混凝土坝裂缝转异诊断的云模型法

徐波^{①②*}, 李占超^③, 黄志洪^④, 欧斌^②, 郑付刚^⑤

① 扬州大学水利与能源动力工程学院, 扬州 225127;

② 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098;

③ 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100;

④ 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 扬州 225127;

⑤ 中国水电工程顾问集团成都勘测设计研究院, 成都 610072

* E-mail: xubo@yzu.edu.cn

收稿日期: 2015-01-03; 接受日期: 2015-06-25

国家自然科学基金重点项目(批准号: 51139001)和国家自然科学基金青年基金(批准号: 51409227)资助

摘要 针对现有混凝土坝裂缝转异诊断方法多是基于裂缝开度单个测点进行分析这一不足, 提出利用多个测点综合信息量诊断裂缝性态的思路. 根据这一思路, 首先研究了将裂缝开度变化转化为裂缝信息量的方法, 其次利用投影寻踪法研究了裂缝开度各测点权重的确定方式, 然后将裂缝开度多个单测点的信息量归纳为综合信息量, 最后根据云模型理论, 建立了裂缝转异诊断的两种判据: 基于裂缝信息量总体数据序列的判据, 以及考虑裂缝信息量历史数据和当前数据差异性的判据, 建立了裂缝转异诊断的云模型法. 实例分析表明, 裂缝转异诊断的云模型法能够较客观地分析历史数据和当前数据贡献以及对结果的影响, 该方法具有可行性.

关键词

混凝土坝裂缝
转异诊断
裂缝信息量
云模型法

1 引言

裂缝是混凝土坝常见的病害. 在混凝土坝正常的运行过程中, 裂缝是否会进一步扩展, 是否会突然发生失稳转异, 是工程界的学者专家以及运行管理人员共同关注和研究的问题. 当前, 大坝安全已引起各国政府和人们的高度关注, 水工程安全被列为《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020)》中“重大自然灾害监测与防御”的重要内容, 而大坝是最重要的水工程^[1,2]. 裂缝作为混凝土坝病害的主要表现之一, 分析其性态对于预示工程险情具有关键性意义.

目前, 混凝土裂缝性态诊断的方法主要集中于断裂力学法和应用数学法^[3]. 在实际工程中, 由于裂缝的复杂性和检测技术的局限性, 裂缝的许多参数不容易得到, 只能得到裂缝口张开位移等实测资料, 即通常情况下, 裂缝的开度是较容易获得的裂缝参数. 由于断裂力学方面的裂缝转异准则在大坝安全监控中应用时不能和裂缝的开度便捷地联系起来. 因此, 对于裂缝转异诊断判据的研究, 应该基于裂缝开度的监测资料进行, 对目前已有的关于裂缝开度转异诊断的方法进行丰富和发展, 以及借助一些新的理论方法建立关于裂缝开度的转异诊断判据. 混凝土裂缝性态转异诊断的应用数学方法包括基于突

引用格式: 徐波, 李占超, 黄志洪, 等. 混凝土坝裂缝转异诊断的云模型法. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 1218–1226

Xu B, Li Z C, Huang Z H, et al. Cloud model diagnosis method of concrete dam crack behavior abnormality (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 1218–1226, doi: 10.1360/N092014-00195

变理论、灰色理论、混沌动力学理论和运动稳定性理论等提出的裂缝转异诊断识别法. Bao 和 Yu^[4]提出了分析裂缝亚临界扩展的灰色系统法等. 李雪红等人^[5]认为裂缝的时效变形反映了裂缝的稳定性和转异特征, 采用相空间重构技术对时效变形重构相平面, 由此识别裂缝的转异点, 确定裂缝转异发生的时间. Gu 等人^[6]提出了混凝土坝裂缝转异诊断的动力学模糊互相关因子指数法, 实现了混凝土坝裂缝的动态转异诊断, 此外, Li 等人^[7]还建立了混凝土坝裂缝的无参数变点转异诊断法.

根据上述分析可以发现, 目前混凝土坝裂缝性态转异诊断的应用数学方法, 多是利用裂缝开度单个测点进行分析的, 而对于混凝土坝的裂缝, 一条裂缝往往布置多个测点, 如图 1 所示. 单个裂缝开度测点提供的裂缝变化信息毕竟是有限的, 多个测点提供的信息要比单个测点提供的信息量要丰富的多. 因此, 有必要利用多个测点的信息分析裂缝的稳定性, 这要比基于单个测点的信息分析裂缝的稳定性更为全面合理. 针对上述问题, 本文的主要研究内容为: 研究将裂缝开度的变化转化为裂缝的信息量, 并将多个单测点的信息量综合成综合信息量的方法, 以及利用综合信息量和云模型建立裂缝转异诊断判断的方法, 以期丰富混凝土坝裂缝性态的诊断技术.

