

3次元モデルによる消波ブロック群の崩壊過程における ブロック間応力推定

原田 英 治*・後 藤 仁 志**・酒 井 哲 郎***・大 野 正 博****

消波ブロック被覆堤の波浪による被災事例として、ブロックの沈下・散乱がある。ブロックの支持地盤の沈下が生じると、ブロック群は大きく変形し、過度の応力が特定のブロック間に作用して、ブロックの破壊（折損）が発生することが報告されている。本稿では、その被災機構を詳細に検討すべく、ブロック形状を表現できる剛体連結モジュールを組み込んだ3次元個別要素法を用いた数値シミュレーションを実施した。その結果、ブロック間相互作用を伴うブロック群としての崩壊過程の一端が示され、崩壊時のブロック間応力の分布特性が推定された。さらに、単一のブロックの挙動や、ブロック構成要素間の応力など、詳細な情報についても検討した。

1. 緒 言

ケーソン前面に消波ブロックを積上げる消波ブロック被覆堤は、最も一般的な防波堤様式の一つであるが、消波ブロックが波浪に直撃されるため、ブロックの沈下・散乱等の被災事例も多く報告されている（曾我部ら, 1982; 五明ら, 1997; 鈴木・高橋, 1998）。ブロック間に消波に有効な適切な容量の空隙を確保しつつ、来襲波に対してはブロック間の噛み合わせによりブロック群としての十分な抵抗力を有することが、消波ブロック被覆層に求められる要件となる。また、被覆層支持地盤の一部が洗掘等により沈下したときにも、個々のブロックは剛体連結されていないから、被覆層全体としては地盤高の変化に応じて容易に変形できる。このような柔軟性は、消波ブロック被覆層の利点でもある。沈下・変形後に被覆層が引き続き有効に機能するには、ブロック間の噛み合わせが損なわれないことが必要となるが、ブロックの再配置の過程でブロック間作用応力がコンクリートの圧縮およびせん断強度を超えると、ブロックが折損（足折れ）し、局所的に噛み合わせ効果が損なわれることとなる。実際に、消波ブロックの被災事例調査においても、足折れがしばしば報告されている（例えば、五明ら, 1997）。この種の局所的な噛み合わせ効果の損失は、被覆層からの単一ブロックの離脱（抜出し）を誘発し、それを契機に被覆層の大規模な破壊を招きかねない。本研究では、このような消波ブロック被覆堤の被災機構の一端に迫るべく、ブロック間干渉を陽に取り扱える個別要素法型の数値シミュレーションによって、消波ブロック被覆層が局所的な支持地盤の沈下に見舞われた際のブロック間応力の特性を推定する。

2. シミュレーションモデルの概要

計算には、剛体連結モジュールを組み込んだ拡張型の

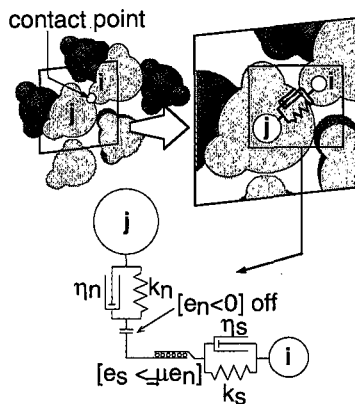


図-1 要素間接触モデル

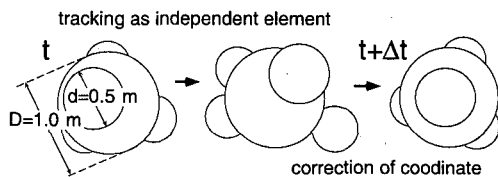


図-2 剛体連結モジュール

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。粒子間相互作用がパネ・ダッシュポット系でモデル化され（図-1 参照）、個々の要素の運動は球の並進および回転の運動方程式を解いて追跡される。

