混凝土坝裂缝转异诊断的顺序典型小概率法

徐波^{①②*}, 陆伟刚^①, 李占超^③, 黄志洪^④

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

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

收稿日期: 2014-06-03; 接受日期: 2014-07-02

国家自然科学基金重点项目(批准号: 51139001)、水利部公益性行业科研专项经费(批准号: 201201038)和国家自然科学基金(批准号: 51179066)资助项目

摘要 裂缝是混凝土坝不可避免的病害, 其稳定与否是关系到混凝土坝结构安全的关键因素. 基于裂缝开度与裂缝尖端张开位移之间的函数关系, 提出了混凝土坝裂缝转异诊断的临界裂缝开度准则, 并探讨了该准则所需的裂缝尖端张开位移和裂缝亚临界扩展量的确定方法. 借助裂缝开度监控模型将临界裂缝开度准则进行转化, 并与大坝安全监控中裂缝的原位监测资料-裂缝开度联系起来, 建立了混凝土坝裂缝转异诊断的顺序典型小概率法. 实例分析表明, 顺序典型小概率法实现了临界裂缝开度准则在大坝安全监控中的具体应用, 是合理可行的.

关键词

混凝土坝裂缝
转异诊断
临界裂缝开度准则
顺序典型小概率法

1 引言

随着社会经济的发展和人民生活水平的提高, 大坝安全已引起各国政府和人们的高度关注, 水利工程安全被列为《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利工程^[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. 随着坝龄的增长, 裂缝可能会进一步扩展, 最终引起严重的断裂事故, 危及混凝土坝的安全状态, 在混凝土坝正常的使用、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.

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. 1961 年, Kaplan^[3]率先将断裂力学应用于混凝土研究中, 而目前混凝土断裂力学已经得到了长足发展. 国内外学者基于断裂力学建立了多种裂缝性态转异诊断判据, 例如 Xu^[4–6]提出的双 K 断裂准则, 该准则也引起了其他学者的关注和研究, 吴智敏等人^[7]研究了双 K 断裂参数的尺寸效应对双 K 断裂参数的影响, 赵志方和徐世烺^[8]研究了混凝土软化本构曲线形状对双 K 断裂参数的影响, 胡少伟等人^[9]研究了强度等级对混凝土双 K 断裂参数的影响. 学者们还提出了最大周向应力准则、复合应力准则、扭转应变能密度因子准则、最大能量释放率准则、双 G 断裂准则^[10]、以及双裂缝尖端张开位移准则^[11]等. 此外, 学者们还做了一些其他方面的研

引用格式: 徐波, 陆伟刚, 李占超, 等. 混凝土坝裂缝转异诊断的顺序典型小概率法. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 1035–1042

Xu B, Lu W G, Li Z C, et al. Order typical small probability diagnosis method of concrete dam crack behavior abnormality (in Chinese). Sci Sin Tech, 2014, 44: 1035–1042, doi: 10.1360/N092014-00194

究, 例如: Moës 和 Belytschko^[12]在裂缝尖端节点上富集线弹性断裂力学位移场的基函数, 采用 J 积分求解 I 型和 II 型应力强度因子; Kyunwook 等人^[13]研究了裂缝在附近骨料影响下的路径选择问题, 并从理论和实验上提出了裂缝扩展路径选择的判断准则; 而 Wang 等人^[14]和徐世烺等人^[15]分别对混凝土扩展过程中的临界裂缝尖端张开位移以及裂缝口张开位移与裂缝尖端张开位移之间的关系进行了研究. 对于混凝土坝中的裂缝, Lohrasbi 和 Attarnejad^[16]基于断裂力学和离散裂缝模型对混凝土重力坝的裂缝扩展进行了研究. 刘海成等人^[17]通过多组不同削弱度的深埋椭圆裂缝、矩形裂缝和穿透裂缝的单轴拉伸试验, 应用双 K 断裂准则, 建立了碾压混凝土拱坝诱导缝开裂的等效应力准则.

