

水力扩散与水库诱发地震关系的讨论*

谢原定 汤 泉

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

本文讨论了水力扩散和水库诱发地震与水文动力地质条件之间的联系,提出了水力扩散是水库诱发地震的主要原因。本文还建立了两个与水力扩散相联系的诱发震源模型——非应力增长模型和应力调整模型,并给出了该模型在水库地震预报中的应用条件和方法。

一、前 言

关于水库地震的成因问题,现有多种认识^[1-10]。归纳起来大致可以分为两类:一类是应力说,即水库蓄水后,改变了地壳内部应力分布状态,引起了地震。至于应力改变的途径,有人认为是由于水库蓄水,增加了地表的载荷,引起了地壳应力的增加。有人认为是由于库水的渗透,改变了地壳应力的分布等。另一类是软化说,即库水渗透后,由于水的直接作用或通过应力腐蚀的途径,引起断裂面物质的软化及其抗剪强度的降低。我们认为,水库地震的发生,可能是应力和地壳介质特性综合作用的结果。本文从地震学、水力学、地质构造学三者的关联上对水库诱发地震成因做了一些讨论。

二、水力扩散与水文动力地质条件的联系

引起一个地区水力性质突变的原因是多方面的。属于外部的原因有:水库蓄水后,库区水位抬高,库基和库区附近的水力性质——水的渗透率就要发生改变,不仅在同一深度上的水平向渗透和孔隙压力要增大,而且也要加大向深部的渗透,增大深部岩石孔隙中的孔隙水压。如果库区基岩中有断裂、裂隙、节理存在,库水沿着断裂、裂隙、节理常年渗透,最后会使库底深处的地下水与库区水沟通。沟通后,水压就要随深度呈正比例增大。

外因还可通过内因起作用。如水在向深部渗透运移过程中,水温随地体温度的增高而增高。被增温了的水,在地下运移过程中,会使通道内的部分盐类溶解,特别是硅酸盐类矿物。被溶解后的通道,由于管道口径和裂面间隙增大,其水流速率也要增大。如遇到温度和压力降低或硅酸盐溶液浓度增大到过饱和时,硅酸盐类矿物就会从水溶液中沉淀出来,堆积

*本研究得到地震科学联合基金资助。

在管道壁上，导致管道口径缩小或被堵塞，致使水文地质条件和水力性质发生改变。

属于内部的原因有：构造运动引起热液沿着断裂上涌，上涌物质形成的热应力使岩体裂隙及周围介质受热膨胀，孔隙度和裂隙宽度可能由此变大，孔隙和裂隙中原有的水压则可能变小。相反远离热源岩石介质中的孔隙和裂隙则可能变小变窄，孔隙—裂隙水压可能变大。同出一因，断裂活动也有可能使深处的断层泥物质沿着断层上涌，升到浅处某一高度，堵塞水的通道，切断地表水和地下深部水的联系，改变其水文地质条件和水力性质。

另外，构造地震的发生，也同样会在短时间内迅速改变受震强烈地区和震源区附近的水文地质条件和水力性质。

以上导致几种水力性质变化的原因，都可能是地壳内岩体孔隙和裂隙中孔隙水压或裂隙水压瞬时上升的机制。另外强的构造活动也会改变断裂破碎带上的孔隙度。与主压应力轴相垂直的断裂带，由于受到压缩，裂隙宽度会变小，水被溢出，裂隙水压变小。与主张应力轴相垂直的断裂带，由于受到拉伸，裂隙宽度增大，如果有水补充，裂隙水压随之变大。另外，当一个地区的区域应力场主压应力方向发生改变时，同样也引起水文地质条件和水力性质的变化。这是由于在主压应力方向改变的情况下，张性和张扭性断裂可能改变成压性和压扭性断裂，断裂破碎带上的裂隙水压将由大变小。根据以上分析不难看出，导致水力性质变化的几种原因，其根本都在于孔隙—裂隙水压的变化。

