DOI:10.11705/j. issn. 1672 - 643X. 2020. 03. 29

寒潮对导墙坝段施工期温度应力影响研究

戴宏斌[1], 严 涛[2], 刘 茜[3], 张 昕[3], 张晓飞[2]
(1. 陕西省水利厅 规划计划处, 陕西 西安 710004; 2. 西安理工大学 水利水电学院,
陕西 西安 710048; 3. 陕西省引汉济渭工程建设有限公司, 陕西 西安 710010)

摘 要: 导墙外侧边界对外界温度变化非常敏感,寒潮使周围环境温度骤降进而将导致混凝土表面和内部呈现较大温差,引起温度应力过大和出现温度裂缝等问题。针对旬阳水电站右导墙坝段,采用三维有限元法,模拟坝段施工过程,对无寒潮无保温、有寒潮无保温和有寒潮有保温3种工况进行温度场和应力场仿真计算研究。结果表明:寒潮过程对坝段表面温度影响较大,在坝段表面产生了较大拉应力,对坝段内部温度和应力几乎没有影响;寒潮发生时,采用5 cm厚的泡沫塑料板进行保温,可使坝段表面温度提高8.0℃左右,表面最大应力小于过流面抗冲磨混凝土允许拉应力,能有效避免寒潮引起的温度裂缝。研究成果可为类似工程提供借鉴和参考依据。

关键词: 导墙坝段; 寒潮; 施工期; 保温; 温度应力; 温度场
中图分类号:TV642 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2020)03-0200-07

Temperature stress effect of cold waves on the guide wall of a dam during construction period

DAI Hongbin[1], YAN Tao[2], LIU Qian[3], ZHANG Xin[3], ZHANG Xiaofei[2]
(1. *Planning Office, Shaanxi Provincal Department of Water Resources, Xi' an* 710004, *China*; 2. *Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi' an University of Technology, Xi' an* 710048, *China*;
3. *Hanjiang - to - Weihe River Valley Water Diversion Project Construction Co., Ltd., Xi' an* 710010, *China*)

Abstract: The external boundary of a dam guide wall is very sensitive to temperature change. Cold waves will cause sudden temperature drops that lead to large temperature gaps between the surface and the internal of the concrete guide wall, resulting in excessive temperature stress and temperature cracks. Taking the right guide wall of Xunyang Hydropower Station as an example, the three-dimensional finite element method was used to simulate the construction process of this dam section. The temperature field and stress field were simulated under three scenarios, namely, no insulation and no cold wave, no insulation with cold wave and insulation with cold wave. The results show that the cold wave has a great influence on the surface temperature of the wall, and produces a large tensile stress on the surface; however, it has little effect on the internal temperature and stress of the dam section. When the cold wave hits, the thermal insulation of Polyfoam sheet with a thickness of 5 cm can increase the surface temperature of the wall by about 8.0 ℃, and the maximum stress on the surface is less than the acceptable tensile stress for abrasion-resistant concrete on the overflow surface. So this measure can effectively avoid the occurrence of temperature cracks caused by cold waves. The research results can provide some reference for similar engineering projects.

Key words: dam guide wall; cold wave; construction period; insulation; temperature stress; temperature field

1 研究背景

水利工程中,导墙坝段起到引导水流和保护河岸的作用,通常采用耐水性能好的混凝土材料进行浇筑。导墙顺水流方向两面均为大气边界,对环境温度变化十分敏感,短时间内外界温度骤降,会致使

收稿日期:2019-09-01; **修回日期**:2019-10-16
基金项目:国家自然科学基金项目(51479168); 2012年省级水利科技项目(2012slkj - 30)
作者简介:戴宏斌(1972-),男,宁夏固原人,本科,高级工程师,研究方向为水利工程安全管理。
通讯作者:张晓飞(1978-),男,陕西周至人,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为水工结构数值分析。

其出现较大的内外温差,表层混凝土将产生较大的温度应力以致出现温度裂缝[1-4]。寒潮是一种常见的冬季灾害性天气,寒潮来临时会导致坝体表面温度急剧下降,造成的温度荷载对坝段的影响往往超过水荷载等其他荷载对坝段的影响,如果不采取合理有效的保温措施,将严重影响材料性能的发挥和建筑物的正常工作,甚至危及坝体安全[5-7]。因此,探究寒潮来临时混凝土的温度场和应力场的变化,进而通过模拟和计算得出行之有效的导墙表面防寒保温方案,从而通过保温方案的实施,对确保大坝的安全运行和顺利越冬有重要意义。

