

文章编号: 2097-096X(2026)03-0261-10

大孔口水闸混凝土温度控制标准研究

张建华^{1,2}, 李海枫³, 杨志华^{1,2}

(1. 中铁水利水电规划设计集团有限公司, 江西 南昌 330029; 2. 江西省水工结构工程技术研究中心, 江西 南昌 330029;
3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 大孔口水闸由于闸孔尺寸增大、混凝土底板及闸墩增厚, 导致底板与闸墩之间相互制约增强进而减小了相互之间的变形协调性, 易受外界环境温度影响, 施工期和运行期间易产生超标拉应力, 温控防裂形势严峻。大孔口水闸混凝土温控防裂首要任务是确定温度控制标准, 然而我国现有水闸设计规范对水闸混凝土温度控制问题仅作了一些原则性规定而未对温控标准如何确定给出详细说明, 为此水闸结构混凝土温控标准可参考混凝土坝相关规范进行确定。即首先提出水闸混凝土温度应力控制标准, 再确定基础容许温差和上下层容许温差, 结合水闸结构准稳定温度场确定施工期容许最高温度, 最后拟定浇筑温度; 水闸结构混凝土温度应力控制标准可采用安全系数法进行确定, 建议其抗裂安全系数取值不小于1.30; 应力约束系数取值可由本文给出的拟合公式计算得到。本文最后以赣江某大孔口水闸为工程案例, 提出相应的温度控制标准, 研究成果可为大孔口水闸工程温控标准制定提供参考。

关键词: 大孔口水闸; 温控标准; 容许温差; 容许最高温度; 浇筑温度

中图分类号: TV66

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20240251

1 研究背景

国内水闸闸孔尺寸基本在8~12 m之间, 20 m以上水闸较少, 相比常规水闸, 大孔口水闸闸孔尺寸均超过30 m, 且多采用分离式底板型式^[1]。闸孔尺寸增大、底板与闸墩增厚, 导致底板与闸墩之间相互制约增强进而减小了相互之间的变形协调性; 另外, 大孔口水闸结构大多采用高性能混凝土, 其水泥用量多、水化热量大、发热快、弹性模量大^[2], 这使得大孔口水闸在施工期和运行期更易产生超标拉应力。相比常规坝工混凝土结构温控问题^[3-4], 大孔口水闸结构的混凝土温控防裂形势严峻且具有特殊性。目前, 大孔口水闸施工期温控防裂方面存在以下问题^[5]: (1) 规范不完善, 当前还没有专门针对大孔口水闸的设计施工规范, 由于已建工程较少, 缺乏实际工程经验及相应的温度控制标准; (2) 通水冷却问题, 大孔口水闸为典型水工钢筋混凝土结构且配筋较多, 布置冷却水管会严重影响施工, 且初期降温防裂难度较大; (3) 间歇期选取问题, 通常闸墩上部墩墙与下部底板是分开浇筑的, 较长间歇期导致两者之间存在明显的相对温差, 可能导致底板顶部和墩墙下部应力超标, 合理选择间歇期进而改善该区域的应力状态是一个值得研究的问题。其中, 确定合理的温度控制标准是大孔口水闸混凝土温控防裂首要任务。

针对水工混凝土结构温控问题, 我国水利水电行业对混凝土坝提出了不同条件下的基础容许温差要求, 并指出要根据工程当地气候条件确定坝体内外温差的控制标准或坝体内最高温度的控制标准^[6]; 而我国现有水闸设计规范对水闸混凝土温度控制问题仅作了一些原则性规定, 而未对温控标准如何确定给出详细说明^[7]; 与水闸结构型式相类似的船闸(两者均属于薄壁混凝土结构), 交通行业相

收稿日期: 2024-12-14; 网络首发时间: 2025-05-22

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/10.1788.tv.20250522.0925.001>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401807); 中国中铁股份公司科技研究开发计划项目(2022-重大-08)

作者简介: 张建华(1970—), 正高级工程师, 主要从事水工建筑物设计研究。E-mail: 1050708448@qq.com

通信作者: 李海枫(1979—), 博士, 正高级工程师, 主要从事复杂水工结构数值模拟、调水工程关键技术研究。E-mail: lihfd-lut@126.com

关规范则提出了明确的温控控制标准，但并没有给出温控标准制定的详细步骤^[8]。

为此，本文参考混凝土坝温度控制标准的确定方法，结合大孔口水闸的结构特点，提出了大孔口水闸混凝土温度控制标准制定方法，重点研究水闸结构的温度应力控制标准选取与温度控制标准的确定，并以赣江某大孔口水闸为工程案例，提出相应的温度控制标准，研究成果可为类似大孔口水闸工程温控标准制定提供参考。另外，大孔口混凝土水闸属于典型钢筋混凝土结构，钢筋对混凝土的温控防裂和限裂是有利的，因其对结构内力影响较小可以忽略不计；另从安全角度来看，可作为一种安全储备来考虑。因此，本文在进行大孔口混凝土水闸温控分析时，未考虑钢筋效应，而是近似地按素混凝土结构进行温度应力分析。

