

高粘性の流れへの浅水流方程式の適用性

九州大学農学部（現福岡県八幡農林事務所） 松尾響子
九州大学大学院農学研究院 ○水野秀明
九州大学大学院生物資源環境科学府 土谷麻菜、江藤稚佳子

1. はじめに

土石流には石礫型と泥流型があり、それぞれ異なる性質をもっている。九州地方では、平成 22(2010)年に鹿児島県南大隅町船石川で発生した土石流や平成 27(2015)年に鹿児島県垂水市深港川で発生した土石流、平成 28(2016)年に熊本県阿蘇村山王谷川で発生した泥流等にみられるように、シルトや粘土などの細かい土砂を多く含む泥流が豪雨や地震に伴って発生している。これまで石礫型土石流の数値計算については比較的多くの研究がなされている一方、泥流型土石流については少ないのが現状である。これを踏まえ近年では、泥流型土石流についての数値計算手法の精度向上と適用範囲の拡大が必要になってきている。

泥流や土石流の動きを予測する数値解析手法の代表的なものに、浅水流方程式があげられる。例えば、新井・高橋(1992)は、粒子を含む流体塊の乱れ応力と粒子の衝突による応力の総和をせん断応力として導いた底面摩擦応力を、2次元浅水流方程式に組み込んだ数理モデルを提案した。水野ら(2002)は流れの底面での重力の斜面方向成分が粘性と釣り合うとして求めた底面摩擦応力を浅水流方程式に組み込んだ数理モデルを提案した。宮沢ら(2007)は新井・高橋(1992)らの提案した数理モデルに侵食推積速度を新たに組み込んだ数理モデルを提案した。また、宮田ら(2014)は底面摩擦応力を Manning 型のものを 2次元浅水流方程式に組み込んだ数理モデルを提案した。このように、従来の研究では、泥流の運動を予測するための数理モデルは 2次元浅水流方程式を基本としており、その違いは流れの内部や底面に作用するせん断応力の考え方にあることが分かる。これらの数理モデルは水路実験や実際の泥流に適用してその精度を評価している。

一方、土谷(2020)は、泥流についての 3次元計算を行っている。3次元計算の過程は複雑であるため、時間がかかり、コンピュータの性能も高いものが求められる。2次元浅水流方程式の場合、時間的・金銭的なコストの面で安く抑えることができるため、自治体などでも利用しやすい。

そこで本研究では、平成 27(2015)年に鹿児島県垂水市二川地区深港川で発生した泥流に着目し、浅水流方程式による、降伏応力が存在する流れの再現性を明らかにすることを目的とする。

2. 実験

2.1 手順

図 1 は実験行った水路の模式図である。実験水路はアクリル製で、幅 0.030m、高さ 0.027m、長さ 0.500m である。実験水路を水平な机の上に乗せ、中央にはゴ

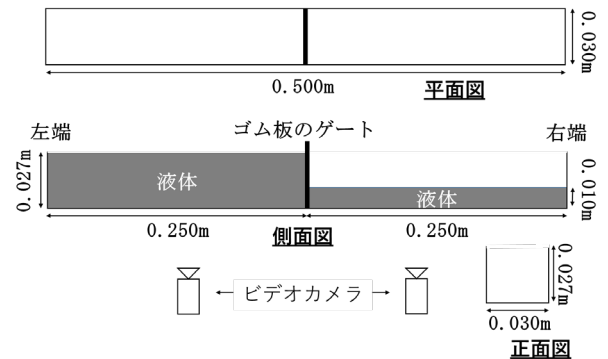


図 1 実験装置

ム板のゲートを設置した。ゲートの左側は深さ 0.027m になるまで液体を注ぎ、右側は深さ 0.010m になるまで液体を注いだ。水路の側面に 2 台のビデオカメラを設置し、ゲートの左側と右側の水深の変化を記録した。実験は、ビデオカメラの撮影を開始した後、所定の液体を注ぎ、手動でゲートを引き上げた。実験に用いた液体は 1000cSt のセンチストーク粘度液(比重 0.904)で、実験に用いたビーズは粒径が 5.6 mm(7/32 インチ)で比重が 0.910 のポリプロピレン球である。ビーズは合計で 1000 個用いて、水路の左右とも液体に対する体積濃度が 30%になるように配合した。

