津波による防波堤捨石マウンドの変形問題 における流体抗力モデルに基づいたSPH-DEM カップリング解析の適用性

岩本 哲也¹・中瀬 仁¹・西浦 泰介²・鶴ヶ崎 和博³・宮本 順司³・
清野 純史⁴

¹正会員 東電設計(株) (〒135-0062 東京都江東区東雲1丁目7番12号KDX豊洲グランスクエア9階)
E-mail:t-iwamoto@tepsco.co.jp

²非会員 海洋研究開発機構(国) (〒236-0001神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25)
E-mail:nishiura@jamstec.go.jp

³正会員 東洋建設(株) (〒663-8142西宮市鳴尾浜1丁目25番1号)
E-mail:tsurugasaki-kazuhiro@toyo-const.co.jp

⁴正会員 京都大学大学院地球環境学堂
E-mail:kiyono.junji.5x@kyoto-u.ac.jp

2011年東北地方太平洋沖地震において、多くの防波堤が津波による被害を受けた。その被災メカニズムとしては、津波による大きな水平力だけでなく、越流後の流れによるマウンドの洗掘や、ケーソン下を流れる浸透流が、防波堤の安定性に影響したと考えられている。そこで本研究では、捨石マウンドにおける洗掘や浸透流を考慮するための手段として、流体抗力モデルに基づいたSPHとDEMのカップリング解析手法を提案し、その適用性について検討した。まず基礎的なシミュレーションを行い、理論値と比較することにより、カップリング解析手法の妥当性を検証した。次に、津波越流実験シミュレーションのパラメトリックスタディを実施し、砕石の形状に関するパラメータがマウンドの変形に与える影響について検討した。

Key Words : tsunami, scour, seepage flow, particle method

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震における津波によって、多くの防波堤が被害を受けた。被災した防波堤のなかには、既往の設計基準に基づいて、実際の津波高さに相当する波力をもとに算出された滑動安全率が1.2を上回っているにもかかわらず、ケーソンが大きく変形した事例もあり、津波による大きな水平力だけでなく防波堤の天端を越流した津波の打ち込みによるマウンドの洗掘や、ケーソン下の浸透流によるマウンドの支持力低下が影響したと考えられている。これを受けて、防波堤の耐津波設計ガイドラインにおいても、マウンドや海底地盤の洗掘の考慮という項目が新たに盛り込まれた¹⁾。被災した防波堤の復旧をする際の設計における洗掘対策の検討については、実験による確認および検証が主な手段であったが²⁾、より経済的で効果的な設計方法として数値解析手法の確立が期待されている。

防波堤の捨石マウンドなどの固体の大変形挙動を解析するための効果的な計算手法として、離散要素を取り扱う Discrete Element Method(DEM)³⁾が挙げられる。DEMは、メッシュベースの解析手法に比べると、比較的容易に大変形問題を取り扱うことが可能であるものの、計算コストが大きく大規模モデルの計算が難しいという欠点を有していた。しかしながら、近年では計算機ハードウェアの進歩や、GPGPUによる高速計算技術の発展⁴⁾によって、三次元解析による検討も可能になってきている。

津波を含む流体の数値解析については、メッシュベースの計算手法が主となって発展を遂げてきたが、近年では粒子法による検討⁵⁾も積極的に進められている。粒子法による流体解析では、厳密な境界条件の取り扱いが難しいという欠点などがあるものの、ラグランジアン記述であるため移流項を解く必要がなく、自由表面の追跡が容易というメリットもある。また粒子法は、DEMと同様メッシュを持たない計算手法であり、ペアとなる粒子

の探査が必要であることなど、DEM と計算過程が類似している点が多く、DEM と連成解析をする際に計算アルゴリズムの共有が可能である。

流体と固体の相互作用力を計算するカップリングモデルについては、実際に固体間隙中を流れるミクロな流速を考慮するモデルから、間隙を含む固体群全体を通過する際のマクロな流速のみを考慮するモデルまで、様々なモデルスケールが考えられる。本研究では、計算コストと実用性を勘案し、辻らの考え方⁷⁾を SPH 形式に拡張した⁹⁾固体間隙中の平均的な流れ場における相互作用力を抗力モデルに基づいて計算する方法を用いる。そして、津波越流時の防波堤における捨石マウンドの変形問題に対する、当該手法の適用性を検討することを本論文の目的とする。

