

濁水密度流に関する基礎的研究(才3報) - 発生条件について -

京都大学防災研究所 正員 芦田和男

同上 正員 江頭進治

1. 緒言: 微細粒子による貯水池密度流の発生および流動機構の究明に努めているが、^{(1),(2)}ここではその流動機構と図-1に示す領域①の形成に関与する水理変数について考察する。

2. 等流領域の形成過程とこの領域での流れ特性: 一定速度の濁水と定常的に循環せると図-1のような密度流が形成される。^{(1),(2)}領域①の形成条件の一つは進行速度 $U=0$ が与えられ、このことと粒子沈降速度 (w_0) を考慮した二次元物質輸送の連続式において鉛直方向濃度分布の定常性を仮定することとはほぼ同

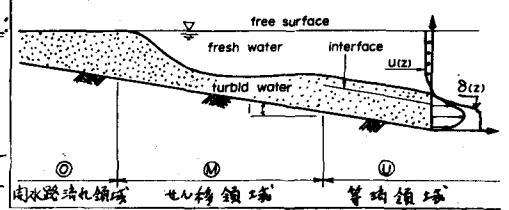


図-1 流下方向流れの模式図

に意味をもつことから領域①の形成に最も重要な役割を果たしていると考えられる。さらに定常性の仮定から、領域 $d_1 \leq z \leq d$ における gradient form Ri 数 (Ri) と w_0 および U_{nd} との関係が(1)式のように求められる。ここに l_0 : 境界面 ($z=d$) におけるプラントルの混合距離、 δ_0 : 流入濁

$$Ri = (\delta_0 g \beta d_2) / (\rho U_{nd}^2) \cdot (w_0 / U_{nd}) \dots \dots \dots (1),$$

$$\beta = l_0 / d_2 \dots \dots \dots (2)$$

水と清水 (ρ_0) との密度差、 $\rho = (2\rho_0 + \delta_0) / 2 \approx \rho_0$ 、他は図-2参照。なお領域 $0 \leq z \leq d_1$ における流速および密度差分布の結果の σ を別記するとつぎのとおりである。

$$\left. \begin{aligned} U(z)/U_{nd} &= Ar + K_1 \ln \frac{z}{d_1} \dots \dots \dots (3) \\ U_1/U_{nd} &= Ar + \frac{1}{K_1} (\ln \frac{d_1}{d_2} - 1) \dots \dots \dots (4) \\ \delta(z) &= \delta_0 = \text{const.}, C(z) = C_0 = \text{const.} \dots \dots \dots (5) \end{aligned} \right\} \left(0 \leq z \leq d_1, U_1 = \frac{1}{d_1} \int_0^{d_1} U dz \right)$$

$$\left. \begin{aligned} U(z)/U_{nd} &= \frac{U_m}{U_{nd}} - \frac{1}{K_2} \ln \frac{\beta + K_2}{\beta + K_2(d-z)/d_2} \dots \dots \dots (6) \\ U_2/U_{nd} &= \frac{U_m}{U_{nd}} - \frac{1}{K_2} \left\{ K_2 - \beta \ln \frac{\beta + K_2}{\beta} \right\} \dots \dots \dots (7) \\ \delta(z) &= \delta_0 - \frac{Ri \rho U_{nd}^2}{g d_1 K_2} \left(\frac{\beta + K_2(d-z)/d_2}{\beta + K_2} - \frac{1}{\beta + K_2} \right) \dots \dots \dots (8) \end{aligned} \right\} \left(d_1 \leq z \leq d, U_2 = \frac{1}{d_2} \int_{d_1}^d U dz \right)$$

$$U_{m3} = (\delta_0 \rho \cdot g d_1 i)^{1/2} \dots \dots \dots (9) \quad U_{nd} = (\delta_2 \rho \cdot g d_2 i)^{1/2} \dots \dots \dots (10) \quad g \approx U_{nd} d_1 + U_2 d_2 \dots \dots \dots (11)$$

