DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2020.04.006

基于声发射监测的堤防管涌试验

明 攀[1,2],耿晓明[3],陆 俊[1,2],蔡 新[2,4]

(1.南京水利科学研究院材料与结构研究所,江苏 南京 210029;
2.南京水利科学研究院水文水资源与水利工程国家重点实验室,江苏 南京 210029;
3.南京市秦淮河河道管理处,江苏 南京 210012;4.河海大学力学与材料学院,江苏 南京 210098)

摘要:为研究声发射实时监测堤防的管涌过程,开展了变水头作用下的砂槽模型试验。通过对管涌过程的渗流量、平均水力坡降与声发射特征参数对比分析,发现管涌过程的水力参数和声发射参数具有相同的分布规律。引入地震级数 b 值计算方法和关联维数 G-P 算法,计算管涌过程中 AE 信号的 b 值和 AE 信号波形的分形维数值 D。结果表明:由 b 值和分形维数值 D 的大小和分布规律,可对管涌过程进行判别,及时对管涌危害进行预报,降低堤防管涌带来的危害。

关键词:堤防管涌;声发射;b 值;分形维数;监测预报

中图分类号: **文献标志码**:A **文章编号**:1006-7647(2020)04-0033-06

Experimental study on monitoring embankment piping based on acoustic emission technology//MING Pan[1,2], GENG Xiaoming[3], LU Jun[1,2], CAI Xin[2,4] (1. *Materials and Structure Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing* 210029, *China*; 2. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing* 210029, *China*; 3. *Nanjing Qinhuai River Management Office, Nanjing* 210012, *China*; 4. *The College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing* 210098, *China*)

Abstract: To study the real-time monitoring of the piping process of embankment by acoustic emission, a sand tank model test under the action of variable water head was carried out. By comparing the seepage flow, average hydraulic gradient and acoustic emission characteristics of the piping process, it is found that the hydraulic parameters and acoustic emission parameters have the same distribution law during the piping process. The b-value calculation method and the G-P algorithm are introduced to calculate the b values and the fractal dimension value D in the AE signal waveforms. The results show that the piping process can be discriminated from the magnitude and distribution of the b-value and the fractal dimension D. The damage can be reduced by in time prediction of the embankment piping damage.

Key words: embankment piping; acoustic emission; b-value; fractal dimension; monitoring and forecasting

堤防是江河湖海重要的防洪工程,担任着抗洪防汛、输水排灌的重要任务。我国堤防总长度长,运行时间悠久,隐患种类多且复杂,极易发生管涌、跌窝等险情[1]。为保证堤防汛期的安全运行和及时紧急抢险,开展堤防管涌实时监测具有非常重要的意义[2]。目前堤防安全监测多采用点式和分布式传感器,建立相应的堤防安全监测与预警系统[3-4],但是堤防所处的环境恶劣,现有的传感器存活率低,且传感器的成本和安装条件较高,测试范围有限,容易存在监测盲区[5]。

声发射技术是一种新型动态的无损检测技术,具有实时、高灵敏的特点,能实时检测材料结构的变化,对结构的状态进行实时探测;对结构的微小变化在线监控;且环境适应能力强,广泛应用于水利和岩土工程中,对施工期和运行期结构安全进行监测和预报[6]。本文通过开展室内堤基管涌砂槽模型试验,将声发射传感器埋置于堤基中,分析堤基管涌过程中的声发射信号规律,建立管涌发生和发展的判别准则,实现对堤防管涌的实时监测和预报。

1 试验方案

1.1 试验装置

试验采用自制的砂槽管涌模型试验装置,布置如图 1(a)所示,该模型长 200 cm,宽 33 cm、高 73.5 cm。

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0401902);国家自然科学基金(51579153);南京市水利科研项目(517007712)

作者简介:明攀(1993—),男,博士研究生,主要从事水工结构病害诊断与修复研究。E-mail:1053238613@qq.com
通信作者:陆俊(1981—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事水工结构病害诊断与修复研究。E-mail:lujun@nhri.cn

