

被圧海底地盤の流動化による護岸前面の捨石群端部の沈下過程

酒井 哲 郎* ・ 後 藤 仁 志** ・ 原 田 英 治***
井 元 康 文**** ・ 大 野 正 博*****

波浪による海底地盤の液状化によって、地盤支持力が低下し、護岸や防波堤の堤脚部に設置された侵食防止のためのブロック群や捨石群が沈下・埋没する被災事例が報告されている。本稿では、耐圧式砂層水槽による水理実験と個別要素法に基づく数値シミュレーションの双方から、液状化による砂地盤の支持力低下がもたらす捨石群の沈下・埋没に伴う変形過程を詳細に検討する。特に、捨石群端部の被覆形状の違いが沈下・埋没に及ぼす影響に着目し、個別要素法が離散型の数値モデルであることの利点を活かして、実験では把握することが困難な捨石群の変形過程の内部構造を、個々の捨石間の作用力を通じて計算力学的に検討する。

1. 緒 言

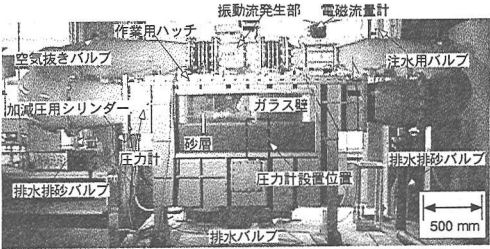
護岸や防波堤の被災の主要な原因の一つに堤脚部に設置された侵食防止のためのブロック群あるいは捨石群の沈下があり、沈下機構の一つとして海底地盤の波浪による液状化が挙げられている。捨石の沈下は、個々の捨石の設置位置での周辺の捨石との接触状況に大きく影響されるので、被災プロセスを明らかにするためには、捨石の接触および配列を考慮した、捨石群としての変形特性の把握が不可欠である。これまで、変動水圧場における単一ブロックの沈下過程の研究は多く存在するが（例えば、名合ら, 1991）、群としての挙動に着目した研究は少ない。そこで、酒井ら（2002）は、護岸に沿う方向に一樣な配列構造を有する標準断面を対象に、海底地盤の液状化による捨石群の沈下過程を検討した。護岸に沿う方向に一樣な配列構造を有する場合には、変形は護岸に直行する方向に卓越し、捨石間の接触力構造も護岸に沿う方向に一樣となって、比較的単純な構造となる。それ故、変形の集中が緩和され、捨石の局所的な崩落に代表される短時間の大変形も生じ難くなる。これに対して、端部では、捨石配列構造の空間的变化が大きいため、変形の集中を生じ易く、捨石の局所的な崩落を誘発して、捨石マウンド全体の変形抵抗を低下させる可能性が危惧される。

以上の点に鑑みて、特に、捨石群端部の形状に注目し、本研究では、昨年度実施した海底地盤の液状化による護岸前面捨石群の沈下過程の検討と同様に、耐圧式砂層水槽による作用水圧の周期的変動下における水理実験と、個別要素法に基づく数値シミュレーションを併用して、液状化に起因する砂地盤の支持力低下がもたらす捨石群の沈下・埋没に伴う変形過程を検討する。また、昨年度のシミュレーションにおける課題であった砂粒子運動の

解像度の低さの問題（比較的大きい粒子によって構成された砂粒子層が捨石接地点周囲の砂層の運動を制約し、砂層全体の流動性を低下されるという問題）に対して、砂粒径を細かくし改善を図った。さらに、実験では計測が困難である捨石群の変形・沈下過程における個々の捨石に作用する接触力を数値的に評価し、捨石群の変形過程の内部構造も検討した。

