

井戸ロスと漏水を考慮した現地揚水試験の解析

Analysis of the Field Pumping Tests Considering Well Loss and Leakage

市川 勉*・星田 義治**・赤石勝***・神野健二****・玉井信行*****

by Tsutomu ICHIKAWA, Yoshiharu HOSHIDA, Masaru AKAISHI,

Kenji JINNO and Nobuyuki TAMAI

The authors developed a formulation and solution for discharge of each aquifer in a multi-layered aquifer-aquitard system including the resistance of a well casing and leakage between each aquifer. Numerical solutions for two field pumping tests are carried out. One is unsteady flow caused by pumping up from a two-layered confined aquifer system. Another is an unsteady flow caused by pumping up from a well in a peddy field area considering leakage through an aquitard.

The observed drawdown in a well and seepage rate into a well from each aquifer determined by vertical velocity measurement in a well are in good agreement with predicted results.

Key words ; field pumping test, leakage, well loss, multi-layered aquifer,

1. まえがき

水源として地下水を取水する場合、井戸は最もよく用いられる施設である。井戸を利用する場合、適正揚水量、帯水層定数や揚水の影響を知るために現地で揚水試験を行う。現地揚水試験によって得られるデータは帯水層や井戸の諸元（帯水層の厚さ、初期水位、井戸径、井戸の深度等）の他に揚水井や観測井の水位変動である。このうち、水位の変動は、帯水層の不均質性の他に、他の領域からの漏水等によって変化する。また、我が国で使われている井戸の形式は2つ以上の帯水層から地下水を取水している多層集水井戸が多く見られる。2層以上の帯水層から揚水する井戸の水位は各帯水層の合成水位を示している。したがって、この形式の井戸では各帯水層から井戸へはいつてくる流量と井戸内外の水位を知ることが重要となる。

多層集水井戸、特に2つの帯水層からの揚水理論については、かつて、いくつかの論文が発表されている。2つの帯水層のうち、下部の帯水層からのみ揚水する場合の両帯水層における地下水定常理論については、本間、荻原¹⁾、Motz²⁾、Hantush and Jacob³⁾ら、非定常理論については、Neuman and Witherspoon⁴⁾、Bredhoeft and Pinder⁵⁾、Fujinawa⁶⁾らがある。また、2つの帯水層から同時に揚水する場合の揚水理論については、Bennet and Patten⁷⁾、Papadapulos⁸⁾、Abdulkhader and Veerankutty⁹⁾らがあるが、これらについては、井戸損失及び各帯水層間の漏水を考慮しているものはない。また、これらの研究では、井戸へ流入する流量や、地下水位の計算であまり良い結果が得られていない。特に、Bennetらの研究では各帯水層から井戸へ流入する流量の算定に好結果が得られない理由のひとつとして、井戸ロスを考慮していないためではないかという

* 正会員 工修 九州東海大学助教授 工学部土木工学科 (862熊本市渡鹿9-1-1)

** 正会員 工博 九州東海大学教授 工学部土木工学科 (862熊本市渡鹿9-1-1)

*** 正会員 工博 東海大学教授 工学部土木工学科 (259-12平塚市北金目1117)

**** 正会員 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科 (812福岡市東区箱崎6-10-1)

***** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科 (113東京都文京区本郷7-3-1)

見方もある¹⁰⁾。著者らは既に、2つの帯水層から揚水する場合の地下水の定常流動について、井戸損失、各帯水層間の漏水を考慮して数値計算による解析を行い、室内実験に適用して、良い結果を得ている¹¹⁾。

本論文では、N個の帯水層からなる多層帯水層から同時に揚水する場合の地下水の非定常流動に対する基礎式に各帯水層間の漏水を考慮した項を加え、この基礎式を井戸における境界条件として、井戸における連続方程式と運動方程式を用いて数値計算を行った。そして、この解析法を現地揚水試験（2層帯水層と上部に水田のある場合とない場合）の解析に利用した。

2. 数値計算のための式の誘導

2.1 被圧群多層帯水層システム

多層帯水層から同時に揚水する場合に考えられるシステムのうち、最も一般的な形は、最上部の帯水層が不圧帯水層で、それ以下の帯水層は、全て被圧帯水層である場合（このシステムを不圧-被圧群多層帯水層システムと呼ぶ）と全ての帯水層が被圧帯水層である場合（このシステムを被圧群多層帯水層システムと呼ぶ）であり、本論文においては、後者の被圧群多層帯水層システムについて述べるものとする。

図-1において、各帯水層の涵養側水頭が異なる場合、井戸内の初期水位は、各帯水層からの流入、流出の総和が0となるような位置になり、帯水層によっては、揚水の場合もあり、注入の場合もある。この場合、井戸枠における運動方程式に含まれている井戸枠の無次元抵抗係数 α が注入と揚水ではやや異なった値（揚水の場合に比べると注入の場合では、 α はやや小さくなる、すなわち井戸損失の量が大きくなるという実験結果を得ている¹¹⁾）となるが、本論文では無次元抵抗係数は、注入、揚水は同じものとして扱う。また、ここで用いる式は、以下の仮定を前提としている。

(1) 各帯水層とも均質等方で水平である。(2) 全帯水層でダルシーの法則が成り立つ。(3) 井戸は最下部の帯水層底部まで完全に貫入している。(4) 井戸枠に設けられるストレーナは帯水層となる部分に連続かつ一様に分布している。(5) 各帯水層に挟まれている難透水層内の流れは鉛直一次元で、難透水層からの絞り出しの現象は考慮しない。(6) 帯水層に注入がある場合には、揚水の場合と全く逆の現象が起きるものとし、揚水、注入の場合も井戸枠の抵抗は同じものとする。(7) 各帯水層の初期の水頭分布は、各帯水層の流れに従って分布しているものとする。

