

急勾配移動床水路における種々の流砂形態に 対する統合的流砂量式

A SEDIMENT DISCHARGE FORMULA FOR VARIOUS TYPES OF SEDIMENT
TRANSPORT IN A STEEP OPEN CHANNEL

橋本 晴行¹・朴崎 璣²・池松 伸也³・田崎 信忠⁴

Haruyuki HASHIMOTO, Kichan PARK, Shinya IKEMATSU and Nobutada TASAKI

¹ 正会員	工博	九州大学大学院助教授	工学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)
² 正会員	工修	九州大学大学院助手	工学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)
³ 正会員		九州大学大学院技官	工学府 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)
⁴ 学生員		九州大学大学院	工学府 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

We can distinguish four main types of sediment transport and their two intermediate types on movable bed in a steep open channel ; those are bed and suspended load types, debris and mud flow types, and intermediate types between bed load and debris flow types. The flow model for hyperconcentrated sand-water mixtures proposed by Hirano and Hashimoto(1995, 1997) can be applied to all types of flows with sediment transport in a steep open channel. The flow model consists of granular and inertial layers; the intergranular stresses play major role in the former layer and inertial forces in the latter layer. On the basis of the flow model, sediment discharge formulas have been derived by Hirano and Hashimoto (1996, 1998). In the present study the sediment discharge formulas are compared with the experimental results and also with the other formulas. The calculation of sediment discharge formulas derived by Hirano and Hashimoto(1996, 1998) shows good agreement with experimental results.

Key Words :sediment-water mixture flow, debris flow, mud flow, bed load, suspended load

1. はじめに

掃流砂と土石流との中間的な流砂形態に掃流状集合流動があるが、一方、浮流砂と泥流との間にも中間的な流砂形態として高濃度の浮流砂流の存在が考えられる(図-1)。この流砂形態については、従来、泥流に対して提唱されている2層構造モデル^{1),2)}が適用され、流砂量や抵抗則の評価式が理論的に誘導されている³⁾。このモデルは、底面付近には粒子間力の卓越する粒子間力層が、その上には慣性力の卓越した慣性力層が存在するものとしてモデル化されたものである。そのため下層が卓越した場合には土石流となり、上層の浮流砂が希薄になれば掃流砂や掃流状集合流動となる。従って、この2層構造モデルは土石流や掃流状集合流動をも包含したモデルであるため広範な適用の可能性をもっており実用上の観点からも注目すべきものがあるが、その適用範囲に

については明らかではない。本研究は、2層構造モデルをもとに高濃度浮流砂流・泥流の領域に対して導かれた流砂量式²⁾について、広範な条件下の実験データや他の流砂量式とも比較しながら、その流砂量式の適用範囲について調べるものである。また、混合砂礫についても流砂量を調べる実験を行い、その適用性について検討することとする。

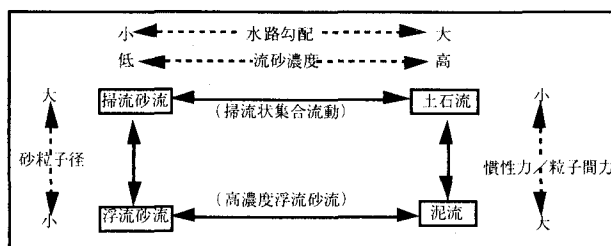


図-1 急勾配移動床水路における種々の流砂形態

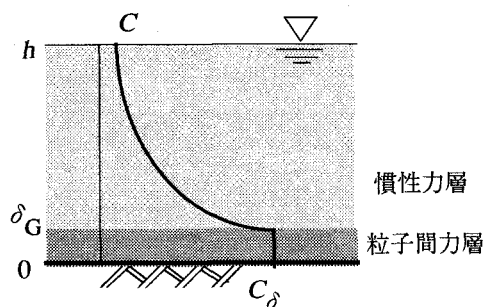


図-2 流れの構造と濃度分布に関する模式図

2. 2層構造モデルに基づいた抵抗則と流砂量式^{1)~3)}

高濃度流の運動方程式における各項のオーダー比較を行い、慣性項と粒子間衝突応力項との比をとると流れを規定する無次元パラメータ $\frac{L}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}}$ が得られる。ここに、 L は代表長さスケール、 d は粒径、 σ は粒子比重、 ρ_t は高濃度流れの密度、 C は土砂濃度である。また $F(C)$ は濃度の関数で $F(C)=(C/C_*)^2/(1-C/C_*)$ として与えられる。

