揚水による不圧帯水層の非定常流れの一解法

A Solution of Unsteady Flow in Unconfined Aquifer

by Pumping through Well

星田義治*・浜野啓造*・市川 勉*

Yoshiharu HOSHIDA, Keizo HAMANO

and Tsutomu ICHIKAWA

Abstract

The unsteady flow by pumping up in unconfined Aquifer is expressed as in Eq. (1).

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{k}{\beta} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r h \frac{\partial h}{\partial r} \right) \quad (1)$$

Where k : hydraulic conductivity, β : effective porosity, h : the water level at a distance r from the center of pumping well, t : time.

The existing solutions are almost approximative ones because Eq. (1) cannot be solved exactly. And the radius of well is neglected in these ones.

In this paper, the authors change the Eq. (1) into the non-dimensional simultaneous ordinary differential equation, and calculate numerically by means of Runge-Kutta method. In this case, the numerical calculation is done under the condition that the radius of well is finite. The calculated value is described as a diagram (this is called the equi-discharge type-curves diagram), and a graphical method which calculates formation constants is proposed (this is called the equi-discharge type-curves method). The equi-discharge type-curves method is compared with existing methods and discussed using data by model tests and field tests. Using this equi-discharge type-curves method, analysis becomes simple, and more uniform result is obtained in comparison with the results using existing methods.

1. 緒 論

不圧地下水の揚水による非定常状態に対しては、従来、Theis・野満の解、Jacobの解等が主に使用されている。しかし、基礎式が非線形のため、これらは近似解となっている。この観点から、これらの近似を行わずに、基礎式を連立常微分方程式に変形し、これを数値計算した。この計算結果を線図化し（この線図を等汲み出し線図と呼んでいる）、実験データより得られた曲線をこの等汲み出

* 東海大学工学部

し線図に重ねることによって、帯水層定数を求める一方法（この方法を等汲み出し線法と呼んでいる）を提案し、室内実験および現場揚水試験のデータをもとに、従来の方法と比較検討を行なった。

この数値計算（非線形解）と線形解である Theis・野満の解と比較すると、非線形効果が定量的に把握できる。また、この数値計算では、従来の解が井戸の半径を無視しているのに対し、井戸の半径を有限としていることから、井戸の中心から任意距離における水位の時間的変化を計算することができ、そのため、帯水層定数を求める時も、揚水井や観測井のデータを同時に解析することができ、解析も従来に比べ、簡単で、比較的安定した値を得ることができる。また、任意時刻における影響半径や任意地点の水位降下を予測することも可能となる。

2. 従来の研究

1935年、Theis が被圧地下水における揚水による非定常状態の解析を行なってから、揚水による非定常浸透の理論は、多くの研究者によって発表されてきた。被圧地下水の非定常浸透の基礎式は、線形偏微分方程式となり、そのまま基礎式を解くことができる。

一方、不圧地下水の非定常浸透の基礎式は、次式で表わされる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{k}{\beta r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r h \frac{\partial h}{\partial r} \right) \quad (2.1)$$

初期条件および境界条件は、

$$\left. \begin{array}{l} t=0 \quad : \eta=0 \\ t>0, r=r_0 : Q_{r0}=Q \text{ (=const.)} \\ r \rightarrow \infty : \eta=0 \end{array} \right\} \quad (2.2)$$

ここで、 Q ：揚水量、 h ：井戸の中心から r の距離における水位、 η ：井戸の中心から r の距離における水位降下、 Q_{r0} ：井戸の縁における流量、 k ：透水係数、 β ：有効空隙率、 H ：揚水前の水位（図 2—1 参照）。

図 2—1 不圧帯水層

(2.1) 式は、次のような仮定のもとに成り立っている。

- 1) 帯水層は、均質等方であり、無限に広がっている。
- 2) 帯水層下の不透水層の上面は、水平であり、下からの水の補給はない。
- 3) 井戸は、完全貫入井戸であり、井戸ロスはない。
- 4) 地下水の流れは、準一様流の仮定を満足し、Darcy の法則が成立する。
- 5) 井戸における浸み出し量と汲み出し量は等しい。

