

井水位气压加卸载响应比

魏 焕, 张昭栋, 耿 杰, 王忠民, 于立业

(山东省地震局, 山东 济南 250014)

摘要: 将加卸载响应比的理论和方法引入到地下水位资料中. 根据承压井水位的气压效应, 将地球表面大气压的随机变化做为加载和卸载的力源, 从理论上论证可以应用大气压变化而引起的井水位变化来计算加卸载响应比, 并给出了计算方法. 以此方法计算了 1995 年 9 月 20 日山东苍山 M_S 5.3 地震前后鲁 14 井、鲁 15 井水位的气压加卸载响应比, 分析了其变化特征.

关键词: 地下水位; 加卸载响应比; 气压; 地震预报

中图分类号: P315.72⁺ **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2003)01-0082-04

0 前言

为了寻找解决地震预报问题的新途径, 1987 年尹祥础分析了现有的各种主要地震前兆后, 指出现有的各种前兆与地震的发生都不存在唯一性的对应关系. 并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, 提出了一个表征地壳力学稳定性的新的无量纲参数 $F_y = 1 - M_p / M_0$. 其中 M_p 为地壳材料加载时的广义切线模量, 而 M_0 是其弹性模量, 所以 F_y 表征着地壳材料在同一载荷增量条件下, 在加载与卸载过程中力学响应的比值. 这一参数反映了稳定问题的本质^[1]. 1991 年尹祥础指出失稳前兆为响应律不断增高或响应比不断增高, 而且加载与卸载的响应是不同的. 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, 测量出固体潮加载周期与卸载周期引起的响应(如地壳形变, 重力, 地震活性等)的比值, 用于地震预报, 计算出在 1970~1988 年间发生在中国大陆的 9 个 $M > 7$ 大地震中的 7 个, 在震前其响应比明显增高^[2].

中国历史上人们早就注意到天气变化与地震有一定的关系. 1968 年邢台地震以后, 地震工作者对气压与地震的关系进行大量的观测与研究, 指出地震的发生与气压变化有一定的关系^[3, 15, 19]; 发现临震前为低压或由低压转高压均有利于强震的发生^[9]. 有报导中国云南地区气压场振动对云南及临区 $M_L > 4.0$ 地震有临震调制作用^[7], 并总结出 30 余年来云南气压涨落的致震方式和阈值^[4]. 在中国华北地区也发现了气压与地震的发生有一定的关系. 例如, 低气压天气过程对邢台地震的触发作用^[8]; 华北四次强震震前气压都呈现出超过 10 hPa 的特殊变化^[10]. 由于大气压变化幅度可达 10~30 hPa, 这样大的垂直向压力变化传递到存在发震背景的断层面上, 可以对断层的活动产生触发与抑制作用, 所以我们完全可以选取气压变化作为加载与卸载的力源, 研究大气压变化与地震的关系.

1994 年张昭栋在中国地震局“八五”攻关中提出了以气压的变化做为加卸载应力, 计算井水位对气压加卸载变化的响应这一研究课题, 本文根据这一思路, 将加卸载响应比的理论和方法引入到地下水位资料计算中, 根据承压井水位的气压效应, 利用地球表面大气压的随机变化做为加载和卸载的力源, 从理论上论证可以应用大气压变化而引起的井水位变化来计算加卸载响应比; 作为实例, 以此方法计算 1995 年 9

月 20 日山东苍山 $M_S 5.3$ 地震前后鲁 14 井、鲁 15 井水位的气压加卸载响应比,分析震前井水位气压加卸载响应比的变化特征.

1 承压井含水层系统对大气压变化的响应

在地震地下水位的连续观测中,发现气压对井水位的影响现象非常普遍,尤其对深井承压水位的影响特别明显.据不完全统计,在地震观测网中的水井有近 80% 的井孔具有不同程度的气压效应,并观测到水位变化一般稍滞后于气压的变化,气压效率高的井水位滞后时间短,但滞后时间一般不超过 1 小时.对于一个理想的水井含水层系统,从弹性理论和地下流体的动力学理论可以得出气压影响承压含水层水头的偏微分方程^[12]

$$\frac{\partial^2 H}{x^2} + \frac{\partial^2 H}{y^2} = \frac{\rho g(\alpha + n\beta)}{K} \cdot \frac{H}{t} - \frac{\alpha}{K} \cdot \frac{P_a}{t} \quad (1)$$

其中 H 为承压含水层压力水头; ρ 和 β 分别为含水层内水的密度和体压缩系数; n 为含水层的孔隙度; K 为含水层的渗透系数; α 为含水层固体骨架的体积压缩系数; g 为重力加速度, P_a 为大气压的压力; t 为时间.

