

軽量骨材を用いた 掃流状集合流動の水路実験

建設省土木研究所

石川 芳治

建設省土木研究所

石塚 忠範

建設省土木研究所

前田 昭浩

(財)砂防・地すべり技術センター ○高濱淳一郎

1. はじめに 最近、山地河川を対象とした氾濫シミュレーションや河床変動計算において掃流状集合流動を取り扱う機会が増え、掃流状集合流動の抵抗則や流砂量式に関する研究の必要性が高まっている。掃流状集合流動は図-1に示すように水流の層と砂礫移動層からなっている。砂礫移動層内部のエネルギー散逸構造が土石流のそれと本質的に異なるものとして砂礫層における流速分布、流砂量を評価した結果¹⁾によれば、全流動深が与えられた場合のinter-

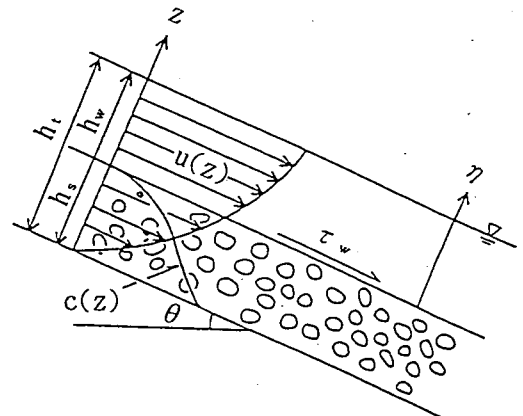


図-1 掃流状集合流動の模式図

faceの位置、流速分布及び流砂量を理論式によって比較的良く再現できている。しかしながら、流れ全体の抵抗則を評価するためには砂礫層と水流層とのinterface近傍の流れの構造を議論する必要があり、特に内部の乱れ及び圧力の構造に関する研究が必要である²⁾。本実験は以上の観点から、掃流状集合流動の流動機構を解明するための基礎資料を得ることを目的とし、圧力、及び圧力変動の深さ方向分布を測定し、その特性について検討を行った。

2. 固定床における集合流動の流砂量関数 集合流動における江頭ら¹⁾の研究成果を応力状態について若干の修正を加えた理論(高濱・宮本²⁾)を固定床に適用すれば、次のようである。

・ $\beta_k=0$ の場合(外力から降伏応力を差し引いた応力が深さ方向に一様の場合)

$$\Phi = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{f(c)^{1/2}} \cdot \frac{1}{\cos^2 \theta} \cdot \frac{\beta_n^{1/2}}{(\beta_s + \tan \theta)^{5/2}} (\sigma/\rho - 1)^2 c_m \tau_*^{5/2} \cdot \left(\frac{h_s}{h_{s0}}\right)^{5/2} \quad (1)$$

・ $\beta_k \neq 0$ の場合

$$\Phi = \frac{2}{15} \cdot \frac{1}{f(c)^{1/2}} \cdot \frac{1}{\beta_k^2} \cdot \frac{1}{\cos^2 \theta} \cdot \frac{1}{(\beta_s + \tan \theta)^{5/2}} (\sigma/\rho - 1)^2 c_m \tau_*^{5/2} \quad (2)$$

$$\cdot \left\{ \beta_n^{5/2} - (\beta_n - \beta_k)^{3/2} \left(\beta_n + \frac{3}{2} \beta_k \right) \right\} \left(\frac{h_s}{h_{s0}}\right)^{5/2}$$

ここに、 $f(c) = k_f (1-c)^{5/3} / c^{2/3} + k_g \cdot \sigma / \rho \cdot (1-e^2) c^{1/3}$

$$\beta_k = (\sigma/\rho - 1) c \tan \phi_k - \{(\sigma/\rho - 1)c + 1\} \tan \theta \quad \beta_s = (\sigma/\rho - 1) c \tan \phi_s - \{(\sigma/\rho - 1)c + 1\} \tan \theta$$

$$\beta_n = \frac{h_{s0}}{h_s} \beta_s + \left(\frac{h_{s0}}{h_s} - 1 \right) \tan \theta \quad \frac{h_{s0}}{h_s} = \frac{\tan \theta}{\beta_s + \tan \theta}$$

であり、 h_t は全流動深、 h_{s0} は移動床における砂礫移動層厚、 h_s は固定床での砂礫移動層厚である。 $\beta_s \leq 0$ となる場合は土石流領域であり、式(2)において $\beta_s = 0$ として計算する。

