

稳定流抽水试验存在的问题及对策 —以王岗水源地抽水试验为例

李玉璞¹, 王献坤^{2,3}, 郭东兴³, 左正金², 罗文金²

(1. 河南省驻马店市节水办, 河南 驻马店 463000; 2. 河南省地质调查院驻马店分院, 河南 驻马店 463000; 3. 河南省地勘局第一地质工程院, 河南 驻马店 463000)

[摘要] 在总结作者多年的水文地质工作经验的基础上, 通过稳定流、非稳定流实例计算、分析、对比, 提出了地下水稳定流在抽水试验、参数计算和影响半径等方面存在的问题, 以及在实际工作中应注意的事项。同时参考国外抽水试验经验, 提出了提高我国水文地质计算整体水平的措施和对策。

[关键词] 稳定流; 裘布依模型; 参数计算; 对策

[中图分类号] P641.2 **[文献标识码]** B **[文章编号]** 1004-1184(2007)04-0064-04

0 前言

笔者翻阅了大量的水源地勘察、设计、岩土工程中有关地下水的内容, 地下水稳定流抽水试验及参数计算方法, 目前水文地质参数计算中仍被广泛应用, 特别是在岩土工程方面更是如此, 在有关的技术规范中也反映了此现象。如《建筑基坑支护技术规程》, “勘察要求”只列出了“测量场地含水层的渗透系数及影响半径”有关稳定流参数的条文, 在“地下水控制”中, 列出的有关基坑总涌水量和基坑降深的计算公式, 均是稳定流公式。在《供水水文地质勘察规范》中, 稳定流抽水试验及参数计算, 也占有大量篇幅。

笔者根据 20 多年的工作经验和理论及实例计算分析, 稳定流抽水试验及参数计算存在着严重的问题, 以至于计算参数偏离真值最大可达 3 倍以上。而且, 稳定流一般只能计算一个参数“渗透系数”和假想的“影响半径”。以下是笔者对“稳定流抽水试验及求参”的一些认识, 供广大同行商讨。

1 裘布依模型与齐姆模型

我国地下水动力学是五十年代初开设的, 其教材以卡明斯基著的《地下水动力学原理》为蓝本。在这本书中, 将裘布依稳定井流的边界条件叙述为无界的, 而对无越流的无界含水层, 是不可能在某影响半径处形成稳定井流的^[6]。为了使井流形成稳定状态, 且在 R 处保持降深 $S=0$, 外边界条件必须是圆形定水头边界, 实际上, 从裘布依公式原文了解到, 裘布依建立稳定井流

公式时, 正是针对圆形定水头外边界条件的。

1870 年齐姆提出, R 值可以近似取从抽水井中心到实际上观测不出地下水位下降处的水平距离, 这样就引出了“影响半径”的概念, 我们称它为齐姆模型。

长期以来将裘布依模型与齐姆模型混为一谈, 误认为这两个模型是等价的, 造成地下水动力学概念上的混乱。裘布依公式是地下水稳定井流的基础, 对两模型作一番分析是很有必要的。

(1) 前已证明, 裘布依条件可以达到稳定流动, 面齐姆条件却不可能。

(2) 对于裘布依条件, 当井流稳定时, 外边界补给量等于抽水流量, 由于初始水头面是水平的, 初始补给量为零, 因而稳定时的抽水量等于补给的增加量。对于齐姆条件, 抽取的水始终是静储量, 直到影响范围扩大到补给、排泄边界, 但此时已不是齐姆条件了。

(3) 裘布依条件在 $r=R$ 处的水力梯度 $\left. \frac{dh}{dr} \right|_{r=R} = \frac{Q}{2\pi R KM}$, 而齐姆条件 $\left. \frac{dh}{dr} \right|_{r=R} = 0$, 因为按照定义, 在 $r>R$ 处的范围内水位几乎没有下降, 因此在 $r=R$ 处的流量 $Q_R=0$ 。

