

# 大体积混凝土温控和预应力 协同防裂措施

王 丽<sup>1</sup>, 邓 继<sup>2</sup>, 徐纯霞<sup>2</sup>, 朱耀军<sup>3</sup>, 蒋梦源<sup>4,5</sup>, 张红石<sup>4</sup>

(1. 淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 淮安 223005; 2. 涟水县水利勘测设计室, 江苏 淮安 223499;

3. 涟水县水生态建设服务中心, 江苏 淮安 223499; 4. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098;

5. 浙江省水文管理中心, 浙江 杭州 310009)

**摘要:**朱码闸水电站的厂房结构复杂, 混凝土体积较大, 容易在施工期温度应力的作用下产生裂缝。通水冷却是降低混凝土温度应力的常用方法, 而预应力技术是一种降低混凝土结构施工期内部拉应力的新方法。为研究温控和预应力对混凝土施工期拉应力的协同作用效果, 运用有限单元法得到了不同预应力张拉荷载作用与不同通水冷却措施下, 结构内部产生的拉应力降幅。通过对计算结果的分析, 最终确定了各仓混凝土的最优防裂措施。

**关键词:**预应力; 温度应力; 混凝土防裂; 有限元计算; 水电站

中图分类号: TV122+.1

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2022)07-0006-0005

## Synergistic anti-cracking measures of mass concrete by temperature control and prestress

WANG Li<sup>1</sup>, DENG Ji<sup>2</sup>, XU Chunxia<sup>2</sup>, ZHU Yaojun<sup>3</sup>, JIANG Mengyuan<sup>4,5</sup>,  
ZHANG Hongshi<sup>4</sup>

(1. Huai'an Water Conservancy Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Huai'an 223005, China;

2. Lianshui County Water Conservancy Survey and Design Office, Huai'an 223499, China;

3. Lianshui County Water Ecological Construction Service Center, Huai'an 223499, China;

4. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

5. Zhejiang Hydrology Management Center, Hangzhou 310009, China)

**Abstract:** The powerhouse structure of Zhuma sluice Hydropower Station is complex, while the concrete volume is large, which is prone to cracks under the action of temperature stress during construction. Water cooling is a common method to reduce the temperature stress of concrete, and prestressing technology is a new method to reduce the internal tensile stress of concrete structures during construction. In order to study the synergistic effect of temperature control and prestress on tensile stress of concrete during construction, the finite element method was used to obtain the reduction of tensile stress inside the structure under different prestressed tensile loads and different water cooling measures. Through the analysis of the calculation results, the optimal anti-cracking measures for the concrete of each warehouse are finally determined.

**Key words:** prestress; temperature stress; anti-cracking of concrete; finite element calculation; hydropower station

收稿日期: 2022-03-20

作者简介: 王丽(1981—), 女, 高级工程师, 本科, 主要从事大中型泵站工程规划设计以及BIM应用工作。E-mail: 50442537@qq.com



朱码闸位于江苏省涟水县城北约5 km处的朱码镇北侧,属于盐河干流梯级控制工程,具有排涝、蓄水灌溉和发电等功能。朱码闸原建于1958年,朱码闸上游河道长约47 km,控制排涝面积191.5 km<sup>2</sup>,原设计过闸流量218 m<sup>3</sup>/s,运行至今已60年之多。新建朱码闸位于S235省道西侧,闸室轴线与河道中心线正交,距离S235省道桥中心线约115.34 m。朱码闸包括节制闸和水电站,节制闸和水电站采用分体式底板结构布置,节制闸位于右岸,水电站位于左岸,正向进、出水布置。左岸设检修间、右岸设控制楼。

水电站的边墩往往为大体积混凝土结构,其拉应力主要来源于两个方面<sup>[1-3]</sup>:一是施工期混凝土温度变化等因素引起的残余应力;二是运行期荷载。而目前常用的减小大体积混凝土拉应力的方法主要是施工期温度控制,但需要在混凝土内布置非常密集的冷却水管,对施工振捣等工作存在一定的不便影响。预应力也是大体积薄壁结构常用的减小运行期拉应力的重要方法,在桥梁、渡槽等大体积

