

ケーソン式護岸の模型振動実験に対する 個別要素法シミュレーション

栗田哲史¹・中瀬 仁¹・安中 正²・嶋田昌義³・藤谷昌弘⁴

¹正会員 工修 東電設計(株)技術開発本部 耐震技術部(〒110 東京都台東区東上野3-3-3)

²正会員 理修 東電設計(株)技術開発本部 耐震技術部(同上)

³正会員 東京電力(株)原子力研究所 耐震研究室(〒230 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1)

⁴正会員 工修 東京電力(株)原子力研究所 耐震研究室(〒230 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎4-1)

個別要素法は大変形・破壊問題の解析に有効であり、護岸構造物の地震時大変形問題を取り扱うにあたり、適した手法である。本研究では、個別要素法を用いてケーソン式護岸の模型振動実験に対するシミュレーションを行い、その妥当性を検証した。特に、要素の回転を拘束する手法を提案し、この手法を用いることにより、通常の間形要素を用いた場合では表現できなかった背後地盤の強度が再現でき、そのことによりケーソンの挙動と背後地盤の破壊形態が精度良くシミュレートできるようになった。

Key Words : *distinct element method, caisson revetment, internal friction angle, simulation analysis, sliding motion*

1. はじめに

発電所等重要構造物の海上立地を考えるにあたり、それを取り巻く護岸構造物の耐震性の検討は重要である。この時、護岸構造物は地盤・構造物・水の連成問題となり、解析的に扱うのは非常に難しい問題である。このため、護岸構造物の地震時挙動の把握やその安定性を評価する目的で多くの実験的研究が行われている^{1)~7)}。解析的な研究として、土岐らはジョイント要素を導入した有限要素法を用いて護岸構造物の地震時応答解析を行っている⁸⁾。また、Uwabe and Moriyaは模型振動実験を行い、その結果に対して剛体モデルとジョイント要素付きの有限要素法の二つの手法を用いてシミュレーションを行っている⁹⁾。数値シミュレーションによって護岸構造物の耐震性を検討することは、模型実験と比較して経済的に有利であり、また、構造物内部の応力状態、ひずみの分布等を詳細に把握できるという利点がある。

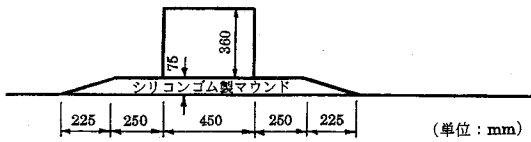
一方、護岸構造物が破壊に至るような強震を受けたとき、その破壊領域は有限要素法などで仮定している微小変形の条件を遙かに上回るような大変形をおこすと考えられる。このような問題を解析する手法として、個別要素法は非常に適した手法であると言える。さらに、個別要素法は通常連続体解析では扱いが困難な、構造物の破壊後の挙動までも解析できるという利点がある。しかし、その適用性についての実証的な研究が少なく、未だ実用的な段階に至っていないのが現状である。そのよう

な中で、中瀬らはアクリル製丸棒の平面ひずみ圧縮試験に対するシミュレーションを行い、個別要素法の適用性に関する実証的な検討を行っている¹⁰⁾。

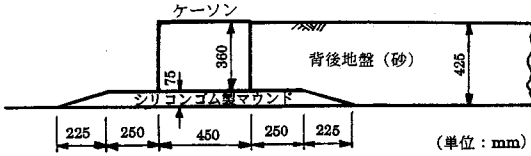
本研究は、実用的な使用への前段階として個別要素法を用いてケーソン式護岸の模型振動実験に対するシミュレーションを行い、その適用性を検証するものである。その際、以下の項目に着目している。

(1) 非粒状体のモデル化

個別要素法を様々な工学的問題に用いる場合、最も問題となる点は膨大な計算時間を要するという点である。この計算時間のうちほとんどは要素間の接触判定に費やされている。そのため、接触判定の簡便な円形要素を用いることが有利である。しかし、解析対象に粒状体以外の構造物が含まれる場合は、通常これらを円形で表すことはできない。例えばコンクリート製のケーソンは矩形であり、消波ブロックは更に複雑な形状をしている。このような解析対象に対して、Meguro and Hakunoは間隙パネを用いて円形要素を連結することにより任意の形状を作成することを提案している¹¹⁾。この手法の利点は円形要素を用いているため、連結してできた要素と他の要素間の接触判定が簡単なことである。本研究では、護岸構造物のうちケーソンのモデル化にこの手法を用いている。



(a) ケーソンとマウンドのみから構成されるモデル



(b) ケーソン、マウンド及び背後地盤より構成されるモデル

図一 実験モデルの概観図

(2) 砂の強度特性の表現

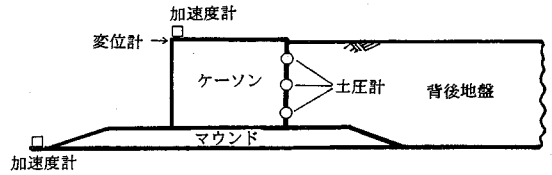
円形要素は回転し易いため、要素間の摩擦係数を幾ら大きくしても実際の砂の強度を再現できないという問題点があった。それに対して、楕円要素を用いる方法¹²⁾、要素を連結して円形以外の要素を用いる方法¹³⁾などが提案されている。本研究ではこの対策として要素の持つ3つの自由度のうち回転自由度を拘束する手法を提案する。Bardet等も要素の回転を拘束する手法を用いて粒状体のマイクロメカニズムの解析を行っている¹⁴⁾。この手法を用いると、接触する要素間の相対変位は滑りのみで生じることになる。背後地盤の砂をモデル化の際この手法を適用し、円形要素を用いても砂と同程度の強度を発揮させることができることを確認した。

(3) 材料定数の決定方法

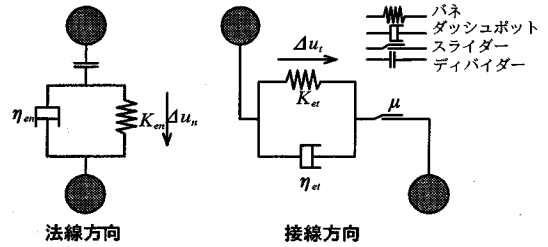
個別要素法の要素に与える材料定数の決定方法は各種提案されている。しかし、実験と比較すると必ずしも適切な値に設定されているとは言えない事例もある。本研究では、背後地盤の砂に関しては、特に、平面ひずみ圧縮試験とこれに対する個別要素法によるシミュレーションを行い、応力比-ひずみ関係の比較において両者が一致するように材料定数を決定する方法を採用した。

