

基于速度与加速度准则的泄水闸裂缝工作性态诊断

徐世媚, 黄耀英, 徐小枫, 殷晓慧, 郝丹, 陈飞

Diagnosis of sluice crack working behavior based on velocity and acceleration criteria

XU Shimei, HUANG Yaoying, XU Xiaofeng, YIN Xiaohui, HAO Dan, CHEN Fei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20210816001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高桩码头裂缝开合度监测模型研究

Study of monitoring model of crack opening displacement for high-pile wharf

水利水电工程学报. 2017(6): 53 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.06.008>

基于安全监测的水闸健康诊断体系研究

Analysis of sluice health diagnosis system based on safety monitoring

水利水电工程学报. 2018(5): 1 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.05.001>

MLR-Legendre多项式模型在混凝土坝裂缝开度预测中的应用

Application of MLR-Legendre polynomials model in concrete dam crack opening prediction

水利水电工程学报. 2019(2): 111 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.02.016>

内部裂缝缺陷对混凝土断裂性能的影响

Effect of internal crack defects on fracture properties of concrete

水利水电工程学报. 2020(5): 96 <https://doi.org/10.12170/20190923001>

基于能量法的水环境混凝土疲劳裂缝扩展模型

Fatigue crack propagation model of concrete under water pressure based on energy approach

水利水电工程学报. 2020(3): 106 <https://doi.org/10.12170/20190303001>

缝面水压力与地震作用下重力坝踵裂缝扩展数值模拟

Numerical simulation of crack propagation in gravity dam heel under in-crack water pressure and earthquake action

水利水电工程学报. 2020(5): 72 <https://doi.org/10.12170/20190907001>



扫码进入官网, 阅读更多精彩文章



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20210816001

徐世媚, 黄耀英, 徐小枫, 等. 基于速度与加速度准则的泄水闸裂缝工作性态诊断 [J]. 水利水运工程学报, 2022(5): 78-85. (XU Shimei, HUANG Yaoying, XU Xiaofeng, et al. Diagnosis of sluice crack working behavior based on velocity and acceleration criteria[J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(5): 78-85. (in Chinese))

基于速度与加速度准则的泄水闸裂缝工作性态诊断

徐世媚¹, 黄耀英¹, 徐小枫¹, 殷晓慧², 郝 丹³, 陈 飞³

(1. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡基地发展有限公司, 湖北 宜昌 443002; 3. 汉江王甫洲水力发电有限责任公司, 湖北 襄阳 430048)

摘要: 裂缝实测资料综合反映了现场复杂因素对水工混凝土结构宏观裂缝性态的影响, 考虑时效分量是评价裂缝工作性态的重要依据, 可基于速度与加速度准则对裂缝工作性态进行诊断。结合王甫洲水利工程泄水闸实际情况, 选取水工混凝土结构裂缝典型位置安装裂缝计组, 监测获得经历不利荷载工况下的裂缝实测资料, 建立反映温度非线性效应的裂缝统计模型, 分离获得时效分量, 采用速度与加速度准则对时效分量进行诊断。裂缝实测资料的应用分析表明, 考虑温度非线性效应的裂缝统计模型拟合效果较好, 虽然王甫洲水利工程泄水闸检修门库裂缝部分测点时效分量表现不收敛, 但均趋于闭合, 由此诊断该泄水闸裂缝目前处于稳定状态。该方法能简便且可靠地反映裂缝的时变规律, 可为水工混凝土结构的裂缝工作性态诊断提供参考。

关 键 词: 裂缝诊断; 速度与加速度; 时效分量; 泄水闸; 裂缝开合度

中图分类号: TV698.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2022)05-0078-08

裂缝是水工混凝土结构常见且难以避免的危害之一, 从裂缝产生至失稳是一个缓慢且不确定的发展过程^[1]。在各种复杂因素的作用下, 施工阶段和运行阶段的混凝土结构会出现微裂缝, 而已有的微裂缝可能会进一步拓展, 严重时将危及整体结构安全, 且难以补救^[2-4]。因此, 及时分析诊断裂缝工作性态并采取相应措施, 可预防结构失稳破坏。

