



航电枢纽工程过流面混凝土温度应力分析及 温控措施研究

张瑞雪¹, 郭芸杉², 苏莹², 贺冰², 陈水兵², 韩莎莎¹, 袁宁宁¹, 薛圆月¹

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 四川岷江港航电开发有限责任公司, 四川 乐山 614400)

摘要: 针对航电枢纽分期导流中混凝土底板因低温河水冷击导致表里温差大、开裂风险高的问题, 融合现场监测与三维有限元仿真, 建立考虑冷却水管的等效热传导模型。通过绝热温升反演, 系统分析不同温控措施下的温度应力场。创新提出中期冷却通水(目标 25 °C)、仓面流水养护与浇筑温控(≤ 22 °C)的多措施协同策略, 并通过通水性分析量化降温阈值影响。结果表明: 常规温控措施, 混凝土内部点应力 1.82 MPa(安全系数 1.27)、表面点 1.46 MPa(安全系数 1.10), 均低于抗裂要求; 中期冷却结合流水养护使表面点应力降至 0.46 MPa(安全系数 3.49); 加入浇筑温控后, 最高温由 44.2 °C 降至 40.4 °C, 内部点应力降至 1.45 MPa(安全系数 1.60), 表面点安全系数增至 3.91; 敏感性分析揭示中期冷却降温速率临界阈值为 1.0 °C/d, 超此值安全系数骤降。该成果构建热力学反演、多场仿真与措施协同优化的温控技术体系, 为航电枢纽混凝土抗裂设计提供量化依据, 显著降低开裂风险并提升耐久性。

关键词: 温度应力; 有限元仿真; 安全系数; 温控措施

中图分类号: U614

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)12-0217-06

Thermal stress analysis and temperature control strategies for flow-surface concrete in navigation-power hub projects

ZHANG Ruixue¹, GUO Yunshan², SU Ying², HE Bing², CHEN Shuibing², HAN Shasha¹, YUAN Ningning¹, XUE Yuanyue¹

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Sichuan Minjiang Port, Shipping, and Power Development Co., Ltd., Leshan 614400, China)

Abstract: In view of the problem of the challenges of excessive internal-external temperature differences, and significant cracking risks in flow-surface concrete of navigation-power hub projects during phased diversion construction caused by low-temperature river water cooling shock, an equivalent heat conduction model incorporating the negative heat source effect of cooling pipes is developed by integrating field monitoring data with three-dimensional finite element simulations. Adiabatic temperature rise inversion is employed to analyze temperature and stress fields under different temperature control strategies. An innovative multi-measure collaborative approach is proposed, combining mid-term cooling (target temperature: 25 °C), surface flow curing, and controlled pouring temperature (≤ 22 °C), while quantifying the critical cooling rate threshold for crack prevention through sensitivity analysis. The results show that by normal temperature control measure, the internal along-river stress reaches 1.82 MPa (safety factor: 1.27) and surface stress 1.46 MPa (safety factor: 1.10), both violating anti-cracking specifications. Mid-term cooling combined with flow curing reduced surface stress to 0.46 MPa (safety factor: 3.49). Introducing pouring temperature control further lowers the peak concrete temperature from 44.2 °C to 40.4 °C, decreases internal stress to 1.45 MPa (safety factor: 1.60), and increases the surface safety factor to 3.91. Sensitivity analysis reveals a critical cooling rate threshold of 1.0 °C/d, exceeding this threshold caused the safety

收稿日期: 2025-04-26 录用日期: 2025-06-26

作者简介: 张瑞雪(1990—), 男, 工程师, 研究方向为大体积混凝土智能温控。

factor to plummet from 1.86 to 1.20. This paper establishes a systematic framework integrating thermodynamic parameter inversion, multi-field simulation, and multi-measure optimization, providing quantifiable design criteria for crack prevention in navigation-power hub projects. The proposed strategy enhances crack resistance significantly and improves structural durability.

