

1989年大同6.1级地震前后地下水位固体潮加卸载响应比的变化*

张昭栋¹, 刘庆国², 魏 焕¹, 耿 杰¹, 王忠民¹

(1. 山东省地震局, 山东 济南 250021; 2. 山东省建筑工程学院, 山东 济南 250014)

摘要:将加卸载响应比的理论和方法引入地下水位潮汐资料计算中,根据岩石的应变与应力的非线性响应分析了井水位固体潮加卸载响应比的物理机理,从理论上论证了用地下水位观测资料计算加卸载响应比的可行性并研究出利用地下水位对固体潮的响应来计算加卸载响应比的方法.以此方法计算了我国大华北地区近20 a来地下水位的固体潮加卸载响应比,分析了1989年大同6.1级地震前后地下水位固体潮加卸载响应比的变化.多数井的水位固体潮加卸载响应比在地震前6~12个月出现升高异常变化.

关键词:固体潮; 地下水位; 大同6.1级地震; 加卸载响应比

中图分类号:P312.4; P315.75; P315.72 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0844(1999)04-0356-07

0 前言

地震预报问题是一个世界科学难题,近年来许多科学家都在努力研究具有物理基础的地震预报方法.尹祥础为了寻求解决地震预报问题的新途径,从岩石的固有特征及稳定性问题的本质出发,借鉴经典力学中的量纲分析与现代信息论的概念^[1],分析了不同非线性系统的失稳过程后得出:其失稳前兆为响应率不断增高或响应比不断增高,而且系统临近失稳时加载与卸载的响应是不同的.将这一理论用于地震预报,利用起潮力引起的地壳中应力的周期性变化,作为加、卸载的手段,用1970~1988年间发生在中国大陆的9个7级以上大地震的资料,将该区域内中小地震所释放的能量的平方根(Benioff称之为释放应变)作为固体潮加卸载的响应,9个地震中的7个,在震前其响应比明显增高^[2~3].该方法已取得了令人瞩目的成效.

1 承压井水位的固体潮加卸载响应比理论

人们对穿过封闭含水层的水井水位能够反映地球固体潮的认识已有100多年的历史了.由于井水响应的量值与含水层的弹性性质有关,水文地质学家、地球物理学家和其他地球科学家都对用含水层的弹性参数解释这种响应的方法感兴趣,也做了大量的观测研究工作^[4~8].

收稿日期:1998-09-27

基金项目:中国地震局“九五攻关”课题(96-913-01-02-03)的部分成果

作者简介:张昭栋(1942-),男,研究员,从事固体潮、地震地下流体、地应力、应变及综合预报地震等研究工作

从理论上证明了深井水位的潮汐现象是对地球固体的响应.更确切地说,深井水位的潮汐是水井含水层对地壳固体潮体应变的响应.

采用水文地质中典型的水平分层承压含水层模式,可以建立固体潮对承压含水层水位影响的偏微分方程^[7~8]

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

其中 H 为含水层内承压水头, K 为含水层的渗透系数, ρ 为含水层内水的密度, g 为重力加速度常数, n 为含水层的孔隙度, 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, θ 为固体潮体应变.

通过一定的边界条件,可以求出该方程的简化解,从而得到水井水头与体应变固体潮之间的关系

$$\delta H_w = \theta / \{\rho g [(1-n)\alpha + n\beta]\} \quad (2)$$

由此可见,当某一水井含水层系统其上述参数确定不变时,固体潮体应变引起井水位的变化与固体潮体应变成正比.大量实际观测结果也证明了这一结论是正确的.

事实上,含水层不仅受固体潮汐力的作用,而且还受构造应力的作用.因此,含水层的应变是两者作用的结果,即

$$\Delta \epsilon = \frac{1}{E(t)} (\sigma_t + \sigma_s) \quad (3)$$

其中 σ_t 为潮汐应力, σ_s 为构造应力, $E(t)$ 为介质的杨氏模量,它的值是随应力的区域不同而不同.从图1可见,在区域OAB, $E(t)$ 近似为一个常数;在区域BC, $E(t)$ 越来越大;在区域CS, $E(t)$ 越来越小;在区域SD, $E(t)$ 又近似为一个常数.由此可见,在非线形失稳过程中潮汐应力在不同区域内 $E(t)$ 的值也不同,有时大,有时小,有时近似为一个常数.这一现象在井水位对固体潮的响应方面,表现为井水位的固体潮体应变系数也在变化.

