

# 寒冷地区碾压混凝土重力坝温控防裂研究

相昆山, 张宏战, 马震岳

(大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 某碾压混凝土重力坝地处寒冷地区, 且其施工方式采取通仓浇筑, 不分纵缝以及越冬长间歇式的施工方法, 增加了该碾压混凝土坝温控和防裂难度。为了对该工程温控措施及效果作深入了解, 选取挡水坝段为研究对象, 采用3种方案进行三维有限元温控防裂仿真分析。通过3种方案结果的对比, 总结出在坝体施工过程中采取保温及通冷却水管的温控措施对改善坝体温度分布、降低温度应力、防止坝体出现裂缝具有重要意义, 结果对该工程及类似工程的结构设计和具体施工具有重要的指导意义。

**关键词:** 寒冷地区; 碾压混凝土; 三维有限元; 温控防裂; 冷却水管; 仿真分析

中图分类号: TV642

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2013)05-0200-04

## Study on Temperature Control and Crack Control of Roller Compacted Concrete Gravity Dam in Cold Area

XIANG Kun-shan, ZHANG Hong-zhan, MA Zhen-yue

(Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

**Abstract:** A roller compacted concrete gravity dam is located in cold region, in its construction, the long block pouring method is adopted without longitudinal joints and with intermittent construction in overwintering, which would increase the difficulty of temperature control and crack control. In order to have a deep understand of the temperature control measures and effect of the project, the water retaining dam section is selected as the study object in this article, and three schemes are adopted for 3-D finite element simulation analysis. Compared with the results of the three schemes, it can be concluded that the temperature control measures such as insulation and cooling water pipes have important significance to improve the dam temperature distribution, lower the temperature stress and prevent the dam cracks. Also, the results of this article have important guiding significance in the structural design and construction of the project and similar ones.

**Keywords:** cold region; roller compacted concrete; 3-D finite element; temperature control and crack control; cooling water pipe; simulation analysis

## 0 引言

碾压混凝土重力坝温度应力问题<sup>[1-3]</sup>一直备受工程界关注, 一般来说, 在考虑正常散热情况下, 水利工程中的混凝土受水泥水化热影响, 内部最高温度仍比浇筑时高 10℃ ~ 20℃<sup>[4]</sup>。在混凝土固结硬化过程中, 由于水泥水化热作用、外界环境温度变化及坝体内部自身约束等原因, 在坝体施工及运行过程中坝体内部及表面会产生较大的温度拉应力, 当该应力大于混凝土所允许范围时, 将会产生温度裂缝。研究表明, 碾压混凝土坝温度应力是导致坝体应力的主要因素<sup>[5-6]</sup>, 其他荷载作用所引起的应力

与温度应力相比较小, 温度应力起控制作用。为了使大坝在施工期及运行期满足温度防裂标准, 通常在大坝施工前进行施工过程仿真分析, 提出较为合理的温控方案<sup>[7-9]</sup>。

## 1 基本原理

### 1.1 非稳定温度场有限元计算原理<sup>[10]</sup>

由热传导理论, 不稳定温度场  $T(x, y, z, t)$  满足热传导连续方程:

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

式中:  $T$  为混凝土温度(℃);  $\alpha$  为导温系数( $\text{m}^2/\text{h}$ );  $\theta$

为绝热温升(°C); $\tau$  为龄期(d); $t$  为时间(d)。

当式(1)中, $\partial T/\partial t \neq 0, \partial \theta/\partial \tau \neq 0$ 时,即水泥水化热存在、混凝土结构的温度继续变化,此时为不稳定温度场。

### 1.2 应力场有限元仿真计算方法

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<sup>[11]</sup>、温度应变增量、干缩应变增量和自生体积应变增量,因此有:

$$\{\Delta \epsilon_n\} = \{\Delta \epsilon_n^e\} + \{\Delta \epsilon_n^c\} + \{\Delta \epsilon_n^T\} + \{\Delta \epsilon_n^s\} + \{\Delta \epsilon_n^0\} \quad (2)$$

式中: $\{\Delta \epsilon_n^e\}$  为混凝土弹性应变增量; $\{\Delta \epsilon_n^c\}$  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; $\{\Delta \epsilon_n^0\}$  为自生体积应变增量。

