

広域土砂流動シミュレーションにおける抵抗力モデル およびその適用性に関する一考察

○東北大学大学院工学研究科	学生会員	大塚 千穂
東北大学大学院工学研究科	学生会員	飛弾野 壮真
東北大学大学院工学研究科	非会員	Dolojan Nilo
東北大学災害科学国際研究所	正会員（個人）	野村 怜佳
東北大学災害科学国際研究所	正会員（個人）	森口 周二
東北大学災害科学国際研究所	正会員（個人）	寺田 賢二郎

について検討する。

1. 序論

平成 30 年 7 月豪雨や令和元年東日本台風による土砂災害など記憶に新しい災害からもわかるように、土石流の被害を防止・軽減するためには、実災害同様、広域かつ同時多発的な発生の予測や評価が求められる。本研究では、山間地帯において豪雨に起因して同時多発のかつ広範囲にわたってに発生する土砂災害リスク評価への適用を意図して、計算コストに優れた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。具体的には、浅水長波方程式によって流動する土砂を流体として表現するために合理的な抵抗力モデルとそのパラメータについて複数の数値解析の試行を通じて考える。扱う抵抗力モデルについては、広く知られている 3 種類に限定し、安定化有限要素法による数値解析結果が既往の実験データと一致するかを検証することで適切なモデルやパラメータの組み合わせを議論する。検証結果として得られた適切なモデル及びパラメータを実災害の検証解析に適用することで有用性及適用限界を評価する。

2. 浅水長波方程式による土砂流動の表現

土砂流動の発生から堆積が終了するまでの過程を表すために、浅水長波方程式を用いることにする。この式は、3 次元 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て、深さ方向に平均化することによって次式のように得られる。

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

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

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、 ν は動粘性係数、 g は重力加速度の大きさを表す。式 (1), (2) に対して 4 節点四辺形要素を用いた安定化有限要素法¹⁾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 Crank-Nicolson 法を適用する。そして本研究では、運動方程式に含まれる抵抗力項 S_i として、既往研究^{2,3)}を参考に以下の 3 通りのモデル

$$S_i = \underbrace{\frac{gn^2 \sqrt{U_1^2 + U_2^2}}{h^{1/3}} U_i}_{\text{Turbulent モデル}} + \underbrace{gh \cos \theta \tan \psi \frac{U_i}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2}}}_{\text{Frictional モデル}} \quad (3)$$

Turbulent + Frictional モデル

ここで、 n はマンニングの粗度係数、 ψ は土の内部摩擦角を表す。また、第 2 項における θ は斜面の角度を表す。 $\psi = 0^\circ$ のとき、式 (3) は第 1 項のみとなるため“Turbulent モデル”， $n = 0$ の場合、第 2 項のみのため“Frictional モデル”， $\psi \neq 0$ かつ $n > 0$ のとき“Turbulent + Frictional モデル”を利用していることとなる。移流項の卓越に対する安定化を施す SUPG 法、自由表面の数値安定性を回避するための衝撃補足項を用いた。下式において、左辺 1, 2 項目は Galerkin 項であり、3 項目は SUPG 法による安定化項、4 項目は衝撃補足項である。

3. 数値解析例

3.1 土石流実験との比較による抵抗力モデルおよびパラメータの検討

文献⁴⁾を参考に、図-1 に示す解析領域を設定し、式 (3) における粗度係数 n と内部摩擦角 ψ の 2 つを変更して数値解析を行う。パラメータについては $n = 0.000, 0.010, 0.020, 0.025, 0.050, 0.100, 0.200$, $\psi = 0^\circ, 3^\circ, 5^\circ, 7^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ を用いる。各境界には滑りなし境界を課し、右端 ($x = 96.5$ m 地点) のみ自由流出条件とした。時間増分 Δt は 0.001 s で総ステップ数は 20,000 とする。

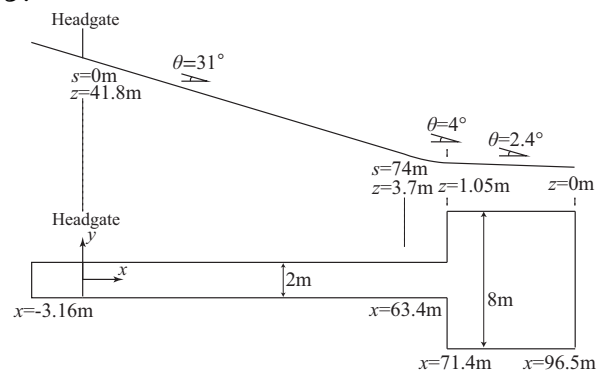


図-1 解析モデル図

Key Words: Debris flow, Stabilized finite element method, Landslide risk evaluation, Regional-scale analysis

〒 980-8572 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1 災害科学国際研究所 4F S403-S404, TEL 022-752-2132, FAX 022-752-2133

$t = 0$ の時点で, $x \leq -3.16$ 地点に設置した土砂を一斉に流出させた際に, Turbulent + Frictional モデル ($n = 0.020$ で固定, $\psi = 0^\circ, \dots, 30^\circ$) で得られる流動先端位置の時刻歴を図-2 に示す. この図から, 内部摩擦角 ψ が小さい場合 (赤, 橙, 青実線, $\psi = 0^\circ, 3^\circ, 5^\circ$), 黒マーカーで示される実験データと類似した流下挙動となることが確認できる. $\psi = 20^\circ, 30^\circ$ や $n = 0.100, 0.200$ のように内部摩擦角や粗度係数が比較的大きい場合と, $n = 0.00$ や $\psi = 0$ を設定した Turbulent モデルと Frictional モデルを用いた場合では, おおむね実験結果と乖離する結果となった. このことから, 粗度係数 n については経験則値⁵⁾を基にした設定, 内部摩擦角については, $3^\circ \leq \psi \leq 7^\circ$ 程度の比較的小さな値を設定した Turbulent + Frictional モデルが有効であるとして, 次節の解析を実施した.

