

防波護岸の地震時変形予測に関する検討・その2

消波ブロックの動的変形特性を考慮した 遠心載荷模型振動実験のシミュレーション解析

鈴木俊一¹・金谷守²・立石章³
馬場崎亮一⁴・茂呂吉司⁵・蟹江俊仁⁶

¹正会員 大成建設(株) エンジニアリング本部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿区1-25-1)

²正会員 工博 (財) 電力中央研究所地盤耐震部 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

³正会員 工修 大成建設(株) 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

⁴(株) 竹中工務店 技術研究所 (〒270-1395 千葉県印西市大塚1-5-1)

⁵正会員 (財) 原子力発電技術機構 耐震技術センター (〒105-0001 東京都港区虎ノ門4-3-13)

⁶正会員 工博 北海道大学大学院 工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

本報告は、経済産業省委託の「高耐震構造立地技術確証試験(新立地方式調査)」の研究成果の一部である。当該研究では、原子力発電所の人工島立地方式を念頭に、消波ブロックを含むケーソン護岸の地震時挙動を把握することを目的として、遠心載荷試験装置による確証試験が行われた。本報告では、この試験結果に対するシミュレーション解析結果を報告するものである。

シミュレーションは、地盤の過剰間隙水圧の蓄積・上昇の影響を評価可能な有効応力解析手法により実施した。その結果、消波ブロック部の加速度応答およびケーソンの残留変位について解析結果と試験結果との整合性が概ね確認された。

Key Words : seawall, earthquake, deformation characteristics, centrifuge, effective stress analysis

1. はじめに

防波護岸は背部に位置する発電所や発電所敷地を高潮や波浪等から防護する目的で設けられるため、その耐波・耐震性は、背面部に設けられる施設の健全性に重要な影響を及ぼすものと考えられる。

防波護岸に要求される機能のうち最も重要なものは越波防止機能であり、波浪および地震によりその機能が損なわれることがないことを確認する必要がある。こうしたことから、本研究では前面に消波ブロックを有するケーソン式護岸を対象に、主として以下に示す事項を目的として、加振実験による遠心載荷模型振動実験¹⁾および実験結果に対するシミュレーション解析を実施した。

①: 防波護岸全体および防波護岸の越波防止機能に対して支配的な影響を及ぼすと想定されるケーソンの地震時挙動の把握と解析による再現性の確認

②: 関連論文・その1²⁾にて定式化を行った消波ブロック集合体の変形係数と拘束圧の関係を有限要素法に適用し、遠心載荷模型振動実験結果のシミュレーション解析を実施し、定式化の妥当性を確認する。

2. 遠心載荷模型振動実験の概要

使用した遠心載荷模型実験装置は有効回転半径が6.5mで、プラットフォームに載せる土槽の大きさは、加振方向長さ110cm、高さ30cm、奥行き40cm、重量は285kgである。この土槽に防波護岸模型を作成し、遠心加速度50G場で実験を実施した。遠心載荷模型振動実験の実験条件を表1に示す。モデル縮尺については、実験装置の制限から想定する実物大断面の1/2のサイズをプロトタイプとして、これを1/50に縮尺して実験を実施した。

表1 実験条件

項目	実験条件
モデル縮尺	1/100
遠心加速度	50G
入力波	ランダム波

図1に実験モデルの寸法、モデル部位および代表的な計測点を示す。また、表2には模型材料の概要と作成条件を示す。実験モデルの奥行き寸法はプロトタイプ寸法で約20mに相当する。想定したケーソンの寸法はプロトタイプ寸法で幅が7m、高さは8.75m、奥行き方向には3個のケーソンを配置した。

