第30卷第1期
2019年 2月

水资源与水工程学报
Journal of Water Resources & Water Engineering

Vol.30 No.1
Feb.,2019

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2019.01.28

基于温度应力仿真的碾压混凝土拱坝诱导缝开裂分析研究

刘 茜, 张晓飞, 张 昕, 李守义

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘 要: 诱导缝作为碾压混凝土拱坝结构防裂措施,能否在坝体温度下降时率先开裂,以消散温度应力,是控制坝体温度裂缝的关键。应用大型有限元分析软件ANSYS,采用薄层实体接缝单元模拟诱导缝,考虑施工期至运行期全过程瞬态温度荷载,通过三维有限元温度应力仿真分析和诱导缝开裂情况分析对全部采用"诱导缝"分缝形式的某碾压混凝土拱坝进行可行性研究。结果表明:坝体高拉应力区设置的诱导缝,在做好缝端处理,消除诱导缝与地基接触部位应力集中的条件下,能够有效地释放坝体应力,保证坝体在温度荷载下的运行安全。仿真分析结果可为该碾压混凝土拱坝的温度控制、裂缝预测及其预防提供参考依据。

关键词: 碾压混凝土拱坝; 诱导缝; 薄层接缝单元; 三维有限元法; 温度应力

中图分类号:TV642.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2019)01-0183-08

Research on induced joints cracking analysis of RCC arch dam based on temperature stress simulation

LIU Qian, ZHANG Xiaofei, ZHANG Xin, LI Shouyi

(*Faculty of Water Resources and Hydro-electric Engineering*, *Xi'an University of Technology*, *Xi'an* 710048, *China*)

Abstract: As a structural anti-cracking measure of the rotter compacted concrete (RCC) arch dam, whether the induced joints can crack firstly to reduce the temperature stress when the temperature of the dam drops is the key to control the temperature crack of the dam. The large finite element analysis software ANSYS and the thin-layer solid joint unit were to simulate the induced joint. Considering temperature load from construction period to operation period, the three-dimensional finite element temperature stress simulation analysis and the induced joint cracking analysis are all adopted to study the feasibility of a RCC arch dam in the form of induced joints. The results indicate that induced joints set in high tension stress area could effectively release the temperature stress of the dam and ensure the safety of the dam under the temperature load when the stress concentration of the contact parts between the induced joints and the foundation is eliminated. The simulation analysis results can provide reference for the temperature control, crack prediction and prevention of the RCC arch dam.

Key words: roller compacted concrete (RCC) arch dam; induced joint; thin-layer joints element; three-dimensional finite element method; temperature stress

1 研究背景

碾压混凝土拱坝采用通仓薄层浇筑、大面积连续上升的施工方法,混凝土产生的大部分水化热在短期内积蓄在坝体,无法及时散发,从而形成坝体中心与边界间的内外温差和上层新浇混凝土与下层老混凝土间的上下层温差,在周边基础的约束作用下坝体更易在温降时产生温度裂缝,因此对于碾压混凝土拱坝结构设计和现场施工而言,温度裂缝问题和温控防裂工作不容忽视[1-3]。目前,碾压混凝土拱坝通常采用"诱导缝+横缝"的分缝形式来释放坝体温度应力,以期控制施工期温度收缩引起的无

收稿日期:2018-07-13; **修回日期**:2018-09-09
基金项目:国家自然科学基金项目(51479168)
作者简介:刘 茜(1993-),女,陕西岐山人,硕士研究生,主要从事大体积混凝土温度场应力场仿真分析研究。
通讯作者:张晓飞(1978-),男,陕西周至人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事水工结构应力分析研究。

序裂缝[4]。

作为一种结构防裂措施,在实际工程中尽管诱导缝的设计意图相同,但发挥效果却不尽相同。我国的第一座碾压混凝土拱坝——普定拱坝,采用“横缝+诱导缝”的分缝形式,运行若干年后坝体多处出现裂缝,右岸坝肩甚至出现贯穿裂缝,而坝体内设置的诱导缝均未开裂,说明诱导缝并未起到预期的保护坝体的作用[5];普定拱坝修建完工后的第二年,温泉堡碾压混凝土拱坝也正式完工,坝体采用“诱导缝+横缝+混合缝”的分缝形式,大坝运行期间,诱导缝及混合缝多次张开,对削弱坝体温度应力、防止坝体产生随机无序裂缝起到了重要作用[6];沙牌碾压混凝土拱坝,运行初期诱导缝已部分张开,有效释放了施工期温度回降在坝体产生的较大的温度应力[6-7]。可见诱导缝能否充分发挥预期效果是控制坝体开裂的关键。

我国通过“八五”到“九五”两次科技攻关,在诱导缝等效强度理论研究和诱导缝数值模拟方面取得一些研究成果。曾昭扬等[8]提出了以断裂能为参数的单向间隔结构形式的诱导缝断裂判别式及其等效强度计算模型;王学志等[9]建立了基于混凝土断裂韧度尺寸效应的双向间隔诱导缝等效强度模型;周伟等[10]采用无厚度的接触单元模拟诱导缝的工作性态,对考虑全过程瞬态温度荷载的小湾拱坝诱导缝设置效果进行了仿真分析;何婷等[11]和周伟等[12]提出一种新的模拟诱导缝形成过程、开合效应及灌浆作用的复合接触单元,并通过小湾拱坝验证了模型的准确性和有效性;孙伟等[13]采用薄层接缝单元实现了循环荷载作用下含接缝非整体性拱坝的全过程模拟。

