



船闸底板混凝土热力学参数反分析

乾东岳¹, 陈亚娇², 王超¹, 叶雅思¹

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南长沙 410004; 2. 武汉海事局, 湖北武汉 430010)

摘要: 对某船闸上游中底板混凝土热力学参数进行了反分析。运用三维有限元传热模型结合遗传算法, 确定了该船闸底板的发热率公式。据此发热率公式对船闸底板三维瞬态温度场进行数值分析, 并与原型观测试验进行了对比。结果显示, 计算值与原型观测值在时间历程上最大相差1.1%, 反分析可满足工程精度要求; 同时验证了利用三维有限元方法结合原型观测数据反分析混凝土绝热温升规律等热力学参数的可行性; 反分析过程显示, 遗传算法的快速性一定程度上弥补了采用三维模型增加的计算量。

关键词: 船闸; 大体积混凝土; 反分析; 遗传算法; 有限元; 传热模型; 三维

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)03-0164-04

Inverse analysis of thermodynamic parameters of lock soleplate's concrete

QIAN Dong-yue¹, CHEN Ya-jiao², WANG Chao¹, YE Ya-si¹

(1. Changsha University of Science & Technology, School of Hydraulic Engineering, Changsha 410004, China; 2. Wuhan Maritime Safety Administration of The People's Republic of China, Wuhan 430010, China)

Abstract: This paper analyzes the thermodynamic parameters of the upper lock soleplate's concrete. The three-dimensional finite element heat-transfer model, combined with genetic algorithm, is used to determine the heating rate formula of lock soleplate. Based on the formula, this paper numerically analyzes the three-dimensional transient temperature field of lock soleplate and compares the analyzed results with the prototype observed ones. The analyzed and compared results show that the maximum discrepancy in the time history between calculated values and prototype observed ones is 1.1% and that the results of inverse analysis could meet the project accuracy requirements. Also, it verifies that inverse analysis on the thermodynamic parameters of temperature rise law of concrete adiabatic combined with three-dimensional finite element and prototype observation is feasible. The process of inverse analysis displays that the rapidity of genetic algorithm makes up for the computation increased by three-dimensional model.

Key words: ship lock; mass concrete; inverse analysis; genetic algorithm; finite element; heat-transfer model; three-dimension

船闸底板是受基础约束较强的大体积混凝土结构, 温度对混凝土结构的应力状态具有重要影响^[1]。美国混凝土学会(American Concrete Institute)规定^[2]: “大体积混凝土指尺寸足够大的任何形式的混凝土, 其需要采取措施, 以应付水泥及伴随物体积变化时由于水合作用产生的热量(水

化热), 使混凝土的破裂可能性降低到最小程度。”为避免混凝土开裂, 获得准确的热力学参数很重要。混凝土热力学参数往往由现场或室内试验甚至经验得出^[3]。混凝土为复合型材料, 材料属性与浇筑过程、拌合用料、外界环境等密切相关, 现场或室内试验样本与现场浇筑混凝土之间

收稿日期: 2012-08-20

作者简介: 乾东岳(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事港口、海岸及近海工程方面的研究。

不可避免地存在偏差。因此反求混凝土热力学参数的问题引起了越来越多的学者关注^[4-6]。

混凝土的主要热力学参数包括混凝土的绝热温升 θ , 导温系数 a , 导热系数 λ 以及表面放热系数 β 以及绝热温升规律等。反分析参数数量、正演模型的选择对反分析计算的速度和精度影响比较大。文献[4]中提到对于施工期混凝土温度场需要采用三维有限元传热模型进行分析。文献[6]曾采用三维传热模型结合遗传算法对泵站混凝土表面传热系数进行了反分析。但对大体积混凝土绝热温升规律进行反分析的实例尚未见到。因此本文尝试采用三维有限元模型对某船闸底板的绝热温升规律进行反分析。

1 反分析模型

反分析问题包括系统辨识与参数辨识, 这里采用遗传算法对绝热温升规律相关参数进行随机搜索。通过原型观测试验获得现场大体积混凝土温度值, 并建立三维有限元热力学模型作为正演模型。参数反分析步骤如下:

- 1) 设定参数数目及上下限, 随机生成反分析参数初始总群, 如 $X_{1min} < X_1 < X_{1max}, X_{2min} < X_2 < X_{2max}$ 。
- 2) 将参数(如 X_1, X_2)代入正演模型计算各测点温度场的温度值 \bar{T}_{ij} 。
- 3) 提取原型观测试验测点现场大体积混凝土温度值 T_{ij} 。
- 4) 求目标函数值, 根据目标函数值计算参数(如 X_1, X_2)的适应度。
- 5) 根据个体适应度对初始种群内的个体进行遗传、交叉、变异操纵, 形成下一代种群。并进入下一代循环, 直到目标函数达到目标精度。

2 船闸底板原型观测试验

施工期原型监测底板为某船闸二线上游中底板, 高7.5 m, 宽20 m, 长17.5 m。混凝土共布置35支温度计, 沿上下游方向共布置5排, 每排布置7支。仪器编号分别为 $T_{11} \sim T_{17}, T_{21} \sim T_{27}, T_{31} \sim T_{37}, T_{41} \sim T_{47}, T_{51} \sim T_{57}$, 埋设高程为10.9 m。2011-07-11T07:30:00混凝土浇注前进行第一次观

测。埋设位置见图1和2。

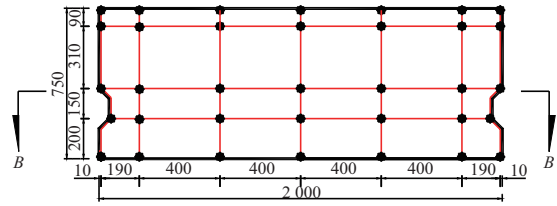


图1 温度计埋设立面

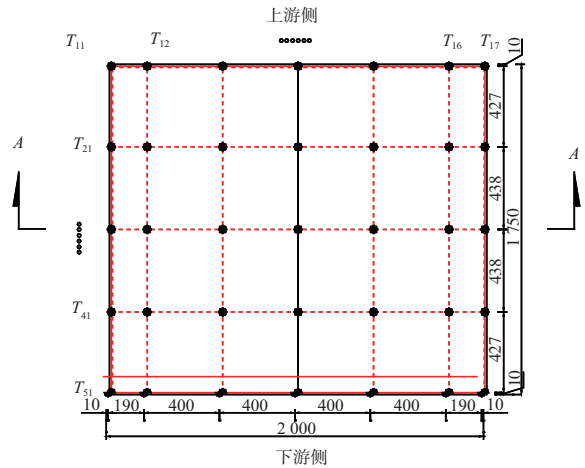


图2 10.9 m高程混凝土温度计监测埋设位置

3 三维有限元热力学模型简述

温度在时间域和空间域中的分布, 称为温度场, 它表示为

$$T = T(x, y, z, t) \tag{1}$$

混凝土的热传导方程如下:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \theta(\tau)}{\partial \tau} \tag{2}$$

式中: T 为温度($^{\circ}\text{C}$); a 为导温系数 (m^2/h); $\theta(\tau)$ 为绝热温升($^{\circ}\text{C}$)。

