



研究简报

应力减小引起地震

耿乃光

(国家地震局地球物理研究所)

摘 要

最近完成的岩石力学实验表明,在三轴应力状态下最大主应力的增加、中等主应力的变化(增加或减小)和最小主应力的减小都能导致岩石的破坏。由此启示,地震的发生既可能由地壳中的最大主应力的增加引起,又可能由中等主应力或最小主应力的减小引起。讨论了地壳中可能引起应力减小的作用,并从地震活动的规律性探讨了应力减小引起地震的可能性。指出在地震研究的各个领域,不仅应考虑应力增加和能量积累过程中发生的地震,还应考虑在应力减小和能量减小过程中引起的地震。

一、引言

本世纪初 Reid 提出,当地壳的应力逐渐增大达到一定值时发生断层错动,引起地震^[1]。这意味着地震发生前的相当时期内、地壳岩石中的应力有一个增长过程,能量有一个积累过程。这种设想符合物理学的基本规律,又为地震观测的资料所证实^[2],成为震源物理学的基础。随着地震预报研究的深入开展,地壳岩石中的应力增长到什么水平,能量积累到什么程度发生岩石破坏和断层错动,成了人们十分关注的问题。人们较少注意地壳中的应力减小现象,至少在考虑地震孕育过程时是这样。在实验室里为探索地震成因而进行岩石破坏实验时,也多是将岩石样品置于各种各样的环境条件下,对岩石样品不断增加荷载直到岩石样品破坏。在这样的实验过程中,岩石样品内部的应力(最大主应力 σ_1)和能量都在持续不断地增长。

最近进行的一系列岩石破裂实验研究^[3-5]采取了与岩石力学的常规实验方法不同的加载方式。实验表明,当岩石样品中的最大主应力 σ_1 增长到一定程度后,保持 σ_1 不再增长,减小最小主应力 σ_3 或改变(增加或减小)中等主应力 σ_2 都可以导致岩石的破坏。图1和图2给出了这两种类型实验的主要结果。

图1是减小最小主应力 σ_3 引起岩石破坏的实验结果。实验所用样品为山口大理岩。图1中纵座标表示最大主应力 σ_1 ,横座标原点左边表示中等主应力 σ_2 ,原点右边表示最小主应力 σ_3 。为了便于比较,图中给出了增加最大主应力 σ_1 使岩石破坏(常规实验)的强度值,在图中用圆圈表示。常规实验值中部分结果为茂木清夫的结果。贯穿这些点的实线即常规三轴实验的强度曲线。在图1中岩石的任何一个应力状态对应于图上的两个

