

海底地盤の液状化による護岸前面捨石群の沈下過程

酒井 哲郎* ・後藤 仁志** ・原田 英治***
井元 康文**** ・田中 秀範****

ケーソン防波堤や海岸構造物の前面での洗掘防止のために設置される捨石や消波ブロックが、波浪による海底地盤の液状化に伴って沈下・埋没する事例が少なからず知られている。本稿では、耐圧式の砂層水槽を用いて水圧変動場を再現し、ガラス球で模擬した捨石群の砂層中への埋没と捨石群自体の変形過程を追跡し、個別要素法に基づく数値シミュレーションによって、現象再現を試みる。数値モデルの予測と水理実験で見られた捨石群の挙動は少なくとも定性的なレベルでは、良好に一致した。一方、定量面では、主として砂層の記述に導入できる粒子数の制約による問題から、現状では必ずしも充分な一致は得られなかった。

1. 緒 言

ケーソン防波堤等の海岸構造物の前面での洗掘抑制を目的に、堤脚部に捨石や消波ブロックが設置されることが多いが、この種の防波堤形態については、ブロックの沈下等の被災事例の報告が数多くなされている。被災のメカニズムの一つとして注目されるのが、海底砂地盤の波浪による液状化である。波浪による海底地盤面への作用水圧と海底地盤内間隙水圧の位相差の存在が、地盤表面付近の砂に見かけの揚力を作用させ、砂の移動抵抗が減少して流動化する。見かけの揚力の発生は短時間現象であるが、反復的に生じるので、捨石は徐々に沈下する。

波浪による液状化現象に起因する単一のブロックの沈下については、既往の研究により基礎的な特性が明らかにされてきた。善ら (1987)、名合ら (1991) は、周期的水圧変動を反復して受ける砂地盤上に設置した単一ブロックの沈下過程を計測した。名合ら (1993) は、ブロック下部に層状および列状に着色した砂を配置して、ブロックの沈下に伴う砂移動を可視化して、ブロック下部の砂が端部から吸い出され、ブロック側方に堆積する過程を明らかにした。酒井ら (1993) は、水圧変動・振動流共存場 (水圧変動のみの場合と比較して現実の波浪場に近い条件) において単一ブロックの沈下過程の実験を行い、ブロックの沈下量が振動流の共存によって増大することを指摘した。

このように、単一ブロックの沈下に関しては、既往の研究が存在するが、捨石や消波ブロックの個々の要素の相互干渉、すなわち、ブロック群としての挙動に着目した研究には例がない。捨石やブロックの沈下は上載荷重の大小に影響されるが、地盤面と接する単一のブロックが隣接するブロックとどのような接触状態にあるかによって接地圧が変化し、局所的な荷重に大きな影響が生じる。このような場合には、隣接するブロックからの影

響を適正に評価するため、群としての変形特性を把握することが不可欠である。

ブロックの群としての挙動を表現するには、離散的な要素間の相互作用を記述できるモデルが不可欠であるが、現時点でこの要求を満たす数値モデルと言えば、個別要素法 (DEM) をおいて他にない。海岸工学の分野での DEM の適用は、漂砂現象を主対象として発展し (例えば、Gotoh・Sakai, 1997)、最近になって被覆ブロック群の破壊過程への適用 (原田ら, 2001) が始められた。波浪による海底地盤の液状化を対象にした DEM の適用には、以下のものがある。後藤ら (1994) は、解析解から推定した間隙水圧分布を駆動力として、DEM で記述した地盤構造骨格が液状化する状況を数値シミュレーションした。前野ら (1998) は、液状化地盤内に埋設されたパイプラインの挙動を DEM で解析し、液状化にともなうパイプの浮上過程をシミュレーションした。また、前野ら (2001) は護岸裏込めの吸い出し過程について、FEM による地盤内水圧分布の数値モデルを DEM とリンクした解析を実施している。このように、既往の研究では、液状化による地盤の大変形に対して DEM の有効性が示されてきた。

