

津波による防波堤マウンドの洗掘対策検討に資する土水連成解析技術の開発

九州大学 学 竹崎奏詠

九州大学大学院 学 辻勲平

九州大学大学院 正 ハザリカ・ヘマンタ

九州大学大学院 正 浅井光輝

1 背景・目的

2011 年 3 月に発生した東日本大震災では想定される津波高をはるかに上回る津波が来襲し、東北地方の沿岸域に多大な被害をもたらした。その災害を機に調査・研究が盛んに進められるようになり海岸構造物の破壊原因が明らかになりつつある。笠間ら¹⁾によると、ケーソン式混成防波堤の破壊要因は、a)防波堤前面と背面の水位差に起因して作用する水平力、b)防波堤の越流水ならびに目地で発生する捨て石マウンドの洗掘、c)捨て石マウンドの支持力低下、の 3 つに大別される。我が国では今後も南海トラフ地震といった巨大地震及び津波の発生が危惧されており粘り強い防波堤の構築は急務である。そこで本研究では防波堤の破壊主要因 b)に着目し、マウンド及び海底地盤の浸透を考慮した越流水塊によるケーソン背面の洗掘発生の再現と補強材を使った洗掘の抑制を目標とした。

2 解析手法

防波堤背面の洗掘は大規模かつ大変形を伴うため本解析では流体は SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)で、捨て石マウンド内の礫は個別要素法 DEM(Discrete Element Method)でモデル化した。SPH 法は連続体を有限個の粒子の集合体とみなし、その粒子一つ一つの運動を解くことで連続体全体の運動を解析する手法である。他方、DEM は球体粒子でモデル化する方針とし、要素間の接触・滑動を考慮して、各時刻におけるそれぞれの要素の運動を逐次追跡する。流体の支配方程式は式(1),(2)を採用し、式(1)の右辺左から順に圧力勾配項、粘性項、抵抗力項である。抵抗力項は固相と液相との相互作用による影響を考慮するために導入した項で、マウンド内外での水の流れに対応するため間隙率 ε によって抵抗力項を切り替えている²⁾。式(2)は質量保存則である。

$$\frac{C_r(\varepsilon)}{\varepsilon} \frac{D\bar{\mathbf{v}}_f}{Dt} = -\frac{1}{\rho_f} \nabla P + \mathbf{g} + \nu_E(\varepsilon) \nabla^2 \bar{\mathbf{v}}_f \begin{cases} -a(\varepsilon) \mathbf{v}_r - b(\varepsilon) |\mathbf{v}_r| \mathbf{v}_r & (\varepsilon < 0.8) \\ -c(\varepsilon) |\mathbf{v}_r| \mathbf{v}_r & (\varepsilon \geq 0.8) \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{D\bar{\rho}_f}{Dt} + \bar{\rho}_f \nabla \cdot \left(\frac{\bar{\mathbf{v}}_f}{\varepsilon} \right) = 0 \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{v}_r$ は相対速度であり、流体の速度 $\mathbf{v}_f$ 、固体の速度 $\mathbf{v}_s$ を用いて $\mathbf{v}_r = \mathbf{v}_f - \mathbf{v}_s$ と表記される。 $\bar{\mathbf{v}}_f, \bar{\rho}_f$ は $\bar{\mathbf{v}}_f = \varepsilon \mathbf{v}_f, \bar{\rho}_f = \varepsilon \rho_f$ であり、それぞれ固相内を流れる流体の平均流速、密度である。 $C_r(\varepsilon), \nu_E(\varepsilon)$ はそれぞれ慣性係数、有効動粘性係数である。 $a(\varepsilon), b(\varepsilon), c(\varepsilon)$ は抵抗力に関する係数であり、間隙率により変化する。

圧力の算出に関しては Asai et al.³⁾によって提案された式(3)で示される安定化 ISPH 法を用いた。

$$\langle \nabla^2 P_i^{n+1} \rangle = \frac{C_r(\varepsilon_i)}{\varepsilon_i} \left(\frac{\rho_f}{\Delta t} \langle \nabla \cdot \bar{\mathbf{v}}_{fi}^* \rangle \right) + \alpha \frac{\bar{\rho}_{fi}^0 - \langle \bar{\rho}_{fi}^n \rangle}{\Delta t^2} \quad (3)$$

一方、DEM に関しては並進運動方程式、回転運動方程式をそれぞれ式(4),(5)を解くことで礫の動きを追跡する。

$$m_s \frac{d\mathbf{v}_s}{dt} = m_s \mathbf{g} - \nabla P V_s + \mathbf{F}_d + \sum \mathbf{F}_c \quad (4)$$

$$I \frac{d\omega}{dt} = \sum \mathbf{M}_c + \sum \mathbf{M}_r \quad (5)$$

式(4)右辺第一項から順に重力項、浮力、抗力、DEM 同士の接触力であり、浮力と抗力は流体から DEM に作用する力を表現している。式(5)は右辺第一項から順に接触力に伴うトルク、転がり摩擦である。モデルの寸法や材料の物性値は宮崎港の南防波堤を対象とした西村⁴⁾の実験条件を参考とした。

