

崩壊土塊の運動と 2 次元数値解析手法の研究

アジア航測株式会社 正 員 ○福住 真仁
鳥取大学工学部 フェロー 道上 正規
筑波大学農林工学科 正 員 宮本 邦明

1. はじめに

土砂災害対策を検討するには災害の原因となる土砂の動態を予測・評価することが重要であり、そのためには数値解析を用いることが有効である。本研究では、これまで提案している崩壊土塊の運動に関する 1 次元数値解析手法¹⁾をもとに 2 次元に拡張した。また 2 次元水路における乾燥土塊の実験を行い、運動の特徴を把握するとともに、2 次元数値解析結果と比較し解析手法の特性を把握した。

2. 支配方程式と停止条件

崩壊し滑動する土塊は、浸食も堆積もしない、固定床上の固液混相流として取り扱うことが出来る。このとき 2 次元支配方程式は表 1 のように示される。式中の $\vec{\tau}_0 = (\tau_{0x}, \tau_{0y})$ は、流速の関数で表される動的応力 $\vec{\tau}_{0d}$ と流速には関係ない固体摩擦応力 $\vec{\tau}_{0s}$ の和で表される²⁾。

支配方程式を差分化して数値解析を行うとき、崩壊土塊の運動の停止は、一般に有限差分時間 Δt 内に生じる。その停止の前後で固体摩擦応力 $\vec{\tau}_{0s}$ の評価は表 2 に示されるように異なる。従って停止条件を導入し、その前後で表 2 に従って固体摩擦応力を評価しなければならない。停止条件は以下のようにして得られる。運動方程式をベクトル表記し時間差分すると、

$$\begin{aligned} \vec{M}^{n+1} &= \vec{M}^n - [(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{M} + gh \nabla H + \vec{\tau}_{0d} / \rho_T] \Delta t - (\vec{\tau}_{0s} / \rho_T) \Delta t \quad (4) \\ \text{となる。運動が停止する場合、それは先述のように有限差分時間 } \Delta t \text{ の間に生じるので、} \\ \vec{M}^{n+\Delta t'} &= [\vec{M}' - (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{M}' + gh \nabla H + \vec{\tau}_{0d} / \rho_T] \Delta t' - (\vec{\tau}_{0s} / \rho_T) \Delta t' \\ &= \vec{M}'(\Delta t') - (\vec{\tau}_{0s} / \rho_T) \Delta t' = \vec{0} \quad (0 < \Delta t' < \Delta t) \quad (5) \end{aligned}$$

を満たす $\Delta t'$ が存在する事が停止条件となる。しかし式(5)中の ∇H は $\vec{M}$ 、 $\vec{\tau}_{0s}$ とは方向が一致するとは限らないので、式(5)は一般に解を持たない。そこで近似として、 $|\vec{M}^{n+\Delta t'}| = |\vec{M}'(\Delta t')| - |(\vec{\tau}_{0s} / \rho_T) \Delta t'| = 0$ 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。

3. 1 次元数値解析法との比較

2 次元数値解析を 1 次元数値解析¹⁾と同一条件で行い 2 つのケースにおいて比較する。そのひとつは、上流側水路勾配 38°、下流側水路勾配 3° からなる水路の上流部に飽和土塊を三角形（底辺 83cm 高さ 25cm の二等辺三角形）の形状で設置し滑動させる場合。ただし 2 次元では設置する土塊の幅は十分広く与え、中央縦断の結果について検討する。もう 1 ケースは、水平板上に飽和土塊を直方体（幅、長さ 50m 高さ 10m）に設置し自重により崩れていく場合である。材料特性は、内部摩擦角 $\phi_s = 36.86^\circ$ 、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。それぞれの解析結果を図 1、2 に示

表 1 2 次元支配方程式

運動方程式 (運動量保存則)	
x 方向の運動方程式 $\frac{\partial M}{\partial t} + \beta \frac{\partial u M}{\partial x} + \beta \frac{\partial v M}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{0x}}{\rho_T}$	(1)
y 方向の運動方程式 $\frac{\partial N}{\partial t} + \beta \frac{\partial u N}{\partial x} + \beta \frac{\partial v N}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{0y}}{\rho_T}$	(2)
連続式 (質量保存則) $\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$	(3)
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 : 砂礫移動量の土砂濃度、 ρ : 間隙流体の密度である。	

表 2 固体摩擦応力の評価

	固体摩擦応力ベクトル $\vec{\tau}_{0s}$
運動中	運動と反対方向 $ \vec{\tau}_{0s} = \alpha c (\sigma - \rho) gh \cos \theta \tan \phi_s$
停止中	外力と静的なつり合いを保つ $\vec{\tau}_{0s} = -\rho_T gh \nabla H - \beta \rho_T (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{M}$

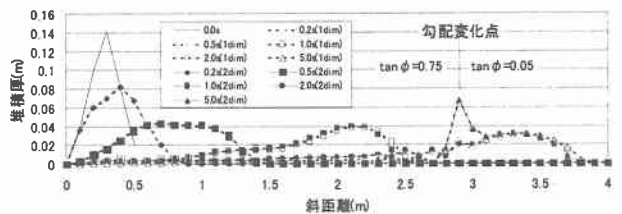


図 1 1 次元水路の解析結果

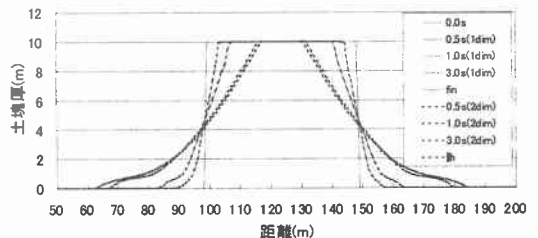


図 2 水平板上の土塊の変形解析結果

す。1次元・2次元両計算から得られる結果は、両ケースとも滑動開始から停止までほぼ一致している。これから2次元数値解析における停止条件が1次元のそれと同等の精度を持つことが示された。

