

2つの帶水層から揚水するときの地下水の 流動についての考察

AN ANALYSIS OF STEADY FLOW TO A WELL IN THE CASE
OF PUMPING IN A TWO-LAYERED AQUIFER

星田義治*・市川勉**・玉井信行***
By Yoshiharu HOSHIDA, Tsutomu ICHIKAWA and Nobuyuki TAMAI

1. まえがき

2層以上の地下帶水層から揚水する多層集水井戸は、少なくともわが国では被圧地下水層から集水する場合最も普通の形式である。

2層の地下帶水層からの集水理論については近年いくつかの研究が発表されている。2層の帶水層において下層だけから揚水したときの両帶水層内の地下水の非定常流動を論じたものには、Neuman and Witherspoon¹⁾, Bredehoeft and Pinder²⁾, Fujinawa³⁾らがあり、定常についてHantush and Jacob⁴⁾, 本間・荻原⁵⁾, Motz⁶⁾らがある。また、本論文のように2層から同時に揚水するときの両帶水層の地下水の流動を研究対象としているものにBennet and Patten⁷⁾, Papadopoulos⁸⁾, Abdul Khader and Veerankutty⁹⁾らがある。ここで挙げた論文では井戸ロスを考慮した式を用いているものはない。また著者らと同じように2層からの同時揚水について研究したもので漏水について考慮したものはない。これら論文においては、本論文の目的である2つの帶水層から同時に揚水を行うとき、各帶水層からの井戸へのしみ出し量、各帶水層の井戸壁における井戸損失（井戸ロス）等の算定について好結果を得ていない。特にBennettらの研究で各帶水層からのしみ出し量の算定に好結果が得られなかった1つの理由は、井戸損失を考慮していないためではないかという見方もある¹⁰⁾。著者らは単層において井戸壁の抵抗を考慮した式を導き、これを用いて井戸ロスの定量的算定に好結果を得ている¹¹⁾。この論文では単層における解析手法が2層または2層以上の帶水層から同時に揚水するときの地下水の流動解析に応用できることを確認したので報告するものである。

2. 理 論

2つの帶水層から同時に揚水することを考えるときの帶水層のシステムは、現実的には次の2つの場合に集約される。

- 1) 上層が不圧帶水層で下層が被圧帶水層の場合（ここでは“不圧-被圧システム”とよぶ）
- 2) 上下両層とも被圧帶水層の場合（ここでは“被圧-被圧システム”とよぶ）

さらに、3層以上の多層帶水層システムについても、ここで展開する手法がただちに適用できる。したがって本論文では上記の2つの場合についてのみ述べることとする。ここで本節で用いる諸式を無次元化するための無次元記号を付録1に挙げた記号を使って次のように定義しておく。

(1) 不圧-被圧システムの解析

図-1において、井戸より一定量 Q_0 のくみ出しによって定常状態が生じたとき、井戸内の水位がどちらか1つの帶水層の初期水位より高くなる場合もある。このようなときは、井戸内の水が低い初期水位を示した帶水層内に注水されることになる。この場合は、井戸内の連続

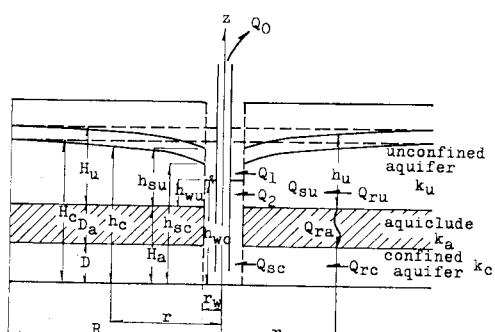


図-1 不圧-被圧システム

* 正会員 九州東海大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 東海大学講師 工学部土木工学科

*** 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科

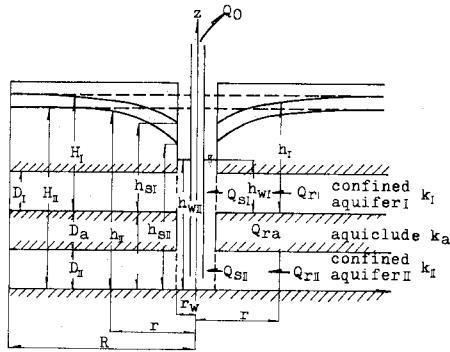


図-2 被圧-被圧システム

$$-(dQ_{r\text{II}}/dr) = Q_{ra} = (dQ_{r\text{I}}/dr) \quad \dots \dots \dots (21)$$