2 水闸温度应力控制标准研究

2.1 应力控制标准 目前，我国《水闸设计规范》(SL 265—2016)，对于水闸混凝土的温度控制只有一些原则性的规定，没有关于温度应力控制标准方面的规定。我国水利水电行业《混凝土坝温度控制设计规范》(NB/T 35092—2017)^[6]基于式(1)或式(2)，采用综合安全系数法或分项系数法来确定混凝土温度应力控制标准。而交通行业《水运工程大体积混凝土温度裂缝控制技术规程》(JTS 202—1—2010)则基于式(3)采用安全系数法来确定混凝土温度应力控制标准。具体如下：

$$\sigma(\tau) \leq \frac{E(\tau)\varepsilon_t(\tau)}{K} \quad (1)$$

式中： $\sigma(\tau)$ 为各种温差所产生温度应力之和，MPa； $E(\tau)$ 为龄期 τ 时的混凝土弹性模量，MPa； $\varepsilon_t(\tau)$ 为龄期 τ 时的混凝土极限拉伸； K 为抗裂安全系数。

$$\gamma_0\sigma \leq \varepsilon_p E_c / \gamma_d \quad (2)$$

式中： γ_0 为结构重要性系数； 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的标准值； E_c 为混凝土弹性模量标准值，MPa； γ_d 为温度应力控制正常使用极限状态结构系数。

$$\sigma(\tau) \leq \frac{f_t(\tau)}{K} \quad (3)$$

式中： $\sigma(\tau)$ 为各种温差所产生温度应力之和，MPa； $f_t(\tau)$ 为龄期 τ 时的混凝土抗拉强度； K 为抗裂安全系数。

考虑到混凝土极限拉伸试验精度低，成果较分散，同一种混凝土由不同机构或由同一机构采用不同方法量测，得到的极限拉伸相差较多，有时还得不合理的结果，而混凝土抗拉强度试验结果比较稳定。综合以上分析，水闸工程温度应力控制标准按照式(3)进行确定。

2.2 抗裂安全系数取值 针对水工混凝土结构抗裂安全系数合理取值问题，朱伯芳提出了理论抗裂安全系数计算方法和实用抗裂安全系数计算公式^[9]，具体如下。

$$K_{20} = 1/b_1 b_2 \quad (4)$$

式中： K_{20} 为理论抗裂安全系数； b_1 为试件尺寸及湿筛影响系数； b_2 为持荷时间效应系数。

$$K_2 = \frac{a_1 a_2 a_3 a_4 a_5}{b_1 b_2 b_3} \quad (5)$$

式中： K_2 为工程实用抗裂安全系数； a_1 为建筑物重要性系数； a_2 为拉应力所在部位的重要性系数； a_3 为超载系数； a_4 为变形后龄期系数； a_5 为校正系数； b_1 为试件尺寸及湿筛影响系数； b_2 为持荷时间效应系数； b_3 为强度后龄期系数。

通过上述分析，将大体积混凝土结构和薄壁水工混凝土结构的理论抗裂安全系数、实用抗裂安全系数以及现有规范取值和若干已建工程取值汇总，详见表1。由表1可知，对于混凝土坝而言，多为全级配混凝土，骨料最大粒径多为80 mm~150 mm，其理论抗裂安全系数为1.56~2.30，平均值为1.93，数值是比较大的；而对于水闸等水工薄壁混凝土结构而言，其混凝土多为二级配，理论抗裂安全系数为1.14~1.43，平均值约为1.285。对于混凝土坝等大体积混凝土结构而言，工程实用抗裂安全系数为

1.05~1.95，平均值约为 1.50；对于水闸等薄壁水工混凝土结构而言，工程实用抗裂安全系数为 1.02~1.57，平均值约为 1.295。规范及实际工程应用方面，坝工混凝土的抗裂安全系数取值在 1.3~1.8，水闸的抗裂安全系数取值在 1.30~1.65。综合以上分析，以混凝土坝为代表的大体积混凝土结构，其抗裂安全系数取值基本在 1.30~2.00 之间，建议取值为 ≥ 1.65 ；以水闸为代表的薄壁水工混凝土结构，其抗裂安全系数取值基本在 1.30~1.65 之间，建议取值为 ≥ 1.30 。

表 1 抗裂安全系数计算汇总
Table 1 Summary of Calculation of Anti-cracking Safety Coefficient

项目	大体积混凝土结构 以混凝土坝为例		薄壁水工混凝土结构 以水闸为例		备注
	范围	平均值	范围	平均值	
理论抗裂安全系数	1.56~2.30	1.93	1.14~1.43	1.285	朱伯芳提出
实用抗裂安全系数	1.05~1.95	1.50	1.02~1.57	1.295	朱伯芳提出
现有规范取值	1.30~2.00	1.65		1.40	《混凝土坝温度控制设计规范》规定：中、高坝宜取 1.5~1.8，坝高大于 200 m 的高坝宜采用 2.0；确定表层混凝土温度应力控制标准宜采用 1.3~1.5。 《混凝土重力坝设计规范》规定：抗裂安全系数取 1.5~2.0。 《混凝土拱坝设计规范(SL282)》规定：抗裂安全系数取 1.3~1.8。 《水工混凝土温度控制施工规范(DL/T 5787-2019)》规定：抗裂安全系数取值为 1.3~1.8，。 《水运工程大体积混凝土温度裂缝控制技术规程》规定：温控抗裂安全系数不应小于 1.40。
典型工程取值 ^[10]	1.65~1.80	1.725	1.30~1.65	1.475	刘家道口节制闸、姜唐湖退水闸、溪洛渡、白鹤滩、乌东德

3 水闸结构温度控制标准研究

对于水闸结构温控而言，温度控制标准拟定应包括容许温差确定、容许最高温度确定、浇筑温度初定以及降温速率确定四部分。降温速率更多涉及到具体工程施工，这里仅讨论前三个问题。

3.1 容许温差 目前，国内外普遍采用的混凝土容许温差包括基础容许温差、内外容许温差及新老混凝土容许温差，这些容许温差确定方法如下。

3.1.1 基础容许温差 ΔT 根据《大体积混凝土温度应力与温度控制》（第二版）一书可知，基础容许温差可由下式确定。

$$\Delta T \leqslant \frac{1-\mu}{K_p R E_c \alpha} \frac{f_t(\tau)}{K} \tag{6}$$

