

混凝土材料声发射过程分形特征及其在断裂分析中的应用*

纪洪广¹ 王基才² 单晓云³ 蔡美峰¹

(¹ 北京科技大学土木与环境工程学院 北京 100083) (² 深圳越众集团股份有限公司 深圳 518040) (³ 河北理工学院数理系 唐山 063009)

摘要 为了寻求混凝土材料声发射过程与断裂演化之间的关系,从实验入手,首先给出了声发射过程关联分维函数的概念,并通过实验,证明了声发射过程分形特征的存在。然后,通过混凝土试块的三点弯曲实验,分析了材料断裂过程中声发射关联分维数的变化规律。进而确定了混凝土试块在临界断裂时的分形特征识别模式。研究结果表明,混凝土材料的声发射过程不仅具有明显的分形特征,而且在临界状态下,各声发射分形特征参数都表现出一定的异常“模式”,这种识别模式可以作为材料出现临界断裂的识别特征。

关键词 混凝土, 声发射, 分形特征, 临界断裂

分类号 TU 528.01

文献标识码 A

文章编号 1000-5915(2001)06-0801-04

1 引言

混凝土内部含有许多不同性质的缺陷、裂纹及微观构造上的不均匀性,其受载断裂过程实质上是一个由原生裂隙到微裂纹扩展,最后出现宏观断裂的连续过程。而断裂力学是以主裂纹的开裂作为材料断裂的判别依据,当采用断裂力学理论解决混凝土的断裂问题时,一个很重要的问题,就是如何确定临界条件,即在上述连续过程中取哪一状态为开裂的临界状态。

大量实验表明,混凝土在整个断裂过程中都伴有声发射产生,并且在不同阶段有着不同的声发射特征。文[1]曾经证明,声发射过程中确实包含有材料临界断裂的突变信息。分形几何是近几年发展起来的研究在自相似意义下所具有的尺度不变性的数学分支^[2]。已证明,岩石材料的声发射事件在空间上的分布具有分形特征^[3]。为了寻求混凝土材料声发射过程与断裂演化之间的关系,本文给出了声发射过程关联分维函数的概念,并通过实验,证明了声发射过程分形特征的存在。然后从实验入手,通过分析声发射过程的分形特征,确定了混凝土试块在临界断裂时的分形特征识别模式。

2 声发射过程的分形特征

为了考察声发射过程在自相似意义下是否具有分形特征,首先引入声发射参数的关联分维数^[4]的概念。

将声发射基本参数序列作为研究对象,则每一声发射基本参数序列对应一个容量为 n 的序列集:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (1)$$

由上式可以构成一个 m 维的相空间($m < n$)。

首先,取前 m 个数作为 m 维空间的一个向量

$$X_1 = \{x_1, x_2, \dots, x_m\} \quad (2)$$

然后,后移一个数再取 m 个数,构成第二个向量

$$X_2 = \{x_2, x_3, \dots, x_{m+1}\} \quad (3)$$

依次类推,可构成 $N = n - m + 1$ 个向量。

若定义关联函数为

$$W[r(k)] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N H[r(k) - |X_i - X_j|] \quad (4)$$

式中: H 为Heavysive函数, $H(u) = \begin{cases} 0, & u < 1 \\ 1, & u \geq 1 \end{cases}$;

$r(k)$ 为给定的尺度。

1999年12月6日收到初稿,2000年3月1日收到修改稿。

* 国家教委博士学科点专项基金资助项目(2000000802)。

作者 纪洪广 简介:男,37岁,1997年于东北大学结构工程专业获博士学位,主要从事声发射技术及应用、结构检测、结构稳定性评价等方面的教学和研究工作。

对每一个给定的尺度 $r(k)$ ，都可得到一个 $W[r(k)]$ 。对于给定的 g 个尺度，在双对数坐标系中可得到 g 个点 $\{\ln W[r(k)], \ln r(k)\}$ ， $k=1, 2, \dots, g$ 。对 g 个点进行回归，当回归成直线时，便说明声发射序列在给定的尺度范围内具有分形特征^[3]，回归直线的斜率就是声发射参数的关联分维数 D 。图1为混凝土试块在单轴压缩过程中声发射率和声发射事件率两个参数在应力水平为45%及75%时的分形特性示意图。

图中回归直线与原始数据的相关系数都大于0.95，这说明声发射过程有着明显的分形特征。同时，由于在不同应力状态下的关联分维数不同，这说明不同应力状态下声发射过程有着不同的自相似程度。