これらの仮定のもとに図-1の揚水量 Q_0 、井戸半径 r_w 、帯水層の諸元（各帯水層及び難透水層の層厚及び揚水前の涵養側水頭） D_i 、 D_{ai} 、 H_{ui} 、 H_{ci} 、涵養半径 R 、井戸内の水頭 h_{wci} 、井戸枠外側の水頭 h_{sci} 、井戸の中心から半径 r 離れた位置における各帯水層の水頭 h_{ci} 、半径 r の円筒を通過する流量を Q_{rci} （以下では $i=1,2,3,\dots,N-1$ または N をとる）の各記号を用いると、帯水層内および難透水層の運動方程式（ここで、 $i-1=0$ 、 $i+1=N+1$ の時は、全ての値は0となる）

$$Q_{rci} = 2\pi r D_i k_{ci} \frac{\partial h_{ci}}{\partial r}, \quad Q_{rci} = 2\pi r k_{ai} \frac{h_{ci} + D_{ai} + D_{i-1} - h_{ci+1}}{D_{ai}}$$

と帯水層間の漏水等の水収支を考慮した連続の式

$$\frac{\partial Q_{rci}}{\partial r} = 2\pi r S_i \frac{\partial h_{ci}}{\partial r} - Q_{rci-1} + Q_{rci}$$

から、多層帯水層の流れを表す以下の各式が導かれる。

第1被圧帯水層（以下の式で、 k は透水係数、 S は貯留係数、 k_a は難透水層の透水係数を表すものとする）

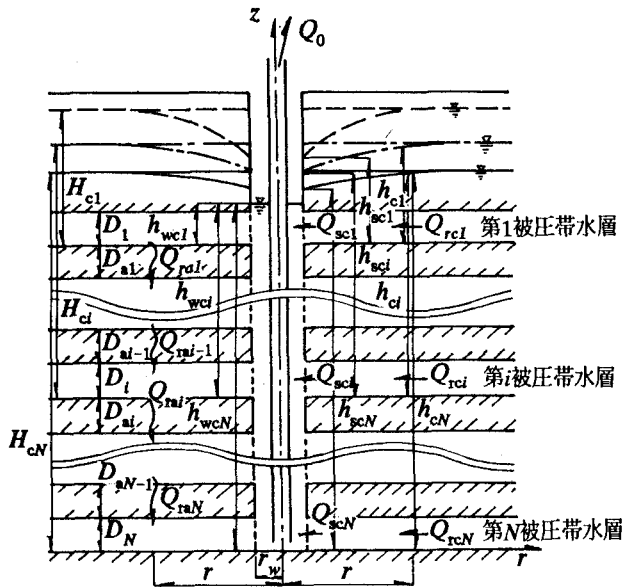


図-1 被圧群多層帯水層システム

$$\frac{\partial h_{c1}}{\partial t} = \frac{k_{c1}D_1}{rS_1} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial h_{c1}}{\partial r} \right) - \frac{k_{a1}}{S_1} \left(\frac{h_{c1} + D_{a1} + D_2 - h_{c2}}{D_{a1}} \right) \quad (1)$$

第*i*被圧帯水層

$$\frac{\partial h_{ci}}{\partial t} = \frac{k_{ci}D_i}{rS_i} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial h_{ci}}{\partial r} \right) + \frac{k_{ai-1}}{S_i} \left(\frac{h_{ci-1} + D_{ai-1} + D_i - h_{ci}}{D_{ai-1}} \right) - \frac{k_{ai}}{S_i} \left(\frac{h_{ci} + D_{ai} + D_{i+1} - h_{ci+1}}{D_{ai}} \right) \quad (2)$$

第*N*被圧帯水層

$$\frac{\partial h_{cN}}{\partial t} = \frac{k_{cN}D_N}{rS_N} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial h_{cN}}{\partial r} \right) + \frac{k_{aN-1}}{S_N} \left(\frac{h_{cN-1} + D_{aN-1} + D_N - h_{cN}}{D_{aN-1}} \right) \quad (3)$$

初期及び境界条件は、次式で与えられる。ここで、 A_p は揚水管の断面積、 A_w は井戸の断面積である。

$$t \leq 0 : Q_0 = 0$$

$$t > 0, \quad r = r_w : Q_s = \sum_{i=1}^N Q_{sci}, \quad (A_w - A_p) \frac{dh_{wcN}}{dt} = Q_s - Q_0 \quad (4)$$

$$Q_{sci} = 2\pi r_w K_{ci} D_i (h_{sci} - h_{wci})^{\frac{1}{2}} \quad (h_{sci} > h_{wci}), \quad Q_{sci} = -2\pi r_w K_{ci} D_i (h_{wci} - h_{sci})^{\frac{1}{2}} \quad (h_{sci} < h_{wci})$$

$$r = R : h_{ci} = H_{ci}$$

式(1)から(4)の無次元化を行う。無次元量は、次式のように定義する。

$$B_i = \frac{r_w^2}{D_i D_{ai}}, \quad B'_i = \frac{r_w^2}{D_i D_{ai+1}}, \quad g_{aci} = \frac{D_{ai} + D_i}{H_{ci}}, \quad g'_{aci} = \frac{D_{ai} + D_{i+1}}{H_{ci}}, \quad g_{ci} = \frac{h_{ci}}{H_{ci}}, \quad g'_{ci} = \frac{h_{ci-1}}{H_{ci}}, \quad g_{cci} = \frac{h_{ci+1}}{H_{ci}}$$