以上のような現況に鑑み、本研究では、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を併用して、波浪による液状化に起因する砂地盤の支持力減少がもたらす捨石群の変形過程を詳細に検討する。

2. 消波ブロック群の沈下・埋没過程の水理実験

実験装置 (酒井ら, 1994) は、砂層水槽の両端に連結されたプロペラ式の流量制御系と油圧シリンダー式の水圧制御系を有し、流速・水圧を任意に制御できるが、本稿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・埋没過程の実験を行った。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

* フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科土木工学専攻
** 正 会 員 工博 京都大学助教授 工学研究科土木工学専攻
*** 正 会 員 工博 日本学術振興会特別研究員
**** 学生会員 京都大学大学院 工学研究科土木工学専攻

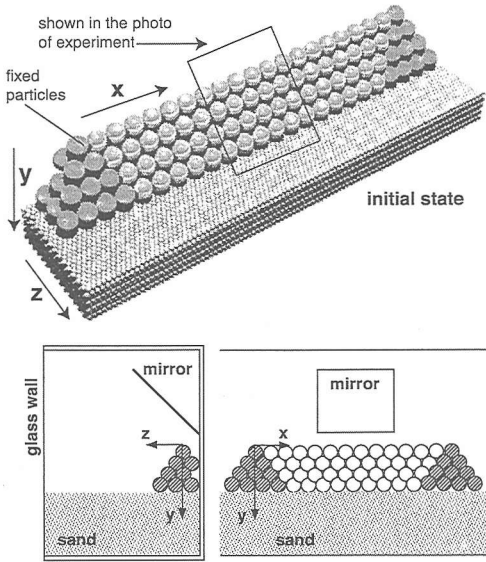


図-1 捨石群の配列

密状態で積上げてマウンドを形成し、周期4.0秒、振幅2.5mAqの水圧変動を繰り返し作用させてガラス球マウンドの変形をビデオで撮影した。図-1に実験に用いたガラス球の配列を示す。ガラス球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。ガラス球マウンドの背面は鉛直壁に接しており、マウンド両端には角錐状にガラス球を連結したサポート部を設けた。また、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と有効土被り圧から有効応力を推定し、減圧位相で液状化が発生する条件が成立することは別途確認している。

図-2に、ビデオ画像から抽出したマウンド中央部の変形過程を示す。時刻の経過とともにマウンド全体が沈下し、かつ前面に迫り出している様子が明瞭に見える。正面図で、マウンド底脚部のガラス球(着色されたもの)に注目すると、時間の経過とともに砂層内に埋没していくのが見て取れる。時刻 $t/T=10.0$ 以降の上方からの画面に注目すると、マウンドの前面に砂の盛り上がりが見られる。マウンドの荷重を受けた砂層が液状化を繰り返すうちに側方に流動してマウンド前面に湧き出して堆積した結果であろう。同様の砂堆積の特性は、名倉ら(1991)によって指摘され、前野ら(2001)のDEM-FEMモデルによって数値モデルの面からも再現されている。

図-3に、マウンド底脚部のガラス球(図-2中に矢印で示したもの)の変位を示す。水圧変動の作用直後の初期に活発な沈下と前面への変位が生じていることが確認できる。また、40周期経過後も緩やかに沈下が継続し、マウンド変形が継続している様子が示されている。

3. 個別要素法による捨石沈下過程の再現

(1) モデルの概要

計算に用いたモデルは、剛体連結モジュール(Koshizukaら, 1988)を組み込んだ拡張型の3次元個別要素法(後藤ら, 2002)である。モデルの概略のみを以下に示す。