2. 実験装置・実験方法

実験は、図—1 に示す水圧制御用のシリンダー付きの振動流装置（酒井ら, 1994）を用いて実施した。この装置は、密閉型の耐圧式砂層水槽に振動流発生用のプロペラ付閉管路と水圧変動発生用の油圧式シリンダーを取り付けたもので、水圧変動・振動流共存場における砂地盤の挙動を再現できるが、本研究では、水圧制御シリンダーのみを使って、耐圧式砂層水槽内に配置した捨石群の沈下・埋没に伴う変形過程の実験を実施した。実験に用いた砂粒子は、粒径 $d=0.25\text{ mm}$ 、比重 2.65 の均一砂を敷きならした砂面上に粒径 $D=25.0\text{ mm}$ 、比重 2.33 のガラス球を細密状態で積上げてマウンドを形成し、周期 4.0 秒、全振幅 2.5 mAq の水圧振動を繰り返し作用させて、ガラス球マウンドの変形を CCD デジタルビデオカメラで撮影した。マウンドの背面は鉛直壁に接しており、マウンドの一方の端部には角錐状に球を連結したサポート部を設けた。図—2 に実験および後述のシミュレーションで用いたガラス球マウンドの配列を示す。なお、



図—1 実験装置

* フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科都市環境工学専攻
** 正 会 員 工博 京都大学助教授 工学研究科都市環境工学専攻
*** 正 会 員 工博 京都大学助手 工学研究科都市社会工学専攻
**** ジェイティービー(株)
***** 学生会員 京都大学大学院 工学研究科土木工学専攻

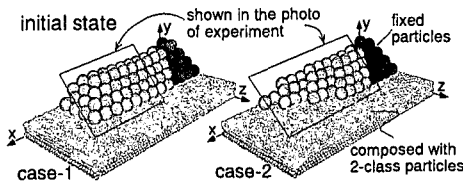


図-2 マウンドの初期配列

マウンド端部の形状の違いが沈下・変形過程に及ぼす効果を論じるため、case-1, 2の2ケースの実験を実施した。ガラス球のマウンドの上部には、45°に傾斜した鏡を設置して、マウンドを正面から撮影し、正面および上方からのマウンドの変形を同時に記録した。なお、砂層の側壁に埋め込んだ間隙水圧計を用いて計測した地盤内間隙水圧分布によって減圧位相で瞬間的液状化が発生する条件が満足されていることは、別途確認している。

3. シミュレーションの概要

計算には、剛体連結モジュール(Koshizuka ら, 1998)を組み込んだ拡張型の3次元個別要素法を基礎としたモデル(後藤ら, 2002)を用いた。粒子間接触力を駆動力とする個々の粒子(砂地盤構成粒子およびガラス球粒子)の運動は、球の並進および回転の運動方程式

$$\ddot{x}_i = \frac{F_{xi}}{M_i} - g \quad (1)$$

$$\ddot{\phi}_i = \frac{T_{xi}}{I_i} \quad (2)$$

$$M_i = \frac{\sigma \pi d_i^3}{6}; I_i = \frac{\sigma \pi d_i^5}{60} \quad (3)$$

を解いて追跡される。ここに、 x_i, ϕ_i : グローバル座標系 x 軸上での粒子 i の位置と回転角, F_{xi} : グローバル座標系 x 軸上での粒子間接触力, M_i : 粒子 i の質量, T_{xi} : グローバル座標系 x 軸上での粒子間作用モーメント, I_i : 粒子 i の慣性モーメント, g : 重力加速度ベクトル, σ : 粒子の密度である。粒子間接触力は、2粒子間接平面の法線方向および接平面内に規定したローカル座標系において、バネ-ダッシュポットシステムを配置したモデルにより評価する。粒子運動はグローバル座標系で追跡され、粒子間接触が生じると接触力の評価がローカル座標系で行われる。個別要素法で使用したモデル定数は、後藤ら(2001)の設定法に準じて、個別要素法で用いる計算時間ステップ $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4}$ s に対して、法線および接線方向のバネ定数および粘性定数をそれぞれ $k_n = 0.814 \times 10^2$ N/s, $k_s = 0.203 \times 10^2$ N/s, $\eta_n = 0.733$ Ns/m, $\eta_s = 0.366$ Ns/m に設定した。なお、本計算では要素間の接触面に生じる法線方向まわりの回転に対するねじりモーメントは考慮していない。

