

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2012.06.007

无坝体温度监测数据老坝的导温系数反演分析

王建^{1,2}, 卢兆辉³, 路振刚³

(1. 河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 国网新源控股有限公司, 北京 100761)

摘要: 为了解决缺乏坝体温度监测数据的老坝混凝土热学参数反演问题, 利用常见的坝体位移监测资料, 通过建立监控模型分离出温度分量, 运用温度分量相位与气温相位之间的滞后关系, 并借助温度场与变形场的有限元计算以及拟合优化, 提出一种基于变形监测资料的老坝导温系数反演方法, 并以丰满大坝为例进行了计算分析。结果表明, 反演得到的导温系数为 $0.0978 \text{ m}^2/\text{d}$, 在合理范围之内。

关键词: 变形; 老坝; 导温系数; 反演
中图分类号: TV331 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2012)06-0636-05

Inverse analysis of thermal diffusivity for old dams without temperature monitoring data

WANG Jian^{1,2}, LU Zhaohui³, LU Zhengang³

(1. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. State Grid Xinyuan Company Ltd., Beijing 100761, China)

Abstract: Based on the fact that most concrete dams are equipped with deformation observation devices, we separated the thermal components of monitored deformations by means of regression analysis. With the help of FEM and optimization and by the use of the phase lag between the thermal component and air temperature, we proposed a new inverse analysis method for thermal diffusivity identification, which can be applied to old dams whose inner temperatures are usually not monitored. Verification was performed by applying this method to the Fengman Dam. The result shows that the inversely analyzed thermal diffusivity was $0.0978 \text{ m}^2/\text{d}$, which falls within the reasonable range.

Key words: deformation; old dam; thermal diffusivity; inverse analysis

温度对重力坝、拱坝等大体积混凝土的应力具有重要的影响, 因此温度场的计算是大体积混凝土结构设计的重要内容之一。对于温度场和温度应力, 国内外有关学者^[1-2]开展了大量的研究, 取得了广泛而有价值的成果。准确计算温度场的前提之一是获取可靠的混凝土热学参数, 然而, 这些参数通常是由室内试验甚至经验得出的, 有时难以真实反映实际情况。因此, 如能根据现场监测数据进行反演分析, 对于准确把握热学参数、指导类似工程具有重要的意义, 国内外已经有学者对此进行了较为深入的研究^[3-11]。但现场监测数据一般是基于不同时刻、不同空间位置的温度测值, 对于某些工程, 如早期建设的老坝, 常常缺乏坝体温度监测资料, 如何获取这些工程的热学参数, 如导温系数等, 目前仍缺乏有效的手段。

变形监测是大坝最常规的监测项目, 对于中等规模以上的混凝土坝, 通常有完善的变形监测数据。如果

能够从这些变形监测数据中挖掘出混凝土导温系数的某些特征,对深入掌握大坝的工作性态是有帮助的。鉴于此,本文尝试提出一种基于变形的坝体导温系数反演方法。

1 坝体导温系数反演方法

热传导基本方程为

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

(1)

式中: T ——温度; τ ——时间; a ——混凝土的导温系数; x,y,z ——空间坐标; θ ——混凝土绝热温升,对于老坝,由于水化热已经消散,温度场计算时可不考虑 θ 的影响。

实践表明:受气温周期性变化的影响,坝体位移也表现出明显的周期性特征,且其相位滞后于气温,如图1所示;而且,滞后时间 Δ 与混凝土导温系数 a 具有很强的相关性。因此,如果能准确计算出 Δ ,那么,结合温度场及温度变形的有限元计算,则可以反演得到坝体的综合导温系数。

1.1 温度分量的提取

在大坝安全监测资料分析中,常通过建立监控模型,如统计模型,将观测效应量(如坝体位移)分解为水压分量、温度分量和时效分量^[12]。其中,温度分量用于刻画效应量受温度变化的影响程度。对于运行多年的老坝,坝体温度变化进入准稳定状态,坝体变形的温度分量呈周期性变化,且相位特征基本不受坝体材料性质(如各种材料的分布及其弹性模量、热膨胀系数、泊松比等)以及地基岩体地质条件(结构面产状、结构面充填物的力学参数、基岩变形模量及其分布等因素)等非周期性因素的影响,这种情况下,采用统计模型分离效应量的温度分量精度总体上较高。

当对坝体变形监测数据采用统计监控模型进行分析时,温度分量可采用余弦函数表示,即

$$\delta_T = b \cdot \cos(\omega t - \varphi')$$

(2)

式中: δ_T ——温度分量; b ——温度分量振幅; ω ——圆频率,取 $\frac{2\pi}{365}$; t ——观测日到始测日的时间,d; φ' ——温度分量的初始相位,rad。

