

個別要素法による消波ブロック被覆堤の変形計算

藤井直樹*・興野俊也**・安田勝則***

近年, 変形を考慮した信頼性設計法などが盛んに検討されており, 今後, 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シミュレーションが重要になると考えられる。本研究では, 消波ブロック被覆堤を対象にケーソンの滑動, 消波ブロックの変形計算手法について検討した。構築したモデルは, 消波ブロック被覆堤のブロックとケーソン部に連結要素と多角形要素で表現した個別要素法 (DEM) を適用し, 数値波動水路 (VOF) による計算結果を作用力とした変形計算手法であり, ケーソンに作用する波力以外に, ブロックの自重やブロックへ作用する波力を通した荷重も含めた適用が可能になった。

1. はじめに

近年, 変形を考慮した信頼性設計法などが盛んに検討されており, 今後, 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シミュレーションが重要になると考えられる。既に, 水理模型実験に代わる設計波力評価手法としては, VOF 法による数値波動水路 (CADMAS-SURF, 2001) が有力なツールとして検討され, さらに, 波の場だけでなく構造物の変形量の予測が期待される。筆者ら (藤井ら, 2001) は, 波浪場計算に数値波動水路を用い, 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について報告している。

今回の研究では, 代表的な構造形式である消波ブロック被覆堤を対象とし, 直立ケーソン部の滑動に加えて, 消波ブロックの変形量を予測できるモデルを構築することを目的に, 個別要素法による変形予測計算手法について検討した。また, ケーソンには, 波がブロックを透過し直接作用する波力とブロックの寄りかかりによる荷重 (ブロック荷重) が働く。個別要素法による変形計算では, ブロック荷重を直接取り扱うことが期待できるため, これを考慮した計算についても検討した。

2. 数値計算の概要

(1) 数値波動水路の概要

消波ブロック被覆堤を対象とした変形計算手法は, 波浪場の計算とその結果を作用力とした構造物の変形計算から成る。波浪場計算には VOF 法に基づく数値波動水路 (CADMAS-SURF, 2001) を用いた。計算は, 防波堤の遡上や越波による波の変形を精度良く再現するため堤体周辺の計算格子間隔を細かくし, それ以外の領域は徐々に粗い格子とした。堤体は不透過としているが, ブロック内では榊山・鈴木 (1998) や中野ら (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。

(2) 個別要素法の概要

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, 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, 数値波動水路による計算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。

a) 消波ブロックとケーソンのモデル化

個別要素法は通常, テトラポッドのような構造物を表現することが困難である。目黒 (1988) はバネとダッシュポットで表現した間隙バネを提案し, このバネで円形要素を連結することによって任意形状を作成している (以下, 連結要素と称す)。連結要素は, 通常要素と比較してディバイダーとスライダが無く, 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点が異なる。そこで, 消波ブロックは, 連結要素でモデル化した (図-1)。

個別要素法で用いる要素は, 通常円形なので, ケーソン等の構造物をモデル化するには, 別途工夫が必要である。藤井ら (2001) はケーソンの滑動計算に連結要素を用いたが, 平滑な面の作成が困難であった。そこで本研究では, ケーソン部のモデル化として中瀬ら (2002) が提案している多角形要素を採用した。多角形要素は, 図-2 に示すように多角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と呼ぶ境界で外部を区画するモデル化手法で

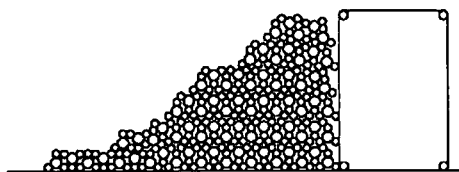


図-1 消波ブロック被覆堤の要素モデル

* 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

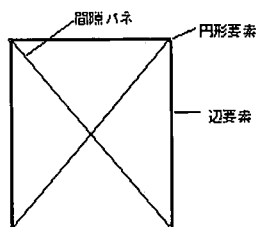


図-2 ケーソンモデル (中瀬ら, 2002)

