

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2008.05.016

混凝土坝材料参数区间反演分析方法

苏怀智^{1,2}, 雷 鹏¹, 顾冲时^{1,2}, 胡 江¹

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098;

2. 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)

摘要 为了充分考虑不确定性信息对大坝结构力学参数反演结果的影响, 利用区间分析方法, 依据大坝原型观测数据和有限元数值计算成果, 构建了大坝变形区间监控模型. 基于此模型, 探讨了反演混凝土坝坝体、坝基弹性模量、线膨胀系数等的原理、算法等. 实例分析表明, 区间分析方法能充分考虑参数反演过程中的多种不确定性, 可避免复杂的区间有限元计算, 其形式比较简单, 效率较高, 能方便地应用于实际工程.

关键词 混凝土坝 区间监控模型 区间分析 参数反演

中图分类号 TV642

文献标识码 A

文章编号 1000-1980(2008)05-0654-05

随着现代测控技术的发展, 根据实测数据进行反分析的理论、方法得到了大量研究并应用于实际工程中, 然而传统的反分析理论主要建立在确定性分析的基础上^[1]. 实际上, 由于各种不确定性因素(如量测误差、仪器精度、荷载等)的存在, 反分析理论只有考虑不确定性信息的影响才更能符合实际情况. 在不确定性分析方法中, 目前多基于随机理论、模糊理论, 前提是知道不确定参数的概率密度函数或隶属函数^[2]. 而在实际工程中, 这些函数往往难以确定, 常常通过人为方式取舍, 其应用受到了一定的限制. 与随机理论、模糊理论相比, 区间分析方法只需要知道数据信息的上下界, 在统计信息不足的情况下, 该分析方法有其独特的优势^[3-5].

近年来, 已有学者对区间参数反分析方法进行了研究. 文献[6]研究了基于参数摄动方法的摄动反演模型以及基于带约束优化技术的可变容差法反演模型. 文献[7]研究了巷道围岩初始应力场和弹性模量的区间反演方法. 文献[8]建立了混凝土坝振动参数的区间逆分析模型, 并用约束变尺度方法对该模型进行求解. 总的来讲, 目前区间参数反演方法大多需要进行区间有限元计算或约束优化计算, 计算效率较低, 离实际工程应用尚有一段距离.

对于混凝土大坝, 随着大坝服役时间的推移, 受材料老化以及环境等因素的影响, 其结构性态会有所调整和改变, 表现为大坝的实际参数和试验得到的值不相符. 而作为大坝实际工作性态最真实反映的大坝原型监测资料, 蕴含了大坝结构性态随时间变化的规律. 因此, 依据大坝原型监测资料反演大坝物理力学参数是一种很有效的方法^[9]. 为此, 本文利用混凝土坝的实测资料, 考虑不确定性信息的影响, 对混凝土坝力学参数的反分析方法进行了研究. 首先, 利用大坝原型监测资料和确定性有限元计算成果, 通过引入区间数因子, 建立大坝安全区间监控模型. 然后考虑水位和温度测值区间误差的影响, 运用该区间监控模型分离成果, 采用区间矩阵摄动法求解大坝材料参数的区间数. 最后应用上述方法反演分析了某大坝坝体、坝基弹性模量、线膨胀系数等.

1 大坝安全区间监控模型

实有界闭集 $[a, b] = \{x | a \leq x \leq b\}$ 称为区间, 该区间可看成由它的 2 个端点 a 和 b 组成的一对有序实数, 称为区间数. 以下以带有上标 I 的数表示区间数, 区间数 x^I 可定义为

收稿日期: 2008-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(50539110 50539010) 国家科技支撑计划(2006BAC14B03)

作者简介: 苏怀智(1973—), 男, 内蒙古鄂尔多斯人, 副教授, 博士, 主要从事水工结构工程安全监控理论和方法研究.

$$x^I = [\underline{x}, \bar{x}] = \{x \mid \underline{x} \leq x \leq \bar{x}\} \tag{1}$$

混凝土坝的水平位移主要由水压分量、温度分量和时效分量组成. 假设变形、水位、温度的实测值序列分别为 $\{ \delta_i \}$, $\{ H_i \}$, $\{ T_i \}$ ($i = 1, 2, \dots, n$), 考虑监测信息的不确定性, 变形、水位、温度的误差最大绝对值分别为 $\{ \Delta \delta_i \}$, $\{ \Delta H_i \}$, $\{ \Delta T_i \}$, 则变形、水位、温度的区间数序列分别为 $\{ [\delta_i - \Delta \delta_i, \delta_i + \Delta \delta_i] \}$, $\{ [H_i - \Delta H_i, H_i + \Delta H_i] \}$, $\{ [T_i - \Delta T_i, T_i + \Delta T_i] \}$. 由于测值存在区间波动, 因此需要在传统的确定性模型中引入区间数因子以适应区间数运算.

