

土石流による河床侵食に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE ENTRAINMENT OF BED MATERIAL INTO DEBRIS FLOW

江頭進治¹・本田尚正²・伊藤隆郭³・有村真一⁴

Shinji EGASHIRA, Naomasa HONDA, Takahiro ITOH, Shinichi ARIMURA

¹ 正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

² 正会員 大阪府立工業高等専門学校講師 建設工学科 (〒572-0017 大阪府寝屋川市幸町26-12)

³ 学生会員 工修 立命館大学大学院 総合理工学専攻 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

⁴ 学生会員 立命館大学大学院 環境社会工学専攻 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

The size of a debris flow will increase if bed material is entrained into the flow body. The erosion velocity or entrainment rate can be predicted if the torrent bed sediment is the same as that of debris flow body. However, such cases are rare. The present paper describes the entrainment characteristics of bed sediment into debris flow body based on flume tests. Experimental results show that the entrainment / erosion velocity decreases with the sediment size ratio, d/d_0 , in which d is the bed sediment size and d_0 is the grain size of the supplied debris flow. The critical grain size of entrainment depends on the relative flow depth, h_0/d_0 , in which h_0 is the debris flow depth.

Key Words : Erosion velocity, entrainment of bed sediment, critical erosion velocity, run-out process, developing process

1. 緒 言

我が国では、地形条件や気象条件の厳しさから、毎年のように各地で山腹崩壊や土石流による土砂災害が頻発している。そのため、砂防ダムをはじめとした構造物による対策ばかりでなく、避難予警報システムの整備やハザードマップの作成など、種々の土石流対策が実施されている。こうした対策をより有効に行うためには、土石流の発生から停止に至る過程における土石流特性値の評価が不可欠であり、現地調査や基礎研究が活発に行われている。その結果、それらの実態や物理機構についてはかなり明らかにされてきている。

ところで、土砂流出の形態および規模は、山腹崩壊や地すべりなどによる土砂生産の発生域およびその下流域の地形的条件、生産土砂の特性、流動域における溪床・溪岸の侵食条件、水の供給条件などに依存する。なかでも、土石流の流動過程における溪床堆積物の取り込みは、土石流の規模を規定する大きな要素であり、それは溪床における堆積物の分布状況に依存し、堆積物の物理特性、たとえば、石礫の粒径にも依存しているものと思われる。これら

のことは、実現象を扱う上できわめて重要な問題である。本研究は、土石流の発達過程を議論するための基礎データを得ることを目的とするものであって、ここでは、特に、後者、すなわち、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、河床材料の取り込みを実験的に議論するものである。特に、河床材料の粒径を種々変化させて実験を行い、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している。

2. 実験の概要

(1) 実験装置

図-1は、実験装置の概要である。図のように、水路は、上流側において所定の土石流を形成させる区間と、下流側において河床材料の侵食を調べる区間からなっており、これらは堰板によって分割されている。上流側には、土石流を形成させるための給水・給砂装置があり、供給土石流の定常性を確保するため、上流側の河床は給砂材料と同じ砂を用いて供給土石流の平衡勾配に設定されている。

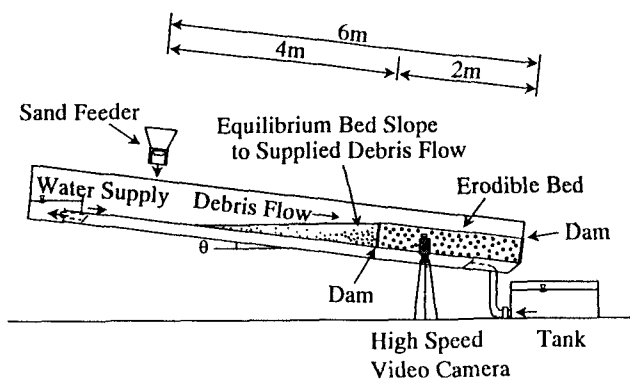


図-1 実験装置

下流側の上流端近傍には、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おり、下流端には、高さ10 cmの堰板を設置している。この区間に、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。

