

3D-DEM による消波ブロック群の沈下過程の数値シミュレーション

Numerical Simulation for Subsidence Process of Wave Dissipating Blocks using 3D-DEM

原田英治¹・後藤仁志²・酒井哲郎³・合田健一⁴

Eiji HARADA, Hitoshi GOTOH, Tetsuo SAKAI and Kenichi GOUDA

Compaction-process of blocks which is one of the subsidence mechanism of wave dissipating blocks has been investigated by experiment and numerical. The experiment was conducted in wave flume with piston-type wave generator. The 1/100 scale model of 80t-type tetrapod[®] block was used as wave-dissipating block. On the other hand, numerical simulation was performed under the same experimental condition using the block model based on the three-dimensional distinct element method with the passively-moving-solid model. Influence of the mound topology to the subsidence of the blocks will be described.

1. はじめに

港湾の外郭施設としての消波ブロック被覆堤は、越波や反射波低減に対して優れた機能を有し、長周期の高波浪が来襲する外洋に面した海岸域で広く用いられている。ケーソン前面に配置された消波ブロック群は波浪の直撃を受けるため、ブロック群の沈下に関する被災事例が多く報告されている。その被災原因として 1) 消波ブロック群下面の砂地盤の液状化(善ら, 1989), 2) 消波ブロック群法先における洗掘(鈴木ら, 2002), 3) 消波ブロック間の噛み合わせの変化による消波ブロック群容積の減少(高密度化)などが指摘され、一連の研究が実施されている。

最近の研究には、現地における地盤内間隙水圧の実測では明瞭な液状化の発生が確認されないにもかかわらず、消波ブロック群の天端が時化の前後で顕著な沈下を示す報告がある(佐々ら, 2003; 高山ら, 2004)。また、後藤ら(2005)は、個別要素法型三次元ブロックモデルを用いた数値シミュレーションからブロック群の高密度化にブロック群底層の配列の不規則性が重要な役割を果たすことを示している。

本研究では、消波ブロック群沈下と消波ブロック群の高密度化との関係について、造波装置を用いた水理実験、個別要素法を基礎とした三次元ブロックモデルによる数値シミュレーションの双方から検討する。水理実験では高密度化によるブロック群沈下を確認し、ブロック配列の幾何的特徴と沈下の発生の関係を明らかにする。一方、三次元ブロックモデルによる数値シミュレーションでは、実験では計測が困難なブロック群の内部構造について、要素間接触力の観点から計算力学的に検討する。

2. 数値シミュレーションの概要

(1) シミュレーションモデル

三次元ブロックモデルは個々のブロック間の相互作用を陽に扱えるシミュレータ(後藤ら, 2002)である。個々の要素は隣接要素との接触力に起因する並進および回転の運動方程式

$$\frac{d^2 \mathbf{x}_i}{dt^2} = \frac{\mathbf{F}_{pint} + \mathbf{F}_{wave}}{M_i} + \mathbf{g} \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{d^2 \phi_i}{dt^2} = \frac{T_{pint}}{I_i} \dots \dots \dots (2)$$

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

で記述される。ここに、 $\mathbf{x}_i, \phi_i$: グローバル座標系 x 上での要素 i の位置と回転角, $\mathbf{F}_{pint}$: グローバル座標系上での要素間接触力, $\mathbf{F}_{wave}$: グローバル座標系上での波力, M_i : 要素 i の質量, T_{pint} : グローバル座標系上での要素間作用によるトルク, I_i : 要素 i の慣性モーメント, d_i : 要素 i の直径, $\mathbf{g}$: 重力加速度ベクトル, σ : 要素の密度である。要素間接触力に関しては、2 要素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において、弾性スプリング(バネ定数 k_n, k_s)およびダッシュポット(粘性定数 c_n, c_s)を配してモデル化され、モデル定数はそれぞれ $k_n = 9.47 \times 10^6 \text{ N/m}$, $k_s = 3.64 \times 10^6 \text{ N/m}$, $c_n = 3.58 \times 10^5 \text{ Ns/m}$, $c_s = 2.22 \times 10^5 \text{ Ns/m}$ に設定した。なお、本計算では要素間接触面に生じる法線方向まわりの回転軸に対するねじりモーメントは考慮していない。

