

基于施工期实测温度的大坝混凝土热扩散率反演

黄耀英¹, 郑东健², 周建兵³

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;
3. 中国长江三峡集团公司向家坝工程建设部, 四川 宜宾 644600)

摘要:为解决采用施工期实测温度进行热扩散率反演时误差较大的问题,建立了施工期混凝土浇筑仓表面小尺度温度统计模型,以消除水泥水化热、通水冷却和随机因素等影响,分离出环境温度分量,结合准稳定温度场下的一维热传导方程的理论解析解,进行热扩散率的反演计算。工程实例计算结果表明,反演的热扩散率稳定可靠,计算方法是可行的。

关键词:热扩散率;施工期;热传导方程;温度统计模型;环境温度分量

中图分类号:TV431 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2013)04-0006-04

The thermal diffusivity inversion of concrete dam based on the measured temperature during construction period//
HUANG Yaoying¹, ZHENG Dongjian², ZHOU Jianbing³ (1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Xiangjiaba Project Construction Department, China Three Gorges Project Corporation, Yibin 644600, China)

Abstract: A small-scale surface temperature statistical model of the concrete casting warehouse was established to solve the problem of great errors in thermal diffusivity inversion using the measured temperature during construction period. The model can eliminate the influences of cement hydration heat, water cooling system and random factors on the measured temperature, and separate out the environment temperature component from the measured temperature. Based on the environment temperature component and the analytical solution of the one dimensional heat conduction equation in a stable temperature field, thermal diffusivity of concrete dam was inversed. The inversion results validate the inversion method of thermal diffusivity.

Key words: thermal diffusivity; construction period; heat conduction equation; temperature statistical model; environment temperature component

进行混凝土坝温度场仿真分析时,热扩散率是一个重要的热学参数,目前一般采用距离混凝土坝体表面0.8m范围内不同深度处的实测温度进行反演^[1-8],并且假设大坝混凝土处于初始影响消失以后的准稳定温度场状态,混凝土温度仅受环境气温影响。但是施工期的大坝混凝土除受环境气温影响外,还存在水泥水化热温升和冷却水管通水降温等影响,因此,当采用距混凝土坝体表面不同距离的施工期实测温度进行热扩散率反演时,如果仍然采用准稳定温度场状态下的热扩散率反演计算公式,反演的精度和稳定性难免不高。本文通过建立施工期混凝土浇筑仓表面小尺度温度统计模型,分离出环境温度分量,然后结合准稳定温度场的热传导方程的理论解析解,进行热扩散率反演。

1 大坝混凝土热扩散率反演

1.1 准稳定温度场的一维热传导方程

混凝土与空气接触时,应按第三类边界条件计算,假设环境气温作正弦变化,准稳定温度场的一维热传导方程的理论解析解为^[1]

$$T(x, \tau) = A_0 e^{-\sqrt{\frac{\pi}{aP}} x} \sin \left[\frac{2\pi\tau}{P} - \left(x \sqrt{\frac{\pi}{aP}} + M \right) \right] = A_0 e^{-\sqrt{\frac{\pi}{aP}} x} \sin \left[\frac{2\pi}{P} (\tau - \tau_0) \right] \tag{1}$$

其中 $A_0 = A_h \left(1 + \frac{2\lambda}{\beta} \sqrt{\frac{\pi}{aP}} + \frac{2\pi\lambda^2}{aP\beta^2} \right)^{-1/2}$ $\tag{2}$

$$M = \arctan \left(\frac{1}{1 + \frac{\beta}{\lambda} \sqrt{\frac{aP}{\pi}}} \right) \tag{3}$$

式中: $T(x, \tau)$ 为距混凝土表面深度 x 处在时刻 τ 的温度; A_h 为环境气温变幅; A_0 为混凝土表面温度变幅; P 为环境气温变化周期; M 为混凝土表面温度变化的相位差; λ 为混凝土导热系数; β 为混凝土表面放热系数; a 为混凝土热扩散率; τ_0 为滞后时间。

