

利用损伤力学模型研究地震前兆现象

余怀忠¹, 尹祥础^{1,2}, 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 100080; 2. 国家地震局分析预报中心, 北京 100036)

摘 要 在地震等灾变破坏发生之前会出现一定的前兆现象, 本文通过损伤力学模型, 运用数值计算的方法对此进行了研究. 从计算结果可以看到, 在灾变破坏发生之前, 由损伤所释放的能量 (能量释放) 和加卸载响应比值 γ 都发生了异常明显的变化, 这表明二者具有相同的物理机制, 在一定程度上都能够较为定量地刻画出系统的损伤演化过程. 如果把二者相结合则可能对地震等灾变破坏做出更为准确的预测, 本文结合实际震例对此也进行了一定的研究.

关键词 损伤力学模型, 临界点理论, 能量加速释放, 加卸载响应比

中图分类号 TU45, P315

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2004)02-0404-10

Use damage rheology model research on the precursor of earthquakes

YU Huai-zhong¹, YIN Xiang-chu^{1,2}, LIANG Nai-gang¹

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of sciences, Beijing 100080, China;

2. Center for Analysis and prediction, Chinese Seismological Bureau, Beijing 100036, China)

Abstract Catastrophes such as earthquakes can be sorted as a kind of critical phenomena. Before these critical phenomena occur some precursors may appear. In this paper, damage rheology model is used and the numerical calculation is integrated with then earthquake cases research to study these precursors. From the results it can be seen that before the failure of system, two important precursors—the Energy Release and the Load/Unload Response Ratio—both change evidently. The results indicate that these two parameters are base on the same physical mechanism. They can quantitatively manifest the damage evolution of a system to a certain extent. It may be feasible to predict the occurrence of some catastrophes such as earthquakes quantitatively by integrating these two parameters.

Keywords damage rheology model, critical point hypothesis, accelerate energy release load/unload response ratio

0 引 言

地震是一种非常严重的自然灾害, 在其灾变破坏发生之前, 会产生在一定的的前兆现象, 中、外科学家运用了多种理论和方法对这些前兆现象进行了研究. 从上个世纪初开始, 国外就有人^[1,2]对大震前地震活动性的改变进行了一些早期研究; 我国科学家也在这一领域进行了大量的研究^[3-18]. 而 Vere-Jones 在 1977 年提出的临界点概念^[19]以及随后形成的临界点理论^[20-26], 反映了震源区固体介质损伤演化的物理实质, 定量地刻画出地震的演化进程以及灾变迫近程度, 因而受到了广泛关注.

按照临界点理论, 可以将地震看成一种临界现象, 而任何临界现象发生之前都会出现两大类前兆:

(1) 相关长度增大.

(2) 对外界干扰敏感性的增加^[25].

这两大类前兆又可以细分为更多的前兆现象. 在这些基于临界点理论的前兆现象之中, 存在两种重要的、可操作性较好的前兆现象, 这就是加卸载响应比 (LURR)^[16, 27-29]和能量加速释放 (AER). 这两种前兆现象具有相同物理机制, 分别反映了系统在接近临界点时临界敏感性的增加和相关长度的增大. LURR 是以加卸载响应比值 γ 来刻画损伤破坏进程, 当 γ 值较小且变化也较稳定时, 灾变不会发生; 当 γ 值出现明显异常的变化时 (急剧增长与回落), 灾变可能就会发生. 能量加速释放 (AER) 则是指在临近灾变时, 能量会出现明显呈幂律 (power-law) 的加速释放过程^[30-32]. 尹祥础等^[27]曾对这两

收稿日期 2003-10-31; 修回日期 2003-11-10.

基金项目 国家自然科学基金 (10232050)、国家 973 项目 (2002CB412706) 及中国科学院计算网络中心 (INF105-SCE-2-02) 项目资助.

作者简介 余怀忠, 男, 1975 年生, 中国科学院力学研究所博士研究生.

种前兆现象在空间尺度上及实际应用中的一致性进行过分析,我们也通过实验的方法对 LURR 和 AER 予以了验证^[33-35],本文结合我们的实验,通过 Lyakhovsky^[36, 37]等人提出的损伤力学模型,采用数值计算的方法,从损伤力学角度对这两种基于临界点理论的重要前兆现象作了进一步研究。

该模型以连续介质力学为基础,对岩石等脆性材料在不可逆变形条件下的非线性演化特征进行了分析,除了两个弹性参数 λ 和 μ 之外,还引入了第三个参数 r ,用以反映在拉伸或压缩条件下岩石材料的非对称变形。同时,随着损伤的发展,将岩石材料的模量以及三个弹性参数 λ , μ 和 r 分别定义为损伤变量 D 的函数 ($0 < D < 1$),损伤变量 D 为材料内部微损伤的密度,这样就将岩石材料的状态直接与损伤变量 D 联系起来;再通过能量和熵的基本平衡方程,得到各种参量及其本构关系随着岩石材料破坏的演化过程,这样,就可以较为定量地反映出岩石等脆性材料的损伤演化规律。

1 计算模型

按照 Lyakhovsky 提出的损伤力学模型^[36, 35],可将弹性势能定义为

$$U = \frac{1}{2} \left(\lambda I_1^2 + \mu I_2 - I_1 \sqrt{I_2} \right), \quad (1)$$

其中: λ 和 μ 为正常的拉梅弹性系数, r 为附加的本模型所特有的弹性系数(假定为弹性), I_1 和 I_2 为应变张量的第一不变量和第二不变量,

$$I_1 = \epsilon_{kk},$$

$$I_2 = \epsilon_{ij} \epsilon_{ij}.$$

(1)式对应变求导可得到应力张量为

$$\sigma_{ij} = \left(\lambda - \frac{\sqrt{I_2}}{I_1} \right) I_1 \delta_{ij} + \left(2\mu - \frac{I_1}{\sqrt{I_2}} \right) \epsilon_{ij}, \quad (2)$$

引入新参量 $\mu_r = \frac{I_1}{\sqrt{I_2}}$,应变张量则可表示为

$$\sigma_{ij} = \frac{\lambda - \mu_r}{2\mu - \mu_r} I_1 \delta_{ij}. \quad (3)$$

