

京大防災研究所 正員 大橋行三

扇状地自由地下水の挙動を解明するに際し、扇状地端部に多く見られる排水河川による地下水しほり出しの運動機構を解明する必要がある。本研究はこれらのモデルをFig.1のように想定し、上下流水位、側方排水路水位の四圍境界をもつ一様傾

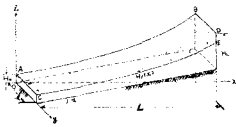


Fig.1. モデル領域図

斜不透層上の平面2次元流に関する理論式を導き、その近似解法を示すとともに若干の考察を述べる。

1. 基本概念

Fig.2のような任意形状の不透過層をもつ帯水層内の流れについては、Darcy則、連続の式からその基礎方程式

の一般形を導いた¹⁾。そ Fig.2. 自由地下水流の概念図。これらのうち、 $f(x,y)=dx$ の場合の定常流方程式は次式である。

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{2}{\beta} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

ここに、 $H=B^2$ 、 $\beta=2B/\alpha$ 、 B : 平均自由地下水位、 α : 不透層傾斜角、 x, y : 水平方向座標軸

いま、この流れを、上流より下流へ向うLongitudinal Flow(X-Flow)とこれに垂直なLateral Flow(Y-Flow)との2つの流れに概念的に分ける。つまり次式を考える。

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{2}{\beta} \frac{\partial H}{\partial x} + \epsilon_x(x,y) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \epsilon_y(x,y) = 0 \quad (3)$$

ここに、 $\epsilon(x,y)$ をRecharge factorとし、(2)、(3)式を関連づける関数であると考え、すなわち、X-Flowは負の ϵ_x を、Y-Flowは正の ϵ_y を受ける1次元流れと等価であると仮定する。したがって、当初、 ϵ は

既知として(2)、(3)式の独自の解を求め、その解を基にしてさらに ϵ を求める関数式を導く。結局、 ϵ に関する積分方程式が導かれ、その解として ϵ を決定する。以上の仮説の証明を試みる。

2. 基本式の誘導

一様傾斜不透層上の平面2次元定常流の連続の式は鉛直成分を含むとき次式となる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_{j-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} v_x dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{i-\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}} v_y dz = 0 \quad (4)$$

いま、 $\int_{j-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} v_x dz = g_x$ 、 $\int_{i-\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}} v_y dz = g_y$ とおき、(4)式を書換え、 y に関して $l_{j-\frac{1}{2}}$ から $l_{j+\frac{1}{2}}$ まで、 x に関して $L_{i-\frac{1}{2}}$ から $L_{i+\frac{1}{2}}$ まで積分した式をそれぞれ導き、さらに、式中の g_x, g_y をD-Fの式による近似値に置換える。また、式中の非線形項を β_1 として線型化すれば、X、Y-Flowの一般式を次式にうる。

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[Fdy + \frac{1}{\beta_1} \frac{\partial}{\partial x} Fdy - 2 \left(\frac{H}{\beta_1} + \frac{\partial H}{\partial x} \right) \right]_{j-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} \cdot \frac{\partial l_{j+\frac{1}{2}}}{\partial x} + 2 \left[\frac{H}{\beta_1} + \frac{\partial H}{\partial x} \right]_{j-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} \cdot \frac{\partial l_{j+\frac{1}{2}}}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial y} \Big|_{j-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} \left[Fdx - 2 \frac{\partial F}{\partial y} \right]_{i-\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}} \cdot \frac{\partial L_{i+\frac{1}{2}}}{\partial y} + 2 \frac{\partial F}{\partial y} \Big|_{i-\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}} \cdot \frac{\partial L_{i+\frac{1}{2}}}{\partial y} + \left(\frac{H}{\beta_1} + \frac{\partial H}{\partial x} \right) \Big|_{i-\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}} - \left(\frac{H}{\beta_1} + \frac{\partial H}{\partial x} \right) \Big|_{i-\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}} = 0 \quad (6)$$