個々の粒子(砂地盤構成粒子および捨石)の運動は、隣接粒子との接触力に起因する並進および回転の運動方

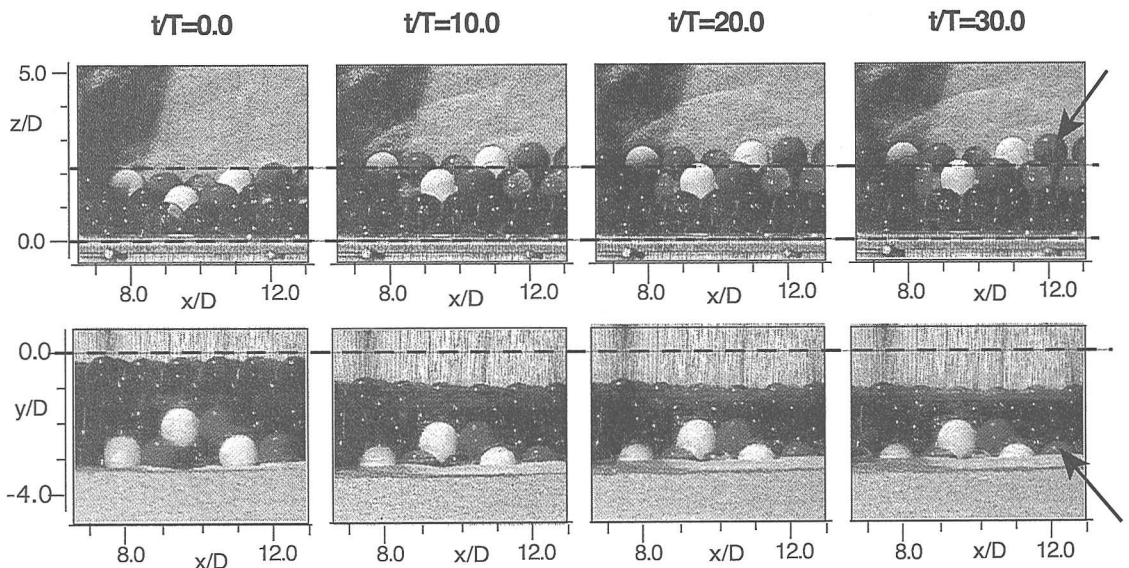


図-2 捨石群の沈下・埋没過程(実験)

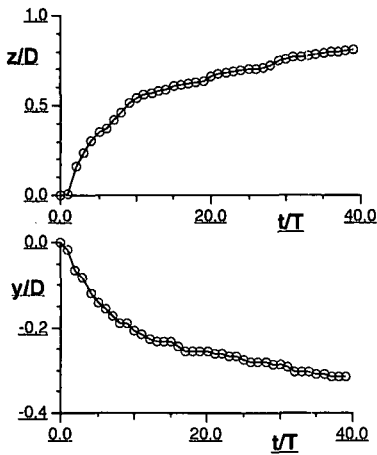


図-3 捨石群底部の捨石の変位

程式

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

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

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

で記述される。ここに、 x_i, ϕ_i : グローバル座標系 x 上での粒子 i の位置と回転角, F_{xi} : グローバル座標系 x 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 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。

粒子間接触力に関しては、2 粒子間接平面の法線方向および接平面内に採ったローカル座標系において、Voigt モデル (バネ-ダッシュポット系) を配置してモデル化する。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。

本稿では、マウンド両端のサポート部 (実験では、ガラス球を接着剤で固定して形成) の記述に移動剛体モデル (Koshizuka ら, 1998) を用いた。始めに、一般の粒子と剛体構成粒子を区別せず (剛体構成粒子間の連結関係が無いとして)、全粒子の運動を DEM で計算する。この結果、剛体は変形し、剛体構成粒子の相対位置に変化が生じる。そこで、以下の方法で剛体構成粒子のみに対して座標修正計算を実施し、剛体構成粒子の相対位置を保持する。

剛体構成粒子の仮速度と仮座標を用いて、剛体の時刻 $t + \Delta t$ における重心の位置 r_g を求め、剛体の重心の並進速度ベクトル T および重心周りの剛体構成粒子の角速度ベクトル R

