

保山井水位异常的数值模拟

尹京苑, 赵利飞

(上海市地震局, 上海 200062)

摘要: 利用 1995 年 7 月 12 日云南孟连 $M_S 7.3$ 地震和 1996 年 2 月 3 日云南丽江 $M_S 7.0$ 地震前保山井水位异常变化的原始资料, 并根据介质体膨胀变化率和水位变化的耦合关系式, 用有限差分法模拟了保山井水位的变化情况. 通过拟合实际观测曲线, 得出观测井附近含水层内平均应力变化率的演变情况.

关键词: 井水水位; 水位变化; 有限差分法; 数值模拟

中图分类号: P315.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2000)04-0397-05

0 引言

保山井($25^{\circ}6.6' N, 99^{\circ}9.9' E$)地处保山断块的保山盆地内, 属承压自流井, 水头+6.7 m, 井深 148.02 m, 水温 $22.0^{\circ}C$, 含水层深度 4.5 m, 含水层为第三系粉砂岩. 保山板块是一个较狭窄、较破碎的地质构造板块. 通过以往的观测发现, 保山井对周边的地震孕育过程中的应力场的调整有较好的反映, 属于映震的敏感点. 1995 年 7 月 12 日和 1996 年 2 月 3 日相继发生了孟连 $M_S 7.3$ 和丽江 $M_S 7.0$ 地震, 保山井很好地记录到了这 2 次地震引起的水位异常变化. 本文根据介质体膨胀变化率和水位变化的耦合关系式, 利用有限差分法, 模拟了保山井水位的变化情况, 从而反演了这一地区应力-应变的变化信息.

1 数学模型与水力学参数

选取理想的水平分层承压含水层模式, 含水层为均匀各向同性介质, 各层的力学性质是均匀完全弹性的. 石绍先(1996)给出了云南及邻区 8 组大震的近源区最大线度 L 与大震震级的关系: $M_S = 3.589 \log L - 2.473$, 由此可得孟连地震的近源区最大半径为 240 km, 丽江地震的近源区最大半径为 200 km. 那么, 保山井对于丽江地震(震中距 278 km)和孟连地震(震中距 340 km)其水位变化定为远场影响来分析场源关系比较恰当. 远场反映了距震源有一定距离的地区应力调整的状况. 在应力调整过程(孕震过程)中, 所选区域只发生弹性形变, 没有大范围的岩石破裂发生. 因此反映区域应力场调整的井水位变化主要由含水层的渗流变化和井孔周围孔隙压变化共同产生的.

计算模型的参数选取如下: 整个模型的渗透系数取为: $K \approx 1.0 \times 10^{-3} \text{ m/d}$, 比贮水系数: $S_s = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$.

收稿日期: 2000-08-14

基金项目: 地震科学联合基金项目(100027)

作者简介: 尹京苑(1955-), 男(汉族), 副研究员, 1995 年于法国斯特拉斯堡第一大学取得博士学位, 主要从事强震孕育和地震前兆机理研究

由于考虑的是水平层状渗流问题, 所以模拟可简化为一个二维问题. 因此计算模型取成一个 $1\ 000\ \text{m} \times 500\ \text{m}$ 的矩形区域(图 1), 对该区域进行均匀剖分, 将其分成 $100 \times 50 = 5\ 000$ 个单元, “观测井”置于模型的中心, 坐标为 $(500, 250)$. 模型的上下边界设为可调透水边界, 即

$$\frac{\partial H}{\partial y} = -\frac{q(x, y, t)}{KM}$$

式中: $q(x, y, t)$ ($y = 0, 500$) 为含水层边界处流体的单宽流量, M 为含水层厚度^[1]. 由于边界流量很难确定, 但在 K 和 M 给定的情况下, 当 Δy 取得足够小

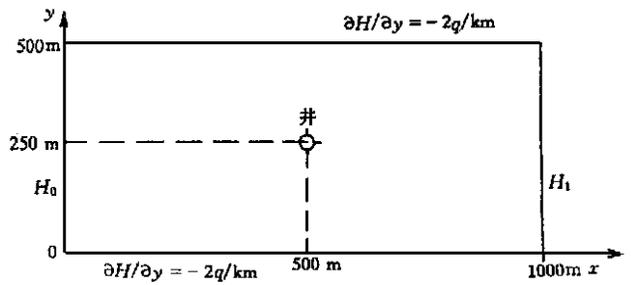


图 1 平面含水层计算模型
Fig. 1 The model for calculating plane aquifer.

