

文章编号:1673-2049(2008)03-0042-05

混凝土受压过程中声发射数的 灰色模型研究

林 峰,李庶林,薛云亮,王 明

(厦门大学 建筑与土木工程学院,福建 厦门 361005)

摘要:针对在混凝土单轴受压破坏全过程的声发射试验中,采用传统 GM(1,1)灰色模型多步预测分析所得预测值普遍较实测值偏大、预测精度偏低的问题,通过引进预测值折减系数,重点探讨了折减系数的特点。结果表明,折减系数在预测曲线起点处基本为一常数,在终点处基本与已知数据百分数呈线性关系。基于上述特点通过插值求其折减系数来合理修正传统的灰色模型,建立起折减修正 GM(1,1)灰色模型。通过该修正 GM(1,1)灰色模型对室内声发射试验建立的预测模型,其精度较传统 GM(1,1)灰色模型有较大提高。

关键词:混凝土;灰色模型;声发射;折减系数;预测精度

中图分类号:TU37 **文献标志码:**A

Study of Number of Acoustic Emission with Gray Model in Compression Process of Concrete

LIN Feng, LI Shu-lin, XUE Yun-liang, WANG Ming

(School of Architectural and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China)

Abstract: The whole compression failure process of acoustic emission test in single axial of concrete was established using GM(1,1) gray model multi-step prediction. The prediction values were larger than the real values and the precision of prediction was not enough. The characteristics of the reduced coefficients were emphatically discussed by introducing the prediction value reduced coefficients. Results show that the reduced coefficients are almost constant at the beginning of prediction curves and linear relation between the reduced coefficients and known data percent is assumed in the end point. Based on above characteristics, the interpolation method is used to solve the reduced coefficients in order to correctly modify traditional gray model, and the reduced modified GM(1,1) gray model can be built. Through modifying GM(1,1) gray model, a prediction model is set up in indoor acoustic emission test, and the precision of prediction by the correct model of GM(1,1) gray model is more advanced than the precision of prediction by the traditional GM(1,1) gray model.

Key words: concrete; gray model; acoustic emission; reduced coefficient; precision of prediction

收稿日期:2008-06-02

基金项目:国家高技术研究发展计划("八六三"计划)项目(2006AA06Z117);国家自然科学基金项目(10572122);

厦门大学人才引进基金项目(xk1005)

作者简介:林 峰(1984+),男,福建福清人,工学硕士研究生,E-mail:linfeng840202@163.com。

0 引 言

声发射(AE)是指材料中局域源快速释放能量而产生瞬态弹性波的现象。声发射信号在一定程度上反映了材料的受力状态,声发射活动的特征可提供现场危险程度的前兆特征,进而实现连续的动态监测^[1]。混凝土等脆性材料在受力破坏时产生的声发射信号存在一定的规律。近年来,根据已知声发射信号来预测声发射信号发展趋势,进而提前预判材料的破坏程度已经成为监测中一种非常重要的手段,针对这一特点多采用诸如灰色理论等具有预测功能的数学模型,基于此类模型的声发射预测研究已取得较大进展,纪洪广等^[2]应用声发射技术结合灰色理论应用于混凝土断裂分析。程学军等^[3]利用声发射技术提出了灰色-突变理论。张星星^[4]通过声发射监测技术建立了灰色理论的预测方法。本文中笔者在上述基础上针对声发射数数据量大、需多步预测等特点,基于传统 GM(1,1)灰色模型,引入折减系数,对传统 GM(1,1)灰色模型折减修正,建立起的预测模型具有较高的预测精度。

灰色理论的模型选择是基于关联度的概念,基于有限范围内近似的关联度收敛原理,根据灰色理论微分方程等观点和方法,建立微分方程模型。由于灰色模型能根据已知的数据预测声发射信号的发展趋势,因此只要有足够的已知信息就可以保证预测的精度。

按时间序列的声发射数是混凝土材料在受压过程中反映其材料破坏程度的重要的声发射信号。一次声发射就代表一次微破裂,因此对混凝土在受压过程中声发射数的发展趋势做出预测具有重要的意义^[5]。

1 灰色模型

1.1 基本原理

灰色系统是既含有已知信息,又含有未知信息或非确定信息的系统,这样的系统普遍存在。研究灰色系统的重要内容之一是如何从一个不甚明确的、整体信息不足的系统抽象并建立起一个模型,该模型能使灰色系统的因素由不明确到明确,由知之甚少发展到知之较多^[6]。