混凝土裂缝性态转异诊断的应用数学方法包括基于突变理论、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. 包腾飞还提出了分析裂缝亚临界扩展的灰色系统法等^[18,19]. 李雪红等人^[20]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^[21]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^[22]还建立了混凝土坝裂缝的无参数变点转异诊断法.

从目前的研究来看, 断裂力学方面的裂缝转异诊断准则主要集中于应力、应变和能量等方面; 而裂缝转异诊断的应用数学法主要针对裂缝的最常用的监测参数——裂缝开度进行了分析研究, 并提出了多种判据. 混凝土坝的各监测项目的实测资料是大坝运行状态最直接有效的反映, 利用实测资料对裂缝的稳定性进行分析, 判断裂缝是否发生转异, 是最接近工程实际的裂缝转异诊断方法, 同时该方法也具有及时有效, 便于工程技术人员掌握等优点. 然而在实际工程中, 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, 分析混凝土坝裂缝的性态.

本文在研究混凝土坝裂缝转异诊断的临界裂缝开度准则的基础上, 探讨了临界裂缝开度准则所需参数的确定方法, 并将该准则与大坝安全监控中裂缝的原位监测资料-裂缝开度联系起来, 建立了混凝土坝裂缝转异诊断的顺序典型小概率法. 以期丰富混凝土坝裂缝性态的诊断技术, 并为混凝土坝的安全监控提供技术支持.

2 混凝土坝裂缝转异诊断的临界裂缝开度准则

目前, 已有较多的基于断裂力学知识的裂缝转异诊断判据, 采用这些判据对水工混凝土结构裂缝的扩展和稳定性分析在理论上是可行的, 但是将这些判据结合裂缝的实测资料应用到实际工程中, 如混凝土坝的裂缝转异诊断分析中, 还存在着一定的难度. 裂缝尖端张开位移准则认为: 不考虑裂缝体的形状、尺寸、受力方式和大小, 当裂缝尖端张开位移 CTOD 达到临界值 $CTOD_c$ 时, 裂缝开始扩展, 临界裂缝尖端张开位移 $CTOD_c$ 是材料性能常数, 可通过试验得到. 该准则是 Wells^[23]在 1963 年提出的, 在金属裂缝诊断领域得到了成功应用. 一些学者将裂缝尖端张开位移 CTOD 理论, 引入到混凝土结构裂缝的诊断分析中, 通过不同尺寸混凝土构件的试验, 得出混凝土结构的临界裂缝尖端张开位移 $CTOD_c$ 与试件尺寸无关的结论, 进一步的研究表明, 临界裂缝尖端张开位移 $CTOD_c$ 可作为控制混凝土断裂的重要材料参数^[24]. 对于混凝土试件, $CTOD_c$ 较容易测得, 而对于混凝土坝等大体积水工混凝土结构出现裂缝时, $CTOD_c$ 和裂缝的亚临界扩展量较难测得. 因此, 直接利用临界裂缝尖端张开位移 $CTOD_c$ 监控混凝土坝的裂缝转异困难较大, 即裂缝尖端张开位移准则, 在混凝土坝裂缝的稳定性分析中的直接应用面临较多难题.

对于混凝土坝或者混凝土试件, 裂缝开度 CMOD 与裂缝尖端张开位移 CTOD 之间存在如下关系^[25](图 1):

$$CTOD = \frac{\Delta a}{\Delta a + a_0} CMOD, \quad (1)$$

图 1 裂缝开度与裂缝尖端张开位移的关系

式中, Δa 为断裂过程区长度, a_0 为初始裂缝深度.

当裂缝处于扩展的临界状态时, (1)式改写为

$$\text{CTOD}_c = \frac{\Delta a_c}{\Delta a_c + a_0} \text{CMOD}_c = \frac{\Delta a_c}{a_c} \text{CMOD}_c, \quad (2)$$

式中, Δa_c 为裂缝的亚临界扩展量; a_0 为初始裂缝深度; a_c 为临界裂缝深度; CTOD_c 为裂缝转异的临界裂缝尖端张开位移; CMOD_c 为裂缝转异的临界裂缝开度.

