

基于蒙特卡罗方法的高拱坝变形监控指标拟定

谷艳昌, 何鲜峰, 郑东健

(河海大学 水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 高拱坝变形安全监控指标, 对于监控和保证大坝的安全运行及评价大坝的工作状态具有重要意义. 文中首次把蒙特卡罗方法引入大坝安全监控指标拟定中, 结合大坝原型观测资料, 并考虑了基本变量的随机性, 所拟定的变形监控指标, 不仅具有概率意义, 同时也对坝体的结构和材料特性进行了模拟, 因此较传统方法更加合理科学.

关 键 词: 变形; 监控指标; 蒙特卡罗方法; 高拱坝

中图分类号: TV698.11

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2008)01-0014-06

Study on the safety-monitoring index for high arch dams based on Monte-Carlo

GU Yan-chang, HE Xian-feng, ZHENG Dong-jian

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: For any high arch dam, the deformation monitoring index is very significant for monitoring its operation and evaluating its safety. The Monte-Carlo method is firstly applied in the study on the deformation monitoring index considering the prototype observation data and the randomness of basic variables. The monitoring index not only contains probability, but also embodies the structure and material properties. So, it is more scientific and more reasonable.

Key words: deformation; monitoring index; Monte-Carlo method; high arch dam

高拱坝运行过程中不仅需要安全监测, 而且必须要进行安全监控. 安全监测数据是大坝运行状态的直接反映, 而安全监控则是在安全监测所获得的大量安全信息的基础上, 依据一定的理论和标准, 对大坝的安全状况及时做出评价和诊断. 在大坝运行过程中, 可以根据监控指标实现对大坝的监控与诊断. 拟定合理的监控指标对监控大坝的安全运行、准确识别险情、制定科学运行方案充分发挥工程效益等具有重大的社会经济效益.

收稿日期: 2007-06-12

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2002CB412707); 国家自然科学基金重点项目(50539010); 国家科技支撑计划课题(2006BAC14B03); 国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合研究基金项目(50539030-1-3)

作者简介: 谷艳昌(1980-), 男, 河南开封人, 博士研究生, 主要从事水工结构方面的研究工作. E-mail: g_ruby@126.com

根据国内外大坝安全监测的实践经验,变形是大坝安全最主要的监测量^[1].目前,拟定监控指标的方法^[2,3]主要包括:①置信区间法.置信区间法的实质是小概率原理,在国内外经常采用.②典型监测效应量小概率法.小概率法是指在选定典型监测效应量的基础上,确定其分布函数,然后根据大坝失事概率确定相应水平的监控指标.上述两种方法均存在如下缺陷,若大坝没有遭遇过最不利荷载组合作用或者资料系列很短,所拟定的指标只能用来预测大坝遭遇荷载范围内的效应量,未必是真正意义上的安全警戒值;其次,选择建模的资料系列不同,分析计算的标准差以及置信区间的大小也不同,如果计算的标准差较大,可能会出现“漏报”情况;此外,这两种方法没有联系大坝失事的原因和机理,也没有联系大坝的重要性(等级和级别)等.③极限状态法.该法首先要求解出满足各种安全极限状态下大坝所能承受的最不利荷载组合,然后再借助数学模型求得极限监控指标,或者求出最不利荷载后,根据监测成果反演出的坝体坝基物理力学参数,再由结构计算求得极限监控指标.由于该法首先要求出大坝的最不利荷载组合,这是个反问题,对于拱坝来讲难度较大,一般情况下需要经过大量试算才能得到合理的结果.④结构分析法.该方法联系了大坝变形发生的原因和机理,物理概念较为明确,不利荷载可以根据设计荷载来确定,因此较前3种方法有优势.但该法的计算结果仅为一个数值,缺乏一定概率意义;同时不利荷载组合选取简单,没有很好结合大坝实际运行时的荷载情况.

1 蒙特卡罗方法

蒙特卡罗(Monte Carlo)法亦称随机模拟法或随机抽样技术,其基本原理是首先依据所求问题的实际情况建立所求问题解的基本表达式,确定出基本变量,并建立基本变量的概率模型.然后,用计算机方法生成伪随机数,根据此伪随机数对模型抽样试验来计算问题的解^[4].