消波ブロックは「テトラポッド」型を対象として図-2中に示すように直径1.0 mの球の周囲に直径0.5 mの4個の球を、4個の小球の中心が作る正四面体の重心に大球の重心が一致するように剛体連結して表現した。剛体を構成する個々の要素は、Koshizukaら（1988）のMoving Solid Modelを準用し、剛体の重心回りの角運動量が保存されるように相対回転角を算定して、要素間の相対位置が保存されるように座標修正を施し剛体挙動させている。シミュレーションでは最初に消波ブロック構成要素間の連結関係はないものとして、全要素を個別要

* 正 会 員 工 博 日本学術振興会特別研究員

** 正 会 員 工 博 京都大学助教授 工学研究科土木工学専攻

*** フェロー 工 博 京都大学教授 工学研究科土木工学専攻

**** 学生会員 京都大学大学院工学研究科土木工学専攻

素法で追跡する。その結果、消波ブロック構成要素は初期の相対位置関係が崩れ変形するが、ブロック構成要素間の初期の相対位置を変化させないように直後に座標修正計算を施す(図-2参照)。座標修正計算は以下の通りである。まず、消波ブロック構成要素の時刻 $t + \Delta t$ での仮速度と仮座標より重心座標 r_{kg} と重心座標での並進速度ベクトル T_k 、重心回りでの角速度ベクトル R_k を算定する。

$$T_k = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} u_{ki} \dots \dots \dots (1)$$

$$R_k = \frac{1}{I_k} \sum_{i=1}^{N_k} u_{ki} \times (r_{ki} - r_{kg}) \dots \dots \dots (2)$$

$$r_{kg} = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} r_{ki}; I_k = \sum_{i=1}^{N_k} |r_{ki} - r_{kg}|^2 \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 I_k : 消波ブロック構成要素の重心周りの慣性モーメント、 N_k : 消波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消波ブロック k の構成要素 i の移動速度

$$\tilde{u}_{ki} = T_k + (r_{ki} - r_{kg}) \times R_k \dots \dots \dots (4)$$

を求める。そして、これを用いて消波ブロック k の構成要素 i の座標は、

$$r_{ki}(t + \Delta t) = r_{ki}(t) + \tilde{u}_{ki} \Delta t \dots \dots \dots (5)$$

と修正される。このように、個別要素法による要素の座標の更新が行われる度に、消波ブロック構成要素に座標修正を施すことにより、消波ブロック間相互干渉を扱った運動が追跡できる。

3. シミュレーション結果

3.1 計算条件

境界壁要素、消波ブロック構成要素の比重はともに $\sigma/\rho = 2.65$ (σ : 境界壁要素および消波ブロック要素の密度、 ρ : 水の密度) であり、境界壁要素は直径 $d = 0.5$ m の球を用いて配置する。

個別要素法で使用したモデル定数 (k_n : 法線方向バネ定数、 k_s : 水平方向バネ定数、 η_n : 法線方向粘性定数、 η_s : 接線方向粘性定数) は、表-1 に示すように後藤ら(2001)の設定法に準じて設定した。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。また、計算時間ステップ Δt はモデルが陽解法であることより、計算の安定性を考慮して、 $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4}$ s とした。

計算領域を図-3 に示す。長さ 14.5 m、奥行き 12.5 m の領域で、領域の中央部の床面が幅 5.0 m にわたって落差 1.0 m の瞬間的陥没を生じる場合に、上層 56 個、中間に 56 個、下層に 72 個の 3 層に規則積みされた消波ブロック群の変形とブロック間応力の時間的変化を計算し

表-1 モデル定数

	3D-model	2D-model
k_n (N/m)	23.8×10^4	4.52×10^9
k_s (N/m)	9.14×10^4	1.74×10^9
η_n (Ns/m)	7.71×10^4	0.40×10^9
η_s (Ns/m)	4.78×10^4	0.25×10^9

