

加卸载响应比与损伤变量关系研究

张浪平^{1,2}, 尹祥础^{1,3}, 梁乃刚¹

(1. 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; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100190;
3. 中国地震局 地震预测研究所, 北京 100036)

摘要: 首先介绍加卸载响应比的2个基本参量, 并从损伤力学的基本理论出发, 引入损伤变量, 结合加卸载响应比方法的思想, 推导用损伤和应变定义的加卸载响应比, 并以 Weibull 分布作为随机分布函数, 建立且分析损伤变量与加卸载响应比之间的联系, 并进一步考察 Weibull 指数对两者关系的影响。然后利用岩石破坏声发射实验的数据, 用声发射数密度描述岩石试件的损伤演化过程, 并由此根据损伤和应变定义的加卸载响应比, 结合实验过程中的损伤和应变, 计算花岗岩试件的加卸载响应比曲线, 并与用 Benioff 应变作响应量计算的加卸载响应比曲线进行比较, 发现两者具有相当程度的一致性, 两者的加卸载响应比值都经历了出现异常→升高到最大值→急剧回落→岩石试件破裂或失稳, 这一规律与实际地震震例中加卸载响应比的演化趋势是一致的, 同时也说明在实际地震预测中用 Benioff 应变作为响应量来计算加卸载响应比是合理的。最后介绍意大利那不勒斯大学完成的二层楼房的加卸载实验, 且对实验结果进行分析。建立的加卸载响应比与损伤变量的关系, 不仅为加卸载响应比用来定量研究脆性介质的损伤程度提供更为坚实的基础, 而且也可能为评估大型建筑的损伤和预测工程事故开辟新道路。

关键词: 损伤力学; 加卸载响应比; Weibull 分布; 声发射实验; Benioff 应变; 地震预测

中图分类号: O 346.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2008)09-1874-08

STUDY ON RELATION BETWEEN LOAD/UNLOAD RESPONSE RATIO AND DAMAGE VARIABLE

ZHANG Langping^{1,2}, YIN Xiangchu^{1,3}, LIANG Naigang¹

(1. State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3. Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China)

Abstract: Two basic parameters of load/unload response ratio(LURR) are introduced firstly; and the new definition of LURR is conducted using damage and strain of materials as response based on the theory of damage mechanics and the idea of LURR. Furthermore, the relation between LURR and damage variable(D) is set up and analyzed with Weibull distribution as probability distribution function; and the effect of Weibull exponential on the relation is also investigated. Secondly, the process of damage evolution in the rock failure acoustic emission(AE) experiment carried out in 2003 is described with AE number density utilizing the experimental data. The curve of LURR against time defined by damage and strain of the granite specimen is calculated and compared with the one calculated with Benioff strain as response rate. The two curves are quite similar, both LURR values experience the same process, i.e. abnormality appears, LURR values rise to the peak with relatively slow speed and then decrease sharply, rock specimens fail or destabilize quickly, which is consistent with the trend of LURR curves calculated with seismic data and also shows the rationality of LURR defined with Benioff strain as response rate in the actual

收稿日期: 2007-08-22; **修回日期:** 2008-08-07

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412706); 国家自然科学基金资助项目(10572140, 10721202)

作者简介: 张浪平(1982-), 男, 2004年毕业于太原理工大学工程力学专业, 现为博士研究生, 主要从事地震力学、地震预测等方面的研究工作。
E-mail: zhanglp@lnm.imech.ac.cn

earthquake prediction. In the end, the loading and unloading experiments on a two-story structure carried out in the University of Naples in Italy are presented; and the experimental data are analyzed using LURR method. In a word, the relation between LURR value and D not only provides more detailed basis to study the damage evolution of a certain kind of brittle materials utilizing LURR method, but also offers a new approach to the health assessment to large-scale structures and prediction of engineering catastrophic failure.

Key words: damage mechanics; load/unload response ratio(LURR); Weibull distribution; acoustic emission(AE) experiment; Benioff strain; earthquake prediction

1 引言

岩石的破坏前兆涉及地质灾害, 比如地震、滑坡、岩爆等的预测, 是岩石力学方面一个重要的课题。目前, 对岩石损伤、破坏的大体过程已经有了一些共识^[1~4]: 在岩石试件加载初期, 微裂纹的发生具有弥散性, 广泛分布于试件内, 裂纹间距离比较远, 难于发生相互作用; 随着载荷的增加, 微裂纹的演化逐渐形成局部化, 致使宏观裂纹开始形成(成核), 并且在一定条件下扩展, 最后导致宏观破坏。基于这些认识, 还很难对地质灾害的发生或岩石工程的失效做出预判, 还有很多问题有待解决, 例如从损伤到宏观破坏的决定性问题: 局部化、成核及发生宏观破坏的条件, 如何定量地对这些灾害的发生进行预测等, 这些问题的深入研究具有重大的意义。