1.1 伪随机数的产生

伪随机数是在计算机上通过某种数学迭代过程而产生的一系列数,并通过局部随机性如均匀性、独立性等检验.能否产生可靠的伪随机数是蒙特卡罗法的最主要问题,也是决定计算结果是否理想的关键所在.要求伪随机数的随机性好、周期长、在计算机上容易实现且节约机时等.目前产生伪随机数的常见方法有平方取中法、位移指令加法、乘同余法、加同余法以及混合法等,其中乘同余法产生的伪随机数统计性质优越,周期长,在各领域中被广泛应用,该法的迭代公式为:

$$x_{i+1} = \lambda x_i \pmod{M} \quad (1)$$

$$r_i = x_i M^{-1} \quad (2)$$

式中: $M=2^s$,取 $s=32$, $x_0=1$, $\lambda=5^{13}$,文献[4]建议 x_0 最好随机选取一个 $4q+1$ 型的数, q 为任意整数, λ 取成 5^{2k+1} 型的正整数,其中 k 为使 5^{2k+1} 在计算机上所能容纳的最大奇数,其他的一般常用参数亦可按文献[4]建议值选用.

1.2 随机变量的抽样模拟

确定了基本变量的概率模型后,可以根据所产生的随机数进行抽样.随机变量分布的模拟方法很多^[5],在水工建筑物安全监测领域常见的有正态分布、对数正态分布以及极值I型分布等,可由以下方法进行基本变量的模拟抽样^[6].

正态分布变量的抽样方法:设伪随机数列为 $\{r_{2n}\}$,那么有

$$\begin{cases} x_{2i-1} = \sqrt{-2LNr_{2i-1}} \cos(2\pi r_{2i}) \\ x_{2i} = \sqrt{-2LNr_{2i-1}} \sin(2\pi r_{2i}) \end{cases} \quad i=1,2,\dots,n \quad (3)$$

所得到的 $\{x_{2i}\}$ 相互独立且满足均匀性要求,并服从 $N(\mu, \sigma^2)$ 分布.

对数正态分布变量的抽样方法:随机数序列 $\{y_n\}$ 服从 $N(\mu, \sigma^2)$ 分布,则

$$x_i = \exp(y_i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

所得序列 $\{x_n\}$ 相互独立且服从如下对数分布:

$$F(x) = \int_0^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2\right] dx \quad (5)$$

极值 I 型分布变量的抽样方法: $\{r_n\}$ 为伪随机数, 令 $F(x_i) = r_i$, 则

$$x_i = K - \frac{1}{a} \ln[-\ln(r_i)] \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

所得到的序列 $\{x_n\}$ 相互独立且服从如下极值 I 型分布:

$$F(x) = \exp\{-\exp[-a(x-K)]\} \quad (7)$$

1.3 变量相关性的处理及抽样次数的确定

蒙特卡罗法计算中, 各个基本变量需要满足相互独立的条件, 倘若某些变量之间具有相关性, 那么就需要事先进行适当的变换处理, 把它们转换到不相关变量空间中方可使用. 其中较为常用的转换方法是协方差矩阵法^[7].

实际上, 模拟计算所需要的抽样次数是随着问题对象的性质和特点的不同而不同的. 不过, 可以为模拟次数设置不同的停机规则, 主要有①设定最大试验次数 N , 当模拟次数达到最大次数时便停止计算; ②每计算 n 次, 便将计算结果与前一个 n 次的结果作对比, 如果差值满足一定的条件则停止计算, 依此来获得计算的总试验次数.

2 基于蒙特卡罗方法拟定变形监控指标的原理

基于蒙特卡罗法拟定变形监控指标的原理及步骤如下: 首先根据观测资料确定大坝所处的工作状态(如粘弹性或粘弹塑性等), 建立大坝变形与各个因素的函数关系式 $\delta = f(X)$ (是一种隐式关系, $X = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]$), 并确定出基本变量, 对基本变量的观测值进行非参数统计检验确定其分布; 借助蒙特卡罗法产生的伪随机数(假设有 N 个)对基本变量模拟抽样, 把抽样值代入大坝变形函数, 从而计算出一系列变形值; 最后, 对计算出的一系列变形值进行统计分析, 给出相应概率水平 α 下的变形值, 即为大坝安全变形监控指标.

3 工程实例

3.1 工程概况

某大(I)型水电站位于青海尖扎县与化隆县交界处, 是黄河上游大型梯级水电站之一, 工程以发电为主, 兼顾灌溉. 枢纽挡水建筑物由混凝土双曲拱坝、左岸重力墩、副坝、坝后双排机厂房和两岸泄水道等组成. 三心圆双曲拱坝最大坝高 155 m, 坝基高程 $\nabla 2\ 030$ m, 厚高比 0.29, 坝顶轴线长 414 m, 最大底宽 45 m, 坝顶基本宽度 8 m, 实际结构宽度 10~21 m, 共分 18 个坝段. 电站正常蓄水位 $\nabla 2\ 180$ m, 相应库容 16.3 亿 m^3 . 坝址地质结构较为发育, 基础的地质条件复杂, 基岩为震旦系黑云更长质条带混合岩及黑云绿泥石闪斜长片岩组成, 其间穿插有花岗伟晶岩脉, 断裂较为发育. 电站大坝垂线观测系统有 7 条垂线组, 共 32 个测点, 分别布置在拱冠、左、右岸 1/4 拱(6#和 16#坝段), 两拱端(1#、重 1#及重 3#坝段)和右岸基础.