濃度・速度分布を考える時、代表長さスケール L として底面からの高さ z を選ぶと、無次元高さ $\frac{z}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}}$ を導入することができる。その結果、底面近傍には粒子間力の卓越した粒子間力層が、その上には慣性力の卓越した慣性力層の存在が考えられる(図-2)。

この2層構造モデルをもとに、流速分布や粒子間力層内の濃度 C_δ の評価式が等流条件下の力の釣り合い式から誘導される^{1)~3)}。まず、流速分布については、濃度分布は一樣として取り扱われ、粒子間力層では線形分布が、慣性力層では対数分布がそれぞれ近似的に得られている(図-3中の実線)。次に、粒子間力層内の濃度については、水路勾配、無次元掃流力、粒子間力層の相対厚さ δ_G/h に規定される式が求められている。これらの成果を基にして流砂量式は

$$q_s = C_\delta \bar{u}_\delta \delta_G + \int_{\delta_G}^h C u dz \quad (1)$$

より得られている³⁾。ここに、 $\bar{u}_\delta$ は粒子間力層における層内平均速度、 C は慣性力層の濃度分布、 u は速度分布を表す。

(1) 粒子間力層厚

粒子間力層厚は、土石流・泥流の速度分布が底層の線形分布から上部の対数分布に変化する境界高さ

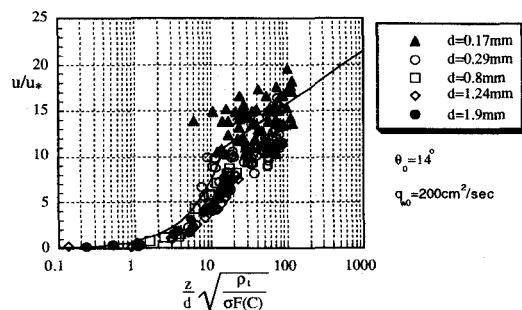


図-3 土石流・泥流の速度分布に基づく粒子間力層厚の決定²⁾

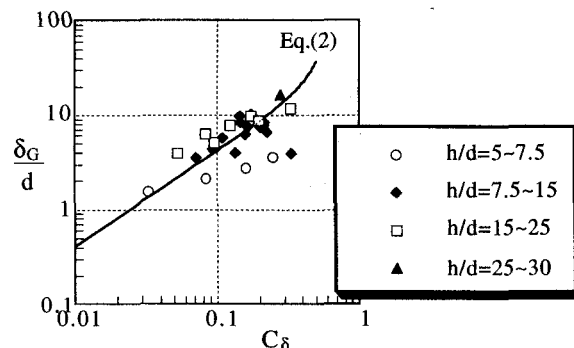


図-4 掃流状集合流動および掃流砂流領域における粒子間力層厚の無次元量

として決定される(図-3)。すなわち、次式により普遍表示される^{1),2)}。

$$\frac{\delta_G}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}} = 15 \quad (2)$$

一方、この式において $C=C_\delta$ 、 $\sigma/\rho=2.65$ 、 $C_*=0.6$ とにおいて δ_G/d を計算し、掃流状集合流動および掃流砂における流砂層厚の実験値⁴⁾と比較したのが図-4である。実験値との適合性は概ね良好であり、式(2)は、土石流、泥流、掃流状集合流動、掃流砂流のいずれの領域においても粒子間力層厚の評価式として概ね妥当であると判断される。

(2) 抵抗則

まず、土石流のように流れの表面が粒子間力層内に存在する場合、すなわち

$$\frac{h}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}} \leq \frac{\delta_G}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}} \quad \text{の場合には}$$

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{\xi}{2\sqrt{K_{zx}}} \frac{h}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}} \quad (3)$$