3. 実験方法 実験は幅20cm、長さ10m（流動部7.9m）の矩形断面水路で行った。給砂は上流端から定常給砂を行い、下流端で直接採取することで流砂量を測定した。流量は下流端に設定した四角堰を用いて計測した。水位はポイントゲージによって縦断方向に3点計測し、その平均値を採用した。また、粒子の運動は水路側壁から高速ビデオカメラによって撮影し、移動軌跡を解析した。

圧力はピトー管を用いて深さ方向に0.3cmピッチで測定し、差圧計による計測値をデータレコーダに記録した。圧力データはAD変換（サンプリングスピード：500Hz）し、圧力変動の時系列データを得ている。これにより、圧力の乱れ成分および乱れの振動特性を調べることができる。実験に用いた勾配は $i=1/20, 1/30, 1/40$ であり、粒子混入の影響をみるために清水のみの実験も行った。

4. 実験結果

4.1 流速分布 図-2にピトー管による流速の平均値、乱れ強度（乱れ成分の2乗平均の平方根）および、粒子流速の平均値とx、及びz方向の乱れ強度を示す。粒子平均流速はピトー管の流速より小さく、河床から離れるにつれて差が大きくなる。粒子の乱れ強度はx方向の方がz方向のものより大きく、z方向の乱れ強度は流体流速の乱れ強度と同程度であった。流体流速の乱れエネルギーの鉛直分布について調べてみると、清水時には上に凸なほぼ三角形分布となるが、粒子が混入すると、中膨らみの分布形となり、粒子の層流運動層の上限近傍で最大値をとる傾向が見られた。

4.2 動圧、静圧の分布及び振動特性 図-3に動圧、

静圧の平均値、及び乱れ強度の分布を示す。図には流動深から計算した静水圧も示してある。乱れ強度についてみると、全ケースを通じて、動圧の乱れ強度に比べ、静圧の乱れ強度は1オーダーほど小さ

