

水渗透引起的应力场调整及岩石强度弱化的初步研究*

龚钢延

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

本文采用二维线弹性的两相多孔介质理论,对水库蓄水后由水渗透引起的耦合应力变化及岩石强度弱化进行了数值模拟计算。结果表明,由于水的渗透使得岩石中的孔隙压力增大,耦合应力随之减小,从而导致岩石的有效应力减小,同时抗剪强度也相应减小,其减小的量值可以与地震时断面上的应力降相比。根据计算结果,本文讨论了由水渗透引起地震的可能机制。

一、前言

在水库区由于水的渗透而引起地震的物理机制已有很多学者进行了研究^[1-4],但是由于水渗透引起的水库区岩石中孔隙流体压力增大及应力场调整的过程,尤其是由水渗透引起的库区岩石强度弱化的时空分布仍是值得进一步研究的课题。本文是在文献^[4]的基础上,对水渗透形成的应力场调整及岩石强度弱化进行了数值模拟计算,根据计算结果,提出了由水渗透引起地震的几种可能的机制。

二、水渗透引起的应力场调整及岩石强度弱化的数值模拟计算

水库蓄水以后,库区岩石中的总的应力

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{(0)} + \sigma_{ij}^{(e)} + p + \sigma_{ij}^{(c)}. \quad (1)$$

(1)式中 $\sigma_{ij}^{(0)}$ 和 $\sigma_{ij}^{(e)}$ 分别为蓄水前的初始应力和蓄水后由水的荷载而产生的瞬时弹性响应,在一定的时间范围内,二者几乎是不变的。只有当水位急剧变化时, $\sigma_{ij}^{(e)}$ 才有相应的明显变化,而 $\sigma_{ij}^{(0)}$ 仅与构造活动程度有关,如较大地震的应力释放等。据此并根据(1)式,可以认为由水渗透形成的孔隙压力 p 和耦合应力 $\sigma_{ij}^{(c)}$ 是水库区应力场变化的主要影响因素。因此,计算水库蓄水后由水渗透引起的应力场变化可以简化为计算 p 和 $\sigma_{ij}^{(c)}$

*本项目得到地震科学联合基金资助

的变化。

多孔岩石介质中的应力是由岩石骨架和孔隙中的流体共同承受的。如果孔隙中的流体压力增大或减小，必然会引起岩石骨架应力的调整，人们把这一过程称为孔隙压力——应力耦合。文献[5]根据两相多孔介质的线弹性理论得出孔隙压力——应力耦合的基本方程：

$$2G\epsilon_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{\nu}{1+\nu}\sigma_{kk}\delta_{ij} + \frac{3(\nu_u - \nu)}{B(1+\nu)(1+\nu_u)}p\delta_{ij} \quad (2)$$

其中 σ_{ij} 是Kronecker张量，其余符号参见文献[4]。计算 σ_{ij} 的具体步骤是，按一定的计算模型给出孔隙流体压力 p 的边值条件，求解出水渗透形成的孔隙压力 p ，然后再求解方程(2)，方程(2)的解又由通解 $\sigma_{ij}^{(1)}$ 和对应于边界应力条件的特解 $\sigma_{ij}^{(2)}$ 两部分组成，即 $\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{(1)} + \sigma_{ij}^{(2)}$ ，本文按照二维计算模型，编制出二维FFT程序求解 $\sigma_{ij}^{(1)}$ ，采用一维FFT方法计算 $\sigma_{ij}^{(2)}$ ，计算时的离散网络为 32×16 ，空间步长为1公里，时间步长为1个月，图1为二维计算网络模型。图1a为均匀渗透模型，图1b、c分别为包含一条垂直断层及一条倾角为 60° 的断层的非均匀渗透模型。图中A、B代表载荷的作用边界，假设断层的深度为5公里，模型中的主要参数 $k = 1\text{md}$ ， $k_0 = 100\text{md}$ ， $G = 15000\text{MPa}$ ， $\nu = 0.2$ ， $\nu_u = 0.22$ ， $B = 0.7$ 。