式中： ΔT 为基础容许温差； E_c 为混凝土弹性模量； μ 为泊松比； K_p 为徐变引起的应力松弛系数，一般取 0.5； α 为线膨胀系数； R 为约束系数； K 为抗裂安全系数； $f_t(\tau)$ 为龄期 τ 时的混凝土抗拉强度。

由式(6)可知，应力约束系数 R 是水工混凝土结构温控设计与计算分析中非常重要的参数，其合理取值直接影响到基础容许温差的选取，进而影响到容许最高温度确定和浇筑温度拟定。目前，针对坝工混凝土，《混凝土坝温度控制设计规范》给出 $H=L$ 时的取值，但对于 $H \neq L$ 或基岩弹性模量和混凝土弹性模量相差较大时，规范没有明确规定。另外，对于软基上的薄壁水工结构而言，以水闸为例，通常认为地基对底板约束较小，从温控设计角度来看，该约束系数《水闸设计规范》没有明确规定。上述问题本质上是不同弹性模量比和不同宽高比下浇筑块约束系数 R 的取值问题，而现有规范对这些均未涉及。为此，作者对该问题进行了详细研究，给出了不同弹性模量比和不同宽高比浇筑块的约束

系数计算公式^[11], 可为各类水工混凝土结构温度应力约束系数确定提供依据; 考虑到现在计算技术今非昔比, 为提高拟合精度, 拟合公式采用改进的复合指数函数且项数 n 取3, 具体形式如式(7)所示, 约束系数随弹性模量比和宽高比的变化规律如图1所示。由图1和公式(7)可知, 约束系数 R 随弹性模量比 E_c/E_R 呈负相关变化而随宽高比 L/H 呈正相关变化; 当混凝土与基岩的弹性模量比 E_c/E_R 趋近于0时, $1 - e^{-h(E_c/E_R)^{k_1}}$ 部分趋近无穷大, 进而使得约束系数 R 趋近于1.0; 上述拟合参数能够反映约束系数 R 随宽高比与弹性模量比的变化规律。

$$R = 1 - \left[0.6427 - 0.0043 \left(\frac{L}{H} \right)^{2.027} \right] \cdot \left\{ 1 - \exp \left[-0.6109 \left(\frac{E_c}{E_R} \right)^{0.341} \right] \right\} - \left[0.3124 + 0.0452 \left(\frac{L}{H} \right)^{-7.8971} \right] \cdot \left\{ 1 - \exp \left[-0.6008 \left(\frac{E_c}{E_R} \right)^{0.9237} \right] \right\} - 0.003 \left(\frac{L}{H} \right)^{2.1374} \cdot \left\{ 1 - \exp \left[-0.2827 \left(\frac{E_c}{E_R} \right)^{0.5974} \right] \right\} \quad (7)$$

式中: L/H 为浇筑块本身宽高比; E_c/E_R 为混凝土和地基的弹性模量比值。

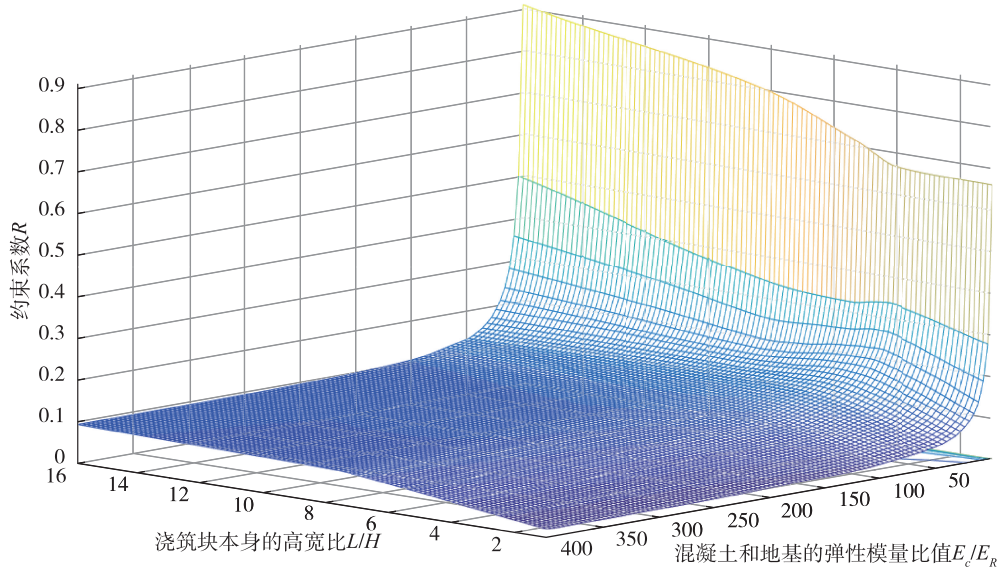


图1 建基面约束系数随弹性模量比值和宽高比的变化曲面

Fig. 1 Variation surface of constraint coefficient of foundation surface with elastic modulus ratio and aspect ratio

3.1.2 内外容许温差 ΔT_1 从浇筑施工角度来看, 水闸底板与闸墩均可视为浇筑块。假定浇筑块最大内外温差的截面温度分布为 $T(T_0, x)$, 则内外容许温差的计算公式如下:

$$\Delta T_1 \leq \frac{f_t(\tau)}{K} \frac{3}{2K_p E_c \alpha} \quad (8)$$

式中: ΔT_1 为内外容许温差; E_c 为混凝土弹性模量; K_p 为徐变引起的应力松弛系数, 一般取0.5; α 为线膨胀系数; K 为抗裂安全系数; $f_t(\tau)$ 为龄期 τ 时的混凝土抗拉强度。

