

浸透層よりの定常選択取水について

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 等

1. まえがき

浸透層が海に面する所では、淡水が海に流出し、塩水が浸透層に侵入している。また、洋上の島の浸透層では、塩水層の上に淡水がレンズ状に存在することがある¹⁾。このように、淡水と塩水が成層を成している浸透層の上層から淡水を取水する場合、下層の塩水位が上昇する結果、塩水が井戸に侵入することになり、取水の障害となる。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、塩水位の上昇を調節することが考えられる²⁾。これは淡・塩水同時取水と呼ばれている。本研究では、淡・塩水が成層を成す浸透層からの選択取水の一方法としての同時取水について著者らが行なつて来た理論的考察を一括するとともに、その実験による検討と實際上への適用に関する諸問題を明らかにしよう。

2. 理論的考察

すでに得られた淡水と塩水が成層を成す自由および被圧浸透層からの同時取水についての基礎方程式および特別の取水条件を付与した結果^{3), 4)}を示し、さらに、同時取水により淡水の可能最大取水量が著るしく増加することを明らかにする。

2-1) 自由浸透層よりの同時取水

1) 基礎方程式

Q : 単位時間当りの取水量 (以下単に取水量とよぶ),
 k : 透水係数, μ : 粘性係数, ρ : 密度, g : 重力加速度
 および $K = k\rho g / \mu$ とし, 淡水, 塩水および影響圏での水理量をそれぞれ添字の f, s および R で表わすと, つぎの各無次元量を用いることができる。

$$\xi = \frac{r}{R}, \quad \eta = \frac{h}{h_R}, \quad g = \frac{Q_f}{2\pi K_f h_R^2}$$

$$\delta = \frac{Q_s / K_s}{Q_f / K_f}, \quad \epsilon = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_s}$$

自由水位 η についての微分方程式:

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

塩水位 η_s についての式:

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

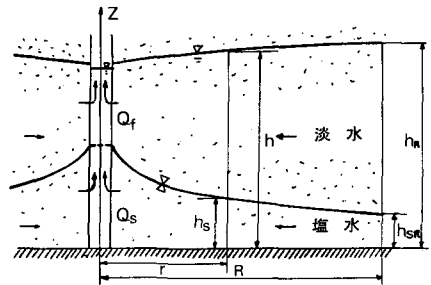


図-1 自由浸透層

II) 塩水位一定の取水条件の場合 ($\eta_s = \eta_{SR}$):

$$\eta = \frac{g}{1 - \eta_{SR}} \ln \xi + 1, \quad \delta_{lev.} = \frac{(1 - \epsilon) \eta_{SR}}{1 - \eta_{SR}} \quad (3)$$

III) 淡水だけ取水の場合 ($\delta = 0$):

$$\eta = \sqrt{2g\epsilon \ln \xi + \epsilon^2 (1 - \eta_{SR})^2} + 1 - \epsilon (1 - \eta_{SR}) \quad (4)$$

また, η_s は(4)式を(2)式に代入すれば得られる。

2-2) 被圧浸透層よりの同時取水

I) 基礎方程式

図-2より, すでに示した無次元量および $\beta = b/h_R$

を用いて,

ピエゾ水頭 η についての微分方程式:

$$\frac{d^2 \eta}{d\xi^2} - \frac{\delta \xi}{\epsilon (\beta_0 \xi \frac{d\eta}{d\xi} - g)} \left(\frac{d\eta}{d\xi} \right)^3 + \frac{(1 - \epsilon) \xi}{g} \left(\frac{d\eta}{d\xi} \right)^3 + \frac{1}{\xi} \frac{d\eta}{d\xi} = 0 \quad (5)$$

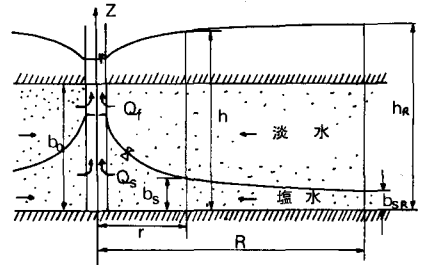


図-2 被圧浸透層

塩水層厚 β_s についての式:

$$\beta_s = \sqrt{\frac{2g(1 - \epsilon + \delta)}{\epsilon} \ln \xi + \frac{2(1 - \epsilon) \beta_0}{\epsilon} (1 - \eta) + \beta_{SR}^2} \quad (6)$$

