

海岸地層への海水注入による淡水あるいは汚水の流出防止

PREVENTION OF OUTFLOW OF FRESH OR DIRTY WATER THROUGH COASTAL PERMEABLE STRATUM DUE TO INJECTION OF SALT WATER

崎山 正常*・新見 文彦**・細川 土佐男***・阿部 孝行****

By Masatsune SAKIYAMA, Fumihiko NIIMI, Tosao HOSOKAWA and Takayuki ABE

1. まえがき

自然のままの海岸付近においては、図-1 に示しているような状態で、地下の淡水は海へ流出している¹⁾。また、淡水の汲み上げ利用によっても、地下水位が低下し、これに起因する地盤沈下なども考えられる²⁾。また、海岸埋立場においては、図示の淡水領域に相当する部分が、埋立土中に含まれている工場廃水やその他の人工廃棄物質などによって汚染されている場合も考えられ、これが湾域へ流出すると湾域が汚染される。

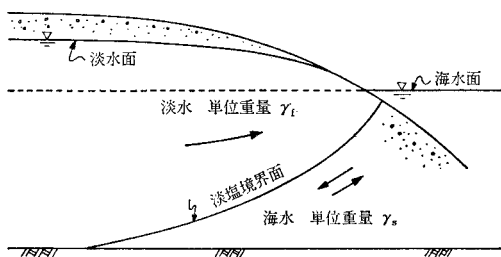


図-1 海岸地下水の海への流出状態

そこで、これらに対する対策として、海水注入によるウォーターカーテン工法を提案する³⁾。その機構は図-2 に示しているようなものである。このようなウォーターカーテンは、これより左側の淡水または汚水の海への流出を防止し、淡水に対しては海岸地下水の水位低下防止対策として、また、汚水に対しては湾域への汚水流出防止対策として、かなりプラスの効用をもつものと考えられる。

しかし、このようなウォーターカーテンの実用化にあたっては、これが内陸部に与えるかも知れないわゆる

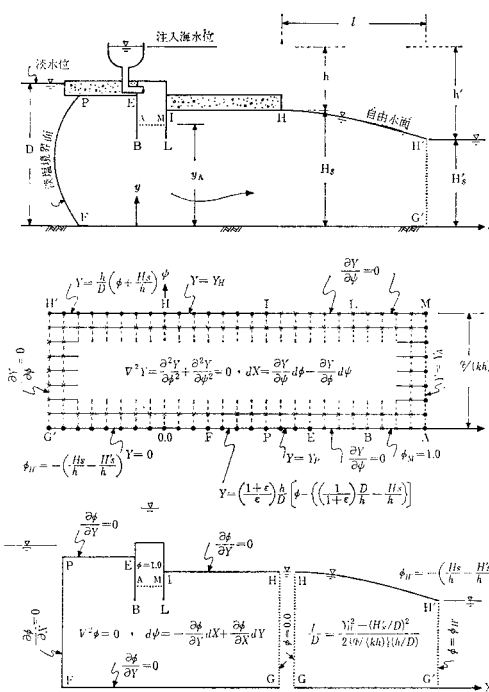


図-2 海水注入機構

塩害など、マイナスの効用も慎重に検討されなければならない。

本報は、このようなウォーターカーテンの設計に伴う地下密度流の場をさきに著者らが発表した手法^{4),5)}により解析し、その妥当性を室内砂模型実験によって検証したものである。

2. 解析の理論

(1) 流れの場とその境界条件

解析の対象は、図-2 に示しているような流れの場である。その解析方法についてはすでに詳述している⁴⁾。

* 正会員 工博 九州産業大学教授 工学部土木工学教室
** 正会員 工修 (株)総合技術コンサルタント技師
*** 正会員 工修 九州産業大学助手 工学部土木工学教室
**** 正会員 九州産業大学副手 工学部土木工学教室

