

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INTERCEPTION OF SALT WATER THROUGH PERMEABLE STRATUM
OF SEASIDE RESERVOIR DUE TO INJECTION OF FRESH WATER

崎山正常*・青柳茂敏**・阿部孝行***・細川土佐男****

By Masatsune SAKIYAMA, Shigetoshi AOYAGI, Takayuki ABE
and Tosao HOSOKAWA

1. ま え が き

河川の流末に人工の貯水池を造り、洪水時の水や常時の放流水を貯留して、これを主として工業用水に役立てようとするいわゆる河口貯水池の計画は、水資源開発の一環として将来ますます必要になってくると考えられる¹⁾。ところが、河口貯水池においては、池内の淡水水位が海水位より少し高い状態あるいはそれ以下に低下した状態では、淡水と海水のポテンシャル差に起因して、海水が河口せき下部やその周辺の透水性地盤を浸透して、池内へ侵入する²⁾。そこで池内の河川水の塩分を許容濃度以下に保つためには、この海水の侵入を防止しなければならない。この海水侵入の防止対策としては、止水矢板工法や薬液注入による地層の難透水層化なども考えられる。しかし、多くの河口部では不透水層は地表より数10 m も下の地下深部にあることが多く、このような地層条件のもとでは上述のような工法による十分な海水しゃ断は、施工あるいは費用上の面などから期待しがたいと考えられる^{3)~7)}。

そこで、このような河口部地層の条件のもとで有効な海水しゃ断対策として提案されたものにいわゆるウォーターカーテン工法がある⁸⁾。この工法は、池内の淡水水位が海水位より少し高い状態あるいはそれ以下に低下した状態の場合に、浸透層内に海水および池内の淡水よりも高いポテンシャルを持つ淡水を暗きよ、溝あるいは井戸などから注入して、淡塩境界面を形成させ、そうしなければ池内に向かって浸透してくる海水を排除しようとするものである。これについて、著者の1人はこれまでに

もかなりの機会をとらえてのべている^{9)~15)}。しかし、これらの結果を広く具体的な実際の設計に役立てるためには、その総合的なとりまとめと発表が必要であった。取り扱っている水理現象は必然的に淡、塩水の二層よりなる成層地下密度流である。これについて、一般的にあらわれる領域の境界条件や解析手法などについてはまえにものべている¹⁶⁾ので、ここでは本報の内容に直接関連することがらだけについて補足、整理し、本旨に入ることとした。

2. 解析の理論

取り扱っている流れの場は、図-1に示しているようになかなか複雑な境界面を有する2次元定常の地下密度流の場である。ここでは海水は静止しており、淡水はDarcyの法則に従って流動しており、淡塩境界面における拡散はなく、地盤は等方性であるとしている。

もとより海岸地下水流においては、(1)潮汐の干満や波浪などに起因して、その現象が厳密には定常にはたもたれない。(2)実際には3次元現象であり、その境界条件や地層が複雑である。(3)淡塩境界面における拡散機構がまだ充分には解明されていない¹⁷⁾。(4)簡単には模型実験が行えない。……などの理由で解析的取り扱いがやっかいであり、問題の厳密な解明はきわめて困難であ

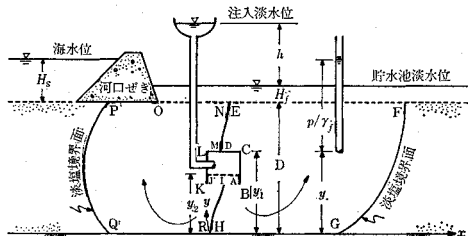


図-1 淡水注入機構 (xy 平面)

* 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 九州産業大学講師 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

**** 正会員 工修 九州産業大学助手 工学部土木工学教室

る。したがって研究の過程においては、きわめて困難な厳密解を追求するだけでなく、実用的価値を失わない範囲で問題を単純化し、その研究結果から複雑多岐な実際の問題について定量的推定をくさせるようにつとめることも有意義なことであると考えられる。ここではこのような考え方のもとに、上述のように問題の単純化を行ったが、その境界条件は依然としてかなり複雑なものである。

さて、本章の冒頭にのべたような前提にたてば、2次元定常の浸透流の解析は、周知のように

$$\phi = kH \dots\dots\dots(1)$$

$$H = \frac{p}{\gamma_f} + y \dots\dots\dots(2)$$

で与えられる速度ポテンシャル ϕ および流れ関数 Ψ に関する Laplace の式の解によらなければならない。ここに k は見かけの透水係数、 p は任意点の圧力、 γ_f は淡水の単位重量である。しかし、地下密度流の場合、一種の自由境界面ともいうべき淡塩境界面はあらかじめ未知であるので、浸透領域は確定していない。したがって ϕ, Ψ について直接解析することは不可能ではないにしても、非常に複雑な試算法によることになり、きわめて困難であると考えられる¹⁹⁾。そこで、かなり複雑な境界条件をもつ場合でも、大気ふれている傾斜面に浸出しているようないわゆる浸出面がその境界に含まれていなければ、 $\phi\Psi$ 平面は、一般に図-2に示すような、注入部の速度ポテンシャル

$$\phi_{AI} = \phi_{IJ} = k(h + H_f + D) \dots\dots\dots(3)$$

流出部の速度ポテンシャル

$$\phi_{EF} = \phi_{ON} = k(H_f + D) \dots\dots\dots(4)$$

の境界の等ポテンシャル線と

$$\Psi_{ABCDE} = QL + QR \dots\dots\dots(5)$$

$$\Psi_{IHGF} = QL \dots\dots\dots(6)$$

$$\Psi_{IRQPO} = QL \dots\dots\dots(7)$$

$$\Psi_{JKLMN} = 0 \dots\dots\dots(8)$$

などの等 Ψ 線（流線）とによってかこまれた長方形またはその集まりになるから、この $\phi\Psi$ 平面内において解析を行うことが、自由表面をもつ通常の浸透流や淡塩境界面を有する地下密度流のような場合には、有利であ

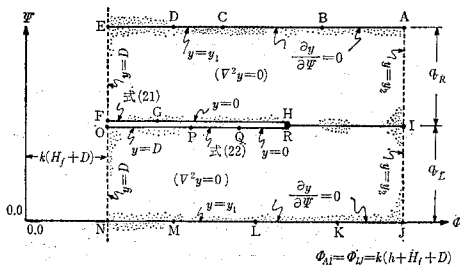


図-2 $\phi\Psi$ 平面

ると推論される^{19), 20)}。

さて、2次元の非同転流においては、周知のように

$$u = -\frac{\partial\phi}{\partial x} = -\frac{\partial\Psi}{\partial y}, v = -\frac{\partial\phi}{\partial y} = \frac{\partial\Psi}{\partial x} \dots\dots\dots(9)$$

なる Cauchy-Riemann の条件と

$$\nabla^2\phi = \frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} = 0, \nabla^2\Psi = \frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Psi}{\partial y^2} = 0 \dots\dots\dots(10)$$

なる Laplace の式が成立する。ここに u および v は、 x および y 方向の流速である。そこでいま、関数行列式

$$J = \begin{vmatrix} \frac{\partial\phi}{\partial x} & \frac{\partial\phi}{\partial y} \\ \frac{\partial\Psi}{\partial x} & \frac{\partial\Psi}{\partial y} \end{vmatrix} = u^2 + v^2 \neq 0 \dots\dots\dots(11)$$

を導入すると、 $J \neq 0$ の場合には、 x および y はともに ϕ と Ψ との関数 $x = x(\phi, \Psi)$ および $y = y(\phi, \Psi)$ の形に解くことができる²¹⁾から、その全微分は

$$dx = \frac{\partial x}{\partial\phi} d\phi + \frac{\partial x}{\partial\Psi} d\Psi \dots\dots\dots(12)$$

$$dy = \frac{\partial y}{\partial\phi} d\phi + \frac{\partial y}{\partial\Psi} d\Psi \dots\dots\dots(13)$$

である。また

$$d\phi = \frac{\partial\phi}{\partial x} dx + \frac{\partial\phi}{\partial y} dy \dots\dots\dots(14)$$

$$d\Psi = \frac{\partial\Psi}{\partial x} dx + \frac{\partial\Psi}{\partial y} dy \dots\dots\dots(15)$$

であるから、式 (14) と式 (15) とを連立させて dx および dy をあらわせば

$$dx = \frac{1}{J} \left(\frac{\partial\Psi}{\partial y} d\phi - \frac{\partial\phi}{\partial y} d\Psi \right) \dots\dots\dots(16)$$

$$dy = \frac{1}{J} \left(-\frac{\partial\Psi}{\partial x} d\phi + \frac{\partial\phi}{\partial x} d\Psi \right) \dots\dots\dots(17)$$

がえられる。そこで、式 (12) と式 (16) および式 (13) と式 (17) とを辺々比較して、式 (9) を考慮すると

$$\frac{u}{J} = -\frac{\partial x}{\partial\phi} = -\frac{\partial y}{\partial\Psi}, \frac{v}{J} = -\frac{\partial y}{\partial\phi} = \frac{\partial x}{\partial\Psi} \dots\dots\dots(18)$$

のようにあらわされ、 x および y の間には ϕ と Ψ とをそれぞれ独立変数とした Cauchy-Riemann の条件が成立し、したがって、 x および y について、それぞれ

$$\nabla^2 x = \frac{\partial^2 x}{\partial\phi^2} + \frac{\partial^2 x}{\partial\Psi^2} = 0, \nabla^2 y = \frac{\partial^2 y}{\partial\phi^2} + \frac{\partial^2 y}{\partial\Psi^2} = 0 \dots\dots\dots(19)$$

なる Laplace の式が成立する。次に、式 (9) ならびに式 (18) の関係を式 (16) および式 (17) に適用すれば

$$dx = \frac{\partial y}{\partial\Psi} d\phi - \frac{\partial y}{\partial\phi} d\Psi, dy = -\frac{\partial x}{\partial\Psi} d\phi + \frac{\partial x}{\partial\phi} d\Psi \dots\dots\dots(20)$$

