

多層帯水層における地下水工法の数値解析

神戸大学工学部 正 川谷 健
 神戸大学大学院 学 久保 真成
 大成建設(株) 亀元 邦英

1. はじめに 地盤掘削のために地下水低下工法を実施する場合、井戸の本数や配置を決定する手段として有限要素法などに基づく浸透流解析手法と最適化手法とが併用される。このとき浸透流解析では、帯水層は、実際にはそれが多層構造であっても、単層構造として取り扱われることが多い。そして、その透水量係数として、各層の層厚あるいは水深を重みとする等価透水量係数が採用される。その結果、定常解として算定される水頭分布は帯水層を構成する地層の層序とは無関係となり、ただ一つである。しかし、帯水層が透水性の異なる幾つかの地層から構成される場合、各層内の水位・水頭は異なっており、揚水の最適化をはかるにはそれを考慮することが重要である。

本研究では、透水性の高い二つの地層間に相対的に透水性の低い地層がはさまれ、漏水性の加圧層として働くような地層構造の帯水層をとりあげ、地下水低下工法の実施に伴う水位・水頭分布を算定した。そして、多層帯水層を単層の帯水層に置換した場合に求められる水位・水頭分布との違いについて考察した。

2. 解析方法 加圧層においては、水平流速成分は透水層内のそれと比べて無視できるが、上下の透水層間に水頭差があるときに生じる鉛直流は帯水層間の漏水を考える上で無視できない。従って帯水層内の流れを、透水層では水平二次元流れ、加圧層では鉛直一次元流れとして取り扱う。

不圧層および被圧層における流れの連続の式は、それぞれ

$$\frac{\partial}{\partial x}(\bar{H}q_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{H}q_y) - q_z = -\sum Q_{pf}\delta(x-x_{pf})\delta(y-y_{pf}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(bq_x) + \frac{\partial}{\partial y}(bq_y) + q_z = -\sum Q_{pc}\delta(x-x_{pc})\delta(y-y_{pc}) \quad (2)$$

である。ここに、 $\bar{H}$ は不圧層内の水位、 h は被圧層の水頭、 b は被圧層厚、 Q_{pf} と Q_{pc} は不圧層および被圧層からの取水量、 x と y は水平座標、 z は鉛直座標であり、 q_x 、 q_y 、 q_z は x 、 y 、 z 方向のDarcy流速成分である。 $\delta(x)$ はdelta関数、 (x_{pf}, y_{pf}) と (x_{pc}, y_{pc}) は不圧層と被圧層の井戸の位置である。加圧層を横切る漏水量 q_z は上下の透水層の水頭差に比例するとして、 $q_z = -K_z \frac{H-h}{D}$ (3) である。ここに、 K_z は加圧層の透水係数、 D は加圧層厚である。

式(1)、(2)の q_x と q_y にDarcy則を適用し、式(3)の q_z を用いる。そして有限要素定式化を行えば、 H と h に関する二元連立方程式

$$\begin{bmatrix} [A]_{11} & [A]_{12} \\ [A]_{21} & [A]_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H \\ h \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} B_f \\ B_c \end{Bmatrix} \quad (4) \quad \text{が導かれる。ここに、}$$

$$[A_{nn}]_{11} = \int_R \left(K_x \bar{H} \frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{\partial N_n}{\partial x} + K_y \bar{H} \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{\partial N_n}{\partial y} + K_z \frac{N_n N_n}{D} \right) dR \quad [A_{nn}]_{22} = \int_R \left(k_x b \frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{\partial N_n}{\partial x} + k_y b \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{\partial N_n}{\partial y} + K_z \frac{N_n N_n}{D} \right) dR$$

$$[A_{nn}]_{12} = [A_{nn}]_{21} = -\int_R K_z \frac{N_n N_n}{D} dR \quad B_f = -\int_S V_f N_n ds - \sum Q_{pf} N_n(x_{pf}, y_{pf}) \quad B_c = -\int_S V_c N_n ds - \sum Q_{pc} N_n(x_{pc}, y_{pc})$$

であり、 $N_n(x, y)$ は補間関数、 (K_x, K_y) と (k_x, k_y) はそれぞれ不圧層と被圧層の透水係数、 R は領域、 S は R の外部境界、 V_f と V_c は不圧層および被圧層からの流出量である。なお、揚水井の水位を被厚層内にまで下げる場合、井戸周辺では被厚層内に不圧流の領域が生じるので、式(4)の連立方程式の数はあらかじめは未知である。

