

DOI: 10.7672/sjgs2025170147

# 考虑材料与环境温度时程的池壁结构 温度场模拟及验证\*

蒋振天<sup>1</sup>, 罗彬<sup>2</sup>, 李林桑<sup>2</sup>, 郝鸿韬<sup>3</sup>, 毛江鸿<sup>1,4</sup>

(1. 重庆交通大学土木工程学院, 重庆 400074; 2. 中国建筑第七工程局有限公司, 河南 郑州 450000;  
3. 浙江省建投交通基础建设集团有限公司, 浙江 杭州 310012; 4. 四川大学建筑与环境学院, 四川 成都 615100)

[摘要] 为掌握全地理污水厂混凝土池壁结构的温度场特性,以四川省成都市洗瓦堰再生水厂工程为例,采用无线物联网系统实时监测池壁混凝土及其周边环境温度,利用有限元软件 ABAQUS 建立考虑环境温度作用的池壁混凝土水化热分析模型,对池壁不同工况进行温度场仿真分析。结合实测数据与仿真结果,对比池壁在冬季、夏季不同位置的温度分布规律,揭示水化温度、昼夜温差的影响作用,分析结构厚度、混凝土龄期对池壁内外温差和降温速率的影响。分析结果表明,夏季进行池壁结构施工,相比冬季更易受水化温度、昼夜温差影响。当结构厚度 $\geq 2.5$ m时,池壁混凝土存在热裂风险。

[关键词] 池壁结构;温度场;有限元分析;物联网;环境温度

[中图分类号] TU93

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)17-0147-06

## Simulation and Verification of Temperature Field in Pool Wall Structure Considering Material and Environmental Temperature History

JIANG Zhentian<sup>1</sup>, LUO Bin<sup>2</sup>, LI Linsang<sup>2</sup>, JIA Hongtao<sup>3</sup>, MAO Jianghong<sup>1,4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;  
2. China Construction Seventh Engineering Bureau Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450000, China;  
3. Zhejiang Infrastructure Construction Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310012, China;  
4. Sichuan University, College of Architecture & Environment, Chengdu, Sichuan 615100, China)

**Abstract:** To understand the temperature field characteristics of the concrete pool wall structure in fully underground sewage treatment plants, taking the Xiwayan wastewater reclamation plant project in Chengdu, Sichuan Province as an example, a wireless IoT system was used to monitor the temperature of the pool wall concrete and its surrounding environment in real time. A finite element software ABAQUS was used to establish a hydration heat analysis model of the pool wall concrete considering the effect of environmental temperature, and the temperature field simulation analysis of the pool wall under different working conditions was carried out. Combining the measured data with the simulation results, the temperature distribution laws at different positions of the pool wall in winter and summer were compared, revealing the influence of hydration temperature and diurnal temperature difference. The influence of structural thickness and concrete age on the temperature difference between the inside and outside of the pool wall and the cooling rate was analyzed. The results show that, the construction of the pool wall structure in summer is more susceptible to the influence of hydration temperature and diurnal temperature difference compared to winter. When the structural thickness is  $\geq 2.5$ m, there is a risk of thermal cracking in the pool wall concrete.

**Keywords:** pool wall structure; temperature field; finite element analysis; Internet of things (IoT); environmental temperature

\* 四川省科学技术厅区域创新合作项目(2022YFQ0048)

[作者简介] 蒋振天, 硕士研究生, E-mail: 624560144@qq.com

[收稿日期] 2025-05-21

## 0 引言

随着我国城市建设深入发展,土地资源稀缺、邻避效应突显<sup>[1]</sup>,大力发展和建设地下工程成为解决城市疾病的关键<sup>[2-3]</sup>。在地下工程建设中,侧壁结构是开裂风险最大的部位,也是影响工程结构使用寿命的关键。一般认为,侧壁混凝土开裂是热变形、湿度变形、约束变形共同作用的结果<sup>[4]</sup>。水泥水化放热和环境温度变化是引起混凝土热变形、产生裂缝最相关的因素<sup>[5]</sup>。因此,考虑材料与环境温度间的交互作用<sup>[6]</sup>,掌握地下大体积混凝土结构的温度场特性,降低因温度梯度产生的拉应力,对温度裂缝控制具有重要意义。