がえられる。そこで、 $\phi\Psi$ 平面の境界において、 x または y に関する条件が与えられれば、式 (19) を満たす x または y を求めることができ、さらにこれに対応する

y または x は、式 (20) により求めることができる。

図-1 に示している流れの場に対応する $\phi\Psi$ 平面は、図-2 のように長方形化され、その境界条件は図示のようにすべて y によって規定される。なお、ここで淡塩境界面 FG 上および PQ 上における y と ϕ の関係は、式 (2) の p に領域の外側の静止海水の圧力を適用し、さらに、これを式 (1) に適用すれば

$$\left. \begin{aligned} \phi_{FG} &= k\{H_f + (1+\epsilon)D - \epsilon y_{FG}\} \\ y_{FG} &= \frac{1}{\epsilon} \left\{ H_f + (1+\epsilon)D - \frac{\phi_{FG}}{k} \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots (21)$$

および

$$\left. \begin{aligned} \phi_{PQ} &= k\{(1+\epsilon)(H_s + D) - \epsilon y_{PQ}\} \\ y_{PQ} &= \frac{1}{\epsilon} \left\{ (1+\epsilon)(H_s + D) - \frac{\phi_{PQ}}{k} \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots (22)$$

となる。ここに ϵ は海水の単位重量を τ_s として

$$\epsilon = \frac{\tau_s - \tau_f}{\tau_f} \dots\dots (23)$$

で定義される無次元量である。したがって、図-2 の中で $\nabla^2 y = 0$ を満たす y を求めることができ、さらに、これに対応する x は式 (20) より

$\Psi = \text{const.}$ にそって

$$x = x_L + \int_{\phi_L}^{\phi} \frac{\partial y}{\partial \phi} d\phi \dots\dots (24)$$

または

$\phi = \text{const.}$ にそって

$$x = x_L - \int_{\Psi_L}^{\Psi} \frac{\partial y}{\partial \phi} d\Psi \dots\dots (25)$$

のように求められる。ここに x_L はそれぞれの積分の下限における x の値である。

Charmonman は、このような手法により、海水飽和地盤中へ 2 次元溝から淡水を注入した場合の淡塩境界面を簡単な境界条件のもとに算定している²²⁾が、この方法を図-1 に示すようなかなり複雑な実用的境界条件をもつ水理構造物下の地下密度流に適用するには、まだかなりの難点を残している^{23), 24)}。すなわち、 $\phi\Psi$ 平面は図-2 のように長方形化されているとはいっても、 Ψ 方向の広がりや、境界上に示している xy 平面の特異点 $B, C, D, R(H); K, L$ および M における ϕ の値は、あらかじめ与えられていない。そこで、これらの多数の未知量を仮定して、これをもとに $\phi\Psi$ 平面内で $\nabla^2 y = 0$ を満たす y をその境界条件のもとに求め、さらに式 (24) あるいは式 (25) により x を求めても、これからえられる xy 平面は、透水層の厚さ D にくらべて暗きよ幅 \overline{JA} が極端に広いとか、矢板の根入れ長 \overline{JK} と \overline{AB} とが極端に異なるとか、あるいはまた、淡塩境界面がそれを形成させたい位置から大きくずれてえられるとかの困難が生じて、実用的な流れの場にはほど遠いものであることが多い²⁵⁾。したがって、 $\phi\Psi$ 平面が長方形化

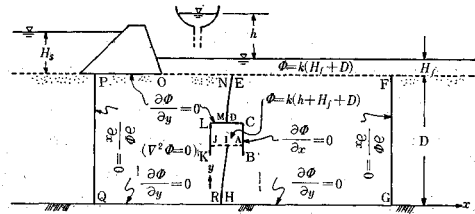


図-3 擬似境界面

されており、解析上有利であるとはいっても、このままではとても実的手法とはいえない。そこで、著者の 1 人はこの点を追求し、この手法を実用的に複雑な境界条件下の地下密度流の解析に適用する場合において生ずる上述のような問題点を、次のような手法により除去した^{26), 27)}。

すなわち、ここに導入する流れの場は、図-3 に示すような、ウォーターカーテンとしてほぼ希望する位置の淡塩境界面 (図-1 中の PQ, FG) を直線あるいは曲線の不浸透固体壁 (図-3 中の PQ, FG) におきかえた擬似的流れの場である。いま、この擬似境界面が与えられ、さらに淡水注入暗きよの大きさ、形状および位置などが与えられれば、与えられた境界条件のもとに $\nabla^2 \phi = 0$ を満たす ϕ を求めることができ、また、式 (9) を式 (15) に適用して

$$d\Psi = -\frac{\partial \phi}{\partial y} dx + \frac{\partial \phi}{\partial x} dy \dots\dots (26)$$

がえられるから、これに対応する Ψ は

$x = \text{const.}$ にそって

$$\Psi = \Psi_L + \int_{y_L}^y \frac{\partial \phi}{\partial x} dy \dots\dots (27)$$

または

$y = \text{const.}$ にそって

$$\Psi = \Psi_L - \int_{x_L}^x \frac{\partial \phi}{\partial y} dx \dots\dots (28)$$

によって求めることができる。また、任意の曲線または傾斜している直線にその場合には、式 (26) をそのまま積分して求めることができる。ここに Ψ_L はそれぞれの積分の下限における Ψ の値である。

さて、このようにして ϕ についてえられた解において点 P と点 Q および点 F と点 G の y の差 $y_P - y_Q = D$ および $y_F - y_G = D$ が同じで、かつ両側に淡塩境界面 PQ と FG が形成される場合には、式 (21) より

$$\phi_G = k(H_f + D + \epsilon D) \dots\dots (29)$$

$$\phi_F = k(H_f + D) \dots\dots (30)$$

式 (22) より

$$\phi_Q = k(1+\epsilon)(H_s + D) \dots\dots (31)$$

$$\phi_P = k\{(1+\epsilon)(H_s + D) - \epsilon D\} \dots\dots (32)$$

がえられるから、この場合の地下密度流の特性ともいう

べき

$$\phi_Q - \phi_P = \phi_G - \phi_F = k\epsilon D \dots \dots \dots (33)$$

が成立しなければならぬ。そこでこの擬似境界面において、暗きよの大きさ、形状および深さ方向あるいは横方向の位置が与えられているとすれば、境界条件はそのままにして、暗きよを水平方向あるいは鉛直方向に移動させ、あらためて ϕ について解き、この場合の特性、式 (33) を満たす ϕ を求め、つづいて ψ を求めなければならない。なお、 $y_P - y_Q \approx y_F - y_G$ の場合にも式 (21) と式 (22) に相当する式から、式 (33) に相当する式がえられるが、ここではこのような場合は取り扱ってはいない。また、このような特性は、のちに示す 図-5 のような、淡塩境界面が片側 PQ だけの場合には消滅してしまう。

このように、左右両側に 2 つの淡塩境界面が形成される場合には、擬似境界面において上述の特性を満たす ϕ および ψ を求める過程にも 3~4 回程度の試行を必要とするが、この過程をへずに直接 $\phi\psi$ 平面によって理想的な流れの場を形成させようとする試行の時間に比べれば、格段にその労力を少なくすることができる。なお、海側に 1 つだけの淡塩境界面を形成させる場合には、この試行は不要になる。

さて、このようにして、擬似境界面において地下密度流の特性を考慮した ϕ および ψ を求めることができたならば、これによって $\phi\psi$ 平面の境界上に示した xy 平面上の数多くの各特異点の ϕ および ψ の近似値を知ることができるから、 $\phi\psi$ 平面の大きさおよび各特異点の位置をほぼ妥当に画定することができ、ほぼ妥当な境界条件が定まる。そこで、この平面内で $\nabla^2 y = 0$ を満たす y を求め、式 (24) あるいは式 (25) によって x を求め、 xy 平面を画けば、これによって定まる暗きよの位置、形状および淡塩境界面の位置は充分満足できるものとなる。このことは理想とするウォーターカーテンを有する流れの場に似た擬似境界面を用いてあらかじめ推定した水理諸量を地下密度流場の $\phi\psi$ 平面の境界条件として与えたことに起因しており、必然の結果である。しかし、このことにより 2 次元の実用的なウォーターカーテンの設計作業の計画が立ち、作業自体も容易で迅速化され、さらにこの種の解法の実用性も充分高められたものとする。

なお、式 (31) および式 (32) の ϕ_Q および ϕ_P の値は、与えられた $k, \epsilon(r_f, r_s), H_s$ および D のもとでは、はじめから既知の値であり、次に、 H_f を設定すれば式 (29) および式 (30) の ϕ_G および ϕ_F もこれに応じて設定される。そうするとこれに対する注入淡水の水頭 h は、あらかじめ設定されている式 (3) の $\phi_{AI} = \phi_{IJ}$ の値より決定される。なお、有効な淡塩境界面形

成のためには、あらかじめ設定された $\phi_{AI} = \phi_{IJ}$ の値について H_f を小さくすると h を大きくする必要があり、したがって、与えられた $h = \text{const.}$ のもとでは式 (3) より定まる H_f は、貯水池の許容最低淡水水位とも定義すべき水位である。

3. 数値解析およびその結果の検討

(1) 水理諸量の無次元化

ここで取り扱う 2 次元ウォーターカーテンの機構は、図-4~7 に示している 4 種類である。なお、取り扱う物理量を

$$X = \frac{x}{D}, \quad Y = \frac{y}{D} \dots \dots \dots (34)$$

$$\phi = \frac{\phi - k(H_f + D)}{kh}, \quad \psi = \frac{\psi}{kh} \dots \dots \dots (35)$$

のように無次元化し、前章でのべた各微分および積分表示の方程式の x を X, y を Y, ϕ を ϕ, ψ を ψ と書きかえても何ら不合理は生じないので、実際の解析においては、上の 2 式によってあらわされる無次元量を用いることにする。そうすると、式 (21) および式 (22) に対応して

$$\phi_{FG} = \epsilon \frac{D}{h} (1 - Y_{FG}), \quad Y_{FG} = 1 - \frac{\phi_{FG}}{(\epsilon D/h)} \dots \dots \dots (36)$$

