

# 水电站厂房大体积混凝土温度应力分析与防裂措施

丁兵勇<sup>1</sup>, 杨忠良<sup>1</sup>, 唐瑜莲<sup>2</sup>, 陈守开<sup>3</sup>, 安晓伟<sup>3</sup>

(1. 华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 310014; 2. 浙江省水利水电技术咨询中心, 杭州 310020;  
3. 华北水利水电大学 水利学院, 郑州 450045)

**摘要:** 针对厂房混凝土结构施工期易开裂的问题, 采用三维非稳定温度场及应力场的有限元计算方法, 对某水电站厂房下部大体积混凝土结构的施工全过程进行数值模拟, 揭示其温度场及应力场的发展过程和分布规律, 并根据计算结果提出切实可行的温控防裂措施。经分析发现, 在低温入仓的基础上, 采取表面保温和内部导热降温相结合的温控防裂措施, 可有效降低混凝土早期的内外温差和后期的温降幅度, 从而提高厂房混凝土的抗裂安全性。

**关键词:** 水电站厂房; 大体积混凝土; 有限元; 温度应力; 温控防裂

**中图分类号:** TU 755 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)02-0362-04

## Analysis of thermal stresses and crack control measures in mass concrete of hydropower station powerhouse

DING Bing yong<sup>1</sup>, YANG Zhong liang<sup>1</sup>, TANG Yu lian<sup>2</sup>, CHEN Shou kai<sup>3</sup>, AN Xiaowei<sup>3</sup>

(1. Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 310014, China;

2. Zhejiang Water Conservancy and Hydroelectric power Consulting Center, Hangzhou 310020, China;

3. School of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

**Abstract:** The concrete structure of hydropower station powerhouse can easily crack during the construction period. In this paper, three dimensional finite element method with unsteady temperature and stress field was used to simulate the whole construction process of the under part concrete structure of a hydropower station powerhouse. The development process and distribution regularity of the temperature field and stress field were obtained, and the feasible temperature control and crack prevention methods were proposed according to the computation results. The analysis showed that on the basis of low temperature before concrete pouring, temperature control and crack prevention measures with surface heat preservation and internal heat conduction can effectively decrease the temperature difference between the internal and external early age concrete, and also decrease the temperature amplitude of later age concrete, which can improve the safety against cracking of the powerhouse concrete.

**Key words:** hydropower station powerhouse; mass concrete; finite element method; thermal stresses; temperature control and crack prevention

水电站厂房下部是一个形状复杂、体积庞大的大跨度厚壁空腔混凝土结构, 受其自身和周围介质温度、湿度变化的影响, 以及基岩的约束作用, 往往在不同部位产生较大的温度应力, 进而导致混凝土产生裂缝。如不有效控制混凝土裂缝的产生, 将破坏厂房下部结构的整体性, 缩短其使用寿命, 甚至改变其结构的受力状态, 影响建筑物安全。

本文采用混凝土非稳定温度场及应力场的有限元计算方法, 依据混凝土材料热力学性能试验的研究成果, 对某水

电站厂房下部混凝土结构施工期的温度场及应力场进行仿真计算分析, 并基于分析成果提出切实可行的温控防裂措施, 进而有效控制混凝土温度裂缝的产生, 为水电站厂房下部结构混凝土的温控设计和施工提供参考。

## 1 计算原理及方法

### 1.1 非稳定温度场计算原理及方法

在混凝土计算域  $R$  内任意一点处, 非稳定温度场

收稿日期: 2014-07-20 修回日期: 2014-10-01 网络出版时间: 2014-03-19  
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150319.0931.008.html>  
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51109081; 51309101)  
作者简介: 丁兵勇(1982-), 男, 安徽合肥人, 工程师, 主要从事水工结构设计研究工作。E-mail: ding\_by@ecidi.com  
通讯作者: 陈守开(1980-), 男, 浙江苍南人, 副教授, 博士, 主要从事水工混凝土结构仿真研究。E-mail: man200177@163.com

$T(x, y, z, \tau)$  需满足热传导方程:

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

式中:  $T$  为温度(°C);  $a$  为导热系数( $\text{m}^2/\text{h}$ ),  $\theta$  为绝热温升(°C);  $\tau$  为时间(h)。温度场有限元计算方法见文献[1]。

