

地下水の揚水試験 (その1)

—基礎理論—

山本 荘 毅*

はじめに

揚水試験は帯水層の水理定数を求めるための試験である。最近、地下水問題が脚光をあびてきているが、これは水資源の開発利用という観点からだけでなく、ほかの重要な問題と関係をもっている。非常に包括的ない方をすれば“人間が自然に働きかける、あるいは働きかけた結果としての反応”として地下水問題をとらえることができるからである。こう考えると、地下水資源の開発からカンガイ排水、ダムの築造、地盤沈下、地スベリなど広い領域がこの中に入ってくる。

水理定数と呼ばれるものの中には多くの種類がある。その重要なものは、透水量係数 (Transmissibility coefficient, T)、透水係数 (Permeability coeff., K)、貯留係数 (Storage coeff., S) などであり、最近では抵抗係数 (Layer resistance $\sigma' = b'/K'$)**、比漏出率 (Specific leakage or Leakance, K'/b')、漏出係数 (Leakage factor $\lambda = (T\sigma')^{1/2}$) が要求されている。これらの定数を使えば、帯水層の、あるいは帯水層に含まれている地下水の挙動を定量的には握ることができ、その将来をも予測することができる。

揚水試験は始め Pumping test と呼ばれたが最近では帯水層試験 (Aquifer test) と呼ぶのが正しいという人もいる。ポンピング・テストではポンプの能力をためすための試験ととられるから、そのものズバリの帯水層試験という方がよいという主張で筆者もこれに賛意を表したい。最近では揚水試験の内容が拡張されて、比ユウ出量、地層係数、井戸係数の算出をも含めているからますます混乱する傾向にあるが少なくとも、揚水試験本来の目的からいうと帯水層試験の方がピッタリとする。

I. 試験と意義

揚水試験は1眼あるいは数眼の井戸を使って、一定の揚水量で水をくみあげ、時間とともに変化する水位を測定するか、長時間の揚水の後で揚水を停止し、回復する

水位を測定することによって水理定数を計算する方法である。人によっては揚水井 (親井戸) の水位だけを測定する方法を Drawdown test といい、観測井 (子井戸) の水位を測定するものを Interference test として区別することもある。

地下水を揚水することによっておこる水の流動は本質的には非定常的であるので、非平衡式を用いて計算することが望ましいが定常状態がえられれば平衡式でよい。一般的にいて、被圧水ではなかなか定常状態がえられないが不圧水 (自由水) では比較的短時間に定常状態がえられる傾向がある。

原理的には揚水によっておこる流れのパターンに理想的なものと考え、帯水層となっている地層は等質であり、有限な半径をもつ完全井で揚水し、井戸ロスはないという条件の下で揚水量 Q 、揚水井または観測井の水位降下 s が時間の関数として測定されれば、 $S \cdot T \cdot K$ が計算できるということである。このような仮定は必ずしも満足されえないが、えられる結果は“真の数値の概数値”——そのような表現が許されるならば——といってもよいようなものがえられているところにミソがある。そして、同じ場所、同じ流れに、この数値をいれてやれば帯水層の挙動の将来が予測できるという強味がある。しかし、これを逆にいえば条件のちがった処に適用すればだめであるということにもなるのである。

揚水試験はできれば何度もくり返して行なうことが望ましく、良い結果をうることが多い。試験を行なう前にテスト地付近の地質や境界条件 (水文的) などについてよく知っておく必要がある。帯水層の連続状態、均質性、タイプなどについての知識はえられた結果の妥当性を判断するのに役立つし、適用の限界についてある程度の示唆を与えてくれる。

揚水試験からえられた水理定数が実験室でえられたそれに比べてよい結果を与えるのは、それが比較的広い区域の平均値を示すからである。実験室で試験に供されるサンプルは点の代表であり、攪乱されたものであるのに対し、揚水試験、特に広域にわたる観測井をつかって行なわれた試験からえられた結果は面を代表しており、攪

** K' は難透水層の透水係数、 b' はその厚さである。

* 東京教育大大学院理学部

乱されない原位置の性質を示すものである。これが一井による試験よりも観測井を広域に設置した試験の方がよいといわれる理由である。

II. 試験の実施

揚水試験の実際については、この講座のなかで遠藤哲男、落合敏郎、川崎敬の諸氏が詳しく述べてくれることになっているのでよくわかると思うが仕事の手順を少し抽象的に書いてみることにした。ここでは項目をあげる程度で、あまり説明をしないことにする。