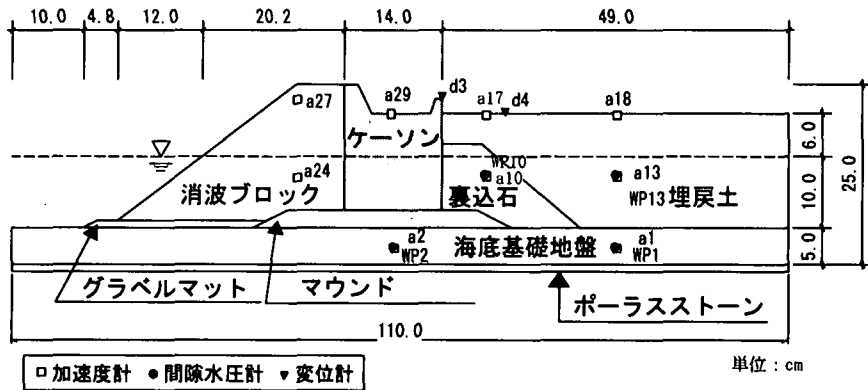


図 1 実験モデル断面図

表 2 模型材料の概要と作成条件

モデル部位	使用材料	作成条件
ケーンソン	アルミ	底盤スリット加工
海底基礎地盤	豊浦砂 (DR=90%)	間隙比 $\epsilon=0.669$
埋立土	豊浦砂 (DR=80%)	間隙比 $\epsilon=0.711$
捨石マウンド	砕石	2~8mm で粒度調整
裏込石	砕石	2~8mm で粒度調整
グラベルマット	砕石	1~4mm で粒度調整
消波ブロック	モルタル	64t 型 (間隙比 $\epsilon=1.0$)
海水・間隙水	シリコンオイル	動粘度が水の 50 倍 $\nu=5.0 \times 10^{-5}$ (m ² /s)

表 3 消波ブロック模型の寸法

s (cm)	6.0
h (cm)	5.0
質量 (kg)	58.8×10^{-3}
体積 (m ³)	25.6×10^{-6}
密度 (kg/m ³)	2.3×10^3

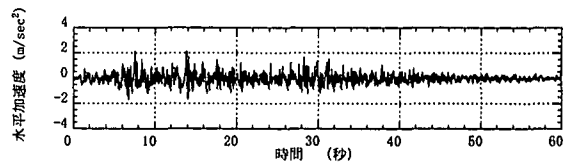


図 3 土槽ベースにおける加速度波形

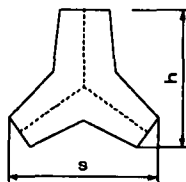


図 2 消波ブロック模型の概念図

海底基礎地盤、埋立土の作成に当たっては、所定の相対密度を確保できるように空中落下法による予備実験を実施し、ホッパーのスリット幅および落下高さを決定した後作成した。

消波ブロックの模型は、64t型の消波ブロックを想定してモルタルを用いて作成した。模型作成時における消波ブロックの配置方法は、最下層のみ整列させた正積みで2層目以降は乱積みとした。図2に消波ブロックの概念図を、表3に消波ブロック模型の寸法をそれぞれ示す。

加振実験は不規則波による入力を行った。図3に土槽ベース上で計測された加速度波形をプロトタイプスケールにて示す。なお、以後に示すグラフ等については、全てプロトタイプスケールに換算して表示するものとする。図4には、実験結果のうちケーンソン頂部(図1中のd3)の水平変位時刻歴波形を示す。その他の計測結果は、後述するシミュレーション

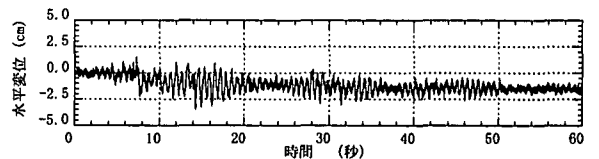


図 4 ケーンソン頂部の水平変位(計測位置 d3)

