

文章编号: 1000-4750(2010)03-0228-08

# 加卸载响应比方法在结构灾变预测中的应用

\*张浪平<sup>1,2</sup>, 余怀忠<sup>3</sup>, 尹祥础<sup>1,2</sup>, 梁乃刚<sup>2</sup>

(1. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036; 2. 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100190;

3. 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室, 北京 100029)

**摘 要:** 加卸载响应比方法为非均匀脆性介质的灾变评估提供了新的思路, 即用加载与卸载响应的差别来定量刻画介质的损伤程度。为了验证加卸载响应比方法应用于结构失效分析的有效性, 首先运用加卸载响应比方法对意大利那不勒斯大学完成的 1 个 2 层楼房的加卸载实验进行分析, 结果表明: 在临近结构破坏之前加卸载响应比时间序列确实出现了异常明显的升高及回落; 进而引入岩石破裂声发射实验进行研究, 发现采用轴向应变做响应量计算得到的加卸载响应比时间序列与楼房结构的响应比曲线在演化趋势上非常一致。进一步比较声发射能量率和宏观应变做响应的加卸载响应比时间序列, 发现两者有着较为同步的稳定、异常、升高至峰值、急剧回落的演化过程。为了明确加卸载响应比与结构内部损伤的联系, 基于损伤力学方法从理论上对此进行了分析, 很明显加卸载响应比值在一定程度上可以反推结构的损伤程度, 其演化可以为大型结构健康评估和工程灾变分析提供有益的参考及借鉴。

**关键词:** 加卸载响应比; 2 层楼房结构; 损伤力学; 岩石破裂声发射实验; 灾变预测

**中图分类号:** TU318 **文献标识码:** A

## APPLICATION OF THE LOAD/UNLOAD RESPONSE RATIO METHOD IN CATASTROPHIC FAILURE PREDICTION OF STRUCTURES

\*ZHANG Lang-ping<sup>1,2</sup>, YU Huai-zhong<sup>3</sup>, YIN Xiang-chu<sup>1,2</sup>, LIANG Nai-gang<sup>2</sup>

(1. Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China;

2. State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The Load/Unload Response Ratio (LURR) method is a new approach to predict the failure of heterogeneous brittle media, i.e. using the ratio between response rates during periods of loading and unloading to describe the damage state of the media. To show the effectiveness of the approach, this paper firstly evaluated the LURR time series associated with a loading and unloading experiment on a two-layer structure carried out in University of Naples in Italy. The result shows that the LURR time series climb to an anomalously high peak and then decrease rapidly prior to the final failure. Moreover, the rock failure acoustic emission (AE) experiment is conducted, and the experiment data is evaluated by the LURR method with macro-axial-strain as response. Results indicate that the LURR curve is very consistent with that of the two-layer structure experiment. Then the LURR curves are compared with AE energy rate and macro-axial-strain as response respectively. It is found both LURR values show identical evolution: initial stability, abnormality, peak value, and decrease sharply prior to the

收稿日期: 2008-10-31; 修改日期: 2009-06-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(10721202, 40704007); 中国地震局地质研究所基本科研业务费项目(DG-IGCEA-0607-1-16); 国家 973 重点项目(2004CB418406)

作者简介: \*张浪平(1982—), 男, 湖南涟源人, 助研, 博士, 从事脆性介质破坏前兆与地震预测研究(E-mail: zhanglp@lnm.imech.ac.cn);  
余怀忠(1975—), 男, 安徽合肥人, 副研究员, 博士, 从事脆性介质破坏前兆与地震预测研究(E-mail: yuhz@lnm.imech.ac.cn);  
尹祥础(1935—), 男, 河南开封人, 研究员, 从事地震力学与地震预测研究(E-mail: xcyin@public.bta.net.cn);  
梁乃刚(1944—), 男, 河南博爱人, 研究员, 博士, 从事计算固体力学研究(E-mail: lng@lnm.imech.ac.cn).

final fracture. In order to determine the relation between LURR evolution and the damage of the structure, the LURR values are combined with damage variable ( $D$ ) to provide the damage estimation of the structure. The results shown in the paper may suggest that the LURR method provides a new approach for the health assessment of large scale structures or ancient buildings and the prediction of engineering catastrophic failure.

**Key words:** Load/Unload Response Ratio (LURR); two-layer structure; damage mechanics; rock failure Acoustic Emission (AE) experiment; catastrophic failure prediction