为降低混凝土结构开裂风险, Lee 等<sup>[7]</sup>结合绝热温升试验,分析比较不同水泥品种对大体积混凝土水化热温升的影响,并计算其热开裂概率。崔激等<sup>[8]</sup>开发基于水化度的热学参数子程序,实现早龄期混凝土热学参数优化及温度场精确模拟。Castellano 等<sup>[9]</sup>研究水灰比、养护温度及矿渣掺量等参数对混凝土水化过程的影响规律。卢玉林等<sup>[10]</sup>研究不同混凝土位置的内外温差变化规律,得到昼夜温差造成温度周期性震荡变化的结论。薛素铎等<sup>[11]</sup>分析不同拆模时间对大尺寸构件降温速率的影响,表明适当延长拆模时间可降低热裂风险。姚婷等<sup>[12]</sup>通过多参数方差分析,预测侧墙中心温度及最大开裂风险,表明结构厚度对温度场的影响远大于热学系数变化。Du 等<sup>[13]</sup>研究不同因素对侧墙温度分布及应力变化的影响,得出适用于不同季节和模板的推荐拆模时间。

综上所述,国内外学者对现浇地下侧墙大体积混凝土结构,从材料、结构、环境到施工方面的系统性研究仍较少。且有限元软件模拟的水泥水化放热曲线大都只看作时间函数,而忽略环境温度与水化过程的相关性。考虑到早龄期混凝土的热学性质具有温度时变性,放热历程受自身水化及环境温度持续时间影响<sup>[14-15]</sup>,有必要构建基于温度时程的混凝土水化热分析模型<sup>[16]</sup>。

## 1 工程概况

成都市排水公司的洗瓦堰再生水厂(见图1)及调蓄池工程位于成都市锦江区锦华路三段与环城高速交叉口东北侧,主要分为20万m<sup>3</sup>/d的全地下式再生水厂及16万m<sup>3</sup>的调蓄设施,并配套地面市政景观公园。该项目全部为2层的现浇钢筋混凝土地下箱体结构,主要由底板、顶板、壁板、内部框架组成,总建筑面积达15万m<sup>2</sup>,日处理污水能力达20万t。



图1 成都市洗瓦堰再生水厂

Fig. 1 Chengdu Xiwayan wastewater reclamation plant

该工程主体布置高效沉淀池、反硝化滤池等水处理构筑物,地下池体结构总长约423m,层高5.9~10m。侧墙位于高效沉淀池壁下部,长27m、高5m、宽1.2m。不同类型的池体及复杂错落的层高,导致难以有效控制结构顶部、梁板交接处的温度,且施工环境潮湿阴暗,温度监测精度受区域和时间影响,因此亟待解决大体积混凝土施工、养护过程中的温度变化监测难题。

采用多通道模拟量采集器(WEMS420-AQ)和低功耗网关(RGW-300)设备。将3个温度传感器分别放至于池壁内侧、中间、表面,通过低功耗网关采集传感器将信号发送至远程终端,获取混凝土内部的温度变化数据。为保证传感器测量精度,将传感器绑扎在钢筋上,防止混凝土浇筑时错位,且需防护好所连外部网关。温度传感器远程预埋及远程监测系统架构如图2所示。

