

安定化有限要素法による地塊挙動シミュレーション

中央大学	学生員	丹羽	諭
中央大学大学院	学生員	唐木田	泰久
中央大学大学院	学生員	小林	義典
中央大学	正会員	櫻山	和男

1. はじめに

日本では気候的、地形的な環境により毎年多くの土砂災害が報告されている。土砂災害は一瞬にして多大な被害を及ぼすものであり、早期に予測、対策を立てることは重要である。現在、土砂災害の数値シミュレーションは主に有限差分法により行われている。しかし、地塊の運動は、斜面の形状や特徴に左右され、大きな影響を受ける。そこで任意形状への適合性に優れている有限要素法が有効であると言える。

そこで、本報告は安定化有限要素法に基づく地塊挙動解析手法の提案を行うものである。安定化手法¹⁾として SUPG 法を適用し、移動境界手法としては、複雑地形にも適応可能な Euler 的移動境界手法²⁾を適用した。また地塊挙動を表現するために、地塊の停止時に動力と最大摩擦力を比較する活動停止条件³⁾⁴⁾を組み込んだ。数値解析例として、平面及び急勾配斜面における乾燥粒子流の移動問題を取り上げ、本手法の有効性の検討を行った。

2. 数値解析手法

(1) 基礎方程式

流体は固液混相流⁵⁾として扱い、浅水長波方程式に地塊の駆動力、及び底面抵抗力⁶⁾の項を加えることで、以下の支配方程式 (1) が得られる。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}_i}{\partial x_i} - \mathbf{K} - \mathbf{R} = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H \\ Hu_1 \\ Hu_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H \\ Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここに、保存変数 \mathbf{U} を上式 (2) のように定義する。 H は地塊の層厚である。また、 u_i は i 軸方向の流速、 $Q_i (= Hu_i)$ は i 軸方向の流量である。式 (1) の第 1 項は未知量に対する時間微分項であり、第 2 項は移流項、第 3 項は重力、流体及び地塊層厚に起因する駆動力項、第 4 項は運動地塊の底面抵抗力項⁶⁾である。ここに、 \mathbf{F}_i 、 \mathbf{K} 、 \mathbf{R} は

$$\mathbf{F}_1 = \begin{bmatrix} Q_1 \\ uQ_1 \\ uQ_2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{F}_2 = \begin{bmatrix} Q_2 \\ vQ_1 \\ vQ_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} gH \frac{\tan\alpha}{q+1} - \frac{\rho_w}{\rho} \lambda g H \frac{\partial H}{\partial x} - kg(1-\lambda)H \frac{\partial H}{\partial x} \\ gH \frac{\tan\beta}{q+1} - \frac{\rho_w}{\rho} \lambda g H \frac{\partial H}{\partial y} - kg(1-\lambda)H \frac{\partial H}{\partial y} \\ 0 \\ - \left[\frac{g}{(q+1)^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{u}{(u^2+v^2+w^2)^{\frac{1}{2}}} h_c(q+1) \right. \\ \left. - \left[\frac{g}{(q+1)^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{v}{(u^2+v^2+w^2)^{\frac{1}{2}}} h_c(q+1) \right] \right] \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{R} = - \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{g}{(q+1)^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{u}{(u^2+v^2+w^2)^{\frac{1}{2}}} H \tan\delta \\ \frac{g}{(q+1)^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{v}{(u^2+v^2+w^2)^{\frac{1}{2}}} H \tan\delta \end{bmatrix} \quad (5)$$

であり、 ρ 、 ρ_w ；地塊及び間隙流体の単位体積重量、 ϕ 、 δ ；地塊層内及びすべり層の摩擦角、 λ ；地塊のすべり面の鉛直力に対する間隙水圧の割合、 g ；重力加速度、 k ；水平土圧係数³⁾、 h_c ；粘着力による係数⁶⁾ ($c = \rho g h_c$ と定義さる、 c ；粘着力、 ρ ；地塊の密度)、長距離運動では $h_c = 0.0$ とする。 $q = \tan^2\alpha + \tan^2\beta$ ($\tan\alpha$ 、 $\tan\beta$ ； $x-z$ 平面及び $y-z$ 平面におけるすべり面の傾斜)、 $w = -(u \tan\alpha + v \tan\beta)$ とする。

(2) 移動境界手法

移動境界手法²⁾として複雑地形に対する適応性に優れた固定メッシュに基づく Euler 的手法を採用した。Euler 的手法とは、対象領域をあらかじめ要素分割しておき、各時間ステップにおいて各要素が陸域か水域かを判定することにより水際線を表現する方法である。