帶水層内の運動方程式

$$Q_{r\text{I}} = 2\pi r D_1 k_1 (dh_1/dr) \quad \dots \dots \dots (22)$$

$$Q_{r\text{II}} = 2\pi r D_{\text{II}} k_{\text{II}} (dh_{\text{II}}/dr) \quad \dots \dots \dots (23)$$

$$Q_{ra} = 2\pi r k_a (h_1 + H_a - h_{\text{II}})/D_a \quad \dots \dots \dots (24)$$

式(21)に式(22)～(24)の関係を用いると次の式が導かれる。

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dh_1}{dr} \right) = \frac{k_a}{k_1 D_1} \frac{h_1 + H_a - h_{\text{II}}}{D_a} \quad \dots \dots \dots (25)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dh_{\text{II}}}{dr} \right) = -\frac{k_a}{k_{\text{II}} D_{\text{II}}} \frac{h_1 + H_a - h_{\text{II}}}{D_a} \quad \dots \dots \dots (26)$$

ここに、境界条件は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} r = r_w; Q_0 = Q_{s\text{I}} + Q_{s\text{II}} &= \text{const.} \\ Q_{s\text{I}} = 2\pi r w K_1 D_1 (h_{\text{I}} - h_{w1})^{1/2} \\ Q_{s\text{II}} = 2\pi r w K_{\text{II}} D_{\text{II}} (h_{\text{II}} - h_{w\text{II}})^{1/2} \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (27)$$

無次元化 この場合も不在-被圧システムと同様に次式の記号を用いて無次元化を行う。

$$\begin{aligned} A = \frac{r_w^2}{D_1 D_a}, B = \frac{r_w^2}{D_{\text{II}} D_a}, D_0 = \frac{D_1}{D_{\text{II}}} \\ g = \frac{H_1}{H_{\text{II}}}, g_{a\text{I}} = \frac{H_a}{H_1}, g_{a\text{II}} = \frac{H_a}{H_{\text{II}}}, g_1 = \frac{h_1}{H_1} \\ g_{\text{II}} = \frac{h_{\text{II}}}{H_{\text{II}}}, g_{s\text{I}} = \frac{h_{s\text{I}}}{H_1}, g_{s\text{II}} = \frac{h_{s\text{II}}}{H_{\text{II}}}, g_{w1} = \frac{h_{w1}}{H_1} \\ g_{w\text{II}} = \frac{h_{w\text{II}}}{H_{\text{II}}}, k_{a\text{I}} = \frac{k_a}{k_1}, k_{a\text{II}} = \frac{k_a}{k_{\text{II}}} \\ Z_0 = \frac{Q_0}{2\pi k_{\text{II}} D_{\text{II}} H_{\text{II}}}, Z_1 = \frac{Q_{r\text{I}}}{2\pi k_1 D_1 H_1} \\ Z_{\text{II}} = \frac{Q_{r\text{II}}}{2\pi k_{\text{II}} D_{\text{II}} H_{\text{II}}}, Z_{s\text{I}} = \frac{Q_{s\text{I}}}{2\pi k_1 D_1 H_1} \\ Z_{s\text{II}} = \frac{Q_{s\text{II}}}{2\pi k_{\text{II}} D_{\text{II}} H_{\text{II}}}, \alpha_1 = \frac{r_w K_1}{k_1 \sqrt{H_1}} \\ \alpha_{\text{II}} = \frac{r_w K_{\text{II}}}{k_{\text{II}} \sqrt{H_{\text{II}}}} \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (28)$$

