

大坝观测资料分析中谐波温度因子的改进及应用

王 建¹, 郑东健¹, 姜海霞²

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学人事处, 江苏 南京 210098)

摘要: 首先从物理、数学的角度, 论述了大坝观测资料回归计算模型中谐波温度因子的起源; 之后, 对其进行了改进, 以考虑气温随机项的影响, 最后通过对谐波温度因子系数的分析, 给出了确定观测效应量滞后于气温时间的计算公式. 实际应用表明, 改进后不但计算精度有所提高, 而且温度分量与时效分量分配也更加合理; 同时, 应用本文提出的方法可以比较精确地计算出观测效应量滞后于气温的时间. 这些都为正确评价大坝工作性态提供了良好的参考.

关键词: 大坝观测; 谐波; 温度因子

中图分类号: TV64 文献标识码: A 文章编号: 1000-198X(2002)01-0068-05

在大坝观测资料分析处理时, 通常采用逐步回归法将观测效应量分解为水压分量 δ_H 、温度分量 δ_T 以及时效分量 δ_θ , 对渗流观测, 还考虑降雨分量 δ_R . 通过分析各分量占整个效应量的比重, 来找出影响观测效应量的主要因素. 其中, 温度分量因子可采用统计模型或确定性模型, 谐波因子即为统计模型的温度因子, 其形式如下:

$$\delta_T = \sum_{i=1}^m [b_{1i}(\cos(\omega_i t) - \cos(\omega_i t_0)) + b_{2i}(\sin(\omega_i t) - \sin(\omega_i t_0))] \tag{1}$$

式中: δ_T ——观测初始日至观测日, 观测效应量的变化量; t ——观测初始日到观测日时间, d ; ω_i ——气温圆频率, $\omega_i = 2\pi i/365$; m ——取 1 或 2, 表示温度分量按年或半年周期变化.

虽然谐波因子无法反映气温突变及建坝初期混凝土水化热的影响, 但由于以谐波作温度因子时, 计算不需要实测温度资料, 因此, 对缺少温度资料或测值无法对应时(如位移观测时无对应温度计测值), 仍不失为一种较好的模型. 考虑到谐波因子具有的这种优越性, 本文将对其作进一步探讨与完善, 并应用其回归系数来求观测效应量滞后于气温的时间.

1 基本原理

1.1 温度分量的“谐波因子”起源

实测资料以及理论计算^[1]表明, 在不考虑水化热影响时, 坝体内任一点的温度基本呈周期性变化, 即

$$T_j(t) = \bar{T}_j + u_j \sin(\omega t + \varphi_j) \tag{2}$$

式中: $\bar{T}_j$ —— j 点的年平均温度; u_j —— j 点的温度变幅; ω ——气温圆频率, $\omega = 2\pi/365$; φ_j —— j 点处温度的初始相位角.

由弹性力学有限元分析^[2], 在变温场作用下, 大坝任一点的位移与各节点的变温值呈线性关系, 即

$$\delta_T = \sum_{j=1}^n a_j \Delta T_j \tag{3}$$

式中: ΔT_j ——节点 j 的变温值; a_j ——节点 j 发生单位变温时对观测效应量的估计; n ——节点总数.

设任一节点 j 的温度随时间作正弦函数变化, 则节点 j 的变温值为

$$\Delta T_j = T_j(t) - T_j(t_0) = [\bar{T}_j + u_j \sin(\omega t + \varphi_j)] - [\bar{T}_j + u_j \sin(\omega t_0 + \varphi_j)] =$$

收稿日期: 2000-12-15
基金项目: 教育部高等学校骨干教师资助计划资助
作者简介: 王建(1975—), 男, 博士研究生, 江苏南通人, 主要从事水工建筑物安全监控研究.

$$u_j \sin(\omega t + \varphi_j) - u_j \sin(\omega t_0 + \varphi_j) \tag{4}$$

式中符号含义同上.

