

粒子法による津波時の堤防崩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年に発生した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。これまでも多くの研究者により防波堤や防潮堤の被害メカニズムが研究されてきており、被災の原因として、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挙げられている。¹⁾ 上記に示した要因はいずれも、水理学(流体力学)や地盤力学、構造力学といった土木工学における3つの力学が複雑に関係しあった複合問題である。今後港湾施設をはじめとした、土木構造物の設計や都市の防災・減災計画の検討のためには、力学現象を正確に記述できるシミュレーション技術の活用が期待され、これらの複数の力学現象を包括した、マルチフィジックスシミュレータの開発が求められる。本研究では、前述したI, II, IIIの被災要因のうち、II. 流体-地盤の連成問題に関わる洗掘現象、III. 浸透流現象の二つの問題に着目し、それぞれが支配的となる例題を用いて再現解析を行う。解析手法には大変形問題の解析に適した粒子型の解法であるSPH法を選択し、流体-地盤-浸透流のモデル化方法について検討する。今回の報告ではそのうち、浸透流現象の再現解析について説明する。浸透流解析では、地表流と浸透流を統一した式で取り扱い、同時解析を行う。

2. 解析手法

本章では、本研究で用いる解析手法(SPH法)の概要と、浸透流解析における流体、浸透流のモデル化について述べる。

2.1. SPH法の概要²⁾

本解析には粒子型の解法である、SPH法を用いる。SPH法では、連続体を有限個の粒子点で表現し、各粒子上に解くべき物理量を与える。任意点上での補間には、距離に応じた重み関数により一種の重み付き平均を行う。ここで、粒子 j の質量 m_j 、密度 ρ_j とすると、物理量 $f(x)$ は、以下の式で表される。

$$f(x) \approx \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x^j) W(x - x^j, h) \quad (1)$$

本研究では、SPH法の中でも、非圧縮性流体解析用開発された Incompressible SPH(ISPH)法を採用した。

2.2. 浸透流解析におけるダルシー流れのモデル化

浸透流解析の第一段階として、地盤を多孔質体として固定し、その内部を流れる浸透流を地盤粒子上に表示するという手法を採用した。そのため、本報告での浸透流解析でモデル化する必要があるのは、流体(地盤外を流れる地表流)と浸透流(地盤内を流れるダルシー流)のみである。両者はそれぞれ、Navier-Stokes式、Darcy則に基づいて一般的に記述されるが、水が地表流から地盤内に浸透し、ダルシー流となるような問題では、両者を統一的に記述する必要がある。そこで本研究では流体-浸透流の支配方程式として、参考文献3),4)を参照し、以下に示すDarcy-Brinkmanの式を用いた。

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

ここで、 χ は間隙率であり、 k は透水係数を表す。 \mathbf{v} は流体相では流速、Darcy相ではDarcy流速を表す。式(2)は流体相では $\chi=1$ 、透水係数 $k=\infty(1/k=0)$ とすることで、Navier-Stokes式に一致する。また、Darcy相においては式(2)に無次元化を施すとその意味が分かりやすい。速度の次元を代表して透水係数 k 、長さの次元を代表して h をとり、

$$\mathbf{v} = k \mathbf{v}^*, \quad \mathbf{x} = h \mathbf{x}^*, \quad t = \frac{h}{k} t^*, \quad p = \rho_l g h p^* \quad (3)$$

と無次元量 $\mathbf{v}^*, \mathbf{x}^*, t^*, p^*$ を定義し、式(2)を変形、整理すると以下を得る。

$$\frac{k^2}{h} \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{v}^* + \frac{k^2}{h} \mathbf{v}^* \cdot \nabla \left(\frac{\mathbf{v}^*}{\chi} \right) = -\chi g \nabla p^* + \frac{\nu k}{h^2} \nabla^2 \mathbf{v}^* + \chi g - \nu \chi \mathbf{v} \quad (4)$$