Keywords: thermal stress; finite element simulation; safety factor; temperature control measure

航电枢纽工程多采用分期导流施工方式, 早期过流面混凝土需要承受河水冷击、环境温度差及施工长间歇等不利条件, 易产生温度裂缝^[1]。国内外学者针对大体积混凝土温控问题开展了大量研究, 朱伯芳^[1]提出基于绝热温升反演的温度应力计算方法, 但在分期导流过流面混凝土的复杂工况下, 现有研究仍存在不足^[2-3]。过流前混凝土的温控标准和温控措施制定以内外温差为依据^[4], 采取过流前通水冷却、表面流水养护及浇筑温度控制的耦合调控方法^[5-6], 控制表面温度梯度和约束应力, 从而抑制过流过程中混凝土表面温度裂缝的萌生和扩展^[7-8]。

基于上述问题, 本文针对某航电枢纽工程泄洪冲砂闸底板混凝土, 建立有限元仿真分析模型, 基于搜集的材料参数和边界参数, 分析不同工况条件下的温度场、应力场, 提出满足度汛过流要求的混凝土温控措施。

1 计算原理与方法

依据热传导理论, 大体积混凝土的非稳定温度场通过热传导方程描述, 即:

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

式中: T 为温度; τ 为时间; a 为导温系数; θ 为绝热温升。

考虑冷却水管作用^[6], 将冷却水管看作负热源, 在平均意义上考虑冷却水管的作用, 由此可得混凝土等效热传导方程:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T + (T_0 - T_w) \frac{\partial \Phi}{\partial \tau} + \theta_0 \frac{\partial \Psi}{\partial \tau} \quad (2)$$

式中: ∇^2 为拉普拉斯算子; T_0 为初始温度; T_w 为环境温度; Φ 为与时间相关的热源函数; Ψ 为其他能量交换项; θ_0 为材料相关常数。

混凝土的应力采用热力耦合方程求解, 有限

元离散格式为:

$$K \Delta \delta_n = \Delta P_n \quad (3)$$

式中: ΔP_n 为包括温度等其他外荷载引起的节点荷载增量矩阵; K 为单元刚度矩阵; $\Delta \delta_n$ 为单元节点的位移增量矩阵。

2 工程概况

某航电枢纽以航运和发电为主要目的, 兼顾防洪, 同时还具有促进地区经济发展等综合效益和作用, 为 II 等大(2)型工程。主要建筑物包括船闸、泄洪冲砂闸、发电厂房、左右岸非溢流坝(混凝土重力坝), 另设有鱼道、开关站和库区防洪堤等。该工程一期施工计划施工完成 15 孔泄洪冲砂闸底板, 在当年 5 月进行度汛。泄洪冲砂闸底板混凝土设计强度等级 C25, 抗冻等级 F50, 抗渗等级 W6, 采用三级配混凝土(水胶比 0.44, 粉煤灰掺量 25%)。

工程区多年平均气温 17.1 °C, 极端高温 36.8 °C, 极端低温 -2.9 °C, 极端温差达 39.7 °C, 河水温度 5 月实测均值在 20.0~20.5 °C。施工期面临高温季节浇筑与汛期过流双重挑战。

3 数值模型及工况

3.1 数值模型

泄洪闸底板三维模型见图 1。模型采用六面体单元进行空间离散, 单元总数 10 728 个, 节点总数 12 600 个。

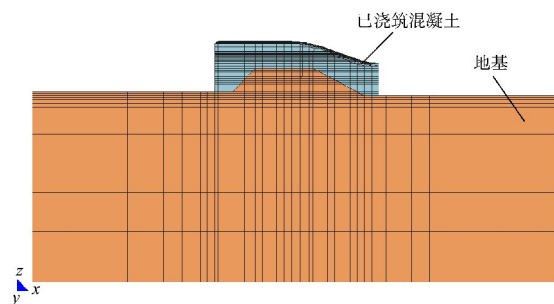


图 1 计算模型

Fig. 1 Numerical model

3.2 主要热力学参数

C25 混凝土坍落度为 70~90 mm; 配合比(质

量比)为胶凝材料:水:砂:石=1:0.44:2.18:6.54; 主要参数见表 1。

表 1 混凝土参数
Tab. 1 Parameters of concrete

弹性模量/GPa		劈拉强度/MPa		导热系数/ (kJ·m ⁻¹ ·h ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	绝热温升/℃		比热/ (kJ·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	线膨胀系数/ (10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹)	极限拉伸值/10 ⁻⁶	
28 d	90 d	28 d	90 d		28 d	90 d			28 d	90 d
30.3	35.0	2.64	3.46	7.734	24.8	27.2	1.002	9.6	109	123