非均匀脆性介质的破坏是一个前沿研究课题,涉及许多重要的自然现象(如地震、矿震、水库地震、滑坡等)和重大工程背景(如桥梁断裂、房屋倒塌、矿难),具有广阔的研究前景。由于这些灾变往往会带来很大的人员伤亡和巨大的经济损失,所以其研究又具有重大的社会意义与经济意义。固体力学中的弹性力学、塑性力学、强度理论、断裂力学、损伤力学等分支均对此问题做出了重大的贡献,但是要从力学(物理)上解决固体的破坏机理,从而精确地预测固体中的灾变问题,目前的研究还远远不够。比如要对地震发生做出预测,又或者要对一座千年古建筑的健康水平进行估计,就现有的科学水平还不能很好地回答这些难题。要对灾变事件进行预测,都必须对其机理和过程有规律性的认识。比如地震孕育过程的物理实质就是震源区介质的变形、损伤、演化、破坏或失稳过程,是一个典型的力学问题。研究地震预测时,遇到的力学问题和通常的力学问题又有所不同。通常力学问题的解决需要知道:本构关系、边界条件、初始条件以及某些力学量的变化历史(如流变)。在地震预测研究或者对古建筑进行健康评估,这些条件都知之甚少或者完全不知道的,只能通过地震台网监测或者实验测试手段知道其中某些物理量的变化。如何从“物理量的变化”提取介质损伤程度的信息呢?根据这一思路尹祥础提出了一个定量表征介质损伤程度的参数-加卸载响应比<sup>[1-2]</sup>。经过多年的地震预测实践,加卸载响应比方法得到了比较广泛的应用和研究,并不断取得新的进展<sup>[3-9]</sup>。除了在地震预测领域以外,加卸载响应比方法在边坡稳定性<sup>[10-11]</sup>和滑坡<sup>[12]</sup>等研究领域都有了比较广泛的应用。在大的灾变发生之前,加卸载响应比时间序列通常会发生明显的异常变化。这一现象通常可以被用作研究非均匀脆性介质灾变的重要前兆以及损伤分析的重要指标。

从宏观角度看,材料的应力-应变曲线是对材料力学行为的全面描述,图1是典型的脆性介质(岩石)

的应力-应变曲线。如果载荷单调增加,材料将分别经历弹性变形、损伤、破坏(或失稳)等过程。弹性阶段的本质特征是其可逆性,即加载过程和卸载过程是可逆的,换句话说就是其加载响应和卸载响应是相同的。而损伤阶段是一个不可逆过程,加载路径与卸载路径是不一致的,反映在应力-应变曲线就是加载响应率大于卸载响应率,这种加载与卸载的差别就能揭示材料由于损伤导致的弱化。把加载响应与卸载响应的比值定义为加卸载响应比,就可以用来定量刻画介质的损伤程度。

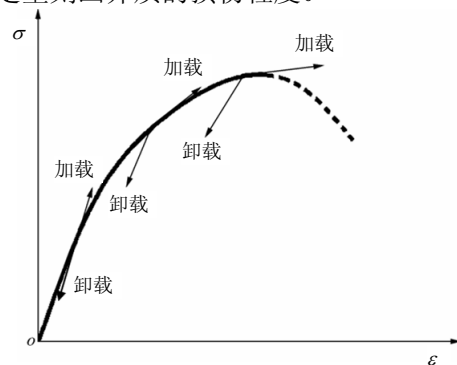


图1 岩石的应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain curve of rock

为了定量的刻画加载响应与卸载响应的差别,定义了下面两个基本量:

第一个是响应量  $X$ , 将其定义为:

$$X = \lim_{\Delta P \rightarrow 0} \frac{\Delta R}{\Delta P} \quad (1)$$

其中,  $\Delta P$  和  $\Delta R$  分别表示载荷  $P$  时, 载荷  $P$  和响应  $R$  对应的增量。

另一个是加卸载响应比, 将其定义为:

$$Y = \frac{X_+}{X_-} \quad (2)$$

这里的  $X_+$  和  $X_-$  分别表示加载响应量与卸载响应量。

很明显, 介质处于弹性阶段时  $X_+ = X_-$ , 加卸载响应比值  $Y=1$ , 到了损伤阶段时  $X_+ > X_-$ , 就有  $Y > 1$ , 而且随着损伤的增加,  $Y$  值也会随着增加, 当介质临近破坏时  $Y$  值达到最大值。因此加卸载响应

比  $Y$  就可以定量刻画介质的损伤程度。

既然加卸载响应比可以定量刻画脆性介质的损伤情况,那么它是否能衡量结构的损伤程度呢?带着这样的思考展开了文中的工作。本文尝试进一步将加卸载响应比方法与工程实践相结合,将方法应用于工程结构的灾变分析。为了验证方法的有效性,我们以意大利那不勒斯大学所完成的2层楼房结构的加卸载实验,以及我们所进行的岩石破裂声发射实验为例进行研究,并结合损伤力学模型对此进行分析和讨论。

## 1 二层楼房实验

### 1.1 实验系统

这一部分将介绍由意大利那不勒斯大学完成的对1座2层楼房结构进行的加卸载实验。该结构是1个2层的砖墙楼房,楼房结构的纵剖面见图2(a),整体见图2(b),在楼房的一侧通过钢架对楼房进行加载和卸载,钢架见图2(c)。实验过程经历加载、卸载,反向加载、再卸载等多个循环。记录了实验过程的载荷值,以及相应载荷下1层、2层顶部的平均横向位移,实验过程中的载荷-位移曲线见图3。从图3可以看出,当载荷达到2500kN时,楼房结构失去承载能力。