从(3)式可见,震源区岩石主要受构造应力与潮汐应力影响,当时间很短时,例如24h,构造应力变化不大,只有潮汐应力在规律地变化.因此有

$$\Delta \epsilon = \sigma_t / E(t) \quad (4)$$

即潮汐应力引起了岩石的潮汐应变.而这种潮汐应变又影响了含水层的应变(如果这个含水层离震源区较近),导致含水层孔隙压力发生变化,表现为承压井水位也发生变化.所以近震源区的承压井水位有可能观测到震前非线性失稳的变化.

对于承压井水位潮汐,我们定义响应率为

$$R_w = \Delta h_w / \Delta \theta \quad (5)$$

其中 Δh_w 为由于固体潮变化引起的承压井水位变化幅度的观测值, $\Delta \theta$ 为固体潮体应变的理论变化值.

由上述分析可知,在系统较稳定时,承压井水位潮汐的响应率也较稳定,当系统非线性失稳状态下,响应率将随固体潮汐应变的增大而增高.

利用井水位对固体潮应变的响应,我们定义井水位固体潮加卸载响应比为

$$y_w = (R_w)_+ / (R_w)_- \quad (6)$$

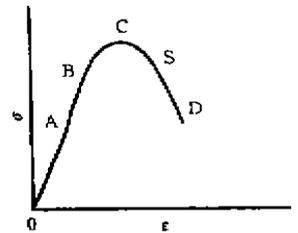


图1 岩石的全应力应变曲线

Fig. 1 The whole stress-strain curve of rock.

其中角标“+”表示加载，“-”表示卸载。

2 井水位固体潮加卸载响应比的计算方法

2.1 固体潮加卸载的计算

如何对一个地块(例如几十公里至几百公里见方的地块)进行加载?这当然不是现时人工力量所能实现的,好在大自然正好为我们创造了这样的条件,这就是固体潮.引潮力在不断地、周期性地变化着,因此它使得地块中的应力也在发生周期性变化.问题的关键是如何判断固体潮潮汐应力对某一断层面的加载与卸载.利用尹祥础等研究的方法,可以求得引潮力在地壳内任意点的任意截面上引起的各个应力分量.设在指定的断层面上引潮力产生的剪应力为 $\overline{\tau}_n$,正应力为 σ_n (取拉应力为正),则该面上潮汐有效剪应力定义为^[2]

$$\overline{\tau}_e = \overline{\tau}_n + f \cdot \sigma_n \cdot \frac{\overline{\tau}_n}{|\overline{\tau}_n|} \quad (7)$$

式中 f 为摩擦系数,该面上的潮汐有效剪应力增量则定义为

$$\Delta\tau_e = \overline{\tau}_e \cdot \overline{D} \quad (8)$$

式中 \overline{D} 为地震断层面上的滑移矢量.

计算 $\Delta\tau_e$ 的关键在于如何求得地震前每时刻的 $\overline{\tau}_e$ 和 \overline{D} .要计算断层面上引潮力产生的剪应力 $\overline{\tau}_e$,须先根据地球的固体潮理论,计算引潮力在地壳某点每时刻产生的固体潮潮汐应力理论值.只要知道某指定断层面的法矢量,就可以进一步计算它在断层面上产生的正应力 σ_n 和剪应力 τ_n ^[9]

$$\sigma_n = l^2\sigma_x + m^2\sigma_y + n^2\sigma_z + 2mnt\tau_{yz} + 2nl\tau_{zx} + 2lm\tau_{xy} \quad (9)$$

$$\tau_n^2 = X_n^2 + Y_n^2 + Z_n^2 - \sigma_n^2 \quad (10)$$

式中 l, m, n 分别为断层面的外法线的3个方向余弦; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}$ 和 τ_{zx} 分别为引潮力在断层该点产生的固体潮潮汐应力理论值的6个分量,而 X_n, Y_n 和 Z_n 分别为

$$\begin{aligned} X_n &= l\sigma_x + m\tau_{xy} + n\tau_{zx} \\ Y_n &= m\sigma_y + n\tau_{yz} + l\tau_{xy} \\ Z_n &= n\sigma_z + l\tau_{zx} + m\tau_{yz} \end{aligned} \quad (11)$$

