

III-142 複層からなる帯水層中の地下水位変動 — とくに揚水の場合 —

京都大学工学部 正員 松尾新一郎

同上 正員 河野伊一郎

1. はしがき

地下水揚水などに起因する地下水位変動を定量的に検討する際、これまでは透水層を単に自由地下水、あるいは被圧地下水のように単層を考え、しかもある地帯での透水性は鉛直方向には一定であるという仮定が行われてきた。しかし地層柱状図をみても明らかなように現実にはその区別が画一的でないばかりか、同じ透水層でも透水性の異なるいくつかの層が重なって一つの透水層を構成している場合が多い。これを複層からなる帯水層と呼ぶことにする。この複層からなる帯水層において地下水を揚水した場合、各層を地下水位低下どのように伝播するのか、これを単層と考えて解析した場合（たとえば Theis の非平衡理論）どのような不合理や誤差が生ずるかを考察しているのが、第一報として2層からなる帯水層中からの揚水に伴う地下水位低下の場合を報告する。

2. 基本的な考え方 図-1に示すように2層からなる半自由地下水的な帯水層構成を考える。上層の透水係数と k_1 、透水層厚さを h （自由地下水面の位置）とし、下層のそれらをそれぞれ k_2 、 D とする。また下層の地下水位を p で表示する。

上層に対する運動方程式として式(1)を与える。ただし、上層の平均地下水位としては自由地下水面 h と下層との境界における水位 p との平均 $(h+p)/2$ とするものとする。 q ：地下水流量である。

$$q_x = -k_1 h \frac{\partial (h+p)/2}{\partial x}, \quad q_y = -k_1 h \frac{\partial (h+p)/2}{\partial y} \quad \text{----- (1)}$$

連続の式としては上層と下層の水位差による両層間の水収支を Darcy の式で導入し式(2)を与える。

$$-\beta \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + k_1 \frac{h-p}{h} \quad \text{----- (2)}$$

ここに、 β ：有効空げき率（貯留係数）である。なお右辺の第3項が上層から下層への流入量である。式(1)、(2)より、上層の地下水位変動に関する式(3)を与える。

$$\beta \frac{\partial h}{\partial x} = k_1 h \frac{\partial^2 (h+p)/2}{\partial x^2} + k_1 h \frac{\partial^2 (h+p)/2}{\partial y^2} + k_1 \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial (h+p)/2}{\partial x} + k_1 \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\partial (h+p)/2}{\partial y} - k_1 \frac{(h-p)}{h} \quad \text{----- (3)}$$

一方、下層について同様な考え方のもとに式(4)を与える。

$$k_2 D \left\{ \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right\} + k_1 \frac{h-p}{h} = 0 \quad \text{----- (4)}$$

ただし、上層の貯留係数は有効空げき率と考えられるのに対し、下層のそれは主として層の伸縮性からきまるものであるため、前者に較べて極めて小さいと考えられるのでこれをゼロと仮定する。

3. 計算手法と境界条件

平面的には図-2に示すように円領域（影響圏半径 $= R$ ）

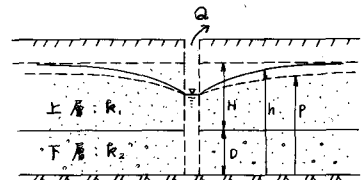


図-1 2層からなる帯水層

の中心Oで揚水(揚水量=Q)を行なうものとする。差分式による数値計算を行なうため、同図に示すようにこの領域を196個の正方形に格子区分し、また計算式として式(3)および(4)を差分表示にしてそれぞれ式(5)、(6)を与える。

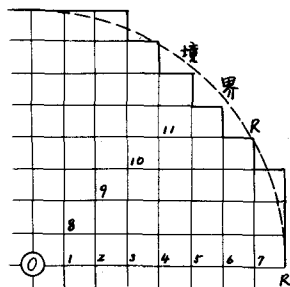


図-2 円領域と格子区分
(円の4分の1を示す)

