

京都大学工学部

学生会員 ○松尾 大介

京都大学大学院工学研究科

正会員 肥後 陽介

京都大学大学院工学研究科

正会員 音田 慎一郎

京都大学大学院工学研究科

フェロー会員 三村 衛

1. はじめに

災害による被害を低減するためには、実現象を精度よく予測し、その規模や発生場所を知ることが重要である。その一環として、堤防の越流による浸透、侵食現象をシミュレーションするための様々な流体－固体連成解析が開発されているが、不飽和土を対象としたものは未だ開発されていない。

そこで本研究では、不飽和土を対象とした流体－固体連成解析法を開発することを目的とした。流体相の解析には HSMAC 法を用い、その適用性を確認するとともに、固体相に GIMP 法を適用して連成解析を行い、その効果を検証した。

2. GIMP 法による固体相の支配方程式

Generalized Interpolation Material Point(GIMP)法¹⁾による Original の MPM の補間関数を一般化し、粒子が計算格子の境界付近に接近した際の数値不安定性を合理的に改良する補間手法である。固相、液相、気相の三相混合体の支配方程式は全体相の運動方程式と液相の連続式で、前者は GIMP 法、後者は有限差分法(FDM)を用いて離散化した。²⁾

3. HSMAC 法による流体相の支配方程式

HSMAC(Highly Simplified MAC)法は、流体の数値解析を行うためのアルゴリズムである(例³⁾)。基礎方程式は連続式と x, y 方向の N-S 式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

であり、圧力に関するポアソン方程式を、ニュートン法を用いて反復計算を行うことで解く。上式にお

いて、 x, y は空間座標、 u は x 軸方向の流速、 v は y 軸方向の流速、 ρ は流体の密度、 P は圧力、 ν は動粘性係数である。本研究では、変数の配置にスタッガード格子を用いた。この格子では圧力を格子中心、速度を半格子点上に定義することで、振動解など非現実的な解の発生を抑えられるが、速度と圧力を同一位置で定義できないため、物理境界の外側にさらに仮想セルを設けて境界条件を与える必要がある。

4. 流体－固体連成解析手法を用いた数値解析

本研究では、固体相に GIMP 法、流体相に HSMAC をそれぞれ適用し、同時に数値解析を行う流体－固体連成手法の開発を行った。具体的には、HSMAC 法における仮想セルに固体相の圧力を、GIMP 法において FDM で連続式を解く際の仮想セルに流体相の圧力を採用することで連成を行った。

まず初めに、HSMAC 法を用いた二次元キャビティ流れの数値解析を行った。計算領域は $1(\text{m}) \times 1(\text{m})$ の正方形領域とし、上面にのみ流速 $0.25(\text{m/s})$ を与え、その他の境界にはフリースリップ条件を課した。時間刻み $\Delta t = 1.0 \times 10^{-2}(\text{s})$ の条件のもと、初期状態において全体の圧力は一様に $0(\text{kPa})$ とし、定常状態になるまで計算を行った。計算結果として流速ベクトルと圧力のコンターを図 1 に示す。

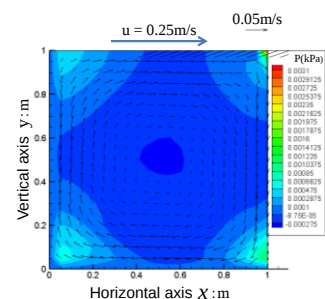


図 1 流速・圧力分布

これを見ると、大きな循環渦が形成され、中心部の圧力が最も低くなっていることがわかる。これはキャビティ流れの代表的な特徴であり、流れの様子を再現できたと考えられる。