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

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

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

を算定する。ここに、 I : 剛体の重心周りの慣性モーメント, N : 剛体構成粒子の総数である。並進速度ベクトル, 角速度ベクトルを用いて、剛体の挙動を満足するための剛体構成粒子 i の移動速度は

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

と記述され、これを用いて構成粒子 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。DEM による粒子の座標の更新が行われる度に、剛体構成粒子に対してのみ上記の座標修正を施すことにより、剛体運動が追跡できる。このモデルは、DEM の組み込まれて消波ブロック群の破壊過程のシミュレーションに適用され (原田ら, 2001)、複数剛体に関しても安定して機能することが確認されている。

ガラス球の直径・比重は実験と同様に設定し、砂地盤については $d = 1.0$ cm, 比重 2.65 の均一粒子を用いて表現した。理想的には実験と同レベルの砂粒径で計算すべきであるが、この設定でも 25,000 個程度の砂粒子が必要となり、計算負荷を考えると、これ以下のサイズの砂粒子を導入した計算は現状では実行不可能である。

さらに、マウンドの沈下の発生は液状化が生じる位相の近傍に限定されるから、計算の効率化のため、表層近傍 (表層面から捨石径に相当する深さの領域) の砂粒子に対して液状化に起因する見かけの揚力 (有効土被り圧を打消す力) の載荷・徐荷を反復する方法で駆動力を表現する簡便な取り扱いを行った。地盤の挙動に主眼を置くなら、前野ら (2001) が行ったように、FEM (間隙水圧系モデル) と DEM (地盤構造骨格モデル) を連成的に解く必要があるが、本稿では、捨石群の挙動に焦点をあてて、地盤のモデルは簡便なものとした。

(2) 捨石沈下過程の数値解

図-4 は、実験と同様の捨石配列での 3D 個別要素法による数値シミュレーションの結果を示している。パッキング直後の初期配列 (時刻 $t/T = 0.0$) と比較すると、沈下の最終局面 (時刻 $t/T = 16.0$) の配列状態には、マウンド頂部の沈下と前縁部のせり出しが明瞭に見られる。時刻 $t/T = 16.0$ の前縁部では、場所的ならばつきはあるものの、ガラス球 1 から 2 粒径程度の顕著なせり出しを示す複数の球が見られる。

本数値モデルでは、液状化の駆動力の表現に簡便な方法を用いているにもかかわらず、少なくとも定性的には、ガラス球マウンドの変形特性に対して概ね妥当な予測を

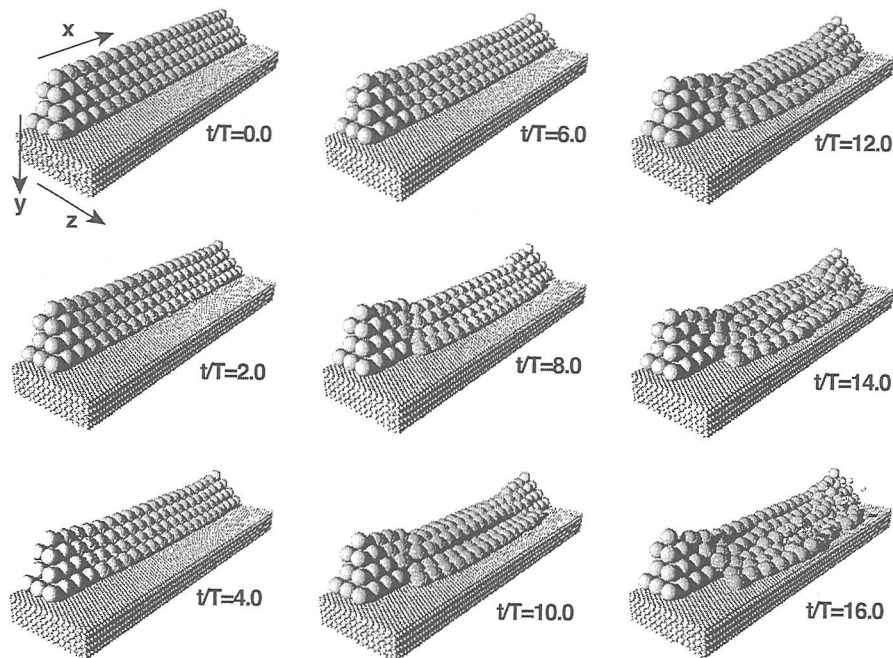


図-4 捨石群の沈下・埋没過程 (数値シミュレーション)