为保证电站运行安全及效益的充分发挥, 要为该大坝拟定科学合理的变形安全监控指标. 这里针对 11#拱冠梁典型坝段坝顶测点拟定变形监控指标, 图 1 给出了该测点实测径向位移过程线, 相应环境量过程线见图 2.

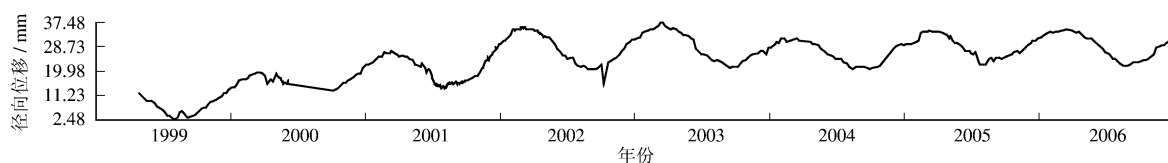
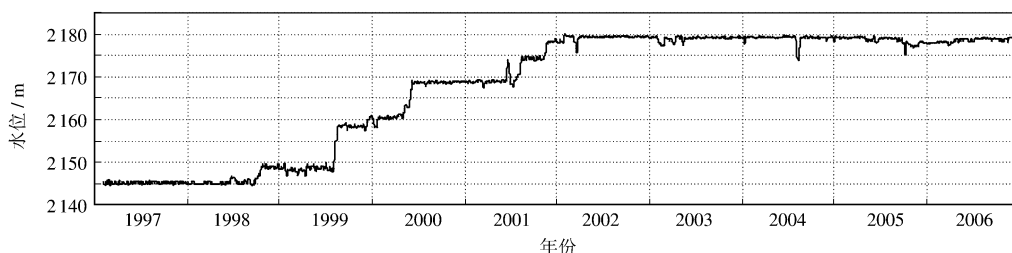
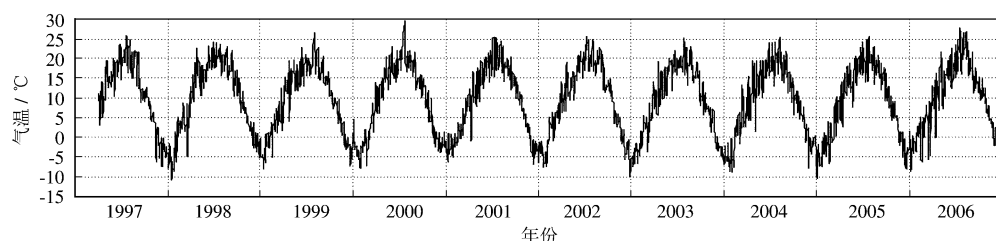


图1 11#坝段坝顶测点径向位移实测过程线

Fig. 1 Process line of radial values of 11th dam section crest

(a) 上游水位变化过程线



(b) 气温变化过程线

图2 环境量过程线

Fig. 2 Process lines of environment factors

3.2 大坝工作状态判定

根据大坝变形、应力应变观测资料等的分析^[8]可以看出,该大坝目前处于粘弹性工作阶段.该阶段坝体变形主要包括瞬时弹性变形和粘性变形两部分.根据混凝土的徐变力学可知,用 n 个 ($n=2$) Kelvin 模型串联的广义 Kelvin 模型来描述坝体变形的粘弹性变形较为合理(见图3).

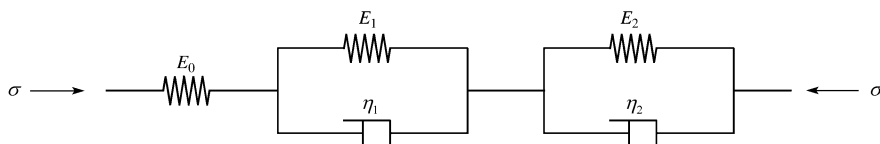


图3 广义 Kelvin 模型示意图

Fig. 3 Sketch of generalized Kelvin model

3.3 变形监控指标的表达式

根据上述分析以及大坝的运行环境,建立如下形式的变形监控指标表达式:

$$\delta_m = f(H, P_y, P_n, T, E_0, E_1, E_2, \eta_1, \eta_2, \mu, c, \varphi, \eta, \Gamma, \Delta) \quad (8)$$

式中: δ_m 为变形监控指标; H 为水压力; P_y 为扬压力; P_n 为泥沙压力; T 为温度; E, μ, c, φ, η 分别为坝体的弹性模量、泊松比、粘结力、摩擦系数及粘性系数; Γ 为模型上的总约束条件; Δ 为模型中其他因素的综合.