针对水工混凝土结构宏观裂缝工作性态诊断, 广大科技工作者采用数值计算、检测或监测等技术手段开展了大量研究。在数值计算方面, 大部分学者基于断裂力学进行计算分析, 并提出了双 K 断裂准则、双 G 断裂准则及裂缝尖端张开位移准则^[5-7]等诊断方法。然而, 断裂力学方法难以准确考虑现场各种复杂因素, 部分计算参数不易确定, 存在模拟不准确的问题。在检测技术方面, 主要采用超声波、瑞利波和 CT 检测技术^[8-10]检测裂缝深度, 为裂缝工作性态诊断提供了有力依据, 但由于检测环境和混凝土结构的复杂性, 单独使用检测方法难以得到可靠信息, 通常还需要结合监测资料进行分析。目前已有学者基于监测资料进行了裂缝分析诊断的研究。吴中如^[11]首先提出将裂缝尖端不可逆变形随时间变化分为稳定状态、亚临界拓展状态和裂缝失稳拓展状态 3 个阶段; 李雪红等^[12]利用小波分析提取裂缝时效变形并采用相空间重构技术识别裂缝所处阶段; 包腾飞等^[13]以实测资料为依据, 通过建立裂缝开度与裂缝尖端展开位移之间的关系提出裂缝失稳扩展判据; Gu 等^[14]提出了混凝土坝裂缝的动态转异诊断; 葛鹏等^[15]将传统统计模型与突变理论相结合, 研究了基于灰色尖点突变模型的裂缝诊断判据; 徐波等^[16]将临界裂缝开度准则与原位监测资料相结合, 基于云模型理论研究了裂缝性态诊断技术。虽然不少学者基于混凝土坝宏观裂缝监测资料开展了

收稿日期: 2021-08-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51779130)

作者简介: 徐世媚(1998—), 女, 湖北宜昌人, 硕士研究生, 主要从事水工程安全监控方面的研究。

E-mail: xushimeim@foxmail.com 通信作者: 黄耀英(E-mail: huangyaoying@sohu.com)

一些分析诊断研究,但基于裂缝监测资料建立统计模型时,通常只考虑温度的线性效应而忽略其非线性效应,导致模型拟合精度不高,从而影响分离出的时效分量的准确性,并且,对分离出的时效分量多是从定性角度进行分析诊断,未深究其收敛情况及规律性。

针对上述问题,本文结合王甫洲水利工程泄水闸检修门库裂缝监测资料,建立考虑温度非线性效应的统计模型,分离获得时效分量,进而采用速度与加速度准则对时效分量进行诊断,从而获得泄水闸检修门库裂缝工作性态。

1 混凝土宏观裂缝工作性态诊断

为有效诊断水工混凝土结构宏观裂缝真实工作性态,首先选取典型裂缝位置安装裂缝计组,采集获取经历不利荷载工况下的裂缝实测值,建立裂缝开合度统计模型^[17],分离出时效分量,进而采用速度与加速度准则进行裂缝工作性态诊断。具体诊断步骤如下:

步骤1:选取典型裂缝位置安装裂缝计组。由于裂缝实测值反映了水工混凝土结构宏观裂缝的工作性态,选取水工混凝土结构宏观裂缝典型位置安装裂缝计组,监测获得宏观裂缝在不利荷载工况下的监测资料序列。

步骤2:基于统计模型的裂缝时效分量分离。研究表明,水压、温度和时效是影响水工混凝土结构宏观裂缝的主要因素^[18-19]。其中,混凝土宏观裂缝时效分量是诊断裂缝工作性态的重要指标,为此,建立裂缝开合度统计模型,分离出相应的时效分量^[20]。混凝土裂缝开合度随温度变化是一个复杂的非线性过程,综合考虑温度非线性影响与模型的简洁性,参考相关文献^[21]建立混凝土裂缝开合度统计模型为:

$$\delta(t) = \delta_T(t) + \delta_H(t) + \delta_\theta(t) = a_0 + \sum_{p=1}^L \sum_{i=1}^K a_{ip} T_i^p + \sum_{i=1}^4 b_i H^i + c_1 \theta + c_2 \ln \theta \quad (1)$$

式中: $\delta(t)$ 为裂缝实测值; $\delta_T(t)$ 为温度分量; $\delta_H(t)$ 为水压分量; $\delta_\theta(t)$ 为时效分量; T_i 为第 i 个测点的实测温度; K 为温度测点总数; L 为反映非线性温度影响的温度多项式的最高阶次,通常为正整数,通过试算确定; H 为水深; $\theta = t/100$, t 为时间; a_0 为常数, a_{ip} 为第 i 个测点实测温度的 p 次方对应的回归系数; b_i 为水压因子回归系数; c_1 、 c_2 为时效因子回归系数。

