

逆解析による漏水性被圧帯水層の水理特性の評価

神戸大学工学部 正会員 川谷 健
 神戸大学大学院 学生員 久保 真成
 神戸大学大学院 学生員 湯本 圭輔

1. 概要

地下水低下工法などによる地下水流況の変化の予測，また揚水量や水位・水頭の適切な管理・制御には，帯水層の水理特性を的確に把握すること，とくに被圧帯水層では漏水の有無や多寡を知ることが重要である。

ここでは解析対象として，ある程度の透水性をもつ難透水層によって，その上方が不圧帯水層，その下方が被圧帯水層に分けられる帯水層を取り上げる。被圧帯水層は異方性，不均質であり，加圧層は等方性，不均質であるとする。揚水は被圧帯水層から複数の井戸で行うとし，このときの被圧層の水頭低下量と揚水量，および漏水に伴う不圧層の水位低下量は，有限要素法によって算定する。

一方，被圧帯水層および加圧層が均質，等方で層厚一定であり，さらに不圧層の水位が一定の場合，揚水量と水頭低下量の関係を与える理論解が既知である。また基礎方程式は水頭低下量に関して線形で，したがって複数の井戸での揚水による水頭低下量の算定には「重ね合わせ」が適用できる。

本研究では，有限要素法によって算定した水頭低下量および揚水量を実測値・観測値と見なし，それらを最もよく再現できるよう理論解に基づく逆解析で加圧層の透水係数を推定する。そして被圧帯水層の不均質・異方性および加圧層を通る漏水量の多寡が，加圧層の透水係数の推定値にどのように反映されるかを調べる。なお，被圧帯水層の漏水性は一般に漏水因子（Leakage factor） $\lambda = \sqrt{TB'/K'}$ （Tは被圧帯水層の透水量係数，K'とB'は加圧層の透水係数と厚さ）で評価される。この逆解析ではTおよびB'は一定とし，K'の値を決定するが，その値はTおよびB'の不均一性も反映すると考えられる。

2. 解析方法および解析条件

解析領域は1 km×1 km，層厚は，被圧層が15 m，不圧層（水深）が12 m，加圧層が3 mとする。揚水井は領域中央付近の直径50 mの円内に3本とし，境界の水位・水頭は帯水層底面から30 mとする。有限要素解析では，透水係数は要素ごとに，被圧層で $-2.5 \leq \log K_x, \log K_y \leq -1.5$ ($0.32 \sim 3.2 \times 10^{-2}$ cm/s)，加圧層で $-4.5 \leq \log K_v \leq -3.5$ ($0.32 \sim 3.2 \times 10^{-4}$ cm/s) となるよう一様乱数を用いて設定した。揚水井の水位は22 m（水頭低下量は8 m）とした。

有限要素解析は，被圧層および不圧層では2次元流れ，加圧層ではその上下の帯水層間に水頭差があるとき鉛直1次元流れが生じるものとして，定式化し実行した。

理論解では，漏水性被圧帯水層の水頭低下量と揚水量の関係は，上部の不圧地下水位が一定である場合，影響半径が ∞ のとき： $s(r) = \{Q_w/2\pi T\} K_0(r/\lambda) / \{(r_w/\lambda) K_1(r_w/\lambda)\}$ …(1)
 影響半径がRのとき： $s(r) = \{Q_w/2\pi T\} \{K_0(r/\lambda) - K_0(R/\lambda) I_0(r/\lambda) / I_0(R/\lambda)\}$ …(2)
 である。ここに，s(r)は井戸からの距離rの地点の水頭低下量， Q_w は揚水量， r_w は井戸半径， $K_0(X)$ と $K_1(X)$ はそれぞれ0次と1次の第2種修正ベッセル関数， $I_0(X)$ は0次の第1種修正ベッセル関数である。群井戸の場合の水頭低下量あるいは揚水量は，重ね合わせの原理を適用して算定できる。

逆解析には制約付きシンプレックス法を採用し，水頭の計算には式(1)を用いた。目的関数は，観測水頭と計算水頭を s_o と s_c として， $f = (1/N) \sum \{(s_o - s_c)^2 / s_o\}$ である。ここに，Nは観測井の数， $\sum$ はすべての観測井についての総和を表す。シンプレックスの頂点は5つとし，初期値は $\log(K_v) = -7, -5, -4, -3, -2$ とした。揚水量は有限要素解析で算定された値を採用した。観測井は4カ所とした。

