

# VOF 法と個別要素法の連成解析による傾斜捨石護岸の変形予測

荒木 進歩\* ・ 小竹 康夫\*\* ・ 金澤 剛\*\*\*  
松村 章子\*\*\*\* ・ 出口 一郎\*\*\*\*\*

## 1. はじめに

捨石式傾斜護岸において, 完成断面は被覆石や消波ブロックにより形状が維持されるが, 施工期間中は設計波に対して安定質量以下の捨石が剥き出しで静水面を切る期間が存在するため, 高波浪が作用すると大規模な被災が生じる危険性が高い。従来は水理模型実験の結果をもとに対策の検討を行ってきたが, 縮尺効果の影響を避けるために大縮尺の実験が必要となる一方で, 出現頻度が低いことを考慮すると体系的な検討は実用的ではなかった。

そこで, 本研究では VOF 法を用いた流体運動解析と要素集合体の変形を解析する個別要素法を連成させる計算を試みた。VOF 法と個別要素法の連成計算は伊藤ら(2000)が捨石潜堤を対象として行っているが, 静水面を切る構造物を対象とした例はないため, 上記の背景を踏まえ, 比較的容易に捨石護岸の変形を予測するための数値計算手法の開発を目的とした。

## 2. 数値計算法

### (1) 数値波動水路の概要

本検討の流体場解析に用いる VOF 法は「数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会」(2001)で開発した数値波動水路 (CADMAS—SURF) を用いるものとした。この方法は NASA-VOF に基づき, 2 次元非圧縮性流体運動の連続式 (1) および Navier-Stokes 方程式をボラスモデルに基づいて拡張した式 (2) および (3) を基礎方程式とし, 自由表面の境界条件としては VOF 関数  $F$  の移流方程式 (4) を用いる解析手法で, 時系列での波動運動解析が可能である。

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z}$$

$$= -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - R_x + \frac{\partial}{\partial x} \left( \gamma_x \nu_e \left[ 2 \frac{\partial u}{\partial x} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \gamma_z \nu_e \left[ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right] \right) \quad (2)$$

$$\lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \gamma_v g - R_z + \frac{\partial}{\partial x} \left( \gamma_x \nu_e \left[ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \gamma_z \nu_e \left[ 2 \frac{\partial w}{\partial z} \right] \right) \quad (3)$$

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w F}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

ここで,  $t$ : 時間,  $x$  および  $z$ : 水平および鉛直座標,  $u$  および  $w$ : 流速の水平および鉛直成分,  $\rho$ : 水の密度,  $p$ : 圧力,  $\nu_e$ : 分子動粘性係数と渦動粘性係数の和,  $g$ : 重力加速度,  $\gamma_v$ : 空隙率,  $\gamma_x$  および  $\gamma_z$ : 水平および鉛直方向の面積透過率であり,  $C_M$  を慣性力係数として  $\lambda_v = \gamma_v + (1 - \gamma_v) C_M$ ,  $\lambda_x = \gamma_x + (1 - \gamma_x) C_M$ ,  $\lambda_z = \gamma_z + (1 - \gamma_z) C_M$ ,  $R_x$ ,  $R_z$  は多孔質体からの抵抗力であり, 流速の 2 乗に比例する形でモデル化されている。

### (2) 個別要素法 (DEM) の概要

個別要素法は Cundall and Strack (1979) によって提案された要素の集合体の動力学の挙動を数値的に解析する手法で, 要素間の力の伝達が作用・反作用の法則に従うことを条件としている。個々の捨石が満足すべき運動方程式は並進および回転に対してそれぞれ式 (5), (6) および (7) で表される。

$$(m + m') \dot{u}_{pi} = \sum_j [F_{xi}]_j + f_{xi} \quad (5)$$

$$(m + m') \dot{w}_{pi} = \sum_j [F_{zi}]_j + f_{zi} - V_i (\rho_s - \rho) g \quad (6)$$

