

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 園田 佳巨
日本工営株式会社 正会員 末崎 将司

1. 目的

2011 年東北地方太平洋沖地震津波は、東北地方を中心に甚大な被害をもたらした。この津波により、堤防をはじめとした土木構造物周辺の地盤において多くの侵食・洗掘被害が発生した。特に、堤防では津波の越流作用によって背後地盤が洗掘され、被覆コンクリートが流されることで堤防の機能を喪失したとの被害事例が多い。また、橋桁の流出被害のように、流体力による構造物の直接的な崩壊事例もあることから、構造-流体-地盤の相互作用を議論し、防災・減災の検討へと活用することが求められている。

本研究では、このうち流体-地盤の連成問題に焦点を絞り、侵食・洗掘現象の再現解析を行う。この際、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、地盤・流体を扱う際のモデル化方法について検討した。本報告では、流体をニュートン流体、地盤をビンガム流体として応力を評価し、両者の統合解析を試みた事例を報告する。

2. 解析手法の概要

本解析には粒子型の解法である SPH 法を用いる。SPH 法では、図-1 のように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、非圧縮性流体解析用に開発された Incompressible SPH(ISPH)法を採用した。

運動の支配方程式としては流体、地盤ともに次の 2 式を用いる。

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{g} \quad (2) \quad \frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (3)$$

前者は固体力学における力のつりあい式(流体力学では運動量保存則の式)、後者は質量保存則の式である。応力の評価は次式で行い、これを式(2)に代入すればナビエ・ストークス方程式が得られる。

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \tau_{ij} \quad (4)$$

また、流体はニュートン流体としてモデル化し、地盤は、せん断抵抗をもつ流体(ビンガム流体)としてモデル化する。

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) \quad (5)$$

$$\tau = \mu_s^0 \dot{\gamma} + \tau_y \quad (6)$$

$$\tau_y = c + p \tan \phi \quad (7)$$

このとき、 τ_y は降伏せん断応力、 μ_s^0 は降伏後の粘性を表し、式(5)と(6)をグラフに表すと図-2 のようになる。本手法では、 τ_y に式(7)に示すモール・クーロンの破壊基準を導入する。なお、 c は粘着力、 ϕ は内部摩擦角である。

キーワード 粒子法, SPH 法, 侵食・洗掘

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

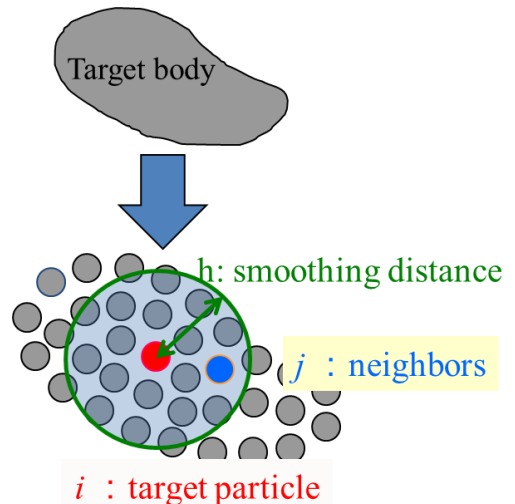


図-1 SPH法の基礎概念図

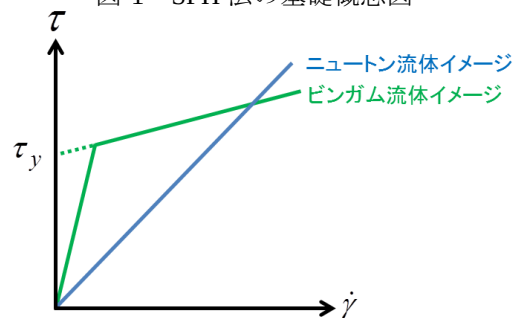


図-2 ひずみ速度とせん断応力の関係

また、式(6)と式(7)より、ビンガム流体モデルにおける地盤の粘性は以下のように表せる。

$$\mu_s = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \begin{cases} \mu_s^0 + \frac{c + P \tan \phi}{\dot{\gamma}} & \mu_s < \mu_s^{\max} \\ \mu_s^{\max} & \mu_s \geq \mu_s^{\max} \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 $\mu_s^{\max}$ は、地盤の粘性係数の最大値である。以上の式を式(1)に示す SPH の定式化に従い粒子分散化して、数値解析を実施した。