ここに、 $H(x,y)=h^2(x,y)$ 、 $\beta_1=h/\alpha$ 、 $h(x,y)$: 自由地下水面高、 $\int_{j-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} = \int_{l_{j-\frac{1}{2}}}^{l_{j+\frac{1}{2}}}$ 、 $\int_{i-\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}} = \int_{L_{i-\frac{1}{2}}}^{L_{i+\frac{1}{2}}}$ 、 $(\lambda_j = (\lambda_{j-\frac{1}{2}}, \lambda_{j+\frac{1}{2}}))$

いま、一般式は求めたが $\int_j Fdy, \int_i Fdx$ の關係が明らかでない。そこで、次式の条件をもつ長方形領域(Fig.1)に関して考察をすすめる。

$$\begin{aligned} 0 \leq x \leq L, -l \leq y \leq l, h(x,l)=h(x,-l)=H_0(x) \\ h(0,y)=H_0, h(L,y)=H_L, h(0)=H_0, h(L)=H_L \end{aligned} \quad (7)$$

上の条件から $\partial h/\partial x=0$ 、 $\partial L/\partial y=0$ をうる。ゆえに(5)、(6)式は次式となる。

$$[X-Flow]: \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[Fdy + \frac{1}{\beta_1} \frac{\partial}{\partial x} Fdy + \frac{\partial H}{\partial y} \right]_{j-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} - \frac{\partial H}{\partial y} \Big|_{j-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} = 0 \quad (8)$$

$$[Y-Flow]: \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left[Fdx + \left(\frac{H}{\beta_1} + \frac{\partial H}{\partial x} \right) \right]_{i-\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}} - \left(\frac{H}{\beta_1} + \frac{\partial H}{\partial x} \right) \Big|_{i-\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}} = 0 \quad (9)$$

つぎに、 x 方向 ΔL 、 y 方向 Δl の単位角柱を考え、平均値表示の関係を次式とおく。

$$[X\text{-Flow}]: \bar{F}_y = \frac{1}{\Delta l} \int_l F dy \quad (10)$$

$$[Y\text{-Flow}]: \bar{F}_x = \frac{1}{\Delta L} \int_L F dx \quad (11)$$

さらに、(10)式を x に関して $L_{i-1/2}$ から $L_{i+1/2}$ まで積分して、 $\bar{F}_y$ と $\tilde{F}_y$ との関係を次式にうる。

$$\bar{F}_y = \frac{\Delta L}{\Delta l} \int_{L_{i-1/2}}^{L_{i+1/2}} \frac{\partial \tilde{F}_y}{\partial x} dy \quad (12)$$

ここで、(8)式を $\bar{F}_y$ によって表わすと

$$\Delta l \frac{\partial^2 \tilde{F}_y}{\partial x^2} + \frac{\Delta l}{\beta} \frac{\partial \tilde{F}_y}{\partial x} + \left\{ \frac{\partial \tilde{F}_y}{\partial y} \right\}_{j+1/2} - \left\{ \frac{\partial \tilde{F}_y}{\partial y} \right\}_{j-1/2} = 0 \quad (13)$$

となるが、式中の第3、4項を $\bar{F}_y$ または $\tilde{F}_y$ によって表示する必要がある。(10)、(12)式より次の関係が求まる。

$$\frac{\partial \tilde{F}_y}{\partial y} = \Delta l \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \tilde{F}_y}{\partial y} \right) = \Delta L \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \tilde{F}_y}{\partial x} \right) = \Delta L \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \tilde{F}_y}{\partial y} \right) \quad (14)$$

ただし、上式には $\tilde{F}_y$ の x 、 y に関する微分の交換が可能であるという条件が含まれている。

結局、 $\frac{\partial \tilde{F}_y}{\partial y} \Big|_j$ の評価は、 $\frac{\partial \tilde{F}_y}{\partial y} \Big|_{j+1/2}$ が $\frac{\partial \tilde{F}_y}{\partial y} \Big|_j$ から、 $\frac{\partial \tilde{F}_y}{\partial y} \Big|_j$ が(9)式から求まる求まることで行なわれる。いま、これらの関係を導く前に(9)式を以下に述べる Recharge factor によって表示する。