对式(4)和差化积后代入式(3),并以 $\cos(\omega t) - \cos(\omega t_0)$ 和 $\sin(\omega t) - \sin(\omega t_0)$ 作为因子合并同类项有

$$\delta_T = b_1 [\cos(\omega t) - \cos(\omega t_0)] + b_2 [\sin(\omega t) - \sin(\omega t_0)] \tag{5}$$

其中

$$b_1 = \sum_{j=1}^n (a_j u_j \sin \varphi_j) \quad b_2 = \sum_{j=1}^n (a_j u_j \cos \varphi_j)$$

式(5)即为以谐波作为温度分量因子的物理意义.该式表明,若假设坝体内任一点温度按正弦函数变化,那么测点位移的温度分量 δ_T 将具有式(5)的形式.也就是说,以谐波作为因子能综合反映整个坝体、坝基变温场对测点位移温度分量 δ_T 的影响.另外要指出的是,在高寒地区,坝内温度可能低于冰点而出现冻胀、冻融交替,由于水在冰点上下线胀系数的差异导致温度分量也相应呈现一定程度的半年周期变化,此时温度分量形式应按式(1)中 $m=2$ 计算.

1.2 对谐波因子的改进

1.2.1 考虑气温突变影响

考虑到气温并非严格的周期函数,同时它又受各种随机因素影响.现假设气温为周期温度与随机温度之和,其形式如下:

$$T_{\text{air}} = \bar{T}_{\text{air}} + q \sin(\omega t + \varphi_0) + T_r(t) \tag{6}$$

式中: T_{air} ——实际气温; $\bar{T}_{\text{air}}$ ——多年平均气温; q ——气温年变幅; φ_0 ——气温初始相位; $T_r(t)$ ——气温随机项.

由文献[1]可知, $T_r(t)$ 对表层混凝土温度有影响,且其滞后于气温的时间约为 0~2 d.考虑 $T_r(t)$ 的滞后效应,建模时温度分量采用以下形式:

$$\delta_T = b_1 [\cos(\omega t) - \cos(\omega t_0)] + b_2 [\sin(\omega t) - \sin(\omega t_0)] + \sum_{k=0}^2 c_k T_r(t-k) \tag{7}$$

式中: c_k ——回归系数; $T_r(t-k)$ ——观测日前 k 天的随机气温值.

我们定义 $T_r(t-k)$ 为“随机气温因子”.下面以变形为例,说明取 $T_r(t-k)$ 作为回归因子的必要性.因上游面坝体混凝土与库水接触,受 $T_r(t)$ 影响较小, $T_r(t)$ 主要引起下游面混凝土表层温度变化.这样,由温度变化引起的坝体上下游面混凝土应变有较大差异,从而,产生沿上下游向位移,特别是在作为变形控制的坝顶,因此,建模应考虑 $T_r(t)$ 的影响.下面说明 $T_r(t)$ 的计算方法.

以气温 T_{air} 为因变量,以 $\cos \omega t$ 、 $\sin \omega t$ 作为回归因子,进行多元线性回归:

$$T_{\text{air}} = \bar{T}_{\text{air}} + q_1 \cos(\omega t) + q_2 \sin(\omega t) \tag{8}$$

求出 $\bar{T}_{\text{air}}$ 、 q_1 、 q_2 、 $\bar{T}$ 后,进一步求得

$$T_r(t) = T_{\text{air}} - \bar{T}_{\text{air}} \tag{9}$$

1.2.2 考虑水化热影响

应力应变类仪器,一般在混凝土浇注后不久就开始观测,因此其温度分量受水化热影响较大.下面以钢筋计为例,讨论温度因子的选择.

如果仅用谐波作为温度因子,建立回归模型时经常将水化热引起的温度分量转嫁给时效,从而产生不合理的结果.同样,如果仅用钢筋计(差动电阻式仪器)测出的温度作为温度因子,也是不全面的,因为虽然钢筋计温度能反映测点处的水化热,但钢筋应力的温度分量是整个坝体温度场综合作用的结果,仅用钢筋计温度作因子则有一定的局限性.实测资料也表明,钢筋应力与钢筋计测得的温度一般是不同步的,而是随钢筋计埋设部位的不同呈现出“滞后”或“超前”.为补偿这种“滞后”或“超前”,可以再加入谐波因子进行调整.应用实例表明,这样调整效果较好,不但精度高,而且分量也很合理.