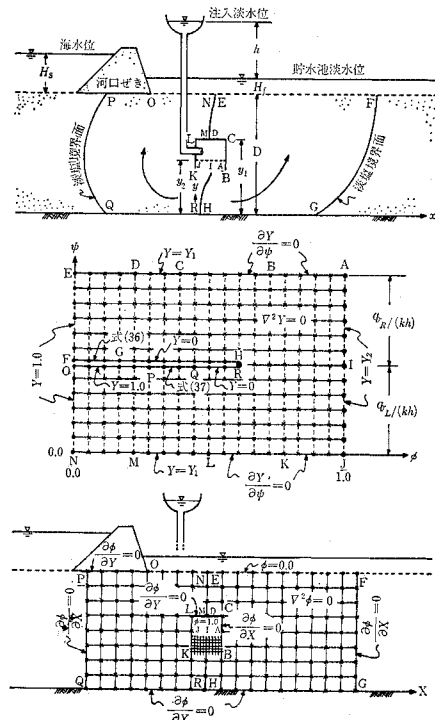


図-4 淡水注入機構

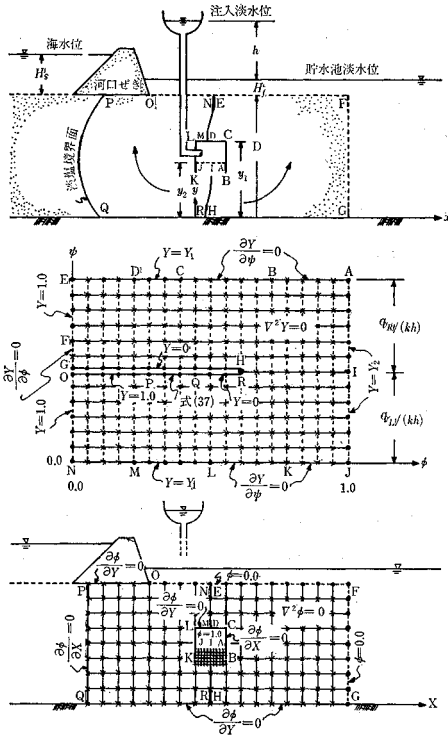


図-5 淡水注入機構

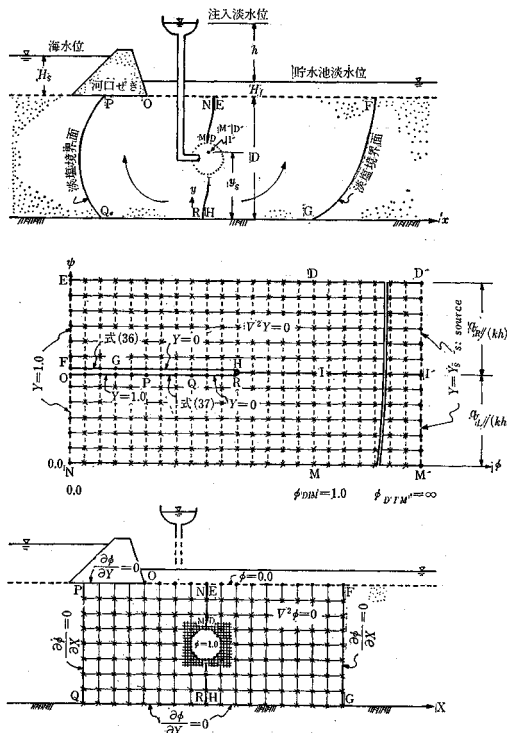


図-6 淡水注入機構

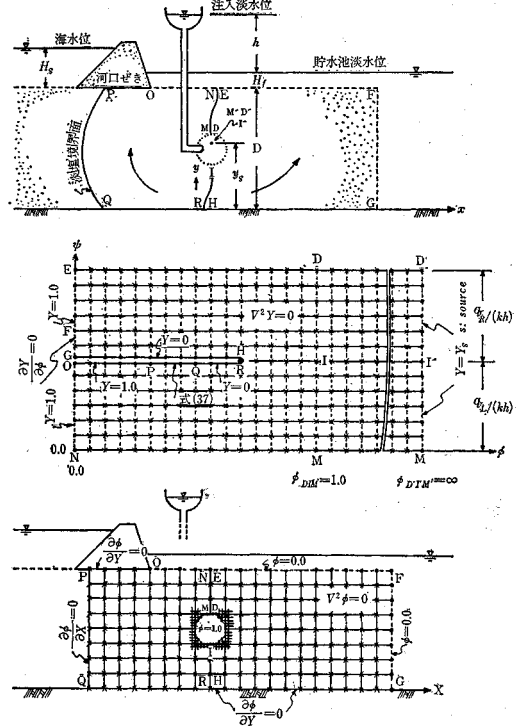


図-7 淡水注入機構

および

$$\left. \begin{aligned} \phi_{PQ} &= (1+\epsilon) \frac{H_s}{h} - \frac{H_f}{h} + \epsilon \frac{D}{h} (1 - Y_{PQ}) \\ Y_{PQ} &= 1 - \frac{\phi_{PQ} - \left\{ (1+\epsilon) \frac{H_s}{h} - \frac{H_f}{h} \right\}}{(\epsilon D/h)} \end{aligned} \right\} \dots (37)$$

がえられる。また、上2式より、式(29)～式(33)に対応して

$$\phi_G = \epsilon D/h \dots (38)$$

$$\phi_F = 0 \dots (39)$$

$$\phi_Q = (1+\epsilon) \frac{H_s}{h} - \frac{H_f}{h} + \epsilon \frac{D}{h} \dots (40)$$

$$\phi_P = (1+\epsilon) \frac{H_s}{h} - \frac{H_f}{h} \dots (41)$$

$$\phi_Q - \phi_P = \phi_G \dots (42)$$

がえられる。なお、周知のことからではあるが、式(34)～式(42)からも明らかなように、透水係数 k の値そのものは、流れの場の幾何学性には何ら影響せず、与えられた透水層において次元をもつ流量や時間などを考慮する場合に影響してくる。

(2) 数値解析における差分方程式

次に、実際の解析は、擬似境界面における ϕ および ψ , $\phi\psi$ 平面における Y および X とも、その境界条件の実用上の複雑さから既知の解析関数などで容易に表現

できる簡単な場合とは違って、いわゆる解析解を求めることが困難であるため、SOR 法により電子計算機を用いて数値的に行っている。そこで、所要の差分方程式ならびに使用したメモリ名称などについて若干の説明を加えておこう。領域内部の任意の点では $\nabla^2\phi=0$ より

$$\phi_{I,J}^m = \frac{\omega}{4} (\phi_{I-1,J}^m + \phi_{I+1,J}^m + \phi_{I,J-1}^m + \phi_{I,J+1}^m) - (\omega-1)\phi_{I,J}^{m-1} \dots\dots\dots(43)$$

また、 $\nabla^2 Y=0$ より

$$Y_{I,J}^m = \frac{\omega}{4} (Y_{I-1,J}^m + Y_{I+1,J}^m + Y_{I,J-1}^m + Y_{I,J+1}^m) - (\omega-1)Y_{I,J}^{m-1} \dots\dots\dots(44)$$

がえられ、境界条件が微分形で与えられる。たとえば図-4 の擬似境界面における FG 上では $\partial\phi/\partial X=0$ に対して

$$\phi_{I,N+1}^m = \phi_{I,N}^m \dots\dots\dots(45)$$

また、同図の $\phi\psi$ 平面における AB 上では $\partial Y/\partial\psi=0$ に対して

$$Y_{1,J}^m = Y_{2,J}^m \dots\dots\dots(46)$$

のような式がえられる。ここに I は、擬似境界面においては Y , $\phi\psi$ 平面においては ψ のそれぞれ下方向の格子点の番号を、 J は、それぞれの平面における X または ϕ の右方向の格子点の番号を示しており、 $\phi_{I,J}^m$ または $Y_{I,J}^m$ は演算回数 m 回目の格子点 (I, J) の ϕ または Y を示している。また ω は加速定数であり、ここでは過去の研究結果²⁸⁾を用いて最適な ω として推定した $\omega_{opt}=1.6$ を使用した。なお、 N および M は擬似境界面の X および Y 方向の分割の総数であり、また N_{RL} は $\phi\psi$ 平面の ϕ 方向のそれである。また ψ 方向のそれは 図-4 の $\phi\psi$ 平面における境界 EF 間を M_R のように、その ON 間を M_L のようにあらわしている。また、流線 $IHGF$ より上部の格子点における $Y_{I,J}$ は $Y_{R,I,J}$ で、流線 $IRQPO$ より下部のそれは $Y_{L,I,J}$ であらわしている。そこで、 $|\phi_{I,J}^m - \phi_{I,J}^{m-1}|$ および $|Y_{I,J}^m - Y_{I,J}^{m-1}|$ の最大値が許容の値（ここでは $ALLOW=10^{-5}$ としている）以下、すなわち

$$|\phi_{I,J}^m - \phi_{I,J}^{m-1}|_{max} \leq ALLOW \dots\dots\dots(47)$$

$$|Y_{I,J}^m - Y_{I,J}^{m-1}|_{max} \leq ALLOW \dots\dots\dots(48)$$

になるまで演算を繰り返すことになる。また、図-4 のような擬似境界面または $\phi\psi$ 平面の境界上に・印で示した点の $\phi_{I,J}$ または $Y_{I,J}$ は、それぞれの境界条件によって与えられており、上述の演算から除外できる点である。さらに、このようにして求められた $\phi_{I,J}$ または $Y_{I,J}$ により ψ の境界値または $X_{I,J}$ を求めるには、式 (27) あるいは式 (28)、または、式 (24) あるいは式 (25) により、次のような数値積分を行うことになる。すなわち、たとえば 図-4 の擬似境界面における FO 上の $I=1$ にあって $\psi_{FO}=(q_R+q_L)/(kh)$ を

$$\psi_{FO} = \sum_{J=J_0}^N \{(\phi_{2,J} - \phi_{1,J}) + (\phi_{2,J+1} - \phi_{1,J+1})\} / 2 \dots\dots\dots(49)$$

のようにして求め、また、内部において $\psi_{FC}=q_R/(kh)$ を 図-8 に示しているような $I=I_C+4$ にあって

$$\psi_{FC} = \sum_{J=J_c}^N \{(\phi_{I_C+5,J} - \phi_{I_C+3,J}) + (\phi_{I_C+5,J+1} - \phi_{I_C+3,J+1})\} / 4 \dots\dots\dots(50)$$

