

京都大学工学研究科	学生員	○鶴田 修己
京都大学工学研究科	正会員	五十里 洋行
京都大学工学研究科	正会員	原田 英治
京都大学工学研究科	正会員	後藤 仁志

## 1. はじめに

防波堤構造物の経済的施工・管理には、防波堤の被災機構の理解が重要である。本研究では、MPS 法<sup>1)</sup>において、新たな固相・液相相互作用モデルを導入し、開発したモデルによる数値シミュレーションを通して、被覆ブロック下部に配置される砕石マウンドを含む、被災機構の検討を行う。

## 2. 数値解析手法

### (1) DEM-MPS 法

MPS 法は、物理量を保持した多数の粒子が相互作用することで非圧縮流れを表現する手法である。粒子間距離に応じた、以下式の重み関数を導入することにより、流体の支配方程式を離散化する。

$$w(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1 & \text{for } r < r_e \\ 0 & \text{for } r_e \leq r \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 $r$ : 粒子間距離、 $r_e$ : 影響半径である。

本研究では、砕石配置領域における透水性を考慮するため、固相と液相を異なる離散空間にて解く、固相・液相オーバーラップ型のモデルを導入する。流れ場の計算には、固相・液相粒子の重複部体積占有率  $\phi$  に応じて固相の物理量を考慮した混相粒子を用いる。混相粒子が保持する各物理量は

$$\bar{\theta} = \theta_l (1 - \sum \phi) + \sum \theta_s \phi \quad (\theta = \mu, \rho) \quad (4)$$

$$\bar{\boldsymbol{u}}_l = (\boldsymbol{u}_s + \boldsymbol{r}_{sl} \times \boldsymbol{\omega}_s) \phi + \boldsymbol{u}_l (1 - \phi) \quad (5)$$

で決定される。ここに、 $\mu$ : 粘性係数、 $\rho$ : 密度、 $\boldsymbol{u}$ : 速度ベクトル、 $\boldsymbol{r}_{sl}$ : 固相・液相各粒子の相対位置ベクトル、 $\boldsymbol{\omega}_s$ : 固相粒子の回転角速度である。下付き添え字  $l, s$  はそれぞれ液相、固相を示す。混相流場の支配方程式は

$$\frac{D\bar{\rho}}{Dt} + \bar{\rho} \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{u}}_l = 0 \quad (6)$$

$$\bar{\rho} \frac{D\bar{\boldsymbol{u}}_l}{Dt} = -\nabla \bar{p} + \bar{\mu} \nabla^2 \bar{\boldsymbol{u}}_l + \bar{\rho} \boldsymbol{g} + \boldsymbol{F}_{int} \quad (7)$$

であり、固相の運動方程式は

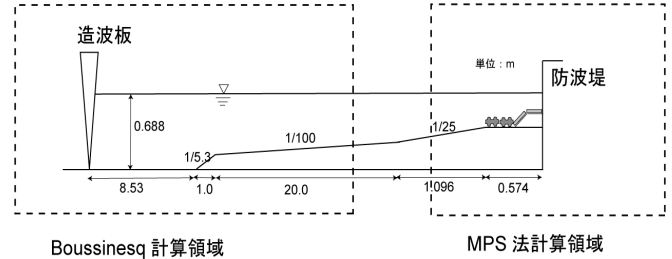


図-1 実験・数値シミュレーション概要

$$m_s \frac{d\boldsymbol{u}_s}{dt} = \int_V \left( \bar{\rho} \frac{D\bar{\boldsymbol{u}}_l}{Dt} - \boldsymbol{F}_{int} \right) dV + \boldsymbol{f}_{colp} \quad (8)$$

$$\boldsymbol{I} \frac{d\boldsymbol{\omega}_s}{dt} = \int_V \boldsymbol{r} \times \left( \bar{\rho} \frac{D\bar{\boldsymbol{u}}_l}{Dt} - \boldsymbol{F}_{int} \right) dV + \boldsymbol{T}_{colp} \quad (9)$$

