

对气压、降雨等附加应力对井水位影响机理的理论分析*

罗奇峰

(国家地震局工程力学研究所)

摘 要

本文运用弹性力学中关于均布荷载下半无限大弹性空间的应力解,对气压效应、降雨效应等进行机理分析,改进了前人提出的气压系数、降雨系数的理论计算公式。通过计算从理论上说明气压系数、降雨系数不仅与含水层本身性质有关,还与气压变化范围、降雨面积大小、承压井含水层埋深有关,并证明了两系数之和为1。本文还以苏07井为例,分析计算了地表水体涨落对井水位的干扰,结果与他人用二元回归方法所得的结果基本相符。

一、引 言

气压、降雨、地表水体等附加于地表的荷载,对承压井水位动态存在影响,其中前二者的影响分别称之为气压效应^[1]、降雨效应^[2]。无疑,识别造成异常的机理,是提高地下水水位动态对地震的预报能力的一项不可忽视的基础工作。

1972年, J. Bear对气压效应进行过分析^[1],他定义承压井水位变化值与大气压力变化值之比为气压系数BE,并推得:

$$BE = \frac{n\beta_w}{n\beta_w + \beta_s} \quad (1)$$

其中, β_w 为含水层中液体的体积压缩系数, β_s 为含水层骨架的压缩系数, n 为含水层的孔隙率。

显然,由(1)式求得的气压系数仅与含水层本身性质有关,与含水层埋深、气压变化范围无关。但是,这与我国地震工作者在观测中揭示的一些现象不相符。近年来,人们发现了附加应力从地表向下衰减传播的现象^[2];承压井的气压效应除与含水层岩性、井的调节能力有关外,还表现出随含水层埋深的增加而增大的趋势;井孔的降雨效应不仅和降雨量密切相关,而且与降雨范围的大小有关。另外,在对降雨效应、地表水体对井水位干扰问题的

*本文是作者1986年硕士学位论文缩写稿。

讨论中, 尚未得出可行的、直接的计算公式。本文运用弹性力学中关于均布荷载下半无限大弹性空间的应力解, 对气压效应、降雨效应等进行机理分析, 对前人提出的气压系数、降雨系数的理论计算公式进行了改进。

二、附加应力影响机理分析

1. 附加应力的分布

如图 1 所示, 在均布荷载作用下, 半无限大弹性空间内的垂直向应力解为:

$$\begin{aligned} \sigma_z = \frac{p}{2\pi} & \left\{ \operatorname{arc\,tg} \frac{(X-A_1)(Y-B_1)}{Z[(X-A_1)^2+(Y-B_1)^2+Z^2]^{1/2}} \right. \\ & - \operatorname{arc\,tg} \frac{(X-A_1)(Y+B_1)}{Z[(X-A_1)^2+(Y+B_1)^2+Z^2]^{1/2}} \\ & - \operatorname{arc\,tg} \frac{(X+A_1)(Y-B_1)}{Z[(X+A_1)^2+(Y-B_1)^2+Z^2]^{1/2}} \\ & + \operatorname{arc\,tg} \frac{(X+A_1)(Y+B_1)}{Z[(X+A_1)^2+(Y+B_1)^2+Z^2]^{1/2}} \\ & + \frac{Z(X-A_1)(Y-B_1)[(X-A_1)^2+(Y-B_1)^2+2Z^2]}{[(X-A_1)^2+Z^2][(Y-B_1)^2+Z^2][(X-A_1)^2+(Y-B_1)^2+Z^2]^{1/2}} \\ & - \frac{Z(X-A_1)(Y+B_1)[(X-A_1)^2+(Y+B_1)^2+2Z^2]}{[(X-A_1)^2+Z^2][(Y+B_1)^2+Z^2][(X-A_1)^2+(Y+B_1)^2+Z^2]^{1/2}} \\ & - \frac{Z(X+A_1)(Y-B_1)[(X+A_1)^2+(Y-B_1)^2+2Z^2]}{[(X+A_1)^2+Z^2][(Y-B_1)^2+Z^2][(X+A_1)^2+(Y-B_1)^2+Z^2]^{1/2}} \\ & \left. + \frac{Z(X+A_1)(Y+B_1)[(X+A_1)^2+(Y+B_1)^2+2Z^2]}{[(X+A_1)^2+Z^2][(Y+B_1)^2+Z^2][(X+A_1)^2+(Y+B_1)^2+Z^2]^{1/2}} \right\} \quad (2) \end{aligned}$$

