

基于混凝土绝热温升新模型分析大体积高强混凝土水化热效应

李军连, 舒小娟, 刘 雄, 王志宇, 汪建群, 沈明燕

湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2024年5月31日; 录用日期: 2024年6月20日; 发布日期: 2024年6月28日

摘 要

绝热温升模型是大体积混凝土水化热效应分析的最重要参数之一。本文根据混凝土所用水泥以C3S、C2S两种水化活性组分为主的特点, 提出了考虑C3S与C2S水化反应速率差异的混凝土双项线性叠加多参数指数函数绝热温升模型。开展了一种普通高强C50混凝土和另一种高性能C60混凝土的绝热温升试验, 将双项叠加式新模型、传统单项指数函数模型与试验结果对比, 结果表明新模型与试验结果拟合更好。将新旧模型用于某桥墩身大体积混凝土水化热有限元建模分析中, 并与实测温度变化过程进行比较。对比结果显示, 运算分析所得的温度变化趋势与实测所得温度变化趋势吻合度较好, 整体误差值控制在 0.1°C ~ 2.97°C 之间, 在快速放热阶段能较好地反应拱脚结构的实际升温情况。

关键词

混凝土, 水化热, 绝热温升, 叠加式指数函数, 有限元

Analysis of Hydration Heat Effect of Large Volume High-Strength Concrete Based on a New Model of Concrete Adiabatic Temperature Rise

Junlian Li, Xiaojuan Shu, Xiong Liu, Zhiyu Wang, Jianqun Wang, Mingyan Shen

School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: May 31st, 2024; accepted: Jun. 20th, 2024; published: Jun. 28th, 2024

文章引用: 李军连, 舒小娟, 刘雄, 王志宇, 汪建群, 沈明燕. 基于混凝土绝热温升新模型分析大体积高强混凝土水化热效应[J]. 土木工程, 2024, 13(6): 1014-1022. DOI: 10.12677/hjce.2024.136111

Abstract

The adiabatic temperature rise model is one of the most important parameters for analyzing the hydration heat effect of large volume concrete. This article proposes a concrete binomial linear superposition multi parameter exponential function adiabatic temperature rise model that takes into account the difference in hydration reaction rates between C3S and C2S, based on the characteristics of C3S and C2S as the main hydration active components in cement used in concrete. We conducted adiabatic temperature rise tests on one type of ordinary high-strength C50 concrete and another type of high-performance C60 concrete. The new dual term superposition model and the traditional single exponential function model were compared with the test results, and the results showed that the new model fits better with the test results. We apply the new and old models to the finite element modeling and analysis of the hydration heat of large volume concrete in a certain bridge pier body, and compare it with the measured temperature change process. The comparison results show that the temperature change trend obtained from the calculation analysis is in good agreement with the measured temperature change trend, and the overall error value is controlled between 0.1°C and 2.97°C. It can better reflect the actual heating situation of the arch foot structure in the rapid heat release stage.

Keywords

Concrete, Heat of Hydration, Adiabatic Temperature Rise, Stacked Exponential Function, Finite Element

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大体积混凝土水化热控制对桥梁施工质量具有重大影响，而绝热温升模型是大体积混凝土水化热分析的关键。很早就有国内外的学者提出了各种水泥混凝土的绝热温升，双曲线式、指数式、复合指数式是目前常见的描述水化放热过程的绝热温升数学模型[1]-[6]。根据化学反应原理，水泥混凝土在不同龄期的水化放热速率，取决于反应温度、参与反应的材料组分(水泥水化活性物和水)及其含量。绝热水化反应过程即绝热温升过程，不考虑材料比热容变化情况下，绝热温升值、水化度和等效龄期三者之间一一对应。De Schutter G.等提出了一种基于水化度的模型来描述早期混凝土的基本蠕变行为，引入了水化度作为控制参数认为水化度是混凝土基本蠕变的主要影响因素之一[4]。董继红、李占印根据恒温水化放热规律和水化放热行为的温度效应，预测任意温度条件下任一时刻水化放热总量，进而推导出大体积混凝土绝热温升表达式[5]。杨如东等则研究了水泥用量、品种等热学因素和掺合料用量、水胶比、温度(初始温度、环境温度)、外加剂等动力学因素对绝热温升和温升速率的影响规律，并建立的温升速率模型[6]。朱伯芳应用水化度或等效龄期成熟度概念，对水泥混凝土的水化放热过程进行了大量研究[7]。刘方琼、杜应吉、赵永兴等人考虑了混凝土的龄期、水胶比、粉煤灰掺量和温度等多种因素对混凝土绝热温升计算模型的影响，并采用统一的函数来描述不同配合比和温度历程下的混凝土绝热温升过程[8]。Jeong Dong Jin, Kim Taehwan 等基于水化反应的化学原理，将绝热温升的参数与水化物的形成和水化度联系起来，通过分析水化反应的热量释放和混凝土的热传导等因素，建立了绝热温升与水化物形成和含量之间的关

