

粒子法による防波堤の浸透破壊シミュレーションに向けた基礎検討

九州大学大学院 学生会員 ○森本 敏弘
九州大学大学院 正会員 浅井 光輝
九州大学大学院 正会員 笠間 清伸
九州大学大学院 正会員 園田 佳巨

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では、津波により防波堤や防潮堤などの港湾施設が甚大な被害を受けた。防波堤や防潮堤の被害メカニズムに関するこれまでの研究・調査より、I. 防波堤前面と背面の水位差に起因して作用する水平力、II. 防波堤の越流水ならびに目地で発生する流水による捨石マウンドの洗掘、III. 浸透流による捨石マウンドの支持力の低下に伴うパイピング破壊などが被災の主因として考えられている。¹⁾ 本研究では上記に示したI, II, IIIの被災要因のうち、IIIの浸透流による破壊現象に着目し解析によりメカニズムの解明を試みる。本報告ではまず、解析手法である3次元ISPH法を用いて3次元キャビティ流れの解析を実施し、Ghiaら²⁾の解析解と比較することで精度検証を行う。その後、笠間ら¹⁾によって行われた水理模型実験を対象とし、再現解析を試みる。なお、再現解析では、地表流と浸透流を統一した式で取り扱い、両者の連成解析を行う。

2. 解析手法概要及び精度検証

本研究では、解析手法として非圧縮性流体解析用に開発された粒子型の解法であるISPH法を採用し、中でも浅井ら³⁾によって提案された安定化ISPH法を用いる。流体解析における支配方程式はNavier-Stokes式と質量保存則であり、これをSPH法の基本概念を用いて解析する。安定化ISPH法の定式化の詳細については参考文献 3)を参照されたい。本章では、まず上記の手法の精度検証を兼ねて、3次元キャビティ流れの解析を行うこととする。解析対象モデルは100cm×100cm×100cmの立方体領域とし、上面に流速100cm/sを与えた。本解析はRe=100に相当する計算となる。時間間隔は0.001秒、境界条件は比較する例題が2次元流れであることを鑑み、流れに平行な方向の境界面には非すべり条件を、流れと垂直な方向の境界面にはすべり条件を与えることとした。定常状態における解析結果を図-1, -2に示す。図-1より良好な流速分布が得られていることがわかる。

また、図-2に示すように、Ghiaら²⁾の解析解に近い結果が得られた。

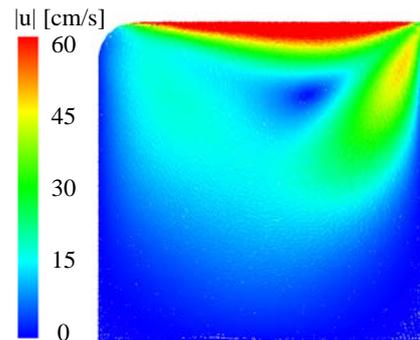


図-1 流速分布

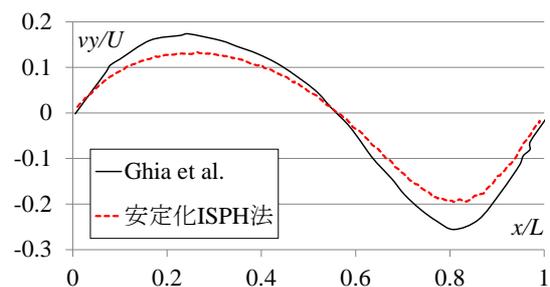


図-2 解析解との比較

3. 浸透流解析におけるダルシー流れのモデル化

次に、地表流と浸透流の連成解析に向けた基礎研究として、地表流はNavier-Stokes方程式、浸透流はDarcy則を用いた解析を実施した。この際、地盤を空間固定した多孔質体としてモデル化し、内部を流れる浸透流を固定した地盤粒子を用いて解析した。異なる二つの方程式を同時に解析するためには、両者を統一的に記述可能な支配方程式が望まれ、本研究では参考文献 4), 5)を参照し、以下に示すDarcy-Brinkmanの式を用いることで両式の同時解法を粒子法にて実施することにした。

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{v} + \mathbf{v} \cdot \nabla \left(\frac{\mathbf{v}}{\chi} \right) = - \frac{\chi}{\rho_l} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{v} + \chi \mathbf{g} - \frac{\nu \chi}{k} \mathbf{v} \quad (1)$$

ここで、 χ は間隙率であり、 k は透水係数を表す。式(1)は流体相では $\chi=1$ 、透水係数 $k=\infty(1/k=0)$ とすることで、

キーワード 粒子法, 侵食・洗掘, 浸透流, Darcy-Brinkman の式

連絡先 〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 TEL 092-802-3370

Navier-Stokes 式に一致し、Darcy 相では $k \rightarrow 0$ とすれば近似的に Darcy 則となる。そのため、式(1)を用いれば流体相と Darcy 相で異なる支配方程式を用いる必要はなく、間隙率と透水係数の値を変化させることによって、流体相では Navier-Stokes 式、Darcy 相では近似的に Darcy 則を満足する流れを同一の支配方程式で解析できる。