系统的损伤程度可由损伤变量 D ($0 < D < 1$) 来表示,没有出现损伤时, $D = 0$;完全破坏之后 $D = 1$.在损伤过程中,参数 λ , μ 和 r 由损伤变量 D 表示^[36, 37]为

$$\lambda = \lambda_0, \mu = \mu_0 + \mu_r, r = r_0, \quad (4)$$

式中:

$$r_0 = 0.5 \left[\frac{3\lambda_0 + 2\mu_0}{3 - \frac{2}{3}} + 0 \right] +$$

$$\sqrt{0.5 \left[\frac{3\lambda_0 + 2\mu_0}{3 - \frac{2}{3}} + 0 \right]^2 + 2\mu_0 \frac{3\lambda_0 + 2\mu_0}{3 - \frac{2}{3}}},$$

$$\mu_r = 0 - r_0.$$

而损伤变量 D 可由下式确定

$$\frac{dD}{dt} = \begin{cases} c_d I_2 \left(\frac{\lambda - \mu_r}{2\mu - \mu_r} \right), & 0 \\ c_1 \exp\left(\frac{\lambda - \mu_r}{c_2}\right) I_2 \left(\frac{\lambda - \mu_r}{2\mu - \mu_r} \right), & 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中: c_d, c_1, c_2 都是与材料性质有关的参数,可由实验测得, λ_0 则由下式决定

$$\lambda_0 = \frac{-\sqrt{3}}{\sqrt{2q^2 \left(\frac{\lambda_0}{\mu_0} + \frac{2}{3} \right)^2 + 1}}, \quad (6)$$

q, λ_0, μ_0 可由实验测定。

在给定加载条件及加载历史后,可用数值方法求解上述方程组,得到其损伤演化过程 $D_i (i = 1, 2, 3 \dots)$,具体步骤如下:

- (1) 在不同的时刻 $T_i (i = 1, 2, \dots)$,若已知 D_i 可由(5)式得到 D_{i+1} ;
- (2) 由(4)能够分别得到 $(\lambda, \mu, r)_{i+1}$ 的值;
- (3) 再由(3)式得到三个方向的主应变: $(\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3)_{i+1}$ 及相应 D_{i+1} 的值;
- (4) 这样,再由(5)式得出下一时刻的损伤 D_{i+2} ;

如此类似的循环计算即可得到相关参量 $(\lambda)_i, (\mu)_i, (r)_i$ 及 D_i 的值 ($i = 1, 2, 3 \dots$).

2 能量加速释放

根据 Turcotte 等的分析结果^[31]可以得到

$$de(t) = \frac{1}{2} \frac{d^2(t)}{E_0(1 - D(t))^2} dt, \quad (7)$$

按照(5)式,可以计算出损伤随时间的演化过程 $D(t_i)$,这样再由(7)式可以求出时间增量 Δt 内所释放的能量 $e(t_i)$ 、Benioff 应变 $\sqrt{e(t_i)}$,并进而得到对应于 t_i 时刻所释放的能量 $e(t_i)$ 以及 Benioff 应变 $\sqrt{e(t_i)}$ 等。

另一方面,物理学中认为,材料在接近临界点时会表现出一定的临界现象,如能量呈幂率的加速释放等,而脆性材料的破坏通常也被看作是一种临界现象,根据临界现象的标度律,能量释放过程(或 Benioff 应变)按照如下形式幂函数演化^[20-23, 25].

$$e(t) = A + B(t_c - t)^z, \quad (8)$$

式中: t_c 为临界时刻, A, B, z 为拟合得到的参数,其中指数 z 是研究加速释放的关键问题,其小于 1 的

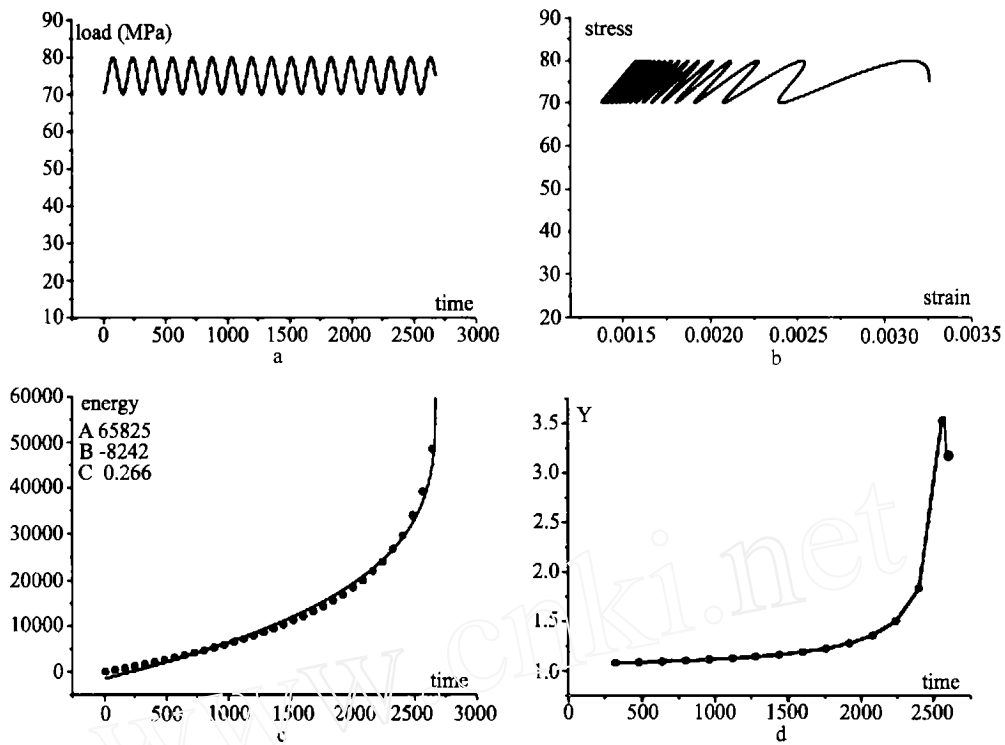


图1 a. 轴压加载方式 b. 应力应变关系 c. 能量释放过程及 power-law 拟合结果 d. 加卸载响应比的变化过程
 Fig 1 a. the axial loading versus time; b. stress versus strain; c. AER and power-law fit; d. the evolution of LURR value

