

III—19

井戸壁からの淡水注入による淡塩境界面の解析

九州産業大学工学部 正員 杉尾 哲

九州産業大学工学部 学生員 ○武井保道

高浜 孝 東家桂樹

1. まえがき

海水で飽和された地盤中に、注入井戸を設け、井戸の側壁から淡水を地盤中に注入した場合に形成される地盤中の淡塩境界面について解析しよう。解析手法は前報と同様に、井戸からの淡水の流出流れに、地盤中の海水をおさへた淡水の垂直上向等速流を重ね合わせるにより定常解を求め、次いでこの結果を用いて非定常解を算出するものであり、これを扇形水槽による砂モデルの実験結果と比較している。

2. 定常状態の解析

図-1の井戸の側壁からの淡水注入による流れを、3次元の流出点を連れた流出線源 (Line Source) と、同様の流入線源との間のポテンシャル流と考えて解析する。いま流出線源の位置を中心軸上の $y=a_1 \sim a_2$ の区間に取り、単位長さ dl 当りの流出量を q 、垂直上向等速流の速度ポテンシャルを $m \cdot r \cdot E$ とすれば、速度ポテンシャル ψ の式は、

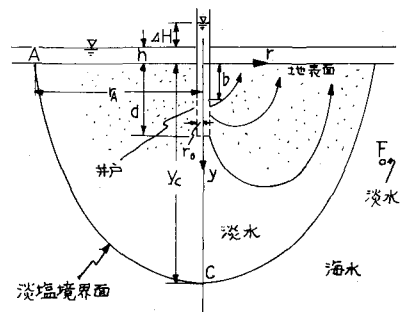


図-1 流れの場合

$$\psi = q \int_{a_1}^{a_2} \left\{ \frac{1}{\sqrt{r^2 + (y-a_1)^2}} - \frac{1}{\sqrt{r^2 + (y-a_2)^2}} \right\} da + C_1 + m \cdot r \cdot E y$$

$$= -q \cdot \log \frac{|y-a_2 + \sqrt{r^2 + (y-a_2)^2}| \cdot |y+a_2 + \sqrt{r^2 + (y+a_2)^2}|}{|y-a_1 + \sqrt{r^2 + (y-a_1)^2}| \cdot |y+a_1 + \sqrt{r^2 + (y+a_1)^2}|} + C_1 + m \cdot r \cdot E y \quad (1)$$

ストークスの流れ関数を ψ とおくと $(\partial \psi / \partial r) = r \cdot (\partial \psi / \partial y)$ より

$$\psi = \int (\partial \psi / \partial y) \cdot r \cdot dr = -q \left\{ \sqrt{r^2 + (y-a_1)^2} + \sqrt{r^2 + (y-a_2)^2} - \sqrt{r^2 + (y+a_1)^2} - \sqrt{r^2 + (y+a_2)^2} \right\} + \frac{1}{2} m \cdot r \cdot E r^2 + C_2 \quad (2)$$

ここに地表面上のポテンシャルより $C_1 = r \cdot E$ 、また $(y > a_2, r=0)$ の流線を $\psi = 0$ とおくと $C_2 = 0$ 、さらに $(y < b, r=0)$ の流線は $\psi = -2q(a_2 - a_1)$ であり、井戸全体からの流出量を Q とおくと $q = Q / \{4\pi(a_2 - a_1)\}$ したがって流出線源の位置を近似的に $a_1 = b$ 、 $a_2 = d$ とし、式-2 に $y = (a_1 + a_2)/2$ 、 $r = r_0$ 、 $\psi = r \cdot E(\Delta H + h)$ を代入すると井戸からの

$$Q = \frac{4\pi(a_2 - a_1) \{m \cdot r \cdot E(a_1 + a_2)/2 - r \cdot E h\}}{\log \frac{|-\frac{a_2 - a_1}{2} + \sqrt{r_0^2 + (\frac{a_2 - a_1}{2})^2}| \cdot |\frac{a_1 + 3a_2}{2} + \sqrt{r_0^2 + (\frac{a_1 + 3a_2}{2})^2}|}{|\frac{a_2 - a_1}{2} + \sqrt{r_0^2 + (\frac{a_2 - a_1}{2})^2}| \cdot |\frac{3a_1 + a_2}{2} + \sqrt{r_0^2 + (\frac{3a_1 + a_2}{2})^2}|}} \quad (3)$$

淡水注入量は

次に淡塩境界面の下端Cの位置は鞍点であることから

$$y_c = \frac{2\pi m \cdot r \cdot E}{Q(a_2 + a_1)} (y_c^2 - a_2^2)(y_c^2 - a_1^2) \quad (4)$$

$(\partial \psi / \partial y)_{r=0} = 0$ とおくと式-4を得る。

次に m の値は、式-2 に $y = y_c$ 、 $r = 0$ を代入して求めたポテンシャルの値が海水飽和地盤中のポテンシャル

$\psi = r \cdot E + r \cdot E y$ に等しくなる

$$m = \frac{Q}{4\pi r \cdot E y_c(a_2 - a_1)} \log \frac{|y_c - a_2| \cdot |y_c + a_2|}{|y_c - a_1| \cdot |y_c + a_1|} + 1 \quad (5)$$

なければならぬことから

式-5に式-3、4を代入し、与えられた境界条件 $d, b, r_0, \Delta H$ について解くと m が求められる。この m の値を式-2 ($\psi = 0$)、式-3に用いれば、淡塩境界面形状、淡水注入量などの水理諸量が求められる。

