DOI:10.11705/j. issn. 1672 - 643X. 2018. 06. 25

碾压混凝土重力坝通水冷却温控效果研究

张 昕1, 张晓飞1, 刘 茜1, 王晓平2, 黄 宇3

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 中国电建集团西北勘测设计研究院 有限公司, 陕西 西安 710065; 3. 广州水务规划勘测设计研究院, 广东 广州市 510640)

摘 要: 对碾压混凝土坝采取合理可行的温控措施,对于降低温控费用和防止温度裂缝尤为重要。以某碾压混凝土重力坝为例,采用三维有限元浮动网格法模拟大坝施工进度安排,考虑混凝土弹性模量和水化热温升随龄期变化、通水冷却时长、通水温度等因素,对该碾压混凝土重力坝进行温控仿真研究,分析了通水冷却效果和坝体温度、应力变化规律。结果表明:通水时间为 20 d,冷却水温从 20℃降低到 15℃时,可使各区最高温度降低 0.6~0.7℃,最大温度应力降低 0.08~0.13 MPa。冷却水温为 20℃,通水时间从 15 d 增加到 20 d,可使各区最高温度降低1.0℃,最大温度应力降低 0.11~0.15 MPa。控制混凝土浇筑温度为 25℃,采取通水温度 20℃、通水时长 20 d、全坝段通水冷却温控措施,坝体最高温度和最大应力均满足控制标准。研究成果为该碾压混凝土重力坝的通水冷却温控设计和施工管理提供了重要依据,对类似工程的温控设计具有参考意义。

关键词:碾压混凝土重力坝;通水冷却;温度应力;温度场

中图分类号:TV544

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)06-0163-07

Study on temperature control effect of water cooling for roller compacted concrete gravity dam

ZHANG Xin¹, ZHANG Xiaofei¹, LIU Qian¹, WANG Xiaoping², HUANG Yu³

- (1. Faculty of Water Rresources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
 - 2. Northwest Engineering Corporation Limited, POWERCHINA, Xi'an 710065, China;
 - 3. Guangzhou Municipal Institute of Water Affairs Investigation and Design, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Reasonable and feasible temperature control methods for the roller compacted concrete (RCC) dams are of great importance to reduce temperature control costs and to prevent temperature cracks. Taking a RCC gravity dam as an example, the three - dimensional finite element floating grid method was used to simulate the dam construction schedule. The temperature control simulation study of the concrete gravity dam was carried out by considering the change of the elastic modulus of the concrete and the temperature rise of the hydration heat with age, the length of the cooling time and the temperature of the water. The cooling effect of water cooling and the change regulation of temperature and stress were analyzed. The results showed that: when the water cooling days were 20 days and the cooling water temperature reduced from 20 to 15 $^{\circ}\mathrm{C}$, the maximum temperature in each area can be reduced by $0.6 \sim 0.7 \, ^{\circ}\mathrm{C}$, and the maximum temperature stress can be decreased by 0.08 ~0.13 MPa. When the water cooling temperature was 20 °C and the days of cooling water increased from 15 days to 20 days, the maximum temperature of each district reduced by 1.0 $^{\circ}\mathrm{C}$ and the maximum temperature stress reduced by 0.11 ~0.15 MPa; The maximum temperature and maximum stress of the dam body meet the temperature and stress control standard by controlling the concrete with pouring temperature 25℃ and taking the cooling water temperature 20℃ for 20 days in the whole dam. This study provides an important basis for the temperature control design of water cooling and construction management of the RCC gravity dam, and can guide the temperature control design of similar projects.

收稿日期:2018-04-08; 修回日期:2018-09-27

基金项目:国家自然科学基金项目(51479168)

作者简介:张昕(1992-),女,河北邯郸人,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。

Key words: RCC(roller compacted concrete) gravity dam; water cooling; temperature stress; temperature field