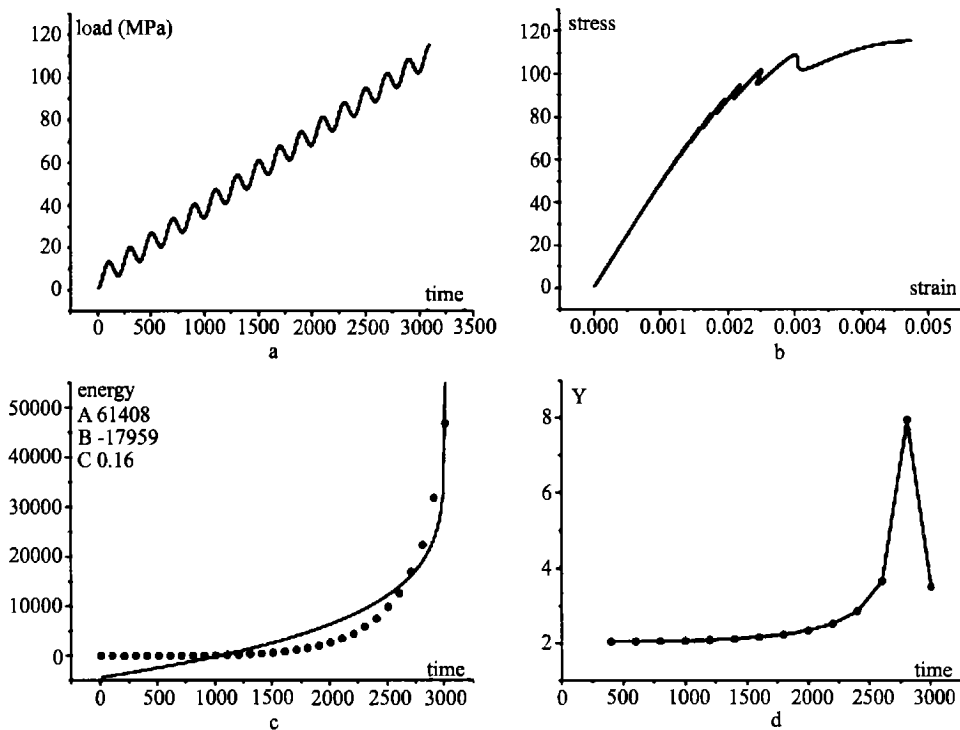


图2 a. 轴压加载方式 b. 应力应变关系 c. 能量释放过程及 power-law 拟合结果 d. 加卸载响应比的变化过程
 Fig. 2 a. the axial loading versus time; b. stress versus strain; c. AER and power-law fit; d. the evolution of LURR value

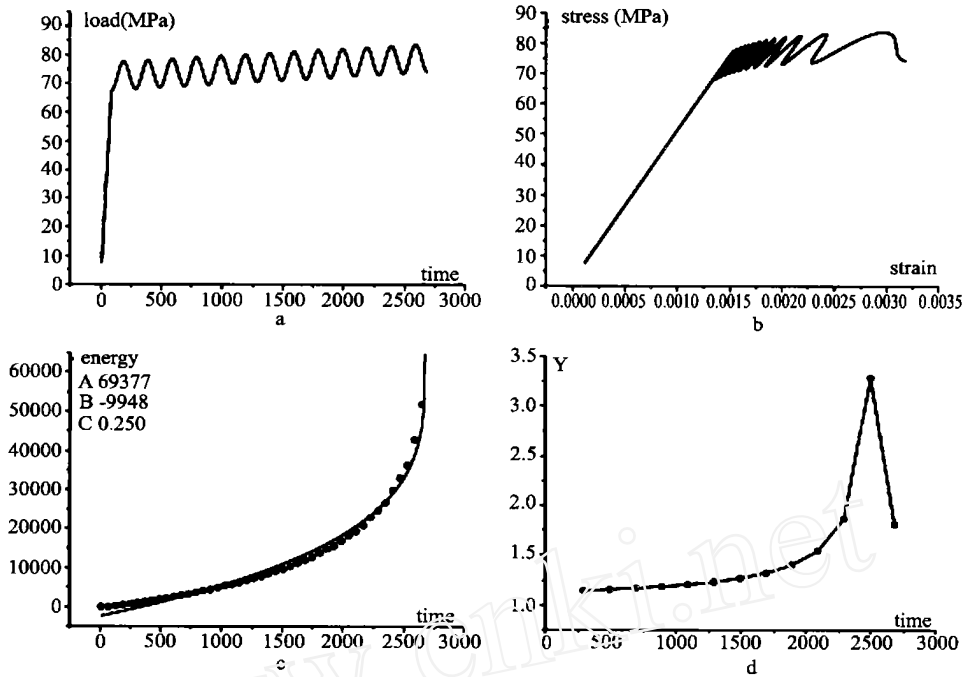


图3 a 轴压加载方式 b. 应力应变关系 c. 能量释放过程及 power-law 拟合结果 d. 加卸载响应比的变化过程
Fig 3 a. the axial loading versus time; b. stress versus strain; c. AER and power-law fit; d. the evolution of LURR value

程度越大,加速释放的程度就越明显.

3 加卸载响应比

加卸载响应比 Y (LURR)^[16, 19, 27-29, 35] 是一个能够较为定量地反映非线性系统趋近失稳程度的参数,可以将其定义如下

$$Y = \frac{X_+}{X_-}, \quad (9)$$

其中正号表示加载阶段,减号表示卸载阶段,响应率 X 可定义为

$$X = \lim_{P \rightarrow 0} \frac{R}{P}. \quad (10)$$

R 和 P 表示载荷为 P 时,载荷 P 和响应 R 所对应的增量.

在弹性阶段, $X_+ = X_-$, 所以 $Y = 1$; 出现损伤之后, $X_+ > X_-$, 所以 $Y > 1$; 随着载荷的增大,材料损伤程度加剧, Y 的值将会变得更大; 而在材料临近破坏之前, Y 值将会出现回落.

