

井水位的固体潮效应和气压效应 与含水层参数间的定量关系

张昭栋

(山东省地震局)

郑金涵

(国家地震局地球物理研究所)

冯初刚

(中国科学院上海天文台)

摘 要

本文分析了水井水位的固体潮效应和气压效应与承压含水层参数之间的定量关系。结果表明,含水层的固体骨架体积压缩系数和孔隙度越小,水井水位的固体潮系数则越大;含水层的固体骨架的体积压缩系数越小,孔隙度越大,则水井水位的气压效率越大。本文还把理论结果和固体潮及气压的实际观测结果进行了对比,两者符合得较好。

在地震地下水动态观测中,存在着许多干扰因素。例如,固体潮、气压、渗流和降水等^[1-8]。为了从地下水位观测中提取地震前兆信息,首先要弄清各种干扰因素对水井水位影响的过程和物理机制,找出各种干扰因素对水位的影响与含水层各种参数之间的定量关系,进而对各种干扰因素进行定量化的排除。

本文用固体潮和气压对承压井水位影响的偏微分方程的不排水情况下的解,分析了井水位的固体潮效应和气压效应与承压含水层参数之间的定量关系,并把所得的理论结果和固体潮及气压的实际观测结果进行了对比。

一、井水位的固体潮效应

1. 理论分析

我们曾用弹性理论和地下流体动力学理论,建立了体膨胀固体潮对水井水位影响的偏微分方程^[1]

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{K}{\rho g[(1-n)\alpha + n\beta]} \nabla^2 H - \frac{1}{\rho g[(1-n)\alpha + n\beta]} \frac{\partial \Theta}{\partial t} \quad (1)$$

其中H为承压含水层内的压力水头, t为时间, K为含水层内水的渗透系数, ρ 为含水层内

水的密度， g 为重力加速度常数， α 为含水层固体骨架的体积压缩系数， β 为含水层内水的体积压缩系数， n 为含水层的孔隙度， Θ 为固体潮体应变。

如果在起潮力作用下，含水层内的水被压缩时可以瞬时释放，井孔面积比含水层面积小得多，则在无穷大的边界条件下，或在不排水的边界条件下，方程(1)的解为：

$$S(x, y; t) = \frac{1}{\rho g[(1-n)\alpha + n\beta]} \cdot \Theta \quad (2)$$

其中 $S(x, y; t)$ 为含水层内的水位降深。

由此可进一步推得水井水位的体应变固体潮系数

$$B_G = \frac{S_w}{\Theta} = \frac{1}{\rho g[(1-n)\alpha + n\beta]} \quad (3)$$

其中 S_w 为固体潮体应变引起的井水位的降深。

B_G 表示在单位固体潮体应变的作用下，引起的承压含水层中井水位降深的变化量，其单位是m或mm，量纲为 L' 。公式(3)反映了水井水位的固体潮效应与含水层参数之间的定量关系。

图1 a给出了 B_G 与含水层固体骨架体积压缩系数 α 之间的关系。图中3条曲线是含水层的孔隙度分别取1%、10%和30%时的情况。由图可以看出，当含水层固体骨架的体积压缩系数小于 $2 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$ 时，含水层的孔隙度越小，则水井水位的体应变固体潮系数反而越大， $B_G-\alpha$ 曲线的变化率也越大。当含水层固体骨架的体积压缩系数大于 $3 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$ 时，图中的3条曲线逐渐趋于重合，说明在此范围内含水层孔隙度的影响很小。总之，随着含水层固体骨架体积压缩系数的增大，水井水位的固体潮系数反而减小。

图1 b给出了 B_G 与含水层孔隙度 n 之间的关系曲线。图中的三条曲线是含水层固体骨架的体积压缩系数分别取 0.5×10^{-10} 、 1×10^{-10} 和 $2 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$ 时所得的结果。由图可见，随着含水层孔隙度的增大，水井水位的固体潮系数反而逐渐减小，而且随着含水层固体骨架的体积压缩系数的增大，其减小的速率也越小。