準備するものとしては次のものがある。

揚水井、観測井、ポンプ、モーター、動力、測水用具 スチール・テープ、マグネット・ベル、折尺あるいは自記水位計など) ノッチ、排水設備、ストップ・ウォッチ、測量機器、テント、紙、鉛筆、消しゴムなど。

(1) 位置の選定 予備調査の結果に基づいて、地下水面の谷の部分に揚水井をつくるのがよい。水路、堤防上はさける。用地の交渉をする。

(2) 揚水井の選定あるいは築造 既設井を使う時は構造をたしかめる。新しく構築する場合には式の条件にあうような井戸をつくるよう努力する。

(3) 観測井の配列と築造 地下水面の谷の方向に配列、揚水井の上流側と下流側に対称の位置に直線状に配列する。放射状に配列する必要はない。不圧水ではせいぜい50m以内、被圧水では200m以内である。深さは揚水井と同じが理想であるが、できなければ地下水面下なるべく深くまでとることが望ましい。内部の清掃をよくする必要がある。水位測定点を決定しておく。

(4) 予備試験の実施 本試験までに半日～1日おくことが望ましい。

(5) 本試験の実施 水位降下の状況を時々刻々図化してゆくと異状な状態あるいは測点の誤りなどを知ることができる。回復の場合も同じである。試験の時間は長い程よいが、最小4時間から数週間である。外国の例では数カ月というのをみたことがあるが日本ではせいぜい数日である。

III. 公式の適用

ここでは揚水試験に適用される公式を、(1)定常状態を示す平衡式、(2)非定常状態を示す非平衡式に分けて、この順にあげ、適用に関する注意を述べることにする。既に述べたとおり、揚水試験は一定の割合 Q での揚水量とそれに対応する $s(r)$ 、 $s(t, r)$ が知られば解がえられる仕組みになっている。ここで、従来あまり注意されなかったが重要なことは水位降下 s に対する補正であ

る。補正式は

$$\bar{s} = s - (s^2/2m)$$

で、ここに \bar{s} : 補正された水位降下量

s : 観測された水位降下量

m : 揚水前の帯水層の厚さ

である。この補正は特に不圧水の際重要である。

1. 定常状態を示す平衡式

(1)完全不圧井 (Full penetrated non-confined water well)

$$K = \frac{Q (\ln R - \ln r)}{\pi (H^2 - h^2)} = \frac{0.732 Q (\log R - \log r)}{(H^2 - h^2)}$$

ここで r は井戸の半径(既知)、 R は影響円の半径で、これを明らかにする必要がある。 $R=300\sim 500m$ にとり、原水位における不透水層からの水位高を H にとるが不正確である。 h も井戸の中で測定される限り不正確である。

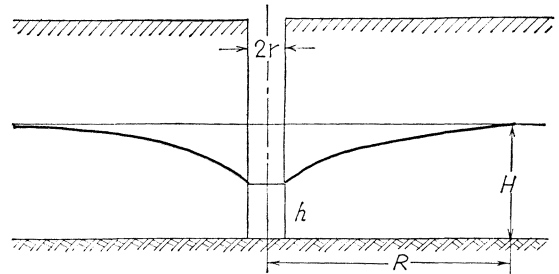


図-1 完全不圧井における揚水

(2) 完全被圧井 (Full penetrated confined water well)

$$K = \frac{Q (\ln R - \ln r)}{2\pi m (H - h)} = \frac{0.366 Q (\log R - \log r)}{m (H - h)}$$

ここで m は帯水層の厚さを示し、他の記号は同じである。問題となるのは R で、この場合 $R=500\sim 700m$ にとる必要があるが正確ではない。 h の不正確さは不圧井より大きい。

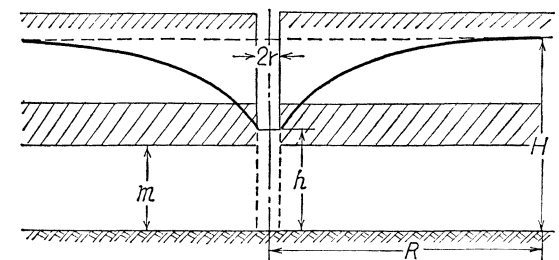


図-2 完全被圧井における揚水

(3) 観測井をもった完全不圧井

$$K = \frac{Q (\ln r_2 - \ln r_1)}{\pi (h_2^2 - h_1^2)} = \frac{0.732 Q (\log r_2 - \log r_1)}{(h_2 + h_1) (s_1 - s_2)}$$

