

九産大 正員 崎山 正常 正員 ○青柳 茂敏

1. まえがき 本報は河口貯水池の水位が海面よりやや高く、Ghyben-Herzbergの法則により、塩水が貯水池底部に停滞する場合、地盤中の塩水の汲み上げによって浸塩境界面を地盤中に低下させる工法の提案と、これに対する地下密度流的検討を行なったものである。

2. 深溝 まず速度ポテンシャルは $\Phi = k(P/\rho_1 + \gamma)$ であり、他の所要水理諸量についての無次元式を示せば

$$X = x/BC, Y = y/BC, \varphi = \{\Phi - k(D_1 + D_2 - h_2)\} / (kR_1)$$

$$\Psi = \Psi / (kR_1) \quad \text{----- (1)}$$

これらを用いて図-1の境界条件を整理すると図-2のようになる。Yに関するLaplaceの式の一般

$$\text{解は } Y = \sum_{m=0}^{\infty} \{A_m \sin(\beta\varphi) + B_m \cos(\beta\varphi)\} \{a_m \sinh(\beta\psi) + b_m \cosh(\beta\psi)\} \quad \text{----- (2)}$$

上式の定数を図-2の境界条件によって決定すれば、若干の計算のうちに

$$Y = \frac{1}{\{1 - \varphi_0\} + \left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}\right) \frac{D_2}{R_1}} \left\{ \frac{1}{2} (1 - \varphi_0)^2 + \left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}\right) \frac{D_2}{R_1} \right\} \frac{\Psi}{\beta / (kR_1)}$$

$$- \frac{2}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \frac{\cos(m\pi\varphi_0) - (-1)^m}{m^2} \right\}$$

$$\cdot \frac{\sinh(m\pi\psi)}{\sinh\{m\pi\beta/(kR_1)\}} \cdot \cos(m\pi\varphi) \}$$

$$X = \frac{1}{\{1 - \varphi_0\} + \left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}\right) \frac{D_2}{R_1}} \left\{ \frac{1}{2} \cdot (1 - \varphi_0)^2 + \left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}\right) \frac{D_2}{R_1} \right\} \frac{\varphi}{\beta / (kR_1)}$$

$$- \frac{2}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \frac{\cos(m\pi\varphi_0) - (-1)^m}{m^2} \right\}$$

$$\cdot \frac{\cosh(m\pi\psi)}{\sinh\{m\pi\beta/(kR_1)\}} \cdot \sin(m\pi\varphi) \}$$

$$\text{----- (3)}$$

式(3)による数値計算の例を図-3、図-4に、その実

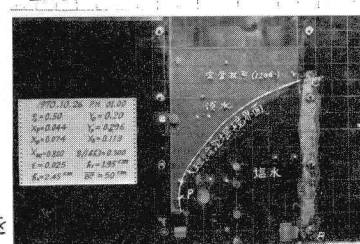
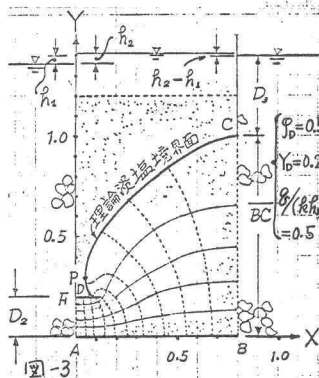
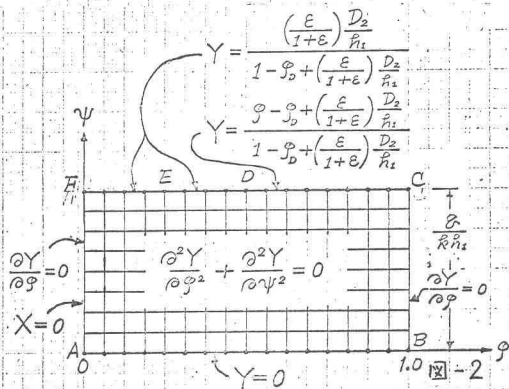
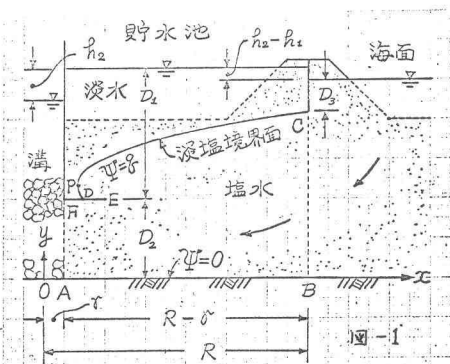