1 研究背景

碾压混凝土坝以其施工速度快、造价低等优点,受 到世界各地坝工界的青睐。但连续式大面积浇筑的快速 施工工艺会影响混凝土浇筑层面热量的散发,且由于混 凝土极限拉伸值和徐弹比都比较小,因此碾压混凝土坝 抗裂性能较差,易产生温度裂缝[1]。国内外许多混凝土 坝均产生了不同程度的温度裂缝,温度裂缝不仅会影响 大坝的强度,还会大大降低其完整性、抗震性和耐久性, 从而影响大坝安全与使用年限,因此温度裂缝问题受到 广泛关注[2-4]。目前,大坝在施工期通常采用通水冷却 的方法来控制混凝土温度,使混凝土温度保持在设计的 容许温度之下,从而控制大坝质量[5-6]。美国胡佛大坝 率先采用了通水冷却技术,利用冷却水管对浇筑完成的 混凝土进行通水冷却,由冷却水的流动将水泥水化产生 的热量带出坝体,以降低坝体内部温度,达到减小温差、 控制温度裂缝的目的[7-9]。该技术[10-11]被坝工建设者 沿用至今,广泛地应用于碾压混凝土坝的温控防裂中,对 防止裂缝的产生和发展起到了很好的作用[12],是大体积 混凝土最为有效、使用最为广泛的温控防裂措施之一。 但是通水冷却措施也存在一些不足,首先大规模的埋设 冷却水管不利于成本控制;其次,埋设水管的施工过程较 为复杂且需增设其他辅助施工流程,不利于工期控制;最 后,埋设管线一旦出现渗漏等问题,将会严重影响大坝结 构的使用年限[13-14]。因此从技术水平、工程预算及绿色 环保等方面进行综合考虑,确定合理的通水冷却方案尤 为重要。

本文利用大型有限元软件 ANSYS 进行建模,采用三维有限元浮动网格法^[15-18]模拟大坝施工进度安排,考虑混凝土弹性模量、水化热温升、通水冷却时间和通水温度等因素进行温控仿真研究,分析了冷却水管温控冷却效果,给出了坝体温度和应力变化规律,提出了合理可行的温控推荐方案。

2 计算原理

2.1 温度场计算原理

根据热传导理论,在瞬态温度场 T(x,y,z,t)中,坝体混凝土温度与时间、空间的关系应满足以下热传导方程:

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

式中: $\frac{\partial T}{\partial t}$ 为温度随时间变化率; θ 为混凝土绝热温

升, \mathbb{C} : α 为混凝土导温系数, $\mathbf{m}^2/\mathbf{h}_{\circ}$

2.2 温度应力场计算原理

在应力场计算中,弹性体内各点应变分量表示为:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = \alpha \cdot T, \ \gamma_{xy} = \gamma_{yz} = \gamma_{zx} = 0$$
式中: α 为热膨胀系数。

在用有限元法求解温度应力时,考虑温度、徐变和自生体积变形后的应力场整体平衡方程可写为:

 $[K_n] \{\Delta \delta_n\} = \{\Delta P_n^T\} + \{\Delta P_n^c\} + \{\Delta P_n^s\}$ (3) 式中: $[K_n]$ 为整体刚度矩阵; $\{\Delta \delta_n\}$ 为节点位移增量; $\{\Delta P_n^T\}$ 、 $\{\Delta P_n^c\}$ 、 $\{\Delta P_n^s\}$ 分别为温度、徐变、自生体积变形引起的荷载增量。

由公式(3) 求得 $\{\Delta\delta_n\}$ 后带人公式(4) 得到各节点应力增量 $\{\Delta\sigma_n\}$,再将其各时段累加,即为节点应力。

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

3 工程概况

某水利枢纽工程位于赞比亚首都卢萨卡西南90 km 的卡富埃河上,主要由左右岸挡水坝、河床溢流表孔、生态放水孔、右岸引水发电系统组成。设计正常蓄水位589.0 m,库容0.86×10⁸ m³,总装机容量750 MW。碾压混凝土重力坝坝基面高程452.0 m,坝顶高程591.0 m,最大坝高139.0 m,坝顶长374.5 m。泄洪建筑物由3孔15 m×18 m的表孔组成,溢流堰顶高程571.0 m。

坝址区气象站气温和水温统计资料见表1。

4 计算模型及材料参数

本次计算选取 10[#]泄洪坝段为研究对象,建立模拟坝体混凝土施工过程的整体计算模型(见图 1)。该坝段长 19.5 m,坝段底宽 126.73 m,坝基面高程为 452.0 m,堰顶高程为 571.0 m,建立模型时将坐标原点选取在右侧坝踵处,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,共划分单元 59 670 个,结点 68 783 个。

该工程所用材料包括三级配碾压混凝土 R1、R2, 二级配碾压混凝土 R3,溢流面常态混凝土 C3、C5,材料 分区见图 2。各分区混凝土材料热力学参数见表 2。

5 计算方案及温度和应力控制标准

5.1 计算方案

10#泄洪坝段混凝土开浇日期为2018年3月12

 $^{\circ}$ C

日,平均每14 d 浇筑一大层,每层层高为3 m, 2018 年7月9日浇筑至高程477.35 m,2018 年10月27日浇筑至高程502.7 m,2019年7月中旬大坝浇筑至溢流堰顶高程571.0 m。2020年4月1日下闸蓄水,2020年4月5日蓄水至溢流堰顶,堰顶以上采用表孔泄洪的方式,按照1.0 m/d 的速度,2020年4月23日蓄水至正常蓄水位589.0 m。