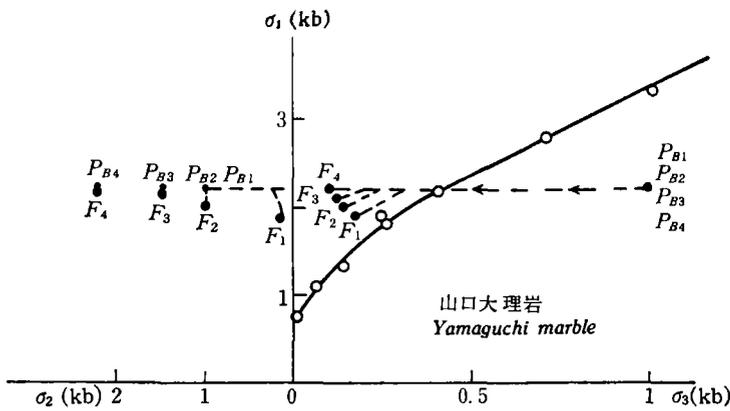


图 1 减小最小主应力引起岩石破坏

Fig. 1 Rock failure caused by deceasing of minimum principal stress

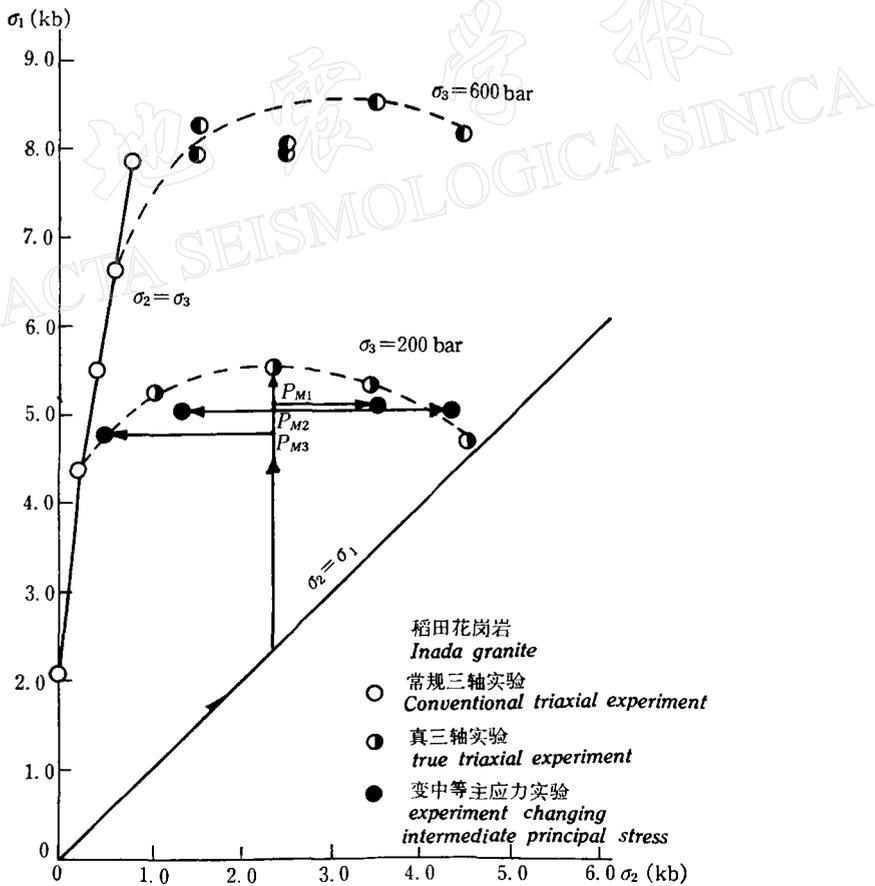


图 2 改变中等主应力引起岩石破坏

Fig. 2 Rock failure caused by changing of intermediate Principal stress

点，一个在 σ_1 轴左侧，一个在 σ_1 轴右侧。在实验中从 P_{B1} , P_{B2} , P_{B3} 和 P_{B4} 等应力状态出发，保持最大主应力 σ_1 和中等主应力 σ_2 不变，减小最小主应力 σ_3 能够导致大理岩的破

坏。破坏点分别为图中所示的黑点 F_1, F_2, F_3 和 F_4 。在这些实验中岩石破坏前虽有最大主应力的增加过程,使岩石达到 P_{B1} 等应力状态,但岩石的最终破坏却发生在最大主应力保持不变最小主应力的减小过程之中。

图 2 是改变中等主应力 σ_2 引起岩石破坏的实验结果。实验所用样品为稻田花岗岩。图 2 中纵坐标表示最大主应力 σ_1 ,横坐标表示中等主应力 σ_2 。为了比较图中用圆圈表示常规三轴实验的结果,连接它们的实线为常规强度曲线。此外,还用半黑点给出了中等主应力 σ_2 ,不等于最小主应力 σ_3 的条件下增加最大主应力 σ_1 使花岗岩破坏的强度值,即茂木型真三轴实验结果。这些结果在图中用虚线连接,表示花岗岩强度随中等主应力 σ_2 的变化。我们从岩石破坏前的某些应力状态 PM_1, PM_2 和 PM_3 出发,保持 σ_1 和 σ_3 不变,单独改变(增加或减小)中等主应力 σ_2 ,其结果导致了岩石的破坏,破坏点在图中用黑点表示。这个实验表明岩石破坏前有一个最大主应力 σ_1 的增加过程使岩石达到 PM_1 等应力状态,但岩石的最终破坏却可能发生在最大主应力和最小主应力保持不变,单独改变中等主应力的过程之中。

以上这些实验结果揭示,岩石的破坏不一定必须发生在最大主应力的增长过程中,也可以发生在中等主应力和最小主应力的减小过程中。岩石破坏前其内部必须积累相当的能量,但岩石的破坏不一定必须发生在能量的继续积累过程中,有可能发生在能量释放的过程中。