截至现在,已有大量学者从不同的角度对寒潮对混凝土坝温度应力的影响这一课题进行了研究。朱伯芳[8]在对小湾拱坝裂缝成因再讨论时进一步细化了在施工过程中的通水冷却标准,从而得出可以完美避免裂缝产生的结论;张子明等[9]利用叠加原理,并结合等效折线降温曲线的方法对气温骤降时的混凝土应力进行分析;王闯等[10]基于子模型法,利用 APDL 语言对寒潮来临时闸墩温度进行仿真和应力耦合分析;由国文等[11]提出了可应用在寒潮作用下的水闸温控防裂仿真分析中的子母模型反馈修正算法;刘发等[12]通过“水化-温度-湿度-约束”多场耦合评估模型定量分析了表面保温措施与开裂风险之间的关系;袁明道等[13]基于氧化镁混凝土双曲线模型仿真分析了长沙拱坝在寒潮作用下的裂缝状况;陈彦玉等[14]运用正交设计实验理论并提出了在气温骤降时溪洛渡坝区有效的保温方案;田振华等[15]探讨了船坞的混凝土表面在寒潮期的保温防裂问题并给出针对性预防措施;朱蕾等[16]通过对比长期实测气象和混凝土温度数据分析了寒潮作用下混凝土箱梁桥温度场的分布特点以及变化规律;张怀芝等[17]总结出寒潮对不同龄期混凝土的影响规律,并将其在亚碧罗混凝土坝工程中加以应用;张国新等[18]提出了越冬时用降雪覆盖在混凝土表面从而达到保温目的,并通过计算论证出其合理和可行性;黄达海等[19]探究了混凝土表面裂缝的半无限平面问题,利用混凝土材料导热的时间延迟性,将半无限平面假设无限化,并结合试验,验证了方法的可行性。李丹峰等[20]着眼于泄洪洞洞口处衬砌结构,对冬季混凝土施工遭遇寒潮时的若干工况进行了讨论,其研究成果再次辅证了低温时采取混凝土材料表面保护的重要性。

以旬阳水电站右导墙坝段为例,充分考虑施工期温度骤降对混凝土瞬态温度荷载的影响,采用三维有限元仿真分析软件,模拟右导墙坝段施工过程,对无寒潮无保温、有寒潮无保温和有寒潮有保温 3 种工况下的材料温度场和应力场进行了仿真分析和计算研究,探究了寒潮以及保温措施对温度应力的影响情况,提出了合理可行的温控方案,研究成果对实际工程有一定的参考和借鉴意义。

2　计算原理

2.1　非稳定温度场有限元计算原理

非稳定温度场有限元计算公式如下:

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

式中:$\frac{\partial T}{\partial t}$ 为温度随时间的变化率;θ 为混凝土绝热温升,℃;α 为混凝土导温系数,m^2/h。

2.2　温度应力场计算原理

应力有限元计算公式如下[21]:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = \beta T,\ \gamma_{xy} = \gamma_{yz} = \gamma_{zx} = 0 \tag{2}$$

式中:β 为线膨胀系数。

计算时需要考虑温差、徐变和自生体积变形等的影响,计算方程为:

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

式中:$[K_n]$ 为整体刚度矩阵;$\{\Delta\delta_n\}$ 为节点位移增量;$\{\Delta P_n^T\}$,$\{\Delta P_n^c\}$,$\{\Delta P_n^g\}$ 为温差、徐变和自生体积变形引起的荷载增量。

由公式(3)可求得$\{\Delta\delta_n\}$后代入应力—应变增量关系公式得到各节点应力增量$\{\Delta\sigma_i\}$,再将其各时段累加,即为节点应力。

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

2.3　寒潮降温过程的模拟

寒潮历时较短,对坝体温度场有显著影响,在仿真计算中,温降与温度场关系见公式(5)[5,22],该公式表示混凝土表面的热流密度 q 与混凝土表面温度与外界气温之差成正比例关系。

$$q = -\lambda\frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_a) \tag{5}$$

