

邕宁闸坝混凝土施工温控方案研究

李焕焕¹, 郝龙², 惠建伟², 傅少君³, 李刚¹

(1. 西京学院 陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安 710100; 2. 中铁二十局集团第六工程有限公司, 陕西 西安 710123; 3. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 为了探究邕宁闸坝混凝土施工温控方案,以该工程 12#溢流闸坝为研究对象,建立三维有限元模型进行仿真计算,分析混凝土在 3 种施工方案下的温度场和温度应力。研究表明:低温季节采用方案 1 进行施工时,施工过程中温度场与温度应力均满足规范要求;高温季节采用方案 2 进行施工时,施工过程中最高温度与最大温度应力值均不满足规范要求;高温季节采用方案 3 进行施工时,施工过程中最高温度与最大应力值均满足规范要求。建议低温季节浇筑时采用自然入仓的浇筑方式;高温季节浇筑时,应控制底板混凝土浇筑温度不超过 14℃,闸墩混凝土浇筑温度不超过 16℃,同时采取通水冷却措施。计算结果可为邕宁闸坝及类似工程施工方案设计提供参考。

关键词: 施工温控; 温度场; 温度应力; 温度控制方案; 邕宁闸坝

中图分类号:TV544

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2021)02-0158-08

Temperature control scheme for the concrete construction of Yongning Sluice Dam

LI Huanhuan¹, HAO Long², HUI Jianwei², FU Shaojun³, LI Gang¹

(1. Shaanxi Key Laboratory of Safety and Durability of Concrete Structures, Xijing University, Xi'an 710100, China; 2. No. 6 Engineering Corporation Limited of CR20G, Xi'an 710123, China; 3. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to explore the temperature control scheme of Yongning Sluice Dam concrete construction, taking No. 12 overflow section of the sluice dam as the research object, a 3 D finite element model is established to analyze the concrete temperature field and temperature stress under three construction schemes. The results show that when scheme 1 is adopted in low temperature season, the temperature field and temperature stress in the construction process can meet the specification requirements. When scheme 2 is adopted in high temperature season, the maximum temperature and maximum temperature stress in the construction process can not meet the specification requirements. However, when scheme 3 is adopted in high temperature season, the maximum temperature and maximum stress in the construction process can meet the specification requirements. It is suggested that the natural pouring method should be adopted in low temperature season. When pouring in high temperature season, the pouring temperature of bottom slab concrete should not exceed 14℃, and that of pier concrete should be no higher than 16℃, meanwhile, water cooling measures should be taken too. The calculation results can provide some reference for the construction scheme design of Yongning Sluice Dam and other similar projects.

Key words: construction temperature control; temperature field; temperature stress; temperature control scheme; Yongning Sluice Dam

1 研究背景

南宁市邕宁水利枢纽工程是一个以改善城市环境和水景观、航运为主,兼顾其他的大(2)型综合利

用工程,水库正常蓄水位 67.0 m,水库总库容 $7.1 \times 10^8 \text{ m}^3$,电站总装机容量 57.6 MW。枢纽主要建筑物包括混凝土闸坝、发电厂房、通航建筑物、过鱼建筑物等,其中闸坝段坝基面高程为 48.0 m,闸墩顶

收稿日期:2020-08-20; 修回日期:2020-12-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51879207);陕西省教育厅专项科研项目(20JK0962)

作者简介:李焕焕(1990-),女,天津宝坻人,博士,主要从事混凝土结构安全与耐久性研究。

通讯作者:傅少君(1968-),男,重庆忠县人,博士,教授,博士生导师,主要从事高坝复杂岩石地基及水工结构数值方法研究。

面高程为 81.8 m, 闸坝最大高度为 33.8 m, 闸坝段长度为 23.0 m, 闸坝段底宽度为 41.0 m。闸坝施工过程中, 浇筑方量大, 属于大体积混凝土浇筑工程。大体积混凝土温控防裂的问题一直是众多学者研究的热点问题^[1-6]。朱伯芳^[1]提出了利用冷却水管等有效热传导方程及有限元法计算混凝土拱坝施工期的温度场问题。Salazar 等^[7]总结了近年来拱坝施工期与运行期热力模型的研究进展。罗滔等^[8]模拟了西南地区某拱坝施工过程, 得出两次通水冷却效果明显, 稳定运行一年后坝体内部温度场趋于均匀连续的结论。邓世顺等^[9]针对高海拔地区的混凝土坝浇筑温控防裂问题, 采用三维有限元仿真分析方法分析混凝土的温降过程与控温速率, 提出了防止降温幅度与降温速率过大的温控措施, 以减小温差。一些研究人员针对混凝土的入仓温度、冷却水管温度以及浇筑厚度等参数对混凝土坝温度场与温度应力的影响规律进行研究, 并提出相应的温控措施^[10-13]。戴宏斌等^[14]分析寒潮对导墙坝段施工期温度应力的影响, 提出采用泡沫塑料板进行保温, 可以避免寒潮引起的温度裂缝。金峰等^[15]通过温度监测的方法, 分析了绿塘堆石混凝土拱坝在取消温

控和分缝情况下施工期温度场的变化过程, 提出该施工方案可在气候温和地区推广应用。孙巧荣等^[16]讨论了不同约束形式对渐变流道混凝土结构在施工过程中温度应力的影响规律。此外, 杨凯^[17]、高山等^[18]分别分析了高温季节、低温季节以及高炎热地区等外界环境变化对混凝土坝浇筑过程中温度应力的影响, 进而提出了有效的温控防裂措施。以上分析表明大体积混凝土施工期的温度场和温度应力受浇筑方案及外界环境的影响很大, 对于不同的水利工程, 由于坝体形式、规模等不同, 其最优浇筑方案也不同。因此, 为了确定邕宁闸坝混凝土的施工温控方案, 本文选取该工程 12#溢流闸坝为研究对象, 采用三维有限元方法, 对溢流闸坝低温季节浇筑和高温季节浇筑的温度场和温度应力进行分析, 进而提出合理的温控方案, 研究结果可为混凝土闸坝的设计和施工提供重要依据。