3 解析結果

洗掘あるいは浸透流による土粒子の運動との連成解析の前に、マウンドおよび土槽を多孔質体としてモデル化し、流体現象のみの解析を行った。解析モデル作成時に参考にした実験模型と解析結果をそれぞれ図1, 2に示す。解析モデルの総粒子数は761,439個、多孔質体の間隙率は0.4、粒径は0.7cmと設定した。水柱前面には実験と同様に、整流効果を与えるために多孔質体を設置した。また、海底地盤の浸透はマウンドと比べて小さく計算コストも抑えられるため海底地盤は間隙率0.40の多孔質体とした。さらに、港内側の水位を一定にするために高さ20cmの壁を設け、港外側の水位は水柱及びその前面に配置した多孔質体の寸法を調節することでケーソン前後の水位差を一定に保ちながら解析を行った。

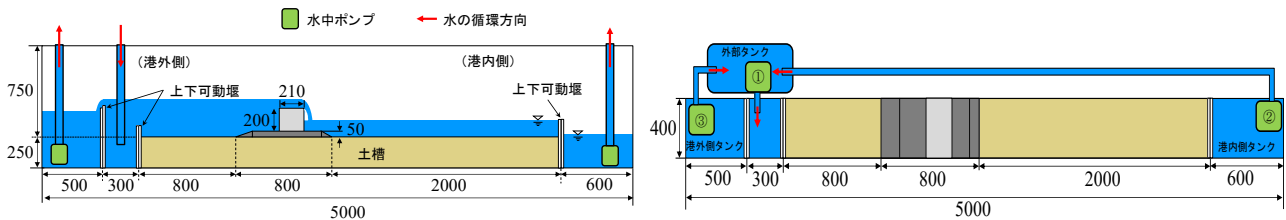


図1 実験で用いられた模型 (左:断面図,右:平面図,単位:mm)

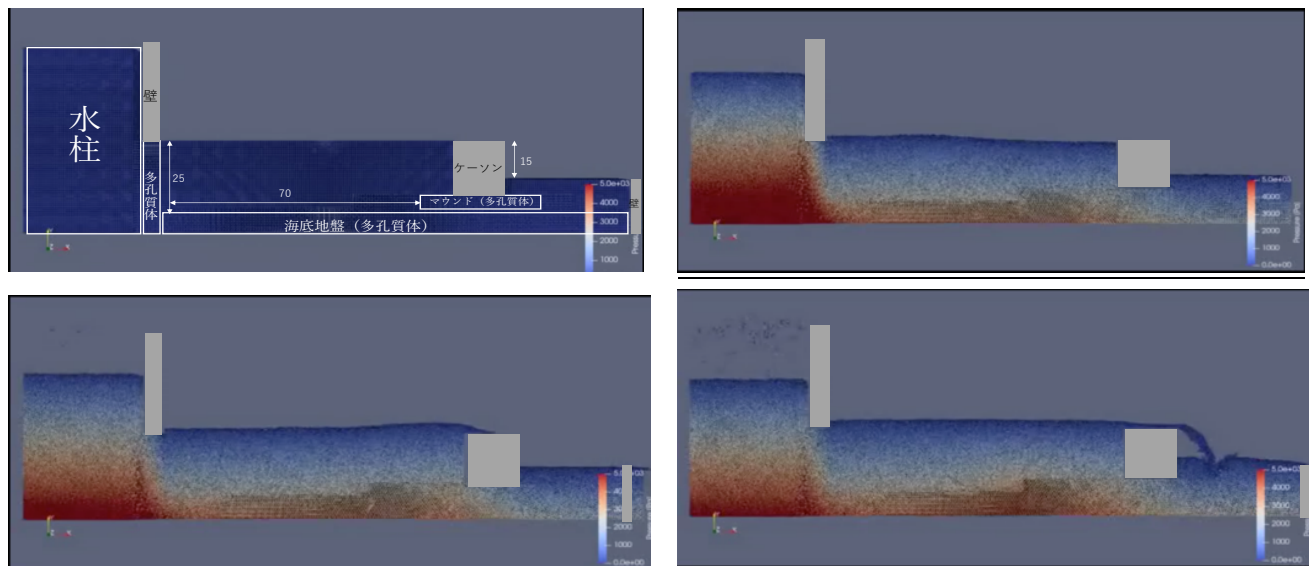


図2 解析結果 (左上,右上,左下,右下は解析開始から0s,0.5s,1.0s,2.1s後の圧力分布図)

4 結論と今後の展望

解析結果から、本手法によりマウンド内の浸透流を含む流体の運動は安定して解くことができ、定性的に実験を模擬できたことを確認した。現在は、マウンドをDEMによりモデル化することで、土粒子の運動として洗掘現象を再現することを試みている。

5 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, 土木学会論文集 B2, Vol.69, No.2, pp.966-970, 2013.
- 2) 原崎健輔, 浅井光輝, 合田哲朗, 笠間清伸, 西浦泰介: SPH-DEM カップリング解析による防波堤マウンドのパイピング破壊解析, 土木学会論文集 A2, Vol.73, No.2, pp.295-304, 2017.
- 3) M.Asai, Aly, AM., Y. Sonoda and Y. Sakai: A stabilized incompressible SPH method by relaxing the density invariance condition, Int. J. for Applied Mathematics, Article ID 139583, 2012.
- 4) Hazarika, H., Nishimura, K. and Chaudhary, B.: Model testing on resilient solution for breakwater protection against tsunami. Japanese Geotechnical Society Special Publication, Vol. 3, No. 2, pp. 40-44, 2016.