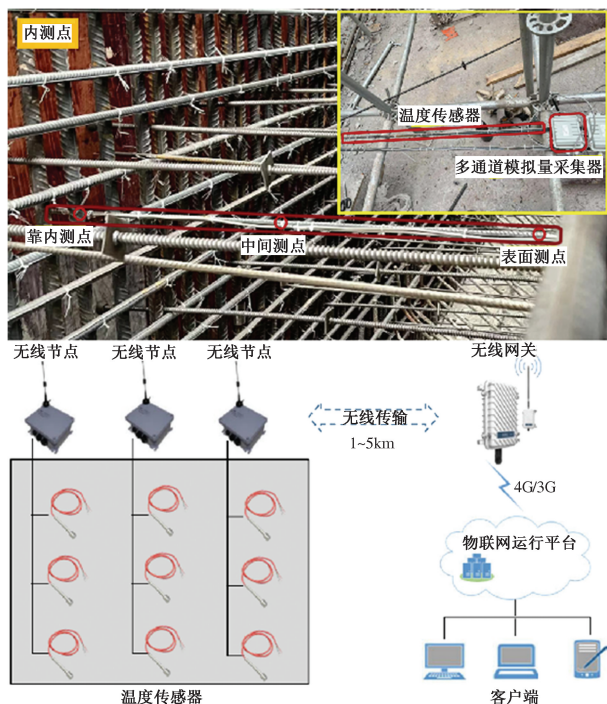


图2 温度传感器预埋及远程监控示意

Fig. 2 Pre-embedded and remote monitoring of temperature sensors

温度传感器预埋于结构中间的上、中、下 3 个部位,从内向外依次布设测点,如图 3 所示。

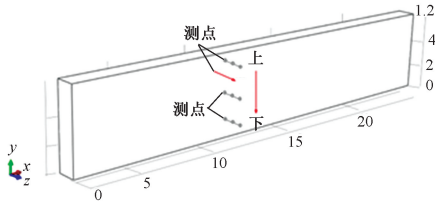


图 3 预埋测点布置

Fig. 3 Layout of pre-embedded measurement points

## 2 数值模拟

### 2.1 模拟参数

2022 年成都冬季环境温度为 3~12℃,夏季环境温度为 25~35℃。根据现场实测结果,假设冬季、夏季混凝土入模温度分别为 18,30℃。

根据工程所用骨料种类、含量、混凝土配合比<sup>[17]</sup>,确定混凝土导热系数为 2.55W/(m·℃)、比热容为 930J/(kg·℃),热膨胀系数为 1×10<sup>-5</sup>/℃。

混凝土热源来源于胶凝材料水化热,其水化放热总量在确定水泥、掺合料、外加剂用量后,可通过材料配合比计算或水化热测试得出。根据现场原材料数据计算可知,水化热总量为 267.7kJ/kg<sup>[17]</sup>。

### 2.2 模拟方法

#### 2.2.1 基于温度时程的热源函数

水泥水化作用是影响混凝土早期温度变化的主要因素,水泥水化放热曲线因材料、环境不同有多种表达式。传统水化放热量随龄期和温度历程的变化规律有复合指数式、双曲线式等<sup>[17]</sup>。其中,复合指数式可更好拟合实际温度场变化,表达式如下:

$$Q(t) = Q_0(1 - e^{-m}) \quad (1)$$

式中: $Q(t)$ 为水泥水化热(kJ/kg); $Q_0$ 为龄期 $t \rightarrow \infty$ 时的最终水化热(kJ/kg); $t$ 为龄期(h);常数 $m$ 随水泥品种、比表面积及浇筑温度不同而不同。

等效龄期方法是基于温度历程对式(1)进行改进,由于成熟度本质与水化度物理性能相同,结合等效时间与水化度,可更加真实地模拟早龄期混凝土温度场<sup>[7]</sup>。根据阿伦尼乌斯公式提出如下等效龄期计算式:

$$t_e = \sum_0^t \exp\left[\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{273 + T_r} - \frac{1}{273 + T}\right)\right] \Delta t \quad (2)$$

式中: $t_e$ 为相对于参考温度的混凝土等效龄期(d); $E_a$ 为混凝土活化能(J/mol); $R$ 为气体常数(J/(mol·K)); $T_r$ 为参考温度(℃); $T$ 为 $\Delta t$ 时段内的混凝土平均温度(℃); $\Delta t$ 为某时间段;等效龄期既有时间