したがって、本報では、ただちにここでの流れの場に特有な密度流的特性を吟味することからはじめたい。

まず、流れの場の任意点 (x, y) について

$$X=x/D, Y=y/D \dots\dots\dots(1)$$

のような無次元化をほどこし、速度ポテンシャル

$$\phi=k\left(\frac{p}{\tau_s}+y\right)\dots\dots\dots(2)$$

と、流れ関数 ψ について

$$\phi=\frac{\phi-kH_s}{kh}, \psi=\frac{\psi}{kh} \dots\dots\dots(3)$$

のような無次元化を行う。ここに k は透水係数、 p は任意点の圧力、 τ_s は海水の単位重量である。また、 ε は、淡水または汚水の単位重量を τ_f とすれば、

$$\varepsilon=\frac{\tau_s-\tau_f}{\tau_f} \dots\dots\dots(4)$$

である。

そうすると、自由水面 HH' では $p=0$ であるから、これを式 (2) に適用し、さらに式 (1) と式 (3) を用いれば、

$$\left. \begin{aligned} \phi_{HH'} &= -\frac{D}{h} \left(\frac{H_s}{D} - Y_{HH'} \right) \\ Y_{HH'} &= \frac{h}{D} \phi_{HH'} + \frac{H_s}{D} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5)$$

が得られ、淡塩境界面 PF では $p=\tau_f(D-y)$ であるから、これを式 (2) に適用し、式 (1) と式 (3) を用いれば、

$$\left. \begin{aligned} \phi_{PF} &= \frac{D}{h} \left[\left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon} \right) Y_{PF} + \left\{ \left(\frac{1}{1+\varepsilon} \right) - \frac{H_s}{D} \right\} \right] \\ Y_{PF} &= \left(\frac{1+\varepsilon}{\varepsilon} \right) \frac{h}{D} \left[\phi_{PF} - \left\{ \left(\frac{1}{1+\varepsilon} \right) \frac{D}{h} - \frac{H_s}{h} \right\} \right] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(6)$$

が得られる。したがって、特異点 H, H', F および P において、

$$\phi_H=0 \dots\dots\dots(7)$$

$$\phi_{H'}=-\frac{D}{h} \left(\frac{H_s}{D} - \frac{H_s'}{D} \right) \dots\dots\dots(8)$$

$$\phi_F=\frac{D}{h} \left\{ \left(\frac{1}{1+\varepsilon} \right) - \frac{H_s}{D} \right\} \dots\dots\dots(9)$$

$$\phi_P=\frac{D}{h} \left[\left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon} \right) Y_P + \left\{ \left(\frac{1}{1+\varepsilon} \right) - \frac{H_s}{D} \right\} \right] \dots\dots\dots(10)$$

が得られる。

(2) $\phi\psi$ 平面の画定と XY 平面の決定

いま、 H_s'/D および H_s/D を任意に与えると、これに対して境界 HH' を自由水面の流線とする h/D が唯一定まらなければならないが、これは未知量である。このことは自由水面の流線となる境界 HH' より上部の砂層を取り除いて考えてみると、任意の h/D では境界 HH' が浸出し面となるか、自由水面の流線となる

か、あるいは、ここまで水面は上がらないかの3つの状態があらわれうることから明らかである。

したがって、図-2 の下方に示している擬似 XY 平面を境界 GH で左と右に分断せずに、すべての境界を固定境界として取り扱おうと、境界 HH' が自由水面の流線となる h/D を定める試行〔I〕が必要になる。次に式 (9) および式 (10) より D/h を消去すると、

$$Y_P=\frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\phi_P}{\phi_F} - 1 \right) \left\{ 1 - (1+\varepsilon) \frac{H_s}{D} \right\} \dots\dots\dots(11)$$

なる密度流的特性を規定する式が得られるから、与えられた $\varepsilon, H_s/D$ のもとで、擬似 XY 平面の解析で得られる ϕ_P および ϕ_F の値を用いて式 (11) で算定される Y_P が与えられている Y_P を満たすかどうかの試行〔II〕が必要になる。

