

立命館大学 学生員 ○吉田佳祐
立命館大学 正会員 伊藤隆郭
立命館大学 学生員 黒田尚吾

立命館大学 正会員 江頭進治
立命館大学 学生員 内海敦郎

1.はじめに 本研究では、土石流を構成する材料の粒径と、河床材料の粒径の大きさが異なる場合に着目し、河床材料の粒径を種々変化させた実験を行い、土石流による河床材料の取り込みを実験的に議論する。土石流の輸送濃度および最終河床位に関する実験結果を基に土石流による河床材料の侵食限界について検討するとともに、侵食限界について次元解析的に考察する。

2.実験の概要 実験には、図-1 に示す長さ 10.0m 幅 10.0cm の矩形断面水路を用い、水路勾配は 12° としている。水路は、上流側において土石流を形成させる区間(長さ 4.0m)と、下流側において土石流による河床材料の侵食を調べる区間(長さ 2.0m)からなり、上流側においては、供給土石流の定常性を保つため、給砂の材料を用いて、供給する土石流の平衡勾配に設定されている。下流側には下流端の堰板(高さ 10.0cm)が設置され、二枚の堰板間に砂礫を敷き詰めて、土石流による侵食を調べるための河床が形成されている。水路上流端より定常給水し同時にホッパーにより定常給砂して、定常状態の土石流を形成させている。供給土石流は平均粒径 $d_0=0.218\text{cm}$ の均一な砂(内部摩擦角 $\phi=38.7^\circ$ 、静止堆積濃度 $c=0.512$ 、砂の比重 $\sigma/\rho=2.62$)で構成されている。上流からの土石流の流入濃度(輸送濃度) c_{fin} は 0 および 0.15 の 2 種類、下流側侵食区間の河床材料には、平均粒径 $d=0.218\text{cm}$ 、 0.438cm 、 0.8cm 、 1.1cm の 4 種類を用いた(以下では給砂材料の平均粒径には d_0 の記号を、河床材料の平均粒径には d の記号を用いる)。測定項目は水路下流端における総流出流量(水+土砂) Q_{out} の時間変化、河床侵食区間における河床最終形状、および最終河床形状が形成された時の水深である。実験においては、河床材料の取り込みが見られなくなるまで給水・給砂を行い、最終河床が形成されているときには、平衡状態が得られている。 Q_{out} はバケツを用いて 2 秒間隔で 1 回当たり 2 秒間採取し(15 回/60sec)、炉乾燥後、流出土砂を供給土石流の材料と河床材料とに分類した。これに基づいて単位幅当たりの流出流量(水+土砂) q_{out} 、全流砂および粒径別の単位幅流砂量(土砂のみ) q_{sout} および輸送濃度 c_f を算出した。

3.実験データの解析 図-2 に $d=0.218\text{cm}$ 、および 0.438cm の水路下流端輸送濃度 c_f の時間変化を示す。図-2 において、 $d_0=0.218\text{cm}$ として示すデータは、供給土石流と同じ材料を河床材料とした場合の実験結果である。また、 d_0 で示すデータは供給土石流材料の c_f 、 d で示すデータは侵食された河床材料の c_f 、 d_0+d で示すデータは全砂礫の c_f である。図-2 より、河床勾配が初期設定値から顕著に変化しない時間領域、すなわち、土石流の下流端到達後の 0~30 秒の時間帯に着目すると、全流砂量および河床材料の c_f は、粒径が大きい程小さくなる。すなわち、河床侵食が抑制されていることが分かる。以上述べた傾向は、 $d=0.8\text{cm}$ および 1.1cm の場合の

