

利用固体点阵模型进行加卸载响应比的统计研究

——兼论潮汐诱发与地震预测*

王裕仓^{1), 2)} Peter Mora¹⁾ 尹 灿¹⁾ David Place¹⁾

1) QUAKES, Department of Earth Sciences, The University of Queensland, Qld 4072,
Brisbane, Australia

2) 中国科学院力学研究所, 非线性力学国家重点实验室 (LNM), 北京, 100080

摘 要 为了验证 Mora 等人利用固体点阵模型研究加卸载响应比结果的统计稳定性, 本文进行了统计实验。每种情况使用 24 组试件, 每一个试件具有相同的宏观参数 (潮汐扰动应力的振幅 A 、周期 T 、构造应力加载率 k), 但是粒子的排列方式不同。单轴压缩实验的结果表明: 在灾变破坏发生以前的一定时间内, 整体平均的加卸载响应比值明显升高, 与大地震发生前观察到的加卸载响应比值异常升高是一致的。在剪切实验中, 我们发现有两个参数控制着地震与潮汐应力的相关性。一个参数是 $A/(kT)$, 该参数控制着最大地震震率与扰动应力最大振幅的相角差。当该参数增加时, 该相角差降低。另一个参数是 AT/k , 该参数控制着模型地震概率密度函数的高度。当这个参数增加时, 概率密度函数变得又尖又狭窄, 表明潮汐应力有很强的诱发作用。剪切实验中加卸载响应比的统计研究结果也表明, 除了在潮汐诱发作用很强的情况下, 卸载周期中数据缺乏导致加卸载响应比不能计算外, 较大事件更容易出现在加卸载响应比的较高阶段, 该结论更进一步支持加卸载响应比理论。

关键词 加卸载响应比理论 (LURR); 固体点阵模型 (LSM); 数值模拟; 潮汐诱发; 地震预测
中图分类号 P315 **文献标识码** A

1 引言

几十年来, 地震的潮汐诱发或者潮汐应力与地震之间的相关性一直引起人们的兴趣。潮汐应力的变化率远远大于构造应力的变化率, 基于这个事实, 似乎有理由认为潮汐应力可以诱发地震。虽然有研究指出潮汐应力与地震之间的正相关性, 但是也有很多相反的结论。这种分歧至少表明两者之间没

有明显的强烈相关。

加卸载响应比理论从不同的角度来看待这个问题。加卸载响应比的主要思路是, 在损伤的初级阶段, 系统是稳定的, 此时, 系统对外部扰动是不敏感的。当接近宏观失稳破坏时, 系统对外界加载过程和卸载过程的响应是不同的, 在这个阶段, 有可能观察到潮汐应力的诱发作用。潮汐应力对地震的诱发作用没有被广泛观测到可能是因为, 瞬间的潮汐应力太小不能诱发地震并且也不是影响地震的唯一因素。过去的研究结果表明,

* 收稿日期: 2004-10-18。

在大部分中等强度地震预测中, 高加卸载响应比值出现在地震前几个月到几年的时间里。最近的研究结果表明, 加卸载响应比的临界区尺度与地震的震级之间有一定的比例关系, 这与能量加速释放的临界区尺度和地震震级之间的关系是相似的, 这表明加卸载响应比理论与能量加速释放可以判断系统是否达到临界状态, 而且它们可能有相同的物理机制。

作为理解加卸载响应比理论物理机制的第一步, 我们利用固体点阵模型进行了模拟研究。初步的数值模拟结果表明, 在试件达到宏观破坏之前, 加卸载响应比逐渐升高, 临近主断裂时突然降低, 这与实际地震预测中加卸载响应比的变化趋势是相似的, 这些结果也表明, 加卸载响应比可以很好地预测弹脆性材料的宏观失稳破坏。由于模型中采用了随机尺寸的粒子, 为了验证统计稳定性和可能的对参数的依赖性, 我们需要运用不同随机机构形和参数来进行统计研究。

本文首先描述了单轴压缩实验中利用固体点阵模型模拟的加卸载响应比的统计特征。第二部分介绍了剪切实验。因为剪切实验中出现了更多的事件, 该部分研究了不同参数对地震的影响以及剪切实验中加卸载响应比的统计特征。