(4) 这两种条件的漏斗曲线是不同的。裘布依稳定漏斗是对数曲线, 以表示各个过水断面的流量相等, 而齐姆的不稳定漏斗则是积分指数曲线, 表示抽取的都是静储量, 过水断面的流量随着 r 的减小而增大。

(5) 两者的流网不同。

从以上的对比分析可知, 两者存在着根本的差别。

[收稿日期] 2007-06-19

[作者简介] 李玉璞(1965-), 女, 河南南阳人, 工程师, 主要从事水资源开发规划管理工作。

2 计算实例

前已述及, 由于长期以来将裘布依模型与齐姆模型混为一谈, 误认为这两个模型是等价的, 造成地下水动力学概念上的混乱。也使计算结果存在较大误差, 甚至是错误的。而且, 以裘布依模型为基础的稳态流参数计算公式, 一般只能计算含水层的渗透系数(K)或导水系数(T), 而对含水层其它参数, 如给水度(μ), 阻越流系数(B)等均不能计算。下面以遂平王岗水源地抽水试验计算成果为例说明稳态流公式存在的问题。

2.1 单孔抽水试验

本次王岗水源地勘察共进行14眼单孔抽水试验,

计算方法采用稳态流法(裘布依公式)及恢复曲线法(非稳态流法)计算导水系数 T。

(1) 稳态流公式

利用裘布依公式: $Q = 2.73 \frac{K \cdot M \cdot S}{\lg R / r_0}$ (1)

和吉哈尔特经验公式:

$R = 10S_0 \sqrt{K}$ (2)

式中: Q—单井涌水量 (m³/d); K—渗透系数 (m/d); M—承压含水层厚度 (m); S₀—降深 (m); R—影响半径 (m); r₀—抽水井(孔)半径 (m)。

以上两式联立, 采用试算法求 T、R 值, 计算结果见表 1。

表 1 遂平王岗水源地导水系数 T 计算成果表 m²/d

孔号	涌水量 (Q)	含水层 厚度 (M)	降深 (S)	稳定流法		非稳定流法		
				单孔抽水试验		带观测孔抽水试验		群孔抽水试验
				稳定流公式	水位恢复法	标准曲线 对比法	水位恢复法	标准曲线 对比法
C1	1 054	49.2	1.9	537	927			
C2	968	40.0	3.3	380	1 197			
C3	968	34.2	2.7	419	1 013			
S1	2 474	54.0	5.7	483	1 461			1 600
S2	2 639	47.0	4.5	685	1 789			1 600
S3	3 586	37.0	6.5	662	1 682	1 901		1 600
S4	3 295	41.0	4.8	795	1 218			1 600
S5	2 807	43.0	3.6	865	1 370			1 600
S6	2 875	38.0	6.5	521	1 340		1 340	1 600
G1	2 875	38.0				1 614	1 457	1 600
S7	2 410	30.0	17.2	187	563			600
S7	1 793	30.0	5.7	425	615			600
S8	3 013	37.7	5.3	657	1 671			1 600
S8	2 474	37.7	3.9	475	1 461			1 600
S8	2 033	37.7	3.0	366	1 338			1 600
S9	2 605	51.0	6.8	428	1 834			1 600
S10	3 660	41.0	7.1	621	1 218	1 575		1 600
S11	1 852	27.8	6.2	404	628			600

注: 、 、 表示降深次数 综合值分区均值

(2) 非稳态流公式(恢复数据直线图解法)

利用公式:

$S = \frac{0.183Q}{T} \lg \frac{t}{t + t_p}$ (3)

式中: S—恢复过程中, 任一时刻的剩余降深 (m);
t—从停抽算起的时间; t_p—抽水时间。

式(3)表明, S 与 $\lg \frac{t}{t + t_p}$ 呈直线关系。将不同时间及剩余降深, 点在半对数坐标纸上, 各点连线为一直线。从图上可得此直线斜率 i, 则有 $T = \frac{0.183Q}{i}$, 计算结果见表 1。

