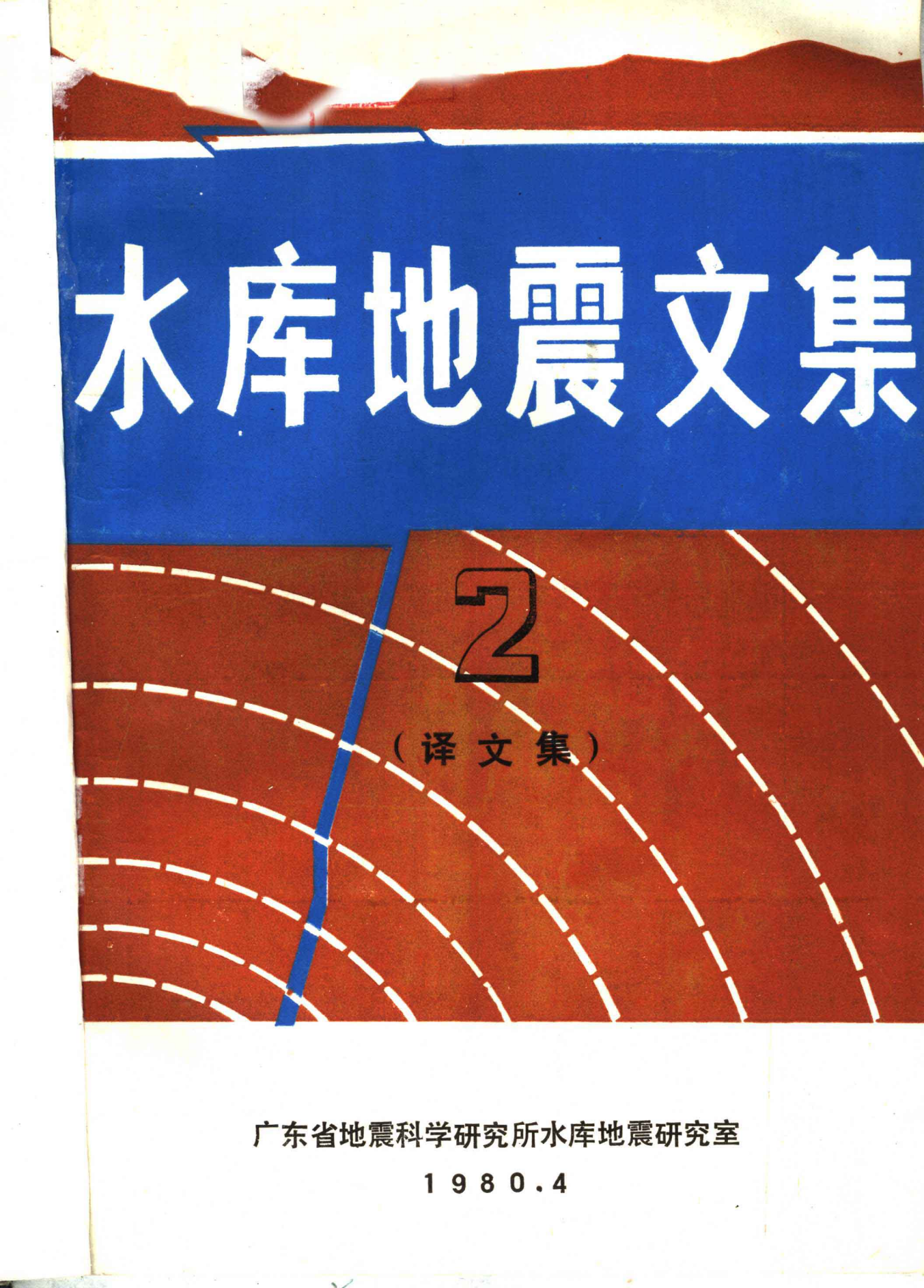




水库地震文集

2

(译文集)

广东省地震科学研究所水库地震研究室

1980.4

前 言

本文集主要取材于第一届国际诱发地震讨论会论文、苏联诱发地震工作组编辑的《工程活动对于震情影响》文集以及加拿大D.I. Gough教授寄给我们的部分文献。

目前, 水库地震研究的主要成果可以大致分为三方面。一是产生水库诱发地震一般规律性的认识, 如发震的地质背景、地貌条件、区域和局部应力场条件以及水库本身的参数(库容、最大水深)等之间的相互关系及相互影响。二是诱发机制的认识。三是新建大型水库产生诱发地震的可能性及其他危险性的预测方法。

关于第一方面, 本文集中有部分论文涉及到, 但由于国内刊物曾有过较多介绍, 本文集选题时未作为重点。

关于诱发机制的研究, 目前有两种假说较为流行。其一是孔隙压效应假说, 另一个是库水荷载效应假说^[1, 2]。后者曾一度为很多研究者所怀疑; 近年, 高夫^[4, 5]、威则^[11]针对卡里巴水库进行了精湛的研究, 提出了值得重新估价库水荷载效应假说的一些论据。

第三, 关于水库地震的预测问题。显然, 这是水库地震研究的主要目的。就我国而言, 虽然水利资源蕴藏量居世界首位, 但目前开发利用的仅占理论蕴藏量的2.5%, 随着经济建设的开展, 我国将会兴建许多大型水库。但是, 据世界范围的统计, 库容超过10亿立米、最大水深在100米以上的大型水库, 产生诱发地震的机率竟达10%以上^[3, 6]。因此, 对于新建大型水库进行诱发地震可能性及其危险性的预测就成为一项很重要的课题。目前, 关于水库诱发地震预测方法大致可举出三种。一种是直观对比法, 即根据对已发震水库的分析, 归纳出几种主要诱震条件, 这几种条件在新建水库中越齐备、越典型, 则发震机率越高^[12]。第二种方法可称为定函数方法, 如高夫^[3, 4, 5]提出根据库水荷载使库基产生大于一巴附加剪应力的岩体体积作为衡量可能诱震大小的指标, 或者把库基中产生超过某值孔隙压力的岩体体积作为衡量尺度。第三种方法是近年苏联尼古拉也夫^[6]提出的概率预测法。这种方法虽然与第一种方法思路接近, 但其有定量预测的性质, 惟其难处在于有关因素的定量指标的选取。

此外, 本文集还选择了介绍进一步开展水库地震研究需要着力进行的某些研究内容, 如用水压致裂法测定深部地应力^[10]、应力—渗流耦合数值分析^[9]、水库引起的地球物理场和岩石性质的变化^[7], 等等^[8]。

