

富士通システムコンストラクション(株)

正会員 ○川西 正人

立命館大学理工学部

正会員 江頭 進治

大阪府立工業高等専門学校

正会員 本田 尚正

1. はじめに 本研究では、土石流を構成する砂礫の粒径と河床を構成する砂礫の粒径とが異なる場合に注目して、河床材料の粒径を種々変化させて実験を行い、土石流による河床材料の取り込みを実験的に議論する。そして、土石流の土砂輸送濃度および河床高の時間的変化に関する実験結果をもとに、土石流の侵食速度に対する河床材料の粒径の影響について検討するとともに、土石流および土砂流における移動限界厚と河床材料の粒径比に着目し、侵食限界粒径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6.0m、幅10.0cmの矩形断面水路を用い、路床勾配は 12° とした。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2.0m)からなり、これらは堰板(高さ10.0cm)によって分割されている。上流側では供給土石流の定常性確保のため、河床は給砂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。水路の上流端より、定常給水(単位幅当り $q_{in}=80.0\text{cm}^2/\text{sec}$)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。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 $c_s=0.55$ 、砂礫と水の密度の比 $\sigma/\rho=2.62$)で構成され、上流からの土石流の流入濃度(輸送濃度) c_{tin} は、0.05および0.10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 の記号をそれぞれ用いる)。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、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。 Q_{out} はバケツを用いて2秒間隔で1回あたり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。そして、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当たりの流砂量(土砂のみ) q_{sout} および輸送濃度 c_t を算出した。

3. 実験結果 図-2に、 $d=0.218\text{cm}$ および 0.8cm の水路下流端輸送濃度 c_t の時間変化を示す。図-2において、 $d_0=d=0.218\text{cm}$ 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_t 、 d で示すデータは侵食された河床材料の c_t 、 d_0+d で示すデータは全砂礫の c_t 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0~30秒の時間帯に着目すると、全流砂および河床材料の c_t は、粒径が大きいほど小さくなる。すなわち、河床侵食が抑制されていることがわかる。次に c_{tin} の違い、すなわち、図-2の(a)と(b)の結果、特に河床材料の c_t を比較すると、 c_{tin} の大きい(b)において河床侵食が抑制されていることがわかる。これは、土石流の土砂侵食能力が c_{tin} が大きい分だけ小さくなっていることによる。以上述べた傾向は、 $d=0.438\text{cm}$ および 1.1cm の場合の実験結果においても同様にみられた。

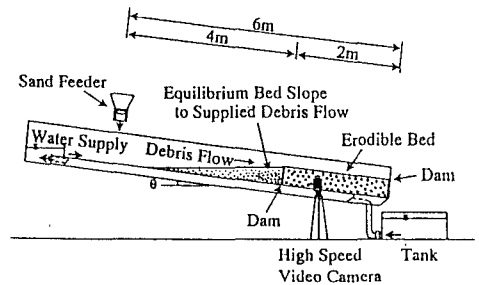


図-1 実験装置

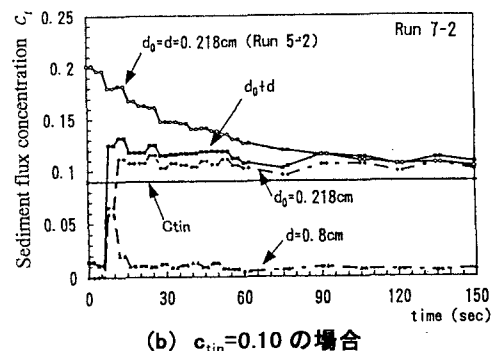
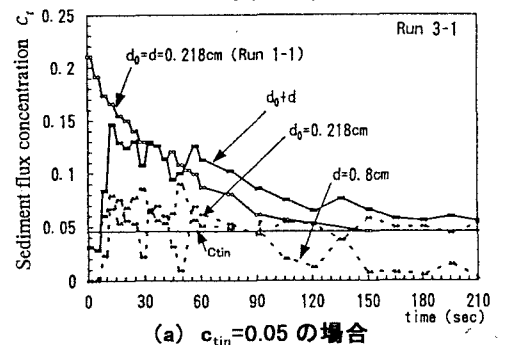
図-2 下流端輸送濃度の時間変化の一例
($d=0.218\text{cm}$ および 0.8cm の場合)

図-3は水路下流端から60cmの位置における河床高の時間変化である。この図によれば、河床材料の粒径が大きいほど河床低下量は小さく、 c_{tin} が大きいほど低下量は小さくなっている。このような結果は、河床材料が大きいほど侵食能力が小さくなり、その結果、輸送濃度が小さくなるという図-2の結果に対応している。なお、図-3において $d=1.1\text{cm}$ の場合の元河床に対する河床上昇は、侵食区間上流側の堰近傍での河床の擾乱によるものと考えられる。

4. 無次元侵食速度および侵食限界粒径 図-2に基づいて、各実験における侵食速度 E を以下の2種類の方法で求めてみる。

(1) c_t のピーク発生時点から30秒間の平均値とした場合

$$E = \int_0^T (Q_s - Q_{s0}) dt / BLT \quad \dots\dots\dots(1)$$

(2) 各実験において河床材料の流出土砂量 V を一定とした場合

$$E = V / BLT \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに B :水路幅、 L :侵食区間長、 $T=30\text{sec}$ 、 Q_s :下流端全流砂量、 Q_{s0} :供給土石流の流砂量、 $V=180\text{cm}^3$ ($d=1.1\text{cm}$, $T=30\text{sec}$)である。

