

## 19 急勾配水路における高濃度流れの抵抗則と流砂量について

(財) 砂防・地すべり技術センター ○高濱 淳一郎

(財) 砂防・地すべり技術センター 宮本 邦明

### 1はじめに

本研究は、水と固体粒子からなる混合物の流れを連続体として取扱い、急勾配水路における抵抗則及び流砂量を評価することを目的としている。

急勾配水路の混合物の流れは図-1に示すように水流の層と砂礫移動層からなっている。ここで、砂礫移動層は両層のinterfaceに作用するせん断力と砂礫層内部に働くbody forceの2つの外力を駆動力として流動している。このような観点からみれば掃流砂とはinterfaceのせん断力が卓越した流れであり、土石流とは逆にbody forceが卓越し、interfaceが自由表面となっている流れであり、両者の中間に位置する流れが集合流動に相当する。江頭ら<sup>1)</sup>は、砂礫層内部の抵抗則が土石流の抵抗則と本質的に変わらないものとして、上述の2つの外力の関係を河床における応力のつりあいに求め、砂礫層における流速分布、流砂量を評価した。これによれば、掃流砂領域において若干の検討を要するものの、有意義な結果が得られている。さらに、流れ全体の抵抗則を評価するためには水流の層の抵抗則が問題となってくる。このとき、水流の層はinterface近傍の流れの影響を受けているため、interface近傍の流れの構造を議論することが必要となってくる。しかしながら、現時点では、土石流の構成則によって砂礫層からinterface近傍の流れまでを連続的に取り扱うことが困難であるという問題もあり、その評価は難しいものとなっている。本報では、以上を踏まえた上で、急勾配水路の抵抗則及び流砂量について検討する。

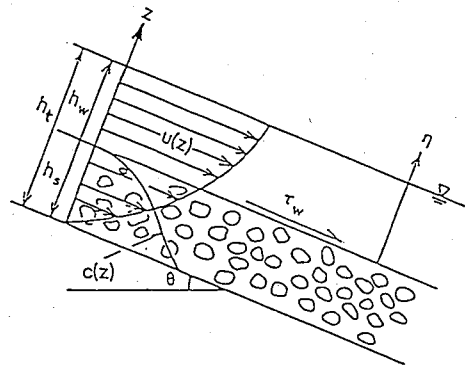


図-1 2次元等流の模式図

2流砂量の検討

図-1に示すような固体粒子と水との2次元等流状態について考える。砂礫層には土石流の構成則を適用する。すなわち<sup>2)3)</sup>

$$\text{せん断力 } \tau = \tau_y + \tau_d \quad (1) \quad \tau_y = p_s \tan \phi \quad (2) \quad \tau_d = f(c) d^2 (du/dz)^2 \quad (3)$$

$$\text{圧力 } p = p_s + p_d + p_w \quad (4)$$

ここで $\tau_y$ は粒子の固体摩擦による降伏応力、 $\tau_d$ は粒子の非弾性衝突によるせん断力、及び粒子間隙水の乱れによるせん断力である。前者は速度勾配に依存せず、後者は速度勾配及び粒径の2乗に比例し、濃度の関数として与えられる。したがって、外力から降伏応力を差し引いたものが流動に使われる。圧力は粒子骨格応力( $p_s$ )、粒子衝突の際に保存されるエネルギーに対応する圧力( $p_d$ )、及び間隙

水圧 ( $p_w$ ) からなる。

ここで、以下の解析に対して次に示す近似、簡略化を行う。

①砂礫層の粒子体積濃度は深さ方向に一様とし、 $c=c_0/2$ で与える。(  $c_0$  は停止砂礫層の粒子体積濃度で0.6とする。 )

②間隙水圧  $p_w$  は静水圧で与える。

③1) 粒子衝突による圧力  $p_d$  は砂礫移動層内で骨格応力  $p_s$  との比が一定 ( $p_d/p_s = 2$ ) となるように与え<sup>2)</sup>、2) 河床面

においてゼロとする。(すなわち、河床面において静的な降伏応力を与え、それより上の砂礫移動層内では動的な

降伏応力を与える。)