正演模型采用三维有限元法传热模型。模型网格划分见图3, 模型在空间进行有限元方法离散, 在时间上采用差分法离散。

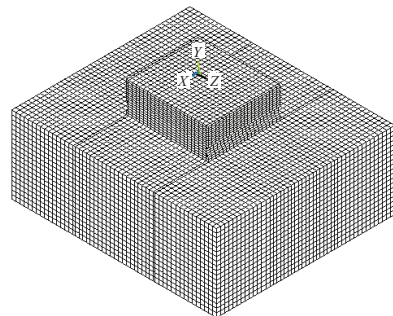


图3 上游中底板有限元网格

4 反分析参数及目标函数选择

绝热温升函数有双曲线式、指数式和双指数式等，文献[2]中提到双曲线式与试验资料符合较好。在绝热条件下，由于水化作用混凝土温度上升速度为

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{Q}{cp} \quad (3)$$

根据经验，取单位质量水泥的最终水化热为 330 kJ/kg，采用双曲线公式利用最小二乘法进行拟合得到水化热曲线为：

$$Q(\tau) = \frac{330\tau}{20.688 + \tau} \quad (4)$$

式中： τ 为龄期（h）； $Q(\tau)$ 为 τ 时刻单位质量水泥累计水化热（kJ/kg）。

对式（4）求导并乘以单位体积混凝土水泥用量可得到混凝土的发热率：

$$Q(\tau)' = \frac{1228867.2}{(20.688 + \tau)^2} \quad (5)$$

式中： $Q(\tau)'$ 为混凝土的发热率（kJ·m⁻³·h⁻¹）。

本文分别以 x_1, x_2 代替参数 1 228 867.2和 20.688，对船闸底板绝热温升规律进行反分析。

该问题可归结为求二元多峰函数的最小值，取求解温度反分析的目标函数为：

$$F(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (T_{i,j} - \bar{T}_{i,j})^2 \quad (6)$$

式中： $T_{i,j}$ 为浇注 t 小时后第 i 排第 j 列测点处温度观测值， i 取2, 3, 4, j 取3, 4, 5； $\bar{T}_{i,j}$ 为浇注 t 小时后第 i 排第 j 列测点处温度计算值。

5 反分析过程及结果分析

5.1 种群目标函数分布

初始种群的目标函数值分布见图4。此时， $x_1=1\ 216\ 611.29, x_2=18.39, \min F(X) = 1.45$ 。

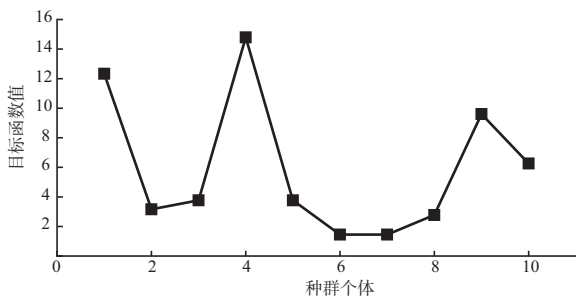


图4 初始种群的目标函数值分布

经过10次迭代后的目标函数值见图5。此时，

$x_1=1\ 213\ 397.86, x_2=20.26, \min F(X)=0.67$ 。

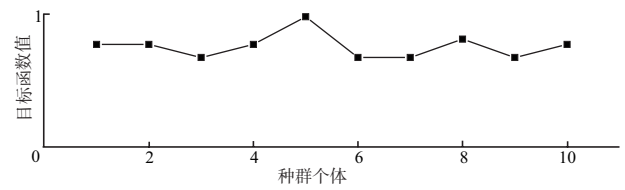


图5 迭代10次后的目标函数值分布

经过30次迭代后的目标函数值见图6。此时， $x_2=1\ 218\ 397.86, x_2=19.94, \min F(X)=0.49$ 。

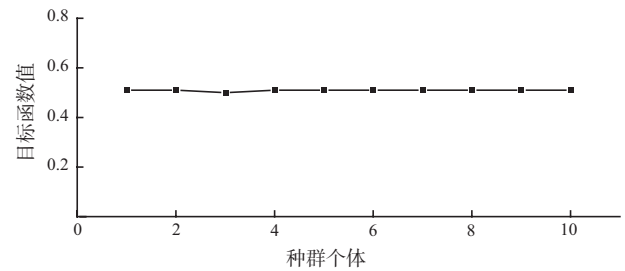


图6 迭代30次后的目标函数值分布

经过50次迭代后的目标函数值见图6。此时， $x_1=1\ 218\ 398.57, x_2=19.94, \min F(X)=0.49$ 。

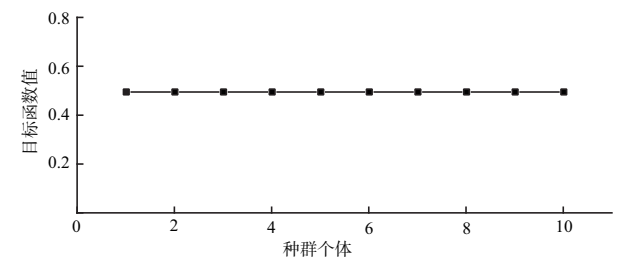


图7 迭代50次后的目标函数值分布

与第30次迭代相比，第50次迭代目标函数值分布变化不大，故取最优解为 $x_1=1\ 218\ 398.57, x_2=19.94$ 。此时，混凝土的发热率公式为：

$$Q(\tau)' = \frac{1218\ 398.57}{(19.94 + \tau)^2} \quad (7)$$

5.2 结果验证

由反分析得到的发热率公式可确定混凝土的绝热温升规律。据此对结构重新进行三维瞬态温度场计算,并与原型观测温度进行对比，取结构中心测点 T_{34} 为典型，温度值场计算值（简称计算值）和实测温度值的历时过程线对比情况见图8。