$$h_{i,j}(t+\Delta t) = h_{i,j}(t) + \frac{R_1 \Delta t}{2\beta(\Delta t)^2} \left\{ h_{i,j}(h_{i+1,j} + h_{i-1,j} + h_{i,j+1} + h_{i,j-1} - 4h_{i,j}) \right. \\ \left. + P_{i+1,j} + P_{i-1,j} + P_{i,j+1} + P_{i,j-1} - 4P_{i,j} \right\} + \frac{1}{4}(h_{i+1,j} - h_{i-1,j})(h_{i,j+1} - h_{i,j-1}) \\ + P_{i+1,j} - P_{i-1,j} + \frac{1}{4}(h_{i,j+1} - h_{i,j-1})(h_{i+1,j+1} - h_{i-1,j-1} + P_{i,j+1} - P_{i,j-1}) \left. \right\} \\ - \frac{R_1 \Delta t}{\beta} \frac{h_{i,j} - P_{i,j}}{h_{i,j}} \quad \text{----- (5)}$$

$$P_{i,j} = \frac{h_{i,j} + Ch_{i,j}(P_{i+1,j} + P_{i-1,j} + P_{i,j+1} + P_{i,j-1})}{1 + 4Ch_{i,j}} \quad \text{----- (6)}$$

$$C = k_2 D / k_1 (\Delta t)^2$$

解析例として境界条件が以下の場合を考える。

上層: $R_1 = 4.35 \text{ m/d}$, $H (=h_{t=0}) = 15 \text{ m}$, $\beta = 0.2$, 下層: $R_2 = 17.28 \text{ m/d}$, $D = 5 \text{ m}$, $P(t=0) = 15 \text{ m}$
また, $\Delta t = 10 \text{ m}$ ($R = 100 \text{ m}$), $Q = 1,000 \text{ t/d}$ とする。なお、揚水量の条件の導入に関して詳しくは文献2)を参照されたい。

4. 解析結果と考察

以上の計算手法、および境界条件のもとに求めた結果を図-3に示す。実線は上層の自由地下水面 h の変動、破線は下層の水位 P の変動を示している。境界条件の仮定では下層の透水係数は上層のその4倍である。したがって下層はやや被圧地下水的な性格を有しているものと考えられる。

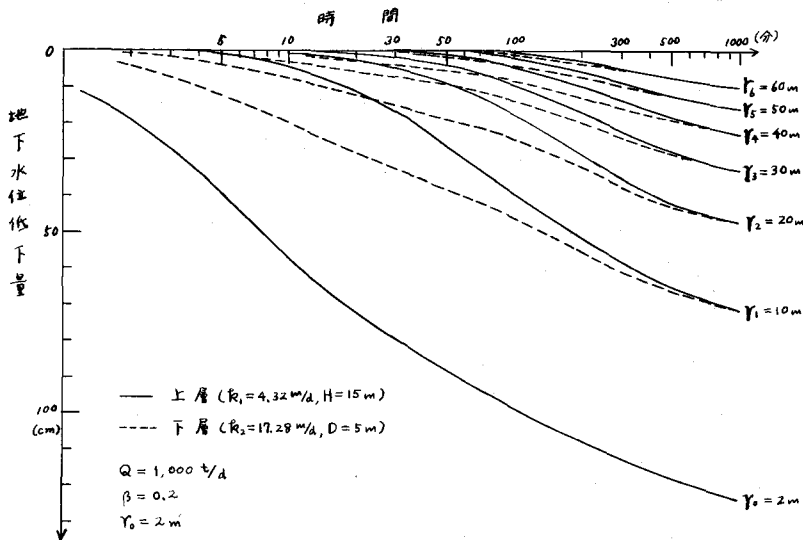


図-3 2層からなる帯水層中の地下水位変動の伝播の一例

その結果、下層の地下水位変動の伝播は上層のそれに較べて著しく速いことがわかる。とくに揚水開始直後において顕著で、時間の経過とともに両地下水位は漸近する。したがって広域地下水のように広範囲、かつ長時間に亘る地下水位変動を問題にする場合には比較的問題は少ないが、いわゆる揚水試験等では観測井が上層、あるいは下層どちらの水位を感知しているかによって帯水層定数の決定に相当大きい影響を与えることになる。

[参考文献] 1) 松尾, 河野: 地下水位低下工法, 鹿島出版会, 昭45-2, PP.192~203

2) 松尾, 河野: 差分式による地下水位変動の解析, 第13回土木工学シンポジウム論文集, 昭43-11, PP.55~60