2. SPH による定式化

(1) SPH 法の概要

SPH 法⁸⁹⁾とは粒子法的一种で、宇宙物理学における星雲の衝突や分裂などを解析する手法として提案された圧縮性流体の数値解析手法であるが、メッシュの作成が不要で大変形解析に対する適性が高いため、近年では自由表面を有する非圧縮性流体解析¹⁰⁾や固体力学の分野¹¹⁾にも応用されている。

SPH 法では、ある位置 r での物理量 $f(r)$ をカーネル近似と呼ばれる近似手法によって評価する。関数 $f(r)$ の近似 $\langle f(r) \rangle$ はカーネル関数 W 、平滑化距離(smoothing length)を h とすると次式によって表される。

$$\langle f(r) \rangle = \int f(r') W(r-r', h) dr' \quad (1)$$

対象粒子の中心から、 h と関連する一定の距離内（影響半径内）に含まれる粒子が、カーネル近似において考慮される。本論文ではカーネル関数 W として以下に示す Wendland カーネル¹²⁾を用いる。ここで、 r_{ab} は粒子 a と粒子 b の相対位置ベクトルを表している。

$$W_{ab} = \frac{21}{16\pi h^3} \left(1 - \frac{|r_{ab}|}{2h} \right)^4 \left(\frac{2|r_{ab}|}{h} + 1 \right) \quad 0 \leq |r_{ab}| \leq 2h \quad (2)$$

(2) 流体の支配方程式

間隙中において局所的に平均化¹³⁾した流れに対するナビエ・ストークス方程式は以下のとおりである。

$$\frac{D(\rho_f \varepsilon v_f)}{Dt} = -\varepsilon \nabla p + \varepsilon \mu \nabla^2 v_f + \varepsilon \rho_f g + \rho_f f_{fs} \quad (3)$$

ここで ρ_f は流体の密度、 ε は間隙率、 v_f は流体の速度、 D/Dt は時間についてのラグランジュ微分、 ∇ は勾配、

∇^2 はラプラシアン、 p は圧力、 μ は粘性係数、 g は重力加速度である。 f_{fs} は流体と固体の相互作用力を表す項であり、詳細は4章で後述する。

また同様に連続の式を以下に示す。

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon \rho_f v_f) = 0 \quad (4)$$

ここで間隙率 ε は、局所領域における流体の割合を意味する。

(3) 状態方程式

圧力を計算するために次式の状態方程式¹⁴⁾を用いる。密度の微小変化に対して大きな圧力を発生させることで、擬似的に非圧縮性を再現する。

$$p = B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0 \varepsilon} \right)^7 - 1 \right] \quad (5)$$

ここで B は流体の圧縮性を決める定数係数である。参照密度を $\rho_0 \varepsilon$ とすることで、SPH 粒子の密度が $\rho_0 \varepsilon$ に近い値となり、間隙率に応じて体積が変化することになる。この結果、固体間隙中を流れる SPH 粒子の体積保存性は担保される。なお、係数 B は対象とする問題の流速に応じて、圧縮性による影響を無視できる大きな値を設定する必要がある。本論文では 3.14×10^7 の値を用いた。

(4) 密度の再初期化

SPH による流体解析では、カーネル近似の誤差に伴う密度の誤差を補正するため、以下に示される密度の再初期化¹⁵⁾を実施する。

$$\rho_{anew} = \frac{\sum_b \rho_b W_{ab} \frac{m_b}{\rho_b}}{\sum_b W_{ab} \frac{m_b}{\rho_b}} \quad (6)$$

本検討では、前節で述べたように、間隙中の流体の体積保存性を満足させるために、間隙率に応じて密度を変化させている。したがって、実質的に密度が大きく異なる複数の相を SPH で解くことになるため、式(6)を多相流向けに修正する¹⁶⁾必要がある。

粒子 b の圧力 p_b は、参照密度 $\rho_0 \varepsilon_b$ を用いて次式で示される。

$$p_b = B \left[\left(\frac{\rho_b}{\rho_0 \varepsilon_b} \right)^7 - 1 \right] \quad (7)$$

一方で、この圧力 p_b は、参照密度 $\rho_0 \varepsilon_a$ とそれに対応する密度 ρ_b を用いて以下の式で示されることになる。

$$p_b = B \left[\left(\frac{\rho_b'}{\rho_0 \varepsilon_a} \right)^7 - 1 \right] \quad (8)$$

(7), (8)式より, 圧力 p_b が同値であるとき, ρ_b' は元の密度 ρ_b と間隙率を関連付けた以下の式で表される.

$$\rho_b' = \rho_b \left(\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_b} \right) \quad (9)$$

粒子 a の密度の再初期化をする際に, ペアとなる粒子 b の密度 ρ_b を(9)式の ρ_b' で置き換えることによって, 間隙率が異なる相を含むような領域におけるカーネル近似の誤差を抑制する.