3.1.3 新老混凝土容许温差 ΔT_2 对于水闸而言, 新老混凝土问题主要存在于墩墙与底板之间或墩墙内部, 其容许温差可参考混凝土坝相关设计规范。《混凝土坝温度控制设计规范》(NB/T 35092—2017)第8.1.3条规定: 新老混凝土容许温差可取15~20℃, 当浇筑块长边长度大于40m时宜取小值。相关条文说明规定: 工程实践中, 有的工程采用的新老混凝土温差标准为10~15℃, 也有的工程采用容许基础温差与相应部位的稳定温度场之和进行控制。

3.2 容许最高温度 对于容许最高温度确定问题, 比较合理的方法是由容许基础温差和上下层温差决

定混凝土最高温度，最高温度控制主要依靠层面散热、水管冷却和预冷混凝土，而内外温差的控制主要依靠表面保温，这可能是比较可行而合理的方法。另外，美国混凝土学会 ACI 编写的《混凝土手册》中，207 委员会关于“大体积混凝土”报告中提到：一个结构或其部分的混凝土，如果需要采取措施控制温度应力行为来减轻开裂，就亦可以视为“大体积混凝土”^[12]。因此，从控制温度应力角度来看，大体积混凝土只是一种本质的形容，而非体量。虽然水闸是属于典型的薄壁水工混凝土结构，但从温度应力特征与温度控制特点方面来看，与坝工等大体积混凝土无本质性差别。综合以上分析，对于水闸混凝土而言，容许最高温度可通过基础容许温差和上下层容许温差（新老混凝土容许温差）来确定，而内外容许温差的控制主要依靠表面保温，具体如下：

$$\begin{cases} T_{\max 1} = T_f + \Delta T \\ T_{\max 2} = T_l + \Delta T_2 \\ T_{\max} = \min\{T_{\max 1}, T_{\max 2}\} \end{cases} \quad (9)$$

式中： $T_{\max}$ 为混凝土容许最高温度； $T_{\max 1}$ 为以基础容许温差为依据确定的混凝土容许最高温度； $T_{\max 2}$ 为以新老混凝土容许温差为依据确定的混凝土容许最高温度； T_f 为相应部位稳定温度或准稳定温度，可根据水闸结构准稳定温度场计算分析得到； ΔT 为基础容许温差； T_l 为浇筑新混凝土时下层老混凝土 0.25 l 高度范围内的平均温度，由式(10)——(11)计算得到^[13]； ΔT_2 为新老混凝土容许温差。

$$T_l = \frac{\int_0^{\frac{L}{4}} \left[T_m + T_b e^{-x\sqrt{\frac{\omega}{2a}}} \sin\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2a}} x\right) \right] dx}{\frac{L}{4}} = T_m + \xi T_b \quad (10)$$

$$\xi = \frac{\int_0^{\frac{L}{4}} e^{-x\sqrt{\frac{\omega}{2a}}} \sin\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2a}} x\right) dx}{\frac{L}{4}} \quad (11)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{P} \quad (12)$$

式中： T_m 为年平均气温； T_b 为气温年变幅； a 为老混凝土导温系数； L 为浇筑块长度； P 为温度变化周期； ξ 和 ω 为中间计算参数； x 为变量。

3.3 浇筑温度拟定 对于水闸结构而言，浇筑温度、容许最高温度及混凝土水化热温升通常满足以下关系，根据此公式可拟定混凝土浇筑温度^[14]。

$$T_p \leq T_{\max} - T_r \quad (13)$$

式中： T_p 为浇筑温度； $T_{\max}$ 为容许最高温度； T_r 为混凝土水化热温升。

4 赣江某大孔口水闸温控标准研究^[15]

4.1 工程概述 赣江某水利枢纽工程为大(Ⅱ)型水利枢纽工程，由主支枢纽、北支枢纽、中支枢纽及南支枢纽组成。主支枢纽总长 750 m，共设 17 孔，由 15 孔净宽 30 m 的常规泄水闸和 2 孔宽净 75 m 的大孔闸组成；常规泄水闸闸墩采用窄底板设计形式，闸墩长 46 m，墩墙高 22.5 m，厚 6.6 m，底板最大厚度为 3 m，底板长度及宽度分别是 46 m 和 26 m。闸墩及底板计算模型见图 2—图 3。

4.2 计算参数 赣江大孔口水闸地基为砂砾石地基，闸墩及底板均采用 C30 混凝土；根据设计提供

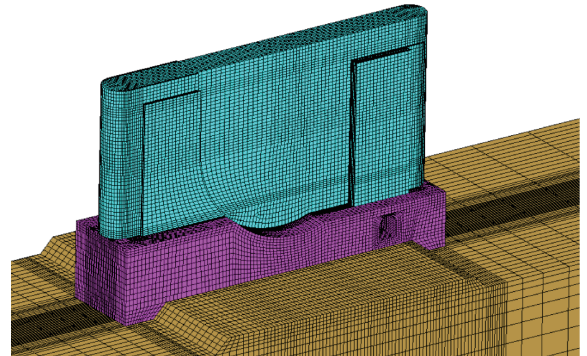


图 2 闸墩有限元计算模型

Fig. 2 Finite element model of gate pier

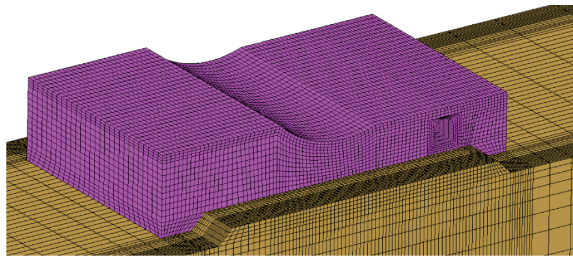


图3 底板有限元计算模型

Fig. 3 Finite element model of bottom plate

资料并参考《涵闸混凝土的温度应力与温度控制》，结合类似工程^[16]，拟定砂砾石地基、闸墩及底板的热力学计算参数，具体见表2—表3。

表2 地基热力学参数

Table 2 Thermodynamic parameters of foundation

地基	热学参数			力学参数		
	密度/(kg/m ³)	导热系数/(kJ/(m·h·°C))	比热/(kJ/(kg·°C))	弹性模量/MPa	泊松比	热膨胀系数×10 ⁻⁶ /°C
砂砾石	1700	10.84	1.328	90.0	0.3	10.0

