

一种测求水井含水层导水系数的新方法

张昭栋¹⁾ 郑香媛²⁾

殷积涛²⁾ 张教祥¹⁾

提要 本文给出了一种测求水井含水层导水系数的新方法。利用 Cooper 理论和振动理论,通过简单的试验,可以测求出水井含水层的导水系数。用这种方法计算出珍珠泉水井含水层的导水系数为 $2439\text{m}^2/\text{d}$,用抽水试验法测得该系数为 $2618\text{m}^2/\text{d}$,两者符合得较好。

关键词: 导水系数 Cooper理论 振动理论 水井含水层

一、前言

要从深井水位观测资料中提取孕震信息,就必须把深井水位变化特点分析清楚,这就需要搞清水井含水层的渗流特性参数。以前水文地质工作者是通过现场抽水试验来测求含水层的导水系数,这种试验需要抽水试验设备,花费较大的人力物力。后来人们研究其它途径来测求含水层的导水系数。1969年P. A. Carr等提出利用井水位的固体潮效应和气压效应来确定水井含水层的渗流参数^[1]。这种方法比抽水试验花费要少一些,但是必须对井水位进行连续的长期的潮汐观测^[2],而且要同时对地面气压进行连续的长期观测^[3]。

本文给出一种测求水井含水层导水系数的新方法,利用一种较简单的装置激起井水位振荡,同时用压力传感式水位仪记录水位的变化,从井水位振荡曲线计算出水井含水层的导水系数。整个试验只有几分钟可以完成,设备简单,经济迅速,便于推广。而且由于不用抽水与注水,不影响水井水位的动态变化。尤其对于连续观测的井孔,测试期间只中断几分钟,不影响整点时值的观测数据。

我们在济南珍珠泉水井进行了上述试验,计算出该井含水层的导水系数为 $2439\text{m}^2/\text{d}$,该井曾由水文地质部门做过抽水试验,测得其含水层的导水系数为 $2618\text{m}^2/\text{d}$ 。可见两种方法的结果基本符合。

二、济南珍珠泉井概况

济南珍珠泉井位于济南市中心区的大明湖附近,就在珍珠泉边。就地质情况来看,该井地处鲁中山区北缘。其南以古生代寒武系—奥陶系灰岩及前震旦系片麻岩为主,组成海拔

1) 山东省地震局, 济南;

2) 国家地震局分析预报中心, 北京;

• 地震科学联合基金资助的课题的部分成果。

300—700米的山区，其北为黄河冲积平原，以第四系亚砂土、粘土和粉细砂为主，下伏新生代第三系砂砾岩。地形南高北低，地下水自南向北流。由于受济南市北的中生代闪长岩所阻挡，因此灰岩裂隙岩溶水呈上升泉排泄，经小清河流进渤海湾。

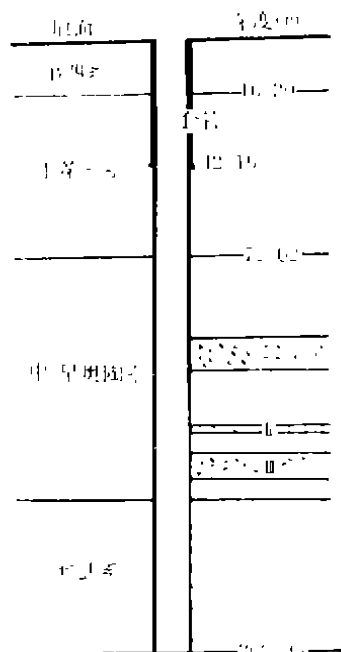


图1 珍珠泉井柱状简图

Fig. 1 Sketch of the well in Pearl Spring

I. 第一含水层 (99.40—108.08米); II. 第二含水层 (126.7—127.9米); III. 第三含水层 (136.26—145.1米)

在珍珠泉水井上试验时，先把压力传感探头放入井孔水面以下2—3m，再把激起水柱振荡的圆柱形的装置放入井孔水面以下，等水位恢复平衡后迅速拉起，激起井内水柱发生振荡。由于圆柱形的装置突然从水中拉起后，相当于在井孔内突然取出一段水柱，使井孔内水柱产生的压力与含水层内的压力失去了平衡，也就是水井含水层系统的水头压力离开了原来的平衡位置，导致水井含水层系统的水产生了固有振荡运动。

压力传感探头将振荡的信号传给放大器，放大器再把信号通过CE—158接口传给PC—1500微

济南珍珠泉水井井深200.96米，套管下至42.16米，套管以下到井底都是裸孔。该井的含水层在71.02米与200.96米之间，其下部为寒武系条带状灰岩和白云质灰岩，岩溶相当发育，其上部为早期和中期奥陶系大理岩，溶洞也相当发育。含水层主要有三层，富水性强，渗流良好的溶蚀层，总厚度为19.22米。含水层的上覆层为第四系粘土和下第三系闪长岩，底托层为寒武系白云质灰岩 (图1)。

