

黄河中流域における河道堆積土砂調査と 高濃度流れの水路実験

FIELD SURVEY OF SEDIMENTS IN THE MIDDLE REACH OF THE YELLOW RIVER
AND EXPERIMENTS OF HYPERCONCENTRATED FLOW IN AN OPEN CHANNEL

橋本晴行¹・高岡広樹²・池松伸也³・全 炳徳⁴・上野賢仁⁵

Haruyuki HASHIMOTO, Hiroki TAKAOKA, Sinya IKEMATSU, Byungdug JUN and Takahito UENO

¹正会員 工博 九州大学助教授 大学院工学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

³学生員 工修 九州大学大学院工学府 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

²正会員 九州大学技官 大学院工学府 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

⁴正会員 工博 長崎大学助教授 教育学部 (〒852-8521 長崎市文教町1-14)

⁵正会員 工博 崇城大学助教授 工学部 (〒860-0082 熊本市池田4-22-1)

The Yellow River basin has serious problems of flood and irrigation due to hyperconcentrated flow from the tributaries of its middle reach. In order to solve these problems, it is important to estimate sediment transport and bed variation in the rivers. The Kuye and Dali River are selected as the study area. First, we investigated sediment characteristics in the Kuye and Dali River. It is found that the Kuye River bed sediment is silt to coarse sand and the Dali River bed sediment is silt to very fine sand. Second, we made experiments of hyperconcentrated flow in an open channel, using silt or sand as flowing materials. It is found that hyperconcentrated flow behavior becomes quite different with grain size and concentration.

Key Words: Yellow River, river bed sediments, hyperconcentrated flow, mud flow, debris flow, flow resistance

1. はじめに

黄河中流域では、その支川が黄土高原を深く切り刻みながら通過するため、微細土砂を高濃度に含有した洪水が本川に流れ込みピーク時で体積濃度 $C=15\% \sim 38\%$ もの高濃度流れを発生させ、流域内の水利・電源開発などの障害や河床上昇による洪水疎通能力の低下の原因となっている¹⁾。従って、高濃度洪水による土砂輸送モデルの構築と河床変動のシミュレーション手法の開発が長年の課題となっている。

黄河における高濃度洪水のような、微細土砂の高濃度流れの特性については芦田ら^{2)・3)}の研究があるが、まだ十分には明らかにされていない。

本研究は、黄河中流域の支川について河道堆積物の現地調査を行うとともに、その成果をもとに高濃度流れの

抵抗則について実験を行ったものである。

まず、調査対象河川を黄河中流域北部の右支川の窟野河 (Kuye River) と無定河 (Wuding River) 支流の大理河 (Dali River) とし (図-1)、現地河道調査を行った。これに対応して、調査対象流域の地形図解析を行い、流域の地形特性、河道の縦断勾配、堆積土砂の粒度特性などを調べた。次に、高濃度洪水を模擬した高濃度流れを開水路に発生させる実験を行い、抵抗則を調べる実験を行った。

2. 窟野河と大理河の流域特性

調査対象河川の窟野河と大理河の流域特性を表-1に示す。流域面積から見ると、我が国では、窟野河は淀川 (流域面積 $A=8,240\text{km}^2$) に、

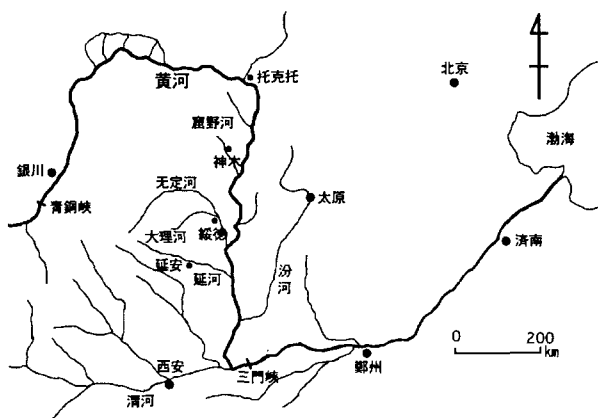


図-1 黄河中流域における主な支川

表-1 流域特性

	窟野河	大理河
流域面積(km ²)	8,706	3,906
流路延長(km)	241.8	170
平均年間雨量(mm)	396.2	419.3
流域内人口密度(人/km ²)	34	106