模型左侧为一个长 25 cm 的进水室,进水室与砂槽之间由一个透水板隔开,使水流均匀流入试样内。堤基为双层透水的砂基,厚 11 cm,堤身采用红色黏土进行填筑。模型槽内部水平共布置了 17 根测压管,1 号测压管用于测定上游水位的变化,其他测压管测量试验过程中试样内部沿程孔隙水压力的变化情况,测压管位置如图 1(b)所示,测压管从侧面深入试样 5 cm,距中间的土体 5 cm。

声发射仪器采用美国声学公司生产的 16 通道全天候监测的 The Sensor Highway Ⅱ System。该装备能推广到大型工厂和结构中使用,允许多个单元放置在正在监控的机器或结构附近,可用于户外环境,能适应-35 ~ 70℃的环境,功耗低,具有各种通讯和遥控功能,适用于大型结构的在线实时监测。试验中在堤防背水侧的堤基中共布置了 6 个声发射传感器,其具体布置方式如图 1(c)所示。其中传感器埋入底层土体 5 cm 固定,进行信号的接收。

1.2 试验砂料

堤基下层 100 mm 厚的透水堤基骨架为 5 ~ 60 mm 的砂砾石,填充料为 0.075 ~ 0.5 mm 的白色细砂,密度为 1.80 g/cm^3,渗透系数为 4.37 cm/s,不均匀系数 C_u 为 34.37,粒径小于 2 mm 的砂量为 24%,为典型的管涌型土[7];上层 1 cm 厚的砂料是粒径 0.25 ~ 2 mm的均匀粗砂;透水堤基砂粒的粒径级配曲线如图 2 所示。堤身由红色黏土填筑,渗透系数为 10^{-6}cm/s,填筑密度为 1.84 g/cm^3,含水率为 21.5%。

1.3 试验步骤

堤基采用水下分层抛填,每层填筑 5 cm,待堤基砂样静止饱和后,进行每层 5 cm 堤身的分层填筑,

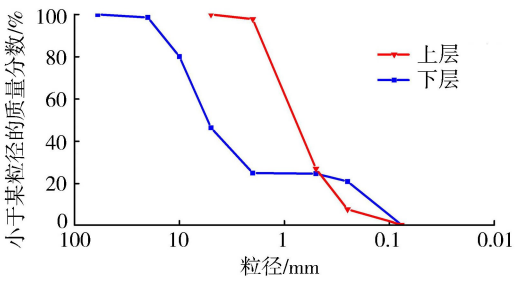


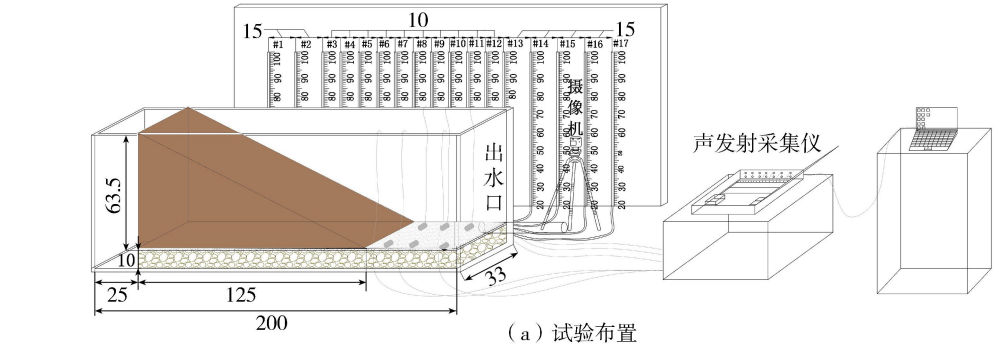
图 2 堤基砂样级配曲线

直至填筑至设定高度。通过控制水龙头的开度固定来水流量开展变水头作用下的堤基管涌连续破坏试验。试验中通过 4 次流量测量,测得固定来水流量的大小为 0.061 2 L/s。试验过程中摄像机和声发射采集系统同步数据采集,并对明显的破坏现象进行照相和记录。待试验结束 24 h 后,取出上层堤身填土,观测双层透水堤基的变化。