系[9]。De Schutter G., Taerwe L.提出一种适用于普通硅酸盐水泥和高炉矿渣水泥的普遍水化模型，模型考虑了水化过程中的主要反应和物理机制，并通过数学方程描述了水化反应的进展和水化产物的形成过程[10]。Byfors J.通过实验和观察研究了普通混凝土在早期龄期的多个方面，包括温度发展、收缩、变形、强度发展以及其他物理和化学过程。通过实验数据和分析，作者对早期龄期的混凝土性能进行了详细的描述和解释[11]。在水泥混凝土的水化热研究理论上，Arrhenius 提出的化学反应速率式是绝大多数文献应用的基础公式，而材料的化学反应和热学参数需基于试验数据。既有的各种水化放热模型，在考虑材料的化学反应速率时，多按所有活性材料的平均反应速率考虑，认为恒温状态下，水化反应速率与整体反应浓度(水化度)成线性关系，相应导出的放热模型为单项函数模型，反应式中的具体参数根据试验值拟算[12]。Shu Xiaojuan 将水化过程视为为多种组料反应叠加过程，提出了水泥净浆的多参数叠加式水化放热模型，能更好地解释水泥不同活性组分反应速率差异对放热过程的影响[14]。

影响水泥净浆的水化热过程的主要因素为水泥活性材料组分、水灰比与反应温度。但混凝土的水化热过程还会受配合料中其他组分的影响，如减水剂、缓凝剂等。因此，要提高大体积混凝土水化热分析的准确度，最好还是基于实验实测的真实的混凝土水化热参数。本文将文献[14]研究水泥净浆水化热模型的思想移植到水泥混凝土绝热温升模型上，考虑水泥混凝土内水化活性物反应速率的差异，提出了水泥混凝土的多参数指数函数式线性叠加模型绝热温升模型。对于通过理论与试验研究两种不同配合比高强混凝土的绝热温升过程，对比验证绝热温升叠加式新模型与单项式模型，验证了新模型具有更好的拟合精度。文章第 2、3 节介绍了混凝土的绝热温升试验数据与不同绝热温升模型拟合的结果对比。文章第 4 节介绍了将新模型用于建立混凝土的热源函数，对某桥墩大体积混凝土进行有限元水化热分析结果，数值分析结果与工地实测温度数据曲线趋势具有一致性。第 5 小节给出了本文研究结论。

2. 高强混凝土绝热温升实验

2.1. 混凝土配合比参数

测试了两种不同的高强混凝土的绝热温升数值，一种为普通硅酸盐水泥所配置的 C50 混凝土，一种为成品 UHPC 粉料所配置的 C60 混凝土，两种混凝土的实验配合比分别见表 1、表 2。C50 混凝土水泥品牌为江西于都南方万年青水泥有限公司生成的 P·O42.5 型号硅酸盐水泥，UHPC 粉料为中德新亚建筑材料有限公司生产的成品 UHPC 粉料。

Table 1. C50 concrete mix

表 1. C50 混凝土配合比

材料	42.5 硅酸盐水泥(kg)	F 类 II 级煤灰(kg)	S95 级矿渣粉(kg)	河沙(kg)	碎石 1(kg)	碎石 2(kg)	减水剂(kg)	水(kg)
用量	21	2	4	32.5	37.5	15	0.729	7.75

Table 2. UHPC C60 concrete mix ratio

表 2. UHPC C60 混凝土配合比

材料	52.5 硅酸盐水泥(kg)	硅灰(kg)	F 类 I 级煤灰(kg)	石英粉(kg)	石英砂(kg)	减水剂(kg)	水(kg)
用量	36.76	9.19	3.67	9.19	40.44	0.735	8.30

