

揚水による地下水汚染物質の除去について

八代高専 正員 藤野和徳

1. はじめに

トリクロロエチレンなどの有機塩素化合物や農薬による地下水汚染が各地で発生し問題となっている。現在、これらの地下水汚染の対策として、有機塩素化合物については真空抽出法や揚水後の生物処理法などが研究され、また、農薬についてはその流出特性が調査研究されている。

ここでは、まず、汚染物質の拡散現象が無視できるとして、基本的な除去対策の一つである揚水法による汚染物質の回収、また汚染領域の拡大を防ぐための揚水量の算定手法を提示している。これは汚染領域の拡大を防ぐために設定された許容領域から汚染物質が流出することなく、すなわち汚染物質制限線（図-1参照）を越えることなく、揚水量最小の状態での汚染物質を除去するものを最適状態としている。次に、解析モデルに本算定手法を適用し、揚水井戸の位置と最小揚水量の関係を明らかにしている。さらに、この最適状態で、拡散現象を考慮した場合の汚染物質濃度の算定手法を提示している。

2. 揚水による地下水汚染物質の除去

定常時の不圧地下水流はダルシーの式と連続の式より、次式で与えられる。

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = \sum_i \frac{2}{k} Q_i \delta(x_i) \delta(y_i) \quad (1)$$

ここに、 $H = h^2$ (m^2)、 h : 地下水位 (m)、 k : 透水係数 (m/H)、 Q : 揚水量 (m^3/H)、 δ : デルタ関数 ($1/m$) である。解析領域を離散化し、差分法や有限要素法等を用いて節点の H と揚水量 Q の関係を求めると、式(1)は次式となる (A 、 B は係数行列である)。

$$Q = AH + B \quad (2)$$

汚染地下水を汚染物質制限線から流出させないためには汚染領域内へ向かう流れがあればよく、これは制限線の外側の地下水位を内側の地下水位より高くすることで達成される。図-1の例では、次の16組の地下水位を制御すればよいこととなる。

$$\begin{aligned} h_{16} &\geq h_1, h_{17} \geq h_2, h_{18} \geq h_3, h_{19} \geq h_4, h_{20} \geq h_5, h_{21} \geq h_6 \\ h_{22} &\geq h_{12}, h_{23} \geq h_{15}, h_{24} \geq h_{16}, h_{25} \geq h_{14}, h_{26} \geq h_{13}, h_{27} \geq h_{11} \\ h_{28} &\geq h_{10}, h_{29} \geq h_7, h_{30} \geq h_4, h_{31} \geq h_1 \end{aligned} \quad (3)$$