1.1 水压分量

在水荷载作用下, 坝体位移由 3 部分组成. 水压作用导致坝体变形引起的位移 (δ_{1H})、坝基变形引起的位移 (δ_{2H}) 和库盘变形引起的位移 (δ_{3H})^[9]. 因此水压分量区间数可以表示为

$$\delta_H^I = \delta_{1H}^I + \delta_{2H}^I + \delta_{3H}^I \tag{2}$$

式中: δ_{1H}^I ——坝体本身的变形区间数; δ_{2H}^I ——坝基变形引起的坝体变形区间数; δ_{3H}^I ——库盘变形引起的坝体变形区间数.

1.1.1 δ_{1H}^I

假设坝体弹性模量为 E_{c0} , 坝基变形模量 $E_{c0} = \infty$. 用确定性有限元法计算在若干组具有代表性坝前水深 H_i ($i = 1, 2, \dots, p$) 下坝体的变形量, 再据此根据最小二乘法拟合得到水压分量多项式

$$\delta_{1H} = \sum_{k=0}^{m_1} a_{1k} H^k \tag{3}$$

式中: a_{1k} ——水压分量系数; H ——水头; m_1 ——多项式项数 (重力坝取 $m_1 = 3$, 拱坝和连拱坝取 $m_1 = 4$).

上述确定性有限元法计算的前提是假设坝体弹性模量为 E_{c0} , 但是实际弹性模量 E_c 与假设并不一致. 考虑到测值的区间误差影响, 水压分量调整系数取区间数 X^I , 因此, 坝体本身的实际水压分量可以表示为如下区间函数:

$$\delta_{1H}^I = X^I \sum_{k=0}^{m_1} a_{1k} (H^I)^k \tag{4}$$
$$X^I = E_{c0} / E_c^I$$

式中: X^I ——水压调整系数区间值; E_c^I ——坝体综合模量区间值; H^I ——坝前水头区间值.

1.1.2 δ_{2H}^I

设坝基与坝体弹性模量之比为 $R_0 = E_{c0} / E_{c0}$, 计算水荷载作用下测点处的变形值 δ'_{2H} , 并由最小二乘法拟合得到 $H \sim \delta'_{2H}$ 的关系式

$$\delta'_{2H} = \sum_{k=0}^{m_1} a_{2k} H^k \tag{5}$$

根据式(3)和式(5), 则基础变形产生的坝体变形为

$$\delta_{2H} = \delta'_{2H} - \delta_{1H} = \sum_{k=0}^{m_1} (a_{2k} - a_{1k}) H^k \tag{6}$$

式(6)是在假设 R_0 的前提下得到的, 考虑到测值的区间波动, 式(6)乘以区间调整系数 Y^I , 则坝基变形引起的坝体变形水压分量区间函数为

$$\delta_{2H}^I = Y^I \sum_{k=0}^{m_1} (a_{2k} - a_{1k}) (H^I)^k \tag{7}$$

$$Y^I = R_0 / R^I \quad R_0 = E_{c0} / E_{c0} \quad R^I = E_r^I / E_c^I$$

式中: E_r^I 为坝基变形模量区间值.

1.1.3 δ_{3H}^I

设库区基岩与坝体弹性模量之比 $W_0 = E_{b0} / E_{c0}$, 用确定性有限元法计算库水重力作用在库区基岩上引起的坝体位移 δ_{3H} , 用最小二乘法拟合得到 $H \sim \delta_{3H}$ 的关系式

$$\delta_{3H} = \sum_{k=0}^{m_1} a_{3k} H^k \tag{8}$$

式(8)是在假设 W_0 的前提下得到的. 考虑到区间因素的影响, 式(8)乘以区间调整系数 Z^I , 则库盘变形引起的坝体变形水压分量区间函数为

$$\delta_{3H}^I = Z^I \sum_{k=0}^{m_1} a_{3k} (H^I)^k \tag{9}$$

$$Z^I = W_0/W^I \quad W_0 = E_{10}/E_{c0} \quad W^I = E_b^I/E_c^I$$

式中 E_b^I 为库盘变形模量区间值.