大理河は吉野川（ $A=3,750\text{km}^2$ ）にそれぞれ匹敵する。

窟野河流域の平面図を図-2 に、河道縦断面図を図-3 にそれぞれ示す。ここに地形図は、1978 年～1986 年における測量を基に作成された旧ソ連製地形図(10 万分の 1)を用いた。

図からわかるように、河床勾配 i は $i=1/510\sim 1/290$ を示し、比較的急勾配の河川である。

同様に、大理河の流域平面図を図-4 に、河道縦断面図を図-5 にそれぞれ示す。河床勾配 i は窟野河より急勾配であり、 $i=1/270\sim 1/80$ となっている。

3. 窟野河と大理河における河道堆積土砂の特性

窟野河と大理河において、河道堆積土砂をそれぞれ 4 個採取し、粒度試験および密度試験を行った。土砂の採取地点を窟野河は図-2 に記号 K-1, 2, 3, 4 によって、大理河は図-4 に記号 D-1, 2, 3, 4 によってそれぞれ示している。図-6, 7 に粒度試験結果を、表-2 に粒度特性値と密度試験結果をそれぞれ示す。

図-6は窟野河において採取した土砂の粒度分布である。K-3, 4 は下流の河道堆積土砂、K-1, 2 は源流付近の試料で、K-1 は側岸斜面の、K-2 は河床の堆積土砂である。K-1 はシルト、K-2 は粗砂、K-3 は細砂、K-4 は微細砂に分類される。