領域内のある点 $F(i, j)$ の x 方向の単位幅流量 g_{xi}

[L²T] はD-F式から次式で求まる。

$$g_{xi} = -K \Delta l \left[F \beta_i + \frac{\partial F}{\partial x} \right]_{ij} \quad (15)$$

つぎに、Recharge element r_{yi} [L²T] を次式に定義する。

$$r_{yi} = \frac{g_{xi, i+1/2} - g_{xi, i-1/2}}{\Delta L} = \frac{\partial g_{xi}}{\partial x} \quad (16)$$

また、Recharge depth R_{yi} [L] を次式に定義する。

$$R_{yi} = r_{yi}/K = \partial g_{xi}/\partial x = R_y(i, y) \quad (17)$$

ここで、(11)、(15~17)式によって(9)式を書換えれば、

$$\frac{\partial^2 \tilde{F}_y}{\partial y^2} - \frac{1}{\Delta l} \left\{ \frac{g_{xi, i+1/2} - g_{xi, i-1/2}}{K \Delta L} \right\} = \frac{\partial^2 \tilde{F}_y}{\partial y^2} - \frac{1}{\Delta l} R_{yi} = 0 \quad (18)$$

となる。上式を y に関して $l_{j-1/2}$ から $l_{j+1/2}$ まで積分し、 $\frac{\partial \tilde{F}_y}{\partial y}$ を求める。したがって $\frac{\partial \tilde{F}_y}{\partial y} \Big|_j$ が求まる。

$$\frac{\partial \tilde{F}_y}{\partial y} \Big|_j = \Delta L \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\Delta l} \int_l R_{yi} dy \right] \quad (19)$$

一方、(13)式の第3、4項を書換えて次式とする。

$$\frac{1}{\Delta l} \left\{ \frac{\partial \tilde{F}_y}{\partial y} \right\}_{j+1/2} - \frac{\partial \tilde{F}_y}{\partial y} \Big|_j = \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{\partial \tilde{F}_y}{\partial y} \right\}_j = R_{xi}(x, y) \quad (20)$$

ここに、 R_{xi} [1]を x のRecharge factor と定義し、(19)式を用いて、 R_{yi} 、 r_{yi} との関係が次式に求まる。

$$R_{xi} = \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{\partial \tilde{F}_y}{\partial y} \right\}_j = \frac{\Delta L}{\Delta l} \frac{\partial}{\partial x} (R_{yi})_j = \frac{\Delta L}{\Delta l} \frac{\partial^2 R_{yi}}{\partial x^2} \quad (21)$$

したがって、(8)、(9)式は書換えて次式になる。

$$\frac{\partial^2 \tilde{F}_y}{\partial x^2} + \frac{1}{\beta} \frac{\partial \tilde{F}_y}{\partial x} + R_{xi} = 0 \quad (22)$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{F}_y}{\partial y^2} - \frac{1}{\Delta l} R_{yi} = 0 \quad (23)$$

これら両式が近似解法の基本式であり、(8)、(9)式の F はそれぞれ平均値表示された $\bar{F}_y$ 、 $\tilde{F}_y$ によって評価され、両者の変換は(12)式に、 $\varepsilon_x \sim \varepsilon_y$ の関係は(21)式によって説明される。これらのことから、(1)式を(2)、(3)式の型に概念的に分離して解く方法の妥当性が実証されたといえる。

この後、(22)、(23)式を解き、 $R(x, y)$ を決定する演算を行なうが、ここで、主眼をRecharge factor と「しぼりぬし効果」との関連に置いて論ずるため、平均値評価をさらに簡略化する方法を以下で検討する。

3. 準2次元解法(1幅平均流れ)

Fig.1 に示すX-Flowの全断面平均水位を考慮する。

基本式は(8)式の積分範囲が0から l までに変更され、(9)式は同一である。平均値表示は次式になる。

$$[X\text{-Flow}]: \bar{F} = \frac{1}{l} \int_0^l F dy \quad (24)$$

$$\bar{F} = \frac{\Delta L}{l} \int_0^l \frac{\partial \tilde{F}_y}{\partial x} dy \quad (25)$$

