

鳥取大学工学部 道上正規
 鳥取大学地域共同研究センター 宮本邦明
 鳥取大学大学院 ○片嶋啓介
 (財) 砂防・地すべり技術センター 松本和樹
 (財) 砂防・地すべり技術センター 高濱享一郎
 (財) 砂防・地すべり技術センター 嶋 大尚

1. はじめに

火山活動や地震などに伴い大規模な土砂移動(土塊の滑動)が生じることがあり、広範囲わたり大きな災害をもたらすことがある。このような土砂移動現象を予測・評価するためには、数値シミュレーションによる方法が有効である。シミュレーションの実施にあたっては、計算条件の設定、計算結果の解釈が重要であるが、想定する現象を如何に評価するかという問題が複雑である。このことは、対象とする流れがどのような移動形態をとり、流れの発生、発達、流下、堆積のそれぞれの過程がどのようなファクターに支配されているのかという議論に還元される。つまり、流れの応力構造の議論へと集約されていく。そして、流れの応力構造の議論・評価を基に数値シミュレーションを実施する必要がある。本研究は、乾燥粒子流としての崩壊土塊の運動を予測・評価するための1次元数値計算手法について検討を行い、別稿¹⁾における実験の再現計算、及び寛政4年(1792)眉山崩壊における崩壊土塊の運動について試算した。

2. 数値シミュレーションの概要

一次元数値シミュレーションの基礎式は次のようである。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \beta \frac{\partial u_m M}{\partial x} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_0}{\rho} \quad (2)$$

ここに、 h : 流動深、 M : 運動量フラックス、 H : 流動面標高、 u_m : 平均流速、 τ_0 : 河床面せん断力、 ρ : 流れの密度である。上式(1)(2)を用いてリープフロッグスキームによりシミュレーションを行う。流れは、式(2)の中の τ_0 が作用することにより運動量が減衰し、停止することになる。 τ_0 は、クーロン力 τ_s と非弾性衝突によるせん断力 τ_d からなる。²⁾このとき、 τ_d と τ_s の特徴として、表-1に示されるように流動中と停止中で τ_0 に対する評価が全く異なる。さらに、 τ_s は停止の直前と直後において τ_s の作用する大きさが異なる。 τ_s は運動の方向と逆方向に作用するので、2次元数値シミュレーションでは作用する方向も評価する必要がある。したがって、数値シミュレーションを実施する場合は、これらの特徴を差分式中に取り入れなければならない。

式(2)の運動方程式を新しい時間のフラックス M^{n+1} を求めるために、時間 Δt に関して整理し直すと、

$$M^{n+1} = M^n + \left[-\beta \frac{\partial u_m M}{\partial x} - gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{1}{\rho} (\tau_s + \tau_d) \right] \Delta t \quad (3)$$

のように表される。このとき、停止に関する条件は M^n と M^{n+1} の間に0が存在するので、

$$M^n \cdot M^{n+1} < 0 \quad (4)$$

と表される。図-1に示されるように通常の差分のままであれば図中の線1のように計算される。しかし、実際には $M=0$ となる時刻を $t = t + \Delta t'$ とすると、その瞬間停止した土塊が次の瞬間において停止し続けるか(線2)、再び動き始めるか(線3)を判断する。2次元シミュレーションの場合は再び動き出す方向も判断する。以上のようにして、差分式中の土塊の停止を表現することができる。

3. 計算結果

1) 連続線外に対する再現計算

別稿¹⁾で実施した連続線外による実験について数値シミュレーションによる再現計算を行う。実験では水路下流端から4.5mの位置で給砂を行っているが、計算では水路下流端から3.5mの地点での実験による流動深の値を用いて、フラックスと速度を求め境界条件とし、不等

表-1 停止条件

	τ_d	τ_s
流動中	流速の関数 $f(u)$	方向は流れの方向の逆方向 $ p_s \cdot \tan \phi_s $
停止中	存在しない 0	静的なつり合いを保つ $-\rho gh \frac{\partial H}{\partial x}$ $ \tau_{s(\max)} = p_s \cdot \tan \phi_s$

