

立命館大学大学院
立命館大学理工学部
立命館大学大学院

学生員 ○竹内宏隆
正会員 江頭進治
学生員 伊藤隆郭

1. はじめに 固定床上の土石流は河床の位置が人工的に決められる流れであり、そのため河床において流動応力が生じ、その流れは上流側からの供給条件などに支配される。一方、移動床上における土石流は理論河床面において流動応力が生じない流れである。このことは、移動床上の土石流は勾配に対して一意に決まることを意味している。このような両者の違いやその遷移過程についての理論的検討がなされてきた¹⁾。そこで、本研究では固定床上における土石流の実験を行い、固定床から移動床上の流れへの遷移過程を実験及び理論の両面から検討する。

2. 実験的検討 実験には長さ12 m、幅10 cm の可変勾配式の矩形断面開水路を用い、その路床勾配は 19° とした。また、実験用砂として、 $d_{50} = 0.218$, $\bar{\phi}_s = 38.7^\circ$, $c_s = 0.512$, $\sigma/\rho = 2.62$ の一樣砂を用いている。ここに、

d_{50} : 中央粒径, $\bar{\phi}_s$: 内部摩擦角の実測平均値, c_s : 静止砂礫層の体積濃度, σ/ρ : 砂の密度である。水路床には実験用砂と同じ砂を貼り付けている。上流端より定常給水し、同時にホッパーより給砂して、定常状態の土石流を形成させた。実験では、勾配一定のもとで、土砂輸送濃度を徐々に増加させていくとき、流速分布と濃度分布がどのように変わるかを調べることに焦点を絞っている。図-1~4は実験で得られた流速分布及び局所輸送濃度の分布であり、それぞれ流量はほぼ一定である。輸送濃度 c_t が0.2程度の場合には下に凸の流速分布であり、 c_t の増加させるに伴いその形が直線形を経て、最終的には河床近傍で上に凸となる特有の分布形になり、河床近傍の速度勾配が小さくなっていることが分かる。つまり、 c_t の増加に伴い流動応力が徐々に減少していく様子が分かる。最終的には、

図-4に示すような河床面において流動応力が全く存在しない土石流となる。以上より、固定床と移動床上の土石流の流速分布の大きな違いは河床近傍にあることが分かる。実験値のこのような傾向は、従来より提案されているような流動応力のみにせん断力を受け持たせている土石流の構成則^{2), 3)}を用いても、ほとんど説明できないものである。この結果は、 c_t の増加とともに、流れに依存しない何らかの応力が卓越していくことを表しているようである。

3. 遷移過程における流速分布の解析 前節の実験データは土石流において、流動応力と流れに依存しない応力が作用していることを示唆しており、江頭・宮本・伊藤の構成則^{4), 5)}(図-5参照)を適用して解析すると、非圧縮性連続体の2次元等流状態における運動量保存則の x , z 成分は次式のように表される。

$$p_s \tan \phi_s + \rho_f f d^2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \rho_f d^2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 = \int_z^{h_t} \rho_m g \sin \theta dz \quad (1)$$

$$p_s + \rho_f p_d d^2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 = \int_z^{h_t} \rho_m g \cos \theta dz \quad (2)$$

$$p_s / (p_s + p_d) = f(c) = (c/c_s)^{1/n}$$

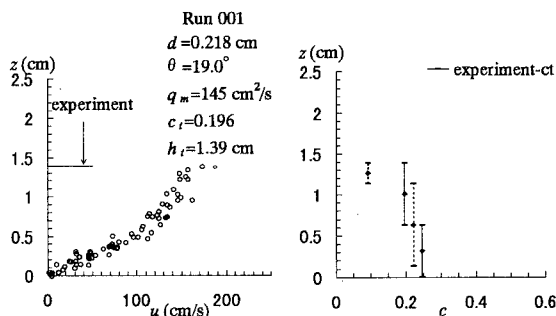


図-1 $c_t = 0.196$ における実験結果(固定床)