2. 模型振動実験の概要

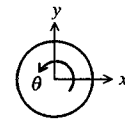
本研究で用いた実験データは、文献6)、7)のケーソン式護岸構造物を対象とした水の無い場合の実験で得られたものである。実験モデルの概観図を図一に示す。図一(a)はケーソンとマウンドのみから構成されるモデル、図一(b)はそれに背後地盤が追加されたモデルである。モデルの縮尺は約1/40である。ケーソンはコンクリート製、マウンドはシリコンゴム製である。



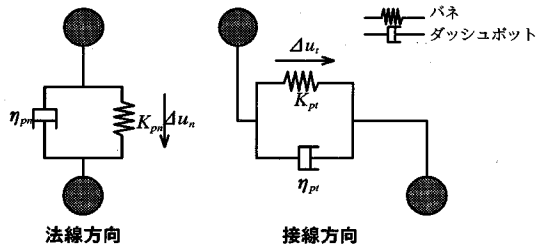
図二 計測器の位置



(a) 接触点におけるモデル (通常の要素)



(b) 要素の自由度



(c) 接触点におけるモデル (連結要素)

図三 個別要素のモデル

なお、マウンドの表面にはテフロンシートを貼って、ケーソンの滑動を生じ易くしてある。背後地盤は、平均粒径1 mm程度の粗い乾燥砂(茨城県鹿島郡波崎町産)を用い、振動入力により締め固められ相対密度は $D_r=100\%$ であった。背後地盤がある場合の計測器の位置を図二に示す。入力波である振動台の加速度、ケーソン左上部の水平相対変位応答と水平加速度応答、ケーソンに作用する背後地盤の動土圧が計測されている。背後地盤が無い場合も、土圧計が無いだけで、その他は同じである。

3. ケーソンのモデル化

コンクリート製のケーソンのモデル化は、Meguro and Hakunoが提案している間隙バネ(バネとダッシュ

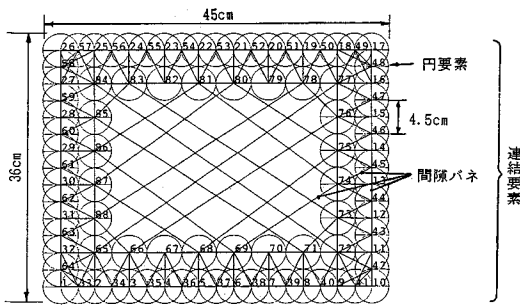


図-4 ケーソンモデル

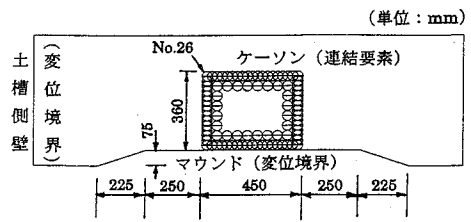


図-5 個別要素による実験のモデル化

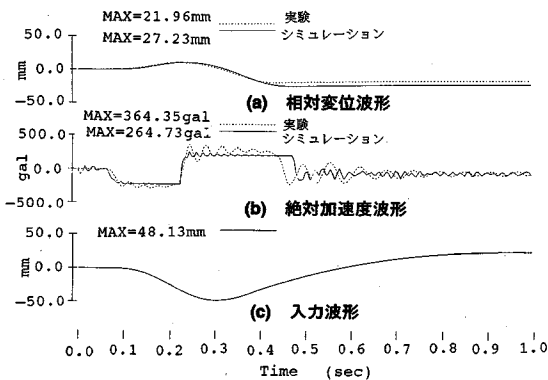


図-6 時刻歴波形 (ケーソン-マウンド間の摩擦角=12.5°)

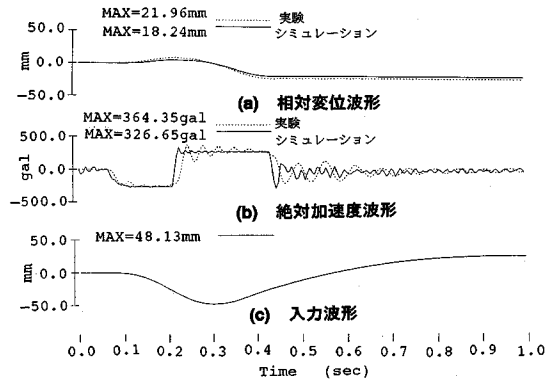


図-7 時刻歴波形 (ケーソン-マウンド間の摩擦角=15.2°)

ポット) を用いて円形要素を連結する方法 (以下、連結要素と呼ぶ) により行った¹¹⁾。このモデル化の妥当性の検討は、マウンドとケーソンのみから構成されるモデルの模型振動実験のシミュレーションを行うことにより確認した。

(1) 連結要素

個別要素法による通常の要素の接触点におけるモデルを図-3 (a) に示す。要素は図-3 (b) に示すように並進2成分と回転の合わせて3自由度を有する。ここで、図-3 (a) に示した通りこのモデルは法線方向にディバイダーを有し接触していた要素同士は、自由に分離できる。また、接線方向にはスライダを有しクーロン摩擦によって摩擦力を表現している。このような要素が多く接触している実際の問題では、運動方程式は複雑な形になる。そこで、運動方程式を時間領域で差分近似して解いている。詳細については参考文献15)を参照されたい。

本研究で用いた連結要素のモデルを図-3 (c) に示す。連結要素は、法線方向にディバイダーが無く引っ張りに対して抗力を発揮する。接線方向にはスライダが無く要素間で滑りを生じない。この2点で通常の個別要素と異なる。また、連結要素は要素を解析的に連結している為、連結された要素間力は全て予め設定したバネの自然

