

個別要素法による砂地盤を考慮した傾斜堤の変形解析

藤井直樹* ・興野俊也**・安田勝則***
中野 修****・大熊義夫*

消波ブロック被覆式傾斜堤は、消波ブロックの沈下等の被災事例が多く、消波ブロック下部の砂地盤の洗掘・吸い出しや液状化が、変形の主要な原因として考えられている。近年、防波堤などの港湾施設に対する性能設計の体系化が進み、変形量で評価することが多くなってきているため、構造物の破壊時の挙動を含め、多くの情報が得られる数値解析手法の高度化が盛んに検討されている。そこで本研究では、基礎地盤も考慮した消波ブロック被覆式傾斜堤を対象とし、波浪場計算にVOF法による数値波動水路を用い、それを作用力として地盤や消波ブロック等の大変形問題への適用が可能である個別要素法 (DEM) による変形計算手法の適用可能性について検討した。

1. はじめに

近年、防波堤などの港湾施設に対する性能設計の体系化が進み、変形量で評価することが多くなってきているため、構造物の破壊時の挙動を含め、多くの情報が得られる数値解析手法の高度化が盛んに検討されている。防波堤の被災は、変形の進行過程やメカニズムが明確でないのが現状である。特に、消波ブロック被覆式傾斜堤では、消波ブロックの沈下等の被災事例が多く、消波ブロック下部の砂地盤の洗掘・吸い出しや液状化が、変形の主要な原因として考えられている (鈴木ら, 2002)。

筆者ら (藤井ら, 2001, 2002) は、波浪場計算に数値波動水路 (CADMAS-SURF, 2001) を用い、それを作用力として構造物の大変形問題への適用が可能である個別要素法 (DEM) によるケーソン式防波堤の滑動計算手法や消波ブロック被覆堤の変形計算手法について検討している。

今回の研究では、地盤を考慮した消波ブロックや捨石の変形挙動が把握できるモデルの構築を目的に、個別要素法 (DEM) による傾斜堤の変形予測計算手法について検討した。

2. 水理模型実験

(1) 実験概要

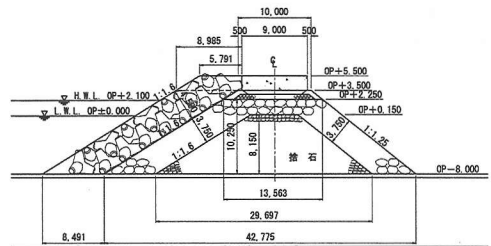
ブロックおよび砂地盤の変形状況を観察するため、図-1に示す断面形状を対象とした移動床実験を実施した。模型縮尺は1/50とし、消波ブロックはブロックの移動を促すため、16t型テトラポッドとした。実験は、写真-1のようにブロックの挙動に着目し水路幅方向に1列だけ並べた実験 (ケース1)、写真-2のようにブロックを水平三層積した実験 (ケース2)、図-1の断面形状に対する実験 (ケース3、写真-3) の3タイプを実施した。

ケース1, 2の波浪は、 $H=7.5\text{ cm}$, $T=2.26\text{ s}$ (現地換算 $H=3.75\text{ m}$, $T=16\text{ s}$) の規則波, ケース3は $H_{1/3}=12\text{ cm}$, $T_{1/3}=2.26\text{ s}$ (現地換算 $H_{1/3}=6\text{ m}$, $T_{1/3}=16\text{ s}$) の不規則波を対象とした。砂の中央粒径は、 0.084 mm である。

(2) 実験結果

写真-1は、23波作用させた後のブロック1列実験における変形状態である。これに先立ち実施した固定床実験ではブロックが5cm岸側に移動したのに対し、移動床実験では3, 4mm沈下し、僅かに右側 (岸側) に傾いた。なお、写真や図は左側が沖、右側が岸を示す。

