

基于试验测定的混凝土热工参数反演计算

宋志文, 肖建庄, 赵 勇

(同济大学 建筑工程系, 上海 200092)

摘要: 热工参数的选取, 对混凝土结构温度场和温度效应的分析结果有重要影响. 为了选取更接近实际的热工参数, 采用试验和反演分析相结合的方法, 计算影响日照条件下混凝土结构温度场和温度效应分析结果的热工参数. 基于一维热传导方程和热边界条件, 假设混凝土表面附近温度分布为坐标的二次函数, 建立导热系数、混凝土表面换热系数和混凝土表面太阳辐射吸收系数的反演方程; 基于热膨胀系数的物理意义, 建立其反演公式; 最后, 根据实测的温度、应变和气象数据, 反分析计算一块混凝土板的热工参数.

关键词: 混凝土; 热工参数; 试验测定; 日照; 反分析

中图分类号: TU 111

文献标识码: A

Back-Analysis of Concrete Thermal Parameters Based on Experimental Measurements

SONG Zhiwen, XIAO Jianzhuang, ZHAO Yong

(Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on a test and back analysis, the thermal parameters close to practice can be obtained, which have great influence on the analysis results of temperature field and thermal effects for solar concrete structures. Assuming that the temperature distribution close to the concrete surface is the quadratic function of the coordinate, the back-analysis equations of thermal conductivity, heat transfer coefficient and absorption coefficient of solar radiation are derived based on one dimension Fourier equation of heat conduction and thermal boundary conditions. And the back-analysis equations for coefficient of thermal expansion is presented based on the physical explanation. Finally back-analysis of thermal parameters for a concrete slab is made through the measured temperature, strain and meteorological data.

Key words: concrete; thermal parameter; experimental measurement; solar; back-analysis

随着全球气候的显著变化和对土木工程的功能与性能要求越来越高, 由日照等环境因素引起的混凝土温度效应日益引起工程界的重视. 目前常采用有限元方法来仿真分析混凝土结构温度场和温度效应. 仿真分析时, 存在热工参数选取的问题, 而影响这些参数的因素众多, 通常使计算结果与实际情况有所差别^[1]. 影响日照混凝土结构温度场和温度效应的热工参数主要有: 导热系数, 混凝土表面换热系数, 混凝土表面太阳辐射吸收系数和热膨胀系数. 通常情况下, 通过经验或室内实验确定混凝土的热工参数, 但是, 由于室内实验的局限性, 所得的混凝土热工参数与实际有较大的出入^[2].

热工参数的反演分析研究成果不是很多. 文献[1-2]从原理上给出了常用热工参数反分析的方法; 还有的学者基于边界元法^[3]、模糊理论^[4]和遗传算法^[5], 提出热工参数反演方法. 但是, 这些研究基本上都是以大坝等大体积混凝土为对象的, 对导热系数和绝热温升的研究较深入, 而对混凝土表面换热系数的研究还不够充分, 并且完全没有混凝土表面太阳辐射吸收系数的研究. 而混凝土表面换热系数和太阳辐射吸收系数, 对日照混凝土结构温度场和温度效应影响很大^[6].

笔者在实测的温度、气象和应变等数据的基础上, 基于热传导方程、热边界条件以及热工参数的物理意义, 反分析上述的热工参数, 为这些热工参数的选取提供一种新思路.

1 热工参数反演模型

(1) 导热系数 λ

一维瞬态热传导方程为^[2]

收稿日期: 2008-07-02

基金项目: 上海市青年启明星计划(跟踪)资助项目(06QH14012)

作者简介: 宋志文(1980—), 男, 博士生, 主要研究方向为日照环境下混凝土结构温度效应. E-mail: songjiman66@163.com

通讯作者: 肖建庄(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为混凝土抗火和再生混凝土. E-mail: jzx@tongji.edu.cn

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

式中: a 为导温系数, $a = \lambda / \rho C$, ρ 为密度, C 为比热容; θ 为绝热温升; t 为时刻; T 为温度.

