

研究简报

水井的频率特性试验和对地震波的响应^{*}

张昭栋¹⁾ 迟镇乐²⁾ 陈会民²⁾ 栾金玉²⁾

1) 中国济南 250014 山东省地震局

2) 中国山东烟台 264000 烟台市地震局

关键词 水井 SLUG 试验 频率特性 渗流特性 响应

前人用 SLUG(殷积涛, 郑香媛, 1992)试验, 根据渗流理论, 由井水位的恢复曲线, 计算水井含水层的渗透系数. 我们在做 SLUG 试验时, 对井水位的振荡产生兴趣, 根据振动理论, 由井水位的振荡曲线, 不但计算了水井含水层的渗透系数, 而且计算出水井含水层的频率参数: 固有周期和阻尼系数. 这不仅给出了一种新方法, 而且用它可以从理论上解释井水位对地震波响应的不同.

1 SLUG 试验理论

对于一个理想的水井含水层系统, 当含水层受到的扰动压力为 $P_0 \sin(\omega t - \eta)$ 时, 井水位产生的运动方程为(Cooper, Robison, 1965)

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2 \beta \omega_w \frac{dx}{dt} + \omega_w^2 x = \frac{P_0}{g H_e} \sin(\omega t - \eta) \quad (1)$$

式中, P_0 为含水层受到压力的振幅, ω 为压力的波动角频率, η 为井水位相对于扰动的位相角, t 为时间, x 为井孔内水位的位移, g 为重力加速度常数, H_e 为井孔内水柱的有效高度.

由振动理论可知, 受到带有阻尼强迫运动的微分方程为

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

式中, n 为系统的阻尼系数, k_w 为振动角频率, $P(t)$ 为单位质量所受的干扰力.

在 SLUG 试验中, 激起井水位振荡后, 干扰力立即停止作用, 即当 $t > 0$ 时, $P(t) = 0$. 因此, 方程(2)就变成了单自由度的阻尼固有振动. 解此振动方程可得

$$x = A e^{-nt} \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

式中

$$A^2 = x_0^2 + (v_0 + n x_0)^2 / (k^2 - n^2)$$

$$\varphi = \arctan [x_0 c / (v_0 + n x_0)]$$

$$c^2 = k^2 - n^2$$

其中, x_0 为振动的初位移, v_0 为振动的初速度.

由公式(3)可以看出, 这种单自由度的阻尼固有振动是一个振幅逐渐衰减的振动. 由于阻尼作用, 振动的周期也渐渐加长. 严格说这种阻尼振动的周期是不存在的. 我们可以根据试验曲线, 测得振动由平衡位置经过一次振动后, 再回到平衡位置所经历的时间, 把它作为第 1 个准周期. 根据振动理论可知, 振

^{*} 1998-09-29 收到初稿, 1999-01-19 收到修改稿并决定采用.

动的角频率与第 1 个准周期有如下的关系：

$$k^2 = 4 \pi^2 / \tau_1^2 + n^2 \tag{4}$$

其中， τ_1 为振动的第 1 个准周期。由公式(3)可知，两次相邻的振幅之比为

$$\delta = A_i / A_{i+1} = e^{\pi \eta} \tag{5}$$

从试验曲线中可以量得 A_i 和 A_{i+1} 的值，还可以找出振动的第 1 个准周期。这样，我们可从式(5)得出系统的阻尼系数。把阻尼系数代入式(4)，就可以求出系统振动的角频率，则水井含水层系统的两个频率参数就可以求出来了。

