

京都大学工学部	学生会員	○菅原康之
京都大学工学部	学生会員	中村 舞
京都大学工学研究科	正 会 員	後藤 仁志
京都大学工学研究科	正 会 員	五十里洋行

1. はじめに

粒子法の一つである MPS(Moving Particle Semi-implicit)法¹⁾は大変形を伴う多様な運動の解析が可能である。本研究では、後藤ら²⁾の粒子法型数値波動水槽により、高精度粒子法(MPS-HL-HS-GC 法)³⁾を用いた数値解析を行う。さらに、固相 - 液相相互作用項や侵食モデル⁴⁾の導入により、マウンド被覆ブロックの移動や海底地盤の洗掘を考慮した包括的なシミュレーションを行い、防波堤の津波に対する安定性をより詳細に検討する。

2. 数値解析手法

2.1 高精度粒子法

(1) 高精度生成 (High-order Source) 項

粒子数密度の定義に従って Poisson 方程式を実質微分することで、圧力擾乱を低減する。

$$(\nabla^2 p^{k+1})_i = -\frac{\rho}{n_0 \Delta t} \sum_{j \neq i} \frac{r_e}{|\mathbf{r}_{ij}^*|^3} (x_{ij}^* u_{ij}^* + y_{ij}^* v_{ij}^*) \quad (1)$$

ここで、 p :圧力、 ρ :密度、 n_0 :粒子数密度、 Δt :時間、 r_e :影響半径、 $|\mathbf{r}_{ij}|$:粒子 i, j 間の距離、 $\mathbf{x}_{ij}$:粒子 j の粒子 i に対する相対座標ベクトル、 $\mathbf{u}_{ij}$: 粒子 j の粒子 i に対する相対速度ベクトルである。

(2) 高次 Laplacian (High-order Laplacian) モデル

粒子 i における勾配の発散をとり、さらなる圧力擾乱の低減が可能な高次 Laplacian モデルを導出する。

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \nabla \cdot \langle \nabla \phi \rangle_i = \frac{1}{n_0} \sum_{j \neq i} \left(\frac{3\phi_{ij} r_e}{|\mathbf{r}_{ij}|^3} \right) \quad (2)$$

(3) 高精度勾配 (Gradient Correction) モデル

圧力勾配モデルの修正により、粒子配置が不均等の場合でも高精度に圧力勾配を評価できる。

$$\langle \nabla p \rangle_i = \frac{D_s}{n_0} \sum_{j \neq i} \frac{p_j - p_i}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} \mathbf{C}_{ij} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (3)$$

$$\mathbf{C}_{ij} = \begin{pmatrix} \sum_{j \neq i} V_{ij} \frac{w_{ij} x_{ij}^2}{|\mathbf{r}_{ij}|^2} & \sum_{j \neq i} V_{ij} \frac{w_{ij} x_{ij} y_{ij}}{|\mathbf{r}_{ij}|^2} \\ \sum_{j \neq i} V_{ij} \frac{w_{ij} x_{ij} y_{ij}}{|\mathbf{r}_{ij}|^2} & \sum_{j \neq i} V_{ij} \frac{w_{ij} y_{ij}^2}{|\mathbf{r}_{ij}|^2} \end{pmatrix}^{-1} V_{ij} = \frac{1}{\sum_{j \neq i} w_{ij}} \quad (4)$$

ここで、 D_s :次元数、 w :重み関数である。

2.2 透過型 DEM-MPS カップリングモデル

ケーソンに作用する波力を正確に評価するために、マウンドおよびブロック粒子と流体を別の解空間で解き、両者の相互作用を抗力型で記述する方法を用いる。

$$\mathbf{f}_m = \frac{n_w}{K_p} \bar{\mathbf{u}}_s + \frac{C_f n_w^2}{\sqrt{K_p}} \bar{\mathbf{u}}_s |\bar{\mathbf{u}}_s| \quad (5)$$

$$\mathbf{f}_b = \frac{1}{2} C_D \rho_l A_2 d^2 |\bar{\mathbf{u}}_l - \mathbf{u}_s| (\bar{\mathbf{u}}_l - \mathbf{u}_s) \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{f}_m$:捨石マウンド内の粒子に作用する固液相互作用項⁵⁾、 n_w :マウンドの間隙率、 K_p :固有透過度、 C_f :非線形抵抗係数、 $\bar{\mathbf{u}}_s$:ポーラス内部流速、 $\bar{\cdot}$:空間平均操作、 $\mathbf{f}_b$:消波ブロックおよび被覆ブロックに作用する流体抗力項、 C_D :抗力係数、 A_2 :粒子の2次元形状係数、 d :粒子径、 $\mathbf{u}$:速度(添え字 l, s はそれぞれ液相、固相)である。

2.3 侵食モデル

海底面の侵食過程は、土砂 flux と計算時間間隔の積を底面壁粒子1個の占める面積で割った値をその地点での沈下量とし、底面壁粒子を鉛直下方向にずらすことによって表現する。本モデルでは、洗掘を流体の底面せん断と水撃作用によって発生するものとし、底面