如果把轴向应变作为响应 R , 则由 (9) (10) 两式可得到加卸载响应比为

$$Y = \frac{(\epsilon)_+}{(\epsilon)_-}. \quad (11)$$

加载和卸载过程中的应变变化 $(\epsilon)_+$ 和 $(\epsilon)_-$ 则可通过 (3) 式求得,再由 (11) 式可得到加卸载响应比

值 Y .

4 计算与分析

根据我们的实验^[33-35],取材料的初始物理参数为: $\sigma_0 = (1.2, \sigma_0 = 2.88 \times 10^4 \text{ MPa}, \mu_0 = 1.92 \times 10^4 \text{ MPa}$; 其它基本计算参数: $c_d = 40, c_1 = 1.0 \times 10^{-10}, c_2 = 8.0 \times 10^{-2}$ ^[36,37]; 在本文所进行的计算中,轴压采用的加载历史如图 1(a) ~ 图 3(a) 所示,相应的应力应变关系如图 1(b) ~ 图 3(b). 能量 (Benioff 应变) 释放过程以及按照 (11) 式处理得到的加卸载响应比值演化过程分别如图 1(c) ~ 图 3(c) 和图 1(d) ~ 图 3(d) 所示.

从图 1 ~ 图 3 可以看到,虽然采用了不同的轴压加载历史,但在灾难破坏发生之前,能量释放与加卸载响应比都发生了明显异常的变化,这表明它们具有相同的物理机制. 刚开始加载时,材料的损伤程度较小,其内部结构的稳定性较高,因而加卸载响应比值也较小,能量释放不会出现明显的加速过程,此时,微小的载荷变化不会导致灾难的产生,只能造成损伤的微小扩展和变形的微小增量; 随着加载的继续,材料内部的损伤和破坏不断产生和扩展,此时虽然从表面上看仅仅是材料的刚度有所降低,但是实

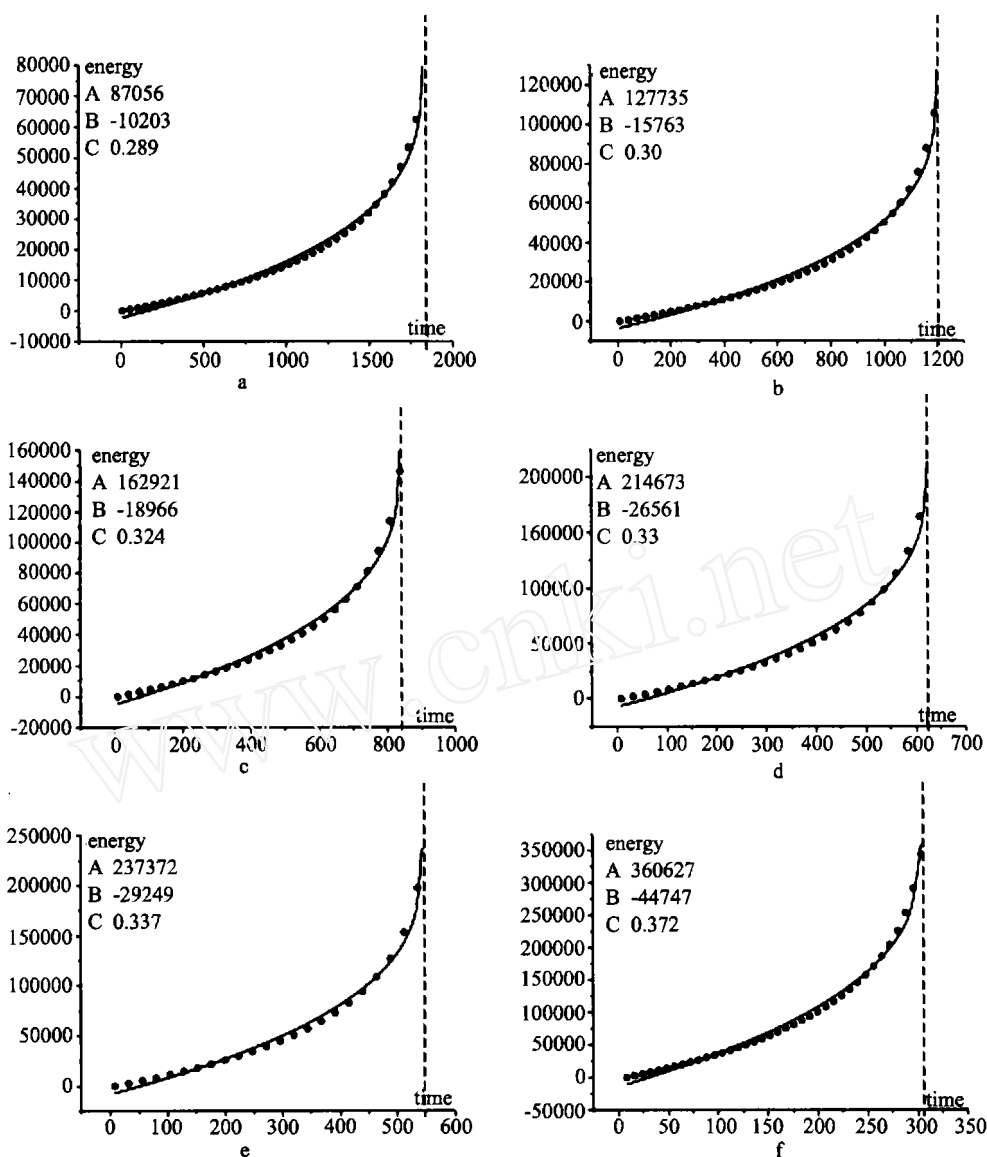


图 4. 不同载荷水平下能量释放过程(虚线表示破坏时刻)

(a) $\sigma_0 = 70$ MPa; (b) $\sigma_0 = 90$ MPa; (c) $\sigma_0 = 110$ MPa;