时, 可假设 q 和边界内侧的水头 H 为线性关系, 即有 $q \approx bH \big|_{y=0+\Delta y, 500-\Delta y}$ (b 为常数). 而左右两边界设为水头可调边界, 即 $H \big|_{x=0} = H_0, H \big|_{x=1\ 000\ \text{m}} = H_1$. 计算空间步长 $\Delta x = \Delta y = 10\ \text{m}$. 时间为 1995 年 5 月 1 日至 1996 年 4 月 30 日, 计算时间步长 $\Delta t = 0.025\ \text{d}$.

2 计算方法

假定含水层等厚度, 在含水层内体膨胀均匀分布, 根据地下水动力学理论和弹性理论, 体应变对水孔隙压的影响可以用下面的微分方程表示^[4]

$$S_s = \frac{\partial p}{\partial t} = K \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) - \rho_g \frac{\partial \theta}{\partial t} \tag{1}$$

其中: S_s 为介质比贮水系数, K 为渗透系数, p 为孔隙水压力, $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ 为体膨胀的变化率, ρ 为流体密度, g 为重力加速度.

在准静态条件下, 用下式近似估计孔隙压带来的井孔水位 H 的变化

$$\Delta H = \frac{\Delta p}{\rho g} \tag{2}$$

因此式(1)又可写成

$$S_s \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial \theta}{\partial t} = K \left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \right) \tag{3}$$

而体膨胀与平均应力的关系式为

$$\theta = \frac{3(1-2\nu)}{E} \sigma_a = \frac{\sigma_a}{d} \tag{4}$$

式中: σ_a 为平均应力, $\nu = 0.25$ 为含水层的泊松比; 杨氏弹性模量 $E = 2.2 \times 10^4\ \text{MPa}$, $d = E/3(1-2\nu)$ 为体积弹性常数. 于是式(3)可以写成

$$S_s \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{d} \frac{\partial \sigma_a}{\partial t} = K \left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \right) \tag{5}$$

由式(5)可得相应的定解问题

$$\begin{cases} S_s \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{d} \frac{\partial \sigma_a}{\partial t} = K \left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \right) & 0 < x < 1\,000 \text{ m}, 0 < y < 500 \text{ m} \\ H(x, y, 0) = f(x, y) & 0 \leq x \leq 1\,000 \text{ m}, 0 \leq y \leq 500 \text{ m} \\ H|_{x=0} = H_0 & 0 \leq y \leq 500 \text{ m} \\ H|_{x=1\,000 \text{ m}} = H_1 & 0 \leq y \leq 500 \text{ m} \\ \frac{\partial H}{\partial y} \Big|_{y=0, 500 \text{ m}} = -\frac{bH|_{y=0+ \Delta y, 500- \Delta y}}{KM} & 0 < x < 1\,000 \text{ m} \end{cases} \quad (6)$$

式(5)中取 σ_a 为时间的线性函数, 假设 $\frac{\partial \sigma_a}{\partial t} = c$, c 在不同的模拟时间段内取值不同. 设 $a = (1 - \frac{2b\Delta y}{KM})$ 为一常数, a 的取值范围在 0 和 1 之间. $a = 0$ 时为强透水边界, $a = 1$ 时为隔水边界. 实际模拟中 a 取为 0.99, 意味着二侧边界为极弱透水边界.

由于隐式差分方法是无条件收敛的, 也就是说对于时间步长 Δt , 不受空间步长 Δx 和 Δy 的限制, 较显式差分方法优越, 因此本文采用隐式差分法进行计算. 将式(6)离散可得

$$\begin{cases} S_s \frac{H_{i,j}^{k+1} - H_{i,j}^k}{\Delta t} + \frac{c}{d} = K \left[\frac{H_{i-1,j}^{k+1} - 2H_{i,j}^{k+1} + H_{i+1,j}^{k+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{H_{i,j-1}^{k+1} - 2H_{i,j}^{k+1} + H_{i,j+1}^{k+1}}{(\Delta y)^2} \right] \\ i = 1, 2, \dots, n-1, j = 1, 2, \dots, m-1, k = 1, 2, \dots, T \\ H_{i,j}^0 = f_{i,j}^k \quad i = 1, 2, \dots, n-1, j = 0, 1, \dots, m \\ H_{0,j}^k = H_0 \quad H_{n,j}^k = 0 \quad j = 0, 1, \dots, m, k = 0, 1, \dots, T \\ H_{i,j-1}^k = aH_{i,j+1}^k \quad j = 0, i = 1, 2, \dots, n-1, k = 1, 2, \dots, T \\ H_{i,j+1}^k = aH_{i,j-1}^k \quad j = m, i = 1, 2, \dots, n-1, k = 1, 2, \dots, T \end{cases} \quad (7)$$