マウンドの片方の端部のサポート部(実験では、ガラス球を接着剤で固定して形成)は、Koshizuka ら(1998)の移動剛体モデルを用いて剛体挙動させる。計算手順は、始めに、粒子間に特別な連結関係が無い条件で、全粒子の運動を個別要素法で追跡し、その後、サポート部構成粒子に対しては、移動剛体モデルを用いて初期の相対位置関係が保存されるように座標修正計算を行う。なお、座標修正計算は以下の通りである。まず、サポート部構成粒子の時刻 $t + \Delta t$ での仮速度と仮座標より重心座標 r_g と重心座標での並進速度ベクトル T , 重心回りでの角速度ベクトル R を算定する。

$$T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \quad (4)$$

$$R = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^N u_i \times (r_i - r_g) \quad (5)$$

$$r_g = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i; I = \sum_{i=1}^N |r_i - r_g|^2 \quad (6)$$

ここに、 I : サポート部構成粒子の重心周りの慣性モーメント, N : サポート部構成粒子の総数である。次に、並進速度ベクトル, 角速度ベクトルを用いて、剛体的挙動を満足するためのサポート部の構成粒子 i の移動速度

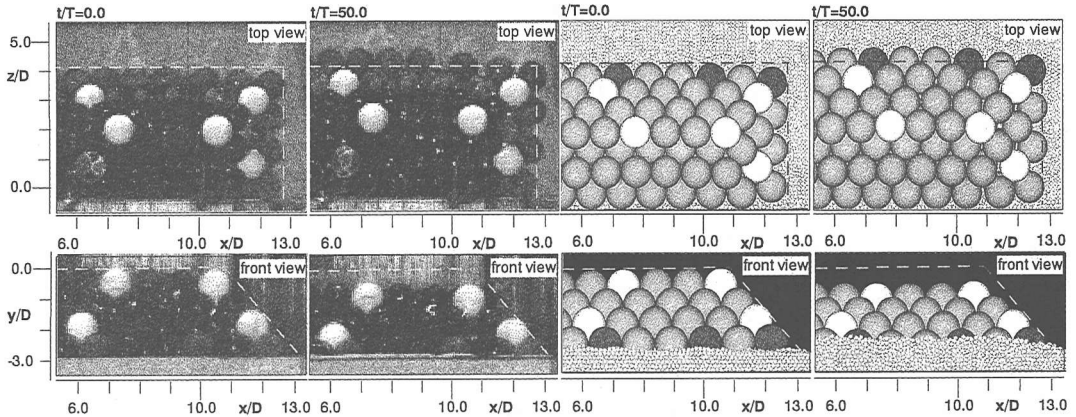
$$\tilde{u}_i = T + (r_i - r_g) \times R \quad (7)$$

を求める。そして、これを用いてサポート部の構成粒子 i の座標は、

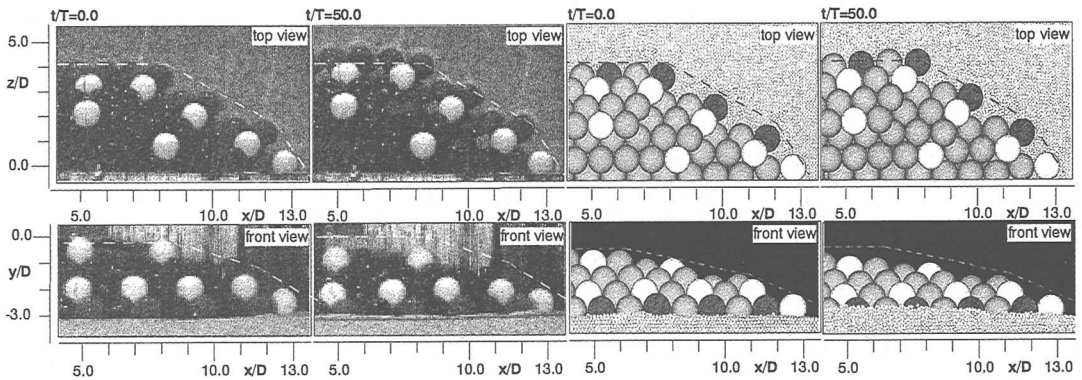
$$r_i(t + \Delta t) = r_i(t) + \tilde{u}_i \Delta t \quad (8)$$

と修正される。このように、個別要素法による全粒子の座標の更新が行われる度に、サポート部構成粒子に座標修正を施すといった一連のプロセスが計算時間刻み毎に行われ、砂粒子およびガラス球粒子とサポート部の相互作用を考慮したガラス球マウンドの沈下・変形過程が追跡される。

