



关于加卸载响应比理论运用于地震预测的几点思考*

万永革

(中国地震局防灾技术高等专科学校 燕郊(北京东) 101601)

摘要 加卸载响应比理论已在地震预测中得到广泛应用,但也面临挑战。本文对加卸载响应比理论及方法进行了分析,并提出该理论几个可能的研究方面(1)根据固体潮应力变化值给定每个小地震 Benioff 应变在加卸载响应比计算中的权重(2)考虑地震之前应力空间分布,确定加卸载响应比可能升高的区域形状,进而确定加卸载响应比计算中小震资料的选取范围(3)将实测的小震震源机制与假定小震震源机制都相同时的加卸载响应比计算结果进行比较,研究测定的小震震源机制对加卸载响应比方法的改善情况(4)研究加卸载响应比方法对不同震源机制类型地震的适用情况。

关键词: 加卸载响应比; 权重; 应力分布; 震源机制

中图分类号: P315.72⁺7

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2004)02-0178-05

0 引言

地震预测的加卸载响应比方法(LURR)是目前比较流行的地震预测方法之一。该方法具有物理基础并且在地震预测实践中取得了令人鼓舞的预测效果。然而近年来,随着该方法应用的推广,也出现了一些与该方法预测相矛盾的震例,对该方法的进一步广泛应用提出了挑战。本文首先对加卸载响应比的基础理论进行简要介绍,然后作为抛砖引玉,提出了该理论进一步研究的几个可能方面。

1 加卸载响应比理论简述

地震的发生是地壳介质在构造应力场作用下的突然失稳,沿其薄弱面,即断层产生脆性快速破裂的结果,并伴随着机械能的快速释放。这是地震这一特殊运动形式与其他一般的构造运动(如造山运动、板块运动、断层蠕滑等)的最本质的区别^[3]。根据岩石断裂力学和损伤力学的加载破坏试验规律,尹祥础研究员及其研究小组提出了加卸载响应比理论^[1~4]。该理论认为,地球岩石圈作为一个强非线性系统,当系统处于稳定状态时,其对加载与卸载的路径相同,加载相应率与卸载响应率大致相等;当系统偏离稳定时,加载与卸载的响应路线不同,加载响应率大于卸载响应率;当系统失稳时,两者之比无限增大。为了描述系统的稳定性,定义如下物理量——加卸载响应比 Y :

$$Y = \frac{\text{系统对加载的响应率}}{\text{系统对卸载的响应率}} \quad (1)$$

当系统处于稳定状态时, $Y=1$;当系统偏离稳定时, $Y>1$;当系统失稳时, $Y \rightarrow \infty$ 。

将响应比理论应用于地震预测时,第一个问题是怎样对震源区进行加载和卸载?众所周知,固体潮引力每时每刻都在对地球进行加载和卸载,因此可以选择它来对震源区进行加载和卸载。根据 Coulomb 准

* 收稿日期 2003-06-16

基金项目 地震科学联合基金资助项目(065201)和国家重点基础研究发展规划项目(2001CB711000)共同资助。

作者简介 万永革(1967-)男(汉族)河北馆陶人,副研究员,现在中国地震局地质研究所作博士后主要从事地震学、地球动力学研究和教学工作。

则,岩石趋于破裂时的库仑破裂应力 (Coulomb failure stress) 为

$$\sigma_f = |\tau| - [S - k\sigma_n] \quad (2)$$

这里, $|\tau|$ 为地震破裂面上剪应力的大小; S 为材料的内聚应力; σ_n 为平面法向应力; k 为材料的内摩擦系数。通常假定 k 和 S 不随时间变化, 而定义库仑破裂应力变化 (Coulomb failure stress change) 为^[1,3,5]

$$\Delta\sigma_f = \Delta|\tau| + k\Delta\sigma_n \quad (3)$$

其中 $\Delta|\tau|$ 、 $\Delta\sigma_n$ 为固体潮加卸载应力变化张量在断层面上的投影。若 $\Delta\sigma_f$ 为正, 则对后续地震有加载效应, 发生的地震称为“加载地震”(load earthquake); 相反 $\Delta\sigma_f$ 为负, 对后续地震有卸载效应, 发生的地震称为“卸载地震”(unload earthquake)。