沿热传导方向布置 4 个温度计(如图 1 所示), 温度计间距记为 h_{i-1} , h_i 和 h_{i+1} . 设 $T_{i,t}$ 代表第 i 点在时间 t 的温度. 4 个温度计的位置, 分别记为 $i-1$, i , $i+1$ 和 $i+2$. 用差分代替微分, 根据差分原理, 忽略截断误差, 可推导得下式^[1]:

$$\begin{aligned} (T_{i+1,t} - T_{i+1,t-\Delta t}) - (T_{i,t} - T_{i,t-\Delta t}) = \\ \frac{2a\Delta t}{h_i + h_{i+1}} \left[\frac{T_{i+2,t} - T_{i+1,t}}{h_{i+1}} - \frac{T_{i+1,t} - T_{i,t}}{h_i} \right] - \\ \frac{2a\Delta t}{h_{i-1} + h_i} \left[\frac{T_{i+1,t} - T_{i,t}}{h_i} - \frac{T_{i,t} - T_{i-1,t}}{h_{i-1}} \right] \quad (2) \end{aligned}$$

当温度计布置好后, h_i 为定值, 只需知道这 4 个温度计在 $t + \Delta t$ 和 t 时刻的实测温度, 即可根据式(2)计算出混凝土的 a . 于是, 得导热系数

$$\lambda = \rho C a \quad (3)$$

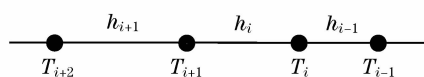


图 1 温度测点布置

Fig.1 Arrangement of thermometers

(2) 混凝土表面换热系数 β

如图 2 所示, 在混凝土表面附近沿垂直方向, 埋设 3 只温度计(位置分别为 d, e, f), 某瞬时实测温度分别为 T_d, T_e, T_f , 混凝土表面温度为 T_s , 环境温度为 T_0 . 把原点放在温度计测点 d 上, 设 x 点的温度为 $T = T(x)$, 则表面温度为 $T_s = T(-L_d)$.

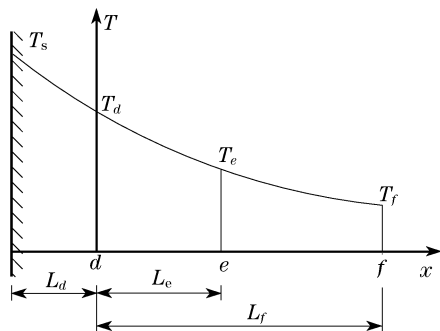


图 2 表面温度计算示意

Fig.2 Calculation layout of temperature close to surface

设混凝土表面附件温度为

$$T(x) = k_1 + k_2 x + k_3 x^2 \quad (4)$$

用 d, e, f 这 3 点温度实测值代入式(4), 可求

得 k_1, k_2, k_3 . 对式(4)求偏导得

$$\frac{\partial T}{\partial x} = k_2 + 2k_3 x \quad (5)$$

混凝土表面温度为

$$T_s = T(-L_d) = k_1 - k_2 L_d + k_3 L_d^2 \quad (6)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_s = k_2 - 2k_3 L_d \quad (7)$$

无日照条件下, 混凝土表面边界条件为^[1]

$$\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_s = \beta (T_s - T_0) \quad (8)$$

所以

$$\beta = \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_s / (T_s - T_0) \quad (9)$$

目前, 对混凝土表面换热系数尚无公认的研究成果, 各学者在研究中的取值差异相当大^[6]. 多数学者认为, 混凝土表面换热系数与结构周围风速呈线性关系, 并按一次函数取值进行分析^[7-8]. 把表面换热系数取为风速 v 的一次线性函数, 求出表面换热系数后, 根据实测的风速, 可以回归得到二者的线性函数关系式.

(3) 混凝土表面太阳辐射吸收系数 α

日照条件下, 混凝土表面热边界条件为^[2]

$$\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_s = \beta (T_s - T_0) - R \quad (10)$$

式中, R 为混凝土表面吸收的太阳辐射.

先无日照条件下, 根据实测温度, 反演得到 β , 然后在日照条件下, 根据实测温度, 求出 T_s 和 $\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_s$, 可得到混凝土表面吸收的太阳辐射.

混凝土表面吸收的太阳辐射 R , 可以表示为

$$R = \alpha I \quad (11)$$

式中, I 为垂直于表面的太阳总辐射.

根据求得的表面吸收的太阳辐射和实测的太阳总辐射, 可以得到混凝土表面太阳辐射吸收系数.

(4) 热膨胀系数 α_c

混凝土的热膨胀系数即为单位温度变化导致混凝土单位长度的变化. 当纤维可以自由伸缩时, 其热应变 ϵ_t 为

$$\epsilon_t = \alpha_c T \quad (12)$$

选取某一时刻热应变 ϵ_{t_0} , 温度 T_0 为初始状态, 则对于任意时刻, 都有如下关系:

$$\epsilon_t - \epsilon_{t_0} = \alpha_c (T - T_0) \quad (13)$$

由式(13)可得热膨胀系数的计算公式

$$\alpha_c = \frac{\epsilon_t - \epsilon_{t_0}}{T - T_0} \quad (14)$$

2 混凝土试验板热工参数反演分析

一正方形混凝土试验板,边长为 1 000 mm,板厚 220 mm,四周为保温绝热材料,底部为封闭的空气介质,顶面受太阳辐射.可认为板内热传导是一维的,如图 3 所示.在板中部沿板厚方向布置 4 个电阻温度计,如图 4 所示,现场照片如图 5 所示.此外,在试验现场建立简易气象站,测试现场的环境温度、风速和太阳总辐射.