薄壁结构中都有成功的应用<sup>[4]</sup>,也有学者通过数值模拟对其在水闸中的作用进行分析;陈坚等<sup>[5-6]</sup>探究了软基上水闸应用预应力技术的可行性;沈旭鸿等<sup>[7]</sup>研究了在不同闸室结构中预应力的加固作用;但在水闸、水电站工程中,尚未见预应力技术在减少施工期温度应力上的应用。本文在传统温控措施<sup>[8]</sup>的基础上协同使用了预应力措施,将两者联合运用,从而更方便、有效地控制这种闸站结构的施工期拉应力。

## 1 计算参数和模型

### 1.1 基本参数和边界条件

根据当地的多年气温资料,将多年月平均气温拟合为一条余弦曲线:

$$T_a(t) = 13.3 + 14.2 \times \cos\left[\frac{\pi}{6}(\tau - 6.5)\right] \quad (1)$$

式中: $t$ 为时间,月; $T_a$ 为月平均气温,℃。

参考类似工程的材料参数,取热力学及力学参数如表1所示。

表1 材料参数

材料	导热系数 $\lambda$ [KJ·(m·h·℃) <sup>-1</sup> ]	绝热温升终 值 $\theta_0$ /℃	导温系数 $a$ / (m <sup>2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	线胀系数 $\alpha$ / (10 <sup>-6</sup> ℃)	泊松 $\mu$	密度 $\rho$ / (kg·m <sup>-3</sup> )	自生体积收缩 变形终值/10 <sup>-6</sup>	最终弹性模 量 $E_0$ /GPa
地基	2.41	0	0.00122	8	0.3	1 800	0	20
垫层	8.80	30	0.00335	8	0.167	2 300	-60	20
C30	8.95	55	0.00337	10	0.167	2 400	-130	32

### 1.2 计算模型

鉴于朱码闸水电站厂房结构的对称性,取一半结构进行建模,图1中有限元模型共有单元69 277个,节点76 649个,含地基和桩。坐标原点位置如图2所示。

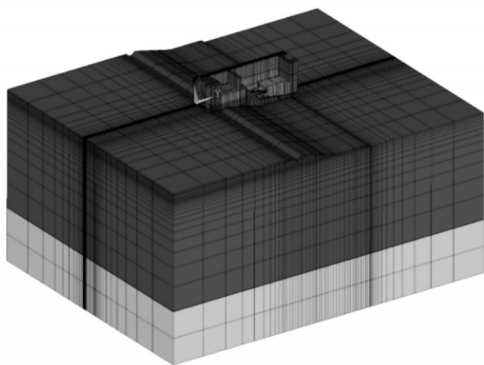


图1 结构总体有限元模型

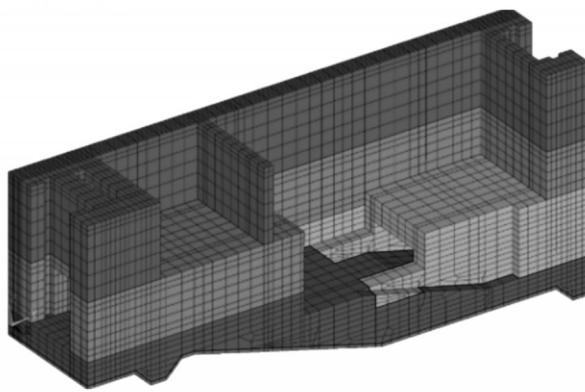


图2 半个厂房结构有限元模型

温度场仿真计算中,地基的四周和底面为绝热边界,上表面为散热边界。结构对称面为绝热边界,其他表面为散热边界。各仓混凝土在不同龄期阶段有木模板或保温材料进行保温,一段时间后自



