

文章编号: 1006-4710(2013)01-0038-07

# 人工短缝对严寒地区碾压混凝土坝 越冬层面应力的释放效果

司政, 黄灵芝, 宋志强, 田志斌

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 严寒地区碾压混凝土坝越冬层面上、下游侧易出现水平裂缝。在越冬层面上、下游侧设置人工短缝, 采用接触单元模拟人工短缝, 考虑人工短缝切向接触摩擦力, 并以扩展拉格朗日乘子法作为人工短缝的法向接触协调条件, 采用三维有限元仿真计算程序对人工短缝的应力释放效果进行计算分析。计算结果表明, 设置人工短缝对越冬层面坝轴线方向和顺水流方向温度应力影响较小, 但越冬层面上、下游侧铅直向温度应力最大值大幅降低, 应力释放效果显著; 越冬层面中部铅直向温度应力虽有所增大, 但仍未超过碾压混凝土的抗拉强度。在严寒地区碾压混凝土坝越冬层面上、下游侧设置人工短缝, 配合缝内的止水及缝末端的槽钢, 保证人工短缝的稳定性, 能有效避免越冬层面附近上、下游侧出现无序的裂缝。

**关键词:** 严寒地区; 碾压混凝土坝; 越冬层面; 人工短缝

**中图分类号:** TV642.2      **文献标志码:** A

## Effect of Artificial Short Slit on RCC Dam Overwintering Face Stress in Severe Cold Area

SI Zheng, HUANG Lingzhi, SONG Zhiqiang, TIAN Zhibin

(Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In severe cold area, horizontal crack easily appears in upstream and downstream of RCC dam overwintering face. Artificial short slit at the downstream side can be set on the overwintering face, and simulated with contact element in considering the tangential friction forces and extended Lagrange multiplier method as normal contact coordination conditions. The effect of stress release is calculated and analyzed with 3D finite element program. The results show that setting artificial slit has a little effect upon the temperature stress of the dam axis and flow direction, but on the vertical direction of overwintering face, the maximum of temperature stress is dramatically reduced, the effect of stress release is remarkable. On the other hand, the vertical temperature stress of central overwintering face has increased, but not still exceeded the tensile strength of roller compacted concrete. Therefore, in severe cold area, setting artificial short slit in the upstream and downstream of RCC dam overwintering face with water stop in the joint and channel steel at end of the joint can satisfy the stability, and effectively avoid the disordered crack appeared on the upstream and downstream of RCC dam overwintering face.

**Key words:** severe cold area; RCC dam; overwintering face; artificial short slit

我国地处欧亚大陆东南部, 其气候特点为南热北冷且南北温差大, 冬季气温普遍偏低。西北与东北地区占国土面积近 1/3, 而这些地区绝大部分最冷时的月平均气温均低于  $-10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 属严寒地区。

收稿日期: 2012-11-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51009116); 中央财政支持地方高校发展专项基金资助项目(106-5X1205); 陕西省重点学科建设专项基金资助项目(106-00X903)。

作者简介: 司政, 男, 讲师, 博士, 研究方向为水工结构应力及温度应力分析。E-mail: sz123hlz@163.com。

由于碾压混凝土坝具有施工速度快、造价低等优点,因此在严寒地区也是非常具有竞争力的坝型,如已建成的辽宁观音阁碾压混凝土重力坝、白石碾压混凝土重力坝、玉石碾压混凝土重力坝、河北桃林口碾压混凝土重力坝、新疆喀腊塑克碾压混凝土重力坝等。随着新疆、西藏等地区水电能源的进一步开发,在严寒地区修建碾压混凝土坝将越来越普遍。

严寒地区碾压混凝土坝施工的最大特点为每年的10月底至翌年的4月初,由于外界气温太低,不适宜浇筑混凝土,即混凝土的浇筑时间一般为每年的4~10月份。每年10月底浇筑的混凝土顶面称为越冬层面。翌年4月初恢复混凝土浇筑后,新老混凝土结合面及上部新浇混凝土中极易出现裂缝。如辽宁本溪观音阁碾压混凝土重力坝,1990年5月开始浇筑坝体混凝土,1995年10月竣工。混凝土施工中非常注重温控与防裂,采取了严格的温控防裂措施<sup>[1]</sup>,但在1991—1994年三个越冬层面附近上、下游侧仍然出现了较为严重的水平裂缝。由此可见,越冬层面及其附近混凝土采取与其它部位混凝土相同的温控措施,无法满足温控防裂要求。

