

群馬大学大学院 学生会員 ○岡田 崇
群馬大学大学院 正会員 松本健作・清水義彦・若井明彦

1. 序論

浸透性破堤現象は基本的には飽和・不飽和浸透流解析等の土質力学的なアプローチで解析されるが、その終局状態においては泥濁流として法崩れを起こすなど、むしろ自由表面流体としての振る舞いをみせる。この土と流体の挙動を連成させて扱える手法は現在において少なく、本研究では飽和・不飽和浸透流解析と、自由表面流体解析手法である VOF 法に Bingham 流体に代表される非 Newton 流体表現を加味した解析を連成させ、浸透による法崩れを起こしながら含水量等をパラメータとして再び土的な挙動を示す進行性の崩壊現象を再現する数値解析手法の開発を目的とするものである。流体解析と連動させる飽和・不飽和浸透流解析プログラムは、共同研究者によって開発されたものが既にあり、現在は、両手法の連成方法の検討を行っている。

本論文では、Bingham 流体を考慮した VOF 法の数値解析の精度検証、また実現象への適用として、2004 年から日本最大の土砂崩壊実験施設がある防災科学技術所における土砂崩壊実験に参加しているので、その蓄積データとの比較検証を行う。

2. 崩壊実験の概要

崩壊実験で使用した斜面の外観を写真－1、斜面の諸元を表－1 に示す。実験施設内の天井に設置されている散水器により、50mm/h で散水させ、崩壊まで続けた。また斜面内には、加速度センサ、土壌水分計、傾斜計が埋設されている。写真－2 は崩壊後の斜面を側面から見たものである。土砂の移動距離は斜面の最下端を基準とすると、およそ 1.2m 移動した。図－1 は、Bingham 流体を加味していない VOF 法の解析結果と実験結果を表したものである。縦軸は土砂の移動距離 (cm)、横軸は時刻であり、崩壊の瞬間を時刻 0(sec) とした。各解析数値は、解析中の ν (動粘性係数) を変化したものである。 ν の値を大きくすると、実現象の挙動(傾き)に近づけることができるが、それでは限界がある。 ν の値だけでなく、Bingham 流体を考慮した VOF 解析が必要となる。



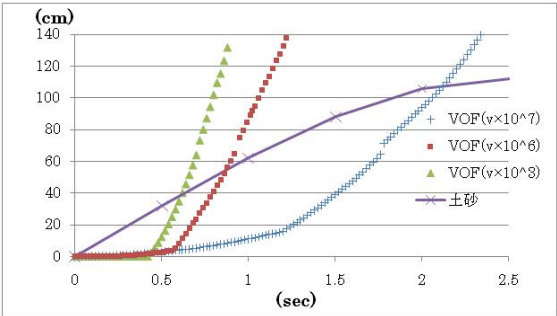
写真－1 実験斜面

表－1 斜面諸元

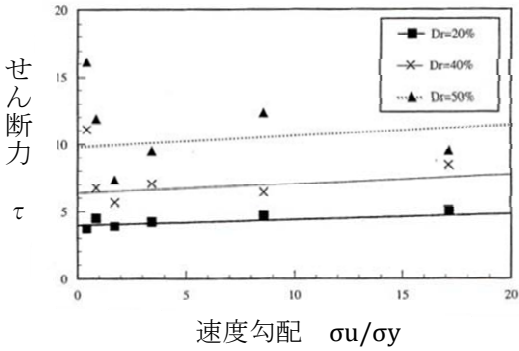
実験条件	
斜面幅	4m
方面長	10m
斜面厚さ	1m
散水強度	50mm/h
給水強度	15mm/h



写真－2 崩壊後の実験斜面(側面)



図－1 土砂移動の経時変化



図－2 液状化した砂の τ と $\partial u / \partial y$ の関係

3. Bingham 流体の概要

非 Newton 流体の一つである Bingham 流体は、せん断応力が降伏値に達するまでは速度勾配を持たなく、固体のようにふるまう性質をもっている。降伏値を超えた後は流動するという特徴がある。Bingham の一般式は式(1)であり、降伏値 τ_0 と降伏後の粘性係数 η を用いて表現される。また、土砂流動の解析に Bingham 流体を用いた理由は、液状化した砂のせん断応力と速度勾配の関係が示す挙動が Bingham 流体のそれと近似できるからである。図-2 のように相対密度 Dr によるばらつきは多少あるものの切片を持った直線をとっていることがわかり、先程の式(1)と近似できる。砂の液状化が Bingham 流体で表現できるのならば、同じ砂と水の混在している状態にある土砂流動現象も Bingham 流体で表現することが可能であると考えた。

$$\tau = \tau_0 + \eta \gamma \quad \left(\gamma = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (1)$$

