

陇06井水潮汐的分析结果及其意义

田少柏 郭大庆

刘光远 王 薇

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

本文推导出了计算含水层参数的有关公式,并用陇06井的潮汐观测数据计算出了岩石的孔隙度 n 、等效水体体积 V 、岩石体弹性模量 E ,以及该井作为体应变仪的灵敏度 η 。

水井和含水层系统参数的改变反映了地下岩石结构和应变状态的改变,研究这些参数的变化对地震预报有一定意义。

一、水井及含水层系统对体膨胀固体潮的响应

假定一个水井及含水层系统的模型,即在地表以下一定的深度上,在由隔水层构成的顶板与底板之间,水平分布着一层等厚度、均匀、各向同性的弹性孔隙介质。孔隙介质的骨架是连续的,孔隙被水饱和,且孔隙之间是互相连通的,在水平方向上无限延伸。含水层介质是液相和固相的两相体,层内的液体水是可压缩的,具有一定的粘滞性,处于等温、承压状态。井孔垂直穿过整个含水层,即是完整井。含水层内的井壁具有与含水层介质相同的渗透率,在含水层段以外的井壁是隔水介质,井口与大气相通。这样的模型是对承压、封闭性好的水井和含水层系统的近似模拟。

根据上述水井及含水层系统的模型,利用含水层内孔隙液体与固体骨架的连续性方程、渗流液体的物理方程和液体的状态方程,可以得到孔隙介质中有源的压力扩散方程:

$$K\nabla^2 P - \alpha_s \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial \Delta a}{\partial t} \quad (1)$$

其中, K 为介质渗透率, P 为孔隙压力, Δa 为孔隙介质的体膨胀, α_s 为孔隙介质的体压缩系数。

体压缩系数 α_s 的倒数定义为孔隙介质的体压缩模量 E_a ^[1],即 $E_a = 1/\alpha_s$ 。假设水的体压缩模量 $E_w = -V_w \frac{dp}{dv_w}$,含水层岩石骨架的体压缩模量 $E_M = -V_M \frac{dp}{dv_M}$ 。因为 $V_a = V_M + V_w$,则 $\frac{dv_a}{dp} = \frac{dV_M}{dp} + \frac{dV_w}{dp}$, $V_M = (1-n)V_a$, $V_w = nV_a$ 。将以上各

式合并, 移项得到孔隙介质的体压缩模量为:

$$\frac{1}{E_a} = \frac{(1-n)}{E_M} + \frac{n}{E_w}$$

只考虑体膨胀引起的压力变化, 不考虑方程(1)的初始条件, 求得方程(1)的全平面有界解

$$P = -E_a \Delta a$$

这一结果表示了含水层内的孔隙压力正比于体膨胀, 但是反相。物理意义是, 当体膨胀时, 孔隙压力减小; 当体压缩时, 孔隙压力增大。孔隙压力也可用井水的水柱高度来表示, 即:

$$P = \rho g h$$

其中 ρ 为水的密度, g 为重力加速度。这样水柱高度可写成:

$$h = -\frac{E_a}{\rho g} \Delta a$$

如令水位高度 h 与该水井地点的体膨胀 Δa 之比的绝对值为 α , 则 α 为:

$$\alpha = |h/\Delta a| = E_a/\rho g$$

从定义可看出 α 值能代表水井和含水层系统对体膨胀的响应能力, 单位取为厘米/10⁻⁹。

一般来说, 水井及含水层系统的体膨胀 Δa 由下式表示

$$\Delta a = \Delta E + \Delta_0 = \Delta p$$

式中 ΔE 为地球固体潮汐体膨胀, Δ_0 为海洋负荷引起的水井及含水层系统的体膨胀, Δp 为气压潮引起的井水及含水层系统的体膨胀。

由于甘肃省境内的水井及含水层系统均远离海洋, 故海洋负荷潮汐可以略去, 则大气潮汐引起的体膨胀可以表示为:

$$\Delta p = \frac{P_p}{\alpha} H_p$$

其中 P_p 为水井及含水层系统的气压效率, 其定义为由气压引起的井水水位变化和 水柱表示的气压变化 H_p 之比。气压效率 P_p 反映了含水层在边界作用下的弹性性质。

按上式对观测值作气压改正后, 井孔水位观测值 H 就只与 ΔE 一项有关, 即

$$H = -\alpha \Delta E$$

1944年勒甫推导出某点的体应变 ΔE 和引潮位之间具有如下关系:

