

混凝土声发射现象的协同效应及混沌效应

荆 昱^{1,2}, 于广明¹, 赵文彦¹, 李 杏¹, 路世豹¹

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 潍坊市规划局, 山东 潍坊 261500)

摘 要: 利用协同学对混凝土损伤过程的声发射现象进行了研究, 以绝热消去原理为基础建立了以声发射事件为序参量的演化方程, 并对方程的解进行分析。分析了声发射事件的混沌效应, 指出混沌可以使绝热消去原理失效。应用 RFPA 软件进行的数值试验表明, 混凝土声发射事件呈现出涨落式上升-突变-涨落式衰减的模式, 声发射源则呈现出随机分布-聚集的模式, 数值试验结果验证了混凝土声发射的协同演化机理。

关键词: 声发射; 协同学; 绝热消去; 混沌效应; 数值试验

中图分类号: TU528.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2012)04-0080-05

Synergy Effects and Chaos Effects of AE Laws of the Concrete

JING Yu^{1,2}, YU Guangming¹, ZHAO Wenyan¹, LI Xing¹, LU Shibao¹

(1. School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao, Shandong 266033, China;

2. Weifang Urban Planning Bureau, Weifang, Shandong 261500, China)

Abstract: Synergy science was used to study AE(acoustic emission) phenomenon on the injury of concrete, adiabatic elimination principle was used to establish a equation which determined by the parameter of AE event, and the equation was analyzed. The chaos effect of AE event was analyzed exploratively, which can lead the adiabatic elimination principle invalid. Numerical experiments using RFPA software were run to verify the synergy mechanism of AE events and AE sources on the injury of concrete. Results showed that AE events appeared fluctuant ascension-mutation-fluctuant attenuation mode, AE sources appeared random distribution-aggregation mode.

Key words: acoustic emission; synergy; adiabatic elimination; chaos effect; numerical experiment

材料或结构受到外力或内力作用产生变形或断裂, 以弹性波形式释放出应变能的现象称为声发射(acoustic emission, AE)^[1]。大部分材料都是非均匀的或者有缺陷的, 在外力作用下, 内部强度较低的微元体在局部应力集中到某一程度时发生破坏, 随后局部应力松弛, 产生应力降, 造成局部区域快速卸载, 从而产生声发射^[2]。混凝土材料在单轴拉压、受弯或者受剪条件下, 其损伤过程中都会伴有声发射现象, 而且声发射特征由其内部结构特征决定。声发射事件与应力水平之间也存在明显的对应关系, 因此声发射事件的发展趋势能够反映混凝土内部破坏的微观过程^[3-4]。

声发射信号受多种因素影响, 呈现出显著的非线性, 传统理论方法在分析声发射信号时存在诸多障碍。协同学(Synergetic)由德国斯图加特大学 Haken 教授于 20 世纪 70 年代创立, 它指出系统并不是子系统的机械总和, 而是子系统通过协同作用自组织起来的整体, 这些子系统之间的协同作用受相同原理的支配, 与自身的性质无关^[5-6]。协同学为研究混凝土声发射的非线性演化过程提供了工具。

本研究采用协同学理论建立了混凝土声发射的序参量方程和混沌方程, 并对其进行分析, 最后运用数值

收稿日期: 2011-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(50804026); 教育部博士点基金项目(200804290002); 青岛市地铁一期工程(3 号线)科研课题(SDSITC-0108310)

作者简介: 荆 昱(1987—), 男, 山东高密人, 硕士研究生, 主要从事混凝土损伤的协同学分析. E-mail: 740643521@qq.com

于广明(1963—), 男, 黑龙江青冈人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事工程力学、防灾减灾工程、工程测量等方面的研究工作. E-mail: yuguangmin@263.net

