

# 岩体裂隙充水后对拐角频率的影响

姚立珣, 钟羽云, 张震峰, 杨钢宇

(浙江省地震局, 浙江 杭州 310013)

摘要: 2002年在浙江温州的珊溪水库发生了一系列水库诱发地震, 其拐角频率明显小于同震级的构造地震。本文从二相介质理论出发, 讨论了水库岩体在扩容、流体渗入饱和和强度弱化过程中波速和波速比的变化以及对拐角频率的影响。根据实验结果, 当孔隙度为0.15, 岩体弹性模量减小23%时, 拐角频率可以减小约29%。由此解释了水库诱发地震拐角频率偏小主要是由裂隙发育和库水渗透扩散使地壳浅部岩体强度弱化引起的。因此拐角频率可以作为区别两者的一个依据。

关键词: 水库诱发地震; 二相介质; 岩体弱化; 拐角频率

中图分类号: P315.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2004)04-0315-07

## 0 引言

目前在使用地震波频谱方法计算震源参数时, 拐角频率是一个关键量, 它直接影响震源尺度、位错和应力降的计算结果, 也影响到使用低于拐角频率的频谱值计算地震矩, 而这些震源参数正在被试用于地震预报和工程地震中。因此定量研究某些因素对地震拐角频率的影响是必要的。

2002年7月29日浙江温州市珊溪水库发生水库诱发地震, 最大震级为9月5日 $M_L 3.9$ 。对该地震序列震源参数处理的结果显示, 序列中的地震拐角频率明显低于同震级的构造地震的拐角频率。显然水库诱发地震震源区的介质条件变化与一般构造地震不同, 这与水的作用有密切关系。岩体的扩容、饱和以及浸水弱化对地震波传播速度、破裂速度及破裂尺度有较大影响, 而这些也是决定拐角频率的主要因素。有些因素涉及到地震波在二相介质中传播的问题, 对此已进行了较多的研究。Biot<sup>[1-3]</sup>研究了多孔介质中波的传播过程, 建立了各向异性多孔线性粘弹介质中波的传播方程, 并证明了在有耗散的介质中, 存在二个纵波和一个横波。Plona<sup>[4]</sup>、Berryman<sup>[5]</sup>在实验中观察到了第二个较慢的纵波。冯德益、李清河等<sup>[6,7]</sup>对二相介质中地震波的动力学特性进行了研究, 对波速比、振幅比等异常进行了分析。门福录等<sup>[8]</sup>、李伟华<sup>[9]</sup>研究了二相介质对地震波传播的影响。

研究水库地震震源区介质条件变化对地震波速和拐角频率的影响, 对于地震矩、拐角频率、震源尺度、应力降等震源参数应用于地震预测和工程地震有重要意义。

## 1 岩体扩容和渗水对拐角频率的影响

当取震源时间函数为

$$\alpha(t) = H(t) = \begin{cases} 1 & (t \geq 0) \\ 0 & (t \leq 0) \end{cases} \quad (1)$$

由远场地震体波位移谱可以求得拐角频率 $\omega_c$ <sup>[10]</sup>

$$\omega_c = 1 / \left[ \frac{L}{2} \left( \frac{1}{v_F} - \frac{\cos \theta}{c} \right) \right] \quad (2)$$

式中  $L$  为破裂长度  $\theta$  为震源—观测点与地震断层面走向间的夹角  $v_F$  为破裂速度  $v$  为地震波速度。

破裂速度、地震波速度和破裂长度都是与介质性质有关的。下面将讨论在二相介质中, 岩体扩容、饱和、浸水弱化过程中对地震波速度、破裂长度和破裂速度的影响。

### 1.1 二相介质中的地震波速度

二相介质中以位移表示地震波传播的运动方程为<sup>[6]</sup>

$$\begin{aligned} \mu_1 \nabla^2 u^{(1)} + \nabla[(\lambda_1 + \mu_1 - a_2 \rho_2 / \rho) e^{(1)} + (\lambda_3 - a_2 \rho_1 / \rho) e^{(2)}] = \\ \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\rho_{11} u^{(1)} + \rho_{12} u^{(2)}) + \gamma \frac{\partial}{\partial t} (u^{(1)} - u^{(2)}) \nabla[(\lambda_4 + a_2 \rho_2 / \rho) e^{(1)} + \\ (\lambda_2 + a_2 \rho_1 / \rho) e^{(2)}] = \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\rho_{12} u^{(1)} + \rho_{22} u^{(2)}) - \gamma \frac{\partial}{\partial t} (u^{(1)} - u^{(2)}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$e^{(1)} = \nabla u^{(1)} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} u_i^{(1)}, \quad e^{(2)} = \nabla u^{(2)} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} u_i^{(2)} \quad (4)$$