3 模拟结果分析

图 2 为保山井 1995 年 5 月 1 日至 1996 年 4 月 30 日的水位日均值曲线. 从图 2 可以看出, 在 1995 年 7 月 12 日孟连 $M_S7.3$ 地震前的 2 个月中, 保山井水位有 2 次小幅上升, 可能对应地震前的 2 次蠕滑过程. 而对应于临震前的应力加速过程, 观测曲线发生了近 16 cm 的突升, 以后逐渐下降并趋于平缓直到 1996 年 1 月 25 日的最低值. 接着在 1996 年 2 月 3 日云南丽江 $M_S7.0$ 地震前 3 d, 水位突升 20 cm, 地震发生后水位开始下降, 大约 100 d 后基本恢复正常.

模拟中设模型二端的水头始终保持恒定, 即在 $x = 0$ 和 $x = 1\,000$ m 两边界处分别有 $H_0 = 16$ m, $H_1 = 0$ (保山井的实际水头是 6.7 m). 模拟取值从渗流场在初值状态下达到稳定时开始, 这时模型中“观测井”的水头是 6.54 m. 图 3 是通过



图 2 1995 年 5 月 1 日至 1996 年 4 月 30 日保山井水位日均值曲线

Fig. 2 The curve of daily mean water level values of the Baoshan well from 1995-05-01 to 1996-04-30.

有限差分法模拟所得到的拟合曲线与实际观测曲线的对比图. 整个模拟过程分为 $OA, AB, BC, CD, DE, EF, FG, GH, HI, IJ, JK, KL$ 等 12 个阶段(图 3), 分别对应不同的平均应力变化率. 具体的取值见表 1. 图 4 为反演所得平均应力变化率随时间的变化曲线, 它反映了不同时段含水介质受力的情况.

图 3 中水位剧烈上升的 FG 段的 2 个月前, 有一次水位上升较大的现象(DE 段), 对应了

介质的压缩,可认为是孟连地震前断层的一次较小的蠕变过程.对应 1995 年 7 月 12 日孟连 M_s 7.3 地震和 1996 年 2 月 3 日云南丽江 M_s 7.0 地震前的 2 次大的水位变化段 FG 和 JK ,介质的受压状况非常强烈,这 2 个阶段的平均应力变化率 $\partial\sigma_a/\partial t$ 的值比其它阶段至少高出了一个数量级,这时水位的变化完全由孔隙压变化控制,渗透的作用基本可以忽略不计.而 EF , GH 和 I 段的平均应力变化率很小,意味着这几个过程里主要影响水位变化的因素是渗流作用.而 KL 段的平均应力变化率取为零即可满足与实际观测曲线的拟合,意味着这一过程仅仅是一个渗流过程.

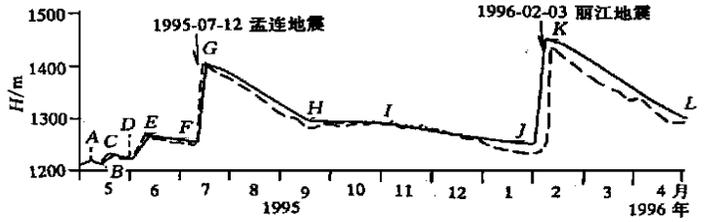


图 3 通过有限差分法模拟所得的数值结果. 图中虚线为保山井实际的水位观测曲线,而实线为模拟结果.
Fig. 3 The result simulated by using finite differential method

4 结论

水头的变化一方面是水的传递过程的一个反映,即它反映水在渗流过程中的顺利程度,在渗流路线上有无堵塞;另一方面也是地应变信息的反映,即若一封闭含水层局部受到挤压时会

表 1 模拟过程中不同阶段体膨胀变化率 $\partial\theta/\partial t$ 和平均应力变化率 $\partial\sigma_a/\partial t$ 的取值