地震被认为是地壳中的岩石破坏过程。从上述实验得到的启发是,在地震发生之前地壳岩石中必须有一个应力(最大主应力 σ_1) 增长的过程和能量积累的过程。然而,地震事件既可能发生在应力继续增长和能量继续积累的过程中,又可能发生在应力(中等主应力 σ_2 或最小主应力 σ_3 , 或二者)减小和能量释放的过程中。这一概念如果成立,在地震学的许多领域中可望得到广泛的应用。

当前的困难是地壳中的应力测量这一非常重要的问题未能得到很好的解决。特别是相应于每个具体的地震事件发生前后地壳中三个主应力的连续变化情况我们无法知道,因而不能直接证实上述概念。我们在下面一节里将用地质学中的一些基本知识论述地壳中可能存在的应力减小过程;在第三节中将从地震活动的一般规律性论述在应力减小过程中发生地震的可能性。

二、地壳中的应力减小过程

地球上存在着许多使地壳内部某些地区产生应力增加或应力减小的作用。常常一种作用在某一阶段使地壳岩石中的应力增加,而在另一阶段使地壳岩石中的应力减小。也常有一种作用在地壳的某一部分引起应力的增加,而在地壳的另一部分引起应力的减小。人们已经对这些作用引起的应力增加给予了高度的重视。本文则想指出,这些作用引起的应力减小也不应该忽视。特别是当减小的应力恰与地壳岩石中的中等主应力或最小主应力相符合而最大主应力又保持在较高值的场合,就不能不考虑这种应力减小作用成为发震因素的可能性。

我们来讨论以下几种作用:

1. 板块运动 现在人们广泛地讨论板块碰撞与板块消减作用引起板块边界以至板块内部地壳中的挤压力,并把这些力看作引起地震的因素。与此同时,板块运动必然在地壳的某些部位引起应力减小。即使在板块碰撞带上,由于板块接触面不是理想的平面,挤压过程中的局部应力减弱点也可能存在。

2. 断层运动 断层周围的应力状态因断层类型、规模和走向而异,非常复杂。断层的存在影响地壳中应力的分布,断层的运动又引起地壳中的应力场的变化,使某些地区应力增加,同时使另一些地区应力减小。断层的蠕动总的说来是一个应力减小的过程。断层的间歇运动可能造成某些地区应力增加与减小的交替。地壳深部断层的蠕动可能引起地壳上部的应力减小,而浅部的断层运动也可能影响到深部的地壳。

3. 垂直运动 地壳中的岩石随着地壳的抬升所受的围压可能会渐渐降低,从而使某些方向的应力分量减小。

4. 地幔物质的作用 人们考虑过地幔物质的相变或运动对上面地壳岩石的挤压力。地幔物质的相变或运动也应有可能在某些时间、某些地区使其对地壳岩石的挤压力降低。

5. 岩石的塑性变形 地壳中的岩石处于高温高压状态,容易发生屈服效应。岩石内部的应力随时间会逐渐地松弛。

6. 温度的变化 地壳中的温度变化产生的热应力能够引起地壳岩石中的应力增加,也能引起应力的减小。

7. 流体迁移 地下流体的迁移可以引起岩石孔隙压力的增加,从而使有效围压降低。

8. 地球自转速率的变化 地球自转速率的变化在地壳某些地区引起应力增加,在另一些地区引起应力减小。应力的增加和减小还会因地球自转速率的增减随时间交替变化。

9. 天体的影响 固体潮的作用可以使地壳中的应力得到增加或减弱。

10. 气象因素 干旱和降雨可能对地壳上部某些地区的应力有所增加或减弱。

三、地震活动规律与应力减小引起地震的可能性

地震本身是地壳中应力减小的一种特殊形式。其表现是在地震发生时震源区岩石中的应力突然降低,震后的一定时期内应力降低的范围逐渐扩大。当然,地震的发生也会在地壳的某些部位引起应力集中现象。

地震活动的特点之一是其群体性。地震不是单个地、孤立的和随机地发生的。一个地震的发生往往和另一个或几个地震有关。虽然地震之间相互关联的机制目前还未能完全阐明,但地震之间的相互关系决不是表面现象。应力减小引起地震的概念可能与地震活动的某些特征相符合。

1. 地震活动期

地震的发生在时间上是不均等的。有集中发生的活动期,也有相对稳定的平静期。金森博雄^[6]绘制了全球地震释放能量随时间变化曲线。曲线显示了本世纪以来有三个地震活动期。宇佐美龍夫、茂木清夫等研究了日本、朝鲜的地震活动期问题,发现日本、朝鲜的