本文集可供地质、地球物理、水工、地震等专业人员参考。

编校者 常宝琦

注: [] 内的编号是指本文集目录的编号

目 录

1. H.И.尼古拉也夫 诱发地震问题研究现状.....	(1)
2. Carl.基斯林格 诱发地震机制理论评论.....	(12)
3. D.I.高夫 诱发地震.....	(23)
4. D.I.高夫等 卡里巴水库地区的应力与形变(一).....	(39)
5. D.I.高夫等 卡里巴水库诱发地震(二).....	(52)
6. H. И. 尼古拉也夫 水库地震预测方法.....	(71)
7. B.M.勒牙傑尔等 在地震活动区由于水库引起的地球物理场和岩石性质的 变化.....	(82)
8. H. K.古普塔 其他问题.....	(101)
9. R. J.维塞尔等 预测荷载随时间变化的水库的地震破裂计算模型研究.....	(107)
10. 塚原弘昭等 用水压致裂法测定地壳应力.....	(117)
11. R. J.威则等 在层状和孔隙介质之上的水库的库基沉降速解理论.....	(131)
12. 出席第一届国际诱发地震讨论会中国代表团 对诱发地震研究的几点 看法.....	(143)

诱发地震问题研究现状

Н. И. 尼古拉也夫

近年来,积累了因人类工程活动导致局部地区地震活动增强的大量资料。两次国际会议听取了100多篇报告^[1-3],讨论了这一问题的各个方面,就充分说明了这一点。目前,我们拥有非常丰富的资料,足以说明诱发地震的研究现状。现就其主要方面做一概述。

最近,诱发地震的事例显著增加,或者与大型水库蓄水有关,或者与钻孔注液、抽水、采矿、地下核爆炸及其他工程活动有关。这些现象,已为世界上许多国家所共知。

从国外与水工建筑有关的大量地震中,可以发现几个很好的震例,其地震活动与水库的关系是毋庸置疑的。美国在科罗拉多河上修筑胡佛坝,形成米德湖之后,首先注意到这一现象。1936年即水库开始蓄水后一年,记录到一次地震。在此之前,库区未发现地震活动。据A. Ro'gers的资料^[4],现在一天可记到1~2次地震,地震沿断裂集中分布,震源深5公里或更小些,最大震级达5级。同时,局部地区地震活动与库水荷载之间存在着直接关系。

E. Anderson^[5]已查明二千一百万年以来,即新构造运动时期该区的地质构造发展史。确定了两个构造上的洼地,在水库外形上表现为被峡谷分成两个库段。毗连大坝的库段Боулдер地震活动性较高,而位于其上游的库段Вирджин地震活动性较低。

E. Anderson用Вирджин洼地在不大的深度上广泛分布着盐类沉积物,来释解其地震活动方面的差异。在这里,盐类和粘土类岩石构成隔水层,因而不存在库水与深部地下水之间的联系,地震活动性便较低。

希腊的克里马斯塔和印度的柯依纳水库的地震情况已有很好的记载。这些水库蓄水后,在它们附近随即出现了少量弱震。正如许多学者^[6-9]所注意到的,地震与水库的联系是毫无疑义的。弱震之后,便发生6.2级(克里马斯塔)和6.3级(柯依纳)强震。在克里马斯塔水库,弱震活动三个月后便发生了强震,而柯依纳直到水库建成后四年,才发生最大地震。

世界上最大的人工湖——赞比亚(非洲)的卡里巴水库蓄水后,地震活动性也显著增强。其最大地震达6级。

对于上述事例,均已查明水位与地震能量释放的相关关系。譬如克里马斯塔,这个关系可用水库水位与前震频度之对数的相关系数来表示,该系数在某些时段可达0.96,就整个时段而言,结果也是满意的。

新丰江水库(中国)是一个资料丰富的事例。它对于研究诱发地震有着特殊的意义。因为,在那里进行了长期、连续的和各种各样的观测^[11-13]。该水库位于广州市东北

160公里处,坝高105米,库容115亿立方米。1959年10月开始蓄水,不久便出现频繁的地震活动。最大地震发生在1962年3月19日,震级为6.1级,震中烈度Ⅷ度。从那时起,已记录20万次以上的弱震。

在地质构造上,新丰江大坝处于高活动性地带。它位于中生代晚期巨大的花岗岩体内。岩体附近是沉积了巨厚(~4000米)的第三纪沉积物的盆地。沿老断裂发生新的构造活动。水库蓄水后随即出现地震活动。至1972年12月,共记录大于0.2级的地震25万多次。震中分布是不均匀的,多集中在水深最大的大坝附近。震源深1~11公里,多数为4~7公里。水位与地震释放的能量及频度之间相关性很好。随着水位的升高,地震活动性增强,应变能释放速率增加。在主震前的28个月中,记录大小地震约82000次。

6.1级主震前20天,地震活动性逐渐减弱,无 ≥ 3.0 级地震。

对于上述震例,首先研究了库区地震波波速比 V_p/V_s ,查明地震活动持续的时间和空间分布。在其分布范围内,发现了异常的波速比 V_p/V_s ,它低于一般构造地震的相应数值。在水库区内,产生弱震($M=1.5\sim 4.1$)的主压应力方向是变化的。后来,在南阿尔卑斯水库区得到了同样的比值。异常的波速比 V_p/V_s 值仅仅在地震活动开始后18个月才出现。该地波速异常的范围比一般构造地震小。大多数地震的深度随着时间的推移而增大,这就表明了水库的渗透作用^[11, 13]。

在所列举的事例中,诱发地震对大坝、房屋及其他建筑物造成了破坏,有两个事例还导致了人员伤亡。

分析已知水库地震事例,并考虑各水库不同的地质构造条件,可作以下概括:

I. 按诱发地震震级大小,水库可划分如下几类^[17, 19]。

1. 出现微震活动的水库。有感地震不多。很多水库的地震活动性属于这种情况。但由于没有设置地震仪,往往没有记录资料。蓄水前安装了灵敏仪器的水库,都记录到微震($M < 2$)活动的变化。

2. 蓄水后,除微震外,已发生3~5级地震的水库。这种情况已知有12例。

3. 蓄水后,出现长时间的前震序列,发生大于5级的强震,并伴有大量余震的水库。这一类型已有6例——柯依纳、克里马斯塔、馬拉松、卡里巴、新丰江和胡佛。在所有这些事例中,水库诱发的地震活动均局限在水库附近地区。

上述三种蓄水后区域地震活动性增强的水库,在全世界大水库总数中仅占很小一部分。

绝大多数库容很大、坝很高(> 100 米)的水库,蓄水后地震活动并没有增加。这些水库多半位于地震活动水平低的地区。就目前研究水平而言,我们还未能确定水库诱震的标志。因此,不仅要查明已知震例诱发地震的条件,还要研究其他水库没有诱震的原因。所有大水库都应作为潜在的诱发地震的对象来研究^[17, 20]。