目前国内高拱坝基本采用“诱导缝+横缝”的分缝形式,设置横缝及灌浆系统的温控防裂技术已基本成熟,但横缝施工比较复杂,影响整体施工进度,因此在坝体合理的位置设置合适数量的诱导缝,使其在满足大坝温控标准和减小施工干扰的条件下,释放坝体温度应力的同时又不影响坝体的刚度、整体性和稳定性,从而实现碾压混凝土拱坝结构设计的经济安全性,是学术界和工程界普遍关心的问题,具有重要的实际研究意义。本文应用大型有限元分析软件 ANSYS,考虑施工期至运行期全过程瞬态温度荷载,采用薄层实体接缝单元模拟诱导缝,对只设置诱导缝的某碾压混凝土拱坝进行了温度应力仿真分析和诱导缝开裂情况分析,研究成果可为碾压混凝土拱坝的设计和施工提供参考,具有一定的工程应用价值。

2 计算原理

2.1 温度场计算原理

根据热量平衡原理,坝体混凝土温度与时间和空间关系应满足如下热传导方程:

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

式中:a 为混凝土的导温系数,m^2/h; θ 为混凝土的绝热温升,℃。

温度场定解条件(初始条件和边界条件)详见文献[14]。

2.2 温度应力场计算原理

坝体混凝土在某一时段内的应力-应变增量关系为:

$$\{\Delta\sigma_n\} = [D_n]\{\Delta\varepsilon_n^e\} = [D_n](\{\Delta\varepsilon_n\} - \{\Delta\varepsilon_n^c\} - \{\Delta\varepsilon_n^T\} - \{\Delta\varepsilon_n^g\}) \tag{2}$$

式中:$[D_n]$ 为弹性矩阵; $\{\Delta\varepsilon_n^e\}$ 为坝体加荷瞬时的弹性应变增量; $\{\Delta\varepsilon_n^c\}$ 为坝体在长期恒定荷载作用下,应变随时间延长不断增长的徐变应变增量,与加荷龄期和荷载持续时间有关; $\{\Delta\varepsilon_n^T\}$ 为温度变化引起的应变增量; $\{\Delta\varepsilon_n^g\}$ 为混凝土自生体积变形引起的应变增量。

将结点力和结点荷载加以集合的应力场平衡方程为:

$$[K_n]\{\Delta\delta_n\} = \{\Delta P_n^c\} + \{\Delta P_n^T\} + \{\Delta P_n^g\} \tag{3}$$

式中:$[K_n]$ 为整体刚度矩阵; $\{\Delta\delta_n\}$ 为各结点位移增量; $\{\Delta P_n^c\}$、$\{\Delta P_n^T\}$、$\{\Delta P_n^g\}$ 分别为徐变、温度变化和混凝土自生体积变形引起的单元结点荷载增量。

由公式(3)求得 $\{\Delta\delta_n\}$ 后,代入应力-应变增量关系式求出应力增量。逐时段累加,得:

$$\{\Delta\sigma_n\} = \sum_{i=1}^{n}\{\Delta\sigma_i\} \tag{4}$$

3 基于薄层接缝单元的诱导缝的模拟

3.1 薄层接缝单元

为了便于与普通实体单元相连接,薄层接缝单元的刚度矩阵与普通单元一样,忽略了垂直于厚度方向的变形模量和耦合作用,其本构矩阵中的法向弹模和切向弹模分别如公式(5)和(6)[13,15]。

$$D_{nn} = tK_{ni}\left(1 - \frac{\sigma_n}{V_m K_{ni} + \sigma_n}\right)^{-2} \tag{5}$$

式中:t 为薄层接缝单元的厚度,m; K_{ni} 为法向初始刚度,MPa/m; σ_n 为法向正应力,MPa; V_m 为法向最大压缩量,m。

$$D_{ns} = tK_{si}\gamma_w\left(\frac{\sigma_n}{P_a}\right)^n\left(1-\frac{\tau R_f}{\tau_p}\right)^2 \tag{6}$$

式中:K_{si} 为初始剪切刚度,MPa/m;τ 为切向剪应力,MPa;R_f 为破坏比;τ_p 为临界剪应力,MPa,$\tau_p = c - \sigma_n \cdot \tan\varphi$。

3.2　诱导缝的模拟

为了释放施工期温度回降在坝体中产生的较大的温度应力,控制坝体随机无序温度裂缝的产生,须在坝体合理的位置设置合理数量的诱导缝。诱导缝断面混凝土被部分削弱,而未被削弱的残余的那部分混凝土所具有的抗拉强度(等效强度)对分析诱导缝的开裂状况十分重要[16]。

基于诱导缝模拟的碾压混凝土拱坝非整体性温控仿真分析时,将径向诱导缝单元(见图 1)视为弹性徐变体(见图 2),垂直于层面方向的抗拉强度降低为诱导缝断面等效强度,并相应的降低法向刚度,而平行于层面方向的抗拉强度和弹性模量保持不变。假定 Z 轴垂直于层面,则诱导缝单元的应力 - 应变关系如下:

$$\begin{cases}\varepsilon_x = \sigma_x/E_m - \mu_n\sigma_z/E_n - \mu_m\sigma_y/E_m\\ \varepsilon_y = \sigma_y/E_m - \mu_n\sigma_z/E_n - \mu_m\sigma_x/E_m\\ \varepsilon_z = \sigma_z/E_n - \mu_m\sigma_x/E_m - \mu_m\sigma_y/E_m\\ \gamma_{xy} = 2(1+\mu_m)\tau_{xy}/E_m\\ \gamma_{yz} = \tau_{yz}/G_n\\ \gamma_{zx} = \tau_{zx}/G_n\end{cases} \tag{7}$$

