

# 広域土砂流動シミュレーションのための基礎的検討

東北大学工学部建築・社会環境工学科  
東北大学大学院工学研究科  
東北大学大学院工学研究科  
東北大学災害科学国際研究所  
東北大学災害科学国際研究所  
東北大学災害科学国際研究所

学生会員  
学生会員  
非会員  
正会員（個人）  
正会員（個人）  
正会員（個人）

大塚 千穂  
飛弾野 壮真  
Dolojan Nilo  
野村 怜佳  
森口 周二  
寺田 賢二郎

## 1. 序論

近年、豪雨に起因する土石流が増加している。土石流は土砂災害のなかでも特に人々に与える被害が大きい。近年では、平成30年7月豪雨、令和元年東日本台風による土砂災害で多数の犠牲者が出た<sup>1)2)</sup>。このような被害を防止・軽減するためには、土石流の流量や氾濫範囲を事前に予測しておくことが重要である。土砂・流体が混合した状態の数値解析手法は様々であり、崩壊挙動を対象とした手法や、斜面崩壊後の土砂の流動・堆積挙動を対象とした手法がある。

本研究では後者の「斜面崩壊後の土砂流動・堆積挙動の予測」を対象とし、今後の研究である広域土砂シミュレーションを見据えた基礎的検討を行う。広範囲にわたる同時多発的な崩壊・流動・堆積のシミュレーションには、計算コストに優れた二次元解析手法が有効である。そこで、本研究では、浅水長波方程式による土砂流動解析手法や構成則に関する検討を目的とする。土石流を流体として扱う上では多くの構成則が考案されているが、本研究では3種類の構成則に関して数値解析を実施し、比較・検討する。

## 2. 浅水長波方程式による土砂流動の表現

土石流の発生から堆積が終了するまでの過程を追う支配方程式として、浅水長波方程式を用いる。浅水長波方程式は、非圧縮性粘性流体の基礎方程式である Navier-Stokes 方程式における連続の式と運動方程式を鉛直方向に積分したのち、深さ方向に平均化することによって導出される。

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} + g \frac{\partial h}{\partial x_i} + S_i = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} U_i h = 0 \quad (2)$$

ここで、 $U_i$  は  $x_i$  方向 ( $i = 1, 2$ ) の鉛直方向平均流速、 $h$  は全水深、 $\nu$  は動粘性係数、 $g$  は重力加速度の大きさを表す。また、運動方程式に含まれる抵抗力  $S_i$  に関して、本研究では、既往研究を参考に以下の3通りのモデルを採用する。

### 1. Turbulent model<sup>3)</sup>

$$S_i = \frac{gn^2 \sqrt{U_1^2 + U_2^2}}{h^{1/3}} U_i \quad (3)$$

### 2. Frictional model<sup>3)</sup>

$$S_i = gh \cos \theta \tan \psi \frac{U_i}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2}} \quad (4)$$

### 3. Turbulent + Frictional<sup>4)</sup>

$$S_i = \frac{gn^2 \sqrt{U_1^2 + U_2^2}}{h^{1/3}} U_i + gh \cos \theta \tan \psi \frac{U_i}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2}} \quad (5)$$

ここで、 $n$  はマンギングの粗度係数、 $\psi$  は土の内部摩擦角を表す。また、Frictional モデルにおける  $\theta$  は斜面の角度を表す。

式(1)、(2)について四節点四辺形要素を用いた安定化有限要素法<sup>5)6)</sup>による空間離散化を行い、時間方向については、数値安定性に優れた陰解法の一つであるクランクニコルソン法を利用する。

## 3. 数値解析例

### 3.1 Iverson, et al.2010 との比較

文献<sup>7)8)</sup>をモデルに、上述の3通りの構成則それぞれについて、土や斜面の特性を表すマンギングの粗度係数  $n$  や、土の内部摩擦角  $\psi$  の2つのパラメータを変更して数値解析を行う。解析モデル図、解析に利用したパラメータの一覧をそれぞれ次の図-1、表-1に示す。 $t = 0$ の時点で、 $x = -3.16$ 地点にたまっている流体を一斉に流出させる。各境界には滑り境界を課し、時間刻み幅 0.001s で総ステップ数は 20,000 とする。