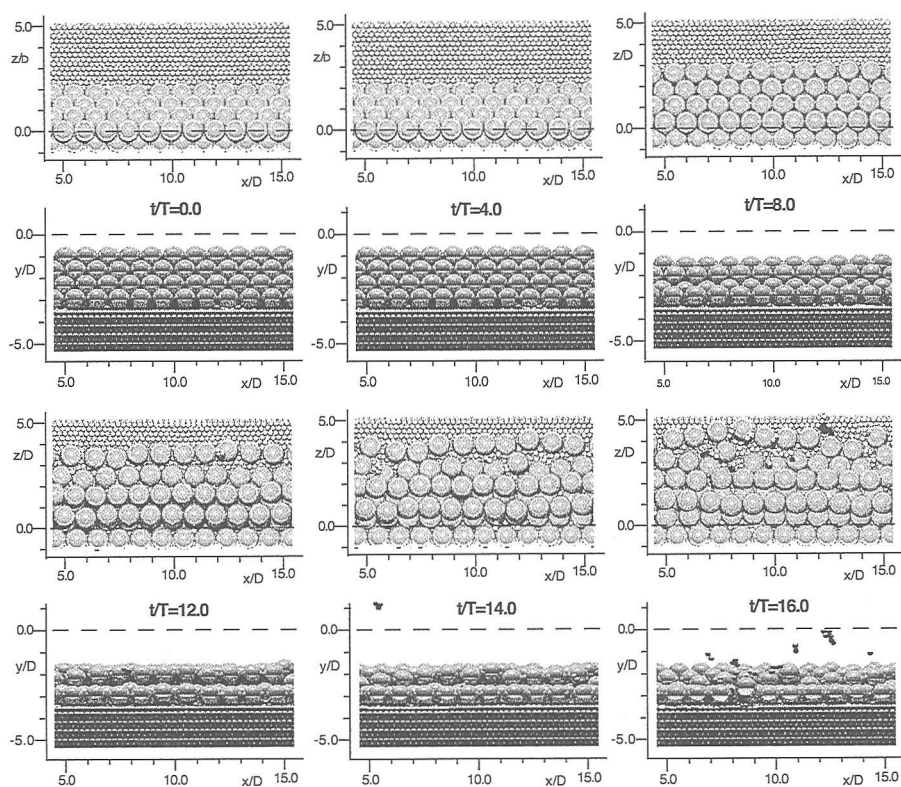


図-5 捨石群の沈下・埋没過程 (数値シミュレーション, 正面図, 平面図)

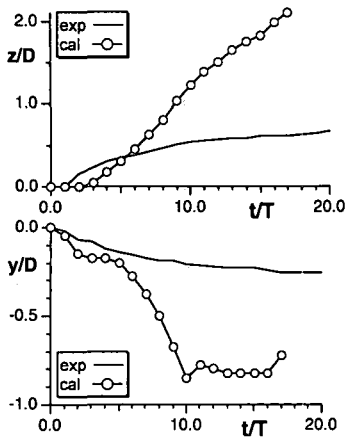


図-6 捨石群底部の捨石の変位 (実験との比較)

与えるものとなっている。しかし、より詳細に見ると、実験との相違も存在する。図-5は、実験の画像と同様の正面と上方から見た捨石群を示しており、図-6には、実験で着目したのと同様の捨石 (図-2中に矢印で示したものに对应する球) の変位の時系列を示している。何れの図からも明かなように、数値モデルでは、捨石マウンドの変形が活発に進行し、変形量が大きく推定されている。図-4からも分かるように、一旦崩壊が始まると、前面への迫り出しが迅速に進行し、変形量も大きく生じる。さらに、図-6によると、沈下が概ね終了する時刻 $t/T=16.0$ においても、前面への迫り出しの時間軸上の勾配は有意で、前面への変形が持続することを示唆している。

