地下水位前兆敏感水力学条件 的数值模拟研究

赵利飞, 尹京苑

(上海市地震局,上海 200062)

摘要: 根据弹性 孔隙 理论, 利用 数值分析的方法, 研究了 承压含水层 对井水位的映震 效果的影响.模拟结果显示:含水层系统的封闭状态 对水位的 映震效果有 很大影响, 侧漏的大小和水头的高低会直接影响水位的观测效果.在系统封闭很好的情况下, 观 测水位的变 化基本与水头的变 化呈线性关系.此外,含水层系统的渗透性也是影响水 位变化的重 要条件之 -,渗透性好则水位的映震效果明显. 主题词: 井水水位; 井含水层系统; 渗透性; 有限差分法; 数值模拟 中图分类号: P315.72⁺3 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2000)03-0306-05

0 引言

在地下水位动态监测实践中发现,一些观测井具有很好的映震效果,被人们称之为"前兆敏感井".这些井的共同特点是水头较高,水温偏高,封闭性较好,并往往是自流井.为什么水头高、水温高、封闭性好的井对地震反映好,这个问题是值得进行研究的.这对于地下水微动态前兆机理研究、选井和提高井网和井孔观测效果有一定意义.

另外,含水层通常是含有流体的弹性孔隙介质,在外界条件不变的情况下,地下流体的运移是稳定的渗流过程.当含水层介质受到区域应力场的不断作用时,弹性孔隙介质的固体骨架 不仅会发生相应的弹性变形,还会发生非弹性膨胀以及微裂隙的闭合,甚至导致已有孔隙的坍塌.微裂隙和孔隙的闭合与坍塌,均可造成地下流体通道的局部阻塞,从而使含水层的渗透性 能发生改变.

本文以弹性多孔介质渗流理论为基础,利用有限差分方法,对井-含水层系统的封闭性、水 头以及渗透性变化对水位观测的影响进行了讨论.

1 计算方法与计算模型

假设含水层是在地表以下一定深度,水平分布的有一定尺度的一层等厚度、均匀、各向同性的弹性孔隙介质,其上部和底部分别有隔水层.含水层介质为固液二相混合体,呈饱和状态, 孔隙的骨架是连续的.孔隙中的水是具有一定粘滞性的牛顿液体,处于等温承压状态.观测井 为完整井.含水层内的井段为裸孔,井壁与含水层为同一介质,具有相同的物理性质和水力

收稿日期: 2000-05-12

作者简介:赵利飞(1974-),男(汉族),河北行唐人,中国地震局分析预报中心在读硕士研究生,现从事地震前兆机理研究.

学性质.井口与大气相通.观测井处在渗流场中,井孔水位的变化受到渗流规律的影响.根据达 西定律,水流体的渗透规律可用下式描述^[1]:

$$S_{s} \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{x} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{y} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{z} \frac{\partial H}{\partial z} \right)$$
(1)

式中: K_x、K_y和K_z分别为x、y和z方向的渗透系数.在含水层厚度不是很大的情况下,可考虑 只有水平流动,即H的变化与z无关,这时问题简化为水平层状渗流问题,公式(1)可简化为:

$$S_{s} \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{x} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{y} \frac{\partial H}{\partial y} \right)$$
(2)

定解问题:

$$\begin{split} \left[2S_s \frac{\partial H}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right] \quad 0 < x < 1 \text{ km}; \ 0 < y < 0.1 \text{ km} \\ H(x, y, 0) &= f(x, y) \quad 0 \leq x \leq 1 \text{ km}; \ 0 \leq y \leq 0.1 \text{ km} \\ H|_{x=0} &= H_0 \quad 0 \leq y \leq 0.1 \text{ km} \\ H|_{x=1 \text{ km}} &= H_1 \quad 0 \leq y \leq 0.1 \text{ km} \\ \frac{\partial H}{\partial y} \Big|_{y=0,100 \text{ m}} &= g(x) \quad 1 < x < 1 \text{ km} \end{split}$$
(3)

计算模型取一个 1 km×0.1 km 的矩形区域(图 1). 将其均匀分成 100×10 个单元, 取模型的中点作为"观测井". 在模型中设沿 x 轴方向 0.5 km 至 0.7 km 之间为一堵塞段, 其中介质的渗透系数在模拟中将发生变化, 从而观察流道阻塞对水位变化的影响. 计算空间步长 $\Delta x = \Delta y = 10 \text{ m.}$ 计算时间步长 $\Delta t = 0.01 \text{ d.}$ 整个模型介质的初始渗透系数 $K_0 = 8.64 \times 10^{-2} \text{ m/d}$, 贮水系数 $S_s = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$.

