

走进地震预测

——加卸载响应比方法

袁帅^{*,**,(1)} 尹祥础^{*,†} 梁乃刚^{*} 刘月^{*,**}

^{*}(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)

[†](中国地震局地震预测研究所, 北京 100036) ^{**}(中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 概括介绍了加卸载响应比的基本思路、基本概念、物理基础、加卸载响应比在地震预测中的应用以及取得的一些成果. 加卸载响应比方法物理基础扎实, 只需利用地球内部的某些实测数据, 为地震预测提供了一条新的途径.

关键词 加卸载响应比, 地震预测, 地震活动性

首先要从一个寓言故事说起: 有一个商人让他的骆驼驮了很重的货物, 他对同伴炫耀说: “伙计, 你瞧我的骆驼多能干啊!” 同伴说: “伙计, 你的这匹骆驼是很能干, 可它也已经驮到极限了, 你看它的腿在哆嗦呢! 我敢保证, 如果再加一根稻草, 就足以把这个可怜的家伙压垮了.” 商人很不服气, 说: “尊敬的伙计, 你也太小瞧我这匹骆驼了, 你看它威猛无比, 我就不信一根稻草能将它压垮.” 同伴说: “那就见证一下吧.” 说着同伴捡起一根稻草, 往骆驼背上轻轻一放, 这匹威猛而能干的骆驼果然轰然倒下. 这是一个广为流传的寓言故事, 而这个故事也为地震预测提供了启发.



图1

在寓言中, 骆驼负重已经达到了临界状态, 加一根稻草和减一根稻草对于骆驼来说是有天壤之别的: 减一根稻草, 骆驼会感觉少许轻松, 而加一根稻草骆驼就会被压垮; 而在负重很小的情况下, 骆驼对于加减一根稻草却有相似的反应, 少许加重或者少许轻松. 同样道理, 如果把地壳比作骆驼的话, 当进入大地震前的临界状态, 地壳对于加载和卸载的响应也会有着巨大的差别. 正是基于这个道理, 尹祥础提出加卸载响应比理论, 来为地震预测提供一条新的途径.

地震是极具破坏力的自然现象, 地震造成的人员伤亡和

本文于 2010-11-19 收到.

1) E-mail: yuans@lnm.imech.ac.cn

财产损失是非常巨大的, 进行地震预测、预报是减少地震破坏力的最有效的方法之一. 地震的孕育过程是极其复杂的, 但从力学角度看, 其物理实质在于震源区介质的损伤、失稳和破坏, 地震的孕育过程就是震源区介质的损伤、演化、破坏过程. 图2是典型的岩石的本构曲线, 本构关系表征受到外载时, 材料的各力学量之间的关系. 图中纵坐标表示载荷 P , 横坐标表示响应 R , 在一维应力应变状态下即是相应的应力和应变. 如果使材料的受力单调增加, 材料将分别经历弹性变形(A)、损伤(B)、失稳(C)等过程. 弹性变形的本质特征为其可逆性, 即加载过程和卸载过程是可逆的(加载和卸载沿同一条曲线变化); 损伤过程的本质特征与弹性过程相反, 具有不可逆性(加载和卸载不沿同一条曲线变化), 这种差异反映了材料的损伤或劣化的程度. 加卸载响应比理论的出发点即基于此. 在加卸载响应比理论里面, 首先要定义两个基本的参数.

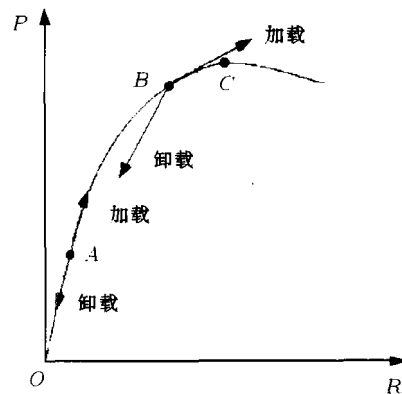


图2 岩石材料本构曲线

(1) 响应率: 设载荷增量为 ΔP , 相应的响应的增量为 ΔR , 定义响应率 X 为

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

(2) 加卸载响应比: 令 X_+ 和 X_- 分别代表加载与卸载时段的响应率, 则加卸载响应比 Y 定义为

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

对于弹性变形, $X_+ = X_-$, 因而 $Y = 1$. 而对于损伤过程, $X_+ > X_-$, $Y > 1$; 当系统失稳时, $Y \rightarrow \infty$.

而将加卸载响应比应用于地震预测要解决 3 个主要的科学问题。

(1) 如何对地壳进行加载和卸载

整个孕震区的线尺度可达几百甚至上千公里，对这样巨大的系统进行加卸载，显然不是目前人力所能及的。好在大自然正好为我们提供了这样的条件，这就是日、月运行产生的引潮力。日月引潮力的周期性变化就实现了对地球的周期性加载和卸载。

(2) 如何判断加载和卸载

根据大量实验研究，对于岩石材料，库仑准则是最适用的。根据库仑准则，断层面的库仑应力（有效剪应力）为

$$CFS = \tau_n + f\sigma_n \quad (3)$$

其中， f 、 τ_n 和 σ_n 分别代表断层面的内摩擦系数、剪应力和正应力。 $\Delta CFS > 0$ 判断为加载，反之， $\Delta CFS < 0$ 判断为卸载。

