

老混凝土坝防渗加固施工中温度应力仿真分析

王 刚¹,马震岳¹,陈昌林²

(1.大连理工大学土木水利学院,辽宁 大连 116023 ;2.丰满发电厂,吉林 吉林 132108)

摘要 运用大型通用有限元分析软件 ANSYS 对某老混凝土重力坝防渗加固形成防渗心墙施工中的温度场及温度应力进行全过程的仿真分析.计算中考虑了水温、气温、坝体材料分区、坝体切槽、浇筑层尺寸以及混凝土发热率等因素的影响.得出了施工过程中温度场及温度应力的变化规律,新浇混凝土对坝体整体湿度场影响较小,但浇筑坝内的温度和应力都有一定变化,新老混凝土接触处应力发生较大变化,开挖、浇筑施工中温度作用不显著改变坝体整体应力状态,但温度荷载却为产生坝体应力的主要因素.

关键词 防渗加固 温度应力 有限元 仿真计算 混凝土重力坝

中图分类号 :TV131.4 ;TV642.3 文献标识码 :B 文章编号 :1006-7647(2005)06-0063-04

Numerical simulation of thermal stress during construction period of seepage control and reinforcement of aged concrete dams//WANG Gang¹, MA Zhen-yue¹, CHEN Chang-lin² (1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China ;2. Fengman Power Plant, Jilin 132108, China)

Abstract :A numerical simulation of temperature field and thermal stress was carried out for the full process of water-tight core wall construction for reinforcement of an aged concrete dam by use of the universal finite element software ANSYS. The influences of some factors, including the water temperature, air temperature, partitioning of dam body materials, size of concrete lift, and rate of heat generation, were taken into account in the calculation, and the regularities of temperature field and thermal stress during the construction were obtained. The newly poured concrete has little influence on the temperature field of the whole dam body ;however, it results in local variation of temperature and stress in the newly poured concrete block, and the stress in the interface of old and newly poured concrete changes a lot. It is also indicated that the temperature variation has little influence on the stress of the whole dam body during the excavation and concrete pouring process, but the thermal load is the main factor causing the dam stress.

Key words :seepage control and reinforcement ;thermal stress ;finite element ;numerical simulation ;concrete gravity dam

我国某混凝土重力坝已建成运行 60 余年,其间经过多次维修加固和全面系统的加固补强,使大坝混凝土强度偏低、某些部位浇筑质量不好、老化、冻融、渗漏等安全问题得到了一定程度的处理,但一些先天性缺陷和老化混凝土坝的固有问题仍然是影响该坝安全的制约因素.经过长期研究,提出了多种解决方案,其一就是混凝土防渗心墙方案,其基本设想是利用静态切槽或机械切割技术,在靠近大坝上游部位切割一个适当宽度的腔槽,回填具有较好防渗性能的微膨胀混凝土,在原坝体内形成一道混凝土防渗墙.切槽布置在坝轴线下游 9 m 处,切槽开挖一段高程后又回填一段高程,直至形成防渗心墙,达到减小坝体渗透量和降低混凝土防渗墙下游坝体扬压力和浸润线的目的.由于形成防渗心墙需要在坝体内进行开挖、浇筑施工,会直接改变大坝原已平衡的应力分布状况,而且此时大坝仍处于运行状态,因而

必须充分估计开挖、浇筑施工对大坝安全状态的影响.本文研究的重点即是通过三维有限元仿真分析^[1,2],模拟坝体切槽开挖、浇筑施工过程,确定工程施工过程中温度场及温度应力分布的变化规律,为施工方案选择和温控设计提供依据.

1 计算参数

水文与气象资料及混凝土的力学和热学参数,按当地实测数据和试验数据选取,具体如下.