式中上角标(1)、(2)分别表示固相和液相介质;  $\mu_1$  为固相介质的剪切模量;  $\gamma$  为耗散数;  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  分别为复合介质中固相和液相介质弹性模量;  $\lambda_3$  为固相作用于液相的介质的弹性模量;  $\lambda_4$  为液相作用于固相介质的弹性模量。且有

$$\begin{aligned} \lambda_1 = (1 - k_0)(1 - \delta_2 k_0)^2 \lambda_s, \quad \mu_1 = (1 - k_0)(1 - \delta_1 k_0)^2 \mu_s, \\ \lambda_2 = (1 - (1 - k_0)(1 - \delta_2 k_0)^2) \lambda_f, \quad \lambda_3 = \sqrt{\lambda_1 \lambda_2} - k_0 P_0, \quad \lambda_4 = \sqrt{\lambda_1 \lambda_2}. \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $P_0$  为静压力;  $k_0$  为多相介质孔隙度;  $\lambda_2 = \lambda_3 - \lambda_4 = -k_0 P_0$ ;  $\delta_1 = 0.478$ ;  $\delta_2 = 1.348$ ; 下角标  $s$  表示固相介质, 下角标  $f$  表示液相介质。

$\rho$  为复合介质密度;  $\rho_1$  为复合介质中固相密度;  $\rho_2$  为其液相密度, 则有

$$\rho_1 = (1 - k_0) \rho_s, \quad \rho_2 = k_0 \rho_f \quad (6)$$

设  $\rho_{11}$ 、 $\rho_{12}$  为固相对应于应力  $\sigma^{(1)}$ 、 $\sigma^{(2)}$  作用下而产生运动的那一部分物质在  $\rho_1$  和  $\rho_2$  中所占的分量,  $\rho_{21}$ 、 $\rho_{22}$  为液相对应于应力  $\sigma^{(1)}$ 、 $\sigma^{(2)}$  作用下而产生运动的那一部分物质在  $\rho_1$  和  $\rho_2$  中所占的分量, 则

$$\rho_{11} + \rho_{12} = \rho_1, \quad \rho_{21} + \rho_{22} = \rho_2, \quad \rho_{12} = \rho_2, \quad \rho_{21} \rho_{22} = -\gamma. \quad (7)$$

解(3)式得到二相介质弹性波传播速度为

$$v_{ij}^2 = \frac{A_1 + \beta_j B_1}{\rho_{11} + \beta_j \rho_{12}} = \frac{B_2 + \beta_j A_2}{\rho_{12} + \beta_j \rho_{22}}, \quad v_{sj}^2 = \frac{\rho_{22} \mu_1}{\rho_{11} \rho_{22} - \rho_{12}^2} \quad j = 1, 2 \quad (8)$$

$$(B_1 \rho_{22} - A_2 \rho_{12}) \beta_j^2 + (B_1 \rho_{12} + A_1 \rho_{22} - A_2 \rho_{11} - B_2 \rho_{12}) \beta_j + (A_1 \rho_{12} - B_2 \rho_{11}) = 0 \quad (9)$$

式中:  $A_1 = \lambda_1 + 2\mu_1 - \frac{a_2 \rho_2}{\rho}$ ,  $B_1 = \lambda_3 - \frac{a_2 \rho_1}{\rho}$ ,  $B_2 = \lambda_4 + \frac{a_2 \rho_2}{\rho}$ ,  $A_2 = \lambda_2 + \frac{a_2 \rho_1}{\rho}$ .

由式(9)和式(8)可以计算出二相介质的纵波和横波速度。可以看到, 二相介质中纵波有二个速度, 而横波只有一个速度。

地壳岩石在孕震过程中, 经历从完整—出现微裂隙—流体渗入—饱和—硬化发震的复杂过程。在这一过程中介质状态和力学性质会有很大变化, 地震波速也会随之变化。根据实验室结果<sup>[11-15]</sup>, 岩石中波速明显受样品孔隙度、裂隙密度及饱和度影响, 更受岩石强度变化影响, 概括如下:

纵波速度受饱和度影响变化最大可达30%, 横波变化较小, 甚至没有变化。

岩石浸入水中后强度降低。不同种类的岩石强度可降低5%~76%<sup>[16]</sup>。其中砂岩抗压强度可降低到自然状态的20.2%, 弹性模量可降低到33.3%; 花岗闪长岩强度可降低到自然状态的64.4%, 弹性模量可降低到77.4%<sup>[12]</sup>。