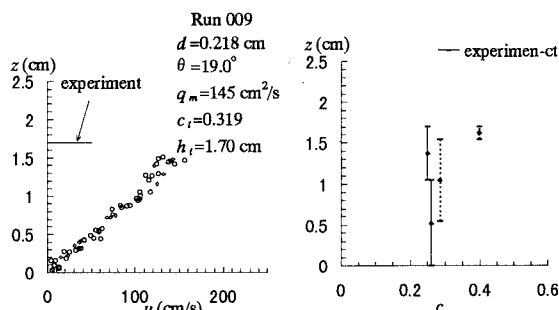


図-2 $c_t = 0.319$ における実験結果(固定床)

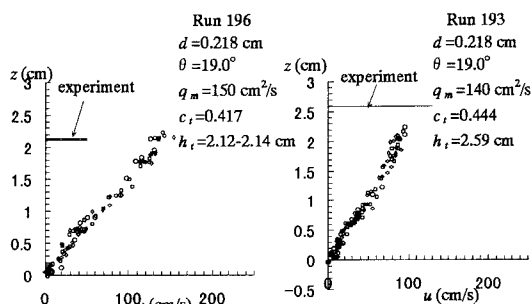


図-3 $c_t = 0.417$ における実験結果(固定床)

図-4 $c_t = 0.444$ における実験結果(移動床)

ここに、 $f_f = k_f(1-c)^{5/3}/c^{2/3}$ 、 $f_d = k_d(1-e^2)(\sigma/\rho)c^{1/3}$ 、 $f_{pd} = k_d e^2(\sigma/\rho)c^{1/3}$ であり、 ϕ_s :砂粒子の内部摩擦角、 e :反発係数、 d :粒子径、 g :重力加速度、 c :粒子の体積濃度、 ρ_m :混合物の密度で $\rho_m = (\sigma - \rho)c + \rho$ 、 n :経験定数($n=5$)、 k_d 、 k_f は実験定数でそれぞれ0.0828、0.16である⁵⁾。上式を解くと、流速と粒子濃度の鉛直分布が導かれる。この結果を、以下理論値とよぶことにする。図-6~9は実験値と理論値を比較したものであり、実線は理論値を示している。本理論では濃度の増加に伴い降伏応力 τ_y が増加し、それが流れを支配するようになる。また、固定床から移動床への遷移過程においては流れが非常に不安定になる。このようなことを考慮して、 τ_y に大きく影響を与える ϕ_s に幅を持たせて検討する。図中には、実験で実測した ϕ_s の最大値、最小値である 39.8° 、 37.7° を用いた理論値も重ねている。図から分かるように c_i が0.2程度の領域から、移動床への遷移が見られる $c_i = 0.444$ の領域まで本理論は実験値を概ね説明している。ここで得られる結果については、2つの点に注意しなければならない。一つは、構成則に関わる問題で、もう一つは、固定壁面の存在によって流れの構造が変化するような問題である。前者においては、本理論では静的な接触応力について、そのせん断応力と圧力の比 $\tan\phi_s$ を一定とおいているが、これは粒子濃度の関数であり、濃度の減少に伴って小さくなると言われている⁶⁾。しかし、 ϕ_s の微妙なちがいがいにより、流速分布は若干変化するものの流れの傾向はあまり変化しない。次に、後者であるが、これは粒子濃度の小さい領域で見られ、特に粒子濃度によって規定される粒子間隙の空間スケールが壁の影響を受ける場合である。図-6の濃度の小さい結果に着目すると、底面近傍の速度勾配が理論値よりも若干大きい値をとっている。これは、理論において粒子間隙のスケールが固定壁に依存する乱れスケールよりも大きいため、流動応力が過大に評価されているためである。

4.おわりに 固定床の土石流から移動床上の流れへの遷移過程に着目した実験に基づき、流れには流動応力と流れに依存しない応力が作用することが確認された。また、そのことを考慮して本研究では江頭らの構成則を用いて固定床上の流れから移動床上の流れへの遷移過程を解析した結果、実験値の傾向を概ね説明できることが分かった。しかし、濃度の小さい流れにおいては河床近傍において、壁の影響が支配的になることがあり、これについては今後検討していく必要がある。