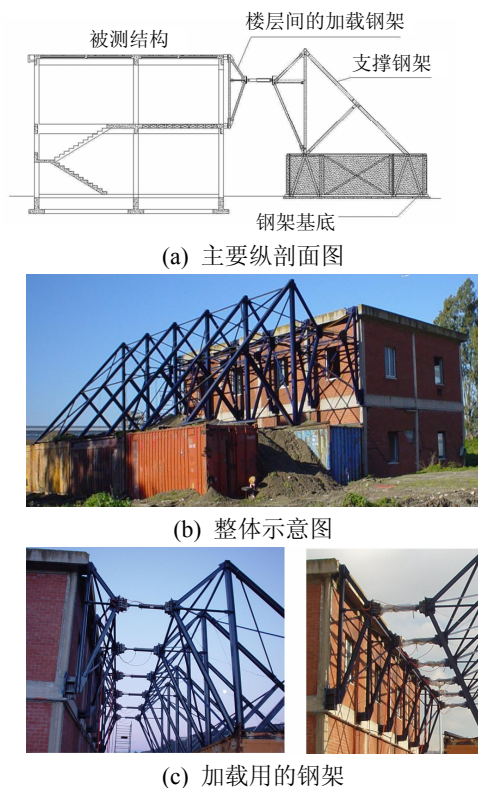


图2 实验示意图

Fig.2 Sketch maps of the experiment

线见图3。从图3可以看出,当载荷达到2500kN时,楼房结构失去承载能力。

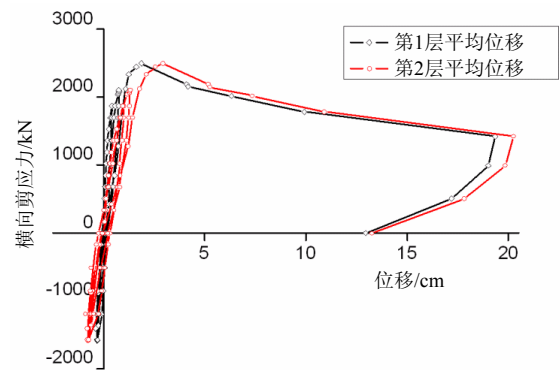


图3 载荷-位移曲线

Fig.3 Curves of load vs. displacement

### 1.2 实验结果分析

对实验结果进行加卸载响应比分析。以楼房结构1层、2层顶部的横向位移做为响应,对经历先加载、后卸载,或是反向加载、再卸载点进行响应比计算,并把这些点称之为加卸载点。加载过程中第1层的第1个加卸载点记为I-1点。以I-1点为例,先将加载路径和卸载路径的数据点进行拟合,再计算该点的加载斜率与卸载斜率,这样就得到了该点的加卸载响应比值。第1层的第2个加卸载点记为I-2点,第2层的第1个加卸载点记为II-1点、第2个记为II-2点,依次把实验过程中所有的加卸载点进行标记、分析,见图4。并且通过加载响应与卸载响应的比值计算出所有加卸载点的响应比值,见表1。将加卸载点的响应比值按加载过程中的先后顺序排列,给出了实验过程中加卸载响应比的时间序列,见图5。从图5中可以看出,整个实验过程响应比的值在加载初期比较低,而在结构破坏之前出现了明显的异常,这表明加卸载响应比可以用来预测结构的破坏。

表1 楼房结构加卸载响应比、损伤程度分析结果

Table 1 The analysis results of LURR, damage degree of two-layer structure

编号	载荷/kN	第1层			第2层		
		位移/cm	LURR	$D/D_F$	位移/cm	LURR	$D/D_F$
1	1871.7	0.41	3.87	0.79	1.00	3.71	0.78
2	-1583.4	-0.30	3.13	0.75	-0.76	3.12	0.73
3	-1402.4	-0.37	0.84	—	-0.78	1.42	0.35
4	-1572.1	-0.33	2.69	0.69	-0.79	1.91	0.54
5	2105.7	0.78	8.73	0.91	1.32	9.56	0.92
6	-1572.1	-0.29	1.27	0.26	-0.72	2.31	0.63