1.2 温度分量

根据不同情况, 温度分量有不同的表达形式, 本文用单位温度和载常数来确定温度分量^[9]. 假定混凝土温度线膨胀系数为 α_{c0} , 用确定性有限元法计算单位平均温度、梯度引起的变形温度分量 b_{1i} 和 b_{2i} , 即载常数. 考虑到测值的区间不确定性, 则温度区间分量用以下区间函数表示:

$$\delta_T^I(t) = J^I \delta_T = J^I \sum_{i=1}^{m_2} [b_{1i} \Delta T_i^I(t) + b_{2i} \Delta \beta_i^I(t)] \tag{10}$$
$$J^I = \frac{\alpha_c^I}{\alpha_{c0}} \quad \alpha_c^I = J^I \alpha_{c0}$$

式中: J^I ——调整参数; α_c^I ——坝体材料区间线膨胀系数; $\Delta T_i^I(t)$, $\Delta \beta_i^I(t)$ ——考虑温度测量误差的平均温度区间值和梯度区间值.

1.3 时效分量

根据文献[9], 选择时效分量表达式为

$$\delta_\theta^I = C_1^I (\theta - \theta_0) + C_2^I (\ln \theta - \ln \theta_0) \tag{11}$$

式中: C_1^I, C_2^I ——时效因子区间系数; θ ——变形观测日至始测日的累计天数除以 100, 即 $\theta = t/100$; θ_0 ——变形建模所取资料系列的第 1 个测值日至始测日的累计天数除以 100, 即 $\theta_0 = t_0/100$.

1.4 区间监控模型

由式(4), (7), (9), (10) 和 (11) 得到大坝变形的区间监控模型表达式为

$$\delta^I = \delta_H^I + \delta_T^I + \delta_\theta^I = a_0^I + X^I \sum_{k=0}^{m_1} a_{1k} (H^I)^k + Y^I \sum_{k=0}^{m_1} (a_{2k} - a_{1k}) (H^I)^k + Z^I \sum_{k=0}^{m_1} a_{3k} (H^I)^k + J^I \sum_{i=1}^{m_2} [b_{1i} \Delta T_i^I(t) + b_{2i} \Delta \beta_i^I(t)] + C_1^I (\theta - \theta_0) + C_2^I (\ln \theta - \ln \theta_0) \tag{12}$$

式中 a_0^I 为区间常数项.

2 参数反演分析

将水压系数、温度载常数以及水位、温度、变形等代入式(12), 则得到如下区间线性方程组:

$$A^I \cdot x^I = \delta^I \tag{13}$$

式中: A^I —— $n \times m$ 阶的区间矩阵; n ——变形监测次数; m ——待求系数的个数.

对式(13)进行变换即可得到

$$(A^I)^T A^I \cdot x^I = (A^I)^T \delta^I \tag{14}$$

对式(14)进行区间运算, 得到如下形式的区间方程组:

$$S^I \cdot x^I = Q^I \tag{15}$$

$$S^I = (A^I)^T A^I \quad Q^I = (A^I)^T \delta^I$$

根据实际情况, 式(15)中 S^I 矩阵有不同的形式, 其分别对应下面 2 种求解方法.

a. 当不考虑水位和温度测值区间误差影响时, 将水位和温度作为定值处理, 即 $H^I = H, T^I = T$. 此时区间矩阵 A^I 退化为确定性矩阵 A , 同时 S^I 亦退化为 S , 此时, 式(15)可直接求解, 即

$$x^I = S^{-1} Q^I \tag{16}$$

b. 当考虑水位和温度测值区间误差影响时, 式(15)可采用区间矩阵摄动法^[6,10]求解.