第二个问题是怎样选择响应参数 R 。对于地震, 一般来说可以选择与地震孕育有关的参数, 通常选择地震能量 E 的平方根 (所谓 Benioff 应变) 为响应参数, 定义加卸载响应比为

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^{N_+} E_i^{\frac{1}{2}}}{\sum_{i=1}^{N_-} E_i^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

式中 N_+ 为处于大地震发生前的某个时段内在固体潮加载期间发生的地震数; N_- 为固体潮卸载期间发生的地震数。

采用 LURR 方法尹祥础等已经对数百个震例进行回顾性研究, 结果表明 80% 以上的地震在震前加卸载响应比明显增高并持续保持高值^[2]。作为对比, 中国大陆的 7 个具有较低地震活动的地区 (无 $M_s \geq 4$ 的地震发生) 在 20 年的检验时段内的加卸载响应比均在 1 附近涨落^[1]。

采用该方法, 尹祥础等进行了 16 次地震预测实践, 其中 12 次为正确的地震预测意见; 4 次地震未发生在预测的时间段, 没有地震漏报发生^[2]。特别是, 采用 LURR 对 1994 年 1 月 17 日美国洛杉矶地震 (现称 Northridge 地震) 和 1996 年 9 月 11 日日本关东地震的成功预测受到国际地震界的重视。

LURR 理论的有效性也为一系列的岩石力学实验^[6,7]和数值模拟^[8]所验证。对加卸载响应比方法在统计意义上进行分析^[9,10], 发现只要有足够的地震数目, 加卸载响应比确实反映了地壳趋近失稳的程度。宋治平等^[11]和王裕仓等^[12]对地震之前加卸载响应比的变化图式进行了分析, 为加卸载响应比方法在地震预测中的应用提供了基础。值得提出的是, 最近对新疆伽师地震危险区划分的主要判据也是采用了加卸载响应比方法 (张天中, 陈学忠, 私人通信)。

尽管过去的工作有不少显著成果, 并为今后的发展提供了希望, 但随着 LURR 方法在地震预测实践中的进一步应用, 发现一些被漏报的地震 (张天中, 私人通信)。最近许昭永等^[13]的实验结果表明加卸载响应比的倒数在逼近主破裂时, 急剧下降并出现极小值 (甚至为负值)。他们指出这可以看作临近主破裂的标志。因此加卸载响应比还有许多问题值得进一步研究。本文拟对一些相关问题进行讨论。

2 加卸载响应比理论应用于地震预测应进一步澄清的问题

在以往的加卸载响应比方法中, 通常假定在研究区域内所发生的小震震源机制与后续发生的大地震相同, 这是因为中国大陆乃至世界范围内还很难得到较为详细的小震震源机制目录。然而在大地震发生前, 地壳处于临近失稳状态, 应力轴的取向和主应力的大小会发生一定的变化^[14]。如唐山地震前的构造应力场的主应力方向发生改变的持续时间达 4 年之久^[15~17], 这些变化会造成小震震源机制的变化。宁河地震前也发现类似的现象^[18]。因此, 加卸载响应比计算中考虑精确的小震震源机制是必要的。近年来随着观测技术的提高, 在世界范围内能提供详细小震震源机制的震级下限越来越低 (如美国南加州地区和日本), 为解决这一问题提供了资料基础。一个可行的思路是首先利用大地震之前具有详细小震震源机制的地震目录进行回顾性检验, 研究加卸载响应比方法的改善情况, 然后根据结果确定加卸载响应比预测理论考虑测定的小震震源机制的必要性。

在以前的加卸载响应比预测地震的过程中, 没有考虑地震不同类型的震源机制对加卸载响应比方法预测结果的影响。然而, 实际上不同类型的地震具有不同的机制和前兆现象。比如, 地震前震对地震机制