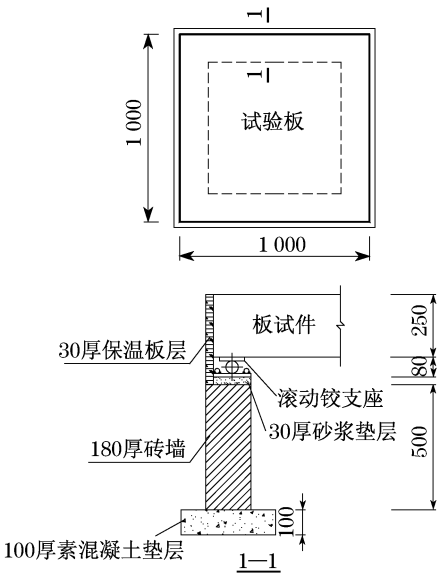


图 3 试验板示意图(单位:mm)
Fig.3 Layout of test slab(unit:mm)

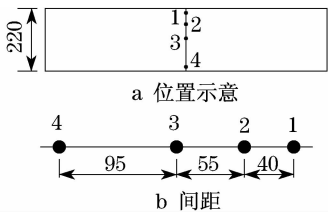


图 4 温度计布置示意图(单位:mm)
Fig.4 Layout of thermometers(unit:mm)

(1) 导热系数 λ

由温度实测值可得板内各测点温度日变化曲线(以 2006 年 8 月 18 日为例),如图 6 所示.由图可得,一天内从上午 8:00 至下午 13:00,所有测点均处于由太阳辐射引起的升温阶段,因此,取这一时段的测点温度作为反演数据.选取的部分数据及反演结果如表 1 所示.根据实测的数据,反演导热系数取平均值,得导热系数 $\lambda = 1.68 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$.



图 5 试验现场
Fig.5 Testing field

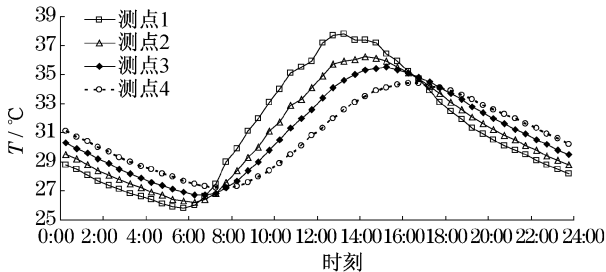


图 6 板内温度时程曲线
Fig.6 Diurnal temperature variation of temperature in slab

表 1 部分实测数据及反演结果
Tab.1 Partial measured data and result of back-analysis

时间点	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	$a/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1})$	$\lambda/(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$
t_{i-1}	26.5	25.9	25.9	26.3	0.002 4	—
t_i	28.9	27.4	26.7	26.4	0.002 0	1.69
t_{i+1}	32.0	29.6	28.1	27.0	0.002 5	1.76
t_{i+2}	34.7	31.7	29.6	28.1	0.002 1	1.52

注:取混凝土密度为 $2\,500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,比热容为 $988 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$.

(2) 混凝土表面换热系数 β

利用晚上无日照条件下的温度实测值,由式(6)求得混凝土表面温度 T_s ,再由实测气温和已得的导热系数由式(9)计算表面换热系数;将实测风速与表面换热系数进行一元线性回归(如图 7 所示),拟合得到表面换热系数 β 与风速 v 的关系为

$$\beta = 10.22 + 2.53 v \tag{15}$$

(3) 混凝土表面吸收的太阳辐射

利用所得的导热系数与混凝土表面换热系数,利用式(10),可以求得混凝土表面吸收的太阳辐射.

将所得的混凝土表面日照辐射 R 和实测的太阳总辐射 I 进行一元线性回归,结果见图 8,得混凝土表面太阳辐射吸收系数 $\alpha = 0.52$.