のように求める。

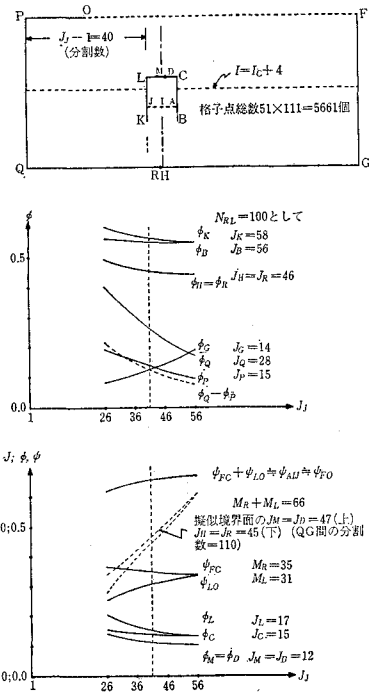


図-8 設定擬似境界面とその水理諸量による $\phi\psi$ 平面の画定値

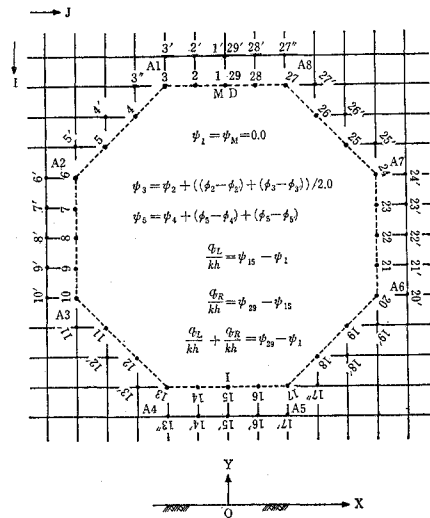
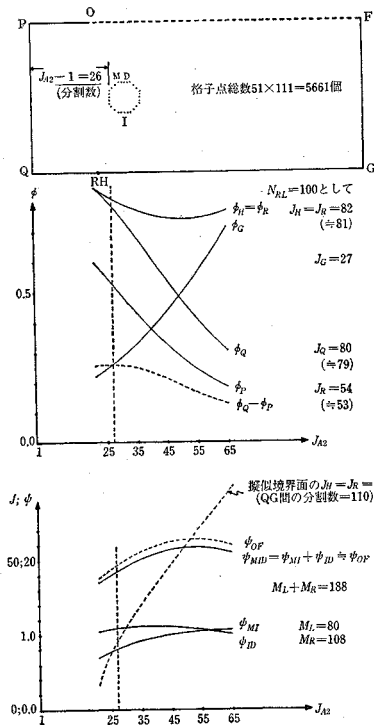


図-9 擬似円形淡水注入暗きよ



図一10 設定擬似境界面とその水理諸量による $\phi\psi$ 平面の画定値

また、図一6 に示している擬似境界面における8角形暗きよ周辺より流出する流量 $\psi_{MID} = (q_R + q_L) / (kh)$ を算定する場合に、その傾斜境界については式(26)をそのまま積分し、たとえば、図一9 に示している点5においては点1から点4までの $\psi = \psi_4$ に点4と点5の間の 4ψ を加える。

$$\psi_5 = \psi_4 + (\phi_5 - \phi_4) + (\phi_5 - \phi_5) \dots (51)$$

のような算定式によった。図一9 に示している8角形周辺上とその外廻りの格子点に・印を付した点は、このような算定に必要な点である。このようにして、暗きよ周辺の点1, 2, ..., 29 における $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_{29}$ の値を知れば、図一6 の $\phi\psi$ 平面内の等ポテンシャル線 MID 上にこれより左側の領域の境界条件として与えられそうな ψ と Y との関係が、点 D, I および点 M を含んで都合 29 個えられ、これが線 MID 上に点在するから、これらの点と点の間の ψ 方向の他の格子点については内挿を行うものとするれば、その境界条件がほぼ妥当に決定できると考えられる。しかし、実際にこのようにして $\phi\psi$ 平面において $\nabla^2 Y = 0$ を解き、さらに X を求めて画かれた XY 平面における暗きよの形状は、擬似境界面における8角形のそれからかなりかけ離れた形となり、その理由としては上述の内挿に基づく誤差が影響しているものと考えられた。そこで、このようにして線 MID 上の ψ と Y の関係を充分妥当に知るためには、

当初の擬似境界面の分割をさらに細分化する必要があると考えられた。しかし、擬似境界面の全体的な大きさと暗きよ断面の比を一定のまま、格子点を密にすれば電子計算機のメモリーや計算時間が増加し、実際にはかなりの困難が生じる。そこで擬似境界面における8角形暗きよ周辺の格子点の個数はこの29程度とし、式(51)のようにして求めた $\psi_{15} - \psi_1$ および $\psi_{29} - \psi_{15}$ を $\phi\psi$ 平面の $q_L / (kh)$ および $q_R / (kh)$ として与えても流量としてはさほどの誤差は生じておらず、その状態で、図一6 に示しているように、 $\phi\psi$ 平面を理論的には $\phi D' I' M' = \infty$ にまで拡大すれば、 $\phi\psi$ 平面上の点 D', I' および点 M' の3点に対応する xy 平面上の点は、暗きよ内に示しているように1点に集まり、いわゆる湧点になる。この湧点の高さ Y_0 を正しく与えることができれば、図一6 に示しているように、 $\phi\psi$ 平面の境界条件は定まるが、数値解析においては、もとより $\phi D' I' M'$ の値を無限大にすることはできなく、実際には電子計算機のメモリーや計算時間の制限などのため、暗きよ周辺の $\phi_{DIM} = 1.0$ の数~十倍程度の値しか与えられない。しかし、 $\phi\psi$ 平面の右側への拡大がこの程度であっても、 $\phi\psi$ 平面の線 $M' I' D'$ にそう $Y \sim X$ の関係はきわめて微小な円形状の周辺上にプロットされ、いわゆる湧点とみなしてよい程度のもとなるから、実用的には充分満足できる数値解がえられる。のちに、図一15 または 図一16 に示している数値解析例における $\phi\psi$ 平面においては、 ϕ 方向にほぼ 500 個、 ψ 方向にほぼ 100 個の分割を行い、ほぼ 50 000 個程度の電子計算機のメモリーを使用し、これに対する計算時間にはほぼ 8 分程度を要しているが、これをそれぞれの方向に 1/4 程度まで縮小すれば、メモリー所要量は 1/16 程度まで縮小でき、電子計算機の内蔵メモリーはほぼ 4 000 個もあれば事足り、さらに計算に要する時間も短縮され、小型の電子計算機でも充分処理できると考える。なおまた、湧点の高さ Y_0 はあらかじめ与えられてはいないので、適当に何種か仮定して、これに基づく演算を行ってもよいが、擬似境界面の暗きよの中心点などを参考としてあらかじめ仮定された Y_0 に基づいて、 $\phi\psi$ 平面全域について $(m-1)$ 回目の演算を終わった段階で

$$\left(\sum_{l=1}^{M_R+1} YR_{l,N_{RL}}^{\psi} + \sum_{l=1}^{M_L+1} YL_{l,N_{RL}}^{\psi} \right) / (M_R + M_L + 2)$$

の値を求め、これを次の $m (= 2, 3, \dots)$ 回目の Y_0 として与えなおしてゆけば、 Y_0 も一定値に収束してゆき、演算の過程で自動的にほぼ妥当な湧点の高さを決定することができ、便利であることを確かめている。なお、真の湧点の高さは、上のようにしてえられた Y_0 とは若干異なるであろうことは容易に推察されるが、この差は、理論的な興味は別としても、実際的には問題とする量に

は当たらないと考える。なおまた、このようにしてえられた XY 平面の暗きよは、必然のこととはいえ、擬似境界面の8角形に対応して、図-15 および 図-16 に示しているように、ほとんど正円形状にえられる。

次に、各 $Y_{I,J}$ に対応する $X_{I,J}$ の算定にあたり、図-4 に示しているような逆U字型の暗きよについては、 $\phi\psi$ 平面における境界 JI 上および境界 IA 上の等ポテンシャル線にそって、その幅 $XR_{1,N_{RL}+1}$ を

$$XL_{I,N_{RL}+1} = \sum_{I=M_L}^J (YL_{I,N_{RL}+1} - YL_{I,N_{RL}}) \dots\dots\dots(52)$$

$$XR_{I,N_{RL}+1} = XL_{I,N_{RL}+1} + \sum_{I=M_R}^J (YR_{I,N_{RL}+1} - YR_{I,N_{RL}}) \dots\dots\dots(53)$$

のようにしてあらかじめ求めておき、あるいはまた、図-6 に示している円形状の暗きよについては、その形状を

$$XL_{I,J_{MID}} = \sum_{I=M_L}^J (YL_{I,J_{MID}} - YL_{I,J_{MID}-1}) \dots\dots\dots(54)$$

$$XR_{I,J_{MID}} = \sum_{I=2}^J (YR_{I,J_{MID}} - YR_{I,J_{MID}-1}) \dots\dots\dots(55)$$

のようにしてあらかじめ求めておく。次に、任意の $X_{I,J}$ については

$$XL_{I,J} = XL_{I,N_{RL}+1} + \sum_{J=N_{RL}}^J (YL_{I-1,J} - YL_{I+1,J})/2 \dots\dots\dots(56)$$

$$XR_{I,J} = XR_{I,N_{RL}+1} + \sum_{J=N_{RL}}^J (YR_{I-1,J} - YR_{I+1,J})/2 \dots\dots\dots(57)$$

のような数値積分を行い、すべての $Y_{I,J}$ に対応する $X_{I,J}$ を求める。なお、上の2つの数値積分における積分の下限として () 内に示した J の値は円形状暗きよ、そうでないものは逆U字型暗きよの場合に用い、このような表現は以後も同じである。また、図-4 に示しているような逆U字型の暗きよ周辺の境界にそう流線については

$$XL_{M_L+1,J} = XL_{M_L+1,N_{RL}+1} + \sum_{J=N_{RL}}^J (YL_{M_L,J} - YL_{M_L+1,J}) \dots\dots\dots(58)$$

$$XR_{I,J} = XR_{I,N_{RL}+1} + \sum_{J=N_{RL}}^J (YR_{I,J} - YR_{I+1,J}) \dots\dots\dots(59)$$

のように求め、また、各淡水注入機構における ψ_{IRQPO} 、 ψ_{IHGF} (または ψ_{IHG}) の流線については

$$XL_{1,J} = XL_{1,N_{RL}+1} + \sum_{J=N_{RL}}^J (YL_{1,J} - YL_{2,J}) \dots\dots\dots(60)$$

$$XR_{M_R+1,J} = XR_{M_R+1,N_{RL}+1} + \sum_{J=N_{RL}}^J (YR_{M_R,J} - YR_{M_R+1,J}) \dots\dots\dots(61)$$