写真-1

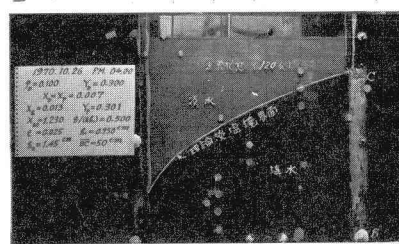
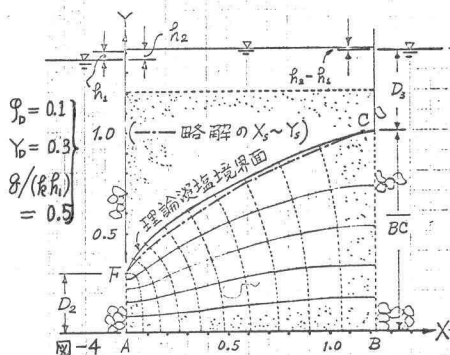


写真-2

験を写真-1, 写真-2 に示している。

3. 浅溝 式(1)を用いて図-5の境界条件を整理すれば図-6がえられる。これについて解析解を求めることは困難であるので数値解により検討を加える。この場合 φ_0 は地下密度流の特性としてあらかじめ与えられるが $\varphi_E, \varphi_0, \delta/(k h_1)$ は未知である。これらの推定にあたり、では本講演会でさきに発表したもの¹⁾と同様な手法を用いた。例解を図-7に、その実験を写真-3に示している。なお図-7の例解については、 $\varphi_0 = 0.7, \varphi_E = 0.5, \varphi_0 = 0.3, \delta/(k h_1) = 0.3$ であるから、海面から不透水層面までを40.0 m, $\varepsilon = 0.025, h_2 - h_1 = 0.25$ m とすると $h_1 = 1.22$ m, $h_2 = 1.47$ m, $D_1 = 25.25$ m, $D_2 = 15.0$ m, $D_3 = 10.0$ m と取り、 $k = 10^{-5}$ m/sec, 溝の長さ500 m とすると塩水汲み上げ量は158.1 m³/day となる。このように溝の規模に対して塩水汲み上げ量はたいした量ではないので実用化が期待できると考える。

4. 井戸 まず群井戸の解の基礎となる単一井戸の解を準一様流の仮定のもとに検討する。図-9を参照すると

$$P = \gamma_s(h-y) = \gamma_s(D_1 + D_2 - y_s) + \gamma_s(y_s - y) \quad (1)$$

$$\text{すなわち} \quad h = \left(\frac{1}{1+\varepsilon}\right)(D_1 + D_2) + \left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}\right)y_s \quad (2)$$

$$\text{したがって} \quad u = k \frac{dh}{dx} = k \left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}\right) \frac{dy_s}{dx} \quad (3)$$

$$Q = 2\pi x y_s \cdot k \left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}\right) \frac{dy_s}{dx} \quad (4) \quad \frac{Q}{\pi k \left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}\right)} \ln|x| = y_s^2 + \text{const} \dots (5)$$

$$\text{また,} \quad \Phi = k \left(\frac{P}{\gamma_s} + y\right) \quad (6) \quad \Phi_{NF} = k(D_1 + D_2 - h_2) \quad (7)$$

$$\text{海側から浸透する塩水のエネルギー損失を堤体中央の矢板直下の面BCまでは無視できるとすると,} \quad \Phi_{BC} = k(D_1 + D_2 - h_2 + h_1) \quad (8)$$

$$\text{次に淡塩境界面における圧力は} \quad P_0 = \gamma_s(D_1 + D_2 - y_s) \quad (9)$$

であるから、これを式(6)に適用すると、

$$\Phi_0 = k \left(\frac{1}{1+\varepsilon}\right)(D_1 + D_2) + k \left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}\right)y_s \quad (10)$$

$$\varphi = \{\Phi - k(D_1 + D_2 - h_2)\} / (k h_1) \quad (11)$$

なる無次元式を導入すると

$$\varphi_s = \frac{h_2}{h_1} - \left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}\right) \left(\frac{D_1 + D_2}{h_1}\right) + \left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}\right) \frac{y_s}{h_1} \quad (12)$$