II) 塩水位一定の取水条件の場合 ($\beta_s = \beta_{SR}$):

$$\eta = \frac{g}{\beta_0 - \beta_{SR}} \ln \xi + 1, \quad \delta_{lev.} = \frac{(1 - \epsilon) \beta_{SR}}{\beta_0 - \beta_{SR}} \quad (7)$$

III) 淡水だけ取水の場合 ($\delta = 0$):

$$\eta = \sqrt{\frac{2g\epsilon}{1 - \epsilon} \ln \xi + \frac{\epsilon^2}{(1 - \epsilon)^2} (\beta_0 - \beta_{SR})^2} + 1 - \frac{\epsilon}{1 - \epsilon} (\beta_0 - \beta_{SR}) \quad (8)$$

なお, β_s は(8)式と(6)式とから得られる。

2-3) 同時取水および淡水だけ取水する時の可能取水量

説明の便宜上, 塩水位が一定という取水条件の場合下における同時取水と淡水だけ取水する場合との可能取水量を比較し, 同時取水の有利性を明らかにしよう。これらの可能最大取水量をそれぞれ $g_{\eta_s = \eta_{SR}}^*$ および $g_{\delta=0}^*$ とする。 ξ_0 を井戸半径の無次元量とすれば, 自由浸透層では, 前者は(3)の第1式で $\eta = \eta_{SR}$ とし, $g_{\eta_s = \eta_{SR}}^* = (1 - \eta_{SR})^2 / \ln \frac{1}{\xi_0}$ で与られ, 後者には(4)式の根号内が正であることから, $g_{\delta=0}^* < \epsilon (1 - \eta_{SR})^2 / 2 \ln \frac{1}{\xi_0}$ の関係がある。この2式から, つぎの関係式が得られる。

$$g_{\eta_s = \eta_{SR}}^* / g_{\delta=0}^* > \frac{2}{\epsilon}$$

また, 被圧浸透層についてもほぼ同じ結果が得られる。したがって, 同時取水により ϵ の逆数のオーダー倍の淡水取水が可能になる。このような取水条件の下では各水理量はモデルの仮定を満たさなく

なるから、実際上は、これよりやや小さい値となろうが、同時取水により、淡水取水量が飛躍的に増加することが明らかにされたことになる。

3. 基礎方程式の数値計算および結果

基礎方程式(1)および(5)は、かなり高次の非線型であるが、 $\frac{d^2\eta}{d\xi^2} = F(\xi, \eta, \frac{d\eta}{d\xi})$ となっているから、つぎに示す方法により容易に数値解が得られる。

計算方法 Runge-Kutta Method

境界条件⁴⁾ 自由浸透層 $\xi = 1 : \eta = 1, \frac{d\eta}{d\xi} = \varphi / (1 - \eta_{SR})$

被圧浸透層 $\xi = 1 : \eta = 1, \frac{d\eta}{d\xi} = \varphi / (\beta_0 - \beta_{SR})$

したがって、(1)式から $\eta = \eta(\xi, \varphi, \delta, \eta_{SR}, \epsilon)$ および(5)式から $\eta = \eta(\xi, \varphi, \delta, \beta_0, \beta_{SR}, \epsilon)$ の形で η と各水理量との関係が求められ、(2)および(6)式に用いれば、 η_s および β_s が求められる。図-8 ~ 図-8 は、 $\epsilon = 0.029$ について得られた結果の一例である。

I) 自由浸透層

図-3 : $\varphi = 0.001$ について、 δ および η_{SR} を助変数として求められた塩水層の形状を表わしたもので、鎖線は塩水位一定の取水条件を示す。

図-4 : $\xi = 0.01$ での塩水位の無次元量 η_s および塩水取水比 δ の関係が、 φ および η_{SR} を助変数として表わされている。

$|\partial\eta_s/\partial\delta|$ の値は、 $\varphi = 0.0005$ では小さいが、 0.002 では急激に大きくなり、 η_s は δ の若干の変化により、 η あるいは 0 に達する。

$\eta_{SR} = \text{const.}$ のとき、 φ を助変数とする各曲線の交点は塩水位一定の条件を表わし、この条件は φ に独立なことを意味する。(or. (3)式)

図-5 : $\xi = 0.01$ で $\eta_s = \eta$ ($\eta_r = 0$) および $\eta_s = 0$ となる時の塩水取水比 $\delta_{\eta_s = \eta}$ (点線) および $\delta_{\eta_s = 0}$ (鎖線) が η_{SR} について表わされている。また、実線は塩水位一定の時の $\delta_{lev.}$ を表わす。 φ の値が大きくなると、 $\delta_{\eta_s = \eta} - \delta_{\eta_s = 0}$ の値は小さくなり、塩水取水比 δ の選択範囲が小さくなることが明らかにされる。