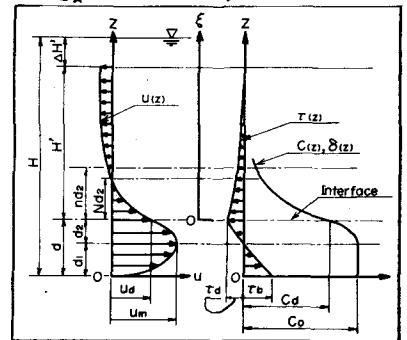


図-2 理論式計算のたけの模式図

ここに $\delta_2 = \frac{1}{d_2} \int_{d_1}^d \delta dz$, $U_m = (Ar + K_1 \ln \frac{d_1}{d_2}) U_{nd}$, i : 水路こう配, g : 水路床面粗度高さ, K_1 : カルマン定数, K_2 : 領域 $d_1 \leq z \leq d$ の混合距離の分布を決める係数である。さらに流入濁水の単位幅流量 (Q) は(11)式のように表わされている。

3. 領域 $0 \leq z \leq n d_2$ の流速分布および密度差分布(濃度分布): $z = n d_2$ および $z = m d_2$ はそれぞれ $U(n d_2) = 0$ および $\delta(n d_2) \ll \delta_0$ となる位置である(図-2参照)。この領域では滑動粘性 (E) が分子粘性 (ν) に比し卓越していると考えられ、さらに $E(z) = \text{const.} = \beta d_2 U_{nd}$ と仮定し、流速分布についてはせん断力 (τ) の直線分布、密度差分布については滑動拡散係数 (E_0) の(12)式で近似するとともに平衡状態と仮定することにより、それぞれ分布形が(13),(14)式のように求められる。

$$E_0 \approx E = \beta d_2 U_{nd} \dots \dots \dots (12).$$

$$U(z)/U_{nd} = \frac{U_d}{U_{nd}} - \frac{1}{\beta} \left(\frac{z}{d_2} \right) + \frac{A}{2N} \cdot \frac{U_{nd}}{w_0} \left(\frac{z}{d_2} \right)^2 \dots \dots \dots (13), \quad \delta(z) = \delta_d \exp \left[- \frac{w_0}{U_{nd}} \cdot \frac{z}{d_2} \right] \dots \dots \dots (14).$$

ここに $A = \{1 - b_5 (w_0^2 / U_{nd})\} / \{1 - (b_4 - b_5) \rho K_2 w_0 / U_{nd}\}$, $N = (U_2^2 / U_{nd} + b_1 - b_4) / (\frac{1}{\beta} - \frac{A}{2} \cdot U_{nd} / w_0)$, $b_1 = \frac{1}{K_2} (K_2 - \beta b_0)$, $b_2 = b_0 - K_2 b_5$, $b_3 = \frac{1}{K_2} \left\{ \frac{1}{2} b_1^2 + \beta b_5 b_0 - K_2 b_5 \right\}$, $b_4 = \frac{1}{K_2} b_1$, $b_5 = \frac{1}{(\beta + K_2)}$, $b_6 = \ln (\beta + K_2) / \beta$ である。

4. 物質輸送の連続式および抵抗則: $N < n$ の場合に逆向き輸送を考慮するため絶対値連続 $|U(z)|$ を用いると連続式は(15)式のように表わされ, この式に2., 3. 章の結果を代入すると U_2/U_{nd} が ω_0/U_{nd} の関数として(16)式のように求められる。

$$U_2/U_{nd} = R_U/R_L = F(\omega_0/U_{nd}) \quad (16)$$

ここに $R_U = b_4 - b_1 + \frac{U_{nd}}{\omega_0} \{ 1 - 2r + r' + \beta A r \frac{U_{nd}}{\omega_0} - \frac{A(1-r)}{N} (\beta \frac{U_{nd}}{\omega_0})^2 - \frac{\pi^2}{2N} A r' \} + (b_4 - b_1 + \frac{r}{\beta}) r' + \beta A (\frac{U_{nd}}{\omega_0})^2 \{ r - \frac{\pi^2}{N} r' + \beta \frac{U_{nd}}{\omega_0} \frac{r-r'}{N} \} - \frac{b_2 - b_1 b_2}{k_2^2} \frac{(\omega_0/U_{nd})^2}{1 - b_2 \frac{\omega_0}{U_{nd}}}$
 $R_L = 1 + r' - \frac{b_2 (\omega_0/U_{nd})^2}{k_2^2 (1 - b_2 \frac{\omega_0}{U_{nd}})}$, $r = \exp[-\frac{\omega_0}{\beta U_{nd}} N]$, $r' = \exp[-\frac{\omega_0}{\beta U_{nd}} n]$ であるが, $n \leq N$ の場合は $r' = 0$ である。