从物理或者力学的角度看, 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, 并伴随着能量的快速释放, 也就是说地震的孕育过程是一个震源区介质的损伤过程, 是一个典型的力学过程。从细观力学角度看, 地质材料(岩石)的损伤过程甚为复杂, 整个损伤过程包含裂纹的产生、扩展、交互影响、联接、串级等等, 而且这个过程是一个远离平衡态的、非线性的、不可逆过程, 经过数十年的深入研究, 很多基本的问题仍旧没有得到解决, 这也是地震预测困难的根本原因。在研究地震预测时, 遇到的力学问题和通常的力学问题有所不同。通常, 解决力学问题需要知道本构关系、边界条件、初始条件以及某些力学量的变化历史(如流变)。在地震孕育过程中, 这些条件是知之甚少或者完全不知道的, 只能通过地震台网监测或其他监测手段知道地壳中某些物理量的变化。如何从这些“物理量的变化”提取介质损伤程度的信息, 根据这一思路, 尹祥础等^[5~8]提出了一个定量地表征地震的孕育过程的参数——加卸载响应比(load/unload response ratio, LURR)。应用加

卸载响应比作为地震前兆, 用已发生的上百例地震资料进行检验, 80%以上的震例效果很好^[9~11]。经过多年的地震预测实践, 加卸载响应比方法在物理机制、实验研究、数值模拟等方面得到了深入的研究, 并不断取得新的进展^[12, 13]。

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 是典型的岩石的应力-应变曲线。如果载荷单调增加, 材料将会依次经历弹性、损伤、破坏或失稳等过程, 弹性阶段的特征就是可逆性, 也就是加载路径与卸载路径是可逆的, 换句话说就是弹性阶段的加载模量与卸载模量是相同的; 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。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。因此加卸载响应比与损伤变量之间的关系将是本文讨论的主要问题。

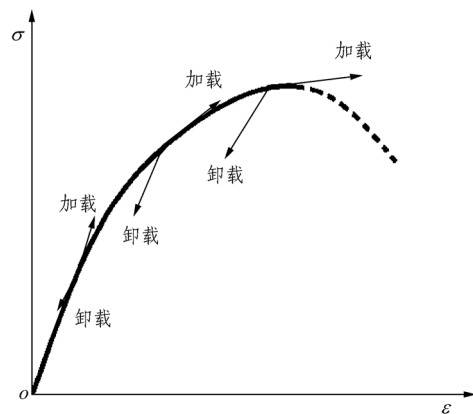


图 1 岩石的应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain curve of rock

声发射是研究脆性材料损伤演化的很好的工具, 它能连续、实时地监测脆性物体内部微裂纹的产生与扩展, 这是其他方法不具有的优势^[14~16]。岩石实验中微破裂的发生与地壳中地震的发生具有很大的相似性, 因此岩石破坏声发射研究对于地震活动性分析和研究是非常重要的和有意义的。本课题组分别在 2001, 2003 年通过国际合作的方式进行了

大、中尺度岩石破坏声发射实验^[17~24], 该实验所采用的声发射测量系统以数字方式输出声发射信号的相关特征量。

本文首先介绍加卸载响应比的两个基本量, 以及在地震预测中选用 Benioff 应变作为响应量; 然后从损伤力学出发, 引入损伤变量, 建立且分析加卸载响应比与损伤变量之间的联系; 最后用岩石破坏声发射实验验证了用损伤和应变定义的加卸载响应比与 Benioff 应变定义的加卸载响应比之间具有相当程度的一致性, 这也表明在实际地震预测中选用 Benioff 应变作为响应量的合理性; 最后用意大利那不勒斯大学完成的二层楼房实验来说明加卸载响应比方法可能为评估大型建筑的损伤和预测工程事故开辟新道路。

2 加卸载响应比与损伤变量

在地震力学、断裂力学、损伤力学、非线性科学等学科的基础上, 尹祥础等^[5~8]提出了一种新的地震预测方法——加卸载响应比理论。

为了定量刻画加载响应与卸载响应的差别, 定义了下面 2 个基本量:

(1) 响应量 X , 将其定义为

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

式中: ΔP 和 ΔR 分别为载荷 P 和响应 R 对应的增量。

(2) 加卸载响应比, 将其定义为

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

式中: X_+ 和 X_- 分别为加载与卸载响应量。

很明显, 当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 $X_+ > X_-$, 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 值达到最值。因此加卸载响应比 Y 可以定量刻画震源区介质的损伤程度。