(2.1) 式を見ればわかるように、不圧地下水の非定常浸透の基礎式は、非線形偏微分方程式となり、厳密解を求めることはできない。

1935年、野満らは、この基礎式を水位降下が揚水前の水位に比べ十分小さい ($h \doteq H$) として、(2.1) 式を解いた。その解は、次式で表わされる。

$$\eta = \frac{Q}{4\pi kH} \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{Q}{4\pi kH} W(u) \quad (2.3)$$

ここで、 $W(u)$ は井戸関数と呼ばれるものであり、 $u = \beta r^2 / (4kHt)$ である。この解は、Theis・野満の解と称する。

1946年、Jacob は、井戸関数を級数展開したものを用いて、(2.3) 式を次式のように表わし、帯水層定数算定法を提案している。(この方法を Jacob の直線法と称している。)

$$\eta = \frac{2.303Q}{4\pi kH} \left(\log \frac{t}{r^2} - \log \frac{\beta}{2.25kH} \right) \quad (2.4)$$

しかし、この近似が、水位降下の大きさによって、どの程度結果に影響があるものなのかということについては、はっきりしていなかった。

1965年、岸・三宅・池田は、(2.1) 式を摂動法により、野満らの近似を行わずに解いた。この解は、次式で示される。

$$\zeta = \frac{\eta}{H} = \delta\zeta_1 + \frac{1}{2} (\delta\zeta_1)^2 + \frac{1}{2} (\delta\zeta_1)^3 + \dots \quad (2.5)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} \zeta_1 &= \int_{\xi}^{\infty} \frac{e^{-\xi^2}}{\xi} d\xi = \frac{1}{2} \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{1}{2} W(u) \\ u &= \xi^2 = \frac{\beta r^2}{4kHt}, \quad \delta = \frac{Q}{2\pi kH^2} \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

この解を岸・三宅・池田の解と称する。この解は、基礎式を理論的に解いた解であるが、誘導の過程で近似をしている。また、実用上のことを考慮して、(2.5) 式のように、第3項まで求めている。理論的に基礎式の解を求めたものでは、岸らの解が現在のところ最も厳密解に近いものと思われる。第4項以降を著者らが計算したところ、次のようになった。

$$\zeta = \delta\zeta_1 + \frac{1}{2} (\delta\zeta_1)^2 + \frac{1}{2} (\delta\zeta_1)^3 + \frac{5}{8} (\delta\zeta_1)^4 + \frac{7}{8} (\delta\zeta_1)^5 + \dots \quad (2.7)$$

一方、近年、コンピュータが急激に発達し、このコンピュータを用いて数値解を求める動きがでてきた。1966年、J. Kriz らは、(2.1) 式を変形し、Runge-Kutta 法によって数値計算を行なった。そして、この結果を線図として表わし、この線図による帯水層定数算定法を提案している。その計算式は、次式で表わされる。

$$\frac{d^2\omega}{d\xi^2} + \left(\frac{1}{\xi} + \frac{1}{\sqrt{\omega}} \right) \frac{d\omega}{d\xi} = 0 \quad (2.8)$$

この式に即した形の境界条件は、

$$\left. \begin{aligned} \lim_{\xi \rightarrow \infty} \sqrt{\omega}(\xi) &= 1 \\ \lim_{\xi \rightarrow 0} \xi \frac{d\omega}{d\xi} &= \frac{Q}{2\pi kH^2} \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

ここで、 $\xi = \beta r^2 / (4kHt)$, $\omega = g^2 = (h/H)^2$ である。

これらの解は、すべて同じ仮定、条件で解かれている。ただし、(2.2) 式に示した境界条件で、 $r=r_0$ で $Q_{r_0}=Q$ としているが、これらの解では、井戸の半径を帯水層の広がり比べ、十分小さいとして無視している。 $(r=0$ で $Q_r=Q)$ したがって、その差は、いかに忠実に基礎式を解くかということになる。

3. 等汲み出し線法 (I)

3-1 基礎式の数値計算

(2.1) 式を $y=r^2/(4CHt)$ ($C=k/\beta$) を使って変数変換し、境界条件を導入すると、次の連立常微分方程式となる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dz}{dy} &= -\frac{z}{g} \\ \frac{dg}{dy} &= \frac{z}{gy} \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