由方程(1)可以得出井水位的气压效率为

$$B_p = f(k, T, \omega, t) \frac{n\beta}{\alpha + n\beta} \quad (2)$$

其中 $f(k, T, \omega, t)$ 是一个与气压变化频率有关的函数,若气压频率变化较慢,则式(1)变为

$$B_p = \frac{n\beta}{\alpha + n\beta} \quad (3)$$

由此可见,井水位气压系数与井孔含水层的水文地质参数有关.如果含水层靠近震源区,在正常状态下,应力应变处于线性区,井水位气压效率也处于线性区,即气压的涨落与井水位的变化成正比.当该区处于非线性的失稳状态时,井水位气压效率也处于非线性区,即气压的涨落与井水位的变化不成正比,会出现气压的加载与卸载产生井水位气压效率的不同.利用此不同可以计算出井水位的气压加卸载响应比.

2 井水位气压加卸载响应比

2.1 井水位气压加卸载响应比理论

据文献[1]、[2]、[14],一个系统在载荷 P 的作用下,系统对应载荷 P 时的响应率为 $F = (\Delta R_1 / \Delta P_1) / (\Delta R_0 / \Delta P_0)$; 将加卸载响应比 y 定义为

$$y = (\Delta R_+ / \Delta P_+) / (\Delta R_- / \Delta P_-) \quad (4)$$

式中 $(\Delta R_+ / \Delta P_+)$ 为加载响应率, $(\Delta R_- / \Delta P_-)$ 为卸载响应率.

深井水位的水位变化大部分来源于固体潮和大气压力的随机波动变化.其实,含水层所受应力变化是由构造应力、大气压力、固体潮汐等应力共同作用的结果,即

$$\Delta \epsilon = \frac{1}{E(t)} \cdot (\sigma_t + \sigma_m + \sigma_q + \sigma_y) \quad (10)$$

其中, σ_m 为构造应力; σ_t 为固体潮汐应力; σ_q 为大气压力; σ_y 为其他应力; $E(t)$ 为介质的扬氏模量,它的值随应力区域的不同而不同.由图 1 可见,在区域 OAB, $E(t)$ 近似为一常数; 在区域 BC, $E(t)$ 越来越大; 在区域 CS, $E(t)$ 越来越小; 在区域 SD, $E(t)$ 又近似为一常数.由此可见,在非线性失稳过程中,随着大气压应力在不同的区域变化, $E(t)$ 的值也不同,有时大,有时小,有时近似为一常数.这一现象在井水位对大气压力变化的响应方面,表现为井水位气压效率的变化.

由式(5)可见,震源区岩体应变主要受构造应力,潮汐应力和大气压应力等作用.在水位日均值中,实质是对井水位 24 个时值的滤波,去掉了低于 24 小时的高频成分,因此固体潮的日波和半日波的潮汐应力的影响可忽略不计; 在以数天计的时间段内,构造应力和其他应力变化不大,故以大气压随机变化为主.因此有 $\Delta \epsilon = \sigma_q / E(t)$, 即气压应力引起岩石的应变; 而这种应变又影响了含水层的应变,导致含水层孔隙

压力发生变化, 表现为承压井水位变化. 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. 我们定义承压井水位对气压的响应率为

$$F = \frac{h_1 - h_0}{q_1 - q_0} = \frac{\Delta h}{\Delta q} \quad (6)$$

其中 Δq 为气压变化的观测值; Δh 为因气压变化引起的承压井水位变化的观测值.

由上述分析可知, 在系统较稳定时, 承压井水位气压的响应率也较稳定, 当系统非线性失稳状态下, 响应率将随气压应变的增大而增大. 利用承压井水位对气压体应变的响应率, 我们定义承压井水位气压加卸载响应比为

$$Y = \frac{(\Delta h / \Delta q)_+}{(\Delta h / \Delta q)_-} \quad (7)$$

其中角标“+”表示加载, 角标“-”表示减载.