1.1 气温变化

根据当地气温实测资料,利用文献[2]提供的气温计算方法,得出气温年变化的近似计算公式:

T_{a1} = 5.39 + 19.2cos[$\frac{\pi}{6}(t - 6.5)$] (1)

T_{a2} = 5.39 + 19.2cos[$\frac{2\pi}{365}(t - 196)$] (2)

作者简介 王刚(1979—),男,湖北宜都人,硕士研究生,从事水工结构安全性分析和计算机仿真研究.

式(1)用来为计算不同月份的气温变化,式(2)用来计算每天的气温变化,周期均为 1 a.

1.2 水温变化

水库水温采用如下经验公式^[2]：
$$T(y, \tau) = T_m(y) + A(y) \cos \omega(\tau - \tau_0 - \epsilon) \quad (3)$$

式中： y 为水深，m； τ 为时间； $\omega = 2\pi/12$ ，为温度变化的圆频率； $T(y, \tau)$ 为各月不同高程的水温，℃； $T_m(y)$ 为水深 y 处的年平均水温，℃； $A(y)$ 为水深 y 处的温度年变幅，℃； τ_0 为气温最高的时间； ϵ 为水温相位差。

下游水温根据实测各月多年平均水温资料得到。

1.3 坝体混凝土和基岩热力学参数

坝体混凝土和基岩所用力学参数如表 1 所示。

表 1 坝体混凝土和基岩力学参数

部 位	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
原大坝混凝土 C5	9000	0.167	2400
原大坝混凝土 C10	12000	0.167	2400
原大坝混凝土 C15	15000	0.167	2400
原大坝混凝土 C20	26000	0.167	2400
原大坝混凝土 C30	30000	0.167	2400
新浇混凝土	28000	0.167	2400
基 岩	15000	0.167	

混凝土和基岩的热学参数均为：比热容 $c = 1.047 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ ，导热系数 $\lambda = 2.905 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ，放热系数 $\beta = 23.264 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ ，线膨胀系数 $\alpha = 1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。

1.4 新浇混凝土绝热温升

采用与工程实际符合较好的双曲线公式^[2]：

$$\theta(s) = \frac{\theta_0 s}{n + s} \quad (4)$$

式中： $\theta(s)$ 为龄期 s 时的绝热温升，℃； θ_0 为 $s \rightarrow \infty$ 时的最终绝热温升，℃； n 为常数，取为 3.21。

2 计算方法、计算模型及计算工况

2.1 计算方法

2.1.1 仿真模拟方法

本文研究的温度应力仿真分析包括坝体切槽开挖、浇筑施工前坝体初始温度场与温度应力的分析和对施工过程(包括开挖施工与新混凝土浇筑施工，开挖与浇筑施工是一个相互交替、反复进行的过程)的模拟以及施工过程中温度场和温度应力的分析。应用 ANSYS 软件可以仿真模拟坝体施工的整个过程。坝体交替反复的开挖、浇筑施工通过该软件提供的单元“生”“死”操作功能来实现。

2.1.2 准稳定温度场的计算

要计算出施工过程中的温度场及温度应力，需求出施工前初始温度场。这样，就必须计算出施工前

坝体各月温度场(准稳定温度场)的分布^[3]。为此，采用温度场的瞬态分析理论^[2]以月为时间步长，施加以年为周期变化的温度边界条件，计算多年温度场分布，并比较相邻年份同月的温度场分布，如果两者相差在允许范围内，计算结束。在已计算得到的各月温度场基础上，计算坝体内各点的平均温度，从而得出年均温度场。

2.2 计算模型

取该坝某一溢流坝段为研究对象，该坝段坝高 77.7 m，坝宽 18 m，计算时考虑一定范围的地基(上、下游和深度方向各 1 倍坝高)，建立三维整体计算模型。不考虑地基自重。在温度场计算的边界条件中，与水接触的边界视为第一类边界。地基铅直面、地基底面为第二类边界。其余与空气接触的界面视为第三类边界。对于结构应力计算的边界条件，在地基铅直面上施加水平法向单向约束，在其底面施加固定约束。考虑到该坝段坝体的对称性，计算模型仅取半个坝段，对称面上施加对称约束。计算时考虑混凝土分区(按混凝土的标号不同进行划分)。由于大坝运行多年，原坝体材料强度已经稳定，因此，分析过程中未考虑坝体材料的徐变和自生体积变形的影响。有限元网格划分如图 1 所示。