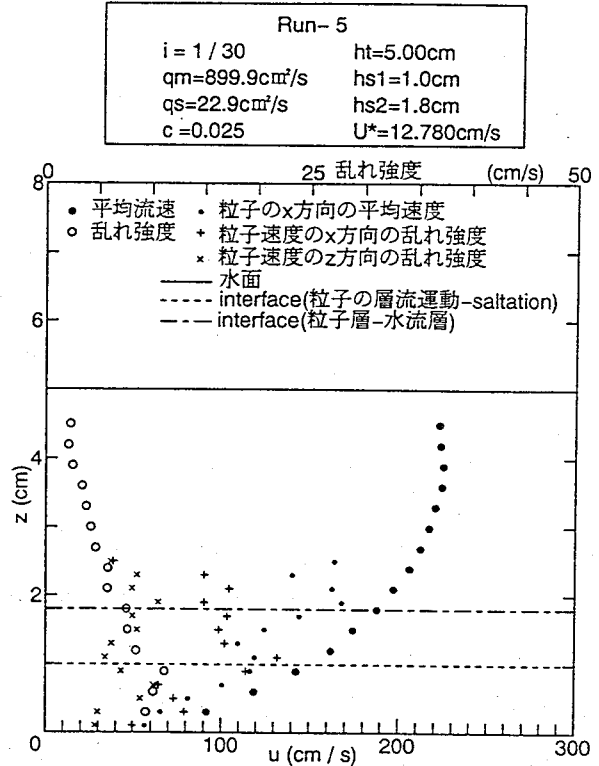


図-2 流速分布

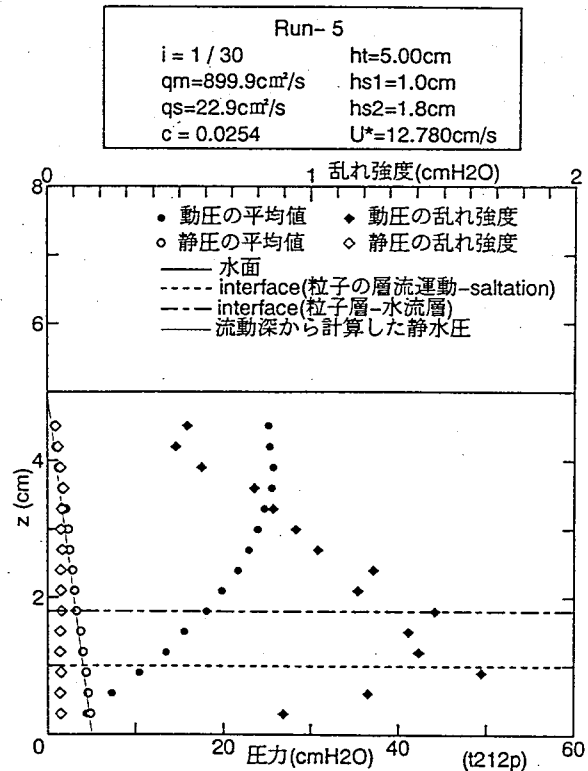


図-3 圧力分布

い結果となった。土砂の混入、非混入による圧力変動の変化をみると、動圧については、乱れエネルギーの変化と同様な結果が明瞭に現れているが、静圧については、動圧ほど有意な変化はみられなかった。ピトー管で測定した動圧、静圧の時系列データ（約8秒間）について、スペクトル解析を行い、各圧力のフーリエスペクトルを計算した。フーリエスペクトルは振動データにおける各周波数成分の寄与率、卓越周波数を調べるためのものである。図-4、5に計算結果の一例を示す。横軸は周波数（Hz）、縦軸は最大値で正規化したフーリエスペクトルである。計算結果をみると土砂の混入時、非混入時にかかわらず、卓越周波数は1Hz近傍に集中しており、水面近傍で高周波（10～100Hz）の周波数成分が出現していた。粒子間隙スケールを l とすれば、2体の単位時間当たりの衝突回数 n は $n=l / \{l \cdot (du/dz)\} = du/dz$ であり、卓越周波数は速度勾配のオーダーになることが予想される。しかしながら、実験による卓越周波数は水と比較して有意な差が見られず、卓越周波数は1のオーダーであり、実験での速度勾配（10のオーダー）と比較すると1オーダー小さい結果となっている。

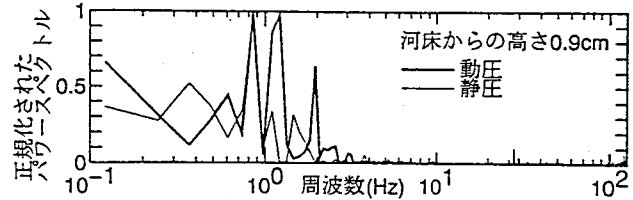


図-4 土砂混入時の圧力のパワースペクトルの一例

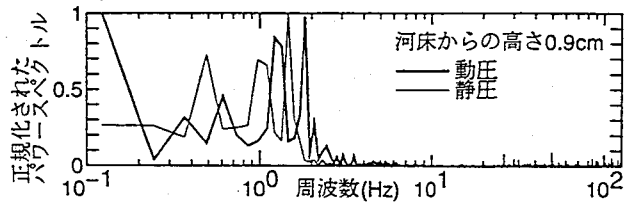


図-5 清水の圧力のパワースペクトルの一例

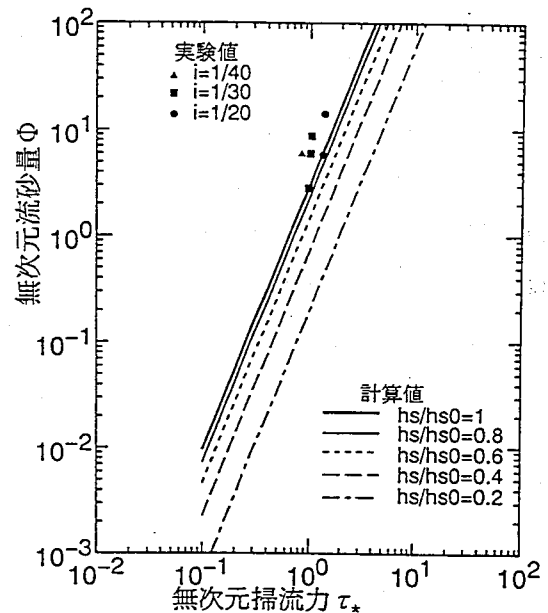


図-6 流砂量に関する実験値と計算値
計算値の勾配 $i=1/20$ ($hs_0/ht=0.407$)

4. 3流砂量 図-6には流砂量式(1)(2)において勾配 $i=1/20$ として計算した流砂量と実験値とを比較したものが示されている。図中には $h_s/h_{s0}=1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2$ とした計算値が示されている。