弹性应变增量 $\{\Delta \epsilon_n^e\}$  由下式计算:

$$\{\Delta \epsilon_n^e\} = \frac{1}{E(\bar{\tau}_n)} [Q] [\Delta \sigma_n] \quad (\bar{\tau}_n = \frac{\tau_{n-1} + \tau_n}{2}), \text{以下同} \quad (3)$$

混凝土弹模  $E(\bar{\tau}_n)$  一般用双指数式计算:

$$E(\tau) = E_0(1 - e^{-a\tau}) \quad (E_0 \text{ 为终弹性模量}) \quad (4)$$

混凝土徐变应变增量 $\{\Delta \epsilon_n^c\}$  由下式计算:

$$\{\Delta \epsilon_n^c\} = \{\eta_n\} + C(t_n, \bar{\tau}_n) [Q] \{\Delta \sigma_n\} \quad (5)$$

式中:

$$\{\eta_n\} = \sum_s (1 - e^{-r_s \Delta \tau_n}) \{\omega_{sn}\} \quad (6)$$

$$\{\omega_{sn}\} = \{\omega_{s,n-1}\} e^{-r_s \Delta \tau_{n-1}} + [Q] \{\Delta \sigma_{n-1}\} \times \psi_s(\bar{\tau}_{n-1}) e^{-0.5r_s \Delta \tau_{n-1}} \quad (7)$$

$$C(t_n, \tau_n) = \sum_s \psi_s(\tau) [1 - e^{-r_s(t-\tau)}] \quad (8)$$

混凝土温度应变增量 $\{\Delta \epsilon_n^T\}$  由非稳定温度场计算结果求得。求出温度场后可由下式求得:

$$\{\Delta \epsilon_n^T\} = \{\alpha \Delta T_n, \alpha \Delta T_n, \alpha \Delta T_n, 0, 0, 0\} \quad (9)$$

式中: $\alpha$  为混凝土热变形线膨胀系数; $\Delta T_n$  为温差。

混凝土干缩应变增量 $\{\Delta \epsilon_n^s\}$  由下式计算:

$$\{\epsilon_n^s\} = \{\Delta \epsilon_0^s\} (1 - e^{-c\tau_n}) \quad (10)$$

$$\{\Delta \epsilon_n^s\} = \{\epsilon_n^s\} - \{\epsilon_{n-1}^s\} \quad (11)$$

在任一时刻  $\Delta t_i$  内,由弹性徐变理论的基本假定可得增量形式的物理方程:

$$\{\Delta \sigma_n\} = [\bar{D}_n] (\{\Delta \epsilon_n\} - \{\eta_n\} - \{\Delta \epsilon_n^T\} - \{\Delta \epsilon_n^s\} - \{\Delta \epsilon_n^0\}) \quad (12)$$

$$[\bar{D}_n] = \bar{E}_n [Q]^{-1} \quad (13)$$

$$\bar{E}_n = \frac{E(\bar{\tau}_n)}{1 + E(\bar{\tau}_n) C(t_n, \bar{\tau}_n)} \quad (14)$$

## 2 模型建立及边界

### 2.1 模型建立

本文以某一大型水利枢纽工程挡水坝段作为研究对象,坝基取竖直向下及上、下游方向 1.5 倍坝高的岩石。整体坐标系的坐标原点位于大坝上游坝踵处, $X$  向为水流方向,正向为上游指向下游, $Y$  向为竖直方向,竖直向上为正, $Z$  向为垂直水流方向,正向为左岸指向右岸。该挡水坝段三维有限元模型采用 8 节点等参单元,模型见图 1。

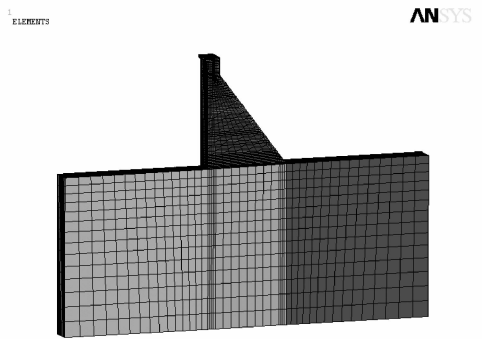


图 1 挡水坝段三维计算模型

### 2.2 温度及应力边界条件

根据温控计算、各类温控措施对比分析对温度场和位移应力场的要求,对各类温控计算研究方案分别选择确定模型、单元、结点的初始和边界条件。温度场计算时,对于基岩底部和四周设为绝热边界条件,顶部与空气接触面设置为热对流边界;对于坝体,上下游面和顶面均设置为与空气的对流边界。应力场计算时,对于基岩,底部设为全约束,四周面设置为单向约束,顶部设置为自由面;对于坝体,上下游面和顶面均设置为自由边界条件。