3.3 绝热温升反演

绝热温升通过实测温度进行反演, 通过对过流面混凝土埋设内部温度传感器, 过流面混凝土浇筑块尺寸为 34.26 m×24.48 m×3 m(长×宽×高), 温度传感器埋设位置为过流面混凝土浇筑块的距离上游面 1/4 和 1/2 处, 高程方向为 1/2 处。通过接入自动监测系统, 持续监测混凝土内部温度。监测结果表明, 该混凝土浇筑仓内部温度最大值为 42.25℃, 混凝土浇筑仓内部温度到达峰值的时间为 57 h, 内部温度实测过程线见图 2。

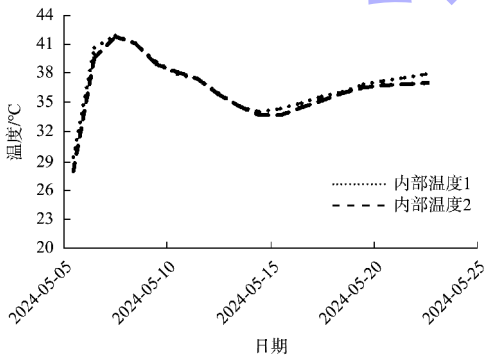


图 2 内部温度实测过程线
Fig. 2 Measure time-history curve of internal temperature

基于实测数据拟合混凝土绝热温升公式为^[9]:

$$T_{\tau} = \frac{\theta'_0 \tau}{\tau + a} \quad (4)$$

式中: θ'_0 为最终绝热温升值; a 为时间常数。基于实测数据反演得到 C25 三级配混凝土参数 $\theta'_0=35.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $a=1.27$ 。绝热温升拟合过程线见图 3。

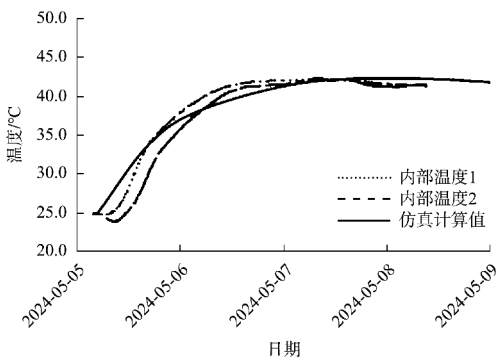


图 3 绝热温升拟合过程线
Fig. 3 Fitted time-history curve of adiabatic temperature rise

3.4 计算工况

本文针对泄洪冲砂闸底板过流面混凝土浇筑仓, 就无措施(工况 1)、中期冷却通水加流水养护措施(工况 2)、中期通水冷却加流水养护加浇筑温度控制(低于 22℃)的综合温控措施(工况 3)等工况展开研究。

基准工况(无措施): 混凝土采用自然入仓方式, 仅实施初期冷却通水(持续时间 14~21 d), 冷却水管布置横、纵向间距均为 1.5 m, 通水流量 1.2~1.5 m³/h, 未采取表面保湿养护措施。

中期冷却通水: 在混凝土过流前, 对于一期冷却通水完成的浇筑仓, 进行中期冷却通水, 将混凝土内部温度降低至 25℃。

流水养护: 对于浇筑完成的浇筑仓上游面、下游面、顶面进行布置花管不间断流水养护。

浇筑温度控制(低于 22℃): 混凝土采用冷水拌和、运输车加设隔热面、浇筑仓面通过喷雾、浇筑批层覆盖等一系列措施控制混凝土浇筑温度低于 22℃。

4 计算结果与分析

4.1 混凝土允许应力

按照 SL 219—2018《混凝土重力坝设计规范》^[10](简称规范), 温度应力的控制按下式确定:

$$\sigma \leqslant \frac{\varepsilon_p E_c}{K_f} \quad (5)$$

式中: σ 为各种温差所产生的温度应力之和; ε_p 为混凝土极限拉伸值, 为 $0.7 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-4}$; E_c 为混凝土弹性模量; K_f 安全系数。