由散热。

为了观察仿真计算的结果,选取了3个特征点,见表2、图3。由于边墩拉应力较大易裂,取边墩中心剖面为特征剖面,即 $x=0.6$  m剖面。

表2 各特征点位置坐标

特征点	$x$	$y$	$z$	备注
1	0.60	18.65	-1.75	第一浇筑仓
2	0.60	15.93	2.31	第三浇筑仓
3	0.60	15.93	5.47	第四浇筑仓

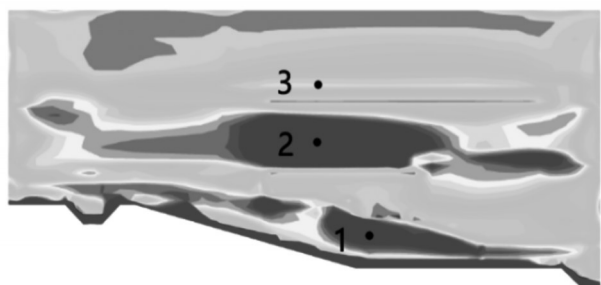


图3 特征点1~特征点3位置示意图( $x=0.6$  m剖面)

本文计算了水电站结构在春季浇筑并采用不同温控措施和预应力张拉荷载加载方案时的工况,各结构的浇筑时间与浇筑温度如表3所示。

表3 浇筑进度

浇筑层号	浇筑部位	浇筑高程/m	浇筑日期	浇筑温度/℃
1	底板	-1.95~1.50	2月20日	9.57
2	发电机层及空箱	-1.95~2.26	3月10日	12.96
3	流道及空箱	1.50~5.60	3月30日	17.33
4	地面层	5.60~10.30	4月20日	22.16

## 2 不同温控与预应力措施对防裂效果的影响

本研究共计算分析了基本工况和10个协同优化工况,限于篇幅,仅介绍其中4个典型工况的结果,分别为:不施加任何防裂措施的基本工况;只施加预应力措施的工况1;只施加温控措施的工况2;同时施加预应力措施与温控措施的最优工况。

### 2.1 基本工况的计算结果

基本工况模拟了未施加任何防裂措施情况下的施工期温度场和应力场。由结构的温度包络图

(图4)与应力包络图(图5)可见,各仓混凝土的最高温度较高,且高温时段持续时间较长。这2个现象除了对本仓混凝土的施工期拉应力不利以外,还对其下部浇筑层产生较明显的拉扯效应。后期各仓温降幅度大则拉应力增幅大,此外各仓上部相邻仓的温升幅度大且高温持续时间长亦导致其自身拉应力增幅大。

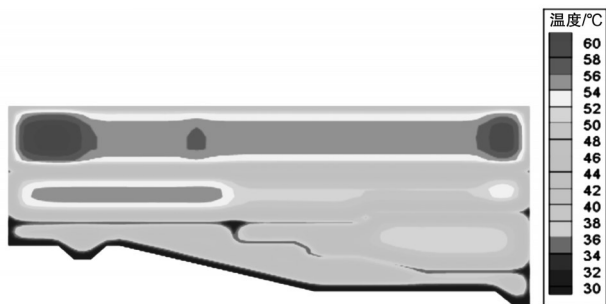


图4 基本工况边墩中心的温度包络图

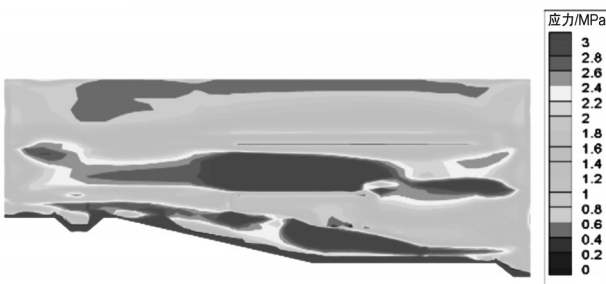


图5 基本工况边墩中心的应力包络图

选取应力较大处的特征点2观察其温度历时曲线(图6)及应力历时曲线(图7),该处的混凝土温度与拉应力在早龄期出现峰值,特征点最高温度为49.6℃,最大拉应力达到了4.22 MPa。可见底板和墩墙下部混凝土内部拉应力超过抗拉强度,结构易出现贯穿性裂缝。特征点1与特征点3的应力峰值同样出现在早龄期,最高温度分别为42.9℃与52.5℃,最大拉应力分别为4.21 MPa与2.11 MPa。

