

被圧帯水層中の熱密度流に関する基礎的検討

名古屋大学工学部 正員○原田守博, 学生員 杉山陽一, 正員 高木不折

1. はじめに

地下水障害を起こすことなく地下水の熱的利用を図る技術として、井戸注入による帯水層への熱エネルギー貯留 (Aquifer Thermal Energy Storage) が注目されている。ATESの実施にあたっては、地下水の流速・流向を把握するだけでなく、帯水層中における熱拡散過程を定量的に評価することが必要となる。本研究は、濃尾平野において行われた人工涵養実験の現地データに基づき、帯水層内での注入熱水塊の挙動を熱密度流として解析し、帯水層の熱伝導率や熱分散係数といった熱拡散パラメータの推定を通じて、井戸注入による帯水層の蓄熱効率を高めるための基礎的指針を得ることを目的としている。

2. 井戸注入による熱水塊の挙動

図-1のような被圧帯水層中に、地下水温とは異なる温度の水を井戸から注入するとき、帯水層における熱輸送は次の4つの伝熱形式によって行われる。

I. 強制対流 (移流, Forced convection): 一定流量 Q で t 時間注入を行ったとき、流体と帯水層の土粒子の温度が瞬時に平衡に達し、他の伝熱形式が存在しないならば、注入熱水塊の半径は次式となる。

$$r(t) = \left[\frac{(\rho c)_w Q t}{(\rho c)_a \pi b} \right]^{1/2} \quad (1)$$

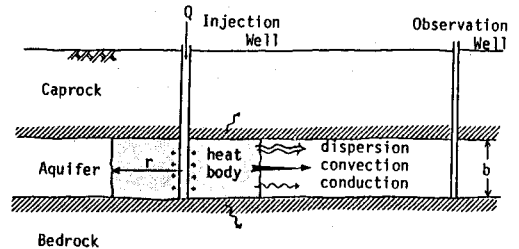


図-1 対象現象の模式図

ここに、 b : 帯水層厚、 ρ : 密度、 c : 比熱、 ρc : 熱容量、添字 w, a はそれぞれ水、帯水層全体を指す。

II. 熱伝導 (Thermal conduction): 実際には、注入水塊と地下水の境であるフロントや帯水層の上下の境界面において熱伝導による熱損失が生ずる。熱伝導による熱フラックスはフーリエの法則によって表される。

III. 熱分散 (Thermal dispersion): 多孔体中の空隙経路の複雑さ、不均一性によって生ずる機構的分散。一般にフーリエ則と同じ形式で表現され、熱分散係数は浸透流速に比例して増大することが知られている¹⁾。

IV. 自然対流 (Natural convection): 鉛直方向に強い温度勾配が存在するとき、密度差に起因した対流が生ずる。本研究では、地下水と注入水との温度差が小さく帯水層厚が薄いことから、この効果は考慮しない。

I, II, IIIによる熱輸送は、帯水層中の溶質輸送機構と類似のものであり、熱輸送の支配方程式は溶質輸送のそれとのアナロジーから定めることができる。井戸からの放射流による被圧帯水層内の溶質輸送方程式は、

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{A}{r} \frac{\partial C}{\partial r} = \alpha \frac{A}{r} \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{D_m}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial C}{\partial r} \right], \quad A = \frac{Q}{2 \pi b n} \quad (2)$$

ここに、 C : 溶質濃度、 r : 井戸からの半径、 n : 間隙率、 α : 溶質の縦方向分散長さ、 D_m : 分子拡散係数。Hoopes & Harleman(1967) は、井戸からある程度離れた地点での溶質の拡散が、その地点までに生じた拡散の総和に比べて小さいと仮定して上式を変形し、解析解を求めている²⁾。溶質輸送と熱輸送とのパラメータの間には次の対応関係があり、Hoopes らの近似解は熱輸送に対して(4)式となる。

$$n \rightarrow (\rho c)_a / (\rho c)_w, \quad \alpha \rightarrow \beta, \quad D_m \rightarrow \lambda o / (\rho c)_w \quad (3)$$

$$\frac{T}{T_o} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{1/2 (1 - \tau)}{(4 \eta / 3 + \xi)^{1/2}} \right], \quad \tau = \frac{(\rho c)_w Q t}{(\rho c)_a \pi r^2 b}, \quad \eta = \frac{\beta}{r}, \quad \xi = \frac{2 \lambda o (\rho c)_a \pi b}{(\rho c)_w^2 Q} \quad (4)$$

ここに、 β : 熱の縦方向分散長さ、 λ_0 : 熱伝導率、 T : 地下水温、 T_0 : 注入水温、 $\text{erfc}(x)$: 補誤差関数、 τ 、 η 、 ξ は無次元パラメータである。 τ は(1)式からもわかる通り、移流によって注入水塊が広がるのに要する無次元時間であり、 Q で注入された水塊は $\tau = 1$ のとき井戸から r の地点に到達する。 η 、 ξ はそれぞれ熱分散、熱伝導の効果を表しており、 η は距離 r 、 ξ は注入強度 Q の関数となっている。以下では、現地における種々の Q 、 r に対する実験データをもとに、(4)式に含まれる未知パラメータ β 、 $\lambda_0/(\rho c)_w$ を推定し、I、II、IIIの伝熱形式が熱輸送に果たす役割について考察する。

