-1	1+1	1 54	ı –
1.	14	LαJ	۔ ا

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. これまでに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. 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 力学といった十木工学における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、そのため にも、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する. また, 洗掘現象と浸透流現象が 互いに支配的となる問題を別々に解くことにより、それぞ れが崩壊現象に与える影響について検討する. 解析手法に は粒子法の一種である 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

本章では、浸透流解析に用いる支配方程式と安定化 ISPH 法を用いた定式化、最後に洗掘の判定式について述べる.

2.1. 地表流と浸透流の支配方程式

浸透流問題を考える場合,地表流と浸透流の境界で水が 地盤を出入りする度に地表流から浸透流へ,浸透流から地 表流へと絶えず変化することを考えなければならない.そ こで本研究では、この状況を考慮し、Akbariらによって提 案された²⁾地表流ではナビエ・ストークス方程式,浸透流 では拡張されたダルシー則を近似的に満足する統一式を採 用した.

$$\frac{C_r(\varepsilon)}{\varepsilon} \frac{D \mathbf{v}_D}{Dt} = -\frac{1}{\rho^0} \nabla P + v_E(\varepsilon) \nabla^2 \mathbf{v}_D - a(\varepsilon) \mathbf{v}_D - b(\varepsilon) \mathbf{v}_D |\mathbf{v}_D| + \mathbf{g}$$
(1)

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	学生会員	森本	敏弘
九州大学大学院	正会員	笠間	清伸

ここで v_D はダルシー流速または平均流速を表しており, 通常の速度vを用いると、 $v_D = sv$ と表される. ε は地盤内 の間隙率を示す.なお、各種係数は間隙率の関数となって おり、その関係式は以下の通りである.

$$C_r(\varepsilon) = 1 + 0.34 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon}$$
 : 慣性係数 (2a)

$$v_{\rm E}(\varepsilon) = \frac{v_w + v_T}{\varepsilon}$$
:有効動粘性係数 (2b)

$$a(\varepsilon) = \alpha_c \frac{v_w (1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 D_{50}^2} : 線形係数$$
(2c)

$$b(\varepsilon) = \beta_c \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3 D_{50}}$$
 : 非線形係数 (2d)

2.2. 安定化 ISPH 法による定式化

ISPH 法は、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(1)式と以下の質量 保存則を支配方程式として用いた.

$$\nabla \cdot \boldsymbol{v}_D = 0 \tag{3}$$

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.

$$\left\langle \nabla^2 P_i^{n+1} \right\rangle = \frac{C_r(\varepsilon_i)}{\varepsilon_i} \frac{\rho_i^0}{\Delta t} \left\langle \nabla \cdot \boldsymbol{v}_{Di}^* \right\rangle \tag{4}$$

次に 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、式(4)で与え られた圧力ポワソン方程式は以下のように修正される.

$$\left\langle \nabla^2 P_i^{n+I} \right\rangle \approx \frac{C_r(\varepsilon_i)}{\varepsilon_i} \left(\frac{\rho_i^0}{\Delta t} \left\langle \nabla \cdot \boldsymbol{v}_{Di}^* \right\rangle + \alpha \varepsilon_i \frac{\rho_i^0 - \left\langle \rho_i^n \right\rangle}{\Delta t^2} \right)$$
(5)

なお、αは0~1までの値をとる安定化パラメータであり、 通常は1%程度以下の小さな値を設定する.本解析では α=0.01とした.この圧力ポアソン方程式は、安定化パラ メータをゼロとすれば速度発散ゼロ条件による定式化と完 全に一致する.また、累積誤差を密度差の項で徐々に解消 していくことで密度が一定に保たれ、体積保存性の良いス キームとなる.

2.3. 洗掘判定式

本研究では,洗掘の有無を流砂量式に基づいて判定した. 砂粒子の移動限界流速 *u_{bc}*は,

$$u_{bc} = \sqrt{\frac{2A_3 \left(\mu_f \cos\theta - \sin\theta \left(\frac{\rho_{sp}}{\rho_l} - I\right)gd}{\left(C_D + \mu_f C_L\right)A_2}} \tag{6}$$

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, ρ_{sp} :砂粒子の密度, 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.

3. 解析結果

3.1. 浸透流解析

本節では、前章で述べた解析手法を用いて、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. 実験は、笠間ら³によって行われた防波堤の浸透崩壊の実 験を対象とした.実験概要を図-1に示す.実験では港内側 と港外側の水位差 Δ hは40mm,80mm,120mm,145mmの4 ケースを実施しており、 Δ h=145mmにおいてマウンドは崩 壊した.解析条件については、粒子数851946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.比較には以下に示すピエゾ水頭に用いた.

$$Piezo = \frac{P}{\rho q} + \Delta z$$

なお、位置水頭z=0となる基準点は港内側の水面とした. 図-2にΔh=145mmの場合のピエゾ水頭分布の解析結果を 示す.図-3は、各水圧計に対応したピエゾ水頭の実験値と 解析値である.水位の高い港外側から水位の低い港内側に かけてのピエゾ水頭の推移や値など、解析結果は実験と同 様の傾向を得られ、妥当な結果であると言える.

3.2. 洗掘解析

洗掘解析では,前章で述べた洗掘判定式を用いる.洗掘 現象に伴う土塊の分離や変形を粒子法によって再現を行っ た.ここでは解析過程での洗掘現象の様子を図-4に示す. 本解析の検証および妥当性の確認は今後行っていく予定で ある.

4. おわりに

本論文で得られた結論を以下に示す.

- Akbariによる地表流と浸透流の流れを統一した式を導入することで、粒子法を用いて浸透流解析を実施することができた。
- 2) 浸透流解析の水圧の結果を比較し、実験と同様の結果 を得ることができた.
- 3) 基礎段階として,洗掘の現象を再現することが出来た.

以上より、粒子法を用いて、浸透流と洗掘現象を再現す ることができた. 今後は洗掘解析の検証を行い、浸透流と 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

- M. Asai, AM. Aly, Y. Sonoda and Y. Sakai : A stabilized incompressible SPH method by relaxing the density invariance condition, *Int.l J. for Applied Mathematics*, Volume 2012, Article ID 139583, 2012.
- Akbari, H. : Modified moving particle method for modeling wave interaction with multi layered porous structures. Coast. Eng. 89, 1-19, 2014
- 3) 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, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_966-I_970, 2013.11









図-3 間隙水圧計と解析結果(ピエゾ水頭比較)