为了防止温度降低导致坝体混凝土产生裂缝,国内外已建的碾压混凝土拱坝中普遍采用诱导缝的分缝形式,即在坝体碾压混凝土中人为地形成一个潜在的“缝”,该缝具有一定的抗拉强度,但强度较周边混凝土强度低。当诱导缝断面上的拉应力超过其等效强度时,诱导缝自动张开,释放坝体的拉应力,避免坝体混凝土产生无序的温度裂缝。目前诱导缝在我国几座碾压混凝土拱坝中已经得到成功应用<sup>[2-4]</sup>。严寒地区碾压混凝土重力坝越冬层面上、下游侧受上、下层混凝土的大温差以及下部混凝土的强约束,易出现水平裂缝,从碾压混凝土拱坝设诱导缝释放坝体应力中得到启示,考虑在越冬层面或上部混凝土的上、下游侧设置人工短缝,当出现拉应力时人工短缝自动张开,释放越冬层面混凝土的拉应力,避免越冬层面及其上部混凝土中出现其它裂缝。

已有学者就人工短缝对碾压混凝土坝温度应力的释放效果开展了相关的研究工作。周伟等<sup>[5]</sup>在综合考虑有缝和无缝、不同施工过程、不同短缝设置高程、不同的缝内水压力等对短缝部位应力变形的影响,对小湾高拱坝坝踵附近人工短缝的设置效果进行计算分析;黄玮等<sup>[6]</sup>对设置在碾压混凝土重力坝上下游面中间的竖向人工短缝进行研究,得出竖向人工短缝能缓解坝体上下游表面应力的结论;李守义、魏忠元等<sup>[7-8]</sup>对碾压混凝土重力坝坝踵处设

人工短缝进行了仿真计算分析。本文以严寒地区某碾压混凝土重力坝为例,采用三维有限元仿真计算程序对其施工期及运行期全过程进行仿真计算,重点研究设人工短缝对越冬层面应力的释放效果,为工程温控防裂设计提供参考。

## 1 计算原理

### 1.1 温度场计算基本理论

计算域任意一点的温度  $T(x, y, z, t)$  应满足以下热传导方程<sup>[9-10]</sup>:

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

式中,  $T$  为温度(°C);  $\alpha$  为导温系数( $\text{m}^2/\text{h}$ );  $t$  为时间(d);  $\theta$  为绝热温升(°C)。

对式(1)进行空间域离散和时间域差分,引入初始条件和边界条件,可得向后差分的温度场计算递推公式:

$$\left( [\mathbf{H}] + \frac{1}{\Delta t_n} [\mathbf{R}] \right) \{ \mathbf{T}_{n+1} \} - \frac{1}{\Delta t_n} [\mathbf{R}] \{ \mathbf{T}_n \} + \{ \mathbf{F}_{n+1} \} = 0 \quad (2)$$

式中,  $[\mathbf{H}]$  为热传导矩阵;  $[\mathbf{R}]$  为热传导补充矩阵;  $\{ \mathbf{T}_n \}$ 、 $\{ \mathbf{T}_{n+1} \}$  为结点温度列向量;  $\{ \mathbf{F}_{n+1} \}$  为结点温度荷载列向量;  $n$  为计算时段数;  $\Delta t$  为时间步长。

由公式(2)及上一时刻结点温度  $\{ \mathbf{T}_n \}$  可推求下一时刻结点温度  $\{ \mathbf{T}_{n+1} \}$ 。

### 1.2 应力场计算基本理论

混凝土应变增量包括弹性应变增量、徐变应变增量、温度应变增量、自生体积变形应变增量和干缩应变增量等。由线弹性理论可知,复杂应力状态下应力增量与应变增量间的关系可表示为<sup>[9]</sup>:

$$\{ \Delta \sigma_n \} = \bar{E}_n (\{ \Delta \epsilon_n \} - \{ \eta_n \} - \{ \Delta \epsilon_n^t \} - \{ \Delta \epsilon_n^s \}) \quad (3)$$

$$\bar{E}_n = \frac{E(\bar{\tau}_n)}{1 + E(\bar{\tau}_n) C(t_n, \bar{\tau}_n)} \quad (4)$$

式中,  $\{ \Delta \sigma_n \}$  为应力增量;  $\bar{E}_n$  为混凝土的等效弹性模量;  $\{ \Delta \epsilon_n \}$  为总应变增量;  $\{ \eta_n \}$ 、 $\{ \Delta \epsilon_n^t \}$ 、 $\{ \Delta \epsilon_n^s \}$ 、 $\{ \Delta \epsilon_n^s \}$  分别为徐变应变增量的第一项列向量、温度应变增量列向量、自生体积变形增量列向量和干缩变形增量列向量。

当前时刻应力值等于各时段应力增量叠加,即:

$$\{ \sigma_n \} = \{ \Delta \sigma_1 \} + \{ \Delta \sigma_2 \} + \{ \Delta \sigma_3 \} + \dots + \{ \Delta \sigma_n \} \quad (5)$$