II. 在已知的诱震事例中,震源深度都不大于5—6公里。相应的震源体直径不大,震中区范围较小。只有个别水库震源深度达到10公里或更大。水库诱发的地震数量很大,已知的是每年几十至几千次(取决于仪器的灵敏度和仪器数量)。

III. 震中分布有一定的规律性。大多数震中集中在断层面、破裂带和构造线走向等区域构造特征所控制的地区内。所以,诱发地震的震中,不仅分布在大坝和水库区,而

且可在距此几公里至几十公里的地方出现。

Ⅳ. 很多震例说明, 水库水位与地震频度之间有着明显的相关关系。水库蓄水不久, 就开始出现地震活动, 地震活动水平随水位升高而加强。具体地说, 在不同的情况下, 这一关系的特征是不同的: 可以看到, 库水位升高后, 或者地震频度完全相应地增加, 或者地震频度反而减少。已发生的情况是, 地震活动在水位升高后加强, 在水位稳定后减弱, 而水位下降时明显地减弱。多数大震是在水位最高或接近最高水位时发生的。最大的地震与长时间的前震和余震序列相联系。

Ⅴ. 在克里马斯塔水库的影响下, 强震形式的能量释放得到了“应力极限值”的表达式^[21]。可以把它理解为临界点。超过临界点, 便是应力恢复。现在, 克里马斯塔水库即使水位上升超过23~25米——这是主要地震活动时的水位, 地震频度仍然较小。这表明, 要达到“应力极限值”需要时间。

Ⅵ. 发生强震的水库资料表明^[10, 18], 最大余震与主震震级的比值是很高的(大约0.9)。同时, 前震和余震的频度——震级关系式中的b值较大(大于1.0)。这两点与同一地区天然地震的情况显著不同。由此推测出不均匀介质中应力状态的不均匀性。

Ⅶ. 已查明新丰江水库地震活动持续的时间和出现波速比 V_p/V_s 异常的空间范围都小于一般构造地震的相应数值^[12]。对该水库来说, 小震($M=1.5\sim4.1$ 级)主应力方向是随时间变化的。

Ⅷ. 在有利的情况下, 几十米高的坝也会诱发地震(南非的Хенрик-Фервуд, 希腊的Марофоч、南斯拉夫的Белеча等)。而水深达100米或更深时(法国的Монтейнлард——147米, 柯依纳——103米, 卡里巴——128米, 克里马斯塔——147米, 西班牙的Капельес——150米, 日本的 Куробе——100米, 以及其他许多坝), 诱发地震活动格外明显。同时, 还查明库容和水域面积也有很大的影响。这些参数增大会增加诱震的可能性。因为, 在这种情况下, 受水作用的岩石体积增大了。

由此得出结论, 并不是所有诱发地震都会对工程建筑造成危害。诱发地震的强度随坝高和库容的增加而增大。如果总库容超过10亿立方米, 最大水深达90米或更深, 就会发生破坏性地震。但是也有许多例子, 其中一、二个已达到上述数值, 却没有诱发地震, 地震活动性也没有加强。这就说明, 发生诱发地震还必须有其他一些特殊条件, 首先是地质条件。

Ⅸ. 在地震对地质条件——地貌形态、地质结构、构造和构造物理条件的依赖关系方面, 已经得出一些经验规律。这些条件的组合, 有利于发生诱发地震。现对此做些简单论述。

1. 引起设计家们注意的(最经济的方案), 是山区所特有的切割地形。在那里会迁到很深的峡谷。这些地区以复杂的地质构造为特征。例如, Нурек、Токтогул、Чиркей、Ингури和其他一些水利枢纽, 都分布在深部逆断层的上盘, 或在有先成河谷的环境中, 或者一定处在经受强烈的最新构造运动的地区。因此, 多数地震区的高水头坝址都处在地壳构造最不均匀和有潜在地震的地区。

2. 平缓的沉积岩中软土层的存在, 断裂不发育, 均匀的岩石, 这些都不利于应力的积累, 水库蓄水后也不会诱发地震。反之, 水库范围内各种断裂的存在, 不均匀基底

中裂隙岩石的分布,有利于发生地震。按D.S.Carder的观点^[14],老断裂的存在是所有水库地震发生的必要条件;缺乏这些条件的地区,就没有地震活动。

3. 构造变形产生的应力积累超过当地介质强度,也是发生诱发地震的必要条件^[18,20]。实验资料、震源力学分析和新构造的力学分析表明,地壳上层的应力场是很不均匀和相当复杂的。它反映了相当大的弹性应力的积累、分布不均,是潜能大量储存的证据。这些地区处于准静态平衡状态,Н.Хаст称之为“动平衡”^[23]。在活动区,岩体内积累的应力形成地质动力场,那里的应力超过静土压力,且各个分量在数值上和方向上都是不均匀的。几乎各处都显示以明显的各向异性为特征的水平挤压应力占优势。这在现代造山作用和最新褶皱作用剧烈的地带尤为明显。П.Н.Кропоткин和Н.Хаст用现代地球普遍收缩来解释全球性的挤压应力场的存在。然而,按Н.К.Булин^[23]的意见,对相当分散的各点的地应力的实地测定,不能象人们通常做的那样按线性关系来求它们的平均值。因此,上述解释根据还是不足的。应当指出,天然应力场是随深度变化的,在褶皱基底的上部,它接近于大多数地震带产生地震的构造应力场。其下“剩余”应力值很大的那个面位于不同深度(1~2公里)。岩石中剪应力计算值达几百至1000公斤/平方厘米。

4. 水库蓄水诱发地震所必须的最后一个地质条件是,岩体内构造不均匀,特别是存在早期形成的破裂,在破裂范围内发生急剧的应力重新调整。研究表明,应力场的扰动取决于破裂形式和破裂方向同主应力方向的关系。在某些地区,不仅观测到应力的降低,而且观测到应力的升高^[24]。构造活动性增强的地区与应力相对升高的地区相吻合。这样的地区预料会发生诱发地震。据此认为,在预测可能发生诱发地震的地区,必须组织监测^[18,20]。

X. 通常认为,水库修筑前,构造变动引起的应力积累,是水库诱震的必要条件之一。同时,其应力积累的程度应接近介质的强度。在建库前,应力超过静土压力,并且应力的各分量在数值上和方向上显示出均匀的地质动力场的存在,有利于发生诱发地震(在其他有利条件存在时)。

由此可得出两点结论:

1. 诱发地震也是一种天然地震,只不过在人类工程活动的影响下,它的能量释放情况不同而已。其特点是:а)在大震之前有大量前震;б)余震衰减缓慢;в)最大余震同主震震级的比值非常大;г)前震和余震的频度之间有特殊的关系;д)由于震源深度浅以及地形和土质条件,震中烈度高于区域性地震的烈度。

2. 水库诱震必须有各种有利条件的配合。与此有关的是上述的水库参数(坝高、库容、库水面大小)、水库范围内构造不均匀的岩石的存在、有利的地貌条件、岩体内原已积累的剩余弹性应力、有利的构造物理背景。在不同的条件下,这些组合可以是很不相同的,并产生不同的效果。当然,可能还有一些尚未认识的发生诱发地震的因素。