由(2)式知, 裂缝的临界裂缝开度 CMOD_c 与临界裂缝尖端张开位移 CTOD_c 存在对应关系, 因此可将利用临界裂缝尖端张开位移判断裂缝转异的准则, 转换为利用临界裂缝开度判断裂缝的转异. 对于裂缝实测资料来说, 裂缝开度 δ_c 是最容易得到的, 这与利用临界裂缝开度 CMOD_c 判断裂缝的转异不谋而合. 根据上述分析可以建立利用裂缝开度判断裂缝转异的准则:

$$\begin{cases} \delta_c < \text{CMOD}_c, & \text{裂缝未转异;} \\ \delta_c = \text{CMOD}_c, & \text{裂缝处于临界状态;} \\ \delta_c > \text{CMOD}_c, & \text{裂缝转异.} \end{cases} \quad (3)$$

建立了(3)式裂缝的转异准则后, 需要确定临界裂缝开度 CMOD_c 才能将该准则用于混凝土坝裂缝的

转异诊断. 由(2)式知

$$\text{CMOD}_c = \frac{\Delta a_c + a_0}{\Delta a_c} \text{CTOD}_c. \quad (4)$$

由(4)式知, 对于一条已知裂缝(裂缝的长度、深度和开度等参数已知), 确定临界裂缝开度 CMOD_c 的值, 需要确定临界裂缝尖端张开位移 CTOD_c 的值和裂缝的亚临界扩展量 Δa_c . CTOD_c 的值为混凝土的材料参数, 可以通过试验确定; Δa_c 的值则可以通过数值分析的方法确定.

综上, 本文研究的基于断裂力学知识的裂缝转异诊断判据的核心思想是, 将断裂力学模型试验(确定混凝土材料的 CTOD_c)和数值模拟分析(确定裂缝的亚临界扩展量 Δa_c)相结合, 得到临界裂缝开度 CMOD_c , 以监控裂缝的性态. 下面将对确定临界裂缝开度 CMOD_c 的方法进行具体研究, 建立 CMOD_c 准则.

3 临界裂缝开度准则的建立

结合裂缝的虚拟裂缝模型、断裂力学知识和混凝土构件试验^[25], 可以得到混凝土的临界裂缝尖端张开位移 CTOD_c . 基于虚拟裂缝模型的混凝土试件的力学模式如图 2(a)所示. 根据叠加原理, 图 2(a)的作用模式可以由图 2(b)和(c)代替. 其中 P 为试验时混凝土试件承受的荷载值, l_0 为裂缝的初始深度, Δl 为裂缝的亚临界扩展量, 此外, 试件高度为 h , 试件厚度为 B , 裂缝尖端张开位移为 CTOD , 临界裂缝尖端张开位移为 CTOD_c . 为与混凝土坝裂缝开度区分, 将试件临界裂缝开度记为 CMOD'_c .

通过试验和迭代计算可以得到混凝土试件的 Δl_c . 在得到 Δl_c 之后, 因为试件裂缝的临界开度 CMOD'_c 在试验中可以获得, 所以根据(2)式可以得到混凝土试件的 CTOD_c :

图 2 混凝土试件叠加算法示意图

$$\text{CTOD}_c = \frac{\Delta l_c}{\Delta l_c + l_0} \text{CMOD}'_c. \quad (5)$$

因为 CTOD_c 是混凝土的材料参数, 所以若混凝土试件的材料特性与混凝土坝接近, 或者混凝土试件为从混凝土坝上取样所得, 则可以将(5)式中混凝土试件的 CTOD_c 看做混凝土坝的临界裂缝尖端张开位移 CTOD_c , 即上述分析过程也是确定混凝土坝临界裂缝尖端张开位移 CTOD_c 的过程。

混凝土坝裂缝的临界裂缝尖端张开位移 CTOD_c 可以采用混凝土试件的试验值代替, 但是混凝土坝裂缝的亚临界扩展量 Δa_c 则无法通过试验确定, 而且也较难通过检测手段检测到。