この過程で試行〔I〕および〔II〕を満足させることができなければ、さらに暗渠の大きさを変化(試行〔III〕)させ、あらためて同様な試行が必要になる。したがって、擬似 XY 平面を境界 GH で分断せずにすべての境界を固定境界として取り扱うことは可能ではあるがかなりの手数を必要とする。

そこでいまの場合、真の xy 平面の点 H を通る等ポテンシャル ($\phi_H=0$) 線が、ほぼ鉛直下方にのびることに着目し、擬似 XY 平面を境界 GH で分断して取り扱うことにする。そうすると、前述の試行〔I〕,〔II〕および〔III〕から試行〔I〕をはぶくことができ、その手数をきわめて少なくすることができる。

このように、試行〔II〕および〔III〕を擬似 XY 平面の解析にほどこすことによって、式 (11) の密度流的特性式から算定される Y_P が与えられた Y_P を満たす ϕ_P および ϕ_F が決定できたならば、注入海水の水頭 h は式 (9) および式 (10) より、

$$\frac{h}{D}=\frac{\left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon} \right) \cdot Y_P}{\phi_P-\phi_F} \dots\dots\dots(12)$$

によって規定される。

次に、境界 GH より右側の流れの場については、Muskat の解あるいは Dupuit-Forchheimer の準一様流の仮定に基づく解を利用して、

$$\frac{l}{D}=\frac{(H_s/D)^2-(H_s'/D)^2}{2\{q/(kh)\}(h/D)} \dots\dots\dots(13)$$

により、境界 GH より右側の流れの場の長さ l があらかじめ推定できる^{7),8)}。

このようにして、擬似 XY 平面において密度流的特性を満たす解が得られたならば、これを $\phi\psi$ 平面に適用して $\phi\psi$ 平面を画定し、このなかで Y, X を求めて、 YX 平面を画けば、これによって定まる暗渠の位置、形状および淡塩境界面の位置は十分満足できるものとなる。

(3) 浸透領域, 揚圧力および合速度

次に, 流れがほぼ定常状態におちついたのちにおいて, 海水注入部を時刻 0 に流出した水分子がその後の時刻 t に到達している位置を (X, Y) とすれば,

$$T = \int \sqrt{(\partial X / \partial \phi)^2 + (\partial Y / \partial \phi)^2} \cdot dL \dots\dots\dots(14)$$

ここに, $T = t / [D^2 / \{ (k/\lambda) \cdot h \}]$, $L = l_s / D$ (15)

- l_s : 海水注入部からの流線に沿う距離
- h : 注入海水位
- k : 見かけの透水係数
- λ : 砂層の空隙率

が得られる⁹⁾. 上式で算定された等 T 線の内側は, 時刻 0 にはじめた海水注入において, 現象がまだ遷移過程であるその後の時刻 T の注入海水の浸透領域にほぼ一致する¹⁰⁾. 次に式 (2) を式 (3) に適用し, さらに式 (1) を用いれば,

$$\frac{(p/\gamma_s)}{D} = \frac{h}{D} \phi - \left(Y - \frac{H_s}{D} \right) \dots\dots\dots(16)$$

が得られる. したがって任意点の圧力水頭を求めることができる.

また, X, Y 方向の分速度および合速度

$$U = \frac{(u/k)}{(h/D)}, V = \frac{(v/k)}{(h/D)}, G = \sqrt{U^2 + V^2} \dots\dots\dots(17)$$

ここに, u および v は x および y 方向の流速を導入すると,

$$G = \frac{1}{\sqrt{(\partial X / \partial \phi)^2 + (\partial Y / \partial \phi)^2}} \dots\dots\dots(18)$$

が得られるから,

$$G_{I,J} = \frac{\Delta \phi}{\sqrt{(X_{I,J} - X_{I,J-1})^2 + (Y_{I,J} - Y_{I,J-1})^2}} \dots\dots\dots(19)$$

によって, 任意点の Darcy の動水勾配と D で平均化された注入水頭勾配との比を求めることができる. ただし, いまの場合 $G_{I,1} = G_{I,2}$ としている.