结合混凝土宏观裂缝实测资料,采用逐步回归分析法或优化算法,容易分离出裂缝时效分量。

步骤3:基于速度与加速度准则诊断裂缝工作性态。混凝土裂缝时效分量对单位时间 θ 的一阶导数为: $\frac{d\delta_\theta}{d\theta} = c_1 + c_2 \theta^{-1}$; 二阶导数为: $\frac{d^2\delta_\theta}{d\theta^2} = -c_2 \theta^{-2}$; 三阶导数表达式为: $\frac{d^3\delta_\theta}{d\theta^3} = 2c_2 \theta^{-3}$ 。根据混凝土裂缝时效分量随时间的变化规律,将裂缝性态分为以下4个变化阶段,提出基于速度与加速度准则的诊断标准^[11]如下:

(1)时效分量变化平稳。当时效分量变化 $\frac{d\delta_\theta}{d\theta} \approx 0$, 说明混凝土结构裂缝的变化规律正常,其中,若时效分量单位增量小于裂缝计有效读数精度,可认为一阶导数为0,即 $\left| \frac{d\delta_\theta}{d\theta} \right| < 0.01 \text{ mm}$, 表示100 d时效增量小于0.01 mm。

(2)时效分量呈收敛趋势。当时效分量变化 $\frac{d\delta_\theta}{d\theta} > 0$ 且 $\frac{d^2\delta_\theta}{d\theta^2} < 0$ (或 $\frac{d\delta_\theta}{d\theta} < 0$ 且 $\frac{d^2\delta_\theta}{d\theta^2} > 0$), 但 $\delta_\theta < \delta_{\theta\max}$, 说明时效分量减速率增长,但实测变形小于或等于历史极值;若检测未发现危及结构的隐患病害,则变化规律基本正常。

(3)时效分量呈线性增大趋势。当时效分量变化 $\frac{d^2\delta_\theta}{d\theta^2} = 0$, 这说明时效分量等速增长,则变形规律异常。

(4)时效分量加速增大。当时效分量变化 $\frac{d^2\delta_0}{d\theta^2} > 0, \frac{d^3\delta_0}{d\theta^3} < 0$, 这说明裂缝开合度时效分量加速增长, 裂缝处于加速开裂的危险状态。

2 实例分析

湖北汉江王甫洲水利枢纽位于湖北省老河口市, 是一座以发电为主的大(2)型水利枢纽工程, 土石坝及围堤、重力坝、电站厂房、泄水闸等主要建筑物级别为 3 级, 次要建筑物级别为 4 级。正常蓄水位为 86.23 m, 校核洪水位为 89.30 m, 设计洪水位为 88.11 m。经巡视检查发现, 王甫洲水利枢纽泄水闸左岸门库上游交通桥顶部出现 3 条裂缝, 产生时间尚不清楚。其中 2 条裂缝贯穿上下游, 在胸墙最低高程 88.1 m 处终止; 门库上游挡墙竖直面的 1 条裂缝, 有长期析钙痕迹, 裂缝延伸至门库上游墙底板, 在坝轴线方向位于坝顶两条贯穿缝之间。

2.1 裂缝计布置

由于裂缝贯穿门库上游胸墙, 对门库挡水形成严重威胁, 因此, 2020 年 6 月在裂缝位置布置了 9 组双向裂缝计, 编号为 Mkj-1~Mkj-9。其中, Mkj-1 和 Mkj-2 位于上游侧面, Mkj-6 和 Mkj-7 位于门库上游侧面。每组裂缝计包含两支相互垂直的裂缝计, 以监测裂缝开合度和错动量(其中, J1-1、J2-1、⋯、J9-1 表示裂缝开合度测点编号)。采用传感器型号为 NVJ-5, 灵敏度系数为 0.001, 从所得监测数据可以看出裂缝计测值精度较高, 测值也较稳定。泄水闸裂缝计平面布置如图 1 所示。

