

温度问题现场反分析与施工反馈

刘勇军¹, 聂跃高²

(1. 广东省广州市水利局, 广东 广州 510640; 2. 广东省东莞市水利局, 广东 东莞 511700)

摘要 根据现场实测数据所进行的反分析获取温度计算模型和参数, 再把反分析得到的模型和参数通过仿真计算预测下一步施工时的温度和应力状况, 指导下一步施工, 即建立了温度控制反馈机制, 并在淮河入海水道淮安立交地涵工程中获得了较好的应用效果. 同时还提出了能较准确地表达掺缓凝剂混凝土绝热温升特性的指数双曲线型表达式.

关键词 温度问题; 反分析; 绝热温升; 缓凝剂; 反馈模式

中图分类号: TV315 文献标识码: A 文章编号: 1000-1980(2003)05-0530-04

在大体积混凝土中, 温度问题常常成为工程控制的关键问题之一^[1]. 近几年来, 虽然已能对大体积混凝土温度和应力进行较为详细准确的仿真计算分析^[2~4], 但对温度参数的研究却相对滞后, 而温度参数的精度会直接影响到温度仿真计算结果的可靠性甚至成败. 以往温度参数主要通过试验或经验公式获得, 代价高且精度难易保证. 笔者通过工程建立反馈机制, 利用现场实测值进行参数反分析, 获得了温度计算参数. 该参数既可用于校正以前的温度试验参数, 又可用于后续结构的计算及指导工程下一阶段的施工. 同时, 笔者还建立了掺加了缓凝剂的混凝土的新的绝热温升模型, 并在实际工程中得到了应用.

1 温度反问题

1.1 计算方程

反分析可分为系统辨识和参数辨识, 系统辨识是确定模型结构, 参数辨识是在模型结构已知的情形下确定模型中的某些或全部参数. 温度计算的微分方程组为

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + f(\tau) \\ T = g(x) & \tau = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial x} = 0 & \tau > 0, x \in \Gamma_2 \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \beta(T - T_a) & \tau > 0, x \in \Gamma_3 \end{cases} \tag{1}$$

式中: T_a ——环境温度; $f(\tau)$ ——绝热温升随时间变化的函数; $g(x)$ ——初始温度分布函数; Γ_2 ——第二类边界; Γ_3 ——第三类边界. 如果给定 T_a , $f(\tau)$, $g(x)$ 及过界条件, 整个模型结构即可确定, 并存在确定性的解. 但在温度反问题中, 这些都可能是需要反求的函数.

在混凝土温度计算常用的温度参数中, 固体的比热容 c 变化较小, 可直接通过试验确定或通过经验公式获得. 导热系数 λ 和导温系数 a 存在关系式 $a = \lambda / (c\rho)$. 导温系数 a 、表面放热系数 β 和绝热温升特性参数, 由于实验代价昂贵且不易准确确定, 因此可用现场实测值通过反分析求得.

1.2 反分析方法

温度反分析的目标函数取为

$$F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} (T_{i,j} - \overline{T}_{i,j})^2 \tag{2}$$

式中: λ_{ij} ——加权系数, 根据测量点与测量时刻的重要性而定; $T_{i,j}$ ——第 i 时刻第 j 点的温度计算值;

$\overline{T}_{i,j}$ ——第 i 时刻第 j 点的温度实测值.

反分析方法有正法和逆法 2 种. 对于复杂的工程问题,因逆法不太适用,故大多采用正法^[5]. 在最优化技术中,直接法是正法求解的有力工具. 常用的直接法有模式搜索法、变量轮换法、单纯形法、鲍威尔法、可变容差法、复合形法等^[6~8]. 近几年又出现了遗传算法等新的反分析方法.

2 施工反馈模式

为了在整个工程中对温度问题有效地进行监控,必须建立恰当的温控反馈模式. 具体步骤为:(a)施工前根据混凝土的配合比用经验公式或类比方法初步确定混凝土的温度计算模型和计算参数,计算得到初步的温度场和应力场,并作为混凝土施工的部分依据;(b)施工开始后在混凝土中布置若干实测点,测定混凝土不同龄期的温度值,同时确定外界环境的变化;(c)对实测值进行反分析,修正温度计算模型和计算参数;(d)再利用修正后的模型和参数进行下一阶段混凝土的仿真计算,预测其温度和应力状况,用于指导下一阶段混凝土的施工;(e)再实测,修正,如此循环反复. 如图 1 所示. 施工预测的最终目的就是使计算模型和参数更加准确和精确,使仿真计算能更好地指导施工.

