

II-7 多層帯水層からの最適取水について

神戸大学工学部 正員 ○ 川谷 健
清水建設(株) 正員 黒坂 昌弘

1. はじめに 本域的な地下水利用に際して、地下水流の基礎方程式が線形であることに着目し、これに線形計画法を組合せて、個々の井戸の最適揚水量を決定する方法があり、種々の問題に応用され^(1,2,3)、その解決に役立っている。ところで、そのような最適揚水の解析では、単層の帯水層が取りあげられている。しかし、本域の地下水利用の最適化を考えるには、多層構造の帯水層を取扱うことが必要であると思われる。すなわち、帯水層はふつう透水性の異なる幾つかの地層から構成されており、相対的に透水性の小さい地層が加圧層として働き、その下の透水層は被圧帯水層となる。このとき加圧層にも多少の透水性があるので、加圧層を挟む上下の透水層間に水頭差があれば、一方の透水層から他方の透水層へ加圧層を横切って漏水が生ずる。そして、1つの透水層だけから揚水が行われても、他の透水層との水頭差が大きくなることで、漏水量も多くなる。このように、多層構造の帯水層において異なる地層から揚水すれば、個々の地層での流況の変化は他の地層内の地下水流動にも大きく影響する。それゆえ、1つの地下水系での揚水量の最適化を図るには、解析モデルとして多層の帯水層を設定することが必要になる。本研究では、上記の観点から、解析の対象として多層帯水層を取上げ、最適揚水量の決定方法をさらに広い範囲の問題に適用することについて検討した。

2. 解析例

解析の対象とする帯水層を図-1に示す。帯水層は、1つの加圧層によって不圧帯水層と被圧層に分けられる。ところで本域の地下水流動の解析では、一般に、解析の場の鉛直方向のスケールは水平方向のスケールに比べて非常に小さい。そのため、透水層内では、動水勾配の鉛直成分は水平成分に比べて無視でき、流れは水平2次元流とみなせる。一方、加圧層では、透水性が透水層のそれに比べて十分小さいとき、水平方向の流れは無視でき、ただ上下の透水層間に水頭差があるときだけ、鉛直1次元の流れが生ずる。したがって、解析では、透水層で水平2次元流、加圧層で鉛直1次元流という準3次元流モデルを設定する。

上述のような準3次元流を考え、基礎方程式

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j}) - Q_w = 0 \quad \dots (1)$$

(ここに、 Q_w は揚水量)を有限要素法によって離散化する。このとき、図-1および図-2に示すように、2つの帯水層を、2次元要素を用いて全く同いように分割する。そして、帯水層では2次元(x, y)の補間関数を用い、加圧層では、それを挟む上下2つの節点間に1次元(z)の補間関数を用いる。離散式は、

$$[E]\{h\} = \{F\} + \{a\} \quad \dots (2)$$

であり、 $[E] = [E^I] + [E^{II}]$ である。ここに、

$$E_{nm}^I = \sum_e \int_{A_e} D_I (k_x \frac{\partial N_m}{\partial x} \frac{\partial N_n}{\partial x} + k_y \frac{\partial N_m}{\partial y} \frac{\partial N_n}{\partial y}) dA$$

$$E_{nm}^{II} = \sum_e \left(\pm \frac{k_z}{D_{II}} \int_{A_e} N_m dA \right); \left\{ \begin{matrix} m=n \text{ とき} + \\ m \neq n \text{ とき} - \end{matrix} \right\}, \quad F_n = - \sum_e \int_{A_e} D_I \frac{\partial}{\partial z} N_n ds, \quad Q_n = - \sum_{k=1}^M W_k N_n(x_k, y_k)$$

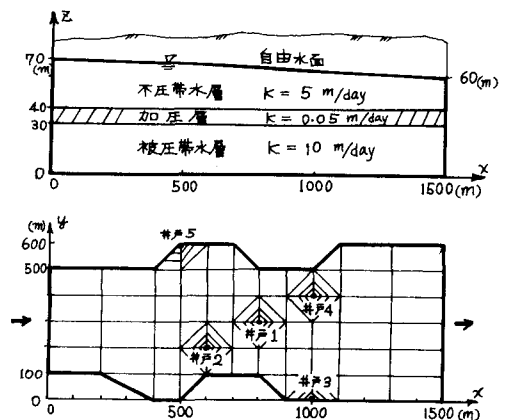


図-1 解析領域

である。また、 N_n は2次元 (x, y) の補間関数、 D_r は被圧帯水層の厚さ(不圧帯水層では水深 H)、 D_x は加圧層の厚さ、 W_k は k 番の井戸の揚水量であり、井戸 k の位置が (x_k, y_k) である。