式中:q 为热流密度,kJ/(m^2·h);λ 为导热系数,kJ/(m·h·℃);n 为表面外法线方向;h 为表面放热系数,kJ/(m^2·h·℃);T_a 为气温,℃。

在计算中用半周期正弦函数来表示寒潮期间的日平均气温,表达式为:

$$T_a = T_0 + T_d\sin\left[\frac{\pi}{t_s}(t - t_0 + t_s)\right],\ t \in [t_0, t_0 + t_s] \tag{6}$$

式中：T_a 为寒潮期间的气温，℃；T_0 为寒潮前的气温℃；T_d 为寒潮期间的气温最大降幅，℃；t_s 为寒潮持续时间，h；t_0 为寒潮起始时间，h；t 为计算时间，h。

T_0、T_d、t_s、t_0 可由坝址区当地的气象统计资料得出。将公式(6) 的结果代入公式(5) 中，再求解公式(1)，可得寒潮期间坝体内部的温度场。

3 工程概况

旬阳水电站是汉江干流规划的 7 个梯级中的第 5 个梯级，位于陕西省旬阳县城南约 2 km，上距安康水电站 57 km，下距蜀河水电站约 55 km。正常蓄水位 241 m，死水位 239 m，总库容 3.25×10^8 m^3，总装机容量 320 MW，保证出力 36.7 MW，多年平均发电量 8.4×10^8 kW·h。

枢纽布置从右至左分别为右岸非溢流坝段、右 7 孔冲沙泄洪闸坝段、9#右导墙坝段、左 5 孔冲沙泄洪闸坝段、左导墙坝段、主机间坝段、安装间坝段，共 19 个坝段。本次计算的右导墙坝段坝顶高程 247.0 m，最大坝高 44.0 m，坝轴线长度 22.5 m，导墙宽为 18.0 m。

坝址区气象站统计资料见表 1。

表 1 坝址区气象站气温和水温统计表

月份	气温/℃	水温/℃
1	3.6	4.62
2	5.7	6.48
3	10.3	10.54
4	16.2	16.25
5	20.5	20.24
6	24.5	23.92
7	26.7	26.03
8	26.3	25.59
9	21.1	21.26
10	15.7	15.85
11	9.9	10.14
12	4.9	6.13
平均	15.45	15.59

4 计算模型与材料参数

选取 9#右导墙坝段为研究对象，建立导墙坝段整体有限元计算模型，如图 1 所示。计算模型中，划分网格为六面体，温度场计算时采用 solid70 热单元，应力场计算时用 solid185 结构单元。地基结点数为 13 608，单元数为 11 440；坝体结点数为 40 478，单元数为 33 886。温度场计算中地基底面和 4 个侧面为绝热边界；右导墙坝段右横缝面在 2017 年 5 月 30 日一期临时围堰拆除前为气边界，2017 年 6 月 1 日一期临时围堰拆除过水后 220.16 m 高程水面以下为水边界，水面以上为气边界；右导墙坝段坝左横缝面在 8#孔溢流堰浇筑之前为散热面，浇筑之后为绝热面[23-24]。

在应力场计算中，坝段地基处设置为固定支座，即对地基中每个节点的 X、Y、Z 方向自由度进行约束，使地基部分可等效为固定支座。地基在上下游方向按 Y 向简支处理，其余为自由边界。

该工程所用材料包括三级配基础垫层常态混凝土 C_{90}20W6F100、三级配过流面抗冲耐磨常态混凝土 C_{30}W6F100和三级配内部碾压混凝土 C_{180}15W4F50。坝体材料分区见图 2，各材料参数见表 2。

5 计算工况与应力控制标准

5.1 计算工况

右导墙坝段坝基面高程为 207.0 m(局部 203.0 m)，坝顶高程为 247.0 m，坝段长度为 22.5 m，坝底宽度为 61.0 m。2017 年 4 月 1 日开始浇筑基础垫层常态混凝土，2017 年 4 月 9 日开始浇筑碾压混凝土，大坝于 2017 年 6 月 31 日浇筑至 238.5 m 高程；2017 年 12 月 1 日恢复碾压混凝土浇筑，2018 年 3 月 30 日浇筑至坝顶高程 247.0 m。水库的蓄水过程为：2019 年 12 月 1 日，水库蓄水至 237.0 m 高程；2020 年 6 月 1 日，水库蓄水至正常蓄水位 241.0 m。

