

# 個別要素法によるケーソン防波堤の滑動計算

藤井直樹\*・興野俊也\*\*・安田勝則\*\*・大熊義夫\*

## 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が有力なツールとして検討されている(たとえば磯部ら, 1999)。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ている。

ケーソン式防波堤の動的変形に対する検討例として, 直立部の滑動については青木・奥部 (1995) や谷本ら (1996) の研究, 波・地盤・構造物の VOF-FEM による連成解析 (蔣ら, 2000) があり, また捨石潜堤ではあるが荒木・出口 (1997) や伊藤ら (2000) による個別要素法による研究もある。しかしながら, 直立部や捨石あるいはブロックまで含めた動的な応答については, 十分でなく今後検討すべき課題が多い。

本研究では, ケーソン式防波堤の滑動や沈下等の動的破壊現象や変形量を予測できるモデルを構築することを目的に, 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) による計算手法について検討した。また, 個別要素法の作用力としては, 波浪場計算に数値波動水路を用い, 低天端直立ケーソン堤の滑動実験と比較することによって, 構築したモデルの適用性について検討した。

## 2. 水理模型実験および数値計算の概要

### (1) 水理模型実験の概要

計算の対象とした実験は, 東京電力で実施した低天端直立ケーソン防波堤である。図-1 に直立ケーソン堤の実験で使用した 2 次元造波水路と模型の断面形状を示す。実験縮尺は 1/50 である。ケーソン模型は, 2 次元造波水路内に設けた 1/100 勾配斜面上の水深 40 cm (現地換算 20 m) の位置に設置した。天端高は 3 cm, マウンド厚は 8 cm である。入射波は, 周期  $T=1.27$  s, 波高  $H=$

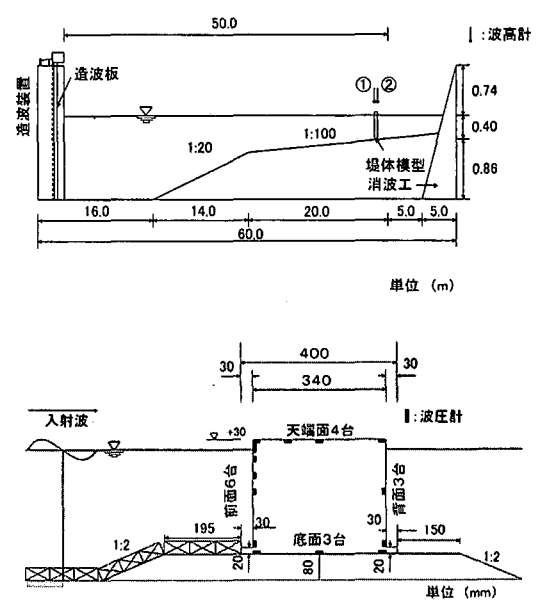


図-1 直立ケーソン堤の実験水路と断面形状

18 cm の規則波を作用させた。計測は, 図に示す位置で水位変動と作用波圧を測定し, 各波力を計算した。

### (2) 数値波動水路の概要

個別要素法の各要素に作用させる力は, 磯部ら (1999) の VOF 法に基づく数値波動水路による結果を用いた。解析は, 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, 揚圧力を算定するため捨石マウンド内では榊山・鈴木 (1998) を参考に, 空隙率 0.43, 抗力係数 1.0, 慣性力係数 1.2 の透過層を設定した。また, 越波によって混入した気泡は計算時間の経過に従い蓄積されるため, Timer-Door 法 (喜田ら, 2000) により気泡の上昇処理を行った。

### (3) 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図-2(a) で示すバネ, 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 (1) をたて, 数値波動水路による計算結