令 (2) 式中均布荷载 p 的系数为 k , 则

$$\sigma_z = kp \quad (3)$$

定义 k 为应力衰减因子, 或称之为应力系数, 它反映在单位均布荷载作用下, 地下某位置 M 的 Z 向应力与 M 点的深度 (Z)、水平位置 (X, Y) 和矩形均布荷载作用面积 (由矩形的边长之半 A_1, B_1 决定) 的函数关系。

计算表明, 在均布荷载作用下, 距荷载作用区域中心 140 m 范围内, 影响 M 点的 Z 向应力的主要因素是 M 点的埋深 Z 及均布荷载作用面积的大小 (见图 2、图 3)。

2. 气压效应的机理分析

如图 4 所示, 假设承压井的含水层在水平方向上为无限大, 含水层的上复岩层为弹性地质体, 井孔位于气压变化范围中心。令 X, Y 轴平行地面, Z 轴垂直于地面且向下为正, 坐标系原点位于地面井孔中心。当大气压强改变 Δp_a 时, 考虑附加应力的衰减分布, 则在含水层顶板上各应力增量间的平衡关系为:

$$k\Delta p_a = \Delta p + \Delta p_s \quad (4)$$

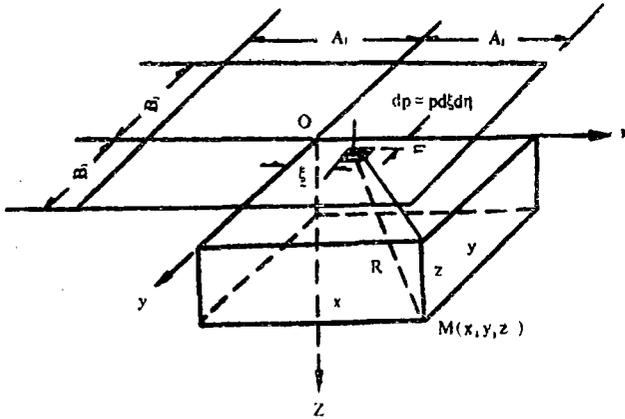


图 1 矩形均布荷载下地下应力
Fig. 1 Underground stress under homogeneous rectangular loading

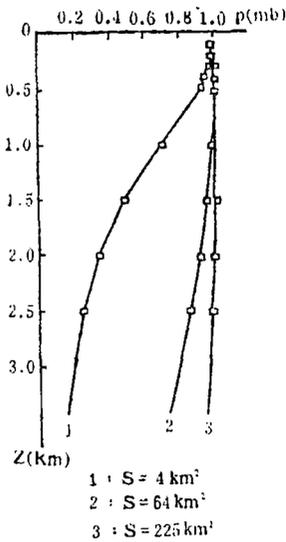


图 2 在 1 mb 矩形均布荷载作用下，地下 Z 向应力 P 与深度 Z 的关系

Fig. 2 Under 1mb rectangular homogeneous loading, the relation between Z direction stress p and the depth Z

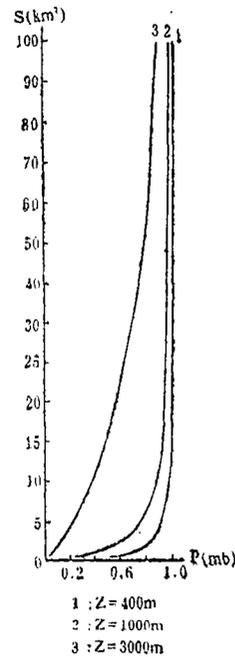


图 3 Z 向应力 P 与附加荷载作用面积的关系
Fig. 1 The relation between the Z direction stress P and the additional loading area S