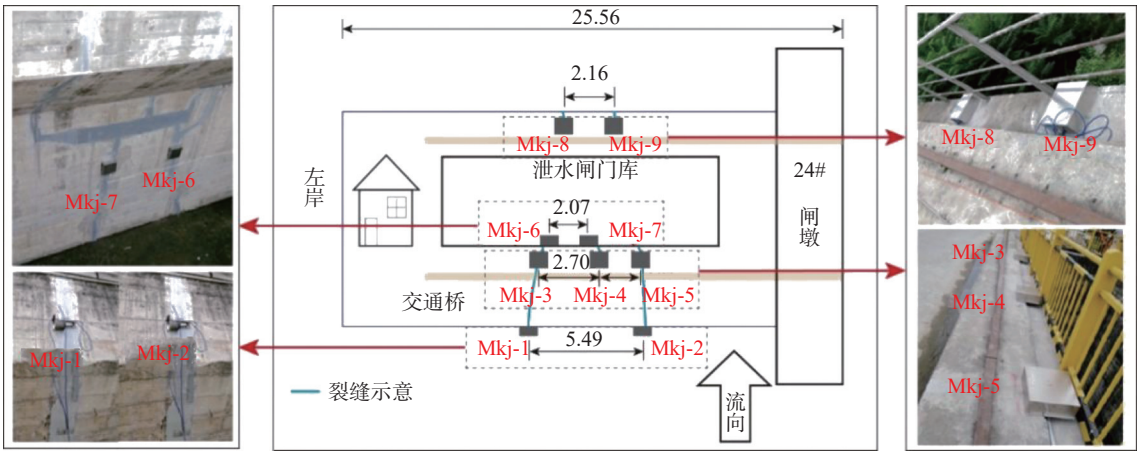


图 1 泄水闸裂缝计平面布置 (单位: m)

Fig. 1 Layout of crack meter in discharge sluice (unit: m)

2.2 基于统计模型的裂缝时效分量分离

2.2.1 裂缝统计模型建立及回归分析 选择裂缝计监测资料系列为 2020 年 6 月 23 日 17:00:00—2021 年 4 月 21 日 12:00:00, 期间经历了汛期、高温季节和低温季节等不利荷载工况。由于泄水闸检修门库出现裂缝, 为此管理单位对泄水闸交通进行了管制, 限制重型卡车通行。结合现场实际情况分析认为裂缝变形主要受水压、温度和时效影响, 因此采用式(1)建立裂缝统计模型。由于温度是影响王甫洲泄水闸检修门库裂缝开合和错动的重要因素, 采用 9 支裂缝计的实测温度作为温度因素数据, 其中, 温度测点总数 $K=9$; 参考相关工程经验及文献^[20-21]选取 L 值进行试算, 在测点温度分量与 9 支裂缝计实测温度的一次方、二次方、三次方成正比时拟合精度最高, 因此, 反映非线性温度影响的温度多项式的最高阶次 $L=3$ 。对步骤 2 中所建立的裂缝统计模型, 采用逐步回归分析法回归获得模型系数, 由此计算得到各测点裂缝统计模型复相关系数、均方根误差如表 1 所示, 各测点变幅及各分量影响占比如表 2 所示。其中, J6-1 测点拟合精度较高且规律性较明显, 其实测值与拟合值及温度过程线如图 2 所示。

表 1 各测点裂缝统计模型复相关系数、均方根误差

参数	J1-1	J2-1	J3-1	J4-1	J5-1	J6-1	J7-1	J8-1	J9-1
复相关系数	0.933	0.962	0.933	0.9	0.884	0.996	0.988	0.913	0.898
均方根误差/mm	0.017	0.014	0.047	0.014	0.041	0.006	0.011	0.021	0.051

表 2 各测点变幅及各分量影响占比

Tab. 2 The amplitude of each measuring point and the proportion of influence of each component								
位置	测点	总变幅/mm	温度分量		上游水压分量		时效分量	
			变幅/mm	影响占比/%	变幅/ 10^{-2} mm	影响占比/%	变幅/mm	影响占比/%
门库上游面	J1-1	0.32	0.23	71.26	3.05	9.61	0.06	19.12
	J2-1	0.41	0.28	68.68	3.97	9.77	0.09	21.55
门库顶上游面	J3-1	1.15	0.67	58.08	19.30	16.79	0.29	25.13
	J4-1	0.30	0.20	66.28	5.62	18.66	0.05	15.06
	J5-1	0.76	0.53	68.93	15.00	19.75	0.09	11.32
门库内	J6-1	0.39	0.33	84.65	0.57	1.47	0.05	13.87
	J7-1	0.41	0.31	77.13	1.69	4.16	0.08	18.71
门库顶下游面	J8-1	0.51	0.32	62.43	9.37	18.28	0.10	19.29
	J9-1	0.92	0.63	68.62	12.20	13.23	0.17	18.14