表3 水闸闸墩及底板混凝土热学参数汇总

Table 3 Summary of thermal parameters of concrete of sluice pier and floor

密度/(kg/m ³)	导热系数/(kJ/(m·h·°C))	导温系数/(m ² /h)	比热/(kJ/(kg·°C))	热膨胀系数×10 ⁻⁶ /°C	绝热温升
2400	10.00	0.0047	0.928	10.0	$\theta = 41 \cdot (1 - e^{-0.65\tau^{0.92}})$

该水闸所在地区多年月平均气温变化曲线见图4。正常运行工况下水闸过水面施加水温边界条件，其值取多年月平均水温。基于南昌地区多年气温变化特点，基于水温与气温关联关系并参考类似工程经验拟定多年月平均水温，具体见表4。

4.3 准稳定温度场分析 图5为闸墩及中间剖面典型月份稳定温度场分布云图，图6为底板及中间剖面典型月份准稳定温度场分布云图，闸墩准稳定温度场计算结果汇总见表5。整体来看，闸墩受外界气温与水温影响很大，不存在稳定温度场，内部温度随外界气温和水温呈滞后性的周期温度变化分布；而底板除了受水温、气温影响外，还受地温影响，不存在稳定温度场，呈滞后性的周期温度变化。由闸墩准稳定温度场计算结果汇总表可知，闸墩内部不存在稳定温度场，内部温度受气温与水温影响较大，呈滞后性周期变化分布。其中，以1月份内部温度最低，8月份内部温度最高。

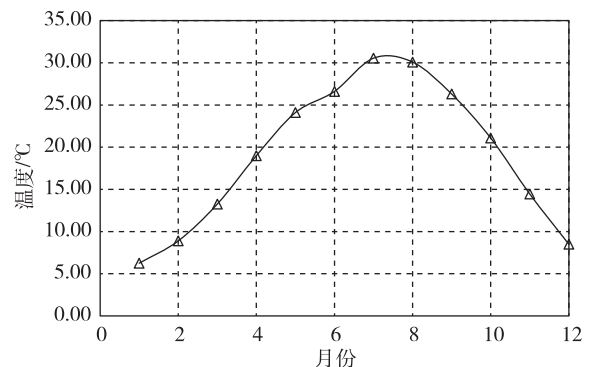


图4 多年月平均气温变化曲线

Fig. 4 Multi-year monthly mean temperature curve

4.4 温控标准拟定 该水闸闸基为砂卵石地基，其弹性模量为90 MPa左右，即使考虑桩基础的约束

表4 多年月平均水温

(单位:°C)

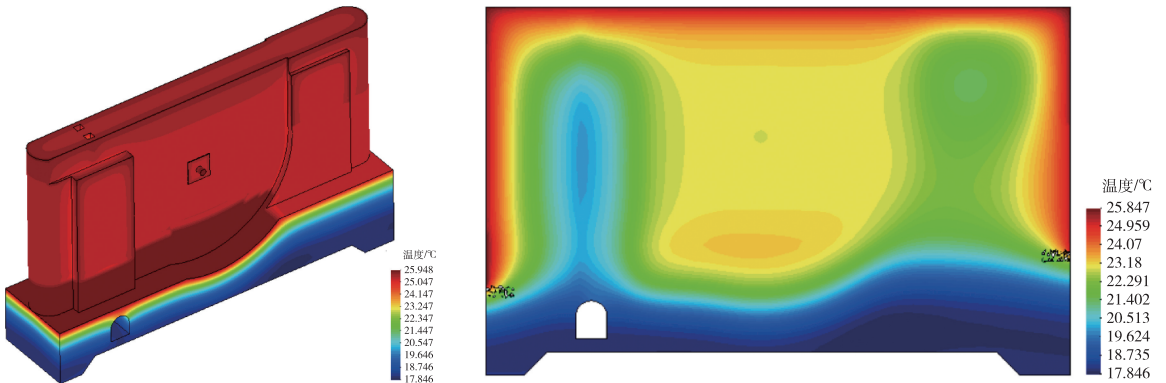
Table 4 Annual average monthly water temperature

(unit:°C)

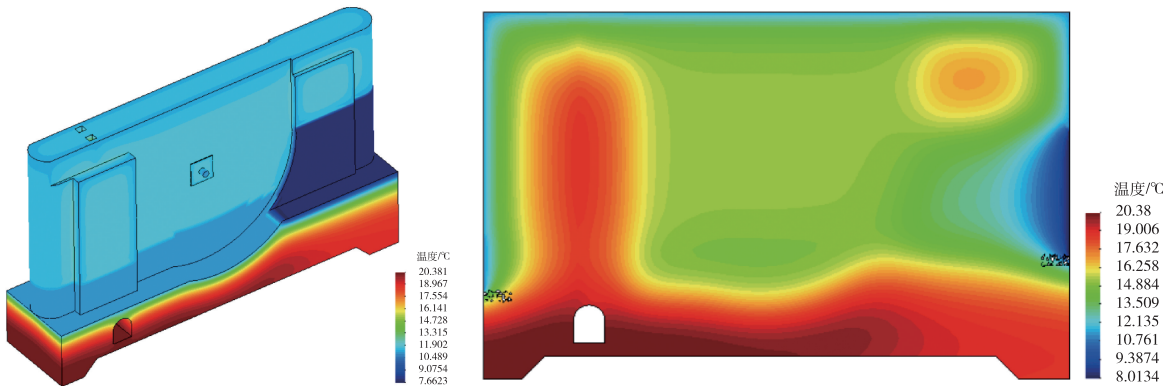
1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年
7.1	9.5	15	20	22	23	26.5	26	23	20	15	9	18.0