1.2 滞后时间的确定

类似的,气温也可以采用余弦函数来表示。设气温的形式为

$$T_a = T_{am} - A_a \cdot \cos(\omega t - \varphi)$$

(3)

式中: T_a ——气温; T_{am} ——年平均气温; A_a ——气温振幅; φ ——气温初始相位,rad。

效应量的温度分量与气温之间的相位差则代表了滞后时间。如图1所示,气温及效应量的温度分量均为余弦函数,当规定坝体位移向下游为正时,温度下降时位移增加,因此两者呈负相关关系,且坝顶位移曲线略滞后于气温。

对比式(2),(3)可知,温度分量滞后于气温的相位差为

$$\Delta\varphi = \varphi' - \varphi$$

(4)

将相位角转化为天数,则滞后时间为

$$\Delta = \frac{\Delta\varphi}{\omega} = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \times 365$$

(5)

1.3 导温系数与滞后时间的关系

仅考虑温度荷载作用,计算出坝体内的准稳定温度场以及由此产生的温度变形,通过相位的比较,可以得到测点处坝体位移的峰值相对于气温的滞后时间 Δ 。假定不同的坝体材料导温系数 a_i ,则根据有限元模拟,可以得到多个反映导温系数 a_i 与滞后时间 Δ_i 关系的样本点。计算表明:坝顶位移滞后于气温的时间通

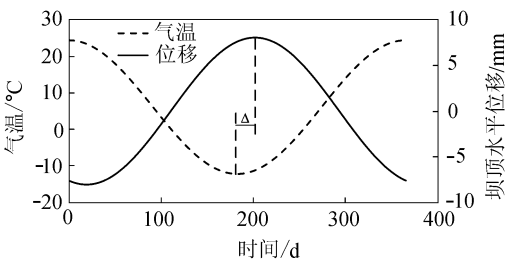


图1 坝顶水平位移滞后于气温示意图
Fig. 1 Schematic diagram of phase lag of dam's horizontal displacement to air temperature

常随着导温系数的增加而降低,曲线如图2所示。根据曲线的特征,可以采用多项式拟合坝体导温系数与滞后时间的关系,一般采用二次多项式可以很好地拟合:

$$\Delta = f(a) = c_0 + c_1a + c_2a^2$$

(6)

式中, c_0, c_1, c_2 为系数,可采用最小二乘法等优化方法确定。

这里应说明,计算坝顶位移时,所涉及的边界温度除了气温以外,还包括水温。对于有水温监测的大坝,可以直接采用监测值;若无水温监测资料,则可按经验公式确定,如文献[13]中的方法。

1.4 导温系数反演

当根据式(5)获得坝顶位移相对于环境温度的滞后时间后,则坝体混凝土的导温系数为

$$a = f^{-1}(\Delta)$$

(7)

式中, f^{-1} 为函数 f 的反函数。

由于 f 为二次多项式形式,即式(6),因此, a 可通过直接求解二次方程得到。

2 计算实例

丰满水电站是1949年中华人民共和国成立前我国修建的第一座大型水力发电工程。枢纽工程由混凝土重力坝、溢流坝、坝后式厂房及变电站、左岸泄洪洞(后改建成三期引水洞)及三期发电厂房组成,最大坝高91.7 m,坝顶长度1080 m,坝顶高程267.70 m,共有60个坝段。这里以38~40号挡水坝段2001—2010年间坝顶顺河向的水平位移为例,对丰满老坝坝体材料的导温系数进行反演分析。

2.1 滞后时间确定

由于丰满大坝为重力坝且规定位移向下游为正,温降时坝顶位移增加,因此,最大位移出现时间与最低气温值出现时间之差即为滞后时间 Δ 。为了避免复杂边界以及引水或泄水等不确定因素对坝体温度场计算的影响,本文选择接近河床中央且远离溢流坝段和厂房的38~40号3个挡水坝段的坝顶水平位移建立监控模型:

$$\delta = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i H^i + \left(b_1 \sin \frac{2\pi t}{365} + b_2 \cos \frac{2\pi t}{365} \right) + \sum_{i=1}^3 c_i t^i$$

(8)

式中: δ ——坝顶位移; H ——上游水位; a_0, a_i, b_1, b_2, c_i ——回归系数。括号内为温度分量形式,通过和差化积可转化为式(2)的形式。