鉴于试验和检测手段均较难得到混凝土坝裂缝的亚临界扩展量 Δa_c , 考虑采用数值模拟方式确定 Δa_c 的近似值^[26]。在裂缝扩展过程中, 宏观裂缝和裂缝的微裂区不断向前推移, 裂缝尖端位置不断变化, 直至裂缝失稳。建立混凝土坝的模拟分析模型, 采用数值模拟手段, 借助虚拟裂缝模型, 可以模拟裂缝扩展的过程, 因此可以追踪裂缝尖端的前移过程, 从而可以确定裂缝临界失稳时的 Δa_c 。在此, 采用虚拟裂缝模型的接触有限元法分析裂缝的扩展^[27,28], 进而确定裂缝临界失稳时的 Δa_c 。

在确定了混凝土坝裂缝的亚临界扩展量 Δa_c 之后, 采用混凝土试件的临界裂缝尖端张开位移作为混凝土坝裂缝的 CTOD_c , 通过公式(5)可以求得混凝土坝裂缝的临界裂缝开度 CMOD_c :

$$\begin{aligned} \text{CMOD}_c &= \frac{\Delta a_c + a_0}{\Delta a_c} \text{CTOD}_c \\ &= \frac{\Delta a_c + a_0}{\Delta a_c} \frac{\Delta l_c}{\Delta l_c + l_0} \text{CMOD}'_c, \end{aligned} \quad (6)$$

式中, Δa_c 为通过数值模拟确定的混凝土坝裂缝的亚临界扩展量, a_0 为混凝土坝裂缝的初始深度, CTOD_c 为试验确定的临界裂缝尖端张开位移, Δl_c 为试验和迭代计算确定的混凝土试件裂缝的亚临界扩展量, l_0 为混凝土试件裂缝的初始深度, CMOD'_c 为试验中试件的临界裂缝开度。

根据(6)式可以确定混凝土坝裂缝的临界裂缝开度 CMOD_c , 从而建立起(3)式对应的裂缝转异诊断准则, 进而可以对混凝土坝裂缝的实测裂缝开度 δ_c 进行监控分析。

4 临界裂缝开度准则的具体实现-顺序典型小概率法

由(6)式知, 通过上述方法确定混凝土坝裂缝的临界裂缝开度 CMOD_c 时, 需要确定混凝土坝裂缝的亚临界扩展量 Δa_c , 混凝土坝裂缝的初始深度 a_0 , 混凝土试件裂缝的亚临界扩展量 Δl_c 以及试件的临界裂缝开度 CMOD'_c 等多个参数, 因此该方法确定的临界裂缝开度值误差较大。此外, 混凝土坝裂缝转异后, 其裂缝深度将会发生变化, 这就需要重新确定临界裂缝开度。因此, 临界裂缝开度准则直接用于大坝安全监控时, 还有一定的困难。

混凝土坝裂缝的转异可能是由于水压、温度荷载以及时效等的改变引起的, 也可能是其它一些未知因素导致的。但是裂缝的转异主要表现在裂缝深度或长度的改变, 进而也引起裂缝开度的改变。即正常情况下裂缝开度值 CMOD 包括两部分

$$\text{CMOD} = \text{CMOD}_0 + \text{CMOD}_h, \quad (7)$$

式中, CMOD_0 为裂缝开度的初始值, CMOD_h 为水压、温度荷载以及时效等的改变引起的裂缝开度的变化。

当裂缝发生转异时, 裂缝开度值则包括三部分

$$\text{CMOD}_{\text{un}} = \text{CMOD}_0 + \text{CMOD}_h + \text{CMOD}_j, \quad (8)$$

式中, CMOD_{un} 为转异时裂缝的开度, CMOD_0 为裂缝开度的初始值, CMOD_h 为水压、温度荷载以及时效等的改变引起的裂缝开度的变化, CMOD_j 为裂缝在长度或深度上的变化引起的裂缝开度的变化。