長からの伸縮量により計算される。従って、バネ自然長を要素半径の和より大きくした場合は、見かけ上離れている要素同士が連結していることになり、バネ自然長を要素半径の和より小さくした場合は、要素が重なり合った状態で安定していることになる。

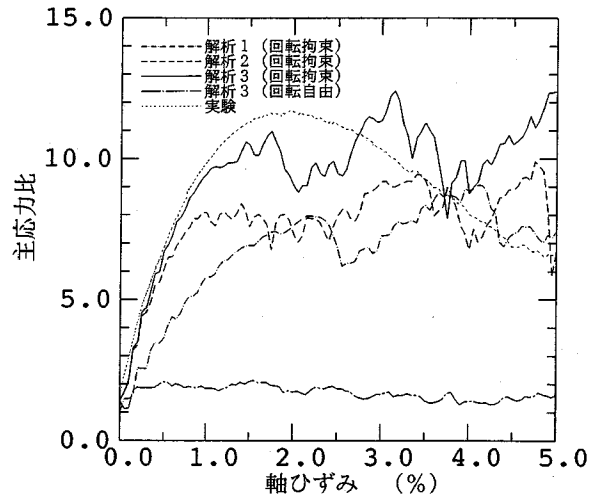
(2) ケーソンのモデル化と検証

図-4 に連結要素によるケーソンのモデルを示す。ケーソンモデルは直径45 mmの円形要素88要素から成っている。ケーソンの表面は本来平坦であることから、モデルでは円形要素を重ね合わせ、できるだけ凹凸を減じ他の要素との間に無用の噛み合せを生じないように配慮した。図中の太い実線が間隙バネを示している。ケーソンの剛体的な挙動を表すため、間隙バネを十分に張り巡らせ系全体の剛性を大きくした。また、要素の密度を調節することによってモデル全体の質量とケーソンの質量を一致させた。ただし、回転慣性は実際より大きくなっている。

連結要素によって作成したケーソンモデルの妥当性を確認するため、図-1 (a) に示すようなケーソンとマウンドのみから成るモデルの模型振動実験に対するシミュレーションを行った。また、ケーソンの挙動に大きな影響を与えると考えられるケーソン-マウンド間の摩擦角

表—1 平面ひずみ圧縮試験の諸元

供試体のサイズ (cm)	8.0W×16.0D×20.0H
平均粒径 (mm)	1.1
密度 (kg/m ³)	1610
間隙比	0.65
過圧密比	1.0
拘束圧 (kPa)	9.8
載荷速度 (%/min)	0.125



図—8 応力比-ひずみ曲線

表—2 解析別の材料定数

	K_{en} (N/m)	K_{et} (N/m)	η_{en} (N·sec/m)	η_{et} (N·sec/m)	ϕ_{μ} (°)
解析1	1.44×10^7	1.44×10^7	1.37×10^2	0.547	25.0
解析2	3.60×10^7	3.60×10^7	2.17×10^2	0.865	25.0
解析3	3.60×10^7	3.60×10^7	2.17×10^2	0.865	27.0

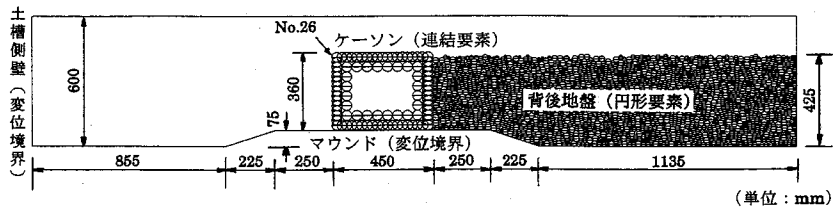
の検定を行った。ケーソン-マウンド間の摩擦角はテフロン面にコンクリートブロックを載せて一面せん断試験を行い、静止摩擦角=15.2°、動摩擦角=12.5°という結果が得られている。解析では、静止摩擦角と動摩擦角の区別をせず同一の値を用いる事とした為、2つの場合を検討した。図—5に解析モデルを示す。入力波は最大加速度550 galの3 Hz 正弦波1波を用いている。図—6に摩擦角=12.5°の時、図—7に摩擦角=15.2°の時の結果を示す。(a)はケーソンの振動台に対する相対変位波形、(b)はケーソンの絶対加速度波形であり、実験結果と解析結果を比較している。また、(c)は入力変位波形であり、振動台の加速度波形を数値積分して得た。シミュレーションで出力しているケーソンの変位波形と加速度波形は、実験の計測位置に対応する要素 No. 26の値である。図—6と図—7の両者とも実験結果と良く対応しており、連結要素によるケーソンのモデル化が妥当であることを示している。また、ケーソンモデルの各要素間の相対的な位置関係は十分安定しており、ケーソンモデルは全体として剛体的な運動をしている。加速度波形の頭打ち状態になっている部分はケーソンが滑動状態にあることを示しており、そのレベルが実験と良く一致していることからケーソン-マウンド間の摩擦角は実験とほぼ一致していることが分る。しかし、摩擦角=12.5°とした場合はケーソンがやや滑り過ぎる傾向にあり、摩擦

角=15.2°の場合はケーソンの滑動量がやや小さくなる傾向にある。実際のケーソン-マウンド間の摩擦角は両者の間に存在するものと思われる。また、波形の中に見られる入力波より高周波数の振動は系固有の振動であり、実験の場合はマウンドが柔なシリコンゴムによる為と考えられる。解析ではマウンドを剛な境界で表現している為、解析に見られる高周波数振動はケーソン自体の運動によるものであり、実験とは原因が異なるものと考えられる。以下の検討では、動摩擦角の値(摩擦角=12.5°)をケーソン-マウンド間の摩擦角に採用した。

4. 背後地盤の材料定数

個別要素法で用いるばね定数の決定方法として、弾性体の接触理論に基づく方法や波動伝播速度を合わせる方法等各種提案されている。著者等は基本的に弾性体の接触理論に基づく方法で決定してきた。しかし、実験の結果と比較した場合、バネ定数を大きめに評価している傾向が見られた¹⁶⁾。

一方、円形要素を用いて土質材料をモデル化した場合、その回転し易さに起因して要素間の摩擦係数を幾ら大きくしても強度(内部摩擦角)が発揮されないという問題点があった¹⁷⁾。背後地盤の強度が発揮されなければ、模型振動実験の結果を個別要素法によりシミュレーション



