

地下塩水汲み上げによる淡塩水境界面の低下

DROP OF INTERFACE DUE TO UNDERGROUND SALT WATER DRAINAGE

崎山 正常*・細川 土佐男**・阿部 孝行***

By Musatsune SAKIYAMA, Tosao HOSOKAWA and Takayuki ABE

1. ま え が き

海岸付近の透水性地盤中では、上層に淡水をのせて下層に塩水が存在している¹⁾。そこで、上層の淡水位が淡水の利用、流出あるいは蒸発などによって低下すると、いわゆる Ghyben-Herzberg の法則によって、淡塩水の境界面が上昇する¹⁾。この淡塩水境界面がある限度、たとえば河口貯水池底面、より上に上がってくると、淡水の取水に支障をきたすようになり²⁾、また、農耕地においてはいわゆる塩害発生の原因ともなると考えられる³⁾。

本報では、これらの対策として、塩水が存在している透水性地層に 図-1~2 に示すような暗渠を設け、これより塩水を汲み上げ排水することによって生ずる塩水のポテンシャル低下を利用して、淡塩境界面を地盤中の安全な深さまで低下させる工法を提案し、これになるべく実用的な境界条件を導入して解析し、その結果を砂モデル実験によって検討した。なお、この工法を現場に使用する場合には、淡塩境界面の低下に見合う淡水を地盤中へ補給しなければならないが、これには、次のような方策が考えられる。すなわち、海岸付近の淡水池においては、豊水時や常時の余水を池内へとどめおき、また、地表が淡水池ではなく、普通の透水層である場合には、自然の降雨をなるべく地中に涵養させ、上述の補給にあてることができる。また、最近、地下ダムによる地下水の貯水もさかんに考えられてきているが、これを海岸付近の地盤において考える場合には、在来の淡塩境界面が地盤の浅部に存在するよりも、これを人為的に深部に引き下げておけば、その分だけ地下淡水の貯水容量を増加させることができるという効果も期待できる。本工法の実用化については、今後、上述のような場所で、塩水侵入防止対策としての止水矢板工法、ウォーターカーテン工

法あるいは難透水層化工法などととも、その有効性の検討を試みる計画である。なお、著者の一人、崎山が、このような技術的提案をするに至るまでの過程においては、ウエルポイント工法などいわゆる地下水位低下工法⁴⁾の先駆的技術に負うところが大きい。

2. 解 析

(1) 流れの場とその境界条件

解析の対象は、図-1~2 のそれぞれ上部に示しているような y 軸を対称軸とする 2 次元定常の流れの場であ

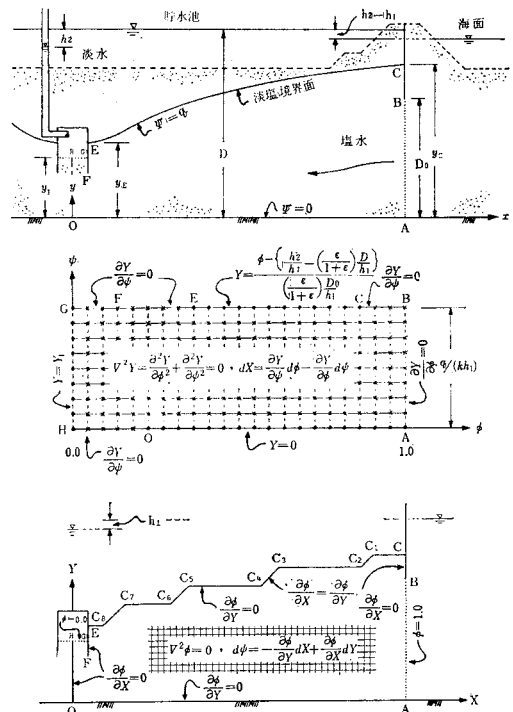


図-1 逆 U 字型暗渠による塩水汲み上げ

* 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 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