自然状态下各类岩石的孔隙度差别很大, 大多数结晶岩孔隙度为0.1~1.0%, 火山岩和砂岩在20%左右, 其余岩石介于二者之间<sup>[17]</sup>。

根据上述一些实验结果和天然观测结果设定岩石的力学参数, 使用(8)式计算了二相介质在以下6

种状态下的地震波速度。这6种状态是：

(1) 自然状态岩石,即岩体未出现新裂隙时,相当于未孕震时地壳岩石状态。取孔隙度  $k_0 \rightarrow 0$ ,  $\lambda_s, \rho_s$  取地壳岩石平均值,  $\lambda_s = \mu_s = 3.30 \times 10^{10}$  pa,  $\rho_s = 2.70$  g/cm<sup>3</sup>。这时求得的波速相当于地下15 km左右的波速值,可视为上地壳岩石的波速平均值,并作为衡量岩石在其它状态下地震波速变化的参考值。

(2) 微裂隙出现阶段,水尚未渗入,孔隙中充满气体,对应扩容初期。取  $k_0 = 0.1$ 。假设此时岩石强度变化不大,  $\lambda_s$  和  $\rho_s$  不变;气体  $\lambda_f = 1.42 \times 10^5$  pa,  $\rho_f = 1.25 \times 10^{-3}$  g/cm<sup>3</sup>。  $P_0$  的选取考虑具体问题,一般水库诱发地震大多发生在地下6、7 km以内,我们平均取3 km。此外考虑在微裂隙形成时虽然有裂隙扩展和连通,但整体上相互之间还是孤立的,此时  $P_0$  取岩体静压力。

(3) 孔隙和裂隙中充满饱和流体,这时对应扩容晚期。为方便与(2)比较,孔隙度仍取  $k_0 = 0.1$ 。假设岩石尚未被流体软化,其参数不变,流体的  $\lambda_f = 2.07 \times 10^9$  pa,  $\rho_f = 1.00$  g/cm<sup>3</sup>。

(4) 岩石骨架被流体弱化,岩石强度显著降低。岩石强度降低也会影响到二相介质的耦合作用,这时软化和未软化的岩石并存,问题变得复杂。为使问题简化,我们仅考虑流体浸入岩体后使岩石骨架弹性模量降低,对其它影响不考虑。岩石弹性模量  $\lambda_s, \mu_s$  降低15%,其它参数不变。为便于与(3)对比,仍设孔隙度  $k_0 = 0.1$ 。

(5) 岩体出现扩容后期,不仅其裂隙密度增加,而且裂隙间出现扩展和连通,形成较长的裂隙,但仍然保持相互孤立,扩容区仍然存在有限区域。设孔隙度  $k_0$  增加为0.15,  $\lambda_s, \mu_s$  降低15%,其它参数不变。

(6) 设  $k_0 = 0.15$ ,  $\lambda_s, \mu_s$  降低23%,其它参数不变。

上述6种状态大体能够反映在二相介质环境中,地震孕育和发生时引起地震波变化的背景情况,计算结果见表1。

由表1可以看到：

表1 岩石在不同状态下二相介质地震波速和波速比值

岩体状态	孔隙度 / $k_0$	岩石强度	P波		S波		$v_p/v_s$
			$v_p$ / [ km · s <sup>-1</sup> ]	$\Delta v_p/v_p$ %	$v_s$ / [ km · s <sup>-1</sup> ]	$\Delta v_s/v_s$ %	
1. 自然状态岩体	$\rightarrow 0$	未弱化	6.0220	-	3.4768	-	1.732
2. 孔隙含气体	0.1	未弱化	5.6215	6.68	3.3286	4.26	1.689
3. 孔隙含饱和水	0.1	未弱化	5.7827	3.94	3.2755	5.79	1.765
4. 孔隙含饱和水	0.1	减小15%	5.3579	11.00	3.0199	13.14	1.744
5. 孔隙含饱和水	0.15	减小15%	5.1483	14.48	2.9168	16.11	1.765
6. 孔隙含饱和水	0.15	减小23%	4.8686	19.13	2.7761	20.19	1.754

(1) 在二相介质的第2种状态,当岩体内出现扩容,裂隙内只是充满空气时,P波速度出现较大变化,可以降低6.68%,S波速度虽然也降低,但比P波小,为4.26%;同时波速比也减小。这对应震源质出现微破裂的阶段,即孕震早期阶段。