図-4は、上述の E を $d=d_0=0.218\text{cm}$ の場合の侵食速度 E_0 で無次元化し、これと d/d_0 との関係をみたものである。どのケースにおいても d/d_0 が大きくなると E/E_0 は減少している。また、 E/E_0 は c_{tin} の小さい0.05のケースにおいて、0.10のものよりも若干大きくなっている。 c_{tin} の影響は E_0 に含まれているため、無次元量 E/E_0 に対する c_{tin} の影響は当初は現れないものと考えていたが、図示の程度の影響はみられる。これについてはさらなる検討が必要である。

さて、 E/E_0 が0となる河床材料の粒径と、土石流の流動深 h_{s0} あるいは土砂流における移動砂礫層 h_{s0} との間には、密接な関係があることが予想される(図-5)。ところで h_{s0} は、次式によってかなり適切に評価されることがわかっている。^{1),2)}

$$\frac{h_{s0}}{d_0} = \frac{\tau_*}{c \cos \theta \left\{ (c/c_*)^{1/3} \tan \phi_* - \tan \theta \right\}} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\tau_* = h_* \sin \theta / \{ (\sigma/\rho - 1) d_0 \} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 c :平衡状態における砂礫の断面平均濃度、 ϕ :砂礫の静摩擦角、 θ :勾配、 h_* :全流動深である。いま、土石流がマッシーブな運動であることを考慮すれば、砂礫の侵食限界粒径 d_c と h_{s0} は同じオーダーであると推察され、これを $h_{s0}=kd_c$ として次式を得る。

$$\frac{d_c}{d_0} = \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{c \cos \theta \left\{ (c/c_*)^{1/3} \tan \phi_* - \tan \theta \right\}} \tau_* \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 $k=1\sim 2$ 程度となることが予想できる。今回の実験では $\tau_*=0.58\sim 0.87$ 程度であり、 $\tan \phi=0.7\sim 0.8$ 、 $c=c_*/2$ 、 $k=1\sim 2$ とすれば $d_c/d_0=5\sim 10$ 程度となる。これは図-4で E/E_0 が0となるところを外挿して求められる侵食限界粒径とほぼ一致する。

5. おわりに 以上、定性的ではあるが興味ある結果が得られている。なお、侵食限界粒径の予測式は、略算の結果、実際の土石流堆積物に含まれる巨礫の影響をかなり合理的に説明できようであるが、水路実験や現地データに基づいて今後さらに検討する必要がある。

参考文献: 1) 江頭・芦田・高濱・田野中:エネルギー散逸機構に基づく流砂モデル,京大防災研究所年報 No.33.B-2, 1990。

2) 江頭・宮本・伊藤:掃流砂量に関する力学的解釈,水工学論文集 No.41,1997。

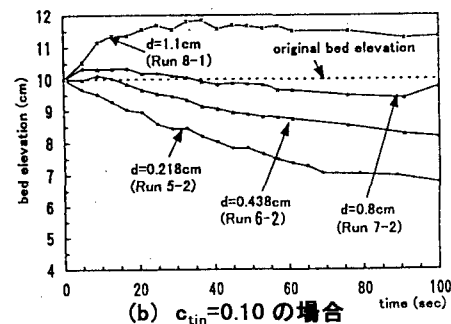
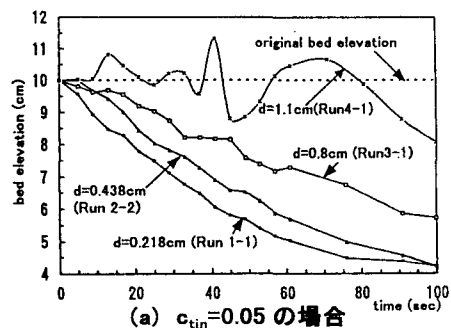


図-3 河床高の時間変化

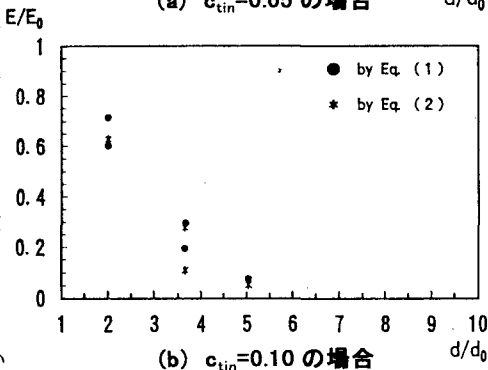
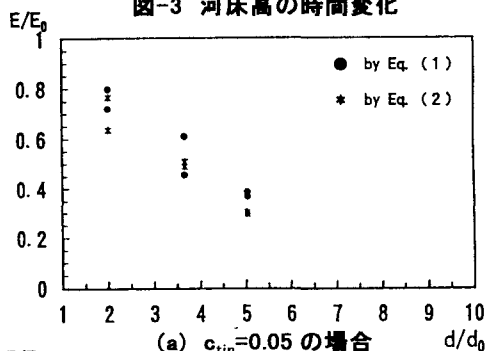


図-4 無次元侵食速度

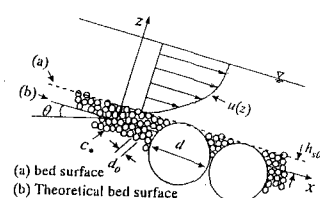


図-5 d と h_{s0} との関係(模式図)