1.3 观测效应量滞后于气温时间的确定

当坝内温度基本处于冰点以上时,可通过由式(8)求出的 q_1 和 q_2 来求式(6)中的 φ_0 ,设

$$q_1 = q \sin \varphi \tag{10}$$

$$q_2 = q \cos \varphi \tag{11}$$

式(10)和式(11)中, $q = \sqrt{q_1^2 + q_2^2}$.

将(10)和(11)两式代入式(8),得

$$T_{\text{air}} = \bar{T}_{\text{air}} + q \sin \varphi \cos(\omega t) + q \cos \varphi \sin(\omega t) + T_r(t) \quad (12)$$

积化和差:

$$T_{\text{air}} = \bar{T}_{\text{air}} + q \sin(\omega t + \varphi) + T_r(t) \quad (13)$$

对比(13)和(6)两式的正弦项,可以看出,式(10)和(11)中的 φ 即为气温初始相位 φ_0 .

设 $0 < \varphi < 2\pi$, 由式(10)和(11)容易求出:

$$\varphi_0 = \varphi = \begin{cases} \arctan(q_1/q_2) & (q_2 > 0, q_1 > 0) \\ \arctan(q_1/q_2) + 2\pi & (q_2 > 0, q_1 < 0) \\ \arctan(q_1/q_2) + \pi & (q_2 < 0) \\ \pi/2 & (q_2 = 0, q_1 = q) \\ 3\pi/2 & (q_2 = 0, q_1 = -q) \end{cases} \quad (14)$$

同理,由式(7)中的谐波温度因子的系数 b_1 和 b_2 可以求出 φ'_0 ,使式(7)等价于下式:

$$\delta_T = cst + b \sin(\omega t + \varphi'_0) + \sum_{k=0}^2 c_k T_r(t - k) \quad (15)$$

其中

$$b = \sqrt{b_1^2 + b_2^2} \quad cst = -b_1 \cos(\omega t_0) - b_2 \sin(\omega t_0)$$

对比式(6)和式(15)中的正弦项可知,测点效应量滞后于气温的相位差为

$$\Delta\varphi = \begin{cases} \varphi_0 - \varphi'_0 & \varphi_0 > \varphi'_0 \\ \varphi_0 - \varphi'_0 + 2\pi & \varphi_0 < \varphi'_0 \end{cases} \quad (16)$$

将相位角转化为天数:

$$\Delta t = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \times 365 \quad (17)$$

式(14)和(16)和(17)即为测点效应量滞后于气温时间的计算公式.

2 应用实例

2.1 考虑气温突变的模型以及温度滞后时间确定

2.1.1 梅山水电站工程概况

梅山水库位于淮河支流史河上游的安徽省金寨县,流域面积 1970 km^2 ,总库容 23.37 亿 m^3 ,水库正常蓄水位 128.0 m . 水库枢纽工程 1954 年 3 月开工,1956 年 4 月竣工. 枢纽大坝由连拱坝、接拱重力坝和空心重力坝组成,最大坝高 88.24 m . 梅山大坝的正垂线系统共有 15 个测点,分别布置在 2#~4# 垛、9#~15# 垛上,系统在 1982 年 4 月进行了改造.

2.1.2 坝顶水平位移计算模型及结果

模型采用统计模型,计算采用逐步回归法. 由于系统在 1982 年 4 月进行了改造,因而在建模时,将资料分成两段进行. 对 1982 年 4 月以后的观测数据,由于从建坝至 1982 年已有近 30 年时间,坝体水化热已基本散尽,坝内温度场为准稳定温度场,因此,测点水平位移统计模型如下:

$$\delta = a_0 + \sum_{i=1}^4 [a_{1i}(H_1^i - H_{10}^i) + a_{2i}(H_2^i - H_{20}^i)] + [b_1(\cos \frac{2\pi t}{365} - \cos \frac{2\pi t_0}{365}) + b_2(\sin \frac{2\pi t}{365} - \sin \frac{2\pi t_0}{365}) + \sum_{k=0}^2 c_k T_r(t - k)] + [d_1 \theta + d_2(\ln \theta)] \quad (18)$$

式中: H_1, H_2, H_{10}, H_{20} ——上下游水深及水深初值; t ——观测初始日到观测日时间, d ; θ —— $t/100$, 当 $t = 0$ 时,取 $\ln \theta = 0$.