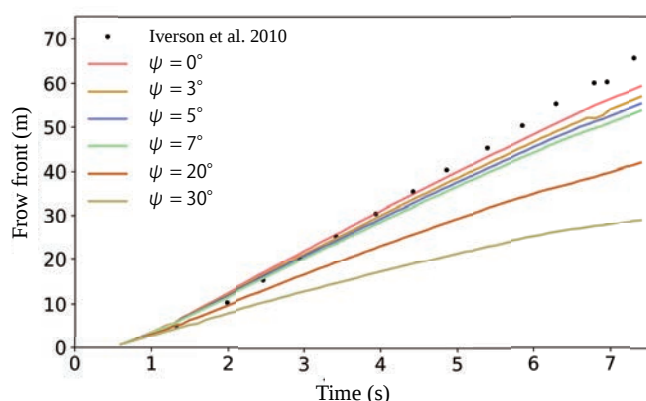


図-2 $n = 0.020$ における解析結果：各解析における流動先端位置の時刻歴

3.2 実地形での解析

令和元年東日本台風に伴う豪雨により土砂災害が発生した宮城県伊具郡丸森町の一部地域 ($385 \text{ m} \times 403 \text{ m}$) を対象とした, 広域土砂流動シミュレーションを実施した. 計算結果と同領域における実際の土砂災害の堆積分布を比較し, 前節で評価した抵抗式とパラメータの組み合わせの実用性や適用限界について論ずる. 山岳部では岩等で底面が粗くなることから粗度値⁵⁾ $n = 0.050$ を利用した. 内部摩擦角は前節で妥当と評価された $\psi = 3^\circ$ とし, 各領域境界に自由流出条件を課した. 災害発生後の数値標高モデル (DEM) を基に生成した初期条件を図-3 に示す.

図-4 に解析結果と実際に観測された土砂流動後の流動範囲の比較を示す. 水色で示す流動範囲と黒色の実線で示す実際に観測された土砂流動後の流動範囲の比較から, 広域かつ同時多発的な土砂流動及び堆積傾向をおおまかに評価可能であることが分かる.

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の実現を目指して, 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抵抗力モデルおよびそのパラメータの組み合わせを確認した. この結果を基に実災害発生地域を対象とした準広域土砂流動シミュレーションを実施したところ, 浅水長波方程式に基づく土石流解析により, 簡単なパラメータによるモデル化によって土砂流動及び堆積の傾向を大まかに推定できることが分かった. 一方, より正確な堆積傾向の予測には, 流体的挙動から固体的挙動への遷移過程等をより高度にモデル化する必要があると言え, 今後の課題としたい.

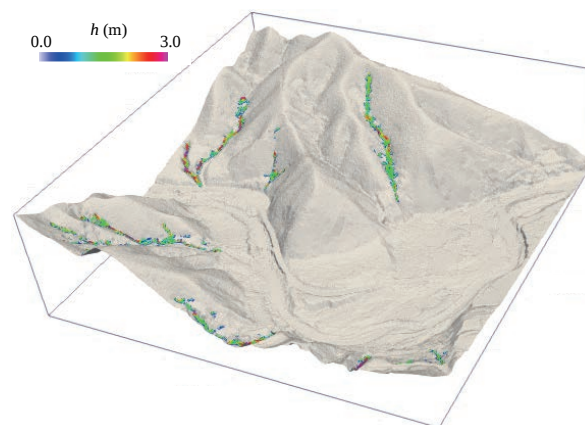


図-3 発災後の数値標高モデル (DEM) を基に作成した初期条件：崩壊箇所・土砂量の様子

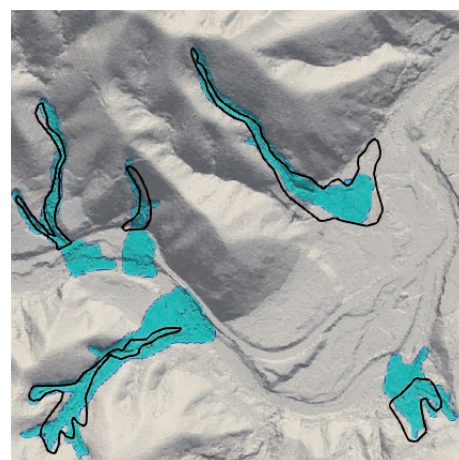


図-4 解析結果 (水色部分) と実際に観測された土砂流動後の流動範囲 (黒線) の比較

参考文献

- 1) 利根川大介, 檜山和男: 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, 2009.
- 2) Lee, S. O. and Song, C. G.: Influence of flow resistance stresses on debris flow runout, 2018, <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7604-2>.
- 3) Murillo, J. and García-Navarro, P.: Wave riemann description of friction terms in unsteady shallow flows: Application to water and mud/debris floods, *J Comput Phys*, 2012.
- 4) Iverson, R. M., Logan, M., LaHusen, R. G. and Berti, M.: The perfect debris flow aggregated results from 28 large-scale experiments, *J Geophys Res*, 2010.
- 5) Chow Ven, T.: Open channel hydraulics, 1959.