

基于水化度的泵送混凝土温升模型及参数反演

程井¹, 魏李威¹, 张玉鑫¹, 胡晓辉²

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098; 2. 上海和翔建设工程有限公司, 上海 201399)

摘要:针对泵送大体积混凝土绝热温升高、早期水化速率快的特点,结合绝热温升试验,构建了基于水化度的水化温升速率模型(简称水化度模型),采用人工蜂群算法对水化度模型、双曲线模型、单指数模型和双指数模型参数进行反演对比分析,将水化度模型应用于5组绝热温升试验结果拟合中,使用4种温升模型对上海某泵闸工程混凝土试块温度场进行了反馈仿真分析。结果表明,水化度模型仿真结果与试验结果吻合较好;水化度模型能反映不同阶段的水化热变化特性,其参数采用分阶段拟合,稳定性好,避免了一般模型参数过多时出现的过拟合问题,能为泵送混凝土结构施工期智能温控提供较准确的温度场数值模拟结果。

关键词:泵送混凝土;大体积混凝土;绝热温升;水化度;人工蜂群算法

中图分类号:TV331

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2021)02-0075-07

Temperature rise model for pumped concrete based on hydration degree and parameter inversion//CHENG Jing¹, WEI Liwei¹, ZHANG Yuxin¹, HU Xiaohui² (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Shanghai Hexiang Construction Engineering Co., Ltd., Shanghai 201399, China)

Abstract: In view of the high adiabatic temperature rise and rapid hydration heat release rate of pumped concrete, a hydration temperature rising rate model based on hydration degree (hydration degree model) was constructed combined with the adiabatic temperature rise tests. Parameter inversion of hydration degree model, hyperbolic model, single exponential model and compound exponential model was performed and compared by the ABC (artificial bee colony) algorithm. The hydration degree model was applied to the fitting of five sets of adiabatic temperature rise test results, and the four temperature rise models were performed a feedback simulation analysis on the temperature field of a concrete test block in a pump gate project in Shanghai. The simulated results show good agreement with the experimental data. Hydration degree model can fully describe the characteristics of the hydration heat release in different stages, and the parameters are fitted in steps, which can greatly avoid the over-fitting problem when too many parameters exist. The model can provide more accurate temperature simulation results for intelligent temperature control during the construction of pumped concrete structures.

Key words: pumped concrete; massive concrete; adiabatic temperature rise; hydration degree; artificial bee colony algorithm

平原地区河流众多,泵闸工程成为平原地区主要的水工建筑物。然而在许多完建和在建工程中,底板、墩墙等结构在施工期就出现了裂缝。这些裂缝不仅对工程外观有影响,也对结构的安全性和耐久性不利。通过对上海及江苏地区近年来完建和在建的泵闸工程大体积混凝土温控防裂现状调查发现,泵闸工程底板、墩墙等部位普遍使用C30及以上的泵送混凝土,其粗骨料级配单一,多为5~25mm碎石,胶凝材料用量高,可达360 kg/m³以上^[1-2]。泵送混凝土

一般具有坍落度大,流动性强,浇筑初期温升快,绝热温升较高^[3-4]等特点。早龄期温度场变化是导致裂缝出现的重要原因之一^[5]。准确地预测混凝土温度场分布对于确定合理的温控防裂措施尤为关键。传统的水化放热模型如指数式、双曲线式和双指数式,因未考虑温度对混凝土水化放热速率的影响而产生较大的偏差^[6-8]。诸多专家提出了同时考虑混凝土龄期和温度效应的水化放热模型,如朱伯芳^[9]提出的带有温度项的绝热温升表达式,张子明

基金项目:贵州省水利厅科技专项经费(KT202003);水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心开放课题(DFZX202001);国家重点研发计划(2018YFC0407103)。

作者简介:程井(1982—),男,副教授、博士,主要从事水工结构计算力学研究。E-mail: cj042@126.com

等^[10-11]提出的基于等效龄期的绝热温升模型。但上述模型的表达式均针对混凝土的温升值进行曲线拟合,未能较好地反映混凝土的水化温升速率,特别是早龄期的水化温升速率。Schutter^[12]较早地提出了基于水化度的水化放热速率模型,但该模型中的部分参数需要在混凝土等温试验中获取,所以难以在实际工程中推广使用。

本文对 Schutter 水化放热速率模型进行了改进,结合绝热温升试验,构建了基于水化度的水化温升速率模型(下文简称水化度模型);结合绝热温升试验结果,将人工蜂群算法应用于水化度模型和3种传统温升模型的参数拟合,并将拟合效果较好的水化度模型进一步应用于5组绝热温升试验结果拟合中;结合工程现场的非绝热温升试验,将推荐的水化度模型应用于混凝土试块的温度场反馈仿真分析中,并与其他传统模型的仿真结果进行对比。

