

粒子流の流動機構に関する研究

鳥取大学工学部 正 員 道上 正規
鳥取大学地域共同研究センター 正 員 宮本 邦明
住鉦コンサルタント(株) 正 員 ○片嶋 啓介

1. はじめに

昨年、火砕流本体部の堆積過程に着目し、粒子間の静的な接触応力を考慮した構成則を用いて流れの抵抗則を導き、流下・堆積過程の数値解析手法について検討した¹⁾。本研究では、昨年度検討が十分ではなかった構成則について検討するとともに、土塊の滑動実験を行って計算との比較を行い、シミュレーションの特性について検討したので報告する。

2. 応力構造

流れの応力を動的な衝突応力と静的な接触応力の和として、圧力 p とせん断力 τ 、それぞれ

$$p = p_s + p_d, \quad \tau = \tau_s + \tau_d \quad (1), (2)$$

$$\tau_s = p_s \cdot \tan \phi_s \quad (3)$$

$$\tau_d = \frac{1}{12} (1 - e^2) \sin^2 \Psi \cdot C^{\frac{1}{3}} \cdot \sigma d^2 \left(\frac{du}{dz} \right)^2, \quad p_d = \frac{1}{12} e^2 \sin^2 \Psi \cdot C^{\frac{1}{3}} \cdot \sigma d^2 \left(\frac{du}{dz} \right)^2 \quad (4), (5)$$

と表わす²⁾。ここに、 p_d ：動的な圧力、 τ_d ：動的なせん断力、 p_s ：静的な圧力、 τ_s ：静的なせん断力、 ϕ_s ：粒子の内部摩擦角、 e ：粒子の反発係数、 Ψ ：粒子の衝突角、 C ：粒子濃度、 σ ：粒子の密度、 d ：粒径である。式(3)～(5)を式(1)(2)に代入すると、未知数が3つ(C 、 p_s 、 u)に対し、式が2つであるからこのままでは式系が閉じない。そこで、新たに構成式として

$$p_s = \alpha p, \quad \alpha = (C/C_s)^n \quad (6), (7)$$

を導入する。ここに、 C_s ：堆積層の濃度、 n ：実験定数である。

3. 構成則に関する実験

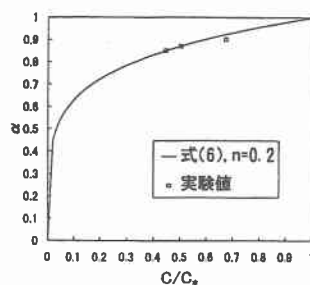
実験は、長さ7m、幅20cm、高さ50cmの勾配可変の一次元水路を用いて行った。実験砂は粒径5mm、内部摩擦角 $\phi_s = 37.1^\circ$ である。また、水路床には粗度として実験砂と同じ砂を接着した。水路下流端から4.5mの地点

でホッパーによる連続給砂を行いほぼ定常・等流区間で高速度ビデオカメラによる流速分布の測定をした。その他の実験条件を表-1に示す。図1に式(7)の α と濃度との関係を示すがこれより、 α はほぼ一定値をとるものの、濃度とともに若干変化し、 $n = 0.2$ とするとよく一致することがわかる。また、図2は式(2)を積分して得られる抵抗則

$$\frac{u_m}{u_s} = \left\{ \frac{48}{25} C^{\frac{2}{3}} \frac{[1 - \alpha (\tan \phi_s / \tan \theta)]^{\frac{1}{2}}}{(1 - e^2) \sin^2 \Psi} \right\}^{\frac{1}{2}} \left(\frac{h}{d} \right) \quad (8)$$

表-1 実験条件

	勾配(°)	流量(kg/s)
CASE A1-1	38	22.45
CASE A1-2	38	15.64
CASE A1-3	38	7.76
CASE A2-1	42	22.45
CASE A2-2	42	15.64
CASE A2-3	42	7.76
CASE A3-1	45	22.45
CASE A3-2	45	15.64
CASE A3-3	45	7.76