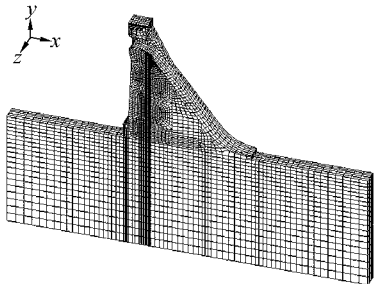


图 1 溢流坝有限元网格

2.3 计算工况

在形成防渗心墙的过程中，需计算一次性切槽多种合理尺寸的方案，限于篇幅，本文对切槽 1.5 m × 5 m(宽 × 高)、1 月 1 日开始施工的工况作详细分析，并列出一些其他工况下的情况作简要的比较说明。计算在正常蓄水位下进行。

仿真过程包括开挖和浇筑两部分，施工进度安排如下：坝体常态混凝土切槽开挖每层层厚 1 m，每层开挖时间为 1 d，开挖完 1 层后间歇 4 d，开挖完 5 层后间歇 7 d 之后，进行混凝土浇筑，浇筑层每层厚也为 1 m，浇筑 1 层需 1 d，1 层浇筑完间歇 4 d，浇筑完 5 层(第一轮施工仅浇筑 3 层，保留 2 m 以便进行混凝土浇筑施工)间歇 7 d。每轮施工都包括坝体老混凝土开挖和新混凝土浇筑两个过程。这样一轮接一轮依次进行开挖、浇筑，直至防渗心墙形成。

3 温度场、温度应力计算及成果分析

3.1 坝体准稳定温度场计算

运用前述温度场瞬态分析理论,计算 10 a 内坝体各月的温度场,即准稳定温度场,在此基础上计算出年均温度场.分析可知 坝体内部的温度场较为稳定,大约 6.1℃,温度梯度很小.坝体表面的温度随外界环境变化非常显著,坝面处的温度梯度也相当大.

3.2 坝体施工期温度场

采用坝体 1 月份的准稳定温度场作为初始温度场,以 1 d 为时间步长,考虑温度场计算的三类边界条件,同时考虑新浇混凝土 10℃ 的浇筑温度,计算得到坝体施工过程中的温度场.第六轮开挖结束,即开挖至 220m 高程时坝段中心剖面的温度场见图 2(a),并将其与原始坝体(坝体未开挖、浇筑施工)相同时刻的温度场作比较.由图 2 可见,切槽开挖、浇筑过程中,新浇混凝土附近温度有所升高,但对整个坝体的整体温度场影响并不大.这表明由于开挖浇筑尺寸相对于整个坝体而言较小,新浇混凝土对原坝体温度场的改变并不显著.

