

九州大学工学部 正 羽田野 繁義

九州大学工学部 学 赤司 孝也

九州大学工学部 学 梅尾 信之

1 まえがき

前報では泥水密度流が濁質の沈積や底質のまさあげを起こさず流下する場合について先端部の運動を解析し、結果を報告した。今回は、実験水路において塩水密度流による細砂のまさあげに関し若干の実験を行ない、理論的には固、液の二相流的取り扱いを試みた。

2 理論的考察

浮遊粒子は十分小さく固相の流れは連続体として記述できるものとする。本報の実験では塩水を用いて密度流を発生させたので、液相は塩水である。図-1にモデル図を示す。

固相、液相についての連続式、質量保存則、運動量保存則は次式のように示される。

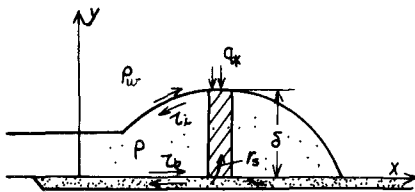


図-1 モデル図

連続式

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{(固相)} \partial C / \partial t + \text{grad}(C v_s) = 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{(液相)} \partial (1-C) / \partial t + \text{grad}\{(1-C) v_w\} = 0 \end{array} \right. \quad (2)$$

質量保存則

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{(固相)} \partial \sigma_s C / \partial t + \text{grad}(\sigma_s C v_s) = 0 \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{(液相)} \partial \rho_l (1-C) / \partial t + \text{grad}\{\rho_l (1-C) v_w\} = 0 \end{array} \right. \quad (4)$$

運動量保存則

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{(固相)} \sigma_s C (\partial v_s / \partial t + v_s \cdot \text{grad} v_s) = \sigma_w C g + R \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{(液相)} \rho_l (1-C) (\partial v_w / \partial t + v_w \cdot \text{grad} v_w) = \rho_l (1-C) g - R - (1-C) P + (1-C) \text{div} \tau_w \end{array} \right. \quad (6)$$

ここに C : 固体粒子の体積濃度, v_s : 固体粒子の流速ベクトル, v_w : 液相の流速ベクトル, σ_s : 固体粒子の密度, ρ_l : 液相の密度, σ_w : $\sigma_s - \rho_l$, g : 重力加速度, R : 固相と液相の相互作用による力, P : 液相の圧力, τ_w : 液相のせん断応力である。式(1)および(2)から得られる混相の連続式を x について $0 \sim \delta$ で積分し、特性曲線 $dx/dt = \bar{u}_w$ 上で δ の変化を考えると、 $\partial \bar{u}_w / \partial x$ がゼロの断面では $m = E_1 + E_2$ ($E_1 = \bar{\sigma}_s / \bar{u}_w$, $E_2 = \bar{\sigma}_l / \bar{u}_w$, $\bar{\sigma}_s$ および $\bar{\sigma}_l$ は各々泥水密度流が上層水を連行、河床面を流掘する速度), を一定とした場合、先端の厚さ δ について $\delta = \delta_0 + m(x - x_0)$ (7) となる。添字 0 は $x = x_0$ における値であることを示す。次に混相の密度を ρ とすると、 $\rho = C \sigma_s + (1-C) \rho_l$ である。さらに清水の密度を ρ_0 , $\Delta \rho_1 = \rho_l - \rho_0$, $\Delta \rho_2 = \rho - \rho_0$ とすると、液相および混相の質量保存則を $0 \sim \delta$ で積分し変形すれば、特性曲線 $dx/dt = \bar{u}_w$ 上で次式を得る。

$$\Delta \rho_1 = \Delta \rho_0 \left\{ \frac{m(x - x_0)}{\delta_0} + 1 \right\}^{-\frac{E_1}{(1-C)m}} \quad (8) \quad \Delta \rho_2 = \bar{\sigma}_w \frac{E_2}{E} + (\Delta \rho_0 - \bar{\sigma}_w \frac{E_2}{E}) \left\{ \frac{m(x - x_0)}{\delta_0} + 1 \right\}^{-\frac{E}{m}} \quad (9)$$

上式で $E = E_1 + E_2$ である。また、 $u_w \approx 0$, $u_s \approx u_w - u_b$ (u_b : 粒子の沈降速度) とすると、液相の x 方向の運動方程式を底面から境界面まで積分した式は近似的に次のようになる。

$$\frac{\partial \bar{u}_w}{\partial t} + \bar{u}_w \frac{\partial \bar{u}_w}{\partial x} + E_1 \frac{\bar{u}_w}{\delta} \left\{ 1 - \frac{u_w(s)}{\bar{u}_w} \right\} = \frac{\Delta \rho_1}{\rho_l} g \sin \theta - \frac{g}{\rho_l \delta} \cos \theta \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} \bar{\rho}_s \delta^2 \right) - \frac{1}{\rho_l \delta} \int_0^\delta R_x dz \quad (10)$$

上式は塩水密度流内に粒子が存在しない場合の式に右边第3項が加わったものと同義で、この項が負の場合加速の効果、正の場合減速の効果を与える。(5)式の x 方向の式について左辺が小さい場合、 $R_x \approx -(\Delta \rho_1 - \Delta \rho_2) g \sin \theta$ となる。また、(10)式の右辺第2項は δ_{max} 付近でオーダー的に無視でき、左辺を若干変形し、 $u(s)/\bar{u}_w = \eta$ と