(16)式において $\beta = 0.068$, $k_2 = 0.18$ とおき $n=2$ とすると図-3に示す結果が得られる。2., 3. 章の議論から水理条件 $\delta_0, \omega_0, \delta, \delta'$ および $U_1, U_2, d_1, d_2, U_{nd}, U_{nd}'$ が(1), (4), (9), (10), (11), (16)式から求められる。 U_{nd} および d_1 に関する方程式を示すと(17)および(18)式のようになる。

$$\{ A r + k_2 (\ln \frac{d_1}{d_2} - 1) \} d_1^3 + \frac{U_{nd}^2}{\alpha^2} F(\frac{\omega_0 U_{nd}}{U_{nd}'}) / [1 - (b_2 - b_1) \frac{\omega_0}{k_2} \frac{U_{nd}}{U_{nd}'}] = \delta \quad (17)$$

$$(A r + k_2 \ln \frac{d_1}{d_2}) \alpha d_1^2 = U_{nd} [b_1 + F(\frac{\omega_0 U_{nd}}{U_{nd}'})], \quad (\alpha = \delta_0 \delta' / \rho) \quad (18)$$

5. 領域①の形成条件について: 2. 章の前半において流量と水深の条件が与えられている場合, 領域①の形成に ω_0 が重要な役割を果たすことを述べたが, ここではこのような密度流が存在するとして, この流れを保持するための流量, 水深(H)および堆積条件について考察する。(16)式の解の存在域は $0.04 \leq \frac{\omega_0}{U_{nd}} \leq 0.15$ で, $\frac{\omega_0}{U_{nd}} = 0.04$ のとき(17)式は最小流量 q_{min} となり, この関係が図-4に示されている。領域①での堆積条件($\frac{\omega_0}{U_{nd}}$)を考慮すると q_{min} は若干変化するが, これらの曲線の左側の流量では定常等流状態は保持されないと考えてよい。つぎに $\xi = N d_2$ と $\xi = N d_1 + \alpha (\Delta \text{微小量})$ の速度こう配の条件から必要最小全水深条件が(19)式のように示される。

$$H_{min} \geq d_1 + [1 + N + \frac{3(\omega_0/U_{nd}) - 2A\beta}{2(\omega_0/U_{nd} - \beta)}] N d_2 \quad (19) *$$

以上の議論から, $q_{min} \ll \delta$ のときは ω_0 および H が, $\delta \div q_{min}$ では堆積条件が領域①の形成に重要な意味をもっていることが考察される。

なお副題の発生条件については考察できなかったが, $\frac{\partial \theta}{\partial x} = 0$, $\frac{\partial \theta}{\partial x} = \text{const} > 0$ (B:水路幅, A:流水断面面積, x:流下方向距離)で近似できる貯水池のようなところに図-5のような水理量が増入した場合, 領域②から(19)の移行条件(すなわち発生条件)については本章で明らかにした水理変数ならびに, $t = t_1$ に流入した濁水の先端近傍での縦分散および拡散を考慮することによって議論できるものと考えている。なお本報からわかる濃度分布と密度差分布とはほぼ同意である。最後に有意義な議論をしていただいた当研究所の高橋保助教授ならびに同面作成などでお世話になった吉田義則技官に感謝いたします。

参考文献: 1) 吉田・高橋・江頭「泥濁密度流に関する基礎的研究(才1版)」, 内西支部年報, 昭和6 2) 吉田・高橋・江頭「泥濁密度流に関する基礎的研究(才2版)」 全国年報, 昭和10 * この式は講演時に述べる。

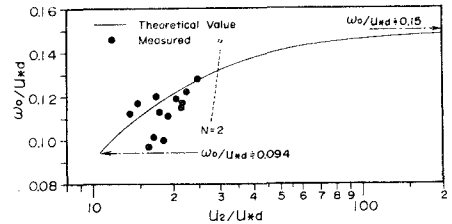


図-3 領域 $d_1 \leq z \leq d$ における清水の抵抗

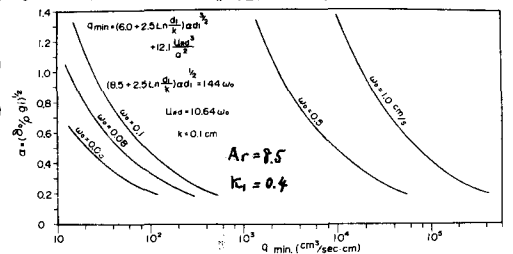


図-4 α および ω_0 と最小流量との関係

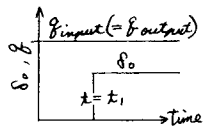


図-5