

揚水浄化工法の井戸配置計画における効果予測指標に関する一考察

大成基礎設計(株) 正○進士喜英

" 志賀 剛

(株) 鴻池組 正 笹本 譲

近畿基礎工事(株) 正 性田 学

はじめに：地下水低下工法に対する井戸配置計画では、設計計算時の効果予測指標は対象領域内の水位あるいは水頭の低下量で表現することができる。これに対して、汚染地下水の回収を目的とした揚水浄化工法の井戸配置計画における効果予測指標の設定が容易ではない。つまり、揚水浄化工法の効果確認では地下水の汚染物濃度の低減が最終的な目的になることは言うまでもないが、汚染地下水の移流分散および土塊との吸脱着現象まで考慮した予測手法を用いるとすれば、現在の技術では高度な数値解析法に頼らざるを得ない。そこで、移流分散および吸脱着現象は地下水移動特性の推定後評価すると考え、井戸配置計画では回収する流量および回収範囲を効果予測指標として扱うと単純化すれば、井戸配置計画は簡易な理論式の適用で実施できる。本報文では、回収時間と回収範囲の推定式の誘導と、ここで得られた推定式を用いた井戸配置計画のケーススタディを紹介する。

回収範囲推定式の誘導

(1) 被圧帯水層の場合：一定層厚 D [L] の被圧帯水層において定常揚水状態にある完全貫入井戸が揚水流量 Q [L³/T] で移動しているとする。この時、井戸から離れ r [L] における間隙内平均流速 v [L/T] は微小時間 dt 間に微小距離 dr の移動を表すと定義され、次式で示すことができる¹⁾。流速ベクトルは距離 r の増加方向に正方向とする。

$$v = \frac{dr}{dt} = -\frac{Q}{2\pi m_e D} \cdot \frac{1}{r} \quad [\text{L/T}] \quad (1) \quad \text{ここで、} n_e : \text{有効間隙率} [-]$$

さらに、 r および t について変数分離を施し、この流速による移流によって地下水中の汚染物質は時間 t_1 から時間 t_2 の間に、距離 r_1 から r_2 まで移動する時、以下の積分関係が成立し、その解が誘導できる。

$$\int_{r_1}^{r_2} r dr = -\int_{t_1}^{t_2} \frac{Q}{2\pi n_e D} dt \quad (2) \quad r_2^2 - r_1^2 = \frac{-Q}{\pi m_e D} (t_2 - t_1) \quad (3)$$

揚水回収の問題では、 $t_1=0$ で $r_1=r$ に存在した汚染物質は、 $t_2=t$ 時間後 $r_2=r_w$ (揚水井戸) に到達するとした時、(3) 式は以下となる。

$$r^2 - r_w^2 = \frac{Qt}{\pi m_e D} \quad (4) \quad \text{ここで、揚水流量 } Q > 0 \text{ とする。}$$

また、注水では、 $t_1=0$ で $r_1=r_w$ (付近) に存在した汚染物質あるいは注入物質は、 $t_2=t$ 時間後に $r_2=r$ に到達するとし、注水流量 Q を正值で(3)式に代入した場合も、(4)式を得る。よって、(4)式は井戸に負荷させる流量に対して回収や注水押し出しによる移動距離と時間の関係を表すとみなすことができる。

(2) 不圧帯水層の場合：不圧帯水層では地下水の流動する飽和高さが水位によって異なることから、(1)式に相当する流速は以下となる。

$$v = \frac{dr}{dt} = -\frac{Q}{2\pi m_e h} \cdot \frac{1}{r} \quad (5) \quad \text{ここで、} h : \text{帯水層下端高さからの自由水面高さ [L]}$$

h は不圧井戸公式から求めることができ、これを(5)式に代入し、(2)式と同様な積分式を誘導することができるが、水位高さ h が流量や距離の関数であるため、その解を得ることは被圧問題と比較すると困難である。そこで井戸を中心にした半径距離 r の異なるいくつかの同心円によるゾーン区分を行い、各ゾーンを通過する時間を足し合

キーワード：地下水汚染回収、回収範囲、回収時間、井戸理論

〒113-0022 東京都文京区千駄木 3-43-3 千駄木ビル tel : 03-5832-7182/fax : 7414

わせることで数値的に移動時間と距離の関係を知らんとする。

$$t_{TOTAL} = \sum \Delta t_i = \sum \frac{\Delta r_i}{v_{i-average}} \quad (6)$$

$$\text{ここで、} v_{i-average} = (v_{@r=r_{i-1}} + v_{@r=r_i})/2 \quad (7) \quad \Delta r_i = r_{@r=r_{i-1}} - r_{@r=r_i} \quad (8)$$

一般に、地下水汚染が発見される帯水層は不圧帯水層が多いと考えられ、揚水による自由水面高さの違いを考慮する必要性は認められるが、水位低下工法とは異なり地下水を回収する観点からみれば、揚水と注水を併用させるなどして、できる限り水位高さを維持し飽和浸透高さを大きくした方が回収には効率的という考え方もある。この場合には、平均的な水位高さを導入し、被圧帯水層問題としてモデル化することも可能である。

