

DOI: 10.7672/sgjs2026100018

# 基于等效龄期的超长混凝土结构温度场 模拟分析与监测\*

唐国旺<sup>1</sup>, 李建华<sup>1</sup>, 骆杰<sup>1</sup>, 邓强<sup>1</sup>, 赵中军<sup>1</sup>, 贾向阳<sup>1</sup>, 袁荟凯<sup>2</sup>

(1. 北京城建集团有限责任公司, 北京 100088; 2. 清华大学, 北京 100084)

[摘要] 以合肥新桥机场T2航站楼3层楼板为例,对超长混凝土结构温度场进行了深入分析。结合等效龄期和温度的影响,构建混凝土的温度场模型,模拟混凝土的水化放热和热传导过程,并对比分析模拟结果与现场监测数据,验证了模型的精确性和实用性。研究表明,温度峰值主要出现在水化反应的初期阶段,且不同位置的温度峰值因散热条件不同而异;优化混凝土配合比和跳仓法施工顺序,可降低水化热积累,优化超长混凝土结构施工。

[关键词] 混凝土;温度场;水化热;等效龄期;有限元分析

[中图分类号] TU525

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)10-0018-07

## Simulation Analysis and Monitoring of Temperature Field of Super-long Concrete Structure Based on Equivalent Age

TANG Guowang<sup>1</sup>, LI Jianhua<sup>1</sup>, LUO Jie<sup>1</sup>, DENG Qiang<sup>1</sup>, ZHAO Zhongjun<sup>1</sup>,  
JIA Xiangyang<sup>1</sup>, YUAN Huikai<sup>2</sup>

(1. Beijing Urban Construction Group Co., Ltd., Beijing 100088, China;

2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Taking the three floor slab of Hefei Xinqiao Airport Terminal T2 as an example, the temperature field of super-long concrete structure is analyzed in depth. Combined with the influence of equivalent age and temperature, the temperature field simulation model of concrete is constructed to simulate the hydration heat release and heat conduction process of concrete. The accuracy and practicability of the model are verified by comparing the simulation results with the field monitoring data. The results show that the peak temperature mainly occurs in the early stage of hydration reaction, and the peak temperature at different positions varies with the heat dissipation conditions. Optimizing the concrete mix ratio and the construction sequence of the jump method can reduce the accumulation of hydration heat and optimize the construction of super-long concrete structures.

**Keywords:** concrete; temperature field; heat of hydration; equivalent age; finite element analysis

### 0 引言

超长混凝土结构在现代大型基础设施建设中应用广泛,但其面积庞大,水化热累积显著,易产生裂缝。由于混凝土为不良导热体,其常温下( $25^{\circ}\text{C}$ )湿润的混凝土导热系数为 $2.48\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ,干燥状态下仅为 $1.68\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ <sup>[1]</sup>。故混凝土在降温过

程中内外温度差很大,易形成不均匀的温度场和应力、应变场<sup>[2-4]</sup>。温度场的不均匀分布可能导致混凝土开裂<sup>[4-5]</sup>,影响结构的长期耐久性和安全性。因此,精确模拟和预测超长混凝土结构的温度场具有重要意义。

超长混凝土结构温度场的模拟主要依赖于有限元法。通过构建混凝土的热学模型,预测在不同施工条件和环境温度下超长混凝土结构的温度分布。目前,已有许多研究针对不同混凝土配合比、浇筑方式及环境条件进行了深入探讨,并据此提出了多种超长混凝土结构的工程实践指导方法,如掺

\* 国家自然科学基金(52308316)

[作者简介] 唐国旺,高级工程师, E-mail: 3002180015@email.cugb.edu.cn

[通信作者] 袁荟凯,博士研究生, E-mail: 1204310653@qq.com

[收稿日期] 2025-11-06

入低水化热的矿物掺合料<sup>[6]</sup>、改进混凝土配合比设计<sup>[7]</sup>、采用跳仓法施工并合理设计分仓<sup>[8-9]</sup>、保温保湿养护<sup>[10-12]</sup>等。

为了验证模拟结果的准确性,也作为研究超长混凝土结构温度场的重要手段,常在工程现场混凝土内、等尺或缩尺的试验试样内埋设传感器监测混凝土内部温度<sup>[13]</sup>。尽管这种方法能提供准确的温度分布信息,但其成本较高且传感器损坏后无法更换,常将现场监测作为超长混凝土结构模型的研究补充和验证<sup>[14]</sup>。在一些大型工程中,通过埋设温度传感器进行温度监测,可在时间和空间维度上提供详细的数据,并与模拟结果对比,有效检验模型精度,为模型修正和优化提供依据。

