

水电站厂房坝段温度场和热应力仿真研究

丁陆军^{1,3}, 张晓飞², 李守义², 张 栋²

(1. 四川大学水电学院, 四川 成都 610065; 2. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048;
3. 四川建筑职业技术学院, 四川 德阳 618000)

摘 要: 本文模拟了水电站厂房混凝土施工过程, 即考虑混凝土热力学参数随龄期的变化, 采用三维有限单元法进行了温度场和热应力仿真计算研究。结果表明: 若对低温季节浇筑的部位, 采取自然入仓浇筑方式, 高温季节浇筑的部位, 采取控制浇筑温度和采用天然河水冷却的措施, 最高温度和最大热应力均可满足规范要求。研究成果可为有关厂房坝段的设计、施工和温度控制提供参考。

关键词: 厂房坝段; 温度场; 热应力; 三维有限元法; 施工过程

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2016.10.002

中图分类号: TV315

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2016)10-0006-04

Simulative study on temperature field and thermal stress of powerhouse dam section of hydropower station

DING Lujun^{1,3}, ZHANG Xiaofei², LI Shouyi², ZHANG Dong²

(1. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;

2. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China;

3. Sichuan College of Architectural Technology, Deyang 618000, Sichuan, China)

Abstract: The construction process of the powerhouse dam section of a hydropower station is simulated herein, i. e. the simulative calculation on the temperature field and thermal stress is studied with 3-D finite element method under the consideration of the change of the concrete thermal parameters along with its age. The result shows that if the natural placement of concrete is adopted for the placing location in the cold season and the measures of controlling placing temperature or cooling with the natural river water are applied to the placing location in the hot season, both the maximum temperature and the maximum thermal stress can meet the requirements of the relevant specification. The study result can provide some references for the design, construction and temperature control of the powerhouse dam section concerned.

Key words: powerhouse dam section; temperature field; thermal stress; 3-D finite element method; construction process

大体积混凝土结构广泛应用于水利水电工程中, 尤其是混凝土坝建设。混凝土内部水化热温升导致混凝土中产生温度应力裂缝, 进而破坏结构的整体性, 使混凝土的耐久性能下降, 甚至危及建筑物的安全。因此, 需要采取温控防裂措施解决混凝土内部水化热温升问题^[1,2]。而温度控制和温度裂缝问题长期困扰着工程建设人员。从 20 世纪 30 年代开始^[3], 国内外众多学者进行了温控防裂的理论探讨, 并采取了一系列如改善混凝土抗裂性能、分缝分块、水管冷却、预冷骨料、表面保温等防裂措施。本文采用三维有限元

法, 模拟水电站厂房施工过程进行温控仿真研究, 提出合理可行的温控措施。

1 工程概况

某水电站工程以发电为主, 装机容量为 420 MW,

收稿日期: 2015-11-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479168); 四川省科技计划项目(2015 JY0035)。

作者简介: 丁陆军(1975—), 男, 副教授。

表 1 坝址区多年月平均气温 ℃

月 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	全 年
气 温	7.47	8.83	11.43	14.43	18.98	21.35	22.68	21.8	20.5	16.15	10.93	8.05	15.21

最大坝高 79.6 m，坝顶高程 1 820.5 m，坝顶长度 346.4 m。混凝土总量 116.40 万 m³。厂房坝段体积大，结构形式复杂，考虑到大坝安全和温控措施的选择，进行温度场及温度应力仿真研究，为工程设计和施工提供参考依据。

2 计算原理

在计算域 R 内任一点，非稳定温度场 $T(x, y, z, \tau)$ 需满足热传导方程

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \tag{1}$$

式中， α 为导温系数； θ 为混凝土的绝热温升。

混凝土在复杂应力状态下的应变增量 $\Delta \varepsilon_n$ 包括弹性应变增量、徐变应变增量、温度应变增量、干缩应变增量和自生体积变形增量，因此有

$$\Delta \varepsilon_n = \Delta \varepsilon_n^e + \Delta \varepsilon_n^c + \Delta \varepsilon_n^T + \Delta \varepsilon_n^s + \Delta \varepsilon_n^0 \tag{2}$$