珍珠泉水井在钻孔过程中发现有溶洞和岩溶其他现象。经抽水试验测得该水井含水层的渗透系数达到136.233m/d。这样大的渗透系数在一般水井含水层是少见的，可见该井的渗透性能是相当强的。

三、在珍珠泉井试验情况

我们的试验设备主要由两大部分组成，一部分是激起井水柱振荡的“SLUG”试验装置，另一部分是井水位振动的记录装置。后一部分是由压力传感探头和记录仪组成，压力传感探头的分辨率为0.1mv，相当于水位变化0.4mm。

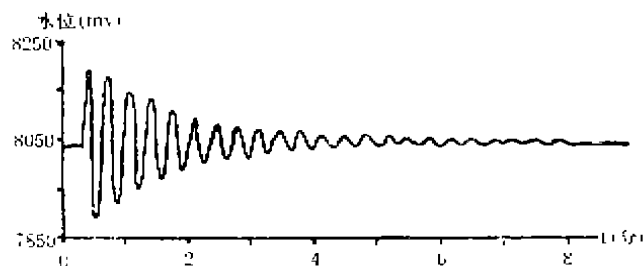


图2 珍珠泉井试验曲线

Fig. 2 The experimental curve of the well in Pearl Spring

机。微机依照程序把水位振荡数据录入磁带，接着将试验曲线画出图来（图2）。

本试验的进行是非常快的，在珍珠泉水井上进行一次试验也只有十几分钟。

四、理论分析

考虑一个不加封、不流动的承压井，在均匀的各向同性的含水层顶板以上，一直用套管封到井口，含水层完全揭露并且用滤水管作护壁。含水层及其上下的隔水层产状水平，并沿水平方向向四周无穷延伸。对于这样一个水井含水层系统对外界波动干扰的响应满足下列运动方程^{〔4〕}

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{r_w^2 g}{2TH_e} \text{Ker}\alpha_w \frac{dx}{dt} + \frac{g}{H_e} \left(1 - \frac{r_w^2 \omega}{2T} \text{Kei}\alpha_w \right) x = \frac{p_0}{gH_e} \sin(\omega t - \eta) \quad (1)$$

若令

$$\omega_w^2 = \frac{g}{H_e} \left(1 - \frac{r_w^2 \omega}{2T} \text{Kei}\alpha_w \right) \quad (2)$$

$$\beta = \frac{r_w^2 g}{4\omega_w TH_e} \text{Ker}\alpha_w \quad (3)$$

则运动方程可变成

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta\omega_w \frac{dx}{dt} + \omega_w^2 x = \frac{p_0}{gH_e} \sin(\omega t - \eta) \quad (4)$$

其中 x 为井孔中水位的位移（向上为正）， t 为时间， r_w 为井管的内半径， g 为地面附近的重力加速度常数， T 为含水层的导水系数， ω 为外界干扰的振动角频率， p_0 为外界干扰的压力振动振幅， η 为位相角， H_e 为水井的有效水柱高度， Ker 和 Kei 分别为开尔文函数的实部和虚部，而开尔文函数中的 α_w 由下式决定

$$\alpha_w = r_w \sqrt{-\frac{\omega S}{T}} \quad (5)$$

其中 S 为含水层的存贮系数。

由振动理论可知，做阻尼强迫振动的力学系统的运动方程为^{〔5〕}

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2n \frac{dx}{dt} + k^2 x = P(t) \quad (6)$$

其中 n 为振动运动的阻尼系数， k 是振动系统的固有振动角频率， $P(t)$ 为单位质量受到的干扰力。就珍珠泉水井的这次试验情况来说，在 $t > 0$ 时干扰力 $P(t) = 0$ 。因此，方程（6）就变成了单自由度的阻尼固有振动

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2n \frac{dx}{dt} + k^2 x = 0 \quad t > 0 \quad (7)$$

从图 2 可以清楚地看出, 珍珠泉井水位这次试验记录的水位固有振动是属于 $n < k$ 情况下的小阻尼固有振动运动。由方程 (7) 可以得到它的解为

$$x = A e^{-nt} \sin(\sqrt{k^2 - n^2} t + \varphi) \quad (8)$$

其中振幅 A 由下式决定

$$A^2 = \dot{x}_0^2 + \frac{(x_0 + n \dot{x}_0)^2}{k^2 - n^2} \quad (9)$$

其中 x_0 为井水位振动的初位移, \dot{x}_0 为井水位振动的初速度。式 (8) 中的位相 φ 由下式决定

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x_0 \sqrt{k^2 - n^2}}{\dot{x}_0 + n x_0} \quad (10)$$