この定義に従えば、式(25)～(27)は次のような無次元式となる。

$$\left. \begin{aligned} dg_1/dx &= Z_1/x \\ dZ_1/dx &= k_{a\text{I}} Ax(g_1 + g_{a\text{I}} - g_{\text{II}}/g) \\ dg_{\text{II}}/dx &= Z_{\text{II}}/x \\ dZ_{\text{II}}/dx &= -k_{a\text{II}} Bx(g_1 g + g_{a\text{II}} - g_{\text{II}}) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (29)$$

境界条件を無次元形で示すと次式となる。

$$\left. \begin{aligned} x=1 &; Z_0 = (k_{a\text{II}}/k_{a\text{I}}) g D_0 Z_{s\text{I}} + Z_{s\text{II}} \\ Z_{s\text{I}} &= \alpha_1 (g_{s\text{I}} - g_{w1})^{1/2} \\ Z_{s\text{II}} &= \alpha_{\text{II}} (g_{s\text{II}} - g_{w\text{II}})^{1/2} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (30)$$

$$x=R_m; g_1=1, g_{\text{II}}=1$$

(3) 漏水量が無視できる場合の解

図-1, 図-2で示したようなシステムにおいて、上・下両帶水層の間にある難透水層からの漏水量が無視できる場合は直接に解析解が得られる。すなわち、不圧-被圧システムでは式(11), (12)の解として、式(14)の無次元量を用いて表わすと次のようになる。

$$g_{su}^2 = 1 - 2 Z_{su} l_n R_m \quad \dots \dots \dots (31)$$

$$g_{sc} = 1 - Z_{sc} l_n R_m \quad \dots \dots \dots (32)$$

同様に、被圧-被圧システムでは、式(25), (26)の解は、式(28)の無次元量を用いて次のように表わせる。

$$g_{s\text{I}} = 1 - Z_{s\text{I}} l_n R_m \quad \dots \dots \dots (33)$$

$$g_{s\text{II}} = 1 - Z_{s\text{II}} l_n R_m \quad \dots \dots \dots (34)$$

3. 実験

実験装置は円形の1/24の中心角を有する扇形の水槽を用いた。各部の寸法は図-3(不圧-被圧システム)および図-4(被圧-被圧システム)に示したとおりである。上・下両帶水層には、均等係数1.49, 10%粒径0.43mmの砂を使用した。難透水層としては、漏水ありの場合標準砂を使用し、漏水なしの場合には下層の

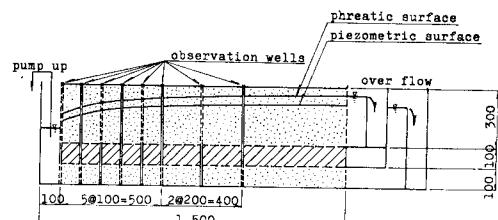


図-3 不圧-被圧モデル

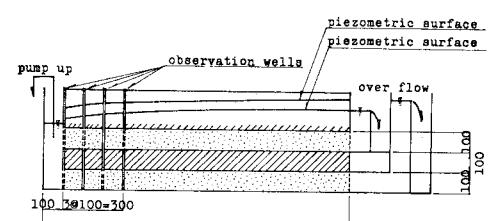


図-4 被圧-被圧モデル

帶水層の上面を厚さ 2 mm のゴム板で覆い、側壁および観測井とのすき間をシリコンシーランドおよびパテで詰めて完全に防水し、ゴム板の上に普通砂を置き、その上を再びゴム板で覆って止水し、厚さ 10 cm の不透水層とした。