从 T_{34} 的温度历时过程线可知，结构在各个龄期计算值与实测值均比较接近。如表1所列数据显示,计算值与实测值在各个特殊时刻的最大误差

≤1.1%, 说明反演结果可满足工程精度要求, 同时验证了利用原型观测试验和反分析手段求解混凝土绝热升温规律参数的可行性。

5.3 种群目标函数均值及最优解

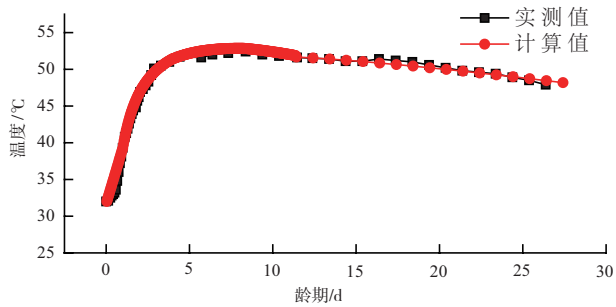


图8 测点 T_{34} 的温度实测值与反演参数计算值比较

表1 T_{34} 测点计算值与实测值对比

t/d	实测值/℃	计算值/℃	误差/%
0	30.0	30.000	0
1	39.3	39.245	0.14
2	46.9	46.799	0.22
5	51.7	52.155	0.87
10	51.8	52.375	1.10
15	51.1	51.047	0.10
20	49.8	49.976	0.35
25	48.5	48.720	0.45

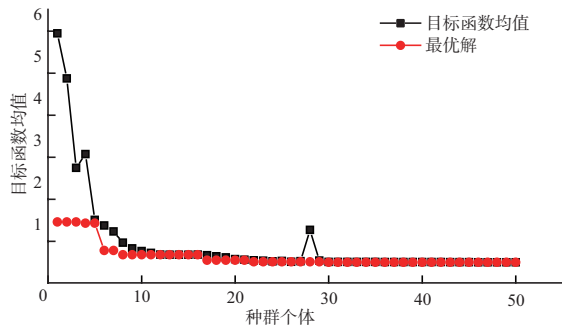


图9 种群目标函数均值的变化和最优解的变化

50次迭代过程中, 种群目标函数均值的变化和最优解的变化见图9。

如图9所示, 在20次迭代后种群最优解就基本稳定, 而目标函数均值波动明显减小。遗传算法策略的快速性减少了运用三维模型求解增加的计算量。

6 结论

1) 根据现场监测试验, 运用三维有限元传热模型结合遗传算法对船闸底板混凝土热力学参数进行反分析, 方法可行, 计算结果可靠。

2) 反分析过程显示遗传算法策略的快速性一定程度上弥补了运用三维模型所增加的计算量。

计算值与现场实测值仍存在误差, 存在误差的原因可能有以下原因: 原型观测测量值存在噪声; 其他热力学采用经验值带来的误差, 比如导热导温系数等; 边界条件的非线性。

参考文献:

- [1] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- [2] ACI-207.1R-05 MASS CONCRETE[S].
- [3] 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, 1996.
- [4] 张宇鑫, 宋玉普, 王登刚. 基于遗传算法的混凝土三维非稳态温度场反分析[J]. 计算力学学报, 2004(3): 338-342, 367.
- [5] 张宇鑫. 大体积混凝土温度应力仿真分析与反分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2002.
- [6] 马跃峰, 肖志乔, 朱岳明. 基于遗传算法的泵站混凝土热学参数反演分析[J]. 水电能源科学, 2005(6): 31-33, 91.

(本文编辑 武亚庆)