3. 解析条件と解析結果 解析領域を図-1に示す。表-1は、各ケースの透水層および加圧層の透水係数であり、Case0は帯水層を単層構造と仮定した場合である。被圧層厚は50m、加圧層厚は10m、上・下流境界の水位・水頭は不圧層と被圧層で等しく、それぞれ90mと70mである。揚水井の水位は40mとした。

図-2に、各ケースの $y=400\text{m}$ の断面における水位・水頭分布を示す。被圧層の透水係数が不圧層より小さい場合（Case1 と Case2 ）、不圧層と被圧層の動水勾配はどちらも、Case0 と比べて、上・下流境界付近で小さく、逆に井戸付近ではかなり大きい。これは、Case0 では等価透水量係数が被圧層のそれよりも大きく評価されるためである。すなわち、境界付近で Case2 と Case3 の動水勾配が小さいのは、Case0 と比べて揚水量（領域への流入量）が小さいためである。また井戸付近で動水勾配が大きいのは、被圧層の流量に加えて不圧層からの漏水量を揚水しているためである。井戸付近の動水勾配が大きい結果、掘削対象領域内の水頭も Case0 よりかなり高くなっており、ヒーピングの検討などでは留意する必要があると考えられる。Case1 と Case2 を比較すれば、加圧層の透水係数が大きくなると、当然、不圧層と被圧層の水頭差が小さくなることが確かめられる。ただ、水位・水頭の分布は Case1 と Case2 でほとんど違いがない。

不圧層と被圧層の透水係数が等しい場合（Case3 ）、被圧層の水頭分布は、Case0 の水位分布とほとんど同じである。これは、Case0 の等価透水量係数が被圧層のそれとほとんど同じに評価されるためである。一方、このケースでは加圧層の透水性が小さいために、不圧層の水位が水頭より 10m 以上高くなっているところもある。不圧層の水位低下が小さいという意味で、揚水の影響が広範囲に及ばないと言える。

4. まとめ 帯水層が相対的に透水性の小さい地層によって不圧層と被圧層に分けられる場合、そこでの水位・水頭分布は、等価透水量係数を導入して帯水層を単層と仮定して求められる水位分布と大きく異なることがある。また、掘削対象領域内の水頭は、単層とした場合の算定値より高くなることがある。したがって、地下水低下工法の最適施工を取り扱う場合などには、帯水層の地層構造を考慮した浸透流解析が重要と考えられる。

表-1 透水係数の設定条件
(cm/s)

case	K_x, K_y	K_z	k_x, k_y
1	10^{-2}	10^{-5}	10^{-3}
2	10^{-2}	10^{-4}	10^{-3}
3	10^{-2}	10^{-5}	10^{-2}
0	単層（等価透水量係数）		

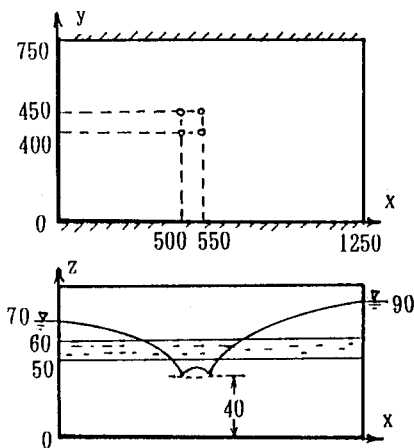


図-1 解析領域

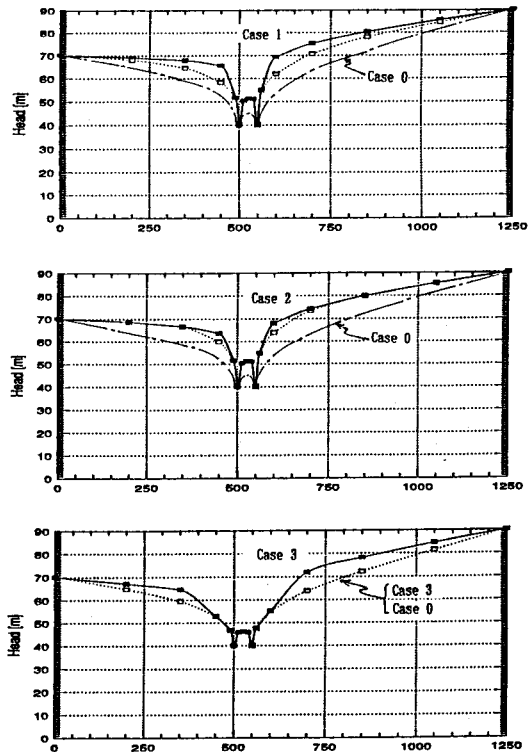


図-2 各ケースにおける水位・水頭分布 ($y=400\text{m}$)