1.2 建模步骤

灰色系统理论是将一组按时间排列的随机上下波动的序列进行累加,生成有规律的数据序列,然后进行建模预测。灰色预测模型形如 GM(k, h),当取

$k=1, h=1$ 时则为单序列 1 阶线性动态 GM(1,1)模型。

GM(1,1)模型是 1 阶微分方程模型,其形式为

$$\frac{dx}{dt} + ax = u \tag{1}$$

式中: x 为模型数列; t 为时间序列; a, u 为待定参数。

按照模型原理,其建模步骤如下:

(1)对原始数列 $x^{(0)}$ 做一次累加,即

$$x^{(1)}(t) = \sum_{i=1}^t x^{(0)}(i) \quad t = 1, 2, \dots, n \tag{2}$$

式中: $x^{(0)}$ 为原始数列; $x^{(1)}$ 为累加数列; n 为原始数列个数。

累加生成序列建模的优点是强化突出其趋势性因素,淡化削弱原始数列的随机因素。

(2)对 $x^{(1)}(t)$ 按式(1)进行 1 阶线性微分,根据 GM(1,1)模型有

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u \tag{3}$$

(3)用最小二乘法求出式(3)中的待定参数 a, u ,得

$$(a, u)^T = (B^T B)^{-1} B^T Y_n$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} [x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)] & 1 \\ -\frac{1}{2} [x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)] & 1 \\ \dots & \dots \\ -\frac{1}{2} [x^{(1)}(n) + x^{(1)}(n+1)] & 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$Y_n = (x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n))$$

时间响应函数为

$$\hat{x}^{(1)}(n+m) = [x^{(0)}(1) - \frac{u}{a}]e^{-a(n-m)} + \frac{u}{a} \tag{5}$$

式中: $\hat{x}^{(1)}$ 为预测累加数列; m 为预测总步数。

(4)还原计算,其公式为

$$\hat{x}^{(0)}(n+k) = \hat{x}^{(1)}(n+k) - \hat{x}^{(1)}(n+k-1) \tag{6}$$

$$k = 1, 2, \dots, m$$

式中: $\hat{x}^{(0)}$ 为预测数列; k 为预测步数。

针对声发射数数据量记录时间间隔短、数据量大的特点,传统的灰色预测 GM(1,1)模型为一步预测模型,即 $m=1$ 。此模型预测精度较高,但不太适合用于大数据量、多步声发射数预测。因此笔者对传统的灰色预测 GM(1,1)模型进行了修正,使其能多步预测,即 $m>1$ 。修正模型可以实现大数据量、多步预测,但预测精度也会有所下降,下面对该模型

进行修正,从而提高其预测精度。

2 声发射灰色模型

2.1 试验设备及试验内容

混凝土轴抗压试验在 250 t 的 MTS815 型全数字式试验系统上进行,配合采用多通道 DYF-2 声发射仪测试声发射特征。试验测量混凝土受力变形全过程的应力、应变曲线,同步测试声发射事件特征。试验可获得压力、位移、应力、应变、声发射事件累计数与时间等参数,相关试验结果见文献[7]、[8]。笔者在这些试验测试数据中,选取典型的试验数据,进行建模分析。

2.2 模型的建立

根据试验声发射数据,以 5 s 为 1 个时间间隔记录下一系列按时间序列的声发射数据,现提取 1 组声发射数据来建立灰色模型。原始声发射数序列为

$$x^{(0)} = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_i, \dots, a_n) \quad (7)$$

式中: a_i 为时间 $t = 5i$ 时记录的声发射数,即时间序列 t 以 5 s 为 1 个时间间隔。

对原始数据 $x^{(0)}$ 采用上述灰色理论建模步骤,由式(4)解出 $a、u$ 。计算出时间响应函数 $\hat{x}^{(1)}$,代入式(5)反算出预测数列 $\hat{x}^{(0)}$ 。根据已知数据的比例计算的 $a、u$ 值见表 1。

表 1 不同比例已知数据的 $a、u$ 值

Tab. 1 Values of a, u on Different Percentage Known Data					
$T_0 / \%$	20	40	60	80	90
a	- 0.054	- 0.036	- 0.025	- 0.018	- 0.015
u	27.574	52.732	115.302	212.243	269.473