寒潮与保温：2017 年 12 月 21 日开始遭遇寒潮，4 d 降温 15.1℃，于 12 月 25 日达到最低温度 -10.2℃。保温起始时间为 2017 年 11 月 1 日，保温材料为 5 cm 厚的聚苯乙烯泡沫板。针对寒潮资料设计对比工况，分析寒潮对右导墙坝段的影响以及寒潮保温的效果。

工况 1：该工况对 2017 年 4、5、6 月浇筑的部位，采取控制浇筑温度和通制冷水冷却措施，大层浇筑完即刻通水。通水时间为 24 d，4、5 月份通河水，6 月份通制冷水，冷却水管按要求布置，间隔距离为 1.5 m×1.5 m，通水流量为 1.0 m^3/h，单根冷却水管长度为 250 m。4 月份浇筑的部位控制混凝土浇筑温度小于等于 18℃；5 和 6 月份浇筑的混凝土控制浇筑温度小于等于 22℃。

工况 2：该工况在冬季考虑寒潮，不采取保温措施。其他条件与工况 1 相同。

工况 3：该工况在冬季考虑寒潮，并采取保温措施。其他条件与工况 1 相同。右导墙坝段计算工况汇总见表 3，大坝施工进度和浇筑温度见表 4。

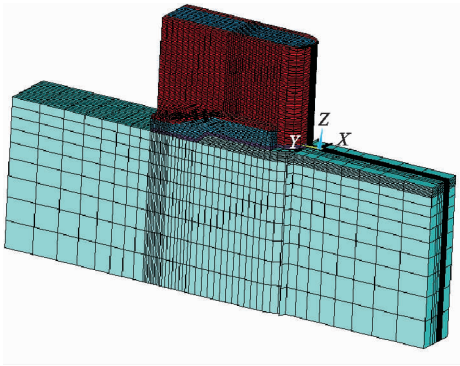

图 1　旬阳水电站右导墙坝段计算模型

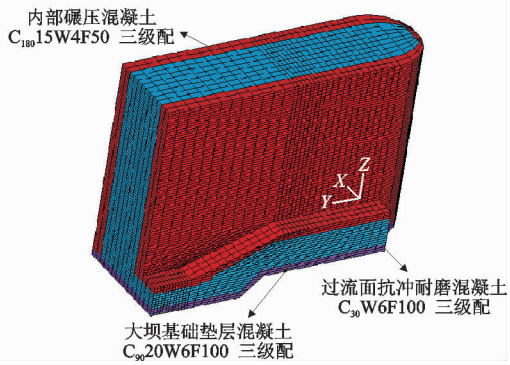

图 2　旬阳水电站右导墙坝段材料分区

表 2　旬阳水电站坝体混凝土热力学参数

材料	容重/(kN·m^{-3})	绝热温升/℃	比热/(kJ·kg^{-1}·℃$^{-1}$)	导温系数/(m^2·h^{-1})	导热系数/(kJ·m^{-1}·h^{-1}·℃$^{-1}$)	抗压弹性模量/GPa	极限拉伸值/10^{-6}
C_{90}20W6F100 三级配	23.98	$T=\frac{34.9(t-0.8)}{t+2.79}$	1.014	0.003192	7.769	27.2	105.0
C_{30}W6F100 三级配	24.00	$T=\frac{45.6(t-1.2)}{t+0.75}$	0.994	0.003212	7.664	34.6	172.0
C_{180}15W4F50 三级配	24.42	$T=\frac{24.7t}{t+9.43}$	0.974	0.003478	8.276	26.7	88.0

表 3　旬阳水电站右导墙坝段计算工况汇总表

计算工况	浇筑温度	通水冷却	有无寒潮	有无保温
工况 1	4 月浇筑温度≤18℃ 5－6 月浇筑温度≤22℃	4－5 月通河水冷却 6 月通制冷水冷却	无寒潮	无保温
工况 2	4 月浇筑温度≤18℃ 5－6 月浇筑温度≤22℃	4－5 月通河水冷却 6 月通制冷水冷却	有寒潮	无保温
工况 3	4 月浇筑温度≤18℃ 5－6 月浇筑温度≤22℃	4－5 月通河水冷却 6 月通制冷水冷却	有寒潮	有保温