初期条件および境界条件は、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} y \leq 0 & & : g=1 \\ y > 0, \quad y=y_0=\frac{r_0^2}{4CHt} & & : z=z_0=\frac{Q}{4\pi kH^2} \\ y \rightarrow \infty & & : g=1 \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

(3.1) 式を導く仮定は、従来の解と全く同じであるが、従来の解と異なる点は、従来の解が、境界条件で、 $r=0$ で $Q_r=Q$ としているのに対し、等汲み出し線 (I) では、 $r=r_0$ で $Q_{r_0}=Q$ (井戸の半径は有限) としている点である。

(3.1) 式は、このままでは解けないので、数値計算を行なった。この数値計算は、2点境界値問題として取扱い、計算手法は、Runge-Kutta 法を用いた。この計算結果を次のように線図として表わした。

片対数紙の横軸に y 、縦軸に $g (=h/H)$ をとり、 g と y の関係を表わした曲線 (この曲線を g 曲線と呼ぶ) を描く、次に、各 g 曲線上の z の等しい点を結び、 z を z_0 とする (この曲線を等汲み出し線 (I) と呼ぶ)。この等汲み出し線 (I) に実験曲線を重ねることによって帯水層定数を求めることができる。 z_0 は無次元の汲み出し量を表わし、この汲み出し量が一定である位置は揚水井であるので、等汲み出し線 (I) は、揚水井における水位変化を表わすものである。この等汲み出し線 (I) を図 3-1 に示す。

2. で述べた従来の解も等汲み出し線 (I) と同様な曲線に表わすことができる。

Thels・野満の解は、(2.3) 式より、

$$g = \frac{h}{H} = 1 - \frac{\eta}{H} = 1 - \frac{Q}{4\pi kH^2} W(u) = 1 - Z_0 W(u) \quad (3.3)$$

これを等汲み出し線 (I) と比較したのは、図 3-2 である。また、岸・三宅・池田の解は、

$$g = 1 - Z_0 W(u) - \frac{1}{2} (Z_0 W(u))^2 - \frac{1}{2} (Z_0 W(u))^3 \quad (3.4)$$

となり、同様に比較することができる。図 3-2 を見ると、水位降下率 (水位降下/初期水位) が約 10% 付近まで一致している。また、(3.4) 式より、岸・三宅・池田の解と等汲み出し線 (I) を比較

図3-1 等汲み出し線 (I)

図3-2 等汲み出し線 (I) と Theis・野満の解の比較

図3-3 等汲み出し線 (I) と Theis・野満の解 (井戸の半径を有限とした場合) の比較

すると、水位降下率が約40%まで一致する。次に、Krizらの解は、すでに線図化されているので比較すると、等汲み出し線(Ⅰ)とほぼ一致した。これらの比較で共通していることは、 y の値の大きいところで、従来の解と等汲み出し線(Ⅰ)と一致しないことである。(図3-2参照)これは、従来の解の境界条件が、井戸の半径を無視しているのに対し、等汲み出し線(Ⅰ)では、井戸の半径を有限としたためである。

Theis・野満の解、岸らの解について、井戸の半径を有限として解いてみると、次のようになる。

$$g = 1 - Z_0 W(y) e^{y_0} \quad (3.5)$$

$$g = 1 - Z_0 W(y) e^{y_0} - \frac{1}{2} (Z_0 W(y) e^{y_0})^2 - \frac{1}{2} (Z_0 W(y) e^{y_0})^3 \quad (3.6)$$

ここで、 $y_0 = r^2 / (4CHt) = (U_0)$ である。

(3.5) 式と等汲み出し線(Ⅰ)を比較したのが図3-3である。図3-2で見られた y の値の大きいところでの不一致は、図3-3では見られない。岸らの解についても同様になる。

3-2 等汲み出し線法(Ⅰ)

