

被覆ブロック移動予測のための DEM-MPSハイブリッドモデルの提案

DEM-MPS model of solid-flow interaction for simulating behavior of armor blocks

後藤仁志¹・五十里洋行²・安岡恒人³・奥 謙介⁴

Hitoshi GOTOH, Hiroyuki IKARI, Tsunehito YASUOKA and Kensuke OKU

At a low crown caisson seawall with a large-size wave overtopping drainage, the pick-up of blocks on a caisson mound is one of the important issues. In a previous paper, it was conducted to predict the pick-up of blocks by using the C.E.R.C formula and the simulation by the MPS method, however, in order to predict more precisely, the movement of blocks should be tracked. Therefore, in this study, a simulation by the DEM-MPS hybrid model is carried out. In this model, fluid is calculated based on the MPS method and blocks are tracked by DEM. In a calculated result, blocks around the top of mound slope were picked up. This fact shows a good agreement with the hydraulic experiment.

1. はじめに

大型の越波排水路付低天端ケーソン護岸では、時化の際のマウンド表面の被覆ブロックの移動・剥離が大きな問題となっている。この種の護岸における越波形態は、ケーソン天端に乗り上げた越波水塊による落下流の存在が特徴的である。被覆ブロックの移動の原因を調査するためには、この落下流の存在下における被覆ブロック周辺の波浪場の流速変動を把握する必要があるが、ケーソン前面は、落下流に連行された多量の混入気泡が存在し、水理実験による流速の測定が困難である。また、被覆ブロックの移動・衝突による流速計の損壊も懸念される。したがって、被覆ブロックの移動に関する検討については、数値解析による議論が有効である。後藤ら (2006a) はMPS法 (Koshizukaら, 1995) を用い、有光ら (2007) はCADMAS-SURF (磯部ら, 1999) によって、それぞれこの種の護岸における波浪場の再現計算を行っている。被覆ブロックの移動に関しては、後藤ら (2007) が、MPS法を用いて固定床マウンド周辺の流速場を推定し、C.E.R.Cの式に基づいて被覆ブロックの移動の予測を試みたが、より高い精度で予測を行うためには、被覆ブロックの移動も計算すべきである。そこで、本研究では、移動物体の扱いの容易な粒子法の特性を生かして、被覆ブロックの移動を伴う場合の数値シミュレーションを実施する。

2. 水理実験と計算境界条件の改良

本研究で使用了実験装置は、後藤ら (2007) と同様の二次元造波水槽である。波高計および流速計の設置位

置も同様であり、入射条件も同様の沖波波高 $H=15.0\text{cm}$ 、 $T=1.9\text{s}$ の規則波である。図-1に、水理実験で記録されたビデオ映像の例を示す。水理実験で観測された被覆ブロックの捨石マウンド上からの移動過程は、主に法肩近辺のブロックが、1)来襲波の作用によって時計回りに捲れ上がり、2)反射波による戻り流れによって捨石マウンド法面上を滑るように沖側に移動し、3)マウンド法先のやや沖側に散乱するというものであった (図中の番号に対応)。ブロックが捲れ上がるための駆動力は、被覆ブロック表面 (上面) と裏面 (下面) の圧力勾配に起因すると思われる。したがって、駆動力の評価には捨石マウンド内の流体の圧力の解も必要である。しかし、従来の二次元MPS法を用いた場合は、被覆ブロック群を所定の位置に配置するためには、図-2の上図に示すように壁粒子をブロックの直下に配置しなくてはならず、マウンド内の圧力を計算することができない。そこで、本研究では、図-2の下図のようにマウンド内にも水粒子を配置し、ブロックを支えるためにマウンド天端をなぞるように配置された壁粒子およびブロック構成粒子と水粒子との間では、粒子間相互作用を行わないものとした。これにより、マウンド内への流体の流入・流出が可能となる。す