観測諸量は、くみ出し量 (Q_0)、井戸内の水位 (h_{wu} , h_{wc} , h_{w1} , h_{w2})、井戸枠のすぐ外側の水位 (h_{su} , h_{sc} , h_{s1} , h_{s2}) である。さらに、上・下両帶水層内においては、井戸半径の 2~10 倍の間に数か所の観測井を設けて水位変動を測定した。揚水はビニール管を用いて行い、サイフォンによって井戸からくみ上げ、ビニール管の先端を流量計に接続して一定揚水量になるように調節した。井戸を除く各地点の水位および水頭は、各帶水層内を貫通する直径 5 mm の真鍮のパイプの側面に各帶水層の厚さに相当する長さのストレーナーをつけ、この管の下部よりビニール管でマクメーターに連結してその読みを測定した。給水側は水位一定を保つため図-3、図-4 に示しているようにオーバーフローさせた。各帶水層の貯水槽への流入量はフローメーターを用いて一定量とした。各帶水層への注入量は、各帶水層への供給量より各帶水層の貯水槽からオーバーフローによって排水される量を差し引いた量に等しいとした。そして、上・下両帶水層の間にある難透水層からの漏水がないときは、これが各層からの井戸へのしみ出し量と等しくなる。この実験に使用した水は上水道用水である。

4. 2 層システムにおける無次元抵抗係数 α の算定

著者らは単層システムにおいて、不圧帶水層の井戸枠の抵抗係数 α_u と被圧帶水層の α_c とが、不圧帶水層において鉛直流の影響の無視できる範囲で大体一致することを確認している¹¹⁾。そして、これらの結果を用いることによって帶水層内の地下水流动の時間的・空間的変動が井戸における特異点（井戸ロス）を含めて解析でき、その解析結果を実験によって検証している。さらに、地下水が井戸へ流入するときの井戸枠の無次元抵抗係数 α

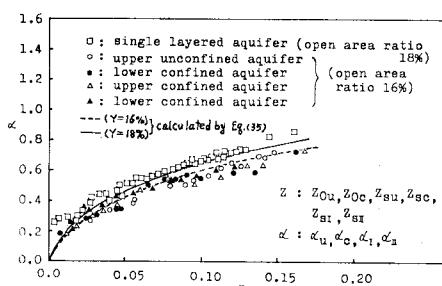


図-5 2 層システムにおける井戸枠の無次元抵抗係数

は、標準砂と普通砂を用いた実験において大体等しい値をとることを確かめている¹¹⁾。

図-5 における無次元抵抗係数 α_u , α_c , α_1 , α_2 の算定の順序は、各帶水層からのしみ出し量 Q_{su} , Q_{sc} , Q_{s1} , Q_{s2} および井戸枠のすぐ外側の水位 h_{su} , h_{sc} , h_{s1} , h_{s2} を実験より測定する。そして、式 (14), (28) を用いて、それぞれの無次元量 Z_{su} , Z_{sc} , Z_{s1} , Z_{s2} , g_{su} , g_{sc} , g_{s1} , g_{s2} を算定する。さらに井戸内の水位を測定して無次元水位 g_{wu} , g_{wc} , g_{w1} , g_{w2} を求め、これらの値を式 (16), (30) に代入すると α_u , α_c , α_1 , α_2 がそれぞれ算定される。この無次元抵抗係数 α の算定には式 (35) の実験式を用いる。この α は井戸枠のストレーナーの開孔率 (Y) と無次元のくみ出し量 (Z) によって定まるから一般的には $\alpha = f_1(Y)f_2(Z)$ の形で表現することもできる。著者らは現在までの実験データ¹¹⁾をもとに次の関数形として近似させておく。この関数形は今後実験を積み重ねて、さらに精度の高い実験式へと改良する余地がある。