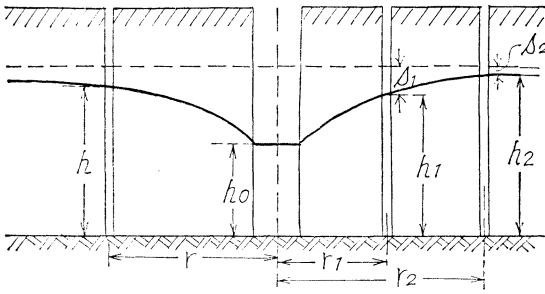


図-3

観測井2眼を利用した式である。揚水井を中心に、上下流対称の位置に観測井があれば、 h 、 s とも平均値をとって計算する。

(4) 観測井をもった完全被圧井

$$K = \frac{Q (\ln r_2 - \ln r_1)}{2\pi m (s_1 - s_2)} = \frac{0.366 Q (\log r_1 - \log r_2)}{m (s_1 - s_2)}$$

ここで m は帯水層の厚さ、図は省略するが、図-3から見当がつくと思われる。実際の試験で観測井をつくることは困難(経済的に)であるので既設の井戸を使用することが多い。被圧帯水層は不圧帯水層より等質なことが多いので、水位低下 s は方向に関係なく、 r の関数とみてよいことが多い。

(5) 観測井をもつ完全井で地下水面が傾いている場合 (1)限定公式

普通の公式は始め、地下水面が水平であるとしているがこれは傾斜をしている場合である。式は一般式の変形で次のように書くことができる。

$$K = 0.366 Q C$$

ここで、 Q は揚水量、 $C = A/B$

$$A = \frac{\log (r_2/r_1)}{0.25M}$$

$$B = \frac{1}{2} (s_{1u} + s_{1d} - s_{2u} - s_{2d})$$

s_{1u} : 上流 r_1 井における水位低下

s_{1d} : 下流 r_1 井 " "

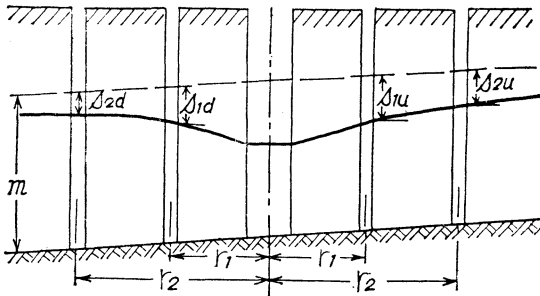


図-4 限定公式を適用する試験

s_{2u} : 上流 r_2 井 " "
 s_{2d} : 下流 r_2 井 " "

$M = 4m - s_{1u} + s_{1d} + s_{2u} + s_{2d}$, ただし被圧水では

$$M = 4m$$

m : 揚水開始前の帯水層の平均の厚さ

(6) 観測井をもつ完全井で地下水面が傾いている場合 (2)コウ配公式

この公式も最初の地下水面が傾いており、揚水井に向う地下水の流れは必ずしも四方八方同じではないが平均をとれば(例えば上流側と下流側とで)等しくなると考えられる。式は不圧水で

$$K = \frac{4bQ}{\pi r (h_u + h_d) [f(r+b)_u + f(r+b)_d - f(r-b)_u - f(r-b)_d]}$$

被圧水では

$$K = \frac{2bQ}{rm [f(r+b)_u + f(r+b)_d + f(r-b)_u - f(r-b)_d]}$$

m は帯水層の厚さである。

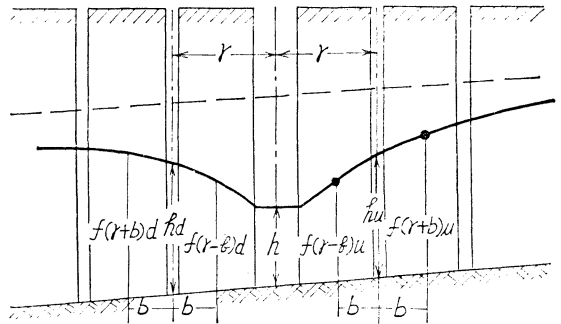


図-5 コウ配公式を適用する試験

2. 非定常状態を示す非平衡式

(1) 井底が不透水層に達しない場合 (不完全井, Partially penetrating well)

