

立命館大学理工学部
立命館大学大学院

学生員○小山大輔
学生員 吉田佳祐

立命館大学理工学部
立命館大学理工学部

正会員 江頭進治
正会員 伊藤隆郭

1.はじめに 土石流の発達過程の規模は、河床堆積物の取り込みに依存し、土石流本体と河床の粒子径が等しい場合には、それは河床勾配と平衡勾配の差に依存する。ところが、河床の粒子径が土石流本体のそれと異なる場合には、土石流の侵食能力に及ぼす河床の粒子径の影響が大きいものと推察される。本研究においては、土石流による河床材料の取り込み限界（侵食限界）について、実験データを用いて検討する。

2.実験概要 実験は図-1に示す幅 10.0cm、長さ 10.0m の矩形断面水路を用いている。水路は上流側において所定の土石流を形成させる区間（長さ 4.0m）と、下流側において河床材料の侵食を調べる区間（長さ 3.0m）からなっており、これらは堰板（高さ 10.0cm）によって分割されている。上流側では、侵食区間へ供給される土石流流量をコントロールするために、河床の供給材料を用いて供給土石流の平衡勾配に設定されている。下流側では、下流端に高さ 10.0cm の堰板が設置され、2 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。なお、侵食区間の上流端近傍には、土石流の流入に伴う河床材料の擾乱を防ぐための対策工を施している。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。以後、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 の記号をそれぞれ用いる。実験ケースおよび供給する土石流の条件を表-1 に示す。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形状、河床侵食区間の定点における河床高 z_b および水深 h の時間変化である。なお、実験においては、侵食区間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、その時点で平衡状態が得られているものとして、水位の縦断分布と流速分布を計測し、通水停止後の河床縦断分布（最終河床形状）を測定している。

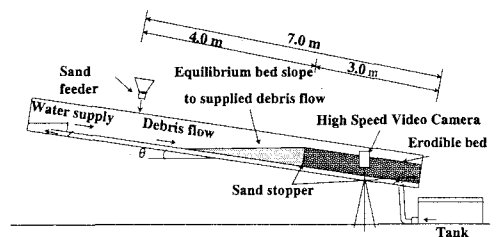


図-1 実験装置

表-1 実験条件

Run	Bed sediment size d (cm)	Supply conditions from the upper stream of channel		
		Sediment flux concentration c_{in} (%)	Sediment-water mixture discharge q_m (cm ² /s)	Sediment discharge q_{ss}
1-1	0.438	4.76	100	9.89
1-2		4.49	153	6.87
2-1	0.800	4.73	99.5	4.70
2-2		4.49	153	6.87
3-1	1.10	5.35	153	8.19
4-1	0.218	10.1	97.8	9.89
4-2		9.52	97.2	9.46
4-3		10.4	99.2	10.3
5-1	0.438	8.93	98.4	8.79
6-1	0.800	10.4	99.2	10.3
7-1	0.218	15.6	101	15.8
8-1	0.438	14.0	96.3	13.5
8-2		15.5	98.0	15.8
9-1	0.800	15.6	101	15.8
9-2		15.1	48.1	7.25
10-1	1.10	15.1	130	19.7
10-2		14.3	153	21.9
11-1	0.800	2.88	46.4	1.33

3.実験データの解析 図-2 は、下流側へ供給する土石流の流入濃度 $c_{fin}=0.10$ において、 $d=0.218\text{cm}$ 、 0.438cm 、 0.8cm の場合における侵食区間の河床最終形状を示している。なお、図において、太い点線で示しているのは、給水・給砂開始前の初期河床高（水路床より 10.0cm）であり、点線は $d=d_0$ の場合の平衡河床である。図において、 $d=d_0=0.218\text{cm}$ の時に

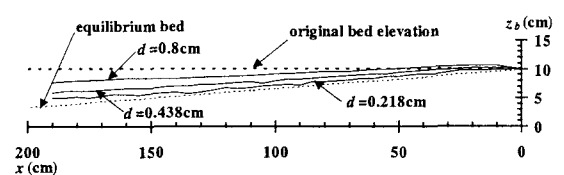


図-2 最終河床の縦断形 ($c_{fin}=0.10$)

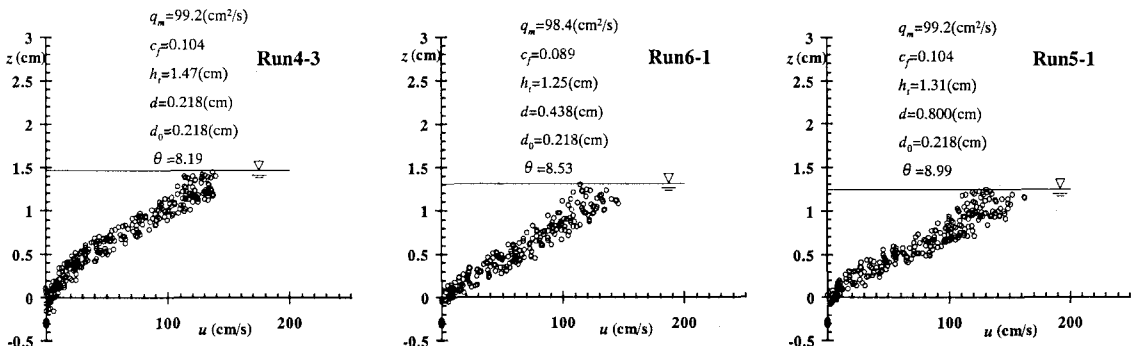


図-3 流速分布 ($c_{fin}=0.10$)