なお, この G の値は海水注入に伴う砂層のパイピン

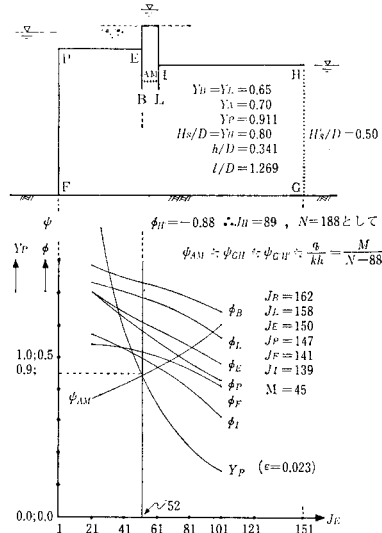


図-3 設定擬似 XY 平面とその水理諸量による $\phi\psi$ 平面の画定値

グ現象発生危険性を評価するための有力な物理量である¹¹⁾.

3. 数値解析の例

図-3 は, 暗渠の形状, 大きさおよび深さ方向の位置を固定した擬似 XY 平面内で, 暗渠を水平方向に移動させ, 前述の密度流的特性を満たす各特異点の ϕ および ψ の決定を行った状態を示したものである. すなわち, 暗渠の水平方向の移動に対応して, 式 (11) で算定される Y_P の値は, 図示のように右下りの変化をするが, その過程で, 与えられた Y_P に一致している. したがって, この暗渠位置での各特異点の ϕ および ψ の値を図から読みとれば, 式 (12) により h/D が定まり, 式 (8) より ϕ_H' も定まる. そうすると, $\phi\psi$ 平面の大きさを画定するための各特異点の (I, J) が図示のように定まる. なお, ここで $\phi\psi$ 平面における I および J の値は, 流線 MLIHH' 上を $I=1$, 流線 ABEFG' 上

