

(182) ケーソン式護岸に関する模型振動実験とその数値シミュレーション

東京電力(株) ○藤谷昌弘 安田 登
東電設計(株) 佐藤正行 西村友次
同 上 黒瀬浩公 福井史朗

1. はじめに

沖合人工島は、その重要性から、どのような地震力に対しても重大な破壊を生じないようにする必要があり、その周辺に設置されるケーソン式護岸に要求される機能としては、敷地全体の安全性を確保することにある。すなわち、護岸に変形が生じて、十分安全な範囲であることを定量的に把握することが必要である。ところが、現在の護岸の設計では、剛体としてのケーソンが滑動するか否かを、滑り安全率のみで評価する方法をとっており、変形を定量的に評価することは行われていない。そこで、ケーソン式護岸を検討対象に模型振動実験を行い、ジョイント要素を有する二次元FEM解析による数値シミュレーションを実施し、これらの比較・分析を行うことによって解析手法の適用性について検討した。

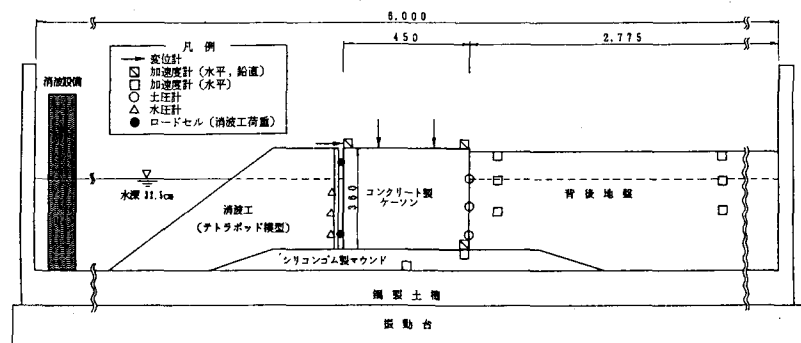


図-1 実験モデル及び計測器の配置図

2. 模型振動実験

(1) 実験方法

幅6.0m、奥行1.0m、高さ1.3mの鋼製土槽を、長さ6.0m、奥行き6.5mの振動台にのせて実験を行った。実験モデルは、図-1に示すように、ケーソン、マウンド、消波工及び背後地盤からなるケーソン式護岸を対象とし、縮尺約1/40のスケールとした。計測項目は、加速度、変位、土圧、水圧及び荷重であり、図中に示す位置に設定した。実験で用いたマウンドは、ケーソンの底面の破壊として滑動のみが生じるように、内部で破壊が生じないシリコンゴム製とした。また、その表面には、ケーソンとの境界面の摩擦係数を小さくするためにテフロンシートを貼った。実験ケースは、マウンド上のケーソンを基本として、背後地盤、消波工、及び水の有無による組合せで表-1に示す6ケースとし、入力波は主に最大加速度400gal、2Hzの正弦波とした。

(2) 実験結果の分析^{1) 2) 3)}

模型振動実験結果から、各構造要素がケーソンの挙動に与える影響度を把握した。

表-1 実験ケース一覧表

実験ケース	水の有無	構成要素	実験モデル	実験に使用した入力波
1	無	ケーソン		2 Hz 400 gal 3 波
2	有	ケーソン		2 Hz 400 gal 3 波
3	無	ケーソン 背後地盤		2 Hz 400 gal 3 波 [400 gal 7 波]
4	有	ケーソン 背後地盤		2 Hz 400 gal 7 波 [400 gal 7 波]
5	無	消波工 ケーソン 背後地盤		2 Hz 400 gal 7 波
6	有	消波工 ケーソン 背後地盤		2 Hz 400 gal 7 波

(a) 振動特性（共振振動数と応答倍率の関係）

水の存在によって応答倍率、共振振動数が低下すること、及びケーソン単体から消波工、背後地盤と各要素が付加されるに従って振動の共振点が高くなり、より剛性が大きな構造系になっていることが確認された。

(b) ケーソンの挙動

ケーソンとマウンド間の境界面の摩擦角 ケーソンとマウンド間の境界面の動摩擦角をケーソン滑動時の応答加速度値から逆算すると $12.4^{\circ} \sim 15.4^{\circ}$ となった。これは、ほぼ室内試験等で求めた動摩擦角と同様の値であった。

