

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 ○土山 滋郎

1. はじめに

被圧帯水層において深井戸工法を実施する際、加圧層の透水性を把握しておくことが重要である。すなわち、加圧層に多少とも透水性があれば、揚水の影響は、揚水対象の帯水層だけでなく、隣接する帯水層にも及ぶので、水位・水頭低下や沈下の範囲および大きさを適切に予測するために、加圧層の透水性の評価は重要である。一般に、帯水層や加圧層の厚さは地質調査によって、また前者の透水性は現場透水試験などによって知ることができるのに対し、加圧層の透水性はオーダーすら把握するのが困難な場合も多い。

ここでは、漏水性被圧帯水層から揚水することによって、上層の不圧帯水層で地下水面が低下する場合を取り上げる。このとき、地下水面の経時変化は加圧層の透水性を反映していると考えられるので、試験揚水段階などでの地下水位の変化を観測し、その結果から逆解析によって加圧層の透水性を評価することを検討する。

2. 基礎方程式

揚水の結果、加圧層を通して不圧帯水層から被圧帯水層へ漏水するとき、両帯水層内の流れは水平2次元流、加圧層内の流れは鉛直1次元流と近似できる。このとき基礎方程式は

$$S \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k_c B \frac{\partial h}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k_c B \frac{\partial h}{\partial y} \right) - k_v \frac{H-h}{D} = Q_w \delta(x-x_w, y-y_w)$$

$$n \frac{\partial H}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k_f H_f \frac{\partial H}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k_f H_f \frac{\partial H}{\partial y} \right) + k_v \frac{H-h}{D} = 0$$

である。ここに、 h , k_c , B , S はそれぞれ被圧帯水層の水頭、透水係数、層厚、貯留係数であり、 H , k_f , H_f , n はそれぞれ不圧帯水層の水頭、透水係数、水深、空隙率であり、 k_v と D は加圧層の透水係数と層厚である。また、 Q_w は被圧帯水層からの揚水量、 (x_w, y_w) は揚水性の座標、 $\delta(x, y)$ はデルタ関数である。境界条件は、流量が規定されている境界で

$$-\left(k_c B \frac{\partial h}{\partial x} n_x + k_c B \frac{\partial h}{\partial y} n_y \right) = V_c \quad , \quad -\left(k_f H_f \frac{\partial H}{\partial x} n_x + k_f H_f \frac{\partial H}{\partial y} n_y \right) = V_f$$

である。ここに、 V_c と V_f は被圧帯水層と不圧帯水層からの流出量、 n_x と n_y は境界の法線方向余弦である。

3. 解析モデルと解析方法

解析は有限要素法によって実行する。解析領域は $600 \text{ m} \times 600 \text{ m}$ の正方形で、その中央に揚水井、さらにその周辺に3つの観測井がある。層厚は、被圧帯水層が 15 m 、加圧層が 5 m である。境界の水位・水頭は上流側 50 m 、下流側 40 m とし、二つの側方境界は不透水性境界とした。両帯水層および加圧層はそれぞれ均質、等方性とし、透水係数は、被圧帯水層が 3 m/day 、不圧帯水層が 10 m/day 、加圧層が 0.1 m/day とした。被圧層の貯留係数は $S=0$ 、不圧層の空隙率は $n=0.3$ とした。時間積分の時間間隔は $\Delta t=5 \text{ 日}$ とした。初期の水位・水頭分布は定常状態の分布とし、井戸水位は瞬間的に $h=30 \text{ m}$ に下げられ、その後は一定に保たれる。

逆解析では、推定の対象は加圧層の透水係数であり、観測値としては順解析によって得られた観測井での不圧帯水層の水位を採用する。順解析結果の例として、図-1に、地点(280 m, 250 m)での水面と被圧水頭の経時変化を示す。

逆解析における最適化手法としては制約付きシンプレックス法を用いた。シンプレックスの頂点の初期座標、すなわち加圧層の透水係数の初期推定値は、表-2に示すとおりである。

Masahiko SAITO, Takeshi KAWATANI, Jiro TSUCHIYAMA

4. 解析結果

(Case 1; 観測誤差がない場合) 逆解析に用いた観測値を表-1 に示す。またシンプッレクスの頂点の初期座標、すなわち加圧層の透水係数の初期推定値を表-2 に示す。

逆解析の結果、推定値は完全に真値と一致した。したがって、観測誤差のない場合、推定の精度は高い。
(Case 2; 観測誤差がある場合) 観測値として、表-2 の値に、表-3 に示す正・負の符号にしたがって一定の誤差を加えた値を用いる。

観測誤差が 2 cm のとき、推定値は 0.108 cm/day であり、推定誤差は真値の 10 % 以下である。観測誤差が 5 cm のとき、推定値は 0.118 cm/day、推定誤差は真値の 20 % である。観測誤差が 10 cm/day のとき、推定値は 0.147 cm/day、推定誤差は真値の 50 % 弱となった。加圧層の透水係数が各々上述の推定値である場合について、観測井での計算水位と観測水位の差をそれぞれ表-4, 5, 6 に示す。

5. おわりに

不圧帯水層での水面低下は緩やかに進行するので、その観測精度を高く保つことは可能と考えられる。解析例のように観測誤差を±5 cm 程度にすれば、加圧層の透水係数を 20 % 程度の誤差で同定でき、また観測誤差が±10 cm の場合でも、透水係数のオーダーは真値のそれと同程度に同定できる。この精度は、実用的には十分であり、ここに示した逆解析手法の適用性は高いと考えられる。

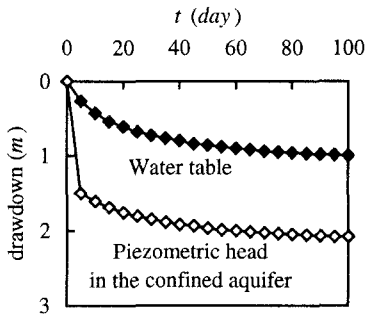


図-1 被圧帯水層からの揚水に伴う自由水面と被圧水頭の経時変化

表-1 逆解析に採用した自由水面の観測値 (Case 1)

(x, y) \ t (day)	5	10	20
(280, 250)	45.48	45.32	45.14
(280, 330)	45.42	45.24	45.05
(350, 300)	44.30	44.13	43.94

表-2 加圧層の透水係数の初期値 (Case 1)

Apex	Initial value
1	$10^{-0.3} \div 0.5$
2	$10^{-1.5} \div 0.03$
3	$10^{-2.5} \div 0.003$

表-3 観測誤差の正負 (Case 2)

(x, y) \ t (day)	5	10	20
(280, 250)	+	-	+
(280, 330)	-	+	-
(350, 300)	-	-	+

表-4 自由水面の真値と計算値の差 (観測誤差±2 cm のとき)

(x, y) \ t (day)	5	10	20
(280, 250)	+2.8	-0.9	+9.0
(280, 330)	-0.9	+3.5	-0.7
(350, 300)	-1.2	-0.8	+3.6

表-5 自由水面の真値と計算値の差 (観測誤差±5 cm のとき)

(x, y) \ t (day)	5	10	20
(280, 250)	+6.9	-2.7	+9.0
(280, 330)	-2.9	+8.1	-0.7
(350, 300)	-3.0	-2.0	+9.2

表-6 自由水面の真値と計算値の差 (観測誤差±10 cm のとき)

(x, y) \ t (day)	5	10	20
(280, 250)	+13.9	-4.3	+17.3
(280, 330)	-4.0	+18.1	-0.2
(350, 300)	-5.5	-3.6	+18.1