考虑到浇筑层面对混凝土强度的削弱作用, 竖向允许抗裂应力在其他方向允许抗裂应力的基础上进行一定程度的折减, 折减系数取 0.6。

4.2 各工况混凝土温度应力分析

不同工况内部点和表面点的温度、应力结果见表 2, 特征点位置见图 4, 各工况应力过程线见图 5。安全系数采用劈拉强度作为控制标准。

表 2 温度和应力计算结果
Tab. 2 Calculation results of temperature and stress

点位置	工况	最高温度/℃	过流前温度/℃	顺河向应力/MPa	安全系数
内部点	1	44.2	41.3	1.82	1.27
	2	43.9	40.4	1.73	1.34
	3	40.4	36.6	1.45	1.60
表面点	1	27.4	25.5	1.46	1.10
	2	24.1	22.6	0.46	3.49
	3	24.0	22.3	0.41	3.91

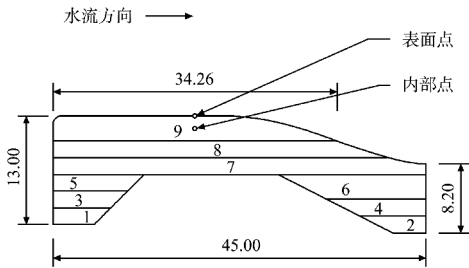


图 4 特征点位置 (单位: m)

Fig. 4 Position of key points (unit: m)