2.2 水位气压加卸载响应比的计算

在大气压力变化中, 包含着不同的周期成份, 主要有长周期(年变等)、中短周期(数天)和短周期(一天内). 其中大气环流和一般天气过程引起的气压趋势性升降即随机波动, 变化周期一般数天至十几天, 幅度可达 10 hPa 以上. 地下水位变化也具有相同的周期成份. 由于地下水位尤其是承压井水位是地壳含水层孔隙压的反应, 对应力变化反映较灵敏, 因此影响水位变化的干扰也较多, 如气压、降水、固体潮汐、地下水运移和工农业用水等. 其周期也可分为长、中短、短三种周期. 计算中, 采用水位、气压日均值, 即可将固体潮汐等成份影响大大减小; 对长周期成份和降水载荷、工农业用水等干扰用最佳滤波器选择合适的滤波周期, 对水位和气压进行滤波, 将干扰压制在最低水平; 然后以气压随机变化为加卸载力源, 水位变化为响应, 利用公式(5)进行水位气压加卸载响应比的计算.

3 计算实测

1995年9月20日, 山东苍山县发生 $M_s 5.2$ 地震. 距震中分别为 45 km 和 60 km 的鲁 14 井和鲁 15 井水位无明显异常反映. 但对上述两井的水位气压加卸载响应比计算, 出现了明显的震前短临异常现象.

3.1 鲁 14 井

该井位于山东莒南县石莲子乡, 东经 $118^\circ 45'$, 北纬 $35^\circ 21'$. 井深 321 m, 观测层为 251~321 m. 构造上位于沂沭断裂带之安丘-莒县断裂上, 为石炭系灰岩裂隙承压水, 主要干扰为大气降水和工农业用水. 对该井水位和气压日均值应用最佳滤波器带通滤波后, 计算水位气压加卸载响应比见图 2. 该曲线基本上在 1 附近波动; 1995年3月响应比值开始升高, 8月达到最大值 4.0; 地震发生在响应比值降低的9月; 震后响应比值迅速恢复到 1 附近.

3.2 鲁 15 井

该井位于山东枣庄市邹坞乡马庄村, 东经 $117^\circ 37'$, 北纬 $34^\circ 46'$. 井深 501.61 m, 观测层位 239.6~421 m. 构造上位于北山断裂上盘, 为二迭系砂岩孔隙裂隙承压水, 主要干扰为大气降水和工农业用水. 对该井水位和气压日均值应用最佳滤波器低通滤波后, 计算水位气压加卸载响应比见图 3. 该曲线基本上在 1 附近波动; 1995年5月响应比值有一小高潮, 最大值在 10 附近; 9月响应比达最大值 20 后迅速回落, 基本恢复后发震.

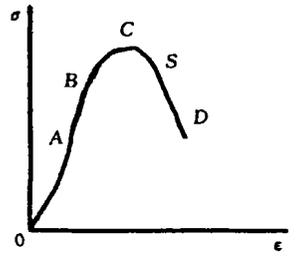


图 1 岩石的全应力应变曲线

Fig. 1 Curve of par-stress-strain of rock.

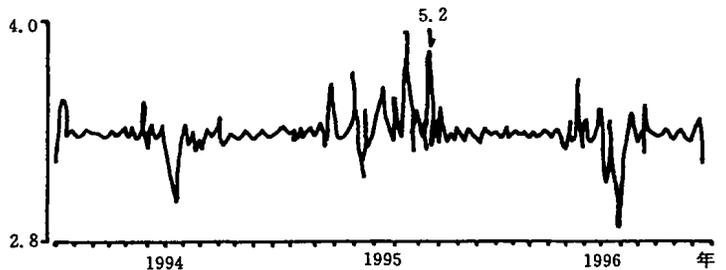


图 2 鲁 14 井水位气压加卸载响应比变化

Fig. 2 The load/unload response ratio of water level to change of air pressure in Lu-14 well.