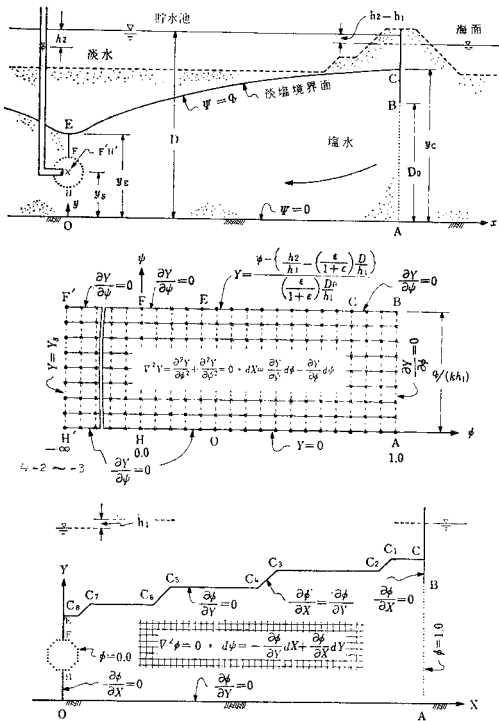


図-2 円形暗渠による塩水汲み上げ

る。ここでは、淡水は静止しており、AB面は、静止していると仮定する海面と同じポテンシャルをもち、暗渠に向う塩水の流れは Darcy の法則に従い、淡塩境界面においては淡水側からの圧力と塩水側からの圧力が釣り合い、かつ両水は完全な成層にあるという仮定に立っており、拡散および淡水の連行現象は無視できるとしている。また、地盤は等方性であるとしている。

図-1~2 の流れの場の境界条件は、それぞれの中央部に示している $\phi\psi$ 平面に記入しているように、かなり複雑であるため、その解析は数値解法による。また、それぞれの下部に示しているような擬似 XY 平面の導入が実用的に有用であるという原理についてはすでに詳述している⁹⁾。なお、ここでの擬似 XY 平面の作り方については、のちに 3.(2) で具体的にのべている。したがってここでは、これらの流れの場に特有な地下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

$$X = x/D_0, Y = y/D_0 \dots\dots\dots (1)$$

のような無次元化をほどこし、速度ポテンシャル

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

と、流れ関数 ψ について

$$\phi = \frac{\phi - k(D - h_2)}{kh_1}, \psi = \frac{\psi}{kh_1} \dots\dots\dots (3)$$

なる無次元化を行う。ここに、 k は透水係数、 p は任意

点の圧力、 r_s は塩水の単位重量、 h_1 は海面と暗渠内塩水頭との差、および、 h_2 は淡水面と暗渠内塩水頭との差である。また、淡水の単位重量を r_f として

$$\varepsilon = (r_s - r_f) / r_f \dots\dots\dots (4)$$

を定義する。そうすると、淡塩境界面 (EC) においては $p_{EC} = r_f(D - Y_{EC})$ であるから、式 (1)~(3) を用いて

$$\left. \begin{aligned} \phi_{EC} &= \frac{h_2}{h_1} - \left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} \right) \frac{D_0}{h_1} \left(\frac{D}{D_0} - Y_{EC} \right) \\ Y_{EC} &= \frac{\phi_{EC} - \left\{ \frac{h_2}{h_1} - \left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} \right) \frac{D}{h_1} \right\}}{\left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} \right) \frac{D_0}{h_1}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

がえられる。したがって、特異点 C および E において

$$\phi_C = \frac{h_2}{h_1} - \left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} \right) \frac{D_0}{h_1} \left(\frac{D}{D_0} - Y_C \right) \dots\dots (6)$$

および

$$\phi_E = \frac{h_2}{h_1} - \left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} \right) \frac{D_0}{h_1} \left(\frac{D}{D_0} - Y_E \right) \dots\dots (7)$$

がえられ、この 2 式の辺々の差をとれば

$$\frac{h_1}{D_0} = \frac{\left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} \right) (Y_C - Y_E)}{\phi_C - \phi_E} \dots\dots\dots (8)$$

比をとれば

$$\frac{h_2}{D_0} = \frac{\left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} \right) \left\{ \phi_C \left(\frac{D}{D_0} - Y_E \right) - \phi_E \left(\frac{D}{D_0} - Y_C \right) \right\}}{\phi_C - \phi_E} \dots\dots\dots (9)$$

がえられる。

そこでいま、流れの場に対する外的な自然条件として

$$C_s = \frac{D}{D_0} - \left(\frac{h_2}{D_0} - \frac{h_1}{D_0} \right) \dots\dots\dots (10)$$