$$g_{wci} = \frac{h_{wci}}{H_{ci}}, \quad g_{sci} = \frac{h_{sci}}{H_{ci}}, \quad k_{aci} = \frac{k_{ai}}{k_{ci}}, \quad k'_{aci} = \frac{k_{ai-1}}{k_{ci}}, \quad X = \frac{R}{r_w}, \quad x = \frac{r}{r_w}$$

$$\tau_{ci} = \frac{k_{ci} D_i t}{S_i r_w^2}, \quad y_{oci} = \frac{1}{\sqrt{\tau_{ci}}}, \quad S' = \frac{S_N}{1 - A_p/A_w}, \quad \alpha_{ci} = \frac{r_w K_{ci}}{k_{ci} H_{ci}^{1/2}}$$

$$Z_0 = \frac{Q_0}{2\pi k_{cN} D_N H_{cN}}, \quad Z_{ci} = \frac{Q_{rci}}{2\pi k_{ci} D_i H_{ci}}, \quad Z_{sci} = \frac{Q_{sci}}{2\pi k_{ci} D_i H_{ci}}, \quad g_{iD} = \frac{D_i}{D_N}, \quad g_{cNi} = \frac{H_{ci}}{H_{cN}}$$

式(1)から(4)を無次元化すると式(5)、(6)のようになる。

$$\frac{dg_{c1}}{dx} = \frac{Z_{c1}}{x}, \quad \frac{dZ_{c1}}{dx} = -(y_{oc1}^2 x Z_{c1})/2 + x k_{aci} B'_i (g_{ci} g_{aci} - g_{cci})$$

$$\frac{dg_{ci}}{dx} = \frac{Z_{ci}}{x}, \quad \frac{dZ_{ci}}{dx} = -(y_{oci}^2 x Z_{ci})/2 - x k'_{aci} B'_i (g_{ci} + g_{aci} - g_{cci}) + x k_{aci} B_i (g_{ci} + g_{aci} - g_{cci}) \quad (5)$$

$$\frac{dg_{cN}}{dx} = \frac{Z_{cN}}{x}, \quad \frac{dZ_{cN}}{dx} = -(y_{ocN}^2 x Z_{cN})/2 - x k'_{acN} B'_N (g_{cN} + g_{acN} - g_{cN})$$

$$\tau_{ci} \leq 0; \quad Z_0 = 0$$

$$\tau_{ci} > 0, \quad x = 1; \quad Z_s = \sum_{i=1}^N k_{iN} g_{cN} g_{iD} Z_{sci}, \quad \frac{dg_{wN}}{d\tau_{cN}} = 2S'(Z_s - Z_0) \quad (6)$$

$$Z_{sci} = \alpha_{ci} (g_{sci} - g_{wci})^{1/2} \quad (g_{sci} > g_{wci}), \quad Z_{sci} = -\alpha_{ci} (g_{wci} - g_{sci})^{1/2} \quad (g_{sci} < g_{wci})$$

$$x = X; \quad g_{ci} = 1$$

ここに

$$k_{iN} = \frac{\prod_{j=i+1}^N k'_{acj}}{\prod_{j=i}^{N-1} k_{acj}} \quad (7)$$

これらの各式を数値計算によって解き、各帯水層から井戸へのしみ出し量、井戸ロス、各帯水層における水位水頭の時間的、空間的変動及び漏水量の算定を行う。式(1)から(7)において、既知量と考えられるものは、揚水量 Q_0 、井戸半径 r_w 、帯水層の諸元（各帯水層及び難透水層の層厚及び揚水前の水位水頭） D_i 、 D_{ai} 、 H_u 、 H_c 、涵養半径 R である。井戸枠の抵抗係数 K_{ci} は、無次元の抵抗係数 α_{ci} に変換し、各被圧帯水層の貯留係数 S_i 、無次元の揚水量 Z_0 、帯水層と難透水層の透水係数比 k_{aci} 、 k'_{aci} とともに仮定する。これらの諸量と時間きざみ Δt を与え、式(6)から Δt 時間後の井戸内水位を計算し、井戸内水頭、井戸枠外側の水頭から、各帯水層から井戸へ流入する無次元のしみ出し量 Z_{si} 、 Z_{sci} を計算する。この無次元のしみ出し量をもとに、式(5)の各式を、井戸外の水頭、 h_{sci} を仮定し、2点境界値問題としてRunge-Kutta法により数値計算する。その結果が式(6)の $x=1$ における条件を満足するまで井戸枠外側の水頭を仮定し直して数値計算を続ける。時間方向についてもRunge-Kutta法を用いて計算を続け、井戸からの無次元揚水量と各帯水層から井戸へのしみ出し量の総和がほぼ等しくなったら計算を終了させる。この計算結果と現地揚水試験の結果を図式解法で解き、透水係数と貯留係数を決定する。