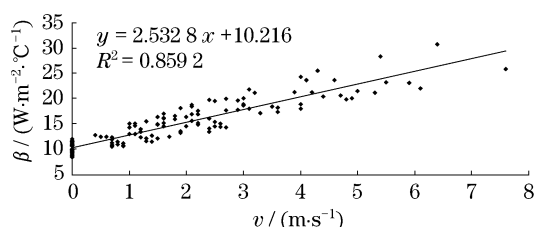


图7 表面换热系数与风速的关系

Fig.7 Relation of heat transfer coefficient and wind speed

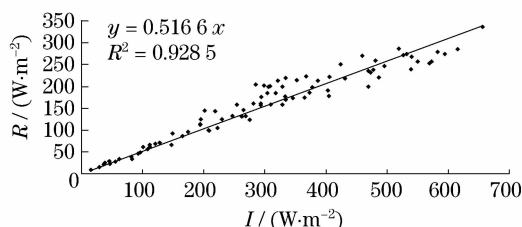


图8 混凝土吸收的日照辐射与太阳总辐射强度的关系

Fig.8 Relation of radiation absorbed by concrete surface and total solar radiation intensity

(4) 热膨胀系数 α_c

在上述的试验板中部 1/2 厚度处,布置一内置应变计,由于试验板不受外荷载,可以认为测得的应变即为该点的热应变.根据实测的 2006 年 8 月 18 日至 19 日的应变与温度数据,以 6:00 为初始时刻,由式(14)反演得到混凝土板热膨胀系数时程曲线(如图 9 所示).

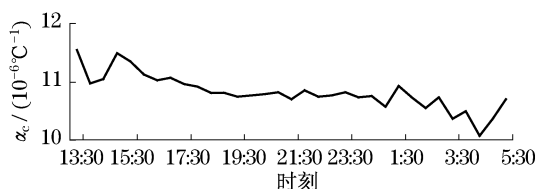


图9 混凝土热膨胀系数时程曲线

Fig.9 Temporal curve of coefficient of thermal expansion

混凝土的热膨胀系数取决于混凝土的成分——水泥浆和骨料的含量,及其各自的热膨胀系数和混凝土的饱和程度.从图 9 可以看出,试验板混凝土的热膨胀系数基本上为一常数,因此,取其平均值 $10.8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 作为其热膨胀系数代表值.

3 结语

影响日照混凝土结构温度场和温度效应的热工

参数主要有导热系数、混凝土表面换热系数、混凝土表面太阳辐射吸收系数和热膨胀系数.为了合理选取这些热工参数,以日照条件下单向传热混凝土板(边长 1 000 mm,板厚 220 mm)的实测数据为基础,假设混凝土表面附近温度分布为坐标的二次函数,推导了导热系数、表面换热系数和太阳辐射吸收系数的反分析方程;根据物理定义,得出热膨胀系数的反分析方程.

反演得到该混凝土板导热系数为 $1.68 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$,混凝土表面换热系数 β 与风速 v 的关系为 $\beta = 10.22 + 2.53v$,混凝土表面太阳辐射吸收系数为 0.52,热膨胀系数为 $10.8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

参考文献:

- [1] 吴相豪,吴中如.混凝土热力学参数反分析模型[J].水力发电,2001(2):20.
WU Xianghao, WU Zhongru. Inverse analysis model of concrete thermal parameters[J]. Water Power, 2001(2):20.
- [2] 朱伯芳.大体积混凝土的温度应力和温度控制[M].北京:水利水电出版社,1999.
ZHU Bofang. Thermal stresses and temperature control of mass concrete [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [3] Taler J, Weglowski B, Zima. Monitoring of transient temperature and thermal stresses in pressure components of steam boilers [J]. Pressure Vessels and Piping Conference, 1997, 72(3):231.
- [4] 李守巨,刘迎曦.基于模糊理论的混凝土热力学参数识别方法[J].岩土力学,2004,25(4):570.
LI Shouju, LIU Yingxi. Identification of concrete thermal parameters based on fuzzy theory [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(4):570.
- [5] 朱岳明,林志祥.混凝土温度场热力学参数的并行反分析[J].水电能源科学,2005,23(2):69.
ZHU Yueming, LIN Zhixiang. Parallel feedback analysis for thermal characteristic parameters of concrete [J]. Water Resources and Power, 2005, 23(2):69.
- [6] 刘文燕,耿耀明.热工参数对混凝土结构温度场影响研究[J].混凝土与水泥制品,2005(1):11.
LIU Wenyan, GENG Yaoming. Research on influence of basic thermal parameters to temperature field of concrete structure [J]. China Concrete and Cement Products, 2005(1):11.
- [7] Rao D S P. Temperature distribution and stresses in concrete bridges[J]. ACI Journal, 1986, 83(52):588.
- [8] Moorty S, Roeder C W. Temperature-dependent bridge movements[J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(4):1090.