就有非常强的选择性^[19];不同震源机制类型具有不同的触发效应^[20];潮汐的触发作用对正断层型的地震比较显著,而对逆冲型和走滑型地震就没有这种现象^[21]。因此需要进行不同震源机制类型地震震前的加卸载响应比进行对比研究。

以前的加卸载响应比方法没有考虑固体潮产生的库仑破裂应力变化影响大震之前小震加卸载响应比变化的阈值。然而对于特定的地区和特定的断层,固体潮产生的小震断层面上的库仑破裂应力变化相当小,可能使得此应力变化对该区内的小震发生不敏感。因此有必要考虑特定地区固体潮计算的库仑破裂应力变化阈值,研究加卸载响应比的适用情况,给出不同库仑破裂应力变化阈值计算的加卸载响应比与大震的对应关系。

3 加卸载响应比方法进一步发展的可能生长点

(1)在地震预测的加卸载响应比方法中,常根据式(4)计算大震之前的加卸载响应比,未考虑固体潮在该小震断层面上产生的库仑破裂应力变化的幅值,给定地震发生在库仑破裂应力变化的零值附近和峰值处以相同的权重。若有较大的小震发生在零值附近,则会对加卸载响应比的计算造成较大的影响。然而固体潮产生的库仑破裂应力变化的幅值对于不同地区和不同的断层机制有很大差别,采用适合于不同地区的加卸载响应比计算的方法非常重要。作为建议,可采用固体潮产生应力日变化的峰值将该小震的 Benioff 应变归一化。将式(4)修改为

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^{N_+} a_i E_i^{\frac{1}{2}}}{\sum_{i=1}^{N_-} a_i E_i^{\frac{1}{2}}} \quad (5)$$

这里 a_i 为第 i 个地震发生时,该小震破裂面上固体潮产生的库仑破裂应力变化与该日固体潮产生的库仑破裂应力变化峰值之比。这种方法虽未考虑固体潮产生的库仑破裂应力变化的阈值,但可以将其不确定因素的影响减少到最低的程度。

在选取参与加卸载响应比计算的小震资料时,应该首先确定研究地区地震台网所能监测的地震震级下限。常用的方法有 Gutenberg 的震级频度关系和 Rydelek - Sacks 检验方法^[22]。采用这些方法可以去掉一些随机因素,使得加卸载相应比分析建立在可靠的数据基础之上。

(2)在以往的加卸载响应比方法中,通常在可能发生地震的研究区域划分网格,计算每个格子($2^\circ \times 2^\circ$ 或 $5^\circ \times 5^\circ$)的加卸载响应比,确定将来地震发生的位置。根据地震力学的研究,地震之前该地区的应力场可以通过该地震震源参数精确计算出来。在震源的不同方位和距离,优势断层面上的库仑破裂应力大小不同,以此可以推断加卸载响应比也会有所不同。因此根据地震之前的应力场和该地区的优势断层构造确定的地壳失稳区形状并不是规则的圆形区域,更不是矩形区域,而类似于“蝴蝶”型(对于走滑地震)^[23]和椭圆形(对于倾滑断层)^[24]及其它们的组合。在此范围内对表示地壳失稳状态的加卸载响应比进行回顾性检验,并以此对网格搜索方法进行改进,可以在具有确定物理意义的基础上将这些理论进一步发展。Bowmann 和 King^[25]采用该技术对于加速地震矩释放模型(Accelerated seismic moment release model)的回顾性检验更加说明了上述做法的可行性和有效性。

(3)在根据强震震源机制和破裂尺度参数确定地震之前该地震断层面和滑动方向上的库仑破裂应力变化计算方面,为了不过多引入不确定因素,可以采用相对简单的弹性半空间介质模型。对于这一问题,在数学上已有比较完善的理论基础^[26]。当然,随着研究的深入也可采用粘弹性介质中的地震错动产生的应力计算方法^[27]。