模拟验证了其正确性。

1 混凝土声发射的协同效应

1.1 声发射序参量方程

混凝土损伤过程始终伴随着声发射现象,因此,以声发射事件计数率作为混凝土损伤过程的序参量。定义声发射事件的峰值计数率 \dot{N}_1 对应某一时间段内最大裂缝的扩展,小事件计数率 \dot{N}_2 对应某一时间段内较小裂缝的扩展。很明显,这两者存在着关联:一方面,大量微小裂缝的扩展会导致较大裂缝的产生;另一方面,较大裂缝的产生会衍生更多的小裂缝。

参照 Langevin 方程,峰值事件的计数率可以表示为:

$$\dot{N}_1 = (-\kappa_1 + i)N_1 + j \sum g_{u1} - F_\lambda(t). \quad (1)$$

其中: κ_1 —阻尼系数; i —声发射增长系数, $i = k \frac{\ln \sigma}{\ln \sigma_m}$; k —常数, σ_m —峰值应力; $j \sum g_{u1}$ —混凝土内部单元相互作用引起的声发射峰值事件涨落, j 为应力增长系数; $F_\lambda(t)$ —声发射的随机涨落。

研究^[7]表明,分岔产生的声发射事件数近似正比于较大事件数的平方,因此小事件的声发射计数率可以表示为:

$$\dot{N}_2 = (-\kappa_2 + i)N_1 N_2 + j \sum g_{u2} - F_\lambda(t). \quad (2)$$

其中: κ_2 —阻尼系数; i —声发射增长系数; $j \sum g_{u2}$ —混凝土内部单元相互作用引起的声发射小事件涨落。

1.2 绝热消去原理

混凝土损伤的声发射过程可以近似视为绝热过程,峰值事件的声发射率可以看作是快弛豫参量,小事件的声发射率可以看作是慢弛豫参量。快弛豫参量阻尼系数大($\kappa_1 \gg \kappa_2$),衰减较快(弛豫时间 $t_1 \ll t_2$),因此系统的发展和演化主要决定于慢弛豫参量。消去快弛豫参量,即令 $\dot{N}_1 = 0$,得到:

$$N_1 = \frac{-j \sum g_{u1} + F_\lambda(t)}{-\kappa_1 + i}. \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)得:

$$\dot{N}_2 = (-\kappa_2 + i) \frac{-j \sum g_{u1} + F_\lambda(t)}{-\kappa_1 + i} N_2 + j \sum g_{u2} - F_\lambda(t). \quad (4)$$

式(4)即为混凝土声发射的序参量方程。可见,声发射计数率有两个与之对抗的因素:自身的阻尼系数 κ_2 以及涨落作用 $j \sum g_{u2}$ 。系统本身的性质、子系统的性质,以及二者之间的非线性作用共同决定着序参量的演化。令 $(-\kappa_2 + i) \frac{-j \sum g_{u1} + F_\lambda(t)}{-\kappa_1 + i} = a$,则方程(4)可简化为:

$$\dot{N}_2 = aN_2 + j \sum g_{u2} - F_\lambda(t). \quad (5)$$

求解方程(5)得:

$$N_2 = e^{at} \left[\int [j \sum g_{u2} - F_\lambda(t)] e^{-at} dt + C \right]. \quad (6)$$

由混凝土声发射机理可知,声发射事件的变化曲线与应力-应变曲线相吻合,因此声发射从小事件到峰值事件再到小事件的演化过程近似与某一子系统的应力-应变曲线相一致。在此,假定 $F_\lambda(t) = 0$,声发射事件的涨落 $j \sum g_{u2}$ 近似为三角函数受压应力-应变曲线 $j \sin(\omega t)$,将其代入方程(6)解得:

$$N_2 = Ce^{at} + e^{at} \int j \sin(\omega t) e^{-at} dt = Ce^{at} - j \cdot \frac{\alpha \sin(\omega t) + \omega \cos(\omega t)}{\alpha^2 + \omega^2}. \quad (7)$$

由方程(7)可以看出,当应力水平比较低 ($\kappa_2 \gg i, j$ 较小) 时,声发射事件频率较小,涨落幅度也较小,在随机涨落力的作用下,声发射事件甚至可能消失;随着应力的增大 (i, j 增大),声发射事件频率不断增大,声