### 1.2 水管冷却问题的处理

文献[1]中给出了一套近似解法,即把冷却水管看成负热源,在平均意义上考虑水管冷却效果,可得混凝土等效热传导方程:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + (T_0 - T_w) \frac{\partial \phi}{\partial \tau} + \theta_0 \frac{\partial \phi}{\partial \tau} \quad (2)$$

式中:  $T_0$  为混凝土初温(°C);  $T_w$  为冷却水温度(°C);  $\phi$  为考虑初始温差影响的函数(°C);  $\phi$  为考虑混凝土绝热温升影响的函数(°C)。

### 1.3 应力场计算原理及方法

混凝土在复杂应力状态下的应变增量包括弹性应变增量、徐变应变增量、温度应变增量、干缩应变增量和自生体积应变增量,因此有

$$\{\Delta \epsilon_n\} = \{\Delta \epsilon_n^e\} + \{\Delta \epsilon_n^c\} + \{\Delta \epsilon_n^T\} + \{\Delta \epsilon_n^S\} + \{\Delta \epsilon_n^D\} \quad (3)$$

式中:  $\{\Delta \epsilon_n^e\}$  为弹性应变增量;  $\{\Delta \epsilon_n^c\}$  为徐变应变增量;  $\{\Delta \epsilon_n^T\}$  为温度应变增量;  $\{\Delta \epsilon_n^S\}$  为干缩应变增量;  $\{\Delta \epsilon_n^D\}$  为自生体积应

变增量。应力场有限元计算方法见文献[1]。

## 2 计算模型和参数

### 2.1 计算模型

本文选取某水电站厂房标准机组段的下部混凝土结构,上下游方向长 85.4 m,宽 30 m,高 33.3 m。有限元计算分析模型(图 1)中地基在上下游和深度方向各延伸一倍混凝土结构高度。模型总共设 18 个浇筑层,约束区层厚 1~2 m,非约束区层厚 2~3 m,每层内又划分 2~6 个浇筑块。

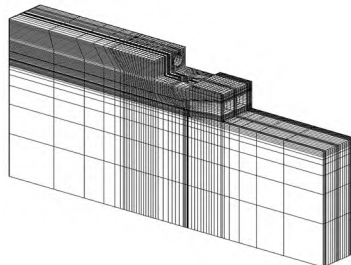


图 1 有限元计算模型

Fig. 1 The finite element calculation model

### 2.2 主要计算参数

工程区多年月平均气温统计见表 1。

表 1 多年月平均气温统计

Tab. 1 Monthly average temperature

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年均
平均气温(°C)	7.8	9.9	13.1	16.4	19.8	21.8	21.5	20.9	19.6	16.7	12.0	8.3	15.6

气温  $T_a$  拟合如下式:

$$T_a(t) = 15.64 + 7.02 \times \cos\left[\frac{\pi}{6}(t - 6.4)\right] \quad (4)$$

式中:  $t$  为时间(月)。

基岩和混凝土的主要热力学计算参数见表 2 和表 3。

表 2 材料热学计算参数

Tab. 2 Thermal parameters of the material

材料	导热系数 $/( \text{kJ} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} )$	线胀系数 $/( 10^{-6} \cdot \text{°C} )$	导温系数 $/( \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1} )$	比热 $/( \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} )$	绝热温升 (°C)
基岩	6.85	11.5	0.003 42	0.775	0
C20 混凝土	6.63	8.13	0.003	0.90	$\theta(\tau) = 28.90(1 - e^{-0.42\tau})$

表 3 材料力学计算参数

Tab. 3 Mechanical parameters of the material

材料	泊松比	密度 $/( \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} )$	弹模/GPa
基岩	0.13	2 740	3.83
混凝土 C20	0.17	2 536	$E(\tau) = 23.30(1 - e^{-0.68\tau^{0.40}})$

混凝土徐变计算式:

$$C(t, \tau) = C_1(1 + 9.20\tau^{-0.45})[1 - e^{-0.3\alpha t - \tau}] + C_2(1 + 1.70\tau^{-0.45})[1 - e^{-0.005\alpha t - \tau}] \quad (5)$$