となる。ここに u_* は摩擦速度、 ξ は粒子間力層内の速度分布の補正係数で $\xi=0.343$ 、 K_{zx} は粒子間応力に関する係数で $K_{zx}=0.2989$ である。

次に、泥流のように流れの表面が慣性力層内に存

在する場合、すなわち

$\frac{h}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}} \geq \frac{\delta_G}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}}$ の場合には

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{\xi}{2\sqrt{K_{zx}}} \frac{\delta_G}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}} \frac{\delta_G}{h} + \left(\frac{u_\delta}{u_*} - \frac{1}{\kappa} \right) \left(1 - \frac{\delta_G}{h} \right) - \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{\delta_G}{h} \right) \quad (4)$$

を得る。ここに、 κ はカルマン定数、 u_δ は $z=\delta_G$ における速度である。また粒子間力層内の平均速度 $\bar{u}_\delta$ として次式が導かれる。

$$\frac{\bar{u}_\delta}{u_*} = \frac{\xi}{2\sqrt{K_{zx}}} \frac{\delta_G}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}} \quad (5)$$

これに式 (2) を代入すると $\bar{u}_\delta/u_* = 4.705$ を得る。

(3) 流砂量式

流砂量式は式 (1) から次式が誘導されている。

$$\frac{q_s}{\sqrt{sgd^3}} = \frac{\bar{u}_\delta \tau_*^{3/2}}{u_*} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \frac{1}{(\alpha - \tan \theta_0) \cos \theta_0} G \left(\tan \theta_0, \frac{h}{d}, \frac{w_0}{u_*} \right) \quad (6)$$

ここに、 τ_* は無次元掃流力、 τ_{*c} は無次元限界掃流力で $\tau_{*c}=0.05$ 、 α は粒子比重の関数で通常 $\alpha=0.875$ 程度である。また θ_0 は水路勾配、 $G(\tan \theta_0, h/d, w_0/u_*)$ は $\tan \theta_0, h/d, w_0/u_*$ の関数で、次式により与えられる。

$$G \equiv \left\{ 1 + \frac{1}{\bar{u}_\delta/u_*} \frac{1}{\eta_\delta} \int_{\eta_\delta}^1 \frac{C}{C_\delta} \frac{u}{u_*} d\eta \right\} \left[1 - \frac{\tau_{*s}}{6Z} \{ 1 - \exp\{-6Z(1-\eta_\delta)\} \} \right] \frac{1}{(\alpha - \tan \theta_0) \cos \theta_0} \frac{d}{\delta_G} \quad (7)$$

ここに w_0 は粒子沈降速度、 $Z=w_0/(\beta \kappa u_*)$ 、 $\eta_\delta=\delta_G/h$ である。土砂が粗粒化し $w_0/u_* \rightarrow \infty$ となると $G \rightarrow 1$ となり、式 (6) は橋本・平野により提案された掃流状集合流動の流砂量式⁴⁾に一致する。

$$\frac{q_s}{\sqrt{sgd^3}} = \frac{\bar{u}_\delta \tau_*^{3/2}}{u_*} (1 - \tau_{*c}/\tau_*) \frac{1}{(\alpha - \tan \theta_0) \cos \theta_0} \quad (8)$$

ここに $\bar{u}_\delta/u_* \approx 4.7$ と近似されているが⁴⁾、別に得られた式 (5) の値とも一致している。なお、式 (6) 、

(8) は2層構造モデルを前提にしているので、 $h > \delta_G$ の場合に成立する式である。

3. 急勾配移動床水路における流砂量に関する実験

上述の流砂量式を検証するため、可変勾配水路において、河床材料として、粒子密度は $\sigma=2.59 \sim 2.65 \text{ g/cm}^3$ で、微細砂から中れきまでの種々の粒径の