根据上述分析, 裂缝未发生转异时, $\text{CMOD} < \text{CMOD}_c$; 裂缝发生转异时, $\text{CMOD}_{\text{un}} \geq \text{CMOD}_c$ 。根据(7)和(8)式, 在假定裂缝开度初始值 CMOD_0 不变以及相同的荷载引起的裂缝开度 CMOD_h 在裂缝转异前后相同的条件下, 裂缝转异后开度的变化主要表现在裂缝深度和长度变化引起的开度变化上, 即 CMOD_j 。假定裂缝的开度为 CMOD_i , 则裂缝深度和长度引起的变化 CMOD_j 为

$$\text{CMOD}_j = \text{CMOD}_i - (\text{CMOD}_0 + \text{CMOD}_h). \quad (9)$$

(9)式中, 裂缝稳定时 CMOD_j 不存在, 裂缝转异时 CMOD_j 存在。因为 CMOD_i 为裂缝的实测值, CMOD_0 为裂缝的初始值, 两者均为已知。因此, 确定水压、温度荷载以及时效等的改变引起的裂缝开度 CMOD_h 后, 就可以确定 CMOD_j 。水位变化 H , 温度变化 T , 时效 θ 等引起的裂缝开度可以表示为

$$\text{CMOD}_h = f(H, T, \theta). \quad (10)$$

根据统计模型, (10)式可以改写为

$$\text{CMOD}_h = \sum_{k=1}^{m_1} a_k H^k + \sum_{k=1}^{m_2} b_k T_k + c_1 \theta + c_2 \ln \theta + \varepsilon, \quad (11)$$

式中, a_k, b_k, c_1, c_2 为回归系数, m_1 为水位因子的个数或水位因子的最高次方数, m_2 为温度测点的个数, ε 为误差. 需要指出的是, 根据监测资料的情况, 式中温度或时效因子的表达式可能会有其他的选择.

将(11)代入(8)式可知:

$$\text{CMOD}_j = \text{CMOD}_i - (\text{CMOD}_0 + \sum_{k=1}^{m_1} a_k H^k + \sum_{k=1}^{m_2} b_k T_k + c_1 \theta + c_2 \ln \theta + \varepsilon). \quad (12)$$

上式可改写为

$$\begin{aligned} \text{CMOD}_j + \varepsilon &= \text{CMOD}_i - (\text{CMOD}_0 + \sum_{k=1}^{m_1} a_k H^k \\ &+ \sum_{k=1}^{m_2} b_k T_k + c_1 \theta + c_2 \ln \theta), \end{aligned} \quad (13)$$

记 $c\text{mod}_j = \text{CMOD}_j + \varepsilon$, 则

$$\begin{aligned} c\text{mod}_j &= \text{CMOD}_i - (\text{CMOD}_0 + \sum_{k=1}^{m_1} a_k H^k \\ &+ \sum_{k=1}^{m_2} b_k T_k + c_1 \theta + c_2 \ln \theta). \end{aligned} \quad (14)$$

裂缝转异前 $c\text{mod}_j$ 中仅含有 ε 一项, CMOD_j 不存在, $c\text{mod}_j$ 的数据序列服从均值为 0 的某一分布, 例如正态分布; 裂缝转异后 $c\text{mod}_j$ 中包含 ε 和 CMOD_j 两项, 其分布形式将发生变化, 例如均值或方差不再相同.

经过上述分析, CMOD_e 准则在大坝安全监控中具体实现时可转化为分析 $c\text{mod}_j$ 的数据序列. 在此, 采用顺序典型小概率法分析 $c\text{mod}_j$ 以分析裂缝是否转异. 在给定的显著性水平 β 下, 对于序列 $c\text{mod}_{js}$ ($s=1, 2, \dots, n, n$ 为样本数据个数), 当 $1-F(c\text{mod}_{js}) \leq \beta$ 或 $F(c\text{mod}_{js}) \leq \beta$ 时, $c\text{mod}_{js}$ 发生转异, 对应的实测裂缝开度值 CMOD_{is} 发生转异. 显著性水平 β 一般可取 0.05, 0.01, 0.005 等. 顺序典型小概率法诊断混凝土坝裂缝转异的基本步骤为

1) 在裂缝开度数据序列 CMOD_{is} ($s=1, 2, \dots, n$) 中, 选取一段子序列, 子序列中样本个数为 N , 利用子序列建立(11)式的监控模型得到回归系数 a_k, b_k, c_1, c_2 等.