针对超长混凝土结构水化过程温度场的研究,大多数工程模拟中水化放热速率仅作为时间的函数,较少考虑放热速率随水化等效龄期和温度的变化。此外,一些工程模拟将温度荷载和收缩荷载统一为温度变化加载在模型上,影响了模拟精度。早在2003年,朱伯芳<sup>[15]</sup>就提出了混凝土绝热温升计算模型,开始考虑等效龄期和温度对混凝土的影响。通过不断试验和计算,许多混凝土绝热温升模型被提出,其中复合指数模型对普通混凝土的拟合效果最好<sup>[16-18]</sup>。有研究表明,混凝土水化过程中的许多参数均会随混凝土等效龄期和温度的变化而变化<sup>[19]</sup>。因此,将与等效龄期和温度相关的水化热模型应用于超长混凝土结构的工程模拟中,可显著提高模型精度。

本文以合肥新桥机场T2航站楼3层楼板超长混凝土结构为例,利用现场监测温度结果,基于等

效龄期和温度效应进行超长混凝土结构的温度场有限元分析。通过ABAQUS建立有限元模型,考虑等效龄期和温度对水化放热速率及导热系数等材料参数的影响,利用HETVAL和FILM子程序分别模拟水化放热和热交换,使用USDFLD子程序模拟热传导系数、比热等材料参数随等效龄期与温度的变化。通过将模型的温度场与实际工程监测值对比,验证模型的有效性和准确性,并最终优化混凝土配合比,指出适宜的配合比要求。

1 工程概况

合肥新桥机场T2航站楼位于合肥市肥西县高刘镇境内,建筑总面积约36.98万m<sup>2</sup>。航站楼主体结构为钢筋混凝土框架,屋顶为大跨度空间钢结构体系。3层楼板宽约480m,进深约180m,楼板厚250mm,超长结构在长宽两个方向的单元长度均超过GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》(2015年版)规定的混凝土结构伸缩缝最大间距。采用跳仓法施工设计,根据T/CECS 640—2019《超长大体积混凝土结构跳仓法技术规程》设计分仓与施工顺序,保证分仓长度不超过40m且相邻两个仓格浇筑时间间隔7d以上,将楼板分为M1~M5 5个跳仓区,每个区同时施工,相邻施工顺序的仓格施工间隔为7d。其中3层最大分仓尺寸为M3-F3-17仓格,最大长度39m;最大分仓面积出现在M3-F3-16仓格,仓格面积为1338m<sup>2</sup>;最大混凝土方量出现在M3-F3-16仓格,混凝土量为340m<sup>3</sup>。3层分仓和施工顺序如图1所示。3层楼板均使用C40混凝土,配合比设计如表1所示。

