

京都大学工学部 正 員 岩佐義朗

京都大学大学院 学生員 ○武内 孝

1 まえがき

海岸付近の浸透層などにみられるように、浸透層内で淡水と塩水とが成層状態にあるとすると、その上層から淡水を取水するときには、下層の塩水位が上昇し、その結果、塩水が取水井内に混入して淡水取水の障害となる。この対策として、才一報⁰では淡水の取水と同時に、塩水位を下げるために、別の取水管を用いて塩水をも取水する方法、すなわち、淡・塩水同時取水について考察をすすめた。

本報告では、才一報で求めた不圧浸透層からの同時取水に関する考察に続いて、被圧浸透層からの同時取水について理論的考察を行ない、また、不圧浸透層からの同時取水について行なった実験結果を述べる。

2 被圧浸透層からの同時取水についての理論的考察

2-1) 基礎方程式 無限の広がりを持つ不透水層ではさまれた被圧浸透層で淡水と塩水が成層

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に示す通りであり、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。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 の仮定を満足する。

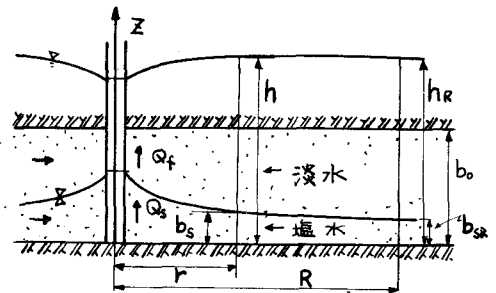


図-1

これらの仮定の下に、同時取水における淡水位および塩水位を表わす式を近似解として求める。淡水および塩水をそれぞれ独立に Q_f および Q_s 取水するとき、運動方程式は Darcy の法則から、

$$U_f = -(k/\mu_f) dp_f/dr, \quad U_s = -(k/\mu_s) dp_s/dr \quad (11)$$

ここに、 U : r 軸方向の流速、 k : 透水係数、 μ : 粘性係数、また p は圧力で、 b_s を塩水層厚とし、

$$p_f = \rho_f g (h - z), \quad p_s = \rho_f g (h - b_s) + \rho_s g (b_s - z) \quad (12)$$

である。(11) および (12) 式から、次式をうる。

$$U_f = -K_f \frac{dh}{dr}, \quad U_s = -K_s \left((1-\epsilon) \frac{dh}{dr} + \epsilon \frac{db_s}{dr} \right) \quad (13)$$

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

$$Q_f = 2\pi r (b_0 - b_s) (-U_f), \quad Q_s = 2\pi r b_s (-U_s) \quad (14)$$

(13) および (14) 式から、 U_f および U_s を消去すると次式をうる。

$$\frac{dh}{dr} = \frac{Q_f}{2\pi K_f r (b_0 - b_s)}, \quad \frac{db_s}{dr} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{Q_s}{2\pi K_s b_s} - (1-\epsilon) \frac{dh}{dr} \right) \quad (15)$$

ここで、つぎに示す無次元量を導入する。

$$\xi = \frac{r}{R}, \quad \eta = \frac{h}{h_R}, \quad \beta = \frac{b}{h_R}, \quad q = \frac{Q_f}{2\pi K_f h_R^2}, \quad \delta = \frac{Q_s/K_s}{Q_f/K_f} \quad (16)$$

したがって、(15)式は、次式のように表わされる。

$$\frac{d\eta}{d\xi} = \frac{q}{\xi(\beta_0 - \beta_s)}, \quad \frac{d\beta_s}{d\xi} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\delta q}{\xi \beta_s} - (1-\epsilon) \frac{d\eta}{d\xi} \right) \quad (17)$$