検討例： 地下水汚染地盤モデルを次のように想定する。

対象領域面積は、900m² (30m×30m) であり、自然飽和水位高さ H=5m を有する不圧帯水層である。透水係数 $k=10^{-3}\text{cm/s}=6.0 \times 10^{-4}\text{m/min}$ 、有効間隙率 $ne=0.1$ 、井戸半径 $r_w=0.2\text{m}$ 、井戸内水位 $h_w=3\text{m}$ 、影響圏半径 $R=30\text{m}$ とし、領域中央部およびその周辺に4基、計5基の井戸で揚水する場合を考える。井戸干渉を考慮した群井戸計算²⁾によれば、各井戸の揚水流量 Q_w は、中央井戸 0.0032m³/min、各周辺井戸 0.0047m³/min となり、総流量は 0.022m³/min となった。図1において矢印で示した移動がこの井戸配置で最大長の移流経路($r=11.2\text{m}$)を示す。ここで、式(4)に $Q=0.0047\text{m}^3/\text{min}$ 、 $r=11.2\text{m}$ を代入し、簡単のために平均水位高さ $D=4\text{m}=(5+3)/2$ を代入し、この間の移流に要する時間を求めると $t=23$ 日となった。図1において各井戸を中心に描いた円形範囲は 23 日間で回収の見込まれる範囲を表したものである。このように、対象領域を網羅するように各井戸の回収範囲が認められることが計算

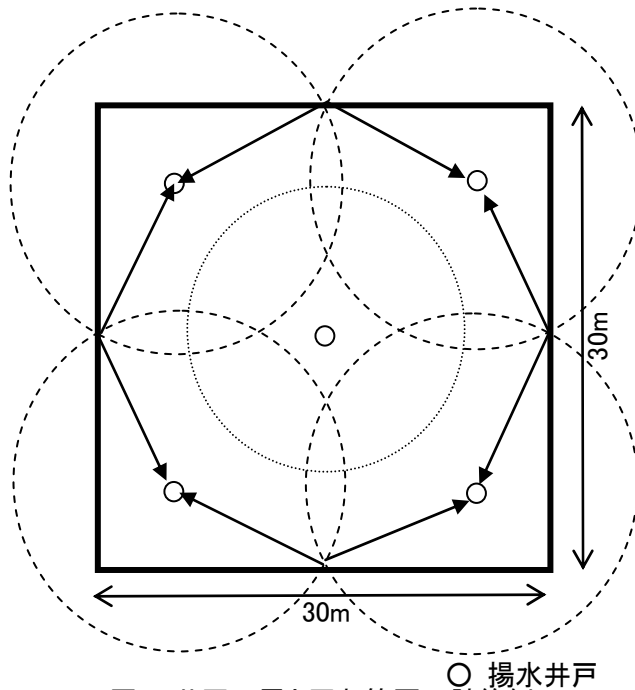


図1 井戸配置と回収範囲の計算例

の目的となる。これに対して概略の計算では、面積 900m²、汚染水深高さ 5m、有効間隙率 0.1 に含まれる地下水は 450m³ であり、総流量 0.022m³/min で揚水すれば、14 日間の揚水量となる。この差異は、井戸による回収は領域外にも及ぶことおよび領域内でも回収範囲が重なり合うことが、いずれも時間を大きく評価することに起因する。この基本計算をツールにして、以降の設計計算では、水処理プラント容量の許容、回収時間の制約などを考慮しつつ井戸本数・配置の再検討により、最適配置・運転管理を行うことになる。

まとめ： これまで、汚染地下水回収のための井戸位置検討においては、適切な評価指標が見当たらなかったが、ここで提案した各井戸揚水流量に対応した回収範囲と回収(移流)時間の関係を用いることで、対象帯水層の保有する地下水量の回収効率を予測することが可能となり、これを用いて井戸配置および井戸運転管理の最適化が検討できる。より詳細には、領域内での地下水流速分布を評価し任意地点から井戸までの移流計算で評価することや³⁾、直接汚染地下水の数値解析の適用が考えられる。また、ここで提案した手法は移流計算による回収範囲の推定であって、汚染地下水の汚染物濃度の低減メカニズムに踏む込んだ検討を実施していない。このため、貯留汚染水量相当の地下水を汲み上げで、汚染物質の回収が完了すると考えるのではなく、分散や拡散現象さらには土粒子から脱着の影響により、浄化に至るまでには複数回の地下水の入れ替えが必要であると考えられる。

参考文献:1)Fetter,C.W., Contaminant Hydrology, the 2nd edit.,Prentice-Hall,p.57, 1999. 2)進士ら、井戸干渉を考慮した井戸揚水流量の決定手法,第31回地盤工学研究発表会,pp.2153-2154,1996. 3)Shinshi,Y. et al., Case studies on designs of multi-well system with matrix scheme, Groundwater Engineering, Recent Advances, edited by Kono et al., A.A.Balke,a Publishers, pp.605-609,2003.