(2) 对于第3种状态,即水进入微裂隙并饱和后,P波速度出现明显回升,而S波速度变化不大,略有下降,波速比有较大回升。这对应孕震晚期,即临震阶段。

(3) 第4、5、6三种状态,说明震源区岩体微裂隙密度增加和强度弱化时波速变化情况。对比状态4和5,即微裂隙密度增加,对P波和S波速度都有较大的影响,对P波影响稍大些。

(4) 对比状态5和6,即岩体强度减小,对P波和S波速度也都有较大的影响。相比之下对P波影响也略大些。

在珊溪水库地震几个较大地震前可以看到波速比的这种变化,即在扩容期间波速比降低,在震前波速比回升,见图1。

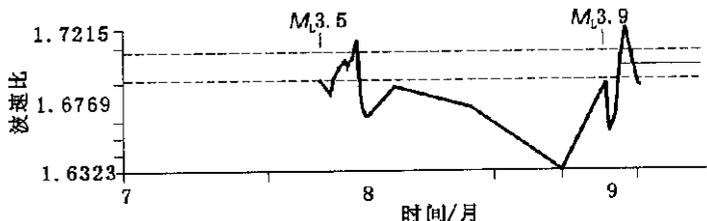


图1 2002年珊溪水库诱发地震波速比日均值变化曲线  
Fig. 1 Curve of the wave velocity ratio of Shanxi reservoir earthquakes in 2002.

## 1.2 破裂速度

地震的破裂速度主要与介质有关,大多数地震的破裂速度在 2 ~ 3 km/s 之间,少数超出这一范围<sup>[18-22]</sup>。我们统计了 20 多次地震的破裂速度,其平均结果为  $v_F = 2.40$  km/s,这与实测的 1966 年美国帕克菲尔德地震破裂速度为 2.40 km/s 相当<sup>[23]</sup>。

实际地震的破裂速度并不是一个常数,它的大小与介质结构、性质和应力水平等多种因素有关。由于破裂速度与地震波速都是与介质性质有关的量,且两者有定量关系<sup>[24]</sup>。在应用时可以使用一般状态下  $v_s$  的参考值 3.476 8 km/s 和  $v_F$  的平均值  $v_F = 2.40$  km/s,得到破裂速度  $v_F = 0.69v_s$ ,这样相当于考虑到破裂速度与介质变化的关系。

## 1.3 破裂长度

为了得到中、小地震的破裂长度,大多采用求位移谱拐角频率,然后选用圆盘位错模型计算震源等效半径的方法。另外还可以使用较大地震的震级与破裂长度统计公式,根据自相似原理外推到小地震,得到小地震破裂尺度。由于我们的目的是研究拐角频率与破裂长度变化的关系,要抛开波谱方法求小震震源尺度,而选用了后一个方法确定震源尺度。构造地震震级与破裂尺度的统计公式很多,对比后选用<sup>[25]</sup>

$$M_s = 2.1 \log L + 3.3 \quad (10)$$

经过对比在中小震级段,用该公式计算的震源尺度与其它用频谱方法得到的结果比较接近<sup>[26]</sup>。

我们将构造地震的震源尺度作为参考值,讨论水库地震由于浸水岩体强度弱化引起的震源尺度变化。地震的大小取决于断层破裂释放的应变能  $\Delta W$ <sup>[10]</sup>,

$$\Delta W = \frac{7m_0^2(1 + \gamma)}{32\mu r^3(1 - \gamma)} \quad (11)$$

式中  $m_0$  为地震矩,  $\gamma = \sigma_1/\sigma_0$ ,  $\sigma_0$  为初始应力,  $\sigma_1$  为终止应力,  $r$  为震源尺度。设对于相同的  $\Delta W$  和  $m_0$  同样大小的地震,当剪切模量  $\mu$  减少时,震源尺度  $r$  会增加。假设由于岩体浸水  $\mu$  减少 23%,则  $r$  增加约 10%。

## 1.4 计算结果

我们选用位于震中北部 140 km 的永康地震台 (28.9621°N, 120.2008°E) 的数字记录资料求拐角频率。根据浙江省地震局对珊溪水库地震烈度考察结果和震源机制结果,走向为 NW50° 的断裂为发震断裂,计算时  $\theta$  取为 130°。相对于表 1 的 6 种状态计算的拐角频率列于表 2。