4. 結 語

本研究では、耐圧式砂層水槽による水理実験によって、波浪による液状化に起因する砂地盤の支持力減少がもたらす捨石群の変形過程を追跡し、個別要素法に基づく数値シミュレーションによって、その再現を試みた。波浪伝播に起因する地盤内間隙水圧変動による液状化の反復が、砂地盤上の捨石群の変形の駆動力となっていることが、実験を通じて明らかとなり、個別要素法のモデルによっても同様の特性が、少なくとも定性的には再現された。

個別要素法のモデルでは、2つの大きな仮定が導入されている。第1は間隙水圧の変動モデルの簡便化、第2は砂層構成粒子の粗視化である。特に後者は、解に与える影響が小さくないと懸念される。すなわち、砂層の記述には、計算負荷の制約から、砂粒塊を1つの粒子 (砂層構成粒子) と見立てて取り扱わざるを得ないが、砂層構成粒子の粒径を捨石粒子と比較して十分に小さく採れないと、捨石の間に砂が潜り込む状態を模擬できない。

このような制約の下で、捨石群の沈下を模擬しようとするれば、粒子間接触力モデルの接平面内の変形抵抗を小さく設定して、せん断変形が生じやすいようにモデルのパラメーター設定を行わざるを得ない。この種の設定を用いれば、変形初期 (図-6の開始後5秒程度) の捨石マウンドの変形が比較的小さい条件下では、実現象との対応がよいが、マウンドの変形量が大きくなるとせん断抵抗を低く設定していることが原因で、大変形が容易に生じてしまう。この種の問題を解決するには、砂層の解像度を上げる (砂層構成粒子の粒径を小さくする) 以外に解決策はなく、計算効率を向上させる工夫に努めて高負荷の計算を早期に実行できるよう努めたいと考えている。

なお、本研究の遂行に当たり、平成12および13年度・科学研究費補助金 (基盤研究 (B) (1))、課題番号: 12450202、代表: 岡山大学環境理工学部・名合宏之教授) の補助を受けたことを記して、謝意を表する。

参 考 文 献

- 後藤仁志・酒井哲郎・富永圭司・豊田泰晴 (1994): 変動波圧を受ける海底地盤の挙動の数値模擬への個別要素法の応用, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 596-600.
- 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・山本哲也・柏村真直 (1993): 水圧変動と振動流の同時作用下での砂地盤上のブロックの沈下, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 811-815.
- 菅 功企・山崎浩之・渡辺 篤 (1987): 海底地盤の波浪による液状化および高密度化, 港湾技術研究所報告, 第26巻, 第4号, pp. 125-180.
- 名合宏之・前野詩朗・清水雄一 (1993): 変動水圧によるブロック沈下にもなる周辺砂地盤の流動の可視化, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 516-520.
- 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.
- 原田英治・後藤仁志・酒井哲郎 (2001): 被覆ブロックの幾何配列特性の破壊抵抗に及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 936-940.
- 前野詩朗・後藤仁志・坪田裕至・原田英治 (2001): DEM-FEMモデルによる変動水圧場の臨岸裏込め土砂の流動解析, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 976-980.
- 前野詩朗・猿木広一郎・星山知恵 (1998): 波浪作用下における海底埋設パイプラインの浮上機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 906-910.
- Gotoh, H. and T. Sakai (1997): Numerical Simulation of Sheetflow as Granular Material, Jour. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engrg., ASCE, Vol. 123, No. 6, pp. 329-336.
- Koshizuka, S., A. Nobe and Y. Oka (1998): Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semi-implicit method, Int. J. Numer. Meth. Fluids, Vol. 26, pp. 751-769.