1 基本理论和方法

1.1 水泥水化热释放速率基本理论

依据文献^[12],混凝土中水泥(或其他胶凝材料)的水化度 α 定义为龄期 τ 时累计参加水化反应的胶凝材料与胶凝材料总量之比。由于在试验中难以直接确定水化度 α ,所以通常可用反应度 r 来近似,即某一龄期 τ 时累计水化放热量与水泥完全水化时的放热量之比:

$$r(\tau) = \frac{H(\tau)}{H_{\text{tot}}} = \frac{1}{H_{\text{tot}}} \int_0^{\tau} q(\tau) d\tau \quad (1)$$

式中: $H(\tau)$ 为龄期 τ 时的累计水化反应放热量,J; H_{tot} 为最终水化放热量,J; $q(\tau)$ 为龄期 τ 时的水化放热速率,J/h。

de Schutter^[12]发现在不同温度 T 条件下的 $q \sim r$ 曲线在形状上非常相似,并将得到的 $q \sim r$ 曲线进行标准化处理,得到如下与 T 无关的标准化曲线 $q(r, T)/q_{T, \text{max}} \sim r$:

$$\frac{q(r, T)}{q_{T, \text{max}}} = f(r) = c [\sin(r\pi)]^a \exp(-br) \quad (2)$$

式中: a 、 b 、 c 为曲线拟合参数; $q_{T, \text{max}}$ 为混凝土温度为 T 时的最大水化放热速率。以温度 20°C 为参考值时, $q_{T, \text{max}}$ 可以单独描述为

$$q_{T, \text{max}} = q_{20, \text{max}} g(T) \quad (3)$$

$$\text{其中 } g(T) = \exp\left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273 + T}\right)\right]$$

式中: $q_{20, \text{max}}$ 为混凝土温度为 20°C 时的最大水化放热速率; $g(T)$ 为基于 Arrhenius 方程的温度函数; R 为气体常数, $R=0.00831 \text{ kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; E_a 为混凝土活化能^[13],估算时可取 $33.5 \text{ kJ}/\text{mol}$ 。

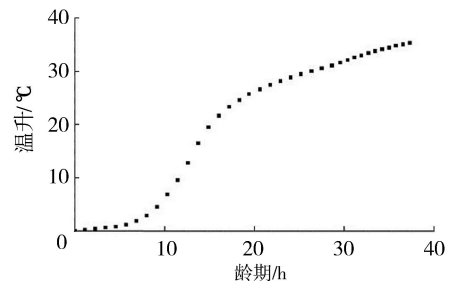
结合式(2)(3)即可得到基于水化度的水化放热速率模型:

$$q(r, T) = q_{20, \text{max}} f(r) g(T) \quad (4)$$

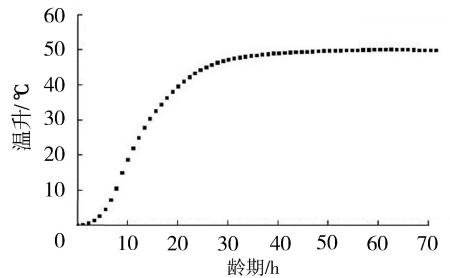
1.2 基于绝热温升试验的水化温升速率模型及其实用算法

上述 Schutter 提出的基于水化度的水化放热速率模型中的部分参数需要在混凝土等温试验中获取。本文对上述模型进行适当改进,结合绝热温升试验,构建了基于水化度的水化温升速率模型及其实用算法。

水化放热量难以直接量测,可用绝热温升来体现。通过混凝土绝热温升试验,可以测得混凝土的水化放热过程。图1为在河海大学水工结构研究所完成的两组试验的混凝土绝热温升曲线,两次试验的测量时间间隔 $\Delta\tau=0.553 \text{ h}$ 。由图1可知,两组温升曲线均呈现前期平稳缓慢,中期逐渐加速,后期又逐渐趋缓。利用温度增量除以测量间隔 $\Delta\tau$,可得温升速率 s 及 $s \sim \tau$ 曲线。将 $s \sim \tau$ 曲线横轴的时间 τ 转变为反应度 r ,可以得到 $s \sim r$ 曲线。



(a) 常态C35



(b) 泵送C35

图1 混凝土绝热温升曲线

考虑到 $q = c\rho s$, c 、 ρ 分别为比热常数和密度常数,参考式(2)可得到如下与 T 无关的标准化温升速率曲线 $s(r, T)/s_{T, \text{max}} \sim r$:

$$\frac{s(r, T)}{s_{T, \text{max}}} = f(r) = c [\sin(r\pi)]^a \exp(-br) \quad (5)$$

