

拱坝结构损伤的多测点 R/S 分析

田振华,孙建会,朱赵辉

(中国水利水电科学研究院,北京 100038)

摘要:为了研究大坝监测资料与结构完整性的关系,利用 R/S 分析法对实测资料时间序列进行分时段分析,根据计算的分形维数判断坝体结构的损伤程度。实例计算结果表明:大坝结构完整,实测资料的变化规律相似性越高,其分形维数越小;当大坝结构出现损伤,实测资料的变化规律越复杂,其分形维数越大;与传统的仿真模拟相比,R/S 分析法更接近大坝实际工作性态,具有很强的适用性。

关键词:结构损伤;监测资料;分形维数;非线性程度;R/S 分析法

中图分类号:TV37 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)01-0065-03

Multi-point R/S analysis of arch dam structural damage//TIAN Zhenhua, SUN Jianhui, ZHU Zhaohui (China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to study the relationship between monitoring data and structural integrity of a dam, R/S analysis was conducted to calculate the fractal dimension of the monitoring data, which were divided into sub-period time series, and the degree of damage to the dam structure was determined. An example shows that, when the dam maintained its structural integrity, the fractal dimension grew smaller as the similarity of the sub-period time series of the monitoring data became greater; when the dam structural damage occurred, the fractal dimension became greater as the variation of the monitoring data grew more complicated. Compared with traditional simulation, the R/S analysis method is more suitable for the actual working behavior of dams and has strong applicability.

Key words: structural damage; monitoring data; fractal dimension; nonlinear degree; R/S analysis method

拱坝作为一种空间壳结构,主要依靠坝体的整体性来传递分配荷载,其结构的整体性很强并且非常重要。开裂、混凝土老化等损伤破坏了拱坝结构的整体性,若不进行有效的控制,将可能对拱坝的整体稳定性造成严重破坏,以致危及坝体的安全^[1]。目前一般借助有限元方法计算拱坝结构整体稳定的安全度,评价拱坝的工作性态。但对于正常运行的拱坝而言,拱坝材料性能与设计值已经不同,通过有限元计算的结果与实际情况有所偏差。监测资料是大坝运行性态的直接反映^[2],本文旨在研究大坝监测资料与大坝结构完整性的关系,从监测资料的角度分析拱坝结构的完整性。

大坝的实测资料受水位、温度等环境量的周期性影响,变化规律的相似性程度较高,但是坝体结构不确定损伤也扰乱了实测资料的周期性变化,降低了其自相似程度。R/S 分析法是一种非线性数值分析方法,其计算的分形维数代表了分析数据的非线性

程度;数据序列的非线性程度越高,计算的分形维数越大,反之,分形维数越小^[3]。本文利用 R/S 分析法对实测资料时间序列进行分时段分析,根据计算的分形维数判断坝体结构的损伤程度。

1 R/S 分析法原理

重标度极差分析(rescale range analysis,R/S)法是 20 世纪 60 年代英国水利专家 Hurst^[4]在研究库水位与河水位关系时提出的一种时间序列统计方法,后来 Mandelbrot^[5]结合分形理论对该方法进行了补充和完善,使之广泛应用于解决时间尺度的诸多问题。R/S 分析法的基本思想是:分析重标度的累积均值偏差的标度行为,即改变所研究对象的时间尺度的大小,研究其统计特征值变化规律,从而将小的时间尺度的规律用于大尺度范围,或者将大尺度的规律用于小尺度范围,其基本原理如下:

实测资料时间序列为 $\{x_i\}$ ($i=1,2,\cdots,n$),则该

时间序列的时间跨度 $\tau = t_n - t_1$, 在时间段 τ 内, 该时间序列的均值 $\bar{x}_\tau$ 为

$$\bar{x}_\tau = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

式中: i 为测点序列; n 为时间序列范围。在 t_j 时刻, x_i 相对于其均值 $\bar{x}_\tau$ 的累积偏差为

$$A(t_j, n) = \sum_{i=1}^j (x_i - \bar{x}_\tau) \quad (2)$$

式中: j 为时间跨度序列数。每个 n 值对应一个 $A(t_j, n) \sim t$ 序列, 把同一个 n 值所对应的最大值 $A_{\max}(t, n)$ 和最小值 $A_{\min}(t, n)$ 之差称为域, 记为 R , 标准偏差为 S , 即

$$R = A_{\max}(t, n) - A_{\min}(t, n) \quad (t_1 \leq t \leq t_n) \quad (3)$$

$$S = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^j (x_i - \bar{x}_\tau)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