この等汲み出し線(Ⅰ)を使用した帯水層定数算定法(等汲み出し線法(Ⅰ)と呼ぶ)は、次のような手順で行なう。

- 1) 実測値より、 $y = r^2 / (4Ht)$, $g = h/H$ を計算し、片対数紙の横軸に y' , 縦軸に g をとり、 y' に対する g の値をプロットする。
- 2) 実測値より得た1)の曲線を等汲み出し線(Ⅰ)に重ね、 g の値を一致させながら実験曲線と最も良く合致する等汲み出し線(Ⅰ)を見つける。
- 3) 合致した状態で、 Z_0 の値と y' に対応する y の値を読む。
- 4) これらの結果より、次のようにして透水係数(k)と有効空隙率(β)を求める。 z_0 の値より

$$k = Q / (4\pi Z_0 H^2)$$

y および y' の値より、

$$\frac{y'}{y} = \frac{r^2}{4Ht} / \frac{r^2}{4CHt} = C = \frac{k}{\beta}$$

4. 等汲み出し線法(Ⅱ)

(2.1) 式を $\tau = kHt / (\beta r_0^2)$, $y = x / \sqrt{\tau}$, $x = r / r_0$, $y_0 = 1 / \sqrt{\tau}$, $\xi = y / y_0$ を使って変形し、境界条件を導入すると、次の連立常微分方程式となる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dz}{d\xi} &= \frac{z}{\xi g} \\ \frac{dz}{d\xi} &= -\frac{y_0^2 \xi z}{2g} \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

(4.1) 式に対応する境界条件は、

$$\left. \begin{aligned} \xi = 1 : \xi g \frac{dg}{d\xi} \Big|_{\xi=1} &= z_0 = \frac{Q}{2\pi k H^2} \\ \xi \rightarrow \infty : g &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

(4.1) 式を導く仮定は、従来と全く同じであり、(4.2) 式の境界条件も等汲み出し線(Ⅰ)の場合と同じである。(4.1) 式を Runge-Kutta 法によって数値計算すると、各 z_0 , y_0 の値に対して、 x ,

g, z の一連の値が計算される。この計算は、東海大学電子計算機システム、UNIVAC 1108を用いて行なった。また、3. で示した等汲み出し線(Ⅰ)の数値計算は、東海大学電子計算機システム、FACOM 45/55 OS-2 を用いて行なった。この計算結果より、ある z_0 に対して、パラメータ y_0 の各値について、 $x-g$ 曲線を描くと水位の時間的空間的变化を表わすことができる。これを図4-1に実線で示す。また、 x を一定にして、 $g-\tau$ 曲線を描くと、各観測井の位置における汲み出し量 z_0 による水位の時間的变化を表わすことができる。(これらの線図を等汲み出し線(Ⅱ)と呼ぶ。) これらの図を用いれば、帯水層定数を求めることができ、また、影響半径も井戸の中心から任意距離における水位変化も予測可能となる。

従来の解も等汲み出し線(Ⅱ)と同様に、水位の時間的空間的变化を描くことができる。

・ Theis 野瀬の解は、 $y=y_0x^2$ より、

$$g=1-Z_0W(y_0x^2)e^{y_0} \quad (4.3)$$

一方、岸らの解は、次のようになる。

$$g=1-Z_0W(y_0x^2)e^{y_0}-\frac{1}{2}\left(Z_0W(y_0x^2)e^{y_0}\right)^2-\frac{1}{2}\left(Z_0W(y_0x^2)e^{y_0}\right)^3 \quad (4.4)$$

図4-1には、(4.3)式で計算した Theis・野瀬の解と、等汲み出し線(Ⅱ)とを比較したものである。岸らの解も(4.4)式より同様に比較でき、これらは、等汲み出し線(Ⅰ)と比較した場合と同様な結果となる。

図4-1 水位の時間的空間的变化図

4-2 等汲み出し線法(Ⅱ)

3. で説明した等汲み出し線法(Ⅰ)と同様に実験曲線を等汲み出し線(Ⅱ)に重ねることによって、帯水層定数を求めることができる。その式は、次のようになる。

z_0 の値より、

$$k=Q/(2\pi Z_0 H^2)$$

τ (等汲み出し線(Ⅱ)) と τ' (実験曲線) より

$$\frac{\tau}{\tau'} = \frac{kHt}{\beta r_0^2} \bigg/ \frac{Ht}{r_0^2} = \frac{k}{\beta}$$