写真-2は、ブロック水平三層積の実験における変形結果であり、噛み合わせの小さかった天端ブロックが転倒し、3, 4mm沈下した。また、固定床実験より変形が



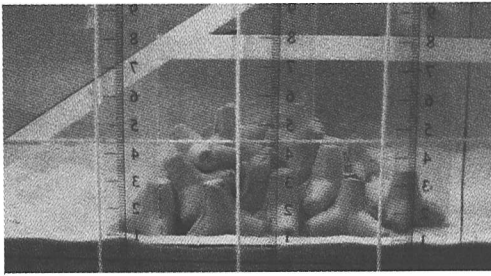
寸法は現地スケール(mm)

図-1 実験断面

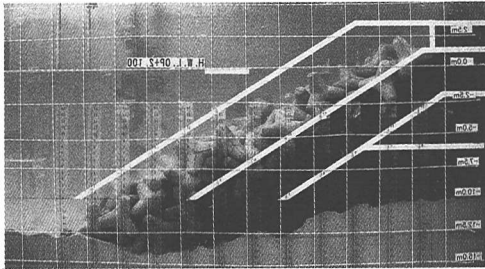


写真-1 ブロック1列に対する実験結果 (ケース1)

* 正会員 東電設計(株)港湾・海岸部
** 正会員 東京電力(株)技術開発研究所 建設技術G
*** 東京電力(株)技術開発研究所 建設技術G
**** 正会員 修(工) 東京電力(株)東火力事業所保修部土木建築G



写真一2 水平三層積に対する実験結果 (ケース2)



写真一3 消波ブロック被覆式傾斜堤に対する実験結果 (ケース3)

小さかった。沈下は一気に進行するのではなく、徐々に進行していく様子が観察された。

写真一3は、消波ブロック被覆式傾斜堤に対する移動床実験結果であり、捨石マウンド部に比べて比較的空隙の大きなブロック下部の地盤が洗掘され、ブロックの沈下が徐々に進行していく過程が見られた。沈下量は8cm程度であり、10000波作用させた結果である。

3. 解析モデル

地盤を考慮した消波ブロック被覆式傾斜堤に対する変形解析モデルは、構造物と地盤の変形解析モデルとその作用力を求めるVOF解析と浸透流解析モデルから成る。

(1) VOF・浸透流解析モデル

傾斜堤および砂地盤挙動の作用力となる外力場の解析は、堤体内および周辺に対するVOF解析(沿岸開発技術研究センター, 2001)と地盤内の圧力伝播を計算する浸透流解析に分けて行った。両解析の接続は、VOFで計算された波浪による海底地盤面上の水圧変動を浸透流解析の境界条件として設定した。便宜上分けたVOF解析の底面は、固定境界条件を用いている。また、上部工は不透過条件としているが、ブロック内では中野ら(2002)を参考に、抗力係数1.0、慣性力係数1.2、空隙率0.5を設定した。

地盤を構成する要素に対する間隙水の影響を考慮するために、①要素の運動による間隙の変化、②間隙の変化

による間隙水圧の発生、③間隙水圧の要素に対する作用、④間隙水の消散、について計算している。④が浸透流解析の項目であり、①～③を追加して差分法によりモデル化した。

(2) DEMによる堤体・地盤モデル

個別要素法では、互いに接触する多数の要素間の接触力をバネ、ダッシュポット、スライダー、ディバイダーを用いてモデル化し、要素一つ一つについて運動方程式をたて、VOF・浸透流解析結果を流体力として作用させることによって変位が求まり、その変位に基づいて新たに外力が与えられる。並進および回転に対する運動方程式の解き方は、木山・藤村(1983)と同様であり、流体力の与え方が異なる(藤井ら, 2002)。

a) 消波ブロックと上部工のモデル化

消波ブロックは、通常の要素と比較してディバイダーとスライダーが無く、引張り力に対して抗力を発揮し、また要素間にすべりが生じない、目黒(1988)による連結要素でモデル化した。上部工は、矩形の隅部に円形要素を配置し、これらを互いに間隙バネで連結し、隅部の円形要素の外縁を辺要素で外部を区画する多角形要素(中瀬ら, 2002)を採用した。

