

安定化 ISPH 法による津波時堤防崩壊メカニズム解明に向けた基礎検討

九州大学大学院 学生会員 ○野上 智隆
九州大学大学院 正会員 浅井 光輝
九州大学大学院 正会員 有川 太郎

1. 目的

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。特に2011年の震災では、防波堤背面での地盤の崩壊が報告されており、防波堤崩壊に洗掘現象が大きく関係していることが確認された。そのため、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に着目し、シミュレーション解析を行うことでメカニズムの解明を試みる。解析手法には粒子法的一种であるSPH法の中でも、独自に定式化を行った安定化ISPH法¹⁾を選択し、流体-地盤のマルチフィジックスシミュレーションを行った。

2. 解析手法

2.1. 安定化 ISPH 法

ISPH法¹⁾は、非圧縮性流体の支配方程式を予測子修正子法に基づく射影法と呼ばれる分離型解法によって時間離散化し、その分離された方程式をSPH法の基礎式に基づいて空間離散化を行う手法である。本研究ではナビエ・ストークス式と以下の質量保存則を支配方程式として用いた。

$$\nabla \cdot \mathbf{v}_D = 0 \quad (1)$$

ISPH法の離散化された圧力ポアソン方程式に粒子分布の平滑化に作用する項を付加し、粒子分布の不均一性に起因する空間近似作用素の精度低下を防ぐ安定化ISPH法という手法を用いる。安定化ISPH法では、圧力ポアソン方程式は次のように離散方程式を定める。

$$\langle \nabla^2 P_i^{n+1} \rangle \approx \frac{C_r(\varepsilon_i)}{\varepsilon_i} \left(\frac{\rho_i^0}{\Delta t} \langle \nabla \cdot \mathbf{v}_{Di}^* \rangle + \alpha \varepsilon_i \frac{\rho_i^0 - \langle \rho_i^n \rangle}{\Delta t^2} \right) \quad (2)$$

なお、 α は0~1までの値をとる安定化パラメータであり、本解析では $\alpha=0.01$ とした。

2.2. 洗掘判定式

既存の流砂量式の多くは経験則によって定義されている。各流砂量式が流砂の運動方程式の代わりとなっていることを考慮すると、それぞれの式に対象となる運動形態が存在する。本章では、その中でも洗掘現象を再現するのに適しているものと思われる滑動離脱過程における簡便な流砂量式を使用する。滑動離脱過程において駆動力と抵抗力の関係により移動限界流速を推定でき、洗掘の判定基準となる。砂粒子の移動限界流速は、

$$u_{bc} = \sqrt{\frac{2A_3(\mu_f \cos\theta - \sin\theta) \left(\frac{\rho_{sp}}{\rho_l} - 1 \right) gd}{\varepsilon(C_D + \mu_f C_L) A_2}} \quad (3)$$

と与えられる。ここで A_3 ：砂粒子の3次元形状係数、 μ_f ：静止摩擦係数、 θ ：斜面傾斜角、 ρ_{sp} ：砂粒子の密度、 ρ_l ：水粒子の密度、 d ：砂流子の粒子径、 ε ：遮蔽係数、 C_D ：抗力係数、 C_L ：揚力係数、 A_2 ：砂粒子の2次元形状係数とする。ここでの移動限界流速は地盤面に対してのせん断方向の速度を意味している。

キーワード 安定化 ISPH 法, 洗掘, 防波堤

連絡先 〒819-0395 福岡市西区元岡 744 ウェスト 2 号館 11 階 1102 号室構造解析学研究室 TEL
092-802-3370

3 検証

3.1. 洗掘現象の確認

前述した解析モデルを用いれば、粒子法の利点である分離、再結合等の表現能力により、**図-1**に示すような越流時に発生する堤防背面での洗掘現象を定性的に表現できることを事前に確認した。以下ではより単純な問題に対して精度検証を実施した例を報告する。

