

個別要素法と連続体の原理を組み合わせた土石流の流動モデルの検討

山梨大学大学院工学研究科 学生会員 ○谷島 亨
 山梨大学工学部土木環境工学科 正会員 宮沢 直季
 山梨大学工学部土木環境工学科 フェロー会員 砂田 憲吾

1. はじめに

これまでに土石流の流動モデルとして、個別要素法を用いたモデル¹⁾、連続体の原理に基づいたモデル²⁾がある。実際の現象を考えた場合、非連続体として扱う個別要素法の方が好ましいと思われる。しかし個別要素法を用いると、取り扱う粒子の数が多、計算時間がかかるという問題に直面する。そこで本研究では、3次元個別要素法と連続体の原理を合わせたモデルを構築し、その妥当性を検討した。

2. 計算方法

基本的な考え方として、大きい粒径部分は個別要素法(以後 DEM と呼ぶ)、その他の粒径部分は連続体(間隙流体)として扱う。今回モデルの妥当性を見るために、高橋ら³⁾の実験結果と比較してみる。図-1は粒度分布である。DEMで扱う部分は6つの粒径階に分け、連続体として扱う部分は1つの粒径階とした(小さい粒径から粒径階1とする)。DEMに関して粒子の回転は考えない、粒子は球、流体力は河床と平行に働くと仮定する。すると運動方程式は次式のように表わされる。

$$\left(1 + C_m \frac{\rho_M}{\sigma}\right) m \ddot{x} = mg \sin \theta_0 - \rho_M \frac{m}{\sigma} g \sin \theta_0 + F_x + f_w \cos \theta_b \quad (1)$$

$$\left(1 + C_m \frac{\rho_M}{\sigma}\right) m \ddot{y} = -mg \cos \theta_0 + \rho_M \frac{m}{\sigma} g \cos \theta_0 + F_y + f_w \sin \theta_b \quad (2)$$

$$\left(1 + C_m \frac{\rho_M}{\sigma}\right) m \ddot{z} = F_z \quad (3)$$

$$f_w = \frac{1}{8} \pi d_k^2 \rho_M C_D \{u_M - (\dot{x} \cos \theta_b + \dot{y} \sin \theta_b)\} |u_M - (\dot{x} \cos \theta_b + \dot{y} \sin \theta_b)| \quad (4)$$

ここに、 $C_m (=0.5)$: 付加質量係数、 ρ_M : 間隙流体の密度、 σ : 粒子の密度、 m : 粒子の質量、 x : 流下方向の座標、 y : 流下直角方向の座標、 z : 横断方向の座標、 g : 重力加速度、 θ_0 : 水平軸と x 軸の角度、 θ_b : x 軸と河床面の角度、 F_x, F_y, F_z : 衝突時の作用力、 f_w : 流体力、 u_M : 間隙流体の断面平均流速、 d_k : 粒径階 k ($k=2\sim7$) の平均粒径、 C_D : 抗力係数、 $(\dot{\quad})$: 時間微分である。

連続体として扱う部分の基礎式は次式のように表わされる。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \sum_{k=1}^7 E_k = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = \sum_{k=1}^7 E_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial (C_1 h)}{\partial t} + \frac{\partial C_1 M}{\partial x} = E_1 C_* \quad \left(DEMのC_k = \frac{Vol_k}{\Delta x \times B \times h}, k=2\sim7 \right) \quad (7)$$

$$B \frac{\partial M_M}{\partial t} + B \frac{\partial (u_M M_M)}{\partial x} = -gBh(1 - C_{DEM}) \frac{\partial z_b}{\partial x} - gBh(1 - C_{DEM}) \frac{\partial h}{\partial x} - B \frac{\tau_b}{\rho_M} \quad (8)$$

ここに、 z_b : 河床高、 E_k : 粒径階 k の侵食・堆積速度、 h : 水深、 $M = M_L + M_M$: 単位幅流量、 M_L : DEM 粒子の単位幅流砂量、 M_M : 連続体部分の単位幅流量、 C_k : 粒径階 k の流れの土砂濃度、 C_* : 河床の土砂濃度、 Vol_k : 空間

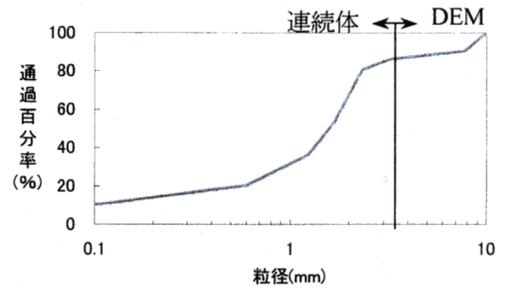


図-1 粒度分布

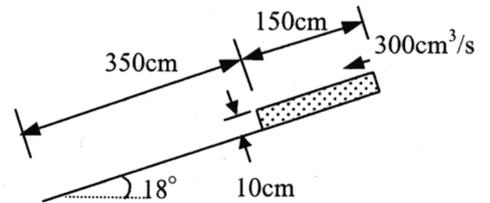


図-2 実験水路

キーワード: 土石流、個別要素法 (DEM)、連続体

連絡先: 〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11 TEL055-220-8523 FAX055-220-8773