図-7 は大理河において採取した土砂の粒度分布を示している。D-1, 2 は上流地点の試料で、D-1 はガリの側岸

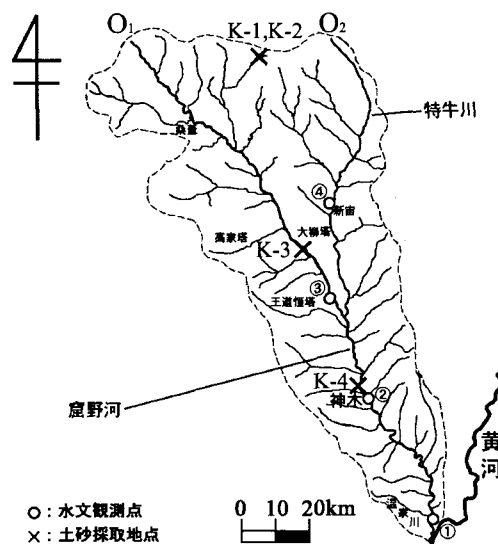


図-2 窟野河流域の平面図

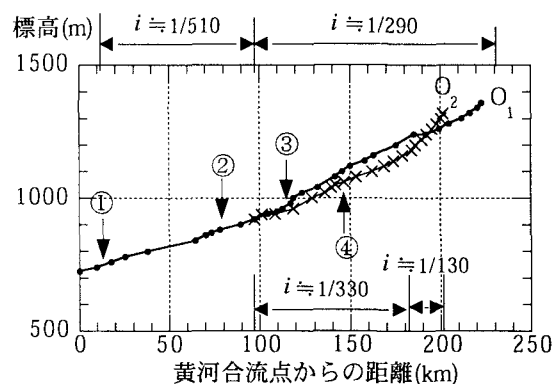


図-3 窟野河の河道縦断面図

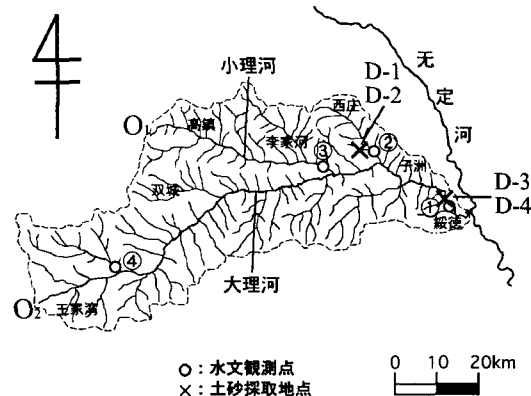


図-4 大理河流域の平面図

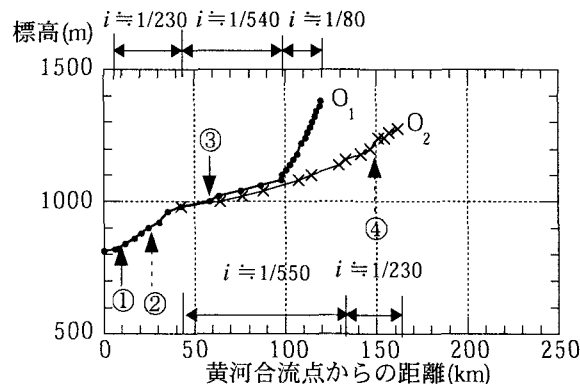


図-5 大理河の河道縦断面図

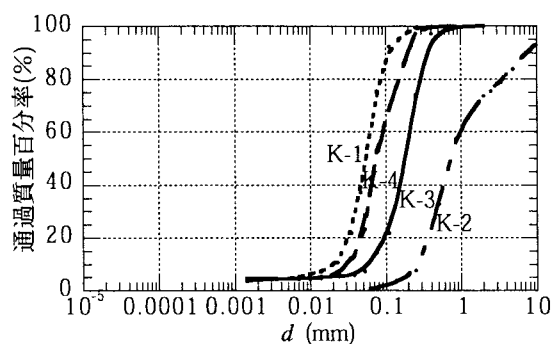


図-6 窟野河において採取された河道堆積土砂の粒度分布

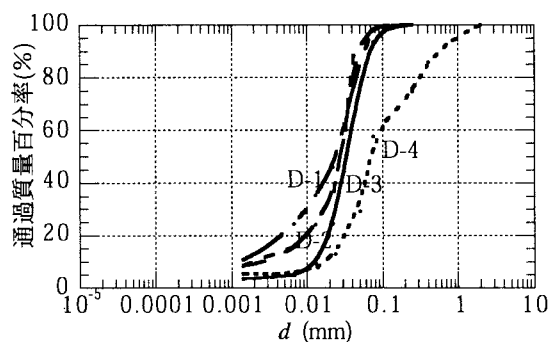


図-7 大理河において採取された河道堆積土砂の粒度分布

斜面の、D-2 はガリの河床底面の堆積土砂である。また、D-3, 4 は下流地点の河道左岸の試料で、D-3 は水際の、D-4 は河岸の堆積土砂である。D-1, 2, 3 はシルト、D-4 は微細砂に分類される。

表-2 は窟野河および大理河において採取した堆積土砂の特性値を示している。ここに、 σ : 土粒子の密度、 ρ : 水の密度である。比重 σ / ρ は大きな差異はないが、粒度は、窟野河源流付近の K-2 地点の粗砂を除くと、大略において、シルト～細砂の細粒となっている。

表-2 黄河中流域における河道土砂の特性

	d_m (mm)	d_{50} (mm)	σ / ρ
K-1	0.051	0.055	2.705
K-2	2.02	0.73	2.638
K-3	0.18	0.077	2.699
K-4	0.089	0.18	2.684
D-1	0.021	0.023	2.677
D-2	0.023	0.028	2.669
D-3	0.03	0.033	2.722
D-4	0.17	0.069	2.673