ある。多角形要素の利点は、円形要素と辺要素のみを使用しているため、基本的な接触判定アルゴリズムをそのまま利用でき、かつ任意形状の剛体を簡単にモデル化できることである。このモデルは、辺要素や隅部の円形要素に接触した他の要素や境界からの荷重を、等しく隅部の円形要素に分配することにより、個別要素法の計算アルゴリズムに組み込まれている。

b) 数値波動水路から DEM 要素への作用力

DEM 要素への作用力は、消波ブロックと直立ケーソン部に分けて考えた。数値波動水路では圧力と流速を直接解いているため、消波ブロックは流速値からモリソン式（抗力・慣性力）に揚力も加えた流体力を各要素に作用させ、直立ケーソン部には圧力を DEM 要素への作用波力とした。抗力係数と慣性力係数は数値波動水路と同様とし、揚力係数は 0.5 とした。また、作用力算定に必要なバネ定数等は中瀬ら (2002) を参考にした。

3. 個別要素法によるシミュレーション

(1) 消波ブロックの変形計算

消波ブロックの変形計算対象は、鹿島ら (1992) の消波工の水理模型実験結果である。計算対象ケースは変形量の大きい中型実験（縮尺 1/85.5）とし、規則波（波高 $H=0.2093$ m, 周期 $T=1.73$ s）である。ブロックの重量は 59 g である。図-3 に実験に用いられた護岸断面形状を示す。図-4 に消波工変形実験結果を示す。

図-5 は数値波動水路による流速ベクトルの計算結果である。消波工内外で押し波、引き波時とも位相の違いが見られる。また、斜面近傍で大きな流速が発生してい

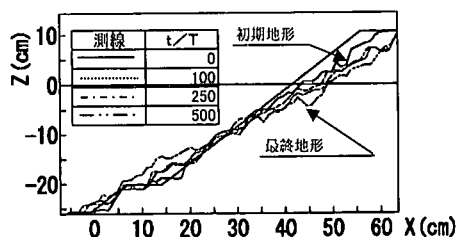


図-4 実験結果 (鹿島ら, 1992)

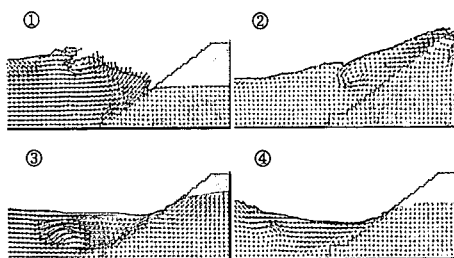


図-5 流速ベクトル結果 (上段：押し波時, 下段：引き波時)

る。流速は静水面付近から法肩で非常に大きく、消波工外で渦が見られる。

実験に対する要素は、図-1 のようにモデル化し、ケーソンは滑動させず消波ブロックのみを対象とした計算を実施した。図-6 がテトラポッド消波工変形計算結果である。計算時間は 100 周期間実行した。ブロックの変形は比較的早い段階で生じている。ブロックは、押し波時に水面の上昇と同時に浮上し、引き波時に沈降しながら法尻方向へ移動している。数値波動水路の計算では、斜面上の流速が大きく、マウンド内部の流速は小さくなる。そのため、表層のブロック要素は移動しやすく、一度消波工から外れた要素は容易に移動しやすくなる。DEM による変形計算では、斜面上の水面より上方の法尻付近で大きく移動しており、実験で見られる傾向が概ね表現可能であることがわかる。

実験の最終地形は変形が収束状態でなく、変形量が大きい実験結果であるが、計算結果の方がより変形の進行が速かった。その原因として、計算のブロックは静水状態で積み、その後締め固まっていなかった状態で計算したため、初期の変形の進行が速かったものと考えられる。また、揚力係数は抗力係数の半分と仮定したが、揚力係数や抗力係数の設定を検討する必要があると考える。

(2) ケーソン水平載荷時のブロックの変形

波を作用させる前に、ケーソンの滑動によりブロックがどのように変形するか、またそのときにケーソンに作用するブロック荷重の変化について水平載荷を模擬した計算により検討した。写真-1 はケーソンを強制的に移動させた場合のブロックの変形程度を観察したものであ

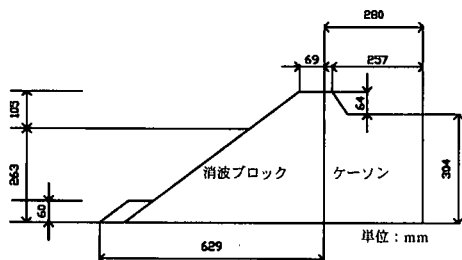


図-3 実験断面形状 (鹿島ら, 1992)