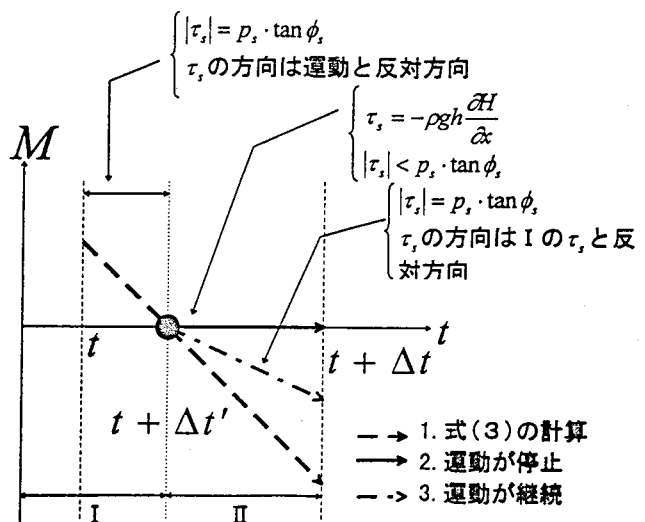


図-1 停止条件の模式図

流状態を計算した。図-2には、勾配38°、流量22.45kg/sの条件における流動深断面形状に関する実験値と計算値を示す。流動深に関する計算値は水路下流端から4~2m程度までは若干実験値よりも大きいものの、下流端ではほぼ等流水深であり、実験値に近い値となっていることがわかる。また、図-3にそのときの応力状態を示している。等流に近づくに従い慣性項が0に等しくなり、圧力勾配項とせん断力項の大きさが等しくなっており、計算によって等流状態の再現を行うことができる。

2) 有限土塊に対する再現計算

別稿⁹⁾で実施した有限土塊の堆積形状に関する実験値(上流水路勾配45°、下流水路勾配3°、流下開始位置:勾配変化点から5m上流)と計算値との比較を図-4に示してある。これを見ると計算値と実験値とは概ね対応している。また、図-5に図-4に示した実験での重心位置の時間的な変化を数値シミュレーション結果とともに示している。図中には土塊と同じ摩擦係数を有する質点の移動についても示している。数値シミュレーションと実験結果の双方では、最初加速され、その後減速して、質点系の運動よりも遅くなっているという点では一致する。しかしながら、数値計算の方が実験より流速が大きめになり、移動開始から土塊が変形(崩壊)していく過程で顕著である。

3) 眉山崩壊に関する試算

1次元数値シミュレーションを用いて寛政4年(1792)眉山崩壊における崩壊土塊の運動について試算した。計算断面は、眉山の崩壊流下方向と思われる断面を用いた。計算条件は崩壊現象における見かけの摩擦係数を $\mu_0 = 0.19^3$ とし、粒径は不明であるので、1cm、10cm、100cmの3種類を用いた。計算の結果、粒径による有意な差が見られなかったため、粒径100cmに対する計算結果を示す。図-6には眉山崩壊前の復元地形とすべり面³⁾、及び崩壊土塊の重心位置の時間的な変化を示してある。重心のプロットはゼロ秒(崩壊前)、移動開始10秒後、20秒後、30秒後、及び112秒後に対応している。重心速度は0~10秒で17.5m/s、10~20秒で37.6m/s、20~30秒で41.1m/s、30~112秒で11.5m/sである。また、海面突入時の流速は94.2m/s、流動深は15.2mである。通常、流入土塊の流速が十数mあれば波が生じるとされているので今回の計算条件による計算結果(重心位置速度、海面突入時速度)からは段波が起るのに十分な流速を持っているといえる。

5.まとめ

乾燥粒子流としての崩壊土塊の運動を予測・評価するための1次元数値計算手法に関する検討を行い、基礎実験結果に対する再現計算、及び寛政4年(1792)眉山崩壊における崩壊土塊の運動について試算した。計算により、崩壊土塊の定常状態をよく説明している。また、土塊の堆積形状についても実験結果と概ね対応している。土塊の重心速度は移動開始直後において、計算値が過大となるものの、定性的な傾向については説明できている。今後、定量的評価に関する検討を進めていくとともに、間隙に水、泥水を含む場合について検討を行う。

