

防波護岸の地震時挙動に関する研究・その3

-防波護岸の遠心力载荷模型実験の数値シミュレーション-

金谷守¹・栃木均²・河井正²・西好一¹
石川博之³・武田智吉⁴

¹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)

²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)

³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)

⁴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の適用性を確認するため、消波ブロック領域については個別要素法(DEM)を適用し、マウンド・背後地盤などの地盤材料領域については有効応力に基づく非線形構成式を用いた有限要素法(FEM)を適用した二次元カップリング解析手法を用いて、遠心载荷模型振動実験の数値シミュレーションを試みた。解析により、振動の継続とともに消波ブロックが海側に徐々に移動する様子や、背後地盤の変形・間隙水圧挙動等について、実験結果を概ね良好に模擬できることが示された。

Key Words : seawall, centrifuge, FEM, DEM, coupling analysis, numerical simulation

1. はじめに

前面に消波ブロックを有するケーソン式防波護岸の地震時変形を時刻歴で解析する手法としては、例えば、すべての解析領域をFEMによる連続体解析領域として扱う方法と、すべての解析領域をDEMによる個別要素解析領域として扱う方法が考えられる。前者の場合、これまでに多くの適用実績があり、後者に比べて演算時間の短縮化が図れると考えられるものの、消波ブロックの集合体のように個々のかみ合わせや転がり現象が集合体全体の変形挙動に影響を及ぼす可能性がある場合には必ずしも十分な手法とは言えない面もある。一方、後者の場合には、自由度が膨大になる上、一般に安定した解を得るためには相当時間刻みを小さくする必要があり、入力物性値についても不明な点が多いが、消波ブロックのような材料の解析に対しては、FEMに比べてより実挙動に合った解析を行える可能性がある。このように、現状では個々の解析法で一長一短があるが、より合理的かつ高精度

の解析を行う手法として、材料の特徴に応じて解析法を使い分け、それらのカップリングを図ることによって構造物全体の挙動を解析する手法も工学的には十分価値のある手法と言える。金谷・西¹⁾は、FEMを用いた地盤の二次元有効応力解析手法(NAFSS)を開発しており、栃木²⁾・³⁾は、消波ブロックをDEM解析の領域とし、ケーソンやマウンドに対しては線形モデルを適用したFEM解析の領域とした二次元カップリング解析手法(TSLIDE II)を開発している。本研究では、両者の結合を図り、消波ブロック領域をDEM解析領域とし、ケーソンを線形モデル、マウンド・背後地盤などを非線形モデルでモデル化したFEM解析領域として、防波護岸の遠心模型振動実験の数値シミュレーションを試みた結果について述べる。