図一2にDEM要素モデル図を示す。2次元解析のためケース1は、ブロック単体を扱うことになる。ケース1と2のブロックは16tの1/100縮尺としたため、高さを3.04cmで作成した。ケース1の解析範囲は、地盤の幅0.2m、高さ0.1mであり、ケース2は幅を0.3m、ケース3は1.3mと設定した。底面と左右境界は固定条件とした。DEM要素の平均粒径は砂地盤を1cm、捨石マウンドを2cmとし、粒径にばらつきを与えてパッキングした。

b) 波動場計算モデルからDEMモデルへの作用力

堤体のDEM要素への作用方法は、消波ブロック、捨石マウンドと上部工に分けた。VOF解析結果より、消波ブロックとマウンド部は流速値からモリソン式による流体力を要素に作用させ、上部工は圧力をDEM要素への作用波力とした。慣性力係数はVOF解析と同様とし、揚力係数は0.5とした。この値は固定床実験におけるブロックの移動量に対し確認して設定したものである。

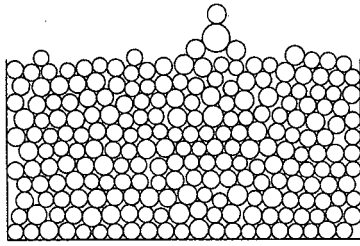
地盤DEMモデルは、浸透流解析により得られた動水勾配に基づく浸透力を作用させた。また、作用力算定に必要なバネ定数等は中瀬ら(2002)を参考に設定した。

4. 解析結果

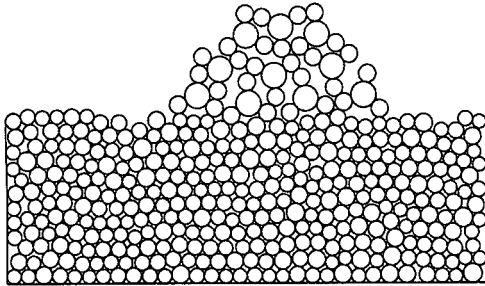
上記の解析モデルを用いて3つの移動床実験に対する再現解析を実施した。

(1) ブロック1列(実験ケース1)の解析

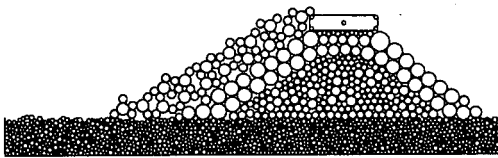
図一3に計算初期断面に対する変位ベクトルを示す。



(a) ケース 1



(b) ケース 2



(c) ケース 3

図-2 DEM 要素モデル

作用している波は非線形性のため、振動流の場合と異なり全体的に岸側に移動している。ブロックは岸側に傾き、僅かに沈下している。その結果、ブロック岸側表面の地盤粒子が盛り上がるため、ベクトルは上方に向いている。

図-4はブロックとその下部および岸沖地盤表面粒子の水平と鉛直方向の移動量を示したものである。変位ベクトルで見られたように、ブロックは右側（正）方向に移動し、ブロックは沈下していく。ただし、ブロックの下部粒子は鉛直方向に変化せず、水平方向に移動している。ブロック沈下量は実験より小さいが、傾きながら沈下する傾向は再現できている。

図-5は接触力分布状態を示したものであり、接触力が大きい濃い線は初期に密に存在していたが、波作用後は全体的に接触力が小さくなった。ブロック周辺には大きな接触力もなく、流動化し易い状況下であると考えられる。