3. 非定常境界面の算定

図-1の井戸の側壁から注入した淡水が、徐々に拡がってゆく過程を考えよう。ここに淡水と海水の粘性の相違が小さいため、内部境界面の移動特性を支配する Mobility ratio (M) は $M \approx 1$ と考えられ、淡塩境界面に与える M の影響は、ほとんど無視できると考えられる。したがって、非定常状態の淡塩境界面付近とその内部の流れは

定常状態に達した後の、浸透境界面内部の同じ位置の蒸気圧に近似していると考える。このようにすれば、定常状態における浸透境界面内部の、各蒸気線に沿う、各粒子の同時刻の到達時間を求め、互いに結べば、その時刻の浸透境界面が求められる。いま、地盤中の空隙率を n 、時間をもとすれば、蒸気線(2)に沿う定常速度は

$$v = dl/dt = -(2/n) \cdot (2\pi/3l) \quad \text{であり、浸水が、ある蒸気線に沿って、ある位置}(y_0, r_0) \text{からある位置}(y_i, r_i) \text{に到達する時間は式-6で表わされる。いま井戸の埋設深さを} d \text{で無次元化して、} y/d = Y, \quad r/d = R \quad \text{および} \quad 2\pi/3l = 2\pi_0 \quad \text{とおけば}$$

$$t = -n \sum_{i=1}^s \left(\frac{\Delta l^2}{\Delta \pi} \right) \quad \text{--- (6)}$$

$$T = \frac{2t}{nd} = \sum_{i=1}^s \frac{(Y_i - Y_0)^2 + (R_i - R_0)^2}{\Phi_D(Y_{i-1}, R_{i-1}) - \Phi_D(Y_i, R_i)} \quad \text{--- (7)}$$

によって蒸気線を描いておけば、蒸気線上的各点までの到達時間が求まるから、各蒸気線上的等時刻到達位置を結び曲線を容易に描くことができる。

4. モデル実験による検証

浸水注入のモデル実験装置を図-2に示す。海水は比重1.025に調整した食塩水を通マンガン酸カリウムで着色したものを、淡水は水道水を用いた。また水槽内の実験砂($d_{50} = 0.74 \text{ mm}$)の空隙率と透水係数の値は、 $n = 0.43$ 、 $k = 0.30 \text{ cm/sec}$ を用いた。なお本実験のように、井戸から注入する場合には、従来の問題になっているように、井戸内に与えた水頭が浸透層内に十分に伝達されない。したがって計算は $r = 3.1 \text{ cm}$ で $y = 17.8 \text{ cm}$ 、 $y = 23.0 \text{ cm}$ の2箇所に設置したマノメーターの水頭の差動値を基準にして算定した。また実験結果は水槽両面の平均値を用いた。この結果を図-3に示す。まず定常状態の境界面形状と比較すると、深い所ではよく一致しているが、横方向の大きさが異なり、実験結果の方が大きくなっている。これは、実験継続時間が長くなると、地表面上の海水と淡水の混合が進行し、地盤中の海水が徐々に希釈され、密度差が実験開始時より小さくなったことによるものとする。次に非定常状態の境界面と比較すると、実験開始後16分間の境界面形状は、井戸の下方以外では、よく一致している。このことから、地盤中の海水の希釈が進行する以前の非定常境界面の移動現象は、上述した近似取り扱いにより、十分に説明できたものといえよう。また30分以後の境界面形状は、定常状態と同様に、密度差の減少により、移動速度が増大せられたものとする。次に井戸下方の鉛直方向の移動の相違については、まだ十分な検討を行っていないが到達時間の計算上の誤差、 $d_2 = d$ の近似誤差あるいは実験誤差などが考えられ、今後追究してゆきたいと考えている。

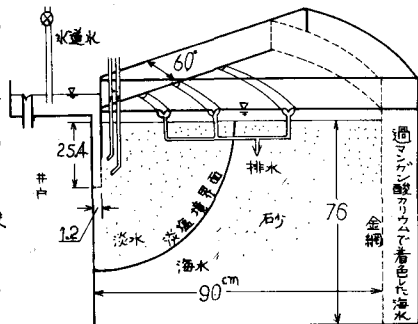


図-2 実験装置の概略図

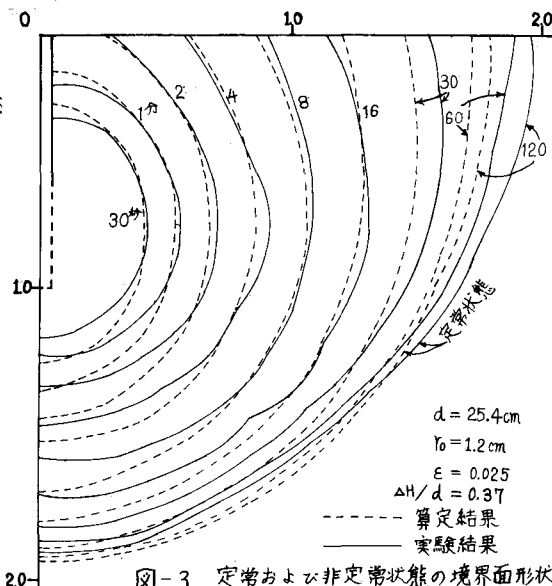


図-3 定常および非定常状態の境界面形状

末尾になったが、本研究の推進にあたり九州大学・上田年比古教授の御指導を頂いた。また本研究は昭和50年度文部省科学研究費試験研究の補助を受けた。ここに記して深く謝意を表する。

参考文献) (1) 上田・杉尾: 暗きからの浸水注入による浸透境界面の解析, 土木学会論文報告集, 第225号, P.P.43~52, 1974年5月。

(2) 上田・杉尾: 浸水注入井戸による海水飽和地盤中の浸透境界面の近似解析, 第30回年講概要集, P.P.474~475, 1975年10月。

(3) Muskat: The flow of homogeneous fluid through porous media.