3. 中間層の定義

上記に示すように、異なる物性値を持つ地盤と流体を SPH 法といった同一のアルゴリズムで解くため、両者の間にサスペンション機能を持たせた中間層を導入することで、その矛盾の解消を試みた。具体的には図-3 のように、近傍粒子内の地盤粒子と流体粒子の割合を $\tilde{c}_{soil}$ と定義し、その値に応じて粘性を変化させている。その際、中間層には粘性の低いビンガム流体を定義することで、地盤粒子の表層の水粒子を流れやすく設定し、両者の層をできるだけ乖離した。

$$\tilde{c}_{soil} = \frac{V_{soil}}{V} = \frac{N_{soil}}{N_{soil} + N_{fluid}} = \frac{\text{砂粒子の数}}{\text{近傍粒子の総数}} \quad (9)$$

$$\mu_{susp} = \begin{cases} \mu_f + \frac{\mu_c - \mu_f}{0.3} \tilde{c}_{soil} & \tilde{c}_{soil} \leq 0.3 \\ \mu_c & 0.3 < \tilde{c}_{soil} < 0.6 \\ \mu_c + \frac{\mu_s - \mu_c}{1 - 0.6} (\tilde{c}_{soil} - 0.6) & \tilde{c}_{soil} \geq 0.6 \end{cases} \quad (10)$$

μ_f : 水の粘性, μ_c : 中間層の粘性

なお、中間層の粘性は Ulrich らの論文¹⁾から以下の式を用いた。

$$\mu_c = \frac{\rho_s C_f (v_i v_i)}{\dot{\gamma}} + \mu_T \quad C_f : \text{摩擦係数}, \quad \mu_T : \text{渦動粘性}$$

4. 結果・考察

地盤の洗掘の検証例題として、山本ら²⁾によって行われた実験を採りあげた。この実験の諸元を図-4 に示す。なお、解析モデルは、粒子間隔 2cm, 総粒子数約 137 万個として作成した。解析結果を図-5 に示す。実験結果と比較すると、洗掘深さが浅いように見える。これは、式(6)で示した降伏応力が自然土の値よりも大きくとられており、それによって地盤が流動しにくかったためと考えられる。また、解析では実験よりも水が排出されにくく、溜まった水がクッションとなり洗掘を妨げていたことも要因として挙げられる。

5. 結論

例題を通して、本手法の地盤洗掘問題への適用可能性を示すことができた。なお、実験結果と解析結果との比較・検討による定量的な評価は今後の課題となる。当面の課題としては、前章でも述べたように、降伏応力の低減と、排水の再現が挙げられる。最終的には、剛体のモデル化も含めた構造-流体-地盤 3 者の連成解析を行い、堤防崩壊のメカニズムを再現するシミュレーションへと発展させる予定である。

参考文献

- 1) Christian Ulrich and Thomas Rung. : Multiphysics SPH for harbor and ocean engineering hydrodynamics. , V European Conference on Computational Fluid Dynamics ECCOMAS CFD 2010, 2010
- 2) 山本吉道, Nunthawath, C., 成吉兼二: 津波による陸域構造物被害の合理的評価法の提案, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.67, No.1, pp.72-91, 2011.

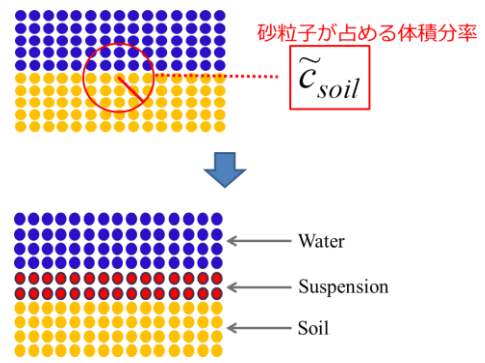


図-3 中間層領域の定義

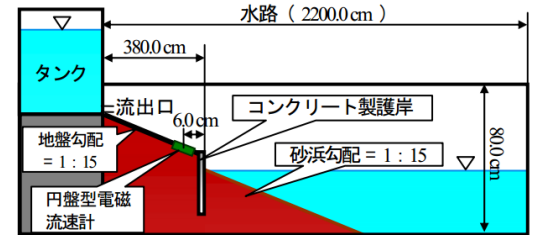


図-4 検証例題諸元

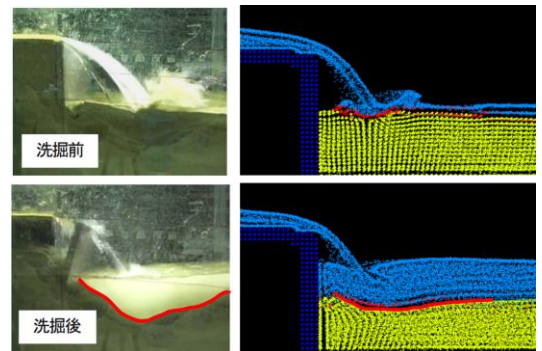


図-5 実験と解析結果の比較