其中的 Δp 为孔隙水承受的压力增量， Δp_s 为含水层骨架承受的压力增量， k 为前已定义的应力系数。

在井孔内有：

$$\Delta p = \Delta p_s + r\Delta H \tag{5}$$

定义承压井水位的变化值与大气压强的变化值（用水柱高度 $\frac{\Delta p_s}{r}$ 表示， r 为水的比重）之

比为该井的气压系数 BE ，则由（4）、（5）式和关系式 $\frac{\Delta p}{\Delta p_s} = \frac{\beta_s}{n\beta_w}$ (8)，可推得：

$$BE = 1 - \frac{k\beta_s}{\beta_s + n\beta_w} \tag{6}$$

如定义气压系数为大气压强变化 1 毫巴引起的承压井水位变化的毫米数, 则有:

$$BE = 10 \left(1 - \frac{k\beta_s}{\beta_s + n\beta_w} \right) \quad (7)$$

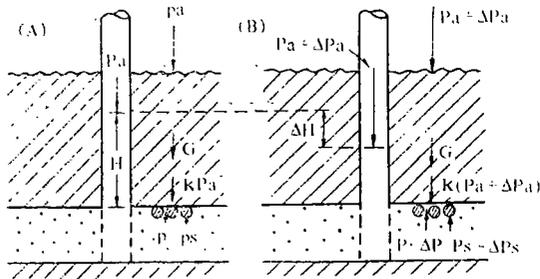


图 4 气压效应示意图

Fig. 4 Sketch for air pressure effect

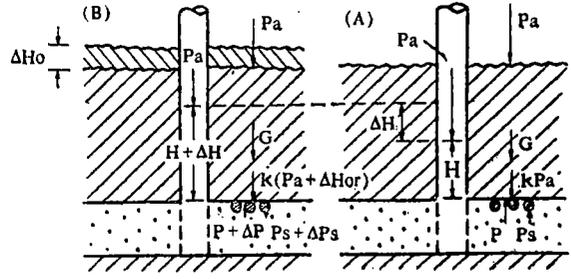


图 5 降雨效应示意图

Fig. 5 Sketch for rain effect

3. 降雨效应的机理分析

如图 5 所示, 设承压井孔位于降雨区域中心, ΔH_0 为降雨量, 则由于降雨负荷 $\Delta H_0 r$ 引起的在含水层顶板上的各应力增量间的平均关系为

$$K\Delta H_0 r = \Delta p + \Delta p_s \quad (8)$$

在井孔内有

$$\Delta H = \Delta p / r \quad (9)$$

定义单位降雨量 (毫米数) 引起的承压井水位变化值 (毫米数) 为承压井的降雨系数 RE, 则可推得:

$$RE = \frac{k\beta_s}{\beta_s + n\beta_w} \quad (10)$$

若将 RE 的单位变化成 mm/mb, (10) 式应写为:

$$RE = \frac{10k\beta_s}{\beta_s + n\beta_w} \quad (11)$$

对照 (6)、(10) 式或 (7)、(11) 式, 可得:

$$BE + RE = \left(1 - \frac{k\beta_s}{\beta_s + n\beta_w} \right) + \frac{k\beta_s}{\beta_s + n\beta_w} = 1 \text{ (mm/mm)} \quad (12)$$

$$\text{或 } BE + RE = 10 \text{ mm/mb} \quad (13)$$

根据文献〔2〕提供的数据, 我们计算了江苏、安徽部分深井的降雨系数, 表 1 给出了计算的理论值 (表中符号为 E) 与实际观测值 (表中的 C 项), 它们的差 (表中的 F 项) 相差不多。