2.2. 混凝土绝热温升试验

本研究采用 TH-2C10 型混凝土热物理参数测定仪，详细测试了 C50 混凝土在 21℃入模温度以及

UHPC 在 22℃入模温度下，两种混凝土 7 天的绝热温升变化过程。绝热温升每次测试间隔时间为 30 s。共测试了两份试样，可以看出在两组数据在 420 min~2160 min 这段时间水化程度是最快的，其最终温升值相差并不大。部分时刻绝热温升结果见表 3。表 3 中并给出了同步测试的某些代表性龄期相应的绝热温升值。

Table 3. Adiabatic temperature rise test results
表 3. 绝热温升试验结果

时间(min)	C50 混凝土	UHPC C60
	绝热温升(修正) (℃)	绝热温升(修正) (℃)
8.00	2.719	3.077
20.00	2.918	3.241
60.00	3.035	3.330
130.00	3.213	3.504
210.00	3.502	3.830
300.00	3.789	4.620
420.00	4.253	6.190
540.00	5.094	10.020
720.00	9.777	21.540
900.00	23.110	27.230
1080.00	32.028	31.330
1440.00	41.384	36.470
2160.00	48.760	42.060
2880.00	50.775	45.550
4320.00	52.391	49.340
7200.00	53.883	52.130
10080.00	54.729	53.300

根据实测数据分析，在 7 h~36 h 这个时间段两组混凝土绝热温升增量速率都是极快的，占前 7 天总量的 80%，而在 6~7 天时间段的绝热温升增量，仅为前 7 天总量的 0.18%左右，可判断在第 7 天时水泥浆石的水化反应基本完成，故按 3~7 天的增长衰减率，以指数衰减关系推算第 100 天绝热温升量。

此外，因本次绝热温升试验实际上是从 8 min 开始，8 分钟之间的温升量在仪器表中并未体现。因此真实的绝热温升值亦在实测温度基础上进行了修正，C50 混凝土修正值为 2.72℃，UHPC C60 修正值为 3.08℃。

3. 混凝土绝热温升新模型

3.1. 混凝土单项指数函数绝热温升模型

混凝土绝热温升一般在 40℃~55℃之间，水化反应在这一温度范围内变化时，恒温等效龄期与实际龄期发展关系相似。在文献[7]中，朱伯芳考虑温度影响的混凝土绝热温升表达式中，提出水化度复合指数函数形式见式(1)

$$\alpha(t)=1-\lambda e^{-m t^n} \tag{1}$$

忽略不考虑混凝土水化过程中比热容与质量的变化,则混凝土某龄期的绝热温升值 ΔT 与绝热最大温升值 T_m 之比,等于该龄期其水化放热量与总水化热之比,即等于水化度,则下式成立:

$$\Delta T\left(t_e\right)=\alpha\left(t_e\right) T_m \tag{2}$$

结合式(1)、式(2)得绝热温升值的表达式:

$$\Delta T\left(t_e\right)=\left(1-\lambda e^{-m t^n}\right) T_m \tag{3}$$

式中, m, n 为根据试验拟合,间接反映材料的水化速率的材料系数。 λ 为小于 1 的修正系数。该绝热温升模型为单项式指数函数模型,本质上是将混凝土内各水化活性材料的水化速率做平均化处理。但实际上,不同水化活性料在不同浓度、不同反应温度下,水化速率差异很大。平均化处理在总量拟合上没有问题,但在不同水化阶段的拟合上,将可能导致明显的偏差。

3.2. 混凝土双项叠加式指数函数绝热温升模型

本文分析的两种混凝土所用水泥的主要活性组分均为 C_2S 和 C_3S 。鉴于此,本文借鉴文献[14]研究水泥净浆水化热的思路,将混凝土的总水化过程假设为两种不同水化速率材料的水化进程的线性叠加过程,将(1)式改为如下的双项叠加式复合指数函数计算模型式(4)

$$\alpha(t)=\alpha_x\left(1-e^{-m_1 t^{n_1}}\right)+\left(1-\alpha_x\right)\left(1-e^{-m_2 t^{n_2}}\right) \tag{4}$$

结合式(2)、式(4)得双项叠加式复合指数函数计算模型绝热温升值的表达式:

$$\Delta T\left(t_e\right)=T_0+\left[\alpha_x\left(1-e^{-m_1 t^{n_1}}\right)+\left(1-\alpha_x\right)\left(1-e^{-m_2 t^{n_2}}\right)\right] T_m \tag{5}$$