3. DEMの概要

DEM³⁾は, 粒子間の距離の増減, および相対速度に比例するデバイスすなわちバネとダッシュポットを介して粒子間接触力を直接的に求める. すなわち, 図-1 に示されるような法線方向と接線方向のバネとダッシュポットによる力を足し合わせることで, DEM における粒子間接触力 F_c は与えられる. ここで, K_n, K_s はそれぞれ法線方向および接線方向のバネ定数であり, η_n, η_s はそれぞれ法線方向および接線方向の減衰係数である. 求めた接触力をもとに, 式(10)の運動方程式を各粒子について解くことで, 粒子群の運動を計算する. ここで, $\rho_{dem}, V_{dem}, v_{dem}$ はそれぞれ DEM 粒子の密度, 体積, 速度であり, F_d は流体との相互作用力項を表し詳細は4章に後述する. なお, 本論文では三次元解析を取り扱うため, 球の DEM 要素を用いる.

$$\rho_{dem} V_{dem} \frac{\partial v_{dem}}{\partial t} = \rho_{dem} V_{dem} g + F_c + F_d \quad (10)$$

4. SPH と DEM の相互作用力の概要

図-1 本研究で用いる接触モデル（接線方向力は, 法線方向の圧縮力が0以下になった時点で0とする）

マウンドを構成する捨石や消波ブロックの隙間には, その間隙率に応じて流体が浸透する. そこで, 捨石マウンドは DEM 粒子でモデル化し, 流体は SPH でモデル化する. この様な DEM 粒子と流体の相互作用力は, 辻らのモデル⁷⁾を SPH 形式に拡張⁸⁾して考慮する. すなわち, 間隙流によって生じる DEM 粒子と SPH 粒子の粒子流体間相互作用は, 以下に示す相関式で与える.

$$f_{fs} = \frac{\beta}{\rho_{sph}} (\bar{v}_{dem} - v_{sph}) \quad (11a)$$

$$\beta = \begin{cases} \frac{(1-\varepsilon)}{d_{dem} \varepsilon} \left[150 \frac{(1-\varepsilon)\mu}{d_{dem}} + 1.75 \rho_{sph} \varepsilon |v_{sph} - \bar{v}_{dem}| \right] & (\varepsilon \leq 0.8) \\ \frac{3}{4} \frac{\rho_{sph} \varepsilon (1-\varepsilon) |v_{sph} - \bar{v}_{dem}|}{d_{dem}} C_D \varepsilon^{-2.7} & (\varepsilon > 0.8) \end{cases} \quad (11b)$$

ここで, 流体抵抗係数は式(11b)で与え, 間隙率が 0.8 以下の領域に対しては上側の Ergun の式, 間隙率が 0.8 より大きい領域に対しては下側の Wen と Yu の式を用いた. d_{dem} は DEM 粒子の直径, ε は間隙率, C_D は単一球形粒子の抵抗係数を表す. 間隙率 ε は, それぞれの SPH 粒子について, 影響範囲内の体積から影響範囲内に含まれる DEM 粒子の体積を差し引くことにより求めた. また, 式中の「 $\bar{\quad}$ 」は, 範囲内にある DEM 粒子の物理量の平均をとることを意味する. この時, 平均化する範囲は SPH の影響半径内に存在する粒子を対象とした. この相互作用を式(3)に代入して解くことで間隙流体流れを SPH で計算することができる. 一方, DEM 粒子に働く間隙流体からの力は, 流体に働く作用 f_s の反作用と圧力による力 f_p の和として次式で与える. DEM 粒子周りの影響範囲内に存在する SPH 粒子に作用する粒子流体間相互作用力および圧力をそれぞれ平均化し, その合力を F_d として DEM 粒子に作用させる.

$$F_d = -\frac{V_{dem}}{1-\varepsilon} \overline{\rho_{sph} f_{fs}} + V_{dem} \overline{\rho_{sph} f_p} \quad (12)$$