众所周知，地壳应力 σ_{ij} 包含构造应力 σ_{ij}^T 和潮汐应力 σ_{ij}^t 。由于构造应力 σ_{ij}^T 的量级 ($10^6 \sim 10^8 \text{Pa}$) 远远高于潮汐应力 σ_{ij}^t 的量级 ($10^3 \sim 10^4 \text{Pa}$)，因此可以认为地壳应力的主方向和构造应力的主方向是一致的。然而，由于潮汐应力的变化率远远大于构造应力的变化率，因此库仑破裂应力的增量 (ΔCFS) 主要是由于潮汐应力引起的。地壳的弹性变形可以通过对 6 个一阶偏微分方程求解得到。采用龙格-库塔数值计算方法，可以计算出任何截面上的潮汐应力分量。这样在法线方向为 n 的断面上的正应力和剪应力就可以通过应力张量的坐标转换得到，然后根据式 (3) 就可以很容易的计算出库仑破裂应力增量 (ΔCFS)。

(3) 如何选取响应

在地震学中可以用地震能量，在实验中用声发射能量来定义加卸载响应比 Y 。选取地震能量作为响应，定义加卸载响应比 Y 为

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

式中， E 为地震能量，“+”和“-”分别代表加载和卸载， m 为一个 $0 \sim 1$ 之间的常数， $m = 1$ 时， E_i^m 是该次地震的能量； $m = \frac{1}{2}$ 时， E_i^m 即为地学中熟知的贝尼奥夫应变； $m = \frac{1}{3}$ 及 $\frac{2}{3}$ 时， E_i^m 分别代表震源体的线尺度和面尺度； $m = 0$ 时，加卸载响应比定义为加载地震跟卸载地震次数的比值。 $N+$ 和 $N-$ 分别为所研究时段加载和卸载地震的总数。

解决了这 3 个问题以后，就可以将加卸载响应比应用于实际的地震预测。在强震发生前加载响应大于卸载响应，加卸载响应比出现异常，从而为地震预测提供重要的依据。加卸载响应比提出以来取得了较好的效果。2004~2007 年期间 92% 的震级 $M \geq 5$ 的地震，都落在 LURR 预测区内。关

于汶川地震，在震前做过一定程度中期预测，但临震前没有做出正确判断，震后对地震序列判断正确并且成功预测了数次余震（正式填写预报卡）。2008 年中国大陆发生的 8 次 6 级以上地震，除 2 次发生在西藏等缺乏资料地区的地震外，都符合 LURR 的规律。

根据大量的研究，发现加卸载响应比在地震发生前的一般演化规律为：在地震孕育初期，加卸载响应比值 Y 在 1 附近波动，在强震来临的时候，加卸载响应比值发生异常，升高、达到峰值、然后回落，即在主震发生的前夕，加卸载响应比会迅速下降，然后地震发生。图 3 为典型的加卸载响应比 Y （即 LURR）的演化曲线。南加州 1989 年地震发生前，加卸载响应比突然上升，然后下降，到年底（红色箭头所指的时间）即发生了 6.9 级强地震。

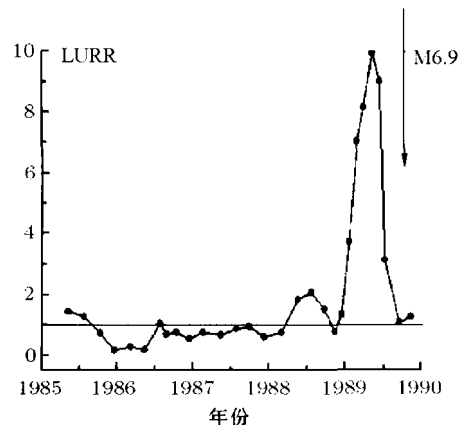


图 3 1989 年南加州地震前加卸载响应比的演化曲线

图 4 为加卸载响应比在汶川地震余震预测中的应用。横轴为时间，黑色点的纵轴为响应比的值，红色竖线的纵轴为发生余震的震级 M ，水平的蓝色虚线代表响应比为 1 的边界，虚线上的点为异常点。由图中可见，加卸载响应比的预测效果比较好，跟汶川地震余震的对应情况比较好。

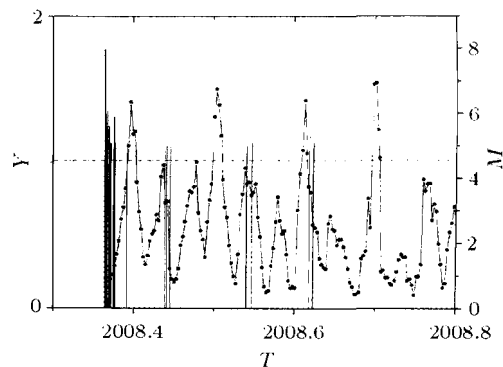


图 4 加卸载响应比在汶川地震余震预测中的应用

不难看出，加卸载响应比值 Y 可以定量地刻画岩体逼近失稳的程度。地震及许多其他地质灾害，如滑坡、岩爆及火山喷发等均为不同尺度岩体的失稳现象，因此加卸载响应比理论可能为地质灾害的预测开辟出一条新的途径。