

ケーソン式護岸の地震時挙動に関する実験的研究

安田 登*・藤谷昌弘*・福井史朗**
佐藤正行**・西村友次**

1. まえがき

近年、空港施設や発電所施設等の人工島立地が行われ、後背地の有効活用のための護岸構造物の安定信頼度の向上がますます重要となっている。護岸の地震時安定性に影響を及ぼす要因の一つである動水圧や動土圧の挙動に関しては、個別の研究が数多くみられるが、動水圧、ケーソン、動土圧の相互作用を踏まえた地震時挙動及びケーソンの安定性への影響度合を議論した研究は少ない。本研究は、上記の観点から、大型振動台を用いたケーソン式護岸の模型振動実験を実施し、ケーソン滑動前や滑動中のケーソン前面の動水圧、ケーソン本体の加速度、変位、及び背後地盤からの動土圧の深さ方向の分布ならびに各々の位相特性を把握し、ケーソン前面に作用する動水圧や背面に作用する動土圧がケーソン式護岸の地震時安定性に与える影響について分析するものである。

2. 実験概要

2.1 実験に用いた土槽と振動台

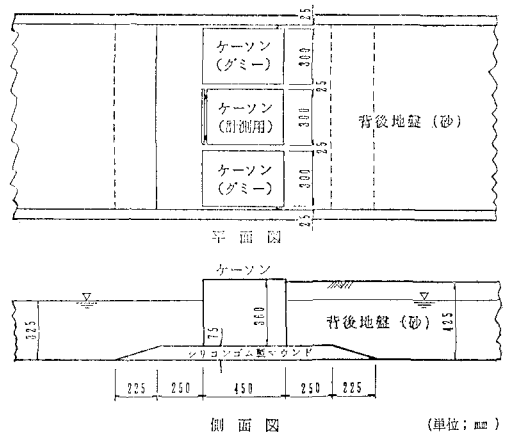
実験には、内側の寸法が、長さ 6.0m、奥行 1.0m、高さ 1.0m の側面がアクリル製の鋼製土槽を用いた。水を入れた実験を行う場合には、消波のため、土槽中の妻壁の近くにビニール片を入れた金網かごを取り付けた。実験に用いた振動台の性能を表一に示す。

2.2 実験モデルと計測器の配置

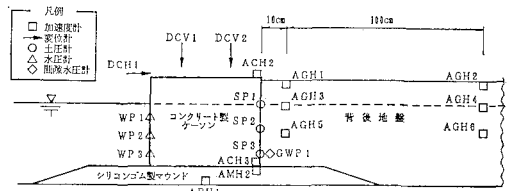
本実験では、ケーソン、マウンド、および背後地盤から成るケーソン式護岸を対象とし、縮尺約 1/40 のモデルを用いた。土槽内に設置した実験モデルの形状および寸法を図一に示す。ケーソンモデルはコンクリート製、マウンドは後の数値解析の際に物性が明確となるよう、また破壊が生じないようにシリコンゴム製とした。なお、マウンドの表面には、ケーソンとの境界面の摩擦係数を小さくして滑動が生じ易くするためにテフロンシートを貼った。背後地盤は実験中に液状化が生じないよう

表一 振動台の性能

項目	性能
寸法	6.0m×6.5m
最大積載量	120tf
最大振幅	±50mm
最大加速度	1000gal
振動数範囲	0.1~30Hz
入力波形	任意
加振力	30t×4



図一 実験モデルの形状および寸法



図二 計測器の配置図

に平均粒径 1mm 程度の粗砂を締め固めて作成した。実験では、ケーソンの加速度・変位、マウンドと背後地盤の加速度、ケーソンに作用する動土圧・動水圧、背後地盤内の間隙水圧を図二に示した位置で計測した。

* 正会員 東京電力(株) 技術開発本部 原子力研究所
** 正会員 東電設計(株) 技術開発本部 耐震技術部

2.3 実験ケース

背後地盤の有無と水の有無の組合せから、実験モデルとして表-2に示す4モデルを設定した。これらのモデルを用いて、共振振動数等を調べるための共振実験と、ケーソンの滑動時の挙動特性を把握するための破壊実験を実施した。ただし、使用した振動台の正弦波として制御できる振動数の上限が30Hzであることから、共振振動数が30Hzを越えるモデル3,4については、共振実験により共振曲線を求める代わりに、モデルに破壊を生じさせない10gal程度のランダム波を入力した実験(以下、微小ランダム波実験と呼ぶ)を実施し、入力加速度に対する応答値の周波数伝達関数を求めた。

