

DOI:10.3969/j.issn.1004-4701.2018.02.11

某重力坝溢流坝段施工期温度及应力场仿真分析和温控措施研究

胡国平^{1,2},周清勇^{1,2},洪文浩^{1,2},熊磊¹

(1. 江西省水利科学研究院,江西 南昌 330029;2. 江西省水工安全技术研究中心,江西 南昌 330029)

摘要:大体积混凝土重力坝采用大仓面浇筑,浇筑速度快,混凝土热传导性又差,在硬化过程中将产生温度应力.本文针对混凝土重力坝典型坝段,在给定施工进度条件下,进行施工期的温度场和徐变应力场仿真分析,对大坝浇筑块的温度和应力结果作出综合评价,计算结果可为溢流坝段的温控设计提供有益的参考依据.

关键词:溢流坝段;施工期;温度场;应力场;温控措施

中图分类号:TV652.1⁺1 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-4701(2018)02-0129-05

1 概述

某大坝采用混凝土重力坝型,坝顶高程 257.50 m,坝轴线处坝顶全长 205.00 m,最大坝高 46.00 m,自左至右依次布置为左岸非溢流坝段、溢流坝段、排漂孔坝段、冲砂泄洪底孔坝段和右岸非溢流坝段。溢流坝闸室采用开敞式结构,共 3 孔,布置于河床中部,堰顶高程 241.00 m,单孔净宽 12.00 m,堰体采用 WES 曲线实用堰型。闸墩顺水流方向长 48.00 m,闸墩顶部设有交通桥、门机轨道桥、人行桥、液压管道桥各一座。本分析针对典型坝段,在给定施工进度条件下进行施工期的温度场和徐变应力场仿真计算,推荐合理的施工混凝土温控方案。

2 温度场及温度应力计算原理

2.1 温度场计算原理

为全面反映温度对坝体结构特性的作用与影响,需要研究坝体施工期的温度场、初期蓄水过程中坝体随气温与水温等因素变化的变化温场、运行蓄水期的稳定(准稳定)温度场。根据热量平衡原理,可导出固体热传导基本方程^[1]:

$$\frac{\partial}{\partial x}(a_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(a_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(a_z \frac{\partial T}{\partial z}) + \frac{\omega}{c\rho} - \frac{\partial T}{\partial \tau} = 0 \quad (1)$$

式中: $a_x = \frac{\lambda_x}{c\rho}, a_y = \frac{\lambda_y}{c\rho}, a_z = \frac{\lambda_z}{c\rho}$; a_x, a_y, a_z 为导温

系数, $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ 为导热系数, c 为材料比热, ρ 为材料容重, τ, T 代表叙述任意时间及温度。将求解区域 R 划为有限个单元 Ω_e , 引入单元形函 N_i , 则单元内任意点的温度可由构成单元 m 个节点温度插值:

$$T = \sum_{i=1}^m N_i T_i \quad (2)$$

基于变分理论推导出有限元支配方程:

$$[H] \{T\} + \{F\} = 0 \quad (3)$$

式中: $H_{ij} = \sum h_{ij}^e; F_i = \sum F_i^e$

$$\text{而: } h_{ij}^e = \int_{\Omega_e} [a_x \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + a_y \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + a_z \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z}] d\Omega \quad (4)$$

$$f_i^e = - \int_{\Omega_e} \omega N_i d\Omega + \int_s q N_i \cdot ds \quad (5)$$

2.2 温度应力计算原理

由于混凝土浇筑后弹性模量和徐变度都随时间而变化,可以采用增量法计算。对于此法的变应力作用下混凝土徐变应力的计算^[2],给出了隐式解法,与初应变法相比计算精度大大提高。根据虚功原理,不难导出计算混凝土结构在热、力作用下单元在时段 n 时的温度徐变应力矩阵方程:

$$[K] \{\Delta \delta_n\} = \{\Delta P_n\}^L + \{\Delta P_n\}^C + \{\Delta P_n\}^T + \{\Delta P_n\}^0 + \{\Delta P_n\}^S \quad (6)$$