可见: 各测点的复相关系数计算值为 0.884~0.996, 均方根误差为 0.006~0.051mm, 均值较小, 标准差较小, 分布相对集中, 这表明拟合效果较好。2020 年 6—8 月为汛期, 6—10 月为高温季节, 2020 年 11 月—2021 年 2 月为低温季节。温度在 2020 年 8 月 16 日达到最高(34.4 ℃), 对应的裂缝开合度实测值为-0.08 mm; 在 2021 年 1 月 8 日达到最低(0.3 ℃), 对应的裂缝开合度实测值为 0.20 mm。从总体趋势来看, 裂缝开合度与温度变化相关性较明显。当温度升高时, 裂缝开合度减小; 温度降低时, 裂缝开合度增大。通过各分量影响占比的计算可见, 温度分量影响占比最大, 为 58.08%~84.65%。因此, 温度是影响裂缝开合度的主要因素。

本文根据非线性温度影响因素所建的裂缝开合度统计模型精度较高, 能够反映出裂缝的变化趋势, 可以运用所建统计模型时效分量对王甫洲泄水闸裂缝进行工作性态诊断。

2.2.2 时效分量分离 由所建立的统计模型分离出的时效分量随时间变化的过程线见图 3。

从图 3 可以看出: 同一面上的测点时效分量变化趋势基本一致。门库上游面测点时效分量均呈先增后减趋势; 门库顶上游面测点 J4-1 变幅较小, 近似于平缓直线, 其余测点均呈先增后减趋势; 门库内测点均呈减小趋势; 门库顶下游面测点 J8-1 变幅较小, 后期变化近似于平缓直线, J9-1 呈先增后减趋势。从表 2 可以看到, J3-1 测点受时效分量影响最大, 且开合度时效分量分布规律接近于开合度日变幅的分布规

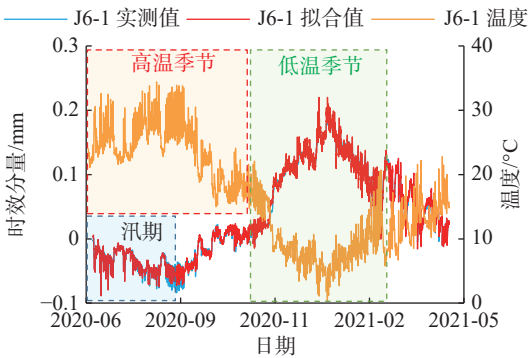


图 2 J6-1 测点开合度实测值与拟合值及温度过程线
Fig. 2 Measured value, fitting value and temperature process line of J6-1 measurement point

律,即开合度变动幅度越大的测点其时效分量变动相对越为明显。靠近 24#闸墩测点的时效分量明显小于远离 24#闸墩的时效分量,原因为 24#闸墩坐落在基岩上,检修门库位于泄水闸和老河道右岸围堤土石坝的连接处,受左岸联接段沉降影响。靠近左岸测点受沉降影响大,裂缝开合度测值相对较大。除 J8-1 的时效分量呈张开趋势外,其余测点均呈现闭合趋势,这表明裂缝正在朝着有利的方向发展,但其稳定性从图 3 中难以判断。