式中， $\Delta \varepsilon_n^e$ 为弹性应变增量； $\Delta \varepsilon_n^c$ 为徐变应变增量； $\Delta \varepsilon_n^T$ 为温度应变增量； $\Delta \varepsilon_n^s$ 为干缩应变增量； $\Delta \varepsilon_n^0$ 为自生体积应变增量。温度场和应力场有限元方法参见文献 [4]。

3 计算参数及有限元模型

3.1 计算参数

工程所在地多年月平均最高气温为 22.68 ℃，多年月平均最低气温为 7.47 ℃，多年平均气温为 15.21 ℃。坝址区多年月平均气温如表 1 所列，施工进度如表 2 所列，混凝土热力学参数如表 3 所列。

3.2 有限元计算模型

厂房坝段计算模型均为坝体在坝轴线方向取横缝之间的整个坝段。整体坐标系的坐标原点在坝段左侧坝踵处。坝轴线指向右岸为 x 轴正向，下游方向为 y 轴正向，铅直向上为 z 轴正向。计算模型在坝基深度方向取 100 m，上游方向取 100 m，下游方向也取 100 m。

表 3 大坝混凝土热力学参数

混凝土	线膨胀系数 /℃	导温系数 /m ² ·h ⁻¹	比热 /kJ·(kg·℃) ⁻¹	导热系数 /kJ·(m·h·℃) ⁻¹	水化热温升 /℃
垫层常态	5.8	0.003 13	0.992 20	7.280	$T = \frac{29.617(t^{0.907} - 0.46)}{0.40 + t^{0.907}}$
大坝常态	5.75	0.003 18	0.990 35	7.395	$T = \frac{32.05 \cdot \tau}{2.15 + \tau}$

表 2 水电站厂房坝段上游侧施工进度

序 号	开始施工时间/年-月-日	起始高程/m	终止高程/m
1	2015-06-01	1 742.9	1 744.0
2	2015-06-20	1 744.0	1 746.5
3	2015-06-20~2015-07-20	固结灌浆 肘管安装	
4	2015-07-20~2015-08-20		
5	2015-09-10~2016-01-10	1 746.5	1 763.0
6	2016-01-30~2016-03-10	1 763.0	1 772.0
7	2016-03-10~2016-04-30	锥管安装及二期混凝土、蜗壳	
8	2016-05-20	1 772.0	1 774.4
9	2016-06-10~2017-02-28	1 774.4	1 820.5

注：其向下游机组段、尾水平台段开始施工时间以此推后 20 d。

温度场计算中边界条件的选取^[5]：地基地面和 4 个侧面以及坝段横缝面为绝热边界，坝体上下游面在水位以上为固~气边界，水位以下为固~水边界。固~气边界按第三类边界条件处理，固~水边界按第一类边界条件处理。应力场计算中边界条件的选取^[6]：地基地面按固定支座处理，地基在上下游方向按 y 向简支处理，其余为自由边界。厂房坝段计算模型如图 1 所示。

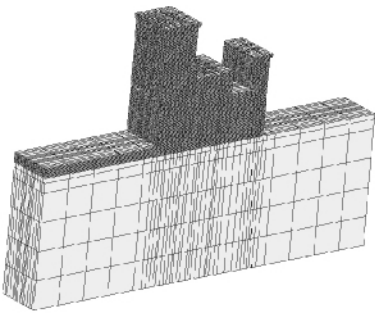


图 1 厂房坝段计算模型

4 计算方案

厂房坝段的坝基面高程为 1 742.9 m，坝顶高程为 1 820.5 m，坝高 77.6 m，坝段长度为 28.6 m，坝底宽度为 76.0 m。上游测混凝土的开浇时间为 2015 年 6 月 1 日，至 2017 年 2 月 28 日达到设计高程 1 820.5 m 高程。下游机组段、尾水平台段开始施工时间以此推后 20 d。对 5~9 月浇筑的部位采取通水冷却措施，