なる海水位が与えられれば、式 (8) および式 (9) より

$$\left. \begin{aligned} \frac{D}{D_0} &= (1 + \varepsilon) \left[C_s + \left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} \right) \left\{ Y_E \left(\frac{1 - \phi_C}{\phi_C - \phi_E} \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - Y_C \left(\frac{1 - \phi_E}{\phi_C - \phi_E} \right) \right\} \right] \dots\dots\dots (11) \end{aligned} \right\}$$

がえられる。

すなわち、与えられた暗渠の形状および大きさ、 Y_E 、 Y_C 、 X_{ABC} のもとにのちに述べる妥当な擬似 XY 平面を解析し、 ϕ_E および ϕ_C の値を知れば、式 (8) により海水位と暗渠内水頭との差 h_1/D_0 が算定され、式 (10) の C_s の値が与えられれば、式 (11) により貯水池淡水位 D/D_0 が算定される。そこでこの D/D_0 は、淡塩境界面を所定の深さより少なくとも深く押し下げておくための許容最低淡水位とでも定義すべき水量である。ついで式 (9) より貯水池淡水位と暗渠内塩水頭との差 h_2/D_0 が算定され、したがって h_2/h_1 、 D/h_1 および D_0/h_1 が算定される。

Y の式を用いて、 a_0 および a_m に Fourier の余弦係数⁷⁾ を適用すれば

$$a_0 = \frac{1}{\left\{1 - \phi_E + \left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}\right) \frac{y_1}{h_1}\right\}} \left[\left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}\right) \frac{y_1}{h_1} \int_0^{\phi_E} d\phi + \int_{\phi_E}^1 \left\{ \phi - \phi_E + \left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}\right) \frac{y_1}{h_1} \right\} d\phi \right] \\ = \frac{\frac{1}{2}(1 - \phi_E)^2 + \left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}\right) \frac{y_1}{h_1}}{1 - \phi_E + \left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}\right) \frac{y_1}{h_1}} \dots\dots\dots(23)$$

$$a_m = \frac{2}{\left\{1 - \phi_E + \left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}\right) \frac{y_1}{h_1}\right\}} \times \left[\left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}\right) \frac{y_1}{h_1} \int_0^{\phi_E} \cos(m\pi\phi) d\phi + \int_{\phi_E}^1 \left\{ \phi - \phi_E + \left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}\right) \frac{y_1}{h_1} \right\} \cos(m\pi\phi) d\phi \right] \\ = - \frac{2 \left(\frac{1}{m\pi}\right)^2 \{ \cos(m\pi\phi_E) - (-1)^m \}}{1 - \phi_E + \left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}\right) \frac{y_1}{h_1}} \dots\dots\dots(24)$$

がえられる。したがって、式 (20) および式 (21) より

$$B_0 = \frac{a_0}{\lim_{m \rightarrow 0} \sinh\left(m\pi \frac{q}{kh_1}\right)} \dots\dots\dots(25)$$

$$B_m - B_{-m} = \frac{a_m}{\sinh\left(m\pi \frac{q}{kh_1}\right)} \dots\dots\dots(26)$$

となり、これらを式 (19) の展開式に適用する過程で

$$\lim_{m \rightarrow 0} \frac{\sinh(m\pi\phi)}{\sinh\left(m\pi \frac{q}{kh_1}\right)} = \frac{\phi}{\left(\frac{q}{kh_1}\right)} \dots\dots\dots(27)$$

に留意すれば

$$Y = \frac{1}{\left\{1 - \phi_E + \left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}\right) \frac{y_1}{h_1}\right\}} \times \left[\left\{ \frac{1}{2}(1 - \phi_E)^2 + \left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}\right) \frac{y_1}{h_1} \right\} \frac{\phi}{\left(\frac{q}{kh_1}\right)} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \frac{\cos(m\pi\phi_E) - (-1)^m}{m^2} \right\} \times \frac{\sinh(m\pi\phi)}{\sinh\left(m\pi \frac{q}{kh_1}\right)} \cos(m\pi\phi) \right] \dots\dots\dots(28)$$

