

住鉦コンサルタント 正員 片嶋 啓介*

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***

1. はじめに

雲仙普賢岳の火山活動以来、火砕流は一般に知られるようになったが、その運動・堆積機構についてはよくわかっていない。火砕流の流下・堆積は本体部の運動に依存すると考えられている。本研究では火砕流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、構成則を検討するとともに、数値解析手法を開発した。また、土塊の滑動実験を行い実験と数値計算との比較をすること、その特性を検討している。

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 を、それぞれ式(1)～(5)で表す¹⁾。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、式(6)、(7)を導入する。

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-2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、式(8)について理論と実験を比較したものであるが両者はよく一致している。

表-2 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

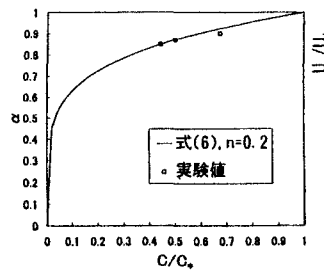
図-1 α と濃度の関係

表-1 支配方程式

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

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

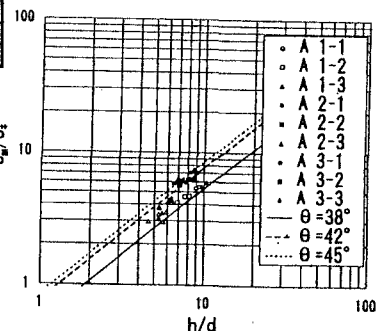
$$\tau_d = \frac{1}{12} (1 - e^2) \sin^2 \Psi \cdot C^{\frac{1}{3}} \cdot \alpha d^2 \left(\frac{du}{dz} \right)^2 \quad (4)$$

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

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

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

ここに、 p_d ：動圧、 τ_d ：動せん断力、 p_s ：静圧、 τ_s ：静せん断力、 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、 α ：粒子の密度、 d ：粒径、 C_s ：堆積層の濃度、 n ：実験定数である。

図-2 u_m/u_s と h/d の関係

キーワード 粒子流、火砕流、抵抗則、土塊の流動と変形、数値シミュレーション

* 〒160 東京都新宿区歌舞伎町 2-16-9 Tel.03-3205-6031 FAX 03-3205-6034

** 〒680 鳥取県鳥取市湖山町南 4-101 Tel.0857-31-5285 FAX 0857-28-7899

*** 〒680 鳥取県鳥取市湖山町南 4-101 Tel.0857-31-5686 FAX 0857-31-5687

4. 土塊の滑動実験と数値計算

計算は一次元浅水流方程式を用いて行ったが、その際、静的な応力 τ_s が流れが停止するときその方向や大きさを変えることに留意する必要がある。そのため、停止条件として時刻 t と $t + \Delta t$ のフラックスの積が負であることを導入する。そして、一端停止した後の運動を図3に示すように停止時の力の釣合から場合分けする。次に、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-3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-4のとおりである。図4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5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6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。

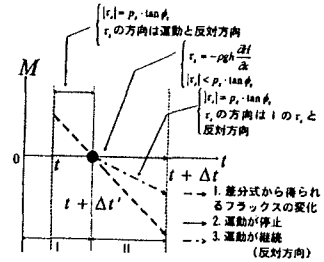


図-3 停止条件

表-3 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-4 計算パラメータ

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

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。

最後に、本研究の一部は（財）砂防・地すべり技術センターとの共同研究として行われた。尚、実験に関して建設技術研究所の諸氏に協力を得た。関係各位に記して感謝する次第である。

参考文献

1) 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.

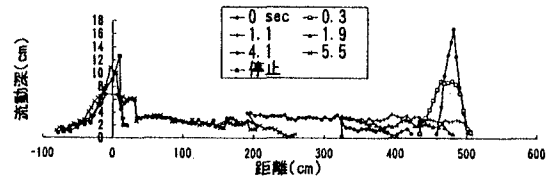


図-4 (a) 土塊の時間的の形状変化 CASE B 3-1 (実験値)

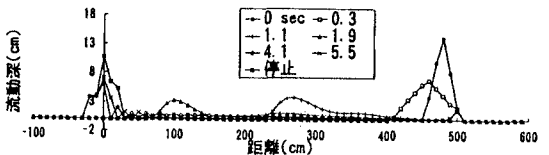


図-4 (b) 土塊の時間的の形状変化 CASE B 3-1 (計算値)

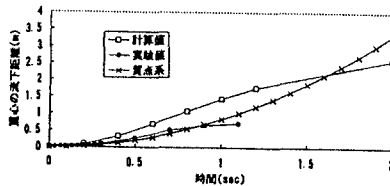


図-5 重心位置の時間的変化 (CASE B 3-1)

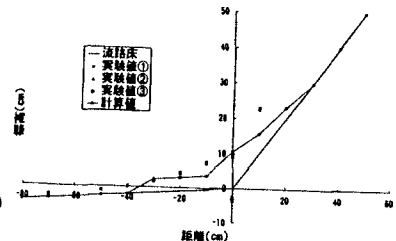


図-6 堆積形状の比較 (CASE B 3-1)