水管间距 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ ，通水温度为当月河水温度，通水时间为 15 d ，单根冷却水管长度为 250 m 。计算采取 3 种浇筑温度方案，各方案浇筑温度如表 4 所列。

表 4 厂房坝段各方案浇筑温度 $^{\circ}\text{C}$

计算方案	浇筑温度	
	约束区	非约束区
1	$T_p = 18$	$T_p = 20$
2	$T_p = 20$	$T_p = 22$
3	$T_p = 22$	$T_p = 24$

5 温度控制标准及温度场计算结果分析

5.1 温度控制标准

大体积混凝土施工过程中水泥水化热温升高，控制混凝土浇筑温度和内部最高温度是大坝温控防裂的关键问题^[7-8]，尤其是强约束区和弱约束区的最高温度。厂房坝段不同部位大体积混凝土最高允许温度如表 5 所列。

表 5 厂房坝段不同部位最高允许温度值

部位			控制最高温度/ $^{\circ}\text{C}$		
			11~3月	4、10月	5~9月
厂房坝段	常态混凝土	1 742.9~1 763.0 m	28~30	32~34	36
		1 763.0~1 774.4 m	28~30	32~34	38
		1 774.4 m 以上	28~30	32~34	38

5.2 非稳定温度场计算结果分析

影响温度场的主要因素有：施工进度安排、浇筑温度、浇筑层厚、混凝土的绝热温升随龄期的变化、外界气温随时间的变化、分期蓄水、层间间歇、寒潮降温、表面保温、通水冷却等因素，尤其是混凝土的绝热温升。论文模拟水电站厂房的施工过程进行了温度场仿真研究，方案 1、方案 2 和方案 3 在 2016 年 5 月 20 日温度等值线图如图 2~4 所示，以反映不同时刻厂房温度场的分布情况。不同区域最高温度如表 6 所列。

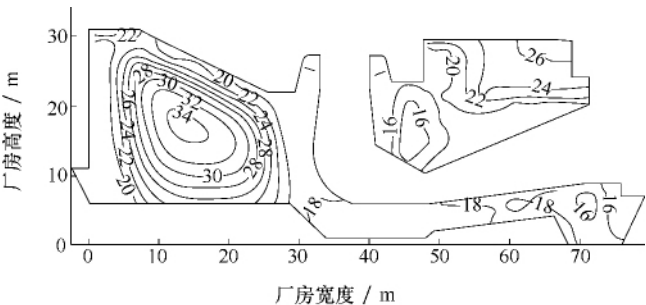


图 2 方案 1 2016 年 5 月 20 日温度等值线(单位： $^{\circ}\text{C}$)

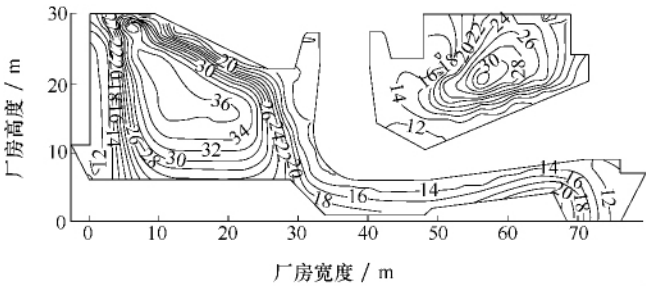


图 3 方案 2 2016 年 5 月 20 日温度等值线(单位： $^{\circ}\text{C}$)

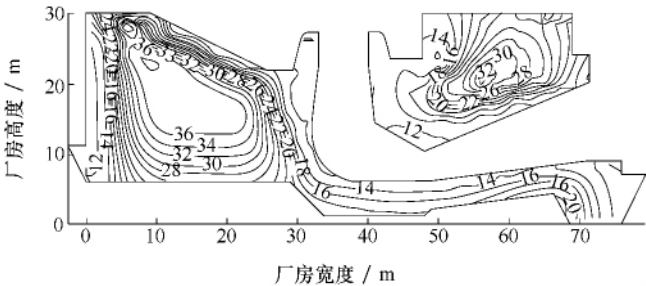


图 4 方案 3 2016 年 5 月 20 日温度等值线(单位： $^{\circ}\text{C}$)