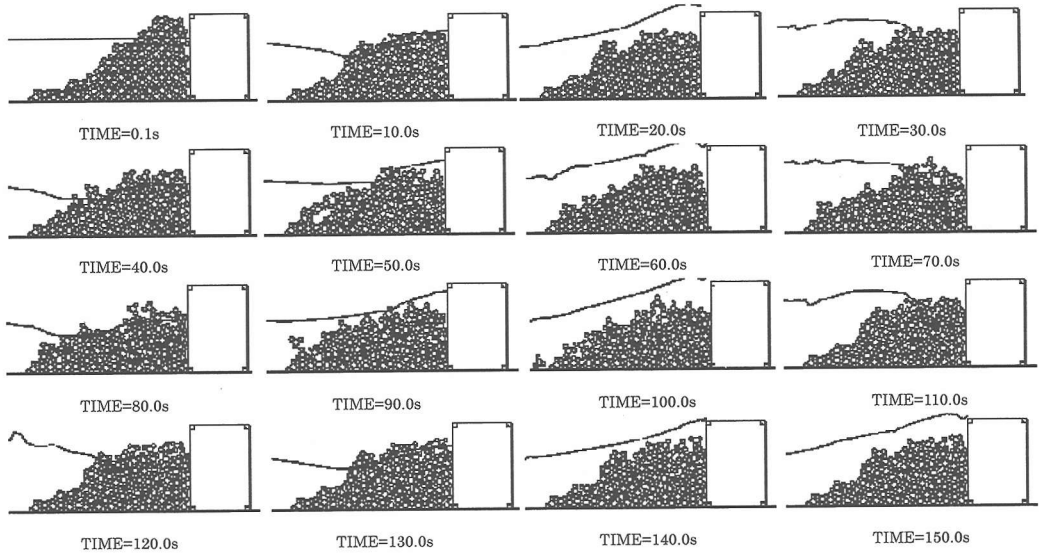


図-6 消波ブロック変形計算結果

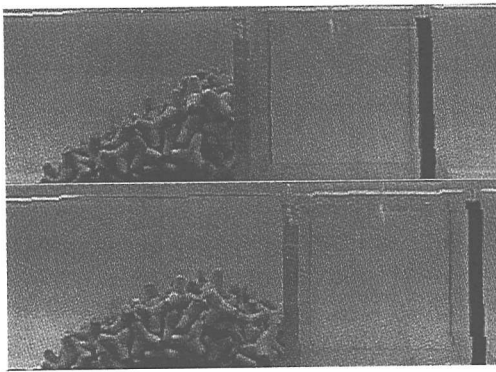


写真-1 ブロック変形実験（上：変形前，下：変形後）

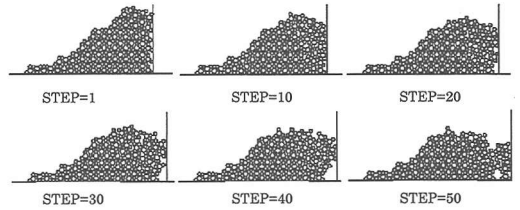


図-7 水平載荷によるブロック変形過程

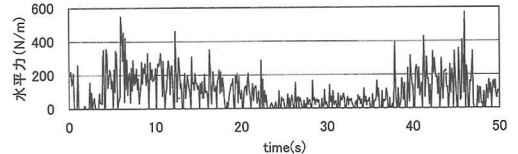


図-8 水平載荷時のブロック荷重の時刻歴

り、ケーソン前面がある角度で崩れるが、斜面は変形しなかった。

図-7 は、水平載荷時(10 cm 岸側、図中右側に平行移動)のケーソン滑動によるブロックの変形過程を示したものである。壁に寄りかかりながら天端のブロックから崩れていく様子が見られる。しかし、斜面側ブロックはほとんど変形していない。

図-8 にブロック荷重の時間変化を示す。ブロック荷重は、ケーソン壁に接している要素全ての接触力を足し合わせたものであり、初期に掛かっていた荷重が徐々に寄りかかることにより増加し、その後移動に伴い接点が徐々に減少することにより荷重も減少していく様子が把握できる。