2 使用不同随机机构形的单轴压缩实验条件下加卸载响应比的统计实验研究

和我们以往的模拟一样, 本文中的模型是由直径为 $0.2 \sim 1$ 不同尺寸的粒子构成的 2-D 非均匀块体。实验中, 利用刚性驱动板在模型的上下两个边界施加单轴压缩载荷, 采用应力控制和应变控制两种加载方式。详细的实验标准和裂纹走向可在我们以往的文章中看到。为了模拟潮汐应力对地球的加载和卸载作用, 在恒定加载率的条件下施加正弦扰动载荷

$$\sigma_{zz} = A \cos(2\pi t/T) \quad (1)$$

式中, T 和 A 分别为潮汐应力的周期和振幅。因此, 总应力为 $\sigma_{zz} = \sigma_{zz} + kt$, k 代表构造应力 σ_{zz} 的加载率。

加卸载响应比用下式来计算:

$$LURR = E^+ / E^- \quad (2)$$

式中, E^+ 和 E^- 分别为给定的时间窗内加载阶段和卸载阶段的累积地震能量释放。累积地震能量释放是指在给定的计算时间内加载阶段和卸载阶段释放的全部动能的总和, 我们定义 $d\sigma_{zz}/dt > 0$ 时为加载, $d\sigma_{zz}/dt < 0$ 时为卸载。任意给定时刻的全部动能释放由累加 t 时刻前系统内部的动能与损失的人工粘性能量而得到。

本次实验中的 24 组数值模拟采用相同的参数 T , A , k , 但是随机大小的粒子组成不同的宏观构型。加卸载响应比值的计算与前文的方法是相同的。由于样本个性行为, 对于不同的试件, 其断裂方式和灾变发生的时间是各不相同的。所以, 为了比较和平均, 试件失稳的时间归一化为 1。图 1 为前面所提到的具有相同参数的 24 组试件的平均加卸载响应比的变化曲线, 其中时间轴进行了归一化处理。由图中可以看到, 平均加卸载响应比值在 $t = 0.5$ 时开始上升, 至 t

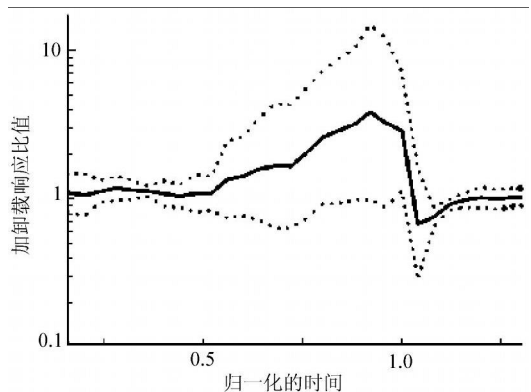


图 1 加卸载响应比整体平均值的演化规律 (24 个试件)

虚线为标准偏差, 参数分别为: $k = 30 \text{ MPa}/100000$ 时间步长, $T = 4000$ 个时间步长, $A = 0.96 \text{ MPa}$

= 0.9时达到极大值, 然后, 在 $t = 1.0$ 的主破坏发生以前突然降低, 当 $t = 1.0$ 之后, 虽然还有许多事件, 但是曲线非常平缓。我们也注意到加卸载响应比值的标准偏差在主破坏发生以前升高。

由于计算能力的限制, 不可能对所有的参数进行扫描, 本次模拟中所选取的参数 T, A, k 只在 5 倍大小范围内变化, 得到与前文相似的结果, 表明我们原来的结论是统计稳