格子内にある DEM 粒子の体積、 B ：幅、 C_{DEM} ：DEM 粒子の濃度、 τ_b ：河床せん断力である。

侵食速度・堆積速度、河床せん断力においては、中川⁴⁾、Takahashi et al.⁵⁾の式を用いた。

3. 計算条件

全長 5m、幅 10cm の水路に上流端から 150cm 下流地点に高さ 10cm の堰を設け、これより上流側に厚さ 10cm で図-1 の粒度分布の土砂を敷き、上流端より 300cm³/s の水を 20 秒間給水した（図-2）。計算のパラメータとして DEM においては、時間間隔 $\Delta t_L=5.0 \times 10^{-5}$ 秒、法線方向のバネ定数 $K_N=1000$ N/m、接線方向のバネ定数 $K_S=333$ N/m、法線・接線方向の減衰係数 $C_N=C_S=0.0285$ N・s/m とした。連続体部分は時間間隔 $\Delta t_M=1.0 \times 10^{-3}$ 秒、格子間隔 $\Delta x=5$ cm とした。境界条件は上流端で 20 秒までは $M_M=30$ cm²/s、その後 $M_M=0$ cm²/s とし、下流端で断落ちとした。

4. 結果

図-3 は、高橋らの実験結果と本計算結果を比較したものである。縦軸はそれぞれ下流端での流量、土砂濃度、累加土砂量を示し、横軸は下流端に土石流が到達したときからの経過時間を示している。流量に関して 15 秒から激しく振動しているが、ある程度再現できたといえる。土砂濃度、累加土砂量に関して、後半部分は少ない値を示しているが、概ね一致しているといえる。

図-4 は、土石流が下流端に到達したときの流動状況を示した図である。線は水深を表わしている。先頭部に DEM 粒子が届いていないが、これは流れよりも遅れて侵食されるため、粒子が流体力を受け、次第に周りの流体と同じ速度になるのが原因と考えられる。しかし、ある程度現象は再現できているといえる。

5. おわりに

今回、大きい粒径部分は個別要素法、その他の粒径部分を連続体としたモデルを構築した。その結果、概ね実験結果と一致することが確認された。今後の課題として、個別要素法で扱う粒子が流体に与える力を考慮する必要がある。また、格子型砂防ダムを配置した実験結果と比較してみる必要がある。

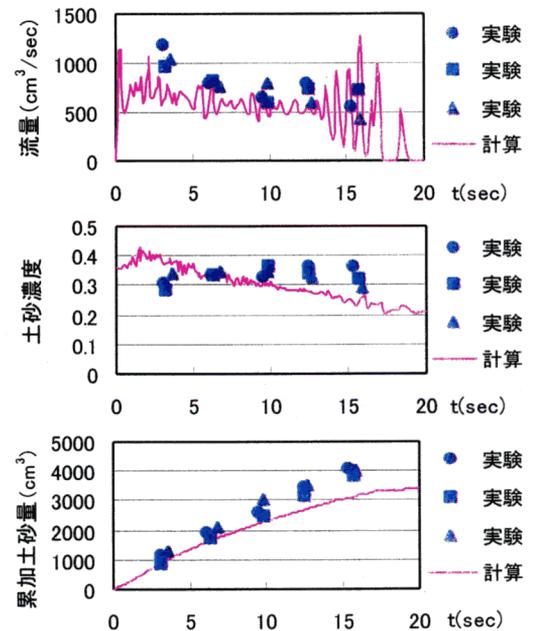


図-3 実験と計算結果の比較

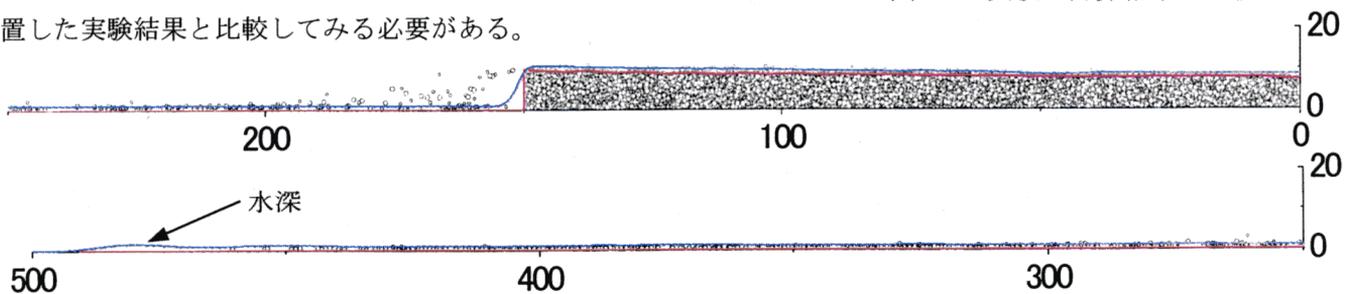


図-4 流動状況（土石流が下流端に到達した時点）

【参考文献】 1) 水野秀明・水山高久・南哲行・倉岡千郎：個別要素法を用いた鋼管製透過性砂防ダムの土石流捕捉効果に関するシミュレーション解析，砂防学会誌，Vol.52，No.6，pp4-11，2000.
 2) 芦田和男・江頭進治・栗田三津雄・荒牧浩：透過性砂防ダムの土石流調節機構，京都大学防災研究所年報，第30号B-2，1987.
 3) 高橋保・中川一・里深好文・王浩民：立体格子型砂防ダムによる土石流調節のシミュレーション，水工学論文集，第46巻，pp.689-694，2002.
 4) 中川一：水理公式集例題プログラム集，例題2-5，2002.
 5) Takahashi, T., Nakagawa, H., Satofuka, Y. & Kawaike, K. : Flood and Sediment Disasters Triggered by 1999 Rainfall in Venezuela ; A River Restoration Plan for an Alluvial Fan, Journal of Natural Disaster Science, Vol.23, No2, pp65-82, 2001.