(2) 実験条件

実験ケースおよび供給する土石流の条件を表-1に示す。すべてのケースにおいて、下流側の河床勾配は12°に設定されている。これは、通常の土石流の勾配よりも若干緩い。水路上流側で形成させる土石流は、平均粒径 $d_0 = 0.218$ cmの均一な砂で構成され、その流量は一定になるよう留意し、ここでは単位幅当たり $q_{in} = 80.0$ cm²/sとしている。上流からの土石流の流入濃度（輸送濃度） c_{in} として5%および10%の2種類、下流側の侵食区間の河床材料には、平均粒径 $d = 0.218$ cm, 0.438 cm, 0.8 cmおよび11 cmの4種類を用い、計8ケースの条件で、

表-1 実験条件

Run	Bed sediment size d (cm)	Supply conditions from the upper stream of channel		
		Sediment flux concentration c_m (%)	Sediment-water mixture discharge q_m (cm ² /s)	Sediment discharge q_{sm} (cm ² /s)
1-1	0.218	4.57	79.24	3.62
1-2	0.218	4.54	79.03	3.59
2-1	0.438	4.62	79.58	3.68
2-2	0.438	4.31	80.20	3.46
3-1	0.800	4.57	78.00	3.56
3-2	0.800	4.73	78.93	3.73
4-1	1.100	4.53	77.68	3.52
4-2	1.100	4.53	80.42	3.64
5-1	0.218	9.75	79.05	7.71
5-2	0.218	9.40	79.34	7.46
6-1	0.438	9.83	79.43	7.81
6-2	0.438	9.61	76.38	7.34
7-1	0.800	9.70	79.51	7.71
7-2	0.800	9.32	77.00	7.18
8-1	1.100	9.29	79.09	7.35
8-2	1.100	9.46	80.67	7.63

各ケース2回の実験を行った。なお、ここで、濃度の小さい流れを土石流と記述したが、これは便宜上のことである。

(3) 測定項目および測定方法

測定項目は、水路下流端における総流出流量（水と土砂） Q_{out} の時間変化、河床侵食区間における河床の最終形状、河床侵食区間内の定点における水深 h および河床高 z_b の時間変化である。

Q_{out} はバケツを用いて2秒間隔で1回当たり2秒間採取し（15回/60 sec.）、炉乾燥後、流出土砂を上流側から供給される土石流の材料と河床材料とに分類した。これに基づいて、全流砂および粒径別の輸送濃度 c_i を算出した。河床の最終形状は、ポイントゲージを用いて縦断方向に5 cm間隔、横断方向には中心および中心から左右4 cmずつの計3ヶ所で測定した。 h および z_b は、高速ビデオを用いて水路下流端から60 cm上流の地点の流れを追跡し、画像解析によって求めた。