破壊実験に用いた入力波は、振動台の加振能力の上限に近い最大加速度400galの2Hzの正弦波とした。入力波の波数は、変位計の計測能力に合わせてモデル1,モデル2,モデル3では3波,モデル4では7波とした。実施した実験ケースの一覧を表-3に示す。

表-2 実験モデル

モデル条件	水無し	水有り
ケーソンのみ	モデル1	モデル2
背後地盤あり	モデル3	モデル4

表-3 実験ケースの一覧表

モデル	水	背後地盤	共振実験	破壊実験
モデル1	無し	無し	加振振動数を5~30Hzまで変化させる	2Hz,3波,400gal
モデル2	有り	無し		
モデル3	無し	有り	10gal程度のランダム波を入力する	2Hz,7波,400gal
モデル4	有り	有り		

3. 実験結果と考察

3.1 共振実験

a) 共振振動数と応答倍率

モデル1とモデル2のケーソン上端位置の加速度の共振曲線を図-3に示す。また同図中には、モデル3とモデル4の微小ランダム波実験の結果から得られた、ケーソン上端位置の加速度の土槽底面の加速度に対する周波数伝達関数も示している。

これらの結果によると、背後地盤の有無に関わらず、水が存在することにより共振振動数および応答倍率は若干低下している。共振振動数の低下は水の付加質量によるものと考えられるが、その差は背後地盤の有無による共振振動数の変化よりもかなり小さなものとなっている。

b) 共振実験時の動水圧

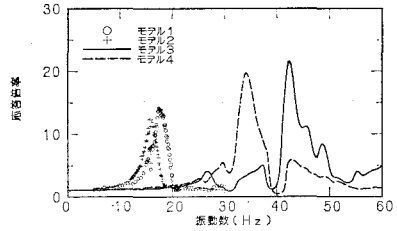


図-3 共振曲線

モデル2の共振実験による動水圧分布を図-4に、モデル4の微小ランダム波実験による動水圧分布を図-5に示す。図中のプロットは、加振振動数毎に動水圧の計測値をその位置のケーソンの応答加速度から換算した震度で除した単位震度当たりの動水圧であり、図中の破線はWestergaardの動水圧の近似式(以下、単に近似式と呼ぶ)を震度で除した下式による分布である。

$$\frac{P_a}{K} = \frac{7}{8} w \sqrt{hy} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 P_a は動水圧の最大値、 K は水平震度、 w は水の単位重量、 h は全水深、 y は水深である。通常、実験結果の動水圧を近似式と比較する場合には、ケーソンの重心位置の加速度等から換算された一律の震度を用いる場合が多いが、ここでは、ケーソンの下端位置から上端位置への加速度の変化を考慮するため、ケーソンの上下端の加速度から直線補間して求めた動水圧測定位置の加速度から換算した震度を用いている。

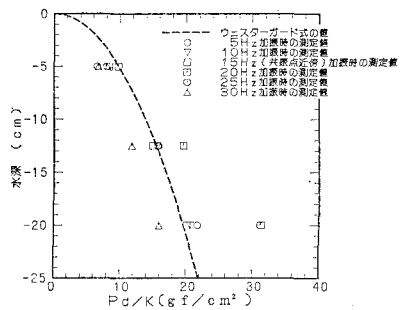


図-4 モデル2の動水圧分布

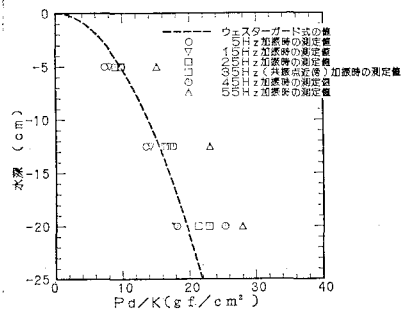


図-5 モデル4の動水圧分布

同図によると動水圧は、共振振動数以下では近似式の分布とほぼ同じ値を示しているが、共振振動数を越えると次第に近似式からかけ離れた値になって行くようである。この様子を見るため、モデル2の共振実験結果を例に取り、加振振動数毎の単位震度当たりの動水圧の変化について整理すると 図-6 に示す通りとなる。

3.2 破壊実験

a) 応答波形

破壊実験によるモデル1およびモデル2の土槽底面位置の水平加速度、ケーソンの上端、下端位置の水平加速度、ケーソン上端位置の水平相対変位の応答波形を 図-7 に示す。この図にはモデル2の水深5cm、水深12.5cm および水深20cm の位置の動水圧の波形も併せて示している。なお、加速度と変位は海側方向を正とし、動水圧は圧縮を正としている。