综上所述，当含水层的孔隙度一定时，水井水位的固体潮系数随含水层固体骨架体积压

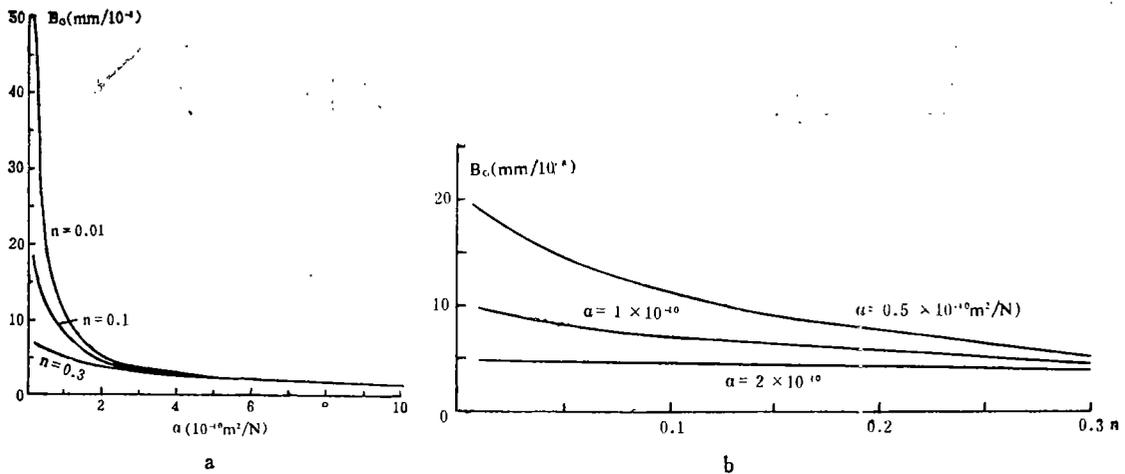


图1 水井水位的固体潮效应与含水层参数之间的关系

a. $B_G-\alpha$ 关系曲线

b. B_G-n 关系曲线

Fig. 1 Relationship between B_G and α ; B_G and n

缩系数的增大而减小；当含水层固体骨架的体积压缩系数一定时，水井水位的固体潮系数随含水层孔隙度的增大而减小。因此，含水层的固体骨架体积压缩系数和孔隙度越小，水井水位的固体潮系数则越大。

2. 观测结果

实际观测统计结果表明，水井水位的潮差与含水层岩石性质有十分密切的关系。含水层的岩性不同，水位潮差相差很大。在通常情况下，灰岩含水层的平均水位潮差为128mm，砾岩含水层的平均水位潮差为108mm，花岗岩、玄武岩含水层的平均水位潮差为65mm，砂岩含水层的平均水位潮差为42mm〔5〕。

表1给出了对全国地震地下水观测井网中近200口井的统计结果〔1〕。

表1 潮差与含水层岩性的关系

| 岩石类别 | | 井数 | 潮差平均值 | | 潮差最大值 (cm) |
|------|------|----|----------|--------|-----------------|
| | | | 本类值 (cm) | 与第四系比值 | |
| 侵入岩 | | 9 | 10.9 | 25.3 | 23.4 |
| 碳酸盐岩 | | 46 | 8.3 | 19.3 | 22.4 |
| 火山岩 | | 11 | 5.7 | 13.3 | 14.5 |
| 碎屑岩 | 前第三系 | 29 | 3.6 | 8.4 | 15.0 |
| | 前白垩系 | 17 | 4.8 | 11.2 | 15.0 |
| | 白垩系 | 12 | 1.8 | 4.2 | 4.5 |
| | 第三系 | 32 | 1.3 | 3.0 | 5.8 (除一口井外均小于5) |
| | 第四系 | 64 | 0.43 | 1 | 3.0 (除一口井外均小于2) |

可以看出，坚硬且难以变形的岩石含水层的水位潮差大；反之松软且易于变形的岩石含水层水位潮差小。

图2给出了水井水位的潮差与含水层体积压缩系数及杨氏模量的关系〔5〕。同样显示了随着含水层体积压缩系数的增大，水位潮差反而迅速地减小。

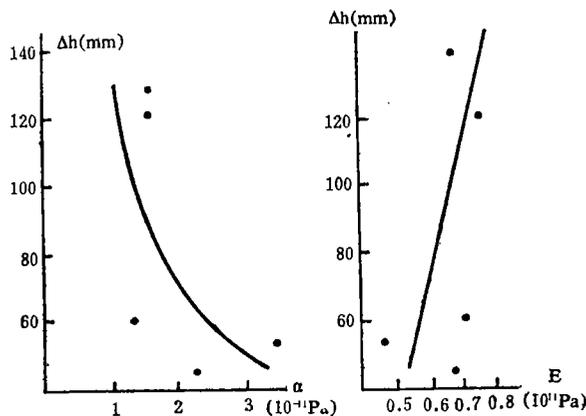


图2 水位潮差与含水层体积压缩系数及杨氏模量的关系
 Fig. 2 Relationship between tide difference of well water and volume compressibility of aquifers, Young's modulus

1) 黄祖彰, 承压水的弹性动态与井孔反应能力, 1987.