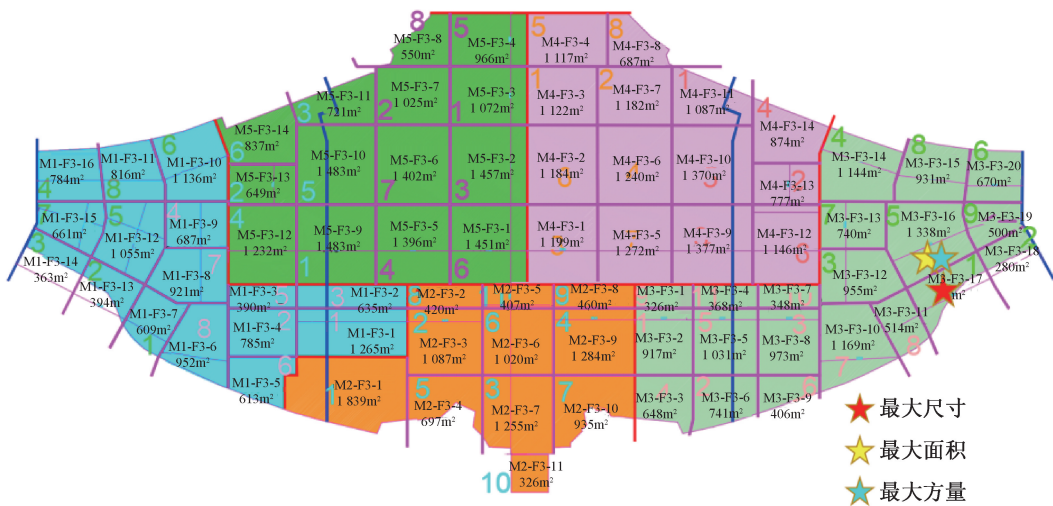


图1 3层分仓及施工顺序

Fig. 1 Three-layer warehouse partition and construction sequence

表 1 M3 区域混凝土配合比

| Table 1 Concrete mix proportion of M3 area |      |                                  |                         |                         |                                  |                             |                              |                       |  |
|--------------------------------------------|------|----------------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------|--|
| 水胶比                                        | 砂率/% | P·O42.5 水泥/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 水/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 砂/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 5~31.5mm 石/(kg·m <sup>-3</sup> ) | Ⅱ级粉煤灰/(kg·m <sup>-3</sup> ) | S95 矿粉/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 高效减水剂                 |  |
|                                            |      | (kg·m <sup>-3</sup> )            | (kg·m <sup>-3</sup> )   | (kg·m <sup>-3</sup> )   | (kg·m <sup>-3</sup> )            | (kg·m <sup>-3</sup> )       | (kg·m <sup>-3</sup> )        | (kg·m <sup>-3</sup> ) |  |
| 0.38                                       | 39   | 282                              | 162                     | 678                     | 1 050                            | 93                          | 66                           | 9.3PY-8 聚羧酸           |  |

2 温度监测分析

2.1 监测方案

选取 M3-F3-16 及周围区域进行现场监测和数值模拟。测点布置如图 2 所示,红点标识处为埋设点 1~3,分别代表超长混凝土结构侧边、超长混凝土结构被已完成大部分水化的混凝土包围的拐点,及超长混凝土结构中心。在每个水平点中心相互垂直埋设 2 个水平方向传感器。东西方向埋设传感器后缀记为  $x$ ,南北方向记为  $y$ ,且两个传感器在  $z$  方向上有一定距离, $x$  方向传感器检测上表面温度, $y$  方向检测中心点温度,共同检测不同高度的温度情况。使用自动采集仪作为现场采集设备,混凝土浇筑前将中频振弦式传感器埋设在相应位置,数据获取频率为 1h。

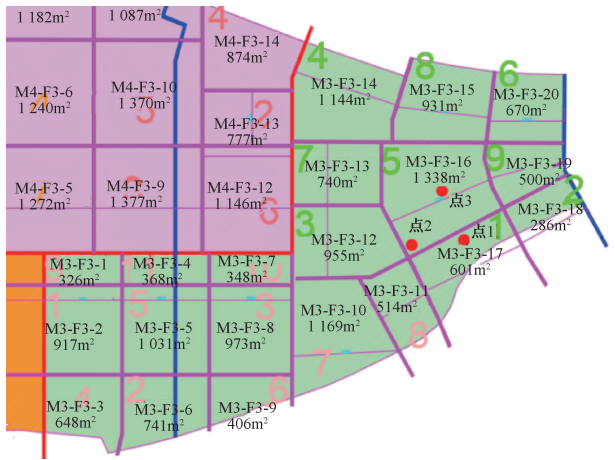


图 2 M3 区域测点布置

Fig. 2 Arrangement of measuring points in M3 area

2.2 监测结果

为统一监测结果,以 M3-F3-17 仓格开始施工即点 1 混凝土开始浇筑水化为第 1 天,点 2 和点 3 开始浇筑水化为第 28 天,监测结果如图 3 所示。由图 3 可知,同一测点两个正交方向上的温度大致相近,但也有所不同。这是由于两个正交采集仪本身测试位置并不完全重合,相近位置的温度变化接近而不完全相同,可认为两个方向测量结果均能代表监测点的温度变化。对比 3 个测点温度变化