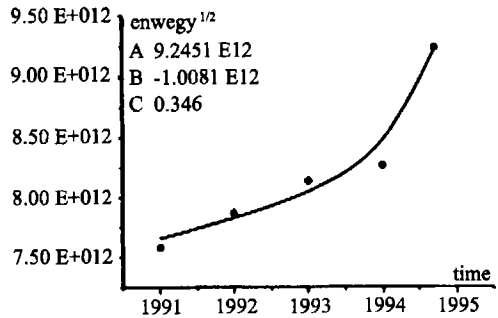
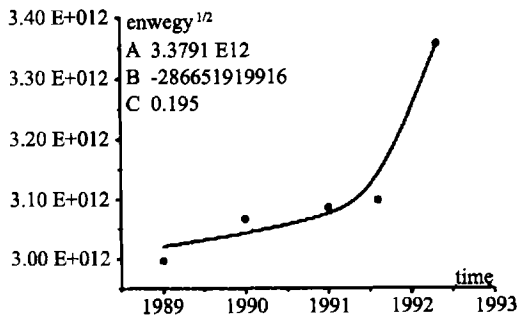
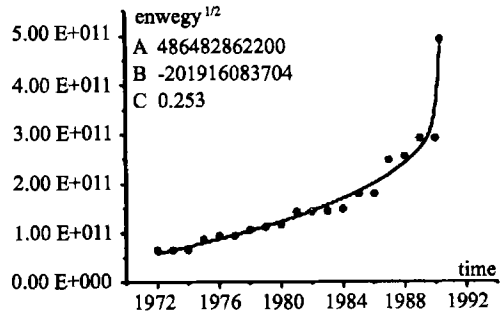
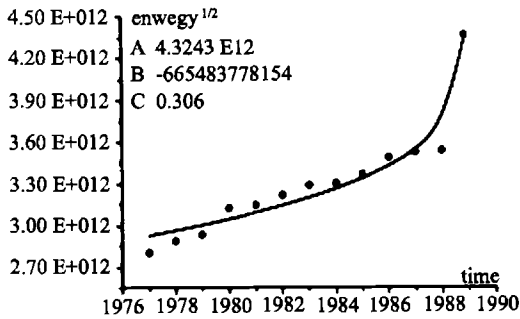
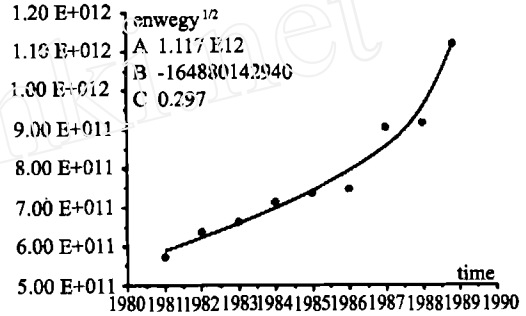
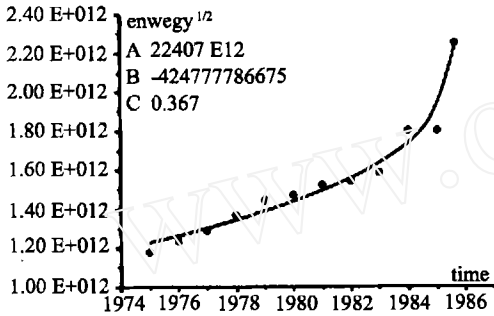
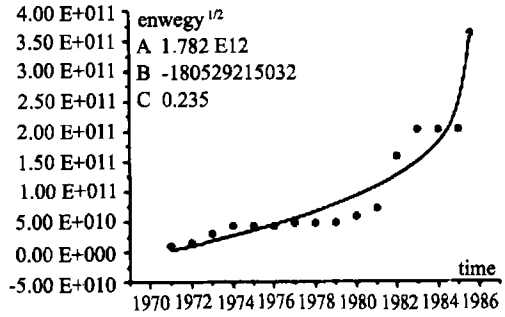
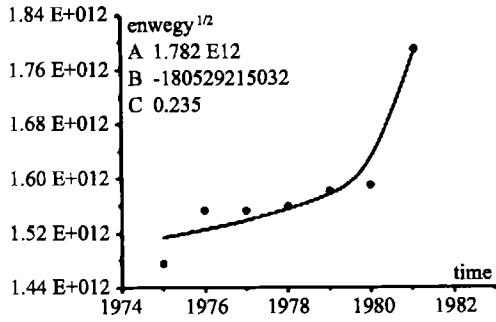
(d) $\sigma_0 = 130$ MPa; (e) $\sigma_0 = 150$ MPa; (f) $\sigma_0 = 200$ MPa

Fig. 4 The AER during different load levels (dashed - line denote the failure time) :

(a) $\sigma_0 = 70$ MPa; (b) $\sigma_0 = 90$ MPa; (c) $\sigma_0 = 110$ MPa; (d) $\sigma_0 = 130$ MPa; (e) $\sigma_0 = 150$ MPa; (f) $\sigma_0 = 200$ MPa

际上更危险的是材料内部结构的稳定性在逐渐下降.正是由于材料内部损伤的不断增加,而抵抗失稳破坏的能力却不断下降,所以失稳破坏的可能性在逐渐增大,这样能量就开始出现加速释放过程,而加卸载响应比的值也会增大;当材料内部的损伤极度发展,损伤开始出现明显的集中,裂纹开始汇聚,抵抗失稳破坏的能力会大大降低,任何微小的载荷变

化都可能导致材料失稳破坏的进一步发展,此时,加卸载响应比值会迅速增加,能量也开始出现较明显的加速释放过程;在破裂面开始形成之后,材料开始进入自驱动演化过程,其损伤和破坏的发展主要由内部机制所控制,这时能量会出现明显的加速释放,而加卸载响应比值则出现较为明显的回落,最终的宏观破坏就是在这过程中发生.



