

碾压混凝土坝温度线膨胀系数反演分析

李 云^{1 2}, 黄光明^{1 3}, 朱国金²

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院, 云南 昆明 650051; 3. 云南华能澜沧江水电有限公司, 云南 昆明 650214)

摘要 根据碾压混凝土坝实测温度资料,研究了坝体综合双向异性温度线膨胀系数的优化反演方法,在此基础上,依据变形等效原理和串并联理论,推导了层面影响带的温度线膨胀系数的计算公式。算例计算结果表明,用本文方法计算得到的参数值符合大坝运行的实际情况,层面影响带的存在对碾压混凝土坝的温度应变有一定的影响。

关键词 碾压混凝土坝 温度线膨胀系数 反演分析 层面影响带

中图分类号 TV642.2 **文献标识码** A **文章编号** 1006-7647(2008)03-0025-04

Back analysis of thermal expansion coefficients of RCC dam/LI Yun^{1 2}, HUANG Guang-ming^{1 3}, ZHU Guo-jin² (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Kunming Hydropower Investigation Design and Research Institute, CHECC, Kunming 650051, China; 3. Yunnan Huaneng Lancang River Hydropower Co., Ltd, Kunming 650214, China)

Abstract : Based on the temperature data of an RCC dam, an optimization method for back analysis of the thermal linear expansion coefficients is proposed. The formulas for determination of temperature linear expansion coefficients of the effect zones are derived based on the equivalent deformation principle and a series-wound and shunt-wound model. Results of an example calculation show that the effect zones have some influence on temperature strain in an RCC dam.

Key words : RCC dam, thermal expansion coefficients, back analysis, effect zone

温度对大体积混凝土结构的应力影响较为显著,国内外许多学者就混凝土坝温度场以及温度应力的分析开展了大量的研究工作。对于常规混凝土坝,目前已经建立了一套比较成熟的设计理论和分析方法。而对于碾压混凝土坝,尽管其与常态混凝土坝的工作原理基本相同,但由于碾压混凝土中掺入了大量的混合料及碾压混凝土坝大仓面薄层碾压、逐层上升等施工特点,使得碾压混凝土坝温度场及其效应场与常态混凝土坝有一定的差别。

混凝土的温度线膨胀系数是影响坝体温度效应场的主要因素,一般主要是根据经验或试验确定,并不能真实地反映出坝体混凝土受热膨胀的情况。与此同时,由于碾压混凝土坝施工层面的存在,使得它的温度线膨胀系数与常规混凝土坝的温度线膨胀系数的特征存在差异。为合理选用碾压混凝土坝温度线膨胀系数,正确分析和评价温度变化引起坝体的效应场,笔者根据碾压混凝土坝变形和温度实测资料,对碾压混凝土坝温度综合线膨胀系数的反演分

析方法进行了研究,在此基础上,依据变形等效原理和串并联理论,推导了层面影响带的温度线膨胀系数的求解公式。

1 坝体综合温度线膨胀系数反演

碾压混凝土坝由于层面影响带^[1]和本体的弹性模量、渗透系数不同,使得坝体综合弹性模量、综合渗透系数呈现明显的双向异性^[2-3],温度线膨胀系数也有类似的规律,由于层面影响带的存在,层面影响带和本体温度线膨胀系数不同,从而导致坝体综合线膨胀系数也呈现了双向异性的特征,即坝体水平方向和竖直方向的温度线膨胀系数不等。

1.1 反演方法

假设碾压混凝土坝竖直方向和水平方向的温度线膨胀系数分别为 α_1, α_2 ,在温度荷载 ΔT 作用下,将引起坝体的变形为 $\delta_T = f(\alpha_1, \alpha_2, \Delta T)$ 。显然,在温度荷载 ΔT 已知时,变温引起坝体的变形为大坝综合温度线膨胀系数的函数,即 $\delta_T = f(\alpha_1, \alpha_2)$ 。故

反演坝体综合温度线膨胀系数的基本步骤是:首先利用数学模型^[4]从原型观测资料中分离出坝体在变温作用下的真实位移 δ'_T ,然后根据工程经验假定一组温度线膨胀系数 α_1, α_2 值,并采用结构分析法(如有限元)推求在变温条件下坝体的计算位移值 δ_T 。通过一些迭代计算,使得计算位移值 δ_T 与真实位移值 δ'_T 在某一评判尺度 J 下无限接近,这样解得的 α_1, α_2 值即为待求的碾压混凝土坝综合温度线膨胀系数值。