监控模型的复相关系数、拟合标准差、温度分量等主要成果见表1。从表1可以看出,各测点温度分量的初始相位比较接近,平均值约为0.4348。

表1 监控模型主要成果

Table 1 General results of regression equation for safety monitoring

测点编号	回归模型 复相关系数	标准差/ mm	温度分量
D38	0.969	0.719	$\delta_T = 3.9841 \cos \frac{2\pi t}{365} + 1.9598 \sin \frac{2\pi t}{365} = 4.44 \cos \left(\frac{2\pi t}{365} - 0.4371 \right)$
D39	0.973	0.676	$\delta_T = 4.0242 \cos \frac{2\pi t}{365} + 2.0118 \sin \frac{2\pi t}{365} = 4.50 \cos \left(\frac{2\pi t}{365} - 0.4434 \right)$
D40	0.973	0.646	$\delta_T = 3.9164 \cos \frac{2\pi t}{365} + 1.8619 \sin \frac{2\pi t}{365} = 4.34 \cos \left(\frac{2\pi t}{365} - 0.4237 \right)$

气温初始相位根据丰满坝址区气温实测资料按余弦函数拟合后得到,拟合函数为

$$T_a = 6.45 - 18.23 \cos \left(\frac{2\pi t}{365} - 0.2316 \right)$$

(9)

本文始测日取2010年1月1日。

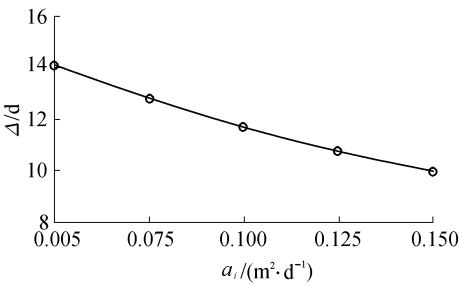


图2 混凝土导温系数与滞后时间的关系
Fig. 2 Relationship between phase lag and thermal diffusivity

根据各测点的平均相位以及式(9)中的相位,由式(5)可以得到 $\Delta=11.8\text{ d}$ 。

2.2 温度场计算

分别假设坝体导温系数为 $0.050\text{ m}^2/\text{d}$, $0.075\text{ m}^2/\text{d}$, $0.100\text{ m}^2/\text{d}$, $0.125\text{ m}^2/\text{d}$, $0.150\text{ m}^2/\text{d}$, 进行温度场计算。各工况下, 坝体初始温度均取多年平均气温。为了消除初始温度对准稳定温度场的影响, 温度场计算时间较长, 共 30 a ; 而计算坝顶变形, 为了减小计算量, 仅取最后 1 年 (2010 年) 进行计算。计算软件采用 ABAQUS。

温度场计算时的边界条件包括气温和水温。其中, 坝体上游面在 $2001\text{—}2010\text{ 年}$ 间的平均库水位以下采用水温边界, 其余采用气温边界。气温边界按式(9)计算, 水温边界利用丰满水库温度实测资料的拟合公式计算^[13]:

$$T(y, \tau) = 5.67 + 5.43e^{-0.04y} + 13.4e^{-0.018y} \cos\left[\frac{2\pi}{12}(\tau - 6.5 - 2.15 + 1.30e^{-0.085y})\right] \tag{10}$$

式中为 y 水深, m 。

图 3 为导温系数取 $0.075\text{ m}^2/\text{d}$, 气温最低时的坝体温度场分布云图。为尽量提高坝体显示的比例尺, 增加云图的清晰度, 坝基部分未在图中给出。

2.3 导温系数的反演

根据不同导温系数下温度场的成果, 假设弹性模量为 25 GPa , 线膨胀系数为 1.0×10^{-5} , 采用 ABAQUS 有限元软件分别对 2010 年 的坝体温度变形进行了计算, 并输出各个时刻测点位置的变形量, 由此可确定最大位移出现时间。将其与气温最低时间进行对比, 即可得到不同导温系数下坝顶位移滞后于气温的时间。这里要说明的是, 尽管位移计算时弹性模量与线膨胀系数是假设的, 但对坝体位移周期性的相位特征, 如最大位移出现时间是没有影响的, 因此不会给滞后时间的确定带来误差。

分别取导温系数为 $0.050\text{ m}^2/\text{d}$, $0.075\text{ m}^2/\text{d}$, $0.100\text{ m}^2/\text{d}$, $0.125\text{ m}^2/\text{d}$, $0.150\text{ m}^2/\text{d}$, 得到对应的滞后时间为 14.1 d , 12.8 d , 11.7 d , 10.8 d , 10.0 d , 图 2 为对应曲线。对上述结果按式(6)进行拟合, 得到回归方程(11), 其复相关系数 $R=0.999$, 接近 1.0 , 拟合精度很高。

$$\Delta = f(a) = 137.1a^2 - 68.23a + 17.16 \tag{11}$$

将 $\Delta=11.80$ 代入式(11), 求解二次方程并舍去不合理的解, 得到坝体的导温系数为 $0.0978\text{ m}^2/\text{d}$ 。