2 裂缝开度信息的度量

假定某条裂缝第 i 个开度测点的第 j 个测值为 J_{ij} , 则该裂缝所有测点的样本可以表示为 $\{J_{ij} | i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m\}$. 对每个测点的裂缝开度值进行统计分析可以确定该测点裂缝开度的概率密度函数 $g_i(J)$ 和概率分布函数 $G_i(J)$, 则有

$$G_i(J) = \int_{-\infty}^J g_i(x) dx. \quad (1)$$

根据上式可以看出, 混凝土坝裂缝开度的变化

图 1 裂缝多测点示意图

可以视为一个概率事件, 而根据典型小概率的知识可知, 裂缝开度值出现的概率越小, 裂缝的稳定性越差, 当裂缝开度对应的概率小于给定的阈值时, 裂缝可能转异, 需要加强对裂缝开度的观测. 所以, 裂缝开度出现的概率能反映裂缝开度变化的情况, 可以为分析裂缝开度的变化提供有效信息.

在定义裂缝开度信息量前, 先定义裂缝开度监测值的有序度, 基于概率法, 裂缝开度测点 i 的第 j 个测值的有序度可以定义如下.

(1) 当裂缝开度相对于初始测值变大时, 裂缝第 i 个测点的第 j 个测值的有序度为

$$\lambda_{ij} = G_i(J_{ij}) = \int_{-\infty}^{J_{ij}} g_i(x) dx. \quad (2)$$

(2) 当裂缝开度相对于初始测值变小时, 裂缝第 i 个测点的第 j 个测值的有序度为

$$\lambda_{ij} = 1 - G_i(J_{ij}) = \int_{J_{ij}}^{+\infty} g_i(x) dx. \quad (3)$$

由上述定义可以发现, 裂缝开度值相对于初始值增大或者减小时, 有序度 λ_{ij} 增大; 裂缝开度值靠近初始值时, 有序度 λ_{ij} 减小.

定义了有序度后, 利用有序度可以定义单个裂缝开度测点的信息量. 裂缝开度第 i 个测点的第 j 个测值提供的信息量为

$$Q_i^j = -[\lambda_{ij} \ln \lambda_{ij} + (1 - \lambda_{ij}) \ln(1 - \lambda_{ij})] = -\sum_{k=1}^2 \lambda_{ij}^k \ln \lambda_{ij}^k, \quad (4)$$

其中 $\lambda_{ij}^1 = \lambda_{ij}$, $\lambda_{ij}^2 = 1 - \lambda_{ij}$, 且 $0 < \lambda_{ij}^1 < 1$, $0 < \lambda_{ij}^2 < 1$.

利用裂缝多个单测点的信息量可以求得某条裂缝开度变化的综合信息量. 由于每个测点提供的信息量有差异性, 因此在计算综合信息量时, 需要考虑每个测点的权重值. 假定某条裂缝第 i 个测点的权重为 w_i , 则该裂缝所有测点提供的综合信息量为

$$Q^j = -\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^2 (w_i \lambda_{ij}^k) \ln(w_i \lambda_{ij}^k). \quad (5)$$

(5)式可以作如下的变换:

$$\begin{aligned} Q^j &= -\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^2 (w_i \lambda_{ij}^k) \ln(w_i \lambda_{ij}^k) \\ &= -\sum_{i=1}^n \left(\sum_{k=1}^2 w_i \lambda_{ij}^k \ln w_i + \sum_{k=1}^2 w_i \lambda_{ij}^k \ln \lambda_{ij}^k \right) \\ &= -\left(\sum_{i=1}^n w_i \ln w_i \sum_{k=1}^2 \lambda_{ij}^k + \sum_{i=1}^n w_i \sum_{k=1}^2 \lambda_{ij}^k \ln \lambda_{ij}^k \right) \end{aligned}$$

$$= -\sum_{i=1}^n w_i \ln w_i + \sum_{i=1}^n w_i Q_i^j. \quad (6)$$

定义 Q_w^j 为裂缝测点权重的权重信息量, 并取

$$Q_w^j = -\sum_{i=1}^n w_i \ln w_i, \text{ 则上式转化为}$$

$$Q^j = Q_w^j + \sum_{i=1}^n w_i Q_i^j. \quad (7)$$

(7)式为待分析裂缝所有测点提供的信息量的计算公式, 利用信息量 Q^j 可以分析裂缝的稳定性.