水の影響 水の存在は、ケーソン単体の場合、浮力により滑動を大きくするが、背後地盤があるときにはケーソンの急激な海側への滑動により、背後地盤中に負の土水圧が生じて滑動量を抑制する傾向が見られた。また、ケーソン前面に作用する動水圧の方向は、ケーソンの慣性力と同じ向きになっており、その分布はWestergaardの近似式とほぼ整合していた。

背後地盤がケーソンに作用する動土圧 ケーソンに作用する動土圧は、動水圧より大きく、その位相はケーソンの慣性力の方向と反対であり、その値は水の無いケースではケーソンの慣性力の $1/2 \sim 1/4$ 程度、水の有るケースではケーソンの慣性力とほぼ同程度になった。背後地盤の崩壊角は、物部・岡部の地震時主働崩壊角とほぼ一致している。

消波工の挙動 ケーソンに作用する消波工圧は、荷重としてはケーソンの慣性力よりもかなり小さいが、消波工の存在により、ケーソンの海側への滑動量は抑制されることがわかった。

3. 実験結果のシミュレーション

(1) 解析手法および解析モデル

表-1に示した実験ケースのうち、水無しのケース3及びケース5を今回の解析の対象とした。解析には、図-2に示す完全弾・塑性のジョイント要素及びソリッド要素を持つ、土岐・三浦⁴⁾による二次元FEM解析プログラムを若干修正したものを用いた。室内要素試験、水平載荷試験等から設定した解析用物性値を表-2及び表-3に示す。

ケース3の解析モデルを図-3に示す。いずれのモデルもケーソン及びマウンドは弾性のソリッド要素で、背後地盤は完全弾・塑性のソリッド要素でモデル化している。また、ジョイント要素を物性値の異なる接触面全てに配置している。図-3の(a)は比較的大きなソリッド要素を用いたモデル（Lモデルと呼ぶ）、(b)は背後地盤のソリッド要素のメッシュ分割を細かくしたモデル（Fモデルと呼ぶ）、(c)はソリッド要素の分割はLモデルとほぼ同様とし、背後地盤内の主働崩壊角の方向にジョイント要素を配したモデルである（Jモデルと呼ぶ）。

ケース5の解析モデルを図-4に示す。このモデルは、ケース3のJモデルに、完全弾・塑性ソリッド要素でモデル化した消波工を付加したものである。

(2) 解析結果と考察

ケース3の実験結果と解析結果の時刻歴を比較し

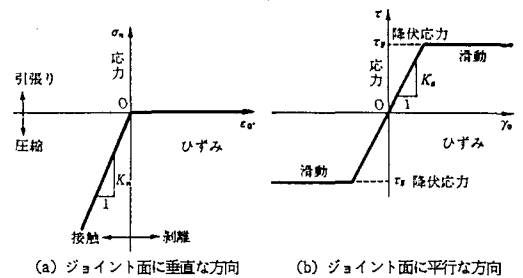


図-2 ジョイント要素の特性

表-2 解析用物性値

	単位体積重量 γ (gf/cm ³)	せん断波速度 V_s (m/sec)	内部摩擦角 ϕ (度)
コンクリート製ケーソン	2.23	2000	-
シリコンゴム製マウンド	1.18	26	-
背後地盤	1.61	43	30.0
消波工	1.14	60	40.0

表-3 境界面の摩擦角

	静摩擦角 ϕ_s (度)	動摩擦角 ϕ_d (度)
ケーソン～マウンド	15.2	12.5
ケーソン～背後地盤	20.0	20.0
背後地盤～マウンド	15.2	12.5
ケーソン～消波工	16.0	16.0
消波工～マウンド	12.7	11.3

図-5に示す。最上位の波形は土槽底面において計測された加速度波形であり、解析における入力波形である。動土圧は奥行き1cm 当たりの合力であり、加速度、相対変位と同様陸側から海側へ向かう方向を正としている。

Lモデルでは、ケーソンと背後地盤の間に剥離が生じやすく小さな動土圧しか作用していないが、Fモデルでは、メッシュ分割を細かくしたことにより背後地盤全体が塑性変形しやすくなったためLモデルよりも大きな動土圧を生じている。一方Jモデルでは、ほぼ全時刻を通じて他のモデルよりも大きな動土圧がケーソンに作用している。変位波形を見ると、背後地盤からの動土圧が大きくなるLモデル、Fモデル、Jモデルの順に大きなケーソンの変位が生じており、Jモデルの変位波形が実験結果と最も良く対応している。