ン解析結果と比較して示すこととする。

3. 実験結果のシミュレーション解析

(1) シミュレーションに用いた解析プログラム
シミュレーション解析に用いた解析プログラムは、地盤の地震時における過剰間隙水圧の蓄積・上昇が評価可能な二次元有効応力解析コード FLIP³⁾を用いた。有効応力解析を実施するためには、地盤の初期状態での応力に関する情報が必要であるため、重力場における自重解析を実施し、各要素の初期応力を算出した後に、加振実験のシミュレーション解析を実施した。

(2) 各部位のモデル化

シミュレーション解析時は、消波ブロックを含む全てのモデル部位を二次元平面ひずみ要素にてモデ

ル化を行った。解析に用いた各地盤材料の初期剛性は、加振実験に先立ち実施した動的変形試験結果から、初期せん剛性の拘束圧依存性を考慮した値を用いた。消波ブロックの初期せん断剛性の拘束圧依存性は関連論文・その¹⁾で定式化を行った結果を用いた。図5には繰返しせん断試験¹⁾により計測した消波ブロックの $G/G_0 \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ の関係を示す。表4には解析に用いた各材料の材料定数を示す。

なお、解析時には、埋戻土および海底基礎地盤を有効応力非線形、ケーソンを全応力線形、その他の部位については全応力非線形にてモデル化を行った。

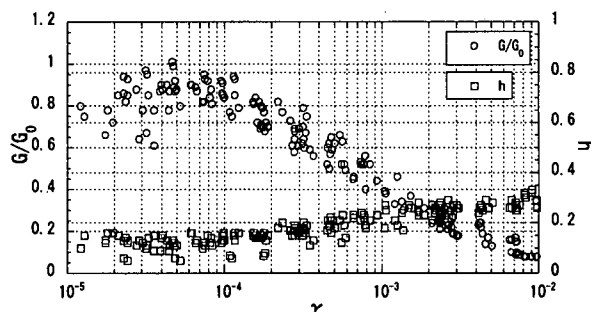


図5 消波ブロックの $G/G_0 \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ 関係

表4 解析時に用いた材料定数

モデル部位	乾燥 質量密度 (kg/m^3)	間隙比	初期剛性 (MPa)
埋戻土	1569	0.669	$G_0 = 4.1 \times (\sigma'_m)^{0.67}$
海底基礎地盤	1608	0.711	$G_0 = 4.5 \times (\sigma'_m)^{0.67}$
マウンド・ グラベルマット	1500	0.803	$G_0 = 4.9 \times (\sigma'_m)^{0.58}$
裏込石	1600	0.691	$G_0 = 6.2 \times (\sigma'_m)^{0.58}$
消波ブロック	1150 ($\nu=1.0$)	1.00	$G_0 = 13.1 \times (\sigma'_m)^{0.37}$
ケーソン	2100	—	$E = 7.56 \times 10^4$

表中の平均有効応力(σ'_m)の単位は (kPa)

異種の材料間にて剥離・滑りが予想される部位についてはジョイント要素にてモデル化を行った。図6に解析モデルの要素図を示す。

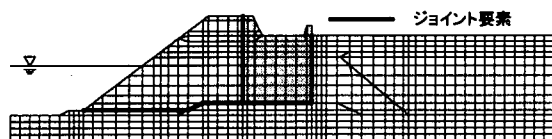


図6 解析モデルの要素図

表5には、解析に用いたジョイント要素の静止・動摩擦係数の値を示す。

表5 ジョイント要素の摩擦係数

位置	静止・動摩擦係数
ケーソン-埋戻土	0.5
ケーソン-消波工	0.5
ケーソン-マウンド	0.6
マウンド-消波工	0.6
グラベルマット-消波工	0.6

解析時の境界条件は、自重解析および地震時解析とも側方境界を鉛直ローラー、底面境界を固定とした。消波ブロック間のシリコンオイルの取り扱いについては、Westergaard式に基づき動水圧として評価を行った。なお、解析継続時間は図4に示したケーソン頂部の水平変位が概ね25秒付近で収束していることから、24.14秒までとした。