表 2 表 1 中 6 种状态下的拐角频率

震级	破裂长度 $L/\text{km}$	拐角频率 $\omega_c/\text{Hz}$					
		状态 1	状态 2	状态 3	状态 4	状态 5 $L' = 1.06L$	状态 6 $L' = 1.10L$
1.0	0.028	118.70	113.65	111.83	103.11	93.95	84.10
1.5	0.052	63.92	61.20	60.22	55.52	50.58	45.29
2.0	0.098	33.92	32.47	31.95	29.46	26.84	24.03
2.5	0.183	18.16	17.39	17.11	15.78	14.38	12.86
3.0	0.333	9.83	9.41	9.26	8.54	7.78	6.96
3.5	0.631	5.27	5.04	4.96	4.58	4.17	3.73
4.0	1.166	2.85	2.73	2.69	2.48	2.25	2.02
4.5	2.178	1.53	1.46	1.44	1.33	1.21	1.08

注:  $L'$  为岩体浸水强度降低后破裂长度

仍然以“自然状态岩石”(状态 1)为基准,由表 2 可以看到:

(1) 对于状态 2,  $k_0 = 0.1$ , 孔隙含气体,得到拐角频率降低约 4% 左右;对于状态 3,  $k_0 = 0.1$ , 孔隙含水,得到拐角频率降低约 5% 左右,两者相差不大。而对于状态 4,  $k_0 = 0.15$ , 孔隙含水,得到拐角频率降低约 13% 左右。可见孔隙和裂隙的丰度对于拐角频率的变化起重要作用,而另一相介质是水还是空气影响不大。

(2) 对于状态 5,  $k_0 = 0.15$ , 孔隙含水,且岩石弹性常数降低 15%,得到拐角频率降低约 21% 左右;对于状态 6,  $k_0 = 0.15$ , 孔隙含水,且岩石弹性常数降低 23%,得到拐角频率降低约 29% 左右。可见岩石强度的变化对于拐角频率起的作用也很大。

(3) 在  $k_0 = 0.15$  , 岩石弹性常数降低 23% 时( 状态 6 ) , 震源尺度的变化引起的拐角频率的变化约为 10%。

## 2 珊溪水库诱发地震序列拐角频率的变化

珊溪水库相对坝高 131.8 m , 库容 12.9 亿  $m^3$  , 2000 年 5 月水库建成蓄水。2002 年 7 月 28 日当蓄水到 110 m 时发生了  $M_L 3.5$  地震 , 宏观震中(  $27^\circ 41.5' N$  ,  $119^\circ 59' E$  ) 位于大坝上游 6 km 处。2002 年 9 月 5 日又发生  $M_L 3.9$  地震 , 宏观震中位于  $27^\circ 40.4' N$  ,  $119^\circ 57.5' E$ 。之后时有余震发生。这些地震震源小于 5 km 。图 2 给出珊溪水库地震构造图。图 3 给出水库水位与地震的关系。由图 2、3 可以看到 , 地震主要发生在北西和北东向断裂的交汇处 , 且与水位有较好的相关性 , 较大地震大多发生在水位高值之后 , 有一定滞后时间。

挑选永康地震台记录清晰的数字化记录 , 利用频谱方法测定了拐角频率。表 3 给出了发震时间、震级和拐角频率  $\omega_c$ 。

将表 3 与表 2 的结果对比可以看出 , 除 7 月 28 日  $M_L 3.5$  和 9 月 5 日  $M_L 3.9$  地震的拐角频率与自然状态( 状态 1 ) 的拐角频率相差不大外 , 其余地震的拐角频率都偏小很多。

另一方面 , 为了与一般构造地震对比 , 我们列出一些地区的构造地震拐角频率的实测值 :

(1) 北京地区<sup>[26]</sup> :  $M_L 2.0$  ,  $f_c = 30$  Hz ;  $M_L 3.0$  ,  $\omega_c = 11$  Hz ;  $M_L 4.0$  ,  $\omega_c = 2.6$  Hz。

(2) 唐山地区<sup>[27]</sup> :  $M_L 3.0$  ,  $\omega_c = 11$  Hz ;  $M_L 3.5$  ,  $\omega_c = 5.6$  Hz ;  $M_L 4.2$  ,  $\omega_c = 7.0$  Hz。

(3) 唐山地区<sup>[28]</sup> :  $M_L 2.9$  ,  $\omega_c = 6.7$  Hz ;  $M_L 3.5$  ,  $\omega_c = 5.7$  Hz ;  $M_L 4.2$  ,  $\omega_c = 3.9$  Hz。