(3) 運動地塊の活動停止条件

地塊は活動中か停止中かにより、底面に作用する底面抵抗力が相違している。運動中の場合は底面において、地塊の最大抵抗力に等価な力が運動する方向と反対方向に作用する。また、停止中の場合は地塊の底面抵抗力が外力とつり合っており、地塊の最大底面抵抗力より小さく、外力の作用する方向と反対方向に作用する。

この活動停止条件³⁾⁴⁾は運動停止時、つまり $u_i = 0.0$ である節点で、軸方向において以下の式を用いて判定を行う。

$$\left| \frac{\partial \mathbf{F}_i}{\partial x_i} - \mathbf{K} \right| \geq g(1-\lambda)H \tan\delta \quad (6)$$

上式において右辺は最大摩擦力である。左辺項が右辺項より大きい場合は地塊が運動を再開し、その逆の場合、停止状態を続行し、その節点に $u_i = 0.0$ 、 $Q_i = 0.0$ という条件を与える。

3. 数値解析例

(1) 平面における堆積乾燥粒子流の移動問題

本手法の有効性について検討を行うため、堆積乾燥粒子流移動問題を取り上げ、計算解と厳密解と比較を行った。解析領域、初期矩形地塊形状を図-1に示す。分割幅は、 x 、 y 方向ともに $0.05[m]$ 、境界条件として壁面において slip 条件を与えた。微小時間増分量 Δt は $0.001[sec]$ 、地塊有無の判定誤差 ϵ は $1.0 \times 10^{-4}[m]$ 、マルチパス法の反復回数は 3 回とした。なお、地塊層内の摩擦角 ϕ は 0° 、すべり層の摩擦角 δ は 10° 、 20° 、 30° とした。地塊停止時の土圧係数は

KeyWords： 安定化有限要素法、土石流、移動境界手法、運動停止条件

連絡先： 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 E-mail: d31119@educ.kc.chuo-u.ac.jp

吉松ら³⁾⁴⁾と同じく 1.0 を与え, $\lambda, h_c = 0.0$ として解析を行った.

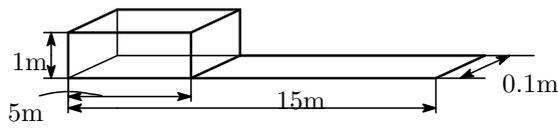


図-1 地塊堆積高さ初期図

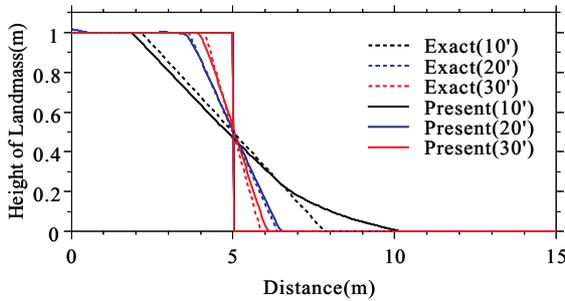


図-2 運動停止時における地塊堆積深

図-2に地塊のすべり面の摩擦角を $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ とした場合の運動停止時地塊形状を示す. すべり面摩擦角が大きいほど地塊の斜面傾斜が傾く傾向を示していることがわかる. また, 厳密解と比較をするとすべり面の摩擦角 10° の場合, 停止時において, x 軸 $6m$ 付近まで良い一致を示しているが, 地塊の先端において, 停止位置が過大評価されている. すべり面の摩擦角 $20^\circ, 30^\circ$ の場合, 厳密解と良い一致を示していることがわかる.

(2) 急勾配斜面における地塊移動問題

地塊の進行速度, 停止位置における有効性の検討を行うため, 急勾配斜面における地塊移動問題を取り上げ, Hutter, 吉松らが行った計算解と比較を行った. 解析領域, 初期地塊形状を図-3に示す. 分割幅は, x, y 方向ともに $0.01[m]$ であり, 境界条件として壁面において slip 条件を与えた. 微小時間増分量 Δt は $0.0001[sec]$, 地塊有無の判定誤差 ϵ は $1.0 \times 10^{-4}[m]$, マルチパス法の反復回数は3回とした. なお, 計算条件として, 地塊層内の摩擦角 ϕ は 29° , すべり層の摩擦角 δ は 23° とし, 地塊停止時の土圧係数は吉松ら³⁾⁴⁾と同じく 1.0 を与えた. λ, h_c は 0.0 とした.