2.2 带观测孔非稳态流抽水试验

(1) 稳定流法

采用 S₁孔、G₁孔资料, G₁降深 1 m, 与抽水孔 S₆距离有 80 m。

用有一个观测孔的稳定流公式:

$T = \frac{0.366Q (\lg r_1 - \lg r_w)}{(S_w - S)}$

计算的 T 值为 522 m²/d。

(2) 非稳定流法

遂平王岗水源地进行带观测孔非稳态流抽水试验 1 组, 抽水孔 S₆, 主观测孔 G₁, 辅助观测孔多眼, 采用非稳态流标准曲线对比法、直线图解法、恢复数据直线图解法分别计算各种参数, 参见图 1, 计算结果见表 1。

2.3 群孔抽水试验

遂平王岗水源地进行群孔干扰非稳态流抽水试验 1 组, 抽水孔 S₁、S₃、S₅、S₆, 抽水流量 11 405 m³/d, 抽水时间 10 d 以上, 采用非稳态流标准曲线对比法计算各种参数, 计算结果见表 1。

2.4 数值法

利用长观资料,采用正演模型校正法取得各分区的有关参数的平均值,参见表1。

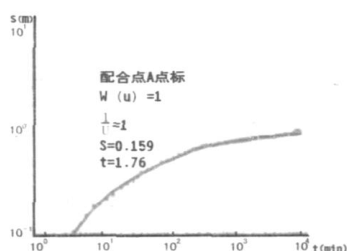


图1 G_1 孔观测数据与标准曲线拟合图

2.5 计算结果分析

从以上计算结果看出,单孔稳定流裘布依公式及有一个观测孔的稳定流公式计算结果误差较大,误差大到10倍以上,小到80%以上。主要问题是井中附加降深难求及“影响半径”物理意义不明确。裘布依公式是其它稳定流公式的基础,其它类似公式存在着同样的问题。

求取井中附加降深要做多个落程的抽水试验,而且一个井的附加降深与另外一个井的不一样,这种方法是得不偿失的。而T值可以应用非稳定流抽水试验很容易直接求得。

而非稳定流公式计算的T值,各个公式计算的结果较接近,误差微小,较接近真值。非稳定流公式还可计算其它有关参数。

3 R 物理意义及存在问题

裘布依假定中“影响半径R”的意义,在自然界几乎是不存在的,有些书中说R应代表含水层对单井的补给能力(可定名为引用补给半径),即R是一个用长度为代表的含水层对井的补给能力的抽象数值,这不能在野外抽水试验中从含水层的动水位的测量中直接得出,而只能从具体水文地质条件的抽水试验时通过计算或图解法间接地加以确定。它受地下水系统的水文参数、几何参数、抽水流量、降深等多因素影响,具体与这些因素的关系,很难确定或没有确定关系,从《供水水文地质手册》中列出的几十种经验公式中也可看出,各公式有时还相互矛盾。以上混乱主要是由R物理意义不明确造成的,从而使精确求取相当困难,或者说,不同的条件,不同的公式中R的含意、数值是不一样的,它不象渗透系数K有明确的物理意义,它的大小不会因为抽水井流量、观测位置、边界条件的改变而变化。

影响半径(引用补给半径R),它不是抽水实际影响到的距离。据实际观测,由各种公式计算的R远小于实际抽水实际影响距离。如遂平王岗水源地 S_6 抽水7d后距主孔2000m的观测孔水位降深达20cm以上,显然,它的影响公式 $R = 10s\sqrt{K}$ 计算的R值约为400m。

综上所述,R物理意义不明确,求取相当困难,难度远超过求取T值本身(用非稳定流方法)。R值远小于抽水影响距离,这是一个虚拟的不确定的参数,它使稳定流计算公式计算的参数T值有较大的误差。而非稳定流法很容易求得有关参数,因而花很大力气求取R,是得不偿失的。