注: T_0 为已知数据占总数据的百分比, $T_0 = \frac{p}{q+p} \times 100\%$, p 为

已知数据个数, q 为预测数据个数。

根据表 1 算出的 $a、u$ 值,应用式(5)进行多步预测,图 1 为根据已知数据占总数据不同百分比进行计算得到的预测曲线。

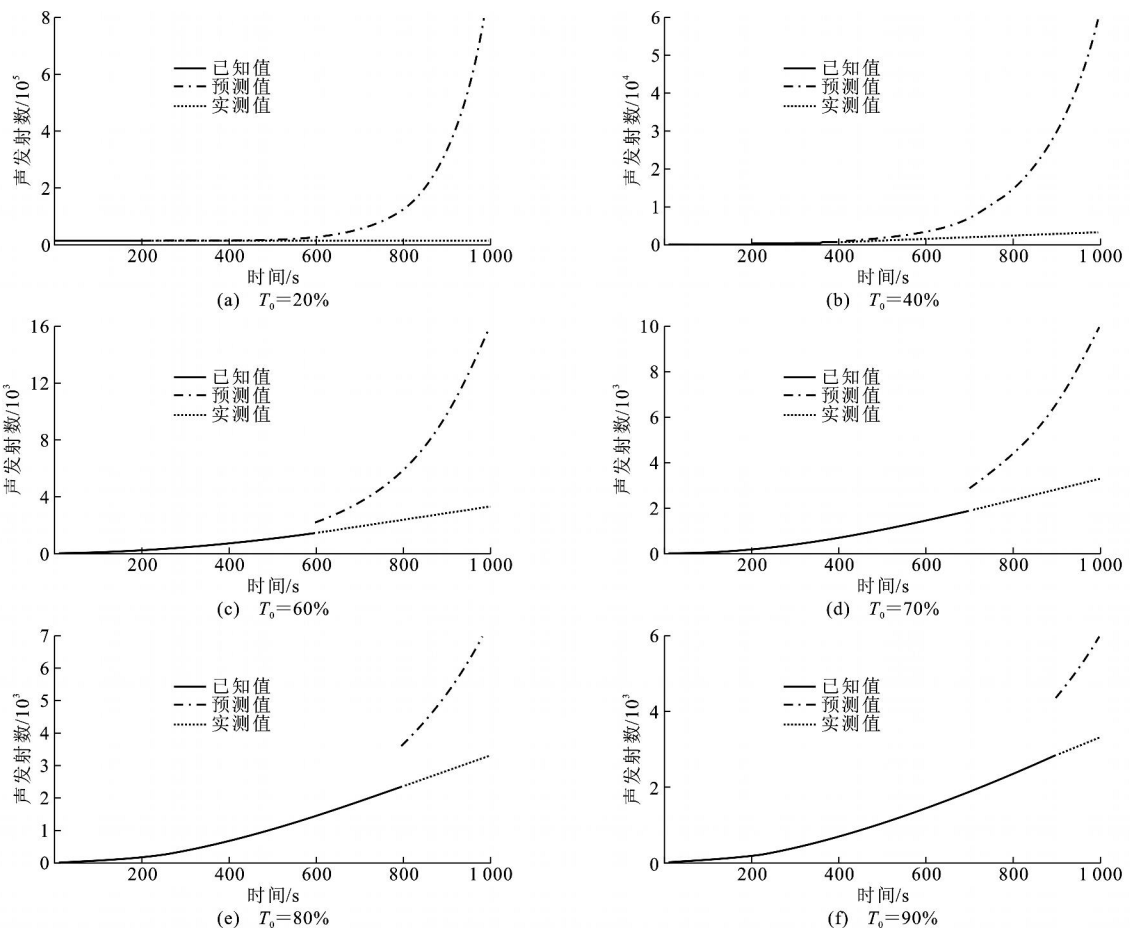


图 1 不同 T_0 时的预测曲线

Fig. 1 Forecast Curves on Different T_0

由图 1 可以看出:根据 20% ~ 90% 的已知数据来预测整个时间序列上的声发射数,其中 20% ~

60% 已知数据预测值与实测值差别较大,预测结果不理想,参考价值不大;60% ~ 90% 已知数据预测值

与实测值逐渐接近,有一定的参考价值。从图 1 还可以看出,预测值明显较实测值偏大,有必要对模型进行折减修正。

2.3 模型的修正

基于上述分析,预测值比实测值偏大。本文中通过对灰色模型建模步骤 4 进行折减,得模型的预测修正值 P_m 为

$$P_m = P_c \quad (8)$$

式中: α 为折减系数; P_c 为预测计算值。

表 2 给出了预测曲线在起点处的折减系数 α_0 的平均值。由表 2 可知,随着已知数据变化,其折减系数变化不大,均值为 0.650,取 $\alpha_0 = 0.650$ 为预测值曲线起点处折减系数。

