

株式会社 東京建設コンサルタント ○黒田 尚吾 立命館大学理工学部 江頭 進治
立命館大学理工学部 伊藤 隆郭

1.はじめに 均一な固体粒子が層流流動をするような水との混合物の流れを対象とすると、砂と水の混合物の流れにおいて、土石流から掃流砂流にまたがる流動形態の流れを力学的に統一して説明出来る段階にある¹⁾。一方、現地の土石流の観測データや微細粒子を伴う流れに関する水路実験データによると、上述の流れとは流れの構造が異なることが示唆されている^{2),3)}。本研究では、高濃度流れの構造に及ぼす流れの規模の影響について、移動床における実験データを用いて解析すると共に、江頭らの構成則を用いて定義されるレイノルズ数に着目して流れの規模の影響に関する検討を行う。

2.水路実験 実験には、長さ12m、幅5cmの可変勾配式矩形断面水路を用いている。水路下流端より約8mの地点に設置したホッパー型の給砂装置により給砂を行い、混合用のタンクにて水と十分に混合させた後、混合物を水路に供給し、移動床上の土石流を形成させている。本研究においては、一様な微細砂を用いて、混合物の流量を変化させ、流れの規模の影響を調べることに着目した実験を行っている。砂の材料特性は次のようである。比重:2.65, 粒子径 d :0.029 cm, 内部摩擦角 ϕ_s :38.1 deg., 静止堆積濃度 c_* :0.537。実験においては、流れが平衡状態に達した時に、平衡勾配 θ_e 、水深 h_t 、流速分布 $u(z)$ 、流量 q_m 、流砂量 q_s を測定している。

3.実験データの解析 図-1は、本研究で得られた平衡勾配と輸送濃度の関係を示している。同図には、混合物の単位幅流量 q_m がそれぞれ10, 30, 50, 100 (cm^2/s)程度の流れの実験値、ならびに粒子が層流流動することを想定した土石流の構成則を用いて得られた計算値(以下、厳密解¹⁾とよぶ)を載せている。図-2、図-3、図-4および図-5は、平衡勾配が 10° 程度における流速分布の実験データと厳密解を比較したものである。図-1と図-2を見ると、単位幅流量 $q_m \approx 10 (\text{cm}^2/\text{s})$ 程度の場合においては、実験データと厳密解がよく一致しており、粒子の運動は層流的であることを示している。これに対して、図-2から図-5および図-1を参照すると、粒子の層流運動を想定した厳密解は実験データと大きな違いが見られ、その差は流量の増加に伴い大きくなっている。これらの結果から、流れの規模の増加に伴って、粒子の運動は層流的な状態から異なる流れに変化していることが推察される。

4.流れのレイノルズ数 平衡勾配および流速分布から、 $q_m \approx 10 (\text{cm}^2/\text{s})$ 程度の場合においては、粒子は層流流動することが示された。さらに、流量の増加に伴い、粒子の運動が層流のものとは異なる流れになることが明らかとなった。ここでは、平衡勾配に及ぼす流れの規模の影響に着目して、粒子が層流的な運動を示さなくなる現象についての解析を行う。まず、平衡勾配比 $\tan \theta'_e / \tan \theta_e$ を定義する。