模拟阶段	$\partial\theta/\partial t/[1 \cdot d^{-1}]$	$\partial\sigma_a/\partial t/[MPa \cdot d^{-1}]$
OA	-2.1×10^{-7}	-3.08×10^{-3}
AB	2.1×10^{-7}	3.08×10^{-3}
BC	-2.5×10^{-7}	-3.67×10^{-3}
CD	0.8×10^{-7}	1.17×10^{-3}
DE	-5.2×10^{-7}	-7.63×10^{-3}
EF	-0.2×10^{-7}	-0.29×10^{-3}
FG	-41.0×10^{-7}	-60.13×10^{-3}
GH	0.4×10^{-7}	0.59×10^{-3}
HI	-1.1×10^{-7}	-1.61×10^{-3}
IJ	-0.5×10^{-7}	-0.66×10^{-3}
JK	-55.0×10^{-7}	-80.67×10^{-3}
KL	0	0

注:表中负值意味着含水层受力过程中处于受压状态.

引起这一部位水头的重新调整.在上述第一种情况下,水的受力没有发生改变,但流体的质量发生了变化;在第二种情况下虽然挤压造成了局部的水位变化,但这一局部区域里水的总体质量没有改变.在分析实际问题时,应将其分解成这 2 个方面同时考虑.

不大,井水位的变化基本符合渗流规律,可以认为水位变化的中长期异常主要由于含水层渗流性质的改变而体现出来.而在孕震的短临阶段,由于应力变化开始加速,这时孔隙压变化引起的井水位变化将占绝对的主导作用,而渗流作用基本可以忽略不计.

模拟得到的体膨胀变化率和平均应力变化率的量级与资料给出的这 2 个变

式(5)中包含了两部分的内容,一是应力变化对水位变化的影响,二是渗流场变化对水位变化的影响.后者的影响中含水介质的渗透系数 K 起着重要的作用.但渗流参数变化引起的水位变化有一个较长的时间响应,从变化曲线上来看显得较平缓.对于孕震的初始阶段,应力场的调整幅度

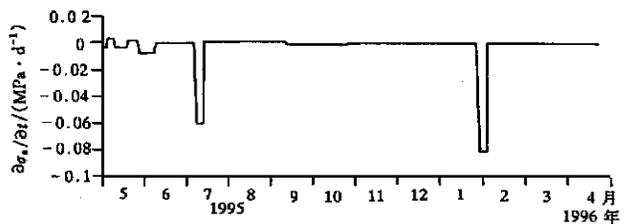


图 4 反演所得平均应力变化率的变化曲线
Fig. 4 The avariation curve of the mean stress change ratio obtained by conversion.

化量的实际观测量级相符, 证明参数的选取和模拟过程是可靠的.

[参考文献]

- [1] 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.
- [2] 汪成民, 车用太, 万迪等. 地下水微动态研究[M]. 北京: 地震出版社, 1988. 117—180.
- [3] 云南省地震局滇西地震预报实验场. 一九九六年丽江地震[M]. 北京: 地震出版社, 1998.
- [4] 张永仙, 石耀霖, 张国民. 孕震过程中孔隙压及地下水位变化的数值模拟[J]. 地震, 1994, 14(1): 65—71.
- [5] 张伯崇, 邬慧敏, 刘长义, 等. 应力对岩石中孔隙流体压力的影响和地下水位震前异常变化机理[J]. 地震学报, 1991, 13(1): 88—95.

NUMERICAL SIMULATION OF WATER LEVEL ANOMALY OF BAOSHAN WELL

YIN Jing-yuan, ZHAO Li-fei

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

Abstract: Based on the coupling relation between bulk dilatation ratio and water level variation, the water level variation of Baoshan well is simulated by using finite differential method. The original water level data is sampled during the preparation and occurrence of the Menglian $M_S7.3$ earthquake on July 12, 1995 and Lijiang $M_S7.0$ earthquake on Feb. 3, 1996. The variations of the average stress rate near the well are obtained by fitting the simulated curves with practical measurement curves.

Key words: Well water level; Water level change; Numerical simulation; Finite difference method

本刊 2000 年第 3 期所刊“兰州地震研究所地电场预报地震研究取得显著进展”一文, 因原稿有误, 特更正如下:

第 351 页倒数第 5 行“国内领先水平”应为“国际先进水平”; 倒数第 3 行“(10 s) 噪声小于 $10 \mu\text{V}$ ”应为“(30 分钟) 噪声小于 $10 \mu\text{V}$ ”; “电极的频率范围为 0 ~ 1 kHz”应为“电极的频率范围为 0 ~ 10 kHz”.