包括温度概念,能够全面反映混凝土热学参数的增长情况。

为考虑昼夜温差的环境变化影响,环境温度函数<sup>[14]</sup>计算如下:

$$SN_1 = \sin[\pi(t_1 - t_0)/12] \quad (3)$$

$$SINK = (T_{\max} + T_{\min})/2 + (T_{\max} - T_{\min})SN_1/2 \quad (4)$$

式中: $SN_1$ 为环境温度函数; $t_1$ 为当前时间(h); $t_0$ 为一天中最高温度的出现时间(h); $SINK$ 为环境温度(℃); $T_{\max}$ 为一天中的最高温度(℃); $T_{\min}$ 为一天中的最低温度(℃)。

采用 Fortran 语言对 HETVAL, FILM 子程序进行二次开发,结合等效龄期及环境变化对温度时程的影响,将其应用于早龄期混凝土温度场。通过实测材料参数,考虑水化、环境温度随时间的变化,建立关于材料与环境温度时程的热源函数,技术路线如图 4 所示。

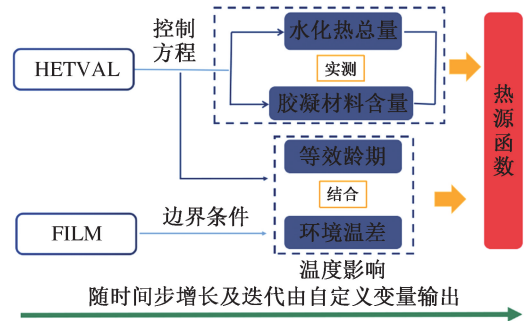


图 4 技术路线

Fig. 4 Technical route

#### 2.2.2 合理性假设

采用 ABAQUS 软件进行数值模拟,根据工程实际池壁尺寸,建立不同外界环境温度的混凝土有限元模型。混凝土热源函数根据式(1),(2)确定。由于实际池壁混凝土水化热是复杂的物理化学过程,结合研究重点,引入如下合理性假设:①将混凝土视为均匀、各向同性的物体;②混凝土导热系数、比热容、热膨胀系数等参数不随时间变化;③不考虑湿度对混凝土温度场的影响。

## 3 结果分析

### 3.1 环境温度对于池壁温度场的影响分析

夏季、冬季环境下,池壁混凝土实测温度变化如图 5 所示。由图可知,池壁混凝土温度先增后减,最后随环境温度变化上下波动。在水化过程中,中间温度最高、内侧温度次之、表面温度最低。以浇筑完成为基准点,夏季环境下,表面和内侧温度最先在 33h 达到最大值 53.63,54.77℃,中间测点于

34h 达到最大值  $55.96^{\circ}\text{C}$ , 最大温升为  $25.58^{\circ}\text{C}$ 。冬季环境下, 表面和内侧温度分别在 41, 42h 左右达到最大值  $38.53, 40.30^{\circ}\text{C}$ , 中间温度约 43h 达到最大值  $47.97^{\circ}\text{C}$ , 最大温升为  $27.25^{\circ}\text{C}$ 。

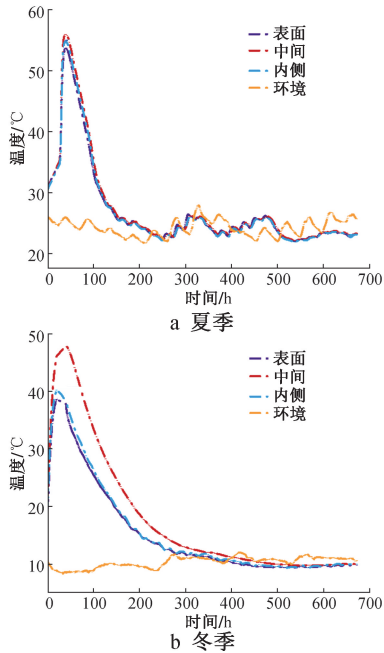


图5 池壁混凝土实测温度变化

Fig. 5 Measured temperature changes of pool wall concrete

相比冬季环境, 池壁混凝土在夏季达到峰值温度所需时间更短, 峰值温度更高。夏季环境混凝土表面温度及峰值时间与内部点相近, 因为该年夏季最高温达  $42^{\circ}\text{C}$ , 且模板使混凝土表面散热受阻, 导致内外温差不明显。