同时分析发现，声发射参数的分形特征具有一定的尺度范围，超出这个尺度范围后，分形特征便不明显^[4]。

在尺度 $r(k)$ 取值时，为了避免分散性，一般使

$$r(k) = br_0 \tag{5}$$

式中： k 为比例系数， $r_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |X_i - X_j|$ 。

试验分析表明：相空间维数 m 对关联维数有一定影响， m 值越大，分维数越小^[9]。因此，在考察不同应力水平上分维数变化的规律时，应以同样的 m 值来计算分维数。

从图1可以看出，在材料的受载过程中，声发射关联分维数随应力水平的变化而变化，这说明了不同应力状态下声发射过程的自相似程度不同。因此，同材料的应力、应变等力学参数一样，声发射过程的关联分维函数也可以作为描述材料力学特征的特征参数。

3 混凝土材料临界断裂的分形识别特征

混凝土材料的结构特点也决定了其断裂过程是一个微裂纹变形、扩展的连续过程。为了研究混凝土断裂过程中的声发射特征，进行了混凝土中间切口梁状试块的三点弯曲实验。

试件尺寸为4 cm×8 cm×28 cm，配合比为：水泥：砂：碎石：水=1：1.35：3.15：0.55，试块成型后24 h脱模，在20℃的水中浸泡7 d，然后放置在标准养护室中养护至28 d。试块中部预设有长4 cm的切口，实验前用钢锯将切口端部锯尖，采用连续加载的方式。实验中，在进行声发射检测

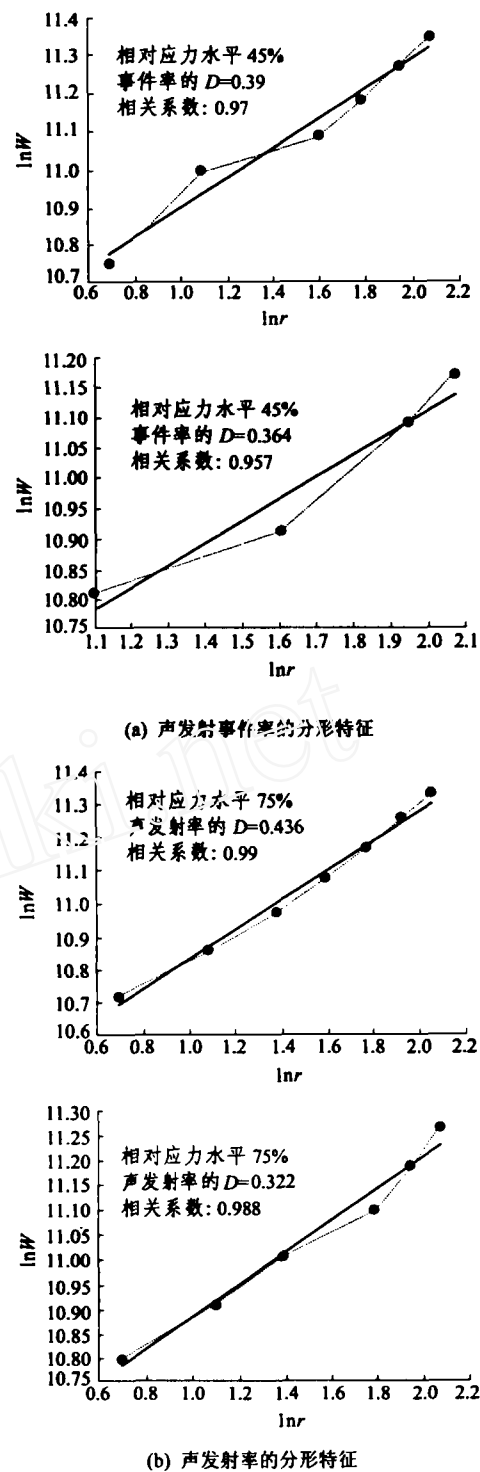


图1 不同应力水平时混凝土声发射参数的分形特征及关联分维数

Fig.1 Fractal characteristics and relevant fractal dimensions of AE parameters under different stresses

的同时，用千分表测出梁中心点处的竖向位移。声发射检测设置总增益为100 dB，其中前放为40 dB，主放为60 dB，设置门槛值为32 dB。实验系统如图2所示。

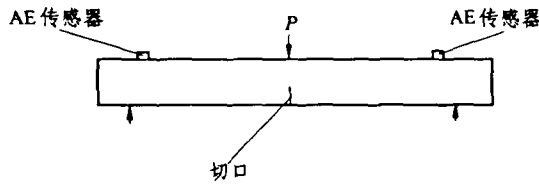


图2 混凝土切口试块三点弯曲实验示意图
Fig.2 Three-point bending test of center-notched concrete beam