4 稳定流抽水试验存在问题及解决办法

4.1 稳定流抽水试验抽水时间长,抽水设备较复杂

目前稳定抽水试验以单孔抽水为主,一般认为简单、省时,实际上这是一个“误区”。稳定流抽水试验,对前期观测数据要求低(计算参数无用),对开始抽水时间没要求(不要求水位恢复到静止水位),它只关心稳定后的数据,但一般要求有三个落程,抽水设备较复杂;抽水试验经过不稳定段,再到稳定段(如果能稳定的话),因此,从理论上讲,稳定流抽水试验用时应大大多于非稳定流用时,很多情况下,不能达到真正的稳定,而是稳定的假象。

4.2 回水引起井内承压水位反常

三个落程,小流量抽水如采用回水的方式实现,将引起井内承压水位反常。在两种原因:^[5]大流量抽出水后再回到井内,给人一种小流量抽水的假象,对承压水,这时反映的不是小流量抽水时的流场形态;大水泵抽水回水后的水位要高出小水泵抽水时同等出水量的水位,这是承压含水层的性质决定的,回水越多,影响越大;水位异常另外一种原因是因水冲击井水面而使测压管水位上升引起的。解决的办法是进行水位修正或采用小流量水泵。

4.3 影响“稳定”的因素

自然界中,抽水试验真正能达到稳定的并不是很多,即使能达到稳定也要经过漫长的不稳定期。

能够达到稳定的有,越流系统的井位抽水,补给边界井流抽水,它们要达到稳定要经过较长的不稳定期。如:遂平王岗水源地 S_6 孔抽水试验(第一类越流系统),抽水7d,仍不能稳定(每天仍有5~10cm的下降),根据非稳定流理论计算, S_6 孔抽水达到稳定需2个月以上。

对于我们计算参数最常遇到的无限含水层无越流承压井流、潜水井流,一般不能达到稳定(特别是对大流量群孔抽水试验),在实际工作中,对于单孔稳定流抽水试验,一般情况下没有达到真正的稳定,“稳定”有可能是下列因素造成假象:抽水设备的问题,流量逐渐减小(观测误差而使数据上没显示),而使井中水位在一定时间内基本上保持不变;天然水位变化影响或其它抽水井干扰,如果抽水一段时间后水位缓慢下降,而天然水位处于上升期,这时观测到的水位好象稳定的(如果忽视天然水位变化);潜水中抽水水位要经历三个阶段,当经历中间的平直段时,即认为达到稳定;人为因素,当按一定流量抽水水位很难达到稳定时,把流量人为的调小,在一定时段内水位不再变化,

而认为水位达到稳定; 抽水前水位没有回到静水止位, 这是在实际工作中最易忽视也是经常发生的一个普遍问题, 它引起假稳定的原理用非稳定流群井干扰理论很容易说明; 前期水位没回到静止水位相当于一个注水井而使水位缓慢回升, 抽水而使水位缓下降(后期), 两者达到平衡, 水位“稳定”。

5 稳定流与非稳定流法综合对比

综合以上论述, 可列出稳定流与非稳定流方法对比表, 见表3。稳定流抽水试验及参数计算, 存在很多问题。有些问题采取一些措施是可以改善的, 如承压水抽水时不应向井中回水以免引起井中水位异常; 有些不可能解决, 如给水度的求取。稳定流求参如果仍在稳定流理论范围内采取有关措施是很难从根本上解决问题的, 而非稳定流方法就不难解决(参见表 2)。

地下水井流运动过程包括前期的不稳定状况和后期稳定状态(有可能不存在), 这是一个连续过程, 非稳

定流计算公式也包括了稳定阶段。电子计算机现已普及, 一些复杂的非稳定流计算公式计算很容易实现, 因此, 用非稳定流计算公式代替稳定流计算公式条件早已成熟。

在很多国外抽水试验的书籍中, 已找不到影响半径(R)的概念了, 而且稳定流公式只保留了少数几个, 且可用非稳定流公式推导出, 实际上它应属于非稳定公式, 如带 2 个观测孔的求 K 值公式: $K = \frac{Q (\ln r_2 - \ln r_1)}{2\pi M (S_1 - S_2)}$, 它与有越流承压水稳定时的非稳定流计算公式是一致的, 实际上已抛弃了稳定流理论。(参阅^[1]《抽水试验资料的分析和评价》G·P·克鲁斯曼等著、俞树森等译)。