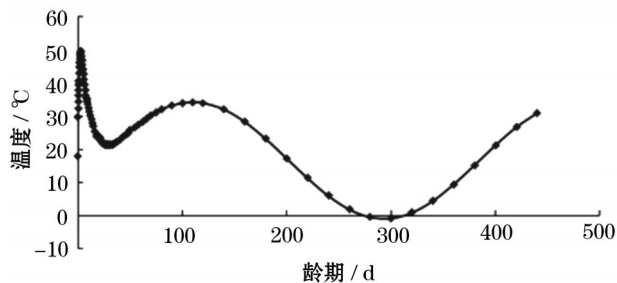


图6 基本工况特征点2的温度历时曲线



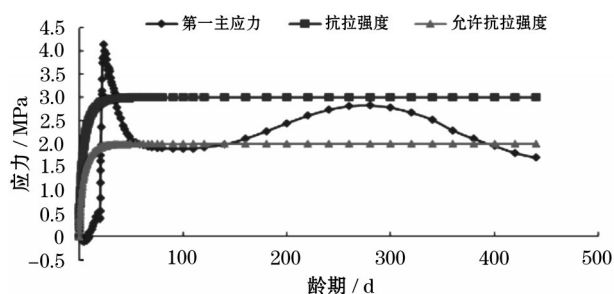


图7 基本工况特征点2的应力历时曲线

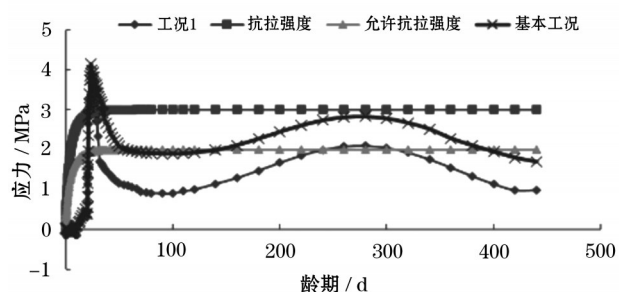


图10 工况1特征点2应力历时曲线

## 2.2 预应力措施对结构应力的影响

工况1在基本工况的基础上施加预应力,加载位置如图8黑圆点所示。预应力加在边墩上,每个浇筑层加载6对荷载,加载时刻为各仓混凝土14 d龄期,单节点上施加1 MN的张拉荷载。

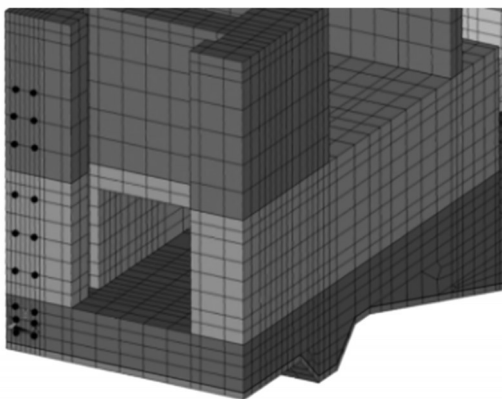


图8 工况1预应力加载位置

该工况下,第三浇筑仓受到预应力的明显影响(图9);特征点2的最大拉应力为3.60 MPa,下降了0.62 MPa(图10);特征点3的最大拉应力为1.61 MPa,下降了0.50 MPa。第一仓混凝土未施加预应力,特征点1未受到影响。由于预应力会弥散到相邻混凝土浇筑层中,因此实际本层应力降幅会明显低于“预应力荷载/本层混凝土横截面面积”。