裂缝开度相对于初始开度变小或变大时, 裂缝的有序度均变大, 而裂缝的信息量变小, 因此裂缝信息量的监控分析是单向的, 裂缝信息量不小于某一监控值时, 裂缝是稳定的. 当裂缝开度相对于初始开度变小时, 裂缝趋于安全, 无需分析裂缝的稳定性; 而当裂缝开度相对于原始开度变大时, 则需要分析裂缝的稳定性.

3 确定测点权重的投影追踪法

投影追踪法可以将高维的裂缝开度监测数据投影到低维空间, 能够得到数据在投影空间中的结构或特征, 并根据数据的散布程度和局部凝聚程度来分析各测点的权重^[8,9].

裂缝所有测点的样本可以表示为 $\{J_{ij} | i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m\}$, J_{ij} 为裂缝第 i 个开度测点的第 j 个测值. 对 J_{ij} 进行规格化处理得到规格化后的数据 q_{ij} :

$$q_{ij} = \frac{J_{ij} - J_{i\min}}{J_{i\max} - J_{i\min}}, \quad (8)$$

其中 q_{ij} 为裂缝开度测值规格化后的数据序列值; $J_{i\max}$ 和 $J_{i\min}$ 分别为第 i 个测点测值序列中的最大值和最小值.

将 m 维规格化后的裂缝测值序列 $\{J_{ij} | i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m\}$ 综合成以 $l = \{l_1, l_2, \dots, l_m\}$ 为投影方向的一维综合投影值:

$$T(i) = \sum_{j=1}^m l_j q_{ij}, \quad i=1, 2, \dots, n, \quad (9)$$

其中 l 为单位长度向量.

在确定了裂缝规格化的样本集后, 投影方向 l 决

定了投影指标函数 $Z(l)$ 的值. 投影方向 l 发生改变, 则投影指标函数 $Z(l)$ 也将发生改变. 根据投影方向 l 和投影指标函数 $Z(l)$ 之间的关系, 通过求解 $Z(l)$ 最大化问题可以得出最佳投影方向. 则该问题的目标函数为

$$\max : h(l) = S_T \cdot Z_T, \quad (10)$$

该问题的约束条件为

$$\sum_{j=1}^m l^2(j) = 1, \quad (11)$$

其中

$$S_T = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (T(i) - \bar{T})^2}, \quad (12)$$

$$Z_T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (R - r_{ij}) \cdot f(R - r_{ij}), \quad (13)$$

式中 S_T 为投影值的散开度; Z_T 为投影指标函数; $\bar{T}$ 为数据序列 $T(i)$ 的平均值, $i=1, 2, \dots, n$; R 为局部密度的窗口半径, 可取为 $0.1S_T$; r_{ij} 为投影值之间的距离, $r_{ij} = |T(i) - T(j)|$; $f(t)$ 为单位阶跃函数, 满足下式:

$$f(t) = \begin{cases} 1, & t > 0, \\ 0, & t < 0. \end{cases} \quad (14)$$

(10)-(11)式对应的优化问题可以借助粒子群算法或混沌鱼群算法等求解.

将求得最佳投影方向记为 l^* , 利用 l^* 根据(9)式可求得样本点的投影值, 对投影值进行归一化处理可得到裂缝各测点的权重值:

$$w_i = \frac{T^*(i)}{\sum_{j=1}^n T^*(j)}, \quad i=1, 2, \dots, n, \quad (15)$$

其中 w_i 为第 i 个测点的权重值; $T^*(i)$ 为第 i 测点测值的最佳投影值.

4 基于云模型的裂缝转异判据的建立

根据裂缝的实测资料序列, 利用(7)式将裂缝开度的监测数据转换为裂缝信息量序列 $\{Q^j\}$. 基于云模型的相关知识分析信息量序列 $\{Q^j\}$, 从而可以建立裂缝转异的判据. 云模型是在概率理论和模糊集合理论交叉渗透的基础上, 利用特定构造算法, 形成

定性概念与定量之间的转换模型, 该模型可以揭示随机性和模糊性的内在关联性^[10,11]. 将云模型运用到混凝土坝裂缝信息量的分析研究之中, 同时考虑裂缝信息量异常值的随机性和模糊性, 把两者有机的集成在一起, 通过“定量-定性-定量”的转换, 构成“安全度”和“裂缝信息量”之间的映射, 将裂缝信息量的范围和分布规律有效转化为裂缝稳定性的监控, 建立裂缝转异的判据.