将(9)和(10)式代入(7)式,可以计算出指定的断层面上引潮力产生的每一时刻的有效剪应力 $\overline{\tau}_e$.

地震断层面上的滑移矢量 \overline{D} 的计算是根据研究区内以前发生过的大地震的震源机制解并结合震源区的地震地质构造来进行的.对于研究区域内以前没有发生过较大地震的,则可根据该区域的地震地质构造条件,尤其是断层走向情况,给出一个若要发生大地震可能造成的断层面上的滑移矢量.

计算出剪应力 $\overline{\tau}_e$ 和滑移矢量 \overline{D} ,由(8)式计算出每时刻的有效剪应力 $\Delta\tau_e$.对某一地区(更确切地说是地壳内任一点), $\Delta\tau_e(t) > 0$ 的时间区间称为正区间,反之称为负区间.在正区间里,起潮力在发震断层上引起的有效剪应力与原来的构造有效剪应力互相叠加,有利于地震的发生,而在负区间里有抑制地震发生的作用^[3].

2.2 深井水位的干扰排除

地下水位是地壳含水层孔隙压的反映,承压井水位对含水层的应力变化反应尤为灵敏,因而影响水位变化的干扰也就多.其中地球的固体潮汐作为加卸载的力,那么气压则是一种干

扰,应想法从井水位的观测资料中扣除气压的影响.

首先利用别尔柴夫滤波器将地下水位观测值进行滤波,把井水位中的潮汐成分(主要是日波、半日波和 $\frac{1}{3}$ 日波)与长周期成分分开.把气压观测值也作同样的滤波处理,再把水位的长周期成分与气压的长周期成分作一阶差分相关分析,得出气压对井水位影响的气压系数 B_p ,然后以此系数进行井水位气压改正,得出经气压改正后的水位

$$W_c(t) = W_0(t) - B_p \cdot P(t) \quad (12)$$

式中 W_0 为水位测值, P 为气压测值, t 为时间.

2.3 利用含水层体应变增减法计算井水位固体潮加卸载响应比

一个系统对外部作用的响应可简化为两种情况,一种是线性响应,另一种是非线性响应.在线性响应情况下,系统的响应与外部作用呈线性关系.例如,线性弹性材料对外部应力作用的响应,其应变与应力呈线性关系(图2(a)).对非线性响应,其应变与应力呈非线性关系(图2(b)).由岩石力学的理论可知,真实岩石的全应力应变曲线是复杂的(图1).其中在OAB区域内,应力应变关系可以近似于线性变化.在BC区域内,随着应力的增大,应变也增大,而且响应率($\Delta\epsilon/\Delta\sigma$)也越来越大;在CS区域内,应力的变化响应率倒转,斜率为负,数值越来越小;在SD区域内,岩石发生破裂.

在岩石单轴压缩的全应力应变过程中,如果应力不是一直单向加载,而是出现一定范围的卸载,在不同的应力范围内产生的效果不同.图1所示在线性区OAB内,加载与卸载引起的应变是线性的,两者的响应率不变.当应力在非线性区BC范围内,由于应力已超过了介质的弹性损伤,所以每次加卸载变化引起岩石发生一定程度的塑性变形,应力应变曲线将按图3所示的情况变化,因而出现了加载与卸载的应变响应率不同的现象,加载响应率要大于卸载响应率(图3).