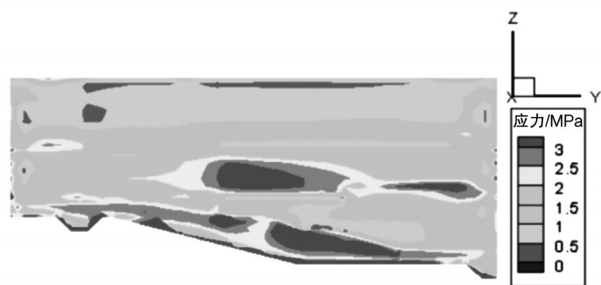


图9 工况1边墩中心的应力包络图

## 2.3 通水冷却对结构施工期拉应力的影响

工况2在基本工况的基础上,对第二、三、四仓混凝土削峰7℃,通水10 d,温降速率1℃/d。

该工况下,对第二、三、四仓混凝土最高温度下降约10℃(图11);特征点1的最大拉应力为4.15 MPa,下降了0.06 MPa;特征点2的最高温度为45.2℃,下降了4.6℃,最大拉应力为3.65 MPa,下降了0.57 MPa(图13);特征点3的最高温度为48.3℃,下降了4.2℃,最大拉应力为1.85 MPa,下降了0.26 MPa。通水冷却措施能使前两仓混凝土的拉应力明显下降,但第三仓混凝土的应下降不明显,仍有大部分部位拉应力超过3 MPa(图12)。

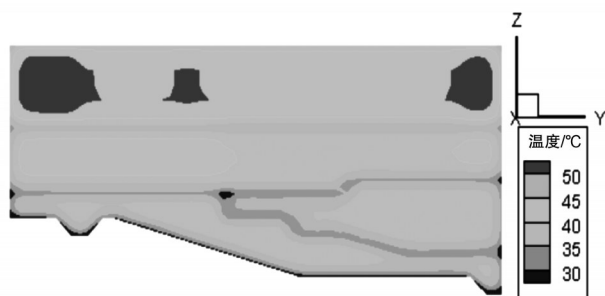


图11 工况2边墩中心温度包络图

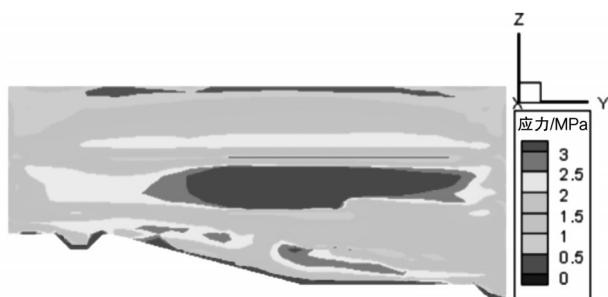


图12 工况2边墩中心应力包络图

## 2.4 最优工况

在经历了多个协同施加不同预应力措施与温



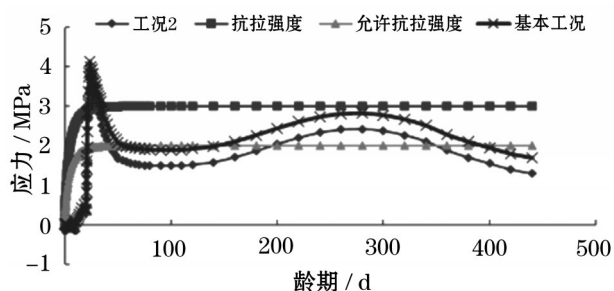
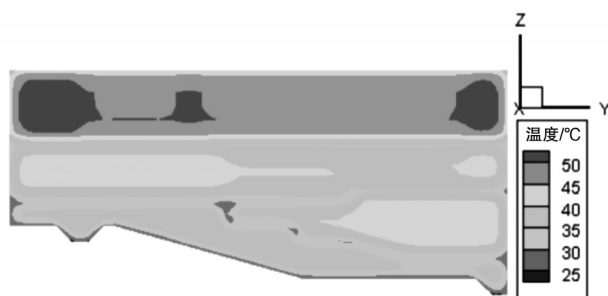