4.1 云模型的基本原理

设 U 为一个用精确数值表示的定量论域, C 为 U 上的定性概念, 若定量值 $x \in U$, 且 x 为定性概念 C 的一次随机实现, 同时 x 对 C 的隶属度 $\mu(x) \in [0,1]$ 是有稳定倾向的随机数:

$$\mu: U \rightarrow [0,1], \forall x \in U, x \rightarrow \mu(x), \quad (16)$$

则 x 在论域 U 上的分布称为云(Cloud), 每一个 x 称为一个云滴.

概念的整体性可以通过云的数字特征来反映, 这是定性概念的整体定量特性, 对理解定性概念的内涵和外延有着重要意义. 云用期望 Ex 、熵 En 和超熵 He 三个数字特征来共同表征一个概念. 期望 Ex 为云滴在论域空间分布的期望. 熵 En 为定性概念的不确定性度量, 由概念的随机性和模糊性共同决定. 超熵 He 为熵的不确定性度量, 是熵的熵.

设 U 为一个用精确数值表示的定量论域, C 为 U 上的定性概念, 若定量值 $x \in U$, 且 x 是定性概念 C 的一次随机实现, 若 x 满足: $x \sim N(Ex, En^2)$, 其中, $En' \sim N(En, He^2)$, 同时 x 对 C 的隶属度满足:

$$\mu = e^{-\frac{(x-Ex)^2}{2(En')^2}}, \quad (17)$$

则 x 在论域 U 上的分布称为正态云.

4.2 裂缝信息量的正向和逆向云发生器

4.2.1 逆向云发生器

逆向云发生器是可以将定量值转换为定性概念的模型. 它能够把一定数量的精确数据转换为用数字特征表示的定性概念. 基于统计原理的逆向正态云发生器的算法有两种, 一种是需要借助隶属度信息的, 另一种是无需隶属度信息的. 裂缝信息量的逆向云发生器的算法为第二种情况, 其具体的实现过程为: 输入裂缝信息量样本点 Q_j ($j=1,2,3,\dots,n$),

(Q_j 为裂缝信息量的样本点, 与(7)式中 Q^j 含义相同, 在后面的分析中均记为 Q_j) 得到期望 EQ 、熵 En 和超熵 He . 即

$$EQ = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Q_j, \quad (18)$$

$$En = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |Q_j - EQ|, \quad (19)$$

$$He = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (Q_j - EQ)^2 - En^2}. \quad (20)$$

4.2.2 正向云发生器

正向云发生器能够实现从定性到定量的映射, 它根据云的数字特征 (EQ, En, He) 产生云滴. 裂缝信息量正向云发生器输入数字特征 (EQ, En, He), 生成 n 个云滴 (Q_j, u_j) 的具体算法如下.

首先以 En 为期望, He^2 为方差生成正态随机数 $En'_j = NORM(En, He^2)$; 然后以 EQ 为期望, En'^2_j 为方差生成正态随机数 $Q_j = NORM(EQ, En'^2_j)$; 其次计算 $u_j = \exp(-\frac{(Q_j - EQ)^2}{2En'^2_j})$, 得到一个云滴 (Q_j, u_j), u_j 为 Q_j 的隶属度; 最后重复上述过程直到生成所需的 n 个云滴.

4.3 裂缝转异判据的建立

裂缝信息量数据序列是根据裂缝多个测点的裂缝开度数据序列得到的, 因为裂缝开度数据序列是不断变化的, 因此, 裂缝信息量数据序列也是不断变化的. 利用裂缝信息量的全部数据, 基于云模型的正向、逆向发生器可以得到裂缝转异的判据. 这种基于裂缝信息量总体数据的云模型, 考虑了裂缝信息量的总体变化过程, 包括了所有的历史数据和当前数据. 裂缝信息量的历史数据和当前数据所具有的性质(主要表现为数字特征)可能有一定的差异性. 而基于裂缝信息量总体数据建立的转异判据, 则无法体现上述差异性. 历史数据可以表征在经历荷载下, 裂缝信息量的变化情况, 而当前数据可以表征裂缝信息量近期的性质. 因此可以将数据分为历史数据和当前数据两个样本集, 分别建立基于历史数据的历史云和基于当前数据的当前云, 然后将历史云和当

前云综合为综合云, 利用综合云模型建立裂缝转异的判据. 这种考虑裂缝信息量历史数据和当前数据的裂缝转异判据, 既考虑了裂缝已经历荷载的影响, 又考虑了裂缝近期的真实状态, 同时能够反映裂缝信息量历史数据和当前数据数字特征的差异性.

