

蛇籠補強を施した粘り強い防波堤設計のための ISPH-DEM 連成シミュレーション

九州大学大学院 学生会員 ○辻 勲平
 東京大学大学院 学生会員 竹崎 奏詠
 九州大学大学院 正会員 浅井 光輝
 九州大学大学院 正会員 ハザリカ ヘマンタ

1. 目的

2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う巨大な津波により、多くの防波堤が崩壊した。防波堤の崩壊要因として、(I) 防波堤ケーソンの前面と背面の水位差に起因する大きな水平力、(II) 防波堤の天端を越流する津波による洗掘、(III) ケーソン直下の浸透流による捨石マウンドの支持力低下及びパイピング破壊が影響すると考えられている。近年、金網に碎石などの礫材を充填した透水性を有する蛇籠を捨石マウンド上に設置した補強工法が注目され、ハザリカらの実験¹⁾によって洗掘低減効果が示された。本研究では安定化 ISPH 法²⁾と個別要素法 DEM を組み合わせた流体－地盤－剛体連成解析ツールを提案し、蛇籠補強を施した防波堤実験¹⁾に対応する数値実験を通して、提案手法の有効性を確認する。

2. 解析手法

(1) 流体の計算手法

津波は非圧縮性流体として扱い、解析手法として M. Asai et al.²⁾ が提案した安定化 ISPH 法を用いる。支配方程式には地表流と浸透流を間隙率 ε を介して統一的に記述した Darcy-Brinkman 型の統一方程式を採用した。

$$\frac{C_r(\varepsilon)}{\varepsilon} \frac{D\bar{\mathbf{v}}_f}{Dt} = -\frac{1}{\rho_f} \nabla P + \mathbf{g} + \nu_E(\varepsilon) \nabla^2 \bar{\mathbf{v}}_f$$

$$\begin{cases} -a(\varepsilon)\varepsilon\mathbf{v}_r - b(\varepsilon)\varepsilon^2|\mathbf{v}_r|\mathbf{v}_r & (\varepsilon < 0.8) \\ -c(\varepsilon)|\mathbf{v}_r|\mathbf{v}_r & (\varepsilon \geq 0.8) \end{cases} \quad (1)$$

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

ここで $P, \mathbf{g}, \rho_f, \mathbf{v}_f, \mathbf{v}_r, C_r$ はそれぞれ、圧力、重力加速度、流体密度、流体速度、仮想質量係数、有効粘性係数を表す（下付き添字 $_f$ は流体粒子）。 $\mathbf{v}_f, \rho_f$ はそれぞれダルシー流速、地盤中の見かけの密度であり、間隙率 ε を用いて、 $\bar{\mathbf{v}}_f = \varepsilon\mathbf{v}_f$ 、 $\bar{\rho}_f = \varepsilon\rho_f$ で示される。また、 a, b, c, ν_E は抵抗係数、粘性係数を示す。抵抗力項は流体と土粒子の相互作用力であり、相対速度 $\mathbf{v}_r = \mathbf{v}_f - \mathbf{v}_s$ （ $\mathbf{v}_f$ は流体の速度、 $\mathbf{v}_s$ は固体の速度）により相対的に評価する。

(2) 捨石マウンド、ケーソングロック、蛇籠の計算手法

捨石マウンド及びケーソングロック、蛇籠の挙動は個別要素法 DEM で表現する。この際、捨石マウンドは球形 DEM 粒子で表現した。接触解析にはバネ-ダッシュポットモデルを採用し、回転運動には凹凸形状の土粒子が持つ転がり抵抗を転がり摩擦 $\mathbf{m}_r$ で表現する。また、流体粒子の抵抗力の反作用として抗力 $\mathbf{f}_d$ を考慮した。一方、ケーソングロックと蛇籠はそれぞれ、不透水の剛体、透水性を有する剛体としてモデル化し、外力の評価には大きな違いがある。不透水の剛体であるケーソングロックは、従来の流体-剛体連成解析³⁾と同様の計算手法で挙動を追跡する。透水性を有した剛体である蛇籠については複数の DEM 粒子を結合した剛体としてモデル化し、抗力による流体力評価を行うことで蛇籠の持つ透水性を再現した。なお、個々の抗力 $\mathbf{f}_{d,i}$ から合力 $\mathbf{F}_d$ ・合トルク $\mathbf{M}_d$ を求め、以下の剛体計算を行う。