5.2　应力控制标准

《混凝土重力坝设计规范》(NB/T 35026－2014)给出了应力控制标准的计算式,根据该规范要求,温度应力的控制应按下式进行:

$$\gamma_0\sigma \leqslant \varepsilon_p E_c/\gamma_d \tag{7}$$

式中:γ_0 为结构重要性系数,取 1.1;σ 为各种温差所产生的温度应力之和,MPa;ε_p 为混凝土极限拉伸值;E_c 为混凝土弹性模量,MPa;γ_d 为温度应力控制正常使用极限状态结构系数,取 1.5。混凝土容许拉应力值见表 5。

6　结果与分析

6.1　温度场计算成果分析

寒潮起始时间为 2017 年 12 月 21 日,在 2017 年 12 月 25 日发生极端最低气温－10.2℃,寒潮期间对坝段表面采用 5 cm 厚的聚苯乙烯泡沫板进行保温。为了分析冬季遇寒潮条件下表面保温的保温效果,现给出工况 1、工况 2 和工况 3 右导墙坝段中心剖面寒潮期间温度云图,如图 3 所示,其对应的温度值见表 6。从图 3 可以看出:

(1)由于坝段表面温度滞后于外界气温 1 d,因此 2018 年 12 月 26 日坝体表面温度最低,工况 1 坝段表面最低温度为 4.0℃,工况 2 为－4.0℃,工况 3 为 4.0℃。采用 5 cm 厚的聚苯乙烯泡沫板保温之后,坝段表面温度提高了为 8.0℃。由此可见,保温板的保温效果较好。

(2)由于坝段混凝土方量较大,寒潮历时较短,寒潮对坝段表面温度影响较大,对坝段内部混凝土温度几乎没有影响。

表 4 旬阳水电站右导墙坝段施工进度和浇筑温度表

序号	施工开始时间/(年-月-日)	施工结束时间/(年-月-日)	起始高程/m	终止高程/m	浇筑温度/℃		
					工况 1	工况 2	工况 3
1	2017-04-01	2017-04-08	203.0	204.5	18	18	18
2	2017-04-09	2017-04-15	204.5	207.5	18	18	18
3	2017-04-16	2017-04-22	207.5	210.5	18	18	18
4	2017-04-23	2017-04-30	210.5	213.5	18	18	18
5	2017-05-01	2017-05-08	213.5	216.5	22	22	22
6	2017-05-09	2017-05-15	216.5	219.5	22	22	22
7	2017-05-16	2017-05-22	219.5	222.5	22	22	22
8	2017-05-23	2017-05-30	222.5	225.5	22	22	22
9	2017-06-01	2017-06-08	225.5	228.5	22	22	22
10	2017-06-09	2017-06-15	228.5	231.5	22	22	22
11	2017-06-16	2017-06-22	231.5	234.5	22	22	22
12	2017-06-23	2017-06-29	234.5	236.5	22	22	22
13	2017-06-30	2017-06-31	236.5	238.5	22	22	22
14	2017-12-01	2018-01-10	238.5	241.5	6.9	6.9	6.9
15	2018-01-11	2018-02-20	241.5	244.5	5.6	5.6	5.6
16	2018-02-21	2018-03-30	244.5	247.0	7.7	7.7	7.7

表 5 旬阳水电站右导墙各部位混凝土容许拉应力

工程部位	混凝土等级	极限拉伸值/10^{-6}	弹性模量/GPa	温度应力控制指标/MPa
大坝基础垫层混凝土	C_{90}20W6F100 三级配	105	27.2	1.73
过流面抗冲耐磨混凝土	C_{30}W6F100 三级配	172	34.6	3.61
右导墙内部碾压混凝土	C_{180}15W4F50 三级配	88	26.7	1.42

表 6 寒潮期间各工况右导墙坝段中心剖面温度值 ℃

工况	坝体表面			坝体内部		
	2017-12-24	2017-12-25	2017-12-26	2017-12-24	2017-12-25	2017-12-26
工况 1	6	6	4	38	38	38
工况 2	0	-4	-4	32	32	32
工况 3	6	6	4	32	32	32