である。ここに、 $t$ : 時間、 $p$ : 圧力、 $\boldsymbol{g}$ : 重力ベクトル、 $m$ : 固相粒子の質量、 $V$ : 固相粒子の体積、 $\boldsymbol{F}_{int}$ : 固相・液相間相互作用力ベクトル、 $\boldsymbol{f}_{colp}$ : 固相間衝突力ベクトル、 $\boldsymbol{I}$ : 慣性モーメント、 $\boldsymbol{r}$ : 固相・液相間各粒子の相対位置ベクトル、 $\boldsymbol{T}_{colp}$ : 固相間衝突に起因するトルクである。固相・液相間相互作用力ベクトルは

$$\boldsymbol{F}_{int} = \sum \frac{(\bar{\rho} \bar{\boldsymbol{u}}_l)^k - (\bar{\rho} \bar{\boldsymbol{u}}_l)^{k-1}}{\Delta t} \quad (10)$$

で与えられる。上付き添え字  $k$  は計算ステップ数を示す。

なお、MPS 法の計算には、Khayyer・後藤<sup>2)</sup>により提案された高精度粒子法(CMPS-HS 法)を用い、固相間衝突力にはバネ・ダッシュポットを用いた個別要素法を適用する。

### 3. 被覆ブロック群の耐波安定性評価

#### (1) 実験・数値シミュレーション概要

後藤ら<sup>3)</sup>による、防波堤模型を用いた造波水路による水理実験を対象に、開発したモデルを用いて数値シミュレーションを実施した。被覆ブロック群下部には砕石が配置され、ビーハイブブロックは二列配置される(図-1, 2 参照)。

本計算では、計算負荷を考慮して、後藤ら<sup>3)</sup>と同様に Boussinesq・MPS 法カップリングモデルを用いる(図-1 参照)。ビーハイブブロックおよび砕石は、その形状を再現するために複数の粒子を剛体連結した。砕石の形状は図に示す通り、2 種を設定し、同比率でランダムに配置した(図-3 参照)。