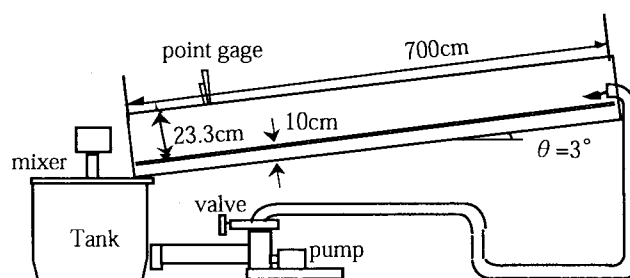


図-8 循環水路

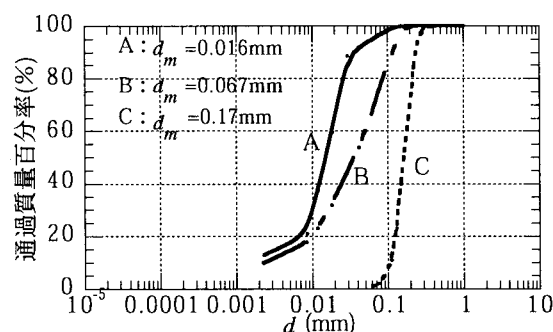


図-9 実験に用いた材料の粒度分布

4. 高濃度流れの抵抗則に関する実験

上述のように黄河中流域の河道堆積土砂は、シルト、微細砂、細砂であり、これが洪水時に高濃度流れとして本川に流れ込んで来るものと考えられる。そこで、以上のような材料を用いて高濃度流れを発生させる実験を行い、その抵抗則を調べた。

(1) 実験方法

実験に使用した水路は、全長 7.0m、幅 15cm の両側アクリルライト製の水路である。水路勾配 θ は 3° とした。水路底面にはベニヤ板を貼り滑面固定床とした。下流端のタンクは直径 136cm、高さ 80cm である。タンク中の土砂と水は攪拌機であらかじめ攪拌し、ポンプで水路上流

端に送り循環させている(図-8)。材料としてシルト、微細砂、細砂をそれぞれ用いた。図-9 にそれらの粒度分布を示す。

実験は 2 種類行った。ひとつは流速分布を調べる実験であり、もうひとつは摩擦損失係数を調べる実験である。

表-3 に循環水路による実験の概要を示す。ここに C_0 はポンプを作動する前のタンク内における土砂の初期体積濃度である。

まず前者の実験では、ピトー管を下流端から 1.43m の地点に設置して流速を測定した。また下流端から 1.5m の地点に設置したポイントゲージを用いて水深を測定した。次に後者の実験では、タンク内の土砂の初期濃度を種々設定し、ポンプを作動し、高濃度流れが水路下流端に到達してから所定の時間間隔で流れを採取し、単位幅流量 q_t 、流砂濃度 C_T を測定した。また水深 h は下流端から

表-3 実験条件と流れの特性

材料	粒径 d (mm)	比重 σ/ρ	タンク内濃度 C_0	流砂濃度 C_T	単位幅流量 q_t (cm^2/s)	水深 h (cm)	断面平均流速 v (cm/s)
シルト	0.016	2.708	0.100~0.498	0.088~0.369	169~266	1.45~3.42	77~148
微細砂	0.067	2.64	0.050~0.401	0.046~0.404	198~257	1.30~1.81	134~180
細砂	0.17	2.62	0.049~0.301	0.059~0.296	229~296	1.74~2.11	126~146

1.5mの位置に設置したポイントゲージを用いて測定した。
これらの測定値を用いて摩擦損失係数を求めた。

(2) 実験結果と考察

a) 流速分布

図-10 は、材料としてシルトを用いた場合の固液混相流の流速分布を清水流のそれとともに示している。いずれも流量 q_t はほぼ同じであるが、土砂輸送濃度が $C_T \approx 0.312$ になると高濃度流れの速度が大きくなっている。しかしながら、さらに濃度が大きくなり $C_T \approx 0.369$ になると、水深は大きくなり、流速は表面付近で一様となり、ビンガム流体のような分布を示すようになる。

図-11, 12 は、材料として微細砂、細砂をそれぞれ用いた場合の流速分布の実験結果を示している。微細砂の場合、清水流の流速分布とほとんど同様な分布を示しているが、高濃度になり $C_T \approx 0.401$ になると、清水流の場合より速度が大きくなっている。一方、細砂の場合、清水流の場合より速度が小さくなっていることが分かる。

図-13, 14, 15 は、材料としてシルト、微細砂、細砂をそれぞれ用いた場合の混相流の流速分布の対数則への適合性を調べたものである。図中には滑面床上的の清水流の流速分布

$$\frac{u}{u_*} = 5.5 + \frac{2.3}{\kappa} \log_{10} \frac{u_* z}{\nu} \quad (1)$$

