

淡水と塩水を含む浸透層からの取水についての考察

京都大学工学部 正員 工博 岩佐義朗

京都大学大学院 学生員 工修 ○武内 孝

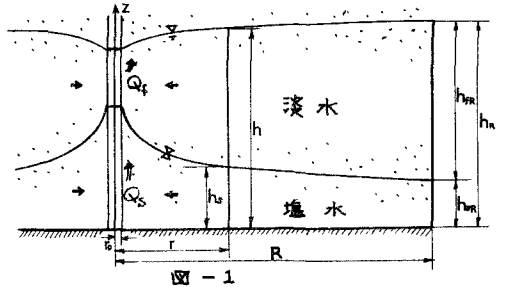
大阪府 正員 小沢宣雄

1 まえがき 淡水と塩水が成層をなしている浸透層の上層から淡水を取水する場合、F層の塩水位が上昇し取水井内に塩水が混入することは、淡水利用上障害となる。この対策の一つとして、淡水の取水と同時に、別の取水管を用いて塩水をも取水し塩水位の上昇を防ぐことが考えられる¹⁾。これを浸塩水同時取水、あるいは同時取水と呼ぶことにする。

本報告では 浸透層内の流れの解析の一つとして、この同時取水について考察した。

2 同時取水に関する理論的考察

2-1) 基礎方程式 無限の広がりを持つ不透水層上の不圧浸透層に淡水と塩水が成層をなし、浸透層は等方等質とする。解析には円筒座標を用い、記号は図-1の通りで 添字 f , s および R は、それぞれ淡水、塩水および影響圏に関する水理量であることを示す。また、淡水と塩水の境界での混合は無視され、流れは定常的であり、井戸理論に適用されている Dupuit の仮定が近似的に満足されるとする。これらの仮定の下に、Darcy の法則を適用すると、運動方程式は次式で表わされる。



$$U_f = -\frac{k}{\mu} \frac{dP_f}{dr}, \quad U_s = -\frac{k}{\mu_s} \frac{dP_s}{dr} \quad (1)$$

ここに、 U : r 方向の流れ, k : 透水係数, μ : 粘性係数, また P は圧力で

$$P_f = \rho_f g(h - z), \quad P_s = \rho_f g(h - h_s) + \rho_s g(h_s - z) \quad (2)$$

である。(1)式および(2)式から次式をうる。

$$U_f = -K_f \frac{dh}{dr}, \quad U_s = -K_s \left(\epsilon \frac{dh_s}{dr} + \frac{dh}{dr} \right) \quad (3)$$

ここに、 $\epsilon = (\rho_s - \rho_f) / \rho_f$, $K = k \rho_f g / \mu$ である。また連続の式は次式で与えられる。

$$Q_f = 2\pi r (h - h_s) (-U_f), \quad Q_s = 2\pi r h_s (-U_s) \quad (4)$$

(3)式および(4)式から U_f および U_s を消去すると次式をうる。

$$\frac{dh}{dr} = \frac{Q_f}{2\pi r K_f (h - h_s)}, \quad \frac{dh_s}{dr} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{Q_s}{2\pi r K_s h_s} - \frac{dh}{dr} \right) \quad (5)$$

ここで、つぎに示す無次元量を導入する。

$$\xi = \frac{r}{R}, \quad \eta = \frac{h}{h_n}, \quad \beta = \frac{Q_f}{2\pi K_f h_n^2}, \quad \delta = \frac{Q_s / K_s}{Q_f / K_f} \quad (6)$$

したがって、(5)式は次式で表わされる。

$$\frac{d\eta}{d\xi} = \frac{\delta}{\xi(\eta - \eta_s)} \quad , \quad \frac{d\eta_s}{d\xi} = \frac{1}{\xi} \left(\frac{\delta\delta}{\xi\eta_s} - \frac{d\eta}{d\xi} \right) \quad (7)$$

(7)式のオ1およびオ2式から η_s および $d\eta/d\xi$ を消去すると、 η の微分方程式がえられる。

$$\frac{d^2\eta}{d\xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{d\eta}{d\xi} + \left(1 + \frac{1}{\xi}\right) \frac{\delta}{\eta} \left(\frac{d\eta}{d\xi}\right)^2 - \frac{\delta\delta}{\xi(\eta\eta_s)} \left(\frac{d\eta}{d\xi}\right)^3 = 0 \quad (8-a)$$