$$\alpha = 0.59 Z^{0.51} \exp[(10 Y)^{0.35}] \dots \quad (35)$$

式 (35) の適用範囲は $9\% < Y < 50\%$ 、不圧帶水層においては、 $Y > 18\%$ では鉛直流の影響が無視できなくなるので $Z < 0.1$ ぐらいである¹¹⁾。開孔率 Y は現場においては 50% を超えることはほとんどないが、9% より小さくなることはある。9% 以下の実験データがないので上記のような適用範囲としたが 9% より小さい場合も近似的に使えるものと思われる。式 (35) における α は α_u , α_c , α_1 , α_2 ; Z は Z_{su} , Z_{sc} , Z_{s1} , Z_{s2} を表わす。また、 Y は井戸枠のストレーナーの開孔率（井戸枠のストレーナー部分の開孔面積をその部分の全側面積で除したもの）である。式 (35) を用いるといろいろな開孔率をもつ井戸枠のストレーナーについて α の値がある程度の予測ができる、井戸ロスや各層からのしみ出し量の推定が可能になる。

5. 数値計算

多層帶水層において、各層からの井戸へのしみ出し量、井戸壁における損失水頭（井戸ロス）、難透水層からの漏水等が計算されると、各帶水層における水理定数の算定には単層の理論が有効に使えるし、さらに地下水のシミュレーションや多層からの地下水の集水計画等にとって有力な情報を提供することになる。

したがって、本論文では 2 層における関係諸式、不圧-被圧システムでは式 (1)~(10)、被圧-被圧システムでは式 (17)~(24) に含まれている諸量の中で現場において比較的容易に入手できると思われる量を知って、式 (11)~(13) や式 (25)~(27) の無次元式を利用して、各

層からのしみ出し量、井戸ロスおよび漏水量等の算定を試みるものである。

多層帶水層における各層からのしみ出し量および各層の井戸ロスの算定が可能になった根本的原因は、井戸枠の抵抗を考慮した運動方程式の導入のためである。そして技術的には、この方程式に含まれる井戸枠の無次元抵抗係数 α が、単層と多層、不圧と被圧、2層システムにおける上層と下層、砂の種類（普通砂と標準砂）等にあまり関係なくほぼ同じ値を示し、これを実験的に定めることができる。すなわち、 α と Z および Y の間にある一定の関係式で表現できるような規則性が見出されたためである。さて、式(1)～(10)、(17)～(24)において既知量は $Q_0, r_w, D, D_a, H_u, H_c, h_{wu}$ および $D_1, D_{II}, H_1, H_{II}, h_{wI}, R$ である。 K_u, K_c, K_1, K_{II} は無次元の抵抗係数 $\alpha_u, \alpha_c, \alpha_1, \alpha_{II}$ と変形あらかじめ実験的に定めておく[式(35)を利用する]。これらの既知量をもとに各帶水層の井戸ロス、帶水層ごとの井戸へのしみ出し量、漏水量ならびに下層の透水係数を算定するためのフローを図-6に示す。

なお、漏水層からの漏水量が無視できるときは、図-6のフローでv)の欄は不用になり、vii)の欄で $g_{su}, g_{sc}, g_{sI}, g_{sII}$ の算定は式(31)～(34)を用いるとよく、以下図-6のフローと同じ流れで終了する。この場合はきわめて簡単な計算となる。また、この計算では不圧帶水層における地下水の流動が準一様流であるという仮定をしているが著者らの研究¹¹⁾によると、井戸枠のストレーナーの開孔率が約18%以上になり、 Z_{su} がおよそ