等汲み出し線法(Ⅱ)の場合、等汲み出し線法(Ⅰ)や従来の方法と異なり、各観測井のデータを同時に解析できるので、より安定した帯水層定数を算定できるものと思われる。

5. 室内実験

5-1 実験装置および方法

実験は、円筒形実験装置と円形を1/24にした扇形実験装置を用いて行なった。円筒形実験装置は、初期水位 125.2cm、半径 100cm で、中央に直径 10.53cm の揚水井があり、この井戸からサイフォンによって揚水を行なう。井戸の中心から 90cm の位置で水位一定とし、各観測井には、砂層中に径 2.3 cm のストレナのためのビニールパイプを立てたものを用い、これらの水位は、実験装置下部より逆サイフォンでマンメータへ導き、その水位変化を抵抗線式の記録装置によって自動記録させた。

扇形実験装置は、揚水井の半径 10cm、揚水井の中心から 2 m の距離で水位一定とし、揚水は揚水井よりサイフォンにて行ない、流量は、流量計を通すことによって一定化した。各観測井の水位変化は、円筒形の場合と同様な方法で測定した。実験に使用した砂は、比重 2.62、平均粒径 0.8mm、均等係数 1.96 の砂 (赤砂と呼ぶ)、豊浦産標準砂、比重 2.60、平均粒径 0.64mm、均等係数 1.49 の砂 (白砂と呼ぶ) の 3 種である。ただし、円筒形の実験では、赤砂のみで実験を行なった。

5-2 結果および考察

解析は、標準曲線法、Jacob の直線法、Thiem の定常解、等汲み出し線法(Ⅰ)、(Ⅱ)の各方法で行なった。

Thiem の定常解を除く他の 4 つの方法は、全て図式解法である。図式解法の場合、実験曲線の解析位置によって、結果が大きく異なる。特に、等汲み出し線法(Ⅱ)を除く他の 3 つの方法は、曲線が 1 本であるので、曲線上のいたるところで解析可能である。等汲み出し線法(Ⅰ)で解析する場合、実験曲線は、3 つの折れ線に近似できる。そこで、この 3 つの勾配のうち、中央の勾配を使用した。標準曲線法や Jacob の直線法についても、同じ位置を使用した。等汲み出し線法(Ⅰ)と等汲み出し線法(Ⅱ)の解析例を図 5-1、図 5-2 に示す。また、これらの解析結果の一例を図 5-3、図 5-4 に示す。図 5-3 は、透水係数と井戸の中心からの距離、図 5-4 は、透水係数と水位降下率で結果を

図 5-1 等汲み出し線法(Ⅰ)解析例

図5-2 等汲み出し線法(Ⅱ)解析例

図5-3 各解析法による解析結果(室内実験)

図5-4 各解析法による解析結果(室内実験)

表わしたものである。

図5—3を見ると、等汲み出し線法(Ⅰ)、標準曲線法、Jacobの直線法で、井戸から離れるにしたがって、透水係数が大きくなっている。これは、3.でも述べたように、等汲み出し線法(Ⅰ)は、揚水井に対して表わされていることが原因となっているように思われる。次に図5—4で、透水係数の解析値を見ると、標準曲線法とJacobの直線法による値が、水位降下率が大きくなるにしたがって、小さくなっている。これは、3.で述べたように、Theis・野満の解が、水位降下が初期水位に比べ十分小さいとして解いていることが原因となっているものと思われる。また、有効空隙率は、等汲み出し線法(Ⅰ)、(Ⅱ)を除く他の方法では、水位降下率が大きくなるにしたがって、大きくなる。したがって、Theis・野満の解を基礎にしている標準曲線法やJacobの直線法は、図式解法という方法の特性も考慮に入れて、その適用限界は、水位降下率15~20%付近と思われる。以上のように、等汲み出し線法(Ⅰ)、標準曲線法、Jacobの直線法は、1本の実験曲線を解析するのであるから、曲線のいたるところで解析可能であり、上記のような方法をとっても解析値にある程度の幅がでてくる。これに対して、等汲み出し線法(Ⅱ)では、揚水井および各観測井のデータを同時に解析できるので、比較的安定した結果を得ることができるものと思われる。また、等汲み出し線法(Ⅱ)では、揚水井の水位降下が大きくなると、観測井のデータはよく合致するが、揚水井および揚水井の近くの観測井のデータは、計算曲線を下回る。そして、図5—2を見るとわかるように、揚水開始直後では、計算曲線を上回っている。これらは、基礎式の井戸における条件が不十分、直接測定でないためのTime-Lag等の原因が考えられる。