地震活动期与中国北部的地震活动期相一致^[7,8]。我国有不少学者研究一定范围地震活动同时高涨和同时平静的规律^[9]。虽然在地震活动期和平静期的划分细节上不同作者有所出入,但活动期与平静期的交替出现是一个普遍的规律。

上述金森博雄的研究表明,地震活动期也就是地震能量的集中释放时期。既然地震时释放的能量被认为是积聚在地壳岩石内的弹性能,这种能量的积聚就必然与地壳岩石中的应力增长过程相联系。地震发生时总伴随着应力降。地震活动期地壳中积聚的能量集中释放,导致地壳岩石中的应力紧张状态逐步缓和。地震活动期后转入平静期。在此期间地壳中必须有能量的再积累、应力的再增加,才能出现下一个地震活动期。当然,在地震活动期中也会有能量的积累与应力的增加,在平静期中也会有能量的释放与应力的减小。但总的说来,与地震有关的能量和应力,在地震活动期以释放和减小为主,在平静期以积累和增加为主。如前所述,实验证实岩石的破坏能够发生在应力减小过程中,而大多数地震又发生在以应力减小过程为主的活动期内,那么为数众多的地震事件中很可能有一部分地震不发生在最大主应力的增加过程中而发生在中等主应力或最小主应力的减小过程中。

2. 地震空区

1965年 Fedotov 研究了本世纪以来北环太平洋地震带上的地震活动,指出今后大地震可能发生在未破坏的地区^[10]。宇津德治^[11]、茂木清夫^[12]等研究了日本列岛及其周边的地震空区。我国许多人在地震空区问题上作了深入细致的研究^[13,14]。根据空区理论国内外学者均成功地预测了一些未来地震的地点,但也都有并不成功的例子。这里不打算评价空区理论在预报中的作用,只想说明,相当一部分大地震发生在地震空区内不能看作是偶然的现像。

关于空区的概念并不完全统一。茂木提出第一种空区与第二种空区的概念^[12]。我国也有一些新概念^[13,14]。总的说来,空区有以下两个特点:(1)近期本区内未发生强震;(2)本区邻近、周围或同一地震带上近期发生了一系列的地震。已经发生的地震将对尚未发生地震的空区产生影响。产生什么影响呢?一种可能是引起空区的应力集中。但也可能存在另一种情况,即空区周围发生的一系列地震——能量释放——应力减小事件,使空区内地壳中的某个方向的主应力减小,从而导致地震在空区内发生。

3. 地震迁移

1958年 Richter 记述了土耳其1939年M8.0级地震后7级以上地震沿着横贯土耳其北部的安纳托利亚断裂带相继发生的现象^[16]。此后,地震迁移现象受到人们的重视,被看做地震活动的重要时空规律之一。茂木清夫研究了日本及其周围的三种类型地震迁移现象^[17]:震源区的扩大、沿地震带的迁移和由浅源向深源的迁移。欧洲也有人进行地震迁移的研究^[18]。我国的地震迁移研究开展较早,也很广泛^[19]。结合我国地震大多发生在大陆内部的特点总结了多种多样的地震迁移形式。

虽然地震迁移不是表面现象,是一种客观规律并在地震预报中起过一定的作用,然而地震迁移的机制一直未能很好的阐明。正如茂木清夫所说,地震迁移不是简单的破裂扩展。在许多场合下用应力集中也不好解释。如果说是一个地震引起的应力场变化影响到另一个孕震区并引起地震,这种影响很可能是一种应力减小的作用。

四、结 语

如前所述,地壳中的应力增加与应力减小作用都普遍存在于地壳变动过程中。然而,震源物理研究者们往往注目于前者而忽视后者。人类生活在围压仅有一个大气压的地球表面,这个围压对于固体的破坏所起的作用是微不足道的,人们看到的自然界和工程上的破坏往往起因于应力的增长。地震发生的环境与人类生活的环境根本不同,地壳中的岩石经常处在三向不等的高压状态,内部聚积着巨大的能量,却又在高压下保持着相对的稳定。随着地壳的变动三个方向的主应力彼此消长而岩石内部的能量时增时减,地震就发生在地壳岩石中各个方向的主应力的消长过程中。