在地震学中, 常使用地震能量 E 及其相关量作为响应量, 响应比 Y 就可以定义为

$$Y = \frac{\left(\sum_{i=1}^{N_+} E_i^m \right)_+}{\left(\sum_{i=1}^{N_-} E_i^m \right)_-} \quad (3)$$

式中: E 为地震能量, N_+ 为加载地震数目, N_- 为卸载地震数目。当 $m = 1/2$ 时, E^m 在地震学中被称为 Benioff 应变。

对于一个简单的加载过程, 比如单轴拉伸或压缩, 加卸载响应比与损伤变量(D)之间存在着如下关系。首先引入真实应力与名义应力之间的关系^[25, 26]:

$$\sigma_n = \sigma_a(1 - D) \quad (4)$$

式中: σ_n 为名义应力, σ_a 为真实应力。对式(4)左右两边取全微分则有

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

假设介质处于卸载过程时, 损伤不会增加也不会减少, 也就是卸载过程中 $dD = 0$, 则有

$$\left. \begin{aligned} d\sigma_{n(+)} &= (1 - D)d\sigma_{a(+)} - \sigma_a dD \\ d\sigma_{n(-)} &= (1 - D)d\sigma_{a(-)} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

根据虎克定律有

$$\left. \begin{aligned} d\sigma_{a(+)} &= E_0 d\varepsilon_{(+)} \\ d\sigma_{a(-)} &= E_0 d\varepsilon_{(-)} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: E_0 为介质的初始弹性模量。

根据式(6), (7)就可以分别得到加载与卸载响应量:

$$\left. \begin{aligned} X_+ &= \left[E_0(1 - D) - \frac{\sigma_a dD}{d\varepsilon_{(+)}} \right]^{-1} \\ X_- &= [E_0(1 - D)]^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

再由加卸载响应比的定义(式(2))可得

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

假设介质在细观尺度上服从某一个概率分布函数, 比如 Weibull 分布^[27~29]:

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

式中: m 为 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)有

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

式中: ε_F 为在破坏点的应变值, 且 $\varepsilon_F = \left(\frac{1}{m}\right)^{\frac{1}{m}}$ 。将 ε_F 代入式(11)就得到破坏点对应的损伤为 $D_F =$

$1 - e^{-1/m}$, 再根据式(11)与(12)则有

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

式(13)给出了加卸载响应比与损伤变量之间的关系。当 Weibull 指数 $m = 1, 2, 4, 8$ 时, D/D_F 与 Y_E 的关系曲线见图 2。

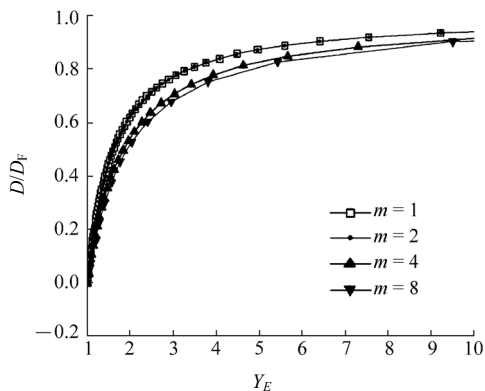


图 2 D/D_F 与 Y_E 的关系曲线
Fig.2 Relation curves between D/D_F and Y_E

3 岩石破坏实验

3.1 实验系统

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^[20, 21, 23]。该实验选用了两种岩石, 分别为花岗岩和砂岩, 花岗岩试件的尺寸为 $360 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高), 砂岩试件的尺寸为 $360 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高)。实验采用的加压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, 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。实验中为了模拟日月潮引力对地球的加载和卸载作用, 在一个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应力。试件的尺寸和声发射探头的布置方式见图 3。试件的加载过程与声发射记录结果见张晖辉等^[20, 21]的研究, 其中包括声发射事件率与能量率的时间序列。根据式(3), 以声发射能量的平方根即 Benioff 应变作为响应量, 张晖辉等^[20, 21]研究了岩石试件在破坏前加卸载响应比的变化趋势。图 4, 5 是 2 个花岗岩试件的加卸载响应比曲线, 图中箭头表示破裂发生。