由小阻尼固有振动的理论还可以得到, 第一个振动周期 τ_1 和振动的固有角频率及阻尼系数有如下关系

$$\tau_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{k^2 - n^2}} \quad (11)$$

由振动方程的解式 (8) 可知, 振动运动的振幅是按时间的指数规律逐渐衰减, 由前两次相邻振动的振幅比可得

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{A e^{-n(t_1)}}{A e^{-n(t_1 + \tau_1)}} = e^{n\tau_1} \quad (12)$$

从式 (11) 和 (12) 可以得出水井含水层系统振动的固有角频率 k 和阻尼系数 n 。再把方程 (4) 与 (6) 比较可得

$$n = \beta \omega_w \quad (13)$$

而

$$k^2 = \omega_w^2 \quad (14)$$

从而可以求出

$$\beta = \frac{n}{k} \quad (15)$$

把以上结果代入式 (2) 和 (3), 结合开尔文函数的性质, 对其进行数值运算, 最后可以计算出含水层的导水系数 T 来。

五、珍珠泉井的计算结果

利用上述理论对珍珠泉井的试验进行计算。从图 2 的试验曲线中, 得出第一个振动周期 $\tau_1 = 20.4s$, 前两次相邻振动的振幅比为 1.24, 由式 (11) 和 (12) 可以解出振动系统的阻尼系数为 $n = 0.0105 (s^{-1})$, 系统的固有振动角频率 $k^2 = 0.095 (s^{-2})$ 。

由珍珠泉井含水层的已知条件:井水柱高度 $H=96.4\text{m}$,水位埋深 3m ,含水层等效厚度 45.7m ,井管内半径 $r_w=0.1524\text{m}$ 。地面的重力加速度常数 $g=9.81\text{m/s}^2$,角频率 $\omega=0.308\text{s}^{-1}$ 。再结合开尔文函数的性质,则可以从上述理论计算出珍珠泉井含水层的导水系数 $T=0.0282\text{m}^2/\text{s}$,即 $2439\text{m}^2/\text{d}$ 。

从珍珠泉井孔结构地层柱状简图可知,含水层主要有三层,第一层埋深 $99.40\sim 108.08\text{m}$,是溶洞发育富水性强的大理岩,第二层埋深 $126.7\sim 127.9\text{m}$,是溶蚀较好的大理岩,第三层埋深 $136.26\sim 145.1\text{m}$,是岩溶发育富水性强的灰岩。因此,计算含水层的导水系数用的含水层厚度应当与计算振动的水井有效水柱高度用的含水层等效厚度不同,对于前者含水层厚度只能取三层含水层的总厚度 19.22m 。这样可以得出本试验测出的珍珠泉井含水层的渗透系数也就是 126.9m/d 。

$$K = \frac{T}{d} = 1.467 \times 10^{-3} (\text{m/s})$$

珍珠泉井含水层的渗透系数是比较大的。水文部门曾在该井做过抽水试验,测得其含水层的渗透系数为 136.233m/d 。本文试验得到的渗透系数和抽水试验得到的符合得较好,两者相差不到 8% 。可见本文的方法是可行的。

六、讨 论

(1) 本文给出的测求水井含水层导水系数的新方法比抽水试验法有两点优点。首先,本文的方法试验设备简单,化费的人力、物力少,而且试验时间非常短,只需几分钟,所以它比抽水试验经济、迅速、易于推广。其次,本文的试验没有改变水井含水层原有的水容量,不需要中断井水位的连续自记,从而保持了水井含水层原有的性质和井水位观测数据连续性。即使是在用浮标水位观测的井上测试,也只需中断几分钟,不影响整点时值的观测。

(2) 珍珠泉井含水层的条件,基本上满足方程(1)的要求。方程(1)要求含水层为水平层状承压含水层,珍珠泉井含水层产状基本水平,含水层总厚度不足 20m ,比起含水层的面积的平方根小得多;方程(1)还要求水井为完整井,并且含水层处的滤水管阻力可以忽略。珍珠泉井含水层已完全揭露,整个含水层部分不用滤水管,全部为裸孔,所以含水层与井孔直接连通,不存在滤水管的阻力问题;方程(1)要求水井为承压井,珍珠泉井是一口比较好的承压井,其止水条件良好。

