

# 防波護岸の地震時挙動に関する研究・その2 -個別要素法による消波ブロックの震動解析-

栃木 均<sup>1</sup>・金谷 守<sup>2</sup>・河井 正<sup>1</sup>  
石川博之<sup>3</sup>・武田智吉<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 (財)電力中央研究所 地盤耐震部 (〒270-11 我孫子市我孫子 1646)

<sup>2</sup>正会員 工博 (財)電力中央研究所 地盤耐震部 (〒270-11 我孫子市我孫子 1646)

<sup>3</sup>正会員 東京電力株式会社 技術開発本部 (〒230 横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1)

<sup>4</sup>正会員 工修 東京電力株式会社 技術開発本部 (〒230 横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1)

ケーソン前面に消波ブロックを有する防波護岸の地震時変形解析手法として、消波ブロックの領域をDEMでモデル化し、マウンド・背後地盤などの地盤材料の領域をFEMでモデル化した二次元カップリング解析手法の開発を行った。DEMによる消波ブロックのモデル化法および入力物性の検討を行うため、消波ブロック堤体の遠心力荷重模型実験の数値シミュレーションを実施し、消波ブロック堤体の増幅特性や伝達関数などに関する実験結果との比較から解析手法の妥当性を示した。

*key Words*: sea wall, armored layer, FEM-DEM coupling, numerical simulation

## 1. はじめに

防波護岸の構造形式は、水深が大きい場合ケーソン堤となることが多く、その地震時挙動に関しては、ケーソンの滑動や沈下などに対する検討が行われている。これらの変形挙動の評価においては、ケーソンのロッキング振動、滑動および傾斜など、ケーソンの地震時挙動に対する消波ブロックの影響を正しく評価する必要が生じている。本研究では、防波護岸の地震時変形挙動の評価を目的とし、消波ブロックとケーソンとの動的相互作用の影響を考慮できる解析手法を開発するため、消波ブロックをモデル化したDEMと、ケーソン、マウンド、背後地盤をモデル化したFEMとのカップリングを行った。本報告では、上記のカップリング解析手法の内、消波ブロックをモデル化したDEMによる解析手法の妥当性について検討するため、消波ブロック堤体の遠心力荷重模型実験に関する数値シミュレーションを実施した。消波ブロックのかみ合いを考慮した震動挙動について検討した結果を報告する。

## 2. 消波ブロックのモデル化

消波ブロックの相互のかみ合いによる強度、変形特性を表現するため、個々の消波ブロックが持つ幾何学的な形状特性を反映させた二次元の解析要素を作成した。対象とした消波ブロックは、高さ約4cm、質量約46gのモルタル製の模型である。以下に示す実験では全てこれと同じ共通の消波ブロック模型を使用している。

図-1に解析要素の概要を示す。解析要素の形状は、消波ブロック模型の上からの投影図形となるよう定めた。解析要素は剛体であり、相互のかみ合いによる力学的挙動を要素間のばね定数および摩擦係数により表現するものとした。

## 3. DEM解析に用いるばね定数

### (1) 消波ブロックの荷重試験

接触点のばね定数を求めるため、消波ブロック模型に関する荷重試験を行った。荷重試験は図-2に示すとおり消波ブロックの突起と荷重面の接触状態を

変えて2ケース実施した。試験1は消波ブロックを正立させた場合であり、上側1点载荷、下側3点支持とした。試験2は上側2点载荷、下側2点支持とした。

図-2の荷重～変位関係に示される剛性 $k_{EX1}$ 、 $k_{EX2}$ から、消波ブロック模型の4本の突起についての剛性を求め、それらを1点支持、2点支持および3点支持の剛性 $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ として整理した。試験1では、模型全体の剛性 $k_{EX1}$ は、突起の剛性 $k_1$ 、 $k_3$ と同表中の式の関係にあり、また、突起をはり要素とした弾性論から $k_1$ と $k_3$ の剛性比を求め、この2つの関係から $k_1$ および $k_3$ を求めた。試験2では、4本の突起の剛性は全て2点支持の剛性 $k_2$ に等しく、 $k_2=k_{EX2}$ として求めた。