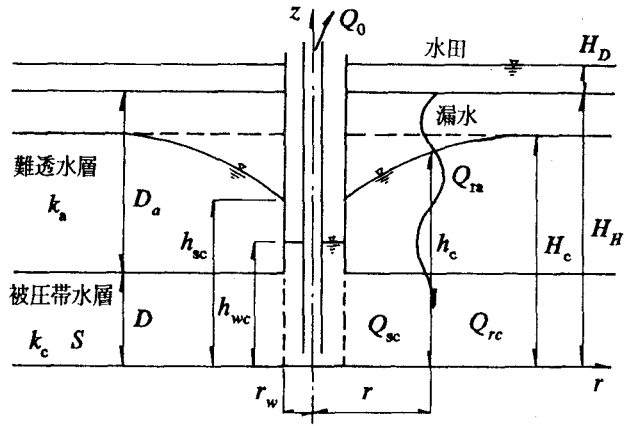


図-2 水田からの涵養がある場合の井戸への地下水流動

井戸枠外側の水頭から、各帯水層から井戸へ流入する無次元のしみ出し量 Z_{si} 、 Z_{sci} を計算する。この無次元のしみ出し量をもとに、式(5)の各式を、井戸外の水頭、 h_{sci} を仮定し、2点境界値問題としてRunge-Kutta法により数値計算する。その結果が式(6)の $x=1$ における条件を満足するまで井戸枠外側の水頭を仮定し直して数値計算を続ける。時間方向についてもRunge-Kutta法を用いて計算を続け、井戸からの無次元揚水量と各帯水層から井戸へのしみ出し量の総和がほぼ等しくなったら計算を終了させる。この計算結果と現地揚水試験の結果を図式解法で解き、透水係数と貯留係数を決定する。

2.2 涵養を受ける被圧帯水層における非定常地下水流動

地表面に近い帯水層では、農地、特に水田の下にある帯水層の地下水の流れは常に水田からの涵養を受けながら流れているので、水田からの地下水の涵養を考慮にいれる必要がある。

図-2に示したような場合、2.1の場合と同様な仮定にしたがって帯水層内の地下水の流れの方程式と初期及び境界条件を導くと式(8)、(9)のようになる。

$$\frac{\partial h_c}{\partial t} = \frac{k_c D}{r S} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial h_c}{\partial r} \right) + \frac{k_a}{S} \frac{H_H + H_D - h_c}{D_a} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} t \leq 0 &: Q_0 = 0, \quad h_c = h_{wc} = h_{sc} = H_c \\ t > 0, \quad r = r_w &: Q_0 = \text{Const.}, \quad h_c = h_{sc}, \quad (A_w - A_p) \frac{dh_{wc}}{dt} = Q_s - Q_0, \quad Q_{sc} = 2\pi r_w K_c D (h_{sc} - h_{wc})^{\frac{1}{2}} \\ r = R &: h_c = H_c \end{aligned} \quad (9)$$

ここに、 h_c は井戸の中心から半径 r の位置における帯水層の水頭、 H_c は涵養側における水頭、 D は帯水層の層厚、 H_H は水田の湛水深、 H_D は帯水層の底部を基準にした水田の底までの高さ、 D_a は難透水層の層厚、 k_c は帯水層の透水係数、 S は帯水層の貯留係数、 k_a は難透水層の鉛直方向の透水係数、 Q_0 は揚水量、 h_{wc} 、 h_{sc} はそれぞれ、井戸内、井戸外の水頭、 A_w 、 A_p は井戸と揚水管の断面積、 t は揚水開始後の経過時間、 Q_s は井戸枠通じて井戸内へ流入するしみ出し量、 R は影響円半径である。

式(8)を式(9)の条件で解くために無次元化して数値計算する。無次元化は式(10)の各式でおこなう。

$$\begin{aligned} g_c &= \frac{h_c}{H_c}, \quad g_{sc} = \frac{h_{sc}}{H_c}, \quad g_{wc} = \frac{h_{wc}}{H_c}, \quad x = \frac{r}{r_w}, \quad k_{sc} = \frac{k_a}{k_c}, \quad B = \frac{r_w^2}{D_a D}, \quad y_0 = \frac{1}{\sqrt{\tau_c}}, \quad g_H = \frac{H_H}{H_c}, \quad g_D = \frac{H_D}{H_c} \\ S' &= \frac{S}{1 - A_p/A_w}, \quad \alpha_c = \frac{r_w K_c}{k_c H_c^{1/2}}, \quad \tau_c = \frac{k_c D t}{S r_w^2}, \quad Z = \frac{Q_{sc}}{2\pi k_c D H_c}, \quad Z_{sc} = \frac{Q_{sc}}{2\pi k_c D H_c}, \quad Z_0 = \frac{Q_0}{2\pi k_c D H_c}, \quad X = \frac{R}{r_w} \end{aligned} \quad (10)$$

これらの式を用いて、微分方程式(8)と初期および境界条件を無次元化すると、式(11)、(12)となる。

$$\frac{dg_c}{dx} = \frac{Z}{x}, \quad \frac{dZ}{dx} = -\frac{y_0^2 x Z}{2} - x k_{sc} B (g_H + g_D - g_c) \quad (11)$$

$$\tau_c \leq 0; \quad g_{wc} = g_{sc} = g_c = 1$$

$$\tau > 0, \quad x=1; \quad \frac{dg_{wc}}{d\tau_c} = 2S'(Z_{sc} - Z_0), \quad Z_{sc} = \alpha_c (g_{sc} - g_{wc})^{1/2} \quad (12)$$

$$x=X; \quad g_c=1$$

数値計算では、最初に Z_0 、 S 、 α_c を仮定して、 τ_c 、 g_c 、 τ_c のキザミの初期値を与え、時間方向に井戸内水頭の計算をおこない、次に、井戸枠の抵抗の式から井戸枠外側の水頭を計算する。次に、これらの計算結果を用いて Runge-Kutta 法により、帯水層内の水頭の計算をおこない、式(12)の条件を満足するような井戸への無次元の流入量 Z_{sc} を求める。この計算を時間方向の Runge-Kutta 法で繰り返し計算し、1 ステップとする。井戸への無次元流入量 Z_{sc} と井戸からの無次元揚水量 Z_0 がほぼ等しくなった時、計算を終了する。

