

单孔稳定抽水试验水位恢复资料确定含水层参数

石中平

(铁道部第一勘测设计院 西安分院, 陕西 西安 710043)

[摘要] 将抽水试验水位恢复过程看成是抽水和等量注水两个相反过程的叠加,并根据势函数叠加原理,从理论上导出了利用单孔稳定抽水试验水位恢复资料求解含水层参数的新公式,包括导水系数(T)、渗透系数(K)、贮水系数(S)及重力给水系数(μ)等。同时还导出了相对于某一稳定降深下影响半径的计算公式。该方法充分利用了单孔抽水试验的水位恢复资料。通过对几个实例进行验算,并与经验法计算结果作了比较,效果很好。

[关键词] 单孔;稳定抽水试验;水位恢复;含水层参数;叠加原理

[中图分类号] P641.2 [文献标识码] A [文章编号] 1007-9955(2000)02-0071-04

[第一作者简介] 石中平(1963-),男,工程师,主要从事铁路供水、排水水文地质勘察工作。

在水文地质勘探实践中,一个重要的工作就是确定含水层的水文地质参数。对于无界含水层非稳定抽水、无界含水层带观测孔稳定抽水及有界含水层稳定抽水来说,由于都有相应的解析解,求参问题不大。但对于无界不带观测孔的稳定抽水就不易进行。常用的方法是借助于经验公式 $R = 2s \sqrt{HK}$ (库萨金,潜水含水层), $R = 10 s \sqrt{K}$ (吉哈尔特,承压水含水层),通过迭代反复验算近似求解,其理论依据不足。依据势函数叠加原理,从理论上导出了利用无界含水层单孔稳定抽水试验水位恢复资料求取含水层水文地质参数的公式。通过实际验算,效果很好。

文中仅考虑非稳定恢复过程已满足 Jacob 条件的情形,同时假设含水层为均质各向同性、无界无越流、隔水顶、底板及抽水前静水位呈水平状,抽水孔为完整孔。

1 基本原理及方法

抽水试验的水位恢复过程可以看成是两个相反过程的叠加,即抽水过程和等量注水过程。其中抽水过程属稳定流,注水过程属非稳定流。由于二者

均有相应的解析解,因而不难推导出新的求解公式。

1.1 承压含水层

设稳定抽水试验从 t_0 时刻起停抽,同时进行水位恢复观测。相应的稳定涌水量、稳定水位降深及影响半径分别为 Q_0 、 s_0 、 R_0 。(s_i , t_i)为一组实测数据(s_i 为剩余降深, t_i 为从 t_0 时刻计起的对应于 s_i 的水位恢复时间, $i=1, 2, 3, \dots, n$)。对于稳定抽水过程和非稳定注水过程见公式(1~2)^[2]:

(1) 稳定抽水过程:

$$s_0 = \frac{0.366 Q_0}{T} \log \frac{R_0}{r_w} \quad (1)$$

(2) 非稳定注水过程,有:

$$s'_i = \frac{0.183 Q_0}{T} \log \frac{2/25 T t_i}{r_w^2 S}$$

$$\left(\text{当 } u = \frac{r_w^2 S}{4 T t_i} \leq 0.01 \text{ Jacob 条件} \right) \quad (2)$$

则水位恢复过程有:

$$s_i = s_0 - s'_i = \frac{0.183 Q_0}{T} \log \frac{R_0^2 S}{2.25 T t_i} \quad (3)$$

式中: s'_i 为恢复过程中的水位回升值; r_w 为钻孔半径;其他符号意义同前。

1.1.1 T 、 K 的求取

由(2~3)两式明显看出,在单对数坐标系中,水位回升值 s'_i 和剩余降深值 s_i 对于恢复时间 t_i 呈线

性关系,并且二者斜率大小相等,符号相反,同时关于直线 $s = \frac{0.183 Q_0}{T} \log \frac{R_0}{r_w}$ 对称。其斜率分别为:
 $I = 0.183 Q_0/T$ 和 $I = -0.183 Q_0/T$ 则:

$$T = 0.183 Q_0/I \quad (4-1)$$

$$T = -0.183 Q_0/I \quad (4-2)$$

实际计算时,可将时间坐标取一个对数周期,此时有: $I = \Delta s'_i$, $I = -\Delta s_i$, 从而(4)式变为:

$$T = 0.183 Q_0/\Delta s'_i$$

或 $T = 0.183 Q_0/\Delta s_i \quad (5)$

事实上,水位回升值 s'_i 的变化量与剩余降深值 s_i 的变化量是相等的,故(5)式得出的 T 必定一致。若承压含水层厚度 M 已知,则其渗透系数 K 由下式求得:

$$K = T/M = 0.183 Q_0/\Delta s'_i$$

或 $K = 0.183 Q_0/M\Delta s_i \quad (6)$

1.1.2 S 的求解

将(2)式的对数项展开后得:

$$s'_i = \frac{0.183 Q_0}{T} \log t_i + \frac{0.183 Q_0}{T} \log \frac{2.25 T}{r_w^2 S}$$

可见,若将该直线向两坐标轴延伸,并设($s'_a, 1$), ($0, t_a$)分别为两交点坐标,则对于前者有:

$$s'_a = \frac{0.183 Q_0}{T} \log \frac{2.25 T}{r_w^2 S} = \Delta s'_i \log \frac{2.25 T}{r_w^2 S}$$

或 $\log \frac{2.25 T}{r_w^2 S} = \frac{s'_a}{\Delta s'_i}$

从而 $S = \frac{2.25 T}{r_w^2 \log^{-1}(s'_a/\Delta s'_i)} \quad (7)$

对于后者有 $O = \frac{0.183 Q_0}{T} \log \frac{2.25 T t_a}{r_w^2 S}$

或 $\log \frac{2.25 T t_a}{r_w^2 S} = 0$,

从而 $S = \frac{2.25 T t_a}{r_w^2} \quad (8)$

因为: $\Delta s'_i = s'_a/\log t_a$, 则 $-\log t_a = s'_a/\Delta s'_i$, 或 $t_a = 1/[\log^{-1}(s'_i/\Delta s'_i)]$, 故(7~8)两式也不矛盾。

1.1.3 R_0 的求解

将(3)式的对数项展开后得:

$$s_i = \frac{0.183 Q_0}{T} \log t_i + \frac{0.183 Q_0}{T} \log \frac{R_0^2 S}{2.25 T}$$

同理,将该直线向两坐标轴延伸并设两交点坐标分别为($s_b, 1$)和($0, t_b$)。则对于前者有:

$$s_b = \frac{0.183 Q_0}{T} \log \frac{R_0^2 S}{2.25 T} = \Delta s_i \log \frac{R_0^2 S}{2.25 T}$$

或 $\log \frac{R_0^2 S}{2.25 T} = \frac{s_b}{\Delta s_i}$

从而 $R_0 = 1.5 \sqrt{\frac{T}{S} \log^{-1}(s_b/\Delta s_i)} \quad (9)$

对于后者有:

$$O = \frac{0.183 Q_0}{T} \log \frac{R_0^2 S}{2.25 T t_b}$$

$$\log \frac{R_0^2 S}{2.25 T t_b} = 0$$

从而 $R_0 = 1.5 \sqrt{\frac{T}{S} t_b} \quad (10)$

因为 $\Delta s_i = \frac{s_b}{\log t_b}$, 则 $\log t_b = \frac{s_b}{\Delta s_i}$, $t_b = \log^{-1} \frac{s_b}{\Delta s_i}$, 故(9)(10)两式不相矛盾。

另外,由于 T 值已由(5)求得,故由(1)式得:

$$s_0 = 2 \times \frac{0.183 Q_0}{T} \log \frac{R_0}{r_w} = 2\Delta s'_i \text{ (或 } \Delta s_i) \log \frac{R_0}{r_w} \text{ 或}$$

$$\log \frac{R_0}{r_w} = \frac{s_0}{2\Delta s'_i \text{ (或 } \Delta s_i)} \text{ 从而有:}$$

$$R_0 = r_w \log^{-1} \frac{s_0}{\Delta s'_i \text{ (或 } \Delta s_i)} \quad (11)$$

总之,对于承压含水层,利用完整单孔稳定抽水试验水位恢复资料可求出导水系数 T , 渗透系数 K 及贮水系数 S 三项含水层参数,同时还能求出相对于某一稳定降深的影响半径 R_0 。各参数公式及利用资料情况详见表1:

表1 承压水含水层求参公式

$TK(\text{m}^2/\text{d}-1)$	$S/10^{-2}$	R_0/m
$T = \frac{0.183 Q_0}{\Delta s_i}$ 利用剩余降深值	$S = \frac{2.25 T t_b}{r_w^2}$ 利用水位回升值 坐标系中的时间	$R_0 = 1.5 \sqrt{\frac{T}{S} \log^{-1}(\frac{s_b}{\Delta s_i})}$ 利用剩余降深值
$T = \frac{0.183 Q_0}{\Delta s'_i}$ 利用水位回升值	$S = \frac{2.25 T}{r_w^2 \log^{-1}(\frac{s'_a}{\Delta s'_i})}$ 利用水位回升值	$R_0 = 1.5 \sqrt{\frac{T}{S} t_b}$ 利用剩余降深值 坐标系中的时间
		$R_0 = r_w \log^{-1} \frac{s_0}{2\Delta s_i \text{ (或 } s'_i)}$ 利用剩余降深值 或水位回升值

1.2 潜水含水层

潜水含水层抽水过程比较复杂,不但水流可由二维流变为三维流,而且还存在重力疏干延迟及不同阶段所抽之水的来源不同的情形。一般情况下,当降深 s 与抽水前含水层厚度 H_0 之比 $s/H_0 \geq 3/10$

时 ,就不能按二维流考虑。另外 ,即使在二维流范围内 ,不同阶段也有不同的解析解。以下的推导过程将不考虑含水层的延迟给水、弹性贮量及水流的垂直分量。

1.2.1 $s/H_0 \leq 1/10$

该阶段潜水含水层可按承压含水层考虑 ,其非稳定注水过程的水位回升值有相应的 Jacob 近似解^[2] :

$$s'_i = \frac{0.183 Q_0}{KH_0} \log \frac{2.25 KH_0 t_i}{r_w^2 \mu} \tag{12}$$

而稳定抽水过程的水位降深值为^[2] :

$$s_0 = \frac{0.366 Q_0}{KH_0} \log \frac{R_0}{r_w} \tag{13}$$

各参数求解过程同承压含水层完全一致。下面给出各参数的求解公式 (见表 2) :

表 2 潜水含水层求参公式

$K/(m \cdot d^{-1})$	μ	R_0/m
$K = \frac{0.183 Q_0}{\Delta s_i \times H_0}$ 利用剩余降深值	$\mu = \frac{2.25 KH_0 t_a}{r_w^2}$ 利用水位回升值 坐标系中的时间	$R_0 = 1.5 \sqrt{\frac{KH_0}{\mu} \log^{-1} \left(\frac{s_b}{\Delta s_i} \right)}$ 利用剩余降深值
$K = \frac{0.183 Q_0}{\Delta s'_i \times H_0}$ 利用水位回升值	$\mu = \frac{2.25 KH_0}{r_w^2 \log^{-1} \left(\frac{s'_a}{\Delta s'_i} \right)}$ 利用水位回升值	$R_0 = 1.5 \sqrt{\frac{KH_0}{\mu} t_b}$ 利用剩余降深值 坐标系中的时间 $R_0 = r_w \log^{-1} \frac{s_0}{2 \Delta s'_i \text{ (或 } s'_i \text{)}}$ 利用剩余降深值 或水位回升值

1.2.2 $1/10 < s/H_0 < 3/10$

该阶段按潜水二维流考虑 ,其非稳定“注水”过程的水位回升值具有如下形式的仿 Jacob 公式^[2]

$$(2H_0 - s'_i) s'_i = \frac{0.366 Q_0}{K} \log \frac{2.25 KH_0 t_i}{r_w^2 \mu} \tag{14}$$

而稳定抽水过程的水位降深值有^[2] :

$$(2H_0 - s_0) s_0 = \frac{0.732 Q_0}{K} \log \frac{R_0}{r_w} \tag{15}$$

两式相减得

$$(2H_0 - s_0) s_0 - (2H_0 - s'_i) s'_i = \frac{0.366 Q_0}{K} \log \frac{R_0^2 \mu}{2.25 KH_0 t_i} \tag{16}$$

设 $(2H_0 - s'_i) s'_i = 2H_0 s'_{ic}$ (17-1)

万方数据 $(2H_0 - s_0) s_0 = 2H_0 s_{oc}$ (17-2)