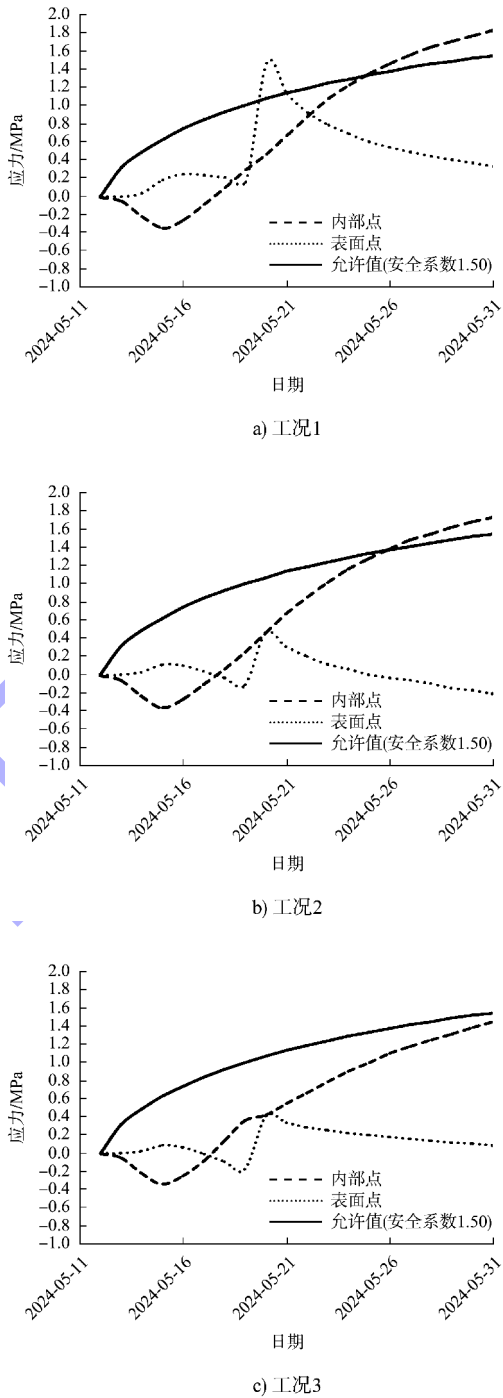


图 5 各工况应力过程线

Fig. 5 Stress time-history curves of each condition

4.3 降温速率对混凝土应力的影响

工程施工期不但面临高温季节浇筑与汛期过流双重挑战, 而且存在进度节点目标的工期压力。为了验证是否能够通过提升冷却通水降温速率,

从而减少冷却通水时间, 为混凝土浇筑进一步争取时间, 故在前述研究的基础上进一步开展了冷却通水降温速率敏感性分析计算, 分析不同的降温速度对混凝土应力的影响, 计算结果见表 3。可以看出, 在温度峰值过后, 降温速率为 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 时, 最大应力为 1.84 MPa , 安全系数 1.20 ; 降温速率为 $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 时, 最大应力为 1.63 MPa , 安全系数 1.35 ; 降温速率为 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 时, 最大应力为 1.18 MPa , 安全系数 1.86 。

表 3 不同降温速率对应力的影响
Tab. 3 Influence of cooling rates on stress

降温速率/ $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}^{-1})$	最大应力/MPa	安全系数
1.5	1.84	1.20
1.2	1.63	1.35
1.0	1.18	1.86

在计算分析时混凝土的内部变化考虑多方面的因素, 主要考虑表面散热、冷却水管带走热量、相邻混凝土块传热等主要的热交换边界, 从而进行混凝土内部的温度历程线分析, 通过分析明确不同措施条件下的内部降温速率, 根据反演结果确定表面养护、通水等关键温控参数。具体的表面散热等边界处理如下^[11]。

均匀、各向同性固体温度场满足式(1), 其边界条件为:

$$T = \bar{T} \quad (6)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q \quad (7)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta(T - T_a) \quad (8)$$

式中: λ 为导热系数; n 为法线方向; \bar{T} 为 C_1 边界上的给定温度; q 为 C_2 边界上的给定热流; β 为 C_3 边界上表面放热系数; T_a 为自然对流条件下的外界环境温度, 或在强迫对流条件下的边界层的绝热壁温度。其中 C_1 、 C_2 、 C_3 边界见图 6。

施工过程中采取控制措施为该工程引用智能温控系统, 智能温控系统内嵌入智能通水模型。该模型通过综合考虑绝热温升、温度梯度及降温速率等因素, 通过大坝混凝土理想温度控制曲线模型计算得到的理想温度过程线确定已知降温目

标, 并据此预测通水水温 and 流量, 达到精准控制降温速率目的。

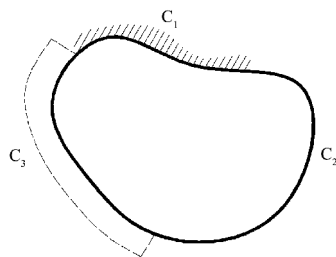


图 6 温度场计算边界

Fig. 6 Calculation boundary of temperature field

4.4 计算结果分析

在无温控措施(工况 1)条件下, 过流面混凝土受低温河水冷击作用显著, 内部点顺河向最大应力达 1.82 MPa (安全系数 1.27), 出现在过流后 7 d 的时间节点(下同), 表面点最大应力达 1.46 MPa (安全系数 1.10), 出现在过流当天(下同), 均不满足规范抗裂要求, 存在显著开裂风险。

采用中期冷却通水(目标温度 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$)结合仓面流水养护(工况 2), 可有效降低内外温差, 表面点应力降至 0.46 MPa (安全系数 3.49), 但内部点应力仍为 1.73 MPa (安全系数 1.34), 需要进一步优化措施。

引入浇筑温度控制($\leq 22\text{ }^{\circ}\text{C}$)后(工况 3), 混凝土最高温度由 $44.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至 $40.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 内部点应力降至 1.45 MPa (安全系数 1.60), 表面点应力进一步降至 0.41 MPa (安全系数 3.91), 满足规范抗裂要求, 表明中期冷却、流水养护与浇筑温度控制的综合应用可显著提升抗裂性能。

冷却通水降温速率对温度应力敏感性分析表明, 当降温速率 $\leq 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 时, 最大应力为 1.18 MPa (安全系数 1.86), 可有效规避开裂风险; 若速率达 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$, 安全系数骤降至 1.20 , 需要严格控制降温速率。