由物理方程、平衡方程和几何方程可得任意时

段的有限元方程为:

$$[K]\{\Delta\delta\} = \{\Delta P_n\} + \{\Delta P_n^C\} + \{\Delta P_n^T\} + \{\Delta P_n^g\} + \{\Delta P_n^s\} \quad (6)$$

式中,  $[K]$  为整体刚度矩阵;  $\{\Delta\delta\}$  为位移增量;  $\{\Delta P_n\}$ 、 $\{\Delta P_n^C\}$ 、 $\{\Delta P_n^T\}$ 、 $\{\Delta P_n^g\}$ 、 $\{\Delta P_n^s\}$  分别为外荷载、徐变、温度、自生体积变形和干缩变形引起的荷载增量。

由式(6)求得位移增量  $\{\Delta\delta\}$  后,再根据单元形函数求应变增量,代入式(3)中求得应力增量  $\{\Delta\sigma_n\}$ ,进而求得当前时刻应力值  $\{\sigma_n\}$ 。

## 2 人工短缝

### 2.1 人工短缝的形式

碾压混凝土重力坝越冬层面上、下游侧设置的人工短缝见图1。

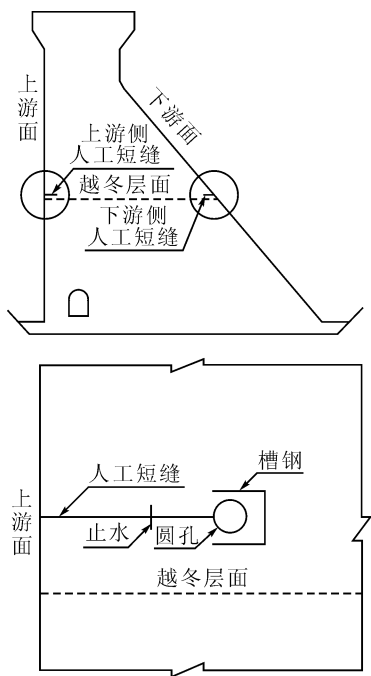


图1 越冬层面水平人工短缝示意图

Fig.1 Schematic diagram of artificial short slit on overwintering face

人工短缝与碾压混凝土拱坝中的诱导缝有所不同<sup>[11]</sup>。首先,在构造上,两缝具有本质上的区别。诱导缝是在拱坝的横断面中按一定规律埋设诱导片,部分切断坝体混凝土,形成诱导缝断面。诱导缝能够承受一定的拉应力,只有在拉应力超过诱导缝的等效强度时,诱导缝才张开。而碾压混凝土重力坝越冬层面上、下游侧设置的人工短缝为构造缝,不能承受拉应力。在人工短缝上游侧设置止水,缝末端采用开口PVC管形成圆孔,以避免缝端应力集中。圆孔末端布设槽钢,以防止裂缝扩展。其次两

缝在布置上也有较大的区别,碾压混凝土拱坝中的诱导缝一般是沿拱圈径向布置在坝体横断面上,而碾压混凝土重力坝越冬层面上、下游侧设置的人工短缝为平行于坝轴线方向的水平施工缝,深入坝体碾压混凝土1~3 m。

### 2.2 人工短缝的接触摩擦算法

碾压混凝土重力坝越冬层面上、下游侧设置的人工短缝为构造缝,缝的两侧混凝土之间为接触关系,应采用接触单元模拟人工短缝的接触行为。接触问题属于非线性问题,求解之前接触域和接触状态均是未知的,它们随着边界条件、荷载、材料属性及其他因素的变化而发生改变。根据弹塑性接触分析最小位能原理,可将接触摩擦问题转化为求解在接触边界的约束下系统总位能泛函的驻值。弹塑性系统的总位能泛函  $\Pi$  可写为:

$$\Pi = \Pi(\varepsilon_{ij}, u_i, \lambda) = \int_V \left( \frac{1}{2} D_{ijkl} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{kl} - \bar{f}_i u_i \right) dV - \int_S \bar{T}_i u_i dS - \lambda^T \cdot C \{u\} \quad (7)$$

式中,  $\bar{f}_i$  为体积力,  $\bar{T}_i$  为边界上的面力;  $u_i$  为变位向量;  $\lambda$  为拉格朗日乘子向量;  $C$  为约束矩阵。