がえられ、さらにこれに対応する X は、 $dX = (\partial Y / \partial \phi) \cdot d\phi - (\partial Y / \partial \phi) d\phi$ なる全微分を、各 ϕ について ϕ 方向に適用すれば

$$X = \int \frac{\partial Y}{\partial \phi} d\phi \dots\dots\dots(29)$$

により

$$X = \frac{1}{\left\{1 - \phi_E + \left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}\right) \frac{y_1}{h_1}\right\}}$$

$$\times \left[\left\{ \frac{1}{2}(1 - \phi_E)^2 + \left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}\right) \frac{y_1}{h_1} \right\} \frac{\phi}{\left(\frac{q}{kh_1}\right)} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \frac{\cos(m\pi\phi_E) - (-1)^m}{m^2} \right\} \times \frac{\cosh(m\pi\phi)}{\sinh\left(m\pi \frac{q}{kh_1}\right)} \sin(m\pi\phi) \right] \dots\dots\dots(30)$$

となる。そこで上式に $\phi=1$ で $X=X_{AC}$ を適用すると

$$\frac{q}{kh_1} = \frac{\left\{ \frac{1}{2}(1 - \phi_E)^2 + \left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}\right) \frac{y_1}{h_1} \right\}}{\left\{1 - \phi_E + \left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}\right) \frac{y_1}{h_1}\right\}} \cdot \frac{1}{X_{AC}} \dots\dots\dots(31)$$

がえられ、さらに式 (1) および式 (15) より

$$Y_E = \frac{y_1}{D_0} = \frac{\left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}\right) \frac{y_1}{h_1}}{1 - \phi_E + \left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}\right) \frac{y_1}{h_1}} \dots\dots\dots(32)$$

であるから、これを式 (31) に適用すれば

$$\frac{q}{kh_1} = \frac{(1 - \phi_E) \left\{ 1 + \left(\frac{1 + \phi_E}{1 - \phi_E}\right) Y_E \right\}}{2 X_{AC}} \dots\dots\dots(33)$$

となり、やや簡単な表現となる。したがって、式 (12) により ϕ_E が規定され、 Y_E および X_{AC} が与えられれば式 (33) により $q/(kh_1)$ が算定され、また、 ϕ_E, Y_E および $q/(kh_1)$ を与えてこれに対応する X_{AC} が算定される。次にこれらの値を式 (30) および式 (28) に適用すれば、任意の (ϕ, ψ) に対応する (X, Y) が求められる。

3. 数値計算の例

(1) 厳密解と数値解との比較

前章において導いた厳密解に対して、a) の場合として、 $\varepsilon=0.025, \phi_E=0.5, Y_E=0.3$ を与えれば式 (32) により $y_1/h_1 \doteq 8.786$ となり、次に $q/(kh_1)=0.5$ を与えれば式 (31) あるいは式 (33) より $X_{AC}=0.95$ となる。同様にして、b) は、 $\varepsilon=0.025, \phi_E=0.0, Y_E=0.3, y_1/h_1 \doteq 17.572; q/(kh_1)=0.5, X_{AC}=1.30$, c) は、 $\varepsilon=0.025, \phi_E=0.1, Y_E=0.3, y_1/h_1 \doteq 15.814; q/(kh_1)=0.5, X_{AC}=1.23$ の場合である。

そこで、これらの値を前述の X および Y の式に適用し、与えられた (ϕ, ψ) に対応する (X, Y) を小数点以下第 4 位程度 (m の最大値 $\doteq 7 \sim 200$) まで正しく求めて流線網を描けば、図-4 がえられる。なお、この図中の各水位は、式 (10) の表現を用いた海水位 C_s の値がいずれも 1.20 と与えられた場合について示されている。 ϕ_E の値によってかなり様相の変わった流れの場が