また、(7)式のオ1およびオ2式をそれぞれ δ および $\delta\delta$ について解き、辺々加え、 $\xi=1$ のとき、 $\eta=1$ および $\eta_s=\eta_{sr}$ を用いて積分すると、 η_s に関する次式をうる。

$$\eta_s = \sqrt{\{2\delta(1+\delta)/\xi\} \ln \xi + (1-\eta_s^2)/\xi + \eta_{sr}^2} \quad (8-b)$$

(8-a)式を解くことは容易ではないが、数値積分により、 $\eta=\eta(\xi, \delta, \eta_{sr})$ がえられる。

2-2) 塩水位を一定にする場合 (7)式に影響圈での値 $\eta=1$ と $\eta_s=\eta_{sr}(=const.)$ を適用すると、次式がえられる。

$$\delta = \eta_{sr}/(1-\eta_{sr}), \quad \eta = (\delta\delta/\eta_{sr}) \ln \xi + 1 \quad (9)$$

2-3) 淡水のみを取水する場合 (8-a)式に $\delta=0$ を用い $\xi=1$ のとき、 $\eta=1$ および $d\eta/d\xi = \delta/(1-\eta_{sr})$ の条件の下に積分すると次式をえる。また η_s は(8-b)式からえられる。

$$\eta = \sqrt{\frac{2\delta}{1+\xi}} \sqrt{\ln \xi + \frac{(1-\eta_{sr})^2}{2\delta(1+\xi)}} + \frac{1}{1+\xi} + \frac{\xi\eta_{sr}}{1+\xi} \quad (10)$$

2-4) 塩水取水限界 同時取水で、 δ を小さくすると塩水位が上昇し、自由水面に達することがあり、これを塩水最小取水限界、また、大きくすると、塩水位が不透水層に達する、これを最大取水限界とよぶ。図-2は(8-a)式を数値積分して求めた結果である。

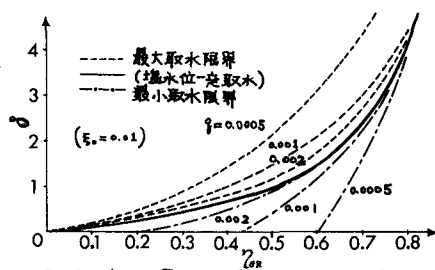


図-2 塩水の最大および最小取水限界曲線

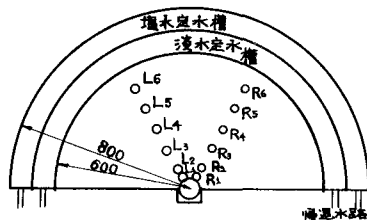
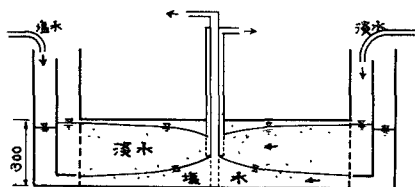


図-3 実験装置

3 実験的考察 実験装置は図-3の通りで、半円筒形のアクリル樹脂製である。浸透層は平均粒径1.05 mmのガラス球からなり透水係数は $0.68 \text{ cm}^2/\text{sec}$ である。自由水面の測定は観測井($R_1 \sim R_6$)で行ない、浸塩水の境界は浸透層内の電極($L_1 \sim L_6$)に700%の電流を流し、電極間の電圧度の相違から求めた。図-4は、実験結果の一部であり、U-1 ($\delta=0.00769$, $\delta=0.241$, $\eta_{sr}=0.194$), U-2 ($\delta=0.00653$, $\delta=0.201$, $\eta_{sr}=0.167$)およびU-3 ($\delta=0.00829$, $\delta=0.218$, $\eta_{sr}=0.178$)である。

4 あとがき これと同様な展開は、嶋玉井らの塩水楔の研究に見られる。本報告の詳細は講演時に述べる予定である。参考文献 1) Samuel Mandel: Underground water, International Science and Technology, June 1967 2) 嶋玉井: Salt water wedge in confined coast aquifers, 土木学会論文集139号, march, 1967

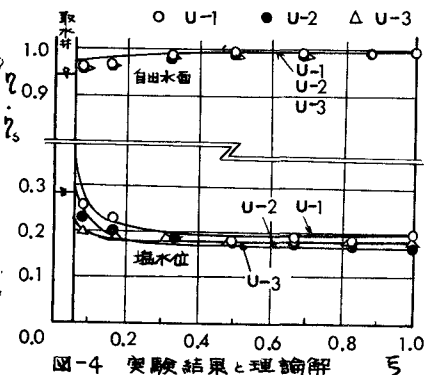


図-4 実験結果と理論解