同図を見ると、ケーソンの加速度波形は、ある加速度になると頭打ち状態となり、ほぼ同時刻からケーソンの相対変位が発生しており、ケーソンが滑動していることを示している。モデル1のケーソン下端の加速度波形をみると、頭打ちとなっている部分の加速度は約270 gal となっており、この加速度を重力加速度980 gal で除した値0.28 (摩擦角 $\phi=15$ 度) は、室内試験等により求めたケーソンとマウンドの境界の摩擦係数 $\mu=0.23$ (摩擦角 $\phi=13$ 度) と比較的良好な対応を示している。

一方、モデル2について見ると、ケーソン下端の加速度波形で頭打ちとなっている部分の加速度の値は200 gal 程度とモデル1よりも小さく、ケーソンの相対変位量が大きくなっている。これはケーソンに働く浮力や動水圧の影響によるものと思われる。動水圧の波形を見ると、動水圧はケーソンの慣性力の方向(加速度と逆方向)と同じ方向すなわちケーソンを滑動させる向きに作用していることがわかる。

モデル3およびモデル4の破壊実験では、前述の通り、入力したサイン波の波数が異なるため、ここでは入力加速度がほぼ等しい2波目までの応答を比較した。モデル3およびモデル4の破壊実験によるケーソンの応答波形、および深さ30cm 位置の動土圧の波形を比較し 図-8 に示す。同図にはモデル4におけるケーソン近傍の背後地盤側深さ35cm の過剰間隙水圧、および水深5cm、水深12.5cm、水深20.0cm 位置の動水圧の波形も併せて示している。なお、動土圧は動水圧と同様に圧縮を正としている。

同図を見ると、モデル3のケーソンの加速度波形は負の方向(慣性力が海側方向)の時に頭打ち状態となり、同時にケーソンは海側方向に滑動して大きな変位が発生しており、この変位は加速度が海側へ向かう間もほぼそのまま残留変位となって残っている。動土圧について

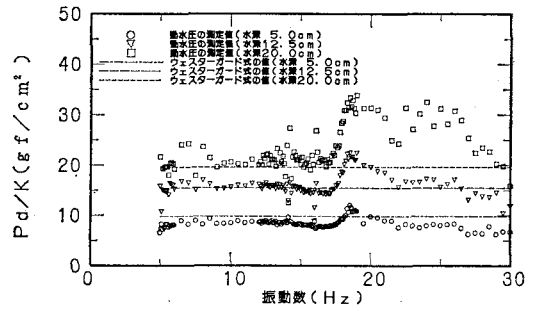


図-6 モデル2の単位震度当たりの動水圧の変化

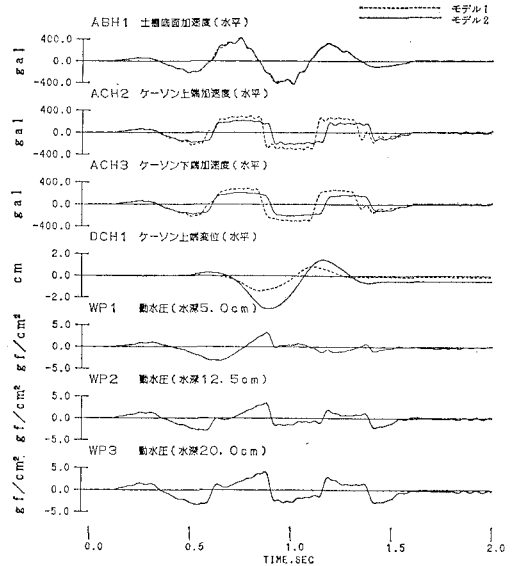


図-7 モデル1およびモデル2の応答波形

は、ケーソンの加速度が正の方向(慣性力が背後地盤方向)の時に正(圧縮)、ケーソンの加速度が負の方向(慣性力が海側方向)の時に負(引張)の動土圧が生じている。また動土圧波形はケーソンの加速度波形と似かよっており、負の動土圧はピークを持たない頭打ちの状態となっている。

これに対してモデル4では、ケーソンの加速度波形は山の尖った形状を示しており、加速度が負(慣性力が海側方向)となる時に一旦海側に生じた変位量とほぼ同程度の逆向きの変位が加速度が正(慣性力が背後地盤方向)となる際に生じるため、モデル3に比べて少ない残留変位しか生じない結果となっている。動土圧波形および動水圧波形は、ケーソンの加速度波形と類似しているが、動水圧の方向がケーソン慣性力の方向と同じであるのに対し、動土圧はケーソンの慣性力と逆向きとなっている。とくにケーソンの慣性力が海側方向となり、ケーソンが海側方向に滑動を起こす時には、動土圧は静止土圧を越える程の大きな負(引張)の値となり、ケーソン