## 3 计算方案及结果

### 3.1 计算方案

本文主要进行了以下三个方案的仿真分析,方案 1:混凝土浇筑温度自然入仓,该方案中不考虑保温,不考虑冷却水冷却,不考虑蓄水。基岩初始温度 4.9°C(不考虑太阳辐射),在计算过程中,基岩表面受气温和太阳辐射影响。每层混凝土顶面、上下游面均考虑 2 度太阳辐射影响;方案 2:采取保温。保温方案为上、下游面采取永久保温措施,所选保温材料的等效放热系数为 29.79 kJ/(m<sup>2</sup>·d·°C);方案 3:采取保温同时通水冷却。

冷却水管布设方式及一期冷却水温如表 1,表 2

所示。

表 1 冷却水管布设方式

混凝土浇筑高度/m	0~12.3	12.3~51.0	51.0~坝顶
冷却水管布设间距/m	1.0×1.5	1.5×1.5	1.5×1.5

表 2 一期冷却水温

月份	4	5	6	7	8	9	10
冷却水温/°C	5	10	10	10	10	13	13

### 3.2 坝体水平拉应力和主拉应力控制标准

本工程按式(15)控制大坝水平拉应力和主拉应力:

$$\sigma \leq \frac{R_f}{1.6} \quad (15)$$

式中:  $R_f$  为混凝土的抗拉强度。

不同龄期混凝土抗拉强度的公式用  $\sigma_t = \sigma_{t0}(1 - e^{-at^b})$  来拟合, 其中  $\sigma_{t0}$ 、 $a$ 、 $b$  为常数, 混凝土的允许拉应力公式见表 3。

表 3 混凝土不同龄期允许拉应力  
(水平拉应力和主拉应力控制指标)

骨料级配	分区编号	允许拉应力/MPa
三	R I	$1.75 \times (1 - e^{-0.1t^{0.735}})$
二	R II	$1.76 \times (1 - e^{-0.105t^{0.714}})$
二	R III	$1.66 \times (1 - e^{-0.078t^{0.815}})$
三	R V	$1.59 \times (1 - e^{-0.111t^{0.670}})$
三	C I	$1.86 \times (1 - e^{-0.362t^{0.429}})$
四	C II	$1.76 \times (1 - e^{-0.105t^{0.714}})$
四	C III	$1.61 \times (1 - e^{-0.218t^{0.497}})$
三	C IV	$2.54 \times (1 - e^{-0.431t^{0.402}})$
四	C V	$1.81 \times (1 - e^{-0.218t^{0.497}})$