\* 正会員 東電設計(株) 港湾・海岸部  
\*\* 正会員 東京電力(株) 電力技術研究所 土木G

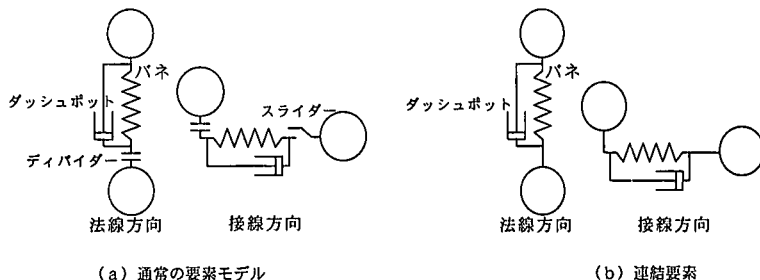


図-2 要素間接触力モデル

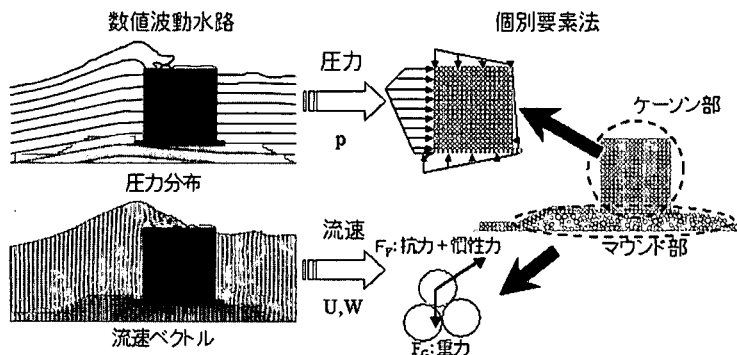


図-3 個別要素法への作用力の考え方

果を流体力 ( $F_F$ ) として作用させることによって式 (1) から変位が求まり、その変位に基づいて新たに外力が与えられる。

$$m\ddot{X} = F_F + F_G + F_C \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $m$ : 質量、 $\ddot{X}$ : 加速度、 $F_F$ : 流体力、 $F_G$ : 重力、 $F_C$ : 接触力である。

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。

#### (4) 数値波動水路から DEM 要素への作用力

図-3 に本研究で用いた考え方を示す。構造物が波から受ける力については、①波の進行が完全に阻害される構造物に作用する波力、②透水性を有する構造物に作用する波力に分けられる。そこでここでは、DEM 要素への作用力としては、①直立部と②捨石マウンド部に分けて考えた。数値波動水路では圧力と流速を直接解いているため、直立部では水に接する 4 面の DEM 要素に対して圧力を波力として作用させた。また、捨石マウンド部は流速値からモリソン式による波力 (抗力と慣性力) を計算し、作用力とした。

### 3. 個別要素法によるシミュレーション

#### (1) 直立部のモデル化

##### a) 連結要素モデル

個別要素法は通常、防波堤直立部のような矩形や上部斜面堤のような台形などの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)。図-2(b) が連結要素であり、図-2(a) 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点が通常の要素と異なる。

図-4 は、 $3 \times 3$  の 9 要素を連結した矩形があたかも一つの要素として挙動する状況を示した例である。計算結果は連結要素を自由落下させ、勾配  $30^\circ$  の斜面上をパウンドしながら転がる軌跡を 0.015 s 間隔で示している。各要素が分離することなく、一体となって運動することが確認できる。

##### b) 実験結果を作用力とした直立部の滑動計算

図-1 の直立ケーソン部のみを対象として連結要素によりモデル化し、直立堤実験の圧力計測結果を作用力として計算した。図-3 の直立ケーソン部がそれに対する要素モデルである。表-1 に計算条件を示す。表に示した計算条件は、アクリル棒に対する既往の研究成果を参考にしている。密度は実測値を用いた。

図-5 に  $H=18$  cm、 $T=1.27$  s のときの作用力として用いた 4 面の波力 ( $P_f$ ,  $P_u$ ,  $P_o$ ,  $P_b$ ) の時系列波形と個