$$(I + I') \dot{\omega}_{pi} = \sum_j [M_i]_j \quad (7)$$

ここで,  $m_i$ : 捨石  $i$  の質量,  $u_{pi}$ ,  $w_{pi}$  および  $\omega_{pi}$ : 捨石  $i$  の速度の水平, 鉛直方向成分および角速度,  $V_i$ : 捨石  $i$  の体積,  $\rho_s$ : 捨石の密度,  $m_i$  および  $I_i$ : 捨石  $i$  の付加質量および付加慣性モーメント,  $\sum_j [F_{xi}]_j$ ,  $\sum_j [F_{zi}]_j$  および  $\sum_j [M_i]_j$ : 捨石  $i$  が接触している粒子から受ける水平, 鉛直方向成分の力の総和およびモーメントの総和,  $f_{xi}$  および  $f_{zi}$ : 捨石に作用する波力の水平および鉛直方向成分である。

\* 正会員 博(工) 大阪大学助手 大学院工学研究科  
\*\* 正会員 博(工) 東洋建設(株) 鳴尾研究所水工研究室  
\*\*\* 正会員 工 修 東洋建設(株) 鳴尾研究所水工研究室  
\*\*\*\* 正会員 東洋建設(株) 鳴尾研究所水工研究室  
\*\*\*\*\* 正会員 工 博 大阪大学教授 大学院工学研究科

また、式(8)で表される接触条件が満たされるときは、当該する捨石間に図-1に示されるような弾性バネと粘性ダッシュポットの並列配置で表現される力が作用するものとした。

$$r_i + r_j \geq R_{ij} \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 $r_i$  および  $r_j$ : 捨石  $i$  および  $j$  の半径、 $R_{ij}$ : 捨石  $i$  と捨石  $j$  の中心間距離、 $K_n$ ,  $K_s$ : 法線および接線方向のバネ定数、 $\eta_n$ ,  $\eta_s$ : 法線および接線方向の粘性減衰係数、 $\mu$ : 摩擦係数、 $e_n$ ,  $e_s$ : 法線および接線方向の弾性バネによる抗力、 $O_i$ ,  $O_j$ : 接触している2つの捨石である。

### (3) 計算手順

#### a) 解析領域

図-2に、今回数値波動水路で対象とした解析領域を示す。造波にはストークス波第5次近似解による造波境界を用いた。造波境界より岸向きに約3波長の波浪安定化領域を設け、その位置で入射波高などの検定を行うものとした。なお通過波浪の検定は、傾斜護岸を設置せずに計算を行った。また解析領域の岸側端にエネルギー減衰帯を設けた。これにより傾斜捨石護岸に越波が生じた場合でも、解析領域境界からの反射波が護岸背面から作用することを防止することができる。また、傾斜捨石護岸としては複断面構造を想定し、捨石護岸の変形計算は上部のみを対象とした。

#### b) 連成計算

波の作用により断面が変形し、また断面が変形することにより流体場も変化するため、連成計算を行ううえでは、両者の相互干渉を考慮することが重要である。しかし、今回の計算は開発の第一段階として次のような方法で相互干渉を考慮した。

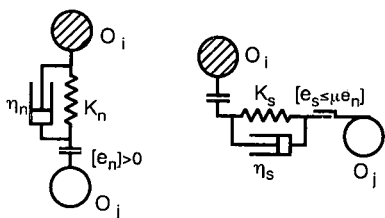


図-1 捨石間作用力モデル

- ①数値波動水路により1周期分の流速波形を出力する
- ②1周期分の流速を繰り返し作用させ、断面変形が収束するまで個別要素法による計算を行う
- ③変形した断面に対して数値波動水路により1周期分の流速波形を出力する
- ④以下、上記の手順を繰り返し、計算された1周期分の流速波形に対して変形が生じなくなった断面を平衡断面とし、最終的な結果とする