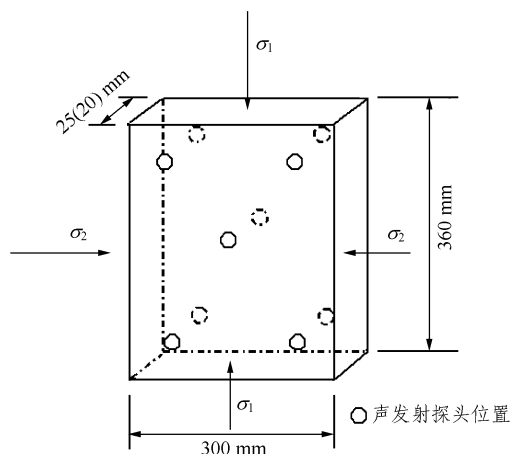


图 3 试件示意图与声发射探头的布置方式

Fig.3 Sketch of specimen and arrangement of AE probes

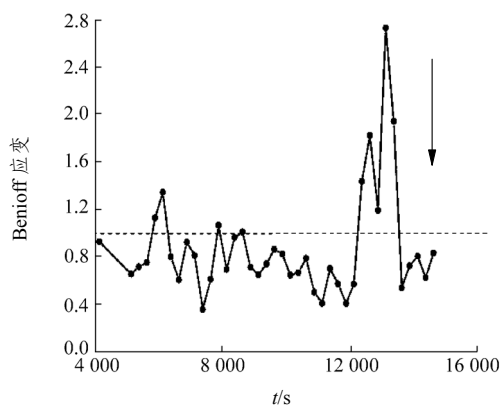


图 4 以 Benioff 应变为响应量花岗岩试件 G2 的加卸载响应比曲线

Fig.4 Curve of LURR of granite specimen G2 with Benioff strain as response

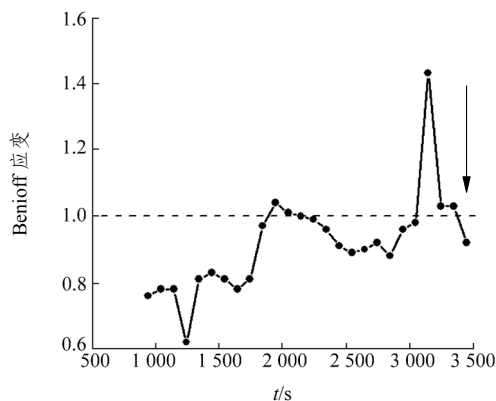


图 5 以 Benioff 应变为响应量花岗岩试件 G3 的加卸载响应比曲线

Fig.5 Curve of LURR of granite specimen G3 with Benioff strain as response

3.2 实验结果分析

对上面的实验结果进行分析, 首先考虑如何描述介质在加载过程中的损伤程度。在 20 世纪 60 年

代, 研究者们^[3, 4, 30]提出了一种通过微损伤数密度对损伤程度进行统计描述的方法, 在本文中, 也将采用统计的方法来描述介质的损伤程度, 假定试件破坏时的损伤程度为 D_F , 那么任意时刻介质的损伤程度就可以用下式来计算:

$$\frac{D(t)}{D_F} = \frac{\int_0^t [E(t)]^n dt}{\int_0^T [E(t)]^n dt} \quad (14)$$

式中: $D(t)$ 为 t 时刻试件的损伤程度; T 为整个加载过程所经历的时间; $[E(t)]^n$ 为 t 时刻的声发射率, 当 $n=0$ 时, $[E(t)]^0$ 为 t 时刻的声发射数率, 当 $n=1/2$ 时, $[E(t)]^{1/2}$ 为 t 时刻的 Benioff 应变率, 当 $n=1$ 时, $[E(t)]$ 为 t 时刻的声发射能量率。

本文将取 $n=0, 1/2, 1$ 分别定义介质的损伤程度, 由此可以考察岩石试件在实验过程中的损伤演化情况。取 $m=0, 1/2, 1$, 以花岗岩试件 G2 为例, 其损伤演化曲线见图 6, 实验获得的名义应力 - 名义应变曲线见图 7。

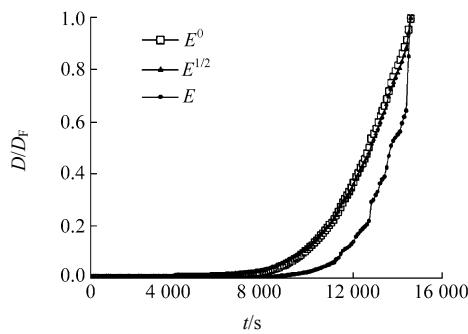


图 6 花岗岩试件 G2 损伤演化曲线

Fig.6 Damage evolution curves of granite specimen G2

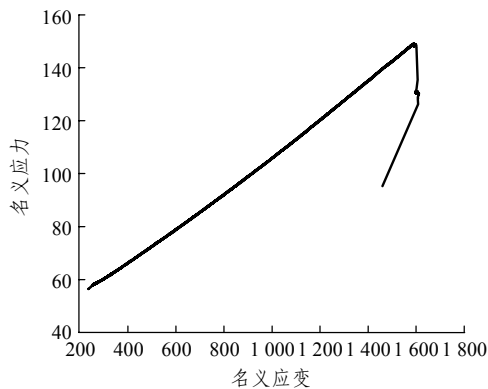


图 7 花岗岩试件 G2 实验获得的名义应力 - 名义应变曲线

Fig.7 Nominal stress-nominal strain curve of granite specimen G2 obtained from experiment