(3) 解析結果

図7および図8にケーソン部の水平加速度時刻歴と加速度応答スペクトルをそれぞれ示す。

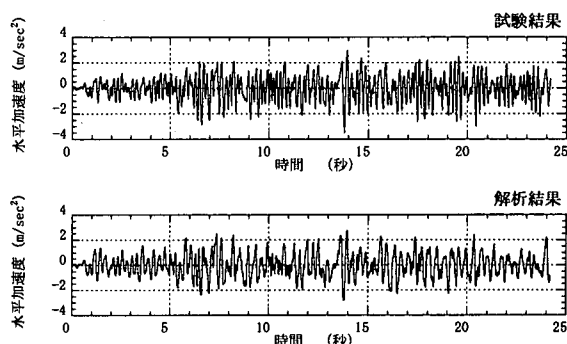


図7 ケーソン部水平加速度時刻歴 (a29)

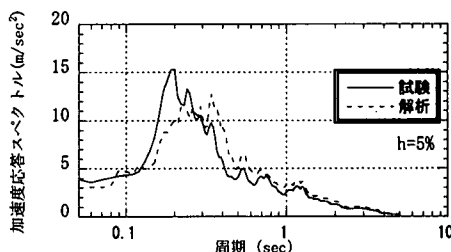


図8 ケーソン部水平加速度応答スペクトル

図9および図10には消波ブロック部の水平加速度時刻歴、加速度応答スペクトルをそれぞれ示す。

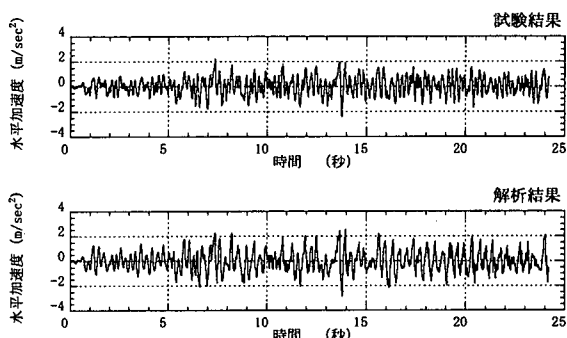


図9 消波ブロック部水平加速度時刻歴 (a24)

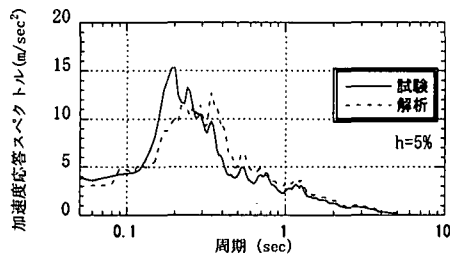


図 10 ケーソン部水平加速度応答スペクトル

これらの図から短周期成分については多少の乖離が見られるものの、解析結果は実験の計測結果を良好に再現していることがわかる。

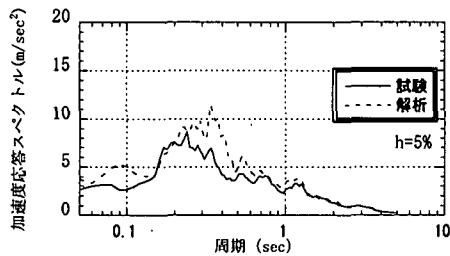


図 11 消波ブロック部水平加速度応答スペクトル

図 12にはケーソン部の水平変位の時刻歴を示す(海側方向への変位が負)。この図からわかるように、解析では実験で計測されたような比較的大きな振動成分を再現するには至らなかったが、越波防止機能の保持に支配的な影響を与えるケーソンの残留変位量については概ね再現することができた。