则(14~16)三式分别变为 :

$$s'_{ic} = \frac{0.183 Q_0}{KH_0} \log \frac{2.25 KH_0 t_i}{r_w^2 \mu} \tag{18}$$

$$s_{oc} = \frac{0.366 Q_0}{KH_0} \log \frac{R_0}{r_w} \tag{19}$$

$$s_{oc} - s'_{ic} = \frac{0.183 Q_0}{KH_0} \log \frac{R_0^2 \mu}{2.25 KH_0 t_i} \tag{20}$$

再设 $s_{ic} = s_{oc} - s'_{ic}$ (21)

则(20)式变为 :

$$s_{ic} = \frac{0.183 Q_0}{KH_0} \log \frac{R_0^2 \mu}{2.25 KH_0 t_i} \tag{22}$$

至此 ,由(18)(19)(22)三式便可推导出各求参公式(表 3)。

表 3 潜水含水层求参公式

$K/(m \cdot d^{-1})$	μ	R_0/m
$K = \frac{0.183 Q_0}{\Delta s_{ic} \times H_0}$ 利用处理后的 剩余降深值	$\mu = \frac{2.25 KH_0 t_a}{r_w^2}$ 利用处理后的水位回 升值坐标系中的时间	$R_0 = 1.5 \sqrt{\frac{KH_0}{\mu} \log^{-1} \left(\frac{s_b}{\Delta s_{ic}} \right)}$ 利用处理后 的剩余降深值
$T = \frac{0.183 Q_0}{\Delta s'_{ic} \times H_0}$ 利用处理后的 水位回升值	$\mu = \frac{2.25 KH_0}{r_w^2 \log^{-1} \left(\frac{s'_{ac}}{\Delta s'_{ic}} \right)}$ 利用处理后 的水位回升值	$R_0 = 1.5 \sqrt{\frac{KH_0}{\mu} t_b}$ 利用处理后的剩余降 深值坐标系中的时间 $R_0 = r_w \log^{-1} \frac{s_{0c}}{2 \Delta s'_{ic} \text{ (或 } \Delta s'_{ic} \text{)}}$ 利用处理后的剩余 降深值或水位回升值

表中各处理资料由(17)(21)两式求得

总之 ,对于潜水含水层 ,当 $s/H_0 \leq 1/10$ 时 ,可直接根据原始资料求参 ;对于 $1/10 < s/H_0 < 3/10$,则需先对原始资料处理后才能应用。

2 实际应用

实例一 :某水源地系承压水含水层 ,由 Q_4^{al} 圆砾土组成 ,含水层厚度为 4.1 m ,在稳定降深为 0.95 m 时 ,单孔 ($\varphi = 130$ mm)稳定涌水量为 180.14 m³/d。停泵后观测 ,水位恢复很快 ,14 min 即全部恢复。经作图求解得 : $T = 87.84$ m²/d , $K = 45.8$ m/d , $S = 2.794 \times 10^{-3}$, $R_0 = 32.03$ m。

实例二 :某水源地系承压水含水层 ,由 Q_4^{al} 卵石组成 ,含水层厚度为 4.5 m ,在稳定降深为 0.27 m 时 ,单孔 ($\varphi = 130$ mm)稳定涌水量为 102.3 m³/d。停泵后进行观测 ,水位恢复较快 ,240 min 即全部恢复。经作图求解得 : $g = 399.17$ m²/d , $K = 88.71$ m/d , $S = 9.56 \times 10^{-2}$, $R_0 = 47.98$ m。

实例三 ;某水源地系潜水含水层 ,由 Q_4^{al} 卵砾石

层组成,抽水前含水层厚度为 9.48 m,在稳定降深为 1.27 m 时,单孔($\varphi=130\text{ mm}$)稳定涌水量为 $262.4\text{ m}^3/\text{d}$ 。停泵后观测,水位恢复较快,1 459 min 恢复了 96%,基本全部恢复。经作图求解得: $K=31.27\text{ m}^2/\text{d}$, $\mu=1.669\times 10^{-2}$, $R_0=300.55\text{ m}$ 。

为便于对比,以上各参数结果列于表 4,同时将用经验法计算的结果一同列出:

表 4 不同方法计算实例含水层参数对照表

水源地	参数	水位恢复法	经验法
承压水	$K/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	45.81	51.59
	$S/10^{-2}$	9.56	
	R_0/m	32.03	68.24
承压水	$K/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	88.71	81.21
	$S/10^{-2}$	9.56	
	R_0/m	47.98	24.33
潜 水	$K/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	31.27	23.75
	$S/10^{-2}$	1.669	
	R_0/m	300.55	38.05

