

神戸大学工学部

正会員

斎藤雅彦

神戸大学都市安全研究センター

正会員

川谷 健

神戸大学大学院

学生員

○ 山本剛史

1. はじめに

被圧帯水層の加圧層に多少とも透水性があれば、揚水によって被圧水頭が低下すると加圧層を通して上部の帯水層から漏水が生じる。そして漏水の影響は被圧水頭の分布や低下挙動、さらに上部の帯水層の流れにも及ぶ。とくに漏水の供給が不圧帯水層からで、漏水のために地下水面が低下する場合、水面低下と被圧水頭低下は相互に干渉し、後者の非定常挙動は完全な被圧帯水層のそれとは違ったものになる。

本研究では、不圧帯水層からの漏水が揚水時の被圧地下水流に及ぼす影響を評価するため、両帯水層および加圧層の特性値を用いて基礎方程式の無次元化を行い、それに基づいて有限要素解析を実行した。

2. 基礎方程式の無次元化

本研究で取り上げる流れ場では一般に、帯水層内の流れは水平流であり、加圧層内の流れは鉛直流であると近似できる。いま無次元化のための代表値として、水位・水頭低下量に関しては井戸の水頭低下量(s_w)、透水量係数には被圧帯水層の基準値($k_{c0}B_0$)、加圧層厚にはその基準値(D_0)、水平座標に関しては被圧帯水層の透水量係数および加圧層の透水係数(k_{v0})と層厚とによって定義される漏水因子(λ_c) $\lambda_c = \sqrt{k_{c0}B_0D_0/k_{v0}}$ を用いる。その結果、無次元化された諸量は以下のとおりである。

$$\begin{aligned} \text{水平座標} &: \xi = x/\lambda_c, \eta = y/\lambda_c & \text{加圧層の層厚} &: d = D/D_0 & \text{時間} &: \tau = t / \left(S\lambda_c^2 / k_{c0}B_0 \right) \\ \text{水位・水頭低下量} &: (\text{被圧地下水}) \quad \phi = s_c / s_w, & (\text{不圧地下水}) \quad \varphi = s_f / s_w \\ \text{透水量係数} &: (\text{被圧帯水層}) \quad \kappa = k_c B / k_{c0}B_0, & (\text{不圧帯水層}) \quad \gamma = k_f H_f / k_{c0}B_0 \\ \text{揚水量} &: (\text{被圧帯水層}) \quad Q_c = \left(\lambda_c^2 / s_w k_{c0}B_0 \right) Q_w \end{aligned}$$

ここに、 Q_w は被圧帯水層の揚水量、添字 c と f はそれぞれ被圧層と不圧層を表す。なお、不圧帯水層の漏水因子を $\lambda_f = \sqrt{k_{f0}H_fD_0/k_{v0}}$ と定義すれば、不圧帯水層の無次元透水量係数とは $\gamma = (\lambda_f/\lambda_c)^2$ の関係にある。

このとき無次元化された基礎方程式は

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\kappa \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \right) - \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\kappa \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right) - \frac{\varphi - \phi}{d} &= \Omega_c \delta(\xi - \xi_w, \eta - \eta_w) \\ \frac{n}{S} \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\gamma \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} \right) - \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\gamma \frac{\partial \varphi}{\partial \eta} \right) + \frac{\varphi - \phi}{d} &= 0 \end{aligned}$$

と書ける。ここに、 $\delta(\xi, \eta)$ はデルタ関数、 S は被圧帯水層の貯留係数、 n は不圧帯水層の空隙率、 (ξ_w, η_w) は井戸の座標である。流量規定の境界条件は、無次元流量を Θ_c と Θ_f 、有次元の既知流量を v_c と v_f とすれば

$$\kappa \left(\frac{\partial \phi}{\partial \xi} n_\xi + \frac{\partial \phi}{\partial \eta} n_\eta \right) = \Theta_c, \quad \gamma \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \xi} n_\xi + \frac{\partial \varphi}{\partial \eta} n_\eta \right) = \Theta_f \quad : \quad \Theta_c = (\lambda_c / s_w k_{c0}B_0) v_c, \quad \Theta_f = (\lambda_c / s_w k_{c0}B_0) v_f$$

と書ける。ここに、 n_ξ と n_η は境界の法線方向余弦である。

3. 有限要素解析

(1) 解析条件 解析領域は $0 \leq (\xi, \eta) \leq 6$ の正方形で、揚水井は領域中央に1つである。領域境界で水頭と水位は等しい。初期の水位と水頭は一定で、等しい。各層の層厚はそれぞれ一定とする。

(2) 解析結果 基礎方程式より、漏水が起こっても地下水位が低下しない場合、被圧水頭の分布は、井戸の水位低下量 s_w および漏水因子 λ_c に無関係で、ただ1つであることが判る。この場合の水頭分布(井戸を通る断面)を図-1に示す。

漏水因子 λ_c と λ_f はそれぞれの帯水層の影響半径を表し、その比の2乗は不圧帯水層と被圧帯水層の透水量係
Takeshi KAWATANI, Masahiko SAITO, Tsuyoshi YAMAMOTO