方案 1:该方案采取全坝段通水冷却措施,通水时间为 20 d,冷却水温 15℃,大层浇筑完成立即通水冷却,通水流量 1.2 m³/h,水管间距 1.5 m,采用 U 形卡固定,冷却水管采用高密聚乙烯塑料管,外径 32 mm,内径 28 mm,在上下两层水管中间位置布置温度计以测定混凝土内部温度,冷却水管计算采用等效热源法^[4]进行模拟。具体布置如图 3 所示。

7,0	八年四 (新年	(1m1)1/1m3/27/17/2
月份	气温	水温
1	26.08	25.90
2	25.78	25.00
3	25.38	24.80
4	24.18	24. 10
5	21.78	22.80
6	19.78	21.70
7	19.68	21.60
8	22.18	23.80
9	25.78	25.80
10	28.18	27.10
11	27.68	26.80
12	26.48	26.20
平均	24.41	24.63

表 1 坝址区气象站气温水温统计表

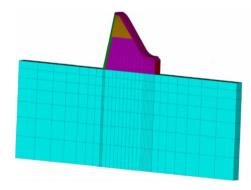


图 1 泄洪坝段计算模型

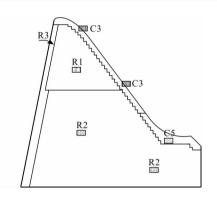


图 2 泄洪坝段材料分区

表 2 大坝混凝土基本热力学计算参数

£*#r	分区材料						
<u>参数</u>	R1	R2	R3	C3	C5		
容重/(kN·m ⁻³)	23.94	23.95	23.70	23.50	23.75		
		$T = \frac{18.92(t^{1.983} + 1.093)}{t^{1.983} + 14.73}$					
比热⁄(kJ·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	$C = 1.5819 - 0.03236\theta + 0.0004060\theta^2$	$C = 1.2310 - 0.01729\theta + 0.0002470\theta^2$	$C = 1.3641 - 0.02120\theta + 0.0002750\theta^2$	$C = 0.6269 + 0.00326\theta + 0.0009900\theta^2$	$C = 1.5320 - 0.03336\theta + 0.0004458\theta^2$		
导温系数/(m²·h-1)	0.003969	0.003769	0.003884	0.004054	0.003804		
导热系数/ (kJ·m ⁻¹ ·h ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	9.280	9. 245	9.117	9.083	8.710		
抗压弹性模量/GPa	17.00	18.89	21.94	32.20	33.10		
极限拉伸值/10-6	88	92	96	127	140		

方案 2: 该方案通水时间为 20 d, 冷却水温 20° , 其他条件与方案 1 相同。

方案 3:该方案通水时间为 15 d,冷却水温 20° ,其他条件与方案 1 相同。

方案 4: 为节省投资,该方案仅对约束区(高程452.0~502.7 m)进行通水冷却,通水时间为 20 d,

冷却水温为当月河水温度。其他条件与方案 1 相同,当月河水温度见表 1。

方案 5:该方案仅对约束区(高程 $452.0 \sim 502.7$ m)进行通水冷却,通水时间为 20 d,冷却水温 20 %。 其他条件与方案 1 相同。

各计算方案汇总表见表3。

———— 计算 方案	约束区 (高程 452.0~502.7 m)	非约束区 (高程 502.7~571.0 m)	开始浇 筑时间	约束区	非约束区
刀杀	通水天数×水温	通水天数×水温	巩凹凹	浇筑温度	浇筑温度
方案1	$20 \mathrm{d} \times 15^{\circ}\mathrm{C}$	$20\mathrm{d} \times 15\mathrm{^\circ\!C}$	2018-03-12	€25°C	€27°C
方案2	$20d \times 20$ °C	$20d \times 20$ °C	2018-03-12	€25°C	€27°C
方案3	$15d \times 20$ °C	$15d \times 20$ °C	2018-03-12	€25°C	€27°C
方案4	20d×河水水温		2018-03-12	€25°C	€27°C
方案 5	$20d \times 20$ °C		2018-03-12	€25°C	€27°C