2 基本技术资料

2.1 计算参数

(1) 坝址气温资料。邕宁水利枢纽工程坝址区的多年平均气温为 21.6 °C, 各月平均气温资料见表 1。

表 1 邕宁水利枢纽工程坝址气温资料

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
平均气温/°C	12.7	13.8	17.6	22.1	26	27.6	28.4	28	26.8	23.4	18.6	14.6

(2) 混凝土计算参数。经验表明, 在大体积混凝土温度应力分析中, 混凝土的绝热温升采用双曲线形式和双指数形式表示与试验资料符合较好, 弹性模量采用指数式或者双曲线形式拟合较好^[1]。因此, 本文选取双指数形式表示混凝土的绝热温升, 采用双曲线形式计算混凝土的弹性模量, 并根据试验数据进行参数拟合, 最终确定 C25、C30 混凝土的绝热温升按公式 (1)、(2) 计算, 弹性模量按公式 (3)、(4) 计算。混凝土的热力学参数根据试验结果选取, 见表 2。

C25 混凝土绝热温升(°C):

$$T(\tau) = 30.65 \times (1 - e^{-0.36\tau^{0.74}}) \quad (1)$$

C30 混凝土绝热温升(°C):

$$T(\tau) = 34.50 \times (1 - e^{-0.36\tau^{0.74}}) \quad (2)$$

C25 混凝土弹性模量(GPa):

$$E(\tau) = \frac{28.0\tau}{12.5 + \tau} \quad (3)$$

C30 混凝土弹性模量(GPa):

$$E(\tau) = \frac{30.0\tau}{12.5 + \tau} \quad (4)$$

式中: τ 为混凝土龄期, d。

根据文献[1]朱伯芳提出的混凝土徐变拟合公式, 结合徐变试验数据, 拟合得到混凝土徐变的表达式:

$$C(t, \tau) = (5.867 + 53.979\tau^{-0.45})[1 - e^{-0.30(t-\tau)}] + (13.265 + 22.551\tau^{-0.45})[1 - e^{-0.005(t-\tau)}] \quad (5)$$

式中: t 为计算时刻混凝土的加载时间, d; τ 为混凝土龄期, d。

(3) 基岩热力学参数。邕宁水利枢纽工程基岩热力学参数参考相关试验结果取值, 见表 3。

2.2 温度控制标准

为了满足施工期混凝土抗裂要求, 常态混凝土基础容许温差按《混凝土重力坝设计规范》(SL 319—2018)^[19]执行。溢流闸坝段强约束区基础容许温差为 16~14 °C, 弱约束区基础容许温差为 19~17 °C。根据工程经验可知, 溢流闸坝混凝土结构稳

定温度接近年平均气温,约 21.5 ℃。经计算可知, 37.5 ℃,溢流闸坝弱约束区的容许最高温度区间为溢流闸坝强约束区的容许最高温度区间为 35.5 ~ 38.5 ~ 40.5 ℃。

表 2 混凝土各热力学参数选取

混凝土等级	比热/ (kJ · kg ⁻¹ · °C ⁻¹)	导温系数/ (m ² · h ⁻¹)	导热系数/ (kJ · m ⁻¹ · h ⁻¹ · °C ⁻¹)	表面放热系数/ (kJ · m ⁻² · h ⁻¹ · °C ⁻¹)	线胀系数/ 10 ⁻⁶ °C ⁻¹	泊松比
C25	1.034	0.0031	8.016	70	7.0	0.167
C30	1.036	0.0032	8.288	70	7.0	0.167

表 3 基岩各热力学参数取值

弹性模量 E / GPa	容重/ kg	比热/ (kJ · kg ⁻¹ · °C ⁻¹)	导温系数/ (m ² · h ⁻¹)	导热系数/ (kJ · m ⁻¹ · h ⁻¹ · °C ⁻¹)	线胀系数/ 10 ⁻⁶ (°C ⁻¹)	泊松比
17.2	2636	1.05	0.0032	8.307	4.56	0.20

2.3 应力控制标准

根据《混凝土重力坝设计规范》(SL 319—2018)^[19],温度应力控制标准按公式(6)计算:

$$\sigma \leq \varepsilon_p E_c / K_f \quad (6)$$

式中: σ 为各种温差所产生的温度应力之和,MPa; ε_p 为混凝土的极限拉伸值,一般工程可取(0.7 ~ 1.0) × 10⁻⁴; E_c 为混凝土的弹性模量,MPa; K_f 为设计安全系数,规范建议取 1.5 ~ 2.0 之间,具体视工程重要性和开裂的危害性而定。本工程计算时 K_f 取为 1.65。

邕宁水利枢纽工程常态混凝土 180 d 龄期温度应力控制指标计算见表 4。

表 4 混凝土 180 d 龄期容许温度应力值计算表

混凝土等级	混凝土 极限拉伸值/10 ⁻⁴	弹性模 量/GPa	温度应力 控制指标/MPa
C25	0.98	26.18	1.55
C30	0.98	28.05	1.67

3 有限元模型及计算方案

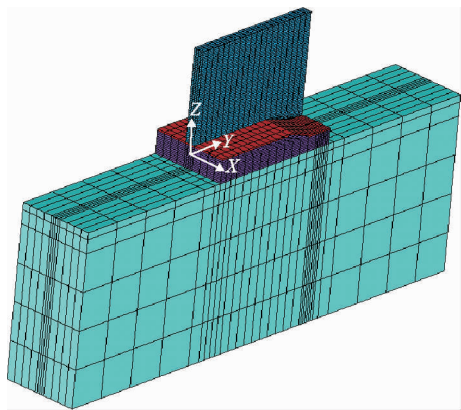
3.1 有限元模型

选取 12[#]溢流闸坝为研究对象,采用 ANSYS 软件建立三维模型。该闸坝段坝基面高程为 48.0 m,闸墩顶面高程为 81.8 m,闸坝最大高度为 33.8 m,闸坝段长度为 23.0 m,闸坝段底宽度为 41.0 m。以闸坝段上游面 52.2 m 高程中心点位置作为坐标的原点,垂直水流的方向为 X 方向,以指向右岸为正;顺水流的方向为 Y 方向,以指向下游为正;坝体高度方向为 Z 方向,以向上为正。