式中:  $t$  为时间(d);  $\tau$  为加载龄期(d); 参数  $C_1 = 0.23/E_0$ ,  $C_2 = 0.52/E_0$ ;  $E_0$  为  $\tau \rightarrow \infty$  时的最终弹模。

### 2.3 边界条件

温度场计算时,计算模型中地基地面及四周侧面取为绝热边界,机组段的上下游面及其它临空面为固体散热边界,根据多年平均风速和覆盖的保温材料赋予相应的表面放热

系数。应力场计算时,地基地面及四周侧面取为法向约束,其它临空面为自由边界。

## 3 计算工况

工况 1: 6月1日开始第一层混凝土浇筑,按规范要求控制浇筑温度不低于 5 °C,不高于 28.0 °C。

工况 2: 6月1日开始第一层混凝土浇筑,控制混凝土的浇筑温度不高于 18 °C。混凝土表面保温措施: 3月-5月(春季)、9月-10月(秋季)浇筑的混凝土,浇完后立即对新浇混凝土的仓面及模板外侧覆盖 1 cm 厚泡沫塑料板进行保温,到龄期 14 d 时拆除; 12月-2月(冬季)浇筑的混凝土,浇完后立即对新浇混凝土的仓面及模板外侧覆盖 2 cm 厚泡沫塑料板进行保温,至冬季结束;在进入施工期第一个冬季前(11月份),对所有混凝土裸露表面覆盖 2 cm 厚泡沫塑料板至冬季结束。混凝土内部冷却水管通水措施: 混凝土浇筑完毕后立即进行通水冷却,水管间距 1.5 m × 1.5 m, 4月-10月

使用 15℃ 制冷水,其它月份采用天然河水,流量 1.5 m<sup>3</sup>/h, 通水时间 10 d, 每 24 h 换向一次。

## 4 计算结果分析

### 4.1 工况 1 计算结果分析

选取尾水管底板部位混凝土表面点和内部点作为特征点,绘制温度及应力历时曲线(图 2);选取机组横剖面作为典型剖面,绘制温度及应力包络图(图 3),图中拉应力为正,压应力为负, $\Delta_t$ 为允许应力曲线,由极限拉伸强度除以安全系数(为 1.8)获得。

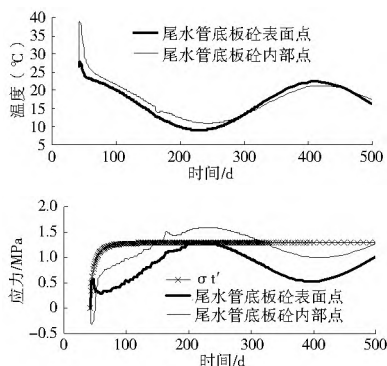


图 2 工况 1 尾水管底板混凝土表面点和内部点的温度及应力历时曲线

Fig. 2 Temperature and stress duration curves for the surface and internal points of the concrete in the draft tube floor under working condition 1

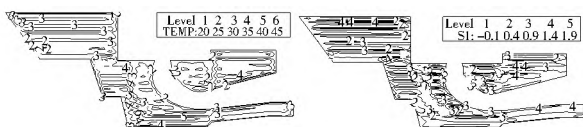


图 3 工况 1 机组横剖面温度(°C)及应力(MPa)包络图

Fig. 3 Cross sectional temperature (°C) and stress (MPa) envelope diagrams under working condition 1

对于浇筑初期的混凝土,表层混凝土的升温幅度远小于内部混凝土,从而产生较大的内外温差。混凝土也因此产生了相应的内外变形约束。此时,外表面混凝土处于相对收缩变形的状态,而内部混凝土则相反,处于相对体积膨胀的状态,因而在表面相对受张拉的区域出现拉应力,而在结构内部相对受挤压的区域就产生了压应力。且当温差足够大时,混凝土表面的拉应力就能够达到甚至超过混凝土的即时允许应力。如图 2 中尾水管底板混凝土早期最大内外温差达到 12℃ 左右时,表面拉应力已超出即时允许应力,极易导致混凝土早期表面裂缝的产生,有必要采取温控措施以降低早期混凝土过大的内外温差。