以上的观测统计结果与本文的理论结果一致。

3. 水井水位的固体潮改正

由(3)式可知,如果水井水位只受固体潮单一因素的影响,作固体潮改正后水井水位的值应是

$$H_{wc}(t) = H(t) - B_G \cdot G(t) \quad (4)$$

其中 $H(t)$ 是水井水位的观测值, $G(t)$ 为该井处的体应变固体潮理论值。

如果水井含水层的参数(α 和 n)已知,(4)式中的水井水位固体潮系数 B_G ,可以用(3)式计算。如果不知道含水层的参数,一般用回归等统计方法来计算。固体潮的日波和半日波成分对水位的影响,可以用别尔柴夫滤波法来消除,还可以用水位24个时值滑动平均。

二、水井水位的气压效应

1. 理论分析

从文献[2]给出的气压变化对承压含水层影响的方程

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = \frac{\rho g(\alpha + n\beta)}{K} \frac{\partial H}{\partial t} - \frac{\alpha}{K} \frac{\partial Pa}{\partial t} \quad (5)$$

可以推导出由于气压(Pa)的变化引起水井水位变化的比值,即水井水位的气压效率为

$$B_p = \frac{n\beta}{\alpha + n\beta} \quad (6)$$

图3 a是水井水位的气压效率与含水层的固体骨架体积压缩系数之间的关系曲线。图中的4条曲线是含水层的孔隙度分别取1%、10%、20%和40%时得出的结果。由图3 a可以明显地看出,当含水层的孔隙度不变时,水井水位的气压效率随着含水层固体骨架的体积压缩系数的增大而减小,而且,含水层固体骨架的体积压缩系数越小,水井水位气压效率的变化速率越大。

图3 b是水井水位的气压效率与含水层的孔隙度之间的关系曲线。图中的3条曲线是含

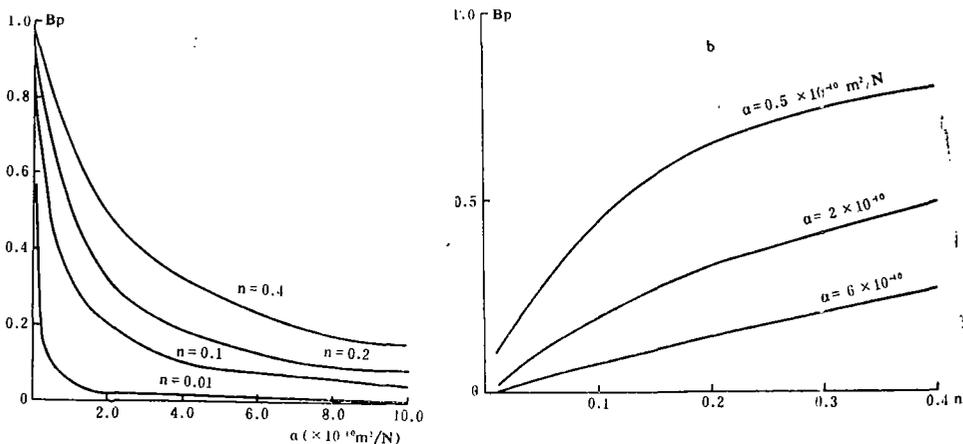


图3 气压效率与含水层孔隙度及固体骨架压缩系数间的关系

Fig. 8 Relationship between B_p and α, B_p and n

水层固体骨架的体积压缩系数分别取 0.5×10^{-10} 、 2×10^{-10} 和 $6 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{N}$ 时所得出的结果。由图可见，当含水层固体骨架的体积压缩系数不变时，随着含水层孔隙度的增大，水井水位的气压效率也同时增大，而且含水层的孔隙度越小时，水井水位气压效率的变化速度越大。

总之，含水层的孔隙度愈大，含水层固体骨架的体积压缩系数愈小，则水井水位的气压效率愈大。但是水井水位的气压效率的最大值不超过1，或者说水井水位的气压系数的最大值不会超过 10.2mm/hPa 。

2. 观测结果

大量观测资料表明，水井水位的气压效率因井而异，差别很大。从对统计资料的分析来看，水井水位的气压系数是受到多种因素制约的，但主要与含水层的岩石性质及其力学性质有关。

表2给出了对48口水井水位的气压系数观测值的统计结果^[6]。从表2可以看出，水井含水层的岩性不同，其水位的气压系数也明显不同。含水层为灰岩的井的气压系数最大， B'_p 的平均值为 6.0mm/hPa ；砂岩及大理岩井次之，平均气压系数为 $3.6-4.2 \text{mm/hPa}$ ；砂砾岩、火成岩井的气压系数较小，平均值为 $2.5-2.9 \text{mm/hPa}$ ；松散的第四系砂砾石、砂层井的气压系数最小，一般都小于 2mm/hPa 。