同时,大坝变形又可以分为水压、温度及时效3个分量,因此(8)式又可以写为:

$$\begin{aligned} \delta_m &= f(H, P_y, P_n, T, E_0, E_1, E_2, \eta_1, \eta_2, \mu, c, \varphi, \eta, \Gamma, \Delta) \\ &= f(H) + f(T) + f(\theta) = \delta_{m1} + \delta_{m2} + \delta_{m3} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $f(H)$, $f(t)$, $f(\theta)$ 分别为水压、温度和时效分量; δ_{m1} , δ_{m2} , δ_{m3} 分别为相应变形监控指标的水压、温度和时效分量。

3.4 基本变量的确定及统计检验

对于高拱坝而言, 扬压力对位移影响很小, 可以不考虑; 泥沙压力对坝体变形影响十分复杂, 在缺少泥沙相关资料的情况下, 也无法确定, 一般由时效因子来体现泥沙的影响; 对于具体的模型, 可以认为 Γ 和 Δ 是不变的; 温度 T 作用一般具有周期性, 可不作为基本变量; 水压荷载 H 及模型材料参数都具有随机性, 并且对拱坝变形影响显著, 故把水压和材料参数作为基本变量。

目前, 由于笔者尚无法获取该坝材料参数的统计资料, 为了简化计算, 在能够说明问题的前提下, 仅选择水压 H 为基本变量进行计算, 材料参数则选用反演结果或者按照类似工程对比选取确定。那么, 变形监控指标与基本变量的关系就可表示为:

$$\delta_m = f(H, \psi) \quad (10)$$

式中: H 为水压基本变量; ψ 为其他恒定常量。

采用非参数检验方法(K-S法)^[6]对该坝的水压荷载进行统计检验, 水头样本系列为1999~2005年, 2006年样本资料校核, 经检验水压服从正态分布, 即 $H \sim N(138.59, 13.03)$ 。

3.5 水压分量的抽样模拟计算

为了计算给定失效概率水平下的水压分量, 需要模拟的次数应该足够多, 本文选择计算10 000次。同时, 为了提高效率, 本文借助大型通用软件 MSC. Marc 并行计算技术, 把整个模型分成8个子区域, 显著提高了计算速度。

采用有限元法计算水压分量(有限元模型见图4)。计算范围: 上游方向取1倍左右坝高(约150 m), 左右坝肩各取1倍左右坝高(约150 m), 下游方向取2倍坝高(约300 m), 坝基岩体取1.5倍坝高(约200 m)。尽可能将变形测点布置在有限元节点上。此外, 在单元划分时考虑断层走向及软弱带的分布, 尽量使划分的单元反应实际情况。单元采用六面体8节点等参单元和少量五面体6节点等参单元。模型共划分了40 981个单元, 42 724个节点。材料参数采用文献[8]的反演结果。计算总共耗费20.8个机时, 表1给出了部分计算结果。

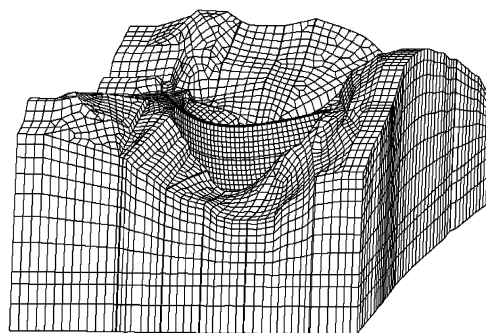


图4 有限元模型

Fig. 4 FEM model

表1 蒙特卡罗法基本变量模拟结果

Tab. 1 Simulating results of basic variables based on Monte-Carlo

次数/次	均 值	标 准 差	变异系数
500	23.01	1.01	4.4%
1 000	22.89	0.62	2.7%
2 000	21.58	0.23	1.1%
3 000	22.78	0.08	0.4%
4 000	22.75	0.08	0.3%
5 000	22.81	0.08	0.3%
6 000	22.76	0.08	0.3%
8 000	22.72	0.06	0.2%
10 000	22.80	0.05	0.2%