基岩计算范围的选取:以闸坝段为中心,沿着水

流上游、下游方向各延伸 50.0 m,沿基岩的深度方向延伸 50.0 m。

整体有限元模型共有单元 9 704 个,节点 12 215 个,闸底板和闸墩单元 7 400 个,节点 9 212 个。坝体与坝基单元均采用八节点六面体等参单元,计算模型如图 1 所示。由于本文重点研究坝体浇筑工程中的温度场与温度应力变化,坝基主要作为混凝土浇筑过程中的一个边界条件,因此坝体与坝基界面采用共用节点连接,不考虑接触、滑移问题。坝基底面和 4 个侧面为绝热边界,溢流闸坝上、下游面为固-气边界,按第三类边界条件处理。

图 1 选取的 12[#]溢流闸坝整体计算模型

3.2 计算原理

(1)非稳定温度场。根据热量平衡的原理,物体温度升高而吸收的热量必须等于所有从外面流入的净热量与内部水化热之和。因此,对于各向同性问题,三维瞬态温度场热传导基本方程为:

$$\alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (7)$$

式中: T 为混凝土的温度, $^{\circ}\text{C}$; θ 为混凝土的绝热温升, $^{\circ}\text{C}$; $a = \lambda/c\rho$; λ 为混凝土的导热系数, $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$; c 为混凝土的比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; ρ 为混凝土的密度, kg/m^3 ; τ 为时间, d 。

对于公式(7),引入相应的初始条件和边界条件即可得到唯一解。根据变分原理,可导出有限元控制方程:

$$\mathbf{HT} + \mathbf{F} = 0 \quad (8)$$

式中: $\mathbf{H}$ 为热传导矩阵; $\mathbf{F}$ 为热流列阵。

(2) 冷却水管模拟。工程经验表明,通水冷却的方法能够降低混凝土的最高温度,进而减小因温差过大引起的温度应力。相比整个浇筑坝体而言,冷却水管的管径极为细小,在有限元建模过程中,若将水管和坝体分别建模划分网格,则水管处网格相当密集,最终导致模型单元数目非常庞大,在三维仿真计算时,计算效率也会大为降低,且对计算设备的要求非常高。因此,本文采用文献[1]朱伯芳所提出的等效算法,该方法不对冷却水管进行单独建模,而是把水管看作内部热源,考虑冷却水初温、通水时间、混凝土绝热温升等因素建立等效热传导方程,从平均意义的角度考虑通水冷却效果。则公式(7)改写为:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T + (T_0 - T_w) \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} + \theta \frac{\partial \psi}{\partial \tau} \quad (9)$$

式中: φ 和 ψ 均为考虑水管冷却效果的函数; ∇^2 为 Laplace 算子; T_0 为通水冷却时混凝土初始温度, $^{\circ}\text{C}$; T_w 为冷却水的初始温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 温度应力。在时间 τ 时,混凝土的总应变可表示为:

$$\varepsilon(\tau) = \varepsilon^e(\tau) + \varepsilon^c(\tau) + \varepsilon^T(\tau) + \varepsilon^s(\tau) + \varepsilon^d(\tau) \quad (10)$$

式中: $\varepsilon^e(\tau)$ 为应力引起的弹性应变; $\varepsilon^c(\tau)$ 为混凝土的徐变应变; $\varepsilon^T(\tau)$ 为温度变化引起的应变; $\varepsilon^s(\tau)$ 为混凝土的干缩应变; $\varepsilon^d(\tau)$ 为混凝土的自

身体积变形。

设弹性体内各点的温度变化为 ΔT ,其产生的自由变形则为 $\alpha \Delta T$,其中, α 为热膨胀系数。则由 ΔT 产生的初应变可表示为:

$$\varepsilon^T(\tau) = \alpha \Delta T \{1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0\}^T \quad (11)$$

实践表明,当混凝土应力不超过其强度的一半时,徐变与应力之间呈线性关系。对于变荷载情况,在龄期 τ 时加载,则 t 时刻的应力-应变关系为:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(\tau)}{E(\tau)} - \int_{\tau}^t E(\tau) \varepsilon(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} J(t, \tau) d\tau \quad (12)$$

$$J(t, \tau) = \frac{1}{E(\tau)} + C(t, \tau) \quad (13)$$

式中: $\sigma(\tau)$ 为 τ 时应力, MPa ; $E(\tau)$ 为时的弹性模量, MPa ; $J(t, \tau)$ 为徐变柔量, MPa^{-1} ; $C(t, \tau)$ 为徐变度, MPa^{-1} 。

根据弹性力学中的平衡方程、物理方程、几何方程,应用变分原理可得应力应变问题的有限元控制方程:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}^e &= \mathbf{K}^e \boldsymbol{\delta}^e - \iiint_e \mathbf{B}^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}^0 dx dy dz \\ &= \mathbf{k}^e \boldsymbol{\delta}^e - \mathbf{F}_{\Delta T}^e \end{aligned} \quad (14)$$

$$\mathbf{k}^e = \iiint_e \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dx dy dz \quad (15)$$

$$\mathbf{F}_{\Delta T}^e = - \iiint_e \mathbf{B}^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}^0 dx dy dz \quad (16)$$

式中: $\mathbf{F}$ 为荷载列阵; $\mathbf{k}^e$ 为刚度矩阵; $\mathbf{F}_{\Delta T}^e$ 为由变温引起的等效节点荷载; $\mathbf{D}$ 为弹性矩阵; $\mathbf{B}$ 为应变矩阵; $\boldsymbol{\delta}^e$ 为结点位移列阵。

3.3 计算方案

方案1为低温季节浇筑方案。溢流堰混凝土开始浇筑的时间为2017年1月9日,结束的时间为2017年1月26日。闸墩开始浇筑的时间为2018年1月1日,结束的时间为2018年2月11日。混凝土施工进度安排和浇筑温度见表5。