表 1 中 2# y ~4# y 和 9# y ~15# y 是 2#~4# 垛和 9#~15# 垛坝顶水平位移测点,计算所采用的数据为 1982 年以后上下游方向位移观测数据. R_1, R_2, S_1, S_2 分别为不考虑和考虑 $T_r(t)$ 时,计算出的复相关系数与剩余均方差. Δt 为计算出的滞后时间. 可以看出,考虑 $T_r(t)$ 的复相关系数比不考虑 $T_r(t)$ 的要高 $0.03 \sim 0.05$.

左右,而剩余均方差要低 0.03~0.04 mm 左右.滞后时间为靠近两岸的 2[#]、3[#]、14[#]和 15[#] 垛测点位移滞后于气温时间比河床中央的 9[#]、10[#]、11[#] 垛要短,这也与实际情况一致.

表 1 梅山连拱坝坝顶水平位移计算成果

计算量	测 点									
	2 [#] y	3 [#] y	4 [#] y	9 [#] y	10 [#] y	11 [#] y	12 [#] y	13 [#] y	14 [#] y	15 [#] y
R ₁	0.791	0.793	0.828	0.737	0.807	0.770	0.811	0.594	0.754	0.756
R ₂	0.839	0.812	0.844	0.746	0.825	0.796	0.838	0.646	0.781	0.798
S ₁ /mm	0.76	0.69	0.65	0.66	0.63	0.68	0.87	0.52	0.71	0.46
S ₂ /mm	0.70	0.65	0.61	0.63	0.59	0.65	0.85	0.50	0.67	0.40
Δt/d	30	49	83	101	85	91	66	61	26	2

图 1 中曲线 I 为 11[#] y 测点实测位移及拟合过程线,曲线 II 为考虑 $T_r(t)$ 时的温度分量过程线,曲线 III 为坝上实测气温及按正弦曲线拟合的过程线.为清晰起见,图中只绘制了 1982~1987 年的过程线.对照曲线 II、III 可以看出,考虑 $T_r(t)$ 后,III 中气温突变在 II 中得到了比较恰当的反映.而且,从图中可以看出,测点位移滞后于气温的时间大约为 3 个月,与计算值 91 d 吻合得很好.

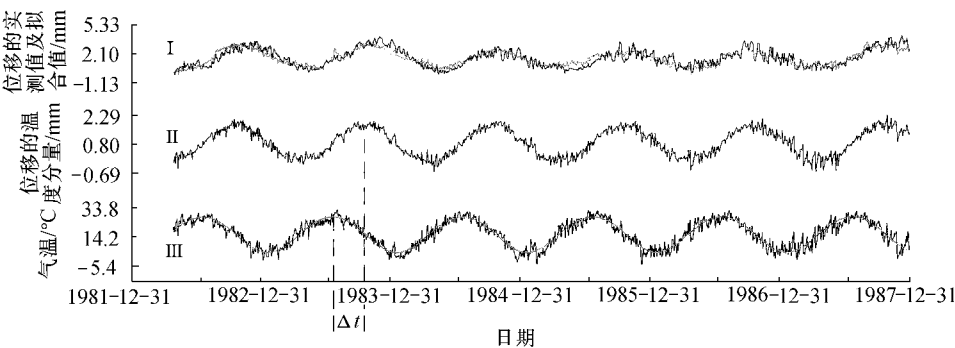


图 1 梅山 11[#] y 位移、温度分量、气温测值过程线

Fig.1 Process curve of displacement ,temperature component and air temperature at 11[#] y

2.2 考虑混凝土水化热的模型

2.2.1 凌津滩水电站工程概况

凌津滩水电站位于湖南省沅水干流下游桃源县境内,是沅水干流梯级开发的最后一个梯级.大坝为混凝土重力坝,坝体分 44 个坝段,坝顶高程 65.50 m,最大坝高 52.05 m,正常蓄水位 51.00 m,汛期限制水位 50.00 m,控制流域面积 85 800 km².工程从 1995 年 10 月开工,1998 年 12 月 28 日首台机组发电.