④間隙流体の乱れによるせん断力は非弾性衝突によるせん断力の係数に含めて考え、計算に用いる数値は江頭らの土石流の構成則<sup>2)</sup>によって与える。

水流の層厚  $h_w$ 、及び砂礫移動層厚  $h_s$  の比は次式に示す河床面における応力の静的なつりあいによって与えられる。<sup>1)</sup>

$$\tau_{ext} - \tau_y = 0 \quad (5)$$

$$\tau_{ext} = \tau_w + \rho_m g h_s \sin \theta \quad (6) \quad \tau_w = \rho_m g h_w \sin \theta \quad (7)$$

ここに  $\tau_{ext}$  は外力としてのせん断力、 $\tau_w$  は interface に働くせん断力である。ここで上述の項目③2)により式(5)における  $\tau_y$  には静的な降伏応力を与える。このとき、 $h_w$  と  $h_s$  の比は勾配の関数となる。式(5)において  $h_w \leq 0$  となるときの流れを土石流として取り扱うことにすれば、勾配の連続的な変化に対して砂礫移動層の流れは式(1)~(4)に示す構成則によって統一的に取り扱われる。図-2には全流動深  $h_t$  に対する砂礫移動層厚  $h_s$  の比に関する実験値<sup>1)4)</sup>と式(3)による計算値を示している。図には江頭らの計算による結果(濃度を一様とした場合の近似解)も示してある。江頭ら<sup>1)</sup>の計算では式(5)における河床面での  $\tau_y$  に砂礫移動層内と同じ  $p_d$  が存在する動的な降伏応力を与えて計算している。 $h_s/h_t$  の実験値は勾配の増加に伴って増加しており、計算値においても同じ増加傾向を示している。しかし、その分布形についてみると実験値は上に凸、計算値は下に凸であり、逆の傾向となっている。これは、濃度一様として計算したためと思われる。

式(1)~(7)より、図-1に示す流動深  $h_t$  が決まれば、砂礫層の流速分

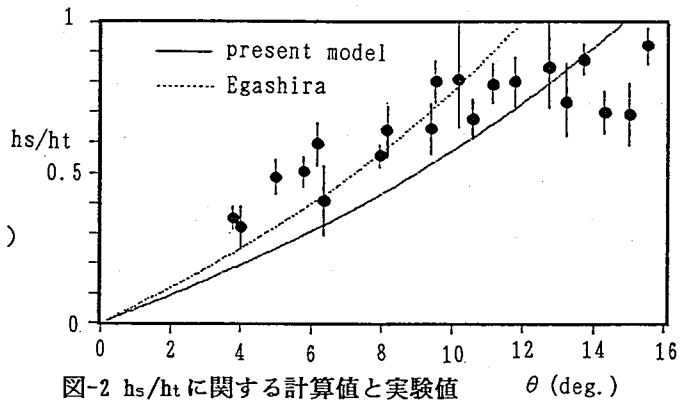


図-2  $h_s/h_t$  に関する計算値と実験値  $\theta$  (deg.)

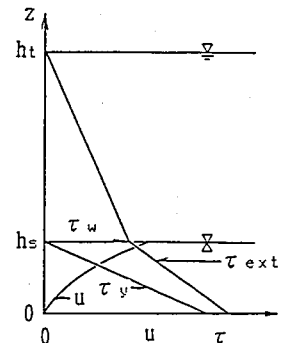


図-3(a) 応力及び流速分布

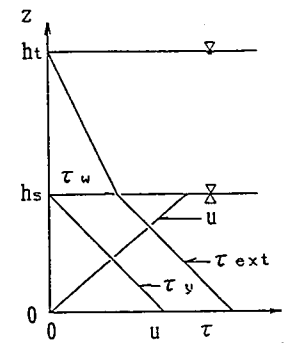


図-3(b) 応力及び流速分布

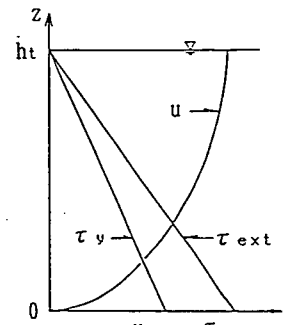


図-3(c) 応力及び流速分布

布が求まる。このとき図-3(a), (b), (c)に示すように、勾配の増加に伴って $\tau_{ext}-\tau_y$ の鉛直分布がz方向に増加、一様、減少と変化し、流速分布はこれらに対応して順に上に凸、直線、下に凸の分布形へと変化する。そして、図-3(c)に示すように流れが土石流となる場合には、 $\tau_{ext}-\tau_y$ は三角形分布となり、流速分布は3/2乗則にしたがう。