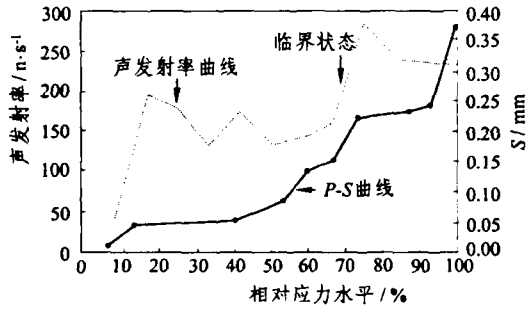


图3 混凝土试块三点弯曲实验P-S曲线
Fig.3 Curve of loading and center-displacement during the three-point bending test

图3为实验中测得的声发射率曲线和P-S曲线(荷载-位移曲线)。图中,声发射率曲线急剧上升的点即为临界断裂点^[6]。

图4为混凝土试块在三点弯曲断裂过程中,声发射关联分维数的变化曲线。实验结果表明,在混凝土试块的断裂过程中,不同应力水平下声发射过程的关联分维数是不同的。可以看出,在临界断裂状态下,声发射参数的关联分维数所表现出的识别特征为“最大-最小”模式。

图5为混凝土试块单轴压缩断裂过程中,声发射过程关联分维数随应力水平的变化曲线。

文[5]在利用声发射参数的关联分维数分析矿山岩层运动混沌特性时指出,关联分维数越大,岩层运动的混沌性态越明显。岩层的断裂则对应着降维过程。本文的分析结果说明:在混凝土试块的断裂过程中,在临界状态下,关联分维数的降低正标志着声发射过程有序度的提高。试验中所观察到的微裂纹的集中与微裂带的形成,便是材料变形与开裂自随机状态过渡到有序状态的外部表现。

比较图3, 4和5可以看出:混凝土试块无论是在单轴压缩还是在三点弯曲情况下,其声发射过程的关联分维数都随着应力水平的变化而变化,且在临界断裂状态有着相同的识别模式,即为“最大-最小”模式。

需要指出的是,由于混凝土材料自身结构的特点,在其受力过程中,声发射基本参数会由于试块上的局部剥落而发生突发性变化,但这种变化并不

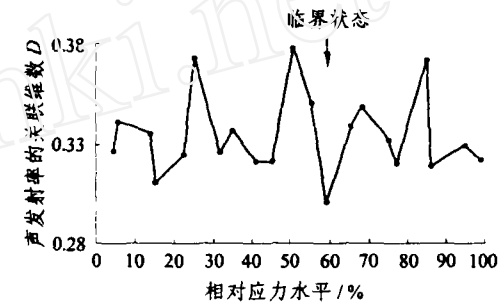
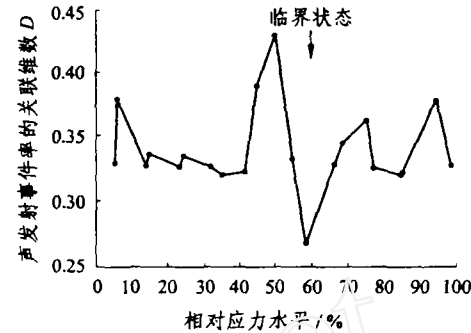
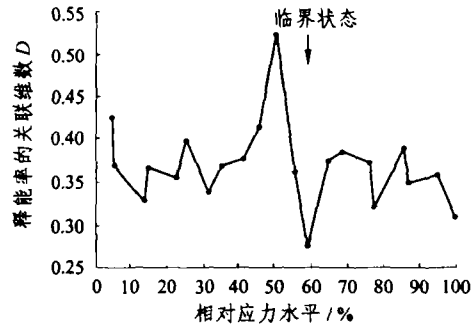


图4 混凝土试块断裂过程中声发射关联分维数的变化曲线
Fig.4 Variation curve of relevant fractal dimensions during fracture of concrete specimen

意味着试块的断裂^[7-9]。因此,在用声发射基本参数识别临界状态时会存在一定的困难^[10]。而分形特征函数是建立在声发射过程自相似意义下尺度不变性的特征之上的,因而,声发射过程的关联分维数具有相对稳定性,不会由于声发射信号的突发性跳跃而发生显著的变化。

4 结 论

(1) 试验结果证明,混凝土材料的声发射过程具有分形特征。分形特征是声发射过程在自相似意义下所具有的尺度不变性,它可以作为从复杂多变的声发射信号中提取有关材料内部变化的可靠信息的内在根据。