发射事件涨落幅度亦相应增大,即声发射事件呈现“相对声发射小事件-峰值事件-相对声发射小事件”的循环过程;当应力增大到某个阈值,即 $Ce^{\alpha t} \gg j \cdot \frac{\alpha \sin(\omega t) + \omega \cos(\omega t)}{\alpha^2 + \omega^2}$,可认为声发射事件将趋于无穷,这也意味着系统将要发生突变;当系统出现显著的宏观破坏,声发射事件频率随即呈下降趋势,但仍然存在声发射事件的涨落。

2 混沌效应

对于自组织结构,绝热消去原理的应用是有条件的,系统达到一定的阈值便会进入混沌状态,此时绝热消去原理就会失效。混凝土损伤过程中的声发射小事件变化率决定于自身阻尼系数、驱动力水平和声发射峰值事件,假设在 i 状态下声发射小事件的数量为 n_i ,则 $i+1$ 状态下的声发射事件数量 n_{i+1} 可以表示为:

$$n_{i+1} = -\kappa n_i + j n_i - j Z_i n_i. \quad (8)$$

其中: κ —阻尼系数; j —驱动力增长系数, $j = \alpha \frac{\ln \sigma}{\ln \sigma_{\max}}$; Z_i —相对涨落幅度, $Z_i = n_i / n_0$, n_0 为 i 到 $i+1$ 状态之间的声发射峰值事件。式(8)左右两边除以 n_0 得:

$$\frac{n_{i+1}}{n_0} = -\kappa \frac{n_i}{n_0} + j \frac{n_i}{n_0} - j Z_i \frac{n_i}{n_0}; \quad (9)$$

$$Z_{i+1} = -\kappa Z_i + j Z_i - j Z_i^2. \quad (10)$$

变换式(10)得到:

$$\frac{j Z_{i+1}}{-\kappa + j} = (-\kappa + j) \frac{j Z_i}{-\kappa + j} \left(1 - \frac{j Z_i}{-\kappa + j}\right). \quad (11)$$

令 $\frac{j Z_i}{-\kappa + j} = X_i$, $(-\kappa + j) = \eta$,则得到

$$X_{i+1} = \eta X_i (1 - X_i). \quad (12)$$

方程(12)具有 Logistic 方程的形式。① 当 $0 < \eta < 1$,任选一个初始值 X_0 ,迭代方程会迅速趋向一个不动点 $X_0 \rightarrow 0$ 。这说明在应力水平比较低时,混凝土内部的初始裂纹发展不明显,有些微裂纹会闭合,声发射事件数量很少,而且在随机涨落力的作用下可能会降低为 0;② 随着 η 的增长($1 < \eta \leq 3$),方程将出现两个不动点 A、B,A 点不稳定而 B 点稳定,由初始值 X_0 出发的迭代过程逐渐远离不稳定点 A,而趋近稳定点 B。表明随着应力的增长,声发射事件将远离初始的低水平而趋向一个更高的水平,可以推测声发射事件的稳定点在空间和时间上都存在;③ 当 $3 < \eta \leq 1 + \sqrt{6}$,稳定点 B 经过过渡阶段后分岔出一对新的稳定的不动点,即 X_i 在两个值之间波动,意味着声发射事件在增长过程中伴随着涨落;④ 随着应力水平的继续增长($1 + \sqrt{6} < \eta \leq 3.545$), X_i 的值将在四个值之间波动,随着 η 值的不断增大,将出现倍周期分岔现象。

由此可见,声发射事件将呈现非衰减的振荡行为。然而,由于混凝土的强度(抗压强度、抗拉强度或抗剪强度)限制,在某个阈值,声发射事件将达到最大,系统的整体性能被破坏,声发射峰值事件和声发射小事件将呈现均势状态,绝热消去原理不再适应。