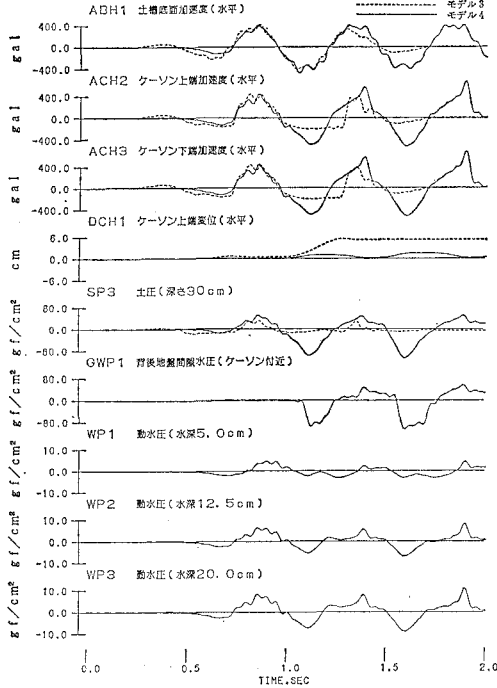


図-8 モデル3およびモデル4の応答波形

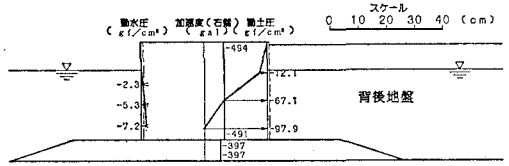


図-9 時刻1.115秒における応答値分布

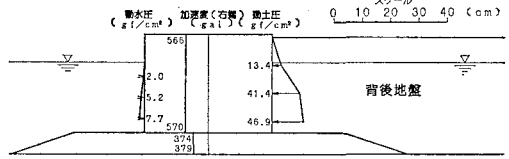


図-10 時刻1.385秒における応答値分布

の変位が増大するにつれてこの負の動土圧も増大しており、これによってケーソンの海側への滑動が抑制され変位量も小さくなっているものと判断される。なお、背後地盤内の過剰間隙水圧は、ほぼケーソンが滑動を始める時刻から発生し、その後の波形は位相、振幅とも動土圧とほぼ同じであることから、大きな負の動土圧はほとんど過剰間隙水圧によるものと判断される。

b) 時刻断面における応答値分布

モデル4の破壊実験でケーソンが海側に滑動している時刻 ($t=1.115$ 秒) における加速度、動水圧および動土圧の分布を図-9に示す。また、ケーソンが背後地盤側に滑動している時刻 ($t=1.385$ 秒) における加速度、動水圧および動土圧の分布を図-10に示す。

これらの図からも分かるように、どちらの時刻においても動水圧はケーソンの慣性力と同方向、すなわちケーソンに滑動を生じさせる方向に、動土圧はケーソンの慣性力と逆方向、すなわちケーソンの滑動を抑制する方向に働いている。ただし、動水圧は動土圧の約 1/10 程度のかなり小さな値であり、ケーソンの挙動は動水圧よりも動土圧に大きく影響されているといえる。

c) 破壊実験時の動水圧

モデル2の破壊実験時の動水圧の計測値と、Wester gaard の近似式にケーソンの水圧計取付位置の加速度から換算した震度を代入して求めた動水圧波形の計算値を比較し図-11に示す。また、モデル4の破壊実験によ

る同様の波形の比較を図-12に示す。なお、これらの図中には、各水深における動水圧の計測値と計算値の差の波形、および加速度波形から求めたケーソンの絶対変位波形を下段に併せて示している。

どちらのモデルについても計測値と計算値の波形は類似しているが、ケーソンの滑動時には多少の差がみられる。これは、計測値と計算値の差の波形が、形状、振幅ともに、どの水深の波形についてもほぼ同じであることから、水中でケーソンが移動することによって水面に生じた波の水頭差の影響によるものと考えられる。また、計測値と計算値の差の波形とケーソンの絶対変位波形の