また、領域の対称性から $\frac{\partial \tilde{F}_y}{\partial y} \Big|_0 = 0$ となり、(8)式は次式になる。

$$l \frac{\partial^2 \bar{F}}{\partial x^2} + \frac{l}{\beta} \frac{\partial \bar{F}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{F}}{\partial y} \Big|_l = 0 \quad (26)$$

上式の第3項は(24)、(25)式より次式になる。

$$\frac{1}{l} \frac{\partial \bar{F}}{\partial y} \Big|_l = \frac{\Delta L}{l} \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial \tilde{F}_y}{\partial x} \right]_l = \frac{\Delta L}{l} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \tilde{F}_y}{\partial y} \right) \Big|_l \quad (27)$$

$\frac{\partial \tilde{F}_y}{\partial y} \Big|_l$ の評価は前と同様な手順を用い、(18)式を y に関して0から l まで積分して求める。

$$\frac{1}{L} \frac{\partial \bar{H}}{\partial y} \bigg|_L = \frac{\alpha}{L} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{1}{\beta} \left[R_{yL} dy \right] \right\} = \bar{R}_x \quad (28)$$

ここに、 $\bar{R}_x$: x の断面平均 Recharge factor.

R_{yi} の関係は次式になる.

$$\bar{R}_x = \frac{\Delta L}{\Delta L} \frac{1}{K\ell} \frac{\partial}{\partial x} \int_0^L R_{yi} dy \quad (29)$$

結局、X-Flow の基本式は次式に変わる.

$$\frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial x^2} + \frac{1}{\beta} \frac{\partial \bar{H}}{\partial x} + \bar{R}_x = 0 \quad (30)$$

[X-Flow の解] 境界条件、 $\bar{h}(0) = H_0$, $\bar{h}(L) = H_L$ を満たす (30) 式の解は次式となる.

$$\bar{H}(x) = \bar{H} = H_0 + (H_L - H_0) - I[P_x]_0^x + I[P_x]_x^L \quad (31)$$

$$\text{ここに、} I[P_x] = \int \left\{ e^{\frac{x}{\beta}} p_x dx \right\} e^{-\frac{x}{\beta}} dx, \quad f(x) \equiv \frac{(1 - e^{-\frac{x}{\beta}})}{(1 - e^{-\frac{L}{\beta}})}$$

$$p_x = \bar{R}_x$$

[Y-Flow の解] 境界条件、 $\partial h(x, 0)/\partial y = 0$, $h(x, L) = H_L(x)$ を満たす (25) 式の解は次式となる.

$$\bar{h}_L(x, y) = \bar{h}_L = H_L(x) + \frac{\Delta L}{\ell} I[I(P_{yL})_0^y] \quad (32)$$

$$\text{ここに、} I[I(P_{yL})_0^y] = \int_0^y p_y dy, \quad p_y(x, y) \equiv R_{yi}$$

最後に、(31)、(32)式に示される $\bar{H}$, $\bar{h}_L$ から p_x , p_y を決定するための方程式を導く. まず、 $\bar{H}$ を用いて、 $x = x_L$ での X-Flow の全幅流量 $\bar{q}_x$ を求める.

$$\bar{q}_x = K\ell \left(\bar{H}_{\beta} + \partial \bar{H} / \partial x \right) \quad (33)$$

さらに、 $\partial \bar{q}_x / \partial x$ を求めると、

$$\frac{1}{K\ell} \frac{\partial \bar{q}_x}{\partial x} = \left\{ (H_L - H_0) - I[P_x]_0^L \right\} \left\{ \frac{1}{\beta} f'(x) + f''(x) \right\} + \left\{ \frac{1}{\beta} I[P_x]_0^x + I''[P_x]_x^L \right\} \quad (34)$$

という. ここに、prime は $\partial/\partial x$ を示す.