φ および η_{SR} が与えられ、実際に同時取水を行なうとき、 δ を仮定すれば、図-4 から、 $\xi = 0.01$ での η_s の値が内挿され、この値と図-3 により塩水位の概略が得られる。この操作を繰り返すことにより、適正な δ の値が決定されよう。

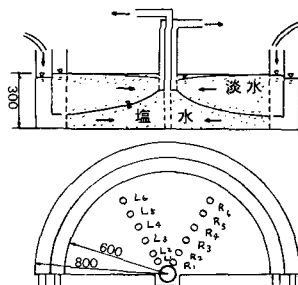
II) 被圧浸透層

$\beta_0 = 0.4$ について計算された結果が図-6 から図-8 で、I) とほぼ同じ性状が示されている。

4. 自由浸透層からの同時取水についての実験的考察

4-1) 実験概要

実験装置は、透明アクリル樹脂製の半径 800mm および高さ 300mm の半円筒形で、図-9 にその大略を示す。



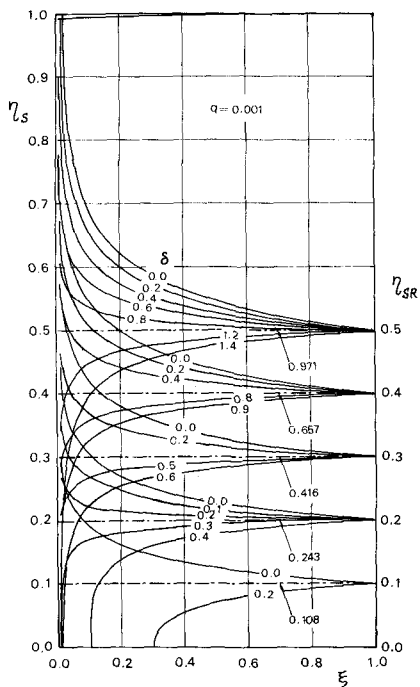


図-3 自由浸透層の塩水位

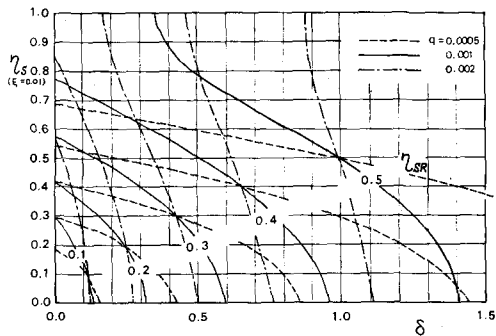


図-4 自由浸透層の $\xi = 0.01$ での η_s についての関係

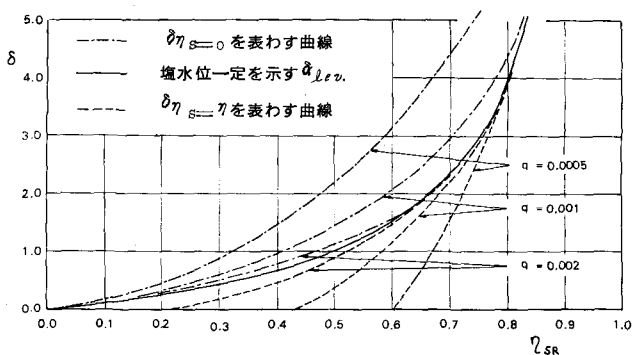


図-5 自由浸透層での $\delta_{\eta_s=\eta}$, $\delta_{lev.}$, $\delta_{\eta_s=0}$

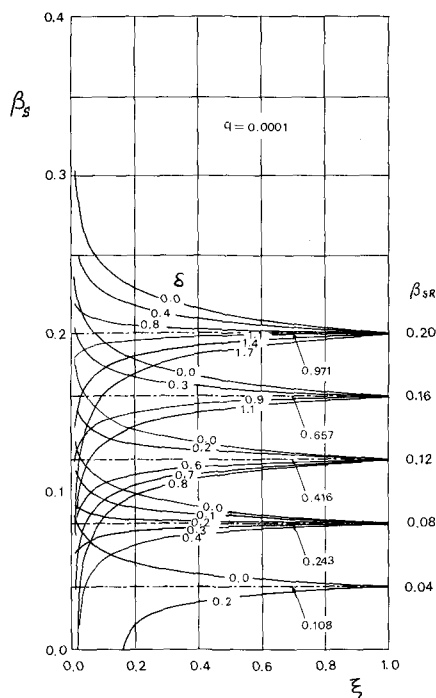


図-6 被圧浸透層の塩水位

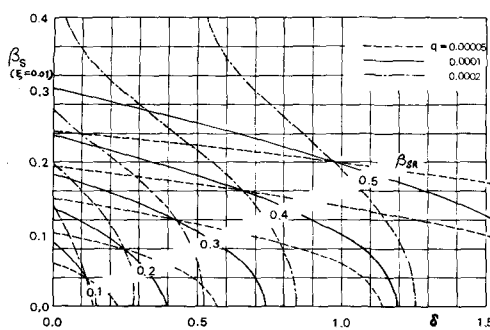


図-7 被圧浸透層の $\xi = 0.01$ での β_s についての関係

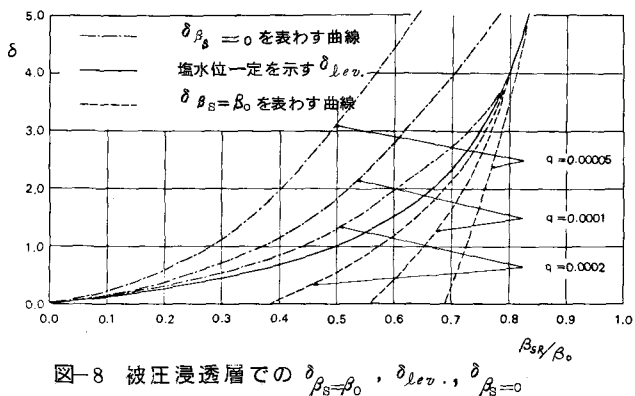


図-8 被圧浸透層での $\delta_{\beta_s=\beta_0}$, $\delta_{lev.}$, $\delta_{\beta_s=0}$

浸透層を構成する砂は、粒径 2mm から 8mm で、 $K = 1.4\text{ cm/sec}$ である。

淡水および塩水は、取水井からそれぞれ独立して取水される。

自由水位は R_1 から R_6 および L_1 から L_6 で示される観測井で測定され、塩水位は、着色された塩水の流れとして装置前面の透明アクリル樹脂板を通して視覚的に求められた。

表-1に、本研究で得られた実験および実験条件が一括されている。

実験条件 δ/δ_{lev} は、1より大であれば、 $d\eta_s/d\xi > 0$ となることを意味する(写真-2)。