1.2 综合温度线膨胀系数的反演

一般而言,碾压混凝土坝变形主要受水压、温度和时效的影响^[4],坝体任一点的变形可表示为

$$\delta = \delta_H + \delta_T(\alpha_1, \alpha_2) + \delta_\theta \tag{1}$$

式中: $\delta_H, \delta_T, \delta_\theta$ 分别为变形的水压、温度和时效分量。

由式(1)可得

$$\delta_T(\alpha_1, \alpha_2) = \delta - (\delta_H + \delta_\theta) \tag{2}$$

利用式(2)得坝体变形的温度分量,可视为在温度荷载作用下坝体的真实位移 δ'_T ,则碾压混凝土坝综合温度线膨胀系数反演的目标函数为

$$J(\alpha_1, \alpha_2) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} W_{ij} [\delta_{Tij}(\alpha_1, \alpha_2) - \delta'_{Tij}(\alpha_1, \alpha_2)]^2 \tag{3}$$

式中: W_{ij} 为第 i 测点第 j 次测值的权重系数; $\delta_{Tij}(\alpha_1, \alpha_2)$ 为有限元计算得到的测点的温度分量; $\delta'_{Tij}(\alpha_1, \alpha_2)$ 为从实测位移中分离出的温度分量; i 为测点序号; n 为测点个数; j 为第 i 测点的测次; m_i 为第 i 测点的观测次数。

式(3)中, $J(\alpha_1, \alpha_2)$ 的最小值 $J(\alpha_1^*, \alpha_2^*)$ 即为大坝综合温度线膨胀系数的反演值,即

$$J(\alpha_1^*, \alpha_2^*) = \min_{\alpha_1, \alpha_2 \in D} J(\alpha_1, \alpha_2) = \min_{\alpha_1, \alpha_2 \in D} \left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} W_{ij} [\delta_{Tij} - \delta'_{Tij}(\alpha_1, \alpha_2)]^2 \right\} \tag{4}$$

式中 D 为参数 α_1 和 α_2 的可能取值区域。

当建立了上述参数反分析模型(式4)时,即可利用DFP优化方法^[5]来反演碾压混凝土坝双向综合温度线膨胀系数。

2 层面影响带温度线膨胀系数求解

坝体在温度荷载 ΔT 作用下产生水平方向和竖直方向应变,由于层面影响带和本体各自的温度线膨胀系数不同,它们在水平方向和竖直方向的自由膨胀量也就不相同。然而,层面与本体是黏结牢固

的,它们并不能各自自由膨胀,在水平方向上还应具有相同的应变变化量,这样势必要在层面影响带与本体之间产生附加应力来抵消层面影响带和本体的不同膨胀。而附加应力的大小又与本体和层面影响带的温度线膨胀系数密切相关。一般来说,本体的温度线膨胀系数通过试验能较方便地得到,而层面影响带的温度线膨胀系数很难通过试验求得。因此,以下探讨碾压混凝土坝层面影响带的温度线膨胀系数的求解方法。

依据复合材料力学分析思想^[6],采用薄层模型模拟碾压混凝土层(见图1)。假设碾压混凝土层面影响带线膨胀系数为 α_a ,厚度为 b_a ;本体的线膨胀系数为 α_c ,厚度为 b_c ;碾压混凝土层厚度为 B ($B = b_a + b_c$),下角标 a 表示层面影响带, c 表示本体。假设单元体只受到温度荷载(温度变化为 ΔT)的作用,并认为在同一时刻本体和层面影响带的温度变化是相同的、均匀的。

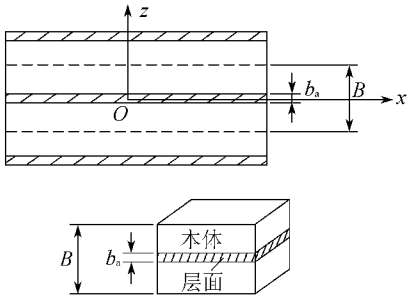


图1 薄层模型单元体

2.1 由并联模型推求 α_a

由变形协调关系可知,在同一时刻 t 整体与层面影响带及本体在水平方向的应变相等,即

$$\epsilon_c(t) = \epsilon_a(t) = \epsilon_c(t) \tag{5}$$

在温度荷载 ΔT 作用下,本体内产生水平向细观应力 σ_{c2} ,层面影响带内将产生水平向细观应力 σ_{a2} ,并有以下平衡方程:

$$\sigma_{c2} b_c + \sigma_{a2} b_a = 0 \tag{6}$$

用三单元模型来描述碾压混凝土坝的黏弹性,在温度荷载的作用下,有以下本构方程:

$$\begin{cases} \epsilon_{c2}(t) = \sigma_{c2} m + \alpha_c \Delta T \\ \epsilon_{a2}(t) = \sigma_{a2} n + \alpha_a \Delta T \end{cases} \tag{7}$$