式中:E_m、μ_m 为层面方向的弹性常数;E_n、μ_n 及 G_n 为垂直于层面方向的弹性常数。

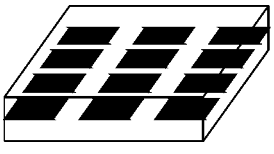


图 1　诱导缝示意图

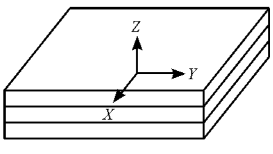


图 2　弹性薄层实体接缝单元

3.3　诱导缝开裂判别准则

本文采用的弹性薄层实体接缝单元能充分模拟坝体诱导缝在周期性荷载反复加载作用下的开合变化,反映不连续诱导缝面对整体结构的影响[13]。诱导缝扩展时,在做好诱导缝从闭合到开裂衔接过渡时单元类型转换的基础上,只需修改接缝单元的本构关系,通过其高斯积分点法向正应力,即可实现非整体性碾压混凝土拱坝施工期及运行期全过程温度应力仿真模拟和诱导缝接触状态的判别。诱导缝的开裂判别条件如下:

$$\begin{cases}\dfrac{\sigma_i}{\sigma_{\max}} \geqslant \dfrac{f_{eq}}{f_t}\\ \sigma_i \geqslant f_{eq}\end{cases} \tag{8}$$

式中:σ_i 为诱导缝缝面上的主拉应力,MPa;$\sigma_{\max}$ 为拱端或拱冠最大主拉应力,MPa;f_{eq} 为诱导缝等效强度,MPa;f_t 为坝体混凝土抗拉强度,MPa。

当薄层接缝单元法向正应力首次达到其等效强度时,诱导缝面局部开裂,假定局部开裂的裂缝尖端的应力集中现象能够使诱导缝其他部位进一步开裂,即将其视为面面接触的非线性问题。仿真计算所采用的薄层接缝单元考虑了接触面粘结、滑移、张开 3 种变形模式:(1) 当接缝单元的法向正应力 $\sigma_n \leqslant 0$ 且切向剪应力 $\tau < f|\sigma_n|$ 时,接触面处于粘结模式;(2) 当接缝单元的法向正应力 $\sigma_n \leqslant 0$ 但切向剪应力 $\tau \geqslant f|\sigma_n|$ 时,接触面处于滑移模式;(3) 当接缝单元的法向正应力 $\sigma_n > 0$ 时,开裂后的接触面处于张开模式。

4　工程算例

4.1　基本资料

4.1.1　*工程概况*　某碾压混凝土拱坝最大坝高 132 m,坝顶拱圈中心线弧长 337.60 m,坝顶厚 8.0 m,拱冠梁底部厚 35 m,厚高比 0.265。大坝采用坝顶溢流和底孔泄流,泄洪建筑物正对下游主河床布置。坝体混凝土采用全年浇筑施工方式,2018 年 4 月 1 日开始混凝土浇筑,2020 年 5 月 4 日浇至坝顶,完成混凝土浇筑。坝体诱导缝布置位置见图 3。坝址区多年月平均气温统计资料见表 1。

4.1.2　*混凝土及基岩的材料参数*　筑坝材料主要包括垫层常态混凝土 C1(C_{28}200W8F100)、迎水面二级配碾压混凝土 R1(C_{90}200W8F50)、坝体内部三级配碾压混凝土 R2(C_{90}200W2F50)和溢流面常态混凝土 C2(C_{28}25F50),坝体材料分区见图 4。混凝土及基岩热力学参数见表 2。

文献[13]研究表明,垂直于诱导缝薄层接缝面的法向刚度可取为混凝土刚度的 80%,诱导缝薄层接缝面的等效抗拉强度可取为混凝土抗拉强度的 55%。

4.2　有限元计算模型

建立模拟坝体混凝土施工过程的整体计算模型,采用有限元分析软件 ANSYS 的生死单元技术模拟坝体浇筑上升过程[17-18]。有限元计算模型如图 5 所示。施工期计算步长为 1 d,运行期的计算步长为 2 ~ 5 d 的变步长,利用 ANSYS 参数化设计语言编制开发温度场和温度应力场计算程序进行每个荷载步的计算。

表 1　坝址各月份月平均气温　　℃

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
6.3	7.8	12.5	18.9	24.5	27.6	30.2	31.1	24.3	18.4	13.1	7.6

