

高濃度土砂が流れの抵抗および乱流構造に与える影響について

熊本大学 学生会員 近藤 嘉人 安達 幹治 緒方 太一 宇根 拓孝 正会員 大本 照憲

1. はじめに

河川の治水安全度を評価するうえで基本となるものは流れの抵抗則の確立であり，粗度係数の予測精度の向上が重要である．従来多くの研究がなされ，流れの抵抗則は，粗度形状，配列および大きさ，流れの条件に依存している．しかしながら，清水流における抵抗則については十分な研究は行われているが，高濃度土砂流における抵抗則の研究は十分に行われていない．

高濃度土砂流における抵抗特性についての実験的研究において，Z.Wang¹⁾は，滑面，礫床(gravel bed)および巨礫床(stone bed)においてカオリン懸濁流体積土砂濃度を 0-9%の範囲で変化させ，抵抗係数は，礫床および巨礫床においては体積土砂濃度が 3-9%の範囲では土砂体積濃度の増大に伴い明瞭な減少傾向を示し，滑面においては微増することを示した．

高濃度土砂流の研究は流れの計測が困難である．そのため，概念モデルを基にしたものが多い，銭寧²⁾らはビンガム流体モデルを用い，P.Coussot³⁾は降伏応力を持つ凝塑性流体モデルを用いて降伏と応力や粘性係数が粒子濃度や粒度分布と関数関係があることを求めた．しかし，これらの研究は非ニュートン流体流れの内部構造や抵抗特性については明らかにしていない．

本研究では，直径 30mm のアルミパイプを用い円柱粗度上流れにおける高濃度土砂が抵抗特性および乱流構造に与える影響に関して清水流との比較によって検討した．本研究では，流れの計測に PIV(Particle-Image Velocimetry)法を用い，高濃度土砂流の模擬流体として無色透明であるポリアクリル酸ソーダ(PSA)溶液を用いた．

2. 実験装置および方法

実験装置および実験方法は前報⁴⁾と同様であり，大きく異なる点は，河床粗度を角柱粗度から円柱粗度に変更したことが挙げられる．粗度材

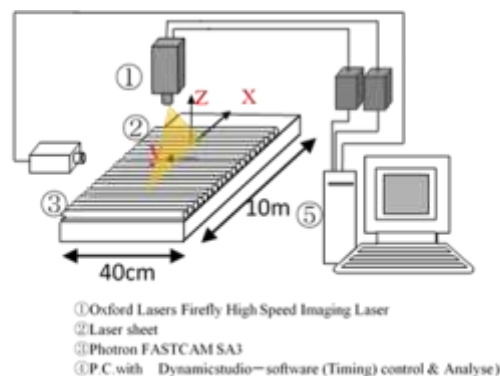


図-1 流れの計測システム

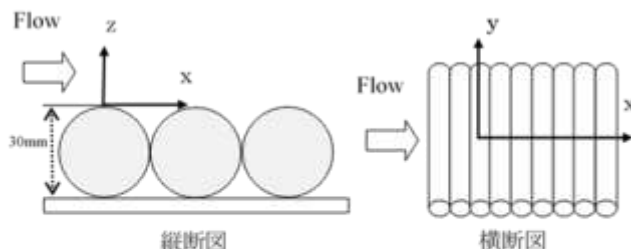


図-2 水路床の境界条件

表-1 流れの計測条件

	Case-1	Case-2	Case-3
PSA 溶液濃度 C_w (mg/l)	0	300	800
流量 Q (l/s)	4.0	4.2	3.6
水路勾配 I_0	1/300	1/300	1/300
等流水深 H (cm)	3.23	2.83	3.50
断面平均流速 U_m (cm/s)	31.37	35.74	28.92
摩擦速度 U_* (cm/s)	3.25	3.04	3.38
Fr 数 $U_m/\sqrt{gH}$	0.557	0.678	0.493
抵抗係数 $C_f=2(U_*^2/U_m^2)$	0.0215	0.0145	0.0274

料は直径 30mm のアルミパイプを使用し，水路床に配列した．また，粗度は水路上流端から流下方向に 9m の長さに亘って配置した．

流れは表-1 に記した実験条件の流量を通水し下流端の堰を操作し等流場を形成し，ポイントゲージを用いることで等流水深を計測した．座標系の詳細は図-1，水路床の境界条件を図-2 に示す．