对 (7) 和 (11) 式的分析与计算表明, 气压系数、降雨系数除与含水层本身性质有关外, 还与含水层埋深、附加应力作用范围有关 (见图 6), 这是与 J. Bear 分析不同之处。在图 6 中, BE_1 、 RE_1 是取孔隙率 n 为 0.1 得出的计算结果, BE_2 、 RE_2 是取 n 为 0.01 的计算结果。

表 1 江苏、安徽部分深井水位降雨效应一览表

井号及位置	项 目	符 号						
			A	B		C	D	E
井 号	地 点	异常幅度 (mm)	梅雨总量 (mm)	持续时间 (年、月、日)	A/B (mm/mb)	气压系数 (mm/mb)	10-BE (mm/mb)	C-E (mm/mb)
苏73井	江苏泰县	130	250	1980.6.23~29	5.2	5.4	4.6	0.6
苏73井	江苏泰县	85	200	1980.7.9~20	4.25	5.4	4.6	-0.35
苏73井	江苏泰县	64	140	1981.10.3~8	4.57	5.4	4.6	-0.03
戴参1井	江苏兴化	60	180	1980.6.23~29	3.33	6.8	3.2	0.13
戴参1井	江苏兴化	50	150	1981.6.23~29	3.33	6.8	3.2	0.13
刘4井	江苏金湖	80	225	1981.6.25~27	3.56	6.2	3.8	-0.14
天深19井	安徽天长	250	280	1980.6.9~27	8.93	1.7	8.3	0.63
天深19井	安徽天长	110	130	1981.6.22~26	8.46	1.7	8.3	0.16

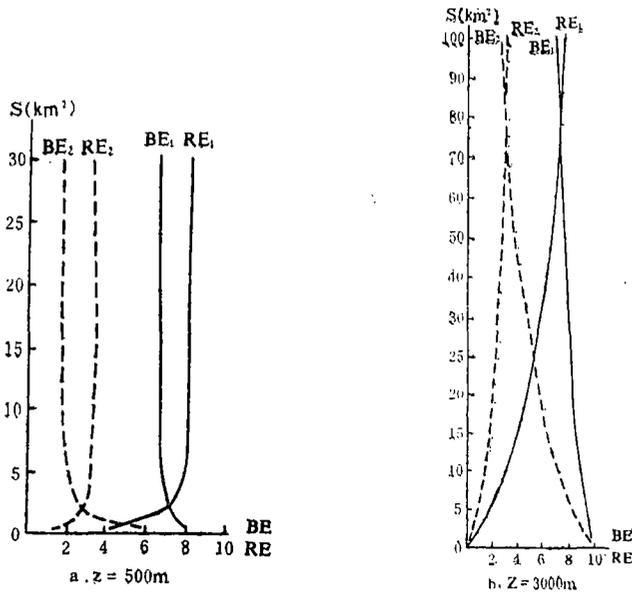


图 6 气压系数 (BE)、降雨系数 (RE) 与附加荷载面积的关系
 Fig. 6 The relation between the air pressure coefficient (BE), rain coefficient (RE) and the additional loading area S

三、地表水体对附近井水位的影响

有些承压井位于地表水体附近，当地表水体的水位发生变化时，观测井水位会发生变化，推得它们之间的关系：

$$\frac{\Delta H}{\Delta W} = \frac{100k\beta_s}{\beta_s + n\beta_w} \quad (14)$$

其中, ΔH 为井水位的变化量, 单位为cm, ΔW 为地表水体的变化量, 单位为m。

江苏金湖县境内的苏07井, 其西面为宽达3 km的入江水道, 东面、南面为高邮湖。文献〔4〕曾对苏07井水位、高邮湖水位、入江水道水位资料进行回归分析, 求得相关系数为0.976的回归关系为

$$\widehat{\Delta y} = -5.617\widehat{\Delta x_1} - 0.592\widehat{\Delta x_2} \quad (15)$$