## (2) 接触点のばね定数

接触点の剛性は2本の突起が互いに押し合うときの剛性として評価される。上で求めた3種類の剛性を種々組み合わせる様々な接触状態に応じたばね定数を求め、それらを表-1に示した。同表に示すように接触点の剛性は、突起の接触状態に応じて種々変化するが、消波ブロックの集合体としての挙動はこれらの平均的な剛性が反映されるものと考えられ、表中の平均値を解析に用いるものとした。

## 4. 消波ブロック堤体の振動解析

解析モデルの妥当性について検討するため、遠心力装置を用いた消波ブロック堤体の振動実験に関する数値シミュレーションを実施した。

### (1) 実験の概要

消波ブロックの堤体模型は、鋼製の土槽(長さ172cm、高さ79cm、奥行き70cm)内に、1個当たり約46gのモルタル模型を乱積みにして作成した。堤体底面の境界条件は固定とし、2497個のブロックを用いて約20cmの高さに積み上げた。図-3に実験に使用した消波ブロックとその堤体模型を示す。堤体の体積と質量から求めた平均的な密度は、実験前 $1.189\text{g/cm}^3$ ( $e=0.727$ )、実験後 $1.208\text{g/cm}^3$ ( $e=0.700$ )である。消波ブロック模型の内部に加速度計を埋設し、堤体天端および底面付近の加速度応答を計測した。遠心加速度

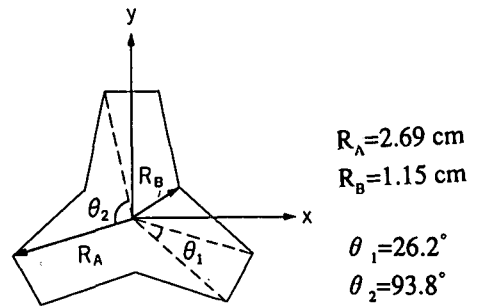
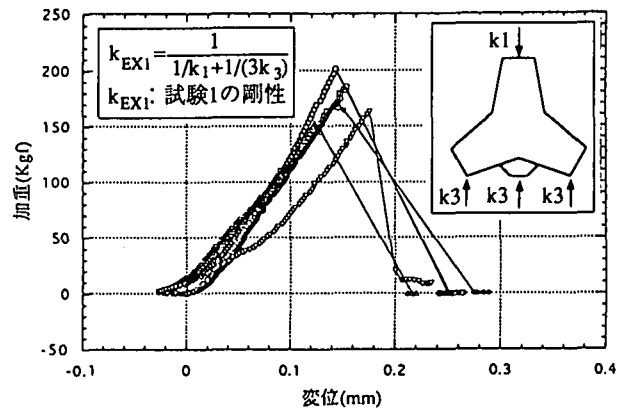
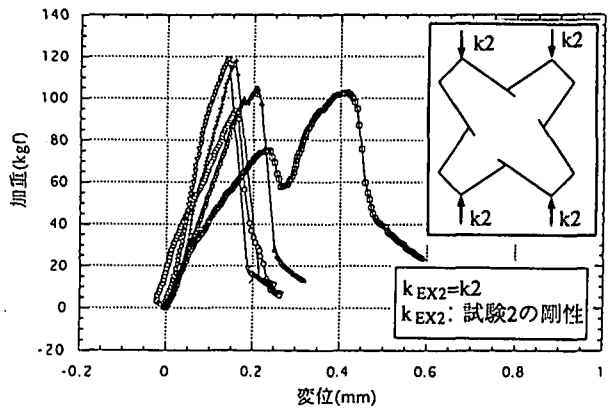