诱发地震的成因问题尚有许多不清楚的地方。这个问题有待进一步研究。关于它们的诱发机制问题,已发表了许多不同的意见^[9,9,10,12,14,15,18,20,25-28]等。

有些研究认为,大水库的水荷载可以解释地震能的释放。在水的重量作用下,以地壳拗陷作用(据水准测量资料为10~15公分)释放的重力能,转变为弹性应变能和地震

能。卡里巴水库^[25]和美国的米德湖^[14]的计算结果,已表明这一观点的正确性。对新丰江水库荷载引起的应力场的变化已进行过研究^[15]。计算表明,在水的重量作用下,地表最初的凹陷作用(达10公分或更大)产生了水平应力,其数值小于垂直应力,在3~5公里深处它几乎等于零。在水库中心,最大剪应力约为3巴,往边上便减少。主震震源机制与水的荷载产生的应力场相比,说明主震不可能是水的荷载所引起。从已做过计算的各水库震例可以得出结论:在水库区,由主震及有关的弱震所释放的应力,筑库前业已积累,且在蓄水前接近于岩石破裂的强度极限。因此,提出了另一种机制,即库水的重量是原已积累的接近岩石强度的弹性能释放的触发因素。岩层对变形的稳定性不同,有利于这种触发作用。

要注意,我们所知道的情况是天然的即自然“荷载”在有利的地质、地貌条件下,它能以地震的形式释放应力。海洋大的涨潮、洪水时水体的增加、渗入岩石的大气降水等等,都可能是触发因素。

目前,水对岩石强度的影响的观点颇为流行。这种观点的基础是美、英等国家的研究者取得了关于压力作用下岩石强度性状的实验资料。这项工作对诱发机制研究的主要成果,是承认流体压力对岩石性质的影响及其在构造变形过程中的作用。孔隙——裂隙压力抵消着静土压力,减少摩擦力和岩石强度,改变岩石的柔性,导致震源的形成,岩块沿积累了构造应力的脆弱的构造部位滑动。这些概念,可用以解释钻孔注液、地下核爆炸及水库诱震的机制^[16, 18]。各国在这方面都进行了许多研究。在较深的部位,压力梯度的增大促进了水的渗透,孔隙压力的增大又促使裂隙扩展,结果水向更深处渗透。水在岩石中的渗透需要有高的附加孔隙压力。这一过程沿着软弱地带和构造不均匀处进行。岩石强度变小,原已存在的构造应力发展为地震。

岩石强度的减弱促成了一系列附加机制,包括硅酸盐类岩石溶解应力。实验研究表明,在稳定荷载条件下,石英中水的增加,使其破坏的时间大大缩短,或使裂隙形成的过程大大加速。有人假定,氧化硅(SiO_2)分子的水合作用使材料的强度减弱^[18, 20, 30]。裂隙中粘土物质饱和水,也可能导致岩石抗剪强度减弱。实验表明,它使内摩擦系数减小15%,抗剪强度减小50%^[11, 12, 18]。渗入微破裂中的水,其吸附薄膜的破裂作用,促进了岩石的破裂过程。岩石中的此类微破裂,是在几百甚至几千个大气压下产生的(П.А.Ребиндер)。

上述过程和一系列其他过程的结合,使岩石的物理——力学、物理——化学性质发生变化,特别是岩石强度减弱。与库水有水力联系的沿裂隙带和断裂破碎带渗透的水,导致周围介质中孔隙压的增加。老破裂之间的联系很快被破坏。能引起滑动或剪切变形的自然应力值就大大地减少。过程如雪崩似地发展。随着大部分地震能量的释放,便形成大破裂^[20]。这样,孔隙——裂隙压力的增加使岩石强度减少到原已积累的应力能够产生破裂的程度。这些应力在建库前还不能造成破裂。在蓄水情况下,水影响着岩石物理、化学性质的变化,并使岩石强度减弱。丹佛注液的例子表明,它能不断诱发地震;停止注液后,诱震过程也就停止。这证明在某些情况下,地震能量的释放在达到最高应力状态后仍不停止。这就要求用钻孔注液的方法进行应力解除实验时慎重从事。

正如所指出的那样,一个水库诱震不会光是某一种机制起作用,而是各种机制都有

所表现^[26, 18]。岩石强度降低后, 它们的作用是促使岩体中形成低强度的区域, 产生剪切变形、沿老的构造裂隙或新形成的破裂滑动。

显然, 地壳中应力场进行调整并形成破裂的某一空间, 相当于水库区的震源。破裂扩展理论很复杂。Я.Б.Фридман、М.В.Гзовский和其他一些学者研究认为, 破裂形成的过程可分为五个阶段。假若水库范围内发生了一些潜在的破裂面, 它们的存在有利于产生诱发地震。对此, 可划分三个主要发展阶段。

在长期自然的发展过程中, 它可分为以下阶段(图1):