其中 $r = T(\tau)/T_0$

式中: T_0 为总温升值,可由绝热温升试验测得或根据混凝土配合比由经验公式算得。

由于实际实验室中常采用绝热温升试验,此时混凝土的温度 T 是不断变化的,需要对式(3)(4)作

出改变,具体公式及做法如下:①利用实测温升数据 $T(\tau)$ 得到变化温度条件下的 $s \sim r$ 曲线;②找出最大温升速率 s_{\max} 及其对应温度 T' ,参照式(3)有 $s_{T,\max} = s_{20,\max}g(T)$,令 $T=T'$, $s_{T',\max} = s_{\max}$,根据 $g(T)$ 的表达式可求得 $s_{20,\max}$,继而求得任意 r 对应的 $s_{T,\max}$;③基于求得的标准化温升速率曲线 $s(r,T)/s_{T,\max} \sim r$,利用优化算法求得式(5)中的参数 a, b, c 。

1.3 瞬态温度场基本理论与有限元求解

1.3.1 基于水化度的瞬态温度场热传导方程

根据热量平衡原理,基于水化度的三维各向同性瞬态温度场热传导方程^[14-15]为

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = h \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \theta_r}{\partial \tau} \quad (6)$$

式中: θ_r 为反应度为 r 时的绝热温升; h 为导温系数。

1.3.2 温度场的有限元求解

根据变分原理,对式(6)在时间域及空间域上进行离散^[16-17],可得温度场的有限元递推方程:

$$\left(\mathbf{H} + \frac{1}{\Delta \tau_n} \mathbf{R} \right) \mathbf{T}_{n+1} - \frac{1}{\Delta \tau_n} \mathbf{R} \mathbf{T}_n + \mathbf{F}_{n+1} = 0 \quad (7)$$

式中: \mathbf{H} 为热传导矩阵; \mathbf{R} 为整体热容矩阵; \mathbf{T}_n 为节点温度列阵; \mathbf{F}_{n+1} 为节点温度荷载列阵; $\Delta \tau_n$ 为时间步长;下标 n 为时段数。由于 $\partial \theta_r / \partial \tau$ 为非已知量,可通过 $\Delta \tau_n$ 时段起始的 \mathbf{T}_n 及 r 进行求解,也可通过中点法进行迭代求解。且对于因水化热导致的荷载项,由于 $\int_0^\infty \frac{\partial \theta_r}{\partial \tau} d\tau = \sum_i (\theta_{r_i} - \theta_{r_{(i-1)}}) \equiv \theta_{r=1} \equiv \theta_0$,该方法能保持任意时间步及差分方法的总水化温升不变,具有较好的稳定性。

1.4 人工蜂群算法

混凝土水化放热模型参数可以通过优化算法来确定。朱岳明等^[18]较早地使用阻尼最小二乘法反演了混凝土热力学参数。随着计算机硬件和软件的发展,粒子群算法、遗传算法等计算精度较高的优化算法在模型参数拟合中得到了广泛应用^[19]。考虑温度效应的水化放热模型参数个数较多,反分析难度增加。研究表明,人工蜂群(artificial bee colony, ABC)算法具有控制参数少,全局搜索能力强,适合于求解多参数问题等特点^[20]。

ABC算法是Karaboga在2005年提出的一种智能优化方法。该算法模仿了自然界蜜蜂寻求最优质蜜源的行为,在设定的参数空间中搜索满足目标函数的最优解。张石等^[21]于2014年利用ABC算法反演温度场参数,并用正交试验法选取初始种群。算法的基本步骤如下:①初始化种群:选择合适的蜜源数 F_N ,也等于雇佣蜂和跟随蜂数。依据边界约束条件,对可行解区域进行随机抽样,生成初始种群,每个解