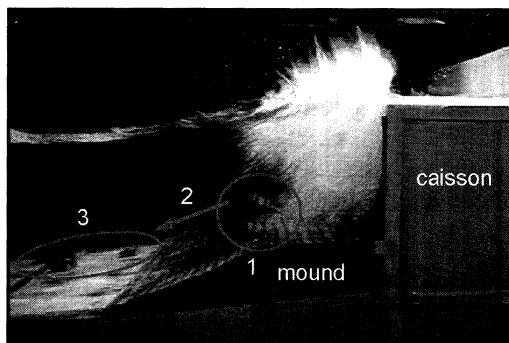


図-1 被覆ブロックの移動 (実験画像)

1 正 会 員 工博 京都大学教授 工学研究科都市環境工学専攻
2 正 会 員 工博 (株) ニュージェック
3 正 会 員 関西電力 (株) 電力技術研究所
4 (株) NTTドコモ関西

なわち、本研究では、五十里ら（2008）と同様に被覆ブロックの移動計算と流体計算を切り離し、両者の相互作用力の計算には、MPS法の標準的な粒子間相互作用ではなく、次章に示す間接的な取り扱いを適用した。

3. 数値解析の概要

(1) 流体解析

本研究では、後藤ら（2007）と同様に、MPS-Boussinesqカップリングモデル（後藤ら、2006b）を用い、MPS法を構造物周辺の領域に、計算負荷の比較的軽いBoussinesqモデルを水面変動の穏やかな沖側の領域に適用した。

Boussinesq方程式の基礎式は、分散特性を補正した修正Boussinesq方程式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ & - \nu_t \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q}{\partial y^2} \right) + \varepsilon P + \frac{f}{2D^2} P \sqrt{P^2 + Q^2} \\ & = \left(B + \frac{1}{3} \right) h^2 \left(\frac{\partial^3 P}{\partial x^2 \partial t} + \frac{\partial^3 Q}{\partial x \partial y \partial t} \right) \\ & + Bgh^3 \left(\frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial x \partial y^2} \right) \\ & + h \frac{\partial h}{\partial x} \left(\frac{1}{3} \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t} + \frac{1}{6} \frac{\partial^2 Q}{\partial y \partial t} \right) + h \frac{\partial h}{\partial y} \left(\frac{1}{6} \frac{\partial^2 Q}{\partial x \partial t} \right) \\ & + Bgh^2 \left\{ \frac{\partial h}{\partial x} \left(2 \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\partial^2 \eta}{\partial x \partial y} \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

である（ y 方向の運動方程式は省略）。ここに、 x, y ：平面座標、 t ：時間、 η ：水位、 P, Q ： x, y 方向の線流量、 g ：重力加速度、 D ：全水深（ $D=h+\eta$ ）、 f ：底面摩擦係数、 ν_t ：渦動粘性係数（碎波による乱れに起因する運動量混合を表現）、 ε ：エネルギー吸収帯の吸収係数、 B ：分散特性に関する補正係数（ $=1/15$ ）である（平山，2002）。

一方、MPS法で扱う流体粒子の運動方程式は、Navier-Stokes式

$$\rho_l \frac{Du_l}{Dt} = (-\nabla p_l + \rho_l \nu_l \nabla^2 u_l) + \rho_l g + \sigma \kappa \delta_s n + \delta_m F_m + \delta_{bl} F_{bl} \quad (3)$$

である。ここに、 ρ_l ：密度、 u_l ：流速ベクトル、 p_l ：圧力、 g ：重力加速度ベクトル、 ν_l ：動粘性係数、 δ ：表面張力係数、 κ ：表面曲率、 δ_s ：表面判定に関するデルタ関数、 n ：法線方向の単位ベクトル、 δ_m ：マウンド内粒子に関するデルタ関数、 F_m ：マウンド内の水粒子に与える付加的抗力、 δ_{bl} ：ブロックとの相互作用力に関するデルタ関数、 F_{bl} ：ブロックから与えられる抵抗力