本実験はダムブレイクと呼ばれる現象を再現するもので、センチストーク粘度液のみを用いた場合と、センチストーク粘度液にビーズを含んだ場合の 2 ケースとした。水深の時間変化は、ビデオカメラで撮影した動画より静止画を 1 秒間に 60 枚の割合で抽出し、0.050m ごとに 11 点において水面の位置を読み取った。なお、ゲートを引き上げた時刻を 0 秒とし、それぞれのケースについて経過時間が 5 秒になるまで観測し、1 秒ごとの水深を記録した。

2.2 結果

ゲートを引き上げてから 5 秒間までの水深の変化について、センチストーク粘度液のみの場合の結果を図 2 に示し、ビーズを含むセンチストーク粘度液の場合の結果を図 3 に示した。なお、水路の左端を原点とし右方向を正の向きとして x 軸を設定した。

図 2 では、5 秒経過後、左端の水深は 0.027m から 0.021m まで下降し、右端の水深は 0.010m から 0.011m まで上昇した。

一方、図 3 では、5 秒経過後も両端の水深に変化はなかった。また、図 2 よりも時間変化が小さく、水面勾配が比較的急であった。

3. 数値計算による降伏応力の推定と適用性

センチストーク粘度液のみの場合における 5 秒後の水深結果から、浅水流方程式において、流れに関わる 2 つのパラメータ α と β について、20 ケース ($\alpha =$

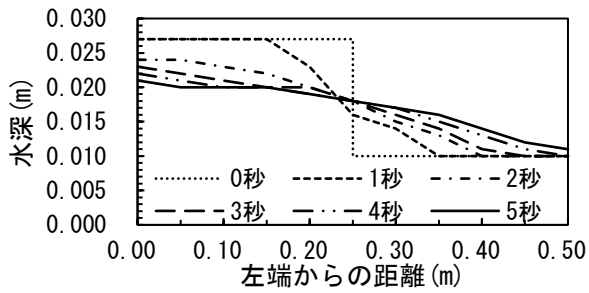


図2 センチストーク粘度液のみの水深の変化

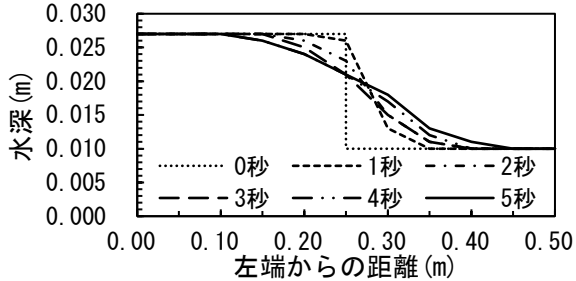


図3 ビーズを含む場合の水深の変化

0.001, 0.002, 0.003, 0.004 と $\beta = 0.00001, 0.00010, 0.00100, 0.01000$ の組み合わせを検証し、実験値と計算値の平均絶対誤差 MAE を算出し、流れを再現するのに妥当な値を求めた結果、 $\alpha = 0.003$ 、 $\beta = 0.00001$ (MAE は 0.00128) となった (図 4)。

2 つの値を浅水流方程式に代入し、 $\tau_y = 1, 10, 100, 1000, 10000, 100000$ と値を変化させて、ビーズを含む場合の実験値と計算値の MAE を算出した。その結果、 $\tau_y = 100$ (N/m²) 以上で MAE の値が 0.0011 で一定となった (図 5)。そのため、実験結果を再現するのに、 $\tau_y = 100$ を最も妥当な降伏応力とした。それぞれ 5 秒後における実験値と $\tau_y = 100$ の計算値の比較を図 6 に示した。また図 6 には、降伏応力の有無の比較として、5 秒後におけるビーズを含まないセンチストーク粘度液のみの実験値と $\tau_y = 0$ の計算値を加えた。

4. 考察

実験結果において、ビーズを含む場合の左右両端の水深が変化しなかったのは、ビーズを含むことによって降伏応力が発生したからであると考えられる。また、 $\tau_y = 100$ を用いることで、実験結果を概ね再現できたが、僅かに差が生じた。これは、水路実験の流れにおいて、ビーズの比重が想定より小さかったために水面付近に浮いてしまい、ビーズを含む上層と含まない下層とに分離してしまったことが一因であると考えられる。その結果、一つの流れの中で、降伏応力が発生する箇所とそうでない箇所が存在するようになった。