2. カップリング解析手法の概要

2つの解析手法の詳細については、個々の文献1)、2)、3)に譲るとして、両解析のカップリングの考え

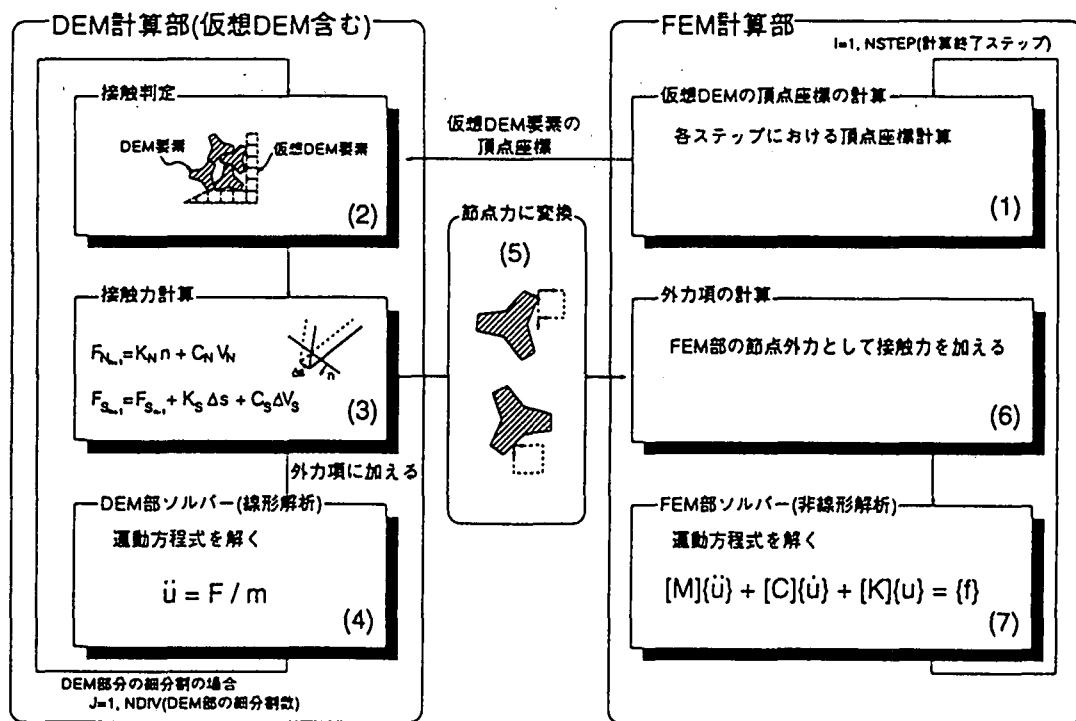


図-1 カップリング解析の流れの概要

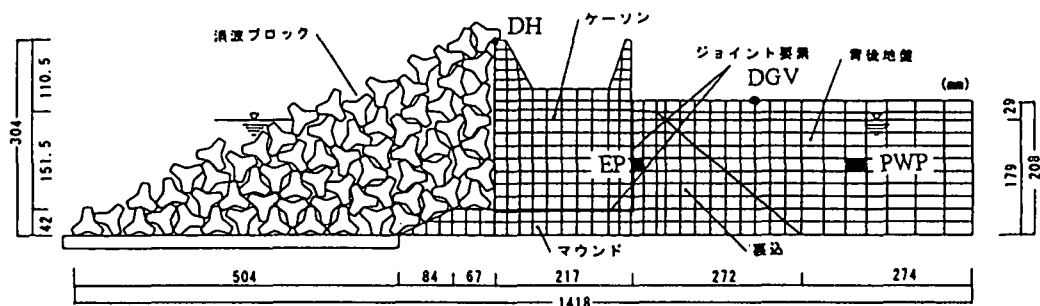


図-2 解析モデルと出力点

方を簡単に紹介する。図-1に、カップリングに対する解析の流れの概要を示した。基本的には、DEMとFEMでそれぞれ独立に運動方程式を解くが、その際、両者の接触面において荷重のやり取りを行って、相互作用を考慮しようとする方法である。すなわち、ある時刻におけるFEM計算部の解析結果から、DEM要素と接触するFEM要素の頂点座標を求め、DEM計算部ではそれらの要素を動きのない仮想DEM要素であるとみなして、個々の消波ブロックや仮想DEM要素との接触判定・接触力を計算し、全体系としての運動方程式から消波ブロックの動きを計算する。このDEM計算部の解析で求められた仮想DEM要素との接触力からFEM解析にあたっての要素の節点力を評価し、次のFEM計算ではそれらを節点外力として与え、その条件のもとでFEM部の運動方程式を解く。この操作を短い時間刻みで繰り返し行うこと

により、応答や変形を逐次求めていくものである。

3. 解析モデルと解析条件

(1) 解析モデルと入力物性値

図-2に、解析モデルを示す。本モデルは、その1⁴⁾で示した岩着タイプの模型実験に対応している。解析では、FEM部について、ケーソンの陸側側面と底面にジョイント要素を配置した。DEM部については、底面に剛な仮想の要素を配置し、底面に接するブロックとのすべりを考慮している。

FEM部である背後砂・裏込・マウンド碎石部の入力物性値については、同一材料を用いて別途実施した液状化試験や動的変形試験を構成式によるシミュレーションによって推定した。ケーソン海側側面に作用する動水圧は、Westergaard式に基づく

付加質量で与えた。ジョイント要素の摩擦係数については、静止摩擦係数、動摩擦係数ともに0.5とした。また、降伏後の剛性は初期剛性の400分の1としている。DEM部のばね定数・減衰定数などの入力物性値については、その2⁵⁾に示した消波ブロック堤体のシミュレーション解析結果に基づいて設定した。また、要素の総数は68個としたが、その質量は実験での単位奥行き当たりの消波ブロック全重量を要素数で除した値を与え、全体としての慣性力の効果になるべく等価になるよう調整した。接触点における摩擦係数は、静止摩擦係数を0.6、動摩擦係数を0.5とした。水面より下に存在するブロックについては浮力を考慮している。