2) 选取待诊断子序列, 其数据个数为 M , 利用(13)式对待诊断子序列进行分析, 计算 $c\text{mod}_{js}$:

$$\begin{aligned} c\text{mod}_{js} &= \text{CMOD}_{is} - \left(\text{CMOD}_0 + \sum_{k=1}^{m_1} a_k H_s^k \right. \\ &\left. + \sum_{k=1}^{m_2} b_k T_s^k + c_1 \theta_s + c_2 \ln \theta_s \right), \end{aligned} \quad (15)$$

式中, H_s, T_s 和 θ_s 分别为 s 时刻的水位、温度和时效因子, $s = N, N+1, \dots, M$.

3) 估计建模子序列对应的 $c\text{mod}_{js}$ ($s=1, 2, \dots, N$) 的概率分布形式和分布参数. 给定显著性水平 β , 对 $c\text{mod}_{js}$ ($s = N, N+1, \dots, M$) 进行小概率检验, 若 $1-F(c\text{mod}_{js}) \leq \beta$ 或 $F(c\text{mod}_{js}) \leq \beta$ 时, 则认为裂缝在该时刻发生转异, 否则认为裂缝未发生转异.

4) 对于步骤 3 中的诊断结果, 若裂缝发生转异, 则在转异处将裂缝开度数据序列重新分段, 选取转异点之后的数据重新建立(11)式的监控模型, 然后按照步骤 1~3 对后续的数据进行诊断. 若裂缝未发生转异, 则将原待诊断子序列(序列样本个数为 M , 与步骤 2 对应)与原建模序列(样本个数为 N 与步骤 1 对应)合并为新的建模序列, 对(11)式的模型系数 a_k, b_k, c_1, c_2 等进行修正, 然后按照步骤 1~3 对后续的数据序列进行诊断.

5) 按照步骤 1~4 的过程, 反复进行诊断, 直到裂缝的整个数据序列诊断完毕.

通过上述分析可以发现, 顺序典型小概率法实现了 CMOD_e 准则在裂缝原型监测资料分析中的应用, 可以对裂缝开度的数据序列进行动态的全序列诊断.

5 工程实例

某水电站拦河坝为碾压混凝土实体重力坝, 坝顶高程 233.0 m, 最大坝高 110 m, 坝顶全长 525 m; 共分 28 个坝段, 水库正常蓄水位 223.0 m, 相应库容为 $26.12 \times 10^8 \text{ m}^3$, 设计洪水位(0.1%)为 227.20 m, 校核洪水位(0.02%)为 229.20 m, 为不完全年调节水库. 电站主体工程于 1985 年 3 月开工, 1992 年导流底孔下闸水库蓄水, 1992 年 9 月 16 日并网发电, 1996 年 12 月竣工验收. 选取该坝某裂缝测点在 2002 年 1 月至 2009 年 3 月的数据作为研究对象, 分析验证本文提出的顺序典型小概率法的可行性. 该裂缝测点的实测过程线如图 3 所示.

根据该碾压混凝土重力坝的实测资料, 将(10)式的统计模型选取为如下形式:

图 3 裂缝开度实测过程线

表 1 顺序典型小概率法转异诊断结果

显著性水平	日期					
	2003	2004	2005	2006	2007	2008
0.05	2003-1-5	2004-2-16	2005-1-23	2006-4-21	2007-3-21	2008-1-14
	2003-9-3	2004-2-20	2005-5-21	2006-7-17	2007-6-13	2008-3-13
				2006-9-10	2007-10-9	2008-6-3
0.01	2003-1-5		2005-3-14			2008-3-25
	2003-9-3	2004-2-22	2005-4-4		2007-10-10	2008-5-7

$$CMOD_h = \sum_{k=1}^3 a_k H^k + b_1 T_1 + c_1 \theta + c_2 \ln \theta + \varepsilon. \quad (16)$$

按照顺序典型小概率法的分析步骤,对裂缝进行转异诊断分析,部分可能的转异点(2003~2008)由表 1 给出.