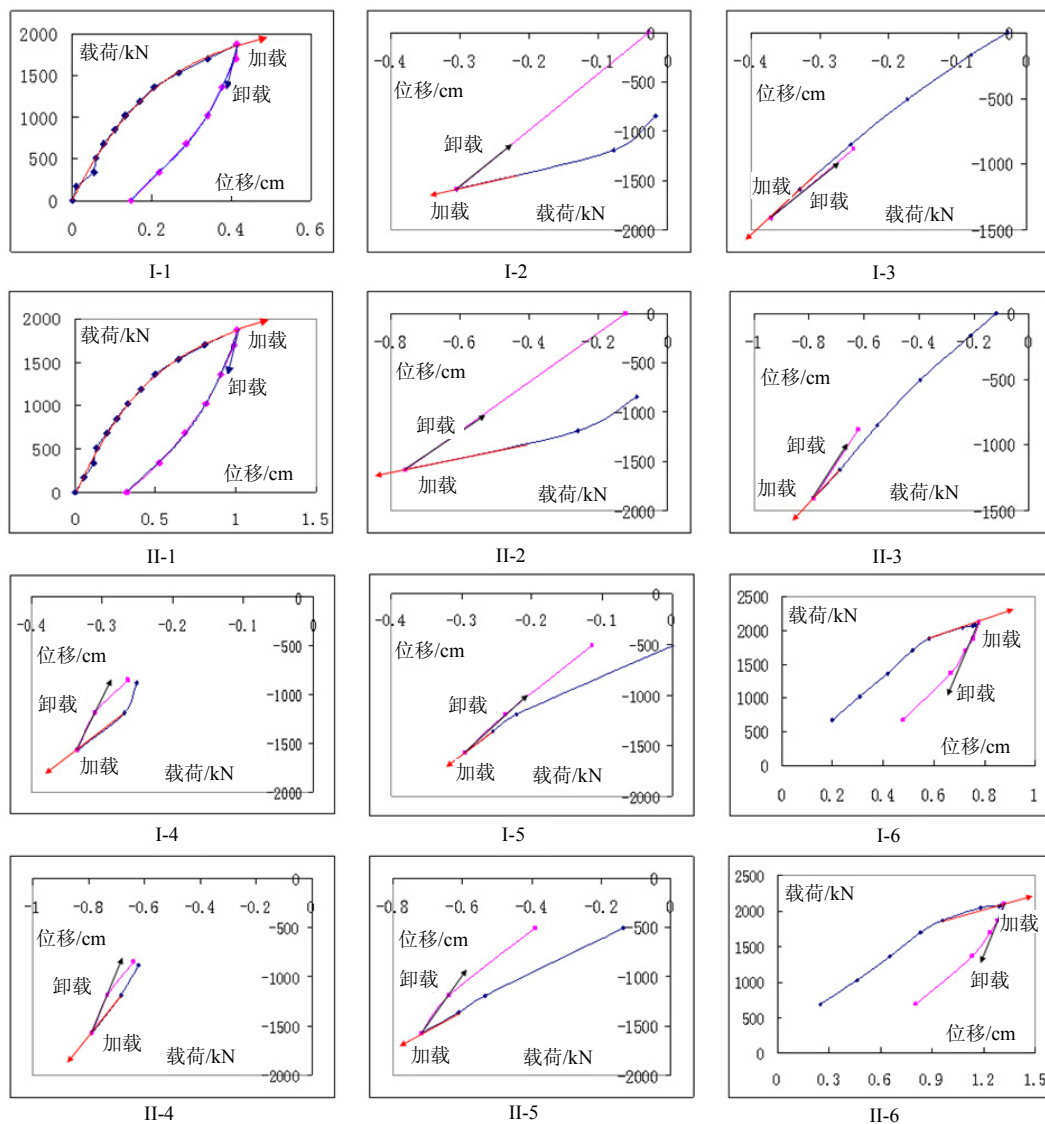


图 4 楼房实验的加卸载响应比分析

Fig.4 LURR analysis of two-layer structure experiment

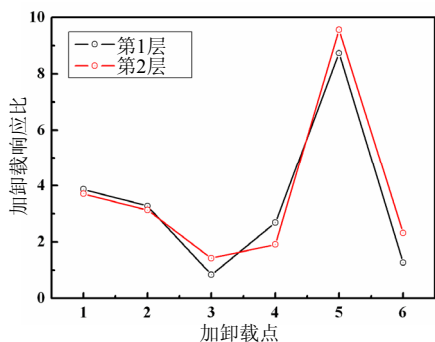


图 5 楼房实验的加卸载响应比曲线

Fig.5 LURR curves of two floors structure experiment

## 2 岩石破裂声发射实验及其加卸载响应比分析

第 2 部分用位移做响应量分析了楼房实验，发

现加载过程中响应比值在楼房破坏之前出现峰值、回落的现象，这表明加卸载响应比可以预测楼房的灾变破坏。我们将在这部分利用岩石破裂声发射实验数据，以岩石试件的轴向应变为响应量进行加卸载响应比分析，对此作进一步的研究。岩石材料与混凝土材料同属于非均匀脆性介质，其本构关系、损伤演化规律等具有类似性；另一方面，由于加卸载响应比方法并不依赖于系统所采用的加载方式，仅需对加卸载过程做出正确划分，就能对系统的稳定状态做出判断，因此这里可以合理采用岩石声发射实验进行分析。

2003 年，本课题组通过国际合作的方式进行了中尺度岩石破裂声发射实验<sup>[13-15]</sup>。该实验选用的花岗岩试件的尺寸为 360mm×300mm×25mm (长×宽×

高)。实验采用的加载设备为中国地震局地球物理研究所震源物理实验室的 MTS-100 伺服实验机, 进行双向加载以实现三向应力状态; 采用俄罗斯科学院 Ioffe 物理技术研究所的 A-Line16D 声发射系统对实验进行记录, 实验过程中可以对声发射进行实时定位, 还可以记录到完整的波形; 采用应变计测量整个实验过程中应变的变化。实验中为了模拟日月潮引力对地球的加载和卸载作用, 在常数加载率的轴向压力作用下, 再叠加上一个微小的正弦扰动。试件的尺寸、声发射探头的分布位置、加载情况见图 6。图 6 中  $P_2$  为侧压( $P_2=100\text{kN}$ ), 在整个加载过程中保持不变;  $P_1$  为轴压 ( $P_1=kt + A\sin(2\pi t/T)$ ), 其中扰动载荷的周期为 50s、振幅 2kN, 见图 7, 直至岩石破坏。实验过程中的轴向应力-应变曲线见图 8。

