

低渗透性含水层水文地质参数确定方法及其应用

黄 勇 ,周志芳 ,王锦国

(河海大学土木工程学院 ,江苏 南京 210098)

摘要 :基于低渗透性含水层的微水试验 ,提出了利用试验资料计算含水层水文地质参数的解析方法 ,推导了其解析表达式 .该解析方法既考虑了水位降深和时间等参数 ,也考虑了将抽水量作为计算参数的已知量 .用该方法确定含水层的水文地质参数 ,比用微水试验的配线法和水位恢复法具有更好的适用性 .以某电厂地基抽水试验为例 ,用该解析法计算其含水层的水文地质参数 ,计算结果比较合理 .

关键词 :微水试验 ;低渗透性含水层 ;水文地质参数

中图分类号 :P641 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2006)06-0672-04

含水层水文地质参数确定方法主要有配线法、Jacob 直线图解法和水位恢复法等^[1-2] ,这些方法一般要求抽水时间比较长 .对于抽水时间比较短、水位恢复时间较长的抽水试验 ,可以应用微水试验法来求解参数^[3-4] .微水试验法是在 $t = 0$ 时刻 ,点 (x_0 ,y_0) 处有一个作用强度为 $Q(t)$ 作用时段很短的抽或注水井 ,通过观测井水位变化情况 ,来求得井附近含水层渗透参数的方法 .对于渗透性较高的含水层 ,瞬时向井抽或注一定流量水后 ,井中水位很快恢复到初始水位 ,因此不易观测井中水位降深随时间的变化 ;对于低渗透性含水层 ,瞬时向井抽或注一定流量水后 ,能够很好地观测到井中水位降深随时间的变化规律 ,从而求得含水层水文地质参数 .本文针对低渗透性含水层提出确定其水文地质参数的方法 .

1 水文地质参数确定方法

本文提出的水文地质参数确定方法是解析法 ,为了便于比较 ,对目前常用的微水试验配线法和水位恢复法作简单介绍 .

1.1 解析法

假设在均质、等厚、各向同性、侧向无限延伸、无越流补给的承压含水层中有一完整井 ,以定流量抽水 ,地下水运动规律满足下列定解问题 :

$$\begin{cases} a\left(\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial y^2}\right) + \frac{1}{S}Q\delta(x-x_0,y-y_0) = \frac{\partial s}{\partial t} & (t > 0, -\infty < x,y < \infty) \\ s(x,y,0) = 0 & (-\infty < x,y < \infty) \\ s(\pm\infty,y,t) = 0 & (t > 0) \\ s(x,\pm\infty,t) = 0 & (t > 0) \end{cases} \tag{1}$$

式中 , δ 函数满足 $\delta(x-x_0,y-y_0) = \begin{cases} \infty & (x=x_0,y=y_0) \\ 0 & (x\neq x_0,y\neq y_0) \end{cases}$ 且 $\int_{x_0-\varepsilon_1}^{x_0+\varepsilon_2} \int_{y_0-\varepsilon_1}^{y_0+\varepsilon_2} f(x,y)\delta(x-x_0,y-y_0)dxdy = f(x_0,y_0)$,基本解为^[5-7]

$$s = \frac{Q}{S} \frac{1}{4\pi at} \exp\left(-\frac{r^2}{4at}\right) \tag{2}$$

式中 : s ——观测孔水位降深 ; Q ——瞬时抽水或注水量 ; t ——观测时间 ; a ——压力传导系数 , $a = T/S$, T 为导水系数 ; S ——贮水系数 ; r ——抽水井到观测井的距离 .

在抽水井井壁上, r 近似为井半径 r_w , 当 $\frac{r_w^2}{4at} \leq 0.01$ (或 $t \geq 25 \frac{r_w^2}{a}$) 时, $e^{-\frac{r^2}{4at}} \rightarrow 1$, 式(2)可以简化为

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \frac{1}{t} \tag{3}$$

绘出 $s \sim 1/t$ 曲线, 若曲线斜率为 i , 则可以求出含水层的导水系数 $T = Q/(4\pi i)$.