将式(7)采用矩阵的形式可写为:

$$\Pi(u, \lambda) = \frac{1}{2} u^T K u - u^T F - \lambda^T C u \quad (8)$$

式中,  $K$  为刚度矩阵,  $F$  为结点荷载向量。

由变分原理,有:

$$\delta\Pi(u, \lambda) = 0 \quad (9)$$

可得:

$$K u = F \quad (10)$$

$$C u = 0 \quad (11)$$

式(10)和(11)即是由最小位能原理和变分原理得到的非线性接触问题的有限元方程和接触边界条件,通过它们就可以得到接触非线性问题的解。

### 2.3 人工短缝的接触关系

非线性接触问题接触面之间的关系包括切向关系和法向关系两种,切向关系上,主要考虑接触面间摩擦力的作用;法向关系上,应能实现力的传递,且两个接触物体之间存在相关的协调条件而不致使接触物体间出现相互穿透现象。

接触物体的切向关系本质上可以认为是接触面之间由于正压力的存在而产生摩擦。根据摩尔-库仑理论,两物体之间产生相互滑移是由于剪应力超过了摩擦力。物体间产生相互滑移时的摩擦力可表示为:

$$f = \mu N + C \quad (12)$$

式中,  $\mu$  为接触面摩擦系数;  $N$  为两物体接触面上的正压力;  $C$  为抗滑粘聚力。由此也可以得出人工短缝接触状态的判断准则, 即: ①分离状态(接触面上法向应力为负即出现拉应力时, 接触面张开); ②粘状态(接触面上存在正压力, 但接触面切向剪应力小于摩尔-库仑准则所确定的允许剪应力); ③滑移状态(接触面上存在正压力, 且接触面切向剪应力大于摩尔-库仑准则所确定的允许剪应力)。

接触物体之间的法向接触关系可采用罚函数算法和拉格朗日乘子算法加以解决。罚函数法运用力与位移的关系, 建立接触力、接触刚度以及接触面间穿透值的线性方程:

$$F = K\Delta \quad (13)$$

式中,  $K$  为接触刚度。接触刚度  $K$  取值越大, 则接触面间穿透值  $\Delta$  越小。理论上讲当接触刚度  $K$  为无穷大时, 接触面间穿透值  $\Delta$  为零, 接触面间为完全的接触状态。但是当接触刚度取值过大时, 总体刚度矩阵易出现病态而导致计算结果收敛困难, 因此采用罚函数法求解接触问题时接触面间穿透值不可能为零, 这必然会导致计算结果出现一定的误差。拉格朗日乘子法与罚函数法不同, 它是将接触力看成一个拉格朗日乘子, 建立接触力与接触单元位移及约束的拉格朗日函数, 再通过特殊方法如拟牛顿法、梯度法等进行求解, 以获得接触力。因此拉格朗

表1 坝址区多年平均气温

Tab.1 Annual average temperature of dam site

项目	多年平均气温/( $^{\circ}\text{C}$ )												全年
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
逐月	-20.6	-17.6	-6.7	7.2	14.9	20.3	22.0	20.0	13.7	5.1	-6.8	-17.5	4.6
上旬	-19.8	-19.0	-12.5	3.5	12.9	18.8	21.8	21.1	15.7	8.2	-1.8	-15.0	2.8
中旬	-20.4	-17.7	-7.6	8.0	14.9	20.6	22.4	20.8	14.1	5.3	-6.6	-17.4	3.0
下旬	-21.5	-15.8	-0.5	10.0	16.8	21.5	21.7	18.3	11.2	2.2	-12.0	-19.9	2.9

挡水坝段全断面采用碾压混凝土浇筑, 建基面高程为 624.0 m, 最大坝高 121.5 m, 底宽 98.5 m, 坝段宽度 15.0 m。有限元仿真计算时取整个坝段为研究对象, 坝基基岩范围为沿地基深度方向、坝踵上游以及坝趾下游各取 130 m, 计算模型整体坐标系的坐标原点设在左侧横缝坝踵处, 左右岸方向为  $X$  轴方向, 指向右岸为正; 水流方向为  $Y$  轴方向, 指向下游为正; 铅直方向为  $Z$  轴方向, 向上为正, 计算模型见图 2。图 3 为坝体有限元网格及材料分区图。根据工程施工进度安排, 大坝碾压混凝土施工时间为 2007 年 4 月至 2009 年 9 月, 2007 年 10 月底~2008 年 4 月初和 2008 年 10 月底~2009 年 4 月初由于外界气温太低而不适宜浇筑混凝土, 两次 10

日乘法可以真实实现接触面的零穿透, 这是罚函数法不可能实现的。但是拉格朗日乘子的引入大大增加了方程组的尺度, 使得求解困难; 另外当接触状态发生变化时, 接触力出现突变, 进而产生接触状态的振动式交替, 单纯的拉格朗日乘法也无法有效控制这一情况。