$$M \frac{d\mathbf{V}}{dt} = M\mathbf{g} + \mathbf{F}_c + \mathbf{F}_d \quad (3)$$

$$\frac{d(\mathbf{I}\boldsymbol{\Omega})}{dt} = \mathbf{M}_c + \mathbf{M}_d \quad (4)$$

$$\mathbf{F}_d = \sum_{i \in \text{gabion}} \mathbf{f}_{d,i} \quad (5)$$

$$\mathbf{M}_d = \sum_{i \in \text{gabion}} \mathbf{f}_{d,i} \times (\mathbf{x}_i - \mathbf{X}_g) \quad (6)$$

ここで、 $M, \mathbf{I}, \mathbf{V}, \boldsymbol{\Omega}, \mathbf{F}_c, \mathbf{M}_c$ はそれぞれ蛇籠の質量、慣性テンソル、速度、角速度、接触力、接触トルクを示す。また、 $\mathbf{x}_i, \mathbf{X}_g$ はそれぞれ i 粒子（ $\in \text{gabion}$ 、蛇籠を構成する DEM 粒子）の位置ベクトル、重心の位置ベクトルを表す。なお、剛体（ケーソン及び蛇籠）の回転運動に関しては、四元数（quaternion）を用いた計算を行った。

キーワード 防波堤、蛇籠、洗掘、浸透流、ISPH、DEM

連絡先 〒819-0395 福岡市西区元岡 744 W2-1102 構造解析学研究室 TEL 092-802-3370

3. 解析結果・まとめ

蛇籠による防波堤の捨石マウンド補強工法に関して、図-1 に示すモデルを作成し、数値シミュレーションを実施した。基礎地盤は変形しない多孔質領域として扱い、捨石マウンドの礫材のみを球形 DEM 粒子で表現した。今回は(a)無補強の場合、(b)蛇籠を設置した場合、(c)蛇籠の質量を仮に2倍にした場合の3 ケースの解析を実施した。図-2 に3つの解析結果の比較を示す。ここでは、解析コスト削減の観点から、ケーソンは固定壁境界とした。(a)無補強の場合、越流水が捨石マウンドに打ち込まれ、マウンドの大変形を伴う洗掘が確認できる。最終的に浸透流が捨石マウンドを貫通し、パイピング破壊に至った。(b)捨石マウンド上に蛇籠を設置した場合、越流初期は洗掘を防いだものの、越流水が蛇籠間の目地に直撃する場合は蛇籠が押し流された。その後はケーソン背面で洗掘が発生し、捨石マウンドの大変形が生じている。(c)蛇籠の質量を仮に2倍にした場合、若干の捨石マウンドの変形と、蛇籠の変位が生じたものの、洗掘を防ぎ、大きな破壊には至らなかった。

以上の数値実験から、蛇籠の被覆により洗掘防止し、

捨石マウンドの洗掘破壊を防ぐことが確認できた。なお、蛇籠が持つ透水性の定量的な評価、あるいは基礎地盤の変形まで考慮できておらず、定量的な比較検討はまだ実施していない。しかし、越流後には蛇籠の持つ洗掘低減効果までを定性的に表現できており、粘り強い防波堤の事前予測が可能なツールの基礎が開発できた。