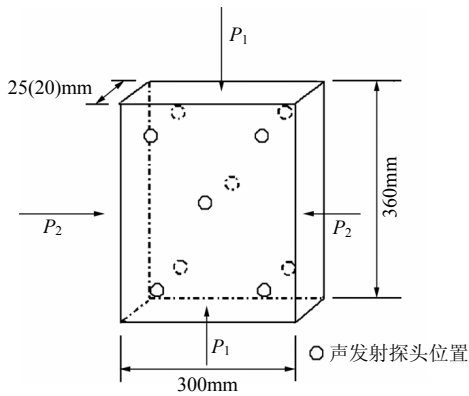


图 6 试件示意图、加载条件与声发射探头的布置方式 (圆圈表示探头位置)

Fig.6 Sketch of specimen, load condition and arrangement of AE probes (circles denote the positions of AE probes)

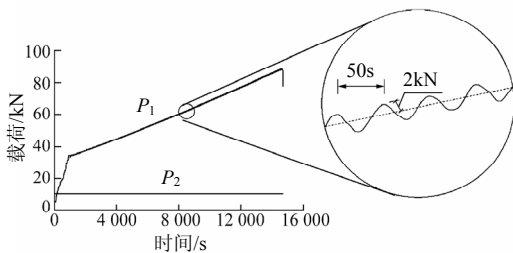


图 7 岩石实验的加载曲线

Fig.7 Curves of load vs. time in rock experiment

将轴向应变做为响应量, 根据定义式(2)可以将加卸载响应比的定义改写为:

$$Y = \frac{(\Delta\varepsilon_1)_+ / (\Delta P_1)_+}{(\Delta\varepsilon_1)_- / (\Delta P_1)_-} \quad (3)$$

由此根据实验中记录的载荷与应变的数据, 以 5 倍周期、即 250s 为计算时间窗, 可以计算出实验

过程中的加卸载响应比值, 见图 9(a)。图 9(a)中可以看出在破坏发生之前, 大约  $t=11000\text{s}$  时出现异常, 在  $t=12500\text{s}$  时异常升高至峰值, 随即下降, 不久岩石试样发生破裂(图中的黑色箭头表示)。

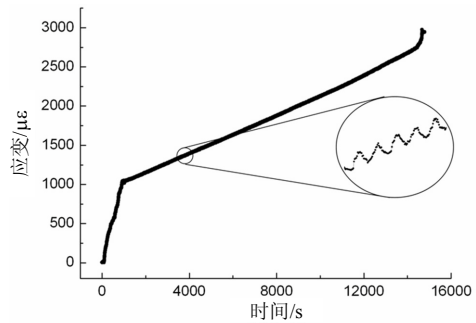


图 8 实验中记录的应变曲线

Fig.8 Curves of strain vs. time recorded in rock experiment

### 3 对比和分析

比较图 5 与图 9(a), 两者的响应比曲线在趋势上演化是一致的。在加载初期, 响应比的值都比较低, 随着载荷的增加, 响应比值不断升高, 在岩石破裂或者结构失稳之前响应比值都会出现峰值异常。这表明加卸载响应比方法不仅可以预测脆性连续介质的突变破坏, 也可用于楼房等砖墙结构的失稳破坏。

Zhang Huihui 等<sup>[15]</sup>利用本岩石破裂实验的声发射能量率的时间序列, 根据下面的式子进行了加卸载响应比分析:

$$Y_m = \frac{\left( \sum_{i=1}^{N^+} E_i^m \right)_+}{\left( \sum_{i=1}^{N^-} E_i^m \right)_-} \quad (4)$$

式中:  $E$  为声发射能量; “+”代表加载; “-”代表卸载;  $m$  可以取为 1/2。计算结果见图 9(b)。

图 9(a)、图 9(b)是用不同的参数做为响应量, 根据实验中记录的不同数据直接计算出来的加卸载响应比曲线。从图 9 中可看出两条曲线的稳定阶段、出现异常、异常升高至峰值、急剧回落到最后的岩石破裂有着较为同步的一致性。

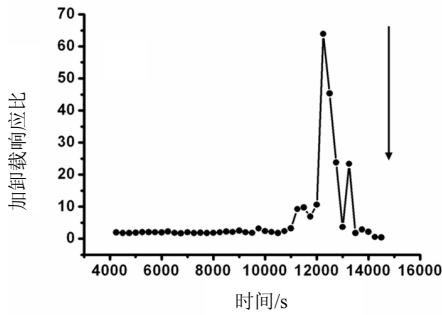
对于一个简单的加载过程, 比如单轴拉伸或压缩, 加卸载响应比(LURR)与损伤变量(D)之间存在着如下的关系。首先引入真实应力与名义应力之间的关系<sup>[16-17]</sup>:

$$\sigma_n = \sigma_a(1-D) \quad (5)$$

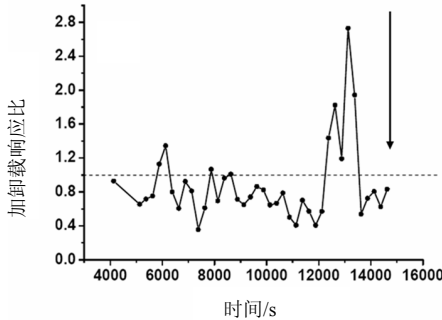
这里:  $\sigma_n$  是名义应力;  $\sigma_a$  是真实应力;  $D$  是损伤