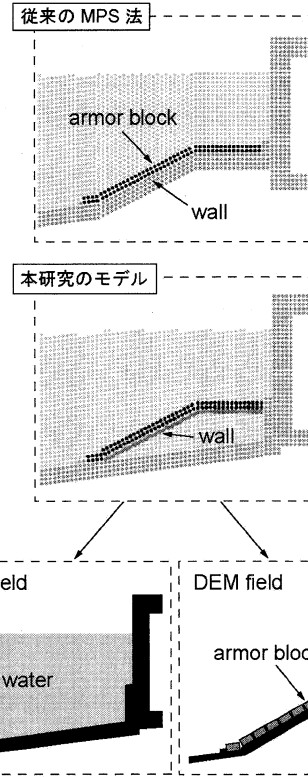


図-2 被覆ブロック周辺の境界条件の改良

（次節に後述）である。MPS法では、計算領域に多数の粒子（計算点）を配置し、個々の粒子の周囲に設定した影響域内での粒子間相互作用として基礎式の各項がモデル化される（越塚，2005）。

本研究では、捨石マウンドを透水層として扱い、マウンド内の水粒子には、後藤ら（1999）と同様に付加的な抗力を与えた。

$$F_m = -(1-\gamma_m) \frac{1}{2} \frac{C_{Dm}}{d_0} |\bar{u}_u| \bar{u}_{ii} \quad (4)$$

ここで、 $\bar{u}_u$ ：粒子近傍の局所平均流速ベクトル、 C_{Dm} ：抗力係数（ $=4.0$ ）、 γ_m ：捨石マウンドの空隙率（ $=0.4$ ）、 d_0 ：粒子径であり、抗力係数は、マウンド近傍の水面形が水理実験結果と一致するようにチューニング計算によって決定した。

(2) 被覆ブロックの移動追跡

a) ブロックの接触力の評価

本研究では、被覆ブロックを剛体と仮定し、複数個の固相粒子を剛体連結モデル（Koshizukaら，1998）によって連結させて構成する。ブロック間およびブロック-壁粒子間の接触力は、個別要素法（Cundallら，1979）と同様のバネ-ダッシュポットモデルによって評価する。ブロックに作用する接触力 f_{colp} は、ブロックを構成する粒子が個々に受けた接触力 f_{colpi} の和として計算される。

$$\mathbf{F}_m = -(1-\gamma_m) \frac{1}{2} \frac{C_{Dm}}{d_0} |\mathbf{u}_{li}| \mathbf{u}_{li} \quad (5)$$

ここに、 N_b ：ブロックを構成する固相粒子の個数である。ブロック構成粒子 i に作用する接触力ベクトル $\mathbf{f}_{colpi}$ は、以下のように書ける。

$$\mathbf{f}_{colpi} = \sum_j \{ \mathbf{f}_n(t) + \mathbf{f}_s(t) \}_j \quad (6)$$

$$\mathbf{f}_n(t) = -e_n(t) \frac{\Delta \xi_n}{|\Delta \xi_n|} + \mathbf{d}_n(t) \quad (7)$$

$$\mathbf{f}_s(t) = -e_s(t) \frac{\Delta \xi_s}{|\Delta \xi_s|} + \mathbf{d}_s(t) \quad (8)$$

$$e_n(t) = e_n(t - \Delta t) + k_n |\Delta \xi_n| \quad (9)$$

$$e_s(t) = e_s(t - \Delta t) + k_s |\Delta \xi_s| \quad (10)$$

$$\mathbf{d}_n(t) = \eta_n \cdot \Delta \xi_n / \Delta t \quad (11)$$

$$\mathbf{d}_s(t) = \eta_s \cdot \Delta \xi_s / \Delta t \quad (12)$$

$$\Delta \xi_n = \left(\Delta \xi \frac{\mathbf{r}_{ij}}{|\mathbf{r}_{ij}|} \right) \frac{\mathbf{r}_{ij}}{|\mathbf{r}_{ij}|} \quad (13)$$