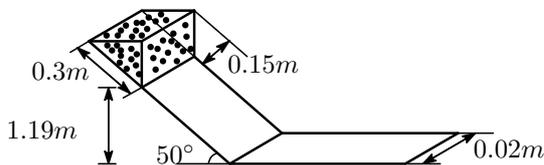


図-3 地塊堆積高さ初期図

図-4は時間経過に伴う地塊堆積高さであり, x 軸は斜面表面の距離である. ここで $L = 0.3[m], H = 0.15[m]$ とし, x 軸上 6.171 までが斜面となる. 時間経過につれて地塊の進行を捉えている. 本手法による計算結果は, Hutter による計算結果と $0.525[sec]$ まで良い一致を示し, $0.700[sec]$ において, 後方側に地塊が残り, 進行速度が遅れていることがわかる. また, 地塊が停止した $1.575[sec]$ では, いづれの手法もほぼ同様の形状となり, 地塊の停止位置は良い一致を示した.

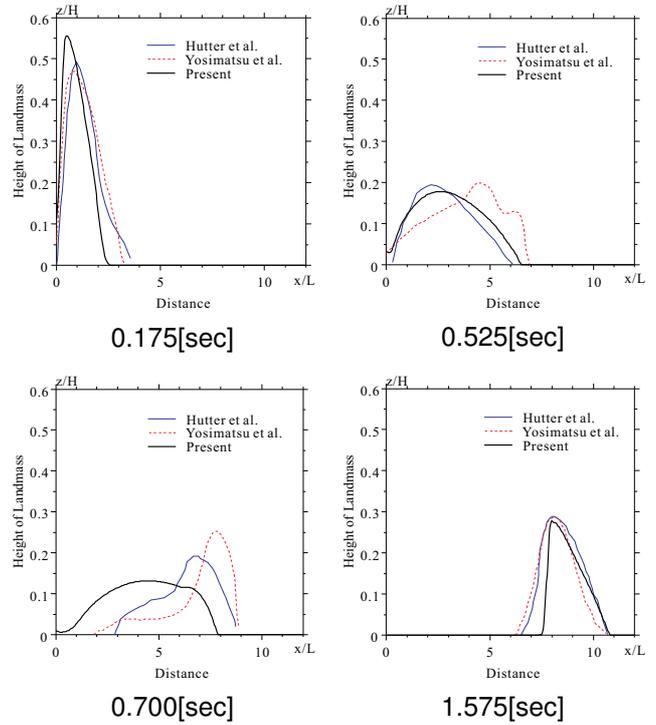


図-4 時間経過による地塊層厚の比較

4. おわりに

本報告では, Euler 的移動境界手法を用いた安定化有限要素法に基づく, 地塊挙動解析手法の提案を行った. 本手法の有効性を検討するために, 数値解析例として平面と急勾配斜面における堆積乾燥粒子流の移動問題を取り上げた. その結果, 以下の結論を得た.

- 平面における地塊移動問題において, すべり面の摩擦角の値により, 地塊の傾斜角は厳密解と良い一致を示した. しかし, すべり面の摩擦角を小さくするにつれて, 地塊先端において停止位置が過大評価される傾向を示した.
- 急勾配斜面における地塊移動問題において, 過渡的な挙動は, Hutter, 吉松らが行った計算解と形状の相違が生じたが, 地塊の停止位置, 最終形状において良い一致を示した.

今後の課題として, 運動停止条件の検討, 現象が2次元的な解析例による精度検証が挙げられる.

参考文献

- 1) Aliabadi, S.K., Tezduyar, Stabilized finite element formulations for incompressible flow Computations, *Advance in applied Mechanics* 28, pp1-44, 1992.
- 2) Mutsuto Kawahara, Tsuyoshi Umetsu: Finite element method for moving boundary problems in river flow.
- 3) 吉松弘行, 張馳: 安定化有限要素法による地すべり地塊の運動シミュレーション, *Journal of the Japan Landslide Society* Vol.41, No1, pp.1-8, 2004
- 4) 吉松弘行, 櫻庭雅明, 櫻山和男: CIP-FEM による地すべり地塊の運動シミュレーション, 地すべり学会研究発表会論文集 (印刷中)
- 5) 高橋保: 地質・砂防・土木技術者/研究者のための土石流の機構と対策, 近未来社, 2004.
- 6) 汪發武, 佐々恭二: 地すべり運動シミュレーションとハザードマップ, pp.61-, 79.