(1)井底が平らな場合 (図-6)

$$K = Q/4sr = 0.25Q/sr$$

(2)井底が円い場合 (図-7)

$$K = Q/2\pi sr = 0.159Q/sr$$

これらの式は浅くて、面積の大きい集水池では多少側壁からユウ水があっても使用できる。

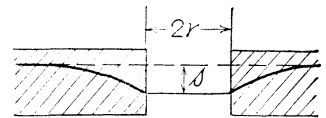


図-6

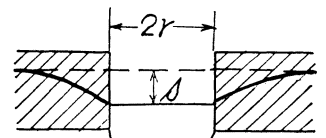


図-7

(2) 不完全井で、帯水層があまり厚くなく、側壁および井底からユウ水する場合

$$K = \frac{Q \log \frac{R}{r} \left(\frac{h}{t+0.5r} \right)^{0.5} \left(\frac{h}{2h-t} \right)^{0.25}}{1.36 (H^2 - h^2)}$$

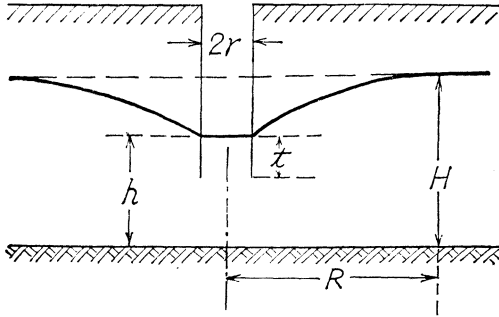


図-8 側壁と横から流入する不完全井

(3) 不完全被圧井のド・グリー式

ド・グリーは不完全被圧井で $b_s \leq 0.8b$, $b_s \geq 10r$ の時に下の式を与えている。

$$K = \frac{Q}{2\pi b_s} \frac{1-p}{p} \ln \frac{(1.2-p)b_s}{\beta r_0}$$

ここに $p = b_s/b$ で、トップ・スクリーンすなわち $b_2 = 0$ か、ボトム・スクリーンすなわち $b_1 = 0$ の時には $\beta = 1$ 、中間スクリーンの時は $\beta = 2$ である。 s は水位降下。

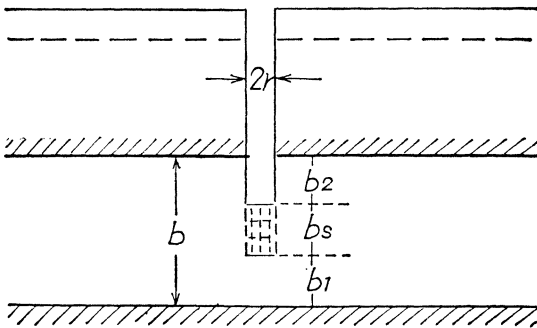


図-9 de-Glee の不完全井

3. 非平衡式

一定の揚水量に対して、水位低下 s は増加し、なかなか定常状態がえられないという一般的情况に対して非平衡式が適用される。非平衡式は一般に被圧水についてよく当はまるものである。

(1) タイスの解法

非平衡式は $s = (Q/4\pi T) W(u)$
 $r^2/t = 4Tu/S$

で示される。ここに $W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du$ で $u = r^2 S/4Tt$ である。

また、

T : 透水量係数 (K に帯水層の厚さをかけたもの)

S : 貯留係数

r : 距離

t : 時間

である。

$W(u)$ を井戸関数とよんでいる。

この式は T と S という二つの未知数を含んでいるにもかかわらず式が二つしかないので解くことはできない。タイスはこれを s と r^2/t ならびに $W(u)$ と u の関係に注目して図形的に解くことができることを示した。前式の両辺の対数をとれば

$$\log s = (Q/4\pi T) + \log W(u)$$

$$\log (r^2/t) = \log (4T/S) + \log (u)$$

となる。ここで $Q/4\pi T$, $4T/S$ は定数で、 $W(u)$ と u の関係は s と r^2/t との関係に帰着する。 $W(u)$ と u の関係を標準曲線として作っておく。標準曲線と同じ大きさの透明な両対数方眼紙に観測された s を r^2/t (観測井が一つなら $1/t$) に対してプロットする。両者を重ね合せて、任意のマッチポイントを選べば、ある $W(u)$ と T がえられ、したがって u と r^2/t もえられるから S が求まるのである。これに関しては後章で実例によって説明する。