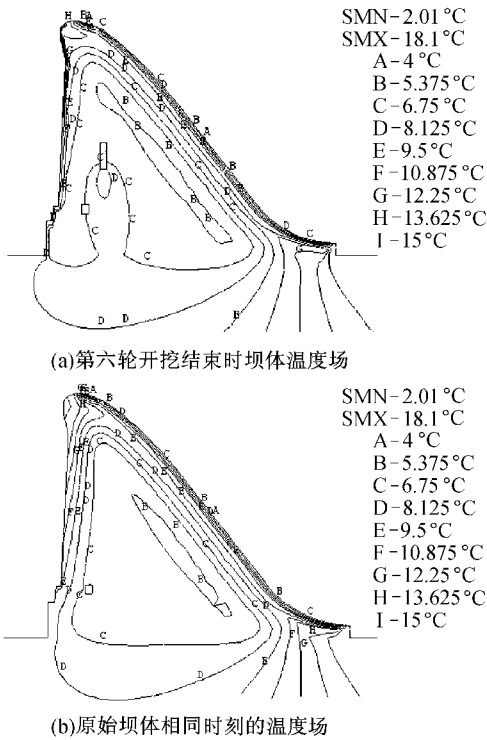


图 2 施工过程中坝体与原始坝体温度场

图 3 给出了第六轮浇筑结束时浇筑块的温度场,并将其与原始温度场同一时刻该处混凝土的温度场进行对比.如图 3 所示,浇筑块浇筑完成时的温度场相对于原始坝体相同时刻的温度场是不同的,浇筑块内的最大温升达 5.76℃,而且,温度等值线的趋势也有所不同.显然,新浇混凝土浇筑块内部温度要高于其外部与老混凝土接触处的温度.

对水化热相关参数进行敏感性分析,发现混凝土发热率(单位时间内发热量)增加会提高浇筑块的温度.对第六轮施工的浇筑块进行具体分析,发现当发热率增加 10%,20%,30%,40% 时,浇筑块内最大温升分别为 6.37℃,6.63℃,6.92℃和 7.21℃.另外,发热率相同时,浇筑层大小不同,浇筑块内温度分布也不尽相同.以槽高 5 m 为例,比较相同浇筑层厚度,不同浇筑层宽度的温度场,当浇筑层大小为 1.5 m×1 m,2.0 m×1 m,2.5 m×1 m 时,整个施工过程中浇筑层内最高温度分别为 10.75℃,12.76℃和 15.23℃.

由此可知,浇筑块的温度随混凝土发热率的增大而增大,因而,施工中采用低热水泥和其他降低水化热的措施是有利的.在层厚一定的情况下,切槽宽度越大,温度升高越明显,因此必须控制好浇筑层的大小.

3.3 坝体施工期温度应力

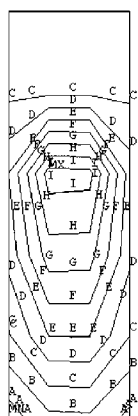
3.3.1 原始坝体温度应力

对整个坝体而言,由于表面温度梯度较大,出现了较大的拉应力,尤其是溢流面顶部和反弧段的拉应力最为显著,因此,1987 年对坝体溢流面的加固工程是很有必要的.而坝体中心区域,由于温度场比较稳定,且温度梯度不大,各向正应力、剪应力及主应力值都比较小,并且可知坝体基本处于压应力状态,主压应力(第三主应力 σ_3)约 0.3 MPa.

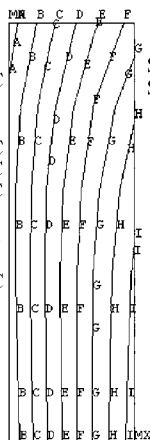
3.3.2 施工过程中温度应力

开挖、浇筑施工过程中,整个坝体温度应力变化不是太大,只是在施工切槽空腔和浇筑块处各向正应力、剪应力和主应力有一定的变化.施工中新老混凝土结合面上的水平正应力 σ_x 和剪应力 σ_{xy} 是值得关注的.就新混凝土浇筑块而言,最大水平正应力值均出现在最上层的浇筑层中心.同时,在新老混凝土结合部位,剪应力发生了很大的变化,尤以切槽靠近上游面处与坝基结合部位剪应力值为最大.图 4 给出了新浇混凝土施工过程中所有浇筑块最大水平正应力(压)和最大剪应力的变化.