4. 土塊の滑動実験と数値解析

図3に示すような水路を用いて土塊の滑動実験を行った。滑動させる土塊は、粒径5mm、内部摩擦角 $\phi_s = 33.87^\circ$ の乾燥砂で、図3に示される形状で上流部に設置し滑動させる。実験条件を表3に示す。ここではcase2-1-2についての比較・検討を示す。図4は滑動開始プロセスを示している。滑動を開始すると土塊の流動梁は薄くなり、表面勾配が水路勾配に対し平行に近づき、ほぼ一定幅を維持したまま滑動する。解析においてもその特性は再現できている。しかし、変形・流下は実験に比べて解析の方が早く、その形状もより薄く長い。図5には河床勾配変化点における土塊の停止プロセスを示す。なお土塊先端が勾配変化点に到達した時刻を0秒としている。土塊は河床勾配変化点到達後も上流部での幅を維持したまま流下し、やがて停止する。解析においても同様の停止過程を示した。図6は最終堆積形状を示している。堆積形状コンターは実験・解析ともほぼ同じであり、またアクリル板に沿った縦断面図(図7)を見ても、両者がよく一致しているのが分かる。

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し数値解析法の特徴を把握するとともに、乾燥土塊の滑動実験の結果との比較を行った。その結果、1次元から拡張する際の停止条件の取り扱いが妥当であり、また実験結果との比較から、数値解析では滑動開始直後の変形・流下が早いものの、変形プロセス、停止プロセス、および最終堆積形状をよく再現することが分かった。

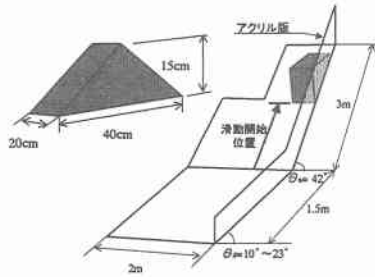


図3 実験水路と滑動させる土塊の形状

表3 実験条件

Case no	下流側勾配 (°)	滑動開始位置 (cm)
2-1-1	23	150
2-1-2	23	200
2-1-3	23	250
2-2-1	10	150
2-2-2	10	200
2-2-3	10	250

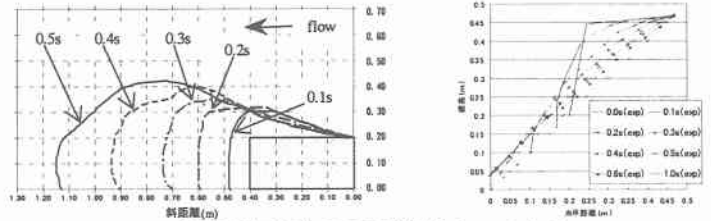


図4 (a) 滑動開始プロセスの実験結果 (case2-1-2)

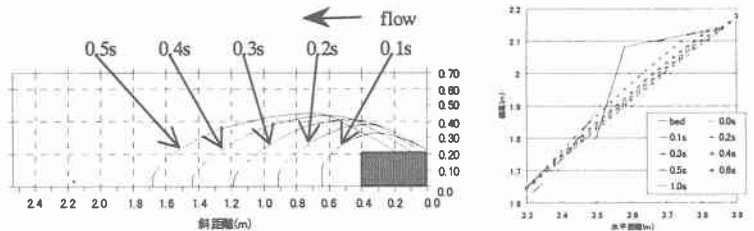
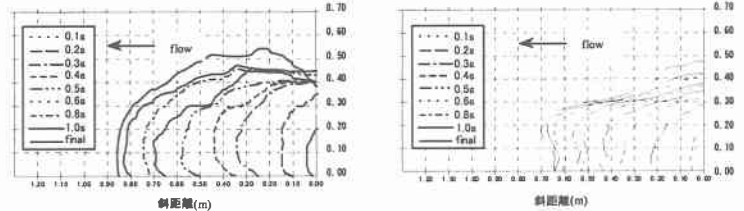


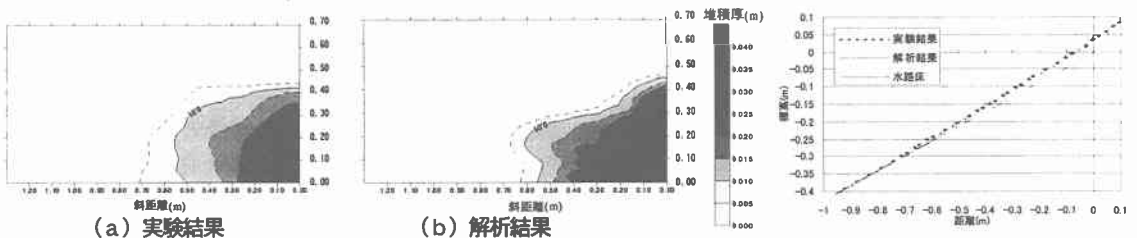
図4 (b) 滑動開始プロセス解析結果 (case2-1-2)



(a) 実験結果

(b) 解析結果

図5 停止プロセス実験結果と解析結果(case2-1-2)



(a) 実験結果

(b) 解析結果

図6 最終堆積形状実験結果と解析結果 (case2-1-2)

図7 最終堆積形状縦断面 (case2-1-2)

参考文献

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