三、库水渗透诱发地震的震源模式

根据水库地震的不同成因，本文提出两种水库地震的震源模式。

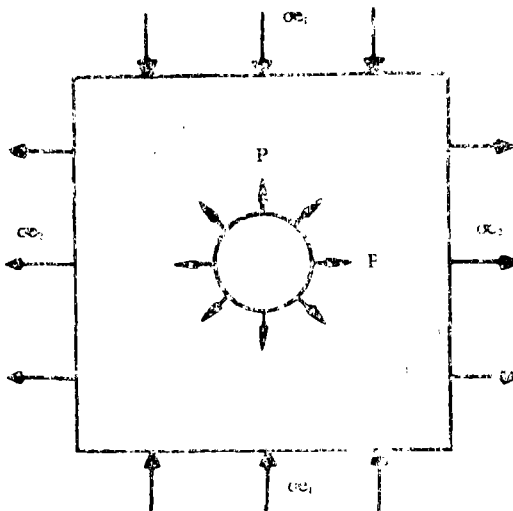


图1 非应力增长模型
Fig.1 Nonstress increasing model

1. 非应力增长模型：也称均质水渗透—破裂模型，如图1所示。其中 $\sigma_{1,1}$ 、 $\sigma_{2,2}$ 是构造应力， P 是孔隙压力。它是建立在岩石抗剪强度基础上的，即

$$\tau = \mu(\sigma - P) + \tau_0 \quad (1)$$

其中 τ_0 是岩石的粘结强度， μ 是破裂面上的摩擦系数， σ 是破裂面上的法向正应力， P 是破裂面上的孔隙水压力。当构造应力不变时，水渗透以后会使 P 增大， μ 和 τ_0 减小。这样可使岩石抗剪强度 τ 减小。当 τ 减小到小于构造应力中的剪切应力值时，于是岩石就会发生剪切破坏而发生地震。但必须指出，由孔隙压增大引起岩石骨架耦合应力的减小的同时，岩石的粘结强度不能减小到零。如果固体骨架的粘结强度减小到零，那么这种非应力增长只能导致岩石的流变，

而不能引发地震。基于这个原因，渗透—破裂模型要求岩石在抗剪强度下降以后仍处在弹性变形范围内。这样应用上述模型解释水库诱发地震的先决条件是，必须在高应力背景下，库区岩石属中等弱化介质。根据对发生诱发地震的水库的岩石的归类统计，片岩、千枚岩、

板岩、页岩和砂岩类岩石,都属于强度低、高弱化介质,因而均不适用于这类模型。碳酸盐类的岩石属中等强度和中等弱化介质,其次是变质岩,这两类岩石适用于上述模型。而花岗岩和火成岩在水渗透以后是属于高强度低弱化或不弱化的岩类,因此也不适合于上述模型。

从实际情况看,水库地震只限于库区及其附近,随着震源深度的加深,地震越来越少。而且水库地震活动与水渗透相关的持续时间不是延续得很久。这些水库地震的活动特征,都可用上述模型来解释,即随着距水库距离的增大和深度的加深,水力扩散越来越小,由水力扩散引起孔隙压力的增长值也越来越小,因而导致剪切强度 τ 的变化也越来越小。此外在水库近处及在浅处,随着时间的推移,由于水的渗透产生的弱化作用逐渐趋于稳定平衡或者使岩石的弱化程度很高,超出了弹性范围从而仅以流变的形式来达到应力平衡。这个结论可由文献[11]所证实。文献[11]采用二维线弹性的两相多孔介质理论,对均匀介质模型计算的剪切强度弱化的时空分布结果表明,在库区中央 $\Delta\tau$ 值最大,为 $1\rho_0$ (ρ_0 是库区水形成的压力, $\rho_0 = \rho gh$, h 是水位高度)以内,在深5 km处弱化值为 $0.5\rho_0$,弱化作用由浅至深逐渐减小,而且随着时间的延续,弱化值开始变化幅度很大,以后变化幅度逐渐变小。这个结论也和新丰江水库诱发地震的时空分布是相吻合的。