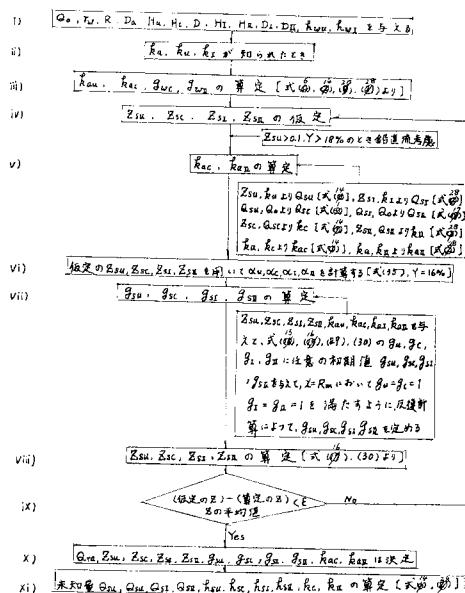


図-6 各帶水層の井戸ロス、しみ出し量、下層の透水係数および漏水量算定のためのフロー

0.1以上になると鉛直流が無視できなくなり、鉛直流を考慮した解による修正が必要となってくる。したがって図-6のフローでもこの点のチェックは必要である。

図-7、図-8、図-9は2層システムにおけるこの解析手法の妥当性を検証するための各層の水位の計算値と実測値を比較したものである(図-7、図-8は観測井が少なくなっている。これは実験における測定が少なかったためである)。図-9に示した2つの帶水層の初期水頭が異なる場合は、まだ十分なるシミュレーションができるないが、ここで対象としている問題を解くための手法としては基本的には許容できるものと思われる。次に

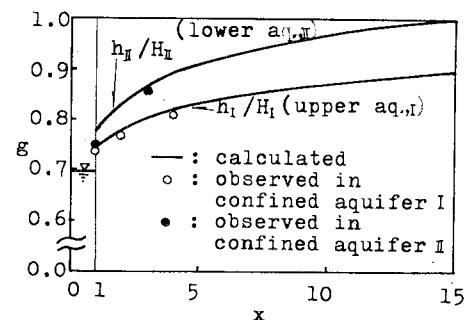


図-7 初期水頭の異なる被圧-被圧システムにおける水頭曲線(漏水なし)

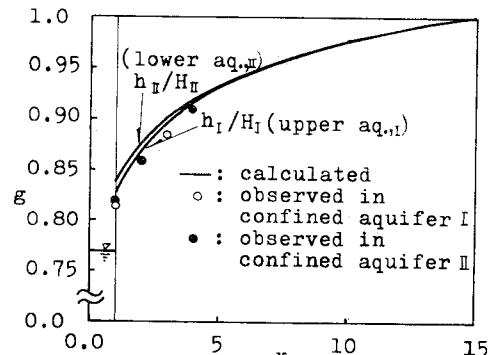


図-8 初期水頭が同じ被圧-被圧システムにおける水頭曲線(漏水あり)

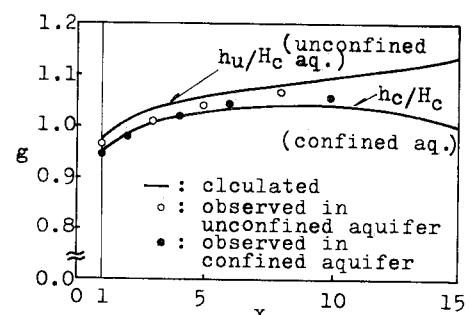


図-9 初期水位の異なる不圧-被圧システムにおける水位曲線(漏水あり)

表-1 井戸へのしみ出し量、井戸ロス、漏水量、下層の透水係数

漏水	初期水頭	各層からのしみ出し量		井戸ロス		下層の透水係数	漏水量			漏水係数
		Q_{su} (cm³/s)	Q_{sc} (cm³/s)	$h_{su} - h_{sw}$ (cm)	$h_{sc} - h_{wc}$ (cm)		Q_a (cm³/s)	Q_{rw} (cm³/s)	Q_{rd} (cm³/s)	
あり 異なる (不圧-被圧)	計算	67.5	35.0	2.5	1.8	0.28	202.7	35.0	167.7	0.01
	実験	—	—	3.1	2.0	0.30	—	—	154.8	—
なし 異なる (被圧-被圧)	計算	52.1	69.5	2.4	3.9	0.29	0	—	—	0
	実験	54.5	68.1	1.9	2.5	0.31	0	—	—	0
あり 同じ (被圧-被圧)	計算	59.6	62.8	2.9	2.3	0.37	6.6	—	—	0.01
	実験	—	—	2.2	3.2	0.30	—	—	—	—