模型的左右边界为第一类边界条件, 即 $H|_{x=0} = H_0$, 100 $H|_{x=1 \text{ km}} = H_1, H_0$ 和 H_1 为可调水头. 模型的上下边界为 $\partial H/\partial y|_{y=0,100}$ m = g(x), 离散后可得到 $H_{i,j-1} = g(x)\Delta y + \xi$ so H_1 $H_{i, i+1}$ (*j* = 0, m; *i* = 1, 2, …, *n* - 1), 这说明在边界处 y 方向 H 200 400 sòn RÓO 1000 上的相邻二节点水头呈线性变化,在模拟中为简化起见,设离 散后的上下边界条件为 $H_{i, i-1} = aH_{i, i+1}$ (j = 0, m; i = 1, 2,图 1 平面 含水层计 算模型 Fig. 1 The plane model of the aquifer. …, n - 1), 它仍然保持了边界处 y 方向上的相邻二节点水头 呈线性变化.对于不同的 a 值,可获得不同的渗漏边界条件.当 a < 1时,为透水边界条件:当 a = 1时,模型的上下边界为隔水边界条件.

以渗流场的平衡状态作为模拟的初始条件.由于不同条件下的平衡状态各异,就不透水边 界而言,渗流场的水头分布在 x 方向是呈一斜面状态;对于透水边界,水头分布呈马鞍形状. 对第一种情况水头的分布可以用线性函数形式给出;而第二种情况较为复杂,不易用函数形式 表示.本文的处理方法是,先给渗流场各点一个初始值,然后让其进行自然渗流,取经过足够长 的时间后的值作为稳定状态.

对式(3)离散后进行有限差分计算.由于隐式差分方法是无条件收敛的,它较显式差分方法优越²¹,因此本文采用隐式差分法进行计算.将式(3)离散后得到下面形式:

$$\begin{aligned}
S_{s} \frac{H_{i,j}^{k+1} - H_{i,j}^{k}}{\Delta t} &= \frac{K_{i-1,j}^{k+1} \circ H_{i-1,j}^{k+1} - 2K_{i,j}^{k+1} \circ H_{i,j}^{k+1} + K_{i+1,j}^{k+1} \circ H_{i+1,j}^{k+1}}{(\Delta_{X})^{2}} + \frac{K_{i,j-1}^{k+1} \circ H_{i,j-1}^{k+1} - 2K_{i,j}^{k+1} \circ H_{i,j}^{k+1} + K_{i,j+1}^{k+1} \circ H_{i,j+1}^{k+1}}{(\Delta_{Y})^{2}} \\
(i = 1, 2, ..., n - 1; j = 0, 1, ..., m; k = 1, 2, ..., T) \\
H_{i,j}^{0} &= f_{i,j}^{0} \qquad (i = 1, 2, ..., n; j = 0, 1, ..., m) \\
H_{0,j}^{k} &= H_{0} \qquad (j = 0, 1, ..., m; k = 0, 1, ..., T) \\
H_{i,j-1}^{k} &= aH_{i,j+1}^{k} \qquad (j = 0; i = 1, 2, ..., n; k = 0, 1, ..., T) \\
H_{i,j+1}^{k} &= aH_{i,j-1}^{k} \qquad (j = m; i = 1, 2, ..., n; k = 0, 1, ..., T)
\end{aligned}$$

为减少求解的工作量,采用交替方向法进行求解.

2 计算结果分析

2.1 含水层封闭性对水位变化的影响

图 2 为含水层在不同封闭状况下,流道发生阻塞时水位的变化情况.模型左右二端的水头 差为 20 m,模拟过程中阻塞段的渗透系数按如下分段函数变化:

$$\begin{cases} K(T) = K_0 & 0 \leqslant T < 1 \\ K(T) = K_0 [1 - 0.1(T - 1)] & 1 \leqslant T < 2 \\ K(T) = 0.9K_0 & 2 \leqslant T \leqslant 3 \end{cases}$$
(5)

对模型上下边界条件取 2 种情况进行讨论: (1) *a* = 0.999. 这时含水层的封闭性较好. 从图 2(a) 中可以看出, 模拟到第一天后, 当阻塞段渗透系数发生渐变时, 观测点水位不断上升, 在 第二天结束时达到最大值 14.5 cm, 随后由于渗透系数停止增加, 水位略有下降并最终达到稳 定; (2) *a* = 0.9. 这时水位变化的形态与第一种情况基本相同, 但由于侧漏的加大, 在同样的 阻塞过程中, 水位仅上升了 2 cm. 比较图 2(a)和图 2(b)可以看出, 由于侧漏的不同, 渗流场平 衡状态下观测井的初始水头差别很大. 第一种情况下观测井的初始水头约为 9.41 m, 第二种 情况下观测井的初始水头约为 0.621 m.



图 2 在不同封闭状况下含水层流道发生阻塞时水位的变化 Fig. 2 Variation of water level under different confining condition and water way blocked in aquifer.