混凝土进入绝热温升实验筒的短时搅拌过程,因为瞬时性、材料均匀性、保温条件等原因,很难用理论模型去拟合它,这一现象在实际施工过程中也同样存在。因此,将短时搅拌过程以初始温升 T_0 拟设,将(5)式修正为(6)式。

$$\Delta T\left(t_e\right)=T_0+\left[\alpha_x\left(1-e^{-m_1 t^{n_1}}\right)+\left(1-\alpha_x\right)\left(1-e^{-m_2 t^{n_2}}\right)\right] T_m \tag{6}$$

式中 m_1, n_1, m_2, n_2 为根据试验数据拟合的材料参数。 α_x 和 $(1-\alpha_x)$ 分别表示整体水化反应结束,第一种与第二种活性材料的水化放热量占总水化热之比。时间单位 t 以天计。

3.3. 绝热温升曲线模型对比

在比热容不变假设下,绝热温升过程与水化度过程一致,由实测数据推测得出 100 天后两组试验数据的绝热温升最大值分别为 54.729°C , 53.300°C 。应用式(5)计算出龄期绝热温升理论值,并使用最小二乘法原理,拟合出两组试验的参数 m, n, m_1, n_1, m_2, n_2 。拟合结果见表 4。

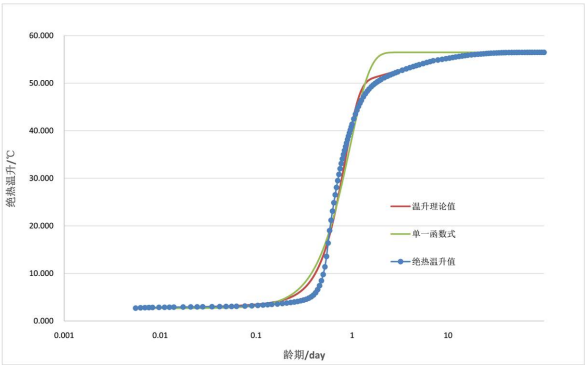
Table 4. Parameter fitting results of hydration heat exothermic calculation model
表 4. 水化热放热计算模型参数拟合结果

(a)									
参数	λ	m	n	m_1	n_1	m_2	n_2	α_x	T_0
拟合结果	0.0475	-1.105	2.07	-1.638	2.85	-0.41	0.74	0.82	2.72

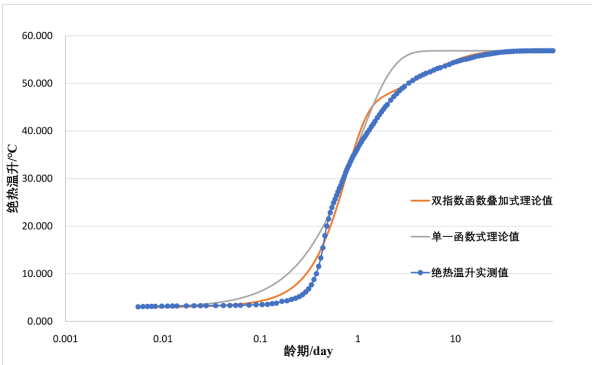
续表

(b)									
参数	λ	m	n	m_1	n_1	m_2	n_2	α_x	T_0
拟合结果	0.0510	-1.01	1.19	-1.74	1.99	-0.304	0.83	0.71	3.08

将式(3)计算出来的绝热温升值作为单一函数式理论值,式(5)计算出来的绝热温升值作为双指数函数线性叠加式理论值,实测数据作为绝热温升实测值,做出两份对比图如图 1 所示。



(a) C50 混凝土绝热温升曲线对比图



(b) UHPC 绝热温升曲线对比图

Figure 1. Model comparison of adiabatic temperature rise curves
图 1. 绝热温升曲线模型对比

分析图 1, 显然, 双项指数函数线性叠加式模型计算理论结果, 与绝热法实测结果十分接近, 理论与实测吻合整体效果理想。实测早期的绝热温升值(实测值)与按模型式计算绝热温升值(理论值)有一定差异, 判断为材料早期水化过程中物态变化显著, 材料比热容并不恒定所致。因此使用双项指数函数式进行修正后的理论值更吻合实际测试结果, 说明双项指数函数式较单项函数式更具有合理性。