随着龄期增长, 夏季环境下, 池壁混凝土温度变化曲线较冬季有明显波动起伏, 且浇筑后期受环境温度变化影响较显著。实际工程中, 混凝土脱模后的保温措施减少, 池壁混凝土外表面温度更易受昼夜温差变化影响而产生波动。因地处冬阴夏晴的西南地区, 夏季日温差大于冬季, 所以夏季温度曲线变化较明显。

经过数值模拟所得的夏季、冬季池壁混凝土模拟温度变化如图 6 所示。对比分析实测数据可知, 池壁模拟温度变化趋势基本吻合, 夏季和冬季的池壁中间、内侧峰值温度几乎一致, 表面峰值温度相差  $1^{\circ}\text{C}$  左右, 验证模拟结果的可靠性。

### 3.2 池壁厚度对温度场的影响分析

由文献[10]可知, 混凝土结构厚度变化会对温度场产生影响, 且对池壁混凝土中心温度的影响大于其他热学材料系数。研究不同池壁厚度对结构内外温差的影响, 可有效预测实际工程不同类型的池壁中心温度, 把握结构内外温差限度。当池壁厚

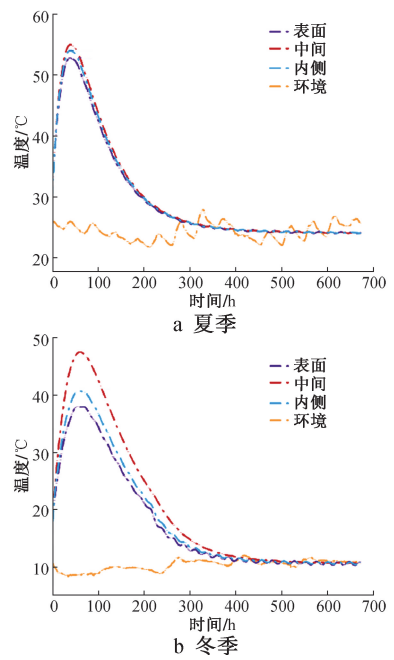


图6 池壁混凝土模拟温度变化

Fig. 6 Simulated temperature changes of pool wall concrete

度分别为 0.8, 1.2, 1.5, 2.0, 2.5m 时, 对应的池壁混凝土温度变化如图 7 所示。为便于比较, 图中相同颜色表示同一池壁厚度下中间及表面测点的温度。

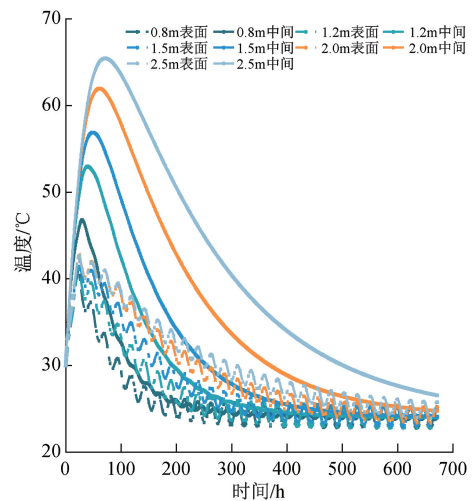


图7 不同墙厚的池壁混凝土温度变化

Fig. 7 Temperature changes of pool wall concrete under different wall thicknesses

由图 7 可知, 厚度为 0.8m 的池壁在 30h 时达到温度峰值  $46.79^{\circ}\text{C}$ 。厚度为 1.2, 1.5, 2.0m 的池壁分别在 40, 50, 62h 左右达到峰值温度  $52.98, 56.89$  和  $61.97^{\circ}\text{C}$ , 厚度为 2.5m 的池壁在 72h 左右达到峰值温度  $64.46^{\circ}\text{C}$ 。随着池壁厚度增加, 中间峰值温度逐渐升高, 且出现时间规律性后延。厚度每增加 0.5m, 中间峰值温度约升高  $5^{\circ}\text{C}$ , 2.5m 厚的