また、センチストーク粘度液のみの実験値と $\tau_y = 0$ の計算値との間に差が生じた理由は、目視による差によって読み取った値が厳密には正確でなかったからだと考えられる。

5. 終わりに

本研究では、平成 27 年に深港川で発生した流れに着目し、降伏応力を含む条件での浅水流方程式の適用性について評価した。その結果、 $\alpha = 0.003$ 、 $\beta = 0.00$

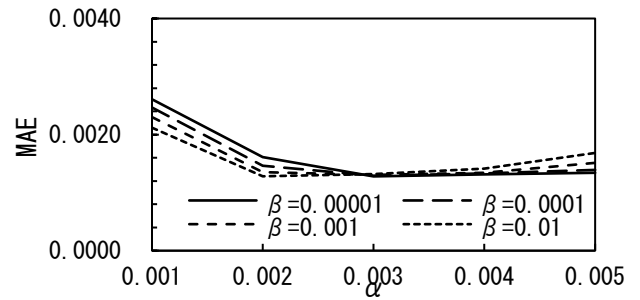


図4 α と β の組み合わせによる MAE の変化

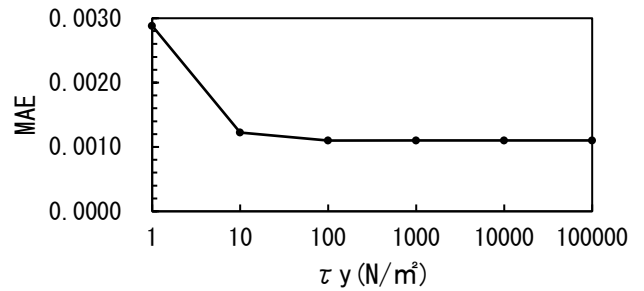


図5 τ_y の値による MAE の変化

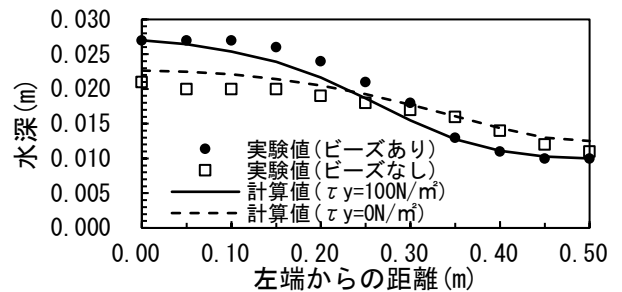


図6 実験値と計算値の水深(5秒経過後)の比較

0.001 のとき $\tau_y = 100$ で計算値が実験値に最も近いものとなった。このことから、 α 、 β 、 τ_y を変数と考えて適切な値を設定すれば、浅水流方程式の適用性は高いと考えられる。また、2 つの値の差が生じた理由は、水路実験の流れにおいて降伏応力が発生する層と発生しない層に分離したからだと考えられる。本研究は国土交通省河川砂防技術研究開発公募地域課題(砂防)「微地形が泥流型土石流の水面形の変化に及ぼす影響の解明」の研究助成を受けた成果の一部である。関係各位に謝意を表す。

引用文献

- 新井宗之, 高橋保 (1992) : 泥流型土石流の氾濫堆積シミュレーション, 水工学論文集, Vol. 36, p. 227-234
- 宮沢直季, 砂田憲吾, 大石哲 (2007) : 火山地域における土砂堆積の評価のための 2 次元泥流モデルの開発, 砂防学会誌, Vol. 59, No. 5, p. 23-34
- 水野秀明, ビットリオ・ボボリン, 仲野公章 (2002) : 透過型砂防堰堤を通過する泥流のハイドログラフ推定に関する研究, 砂防学会誌, Vol. 54, No. 5, p. 3-11
- 土谷麻菜, 江藤稚佳子, 水野秀明, 久保田哲也 (2020) : 平成 27 年に鹿児島県深港川で発生した泥流の 3 次元計算による再現, 2020 年度砂防学会研究発表会概要集, p. 139-140