5 结论

1) 未采取温控措施时, 过流面混凝土在低温河水冷击与内外温差作用下, 最大温度应力远超规范允许值(安全系数低至 1.10), 验证了温控措

施对抑制裂缝生成的必要性。

2) 中期冷却通水(目标温度 25 ℃)结合流水养护可显著降低表面冷击应力(安全系数提升至 3.49),而进一步引入浇筑温度控制(≤ 22 ℃)后,混凝土最高温度降幅达 8.5%,内外温差减少约 30%,内部应力安全系数提升至 1.60,形成了一套多维度协同的温控技术体系。

3) 通过敏感性分析发现,降温速率超过 1.0 ℃/d 时,温度应力急剧增大(安全系数骤降至 1.20),表明降温速率是规避开裂风险的核心控制参数。

参考文献:

- [1] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- ZHU B F. Thermal stress and temperature control of mass concrete [M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 2012.
- [2] 胡拓, 杨曦. 港口与航道工程大体积混凝土裂缝控制[J]. 中国水运, 2019(11): 74-75.
- HU T, YANG X. Thermal stresses and temperature control of mass concrete[J]. China water transport, 2019(11): 74-75.
- [3] 束荣. 船闸大体积混凝土裂缝控制施工措施[J]. 中国水运, 2019(10): 96-97.
- SHU R. Construction technical measures for crack control of large volume concrete of ship locks[J]. China water transport, 2019(10): 96-97.
- [4] 刘毅, 张国新. 混凝土坝温控防裂要点的探讨[J]. 水利水电技术, 2014, 45(1): 77-83, 89.
- LIU Y, ZHANG G X. Discussion on key points of temperature control and crack prevention of concrete dam[J]. Water resources and hydropower engineering, 2014, 45(1): 77-83, 89.
- [5] 张国新, 沙莎. 混凝土坝全过程多场耦合仿真分析[J]. 水利水电技术, 2015, 46(6): 87-93, 99.
- ZHANG G X, SHA S. The multi-field coupling simulation analysis of concrete dams during the whole process[J]. Water resources and hydropower engineering, 2015, 46(6): 87-93, 99.
- [6] 刘有志, 张国新, 杨萍. Saptis 结构多场仿真与非线性分析软件开发及应用(之四)[J]. 水利水电技术, 2014, 45(8): 33-39.
- LIU Y Z, ZHANG G X, YANG P. Development and application of Saptis-a software of multi-field simulation and nonlinear analysis of complex structures(part IV)[J]. Water resources and hydropower engineering, 2014, 45(8): 33-39.
- [7] 邱永荣, 张国新. 混凝土板温度场的解析计算方法[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2010, 8(4): 252-257.
- QIU Y R, ZHANG G X. Analytic method for solving temperature field of concrete plate[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2010, 8(4): 252-257.
- [8] 李松辉, 雒翔宇, 张国新, 等. 船闸等薄壁结构长间歇后温控防裂措施研究[J]. 水力发电, 2022(4): 49-53.
- LI S H, LUO X Y, ZHANG G X, et al. Study on temperature control and crack prevention measures for thin-walled structures such as ship lock after long intervals[J]. Water power, 2022(4): 49-53.
- [9] 李富春, 吴海森. 超长地下室大体积混凝土温控有限元模拟及开裂风险分析[J]. 水运工程, 2019(11): 13-19.
- LI F C, WU H S. Temperature control finite element simulation and cracking risk analysis of mass concrete in super-long basement [J]. Port & waterway engineering, 2019(11): 13-19.
- [10] 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.
- Design specification for concrete gravity dams: SL 319-2018[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2018.
- [11] 曹周红, 刘晓平, 沈志刚. 株洲航电枢纽船闸混凝土工程温度控制措施研究[J]. 水运工程, 2005(4): 67-69.
- CAO Z H, LIU X P, SHEN Z G. Concrete engineering temperature control of Zhuzhou navigation power junction shiplock [J]. Port & waterway engineering, 2005(4): 67-69.

(本文编辑 王璁)