図—9 個別要素による実験のモデル化

することは困難と考えられる。そこで、本研究では要素の回転自由度を拘束することによって土質材料の強度特性を表現することを試みた。この手法は、要素の運動を並進だけに限定し、その為、粒子構造の破壊を滑りのみによって表現する。強度特性は要素間の摩擦角に強く依存することになり、後述の通り要素間の摩擦角で強度特性を制御することが可能になる。

ここでは、模型振動実験に用いた砂に対する平面ひずみ圧縮試験¹⁹⁾の応力比-ひずみ曲線が回転自由度を拘束した個別要素法で良くシミュレーションされることを示し、その結果に基づきバネ定数と要素間摩擦角を決定する方法を提案する。

平面ひずみ圧縮試験は平面ひずみ状態で行うせん断試験であり、空中落下により堆積させた乾燥砂を可能な限り密に突き堅めた供試体を、厚さ0.3 mmのラテックス・メンブレンで包み、負圧によって所定の拘束圧を与えて圧縮を行った。供試体の前後面にはアクリル製の拘束板を設置して平面ひずみ状態を保っている。尚、供試体の上下端面の摩擦除去処理は特に行っていない。実験の諸元を表—1に示す。平面ひずみ圧縮試験で用いた拘束圧は、模型振動実験の背後地盤の層厚が厚くなく地盤の最深部でもさほど大きな土圧が作用していないと考えられるため、低めの値に設定した。

図—8にバネ定数と要素間摩擦角を変数とした感度解析の結果と実験結果の応力比-ひずみ曲線の比較を示す。個別要素法によるシミュレーションの要素数は3150、時間刻みは 1.0×10^{-5} sec、載荷速度は解析時間短縮のため10%/secとした。要素間の摩擦角を 0° にしてパッキングを行ったので D_r は100%に近いものと思われる。解析別の材料定数を表—2に示す。ここで、 k_{en} は法線方向バネ定数、 k_{et} は接線方向バネ定数、 η_{en} は法線方向減衰係数、 η_{et} は接線方向減衰係数、 ϕ_e は要素間摩擦角を表している。減衰係数は文献10)に基づいて決定している。変形特性(初期勾配)についてみると、解析2(回転拘束)と解析3(回転拘束)がほぼ一致しているが、それらに比べ解析1(回転拘束)の初期勾配は小さい。初期勾配にはバネ定数の影響が強い。一方、強度特性については、解析1(回転拘束)と解析2(回転拘束)が同程度であり、それらに比べ解析3(回転拘束)の強

度は大きい。強度特性には要素間摩擦角が支配的である。実験結果と比較すると、解析1(回転拘束)は初期勾配が実験より小さ過ぎる。解析2(回転拘束)は初期勾配は良く一致しているが内部摩擦角が実験の $\phi_{max} = \sin^{-1} \{(\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 + \sigma_3)\}_{max} = 57^\circ$ に対して解析は $\phi_{max} = 52^\circ$ と小さい。解析3(回転拘束)の結果が初期勾配、内部摩擦角共に良く一致している。尚、解析3(回転自由)は、解析3の材料定数を用いて要素の回転を自由にした時のシミュレーション結果である。この時、内部摩擦角は $\phi_{max} = 20^\circ$ 程度であり、回転を拘束した時と比較して全く強度が発揮されていないことが分る。

以上のように、バネ定数と要素間摩擦角を適切に設定すれば、回転自由度を拘束した個別要素法により平面ひずみ圧縮試験の結果を良好にシミュレーションすることができる。上記の結果に基づき、背後地盤の材料定数として試験結果を良好にシミュレーションできている解析3(回転拘束)の値を採用した。

5. 背後地盤があるモデルに対する数値シミュレーション

図—9に個別要素によるモデルを示している。背後地盤の初期状態を作成する際に、要素間の摩擦角を 0° にしてパッキングを行ったので D_r は100%に近く、実験と対応しているものと思われる。ケーン-マウンド間の摩擦角、背後地盤の材料定数はこれまで述べてきた方法で設定したが、それ以外に背後地盤が接触している各境界での摩擦角を設定する必要がある。

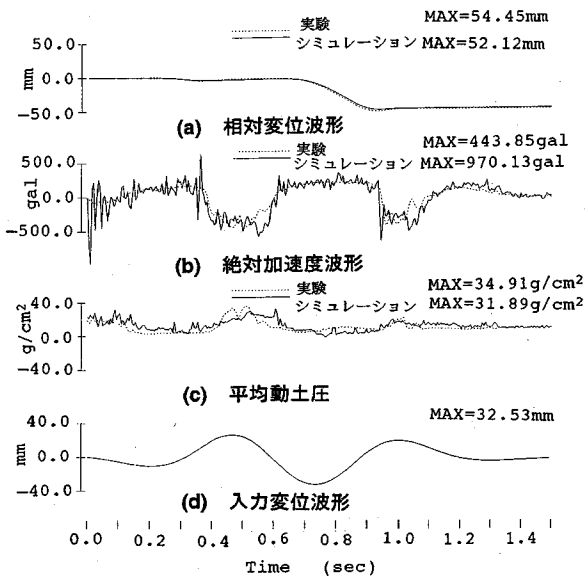
背後地盤-マウンド間の摩擦角は砂を接着したコンクリートブロックをテフロン面に載せて一面せん断試験を行った結果があるが、それよりやや大きくした方がシミュレーション結果と実験結果との対応が良いことが分った。また、背後地盤-ケーン間及び背後地盤-土槽間の摩擦角は測定されていない為、背後地盤-ケーン間の摩擦角は背後地盤の要素間摩擦角をそのまま用い、背後地盤-土槽間の摩擦角は、土槽に突起が設けてあり砂と土槽の間で滑りが起こらないようにしてあるため、 45° と大きな値を設定した。