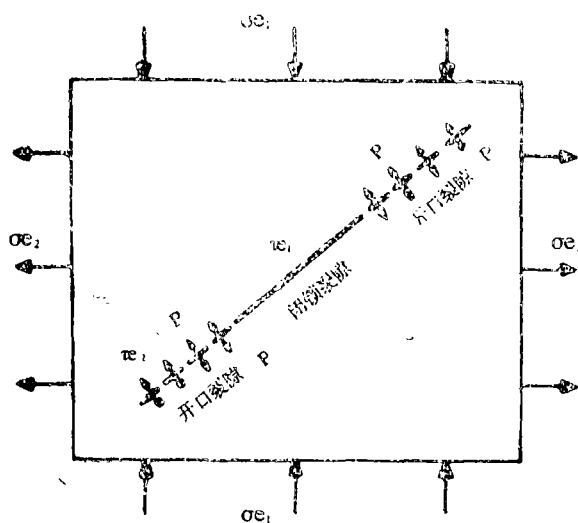


图2 应力调整模型

Fig. 2 Stress adjusting model

2. 应力调整模型: 也称非均匀介质水渗透—摩擦滑动模型, 如图2所示。图中 σ_{11} 、 σ_{22} 代表构造应力, P 代表裂隙面上水渗透的水压力。设地体内存在着开、闭相间分布的裂隙, τ_{11} 代表锁住的闭裂隙段上的剪切强度, τ_{22} 代表未锁住的开裂隙段上的剪切强度。当 σ_{11} 、 σ_{22} 保持不变, 水未进入开裂隙时, 则 τ_{11} 和 τ_{22} 也保持不变。当 σ_{11} 、 σ_{22} 保持不变, 而水沿开裂隙渗透引起水压 P 增大和耦合应力减小时, 则 τ_{22} 减小, 于是在开裂隙段上首先产生粘滑。因其强度和规模均不大, 因而这时仅发生一些小地震。开裂隙段的滑动将引起闭裂隙段上的应力集中。通过开裂隙段的多次滑动, 闭裂隙段上应力的多次调整, 该段的应力值不断

增加。当其剪应力值超过 τ_{11} 时, 便会发生规模较大的地震。当然, 在水库地震的整个孕育过程中, 震源处的水力条件也会不断地发生变化。在开裂隙段发生规模小的粘滑后, 一些开裂隙会闭合, 一些闭裂隙又会开裂。显然, 这种变化从宏观上来看有其随机性。如这种变化始终形成不了大的闭合裂隙段, 那么水库地震将以一系列的小震的形式发生。相反, 如能在某处形成一条逐渐增长的闭裂隙段, 那么就可能孕育一个规模较大的地震。当较大地震发生以后, 震源区的介质已相当弱化了, 不再具备积累应力的条件, 水库地震的活动也就趋于终止。施行党与C. Y. Wang所做的水的扩散与断层粘滑的实验表明, 在室内低围压条件下, 将水注入Westerly花岗岩切割裂纹中, 发生了一系列粘滑事件, 随着粘滑的产生偏应力减少。他们认为随着孔隙压力的增大, 断层面上广大区域可能逐渐被弱化和卸载[12]。

实际发生的水库地震中绝大多数都属于这类成因。因为在漫长的地史发展过程中,地壳岩体不可能是完整的。由于构造运动使岩层产生褶皱和断裂,而后期的构造运动又使断裂的几何形态、断裂规模、破碎程度、断裂的力学性质等,都会产生很大差异,这就导致了各个地区的水文地质条件和水力性质的差异。有的岩体内断裂和断裂的某些段落导水性好,而有的岩体断裂和断裂段的导水性差,有的断裂被锁住得好甚至成为阻水断裂,因此地壳内的岩体中断裂的孔隙—裂隙水压分布始终是不平衡的。有些断裂和断裂段在水渗入后引起的孔隙—裂隙水压的变化克服不了断裂面上的摩擦力,则其仍处于应力积累阶段。有些断裂和断裂段,在水渗入后引起孔隙—裂隙水压的变化克服了断裂面上的摩擦力,则使得岩体错动,从而发生地震。

另外,还需指出,在水沿裂隙渗透过程中,水的物理化学作用及水的应力腐蚀作用,还会引起断裂端部介质强度降低,使周围介质的应力向此端部集中。因此加速了断裂的锁住部位的粘滑的发生。