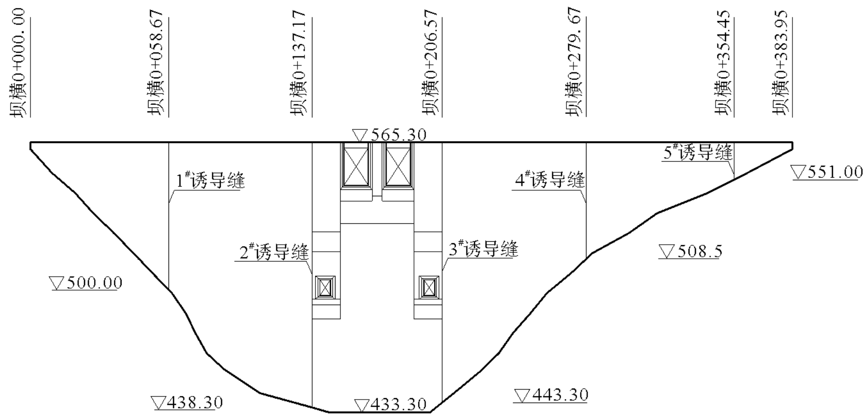


图 3　坝体诱导缝布置位置示意图

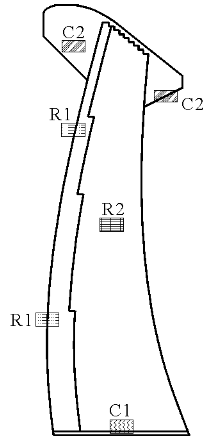
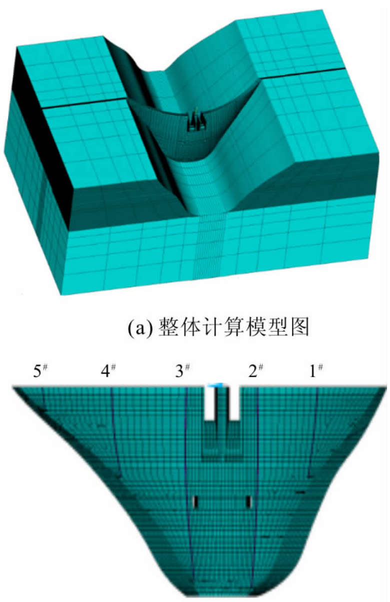


图 4　坝体材料分区图

表 2　混凝土与基岩热力学参数表

材料	线胀系数/ 10^{-6}℃$^{-1}$	比热/ (kJ·kg^{-1}·℃$^{-1}$)	导热系数/ (kJ·m^{-1}·h^{-1}·℃$^{-1}$)	绝热温升/ ℃	弹性模量/ GPa
垫层常态混凝土	9.9	0.956	6.33	$\theta=\frac{34.40\tau}{\tau+1.20}$	37.7
二级配碾压混凝土	7.2	0.915	7.00	$\theta=\frac{25.90\tau}{\tau+3.59}$	36.5
三级配碾压混凝土	7.2	0.922	7.46	$\theta=\frac{22.30\tau}{\tau+3.87}$	35.2
溢流面常态混凝土	9.5	0.971	6.71	$\theta=\frac{36.98\tau}{\tau+1.20}$	39.9
基岩	7.5	0.766	6.8		12.0



(a) 整体计算模型图

(b) 坝体计算模型图

图 5　有限元计算模型

温度场仿真计算采用 Solid70 单元，地基底面及 4 个侧面均为绝热边界，坝体上、下游面在水位以上为固－气边界，假定混凝土表面热流量与混凝土表面温度和空气温度之差成正比，即按第三类边界条件处理；水位以下为固－水边界，混凝土表面温度等于水温，表面散热系数 β 趋于无穷，即按第一类边界条件处理[19]。应力场仿真计算采用 Solid185 单元，地基底面按固定约束处理，4 个侧面加法向约束，其余为自由边界[19]。

4.3　温度应力控制标准

根据《碾压混凝土坝设计规范》SL314－2004，本工程强约束区（高程 433.3～449.3 m）碾压混凝土基础容许温差为 10～12℃，弱约束区（高程449.3～465.3 m）碾压混凝土基础容许温差为 12～14.5℃。根据《混凝土拱坝设计规范》SL282－2003，坝体混凝土允许抗裂温度应力应满足：

$$\sigma \leqslant \varepsilon_p E_c / K_f \tag{9}$$

式中:σ 为初始温差、内外温差和上下层温差所产生的温度应力之和,MPa;ε_p 为混凝土极限拉伸标准值,是混凝土抗裂性能的一个重要指标;E_c 为混凝土弹性模量标准值,GPa;K_f 为安全系数,根据重要性和开裂的危害性,本工程取为 1.65。

根据坝体各部位混凝土弹性模量和极限拉伸值计算的混凝土允许拉应力见表 3。

表 3　坝体各部位混凝土允许拉应力　MPa

垫层常态混凝土	二级配碾压混凝土	三级配碾压混凝土	溢流面常态混凝土
2.22	1.98	1.81	2.47

4.4　计算工况

本文在控制约束区浇筑温度不超过 17℃,非约束区浇筑温度不超过 21℃的情况下,对以下 3 种工况进行温度场仿真研究。

工况 1:该工况作为对比工况,不考虑通水冷却措施。

工况 2:该工况采取全坝段通水冷却措施,通水时间为 15 d,4 月和 10 月浇筑混凝土通水温度对应为当月河水温度,5－9 月浇筑混凝土通 22℃冷却水。浇筑层厚 3 m,大层浇筑完立即通水冷却,冷却水管垂直间距与水平间距均为 1.5 m,通水流量为 1.0 m^3/h,单根冷却水管长度为 250 m。

工况 3:该工况采取全坝段通水冷却措施,通水时间为 15 d,4 月和 10 月浇筑混凝土通水温度对应为当月河水温度,5－9 月浇筑混凝土通 18℃冷却水。其他条件与方案 2 相同。