(17)の第1および第2式から、 β_s および $d\beta_s/d\xi$ を消去すると、つぎの微分方程式がえられる。

$$\frac{d^2\eta}{d\xi^2} + \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon} \frac{\xi}{q} \left(\frac{d\eta}{d\xi} \right)^3 - \frac{\delta \xi}{\epsilon (\beta_0 \xi \frac{d\eta}{d\xi} - q)} \left(\frac{d\eta}{d\xi} \right)^3 + \frac{1}{\xi} \frac{d\eta}{d\xi} = 0 \quad (18-1)$$

また、(17)の第1および第2式を、それぞれ q および δq について整理し、辺々、加えると、

$$q + \frac{1}{1-\epsilon} \delta q = \xi \beta_0 \frac{d\eta}{d\xi} + \frac{\epsilon}{1-\epsilon} \xi \beta_s \frac{d\beta_s}{d\xi} \quad (18-2)'$$

がえられ、これを $\xi=1$ で $\eta=1$ および $\beta_s = \beta_{sR}$ を用いて積分すると次式をうる。

$$\beta_s = \sqrt{\frac{2(1-\epsilon)q + 2\delta q}{\epsilon} \ln \xi} + \frac{2(1-\epsilon)\beta_0(1-\eta)}{\epsilon} + \beta_{sR}^* \quad (18-2)$$

(18-1)式の解析解を得ることは容易ではないが、数値積分により、 $\eta = \eta(\xi, q, \delta, \beta_{sR})$ がえられるから、(18-2)式と連立させれば、 η および β_s は任意の境界条件に対して計算される。

(18-1)式は特別な境界条件の下では解かれる。すなわち、塩水位を一定にする場合と淡水だけを取り水する場合についての解析解を求めることができる。

2-2) 塩水位を一定にする場合

$d\beta_s/d\xi \equiv 0$ であるから、(17)式にこの条件を適用すると、塩水位を一定にするための塩水取水比 δ および、そのときの η は次式で与えられる。

$$\delta = \frac{(1-\epsilon)\beta_{sR}}{\beta_0 - \beta_{sR}}, \quad \eta = \frac{\delta q}{(1-\epsilon)\beta_{sR}} \ln \xi + 1 \quad (19)$$

2-3) 淡水のみを取り水する場合

(18-1)式に $\delta=0$ を用いると、つぎの微分方程式がえられる。

$$\frac{d^2\eta}{d\xi^2} + \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon} \frac{\xi}{q} \left(\frac{d\eta}{d\xi} \right)^3 + \frac{1}{\xi} \frac{d\eta}{d\xi} = 0 \quad (20)$$

(20)式から $d\eta/d\xi$ を求めると次式で表わされる。

$$\frac{d\eta}{d\xi} = \frac{1}{2\xi} \sqrt{\frac{2\epsilon q}{(1-\epsilon) \ln(G\xi)}} \quad (21)$$

ここで、 $\xi=1$ で $\eta=1$ および $(d\eta/d\xi)_{\xi=1} = q/(\beta_0 - \beta_{sR})$ を用いて積分すると次式がえられる。

$$\eta = \sqrt{\frac{2\epsilon q}{1-\epsilon} \ln \xi} + \frac{\epsilon^2}{(1-\epsilon)^2} (\beta_0 - \beta_{sR})^2 + 1 - \frac{\epsilon}{1-\epsilon} (\beta_0 - \beta_{sR}) \quad (22)$$

また、 β_s は(18-2)式に(22)式を用いると求められる。

水についての理論解を再掲する。記号は図-2の通りで、無次元量は(16)式に示している。

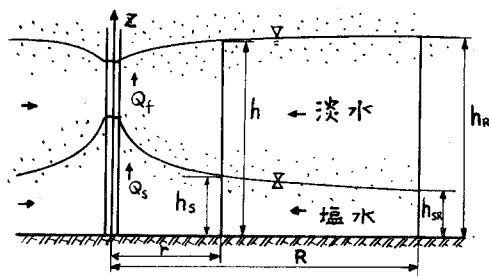


图 - 2

基礎式

γ および γ_s についての基礎式はつきに示す通りである。

$$\frac{d^2\eta}{d\zeta^2} + \frac{1}{\zeta} \frac{d\eta}{d\zeta} + \frac{\zeta}{\epsilon g} \left(\frac{d\eta}{d\zeta} \right)^3 - \frac{\delta \zeta}{\epsilon \left(\zeta \eta \frac{d\eta}{d\zeta} - g \right)} \left(\frac{d\eta}{d\zeta} \right)^3 = 0$$