$$F(re) = \frac{1-2\nu}{1-\nu} (2\bar{h} - 6\bar{l})$$

式中 ν 是泊松比, \bar{h} 和 \bar{l} 是勒甫数。根据地震和实际地球固体潮汐的测量, 得到

$$\nu = 0.25, \bar{h} = 0.60, \bar{l} = 0.07$$

将以上数据代入, 可得到体应变理论值的实际计算公式

$$\Delta E = 0.5W_2/gR$$

式中 W_2 为引潮力位二阶项, R 为地球半径, g 为重力加速度。

二、水潮的频谱分析和有关水井及含水层参数的计算

(1) 水井及含水层系统对潮汐的体应变幅度比 $\alpha = KV_{\text{等}}(\bar{h}_2 - 3\bar{l}_2)$ ，所谓水井和含水层系统的等效水体体积的物理解释是，假设水井和含水层系统为一含水容器，等效水体体积即相当于容器内的水的体积，即 $\alpha = KV_{\text{等}}\varepsilon$ ，式中 K 为各分潮波的比例系数。如取 $\bar{h} = 0.6$ ， $\bar{l} = 0.07$ ，对于 M_2 波， $K = 1$ ，则 $\alpha_{M_2} = 0.4V_{\text{等}}$ ，所以 $V_{\text{等}} = \alpha_{M_2} \times 2.5$ 。说明利用半日波 M_2 的振幅比 α_{M_2} ，就可以计算出水井及含水层系统的等效水体体积。

当将水井和水井含水层系统作为一个体应变仪时，其灵敏度定义为：当水潮位变化 1 毫米时，相应的体应变即为该系统的灵敏度 η 。

$$\eta = 0.1(\text{cm}) \times \pi D^2 / V_{\text{等}}$$

其中 D 为井孔半径， $V_{\text{等}}$ 是井水和含水层系统的等效体积。

(2) 当已知振幅比 α 时，可以计算出孔隙介质的体压缩模量 $Ea = \alpha \rho g$

(3) 含水层孔隙度 n 可表示为：

$$n = \left(-\frac{E_w}{E_a} - \frac{E_w}{K_m} \right) / \left(1 - \frac{E_w}{E_M} \right)$$

一般情况下，岩石骨架的体压缩模量 E_M 要比水的体压缩模量 E_w 大得多，故可以认为 $E_w/E_M \approx 0$ ，这样孔隙度 n 则可简化为：

$$n = E_w / E_a$$

其中 E_w 是水的体压缩模量，为已知量。这样当计算出 E_a 后，便可利用上式计算出孔隙度 n 。

(4) 频谱分析

在频率域内，本文根据水位的实测值和理论值，分别对主要日波 P_1 、 K_1 、 O_1 和主要半日波 M_2 、 S_2 、 n_2 、 K_2 共 7 个潮汐波作振幅谱和相位谱计算，然后求出每个潮波的振幅比 α 和相位差^[2]。

在系统周围的围压不变的情况下，水井及含水层系统的等效水体体积、岩石骨架的压缩模量和含水层系统的孔隙度是一个常量。但当系统周围应力在积累时，围压将变大或变小，关于岩石的压力实验表明，岩石内的孔隙有一个收缩—扩张的过程，因此体压缩弹性模量 E_a 将有一个增大和减小的物理过程，岩石孔隙度 n 有一个减小和增大的反过程。因此，可以根据这两个物理量对水井及含水层附近地区震源孕育的过程进行研究^[8]，进而利用其异常形态来监测和预报地震。

等效水体体积的值又可表征将水井及含水层系统作为体应变仪使用时其灵敏度的高低，一般来讲等效水体体积越大其灵敏度越高。岩石孔隙度 n 和体弹性模量的变化能更明显地反映出灵敏度的高低。

三、陇06井的计算实例

(1) 观测条件

陇06井是经过国家地震局验收的水位固体潮观测井，其地质条件清楚，封闭性好，观

测质量高，资料连续可靠。观测井位于东经105°.81，北纬35°.35海原—六盘山断裂带西南端，静宁县葫芦河北岸I级阶地上(图1)。井深400.82米，钻孔揭露地层为第四系、第三系和志留系，观测含水层为志留系砂岩，地下水类型属于承压裂隙水，大气降水为其主要补给源，年降雨量为500毫米左右，水位埋深8.6米左右，图2为其地质剖面图。

陇06井在剖面上呈上大下小的漏斗状，可分为三段，上段加套管(井口至水面)，井孔直径127毫米，套管长56.77米。中段是长257.11米的裸眼井，井孔直径为110毫米。下段井孔直径为91毫米。陇06井配有气压和降雨辅助观测，从1982年10月到现在采用SW₄₀型的水位记录仪，其精度为0.1毫米。



图1 陇06井地理位置图

Fig.1 The location of the No.06 well in Gansu province

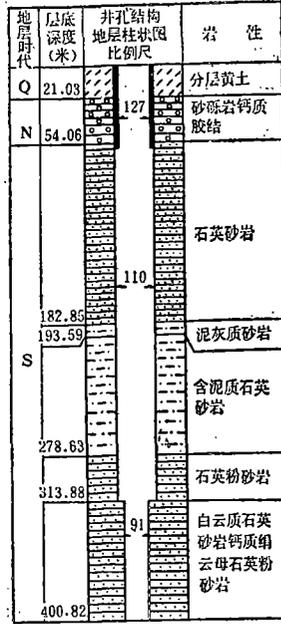


图2 陇06井的地质剖面图

Fig.2 The geologic section of the No.06 well in Gansu province

(2) 观测效果

陇06井的水位日变和月变形态主要受固体潮汐的影响，其潮差达14厘米，动态比较稳定，是甘肃省井网中记录到潮汐振幅最大的一口井(图3)，并且可以记录到气压效应。利用1985年9月的水位固体潮观测的日均值与降雨量和气压分别进行回归计算，得到相关系数R=0.26和R=0.96，表明陇06井水位受降雨量的影响不大。