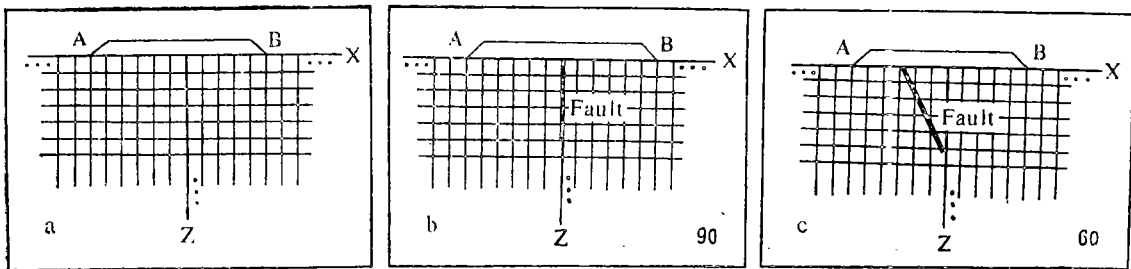


图1 二维计算网络模型
Fig. 1 Two dimensional nets for calculation

按照上述两种模型，作者分别计算了水渗透所形成的正应力 $\sigma^{(c)} = \sigma_{xx} + \sigma_{zz}$ 与剪应力 τ_{xz} 的变化以及库区岩石强度弱化的情况。

1. 水渗透引起的孔隙流体压力扩散

按照图1模型所示的三种情况分别进行了计算。在均匀渗透情况下，最初半年内水的渗透主要在库区中央区域，孔隙压力梯度最大的地方在水库边缘外侧1~2 km范围内(图2a，其中 $p_0 = pgh$ ，当水深 $h = 100\text{m}$ 时， $p_0 \approx 10\text{bar}$)，以后孔隙压力在浅层向四周扩散，库区

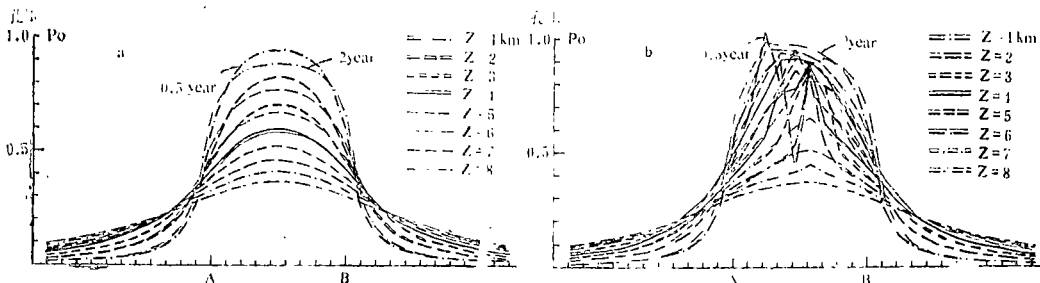


图2 水渗透引起的孔隙压力变化
Fig. 2 Pore pressure caused by water seeping

中央的孔隙压力减小，而在7~8 km深处的孔隙压力基本不变。对图1 a模型的计算结果表明1由水渗透引起的孔隙压力变化并不是很明显的。对图1 b模型的计算结果与图1 a模型明显地不同。在蓄水后半年内，浅层的孔隙压力变化幅度异常大（见图2 b），但孔隙压力增大的区域范围较小，两年后孔隙压力增大的区域范围变大，其峰值也系统地增加，尤其是库区深部的孔隙压力系统地增大了0.1~0.2p₀，对图1 c模型的计算结果见文献〔4〕。

2. 水渗透引起的耦合应力变化

根据图1a模型计算的耦合应力变化引起的 $\sigma_{xx} + \sigma_{zz}$ 、 τ_{xz} 如图3a所示。随着时间的延续，在均匀渗透情况下，岩石介质中的耦合应力没有明显的变化。但是值得注意的是，水渗透引起的耦合应力变化导致了正应力的减小，最大减小量约为0.9p，剪应力系统地增大，最大值为0.16p。对图1b模型的计算结果则有所不同。在最初半年内浅部正应力出现剧烈的变化（图3b），2年后，在3~6 km深处的断层附近正应力出现大范围的减小，在断层面两侧正应力的差值为0.6p₀，而剪应力则基本不变。