おき、 $U_w = \bar{u}_w / \bar{u}_m$, $X = X / \delta_0$, $F_{30} = \bar{u}_w / \sqrt{g \delta_0 / \rho_0}$, なる無次元表示をすると、特性曲線 $dx/dt = \bar{u}_w$ 上で

$$U_w^* = \frac{2F_{30}^2 H \sin \theta}{2\{E_1(1-l) + f\} + m} \left\{ m(X-X_0) + 1 \right\} + \frac{2F_{30}^2 (1-H) \sin \theta}{E_1(1-2l) + 2f + m} \left\{ m(X-X_0) + 1 \right\}^{-\frac{E}{m}} + C \left\{ m(X-X_0) + 1 \right\}^{-\frac{2\{E_1(1-l)+f\}}{m}} \quad (11)$$

$$\text{ここに } H = \frac{U_w E_2}{4 \rho_0 E} \quad C = \frac{2F_{30}^2 [2\{E_1(1-l) + f\} + m - H E_2] \sin \theta}{[2\{E_1(1-l) + f\} + m] \{E_1(1-2l) + 2f + m\}}$$

となる。なお、 f : セン断応力の抵抗係数。以上の理論式の計算値は講演時に発表する予定である。

3 実験方法および結果

(1) 実験装置および方法 実験装置は図-2に示すような幅0.2m, 全長約4m, 底床勾配 $i = 0.206$ で、下流端に越流ゼキを設置した2次元水路を用いた。上流端より下流方向80~340cmにわたり試料砂(砂砂8号: 平均比重2.71, 平均粒径60 μ)を敷厚約1.5cmで置き、清水を満たした水路に上流端から塩水を供給して密度流を発生させた。密度流が砂面上を流下する際、砂粒子の動きあがが認められた。 $x = 140, 220, 280, 340$ cmの各断面に採水器を設置して瞬間的に採水し、その試料水に透光式濁度計を用いて砂粒子の断面濃度分布を測定した。先端部の運動状況は16ミリカメラで撮映し、密度流の移動速度はそれにより求めた。

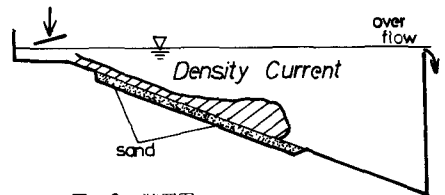


図-2 装置図

(2) 実験結果 塩水密度流の浮遊粒子の濃度分布

図の1例を図-3に示す。 $x = 340$ cmの断面については δ_{max} 付近の濃度分布, $x = 140, 220, 280$ cmの各断面については定常部と先端部の境界付近の断面の濃度分布であるが、他の実験についても同じような分布性状が得られた。この図と前報の流速分布図をもとにして浮遊粒子の断面平均濃度を求め、それから n を求めて、中川らによる pick up rate の推定式

$$\rho_0 \sqrt{d} / (\nu / \rho - 1) g = F_0 \tau_* \{ 1 - (\tau_{*c} / \tau_*)^3 \} \quad (12)$$

による理論曲線と実験値とを比較したものが図-4である。なお、(12)式においては $\rho_0 = 3 \tau_* / 2d$ の関係があり、 $\tau_* = U_*^2 / \{ \nu_s (\rho_0 - 1) g d \} = (U/\varphi)^2 / \{ \nu_s (\rho_0 - 1) g d \}$, $\tau_{*c} = 226d$ (岩垣式), を用いて、実験定数 $F_0 = 0.03$ とした。 $\varphi = 30$ の場合において実験値と理論式はほぼ適合しており、 n と n は多少意味の異なるものであるが、オーダー的には(12)式で n が説明されると考えられる。

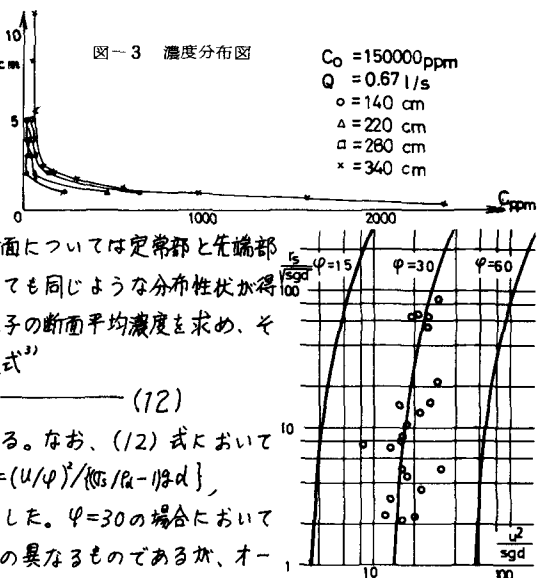


図-4

4 まとめ

本報では泥水密度流が粒子を流床に取りこむ場合について、固、液二相流の取り扱いを試み、 δ_{max} 付近の δ , ρ_0 , $\bar{u}_w$ の流れ方向の変化の理論式を示し、scale rate n が(12)式でほぼ説明されることを示した。しかし、 n はいわゆる pick up rate と異なること、また、粒子の浮上に密接に関連する底面セン断応力の実測がなされていないこと等が今後の課題として残されていると考える。

最後に本報を発表するにあたり、終始適切な御指導を頂いた九州大学平野助教授、また、実験およびデータ整理に熱心に協力してくれた本学学生井元大吉君に心から謝意を表します。

《参考文献》 1) 平野, 羽田野, 赤司: 第33回土木学会年講, 1978, P395

2) 平野, 羽田野, 梅尾: 昭和53年度西部支部年講

3) 中川 述本: 土木学会論文報告集, 第244号, 1980年12月