3 混凝土声发射过程的数值模拟

真实破裂过程分析软件(realistic failure process analysis,RFPA)是一种基于有限元应力分析和统计损伤理论的材料破裂过程分析数值计算方法,是一个能够模拟材料渐进破裂直至失稳全过程的数值试验工具^[8]。由于混凝土的非线性,RFPA 系统中参数的表征方法主要是选择各个组分力学参数的 Weibull 参数以及单元的本构参数,而单元力学参数的选择有很大的随机性,其优化和选取都是通过大量的数值试验后分析获得。本研究对混凝土在单轴压缩下的声发射演化进行了模拟,相变准则控制参数和试件力学参数如表 1 所示。

数值试验采用 Y 向位移加载,初始加载位移为 0.001 mm,加载位移增大值 $\Delta = 0.001$ mm,总共运行 200 步,混凝土试件的空间损伤演化过程如图 1 所示。混凝土材料的不均匀性导致应力的分布也呈现不均匀性,因此裂纹扩展的形式很复杂,边界粗糙,且出现裂纹分岔现象;自发组织的协同作用在加载过程中起主

导作用,小裂纹的发展成为系统发展的主要表现。

表 1 试件参数表

Tab.1 The parameters of specimens

控制参数	参数值	控制参数	参数值	力学参数	参数值
压拉比系数	10	最大拉应变系数	1.5	尺寸/mm	200×100
残余阈值系数	0.1	最大压应变系数	200	细观抗压强度/MPa	30 000
相变准则	Mor-coulomb 准则	摩擦角/(°)	30	弹性模量/MPa	40