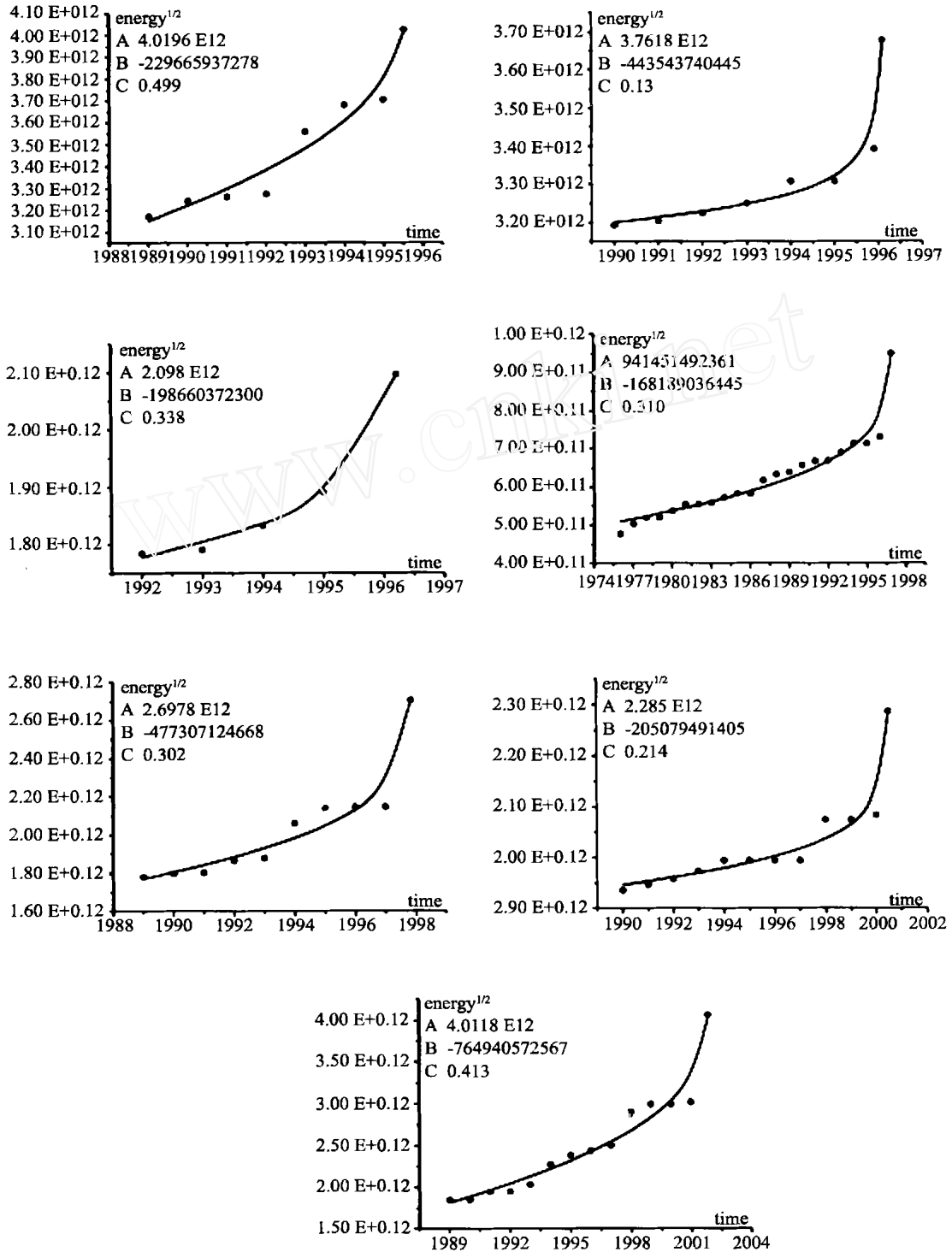


图 5 自 80 年以来,中国大陆发生的 15 个震级大于 7.0(包括 7.0)地震震前的 AER

Fig 5 From 1980s up to present, the AER of the earthquakes which occurred in China with Magnitude greater than 7.0 (include 7.0)

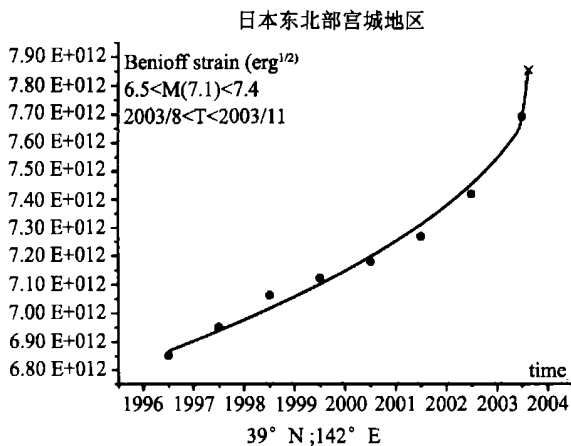


图6 日本东北部宫城地区地震预测结果
Fig 6 The predicted results of east-northeast district of Japan

5 讨论

在非恒定载荷条件下,本文采用的三种加载方式所得到的 z 值分别为:0.266,0.160和0.250,载荷增长的趋势越快,所得到的 z 值相对就越小,能量加速释放就越明显,关于这一点,Main等人曾进行过研究^[38].另一方面,再将能量释放过程按照线性拟合,然后把 power-law 拟合结果与线性拟合结果作比较,在上面三种加载条件下,我们计算得到的比值 r (power-law 拟合的标准差与线性拟合的标准差之比)分别为:0.273,0.541,0.314,都较大程度的小于1,这也表明能量在非恒定载荷的条件下是呈 power-law 释放的.

我们知道,地下岩石圈的构造加载是一个相当缓慢的过程,因此,在一定时段内常常被看作是近似于恒定载荷的加载过程,Voight^[39]曾将这样能量释放过程表示为

$$\frac{dE}{dt} = \frac{k}{(t_f - t)^n}, \quad \text{其中 } k \text{ 为常数} \quad (12)$$

由此可得到 Benioff 应变(能量的平方根)的释放过程为

$$S = A + B(t_f - t)^z. \quad (13)$$

Ben-Zion & Lyakhovsky 通过 1-D 变形^[32]得到在常载荷条件下指数 $z = 1/3$,Turcotte 通过纤维束模型和损伤力学模型也有过类似的结论^[31].对此本文也进行了一定的分析,如图4所示,在常载荷条件下,当载荷水平 σ_0 较低时,相应的指数 z 的值也较小(图4(a), $\sigma_0 = 70$ MPa)为0.289,随着 σ_0 的增大,指数 z 也随之增大,当 $\sigma_0 = 150$ MPa 时,指数为

0.337(图4(e)),此时与 $z = 1/3$ 的结论相一致,当 σ_0 继续增大,如图4(f),指数 z 将会变得更大(0.372).通过我们计算得出 z 值应该在 $1/3$ 上下变化.