2.2 温度对水位变化的影响

水的渗透系数与许多因素有关,其中对温度的变化十分敏感.水温不同,其相应水的动力 粘滞系数也不相同,从而引起介质渗透系数的不同.介质的渗透系数与水的动力粘滞系数的关 系为:

$$K = \frac{k \rho g}{\eta}$$

其中: k 为渗透率, e 为水的密度, g 为重力加速度, η 为水的动力粘滞系数.

在其它因素不变的情况下,介质的渗透系数与水的动力粘滞系数成反比关系,而水的动力 粘滞系数对温度是十分敏感的.模拟中取 10°C 和 100°C 2 种水温来对比讨论. 对于 2 种温度, 水的粘滞系数分别为: $\eta_1 = 1.33 \times 10^{-4} \text{ kg} \circ \text{s/m}^2$ 和 $\eta_2 = 0.29 \times 10^{-4} \text{ kg} \circ \text{s/m}^2$.相应的渗透 系数 $K_{01} = 4.0 \times 10^{-2} \text{ m/d}$ 和 $K_{02} = 1.8 \times 10^{-1} \text{ m/d}^{[3]}$.

取模型二端水头差为 20 m,模型上下边界为不透水 10.2-边界. 当水温为 10°C 时,整个模型的渗透系数为 K₀₁,阻 塞段的渗透系数的变化仍按式(5)选取,只是式中的 K₀ 10.15-用 K₀₁ 代替.模拟所得的水位变化如图 3 中虚线所示,水 位上升的最大幅度为 12.8 cm;当水温上升到 100°C 时, 整个模型的渗透系数为 K₀₂,阻塞段的渗透系数变化按式 10-(5) 进行,这时式中的 K₀ 都换为 K₀₂.相应的水位变化曲 9.95-线如图 3 中实线所示,水位上升的最大幅度为 17.2 cm.

2.3 水头对水位变化的影响

模型上下边界为不透水边界.模型的初始渗透系数 $K_0 = 8.64 \times 10^{-2} \text{ m/d}$.模拟过程中阻塞段的渗透系数的 变化按式(5)进行.图4(a)为 $H_0 = 2 \text{ m}$. $H_1 = 0$ 时的模



图 3

Fig. 3



图 4 含水层水头改变时水位的变化 Fig.4 Variation of water level under different heads of water in aquifer.

3 讨论与结论

井-含水层系统的封闭状态的好坏对井水位的映震效果具有很大影响.模型侧漏加大将会 使水头变小,水位变化幅度也会减小.模拟中发现,当模型二侧边界渗流的水力学梯度达到 1 mm/m时,如果模型中某段发生阻塞,由此引起的水位变化效果基本就看不出来了.

水头高低对观测井水位变化的影响是非常明显的.对于模型二侧有隔水边界的情况下,水 头变化与水位变化呈线性关系.



不同温度状态下含水层流道 发生阻寒时水位的变化

Variation of water level when water

way is blocked in aquifer under different temperature.

309

本文对温度变化引起的水位变化的讨论,仅仅是从水动力学机制上进行的,实际上最终讨论的是阻塞段渗透系数变化对水位观测产生的影响.由于在所有的模拟过程中,都涉及到渗透系数的变化问题,因此可以清楚地看出含水层渗透性对井水位观测有较大影响.由图 2(a)可见,在模型的上下二侧具有弱透水条件时,当模型阻塞段的渗透系数加大,为原渗透系数的0.9 倍时,观测点水位最大上升了 14.5 cm.

实际上水温的变化将引起介质的孔隙压力的变化,而孔隙压力的变化也是影响水位变化的一个非常重要的因素.

[参考文献]

- [1] 吴林高, 缪俊发, 张瑞, 等. 渗流力学[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1996. 1-81.
- [2] 金为芝.水文地质工程地质数值法[M].上海:同济大学出版社,1992.8-68.

[3] 国家地震局科技监测司. 地震地下水手册[M]. 北京: 地震出版社, 1995. 6-16.

NUMERICAL SIMULATION OF HYDRODYNAMIC CONDITION RELATING TO PRECURSORY SENSITIVITY OF UNDERGROUND WATER LEVEL

ZHAO Li-fei, YIN Jing-yuan

(Seismological Bureau of Shanghai City, Shanghai 200062, China)

Abstract: On the basis of the theory of elastic crack, the reflecting earthquake effect of well water level in the confined aquifer is studied by using numerical simulation method. The simulated results demonstrate that the confining condition of well-water bearing system has heavy influence on reflecting earthquake effect of water level change, and the observation quality is directly affected by the leaking level on the sides of aquifer and the height of water head. When the system is confined well, the change of observation water level has a linear relation with water head change. Moreover, for earthquake prediction purpose, in a good well-water bearing system the good penetrability is also one of the important factors to affect water level change, it is effective if the system has a high penetrability.

Key words: Well water level; Well-water bearing system; Penetrability; Finite difference method; Numerical simulation