も示している。ここに、カルマン定数 $\kappa=0.4$ としている。
また、 ρ_t ：流れの密度、 μ ：流体の粘性係数として $\nu = \mu/\rho_t$ である。また、 $\rho_t = \sigma C_T + \rho(1 - C_T)$ である。さらに、 μ_0 ：水の粘性係数、 η_r ：相対粘度として粘性係数 $\mu = \eta_r \mu_0$ である。

相対粘度 η_r の評価が問題であるが、ここでは、森・乙武らの相対粘度式

$$\eta_r = 1 + \frac{3}{(1/C_T - 1/0.52)} \quad (2)$$

を用いて評価する。

シルトの場合(図-13)、 $C_T \approx 0.369$ において明らかに対数則と異なった分布を示している。それ以外のデータについて見ると、無次元速度 u/u_* は、土砂濃度が大きくなるとともに、シルトと微細砂の場合(図-13, 14)には

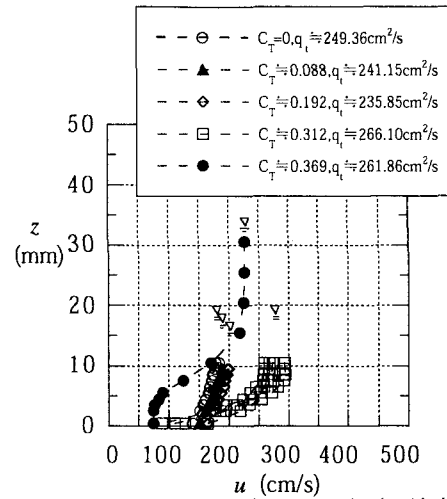


図-10 $d=0.016\text{mm}$ のシルトを用いた混相流の流速分布

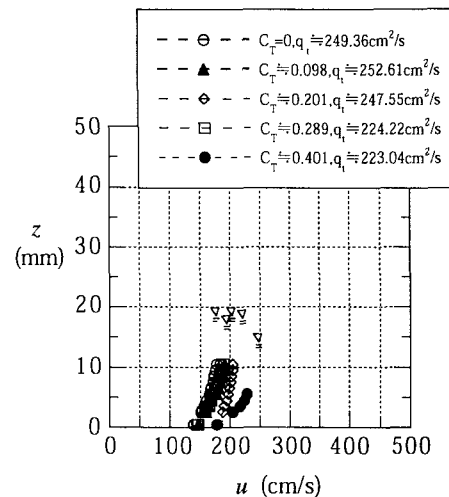


図-11 $d=0.067\text{mm}$ の微細砂を用いた混相流の流速分布

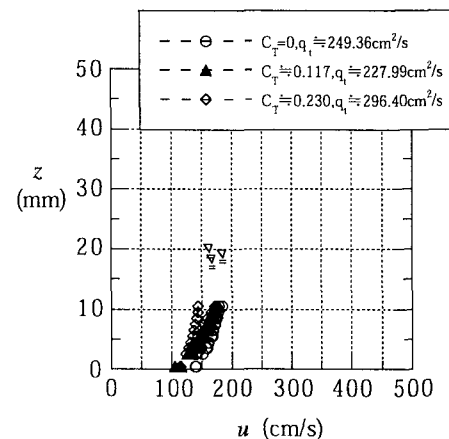


図-12 $d=0.17\text{mm}$ の細砂を用いた混相流の流速分布

大きくなるが、細砂の場合(図-15)には逆に小さくなる。

図-16, 17, 18 は材料の粒子間の衝突効果、すなわち粒子性の効果を調べるため、泥流型土石流に対して提唱されている無次元速度 u/u_* と無次元高さ $z/d \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C_T)}}$ との

関係について調べたものである。ここに、 C_* を最密充填濃度として、 $F(C_T) = \frac{(C_T/C_*)^2}{1 - C_T/C_*}$ である。 $C_* \approx 0.6$ として