变量。对式(5)左右两边取全微分则有:

$$d\sigma_n = d\sigma_a(1-D) - \sigma_a dD \quad (6)$$



(a) 以轴向应变为响应



(b) 以声发射能量率的开平方为响应量

图 9 岩石实验的加卸载响应比曲线

Fig.9 LURR curves of rock experiment

假设当介质处于卸载过程时损伤不会增加也不会减少, 即  $dD = 0$ , 于是就有:

$$\begin{aligned} d\sigma_{n(+)} &= d\sigma_{a(+)}(1-D) - \sigma_a dD, \\ d\sigma_{n(-)} &= d\sigma_{a(-)}(1-D). \end{aligned} \quad (7)$$

其中: “+”表示加载; “-”表示卸载。根据胡克定律存在:

$$\begin{aligned} d\sigma_{a(+)} &= E_0 d\varepsilon_{(+)}, \\ d\sigma_{a(-)} &= E_0 d\varepsilon_{(-)}. \end{aligned} \quad (8)$$

其中  $E_0$  为介质的初始弹性模量, 根据式(7)、式(8)及加卸载响应比的定义式(2)可得到:

$$Y_E = \frac{1}{1 - \frac{\varepsilon}{(1-D)} \left( \frac{dD}{d\varepsilon} \right)_{(+)}} \quad (9)$$

张浪平等<sup>[18]</sup>给出了实验过程中的损伤演化过程且根据实验过程中的应变数据, 按照式(9)分析了实验过程中的加卸载响应比演化。计算的曲线见图 10。图 10 中的虚线形象地描述了响应比的演化趋势。

图 10 是基于损伤力学方法对实验过程进行的加卸载响应比分析结果。图 9(a)、图 9(b)和图 10 的三条曲线在岩石破裂之前都出现了响应比异常、异常升高至峰值、然后急剧下降, 到最后的破裂。这

3 条曲线与楼房实验的加卸载响应比曲线(图 5)在演化趋势上非常一致, 这就再次验证了加卸载响应比方法用于结构破坏预测的有效性、可靠性。同时以不同的变量做为响应量都能得到趋势相同的加卸载响应比曲线, 这就表明加卸载响应比方法中响应量的选取具有广泛性。

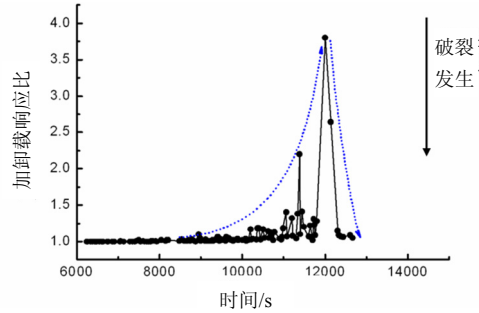


图 10 以损伤为响应的岩石实验的加卸载响应比曲线

Fig.10 LURR curves of rock experiment with damage variable and strain as response

## 4 讨论

基于统计细观损伤力学, Bai Y L 等<sup>[19]</sup>提出了一个适用于弹脆性材料的统计模型, 模型假设材料是由线弹性的脆性单元组成, 即单元具有相同的弹性模量、不同的断裂极限。假设材料的断裂极限在细观尺度上服从某一个概率分布函数, 比如 Weibull 分布<sup>[20-22]</sup>:

$$h(\varepsilon_c) = m\varepsilon_c^{m-1} \exp(-\varepsilon_c^m) \quad (10)$$

其中  $m$  是 Weibull 指数, 那么损伤函数就可以表示为:

$$D(\varepsilon) = \int_0^\varepsilon h(\varepsilon_c) d\varepsilon_c = 1 - e^{-\varepsilon^m} \quad (11)$$

将式(11)代入式(9)就有:

$$Y_E = \frac{1}{1 - m\varepsilon^m} = \frac{1}{m(\varepsilon_F^m - \varepsilon^m)} \quad (12)$$

这里  $\varepsilon_F$  表示的是破坏点对应的应变值, 有  $\varepsilon_F = (1/m)^{1/m}$ 。将  $\varepsilon_F$  代入式(11)就得到破坏点对应的损伤值为  $D_F = 1 - e^{-1/m}$ , 再根据式(11)和式(12)则有:

$$Y_E = \frac{1}{1 + m \ln(1 - D(\varepsilon))} \quad (13)$$

式(13)直接给出了加卸载响应比与损伤变量的关系。

根据式(13)以及楼房结构实验的加卸载响应比值就可以反推出结构的损伤程度, 见表 1。表 1 中可以看出, I-3 点的响应比值小于 1, 以至于由式(13)