3. 現地揚水試験への適用

3.1 被圧群多層帯水層

現地揚水実験は、平成4年にK市A町にあるA取水井で行われた。この井戸は、K市水道局が水道施設として使用するために昭和62年に設置されたものである。実験を行った井戸の直径は、地表から54.4mまでは45cm、それ以下は25cmで、井戸の深さは、地表面より215mで、スクリーンの設置位置は、57.5m～74.4m、99.5m～110.5m、154.0m～198.0mである。地層の層序は、地表面付近から順に、高有機質粘土（厚さ18m）、軽石混じり粘土（厚さ35m）、溶岩（厚さ60m、上部と下部が透水性に富む）、砂礫とシルトの互層（厚さ40m）、砂礫（厚さ45m、高透水性）である。この井戸の自然状態及び揚水時に観測した井戸孔内流速測定結果を図-3に示す。この結果(図-3)より、中央に分布する溶岩中部より下の層では孔内流速が変化していないことから、この層からは井戸内に水が流入していないものと見なし、被圧-被圧2層帯水層システムとして数値計算に用いるパラメータの決定を行った。したがって、解析の対象となる帯水層は最上部のスクリーンの位置と最下部の位置のスクリーンの上部位置の2つの帯水層となる。井戸内水頭の測定値より、水頭降下量(S_w)、比水頭降下量(S_w/Q)を計算し、Jacobの方法により¹²⁾井戸ロスを計算し、井戸枠の外側の水頭を求め、揚水量と井戸枠の抵抗の関係から井戸枠の開孔率を求めた¹³⁾。計算結果を図-4に示す。井戸設置時のスクリーンの開孔率は、第1、第2帯水層で27.3%、第3帯水層で20.0%であったが、図-4では、開孔率が約1%を示している。図-5には図-4をもとにして計算した井戸ロスを示している。この例のように深度が深く、ポンプの位置が地表に近い井戸では、井戸内水位の低下量 S_w を構成するものは、帯水層ロスと井戸ロスであるが、井戸ロスは井戸枠の抵抗によるロスだけではなく、井戸内をポンプの位置まで水が上昇するために生ずる管内の摩擦によるロスやスクリーンに細かい土砂がかんだりしているものと思われる。これらを総称して見かけの井戸ロスと呼ぶ。本来、井戸内の摩擦によるロスは井戸枠の抵抗によるロスとわけて考えるべきである

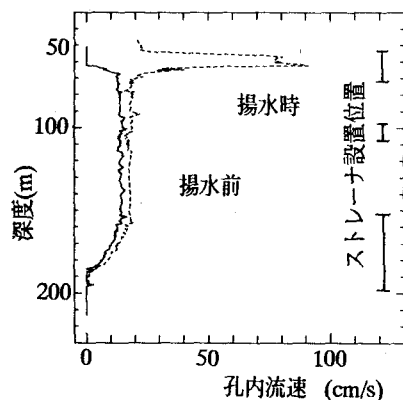


図-3 井戸内鉛直流速分布

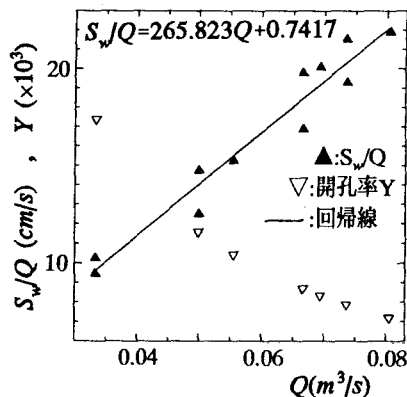


図-4 井戸スクリーン開孔率の計算

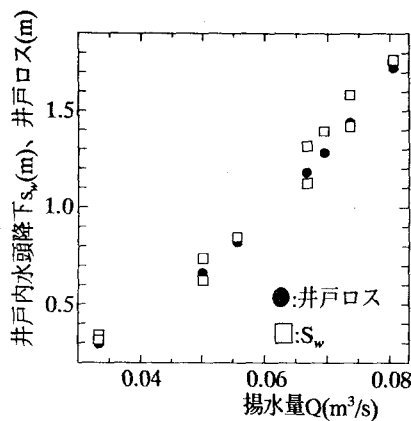


図-5 井戸内水位降下量と井戸ロス

図-4では、開孔率が約1%を示している。図-5には図-4をもとにして計算した井戸ロスを示している。この例のように深度が深く、ポンプの位置が地表に近い井戸では、井戸内水位の低下量 S_w を構成するものは、帯水層ロスと井戸ロスであるが、井戸ロスは井戸枠の抵抗によるロスだけではなく、井戸内をポンプの位置まで水が上昇するために生ずる管内の摩擦によるロスやスクリーンに細かい土砂がかんだりしているものと思われる。これらを総称して見かけの井戸ロスと呼ぶ。本来、井戸内の摩擦によるロスは井戸枠の抵抗によるロスとわけて考えるべきである