※ 漏水係数 = 離透水層の透水係数

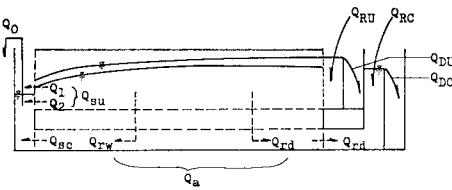


図-10 不圧-被圧システムにおける流動図

図-6 のフローに従って計算した諸量と実験値とを比較すると表-1 のようになる。表-1 の項目の中で各層からのしみ出し量や各層の井戸ロスについて求めている文献はあまり見当らない。また、表-1 の中で一線で記入されている欄は実験において直接測定できなかったものである。漏水量は実験的には図-10 のような関係より求めた（初期水頭の異なる不圧-被圧システムの場合）。図-10 において実線の矢印で示した流量は実験のとき測定しているものである。破線で示した流量は数値計算の結果得られたものである。図-10 において連続の関係より次のように表わされる。

$$Q_{RU} + Q_{RC} = Q_o + Q_{DU} + Q_{DC} \dots \dots \dots (36)$$

また、図-10 から明らかなように漏水量のうち下層の供給側へ向かう量 Q_{rd} は、 $Q_{rd} = Q_{DC} - Q_{RC}$ の関係があるので間接的に実測できる。一方上層における連続関係より

$$Q_{RU} - Q_{DU} = Q_{SU} + Q_{rw} + Q_{rd} \dots \dots \dots (37)$$

となる。式(37)において Q_{RU} , Q_{DU} , Q_{rd} は実測できるが Q_{su} , Q_{rw} は実測できなかった。漏水を考慮しない場合は、 $Q_{su} = Q_{RU} - Q_{DU}$ および $Q_{sc} = Q_{RC} - Q_{DC}$ の関係より間接的に測定できる。表-1 にはこのようにして計算された実測値を記入している。

6. 結 言

2層帶水層に完全貫入している井戸から同時揚水するとき、井戸への地下水の定常流動について、井戸内の水位が両帶水層の初期水位より低い状態における解析およ

び実験より次の結果を得た。

(1) 2層帶水層から同時に揚水するときの地下水の井戸への流動に関する諸式を誘導し、その数値計算を行って、その結果を実験と照合してよい結果を得た。

(2) 2層帶水層における同時に揚水のとき各帶水層に生ずる井戸ロスを評価する式は単層の場合と同一の式が使えることを示した。

(3) 2層における各層の井戸枠によって生ずる無次元の抵抗係数 α は、井戸枠のストレーナーの開孔率 Y および無次元のくみ出し量 Z に関係し、その関数形は近似的に $\alpha = 0.59 Z^{0.51} \exp[(10 Y)^{0.35}] [9\% < Y < 50\%, Y > 18\% \text{ で } Z < 0.1 \text{ (不圧のみ)}]$ の実験式で表わされることを示した。

(4) 無次元の抵抗係数 α を含む井戸における運動方程式を導入することによって、各帶水層からのそれぞれのしみ出し量および井戸壁における水頭損失（井戸ロス）を定量的に求めることができることを示した。

(5) ここで述べた解析手法は3層以上の多層帶水層および井戸内の水位が2層の各帶水層の中間にくる場合等についても発展的に応用できるものと思われる。

謝 辞：この論文をまとめるにあたり、実験ならびに資料のとりまとめに協力していただいた東海大学土木工学科4年 竹本裕之君、九州東海大学土木工学科4年 麻生 純君、天野 享君、中原康延君、山内昭広君に感謝の意を表します。また数値計算には九州大学大型計算機を利用した。

付録 1 記 号

次 元

[L]