ブロックは、図-1 に示すように直径 $d = 2.0 \text{ m}$ の均一球形要素 32 個を用いて、個々の要素間のオーバーラップを許して実際のテトラポッド[®] 型の消波ブロックの幾何形状を再現するように形成した。また、Passively moving solid model に基づく剛体連結モジュール(Koshizuka ら, 1998)を導入し各ブロック構成要素の相対位置にズレが生じないように座標修正計算が施される。

1 正 会 員 博(工) 豊田工業高等専門学校准教授 環境都市工学科
2 正 会 員 博(工) 京都大学准教授 工学研究科都市環境工学専攻
3 フェロー 工博 京都大学名誉教授
4 学生会員 修(工) 住友生命保険相互会社

Each wave-dissipating block consists of 32 elements.

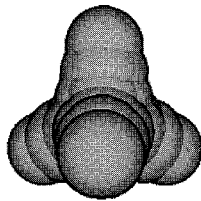


図-1 シミュレーションにおけるブロック模型

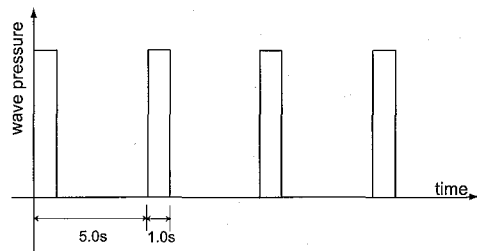


図-2 波圧変動パターン

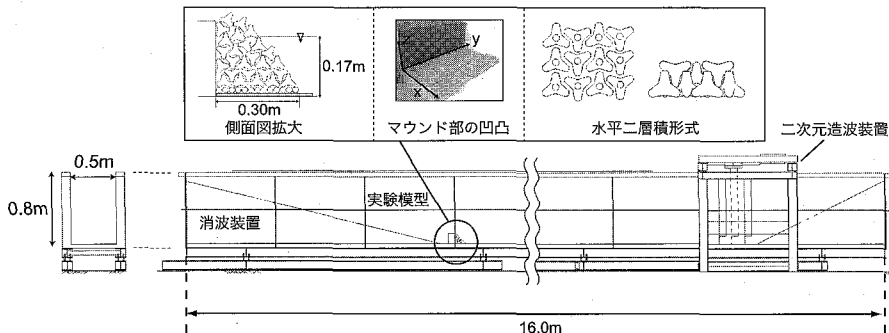


図-3 二次元造波装置と水槽および実験模型

座標修正計算は以下の通りである。まず、ブロック構成要素の時刻 $t + \Delta t$ での速度と重心座標 r_g と重心座標における並進速度ベクトル T 、重心回りでの角速度ベクトル R を算定する。

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

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

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

ここに、 I : ブロック構成要素の重心回りの慣性テンソル、 N : ブロック構成要素の総数である。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ブロック構成要素 i の移動速度

$$u_{gi} = T + (r_i - r_g) \times R \quad (7)$$

を求める。そして、これを用いてブロック構成要素 i の座標は、

$$r_i(t + \Delta t) = r_i(t) + u_{gi} \Delta t \quad (8)$$

と修正される。個別要素法による全要素の座標の更新が行われる度に、ブロック構成要素に対する座標修正が施される。

(2) 波浪による駆動力のモデル化

厳密な作用波とブロックの動的解析には個々の消波ブロック周辺の局所的流れ場を正確に評価する3次元非定常自由表面流解析が必要であるが計算負荷が非常に高くなる。本稿では、ブロック群としての挙動に注目し、流

れ場の評価は簡便な取り扱いとし、個々のブロックに作用する水平方向のピーク波圧は、合田 (1973) 式による波圧分布を用いて評価することとした。

ブロックを構成する個別の要素に対する作用力は、合田式の算定値に球形要素の投影面積を乗じて評価し、作用点は球形要素の中心とした。なお、ブロックは球形要素32個を用いてオーバーラップを許して構成されているため、すべての構成要素に波圧を与えると、波圧を重複して受ける。また、他のブロックに覆われているブロックは直接波力の作用を受けない。以上を考慮して、数値シミュレーションでは、沖側に面した粒子に対してのみに波圧を与えることとした。