表-1 実験条件と流れの特性

d(mm)	σ/ρ	$\theta_0(^{\circ})$	$q_{w0}(\text{cm}^2/\text{s})$	C_T	h/d	w_0/u_*
4.6	2.59	2~23	185~209	0.0039~0.568	5.96~28.3	0.31~2.24
4.4	2.59	2~14	659~1101	0.008~0.23	11.60~18.45	0.48~1.50
1.9	2.61	6~18	100~600	0.066~0.46	10.17~28.54	0.34~0.87
1.24	2.65	6~18	100~600	0.068~0.34	14.65~29.51	0.33~0.82
0.84	2.62	3~6	97.8~203	0.024~0.091	16.09~29.39	0.55~0.82
0.80	2.64	2~22	48.0~661	0.011~0.46	14.45~70.36	0.22~0.76
0.55	2.65	3~18	97.8~667	0.031~0.35	26.56~75.43	0.19~0.76
0.29	2.62	3~18	48.5~221	0.051~0.38	32.80~86.24	0.11~0.50
0.17	2.61	3~18	48.6~217	0.10~0.36	58.3~134.4	0.10~0.25
0.09	2.60	4~18	98.2~209	0.13~0.31	183.4~202.4	0.035~0.045
0.07	2.63	14	99.5~189	0.30~0.34	185.71~239.2	0.022~0.10

材料を用いて行われた土石流、泥流、掃流状集合流動、掃流砂流、高濃度浮流砂流、浮流砂流に関する従来の実験データ^{1)~5)}を用いることとする。その実験条件と流れの特性を表-1に示す。紙数の関係上詳細は省くが、水路は7m~12mの比較的長い水路が用いられ、上流からの給砂はないが、流量と土砂濃度のハイドログラフから、フロント後続部についてはほぼ定常状態の形成が確認されている。用いられたデータはこの定常状態の部分である。しかしながら、水路勾配 $\theta_0=20^{\circ}$ 付近のデータについては定常性に問題が残る。また、水深計測時の河床は、未流動層と流動層との境界として定義され、移動床上の土石流のように河床付近に「ズリ層」を伴う場合には表面速度の3%程度の速度をもつ高さとして定義されている⁶⁾。

4. 平野・橋本・多川の流砂量式³⁾と実験との比較

図-5は無次元流砂量の実験値を無次元掃流力に対して表したものである。ここにパラメータとして相対水深 h/d 、無次元沈降速度 w_0/u_* を用いている。図中の曲線は理論式 (6) の簡便式である。大部分の実験が理論とうまく適合していることが分かる。なお、パラメータの選択には他にもあり、それに対応して無次元流砂量と無次元掃流力との関係も変化する。図は省略しているが、相対水深 h/d のもっとも大きな領域と比較的小さな領域について、輸送濃度 C_T をパラメータとして実験値と理論式とを比較すると、 $h/d > 200$ では理論式が若干過大となる。また $15 < h/d < 35$ では $C_T > 0.5$ のデータが一部、理論と合わないことが分かる。前者は河床材料が微細砂の場合の実験データであり、後者は典型的な土石流のデータ

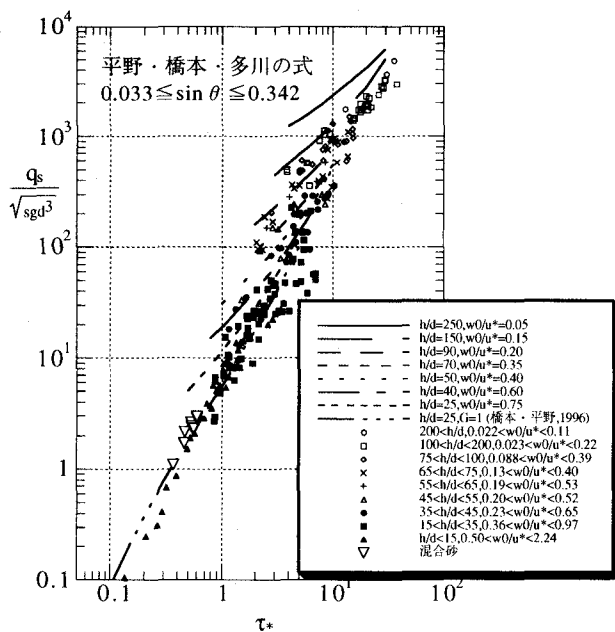


図-5 相対水深と無次元沈降速度をパラメータとした時の無次元流砂量と無次元掃流力との関係

である。前者については、 w_0/u_* が小さくなる領域では粒子間力層の濃度 C_s の評価式の精度に問題があるためと考えられる。後者については、 C_T が0.5以上になり最密充填濃度 $C_m \approx 0.6$ に近くなると C_T の増加が頭打ちの傾向を示すようになることに起因するものと考えられる。