式中の「 $\bar{\quad}$ 」は, 範囲内にある SPH 粒子の物理量の平均をとることを意味する. 上式第一項は式(11a)の反作用で, DEM 粒子周りの流れに伴う粘性抵抗と慣性抵抗による力を表す. 第二項は圧力による力で, 静水圧平衡状態においては浮力に対応する項であり, f_p は以下の式(13)で表される.

$$f_p = -\frac{\nabla p}{\rho_{sph}} \quad (13)$$

5. 透水試験シミュレーションによる検証

カップリング解析手法の検証のために、透水試験シミュレーションを実施する。間隙率が低い解析モデル条件となるため、ここでは粒子が密の場合における相互作用

図2 透水試験実験モデル

図3 透水試験解析モデル

表-1 透水試験解析パラメータ

DEM粒子径 d_{dm} (m)	$5.80 \times 10^{-3} \sim 7.70 \times 10^{-3}$
DEM粒子密度 ρ_{dm} (kg/m ³)	2.61×10^3
SPH粒子間隔(m)	6.67×10^{-3}
SPH粒子密度 ρ_{sph} (kg/m ³)	1.00×10^3
SPH影響半径(m)	粒子間隔 $\times 2.80$
透水距離(m)	0.200
奥行き(m)	0.080
粘性係数 μ (N/m ² ・sec)	1.00×10^{-3}
重力 g (m/sec ²)	9.81×70

図4 砕石の質量等価球半径分布とその回帰直線

力の妥当性が検証される。

解析モデルは、既実施の遠心場透水試験¹⁷⁾の模型寸法（図-2）を参考にし、粒子数節約のため紙面奥行き方向長さを0.08mとして、模型寸法で作成した。解析モデルと解析パラメータを図-3、表-1に示す。流体以外のSPH境界粒子はすべて座標を固定し、ノースリップ条件とした。

DEM粒子充填層モデルは、別途DEM粒子の自由落下によるパッキング解析を事前に実施することで作成した。

DEM解析では、粒径の最大値と最小値の差が大きいほど、粒子ペアを探索する際の計算コストが増大してしまう。そこで本検討におけるDEMの粒径分布については、図-4に示すように、まず抽出した砕石の質量と等価になるような球の粒径を求め、次にその質量等価粒径分布に対し最小二乗法による回帰直線を導出することによって決定した。

捨石マウンドの実際の間隙率はおよそ0.45であるが、DEM粒子は球形であるため、凹凸を含む捨石によって構成される充填層よりも間隙率が小さくなってしまう。そこで本検討では、間隙率を計算する際のDEMの体積に低減係数をかけ、DEM充填層の間隙率が概ね0.45に

図5 DEM充填層における流速-水位差関係

図6 DEM粒子充填層における間隙率の分布図

なるように補正し、実際の捨石マウンドの間隙率に基づいた相互作用力を疑似的に再現した。

解析結果の流速-水位差関係を図-5に示す。解析結果の流速値は、図-2に示した実験モデルの M2 点に対応する充填層の中心付近の領域にある SPH 粒子をモニターし、その速度の平均をとった。

解析結果の流速は、間隙率 0.45、粒子径 6.75mm における Ergun 式の流速と概ね一致している。解析結果の流速値には、ある程度の数値の乱れが見られるが、これは、解析における粒径には、5.80mm から 7.70mm の分布があることに加え、4章で述べたように解析における間隙率は、それぞれの SPH 粒子について影響範囲内にある DEM 粒子の体積を計算することにより求めているため、図-6に示すように、ある程度ばらつきがあることが一因であると考えられる。

図-7 単球落下解析モデル

表-2 単球落下解析パラメータ

DEM 粒子径 d_{dm} (m)	6.67×10^{-3}
DEM 粒子密度 ρ_{dm} (kg/m ³)	2.61×10^3
SPH 粒子間隔(m)	6.67×10^{-3}
SPH 粒子密度 ρ_{sph} (kg/m ³)	1.00×10^3
SPH 影響半径(m)	粒子間隔×2.80
奥行き (m)	0.080
粘性係数 μ (N/m ² ・sec)	1.00×10^{-3}
重力 g (m/sec ²)	9.81×70

6. 単球落下シミュレーションによる検証

前章に続き、カップリング解析手法の検証のために、水中における単球の落下シミュレーションを実施する。間隙率が極めて高い解析モデル条件となるため、ここでは粒子が疎な場合における相互作用力の妥当性が検証される。