$$\Delta \xi_s = \Delta \xi - \Delta \xi_n \quad (14)$$

ここに、 $\mathbf{f}_n$ 、 $\mathbf{f}_s$ ：固相粒子 ij 間の法線(添字 n)および接線(添字 s)方向の作用力ベクトル、 k_n 、 k_s ：弾性スプリング定数、 η_n 、 η_s ：粘性ダッシュポット係数、 e_n 、 e_s ：バネによる抗力、 $\mathbf{d}_n$ 、 $\mathbf{d}_s$ ：ダッシュポットによる抗力ベクトル、 $\Delta \xi_n$ 、 $\Delta \xi_s$ ：時間 Δt 間の変位ベクトル、 $\mathbf{r}_{ij}$ ：相対位置ベクトルである。なお、法線方向の引張りには抵抗しない。モデル定数(弾性バネ定数および粘性ダッシュポット定数)の設定は、田中ら(2007)の提案式を基に決定した。

$$k_n = \alpha_{kn} \frac{m}{\Delta t^2} ; k_s = \alpha_{ks} \frac{m}{\Delta t^2} \quad (15)$$

$$c_n = \alpha_{cn} \frac{m}{\Delta t} ; c_s = \alpha_{cs} \frac{m}{\Delta t} \quad (16)$$

ここに、 m ：質量、 α_{kn} 、 α_{cn} 、 α_{ks} 、 α_{cs} ：チューニングパラメータである。各パラメータの設定は、ブロック間衝突およびブロック-固定壁間衝突で異常反発が生じず、かつブロックの斜面滑動が生じない条件範囲の下に試行錯誤的に決定し、 $\alpha_{kn}=0.1$ 、 $\alpha_{cn}=5.0$ 、 $\alpha_{ks}=2.0$ 、 $\alpha_{cs}=5.0$ とした。計算時間間隔は、MPS法の0.1倍($\Delta t_{DEM}=0.1 \times \Delta t_{MPS}=0.0001s$)とした。

また、ブロックが接触力によって受ける重心周りのトルクは、

$$N_{colp} = \sum_{i=1}^{N_b} \mathbf{f}_{colpi} \times (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_G) \quad (17)$$

となる(ここに、 $\mathbf{r}_G$ ：ブロックの重心の位置ベクトル)。

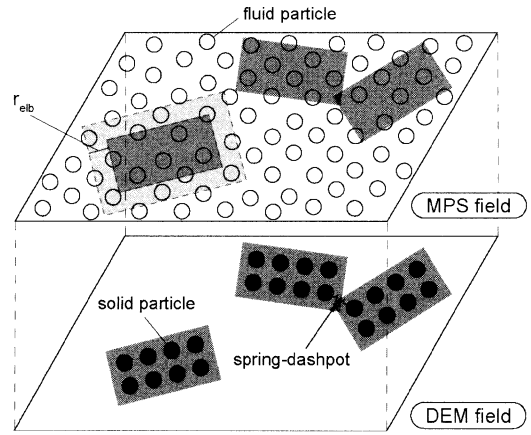


図-3 モデルの模式図

b) ブロックに作用する流体力の評価

ブロックに作用する流体力は、被覆ブロック周囲の水粒子の圧力積分によって評価するものとし、流体力 $\mathbf{f}_f$ は、ブロック表面に沿う幅 r_{eib} の領域(図-3の点線で囲まれる薄い灰色で示される領域)に存在する水粒子の圧力を用いて、

$$\mathbf{f}_f = - \int_S p \mathbf{n}_b dA = - \sum_{j=1}^{N_w} p_j d_0 \mathbf{n}_b = \sum_{j=1}^{N_w} \mathbf{f}_{jb} \quad (18)$$

と書ける。ここで、 $\mathbf{n}_b$ ：ブロック表面の法線方向ベクトル(外向きが正)、 dA ：ブロック表面の面積要素、 N_w ：ブロック表面近傍の水粒子の個数、 $\mathbf{f}_{jb}$ ：水粒子 j からブロックに与えられる力である。上述のパラメータ r_{eib} については、本来はブロック構成粒子に接する(粒子径程度の距離にある)粒子のみから力を受けるものとして、 $r_{eib}=d_0$ 程度の値を用いるべきであるが、MPS法特有の圧力擾乱に起因する数値不安定を回避するために、 $r_{eib}=4.0d_0$ として、空間平均的な操作を行うこととした。