$\mathbf{x}_i = (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n_p})$ ($i=1, 2, \dots, F_N$) 是一个 n_p 维的向量, n_p 为待优化参数的个数。可以采用二分法、正交试验法或均匀分布的随机抽样法获取初始解。②种群中的蜜蜂之间进行信息交流,对解的优劣进行衡量。③雇佣蜂对 \mathbf{x}_i 进行一次领域搜索,寻找新的蜜源 $\mathbf{v}_i^{(1)} = (v_{i,1}^{(1)}, v_{i,1}^{(1)}, \dots, v_{i,n_p}^{(1)})$ (式(8))。④选择蜜源 $\mathbf{v}_i^{(1)}$ 和 \mathbf{x}_i 之间适应度较好的作为蜜源,即若 $\mathbf{v}_i^{(1)}$ 优于 \mathbf{x}_i ,则用 $\mathbf{v}_i^{(1)}$ 替换 \mathbf{x}_i 。⑤计算蜜源 \mathbf{x}_i 的概率 p_i ,即 \mathbf{x}_i 适应度占总适应度的比重。依据 p_i ,给所有的雇佣蜂依次指定观察蜂数量,并由式(8)产生新蜜源 $\mathbf{v}_i^{(2)}$,同样根据适应度选择较优质蜜源作为新蜜源。⑥如果蜜源 \mathbf{x}_i 经过阈值的循环次数 V_{limit} 后不能产生更好的蜜源,则放弃解 \mathbf{x}_i ,相应的雇佣蜂成为侦察蜂。⑦最优解的产生:如果不满足收敛条件,返回步骤③,直到满足收敛条件或循环次数后,输出最优质蜜源。

$$v_{i,j}^{(1)} = x_{i,j} + \Phi_{i,j}(x_{i,j} - x_{i,k}) / (F_N - 1) \quad (8)$$

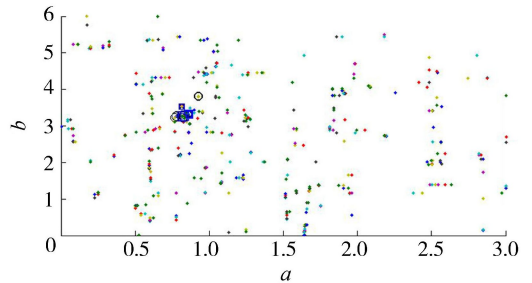
式中: $\Phi_{i,j}$ 为 $[-1, 1]$ 中的随机数。

2 水化度模型验证与应用

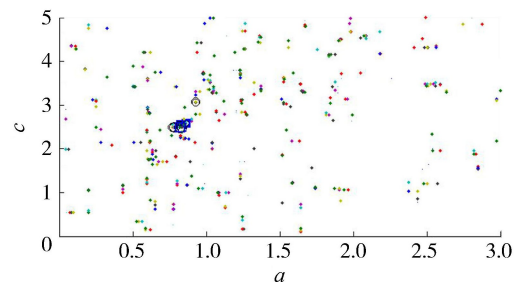
2.1 模型参数反演与模型对比分析

使用水化度模型及不考虑温度效应的单指数、双曲线、双指数模型对图1(b)中的绝热温升试验结果进行拟合,并对各模型拟合结果进行分析。

各个模型所需的参数均使用ABC算法在参数空间中寻求最优解。参数优化过程中,蜜源数 $F_N = 100$,参数 a, b, c 的搜索空间分别为 $(0, 3.0)$, $(0, 6.0)$, $(0, 5.0)$,最大循环次数为100。循环次数为20次时,水化度模型参数 a, b, c 的蜜源分布情况见图2。



(a) 参数(a, b)



(b) 参数(a, c)

图2 水化度模型参数蜂群算法优化过程

通过式(5)拟合得到的标准化温升速率曲线 $f(r)$ 与实测结果对比见图3(a)。图3(b)为温升速率与水化度的关系。几种温升模型的参数拟合结果汇总如表1所示,温升值以及温升速率曲线拟合结果与实测数据的对比见图4。结果表明:①从温升值来看,双曲线模型和指数模型拟合效果较差,均方根误差都在3.5℃以上;而水化度模型和双指数模型均方根误差不超过0.8℃;②从温升速率来看,水化度模型较为理想,均方根误差为0.13℃/h,而双曲线和单指数模型拟合结果较差,前期水化热释放率过高,都只能反映出混凝土整体的水化放热量,不能很好地表示水化放热过程。综上,水化度温升速率模型不仅能较好地拟合绝热温升曲线,还能较好地反映混凝土水化度及温升变化对水化速率的影响,更适用于泵送混凝土结构的温度仿真分析。

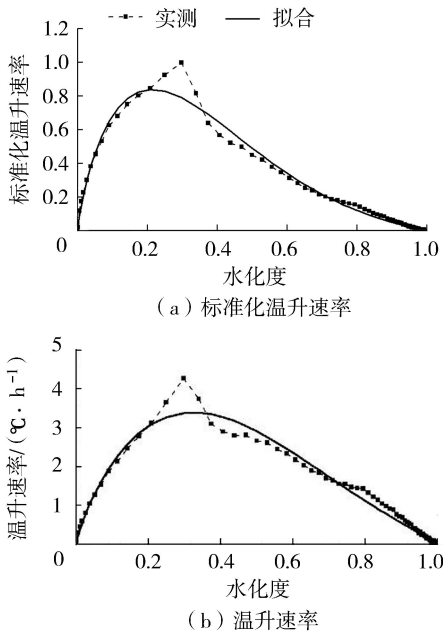


图3 基于水化度的标准化温升速率和温升速率拟合值与实测值对比

2.2 水化度模型应用

将水化度模型进一步应用于5组绝热温升试验结果的拟合中。

绝热温升试验结合上海地区在建的3个泵闸工程的泵送混凝土材料开展。混凝土配合比见表2。模型参数使用ABC算法反演,拟合结果如图5和

表1 各温升模型参数拟合结果(基于人工蜂群算法)