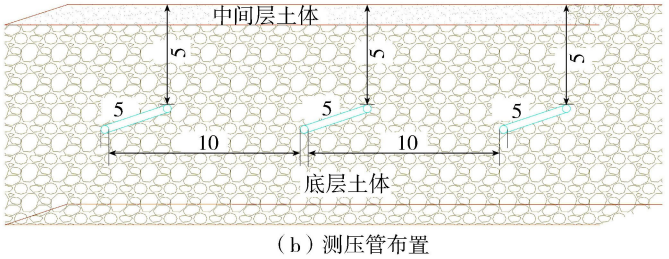
2 声发射基本参数设定

声发射检测规程[8]推荐了不同门槛值的适用范围和不同材料定时参数的选取范围,但是对于具体的材料和结构,由于环境不同,开展声发射试验前,应设置相应的系统采集设置参数。声发射基本的参数设置项为 AE 通道,包含了门槛值、前放增益、带通滤波、采样频率、预触发和采样长度。

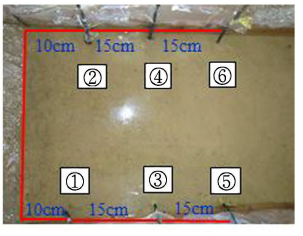
设置合理的门槛值是剔除噪声的一种有效方法,对于管涌破坏试验,将声发射探头埋置于饱和的砂砾石中,用于测定环境噪声和声发射系统自带的电子噪声大小,找到最佳门槛设定值和前放增益值,试验中测得最佳的门槛值为 25 dB,前放增益为 40 dB。由小波包对管涌破坏过程声发射信号进行频谱分析[9],试



(a) 试验布置



(b) 测压管布置



(c) 声发射探头布置

图 1 试验设计示意图(单位:cm)

验中带通滤波下限为 1 kHz,上限 100 kHz。采样频率采用 1 MHz,预触发 256 μs,采样长度 3 k。

3 试验结果分析

目前国内外声发射信号的处理方法,主要分为参数分析法和波形分析法。参数分析方法是声发射信号分析的基本方法,声发射参数是对波形特征提取电路变换的特征参数,是对波形的一种简述表征,通过对其分析,可以得到声发射源的相关信息。声发射信号波形分析方法则是对采集得到的波形进行分析,常见的分析方法有频谱分析、时频分析和分形分析等。波形分析主要对声发射源的特征进行识别,以及通过波形的时差分析和相关性分析,实现对声发射源的定位,以及波形传播特性分析,测定传播速度和衰减的测量,用于结构的检测和实时监测。

3.1 声发射信号特征参数分析

声发射信号是一种瞬态弹性波,通过对信号特征提取,电路变换为特性参数。对特性参数分析可得到声发射信号的分布规律,进而反演声发射源的变化状态。目前,声发射参数分析方法是最普遍的一种分析方法,能很好地揭示结构和材料状态的变化规律,对结构的状态进行判别和预报[10]。图 3 和图 4 分别给出了管涌连续破坏过程中渗流量与平均水力坡降时程曲线及振铃计数与区间累计振铃计数时域分布,可以看出管涌连续破坏的过程可以划分为 3 个阶段:散浸、管涌发生和管涌发展。散浸阶段为堤基砂样静水压力不断增加的过程;管涌发生阶段为静水压力达到一定值,水力坡降达到临界水力坡降,静水压力释放,堤角出现管涌孔群直至连通形成完整管涌孔的过程。管涌发展阶段为管涌孔形成后,细颗粒不断地被携带出堤基,形成管涌通道,管涌通道向上游发展的过程。由图 3 和图 4 可以看出水力参数和声发射特征参数在时域具有相同的分布规律,在散浸阶段水力坡降和渗流量都随时间线性增加,声发射信号逐渐增多;当达到临界水力坡降,管涌发生后,渗流量急剧增加,单个声发射信号的振铃计数数值突然增大。管涌发展阶段,细颗粒稳定的连续不断地被从粗颗粒的骨架中带出,如图 5 所示。此时渗流量保持稳定,一定时间区间内的声发射信号基本保持不变,但信号明显增强,声发射源活动更频繁。