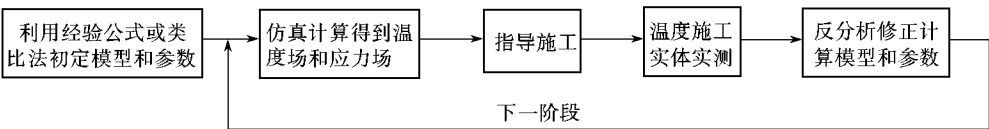


图 1 施工反馈模式
Fig.1 Construction feedback model

3 温度多参数反分析及施工预测实例

3.1 工程概况

淮河入海水道淮安枢纽淮安立交地涵是淮河入海水道的控制性工程,也是目前亚洲最大的立交地涵,地涵上层是京杭运河,下层是淮河入海水道. 地涵结构如图 2(a)所示. 模板采用竹胶模板,厚 1.2 cm. 混凝土养护采用草袋覆膜养护. 混凝土掺加了 2% 的 JM-Ⅱ 外加剂(起减水、缓凝及增强抗裂性的作用).

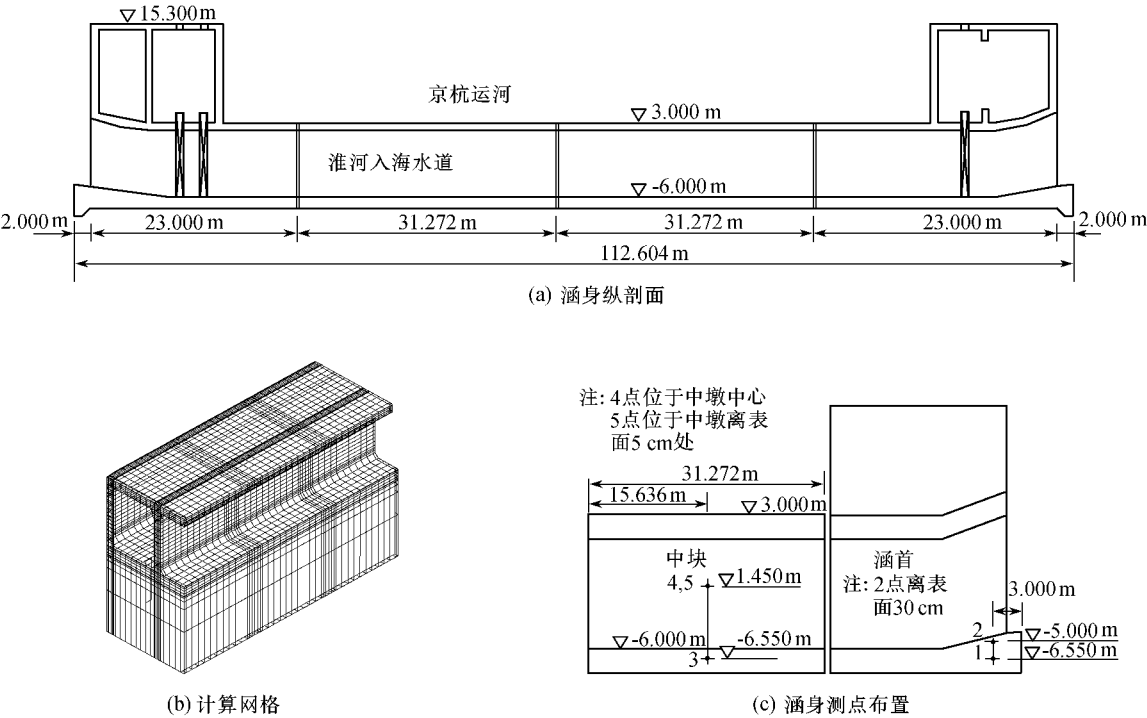


图 2 淮安立交地涵剖面、计算网格及测点布置

Fig.2 Profile, caculating mesh and distribution of measurment points of the Huai 'an underground culvert

3.2 反分析

反分析需进行施工模拟仿真计算,以更精确地求得混凝土真实的温度场.笔者利用自行编制的三维非稳定温度场应力场计算分析程序(PTSA)进行计算.计算网格共划分 10 364 个单元,12 600 个节点,如图 2(b)所示.整个计算过程共划分为 105 个时段.混凝土浇筑时共布置 5 个测点,其布置如图 2(c)所示.