3 结 语

- (1) 该法充分利用了水位恢复过程实测资料。
- (2) 不同的资料求解的参数不同:对于水位回升值及其处理后的资料,可求出 T 、 K 、 S 、 μ 四项参

数,而对于剩余降深值及其处理后的资料,可求出 T 、 K 二项参数及某一降深下的 R_0 值。

(3) 不同类型的含水层及同一类型含水层的不同降深阶段利用的资料情况不同:对于承压水及 $s/H_0\leq 1/10$ 的潜水含水层,可直接由原始资料求参,而 $1/10< s/H_0< 3/10$ 的潜水含水层,则需对原始资料处理后才能应用。

(4) 该方法利用 Excel 应用程序可方便地进行,但要注意以下几点:首先,明确半对数坐标系中的时间单位,笔者认为最好用“天”为单位,这样计算时可避免因单位换算造成混乱而出错;其次,在选取直线段时,先要统观整个散点图的走势,然后选择其直线段明显的点进行拟合;第三,该软件所拟合的直线方程中的对数项为自然对数($\ln t$),而坐标系中却为常用对数($\log t$),故应进行转换。其间的关系为 $\ln t=2.3\log t$ 。

[参 考 文 献]

[1] 交通部第一铁路设计院. 铁路工程地质手册[S]. 北京:人民交通出版社,1975.

[2] 任天培. 水文地质学[M]. 北京:地质出版社,1986.

DETERMINING AQUIFER PARAMETERS
BY USING RECOVERY DATA OF STEASY
PUMPING TEST IN A SINGLE BOREHOLE

SHI Zhong-ping

(Xi'an Branch of First Institute of Exploration and Designing ,Chinese Railway Ministry ,Xi'an 710043 ,China)

[Abstract] Water level recovery of pumping test can be considered as a superposition of two opposite processes , that is , pumping process and “ recharge ” process with an equal quantity. Some new formulas of determining aquifer parameter have been derived from recovery data of steady pumping test in a single borehole by using the principle of superposition of potential function , including coefficient of transmissibility(T) coefficient of permeability(K) coefficient of storage(S) and specific yield(μ). Meanwhile , the formula of radiua of influence has also been given , relative to a certain steady drawdown of water level. In this paper , checking calculations have been carried out through some practical examples , the results of which have been compared with those of experi- mental in methods.

[Key words] single borehole ; steady pumping test of single borehole ; principle of superposition ; water level recovery ; aquifer pa- rameter

单孔稳定抽水试验水位恢复资料确定含水层参数

作者：[石中平](#)，[SHI Zhong-ping](#)

作者单位：[铁道部第一勘测设计院, 西安分院, 陕西, 西安, 710043](#)

刊名：[西安工程学院学报](#) [ISTIC](#)

英文刊名：[JOURNAL OF XI'AN ENGINEERING UNIVERSITY](#)

年，卷(期)：2000，22(2)

引用次数：4次

参考文献(2条)

1. [交通部第一铁路设计院](#) [铁路工程地质手册](#) 1975
2. [任天培](#) [水文地质学](#) 1986

相似文献(1条)

1. 期刊论文 [石中平](#) [水文地质求参实际问题探讨](#) -[西安理工大学学报](#)2002, 18(1)
针对野外水力试验常遇到的四种实际情况,根据非稳定井流理论和势函数叠加原理导出了它们各自的求参公式.对于单孔稳定抽水试验可用水位达到稳定之前的非稳定资料求参;而提水试验可通过把提水过程概化为连续的非稳定抽水过程,再利用其水位恢复资料求参;其它两种情况也是利用稳定之前的非稳定资料和水位恢复资料求参的.

引证文献(3条)

1. [靳晓颖](#), [高业新](#), [吴庆华](#), [韩玉英](#), [王贵玲](#) [华北平原中部深层含水层水文地质参数研究](#)[期刊论文]-[干旱区研究](#) 2008(5)
2. [杨智国](#) [山岭隧道水文地质钻孔测试](#)[期刊论文]-[铁道建筑技术](#) 2004(05)
3. [石中平](#) [水文地质求参实际问题探讨](#)[期刊论文]-[西安理工大学学报](#) 2002(01)

本文链接：http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_xagcxyxb200002018.aspx

下载时间：2009年10月16日