4. 大体积混凝土水化热分析

0 0.5 1 1.5 2

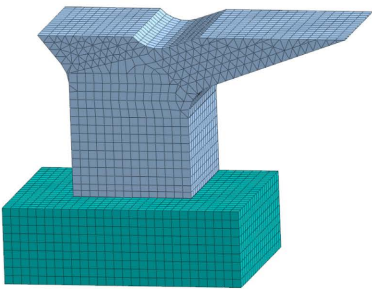


Figure 2. MIDAS/FEA arch foot section model (1/2 model)
图 2. MIDAS/FEA 拱脚段模型(1/2 模型)

江西于都起元大桥主墩采用 C50 混凝土, 胶凝材料用量大, 水化热程度剧烈, 因此在浇筑之前有必

要对大桥实建主墩拱脚段进行有限元水化热分析。本次分析采用 MIDAS/FEA 软件建模, 为了减少模型计算量以及便于查看模型中心部位的分析结果, 在 FEA 中建立拱脚段 1/2 模型并进行网格划分(见 图 2), 同时对承台和拱脚段混凝土的中心切面进行约束, 并对截面采取绝热控温处理。通过分析其水化, 为该大桥的设计和施工提供理论依据和参考。

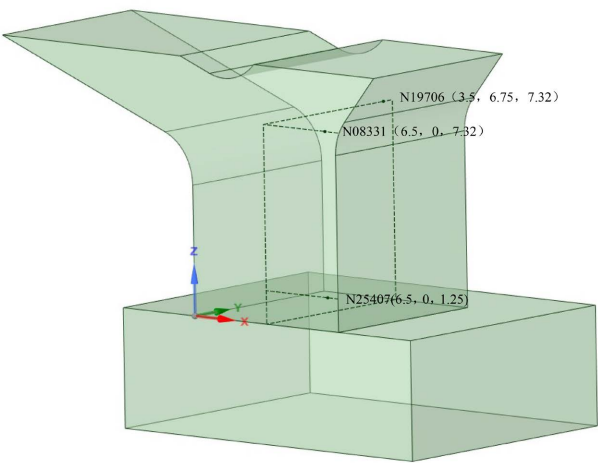


Figure 3. Location diagram of each node
图 3. 各节点位置图

按照现场浇筑混凝土的配合比, 在实验室浇筑 60 L 混凝土试块, 通过混凝土热物理参数测定仪测得其温升函数, 将双指数函数线性叠加式修正后的热源函数代入其 FEA 有限元模型中求解计算, 并选取拱脚段模型横向 1/2 截面处不同位置的 3 个点(见 图 3)的温度变化趋势图进行实测温度值与理论温度值进行分析对比。

为探究两者在实际模型中的温度变化, 在 FEA 中采用单一函数和双指数函数作为热源, 分别求解得出两者的温度场分布及时程变化。同时在模型中提取测点位置的温度变化趋势, 将得到的数据与实测数据进行对比以此来评价修正后的温升函数的精确性。

通过有限元计算, 两种放热模型计算的最高温度场见 图 4。可知采用双指数温升函数计算得到的混凝土内部最高温度为 74.75℃, 出现在 41 h 左右, 而采用单指数温升函数计算得到的混凝土内部最高温度为 79.06℃, 出现在 48 h 左右。在 0.1 d 到 2 d 时间内, 后者混凝土内部温度上升较快, 同时放出的热量更多, 这与绝热温升曲线模型得出的数据是一致的。