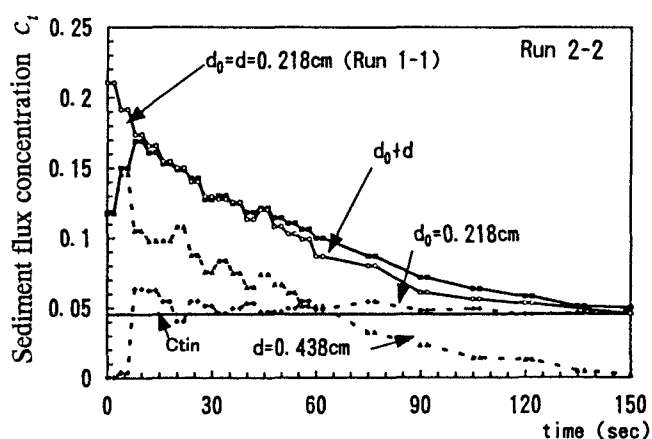
3. 実験結果および考察

(1) 輸送濃度と河床高の変化

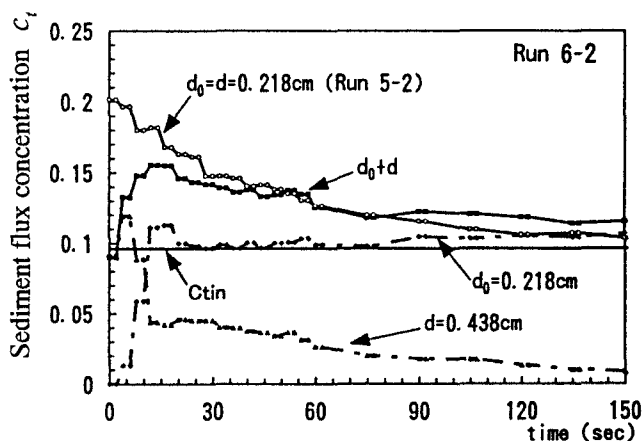
図-2 (a), (b), (c)は、下流側へ供給する土石流の土砂輸送濃度 c_{in} が0.05で、河床材料がそれぞれ0.438, 0.8および1.1 cmの場合の下流端土砂輸送濃度を示し、図-3 (a), (b), (c)は、 $c_{in} = 0.10$ の条件における各河床材料に対する下流端土砂輸送濃度を示したものである。なお、各図の右上には、表-1に対応する実験番号を付記している。

これらの図において、 $d_0 = d = 0.218$ cmとして示すデータは、供給土石流に用いられた同じ材料（ $d_0 = 0.218$ cm）を河床材料とした場合の結果である。これは、他のデータとの比較のため、図-2、図-3の全部の図に示されている。また、 d_0 で示しているものは、供給土石流材料の下流端輸送濃度、 d で示しているものは、侵食された土砂（河床材料）の下流端輸送濃度、 $d_0 + d$ で示しているものは、 d_0 と d 、すなわち全砂礫の下流端輸送濃度である。

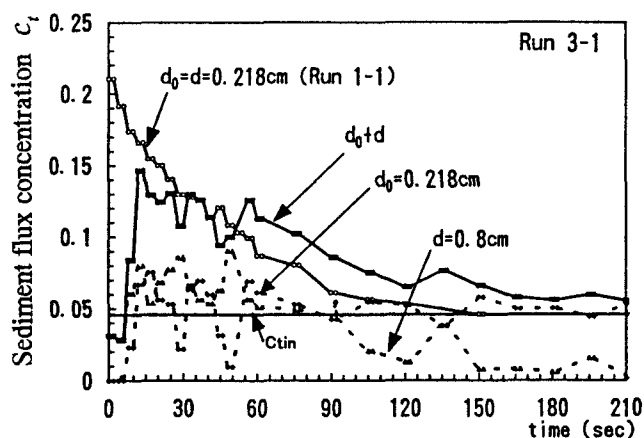
河床勾配が、初期設定値から顕著に変化しない時間領域、すなわち、下流端到達後、0～30秒の時間帯に着目すると、全流砂および河床材料の下流端輸送濃度は、粒径が大きいほど小さくなる。すなわち、侵食が抑制されているのが分かる。次に、 c_{in} の違い、すなわち、図-2と図-3の結果、特に河床材料の流出濃度を比較すると、 c_{in} の大きい図-3において、河床材料の侵食が抑制されていることが分かる。