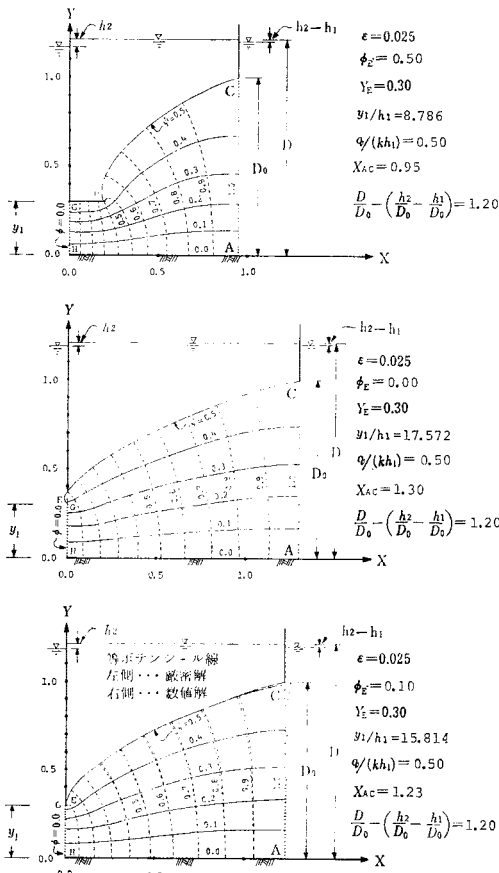


図-4 厳密解と数値解

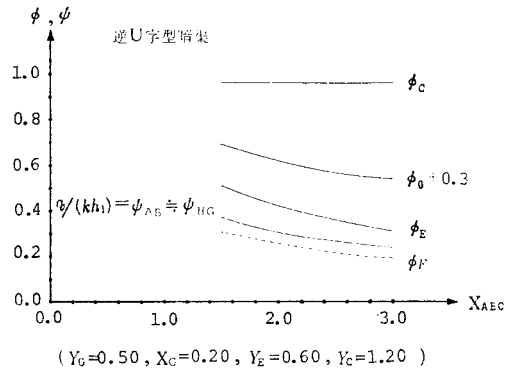
えられるが、若干の実用性を最下部に描いた c) の場合に求める。

そこで、c) の場合については、別に SOR 法による数値解をも求め、前述の厳密解と比較して、妥当な $\phi\psi$ 平面の分割数などを検討し、これらのことがらを 図-1~2 の各中央部に示している実用的な流れの場に対する $\phi\psi$ 平面の分割数などに適用した。ここでは、流入部 AC と流出部 GH の ϕ の差 1.0 を $N=100$ 等分、これに対応する、 $\phi_{GFEC} - \phi_{HA} = q/(kh_1) = 0.5$ を $M=50$ 等分程度に分割すれば、図-4 の下部に示しているように、厳密解とほとんど変わらないような満足できる数値解がえられることを確かめている。

(2) 複雑な流れの場の数値解

さて、図-1~2 に示した実用的な流れの場に対して 2.(1) で述べた手法によりえられた数値解の例について述べる。

まず、図-5 の上部に示した結果は、逆U字型暗渠による塩水汲み上げの流れの場に対応する妥当な擬似 XY 平面の数値解析結果であり、下部に示したものは円形暗



($Y_C=0.50, X_C=0.20, Y_E=0.60, Y_C=1.20$)

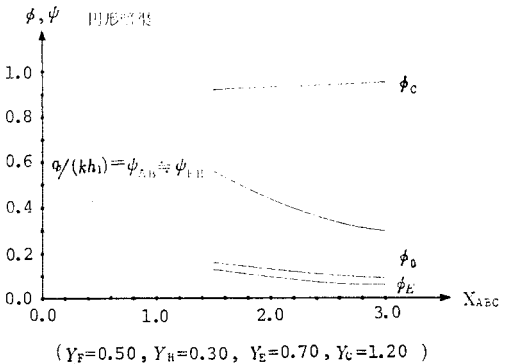


図-5 X_{ABC} の変化に伴う水理諸量の変化

渠によるものである。なお、この擬似 XY 平面の格子点分割数については、これと似かよった被圧流 (confined flow) の場の厳密解と数値解との比較を行った既往の研究⁸⁾を参考としている。また、擬似円形 (8 角形) 暗渠周辺上や折線 $E C_6 C_7 \dots C_1 C$ 上の数箇所に与えたなめの直線境界は、その位置の格子の対角線にそわせている。なお、実際には曲線である淡塩境界線 EC を擬似 XY 平面ではたとえば折線 $EC_6 C_7 \dots C_1 C$ で擬している。ところでこの折線の経路は、与えられた点 E と点 C の途中に淡塩境界線とみなされるような滑らかな曲線を第 1 近似のそれとして経験的に仮定し、これになるべく沿うように設定すれば、通常はほぼ妥当な結果がえられる。しかしその前提としては擬似 XY 平面の数値解による ϕ_{EC} (折線上の X 座標にそって連続的に変化する) と式 (5) の第 1 式で算定される ϕ_{EC} (折線上の X 座標にそって折線的に変化する) とが、折線境界上の全域においてほぼ等しくなければならないということが式 (5) の成立過程、すなわち、実際の淡塩境界線 EC 上では静止淡水圧と浸透塩水圧とが等しくなければならないという条件、から要求される。したがって、上記 2 種の ϕ_{EC} が折線境界の全域でほぼ等しいとみなしえない場合には、当初、第 1 近似のそれとして経験的に仮定した淡塩境界線 EC が不適当であったことになり、この場合には、