收稿日期:2017-08-22

作者简介:胡国平(1983-),男,硕士,工程师。

式中: $[K]$ 为整体刚度矩阵; $\{\Delta P_n\}^L$ 、 $\{\Delta P_n\}^C$ 、 $\{\Delta P_n\}^T$ 、 $\{\Delta P_n\}^0$ 、 $\{\Delta P_n\}^S$ 分别为外荷载、徐变、温度、自身体积变形和干缩引起的结点荷载增量。

求出 $\{\Delta \delta_n\}$ 后, 结构应力易于求得。

徐变度计算:

$$C(t, \tau) = \sum_{s=1}^n \psi_s(\tau) [1 - e^{-r_s(t-\tau)}]; \{\eta_n\} = \sum_s (1 - e^{-r_s \Delta \tau_n}) \{\omega_{sn}\} \quad (7)$$

逐时段累加后, 得到各个单元 τ_n 时刻的应力为:

$$\{\sigma_n\} = \sum \{\Delta \sigma_n\} \quad (8)$$

3 设计温控措施和温控标准

3.1 混凝土主要浇筑温控措施

3.1.1 混凝土浇筑上升方式及浇筑温度

从加快混凝土施工进度, 简化温控措施角度出发, 考虑坝体埋水管冷却措施, 优先考虑预冷骨料、加冰拌和等措施控制混凝土浇筑温度, 实现控制坝体温度应力的目的。混凝土采用自然入仓, 不专门采用保温和通水

措施。

3.1.2 坝体混凝土初步分析采用施工进度计划

坝体混凝土浇筑施工按施工进度计划进行, 每个坝段采取通仓浇筑, 基础约束区(0.2~0.4 L, L为浇筑块长边尺寸)采用浇筑层厚 1.50 m, 间歇 5 d; 脱离约束区采用浇筑层厚 2.80 m, 间歇 6 d。根据溢流坝段(排漂孔坝段、冲沙泄洪底孔坝段)的断面结构, 223.50 m 高程以下为基础约束区, 约束区高 10.50 m, 分 7 层浇筑, 每层厚 1.50 m, 平均每 8 d 浇筑一层, 需 56 d, 223.50~237.50 m 分 5 层浇筑, 每层厚 2.80 m, 平均每 9 d 浇筑一层, 需 45 d, 浇筑至 237.50 m 高程需 101 d。

3.2 混凝土温控标准

为了研究初步可行的温控措施, 需要依据具体材料热力学特性分析温度及温度应力, 从而确定初步的温差控制标准。经分析, 在安全系数取为 1.8 时, 对溢流坝段通仓浇筑时基础允许温差强约束区 0~0.2 L 内部混凝土 16℃, 0.2~0.4 L 为 19℃。表 1 为根据各标号混凝土不同龄期的弹性模量以及相应的极限拉伸值, 计算出的溢流坝混凝土的允许拉应力。

表 1 溢流坝混凝土施工期容许温度应力

项目	极限拉伸值/ $(\varepsilon_p \times 10^{-6})$		抗拉弹模/ (10^4 MPa)		允许应力/MPa	
	7 d	28 d	7 d	28 d	7 d	28 d
C ₉₀ 15 W ₉₀ 6	65.2	77.1	1.82	2.46	0.72	1.21
C ₉₀ 20 W ₉₀ 6	70.5	82.3	2.32	2.61	1.00	1.41

4 仿真分析计算处理

4.1 溢流坝段混凝土浇筑模拟

溢流坝体型随混凝土分层浇筑的同时亦在不断变化, 在仿真分析时采用生死单元进行定义, 根据整体建立的模型, 依据溢流坝体混凝土实际进度而依次激活单元, 相应的各种荷载同步施加, 这样就可以仿真计算溢流坝体从施工期到运行期全过程的温度场和应力场。为使死单元不影响计算收敛及激活单元的计算结果, 在温度场分析中, 将比热矩阵和热传导矩阵乘以一个因子, 且单元热通量设置为 0。