4. 数値解析手法の概要

Bingham 流体は非 Newton 流体である為、本来は、Newton 流体の仮定に基づく Navier-Stokes 式を用いた解析を行うことはできない。しかし、牛島¹⁾は不連続な Bingham 流体の粘性係数に連続性を有する関数を用いて近似することで Bingham 流体の Navier-Stokes 方程式による解析を試みている。そこで本研究では、最終的に堤防の流動性破壊に適用することを念頭におき、自由表面流解析手法である VOF 法の解析 scheme に則った Bingham 流体解析を試みる。なお、今回は Bingham 流の粘性係数の近似精度を検証することを念頭においた取り組みであることから自由表面を考慮しない管路流の場で検証を行うこととした。

Bingham 流におけるせん断応力は牛島に倣い Papanastasiou が提案した次の式を用いる。

$$\tau = \left[\eta + \frac{\tau_0}{|\dot{\gamma}|} (1 - e^{-m|\dot{\gamma}|}) \right] \dot{\gamma} \quad (2)$$

m は成長応力指数と呼ばれ時間の次元を持ち、大きくすれば近似精度が高くなる。この式から見かけの粘度 η' の式を導くことができる。今回の解析では、この見かけの粘度 η' を数値解析で用いられるセル毎の粘性係数として解析を行う。

$$\eta' = \eta + \frac{\tau_0}{|\dot{\gamma}|} (1 - e^{-m|\dot{\gamma}|}) \quad (3)$$

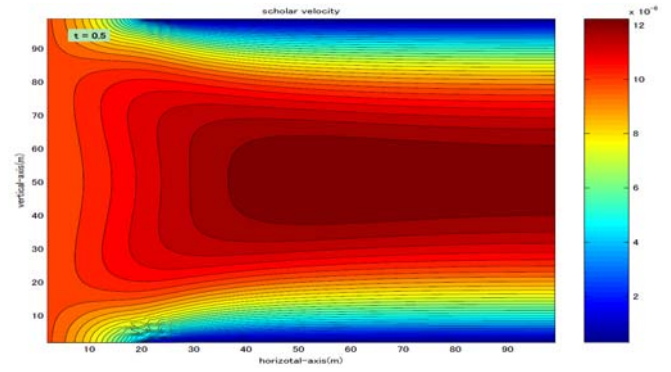


図-3 Bingham 流体の合成流速

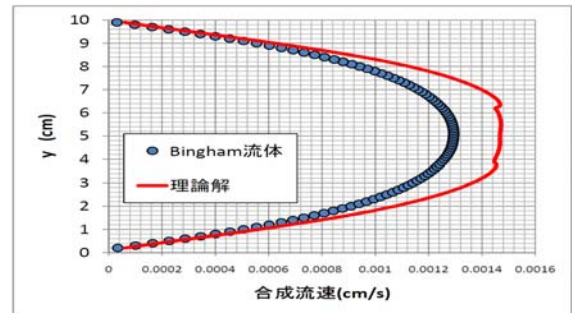


図-4 Bingham 流体流化方向の合成速度

5. 解析結果の概要

図-3 に、Bingham 流体を考慮した硫酸（動粘性係数 $= 1.3 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ）の流速分布を示す。10cm×10cm における平面二次元場において 1mm×1mm のセルが 100×100 個存在している。左から右に流体が流れ、上と下には境界を与えている。左端から 2cm の位置までは上と下には壁面摩擦がなく、2cm から右端までは壁面摩擦が存在している。左端の流入境界から X, Y 軸方向にそれぞれ $U = 1.0 \times 10^{-5} (\text{m/s})$, $V = 0.0 (\text{m/s})$ の流速を与えている。Bingham を考慮していない流速分布と比較すると、境界付近の流速の減少が顕著に表れ、結果として粘性が大きくなっていることが分かった。

図-4 は Bingham 流体の流速の鉛直分布であるが、理論解に概ね良好に一致しており、本解析手法が良好な精度を有していることを確認することができた。

今後の課題は、更に様々な条件下での計算を行うと妥当性の検証を行うと共に、実験斜面における Bingham 流体を加味した VOF 解析を行うことである。

参考文献

- 1) 永井克明, 牛島省: 一般座標系を用いた自由液面を有するビンガム塑性流体の数値解析手法. 水工学論文集, 第 54 巻
- 2) 渦岡良介: 地盤の液状化発生から流動までを予測対象とする解析手法に関する研究,