裂缝信息量的历史数据和当前数据的划分, 可依据混凝土坝运行过程中, 是否采取工程措施, 或大坝的运行工况是否发生显著变化等(例如, 裂缝环氧树脂灌浆和改变水位运行)进行划分, 可以将采取工程措施的时间, 或运行工况改变的时间, 作为裂缝历史数据和当前数据的划分点.

综上, 本文分两种情况建立裂缝转异的判据: 基于裂缝信息量总体数据序列的判据, 考虑裂缝信息量历史数据和当前数据差异性的判据.

4.3.1 基于总体数据序列的判据

选取裂缝信息量数据序列的总体作为分析对象, 通过逆向云算法可以求得裂缝信息量的数字特征, 由于裂缝信息量没有各自的隶属度, 故采用无需隶属度信息的逆向云发生器可以求得样本反映定性概念的数字特征 (EQ, En, He) . 利用求得的数字特征基于正向云发生器可以产生云滴及其各自的隶属度. 所以, 分别采用正、逆向云发生器可以成功实现从未知分布情况的裂缝信息量数据向已知概率密度和隶属度的云滴群的转换.

在构建裂缝信息量正态云模型的基础上, 区别以往单一考虑小概率事件的随机性, 综合考虑 n 个云滴分布的概率密度和各自的隶属度, 确定任一小区间上的云滴群 ΔQ 对定性概念的贡献 ΔC 为

$$\Delta C \approx \Delta \mu_A(Q) * \Delta Q / \sqrt{2\pi}En. \quad (21)$$

因为

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}En} \int_{EQ-3En}^{EQ+3En} \mu_T(x) dx = 99.74\%, \quad (22)$$

所以, 对于定性概念有贡献的云滴, 主要落在区间 $[EQ-3En, EQ+3En]$.

利用裂缝信息量的正向云发生器生成云滴 (Q_j, u_j) 时, $Q_j = NORM(EQ, En_j'^2)$; 而 $En_j' = NORM(En, He^2)$. 因此, 裂缝信息量的期望为 EQ , 而方差为:

$$DQ = \sqrt{En^2 + He^2}. \quad (23)$$

根据小概率的分析方法, 不同的置信概率下, 可以得到不同的裂缝信息量分布区间, 例如, 置信概率为 5% 时, 对应的裂缝信息量分布区间为 $[EQ-1.96DQ, EQ+1.96DQ]$; 而置信概率为 1% 时, 对应的裂缝信息量分布区间为 $[EQ-2.58DQ, EQ+2.58DQ]$. 由于裂缝信息量的监控值是单向的, 当裂缝信息量的值不小于某一控制值时, 裂缝是稳定的, 未发生转异. 因此, 根据小概率的分析方法, 置信概率为 5% 时, 裂缝信息量的控制值为

$$Q_j = EQ - 1.96DQ, \quad (24)$$

而置信概率为 1% 时, 裂缝信息量的控制值为

$$Q_j = EQ - 2.58DQ, \quad (25)$$

即置信概率为 1% 时, 裂缝信息量的控制值为

$$Q_j = EQ - 2.58\sqrt{En^2 + He^2}.$$

因为 $Q_j = EQ - 2.58\sqrt{En^2 + He^2}$ 与 $Q_j = EQ - 3En$ 数值相近, 在此, 为分析方便, 将裂缝信息量的控制值取为 $EQ - 3En$, 即裂缝满足下式时, 裂缝稳定:

$$Q_j \geq EQ - 3En. \quad (26)$$

上述分析与正向正态云的“ $3En$ 规则”相吻合, 因此, 基于“ $3En$ 规则”可以得到裂缝信息量的控制值, 即得到裂缝转异的判据.

裂缝信息量云图可以理解为裂缝信息量与隶属度的散点图, 因此, 可以利用回归拟合的方式确定隶属度与裂缝信息量之间的近似函数关系 $u = f(Q)$. 进而可以求得 $Q = EQ - 3En$ 时, 与之对应的隶属度 u_k . 实际应用表明, 函数关系 $u = f(Q)$, 可近似表示为如下形式:

$$u = a_1 \exp\left[-\left(\frac{Q-b_1}{c_1}\right)^2\right] + a_2 \exp\left[-\left(\frac{Q-b_2}{c_2}\right)^2\right] + a_3 \exp\left[-\left(\frac{Q-b_3}{c_3}\right)^2\right], \quad (27)$$

其中 u 为隶属度; Q 为裂缝信息量; $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, a_3, b_3, c_3$ 为回归拟合系数.