4.2 温度初始条件

溢流坝体新浇筑混凝土为浇筑温度, 新老混凝土交界处采用新老混凝土层的温度平均值。

4.3 边界条件

地基模型上下游侧及底部为绝热边界条件处理。溢流坝上游面跟库水相接触边界为第一类边界条件, 取河水温度(时间函数), 空气接触边界采用第三类边界。

4.4 水化热

水化热以体积力的形式施加在混凝土单元上, 实际计算时取前后两个时间步的水化热之差, 并视坝体混凝土材料分区不同而作相应的拟合处理。

4.5 混凝土热力学性能

在仿真分析计算应力时, 导温、导热及线膨胀系数采用试验值, 抗拉弹模根据实验数据拟合指数(时间函数), C₉₀15 及 C₉₀20 徐变度参照类似工程经验, 采用朱伯芳院士提出相关函数拟合。

4.6 初始地应力

考虑到初始地应力状态下, 基岩基本上处于弹性状

态,为了简化,可直接采用现有河谷形状的基岩在自重作用下产生的应力作为初始地应力。

5 溢流坝段施工期温度及应力场仿真分析

溢流坝体稳定温度场及应力场三维计算网格如图1、图2所示,其中建基面高程以下基岩厚度约1.5倍坝

高,坝轴线上下游侧顺河向范围约1.5倍坝高^[3]。共离散为9 290个节点和7 048个单元,采用空间8节点等参实体单元。

由施工期最高温度包络线图3可知,在溢流坝上部出现一个高温区,主要是该区域浇注温度相对较高,溢流坝的最高温度达到47.4℃。分析选取了典型部位的节点进行温度和应力分析,节点选取见图4。