6 对策

为改变我国地下水水文地质参数计算落后局面, 提高我国整体计算水平, 建议应逐步采取如下对策。

表 2 稳定流与非稳定流法对比表

方法	稳定流	非稳定流
抽水试验	1、要求达到稳定; 2、抽水时间长, 很多情况下不能稳定或时间太长, 经济不能接受; 3、要求三个落程, 设备较复杂。	1、不要求达到稳定; 2、抽水时间短, 可根据不同水文地质条件, 试验目的灵活掌握。
参数计算	1、只能计算K 值; 2、公式中有物理意义不明参数R; 3、由于受井损, 影响半径R 计算精度不高的影响, K 值计算精度不高误差有时很大; 4、不能稳定时, 不能计算参数。	1、可以计算各种有关参数; 2、公式经过较严密的理论推理而得出; 3、恢复法可基本上消除井损影响, 计算参数精度高, 特别是计算K 值时, 抽水计算方法均简单, 且精度高; 3、一个落程, 设备较简单; 4、不稳定、稳定均可计算参数。
降深计算	1、单孔抽水时, R 距离以外处的降深无法计算, 以内处的降深计算误差大; 2、群孔抽水时, R 意义更不明确, 更不可能准确获得, 计算的降深更不可信。	1、能较准确的计算出各处降深; 2、采用非稳定流干扰公式能较准确计算出各处降深。

(1) 大力宣传非稳定流理论及其它先进方法(如同位素示踪测井技术), 使广大工程技术人员了解, 它较稳定流理论计算精度高, 应用广泛等优点, 使其被广泛接受之。

(2) 广大工程技术人员自觉学习非稳定流理论, 并应用到工程实践中。

(3) 大力推广计算机在地下水计算中的应用, 多推出一些简单和实用的计算机软件。

(4) 加强非稳定流理论与实践研究, 以适应各种工程建设的需要。

(5) 对有关地下水计算手册规范进行修订, 取消影响半径的概念, 淡化稳定流与非稳定流之分, 以非稳定流理论(包括稳定阶段)统一思想和工作方法。

(6) 岩土工程勘察等部门, 有关地下水的计算目前仍以稳定流为主, 更应加强以上各方面的工作。

(7) 建立一个由各部门专家广泛参加的协调机构, 对稳定流向非稳定流转变出现的问题进行专门研究。

7 结语

稳定流计算公式存在着计算误差大、影响半径物

理意义不明确、适用范围小等等诸多问题, 但在我国工程实践中仍大量应用, 造成不必要的经济浪费及工程事故。这与我国现阶段的科学技术水平是不相适应的, 也大大落后于西方发达国家。为了改变这种状况, 需要广大水文地质工作者及有关部门大力合作, 采取各种措施完成稳定流理论向非稳定流理论的全面过渡, 使我国地下水计算技术提高到一个新水平。

参考文献

[1] G·P·克鲁斯曼, 等. 抽水试验资料的分析和评价[M]. 北京: 地质出版社, 1980.
[2] 供水水文地质手册编写组. 供水水文地质手册[M]. 北京: 地质出版社, 1986.
[3] GB 50027- 2001 供水水文地质勘察规范[S].
[4] JGJ- 120- 99 建筑基坑支护技术规程[S].
[5] 郭精超. 稳定流抽水试验操作中的两个误区[J]. 工程勘察, 2001, 2.
[6] 陈崇希. 地下水不稳定井流计算方法[M]. 北京: 地质出版社, 1985.