表5 闸墩及底板准稳定温度场计算结果汇总 (单位: °C)

部位	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
闸墩	9~12	9~13	10~14	12~15	16~20	20~24	23~28	25~30	25~28	22~26	20~23	14~19
底板	10~18	11~18	13~18	16~19	20~23	20~28	20~30	20~30	20~29	19~24	18~24	12~21



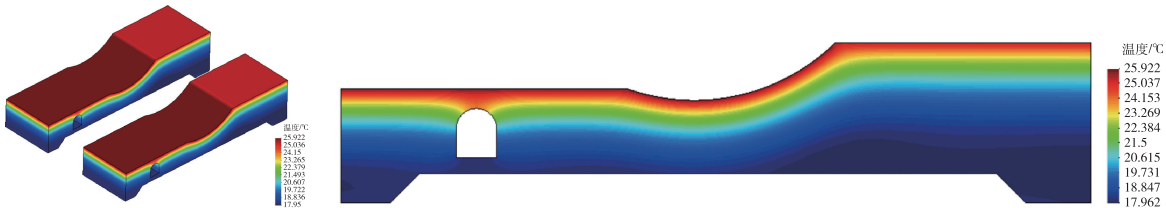
(a) 6月份



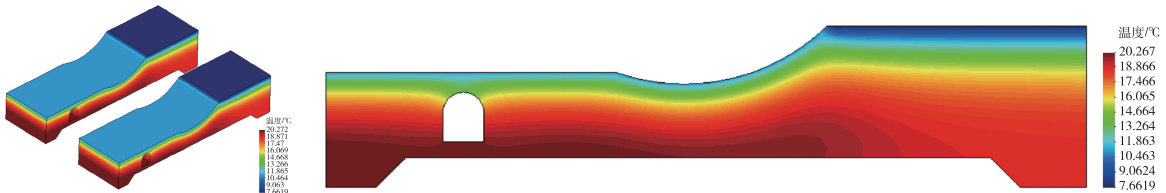
(b) 12月份

图5 闸墩及中间剖面典型月份准稳定温度场分布云图(单位: °C)

Fig. 5 Distribution cloud map of quasi-stable temperature field in typical months of gate pier and middle section (unit: °C)



(a) 6月份



(b) 12月份

图6 底板及中间剖面典型月份准稳定温度场分布云图(单位: °C)

Fig. 6 Distribution cloud of quasi-stable temperature field in typical months of the bottom plate and the middle section (unit: °C)

作用，地基的复合弹性模量也在 1 GPa 以内， E_f/E_R 远大于 10；另外，水闸底板最大厚度为 3 m，底板长度及宽度分别是 46 m 和 26 m，厚常比小于 1.0；根据式(7)可知，闸基面处的基础约束系数取 0.10。

软基上闸墩按其下部底板的长短，分为长底板和短底板两种情况。实际施工中，为减少底板对闸墩的约束，闸墩与底板之间的水平施工缝从底板顶面向上升高一个较小的高度 Δh ，即底板和高 Δh 的闸墩下部一起浇筑，将底板约束变成闸墩的上下层约束，以减少约束应力，具体见图 7 所示。经朱岳明等人研究，与不升高相比，升高 0.5 m 和 1 m，闸墩中心点最大应力分别降低 6% 和 18%，表面点的最大应力降低 10% 和 26%。综合以上分析，对于赣江水闸而言，水平施工缝也会升高，暂时以 1.0 m 考虑，底板对上部墩墙的约束系数取 0.25。

假定 28 d 龄期的 $f_t(\tau)=2$ MPa、 $K=1.65$ 、28 d 龄期的混凝土弹性模量 $E_c=30$ GPa、泊松比 $\mu=0.167$ 、 $\alpha=10\times10^{-6}$ $^{\circ}\text{C}$ 、 $K_p=0.5$ ，根据第 3 章相关计算公式可得到各容许温差，详见表 6。

对于底板而言，容许最高温度通过基础容许温差来确定。由于水闸结构不存在稳定温度场，非高温季节即 1—4 月和 11—12 月份， T_f 取底板准稳定温度场计算结果中的月最低温度；高温季节即 5—10 月份， T_f 取底板准稳定温度场计算结果中的月平均温度。根据式(12)可确定容许最高温度，具体成果见表 7。

对于闸墩而言，容许最高温度通过新老混凝土容许温差来确定。赣江水闸底板厚度基本在 4.5~8.0 m 之间，这里取 8 m 进行计算。对于南昌地区，年平均气温 $T_m=19.1$ $^{\circ}\text{C}$ ，