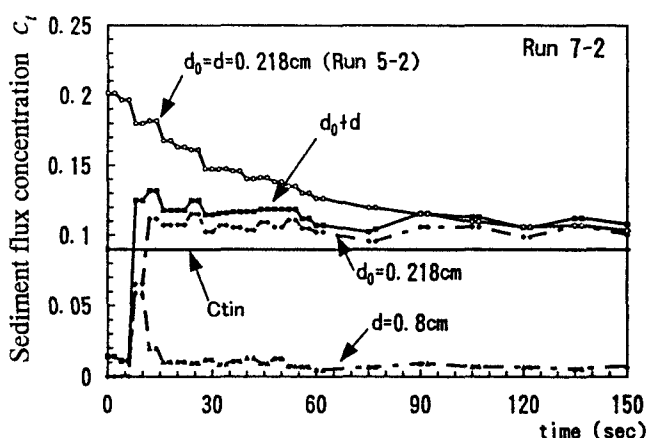
(a) $d = 0.438\text{cm}$ の場合



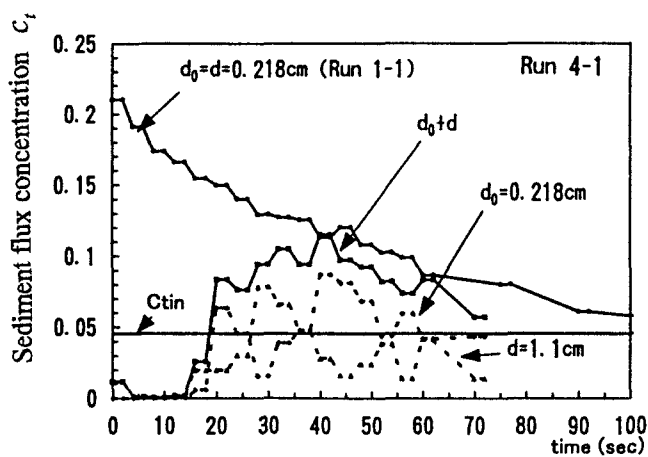
(a) $d = 0.438\text{cm}$ の場合



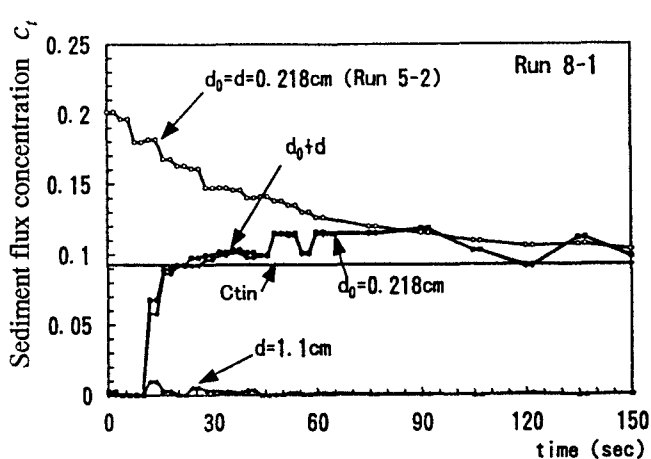
(b) $d = 0.8\text{cm}$ の場合



(b) $d = 0.8\text{cm}$ の場合



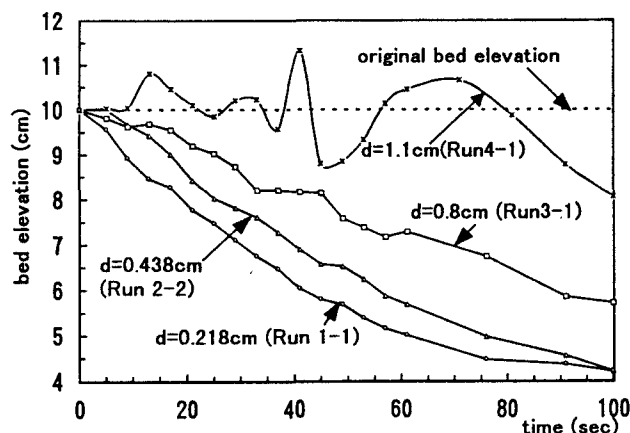
(c) $d = 1.1\text{cm}$ の場合



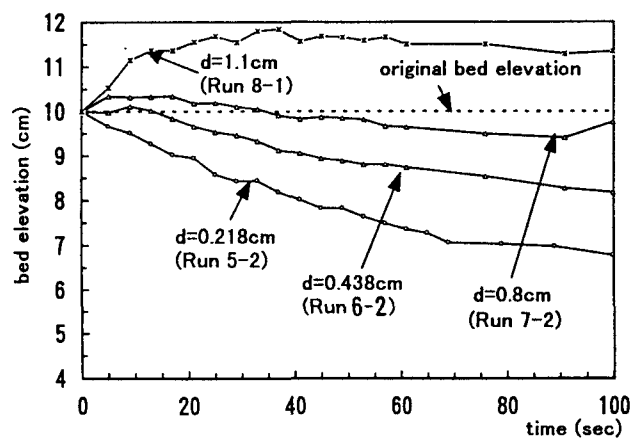
(c) $d = 1.1\text{cm}$ の場合

図-2 下流端輸送濃度の時間変化
($c_{tin} = 0.05$ の場合)