表—3 材料定数

ケーソン要素の密度	ρ_c	(kg/m^3)	2572
背後地盤要素の密度	ρ_b	(kg/m^3)	1920
法線方向要素バネ定数	K_{en}	(N/m)	3.60×10^7
接線方向要素バネ定数	K_{et}	(N/m)	3.60×10^7
法線方向要素減衰係数	η_{en}	($\text{N} \cdot \text{sec/m}$)	2.37×10^8
接線方向要素減衰係数	η_{et}	($\text{N} \cdot \text{sec/m}$)	18.9
法線方向間隙バネ定数	K_{pn}	(N/m)	3.60×10^7
接線方向間隙バネ定数	K_{pt}	(N/m)	3.60×10^7
法線方向間隙減衰係数	η_{pn}	($\text{N} \cdot \text{sec/m}$)	2.43×10^8
接線方向間隙減衰係数	η_{pt}	($\text{N} \cdot \text{sec/m}$)	19.4
背後地盤の要素間摩擦角	ϕ_μ	($^\circ$)	27.0
マウンド-ケーソン間の摩擦角		($^\circ$)	12.5
マウンド-背後地盤間の摩擦角		($^\circ$)	15.2
背後地盤-土槽間の摩擦角		($^\circ$)	45.0
背後地盤-ケーソン間の摩擦角		($^\circ$)	27.0

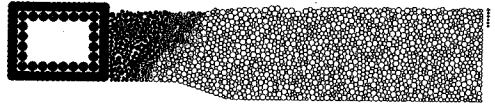
表—4 要素直径の内訳

要素直径	要素数
25.4 mm	380
18.8 mm	980
12.5 mm	640
合計	2000

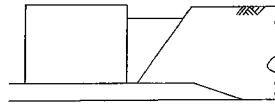


図—12 時刻歴波形

最大値 =5.2cm
しきい値(T.V.)=5.0cm



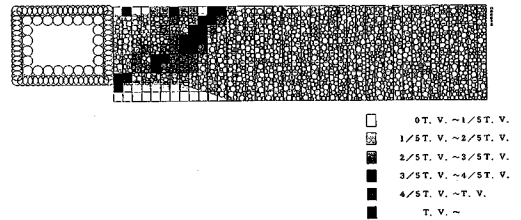
(a) 水平方向相対変位量の分布



(b) 実験結果のスケッチ

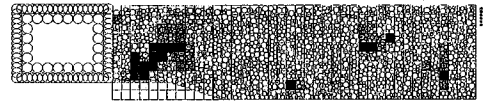
図—10 水平方向相対変位量の分布

最大値 =22.1%
しきい値(T.V.)=15.0%



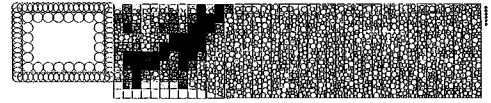
図—11 せん断ひずみの分布

最大値 =2.8%
しきい値(T.V.)=2.5%



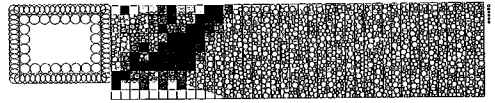
(a) 0.4秒

最大値 =7.8%
しきい値(T.V.)=6.0%



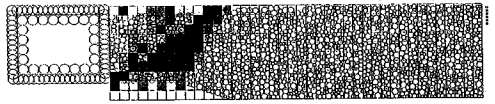
(b) 0.8秒

最大値 =21.9%
しきい値(T.V.)=10.0%



(c) 1.0秒

最大値 =22.1%
しきい値(T.V.)=10.0%



(d) 1.5秒

図—13 加振中のせん断ひずみの集中

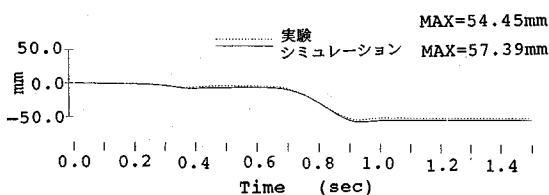


図-14 時刻歴波形 (背後地盤-マウンド間の摩擦角=12.5°)

ここでは、最初に模型振動実験を最も良く再現する場合の結果を示す。次に背後地盤-マウンド間の摩擦角と背後地盤-ケーソン間の摩擦角を変えた場合の影響を示す。最後に、背後地盤の内部摩擦角を小さくした場合の影響を示す。

(1) 実験を最も良く再現するシミュレーション

背後地盤の要素の回転自由度を拘束し、強度特性を実験の砂と一致させたシミュレーションの結果について述べる。表-3に模型振動実験のシミュレーションで用いる全材料定数を示す。実験の入力加速度は、最大400 galの2 Hz正弦波3波である。解析条件は時間刻み5.0×10⁻⁵ sec、継続時間1.5 secとした。背後地盤の要素の構成を表-4に示す。

図-10に加振後の水平方向相対変位量の絶対値の分布を示す。ここで、凡例に示すしきい値(T.V.)を越える要素を最も濃く塗りつぶし、以下段階的に変位量が小さくなるに従い塗りつぶす色を淡くしている。図中の黒く塗りつぶされた要素の領域が海側に大きく移動した領域であり、同時に示した実験のスケッチと比較して、楔型の領域がやや広い傾向はあるものの、滑り面の角度はほぼ対応していることが分かる。背後地盤の沈下量は実験の約5 cmに対して解析は約3 cmと小さめの値となった。図-11はせん断ひずみの分布を示している。ここで、せん断ひずみ量は対象とするメッシュの左右のメッシュの平均鉛直変位量の差の絶対値と上下のメッシュの平均水平変位量の差の絶対値の各々をメッシュの大きさで除したものの和として求めた。黒の濃いメッシュがひずみ量の大きい部分であり、図-10のコントラストの明確な部分に対応する領域が線状に連なりせん断帯を形成している様子が観察できる。図-12(a)にケーソンの振動台に対する相対変位波形、(b)にケーソンの絶対加速度波形、(c)にケーソンに作用する平均動土圧、(d)に入力変位波形を示す。変位波形と加速度波形の極性は山側方向を正、動土圧は圧縮を正としている。動土圧の比較において、実験値は観測点3点の平均値を、解析では背後地盤に接しているケーソンの要素に作用している要素間力の水平成分の総和を背後地盤の層厚で除して、平均的な動土圧としている。相対変位、加速度共