が、非定常の状態における井戸内の流れの状況は、上下両帯水層から井戸へ流入する流量が常に変化し、井戸内の鉛直方向の流速も変化している。そのため、数値計算過程における鉛直方向の流れによるロスの評価を取り入れた場合、数値計算が複雑になるので、今回はこれを井戸枠の抵抗による井戸ロスと併せて評価することにする。したがって、数値計算には、計算で求めた開孔率の平均値 $Y=0.0106$ を用い、透水係数は、揚水試験時に測定した孔内微流速測定結果から計算した単位長さ当りの流量と水頭変化量を用いてde Dupuit式より求めた透水係数の平均値及びこの地域周辺の単層での揚水試験を行った結果から推定して数値計算に用いた。揚水試験の行われた井戸は、2層帯水層と見なされるので、対応する解析式は、式(5)、(6)において $N=2$ とした場合である。数値計算は初期定常計算を行い、揚水前の流れの状況を再現して、その結果を初期値として2.1節で示した手法で、非定常の数値計算を行った。計算結果を図-6から図-8に示す。図-6は、井戸内の水頭の時間変化を表しており、図中の実線が計算値、●は実測値を表している。ここでは、数値計算の貯留係数 S は 1.0×10^{-5} 、実測値の S は 8.0×10^{-4} として表示している。図-7は、井戸内と井戸枠外側の水頭の変化を表している。井戸枠外側の水頭が殆ど変化していないのは、透水係数が大きすぎるためと考えられる。他の揚水試験を行った時に、500m離れた地点で3cm水位降下があったと報告されており、このデータをもとにThiemの式で計算してみると、井戸枠外側での水頭降下はわずか19cmほどで、これは揚水前水頭(184.157m)の0.1%程度にしかすぎない。また、 $\log \tau_{c2}=3$ 付近で、上層の井戸内の水位が外側の水頭より低くなり、注入から揚水の状態へと変化したことが解る。図-8でも同じ位置で井戸へのしみ出し量の井戸への全しみ出し量に対する割合が負(注入)から正(揚水)へ転じている。実線は上層の計算値、点線は下層の計算値、破線は定常時の孔内微流速測定結果より求めた上層の値、一点鎖線は同測定結果より求めた下層の値を示している。この図を見るとわかるように、定常状態では各帯水層からのしみ出し量の計算値と実測値がよく一致していることから、流れの状態ををほぼ再現しているものと思われる。また、中間の難透水層を通した漏水は、難透水層の層圧が88mと厚く、透水係数も 10^{-8} cm/sと帯水層と比べて極端に小さいために、殆ど0に近い結果となった。

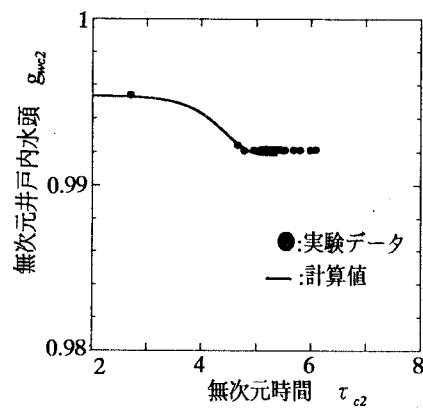


図-6 井戸内水頭の変化

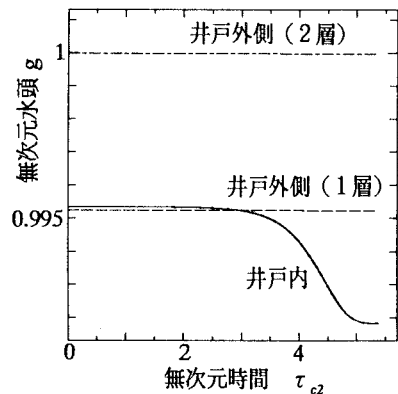


図-7 無次元水頭の変化

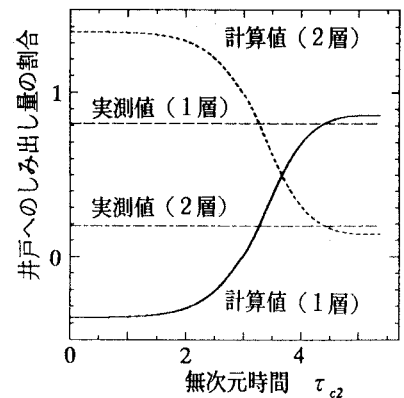


図-8 井戸へのしみ出し量の割合の変化

3.2 水田からの漏水がある場合の現地揚水試験解析

被圧単層の現地試験データとして、熊本県天草郡姫戸町二間戸地区調査井における揚水試験の2例を対象として検討する。この地区における地下水調査は、昭和45年に現地観測および揚水試験を行ったものである。調査地域は海岸に隣接した狭い沖積層で、帯水層の厚さは、試験地点では約6mである。帯水砂礫層の下は頁岩層となり地下水は殆どない。このことは、電気探査の結果でも確認されている。揚水試験は海岸線より600m程度離れた所に直径1.2m、深さ5.4mの浅井戸を掘って実施した。井戸付近の地質は、表土の下1.25mまで砂混じり粘土あるいは粘土が分布し、6月の地下水位の上昇期には被圧地下水になる。揚水地点では海水の変動による影響はほとんど見られず、水質も完全なる淡水である。単層の被圧帯水層として井戸の条件を考慮した境界条件での解析結果を図-9、図-10に示す。ここで、図-9は昭和45年6月(灌漑期)のものであり、図-10は同年12月(非灌漑期)のものである。数値計算は、井戸の貫入率69%の不完全貫入井戸であるが、完全貫入井戸として扱った。図-9では、透水係