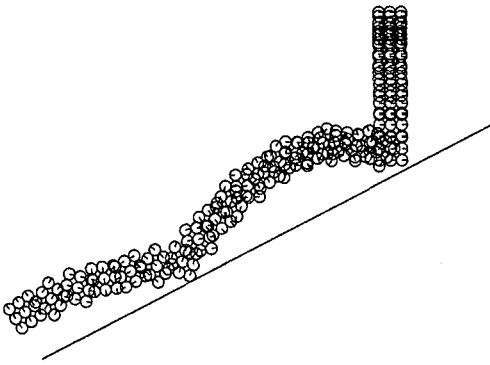


図-4 連結要素の自由落下計算

表-1 直立部の計算条件

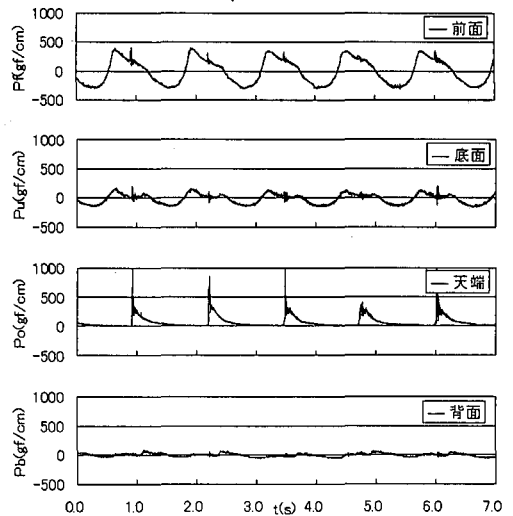
|                                            |                      |
|--------------------------------------------|----------------------|
| 要素半径 (m)                                   | $1.0 \times 10^{-2}$ |
| 要素の密度 ( $\text{kg/m}^3$ )                  | 1407                 |
| 法線方向要素バネ係数 ( $\text{N/m}$ )                | $6.6 \times 10^7$    |
| 接線方向要素バネ係数 ( $\text{N/m}$ )                | $6.6 \times 10^7$    |
| 法線方向要素減衰係数 ( $\text{N} \cdot \text{s/m}$ ) | $2.0 \times 10^2$    |
| 接線方向要素減衰係数 ( $\text{N} \cdot \text{s/m}$ ) | $2.0 \times 10^2$    |
| 摩擦係数                                       | 1.0                  |
| 時間間隔 (s)                                   | $2.0 \times 10^{-5}$ |

別要素法による直立ケーソン変位  $\delta_x$  の時系列波形を示す。実験同様、計算においても若干の岸沖への移動が作用波力に追随した形で表現できている。また、岸側への累積移動量に関して2波目までは良く一致しており、それ以降は計算の方が1.5倍程大きくなった。実験から推定されている摩擦係数は0.62であるが、摩擦係数をパラメータとして検討した結果から係数を大きくした方が実験との整合がよかった。また、バネ係数や減衰係数を変化させた計算も実施したが、摩擦係数に比べ感度は小さかった。摩擦係数については今後の課題である。

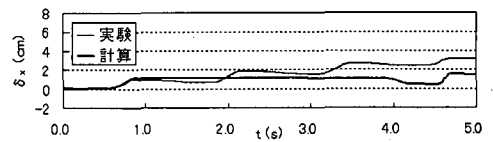
## (2) 捨石マウンド部のモデル化

### a) 転がり摩擦

転がり摩擦は、物体が接触している固体の上を転がるときに起こる抵抗であり、砂や石のように不規則な粒子断面形状では転がり抵抗が作用する。捨石マウンドを円形要素でモデル化した場合、実際よりも要素が回転し易いと予想されるため、転がり抵抗を考慮する必要があると考えられる。このような問題に対して、円形要素の接点でモーメントを伝達する方法が幾つか提案されている(たとえば岩下ら, 1995)。本研究ではSakaguchiら(1993)による転がり摩擦の計算方法を用いる。接触が点であれば伝達されるのは力のみであるが、接触が面的であればモーメントが伝達することになる。したがって、転がり抵抗が発生するためには、図-6のように要素と要素あるいは面がある幅をもって接触する必要がある。



(a) 実験による波力時系列波形



(b) 直立ケーソン移動量の比較

図-5 直立部のみモデル化した滑動計算結果

転がり抵抗モーメントは、接点に転がり摩擦が生じ転がりを止めようとする方向に作用する。転がり抵抗モーメント  $M_r$  は、次式のように与えられる。

$$M_r = N \times \alpha \tan \theta_r \quad (2)$$

ここで、 $N$  は法線方向の接触力、 $\alpha$  は転がり摩擦の係数、 $\theta_r$  は転がり抵抗角である。

### b) 捨石マウンドの変形計算

転がり摩擦の違いを検証するため、透過性粒状体構造物に対する研究例(伊藤ら, 2000)を参考に表-2のように材料定数を設定した。転がり摩擦係数の比較計算ケースを表-3に示す。ただし、転がり抵抗角は既往の検討結果を参考に24°とした。また、要素の回転自由度を拘束することにより要素間の摩擦を大きくすることが簡便に表現できるため、併せて計算を行った。

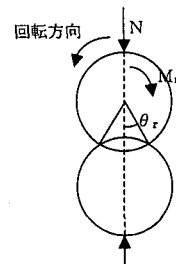


図-6 面接触する要素の転がり抵抗

個別要素法への作用力は、数値波動水路による流速結果を用いる。図-7は、 $H=10$  cm,  $T=3$  s, 水深  $h=15$  cmの孤立的な波を発生させた場合における透過性構造物内外の流速ベクトル例である。構造物内の流速変動は小さいが、斜面法肩付近で大きな流速が発生している。