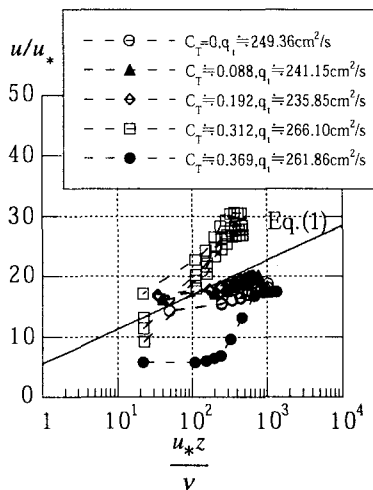


図-13 $d=0.016\text{mm}$ のシルトを用いた
混相流の流速分布の対数則への
適合性

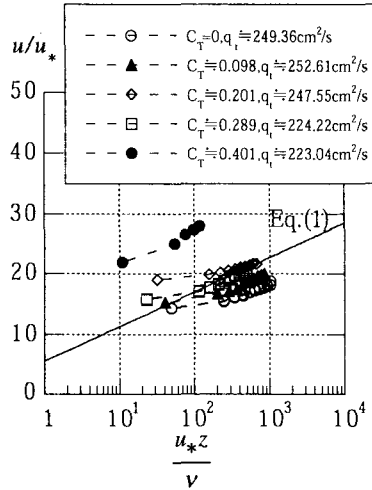


図-14 $d=0.067\text{mm}$ の微細砂を用いた
混相流の流速分布の対数則への
適合性

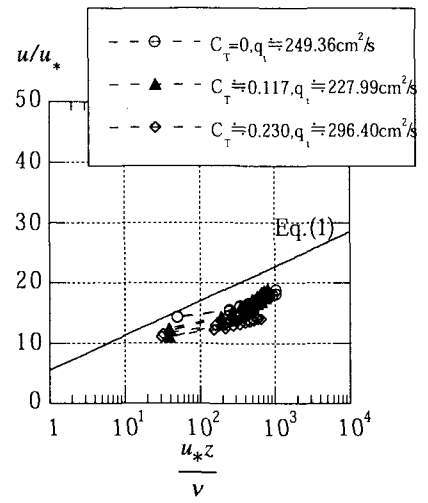


図-15 $d=0.17\text{mm}$ の細砂を用いた
混相流の流速分布の対数則への
適合性

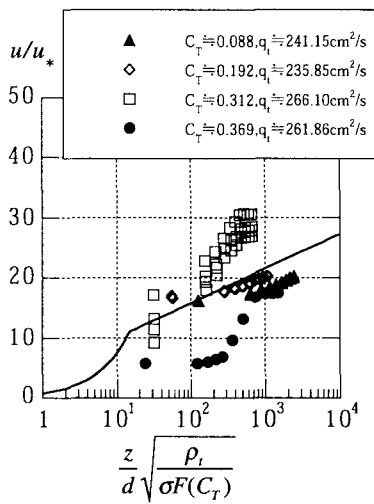


図-16 $d=0.016\text{mm}$ のシルトを用いた
混相流の無次元速度と
無次元高さの関係

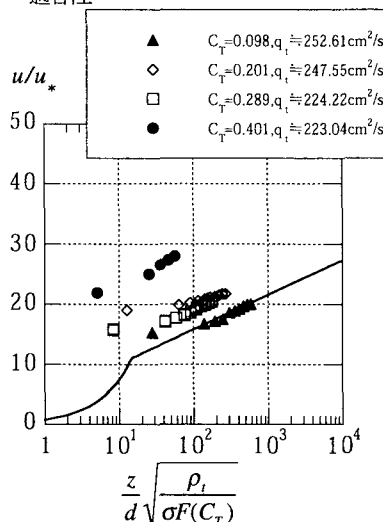


図-17 $d=0.067\text{mm}$ の微細砂を用いた
混相流の無次元速度と
無次元高さの関係

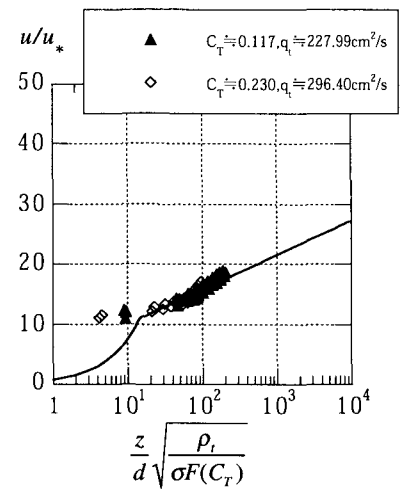


図-18 $d=0.17\text{mm}$ の細砂を用いた
混相流の無次元速度と
無次元高さの関係

いる。図中には、従来より提案されている理論式^{4), 5)}も示している。図-16, 17 では、実験値は明らかに理論式と異なっており、シルト、微細砂の場合、粒子性の効果は現われていないことが分かる。図-18 では、データ数に限りがあるが、実験値は理論式にほぼ一致しており、細砂の場合、粒子性の効果が顕著であることが分かる。

b) 摩擦損失係数

図-19 は摩擦損失係数とレイノルズ数の関係を示したものである。図中には、比較のため、清水流に対する流速分布の式を積分して得られる摩擦損失係数 f の理論式

$$\frac{vh}{v} \leq 500 \quad \sqrt{\frac{8}{f}} = \sqrt{\frac{vh}{3v}} \quad (3a)$$

$$\frac{vh}{v} \geq 500 \quad \sqrt{\frac{8}{f}} = 5.5 - \frac{1}{\kappa} + \frac{2.3}{\kappa} \log_{10} \left(\frac{vh}{v} \sqrt{\frac{f}{8}} \right) \quad (3b)$$