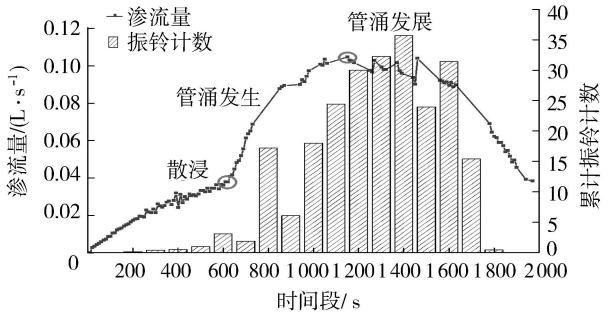


图 3 渗流量与累计振铃计数随时间变化曲线

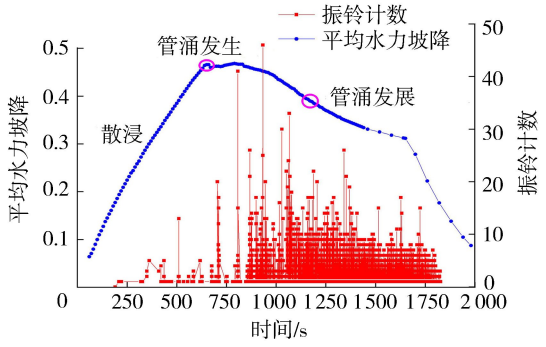


图 4 平均水力坡降与振铃计数随时间变化曲线



图 5 管涌口细砂不断被冲刷带出

地震学中,接收到的信号中幅值大的事件发生的频率明显低于幅值小的事件,Gutenberg 和 Richter 称这种规律为幅值与频率的关系,提出了地震级数 b 值计算方法来量化这种关系,并给出了相应的 b 值计算经验公式[11]。声发射信号类似地震波信号,目前国外学者将 b 值分析方法广泛应用于岩石混凝土断裂过程分析评估[12-13],其中 b 值计算表达式如下:

$$\lg N_a = a - \frac{b}{20} A_{dB} \tag{1}$$

式中:N_a 为声发射信号幅值大于 A_{dB} 的事件数;a 为 $\lg N_a$ 轴上的截距;b 为拟合线斜率的负 20 倍。

计算过程中首先确定幅值计算范围,一般下限为门槛值,上限取最大幅值。然后根据采集得到的声发射总的事件数确定事件组的数量,为了对小的声发射事件足够灵敏,一般事件数组的事件数量为 100[14]。最后每个事件组绘制对数频率-幅值图,采用最小二乘法拟合,得到相应的 b 值。其中某一时刻 b 值的计算是选取某一传感器在该时刻接收到的事件组进行计算。图 6 给出了堤基管涌某一时刻的对数频率-幅值图,拟合后斜率为-0.089,则 b 值为 1.78。

图 7 给出了管涌连续破坏过程 b 值曲线,管涌连续破坏过程声发射信号的 b 值相比混凝土和岩石断裂过程较大[14]。表 1 给出了管涌过程 b 值的定量结果。管涌发生阶段 b 值主要分布在[2.0,4.0]。在管涌发展阶段,b 值主要分布在[3.0,5.0]。可以看出,