6.2 温度应力场计算成果分析

坝段左右表面工况 1、2 和 3 在 2017 年 12 月 26 日顺河向(Y 方向)温度应力云图见图 4,最大应力统计见表 7。从图 4 可以看出:

(1)在左侧表面,工况 1 最大温度应力值为 3.5 MPa,工况 2 为 4.4 MPa,工况 3 为 2.9 MPa。在右侧表面,工况 1 最大温度应力值为 3.1 MPa,工况 2 为 4.4 MPa,工况 3 为 3.1 MPa。工况 1 和工况 3 最大应力均小于过流面抗冲耐磨混凝土 C_{30}W6F100 容许应力 3.61 MPa,工况 2 最大应力大于过流面抗冲耐磨混凝土 C_{30}W6F100 容许应力 3.61 MPa。

(2)寒潮期间,采取表面保温措施后,坝段最大应力大大减小,可见,保温板保温效果较好。

表 7 各工况坝体左、右表面顺河向(Y 向)最大温度应力值(2017 年 12 月 26 日) MPa

工况编号	左侧表面	右侧表面
工况 1	3.5	3.1
工况 2	4.4	4.4
工况 3	2.9	3.1

注:过流面抗冲耐磨混凝土的容许应力为 3.61 MPa。

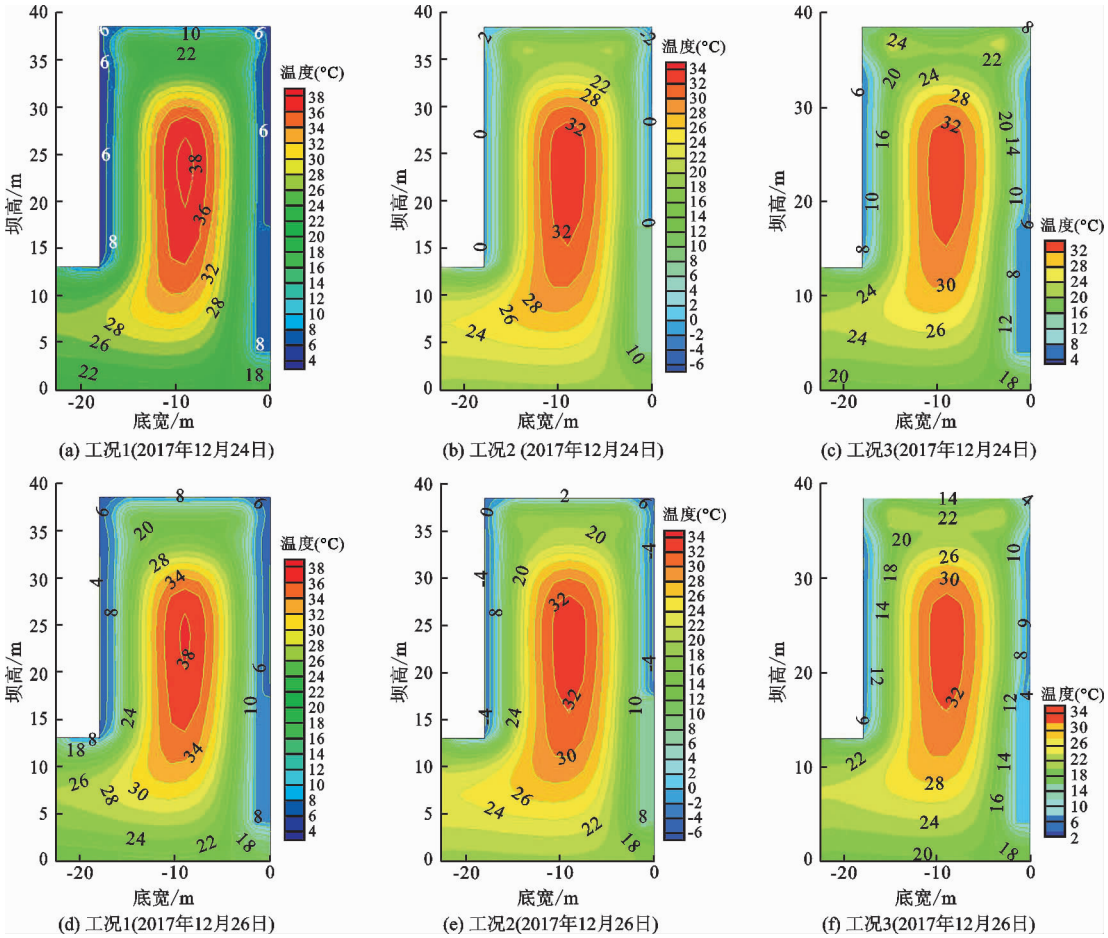

图 3　右导墙坝段温度等值线图(单位:℃)

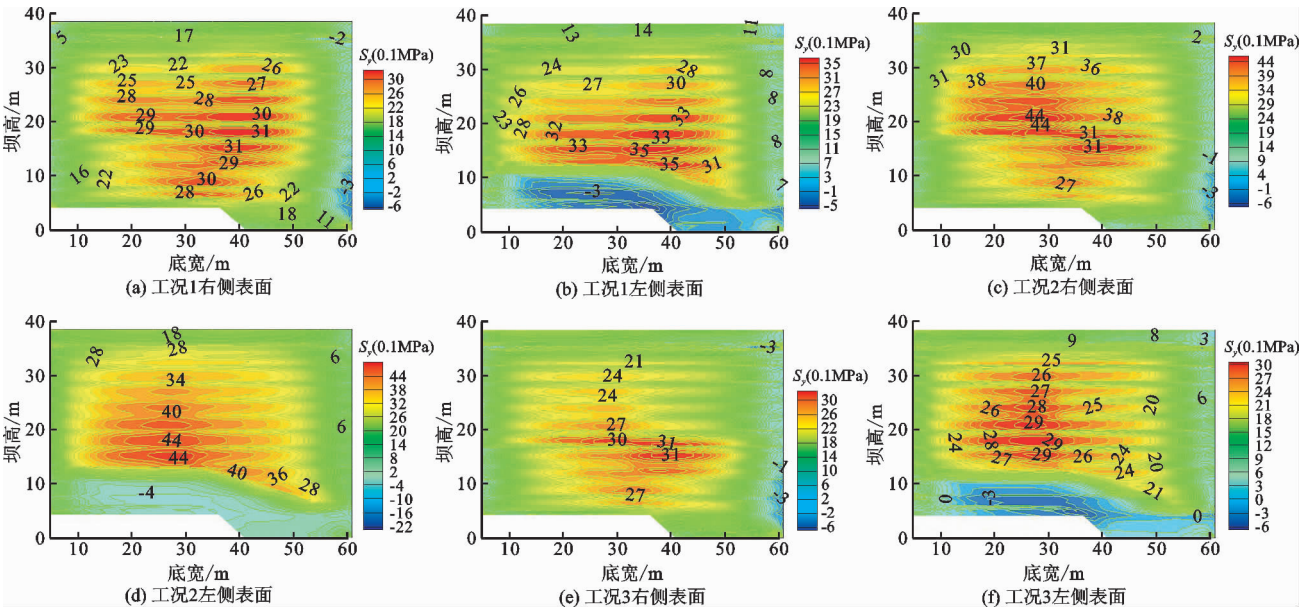