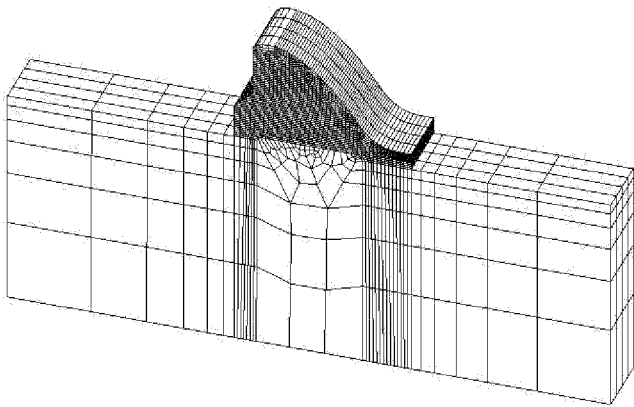


图1 溢流坝段整体有限元计算网格

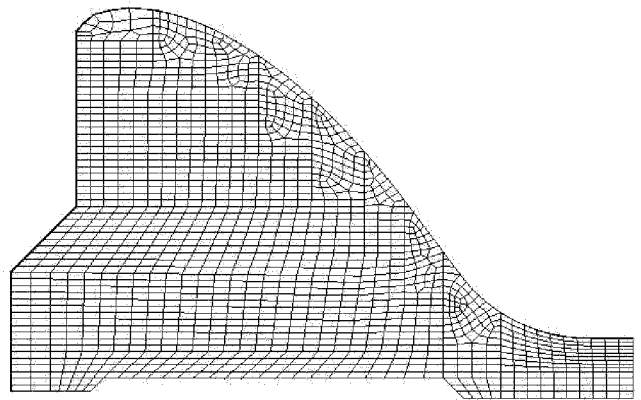


图2 溢流坝段坝体有限元网格

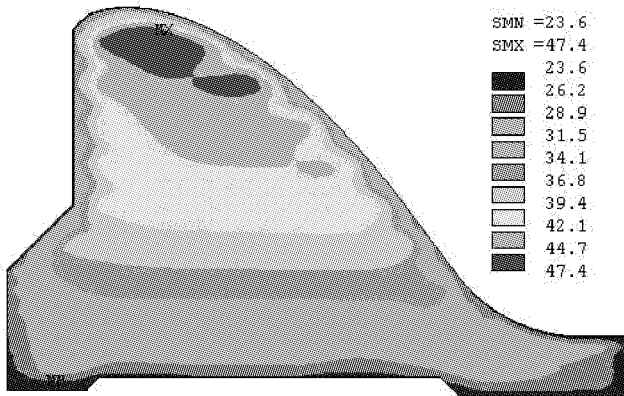


图3 施工期最高温度包络线图

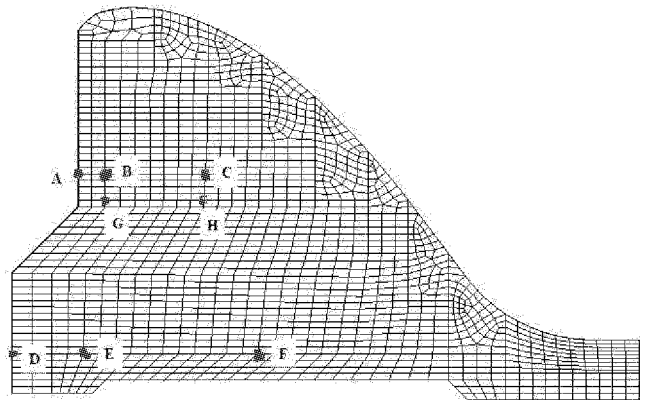


图4 节点选取示意图

典型高程温度历时曲线见图5~7中的典型部位温度历时曲线。从图中可以看出,溢流坝体的表面在浇注后温度略有上升,迅速与气温达到一致。溢流坝体中心部位在混凝土浇注后,温度上升存在很长一段时间。溢流坝中心混凝土,在基础约束部位,在浇注50 d后达到最高温度,溢流坝体上部在20 d左右后达到最高温度,然后由于水化热速度降低,随着坝体表面的散热,温度逐渐下降。从图中可以看出,溢流坝体中心部位的温度受到外界环境的温度影响较小。

溢流坝顺河向应力包络线、横河向应力包络线及其

坝体沿高程分布图8~10。从图中可以看出在溢流坝体底部垫层出现较大的应力,主要是由于浇注的混凝土受到地基的强烈的约束所致,最大拉应力达到1.09 MPa,小于允许应力。在溢流坝的挑流圆弧部位出现了较大应力,应加强布设钢筋,以防开裂。

溢流坝体中心部位顺河向应力、上游表面横河向应力历时曲线见图11~12,可知溢流坝新老混凝土因互相约束,局部层面产生较大拉应力。坝面新浇混凝土在最初迅速达到应力最大值,在水泥水化热及外界环境温度交换影响下,产生拉应力区,但小于允许应力,后随环

境温度逐渐升高,受到膨胀约束,局部产生压应力区,在

夏季高温时尤其明显。

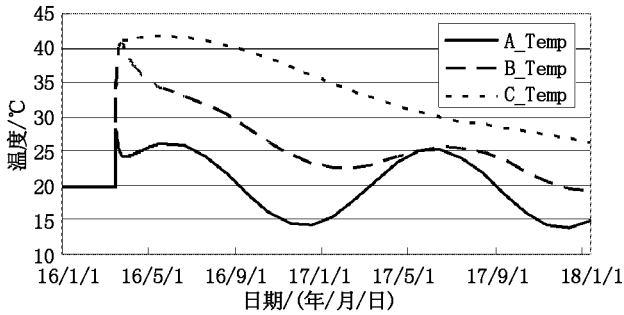


图5 典型部位温度历时曲线(1)

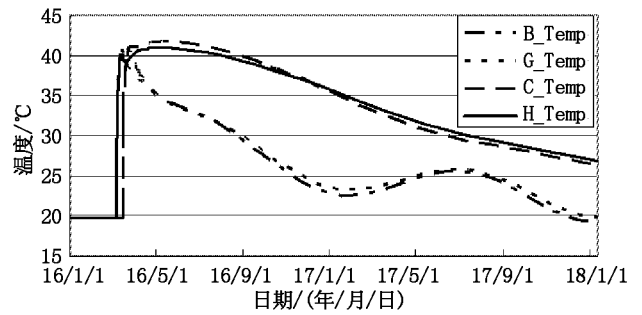


图6 典型部位温度历时曲线(2)