図-9 はブロック間の接触力の分布状態を調べたもので、黒い部分が 5 N/m の接触力が発生している箇所である。STEP=1 では整積みに近い状態、ほぼ均等に黒い部

分が存在している。STEP=20 になると天端から斜めに滑りそうになっており、すべり面らしきものが見られる。また、壁との接触点が少なくなっており、局所的に支えている状態である。そして STEP=40 になると接触点が少なくなり、崩壊へと発展していった。

(3) 消波ブロック被覆ケーソン堤の滑動計算

次に、波作用時における消波ブロックの変形、さらにブロック荷重の変化について検討した。

図-10 にケーソンの滑動も考慮した消波ブロック被覆堤に対する滑動・変形計算結果を示す。ケーソンは滑動しやすくするため、重量を調整した。ケーソン滑動時におけるブロックの変形は、水平載荷時と同様にケーソン前面の天端から変形している。波の作用により斜面上のブロックは、ケーソンの滑動がない場合と同様の変形

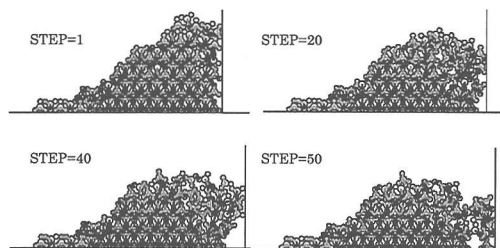


図-9 水平载荷によるブロック間の接触力分布

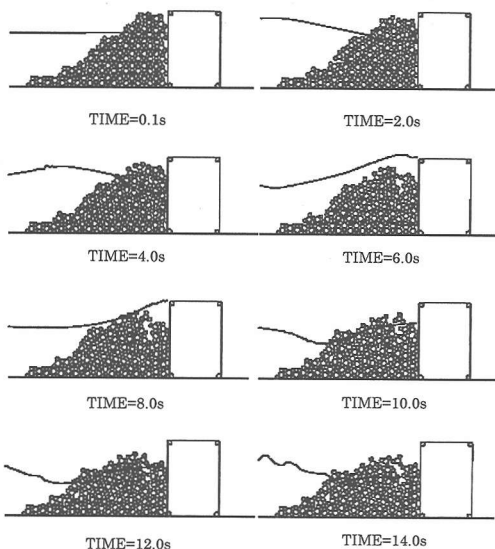


図-10 ブロックとケーソンの変形計算結果

程度である。

図-11はブロック内部の接触力の変化について表したものである。最初の時間では黒い部分(5 N/m以上)が少ないが、その後均等に分布するようになる。波の作用によって、徐々に締め固まっていくものと考えられる。また、初期ではケーソン壁との接点の数が少なく、接触力も小さいが、時間を経るにつれ接点数が多くなり、接触力も増す傾向がある。

図-12にケーソンの滑動量を示す。規則波を造波しているため、波力は規則的に作用させているにもかかわらず16秒付近から大きく滑動している。これはケーソンが波力とブロック荷重の両方を受け、ブロックの上部がケーソンの動きに追従して崩れたためと考えられる。そこで、個別要素法の計算では数値波動水路による波力とブロック接触力を別々に取り扱っているため、ケーソンに作用する波力とブロック荷重に分けて各々の効果について調べた。ブロック荷重は水平载荷計算と同様に、ケーソンを構成する辺要素に接触するブロック要素の作用力を足し合わせたものである。図-13にその結果を時間波