(2) ブロック水平三層積（実験ケース2）の解析

図-6は解析後の変形状況を示したものであり、噛み合わせが弱い天端のブロックが岸側に転倒している。実

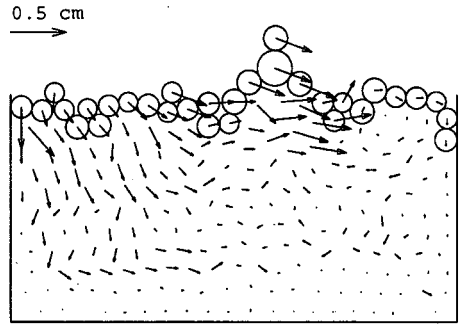


図-3 変位ベクトル（ケース1）

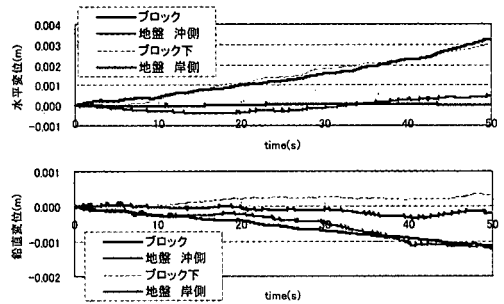
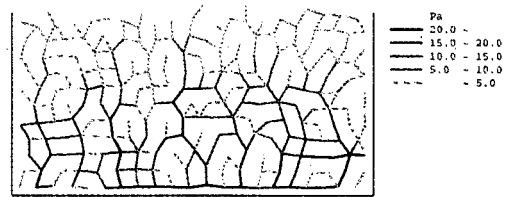
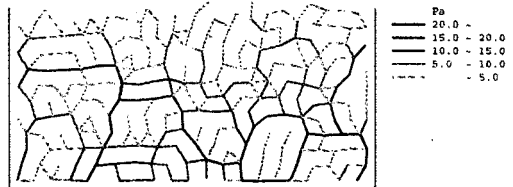


図-4 水平・鉛直変位時系列（ケース1）



(a) 初期状態



(b) 50秒 (22t/T) 後

図-5 接触力分布（ケース1）

験に見られた状況と良く一致している。図-7に計算初期断面に対する変位ベクトルを示す。ブロック1個が転がり落ちたため、ベクトル4本が大きくなっている。その他のベクトル向きは、前面ブロックは沖側、背面ブロックは岸側に移動している。ブロック周辺の地盤も同様の動きを示しているが、全体的には沖側に移動している。図-8は一層目の4つブロック（沖から岸側の順）とその

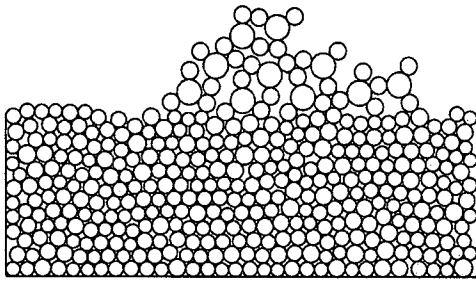


図-6 解析後の状態 (ケース2)

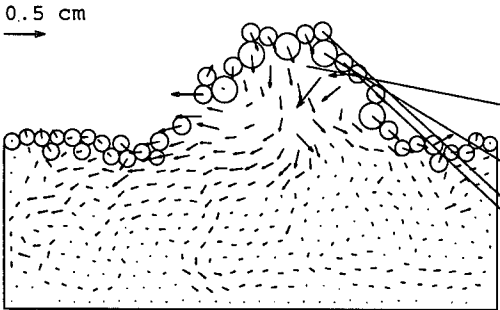


図-7 変位ベクトル (ケース2)