表 3 10 # 泄洪坝段计算方案汇总表

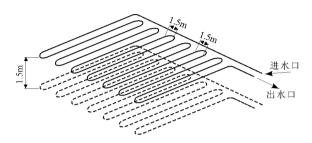


图 3 冷却水管布置示意图

5.2 温度和应力控制标准

(1)混凝土温度控制标准。约束区混凝土基础 容许温差^[19]见表 4。

表 4 约束区混凝土基础容许温差 ℃

混凝土分类	强约束区	弱约束区
碾压混凝土	12.0	13.5
常态混凝土	14.0 ~ 16.0	17.0 ~ 19.0

(2)应力控制标准。基础混凝土容许抗裂应力 应满足下式^[19]:

$$\sigma \leqslant \varepsilon_{p} E_{c} / K_{f} \tag{5}$$

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重要指标; E_c 为混凝土弹性模量的标准值; K_f 为安全系数,根据工程的重要性和开裂的危害性,本工程取 1.65。

该工程坝体混凝土容许拉应力见表5。

	表 5	混凝土容许	MPa	
R1	R2	R3	С3	C5
0.97	1.41	1.38	2.48	2.81

6 温度场计算成果分析

在大坝运行过程中,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,坝体内部最高温 度逐渐减小并趋于坝体稳定温度 24.5℃。大坝稳 定温度场温度等值线图见图 4。

坝体内部区域最高温度随着混凝土水化反应的 发生逐渐升高,在10-12月浇筑的部位以及溢流堰 顶和溢流面反弧段常态混凝土区域温度较高,主要 是因为溢流堰顶处的混凝土浇筑完成历时短,水化 热来不及散发,使得这部分混凝土温度较高。反弧 段常态混凝土温度较高是由于该部位混凝土绝热温 升较高。

方案 1~方案 5 在 2019 年 8 月 15 日温度等值 线图见图 5~9,各方案不同区域最高温度见表 6。 方案 1 和方案 2 相比,通水历时 20 d,冷却水温降低 5℃,可使各区最高温度降低 $0.6 \sim 0.7 \circ C$ 。方案 2 与方案 3 相比,冷却水温 $20 \circ C$,通水时间增加 5 d,可使各区最高温度降低 $1.0 \circ C$ 。方案 2 与方案 5 相比,坝体非约束区通水历时 20 d,冷却水温 $20 \circ C$,可使坝体非约束区最高温度降低 $7.5 \circ C$ 左右,降温效果显著。方案 4 和方案 5 相比,可见通制冷水对坝体温降有益,坝体约束区内部最高温度比通河水降低 $0.5 \sim 1 \circ C$ 。

方案1、方案2和方案3强约束区、弱约束区最大温差均小于基础容许温差,方案4和方案5弱约束区最大温差均大于基础容许温差。

7 温度应力场计算成果分析

 10^* 泄洪坝段各方案最大温度应力见表 7。泄洪坝段高程 454.0 m 和高程 512.0 m 水平面中间点 σ_x 、 σ_y 温度应力历时曲线见图 $10 \sim 11$ 。坝体最大温度应力出现在基础约束区碾压混凝土部位,尤其是在距坝基面高度为 2 m(高程 454.0 m)处。分析原因,一是由于该层面距坝基较近,坝基约束作用明显;二是由于坝基弹性模量为 22 GPa,弹性模量值较大。由于大坝溢流面及堰顶常态混凝土区域,混凝土绝热温升较高,因而温度应力相对较大。

方案1和方案2相比,坝体内部碾压混凝土最

大应力降低 0.08~0.13 MPa。方案 2 和方案 3 相比,坝体内部碾压混凝土最大应力降低 0.11~0.15 MPa。在坝高 60 m(高程 512.0 m)处,由于非约束区未进行通水冷却,所以方案 4 和方案 5 应力与其他方案相比较大。

方案 3 大坝温度等值线图

(2019-08-15)(单位:℃)

方案 1、方案 2 和方案 5 最大温度应力均小于碾压混凝土 R2 容许拉应力 1.41 MPa,方案 3 和方案 4 最大温度应力 σ_y 大于碾压混凝土 R2 容许拉应力 1.41 MPa,各方案表层常态混凝土最大应力均小于常态混凝土 C3 容许应力 2.48 MPa。