も示している。実験値は大きく 3 つのグループに分かれている。シルトを用いた場合の実験では、高濃度 ($C_T \approx$

0.369) で抵抗が増加し f の値は著しく大きくなっている。微細砂を用いた場合の実験では、高濃度 ($C_T \approx 0.401$) で抵抗減少が発生し f の値は小さくなっている。それ以外の場合は清水流の f の値に近くなっている。式(3)の値より若干大きくなっていることについては底面を滑面として計算したこと起因しているものと考えられる。

図-20 は摩擦損失係数と無次元水深 $\frac{h}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C_T)}}$ の関係を示したものである。図中には従来泥流型土流に対して提案されている理論式^{4), 5)}も示している。すなわち、

$$N_h = \frac{h}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C_T)}} \quad \text{として、}$$

$N_h \leq 15$ の場合

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\xi}{K_{zx}}} N_h \quad (4)$$

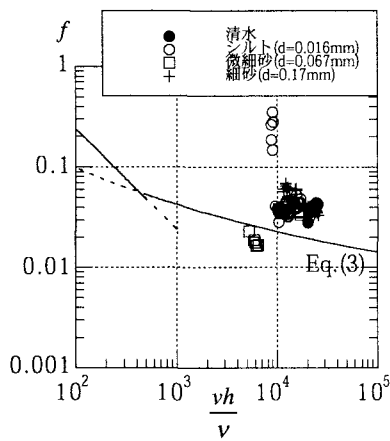


図-19 摩擦損失係数とレイノルズ数の関係

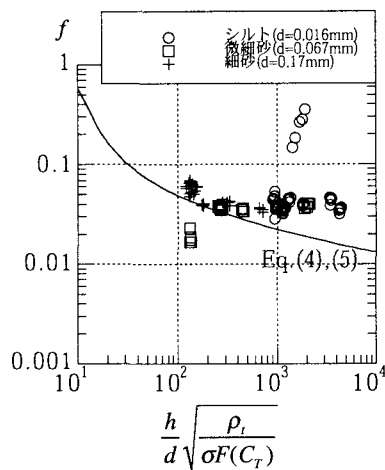


図-20 摩擦損失係数と無次元水深の関係

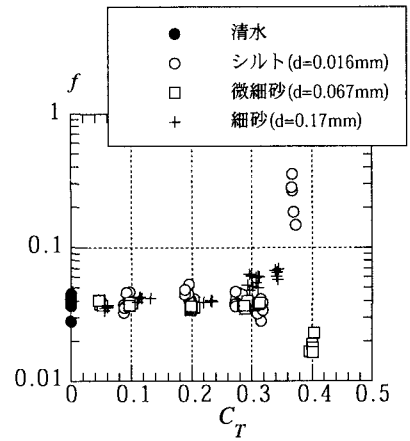


図-21 摩擦損失係数と土砂輸送濃度の関係

$N_h \geq 15$ の場合

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{15}{2} \frac{\xi}{\sqrt{K_{zx}}} \frac{15}{N_h} + \left(\frac{u_\delta}{u_*} - \frac{1}{\kappa} \right) \left(1 - \frac{15}{N_h} \right) - \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{15}{N_h} \right) \quad (5)$$