 D ：被圧帶水層の厚さ添字 $i = a$ 漏水層について

I 上層の被圧帶水層について

II 下層の被圧帶水層について

<i>u</i>	不圧帶水層について	
<i>c</i>	被圧帶水層について	
D_i	帶水層の厚さ	[L]
f_i	帶水層における井戸枠の諸損失係数	[無次元]
G	重力の加速度	[LT ⁻²]
H_a	下層の被圧帶水層厚と漏水層厚の和	[L]
H_i	帶水層の底面から測った初期水頭	[L]
h_{si}	帶水層の底面から測った井戸枠の外側の水頭	[L]
h_{wi}	帶水層の底面から測った井戸内の水頭	[L]
K_i	帶水層の井戸枠の抵抗係数 ($K_c = \sqrt{2G/f_i}$)	[L ^{1/2} T ⁻¹]
k_i	透水係数	[LT ⁻¹]
Q_a	全漏水量	[L ³ T ⁻¹]
Q_{DC}	被圧帶水層の供給側の貯水槽からの溢流量	[L ³ T ⁻¹]
Q_{DU}	不圧帶水層の供給側の貯水槽からの溢流量	[L ³ T ⁻¹]
Q_{ra}	漏水層の単位幅当たりを鉛直方向に通過する流 量	[L ² T ⁻¹]
Q_{ri}	帶水層において井戸の中心から r の距離にある 断面を井戸へ向かって流れる流量	[L ³ T ⁻¹]
Q_{rd}	漏水量のうち供給側へ向かう流量	[L ³ T ⁻¹]
Q_{rw}	漏水量のうち井戸へ向かう流量	[L ³ T ⁻¹]
Q_{RC}	被圧帶水層の供給側の貯水槽への流入量	[L ³ T ⁻¹]
Q_{RU}	不圧帶水層の供給側の貯水槽への流入量	[L ³ T ⁻¹]
Q_{si}	帶水層から井戸へのしみ出し量	[L ³ T ⁻¹]
Q_0	井戸からのくみ出し量(一定量)	[L ³ T ⁻¹]
Q_1	不圧帶水層における浸潤面から井戸へのしみ出 し量	[L ³ T ⁻¹]
Q_2	不圧帶水層における井戸内の水面より下の部分 からの井戸へのしみ出し量	[L ³ T ⁻¹]
R	影響半径	[L]
r	井戸の中心から測った水平距離	[L]
r_w	井戸の半径	[L]
x	井戸の中心から測った水平無次元距離 $x = \frac{r}{r_w}$	[無次元]

Y	井戸枠のストレーナー部分の開孔率(井戸枠の ストレーナー部分の開孔面積をその部分の全側 面積で除した値)	[無次元]
Z_0	井戸からの無次元くみ出し量	[無次元]
Z_i	帶水層からの無次元くみ出し量	[無次元]
α	井戸枠の抵抗の無次元表示($\alpha_c, \alpha_u, \alpha_I, \alpha_H$ を 表わす)	[無次元]
α_i	帶水層における井戸枠の無次元抵抗係数	[無次元]

参考文献

- 1) Neuman, S.P. and A. Witherspoon : Theory of Flow in a Confined Two Aquifer System; Water Resources Research, Vol. 5, No. 4, pp. 803~816, 1969.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 本間 仁・荻原国宏：被圧帶水層への水の補給についての考察，土木学会論文報告集，第217号，pp. 25~32, 1978.
- 6) Motz, L.H. : Steady-State Drawdown in Coupled Aquifer; Journal of the Hydraulics Division, A.S.C.E., Vol. 104, No. Hy 7, pp. 1061~1074, 1978.
- 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) 沢井軍治郎：応用地下水学，p. 202.
- 11) 星田義治・市川 勉：揚水における井戸ロスの評価に関する考察，土木学会論文報告集，第313号，pp. 37~46, 1981.
- 12) 星田義治・瀬野啓造・市川 勉・前原弘光：揚水における井戸枠の抵抗の評価に関する一考察，土木学会論文報告集(ノート)，第275号，pp. 131~134, 1978.

(1982.3.26・受付)