ブロック周囲の圧力分布による重心周りのトルク N_f は、

$$N_f = \sum_{j=1}^{N_w} \mathbf{f}_{jb} \times \xi_{Gj} \quad (19)$$

と書ける。ここに、 ξ_{Gj} ：ブロックの重心を起点として、水粒子 j からブロック表面に下ろした垂線がブロックと交差する点に向かうベクトルである。

更に、ブロックと重なって存在する流体粒子には抗力が作用するものとし、抗力係数 C_{Db} (=1.0)を用いて以下のように与えた。

$$\mathbf{F}_{bt} = -(1-\gamma_b) \frac{1}{2} \frac{C_{Db}}{d_0} \mathbf{u}_{ijn} |\mathbf{u}_{ijn}| \quad (20)$$

ここに、 γ_b ：ブロックの空隙率(=0.2)、 $\mathbf{u}_{ijn}$ ：最も近傍のブロック構成粒子との相対速度のブロック表面法線方向成分である。ブロック構成粒子との粒子間距離が d_0 以

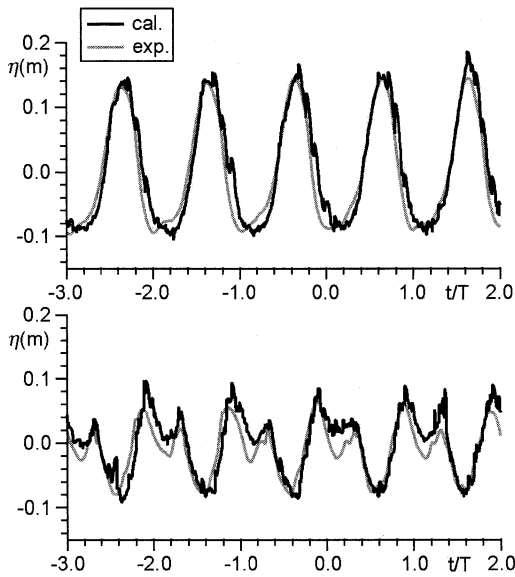


図-4 水位時系列(上H5-1, 下H5-2)

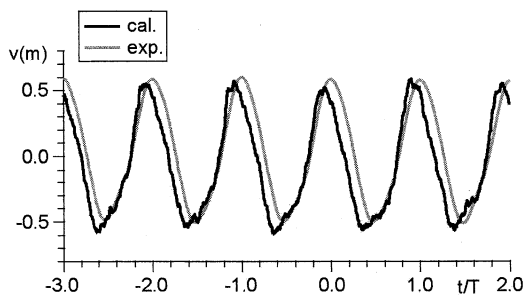


図-5 流速時系列(水平成分)

下の水粒子にのみ抵抗力を課した ($\delta_{bl}=1$).

以上をまとめると、ブロックの並進および回転の運動方程式は、

$$M \frac{du_b}{dt} = \alpha_b f_f + f_{colp} + Mg \quad (21)$$

$$I\omega = N_f + N_{colp} + N_g \quad (22)$$

と記述できる. ここに, M : ブロックの質量, I : ブロックの重心周りの慣性モーメント, ω : 角加速度ベクトル, N_g : 重力によるトルク, α_b : チューニングパラメータであり, 静水中で浮力が適正に与えられるように, $\alpha_b = 0.5$ とした.