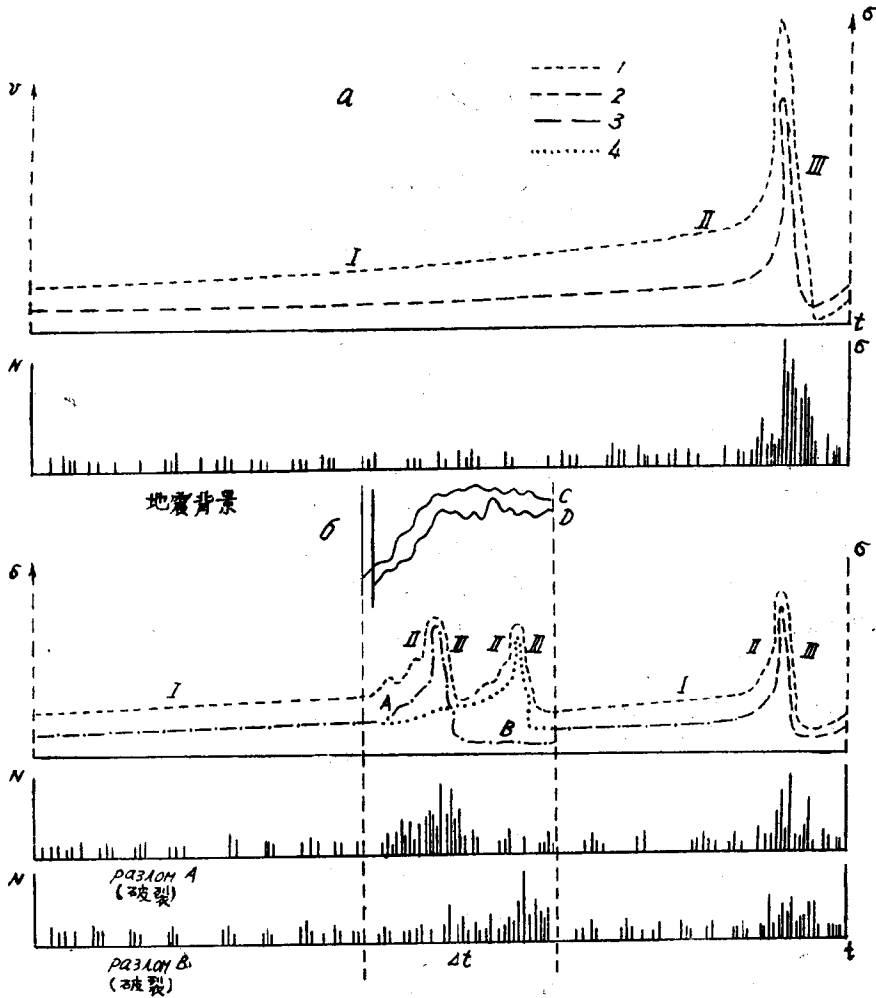


图1. 变形速度 v 、构造应力 σ 和释放地震能 N 随时间变化示意图

a—在长时间 t 内过程的自然发展; σ —在水库的影响下; 1. 应力 σ 变化曲线; 2. 变形速度 v 变化曲线; 3. 破裂A处变形发展曲线; 4. 破裂B处变形发展曲线。I—破裂准备阶段; II—发生前震阶段; III—主震发生, 应力调整, 余震阶段。C—水库水位的变化; D—水荷载的变化; Δt —时间变化尺度和诱发地震的发生。

a) 破裂准备阶段, 缓慢变形、积累构造应力, 且以弱震(地震背景)的形式释放小部分能量;

б) 应力加强和伴有前震的变形活动阶段, 该阶段以发生主震, 形成大破裂而告终;

в) 应力调整阶段, 破裂扩展, 发生余震。

图1中, B表明在水库影响下的同一过程。应力达到原来岩石强度的极限, 同时发生较大的弱震。这时, 各种破裂可能在不同的时间发展“成熟”(A和B)。如果产生破裂的地区与水库有水力联系, 孔隙——裂隙压力的作用可能是有效的。它实际上大于周围介质中孔隙——裂隙压力的作用。在构造接触带内, 这种联系破坏了。促使发生滑动或变形的初始应力值大大减少。过程雪崩似地发展。随着大部分地震能量的释放, 形成较大的破裂。

图1反映出过程的基本方面。上面指出的一系列其他伴随发生的机制都将促使所述的破坏过程。

因此, 修建水库引起应力场调整, 地壳中产生剪切变形, 使弱震频度增加, 发生强震的时间加速来临。同时, 该地震区可能发生的最大地震推迟。

诱发地震研究的重要结果, 乃是试图确定地质(特别是新构造的)背景在诱发地震中的作用, 查明最新的和现代的构造运动对应力的产生有何影响, 人类工程活动是否加速了这些应力以地震形式释放^[16, 20, 32等]。看来, 现今地震活动与最新构造运动有十分密切的联系。这从新构造图上可以清楚地看出。同时, 现今地震活动与新构造时期形成的应力场的联系, 比之与较老的构造多次活动所产生的应力场的联系要密切得多。这些老的构造是在别的应力场中产生的。这从新构造和新构造分区图^[33, 34]可明显看出来。正象M. B. Гзовский^[35]以苏联为例所指出的那样, 每个已查明的新构造区都以其地壳中最大剪应力及构造和地震能量的大小不同为特征。

诱发地震发生在下述两个区域(图2):

1) 最新的构造活动区(大陆造山作用和断裂作用地区)和2) 贡纳瓦(Гондвана)界古地台大洋周围地带(巴西的、非洲的、印度的、澳大利亚的)。

第一个地区的特征是反差明显的地形, 组合岩石的复杂构造; 强烈的差异构造运动比地台区大10~15倍; 大的运动梯度, 高的地震活动性, 火山活动和高的地温。这个地区的特殊之处在于岩体中的不均匀的应力状态, 异常高的层状压力。因此, 它具有大部分已知的诱发地震条件。

在它们与海洋邻接的边缘地区即第二个地区, 存在狭窄的沿海拗陷地带。后者在晚中生代时开始下沉, 新生代时继续沉陷, 新构造时结束。大陆沿海地带的强烈拗陷又被地质的正向运动所代替。这就导致古地台边缘地区地壳中构造应力的积累, 这种应力周期性地以地震形式释放出来。可见, 古地台并不是无震区。在印度(柯依纳等)、巴西、南非等地^[20], 就是这类地区发生了诱发地震。

这些过程的详细确定和研究, 得以编制预测略图, 指出地壳应力过剩的地区, 在那里只要具有有利的条件, 就可能发生诱发地震。

近年来, 根据对美国地震的研究, 肖尔茨^[30]等提出的膨胀——扩容假说广泛地流行。这是严谨的理论模型, 然而对它要有批判的态度。苏联和美国地震观测的结果表

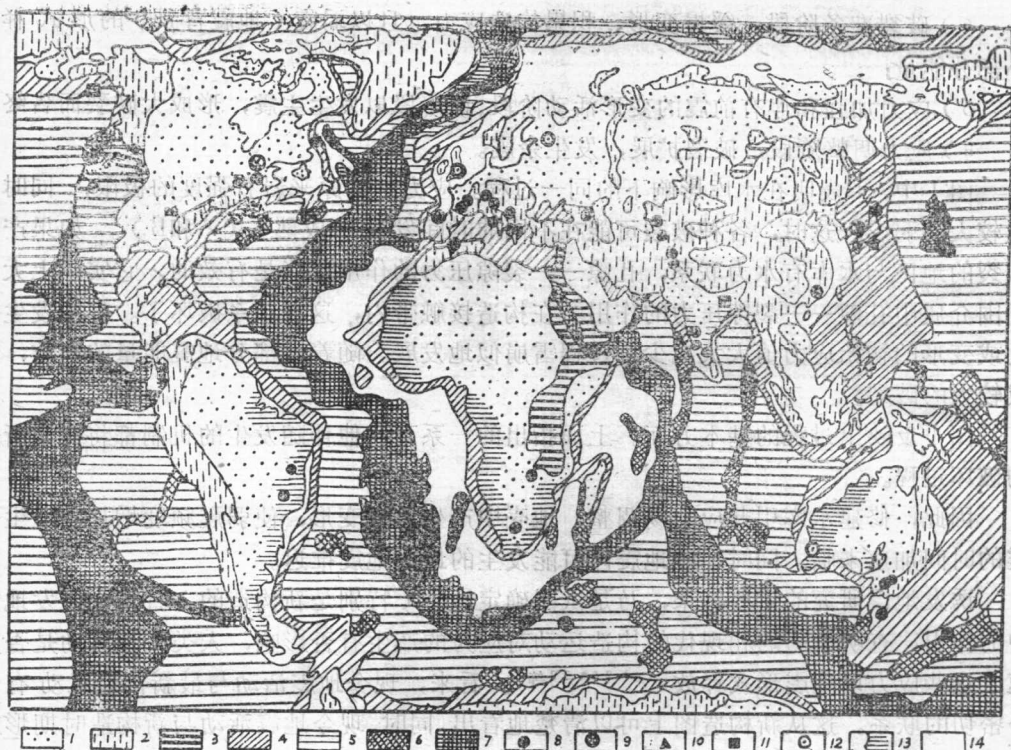


图2. 世界新构造分区简图(附诱发地震分布)