事实上, 即使在抽水井井壁上, 对于微水试验而言, 由于取水时间很短(通常小于 1 min), 条件 $t \geq 25r_w^2/a$ 也很难满足, 不能将式(2)简化为式(3), 因此对于某一具体观测井而言, r 为常数, 由基本解式(2)可知, 第一、二时段内的剩余降深可以分别表示为

$$s_1 = \frac{Q}{S} \frac{1}{4\pi at_1} \exp\left(-\frac{r^2}{4at_1}\right) \tag{4}$$

$$s_2 = \frac{Q}{S} \frac{1}{4\pi at_2} \exp\left(-\frac{r^2}{4at_2}\right) \tag{5}$$

式(4)除以式(5), 得含水层的压力传导系数 a_1

$$a_1 = \frac{r^2}{4} \left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right) / \ln\left(\frac{t_2 s_2}{t_1 s_1} \right)$$

同理, 利用相邻两时段的降深和时间也可以求得含水层的压力传导系数

$$a_2 = \frac{r^2}{4} \left(\frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_3} \right) / \ln\left(\frac{t_3 s_3}{t_2 s_2} \right), a_3 = \frac{r^2}{4} \left(\frac{1}{t_3} - \frac{1}{t_4} \right) / \ln\left(\frac{t_4 s_4}{t_3 s_3} \right), \dots, a_{n-1} = \frac{r^2}{4} \left(\frac{1}{t_{n-1}} - \frac{1}{t_n} \right) / \ln\left(\frac{t_n s_n}{t_{n-1} s_{n-1}} \right)$$

则含水层的平均压力传导系数可表示为

$$a = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} a_i \tag{6}$$

若记停止抽水或注水的时间和降深分别为 t_p 和 s_p , 此时将 t_p , s_p 和 a 代入式(2), 得到贮水系数

$$S = \frac{Q}{s_p} \frac{1}{4\pi at_p} \exp\left(-\frac{r^2}{4at_p}\right) \tag{7}$$

导水系数

$$T = aS$$

1.2 微水试验的配线法^[8]

该方法依据的理论公式为

$$\begin{aligned} H &= H_0 F(\alpha, \beta) = H_0 \frac{8\alpha}{\pi^2} \int_0^\infty \frac{t \exp(-\beta u^2/\alpha)}{u f(u, \alpha)} du \\ f(u, \alpha) &= [u J_0(u) - 2\alpha J_1(u)]^2 + [u y_0(u) - \alpha y_1(u)]^2 \\ \alpha &= \frac{r_s^2 S}{r_c^2} \quad \beta = \frac{kbt}{r_c^2} \quad u = \frac{r^2 S}{4Tt} \end{aligned} \tag{8}$$

式中: α ——无量纲储水系数; β ——无量纲惯性参数; $J_0(u)$, $J_1(u)$ ——第一类 Bessel 函数; $y_0(u)$, $y_1(u)$ ——第二类 Bessel 函数; r_s ——过滤器半径; r_c ——井管半径; b ——承压含水层厚度.

实际计算时, 将不同时刻的水位值减去静止水位值, 换算成水位差(H), 则起始时刻水位差最大为 H , 将 $H/H_0 \sim t$ 记录在半对数纸上, t 轴取对数, 将此曲线与典型曲线(图 1)拟合, 选择一个匹配点, 使这个点在典型曲线上的数值 $Tt/r_c^2 = 1$, 记录 $H/H_0 \sim \lg t$ 该点对应 t 的时间, 则 $T = r_c^2/t$, $k = T/b$, $S = \alpha r_c^2/r_s^2$, 由此可以求得这些水文地质参数.

1.3 水位恢复法^[1]

当 $\frac{r^2 S}{4Tt'} \leq 0.01$ 时, $s' = \frac{2.3Q}{4\pi T} \lg \frac{t}{t'}$, s' 与 $\lg \frac{t}{t'}$ 呈线性关系, $i = \frac{2.3Q}{4\pi T}$ 为直线斜率. 利用水位恢复资料绘出 $s' \sim \lg \frac{t}{t'}$ 曲线, 求得其直线段斜率 i , 由此可以计算参数 $T = 0.183 \frac{Q}{i}$, 将 T 代入 $s_p = \frac{2.3Q}{4\pi T} \lg \frac{2.25 T t_p}{S r^2}$ 中, 可得贮水系数 S .