表 6 厂房坝段各方案不同区域在不同月份的最高温度和允许温度

计算方案	最高温度和允许温度	部 位		
		1 742.9 ~ 1 763.0 m	1 763.0 ~ 1 774.4 m	1 774.4 m 以上
方案 1	最高温度/ $^{\circ}\text{C}$	35.86	38.40	36.20
方案 2	最高温度/ $^{\circ}\text{C}$	37.24	40.20	37.70
方案 3	最高温度/ $^{\circ}\text{C}$	38.63	42.10	39.10
允许最高温度/ $^{\circ}\text{C}$		36.00	38.00	38.00

从计算结果可以看出：

(1)在高程 $1\,742.9 \sim 1\,763.0\text{ m}$ 范围内，方案 1 最高温度为 $35.86\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，小于该部位允许温度 $36.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；方案 2 最高温度为 $37.24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，方案 3 为 $38.63\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，均大于允许最高温度。

(2)在高程 $1\,763.0 \sim 1\,774.4\text{ m}$ 范围内，方案 1 最高温度为 $38.40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，与该部位允许温度 $38.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 基本接近；方案 2 最高温度为 $40.20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，方案 3 为 $42.10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，均大于该部位允许最高温度。

(3)在高程 $1\,774.4 \sim 1\,820.5\text{ m}$ 范围内，方案 1 最高温度为 $36.20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，方案 2 最高温度为 $37.70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，均小于该部位允许最高温度 $38.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；方案 3 最高温度为 $39.10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，大于该部位允许最高温度。

(4)坝体内部最高温度达到准稳定温度需要漫长过程，温度场计算结果表明：坝体的最高温度出现在施工期内。运行期，坝体与周围环境进行热交换，坝体内最高温度逐渐减小。运行 30 年左右，坝体内部

温度基本趋于准稳定温度场。

6 温度应力计算结果分析

影响应力场的主要因素有弹性模量、徐变度和自生体积变形等因素。厂房坝段方案1、方案2和方案3在2017年1月20日温度应力等值线图如图5~7所示。

从计算成果可以看出:方案1最大应力为1.55 MPa,方案2为1.71 MPa,方案3为1.83 MPa。方案1混凝土浇筑温度较低,最大应力也较小。

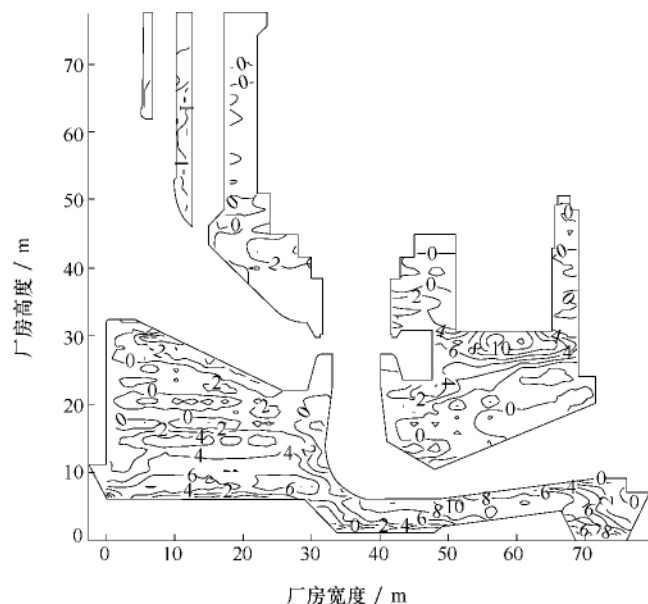


图5 方案1 2017年1月20日温度应力等值线
(单位: MPa)

