

崩壊土塊の運動に関する2次元数値解析

鳥取大学工学部

鳥取大学地域共同研究センター

鳥取大学大学院

フェロー 道上 正規

正 員 宮本 邦明

学生員 ○福住 真仁

1. はじめに

我が国では、山腹崩壊などの土砂災害は毎年のようにどこかで発生している。より有効な土砂災害の対策を推進していくためにも、それらの原因となる崩壊土塊の運動に関する解析は重要である。著者らはこれまで、崩壊土塊の運動メカニズムと1次元数値解析手法¹⁾について検討してきたが、本研究ではこの手法を発展させ、2次元数値解析手法について検討を行ったものである。

2. 構成方程式

江頭・宮本ら²⁾は砂礫粒子を高濃度を含む流れの応力を、粒子間の摩擦・非弾性衝突・粒子間の間隙水の乱れによるエネルギー散逸を考慮して、特に粒子間の摩擦が重要な役割を果たすことを示し、表1の構成方程式を得ている。

表1 構成方程式

$$p = p_s + p_d + p_f, \tau = \tau_s + \tau_d + \tau_f, \tau_s = p_s \tan \phi_s, p_s = \alpha(p_s + p_d), \alpha = (c/c_s)^{\frac{1}{2}}$$
$$p_d = k_g e^2 c^{\frac{1}{3}} \alpha d^2 \left(\frac{du}{dz} \right)^2, \tau_d = k_g (1 - e^2) c^{\frac{1}{3}} \alpha d^2 \left(\frac{du}{dz} \right)^2, \tau_f = k_f \rho d \frac{(1-c)^{\frac{5}{2}}}{c^{\frac{2}{3}}} \left(\frac{du}{dz} \right)^2$$

ここに、 p ；流れの圧力、 τ ；せん断応力、 p_s ；粒子間応力、 τ_s ；個体摩擦応力、 p_d ；粒子の衝突による圧力、 τ_d ；粒子の衝突によるせん断力、 p_f ；間隙流体の圧力で静水圧で近似される、 τ_f ；間隙流体によるせん断力、 ϕ_s ；砂礫の内部摩擦角、 c ；土砂濃度、 c_s ；静止体積層の土砂濃度、 σ ；砂礫の密度、 ρ ；間隙流体の密度、 d ；粒径、 e ；反発係数、 k_f, k_g ；定数（それぞれ、 $k_f=0.16, k_g=0.0828$ ）である。

3. 2次元数値解析

崩壊し滑動する土塊は、形状は変化するもののその体積は保存され、したがって土砂濃度も一定で、材料特性も変化しない。すなわち、飽和した崩壊土塊の運動は、先に述べた構成則を、土砂濃度を一定、流動層全体の密度も一定、侵食速度0の条件の下に適用し、固定床上の流れとして表現することができる。このとき2次元支配方程式は表2のように示される。式中の $\bar{\tau}_0 = (\tau_{0x}, \tau_{0y})$ は、流速の関数で表される動的応力 $\bar{\tau}_{0d}$ と流速には関係ない静的応力 $\bar{\tau}_{0s}$ の和で表される。

表2 2次元支配方程式

運動方程式（運動量保存則）

$$x \text{ 方向の運動方程式 } \frac{\partial M}{\partial t} + \beta \frac{\partial uM}{\partial x} + \beta \frac{\partial vM}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{0x}}{\rho_T}$$

$$y \text{ 方向の運動方程式 } \frac{\partial N}{\partial t} + \beta \frac{\partial uN}{\partial x} + \beta \frac{\partial vN}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{0y}}{\rho_T}$$

$$\text{連続式（質量保存則）} \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$

ここに、 $M = uh, N = vh, H = h + z_b, u, v$ ； x 及び y 方向の平均流速、 h ；流動深、 τ_{0x}, τ_{0y} ； x 及び y 方向の抵抗力、 g ；重力加速度、 β ；運動量補正係数、 ρ_T ；流動層全体の密度である。 ρ_T ；流動層全体の密度、（乾燥時 $\rho_T = c\sigma$ 、飽和時 $\rho_T = c\sigma + (1-c)\rho$ ）、 c ；砂礫移動層の土砂濃度、 ρ ；間隙流体の密度である。

また、 $\bar{\tau}_{0s}$ は土塊が運動中か停止中かでその評価が異なる。運動状態による固体摩擦力の变化を表3に示す。差分はリーフログ法を用いているが、一般に崩壊土塊の運動の停止とは刻み時間 Δt 内に生じるため、運動が停止するとき、静的応力の評価式を刻み時間 Δt 内で変える必要がある。そのため、運動の停止を判断する停止条件を導入しなければならない。

表3 運動状態による固体摩擦力の变化

	流動中	停止中
$\bar{\tau}_{0s}$	作用方向は 流れの方向とは 逆方向 $ \bar{\tau}_{0s} = p_s \tan \phi_s$	静的なつり合いを保つ $\bar{\tau}_{0s} = -\rho_m gh \nabla H - \beta \rho_m (\bar{u} \cdot \nabla) \bar{M}$ $ \bar{\tau}_{0s(max)} = p_s \tan \phi_s$