$$\eta_s = \sqrt{\frac{2(1-\epsilon)\delta + 2\delta^2}{\epsilon} \ln \xi + \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon} (1-\eta^2) + \eta_{SR}^2} \quad (8)$$

塩水位を一定にする場合 ($\eta_s \equiv \eta_{SR}$)

$$\delta = \frac{(1-\epsilon) \eta_{SR}}{1-\eta_{SR}}$$

$$\eta = \frac{\delta f}{(1-f) \eta_{SR}} \ln 3 + 1 \quad (9)$$

淡水のみを取水する場合 ($\delta \equiv 0$)

$$\eta = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \ln \xi}{\epsilon^2 (1 - \eta_{SR})^2}} + 1 - \epsilon + \epsilon \eta_{SR} \quad (10)$$

同時取水で δ を小さくすると、塩水位が上昇し、淡水位に達することがあり、これを塩水最小取水限界、また δ を大きくすると、塩水が不透水層に達し、これを最大取水限界とよぶ。図-3は不圧浸透層からの同時取水について、(8)式の数値積分から、これらの取水限界と水理量との関係を求めたものであり、 δ が増大すると、 δ すなわち Q_0 の Q_0 に対する比が、取り得る範囲は小さくなることがわかる。

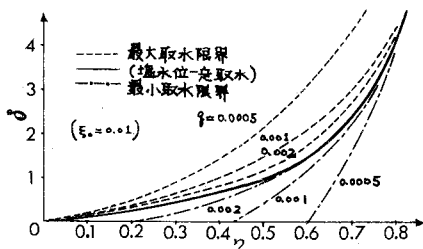


図-3 塩水の最大および最小取水限界曲線

4. 不圧浸透層からの同時取水についての実験的考察

4-1) 実験装置 実験装置は、透明アクリル樹脂製の半径600mm高さ300mmの半円筒形状をもち、図-4にその概略を示す。淡水および塩水は、任意に境界条件を変えることができる定水位水槽から供給され、浸透層水槽を流れて、取水井からそれぞれ独立に取水される。浸透層は網目間隔2mmと3mmのフルイの間に通過した砂からなり、 $K=1.4\text{ cm/s}$ である。淡水位の測定は、観測井(R1~R6)で行ない、淡・塩水の境界の測定は、特別に作られた観測(L1~L6)に高周波数

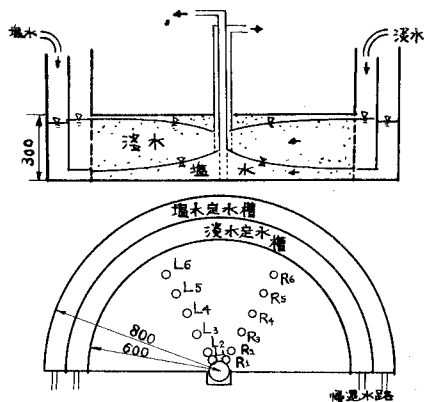


圖-4 實驗裝置

の電流を通じ、電極間の電導度の相違が行なわれる。また、境界は、着色した塩水の流れを、装置の前面の透明アクリル樹脂板が測定することによっても視覚的に求められる。今回の測定方法は後者によった。(なお、第1報で発表した資料は、平均粒径 1.05mm のガラス球を用い、境界面の測定は上記の電気的方法によった。)