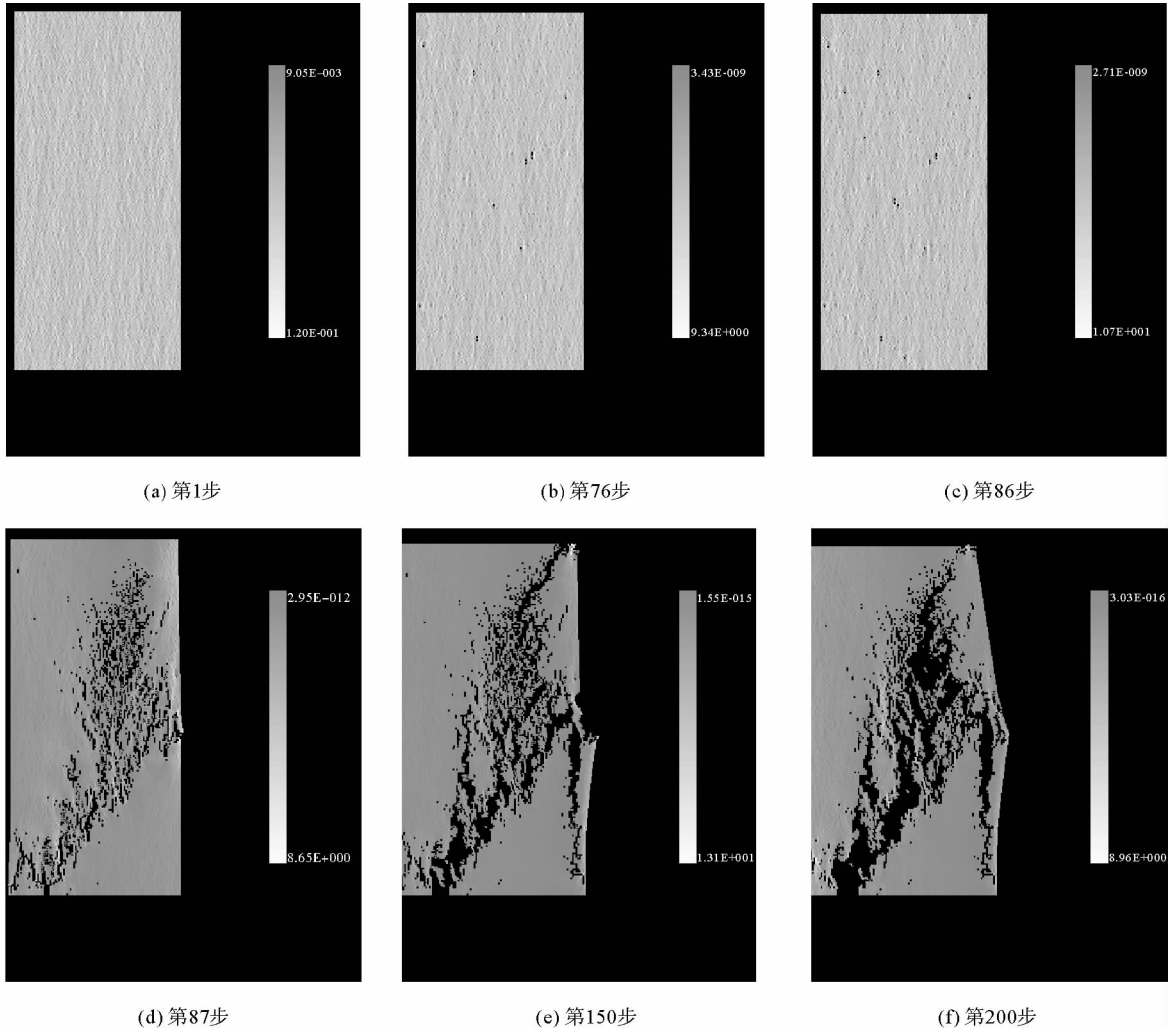


图 1 混凝土试件的空间损伤演化图

Fig.1 The evolution of concrete damage in space

加载初期,声发射事件为 0,应力增大到 $\sigma=25\%\sigma_{\max}$ 时,开始产生声发射事件; $25\%\sigma_{\max}<\sigma<65\%\sigma_{\max}$ 时,声发射事件开始增多,但增长幅度和涨落幅度都较小,声发射源呈随机分布状态(图 1、图 2); $65\%\sigma_{\max}<\sigma<90\%\sigma_{\max}$ 时,声发射事件由于自组织作用呈现显著地涨落式上升,在峰值应力之前($90\%\sigma_{\max}<\sigma<90\%\sigma_{\max}$)的一段加载步,声发射事件有一个衰减(图 3);达到峰值应力后,位移和应力分布状态都发生突变,声发射事件也发生突变(图 4)。

峰值强度之后的声发射事件主要集中在宏观破裂处,总体呈衰减趋势,但仍有涨落现象;随着应力的继续增大,系统的整体性能彻底破坏,声发射峰值事件和声发射小事件呈现均势状态,声发射源呈现一种无序性,可以视为混沌效应,最终不再产生声发射现象(图 5)。由上述数值实验可知,声发射事件的协同演化机