3. 実験結果

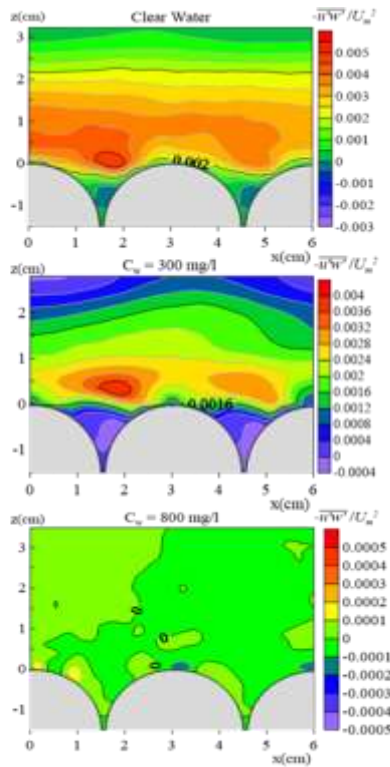


図-3 レイノルズ応力のコンター図

図-3 に各ケースのレイノルズ応力のカラーコンター図を示す。図中の値は断面平均流速の2乗で除し、無次元化している。レイノルズ応力は図-3 から分かるように、清水流および PSA 溶液濃度 $C_w=300\text{mg/l}$ では、粗度近傍において極大値をとることが分かる。また、粗度近傍に注目すると、粗度谷部で極大値を示すことが確認できる。また、PSA 溶液濃度 $C_w=800\text{mg/l}$ におけるレイノルズ応力は清水流における値に比べ小さくほぼゼロとなることから乱れによる運動量輸送は無視できるといえる。また、レイノルズ応力の大小関係は、 $-\overline{u'w'}(800\text{mg/l}) < -\overline{u'w'}(300\text{mg/l}) < -\overline{u'w'}(\text{CW})$ となり、PSA 溶液濃度が増大するに伴いレイノルズ応力は減衰することがわかる。図-4 は粗度近傍におけるせん断応力の大小関係を示す。せん断応力は

$$\tau = -\rho \overline{u'w'} + \mu(du/dz) \quad (1)$$

で示される。また、密度 ρ は一定であるため両辺を密度 ρ で割ると、

$$\tau/\rho = -\overline{u'w'} + \nu(du/dz) \quad (2)$$

と表すことができる。右辺第一項は乱れの運動量輸送を示し、第二項は粘性による運動量輸送を示している。図-4 より、粗度近傍においてせん断応力の大小関係は $\tau/\rho(300\text{mg/l}) < \tau/\rho(\text{CW}) < \tau/\rho(800\text{mg/l})$ であり、これは抵抗係数の大小関係とも一致

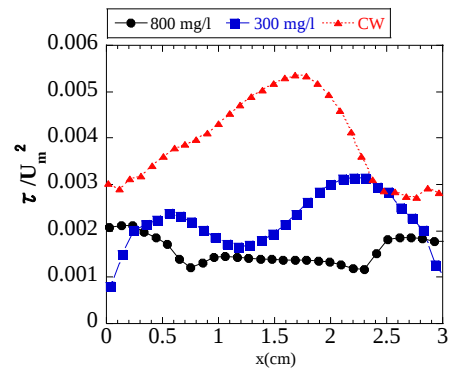


図-4 せん断応力の流下方向変化

することがわかった。PSA 溶液濃度 $C_w=300\text{mg/l}$ におけるせん断応力が清水流に比べて小さくなるのはレイノルズ応力の減少分が粘性応力の増大分を上回るためだと考えられる。また、PSA 溶液濃度 $C_w=800\text{mg/l}$ におけるせん断応力が清水流に比べて大きくなるのは PSA 溶液濃度 $C_w=300\text{mg/l}$ と同様にレイノルズ応力の減少がみられるが PSA 溶液濃度が増大するに伴い粘性応力が増大し、粘性応力の増大分がレイノルズ応力の減少分を上回ることがせん断応力の増大につながったと示唆される。以上のことから、PSA 溶液濃度 $C_w=800\text{mg/l}$ においてレイノルズ応力が減少するにもかかわらず抵抗が増大する原因は粘性応力の増大によるものだと考えられる。

4. おわりに

今後の検討としては運動量輸送やエネルギー収支、渦の同定の観点からより詳細に高濃度土砂と抵抗特性および流れ場の関係性の検討が挙げられる。

参考文献

- 1) Z.Y.Wang: RESISTANCE AND DRAG REDUCTION OF FLOWS OF CLAY SUSPENSIONS. Journal of Hydraulic Engineering, pp.41-49, 1998
- 2) 銭寧, 高含沙水流運動, 清华大学出版社, 1989.
- 3) P.Cousot : Rheology of debris flow - Study of concentrated suspensions. Ph.D. thesis, INPG, Grenoble, 1992
- 4) 大本照憲, Sukarno Tohirin, Liany Hendratta : 角柱粗度を有する開水路粗面乱流における抵抗則と運動量輸送, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.68, No.4, I_901-I_906, 2013.2