4-2) 実験結果

実験の一例を写真-1に示した。ウオターブルーにより着色された塩水層が明瞭に観察されるが、淡水位は、毛管現象のために、写真では観察できない。

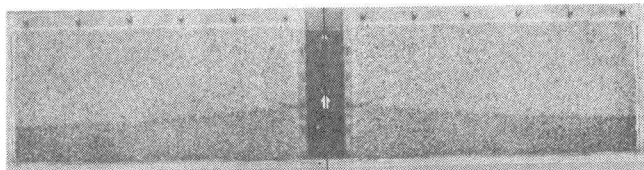


写真-1

図5-1, 5-2 および図5-3はそれぞれ、実験条件UA-5 ($q=0.00179$, $\delta=0.485$, $\eta_{SR}=0.310$), UA-1 ($q=0.00191$, $\delta=0.407$, $\eta_{SR}=0.308$) および UA-2 ($q=0.00197$, $\delta=0.100$, $\eta_{SR}=0.290$) のFにえられた淡水位および塩水位の理論値および実験値を示したもので、○は実験値を実線は理論曲線を示している。淡水位は、その変化が小さく、ほぼ実験値と理論値は一致する。また、塩水位もUA-1およびUA-5では実験値と理論値は良く一致するが、UA-2では、取水井近くで実験値が理論値より若干小さくなる。これは取水井近傍で淡水・塩水の境界の勾配が大きくなり、モデル作成の仮定が満足されなくなること、あるいは、取水井内の水位が、浸透層内の圧力水頭と異なることなどに原因が求められるが、今後実験によって検討するつもりである。また、図5-3に示した最大取水限界より大きい δ で塩水を取水すると、塩水層は不規則な形をして、不透水層の底面近くを流れることが観察される。

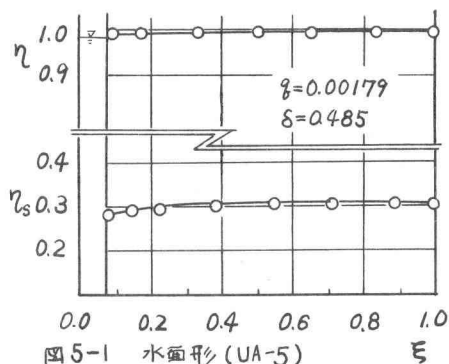


図5-1 水面形 (UA-5)

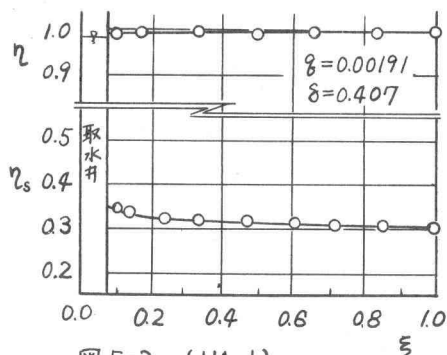


図5-2 (UA-1)

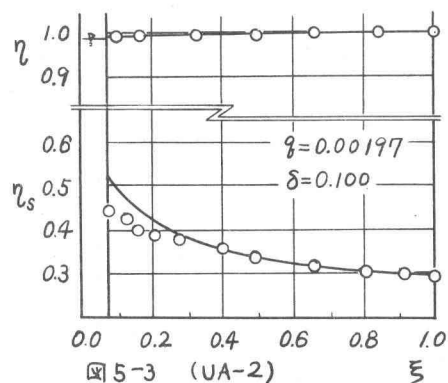


図5-3 (UA-2)

5 あとがき

不圧、被圧浸透層からの同時取水について、理論的考察を行ない、前者については、実験による検討を行なったが、第1報での結果と合せて考えるとき、淡水・塩水の境界が著るしい勾配を持たないような範囲では、理論解は現象を良く説明することがわかった。今後、取水限界に対する検討、境界での塩水の拡散などについて検討を加えるつもりである。

参考文献 リ岩佐, 武内, 小沢

「淡水と塩水を含む浸透層からの取水について」昭和43

年度 土木学会関西支部年次学術講演会講演概要