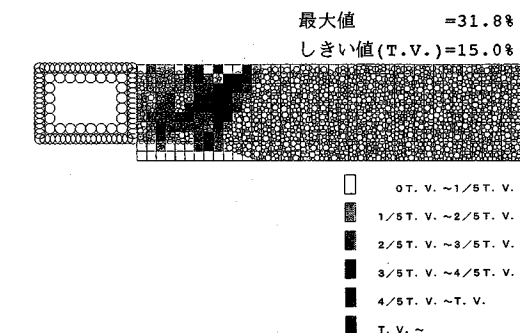


図-15 せん断ひずみの分布 (背後地盤-マウンド間の摩擦角=12.5°)

に良く一致している。特に、相対変位波形は実験値との差が最大で2 mm程度と精度良くシミュレートできている。また、ケーソンは0.3秒付近と0.7秒付近の2回滑っているがその時の滑動量、滑動の継続時間共に良い一致を見せている。(c)のケーソンに作用する動土圧についてもよく一致している。解析の加速度波形と動土圧の波形に見られる短周期振動は、ケーソンが完全に剛でない事と破壊した背後地盤がケーソンに衝撃を与えている事の2つの原因が考えられる。

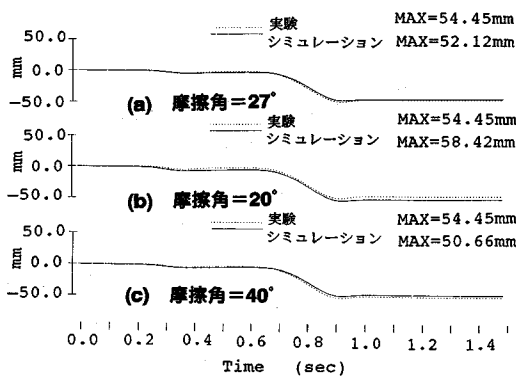
次に、加振による破壊の進展を調べる。図-13に加振中のせん断ひずみの集中の様子を示す。背後地盤のひずみは加振の初期段階にマウンドのごく近くに集中し、次第に地表へ向けて進行する。地表に達して破壊面を形成すると、それ以降は破壊面においてのみひずみ量が増大する。破壊面より海側の楔型の領域は、剛体的に破壊面に沿って滑り落ちるような運動をしているものと思われる。

(2) 背後地盤-マウンド間の摩擦角の影響

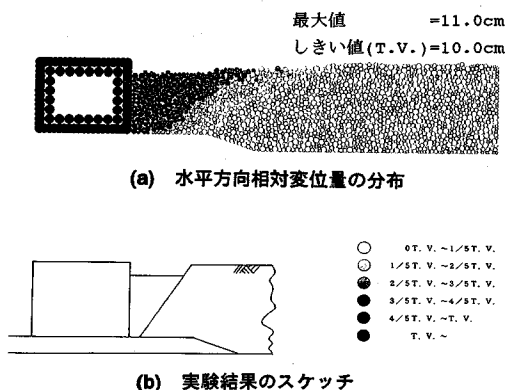
前述の通り、背後地盤-マウンド間の摩擦角は材料実験から求められた値よりやや大きくしている。材料実験で求められた摩擦角は12.5°であった。この値を用いたときのケーソンの相対変位波形の実験値との比較を図-14に示す。また、背後地盤のせん断ひずみの分布を図-15に示す。ケーソンの挙動は摩擦角を15.2°とした図-11の場合と同様に実験と良く一致している。しかし、背後地盤の破壊形態が図-11の解析結果とやや異なっており、マウンドに近い部分の破壊面がより山側に位置する傾向が見られる。これは、図-13から分かるように破壊がマウンドの近傍より発生することから、背後地盤-マウンド間の摩擦角が破壊の開始位置に影響するためと考えられる。

(3) 背後地盤-ケーソン間の摩擦角の影響

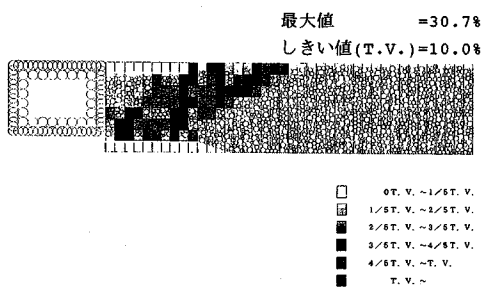
背後地盤-ケーソン間の摩擦角は、材料実験が行われ



図一16 時刻歴波形 (背後地盤-ケーソン間の摩擦角の検討)

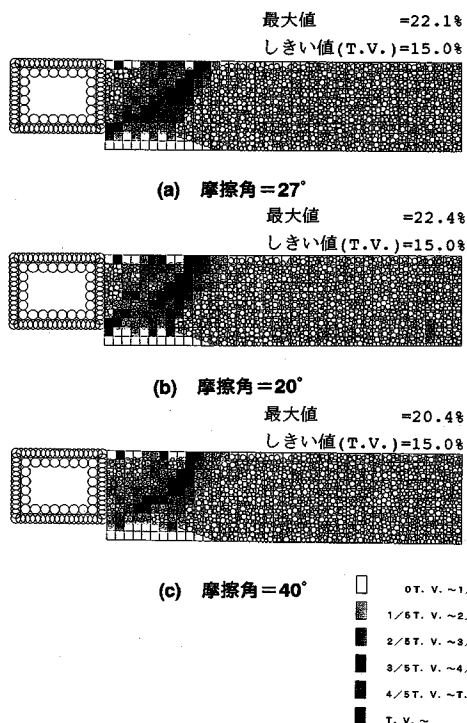


図一18 水平方向相対変位量の分布 (背後地盤の内部摩擦角: 小)