4. 水理模型実験を対象とした再現解析

本章では前章までで述べた解析手法とモデル化を用いて、浸透流問題が支配的となる水理模型実験を対象に解析を行う。解析対象モデルには図-3 に示す模型実験を採用した。これは笠間ら¹⁾によって行われた実験であり、津波を模擬した流体を越流させないことによって水位差を生じさせ、捨石マウンド内の動水勾配と支持力低下の関係を明らかにする狙いがある。実験では図-3 中の Δh は、40,80,120,145mm の4ケースを行っており、 $\Delta h=145\text{mm}$ の際にマウンドはパイピング破壊を起こし、ケーソンは倒壊した。今回はモデル化の妥当性検証の基礎段階として、マウンドが破壊しない $\Delta h=120\text{mm}$ のケースを解析対象とした。

解析結果を図-4 に示す。図-4 上図はピエゾ水頭分布を、下図は上図内の破線で表したケーソン周辺の流速分布(色は流速のノルム)を表している。図-4 上図から、マウンド内のピエゾ水頭分布は、解析と実験で概ね一致しており、浸透流のモデル化の妥当性が確認できた。また、下図から、流速についてもピエゾ水頭の高低差に沿って分布されており、Darcy-Brinkman の式を用いてマウンド内の浸透流の流れを再現できていることがわかる。図-4 上図においてコンターの範囲が実験と解析とで異なるのは、地表流とマウンドの境界面の取り扱いが十分でないことが考えられる。

5. おわりに

本報告で得られた結論を以下に示す。

- 1) 3次元キャビティ流れによる精度検証を通して、本手法の有用性を確認した。
- 2) Darcy-Brinkman の式を導入することで、地表流と浸透流の流れを統一した式で記述し、粒子法を用いて同時解析を実施することができた。
- 3) 浸透流解析の結果を実験と比較により、類似した傾向を得ることができたが、まだ異種問題の境界面処理などの課題を残した。

定量的な評価は今後の課題であり、将来的には浸透破壊までを表現できるシミュレータへと発展させる予定である。

参考文献

- 1) 笠間清伸, 善功企, 春日井康夫: 浸透流に着目したケーソン式混成防波堤の安定性に関する水理模型実験, 第60回海岸工学講演会, 2013.11.1
- 2) U. Ghia, K. N. Ghia, C. T. Shin: High-Re solutions for incompressible flow using the Navier-Stokes equations and multigrid method, J. Comput. Phys. 48(1982)387-411.
- 3) 浅井光輝, 藤本啓介, 田邊将一, 別府万寿博: 階段状の非適合境界を有する粒子法解析における仮想マーカーを用いたすべり・非すべり境界処理法, 日本計算工学会論文集, No.20130011, 2013.
- 4) M. LE BARS and M. GRAE WORSTER: Interfacial conditions between a pure fluid and a porous medium: implications for binary alloy solidification, Journal of Fluid Mechanics, 550, 149-173.
- 5) 藤澤和謙, 村上章, 西村伸一, 珠玖隆行: 有限体積法による Darcy 流と Navier-Stokes 式の同時解析, 計算工学講演会論文集, Vol.18,2013.

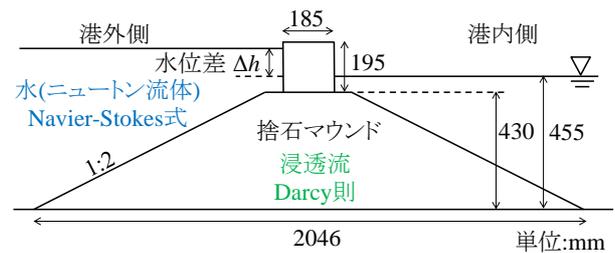


図-3 解析モデル概要

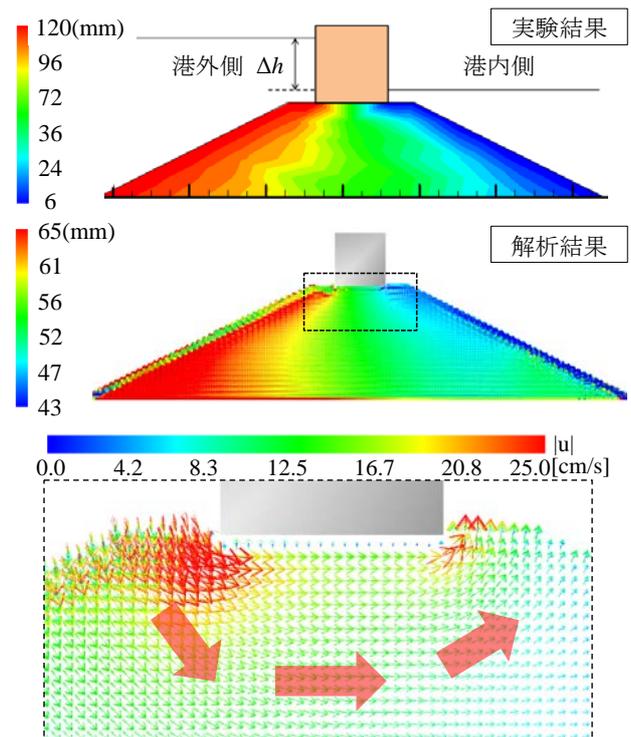


図-4 ピエゾ水頭分布とケーソン周辺の流速分布