図-1 DEMによる消波ブロックの二次元解析要素



(a) 試験1-1点载荷3点支持



(b) 試験2-2点载荷2点支持

図-2 消波ブロック模型の载荷試験

表-1 突起の組合せに応じた接触点の剛性

\* $k_i$ の場合は2本のばねで支えているので、 $k_i/2$ とする。

$k_j \backslash k_i$	$k_i$	$k_i/2=1.7342^*$	$k_2=0.7290$	$k_3=0.6038$
$k_i/2=1.7342$		0.8671	0.5132	0.4479
$k_2=0.7290$		0.5132	0.3645	0.3303
$k_3=0.6038$		0.4479	0.3303	0.3019

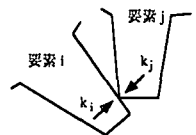
( $\times 10^4 \text{ kgf/cm}$ )

平均  $k_{\text{mean}} = 0.4574 \times 10^4 \text{ kgf/cm}$

$$k_{ij} = \frac{1}{1/k_i + 1/k_j}$$

$$k_{ANL} = k_{ij} \times (\text{奥行き方向の並び個数})$$

$$k_{ANL} : \text{解析用のばね定数(奥行き1m)}$$



x, y座標による堤体の概形 (白抜きは両サイドで若干低めに作成)

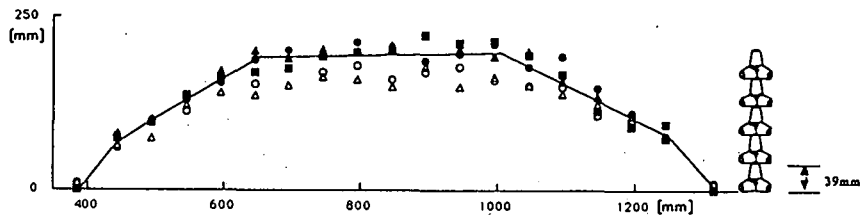


図-3 消波ブロックの堤体模型

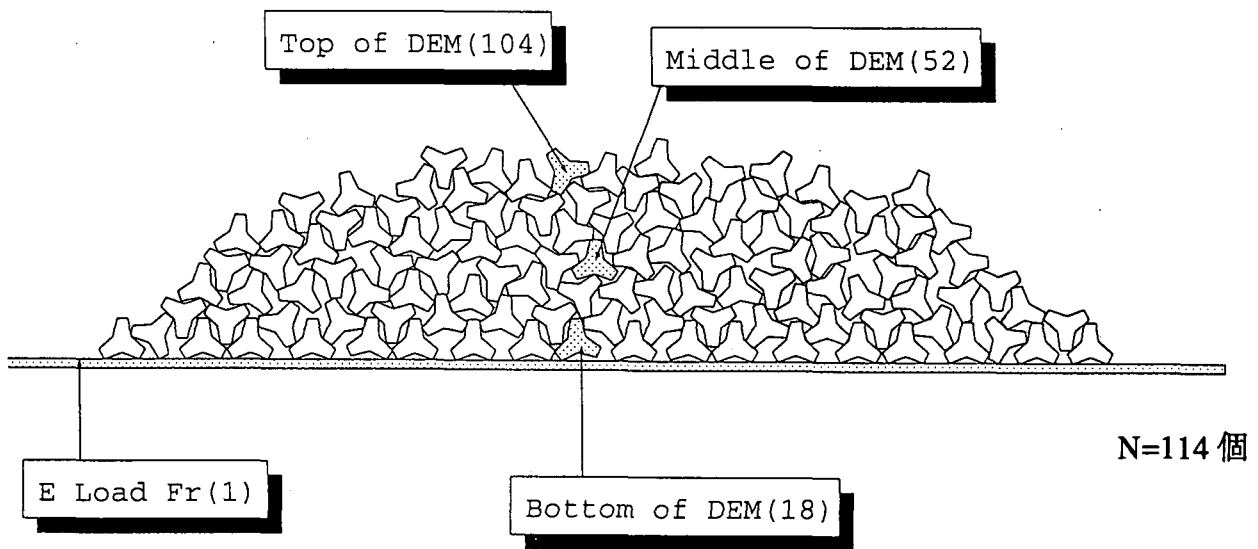


図-4 解析モデルの要素配置