人们常常谈及某些因素触发了地震。触发一词用得非常广泛而对如何触发论述得不够具体。如果触发指的是对临近破坏的地壳岩石给了一个附加的应力变化量,这种变化量应当包括应力的增加与应力的减小。

本文讨论应力减小作用时把它看作应力增加的相反的作用。在时空上区别了两种不同的情况。应该指出,两种相反的作用同时发生在同一地点的不同主应力上是完全可能的。地壳岩石中最大主应力的增大与最小主应力的减小如果同时发生可以引起地震;而最小主应力的增加和最大主应力的减小同时发生则使岩石保持稳定。因此,不能认为地壳中的应力减小作用对地震是绝对的安全因素。也不能把地壳中的应力增加作用看作是绝对的危险因素。

陈运泰同志阅读了原稿并提出了宝贵意见,作者在此表示谢意。

参 考 文 献

- [1] Reid, H. F., The elastic-rebound theory of earthquake, Univ. Calif. Publ., *Bull. Dept. Geol.*, **6**, 413—444, 1911.
- [2] 本多弘吉 增訂地震波動, 230 pp., 岩波書店, 1954.
- [3] 耿乃光 许东俊 最小主应力减小引起的岩石破坏 地球物理学报 **28**, 191—197, 1985.
- [4] 许东俊 耿乃光 中等主应力变化引起的岩石破坏与地震, 地震学报, **6**, 159—166, 1984.
- [5] Geng, N. G., Yao, X. X., Chen, Y., and Xu, D. J., The study on stress path, *Geophysical Research*. (待发表).
- [6] Kanamori, H., Quantification of earthquakes, *Nature*, **271**, 411—414, 1978.
- [7] 宇佐美龍夫, 日本及び朝鮮における年別地震回数の変化, 地震予知連絡会会報, **12**, 149—150, 1974.
- [8] 茂木清夫, アジア東北地方の地震活動期, 地震学会講演予稿集, 1976, 1: 140.
- [9] 许绍燮、沈佩文, 地震活动性图象, 地震学报, **4**, 239—250, 1982.
- [10] Fedotov, S. A., Regularities of distribution of strong earthquakes in Kamchatka, the Kurile Islands and Northeastern Japan, *Akad. Nauk. SSSR. Inst. Fiziki. Zemli. Trudy*, **36** (203), 66—93, 1965.
- [11] 宇津徳治 北海道及びその周辺の地震活動 北海道大学地球物理学研究報告, **20**, 51—75, 1968.
- [12] Mogi, K., Some features of recent seismic activity in and near Japan, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **47**, 395—417, 1969.
- [13] 韩渭宾、席敦礼, 四川地区强震前弱震空区的变化特征, 地震学报, **6**, 8—20, 1984.
- [14] 陆远忠、王伟、沈建文, 地震空区与逼近地震, 地震学报, **5**, 129—144, 1983.
- [15] Mogi, K., Two kinds of seismic gaps, *Pageoph.*, **117**, 1172—1186, 1979.
- [16] Richter, C. E., *Elementary Seismology*, 768 pp., W. H. Freeman, San Francisco, 1958.

- [17] Mogi, K., Migration of seismic activity, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **46**, 53—74, 1968.
- [18] William, Q., Limond, M. R., Possible earthquake migration along the Western European Plate boundary, *J. Geoph. Res.*, **86**, B12, 11623—11629, 1981.
- [19] 郭增建、秦保燕, 地震迁移问题, 国际地震动态, 1983, 1: 7—10.

EARTHQUAKES CAUSED BY STRESS DECREASING

GENG NAIGUANG

(*Institute of Geophysics, State Seismological Bureau*)

Abstract

The experiments of rock mechanics completed recently show that, in the triaxial stress state, all the increasing of maximum principal stress, the changing (increasing or decreasing) of intermediate principal stress and the decreasing of minimum principal stress can lead rocks to failure. It is suggested that earthquakes can be caused not only by strengthening of maximum principal stress, but also by decreasing of intermediate principal stress or minimum principal stress in the earth's crust. The action which can cause stress decreasing in the earth's crust was discussed, and the possibility of earthquakes caused by stress decreasing was searched by investigation of seismic activity. It is pointed that in seismic studies not only the earthquakes caused by stress strengthening and energy increasing, but also the earthquakes caused by stress decreasing and energy decreasing must be considered.