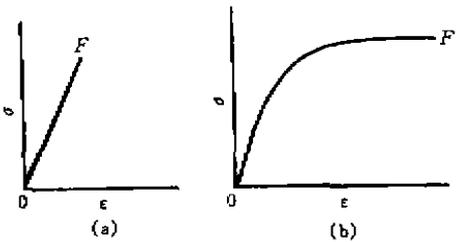


图2 应变与应力关系曲线

Fig.2 The strain-stress relationship curves.

(a) 线性关系; (b) 非线性关系

对于井水含水层而言,起潮力使含水层产生形变,形成固体潮体应变,而承压井水位潮汐是含水层对固体潮体应变响应的反映.因此也可以选取含水层的固体潮体应变作为固体潮加卸载的标准,即选取对应于应力增大时的OA,BC,DE,⋯的O'A',B'C',D'E',⋯为加载,而A'B',C'D',⋯为卸载.也用(8)式来计算井水位固体潮加卸载的响应比^[10].

3 1989年大同6.1级地震前井水位固体潮加卸载响应比的变化

1989年10月19日山西大同发生了 $M_S 6.1$ 地震,我们利用上述方法处理了大华北地区11口水井的观测资料,计算它们在地震前后的井水位固体潮加卸载响应比(图4).其中多数井水位固体潮加卸载响应比在地震前6~12个月出现升高异常变化,少数井在地震前1~2个月,个别的在地震后出现升高异常变化.

我们统计了各井观测时段在大华北地区发生的 $M_S \geq 5.0$ 地震以及井水位固体潮加卸载响应比与地震的关系(表1).

由表1的统计结果可知,在这期间共发生地震35次,各井水位固体潮加卸载响应比出现异常43次(井水位固体潮加卸载响应比数值超过2倍中误差就认为是异常).各井水位固体潮加卸载响应比异常与地震发生的对应率为

$$P_C = \frac{\text{有地震有异常次数}}{\text{响应比出现异常总次数}} = \frac{35}{43} = 81\%$$

各井水位固体潮加卸载响应比异常与地震发生的漏报率为

$$P_L = \frac{\text{有地震无异常次数}}{\text{地震总次数}} = \frac{10}{35} = 29\%$$

而各井水位固体潮加卸载响应比异常与地震发生的虚报率为

$$P_F = \frac{\text{无地震有异常次数}}{\text{响应比出现异常总次数}} = \frac{13}{43} = 30\%$$

由表 1 的统计结果可知,地震多数发生在井水位固体潮加卸载响应比出现异常后的 3~8 个月,较短的只有 30~40 d,较长的有 13 个月。

4 结语

(1) 深井水位的潮汐现象是对地球固体的响应,更确切地说,深井水位的潮汐是水井含水层对地壳固体潮体应变的响应,因此可以利用井水位对地壳固体潮体应变的响应来计算固体潮加卸载响应比。

(2) 本文给出了井水位固体潮加卸载响应比的计算方法:利用含水层体应变增减法计算井水位固体潮加卸载响应比,由于井水位的变化主要受含水层体应变的影响,所以利用含水层体应变的变化计算出的响应比要比地震断层面处的情况更接近水井含水层处的实际情况。

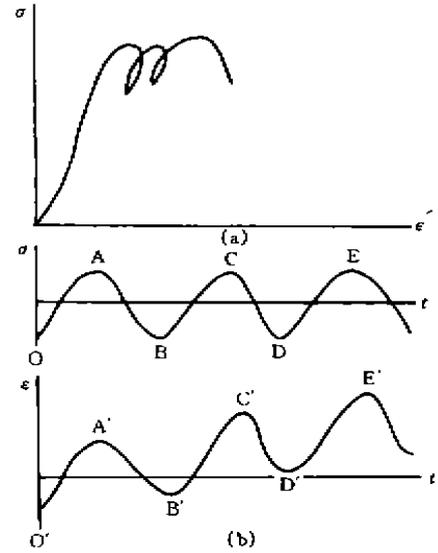


图 3 加卸载响应曲线

Fig. 3 The loading and unloading response curves.