(4) 民乐盆地<sup>[29]</sup> :  $M_L 2.4$  ,  $\omega_c = 15$

Hz ;  $M_L 3.0$  ,  $\omega_c = 8$  Hz。

(5) 浙北地区 :  $M_L 2.0 \sim 2.9$  ,  $\omega_c = 7 \sim 11$  Hz ;  $M_L 3.0 \sim 3.8$  ,  $\omega_c = 4.5 \sim 6.7$  Hz。

将表 3 与上述实际构造地震的拐角频率相比较 , 也可看出珊溪水库地震的拐角频率比相同震级的构造地震拐角频率小得多。

我们认为 , 珊溪水库地震拐角频率数值普遍偏小不是偶然的 , 主要是水库蓄水后裂隙增加、库水渗透和岩石软化强度降低引起的。这可能是水库地震的共同特

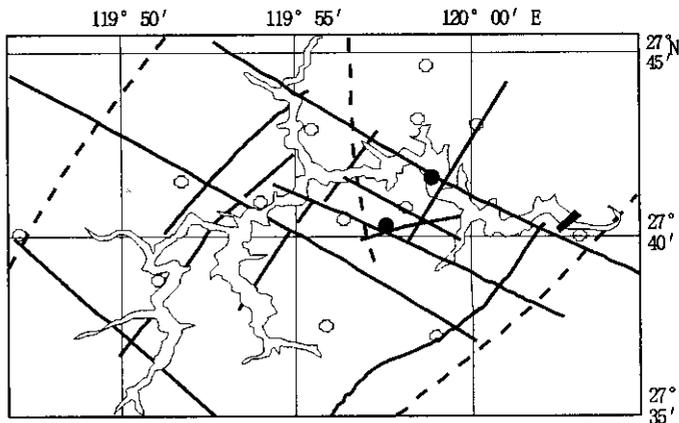


图 2 珊溪水库区主要地震和断裂分布

Fig. 2 Distribution of major reservoir - reduced earthquakes and faults in Shanxi reservoir area.

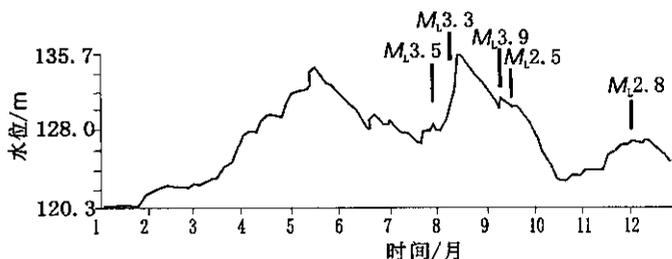


图 3 2002 年珊溪水库水位曲线

Fig. 3 Curve of water level of the Shanxi reservoir in 2002.

表 3 珊溪水库诱发地震序列部分地震的发震时间、震级和拐角频率

发震时间	震级 $M_L$	拐角频率 $\omega_c / \text{Hz}$	发震时间	震级 $M_L$	拐角频率 $\omega_c / \text{Hz}$
2002-07-28	3.5	6.0	2002-07-28	2.8	4.8
2002-07-28	1.8	4.8	2002-07-28	2.1	5.0
2002-07-29	2.3	5.2	2002-07-30	2.2	6.0
2002-07-31	2.5	4.0	2002-07-31	2.2	5.6
2002-07-31	2.2	5.0	2002-08-02	2.4	5.5
2002-08-07	3.3	2.5	2002-08-07	3.0	3.4
2002-08-17	1.9	5.5	2002-08-18	2.2	6.0
2002-08-30	2.6	4.5	2002-09-05	3.9	2.8
2002-09-05	2.6	5.0	2002-09-05	2.5	5.0
2002-09-05	2.4	5.0	2002-09-07	2.9	3.5
2002-11-12	2.6	2.8	2002-11-13	2.1	3.0
2002-11-13	2.1	6.2	2002-11-14	1.9	3.9
2002-11-29	2.8	4.3			

征。

由于水库诱发地震拐角频率明显小于构造地震,可以将其用于区分构造地震和水库诱发地震。如果在显著地震后用拐角频率或断层尺度变化能够迅速区分出构造地震和水库诱发地震,对于震后趋势判断无疑是十分有用的。

### 3 结论和讨论

基于二相介质的地震波理论,用于探讨水库诱发地震拐角频率的变化,得到了比较有说服力的解释。主要结论是:

(1) 引起波速变化的主要因素是岩体裂隙和孔隙变化以及岩体渗水后的软化。而对波速比影响较大的是裂隙中流体饱和度。由珊溪水库地震波速比变化经历下降—回升—正常过程,可以看到水库诱发地震显示出明显的扩容—饱和—发震的过程,这与水库地震震源浅,裂隙发育,水的渗入作用活跃有关。

(2) 由水库地震拐角频率变化看,引起地震拐角频率变化的主要因素是岩体强度的弱化、裂隙密度的增大。孔隙和裂隙中的介质是水还是空气对拐角频率影响较小。在假定孔隙度为0.15,岩体弹性模量降低23%时,拐角频率可减小29%(状态6)。因此,当使用拐角频率以及与之有关的震源参数处理问题时,应特别注意这一点。

(3) 计算了珊溪水库地震序列中25个地震的拐角频率,除第一个地震( $M_L 3.5$ )和最大的一个地震( $M_L 3.9$ )的拐角频率大小符合构造地震外,其余地震的拐角频率均比构造地震的小得多。这一点可以作为区别水库诱发地震和构造地震的依据,对于水库地震震后趋势判断也十分有用。

需要讨论的问题:

(1) 岩体浸水后弱化可导致强度和弹性模量降低,岩体出现较多微裂隙后岩石强度和弹性模量也会降低,但这二种变化机制不一样,前者是岩石物理、化学性质变化,后者是岩石结构变化。计算中我们只考虑了前者。这是因为前者有大量的实验结果,能够定量描述,而后者是很复杂的问题,很难定量描述。现在的计算目的是定量地估计几种因素变化对波速和频谱拐角频率的影响大小及变化趋势,而不是关注其具体数值。

(2) 实测拐角频率时要考虑场地条件的影响问题。由于场地软介质对地震波的高频成分有较强的吸收,对于小地震则会导致拐角频率明显变小。Frankel等研究表明<sup>[31]</sup>,不同的台站波谱形状不同,但其频谱比形状是类似的,说明不同台站波谱形状不同并非震源特征,而是场地条件不同的影响,只有消除了场地影响后的拐角频率才比较真实。例如,使用频谱图确定拐角频率, $M_L 3.1$ 时 $f_c = 10$  Hz; $M_L 1.4$ 时 $f_c = 20$  Hz。而使用频谱比图(消除了场地影响)则分别为8 Hz和60 Hz。可见对于小地震,场地对拐角频率的影响还是很大的,在分析拐角频率变化时要考虑场地条件的影响。

### [参考文献]

- [1] Biot M A. Theory of elastic waves in a fluid - saturated porous solid ,I low frequency range [ J ]. J. Acoust. Soc. Am. ,1956 **28** :168 - 178.
- [2] Biot M A. Theory of elastic waves in a fluid - saturated porous solid ,II high frequency range [ J ]. J. Acoust. Soc. Am. ,1956 **28** :179 - 191.
- [3] Biot MA. Generalized Theory of acoustic propagation in porous dispative media [ J ]. J. Acoust. Soc. Am. ,1992b **34** :1254 - 1264.
- [4] Plona TJ. Observation second bulk compressional wave in porous medium a ultrasonic frequencies [ J ]. Appl. Phys. Lett. ,1980 **36** :259 - 261.
- [5] Berryman J G. Conformation of Biot 's theory [ J ]. Appl. phys. lett. ,1980 **37** :382 - 384.
- [6] 冯德益. 地震波理论与应用 [ M ]. 北京:地震出版社,1988. 265 - 288.
- [7] 李清河. 孕震介质中地震波动力特性研究 [ J ]. 西北地震学报,1982 **A(1)** :24 - 39.
- [8] 门福录, 崔杰, 袁晓铭, 等. 含地下水的土层对地震波传播的影响 [ J ]. 地球物理学报,1992 **35(4)** :521 - 531.
- [9] 李伟华. 饱和度对波在土层交界面的反射、透射系数的影响 [ J ]. 西北地震学报,2002 **24(4)** :301 - 309.
- [10] 徐果明, 周蕙兰. 地震学原理 [ M ]. 北京:科学出版社,1982. 397 - 407.
- [11] 林梓. 流体饱和砂岩在高压下的物性参数 [ J ]. 地球物理学报,1991 **34(3)** :386 - 389.
- [12] 陈钢林, 周仁德. 水对受力岩石变形破坏宏观力学效应的实验研究 [ J ]. 地球物理学报,1991 **34(3)** :335 - 342.