理和混沌效应与实际是吻合的。

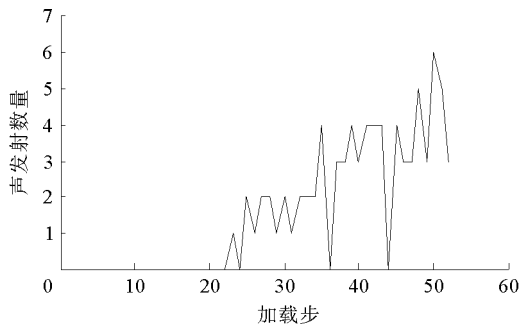


图2 0~54步声发射数量-加载步曲线

Fig. 2 0-54 step AE count-step curve

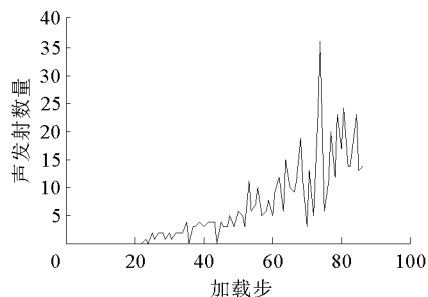


图3 0~86步声发射数量-加载步曲线

Fig. 3 0-86 step AE count-step curve

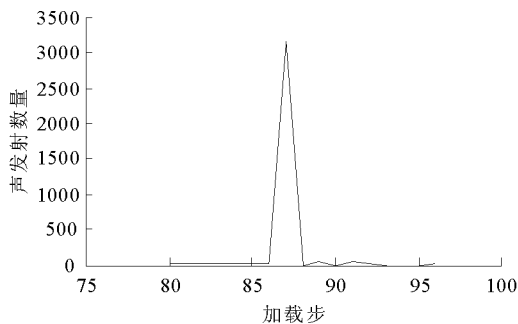


图4 80~96步声发射数量-加载步曲线

Fig. 4 80-96 step AE count-step curve

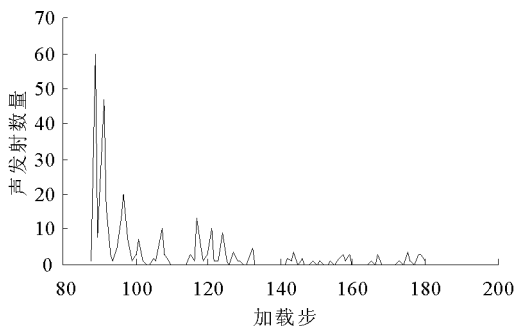


图5 88~200步声发射数量-加载步曲线

Fig. 5 88-200 step AE count-step curve

4 结论

1) 混凝土声发射的演化具有协同效应。加载初期声发射事件较少且随机分布,随着应力增长,声发射事件逐渐向宏观破坏处聚集,达到峰值应力后声发射事件发生突变,随后迅速衰减至不再有声发射。由于自组织作用,声发射过程一直伴随着涨落现象。

2) 单轴压缩条件下的混凝土声发射具有倍周期分岔现象,即混沌效应。

3) 应用 RFPA 软件进行数值模拟,验证了协同学理论分析混凝土声发射的可行性和正确性,为研究混凝土声发射提供了新的理论和方法。

参考文献:

- [1] 纪洪广. 混凝土材料声发射性能研究与应用[M]. 北京:煤炭工业出版社,2004.
- [2] 王明. 混凝土类材料破坏过程的声发射试验与理论研究[D]. 厦门:厦门大学,2008.
- [3] 姜福香,万小梅,赵铁军,等. 轴拉荷载作用下混凝土耐久性损伤及自愈合机理研究[J]. 混凝土,2011,9(3):8-11.
JIANG Fuxiang, WAN Xiaomei, ZHAO Tiejun, et al. Durability damage and self-healing mechanism of concrete under uniaxial tensile loading[J]. Concrete, 2011, 9(3): 8-11.
- [4] 于广明,魏晔,潘永战,等. 混凝土声发射规律的协同学研究及可视化模拟[J]. 青岛建筑工程学院学报,2005,26(4):1-4.
YU Guangming, WEI Ye, PAN Yongzhan, et al. Synergetic study and eyeable simulation of AE laws in the course of concrete break[J]. Journal of Qingdao Institute of Architecture and Engineering, 2005, 26(4): 1-4.
- [5] 王贵友. 从混沌到有序:协同学简介[M]. 武汉:湖北人民出版社,1987.
- [6] 郭治安. 协同学入门[M]. 成都:四川人民出版社,1988.
- [7] 谭云亮,王泳嘉,朱浮声,等. 顶板活动过程的自组织演化研究[J]. 岩石力学与工程学报,1997,16(3):258-265.
TAN Yunliang, WANG Yongjia, ZHU Fusheng, et al. Self-organization evolution of roof movement[J]. Chinese Journal of Mechanics and Engineering, 1997, 16(3): 258-265.
- [8] 唐春安,王述红,傅宇方. 岩石破裂过程数值分析[M]. 北京:科学出版社,2003.