2 试验结果

在山东省选择 4 口有代表性的水井(栖霞井、济南井、禹城井和聊城井)，先后进行了 SLUG 试验，得到了试验曲线(图 1)和水井含水层的频率特性及渗流特性参数。

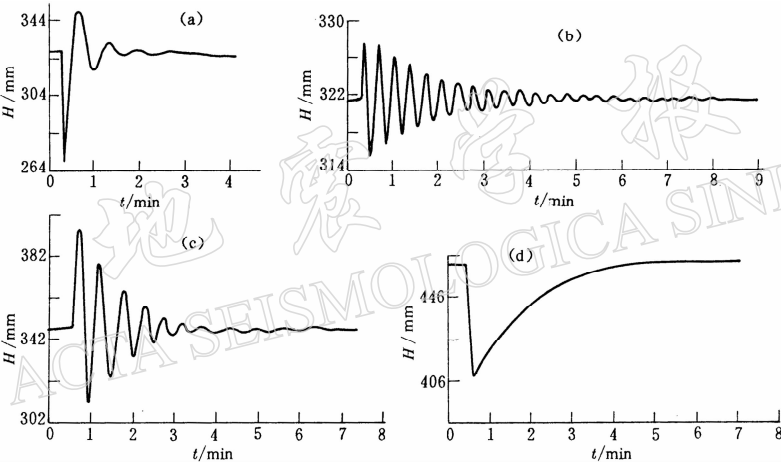


图 1 SLUG 试验曲线
(a) 禹城井；(b) 济南井；(c) 栖霞井；(d) 聊城井

3 水井含水层与地震波响应的内在联系

3.1 水井含水层对地震波的响应

水井含水层像一个长周期的地震仪，对地震波有一定程度的响应，尤其是对地震波的面波响应较好。研究表明，水井含水层对地震波的响应主要是瑞利波，因为水井含水层的固有振动周期在 20 s 左右，与地震波瑞利波的振动周期相当。济南井、栖霞井、禹城井和聊城井对地震波的响应情况不同：济南井有 98 次，栖霞井有 21 次，禹城井有 7 次，聊城井 1 次也没有。

3.2 水井含水层与地震波响应的内在联系

水井含水层对地震波的响应取决于多方面的因素(张昭栋等, 1988)。由振动理论可知，一个系统对于振动的响应，主要取决于系统的固有振动周期和振动的阻尼系数两个参数。水井含水层对地震波的响应主要是瑞利波，而瑞利波的振动周期在 20 s 左右，所以，水井含水层系统的固有振动周期越是接近 20 s，它对地震波的响应越好。另一方面，水井含水层振动的阻尼系数越小，系统对井水位振动的阻力就越小，它对地震波的响应也越好。

表 1 列出了 4 口井的频率特性和渗流特性。由表 1 可见，济南井的固有振动周期最接近 20 s，其振动的阻尼系数最小，所以对地震波的响应最好，响应次数也最多。栖霞井的固有振动周期和振动的阻尼系

数在济南井和禹城井之间，所以，栖霞井对地震波的响应也在济南井和禹城井之间。聊城井在 SLUG 试验时，井水位没有发生振荡，而是产生了一次阻尼运动。这是由于该水井含水层的渗透系数较小，对水振动的阻尼过大，一般地震波激不起其井水位振荡，因此它没有记到一次地震波。

表 1 4 口水井含水层的频率特性和渗流特性

水井名称	固有周期 /s	阻尼系数 /s ⁻¹	导水系数 /m ² ·s ⁻¹	记震次数
济南井	20.0	0.011	0.028	98
栖霞井	34.2	0.028	0.012	21
禹城井	40.59	0.036 2	1.8×10 ⁻³	7
聊城井			1.25×10 ⁻⁵	0

4 结论

- (1) 水井含水层像一台长周期的地震仪，对地震波有一定程度的响应，尤其是对地震波的面波响应较好。
- (2) 水井含水层系统对地震波的响应主要取决于水井含水层系统的固有振动周期和振动的阻尼系数。固有振动周期越是接近地震波瑞利波的振动周期(20 s)，振动的阻尼系数越小，它对地震波的响应越好。
- (3) 水井含水层系统的渗流特性越好，导水系数越大，对水振动的阻尼系数就越小，从而对地震波的响应也越好。
- (4) 根据振动理论，由井水位的振荡曲线，不但计算了水井含水层的渗透系数，而且计算出水井含水层的频率参数：固有周期和阻尼系数。这不仅给出了一种新方法，而且，用它可以从理论上解释井水位对地震波响应的差异。

参 考 文 献

殷积涛, 郑香媛. 1992. 用重锤试验求承压含水层的水文地质参数. 中国地震, 8(4): 68~75

张昭栋, 郑金涵, 张广城. 1988. 水位观测系统和水井含水层系统对固体潮和地震波的响应. 地震学报, 10(2): 171~182

Cooper H H, Robinson E S. 1979. Determination of aquifer parameters from well tides. J Geophys Res, 84(B11): 6 071~6 082