图13 工况2特征点2应力历时曲线

图15 工况10 $x=0.6$  m温度包络图

控措施的优化工况后,得到最优工况:工况10。该工况中,预应力荷载加载位置如图14黑点所示,只加在边墩下部浇筑块上,加载10对荷载,加载时刻为各仓混凝土14 d龄期,单节点上施加1 MN的张拉荷载。温控措施为:对第一仓混凝土削峰7℃,通水13 d,温降速率3℃/d;对第二、四仓混凝土削峰7℃,通水8 d,温降速率3℃/d;对第三仓混凝土削峰15℃,通水8 d,温降速率3℃/d。

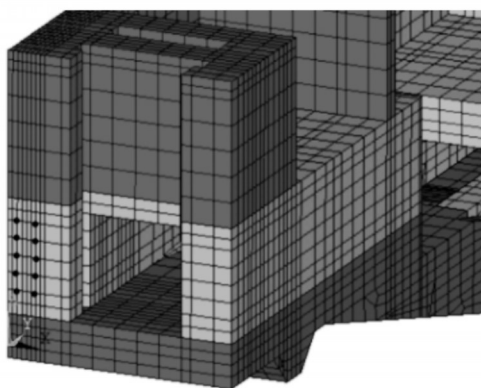


图14 工况10预应力加载位置

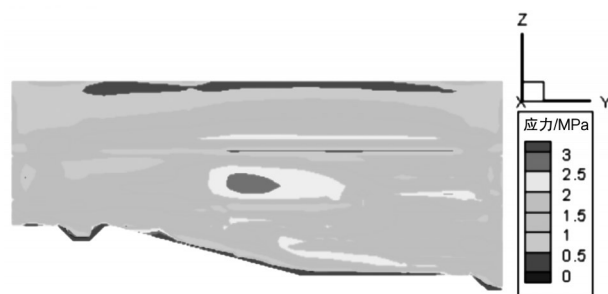
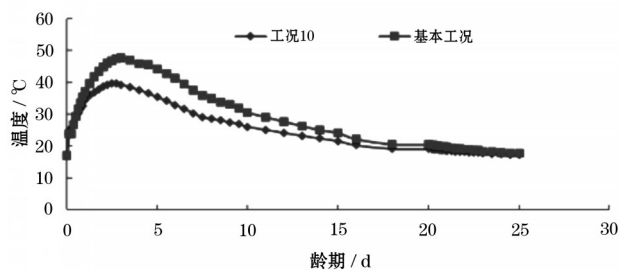
图16 工况10 $x=0.6$  m应力包络图

图17 工况10特征点2早龄期温度历时曲线

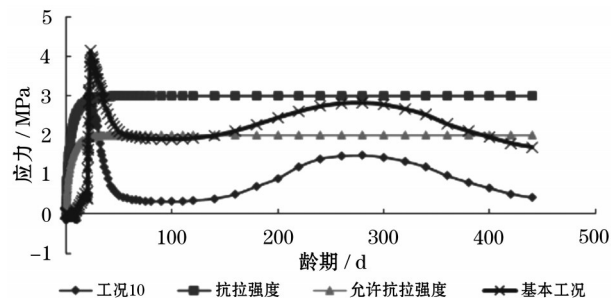


图18 工况10特征点2应力历时曲线

该工况下,结构的最高温度有所下降(图15),且最大拉应力低于3 MPa(图16)。原本应力较大处的特征点2最高温度为39.7℃(图17),最大拉应力为2.64 MPa(图18),已处于安全状态;特征点1的最高温度为36.8℃,最大拉应力为1.86 MPa;特征点3的最高温度为47.8℃,最大拉应力为2.12 MPa。从经济性和安全性综合考虑,本工况为相对最优工况。

该工况的防裂措施在该工程2021年春季的实际施工过程中采用后,截至2022年春季,底板和边墩未发现可见裂缝。

### 3 结 论

(1) 由于预应力会弥散到相邻混凝土浇筑层

中,因此对于施加预应力荷载的浇筑层而言,本层拉应力降幅会明显低于“预应力荷载/本层混凝土横截面面积”。

(2) 单独采用预应力来防裂需要单点施加很大的荷载,可能会压碎局部混凝土;单独采用温控措施则需要密集布置的冷却水管,影响振捣。当温控措施与预应力措施协同发挥作用时,效果更好。本