図-8は、個別要素法により計算した例である。(a) Case 1の転がり抵抗を考慮しない場合は、円形要素のため回転しやすくなり全体的に斜面が崩れ広がっている。また、構造物内部の要素まで回転している様子が分かる。(b) Case 2の転がり抵抗を考慮した場合は、表層付近の要素が移動するもののCase 1に比べて変化量が小さくなっている。しかし、中央内部の要素が回転している。(c) Case 3はさらに転がり摩擦を大きくした場合であり、Case 2で回転していた内部要素が生じなくなった。(d) Case 4の回転を拘束した結果は、Case 3と同程度の変形量である。

以上のように、従来の円形要素による転がり易さは、転がり摩擦により抑制できることが確認できた。転がり摩擦に関するパラメータは、実験により決める必要がある。

### (3) 直立ケーソン堤の滑動計算

これまでの検討では、直立部と捨石マウンド部の個々についてモデル化し、その適用性について検討してきた。そこで、直立ケーソンならびに捨石マウンドを同時に取り扱い、直立ケーソン堤の滑動実験に対する再現計算を実施した。

個別要素法による滑動計算に先立ち、その外力となる流体力の再現性について確認した。計算条件は、藤井ら(2000)の検討結果を踏まえ、 $\Delta x=2$  cm,  $\Delta z=1$  cm, 差分スキーム VP-DONOR-0.2, 空隙率(捨石 0.43, ブロック 0.57), 慣性力係数 1.20, 抗力係数 1.00 である。また、波高は 18 cm, 周期は 1.27 s の場合について計算した。

図-9は、計算と実験の滑動合成波力の時系列であり、個別要素法では4つの壁面に作用する波力を用いるため、4面の合力で比較した。越波が生じるため堤体近傍では、水塊の落下、空気の巻き込みや激しい乱れが起こる。そのため、圧力にスパイクが頻繁に発生する。スパイクは前面よりも背面、特に引き波の位相時に顕著に発生している。スパイクノイズを除けば、数値波動水路と実験値との対応は良好である。

個別要素モデルの各要素半径は、ケーソン 1 cm, 被覆ブロック 1 cm, マウンド 0.67~1.5 cm とした。マウンドの粒径は図-3に示したように要素間の噛み合わせを期待してばらつきを与えることにした。マウンド要素は密度 2600 kg/m<sup>3</sup>とし、他の計算条件は直立部と同一とした。

なお、マウンドは以下の手順で作成した。

①マウンド半径を乱数発生により適当に配置させる。

表-2 捨石マウンドの計算に用いた材料定数

|                            |                      |
|----------------------------|----------------------|
| 要素半径 (m)                   | $8.5 \times 10^{-3}$ |
| 要素の密度 (kg/m <sup>3</sup> ) | 2450                 |
| 法線方向要素バネ係数 (N/m)           | $3.5 \times 10^7$    |
| 接線方向要素バネ係数 (N/m)           | $3.5 \times 10^7$    |
| 法線方向要素減衰係数 (N・s/m)         | $1.5 \times 10^2$    |
| 接線方向要素減衰係数 (N・s/m)         | $1.5 \times 10^2$    |
| 摩擦係数                       | 0.6                  |
| 時間間隔 (s)                   | $2.0 \times 10^{-5}$ |

表-3 捨石マウンドの計算ケース

|        | 回転自由度 | $\alpha$ | $\theta_r$ |
|--------|-------|----------|------------|
| Case 1 | 拘束なし  | 0.0      | 0°         |
| Case 2 | 拘束なし  | 0.2      | 24°        |
| Case 3 | 拘束なし  | 0.6      | 24°        |
| Case 4 | 拘束あり  | —        | —          |