### 3.3 计算结果及分析

#### 3.3.1 温度包络线

温度及应力包络线取典型部位不同节点最大值来绘制分布曲线。挡水坝段典型部位最大温度包络线如图 2 所示。

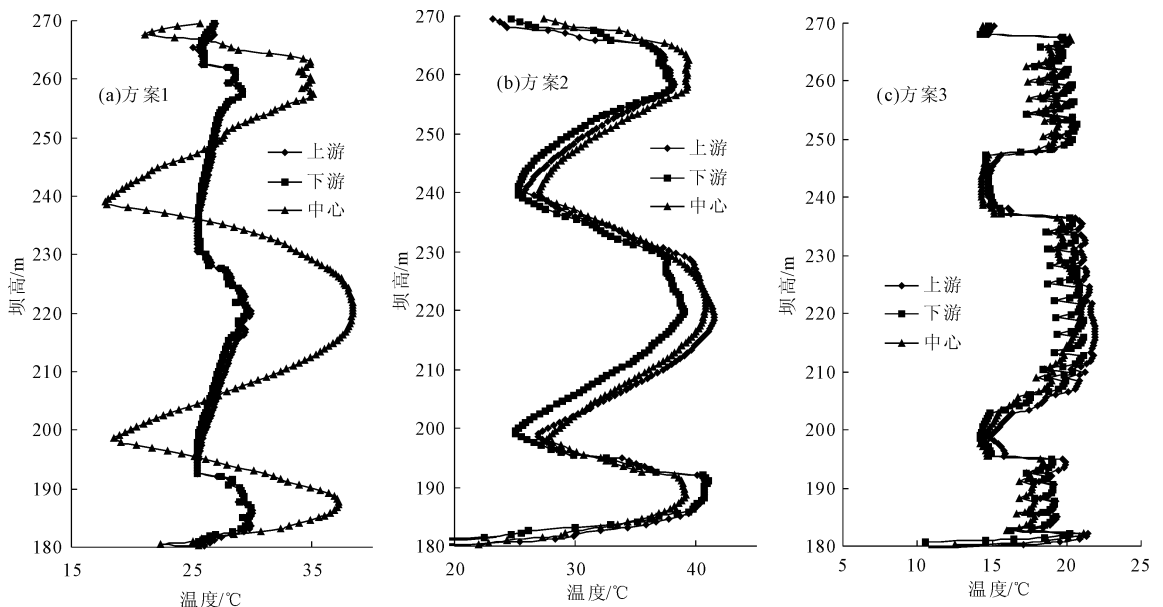


图 2 各方案典型部位最大温度包络线

(1) 由图 2(a)、图 2(b) 结果可以看出, 挡水坝段各部位最高温度沿高程呈现出明显的季节性变化, 夏季浇筑混凝土最高温度较高, 而春秋季节浇筑的混凝土温度较低, 碾压混凝土基础容许温差较严, 坝基垫层常态混凝土水化热较高, 又受地基约束, 必须选择低温季节进行浇筑;

(2) 由图 2(a)、图 2(b) 结果对比可以看出, 采取保温措施有效改善了坝体内部温度分布, 内外温差减小, 温度分布更均匀, 但是只采取保温措施坝体各部位最高温度明显升高, 最高温度为 41.46°C, 明显

超过温差允许范围, 不利于温度及温度应力的控制;

(3) 由图 2(a)、图 2(c) 结果对比可以看出, 采取保温及通冷却水管冷却不仅可以改善坝体内部温度分布, 而且可以削峰降温, 降低坝体最大温差, 有利于温度及温度应力的控制—坝体基础强约束区混凝土温度基本在 10.7°C ~ 21.3°C 范围内, 其他部位最高温度值为 21.92°C, 均满足温度控制标准。

#### 3.3.2 应力包络线

由温度包络线图 2 可以看出, 方案 1 和方案 2 的温度场均不满足温度控制标准, 同时由本文实际

计算知,方案1不采取任何温控措施,坝段上下游表面、越冬面附近、坝踵及坝趾等处的应力水平均超过了混凝土的允许抗拉强度,不能满足防裂要求;方案2只采取保温措施,应力水平得到了明显改善,但仍超过了混凝土的允许抗拉强度,不能满足防裂要求,这里就不再赘述。