上述の第1近似の数値解による ϕ_{EC} を式(5)の第2式に適用して算定される Y_{EC} を目安として第2近似の淡塩境界線ECを仮定しなおし、同様な試行を繰り返す必要がある。しかし、本報では、後に示す具体例でも明らかなように、第1近似のそれで充分満足できる結果がえられている。さて、いまの場合、このようにして、たとえばAB上を50等分とし、他の鉛直および水平境界の分割数は、これに対する長さの比の倍数にとっている。このようにしてえられた水理諸量は、たとえば、与えられた暗渠の形状および深さのもとで X_{ABC} を大きくすると $q/(kh_1)$ が小さくなるというように、その物理的定性を満たしており、数値的にも妥当なものであることが、これらを利用してえられる最終的なXY平面の状態から確かめられる。すなわち、妥当な擬似XY平面は、その流れの領域が実際のXY平面と似せてあることから、その解析によってえられる浸透流量や、点C、Eおよび点0のポテンシャルは、実際のXY平面におけるこれらの値と

ほとんど等しいという物理的性質を有しており、したがってこれらの値を実際のXY平面に対応する $\phi\psi$ 平面へ境界条件として適用することの妥当性が認められている⁵⁾。

次に、図-6は、 $Y_C=0.5, X_C=0.2, Y_E=0.6, Y_C=1.2$ および $X_{ABC}=3.0$ と与えられた逆U字型暗渠による場合の第1近似の擬似XY平面の解析結果を $\phi\psi$ 平面の画定に用い、この $\phi\psi$ 平面内でYについてXを求めて描かれたものである。なお、この場合、 $\phi_E=0.31, \phi_C=0.96, \phi_0=0.24$ および $q/(kh_1)=0.24$ であり、 $\varepsilon=0.025$ とすると式(8)より $h_1/D_0=0.0225$ となる。また、式(10)において $C_s=1.8$ が与えられているとすれば、式(11)より $D/D_0=1.8141$ となり、ついで式(9)より $h_2/D_0=0.0366$ となる。したがって、 $h_2/h_1=1.625, D/h_1=80.575, D_0/h_1=44.417$ および $q/k=0.0054 \cdot D_0$ となっている。

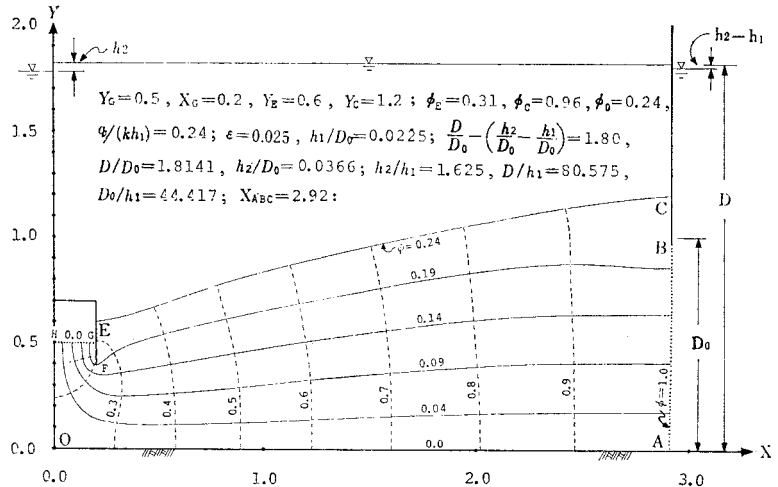


図-6 最終的なXY平面(逆U字型暗渠)