1—大陆地台；2—大陆造山带；3—大陆破碎带；4—过渡地带：地槽系，边缘断裂和大陆挠曲；5—大洋地台；6—大洋造山带；7—大洋破裂带；8—水库地震；9—与钻孔抽液有关的地震；10—与地下爆炸有关的地震；11—水体周期性变化所控制的能量释放区；12—与地震和地下爆炸有关的地下水变化的地点；13—沿海可能诱发地震的区域；14—巨大的陆棚区。

明，地震波波速比 V_p/V_s 值在地震前减少到异常低值。 V_p/V_s 值回升到正常值后，立即发生地震。

岩石破裂实验是膨胀——扩容模式的理论基础。干岩石和湿岩石是按不同方式进行的。在破裂前，岩样发生非弹性的体积增大，这是由于破裂前产生了很多微破裂之故。这种现象就是所谓的膨胀（体积的非弹性变化）。它的扩展使新产生的孔隙和裂隙中水丧失，从而引起纵波速度 V_p 的减少，但不影响横波的速度 V_s 。因而波速比值 V_p/V_s 就减小。此后，由于膨胀作用和自然条件下液体的渗流，岩石裂隙又充水。这时， V_p/V_s 比值回到原来的数值。整个过程是在引起有效应力增大的构造应力逐渐积累的背景下进行的。水充满孔隙和新的裂隙后，孔隙内应力增加，就起了地震的触发作用。重复水准测量发现的垂直运动速度的变化、岩石电阻率的变化、氦含量的变化、地下水的化学变化和泉水流量的变化，水温的变化及其他不正常的情况，都是上述机制的结果。

新假说的实质就是这样的。它很快就在地震学界流行并得到某些地质和构造物理学者的承认，在苏联得到广泛的传播。按此假说，起主要作用的不是构造应力，而是介质性质的变化以及孔隙内压应力，而构造条件却退居第二位。所以我们说，该模式本身是有问题的。我们不得不做简单的评述。岩样的实验结果是整个假说的基础。然而该实验未必能移到自然界中去，自然界完全是另外一种复杂的情况。应当指出，假说并不总能在实践中得到证实。不久前，加州理工学院的地震学家Х. Канамаки注意到这一问题。他研究了1975年6月Мохов荒漠中发生的5.2级地震（加利福尼亚）。他没有记录到膨胀说所设想的地震波速降低的现象。可见，不能脱离地质构造和结构来研究岩石非弹性扩张（膨胀）区。这就告诉我们，根据地震观测资料（ V_p/V_s ）揭示的伴随着非弹性体积增大的岩石破裂，不可能在所有岩块中都发生，而仅仅在构造不均匀地区和有隐蔽破裂的地区才能观测到。在互相分开的块体中，不可能发生任何孔隙度或微裂隙的变化，因为不均匀的地质介质的物理——力学性质将影响这一过程的特征。应当把膨胀看作构造变形的表现，在大多数情况下，构造变形受制于地壳的块体构造，而块体构造在此模型中却未加考虑。鉴于这个过程，扩容——流体渗入——只有在裂隙系统中才有可能进行，而在贯穿整个岩石的孔隙裂隙系统中是不可能的。构造应力的变化毕竟将成为触发因素。这些现象本身相互间是有成生联系的，造成变形的构造运动所引起的岩体内的地质过程和应力状态则是诱发地震的最初原因。

由构造变形来积累弹性能；同时，变形速度也发生变化。这使我们把地震看作是地质过程，并且要注意到地质体特征和地质时间的影响。显而易见，建立在定函数关系上的观点，即地震是由于应力增大而引起的观点是极端简陋的。必须从更复杂的模式出发，考虑许多其他的在地质体内发生并且往往有成生联系的现象和过程之间的概率联系。我们需要有一种体系的观点。这告诉我们，如果不做重大的修正，该假说就不能用以解释诱发地震。

在苏联，关于与人类工程活动有关的地方性地震加强的问题，已经做了大量工作，既有用创造性的观点解释诱震成因的理论^[30, 37等]和实验方面的，也有与建筑有关的实际问题的。工作的主要方面是积累有关拟建和在建水电站的观测资料，这些水电站是：Нурек、Токтогуль、Чарвак、Ингури、Чиркей、Зей和其他一些。

应借助于大型水利建筑工程区的实地观测进行综合研究。研究地震活动规律、地球物理场的变化；在破裂区的试验平峒中进行超声波速度的观测；为研究应力状态的变化进行电法的研究。根据弱震震源机制分析结果确定应力状态的变化，乃是一项特殊的任务。这时要记录自然电场，以查明岩石的导电性。在这些综合研究中，还要借助于各种系统的形变仪和倾斜仪对地表位移进行观测，安装仪器以记录微破裂和与此有关的高频电脉冲；进行重复水准测量和三角测量，对水库水位的变化和致密岩体中水渗透规律进行监测；安装地震仪；进行地球化学研究等。这一综合性工作是在各学科的研究所和设计院同建筑部门密切协作下实现的。

此外，某些科研机构还进行了实验室的实验研究，以研究孔隙压力，并查明它在破裂形成中的作用，揭示流体对孔隙压力变化的影响，岩石强度的相应变化（岩石的摩擦力和内聚力的变化），确定热力学条件变化时水的侵蚀性，水的物理性质的变化（粘

度、表面张力等)。藉助于孔隙压力变化,进行模型的弹性激振实验;进行数学模拟;等等。

上述各种研究清楚地表明,这些工作不仅对了解水库地震,而且对寻找地震前兆,都是有意义的。

可惜,进行这些研究遇到不少困难,也有一些不足之处。这些,在工作中已经注意到了^[38]。例如,在某些情况下,往往是建筑工程开始后,才进行这些研究,并且也不是对所有的对象进行这方面的研究。我们对于最优综合观测方案还不太清楚(有时它是随机的)。虽然大家都明白,所研究的问题是综合性的,但各方面的专家之间的联系是不多的;彼此间互通情报也不够。直到现在,在有目的地研究有关诱发地震的各种观测结果方面,还缺乏方法上的指导和建议。从地质角度上对发生诱发地震的各种地质标志(包括地震发展过程中的固体相以及液体相)的研究,对于了解浅源地震构造和构造物理都是需要的,对于寻找控制地震过程的方法或许也是有意义的。

只有综合研究,才能给出可靠地确定工程活动对于地质介质的影响的必要的实际材料,并学会控制诱发地震。

(肖安予译。原题:“О состоянии изучения проблемы возбужденных землетрясений, связанных с инженерной деятельностью”)