単球が流体中を落下する際、重力と浮力と流体から受ける慣性力と粘性力が釣り合うことで、単球の落下速度は、ある一定の終端速度に到達する。水中における単球の落下速度が高いと、すなわちレイノルズ数が高く慣性力が粘性力に比べて卓越する場合だと終端速度は(14)式で示される。

$$v_{terminal} = \sqrt{\frac{4g}{3C_D} \left(\frac{\rho_{dm}}{\rho_f} - 1 \right) d_{dm}} \quad (14)$$

前章の遠心場における検討を踏襲し、70G 場において単球を水中で落下させる。解析モデルの概念図と解析条件を図-7、表-2にそれぞれ示す。

本解析条件における単球の終端速度は、(14)式より約 4.8m/sec となる。解析結果の単球速度の時刻歴を図-8に示す。

解析の終端速度は、理論値とほぼ一致しており、間隙率が高い領域における固体と流体の相互作用力が、本手法により適切に計算されていることが確認された。

図-8 DEM 粒子速度の時刻歴と終端速度の理論値

7. 津波越流実験の洗掘シミュレーション

遠心場における混成堤津波越流実験シミュレーションを実施し、津波越流時のマウンド変形問題における本手

法の適用性を検討する。

既実施の遠心場津波越流実験¹⁸⁾の模型寸法 (図-9) を参考にして作成した解析モデルを図-10に示す。今回の

検討では、港内側の腹付け工の変形に着目し、SPH 粒子で構成されるケーソンと、DEM 粒子で構成される港外側のマウンドについては座標を固定してモデル化した。こうしたモデルでは、ケーソンの自重がマウンド下の応力状態に考慮されないため、捨石マウンドの強度が適切に評価されないことになってしまうが、港内側の腹付近傍の応力状態および強度への影響は軽微であるものとして、検討を進める。基本的な解析パラメータは、5章の透水試験と同様とした。

本検討では、捨石一つを DEM 粒子一つでモデル化する。実際の捨石は、凹凸がある形状をしているため、全く同じ材料の球体と比較すると、その接触中の回転に伴う摩擦力はずっと大きなものになる。そこで、本検討では転がりに抵抗する力を発生させる、転がり摩擦¹⁹⁾を導入することで、捨石の形状に伴う摩擦力の再現を試みる。DEM の摩擦パラメータは、マウンド全体の強度を決定する重要なパラメータである。本来は、捨石材料の要素

図-9 津波越流実験防波堤モデル

図-10 津波越流実験防波堤解析モデル

表-3 津波越流実験解析の DEM の解析パラメータ

粒子間摩擦角(°)	30.0
転がり摩擦係数	0.05
反発係数	0.45
法線および接線ばね係数 K_n, K_s (N/m)	2.20×10^6

試験にフィッティングさせた DEM 摩擦パラメータを用いるのが望ましいが、今回は、既往の検討⁹⁾における実物大載荷実験を対象として、単球砕石モデルを用いて別途実施したパラメトリックスタディにより、捨石の強度を概ね再現できるであろうと考えられる表-3に示す経験的なパラメータを用いた。

実際の実験では津波の目標水位に到達するまでに 5 秒程度の時間を要しており、解析においても実験同様の水位変化の時刻歴を再現することが望ましいが、計算時間の都合により、解析モデルでは初期状態で港外側の目標水位を設定し、越流を作用させた。越流の再現性については、実験で計測されたケーソン上を流れるトレーサーの流速(右端 3m/sec 前後、左端 5m/sec 前後)、およびケーソン右端での水深(25mm 程度)が、解析でも概ね再現できていることにより確認した。

ところで Ergun 式では、(15)式に示されるように、球径 D_p に対して球形率 ϕ を乗ずることで、間隙中の圧力損失について砕石の凹凸を考慮する。これは、球に比べると凹凸がある砕石の方が、流体の流路が実質的に長くなり、より流体と固体の間の相互作用力が働くという考え方に基づいている。ここでの V_s は、固体と流体を合わせた全体のボリュームにおいて、流体が充填層を通過する際の見かけ上の流速を示している。

$$\nabla p = \frac{150 \mu (1-\varepsilon)^2 V_s}{\varepsilon^3 (\phi D_p)^2} + \frac{1.75 (1-\varepsilon) \rho V_s^2}{\varepsilon^3 \phi D_p} \quad (15)$$

