

土石流の相変化に関する実験的研究

日本建設コンサルタント(株) 正会員 衛藤祐介
立命館大学理工学部 正会員 伊藤隆郭

立命館大学理工学部 フェロー 江頭進治
立命館大学大学院 学生員 磯部智彦

1. はじめに 江頭らの研究によると、均一な固体粒子が層流運動する流れにおいて、土石流から掃流砂流にまたがる領域の流れを力学的に統一して説明できる段階にある¹⁾。一方、微細砂を含む高濃度流においては、流れの規模の増加に伴い、流れの一部に乱流層が形成されることが示唆されている²⁾⁻⁴⁾。これは、固体粒子群が流体のような挙動を示すといった相変化が起こる可能性を示している。しかし、従前の研究においては、相変化に着目して議論は行われていないようである。本研究では、実験データおよび江頭らの構成則を用いて、土石流における相変化の発生について検討する。

2. 水路実験およびデータ解析 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、移動床の上の土石流を形成させている。本研究においては、粒子径 $d = 0.029\text{cm}$ の一様な砂を用いて、混合物の流量を変化させ、流れの規模の影響に着目した実験を行っている。移動床形成区間は、粒子の沈降速度や摩擦速度に着目して、十分に長く形成させている。なお、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。

図-1 は本研究で得られた平衡勾配と輸送濃度の関係、図-2 は平衡勾配が約 10° における流速分布である。両図には層流運動を仮定している構成則を用いて得られた計算値⁵⁾（以下、厳密解と呼ぶ）も載せている。同図によると、 q_m が $10(\text{cm}^2/\text{s})$ 程度の流れにおいては、計算値と概ね一致しており、砂粒子が層流運動していると言える。しかし、 q_m が増加するにつれて、厳密解とのずれが大きくなっている。また、図-2(b), (c), (d) を見ると、河床近傍においては上に凸の分布形を呈し、層流運動の粒子運動が認められるが、流量の増加に伴い、自由水面近傍における流速の変動が大きくなっている。すなわち、水面近傍においては、乱流応力の卓越する流れ、河床近傍では、粒子間の応力が卓越する流れが形成されて2層構造を形成することを示している。図-1 に示す輸送濃度の増加は、これによりもたらされると考えられる。

3. 二層モデルと平衡勾配比 実験データにより、2層構造の流れが形成されることがわかった。ところで、

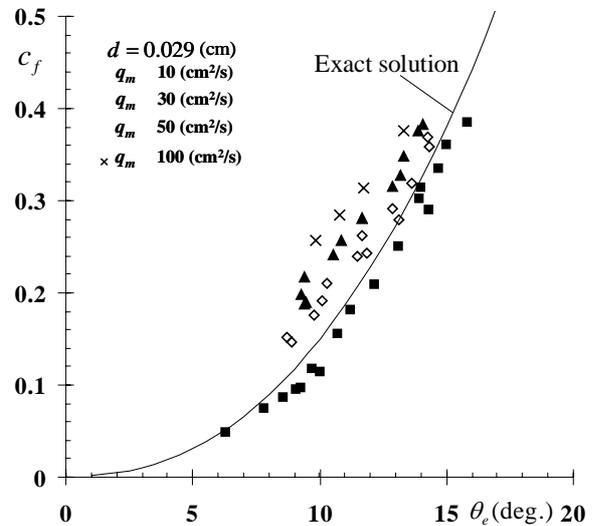


図-1 平衡勾配と輸送濃度の関係

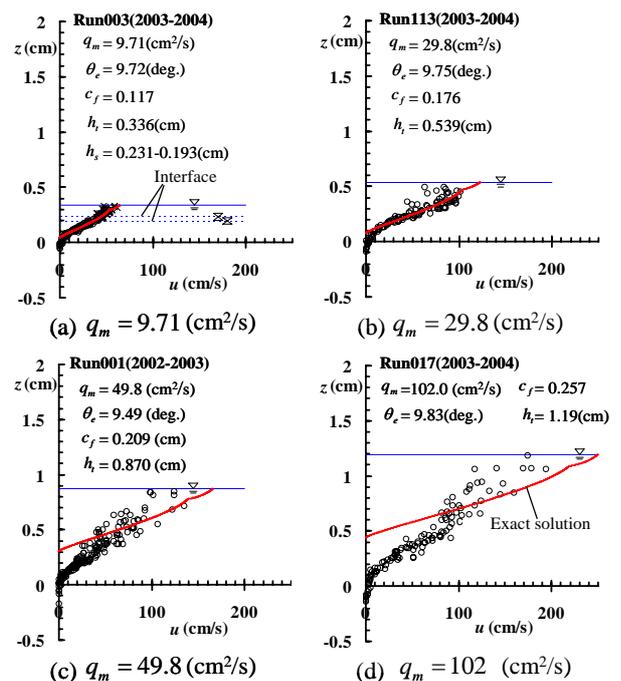


図-2 流速分布

江頭らは、上層においてはレイノルズ応力が卓越し、下層においては粒子摩擦が卓越するものとして、**図-3**に示す二層モデルを提案し、平衡勾配を次のように導いている²⁾。

$$\tan \theta_e = (h_i/h_t) \cdot (\sigma/\rho - 1) \bar{c} \tan \phi_s / \{ (\sigma/\rho - 1) \bar{c} + 1 \} \quad (1)$$