また、式(6)の右辺第3項は浮力を表すが、双方の計算を繰り返し行う際の簡略化のために静水面下の捨石のみ浮力が作用すると仮定した。

数値波動水路を用いた流体場解析は、規則波を用いて行った。傾斜捨石護岸を透過性構造物と仮定し、護岸に作用する波浪が安定した時間帯について、1周期分の流速の時間変動を出力した。計算に用いた波浪条件は現地スケールで、造波位置での水深が22.1m、複断面護岸の法先水深が14.5m、さらに変形対象の上部捨石法先水深が7.6m、法勾配が1:4/3、波浪の周期7.0s、波高3.0mとした。差分格子は、水平方向には波長の1/80を基準として $\Delta x=1$ m、鉛直方向には波高の1/10以下の $\Delta z=0.25$ mとした。

個別要素法による断面変形計算では、捨石は現地スケールで粒径 $D=37.5$ cmの円形要素と見なした。まず連成計算を行う前に重力のみの自由落下運動計算を行い、要素をパッキングして初期断面とした。捨石に作用する波力はMorison式で与えられると仮定し、数値波動水路により計算された1周期分の流速波形を繰り返し作用させることで捨石の移動を計算した。捨石間の作用力算定に用いるバネ定数および粘性減衰係数等は荒木ら(2000)を参考にした。

計算の時間刻み $\Delta t$ は、数値波動水路による流体解析では1/2500周期、個別要素法による断面変形計算ではその約1/10とした。したがって、個別要素法の計算において約10ステップ間は流体運動が変化せず、波力も一定であると仮定した。また、透過構造物にポーラスモデルを適用する際およびMorison式を用いる際の慣性力係数 $C_M$ および抗力係数 $C_D$ は、柳山・鈴木(1998)を参考に、 $C_M=1.2$ 、 $C_D=1.0$ とした。

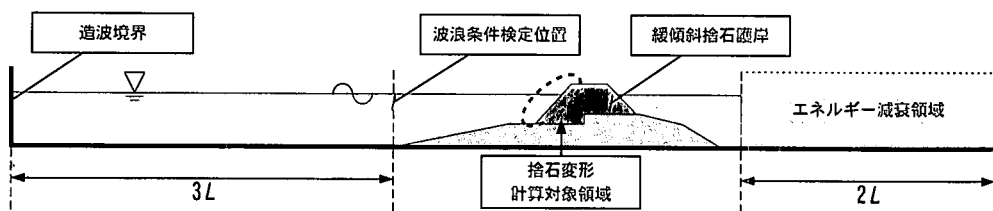
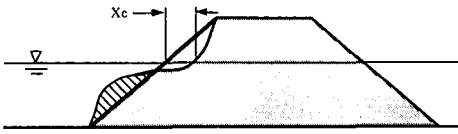


図-2 解析領域

図-3 静水面位置での水平方向断面変形量  $x_e$ 

### c) 断面変形の収束判定

断面変形の収束判定は、図-3に示す静水面位置での初期断面からの水平方向断面変形量  $x_e$  を指標として行った。1周期分の流速波形から計算される波力を十分に繰り返し作用させ、 $x_e$  の変動が小さくなったときを収束と判定し、次の流体運動場解析の断面形状とした。

$x_e$  を収束判定の指標として用いた理由は次の通りである。流体運動と断面変形の相互作用を精度よく取り込むためには、大きな断面変形が生じないうちに流体運動場の計算に断面形状をフィードバックさせる必要がある。断面変形計算中は同一の流速波形を繰り返し作用させているため、侵食された部分には透過性構造物内の小さな流速しか作用せず、侵食域は堆積域に比べて早期に安定形状になりやすい。そこで、後述の水理模型実験結果からも分かるように、通常は侵食域となる静水面位置での断面変形量を収束判定の目安として用いた。