参考文献

- 1)松村ら:乾燥粒子流の流動に関する実験的研究,平成9年度砂防学会研究発表会
- 2)道上ら:乾燥粒子流の流動モデルに関する研究,平成9年度砂防学会研究発表会
- 3)道上ら:眉山崩壊の実態に関する研究,平成8年度土木学会中国支部研究発表会概要集, pp111-112

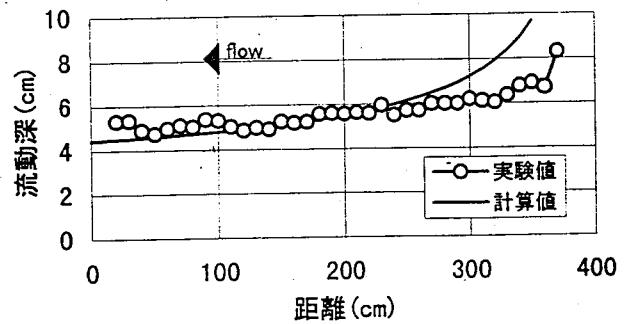


図-2 流動深の断面形状 (CASE A 1-1①)

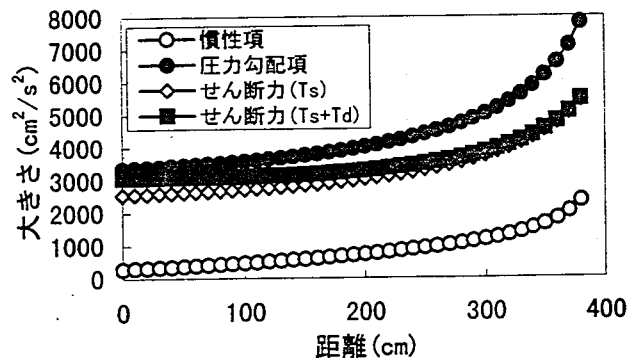


図-3 定常・等流での応力状態

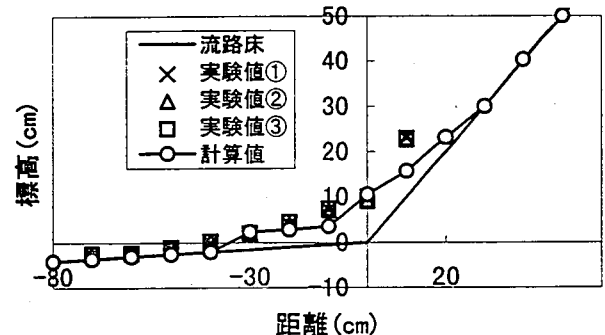


図-4 堆積形状との比較 (CASE B 3-1)

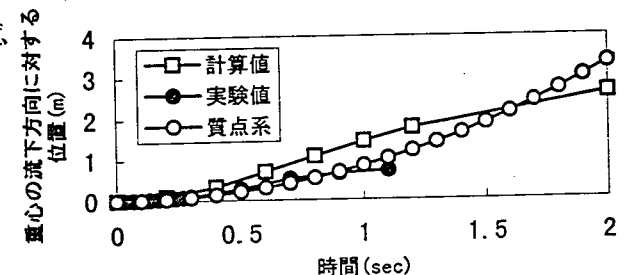


図-5 重心位置の時間的な変化 (1-3-1②)

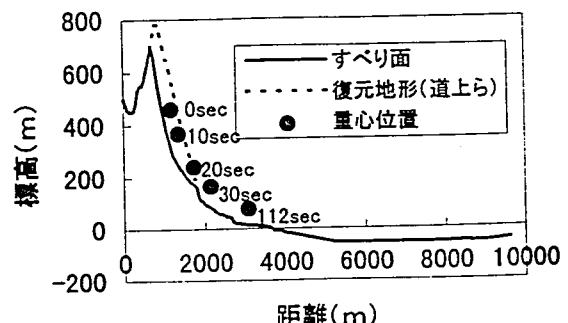


図-6 眉山崩壊における崩壊土塊の運動に関する数値シミュレーション