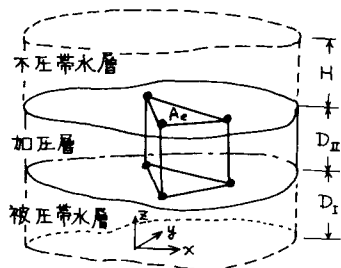


図-2 準3次元流モデルの要素分割

多層帯水層から揚水するとき、井戸には、ただ1つの層からだけ取水するものと、複数の層から取水するものとがある。この解析例では、井戸1は両帯水層から取水するとし、井戸2と3は不圧帯水層からだけ、井戸4と5は被圧層からだけ取水するとする。式(2)の定式化では、井戸1に相当する節点は上下2つの帯水層で別々に設定し、そこでの水頭及び揚水量も別々に扱われている。いま、井戸1に対応する上層の節点での水頭と揚水量を h_{α} と Q_{α} 、下層の節点で h_{β} と Q_{β} とすれば、水頭は $h_{\alpha} = h_{\beta}$ でなければならず、揚水量は $Q_{\alpha} + Q_{\beta}$ で与えられる。したがって、式(2)の係数行列 $[E]$ の α 列と β 列、つづいて α 行と β 行を加え、また揚水量ベクトル $\{Q\}$ の α と β 成分を加えることで、連立方程式の数を1つ減らすことができる。複数の地層から取水する井戸については、同様の取扱いをする。

以上のようにして得られた離散式に、上田らが示した最適揚水量の決定手法を適用し、種々の制約条件の下で、領域内の総取水量を最大にすることを目的として、個々の井戸の最適揚水量を決定する。

解析の条件は、まず下流の境界水位を 60 m とし、それより 200 m 上流 ($x=1300$ m) での水頭を 60.5 m 以上に保つという制約を加えて、下流域へ最低 600 m³/日 の流量を確保する。上流の境界条件としては、流入量が一定の場合と、水位が一定である場合を設定した。前者の場合には、上流の水位が 70 m であるときの流入量 1355 m³/日を、一定流入量として規定し、揚水による上流境界での水頭の低下が 69 m 以上にとどまるようにした。

図-3 では、流入量が一定であり、各井戸の水位低下が揚水前の水位から 1 m 以内であるという制約の下で、2つの帯水層から取水する場合の各揚水量と、等価透水量係数を用いて単層の帯水層として算定される揚水量とを比較した。両者で、各井戸の揚水量にかなりの差が見られ、多層帯水層としての解析が重要であるといえる。

図-4 に、上流からの流入量が一定である場合と、上流の水位を一定 ($z=70$ m) に保つ場合について、許容水位低下量のちがいによる総揚水量のちがいを示す。水位一定のとき、許容低下量がふえると、総揚水量は大きく増える。水位一定の条件では、当然、揚水量の増減の影響は領域外に及ばない。そして、領域内の水位低下が大きく、境界付近での動水勾配が大きくなると、上流から領域への流入量も増加する。したがって、上流側境界に近い井戸ほど、その水位を許容限度まで下げることによって、総揚水量を最大にするという目的を達せられるであろうことは容易に想像できる。しかし実際には、領域への流入量に上限があるのが普通であり、最適取水の解析では、流入量を規定した解析を行うことが、より現実的な結果につながると思われる。

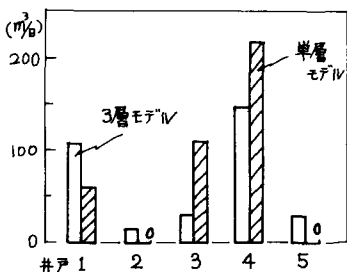


図-3 各井戸の揚水量

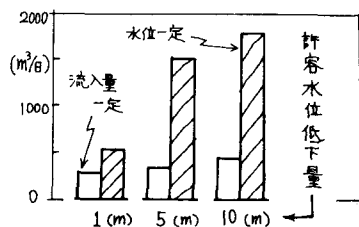


図-4 総揚水量

参考文献 (1) 上田、神野、長野；本領域地下水からの最適井戸取水

について、土木学会論文報告集、283、33～43、1979。

(2) 佐藤、渡辺；地下水の適正揚水システムに関する研究、水資源に関するシンポジウム、506～511、1977。

(3) 上田、藤野他；準-様流を仮定できる定常3次元地下密度流の数値解と最適井戸取水について、土木学会論文報告集、301、83～92、1980。