のようにして求める。このように境界の流線算定に特別の考慮を払った理由は、たとえば、図-11 の算定結果に示している本来1つの点に合致しなければならないよどみ点 R および点 H 、あるいは点 M および点 D 近傍に特に大きく生ずる数値計算上の誤差が他に波及することを防ぐためであり、そうしなくて、たとえば 図-4 に示している $\phi\psi$ 平面の流線 IH 上で

$$XR_{M_R+1,J} = XL_{1,J} = XL_{1,N_{RL}+1}$$

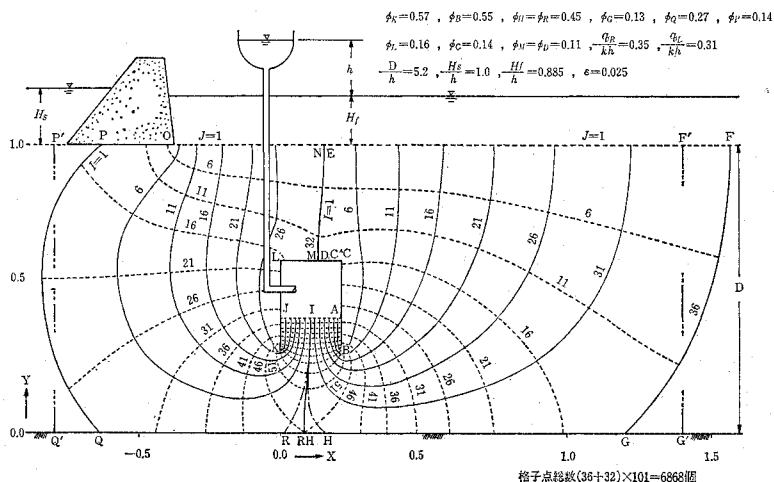


図-11 画定 $\phi\psi$ 平面による XY 平面の決定図

$$+ \sum_{J=N_{RL}}^J (YR_{M,R,J} - YL_{2,J})/2$$

のような式を用いると、点 R と点 H はもちろん1つの点に合致するが、図-11 に示している流線末端の点 0 が、左より2番目に描いている $I=6$ の流線末端より少し右側にプロットされるなどの不合理を生じる場合が出現したためである。このような理由から本来1つの点に合致するはずの点 R と点 H あるいは点 M と点 D は、数値計算上は電子計算機のメモリーや計算時間などの制限のためにさけることのできない数値計算上の誤差によって2つの点にわかれ、若干離れてえられるが、実際の処理としては、図-11 に示しているようにその中間に図上で修正移点し、これらの点より下流の流線については算定されたままを用いれば、ほぼ満足できるものと認められよう。また、点 M および点 D の離れはき

わめてわずかであり、図示してはいない。なお、これらの数値計算上の誤差は、現状よりも電子計算機のメモリーが増加し、計算時間の短縮化が期待できるならば、将来さらに小さくできる性格のものである。

(3) $\phi\psi$ 平面の画定と XY 平面の決定

さて、図-8 および 図-10 は、すでにのべたような計算方法により、それぞれの擬似境界面内において、暗きよの大きさおよび深さ方向の位置を一定として、暗きよを水平方向に3~4種類程度動かしながら、与えられた境界条件のもとにそのつど、 $\nabla^2\phi=0$ を解き、さらに ψ を求め、これによってその過程で式(42)の密度流的特性を満たす暗きよ位置の決定を行った状態を示したものである。すなわち、たとえば 図-8 において右上り

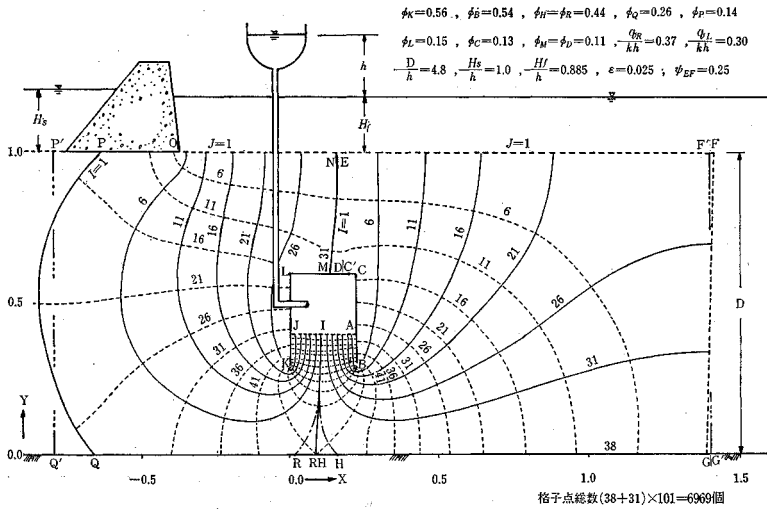


図-12 画定 $\phi\psi$ 平面による XY 平面の決定図

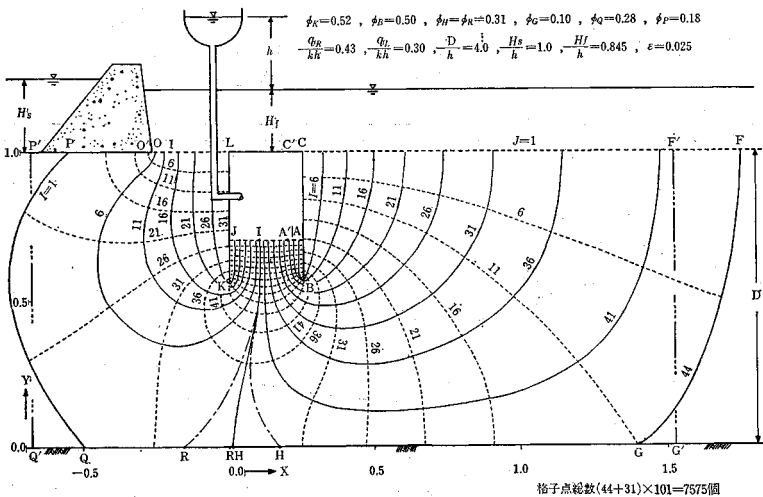


図-13 画定 $\phi\psi$ 平面による XY 平面の決定図

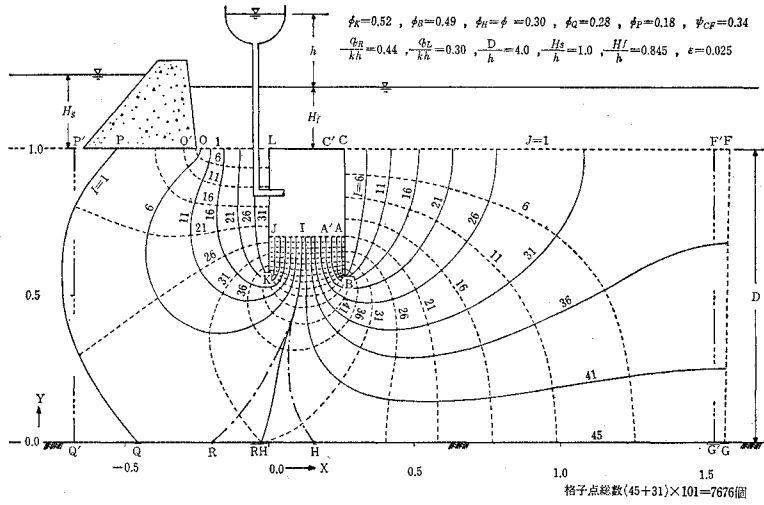


図-14 画定 $\phi\psi$ 平面による XY 平面の決定図

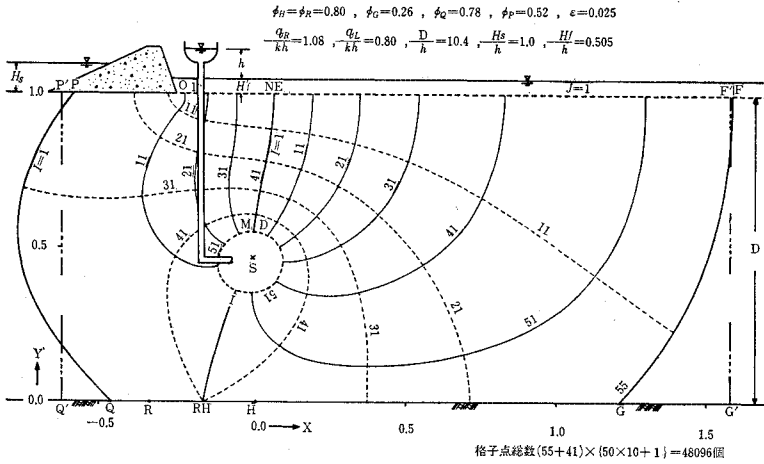


図-15 画定 $\phi\psi$ 平面による XY 平面の決定図

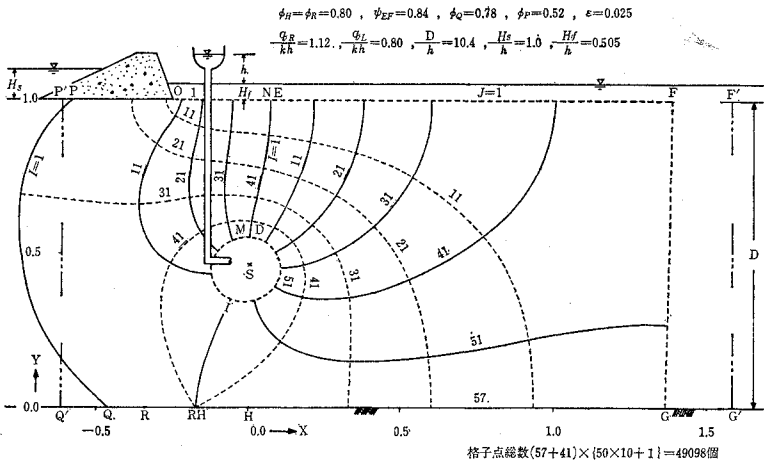


図-16 画定 $\phi\psi$ 平面による XY 平面の決定図

の ϕ_G 曲線と右下がりの $\phi_Q-\phi_P$ 曲線の交点の J_J に暗きよの点 J を一致させた状態は式 (42) の密度流的特点を満たしているので、この交点の J_J 上で、 $\phi\psi$ 平面の画定を行うための水理諸量の推定を行っている。なお、この擬似境界面における暗きよ位置の変動に伴う水理諸量の変動の状態は、その物理性から充分妥当であると考える。