2.2.2 钢筋计计算模型及结果

凌津滩大坝钢筋计模型采用统计模型,计算采用逐步回归法.为考虑坝体水化热,温度因子采用实测温度与谐波组合,具体模型形式如下:

$$\sigma = a_0 + \sum_{i=1}^3 [a_{1i}(H_1^i - H_{10}^i) + a_{2i}(H_2^i - H_{20}^i)] +$$
$$[b_1(\cos \frac{2\pi t}{365} - \cos \frac{2\pi t_0}{365}) + b_2(\sin \frac{2\pi t}{365} - \sin \frac{2\pi t_0}{365}) + b_3 T_R] + [d_1 \theta + d_2 (\ln \theta)] \tag{19}$$

式中: T_R ——钢筋计实测温度;其它符号含义同前.

以 7[#] 坝段钢筋计 7R₁ 为例,计算得出复相关系数 $R = 0.83$,标准差 $S = 4.1$ MPa.图 2 为 7R₁ 的实测温度、拟合值、温度分量和时效分量过程线.由过程线可以看出:(a)钢筋应力与温度测值不同步,钢筋应力滞后于实测温度;(b)温度分量随时间增长稍有增大,产生这种现象是由水化热消散引起;(c)实测值与拟合值吻合,说明由于因子的存在,钢筋应力与温度值不同步得到了调整;(d)时效随时间有增大的趋势,但数值不大且渐趋稳定,可以认为钢筋应力正常.

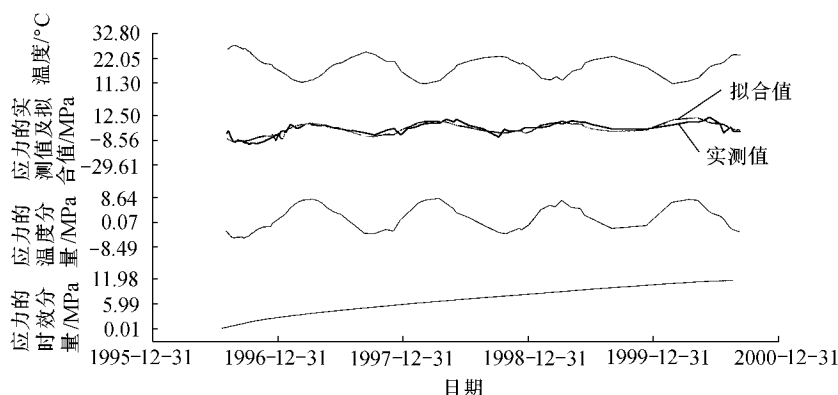


图2 钢筋计 $7R_1$ 实测温度、拟合值、温度分量和时效分量过程线

Fig.2 Process curve of temperature ,regression value ,temperature component , and time effect component measured with re-bar stress metre $7R_1$

由计算结果可以得到如下结论:虽然温度分量、时效分量都随时间增长,但温度分量的增长并没有转移给时效,而是恰当地反映了水化热的影响,因此,两者的分配是合理的。

3 结 论

实际应用表明:本文提出的改善谐波因子的方法是可行的,文中所提出的确定观测效应量滞后于气温的时间的计算公式是合理的。本文提供的方法不但提高了模型计算精度,使温度分量的分离结果更接近实际情况,而且可以比较精确地计算出观测效应量滞后于气温的时间,从而给正确评价大坝工作性态提供了依据。

参考文献:

- [1] 朱伯芳,王同生,丁宝瑛,等.水工混凝土结构的温度应力与温度控制[M].北京:水利电力出版社,1976.42~46.
- [2] 吴中如,沈长松,阮焕祥,等.水工建筑物安全监控理论及其应用[M].南京:河海大学出版社,1990.40~41.

Improvement of Harmonic Wave Temperature Factor and Its Application to Analysis of Dam Monitoring Data

WANG Jian¹, ZHENG Dong-jian¹, JIANG Hai-xia²

- (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;
2. Personal Division, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: From the angle of physics and mathematics, discussed is the origination of the harmonic wave temperature factor in regression calculation model for dam monitoring data. In consideration of the random effect of temperature, the temperature factor is improved in this paper. Based on the analysis of the factor, a formula is given to calculate the time lag of the monitoring effect to the atmospheric temperature. Application shows that the improved factor may not only help improve the calculation precision, but also make the allocation of temperature component and time effect component more reasonable, providing a basis for the evaluation of dam operation behavior.

Key words: dam monitoring; harmonic wave; temperature factor