を 10G, 30G, 45G とし, 振動数を 250Hz, 120Hz とした正弦波により加振し, 水平加速度を遠心加速度の 1/3 付近まで段階的に大きくして, 堤体の基本的な振動特性を把握した。

## (2) 解析モデル

図-4 に解析モデルを示す。解析モデルは, 図-1 に示した解析要素を用い, 重力場において積み上げる解析を行って作成した。作成に当たっては, 層毎に要素を落下させ, 各要素が互いにかみ合いをなし安定した状態となるようにした。最上段の層を積み上げた後, 表面を整形して解析モデルを完成させた。

## (3) 解析に用いる入力物性

二次元の解析では, ブロックの積み方を完全には再現できず, 堤体の密度や空隙率に関して, 実験値との間に差が生じてくる。そのため, 動的解析に用

いる要素の質量, 慣性モーメントは, 積み上げ解析の終了後に, 実験模型との整合を図るため, モデル全体の質量が実験と同じになるように定めた。また, 実験模型の空隙率の影響を反映させるため, 実験と解析とで消波ブロックの総数が等しくなるように解析モデルの奥行き方向の並び個数を定め, その値を 1 個当たりの剛性(表-1 の平均値)に乗じたばね定数を用いた。摩擦係数は, モルタル材料の物性を用い, 静止摩擦係数 0.6, 動摩擦係数 0.5 とした。

## (4) 解析結果

図-5 に遠心加速度 45G, 振動数 120Hz で加振したケースの加速度時刻歴を示す。加速度の出力位置は, 堤体の天端中央および底面中央付近である。実験では, 約 4.4G の入力波に対して, 堤体天端で約 10.2G まで増幅した挙動が得られている。また, 解析においても約 4.4G の入力に対して, 約 8.0G まで増幅し

