冬季,采用无长间歇的固结灌浆方式后,浇筑仓面几乎未发生裂缝。

5 结 语

混凝土坝数字监控是近几年来提出的新理论,其

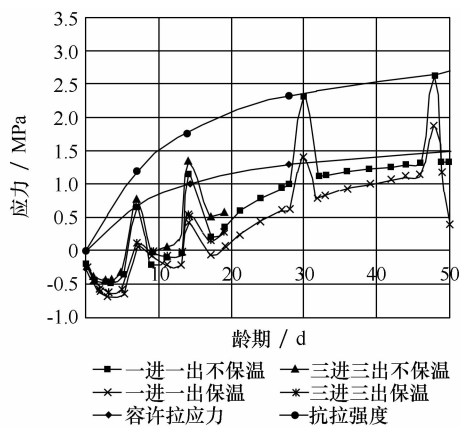


图7 各工况层中表面点长短周期温度荷载叠加温度应力值

基本思想是基于仪器观测资料进行反分析,利用全坝全过程仿真分析,预测预报未来一段时间混凝土坝的应力状态,评估混凝土坝施工期和运行期的工作性态与开裂风险,在条件变化时辅助反馈设计,确保工程安全。

本文结合锦屏一级拱坝的工程应用实践从基本目的、主要内容和模式三个方面阐述了特高拱坝施工期数字监控方法,特高拱坝施工期数字监控的主要目的在于评估施工期大坝工作性态与设计工作状态的差异及其风险、评估施工方案调整的可行性与相应对策,其主要内容包括大坝温度状态监控和大坝应力状态监控,并提出了现场科研团队跟踪反馈仿真、业主与设计进行技术决策、参建各方共同参与的数字监控工作模式。

笔者所在的科研团队在锦屏一级拱坝开展的施工期数字监控工程应用表明,运用特高拱坝施工期数字监控系统,可以实时开展大坝工作性态评估,降低事故风险,同时可以为施工期动态设计提供决策支持。

参考文献:

- [1] DL/T 5346—2006, 混凝土拱坝设计规范[S].
- [2] SL 282—2003, 混凝土拱坝设计规范[S].
- [3] 朱伯芳. 混凝土坝的数字监控[J]. 水利水电技术, 2008, 39(2): 15-18.
- [4] 朱伯芳. 大坝数字监控的作用和设想[J]. 大坝与安全, 2009(6): 8-11.
- [5] 朱伯芳, 张国新, 贾金生, 等. 混凝土坝的数字监控——提高大坝监控水平的新途径[J]. 水力发电学报, 2009, 28(1): 130-136.
- [6] 张国新. 大体积混凝土结构施工期温度场与温度应力分析程序包 SAPTIS 编制说明及用户手册: 中国, 2010SR056988[P].

(责任编辑 陈小敏)