参 考 文 献

1. International colloquium on seismic effects of reservoir impounding (CCSE-RI). London, Roy. Soc., 1973.
2. Seismic effects of reservoir impounding. — “Eng. Geol.”, 1974, 8, N½.
3. First International symposium on induced seismicity. Summaries Canada, Banff, 1975.
4. A. Rogers. Microseismicity studies at lake Mead. — Intern. Colloq. (COERI). London, Roy. Soc., 1973.
5. E. Anderson. Late Cenozoic tectonic environment of the lake Mead area. — Intern. Colloq. (COSERI). London, Roy. Soc., 1973.
6. H.K. Gupta et al, “Bull. Seismol. Soc. America”, 1972, 62, N2.
7. B.C. Papazachos, “Engng. Geol.”, 1974, 8, N½.
8. S.K. Guha et al, “Engng. Geol.”, 1974, 8, N½.
9. J. Drakopoulos. Conditions and triggering mechanism of seismic activity in the regions of Kremasta-Kastraki dams (Greece). Athens, 1974.
10. H.K. Gupta et al, “Bull. Seismol. Soc. America”, 1972, 62, N2.
11. Sheng Chung-kang et al, Earthquakes induced by reservoir impounding and their effect on the Hsinfengkiang dam. Peking, 1973.

12. Wang Miao-yueh e.a. Mechanism of the reservoir impounding earthquakes at Hsinfenfengkiang and a preliminary endeavour to discuss their cause. Peking, 1975.
13. Hsu Tsung-ho e.a. Strong-motion observation of water-induced earthquakes at Hsifengkiang reservoir in China. Peking, 1975.
14. D.S. Carder. "Buff. Geol. soc. America", 1970, 81, N 8.
15. J.P. Roth'e. "Tectonophysics", 1970, 9, N $\frac{3}{4}$.
16. Н.И. Николаев. В кн.: Новейшая тектоника, новейшие отложения и человек, вып. 5. М. Изд-во МГУ, 1973.
17. D.W. Simpson. First Intern. Sympos. Summaries. Canada, Banff, 1975.
18. C. Kisslinger. First Intern. Sympos. Summaries. Canada, Banff, 1975.
19. S.K. Guha et al, First Intern. Sympos. Summaries. Canada, Banff, 1975.
20. N.I. Nikolaev. "Engng Geol.", 1974, 8, N $\frac{1}{2}$.
21. J. Drakopoulos. Intern. Colloq. (COSERI). London, Roy. Soc., 1973.
22. Напряженное состояние земной коры. Под ред. П. Н. Кропоткина. М., "Наука", 1973.
23. Н.К. Булин. "Геол. и геофиз.", 1973, № 12.
24. М.В. Гзовский. В кн.: Тектонофизика и механические свойства горных пород. М., "Наука", 1971.
25. D.I. Gough, W. I. Gough. "Geophys. J.", 1970, 21.
26. D.M. Evans. "Mountain Geol.", 1966, 8.
27. R.S.T. Lane. "Proc. Instn Civil Engrs", 1971, 50, N 9.
28. Н.Г. Кыссин. "Сов. геол.", 1972, № 2.
29. R.J. Martin. "J. Geophys. Res.", 1972, 77.
30. C.H. Scholz. "J. Geophys. Res.", 1972, 77.
31. J.H. Healy et al, "Science", 1968, 161, N 3848.
32. Н.И. Николаев. "Природа", 1973, № 7.
33. Карта новейшей тектоники СССР (масштаб 1 : 5000 000). М., Госгеолтехиздат, 1960.
34. Н.И. Николаев. "Геоморфология", 1970, № 4.
35. М.В. Гзовский. Основы тектонофизики. М., "Наука", 1975.
36. В.С. Панфилов. "Гидротехн. стр-во", 1973, № 5.
37. Л.Д. Белый. "Узб. геол. журн.", 1974, № 1.
38. Н.И. Николаев. "Вести. АН СССР", 1974, № 8.

诱发地震机制理论评论

Carl·基斯林格

摘 要

本文简述由地下爆破,注水和水库蓄水激发地震活动的物理过程的理论。在任何情况下要激发地震,地层材料必须处于接近其破坏强度的初应力状态。由于老断层的存在或地层材料特性方面的非均质性造成的应力集中,在确定诱发地震位置上起重要作用。

在有可用资料的少数情况下,例如由于占孔注水激发的地震,可以通过库仑——莫尔的破坏准则和在充水多孔机制中有效应力的概念去圆满地解释。水库地震机制与注水诱震机制非常相近,但是从前者渗水压力低这一点看,附加于地层介质上的水的物理或化学效应可能起重要作用。有可能由于水的渗入使老断层带介质强度削弱或者由于应力腐蚀而导致硅酸盐岩静力疲劳破坏。

引 言

本文试图论述由于人类从事各种活动激发地震的机制的现代知识水平。目的是介绍这些课题在学术上的最新进展。

这些课题中要探索的是不同方式的诱发地震过程在多大程度上是一致的,又在多大程度上有各自特殊的性质。

我们知道有几种诱发地震的活动,大型地下爆破、水库蓄水,深岩层注水,地下岩层抽液、地下采矿等。每一种诱发地震都是一个引人入胜的地球物理问题,但还没有一个问题已经得到圆满的了解。

在各种诱发地震中,水库蓄水诱发地震常引起世界学术界的广泛注意,其理由是很明显的因为在世界上已经建成或筹建着不少大坝。鉴于发展深井作为处理废液环境保护的一个可行方法,而且还可能控制地震,因此占孔注液诱发地震仍然是一个重要问题。我并不想讨论抽水或采矿而激发的地震。然而应该指出,在发展地热作为能源时,需要一方面从地热蓄水层抽出热水,另一方面又需要把已经提取了热能的那些水重新注入地层。因而就导致两种众所周知的在适当的条件下会诱发地震的过程,我们必须把这种不慎触发的地震作为发展地热能的可能后果去加以考虑。核爆炸问题现在已经不那么引人注意了,因为一方面大规模核装置的试验频度已明显减少,另一方面在试验场进行爆破会触发破坏性地震的担心实际上业已证明是毫无根据的。

一个圆满的机制理论必须能够解释过去发生的事件中所观测到的现象,并能提供一个理论根据,以预测将来的同类活动会诱发地震的条件。在新的地方将来发生的诱发地

震的预测,大概应该基于场地的可测量特征和特定控制参数,即断层位置,现场应力以及诸如注压、设计水位的库容和水深等。

我试图归纳出对于每一种诱发机制看来最有希望的一些假说。其中一些问题是:那些是决定是否会触发地震的共同因素呢?地震时释放的能量来源是什么?一旦地震活动被激发并且其激发因素已去除掉但地震活动仍将持续下去的条件是什么?一般说来,我将依据我们在地震过程物理学方面发展中的认识去研究这些问题。

大规模地下爆破诱发地震

在美国原子能委员会的内华达州试验场于六十年代后期进行了若干次大规模核爆炸,结果在邻近断层产生了可见位移以及在爆破点附近随后发生数次地震^[19, 11, 18]。坎尼金试验在阿拉斯加的安奇特加群岛于1971年11月爆炸了一个高当量的核装置,使得人们对于爆破诱发地震的关心达到顶点。这就提出了一个直接的实际问题:如此一次在地质构造活动区的爆破,能否触发一次大地震,以及能否释放出与这次爆炸本身所放出的相当或更大能量的地震呢?