1.2 混凝土浇筑仓表面小尺度温度统计模型

对施工期混凝土的温度变化规律进行分析, 距混凝土浇筑仓表面不同深度处的实测温度信息包含环境气温、水泥水化热温升、通水冷却降温及随机误差等因素。为了保证热扩散率的反演精度, 应从实测温度中分离出环境气温引起的温度分量(简称环境温度分量), 然后基于准稳定温度场的计算公式进行热扩散率反演。由于环境气温以天为单位作周期性变化, 考虑到实测温度存在时间滞后影响, 以某时刻 τ 的实测环境气温和 $\tau - \tau_0$ 时刻的实测环境气温作为环境温度因子, 两个指数函数累加起来考虑水泥水化热温升和通水冷却的影响, 初始温度则由常数项来表示, 不另选因子, 建立的距混凝土浇筑仓表面深度为 x 处的小尺度施工期温度统计模型为

$$T(\tau) = b_0 + b_1 T_\tau + b_2 T_{\tau - \tau_0} + b_3 (1 - e^{-A\tau/24}) + b_4 (1 - e^{-B\tau/24}) \quad (4)$$

式中: b_0 为常数项; $b_1 \sim b_4$ 分别为回归系数; T_τ 为 τ 时刻对应的实测环境气温; $T_{\tau - \tau_0}$ 为 $\tau - \tau_0$ 时刻对应的实测环境气温; A 和 B 为回归常数, 根据回归经验, 本文取 $A = 0.318$, $B = 0.295$ 。

结合距混凝土浇筑仓表面深度为 x 处的实测温度, 由式(1)计算获得该深度处的温度相对环境气温的滞后时间 τ_0 , 然后获得 τ 和 $\tau - \tau_0$ 时刻对应的实测环境气温, 再根据式(4), 采用逐步回归分析法, 回归获得小尺度温度统计模型表达式中的各系数, 于是分离出环境温度分量。

1.3 基于环境温度分量的大坝混凝土热扩散率反演

如果在混凝土浇筑仓表面 0.8 m 范围内埋设温度计进行温度监测, 由于大坝顺河向和横河向的尺寸均远大于 0.8 m, 因此在垂直于混凝土浇筑仓表面方向, 可以假设为一维热传导问题。根据上述原理, 首先建立浇筑仓表面 0.8 m 范围内的小尺度温度统计模型, 消除水化热温升及水管冷却影响, 分离出环境温度分量, 然后结合初始影响消失以后的准稳定温度场一维热传导方程来反演热扩散率, 目前主要有以下两种方法:

a. 混凝土与空气接触时, 按第三类温度边界条件计算。假设环境气温作正弦变化, 准稳定温度场的热传导方程获得的理论解析解由式(1)计算。由于混凝土表面温度日变幅 A_0 是 A 、 a 、 λ 和 β 等的函数, 因此热扩散率的反演公式为

$$a = \frac{\pi}{P} \left[\frac{x_1 - x_2}{\ln(A_{x_2}/A_{x_1})} \right]^2 \quad (5)$$

式中: A_{x_1} 和 A_{x_2} 分别为距混凝土浇筑仓表面深度为 x_1 和 x_2 处的实测温度日变幅。

b. 混凝土与空气接触时, 按第一类温度边界条件计算。假设环境气温作正弦变化, 按第一类边界条件计算, 由准稳定温度场的一维热传导方程得到距混凝土浇筑仓表面深度为 x 处的温度日变幅为

$$A_x = A e^{-x\sqrt{\frac{\pi}{aP}}} \quad (6)$$

从而热扩散率反演公式为^[3]

$$a = \frac{\pi}{P} \left[\frac{x}{\ln(A/A_x)} \right]^2 \quad (7)$$

由于混凝土与空气接触时, 本质上为第三类边界条件, 当按第一类边界条件计算时, 直接采用式(7)进行混凝土热扩散率反演, 反演精度较差。吴中如^[3]认为通过在真实边界增加虚厚度 d , 可以将第三类温度边界条件近似处理为第一类边界条件, 此时式(6)变为