参考文献

- 1) ハザリカ・ヘマンタラ：鋼矢板および蛇籠補強によるケーソン式防波堤の基礎補強工法の耐震挙動に関する基礎的研究，日本地震工学会論文集，Vol.12, No.13-1（特集号），2016.
- 2) Asai, M. et al.: A stabilized incompressible SPH method by relaxing the density invariance condition, Journal of Applied Mathematics, Vol.2012,2012.
- 3) Asai, M. et al. : Fluid-rigid body interaction simulations and validations using a coupled stabilized ISPH-DEM incorporated with the energy-tracking impulse method for multiple-body contacts, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 377, 113681, 2021

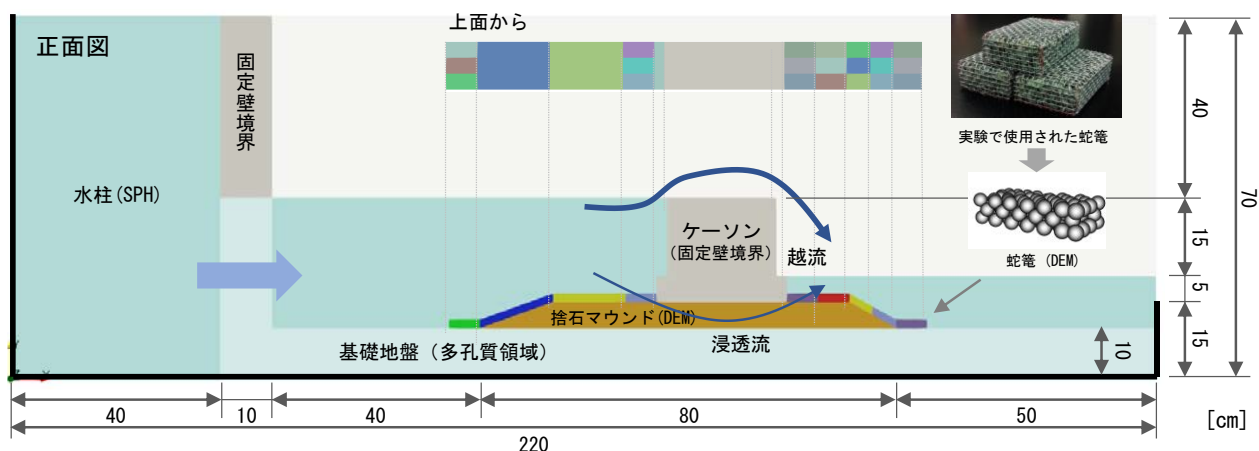


図-1 解析モデル(蛇籠補強を施した捨石マウンド)

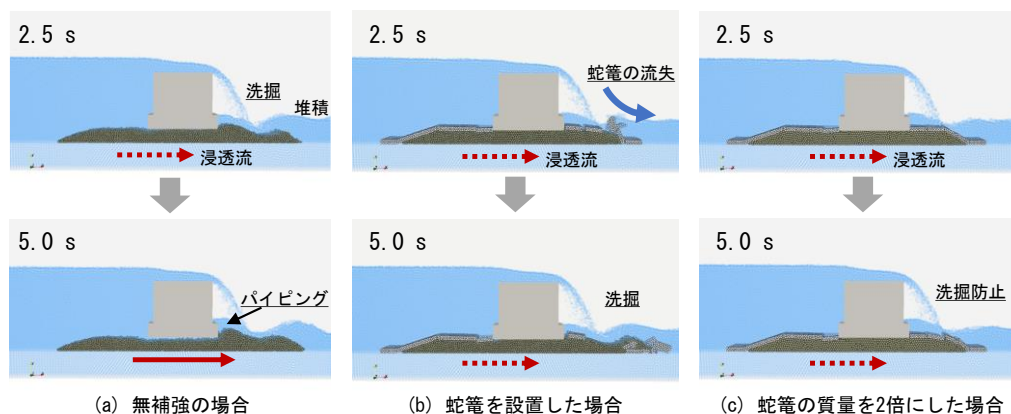


図-2 解析結果