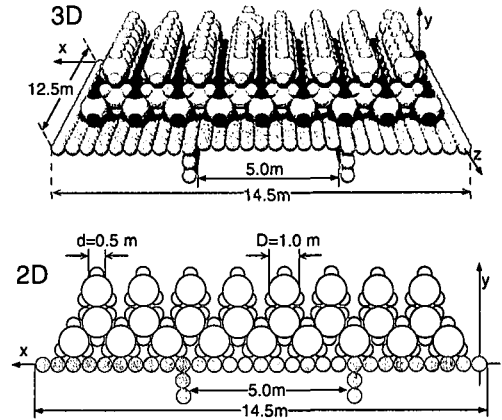


図-3 計算領域

た。なお、本研究では、比較のために 2 次元モデルの計算を実施しているが、3 次元の配列を鉛直面に投影した時 x, y 方向に存在する消波ブロックの個数が等しくなるように 2 次元モデルの初期配列を設定している。表-1 および図-3 にそれぞれ 2 次元モデルで用いたモデル定数と計算領域を示す。なお、各要素の比重および粒径は 3 次元モデルと同一であり、計算時間ステップは $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4}$ s とした。

3.2 消波ブロック群の崩壊過程

図-4 に局所的な支持地盤の沈下によって消波ブロック群が崩壊する過程の瞬間像を示す。パッキング(重力のみの作用下で安定した初期配列を設定する過程)完了直後 ($t = 0.0$ s) の床面の陥没によるブロック群の沈下過程では、3 次元的なブロック間の接触によって、ブロックが多方向に力を及ぼし合ながら下降する様子が確認できる。また、沈下は奥の方から手前へ (z 軸正方向) 伝播するように進行し、沈下完了時 ($t = 0.5$ s) には、消波ブロック群の頂部の沈下量は、左奥で大きく、右手前で小さい配列が得られた。このように、パッキング時に生じる僅かな座標のずれを除けば、ほぼ対称な初期配列にも関わらず消波ブロック群の変形が顕著な非対称性を呈する点が興味深い。