(3) 本文给出的试验方法不仅可以计算出水井含水层的渗透性能参数,即含水层的导水系数,而且还可以计算出水井含水层的频率响应特性参数。例如,水井含水层系统的固有振动频率及井水柱振动的阻尼系数。这两个参数对于分析水井含水层系统对地震波的响应起重要作用。珍珠泉井含水层的固有振动角频率 $k^2=0.095\text{s}^{-2}$,阻尼系数为 0.0105s^{-1} 。这个角频率转换为周期约为 20s ,这正巧是地震波中面波瑞雷波发育的周期。由振动响应理论可知,外来干扰周期与系统的固有周期相近时,将激起系统产生最大的响应幅度。再加上珍珠泉井含水层的阻尼系数较小,所以珍珠泉井水位对地震波的响应非常好。观测表明,珍珠泉井对地震波的响应比有名的济南话剧团水井还好。我们统计了1984年的29次6级以上的地震,珍珠泉井都有明显的反映,最大一次水位振幅超过 101.4cm (井水冲出井口落到地面上

了)。就这29次的统计,珍珠泉井响应的幅度为济南话剧团井的4倍左右^[1],而济南话剧团井水的响应幅度比洼里井的大^[6]。可见珍珠泉井含水层对地震波的响应幅度是最大的。

(4)从前面的理论分析可以看出,水井含水层系统的导水系数与井水振动的阻尼系数有关,含水层的导水系数越大,则振动的阻尼系数就越小。珍珠泉井含水层岩溶发育、富水性强,并且局部出现溶洞,所以含水层的渗流性能良好,导水系数很大,也正由于含水层的渗流性能良好,所以对水的运动阻力较小,因此对振动的阻尼系数较小。

(5)本文讨论的是井水位小阻尼固有振动情况,即 $n < k$ 的条件下。我们在其它水井上做本文的试验时,也出现过阻尼与临界阻尼的情况,即 $n \geq k$ 的条件下。这时井水位不再出现在平衡位置上下来回振动,而是渐渐回到平衡位置。这种情况下也可以从试验曲线中求出含水层的导水系数,只是计算方法的原理与本文讨论的不同。读者有兴趣可查阅文献^[7]。

七、结 论

(1)用Cooper理论结合振动理论,通过本文简单的试验,可以测求出水井含水层的导水系数。用这种方法测求出珍珠泉井含水层的导水系数为 $2439\text{m}^2/\text{d}$,用抽水试验法测得该系数为 $2618\text{m}^2/\text{d}$,两者非常相近,相差不到8%。

(2)本文给出的方法比抽水试验法经济、迅速、设备简单、易于推广,并且保持含水层水的容量不变,不中断井水位的连续观测。

(3)本文试验不仅能测求出含水层的渗流特性参数,而且可以测求出水井含水层的频率响应特性参数,即水井含水层的固有振动角频率和阻尼系数。珍珠泉井的这两个参数分别为 $k^2=0.095\text{ s}^{-2}$, $n=0.0105\text{ s}^{-1}$ 。

(4)由于珍珠泉井含水层的导水系数大,对水振动的阻尼系数小,而且其固有振动的周期正好是地震波瑞雷波发育的周期,所以珍珠泉井含水层对地震波响应的幅度特别大。

感谢济南市地震办公室和山东省地质矿产局水文总站为我们提供了珍珠泉井含水层的有关资料并协助我们进行试验。

参 考 文 献

- [1] G. H. Rhoads and E. S. Robinson, Determination of aquifer Parameters from well tides, J. G. R., 84, 6071—6082, 1979.
- [2] 张昭栋等著,地下水潮汐分析,山东大学出版社,1988.
- [3] 张昭栋,郑金涵、张广城,靖社才,承压井水位对气压动态过程的响应,地球物理学报, Vol 32, No. 5, P 539—549, 1989.
- [4] H. H. Cooper, et al., The response of well-aquifer systems to seismic waves, J. G. R., 70, 16, 3915—3926, 1965.
- [5] W. T. 汤姆逊著,胡宗武等译,振动理论及其应用,煤炭工业出版社, P 14—74, 1981.
- [6] 陈正品等,山东井水振荡特征与地震关系初步研究,地震研究,第3期,1987.
- [7] 张昭栋等,鲁29井重锤试验的解释,华南地质,第9卷第1期,1989.

1) 张昭栋等,水井的频率特性与对震波的响应,中国地震(待发表)

A NEW METHOD OF DETERMINATION OF TRANSMISSIBILITY IN WELL AQUIFER •

Zhang Zhaodong¹⁾ Zheng Xiangyuan²⁾

Yen Jitao¹⁾ Zhang Jiaoxiang¹⁾

[Abstract] A new method of determination of the transmissibility in a well aquifer is described in this paper. By using the Cooper's and the vibration theory and through a simple test, the transmissibility in a well aquifer can be determined. For example, in the well of Pearl Spring, it is calculated as 2439 m²/day, which tallies with the one determined by the pumping test, 2618 m²/day.

Key words, Transmissibility; The Cooper's theory; Vibration theory;
Well aquifer.

1) Seismological Bureau of Shandong Province, Jinan;

2) Centre for Analysis and Prediction, S S B, Beijing;

• Projects Sponsored by the Joint Earthquake Science Foundation.