数の比でもある。一方、井戸水位低下量と漏水因子の比 (s_w/λ_c) は被圧帯水層内の動水勾配を代表する。したがって $s_w/\lambda_c = 0.1$ に保ちつつ λ_f/λ_c を変え、両帯水層の相対的な透水性の大小が水頭と水位の低下に及ぼす影響を調べた。用いた漏水因子の値を表-1に示し、解析結果を図-2と図-3に示す。これから、不圧層の漏水領域が相対的に小さいとき、つまり不圧帯水層の透水量係数が相対的に小さいとき、水位・水頭の低下は大きい。 $\lambda_f/\lambda_c = 3.5$ の場合の被圧水頭の低下は、地下水面が低下しない場合 (図-1) とほぼ同じである。ゆえに約 $\lambda_f/\lambda_c \geq 3$ のとき、地下水面は実質的には低下しないと考えられる。被圧帯水層内の動水勾配 s_w/λ_c を表-2に示す値とした場合も、 λ_f/λ_c の値が同じであれば、水位・水頭低下は図-2と同じになり、被圧帯水層内の動水勾配は水位・水頭の分布に殆ど影響を与えないことが判る。

被圧水頭の経時変化は、地下水面が全く低下しない場合、被圧帯水層の貯留係数だけに支配され、短時間で定常状態になる。一方、地下水面が低下すると、被圧水頭低下もそれと連動し、その非定常過程は長期にわたる考えられる。図-4に、 $n = 0.3$ 、 $S = 2.0 \times 10^{-3}$ 、 $s_w/\lambda_c = 0.2$ および $\lambda_f/\lambda_c = 1.12$ である場合の水頭および水位の低下過程を示す。また図-5に、水位と水頭がともに低下する場合の初期段階の詳細を示す。なお図-4には、水位低下がない場合の水頭低下も示す。この結果から明らかなことは、漏水に伴って不圧帯水層の地下水面が低下すると、その水面低下が被圧水頭の低下過程を支配することである。

4. まとめ

- (1) 定常状態の水頭と水位の分布は両帯水層の漏水因子の比 (すなわち透水量係数の比) に大きく影響され、 $\lambda_f/\lambda_c \geq 3$ 程度で水面の低下は起こらない。
- (2) 漏水による不圧帯水層での水面低下は、ごく初期段階を除き、被圧水頭の経時変化を支配する。

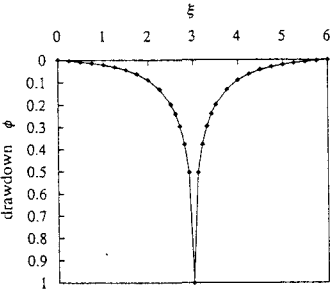


Fig.1 Distribution of drawdown in the confined aquifer in steady state (in section of $\eta = 3$)

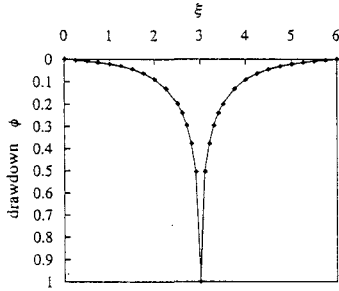


Fig.2 Drawdown in the confined aquifer for λ_f/λ_c listed in Table 1. (in steady state)

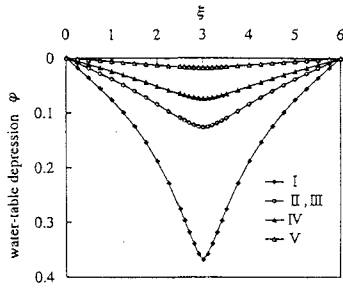


Fig.3 Depression of the water table for λ_f/λ_c listed in Table 1. (in steady state)

Table 1. Parameters used for results in Figs. 2 & 3.

case	λ_c (m)	λ_f (m)	λ_f/λ_c (m)
I	100	35	0.35
II	100	112	1.12
III	141	158	1.12
IV	71	112	1.58
V	32	112	3.50

Table 2. Values of s_w/λ_c used for the analysis

case	s_w/λ_c	λ_f/λ_c
I	0.20	0.35
II	0.20	1.12
III	0.14	1.12
IV	0.28	1.58
V	0.63	3.50

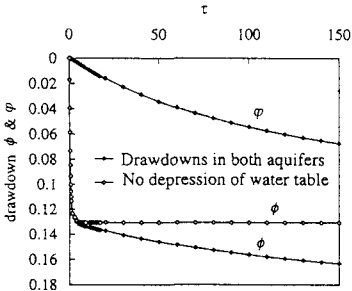


Fig.4 Temporal change of the drawdowns at $(\xi, \eta) = (3, 2.25)$

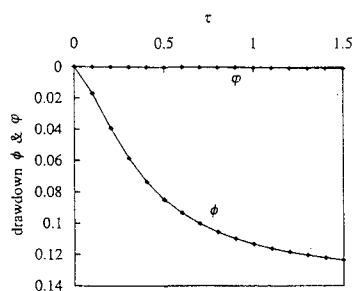


Fig.5 Drawdowns at the early stage