得出的损伤出现负值,这是实验误差带来的影响。式(13)给出的加卸载响应比与损伤变量是一一对应且单调递增的关系,而从表1中可以看出结构损伤值在加载过程中并不是单调递增的,出现了减小的情况。原因是由于实验过程中载荷方向发生了变化,导致了响应比值波动,也就造成了损伤值减小的情况,这并不是意味着结构出现了愈合的情况。先看 I-1 点和 I-5 点,都是正向载荷, I-5 点的载荷、响应比值都比 I-1 点高,而且最后造成结构失稳的载荷也是正向的 2500kN,这表明如果载荷是单调递增的话,那么响应比值、损伤值都将是递增的。I-5 点的载荷值是 2105.73kN,响应比值是 8.733,对应的损伤值为 0.9092,这时响应比出现峰值,这就意味着如果载荷超过 2105.73kN,结构就有可能发生失稳;此时对应的损伤值为 0.9092,这也意味着结构的损伤程度很高。I-2 点、I-3 点、I-4 点是反向载荷,也呈现出载荷越高,响应比值和损伤值也越高的规律。比较 I-4 点和 I-6 点,虽然载荷相同,但是响应比值并不相同,这是两点之间经历了 I-5 点的正向载荷造成的。分析第 2 层各加卸载点,发现也有类似的规律。

由此可以通过实验得出结构的加卸载响应比值,由式(13)算出对应的损伤值,这就说明加卸载响应比可以用来预测结构的破坏,而且还能定量分析结构的损伤程度。

## 5 结论

加卸载响应比方法经过多年的地震预测实践,在物理机制、实验研究、数值模拟等方面取得了深入的研究。首先运用加卸载响应比方法对 1 个 2 层楼房实验进行分析,其加卸载响应比演化的时间序列表明,在临近结构破坏之前确实出现了异常明显的升高及回落。进一步引入岩石破裂声发射实验进行研究,发现采用轴向应变、声发射能量、累积损伤做响应计算得到的加卸载响应比时间序列演化与楼房结构的响应比曲线在趋势上非常一致。各响应比曲线在破裂或者失稳之前均出现响应比异常、升高至峰值、急剧回落的现象,从而验证了加卸载响应比方法应用于结构失效分析的有效性,以及响应量选取的广泛性。最末从损伤变量与加卸载响应比之间的联系出发,从加卸载响应比反推出结构的损伤程度进行了讨论。文中研究结果将为加卸载响应比方法应用于大型结构健康评估和工程灾变分

析提供有益的参考及借鉴。

## 参考文献:

- [1] 尹祥础. 地震预测新途径的探索[J]. 中国地震, 1987, 3(1): 1-7.  
Yin Xiangchu. A new approach to earthquake prediction [J]. Earthquake Research in China, 1987, 3(1): 1-7. (in Chinese)
- [2] 尹祥础, 尹灿. 非线性系统的失稳前兆与地震预测[J]. 中国科学, 1991, 21(5): 512-518.  
Yin Xiangchu, Yin Can. The precursor of instability for nonlinear system and its application to earthquake prediction [J]. Science in China (Series B), 1991, 21(5): 512-518. (in Chinese)
- [3] Yin Xiangchu, Chen Xuezhong, Song Zhiping. The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory and its application to earthquake prediction [J]. Journal of Earthquake Prediction Research, 1994, 3(3): 325-333.
- [4] Yin Xiangchu, Chen Xuezhong, Song Zhiping. A new approach to earthquake prediction-the Load/Unload Response Ratio (LURR) theory [J]. Pure and Applied Geophysics, 1995, 145(3-4): 701-715.
- [5] Yin Xiangchu, Chen Xuezhong, Wang Yucang. Development of a new approach to earthquake prediction: Load/Unload Response Ratio (LURR) theory [J]. Pure and Applied Geophysics, 2000, 157(11-12): 2365-2383.
- [6] Yin Xiangchu, Mora P, Peng Keyin. Load/Unload Response Ratio and Accelerating Moment/Energy Release critical region scaling and earthquake prediction [J]. Pure and Applied Geophysics, 2002, 159(9): 2511-2523.
- [7] Yin Xiangchu, Yu Huaizhong, Victor Kukshenko. Load-Unload Response Ratio (LURR), Accelerating Energy Release (AER) and state vector evolution as precursors to failure of rock specimens [J]. Pure and Applied Geophysics, 2004, 161(11-12): 2405-2416.
- [8] Yin Xiangchu, Zhang Langping, Zhang Huihui. LURR's twenty years and its perspective [J]. Pure and Applied Geophysics, 2006, 163(11-12): 2317-2341.
- [9] Yin Xiangchu, Zhang Langping, Zhang Yongxian. The newest development of Load/Unload Response Ratio (LURR) [J]. Pure and Applied Geophysics, 2008, 165(3-4): 711-722.
- [10] 姜彤, 马莎, 许兵. 边坡在地震作用下的加卸载响应规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3803-3807.  
Jiang Tong, Ma Sha, Xu Bing. Study on laws of load-unload response of slope under seismic load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3803-3807. (in Chinese)
- [11] 贺可强, 周敦云, 王思敬. 降雨型堆积层滑坡的加卸载响应比特征及其预测作用与意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2665-2670.  
He Keqiang, Zhou Dunyun, Wang Sijing. Features of Load-Unload Response Ratio and its significance in