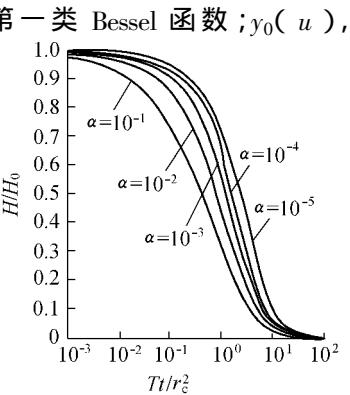


图 1 $H/H_0 \sim \lg Tt/r_c^2$ 对应 α 关系典型曲线
Fig.1 Typical curves of H/H_0 vs. $\lg Tt/r_c^2$ for different values of α

2 计算实例及分析

某电厂地基地层主要由第四系全新统、上更新统冲积成因的粉质黏土、冲、坡积成因的粉质黏土混碎石和志留系泥岩组成,局部分布人工堆积成因的素填土.该地层自上而下可划分为7个地层单元:层①为褐色、黄褐色素填土(Q_4^s),层厚约0.5 m;层②为褐黄色、黄褐色粉质黏土(Q_4^{al}),层厚约1.0 m;层③为棕黄色、棕褐色粉质黏土(Q_3^{al}),层厚约2.5 m;层④为黄色、棕黄色、灰白色粉质黏土混碎石(Q_4^{al+sl}),层厚约2 m;层⑤为灰黄色、褐黄色全风化泥岩(S),层厚约2 m;层⑥为灰黄色、褐黄色强风化泥岩(S),层厚约5 m;层⑦为灰黄色、灰白色若风化泥岩(S),层厚约10 m.地下水主要集中在层④、层⑤和层⑥中,为基岩裂隙水,由于上覆黏土层,因此基岩裂隙水具有承压性.

2006年2月在厂区进行了微水试验,共5个钻孔,分别为71号、62号、78号、74号和84号,限于篇幅,仅列出了62号和78号钻孔水位恢复数据与时间的关系,见表1和表2(钻孔半径为5.4 cm).

表1 62号钻孔地下水位恢复数据

Table 1 Data recovery of groundwater level in borehole 62[#]

累计时间/ min	地下水位/ m	累计时间/ min	地下水位/ m	累计时间/ min	地下水位/ m	累计时间/ min	地下水位/ m
1.5	24.73	30	25.78	80	26.61	1 138	27.85
3.0	24.78	40	25.95	90	26.71	1 311	27.90
5.0	24.77	50	26.12	100	26.79	1 425	27.91
10.0	25.15	60	26.35	110	26.87		
20.0	25.49	70	26.48	996	27.77		

注 流量为0.185 m³/min,抽水时间为0.483 min.

表2 78号钻孔地下水位恢复数据

Table 2 Data recovery of groundwater level in borehole 78[#]

累计时间/ min	地下水位/ m	累计时间/ min	地下水位/ m	累计时间/ min	地下水位/ m	累计时间/ min	地下水位/ m
1	25.53	8	25.76	40	26.70	110	27.87
2	25.58	9	25.82	50	26.93	120	27.98
3	25.60	10	25.85	60	27.12	130	28.06
4	25.61	15	25.95	70	27.30	140	28.13
5	25.67	20	26.08	80	27.44	150	28.18
6	25.73	25	26.27	90	27.57	160	28.24
7	25.75	30	26.42	100	27.67	170	28.28

注 流量为0.145 m³/min,抽水时间为0.35 min.

分别用解析法、微水试验的配线法和水位恢复法计算含水层的水文地质参数,计算结果见表3,由于各个钻孔计算的参数大小不同,表3中的平均值为5个钻孔计算的参数平均值.