由此, 裂缝信息量 $Q_j < EQ - 3En$ 时, 不仅是小概率事件的发生, 而且该事件预示裂缝转异的隶属度也一并得知, 可以给大坝安全监控人员提供定量

信息, 以便于进行裂缝的监控分析.

4.3.2 考虑历史数据和当前数据差异性的判据

假定基于裂缝信息量的历史数据得到的数字特征为 (EQ_s, En_s, He_s) , 而根据当前数据得到的数字特征为 (EQ_n, En_n, He_n) . 同时假定历史云对综合云的贡献为 w_s , 当前云对综合云的贡献为 w_n . 根据综合云的算法^[12], 可以得到裂缝信息量综合云模型的数字特征 (EQ_z, En_z, He_z) 为

$$\begin{cases} EQ_z = \frac{EQ_s En_s w_s + EQ_n En_n w_n}{En_s w_s + En_n w_n}, \\ En_z = En_s w_s + En_n w_n, \\ He_z = \frac{He_s En_s w_s + He_n En_n w_n}{En_s w_s + En_n w_n}, \end{cases} \quad (28)$$

特别当 $w_n = w_s$ 时:

$$\begin{cases} EQ_z = \frac{EQ_s En_s + EQ_n En_n}{En_s + En_n}, \\ En_z = En_s + En_n, \\ He_z = \frac{He_s En_s + He_n En_n}{En_s + En_n}. \end{cases} \quad (29)$$

根据(28)或(29)式的综合云的逆向云发生器可以求得样本反映定性概念的数字特征 (EQ_z, En_z, He_z) . 进一步, 利用求得的数字特征, 基于综合云正向云发生器可以产生云滴及其相应的隶属度. 采用综合云的正、逆向云发生器可以成功实现从未知分布情况的裂缝信息量数据向已知概率密度和隶属度的云滴群的转换, 同时, 基于“ $3En$ 规则”可以得到裂缝信息量的控制值, 即得到裂缝转异的判据.

综合云模型可以在考虑历史数据的同时考虑当前数据的性质, 基于综合云模型的裂缝信息量的控制值, 或称裂缝转异的判据为

$$Q_j > EQ_z - 3En_z. \quad (30)$$

当裂缝信息量满足(30)式时, 裂缝稳定, 否则裂缝转异. 同时, 利用回归拟合可以得到综合云散点图对应的裂缝信息量与隶属度之间的函数关系. 借助该函数关系 $u_z = f_z(Q)$, 可以确定 $Q = EQ_z - 3En_z$ 时, 对应的隶属度 $u_z = f_z(EQ_z - 3En_z)$. 实际应用表明, $u_z = f_z(Q)$ 也可以用形如(27)式的函数关系近似表示.

4.3.3 利用裂缝信息量建立裂缝转异判据的步骤

根据上述分析, 可以利用裂缝上布置的多个测点提供的信息分析监控裂缝的稳定性, 建立裂缝转异的判据. 该方法的具体分析步骤如下.

1) 选取裂缝上具有代表性的裂缝开度测点, 计算单个测点裂缝开度的有序度, 并计算单个测点提供的信息量.

2) 计算测点信息的权重, 并利用单测点信息计算所有测点提供的综合信息.

3) 利用云模型的正向、逆向云发生器建立裂缝转异的判据, 建立判据时分为基于裂缝信息量总体数据序列、考虑裂缝信息量历史数据和当前数据差异性两种情况.

5 工程实例

5.1 工程概况

某混凝土坝存在一条裂缝, 该裂缝自 5#坝段一直延伸至 28#坝段, 长达 300 多米. 经探测, 裂缝深达 5 米以上. 在裂缝上设有 16 支测缝计及时观测裂缝开度变化情况, 分布在 8#~26#坝块. 选取该裂缝的开度测点 X12, X14, X18, X20 等 4 个测点的监测数据作为研究对象, 分析该裂缝的稳定性.

5.2 计算分析

5.2.1 信息量计算

根据裂缝开度单测点信息量的计算方法和测点权重的计算方法可以得到测点 X12, X14, X18, X20 提供的裂缝综合信息量, 该裂缝综合信息量的结果如图 2 所示.

5.2.2 裂缝转异的判据

1) 基于总体数据序列的判据

基于图 2 中的裂缝信息量的所有数据, 利用逆向云算法可以求得裂缝信息量的数字特征 $Ex = 1.92$, $En = 0.29$, $He = 0.12$, 根据数字特征, 通过正向云算法创建云滴可以形成裂缝信息量的云图, 同时可以得到每个云滴对应的隶属度, 如图 3 所示.