- prediction of colluvial landslide by rainfall [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2665—2670. (in Chinese)
- [12] Zhang W J, Chen Y M, Zhan L T. Loading/Unloading Response Ratio (LURR) theory applied in predicting deep-seated landslides triggering [J]. Engineering Geology, 2006, 82: 234—240.
- [13] 张晖辉, 颜玉定, 余怀忠. 循环载荷下大试件岩石破坏声发射实验——岩石破坏前兆的研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 23(21): 3621—3628.
- Zhang Huihui, Yan Yuding, Yu Huaizhong. Acoustic emission experiment research of large-scaled rock failure under cycling load-fracture precursor of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3621—3628. (in Chinese)
- [14] 张晖辉, 尹祥础, 梁乃刚. 模拟引潮力作用下岩石破坏前兆的实验研究——加卸载响应比(LURR)理论和能量加速释放(AER)[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3172—3179.
- Zhang Huihui, Yin Xiangchu, Liang Naigang. Experimental study of rock precursor using simulated tide stress—Load/Unload Response Ratio (LURR) and Accelerating Energy Release (AER) [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3172—3179. (in Chinese)
- [15] Zhang Huihui, Yin Xiangchu, Liang Naigang. Acoustic emission experiments of rock failure under load simulating the hypocenter condition [J]. Pure and Applied Geophysics, 2006, 163(11-12): 2389—2406.
- [16] Kachanov L M. Introduction to continuum damage mechanics [M]. Dordrecht: Martinus Nijhoff, 1986.
- [17] Lemaitre J. A course on damage mechanics [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1992.
- [18] 张浪平, 尹祥础, 梁乃刚. 加卸载响应比与损伤变量关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1874—1881.
- Zhang Langping, Yin Xiangchu, Liang Naigang. Study on relation between Load/Unload Response Ratio and damage variable [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1874—1881. (in Chinese)
- [19] Bai Y L, Xia M F, Ke F J. Damage field equation and criterion for damage Localization, in Rheology for bodies with defects [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998: 55—66.
- [20] Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability [J]. Journal of Applied Mechanics, 1951, 18: 293—297.
- [21] Wei Y J, Xia M F, Ke F J. Evolution induced catastrophe and its predictability [J]. Pure and Applied Geophysics, 2000, 157(11-12): 1945—1957.
- [22] Xu X H, Ma S P, Xia M F. Damage evaluation and damage localization of rock [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2004, 42: 131—138.

(上接第 221 页)

- [4] 游世辉, 钟志华. 汽车安全气囊的计算机仿真研究的现状与趋势[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2000, 27(3): 43—48.
- You Shihui, Zhong Zhihua. Review of the research on computer simulation of working process of automobile airbag in china and abroad [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences Edition), 2000, 27(3): 43—48. (in Chinese)
- [5] Donald E Wayet, J Kenneth Colet, Tommaso P Rivellini. Mars pathfinder airbag impact attenuation system [C]. Proceedings of the 13th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference. Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1995: 109—119.
- [6] 袁春元, 周孔亢, 王国林. 车用空气弹簧力学性能仿真及试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 38—42.
- Yuan Chunyuan, Zhou Kongkang, Wang Guolin. Simulation and experimental investigation of mechanical property of air spring for vehicles [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(3): 38—42. (in Chinese)
- [7] 何稚桦, 徐兆坤, 李锦. 乘用车悬架系统空气弹簧力学性能及刚度分析[J]. 上海工程技术大学学报, 2007, 21(2): 16—18.
- He Zhihua, Xu Zhaokun, Li Jin. Mechanical performance and rigidity analysis of air spring used in suspended truss of passenger car [J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2007, 21(2): 16—18. (in Chinese)
- [8] 王世斌, 亢一澜, 王燕群, 侯振德. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 296—300.
- Wang Shibing, Kang Yilan, Wang Yanqun, Hou Zhende. Mechanics of materials [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008: 296—300. (in Chinese)
- [9] 李琛, 刘晋浩. 基于仿真理论确定缓冲特性曲线方法的研究[J]. 森林工程, 2007, 23(2): 79—80.
- Li Chen, Liu Jinhao. A simulation-based method for determination of cushion curves [J]. Forest Engineering, 2007, 23(2): 79—80. (in Chinese)
- [10] JTJ215-98, 港口工程荷载规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1998: 41—44.
- JTJ215-98, Load code for harbour engineering [S]. China Communications Press, 1998: 41—44. (in Chinese)
- [11] 蒋维清. 船舶原理[M]. 北京: 人民交通出版社, 1992: 225—276.
- Jiang Weiqing. Ship basic theory [M]. Beijing: China Communications Press, 1992: 225—276. (in Chinese)