図-3 下流端輸送濃度の時間変化
($c_{tin} = 0.10$ の場合)



(a) $c_{tin} = 0.05$ の場合



(b) $c_{tin} = 0.10$ の場合

図-4 河床高の時間変化

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。なお、図-3(c)において、河床材料はほとんど流出していないが、これは、河床材料の粒径がいわゆる掃流限界粒径よりも大きいためではないことに留意しておく必要がある。

図-4(a), (b)は、それぞれ c_{tin} が 0.05 および 0.10 の条件下における水路下流端から 60 cm の位置で測定した河床高の変化である。河床高を示した線は、河床材料の粒径および実験番号を用いて区別されている。これらの図において、河床材料の粒径が大きいほど、河床低下量が小さく、かつ c_{tin} が大きい程、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と図-3の結果に対応している。

なお、図-4(b)の $d = 1.1$ cm の材料を用いた実験ケースにおいて、河床高が元河床より上昇しているのは、次の理由による。図-3(c)に示されるように、このケースにおいては土石流フロントによる若干の侵食が見られる以外、河床の顕著な侵食は見られず、河床材料は間欠的な移動をするのみである。したがって、河床高が上昇しているのは、侵食区間の土石流流入部近傍で侵食された材料が堆積したためである。

(2) 侵食速度

後述の式(3)、すなわち土石流による河床材料の侵食速度式を直接的に検証できるような実験方法は見当たらない。ちなみに本実験は、下流端における河床高を一定にしているため、河床侵食のデータはその影響を受けている。そこで、ここでは供給土石流の材料と同じ材料を用いたケースにおける河床の侵食速度を基準値として、これとの比の形で調べてみよう。いま、図-2および図-3に基づいて、各実験における侵食速度を2種類の方法によって算定してみる。これは、この種のデータは精度の面で危惧されることが多いため、異なる方法を用いてデータ整理を行い、それらを比較することにより、求め方によって結果が左右されないことを確認しておくことが重要だからである。

さて、一つは、下流端輸送濃度のピークの発生時点から、30秒間の平均侵食速度であって、次式に基づく。

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

ここに、 B は水路幅、 L は河床の長さ、 $T = 30$ 秒、 Q_s は下流端全流砂量、 Q_{s0} は土石流の供給流砂量である。もう一つの方法は、各ケースにおいて、河床材料の下流端流出土砂量を一定にし、次の方法によるものである。

$$E = \frac{V}{BLT'} \quad (2)$$

ここに、 T' は流出濃度のピーク後から河床材料の流出土砂量が V になるまでの時間である。ここで、 V は、流出土砂量の最も少ないケース、すなわち、河床材料として $d = 1.1$ cm を用いた実験ケースを基準に、 $V = 180 \text{ cm}^3$ ($T' = 30$ 秒) とした。したがって、この方法によれば、流出土砂量の多いケースにおいては評価時間 T' をかなり短くして侵食速度を評価することになる。

図-5 (a), (b)は、それぞれ $c_{in} = 0.05$ および 0.10 のケースにおける侵食速度を上の方の方法によって求め、これらを供給土石流と同じ材料を用いた場合の河床の侵食速度 E_0 で無次元化し、これと d/d_0 との関係を見たものである。ここに、 d は河床材料の粒径、 d_0 は 0.218 cm である。なお、図において、同じ式で求めたデータが2つあるのは、表-1に示すように、同じ条件について2回の実験を行い、それぞれを示しているからである。パラメータ d/d_0 の意義については次節で述べる。前節(1)の結果から推察されるように、いずれのケースにおいても、 d/d_0 が大きくなると、 E/E_0 は減少するの分かる。また、 E/E_0 は c_{in} 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_{in} 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_{in} の影響は、当初現れないことも予想されたが、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。