引入无量纲比值 R/S , 对 R 进行重标度, 有

$$\frac{R}{S} = \frac{A_{\max}(t, n) - A_{\min}(t, n)}{\left[\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^j (x_i - \bar{x}_\tau)^2 \right]^{1/2}} \quad (5)$$

Mandelbrot^[5]通过对尼罗河最低水位等自然事件分析, 发现大多数自然现象满足指数律公式:

$$R/S = (\tau/2)^H \quad (6)$$

式中: H 为 Hurst 指数。对式(6)两边取对数, 可得

$$\lg(R/S) = H(\lg\tau - \lg 2) \quad (7)$$

采用最小二乘法拟合 $\lg(R/S)$ 与 $\lg\tau$ 的离散点, 则直线斜率的绝对值就是 Hurst 指数 H 。Mandelbrot^[5]研究认为 Hurst 指数 H 与分形维数 D 之间存在以下关系:

$$D = 2 - H \quad (8)$$

因此, 分形维数的求解就转化为 Hurst 指数的求解。

Hewett^[6]研究了河流流量、降雨量、泥沙沉积量等自然现象后, 发现 Hurst 指数 H 以 0.5 为间隔, 在时间序列不同的区间表现出不同的特性: 当 $H > 0.5$ 时, 表明原序列具有持久性, 在各个时间尺度上是正相关的; 当 $H = 0.5$ 时, 表明原序列是随机游走的, 观测测量时间序列在各尺度上是完全独立的, 是随机变化的; 当 $H < 0.5$ 时, 表明原序列具有反持久性, 观测测量时间序列在各时间尺度上是负相关的。

当 $H > 0.5$ 时, 监测资料变化规律的相似性较好, D 值也较小。当 $H < 0.5$ 时, 监测资料时间序列的负相关性越强, 意味着时间序列变化规律发生逆转的可能性越大, D 值也将越大, 实测资料变化规律也越复杂, 而这种逆转的发生在一定程度上预示了结构的改变, 也在一定意义上说明 D 值越大, 结构损伤的可能性越大。

2 拱坝结构整体性判断

对于结构完好的大坝, 其各测点实测资料之间的变化规律存在相似性, 表现特征具有共性, 即各测点的分形维数基本一致。当相邻两个测点之间的结构发生损伤时, 其实测资料的变化规律产生差异, 分形维数相差较大。因此, 可以通过比较相邻测点的分形维数来判断测点空间区域内大坝是否发生损伤。如果两个测点的分形维数不一致, 说明影响两个测点监测量变化的区域工作性态有所不同, 并具有非线性关系, 结构发生损伤的可能性较大; 如果两测点的分形维数较一致, 则相应区域内的结构线性变形占主导, 结构完好。

根据测点的空间坐标, 确定相邻测点的分形维数距离。对于传统的六面体有限元模型, 每个空间节点都有 6 个点与其相邻, 需要求解 6 个分形维数距离, 定义分形维数距离函数 F 为

$$F = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (D_{i,j} - D_{i+1,j})^2}} \quad (9)$$

式中: $D_{i,j}$ 、 $D_{i+1,j}$ 分别为空间某相邻两测点在同一时间跨度上的分形维数; m 为各测点的时间跨度数。

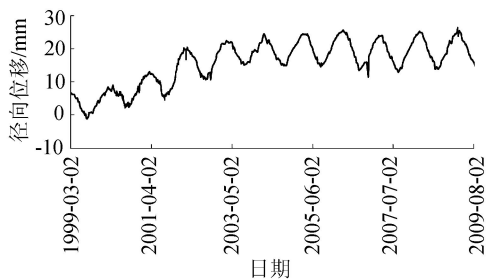
该函数反映了相邻测点之间的相关程度, 可以用于分析大坝结构区域的性态差异。 F 越大, 表明相邻测点间的变化规律差异越小, 结构完整性越好; F 越小, 表明相邻测点间的变化规律差异越大, 区域结构的整体性越差, 应加强安全监测。对于 F 较小的相邻区域, 还需对监测资料的时间序列分时段重新计算 F 值, 调整时间跨度序列 j 值, 逐步计算出最小的 F 值, 确定监测数据异常发生的时间点。