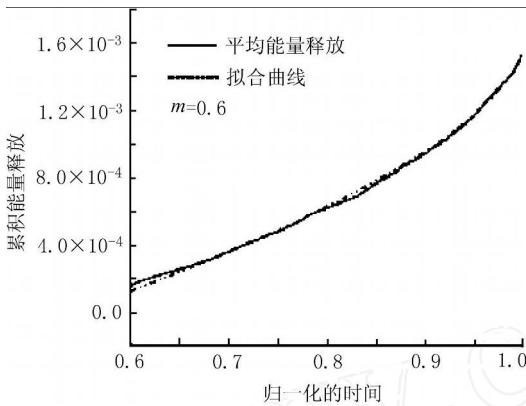


图 2 累积能量释放整体平均值的演化规律
虚线是根据时间失稳函数 $(t) = A + B(t_f - t)^m$ 确定的拟合曲线, 参数如图 1

少的事件出现 (一般为 20 ~ 30 个), 因此, 为了在较大地震发生前能够得到更多的事件, 在下一部分中开展了剪切实验的研究。

3 剪切实验条件下加卸载响应比的统计实验研究

3.1 模型描述

在该实验中, 计算模型为两个弹性区内包含一个中间断层的夹层结构, 弹性区的外部为刚性的驱动板。断层区由随机尺寸的颗粒组成, 断层的表面粗糙度由两个参数控制: 分维 D 和凹凸体高度 H (本文中取为 0.5 和 1.6)。在断层区的颗粒之间, 施加与法向压力成比例的摩擦力。边界条件为水平方向的周期边界条件。通过以中等的常速率移动驱动板来产生剪切应力, 同时保持常数

定的。

图 2 为以上所提到的 24 组试件在主破坏前的平均累积能量释放。图中虚线为根据时间失稳函数 $(t) = A + B(t_f - t)^m$ 确定的拟合曲线, 这里 t_f 设为 1。由图中可以看到明显的能量加速释放, 这些结果表明在主破坏发生前加卸载响应比剧增和能量加速释放两种现象都出现了。

在单轴压缩实验中, 在灾变发生前有较

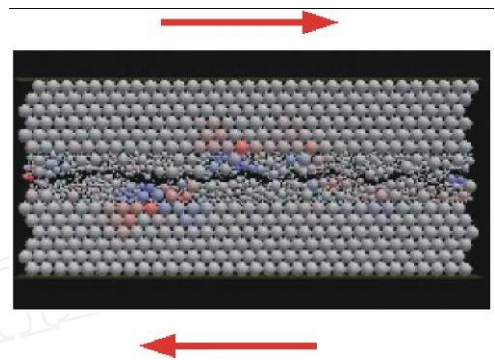


图 3 剪切实验示意图

边界条件为水平方向的周期边界条件, 上下刚性驱动板施加 150 MPa 的正应力

150 MPa 的法向应力来模拟构造应力。类似地, 在缓慢变化的构造应力上施加微小的正弦扰动来模拟潮汐应力。模型允许沿断层区内表面发生破裂, 来模拟滑动和粘着过程 (甚至是凹凸体破坏)。因此, 本模型可以认为是相互作用的包含一个长的单一断层的断层系统的简化模型。

3.2 参数对地震发生的影响

为了模拟潮汐应力对地震发生的影响, 实验参数不能随便选取, 而是依据下面的条件:

$$| \frac{d}{dt} \frac{zz}{zz} | \ll \frac{d}{dt} \frac{zz}{xx} \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{zz}{zz} \gg k \quad \frac{d}{dt} \frac{zz}{zz} = k \quad (4)$$

$$T_e \ll T \ll T_L \quad T_e \quad T \quad T_L \quad (5)$$

式中, T_e 是地震断裂的持续时间, T_L 是大地

震之间的平均间隔时间，引入两个无量纲的

$$\text{参数 } k_1 = \frac{d \dot{\sigma}}{\sigma} \text{ 和 } k_2 = \frac{d \dot{\sigma}}{dt} / k =$$

$$\frac{2A}{Tk}$$

和 (4) 需要 $k_2 \gg 1$, $k_1 \ll 1$ 或者 $Tk/2 \ll A \ll kt$, t 是构造应力的加载时间。

自然界中，潮汐应力可以达到 0.001 ~ 0.004 MPa，它的加载率是 0.001 MPa/h，典型周期是 12 小时。构造应力在 10 ~ 100 MPa 的数量级，长期的加载率大约为 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ MPa/h。所以，上述两个参数的取值范围大致为： $k_1 = 10^{-5} \sim 10^{-4}$, $k_2 = 10^1 \sim 10^3$ 。