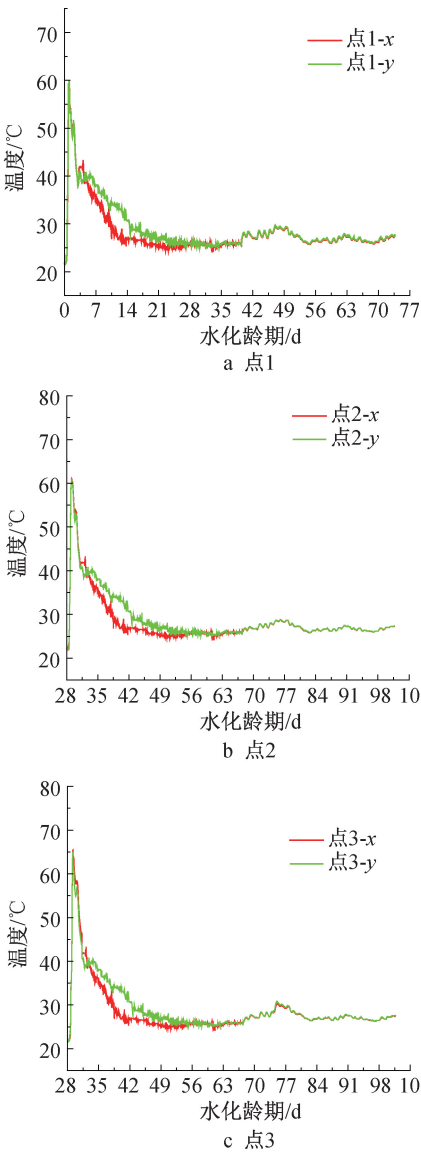


图 3 混凝土温度-龄期监测曲线

Fig. 3 Concrete temperature-age monitoring curves

规律可知,随着施工的进行,混凝土开始水化,温度逐渐上升并在浇筑 1d 左右达到最高峰,随后混凝土温度逐渐降低,这一阶段混凝土温度主要受混凝土的水化放热速率和与环境热交换的影响。此外,在浇筑 28d 后,点 1~3 的温度趋于稳定,表明混凝土水化放热降低,混凝土温度主要受环境温度和施工局部条件影响。总的来说,3 个测点的温度变化规律相似,但温度峰值不同。点 3 温度最高,为 65℃;点 1 最低,为 59℃。点 3 位于超长混凝土结构中心,热量传递少;点 1 位于侧边,主要通过与支持模板环境进行热交换,散热快;点 2 一侧为同龄期混凝土,另一侧为已完成大部分水化的混凝土,热量传递速度介于点 1 和点 3 之间。

### 3 超长混凝土结构有限元分析

#### 3.1 计算依据及参数

##### 3.1.1 等效龄期

根据 Azenha 基于阿伦尼乌斯公式提出的混凝土等效龄期/成熟度计算方法,等效龄期计算如下:

$$t_e = \int_0^t \exp \left[ \frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{T_{ref} + 273.15} - \frac{1}{T + 273.15} \right) \right] dt \quad (1)$$

式中:  $t_e$  为混凝土的等效龄期(h);  $t$  混凝土实际龄期(h);  $R$  为理想气体常数,取  $8.31J/(mol \cdot K)$ ;  $T_{ref}$  为参考温度,取  $20^\circ C$ ;  $T$  为混凝土温度( $^\circ C$ );  $E_a$  为水泥水化的反应活化能,考虑到本研究中混凝土水化过程中温度几乎均大于  $20^\circ C$ ,故  $E_a$  值恒为  $335kJ/mol^{[20]}$ 。

##### 3.1.2 水化热

混凝土水化放热采用复合指数式描述:

$$q(T, t_e) = M_{ce} Q_0 \frac{cb}{24} \left( \frac{t_e}{24} \right)^{c-1} \exp \left[ -b \left( \frac{t_e}{24} \right)^c \right] \quad (2)$$

式中:  $q(T, t_e)$  为  $T$  温度下,  $t_e$  等效龄期时  $1m^3$  混凝土的水化放热速率;  $M_{ce}$  为  $1m^3$  混凝土中含水泥量(kg);  $Q_0$  为  $1kg$  水泥放热量,取  $364kJ/kg$ ;  $b$  和  $c$  均为拟合参数,与混凝土中水泥种类与矿物掺合料占比有关,取  $b=0.36, c=0.74^{[20]}$ 。

##### 3.1.3 其他热学参数

导热系数  $k$  和比热容  $c$  计算如下<sup>[19]</sup>:

$$k(t_e) = k_u \left[ 1 + 0.33 \exp \left( -\frac{t_e}{5} \right) \right] \quad (3)$$

$$c(t_e) = 911.18 + 89.2 \exp \left( -\frac{t_e}{5} \right) \quad (4)$$

式中:  $k_u$  为完全水化后混凝土的导热系数,取  $9.18kJ/(m \cdot h \cdot ^\circ C)$ 。

##### 3.1.4 初始条件

有限元模型 3 种初始条件如下:

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z) \quad (5)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta(T_1 - T_2) \quad (6)$$

$$\begin{cases} T_1 = T_2 \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} \end{cases} \quad (7)$$

式(5)表示混凝土初始入模温度为一定值;式(6)表示混凝土表面与空气热交换的初始条件,其中  $\lambda$  为混凝土导热系数,  $\beta$  为混凝土的热交换系数,取值满足式(8)<sup>[20]</sup>;式(7)为混凝土表面和其他已浇筑完成混凝土的热传递初始条件。

$$\beta = 17.58v^{0.91} + 21.06 \quad (8)$$

式中:  $v$  为混凝土表面风速,取当地平均风速  $1m/s$ 。

#### 3.2 有限元模型建立与计算

合肥新桥国际机场底板浇筑时间为 2023 年 8 月,11 月底完成底板浇筑,环境温度使用正弦函数模拟,选取安徽省合肥市气象站 2022 年 8 月至 11 月气象数据最高、最低气温均值作为正弦函数参数:

$$T_h = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} + \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \sin \left( \pi \frac{t - t_0}{12} \right) \quad (9)$$