有限要素解析は，不圧帯水層の透水係数が1 cm/sの場合と，0.03 cm/sの場合で行った。前者では理論解の前提である不圧地下水位一定の条件がほぼ満たされ，後者では漏水に伴い不圧地下水位が低下する。

3. 解析結果

逆解析によって推定された加圧層の透水係数を表-1に示す。この表で、透水係数の真値（平均値）は、群井戸の中心から半径およそ300m内の要素220個の平均値である。不圧層の透水係数が1cm/sの場合、有限要素解析で算定された不圧地下水位の低下量は、群井戸の中心から半径およそ50m内で10cm以下であり、式（1）の前提条件を満足している。一方、不圧層の透水係数が0.03cm/sの場合、同じ領域内の不圧地下水の低下量は2m前後である。不圧地下水位がほぼ一定の場合、推定値が真値よりやや大きい傾向がみられるものの、両者の差は工学的には無視し得るほど小さいと考えられる。これに対して不圧層の透水係数が0.03cm/sの場合、不圧層からの漏水量が少ないことを反映して加圧層の透水係数が見かけ上小さくなり、推定値は真値（平均値）の40%前後となっている。図-1に、被圧層の水頭低下量の真値（有限要素解析の結果）と再現結果（式(1)による計算結果）を示す。不圧層からの漏水量の多寡が加圧層の透水係数の大小として推定値に現れるので、水頭低下量に関しては実用上許容できる程度に再現できていると思われる。

4. 結論

加圧層が漏水性であり、帯水層も加圧層も透水係数に1オーダー程度の不均質性が存在する被圧帯水層に対して、帯水層および加圧層を均質と仮定し、漏水性被圧帯水層における井戸理論を適用し、加圧層の透水係数の逆解析を行った。井戸理論の前提である不圧地下水位一定の条件が満たされる場合は勿論、漏水に伴い不圧地下水位が低下する場合も、逆解析結果を用いた水頭分布の再現結果は実用上十分な精度であった。

表-1 逆解析の結果

加圧層の透水係数 ($\times 10^{-4}$ cm/s)	
真値 (平均値)	推定値

(不圧層の透水係数：1 cm/s)

1.27	1.48
1.10	1.35
1.11	1.48
1.19	1.20
1.28	1.35

(不圧層の透水係数：0.03 cm/s)

1.27	0.51
1.21	0.45
1.22	0.42

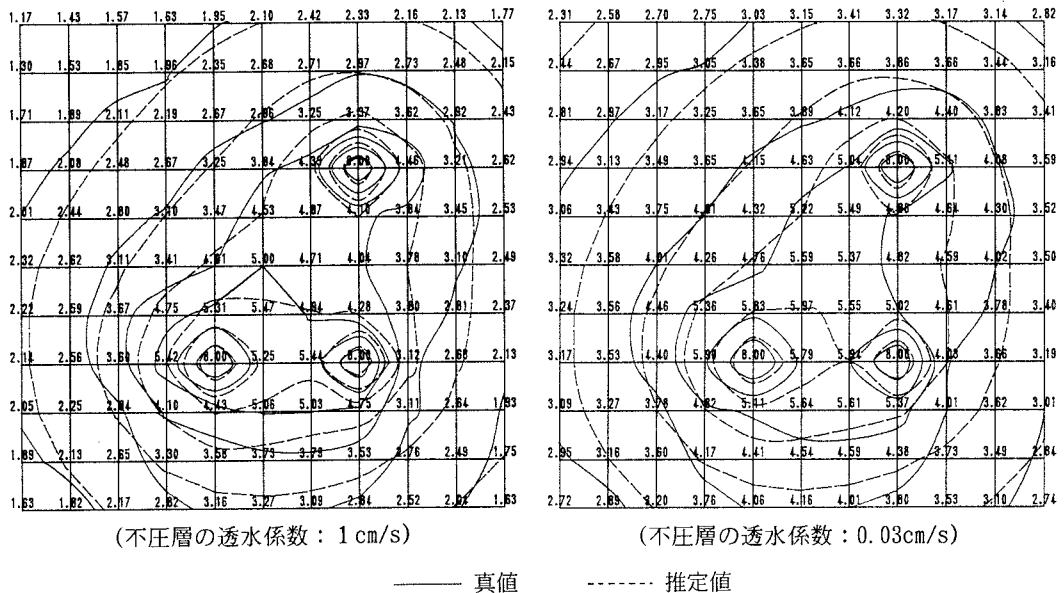


図-1 水頭分布の真値（有限要素解析の結果）と推定値を用いた再現結果