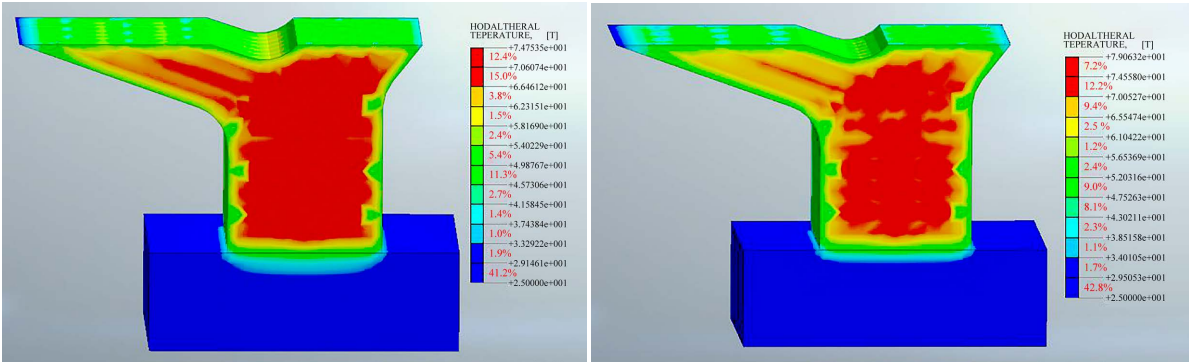


Figure 4. Maximum temperature field of finite element model
图 4. 有限元模型最高温度场

在有限元模型中选取上述 3 个监测节点作温度时程图，并与实际测得的温度进行比较，各节点温度时程变化见下图 5。

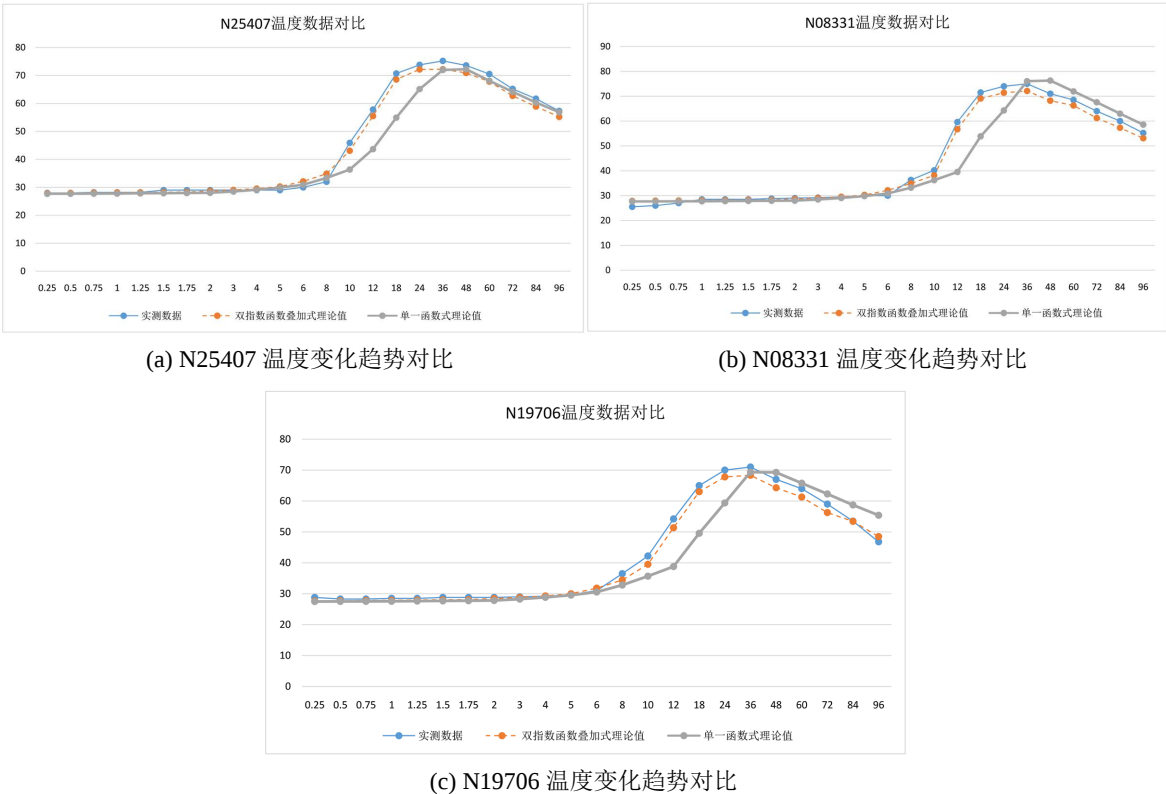


Figure 5. Comparison of theoretical temperature trend and measured temperature trend
图 5. 理论温度变化趋势与实测温度变化趋势对比图