このようにして画定できた $\phi\psi$ 平面上において、与えられた境界条件のもとに $\nabla^2 Y=0$ を解き、さらにこれをもとに X を求め、図-11 に示しているような XY 平面の決定を行っている。なお、図-11 には擬似境界面上の各特異点のいくらかをそれぞれの記号にダッシュを付して示しているが、それらは前述のようにして決定された XY 平面のそれらと充分満足できる程度に合致しているといえよう。

(4) 淡塩境界面の位置の検討

次に、図-12 は、図-11 に示した右側の淡塩境界面 FG に相当する位置を等ポテンシャル ($\phi_{FG}=0.0$) の流出部とした場合である。これに対応する擬似境界面の大きさ暗きよの形状および位置は、図-11 に対応するそれとまったく同じにしている。その理由は、このような状態でえられる淡塩境界面 PQ の位置は、密度流の性格として、図-11 にえられた PQ の位置よりも少なくとも右側にえられることが予期され、その定量性を知ることが実際には重要であるからである。すなわち、実際の河口貯水池において、このようなウォーターカーテンを設定する場合について考えてみると、淡塩境界面においては少なくとも絶えず界面拡散が行われているわけであり、このことを考えると図-11 において、左側の淡塩境界面についてはこれに見合った海水の供給があり、明瞭な成層が時間的に継続するものと考えられる。しかしこれに対して右側の淡塩境界面については、淡水注入開始とともに海水が右側に排除されほぼ定常状態に達したのちにおける界面拡散については左側と同様な海水の供給があるとは考えられなく、拡散に伴う非常に緩慢な現象ではあるとしても、右側の淡塩境界面は絶えず河川上流に移動してゆき、長期にわたっては消滅してしまうものと考えられる。そこで図-12 では、暗きよより有限な距離にある河川上流の線 FG を池内の淡水と等しい等ポテンシャル面としているが、実際の貯水池ではこれより右側も砂層であり、したがって、この面は少なくとも池内の淡水よりも高いポテンシャル分布面になっているわけであるから、これを池内の淡水と等しい等ポテンシャル面として求められる淡塩境界面 PQ の位置は、実際の現地ではこれが最も右側によった極限の位置に近い状態であると考えられる。すなわち、実際に

海水の池内への侵入をしゃ断するウォーターカーテン PQ の位置は、図-11 に示している位置と図-12 に示しているそれとの中間に形成されるものと考えられる。図-11 と図-12 に示している PQ の位置の差は、この場合の境界条件に左右されて明瞭にはつかみがないが、図-13 と図-14 とに示しているそれについてはこのことが多少なりと認められ、論理の妥当性を量的に示しているものとする。なお、図-13 と図-14 は、それぞれ、図-4 と図-5 に示す流れの場の境界 $LM(D)C$ を池底に一致させ、同様に解析してえた結果である。

(5) 暗きよ形状の相違による注入効果の検討

次に、図-15 において、 $J=51$ の等ポテンシャル ($\phi_{MID}=1.0$) 線は、ほとんど正円形状であるから、円形多孔管からの淡水注入の設計も充分可能である。なお、この円形状暗きよの位置および大きさは、あらかじめ擬似境界面において取り扱った八角暗きよのそれらとあまりかわってはおらず、実際の計画にあたりきわめて都合よくえられている。しかし、図-11 に示しているものと同じ程度の淡塩境界面を形成させるのにその無次元淡水注入量 $q_R/(kh)$ または $q_L/(kh)$ は、図-15 の場合の方が図-11 の場合よりもかなり大きい。また、このことは透水係数 k 、砂層厚 D を同じとして、それぞれの場合の h を用い、次元をもつ注入量 q_R または q_L になおして考えても同様である。したがって円形暗きよの上部、点 MD 近傍からほぼ直上に流出してしまう注入淡水は、淡塩境界面の形成にはほとんど寄与していないと考えられる。さらに淡水注入による噴砂の危険性について考えてみると、そのクリーブ比から逆U字型あるいは溝(図-13 のような場合には注入部を溝と考えても同じである)からの注入による方が円形多孔管暗きよによるよりも安全に設計できることは明らかである。したがって、逆U字型の暗きよや溝と円形暗きよの施工の難易にはさほど差がないと考えられる以上、実用的には、逆U字型の暗きよや溝からの淡水注入による方が円形多孔管暗きよからのそれによるよりもはるかに得策であると結論できる。なお、これら3種の注入機構において、その維持、管理および補修などの面においては、溝型が最も容易であると考えられるが、たとえ断続的にでも、このような構造物が河川を横断することについては治水面などからもいろいろな困難が発生するであろう。したがって、ここでは図-13 に示しているように、暗きよの天端を池底面に一致させた逆U字型暗きよを考えた。なお、これらのことについては、さらに検討すべきことが多々残されていると考えるが、ここでは先に進むことにする。

(6) 塩水排除の速度

さて、淡水注入開始の時刻からほとんど定常状態に達するまでの現象の遷移過程における塩水排除の速度については、次のようにして求めてもほぼ妥当な値がえられるという報告がある²⁹⁾。すなわち、塩水と淡水との粘性の差および密度の差がともに小さく、したがって砂層の淡水に対する透水係数と塩水に対する透水係数とを等しいと見なせることから、定常状態の流れの場と遷移過程のそれとはほとんど差がないだろうとの考えのもとに、現象が定常状態に達したのちのある任意時刻0に淡水注入部を流出した淡水の分子がその後の時刻 t に到達する座標群を連ねれば、これが遷移過程における塩水排除の領域にほぼ等しいだろうという推論である。もとより、このような遷移過程の現象を理論的に正しく吟味するには運動の式に非定常項を導入した解析によるべきであるが、それはかなり難解なようである。そこで上述の推論の妥当性はほぼ実験的にも検証されているので、ここでの定常状態の数値解 $Y=Y(\phi, \psi)$ および $X=X(\phi, \psi)$ を用いて、上述の t を求める式をたててみよう。すなわち、式 (11), (18), (34) および式 (35) により、任意地点の流線にそって砂層の空隙率 λ を考慮した水分子の実際の速度を求め、これを dl/dt であらわせば

$$T = \int \sqrt{(\partial X / \partial \phi)^2 + (\partial Y / \partial \phi)^2} \cdot dL \dots\dots\dots (62)$$

ここに

$$T = \frac{t}{\{D^2 / (k/\lambda) \cdot h\}}, L = \frac{l}{D} \dots\dots\dots (63)$$

l : 淡水注入部からの流線に沿う距離

k : 見かけの透水係数 h : 注入淡水位

D : 砂層の厚さ

がえられる。したがって、前に求められた、 $\phi_{I,J}, \psi_{I,J}$

に対応する $X_{I,J}$ および $Y_{I,J}$ を用い、各流線に沿って式 (62) の積分を数値的に求めれば、式 (63) に示す無次元時間 $T_{I,J}$ を求めることができる。そこで式 (63) により与えられた λ, k, h, D および l についての $t_{I,J}$ を求めることができ、これによって等 t 線を描けば遷移過程における任意時刻の塩水排除の領域をほぼ妥当に知ることができよう。なお、 ϕ 方向に等しく分割してある $\phi\psi$ 平面を用いるときは、 $\Delta\phi = \text{const.} (= 1.0/N_{RL})$ であり、また $\Delta L = \sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2}$ であるから、式 (62) は、各 $I = \text{const.}$ に沿ってそれぞれ求めればよく

$$T_{I,J} = \frac{1}{\Delta\phi} \sum_{J=N_{RL}}^{J=MID-1} \{ (X_{I,J+1} - X_{I,J})^2 + (Y_{I,J+1} - Y_{I,J})^2 \} \dots\dots\dots (64)$$

となる。また、 $\partial X / \partial \phi = 0$ あるいは $\partial Y / \partial \phi = 0$ であれば $\Delta L = \Delta Y, \Delta X = 0$ あるいは $\Delta L = \Delta X, \Delta Y = 0$ となるから、式 (64) は、流線始点から終点まで鉛直または水平の場合

鉛直流線上で

$$T_{I,J} = \frac{1}{\Delta\phi} \sum_{J=N_{RL}}^{J=MID-1} (Y_{I,J+1} - Y_{I,J})^2 \dots\dots\dots (65)$$

水平流線上で

$$T_{I,J} = \frac{1}{\Delta\phi} \sum_{J=N_{RL}}^{J=MID-1} (X_{I,J+1} - X_{I,J})^2 \dots\dots\dots (66)$$

と書きなおすことができ、 $T_{I,J}$ の算定は容易である。なお、 $T_{I,N_{RL}+1} = 0$ および $T_{I,MID} = 0$ である。図-17 および 図-18 には、このようにして算定した $T_{I,J}$ を用い、それぞれ3本ずつの等 T 線を例示している。このような等 T 線を描いておけば、粘性の差および密度の差がともに小さく、砂層の淡水に対する透水係数と塩水に対する透水係数とを等しいと見なせる二層流場の遷移過程における現象を、ほぼ妥当に説明できる

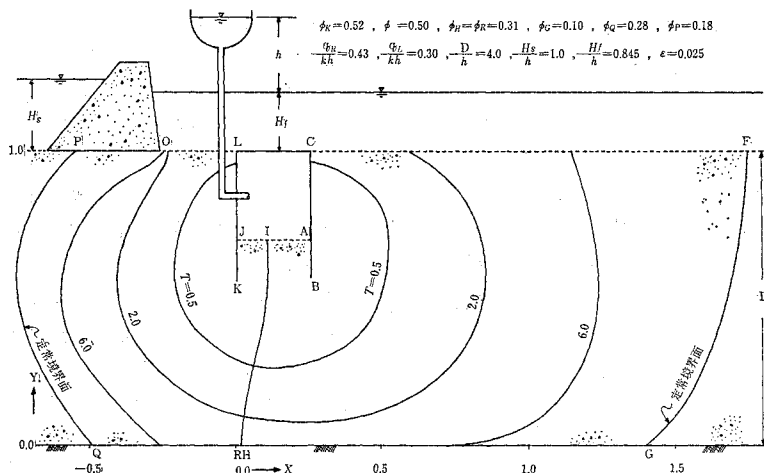


図-17 定常状態における等 T 線図 (内側は淡水注入開始後の T 時間内塩水排除領域にほぼ一致する)