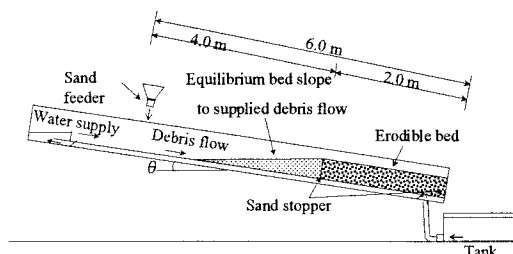


図-1 実験装置

表-1 実験条件

Run	Bed sediment size $d(\text{cm})$	Supply conditions from the upper stream of channel		
		Sediment flux concentration $c_n(\%)$	Sediment-water mixture discharge $q_m(\text{cm}^2/\text{s})$	Sediment discharge $q_m(\text{cm}^2/\text{s})$
1-1	0.218	0.144	67.05	9.47
1-2	0.218	0.144	73.9	11.09
2-1	0.438	0.139	73.75	10.27
3-1	0.800	0.143	75.83	10.87
4-1	1.100	0.137	76.27	10.43
4-3	0.151	0.151	130.44	19.66
5-1	0.218	0.00	75.04	0.00
5-2	0.218	0.00	75.04	0.00
6-1	0.438	0.00	75.01	0.00
6-2	0.438	0.00	75.02	0.00
7-1	0.800	0.00	75.01	0.00
7-2	0.800	0.00	75.01	0.00
8-1	1.100	0.00	75.01	0.00
8-2	1.100	0.00	74.98	0.00

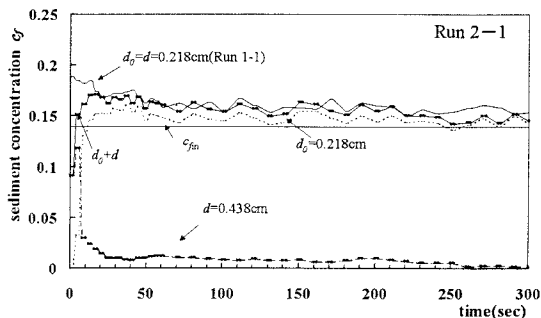


図-2 下流端輸送濃度の時間変化の一例
($d=0.218\text{cm}$ および 0.438cm 、 $c_{fin}=0.15$ の場合)

実験結果においても同様に見られた。図-3 は最終河床形状を示したものである。同図において、初期河床位を点線で示している。図によれば、河床材料の粒径が大きくなると土石流の侵食能力が小さくなり、これは図-2 の結果に対応している。なお、図-3 の $d=0.8\text{cm}$ 、 1.1cm のケースにおいて、初期河床位に対して河床上昇が生じている。これは、侵食区間の土石流の堰近傍での河床擾乱によるものと考えられる。

4.応力モデルと侵食限界粒径 図-4 は、粒径 d_0 で構成される土石流が粒径 $d(d>d_0)$ で構成される河床上を流動する時の流速と応力の鉛直分布に関する模式図である。図において、せん断応力の分布は江頭らのもの¹⁾を用いている。ここに、 h :水深、 δ :河床から $\tau=\tau_y$ の位置(理論河床)までの距離(侵食深さ)である。図-4 に示すように、江頭らの構成則によると、 $\tau-\tau_y$ が流動応力に相当する。いま、流動応力に着目すると、侵食深さは流動応力の増加に伴い増加する。ここで、河床($z=0$)における流動応力に対応する長さスケールを次式のように定義する。

$$\delta' \equiv \left. \frac{\tau - \tau_y}{(\sigma - \rho)g} \right|_{z=0} = \frac{\tau_b - \tau_{yb}}{(\sigma - \rho)g} \quad (1)$$

ここに、 σ :砂粒子の密度 ρ :流体の密度 g :重力加速度である。 $\delta'/\delta = k$ とすると、 k は少なくとも1のオーダー程度の定数と考えられる。これを考慮すると、式(1)より、次式が導かれる。

$$\frac{\delta'}{d} = \frac{\tau_b - \tau_{yb}}{(\sigma - \rho)g} = \tau_{*f} \quad (2)$$

式(2)の τ_{*f} は、無次元限界掃流力 τ_{*c} に非常に類似したパラメータである。ここで、粒子濃度 $c=0$ とすると、 τ_{*f} は τ_{*c} に一致する。