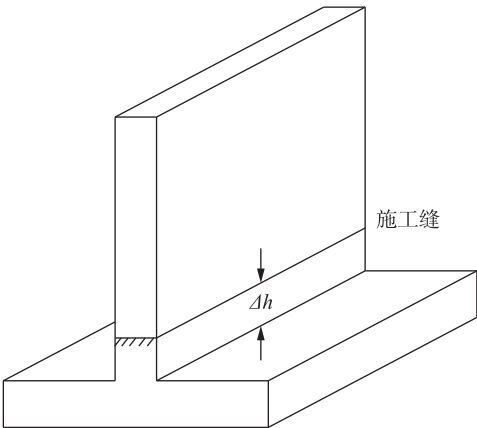


图 7 施工缝升高示意图
Fig. 7 Construction joint elevation diagram

表 6 容许温差汇总 (单位: $^{\circ}\text{C}$)
Table 6 Summary of allowable temperature differences (unit: $^{\circ}\text{C}$)

项目	基础容许温差 ΔT	内外容许温差 ΔT_1	新老混凝土容许温差 ΔT_2
计算结果	≤ 45	≤ 15.38	≤ 30
取值	35	15	30

表 7 底板混凝土容许最高温度计算结果汇总 (单位: $^{\circ}\text{C}$)
Table 7 Summary of calculation results of maximum permissible temperature of concrete on floor (unit: $^{\circ}\text{C}$)

项目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
准稳定温度	10	11	13	16	22	24	25	25	24	21	18	12
容许最高温度	45	46	48	51	57	59	60	60	59	56	53	47

气温年变幅 $T_b=12.15$ $^{\circ}\text{C}$ ，代入式(10)(11)可得下层老混凝土 0.25l 高度范围内平均温度 T_l ，具体见表 8。将新老混凝土容许温差 ΔT_2 代入式(9)，可得闸墩容许最高温度，见表 9。

表 8 新混凝土不同开浇月份及老混凝土平均温度计算结果汇总
Table 8 Summary of calculation results of average temperature of new concrete in different pouring months and old concrete

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
ξ	-0.71	-0.70	-0.51	-0.17	0.23	0.55	0.74	0.72	0.51	0.17	-0.23	-0.55
T_l	10.47	10.60	12.93	17.04	21.89	25.76	28.04	27.85	25.27	21.16	16.31	12.44

表9 闸墩混凝土容许最高温度计算结果汇总

(单位:℃)

Table 9 Summary of calculation results of maximum permissible temperature of concrete of gate pier (unit:℃)

1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
41	41	43	47	52	56	58	58	55	51	46	42

根据表3可知,拟定的混凝土绝热温升为41℃,考虑到水管冷却及天然散热等影响,水化热引起的最大温升按35℃考虑,根据式(13),拟定每个月的浇筑温度,具体见表10。

表10 底板及墩墙混凝土浇筑温度计算结果汇总

(单位:℃)

Table 10 Summary of calculation results of concrete pouring temperature of floor and pier wall (unit:℃)

部位	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
底板	10	11	13	16	22	24	25	25	24	21	18	12
墩墙	6	6	8	12	17	21	23	23	20	16	11	7

5 结论

通过以上分析,可得出以下结论:

(1)针对大孔口水闸混凝土施工规范不完善,缺乏相应的温度控制标准等问题,本文建议水闸结构温控标准可参考混凝土坝相关规范并结合薄壁水工混凝土结构自身温控特性进行确定,即先提出水闸温度应力控制标准,再确定基础容许温差和上下层容许温差,结合水闸结构准稳定场确定施工期容许最高温度,最后拟定浇筑温度。

(2)水闸结构温度应力控制标准可采用安全系数法进行确定;抗裂安全系数取值方面,以混凝土坝为代表的大体积混凝土结构,其抗裂安全系数取值基本在1.30~2.00之间,建议取值不小于1.65;以水闸为代表的薄壁水工混凝土结构,其抗裂安全系数取值基本在1.30~1.65之间,建议取值不小于1.30。

(3)应力约束系数取值可采用本文给出的拟合公式计算得到。

参 考 文 献:

- [1] 万小明,李海枫,张建华,等.国内大孔口水闸结构关键技术问题研究[J].水利水电技术,2018,49(8):136-141.(WAN Xiaoming, LI Haifeng, ZHANG Jianhua, et al. Study on key technical issues of large orifice sluice structure in China[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(8): 136-141. (in Chinese))
- [2] 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 Bofang. Temperature Stress and Temperature Control of Mass Concrete[M]. 2nd Ed. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2012. (in Chinese))
- [3] 刘毅,辛建达,张国新,等.大体积混凝土温控防裂智能监控技术[J].硅酸盐学报,2023,51(5):1228-1233.(LIU Yi, XIN Jianda, ZHANG Guoxin, et al. Intelligent monitoring technology for temperature control and crack prevention of mass concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramics, 2023, 51(5): 1228-1233. (in Chinese))
- [4] 徐小蓉,余舜尧,金峰,等.整体浇筑堆石混凝土拱坝施工期温度监测与等效均质仿真研究[J].水利学报,2023,54(12):1404-1414.(XU Xiaorong, YU Shunyao, JIN Feng, et al. Study on temperature monitoring and equivalent homogenization simulation of monolithic rock-filled concrete arch dam during construction [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(12): 1404-1414. (in Chinese))
- [5] 金鑫鑫,张建华,张国新.某大孔口水闸底板施工温控数值模拟[J].中国水利水电科学研究院学报,2019,17(5):365-370.(JIN Xinxin, ZHANG Jianhua, ZHANG Guoxin. Numerical simulation of temperature control for floor construction of a large orifice sluice [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower

Research, 2019, 17(5): 365–370. (in Chinese))