## 3. 水理模型実験

計算結果の検証には、緩傾斜石積護岸を対象とし実施された相川ら (2001) の水理模型実験結果を用いるものとした。実験は多方向不規則波浪場における堤頭部とそれ以外の一般部の捨石護岸変形について検討している。一般部での結果を図-4に示す。実験では多方向不規則波を用い、有義波高を1.0 mから段階的に3.0 mまで増加させて変形量を計測しているため本検討の解析条件とは異なるが、屈折により対象とする捨石護岸一般部付近では比較的護岸法線に対して垂直な方向から波が入射していると考えられることや、最終的に波高3.0 mでの変形形状を求めていることから、変形特性の比較対象とした。水理模型実験結果によると、護岸前面では水面付近が侵食し法尻付近に堆積が生じる侵食型の断面変形を表している。ただし、来襲波高2.0 mまでは断面変形は明確でなく、来襲波高がそれ以上になると、波高の増大とともに急激に断面変形が進んだとされている。

## 4. 計算結果

図-5に、初期断面から波の作用により断面が侵食されていく1周期間の様子を1/4周期ごとに示す ( $T$ : 入射波の周期)。図の左側に傾斜捨石護岸の流速ベクトル、右側に静水面付近を拡大した捨石の移動の様子を示す。

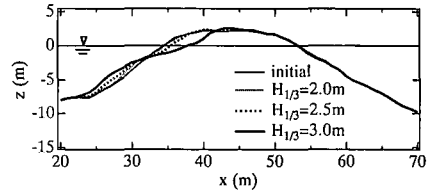


図-4 一般部の捨石護岸変形 (相川ら, 2001)

水理模型実験の結果からも分かるように、法勾配1:4/3の石積護岸ではほとんどの捨石が斜面下方(沖側)に移動している。この傾向が図中にも見られ、波の遡上時には捨石の移動はあまり見られず、波の流下とともに捨石が斜面下方に転落していく様子が再現されている。1周期内だけを見ても捨石が転落していくことが分かるので、波を長時間にわたって入射させる場合には流体場の計算と断面変形計算を交互に行うことにより、相互作用を考慮する必要があることが分かる。以下には、断面形状を双方の計算の繰り返し回数ごとに示す。

図-6(a)に初期断面に対する流速波形から計算された断面形状を示す。縦軸は静水面を0とした鉛直位置を表し、横軸は法先を0とした水平位置である。図-6(b)は水平方向断面変形量  $x_e$  を捨石粒径  $D$  で除した無次元量の波数  $t/T$  による変化を示す。この図から、侵食が6波目~8波目にかけて生じたあとは静水面付近での水平方向の侵食距離はほとんど変化していないことが分かる。したがって、与えられた流速場に対して断面変形は収束したと判断し、10波作用後の断面形状を用いて次のステップの流速場の計算を行った。図-6(a)の断面形状も10波作用後のものである。条件が異なるため単純に比較はできないが、この段階では計算での侵食域は図-4の実験結果よりも小さく、斜面上の法肩付近はほとんど侵食されていない。

図-6(a)の断面に対する流速波形から計算された断面形状を図-7(a)に示す。図-7(b)には水平方向断面変形量  $x_e$  の無次元量の変化を示す。なお  $x_e$  は初期断面からの総変形量で表している。 $x_e$  は細かな変動を繰り返しながら徐々に減少している。12波目から14波目にかけて  $x_e$  がやや増加しているが、この間では全体の断面形状に顕著な変形は見られなかったため、10波作用後の断面形状を用いて次のステップの流速場の計算を行った。図-7(a)の断面形状も10波作用後のものである。この段階では侵食域が拡大し、法肩付近まで侵食されている。

図-7(a)の断面に対する流速波形から計算された断面形状を図-8(a)に示す。図-8(b)には水平方向変形量  $x_e$  の無次元量の変化を示す。 $x_e$  はこの回の計算開始時より若干増加し、静水面付近から上方の侵食作用が弱くなっていることが分かる。 $x_e$  の値に変動は見られるが