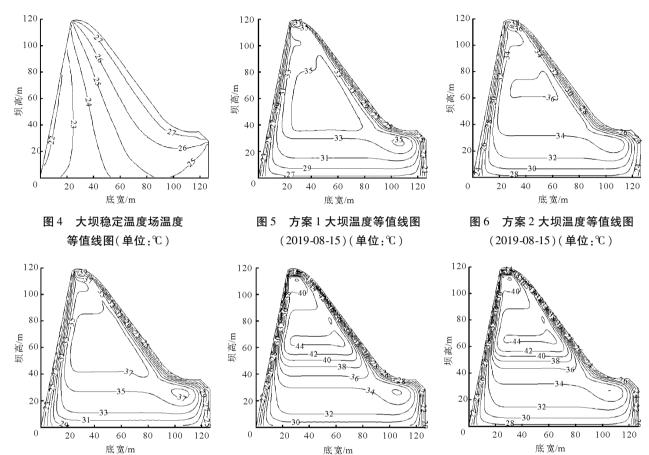


表 6 各方案不同区域混凝土最高温度

图 8 方案 4 大坝温度等值线图

(2019-08-15)(单位:℃)

 $^{\circ}$ C

图 9 方案 5 大坝温度等值线图

(2019-08-15)(单位:℃)

		退始丰豆湿豆油焖工	2000年12月12日12日12日12日12日12日12日12日12日12日12日12日12日1	北州丰豆湿尼川塚工	※ 法五类 大川 塚 L
计算	最高温度	强约束区碾压混凝土	弱约束区碾压混凝土	非约束区碾压混凝土	溢流面常态混凝土
方案	和最大温差	(高程 452.0~	(高程 477.35~	(高程 502.7~	(高程 478.0~
刀采	和取八価左	477.35m)	502.7m)	566.0m)	571.0m)
上 安 1	最高温度	33.34	35.90	35.29	37.35
方案1	最大温差	8.54	11.40	10.78	12.85
方案 2	最高温度	33.94	36.60	36.02	38.25
刀采 4	最大温差	9.44	12.10	11.52	13.75
方案3	最高温度	34.96	37.61	36.99	39.47
刀杀 3	最大温差	10.46	13.11	12.49	14.97
方案 4	最高温度	34.47	39.74	43.45	48.08
刀杀4	最大温差	9.97	15.24	18.95	23.58
方案 5	最高温度	33.94	38.81	43.45	48.08
刀杀 3	最大温差	9.44	14.31	18.95	23.58
稳	急定温度	24.50	24.50	24.50	24.50
基础	出容许温差	12.00	13.50		

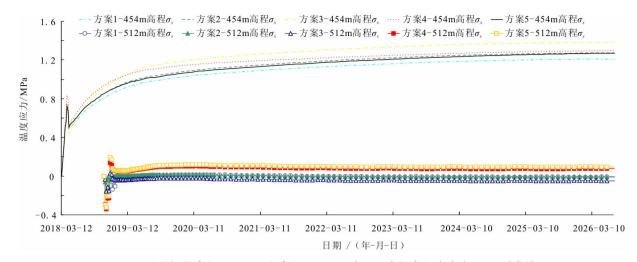


图 10 泄洪坝段高程 454.0 m 和高程 512.0 m 水平面中间点温度应力 σ_x 历时曲线

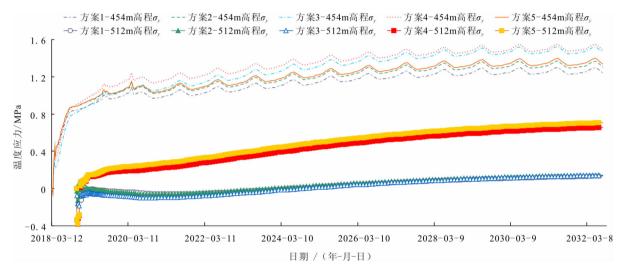


图 11 泄洪坝段高程 454.0 m 和高程 512.0 m 水平面中间点温度应力 σ_{ν} 历时曲线

表 7 10 泄洪坝段各方案最大温度应力

MPa, m

方案编号	碾压混凝土				表层常态混凝土	
	$\sigma_{\scriptscriptstyle x}$	距基岩高度	$oldsymbol{\sigma}_{\scriptscriptstyle y}$	距基岩高度	$\sigma_{\scriptscriptstyle x}$	$oldsymbol{\sigma}_{\scriptscriptstyle y}$
方案1	1.14	2.0	1.29	2.0	0.51	0.89
方案2	1.27	2.0	1.37	2.0	0.60	0.95
方案3	1.38	2.0	1.52	2.0	0.68	1.04
方案4	1.30	2.0	1.55	2.0	0.71	1.17
方案5	1.27	2.0	1.40	2.0	0.64	1.12
容许应力	1.41				2.	48

