

## 高濃度浮遊砂の流れに関する考察

国土技術政策総合研究所 内田太郎、泉山寛明（現：国土交通省砂防計画課）、松本直樹、桜井亘  
株式会社 建設技術研究所 松原智生、西口幸希 立命館大学 里深好文

### 1. はじめに

豪雨時には山地河川に山腹崩壊や溪岸崩壊により大量な土砂が供給される。また、山腹崩壊や溪岸崩壊による供給土砂には多くの細粒分が含まれていることが考えられる。このようなとき、河床を起源とする浮遊砂に比べて、極めて浮遊砂濃度が高い流れが形成される可能性が考えられる。いったん、高濃度な流れが発生した場合、浮遊砂の沈降速度が清水中の沈降速度に比べて小さくなる可能性が指摘されてきた。例えば、高橋・里深（2002）では、土粒子の沈降速度に及ぼす土砂濃度の影響について以下の式を提案した。

$$\omega(c) = (1-c)^\beta \omega_0 \quad \text{式1}$$

ここで、 $\omega$ は沈降速度、 $\omega_0$ は清水中の沈降速度、 $c$ は土砂濃度、 $\beta$ は定数である。しかしながら、これまで、同式は実験による検証が十分におこなわれてきたとは言いがたく、定数 $\beta$ の値についても検討されてきていない。また、沈降速度が低減するメカニズムや沈降速度の低減が浮遊砂量に及ぼす影響についても十分検討がされていない。そこで、本研究では、土粒子の沈降速度に及ぼす影響に関する実験を行った。

### 2. 実験方法

実験装置は図1に示すとおりである。実験前は土砂供給管下端を閉じておき、土砂を充填した。その上で、実験開始とともに、土砂供給管下端を開放した。実験中、土砂供給管から沈降管への沈降量を一定に保つために土砂供給管内の土砂の表面の高さは一定に保つように人力で土砂を供給し続けた。また、土砂供給管の太さを変更することにより、沈降量を変化させた。その上で、ビデオにより、土砂沈降管内の土砂の堆積深を計測した。また、実験期間中3回、土砂沈降管側面から採水し、土砂濃度を計測した。また、土砂沈降管の内径は8cmを基本とし、管のスケールの影響を確認するために、内径20cmのケースも一部実施した。実験には、粒径0.25-0.43 mm、0.43-0.85 mm、0.85-2.0 mm、2.0-4.8 mmの土砂およびこれらの土砂を混合した土砂を用いた。

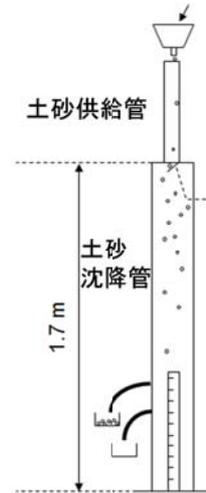


図1 実験装置

### 3. 実験結果

#### 3.1 土砂沈降管の太さの影響

図2に粒径0.43-0.85 mmの土砂を用いたときの土砂濃度と沈降速度の関係に関する実験結果を示す。図に示すように沈降速度は、土砂濃度の増大に伴い減少する傾向が確認された。また、土砂沈降管の径に土砂濃度-沈降速度関係は依存しないことを確認した（図2）。そこで、以降の実験では土砂沈降管を8cmとした。

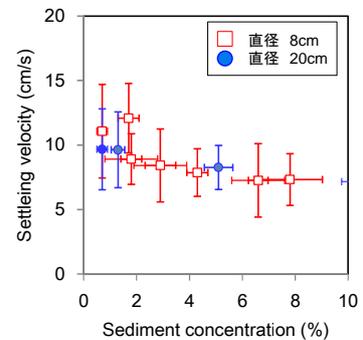


図2 土砂濃度と沈降速度の関係

#### 3.2 土砂濃度-沈降速度関係

図3に示したように、粒径によらず、土砂濃度の増加に伴い、沈降速度が減少する傾向が確認された。また、式1で高橋・里深（2002）が想定したように、片対数グラフ上で土砂濃度と沈降速度の関係は概ね線形の関係であった。さらに、土砂濃度と沈降速度の線形関係の傾きは、粒径によらず一定であった。このことから、高橋・里深（2002）の式の $\beta$ は、粒径に依存しない係数であると考えられる。図に示したように、今回の実験の範囲では、 $\beta=4$ とすると概ね実験の土砂濃度と沈降速度の関係を表すことができた。