基于罚函数法和拉格朗日乘子法的不足, 本文提出将罚函数法和拉格朗日乘子法结合起来解决接触协调条件的扩展拉格朗日乘子法。扩展拉格朗日乘子法计算时, 先按照罚函数法开始, 并设定接触面间最大允许穿透值。如果计算过程中接触面间穿透值大于允许值, 则将各个接触单元的接触力乘以拉格朗日乘子的积与对应单元的接触刚度求和并重新进行计算, 直到接触面间穿透值小于允许值为止。由此可以看出扩展拉格朗日乘子法实际上就是不断改变接触刚度的罚函数法, 但与罚函数法相比总体刚度矩阵较少出现病态, 因此本文中模拟人工短缝时采用扩展拉格朗日乘子法作为法向接触协调条件。

### 3 人工短缝对越冬层面应力释放效果

#### 3.1 工程概况

某水利枢纽工程坝址区多年平均气温见表 1, 其最低月平均气温低于  $-10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 属于严寒地区。

月底停浇时的混凝土顶面即为越冬层面, 其高程分别为 645.0 m 和 699.0 m。

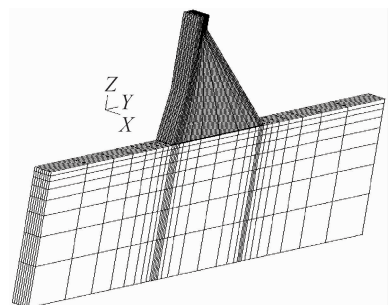


图2 整体计算模型及坐标系

Fig.2 Whole calculating model and coordinate system

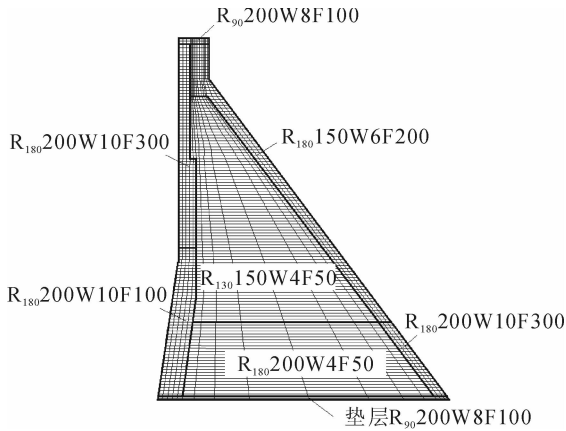


图3 坝体有限元网格及材料分区图

Fig. 3 Finite element mesh of dam and material partition

### 3.2 计算参数

大坝混凝土及基岩热力学参数见表2。大坝混凝土徐变度近似按下列公式计算<sup>[9]</sup>：

$$C(t, \tau) = (A_1 + B_1 \tau^{-C_1}) [1 - e^{-D_1(t-\tau)}] + (A_2 + B_2 \tau^{-C_2}) [1 - e^{-D_2(t-\tau)}] \quad (14)$$

表2 大坝混凝土及基岩热力学参数

Tab. 2 Thermology and mechanical property parameter of the concrete of dam body and the bedrock

混凝土	导热系数/ (kJ/(mh°C))	导温系数/ (m <sup>2</sup> /h)	线胀系数/ (10 <sup>-6</sup> /°C)	放热系数/ (kJ/ (m <sup>2</sup> h°C))	容重/ (kN/m <sup>3</sup> )	混凝土绝热温升 T <sub>r</sub> 表达式/(°C)	泊松比	混凝土弹性模量 E 表达式/MPa
R <sub>180</sub> 200W10F300	10.105	0.005	8.6	67.0	24.37	22.47τ/(1.15+τ)	0.167	30500τ/(5.08+τ)
R <sub>180</sub> 200W10F100	10.105	0.005	8.6	67.0	24.37	22.47τ/(1.15+τ)	0.167	30500τ/(5.08+τ)
R <sub>180</sub> 150W4F50	10.223	0.005	8.6	67.0	24.10	15.96τ/(1.15+τ)	0.167	30300τ/(4.08+τ)
R <sub>180</sub> 150W6F200	10.223	0.005	8.6	67.0	24.10	20.22τ/(1.15+τ)	0.167	30300τ/(4.08+τ)
R <sub>180</sub> 200W4F50	10.105	0.005	8.6	67.0	24.37	16.36τ/(1.15+τ)	0.167	30500τ/(5.08+τ)
R <sub>90</sub> 200W8F100	9.820	0.0046	8.6	67.0	24.20	30.18τ/(1.15+τ)	0.167	34500τ/(10.2+τ)
基岩	6.87	0.00319	7.0	67.0	26.66	0	0.20	20300