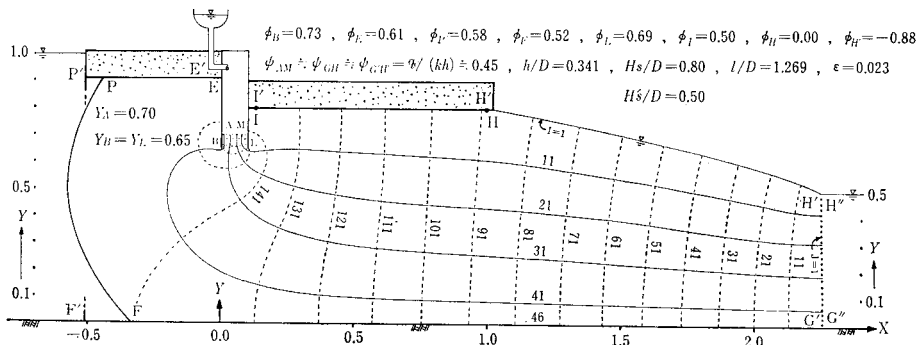


図-4 画定 $\phi\psi$ 平面による XY 平面の決定図

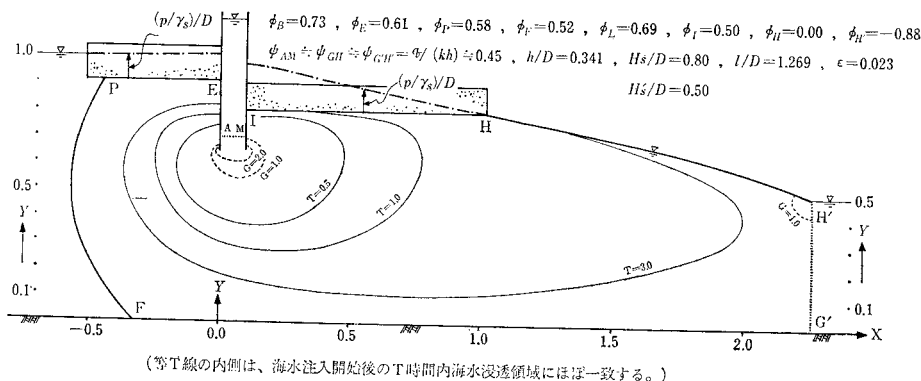


図-5 等 T 線、等 G 線および揚圧力の検討図

を $J=M_1=M+1$ のように、等ポテンシャル線 G'H' 上を $J=1$ 、等ポテンシャル線 AM 上を $J=N_1=N+1$ のように定めている。

以上のようにして画定した $\phi\psi$ 平面内で Y, X を求めて画いた流れの場を 図-4 に示している。なお、図-5 は、図-4 に示しているものと同一境界条件下の解析例であるが、これには、式 (14), (16) および式 (19) によって求めた等 T 線、揚圧力線および等 G 線を例示している。

4. 砂模型実験による検討

数値解析結果の妥当性を文献 5) で用いたような砂模型実験によって検証した。

その模様を 写真-1~2 に示している。まず、写真-1 により遷移過程における海水浸透領域は、海水部と淡水部の色別で、白の実線で示された算定等 T 線の内側領域にほぼ似かよったものであることが認められよう。次に、ほぼ定常状態における淡塩境界面は、写真-2 で明らかなように、海水部と淡水部の色別で鮮明に認められ、白の実線で示した理論淡塩境界面にほぼ一致している。また、これらの写真には、 $J=131$ の理論等ポテン

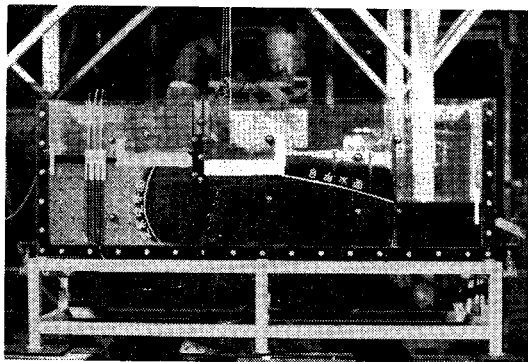


写真-2 ほぼ定常状態 (海水注入開始後 ほぼ 1.5 時間)

シャル線上に設置した 3 本のピエゾメーターを示しており、その内部の着色された水柱はほぼ妥当な高さまで上がっている。このように、ほぼ定常状態における淡塩境界面および等ポテンシャル線の実測値と理論値はそれぞれほぼ一致する。なお、写真-2 においては、白の実線で示した理論自由水面の流線 HH' より上部まで着色された海水が上がっているが、これは理論自由水面の流線 HH' 上の毛管現象に起因するものであることが、この部分に砂層表面より鉛直に掘った小孔内の自由水面がほぼ理論流線上に形成されることで確かめられる。次に、図-4 に示している $q/(kh)$ の値と実測流量とを用いて逆算された透水係数の値は、 $k \approx 0.35 \text{ cm/sec}$ 程度となり、これはこれまでこの他のいろいろな実験によって得られている k の値とほとんど変わらず、また、この値を前述の等 T 線上に適用して式 (15) によって求められた等 t 線の内側がその時刻の海水浸透領域とほぼ一致していることなどから、解析理論ならびにこれに基づく数値計算結果の妥当性は、検証できたものとする。