张晖辉等^[20, 21]已经按照式(3)对实验数据进行

了加卸载响应比的分析(见图 4), 在本文中, 已经得到了实验过程中损伤和应变的演化过程(图 6, 7), 将按照前面的推导, 采用式(9)来计算加卸载响应比, 计算结果见图 8。图 8 显示, 当 $t=12\ 000$ s 时, 加卸载响应比值达到最大值, 然后急剧下降, 不久后, 破裂发生。图中的虚线箭头比较形象地反映了加卸载响应比在整个加载过程中的演化规律, 同时加卸载响应比的演化过程在一定程度上反应了岩石试件内部的损伤破坏过程。从图 4 可以看出, 当 $t=13\ 120$ s 时, 加卸载响应比达到最大值。比较图 4, 5 与 8 可知, 两者的演化过程基本一致, 其加卸载响应比值都经历了出现异常→缓慢升高到最大值→急剧回落→岩石试件破裂或失稳。这说明对于岩石破坏实验, 用损伤和应变定义的加卸载响应比的演化规律与用 Benioff 应变作为响应量定义的加卸载响应比的演化规律是一致的。另外这与实际地震震例中加卸载响应比的变化趋势(见图 9)也是一致的, 表明了在实际地震预测中用 Benioff 应变作为响应量是合理的。

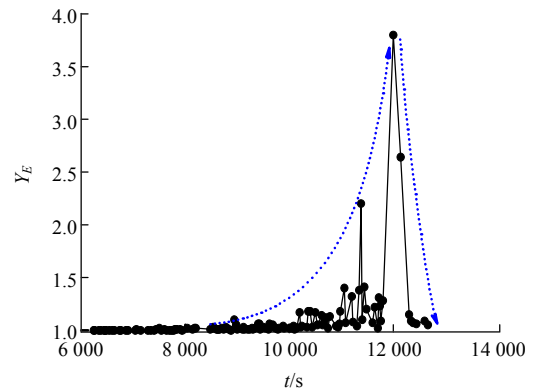


图 8 花岗岩试件 G2 的加卸载响应比随时间的变化曲线

Fig.8 Variable curve of LURR vs. time for granite specimen G2

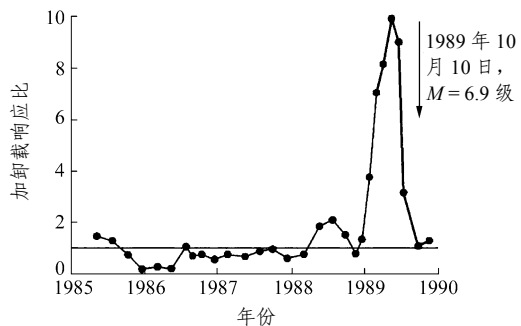


图 9 南加州地震的加卸载响应比曲线

Fig.9 Curve of LURR before strong earthquake in Southern California

4 二层楼房实验

4.1 实验系统

本节将介绍意大利那不勒斯大学完成的对一座二层楼房结构进行的加卸载实验。该结构是一个二层的砖墙楼房, 见图 10(b), 楼房结构的纵剖面见图 10(a), 在楼房的一侧通过钢架对楼房进行加卸载, 钢架见图 10(c)。实验过程多次经历加载、卸载、反向加载、再卸载等多个循环。实验过程记录了载荷值, 以及相应载荷下一层顶部、二层顶部的平均横向位移, 记录的载荷 - 位移曲线见图 11。从图 11 可以看出, 当载荷达到 2 500 kN 时, 楼房失去承载能力, 也就是结构被破坏。



图 10 实验示意图

Fig.10 Sketch maps of experiment

4.2 实验结果分析

对实验结果进行加卸载响应比分析, 对经历先加载、后卸载, 或是先卸载、后加载的载荷方向发生转变的点进行加卸载响应比计算, 并把这些点称之为加卸载点。取加载过程中第一层的第一个加卸