4 结语和讨论

(1) 鲁14井、鲁15井水位气压加卸载响应比的计算结果说明, 水位气压加卸载响应比方法是可行的, 具备明显的地震短临预报特征。

(2) 鲁14井距震中45 km, 水位气压加卸载响应比异常具有明显的升高至极大值, 在下降过程中发震的特征. 异常形态完整, 体现了完整的震源体应力应变由线性至非线性的变化过程. 而离震源体远的水井其井水位气压加卸载响应比反映就差一些, 因为只有震源体处的介质在震前有可能产生非线性的变化过程。

(3) 水位气压加卸载响应比采用水位和气压日均值计算, 资料易取得, 且异常突出, 是一种较有前途的地震预报新方法。

(4) 在计算中, 大气降水和工农业用水是一大干扰, 排除较难, 需根据多年资料选择合适的滤波因子进行压制。

(5) 大气压随机变化, 以数天至十几天不同的周期对孕震体进行反复的加卸载, 是否有个最佳加卸载周期能引起孕震体的最大响应, 有待今后进一步研究。

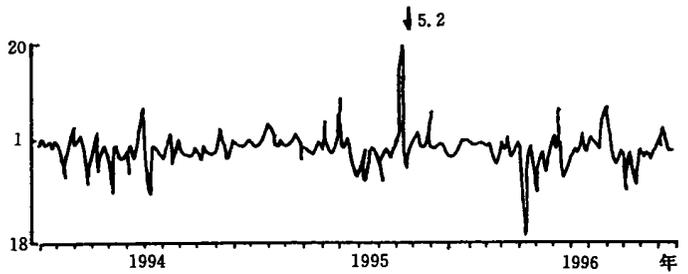


图3 鲁15井水位气压加卸载响应比变化

Fig. 2 The load/unload response ratio of water level to change of air pressure in lu-15 well.

[参考文献]

- [1] 尹祥础. 地震预测新途径的探索[J]. 中国地震, 1987 (3): 1—7.
- [2] 尹祥础, 尹灿. 非线性系统失稳的前兆与地震预报[J]. 中国科学(B), 1991, (5): 512—518.
- [3] 赵洪声, 王世芳, 和宏伟. 气压场剧烈涨落与四川强震爆发的基本关系研究[J]. 四川地震, 1995, (2): 1—7.
- [4] 赵洪声, 王世芳, 和宏伟. 三十年来云南气压涨落的致震方式和阈值研究[J]. 地震研究, 1995, 18(3): 237—245.
- [5] 江崇延. 大气压变化与强震预测[J]. 四川地震, 1988 (2): 42—44.
- [6] 李贵福, 解明恩. 本世纪云南强震的气象特征[J]. 地震研究, 1996, 19(2): 154—161.
- [7] 扬子汉. 我国西南地区气压场振动对云南及邻区 $M_L \geq 4.0$ 地震的临震调制[J]. 西北地震学报, 1988, 10(1): 75—84.
- [8] 袁小滔, 杨永胜, 赵彦露. 气象变化与邢台地震关系初探[J]. 地震研究, 1996, 19(4): 377—383.
- [9] 赵洪声. 云南中强震前气压场特征分析[J]. 地震学报, 1980 2(1): 74—79.
- [10] 黎会议. 华北大地震气压场特征分析[J]. 西北地震学报, 1983, 5(3): 43—47.
- [11] 张昭栋, 郑金涵, 冯初刚. 气压对井水位的影响[J]. 地震, 1986, (1): 42—46.
- [12] 张昭栋, 郑金涵, 张广城, 等. 承压井水位对气压动态过程的响应[J]. 地球物理学报, 1989, 32(5): 539—549.
- [13] 耿庆国. 中国旱震关系研究[M]. 北京: 海洋出版社, 1985.
- [14] 张昭栋, 张学忠, 陈建民, 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, 19(2): 174—180.

THE LOAD/UNLOAD RESPONSE RATIO OF WATER LEVEL TO CHANGE OF AIR PRESURE

WEI Huan, ZHANG Zhao-dong, GENG Jie, WANG Zhong-min, YU Li-ye

(Seismological Bureau of Shandong Province, Jinan 250014, China)

Abstract: The theory and method of load/unload response ratio is led into the analysis for data of underground water level. Based on the air pressure effect to water level in confined well, taking the stochastic variety of air pressure over the earth's surface as load/unload force, the load/unload response ratio of water level to change of air pressure in water well is proved theoretically to be feasible, and the method is given. Using the method the load/unload response ratios of water level in Lu-14, Lu-15 well, Shandong Prov., before Cangshan M_s 5.3 earthquake in 1995 are calculated, and the characteristics of the response ratio change is analysed.

Key words: Underground water level; Load/unload response ratio; Air pressure; Earthquake prediction