次に、崩壊過程のブロック間作用力の選移を検討するために、ブロック要素間に作用する応力を抽出してシリンドラ形式で表示したのが図-5 である。シリンドラの

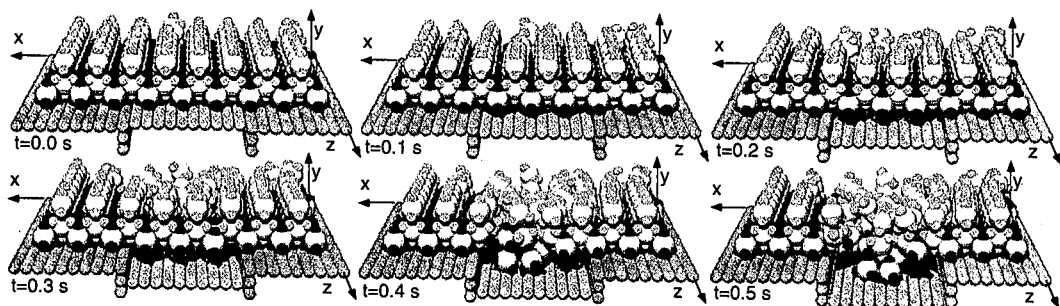


図-4 ブロック群の崩壊過程

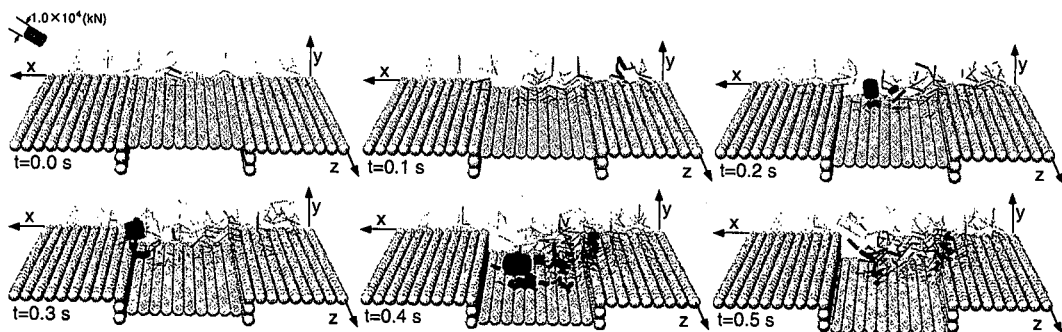


図-5 Force vector plots

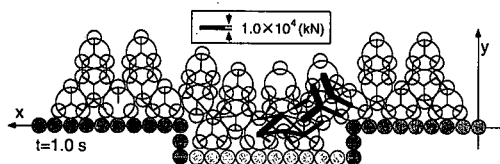


図-6 2次元の崩壊過程と Force vector plots

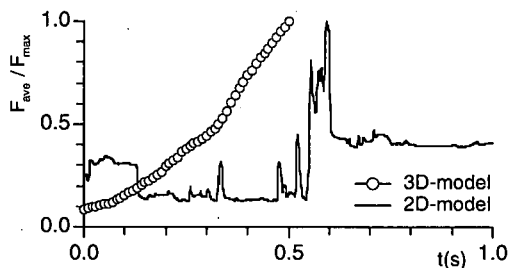


図-7 ブロック群の平均応力

主軸方向が応力の向きを表し、シリンダー径は応力レベルに比例する表示としている。ブロック群頂部の沈下が顕著な左奥の床面付近とブロック群の沈下に伴って大きな曲げモーメントを受けると推定される沈下区間の右奥のエッジ部に顕著な応力が作用しており、ブロックの足折れが危惧される箇所であると考えられる。

図-6に2次元モデルの最終形状(時刻 $t=1.0$ s)と同時刻におけるブロック要素間応力を示す。なお、応力は線分方向に作用し、線分の太さが応力レベルに比例する表示としている。3次元モデルの結果と比較した表現力の乏しさは否定できないが、それでも最終崩壊形状や応力集中が生じる箇所には、3次元モデルとの一定の類似点が見られる。このように、2次元モデルでも大略的な予測が可能であり、予測する際に要求される精度に応じたモデル選択が肝要であると考えられる。

図-7は、ブロック間応力の大きさの単純平均の時系列を示している。なお、2次元モデルと3次元モデルで

は使用しているモデル定数が異なるため、それぞれの平均応力の最大値($F_{\max}$)で規格化して図示した。2次元モデルでは、中盤の $t=0.3, 0.5, 0.6$ s付近でスパイクノイズ的な応力の急増減が生じているが、3次元モデルでは僅かな変動は伴うものの、ほぼ単調な増加傾向で推移する。2次元モデルは3次元モデルと比較して要素間の接触点が少ないので、過度の応力集中が生じ易いことが、このような特性の相違の一因と考えられる。

3.3 単一ブロックの追跡

消波ブロックの被災事例で報告されているブロックの折損(足折れ)の詳細な議論には、個々のブロックの追跡が有用である。そこで、消波ブロック群中の単一のブロックに注目して、そのブロックの軌跡ならびにブロック構成要素に作用する応力のモニタリングを実施した。