$$A_x = A e^{-(x+d)\sqrt{\frac{\pi}{aP}}} \quad (8)$$

对式(8)求自然对数后得到直线方程, 然后结合距混凝土浇筑仓表面不同深度 x 处的实测温度日变幅, 由最小二乘法推导出热扩散率 a 和虚厚度 d 。

2 实例应用

2.1 监测方案及监测结果

西南某建设中的混凝土坝工程, 在脱离基础约束区, 混凝土浇筑仓厚度为 3 m, 分 6 个坏层浇筑, 在浇筑仓第 1 坏层和第 4 坏层顶部布置冷却水管通水冷却。为监测高温季节浇筑仓顶部受环境气温和太阳辐射的影响, 在距离混凝土浇筑仓表面 0.1 m、0.2 m、0.4 m、0.6 m 处分别布置了 4 层测温光纤^[8], 其埋设布置如图 1 所示。分布式光纤测温主机每 2 h 自动采集温度数据, 从而获得太阳辐射和环境气温等对表层混凝土温度的影响。在 2010 年 6 月底至 7 月初期间, 距混凝土浇筑仓表面不同深度处的

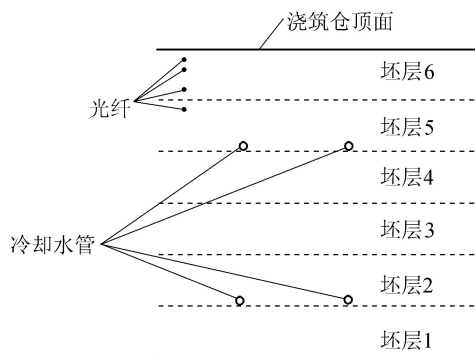


图1 测温光纤埋设布置示意图

分布式光纤测温和大坝坝址处气象站所测的环境气温如图2所示。由图2可见,环境气温对浇筑仓表层混凝土温度的影响十分明显,但影响深度约在距混凝土表面0.5 m的范围内,距离混凝土浇筑仓表面的深度越浅,混凝土温度的日变化幅度越大。

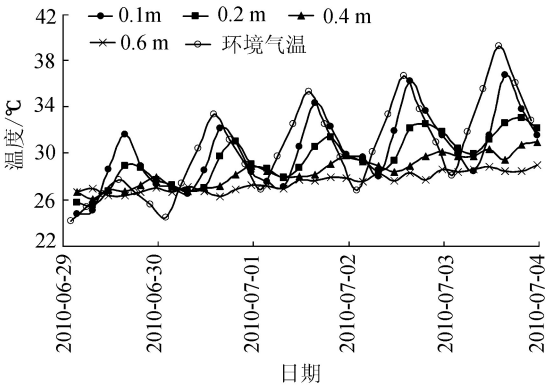


图2 光纤测温 and 坝址环境气温

2.2 建立小尺度温度统计模型

根据距混凝土浇筑仓表面0.1 m、0.2 m、0.4 m、0.6 m处的实测温度,建立小尺度温度统计模型,并采用逐步回归分析法确定小尺度温度统计模型中的各回归系数(表1),分离出的环境温度分量如图3所示。

表1 小尺度温度统计模型回归系数

距混凝土浇筑仓表面深度/m	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	复相关系数
0.1	9.7603	0.6698	0	0	0	0.876
0.2	16.7610	0	0.3828	0	2.4839	0.957
0.4	22.9080	0	0.1433	-53.1280	58.3860	0.968
0.6	26.6150	0	0	-77.0420	82.6030	0.935