運動方程式を時間差分すると

$$\bar{M}^{n+1} = \bar{M}^n - [(\bar{u} \cdot \nabla) \bar{M}^n + gh \nabla H + \bar{\tau}_d] \Delta t - \bar{\tau}_s \Delta t$$

となる。運動が停止する場合、それは刻み時間 Δt の間に生じるため、

$$\vec{M}'|^{t'+\Delta t'}$$

$$= [\vec{M}'' - (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{M}'' + gh \nabla H + \vec{\tau}_d] \Delta t' - \vec{\tau}_s \Delta t'$$

$$\equiv \vec{M}'(\Delta t') - \vec{\tau}_s \Delta t' = \vec{0} \quad (\text{ただし } 0 < \Delta t' < \Delta t)$$

となる $\Delta t'$ が存在する。そこで近似として、

$$|\vec{M}'(\Delta t')| - |\vec{\tau}_s \Delta t'| = 0$$

の実根 $\Delta t'$ が $0 < \Delta t' < \Delta t$ にあることを停止条件として用いる。その概念を図 1 に示す。 $|\vec{\tau}_s \Delta t'|$ は運動量・力積空間で、時刻とともに半径が増加する円で表され、 M' は空間上の運動量変化の軌跡として表される。そして M' の変化中に円に接するとその時、運動は停止したことになる。また、停止後の土塊の運動は図 2 に示すように力の釣り合いから求める。

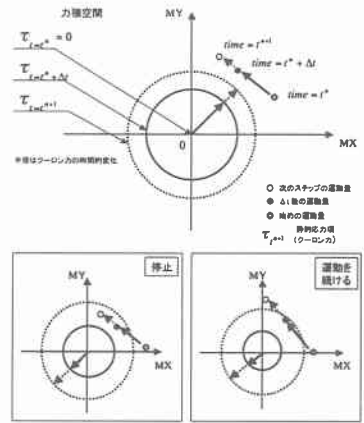


図 1 停止概念図

4. モデル地形による崩壊土塊の数値解析

モデル地形として、平板の上に飽和土塊を直方体に設置した。この状態では土塊は自立できず、自重により崩れていく。その様子を 1 次元¹⁾及び 2 次元で計算を行い比較する。解析結果を図 3、図 4 に示す。計算条件は、内部摩擦角 $\phi = 36.86^\circ$ 、間隙流体の密度 $\rho = 1.0 (\text{g/cm}^3)$ 、砂礫の密度 $\sigma = 2.7 (\text{g/cm}^3)$ 、粒子濃度 $c = 0.6$ 、粒径 $d = 10 (\text{cm})$ である。メッシュ間隔は $1 (\text{m})$ で、土塊の高さは $10 (\text{m})$ 、2 次元の計算結果は中央縦断について示されている。

1 次元 2 次元、両計算から得られる結果は一致している。崩壊は 5 秒で終了し、2 つとも同じ堆積勾配を示し停止した。

5. おわりに

崩壊土塊の運動に関する 2 次元数値解析法の開発を行った。支配方程式、構成方則はすでに提案している 1 次元数値解析法と同じである。また、停止条件を導入する必要があることも同様であるが、その数式化が 1 次元とは異なっている。そこで簡単なケースについて 1 次元 2 次元の解析を行い、その結果を比較したが両者はよく一致しており、ここでの取り扱いが妥当であることが示された。

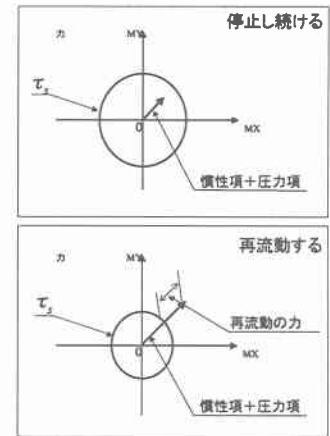


図 2 停止後の判断概念図

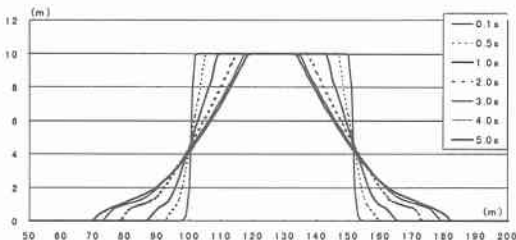


図 3 1次元解析結果

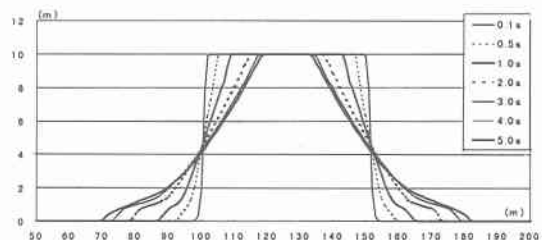


図 4 2次元解析結果

参考文献

- 1) 道上 正規・宮本 邦明・片嶋 啓介・植村 慎：土塊の運動機構と 1 次元数値計算法、水工学論文集、第 42 巻、pp.925-930、1998
- 2) 江頭 進治・宮本 邦明・伊藤 隆郭：掃流砂量に関する力学的解釈、水工学論文集、第 41 巻、pp.789-794、1997