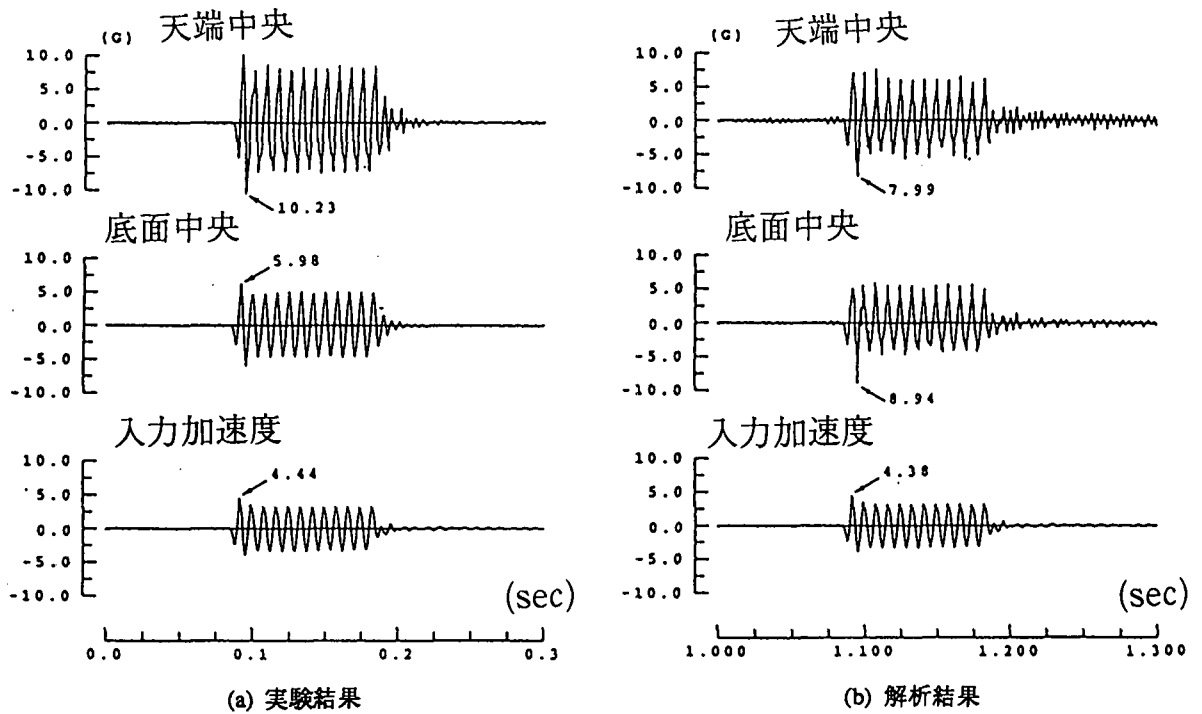


図-5 実験と解析の加速度時刻歴の比較

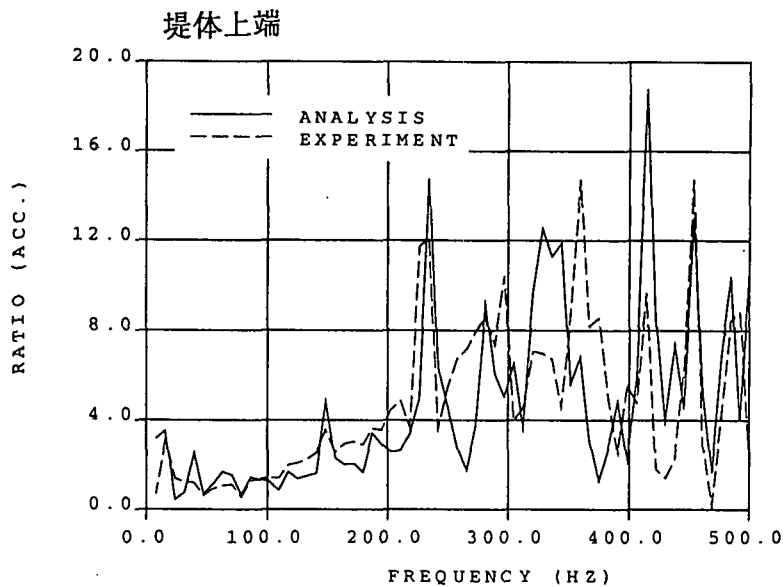


図-6 実験と解析の伝達関数の比較

ており、その加速度波形からも実験をほぼ再現できていることが確認できた。図-6に堤体上部の伝達関数を示す。実験結果、解析結果とも、230Hz～450Hzまでの広い範囲に存在するスペクトルが、ピークとなる周波数および増幅率など、良好に再現されており、解析手法および入力物性の妥当性が確認された。

ここでの結果を用いて護岸の遠心力载荷模型実験の解析を行い、それらを(その3)に報告している。また、本研究は電力9社と日本原子力発電(株)による電力共通研究の一部として実施したことを付記する。

#### 参考文献

- 1) 栃木 均：ケーソン堤の耐震性に及ぼす消波ブロックの影響について-模型振動実験と個別要素法による数値シミュレーション-、電力中央研究所研究報告、U94040、1995。
- 2) 河井 正、金谷 守、田中幸久、石川博之、武田智吉：防波護岸の地震時挙動に関する研究・その1、第24回地震工学研究発表会講演集、1997。
- 3) 金谷 守、栃木 均、河井 正、西 好一、石川博之、武田智吉：防波護岸の地震時挙動に関する研究・その3、第24回地震工学研究発表会講演集、1997。