池壁混凝土最高温升达  $34.46^{\circ}\text{C}$ , 接近计算所得的绝热温升  $35^{\circ}\text{C}$ 。计算式如下<sup>[17]</sup>:

$$\hat{\theta}(t) = Q(t)(W + kF)/c\rho \quad (5)$$

式中: $\hat{\theta}(t)$ 为绝热温升( $^{\circ}\text{C}$ ); $W$ 为水泥用量( $\text{kg}$ ); $k$ 为折减系数; $F$ 为混合材料用量( $\text{kg}$ ); $c$ 为比热容( $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ); $\rho$ 为水泥密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。

混凝土内外最大温差随池壁厚度增加呈逐渐上升趋势。厚度较大的池壁混凝土升温与降温段较平缓,达到温度峰值时间越晚。厚度较小的池壁混凝土升温与降温段较陡,达到温度峰值时间越早,降到环境温度所需时间越短。在大体积混凝土施工工艺标准中,混凝土内外温差宜 $\leq 25^{\circ}\text{C}$ 。根据图7可知,厚度分别为0.8,1.2,1.5,2.0m时,池壁内外最大温差分别为9.82,15.02,18.17,22.30 $^{\circ}\text{C}$ ,均满足规范要求。而厚度为2.5m的池壁混凝土内外最大温差达25.43 $^{\circ}\text{C}$ ,超过规范要求。

### 3.3 不同环境温度的合理拆模时间

外部环境条件会影响混凝土强度发展,也会影响模板拆除时间。在GB 50496—2018《大体积混凝土施工标准》中,规定最大混凝土内外温差宜 $\leq 25^{\circ}\text{C}$ 时拆模,撤除保温覆盖时的混凝土表面与环境温差应 $\leq 20^{\circ}\text{C}$ ,降温速率宜 $\leq 2.0^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。

混凝土拆模过程本质是换热系数的转变,基于等效对流换热系数,运用Fortran语言进行软件子程序FILM的二次开发,不同池壁龄期下的混凝土温度变化如图8所示,其温差及相应降温速率如图9所示。

由图9a可知,在24,48,72h拆模时,混凝土表面与环境最大温差分别为16.36,18.09,20.27 $^{\circ}\text{C}$ ,降温速率分别为1.50,1.92,2.01 $^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。当72h拆模时,温差及降温速率明显超过规范要求。在96,120h拆模时,温差降至15.48,14.26 $^{\circ}\text{C}$ ,降温速率分别为1.90,1.78 $^{\circ}\text{C}/\text{d}$ ,满足规范要求。

冬季环境昼夜温差较小,平均气温约 $10^{\circ}\text{C}$ 。由图9b可知,在24,72,120h拆模时,混凝土表面与环境最大温差分别为20.94,26.15,19.40 $^{\circ}\text{C}$ ,降温速率分别为1.50,2.28,2.15 $^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。在120h拆模时,混凝土表面与环境温差虽降至 $20^{\circ}\text{C}$ 以下,但降温速率仍不满足规范要求。当在168,216h拆模时,温差降至13.82,9.77 $^{\circ}\text{C}$ ,降温速率分别为1.90,1.79 $^{\circ}\text{C}/\text{d}$ ,满足规范要求。

综上所述,于72h左右时,混凝土水化热温度达到峰值,此时拆模产生的温差及降温速率均最大。夏季在96h比72h时拆模,温差降低4.79 $^{\circ}\text{C}$ ,降温

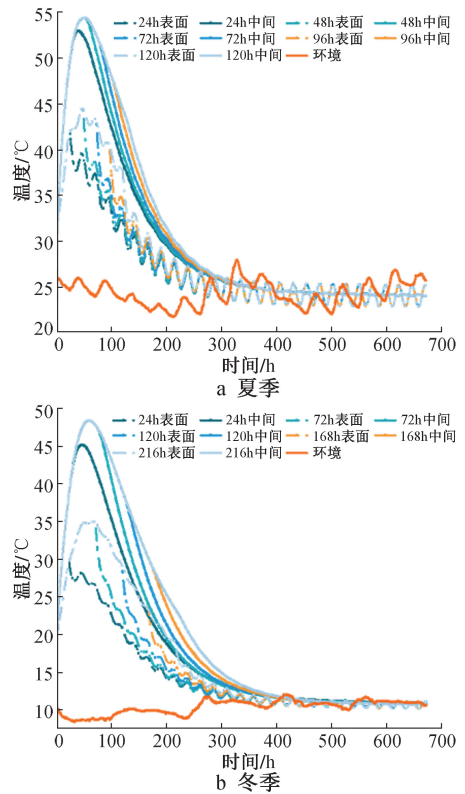


图8 不同龄期下池壁混凝土的温度变化  
Fig. 8 Temperature changes of pool wall concrete at different ages