図-5 は、河床の侵食限界について実験データを用いて、 c_{fn} と τ_{*f} の関係を示したものである。計算においては、実験で平衡状態に達した時の水深、河床勾配および輸送濃度を用いている。なお、図において、 $c_{fn}=0$ (清水)の場合には、勾配の影響を考慮した高橋ら²⁾の研究を参考にしてプロットしている。さらに、同図には過去に江頭ら³⁾によって得られたデータである $c_{fn}=0.05, 0.10$ のデータも掲載している。図の τ_{*f} のデータの下限値が河床材料の侵食限界に相当している。なお、本実験において、水路勾配が 12° に設定されているが、それに対する平衡濃度は輸送濃度に換算すると0.2である。すなわち、図-5 を c_{fn} の増加方向にみると、 $\tau_{*f} \rightarrow 0$ となる。これを考慮してデータをみると、流入濃度 c_{fn} の増加に対して、 τ_{*f} は増加傾向にあり、 $c_{fn}=0.15$ の値は清水のもの約1.5倍である。

5.おわりに 侵食限界粒径について無次元流動応力を用いて、実験データに基づいて検討した。これによると、流入濃度の増加に伴い、無次元応力が大きくなる傾向にある。侵食限界に関する議論を詳細に行うために、実験データを蓄積し、後さらなる検討が必要である。

6 参考文献: 1)江頭・宮本・伊藤:水工学論文集、No.41、789-794、1997、2)芦田・高橋・水山:新砂防、No.97、9-16、1970、11、3)Egashira et al.:Phys. chem. Earth(c)、Vol.26、No.9、645-650、2001。

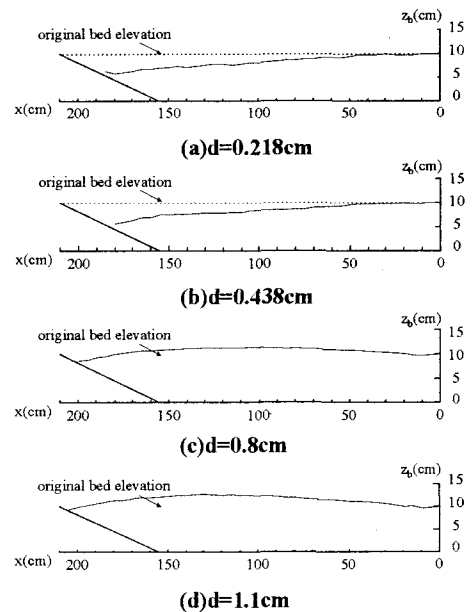


図-3 最終河床位

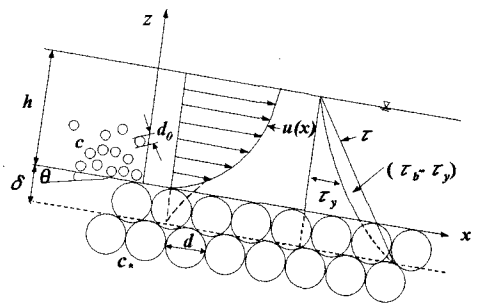


図-4 流れの模式図

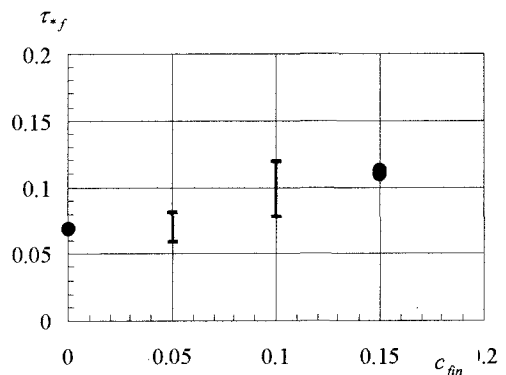


図-5 河床の侵食限界