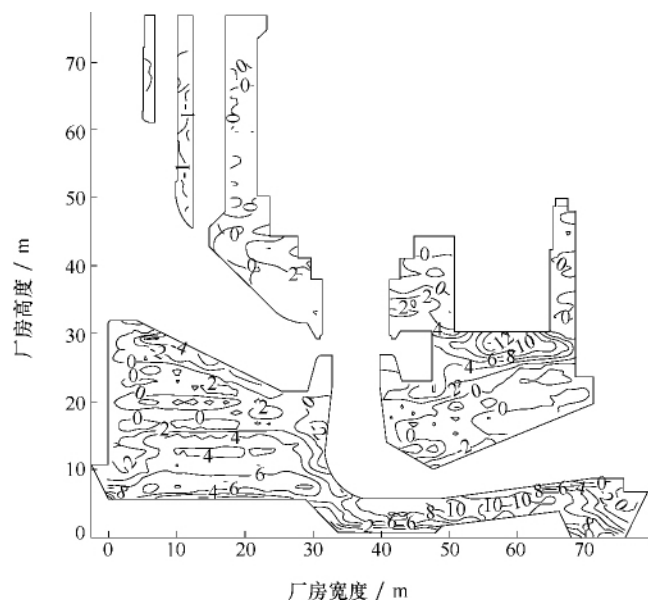


图6 方案2 2017年1月20日温度应力等值线
(单位: MPa)

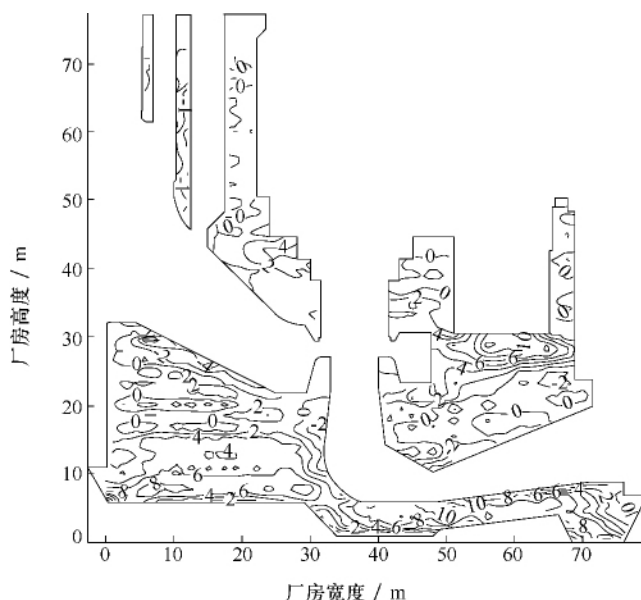


图7 方案3 2017年1月20日温度应力等值线
(单位: MPa)

7 结 论

论文采用三维有限元法模拟水电站厂房施工过程,进行温控仿真计算研究,结果表明:方案1的最高温度和最大应力均满足要求。因此,对于高程1 742.9~1 774.4 m范围内混凝土,浇筑温度宜小于等于18℃;高程1 774.4~1 820.5 m范围内混凝土,浇筑温度宜小于等于20℃,同时需要对高温季节浇筑的部位采取通水冷却措施,其他月份采取自然入仓浇筑方式。研究成果对该工程的设计、施工和温控措施选取提供了参考依据。

参考文献:

- [1] 陈志远,谭恺炎,王振振,等.大体积混凝土冷却通水智能控制方法的应用[J].水力发电,2014,40(7):57-59,66.
- [2] 林鹏,胡杭,郑东,等.大体积混凝土真实温度场演化规律试验[J].清华大学学报(自然科学版),2015,55(1):27-32.
- [3] 林鹏,李庆斌,周绍武,等.大体积混凝土通水冷却智能温控控制方法与系统[J].水利学报,2013(8):950-957.
- [4] 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.
- [5] 李守义,张金凯,张晓飞.碾压混凝土坝温度应力仿真计算研究[M].北京:中国水利水电出版社,2010.
- [6] 张晓飞,李守义,陈尧隆.碾压混凝土拱坝温度场计算的浮动网格法[J].土木工程学报,2006(2):126-129.
- [7] 陈乔.向家坝水电站抗冲耐磨混凝土温控防裂措施探讨[J].人民长江,2015(2):101-103.
- [8] 葛畅,舒光胜,王等.小湾电站大坝混凝土内部温控效果分析[J].人民长江,2009,40(13):25-27.

(责任编辑 韩丽宇)