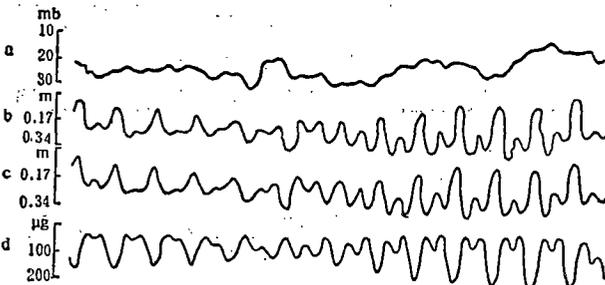


图3 无震时期地下水位的正常动态

a. 气压 b. 实测曲线
c. 排除气压后剩余曲线 d. 理论固体潮曲线

Fig.3 The normal form of water level

in the well during no-earthquake

(3) 利用陇06井1985年9月—1986年6月共10个月的实测资料, 计算了井水潮汐和体膨胀理论值中的各主要日波和半日波的振幅比和相位差, 计算结果见表1。

根据前述公式, 计算出陇06井等效水体体积 $V_{等} = 0.00246 \times 10^9 \times 2.5 \text{米}^3 = 6.15 \times 10^6 \text{米}^3$, 计算出陇06井作为体应变仪的灵敏度 $\eta = 0.01 \times 3.14 \times 0.64^2 / 6.15 \times 10^6 = 2.04 \times 10^{-11}$, 即当水位变化一个毫米时, 其体应变值为 2.04×10^{-11} 。取 $g = 980 \text{厘米/秒}^2$, $\rho_{水} = 1 \text{克/厘米}^3$, $E_w = 2.13 \times 10^{10} \text{达因/厘米}^2$, 求得陇06井及含水层系统的平均弹性模量 $E_a = 1 \times 980 \times 0.229 / 10^{-9} = 2.24 \times 10^{11} \text{达因/厘米}^2$, 平均孔隙度 $n = 2.13 \times 10^{10} / 2.24 \times 10^{11} = 9.5\%$ 。陇06井1985年9月到1986年6月体弹性模量 E_a 和孔隙度 n 随时间的变化过程见表2, 其偏差小于10%。这是因为所使用的资料的长短和观测精度以及降雨等偶然因素引起的误差。

各主要日波和半日波振幅、振幅比和相位差 表1

波名	A (实测值)	A (理论值)	$\alpha(A_{实}/A_{理})$	相位差
P_1	1.7994	10.6559	0.1672	-0.5589
O_1	1.7207	8.1787	0.2107	0.7891
K_1	1.9034	10.7573	0.1714	0.6945
M_2	2.8836	11.7400	0.2457	-0.2388
S_2	1.5800	5.9115	0.2697	-0.1678
N_2	0.5647	2.3322	0.2396	0.7183
K_2	1.6184	5.5708	0.2987	0.9003

振幅比均值 $\alpha = 0.229 \text{厘米}/10^{-9}$

陇06井含水层体弹性模量 E_a 和孔隙度 n 表2

年月	参量	$E_a (\times 10^{11} \text{达因/厘米}^2)$	$n \times 10^{-2}$
1985. 9	9	2.400	8.88
	10	2.146	9.92
	11	2.304	9.24
	12	2.419	8.81
1986. 1	1	2.339	9.11
	2	2.069	10.29
	3	2.141	9.95
	4	2.170	9.82
	5	2.194	9.71
	6	2.255	9.45

总之陇06井作为体应变仪应用时其灵敏度为 2.04×10^{-11} /毫米, 相当于目前高精度的体应变仪, 在监测和预报地震工作中有较高的实用价值。

在工作中, 孙天林、孔学周等同志提供了全部的水文地质资料、气压资料和水位固体潮的观测资料, 在此表示衷心的感谢。

(本文1986年3月5日收到)

参 考 文 献

- [1] G.H. Rhoads, E.S. Robinson, Determination of aquifer parameters from well tides, J.G.R., Vol.84, No.B11, 1979.
- [2] 刘澜波等, 井水固体潮分析结果及其在地震预报中的应用, 地震, No.1, 1985.
- [3] 郭增建、秦保燕, 震源物理, 地震出版社, 1979.

RESULTS AND SIGNIFICANCE OF WELL TIDE ANALYSIS
OF WELL NO. 6 IN GANSU PROVINCE

Tian Shaobai, Guo Daqing, Liu Guangyuan and Wang We
(*Seismological Institute of Lanzhou, State Seismological Bureau, China*)

Abstract

In this paper, the formulas estimating aquifer parameters have been reduced. From well tide observations of well No. 6 in Gansu province, the author calculated rocky porosity n , well-aquifer equivalent volume, rocky elasticity modulus E_a and sensitivity η for using the well-aquifer as strain instrument. Changes of these parameters might reflect the changes of subsurface rock structure and strain case. It is significant to study these changes for predicting earthquake.