式中:  $T_h$  为环境温度( $^\circ C$ );  $T_{max}$  为平均最高温度,为  $30.05^\circ C$ ;  $T_{min}$  为平均最低温度,为  $14.90^\circ C$ ;  $t$  为时间(h);  $t_0$  为每天最高温出现时刻,取  $14:00$ ,即  $t_0=14h$ 。

计算环境温度-时间变化曲线如图 4 所示。

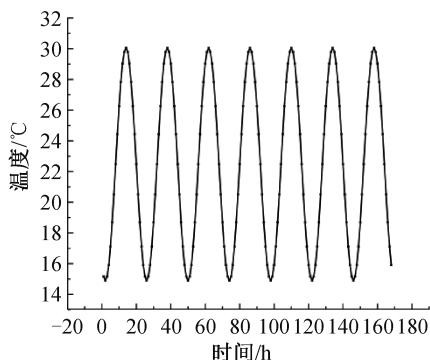


图 4 计算环境温度-时间变化曲线

Fig. 4 Ambient temperature calculated-time curve

选取 M3 区域点 1~3 所在仓格及相邻仓格进行跳仓法施工模拟计算。根据 M3 区域楼板尺寸、跳仓分仓设计与施工顺序建立几何模型。使用 Hetval 子程序描述混凝土材料中的生热属性,从而模拟混凝土水化放热过程,水化放热速率满足式(2)~(3),其中使用等效龄期计算出的最小等效步长替代 ABAQUS 中自带的最小步长 DTIME。使用 Film 子程序描述混凝土表面与周围空气的热交换,热交换系数满足式(9)。使用 USDFLD 子程序模拟热传导系数、比热等材料参数随等效龄期与温度的变化,分别满足式(4)和式(5)。

模型约束住底部混凝土  $z$  方向平动自由度和所有侧边法相方向的平动自由度以模拟模板的支撑作用,约束设计图纸梁及柱所对应节点的全部自由度以模拟梁、柱的约束作用,如图 5 所示。

设置所有单元在 initial 步骤中的温度均为入模温度  $30^\circ C$ ,采用生死单元 model change 命令,预先杀死所有单元;按照 M3 区域跳仓法施工顺序,间隔 7d 依次激活对应仓格,并加载材料生热属性和空气