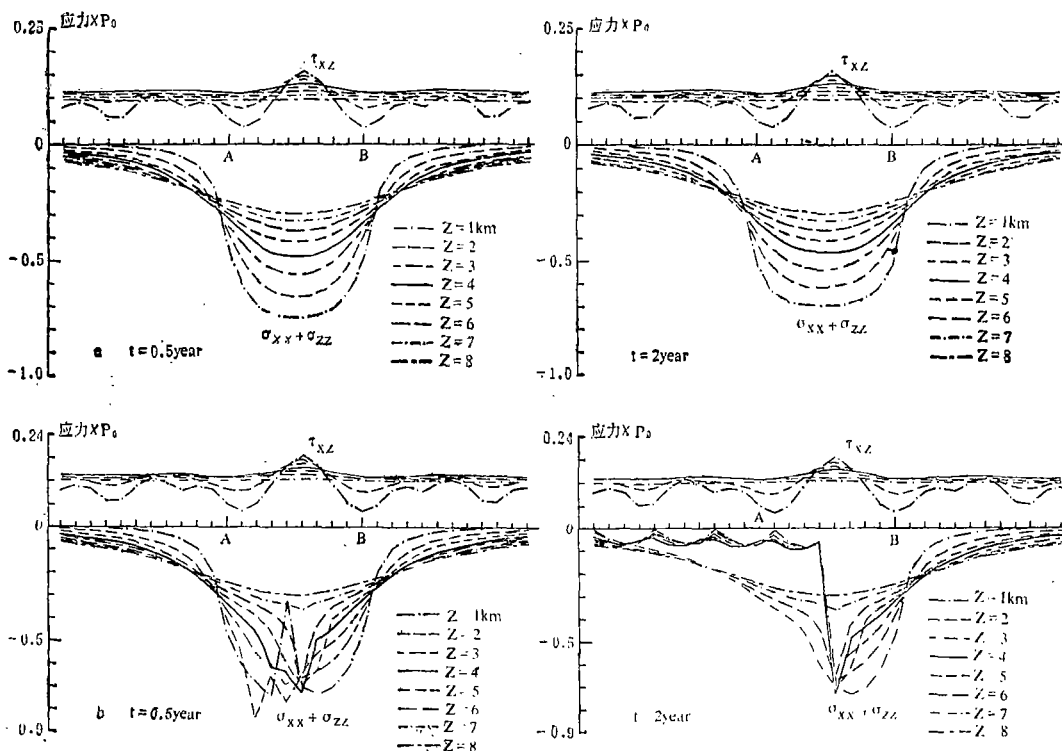


图3 水渗透引起的耦合应力的变化

Fig. 3 Coupled stress due to pore pressure caused by water seeping

3. 水渗透引起岩石强度的变化

按照岩石剪切破坏的库仑准则，岩石抗剪强度为：

$$\tau = \tau_0 + f(\sigma - p) \tag{3}$$

其中 τ_0 是岩石的粘结强度， f 为破裂面上的摩擦系数， σ 、 p 分别是破裂面上的法向正应力和孔隙压力。在水渗透以后，岩石的 σ 和 p 分别增加了 $\Delta\sigma$ 和 Δp ，设 τ_0 和 f 都保持不变，则 $\Delta\tau = f(\Delta\sigma - \Delta p)$ ；计算结果表明， $\Delta\sigma < 0$ ， $\Delta p > 0$ ，所以 $\Delta\tau < 0$ ，即水渗透引起孔隙压力及耦合应力导致岩石的抗剪强度降低。图4为按照 $\Delta\tau = f(\Delta\sigma - \Delta p)$ 计算的岩石剪切强度

弱化的时空分布。计算时取摩擦系数 $f = 0.6$ 。图4b、4c表明，在库区中央 $\Delta\tau$ 值最大，接近 $1 p_0$ ，在 5 km 深处为 $0.5 p_0$ ，表明弱化作用由浅至深是逐渐减小的，而且随着时间的延续，弱化值变化不大。由图 4 b-e 所示的计算结果可以看出，在断层附近透水性好的介质中，岩石强度弱化在最初的时段内发生突跳，先是在库区断层附近的浅层发生，随后向深部扩展，在垂直断层附近，岩石介质的强度弱化值要比倾斜断层附近大，其最大弱化值可达 $2.2 p_0$ ，若 $p_0 = 10 \text{ bar}$ ，则 $\Delta\tau = -22 \text{ bar}$ ，这个值与地震时产生的应力降相当。