表3 3种方法计算的水文地质参数对比

Table 3 Comparison of hydro-geological parameters by three calculation methods

方 法	导水系数 $T/(cm^2 \cdot s^{-1})$			贮水系数 S			渗透系数 $K/(cm \cdot s^{-1})$		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
解析法	0.0183	0.0060	0.0120	9.3×10^{-4}	1.62×10^{-4}	4.6×10^{-4}	10.8×10^{-4}	3.6×10^{-4}	7.1×10^{-4}
配线法	0.0162	0.0053	0.0100	8.5×10^{-4}	1.60×10^{-4}	3.8×10^{-4}	9.5×10^{-4}	3.1×10^{-4}	5.9×10^{-4}
水位恢复法	0.0328	0.0097	0.0195	15.0×10^{-4}	5.80×10^{-4}	12.4×10^{-4}	19.0×10^{-4}	5.7×10^{-4}	11.4×10^{-4}

本文介绍的解析法所求得参数与微水试验的配线法求得参数很接近,而用水位恢复法计算的水文地质参数偏大,这是因为用水位恢复法计算参数时必须满足 $t \geq 25r_w^2/a$,表3中用配线法求出的参数 $a = 26.3 cm^2/s$,可以计算出 $25r_w^2/a$ 为27.7 s,而5个钻孔的抽水时间均小于60 s,故在微水试验中很难满足 $t \geq 25r_w^2/a$,因此计算出来的参数不是很合理.采用微水试验的配线法计算导水系数和贮水系数的公式中,只利用了微水试验的水位降深和时间等参数,没有用到抽水量,本文介绍的解析法既考虑了降深、时间等参数和两次观测时间、降深的相关性,也考虑了抽水量作为计算参数的已知量,计算结果是比较合理的.

3 结 论

- a. 本文基于低渗透性含水层的微水试验 ,提出了利用试验资料计算含水层水文地质参数的解析方法 ,不论是否有观测孔 ,都可以用这些公式进行计算 ,计算实例表明用该方法在确定含水层水文地质参数是简单有效的 .
- b. 在计算含水层水文地质参数时 ,解析法既考虑了水位降深和时间等参数 ,也考虑了抽水量作为计算参数的已知量 ,比微水试验的配线法和水位恢复法具有更好的适用性 .

参考文献 :

[1] 薛禹群 .地下水动力学[M].2 版 .北京 :地质出版社 ,1997 :90-138 .

[2] 周志芳 ,汤瑞凉 .基于抽水试验资料确定含水层水文地质参数[J].河海大学学报 :自然科学版 ,1999 ,27(3) 5-8 .

[3] 杨建锋 ,李同斌 ,许颖 .弱透水层水文地质参数确定方法的探讨[J].世界地质 ,1995 ,14(4) 53-58 .

[4] KIPP K L .Type curve analysis of inertial effects in the response of a well to a slug tes[J].Water Resources Research ,1985 ,21(9) :1397 -1408 .

[5] 戴嘉尊 .数学物理方程[M].南京 :东南大学出版社 ,2002 :165-183 .

[6] 李竞生 ,姚磊华 .含水层参数识别方法[M].北京 :地质出版社 ,2003 :11-14 .

[7] 宿青山 ,王占兴 ,乔国超 .瞬时抽水求参数方法的改进[J].水文地质工程地质 ,1982 ,4(3) 34-36 .

[8] 沈珍瑶 ,谢彤芳 .确定含水层渗透系数的微水试验法[J].地下水 ,1994 ,16(1) 4-5 .

Method for determination of hydro-geological parameter of aquifers with low permeability and its application

HUANG Yong , ZHOU Zhi-fang , WANG Jin-guo
(College of Civil Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract :Based on slug tests on aquifers with low permeability , an analytical method for calculating hydro-geological parameter of aquifers with experimental data was proposed , and a corresponding formula was deduced . In this method , some parameters , including fall in water level , time , etc . were taken into account , and pumping rate was taken as a given value for parameter calculation . The application of the present method to calculation of the hydro-geological parameters based on the test data from foundation pumping tests at a power plant shows that the method is of high applicability as compared with the curve fitting method and water level recovery method .

Key words :slug test ; aquifer with low permeability ; hydro-geological parameter