表2 含水层岩性与水井水位气压系数 (B'_p) 对比表

| 井数 B'_p | 岩性 | | | | | | |
|--------------|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|
| | 石灰岩 | 大理岩 | 砂岩 | 火山岩 | 砂砾岩 | 砂砾石 | 砂层 |
| > 6 | 9 | | | 1 | | 1 | |
| 4-6 | 7 | 2 | 5 | 1 | 2 | | |
| 2-4 | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 | | 2 |
| < 2 | 1 | | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| 合计 | 19 | 5 | 9 | 6 | 4 | 2 | 3 |

表3给出了不同岩性的含水层的压缩系数与水井水位气压系数的平均值^[6]。压缩系数小的灰岩，平均气压系数大，而压缩系数大的砂岩，平均气压系数反而小。

表3 气压系数和压缩系数的关系

| 含水层岩性 | 压缩系数 (10^{-11}Pa) | 平均气压系数 (mm/hPa) |
|-------|-------------------------------|----------------------------|
| 灰岩 | 1.56 | 6.06 |
| 砂岩 | 3.50 | 3.60 |

由表2和表3的观测统计结果可见，水井含水层的岩性是坚硬、难以压缩的，如灰岩，则其水位气压系数一般都相当大，而含水层的岩性是松散、容易压缩的，如砂岩，则其水位气压系数一般都小。这和本文得出的理论结果一致。

3. 水井水位的气压改正

由(6)式可知，如果水井水位只受气压单一因素的影响，那么作气压影响改正后的水井水位值应是

$$H_{wc}(t) = H(t) - B_p \cdot Pa(t) \tag{7}$$

如果含水层参数已知，上式中的水井水位气压效率可以根据(6)式求出。如果不知道含水层的参数，可以用回归方法求出。

三、结 论

1. 当含水层的孔隙度一定时，水井水位的固体潮系数随含水层固体骨架的体积压缩系数的增大而减小；当含水层固体骨架的体积压缩系数一定时，水井水位的固体潮系数随含水层

孔隙度的增大而减小。因此,含水层的固体骨架的体积压缩系数和孔隙度越小,水井水位的固体潮系数则越大。

2.当含水层的孔隙度一定时,水井水位的气压效率随含水层固体骨架的体积压缩系数的增大而减小;当含水层固体骨架的体积压缩系数一定时,水井水位的气压效率随含水层孔隙度的增大而增大。所以,含水层的固体骨架体积压缩系数愈小,而其孔隙度愈大,水井水位的气压效率则愈大。水井水位气压效率的最大值不超过1。

3.水井水位的固体潮系数及气压效率与含水层参数间的定量关系分别为

$$B_G = \frac{1}{\rho g[(1-n)\alpha + n\beta]}; B_P = \frac{n\beta}{\alpha + n\beta}。$$

(本文1988年4月12日收到)

参 考 文 献

- [1]张昭栋、郑金涵、冯初刚,体膨胀固体潮对水井水位观测的影响,地震研究,Vol.9, No.4, 1986.
 [2]张昭栋、郑金涵、冯初刚,气压对水井水位观测的影响,地震, No.1, 1986.
 [3]张昭栋、郑金涵、冯初刚,水井水位的降水荷载效应,地震学报, Vol.8, 增刊, 1986.
 [4]E.S.Robinson, R.T.Bell, Tides in confined well aquifer systems, J.G.R., Vol.76, No.8, 1971.
 [5]国家地震局地下水影响因素研究组,地震地下水动态及其影响因素分析,地震出版社, 1985.
 [6]董守玉、贾化周、万迪堃、秦清娟,井水位气压系数探讨,地震研究, Vol.10, No.1, 1987.
 [7]张昭栋,用高阶差分法计算水位的气压系数, Pc-1500机实用程序及通讯接口,地震出版社, 1987.

QUANTITATIVE RELATIONSHIP BETWEEN THE EARTH TIDE EFFECT OF WELL WATER LEVEL, THE BAROMETRIC PRESSURE EFFECT AND THE PARAMETERS OF AQUIFERS

Zhang Zhaodong

(*Seismological Bureau of Shandong Province*)

Zheng Jinhan

(*Institute of Geophysics, SSB*)

Feng Chugang

(*Shanghai Astronomical Observatory, Academia Sinica*)

Abstract

On the basis of the solutions of partial differential equation of the effect of earth tide and barometric pressures on the well water level of confined aquifers under the condition of non-drainage, this paper analyzes the quantitative relationship between the earth tide effect of well water level and the barometric pressure effect and the parameters of confined aquifers. The paper also compares the results of the theories with the results of field observations of earth tide and barometric pressure and both are identical satisfactorily.