在区间线性方程组中, 采用区间数的中心区间表示法, 区间矩阵 S^I 和 Q^I 可以表示为

$$S^I = S^c + \Delta S^I \quad Q^I = Q^c + \Delta Q^I \quad x^I = x^c + \Delta x^I_\beta \tag{17}$$

$$S^c = \frac{(\bar{S} + \underline{S})}{2} \quad \Delta S^I = [-\Delta S, \Delta S] \quad \Delta S = \frac{(\bar{S} - \underline{S})}{2} \tag{18}$$

$$Q^c = \frac{(\bar{Q} + \underline{Q})}{2} \quad \Delta Q^I = [-\Delta Q, \Delta Q] \quad \Delta Q = \frac{(\bar{Q} - \underline{Q})}{2} \tag{19}$$

$$x^c = \frac{(\bar{x} + \underline{x})}{2} \quad \Delta x^I = [-\Delta x, \Delta x] \quad \Delta x^I_\beta = \frac{(\bar{x} - \underline{x})}{2} \tag{20}$$

将式(17)代入方程(15),得

$$(S^c + \Delta S^I)(x^c + \Delta x^I_\beta) = Q^c + \Delta Q^I \tag{21}$$

由区间矩阵摄动法求解方程(21)的解为

$$x^c = (S^c)^{-1} Q^c \tag{22}$$

$$\Delta x^I_\beta = - (S^c)^{-1} (\Delta S^I Q^c - \Delta Q^I) \tag{23}$$

则解区间上下界分别为

$$\underline{x} = x^c - \Delta x_\beta \quad \bar{x} = x^c + \Delta x_\beta \tag{24}$$

由式(16)或式(24)即可求得区间解 X^I, Y^I, Z^I 和 J^I ,由此计算坝体、坝基、库盘弹性模量以及线膨胀系数的区间值:

$$E^I_c = E_{c0}/X^I \quad E^I_r = E_{r0}/(X^I Y^I) \quad E^I_b = E_{b0}/(X^I Z^I) \quad \alpha^I_c = \alpha_{c0} J^I \tag{25}$$

3 实例分析

以某混凝土重力坝 6 号典型坝段为例,根据坝顶水平位移,反演坝体、坝基弹性模量区间值和线膨胀系数区间值.分析其有限元模型的范围为:上游和坝基以下约 2 倍坝高,下游约 1.5 倍坝高.有限元结点布置时,尽可能考虑将位移测点等安排在单元结点上.单元采用六面体八结点等参单元.共计有 3 305 个等参单元,4 428 个结点.该坝段有限元模型如图 1 所示.

区间参数反演分析前,需要确定材料初始计算参数.本文采用如下设计值作为材料参数的初始值: $E_{c0} = 20.72 \text{ GPa}$, $E_{r0} = 18.95 \text{ GPa}$, $\alpha_{c0} = 1.05 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$.泊松比 μ 对大坝变形影响较小,在反演中将其作为确定性值,并取 $\mu = 0.2$.反演分析时,分别考虑了如下 2 种情况.

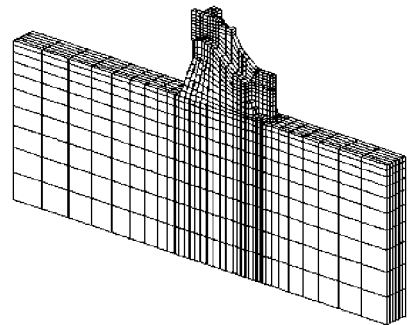


图 1 6 号坝段的有限元模型

Fig.1 FEM mesh of NO.6 monolith

a. 只考虑水平位移测值的不确定性,其误差最大绝对值取 $\Delta\delta = 0.20 \text{ mm}$,水位和温度不考虑误差影响,均取实测值,即 $\Delta H = 0 \text{ m}$, $\Delta T = 0^\circ\text{C}$,则水平位移、水位、温度序列值分别为

$$\delta^I = ([\delta_1 - 0.2, \delta_1 + 0.2], [\delta_2 - 0.2, \delta_2 + 0.2], \cdots, [\delta_n - 0.2, \delta_n + 0.2])$$

$$H^I = H = (H_1, H_2, \cdots, H_n)$$

$$T^I = T = (T_1, T_2, \cdots, T_n)$$

b. 同时考虑水平位移、水位和温度测值的不确定性,其误差最大绝对值分别取 $\Delta\delta = 0.20 \text{ mm}$, $\Delta H = 0.1 \text{ m}$, $\Delta T = 0.1^\circ\text{C}$,则水平位移、水位、温度序列值分别为

$$\delta^I = ([\delta_1 - 0.2, \delta_1 + 0.2], [\delta_2 - 0.2, \delta_2 + 0.2], \cdots, [\delta_n - 0.2, \delta_n + 0.2])$$

$$H^I = ([H_1 - 0.1, H_1 + 0.1], [H_2 - 0.1, H_2 + 0.1], \cdots, [H_n - 0.1, H_n + 0.1])$$

$$T^I = ([T_1 - 0.1, T_1 + 0.1], [T_2 - 0.1, T_2 + 0.1], \cdots, [T_n - 0.1, T_n + 0.1])$$

根据以上 2 种情况,分别计算坝体弹性模量和坝基变形模量的调整系数区间值以及坝体线膨胀调整系数区间值,并根据式(24)计算坝体弹性模量、坝基变形模量区间值和坝体线膨胀系数区间值.计算结果如表 1 所示.