混凝土温度达到峰值以后就开始下降,但外表面降温幅度远小于内部的降温幅度,相对而言,此时内部混凝土的体积收缩变形大,而结构近表面区处于相对被压缩的变形状态。在温度变形作用下,表面拉应力和内部压应力逐渐减小。如图 2 所示,随着内部混凝土温度的进一步降低,混凝土内部的应力有可能从压应力转化为拉应力,从而表面混凝土逐渐表现为受压状态。当这种变形过大时,内部拉应力甚至会超过混凝土的允许抗拉强度。

若不考虑由内外温降幅度不同而引起的混凝土自身的应力状态变化,仅考虑受外界气温逐渐下降的影响(夏季高温阶段到冬季寒冷时刻),尾水管底板混凝土结构相对与下部地基来说,处于温降收缩变形状态,受地基约束作用影响,混凝土内外都呈现出拉应力增长或压应力减小趋势,并在环境气温最低时达到极值。由图 3 可以看出,在遭遇寒冷冬季时,夏季浇筑的尾水管底板混凝土,由于后期温降较大,再加上受地基强约束作用,后期混凝土的内外拉应力均已超出允许应力,此时极易造成混凝土开裂。可见,有必要采取温控措施以降低混凝土后期温降幅度。

### 4.2 工况 2 计算结果分析

计算得出工况 2 的温度及应力历时曲线见图 4,温度及应力包络图见图 5。

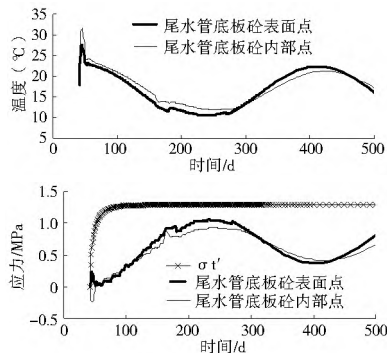


图 4 工况 2 尾水管底板混凝土表面点和内部点的温度及应力历时曲线

Fig. 4 Temperature and stress duration curves for the surface and internal points of the concrete in the draft tube floor under working condition 2

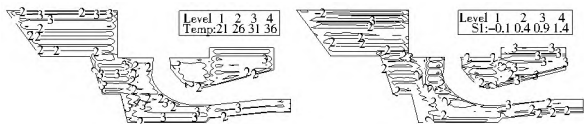


图 5 工况 2 机组横剖面剖面温度(°C)及应力(MPa)包络图

Fig. 5 Cross sectional temperature (°C) and stress (MPa) envelope diagrams under working condition 1

对比图 2 和图 4 可以看出,采取降低浇筑温度和“外保内降相结合”的温控措施后,一方面,混凝土早期内外温差大大减小,仅为 5℃ 左右(工况 1 约为 12℃),相应地混凝土内外相对变形也减小,早期混凝土的表面拉应力状态也随之得到改善早期表面最大拉应力仅为 0.3 MPa(工况 1 为 0.6 MPa,小于混凝土的即时允许应力;另一方面,早期混凝土的升温幅度得到降低,混凝土内部最高温度仅为 32℃ 左右(工况 1 约为 39℃),相应地后期温降幅度也明显减小,从而使后期温降所致的混凝土拉应力也明显减小,混凝土的后期最大拉应力约为 1.1 MPa(工况 1 约为 1.6 MPa),小于混凝土的即时允许应力。

对比图 3 和图 5 可以看出,夏季浇筑的混凝土内部温度峰值大幅降低,大部分区域的混凝土拉应力状态均得到明显改善,抗裂安全性大大提高。

## 5 结论

(1) 从应力历时曲线看,混凝土开裂可能性较大的时刻

(混凝土所承受的拉应力超过其即时允许应力),一是在新浇混凝土块龄期较短时,二是在经历冬季外界气温较低时。

(2) 从有无采取温控措施的工况 1 和 2 的计算结果对比来看,采取降低浇筑温度和内部水管冷却相结合的温控措施,能显著减小早期混凝土的温升幅度和内外温差以及后期的降温幅度,对混凝土的温控防裂有多重作用,十分有效。