由于计算能力的限制，在本文的实验中不可能选取实际的参数进行数值模拟。因此，我们选取一个较高的加载率。此时， $A = 0.06 \sim 4.8$ MPa, $T = 2000 \sim 8000$ 时间步长, $k = 10^{-4} \sim 10^{-3}$ MPa/时间步长，试件的强度约为 120 MPa。因此， $k_1 = 5 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-2}$, $k_2 = 1 \sim 100$ 。注意当 $k_2 < 1.0$ 时意味着 $d \dot{\sigma}/dt$ 恒为正，违反方程 (4)，在这种情况下不能计算加卸载响应比。虽然如此，为了研究参数对地震的影响仍然计算概率密度函数 (见下)。

为了研究参数 A 、 T 、 k 对地震发生的影响，我们比较了不同参数条件下事件随相角的概率密度函数。这里，相角 ϕ ，

$$\phi = \frac{2\pi}{T} (t - nT)$$

是事件发生的时间。

典型的概率密度函数如图 4 所示。从图中可以看出一般有一个峰值，并且在最大的地震发生率和扰动应力的最大振幅之间有一个相移 ϕ 。更进一步的研究结果表明，概率密度函数主要由两个组合参数 k_2 和 k_3 ，而不单由单个的参数 A 、 T 、 k 控制。参数 k_2 控制相移 ϕ ，图 4 中清楚地表明了这一点。在 k_2 相同而 A 、 T 、 k 各不相同的三条曲线中，概率密度函数的最大值出现在相似的位置。

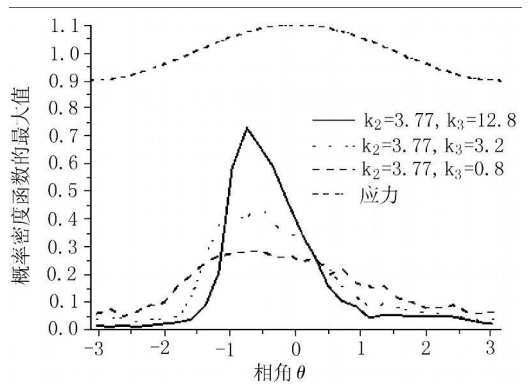


图 4 事件数的概率密度函数随相角的变化曲线 (k_2 相同, A/k 、 T 各不相同)

参数分别为： $k = 5$ MPa/10000 时间步长, $T = 8000$ 个时间步长, $A = 2.4$ MPa ($k_3 = 12.8$)； $k = 5$ MPa/10000 时间步长, $T = 4000$ 个时间步长, $A = 1.2$ MPa ($k_3 = 3.2$)； $k = 5$ MPa/10000 时间步长, $T = 2000$ 个时间步长, $A = 0.6$ MPa ($k_3 = 0.8$)

当 k_2 增大时，相移似乎从 2 降低到 0 (如图 5 所示)。这表明，最大的地震发生率从最大的扰动率的位置转变到最大扰动的位

置。另一个参数 $k_3 AT/k$ 控制概率密度函数曲线的最高点。当这个参数增大时，概率密度函数曲线变得又尖又狭窄，表明潮汐与地震之间强烈的相关性 (如图 6 和图 4)。当参数 k_3 很小 (例如 0.8) 时，概率密度函数曲线几乎是平的，表明二者没有明显的相关性。