管涌发展阶段的 b 值略大于管涌发生阶段。

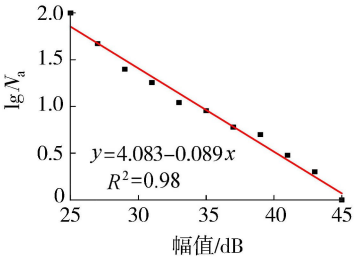


图 6　管涌过程某时刻 b 值的计算

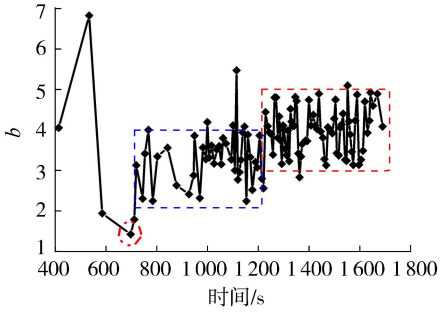


图 7　管涌过程 b 值随时间变化曲线

表 1　b 值定量结果

b	管涌阶段
1.5	管涌的发生时刻
[2.0,4.0]	管涌发生阶段
[3.0,5.0]	管涌发展阶段

在管涌的不同阶段，b 值大小明显不同。在管涌发生时，由于只有管涌孔附近的砂颗粒发生在渗流作用下起动，运输，诱发的 AE 信号频率较低，但是渗透压力瞬间释放，声发射信号幅值较大，导致 b 值最小。在管涌生成阶段和发展阶段，由于更多砂颗粒不断被渗流带出堤基外，诱发更多的声发射信号，声发射信号发生的频率增加，b 值增大。但是渗流作用下，砂颗粒的起动，运输过程是随机的，b 值在一定数值范围内变化。

堤防所处环境恶劣，堤身结构复杂，现有的监测传感器存活率低。声发射技术相比传统技术，能实时接收结构微小变化诱发的信号，且环境适应能力强，已用于边坡，隧洞等岩土领域安全监测。实际堤防监测领域，可以运用声发技术进行管涌破坏过程的监测。根据声发射信号的变化规律监测管涌的发生，通过 b 值的变化范围，分辨管涌所处的阶段。

3.2　声发射信号波形分析

AE 信号的波形十分复杂，没有具体的函数对其进行表达。分形维数作为一种描述几何形体复杂性的方法，广泛运用于各类波形信号的分析中，分析维数是描述波形信号特征的重要参数[15]，采用改进的 G-P 算法对 AE 信号波形进行关联维数的计算。

关联维数是混沌时间序列非线性分析中常见的一个概念，是分形维数的一个重要分支。由 Grassberger 和 Procaccia 于 1984 年提出，因此关联维数的计算方法又称为 G-P 算法[16]。关联维数主要用于确定信号的前后关联性，将信号时间序列通过相空间重构，然后给定一个阈值，在相空间两点间的距离进行搜索，小于阈值，则两点是关联的，否则不相关。对整个相空间进行搜索，相关联的点对数越多，则数据的关联性越强。

声发射的每次测试过程，传感器都会接收到上万次甚至百万次的 AE 波的撞击，每一次的撞击，信号中都夹杂着噪声信号，本文通过硬阈值算法对 AE 信号波形进行降噪处理。由于声发射采集时设置了预触发，波形采样长度范围内，在波形前后存在很多零值电压值，则给波形数据的计算带来了巨大的工作量。本文通过对去噪后的波形时间序列进行去零点处理，然后进行相关的分形计算。

设 AE 信号波形的时间序列 $\boldsymbol{X}=(x_1,x_2,\cdots,x_N)$，$N$ 为信号采样长度，阈值函数为

$$x_i'=\begin{cases}x_i & |x|>t\\ 0 & |x|\leqslant t\end{cases}\qquad(i=1,2,\cdots,N)\tag{2}$$

$$x_j'=\begin{cases}x_{i+k}' & x_i'=0,\ x_{i+k}'\neq 0\\ x_i' & x_i'\neq 0\end{cases}$$

$$(k=1,2,\cdots,N-i\ ;\ j=1,2,\cdots,n)\tag{3}$$

式中：t 为时间阈值。

$\boldsymbol{X}_1$、$\boldsymbol{X}_2$ 经阈值处理后 AE 信号波形新的时间序列 $\boldsymbol{X}'=(x_1',x_2',\cdots,x_N')$，通过式(3)得到 AE 信号波形时间序列为 $\boldsymbol{X}'=(x_1',\ x_2',\ \cdots,\ x_n')$。然后对信号进行相空间重构，设嵌入维数为 $m(m<n)$，对信号进行延迟时间 f 的延迟采样，得到 $M=n-(m-1)f$ 个点的 m 维空间：$\boldsymbol{X}_3,\boldsymbol{X}_4,\cdots,\boldsymbol{X}_n,\ \boldsymbol{X}_{n-(m-1)f}$。

对于 m 维相空间中的一对相点：

$$\begin{cases}\boldsymbol{X}_p=(x_p',x_{p+1}',\cdots,x_{p+m-1}')\\ \boldsymbol{X}_q=(x_q',x_{q+1}',\cdots,x_{q+m-1}')\end{cases}\tag{4}$$