由图 5 可知以双指数函数线性叠加式作为模型中热源函数进行运算分析所得的温度变化趋势与实测所得温度变化趋势吻合度较好，整体误差值控制在 $0.1^{\circ}\text{C}\sim 2.97^{\circ}\text{C}$ 之间，在快速放热阶段能较好地反应拱脚结构的实际升温情况，而采用单一指数式的计算值在温度上升阶段和降温阶段均出现了较大的偏差，水化龄期内多次与实际值偏差在 15°C 以上，准确度有待进一步优化。同时由图 5 可见实测值略高于理论值，推测存在误差的原因为(1) 在实际浇筑过程中温控措施不够理想，冷凝管水温未能达到预设温度 (20°C)；(2) 模型中混凝土表面的放热系数高于实际环境值。除此之外，各节点的温度变化趋势与实际基本一致。

5. 小结与讨论

- (1) 该双项指数函数线性叠加式水化放热模型与绝热法与恒温法试验数据结果吻合良好，特别是早期阶段水化放热集中阶段比单项函数式模型拟合效果更为理想。该多项式模型向下兼容单项式模型。
- (2) 该双项指数函数线性叠加式，基于水化学动力学原理 Arrhenius 公式，故在计算绝热温升上具有一致性。
- (3) 以双项指数函数线性叠加式作为有限元模型中热源函数进行模拟分析得出的温度变化趋势图与实测所得温度变化趋势图基本吻合。
- (4) 使用该双项指数函数线性叠加式进行分析实际工程相较于传统的单项函数式更具吻合性，更适用

于大体积高强混凝土的水化热效应。

参考文献

- [1] 李东, 张晔琛. 混凝土水化放热模型的实验分析和计算[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2021, 27(4): 795-802.
- [2] 朱振洪, 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.
- [3] Zhu, Z.Y., Qiang, S., Zheng, Z.Q., et al. (2013) Determination of Parameters for Hydration Exothermic Model Considering Concrete Temperature Duration by Genetic Algorithm. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, **29**, 86-92.
- [4] De Schutter, G. (2002) Fundamental Study of Early Age Concrete Behaviour as a Basis for Durable Concrete Structures. *Materials and Structures*, **35**, 15-21. <https://doi.org/10.1007/bf02482085>
- [5] 董继红, 李占印. 大体积混凝土绝热温升表达式的推导与试验分析[J]. 盐城工学院学报: 自然科学版, 2010(2): 45-48.
- [6] 杨如东, 权娟娟, 陈健. 水泥水化热与混凝土绝热温升研究综述[J]. 科学技术创新, 2020(4): 100-101.
- [7] 朱伯芳. 考虑温度影响的混凝土绝热温升表达式[J]. 水利发电学报, 2003, 81(2): 69-73.
- [8] 刘方琼, 杜应吉, 赵永兴. 多因素影响下混凝土绝热温升计算模型研究[J]. 人民长江, 2016, 47(7): 97-101.
- [9] Jeong, D.J., Kim, T., Ryu, J. and Kim, J.H. (2021) Analytical Model to Parameterize the Adiabatic Temperature Rise of Concrete. *Construction and Building Materials*, **268**, Article ID: 121656. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121656>
- [10] De Schutter, G. and Taerwe, L. (1995) General Hydration Model for Portland Cement and Blast Furnace Slag Cement. *Cement and Concrete Research*, **25**, 593-604. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00048-h](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00048-h)
- [11] Byfors, J. (1980) Plain Concrete at Early Age. Swedish Cement and Concrete Research Institute.
- [12] Thilakarathna, P.S.M., Kristombu Baduge, K.S., Mendis, P., Vimonsatit, V. and Lee, H. (2020) Mesoscale Modelling of Concrete—A Review of Geometry Generation, Placing Algorithms, Constitutive Relations and Applications. *Engineering Fracture Mechanics*, **231**, Article ID: 106974. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.106974>
- [13] Chu, D.C., Kleib, J., Amar, M., Benzerzour, M. and Abriak, N. (2021) Determination of the Degree of Hydration of Portland Cement Using Three Different Approaches: Scanning Electron Microscopy (SEM-BSE) and Thermogravimetric Analysis (TGA). *Case Studies in Construction Materials*, **15**, e00754. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00754>
- [14] Shu, X., Jiang, Y., Zhao, Y., Xu, Z., Shen, M. and Zhong, X. (2023) Superimposed Hydration Exothermic Model of Cement Slurry Considering Different Reaction Rates of Various Active Substances. *Construction and Building Materials*, **372**, Article ID: 130783. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130783>