ガラス球の直径・比重および配列は、実験と同様に設定し、砂地盤については、粒径 $d = D/4$ ($= 6.25$ mm) の砂粒子から成る厚さ 27.0 mm の砂層の上部に粒径 $d = D/8$ mm ($= 3.125$ mm) の砂粒子から成る厚さ 23.0 mm の砂層を数層重ねて、重力の作用下でパッキングして安定した配列を初期条件とした。2種類の粒径を用いたのは、粒子数を少なくして計算効率を向上させつつも砂層表層の流動性を確保するためである。なお、側壁は、粒径 $d_{wall} = D/8$ の粒子を約半粒径重ねて配置し、約 $0.07 d_{wall}$ 程度の凹凸を有する。対象計算領域内の総粒子数は約 $67,000$ 個である。さらに、マウンドの有意な沈下の発生は地盤の液状化が生じる位相に限定されるから、計算の効率化のため、表層近傍の砂粒子に対して地盤の液状化による有効応力の急減に相当する見かけの揚力



図—3 マウンド端部の変形・沈下過程 case-1 (左：実験, 右：シミュレーション)



図—4 マウンド端部の変形・沈下過程 case-2 (左：実験, 右：シミュレーション)

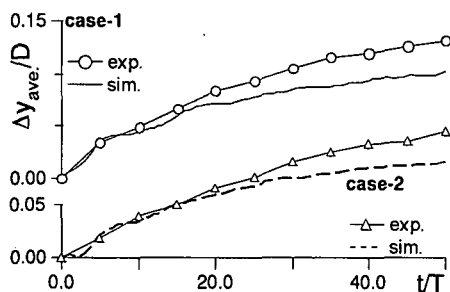
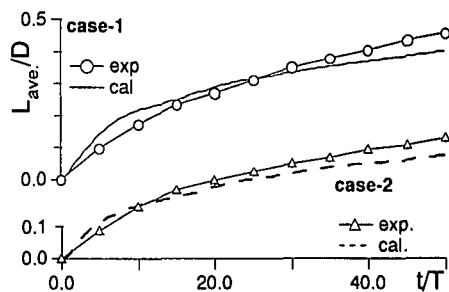
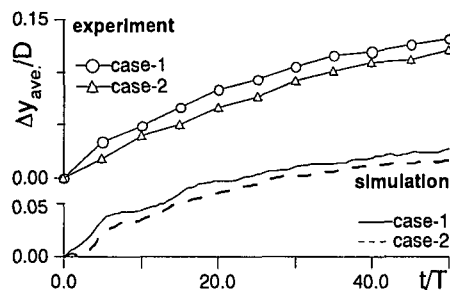
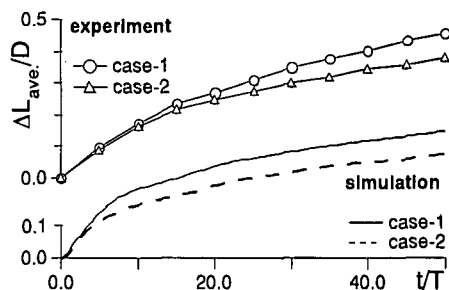
(重力と等大で重力を打ち消す向きに作用) の載荷・除荷を反復する簡便な方法によってマウンド沈下の駆動力を表現した。なお、見かけの揚力は重力作用の切り替え (on/off) によって模擬した。載荷・除荷の作用周期の設定については、個々の載荷位相中の沈下が相互に独立にできるように十分な長さの除荷位相を確保した。これにより、簡便な外力モデルでも、瞬間的液状化の反復事象の本質を表現することが可能となる。

4. 実験とシミュレーション結果の比較

(1) マウンドの変形過程

マウンド端部のガラス球配置の異なる2つのケース (case-1, 2) における実験とシミュレーションの比較 (初期状態と50周期後の結果) を図—3および図—4に示す。図中の破線は、初期位置におけるガラス球の外縁を結んだものである。なお、実験では、個々のガラス球の移動が追跡し易いように一部のガラス球を着色した。初期配列と50周期後の配列状態を比較すると、水圧変動の作用により、いずれの端部形状でも、マウンド頂部の沈下と前縁部のガラス球が放射状に迫出す様子が明瞭に示され