4. 被覆ブロックの移動過程の数値解析

図-4に, 2箇所の計測地点(ケーソン前面より, H5-1: 1.75m 沖側, H5-2: 1.0m 沖側)における水位時系列を水理実験結果と併せて示す. 両者の対応は良好であり, 本モデルを導入しても水面形の再現性には問題はない. 図-5に, H5-2と同じ地点における流速時系列の一例を示

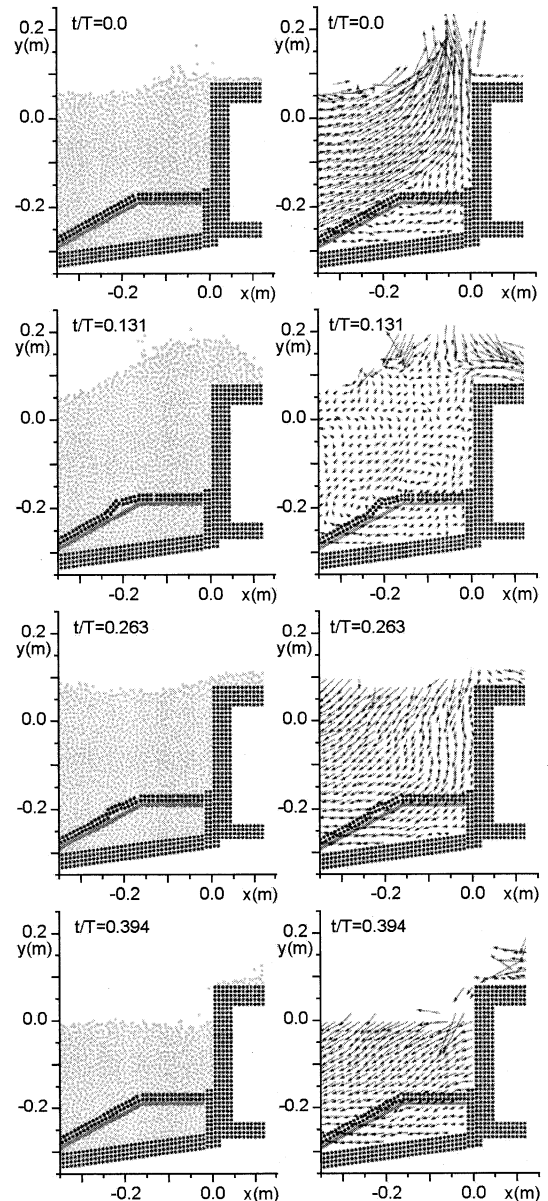


図-6 瞬間像(左)と流速ベクトル(右)

す. こちらも良好な対応を見せており, 流速場についても一定の再現性が得られている.

図-6に, ケーソン前面の瞬間像を流速ベクトル図とともに示す. 来襲波がケーソン前面に衝突後 ($t/T=0.0$), $t/T=0.131$ で法面上端のブロックが時計回りに回転し, 同時に, その下側のブロックが反時計回りに回転して浮上しようとしている. しかし, これらのブロックは, 最終的にはマウンドから剥離せず, $t/T=0.394$ で元の位置に復帰した. このように, 法肩近辺のブロックが移動するという点では, 水理実験と同様の傾向が示されたが,

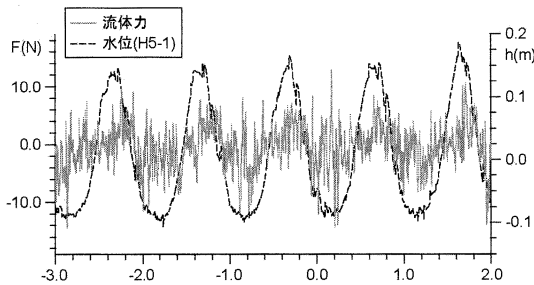


図-7 流速時系列

ブロックは沖側には移動せず、水理実験の完全な再現には至らなかった。その原因として、計算で推定された流体力の過小評価が考えられる。図-1の実験画像に示すように、水理実験では、来襲波のケーソン衝突時にはすでにブロックの回転が始まっており、衝突前に大きな流体力が作用していると推測される。図-7に、マウンド法肩の時計回りに回転したブロックに作用した流体力時系列を、図-4に示した水位時系列(H5-1)と併せて示す。波の押し引きに伴った変動が確認でき、また、計算でも来襲波の衝突前に流体力が上昇する傾向が確認できる。ただし、計算ではブロックが浮上するのは衝突後であり、これは、流速ベクトル図から推定すると、マウンドから流出する流れによる作用と思われる。