模型名称	温升速率拟合公式	温升拟合公式	温升速率均方根误差/(℃·h ⁻¹)	温升值均方根误差/℃
水化度模型	$s(r, T) = 2.46s_{T, \max} [\sin(r\pi)]^{0.81} e^{-3.22r}$ 其中 $r = \frac{T(\tau)}{49.46}$, $s_{T, \max} = 2.86g(T)$	$\theta(\tau) = \int_0^\tau s(r, T) dt$	0.13	0.46
单指数模型	$s(\tau) = 72.99e^{-1.37\tau}$	$\theta(\tau) = 53.28(1 - e^{-1.37\tau})$	0.74	3.54
双曲线模型	$s(\tau) = 53.47 / (0.78 + \tau)^2$	$\theta(\tau) = 68.55\tau / (0.78 + \tau)$	0.84	4.39
双指数模型	$s(\tau) = 214.07e^{-2.29\tau^{1.89}} \tau^{0.89}$	$\theta(\tau) = 49.46(1 - e^{-2.29\tau^{1.89}})$	0.27	0.78

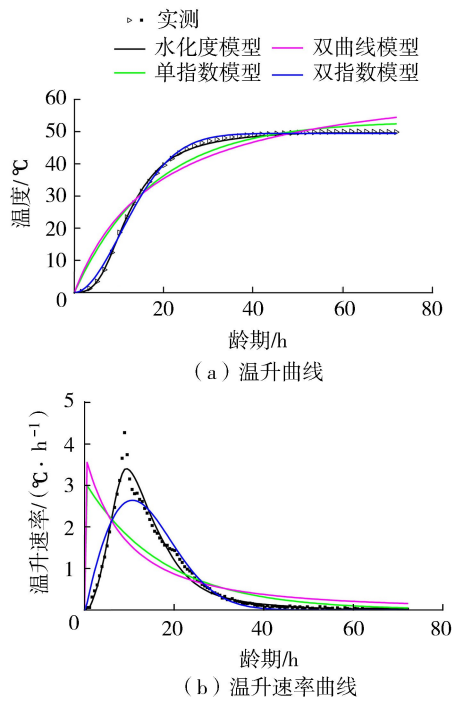


图4 各模型拟合温升曲线和温升速率曲线与实测数据对比

表3。由图5和表3可知,不同初始温度下的混凝土绝热温升数据与拟合曲线吻合良好,也进一步说明采用水化度模型来描述不同温度历程下的混凝土温升过程是可靠的。

表2 试验混凝土配合比 kg/m³

混凝土	水泥	粉煤灰	矿粉	砂	石子	水
HTG-C35	275	35	80	784	1030	170
ZJH-C30	240	56	70	795	1028	160
NXJ-C30	266	53	35	807	1027	170

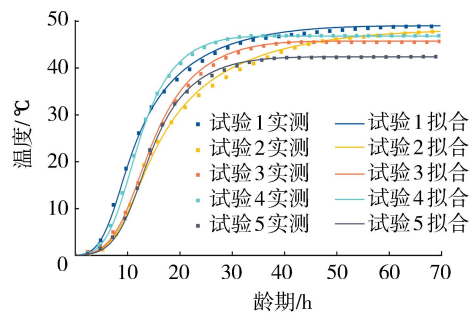


图5 水化度模型拟合值与试验数据比较

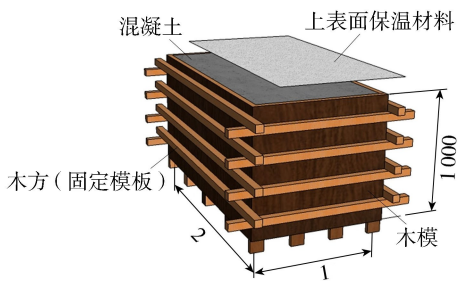
表3 模型参数拟合结果

试验编号	试验材料	初始温度/°C	模型参数					温升值均方根误差/°C
			a	b	c	T_0	$s_{20,max}$	
1	HTG-C35	28.0	0.81	3.22	2.46	49.06	1.90	0.70
2	HTG-C35	22.0	0.81	3.22	2.46	48.18	1.65	0.47
3	ZJH-C30	25.8	0.78	3.36	2.76	45.79	1.45	0.83
4	ZJH-C30	32.0	0.78	3.36	2.76	46.81	1.37	0.79
5	NXJ-C30	22.4	0.80	2.82	2.06	42.43	1.35	0.76