各モデルの解析終了時刻(1.5sec)における変位図を実験結果の変位図とともに図-6に示す。これらの図からもLモデルで背後地盤が完全に剥離している様子、FモデルではLモデルよりも背後地盤の変形が大きくなっている様子、Jモデルではジョイント要素に挟まれた背後地盤が滑り落ちることによってケーソンの移動に追従し剥離が生じていない様子が分かる。

つぎに、ケース5の実験結果と解析結果の時刻歴を比較し図-7に示す。消波工荷重は静止状態を零とする奥行き1cm当たりのケーソンに作用する合力であり、背後地盤から海へ向かう方向を正としている。

実験結果と解析結果の相対変位波形は良く対応しており、動土圧の位相も実験と解析で良い対応を示している。消波工荷重については、計測の困難さから実験値の信頼性は若干劣るが、解析による消波工荷重のレベルおよび波形全体が圧縮側にシフトしている様子等は実験結果と比較的良好一致を示している。

ケース5の解析結果をケース3のJモデルによる解析結果と比較し図-8に示す。なお、この比較は、両者の解析において入力波形のほぼ等しい1.5secまでの比較であるが、ケース5の解析結果によるケーソンの変位は、消波工の存在により、実験結果と同様に、ケース3の変位よりもかなり小さな値となっている。

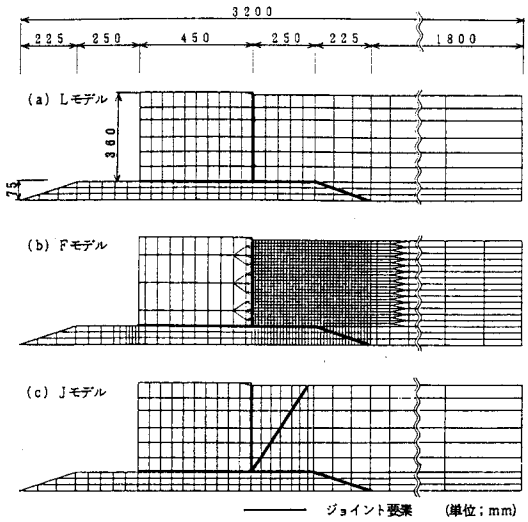


図-3 ケース3の解析モデル

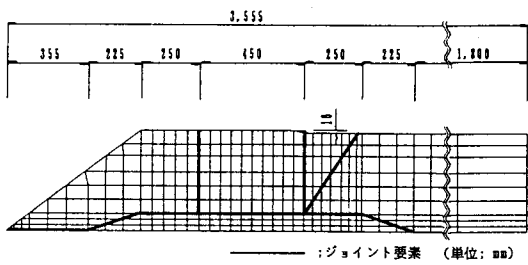


図-4 ケース5の解析モデル

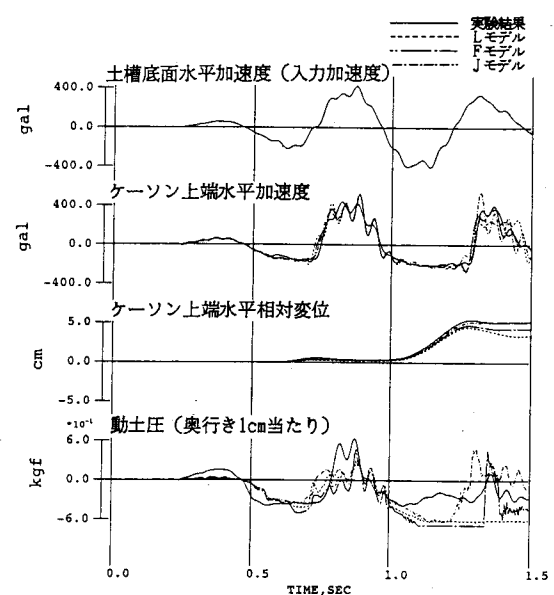


図-5 実験結果と解析結果の時刻歴の比較 (ケース3)