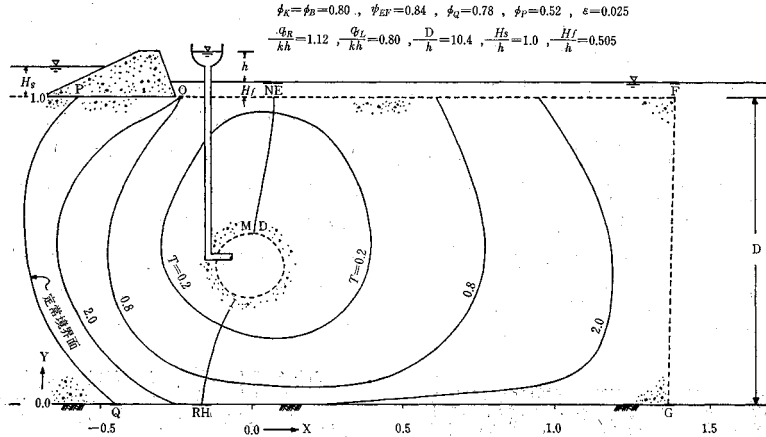


図-18 定常状態における等 T 線図 (内側は淡水注入開始後の T 時間内塩水排除領域にほぼ一致する)

が、これらの差がいずれか一方でも比較的大きな二層流場では、この等 T 線による遷移過程の現象の説明は困難になり、この等 T 線は、現象がほぼ定常状態におちついたのちにおいて、ある任意時刻 0 に注入部を出発した淡水の分子が、その後の時刻 T に流達する座標群を連ねた等流達時間曲線としてしか意味をもたなくなるだろうことが容易に推論される。

(7) 数値解析のフローチャート

次に、図-4 の流れの場の解析のために作成した電子計算機プログラムのフローチャートの概要を 図-19 および 図-20 に示している。なお、図-5~7 に示した流れの場の解析にも同様なプログラムを作成したが、これらについては 図-4 の場合についてのそれを若干書きかえるだけで使用できるので、ここでは割愛する。

4. 砂模型実験による検討

数値解析結果の妥当性を砂模型実験によって検証するため、その対象として、図-13 および 図-16 に示している解析結果をえらんだ。用いた水槽は縦 1 m, 横 2 m, 奥行き 0.4 m の両面有機ガラス張りのものであり、またその砂は透水係数 $k \approx 0.35$ cm/sec の相馬砂である。また、塩水には、水道水に食塩を溶かし、その比重を 1.025 とし、さらにこれに過マンガン酸カリウムを溶かし、赤紫色に着色したものをを用い、注入淡水には水道水をそのまま使用した。なお、水槽内の砂の充填にあたっては、上述のようにしてつくった塩水を水槽内に適量いれておき、これに砂をパラパラ落とし入れながらよくかきまぜ、気泡が砂層内に残らないように注意した。また、厚さ 5 cm 程度ごとにかかるくつきかため、その空隙率は通常の $\lambda \approx 0.4$ とみなせる程度とした。

このようにして、図-13 および 図-16 に示している

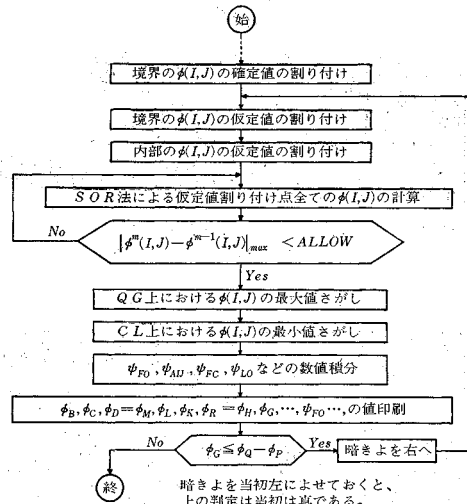


図-19 擬似境界面における解析フローチャートの概略図

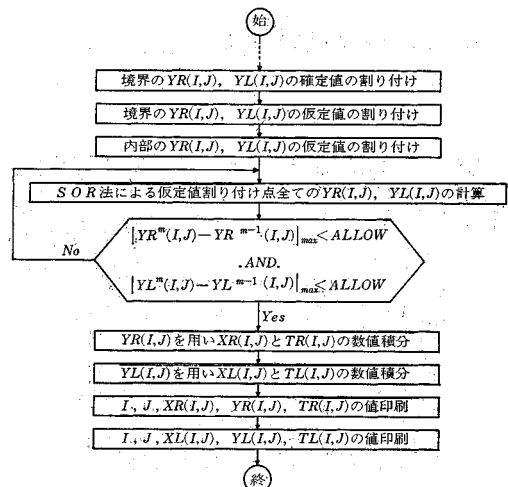
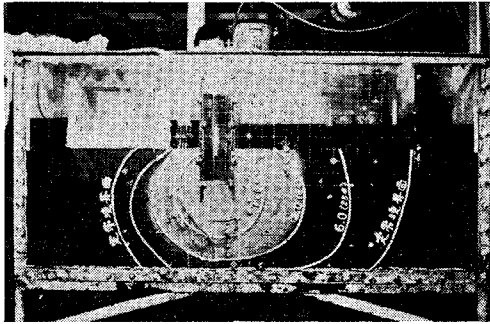


図-20 $\phi\psi$ 平面における解析フローチャートの概略図

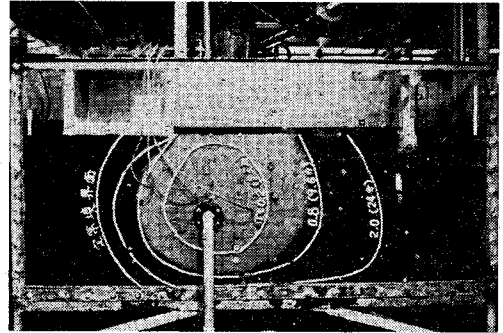
H_s , H_f および h を設定して、淡水注入を開始し、淡水が塩水を徐々に排除してゆく遷移過程をへて、ほとんど定常状態に達するまでの現象をつぶさに観測した。その模様を写真—1—6 に示している。

まず、写真—1 と写真—4 により、それぞれの遷移過程における塩水排除領域は、淡水部と塩水部の色別で、白の実線で示された算定等 T 線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 および写真—5 で明らかなように、淡水部と塩水部の色別で鮮明に認められ、白の実

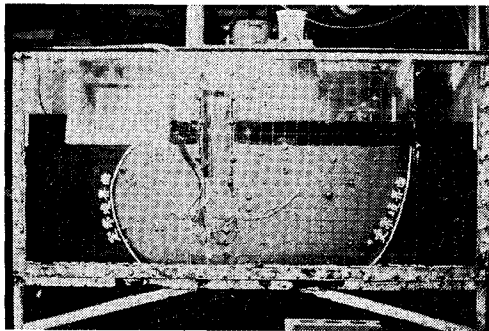
線で示した理論境界面にほぼ一致している。また、これらの写真には、 $J=36$ および $J=31$ の等ポテンシャル線上に設置した3本のピエゾメーターを示しており、その内部の薄く着色された水柱はほぼ妥当な高さまで上がっている。さらにまた、写真—3 および写真—6 には、右側の $I=31$ と左側の $I=11$ の理論流線上に注入した着色液の流れを示しており、これらは白線で画いている理論流線とほぼ一致している。また、図—13 および図—16 に示している $q_R/(kh)$ および $q_L/(kh)$ の値と実測流量とを用いて逆算された透水係数の値は、いずれも



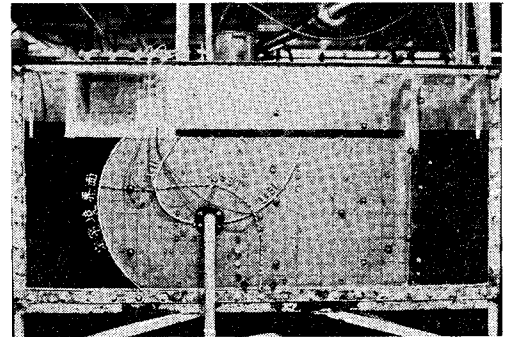
写真—1 遷移過程 (砂層内の塩水排除開始後ほぼ8分
 $\lambda \approx 0.4$, $k \approx 0.35$ cm/s, $h = 12.5$ cm, $D = 50$ cm)



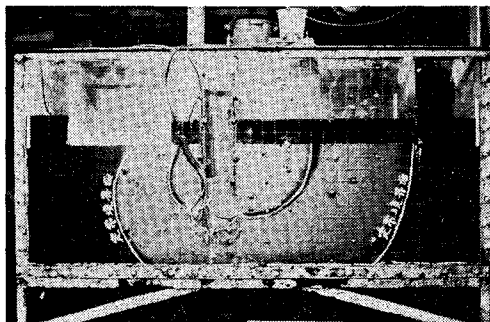
写真—4 遷移過程 (砂層内の塩水排除開始後ほぼ10分
 $\lambda \approx 0.4$, $k \approx 0.35$ cm/sec, $h = 5.77$ cm, $D = 60$ cm)



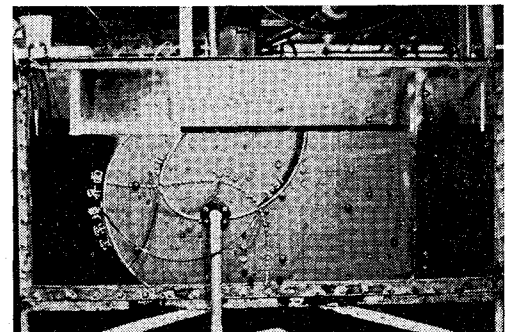
写真—2 ほぼ定常状態 (砂層内の塩水排除開始後
ほぼ2時間)



写真—5 ほぼ定常状態 (砂層内の塩水排除開始後
ほぼ1時間)



写真—3 流線観測 (砂層内の塩水排除開始後
ほぼ3時間)



写真—6 流線観測 (砂層内の塩水排除開始後
ほぼ2時間)

$k \approx 0.35 \text{ cm/sec}$ 程度となり、これはこのほかのいろいろな実験によってえられた k の値とほとんど変らなく、また、この値を前述の等 T 線上に適用して式 (63) によって求められた等 t 線の内側が、その時刻の塩水排除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、ほぼ満足できる程度に検証できたものと考えられる。