図-1 α と濃度の関係

について、理論と実験係数を比較したもので両者がよく一致しているのが分かる。

4. 土塊の滑動実験と数値計算

シミュレーションの特性を調べるため水路に三角形（底辺50cm 高さ15cmの二等辺三角形）の形状をした3.と同じ実験砂の土塊を設置して滑動させ、流下・堆積形状をビデオカメラで測定した。なお、水路の下流端側には新たに勾配3°の水路を接続している。実験条件を表-2に示す。また、同じ条件で計算を行い実験結果と比較する。その他の計算に用いられたパラメータは表-3のとおりである。図3に、流下プロセスに関する実験と計算結果の比較の一例を示す。計算結果は、土塊の変形速度を実験結果より大きく評価する傾向があるがそのプロセスはよく表現している。図4に重心位置の変化を示す。また、図中には参考のため固体摩擦として同じ摩擦係数をもつ剛体の重心位置の変化も示している。土塊の重心は変形に伴う重心位置の低下による加速度を受けるため、剛体のそれに比べ大きくなるが、計算結果の方がその傾向が強くでている。また、剛体とちがって流下とともに一定の速度に近づくことも見てとれる。図5は、堆積形状の実験値と計算値の比較をするが両者はよく一致している。

5. おわりに

構成則として粒子間の全圧力に対する静的な圧力の比 α を導入したことにより粒子流の方程式系が閉じ抵抗則をうまく表現することがわかった。また、土塊の滑動実験とシミュレーション結果との比較から、シミュレーションは実験結果と比べ土塊の変形の影響を強くうけるものの、変形のプロセスおよび最終的な堆積形状をよく表現することがわかった。

参考文献

- 1) 道上正規・宮本邦明・片嶋啓介：乾燥粒子流の一次元数値解析、第48回土木学会中国支部研究発表会概要集、1996、pp. 203-204.
- 2) 大同淳之・宮本邦明・三輪浩・西本直史：Newton 流体を含む粒子流の構成方程式のエネルギー的考察、39回土木学会全国大会II、1984、pp. 367-368.

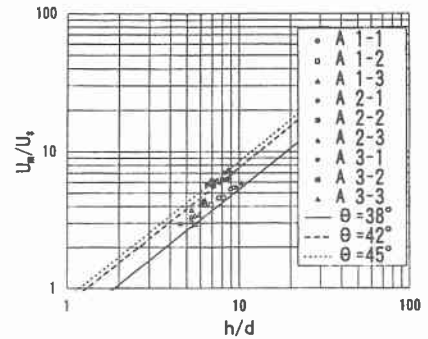


図-2 u_m/u と h/d の関係

表-2 実験条件

	勾配 (°)	流下開始位置 (cm)
CASE B1-1	38	500
CASE B1-2	38	300
CASE B1-3	38	100
CASE B2-1	42	500
CASE B2-2	42	300
CASE B2-3	42	100
CASE B3-1	45	500
CASE B3-2	45	300
CASE B3-3	45	100

表-3 計算パラメータ

	濃度	α
勾配 38°	0.35	0.92
勾配 42°	0.26	0.87
勾配 45°	0.23	0.85

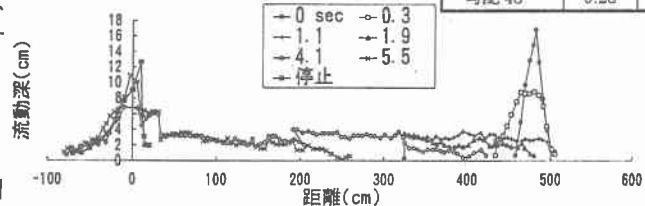


図-3(a) 土塊の時間的形狀変化 CASE B 3-1 (実験値)

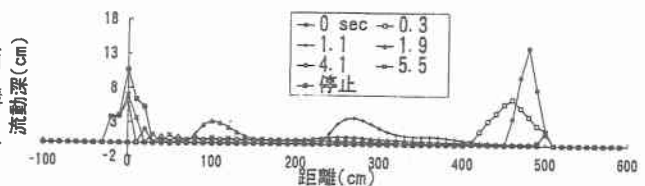


図-3(b) 土塊の時間的形狀変化 CASE B 3-1 (計算値)

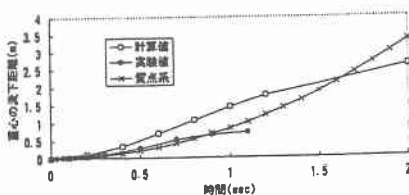


図-4 重心位置の時間的変化 (CASE B 3-1)

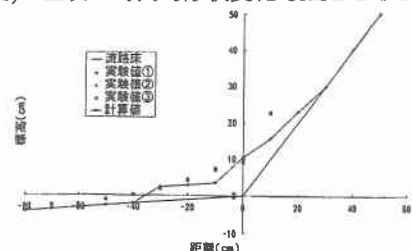


図-5 堆積形状の比較 (CASE B 3-1)