写真-1および写真-2はそれぞれ実験UA-13およびUA-15の塩水位を表わしている。

4-2) 塩水位についての検討

図-10は、 $d\eta_s/d\xi$ が正、負および0に近い実験例で、○印および実線はそれぞれ実験値と理論値を表わす。

図-11は、各実験値と理論値について、 $\xi = 0.100, 0.167$ および 0.500 で、実験値 η_{se} と理論値 η_{st} の差 $\eta_{se} - \eta_{st}$ を縦軸に、この時の η_{st}/η_{srt} を横軸にして整理したもので、理論値と実験値の適合性を示している。

図-10および11から、 $\xi = 0.500$ では、両者は良く一致するが、取水井に近づくとき $\xi = 0.167$ では ± 0.05 、 $\xi = 0.100$ では ± 0.10 前後の差を示すことがわかる。この傾向は $d\eta_s/d\xi > 0$ のときに顕著になる。

しかし、 η_s/η_{srt} が1に近い場合、換言すると、 $\delta/\delta_{lev} \neq 1$ の場合には、両者の一致は良好である。

これは、 η_{st}/η_{srt} が1から離れるとき、モデル作成の仮定が満たされなくなることによろうが、とくに、 $d\eta_s/d\xi < 0$ のときに、

実験 番号	実験条件				
	q	δ	η_{SR}	h_{rcm}	δ/δ_{lev}
UA-1	0.00191	0.407	0.308	26.0	0.915
2	0.00200	0.100	0.290	26.0	0.188
5	0.00179	0.485	0.310	25.4	1.080
6	0.00209	0.209	0.308	25.5	0.583
7	0.00249	0.182	0.289	25.8	0.530
8	0.00179	0.283	0.361	25.6	0.510
9	0.00133	0.392	0.298	25.6	0.952
10	0.00143	0.474	0.307	25.6	1.085
11	0.00167	0.762	0.344	25.6	1.492
12	0.00159	1.093	0.418	25.7	1.577
13	0.00168	0.010	0.298	25.6	0.024
14	0.00165	0.019	0.307	25.7	0.045
15	0.00170	0.721	0.300	25.6	1.765