計算値は h_s/h_{s0} が大きいほど無次元流砂量も大きくなる。勾配を変えて計算した結果によると $h_s/h_{s0}=1$ （移動床）の場合は勾配の増加とともに非常に微少ではあるが計算無次元流砂量は増加している。これは、砂礫を対象とした移動床の計算値とは逆の傾向にある²³。 h_s/h_{s0} の値が小さくなると今度は逆に勾配が大きい方が無次元流砂量は大きくなる。実験値と計算値とを比較すると全体的に実験値の方が大きい結果となった。また、 $i=1/20, 1/30, 1/40$ における h_{s1}/h_t の計算値と実験による h_{s1}/h_t （ h_{s1} は粒子の層流運動の層厚）、及び h_{s2}/h_t （ h_{s2} は粒子層全体の層厚）とを比較すると、サルテーション層（ $h_{s1} \sim h_{s2}$ ）まで考えると実験値は固定床であるにもかかわらず、移動床の計算値よりも移動層比が大きくなっていった。

5. 考察 実験は粒子の混入による圧力（ピトー管の静圧）の平均値、及び変動の変化、interface近傍

でのこれらの分布形や、周波数特性を調べることを目的に行われた。今回の実験条件では間隙の静圧については清水のものと基本的に変わらないという結果が得られた。また、saltation層が砂礫の場合と比べてかなり大きく発達していた。この二つの結果は今後、掃流状集合流動、ひいては固液混相流の構成則の議論に関する基礎資料としてみた場合、次の点で重要であると思われる。

固液混相流の間隙流体の圧力、及び圧力変動の勾配は乱れの構造と密接な関係がある。粒子が層状に流れている場合、その間隙流体が間隙の中で閉じた乱れであれば、間隙流体の圧力は静水圧+過剰圧として現れ、間隙間を行き来するような乱れであれば、静水圧となる。今回の実験条件では、間隙圧は静水のものとほぼ同じであり、開いた乱れであったと推察される。

また、粒子が層状に流れている場合、粒子は主に静的な骨格応力と非弾性衝突の際に保存されるエネルギーに対応する圧力によって支えられているが、サルテーション層ではこのような粒子同士の相互作用による圧力は減少すると思われる。粒子が間隙水圧の勾配によって支えられているものと考えれば、サルテーション層の間隙水圧勾配は静水圧勾配よりも大きくなる必要があるが、今回の実験ではそのような傾向は明瞭には現れなかった。したがって、別の機構によってサルテーション層が形成・維持されていると考えられる。厳密にいうと今回の実験条件が与える流れのレジーム、応力構造ではサルテーションを維持しているものが主に間隙圧勾配によるものとは考えにくいことになる。今回の実験条件が力学的にどのような領域に属するものかを厳密に議論することは難しいが、砂礫に比べて外力に対する降伏応力の割合が砂礫に比べて小さな領域であることは確かである。土石流の構成則では、せん断力がクーロン項と流動に係わる項とからなるとされているが、その割合については現在、意見の分かれるところである。土石流流動層では降伏応力の占める割合が小さく、流動に係わる項に比べて無視できるものとして取り扱っている場合と、降伏応力の占める割合が大きく無視できないものとして取り扱っている場合とがある。今回、降伏応力の占める割合が小さくなることによってサルテーション層が発達したことは土石流中の応力配分に関する議論に関して貴重な資料の一つになるものと思われる。今後、議論を進めていくためには、実験条件（材料の物理定数、外力の条件等）を変えた実験を行い、流れのレジームと内部の応力（圧力）状態との関係、乱れの特性に関する基礎データを蓄積することが必要である。

6. おわりに 今回の実験条件では、圧力（静圧）の分布、変動については粒子の混入による明瞭な変化は得られなかった。この実験結果をもとに構成則を検討していく場合、実験条件を力学的観点から捉えることが不可欠である。砂礫に比べて外力に対する降伏応力の割合が小さな条件で実験を行ったが、今後は、外力に対する降伏応力の割合が大きい領域の実験を行い、両者の測定データの違いを検討することで基礎資料の充実を図る必要がある。

参考文献

- 1) 江頭進治・芦田和男・高濱淳一郎・田野中新：エネルギー散逸に基づく流砂モデル、京都大学防災研究所年報、第33号B-2、1990、pp. 293-306.
- 2) 高濱淳一郎・宮本邦明、”急勾配水路における高濃度流れの抵抗則と流砂量”、平成4年度砂防学会研究発表会概要集、pp. 66-99、1992