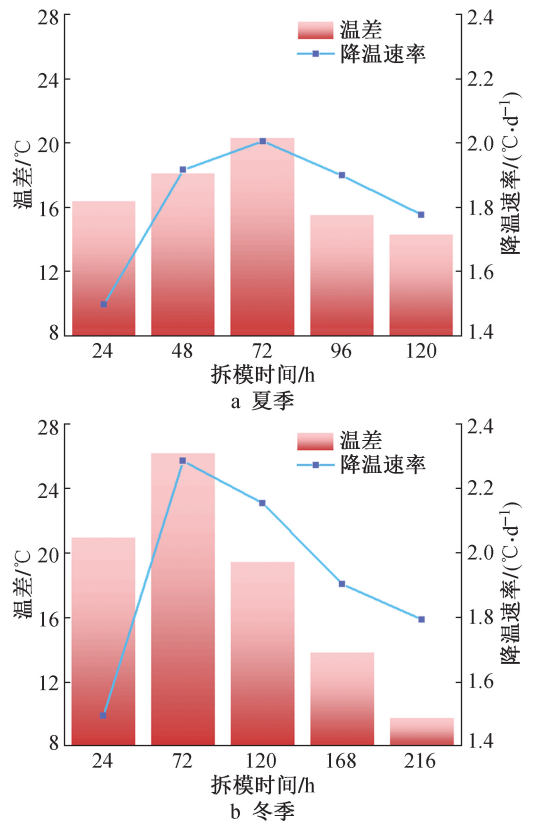


图9 不同龄期下池壁混凝土的温差及降温速率  
Fig. 9 Temperature difference and cooling rate of pool wall concrete at different ages

速率下降  $0.11^{\circ}\text{C}/\text{d}$ ;而冬季在 168h 比 72h 时拆模,温差降低 47%,为  $12.32^{\circ}\text{C}$ ,降温速率下降  $0.38^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。因此,仅从控制热裂角度出发,建议夏季拆模时间为 72h 后,冬季拆模时间为 120h 后。

#### 4 结语

1) 根据实测温度结果可知,池壁混凝土温度变化趋势受水化温度、环境影响。浇筑后期,不同季节昼夜温差不同,混凝土温度呈周期性变化,且夏季较冬季波动更加明显。通过与模拟结果对比分析可知,温度变化趋势及峰值温度基本吻合,验证数值分析的可靠性。

2) 采用 Fortran 语言进行 HETVAL, FILM 子程序的二次开发,结合等效龄期、环境温度应用于早龄期混凝土温度场,基于材料与环境温度时程的热源函数,研究结构厚度不同、混凝土龄期不同时,池壁混凝土不同位置的温度变化及分布规律。

3) 结构厚度对池壁中间峰值温度的影响显著,当厚度  $\geq 2.5\text{m}$ ,池壁最高温升接近绝热温升,内部相当于绝热状态,存在热裂风险。当厚度  $\leq 2.0\text{m}$ ,池壁混凝土内外最大温差均满足规范要求。在实际施工中,应着重关注拆模时,混凝土表面与环境的温差、降温速率。