3.2.1 绝热温升模型的改进

如前所述,绝热温升的模型有多种,需根据具体情况进行调整.利用笔者提出的修正复合指数式与指数双曲线式的模型分别进行反分析,结果如表 1 所示.

表 1 掺缓凝剂混凝土绝热温升模型反分析结果

Table 1 Back analyzed value by concrete adiabatic temperature rise model for concrete mixed with inhibiting agent

模型	$\theta_0/^\circ\text{C}$	a 或 n	b 或 ξ	τ_0	方差和	反分析次数	表达式
修正复合指数式	30.176	$a = 0.866$	$b = 1.154$	0.500	183.131	297	$\theta = \begin{cases} 0 & \tau < \tau_0 \\ \theta_0(1 - e^{-a(\tau - \tau_0)^b}) & \tau \geq \tau_0 \end{cases}$
指数双曲线式	34.164	$n = 1.331$	$\xi = 1.470$	0.500	158.913	602	$\theta = \begin{cases} 0 & \tau < \tau_0 \\ \frac{\theta_0(\tau - \tau_0)^\xi}{n + (\tau - \tau_0)^\xi} & \tau \geq \tau_0 \end{cases}$

注 θ_0 是最终绝热温升值; τ 是混凝土龄期; a, b, ξ, τ_0 是相关系数.

由表 1 可看出,修正复合指数式和指数双曲线式误差较小.其中 τ_0 是由缓凝剂缓凝引起的, τ_0 的大小视掺加缓凝剂的多少和种类,可根据现场实测值加以确定.该工程掺加 2% 的 JM-Ⅱ 外加剂的混凝土前 12 h 混凝土水化极小,因而 τ_0 取为 0.5.

3.2.2 温度参数反分析

由温度实测值进行反分析,可多个温度参数一起反分析.取指数双曲线式, $\tau_0 = 0.5$,应用快速单纯形法进行反分析计算,经过 1 782 次计算,反分析得到惟一的一组温度参数,如表 2 所示.从表 2 可看出,经验值和反分析值比较接近,没有出现异常值,因而反分析是可靠的.由反分析参数算得的温度值和实测值的比较如图 3 所示.

表 2 反分析得到的地涵混凝土的温度计算参数

Table 2 Temperature calculating parameters of culvert concrete obtained by back analysis

参数	导热系数 $/(m^2 \cdot h^{-1})$	导热系数 $/(kJ \cdot (m \cdot h \cdot ^\circ C)^{-1})$	表面散热系数(有模板) $/(kJ \cdot (m^2 \cdot h \cdot ^\circ C)^{-1})$	表面散热系数(草袋覆盖) $/(kJ \cdot (m^2 \cdot h \cdot ^\circ C)^{-1})$	绝热温升 $/^\circ\text{C}$
经验值	0.004 15	9.43	20.44	12.32	$31.6\tau/(1.5 + \tau)$
反分析值	0.003 79	8.33	18.02	8.01	34.164

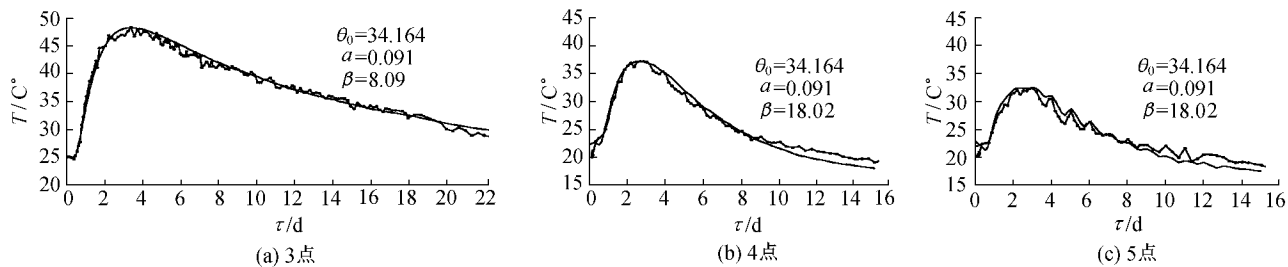


图 3 反分析参数计算的温度值和实测温度值的比较

Fig.3 Comparison between the temperature calculated with back analysis parameters and the measured data