(a) 应力-应变关系曲线;

(b) 应力和应变随时间变化曲线

表 1 井水位固体潮响应比与地震关系的统计结果

水井 序号	井名	井位		资料时段	地震 次数	异常 次数	有震有异 常次数	有震无异 常次数	无震有异 常次数	有震异常在震 前出现的时间
		$\lambda_E/(\circ)$	$\varphi_N/(\circ)$							
1	静乐	111.9	38.2	1987-01-01-1991-12-31	4	3	3	1	0	3、11 个月
2	孝义	111.8	37.1	1987-01-01-1991-12-31	4	3	2	2	1	13、8 个月
3	昌黎	119.2	39.7	1988-01-01-1997-12-31	5	7	4	1	1	3~13 个月
4	永年	114.5	36.7	1988-07-01-1992-12-31	4	3	2	2	1	40 d、8 个月
5	唐山	118.2	39.6	1988-07-01-1996-12-31	7	8	4	3	2	2~5 个月
6	深县	115.6	38.1	1988-07-01-1990-12-31	1	3	1	0	2	6~11 个月
7	永清	116.4	39.2	1988-07-01-1995-12-31	5	7	4	1	3	6~13 个月
8	滦南	118.7	39.5	1988-07-01-1990-12-31	1	2	1	0	1	6 个月
9	玉田	117.8	39.9	1988-07-01-1990-12-31	1	3	1	0	2	6 个月
10	完县	115.1	38.9	1989-01-01-1990-12-31	2	2	2	0	0	30 d、60 d
11	雄县	116.1	39.0	1988-07-01-1990-12-31	1	2	1	0	0	12 个月

(3) 1989 年 10 月 19 日山西大同发生了 $M_S 6.1$ 地震,大华北地区 11 口水井的水位固体潮加卸载响应比在震前 6~8 个月出现升高异常变化。

- [4] Bredhoeft J D. Response of well-aquifer system to earth tides[J]. *J. Geophys. Res.*, 1967, 72(12): 3075~3087
- [5] Narasimhan T N, Kanehiro B Y, Witherspoon P A. Interpretation of earth tide response of three deep, confined aquifers[J]. *J. Geophys. Res.*, 1984, 89(B3): 1913~1924.
- [6] 张昭栋, 郑金涵, 冯初刚. 体膨胀固体潮对水位观测的影响[J]. *地震研究*, 1986, 9(4): 465~472.
- [7] 张昭栋. 地下水潮汐分析[M]. 济南: 山东大学出版社, 1988. 25~79
- [8] 张昭栋, 郑金涵, 冯初刚. 深水井位的固体潮效应[J]. *地震学报*, 1991, 13(1): 66~75
- [9] 徐芝论. 弹性力学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1982. 245~271
- [10] 张昭栋, 等. 井水位固体潮加卸载响应比的地震短临前兆[J]. *地震学报*, 1997, 21(1): 174~180

**VARIATION OF LOADING AND UNLOADING RESPONSE RATIO OF GROUNDWATER
LEVEL TO EARTH TIDES BEFORE AND AFTER THE DATONG
 $M_s6.1$ EARTHQUAKE IN 1989**

ZHANG Zhao-dong¹, LIU Qing-guo², WEI Huan¹, GENG Jie¹, WANG Zhong-min¹

(1. *Seismological Bureau of Shandong Province, Jinan 250021, China;*

2. *Shandong Building Engineering College, Jinan 250014, China)*

Abstract

The theory and method of the loading and unloading response ratio to the earth tide have been quoted in data calculation of tides of the groundwater level. The feasibility for calculating the loading and unloading response ratio by means of the observation data of the groundwater level is proved, and the calculation method has been showed. The loading and unloading response ratio of the groundwater level to the earth tide in the North China during the last 20 years has been calculated by this method, and the variation of loading and unloading response ratio of groundwater level to earth tides before and after the Datong $M_s6.1$ earthquake in 1989 has been analyzed. Increasing anomaly variation of the loading and unloading response ratio of most of the well levels to the earth tides appeared from 6 to 12 months before the earthquake.

Key words: Earth tide; Groundwater level; Datong $M_s6.1$ earthquake; Loading and unloading response ratio