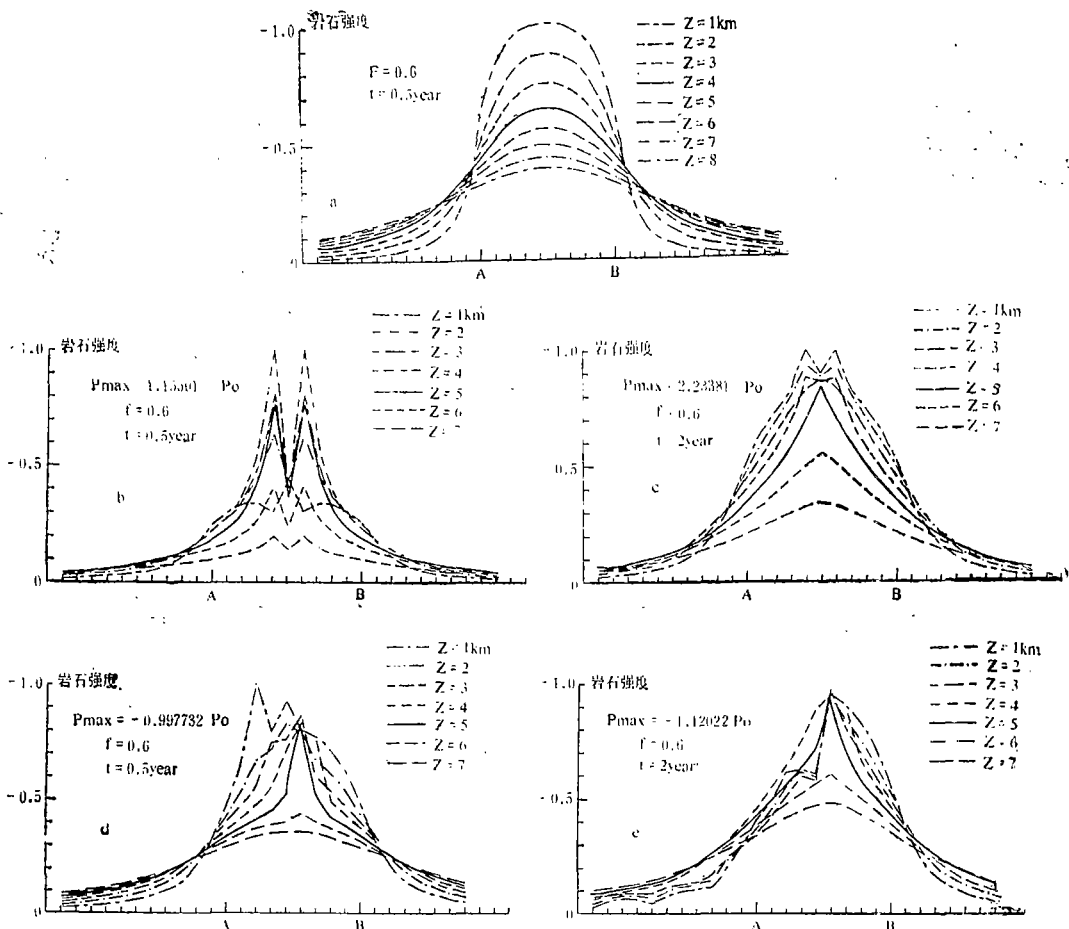


图 4 由水渗透引起的岩石强度弱化
Fig. 4 Weakening of strength caused by water seeping

总之，从水渗透到库区基岩中的力学效果来看，孔隙压力的增大降低了岩石的抗剪强度。水渗透引起的耦合应力使岩石骨架的正应力减小，在水渗透作用下断层面上的正应力减小，从而使岩石的抗剪强度降低。此外，水渗透到岩石中还能引起岩石的摩擦系数及粘结强度的减小，因此本文前面计算的强度弱化值还应该大一些才更接近于真实情况。

三、水渗透引起水库诱发地震机制的讨论

水渗透的过程总是由浅到深的，因此水库蓄水后，由于在库区浅层局部断层的弱化形成了地震震源的让位条件。当水渗透到深处时，可能遇到隔水层或渗透率很小的岩石，从而迫

使水向侧向水平流动而导致了库区周围的小震活动，主震的发生可能是由于前震发生后，库区介质发生了破碎，形成了有利于水渗透的通道而诱发主震。

(本文1988年8月19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. 2，1978.
- [2] 戚绍先，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.
- [3] 胡毓良，我国的水库地震及有关成因的讨论，地震地质，Vol. 1，No. 4，1979.
- [4] 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.
- [5] Rice, J.R., Some basic stress diffusion solution for fluid-saturated elastic porous media with compressible constituents, J.G.R., Vol. 14, No. 12, 1976.

PRELIMINARY STUDY ON STRESS FIELD ADJUSTMENT AND ROCK STRENGTH WEAKENING CAUSED BY WATER SEEPING

Gong Gangyan

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

Abstract

In this paper, we make a numerical and simulant calculation of coupled stress and rock strength weakening caused by water seeping after reservoir impounding, using the theory of two-phase porous medium. The results show that due to water seeping, pore pressure in rock increases and coupled stress decreases, so the effective stress in rock decreases and the shear strength should decrease. The decreasing increment is comparable to the value of the shear stress drop on seismic fault surface. Finally, some possible mechanisms about reservoir earthquake caused by water seeping are discussed.