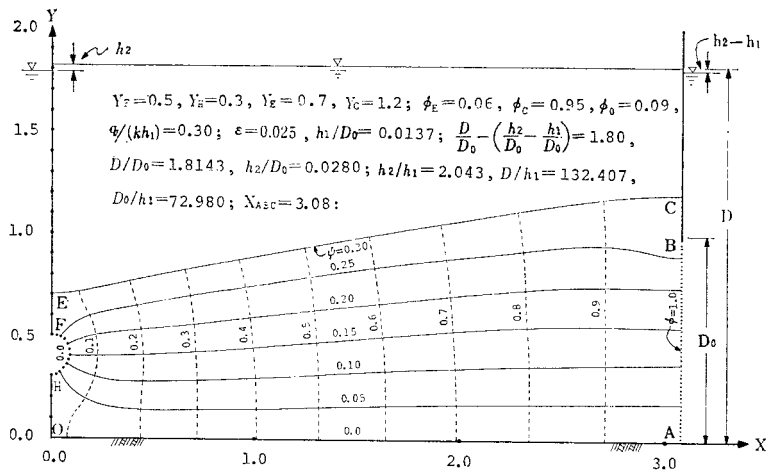


図-7 最終的なXY平面(円形暗渠)

次に、図-7は、同様にしてえられた円形暗渠による場合の結果である。ただしこの場合、 $Y_F=0.5, Y_H=0.3, Y_E=0.7, Y_C=1.2, X_{ABC}=3.0; \phi_E=0.06, \phi_C=0.95, \phi_0=0.09, q/(kh_1)=0.30; \varepsilon=0.025, h_1/D_0=0.0137; C_s=1.8, D/D_0=1.8143, h_2/D_0=0.0280; h_2/h_1=2.043, D/h_1=132.407, D_0/h_1=72.980$ および $q/k=0.0041 \cdot D_0$ となっている。

図-6~7は、共に妥当な流線網に描かれており、しかもその主要な幾何学的寸法は、 X_{ABC} の値にわずかな相違が生じているだけで、当初に取り扱った第1近似の擬似XY平面のそれとほとんど変わらない。また、図-6と図-7の場合を q/k の値について比較してみると、前者の方がやや大きな値となっているが大きな差異はない。

以上、本節でのべた具体例は、このような機構による淡塩境界面低下工法に対して、その目安をつける意味で

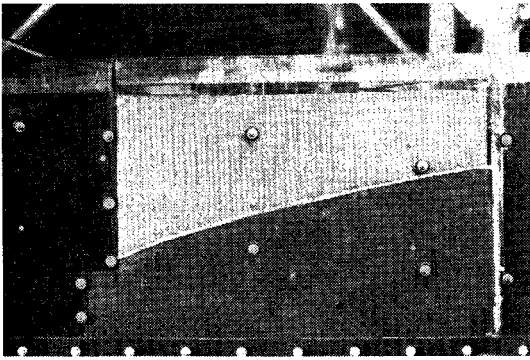


写真 砂模型による実験（ほぼ定常状態）

有力な設計指針になるものと考ええる。

4. 砂模型実験による検討

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討した。取り上げた流れの場は 図-6 に示したものである。その模様を写真に示している。淡塩境界面は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淡塩境界面によく一致している。なお、この場合の塩水汲み上げ量の理論値 $q=0.24 \cdot kh_1$ にこの実験規模で与えられた $h_1 \doteq 0.6 \text{ cm}$ および実測流量 $q \doteq 0.05 \text{ cm}^3/\text{sec}$ を適用して逆算された透水係数は $k \doteq 0.35 \text{ cm}/\text{sec}$ となり、これはこの砂を用いて行われたこの他のいろいろな実験によってえられている k の値とほとんど同じである。したがって、これらのことから、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されたものと考ええる。

なお、当初、暗渠部内の水頭を外海部の水位と同じにしておき、貯水池部に淡水を適当に張って、水槽上部に水平に保たせていた淡塩境界面が、暗渠内の水頭、貯水池淡水位および外海水位を所定および所与の高さに設置し、塩水汲み上げを開始した時刻からほぼ定常と考えられる状態の淡塩境界面に落ちつくまでの時間は、この実験ではほぼ 3.5 時間を要している。ところで、この時間は、当初の水平な淡塩境界面と定常状態の淡塩境界面にはさまれた砂層の空隙中の塩水量 ($\doteq 12000 \text{ cm}^3$) を定常状態の単位時間当り理論塩水汲み上げ量 ($q \cdot B \doteq 1.0 \text{ cm}^3/\text{sec}$, B : 水槽奥行 (20 cm)) で除した時間 ($\doteq 3.3$ 時間) に実験的にほぼ一致しており、このことを用いれば、複雑な非定常現象としての解析を行わなくても、初期状態からほぼ定常とみなされる状態に落ちつくまでの大略の時間を推定することができる。この実験の事実、実施設計の場合においても、有効な時間的指標として活用できよう。なお、この遷移過程において、暗渠内水頭を所定の高さより低くし、E 部近傍の淡塩境界面