5. 他の流砂量式^{7)~10)}と実験との比較

(1) 土石流における高橋⁷⁾の土砂輸送濃度式

土石流については、一様な濃度分布と等流条件のもとで力の釣り合い式が誘導され、その結果土砂輸送濃度式が得られている。それを書き直すと

$$\frac{q_s}{\sqrt{sgd^3}} = \frac{\bar{u}}{u_*} \tau_*^{3/2} \frac{1}{(\tan \phi - \tan \theta_0) \cos \theta_0} \quad (9)$$

となる。ここに $\tan \phi = 0.75, \bar{u}/u_* = 5$ として実験結果と比較した結果が図-6である。明らかに、 h/d の小さな領域と、 h/d が大きく、 w_0/u_* が小さい領域において、式(9)は実験値と適合していないことが分かる。

(2) Takahashi⁸⁾の掃流状集合流動式

Takahashi⁸⁾は、掃流状集合流動の流砂濃度 $C_{s\infty}$ について実験結果を整理して $C_{s\infty} = 6.7 C_T \tau_*^2$ を経験的に得ている。これを書き直すと

$$\frac{q_s}{\sqrt{sgd^3}} = 6.7 \frac{\bar{u}}{u_*} \tau_*^{5/2} \frac{d}{h} \frac{1}{(\tan \phi - \tan \theta_0)^2 \cos^2 \theta_0} \quad (10)$$