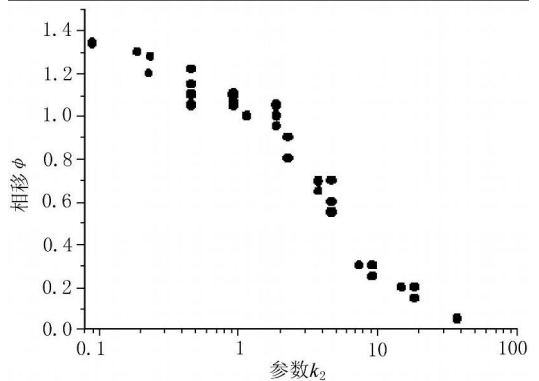


图 5 相移 ϕ 与参数 k_2 的依赖关系

k_2 增加时， ϕ 降低，表明最大的地震发生率向最大的潮汐力的位置转变

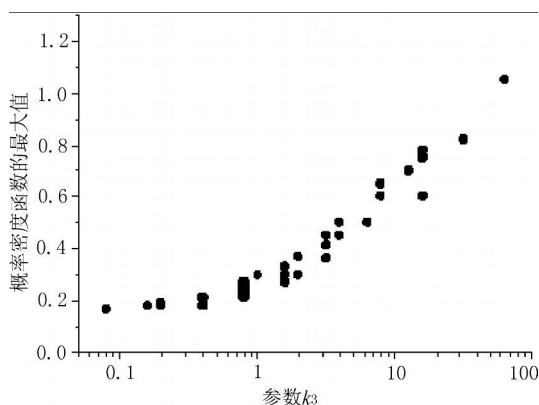


图 6 概率密度函数的最大值与参数 k_3 的关系曲线
参数 k_3 增大时, 概率密度函数曲线变得又尖又狭窄, 表明更强的诱发作用

因此, 我们可以得出结论: 在这样的弹脆性系统中, 一个较大的扰动振幅和较小的加载率使得潮汐应力与地震发生之间表现明显的相关性。除 A 、 k 以外, 潮汐应力的周期 T 也起着非常重要的作用。一方面, 降低潮汐应力的周期 T 也可以使最大的地震发生率接近扰动应力的最大值。另一方面, 较小的 T 可以降低概率密度函数曲线最大值的高度, 降低潮汐应力对地震的影响。

3.3 剪切实验条件下加卸载响应比的统计实验研究

由于在最大地震率和最大扰动应力之间存在一个相移。所以, 这里我们要重新定义加载和卸载。本文中, $\cos(2t/T + \phi) > 0$ 定义为加载, 否则定义为卸载。同时, 为了使加卸载响应比的平均值在 1 附近, 应该扣除平均的触发效应。为此, 定义了一个描述平均触发效应的参数:

$$= \frac{\text{加载过程的全部事件数}}{\text{卸载过程的全部事件数}} \quad (7)$$

此时, 加卸载响应比可以用下式表示:

$$LURR = \frac{E^+}{E^-} \quad (8)$$

式中, E^+ , E^- 分别为模型地震中加载过程和卸载过程释放的动能。为了避免很大的振

荡, 所取的计算时间窗为 $3T$, 并且进行了能量截断, 计算中所取的能量为小于 3×10^{-5} 。与压缩实验不同, 由于在本模拟中并没有出现决定性的大事件, 本次模拟中采用了不同的统计方法, 而没有对失稳时间进行归一化处理。对于有相同参数的 8 组模拟, 我们将全部事件分成两组: 10% 的较大事件和其他小事件, 然后, 我们比较这两组事件中模拟地震发生对加卸载响应比的概率密度函数曲线。图 7 中的虚线为较小事件发生在一定加卸载响应比区间内的比例, 由图中可以看出, 概率密度函数几乎是随机分布的。但是, 图中所示的 10% 大事件的概率密度函数曲线明显向右移动, 说明较大事件更容易出现在加卸载响应比较高的阶段, 而较少出现在加卸载响应比的较低阶段。

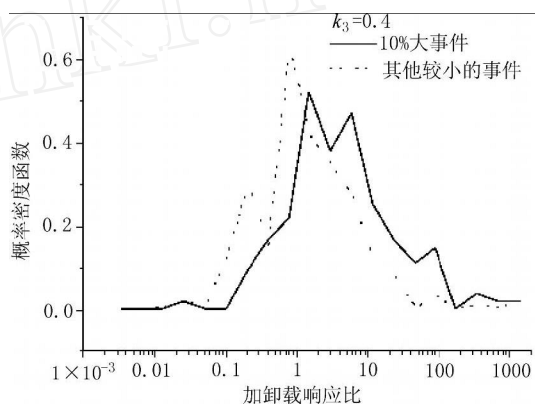


图 7 概率密度函数随加卸载响应比的变化曲线
(实线为 10% 的大事件, 虚线为其他较小的事件)