4.5　计算成果分析

4.5.1　温度场计算成果分析　本文在全坝段控制混凝土浇筑温度的情况下对工况 1～工况 3 进行温度场仿真计算。图 6 为通水冷却前后各工况拱冠梁剖面基础强约束区中间点温度历时曲线;图 7 为工况 3 基础约束区碾压混凝土最高温度云图;各工况不同区域碾压混凝土最高温度见表 4。温度场计算结果表明:

(1)在强约束区碾压混凝土范围内,工况 1 和工况 2 的最大温差均大于基础容许温差,工况 3 的最大温差小于基础容许温差;在弱约束区碾压混凝土范围内,工况 1 最大温差大于基础容许温差,工况 2 和工况 3 最大温差均小于基础容许温差;非约束区碾压混凝土范围内,工况 1 最高温度为 41.7℃,工况 2 最高温度为 37.4℃,工况 3 最高温度为 36.8℃。可见,工况 3 满足温度控制标准要求。

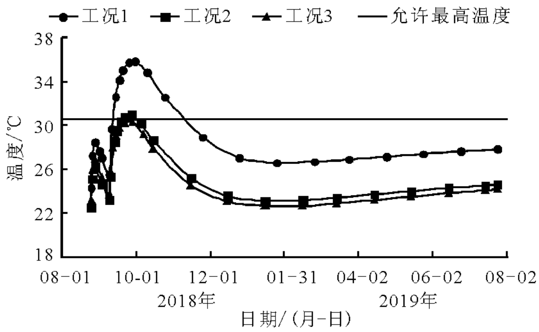


图 6　2018－2019 年通水冷却前后各工况拱冠梁剖面基础强约束区中间点温度历时曲线

表 4　各工况不同区域碾压混凝土最高温度　℃

计算工况	最高温度及容许温度	强约束区(EL433.3～EL449.3 m)	弱约束区(EL449.3～EL465.3 m)	非约束区(EL465.3～EL565.3 m)
1	最高温度	35.9	34.8	41.7
	稳定温度	18.5	18.5	18.5
	最大温差	17.4	16.3	23.2
	基础容许温差	10～12	12.0～14.5	
2	最高温度	31.0	30.5	37.4
	稳定温度	18.5	18.5	18.5
	最大温差	12.5	12.0	18.9
	基础容许温差	10～12	12.0～14.5	
3	最高温度	30.3	30.0	36.8
	稳定温度	18.5	18.5	18.5
	最大温差	11.8	11.5	18.3
	基础容许温差	10～12	12.0～14.5	

(2)坝体最高温度出现在施工期内,施工期对高温季节浇筑的部位埋设冷却水管进行通水冷却,可将坝体最高温度降低4~5℃,降低冷却水水温可将坝体最高温度降低0.5~0.7℃左右。

(3)在拱坝运行过程中坝体混凝土与外界环境不断地进行热交换,随着时间的推移,坝体混凝土最高温度逐渐降低并趋于稳定温度18.5℃。

4.5.2 *应力场计算成果分析* 由上述温度场分析可知,工况3的最高温度满足温度控制标准要求,因此根据工况3的温度场仿真计算成果,对其应力场进行仿真分析,检验是否满足碾压混凝土拱坝应力控制标准。图8为工况3拱冠梁剖面不同高程典型点第一主应力S1历时曲线,坝体不同部位混凝土最大温度应力见表5。应力场计算结果表明:

(1)坝体应力分布基本上与温度分布相吻合,高温季节(4-10月)浇筑的部位,温度应力相对较大;低温季节(11-次年3月)浇筑的部位,温度应力相对较小,坝体表面应力随外界气温和水温呈周期性简谐变化。

表5 坝体不同部位混凝土最大温度应力

部位	应力/MPa	出现时间/(年-月-日)	出现位置
垫层常态混凝土	2.13	2018-12-25	上游坝踵
二级配碾压混凝土	1.86	2018-12-25	坝高7m上游坝面
三级配碾压混凝土	1.63	2018-12-25	坝高7m下游坝面
溢流面常态混凝土	2.27	2021-06-30	常态混凝土内部

(2)垫层常态混凝土最大温度应力为2.13 MPa,出现在低温季节上游坝踵;迎水面二级配碾压混凝土最大温度应力为1.86 MPa,坝体内部三级配碾压混凝土最大温度应力为1.63MPa,均出现在低温季节坝体表面,主要原因是坝体该部位混凝土在高温季节浇筑,较高的水化热温升和浇筑温度导致混凝土温度较高,入冬后坝体内外温差梯度较大,从而产生较大的温度应力;溢流面常态混凝土最大温度应力为2.27 MPa,出现在高温季节常态混凝土内部。坝体各部位最大温度应力均小于允许抗拉强度,满足温度应力控制标准。

4.5.3 *诱导缝开裂分析* 为简单起见,本文不进行诱导缝裂缝开裂扩展过程中的断裂力学分析,而假定局部开裂的诱导缝缝端应力能诱使混凝土进一步开裂。基于应力场仿真计算成果,根据诱导缝开裂判别式,对诱导缝开裂情况进行定性分析,得到诱导缝的开裂情况见表6~8。诱导缝开裂分析表明:

(1)2#诱导缝在施工初期初始终未开裂,主要原因是坝体混凝土在高温季节(4月份)开浇,温升期(5-8月)使坝体混凝土储存了较大的预压应力。在第1个低温季节(2018年12月1日-2019年2月28日),外界气温较低,坝体混凝土温降较大,诱导缝在433.3~443.3 m高程拱端和拱冠应力均小于缝面应力,诱导缝上下游面均开裂,说明诱导缝布设位置合理且有效地释放了温度回降在坝体产生的较大温度应力;在第2个低温季节(2019年12月1日-2020年2月29日),诱导缝在433.3~443.3 m高程缝面应力均大于拱端和拱冠应力,诱导缝上下游面均开裂;在第3个低温季节(2020年12月1日-2021年2月28日),诱导缝在433.3~443.3 m高程上游面闭合、下游面开裂,其原因是上游受水库蓄水水压的影响,温降应力有所缓解。

表6 2#和3#诱导缝缝面应力及诱导缝状态 MPa

高程/m	时间/(年-月)	上游面						下游面				
		左岸坝肩	2#缝面	状态	右岸坝肩	3#缝面	状态	拱冠	2#缝面	状态	3#缝面	状态
438.3~443.3	2018-12-2019-02	1.57	1.71	开裂				1.63	1.74	开裂		
	2019-12-2020-02	1.23	1.59	开裂				1.37	1.67	开裂		
	2020-12-2021-02	1.07	0.83	闭合				0.83	1.21	开裂		
443.3~469.3	2018-12-2019-02	1.63	1.32	开裂	1.39	1.82	开裂	1.52	1.30	开裂	2.07	开裂
	2019-12-2020-02	1.22	1.01	开裂	1.31	1.45	开裂	1.27	1.22	开裂	1.93	开裂
	2020-12-2021-02	1.08	0.59	闭合	0.98	0.87	开裂	0.75	0.92	开裂	1.53	开裂
469.3~508.5	2018-12-2019-02	1.21	0.96	闭合	1.23	0.95	闭合	0.94	0.86	开裂	0.87	开裂
	2019-12-2020-02	1.19	0.54	闭合	1.18	0.56	闭合	0.81	0.76	开裂	0.76	开裂
	2020-12-2021-02	0.99	0.36	闭合	1.02	0.38	闭合	0.65	0.59	开裂	0.56	开裂

(2)3#诱导缝在第 1 个低温季节(2018 年 12 月 1 日－2019 年 2 月 28 日)、第 2 个低温季节(2019 年 12 月 1 日－2020 年 2 月 29 日)及第 3 个低温季节(2020 年 12 月 1 日－2021 年 2 月 28 日),443.3～469.3 m 高程拱端和拱冠应力均小于缝面应力,诱导缝上下游面均开裂,这在拱坝的施工和温控防裂工作中是个有利因素,说明诱导缝设置较为合理。

(3)1#诱导缝和 4#诱导缝第 2 个低温季节(2019 年 12 月 1 日－2020 年 2 月 29 日),508.5～530.8 m 高程拱端和拱冠应力均小于缝面应力,诱导缝上下游面均开裂;在第 3 个低温季节(2020 年 12 月 1 日－2021 年 2 月 28 日),508.5～530.8 m 高程诱导缝上下游面均开裂。说明诱导缝的设置削弱了坝体温度应力,有效防止了坝肩产生随机无序裂缝,充分发挥了预期效果。

(4)5#诱导缝在第 3 个低温季节(2020 年 12 月 1 日－2021 年 2 月 28 日),551～562 m 高程上下游缝面均开裂,有效释放了坝体温度应力,说明诱导缝的布设位置是合理的。

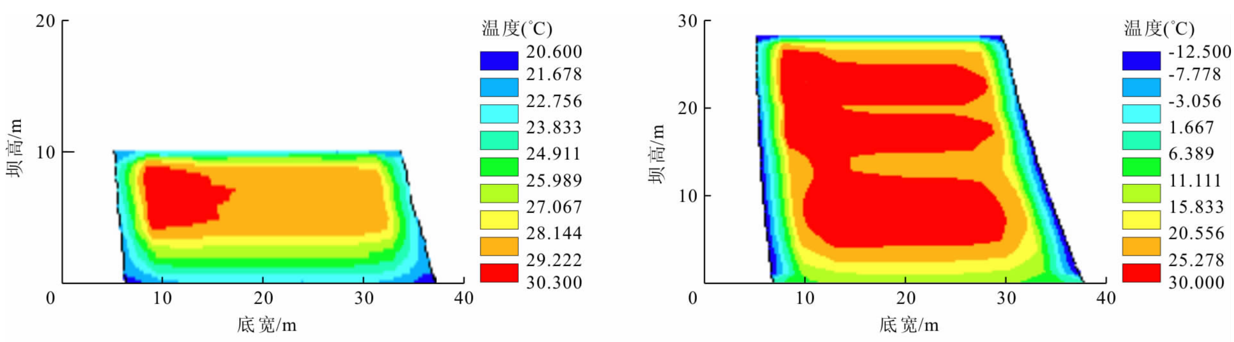
4.5.4　诱导缝对坝体应力的影响　在碾压混凝土拱坝非整体性温控仿真分析中,诱导缝的开裂情况直接影响着坝体应力分布状态,图 9 为坝体上游面第一主应力 S1 包络图。由图 9 可以看出,忽略诱导缝缝端与基岩接触部位的应力集中现象,坝体应力分布均匀且出现明显分区,坝体上游面最大主拉应力为 1.86MPa,小于迎水面二级配碾压混凝土的允许抗拉强度。坝体在诱导缝处的温度应力明显降低,随着与诱导缝之间距离的增大,温度应力降低幅度逐渐减小,可见诱导缝对坝体不同部位应力的削弱程度不同。诱导缝对坝体应力的影响分析表明诱导缝的开裂在一定程度上削减了因基础温降引起的坝体温度应力,能够保证坝体的抗裂安全性。