- [6] 国家能源局. 混凝土坝温度控制设计规范: NB/T 35092—2017[S]. 北京: 中国电力出版社, 2017. (National Energy Administration. Design code for temperature control of concrete dam: NB/T 35092—2017[S]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2017. (in Chinese))
- [7] 中华人民共和国水利部. 水闸设计规范: SL 265—2016[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Design specifications for sluices: SL 265—2016[S]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2016. (in Chinese))
- [8] 中华人民共和国交通运输部. 水运工程大体积混凝土温度裂缝控制技术规程: JTS 202—1—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010. (Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical specification for temperature crack control of Mass Concrete in water transport Engineering: JTS 202—1—2010[S]. Beijing: People's Communications Press, 2010. (in Chinese))
- [9] 朱伯芳. 论混凝土坝抗裂安全系数[J]. 水利水电技术, 2005, 36(7): 33–37. (ZHU Bofang. On safety coefficient of crack resistance of concrete dam[J]. Water Resources and Hydropower Technology, 2005, 36(7): 33–37. (in Chinese))
- [10] 王同生. 涵闸混凝土的温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010. (WANG Tongsheng. Temperature Stress and Temperature Control of Sluice Concrete[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2010. (in Chinese))
- [11] 杨志华, 李海枫, 胡永林. 水工混凝土结构温度应力约束系数研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2025, 23(2): 121–130. (YANG Zhihua, LI Haifeng, HU Yonglin. Research on temperature stress constraint coefficient of hydraulic concrete structure[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2025, 23(2): 121–130. (in Chinese))
- [12] 龚召熊. 水工混凝土的温控与防裂[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. (GONG Zhaoxiong. Temperature Control and Crack Prevention of Hydraulic Concrete [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 1999. (in Chinese))
- [13] SPRINGENSCHMID R. The Prevention of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages[M]. E & FN Spon, 2004.
- [14] 《三峡水利枢纽混凝土工程温度控制研究》编委会. 三峡水利枢纽混凝土工程温度控制研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001. (Study on Temperature Control of Concrete Project of Three Gorges Water Conservancy Project, Editorial Committee. Research on Temperature Control of Concrete Project of Three Gorges Project[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2001. (in Chinese))
- [15] 中国水利水电科学研究院. 赣江某综合整治工程大孔口水闸温控仿真分析研究报告[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2020. (China Research Institute of Water Resources and Hydropower. Research Report on Temperature Control Simulation and Analysis of Large Orifith Gate of a Comprehensive Regulation Project in Ganjiang River [R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2020. (in Chinese))
- [16] 李泽鹏, 黄耀英, 余正源, 等. 早龄期损伤水工混凝土自然自愈合效果试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2023, 21(6): 511–518. (LI Zepeng, HUANG Yaoying, YU Zhengyuan, et al. Experimental study on natural self-healing effect of early-age damaged hydraulic concrete[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2023, 21(6): 511–518. (in Chinese))

(下转第 389 页)

ing in the process of excavation construction. If it is easy for water to leak between different aquifers, and difficult to fully block the hydraulic connection between inside and outside the excavation, it will cause a large change of water level outside the excavation in the process of dewatering, leading to a series of environmental problems. Therefore, the deformation pattern and control method caused by the dewatering in multi-aquifer leaking excavation are worthy of further study. Based on the dewatering test results of the excavation of a subway station in Tianjin, this paper adopts the finite element method to study the influence of silt lens and leaking aquifers on the excavation deformation in the toe soil layer of the diaphragm wall induced by dewatering. Moreover, the mechanism of influence of silt lens on dewatering induced deformation and the comparative study of deformation induced by different dewatering schemes are also conducted. The results show that hydraulic connection between the upper and lower aquifers at the depth of the toe of the diaphragm wall can reduce the deformation of the diaphragm wall while increasing the settlement outside the excavation. The mechanism behind this is that the hydraulic connection reduces the pore pressure difference between the sides of the diaphragm wall, but increases the drawdown outside the excavation. In this case, it is recommended to adopt the “deep and shallow well” dewatering system with independent filters for the phreatic and confined aquifers, along with timely installation of horizontal supports. Dewatering should be implemented as needed to control the deformation induced by the dewatering process.

Keywords: leaking aquifer; numerical simulation; excavation dewatering; diaphragm wall deformation; settlement

(责任编辑: 祁 伟)

(上接第 270 页)

Research on concrete temperature control standard of large orifice sluice

ZHANG Jianhua^{1,2}, LI Haifeng³, YANG Zhihua^{1,2}

(1. China Railway Water Conservancy & Hydropower Planning and Design Group Limited Company, Nanchang, 330029, China; 2. Jiangxi Provincial Hydraulic Engineering Technology Research Center, Nanchang, 330029, China; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing, 100038, China)

Abstract: Due to the increase of the size of the gate hole and the thickening of the concrete floor and pier, the mutual restriction between the floor and pier is strengthened and the deformation coordination between them is reduced. It is easy to be affected by the external environment temperature, and it is easy to produce excessive tensile stress during the construction period and operation, and the situation of temperature control and crack prevention is severe. The primary task of temperature control and crack prevention of sluice gate is to determine the temperature control standard. However, the existing sluice gate design code only makes some principle provisions for the temperature control of sluice gate concrete, but does not give a detailed description of how to determine the temperature control standard. That is, the temperature stress control standard of sluice concrete is proposed first, then the permissible temperature difference of foundation and upper and lower layers is determined, and the maximum permissible temperature during construction is determined according to the quasi-stable temperature field of sluice structure. The temperature stress control standard of concrete of sluice structure can be determined by safety factor method, and it is recommended that the value of safety factor against cracking should not be less than 1.30. The value of stress constraint coefficient is calculated by the fitting formula given in this paper. Finally, taking a large orifice sluice in the Ganjiang River as an engineering case study, the corresponding temperature control standards are proposed. The research results can provide reference for the formulation of temperature control standards for a large orifice sluice.

Keywords: large orifice sluice; temperature control standard; allowable temperature difference; allowable maximum temperature; temperature at concrete placing

(责任编辑: 祁 伟)