

財団法人 砂防・地すべり技術センター ○中島 達也

高濱 淳一郎

松村 和樹

1. はじめに

乾燥粒子流を連続流体として取り扱う数値シミュレーションに関する研究は、これまで、主に粒子が活発に運動し、圧力・剪断力とも衝突による応力が支配的な場合について主に行われてきた¹⁾。筆者らは、これに対し、緩勾配区間での粒子流の挙動に興味を持ち、粒子の運動が活発でない条件下での数値シミュレーション手法についての検討を昨年度から行っている²⁾。昨年度は、対象とする流れを支配する圧力・抵抗力(剪断力)の構造と数値シミュレーションの基礎方程式系および手法について報告し、結局クーロン摩擦による停止条件の定式化が重要であり検討の余地が残されていることを報告した。

本報では、停止条件について新たに検討を行い、シミュレーション手法にも改良を加えたので報告する。

2. 基礎方程式と停止条件

基礎方程式の基本的な考え方は前報²⁾と同様である。基礎方程式は流れの深さ方向に積分した、いわゆる2次元の浅水流方程式(平面流方程式)で与える。したがって、基礎方程式は連続式と運動方程式からなる。運動方程式をベクトル表現で書くと以下のように表される。

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} + (\vec{u} \vec{M}) \cdot \nabla = -g h (\nabla H) - \frac{\vec{\tau}_0}{\rho} \quad (1)$$

ここで、 \vec{M} は流量フラックス・ベクトル、 \vec{u} は平均流速ベクトル、 g は重力加速度、 h は流動深、 H は流動面標高、 $\vec{\tau}_0$ は底面剪断力ベクトル、 ρ はみかけの密度($\rho = c \sigma$; c :濃度、 σ :粒子密度)である。底面における応力状態は、クーロン摩擦力 $\vec{\tau}_s$ と粒子の非弾性衝突に起因する動的な応力 $\vec{\tau}_d$ の和、

$$\vec{\tau}_0 = \vec{\tau}_s + \vec{\tau}_d \quad (2)$$

で表わされる。

クーロン力は、地盤面に働く垂直応力(圧力)と内部摩擦角の積で表される大きさを持ち、その方向は、常に運動の方向と反対方向に作用している。運動中は、クーロン力の持つ力積ベクトルの大きさは常に外力の力積ベクトルと流れの運動量ベクトルの和ベクトルの大きさより小さい。すなわち、この条件を満たしている間は流動を継続することができる。したがって、粒子流の停止条件は、クーロン力による力積ベクトルの大きさが外力の力積ベクトルと流れの運動量ベクトルの和ベクトルの大きさより大きいことによって与えられよう。また、粒状体が停止し続けているということは、外力の大きさがクーロン力より小さいということと等価である。粒子流の停止条件を模式的に示すと図-1のように表される。

停止条件について、式(1)を時間について差分化することによって表現してみよう。時刻 n (n ステップ)の時の流れの持つ運動量ベクトルと外力の力積ベクトルの和の大きさは、式(3)のように表される。

$$\vec{M}_0 = -\vec{M}_n + ((\vec{u}_n \vec{M}_n) \cdot \nabla + g h_n (\nabla H_n) + \vec{\tau}_d \cdot n / \rho) \cdot \Delta t \quad (3)$$

ここで、 Δt は差分時間である。したがって、停止条件は、

$$|\vec{M}_0| \leq |\vec{M}_c| \quad : \quad \vec{M}_c = \vec{\tau}_s \cdot \Delta t \quad (4)$$

となる。すなわち、式(4)が満たされている時 $n+1$ ステップ目で流れは停止する。

3. モデル斜面への適用

本モデルをモデル斜面に適用し計算を行った。モデル斜面は、滑走部と堆積部の平板状の斜面とし、それぞれの勾配を40度、20度とした。滑走部の斜面上に厚さ50cm、縦断方向に1m、横断方向に40cmの合計0.2m³の土砂を設置し、初速度を0とした。また、静的内部摩擦角(ϕ_s)を25度とした。その結果、図-2に示す堆積が40秒後に見られ、停止している。中心線に沿う縦断に対して堆積勾配は、静的内部摩擦角より若干大きい値(約26度)をとっている(図-3)。これは、式(1)から次のように理解される。まず、底面の勾配が内部摩擦角より小さいため、底面におけるクーロン力は斜面勾配が内部摩擦角と等しい条件の下におけるクーロン力より大きい。底面における剪断力の釣り合いを考えると、粒状態が運動を続け最終の堆積形状をとって停止する時、底面勾配が内部摩擦角と等しい条件下でのクーロン力に釣り合うだけの大きな圧力勾配が必要になる。そのため、堆積表面の勾配は内部摩擦角より大きな値をとる。実際、式(1)において左辺を0、あるいは式(3)において M_0 を0とし、体積力、圧力勾配、クーロン力を求め、式(4)のチェックを行うと、 M_0 と M_c は、ほぼ同じ値をとる。また、停止している任意の点(図-2参照)の応力関係について式(3)、(4)に基づいて調べ、図-1に相当するチャートを作成するとクーロン摩擦応力の大きさと質量力と圧力勾配の合力の大きさがほぼ等しいことが分かる。

4. おわりに

本研究からクーロン力が卓越する領域における粒子流の数値シミュレーションが可能となり、流れの特性、物理諸量の把握が可能となった。今後クーロン力が卓越する種々の条件のもとでの実験を行い、計算から得られる物理諸量と比較を行って本モデルの持つ詳細な特性についてさらに検討を進める必要がある。おわりに、本研究は(財)砂防・地すべり技術センター主催の「砂防シミュレーション研究会」の研究の一環で行ったものである。研究会でご指導頂いている鳥取大学宮本邦明助教他、委員各位に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 宮本邦明、鈴木宏、山下伸太郎：火砕流の流動モデルと流下・堆積範囲の予測に関する研究、水工学論文集、第36巻、1992.2、pp211-216
- 2) 高濱淳一郎、中島達也：乾燥粒子流の数値シミュレーション、平成7年度砂防学会研究発表会概要集、1996.5、pp.79-82
- 3) 宮本邦明：Newton流体を含む粒子流の流動機構に関する研究、立命館大学学位論文、1985

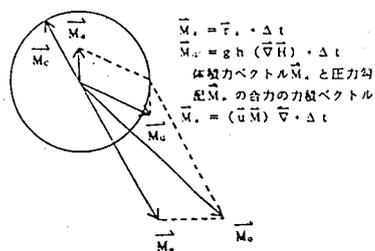


図-1 停止条件模式図

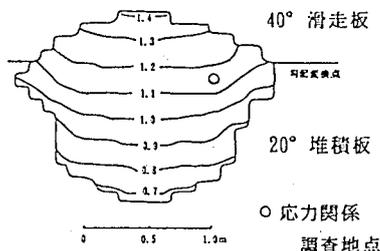


図-2 計算結果平面図

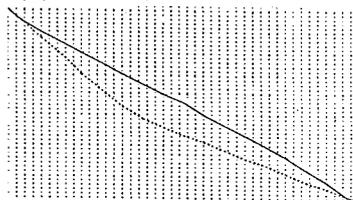


図-3 計算結果縦断面図

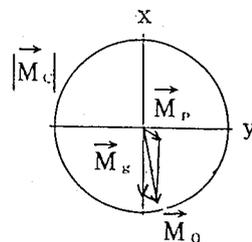


図-4 応力関係確認図