其中 $m = \frac{1}{E_{c1}} + \frac{1}{E_{c2}} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_{c2}}{\eta_c} t\right) \right]$

$$n = \frac{1}{E_{a1}} + \frac{1}{E_{a2}} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_{a2}}{\eta_a} t\right) \right]$$

由式(5)、式(7)可得

$$\sigma_{a2} = \frac{m \sigma_{c2}}{n} + \frac{(\alpha_c - \alpha_a) \Delta T}{n} \tag{8}$$

由式(6)、式(8)可得

$$\sigma_{a2} = \frac{(\alpha_a - \alpha_c) \Delta T b_a}{nb_c + mb_a} \quad (9)$$

由式(8)式(9)得

$$\sigma_{a2} = \frac{(\alpha_c - \alpha_a) \Delta T b_c}{nb_c + mb_a} \quad (10)$$

又 $\varepsilon_2(t) = \alpha_2 \Delta T$, 并根据式(7)式(9)或式(10), 可得层面影响带的温度线膨胀系数为

$$\alpha_a = \alpha_2 + \frac{nb_c}{mb_a} (\alpha_2 - \alpha_c) \quad (11)$$

2.2 由串联模型推求 α_a

在温度荷载作用下, 在某一时刻 t , 整体竖直方向的应变为 $\varepsilon_i(t)$, 本体和层面影响带的竖直方向的应变分别为 $\varepsilon_{ci}(t)$, $\varepsilon_{ai}(t)$, 且它们应该满足以下的变形关系式:

$$B\varepsilon_i(t) = b_c \varepsilon_{ci}(t) + b_a \varepsilon_{ai}(t) \quad (12)$$

如果假设层面影响带的泊松比为 μ_a , 本体的泊松比为 μ_c , 则有

$$\varepsilon_{ci}(t) = -\mu_c \sigma_{c2} m + \alpha_c \Delta T \quad (13)$$

$$\varepsilon_{ai}(t) = -\mu_a \sigma_{a2} n + \alpha_a \Delta T \quad (14)$$

将式(9)式(10)分别代入式(13)和式(14), 得

$$\varepsilon_{ci}(t) = \frac{[(1 + \mu_c)mb_a + nb_c] \alpha_c \Delta T - \frac{\mu_c mb_a \alpha_a}{nb_c + mb_a} \Delta T}{nb_c + mb_a} \quad (15)$$

$$\varepsilon_{ai}(t) = \frac{[(1 + \mu_a)nb_c + mb_a] \alpha_a \Delta T - \frac{\mu_a nb_c \alpha_c}{nb_c + mb_a} \Delta T}{nb_c + mb_a} \quad (16)$$

又 $\varepsilon_i(t) = \alpha_1 \Delta T$, 并结合式(12)式(15)及式(16), 可得层面影响带的温度线膨胀系数 α_a , 即

$$\alpha_a = \frac{nb_c + mb_a}{(1 + \mu_a)b_a b_c n + (b_a^2 - b_a b_c)m} \alpha_1 - \frac{(1 + \mu_c)b_a b_c m + (b_c^2 - b_a b_c)n}{(1 + \mu_a)b_a b_c n + (b_a^2 - b_a b_c)m} \alpha_c \quad (17)$$

式(11)式(17)分别通过不同的途径得到层面影响带的温度线膨胀系数, 2式中大坝综合温度线膨胀系数 α_1 和 α_2 由本文优化反演方法求得, 本体的温度线膨胀系数 α_c 以及黏弹性参数(E_{c1} , E_{c2} , η_c)可通过试验得到, 层面影响带的黏弹性参数(E_{a1} , E_{a2} , η_a)根据文献[7]提出的方法可较方便地得到。因此, 层面影响带温度线膨胀系数 α_a 的最终值取式(11)和式(17)计算结果的平均值。

3 算例

3.1 基本资料

某碾压混凝土坝在坝体 0 + 118.50 断面布置了

18 个温度测点(编号为 $T_1 \sim T_{18}$), 见图 2。各测点的监测起始时间如下: $T_1 \sim T_4$ 为 1992 年 12 月 26 日, $T_5 \sim T_8$ 为 1993 年 2 月 1 日, $T_9 \sim T_{12}$ 为 1993 年 2 月 27 日, $T_{13} \sim T_{15}$ 为 1993 年 3 月 4 ~ 14 日, $T_{16} \sim T_{18}$ 为 1993 年 4 月 11 日。在坝顶布置了 3 个视准线测点, 分别为 I_1 , I_2 和 I_3 , 用来观测大坝的上下游水平位移, 视准线测点的监测起始时间为 1993 年 11 月 15 日。