つぎに、(25)式の関係から (32)式の $\bar{h}_L$ にもとづく x 方向全幅平均水位 ($\bar{H}$) を求めると次式をうる.

$$(\bar{H}) = \frac{\Delta L}{\ell} \frac{\partial \bar{h}_L}{\partial x} dy = \frac{\Delta L}{\ell} \left\{ \int_0^L H_L(x) dy + \frac{\Delta L}{\ell} \frac{\partial}{\partial x} I[I(P_{yL})_0^y] dy \right\}$$

上式を用いて (33)式と同様にして x_L での全幅流量 ($\bar{q}_x$) を求め、さらに $\partial \bar{q}_x / \partial x$ を計算すれば次式をうる.

$$\frac{1}{K\ell} \frac{\partial \bar{q}_x}{\partial x} = \left\{ \Delta L \left[\frac{1}{\beta} \{ H_L(x) \}' + \{ H_L(x) \}'' \right] + \frac{\Delta L}{\ell} \left[\frac{1}{\beta} I'[G_y] + I''[G_y] \right] \right\} \quad (35)$$

$$\text{ここに、} I'[G_y] = \frac{\partial}{\partial x} \int_0^L G_y(x, y) dy \equiv \frac{\partial}{\partial x} \int_0^L \left\{ I[I(P_{yL})_0^y] \right\}' dy$$

結局、(34)、(35)式は (17)、(29)式の関係から $\partial \bar{q}_x / \partial x$ の未知関数を含む式であることがわかる. いま、(34)、(35)式の左辺は $y=L$ における R_{yi} の値と等価である. したがって、両式は R_{yi} に関する積分方程式であり、前述の $R(x, y)$ を決定する方程式が導かれた.

4. Recharge factor

(34)、(35)式による方程式の一般解は容易に求まらない. しかし、数値解析により (1) 式の解を得た結果を参考にして $R(x, y)$ の関数型を試算したところ、次の特解を得た. いま、 $p_y(x, y)$ は次式で与えられるとすむ

$$p_y(x, y) = m y e^{nx} \quad (36)$$

ここに、 m [1], n [L⁻¹] : ある定数、 p_x は次式となる.

$$p_x = \frac{\Delta L}{\ell} \frac{\ell m n}{2} e^{nx} \quad (37)$$

p_x , p_y を (34)、(35)式に代入し、諸計算をまとめれば次式をうる.

$$\frac{1}{K\ell} \frac{\partial \bar{q}_x}{\partial x} = \frac{\Delta L}{\ell} \frac{\ell m n}{2} e^{nx} \quad (38)$$

$$\frac{1}{K\ell} \frac{\partial \bar{q}_x}{\partial x} = \left\{ \Delta L \left[\frac{1}{\beta} \{ H_L(x) \}' + \{ H_L(x) \}'' \right] - \frac{\Delta L}{\ell} \frac{\ell m n}{8} \left(\frac{1}{\beta} + n \right) e^{nx} \right\} \quad (39)$$

両式の左辺は (36)式の $y=L$ における p_y に等しいから未知係数 m , n の決定式は次式になる.

$$n = 2\Delta L / \ell \Delta L \quad (40)$$

$$m \left(1 + \frac{\ell n}{4} \left(\frac{1}{\beta} + n \right) \right) e^{nx} = \Delta L \left[\frac{1}{\beta} \{ H_L(x) \}' + \{ H_L(x) \}'' \right] \quad (41)$$

m に関しては、排水路水位曲線がわかれば、 $x=0$ においてその値を決定する. たとえば、扇状地における排水河川の特性を考慮して、 $H_L(x) = H_0 e^{nx}$ とおけば、 m は次式に与えられる.

$$m = \frac{\Delta L \cdot 4 H_0 S' (1/\beta + 2S)}{\{ 1 + \ell n (1/\beta + n) \} 4} \quad (42)$$

また、排水路への浸透量は次式に与えられる.

$$p_x = m e^{nx} \quad (43)$$

5. 検 討

p_x, p_y が決定され、 X, Y -Flowの水面形は次式になる。

$$\bar{H} = H_0^2 + \left\{ (H_1^2 - H_0^2) - \frac{m}{\pi} \left(\frac{\beta_1}{1 + n\beta_1} \right) (e^{\pi x} - 1) \right\} f(p_x) + \frac{m}{\pi} \left(\frac{\beta_1}{1 + n\beta_1} \right) (e^{\pi x} - 1) \dots (44)$$

$$\tilde{H}_i = H_0(x)^2 + m e^{\pi x} \frac{(y^2 - l^2)}{6 \Delta l} \dots (45)$$