$k = 5 \text{ MPa}/10000$ 时间步长, $T = 2000$ 个时间步长, $A = 0.6 \text{ MPa}$, $k_3 = 0.4$, $\phi = 1.31$

在潮汐强触发的算例中, 由于在卸载过程有很少的事件出现, 所以很难计算加卸载响应比的值。加卸载响应比只能出现在弱触发的情形。我们的统计结果表明, 除了潮汐触发作用很强的实例 (参数 k_3 很大, 例如 $k_3 > 0.8$) 外, 在其他的算例中也出现了相似的结论 (如图 8 所示)。这些结果表明, 虽然没有普遍的潮汐和地震的相关性, 但是仍然可

以看出较大事件更容易出现在加卸载响应比较高的阶段。

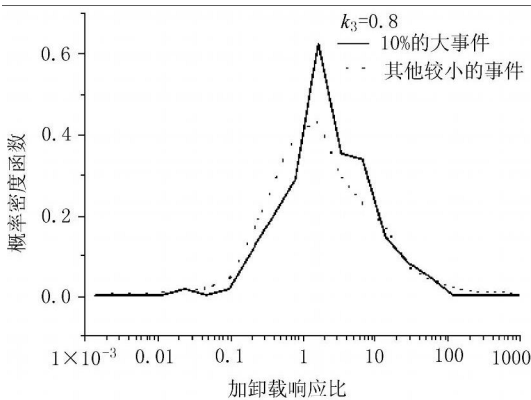


图 8 概率密度函数随加卸载响应比的变化曲线 (实线为 10%的大事件, 虚线为其他较小的事件)
 $k = 5 \text{ MPa}/10000$ 时间步长, $T = 2000$ 个时间步长, $A = 0.3 \text{ MPa}$, $k_3 = 0.8$, $\alpha = 1.45$

4 讨论与结论

本文中提出的统计研究结果证明了以往结论的正确性。在潮汐弱触发的剪切实验中, 大事件比小事件更容易出现在加卸载响应比较高的阶段。这些结果表明, 即使在潮汐应力对地震没有明显的触发作用的情形, 但是仍然可以观测到大地震前潮汐应力与地震的某些相关性。

我们从这种简单的弹脆性系统中, 在所选择的参数范围内, 观测到一个在最大地震率和扰动应力的最大振幅之间有一个似乎是固有的, 由参数 $A/(Tk)$ 决定的相移。已经有实验和数值模拟支持这种现象。地震概率密

度函数的高度或者说潮汐触发的程度由参数 AT/k 所控制。这两种参数的物理机制还不清楚, 这需要进行进一步的观察和数值模拟方面的研究工作。

本文提出的结论也对潮汐作用没有被广泛观测到的原因提出了一种解释。根据 Vidale 的理论, 震前应力率比长期的构造应力率要大很多 (前者约是后者的 1000 倍), 这样就降低了潮汐效应。我们的模拟并没有与该理论相冲突, 在我们的研究中, 高应力率就意味着低的 k_3 值, 因此, 削弱了潮汐效应。另外, 破坏时间滞后的机制被用来解释实验观察到的现象, 在今后的数值模拟研究中还应该加入这种机制。然而我们的结果也表明, 即使在没有破坏时间滞后的弹脆性材料中, 小的扰动周期 T 也可能导致潮汐应力与地震之间的弱相关性。这些也意味着, 当研究潮汐应力对地震的触发作用时, 不仅要考虑周期较小的扰动应力, 也有必要考虑周期较大的成分的作用。

(致谢: 本课题由澳中科技合作特别基金、昆士兰大学新进研究人员科研启动基金、中国国际交流与合作基金、中国自然科学基金 (40004002) 资助, 本文作者特别感谢两位匿名评审专家提出了宝贵的修改意见。)

(译者电子信箱, 张晖辉: zhanghh@lmm.imech.ac.cn)

(译自: Pure and Applied Geophysics, 2004, 161: 1829-1839. 张晖辉, 颜玉定 译, 尹祥础 校)