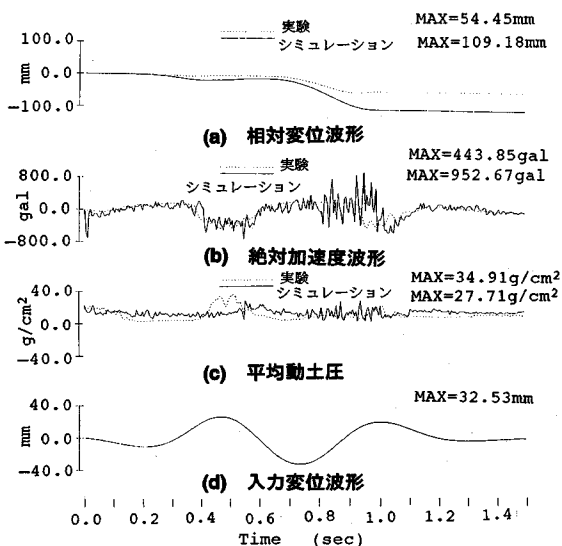


図一19 せん断ひずみの分布 (背後地盤の内部摩擦角: 小)

ていない為不明であった。そのため、(1)のシミュレーションでは背後地盤の要素間摩擦角をそのまま用いた。ここでは、この摩擦角の大小がシミュレーションに及ぼす影響を調べた。背後地盤-ケーソン間の摩擦角以外は全て表-3に示した値を用いた。そして、背後地盤-ケーソン間の摩擦角を、背後地盤の要素間摩擦角と同値である①27°、その前後の②20°③40°の3種類の場合について行った。図-16にケーソンの相対変位波形のシミュ



図一17 せん断ひずみの分布 (背後地盤-ケーソン間の摩擦角の検討)



図一20 時刻歴波形 (背後地盤の内部摩擦角: 小)

レーションと実験との比較を示す。また、図-17に背後地盤のせん断ひずみの分布を示す。図-16では、摩擦角を大きくすると相対変位量が小さくなる傾向が見られるが、違いは小さい。また、図-17から分かるように摩擦角を変えても背後地盤の破壊形態に顕著な違いは

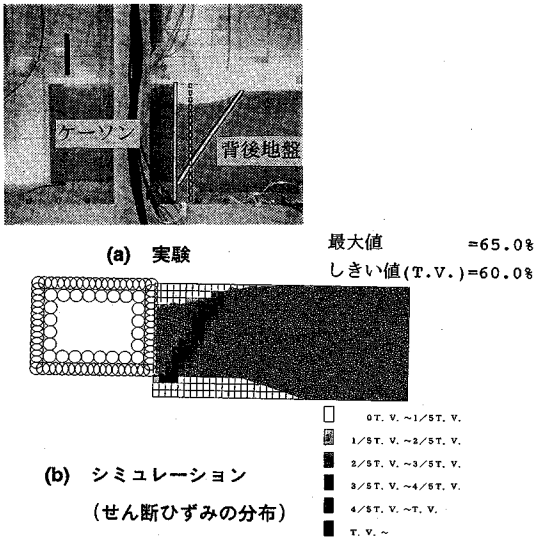


図-21 背後地盤の破壊状況

見られない。従って、(1)で行ったように背後地盤の要素間摩擦角をそのまま用いても問題無いと考えられる。

(4) 背後地盤の内部摩擦角の影響

背後地盤の内部摩擦角が小さい場合として、表-3に示した材料定数を用い背後地盤の要素の回転を自由にした通常の個別要素のシミュレーション結果を示す。図-18に加振後の水平方向相対変位量の絶対値の分布を示す。同時に示してある実験の破壊領域と比較するとシミュレーション結果の方がかなり広い領域で破壊していることが分かる。背後地盤の沈下量は実験、解析共に約5cmであった。図-19はせん断ひずみの分布を示している。図-20(a)にケーンの振動台に対する相対変位波形、(b)にケーンの絶対加速度波形、(c)にケーンに作用する平均動土圧、(d)に入力変位波形を示す。ケーンの2回の滑動現象において、シミュレーションはその両方で滑り過ぎる結果となった。これは、地盤の強度が低下すると破壊領域が広くなりケーンに作用する土圧が大きくなるからである。図-20(b)の加速度波形は2回目の滑動が起こっている付近で大きく乱れている。この加速度波形の乱れの起こっている時間、土圧も乱れている。これは、背後地盤が大規模に破壊し崩れ落ちてきた要素がケーンに衝撃を与えているためと思われる。また、滑動している時間が長いいため位相の反転する時刻も遅れている。

(5) 要素の大きさの影響

上述してきたように図-9に示した解析モデルを用い

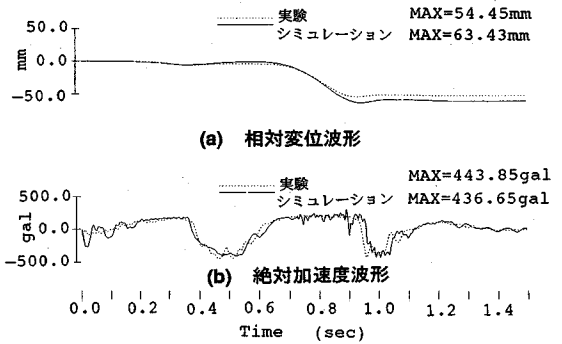


図-22 背後地盤モデルとして9000要素を用いたシミュレーション

実際、背後地盤をモデル化している要素の回転自由度を拘束し、内部摩擦角を実験で用いた砂のそれと対応させておけば、他のパラメータのシミュレーション結果に対する感度は低く、いずれの場合も概ね良好な結果が得られたと言ってよい。しかしながら、背後地盤の破壊状況については、ケーン背後の地表面の沈下や滑り面の幅の比較において実験結果を良好に再現しているとは言えない。これは背後地盤の要素が平均粒径 $D_{50}=19.9\text{mm}$ で実際の砂粒子 ($D_{50}=1.1\text{mm}$) に比べて大きすぎるためであろう。

図-21に背後地盤を表す要素として図-9の5/61の大きさの要素9000個を用いたシミュレーション結果を示す。背後地盤の要素パネの強さは計算時間節約のため1/7にした。時間刻みは $2.0 \times 10^{-5}\text{sec}$ である。マウンド-背後地盤間の摩擦は大きいほど実験を良好に再現する傾向があるので 45° とした。図-21に示すように、地表面の沈下の状況や滑り面の幅についての再現性が大幅に改善され、図-22のケーンの応答についても良好なシミュレーション結果が得られた。この改善は、パネ係数を弱くしたことによるものとは考え難いので、要素の大きさを実際の粒径に近づけるほどシミュレーションが改善できると判断される。