また、鉛直2次元モデルを使用したことによる被覆ブロックの運動自由度の制約も原因の一つと考えられる。本研究では、計算負荷を考慮して2次元モデルを採用した。ここで問題となるのは、2次元モデルと3次元モデルでの粒子配列の相違(例えば、後藤, 2004)である。例えば、規則配列を対象に接触状態にある周囲粒子数を考えると、2次元では4~6個であるのに対して、3次元では4~12個となり、3次元では個々の粒子の支持形態が多様性を有している。このように、2次元モデルは3次元モデルと比較して、個々の粒子の運動の自由度が低く、粒子の移動抵抗が大きい配列となっている。2次元モデル特有の運動の自由度の低さが原因となって、3次元では発生したブロックの移動を再現できなかった可能性がある。

5. おわりに

本研究では、被覆ブロックの移動予測シミュレーションに、DEM-MPSハイブリッドモデルを導入した。結果としては、水理実験と同様の箇所の被覆ブロックが移動

するものの、その挙動は完全には再現されなかった。ブロックに作用する流体力等をより詳細に調査するならば、モデルの3次元化は必須であるが、粒子法の計算負荷の高さを考慮すると、2次元モデルでもある程度のレベルまでの予測計算が実施できるツールを構築することは、実務的な面で重要であると考えられる。本研究で提案したハイブリッドモデルは、チューニング計算により経験的に決定しなければならないパラメータが少なくない。モデルの汎用性を向上させるために、今後多くの事例を通じてパラメータの指標を示したい。

参考文献

- 有光 剛・安岡恒人・川崎浩司(2007): 越波排水路を有する低天端護岸における越波現象に対する数値造波水路の適用性, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 726-730.
- 五十里洋行・後藤仁志(2008): 粒子法による水没柔軟植生の揺動現象の数値シミュレーション, 水工学論文集, 第52巻, pp. 973-978.
- 磯部雅彦・高橋重雄・余 錫平・榊山 勉・藤間功司・蔣 勤・秋山 実・大山洋志(1999): 数値波動水路耐波設計への適用に関する研究 -VOF法基本プログラムの作成-, 海洋開発論文集, 第15巻, pp. 321-326.
- 越塚誠一(2005): 粒子法, 丸善, p144.
- 後藤仁志・酒井哲郎・目見田哲・沖 和哉・林 稔(1999): 粒子法による直立護岸前面の碎波・越波過程の数値解析, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.46-50.
- 後藤仁志(2004): 数値流砂水理学, 森北出版, p223.
- 後藤仁志・五十里洋行・目見田哲・安岡恒人・望月貴文(2006a): 低天端護岸上部の大型排水路への越波過程に対する粒子法の適用性, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 701-706.
- 後藤仁志・五十里洋行・酒井哲郎・奥田一弘(2006b): 粒子法とBoussinesqモデルのハイブリッド化に関する基礎的研究, 水工学論文集, 第50巻, pp. 1453-1458.
- 後藤仁志・五十里洋行・村元茂則・安岡恒人・高橋和秀(2007): 大型越波排水路付護岸前面のブロック移動限界予測へのMPS法の応用, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 756-760.
- 田中正幸・酒井幹夫・越塚誠一(2007): 粒子ベース剛体シミュレーションと流体との連成, *Transactions of JSCEs*.
- 平山克也(2002): 非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究, 港湾空港技術研究所資料, No. 1036, 162p.
- Cundall, P. A. and O. D. L. Strack (1979): A discrete numerical model for granular assemblies, *Géotechnique*, 29, No.1, pp. 47-65.
- Koshizuka, S., H. Tamako and Y. Oka (1995): A particle method for incompressible viscous flow with fluid fragmentation, *Comp. Fluid Dyn. J.*, Vol.4, pp. 29-46.
- Koshizuka, S., A. Nobe and Y. Oka (1998): Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semi-implicit method, *Int. J. Numer. Mech. Fluids*, Vol.26, pp.751-769.