表 7　1#和 4#诱导缝缝面应力及诱导缝状态　　MPa

高程/m	时间/(年-月)	上游面						下游面				
		左岸坝肩	1#缝面	状态	右岸坝肩	4#缝面	状态	拱冠	1#缝面	状态	4#缝面	状态
508.5～530.8	2019-12－2020-02	1.64	2.23	开裂	1.80	2.19	开裂	1.55	2.22	开裂	1.96	开裂
	2020-12－2021-02	1.70	1.45	开裂	1.87	1.52	开裂	1.02	1.46	开裂	1.45	开裂
530.8～551.0	2019-12－2020-02	1.61	0.55	闭合	1.63	0.54	闭合	0.95	0.76	开裂	0.77	开裂
	2020-12－2021-02	1.31	0.36	闭合	1.36	0.35	闭合	0.50	0.36	闭合	0.35	闭合

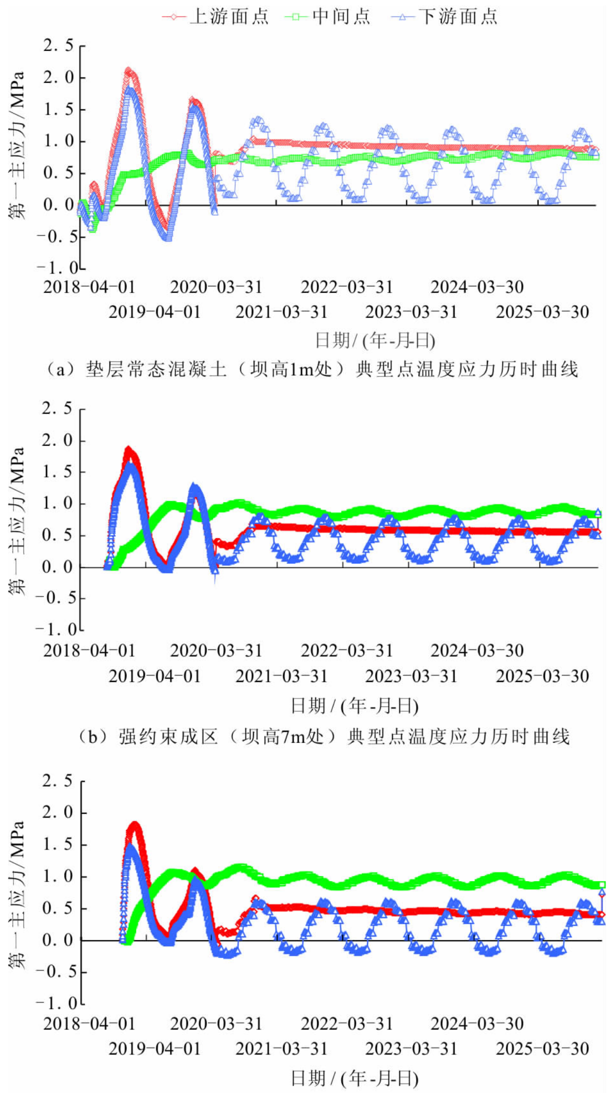
表 8　5#诱导缝缝面应力及诱导缝状态　　MPa

高程/m	时间/(年-月)	上游面			下游面		
		右岸坝肩	5#缝面	状态	拱冠	5#缝面	状态
551.0～562.0	2020-12－2021-02	1.21	0.97	开裂	0.53	0.67	开裂
562.0～565.3	2020-12－2021-02	1.38	1.01	闭合	0.50	0.98	开裂



(a) 强约束区　(b) 弱约束区

图 7　工况 3 基础约束区碾压混凝土最高温度云图



(a) 垫层常态混凝土（坝高1m处）典型点温度应力历时曲线
(b) 强约束成区（坝高7m处）典型点温度应力历时曲线
(c) 弱约束区（坝高24m处）典型点温度应力历时曲线

图 8　拱冠梁剖面不同高程典型点第一主应力 S1 历时曲线

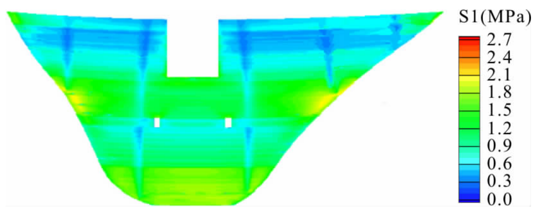


图 9　坝体上游面第一主应力 S1 包络图

5　结　论

采用有限元软件 ANSYS 对设诱导缝非整体性碾压混凝土拱坝进行了全过程温控仿真分析，计算结果表明：

(1)在全坝段控制浇筑温度(基础约束区温度≤17℃，非约束区温度≤21℃)和采取通水冷却(冷却时间 15 d，冷却水温 18℃)的双重温控措施下，坝体垫层常态混凝土的最大温度应力为 2.13 MPa，迎水面二级配碾压的混凝土最大温度应力为 1.86 MPa，内部三级配碾压混凝土的最大温度应力为 1.63 MPa，溢流面常态混凝土的最大温度应力为 2.27 MPa，各部位混凝土的最大温度应力均小于其允许抗拉强度，因而可保证坝体在温度荷载下的运行安全。