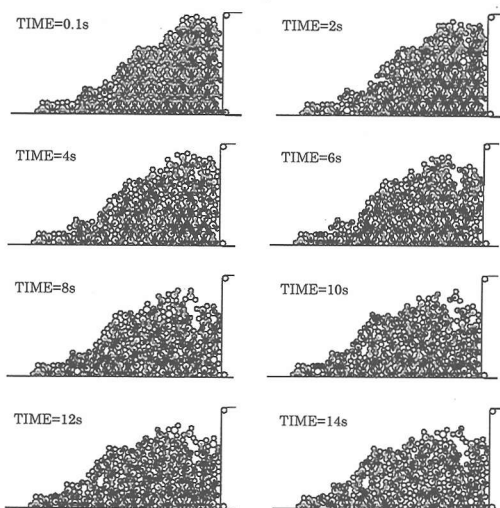


図-11 ケーソンの滑動を考慮したブロック間の接触力の変化

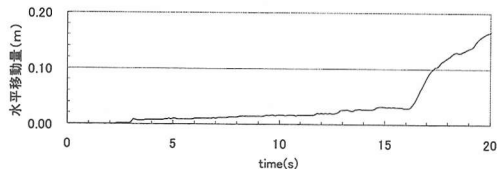


図-12 ケーソンの滑動量

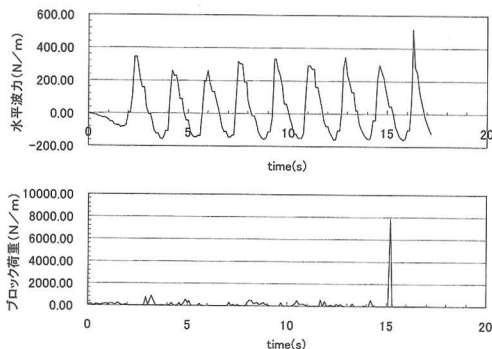


図-13 ケーソンへの水平波力とブロック荷重の時刻歴

形で示す。水平波力は、ほぼ規則的であるが、ブロック荷重は1ヶ箇所だけインパルスが発生している。これは、ブロックが崩壊してケーソン壁に瞬間的に激突したためと考えられる。水平波力と比較して約20倍大きな衝撃力が発生したことになる。また、波作用初期におけるブロック荷重はほとんど発生しておらず、ブロックが締め固まった後、発生する。図-11に見られたケーソン壁とブロック要素の接触傾向と符合した結果である。

一方、衝撃荷重を除けば、波力とブロック荷重は同程度である。しかし、ブロック荷重が大きい時間帯は、押

し波から引き波に転じる波力がゼロとなる付近である。既往の研究(高橋ら, 1989)でも明らかなように, ブロック荷重が小さい原因としては, 水位上昇による浮力の増加, あるいはケーソンの瞬間的な変位が考えられる。

4. ま と め

本研究では, 消波ブロック被覆堤を対象に消波ブロックの変形およびケーソンの滑動計算を実施し, 個別要素法の適用性について検討した。

本研究によって明らかになった点を以下に示す。

- ①消波ブロック被覆堤のブロックには連結要素で, 直立ケーソン部には多角形要素で表現した個別要素法を適用し, 数値波動水路による計算結果を作用力とした変形計算手法を構築した。
- ②消波工の変形実験との比較検討の結果, 静水面付近から法肩までの侵食傾向を再現できることが確認できた。
- ③構築したモデルは, ケーソンに作用する波力以外の荷重として, ブロックの自重やブロックに作用する波力を通した荷重も含めた変形評価手法としての適用が期待でき, 既往の研究成果と一致した考察が得られた。
- ④ただし, ブロックの変形速度が速い等の定量的評価に課題が残されており, 今後, ブロックの積み方やブロックに対する揚力係数や抗力係数の設定方法, それらの感度について検討を進めていく必要がある。

本研究で構築したモデルは, 滑動現象のみならず連結要素によりブロックも含めた破壊現象に対する適用が期待できる手法であると考えている。

今後は実験的な検証を引き続き実施し, 今回の課題に

ついて検討するとともに, 今回考慮していないマウンドも含めた滑動や破壊現象を明らかにすることにより信頼性設計のツールとして発展していきたい。

謝辞: 東電設計(株)の中瀬仁課長には, 個別要素法の多角形要素について大変貴重な助言・協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。本研究で実施した個別要素法の解析には, 京都大学澤田助教授の開発したプログラムに機能を付加したものを利用した。

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.
- 鹿島遼一・榊山 勉・松山昌史・関本恒浩・京谷 修: 安定限界を越える不規則波に対する人工島防波設岸の耐波安定性と越波特性, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 686-690.
- 木山英朗・藤村 尚 (1983): カンドルの離散剛要素法を用いた岩質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.
- 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.
- 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎 (1989): 消波ブロック被覆堤ケーソンの波力と滑動に関する実験的考察, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 594-598.
- 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 (2002): 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 (投稿中).
- 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・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, 地震研究所彙報, Vol. 63, pp. 409-468.