6. 現場揚水試験データへの適用

6—1 帯水層

5.では、室内実験を行ない、等汲み出し線法(Ⅰ)、(Ⅱ)について検討し、考察を行ってきたが、ここでは、さらに、現場のデータ2例について適用し、検討を加える。

2例のデータの諸元は、データAの場合、揚水量 $Q=260\text{cm}^3/\text{sec}$ 、初期水位 13.3m、観測井は、揚水井の中心から 3m, 10m, 20mそれぞれ離れた3本である。揚水井は、貫入率65%と不完全貫入井である。なお、このデータは、赤井・宇野の論文より引用したものである。データBの場合、揚水量 $Q=17667\text{cm}^3/\text{sec}$ 、初期水位 579cm、観測井は、揚水井の中心からそれぞれ、8.9m, 11.95m, 23.15m離れた本である。揚水井の貫入率は、69%である。

6—2 解析結果および考察

解析は、両データとも、標準曲線法、Jacobの直線法、等汲み出し線法(Ⅰ)、(Ⅱ)、Thiemの定常解の各方法について行なった。この結果を表わしたのが表6—1である。表6—1では、揚水井が不完全貫入井であるから、M. Muskatの修正係数を乗じてある。

図6—1、図6—2は、2つのデータの等汲み出し線法(Ⅱ)による解析である。データAの場合、各観測井の曲線とも良く合致する。このデータで、揚水開始後1日経過したときの影響半径と各観測井の水位を予測してみると、1日後の y_0 の値は、 $y_0=4.66 \times 10^{-4}$ となり、このときの水位の時間的空間的变化図より、影響半径は、 $R \approx 130\text{m}$ 、揚水井の水位降下は、105cm、各観測井の水位降下は、それぞれ、55cm, 37cm, 27cmとなる。データBの場合、図6—2を見ればわかるように、揚水井のデータを合致させると、各観測井のデータが、等汲み出し線(Ⅱ)を下回っている。このことから、帯水層が均質等方でなく、揚水井と観測井の位置の地質が異なることが想像される。

表 6—1 帯水層定数解析表 (現場揚水試験)

観測 井戸	標準曲線法		Jacob の直線法		等汲み出し線法(I)		等汲み出し 線法(II)	Thiem の 定常解
	透水係数	有効空隙率	透水係数	有効空隙率	透水係数	有効空隙率		
データ A	観測井 No. 1	1.8×10^{-3}	6.3×10^{-4}	2.0×10^{-3}	4.1×10^{-4}	2.5×10^{-3}	6.6×10^{-4}	1.8×10^{-3} 有効 空隙率 3.4×10^{-4}
	No. 2	1.9×10^{-3}	5.7×10^{-4}	1.9×10^{-3}	6.2×10^{-4}	2.0×10^{-3}	5.6×10^{-4}	
	No. 3	2.1×10^{-3}	4.9×10^{-4}	2.1×10^{-3}	5.6×10^{-4}	2.0×10^{-3}	7.3×10^{-4}	
データ B	揚水井	2.0×10^{-1}	5.9×10^{-2}	1.9×10^{-1}	7.2×10^{-2}	2.1×10^{-1}	7.2×10^{-2}	適用 不能
	観測井 No. 5	2.3×10^{-1}	7.4×10^{-3}	2.2×10^{-1}	7.8×10^{-3}	2.2×10^{-1}	1.2×10^{-2}	
	No. 6	2.3×10^{-1}	4.8×10^{-3}	2.3×10^{-1}	4.9×10^{-3}	2.2×10^{-1}	7.3×10^{-3}	
	No. 7	2.4×10^{-1}	1.8×10^{-3}	2.2×10^{-1}	2.0×10^{-3}	2.4×10^{-1}	3.1×10^{-3}

図 6—1 等汲み出し線法(II)適用図 (データ A)

図 6—2 等汲み出し線法(II)適用図 (データ B)