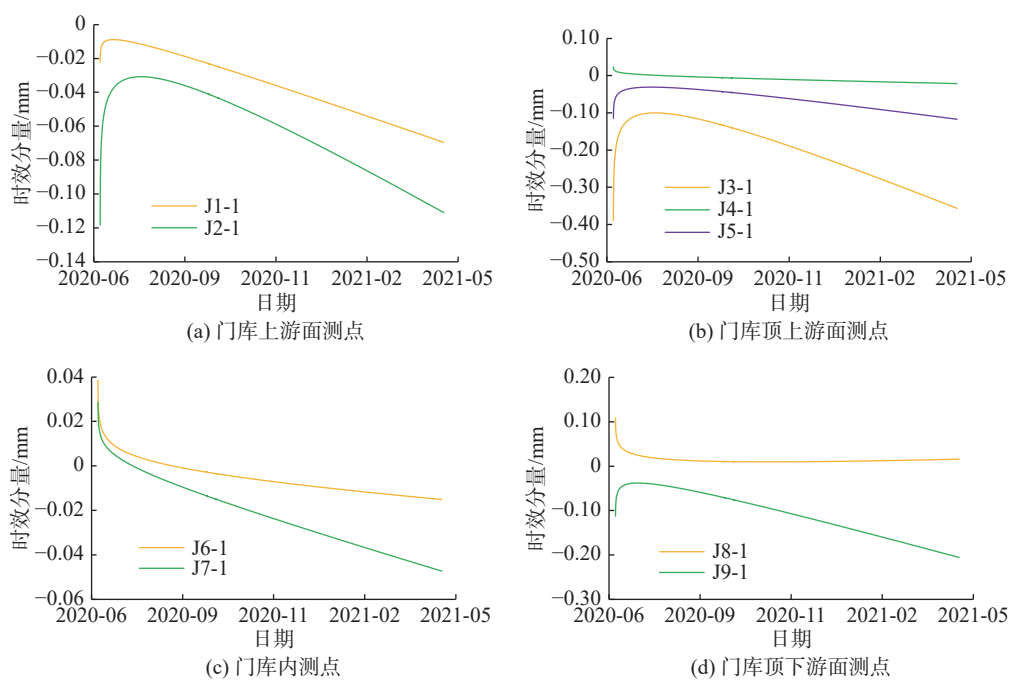


图 3 裂缝各测点时效分量过程线

Fig. 3 Process line of aging component at each measuring point of crack

2.3 裂缝工作性态诊断

根据各阶导数计算表达式及表 3 中时效因子回归系数值,计算各测点时效分量一阶、二阶、三阶导数值,并根据步骤 3 中所提出的速度与加速度诊断准则判断时效分量随时间变化的收敛情况和发展方向,从而诊断裂缝的工作性态。基于裂缝开合度统计模型时效分量计算结果见表 4。

表 3 裂缝统计模型时效因子回归系数
Tab. 3 Regression coefficient of time factor of crack statistical model

回归系数	J1-1	J2-1	J3-1	J4-1	J5-1	J6-1	J7-1	J8-1	J9-1
$c_1/10^{-2}$	-2.408	-4.235	-13.640	-0.598	-4.423	-0.319	-1.433	1.037	-7.340
$c_2/10^{-2}$	0.283	1.520	4.996	-0.307	1.475	-0.497	-0.370	-1.397	1.446

由表 4 可知, J4-1、J6-1、J8-1 的时效分量单位增量小于裂缝计有效读数精度,即绝对值小于 0.01 mm,可以认为一阶导数为 0,时效分量处于平稳变化状态,裂缝工作性态正常。J7-1 的时效分量一阶导数小于 0,二阶导数大于 0,呈收敛趋势,裂缝工作性态基本正常。J1-1、J2-1、J3-1、J5-1、J9-1 的时效分量均表现不收敛,但其发展方向均表现为闭合趋势。因此,目前可以认为王甫洲泄水闸裂缝处于稳定状态,后续应继续监测分析,重点关注高温低温不利工况,及时避免险情的发生。

表 4 裂缝开合度统计模型时效分量计算结果 ($\theta>0$)

Tab. 4 Calculation results of aging component of statistical model of crack opening degree ($\theta>0$)

测点	一阶导数值/mm	一阶导数	二阶导数	三阶导数	收敛情况	发展方向
J1-1	-0.023 1	-	-	+	不收敛	闭合
J2-1	-0.037 3	-	-	+	不收敛	闭合
J3-1	-0.119 9	-	-	+	不收敛	闭合
J4-1	-0.007 0	-	+	-	收敛	闭合
J5-1	-0.039 3	-	-	+	不收敛	闭合
J6-1	-0.004 8	-	+	-	收敛	闭合
J7-1	-0.015 6	-	+	-	收敛	闭合
J8-1	0.005 7	+	+	-	收敛	张开
J9-1	-0.068 6	-	-	+	不收敛	闭合

注: 表中“+”表示结果恒为正;“-”表示结果恒为负。

3 结 语

针对带宏观裂缝的水工混凝土结构, 基于速度与加速度准则, 提出了较为简便且可靠的裂缝工作性态诊断方法。该方法可以较清晰地反映裂缝的收敛情况及发展方向, 从而掌握裂缝的时变规律, 对整体结构失稳破坏起到预示作用。