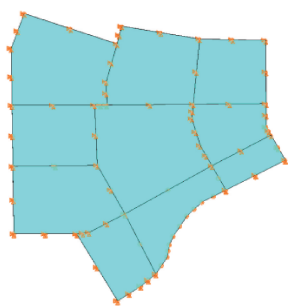


图 5 M3 区域的约束  
Fig. 5 Constraint of M3 region

对流相互作用。

在 Mesh 模块中考虑结构的实际形状,进行有限元网格划分,如图 6 所示。

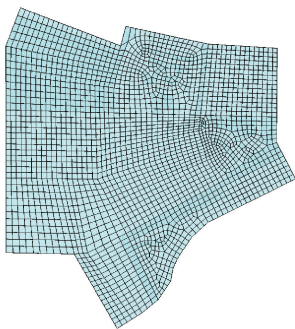


图 6 M3 区域的网格划分  
Fig. 6 Mesh division of M3 region

3.3 温度场模拟结果分析

M3 区域温度场计算结果如图 7 所示。由图 7

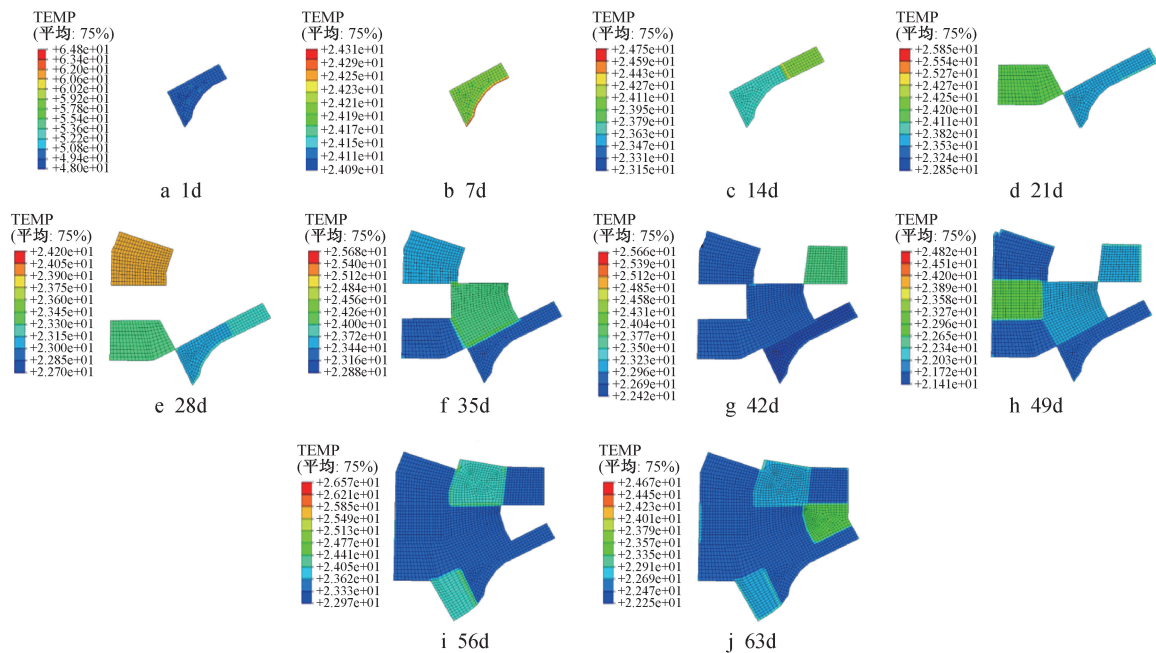


图 7 M3 区域温度场计算结果(单位:℃)

Fig. 7 Calculation results of temperature field in M3 region( unit:℃ )

可知,混凝土在不同龄期内温度变化明显,每 7d 新浇筑的混凝土仓格导致温度场出现周期性变化。初期温度快速上升(1~7d),而后续相邻新仓格水化反应引起的原仓格混凝土局部升温,区域单元温度均趋于稳定;且面积越大的混凝土仓格,其中心温度在水化反应 7d 后越高。这是由于大仓格内部热量集中,向侧边散热速度慢,导致温度较高。

提取点 1~3 位置处的温度场结果如图 8 所示,监测点温度模拟值与实测值对比如图 9 所示。由图 8,9 可知,点 1~3 分别在 0.96,29.17,28.83d 达到峰值,模拟峰值温度分别为 59.72,66.26,69.34℃,均在水化开始 1d 左右达到峰值;各测点温度曲线均表现出初期快速升温,随后温度逐渐下降并趋于稳定,最终接近环境温度。由于不同测点所在混凝土仓格的体积和相邻仓格的热传递情况不同,峰值温度存在一定差异,这与现场对比结果一致。其中,点 3 位置峰值温度最高,说明该位置处的混凝土在水化反应过程中热量积累更多。实测数据与模拟结果基本吻合,验证了温度场模拟的准确性。但实测数据波动性更强,反映了实际施工环境中的复杂热传递过程。除此之外,实际工况中温度下降速率更慢。总体而言,计算混凝土的热学参数和水化放热速率时考虑等效龄期和温度的影响,能较好地模拟现场超长混凝土结构的温度峰值和变化规律。

4 结语

通过有限元模拟和现场监测分析,深入研究了

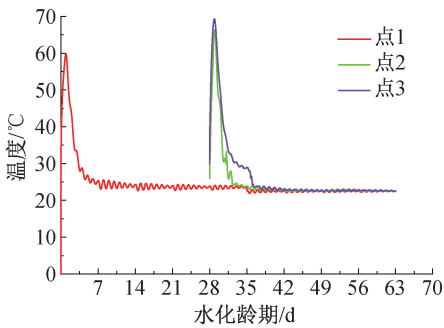
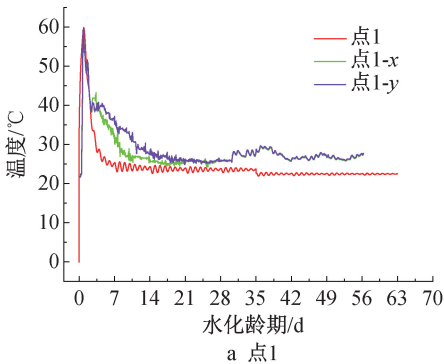
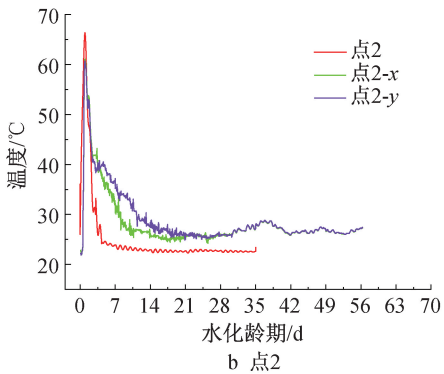