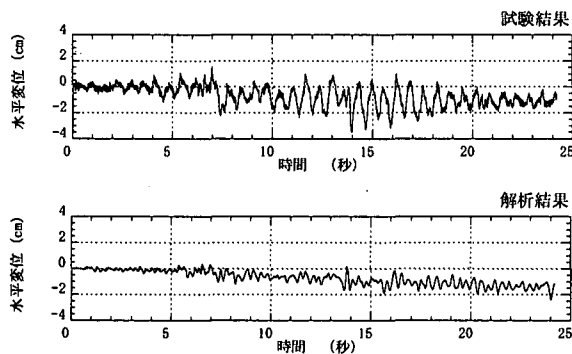


図 12 ケーソン部水平変位時刻歴 (d3)

図 13には埋戻土部 (WP13) , 図 14には海底基礎地盤部 (WP3) の過剰間隙水圧の時刻歴をそれぞれ示す。埋戻土の過剰間隙水圧については、主要動以前の7秒付近までは実験結果を良好に再現することができたが、主要動以降は実験の値を解析結果が上回る結果となった。海底基礎地盤部の過剰間隙水圧については実験結果を良好に再現することができた。

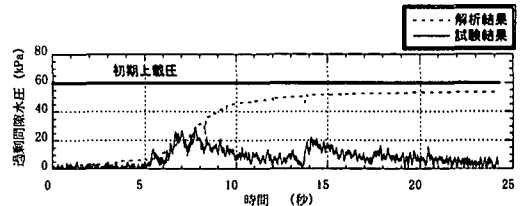


図 13 埋戻土部 (WP13) の過剰間隙水圧時刻歴

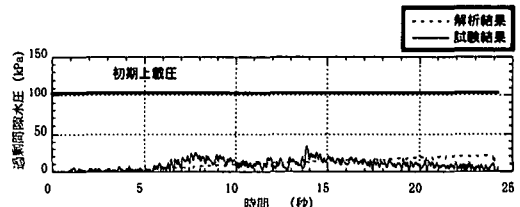


図 14 海底基礎地盤部 (WP3) の過剰間隙水圧時刻歴

4. まとめ

本報告では、関連論文・その¹⁾で定式化した消波ブロック集合体の変形係数と拘束圧の係数を用いて、前面に消波ブロックを有する防波護岸を対象とした遠心载荷模型振動実験の有限要素法によるシミュレーション解析を行った。

その結果、地震時にズレや滑落などといった挙動が想定される消波ブロック部の応答加速度は比較的高い精度で実験結果を再現可能なことがわかった。また、ケーソン部の加速度応答および水平変位についても実験結果を良好に再現することができた。

前面を消波ブロックで覆われたケーソン式護岸の地震時変形を解析する手法としては、金谷ら⁴⁾により消波ブロック部を個別要素法、その他の部分を有限要素法にてモデル化を行うカップリング解析手法が提案されており、実験結果との解の整合性が確認されている。モデルの特性を考慮すれば、このカップリング解析手法が最も厳密な評価手法といえるが、今回の実験に用いた入力レベル(最大加速度 2.14m/sec^2)であれば消波ブロックを含む防波護岸の地震挙動の予測は有限要素法でも十分に可能であることがわかった。

参考文献

- 1) (財)原子力発電技術機構：平成9年度高耐震構造立地技術確証試験 報告書, 1998
- 2) 金谷守, 河井正, 茂呂吉司, 馬場崎亮一, 鈴木俊一, 立石章：防波護岸の地震時変形に関する検討・その1-微小ひずみ時における消波ブロック集合体の変形特性-, 第26回地震工学研究発表会論文集, 投稿中。
- 3) Iai, S., Matsunaga, Y., Kameoka, T. (1990); "STRAIN SPACE PLASTICITY MODEL FOR CYCLIC MOBILITY," Soils and Foundations, Vol. 32, No. 2, pp. 1-15
- 4) 金谷守, 柄木均, 河合正, 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-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-, 第24回地震工学研究発表会論文集, pp. 713-716, 1997