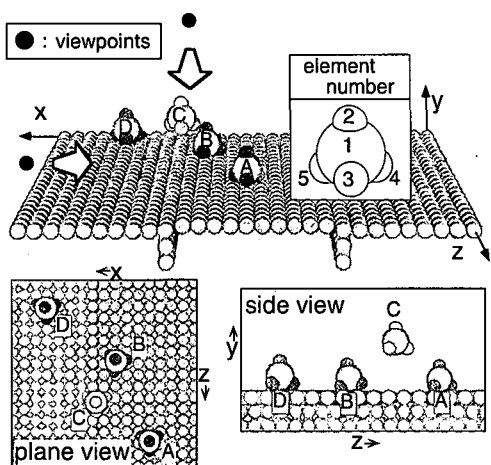


図-8 ブロック A, B, C, D の配置

図-8 に示すブロック A, B, C, D の軌跡とその構成要素の応力の時系列を図-9 に示す。ブロック A は床面の陥没が発生した後、時刻 $t=0.0-0.3$ s で緩やかに下降し、時刻 $t=0.3-0.5$ s の間に運動が活発化して、短時間に大幅な鉛直下降を呈しつつ、右奥へ移動している。また、構成要素に働く応力レベルも短時間に大幅に上昇し、窪地に傾れ込むようにして密集する周囲のブロックから応力を集中して受けていると推定される。初期配列で奥に位置するブロック B は、図-4 の瞬間像で示したように、奥からブロック群の崩壊が進行するため、ブロック A と比較して早い時刻 ($t=0.1-0.3$ s) に移動を開始する。応力もブロック B の運動に伴って変動し、ブロック間の衝突を示す突発的な応力集中が各構成要素に見られる。エッジ部にまたがって配置されたブロック C は、床面陥没後も暫くはエッジ上に留まり、時刻 $t=0.3$ s までは顕著な運動は見られないが、床面の陥没に伴う周辺のブロックの移動が波及し、周辺ブロック群に巻き込まれて陥没部に転落する。その過程が時刻 $t=0.3$ s 以降の座標と応力の急激な変化に如実に表れている。一方、固定境界面上に配置されたブロック D は殆ど床面の陥没による影響が及ばず、応力にも僅かな変動が見られる程度である。

次に、ブロックの挙動を視覚的に把握するには連続した数フレームの画像を重ねて残像効果に類する表示を行うと都合が良い。そこで、ブロック A を例に 0.1 秒間隔の 6 フレームを重ねて表示したのが図-10 である。図-9 でも示されたように時刻 $t=0.3$ s から急激に下降しながら大きく右奥に向かって移動するブロック A の振る舞いが示されている。このように多数ブロック群の内部で生じる単一のブロックの運動だけを抽出してコマ送りで観察することができる点がこの種のシミュレーション

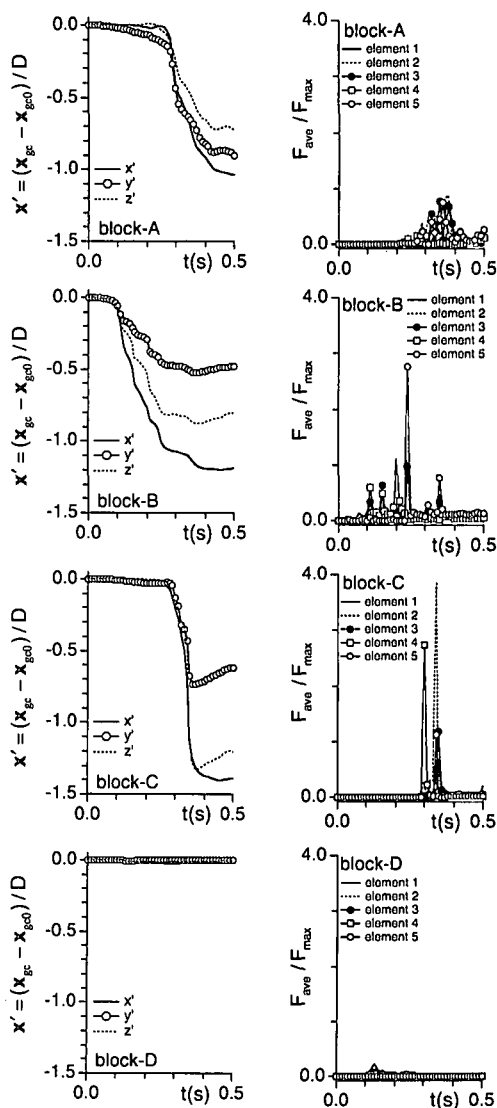


図-9 各ブロックの軌跡 (左) と応力 (右)