ここに、 $\xi = 0.4$ としている。また、 $K_{zx} = (\pi/6)(0.0762 + 0.102\mu)\beta^2 k_M$ 、 $\mu = 0.1$ 、 $\beta = 1.15$ 、 $k_M = 5$ 、 $u_\delta/u_* = 15\xi/\sqrt{K_{zx}}$ である。細砂を用いた場合の実験結果が式(4)、(5)の値に比較的一致している。

図-21 は摩擦損失係数 f と土砂輸送濃度 C_T の関係を示したものである。 $C_T = 0 \sim 0.3$ の範囲では、粒径に関わらず、ほぼ同程度の f の値を示す。しかし、 C_T が 0.3 をこえると、シルトの場合 f は非常に大きくなり、逆に、微細砂の場合には f は小さくなっている。図-19 に対応した結果となっている。また細砂の場合には f は濃度とともに若干増加している。

シルトの場合、高濃度 ($C_T \approx 0.369$) において f の値が著しく大きくなっているのは、電気化学的な力に起因した降伏応力が卓越し、ビンガム流体のような挙動を示しているためと考えられる。微細砂の場合、高濃度 ($C_T \approx 0.401$) において f が小さくなっているのは、乱流混合のスケールが低下し、レイノルズ応力が減少するためと考えられる。また、細砂の場合、土砂濃度の増加とともに粒子間の衝突効果が大きくなり、 f の値は漸増する。

5. おわりに

黄河中流域の窟野河と大理河において河道堆積土砂を採取し、粒度試験および密度試験を行った。その結果、窟野河の河道は主に微細砂～粗砂であり、大理河の河道はシルト、微細砂であることが明らかになった。

そこで、シルト、微細砂、細砂をそれぞれ含有した高濃度の土砂・水混相流を循環水路において発生・流下させて流速分布、抵抗則を調べた。

その結果、材料がシルト、微細砂の場合は、土砂輸送濃度 $C_T = 0 \sim 0.3$ の範囲内で、清水流の流速分布と同じ対数速度分布を示し、摩擦損失係数はほぼ一定な値となることが分かった。しかしながら、 $C_T > 0.3$ の高濃度になると、シルトの場合、ビンガム流体のような流速分布を示し摩擦損失係数は著しく増加するが、逆に、微細砂の場合には、レイノルズ応力が減少し摩擦損失係数は小さくなることが分かった。

一方、細砂の場合には、泥流型土石流に対して提案されている流速分布に適合し、摩擦損失係数は土砂濃度とともに漸増することが分かった。

謝辞

本研究は、一部、科学技術振興事業団・戦略的基礎研究推進事業「黄河流域の水利用・管理の高持続性化」(代表 楠田哲也 九州大学教授)の補助の下におこなわれたものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Zhaohui Wan and Zhaoyin Wang : Hyperconcentrated Flow, IAHR/AIRH MONOGRAPH, 1994.
- 2) 芦田和男・山野邦明・神田昌幸 : 高濃度流れに関する研究 (1), 京都大学防災研究所年報, 第28号, 1982.
- 3) 芦田和男・山野邦明・神田昌幸 : 高濃度流れに関する研究 (2), 京都大学防災研究所年報, 第29号, 1983.
- 4) 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.
- 5) Haruyuki Hashimoto and Muneo Hirano : A FLOW MODEL OF HYPERCONCENTRATED SAND-WATER MIXTURES, Debris-Flow Hazards Mitigation : Mechanics, Prediction, and Assessment, Proceedings of First International Conference, ASCE, August 7-9, 1997.

(2003年9月30日受付)