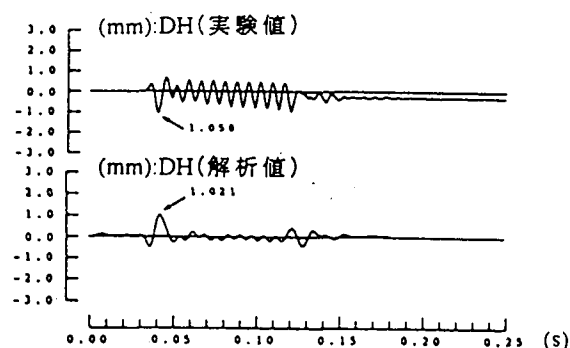
(2) 解析条件

解析は、30Gの遠心加速度の下で水平加速度振幅約14G程度の正弦波加振を行った実験に対して行った。加振振動数は約150Hzであり、振動台で計測された2点の加速度波形の平均値を底面固定条件で直接入力した。継続時間は0.18秒としている。解析における時間刻みは、DEM部で400万分の1秒とし、FEM部で40万の1秒とした。

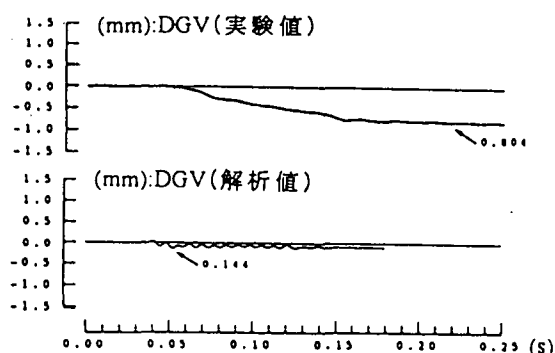
4. 解析結果

図-3には、ケーソンや背後地盤の変位、背後地盤の間隙水圧、ケーソンに作用する土圧の時刻歴の比較を示した。各出力位置は、図-2に示している。ケーソン左上端の水平変位DHについては、ロッキング振動が卓越した波形になっており、ほとんど海側への残留変位が生じない傾向は両者で概ね一致している。背後地盤の鉛直変位DGVは、解析値が実験値に比べて小さくなっているが、測定値自体が1mmにも満たないほど小さいため測定精度などを考慮すると顕著な差とは言えない。背後地盤の間隙水圧PWPについて比較すると、解析値は実験値に比べて上昇量がやや小さめになっている。一方、解析によるケーソンの土圧EPは、振動の継続とともに若干増加傾向を示しながら振動しているが、絶対値としては実験と良い一致を示している。

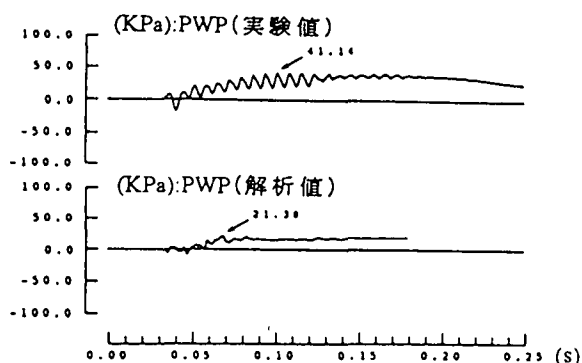
図-4および図-5には、それぞれ時刻 $t=0.15$ 秒における消波ブロックの動きとFEM部の変形状態を示した。消波ブロックは海側に移動しており、実験で観察された傾向と一致している。特にケーソン付近と法面付近で移動量が大きくなる様子が現れている。FEM部の変形状態については、背後地盤が