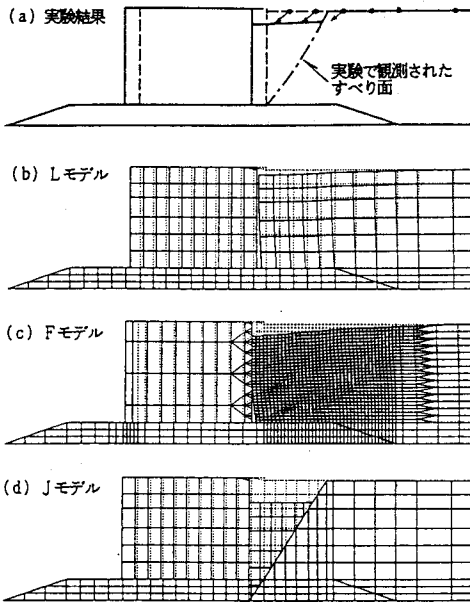


図-6 実験結果と解析結果の変位図の比較
(ケース3)

4. まとめ

ケーソン式護岸の模型振動実験とその数値シミュレーションを行い、解析手法の適用性について検討を行った。FEMが微小変形理論によるものであることから自ずとその適用限界はあるものの、メッシュ分割を細かくしたりジョイント要素を配することにより、滑りや塑性変形の問題に対して実験結果とよく対応する解析結果が得られることが分かった。また、実験でみられた消波工の存在によるケーソンの海側への滑動量の抑制効果は、消波工を等価な物性を持つ連続体とみなすことでほぼ表現できた。

今後は水有りのケースのシミュレーション、実構造物を考慮した解析等を実施し、耐震評価手法の精度向上へ向けて更に研究を進めていく予定である。

実験および解析に際し、有益な御助言をいただいた山口大学工学部の三浦教授に謝意を表します。

参考文献

- 1) 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研究(その1)，土木学会第47回年次学術講演会，平成4年
- 2) 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研究(その2)，土木学会第47回年次学術講演会，平成4年
- 3) 福井史朗・佐藤正行・西村友次・安田登・藤谷昌弘：ケーソン式護岸の地震時挙動に関する実験的研究，第39回海岸工学講演会論文集，1992年
- 4) 土岐憲三・三浦房紀：地盤-構造物系の非線形地震応答解析，土木学会論文報告集，第317号，1982年

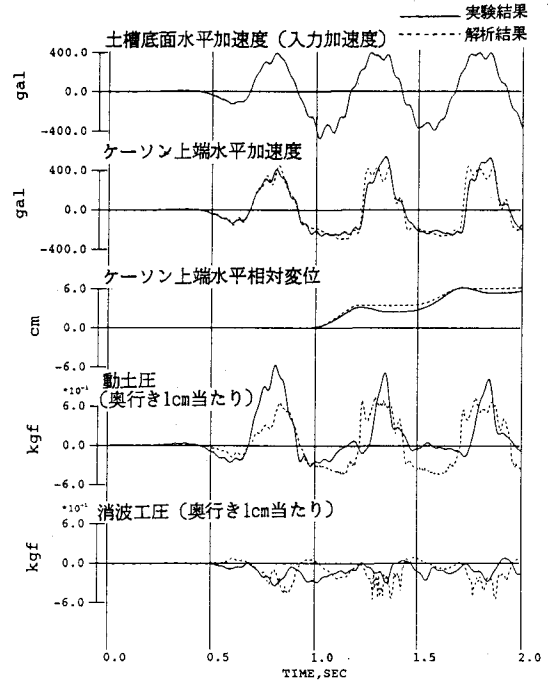


図-7 実験結果と解析結果の時刻歴の比較
(ケース5)

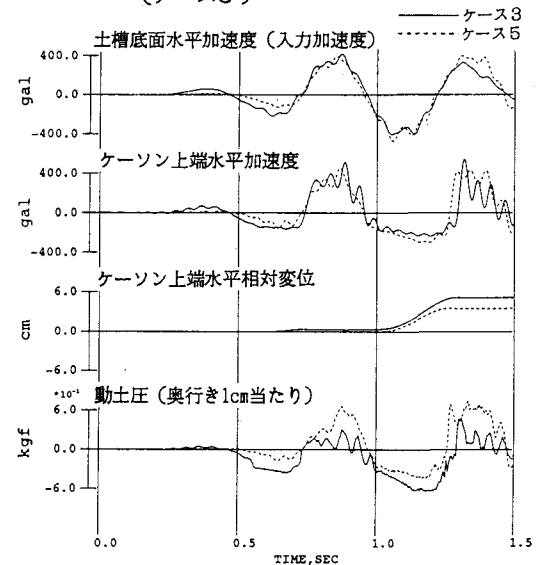


図-8 ケース3とケース5の解析結果の比較