(3) 通过计算和分析发现,工况 2 中所提出的温控方案,基本满足本工程中混凝土抗裂安全系数达到 1.8 的要求,结构的抗裂安全得到保障。

#### 参考文献(References):

- [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, 1998. (ZHU Bo fang. Thermal stresses and temperature control of mass concrete[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999. (in Chinese))
- [2] 张超然. 三峡水利枢纽混凝土工程温度控制研究[M]. 中国水利水电出版社, 2000. (ZHANG Chao ran. Study of temperature control for the Three Gorges Project concrete engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2001. (in Chinese))
- [3] Gajda J. Controlling temperature in mass Concrete[J]. Concrete International, 2002(1): 59-62.
- [4] Yuan Y, Wan Z L. Prediction of cracking within early-age concrete due to thermal, drying and creep behavior[J]. Cement and Concrete Research, 2002(32): 1053-1059.
- [5] Kook Han Kim, Sang Eun Jeon, Jir Keun Kim, et al. An experimental study on thermal conductivity of concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2003(33): 363-371.
- [6] Schutter G De. Finite element simulation of thermal cracking in massive hardening concrete elements using degree of hydration based material laws[J]. Computers and Structures, 2002, 80(27/30): 2035-2042.
- [7] 张子明, 郭兴文, 杜荣强. 水化热引起的大体积混凝土墙应力与开裂分析[J]. 河海大学学报, 2002, 30(5): 12-16. (ZHANG Zi ming, GUO Xing-wen, DU Rong-qiang. Analysis of hydration heat induced stresses and cracks in massive concrete walls[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2002, 30(5): 12-16. (in Chinese))
- [8] 马跃峰, 朱岳明, 曹为民, 等. 闸墩内部水管冷却和表面保温措施的抗裂作用研究[J]. 水利学报, 2006, 37(8): 963-968. (MA Yue feng, ZHU Yue ming, CAO Wei min, et al. Effect of internal cooling pipes and external heat preservation on prevention from concrete cracking during construction of sluice pier[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(8): 963-968. (in Chinese))
- [9] 曹为民, 吴健, 闪黎. 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. (CAO Wei min, WU Jian, SHAN Li. Numerical simulation of temperature field and stress field of sluice piers[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2002, 30(5): 48-52. (in Chinese))
- [10] 彭景文. 三峡电站厂房尾水管温度应力仿真计算分析[J]. 长江科学院院报, 1995, 12(4): 26-31. (PENG Jing wen. Analog computations and analysis of temperature stress of powerhouse draft tube of Three Gorges Project[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1995, 12(4): 26-31. (in Chinese))
- [11] 常晓林, 程井, 周伟. 软基上厂房大体积混凝土施工期温度应力仿真[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2007, 40(2): 21-25. (CHANG Xiaolin, CHENG Jing, ZHOU Wei. Thermal stress simulation for powerhouses on soft rock base during construction period[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2007, 40(2): 21-25. (in Chinese))
- [12] 张金凯, 李守义, 赵丽娟, 等. 某河床式水电站厂房坝段温控计算分析[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(5): 211-218. (ZHANG Jin kai, LI Shou yi, ZHAO Li juan, et al. Simulation analysis of temperature control on hydropower house monolith of some water power station in river channel[J]. Journal of Northwest A & F University: Nat. Sci. Ed., 2007, 40(2): 21-25. (in Chinese))
- [13] 张杨, 郭晓娜. 水电站厂房下部结构混凝土温控防裂分析[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(3): 101-113. (ZHANG Yang, GUO Xiaona. Analysis of temperature control and crack prevention for lower structure concrete of hydropower plant[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(3): 101-113. (in Chinese))
- [14] 颜志强, 强晟, 陈守开, 等. 大型水电站厂房施工期混凝土开裂机理和防裂方法研究[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2010, 32(4): 29-33. (YAN Zhi qiang, QIANG Sheng, CHEN Shou kai, et al. Research on cracking prevention and cracking mechanism of concrete of large scale powerhouse of hydropower plant during construction period[J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2010, 32(4): 29-33. (in Chinese))
- [15] 李万军. 大坝混凝土的温度控制与防裂新措施[J]. 水电站设计, 2006, 22(3): 6-10. (LI Wan jun. Dam concrete temperature control and new anti-cracking measures[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2006, 22(3): 6-10. (in Chinese))