制約条件として、揚水井戸節点およびそれ以外の制約節点では次の制件が課せられる。

$$\bullet \text{ 揚水井戸点} \quad Q_i \geq 0 \quad (i = 1 \sim 15)$$

$$\bullet \text{ 揚水井戸点以外の制約節点} \quad Q_i = 0 \quad (i = 16 \sim 35) \quad (4)$$

なお、式(3)の条件を満たすために、次式の制約を与えた（添え字 l 、 m は式(3)の添え字と対応）。

$$H_l - H_m \geq H' \quad (5)$$

これらの制約条件式(4)、(5)のもとで、総揚水量 Q_{Σ} を最小とすることで目的が達成される。

$$Q_{\Sigma} = \sum_{i=1}^M Q_i \rightarrow \text{最小} \quad (M=15) \quad (6)$$

なお、式(5)の H' は地下水位の2乗の差を表わすもので、直接地下水位の差を表すものでないため、まず、初期値として適当な

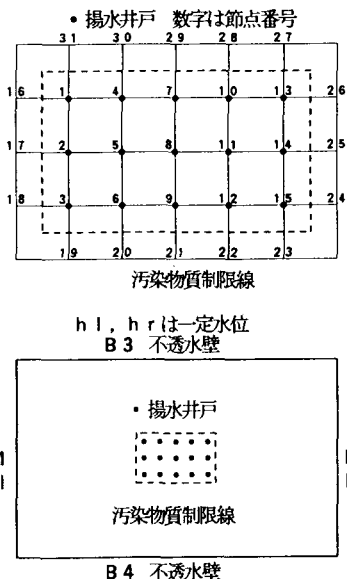


図-1 解析領域

表-1 経済揚水量 (case1~case5) 単位は $m^3/日$

境界条件 制約条件 井戸番号	$h_1=10m$ $h_r=8m$										$h_1=10m$ $h_r=10m$				
	$h' \geq 0cm$					$h' \geq 5cm$					$h' \geq 5cm$				
Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	
1	0.0	0.0		0.0	2.39	0.0			3.78	2.83	0.0			6.92	
2	0.0	57.26			0.0	105.89				0.0	121.95				
3	0.0	0.0		0.0	2.39	0.0			3.78	2.83	0.0			6.91	
4	0.0				1.44					1.86					
5	0.0				0.0					0.0					
6	0.0				1.44					1.86					
7	0.0				0.59					1.81					
8	0.0	37.17			0.0	53.55				0.0	37.61				
9	0.0	0.0			0.59	0.0				1.81	0.0				
10	0.0				0.0					1.86					
11	0.0				0.0					0.0					
12	0.0				0.0					1.86					
13	6.61		6.61		8.62		0.0			2.83			0.0		
14	4.97		4.97	29.71	6.42		111.43	39.84		0.0			121.95	26.81	
15	6.61		6.61		8.62		0.0			2.83			0.0		
総揚水量	18.20	57.26	37.17	18.20	29.71	32.50	105.89	53.55	111.43	47.40	22.40	121.95	37.61	40.64	

H' を与えて解析を行い、得られた地下水位が所定の水位差 h' になっているかを判定し、水位差 h' が得られるまでニュートンラプソン法による収束計算を行った。

3. 解析例と結果の考察

算定手法の有用性と揚水量と揚水井戸位置との関係を検討するため、図-1の解析モデルに、本手法を適用した。解析領域は $600m \times 360m$ で、透水係数 k は $2.592m/日(0.003cm/sec)$ とし、B1, B2は地下水位一定の境界条件を、B3, B4は不透水壁の境界条件を与えた。Case1は図-1に示すように揚水井戸数15とし、Case2からCase5は揚水井戸数3で、井戸の位置は図-1の揚水井戸番号で表すと、それぞれ、(1,2,3), (7,8,9), (13,14,15), (1,3,14)である。また、B1, B2の境界水位は $h_1=10m$, $h_r=8m$ と $h_1=10m$, $h_r=10m$ の2組を用いた。表-1に各Caseの揚水量を示している。

地下水位差 h' の設定如何で揚水量最小を得るための井戸配置が異なってくる。 h' をゼロ以上としたとき、井戸は下流側へ配置する場合が有利となっている。また、ある程度の水位差 h' をつける必要がある場合、多くの井戸を設置することが可能であれば汚染領域の周囲に、井戸数が限られ1本の井戸であれば汚染領域の中央近くに設置する場合、揚水量は少なくてすむ結果が得られた。

4. 拡散による汚染物質の濃度変化

一般には拡散現象が生じる。前節では地下水流の解析に準一様流を仮定しており、ここでは濃度についても同様とし、移流項の離散化誤差をなくすため粒子移動法¹⁾を用いて解析を行った。

$$n \frac{\partial(hc)}{\partial t} + u \frac{\partial(hc)}{\partial x} + v \frac{\partial(hc)}{\partial y} = D_{xx} \frac{\partial^2(hc)}{\partial x^2} + 2D_{xy} \frac{\partial^2(hc)}{\partial x \partial y} + D_{yy} \frac{\partial^2(hc)}{\partial y^2} + \sum \frac{Q_i c}{\Delta x \Delta y} \quad (7)$$

図-2に $h_1=10m$, $h_r=8m$, $h' \geq 5cm$ とし、節点2, 5(図-1)の濃度を $300mg/l$ としたときの、case4について解析結果を示す。

5. むすび

地下水汚染の対策として、線形計画法を用いた揚水量の算定手法を提示し、さらに、拡散を考慮した濃度分布の算定手法について提示した。本手法により拡散が無い場合については揚水量と揚水井戸位置の関係が明らかになったと考える。今後は拡散を含めて、早急な汚染物質の回収手法について検討したい。

1) 神野・上田(1978): 粒子移動法による移流分散方程式の数値解法の検討, 土木学会論文集, 271, 45-53.

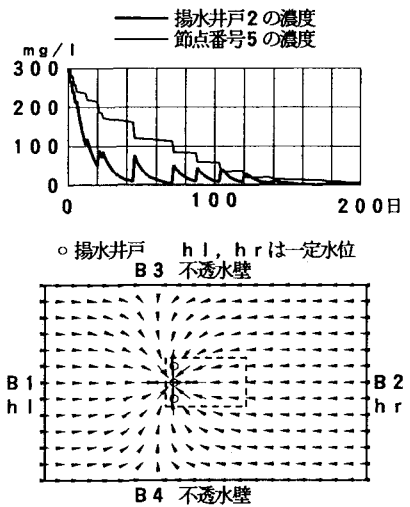


図-2 地下水流況と汚染物質の濃度