表5 方案1溢流闸坝混凝土施工进度安排和浇筑温度

部位	序号	开始施工时间/(年-月-日)	起始高程/m	终止高程/m	层厚/m	浇筑/ $^{\circ}\text{C}$
溢流堰	1	2017-01-09 - 2017-01-10	48.0	50.0	2.0	12.70
	2	2017-01-17 - 2017-01-18	50.0	52.5	2.5	12.70
	3	2017-01-25 - 2017-01-26	52.5	55.0	2.5	12.70
	4	2018-01-01 - 2018-01-15	55.0	73.0	18	12.70
闸墩	5	2018-01-24 - 2018-01-25	73.0	76.0	3.0	12.70
	6	2018-02-02 - 2018-02-03	76.0	79.0	3.0	13.80
	7	2018-02-10 - 2018-02-11	79.0	81.8	2.8	13.80

方案 2 为高温季节浇筑方案。溢流堰混凝土开始浇筑的时间为 2015 年 5 月 23 日,结束的时间为 2015 年 6 月 8 日。闸墩开始浇筑的时间为 2015 年 6 月 23 日,结束的时间为 2015 年 8 月 27 日。混凝土施工进度安排和浇筑温度见表 6。

方案 3 为高温季节浇筑方案。方案 3 采取了控制浇筑温度与通水冷却相结合的措施。溢流堰混凝土

土浇筑温度为 14 ℃,闸墩浇筑温度为 16 ℃。对溢流堰和闸墩混凝土进行通水冷却,冷却水管采用 32 mm 的高密度聚乙烯管,壁厚 2 mm,通水温度为 15 ℃,通水时间为 15 d,通水流量为 1.0 m³/h,水管间距为 1.5 m×1.5 m,单根水管长度为 250 m。其他条件与方案 2 相同。混凝土施工进度安排和浇筑温度见表 6。

表 6 方案 2 和方案 3 溢流闸坝混凝土施工进度安排和浇筑温度

部位	序号	开始施工时间/ (年-月-日)	起始高程/ m	终止高程/ m	层厚/ m	方案 2/ ℃	方案 3/ ℃
溢流堰	1	2015-05-23 – 2015-05-24	48.0	50.0	2.0	26.0	14.0
	2	2015-05-30 – 2015-05-31	50.0	52.5	2.5	27.6	14.0
	3	2015-06-07 – 2015-06-08	52.5	55.0	2.5	27.6	14.0
	4	2015-06-23 – 2015-06-24	55.0	61.0	6.0	27.6	16.0
	5	2015-07-01 – 2015-07-02	61.0	64.0	3.0	28.4	16.0
	6	2015-07-09 – 2015-07-10	64.0	67.0	3.0	28.4	16.0
闸墩	7	2015-07-17 – 2015-07-18	67.0	70.0	3.0	28.4	16.0
	8	2015-07-26 – 2015-07-27	70.0	73.0	3.0	28.4	16.0
	9	2015-08-06 – 2015-08-07	73.0	76.0	3.0	28.0	16.0
	10	2015-08-15 – 2015-08-16	76.0	79.0	3.0	28.0	16.0
	11	2015-08-26 – 2015-08-27	79.0	81.80	2.8	28.0	16.0

4 结果与分析

4.1 温度场仿真结果与分析

温度场仿真采用 ANSYS 有限元软件计算。根据混凝土热学参数和 12[#]溢流闸坝施工进度安排,对邕宁水利枢纽工程溢流闸坝 3 种施工方案进行了温度场仿真计算。计算时间步长为 0.25 d,方案 1 计算时间为 2017 年 1 月 9 日–2019 年 6 月 9 日,方案 2、方案 3 的计算时间为 2015 年 5 月 23 日–2017 年 6 月 9 日。通过计算得到了每个计算步下的温度场,在此仅讨论各个方案的最高温度是否满足规范要求。溢流堰与闸墩的最高温度和允许温度见表 7、8,典型时刻温度场云图如图 2、3 所示。

表 7 溢流堰最高温度和容许温度

计算方案	最高温度	容许温度
方案 1	34.86	35.5 ~ 37.5
方案 2	48.45	35.5 ~ 37.5
方案 3	36.65	35.5 ~ 37.5

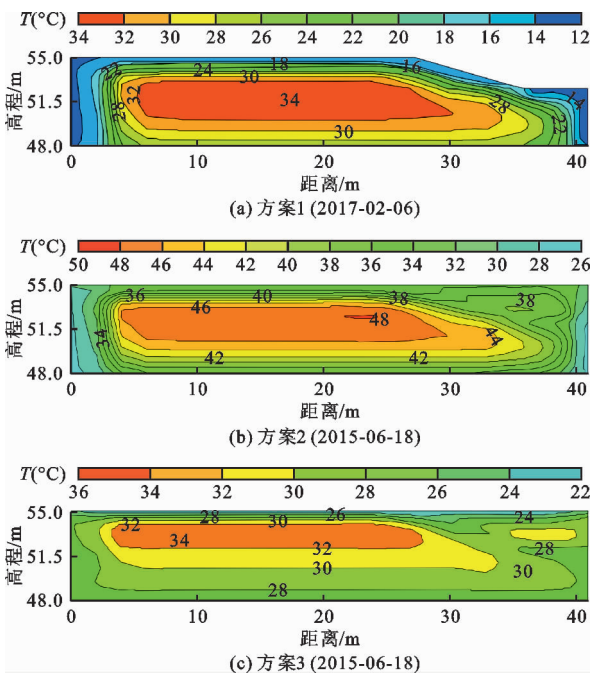


图 2 3 种方案溢流堰浇筑典型时刻温度云图

结合表 7、8 及图 2、3,对 3 种方案溢流堰和闸墩的最高温度分析如下:

(1)方案 1 溢流堰(高程 48.0~55.0 m)最高温度为 34.86 ℃,最高温度出现在高程 52.2 m 附近;方案 2 溢流堰最高温度为 48.45 ℃,最高温度出现在高程 53.0 m 附近;方案 3 溢流堰最高温度为 36.65 ℃,最高温度出现在高程 54.0 m 附近,其中方案 1 和方案 3 最高温度计算结果在规范容许最高温度的范围内(35.5~37.5 ℃),方案 2 最高温度计算结果超出此范围,不满足规范要求。

表 8 溢流闸坝闸墩最高温度和容许温度

计算方案	强约束区(高程 55.0~63.2m)		弱约束区(高程 63.2~71.4m)		非约束区(高程 71.4~81.8m)
	最高温度	容许温度	最高温度	容许温度	最高温度
方案 1	29.31	35.5~37.5	29.36	38.5~40.5	29.34
方案 2	42.13	35.5~37.5	42.46	38.5~40.5	42.59
方案 3	36.22	35.5~37.5	36.31	38.5~40.5	36.46

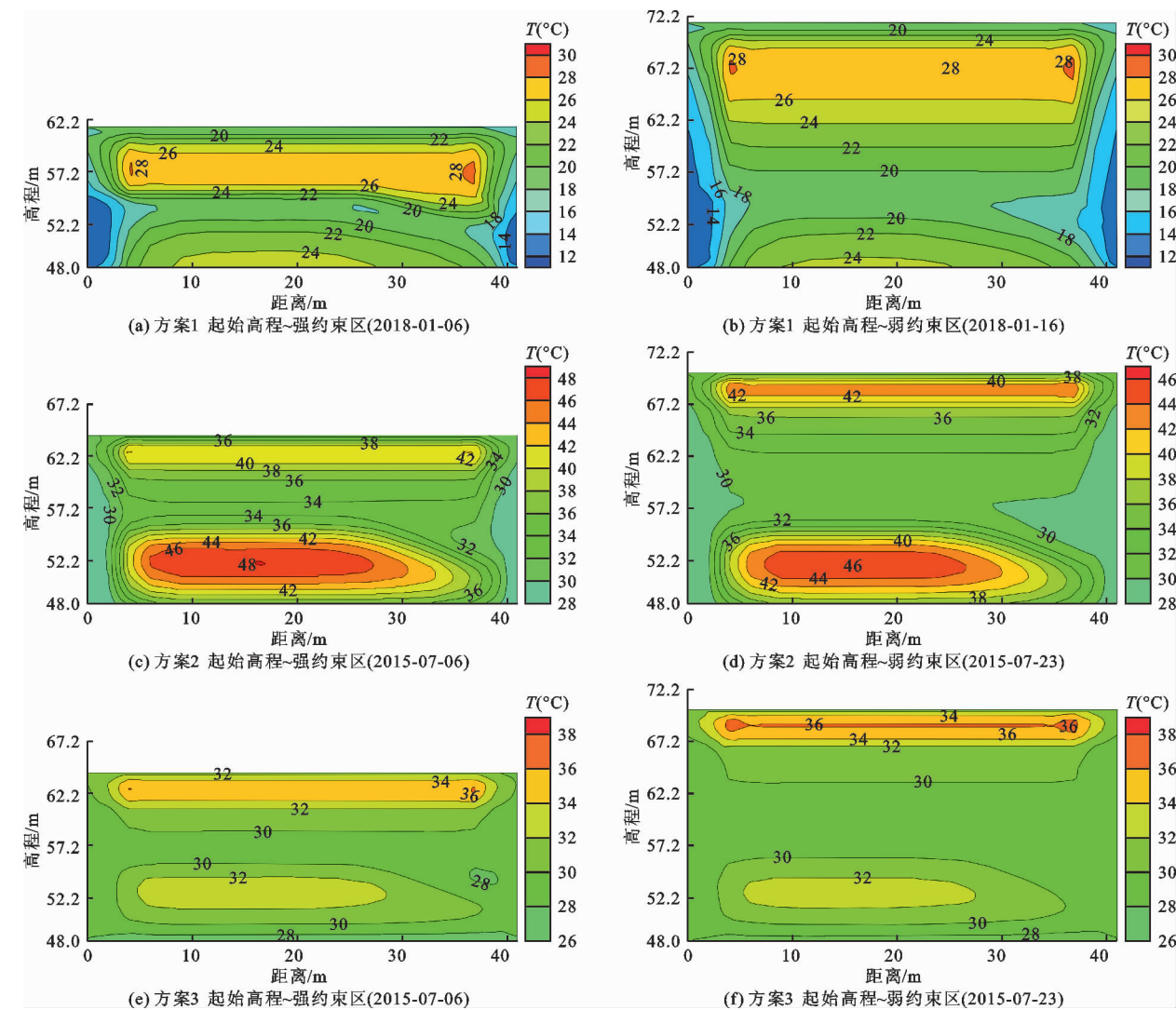


图 3 3 种方案闸墩浇筑典型时刻温度云图

(2)方案 1 闸墩强约束区(高程 55.0~63.2 m)最高温度为 29.31 ℃,出现在高程 52.2 m 附近;弱约束区(高程 63.2~71.4 m)最高温度为 29.36 ℃,出现在高程 67.0 m 附近;非约束区(高程 71.4~81.8 m)最高温度为 29.34 ℃,出现在高程 75.0 m 附近,方案 1 各约束区最高温度均小于容许最高温度,满足设计规范要求。方案 2 闸墩强约束区最高温度为 42.13 ℃,出现在高程 57.0 m 附近;弱约束区最高温度为 42.46 ℃,出现在高程 67.2 m 附近;非约束区最高温度为 42.59 ℃,方案 2 各约束区最

高温均大于容许最高温度,不满足规范要求。方案 3 闸墩强约束区最高温度为 36.22 ℃,出现在高程 62.2 m 附近;弱约束区最高温度为 36.31 ℃,出现在高程 70.5 m 附近;非约束区最高温度为 36.46 ℃,出现在高程 73.0 m 附近,方案 3 各约束区最高温度小于容许最高温度值,满足规范要求。