图 4　2017 年 12 月 26 日右导墙坝段顺河向(Y 方向)温度应力等值线图

7　结　论

采用有限元软件 ANSYS ,对右导墙坝段在无寒潮无保温、有寒潮无保温和有寒潮有保温 3 种工况进行了仿真计算分析,结果表明:

(1)寒潮发生时,外界气温迅速下降(降幅为

15.1℃),工况 1 坝体表面最低温度为 4.0℃,工况 2 为 -4.0℃,工况 3 为 4.0℃;在右侧表面工况 1 最大温度应力值为 3.1 MPa,工况 2 为 4.4 MPa,工况 3 为 3.1 MPa;在左侧表面工况 1 最大温度应力值为 3.5 MPa,工况 2 为 4.4 MPa,工况 3 为 2.9 MPa。工况 1 和工况 3 最大应力均小于容许应力,工况 2 最大应力大于容许应力。

(2)寒潮过程历时相对较短,其影响只限定在坝段表层附近混凝土范围内,对坝段内部温度和温度应力几乎没有影响。

(3)在寒潮发生时,采用 5 cm 厚的泡沫塑料板进行表面保温,可以提高坝体的表面温度 8℃左右,从而降低坝体表面拉应力,可有效避免寒潮引起的温度裂缝。

参考文献:

[1] 李明超,张梦溪,王孜越. 考虑诱导缝的碾压混凝土重力坝控裂结构温度场与温度应力数值分析[J]. 水利学报,2017,48(5):551 -559 +567.