3 实例分析

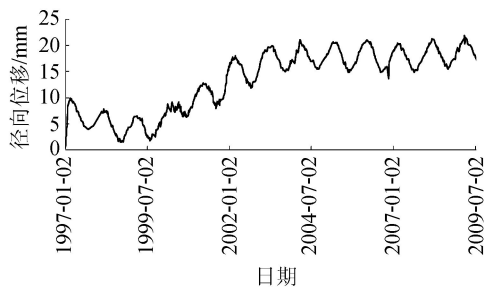
某水电工程主要由双曲拱坝、左岸重力墩、副坝、坝后式厂房和左右岸泄水道等建筑物组成, 划分了 20 个坝段以及左岸 3 个重力墩。拱坝最大坝高 155 m, 坝顶轴线长 414 m, 最大底宽 45 m, 坝顶宽度 8 m。大坝布置 5 条垂线组, 共 24 个测点, 分别布置在拱冠、两拱端和左右岸 1/4 拱处, 其中 4 号垂线位于右岸 1/4 拱处, z 号垂线位于重力墩。监测资料时间系列为 1997 年 1 月 2 日至 2009 年 12 月 29 日。

以 4 号垂线的 1 号、2 号测点和 z 号垂线的 2 号测点的径向位移为例, 利用 R/S 分析法计算各测点的分形维数, 分析两个坝段区域空间的结构损伤程度, 各测点的径向位移实测过程线如图 1 所示。

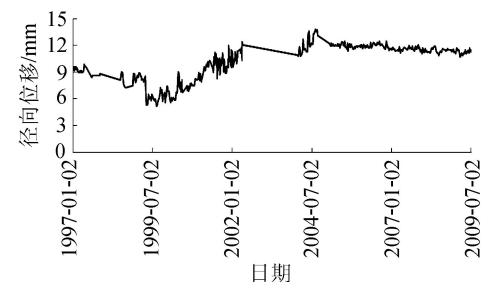
根据 3 个测点的特征, 将它们实测数据的时间序列分成 3 个时间跨度: 2000—2003 年、2004—



(a) 4号垂线1号测点



(b) 4号垂线2号测点



(c) z号垂线2号测点

图1 各测点径向位移实测过程线

2006年、2007—2009年,3个测点各时间跨度上的Hurst指数 H 和分形维数 D 计算结果如表1所示。

表1 测点各时间跨度上的 H 和 D 计算结果

测点	H			D		
	2000— 2003年	2004— 2006年	2007— 2009年	2000— 2003年	2004— 2006年	2007— 2009年
4号垂线 1号测点	0.82	0.91	0.93	1.18	1.09	1.07
4号垂线 2号测点	0.85	0.88	0.91	1.15	1.12	1.09
z号垂线 2号测点	0.36	0.45	0.32	1.64	1.55	1.68

由表1的计算结果可以计算相邻测点的分形维数距离,4号垂线2号测点与1号测点之间 $F=36.93$,4号垂线2号测点与z号垂线2号测点之间 $F=2.11$ 。从表1可知,4号垂线两个测点的分形维数比较接近1,相关度较大,可以判定在该区域内大坝结构整体性较好,2002年前的水位上升引起的变形台阶式增大,未对大坝结构完整性造成大的影响。z号垂线2号测点分形维数较大,结构的非线性程度较高,主要是因为该测点位于坝肩重力墩位置,受岩体岩性影响,受力复杂,并且与4号垂线2号测点的相关度较小,其变形规律已经不一致,说明该区域

存在裂缝等损伤的可能性大,应加强对该区域坝体结构的检查分析。

4 结 论

a. 大坝结构完整,在荷载作用下处于弹性变形,相应的分形维数较小;当大坝结构出现损伤,在相同荷载作用下变化规律会发生变化,相应的分形维数较大。

b. 大坝实测资料的变化规律相似性越高,其分形维数越小,越接近1;实测资料的变化规律越复杂,其分形维数越大。

c. 通过建立分形维数和结构损伤的对应关系,采用R/S分析法对实测资料进行分析,可以发现坝体结构的损伤,从而评价大坝结构的完整性。

参考文献:

- [1] 徐福卫,田斌.高拱坝裂缝成因分析[J].湖北水力发电,2005,59(2):14-17. (XU Fuwei, TIAN Bin. Analysis of contributing factors to cracks of high arch dam[J]. Hubei Water Power, 2005, 59(2): 14-17. (in Chinese))
- [2] 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.
- [3] 赖道平,吴中如,周红.分形学在大坝安全监测资料分析中的应用[J].水利学报,2004,35(1):100-104. (LAI Daoping, WU Zhongru, ZHOU Hong. Application of fractal theory to analyze dam safety monitoring data [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(1): 100-104. (in Chinese))
- [4] HURST H E. Long-term storage capacity of reservoirs[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1951(116):770-808.
- [5] MANDELBROT B. The fractal geometry of nature[M]. New York:Freeman Company,1982.
- [6] HEWETT T A. Fractal distribution of reservoir heterogeneity and their influence on fluid transport[J]. Annual Technical Conference and Exhibition, 1986(5):SPE15386.

(收稿日期:2013-02-26 编辑:周红梅)