综合考虑云滴分布的概率密度与相应的隶属度, 即云滴对定性概念的贡献度 ($3En$ 规则), 可以得到裂缝转异的判据为 $Q = EQ - 3En = 1.05$. 隶属度与裂缝信息量之间的近似函数关系为

图2 裂缝信息量过程线

图3 基于总体数据的裂缝信息量分布云图

$$u = 0.0874 \exp \left[-\left(\frac{Q-1.932}{0.0456} \right)^2 \right] + 0.643 \exp \left[-\left(\frac{Q-1.921}{0.676} \right)^2 \right] + 0.272 \exp \left[-\left(\frac{Q-1.901}{0.244} \right)^2 \right]. \quad (31)$$

利用(31)式可以得到, $EQ-3En=1.05$ 时, 对应的隶属度为 0.122 左右.

2) 考虑历史数据和当前数据差异性的判据

由于不了解裂缝的施工措施或大坝运行工况的改变情况, 所以无法准确确定裂缝信息量历史数据和当前数据的分界点. 但为说明考虑历史数据和当前数据建立裂缝转异判据的可行性, 选取图2中1989年至2004年初的裂缝信息量的数据作为历史数据, 选取2004年初至2006年底的数据作为当前数据, 进行后续计算分析.

根据2004年初至2006年底的当前数据, 可以求得裂缝信息量的数字特征为 $Ex_n=1.83$, $En_n=0.31$, $He_n=0.13$, 根据数字特征通过正向云算法创建云滴

形成裂缝信息量分布云图, 并同时得到每个云滴的隶属度, 如图4中“◇”所示. 因此基于裂缝信息量当前数据的裂缝转异判据为 $EQ_n-3En_n=0.9$. 基于裂缝信息量当前数据和总体数据得到的判据的差别在14.3%左右, 这说明基于总体数据和当前数据建立的裂缝转异判据, 差别较为明显.

根据1989年至2004年初的裂缝信息量的历史数据, 利用逆向云算法可以求得裂缝信息量的数字特征为 $Ex_s=1.94$, $En_s=0.27$, $He_s=0.11$. 根据数字特征, 通过正向云算法创建云滴可以形成裂缝信息量分布云图, 同时可以得到每个云滴的隶属度, 如图4中“*”所示. 因此基于裂缝信息量历史数据的裂缝转异判据为 $EQ_s-3En_s=1.13$. 基于裂缝信息量历史数据得到的判据与基于裂缝信息量总体数据得到的判据的差别在7.6%左右. 这说明基于总体数据和历史数据建立的裂缝转异判据也有一定差别.

考虑裂缝信息量的历史数据和当前数据建立裂缝信息量的综合云模型, 并假定历史云对综合云的贡献 w_s 与当前云对综合云的贡献 w_n 相等, 可以求得

图4 考虑历史数据和当前数据的裂缝信息量分布云图

裂缝信息量的数字特征为 $Ex_z = 1.88$, $En_z = 0.29$, $He_z = 0.12$, 根据数字特征通过正向云算法创建云滴形成裂缝信息量分布云图, 如图 4 中“o”所示. 因此考虑裂缝信息量的历史数据和当前数据差异性的裂缝转异判据为 $EQ_z - 3En_z = 1.01$.

考虑裂缝信息量的历史数据和当前数据建立裂缝信息量的综合云模型, 利用该模型建立的裂缝转异判据与基于总体数据得到的裂缝转异判据的差别为 3.8%左右. 该差别较小的原因为假定历史云对综合云的贡献 w_s 与当前云对综合云的贡献 w_n 相等, 因为当假定 $w_s = 0.1$, $w_n = 0.9$ 时, 判据变为 0.92, 与基于总体数据得到的判据的差别在 12.4%左右. 因此, 考虑历史数据和当前数据差异性, 建立裂缝转异的判据时, 二者的权重值对结果有较为明显的影响.

本算例中, 裂缝转异的判据随当前数据权重的变化如图 5 所示. 当前数据权重值取 0.35 时, 考虑历史数据和当前数据差异性得到的转异判据也为 1.05, 与基于总体数据得到的判据相同. 根据裂缝开度的实测数据, 裂缝开度的当前数据较历史数据有增大趋势, 裂缝信息量的当前数据较历史数据有减小趋势, 但是根据监测分析, 裂缝性态基本稳定, 因此, 在建立裂缝转异判据时, 可以适当增加当前数据的权重以反映裂缝当前的状态, 例如, 取当前数据权重为 0.7, 建立的裂缝转异判据为 0.97.