表3 坝体混凝土徐变特性参数

Tab. 3 Creep characteristic parameters of dam concrete

混凝土	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>
R <sub>180</sub> 150W4F50、R <sub>180</sub> 150W6F200	4.56	100	0.31	0.5	0	100	0.33	0.1
R <sub>180</sub> 200W10F300、R <sub>180</sub> 200W4F50、 R <sub>180</sub> 200W10F100	0.06	100	0.5	0.5	0	99.84	0.45	0.075
R <sub>90</sub> 200W8F100	5.94	54.60	0.45	0.3	13.42	22.81	0.45	0.005

表4 XPS 挤塑板材料特性

Tab. 4 Material characteristics of XPS plastic extrusion plate

材料	导热系数/(kJ/(mh°C))	导温系数/(m <sup>2</sup> /h)	容重/(kN/m <sup>3</sup> )	比热/(kJ/(kg°C))
XPS 挤塑板(5 cm)	0.1008	0.0021	0.24	2.0

### 3.4 计算程序及边界条件

碾压混凝土坝温度场与温度徐变应力场仿真计算程序是在大型商业有限元计算软件 ANSYS 平台上,采用参数化设计语言进行二次开发的<sup>[12]</sup>,利用

式中,  $t$  为时间,  $\tau$  为混凝土的龄期;  $t - \tau$  为持荷时间。  $A_1$ 、 $B_1$ 、 $C_1$ 、 $D_1$ 、 $A_2$ 、 $B_2$ 、 $C_2$ 、 $D_2$  为混凝土徐变特性参数。根据徐变试验资料,对混凝土徐变度参数进行拟合,其结果见表3。

### 3.3 计算方案

为了能够反映出人工短缝对严寒地区碾压混凝土坝越冬层面应力的释放效果,计算时采用对比方案。方案一坝体混凝土浇筑初凝后即在坝体上、下游面铺设5 cm厚的XPS挤塑板,并实行全年保温,越冬层面(645.0 m高程和699.0 m高程)上在冬季停浇时表面也铺设5 cm厚的XPS挤塑板,XPS挤塑板材料特性见表4;方案二除保温措施外,在645.0 m高程越冬层面上、下游侧分别设置深度为3.2 m和3.0 m的水平人工短缝,699.0 m高程越冬层面沿水流方向的尺寸较小,设置人工短缝将大大削弱该截面的抗剪强度,且699.0 m高程已脱离约束区,温度应力相对较小,因此699.0 m高程越冬层面未设置人工短缝。

单元“生死”高级功能实现混凝土浇筑过程的模拟,将温度场仿真计算所得到的结点温度作为外荷载施加到结构应力分析中,保证温度场与温度应力场计算荷载步的全程统一,以序贯耦合法实现温度场与

温度徐变应力场的耦合计算。

计算过程中温度场边界条件为<sup>[13-14]</sup>:坝基基岩底面和四个侧面为绝热边界,顶面在坝体上、下游无水时为固-气边界,按第三类边界条件处理,有水时为固-水边界,按第一类边界条件处理;施工过程中,坝体上、下游面和混凝土顶面为热交换边界,并采用等效表面放热系数法考虑 XPS 挤塑板的保温效果;水库蓄水后,坝体上、下游面在水位以上为固-气边界,按第三类边界条件处理,水位以下为固-水边界,按第一类边界条件处理。温度徐变应力场计算边界条件为:坝基基岩底面按固定支座处理,左、右侧面按 X 向简支处理,上、下游侧面按 Y 向简支处理;坝体外基岩顶面、坝体上下游面以及横缝面均为自由边界。

### 3.5 计算结果及分析

为节省篇幅,文中仅给出方案一和方案二 645.0 m 高程越冬层面 X、Y、Z 三个方向温度应力包络线图,以说明人工短缝对严寒地区碾压混凝土坝越冬层面应力的释放效果。

图 4 为方案一 645.0 m 高程越冬层面 X、Y、Z 三个方向温度应力包络线图。

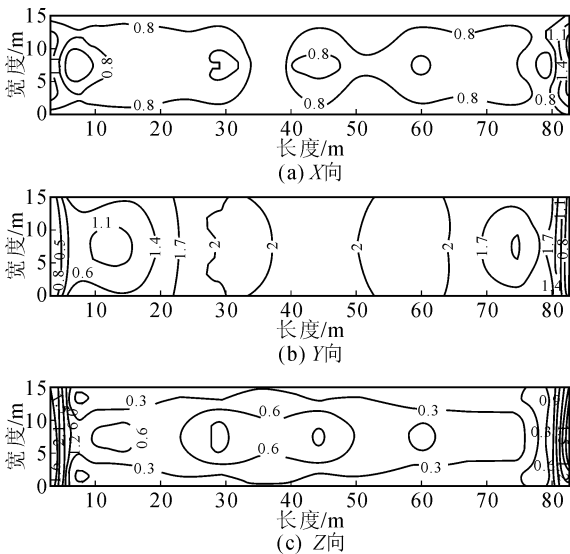


图 4 方案一 645.0 m 高程越冬层面温度应力包络线图(单位:MPa)