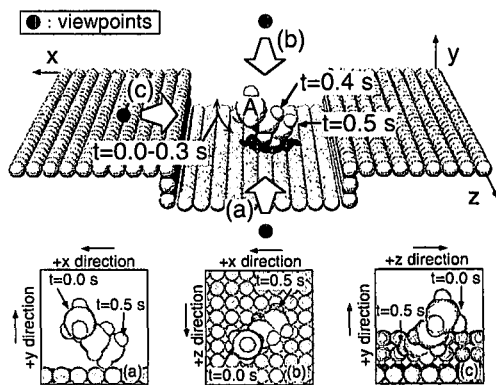


図-10 ブロック A の運動追跡

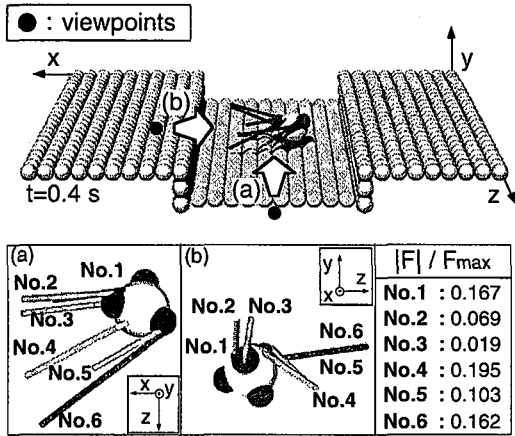


図-11 構成要素に作用する応力レベル

の利点であり、個々のブロックの運動が細部まで浮き彫りにされる。さらに、図-11のように、ブロックに作用する応力の作用点、方向、レベルまでも詳細に表示することが可能である。こうした各構成要素の詳細な情報が明らかになると、ブロックの足折れの発生が懸念される場所の具体的な特定が可能となり、効果的なブロックの設計荷重の評価や消波ブロック群の設計にも有用な情報となることが期待できる。

4. 結 語

本研究では、3次元個別要素法型の粒状体モデルに、個々の要素を剛体連結させる剛体モジュールを組み込んで任意形状の物体間の相互作用を陽に表現可能にしたコードを用いて、局所的な支持地盤の沈下に見舞われた際の消波ブロック群の崩壊過程のシミュレーションを実施した。

ブロック群の崩壊過程の各時間について視覚的に明瞭

に示すと同時に、崩壊過程においてブロック折損被害が危惧されるブロック間の応力集中が発生する箇所を推定した。さらに、特定のブロックの軌跡やブロック構成要素別の応力作用状態を示し、3次元モデルの情報量の多さを示して、消波ブロックの詳細設計への本稿のシミュレーションの導入についての可能性を示唆した。

今回は「テトラポッド」型消波ブロックを大粒径1個と4個の小粒径の球で単純化して構成したが、今後は実際のこの種の消波ブロックに近い幾何形状のモデルを剛体連結モジュールを用いて作成し、実際のブロックの再現性を高めるとともに、応力レベルの定量的な評価についても検討を進めて、より質の高いシミュレーションへと発展させたい。さらに、ブロックの足折れに対するコンクリートの降伏応力を考慮してブロック構成要素間の剛体連結を切断し、足折れ現象も含めて、シミュレーションを実施したいと考えている。

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.
- 五明美智男・高橋重雄・鈴木高二郎・姜 閔求 (1997): 消波ブロック被覆堤のブロックの安定性に関する現状調査 (第2報), 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 961-965.
- 鈴木高二郎・高橋重雄 (1998): 消波ブロック被覆堤のブロック沈下に関する一実験, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 821-825.
- 曾我部隆久・伊東司郎・浅川 昭・西田芳浩 (1982): 離岸堤 (消波ブロック堤) の被災原因に関する考察, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 423-427.
- Koshizuka, S., A. Nobe and Y. Oka (1988): Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semi-implicit method, Int. J. Numer. Meth. Fluids, Vol. 26, pp. 751-769.