综上, 考虑历史数据和当前数据差异性建立裂缝转异判据的方法是可行的, 但是历史数据和当前数据权重值的选取, 是值得进一步深入研究的

图 5 裂缝转异判据与当前数据权重关系曲线

问题.

6 结论

本文探讨了裂缝综合信息量的构建方法, 在此基础上, 基于云模型, 建立了混凝土坝裂缝转异的判据. 并通过工程实例对上述方法进行了验证分析, 得到如下结论.

(1) 将混凝土坝裂缝单测点开度的变化转化为裂缝的信息量, 利用投影寻踪法确定裂缝开度各测点的权重值, 可将裂缝多个单测点的信息量综合成综合信息量, 然后以云模型为理论基础, 可建立裂缝转异诊断的云模型法.

(2) 云模型法的转异诊断判据不仅能体现裂缝多个测点的综合信息, 而且该方法在得到裂缝转异判据的同时, 可以得到相应的隶属度, 这使得云模型法确定的判据更为客观.

(3) 实例分析表明, 借助裂缝综合信息量, 利用云模型建立的裂缝转异判据, 能够较客观地分析历史数据和当前数据贡献以及对结果的影响, 裂缝转异诊断的云模型法是可行的.

参考文献

- Wu Z R, Peng Y, Li Z C, et al. Commentary of research situation and innovation frontier in hydro-structure engineering science. *Sci China Tech Sci*, 2011, 54: 767–780
- Wu Z R, Xu B, Gu C S, et al. Comprehensive evaluation methods for dam service status. *Sci China Tech Sci*, 2012, 55: 2300–2312
- 李占超. 混凝土坝裂缝转异诊断及判据研究. 博士学位论文. 南京: 河海大学, 2012
- Bao T F, Yu H. Detection of subcritical crack propagation for concrete dams. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2009, 52: 3654–3660
- 李雪红, 徐洪钟, 顾冲时, 等. 大坝裂缝转异点的相平面识别法. *应用基础与工程科学学报*, 2007, 15: 177–182
- Gu C S, Li Z C, Xu B. Abnormality diagnosis of cracks in the concrete dam based on dynamical structure mutation. *Sci China Tech Sci*, 2011, 54: 1930–1939
- Li Z C, Gu C S, Wu Z R. Nonparametric change point diagnosis method of concrete dam crack behavior abnormality. *Math Probl Eng*, 2013, 2013: 1–13
- 雷鹏, 常晓林, 肖峰, 等. 高混凝土坝空间变形预警指标研究. *中国科学: 技术科学*, 2011, 41: 992–999
- Lei P, Chang X L, Xiao F, et al. Study on early warning index of spatial deformation for high concrete dam. *Sci China Tech Sci*, 2011, 54:

1607–1614

- 10 王晋伟. 多不确定性信息的多目标电网规划研究. 硕士学位论文. 北京: 华北电力大学, 2012
- 11 徐照华. 基于云模型的大坝安全监控指标拟定方法研究. 南昌工程学院学报, 2012, 31: 73–77
- 12 李波. 碾压混凝土坝力学参数渐变规律和层面综合分析方法研究. 博士学位论文. 南京: 河海大学, 2010

Cloud model diagnosis method of concrete dam crack behavior abnormality

XU Bo^{1,2}, LI ZhanChao³, HUANG ZhiHong⁴, OU Bin² & ZHENG FuGang⁵

¹ School of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China;

² State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

³ College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

⁴ Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou 225009, China;

⁵ Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Institute of CHECC, Chengdu 610072, China

Because the existing diagnosis methods of concrete dam crack behavior abnormality are mostly based on a single measurement point of crack opening. The idea of diagnosing concrete dam crack behavior by use of comprehensive amount of crack information of multiple measurement points was proposed. First, the method of transforming crack opening variation into amount of crack information was studied according to the idea above. Then the determining method of weight of each crack opening measurement point making use of Projection Pursuit Method was researched. Next, amount of crack information of multiple single measurement point was synthesized into comprehensive amount of crack information. At last, on the basis of cloud model theory, two kinds of crack behavior abnormality diagnosis criterion including criterion of all the data sequence of amount of crack information and criterion of considering the difference between historical data and current data of amount of crack information were established. Accordingly, cloud model diagnosis method of crack behavior abnormality was built. The case study shows that the cloud model diagnosis method can objectively analyze the contribution and impact of historical and current data on the results, and it is reasonable and feasible.

concrete dam crack, abnormality diagnosis, amount of crack information, cloud model diagnosis method

doi: 10.1360/N092014-00195