そこで本検討では、抗力モデルにおける解析パラメータについて、粒径に乗ずる形で適用される球形率が 1.00、すなわち砕石が球であるとみなした解析ケースと、無作為にサンプリングした砕石の長径から求めた代替球形率 0.66 を用いた解析ケース、および球形率が 0.30 の解析ケースの計 3 ケースを実施した。解析開始後 1 秒後の時点でのマウンド変形の様子を図-11に示す。また、実験¹⁸⁾におけるマウンド洗掘の様子を示した写真を図-12に示す。

球形率が低いほど、越流の打ち込み箇所が集中的に洗掘を受ける傾向が見て取れる。これは、(15)式より、球形率が低下すると、同じ流速に対して発生する相互作用力が増大し、マウンドの透水性が低下するため、流れの作用が打ち込み部分に集中しやすくなるためであると考えられる。このことから、本手法で捨石マウンドの変形を評価するとき、捨石形状パラメータの考慮が重要であることが示された。

変形後のマウンドの形状について、実験結果¹⁸⁾の写真と解析結果を比較すると、解析結果ではケーソン下部左側において水みちのような空隙が見受けられた。これは、図-10に示したように、解析ではケーソンを空間に固定

してモデル化しているため、ケーソンの重量分の応力がマウンドに生じておらず、その摩擦強度が実験よりも低い場合、ケーソン下における流れの浸透力によって碎石が押し流されたものと考えられる。また、越流打ち込み部分の変形状況については、打ち込み部で洗掘を受けた DEM 粒子が、打ち込み部より紙面左方に盛り上がるように堆積する傾向にあり、マウンド変形のプロセスについて実験結果と定性的な類似性が確認された。これは、津波越流に伴う基礎捨石マウンドの変形問題を数値解析で取り扱うにあたって、本手法が適用性を有していることを示唆するものである。

8. まとめ

本研究では、捨石マウンドにおける洗掘や浸透流を考慮するための手段として、流体抗力モデルに基づいた SPH と DEM のカップリング解析手法を提案し、その適用性について検討した。

まず、透水試験シミュレーションと水中における単球落下シミュレーションを実施し、理論値と比較することにより、カップリング解析手法の妥当性を検証した。その結果、Ergun 式が適用される間隙率が低い領域と、Wen と Yu 式が適用される間隙率が高い領域の両方の条件下で、本手法が有効に機能することを定量的に示した。

次に、津波越流実験シミュレーションのパラメトリックスタディを実施し、抗力モデルにおける球形率パラメータの違いがマウンドの変形に与える影響について検討した。その結果、球形率が低い解析ケースの方が、そうでない解析ケースよりも、マウンドの越流打ち込み部分が集中的に洗掘を受ける結果となった。これは、球形率が小さいほど捨石マウンドの透水性が低下し、マウンドに対する流れの作用力が空間的に分散しにくくなるためである。このことから、越流時の捨石マウンドの変形を評価する際に、球形率すなわち捨石形状の解析上の考慮が重要となることが、定性的に確認された。また、解析結果と実験結果のマウンドの変形状況については、打ち込み部で洗掘を受けた DEM 粒子が、打ち込み部やや後方に盛り上がるように堆積するなど、その類似性が定性的に確認された。これは、津波越流に伴う基礎捨石マウンドの変形問題に対し、本手法が適用性を有していることを示唆するものである。

今後は、ケーソン下を流れる浸透流がマウンドの変形に与える影響についても分析を進め、マウンドやケーソンにおける DEM 摩擦パラメータや解析モデルの詳細化により、本手法の妥当性を定量的に検証していく予定である。

本手法を設計に用いるためには、様々な実験や実現象

図-11 解析における捨石マウンド変形の様子($t=1\text{sec}$)