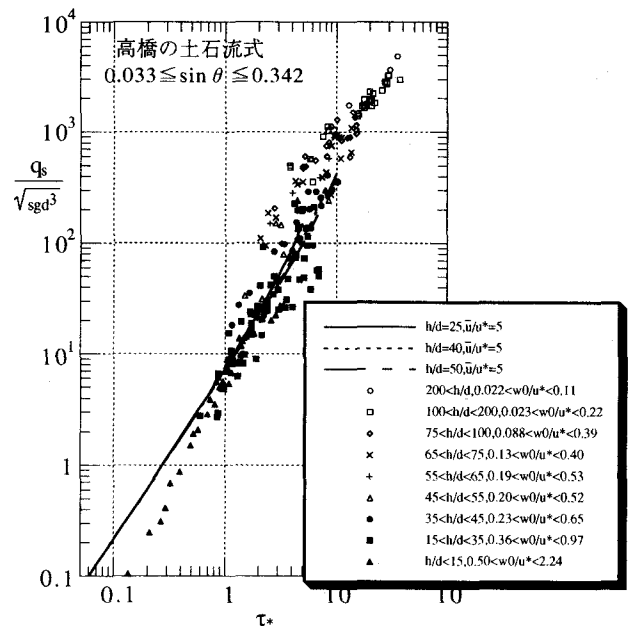


図-6 高橋の土石流濃度式と実験との比較

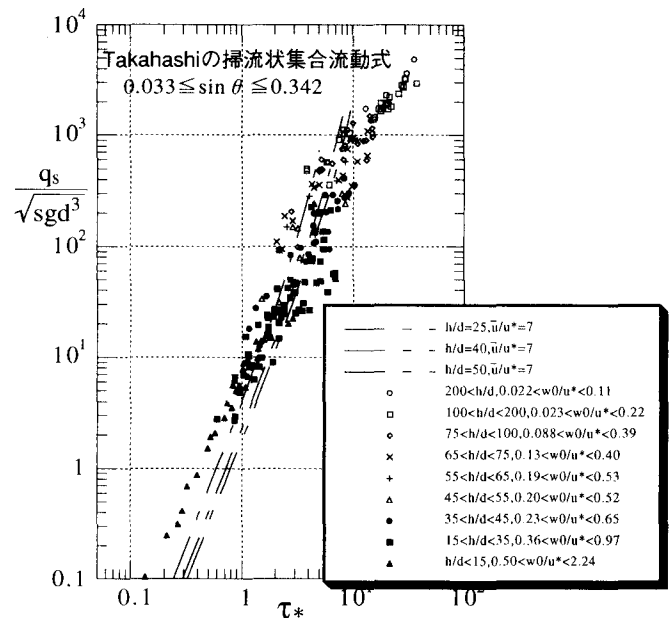


図-7 Takahashiの掃流状集合流動式と実験との比較

となる。ここに $\tan \phi = 0.75, \bar{u}/u_* = 7$ として実験結果と比較した結果が図-7である。 h/d の小さな領域と、 h/d が大きく、 w_0/u_* が小さい領域において、式(10)は実験値とあまり一致していない。

(3) 掃流状集合流動に対する江頭⁹⁾の流砂量式

江頭⁹⁾は、掃流状集合流動に対して2層流モデルをもとに、流砂量式を導いている。流砂量式は紙数の関係で省略するが、これを実験結果と比較した結果が図-8である。Takahashi⁸⁾の結果とはほぼ同様な傾向を示し、 h/d の小さな領域と、 h/d が大きく、 w_0/u_*

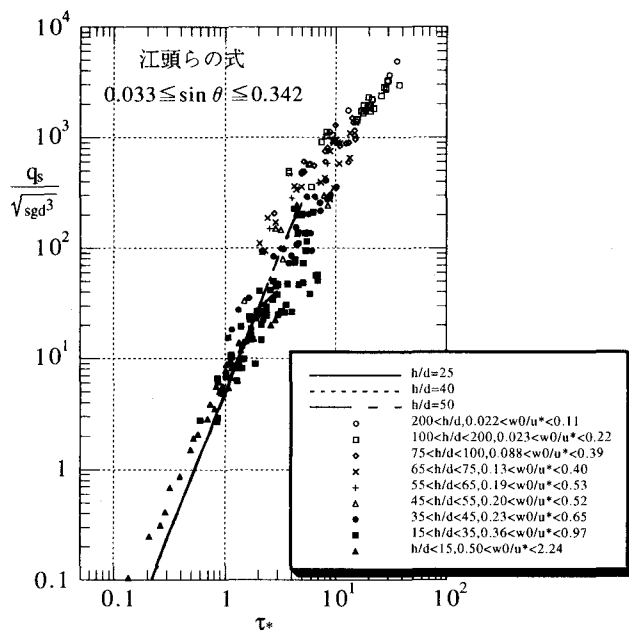


図-8 江頭・芦田・高浜・田野中の流砂量式と実験との比較

が小さい領域において、彼らの式は実験値とあまり一致していない。

(4) 芦田・高橋・水山¹⁰⁾の掃流砂量式

芦田・高橋・水山¹⁰⁾は、山地河川における掃流砂について、単一粒子の釣り合い式から、流砂量式を導いている。流砂量式は省略するが $\tau_{*c}=0.04$ として実験結果と比較した結果が図-9である。彼らの式は、 h/d の小さな領域で過大評価となり、 h/d が大きくなり、 w_0/u_* が小さい領域において、実験値より過小評価となっている。

当然、各流砂量式には適用限界があり、高橋⁷⁾の土石流濃度式は無次元掃流力 $\tau_* < 1$ の掃流砂流領域で実験値に合わなくなる。江頭⁹⁾の式は、式の構造から約10度の急勾配になると計算不能に陥る。芦田¹⁰⁾の式も実験データとの適合性に自ずと限界がある。いずれの式も相対水深 $h/d > 55$ の高濃度浮流砂流・泥流領域や $C_T > 0.5$ の土石流領域では実験値に合わなくなる。