ている。また、双方の配列状態ともマウンド端部からマウンド中央部に向かって繰り返し載荷後のガラス球の移動量が増加する傾向となっている。これは、マウンド中央部では端部と比較して上載荷重が大きく、その分だけ接触圧が大きくなるためであろう。50周期後の側方からの実験画像に注目するとマウンドの裾の前面に砂の盛り上がりが確認できる。砂の盛り上がりは、液状化した砂層が、マウンドの荷重によってマウンドの前面に流動し堆積したと考えられる。これらの傾向は、数値シミュレーション結果からも同様に確認でき、実験結果を良好に再現しているのが分かる。マウンドの沈下・変形過程を量的に把握するには、マウンドの平均移動量の評価が都合が良いが、実験画像からではマウンド内部のガラス球の追跡が不可能であるので、ここでは、実験画像から確認できるマウンドの裾部 (最下層のガラス球) を評価対象とした。鉛直 (y) および水平 (xz 平面) 方向の平均移動量の時系列 (それぞれ Δy_{ave} および ΔL_{ave}) を、図—5および図—6にそれぞれ示す。いずれの端部形状でも、25周期付近以降からシミュレーション結果が実験結果を僅かに下回る傾向を示すものの、その差異は僅かであり、両

図-5 鉛直方向の平均移動量 ($\Delta y_{ave.}$)図-6 水平方向の平均移動量 ($\Delta L_{ave.}$)図-7 鉛直方向の平均移動量 ($\Delta y_{ave.}$)図-8 水平方向の平均移動量 ($\Delta L_{ave.}$)

者はほぼ良好に一致している。本数値モデルは、液状化の駆動力の表現に簡便な方法を用いているのにもかかわらず、ガラス球マウンドの沈下・変形の再現に関して良好な予測を与える結果が得られ、この種の問題への個別要素法型の数値モデルの適用の適切性が示された。

マウンド端部形状の違いが、沈下・変形過程に及ぼす影響を明確にするために、図-7および図-8に鉛直および水平方向の時系列について、実験およびシミュレーションの別のケース間比較を示した。case-2のマウンドの変形・沈下量がcase-1と比較して小さい。これは、case-2ではcase-1と比較して上載荷重が少なく、砂層粒子への接触圧が小さいためであると考えられる。このようにマウンドの沈下・変形には、上載荷重が密接に関連している。

(2) マウンドの内部構造

マウンドの内部構造は、実験では計測が困難であるが、離散型の数値モデルを用いた本研究の場合、個々の粒子間の接触状況を数値的に容易に評価することが可能である。図-9にガラス球粒子間の作用力のレベルと方向をシリンダー型の表示方式を用いて示す。シリンダーの主軸方向が力の向きを表し、シリンダー径が力のレベルに比例する表示としている。なお、全てのガラス球粒子間の作用力を表示すると、表示が重なって個々の粒子間作用力の判別が困難となるので、ここでは、鉛直壁の法線方向にほぼ直線に並んだ4つのガラス球の接地点を選び、それら4接地点の x 座標の平均値を含む yz 平面の中

心としてガラス球粒径 D の幅の帯状の領域内に存在するガラス球粒子のみについて表示した。

初期状態において、下層ほど上載荷重が増加するため、マウンドの下層ガラス球ほど径の大きいシリンダーのパスが示されている。また、マウンド前面(z 軸正方向)への迫出しの駆動力の存在を示唆する大きな径のシリンダーがマウンドの前縁部に確認できる。このことは、この時点ではマウンド前縁のガラス球が支点となってマウンドを支えていることをも示している。

繰り返し載荷・除荷による表層の砂層粒子の液状化発生にもなって、マウンドの形状維持を担っていた前縁部のガラス球は、砂層の支持力低下が原因で、砂層表層に埋没しながら前方(z 軸正方向)に迫出していく。前縁部付近のガラス球への作用力は、マウンドの沈下・変形に伴い減少しているが、これは、迫出しによってマウンドの断面形状が扁平化し、前縁部のガラス球の上載荷重が減少することによる。マウンドの変形に伴う多少の粒子間の接触点の変遷に起因した粒子間接触力の再分配による変動はあるものの、前縁部付近のガラス球への作用力は大略的には変形の進行とともに減少している。