7. 結 論

以上、従来の研究および各解法と等汲み出し線法を理論的な面と実験的な面で検討を行ってきた。その結果次のような結論を得た。

- 1) 等汲み出し線図（非線形解）と Theis・野満の解（線形解）を比較すると、水位降下が初期水位の10%程度まで一致する。
- 2) 従来、無限に広がる帯水層に対し、井戸の半径が微小であるとして、井戸の半径を無視して解いて来たが、井戸の半径を有限として解いた等汲み出し線を用いれば、観測井についても揚水井における解析値や定常解とほぼ等しい値が得られた。
- 3) 等汲み出し線法(Ⅱ)では、何本かの実験曲線を同時に適用するので、解析位置の決定に手間が省け、また、より安定した帯水層定数を算定できる。
- 4) 井戸の半径を有限として解を求めた非線形解（等汲み出し線(Ⅱ)）を用いれば、任意時刻における影響半径や任意地点の水位降下も簡単に予測できる。
- 5) 等汲み出し線法の適用限界については、室内実験では、水位降下率50%付近でも水位降下率20%付近の値とそれほど差がなかったが、鉛直流の考慮をしていないため、この鉛直流を考慮した場合と比較して、決定する必要があるだろう。

今後は、井戸における条件、井戸ロスの評価、Darcy の法則、鉛直流の考慮、不飽和の問題、異方性、不均質、漏水がある場合等の諸問題に関して検討を行なう必要があるだろう。

参 考 文 献

- 1) Theis, C.V. (1935): The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage, Trans. Amer. Geophys. Union, Reports and papers, Hydrology, pp. 519~524.
- 2) 野満隆治・山下 馨 (1945): 井戸理論の一進展（第2報）, 地球物理, 7巻1号, pp. 21~40.
- 3) 岸 力 (1968): 水理学演習(1), 学献社, pp. 274~278.
- 4) Cooper, C.C., Jr. and Jacob, C.E. (1946): A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history, Trans. Amer. Geophys. Union, papers, Hydrology, Vol. 27, No. 4, pp. 526~534.
- 5) 三宅康夫, 岸 力 (1966): 井戸への非定常地下水流に対する非線形解, 第21回年次学術講演会講演集, 土木学会, pp. 94-1~94-2.
- 6) 三宅康夫 (1967): 現場揚水試験の非線形解, 土と基礎, No. 515, October, pp. 19~24.
- 7) Kriz, G.J., Scott, V.H. and Burgoyne, R. H. (1966): Analysis of parameters of an unconfined aquifer, Jour. Hydraulic Division, Proc. ASCE, Vol. 92, HY5, Proc. paper 4901, September, pp. 49~56.
- 8) Kriz, G. J. (1967): Determination of unconfined aquifer characteristics, Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol. 93, No. IR2, Proc. paper 5269, June, 37~47.
- 9) 星田義治・浜野啓造・市川 勉 (1976): 帯水層定数算定のための非定常解析における2, 3の問題, 第11回土質工学研究発表会講演集, 土質工学会, pp. 749~752.
- 10) 星田義治・浜野啓造・市川 勉 (1976): 揚水による非定常状態の数値解(Ⅱ), 昭和51年度秋季講演会講演集, 日本地下水学会, pp. 22~23.
- 11) 星田義治・浜野啓造・市川 勉 (1975): 不圧地下水の揚水による帯水層定数の算定法（第2報）, 東海大

学紀要工学部, 1975—2, pp. 73~93.

- 12) 星田義治・浜野啓造・市川 勉 (1975): 帯水層定数の算定法に関する一実験, 第30回年次学術講会講演集—II, 土木学会, pp. 230~231.
- 13) 星田義治・浜野啓造・飯田邦彦 (1974): 不圧地下水の揚水による帯水層定数の算定法 (第1報), 東海大学紀要工学部, 1974—2 pp. 55~62.
- 14) 赤井浩一・宇野尚雄(1964): 自由水面をもつ地下水の揚水試験に対する考察, 土と基礎, Vol. 12, No. 7, July, pp. 15~19.
- 15) Muskat, M., (1937): The flow of homogeneous fluid through porous media, Mc Graw-Hill, . pp. 96.

(受付: 1977年3月31日, 受理: 1977年7月2日)