设他们的欧式距离 $r_{pq}(m)$ 为维数 m 的函数，满足：

$$r_{pq}(m)=\|\boldsymbol{X}_p-\boldsymbol{X}_q\|\tag{5}$$

给定尺度 r，定义为 m 维相空间的超球体的半径，计算小于半径 r 的点对数，并计算出距离小于 r 的点对数占总点对数的比例：

$$C_m(r)=\frac{1}{M^2}\sum_{i=p}^{M}\sum_{j=q}^{M}H(r-\|\boldsymbol{X}_p-\boldsymbol{X}_q\|)\tag{6}$$

其中 H 为海威赛德(Heavi Side)函数，满足：

$$H(x)=\begin{cases}1 & x\geqslant 0\\ 0 & x<0\end{cases}\tag{7}$$

则由式(6)中不同的 r，可以得到相应的 $C_m(r)$，在给定的相空间下可以画出坐标点[$\ln r$，$\ln C_m(r)$]，

如果坐标点拟合为直线，则表明信号具有分形特征，相应的关联维数 $D(m)$ 为

$$D(m)=\lim_{r\to 0}\frac{\ln C_m(r)}{\ln(r)} \tag{8}$$

为避免分散性，一般取 $r=kr_0$。

$$r_0=\frac{1}{M^2}\sum_{p=1}^{M}\sum_{q=1}^{M}\|\boldsymbol{X}_p-\boldsymbol{X}_q\| \tag{9}$$

图 8～10 给出了堤基管涌破坏不同阶段时刻 AE 信号波形的关联维数计算结果，由拟合的直线看出，回归的直线与原始数据的相关系数都大于 0.95，表明 AE 信号波形在时域内具有自相似特征。对比不同时刻的拟合直线斜率值可以看出，不同时刻的关联维数值各不相同，表明堤基管涌过程不同时刻的 AE 信号波形有着不同的自相似程度。图 11 给出了堤基管涌过程不同时刻的关联维数 D 随时间的变化曲线，可以看出，在管涌发生前，AE 信号波形的关联维数值随时间逐渐增加，在管涌即将发生时出现了一个“最大-最小”模式。在管涌发生和发展阶段，关联维数 D 值在一定范围内变化。在管涌发生阶段，D 值在[1.5，2.25]区间；管涌发展阶段，D 值在[1.25，2.5]区间。由于管涌发展阶段，管涌路径曲折向上游发展，动水压力携走的砂颗粒时空不均，关联维数 D 的数值大小变化范围更大。