また、側壁に接触しているガラス球は、初期状態から沈下・変形過程の間は持続的に大きな接触力を示すが、これは、ガラス球の側壁方向への移動が抑制されているためであろう。換言すると、側壁付近のガラス球の持続的拘束がマウンド全体の前面への迫出しを支えていることになる。

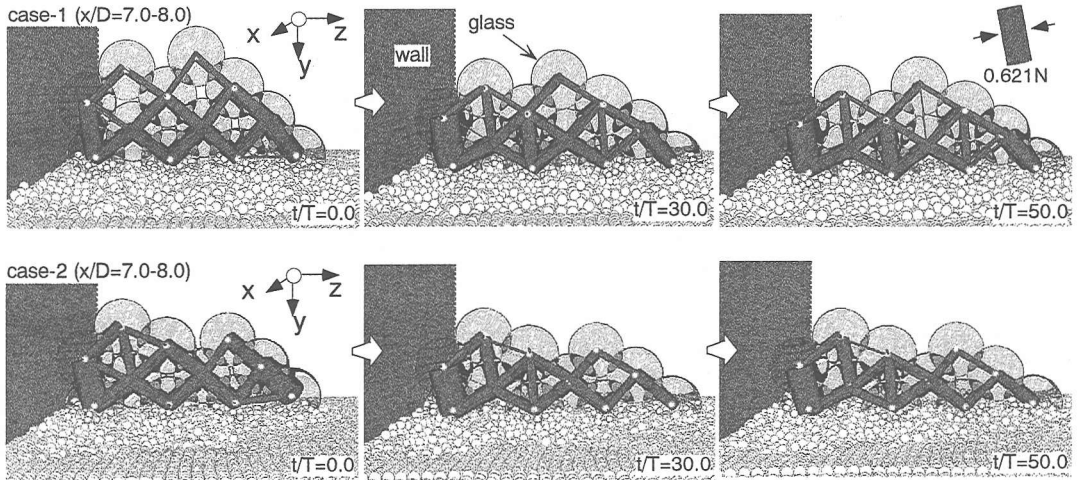


図-9 粒子間作用力図 (上: case-1, 下: case-2)

この図では、ガラス球間作用力の表示対象となっているガラス球以外を非表示としているので、手前のガラス球底面と直接する砂層表層の様子が観察できる。ガラス球手前の砂層表層には小規模な凹凸が見られるが、これは、ガラス球の間に砂粒子が潜り込む様子に対応したものである。

5. 結 語

本研究では、液状化地盤上におけるマウンドの沈下・変形過程について、耐圧式砂層水槽を用いた実験と、剛体連結モジュールを組み込んだ拡張型の3次元個別要素法に基づく数値シミュレーションから検討した。昨年度のシミュレーションでは、計算負荷の制約から砂層粒子径を十分に小さく設定できず、変形初期(約5周期)を再現するのが限度であったが、本シミュレーションでは砂粒子径を小さくして砂層の流動性を再現し、長時間周期の変形に対しても良好な再現性を得るに至った。また、マウンドの沈下・変形過程における、マウンド構成粒子間に作用する力の構造を示し、マウンドの変形機構につ

いての計算力学的アプローチの可能性を示した。今後は、地盤内間隙水圧モデルの詳細化を図って、シミュレーションの精度の更なる向上を目指したい。

参 考 文 献

- 後藤仁志・原田英治・酒井哲郎 (2001): 個別要素法に基づく移動床シミュレーターのモデル定数の最適化, 土木学会論文集, No. 691/II-57, pp. 159-164.
- 後藤仁志・原田英治・酒井哲郎 (2002): 三次元個別要素法による数値移動床の一般化, 水工学論文集, 第46巻, pp. 613-618.
- 酒井哲郎・後藤仁志・森川 淳 (1994): 海底面における排水条件の非一様性が地盤内間隙水圧分布に与える影響, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 911-915.
- 酒井哲郎・後藤仁志・原田英治・井元康文・田中秀範 (2002): 海底地盤の液状化による護岸前面捨石群の沈下過程, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 866-870.
- 名合宏之・前野詩朗・西岡 操 (1991): 変動水圧による構造物の沈下機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 826-830.
- Koshizuka, S., Nobe, A. and Oka, Y. (1998): Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semi-implicit method, Int. J. Numer. Meth. Fluids, Vol. 26, pp. 751-769.