3.2. 検証例題

津波による越流洗掘現象のシミュレーションを可能にするには、落下型の洗掘現象を再現する必要がある。そこで本研究では赤司ら²⁾によって行われた鉛直噴流の実験を検証例題として採用し、再現解析を実施した。実験に伴う解析モデルを**図-2**に示す。幅 B の噴出口から鉛直下向きに一定の噴出速度 u_0 ($=74\text{cm/s}$) で水を流入する。噴出口から地盤表面までの距離は赤司らの実験を参照し、 $h/B=5$ として設定した。解析条件については、粒子数 113766 個、初期粒子間隔 1cm、時間増分 0.001 秒とし、境界条件は非すべり条件とした。また、前章で説明した移動限界流速のパラメータは実験と同様に**表-5**の値を設定した。**図-3**に解析における洗掘形状の様子を示す。流入境界から噴出された流れが地盤に衝突することにより、砂粒子が左右方向に移動していることが確認できる。これは、衝突の際に地盤表面に移動限界流速を超えるせん断流速が発生することで洗掘現象が進行しており、定式化の通りの現象が表現できることを確認した。また流入開始 15s 時における洗掘形状中心から右半分の洗掘形状の実験値と解析値との比較を**図-4**に示す。解析では、概ね実験と似た傾向を掴めていることが確認できる。洗掘判定を行う流砂量式は、せん断流速のみで判定しているが、鉛直噴流のような鉛直向きの速度が卓越する問題においても、この判定式を導入することで簡易的に洗掘現象を再現できた。今後、砂粒子の堆積までも正確に再現していくためには浮遊砂粒子の運動についての再検討が必要である。

4 結論

せん断流速による移動限界流速を用いた洗掘の判定式の導入により、簡易的に洗掘現象の再現が可能であることを確認した。検証例題では、概ね実験と似た洗掘形状を再現でき、鉛直流れが卓越した例題にも簡易的に適用可能であることを確認した。今後は、防波堤背面での洗掘を対象とした実験との比較検証を行い、より現実的な条件での検証を実施する予定である。また、洗掘後の浮遊砂の取り扱いについても改良を施すことを計画している。

- 参考文献 1) 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.
 2) 赤司信義, 斉藤隆: 鉛直噴流による洗掘に関する研究, 土木学会論文報告集, 第 298 号, 1980

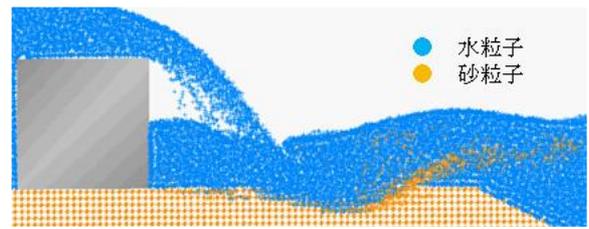


図-1 解析における洗掘形状

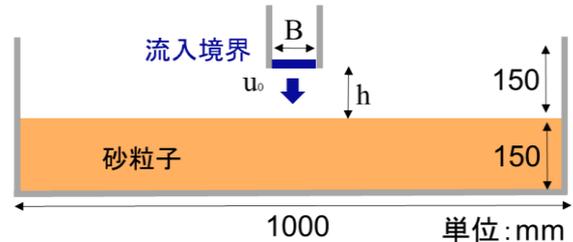


図-2 解析モデル

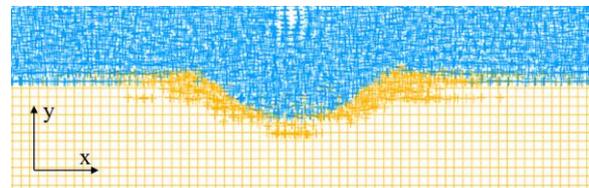


図-3 解析における洗掘形状

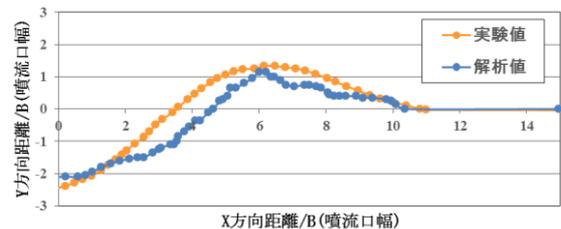


図-4 洗掘形状の比較 (15 秒後)

表-5 限界流速パラメータ

静止摩擦係数	1.0
砂粒子の粒子径[cm]	0.084
砂粒子の密度[g/cm ³]	1.6
遮蔽係数	0.4
抗力係数	0.4
揚力係数	0.4