6. 混合砂礫の流砂量

混合砂礫の流砂量と抵抗則を調べるため、広範な粒度分布をもつ河床材料を作成し、流砂量と流速係数を調べる実験を行った。

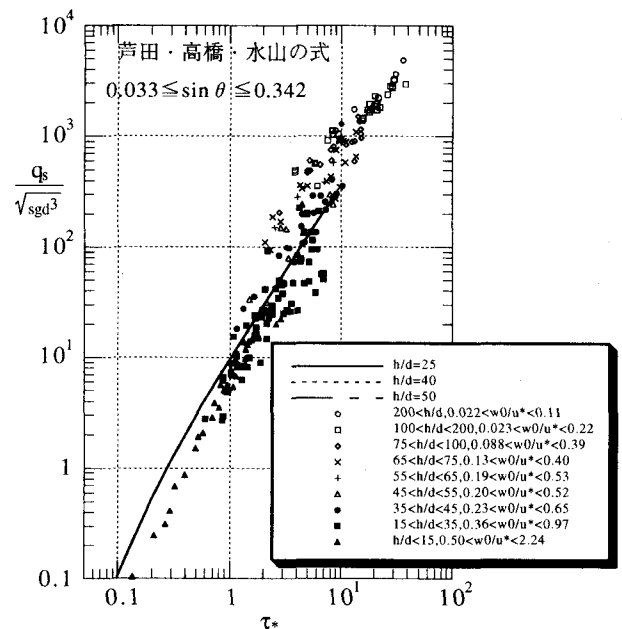


図-9 芦田・高橋・水山の流砂量式と実験との比較

(1) 実験方法

実験に使用した水路は全長12m、幅20cmの片側アクリライト製可変勾配水路であり、水路の下流側8mを厚さ10cmの移動床とした。河床材料としては粒径 $d=0.84, 1.5, 2.0, 3.3, 5.9, 12\text{mm}$ の均一な砂礫をそれぞれ容積比6:6:6:3:3:2で混合した材料を用いた。その平均粒径は $d_m=3.30\text{mm}$ であり、密度は $\sigma/\rho=2.63$ である。その粒度分布を図-10に流砂の粒度分布とともに示す。

実験では水路勾配を 6° とし、上流端から単位流量 $q_{w0} \approx 200\text{cm}^2/\text{s}$ の水を供給した。下流端で流れを採取し全流量 q_t や輸送濃度 C_T を計測した。採取された流砂は炉乾燥し粒度試験を行った。また、実験後、下流端から1m, 3m, 5mの地点において長さ50cm、厚さ2cm、幅20cmの河床砂を採取し、同様に粒度試験を行った。

(2) 実験結果

a) 流砂の分級に関する考察

採取した流砂について粒度分布を調べた結果を図-10に示す。またその平均粒径および標準偏差を図-11に示す。芦田¹⁰⁾により既に指摘されているように、流れの先頭部には比較的粗粒な土砂が集中する一方で、後続流になると原河床のそれとほぼ同様な粒度構成となることが分かる。これは、従来、土石流の特性として知られていることであり、水路勾配 6° のような急勾配の流れにおいても同様な特性をもつことが分かる。これは掃流状集合流動の流れ

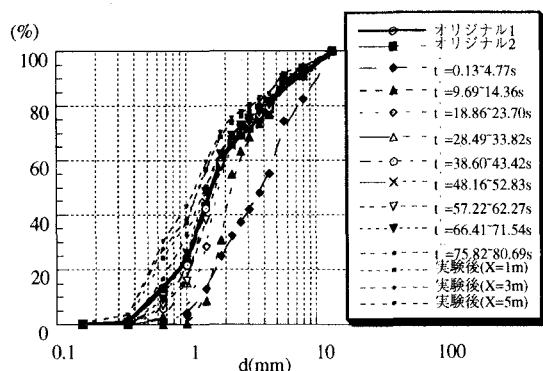


図-10 混合砂の加積通過百分率

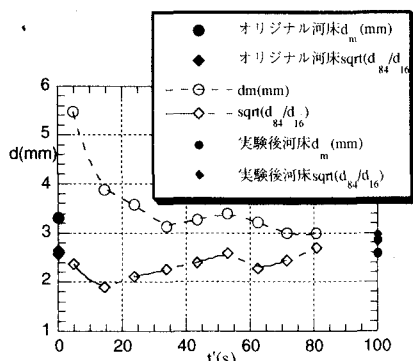


図-11 経過時間と粒径の関係 (t': 先端到達後の時間)