(1) 由图3可以看出坝体坝踵、坝趾及底部固

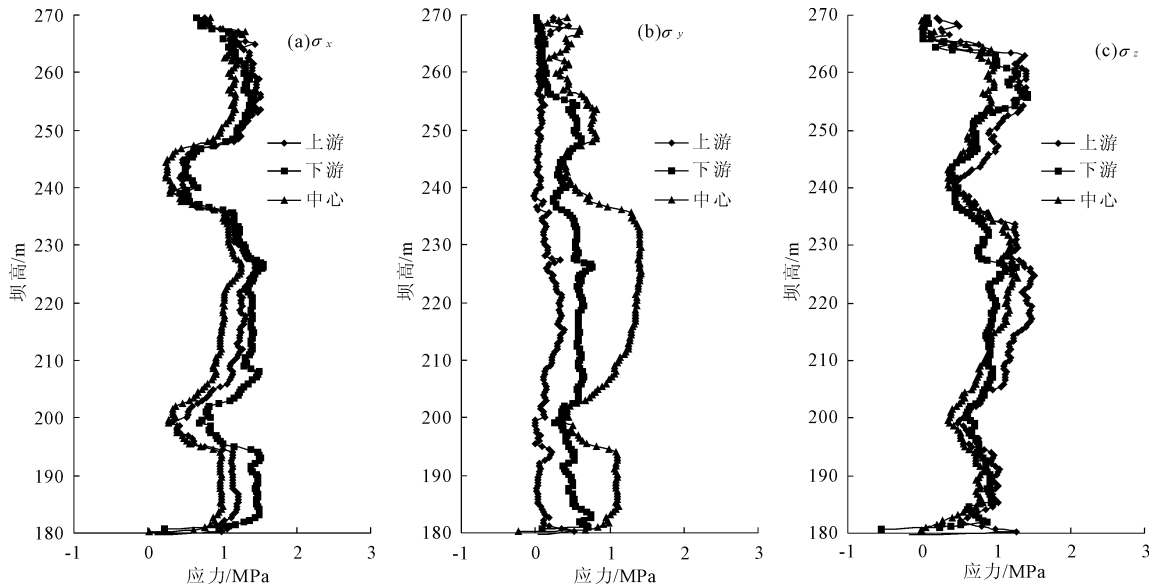


图3 方案3典型部位最大应力包络线

## 4 结论

(1) 通过本文计算,该工程所选取坝段采用保温及通冷却水管的温控措施,最高温度和最大应力均在控制范围之内,满足温控及温度防裂要求;

(2) 通过具体工程实例验证了采取保温措施同时通冷却水管进行冷却的保温措施可以有效改善坝体温度分布、降低温度应力,对防止坝体出现温度裂缝具有重要意义;

(3) 本文采用大型有限元软件 ANSYS 参数化设计语言对不同方案进行了仿真计算,并取得较好结果,但该程序不能满足对最大主应力的提取,需要进一步完善,同时该工程冷却水管参数优化问题有待深入探讨。

### 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] 王成山,陆殿阁. 白石水库碾压混凝土坝温度控制与防裂措施的研究与应用[J]. 水利水电技术,1998,29(9): 44-47.  
 [3] 毛远辉,侍克斌,牛景太. 寒冷干旱地区高碾压混凝土

坝的温控研究初探[J]. 水利科技与经济,2006,12(4): 255-256.

(2) 各部位顺水流方向应力( $\sigma_x$ )、铅垂向应力( $\sigma_y$ )、坝轴线方向应力( $\sigma_z$ )均不大,最大值分别为1.56 MPa(发生在226.6 m高程处)、1.42 MPa(发生在229.68 m高程处)、1.51 MPa(发生在224.75 m高程处),满足温度防裂要求。

坝的温控研究初探[J]. 水利科技与经济,2006,12(4): 255-256.  
 [4] 许正月,任金珂. 碾压混凝土重力坝冷却水管的冷却效果研究[J]. 西部探矿工程,2012,(6):196-198.  
 [5] 朱岳明,徐之青,贺金仁,等. 混凝土水管冷却温度场的计算方法[J]. 长江科学院院报,2003,20(2):19-22.  
 [6] Schutter G D. Finite element simulation of thermal cracking in massive hardening concrete elements using degree of hydration based material laws[J]. Computers and Structures, 2002, (27-30):2035-2042.  
 [7] Kim J K, Kim K H, Yang K J. Thermal analysis of hydration heat in concrete structures with pipe cooling system[J]. Computer and Structures,2001,79(2):163-171.  
 [8] Chen Y L, Wang C J, Li S Y. Simulation analysis of thermal stress of RCC dams using 3-D finite element relocating mesh method[J]. Advanced in Engineering Software, 2001, 32(9):677-680.  
 [9] 朱伯芳,蔡建波. 混凝土坝水管冷却效果的有限元分析[J]. 水利学报,1985,(4):28-34.  
 [10] 朱岳明,张建斌. 碾压混凝土坝高温期连续施工采用冷却水管进行温控的研究[J]. 水利学报,2002,(11): 55-59.  
 [11] 张涛,黄达海,王清湘,等. 沙牌碾压混凝土拱坝温度徐变应力仿真计算[J]. 水利学报,2000,(4):1-7.