格子内粒子ピーク波圧の変動パターンは図-2に示す単純な載荷1.0sと除荷4.0sを定期的に反復する矩形波型の波形を5.0s周期で与えた。なお、載荷・除荷の作用周期の設定は、載荷によって生じたブロック群の運動が除荷位相中に完全に停止し、前回の載荷の影響が次の載荷位相まで残存しないように、十分な長さの除荷位相を確保するように配慮した。また、波の峰がブロック群へ作用する時間は短時間であることを考慮し、ここでは周期12.0sの波を想定し載荷時間を1.0sとした。

3. 水理実験の概要

水理実験は、水路の一端に反射波吸収制御方式のピストン型造波装置が設置された長さ16.0m、幅0.5m、深さ0.8mの造波水槽を用いて実施した。図-3に示す

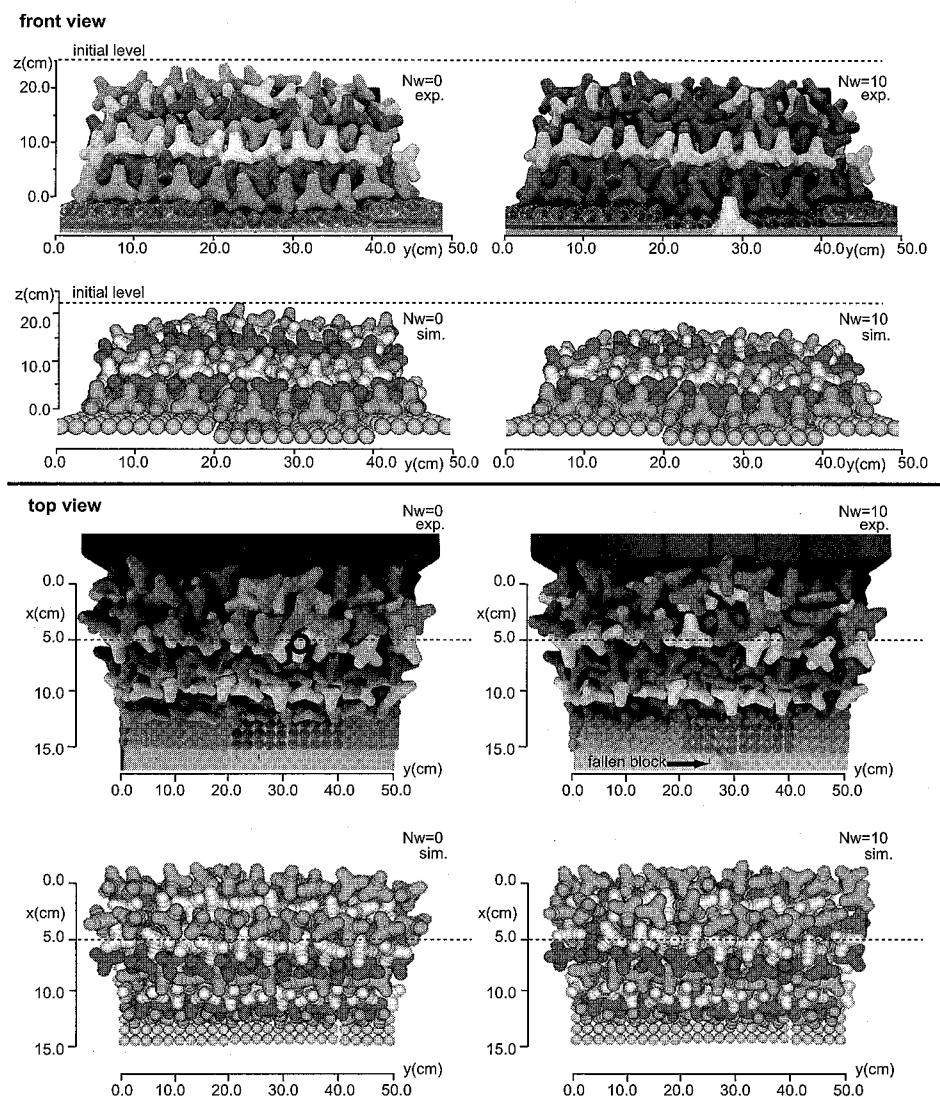


図-4 消波ブロック群の沈下過程 (上：正面図，下：上面図)