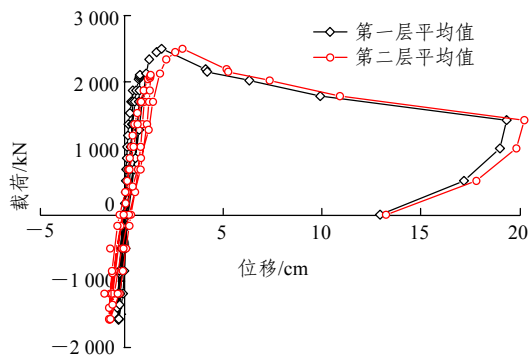
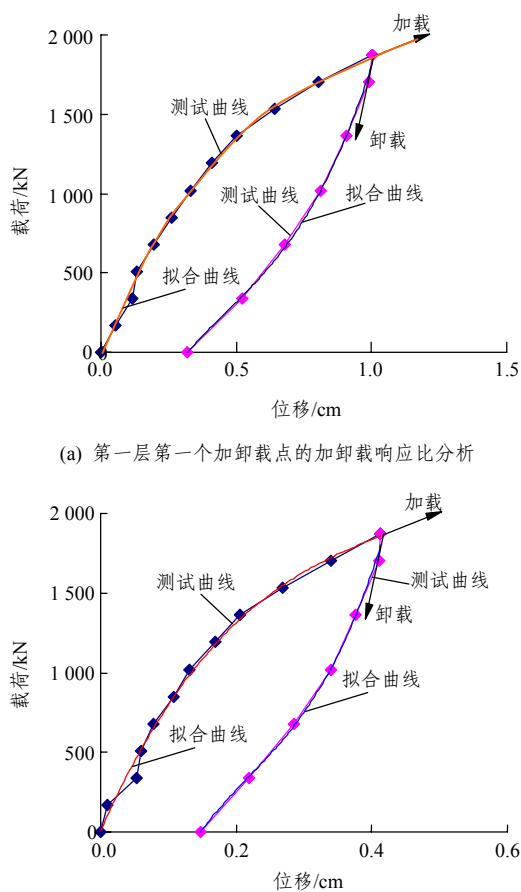


图 11 载荷 - 位移曲线

Fig.11 Curves of load vs. displacement

载点为例进行计算, 先将加载路径和卸载路径进行数据拟合, 见图 12, 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。



(a) 第一层第一个加卸载点的加卸载响应比分析

(b) 第二层第一个加卸载点的加卸载响应比分析

图 12 结构加卸载响应比分析

Fig.12 LURR analysis of structure

依法对其他各加卸载点进行计算, 所得各点的加卸载响应比值见表 1。在实验过程中, 载荷达到 2 152.5 kN 时, 结构发生破坏, 定义此时的损伤值 $D_F = 1$ 。再根据计算得到的加卸载响应比值, 按

表1 结构加卸载响应比分析结果
Table 1 Results of LURR analysis of structure

第一层的加卸载响应比分析				第二层的加卸载响应比分析			
编号	载荷 /kN	加卸载响应比	D/D_F	编号	载荷 /kN	加卸载响应比	D/D_F
1	1 871.76	3.866 7	0.787 2	1	1 871.76	3.713 9	0.777 9
2	-1 583.40	3.278 0	0.746 0	2	-1 583.40	3.127 5	0.732 8
3	0.00	1.794 2	0.505 0	3	0.00	1.340 7	0.303 3
4	-1 572.09	2.686 9	0.684 7	4	-1 572.09	1.910 8	0.538 9
5	2 105.73	8.733 3	0.909 2	5	2 105.73	9.563 8	0.917 3
6	-1 572.09	1.269 6	0.256 0	6	-1 572.09	2.317 5	0.628 8
7	2 175.50	∞	1.000 0	7	2 175.20	∞	1.000 0

照式(13)来反推结构的损伤程度,取 $m = 2$, 计算结果见表 1。从表 1 中可以发现,同向载荷越大,结构的损伤程度越高,说明结构越接近破坏。另外,在实验所给的载荷作用下,第一和第二加卸载响应比值、损伤值都保持一致。在载荷达到 2 105.73 kN 时,结构的损伤程度已经达到了 0.917 3。同时由表 1 可以看出,随着正向载荷的不断加大,反向载荷加到 -1 572.09 kN 时对应的损伤值减小,这可能是由于正向载荷加大影响了反向的损伤程度。

由上面的分析可知,可以通过实验手段对大型结构、古建筑进行加卸载响应比值的测定,从而对结构的健康水平进行估计,这将有成为大型结构健康评估和工程灾变预测的一种新方法。

5 结 论

加卸载响应比理论经过 20 余年的发展,在地震预测方面取得了较好的效果,而且随着研究的深入,预测精度取得了不断的提高,但是加卸载响应比理论还有一些基本问题没有得到解决。加卸载响应比是一个可以定量刻画介质损伤程度的物理量,它与损伤变量之间存在怎样的联系;在实际地震预测中采用 Benioff 应变作为响应量是否合理,基于此,作者进行了相关研究。