6. 結 論

個別要素法を用いてケーン式護岸の模型振動実験に対するシミュレーションを行い実験結果との比較検討を行った。解析結果より得られた結論は、以下のように要約できる。

- (1) 連結要素はケーンのモデル化に適用できる。
- (2) 実際の土質材料と同程度の強度を再現する方法として要素の回転自由度を拘束する手法が有効である。この手法では、モデル化した土質材料の強度を要素間摩擦角によって制御することが可能である。

(3) 要素の回転自由度を拘束する手法を用いて背後地盤の強度特性を再現できるようになったことにより、背後地盤を含む護岸構造物の振動実験結果のシミュレーションを精度良く行うことができるようになった。

(4) 個別要素法によるシミュレーションによって護岸構造物の地震時破壊現象が進行していく様子が観察できた。

以上のように、本研究で提案した手法の有効性が確認され、個別要素法が大変形・破壊問題の解析手法として適していることが示された。

謝辞：模型振動実験の詳細について教えて頂いた東電設計(株)の福井史朗部長、佐藤正行課長、西村友次課長代理、要素の回転を拘束する手法を指摘して頂いた東北学院大学教授佐武正雄博士、平面ひずみ圧縮試験を行って頂いた東京大学生産技術研究所龍岡研究室の亀谷泰久氏、各氏に末筆ながら謝意を表す。本研究で用いた個別要素法のプログラムは、京都大学助手、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

- 1) Uwabe, T. and Higaki, N. : An Experimental Study on Sliding Rigid Body in Water During Earthquakes, *Proc. of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng.*, No.356/I-3, pp.237-245, April 1985.
- 2) 上部達生, 長田 信, 高野剛光: 重力式擁壁の水中における地震時滑動挙動, 第26回土質工学研究発表会講演集, pp.939-940, 1991年.
- 3) 風間基樹, 稲富隆昌: ケーソンに作用する地震時土圧に関する模型振動実験, 土木学会論文集, 第416号/I-13, pp.419-428, 1990年4月.
- 4) 栗本雅裕, 松田敦夫, 武田清治: 混成堤の地震時破壊特性に関する大型模型振動実験, 第34回海岸工学講演論文集, pp.541-545, 1987年.
- 5) 金谷守, 西 好, 青山瑞明, 飯島 健, 玉野浩之: 水中構造物の地震時滑動に関する振動台実験, 第23回土質工学研究発表会講演集, pp.983-984, 1988年.
- 6) 安田 登, 福井史朗, 佐藤正行, 豊田耕一, 黒瀬浩公: 護岸構造物の地震時挙動に関する実験的研究(その1), 土木学会第47回年次学術講演会講演概要集, 第1部, pp.160-161, 1992年.

- 7) 福井史朗, 佐藤正行, 西村友次, 藤谷昌弘, 三浦房紀: 護岸構造物の地震時挙動に関する実験的研究(その2), 土木学会第47回年次学術講演会講演概要集, 第1部, pp.162-163, 1992年.
- 8) 土岐憲三, 三浦房紀, 寺田倫康: 水-地盤-護岸構造物系の地震応答解析, 京都大学防災研究所年報, 第25号B-2, pp.67-83, 1982年.
- 9) Uwabe, T. and Moriya, M. : Shaking Table Model Tests of Sliding Gravity-Type Retaining Walls During Earthquake, *Proc. of 9th WCEE, Vol.III*, pp.685-689, 1988.
- 10) 中瀬 仁, 安中 正, 片平冬樹, 興野俊也: 平面ひずみ圧縮試験に対する個別要素法の適用, 土木学会論文集, No.454/III-20, pp.55-64, 1992年9月.
- 11) Meguro, K. and Hakuno, M. : Fracture Analysis of Concrete Structures by the Modified Distinct Element Method, *Proc. of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng.*, No.410/I-12, pp.113-124, October 1989.
- 12) 澤田純男, 岩崎好規, プラダンテージB.S.: 橋円要素を用いた個別要素法による砂のせん断挙動の解析, 第28回土質工学研究発表会講演集, pp.521-522, 1991年.
- 13) 中瀬 仁, 栗田哲史, 安中 正, 片平冬樹, 興野俊也: 改良個別要素法による平面ひずみ圧縮試験のシミュレーション, 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集, 第3部, pp.466-467, 1991年.
- 14) Bardet, J.P., Huang, Q. and Proubet, J. : A Micromechanical Investigation of the Influence of Couple Stresses on Failure in Granular Materials, *Rock Mechanics*, pp.609-617, 1992.
- 15) 木山英朗, 藤村 尚: 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, 1983年5月.
- 16) 中瀬 仁, 栗田哲史, 安中 正, 安田 登, 藤谷昌弘: 個別要素法による2軸圧縮試験に対するシミュレーション, 第27回土質工学研究発表会講演集, pp.585-588, 1992年.
- 17) 中瀬 仁, 栗田哲史, 安中 正, 安田 登, 藤谷昌弘: 回転自由度を拘束した個別要素法による平面ひずみ圧縮試験のシミュレーション, 土木学会第47回年次学術講演会講演概要集, 第3部, pp.390-391, 1992年.
- 18) 朴春植, 神明 進, 龍岡文夫, 澁谷 啓: 平面ひずみ圧縮試験による Silver Leighton Buzzard sand の変形・強度特性の異方性, 第25回土質工学研究発表会講演集, pp.439-442, 1990年.

(1994.12.12 受付)

NUMERICAL SIMULATION FOR SHAKING TABLE MODEL TESTS OF CAISSON REVETMENT BY DISTINCT ELEMENT METHOD

Tetsushi KURITA, Hitoshi NAKASE, Tadashi ANNAKA,
Masayoshi SHIMADA and Masahiro FUJITANI

The Distinct Element Method (DEM) is an effective method for large deformation and fracture analysis of some engineering problems. It is suitable for the simulation of dynamic large deformation problems of shore protection structures. This report provides a study on the numerical simulation of shaking table model tests of caisson revetment by DEM and its comparison with the test data. By using the rotation confining method, which is proposed in this paper, it is found that the motion of caisson and the fracture mode of backfill are in good agreement with the experimental results.