由表 1 可以看出,顺序典型小概率法可以诊断出裂缝可能的转异点,该方法实现了临界裂缝开度准则在大坝安全监控分析中的应用,能够利用混凝土坝裂缝开度的原位监测资料,实现对裂缝性态的诊断分析.同时,顺序典型小概率法在诊断裂缝性态的过程中,同一裂缝的监控模型是不断更新的,这使得诊断结果更加准确,该方法是可行的.

此外,顺序典型小概率法的诊断结果与显著性水平 β 有关.当显著性水平较低时,诊断出的转异点的个数较多;而当显著性水平较高时,诊断出的转异点的个数较少.这一现象在 2006 年体现的较为明显,显著性水平为 0.05 时,诊断出了多个的可能转异点,而显著性水平为 0.01 时,诊断结果却无转异点.因此,顺序典型小概率法,显著性水平的选取对诊断结果有一定影响,显著性水平太高可能会遗漏一些转异点,而显著性水平太低则可能出现“误诊”,将一些非转异点诊断为转异点.

综上,基于临界裂缝开度准则建立的裂缝转异诊断的顺序典型小概率法是可行的,但应注意显著性水平的选取.

6 结论

本文将断裂力学模型试验和数值模拟方法相结合,基于虚拟裂缝模型和断裂力学知识,研究了混凝土坝裂缝转异诊断的临界裂缝开度准则,建立了该准则在大坝安全监控中能够具体应用的顺序典型小概率法,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) 根据临界裂缝尖端张开位移准则,利用裂缝尖端张开位移与裂缝开度之间的函数关系,可以建立混凝土坝裂缝转异诊断的临界裂缝开度准则.临界裂缝开度准则需要确定混凝土坝裂缝的临界裂缝尖端张开位移 $CTOD_c$ 和混凝土坝裂缝的亚临界扩展量 Δa_c ,前者可以采用混凝土试件的试验值代替,而后者可以通过虚拟裂缝模型的接触有限元法得到.

2) 临界裂缝开度准则直接应用到大坝安全监控中有一定困难,借助裂缝开度监控模型将该准则进行转化,并与大坝安全监控中裂缝的原位监测资料-裂缝开度联系起来,建立了混凝土坝裂缝转异诊断的顺序典型小概率法.

3) 实例分析表明,顺序典型小概率法实现了临界裂缝开度准则在大坝安全监控中的具体应用,该方法是可行的.此外,顺序典型小概率的诊断结果与所选取的显著性水平有关,因此,运用该方法进行裂缝转异诊断时,应注意显著性水平的选取.