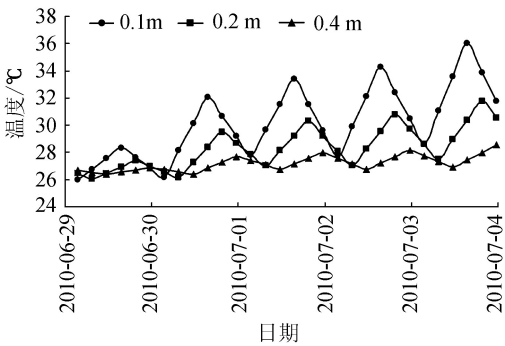


图3 分离出的环境温度分量

由表1和图3可知:①统计模型的复相关系数较高,说明本文建立的混凝土浇筑仓表面小尺度温度统计模型是可行的。②距混凝土浇筑仓表面0.1 m处,实测温度主要受环境气温影响,水泥水化热和通水冷却影响很小;距混凝土浇筑仓表面0.2 m和0.4 m处,实测温度既受环境气温影响,也受水泥水化热和通水冷却影响;而距混凝土浇筑仓表面0.6 m处,实测温度主要受水泥水化热和通水冷却

影响,受日变化的环境气温影响很小,近似等于零。

2.3 大坝混凝土热扩散率反演

在2010年7月1—2日,距混凝土浇筑仓表面不同深度处的温度变幅规律较好,且这两天的温度日变幅均为8.5℃,选取这两个典型日的温度进行反演分析。距混凝土浇筑仓表面不同深度处的实测温度日变幅 A_x 和环境气温日变幅 A_h' 见表2。由表2可知,在这两个典型日分离出来的环境温度分量在不同深度处的日变幅相同。分别采用式(5)、式(7)和式(8)进行热扩散率反演。由于本工程所在纬度约为28°,朱伯芳^[1]对太阳辐射的研究表明,纬度为30°处,太阳辐射引起周围空气温度增加4.5~9.59℃,考虑到浇筑仓表面在间歇期间进行了定期洒水养护,本文将日最高环境气温提高5℃以考虑太阳辐射的影响。利用不同热扩散率反演计算公式的反演结果见表3。

表2 典型日的温度日变幅

距混凝土浇筑仓表面深度/m	$A_x/^\circ\text{C}$	$A_h'/^\circ\text{C}$
0.1	5.69	13.50
0.2	3.25	13.50
0.4	1.22	13.50

表3 不同反演公式的反演结果

公式	计算条件	热扩散率/ ($10^{-3}\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$)	平均热扩散率/ ($10^{-3}\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$)	虚厚 度/cm
式(5)	$x_1=0.1\text{ m}, x_2=0.2\text{ m}$	4.173		
	$x_1=0.2\text{ m}, x_2=0.4\text{ m}$	5.454	4.865	
	$x_1=0.1\text{ m}, x_2=0.4\text{ m}$	4.968		
式(7)	$x=0.1\text{ m}$	1.753		
	$x=0.2\text{ m}$	2.582	2.653	
	$x=0.4\text{ m}$	3.624		
式(8)	$A_h'=13.5^\circ\text{C}$		5.034	7.34
	$A_h'=12.5^\circ\text{C}$		5.034	5.83
	$A_h'=11.5^\circ\text{C}$		5.034	4.19

由反演结果可知:①式(5)和式(8)反演的热扩散率比较接近,即混凝土与空气接触时,既可以按第三类边界条件进行计算,也可以按第一类边界条件进行计算,但按第一类边界条件进行计算时,需要在真实边界外延一个虚厚度,然后采用最小二乘法获得直线方程。公式(7)在按第一类边界条件进行计算时没有考虑虚厚度,反演的热扩散率偏小。②将日最高环境气温提高3℃、4℃、5℃来考虑太阳辐射的影响,计算得到的热扩散率均为 $5.034\times10^{-3}\text{m}^2/\text{h}$,但在真实边界外延的虚厚度分别为4.19 cm、5.83 cm、7.34 cm。

本文还直接采用实测温度进行了热扩散率反演,分析表明反演结果差异较大。如采用公式(5)反演的结果为 $2.175\times10^{-3}\sim9.873\times10^{-3}\text{m}^2/\text{h}$,虽然公式(8)采用最小二乘法获得直线方程的系数,进

而求得热扩散率,但反演结果仍然差异较大,为 $4.478 \times 10^{-3} \sim 5.640 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$ 。