另外,通过对比分析方案 2、方案 3 可知,高温季节对闸墩采取通水冷却措施,浇筑完后立即通水,通水历时为 15 d,可将坝体最高温度降低 3~5 ℃,

可见通水冷却措施对降低闸墩内部温度是有效的。

4.2 温度应力仿真结果与分析

温度应力计算采用自行研制的有限元程序 COCE-3D,该程序已在三峡、龙滩、溪洛渡、小湾等大型水电工程中成功应用^[20-21]。

根据温度场仿真的计算结果,对 3 种施工方案进行了温度徐变应力的仿真计算。溢流堰、闸墩最大温度应力变化计算结果如图 4~6 所示,典型时刻温度应力场云图如图 7、8 所示。

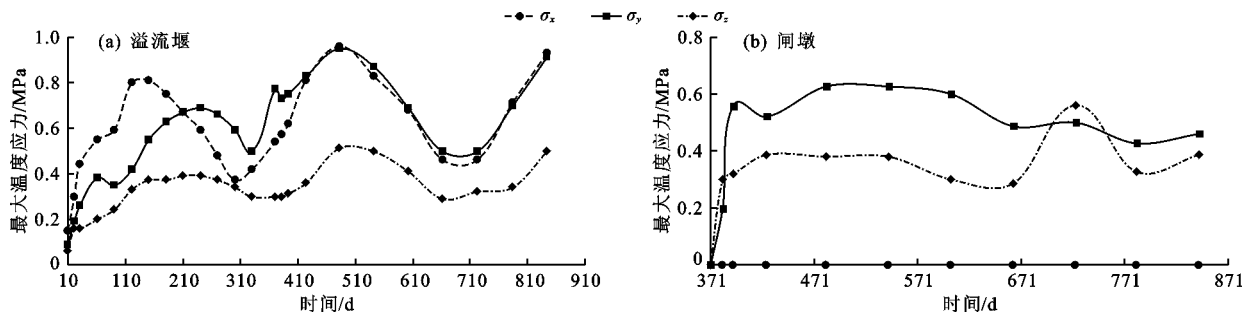


图 4 方案 1 溢流堰及闸墩 3 个方向最大温度应力时间曲线

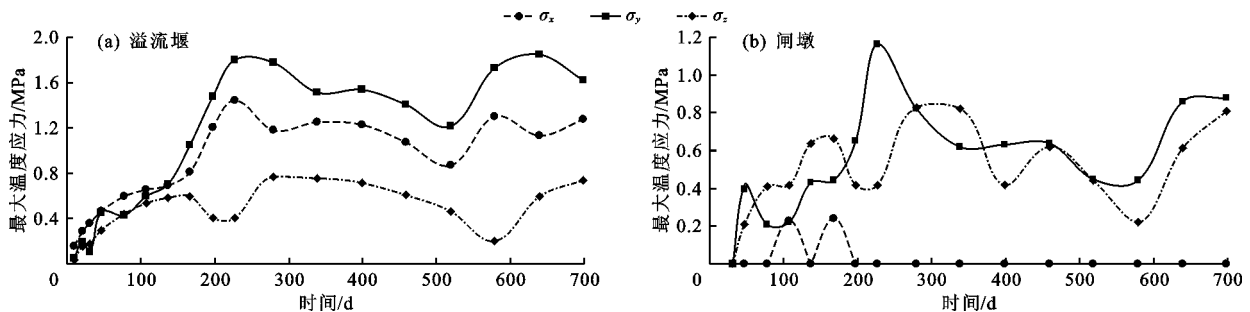


图 5 方案 2 溢流堰及闸墩 3 个方向最大温度应力时间曲线

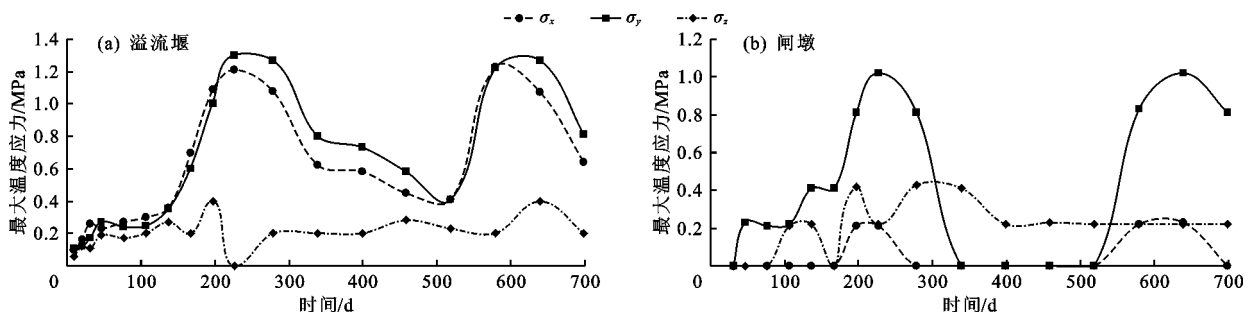


图 6 方案 3 溢流堰及闸墩 3 个方向最大温度应力时间曲线

结合图 4~8,对 3 种方案溢流堰和闸墩的最大温度应力分析如下:

(1) 方案 1 溢流堰最大温度应力: $\sigma_x = 0.96$ MPa、 $\sigma_y = 0.95$ MPa、 $\sigma_z = 0.51$ MPa,3 个方向的应力均小于 C25 混凝土 180 d 龄期的容许温度应力 1.56 MPa。方案 1 闸墩最大温度应: $\sigma_x = 0$ 、 $\sigma_y = 0.63$ MPa、 $\sigma_z = 0.56$ MPa,均小于 C30 混凝土 180 d

龄期的容许温度应力 1.67 MPa。

(2) 方案 2 溢流堰最大温度应力: $\sigma_x = 1.44$ MPa、 $\sigma_y = 1.84$ MPa、 $\sigma_z = 0.78$ MPa, σ_x 和 σ_z 均小于 C25 混凝土 180 d 龄期的容许温度应力 1.56 MPa, σ_y 大于 C25 混凝土 180 d 龄期的容许温度应力 1.56 MPa;方案 2 闸墩最大温度应力: $\sigma_x = 0.24$ MPa、 $\sigma_y = 1.16$ MPa、 $\sigma_z = 0.83$ MPa,均小于 C30 混

