

第 III 部門

FVM-MPM 連成による河川堤防の越流侵食解析手法の構築

京都大学大学院 学生員 ○高田 息吹
 京都大学大学院 正会員 由井 洋和
 京都大学大学院 正会員 音田 慎一郎
 京都大学大学院 正会員 肥後 陽介

1. はじめに

近年局所的な集中豪雨により河川堤防が決壊してしまふ被害が多発している。河川堤防の決壊の多くは、越流による侵食が原因である。そこで越流を想定した上で、堤防の決壊に至るまでに時間を要し被害を抑えることができる粘り強い堤防を構築することが求められている。粘り強い堤防の整備のためには、堤防の破壊に至るまでの浸透、越流、侵食などの進行的な挙動を精緻に再現する必要がある。本研究では、Material Point Method(MPM)¹⁾とFinite Volume Method(FVM)を連成させ、越流侵食解析法を構築した。この解析法を越流時の堤防侵食挙動に適用することが本研究の目的である。

2. 計算手法

計算手法のフロー図を Fig.1 に示す。フロー図に示した通り、FVM でモデル全体の流体計算を行い、水圧、流速、飽和度の情報を算出、更新する。そして、計算された流速から対数則をもとにせん断力を求める。次に、導出された情報を MPM に受け渡し、運動方程式を用いて計算し、粒子の速度と座標を更新する。格子点速度から算出したひずみ増分を構成式に用いることで応力増分を求め、応力を更新する。そして最後に粒子の座標情報を FVM に渡して形状を更新し、再度 FVM で流体計算を行う。ここまでのステップを繰り返すことで堤体の土粒子の形状変化、すなわち侵食現象を表現する。ここで FVM はポーラスメディア法²⁾を用い、MPM には GIMP 法で離散化した土の繰り返し弾塑性構成式³⁾を用いている。

この計算手法によって本解析では表面流によるせん断力を導入でき、MPM を用いているため堤体表面のせん断力による大変形を表現可能である。また不飽和浸透特性を考慮できる構成式を用いているため、サクシオンによるせん断抵抗と浸透による飽和度の変化を表現可能である。

せん断力導入手法

越流による侵食現象を表現するためにせん断力の導入が必要であり、FVM で求めた流体の速度 u から対数則を用いて粒子表面に作用するせん断力を求める。

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{k_s} + const. \quad (1)$$

$$\tau_0 = \rho u_*^2 \quad (2)$$

ここで、 τ_0 は底面付近のせん断応力、 u は水要素の流速、 u^* は摩擦速度、 k_s は粗度、 κ はカルマン定数、 y は格子下端からの距離である。

3. 解析条件

解析に用いたモデルを Fig.2 に示す。これは音田ら⁴⁾が行った水理模型実験の実験水路をモデルとしたものである。計算格子幅は $\Delta x = 0.025m$ 、 $\Delta y = 0.02m$ 、 $\Delta z = 0.025m$ であり、計算格子数は主流方向に 172、横断方向に 10、鉛直方向に 25 とし、横断方向の中央断面を計算している。初期の地盤内では 1 格子に 1 粒子を配置している。時間間隔は $\Delta t = 0.0001s$ であり、透水係数は $0.001m/s$ とした。排水の境界条件として、Fig.2 における上流側壁面と水路床面を非排水条件とし、変位境界条件として床面を y 方向変位固定とした。堤体形状は、高さ $0.05m$ の基礎地盤の上に堤体高さ $0.30m$ となるように設定した。初期状態で冠水するように初期水位を $0.375m$ とし、計算を開始した。本研究では、流体解析と土の変形解析を連成する手法開発を目的としているため、長時間および高分解能の解析は今後の課題とし、さらに長時間表面流を流して粒子にせん断力を与え続けた状態を仮定した解析として、表面流によって生じるせん断力を 500 倍として粒子に与えたケースを実施した。また、解析に用いたパラメータは音田ら⁴⁾が用いた値を参考に設定している。

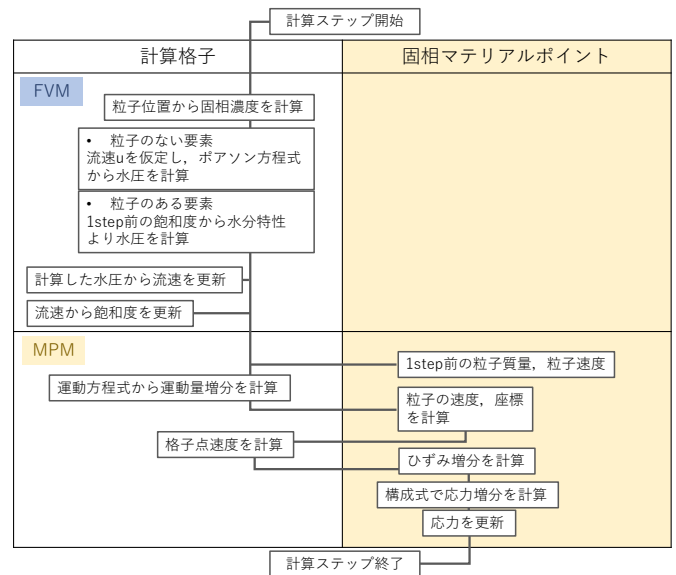


Fig.1 計算手法フロー図

Ibuki TAKADA, Hirokazu YUI, Shinichiro ONDA, Yosuke HIGO
 takada.ibuki.84z@st.kyoto-u.ac.jp