次に、計算領域の壁面を粗面と仮定し、その影響を考慮した解析を行った。底面せん断応力の評価には、粗面の対数則を用い、外力項として N-S 式に組み込んだ。

図 2, 図 3 に下面せん断力を考慮した場合の二次元キャビティ流れの解析結果を示す。

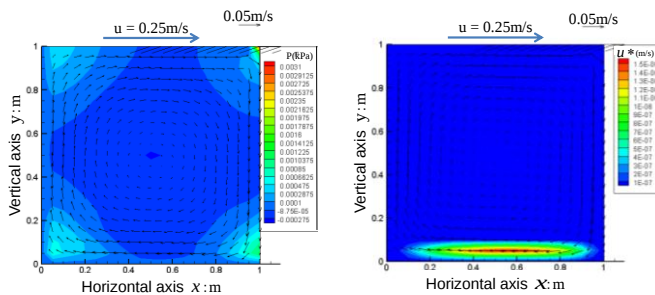


図 2 圧力・流速分布

図 3 摩擦速度分布

粗面の影響を考慮しない場合の結果と比較すると、渦中心の圧力が少し高い値を示している。これは、粗面によるせん断摩擦力の影響を受けて全体の手速度が低下し、その結果として渦の中心と外部の圧力差が小さくなったためと考えられる。

最後に、GIMP 法と HSMAC 法を用いた流体－固体連成解析を行った。固体相のパラメータは参考文献²⁾を参考されたい。解析条件を図 4 に示す。固体相への浸透現象が 10 秒以内に概ね終了していたため、10 秒後の結果について考察を行った。流体相に着目した結果を図 5 に、固体相に着目した結果を図 6 に示す。10 秒間では流体相の流れは定常化していないが、図 6 を見てみると、固体相の間隙水圧が徐々に増加している様子が確認できる。このことから流体が固体相へと浸透していく様子を再現できたと考えられる。

5. 結論

流体解析法の HSMAC 法と不飽和土の粒子法である GIMP 法の連成解析手法を提案し、二次元キャビティ流れに適用することでモデルの妥当性を検証した。また、粗面によるせん断摩擦力の影響も考慮することができた。今後、HSMAC 法に重力を考慮するための外力項を組み込み、また流体の流れによ

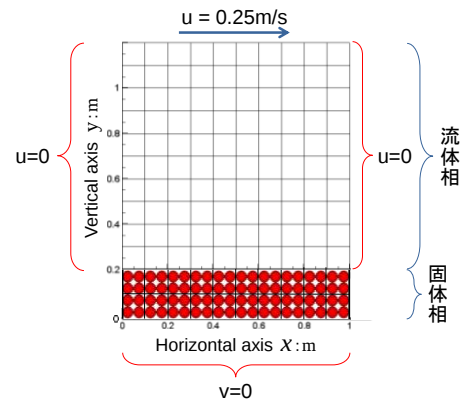


図 4 連成解析条件

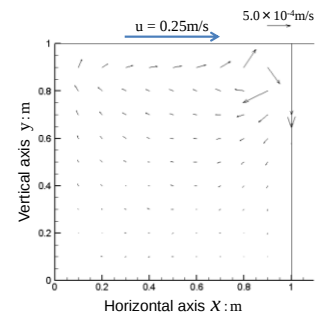


図 5 流体相の流速分布

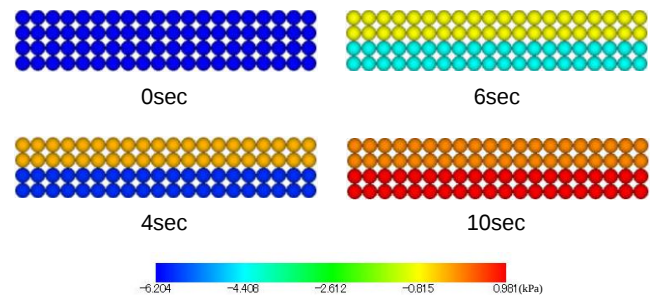


図 6 固体相の間隙水圧分布

て発生するせん断力の固体相への影響を考慮することで、浸透－侵食の同時解析が可能なより精度の高い解析モデルの構築を目指す。

参考文献

- 1) Bardenhagen, S.G. and Kober, E.M. : The Generalized Interpolation Material Point Method, *Computer Modelling in Engineering and Science*, 5(6), pp.477-495, 2004.
- 2) 西村太祐ほか：一般化補間法を適用した MPM-FDM 連成法を用いた不飽和堤防の動的解析, 第 46 回地盤工学研究発表会, 2011.
- 3) 平野博之：流れの数値解析と可視化 第 3 版, 丸善出版株式会社, 2011.