由以上计算结果可以看出:(a)考虑量测误差后,反演得到的是在一定范围内波动的区间参数;(b)考虑水

位和温度测量误差后,反演结果的不确定性区间增大,说明水位和温度量测误差对反演结果也有一定的影响.

表1 基于区间监控模型的参数反演结果

Table 1 Inversion results of the interval monitoring model

反演参数	X'	Y'	J'	坝体综合模量/GPa	坝基变形模量/GPa	线膨胀系数/ 10^{-5}°C
不考虑水位和温度的测量误差	[0.947,1.052]	[0.956,1.048]	[0.944,1.056]	[19.67,21.85]	[17.17,20.88]	[0.99,1.11]
考虑水位和温度的测量误差	[0.926,1.082]	[0.935,1.067]	[0.920,1.075]	[19.18,22.41]	[16.40,21.85]	[0.97,1.13]

4 结 语

由于量测误差、仪器精度、荷载等不确定性因素的存在,据此反演出的大坝材料力学参数也存在不确定性,因此,大坝反演问题本质上是一个不确定问题.本文从该角度出发,综合应用大坝原位观测数据和有限元数值计算成果,通过在传统的确定性模型中引入区间数因子方式,构建了大坝安全区间监控模型.利用该模型,基于参数反演的基本原理,给出了坝体、坝基、库盘的弹性模量以及大坝线膨胀系数等的区间矩阵摄动反演算法.由于数值分析仍然采用传统的确定性有限元方法,不需要进行复杂的区间有限元计算,其计算工作量大大降低;另一方面又利用区间模型的区间数分析功能,考虑量测误差对反演参数的区间影响,其计算过程简便、效率较高,可以方便地应用于实际工程.

参考文献:

[1] 赵新铭,刘宁,张剑.岩土力学反分析的数值反演方法[J].水利水电科技进展,2003,23(2):55-58.
[2] ELISHAKOFF I. Three versions of the finite element method based on concepts of either stochasticity,fuzziness or anti-optimization[J]. Applied Mechanics Review,1998,51(3):209-218.
[3] 王登刚,刘迎曦,李守巨,等.巷道围岩初始应力场和弹性模量的区间反演方法[J].岩石力学与工程学报,2002,21(3):305-308.
[4] RAO S S,BERKE L. Analysis of uncertain structural systems using interval analysis[J]. AIAA Journal,1997,35(4):725-735.
[5] NAKAGIRI S,SUZUKI K. Finite element interval analysis of external loads identified by displacement input with uncertainty[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,1999,168:63-72.
[6] 刘世君.岩石力学反演分析研究及工程应用[D].南京:河海大学,2004.
[7] 王登刚,刘迎曦,李守巨,等.巷道围岩初始应力场和弹性模量的区间反演方法[J].岩石力学与工程学报,2002,21(3):305-308.
[8] 王登刚,刘迎曦,李守巨.混凝土坝振动参数区间逆分析[J].大连理工大学学报,2002,42(5):522-526.
[9] 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.
[10] 邱志平,顾元宪,陈塑寰.估计结构静力响应范围的区间摄动法[J].兵工学报,1996,17(2):154-158.

Interval back analysis for mechanical parameters of a concrete dam

SU Huai-zhi^{1, 2}, LEI Peng¹, GU Chong-shi^{1, 2}, HU Jiang¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : In order to consider the effect of uncertain information on inversion results of the mechanical parameters of a concrete dam, according to prototype observations and finite element method results, an interval monitoring model was developed to identify the mechanical parameters of the concrete dam using the interval analysis method. Based on the model, the principles and algorithms for inversion of the dam body elastic modulus, dam foundation elastic modulus and linear expansion coefficient were discussed. The results of a case study show that the interval analysis method requires no complicated interval finite element calculation, and also has the advantages of a simple form and higher efficiency. Moreover, it can be conveniently applied to practical engineering problems.

Key words : concrete dam ; interval monitoring model ; interval analysis ; parameter inversion