まず、両式が境界条件を満足するかを検討すれば、(44)式は($x=0, \bar{H}=H_0^2$), ($x=L, \bar{H}=H_1^2$)の条件を、(45)式は($y=0, \partial \tilde{H}_i / \partial y = 0$), ($y=l, \tilde{H}_i = H_1(x)^2$)の条件をそれぞれ満たしている。ただし、 $h(L, l)$ 又は Fig.1 の D, E で示すように現象に忠実な境界値を与えていない。この理由は、 l 幅平均による近似表現のためである。したがって、D-E値の決定条件は、実際の現象面からの関連づけが必要であり、 π 値の決定の問題とともに実験的検討を要する。

つぎに、数値計算によって、近似解法の結果の妥当性を検討してみる。計算は、甲府盆地における実流域の資料をもとにして(44)式の数値解析を試みた結果と対比するため、それらのモデルと同一条件の領域を対象とした。とくに、(44)式の水面形状に関する諸計算結果を Fig.3 に示す。なお、排水路水位は次式に与える。

$$H_0(x) = 7.00 \exp(2.312 \times 10^{-3} x) \dots (46)$$

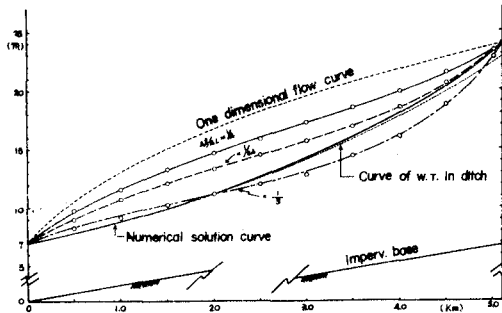


Fig.3. X-Flowの水面形状の比較。

図に明らかなように、X-Flowの水面形状は、(44)式中の π の値、すなわち、平均値表示の $\Delta l, \Delta L$ の向かいのとり方によって非常な変化を示す。その

計算値を Table.1 に示す。

Table.1.

$\Delta l / \Delta L$	1/10	1/10	1/6	1/4	1/3	1/3	1	2
ΔL (m)	50	500	300	200	170	150	50	25
$\pi \times 10^3$	0.400	0.400	0.667	1.000	1.176	1.333	2.000	8.000
$m \times 10^7$	2842	2842	16.73	10.77	8.945	7.716	2.281	0.285
$\frac{m}{\pi} \left(\frac{\beta_1}{1 + n\beta_1} \right) (e^{\pi x} - 1)$	9.768	97.68	96.42	161.52	241.77	364.82	1471.0	∞

計算結果より、 π の値は、 $\pi = 2\alpha \Delta l / \Delta L$ の関係式のみから一意的に決定できないことがわかる。しかし、平均値評価に関する必要条件としての次式

$$\bar{H} > H_2(x) \quad (0 < x < L) \dots (47)$$

と、実験による十分条件の詳細な検討から、 π 値は決定できると考えられる。

水面形状に関しては、(44)式の曲線はいずれも Rising と Falling curve の複合形となる。これは、Falling curve となる 1 次元流に排水路の効果が加味された性状であると判断される。一方、数値解析結果では全曲線が Rising である。この差異は、前者が X-Flow を Falling curve として基本式を誘導したこと起因するものと考えられ、検討の余地を残している。

Fig.3 において、近似解による曲線は $\Delta l / \Delta L = 1/4$ 程度でよい近似となる。この曲線の上流部分では排水路の効果が顕著に現れている。

6. まとめ

1. 平面 2 次元定常流の近似解法を提示し、その理論的根拠を明らかにした。
2. 数値解析結果と対比し、近似解の妥当性を検討するとともに、その問題点を考察した。
3. 近似解法は、検討すべき問題点を含むが、基本過程は有効であると考えられる。
4. さらに今後、実験結果との対比を行なうとともに、解法の細部にわたる検討をすすめる。

(文献) 1). 大橋: 自由地下水水面解析について、京大防災研年報 No.10, 1967.3

2). 前田: 橋: 低地地帯と排水路の効果、第 4 回全国水工学大会論文集 p.44-47