6 震例研究

为了对实际地震孕育过程中 z 值的变化进行研究,我们选取了自上世纪80年以来(截止2002年),在中国大陆发生的19个震级大于等于 $M7.0$ 地震进行分析,其中15例结果如图5所示,此外,还有4例地震由于或在周边地带(1例1990/6/14, $M7.4$)或为大震的强余震(1例1988/11/6, $M7.2$)或为深震(2例1999/4/8,2002/6/29),其资料不易于此项分析.选择的区域、时间及相关结果如表1所示,所有震例拟合得到的 z 值都在0.1~0.5之间,平均值为0.313,稍小于 $1/3$,这和上文计算得到的结果基本一致,与Ben-Zion等人的研究结果^[32]也非常一致.

表1 上世纪80年代至今(截止2002年),中国大陆发生的七级以上地震的震前 AER 参数表

Table 1 The AER powers of the earthquakes which occurred in China with Magnitude greater than 7.0 from 1980's to 2002

序号	时间 (年/月/日)	震级 (M)	震中位置 ($N^\circ; E^\circ$)	区域($^\circ$) ($N^\circ; E^\circ \pm \eta$)	z
1	1981/1/24	7.2	31.0 ;101.17	3.0	0.235
2	1985/7/29	7.0	36.0 ;70.7	3.0	0.297
3	1985/8/23	7.4	39.58;75.6	3.5	0.367
4	1988/11/5	7.1	32.9;90.7	3.0	0.479
5	1988/11/6	7.6	22.83;99.72	4.5	0.306
6	1990/4/26	7.1	36.12;100.13	3.0	0.253
7	1992/4/23	7.0	22.6;99.0	3.0	0.195
8	1994/9/16	7.4	22.67;118.75	3.5	0.346
9	1995/7/12	7.3	21.98;99.07	3.5	0.499
10	1996/2/3	7.2	27.3;100.22	3.0	0.130
11	1996/3/19	7.1	40.13 ;76.63	3.0	0.338
12	1996/11/19	7.2	35.43;78.35	3.0	0.310
13	1997/11/8	7.6	35.2;87.3	4.5	0.302
14	2000/6/8	7.2	26.78;96.85	3.0	0.214
15	2001/11/14	8.1	35.93 ;90.53	7.0	0.417

当 z 值确定以后,可再利用(8)式对灾变发生的时间 t_c 、震级等进行预测,如果再进一步结合加卸

载响应比(LURR)将可能对地震做出更为准确的预测.我们知道,LURR和AER在空间尺度上具有一致性,而LURR本身又具有很强的临界敏感性,它的异常变化发生(急剧升高)能够敏感地预示出灾变的来临,因此可利用LURR对可能发生地震的区域做出判断,然后再利用AER对地震发生的时间及震级做出预测.

2003年5月26日日本东北部宫城县(含仙台)发生里氏7.0级的地震,我们立即使用LURR和AER对该地区进行了分析,选择中心位置为北纬 39° ,东经 142° ,分析区域为其 $\pm 3^\circ$ 之间,得到指数为 $z = 0.443$;结合该地区地震资料(截止时间2003/5/26),由(8)式预计该地区在2003年8月~2003年11月间,将可能会发生6.5~7.4级的地震(结果如图6所示),本文第二作者于2003年6月6日在中国地震局分析预报中心作学术报告时,曾展示这一结果,并将报告的演示文件留存在分析预报中心.实际在日本宫城地区于7月26日和7月28日就连续发生了 $M5.6$ 、 $M6.2$ 和 $M5.2$ 的地震,之后又在预测的时间和区域内发生了一系列地震,包括9月份在预测范围内发生的震级约为 $M8.0$ 的强震.

7 小 结

本文运用损伤力学模型,研究了基于临界点理论的两重要前兆现象——加卸载响应比和能量加速释放,它们分别反映了灾变发生前临界敏感性的增大以及相关尺度的增加.在我们的计算中,即使采用不同的轴压加载历史,在材料破坏之前,能量(Benioff应变)也会表现出明显的加速释放过程(power-law),加卸载响应比值(LURR)也会出现急剧升高及回落,因此,把二者相结合,一起用作为灾变发生的前兆,将可能对地震等灾变做出更为准确的预测.

参 考 文 献 (References):