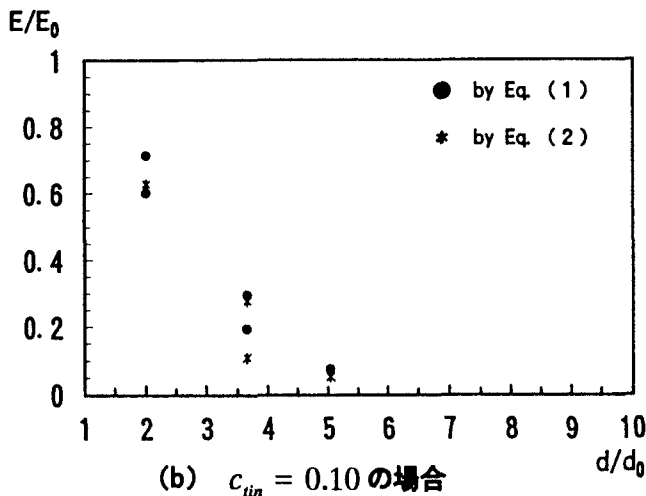
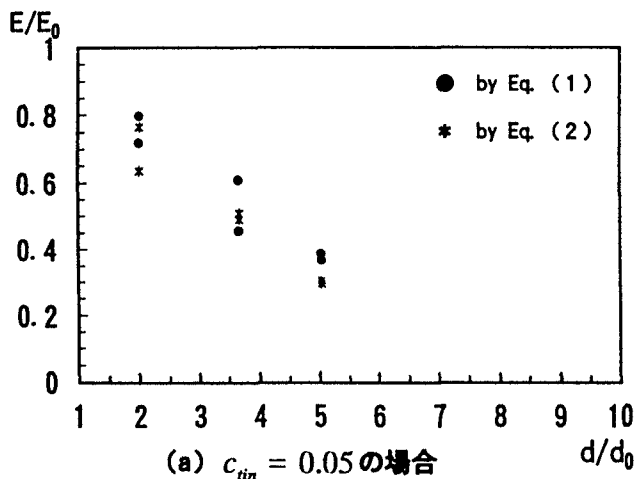


図-5 無次元侵食速度

図-5によれば、 E_0 が与えられると、河床材料の侵食速度が推定される。ところで、土石流の材料と河床材料とが同じであれば、侵食速度 E_0 は次式¹⁾によってほぼ妥当な結果が得られることが、土石流の堆積過程に関するシミュレーションを通じて確認されている^{2), 3)}。

$$\frac{E_0}{v} = c_s \tan(\theta - \theta_s) \quad (3)$$

ここに、 v は土石流の平均流速、 c_s は砂礫の静止堆積層の土砂濃度、 θ は河床あるいは地形勾配、 θ_s は土石流の濃度に対する平衡勾配である。

式(3)の妥当性を確認するため、土石流の質量保存則、運動量保存則および河床位方程式からなる一次元支配方程式²⁾に式(3)を適用し、 $c_{in} = 0.10$ 、 $d_0 = 0.218$ cm の実験を対象として下流端濃度を算定した。その結果を図-6に示している。図に示されるように、実験値と計算値は極めてよく一致しており、式(3)はほぼ妥当であることが分かる。

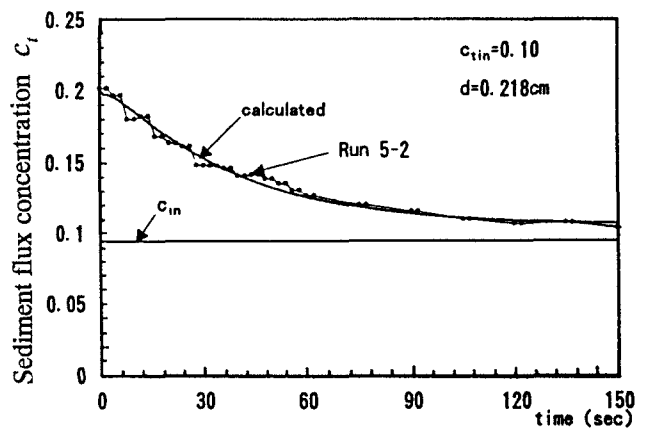


図-6 実験値と数値計算値との比較
($c_{in} = 0.10$, $d_0 = 0.218$ cm)