本研究は、文部省科研費基盤研究B(代表 江頭進治)の補助を受けている。ここに記して感謝します。

4.おわりに 固定床の土石流から移動床上の流れへの遷移過程に着目した実験に基づき、流れには流動応力と流れに依存しない応力が作用することが確認された。また、そのことを考慮して本研究では江頭らの構成則を用いて固定床上の流れから移動床上の流れへの遷移過程を解析した結果、実験値の傾向を概ね説明できることが分かった。しかし、濃度の小さい流れにおいては河床近傍において、壁の影響が支配的になることがあり、これについては今後検討していく必要がある。

本研究は、文部省科研費基盤研究B(代表 江頭進治)の補助を受けている。ここに記して感謝します。

本研究は、文部省科研費基盤研究B(代表 江頭進治)の補助を受けている。ここに記して感謝します。

参考文献 1)伊藤隆郭・江頭進治・宮本邦明:固定床上における土石流の応力構造, 土木学会第52回年次学術講演会, II-231, 462-463, 1997, 2)Takahashi, T.:Debris flow, IAHR Monograph, Balkema, 1991, 3)椿東一郎・橋本晴行・末次忠次:土石流における粒子間応力と流動特性, 土木学会論文報告集, 317, 79-91, 1982, 4)江頭進治・芦田和男・矢島 啓・高濱淳一郎:土石流の構成則に関する研究, 京大防災研年報, 32B-2, 487-501, 1989, 5)江頭進治・宮本邦明・伊藤隆郭:掃流砂量に関する力学的解釈, 水工学論文集, 41 巻, 789-794, 1997, 6)例えば, 最上武雄:土質力学, 第8章, 技報堂。

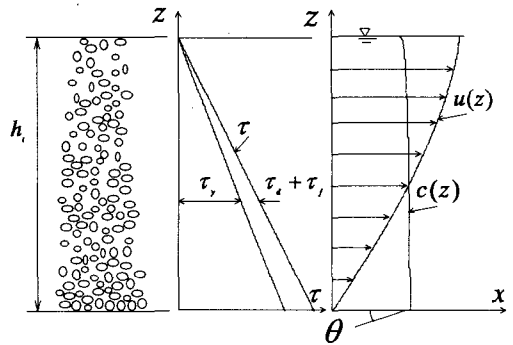


図-5 流れのモデル(固定床)

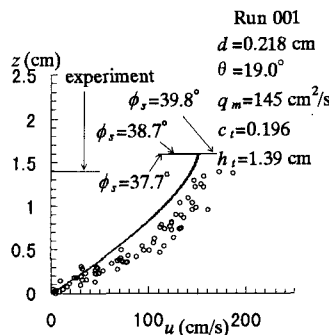


図-6 実験と理論の比較
(固定床 $c_i = 0.196$)

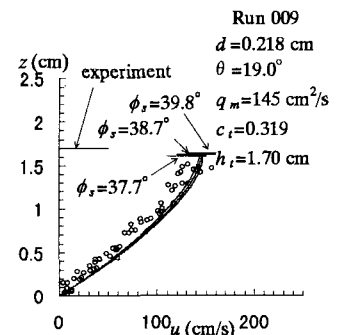


図-7 実験と理論の比較
(固定床 $c_i = 0.319$)

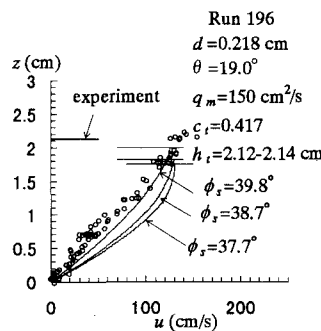


図-8 実験と理論の比較
(固定床 $c_i = 0.417$)

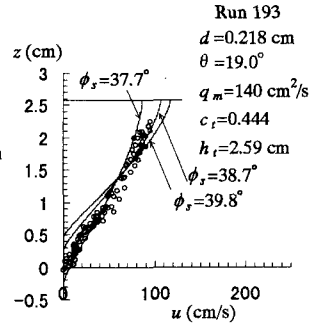


図-9 実験と理論の比較
(移動床 $c_i = 0.444$)