(2) チョーの解法

チョーは一つの媒介変数 $F(u) = s/\Delta s$ を用いて、計算を容易にした。 s はある時間の水位降下量で Δs は次のようにして求める。 s を縦に、 t を横の対数尺にとった $s-t$ 曲線をつくり、この曲線上の任意に選ばれた点で切線をつくり、一つの対数サイクルにおける水位差として Δs をうる。 $s/\Delta s$ を計算すれば $F(u)$ がえられる。あらかじめ用意した $F(u)$, u , $W(u)$ 曲線から $W(u)$ が求まり、 $T = Q \cdot W(u)/4\pi s$ から T が求まる。 s に対応する t , u が知られるから S も計算することができる。

(3) ヤコブの解法

ヤコブは $u < 0.01$ の時に、非平衡式は次の式で近似できるとした。

$$s = \frac{Q}{4\pi T} (-0.5772 - \ln u)$$

そしてこれを次のように変形した。

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left(\ln \frac{1}{u} - \ln e^{-0.5772} \right)$$

$$= \frac{Q}{4\pi T} \left(\ln \frac{4Tt}{r^2 S e^{0.5772}} \right)$$

$$= \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25Tt}{r^2 S}$$

この式から、 t を一定として、 s と $\log r$ の関係を示す式として次式をうる。

$$s = -(2.3Q/2\pi T) [\log r - (1/2)\log(2.25Tt/S)]$$

また、 r を一定にすれば、 s と $\log t$ の関係になり、次式をうる。

$$s = (2.3Q/4\pi T) [\log t - \log(r^2S/2.25T)]$$

次にいくつかの r の異なる観測井でえられた、異なる時間 t の r^2/t と s との関係として

$$s = -(2.3Q/4\pi T) [\log(r^2/t) - \log(2.25T/S)]$$

をうる事ができる。

これらの式を使えば、標準曲線の重ねあわせというようには複雑さをさけることができるので便利である。

(4) 回復式

揚水を相当な時間 t 継続し、そこで揚水を停止すると水位は回復上昇する。揚水停止後の時間を t' 、その時の残留水位(原水位と回復水位との差)を s' とすれば次の式が成立する。

$$s' = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{t}{t'}$$

これから

$$T = \frac{0.183Q}{s'} \log \frac{t}{t'}$$

をうる。 s' と $\log t/t'$ の関係は t 、 t' が十分大きければ、原点を通る直線となる。両者の関係が直線とならない場合には補正係数 C をいれて

$$T = \frac{0.183Q}{s'} \log \frac{t \pm c}{t'}$$

とし、原点を通るようにするという提案もあるが、無理に原点に近づけると直線が立ってしまうことがある。それよりも原点を通らないまま、 $\log t/t'/s'$ を計算した方がよいようである(多少値が大きくなる)。

IV. 段階揚水試験

揚水量一定のまま揚水を継続し、 s の時間的变化を観

測する。次に揚水量を増加して、ある時間揚水を継続、これに対応する s の時間的变化を観測、さらに揚水量を増加して同じことをくり返す方法を段階式揚水試験という。ある人はこの方法によって適正揚水量を求めることができるとして、これがかなり普及しているがうそであるから注意することが肝要である。 Q を変化させ、 s の変化を観測することによって

$$s = BQ + CQ^2$$

といった関係を求めることができる。この式で B は地層係数、 C は井戸係数とよばれるものである。井戸の施工がよい場合、 C の値は小さくなるが同じ場所では B の値は一定である。

V. 比ユウ出量

井戸の揚水量を水位降下で割ったものが“比ユウ出量”である。段階試験の一般式 $s = BQ + CQ^n$ から

$$\frac{Q}{s} = \frac{1}{B + CQ^{n-1}}$$

であるから、 Q/s は一定とは限らない。一般に Q が増加すればこの比は減少をする。これをタイスの式で示せば

$$s = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \frac{2.25Tt}{r^2S} + CQ^n$$

となる。

$$\frac{Q}{s} = \frac{1}{(2.3/4\pi T) \log(2.25Tt/r^2S) + CQ^{n-1}}$$

となり、時間も関係することがわかる。 Q/s のデイメンションは $L^2 T^{-1}$ で透水量係数と同じであるので、この代用値とされることがある。比ユウ出量は簡単にえられてしかも大切な値であるが注意して使用する必要がある。

[1969. 10. 7. 受稿]