上述两类模型说明,水库地震的成因总是和水的渗透有关。在一般情况下,水库地震的震级随着水力扩散面积的增大而增大,根据对实际震例的统计、分析,用最小二乘法计算出水力扩散面积和震级之间的关系为

$$M = a + b \log A \quad (2)$$

式中A代表水力扩散的地表面积,它可以通过水库蓄水后引起的地形变区域大小、小震活动面积和地震波速比异常范围来测得。

如果把诱发主震和水力扩散引起的孔隙—裂隙水压力峰值传播直接联系起来,那么某一个确定震级的地震发生的时间T可由下式给出,

$$T = \frac{A}{C} \quad (3)$$

式中 $\bar{C}$ 代表平均水力扩散率,可以通过井下注水直接测量,也可以通过对水库诱发小震的多种地震学观测结果估计出来^[13],如可利用震中面积生长速率及根据库水位变化和地震活动开始时刻之间的时间延迟来估计,也可用深井中流体注射与地震活动开始时刻之间的时间延迟来估计。尽管用这些方法所取得的介质水力扩散率,其中含有多重不确定性因素,但经过对比观测发现,由这种方法估算的值,基本上和介质水力扩散率接近,因此我们将其称为介质水力扩散率的平均值。把(3)式代入(2)式得到

$$M = a + b \log T \bar{C} \quad (4)$$

由(4)式看出,获得介质平均水力扩散率后,可以根据时间延迟的长短来估计未来诱发主震的震级。

四、结束语

综上所述,水力扩散是水库诱发地震的主要原因。在地壳应力背景下,由于水的渗透,使岩体强度降低和引起剪切应力的集中从而发生地震。这与构造地震是两种不同的应力途径。

文献1)指出,地球表面存在的水的质量约为大陆岩体的质量的282倍,因此认为这些水

1) 张宏,地球水源在哪儿?,人民日报第8版,1988.

如果都归还给大气层,这是大气层所容纳不了的。因而认为地球表面上的水主要是来自地球内部。果真如此,那么现在地壳内部仍有许多水存在,地下水的运移也必然成为天然构造地震的一个十分重要的诱发因素。另外,岩浆和地气的运移和作用也是不可忽视的。因此今后应进一步探讨地壳内部所有流体的运移和作用。

(本文1988年12月15日收到)

参 考 文 献

- [1]沈崇刚等,新丰江水库地震及其对大坝的影响,中国科学, No. 2, 1974.
- [2]王妙月等,新丰江水库地震的震源机制及其成因初步探讨,中国科学, No. 1, 1976.
- [3]胡毓良等,我国的水库地震及有关成因问题的讨论,地震地质, Vol. 1, No. 4, 1979.
- [4]国家地震局地震研究所,中国诱发地震,地震出版社, 1984.
- [5]肖安予,水库诱发地震若干震例的初步分析,水文地质工程地质, No. 3, 1982.
- [6]臧绍先,水的渗透作用及新丰江水库地震的特点和机制,地震地质, Vol. 5, No. 2, 1983.
- [7]D. I. Gough and W. I. Gough, Stress and deflection in the lithosphere near Lake Kariba 2, Geophys. J. R. Astr. Soc., Vol. 21, No. 1, 1970.
- [8]D. T. Snow, Geodynamics of Seismic Reservoirs, Proceeding of the Symposium on Flow Through Fractured Rock German Society for Soil and Rock, Mechanics Stuttgart, 1972.
- [9]吴景浓,岩石软化与水库地震,中国诱发地震,地震出版社, 1984.
- [10]C. Kisslinger, A review of theories of mechanisms of induced seismicity, Engineering Geology, Vol. 10, No. 2-4, 1976.
- [11]龚钢延,孔隙压力扩散与水库诱发地震活动性的初步研究,西北地震学报, Vol. 10, No. 1, 1988.
- [12]施行党、C. Y. Wang, 水的扩散与断层的粘滑,中国地震, Vol. 2, No. 3, 1986.
- [13]P. Talwani, S. Acree, Pore pressure diffusion and the mechanism of reservoir-induced seismicity, PAGEOPH., Vol. 122, No. 6, 1984/85.

DISCUSSION ON RELATIONSHIP BETWEEN THE HYDRAULIC DIFFUSION AND RESERVOIR-INDUCED EARTHQUAKE

Xie Yuanding, Tang Quan

(Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Lanzhou, China)

Abstract

In this paper we have discussed the relations between the hydraulic diffusion, reservoir-induced earthquake and dynamic geological conditions in hydrology. We suggest that the hydraulic diffusion is main cause of reservoir-induced earthquake. We have also constructed two induced focus models associated with the hydraulic diffusion——nonstress increasing model and stress adjusting model, and proposed conditions and method of applying those models in prediction of reservoir-induced earthquake.