Fig. 4 Thermal stress envelope curve of case 1 on elevation of 645.0 m (Unit: MPa)

由图 4 可知,645.0 m 高程越冬层面上游侧 X 向温度应力最大值为 1.18 MPa,下游侧 X 向温度应力最大值为 1.53 MPa,均出现在二分之一坝段宽度处,中心部位 X 向温度应力最大值约为 0.8 MPa;Y 向温度应力最大值为 2.18 MPa,出现在 645.0 m 高程中心部位,Y 向温度应力较大主要是由于碾压混凝土浇筑块沿水流方向长度较长,约束相对较强所

致;上游侧 Z 向温度应力最大值为 2.34 MPa,下游侧 Z 向温度应力最大值为 1.92 MPa,中心部位 Z 向温度应力较小,约为 0.8 MPa,Z 向温度应力较大部位主要集中在坝体上、下游侧深入混凝土 2~3 m 范围内,最大值均超过碾压混凝土的抗拉强度(1.71 MPa),且沿坝段宽度方向变化较小,因此在坝体越冬层面上、下游侧易出现贯穿整个坝段的水平裂缝。

图 5 为方案二 645.0 m 高程越冬层面 X、Y、Z 三个方向温度应力包络线图。

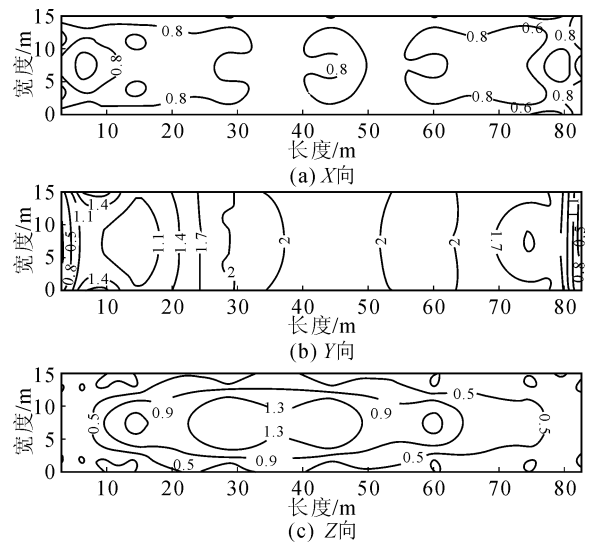


图 5 方案二 645.0 m 高程越冬层面温度应力包络线图(单位:MPa)

Fig. 5 Thermal stress envelope curve of case 2 on elevation of 645.0 m (Unit: MPa)

由图 5 可知,645.0 m 高程越冬层面上游侧 X 向温度应力最大值为 0.84 MPa,下游侧 X 向温度应力最大值为 1.08 MPa,均出现在二分之一坝段宽度处;中心部位 X 向温度应力最大值约为 0.8 MPa。设置人工短缝后,645.0 m 高程上、下游侧 X 向温度应力最大值分别减小了 0.34 MPa 和 0.45 MPa,中心部位 X 向温度应力无明显变化。越冬层面中心部位 Y 向温度应力最大值为 2.17 MPa。比较图 4(b)和图 5(b)可知,设置人工短缝对 645.0 m 高程各部位 Y 向温度应力最大值影响较小,是因为 645.0 m 高程混凝土在其浇筑后的第一个冬季温度达到最低值,Y 向温度应力最大值也出现在浇筑后的第一个冬季,因此设置人工短缝对 645.0 m 高程各部位 Y 向温度应力最大值影响较小。坝体上、下游侧设置人工短缝后,短缝范围内 Z 向温度应力几乎为 0,人工短缝对越冬层面上、下游侧的 Z 向温度应力释放效果非常显著;中心部位 Z 向温度应力最大值约为 1.3 MPa,较未设置人工短缝时有所增加,但未超过碾压混凝土的抗拉强度(1.71 MPa),因此不会出现

水平裂缝。

由图4(b)和图5(b)可知,越冬层面Y向温度应力最大值超过了碾压混凝土的抗拉强度(1.71 MPa),因此顺水流方向中部易出现沿坝轴线方向的贯穿性裂缝,需进一步采取措施,限于篇幅本文未作讨论。

## 4 结 语

针对严寒地区碾压混凝土重力坝越冬层面上、下游侧易出现水平裂缝这一实际工程问题,本文提出在越冬层面上、下游侧设置人工短缝,并采用三维有限元仿真计算程序对人工短缝的应力释放效果进行计算分析,人工短缝按接触单元处理,以接触摩擦力模拟人工短缝的切向关系,扩展拉格朗日乘子法作为法向接触协调条件。计算结果表明,设置人工短缝后,越冬层面上、下游侧铅直向温度应力最大值大幅降低,应力释放效果显著,配合缝内的止水及缝末端的槽钢,保证人工短缝的稳定性,就能很好地避免越冬层面无措施部位的开裂。当然,对于人工短缝的深度和位置的优化等问题有待进一步的研究。