(2)基于温度应力仿真的诱导缝开裂情况预测分析和诱导缝对坝体应力影响分析表明，在忽略诱导缝缝端与基岩接触部位应力集中现象的条件下，坝体上游面最大主拉应力为 1.86 MPa，小于其允许抗拉强度。说明诱导缝的开裂能够有效释放因基础温降引起的拱向温度应力，减小坝体开裂风险。

(3)诱导缝的合理布置与温度应力仿真分析密切相关，真实可靠的温度应力仿真分析可保证诱导缝布置的合理性，合理的诱导缝布置可保证坝体在温度荷载下的开裂安全。

参考文献：

[1] 张国新，刘有志，刘 毅，等. 特高拱坝施工期裂缝成因分析与温控防裂措施讨论[J]. 水力发电学报，2010，29(5)：45－51.
[2] 周秋景，张国新，杨 波. 高坝混凝土裂缝问题研究综述[J]. 南水北调与水利科技，2012，10(1)：129－132.
[3] 张国新，艾永平，刘有志，等. 特高拱坝施工期温控防裂问题的探讨[J]. 水力发电学报，2010，29(5)：125－131.
[4] 周燕红，徐家奇，何蕴龙. 碾压混凝土拱坝诱导缝设置研究[J]. 水电能源科学，2012，30(11)：57－60.
[5] 彭成佳，兰春杰，杨家修，等. 普定拱坝温度场反馈分析及开裂仿真[J]. 武汉大学学报(工学版)，2006，39(1)：21－25.
[6] 李春敏. 我国碾压混凝土拱坝发展概述[C]//全国碾压混凝土坝筑坝技术交流会，贵阳：2004.
[7] 刘海成，吴金国，吴智敏. 沙牌碾压混凝土拱坝应力场仿真计算分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版)，2005，21(5)：445－450.
[8] 曾昭扬，马 黔. 高碾压混凝土拱坝中的构造缝问题研究[J]. 水力发电，1998(2)：30－35＋71.
[9] 王学志，宋玉普，张小刚，等. 碾压混凝土拱坝双向间隔诱导缝等效强度研究[J]. 大连理工大学学报，2006，46(2)：252－256.
[10] 周 伟，常晓林，喻建清，等. 基于施工期温度仿真的小湾高拱坝结构诱导缝设置效果分析[J]. 四川大学学报(工程科学版)，2008，40(1)：51－57.

（下转第 196 页）

(4):87－89.
[8] 李鹏冲. 万家口子拱坝冲沙中孔配筋设计[J]. 红水河, 2016, 35(5):30－33.
[9] 殷 鸣, 李同春, 赵兰浩,等. 基于单弹簧联结单元法的白鹤滩拱坝孔口配筋非线性有限元分析[J]. 水利水电技术, 2017, 48(1):52－58.
[10] 赵兰浩, 张梦迪, 张云峰. 表孔闸墩颈部钢筋混凝土非线性有限元分析[J]. 水电能源科学, 2018,36(1):120－123＋115.
[11] 李同春, 李 淼, 温召旺,等. 局部非协调网格在高拱坝应力分析中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(1):42－45.
[12] 侯化强,王连国,陆银龙,等. 矩形巷道围岩应力分布及其破坏机理研究[J]. 地下空间与工程学报,2011,7(S2):1625－1629.
[13] 朱峰林, 李同春. 地震作用下某混凝土拱坝表孔孔口配筋设计[J]. 水电能源科学, 2016,34(6):75－79.
[14] 韦 未, 李同春, 姚纬明. 建立在应变空间上的混凝土四参数破坏准则[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(5):27－29＋68.
[15] 韦 未, 李同春. 基于四参数等效应变的各向同性损伤模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(4):425－429.
[16] 颜天佑, 李同春, 赵兰浩. 单弹簧联结单元法的改进算法[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2011, 33(6):23－26＋32.
[17] ZHAO Lanhao, ZHANG Wei, BAI Xin, et al. Single spring joint element based on the mixed coordinate system [J]. Mathematical Problems in Engineering , 2015(18):1－16.

(上接第190页)

[11] 何 婷,汪卫明,张 雄,等. 复合接触单元及其在带缝高拱坝仿真中的应用[J]. 水力发电学报,2012,31(5):216－222.
[12] 周 伟,常晓林,解凌飞,等. 模拟高拱坝施工期横缝工作性态的接触－接缝复合单元[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(S2):3809－3815.
[13] 孙 伟,何蕴龙,熊 堃,等. 薄层接缝单元及其在拱坝接缝模拟中的应用[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014,46(S2):26－35.
[14] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.
[15] 刘莹骏,张运良. 一种薄层接触单元的开发及 FLAC～(3D)实现[J]. 水利与建筑工程学报, 2014,12(4):1－8＋49.
[16] 田志斌. 具有诱导缝的碾压混凝土拱坝温度裂缝发展分析[D]. 西安:西安理工大学,2013.
[17] 马建军,符建云,任 涛. 基于 ANSYS 的大体积混凝土浇筑过程仿真分析[J]. 水电能源科学, 2013,31(11):99－101＋123.
[18] CHEN Yaolong, WANG Changjiang, LI Shouyi, et al. Simulation analysis of thermal stress of RCC dams using 3D finite element relocating mesh method[J]. Advances in Engineering Software, 2001, 32(9): 677－682.
[19] 张晓飞,王晓平,黄 宇,等. 寒潮条件下碾压混凝土拱坝温度应力仿真研究[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(1):192－197.