(4)在进行加卸载响应比计算的小震选取范围方面,可以根据研究区域地质构造和区域应力场确定将来地震的震源机制,以5级地震作为基本计算单元,计算该地震之前库仑破裂应力大于0.001 MPa的区域为加卸载响应比小震的选取区域,计算加卸载响应比,并进行时空扫描。依据是如果所选单元震级过小,通过统计公式^[28]给出的地震破裂尺度和滑动量太小。根据最近很多地震应力触发研究结果^[5],计算得出的地震之前库仑破裂应力数值太小,不足以影响加卸载响应比的数值。当然,需要根据尝试的研究结

果对本假定进行改善。之所以选取 0.001 MPa 为影响小震加卸载响应比计算的阈值,是考虑到通常的静态应力触发计算采用的阈值为 0.01 MPa ^[5]和 Ziv 和 Rubin^[29]给出的看不到触发应力阈值的结论。由于地震具有沿断层分布的“条带”特点,沿着断层以 5 级地震作为基本单元搜索将来地震危险区更具有可行性。

4 结语

加卸载响应比理论在地震预测中的应用是目前国际学术界比较关注的一个问题。本研究对该理论和地震预测方法进行分析认为考虑固体潮在小震断层面上产生的库伦破裂应力变化的相对权重和大震之前应力的空间分布,科学确定小震资料的震级下限、考虑测定的小震震源机制(而不是假定)、研究加卸载响应比方法对不同类型地震的适用情况可能是加卸载响应比理论和方法进一步发展要考虑的研究课题。

致谢:本研究与吴忠良研究员、陈学忠博士、张天中研究员进行过有益的讨论,特此致谢。

[参考文献]

- [1] Yin X, Chen X, Song Z, et al. . A new approach to earthquake prediction : The load/unload response ratio (LURR) theory[J]. Pure Appl. Geophys. , 1995 , **145**(3/4) : 703 - 715.
- [2] Yin X, Wang Y, Peng K, et al. , Development of a new approach to earthquake prediction : Load/unload response ratio (LURR) theory[J]. Pure Appl. Geophys. , 2000 , **157** : 2365 - 2383.
- [3] 尹祥础, 尹灿. 非线性系统失稳的前兆与地震预报——响应比理论及其应用[J]. 中国科学(B 辑), 1991 , **5** : 512 - 518.
- [4] 尹祥础. 地震预报新途径探索[J]. 中国地震 , 1987 , **3**(1) : 1 - 7.
- [5] Harris R A. Introduction to special section Stress triggers , stress shadows , and implications for seismic hazard[J]. J. Geophys. Res. , 1987 , **103** : 24347 - 24358.
- [6] 施行觉, 许和明, 万永中, 等. 模拟引潮力作用下岩石破裂特征——加卸载响应比理论的实验研究之一[J]. 地球物理学报 , 1994 , **37**(5) : 633 - 638.
- [7] 王裕仓, 尹祥础, 王海涛. 地震预测的加卸载响应比岩石试验模拟[J]. 中国地震 , 1998 , **14**(2) : 126 - 130.
- [8] Wang Y C, Yin X C, Wang H T, et al. . Numerical simulation of rock failure and earthquake process on mesoscopic scale[J]. Pure Appl. Geophys. , 2000 , **157** : 1905 - 1928.
- [9] 陈棋福, 尹祥础, 马丽. 加卸载响应比的自然概率分布[J]. 中国地震 , 1996 , **12**(3) : 269 - 274.
- [10] 庄建仓, 尹祥础. 加卸载响应比在 Poisson 模型下的随机分布[J]. 中国地震 , 1999 , **15**(2) : 128 - 138.
- [11] 宋治平, 尹祥础, 陈学忠. 加卸载响应比的时空演化特征及其对地震三要素的预测意义[J]. 地震学报 , 1996 , **18**(2) : 179 - 186.
- [12] 王裕仓, 宋治平, 细野耕司, 等. 日本兵库存县南部地震和关东地区强震前正负地震的演变特征及其对地震预测的意义[J]. 地震学报 , 1998 , **20**(1) : 29 - 35.
- [13] 许昭永, 杨润海, 王彬, 等. 负坡段加卸载响应比的物理意义及预测效能[J]. 地震学报 , 2002 , **24**(1) : 42 - 49.
- [14] Brady B T. Theory of earthquake I[J]. Pure Appl. Geophys. , 1975 , **113** : 149 - 168.
- [15] 华祥文. 唐山地震前后北京、天津周围地区应力的变化过程[J]. 地震学报 , 1980 , **2**(2) : 234 - 242.
- [16] 曹新玲, 李自强, 刘建中. 唐山地震前后的应力变化[J]. 地震学报 , 1984 , **6**(4) : 405 - 413.
- [17] Xu Z H, Wang S Y. A possible change in stress field orientation due to the 1976 Tanghsan earthquake[J]. Pure Appl. Geophys. , 1986 , **124** : 941 - 955.
- [18] 赵根模, 褚宝琮, 郭瑞芝. 宁河 6.9 级强震前小震主应力轴取向的变化[J]. 地震学报 , 1984 , **6**(4) : 414 - 424.
- [19] Reasenber P A. Foreshock occurrence before large earthquakes[J]. Geophys. Res. , 1999 , **104** : 4755 - 4768.
- [20] 万永革, 吴忠良, 周公威, 等. 地震静态应力触发模型的全球检验[J]. 地震学报 , 2002 , **24**(3) : 302 - 316.
- [21] Surouka H, Ohtake M, Sato H. Statistical test of the tidal triggering of earthquakes : contribution of the ocean tide loading effect[J]. Geophys. J. Int. , 1995 , **122** : 183 - 194.
- [22] 吴忠良. 鉴别地震活动周期性和随机性的广义 Rydelek - Sacks 检验[J]. 地震学报 , 1999 , **21**(5) : 487 - 494.
- [23] King G C P, Stein R S, Lin J. Static stress changes and the triggering of earthquakes[J]. Bull. Seism. Soc. Amer. , 1994 , **84** : 935 - 953.
- [24] Freed A M, Lin J. Time - dependent changes in failure stress following thrust earthquakes[J]. J. Geophys. Res. , 1998 , **103** : 24393 - 24409.