3 工程实际温度场仿真分析

结合上海 HTG 泵闸工程开展了现场大体积混凝土非绝热温升试验,并使用水化度模型与双曲线模型、单指数模型、双指数模型对混凝土试块温度场进行反馈仿真对比分析。

试块见图 6,长、宽、高分别为 2.0 m、1.0 m、1.0 m,四周及底面用 2 cm 的木模板固定,上表面覆盖保温材料。试块所用混凝土材料与 2.2 节试验 1 相同,配合比见表 2HTG-C35 材料的值。混凝土中水泥标号为 P·O42.5,粉煤灰品类为 F 类 II 级,矿粉等级为 S95,石子粒径为 5~20 mm,中砂细度模数为 2.4。试验过程中对气温进行实时监测并记录,实测气温过程线见图 7。



(a) 模型(单位:m)



(b) 实物

图6 试验混凝土块

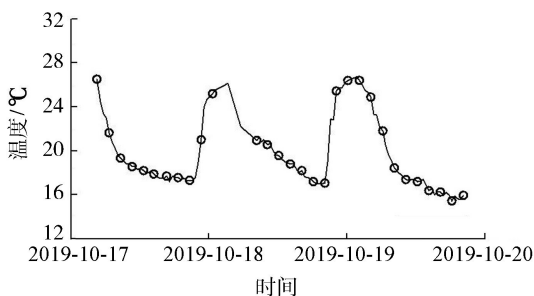


图7 实测气温过程线

混凝土试块测区布置见图 8,布置了 2 个监测断面 A—A 和 B—B,每个断面布置 5 个温度测点,以断面 A—A 为主要监测断面。泵送混凝土 10 min 内一次性浇筑完成,实测浇筑温度为 26.4°C。有限元模型见图 9,共有节点 9672 个,单元 8280 个。混凝土导温系数取 0.13 m²/d,顶面覆盖保温被后的等效表面放热系数为 0.20 m/d,其余各面木模板等效表面放热系数为 0.17 m/d。边界温度采用实测气温数据。4 种模型的温度计算结果均方根误差见表 4。5 个测点的实测温度值与反馈分析结果对比见图 10。

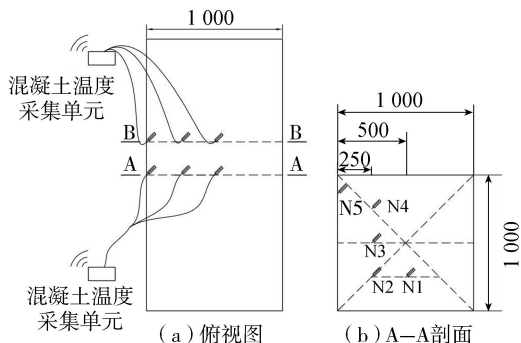


图8 现场试验测温布置(单位:mm)

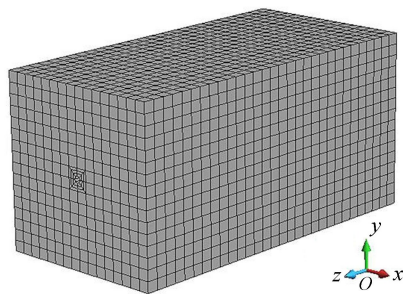


图9 有限元模型

表4 各模型温度计算结果均方根误差 °C

模型	前 1.3 d	后 1.3 d	整体
水化度模型	1.01	2.21	1.73
单指数模型	4.28	1.87	3.31
双曲线模型	4.28	1.60	3.23
双指数模型	5.86	3.15	4.74

由表 4 和图 10 可知:

a. 4 种模型计算结果与实测数据趋势基本相符,在混凝土浇筑前期,因胶凝材料水化放热,整体温升速率较快,随着水化反应的进行,整体温升速率趋于平缓。混凝土浇筑 0.3 d 内,气温降幅较大,同