5. 実物規模での検討

これまで述べてきた現象ならびに水理諸量を実物規模のウォーターカーテンに拡大して検討してみよう。まず流れの場の形状について幾何学的には相似に拡大すればよく、また、時間的には $\phi\psi$ 平面の各格子点すなわち XY 平面の流線と等ポテンシャル線の各交点において、無次元時間 $T_{I,J}$ が求められているから、これに与えられた λ, k, h および D を適用して、式 (63) より $t_{I,J}$ を求め、これに基づく等 t 線の広がりなどで遷移過程のおおよその塩水排除領域や、ほぼ定常状態の淡塩境界面が形成されるまでの、おおよその時間などを知ることができる。

また、模型と実物とにおいて、式 (63) で与えられる無次元量は等しくなければならないから、模型の諸量に m 、実物の諸量に p の添字を付し、幾何学的縮尺を n 、時間的縮尺を β とすれば、これらの関係は

$$n = \frac{D_m}{D_p} = \frac{h_m}{h_p}, \quad \beta = \frac{t_m}{t_p} = \frac{k_p}{k_m} \cdot n \dots\dots\dots (67)$$

となり、また、 $q/(kh)$ も模型と実物とで等しくなければならないので単位幅当りの淡水注入量の縮尺 α は

$$\alpha = \frac{q_m}{q_p} = \frac{k_m}{k_p} \cdot n \dots\dots\dots (68)$$

となる。なお、これらの相似律は必然的に定常浸透流における Darcy の法則からえられる相似律に一致する³⁰⁾。いま、 $k_m/k_p=10$ 、 $n=1/100$ とすれば $t_p=1000 \cdot t_m$ となり、模型における1時間の現象は、実物においてはほぼ42日間の現象となり、かなりの期間を要することになる。したがって、淡水注入の初期においては、注入水頭を設定計画のそれより高くし、これにより現象の促進をうながし、塩水排除が適当に進んだところで計画の高さまで下げ、ほぼ定常状態とみなされるウォーターカーテンをなるべくはやくつくってしまう必要も実際には生じえよう。また $k_m/k_p=10$ 、 $n=1/100$ とすれば $q_p=10 \cdot q_m$ となるから $q_m=0.3 \text{ l/sec/m}$ とすると $q_p=3 \text{ l/sec/m}$ となり、ウォーターカーテン1000 m 当りに $3 \text{ m}^3/\text{sec}$ の淡水を注入することになる。

なお、上述の相似律は、模型と実物との水理諸量を対比するうえでは便利であるが、 T および $q/(kh)$ など

の理論値がわかっている本研究のような場合には、これらに模型あるいは実物の λ, k, h および D などを直接適用して、それぞれの水理諸量を求める方が便利なことも多い。

次に、本研究ではこれまで、地盤はすべて均質等方性として取り扱ってきたが、 x 方向の透水係数を k_x 、 y 方向のそれを k_y として有効透水係数 $k_o = \sqrt{k_x \cdot k_y}$ を導入し、さらにいままでの x に $\sqrt{k_x/k_y}$ を乗じたものを新しい x に変換すれば、均質異方性地盤における同様な現象にも本研究の理論および結果は拡張適用することができる³¹⁾。

6. 結 論

前章までに詳述してきたことがらを要約して結論とした。

(1) 河口貯水池への塩水侵入防止対策の適不適は、貯水池の成否に大きく影響し、本報で詳述したウォーターカーテン工法は、多くの河口部でみられるような透水層の厚さが厚い場合に広く有効であると考えられる。

(2) 地下密度流の水理現象の厳密な解明にはかなりの難点があるが、現象を2次元化し、安全側に定常化し、さらに透水層を均質化して考えれば、本報において述べた理論的手法により、かなり複雑で実用的な境界条件下の水理解析も可能である。

(3) 解析の手法としては、まず、ウォーターカーテンとしてほぼ理想とする位置に淡塩境界面にかわる不浸透の固体壁を考えた擬似境界面を導入し、その中で $\nabla^2 \phi = 0$ を密度流の特性を考慮して解き、 Ψ を求め、特異点の ϕ および Ψ などを知れば、これを $\phi\Psi$ 平面に適用して、この中で $\nabla^2 y = 0$ を解き、 x を求め、理想とする xy 平面を求めることができる。このことの確認は、この手法の実用化にもつながり、これにより2次元ウォーターカーテンの具体的設計が可能となった。

(4) 淡水注入暗きょの形状としては、逆U字型の暗きょあるいは溝型の注入部から注入する方が、円形多孔管の周壁から注入するよりも、注入量が少なく、浸透流による噴砂現象発生の危険性なども少なく、はるかに得策である。

(5) ウォーターカーテンを施工する場合、貯水池淡水水位については、許容最低淡水水位を設定すべきである。

(6) 淡塩境界面を海側の河口ぞき下部地盤と貯水池内地盤の両側に形成させる場合と、海側のみに形成させる場合とにおいて、海側のその位置は、後者の場合に若干貯水池側に移動するが、ほとんど差はない。したがってウォーターカーテン設計にあたってはいずれを前提としてもよい。

(7) 解析結果は、室内における砂模型実験の結果とよく一致し、理論の妥当性は検証された。

(8) 実物規模においては、淡水注入の初期において注入水頭を設定計画水頭よりも上げ、塩水排除の現象を促進させる必要もありうる。

(9) 本報の理論および結果は、均質等方性地盤についてのものであるが、有効透水係数の導入および x 座標の変換により、他の2次元浸透流の場合と同様に、均質異方性地盤についても容易に拡張適用できる。

なお、本報で取り扱った淡水注入機構においては、注入淡水はウォーターカーテンを形成したのち再び貯水池内に環流されているから、淡水の海への流出はない。

7. あとがき

以上、本報では2次元ウォーターカーテンの設計に必要な事項を検討した。現象の厳密な解析にあたり残されている難問は多々あるとしても、本報により2次元ウォーターカーテンの設計指針はある程度まとめえたものとする。今後は、3次元のウォーターカーテンについて、実用的な境界条件を導入し、同様な研究を進め、その設計指針を確立しなければならないと考えている。

なお、本研究は、著者の一人が、昭和46年3月、九州大学に申請し合格した博士論文の内容の一部について、その後若干の検討を加えて、あらためてとりまとめたものである。九州大学教授上田年比古工博、同、椿東一郎工博ならびに元埼玉大学教授嶋 祐之工博(故人)らの方々には当時ご懇切なるお世話をいただいた。また、本研究には文部省科学研究費試験研究(1)(昭和47年~48年度研究代表者埼玉大学 嶋 祐之、昭和49年度研究代表者埼玉大学 佐藤邦明)の交付をうけた。また、本研究の内容に関連するテーマを卒業論文のテーマに選んでもらった何人かの九州産業大学卒業生には、資料整理や実験などの面で多くの労をかけた。

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深甚の謝意を表してむすびとする次第である。

参 考 文 献

- 1) 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。
- 2) 嶋 祐之・上田年比古・崎山正常：成層密度流の界面現象，第4編，地下密度流，土木学会論文報告集，第243号，pp. 114~116，1975年11月。
- 3) 千葉県開発部工業用水課：河口貯水池堤防の浸透流について，pp. 12~18，昭和37年。
- 4) 東京大学工学部河川研究室：滲透水防止工法に関する基礎的研究，pp. 5~19，昭和40年。

- 5) 永岡乙哉・宮沢忠雄：モデル河口湖実験，土木学会誌，第50巻，第8号，pp. 10~15，1965年。
- 6) 山村和也：河口貯水池堤防の塩水浸透防止工法に関する研究，土木研究所報告，129号の3，pp. 85~126，昭和41年。
- 7) 福岡県・北九州市：遠賀川河口堰模型実験報告書，pp. 22~34，昭和43年。
- 8) 前掲1)に同じ。
- 9) 崎山正常：淡塩二層地盤よりの二次元的淡水取水の一方方法，土木学会論文報告集，第180号，pp. 27~38，昭和45年8月。
- 10) 崎山正常：淡塩二層地下水流における塩水排除に関する水理学的研究，九州大学学位論文，pp. 8~141，昭和46年3月。
- 11) 崎山正常・青柳茂敏：淡水注入による河口貯水池の塩水シャ断，土木学会第26回年次学術講演会講演概要集，第2部，pp. 465~466，昭和46年10月。
- 12) 崎山正常・青柳茂敏：河口貯水池塩水シャ断の一方方法，土木学会第27回年次学術講演会講演概要集，第2部，pp. 663~664，昭和47年10月。
- 13) 崎山正常：河口貯水池における海水排除に伴う定常地下密度流の解析について，土木学会第28回年次学術講演会講演概要集，第2部，pp. 380~381，昭和48年10月。
- 14) 嶋 祐之・上田年比古・崎山正常：成層密度流の界面現象に関する水工学的研究最終報告書，第4章，地下密度流，文部省科学研究費試験研究(1)，昭和47年~48年度，研究代表者 嶋 祐之，pp. 49~71，昭和49年3月。
- 15) 崎山正常：河口貯水池への海水の侵入防止について，文部省科学研究費試験研究(1)，昭和49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. 71~76，昭和50年3月。
- 16) 前掲2)に同じ。
- 17) 前掲2)に同じ。
- 18) 前掲10)に同じ。
- 19) 前掲10)に同じ。
- 20) Charmonman, S.: Coastal parallel canals with intermediate drains, Proc. of A.S.C.E., No. HY 1, Vol. 93, pp. 13~28, Jan., 1967.
- 21) 矢野健太郎：微分方程式通論，東海書房，pp. 10~16，昭和27年。
- 22) 前掲20)に同じ。
- 23) 前掲2)に同じ。
- 24) 前掲10)に同じ。
- 25) 崎山正常：海水飽和地盤内部の暗きょからの淡水浸透(第二報)，土木学会第25回年次学術講演会講演概要集，第2部，pp. 403~406，昭和45年11月。
- 26) 前掲10)に同じ。
- 27) 前掲2)に同じ。
- 28) 崎山正常：浸透流による噴砂現象(第一報)，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。
- 29) 上田年比古・杉尾 哲：暗きょからの淡水注入による淡塩境界面の解析，土木学会論文報告集，第225号，pp. 43~52，1974年5月。
- 30) 永井荘七郎：水理学，コロナ社，pp. 487~488，昭和40年8月，10版。
- 31) 土木学会：土木工学ハンドブック上巻，技報堂，pp. 482~483，昭和49年11月。

(1977.5.10・受付)