表 2 预测曲线起点处的折减系数

Tab. 2 Reduced Coefficients at Beginning of Forecast Curve

$T_0 / \%$	60	70	80	90
AE 数预测值	2 266	2 987	3 741	4 496
AE 数实测值	1 495	1 954	2 425	2 931
折减系数	0.660	0.654	0.648	0.652
平均折减系数	0.650			

表 3 给出了预测曲线在终点处的折减系数 α_1 。从表 3 可以看出, α_1 随 T_0 增大而变大。图 2 为预测值曲线终点处折减系数 α_1 的线性回归曲线。从图 2 可以看出, α_1 与 T_0 有很好的线性关系,可采用线性回归计算其关系式。

表 3 预测曲线终点处的折减系数

Tab. 3 Reduced Coefficients at End Point of Forecast Curve

$T_0 / \%$	60	70	80	90
AE 数预测值	14 727	9 495	7 096	5 763
AE 数实测值	3 313	3 313	3 313	3 313
折减系数	0.225	0.349	0.467	0.575

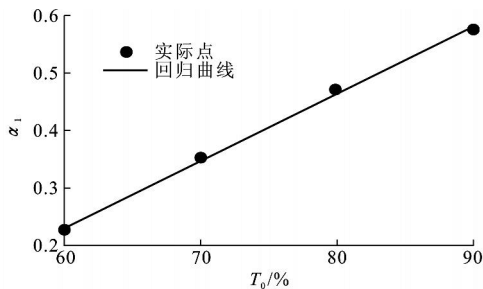


图 2 α_1 的线性回归曲线

Fig. 2 Linear Regression Curve of α_1

线性回归方程为

$$\alpha_1 = -0.472 0 + 0.011 7 T_0 \quad (9)$$

现已知预测值曲线起点处折减系数 α_0 与终点

处折减系数 α_1 , 预测值曲线中各点采用线性插值法求出的各个折减系数为

$$\alpha(t) = \alpha_0 + (\alpha_1 - \alpha_0) \frac{t - 980 T_0}{980 - 980 T_0} \quad (10)$$

式中: $\alpha(t)$ 为 t 时刻所对应的折减系数。

对式(6)进行折减修正得

$$\hat{x}^{(0)}(t) = \alpha(t) [\hat{x}^{(1)}(t) - \hat{x}^{(1)}(t-1)] \quad (11)$$