## 参考文献:

- [1] 王成山. 严寒地区碾压混凝土重力坝温度应力研究与温控防裂技术[D]. 大连:大连理工大学,2003.  
Wang Chengshan. The study on thermal stress and temperature cracks control of RCC gravity dam in severe cold area [D]. Dalian: Dalian University of Technology,2003.
- [2] 黄达海,宋玉普,赵国藩. 碾压混凝土拱坝诱导缝的等效强度研究[J]. 工程力学,2000,17(3):16-22.  
Huang Dahai, Song Yupu, Zhao Guofan. Study on the equivalence strength for crack director of RCC arch dam [J]. Engineering Mechanics, 2000,17(3):16-22.
- [3] 张小刚,宋玉普,吴智敏. 碾压混凝土穿透型诱导缝等效强度和断裂试验研究[J]. 水利学报,2004,(3):98-102.  
Zhang Xiaogang, Song Yupu, Wu Zhimin. Experimental study on fracture parameter and equivalent strength of penetrated induced joints in RCC[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004,(3):98-102.
- [4] 刘杏红,常晓林,周伟. 碾压混凝土重力坝诱导缝施工期三维非线性开裂分析[J]. 武汉大学学报:工学版,2005,38(3):41-44.  
Liu Xinghong, Chang Xiaolin, Zhou Wei. Three-dimension nonlinear cracking study of inducing slit of RCC gravity dam during construction period [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2005,38(3):41-44.
- [5] 周伟,常晓林,喻建清,等. 小湾高拱坝上游坝踵人工短缝设置效果的深入分析[J]. 水力发电学报,2007,26(6):17-24.  
Zhou Wei, Chang Xiaolin, Yu Jianqing, et al. In-depth

study on effect of the induced slit at the heel of Xiaowan high arch dam [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007,26(6):17-24.

- [6] 黄玮,谭力,黄达海. 碾压混凝土重力坝人工短缝效果研究[J]. 云南水力发电,2007,23(3):52-56.  
Huang Wei, Tan Li, Huang Dahai. Study on effects of artificial short cracks of roller compacted concrete gravity dam [J]. Yunnan Water Power, 2007,23(3):52-56.
- [7] 李守义,张晓飞,陈尧隆. 碾压混凝土坝上游面设短缝对温度应力的影响[J]. 水利水电技术,2003,34(7):39-40.  
Li Shouyi, Zhang Xiaofei, Chen Yaolong. Effect of upstream artificial short joint on thermal stress of compacted concrete dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003,34(7):39-40.
- [8] 魏忠元. 碾压混凝土坝设人工短缝温度应力的仿真分析[D]. 西安:西安理工大学,2006.  
Wei Zhongyuan. Simulation and analyses of the thermal stress of the RCC dam with artificial short joint [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006.
- [9] 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.
- [10] 李守义,赵基花. 碾压混凝土重力坝温度场与温度徐变应力仿真分析[J]. 西安理工大学学报,2004,20(1):58-62.  
Li Shouyi, Zhao Jihua. Simulation analysis of temperature field and thermal stress of RCC gravity dam [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2004, 20(1):58-62.
- [11] 王成山,韩国城,吕和祥. 白石碾压混凝土重力坝预留缝的研究与应用[J]. 水利学报,2003,(9):107-111.  
Wang Chengshan, Han Guocheng, Lü Hexiang. Application of preset cracks in RCC dams [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003,(9):107-111.
- [12] 司政,李守义,陈培培,等. 基于ANSYS的大体积混凝土温度场计算程序开发[J]. 长江科学院院报,2011,28(9):53-56.  
Si Zheng, Li Shouyi, Chen Peipei, et al. Development of temperature field calculation program on ANSYS platform for mass concrete structure [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011,28(9):53-56.
- [13] 陈尧隆,王长江,李守义. 模拟分析热应力RCC坝用3-D有限元 relocating mesh 方法[J]. Advanced in Engineering Software, 2001,32(9):677-680.
- [14] 张金凯,李守义,吴忠明,等. 考虑昼夜温差的碾压混凝土坝温度场仿真分析[J]. 西安理工大学学报,2008,24(3):311-315.  
Zhang Jinkai, Li Shouyi, Wu Zhongming, et al. An analysis of temperature field simulation of rolling compacted concrete dam in considering diurnal temperature [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2008, 24(3):311-315.

(责任编辑 王卫勋)