- [25] Bowmann D D , King G C P. Accelerating seismicity and stress stress accumulation before large earthquake[J]. Geophys. Res. Lett. ,2001 , **28** :4039 – 4042.
- [26] Okada , Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half – space[J]. Bull. Seism. Soc. Amer. ,1992 , **82** :1018 – 1040.
- [27] Freed A M , Lin J. Delayed triggering of the 1999 Hector Mine earthquake by viscoelastic stress transfer[J]. Nature ,2001 , **411** :180 – 183.
- [28] Wells D L , Coppersmith K J. New empirical relationships among magnitude , rupture area and surface displacement[J]. Bull. Seism. Soc. Amer. ,1994 , **84** :974 – 1002.
- [29] Ziv A , Rubin A M. Static stress transfer and earthquake triggering : No lower threshold in sight ?[J]. J . Geophys. Res. ,2000 , **105** : 13631 – 13642.

SOME CONSIDERATIONS ON THEORY OF LOAD AND UNLOAD RESPONSE RATIO AND ITS APPLICATION IN EARTHQUAKE PREDICTION

WAN Yong-ge

(College of Disaster Prevention Technique ,CSB ,Yanjiao (east of Beijing) 101601 , China)

Abstract :The theory of Load and Unload Response Ratio (LURR) has applicated in earthquake prediction extensively ,but it meet challenge also. In this paper ,the theory of LURR and its application are analyzed and some aspects for study in near futuer are proposed (1) Weight of Benioff strain of every small earthquake would be added in LURR calculation according to Coulomb failure stress generated by earth tide ;(2) The region shape in where small earthquakes are selected would be determined by the range of LURR would – be – high according to stress distribution before impending large earthquake ;(3) By comparing the results of LURR from the assumed same mechanism of small earthquakes and that from measured mechanism of small earthquakes , study the improvement of LURR from using measured data ;(4) The applicability of LURR to different seismic fault types of large earthquake would be studied.

Key words :Load and unload response ratio (LURR) ; Weight Stress distribution ; Focal mechanism