#### 参考文献:

- [1] 房阔,王凯军.我国地下式污水处理厂的发展与生态文明建设[J].给水排水,2021,57(8):49-55.  
FANG K, WANG K J. Development of underground wastewater treatment plant and eco-civilization in China [J]. Water & wastewater engineering, 2021, 57(8):49-55.
- [2] BALDASSARE M. Residential crowding in urban America[M]. Auckland:University of California Press, 2021.
- [3] PRISCILLA P, NELSON. A framework for the future of urban underground engineering[J]. Tunnelling and underground space technology incorporating trenchless technology research, 2015, 55:32-39.
- [4] LI H, LIU J P, WANG Y J, et al. Deformation and cracking modeling for early-age sidewall concrete based on the multi-field coupling mechanism [J]. Construction and building materials, 2015, 88(30):84-93.
- [5] ADILSON S, CARMEANE E, ITAMAR R, et al. Temperature variation in concrete samples due to cement hydration [J]. Applied thermal engineering, 2016, 103:1362-1369.
- [6] LIU J P, TIAN Q, WANG Y J, et al. Evaluation method and mitigation strategies for shrinkage cracking of modern concrete [J]. Engineering, 2021, 7(3):10-17.
- [7] LEE M H, KHIL B S, YUN H D, et al. Influence of cement type on heat of hydration and temperature rise for mass concrete [J]. Indian journal of engineering and materials sciences, 2014, 21(5):536-542.
- [8] 崔激,陈王,王宁.早期混凝土热学参数优化及温度场精确模

[J]. 四川大学学报(工程科学版),2014, 46(3):161-167.

CUI W, CHEN W, WANG N. Early concrete thermal parameters optimization and accurate thermal field simulation [J]. Journal of Sichuan University (engineering science edition), 2014, 46(3):161-167.

- [9] CASTELLANO C C, BONAVENTI V L, DONZA H A, et al. The effect of  $w/b$  and temperature on the hydration and strength of blastfurnace slag cements [J]. Construction and building materials, 2016, 111(15):679-688.
- [10] 卢玉林,陈晓冉,丁金立.混凝土早龄期温度场测试与数值模拟分析[J].北京工业大学学报,2013,39(12):1843-1848.  
LU Y L, CHEN X R, DING J L. Analysis of concrete temperature in early age with field test and numerical simulation methods [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39(12):1843-1848.
- [11] 薛素铎,康广博,李雄彦,等.大尺寸混凝土构件硬化期水化热温度场[J].北京工业大学学报,2020,46(2):147-153.  
XUE S D, KANG G B, LI X Y, et al. Hydration temperature field of large-size concrete member during hardened period [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2020, 46(2):147-153.
- [12] 姚婷,李忠超,王育江,等.基于统计分析的侧墙混凝土最大开裂风险回归模型[J].地下空间与工程学报,2021,17(3):969-974.  
YAO T, LI Z C, WANG Y J, et al. Multivariate regression model for the maximum cracking risk of side wall concrete based on statistical analysis [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2021, 17(3):969-974.
- [13] DU W X, QIAN C X, XU Y G, et al. Effects of ambient temperature, formwork type, and demolding time on the thermal deformation of sidewall concrete in underground engineering: experiment, simulation, and engineering practice [J]. Construction and building materials, 2022, 353:129083.
- [14] 田野,金贤玉,金南国.基于水泥水化动力学和等效龄期法的混凝土温度开裂分析[J].水利学报,2012,43(S1):179-186.  
TIAN Y, JIN X Y, JIN N G. Thermal cracking analysis of concrete with cement hydration model and equivalent age method [J]. Journal of hydraulic engineering, 2012, 43(S1):179-186.
- [15] ZHU Z, QIANG S, CHEN W M. A model for temperature influence on concrete hydration exothermic rate (part one: theory and experiment) [J]. Journal of Wuhan University of Technology (materials science edition), 2014, 29(3):540-545.
- [16] 朱振决,强晟,郑占强,等.用遗传算法确定考虑温度历程的混凝土水化放热模型参数及试验验证[J].农业工程学报,2013,29(1):86-92.  
ZHU Z Y, QIANG S, ZHENG Z Q, et al. Determination of parameters for hydration exothermic model considering concrete temperature duration by genetic algorithm [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2013, 29(1):86-92.
- [17] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].北京:中国水利水电出版社,2012.  
ZHU B F. Thermal stresses and temperature control of mass concrete [M]. Beijing:China Water & Power Press, 2012.