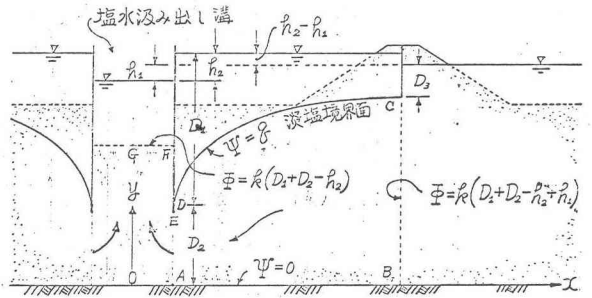


図-5

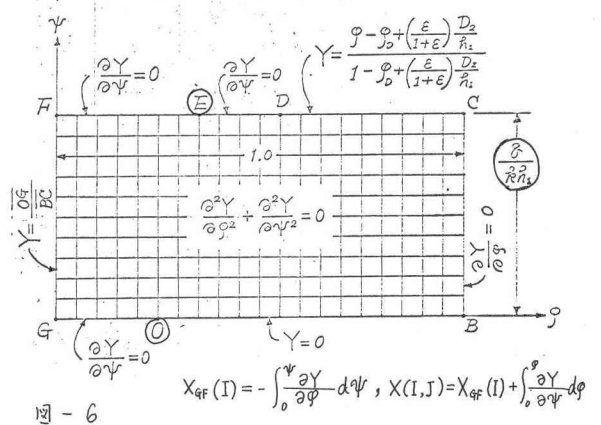


図-6

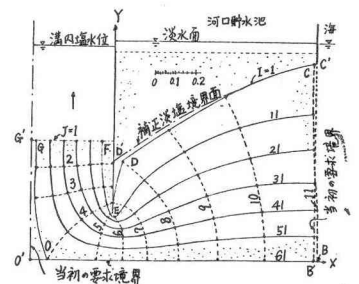


図-7

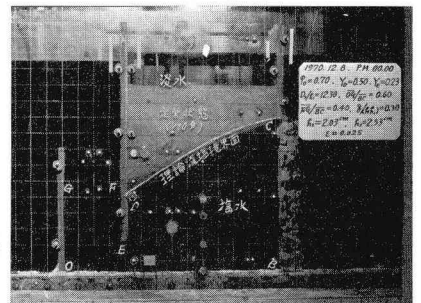


写真-3

$$\text{これより } \varphi_0 = \frac{h_2}{h_1} - \left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}\right) \frac{D_2}{h_1} \quad \text{--- (13)}$$

式(13)を式(12)に適用すると

$$\left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}\right) \frac{\varphi_0}{h_1} = (\varphi_s - \varphi_0) + \left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}\right) \frac{D_2}{h_1} \quad \text{--- (14)}$$

$$\text{さらに } X = x/\overline{BC}, Y = y/\overline{BC} \quad \text{--- (15)}$$

を導入すると、塩塩境界面では

$$Y_s = \frac{y_s}{\overline{BC}} = \frac{(\varphi_s - \varphi_0) + \left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}\right) \frac{D_2}{h_1}}{\left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}\right) \frac{D_2}{h_1}} \quad \text{--- (16)}$$

となる。ここで

$$\overline{BC} = D_1 + D_2 - (h_2 - h_1) - D_3 \quad \text{--- (17)}$$

であるが、点Cにおける圧力の条件より

$$\rho_s D_3 = \rho_l (h_2 - h_1 + D_3) \quad \text{--- (18)}$$

$$\text{すなわち } D_3 = (h_2 - h_1)/\varepsilon \quad \text{--- (19)}$$

これを式(17)に適用し、さらに式(13)の関係

を用いれば式(16)は

$$Y_s = \frac{(\varphi_s - \varphi_0) + \left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}\right) \frac{D_2}{h_1}}{(1 - \varphi_0) + \left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}\right) \frac{D_2}{h_1}} \quad \text{--- (20)}$$

がえられ、また

$$Y_0 = \frac{\left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}\right) \frac{D_2}{h_1}}{(1 - \varphi_0) + \left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}\right) \frac{D_2}{h_1}} \quad \text{--- (21)}$$

がえられる。

しかし、図-9に示す点Fを決定する所要の式は理論的には求まらない。そこで実用的には φ_0 は0付近の値であることから、いま $\varphi_0 < 0.1$ 程度にえらんだ場合に $\varphi_s = 2 \cdot \varphi_0$ とえらべば、

これに対応する Y_s は

$$Y_{s, \varphi_s = 2\varphi_0} = \frac{\varphi_0 + \left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}\right) \frac{D_2}{h_1}}{(1 - \varphi_0) + \left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}\right) \frac{D_2}{h_1}} \geq Y_0 \quad \text{--- (22)}$$