参考文献

- 1 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
- 2 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
- 3 Kaplan M F. Crack propagation and the fracture of concrete. *J ACI*, 1961, 58: 591–610
- 4 Xu S L, Reinhardt H W. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part I: Experimental investigation of crack propagation. *Int J Fracture*, 1999, 98: 111–149
- 5 Xu S L, Reinhardt H W. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part II: Analytical evaluating and practical measuring methods for three-point bending notched beams. *Int J Fracture*, 1999, 98: 151–177
- 6 Xu S L, Reinhardt H W. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part III: Compact tension specimens and wedge splitting specimens. *Int J Fracture*, 1999, 98: 179–193
- 7 吴智敏, 徐世琅, 刘佳毅. 光弹贴片法研究混凝土裂缝扩展过程及双 K 断裂参数的尺寸效应. *水利学报*, 2001, 4: 34–39
- 8 赵志方, 徐世琅. 混凝土软化本构曲线形状对双 K 断裂参数的影响. *土木工程学报*, 2001, 34: 29–34
- 9 胡少伟, 范向前, 陆俊. 强度等级对混凝土双 K 断裂参数的影响. *水电能源科学*, 2012, 30: 77–81
- 10 赵艳华, 徐世琅, 吴智敏. 混凝土结构裂缝扩展的双 G 准则. *土木工程学报*, 2004, 37: 13–18, 51, 91
- 11 Li Z C, Gu C S, Wu Z R. Abnormality diagnosis of cracks in the concrete based on double crack tip opening displacement criterion. *Sci China Tech Sci*, 2013, 56: 1915–1928
- 12 Moës N, Belytschko T. Extended finite element method for cohesive crack growth. *Eng Fract Mech*, 2002, 69: 813–833
- 13 Hyunwook K, Michael P, Wagoner. Numerical fracture analysis on the specimen size dependency of asphalt concrete using a cohesive softening model. *Constr Build Mater*, 2009, 23: 2112–2120
- 14 Wang L M, Xu S L, Zhao X Q. Analysis on cohesive crack opening displacement considering the strain softening effect. *Sci China Ser G*, 2006, 49: 88–101
- 15 徐世琅, 张秀芳, 卜丹. 混凝土裂缝扩展过程中裂尖张开位移(CTOD)与裂缝嘴张开位移(CMOD)的变化关系分析. *工程力学*, 2011, 28: 64–70
- 16 Lohrasbi A R, Attarnejad R. Crack growth in concrete gravity dams based on discrete crack method. *Am J Eng Appl Sci*, 2008, 1: 339–343
- 17 刘海成, 吴智敏, 宋玉普. 碾压混凝土拱坝诱导缝开裂的等效应力准则研究. *土木工程学报*, 2005, 38: 24–31
- 18 Bao T F, Yu H. Detection of subcritical crack propagation for concrete dams. *Sci China Ser E*, 2009, 52: 3654–3660
- 19 包腾飞. 混凝土坝裂缝的混沌特性及分析理论和方法. 南京: 河海大学, 2004
- 20 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
- 21 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
- 22 Li Z C, Gu C S, Wu Z R. Nonparametric change point diagnosis method of concrete dam crack behavior abnormality. *Math Prob Eng*, 2013, 2013: 1–13
- 23 Wells A A. Application of fracture mechanics and at beyond general yielding. *Brit Weld J*, 1963, 10: 563–570
- 24 Visalvanich K, Naaman A E. Fracture methods incement composites. *J Eng Mech, ASCE*, 1981, 107: 1155–1171
- 25 吴智敏, 徐世琅, 王金来. 混凝土断裂韧度及临界裂缝尖端张开位移. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2002, 24: 29–34
- 26 霍中燕. 水工混凝土结构裂缝的扩展有限元分析与安全监控方法. 南京: 河海大学, 2012
- 27 赵兰浩, 李同春, 牛志伟. 有初始间隙摩擦接触问题的有限元混合法. *岩土工程学报*, 2006, 28: 2015–2018
- 28 赵兰浩, 李同春, 颜天佑. 虚拟裂缝模型的接触有限元法实现. *工程力学*, 2010, 27: 60–67

Order typical small probability diagnosis method of concrete dam crack behavior abnormality

XU Bo^{1,2}, LU WeiGang¹, LI ZhanChao³ & HUANG ZhiHong⁴

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 225127, China*

Cracks in concrete dams are inevitable disease and whether they are stable or not is a key factor relating to the structural safety of the concrete dams. According to function relationship between crack opening and crack tip opening displacement, critical crack opening criterion of concrete dam crack abnormality diagnosis was proposed. The determining method of crack tip opening displacement and crack subcritical extension amount needed by the critical crack opening criterion was investigated. The critical crack opening criterion was transformed by using of crack opening monitoring model and associated with the crack in situ monitoring data in dam safety monitoring, crack opening to establish the order typical small probability diagnosis method of concrete dam crack behavior abnormality. The case study shows that the order typical small probability diagnosis method implement specific application of critical crack opening criterion in dam safety monitoring, and it is reasonable and feasible.

concrete dam crack, abnormality diagnosis, critical crack opening criterion, order typical small probability method

doi: 10.1360/N092014-00194