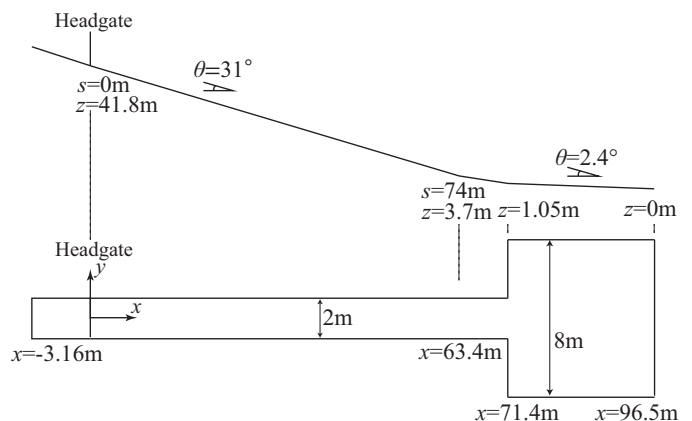


図-1 解析モデル図

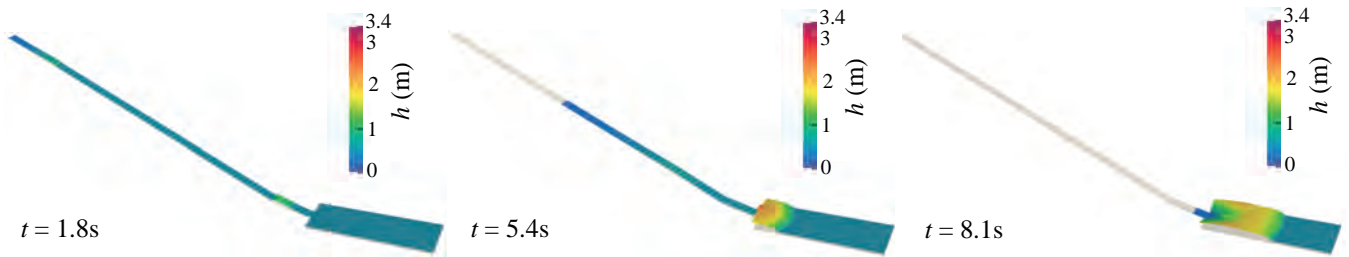


図-2 case2( $n = 0.010, \psi = 20^\circ$ )における流動の様子

表-1 解析で利用したパラメータ  $n, \psi$  の一覧

	$n$		$\psi$		
case1	0	0	20	24	30
case2	0.010	0	20	24	30
case3	0.025	0	20	24	30
case4	0.050	0	20	24	30
case5	0.100	0	20	24	30
case6	0.200	0	20	24	30

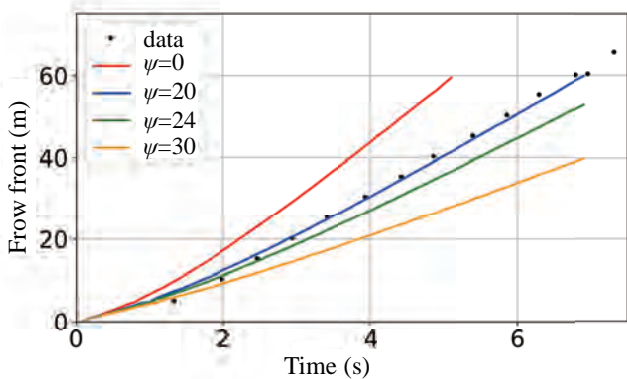


図-3  $n = 0.050$  における解析結果：各  $\psi$  における流動先端位置の時刻歴

解析例として、case2 ( $n = 0.01, \psi = 20^\circ$ ) における流動の様子を図-2 に示す。図-2 について、 $t = 1.8 \text{ s}$  では流体が斜面下部まで到達していること、 $t = 5.4 \text{ s}$  では流体が平坦部に流れ始めていること、 $t = 8.1 \text{ s}$  では流体が堆積し始めていることが確認できる。また、図-3 に  $n = 0.050$  における解析結果として、各  $\psi$  における流動先端位置の時刻歴について、数値解析結果と実験値を重ねて示す。図-3 について、 $n = 0.050$  における解析結果では、黒色のプロットで示される実験データと比較して、青色の実線で示される  $\psi = 20^\circ$  の解析がおおよそ整合することが確認できる。

このような解析結果から、前述の Turbulent+Frictional モデルにおいて  $n = 0.050, \psi = 20^\circ$  と設定した場合、実験結果に最も近い流動を再現できることが分かった。図-1 で示したように斜面の傾斜角が  $\theta = 31^\circ$  である。そのため、

$\psi = 24^\circ, 30^\circ$  の内部摩擦角が大きい場合では、 $\theta$  と  $\psi$  の関係から流体が流れにくくなり、挙動が実験と大きく異なることが確認できた。 $n = 0.1, 0.2$  の場合も同様に実験と乖離する結果となった。

#### 4. 結論

本研究では、同時多発的な崩壊・流動・堆積のシミュレーションを行うため、計算コストに優れた浅水長波方程式による土石流解析手法について検討した。運動方程式の抵抗力項に3種類の構成則を採用し、実験値と数値解析結果を比較して有効な構成則・パラメータの組み合わせを確認した。今後は広域土砂シミュレーションを見据えたさらなる研究を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省中国地方整備局広島西部山系砂防事務所: 広島土砂災害 緊急事業概要, 2020, [https://www.cgr.mlit.go.jp/hiroshima\\_seibu\\_sabo/pamphlet/pdf/pamph\\_disaster\\_2014083.pdf](https://www.cgr.mlit.go.jp/hiroshima_seibu_sabo/pamphlet/pdf/pamph_disaster_2014083.pdf).
- 2) 国土交通省: 台風19号による被災状況と今後の対応について 2019, <https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001323911.pdf>.
- 3) Lee Seung Oh, S. C. G.: Influence of flow resistance stresses on debris flow runout, 2018, <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7604-2>.
- 4) Murillo, J. and García-Navarro, P.: Wave riemann description of friction terms in unsteady shallow flows: Application to water and mud/debris floods, *Journal of Computational Physics*, Vol. 231, No. 4, pp. 1963–2001, 2012.
- 5) 利根川大介, 樫山和男: 安定化有限要素法による津波遡上および流体力の解析手法の構築, 応用力学論文集, Vol. 12, pp. 127–134, 2009.
- 6) Takase, S., Moriguchi, S., Terada, K., Kato, J., Kyoya, T., Kashiya, K. and Kotani, T.: 2d–3d hybrid stabilized finite element method for tsunami runup simulations, *Computational Mechanics*, Vol. 58, No. 3, pp. 411–422, 2016.
- 7) Iverson, R. M., Reid, M. E., Logan, M., LaHusen, R. G., Godt, J. W. and Griswold, J. P.: Positive feedback and momentum growth during debris-flow entrainment of wet bed sediment, *Nature Geoscience*, Vol. 4, No. 2, pp. 116–121, 2011.
- 8) Iverson, R. M., Logan, M., LaHusen, R. G. and Berti, M.: The perfect debris flow? aggregated results from 28 large-scale experiments, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, Vol. 115, No. F3, 2010.