ように造波板から約 12.0 m にケーソンに見立てたレンガブロックの前面に 1/100 スケールの 80 t 型テトラポッド[®] 模型約 200 個を配置して消波ブロック被覆堤の模型とした。なお、ブロック群は水平二層積形式として配置し、個々のブロックができるだけ密に噛み合うように配慮して積み上げた。また、水路底部に敷いた厚さ 0.006 m のアクリル板を用いて凹凸を与えた床上に、捨石マウンドを想定した直径 0.02 m、比重 2.5 のガラス球を接着して形成した一枚 5×5 (個) のガラス球板を 15 枚 (x 軸方向に 3 枚、 y 軸方向に 5 枚) を敷き詰め、その上にブロック群を配置した。

実験は、模型縮尺を 1/100 と設定し、フルードの相似則に従って算定した水深 0.17 m、作用波は周期 1.2 s・波高 0.1 m の条件で実施した。作用波によるブロック

群沈下過程は、デジタルビデオカメラを用いて側面・正面・上面の 3 方向から記録した。

4. ブロック群の高密度化過程

(1) 実験とシミュレーション結果の比較

図-4 に消波ブロック群の波浪による沈下過程の様子を実験と数値シミュレーション結果を示す。正面図では、初期位置 ($N_w=0$) と 10 波作用後 ($N_w=10$) のブロック群の相対位置関係から、ブロック群の沈下傾向が実験と数値シミュレーションの双方に確認できる。実験と比較して、数値シミュレーションでは若干大きな沈下量が表示されている。この理由として、実験では人為的に隣接ブロック間をできるだけ噛み合うように敷き詰めることが可能であるが、数値シミュレーションではそのような

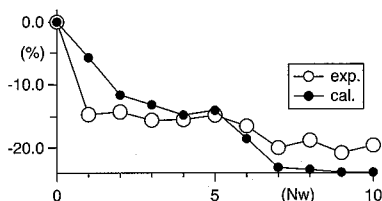


図-5 天端高沈下の時系列

パッキング操作は不可能であり、初期配列時に既に実験と比較して噛み合わせが緩いブロック群構造になっていることが挙げられる。そのために数値シミュレーションが、実験と比較して僅かに大きな沈下量を示したと推察される。また、実験と数値シミュレーションの双方に顕著なブロック群の沈下は、ブロック群の上層部で生じることが、ブロック群の配列の変化から確認できる。これは、上層部のブロック群は、中・下層部のブロック群と比べて上載荷重が小さく、さらに、ブロック間の噛み合わせに関与するブロック数も少ないため、波力によって移動し易いためであると考えられる。実験では、マウンドから抜け出して前面に転落したブロックも確認できる。一方、上面図からは、奥行き (x 軸) 方向の移動状況が理解できる。上層部のブロック群の x 軸の負方向への移動状況が、図中に付した $x=5.0$ cm の破線部周辺における初期位置と 10 波作用後のブロック相対位置の変化から明瞭に確認できる。また、実験結果を良好に数値シミュレーションが再現していることも、破線部上の白く着色されたブロック群の挙動から見て取れる。なお、実験の初期配列の図には、作用波後に転落するブロックに丸印を付した。

図-5 にブロック群天端高の作用波毎の沈下量の時系列を示す。最終沈下量には 5% 程度の違いがあるが、初期の数波による顕著な初期沈下過程、その後の第 3～5 波の沈下量の横違い傾向と第 5～7 波による 2 度目の沈下傾向が示すように、ブロック群の高密度化過程が段階的に発生している傾向は、実験と数値シミュレーション結果が良好に一致し、本数値シミュレーションコードの有効性が確認できる。