ここで、 $k \rightarrow 0$ とすれば、左辺の2つの項は2乗のオーダーで、右辺の第2項は1乗のオーダーで0に近づくことがわかる。そのため、十分に小さい透水係数 k が与えられた場合、式(4)は最終的に以下の式で表され、流速が圧力の勾配に比例する形となる標準的なダルシー則の式となる。

$$\mathbf{u}^* = \frac{g}{\nu} (-\nabla p^* + \mathbf{e}_z) \quad (5)$$

以上から、Darcy相において式(2)を解くことは、近似的に

Darcy 則を満たす浸透流の連続式を解くことに対応することがわかる。そのため、式(2)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。

3. 実問題への適用

本章では、前章で述べた解析手法とモデル化を用いて、実際に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。浸透流解析の対象モデルには、図-1 に示す模型実験を採用した。これは笠間ら⁵⁾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-1 中の Δh は、40mm, 80mm, 120mm, 145mm の 4 ケースを行っており、 Δh が 145mm 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、前章での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-2、図-3 に示す。図-2 はピエゾ水頭分布を、図-3 は図-2 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-2 から、マウンド内のピエゾ水頭分布は、解析値と実験値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、図-3 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。また、図-2 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。

4. おわりに

本論文で得られた結論を以下に示す。

- 1) 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に解析を実施することができた。
- 2) 浸透流解析の結果を実験と比較し、基礎段階としての妥当性を得た。

以上より、粒子法を用いて、地盤内部の浸透流の流れを定性的に再現することに成功した。今後は、既往の研究で行った地盤の大変形解析と組み合わせた、現実的なマルチフィジックスシミュレータへと発展させる予定である。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局:防波堤の耐津波設計ガイドライン, 2013.9

- 2) Liu, G.R. and Liu, M.B. (2003), Smoothed Particle Hydrodynamic: A Meshfree Particle Method, World Scientific, Singapore.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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

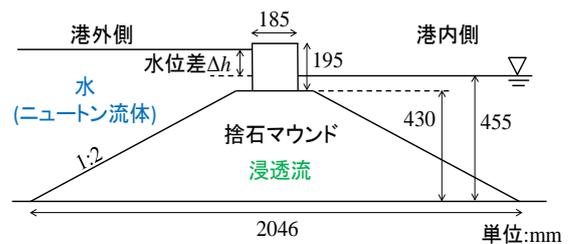


図-1 浸透流解析モデル概要

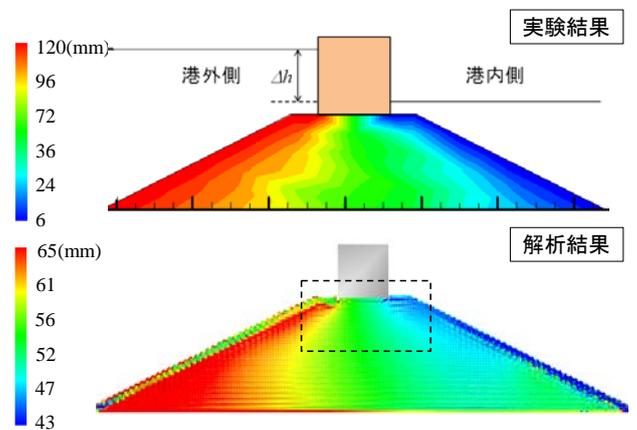


図-2 ピエゾ水頭 $\left(z + \frac{p}{\rho g}\right)$ 分布

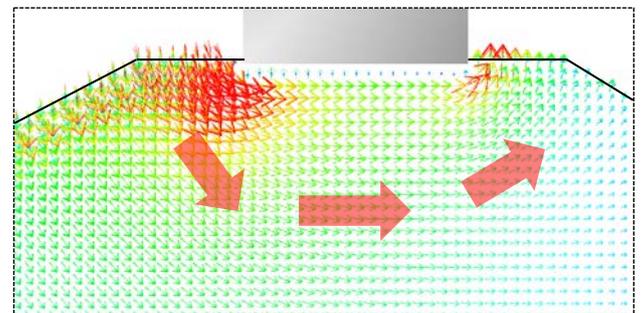


図-3 ケーソン周辺の流速分布