数 k は約 $5.0 \sim 6.0 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ であり、貯留係数 S は入力値および計算値とも 10^{-3} のオーダー（図-9）と 10^{-2} のオーダー（図-10）と算定された。TheisやJacobの既往の方法によって算出した値は透水係数 k_e が $4.5 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ 、貯留係数が 10^{-2} （揚水井）から 10^{-3} （観測井）とばらつきがある。本論文の手法と既往の手法で求めた値では透水係数については大体近い値となっている。一方、貯留係数 S については2オーダー違う結果がでている。この原因の大きな要因は図式解法のための目視による誤差によるものと思われる。図-9で、井戸内の水位はほぼ g_{wc} 曲線（図の中で、実線が計算値であり、○印が観測値を示す）と一致し、井戸枠のすぐ外側の水位は実測されていないが、 g_s 曲線がその計算値を示している。図-9、10を見ると、非灌漑期の12月（図-10）の計算結果と実験データは水位の時間的・空間的変動がよく一致しているが、灌漑期の6月（図-9）は、井戸内で一致しているが観測井では合っていない。この原因は地層が均質・等方性でないこと等も考えられるが、最大の原因は地表面の水田からの鉛直涵養によるものと思われる。このケースは浅井戸であるが地下水位が砂利層の上にある粘土層に達しているため、一応被圧帯水層として扱っている。しかし、難透水層である粘土層が非常に薄い（約1.0m）ので、下層の砂利層から大量に揚水すると、圧力低下が起こるため上層にある水田から下層の帯水層への鉛直浸透が発生することは十分考えられる。とくに、揚水試験を実施した昭和45年6月には水田に水が湛水されていたので鉛直方向の漏水が生じたものと思われる。漏水があると水位降下はそれだけ小さくなるため $x=38.6$ 地点の水位降下の実測値が漏水を考慮してない計算値より小さくなっているものと思われる。また、昭和45年6月のデータで井戸ロスをより大きく評価すれば観測井のデータも合うように思えるが、この井戸の開孔率は13%と比較的大きいので、井戸ロスはそれほど大きくないものと思われる。無次元の井戸枠開孔率 Y と揚水量 Z 、井戸枠の抵抗係数 α の三者の関係は著者らが実験式として、

$$\alpha = 5.5Z^{0.55}Y^{0.55} \quad (13)$$

で与えている¹³⁾。式(13)から $\alpha=0.65$ としている。このようにして決めたパラメータを用いて、水田からの涵養を受ける場合の地下水の非定常解析を行った。式(11)を式(12)の初期及び境界条件で計算する。これは、時間方向と空間方向で差分法によって解くことになる。与えたデータは、定常時無次元揚水量 $Z_0=0.07$ 、帯水層の貯留係数 $S=0.01$ 、井戸枠の無次元抵抗係数 $\alpha=0.65$ 、難透水層と帯水層の透水係数比 $k_s/k=10^{-5}$ である。影響円半径の最大値は、現地の状態を考慮して井戸半径の200倍(120m)とした。これらのデータでは、井戸枠の抵抗係数はやや大きい値になっているがこれらのデータで数値計算を行った。数値計算の結果と揚水試験データの適用図（水頭の変動図）を図-11に示す。また、このときの影響円半径の増大の変化、漏水量、漏水高（漏水量／漏水面積）の変化を図-12に示す。図-12より適用の状況は良好であり、この図を用いて計算される帯水層定数は $k=2.8 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ 、 $S=0.027$ 、難透水層の透水係数は、 $k_s=2.8 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ となり、貯留係数 S は仮定値と計算値はほぼ一致した。帯水層の透水係数としては漏水のない場合と比較すると若