(2) 所建立的分形特征函数从自相似的角度反映了声发射过程的性质。这一特征函数不仅可用于材料声发射性能的研究,而且可用于探讨力学过程与材料内部结构演化之间的关系(即本构关系)。

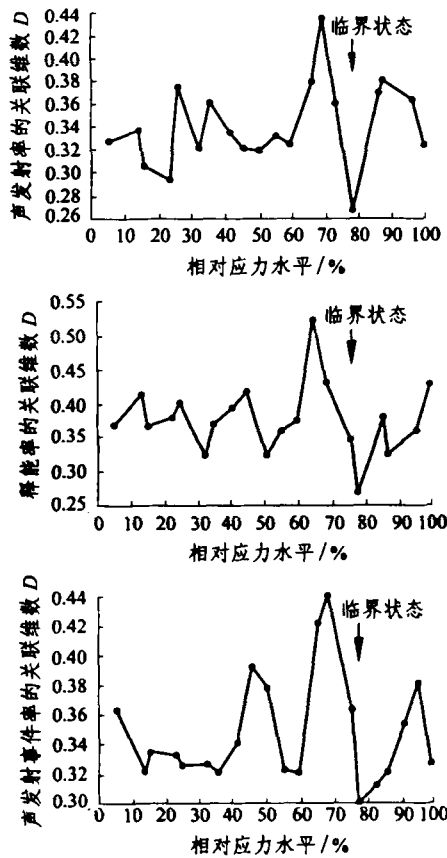


图5 混凝土试块单轴压缩断裂过程中声发射过程关联维数随应力水平的变化曲线

Fig.5 Variation of relevant fractal dimensions of AE resulting from fracture of uniaxial compression of concrete specimen with stress

(3) 声发射特征参数同样能明显地表达出断裂过程中材料内部结构演化的进程,而且与基本声发射参数相比,特征参数有更好的稳定性和直观性,

因而更便于应用。

(4) 在临界状态下,各声发射分形特征参数表现出一定的异常“模式”,而且不同参数对这种异常的反映是一致的。因此,这种识别模式可以作为材料出现临界断裂的识别特征。

参考文献

- 1 纪洪广, 贾立宏, 李造鼎. 声发射参数的灰色尖点突变模型及其在混凝土断裂分析中的应用[J]. 声学学报, 1996, 21(6): 935~940
- 2 Takayuki Hirata. Fractal structure of spatial distribution of microfracturing in rock[J]. Geophysics J. R. Abstr., 1987, 90: 369~374
- 3 曾文曲, 王向阳. 分形理论与分形的计算机模拟[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1993
- 4 谭云亮, 石永奎. 坚硬顶板运动过程中声发射分析特征[J]. 东北大学学报, 1994, 15(增): 332~335
- 5 谭云亮. 矿山岩层运动非线性动力学特征研究[博士学位论文][D]. 沈阳: 东北大学, 1996
- 6 姜福田. 混凝土力学性能与测定[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989
- 7 纪洪广, 张天杰, 蔡美峰等. 混凝土材料损伤的声发射动态检测试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 165~168
- 8 彭向和, 杨春和. 复杂加载史下混凝土的损伤及其描述[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 157~164
- 9 严安, 吴科如, 姚武等. 混凝土的断裂参数与断裂面分维数关系的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增2): 1600~1603
- 10 纪洪广, 蔡美峰. 混凝土材料断裂的声发射自相似性识别特征[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 157~160

FRactal Characteristics of AE Process of Concrete Material and Application to the Fracture Analyses

Ji Hongguang¹, Wang Jicai², Shan Xiaoyun³, Cai Meifeng¹

(¹ School of Civil and Environment Engineering, University of Beijing Science and Technology, Beijing 100083 China)

(² Yuezhong Ltd. Group Corp., Shenzhen 518040 China) (³ Hebei Institut of Technology, Tangshan 063009 China)

Abstract In order to obtain the relationship between the acoustic emission process and fracture evolution of concrete material, the concept of relevant fractal function of acoustic emission process is given. The existence of fractal characteristics of acoustic emission process is proved through experiments firstly. Then, the variation tendency of relevant fractal dimensions in the fracture process of material is analyzed by three-point bending test of concrete specimen. The identification pattern of fractal characteristics for critical fracture is determined. The results show that the acoustic emission process of concrete material is of obvious fractal characteristics, and the different fractal characteristic parameters of acoustic emission in the critical state show some "identification pattern" which can be used to identify the characteristics of critical fracture.

Key words concrete, acoustic emission, fractal characteristics, critical fracture