凝土 180 d 龄期的容许温度应力 1.67 MPa。

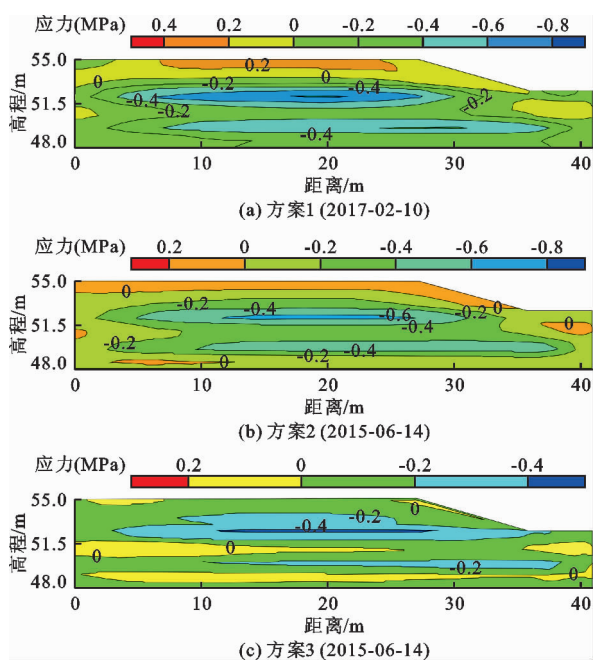


图7 溢流堰浇筑典型时刻 y 方向温度应力云图

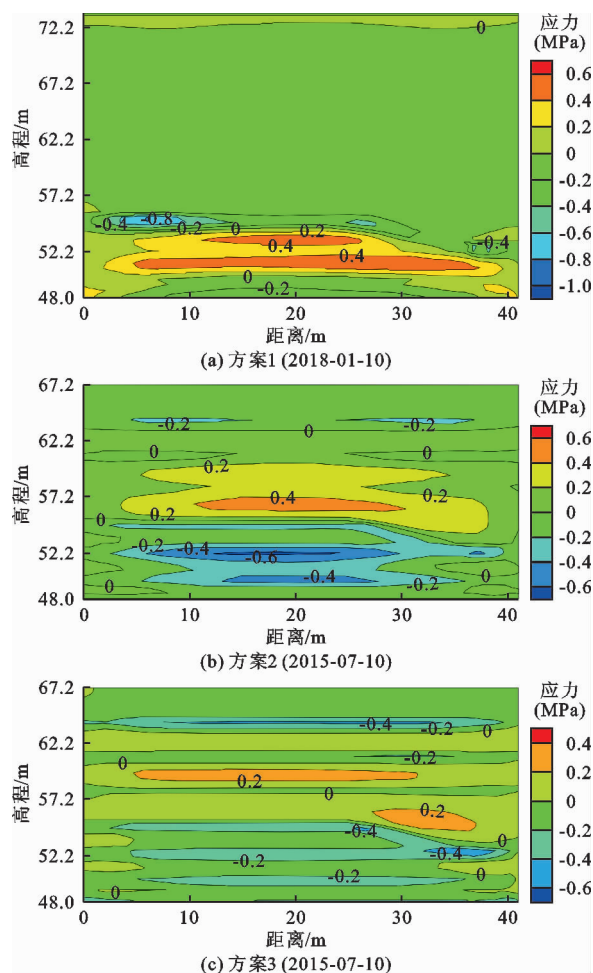


图8 闸墩浇筑典型时刻 y 方向温度应力云图

(3) 方案3 溢流堰最大温度应力: $\sigma_x = 1.21$ MPa, $\sigma_y = 1.30$ MPa, $\sigma_z = 0.40$ MPa, 均小于 C25 混凝土 180 d 龄期的容许温度应力 1.56 MPa。方案3 闸墩最大温度应力: $\sigma_x = 0.23$ MPa, $\sigma_y = 1.02$ MPa, $\sigma_z = 0.43$ MPa, 均小于 C30 混凝土 180 d 龄期的容许温度应力 1.67 MPa。

5 结 论

(1) 采用方案1 进行浇筑时, 溢流堰最高温度为 34.86 °C, 闸墩强约束区最高温度为 29.31 °C, 弱约束区最高温度为 29.36 °C。溢流堰和闸墩强、弱约束区最高温度满足设计规范要求。溢流堰最大温度应力为 0.96 MPa, 闸墩最大温度应力为 0.63 MPa, 均小于混凝土 180 d 龄期的容许温度应力值。

(2) 采用方案2 进行浇筑时, 溢流堰最高温度为 48.45 °C, 闸墩强约束区最高温度为 42.13 °C, 弱约束区最高温度为 42.46 °C。溢流堰和闸墩强、弱约束区最高温度均不满足设计规范要求。溢流堰最大温度应力为 1.84 MPa, 大于 C25 混凝土 180 d 龄期的容许温度应力 1.56 MPa; 闸墩最大温度应力为 1.16 MPa, 小于 C30 混凝土 180 d 龄期的容许温度应力 1.67 MPa。

(3) 采用方案3 进行浇筑时, 溢流堰最高温度为 36.65 °C, 闸墩强约束区最高温度为 36.22 °C, 弱约束区最高温度为 36.31 °C。溢流堰和闸墩强、弱约束区最高温度满足设计规范要求。溢流堰最大温度应力为 1.30 MPa, 闸墩最大温度应力为 1.02 MPa, 均小于混凝土 180 d 龄期的容许温度应力值。

(4) 邕宁水利枢纽工程溢流闸坝施工时, 建议低温季节采用方案1 自然入仓方式进行浇筑, 高温季节采用方案3 进行浇筑, 并控制溢流堰混凝土浇筑温度不超过 14 °C, 闸墩混凝土浇筑温度不超过 16 °C, 同时采取通水冷却措施。

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 飞, 王晓峰. 基于温控仿真的热带地区常态混凝土重力坝施工期温控防裂研究[J]. 水电能源科学, 2020, 38(1): 83-85.
- [3] 肖照阳, 段亚辉. 白鹤滩输水系统进水塔底板混凝土温控特性分析[J]. 水力发电学报, 2017, 36(8): 94-103.
- [4] ALEMBAGHERI M. A study on structural safety of concrete arch dams during construction and operation phases [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37(2): 571-591.