となる。そこで点D付近のポテンシャルの低下はほぼ流線長に比例すると仮定すると

$$Y_0 - Y_F \doteq Y_{s, \varphi_s = 2\varphi_0} - Y_0 = \frac{\varphi_0}{(1 - \varphi_0) + \left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}\right) \frac{D_2}{h_1}} \quad \text{--- (23)}$$

がえられ、点Fの位置も設定することができ。さて式(14)、(20)を参照して円形と仮定された河口貯水池と同心円周上に正多角形に配置された各井戸の諸元は同じとし

$$q = [Q / \{ \pi k \left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon} \right) h_1^2 \}] / \{ (1 - \varphi_0) + \left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon} \right) \frac{D_2}{h_1} \} \quad \text{--- (24)} \quad X_i = \left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon} \right) \frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}}{h_1} / \{ (1 - \varphi_0) + \left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon} \right) \frac{D_2}{h_1} \} \quad \text{--- (25)}$$

$$\bar{r} = \left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon} \right) \frac{r}{h_1} / \{ (1 - \varphi_0) + \left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon} \right) \frac{D_2}{h_1} \} \quad \text{--- (26)} \quad Y_0 = \left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon} \right) \frac{\varphi_0}{h_1} / \{ (1 - \varphi_0) + \left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon} \right) \frac{D_2}{h_1} \} \quad \text{--- (27)}$$

なる無次元式を導入して井戸の総数 n 個とすると、基礎式(5)の重ね合せにより

$$Y_s^2 = \sum_{i=1}^n q \cdot \ln(1/X_i / \bar{r}) + \text{const} \quad \text{--- (28)}$$

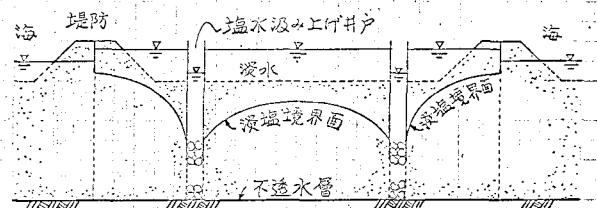


図-8 塩水汲み上げ機構の略図

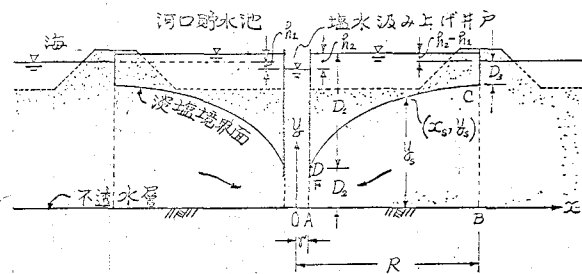


図-9 単一井戸による塩水汲み上げ

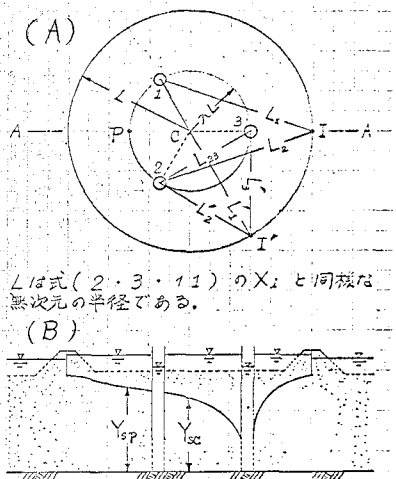


図-10 正三角形配置

境界条件は $|x_i| = L_i$ において $Y_s = 1$ であるとする、
 $const = 1 - \sum_{i=1}^n g \cdot \ln(L_i / \bar{r})$ ----- (29)

また各井戸の側面においては $Y_s = Y_0$ であるから

$$const = Y_0^2 - \sum_{i=1}^n g \cdot \ln\{(L_{ij} - \bar{r}) / \bar{r}\}$$
 ----- (30)

ここに L_{ij} は i 番目の井戸と j 番目の井戸の中心間距離である。式 (29), (30) より塩水汲み上げ量の算定式 $\sum_{i=1}^n g \cdot \ln(L_i / \bar{r}) - \sum_{i=1}^n g \cdot \ln\{(L_{ij} - \bar{r}) / \bar{r}\} = 1 - Y_0^2$ ----- (31)

が求まり、また淡水境界面の式は式 (28), (29) より $Y_s^2 = 1 - \sum_{i=1}^n g \cdot \ln \frac{L_i}{|x_i|}$ ----- (32)