式中, $\widehat{\Delta y}$ 为井水位埋深的变化量, 单位为cm; $\widehat{\Delta x_1}$ 为入江水道水位变化量, 单位为m; $\widehat{\Delta x_2}$ 为高邮湖水位变化量, 单位为m。

根据文献〔5〕, 含水层埋深取1550~1580m, 孔隙率取0.1~0.3, 井孔离入江水道距离取0.6~1 km, 离高邮湖距离取4~6 km, 利用(14)式, 求方程

$$\Delta y = -a\Delta x_1 - b\Delta x_2$$

中的a、b值。其中 Δx_1 、 Δx_2 、 Δy 的意义、单位与(15)式相同。计算结果a为2.5—8.8, b为0.2—0.7。特别是当取 $n = 0.19$, 含水层埋深取1550m, 井离入江水道0.6km, 离高邮湖4 km时, 算得

$$\Delta y = -5.77\Delta x_1 - 0.42\Delta x_2 \quad (16)$$

比较(15)与(16)式, 二者相差较小。

四、结 论

1. 本文运用均布荷载下半无限大弹性空间的应力解, 引入应力系数k, 对气压效应、降雨效应进行机理分析, 得出承压井的气压系数、降雨系数不仅与含水层本身性质有关, 而且与含水层埋深、附加应力作用范围有关的结论, 这与近年来对观测资料的研究结果比较相符。

2. 本文从机理分析入手, 给出了降雨系数计算公式, 证明了气压系数与降雨系数之和为1(若取单位为mm/mb, 则为10)。理论计算与通常算法结果比较相符, 这对于认识降雨效应的机理, 估计承压井降雨系数的大小, 排除负荷带来的对地下水前兆信息的干扰是有益的。

3. 本文给出了地表水体涨落对附近承压井水位影响的计算公式, 并以苏07井为例进行了计算, 结果与文献〔4〕用二元回归方法计算结果基本相符, 说明本文所用思路、方法是可行的, 求得的理论公式是有实际意义的。

由于井水位动态、干扰因素、干扰机理的复杂性, 本文的讨论是初步的, 有些问题尚待深入研究。

本文是在陕西省地震局李永善研究员指导下完成的, 工作中得到刘快胜、黄祖彭二位老师的帮助, 并承蒙刘慈群、秦保燕老师提出宝贵意见, 作者在此一并表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 〔1〕J. Bear, 多孔介质流体力学, 李竞生、陈崇希译, 中国建筑工业出版社, 1983.
- 〔2〕李起彤, 深井水位异常的暴雨荷载效应问题, 地震, №1, 1982.
- 〔3〕陈崇希, 地下水不稳定井流计算方法, 地质出版社, 1983.
- 〔4〕王兆昭等, 塔二井水位干扰因素的分析与排除, 地震, №5, 1982.
- 〔5〕国家地震局, 地下水动态资料汇编, 地震出版社, 1986.

A THEORETICAL ANALYSIS OF MECHANISM OF
DISTURBANCE OF WELL-WATER LEVEL CAUSED BY
ADDITIONAL STRESS FROM AIR PRESSURE
AND RAIN FALL

Luo Qifeng

(*Institute of Engineering Mechanics, State
Seismological Bureau*)

Abstract

The additional stress which is caused either by air pressure and rain fall (The phenomena are defined as air pressure effect and rain effect respectively), or by rise and fall of surface water (such as river, lake etc.) can disturb water level of pressure well. In this paper, the solution of elastic half-space is used to analyse the pressure effect and rain effect. The pressure coefficient by J. Bear is modified and meanwhile the rain coefficient is proposed. Through calculation, we find that air pressure coefficient and rain coefficient are related not only to the behavior of aquifer, but also to the range of pressure variation, area of raining and the depth of pressure aquifer. Some facts of observation have been proposed that the sum of the two coefficients equals unity which is also proved in this paper. Taking Su-07 well as an example, we analyse the disturbance caused by rise and fall of the surface water, and the results of calculation is nearly keeping with the results which are got from the calculation of regression analysis.