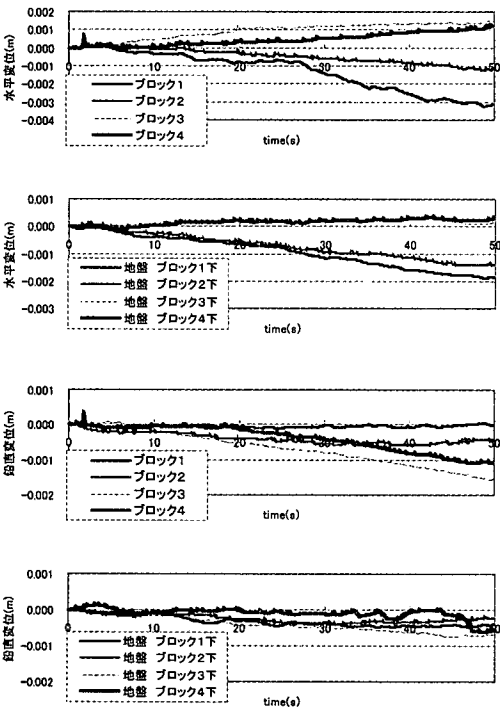
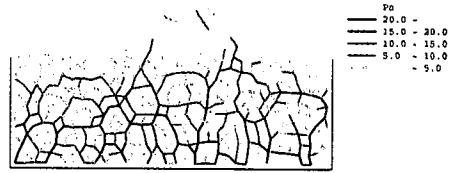


図-8 水平・鉛直変位時系列 (ケース2)

下部地盤表面粒子の水平と鉛直方向の移動量を示したものである。変位ベクトルで見られたように、沖側2つのブロックは沖側(負)方向に移動、残りは岸側に移動し、



(a) 初期状態



(b) 50秒 (221/T) 後

図-9 接触力分布 (ケース2)

ブロック1以外は沈下していく。沖側ブロック下部粒子は沖側に移動している。移動量はブロックの半分程度である。ブロック沈下量は実験より小さいが、継続して沈下する傾向は再現できていると考えられる。

図-9は初期と解析後の接触力分布状態を示したものである。接触力が大きい濃い線はブロック直下の中層から下層にかけて、初期よりも波作用後の方が増加している。しかし、ブロック直下やブロック前面の地盤においては、大きな接触力もなく、流動化し易い状況下であると考えられる。ブロック群は、最も沖側と岸側のブロックだけで地盤に支えられている。

(3) 消波ブロック被覆式傾斜堤 (実験ケース3) の解析

図-10に計算初期断面に対する変位ベクトルを示す。消波ブロックは、沖側に移動している。ブロック直下と前面の地盤も僅かに沖側移動が見られるが、ブロックと比べ非常に小さい。図-11は浸透流解析による間隙水圧の時刻歴である。海底下1cmより9cmの方が振幅は小さく、波形が正弦的である。海底下1cmに着目すると間隙水圧はブロック直下付近が最も大きく、上下非対称波形であり、押し波時間に比べて引き波の継続時間が長い。ごく表層付近で負圧が長い時間発生すると上向きの浸透流が発生する。解析をさらに継続するとブロック下部地盤が噴砂のような状態になり、不安定な結果が得られた。

図-12は初期と解析後の接触力分布状態を示したものである。ブロック直下やブロック前面の地盤においては、初期に存在した大きな接触力がなくなっている。特に、ブロック下部の応力柱がなくなっているため、ブロック間を流下する流れにより砂が巻き上げられ易いと考えられる。また、全体的に大きな接触力が減り、応力柱の

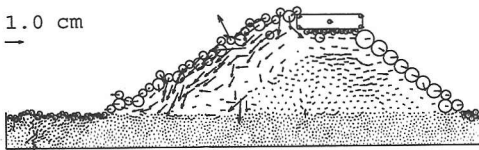


図-10 変位ベクトル (ケース 3)

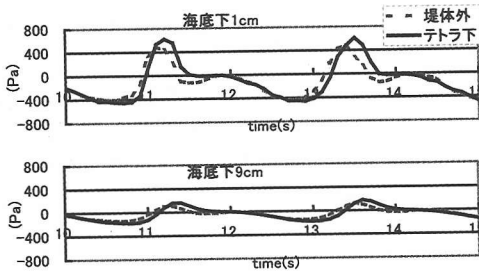
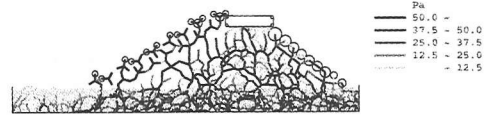
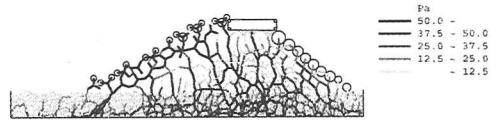