3.3 反馈计算

下一阶段的施工时间为:底板,2001 年 11 月 3 日~5 日;墩墙,11 月 25 日~27 日;顶板,12 月 17 日~19 日.利用表 2 反分析参数和相应的力学参数对图 2(b)所示网格进行计算,得到了 4,5 点及中间点的应力变化曲线,如图 4 所示.从图 4 可看出,整个墩墙的最大拉应力均未超过混凝土当时的抗拉强度,因而可断定地涵基本不会开裂.现场观测表明,从施工期到竣工,均没有出现肉眼可见的裂缝.

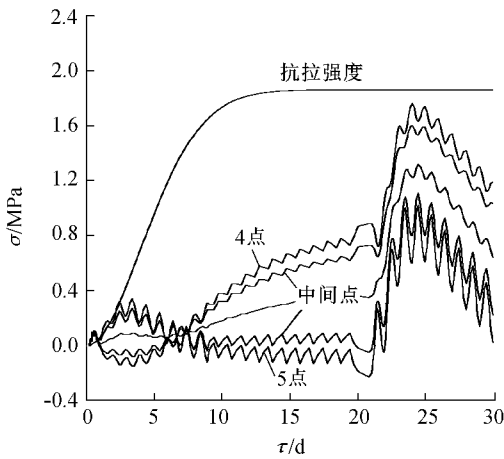


图 4 4,5 点及中间点应力变化曲线

Fig.4 Stress curves for points 4 and 5 and the middle points between them

4 结 论

建立了温度问题现场反分析和温度控制反馈模式,利用反分析手段修正了掺缓凝剂混凝土的绝热温升模型,并推导了新的混凝土绝热温升模型,应用结果表明,新模型能更好地反映实际情况,利用反分析可得到温度计算的多个参数,并可利用这些参数进行施工预测计算。

参考文献：

[1] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].北京:中国电力出版社,1999.622—632.
[2] 曹为民,吴健,闪黎.水闸闸墩温度场及应力场仿真分析[J].河海大学学报(自然科学版),2002,30(5):48—52.
[3] 张子明,张研,宋智通.水化热引起的大体积混凝土墙温度分析[J].河海大学学报(自然科学版),2002,30(4):22—27.
[4] 张子明,郭兴文,杜荣强.水化热引起的大体积混凝土墙应力及开裂分析[J].河海大学学报(自然科学版),2002,30(5):12—16.
[5] 吕爱钟,蒋斌松.岩石力学反问题[M].北京:煤炭工业出版社,1998.39—40.
[6] 陈宝林.最优化理论与算法.北京[M].清华大学出版社,1989.411—432.
[7] 希梅尔布劳 D M.最优化计算方法[M].张义译.北京:科学出版社,1981.181—192.
[8] 席少霖,赵凤治.最优化计算方法[M].上海:上海科学技术出版社,1983.370—377.

Field back analysis of temperature problems and construction feedback

LIU Yong-jun¹, NIE Yue-gao²

(1. Guangzhou Water Conservancy Bureau, Guangzhou 510640, China ;
2. Dongguan Water Conservancy Bureau, Dongguan 511700, China)

Abstract A temperature calculating model and related parameters are obtained by back analysis of field measured data. The model and parameters obtained are used to predict the temperature and stress state of concrete by simulating calculation so as to guide the further construction, thus a temperature control and feedback mechanism is formed. The effectiveness of the model is verified by its application to the Huai'an underground culvert project. Furthermore, an exponential hyperbolic expression is proposed to describe the adiabatic temperature rise of concrete mixed with inhibiting agents. Practice shows that the formula can give accurate description of the characteristics of adiabatic temperature rise of the concrete.

Key words temperature problem ; back analysis ; adiabatic temperature rise ; inhibiting agent ; feedback mode