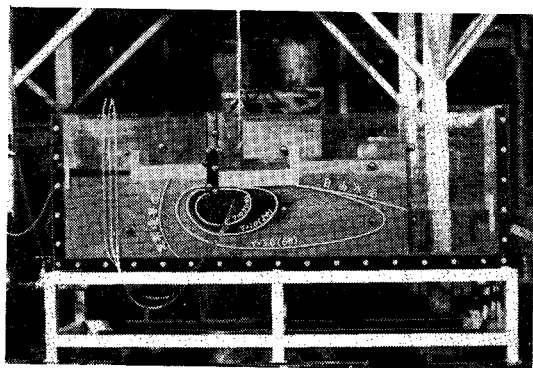


写真-1 遷移過程 (海水注入開始後 ほぼ 2 分, $\lambda \approx 0.4, k \approx 0.35 \text{ cm/sec}, h=10.23 \text{ cm}, D=30.0 \text{ cm}$)

5. 結 論

- (1) 海岸地盤中への海水注入によるウォーターカー

テンは、これが内陸部へ与えるかも知れない塩害については慎重に検討されなければならないが、地下淡水の海への流出防止あるいは湾域への汚水流出防止対策としてかなりプラスの効用をもつと考えられる。

(2) 海水注入部の機構としては、逆U字型の暗渠や溝の底面より下向きに注入するもの、あるいはここには示していないが円形多孔壁の暗渠から放射状に注入するものなどが考えられる。しかし、同程度規模のウォーターカーテンを形成させるにあたり、その注入量は逆U字型や溝型の方が円形暗渠より少なくてよいことを別に同様な解析によって確かめている¹²⁾。

(3) 注入海水の水頭起因する揚圧力や、砂層内のパイピング現象発生危険性を評価する合速度なども容易に算定できる。

(4) 解析結果は、室内における砂模型実験の結果とよく一致する。

6. あとがき

以上、本報では海岸地盤内の地下淡水の海への流出防止または湾域への汚水流出防止を意図した海水注入によるウォーターカーテンの提案を行い、その設計過程における水理解析の手順についてのべた。

また、取り扱った流れの場の境界条件は、固定、淡塩境界面のほかに自由水面をもち、かなり複雑であるが、ここでの地下密度流的特性を考慮すれば、文献 5) の手法がここでも活用できることを示した。

末筆ながら、本研究には文部省科学研究費試験研究

(1) (昭和50年度、研究代表者 埼玉大学 佐藤邦明) の交付をうけた¹³⁾。また、本研究の内容に関連する実験や資料整理には、何人かの九州産業大学卒業生の応援をうけた。

以上、本研究を進めるにあたり、いろいろお世話していただいた方々に心からの謝意を表してむすびとする次第である。

参 考 文 献

- 1) 土木学会編：水理公式集，pp. 593～595，昭和46年改訂版。
- 2) 酒井軍治郎：応用地下水学，朝倉書店，pp. 351～364，昭和43年。
- 3) 嶋 祐之：河口湖工学，日本工業用水協会河口湖開発委員会，p. 79，昭和43年。
- 4) 崎山正常ほか3名：湾域汚染対策としての2次元ウォーターカーテン，土木学会第32回年次学術講演会講演概要集，第2部，pp. 497～498，昭和52年10月。
- 5) 崎山正常ほか3名：河口貯水池下部地層への淡水注入による塩水排除について，土木学会論文報告集，第268号，pp. 75～90，昭和52年12月。
- 6) 前掲 5) に同じ。
- 7) 本間 仁：水理学，丸善，pp. 223～224，昭和42年5月。
- 8) 土木学会編：水理公式集，p. 376，昭和46年改訂版。
- 9) 前掲 5) に同じ。
- 10) 前掲 5) に同じ。
- 11) 崎山正常：浸透流による噴砂現象（第1報），九州産業大学工学部研究報告，第6号，pp. 24～39，昭和44年5月。
- 12) 前掲 4) に同じ。
- 13) 崎山正常：海岸埋立場での海水カーテンによる汚泥中有害物の溶出防止について，文部省科学研究費試験研究（1）昭和50年度，地下密度流の浸透ならびに拡散現象に関する水工学的研究報告書，研究代表者 佐藤邦明，pp. 27～28，昭和51年3月。

(1977. 8. 29・受付)