表-1 実験番号および実験条件

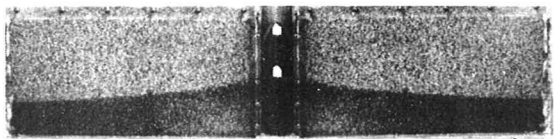


写真-1

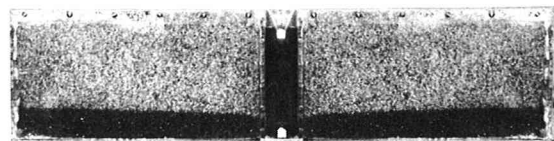


写真-2

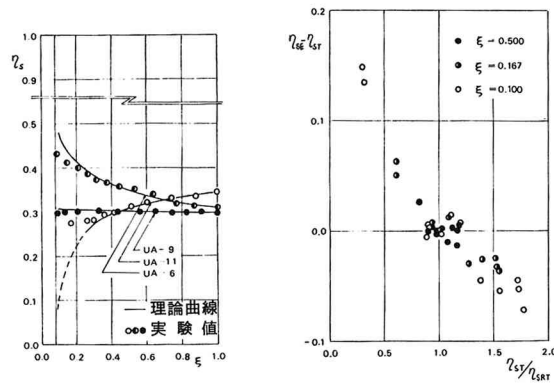


図-10

図-11

$\eta_{ss} - \eta_{st} < 0$ となるのは、境界面で淡水との混合が生ずると、濃度分布のある中間層厚の一部が塩水層厚に寄与するからと考えられる。例えば、D. R. F. Harleman らの浸透層での拡散の実験によると、原点から 1.5 m 離れた所で、淡・塩水境界面に約 2 cm の中間層が認められている⁵⁾。また、 $\frac{d\eta}{dx} > 0$ でかなり大きくなるとき、 $\eta_{ss} - \eta_{st} > 0$ となるのは、塩水層での流速が速くなる結果透水係数一定の仮定が成り立たなくなり、取水井に近づく時、 η_s が大きくなるものと考えられる。

4-3) 取水された淡水の塩分濃度の検討

図-12は、実験により取水された淡水の塩分濃度 C_t を δ/δ_{lev} について整理したもので、 δ/δ_{lev} が大きくなるにつれ C_t は減少する。これは、 $\delta/\delta_{lev} > 1$ では、取水井で塩水取水管の吸引力が、大きくなっており、境界面近くの淡水が連行されるからで、 $\delta/\delta_{lev} < 1$ では、逆の現象が生ずることによろう。

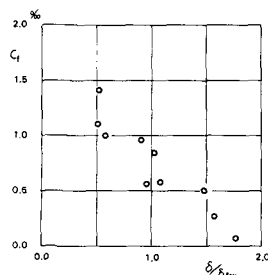


図-12

5. あとがき

浸透層よりの選択取水の一方法として同時取水について考察を加えてきたが、自由浸透層での実験により、自由水位は、理論と実験が良く適合し⁴⁾、また、塩水位については、 $\delta/\delta_{lev} \neq 1$ では良く両者は一致するが、1より離れるときに、若干の不一致を見た。

そこで、同時取水を実際上へ適用する場合の2・3の問題点を列挙すると、つぎのようである。

1) 実際の取水では、実験室におけるよりは、一般に遅い流速で取水されると考えられるから、淡水位および塩水位の理論との適合性は向上すると考えられる。

2) 取水される淡水の塩分濃度を低めることは、淡水取水管を淡・塩水の境界面より若干上に設置することにより、解決されよう。

3) 取水した不要な塩水は、海岸近くであれば、海に捨てれば良いが、海岸から離れている場合は、取水井から十分離れた所で地下にふたたび注水するなどの対策を検討する必要がある。

4) 本実験では、塩水位が変化し始める範囲、すなわち影響圏に関する考察はなされなかったが、野外実験による検討を要すると思われる。

参 考 文 献

1) J. H. Swartz, "Resistivity of Some Salt-Water Boundary in the Hawaiian Islands."

Trans. A. G. U. Hy. 1937

2) H. W. Underhill, "A Coastal Ground Water Study in Libya" Journal of Hydrology 2. 1964

3) 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 土木学会関西支部
年次学術講演概要

4) 岩佐・武内, 「淡・塩水が成層をなす浸透層からの取水について—第2報—」第23回 土木学会
年次学術講演概要

5) D. R. F. Harleman, "Longitudinal and lateral dispersion in an isotropic porous media" Journal of Fluid Mechanics Vol. 16 1963