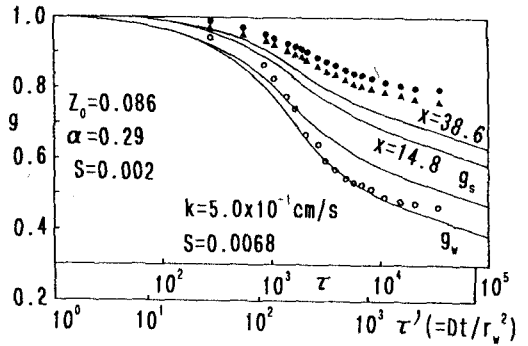


図-9 揚水試験解析結果（6月、灌漑期）

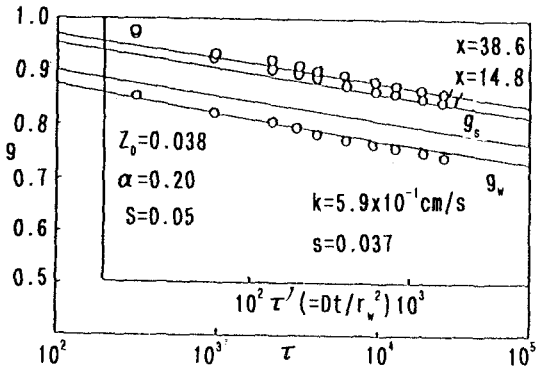


図-10 揚水試験解析結果（12月、非灌漑期）

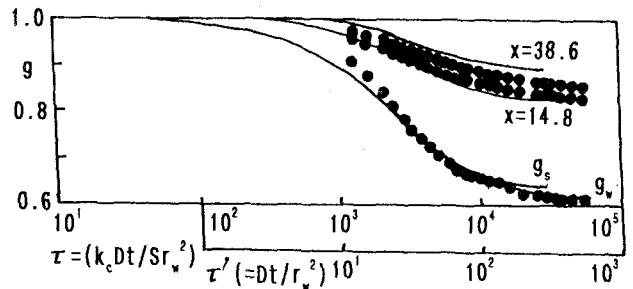


図-11 漏水を考慮した揚水試験解析結果（6月、灌漑期）

無次元の井戸枠開孔率 Y と揚水量 Z 、井戸枠の抵抗係数 α の三者の関係は著者らが実験式として、

無次元の井戸枠開孔率 Y と揚水量 Z 、井戸枠の抵抗係数 α の三者の関係は著者らが実験式として、

干低い値となった。図-12より水田からの漏水量は4時間後の最終的狀態で約200m³/d、水田からの涵養高は約4mm/dであった。図-11と9を比べてみるとわかるように、水田からの涵養を考慮にいたした場合と入れない場合では、漏水を考慮した場合の方が観測井の水頭変化も計算曲線とデータがよく一致するようになっている。外側の $x=38.6$ の水頭のデータが下がっているのは涵養側の半径を数値計算では120mとしているのが原因の一つであると思われる。いずれにしても、このことで、提案した多層集水理論に基づいた数値計算により漏水の影響円半径の広がりや水田からの涵養高が把握できるようになる。

4. 結言

多層帯水層に完全貫入している井戸から揚水するときおよび水田からの漏水がある場合の井戸への地下水の非定常流動について数値解析のための各式を誘導し、その検証の一例として、現地揚水試験の解析を行った結果、次の結論を得た。

(1) 多層帯水層から揚水するときの地下水の井戸への非定常流動に関する諸式を誘導し、数値計算によって解析可能なことを示した。(2) 2つの帯水層から同時揚水する場合の地下水の非定常流動に対する数値計算を行い、その結果を現地実験と比較して良好な結果を得た。(3) 多層帯水層における各層から同時揚水する時の各帯水層に生じる井戸損失評価のための式は、単層の場合と同様な式が使用できる。(4) 無次元抵抗係数 α を含む井戸における運動方程式及び漏水のための運動方程式の導入によって、各帯水層から井戸へのしみ出し量を非定常状態で定量的に求めることが可能となった。(5) 多層帯水層からの同時揚水による地下水の非定常流動解析によって、各帯水層および難透水層の透水係数、貯留係数を評価できる。(6) 水田などの他領域からの漏水による水の補給による地下水位の変化や漏水量、井戸損失など井戸周辺の状況の時間的変化を追跡できる。

参考文献 1) 本間 仁・萩原国宏：被圧帯水層への水の補給についての一考察，土木学会論文報告集，第217号，pp.25～32，1978。 2) Motz,L.H.: Steady-State Draw Down in Coupled Aquifer; Journal of the Hydraulics Division,A.S.C.E.,Vol.104,No.Hy7, pp.1061～1074, 1978。 3) Hantush,M.S. and C.E.Jacob: Steady Three-Dimensional Flow to a Well in a Two-Layered Aquifer; Transaction,American Geophysical Union,Vol.37, No.6,pp.286～292, 1956。 4) Neuman,S.P. and A.Witerspoon: Theoloy of flow in a Confined Two Aquifer System; Water Resources Research,Vol.5, No.4, pp.803～816, 1969。 5) Bredehoeft,J.D. and G.E.Pinder: Digital Analysis of Areal Flow in Multiaquifer Groundwater System; A Quasi Three-Dimensional Model; Water Resources Research, Vol.6, No.3, pp.838～888, 1970。 6) Fujinawa,K: Finite Element Analysis of Groundwater Flow in Multiaquifer System,1. The Behavior of Hydrological Properties in Aquitard While Being Pumped; Journal of Hydrology,33, pp.59～72, 1977。 7) Bennet,G.D. and E.P.Patten,Jr.: Constant-Head Pumping Test Characteristics of Individual Aquifer; U.S.G.S. Water Supply Paper 1536-G, 1962。 8) Papadopoulos,I.S.: Nonsteady Flow to Multiaquifer Wells; Journal of Geophysical Research, Vol.71, NO.20,PP.4791～4797, 1966。 9) Abdul Khader,M.H. and M.K.Veerankutty: Transient Well-Flow in an Unconfined-Aquifer System; Journal of Hydrology,26, pp.123～140, 1975。 10) 酒井軍治郎，応用地下水学，p.202，朝倉書店，1967。 11) 星田義治，市川 勉，玉井信行：2つの帯水層から揚水するときの地下水の流動についての考察，土木学会論文報告集，第331号，pp.75～pp.81, 1983。 12) Jacob,C.E:"Drawdown test to determine effective radius of artesian well",Trans.Amer.Soc.Civil Engrs., Vol.112,1947。 13) 市川 勉，星田義治，濱野啓造，徳平淳：井戸スクリーン開孔率推定による井戸老化の評価，地下水学会誌，第36巻，第1号，pp.45～53, 1994。

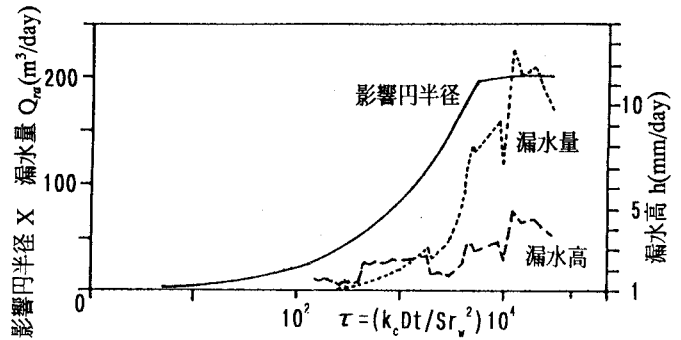


図-12 漏水量、漏水高、影響円半径の変化