図-12 実験¹⁸⁾における捨石マウンド変形の様子

に対して本手法を適用し、普遍的なパラメータやモデル化方針によって再現解析が可能であるかどうか検証を行う必要がある。また、どのような解析パラメータを用いれば設計において安全側の評価ができるのか、という観点からも検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局：防波堤の耐津波設計ガイドライン，pp.31-33，2013.
- 2) 国土交通省港湾局：2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波により被災した防波堤の復旧断面の検討事例，2013.
- 3) Cundall, P. A.: A Computer Model for Simulating Progressive, Large Scale Movement in Blocky Rocksystem, International Proceedings Symposium, ISRM, Vol.2, pp.129-136, 1971.
- 4) Nishiura, D. and Sakaguchi, H.: Parallel-vector algorithms for particle simulations on shared-memory multiprocessors, Journal of Computational Physics, Vol.230, pp.1923-1938, 2011.
- 5) 岩本哲也，中瀬仁，西浦泰介，東山和博，菅野高弘，八尋明彦：GPGPUを用いたSPH-DEMカップリング解析による津波越流実験の再現計算，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.70, No.4（地震工学論文集第33巻），I_295-I_303, 2014.
- 6) 浅井 光輝：大規模粒子法解析の津波防災への応用，京都大学計算科学ユニット 第 11 回研究交流会「固体・流体の計算力学」，2014.
- 7) Tsuji, Y., Kawaguchi, T. and Tanaka, T.: Discrete particle simulation of two-dimensional fluidized bed, Powder Technology, Vol.77, pp.79-87, 1993.
- 8) Gingold, R. A. and Monaghan, J. J.: Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars, Monthly Notes of Royal Astronomical Society, Vol.181, pp.375-389, 1977.
- 9) Lucy, L. B.: A numerical approach to the testing of the fission hypothesis, The Astronomical Journal, Vol.82, No.12, pp.1013-1024, 1977.
- 10) 小野祐輔，岩本哲也，Scawthorn, C.: SPH シミュレーションに基づく液体貯蔵タンクの固定式屋根に作用するスロッシング荷重の評価，応用力学論文集, Vol. 10, pp. 623-630, 2007.
- 11) 岩本哲也，小野祐輔：弾性波伝播問題に対する粒子法の適用性，応用力学論文集, Vol. 12, pp. 611-622, 2009.
- 12) H.Wendland: Piecewise polynomial, positive definite and compactly supported radial functions of minimal degree, Advances in Computational Mathematics, Vol.4, pp.389-396, 1995.
- 13) T. B. Anderson, Roy Jackson: Fluid Mechanical Description of Fluidized Beds. equations of motion. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals 6, pp.527-539, 1967.
- 14) MONAGHAN, J.: Simulating free surface flows with SPH. Journal of Computational Physics 110, 2 399-406 1994.
- 15) Colagrossi, A. and M. Landrini.: Numerical simulation of interfacial flows by smoothed particle hydrodynamics. Journal of Computational Physics, 448-475, 2003.
- 16) Z.Chen, Z. Zong, M.B. Liu, L.Zou, H.T.Li, C.Shu: An SPH model for multiphase flows with complex interfaces and large density differences, Journal of Computational Physics, 283, 169-188, 2015.
- 17) 宮本順司，鶴ヶ崎和博，岩本哲也，中瀬仁：津波越流時のケーソン天端流速とマウンド内流速に関する遠心模型実験，第 70 回土木学会全国大会，III-171，2015.
- 18) 鶴ヶ崎和博，宮本順司，岩本哲也，中瀬仁：津波による防波堤挙動に関する遠心模型実験，第 50 回地盤工学研究発表会，1105，2015.
- 19) Sakaguchi, H., Ozaki, E., Igarashi, T.: Plugging of the flow of the granular materials during the discharge from a silo. Int. J. Mod. Phys. 7, 1949-1963, 1993

(2015. 6. 23 受付)

APPLICATION OF DRAG MODEL ON SPH-DEM COUPLING ANALYSIS METHOD FOR THE FAILURE SIMULATION OF RUBBLE MOUND FOUNDATION AT A CAISSON BREAKWATER DURING TSUNAMI

Tetsuya IWAMOTO, Hitoshi NAKASE, Daisuke NISHIURA,
Kazuhiro TSURUGASAKI, Junji MIYAMOTO, Junji KIYONO

In the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, caisson breakwaters in several ports were damaged by the tsunami. According to the actual damage examples of the breakwater after the tsunami, it is considered that these failures were caused by not only horizontal large tsunami force, but also scouring destruction of foundation mound due to the tsunami overflow. In this paper, SPH-DEM coupling analysis method which is based on drag model is employed in order to analyze scouring and seepage flow phenomena at caisson breakwater during tsunami. Firstly, basic numerical tests are conducted to verify the coupling analysis method to calculate the interaction force between SPH and DEM. Secondly, parametric studies of the simulation on the tsunami overflow experiment are carried out to check the effect of the numerical parameter to express pore water flow influenced by rubble shape.