- [ 13 ] 沈联蒂,史调. 流体饱和度和流体类型对岩石弹性波速影响的实验研究 [ J ]. 地球物理学报, 1992, 35( 增刊 ) 323 - 331.
- [ 14 ] 刘视萍,吴小微,楚泽涵. 岩石声学参数的实验测量及研究 [ J ]. 地球物理学报, 1994, 37( 5 ) 659 - 666.
- [ 15 ] 施行觉,夏从俊,吴永刚. 储层条件下波速变化规律及其影响因素的实验研究 [ J ]. 地球物理学报, 1998, 41( 2 ) 234 - 241.
- [ 16 ] 丁原章,肖安予,陈益明,等. 柘水水库地震 [ J ]. 地震学报, 1984, 6( 增刊 ) 598 - 607.
- [ 17 ] 陈颢. 地壳岩石的力学性能—理论基础与实验方法 [ M ]. 北京:地震出版社, 1988. 121 - 164.
- [ 18 ] 张之立,李钦祖,谷继成,等. 唐山地震的破裂过程及其力学分析 [ J ]. 地震学报, 1980, 2( 2 ) 111 - 129.
- [ 19 ] 姚振兴,纪芯. 时间域内有限地震断层的反演问题 [ J ]. 地球物理学报, 1997, 40( 5 ) 691 - 701.
- [ 20 ] 刘万琴,黄家正. 用瑞利波广义方向性函数研究 5 - 6 级地震的破裂过程 [ J ]. 地震学报, 1982, 4( 1 ) 27 - 34.
- [ 21 ] 姚立珣,虞雪君,陈乃其. 鄞县  $M_L$  3.9 和  $M_L$  4.3 地震的震源参数 [ J ]. 地震学刊, 1996, ( 3 ) 1 - 6.
- [ 22 ] 林邦慧,吴诗芬,高则明. 不对称双侧破裂过程的研究及其在海城地震中的应用 [ J ]. 地震学报, 1979, 1( 2 ) 14 - 24.
- [ 23 ] Aki K. Earthquake mechanism [ J ]. Tectonophysics, 1972, 13( 1 - 4 ) 423 - 446.
- [ 24 ] 郭增建,秦保燕. 灾害物理学 [ M ]. 西安:陕西科学技术出版社, 1989. 36 - 41.
- [ 25 ] 郭增建,秦保燕. 震源物理 [ M ]. 北京:地震出版社, 1979. 124 - 129.
- [ 26 ] 刘杰,郝斯华,黄玉龙. 利用遗传算法反演非弹性衰减系数、震源参数和场地响应 [ J ]. 地震学报, 2003, 25( 2 ) 211 - 218.
- [ 27 ] 付昌洪,朱传镇. 北京及其邻近地区 Q 值分布特征的研究 [ J ]. 西北地震学报, 1980, 2( 3 ) 11 - 22.
- [ 28 ] 张天中,马云生,张焕生,等. 震源谱的尾波多震综合求解方法 [ J ]. 地球物理学报, 1997, 40( 5 ) 702 - 709.
- [ 29 ] 姚立珣,温增平,虞雪君,等. 民乐盆地及其周围地区小震震源参数的研究 [ J ]. 西北地震学报, 1992, 14( 3 ) 27 - 33.
- [ 30 ] Frankel A, L Wennerberg. Microearthquakes spectra from the Anza, California Seismic Network: site response and source scaling [ J ]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1989, 79( 3 ) 581 - 609.

## INFLUENCE OF IMPREGNATED ROCK MASS ON THE CORNER FREQUENCY

YAO Li-xun, ZHONG Yu-yun, ZHANG Zhen-feng, YANG Gang-yu  
( *Seismological Bureau of Zhejiang Province, Hangzhou 310013, China* )

**Abstract** In 2002, a reservoir induced earthquake sequence took place in Shanxi reservoir, Wenzhou city, Zhejiang province. The corner frequencies of the earthquakes were prominently less than that of tectonic earthquakes. Based on the theory of wave propagation in two phases medium, the variations of wave velocity,  $v_p/v_s$  ratio and the influence on corner frequency in the process of dilatancy - diffusion, saturation with water and strength weakness of rock mass are discussed. According to some experiment results if the porosity is 0.15 and the elasticity modulus of rock decreases 23%, the corner frequency can decrease about 29%. It indicates that the corner frequency of the reservoir - induced earthquake decreasing is caused by fracture growing and infiltration diffusion of water, which lead to the strength weakness of rock mass. Thus the corner frequency may be used as a criterion for distinguishing the reservoir - reduced earthquakes from the tectonic earthquakes.

**Key words** : Reservoir-reduced earthquake ; Two phases medium ; Weakness of rock mass ; Corner frequency