ここに、 σ は固体粒子の密度、 ρ は水の密度、 ϕ_s は粒子の摩擦角、 \bar{c} は断面平均濃度である。一方、層流運動するときの平衡勾配は、次式のようになる。

$$\tan \theta_{e0} = (\sigma/\rho - 1) \bar{c} \tan \phi_s / \{ (\sigma/\rho - 1) \bar{c} + 1 \} \quad (2)$$

式(1)、(2)の比をとることにより、平衡勾配比は移動層厚比に対応することが分かる。

$$\tan \theta_e / \tan \theta_{e0} = h_i/h_t \quad (3)$$

ここで、移動層厚比とは、全水深に対する層流流動層厚の比のことである。

4. 流れの無次元パラメータ 流れの規模を表すパラメータを土石流の構成則を用いて定義する。江頭らの構成則¹⁾によるとせん断応力は次式のようなのである。

$$\tau = p_s \tan \phi_s + \rho(f_d + f_f)d^2 |\partial u / \partial z| (\partial u / \partial z), \quad f_d = k_d (\sigma/\rho)(1 - e^2)c^{1/3}, \quad f_f = k_f (1 - c)^{5/3} / c^{2/3} \quad (4)$$

ここに、 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。粒子スケールの応力は式(4)の第二項を用いて次式のように定義される。

$$\tau_D = \rho(f_f + f_d)d^2 |\partial u / \partial z| (\partial u / \partial z) \quad (5)$$

一方、水深スケールの応力は混合距離 l を用いて、次式のように定義される。

$$\tau_T = \rho_m l^2 |\partial u / \partial z| (\partial u / \partial z), \quad l \sim h_t \quad (6)$$

式(5)、(6)の比をとり、 $c \sim \bar{c}$ 、 $\partial u / \partial z \sim \bar{u} / h_t$ のように断面平均値を用いると、次式の無次元パラメータが定義される。

$$\bar{R}_D = (h_t/d)^2 \frac{\bar{\rho}_m/\rho}{f_f(\bar{c}) + f_d(\bar{c})} \quad (7)$$

\bar{R}_D の大小は、流れにおいて水深スケールの乱れが卓越することおよび粒子スケールの乱れが卓越することを示している。

図-4は無次元パラメータ \bar{R}_D と平衡勾配比の関係である。実験データは、濃度ごとに整理し、さらに層流運動する粗粒子のデータ⁵⁾も載せている。同図によると \bar{R}_D がほぼ4000～5000を越

えると、平衡勾配比が1より小さくなり、 \bar{R}_D の増加とともに平衡勾配比が単調に減少している。

5. おわりに 高濃度流れにおける相変化について実験データを用いて検討した。平衡勾配と輸送濃度の関係、流速分布および無次元パラメータと平衡勾配比の関係により、流れの規模が大きくなると、固体粒子群の運動に相変化が起こり、移動層厚比が1より小さくなる。さらに、その遷移領域は \bar{R}_D が4000～5000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，41，789-794，1997，2) 江頭ら：京大防災研年報，37B-2，359-369，1994，3) 高橋ら：土砂移動現象に関するシンポジウム論文集，39-55，1992，4) 橋本ら：土木学会論文集，No.545，33-42，1996，5) 伊藤：立命館大学学位論文，2000

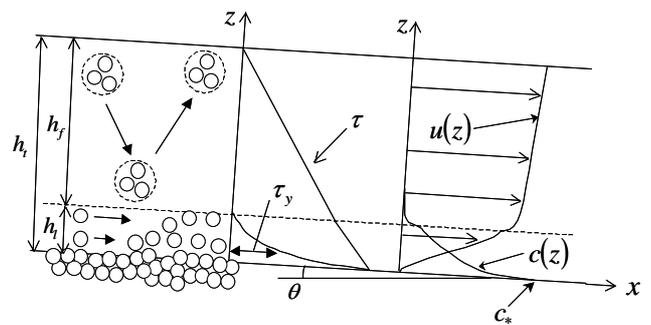


図-3 二層モデル

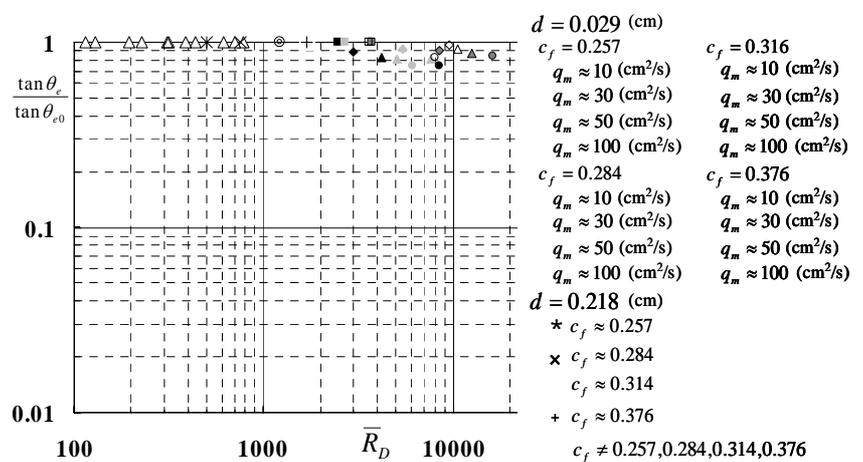


図-4 無次元パラメータと平衡勾配比の関係