以王甫洲泄水闸裂缝计监测资料为例, 基于所提出的时效分量诊断方法, 对 9 支裂缝计所监测的裂缝开合度进行了诊断。结果表明, 考虑温度非线性效应的统计模型拟合精度较高, 虽然部分测点时效分量表现不收敛, 但发展方向均表现为闭合。因此, 诊断王甫洲泄水闸裂缝目前处于稳定状态, 后期应对裂缝进行持续监测分析以避免险情发生。

参 考 文 献:

[1] 李雪红, 顾冲时, 沙迎春, 等. 混凝土坝运行期裂缝演变的荷载效应分析[J]. 水力发电, 2005, 31(1): 27-30. (LI Xuehong, GU Chongshi, SHA Yingchun, et al. The loading effect on the crack of the dam in operatration[J]. Water Power, 2005, 31(1): 27-30. (in Chinese))

[2] 曲芳美. 混凝土重力坝裂缝静动力稳定性分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2020. (QU Fangmei. Analysis of static and dynamic stability of cracks in concrete gravity dam[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese))

[3] 倪福全, 邓玉, 曾赞. 水工建筑物安全检测[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2015: 410. (NI Fuquan, DENG Yu, ZENG Yun. Safety inspection of hydraulic construction[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2015: 410. (in Chinese))

[4] 王畅, 汤华国, 方文杰. 碾压混凝土产生裂缝分析及防裂控制措施[J]. 水利水电技术, 2019, 50(增刊2): 215-218. (WANG Chang, TANG Huaguo, FANG Wenjie. Analysis on cracking of roller-compacted concrete and relevant anti-cracking control measures[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(Suppl2): 215-218. (in Chinese))

[5] 胡少伟, 王阳. 不同冻融方式下混凝土双K断裂韧度对比试验[J]. 水利水运工程学报, 2018(2): 90-96. (HU Shaowei, WANG Yang. Experimental study on double-K fracture toughness of concrete in different freezing and thawing modes[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(2): 90-96. (in Chinese))

[6] 李庆华, 种法澄, 张麒, 等. 改进的圆形紧凑拉伸法研究混凝土双G断裂参数[J]. 水利学报, 2018, 49(4): 474-482. (LI Qinghua, CHONG Facheng, ZHANG Qi, et al. Study of double-G fracture parameters using modified round compact tension