[2] 张 超,常晓林,刘杏红. 大体积混凝土施工期冷却水管埋设形式的优化[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2014,47(3):276 -282.

[3] 奚建猛,孙业文,龚志明. 陶岔渠首枢纽工程混凝土防裂技术研究与应用[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(4):207 -210.

[4] NGUYEN T C, HUYNH T P, TANG V L. Prevention of crack formation in massive concrete at an early age by cooling pipe system [J]. Asian Journal of Civil Engineering, 2019, 20(8): 1101 -1107.

[5] 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.

[6] 刘伟业. 碾压混凝土拱坝气温骤降温控保护措施研究[J]. 黑龙江水利科技,2019,47(7):186 -188.

[7] SU Huaizhi, LI Jinyou, WEN Zhiping. Evaluation of various temperature control schemes for crack prevention in RCC arch dams during construction[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2014, 39(5):3559 -3569.

[8] 朱伯芳. 小湾拱坝施工期裂缝成因的再探讨[J]. 水利水电技术,2015,46(4):1 -5.

[9] 张子明,王嘉航,姜冬菊,等. 气温骤降时大体积混凝土的温度应力计算[J]. 河海大学学报(自然科学版),2003,31(1):11 -15.

[10] 王 闯,闫 滨. 基于子模型法的双台子河闸闸墩受寒潮作用的热 - 应力耦合分析[J]. 水电能源科学,2016,34(10):82 -86.

[11] 由国文,郭 磊,陈守开. 寒潮作用下大型水闸施工期温控防裂仿真分析[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(3):71 -74.

[12] 刘 发,李 明,姚 婷. 表面保温措施对大体积底板及侧墙混凝土开裂风险的影响[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版),2018, 33(4):76 -79 +88.

[13] 袁明道,肖 明,杨光华. 长沙拱坝裂缝状况及寒潮影响的数值分析[J]. 水力发电学报,2012,31(3):175 -181 +187.

[14] 陈彦玉,黄达海,代 婧. 气温骤降时早龄期混凝土表面保温措施研究[J]. 水力发电,2010,36(4):43 -46.

[15] 田振华,郑东健,姚 远,等. 大体积混凝土寒潮期温度应力及表面保温分析[J]. 水电能源科学,2011, 29(5): 93 -95.

[16] 朱 蕾,李姗姗,顾 斌,等. 寒潮侵袭作用下混凝土箱梁桥温度场实测研究[J]. 山西建筑,2017,43(31):152 -154.

[17] 张怀芝,刘新刚,段大琪. 亚碧罗 RCC 重力坝表面保护设计研究[J]. 云南水力发电,2010,26(4):19 -22.

[18] 张国新,刘 毅,李松辉,等. "九三一"温度控制模式的研究与实践[J]. 水力发电学报,2014,33(2):179 -184.

[19] 黄达海,王从峰. 大体积混凝土受寒潮袭击时半无限平面问题的无限平面化[J]. 中国工程科学, 2002,4(7): 33 -39.

[20] 李丹枫,段亚辉. 江坪河泄洪洞洞口段衬砌混凝土遇寒潮温控研究[J]. 中国农村水利水电,2011(7):84 -87.

[21] 张 昕,张晓飞,刘 茜,等. 碾压混凝土重力坝通水冷却温控效果研究[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(6): 163 -169.

[22] 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.

[23] 张建华. 碾压混凝土坝温控模拟及反分析研究[D]. 西安: 西安理工大学,2010.

[24] 王一凡. 高寒地区碾压混凝土重力坝劈头裂缝温度应力仿真计算研究[D]. 西安: 西安理工大学,2010.