8 结 论

本文结合实际工程对某碾压混凝土重力坝通水 冷却温控措施进行了仿真计算,分析了各方案通水 冷却效果及其变化规律。结果表明:

(1)综合对比分析 5 个方案,其中方案 1 和方案 2 温度和温度应力均满足控制标准,但从施工可

行性角度分析,该大坝位处非洲,属热带草原性气候,水温常年在20℃以上,因此20℃制冷水比15℃制冷水更易制得,同时从节省建设投资角度考虑,最后拟定方案2为最终推荐方案。即控制混凝土浇筑温度25℃,采取通水温度20℃、通水时长20d,全坝段通水冷却温控措施,既可以使最大温度和应力在整个施工期、运行期满足温度和应力控制标准,又可

以降低温控措施的综合成本,做到经济可行。

- (2)通水时间为 20 d, 冷却水温从 20℃降低到 15℃时,可使各区最高温度降低 $0.6 \sim 0.7 \circ C$, 最大温度应力降低 $0.08 \sim 0.13$ MPa。
- (3)冷却水温为 20℃,通水时间从 15 d 增加到 20 d,可使各区最高温度降低 1.0℃,最大温度应力降低 0.11~0.15 MPa。
- (4)基础约束区温度应力较大,尤其是在坝基面附近,建议在坝基面使用高标号混凝土,改进此处 混凝土配合比,以增加大坝的安全余量。

参考文献:

- [1] 朱伯芳. 混凝土坝温度控制与防止裂缝的现状与展望 [J]. 水利学报,2006,37(12):1424-1432.
- [2] 漆焕然,李守义,张晓飞,等. 某碾压混凝土重力坝施工 温控措施研究[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(6): 146-152.
- [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] 朱伯芳. 论混凝土坝的水管冷却[J]. 水利学报,2010,41 (5):505-513.
- [5] 朱伯芳. 考虑外界温度影响的水管冷却等效热传导方程. 水利学报,2003,34(3):49-54
- [6] 林鹏,李庆斌,周绍武,等.大体积混凝土通水冷却智能温度控制方法与系统[J].水利学报,2013,44(8):950-957.
- [7] 王继敏,周厚贵,谭恺炎.冷却通水智能控制系统及其在 锦屏一级拱坝中的应用[J].水利水电科技进展,2017, 37(1):50-54.
- [8] 朱岳明,张建斌. 碾压混凝土坝高温期连续施工采用冷却水

- 管进行温控的研究[J]. 水利学报,2002,33(11):55-59.
- [9] 王 衡, 谭恺炎, 燕 乔, 等. 大体积混凝土冷却通水智能控制系统研制与应用[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2013,35(3):12-15.
- [10] 谭恺炎,段绍辉,余 意,等.大体积混凝土温度与冷却 通水参数关系[J]. 武汉大学学报(工学版),2013,46 (6);691-695.
- [11] 朱伯芳. 建设高质量永不裂缝拱坝的可行性及实现策略[J]. 水利学报,2006,37(10):1155-1162.
- [12] 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(3):276-282.
- [13] 王三禄. 基于热流耦合算法的大体积混凝土水管冷却 仿真计算研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- [14] 陈桂林,姜 玮,刘文超,等.大体积混凝土施工温度裂缝控制研究及进展[J].自然灾害学报,2016,25(3):159-165.
- [15] ZHU Bofang ,XU Ping. Methods for stress analysis simulating the construction process of high concrete dams [J]. Dam Engineering, 2001, 12(4);243-260.
- [16] LI Shouyi, CHEN Yaolong, ZHANG Xiaofei, et al. Study on contraction joints for the Longtan RCC gravity dam [J]. Dam Engineering, 2004, 10(4):295-307.
- [17] 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.
- [18] REN Jinke, LI Shouyi, ZHAO Lijuan, et al. Research on the effect of cooling pipe of RCC gravity dam [J]. Dam Engineering, 2008, 19(1):29 38.
- [19] 国家能源局. 混凝土重力坝设计规范: NB/T 35026 2014[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.

喜讯

《水资源与水工程学报》被中国科学引文数据库(Chinese Science Citation Database,简称 CSCD) 收录为 2017 - 2018 年度来源期刊。2017年又被中国科学评价中心(RCCE)、武汉大学图书馆和中国科教评价网联合完成的第五版《中国学术期刊评价报告(2017-2018)》评价为A类核心期刊。