图 8 点 1~3 位置处的温度场模拟结果

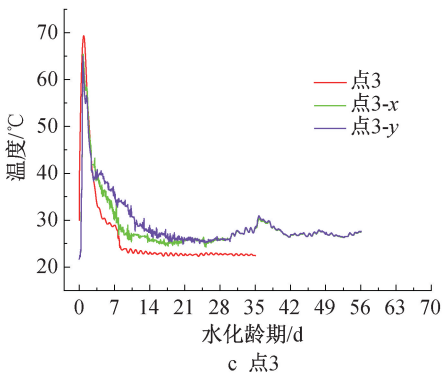
Fig. 8 Simulation results of temperature field at 1~3 points



a 点1



b 点2



c 点3

图 9 不同监测点温度模拟值与实测值对比

Fig. 9 Comparison of simulated and measured values of temperature at different monitoring points

超长混凝土结构在跳仓法施工中的温度场分布及其影响因素,考虑等效龄期和温度对水化放热速率及弹性模量等材料参数的影响,建立超长混凝土结

构水化放热有限元模型,并结合实际监测数据验证了模型的准确性。给出以下主要结论和建议。

1)考虑等效龄期和温度对水化放热速率及导热系数等材料参数的影响下建立的超长混凝土结构水化模型模拟结果与现场监测数据基本吻合,验证了模型的有效性和准确性。

2)混凝土温度峰值出现在水化反应的初期阶段(1d),不同位置的温度峰值存在差异。中心位置由于散热条件差,温度峰值最高,最高达 65℃;侧边位置散热快,温度峰值最低。

3)优化混凝土配合比设计,减少高热水泥用量,选用低水化热的水泥品种,适当减少高热水泥用量,以降低混凝土水化热的积累。掺入矿物掺合料,如粉煤灰、矿粉等矿物掺合料,可有效降低混凝土的水化热,改善混凝土的耐久性和工作性能。

4)根据施工现场实际情况,合理设计跳仓法的仓格大小,控制每仓格的混凝土方量,确保各仓格在水化过程中有足够的时间释放温度应力。

5)优化跳仓法施工顺序,减少相邻仓格连续施工情况,合理安排各仓格的浇筑时间间隔,避免相邻仓格间的温度应力累积,确保施工质量。

参考文献:

[ 1 ] 肖建庄,宋志文,张枫. 混凝土导热系数试验与分析[J]. 建筑材料学报,2010,13(1):17-21.  
XIAO J Z, SONG Z W, ZHANG F. An experimental study on thermal conductivity of concrete [ J ]. Journal of building materials,2010,13(1):17-21.  
[ 2 ] 杨秋玲,马可桢. 大体积混凝土水化热温度场三维有限元分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2004,36(2):261-263.  
YANG Q L, MA K S. Analysis of massive concrete 3-dimensional finite element hydrated heat temperature field [ J ]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004,36(2):261-263.  
[ 3 ] 袁广林,黄方意,沈华,等. 大体积混凝土施工期的水化热温度场及温度应力研究[J]. 混凝土,2005(2):86-88.  
YUAN G L, HUANG F Y, SHEN H, et al. Research on temperature field and thermal stress of hydration heat in massive concrete of construction period [ J ]. Concrete, 2005(2):86-88.  
[ 4 ] 段峰,马朝雷,王莉莉. 现浇大体积混凝土裂缝的成因与防治[J]. 混凝土,2003(5):48-48,58.  
DUAN Z, MA C L, WANG L L. The reasons and preventive measures of the cracking on mass concreting [ J ]. Concrete, 2003(5):48-48,58.  
[ 5 ] 戴建潮. 大体积混凝土的防裂[J]. 混凝土,2001(9):9-11.  
DAI Z C. Cracking control of mass concrete [ J ]. Concrete, 2001(9):9-11.  
[ 6 ] 沈炳龙,王兵,陈波,等. 低磁性四元胶凝材料体系自密实混凝土的制备与性能研究 [ J ]. 施工技术(中英文), 2025, 54(19):1-7.  
SHEN B L, WANG B, CHEN B, et al. Preparation and

properties of self-compacting concrete with low magnetic quaternary cementitious material system [ J ]. Construction technology, 2025, 54 ( 19 ) : 1-7.

[ 7 ] 陈军校. 大体积混凝土水化热模拟及温控方案优化[ D ]. 大连:大连交通大学,2023.

CHEN J X. Simulation of hydration heat of mass concrete and optimization of temperature control scheme[ D ]. Dalian: Dalian Jiaotong University,2023.