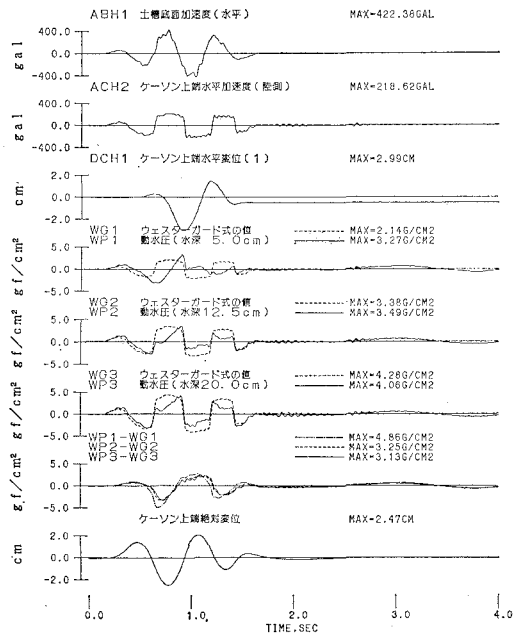
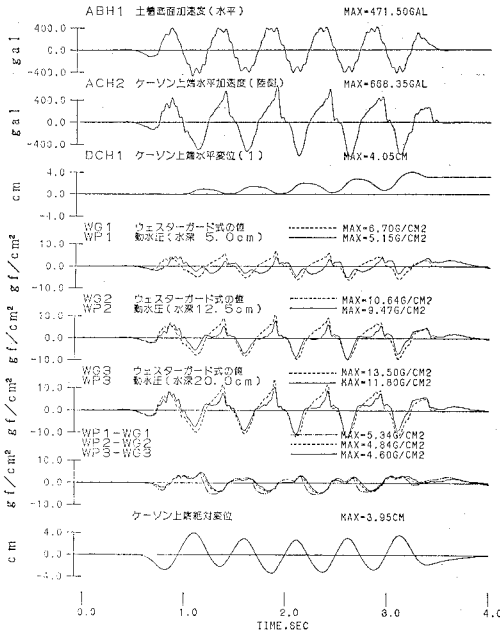


図-11 モデル2の動水圧波形の比較



図—12 モデル4の動水圧波形の比較

形状が非常によく似ていることから、この推測は妥当であろうと思われる。

4. 結 論

動土圧や動水圧がケーソン式護岸の地震時安定性に与える影響について検討するために実施した模型振動実験結果から得られた主な結論を以下に示す。

a) 共振振動数と応答倍率

ケーソンのみのモデルおよび背後地盤のあるモデルのどちらにおいても、水が有ることにより共振振動数および応答倍率は低下する。この共振振動数の低下は水の付加質量によるものと考えられるが、その差は背後地盤の有無による共振振動数変化よりもかなり小さい。

b) 共振実験時の動水圧

共振実験結果の動水圧は、共振振動数以下の振動数では Westergaard の近似式の分布とほぼ同じ値を示すが、共振振動数を越えると次第に Westergaard の近似式からかけ離れた値となった。

c) 破壊実験時の動水圧

破壊実験結果の動水圧波形と Westergaard の近似式による波形は若干異なるが、その差は表面に生じた波の影響によるものと考えられる。この影響を無視すれば、動水圧の計測値は共振実験の場合と同様 Westergaard の近似式による分布とよい対応を示すものと思われる。また動水圧の作用する方向はケーソンの慣性力と同じ向きであることから、動水圧は付加質量として扱うことで近似できるものと思われる。

d) ケーソンの滑動特性

動水圧とケーソンの慣性力の方向が同じであること、および浮力の影響により、ケーソンのみのモデルの場合には水が有る方が滑動しやすい。しかし、背後地盤が有るモデルでは、水が有るとケーソンが海側に滑動しようとする時に背後地盤内に負の過剰間隙水圧が発生し、ケーソン前面の動水圧よりもはるかに大きな負の動土圧が発生することによりケーソンの滑動が抑制されるため、水のないモデルよりも滑動量が小さい。

5. あとがき

ケーソン式護岸の模型振動実験を実施し、動水圧、動土圧およびケーソンの滑動特性等の基本的な地震時挙動特性を把握した。今後は、これらの実験の数値シミュレーションを通じて水—地盤—構造物系の地震時挙動に関して更に検討していく予定である。

謝辞：本実験に際し御助言を頂いた山口大学工学部の三浦教授、(財)電力中央研究所耐震研究室の岩楯室長、当麻氏、栃木氏、また実験を共に担当した東電設計(株)の豊田氏、黒瀬氏に謝意を表します。

参 考 文 献

- 上部達生・長田 信・高野剛光 (1991): 重力式擁壁の水中における地震時滑動挙動, 第26回土質工学会研究発表会, pp. 154-186.
- 金谷 守・西 好一・青山瑞明・飯島 健・玉野浩之 (1988): 水中構造物の地震時滑動に関する振動台実験, 第23回土質工学会研究発表会, pp. 983-984.
- 栗本雅裕・松田敦夫・武田清治 (1987): 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回海岸工学講演会論文集, pp. 541-545.