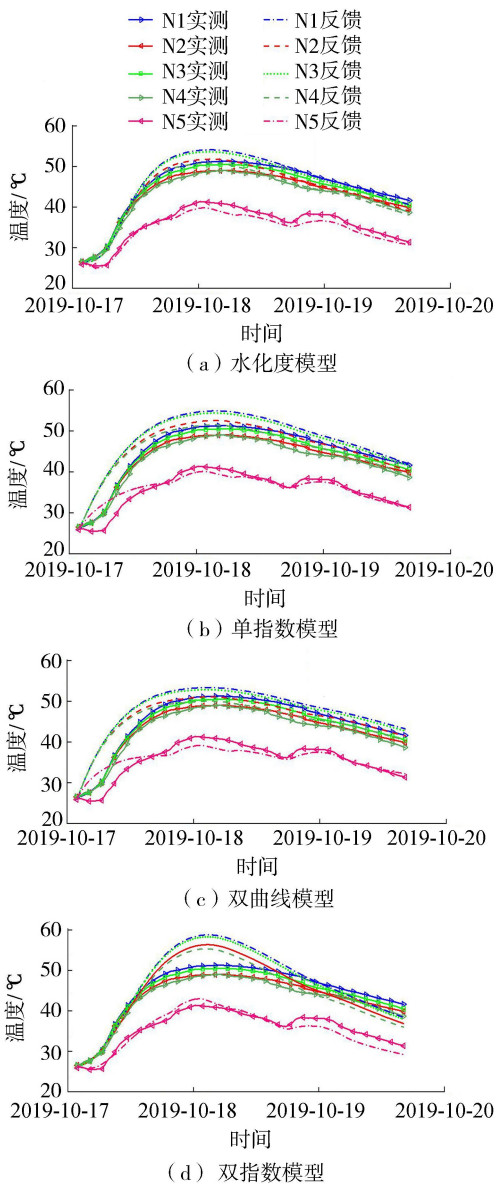


图10 测点实测与反馈仿真温度过程线对比

时混凝土水化放热速率较小,故实测混凝土温度值在0~0.3d上升较为缓慢,靠近上表面及侧模的N5测点温度还有缓慢下降的趋势。

b. 根据5个测点实测值与模型计算结果的接近程度,4种模型从优到劣的顺序为水化度模型、单指数模型、双曲线模型、双指数模型,分析原因如下:双曲线模型和单指数模型前期计算值与绝热温升试验拟合结果较差;在散热条件下,实际混凝土温度比绝热温升条件下的温度低,双指数模型虽然与绝热温升曲线拟合较好,但不能反映水化热释放过程受温度变化的影响,因此,计算结果比实际偏高;水化度模型能较好地反映实际温度变化过程,反馈结果与实测值吻合良好。

c. 采用水化度模型得到的计算结果与实测值的最大偏差出现在龄期0.84d,5个测点计算温度与实测值相差最大不超过3℃。考虑到实际光照、

风速等各种复杂因素的影响,误差在工程可接受范围内。因此基于绝热温升试验的温升速率模型实用算法能够可靠地预测大体积混凝土早龄期温度场。

4 结论

a. 针对绝热温升试验拟合结果,双曲线模型和单指数模型只有两个控制参数,适应性差,拟合结果不理想;双指数模型及水化度模型拟合效果较好。

b. 根据现场非绝热试验仿真结果,水化度模型显著优于其他3种模型,主要原因在于该模型不仅能较好地拟合绝热温升曲线,还能较好地反映混凝土水化度及温升变化对水化速率的影响,更适合于泵送混凝土结构的温度仿真分析。

c. 人工蜂群算法具有简单灵活、自适应能力强、不易收敛于局部最优解的特点,将其应用于绝热温升模型参数的拟合中,有效提高了水化温升模型参数的反演效率,获得了较好的拟合效果。

参考文献:

- [1] 夏国春. 江苏省水工泵送混凝土温控技术研究[D]. 南京:河海大学,2007.
- [2] 郭高贵,许朴. 泵闸工程施工期温度应力数值仿真分析[J]. 城市道桥与防洪,2016(2):166-168. (GUO Gaogui, XU Pu. Numerical simulation analysis of temperature stress in pump gate engineering construction period[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2016(2):166-168. (in Chinese))
- [3] 由国文,郭磊,陈守开. 寒潮作用下大型水闸施工期温控防裂仿真分析[J]. 水利水电科技进展,2015,35(3):71-74. (YOU Guowen, GUO Lei, CHEN Shoukai. The simulation study on temperature control and crack prevention of large sluice under cold wave strike during construction[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(3):71-74. (in Chinese))
- [4] 王振红,朱岳明,于书萍. 薄壁混凝土结构施工期温控防裂研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2007(6):773-778. (WANG Zhenhong, ZHU Yue ming, YU Shuping. Study on temperature control and crack prevention of thin-walled concrete structures during the construction period[J]. Journal of Xi'an University of Agriculture & Technology (Natural Science Edition), 2007(6):773-778. (in Chinese))
- [5] 许朴,朱岳明,贲能慧. 混凝土绝热温升计算模型及其应用[J]. 应用基础与工程科学学报,2011,19(2):243-250. (XU Pu, ZHU Yue ming, BEN Nenghui. Model of adiabatic temperature rise of concrete and its application [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2011, 19(2):243-250. (in Chinese))
- [6] 韩燕华,傅少君,王书法. 基于水化度的热学参数对混