为了分析地震诱发机制,按我所提出的称呼将地层的反应分为即时构造效应和滞后构造效应是合宜的。由若干次观测得知,地下核爆炸常常伴随着释放出一个可观的构造应变能^[23]。仅有很少情况下,爆炸伴随着断层的形成或者原有断层的新位移,并且断层运动实际上发生在爆破的当时。这些均是即时构造效应。

在一些情况下,随着爆破之后即开始并持续若干星期有大量的小地震。其中那些小震就发生在爆炸点附近并明显地与爆破产生的空腔的倒塌和岩面裂口的形成有关系。独特是当爆破口发生倒塌时,这些活动就停止了。另外一些小震是在距离爆破点约十公里观测到的。这些小地震亦始于爆破之时,但可能在爆破之后持续一个较长时间。这些地震相当于由爆破触发的一个“地震群”,而不是通常意义上的“余震”。应该注意到一个很好的例证:在1968年12月进行的 Benham 爆破表明没有明显的与爆破时产生滑移的断层的进一步运动有关连的余震发生。

无论是即时的或滞后的构造效应均相当于初始应变能的释放,这个论据是不容置疑的。如果爆破发生在无应变地层介质中是不可能触发地震的,除非爆炸事件的爆破点紧靠受压的断层并与其有直接的关系。Milrow和Canikin爆破均直接在阿留申岛弧上一个很活动的地震区域进行。然而在每种情况下,主要的诱发地震活动仅持续到爆炸后约36小时爆破空腔塌陷的时候,之后就骤然终止了^[4]。有少数小于 $m_b = 3$ 的地震活动,显然属于构造原因,在邻近的断层上于爆炸后数星期之内断续地发生。

所有以前所进行的核爆破事实表明,安奇特卡岛弧下面几公里的岩层没有处于很高的构造应力状态下。这意味着这些岩层与其下面有强烈活动的减缓层之间并没有机械联结。因而由这些爆炸所产生的诱发地震是可以忽略不计的。这种活动也仅能持续到由爆炸产生的应力能有效的促成地震时那么长久,亦即持续到空腔塌陷时为止。

另一方面在内华达州试验场,其岩层受 Basin区和Range区南部的区域应力特征所支配。这种应力特征也显示在与邻近的米德湖有关的地震上。现在已清楚地知道构造应变能的释放是在处于初应力状态的地层介质中爆破空腔迅速产生的结果。这些认识大部分是属于 Archambeau^[2]的理论研究成果。虽然这个现象引起爆破地震信号的重大修

正,但是在这次讨论会范围内并不是重点,重点是讨论附近断层滑动的触发。

我们假定在爆破时产生滑移的断层,在爆破之前就一定承受了相当大的剪切应力,但这个载荷要低于断层表面的抗剪强度。爆破要不是通过瞬时增加剪切应力就是瞬时降低岩层表面强度而驱使断层滑移。由于断层表面强度取决于束薄断层的有效正应力,因而可以设想至少有二种机制,通过这样机制爆破就于一个短暂的时刻削弱断层。一种机制认为:由爆破产生的瞬时压力脉冲可能会升高岩层内水的孔隙压力,特别是当岩层本来就有点湿润饱和状态的话。孔隙压力的急剧增加会骤然减少断层的有效围压,而初应力就驱使断层位移。

我所提出的机制是:由爆破产生的强压缩波经由自由表面反射成一个拉伸波,骤然施加到断层的张力将减少断层上的围压并使其滑动。有一个实验可能辨明这两种机制,然而这种实验又是永远不可能做到的。这个实验就是去观测断层的滑移是靠近地面开始并往下运动,抑或是从地层深处开始并往上运动,如果是前者则为反射的拉伸波。无论在那一种情况下滑移的方向均由组合构造应力所决定。此外,来自内华达州试验场的有限的资料表明,在爆破时滑移的断层在爆破后瞬间就紧锁住,没有余震发生。这个使断层滑移的机制是非常短促的。

然而随着少数大规模爆破而来的地震群的机制却不那么清楚了。造成地震群就要求这些爆破在远大于公认的非弹性反应半径的距离上产生一个非弹性效应,并且是在爆破好多天之后才发生地震。这个效应一定在爆破时间发生,因为在远离爆破点处很快就发生可感余震,并且爆破所造成的大运动一过去,就在地震图上观测到余震。

在几年前J·T·查理和我提出了一个适当的机制^[14]。我们应用比奥的应变增量理论证明:通过一个具有可变的原有剪应力的区域传播的剪切波,将产生平行于辐射方向的质点加速度。

对于平面应变状态(略去体积力),则运动方程式为:

$$\begin{aligned}\rho \ddot{u} &= \frac{\partial s_{ii}}{\partial x} + \frac{\partial s_{ji}}{\partial y} - 2S_{ii} \frac{\partial w}{\partial x} + (S_{ii} - S_{jj}) \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial S_{ii}}{\partial x} e_{xx} - \frac{\partial S_{jj}}{\partial y} e_{yy} \\ &\quad - \left(\frac{\partial S_{ji}}{\partial y} + \frac{\partial S_{ij}}{\partial x} \right) e_{xy} \\ \rho \ddot{v} &= \frac{\partial s_{ji}}{\partial x} + \frac{\partial s_{ij}}{\partial y} + 2S_{jj} \frac{\partial w}{\partial y} + (S_{ii} - S_{jj}) \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial S_{jj}}{\partial y} e_{yy} - \frac{\partial S_{ii}}{\partial x} e_{xx} \\ &\quad - \left(\frac{\partial S_{ii}}{\partial x} + \frac{\partial S_{jj}}{\partial y} \right) e_{xy}\end{aligned}$$

这里: S_{ii} 为初始应力场; s_{ij} 为与剪切波有关的应力增量; u , v 为变形位移增量;

$$e_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \text{ 余此类推; } \omega = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right).$$

初应力的空间变化通过剪切应变项与两个位移分量相耦联。它证明了一个平行剪切应力梯度传播的纯平面剪切波并不是一个可能解。例如:对 $\frac{\partial S_{ii}}{\partial y} \neq 0$ 的平行 y 轴传播的且质点位移平行于 X 的平面剪切波,一定伴随有一个平行 y 轴的质点加速度。换言之