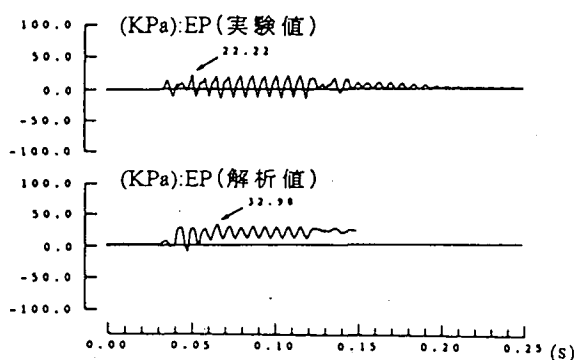
(a) ケーソン左上端の水平変位



(b) 背後地盤の鉛直変位



(c) 背後地盤の間隙水圧



(d) ケーソンに作用する土圧

図-3 変位、間隙水圧、土圧の時刻歴の比較

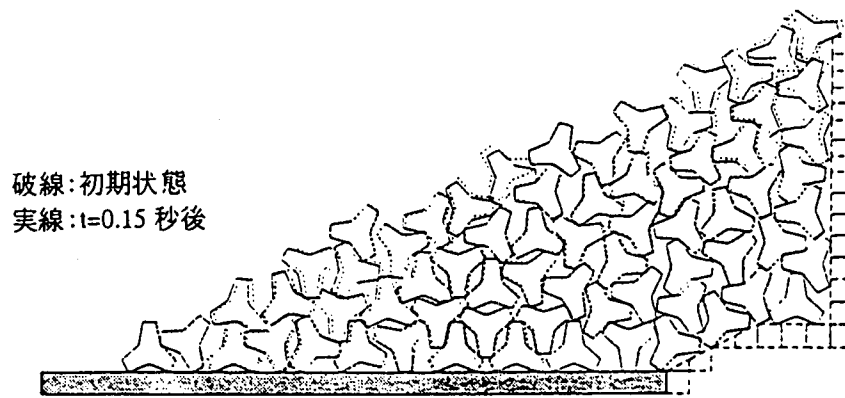


図-4 DEM解析部の消波ブロックの移動状態 (t=0.15秒)

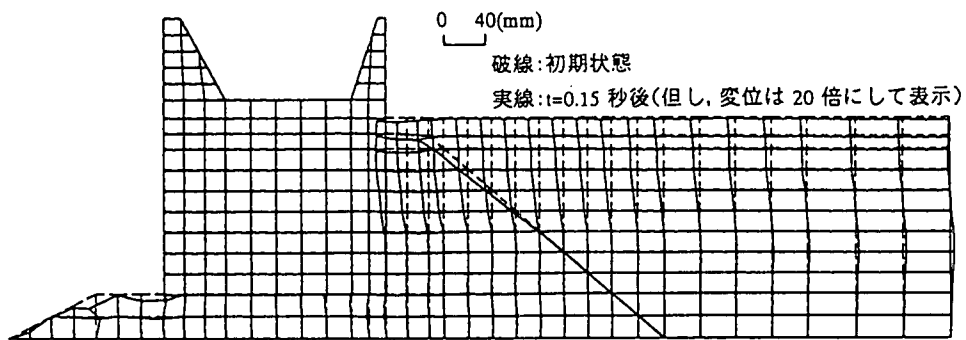


図-5 FEM解析部の変形状態 (t=0.15秒)

ケーソンにもたれかかるように変形していく様子が表されており、実験で得られた変形形態と整合している。

なお、上記の解析においては、スーパーコンピュータPOWER CHALLENGE (Silicon Graphics)を用い、CPUタイムは約12時間であった。

5. まとめ

本報告では、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の適用性を確認するため、消波ブロックをDEM解析領域とし、マウンド・背後地盤などを非線形構成式でモデル化したFEM解析領域とした二次元カップリング解析手法を用いて、遠心載荷模型振動実験の数値シミュレーションを試みた結果について示した。解析結果は実験結果を概ね良好に模擬していたが、今後は海底地盤が砂層で構成されている実験に対するシミュレーションを行って、解析手法の妥当性を検討する予定である。

謝辞：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。関係各位に謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 金谷守, 西好一, 当麻純一, 大波正行: 有効応力に基づく地盤の非線形解析手法の開発とその検証, 土木学会論文集, No. 505/Ⅲ-29, pp. 49-58, 1994.
- 2) 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.
- 3) 栃木均, 金谷守, 河井正: 消波ブロックとの動的相互作用を考慮した防波護岸の耐震性評価手法の開発, 電力中央研究所研究報告, 1997, 準備中.
- 4) 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.
- 5) 栃木均, 金谷守, 河井正, 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2, 第24回地震工学研究発表会講演集, 1997.