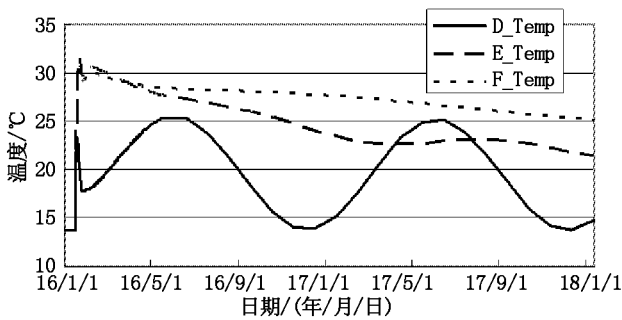


图7 典型部位温度历时曲线(3)

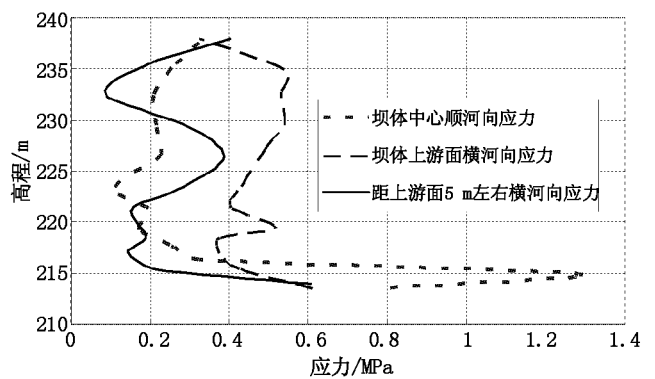


图8 溢流坝段应力图

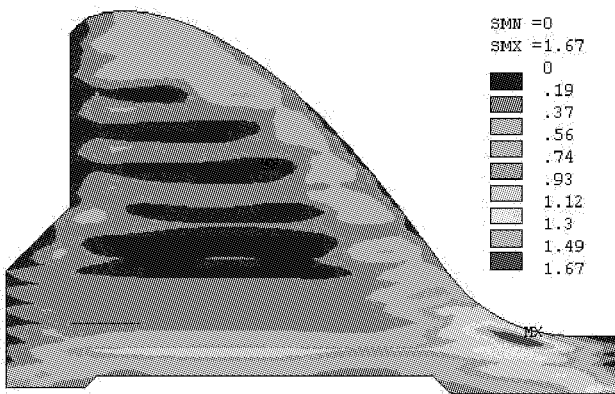


图9 施工期顺河向应力包络线图

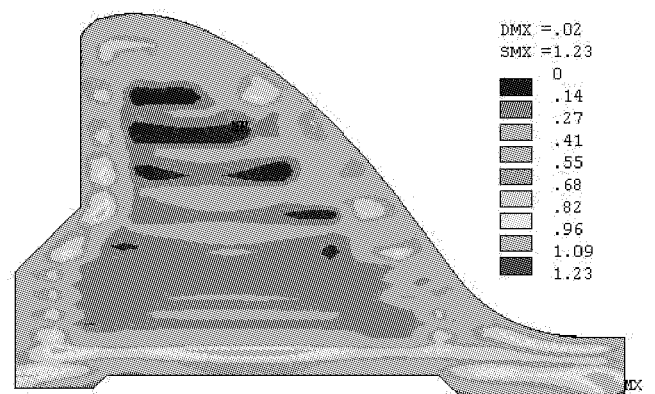


图10 施工期横河向主应力包络线图

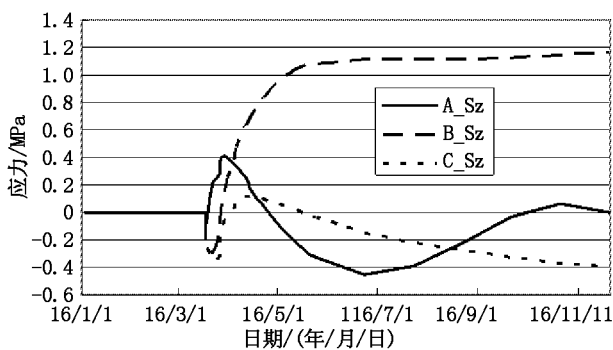


图11 典型部位横河向应力历时曲线

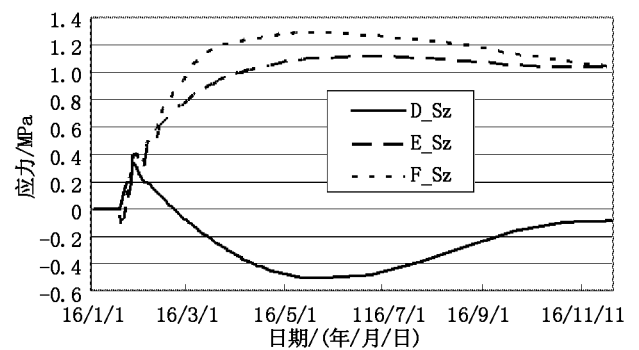


图12 典型部位顺河向应力历时曲线

距溢流坝面相近部位,因绝热温升较大且散热条件差,达到温度峰值,后随坝面热交换,温度逐渐降低,但同时溢流坝中心部位混凝土因散热慢,温度仍较高,因此极易出现较大温度梯度变化,在温差及周围混凝土约束条件下,距溢流坝面相近部位混凝土产生较大的拉应力区,受环境温度及溢流坝面混凝土热胀冷缩双重影响下,该拉应力一直维持较高值,导致在坝体中下部的距溢流坝面相近部位和坝体上部的中心部位出现了较大的应力。从上下相邻部位的温度历时曲线可以看出,上下两个浇注层的温差不是产生拉应力的主要原因。坝体的各区域混凝土的应力结果见表2。

表2 溢流坝段施工期应力结果 MPa

混凝土 坝体区域	C15		C20	
	0~0.2 L	0.2~0.4 L	0~0.2 L	0.2~0.4 L
顺河向应力	0.88	1.00	1.32	0.79
横河向应力	0.90	1.12	1.29	1.16
允许应力	1.20	1.20	1.40	1.40

注:允许应力取为龄期28 d的允许应力。

6 结 语

从仿真计算结果可以看出,溢流坝各个部位应力大部分小于允许应力,局部略大于允许应力。夏季在距离表面5 m左右的部位会产生应力,但应力小于允许应力,冬季表面产生的应力相对较小。坝体基础垫层由于受到地基的约束,产生了较大拉应力,但小于允许应力。坝体由于相对较小,基于仿真分析结果可不需专门采取通水和保温等温控设计措施,亦能满足工程要求。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 吴桐舟. 混凝土徐变对坝体温度应力场的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2016(4): 147~151.
- [3] 吕文丽. 碾压混凝土重力坝整体三维仿真分析[J]. 水利规划与设计, 2011(3): 40~43.

编辑: 张绍付

Simulation analysis of temperature stress field and temperature control measures in construction period of a gravity dam

HU Guoping^{1,2}, ZHOU Qingyong^{1,2}, HONG Wenhao^{1,2}, XIONG Lei¹

(1. Jiangxi Institute of Water Sciences, Nanchang 330029, China;

2. Jiangxi Engineering Technology Research Center on Hydraulic Structures, Nanchang 330029, China)

Abstract: Mass concrete gravity dam is poured with large cabin, pouring speed, the thermal conductivity of concrete is poor, the hardening process will produce temperature stress. For typical dam sections in this paper, under the given condition of the construction progress, was analyzed through simulation analysis of temperature field and creep stress field during construction period, comprehensive evaluation of the temperature and stress results of the dam block was done, the calculation results can provide a useful reference for the temperature control design of the overflow dam section.

Key words: Overflow dam section; Construction period; Temperature field; Stress field; Temperature control measures

翻译: 胡国平