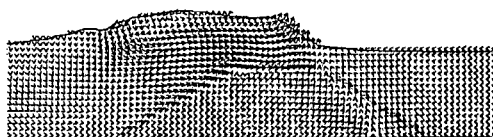


図-7 数値波動水路による流況計算結果

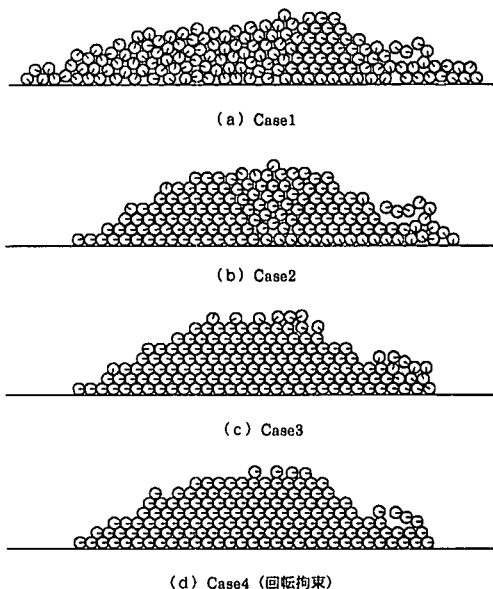


図-8 捨石マウンドの計算

- ②各要素を自由落下させ一定時間放置する。
- ③ケーソン設置するためにマウンド上を平らに均し、一定の力を徐々に加えていき所定のマウンド高さまで締め固める。

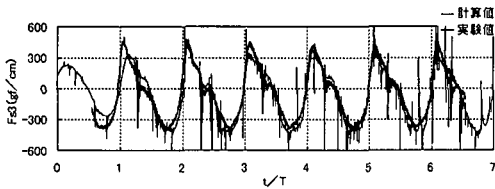


図-9 滑動合成波力の比較

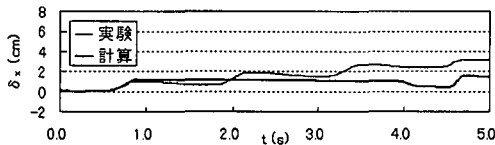


図-10 ケーソン移動量の比較

④以上の過程を経て、マウンド勾配をつけ、被覆ブロック、ケーソンを設置し、しばらく放置する。

これによって、実際のランダムなマウンドを模擬した。またケーソンと被覆ブロックのモデル要素は、連結要素で作成している。図-10に、堤体移動量 $\delta_x$ の計算と実験結果を示す。1波目で1cm岸側に移動する状況は計算においても再現できている。ただし、その後にマウンドが徐々に崩れはじめ、ケーソンが傾き沈下するため実験との間に移動量の差が生じた。実際のケーソン底面形状は平らな滑面であるため、このような形状を模擬できていないことが原因の1つと考えられる。今後はケーソンの要素モデル化方法やマウンドの作成方法、材料定数の設定方法についてさらに検討が必要である。

#### 4. ま と め

本研究では、直立ケーソン堤を対象に滑動計算を実施し、水理模型実験との比較により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捨石マウンド部には通常の要素パネで、直立ケーソン部には間隙パネによる連結要素で表現したDEMモデルを構築した。
- ②従来円形要素に起因する転がり易さを改善するために転がり摩擦を導入した。
- ③直立ケーソン堤の滑動実験との比較検討の結果、直立部のみを対象とした場合は2波目までは滑動量を良好に再現できることが確認できた。
- ④ただし、マウンドも含めた滑動計算の課題が明らかになった。

構築したモデルは、滑動および沈下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：**本研究で使用した数値波動水路は、「数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会」(代表：東京大学磯部教授)の活動成果によるものである。ここに記して、関係各位に謝意を表します。

また、東電設計(株)の中瀬仁課長には、個別要素法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。本研究で用いた個別要素法のプログラムは、京都大学澤田純男氏の開発したDEMSを改良したものである。

#### 参 考 文 献

- 青木伸一・奥部綾子(1995): 防波堤直立部の滑動シミュレーション, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 861-865.
- 荒木進歩・出口一郎(1997): 捨石防波堤の断面変形に関する研究, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 531-535.
- 磯部雅彦・高橋重雄・余 錫平・榊山 勉・藤間功司・川崎浩司・蔭 勤・秋山 実・大山洋志(1999): 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究—VOF法基本プログラムの作成—海洋開発論文集, 第15巻, pp. 321-326.
- 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.
- 岩下和義・松浦浩一・小田匡寛(1995): 粒子接点でのモーメント伝達を考慮した個別要素法の研究, 土木学会論文集, No. 529/III-33, pp. 145-154.
- 喜田義輝・藤間功司・重村利幸(2000): 数値波動水路による浅海波の解析に関する一考察, 第27回関東支部技術研究発表会講演概要集, pp. 338-339.
- 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.
- 蔭 勤・高橋重雄・村西佳美・磯部雅彦(2000): 波・地盤・構造物の相互作用に関するVOF-FEM予測モデルの開発, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 51-55.
- 谷本勝利・古川浩司・中村廣昭(1996): 混成堤直立部の滑動時の流体抵抗力と滑動量算定モデル, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 846-850.
- 藤井直樹・青野利夫・興野俊也・中野 修・五明美智男・阿部光信(2000): ケーソン防波堤の越波・波力算定への数値波動水路の適用, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 706-710.
- 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物の破壊解析, 地震研究所彙報, Vol. 63, pp. 409-468.
- Sakaguchi, H., E. Ozaki and T. Igarashi(1993): Plugging of the flow of granular materials during the discharge from a silo, International Journal of Modern Physics, Vol. B7, pp. 1949-1963.