(2) ブロック群の内部構造

ブロック群の沈下過程における内部ブロックの移動量を調べるために、図-6 に示す各層のブロック群に注目して、作用波後のブロック群の移動変化を図-7 に示した。図中にはブロック重心をプロットした。ブロック群の最上部にあたる第 1 層のブロック群は、実験では個々のブロックの移動量に空間的非一様性が確認できる。特に、 $x=20.0$ – 30.0 cm 付近では顕著な移動が見て取れる。数値シミュレーションでもブロック移動は確認されるが、実験のように顕著な空間的な非一様性は確認されない。

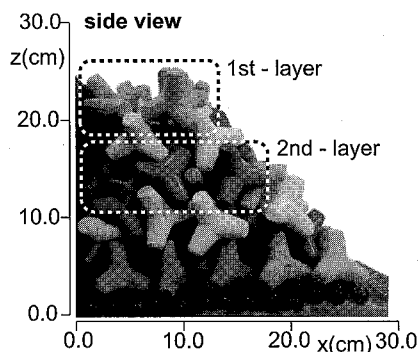


図-6 ブロック群の各層の説明

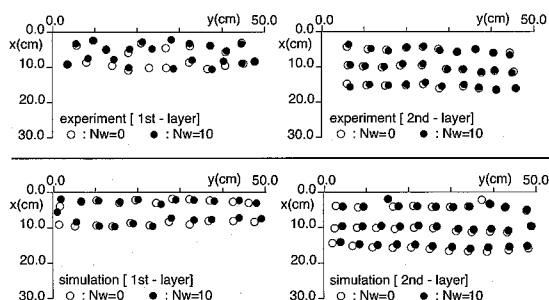


図-7 層別ブロックの移動変化

また、実験では側壁付近のブロックには大きな移動が確認されないが、数値シミュレーションでは、側壁付近に配置されているブロックにも移動が示されている。この違いは、初期配置の形成の条件の違いにある。実験では隣接するブロックとできるだけ噛み合わさるように配置されており、特に側壁付近のブロックは移動し難い状況にある。それと比較して、数値シミュレーションでは周囲の壁要素やブロックと十分に噛み合わさっていない。また、実験ではブロックの配置時に周囲のブロックの配列に応じて微妙な調整がされているため、ブロックの移動が非一様な傾向を示すが、数値シミュレーションでは規則的にブロックが配列されているため、比較的一様に移動する傾向を示すと考えられる。実験における第 2 層のブロック群は、第 1 層のそれと比較して移動量は小さいが、2 層目では上載荷重が 1 層目と比較して大きく動き難い状況であるため移動量が抑えられていると考えられる。また、ブロックの配置では、下層から上層に積み上げるにしたがって底層床の凹凸の影響が大きくなる。すなわち、第 2 層は第 1 層よりも底層床凹凸の影響が少なく、規則正しく配置され、隣接ブロックとの噛み合わせも第 1 層と比較して強く動き難い構造であることも理由であると考えられる。一方、数値シミュレーションの第 2 層のブロック群は、全体的に規則正しく x 軸負方向に押されているが、数値シミュレーションの初期配列は