- method[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(4): 474-482. (in Chinese))
- [7] 黄耀英, 吴中如, 顾冲时, 等. 缝端应力强度因子对网格尺寸的敏感性分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(增刊2): 4147-4152. (HUANG Yaoying, WU Zhongru, GU Chongshi, et al. Sensitivity analysis of mesh size on crack tip's stress intensity factor[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(Suppl 2): 4147-4152. (in Chinese))
- [8] 杜文卫, 江刚, 朱彬占, 等. 基于瑞利波法对混凝土表面裂缝检测的数值研究[J]. *土木建筑与环境工程*, 2018, 40(4): 151-158. (DU Wenwei, JIANG Gang, ZHU Binzhan, et al. Numerical simulation on detection of concrete surface crack based on Rayleigh wave method[J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2018, 40(4): 151-158. (in Chinese))
- [9] 栗宝鹃, 张美多, 刘康和, 等. 水工混凝土构件裂缝检测方法及应用[J]. *工程地球物理学报*, 2021, 18(1): 128-135. (LI Baojuan, ZHANG Meiduo, LIU Kanghe, et al. Crack detection method and application of hydraulic concrete components[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2021, 18(1): 128-135. (in Chinese))
- [10] 李俊如, 高建光, 王耀辉. 超声波检测混凝土裂缝及裂缝成因分析[J]. *岩土力学*, 2001, 22(3): 291-293. (LI Junru, GAO Jianguang, WANG Yaohui. Supersonic wave testing on concrete crack depth and analysis of crack initiation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, 22(3): 291-293. (in Chinese))
- [11] 吴中如. 重大水工混凝土结构病害检测与健康诊断[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005: 384. (WU Zhongru. Disease detection and health diagnosis of major hydraulic concrete structures[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005: 384. (in Chinese))
- [12] 李雪红, 徐洪钟, 顾冲时, 等. 基于小波和相空间重构的裂缝时变规律研究[J]. *水利学报*, 2007, 38(2): 250-254. (LI Xuehong, XU Hongzhong, GU Chongshi, et al. Law of time-dependent deformation of crack based on wavelet and phase space reconstruction technique[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(2): 250-254. (in Chinese))
- [13] 包腾飞, 周扬. 混凝土坝裂缝失稳扩展判据[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(5): 683-688. (BAO Tengfei, ZHOU Yang. A fracture criterion for cracks in concrete dams[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2008, 36(5): 683-688. (in Chinese))
- [14] GU C S, LI Z C, XU B. Abnormality diagnosis of cracks in the concrete dam based on dynamical structure mutation[J]. *Science China Technological Sciences*, 2011, 54(7): 1930-1939.
- [15] 葛鹏, 冯庚. 基于灰色尖点模型的混凝土坝裂缝转异判据研究[J]. *人民长江*, 2013, 44(13): 63-66. (GE Peng, FENG Geng. Research on abnormality criterion of concrete dam cracks based on gray cusp model[J]. *Yangtze River*, 2013, 44(13): 63-66. (in Chinese))
- [16] 徐波, 李占超, 黄志洪, 等. 混凝土坝裂缝转异诊断的云模型法[J]. *中国科学:技术科学*, 2015, 45(11): 1218-1226. (XU Bo, LI Zhanchao, HUANG Zhihong, et al. Cloud model diagnosis method of concrete dam crack behavior abnormality[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2015, 45(11): 1218-1226. (in Chinese))
- [17] 徐金英, 胡明庭. 混凝土重力坝变形预测模型优化研究[J]. *人民黄河*, 2021, 43(增刊1): 173-175, 178. (XU Jinying, HU Mingting. Optimization of deformation prediction model for concrete gravity dam[J]. *Yellow River*, 2021, 43(Suppl1): 173-175, 178. (in Chinese))
- [18] 陈旭东, 李俊杰, 霍中艳. 高桩码头裂缝开合度监测模型研究[J]. *水利水运工程学报*, 2017(6): 53-59. (CHEN Xudong, LI Junjie, HUO Zhongyan. Study of monitoring model of crack opening displacement for high-pile wharf[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2017(6): 53-59. (in Chinese))
- [19] 田振华, 李宝石, 王经臣. 水工隧洞混凝土衬砌裂缝监测与成因分析[J]. *水力发电*, 2017, 43(9): 45-48. (TIAN Zhenhua, LI Baoshi, WANG Jingchen. Monitoring and cause analysis of concrete lining cracking in hydraulic tunnel[J]. *Water Power*, 2017, 43(9): 45-48. (in Chinese))
- [20] 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: 405. (WU Zhongru. Safety monitoring theory & its application of hydraulic structures[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 405. (in Chinese))
- [21] 顾冲时, 吴中如. 大坝与坝基安全监控理论和方法及其应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 2006: 293. (GU Chongshi, WU Zhongru. Safety monitoring of dams and dam foundations: theories & methods and their application[M]. Nanjing: Hohai University Press, 2006: 293. (in Chinese))

Diagnosis of sluice crack working behavior based on velocity and acceleration criteria

XU Shimei¹, HUANG Yaoying¹, XU Xiaofeng¹, YIN Xiaohui², HAO Dan³, CHEN Fei³

(1. *School of Water Resources and Environment, China Three Gorges University, Yichang 443002, China*; 2. *Three Gorges Base Development Co., Ltd., Yichang 443002, China*; 3. *Hubei Hanjiang Wangfuzhou Hydropower Co., Ltd., Xiangyang 430048, China*)

Abstract: The measured data of fracture comprehensively reflect the influence of complex factors on macroscopic crack behavior of hydraulic concrete structure. The aging component is an important basis for evaluating crack working behavior. In this research, the crack working behavior is diagnosed based on the velocity and acceleration criteria. Considering the actual situation, the typical crack location of hydraulic concrete structure is selected to install a crack meter group, and the measured data of cracks experiencing adverse load conditions are monitored and obtained. Then, the crack statistical model reflecting the nonlinear effect of temperature is established, and the aging component is separated and obtained. Finally, the velocity and acceleration criteria are used to diagnose the aging component. The application analysis of measured fracture data shows that the fitting effect of the crack statistical model considering the effect of nonlinear temperature is good. Although the aging components of some measuring points of the cracks in a gate storehouse of a flood diversion sluice at the Wangfuzhou Water Conservancy Project do not converge, they tend to close. Thus, it is diagnosed that the cracks of the sluice are currently in a stable state. This method can reflect the time-varying law of cracks simply and reliably, and provide a reference for the diagnosis of working behavior of cracks in hydraulic concrete structures.

Key words: fracture diagnosis; velocity and acceleration; aging component; discharge sluice; degree of crack opening