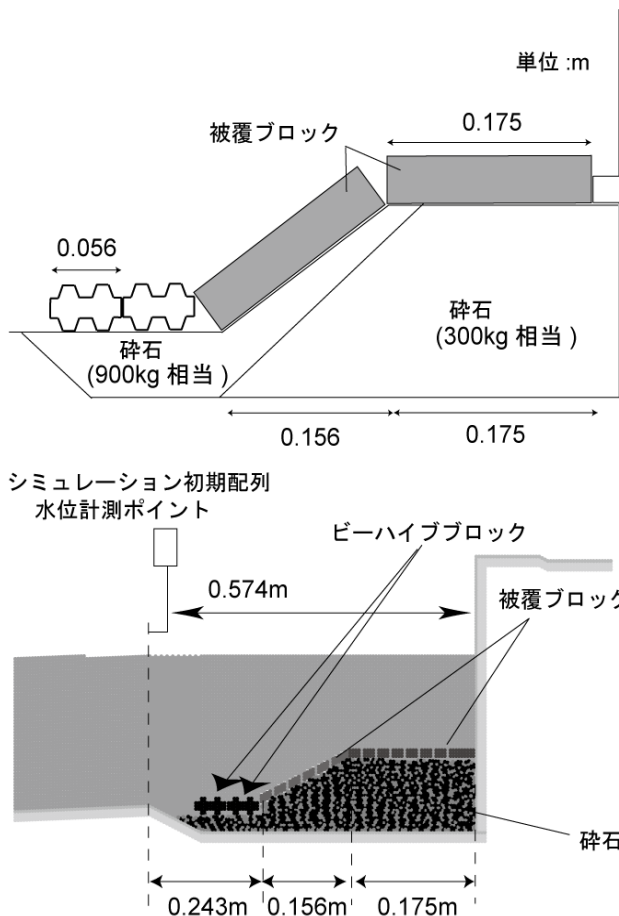


図-2 防波堤模型周辺拡大図

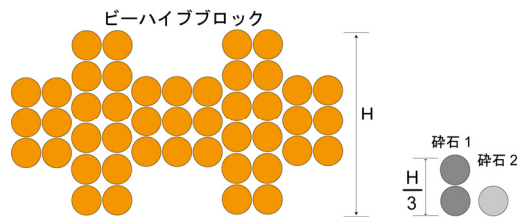


図-3 ビーハイブブロックと砕石の形状

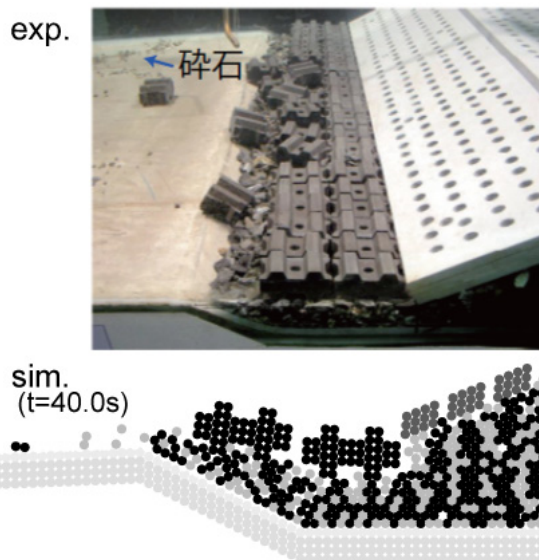


図-4 実験および計算の結果のスナップショット

(2) 実験および計算結果

図-4に実験および数値シミュレーション結果のスナップショットを示す。数値シミュレーション結果では、十分に時間が経過していないことから、実験結果と比較して被災状況は顕著でないが、沖側のビーハイブブロックが大きく変動している様子や砕石の離脱など、実験と酷似した被災の進行過程が確認された。

図-5に水位計測ポイントにおける水位と沖側のビーハイブブロックの時計回り方向の回転角の時系列のグラフを示す。ビーハイブブロックが、押し波・引き波に合わせて回転方向を変えながらも、徐々に回転角を増大させていく様子が見られ、砕石の潜り込みが理解できる。また、時間経過に伴う回転角変動の増大も確認された。

4. おわりに

本研究では、開発したオーバーラップ型 DEM-MPS モデルを用いて、被覆ブロックの被災過程を対象とした数値シミュレーションを実施し、被災機構を検討した。今後、モデルの再現性を高めて、より厳密なアプローチを図りたい。

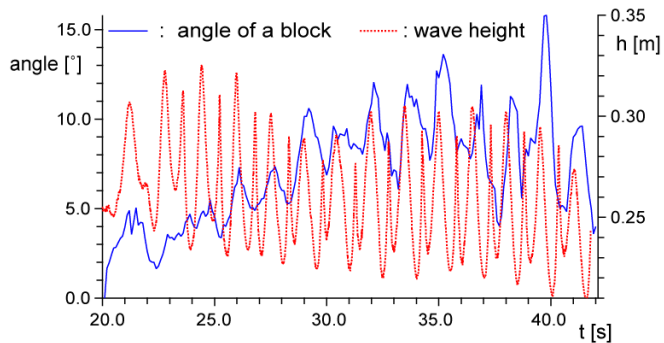


図-5 水位およびビーハイブブロックの回転角

参考文献

- 1) S. Koshizuka: a particle method for incompressible viscous flow with fluid fragmentation, J.Comp.Fluid Dyn.J., Vol.4, pp.29-46, 1995.
- 2) Khayyer A. and H.Gotoh: Modified Moving Particle Semi-implicit methods for the prediction of 2D wave impact pressure, Coastal Engineering, Vol.56(4), pp.419-440, 2008.
- 3) 後藤仁志, 原田英治, 五十里洋行, 大江一也, 安岡恒人: 粒子法と DEM の融合モデルによる被覆ブロック群の耐波安定性評価, 土木学会論文集 B, Vol.66 No.3, pp.258-267,2010.