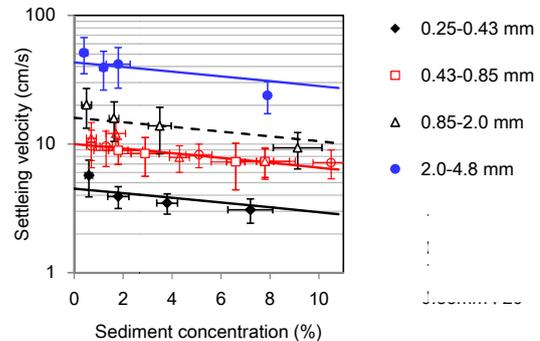


図3 土砂濃度と沈降速度の実験結果。図中の直線は式1の関係を示す。

### 4. 考察

#### 4.1 沈降速度の低下メカニズム

沈降速度が低下するメカニズムとしては、

- (1) 土砂濃度が高くなると、粒子同士の干渉が生じ、沈降速度の小さい細かい粒子が全体の沈降速度に影響を及ぼすため、沈降速度が小さくなる。
- (2) 粒子が沈降すると、水が上昇するカウンターフローが生じる、これにより、圧力勾配が減少し、粒子に作用

する浮力が小さくなり、沈降速度が小さくなる。  
 そこで、本研究では(1)、(2)を検証するために、混合砂による実験、圧力分布の計測を行った、

#### 4.1.1 混合砂の実験

ここでは、粒径0.43-0.85 mm のケースと平均粒径(0.6 mm)が同じになるように粒径0.25-0.43 mm と0.85-2.0 mm の土砂を混合したケースと最小の粒径を同じとし、平均粒径が異なる(1.0mm) ように0.43-0.85 mm の土砂に0.85-2.0 mm の土砂を追加した2 ケースについて実験を実施した(図4)。図に示したように平均粒径が同じであっても、最小粒径が小さいケース(赤の白抜きのプロット)の方が大きいケース(赤の塗り潰しのプロット)に比べて、沈降速度が小さかった。一方、平均粒径を大きくしたケース(黒の白抜きのプロット)では、元のケースに比べて、沈降速度の顕著な増加は見られなかった。このことから、高濃度下では、粒子の平均的な沈降速度は遅い粒子にある程度律速されている可能性が考えられる。

#### 4.1.2 圧力計測結果

圧力勾配の影響を考察するために粒径0.43-0.85 mm のケース、粒径0.25-0.43 mm と0.85-2.0 mm の土砂を混合したケースについて計7回の実験を行い、マンメータを4本設置し、圧力を計測した。土砂濃度と圧力勾配の関係を図5に示す。図に示すように、濃度の上昇に伴い圧力勾配が明確に小さく傾向が確認される。また、圧力勾配は今回の実験の範囲では、土砂の粒度分布の影響は顕著ではなかった。

土砂濃度  $c$  のときの圧力勾配 ( $\Delta p$ ) は式1と同様の形の

$$\Delta p(c) = (1-c)^\alpha \Delta p_0 \quad \text{式2}$$

ここで、 $\Delta p_0$  は土砂濃度0のときの勾配、で表すことができた。図に示すように $\alpha=2$ のとき、最も実験結果と整合した。以上、土粒子が数%の濃度で沈降した場合、圧力勾配が1割程度低下することが確認され、沈降速度低下の一因となっている可能性が考えられた。