重新计算 $\hat{x}^{(0)}$, 在 60% $T_0 < 100\%$ 范围内, 选取几组数据对修正效果进行比较, 结果见图 3。

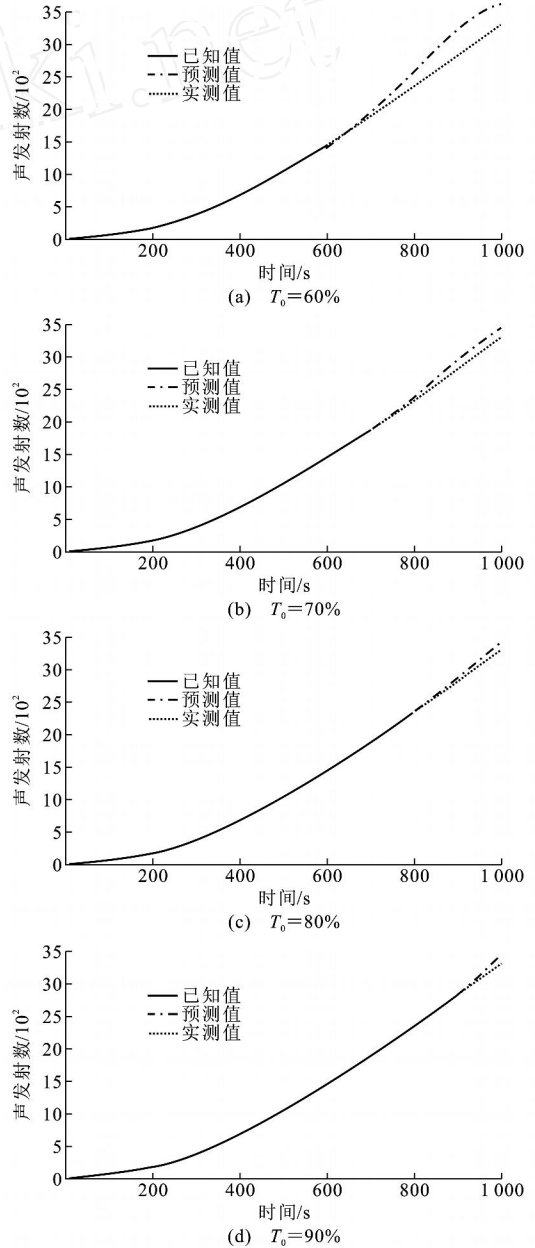


图 3 修正后不同 T_0 时的预测曲线

Fig. 3 Forecast Curves on Different T_0 After Correcting

图 3 中的预测模型经过折减修正, 与图 1 中未修正的相比, 预测精确度有大幅的提高。在不同已知数据占不同比例下其预测精确度也有很大不同,

当已知数据百分比大于 80% 以上,其预测值与实测值相当接近。总体来说,已知数据越多、比例越大,预测精确度越高。

3 结 语

(1) 根据灰色系统的科学理论,运用灰色理论 GM(1,1) 模型对声发射累计事件数进行了预测分析。结果表明,对于 GM(1,1) 灰色模型,当已知数据较少时,预测值与实测值相差较大,甚至当已知数据达到预测全部数据的 90% 时,其预测误差仍然较大,因此必须对 GM(1,1) 灰色模型进行修正。

(2) 对 GM(1,1) 灰色模型通过定义一个折减系数进行修正,给出了针对混凝土的折减系数的表达式。结果表明,修正后的灰色模型预测值与实测值较为接近,误差较小。

(3) 建立的修正后的 GM(1,1) 灰色模型,对于室内声发射试验数据有较好的预测效果,为进一步的声发射监测预报研究提供了一种新方法。

参考文献:

References:

- [1] 腾山邦久. 声发射(AE)技术的应用[M]. 冯夏庭,译. 北京:冶金工业出版社,1996.
KATSU YAMA K. Application of AE Techniques [M]. Translated by FENG Xia-ting. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996.
- [2] 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.
JI Hong-guang, JIA Li-hong, LI Zao-ding. Grey Cusp Catastrophe Model of AE Parameters and Its Application in Fracture Analysis of Concrete Material[J]. Acta Acustica, 1996, 21(6): 935-940.
- [3] 程学军,蔡美峰,李长洪. 灰色-突变模型及其在声发射监测预报中的应用[J]. 中国矿业, 1997, 6(2): 37-39.
CHENG Xue-jun, CAI Mei-feng, LI Chang-hong. A Grey-catastrophe Model and Its Application in Acoustic Emission Monitoring[J]. China Mining Magazine, 1997, 6(2): 37-39.
- [4] 张星星. 灰色预测在矿山安全生产中的应用[J]. 湖南有色金属, 2001, 17(2): 51-53.
ZHANG Xing-xing. Application of Grey Prediction to Safety in Production in Mines[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2001, 17(2): 51-53.
- [5] 李庶林,尹贤刚,王泳嘉,等. 单轴受压岩石破坏全过程声发射特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2499-2503.
LI Shu-lin, YIN Xian-gang, WANG Yong-jia, et al. Studies on Acoustic Emission Characteristics of Uniaxial Compressive Rock Failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2499-2503.
- [6] 袁嘉祖. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京:科学出版社, 1991.
YUAN Jia-zu. Theory and Application of Grey Prediction[M]. Beijing: Science Press, 1991.
- [7] 王明,李庶林. 基于声发射速率过程理论的岩石声发射特性研究[J]. 厦门大学学报:自然科学版, 2008, 47(2): 211-215.
WANG Ming, LI Shu-lin. Study on Acoustic Emission Characteristics of Rock Based on Acoustic Emission Rate Process Theory[J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2008, 47(2): 211-215.
- [8] 王明. 混凝土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.
WANG Ming. Acoustic Emission Experiment and Theory Research During the Fracture of Concrete-like Materials[D]. Xiamen: Xiamen University, 2008.

《建筑科学与工程学报》被美国《化学文摘》、《剑桥科学文摘》等国际权威检索系统收录

《建筑科学与工程学报》由于学术质量及国际影响力大幅度提高,已被美国《化学文摘》、《剑桥科学文摘》以及波兰《哥白尼索引》收录。美国《化学文摘》(Chemical Abstracts, CA)创刊于 1907 年,由美国化学文摘服务社(CAS)编辑出版,是涉及学科领域最广、收集文献类型最全、提供检索途径最多、部卷也最为庞大的一部著名的世界性检索工具。美国《剑桥科学文摘》(Cambridge Scientific Abstracts, CSA)是基于网络服务的文献信息检索系统,包括 60 多个数据库,覆盖的学科范围包括:生命科学、水科学与海洋学、环境科学、计算机科学、材料科学以及社会科学,检索结果为文献的题录文摘信息。