- 凝土温度场影响分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2019, 52(12):1064-1069. (HAN Yanhua, FU Shaojun, WANG Shufa. Influence of thermal parameters on temperature field of concrete based on hydration degree [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2019, 52(12):1064-1069. (in Chinese))
- [7] 崔激, 陈王, 王宁. 早期混凝土热学参数优化及温度场精确模拟[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(3): 161-167. (CUI Wei, CHEN Wang, WANG Ning. Early concrete thermal parameters optimization and accurate thermal field simulation [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2014, 46(3): 161-167. (in Chinese))
- [8] 姚武, 王伟. 混凝土绝热温升的数值模拟[J]. 水利学报, 2014, 45(5): 626-630. (YAO Wu, WANG Wei. Numerical simulation of adiabatic temperature rise of concrete [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(5): 626-630. (in Chinese))
- [9] 朱伯芳. 考虑温度影响的混凝土绝热温升表达式[J]. 水力发电学报, 2003(2): 69-73. (ZHU Bofang. A method for computing the adiabatic temperature rise of concrete considering the effect of the temperature of concrete [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2003(2): 69-73. (in Chinese))
- [10] 张子明, 宋智通, 黄海燕. 混凝土绝热温升和热传导方程的新理论[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002, 30(3): 1-6. (ZHANG Ziming, SONG Zhitong, HUANG Haiyan. New theory on adiabatic temperature rise and heat conduction equation of concrete [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2002, 30(3): 1-6. (in Chinese))
- [11] 张子明, 冯树荣, 石青春, 等. 基于等效时间的混凝土绝热温升[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(5): 573-577. (ZHANG Ziming, FENG Shurong, SHI Qingchun, et al. Adiabatic temperature rise of concrete based on equivalent time [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2002, 32(5): 573-577. (in Chinese))
- [12] DE SCHUTTER G. Hydration and temperature development of concrete made with blast-furnace slag cement [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(1): 143-149.
- [13] BIE Yajing, QIANG Sheng, SUN Xiao, et al. A new formula to estimate final temperature rise of concrete considering ultimate hydration based on equivalent age [J]. Construction and Building Materials, 2017, 142(3): 514-520.
- [14] 张研, 蒋林华, 储洪强. 混凝土早期热-力学模型及工程应用[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(5): 65-68. (ZHANG Yan, JIANG Linhua, CHU Hongqiang. Thermo-mechanical model of concrete at early age and its engineering application [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(5): 65-68. (in Chinese))
- [15] 马跃峰. 基于水化度的混凝土温度与应力研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [16] CHENG Jing, LI T C, LIU Xiaoqing, et al. A 3D discrete FEM iterative algorithm for solving the water pipe cooling problems of massive concrete structures [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2016, 40(4): 487-508.
- [17] 程井, 常晓林, 周伟, 等. 基于无单元伽辽金法的水工结构温度应力及温度裂纹扩展计算[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, 41(4): 26-30. (CHENG Jing, CHANG Xiaolin, ZHOU Wei, et al. Simulation of thermal stress and crack propagation in hydraulic structures based on EFGM [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2009, 41(4): 26-30. (in Chinese))
- [18] 朱岳明, 刘勇军, 谢先坤. 确定混凝土温度特性多参数的试验与反演分析[J]. 岩土工程学报, 2002(2): 175-177. (ZHU Yueming, LIU Yongjun, XIE Xiankun. Determination of thermal parameters of concrete by reverse analysis of test results [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002(2): 175-177. (in Chinese))
- [19] 朱振洪, 强晟, 郑占强. 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 Zhenyang, QIANG Sheng, ZHENG Zhanqiang. 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. (in Chinese))
- [20] 钱坤, 苏国韶. 人工蜂群算法在渠道断面优化设计中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(3): 57-60. (QIAN Kun, SU Guochao. Application of artificial bee colony algorithm to optimization of channel section [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(3): 57-60. (in Chinese))
- [21] 张石, 李同春, 程井, 等. 基于人工蜂群算法的大体积混凝土温度场参数反演[J]. 水电能源科学, 2014, 32(11): 115-117. (ZHANG Shi, LI Tongchun, CHENG Jing, et al. Parameter inversion of massive concrete temperature field based on Artificial Bee Colony Algorithm [J]. Water Resources and Power, 2014, 32(11): 115-117. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-09-30 编辑: 雷燕)