は、点線の平衡河床に一致している。また、 d の違いによる河床高の変化に着目すると、 d が大きいほど最終河床高が高くなっていることが確認できる。すなわち、 d が大きいほど侵食が抑制されていることが示されている。図-3 は、流入する輸送濃度 $c_{fn}=0.10$ で $d=0.218\text{cm}$ 、 0.438cm 、 0.8cm の場合の流速分布を示している。図において、 $d=0.218\text{cm}$ のときには、 $d=d_0$ であるため、流速分布は上に凸の移動床流れの形状である。一方、 $d=0.438\text{cm}$ 、 0.8cm のときは固定床流れの分布形を呈している。

4. 無次元掃流力と侵食限界粒径 図-4 はそれぞれ、 $d=d_0$ および $d>d_0$ のケースにおいて土石流が河床上を流動するとき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、せん断応力には江頭らのもの¹⁾を用いている。ここに、 τ_y ：降伏応力、 h ：水深、 δ ：河床から理論河床までの距離(侵食可能深さ)である。いま、河床($z=0$)における全応力に着目して、次のような長さスケール δ' を定義する。

$$\delta' = \frac{\tau}{(\sigma - \rho)g} \Big|_{z=0} = \frac{\tau_b}{(\sigma - \rho)g} \quad (1)$$

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。いま、 $\delta'/\delta = k$ 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ので、式(1)より、次式が導かれる。

$$\frac{\delta'}{d} = \frac{\tau_b}{(\sigma - \rho)gd} = \tau. \quad (2)$$

式(2)は、侵食限界時を想定すると、通常の流れにおける砂粒子と移動限界 τ_c と全く同様に考えることが可能である。そこで、式(2)における侵食限界、すなわち移動限界時の掃流力を τ_{cd} と定義すると、断面平均濃度 $\bar{c}$ と τ_{cd} の関係は、図-5 のようになる。なお、図-3 の流速分布を見ても分かるように、流れは固定床上のものであることは明らかであるので、図-5 においては、江頭らの構成則から求められる厳密解¹⁾を用いて、輸送濃度 c_{fn} に関する実験データから断面平均濃度 $\bar{c}$ を求めている。

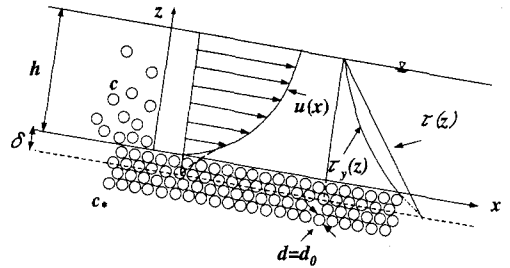
侵食限界時の流動応力 $\tau_b - \tau_{yb}$ は、粒子の移動限界に相当することから、 $\tau_b - \tau_{yb} = \tau_c$ として求めた侵食限界に関する計算値も同図に載せている。ここに、 τ_c ：砂粒子の移動限界掃流力である。ちなみに、江頭らの構成則を適用して、 $\tau_b - \tau_{yb} = \tau_c$ を解くと、次式のような式である。

$$\tau_{cd} = \frac{\tau_c}{(\sigma/\rho - 1)c + 1 - (\sigma/\rho - 1)(c/c_s)^{1/n} c(\tan\phi_s/\tan\theta)} \quad (3)$$

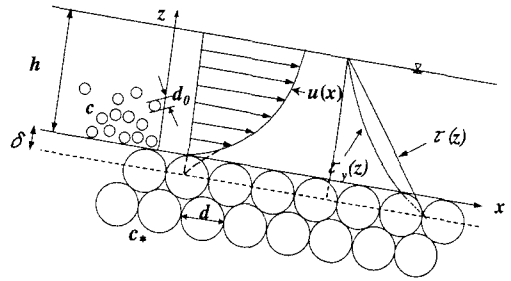
ここに、 c_s ：静止堆積濃度、 ϕ_s ：静止摩擦角、 θ ：河床勾配および n ：経験定数 ($n=5.0$) である。図-5 において、式(3)の計算値よりも大きい領域で侵食が発生することを示している。断面平均濃度 $\bar{c}$ が増加すると、侵食限界の値は大きくなり、勾配の増加に伴い、侵食限界は減少している。清水における移動限界において勾配の増加に伴い、大きくなるという報告²⁾があるが、これとは逆の傾向を示していることも興味深い。次に、計算値と実験データを比較すると、実験データには若干のばらつきは見られるが、計算値と実験データは概ね一致しているようである。

5. おわりに 土石流における河床材料の侵食限界について、侵食可能深さに関する長さスケールのパラメータを定義し、それを用いて侵食限界(移動限界)に関する表示式を提案した。同式の計算値は、実験データと比較すると、概ね一致し、侵食限界式の妥当性が示された。今後、さらなる検討を行うために、実験データを蓄積していく必要がある。

参考文献 1)江頭ら：水工学論文集、No.41、789-794、1997、2)芦田ら：新砂防、No.97、9-16、1970、11。



(a) 土石流材料と河床材料の粒径が同じ場合



(b) 土石流材料と河床材料の粒径が異なる場合

図-4 流れの模式図

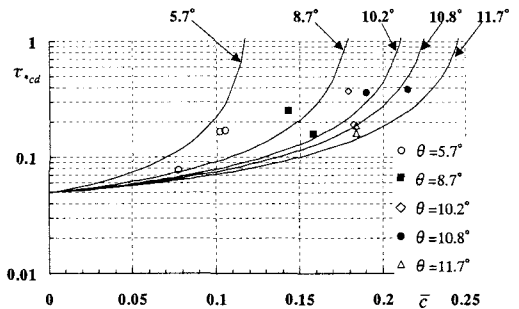


図-5 断面平均濃度と無次元掃流力