#### 4.2 沈降速度の低下が浮遊砂量に及ぼす影響の試算

江頭ら(1992)、平野ら(1997)は、高濃度な浮遊砂に関する水路実験を行い、鉛直濃度分布を計測した。その結果、通常、用いられるラウス分布では鉛直方向の濃度分布が再現できないことを示した。そこで、ここでは、式1を用いて沈降速度の低下を評価した場合の浮遊砂濃度の鉛直分布様式の変化について、ラウス分布を用いて試算した。結果を図6に示す。ここでは、平野ら(1997)の実験で輸送濃度が0.187のケースを対象に試算した例を示した。図に示したように、実験結果とは依然として一致していないものの、沈降速度の低減の影響を考慮しなかったケース(図の青線)に比べて、考慮したケース(赤線)では、実験結果にかなり近づいている。さらに、平均的に約2倍程度考慮したケースで濃度が高くなるのが試算された(図の黒線)。

### 5. まとめ

従来の予想されてきた通り、高濃度下では粒子の沈降速度が清水中の沈降速度に比べて、低下することを確認した。さらに、この沈降速度の低下傾向は高橋・里深(2002)の提案式で概ね表現でき、提案式の係数 $\beta$ は4程度が適当であった。また、定量的な検討はできていないが、粒子の沈降速度の低下には、遅い粒子による干渉、上昇流発生による圧力勾配の低下が寄与していると考えられた。また、高濃度下の浮遊砂の鉛直分布にも沈降速度低下が影響している可能性を示した。

**参考文献** 高橋・里深(2002) 石礫型及び乱流型土石流の一般理論とその実用化モデル, 砂防学会誌, 55(3), 33-42, 江頭ら(1992) 泥流に関する研究-応力構造, 京大防災研年報. 35(B-2), 79-88, 平野ら(1997) 急勾配水路における浮流砂濃度分布に関する研究, 水工学論文集 41, 759-764

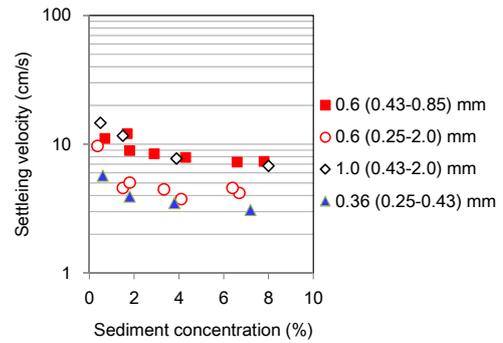


図4 土砂濃度と沈降速度に対する粒径分布の影響

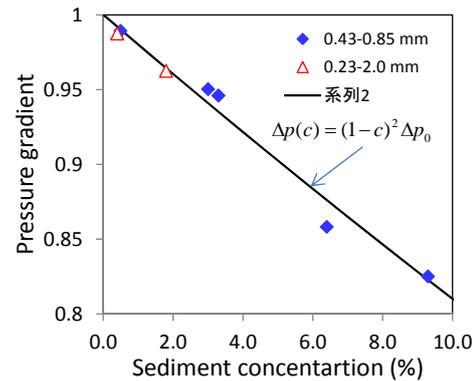


図5 土砂濃度と圧力勾配の関係

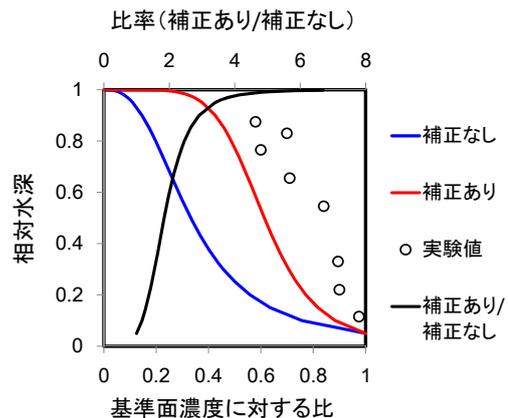


図6 沈降速度の低減を考慮した浮遊砂濃度分布の試算例(実験結果は平野ら(1997)より引用)(勾配 6.04度, 粒径 0.17mm, 水深 2.28cm)