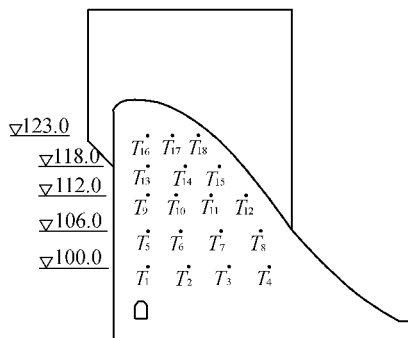


图 2 0 + 118.5 断面温度测点布置

反演分析资料选取 坝顶视准线 I_2 测点选取库水位较高的 1995 年 1 月至 1996 年 7 月监测数据, 对应的上游库水位在 137 ~ 143 m 变化, 坝内温度测点 $T_1 \sim T_{18}$ 的反演资料选取 1995 年 1 月至 1996 年 7 月监测数据。

3.2 温度分量求解

结合坝体自身的特点和温度测点布置情况, 将温度场划分为 6 个区域(按高程划分), 分别为 100 m, 106 m, 112 m, 118 m, 123 m, 128 m。其中, 128 m 处以气温为代表, 123 m 处有 T_{16} , T_{17} , T_{18} 和气温, 118 m 处有 T_{13} , T_{14} , T_{15} 和气温, 112 m 处有 T_9 , T_{10} , T_{11} , T_{12} 和气温, 106 m 处有 T_5 , T_6 , T_7 , T_8 和气温, 100 m 处有 T_1 , T_2 , T_3 , T_4 。加载时, 单位温度在 100 m 和 128 m 处加载等效平均温度, 其余高程(106 m, 112 m, 118 m, 123 m)处加载平均温度和梯度。

利用有限元程序, 计算了单位温度荷载所产生的坝顶位移测点处的水平位移, 即各单位温度的荷载常数 $b'_{11} = 0.0522$ mm, $b'_{12} = 0.01034$ mm, $b'_{22} = 0.0132$ mm, $b'_{13} = 0.00686$ mm, $b'_{23} = 0.0645$ mm, $b'_{14} = 0.00749$ mm, $b'_{24} = 0.00763$ mm, $b'_{15} = 0.2286$ mm, $b'_{25} = 0.2127$ mm, $b'_{16} = 0.05496$ mm。

I_2 测点处温度位移分量表达式为

$$\delta_T = \sum_{i=1}^6 b'_{1i} \bar{T}_i + \sum_{j=2}^5 b'_{2j} \beta_j \quad (18)$$

式中: b'_{1i} ($i = 1, \dots, 6$) 为上述 6 层等效温度的平均温度的载常数; b'_{2j} ($j = 2, \dots, 5$) 为 106 m, 112 m, 118 m, 123 m 层等效温度的梯度的载常数; $\bar{T}_i$, β_j 分别为第 i 、第 j 层温度测点的等效温度的平均温度和梯度。

由式(18)及荷载常数值得求得坝顶水平位移温度分量的数值表达式,进一步可得到测点 I_2 的位移的确定性模型:

$$\delta = 3.459 + 2.24 \times 10^{-4} H + 1.0 \times 10^{-5} H^2 - 1.67 \times 10^{-6} H^3 + 1.25 \times 10^{-5} H^4 - 0.01893 \bar{T}_1 - 0.00375 \bar{T}_2 - 0.00249 \bar{T}_3 - 0.00272 \bar{T}_4 - 0.08291 \bar{T}_5 - 0.01993 \bar{T}_6 - 0.00479 \beta_2 - 0.02339 \beta_3 - 0.00277 \beta_4 - 0.07715 \beta_5 + 0.1018 \theta + 0.0011 \ln \theta \quad (19)$$

该数学模型的精度较高,其复相关系数为 0.9098,其各因子的最大简单相关系数仅为 0.23,因此应用该数学模型式(19)可以很好地分离出测点位移值中温度分量部分 $\{\delta'_T\}_{I_2}$ 序列。