図-4には実験における流動深htを与えて式(1)~(7)を用いて計算した流砂量とその実験値<sup>1)4)</sup>を示している。計算値には勾配による有意な差が見られないため図には $\theta=10^\circ$ の場合についてのみ示してある。実験材料は $d_{50}=0.144, 0.368\text{cm}$ の一樣砂で、勾配は約 $0.3^\circ \sim 16^\circ$ の範囲である。実験値と計算値を比較すると勾配 $3^\circ$ 未滿の実験値が計算値よりやや大きいものの、全体を通じて適合性はよい。

### 3 抵抗則の検討

抵抗則の検討のため、実験における流動深htを与えて $u/u_*$ を計算し、実験値と比較する。

江頭ら<sup>1)</sup>は、水流の層の抵抗則にカルマンの運動量輸送理論を用いており、次式で与えている。

$$= \rho l^2 (du/dz)^2 \quad (8) \quad l = l_0 + \kappa (z - h_s) \quad (9)$$

ここに、 $l$ は乱れの混合距離で、 $l_0$ はinterfaceにおける混合距離である。江頭らは $l_0$ に砂礫層内部における粒子間隙水の乱れスケールを与えている。図-5には $u/u_*$ に関する江頭らの構成則<sup>1)</sup>による計算値と実験値<sup>1)4)</sup>を示している。計算値と実験値を比較すると全体的に計算値の方が小さく、計算による抵抗が大きめになっている。図-6には砂礫層の抵抗則に式(1)~(7)を用い、水流の層の抵抗則には上述の江頭らの構成則を用いて計算した $u/u_*$ とその実験値を示している。図-5、6の計算値の違いは河床面における降伏応力の違いによるものである。図からわかるように勾配 $3^\circ$ 以上では計算値と実験値の対応は良いものの、勾配 $3^\circ$ 未滿の実験に対しては、依然として計算による抵抗が大きめになっている。このような結果は、interface近傍における混合距離を過大に評価したことによるものと考えられる。そこで、水流の層の抵抗則として対数則を用いて次のような計算をする。まず、式(3)によるinterfaceから1粒径下の位置に対数則の河床

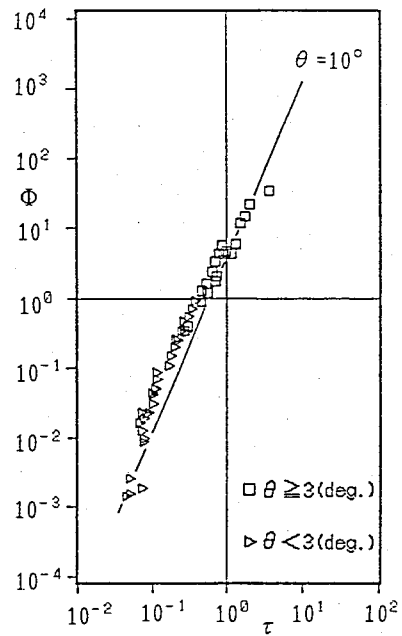


図-4 流砂量に関する計算値と実験値

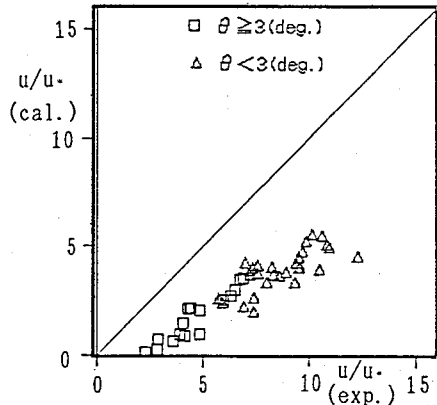


図-5  $u/u_*$ に関する計算値と実験値(1)

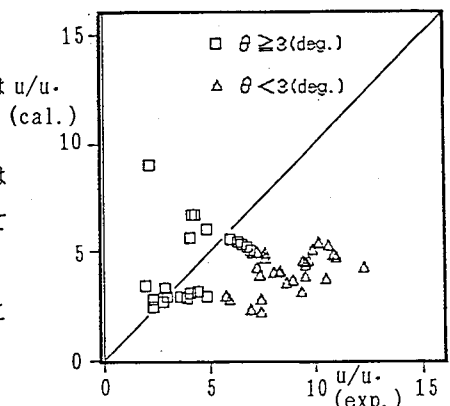


図-6  $u/u_*$ に関する計算値と実験値(2)