であるが、土石流の特性の一面を有していることが分かる。

一方、標準偏差については明瞭な傾向は見られなかった。

b) 混合砂礫の抵抗則と流砂量に関する考察

混合砂礫の場合の流速係数と無次元流砂量の実験結果を、均一砂のそれとともに図-12, 5にそれぞれプロットしている。ここに粒径としては流砂の平均粒径を用いた。また図-12中の曲線は、式(3), (4)の計算結果である。いずれの図においても、均一砂の場合の実験とほぼ同じ結果となっており、混合砂の抵抗則と流砂量は均一砂の場合の式を用いて求めることができるものと考えられる。

7. おわりに

以上、急勾配移動床水路に対して提案されている種々の流砂量式について、広範な条件下で行われた実験結果と比較し、それらの適用範囲を調べた。その結果、平野・橋本らの高濃度浮流砂流に対する流砂量式は、掃流砂、掃流状集合流動、土石流、浮流砂、高濃度浮流砂の流砂量を良好に評価できることが分かった。また、他の流砂量式に比べてより広範な適用性があることも明らかになった。しかしながら、土石流、泥流領域の一部についてはうまく説明

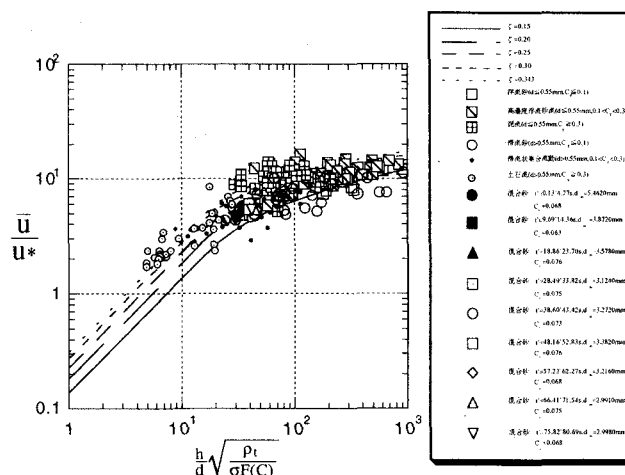


図-12 混合砂と均一砂の流速係数

することができなかった。これについては、今後さらに検討する必要がある。

謝辞：最後に、本研究は、一部、平成13～14年度科学研究費補助金基盤研究(C)(2) (代表 九大 橋本晴行)の補助を受けて行われたものである。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 橋本晴行・平野宗夫：泥流の抵抗則に関する研究，水工学論文集，第39巻，1995。
- 2) H.Hashimoto and M.Hirano: A FLOW MODEL OF HYPERCONCENTRATED SAND-WATER MIXTURES, Debris Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, ASCE, 1997.
- 3) 平野宗夫・橋本晴行・多川博章：急勾配水路における浮流砂を伴う流砂量，水工学論文集，第42巻，1998。
- 4) 橋本晴行・平野宗夫：掃流状集合流動の抵抗則と流砂量，土木学会論文集，No545，1996。
- 5) 椿東一郎・橋本晴行・末次忠司：土石流における粒子間応力と流動特性，土木学会論文報告集，第317号，1982。
- 6) 橋本晴行：土石流の流動に関する研究，九州大学博士論文，1985。
- 7) 高橋保：土石流の発生と流動に関する研究，京大防災研年報，20号B-2，1977。
- 8) Tamotsu Takahashi: Debris Flow, A. A. Balkema, The Nether land, 1991.
- 9) 江頭進治・芦田和男・高浜淳一郎・田野中新：連続体モデルに基づく流砂量式の誘導，水工学論文集，第35巻，1991。
- 10) 芦田和男・高橋保・水山高久：山地河川の掃流砂量に関する研究，新砂防107号，1978。

(2002. 9. 30受付)