3 结 语

以某时刻 τ 的实测环境气温和 $\tau-\tau_0$ 时刻的实测环境气温作为环境温度因子,两个指数函数累加起来考虑水化热温升和通水冷却的影响,初始温度则由常数项来表示,不另选因子,建立了施工期混凝土浇筑仓表面小尺度温度统计模型。根据建立的施工期混凝土浇筑仓表面小尺度温度统计模型,消除水泥水化热、通水冷却和随机因素等影响,分离出环境温度分量,然后结合初始影响消失以后的准稳定温度场一维热传导方程来反演热扩散率。当混凝土与空气接触时,可以按第三类边界条件进行计算,也可以按第一类边界条件进行计算,但按第一类边界条件进行计算时,需要将真实边界外延一个虚厚度。将本文提出的施工期混凝土热扩散率反演方法应用于实际工程,计算结果表明,反演结果稳定可靠,本文提出的方法是可行的。

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:中国水利水电出版社,2012.
[2] 储海宁. 混凝土坝内部观测技术[M]. 北京:水利电力出版社,1989.
[3] 吴中如. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 北京:

高等教育出版社,2003.
[4] 赵志仁. 大坝安全监测设计[M]. 郑州:黄河出版社,2003.
[5] 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):20-22. (WU xianghao, WU Zhongru. Inverse model of concrete's thermodynamics paramter[J]. WaterPower,2001(2):20-22. (in Chinese))
[6] 邢振贤,赵玉清,刘利军. 碾压混凝土导温系数的反演分析[J]. 低温建筑技术,2005(5):46-47. (XING Zhenxian, ZHAO Yuqing, LIU Lijun. Inversion analysis method for thermal diffusivity of roller compected concrete dma[J]. Low Temperature Construction Technology,2005(5):46-47. (in Chinese))
[7] 葛晓春,李民. 混凝土大坝导温系数反演及其随时间变化的规律[J]. 黑龙江水专学报,2006,33(1):14-15. (GE Xiaochun, LI Min. Inverse analysis of the concrete dam's temperature conduct modulus and rule of its change along with the time[J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College,2006,33(1):14-15. (in Chinese))
[8] 江凯,周建兵,黄耀英,等. 基于光纤测温的大体积混凝土导温系数反演分析[J]. 中国农村水利水电,2012(3):91-93. (JIANG Kai, ZHOU Jianbing, HUANG Yaoying,et al. An inverse analysis of thermal diffusivity of mass concrete based on fiber temeperature monitoring[J]. China Rural Water and Hydropower,2012(3):91-93. (in Chinese))

(收稿日期:2012-08-27 编辑:周红梅)

+++++

· 简讯 ·

国际水电协会第4届大会在马来西亚古晋召开

2013年5月21—24日,河海大学协办的国际水电协会(International Hydropower Association)第4届大会在马来西亚沙捞越州古晋市顺利召开,60多个国家的政府官员、企业代表、非政府组织代表、金融界人士、科研人员和专家学者共计500余人参加了会议。

本次会议主题为“推进可持续水电发展”,为体现大会的对话精神,大会分不同专题召开讨论会 and 交流会议,主要议题有:水电的发展方向、可持续理念与经济发展的关系、区域互联、水资源及能源政策、水库与温室气体排放、现代水电定义、水电投融资、水电项目影响小区建设、IHA《水电可持续发展评估规范》的作用、可持续理念的水电实践等。

大会正式开始前,举行了由国际水电协会、世界银行和亚洲开发银行联合主办,中国水利水电建设集团公司协办的全球水电开发区域合作峰会。在会议期间,举行了国际水电协会理事会和水电可持续性评估理事会第一次会议。

全体会议的首场报告安排给了中国代表,在大会安排的64个正式发言中,来自中国的有4位,是发言人数最多的国家。河海大学公共管理学院院长、中国移民研究中心主任、社会发展研究所所长施国庆教授应邀参加了大会,并在大会的第6场主题会议“与受影响社区一起工作”上就水电社会持续性、移民政策与管理良好实践问题作了发言,受到了与会专家的广泛重视和好评。

(本刊编辑部供稿)