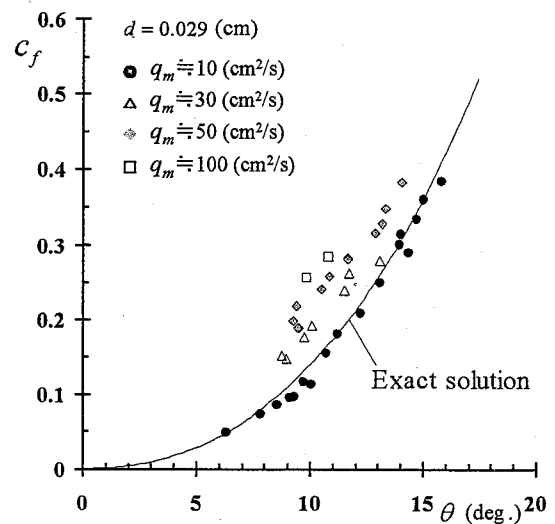


図-1 平衡勾配と輸送濃度の関係

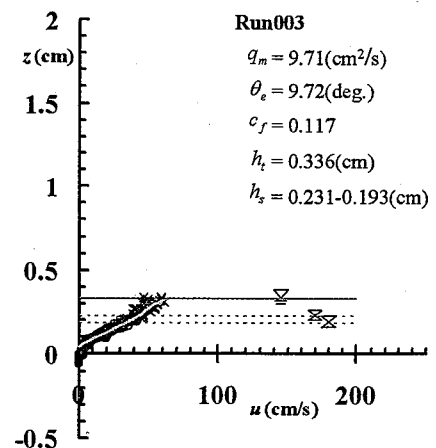


図-2 流速分布 $q_m \approx 10 (\text{cm}^2/\text{s})$

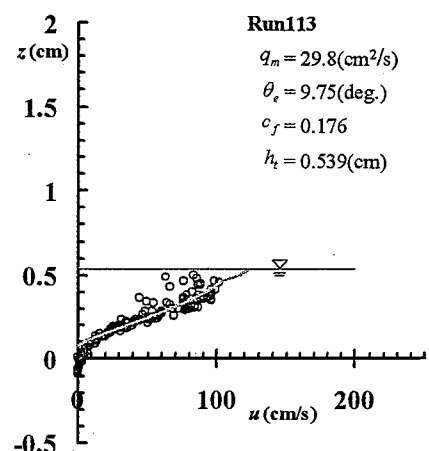


図-3 流速分布 $q_m \approx 30 (\text{cm}^2/\text{s})$

ここに、 θ_e は粒子が層流流動する $q_m \approx 10$ (cm²/s) 程度の流れにおける平衡勾配であり、 θ_e' は図-1において、 θ_e とほぼ同一輸送濃度における各流量の平衡勾配である。次に流れの規模を表すパラメータとして、レイノルズ数を以下のように定義する。江頭ら¹⁾の構成則によると、せん断応力は次式のように表わされる。

$$\tau = p_s \tan \phi_s + \rho(f_d + f_f)d^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1)$$

ここに、 $f_d = k_d(\sigma/\rho)(1-e^2)c^{1/3}$ 、 $f_f = k_f(1-c)^{5/3}c^{-2/3}$ である。式(1)の右辺第1項は降伏応力、第2項は粒子の非弾性衝突に伴うせん断応力、第3項は粒子間隙流体の乱れによる応力、 p_s は静的な骨格圧力、 d は粒子径、 c は混合物中の粒子の体積濃度、 e は反発係数、 $k_f = 0.16$ 、 $k_d = 0.0828$ である。式(1)において、流動に伴う応力に着目すると、土石流のみかけの粘性係数 μ_d は次式のように定義できる。

$$\tau - p_s \tan \phi_s = \mu_d \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho(f_d + f_f)d^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2)$$

流れのレイノルズ数 Re_D は、慣性力と式(2)で示される粘性力との比で定義されるので、 $Re_D = \rho_m u^2 / \{ \mu_d (\partial u / \partial z) \}$ と表わされる。ここに、 $\rho_m = (\sigma - \rho)c + \rho$ である。ここで、 $u \sim \bar{u}$ 、 $c \sim \bar{c}$ 、 $\partial u / \partial z \sim \bar{u} / h$ のように流速や粒子濃度に断面平均値を用いると、土石流の構成則を用いたレイノルズ数 Re_D は、 $Re_D = (h/d)^2 G / (f_f + f_d)$ と表わされる。

ここに、 $G = \bar{\rho}_m / \rho = (\sigma/\rho - 1)\bar{c} + 1$ である。図-6 は、レイノルズ数 Re_D と平衡勾配比の関係である。同図には、本研究で得られたデータのうちのほぼ同一濃度における実験値を載せている。さらに、比較のために、粒子が層流流動をする粗粒子の実験データ^{1), 4)} ($d = 0.218$ cm) および浮遊砂流の実験データ⁵⁾ も載せている。これによると、 Re_D がほぼ 2000~3000 を越えると平衡勾配比は減少し、粒子が層流的な挙動を示さない流れに移移することが分かる。