となる。ところで式 (29) の誘動過程が必要であった L_i は、図-10(A) に示すようにその起点をかえると一般には異なった値とは、ま普遍的ではないが、これが水理諸量に与える影響は小さい。たとえば正三角形配置の場合には式 (34) より

$$g = \{1 - Y_0^2\} / \left\{ \ln \frac{L_1 \cdot L_2 \cdot L_3}{\bar{r}^3} - \ln \frac{\{(L_{21} - \bar{r})(L_{31} - \bar{r})\}}{\bar{r}^2} \right\}$$
 ----- (33)

となり、 $L_1 \cdot L_2 \cdot L_3 = (1 - \lambda^2) L^3$, $L_1' \cdot L_2' \cdot L_3' = (1 + \lambda^2) L^3$, $L_1 = L_2 = L_3 = \sqrt{3} \lambda L$ ----- (34)

となるが、 $\lambda = 0.5$, $\bar{r}/L = 0.025$ のとき、式 (33) の分母の数値的差は 7% 弱である。井戸の総数が n 個の場合には、これに相当する分母の差は、 $|\ln \frac{(1 - \lambda^n)}{(1 + \lambda^n)}|$, ($\lambda < 1$) であるから、 n が大きいほど、 λ が小さいほど影響が小さいと云える。

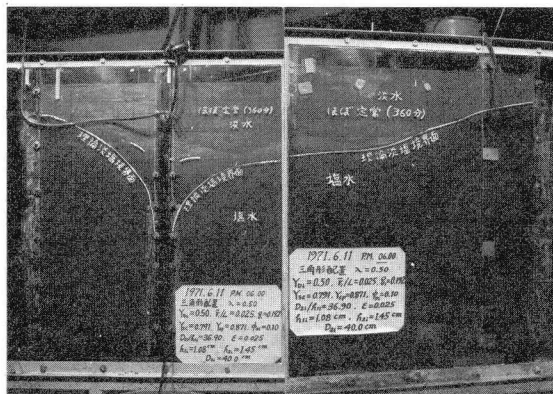
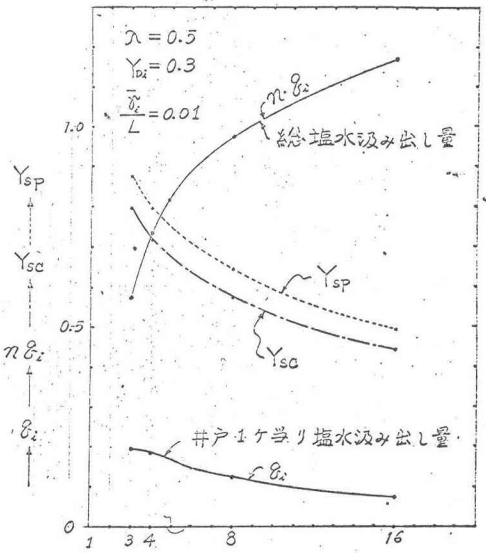


写真-4

写真-5

例解を図-14に、その実験を写真-4、写真-5に示している。紙面の都合で十分な説明でおわることが詳細は講演時にのべる。

参考文献 1) 崎山正孝、青柳茂樹：淡水注入による河口貯水池の塩水切断、不講演集内。



→ n (井戸の個数) 図-11

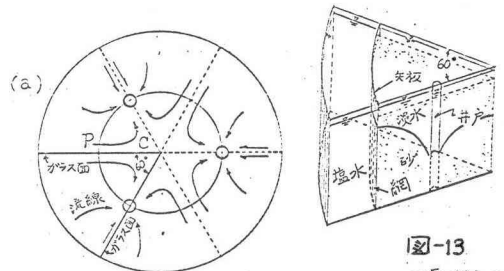


図-12 正三角形配置

図-13
二面ガラス張り
三角形水槽

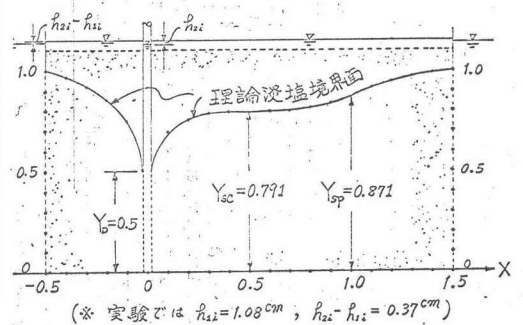


図-14