を設定する。次に、この仮想河床からinterface (cal.) eまでを粗度高さとして水流の層の流速分布を計算する。図-7にはこのようにして計算された $u/u_*$ と実験値が示

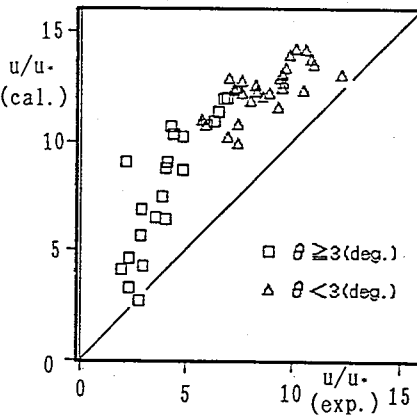


図-7  $u/u_*$ に関する計算値と実験値(3)

算値と実験値を比較すると全体的に計算値の方が大きくなっており、計算による抵抗が小さくなっている。図-8には参考のため、砂礫移動層の河床を対数則の河床として計算したものを示している。

図-7の計算において抵抗が小さめに評価されたのは、対数則の計算における仮想河床近傍の流れは実際には流動層内の乱れによって減勢されているためであると考えられる。しかし、このような乱れを評価することは現時点では困難である。そこで、勾配 $3^\circ$ 未満の実験に対して、対数則の仮想河床を式(3)によるinterfaceに設定し、粗度高さを1粒径として、対数則の定数項Ar (通常は8.5)を計算値と実験値が合うようにいろいろと変えて計算してみるとAr=5程度の時に計算値と実験値はよく合う結果となった。図-9には図-5の勾配 $3^\circ$ 未満のデータに関して、Ar=5として計算したものを示してある。

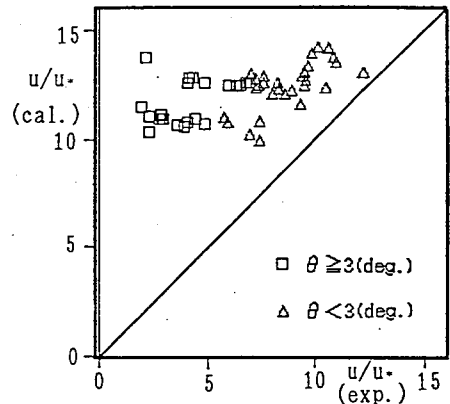


図-8  $u/u_*$ に関する計算値と実験値(4)

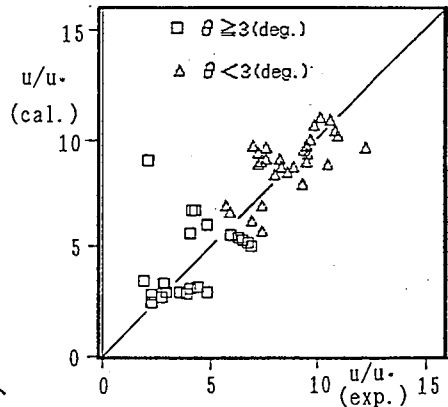


図-9  $u/u_*$ に関する計算値と実験値(5)

#### 4おわりに

急勾配水路における高濃度流れの抵抗則を評価するためには、interface近傍の流れの構造を議論する必要がある。今後、土石流の構成則と合わせて検討していくつもりである。

#### 参考文献

- 1) 江頭進治・芦田和男・高濱淳一郎・田野中新：エネルギー散逸機構に基づく流砂モデル 京大防災年報、第33号、B-2、1990、pp.293-306
- 2) 宮本邦明：Newton流体を含む粒子流の流動機構に関する研究、立命館大学学位論文、昭和60年9月、PP.39-72
- 3) 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、京都大学防災研究所年報、第32号、B-2、1989、PP.487-501
- 4) 江頭進治・芦田和男・田野中新・高橋徹也：連続体手法による掃流砂量式に関する研究、京都大学防災研究所年報 第号B-2、1991、pp261-274