3. 実帯水層の熱拡散パラメータの推定

ここで用いた実験データは、愛知県十四山村において行われた被圧帯水層への人工涵養実験に伴う水温データである。帯水層は 地下130m付近に位置する層厚 $b = 25\text{m}$ の砂礫層である。観測井は注入井から $r = 11, 20, 40, 80\text{m}$ の距離に計4本設置されている。注入水量は $Q = 550$ および $1250 [\text{m}^3/\text{day}]$ の2つのケースがある。

実験データと近似解(4)式との比較を図-2、3に示す。図-2は $r = 20\text{m}$ の観測井における $Q = 550$ (○)、 1250 (●) $[\text{m}^3/\text{day}]$ に対するものである。縦軸の T^* は水温を最大変化幅 ($T_i - T_0$ 、注入水温 $T_0 = 7.5^\circ\text{C}$ 、注入前の地下水温 $T_i = 18.5^\circ\text{C}$) で無次元化したものである。所定の位置 r に注入熱水塊のフロントの中心 ($T^* = 0.5$) が到達するのは $\tau = 1$ の時刻であることから、(1)式の $(\rho c)_s/(\rho c)_w = 0.45$ と求められる。

図-2において Q の差異は、(4)式より熱伝導項 ξ の変化として現れるはずである。図中の二本の曲線は $(\beta [\text{m}], \lambda_0/(\rho c)_w [\text{m}^2/\text{sec}]) = (0.7, 0.2)$ とした場合の近似解 ($\cdots$: $Q = 550$, $-$: $Q = 1250$) を示している。しかしながら、プロット○と●の間にはその差異が殆どみられない。このことは、 ξ 項が現象にあまり効いておらず、熱伝導率 λ_0 が設定値と同程度かそれよりも小さいことを意味している。

図-3は $Q = 1250$ の時の $r = 11, 20\text{m}$ におけるデータと近似解である。(4)式より、 r の差異は熱分散項 η の変化として現れるはずであり、図中の曲線は $(\beta, \lambda_0/(\rho c)_w) = (0.7, 0.2)$ の場合の近似解 ($\cdots$: $r = 11\text{m}$, $-$: $r = 20\text{m}$) を示している。データはばらついてはいるものの、 $r = 11\text{m}$ (○)の方が $r = 20\text{m}$ (●)よりも緩やかな分布となっており、近似解はその変化傾向をほぼ捉えている。

4. おわりに

地下水流れの拡散パラメータは、熱輸送に限らず溶質輸送においても、従来より、対象とする流れの空間スケールによってオーダーが異なる未知量とされてきた。今回の検討により、実際の帯水層の熱拡散パラメータとして、 $\beta \approx 0.7\text{m}$ 、 $\lambda_0/(\rho c)_w \approx 0.2 [\text{m}^2/\text{sec}]$ 未満という一応の数値が得られたことは、そうした点で意味をもっている。今後は、これらのパラメータ値をもとに、種々の注入条件(注入水量、水温など)に対する帯水層の蓄熱効率について定量的評価を行う予定である。

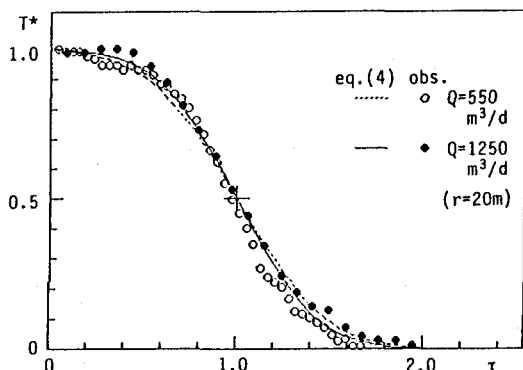


図-2 熱伝導項 ξ の効果

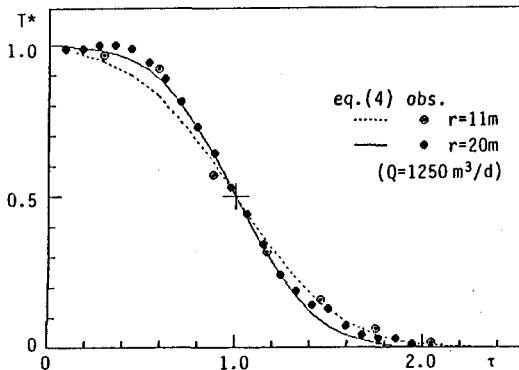


図-3 熱分散項 η の効果

- 参考文献 1) de Marsily, G.: "Quantitative Hydrogeology". Academic Press, 1986.
2) Hoopes, J.A. and Harleman, D.R.F.: J. Geophys. Res., 72(14), 3595-3607, 1967.