(下转第172页)

- 184-189.
- [5] 夏明海, 秦子鹏, 曾霞, 等. 寒区均质土坝混凝土面板冰冻胀破坏的力学分析[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(4): 104-112.
- [6] 王靖荣, 陈有亮, 傅喻. 冻融环境下不同预制裂缝混凝土断裂性能研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(2): 178-185.
- [7] 李阳, 王瑞骏, 程金标, 等. 冻融循环及硫酸盐侵蚀双因素下面板混凝土耐久性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(5): 177-181.
- [8] 刘永前, 陈彦文, 牛晚扬. 含气量与水胶比对混凝土抗盐冻性能的影响[J]. 混凝土, 2019(4): 63-65+75.
- [9] 杨森. 冻融循环与盐冻侵蚀作用下混凝土耐久性性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2019.
- [10] 周志云, 史晓婉, 李强, 等. 除冰盐浓度对混凝土盐冻影响的研究[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(5): 102-105.
- [11] 郭少龙, 鹿群, 林永良, 等. 冻融条件下玄武岩纤维增强水泥土抗疲劳性能的试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(1): 200-206.
- [12] 梁存绍. 水布垭面板堆石坝面板混凝土施工[J]. 水力发电, 2010, 36(2): 17-20.
- [13] 周志云, 张晶磊, 史晓婉, 等. 聚丙烯纤维混凝土的抗冻和抗盐冻耐久性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(1): 152-155+160.
- [14] 高真, 曹鹏, 孙新建, 等. 玄武岩纤维混凝土抗压强度分析与微观表征[J]. 水力发电学报, 2018, 37(8): 111-120.
- [15] 白敏, 牛获涛, 姜磊, 等. 钢纤维改善混凝土力学性能和微观结构的研究[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(10): 2084-2089.
- [16] 张延年, 李振华, 刘晓阳, 等. 钢纤维混凝土的拉压比试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2017, 38(6): 719-723.
- [17] WANG Hongwei. Effect of polypropylene fiber on mechanical properties of concrete containing fly ash[J]. Advanced Materials Research, 2012, 346: 26-29.
- [18] 王瑞珍, 吴赛. 冻融循环作用下纤维混凝土的性能演变规律[J]. 低温工程, 2020(4): 38-41+67.
- [19] 杨益, 宁翠萍, 程瑞芳, 等. 掺钢和玄武岩纤维混凝土的冻融循环试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(4): 182-186+192.
- [20] 张克纯. 聚丙烯-玄武岩混杂纤维混凝土的耐久性性能研究[J]. 非金属矿, 2020, 43(5): 45-47+51.
- [21] 付腾欢, 王瑞骏, 何晓莹, 等. 硫酸盐侵蚀作用下再生混凝土耐久性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(3): 194-199.

(上接第 165 页)

- [5] MALM R, HELLGREN R, ENZELL J. Lessons learned regarding cracking of a concrete arch dam due to seasonal temperature variations[J]. Infrastructures, 2020, 5(2): 19-36.
- [6] 郭宪艳, 殷铭. 混凝土拱坝导流底孔坝段施工期温度及应力仿真分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37(12): 41-44.
- [7] SALAZAR F, VICENTE D J, IRAZÁBAL J, et al. A review on thermo-mechanical modelling of arch dams during construction and operation: Effect of the reference temperature on the stress field[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2020, 27(5): 1681-1707.
- [8] 罗滔, 周先练, 邱焕峰, 等. 西南地区某混凝土拱坝温度场有限元仿真分析[J]. 中国农村水利水电, 2019(1): 142-147.
- [9] 邓世顺, 王振红, 汪娟, 等. 大坝混凝土施工期温控措施的时间和空间优化[J]. 人民黄河, 2019, 41(8): 124-128.
- [10] 张瀚, 陈建康, 赵泽鹏, 等. 大温差地区碾压混凝土重力坝施工期温控防裂技术研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(12): 161-164+168.
- [11] 张晓飞, 郑刚峰, 王瑞科, 等. 浇筑层厚对碾压混凝土坝温度场和应力场的影响[J]. 水电能源科学, 2020, 38(9): 71-74.
- [12] 商波, 郭涛, 朱靖林, 等. 混凝土拱坝施工期温度应力仿真分析[J]. 人民黄河, 2020, 42(S1): 227-228+231.
- [13] 刘少华. 杨溪源拱坝温控防裂方案的研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020.
- [14] 戴宏斌, 严涛, 刘茜, 等. 寒潮对导墙坝段施工期温度应力影响研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(3): 200-206.
- [15] 金峰, 张国新, 张全意. 绿塘堆石混凝土拱坝施工期温度分析[J]. 水利学报, 2020, 51(6): 749-756.
- [16] 孙巧荣, 强晟, 袁华锋, 等. 渐变流道混凝土结构施工期温度应力特性[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(5): 191-196.
- [17] 杨凯. 东庄导流洞衬砌混凝土温控仿真研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- [18] 高山, 陈建康, 陈立宝, 等. 高温炎热地区碾压混凝土重力坝温控防裂研究[J]. 人民长江, 2020, 51(5): 154-159.
- [19] 中华人民共和国水利部. 混凝土重力坝设计规范: SL 319—2018[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- [20] 傅少君, 张石虎, 解敏, 等. 混凝土拱坝温控的动态分析理论与实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 113-122.
- [21] 张雄, 汪卫明, 陈胜宏. 小湾拱坝坝体裂缝加固措施研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 657-665.