文中推导了由损伤和应变定义的加卸载响应比,将计算的花岗岩试件的加卸载响应比曲线与用 Benioff 应变作为响应量计算的加卸载响应比曲线进行比较发现,两者具有相当程度的一致性,其加卸载响应比值都是经历出现异常→较慢升高到最大值→急剧回落→岩石试件破裂(或失稳),这一规律与实际地震震例中加卸载响应比的变化趋势是一致的,说明在实际地震预测中用 Benioff 应变作为响

应量来计算加卸载响应比是合理的。

本文建立了加卸载响应比与损伤变量的对应关系,这样就为用加卸载响应比来定量研究脆性介质的损伤程度提供了更具体的依据,倘若知道某种脆性介质的损伤阈值,就可以给出加卸载响应比临界值来判断该介质将是否失效。同样,对于某地区的地壳介质来说,倘若给出了该地区发震的加卸载响应比临界值,这样将对提高预测精度具有很大的意义。另外,本文最后给出了意大利那不勒斯大学完成的一个二层楼房的加卸载实验,并对实验进行了分析。对于一些大型建筑、古建筑,可以通过实验的方法得到该结构的加卸载响应比值,再由加卸载响应比值反推出结构的损伤值,进而对结构的损伤程度进行评估。综上所述,加卸载响应比与损伤变量之间关系的研究具有重大的意义,本文还只是研究的开始,还有待今后进一步的深入。

致谢 本文中的二层楼房结构实验的照片、数据均由意大利那不勒斯大学 Federico M. Mazzolani 教授提供,在此表示感谢!

参考文献(References):

- [1] BAI Y L, XIA M F, KE F J, et al. Analysis and simulation of evolution induced catastrophe[J]. Chinese Physics Letters, 1993, 10(3): 155 - 158.
- [2] BAI Y L, LU C S, KE F J, et al. Evolution induced catastrophe[J]. Physics Letter A, 1994, 185(2): 196 - 200.
- [3] 夏蒙芬, 韩闻生, 柯孚久, 等. 统计细观损伤力学和损伤演化诱致突变(I)[J]. 力学进展, 1995, 25(1): 1 - 40.(XIA Mengfen, HAN Wensheng, KE Fujiu, et al. Statistical meso-scopic damage mechanics and damage evolution induced catastrophe(I)[J]. Advances in Mechanics, 1995, 25(1): 1 - 40.(in Chinese))
- [4] 夏蒙芬, 韩闻生, 柯孚久, 等. 统计细观损伤力学和损伤演化诱致突变(II)[J]. 力学进展, 1995, 25(2): 145 - 171.(XIA Mengfen, HAN Wensheng, KE Fujiu, et al. Statistical meso-scopic damage mechanics and damage evolution induced catastrophe(II)[J]. Advances in Mechanics, 1995, 25(2): 145 - 171.(in Chinese))
- [5] 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. The new approach of earthquake prediction[J]. Earthquake Research in China, 1987, 3(1): 1 - 7.(in Chinese))
- [6] 尹祥础, 尹 灿. 非线性系统的失稳前兆与地震预报——响应比理论及其应用[J]. 中国科学(B 辑), 1991, 21(5): 512 - 518.(YIN Xiangchu, Yin Can. The precursor of instability for nonlinear system and earthquake prediction—load/unload response ratio theory and its application[J]. Science in China(Series B), 1991, 21(5): 512 - 518.(in Chinese))
- [7] YIN X C, CHEN X Z, SONG Z P. The load/unload response ratio(LURR) theory and its application to earthquake prediction[J]. Journal of Earthquake Prediction Research, 1994, 3(3): 325 - 333.