4. 解析結果

以下に解析結果を示す。なお、堤体内では基礎地盤の下に初期水位が存在するとして、初期水面からの三角形分布で圧力水頭を求める。堤体内の飽和度は堤体内の圧力水頭より、van-Genuchten 式を用いて決定した。初期飽和度分布を Fig.3 に示す。

Fig.4 にせん断力を 500 倍とした場合の流況の時間変化を示す。設定した粒子サイズが大きく、変形も早かったため計算は 5 秒時点で止まっていたが、3 秒時点で川裏側の法尻先端が動き始め、5 秒時点では法面の中ほどから大きく粒子が変形している様子が確認できる。Fig.5 にせん断力を 500 倍とした場合の Fig.2 中の粒子 A～D の変位時刻歴を示す。3 秒以前ではどの粒子も水平方向に数 mm 程度移動しているが、3 秒を超えるあたりで法尻部の粒子 A が 20mm 程度動いている。そして 4.8 秒時点で粒子 A, B が大きく動き、最終的に 50mm 程度移動している。法面の中ほどの粒子 C および法肩部の粒子 D も最終的に 10mm 程度移動している。

結果として、堤体表面を流れる表面流により、堤体の法尻が削られて流れの方向へ移動する様子を定性的に再現することが可能となった。

5. 結論と今後の課題

MPM と FVM を連成させ新たな越流侵食解析法を構築し、表面流によって土に作用するせん断力を導入した。その結果、せん断力による粒子の変位を確認した。今後の展望として、現実的な解析時間など詳細に検討を実施し、さらに精緻な解析結果によって定性的な評価を得られることを目標とする。

参考文献

- 1) Sulsky, D., Chen, Z. and Schreyer, H.L.: *Comput. Methods Appl. Engrg.*, Vol.118, No.1-2, pp.179-196, 1994.
- 2) Onda, S., Hosoda, T., Jacimovic, N.M. and Kimura, I.: Numerical modelling of simultaneous overtopping and seepage flows with application to dike breaching, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.57, No.1, pp.13-25, 2018.
- 3) Oka, F., Yashima, A., Kato, M. and Sekiguchi, K.: A constitutive model for sand based on the nonlinear kinematic hardening rule and its application, *Proc.of 10th World Conf.on Earthquake Engineering*, 10WCEE, Madrid, pp.2529-2534, 1992.
- 4) 音田慎一郎, 木本康太, 肥後陽介: 浸透による堤防裏法尻の破壊に関する数値シミュレーション, *水工学論文集*, Vol.77, No.2, pp.1.649-1.654, 2021.

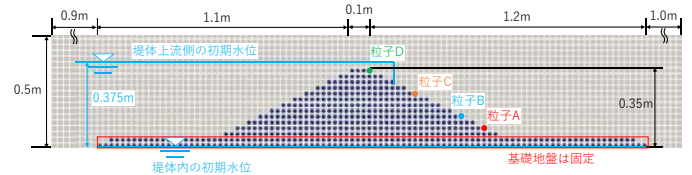


Fig.2 解析モデル

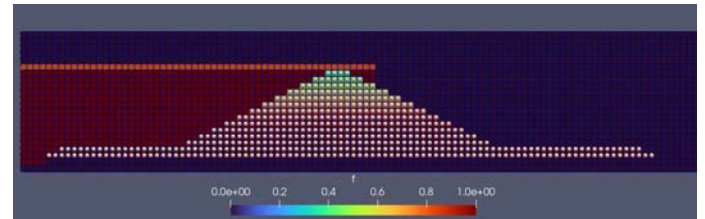


Fig.3 初期飽和度分布

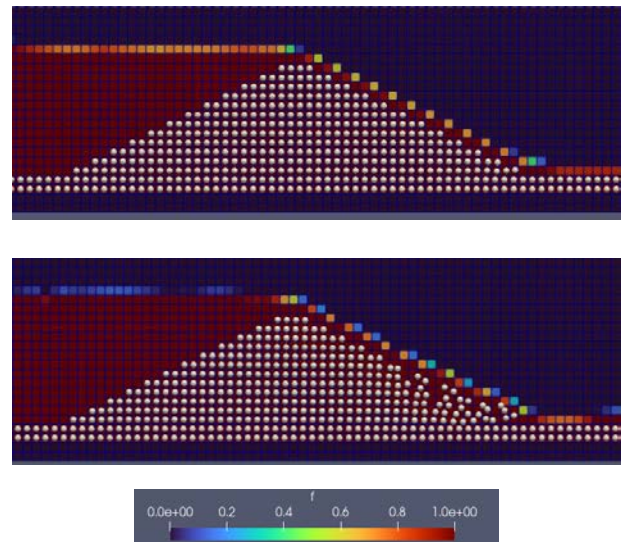


Fig.4 飽和度コンター図 3sec (上), 5sec (下)

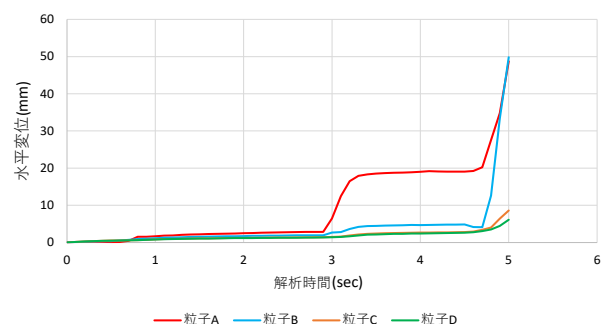


Fig.5 各法面粒子の水平変位時刻歴