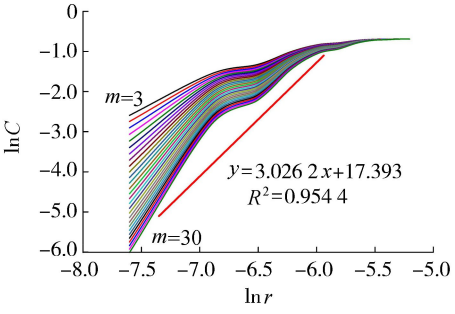


图 8　管涌散浸阶段 AE 信号波形关联维数拟合曲线

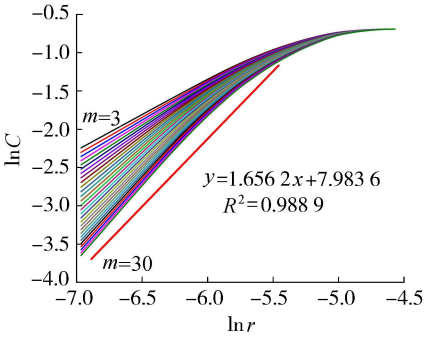


图 9　管涌发生阶段 AE 信号波形关联维数拟合曲线

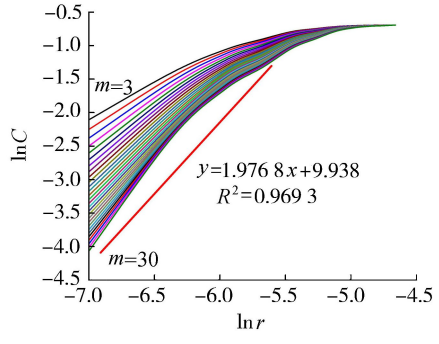


图 10　管涌发展阶段 AE 信号波形关联维数拟合曲线

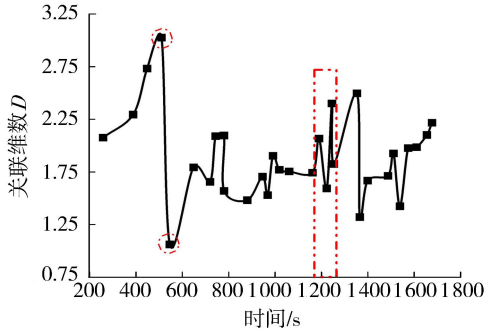


图 11　堤基管涌过程 AE 信号波形关联维数曲线

通过管涌破坏过程声发射波形的关联维数 D 的计算结果，可以看出在管涌发生前，AE 信号的波形关联维数存在一个“最大-最小”模式数值变化。并且，在管涌发生和发展阶段，关联维数 D 的数值变化规律不同，实际管涌监测中，则可以根据声发射的“最大-最小”模式对管涌发生进行预报，根据 D 值的变化状态对管涌状态进行判别。

4　结　论

a. 管涌连续破坏过程中水力参数与声发射特性参数时域上的对比分析，发现管涌过程的水力参数和声发射参数具有相同的分布规律，在管涌发生和发展阶段，声发射信号特性参数存在明显的特征变化。

b. 通过管涌过程 b 值计算，实时监测管涌的状态，并由 b 值的大小对管涌过程判别，及时对管涌危害进行预报。

c. 管涌连续破坏过程 AE 信号波形在时域内具有自相似特征，且不同时刻的关联维数值各不相同。由管涌发生起始时刻前 AE 信号波形关联维数的“最大-最小”模式对堤防管涌进行预报，具有重要的意义。

参考文献：

[1] 冷元宝，朱文仲，何剑，等. 我国堤坝隐患及渗漏探测技术现状及展望[J]. 水利水电科技进展，2002，22(2)：59-62.（LENG Yuanbao，ZHU Wenzhong，HE Jian，et al. Current situation and prospects of dike anomaly and infiltration detecting technology in China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources，2002，22(2)：59-62.（in Chinese））

[2] 邹声杰，汤井田，朱自强，等. 堤防管涌渗漏实时监测技术研究与应用[J]. 水利水电技术，2005，36(1)：77-79.（ZOU Shengjie，TANG Jingtian，ZHU Ziqiang，