近傍流速を底面勾配に平行な成分と垂直な成分に分け、それぞれの値について漂砂量を算出する。

3. 計算結果

3.1 数値シミュレーションの概要

図-1 に計算領域を示す。解析に用いた数値波動水槽の縮尺は 1/10 であり、水粒子は左側の流入境界からの流入と、右側からの流出によって港外側と港内側の水位差を計算条件に合うように一定に保った。本研究ではケーソン、港内側の被覆ブロック、マウンド粒子は可動の DEM 粒子として扱った。港外側の被覆ブロック、マウンド粒子は固定粒子とした（図-2）。

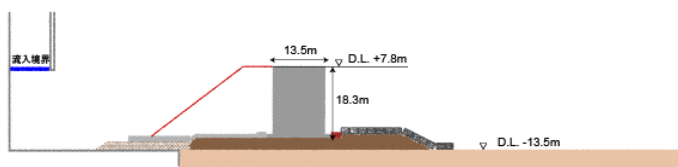


図-1 計算領域

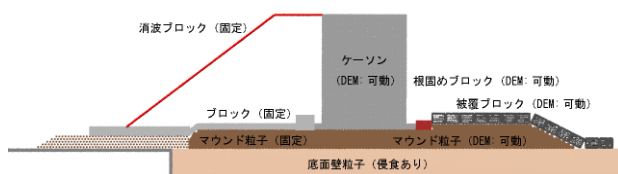


図-2 ケーソン式混成堤の詳細図

3.2 越流破壊解析

Case1) 図-3 に定常状態の流速分布を示す。図より、落下流はブロックの移動や海底地盤の侵食が起こるのに十分な深さまで達しておらず、本条件下では海底地盤の侵食や防波堤の破壊は起こらなかった。

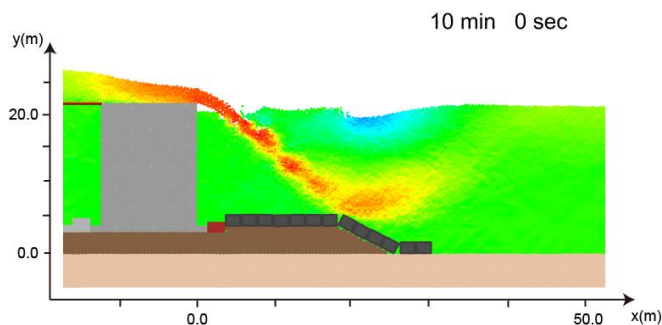


図-3 流速分布図

Case2) Case1 の計算条件よりも港外側と港内側の水位差が大きい津波の発生を想定して、水位差を Case1 の 3 倍にして防波堤の破壊の有無を調査した。図-4 に流速分布を示す。水中に到達した落下流がブロックを押

し上げて移動させ、海底地盤の侵食も発生している。20 分まで計算を行った段階では、マウンドの崩壊やケーソンの倒壊は見られていない。

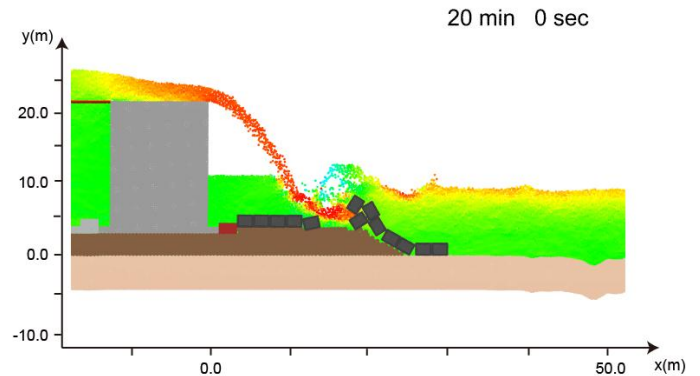


図-4 流速分布図

3. おわりに

本研究では、初めに想定した条件下では防波堤の安定性が確認できたが、港外側と港内側の水位差が大きくなるとブロックの移動や海底地盤の侵食が見られた。

今後は、津波条件を変更した場合のブロックの挙動や海底地盤の変形、防波堤の破壊の有無等をさらに調査し、防波堤の安定性をより詳細に検討していきたい。

参考文献

- 1) 越塚誠一：粒子法，日本計算工学会，2005.
- 2) 後藤仁志，五十里洋行，原口和靖，中島寿，殿最浩司，石井倫生：混成防波堤の越流破壊解析と対策工検討のための粒子法型数値波動水槽の開発，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.69，No.2，pp.I_881-I_885，2013.
- 3) Khayyer, A., H. Gotoh : Enhancement of stability and accuracy of the moving particle semi- implicit method, *J.Comp.Phys.*, Vol.230, No.8, pp.421-434, 1996.
- 4) 後藤仁志，五十里洋行，駒口友章，三島豊秋，吉年英文：粒子法による護岸背後地盤空洞形成過程の数値解析，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.66，No.1，pp.821-825，2010.
- 5) Ching-Jer Huang , Mao-Lin Shen, Hsing-Han Chang : Propagation of a solitary wave over rigid porous beds, *Ocean Engineering*, Vol35, pp1194-1202, 2008.