由表1可见, 随着蒙特卡罗试验模拟次数的增加, 其计算结果的变异性逐渐降低, 但当模拟次数达到一定量时, 便可得到较满意的结果, 如再增加模拟次数, 计算结果的精度不会出现明显改善。就本案而言, 当模拟次数达到3 000时, 即可满足精度要求, 此时变异系数为0.4%。因此选用3 000次的计算结果来确定变形监控指标的水压分量。

由K-S法对3 000次计算结果进行检验,11#坝段坝顶处水压基本变量模拟结果径向位移服从正态分布,即 $\delta \sim N(\bar{\delta}, \sigma)$,其中: $\bar{\delta}=22.78, \sigma=0.08$.

因此,当位移 δ 大于位移的 δ_{m1} 极值时,其概率为:

$$F(\delta > \delta_{m1}) = \alpha = \int_{\delta_{m1}}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(\delta - \bar{\delta})^2}{2\sigma^2}\right] d\delta = \int_{\delta_{m1}}^{+\infty} \frac{1}{0.08\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\delta - 22.78)^2}{2 \times 0.08^2}\right] d\delta$$

由统计理论可知,当 α 足够小时,可以认为是小概率事件,即该事件几乎是不可能发生的,倘若发生则是异常情况;同时为了与文献[8]中的结果进行对比,本文采用5%的概率水平,从而得到11#坝顶径向位移水压模拟分量极大值为22.92 mm,即 $\delta_{m1}=22.92$ mm.

3.6 其它分量

采用文献[9]的方法建立温度分量的数值模型,在给定5%的概率水平下,计算结果为 $\delta_{m2}=16.26$ mm;时效分量采用粘弹性有限元计算,根据不同时间段的粘性变形计算值,与统计模型拟合得到 $\delta_{m3}=0.27\theta-35.43\ln\theta$, θ 为从起测日算起的总天数除以100.

3.7 变形监控指标

由上述分析得出该高拱坝径向变形安全监控指标为: $\delta_m = \delta_{m1} + \delta_{m2} + \delta_{m3} = 22.92 + 16.26 + \delta_{m3} = 39.18 + \delta_{m3}$ (mm),即在保证率为95%的情况下,大坝的安全变形不能超过 $39.18 + \delta_{m3}$ (mm).与文献[8]的计算结果($\delta_m^*=41.41$ mm,采用小概率方法)相比,本文所得到的结果略为偏小,主要是本文方法不仅体现出了监控指标的概率意义,同时也模拟了大坝的结构特性与材料特性,使拟定出的结果更加客观科学.同时,校核2006年的实测变形位移可以看出,目前大坝仍处于正常运行状态.

4 结 语

(1)首次把蒙特卡罗法引入安全监控指标拟定中,考虑了基本变量的随机性,并充分结合了大坝的原型观测资料.所拟定的监控指标,不仅具有概率意义,同时也对坝体的结构和材料特性进行了模拟,较传统方法更加合理科学.

(2)本文仅把水压荷载作为基本变量,实际上坝体的材料参数均可以作为基本变量来考虑.

(3)基本变量模拟次数的确定需视具体问题而定.但如果只为了计算监控指标的均值和方差,模拟的次数可以较少;如果计算某概率水平下的监控指标,则模拟的次数要足够多.

(4)该方法需要多次计算,因此,应从多方面提高计算效率,可采用并行计算技术、尽量减少基本变量等.

参 考 文 献:

- [1] 顾冲时,吴中如,阳武.用结构分析法拟定大坝变形二级监控指标[J].大坝观测与土工测试,1999,23(1):21-23.
- [2] 吴中如.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,2003:360-370.
- [3] 吴中如,顾冲时.大坝原型反分析及其应用[M].南京:江苏科学技术出版社,1999:99-110.
- [4] 徐钟济.蒙特卡罗方法[M].上海:上海科学技术出版社,1985:1-5.
- [5] 王梓坤.概率论基础及其应用[M].北京:科学出版社,1976:37-157.
- [6] 吴世伟.结构安全度与可靠度分析论文集[C].南京:河海大学出版社,1987:43-51.
- [7] 郑治.沉降概率计算的蒙特卡罗法[J].重庆交通学院学报,1999,18(3):69-74.
- [8] 河海大学.李家峡水电站大坝监测资料分析[R].南京:河海大学,2007.
- [9] 郑东健,刘广胜,顾冲时.大坝水平位移监控指标拟定的混合法[J].水电自动化与大坝监测,2002,26(2):42-44.