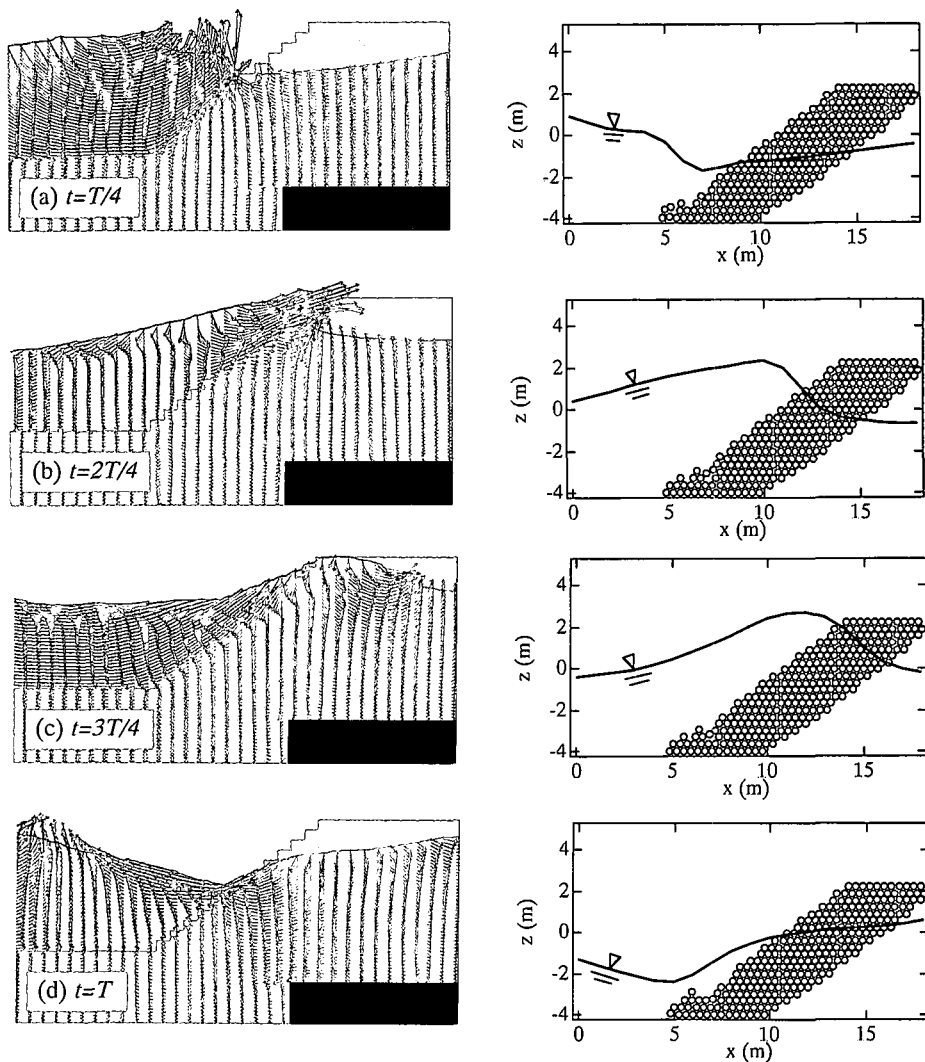


図-5 1周期間での断面変形

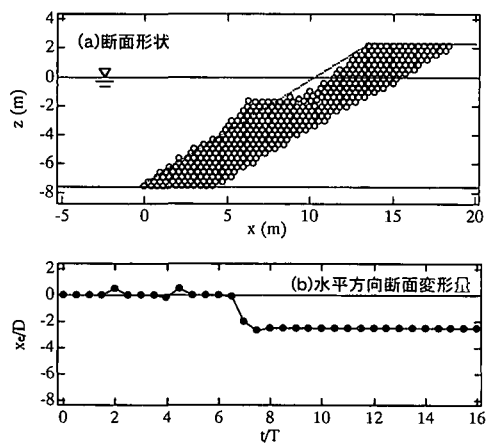


図-6 初期断面からの変形計算

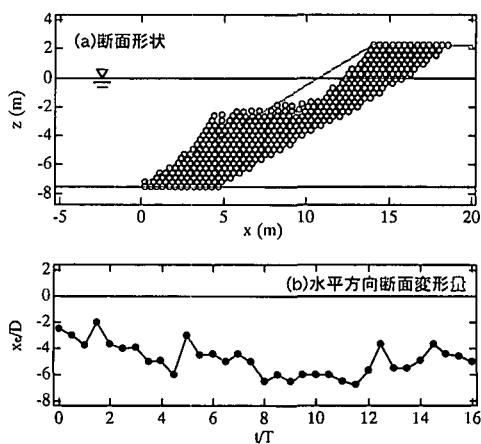


図-7 変形断面からの計算 (繰返し計算2回目)

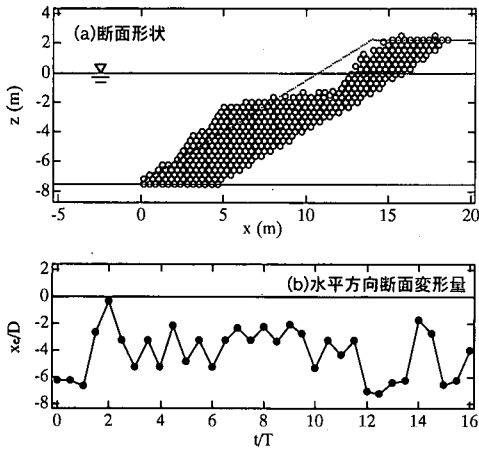


図-8 変形断面からの計算（繰り返し計算3回目）

動的な平衡状態であると考えられ、また図-8(a)と図-7(a)を比較すると法肩付近が若干侵食されているほかは顕著な変化は見られないため、10波作用後の断面を最終的な収束断面形状とした。

図-8(a)に示す最終断面形状からは、図-5で捨石が斜面下方に転落していく様子が再現された結果として、法先から静水面のやや下までが堆積域となり、それより上方では侵食される傾向も水理模型実験の傾向と一致していることが分かる。また、流体場の計算と断面変形計算をそれぞれ1回ずつ行った場合（図-6）では、水理模型実験と比較して侵食域が小さかったが、最終断面では侵食域の形状が実験結果と比較的一致している。これは逆に、双方の計算を1回ずつしか行わなかった場合は、流体運動と断面変形の相互作用が計算に取り込めないことを明確に示したものであると言える。

## 5. おわりに

数値波動水路(CADMAS-SURF)と個別要素法を連成させることにより、傾斜捨石護岸の変形予測手法の提案を行った。今回の計算では流体運動と断面変形の相互作用を直ちに考慮できるモデルの提案までには至らなかったが、両計算を繰り返し行うことで水理模型実験と比較しても再現性の良い結果が得られた。

今後は、流体運動と断面変形の相互作用を精度良く考慮できるモデルとし、また特に砕波した波が直接捨石に作用した際の波力の算定について議論を深めることで、より精度の高い断面変形予測が可能になると期待される。

## 参考文献

- 相川秀一・阪井田茂・金澤 剛・小竹康夫・古川好男(2001): 施工時の捨石層の変形を考慮した緩傾斜石積護岸の施工計画, 海洋開発論文集, Vol. 17, pp. 241-246.
- 荒木進歩・藤原由康・宮崎敏弘・出口一郎(2000): 個別要素法を用いた捨石潜堤の断面変形計算, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 761-765.
- 伊藤一教・東江隆夫・勝井秀博(2000): DEM法とVOF法を用いた粒状体構造物の破壊シミュレーション, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 746-750.
- 榊山 勉・鈴木一広(1998): 数値波動水路による放水口ケーソンマウンド内の底質の吸い出し評価, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 566-570.
- 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会(2001): 数値波動水路(CADMAS-SURF)の研究開発, 沿岸開発技術研究センター(印刷中).
- Cundall, P. A. and O. D. L. Strack(1979): A discrete numerical model for granular assemblies, *Géotechnique* 29, No. 1, pp. 47-65.