がほぼ予定の深さに下がったときに、暗渠内水頭を所定の高さにもどせば、初期状態から定常状態に落ちつくまでの時間を短縮することができ、実際の場にあつては、このような意図的操作も必要となることがありえよう。

5. 結 論

前章までにのべてきたことがらを要約して結論としたと考ええる。

(1) 河口貯水池や海岸付近の農耕地などにおいて、淡塩境界面を地盤中の安全な深さまで人為的に低下させると、これに見合う淡水の補給が必要となるが、安全な淡水の取水や塩害防止あるいは地下淡水の貯水容量の増加などに有効である。

(2) 境界条件を単純化した流れの場の厳密解と数値解とはほとんど一致する。このことを用いて、複雑な境界条件下の実用的な流れの場の数値解析における格子点分割数などを検討している。

(3) 数値解析においては、その過程に擬似 XY 平面の導入が実用的に有用である。

(4) 塩水汲み上げ量については、逆U字型暗渠によっても円形暗渠によっても、これらの間に大きな差異はない。

(5) 淡塩境界面の位置を地盤中の安全な深さに保つためには、許容最低淡水位を設定すべきである。

(6) 解析結果は、砂模型実験の結果とよく一致する。

(7) 与えられた海水位のもとで、所定の暗渠内水頭および淡水位を設置した初期状態からほぼ定常と考えられる状態に落ちつくまでの時間は、定常淡塩境界面より上部の塩水量を定常状態の単位時間当り理論塩水汲み上げ量で除した時間にほぼ一致する。

(8) 淡塩境界面を定常状態のそれに早く落ちつかせるためには、遷移過程における暗渠内水頭を所定のそれよりやや低くして、現象の促進化をはかることが必要となる場合も考えられる。

6. あとがき

以上、本報では、河口貯水池地盤や海岸付近の農耕地などにおいて有効と考えられる淡塩境界面低下工法における塩水汲み上げ機構を2次元の暗渠として取扱い、その設計過程における水理解析の手順についてのべた。

現象の厳密な解明には、その非定常性や地盤の異方性あるいは淡塩水の拡散現象などを取り入れた解析が必要であり、残されている難問は多々あるが、本報により2次元的な塩水汲み上げ機構による淡塩境界面低下工法に

おける塩水汲み上げ量や淡塩境界面の形状など基礎的であつ工学的に主要な水理量は把握され、その設計指針はある程度まとめられたものとする。今後は、上述の難問に加えて、その機構を軸対称の単一井戸あるいは群井戸とする場合や純然たる3次元の機構とする場合などについて、これまでの検討³⁾にさらに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ぬ。

なお、本報で取り扱った流れの場の上層淡水を取り除き、淡塩境界面の圧力 p_{EC} が0となる水位状態の流れの場を考えれば、これは通常の単層地下水の流れの場となる。したがって、本報で示した解析手順は、このような地下水位低下工法の設計にも若干の書き換えを行うだけで容易に適用することができる。

末筆ながら、本研究には、文部省科学研究費試験研究(1) 研究代表者埼玉大学教授 嶋 祐之 工博(故人)(昭和47~48年度)、同、助教授 佐藤邦明工博(昭和49年度)の交付を受けた。また、本報は著者の一人、崎山の学位論文³⁾の一部に検討を加え、あらためてとりまとめたものである。上記の2先生にはもとより、有益なご

講評をいただいた九州大学教授上田年比古工博、同、橋東一郎工博および九州産業大学助教授杉尾哲工博の方々に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：水理公式集，pp. 593~595，昭和46年改訂版。
- 2) 嶋 祐之：密度流論，土木学会水理委員会，p. 3，1965年8月。
- 3) 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. 200~302，昭和46年3月。
- 4) 松尾新一郎・河野伊一郎：地下水位低下工法，鹿島出版会，pp. 109~138，昭和45年2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. 75~90，1977年12月。
- 6) フォーサイス・ワソウ：藤野精一訳：偏微分方程式の差分法による近似解法(下)，吉岡書店，pp. 295~345，1968年8月。
- 7) 近藤次郎：フーリエ変換とその応用，培風館，p. 4，昭和52年3月。
- 8) 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。

(1978.6.5・受付)