- [8] YIN X C, CHEN X Z, SONG Z P, et al. A new approach to earthquake prediction—the load/unload response ratio(LURR) theory[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1995, 145(3/4): 701 - 715.
- [9] 尹祥础, 陈学忠, 宋治平, 等. 关东等地区加卸载响应比的时间变化及其预测意义[J]. *中国地震*, 1996, 12(3): 331 - 334.(YIN Xiangchu, CHEN Xuezhong, SONG Zhiping, et al. The temporal variation of LURR in Kanto and other regions in Japan and its application to earthquake prediction[J]. *Earthquake Research in China*, 1996, 12(3): 331 - 334.(in Chinese))
- [10] 宋治平, 尹祥础, 王裕仓, 等. 美国加州地区地震前加卸载响应比的时空演化特征及预测意义[J]. *地震学报*, 2000, 22(6): 588 - 595. (SONG Zhiping, YIN Xiangchu, WANG Yucang, et al. The tempo-spatial evolution characteristics of the load/unload response ratio before strong earthquakes in California of America and its predicting implications[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2000, 22(6): 588 - 595.(in Chinese))
- [11] YIN X C, WANG Y C, PENG K Y, et al. Development of a new approach to earthquake prediction: load/unload response ratio(LURR) theory[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2000, 157(11/12): 2 365 - 2 383.
- [12] YIN X C, MORA P, PENG K Y, et al. Load-unload response ratio and accelerating moment/energy release critical region scaling and earthquake prediction[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2002, 159(10): 2 511 - 2 523.
- [13] YIN X C, ZHANG L P, ZHANG H H, et al. LURR's twenty years and its perspective[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2006, 163(11/12): 2 317 - 2 341.
- [14] 胜山邦久. 声发射(AE)技术的应用[M]. 冯夏庭译. 北京: 冶金工业出版社, 1996.(KATSUYAMA K. Application of AE techniques[M]. Translated by FENG Xiating. Beijing: China Metallurgical Industry Press, 1996.(in Chinese))
- [15] LOCKNER D A, BYERLEE J D, KUKSHENKO V, et al. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite[J]. *Nature*, 1991, 350(7): 39 - 42.
- [16] LOCKNER D. The role of acoustic emission in the study of rock fracture[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1993, 30(7): 883 - 899.
- [17] 余怀忠, 尹祥础, 夏蒙芬, 等. 地震临界点理论的实验研究[J]. *地震学报*, 2004, 26(增): 122 - 131.(YU Huaizhong, YIN Xiangchu, XIA Mengfen, et al. Experimental research on critical point hypothesis[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2004, 26(Supp.): 122 - 131.(in Chinese))
- [18] YU H Z, YIN X C, XIA M F, et al. Experimental research on the critical point hypothesis[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2004, 17(Supp.1): 129 - 137.
- [19] 张晖辉, 颜玉定, 余怀忠, 等. 循环荷载下大试件岩石破坏声发射实验——岩石破坏前兆的研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(21): 3 621 - 3 628.(ZHANG Huihui, YAN Yuding, YU Huaizhong, et al. Acoustic emission experiment research on large-scale rock failure under cycling load—fracture precursor of rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(21): 3 621 - 3 628.(in Chinese))
- [20] 张晖辉, 尹祥础, 梁乃刚, 等. 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): 3 172 - 3 179.(ZHANG Huihui, YIN Xiangchu, LIANG Naigang, et al. Experimental study of rock failure 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): 3 172 - 3 179.(in Chinese))
- [21] ZHANG H H, YIN X C, LIANG N G, et al. Acoustic emission experiments of rock failure under load simulating the hypocenter condition[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2006, 163(11/12): 2 389 - 2 406.
- [22] 余怀忠. 非均匀脆性介质破坏前兆与地震预测理论的实验研究[博士学位论文][D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2004.(YU Huaizhong. Experimental research on precursors of brittle heterogeneous media and earthquake prediction methods[Ph. D. Thesis]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2004.(in Chinese))
- [23] 张晖辉. 非均匀脆性介质的灾变预测——加卸载响应比理论的研究与实践[博士学位论文][D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2006.(ZHANG Huihui. Prediction of catastrophic failure in heterogeneous brittle media—study and practice of load/unload response ratio(LURR) [Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006.(in Chinese))
- [24] YIN X C, YU H Z, KUKSHENKO V, et al. Load-unload response ratio(LURR), accelerating moment/energy release(AM/ER) and state vector saltation as precursors to failure of rock specimens[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2004, 161(11/12): 2 405 - 2 416.
- [25] KACHANOV L M. Introduction to continuum damage mechanics[M]. Dordrecht, Netherlands: Martinus Nijhoff Publishers, 1986.
- [26] LEMAITRE J. A course on damage mechanics[M]. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 1992.
- [27] WEI Y J, XIA M F, KE F J, et al. Evolution induced catastrophe and its predictability[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2000, 157(11/12): 1 945 - 1 957.
- [28] ZHANG X H, XU X H, WANG H Y, et al. Critical sensitivity in driven nonlinear threshold systems[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2004, 161(9/10): 1 931 - 1 944.
- [29] XU X H, MA S P, XIA M F, et al. Damage evaluation and damage localization of rock[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2004, 42(2): 131 - 138.
- [30] BAI Y L, WANG H Y, XIA M F, et al. Statistical mesomechanics of solid, linking coupled multiple space and time scales[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 2005, 58(6): 372 - 388.