(下转第15页)



- [6] 李建成. 中小型平面钢闸门设计参数影响程度研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(9): 157-159, 166.
- [7] 杨海全. 基于 ANSYS 的大石牛水电站拱坝体型优化设计研究[J]. 东北水利水电, 2021, 39(3): 17-20.
- [8] 李忠彦. 基于 ABAQUS 的水闸闸首段卸荷式挡土结构模型分析[J]. 水利科学与寒区工程, 2020, 3(2): 45-48.
- [9] 杨东玲. 轿顶子水电站挑流鼻坎段体型优化模型试验研究[J]. 东北水利水电, 2021, 39(8): 43-45, 72.
- [10] 施得兵, 李宁, 焦婷丽. 碾盘山水利枢纽泄水闸泄流能力模型试验研究[J]. 水电与新能源, 2021, 35(2): 15-16, 71.
- [11] 李鹤, 李玉建, 俞晓伟, 等. 苏巴什水库泄水建筑物消能防冲优化试验研究[J]. 水利技术监督, 2020(6): 156-160.
- [12] 刘进, 马旭东, 楚志腾, 等. 某厢型沉沙池首部侧向扩散段排沙方案研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(4): 113-116.
- [13] 储维刃, 刘双喜, 潘丽. 龙口引水枢纽冲沙闸拉沙试验研究[J]. 水利建设与管理, 2021, 41(2): 12-16.
- [14] 陈杨. 水库排沙清淤中导流堤与排沙渠结合技术应用的试验分析[J]. 陕西水利, 2021(9): 18-19, 24.
- [15] 王平圆, 吴洋锋, 李琳. 基于大涡模拟的悬板径向坡度对排沙漏斗流场特性影响数值模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(1): 156-163.
- [16] 韩力球, 孙东坡, 赵旭润, 等. 某抽水蓄能电站拦沙库泄洪排沙系统的水力特性研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2017, 38(1): 80-86.

(上接第 10 页)

工程中先对各仓采用温控措施控制温度峰值和高温时段时长, 然后对第三仓施加预应力, 效果相对最优。

(3) 如果混凝土温降阶段的冷却水流量太小则温降速率太小, 高温时段偏长, 对本仓和本仓下部浇筑块的拉应力都不利。但如果温降阶段的冷却水流量太大, 导致温降过快, 拉应力增速过快, 也会使得早龄期抗拉强度较小时, 拉应力超过抗拉强度。因此, 温降速率应该控制在合适的范围内。

#### 参考文献:

- [1] 吴健, 曹为民, 闪黎. 水工墩墙结构混凝土裂缝成因与防裂措施分析[J]. 中国水利, 2005(2): 48-50.
- [2] 王碗琴, 王桂生, 强晟, 等. 大体积薄壁混凝土墩墙结构早

龄期开裂过程的数值模拟[J]. 水电能源科学, 2018, 36(4): 139-142.

- [3] 王海波, 周君亮. 大型水闸闸墩施工期温度应力仿真和裂缝控制研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(7): 169-174.
- [4] 张社容, 祝青, 李升. 大型渡槽数值分析中预应力的模拟方法[J]. 水利发电学报, 2009, 28(3): 97-100.
- [5] 陈坚, 于宙, 王丽, 等. 软基上水闸截面积和地基对预应力效果的影响规律[J]. 江苏水利, 2007(1): 25-31.
- [6] 陈坚, 于宙, 王丽, 等. 软基上水闸预应力张拉加载方法有限元仿真[J]. 水电能源科学, 2021, 39(12): 192-196.
- [7] 沈旭鸿, 王仙美, 苏超. 体外预应力技术在闸室结构加固中的应用研究[J]. 中国水运(下半月), 2014, 14(3): 128-129.
- [8] 沈思朝, 颀志强, 王首豪. 基于数值仿真的闸温控措施敏感性分析[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(1): 146-154.