5. おわりに 流れの構造に及ぼす流量規模の影響について検討した。平衡勾配と輸送濃度の関係、流速分布およびレイノルズ数と平衡勾配比の関係により、流れの規模の小さい場合には、粒子の運動が層流的であることが確認された。しかしながら、流れの規模が大きくなると、粒子の運動が層流流動とは異なることが示され、その限界は $Re_D = 2000 \sim 3000$ 程度であることが示された。

参考文献 1) 江頭ら：水工学論文集，44，677-682，2000，2) 橋本ら：土木学会論文集，No.545，33-42，1996，3) 江頭ら：京大防災研年報，37B-2，359-369，1994，4) 伊藤：立命館大学学位論文，2000，5) 芦田ら：京大防災研究所年報，10B，63-79，1967。

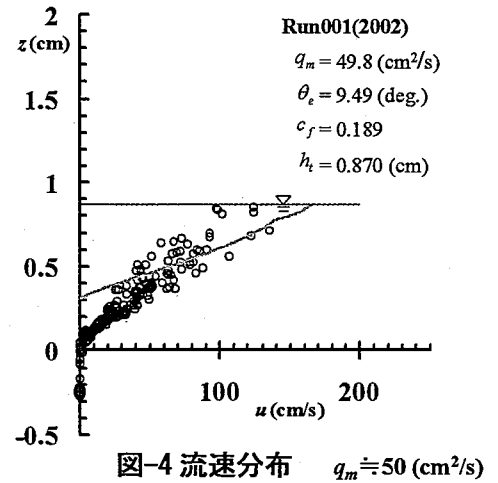


図-4 流速分布 $q_m \approx 50$ (cm²/s)

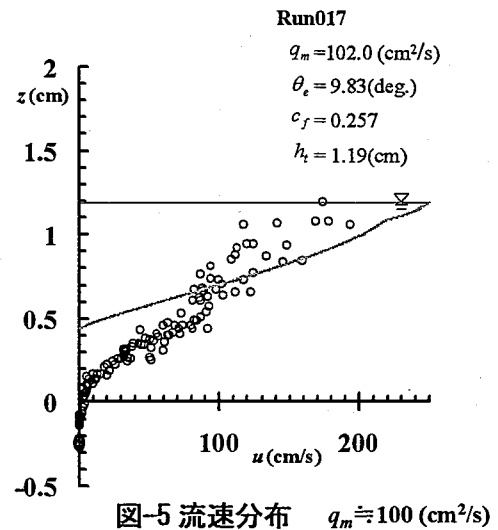


図-5 流速分布 $q_m \approx 100$ (cm²/s)

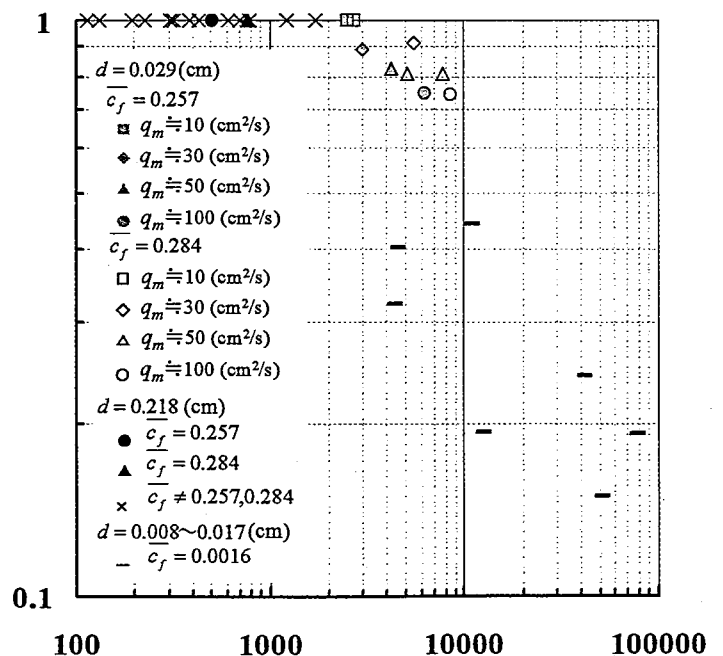


図-6 レイノルズ数と平衡勾配比の関係