図-11 間隙水圧時系列 (ケース 3)



(a) 初期状態



(b) 解析後

図-12 接触力分布 (ケース 3)

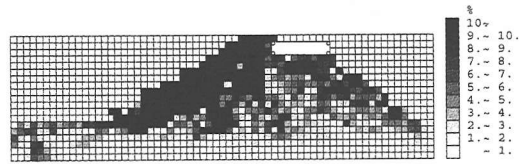


図-13 ひずみ分布 (ケース 3)

形成が目立つ。図-13 は変形状態を把握するため、格子で分割し、格子のひずみ分布を計算した。変位ベクトルと対応しており、ブロックの変形が大きい。他にひずみが大きい箇所は、ブロック下部と前面域である。予備検討として事前に実施した固定床実験とその再現計算では、ブロックがロッキングする程度で、捨石や上部工の移動が生じない結果が得られている。地盤表面付近のひずみが大きい領域の影響でブロックの変形が生じていると考えられる。

5. おわりに

本研究では、消波ブロック被覆式傾斜堤を対象に地盤も含めた消波ブロック・捨石の変形計算を実施し、個別要素法の適用性について検討した。まとめを以下に示す。

- ① 地盤と構造物の相互に作用する力を詳細に検討可能な DEM モデルを構築し、ブロックと地盤間における変形解析を実施した結果、実験の変形状況を再現できた。
- ② 間隙水圧分布に起因する揚力の影響でブロック下部地盤の接触力(支持力)が低下し、引き波時のブロック下部の流れによる地盤変形が推察される。
- ③ 構築したモデルは計算時間の制約上、砂粒子を粗くし、地盤解析領域を狭くしたため定量的評価に課題がある。実験ではブロック内部を流下する流れにより、浮遊砂となって沖側に流出された。このような現象や浸透流の影響がどの程度の割合で、砂の洗掘や吸い出しに寄与しているかも、今後の課題として

残されている。

DEM は、詳細な情報が得られる変形評価手法として発展が期待できるため、この今後も課題解決に向けて改善していく予定である。

参考文献

沿岸開発技術研究センター (2001): 数値波動水路 (CADMAS-SURF) の研究・開発, 沿岸開発技術ライブラリー, No. 12, 296 p.

木山英朗・藤村 尚 (1983): カンドルの離散剛要素法を用いた岩粒状体の重力流動の解析, 土木学会論文報告集, 第 333 号, pp. 137-146.

鈴木高二朗・高橋重雄・高野志忠・下迫健一郎 (2002): 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の沈下被災について, 港研報告, 41 巻, 第 1 号, pp. 51-89.

中瀬 仁・宮田正史・長尾 毅・本田 中・阿部光信・興野俊也・菅野高広 (2001): 個別要素法によるケーソン式防波堤の挙動解析, 応用力学論文集, Vol. 5, pp. 461-472.

中野 修・興野俊也・安田勝則・藤井直樹 (2002): 規則波・不規則波による傾斜堤の波力・越波伝達波への数値波動水路の適用性について, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 726-730.

藤井直樹・興野俊也・安田勝則 (2002): 個別要素法による消波ブロック被覆堤の変形計算, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 761-765.

藤井直樹・興野俊也・安田勝則・大熊義夫 (2001): 個別要素法によるケーソン防波堤の滑動計算, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 801-805.

目黒公郎 (1998): 粒状体シミュレーションによるコンクリート構造の破壊解析, 地震研究所集報, Vol. 63, pp. 409-468.