[ 8 ] 陈鹏,钟恩,胡其,等. 基于仿真分析的跳仓法在厦门翔安国际机场中的应用[ J ]. 施工技术(中英文), 2024, 53 ( 5 ) : 26-31.

CHEN P, ZHONG E, HU Q, et al. Application of jumping warehouse method based on simulation analysis in Xiamen Xiang'an International Airports [ J ]. Construction technology, 2024, 53( 5 ) : 26-31.

[ 9 ] 郑巍,李厚波,王懿晟,等. 超长底板混凝土配合比设计与跳仓法有限元分析[ J ]. 建筑施工, 2024, 46( 2 ) : 164-168.

ZHENG W, LI H B, WANG Y S, et al. Mix proportion design of super-long floor concrete and finite element analysis of alternate bay construction method [ J ]. Building construction, 2024, 46 ( 2 ) : 164-168.

[ 10 ] 李友顺. 大体积桥梁承台温度场模拟及养护方法研究[ D ]. 西安:西安工业大学,2016.

LI Y S. Simulation of temperature field and research on maintenance method of large volume bridge pile cap[ D ]. Xi'an: Xi'an Technological University,2016.

[ 11 ] 赵一博. 气温骤降对大体积混凝土温度场的影响研究[ D ]. 西安:西安建筑科技大学,2023.

ZHAO Y B. Effect of air temperature drop on the temperature field of mixed soil with human accumulation [ D ]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2023.

[ 12 ] 许开成,易彬,张立卿,等. 酸雨环境下掺锂渣钢筋混凝土柱有限元分析[ J ]. 华东交通大学学报, 2021, 38( 3 ) : 7-14.

XU K C, YI B, ZHANG L Q, et al. Finite element analysis of reinforced concrete column mixed with lithium slag under acid rain[ J ]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38( 3 ) : 7-14.

[ 13 ] 夏雄,吴炎,胡坤,等. 大体积混凝土温度演变规律研究[ J ]. 混凝土, 2017( 6 ) : 152-156, 160.

XIA X, WU Y, HU K, et al. Research on temperature evolution law in mass concrete[ J ]. Concrete, 2017( 6 ) : 152-156, 160.

[ 14 ] 陆汝林,吴炎,李荟楠,等. 筏板基础大体积混凝土放热温度场数值模拟研究[ J ]. 混凝土, 2024( 2 ) : 188-192.

LU R L, WU Y, LI H N, et al. Numerical simulation research on heat release temperature field of raft foundation mass concrete [ J ]. Concrete, 2024( 2 ) : 188-192.

[ 15 ] 朱伯芳. 混凝土绝热温升的新计算模型与反分析[ J ]. 水力发电, 2003, 29( 4 ) : 29-32.

ZHU B F. A new computing model for the adiabatic temperature rise of concrete and the method of back analysis [ J ]. Water power, 2003, 29( 4 ) : 29-32.

[ 16 ] 王艳,孙雪. 混凝土绝热温升模型研究[ J ]. 公路交通科技(应用技术版), 2017, 13( 10 ) : 31-33.

WANG Y, SUN X. Study on adiabatic temperature rise model of concrete[ J ]. Highway traffic technology ( application technology edition ), 2017, 13( 10 ) : 31-33.

[ 17 ] 陈川,王起才,张戎令,等. 水灰比以及水化程度对水泥水化计算模型的影响[ J ]. 混凝土, 2014( 7 ) : 32-36.

CHEN C, WANG Q C, ZHANG R L, et al. Computing model for adiabatic temperature rise of cement paste considering the effect of degree of hydration and water-cement ratio of cement paste [ J ]. Concrete, 2014( 7 ) : 32-36.

[ 18 ] 王艳,孙雪. 混凝土绝热温升模型研究[ J ]. 公路交通科技(应用技术版), 2017, 13( 10 ) : 31-33.

WANG Y, SUN X. Study on adiabatic temperature rise model of concrete[ J ]. Highway traffic technology ( application technology edition ), 2017, 13( 10 ) : 31-33.

[ 19 ] 郑伟,袁中夏,乔宏霞,等. 考虑水化度影响的大体积混凝土温度场分析[ J ]. 材料导报, 2024, 38( S1 ) : 254-260.

ZHENG W, YUAN Z X, QIAO H X, et al. Temperature field analysis of mass concrete considering the influence of hydration degree[ J ]. Materials reports, 2024, 38( S1 ) : 254-260.

[ 20 ] LEE Y, KIM J K. Numerical analysis of the early age behavior of concrete structures with a hydration based microplane model[ J ]. Computers & structures, 2009, 87( 17/18 ) : 1085-1101.