- [1] Willis B. Earthquake Risk in California 8. Earthquake Districts [J]. Bull. Seismol. Soc. Am. 1924, 14: 9 ~ 25.
- [2] Tocher D. Seismic history of san francisco bay region, calif [J]. Div Mines Spec Rep. 1959, 57: 39 ~ 48.
- [3] 陈章立, 刘蒲雄, 黄德瑜, 等. 大震前的区域地震活动性特征 [A]. 见: 国际地震预报讨论会论文集 [C]. 北京: 地震出版社, 1981, 121 ~ 131.
- [4] 黄德瑜, 冯浩. 强震前大范围地震活动性参数的时空扫描 [J]. 地震学报, 1981, 3: 344 ~ 353.
- [5] 李世愚, 尹祥础, 李红, 王敏. 闭合裂纹面相互作用过程中的多点破裂现象及其分析 [J]. 地球物理学报, 1989, 32(1): 174 ~ 182.
- [6] 刘蒲雄. 大震前地震活动性的增强特征 [J]. 地震, 2: 255 ~ 262.
- [7] 陆远忠, 吕悦军, 郑月军. 强震孕育后期地震活动演化的定量表征 [J]. 地震(增刊), 1994.
- [8] 尹祥础, 陈学忠, 尹灿. 加卸载响应比一个刻划构造运动稳定性新参数及其在地震灾害预测中的应用 [J]. 地球物理学进展, 1993, 8(4): 97 ~ 103.
- [9] 陈学忠, 尹祥础. 非线性科学在地震研究中的一些应用 [J]. 地球物理学进展, 1994, 9(1): 100 ~ 109.
- [10] 梅世蓉. 中国的地震活动性 [J]. 地球物理学报, 1, 19.
- [11] 尹祥础, 陈学忠, 宋治平, 尹灿. 加卸载响应比理论(LURR)一种新的地震预报方法 [J]. 地球物理学报, 1994, 37(6): 767 ~ 775.
- [12] 孙加林, 陆远忠, 曹井泉, 等. 地震活动性图像演化及有序性在短临预报中应用研究的新进展 [J]. 地震(增刊), 1995, 14: 566 ~ 572.
- [13] 滕春凯, 尹祥础. 非穿透裂纹平板试件三维破裂的实验研究 [J]. 地球物理学报, 1987, 30(4): 371 ~ 378.
- [14] 王新华, 尹祥础, 滕春凯. 用断裂力学方法研究地震断裂的扩展方式 [J]. 地球物理学报, 1984, 27(3).
- [15] 尹祥础, 李世愚, 李红, 王敏. 闭合裂纹面相互作用的实验研究 [J]. 地球物理学报, 1988, 31: 306 ~ 314.
- [16] 尹祥础, 尹灿. 非线性系统的失稳前兆与地震预报 [J]. 中国科学, 1988, 5: 512 ~ 518.
- [17] 张国民, 傅征祥. 华北强震的时间分布及物理解释 [J]. 地球物理学报, 1985, 28(6): 569 ~ 578.
- [18] 张国民. 我国大陆强震活动的韵律性特征 [J]. 地震地质, 1987, 9(2).
- [19] Vere-Jones D. Statistical theory of crack propagation [J]. Math. Geol., 1977, 9: 455 ~ 481.
- [20] Sornette A, Sornette D. Earthquake rupture as a critical point: Consequences for telluric precursors [J]. Tectonophysics, 1990, 179: 327 ~ 334.
- [21] Sornette D, Sammis C G. Complex critical exponents from renormalization group theory of earthquakes: Implications for earthquake predictions [J]. J Phys I, 1995, 5: 607 ~ 619.
- [22] Sammis C G, Smith S W. Seismic cycles and the evolution of stress correlation in cellular automaton models of finite fault networks [J]. Pure Appl Geophys, 1999, 155: 307 ~ 334.
- [23] Bowman D D, Ouilon G, Sammis C G, Sornette A, Sornette D. An observation test of the critical earthquake concept [J]. J Geophys Res., 1998, 103(24): 359 ~ 372.
- [24] Rundle J B, Klein W, Gross S. A physical basis for statical patterns in complex earthquake populations: models, predictions and tests [J]. Pure Appl Geophys, 1999, 155: 575 ~ 607.
- [25] Jaume S C, Sykes L R. Evolution toward a critical point: a review of accelerating seismic moment/energy release prior to large great earthquakes [J]. Pure Appl Geophys, 1999, 155: 279 ~ 306.
- [26] 吴忠良. 地震震源物理中的临界现象 [M]. 北京: 地震出版社, 2000.
- [27] Yin X C, Mora K Peng, Wang Y C, Weatherley D. Load-un-

- load response ratio and accelerating moment/energy release critical region scaling and earthquake prediction [J]. PAGEOPH, 2002, 159: 2511 ~ 2523.
- [28] Yin Xiangchu, Chen Xuezhong, Song Zhiping, Can Yin. A new approach to earthquake prediction—the Load/Unload Response Ratio (LURR) Theory [J]. PAGEOPH, 1995, 145 (3/4): 701 ~ 715.
- [29] Yin Xiangchu, *et al.* Development of a new approach to earthquake prediction: Load/Unload Response Ratio (LURR) theory [J]. Pure appl. geophys, 2000, 157: 2365 ~ 2383.
- [30] Bufe C G, Nissenko S P, Sykes L R. Clustering and potential for large earthquakes in the Alaska-Aleutian region (Extended Abstract) [A]. Proc. Wadati Conf on Great Subduction Earthquakes [C]. University of Alaska, 1992, 129 ~ 132.
- [31] Turcotte D L, Newman W I, Shcherbakov R. Micro-and Macroscopic models of rock fracture [J]. Geophys, J. Int. 2002, 152: 718 ~ 728.
- [32] Ben-Zion Y, Lyakhovsky V. Accelerated seismic release and related aspects of seismicity patterns of earthquakes faults [J]. Pure appl Geophys., 2002, 159: 2385 ~ 2412.
- [33] 余怀忠,尹祥础,夏蒙芬,梁乃刚,李敏,许昭永,彭克银,Victor Kukshenko, Wu Zhishen, Qi Li, Surguei Elizarov. 加卸载响应比(LURR)理论的实验研究[J]. 中国地震, 2003, 1: 58 ~ 66.
- [34] 余怀忠,尹祥础,夏蒙芬,梁乃刚,李敏,许昭永,彭克银,Victor Kukshenko, Wu Zhishen, Qi Li, Surguei Elizarov. 临界点理论的实验研究[J]. 地震学报(已投稿).
- [35] Yin Xiangchu, Yu Huaizhong, Victor Kukshenko, Xu Zhaoyong, Zhishen Wu, Min Li, Keyin Peng, Sergey Elizarov, Qi Li, Load-Unload Response ratio (LURR), Accelerating Energy release (AER) and State Vector evolution as precursors to failure of rock specimens [J]. Pure Appl Geophys. (accepted).
- [36] Lyakhovsky V. Ben-Zion Y, Agnon A. Distributed damage, faulting, and friction [J]. J Geophys Res, 1997a: 102: 27635 ~ 27649.
- [37] Lyakhovsky V. Reches Z, Weinberger R, Scott T E. Nonlinear elastic behavior of damaged rocks [J]. Geophys J Int. 1997b: 130: 157 ~ 166.
- [38] Main I. Prediction of failure times in the earth for a time-varying stress [J]. Geophys J, 1988, 92: 455 ~ 464.
- [39] Voigt B. A relation to describe rate-dependent material failure [J]. Science, 1989, 243, 200 ~ 203.