3 结 论

- a. 对于运行多年的老坝, 坝体温度变化进入准稳定状态, 坝体变形的温度分量呈周期性变化, 且相位特征基本不受坝体材料性质 (如各种材料的分布及其弹性模量、热膨胀系数、泊松比等) 以及地基岩体地质条件 (结构面产状、结构面充填物的力学参数、基岩变形模量及其分布等因素) 等非周期性因素的影响, 这种情况下, 采用统计模型分离温度分量的精度总体上较高。
- b. 导温系数 a 的反演主要是利用坝体位移的温度分量滞后于气温的时间 Δ , 因此, Δ 的精度将直接影响 a 的反演精度。本文通过建立监控模型分离出余弦形式的坝体温度分量, 同时对气温也采用余弦函数拟合, 利用两者间的相位差来确定坝体位移滞后于气温的时间 Δ , 而不是以目测的方法, 保证了 Δ 的准确性。
- c. 从丰满大坝导温系数的反演成果来看, $a=0.0978\text{ m}^2/\text{d}$ 在合理范围之内, 可以认为反演的成果是可信的。因此, 本文方法是可行的。不过, 若将该数值与常规混凝土导温系数总体均值^[1]相比, 略显偏低, 这是否与坝体混凝土老化有关目前尚无法定论。
- d. 由于坝体取不同导温系数时算出的滞后时间的变化范围较窄, 使得导温系数对滞后时间较为敏感, 这是本文方法的不足之处。因此, 当坝体内布置有温度计时, 宜优先采用基于坝体温度测值的反演方法。但对于缺乏坝体温度测值的老坝, 本文方法则具有明显优势, 可为大坝安全监测的分析评估提供有益信息。

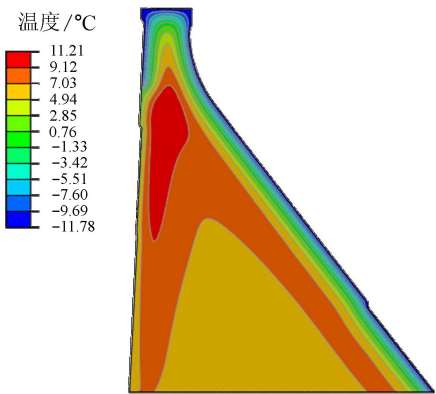


图 3 低温时坝体温度场分布云图
Fig. 3 Contour of dam temperature when air temperature is low

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,1998.
- [2] CARSLAW H S, JAEGER J C. Conduction of heat in solids[M]. 2th ed. Oxford:Oxford University Press,1959.
- [3] KOHN R, VOGELINS M. Determining conductivity by boundary measurements[J]. Common Pure Applied Mathematics,1984, 37(3):289-298.
- [4] KUNIHITO M, NORIYUKI N, YOSHIERU D, et al. Inverse method for estimation of thermal properties of mass concrete[J]. Transactions of the Japan Concrete Institute,1994,16:131-138.
- [5] NAKAMURE M, TANAKA M, ADACHI O. Simulation of temperature control for transient heat conduction fields using boundary element inverse analysis[C]// Proceeding of the 1995 Joint ASME/JSME Pressure Vessels and Piping Conference. New York: ASME,1995:19-24.
- [6] 刘宁,张剑,赵新铭. 大体积混凝土结构热学参数随机反演方法初探[J]. 工程力学,1996,20(5):114-120. (LIU Ning, ZHANG Jian, ZHAO Xinming. Stochastic back analysis of thermal parameters of mass concrete structures[J]. Engineering Mechanics,1996,20(5):114-120. (in Chinese))
- [7] LESNIC D, ELLIOTT L, INGHAM D B. An inverse coefficient identification problem for the heat equation[C]//International Symposium on Inverse Problems in Engineering Mechanics. Nagano, Japan:[s. n.],1998:11-16.
- [8] NOWAK I, NOWAK A J, WROBEL L C. Boundary and geometry inverse thermal problems in continuous casting[C]// International Symposium on Inverse Problems in Engineering Mechanics IV. Nagano, Japan:[s. n.],2003:21-31.
- [9] 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,2004,21(3):338-342. (ZHANG Yuxin, SONG Yupu, WANG Denggang. Inverse analysis of three dimensional unsteady temperature field with genetic algorithms[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics,2004,21(3):338-342. (in Chinese))
- [10] JEONG J H, ZOLLINGER D G. Finite-element modeling and calibration of temperature prediction of hydrating Portland cement concrete pavements[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2006,18(3):317-324.
- [11] KUZMANOVIC V, SAVIC L, STEFANAKOS J. Long-term thermal two- and three-dimensional analysis of roller compacted concrete dams supported by monitoring verification[J]. Canadian Journal of Civil Engineering,2010,37(4):600-610.
- [12] 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.
- [13] 朱伯芳. 库水温度估算[J]. 水利学报,1985(2):12-21. (ZHU Bofang. Prediction of water temperature in reservoirs[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1985(2):12-21. (in Chinese))