3.3 反演成果

a. 坝体双向综合温度线膨胀系数 α_1 和 α_2 的求解。假设该坝双向综合线膨胀系数的初始值为 $\alpha_{10} = 1.0 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 和 $\alpha_{20} = 1.0 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 它们的取值范围 D_1 均为 $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。利用有限元方法计算出在温度荷载作用下在测点 I_2 处引起的位移 $\delta_{T_{I_2}}$ 。将 I_2 测点的位移测值 $\delta_{T_{I_2}}$ 和位移计算值 $\delta_{T_{I_2}}$ 代入式(4)得

$$J = \min_{\alpha_1, \alpha_2 \in D_1} \{ \delta_{T_{I_2}} - \delta'_{T_{I_2}} \} \{ \delta_{T_{I_2}} - \delta'_{T_{I_2}} \} = \min_{\alpha_1, \alpha_2 \in D_1} \left\{ \sum_{j=1}^m [\delta_{T_{I_2}j} - \delta'_{T_{I_2}j}]^2 \right\} \quad (20)$$

式中: m 为 $\delta'_{T_{I_2}}$ 序列中元素的个数。

对式(20)进行迭代求解,最后得到该坝的综合线膨胀系数 α_1 和 α_2 分别为 $1.0137 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $1.0336 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

b. 层面影响带的温度线膨胀系数 α_a 的求解。碾压混凝土层厚 B 为 300 mm,层面影响带的厚度 b_a 取为 23.6 mm,碾压混凝土本体材料的黏弹性参数取为 $E_{c1} = 28.437 \text{ GPa}$, $E_{c2} = 50.0 \text{ GPa}$, $\eta_c = 900.0 \text{ GPa} \cdot \text{d}$, $\mu_c = 0.167$,层面影响带的黏弹性参数为 $E_{a1} = 11.286 \text{ GPa}$, $E_{a2} = 67.4 \text{ GPa}$, $\eta_a = 792.0 \text{ GPa} \cdot \text{d}$, $\mu_a = 0.167$;本体线膨胀系数 α_c 取为 $1.15 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,时间取 1995 年 1 月 1 日到 1996 年 7 月 1 日的天数, $t = 548 \text{ d}$ 。将上述参数代入到式(11)和式(17),计算得到 α_a 分别为 $0.967 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $0.985 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,两值相差仅为 1.9%,取两者的平均值作为该坝层面影响带线膨胀系数的最终值,即为 $0.976 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

4 结 语

温度对碾压混凝土坝的应力场有较大的影响,

而温度线膨胀系数是影响坝体温度效应量的主要因素。为此,笔者结合大坝实测资料,研究了碾压混凝土坝温度线膨胀系数的确定方法。主要包括:①研究了碾压混凝土坝综合温度线膨胀系数的特点,在此基础上,探讨了大坝综合双向异性温度线膨胀系数的优化反演方法。②基于复合材料力学串并联理论及变形等效原理,推导了层面影响带温度线膨胀系数的计算公式。

算例计算结果表明,用本文方法计算得到的参数值符合大坝运行的实际情况,为确定碾压混凝土坝温度线膨胀系数提供了一条有效的途径。

参考文献:

[1] GU Chong-shi, ZHU Guo-jin, NIE Xue-jun. Concrete model for analysis of RCC dam [C]//WIEL M, REN Qing-wen, JOHN S Y. New Developments in Dam Engineering. Netherlands :A A Balkema 2004.
[2] 黄光明,李云,顾冲时,等.碾压混凝土坝横观各向同性黏弹性参数反演[J].水利水运工程学报,2006(4):15-20.
[3] 黄光明,李云,朱国金.碾压混凝土坝渗流数值分析的等效均化方法[J].水电能源科学,2006,24(6):43-46.
[4] 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.
[5] 郭志川.排桩冻结法深基坑的动态反分析及其支护结构体形可靠度研究[D].南京:河海大学,2003.
[6] 沈观林.复合材料力学[M].北京:清华大学出版社,1996.
[7] 顾冲时,宋敬重,方海挺.碾压混凝土坝层面影响带渐变规律分析模型[J].应用数学和力学,2006,27(11):1335-1340.

(收稿日期:2007-09-11 编辑:骆超)

· 简讯 ·

第十次全国岩石力学与工程学术大会将在山东召开

由中国岩石力学与工程学会主办的第十次全国岩石力学与工程学术大会将于 2008 年 7 月 28 ~ 30 日在山东威海召开。会议的主题为“新世纪岩石工程难题的学术及技术创新”。主要议题包括:我国重大岩土工程出现的难题及对策;水利水电工程和矿山工程深部开挖的灾害及其效应和防治方法;近地表开挖和自然坡体的失稳研究;岩土体稳定性和风险问题;岩土工程围岩力学效应的监测技术和方法;岩土工程加固的新原理、新方法和新技术;岩土力学新的理论方法和数值分析新技术;岩土力学实验研究方法及其与岩土工程稳定研究的相关性;其他岩石力学与岩土工程问题。

(本刊编辑部供稿)