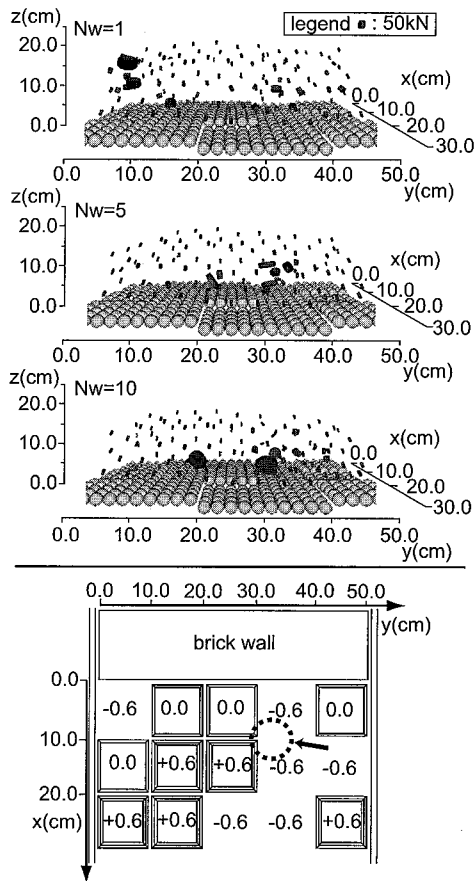


図-8 要素間力分布と底層床凹凸

実験と比較して隣接するブロックとの噛み合わせが不十分な状態で規則正しく配列されていることから、ブロック間の噛み合わせが緩く、作用波によって整然と移動したと考えられる。なお、底層床付近のブロック群については、実験と数値シミュレーションの双方の作用波後のブロック移動量に有為な差は確認されなかった。

波浪によるブロック群沈下過程における内部構造の理解にはブロック間力の把握は重要である。実験ではブロック間力の計測は困難であるが、数値シミュレーションではその評価は容易である。作用波時のブロック間力を図-8に示す。ブロック間力はシリンドー形式で表示し、シリンドーの向きが力の作用方向、シリンドーの直径がブロック間力に比例する表示とした。

第1波作用時では $(x, y, z) = (10.0, 0.0, 20.0)$ 付近で、作用波による壁面表層付近のブロック配列の急激な変化による大きなブロック間力が示されているが、ブロック群内部では際立ったブロック間力の集中は確認されない。この段階での初期配列ではブロック間の噛み合わせが緩いブロック群の沈下移動過程であるため、ブロック間力が発現し難い状況であると考えられる。しかし

ながら、図-5のブロック群の沈下量の時系列で示したように、ブロック間の高密度化が進行した第5波目では、一時沈下傾向が収束しており、作用波による力が内部ブロック間力の集中を引き起こしていると考えられる。同様に沈下傾向が収束する第10波目のブロック間力の図にも顕著なブロック間力の集中が内部に確認される。また、このブロック間力の集中の発生箇所は、底層床の凹凸レベルが大きい $x=5.0-15.0$ cm, $y=30.0-40.0$ cm 付近に発生していることから、底層床の大きな凹凸は、ブロック脚折れ被害を誘発し易い箇所であることを示唆する結果だと考えられる。また、このような底層床凹凸によるブロック間力集中の現象は、ブロック群の間隙から吸い出される砂によっても、底部凹凸が促進されるため、ブロック群沈下被害低減には、底層床凹凸を抑える工夫が重要であると言える。

5. おわりに

本研究では、実験および三次元ブロックモデルによる数値シミュレーションの双方からブロック群沈下過程の詳細について検討し、内部ブロックの移動特性やブロック間力集中と底層床凹凸との関連性について示した。

謝辞：本研究の着想を得るに際しては京都大学名誉教授・高山知司先生から有益な御助言を頂戴した。また、実験およびデータの整理に関して、豊田工業高等専門学校建設工学専攻・草野雄哉君（現、国土交通省中部地方整備局名古屋港湾事務局）の協力を得た。以上記して、謝意を表する。

参考文献

- 合田良実 (1973): 防波堤の設計波圧に関する研究, 港研報告, 12巻, 3号, pp. 31-69.
- 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.
- 後藤仁志・原田英治・高山知司・水谷雅裕・不動雅之・岩本晃幸 (2005): 高波浪による消波ブロック群高密度化のメカニズム, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 781-785.
- 佐々真志・高山知司・水谷雅裕・辻尾大樹 (2003): 実海域における海底砂地盤の残留間隙水圧の発生と消散過程, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 846-850.
- 鈴木高二朗・高橋重雄・高野忠志・下迫健一郎 (2003): 砂地盤の吸い出しによる消波ブロック被覆堤のブロック沈下被災について, 港研報告, 41巻, 1号, pp. 51-89.
- 善巧企・山崎浩之・佐藤泰 (1989): 海底地盤の波浪による液状化, 港研報告, 28巻, 3号, pp. 29-57.
- 高山知司・佐々真志・水谷雅裕・辻尾大樹・谷口昇太郎 (2004): 防波堤マウンド下における残留間隙水圧の応答に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 821-825.
- 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.