由图 4 可知,浇筑块剪应力和水平正应力最大值随施工过程的变化较为平缓,只是在第 214 d(8 月的第二天,完成 20 m 开挖,18 m 浇筑)左右有一定的升高现象.整个施工过程中,新浇混凝土的最大水平正应力 σ_x 和剪应力 σ_{xy} 分别为 2.54 MPa 和 0.814 MPa,两者均满足混凝土材料强度指标.当然,由于新浇筑混凝土水化热温升之后,会出现温度降低,由此引发混凝土收缩,导致新老结合部位产生冷缝.在实际工程中,一般是采用回填低热微膨胀混凝土和内含及外掺 MgO 的混凝土等方法来补偿混凝土



(a)第六轮浇筑结束时
坝体浇筑块的温度场



(b)原始坝体该处相
同时刻的温度场

图3 浇筑块与原始坝体温度场

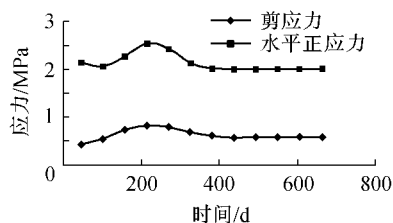


图4 浇筑块施工过程中最大应力变化过程

土的收缩.基于此,本计算未考虑混凝土收缩产生施工裂缝的情况.

3.3.3 综合外力作用下的坝体应力

考虑正常蓄水位下静水压力、坝体自重、扬压力、浪压力、锚索预应力和温度荷载的综合作用,经过计算可知,温度应力是产生坝体内应力的主要因素.此外,通过对大坝切槽开挖部位混凝土施工前后

的应力比较,结合面上温度作用产生的水平正应力和剪应力与原始坝体切槽部位的应力相比要大得多,因此,温度应力是控制开挖、浇筑施工过程中应力状态的关键.

4 结 论

a. 在坝体内切槽浇筑新混凝土形成防渗心墙的施工,相对于整个坝体,施工范围很小,因此,不显著改变坝体原有的温度场和应力场.

b. 在新浇混凝土的浇筑块内,温度和应力都有一定的变化.对于温度场而言,水化热温升会提高混凝土的温度,而且,随着发热率的增加,温度也相应提高,但对坝体整体温度场的影响不明显.切槽宽度不同,即浇筑层尺寸不同时,层内温度也不同,在层厚一定的情况下浇筑层越宽,温度越高.对于应力状态而言,新浇混凝土对整个坝体温度应力的影响不大,只是新老混凝土接触面上的正应力和剪应力有较大变化,是坝内开挖、浇筑施工时需要考虑的关键之处.

c. 温度应力是产生坝体内应力的主要因素,温度应力的仿真成果对混凝土坝的内部施工具有指导意义.

参考文献:

- [1] 曹为民,吴健,閃黎.水闸闸墩温度场及应力场仿真分析[J].河海大学学报(自然科学版),2002,30(5):48—52.
- [2] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].北京:中国电力出版社,1999.
- [3] 刘世鹏.稳定温度场对混凝土坝底孔应力的影响[J].河海大学学报(自然科学版),1998,26(3):61—65.

(收稿日期 2004-09-14 编辑 骆超)

欢迎订阅《水利水电科技进展》

全国中文核心期刊 中国科技核心期刊

全国水利系统优秀期刊 华东地区优秀期刊 江苏省优秀期刊

(邮发代号 28-244, CN32-1439/TV, ISSN1006-7647, 双月刊)

《水利水电科技进展》主要刊登与水科学、水工程、水资源、水环境等学科有关的科技论文,设有水问题论坛、研究探讨、工程技术、专题综述、国外动态、科技简讯等栏目,适合与水科学、水工程、水资源、水环境等有关的科学研究人员、工程技术人员、科技管理人员以及大专院校师生阅读.

《水利水电科技进展》由邮局发行,邮发代号 28-244,2006 年每期定价 8 元,全年 6 期共计 48 元.读者亦可直接向编辑部订阅.欢迎个人和单位直接汇款订阅或函索订单.编辑部地址:210098 南京市西康路 1 号河海大学《水利水电科技进展》编辑部.联系电话 025-83786335, E-mail: jz@hhu.edu.cn, http://kbb.hhu.edu.cn. 汇款时务请注明“订水利水电科技进展”.