(3) 侵食限界粒径

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の流動深 h_{s0} との間には密接な関係があることが予想される。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分かっている^{4), 5)}。

$$\frac{h_{s0}}{d_0} = \frac{\tau_*}{c \cos \theta \left\{ (c/c_s)^{1/5} \tan \phi_s - \tan \theta \right\}} \quad (4)$$

ここに、 c は平衡状態における砂礫の断面平均濃度、 ϕ_s は砂礫の静摩擦角、 θ は勾配である。また、 $\tau_* = h_t \sin \theta / \{ (\sigma/\rho - 1) d_0 \}$ 、 h_t は全流動深である。

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} と同じオーダーであることが推察される。これを、 $h_{s0} = kd_c$ と置き、式(4)に代入すれば、次式を得る。

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

ここに、 $k = 1 \sim 2$ 程度の値をとることが予想できる。前述の実験では、 τ_* が $0.58 \sim 0.87$ 程度であり、 $\tan \phi_s \cong 0.7 \sim 0.8$ 、 $c = c_*/2$ 、 $k = 1 \sim 2$ とすれば、 $d_c/d_0 = 5 \sim 10$ 程度になる。これは、図-5(a)、(b)の結果において、 E/E_0 が 0 となることを外挿して求められる限界粒径にほぼ一致する。

4. 結 語

土石流の流下過程は、その過程において、河床材料を取り込みながら発達することはよく知られている。ところが、土石流の材料と河床堆積物の粒径の違いが、河床材料の取り込み、すなわち、侵食に関してどんな影響を与え、さらには、取り込まれる限界の砂礫の大きさは、どのように決定されるのか、などは、実際に土石流のシミュレーションを行うに当たり、極めて重要である。ところが、これらについては、ほとんど情報が得られていない。本研究は、このような問題を検討するためのものであって、ここでは、基礎実験を行い、その結果ならびにこれまでの基礎研究の成果に基づいて検討したものである。以下、得られた主要な結果と課題を要約する。

(1) その勾配に対応する平衡濃度よりも小さい土砂濃度をもつ土石流は、河床材料を侵食する。侵食速度は、土石流を構成する材料の粒径 d_0 と河床材料の粒径 d および土石流濃度に依存する。これらを一般化するため、無次元侵食速度と d/d_0 および土石流濃度との関係について検討した。それによれば、無次元侵食速度 E/E_0 は、 d/d_0 が大きくなるに伴い、また、土石流濃度が大きくなると減少することが示された。

(2) 無次元侵食速度の基準値 E_0 は、土石流の材料とは異なる河床材料の侵食速度を議論するための基本量である。これについては、流出土砂濃度の数値計算を行い、式(3)によって適切に評価されることを確認した。

(3) 平衡状態における土石流や土砂流における砂礫層の移動層厚（流動深）に着目し、河床材料の侵食限界粒径、あるいは取り込み限界粒径に関して次元解析的考察を行い、限界粒径を大まかに推定する方法を提案した。

(4) 以上、定性的ではあるが興味ある結果が得られているが、 E/E_0 に対する土石流濃度の影響などは、今後に解明すべき課題である。また、取り込み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粒径をかなり合理的に説明できるようであるが、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。

謝辞：本研究は、一部文部省科学研究費 基盤研究B（代表者 江頭進治）の補助を受けている。また、実験に当たり、立命館大学大学院学生 竹内宏隆君、立命館大学理工学部4回生 赤塚祐介君および川西正人君の諸氏には、種々ご協力願った。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 江頭進治：土石流の停止・堆積のメカニズム(1)，新砂防，第46巻第1号，pp. 45-49，1993。
- 2) 江頭進治：土石流の停止・堆積のメカニズム(2)，新砂防，第46巻第2号，pp. 51-56，1993。
- 3) 江頭進治・本田尚正：姫川支川蒲原沢土石流のシミュレーション，水工学論文集，第42巻，pp. 919-924，1998。
- 4) 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，京大防災研究所年報，第33号B-2，pp. 293-306，1990。
- 5) 江頭進治・宮本邦明・伊藤隆郭：掃流砂量に関する力学的解釈，水工学論文集，第41巻，pp. 789-794，1997。

(1998. 9. 30 受付)