et al. Research and application of real-time monitoring technology for levee piping and seepage control [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36(1): 77-79. (in Chinese))
[3] 周小文,包伟力,吴昌瑜,等. 现代化堤防安全监测与预警系统模式研究[J]. 水利学报,2002,30(6):113-117. (ZHOU Xiaowen, BAO Weili, WU Changyu, et al. Dike safety monitoring and alert system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002,30(6):113-117. (in Chinese))
[4] 冷元宝,朱萍玉,周杨. 基于分布式光纤传感技术的堤防工程健康监测系统[J]. 水利水电科技进展,2012,32(增刊2):84-88. (LENG Yuanbao, ZHU Pingyu, ZHOU Yang. Dike project health monitoring system based on distributed optical fiber sensing technology[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012,32(Sup2):84-88. (in Chinese))
[5] 冷元宝,任建东,王锐,等. 堤防隐患探测与监测技术展望[J]. 工程地球物理学报,2004,1(1):74-77. (LENG Yuanbao, REN Jiandong, WANG Rui, et al. Prospect for the technology of detecting and monitoring embankments' hidden danger [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2004,1(1):74-77. (in Chinese))
[6] 王岩,路桂娟,王瑶,等. 声发射技术在土木工程中的应用研究综述[J]. 水利水电科技进展,2012,32(4):89-94. (WANG Yan, LU Guijuan, WANG Yao, et al. Research review of applications of acoustic emission technique in civil engineering[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(4):89-94. (in Chinese))
[7] 刘杰,谢定松,崔亦昊. 江河大堤堤基砂砾石层管涌破坏危害性试验研究[J]. 岩土工程学报,2009,31(8):1188-1191. (LIU Jie, XIE Dingsong, CUI Yihao. Destructive tests on piping failure of sandy gravel layer of river dikes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(8):1188-1191. (in Chinese))
[8] AMERICAN A, STANDARD N. Standard guide for determining the reproducibility of acoustic emission sensor response [EB/OL]. [2019-06-30]. https://www.mendeley.com/catalogue/standard-guide-determining-reproducibility-acoustic-emission/
[9] 明攀,陆俊,胡少伟,等. 堤基管涌破坏过程中的声发射信号特性研究[J]. 水电能源科学,2018,36(2):176-179. (MING Pan, LU Jun, HU Shaowei, et al. Research on acoustic emission signal characteristic in failure process of levee piping[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(2):176-179. (in Chinese))
[10] 胡少伟,陆俊,范向前. 混凝土断裂试验中的声发射特性研究[J]. 水力发电学报,2011,30(6):16-20. (HU Shaowei, LU Jun, FAN Xiangqian. Study on acoustic emission technique for normal concrete fracture test [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(6):16-20. (in Chinese))
[11] COLOMBO I S, MAIN I G, FORDE M C. Assessing damage of reinforced concrete beam using "*b*-value" analysis of acoustic emission signals [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, 15(3):280-286.
[12] NOORSUHADA M N. An overview on fatigue damage assessment of reinforced concrete structures with the aid of acoustic emission technique [J]. Construction and Building Materials, 2016, 112:424-439.
[13] CARPINTERI A, LACIDOGNA G, PUZZI S. From critical to final collapse: evolution of the *b*-value from 1.5 to 1.0 [J]. Chaos Solitons & Fractals, 2009, 41(2): 843-853.
[14] HAN Qinghua, YANG Guang, XU Jie, et al. Acoustic emission data analyses based on crumb rubber concrete beam bending tests [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, 17(4):946-958.
[15] 谢玉琼. 数字波形信号的分形维数与应用[D]. 武汉:武汉大学, 2002.
[16] 付强,李晨溪,张朝曦. 关于 G-P 算法计算混沌关联维的讨论[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2014,15(3):275-282. (FU Qiang, LI Chenxi, ZHANG Zhaoxi. G-P algorithm for evaluating the correlation dimension in chaos [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 15(3):275-282. (in Chinese))

(收稿日期:2019-08-01 编辑:郑孝宇)

(上接第 32 页)

[11] 王丽,吴建华,杨德明,等. 辛安泵站供水工程停泵水锤计算与防护研究[J]. 水电能源科学,2018,36(1):168-171. (WANG LI, WU Jianhua, YANG Deming, et al. Study on protection and pump-stopping water hammer calculation of water supply project for Xin'an Pump Station[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(1): 168-171. (in Chinese))
[12] 黄涛,朱文琴,刘汉丞. 丰满泄水洞岩塞爆破的震动冲击效应与水力特性[J]. 水利学报,1983(11):18-28. (HUANG Tao, ZHU Wenqin, LIU Hancheng. The effect of vibration shock ware and the hydraulic characteristics on tunnel rock-plug blasting at Fengman tunnel [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1983(11):18-28. (in Chinese))
[13] 肖佐庭,张训时. 密云水库引水隧洞水下进水口岩塞爆破水工模型试验研究[J]. 水力发电,1995(4):48-51. (XIAO Zuoting, ZHANG Xunshi. Hydraulic model test study of underwater inlet plug blasting in diversion tunnel of Miyun Reservoir[J]. Water Power, 1995(4):48-51. (in Chinese))
[14] 李玉柱,李永祥,刘沛清,等. 引水隧洞进口岩塞爆破的水力计算[J]. 水利水电技术,1997(1):44-49. (LI Yuzhu, LI Yongxiang, LIU Peiqing, et al. Hydraulic calculation of rock plug blasting at the entrance of diversion tunnel[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1997(1):44-49. (in Chinese))

(收稿日期:2019-10-15 编辑:熊水斌)