

防波護岸の地震時挙動に関する研究・その1

一遠心力載荷模型実験による防波護岸の地震時挙動の検討

河井正¹・金谷守²・田中幸久²
石川博之³・武田智吉⁴

¹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)
²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)
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)

外洋に面した人工島を保護するケーソン式防波護岸の地震時挙動を検討するため、遠心力載荷模型実験を実施した。実験ではケーソン式防波護岸が異なる地盤条件のもとで建造されることを想定し、岩盤上に設置された場合と砂層上に設置された場合の両方の場合について検討した。また一方でケーソン式防波護岸の一部である消波工部分の地震時挙動を把握するため、消波工のみからなる堤体の加振実験も実施した。その結果、岩盤設置型の防波護岸では水平震度 1.0 で加振してもケーソンの変位があまり生じないこと、消波ブロックのような異形材料の集合体でも、動的変形特性にひずみ依存性が認められる結果が得られた。

Key Words: armored embankment, sea wall, centrifuge

1. はじめに

波浪条件の厳しい外洋に面した海域に、重要構造物の設置を目的とした人工島を建造する場合、防波護岸の耐震安定性が重要となる。本研究では、この防波護岸の地震時挙動を評価するため、模型振動実験及び数値解析による検討を行った。本編「その1」では、より実規模レベルに近い拘束圧下での挙動を把握するために実施した遠心力載荷装置による模型振動実験結果について報告する。

遠心力載荷模型実験は、海底地盤条件が異なる場合を中心に、ケーソン式防波護岸の地震時挙動の相違を把握するために実施したが、本報告では、岩盤上に防波護岸が設置されたケースと砂層（相対密度60%程度）上に防波護岸が設置されたケースとを比較する。また、異形材料で構成された消波工堤体の動的振動特性の把握、実験結果とDEM解析結果との比較検討を目的とした、消波ブロックのみで構成された堤体の加振実験についても報告する。

2. ケーソン式防波護岸の加振実験

使用した遠心力載荷模型実験装置はアーム長約

9mで、プラットフォームに乗せる土槽の大きさは、加振方向長さ1.76m、奥行き0.91m、高さ約0.5mである。この土槽に防波護岸模型を作成し、遠心加速度30G場で加振実験を実施した。図-1は砂層上に設置された模型断面図であり、岩盤上に設置されたケースは、この模型断面の海底砂層を除いたものである。なお土槽は剛土槽を使用し、底面には滑り止めのため粒径1~2mmの粗砂を張り付け、側面内壁には摩擦を低減するためLatexシートとグリースを使用している。

模型を構成する材料の物理特性を表-1、図-2に示す。プラットフォームの大きさに合わせて、模型断面は想定する実物断面の1/120としているが、碎石部分の粒度分布は想定実物断面の1/120より若干大きめに設定している。これは実物よりも粒径を縮尺した材料と粘性間隙流体の併用によって、碎石部分の透水性が過度に小さくなり、実物と異なる浸透特性・水圧の伝播が、ケーソン式防波護岸の地震時挙動に及ぼす影響を軽減するためである。さらに、粘性流体も碎石部分の透水性を考慮して選定した。すなわち、遠心加速度30G場での実験においては、砂の部分の透水性に関する時間の相似比を、動的変形に関する時間の相似比に合わせるため、通常は水

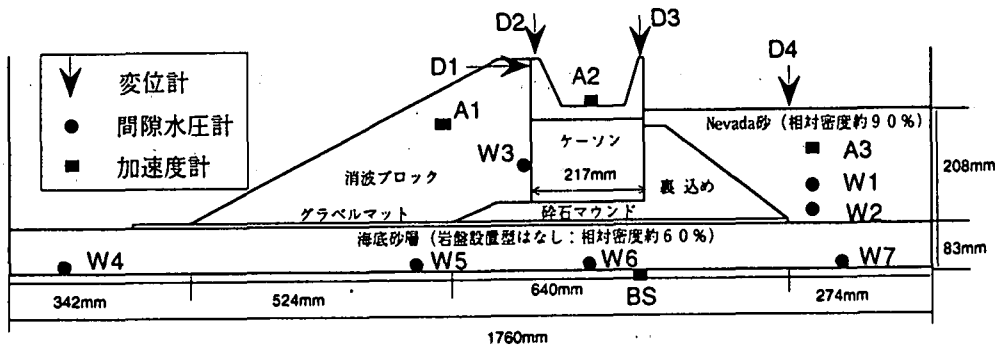


図-1 模型断面図

表-1 実験模型材料の物理特性

	Nevada砂	礫	碎石
Dmax	mm 約 0.3(98%)	3.33	9.5
D60	mm 0.16	1.98	7.0
D10	mm 0.106	0.71	5.3
Dmin	mm 約0.075(1.7%)	0.3	5.0
均等係数	1.51	2.79	1.3
比重	2.662	2.706	2.706
最大密度(g/cm ³)	1.689	1.677	1.677
最小密度(g/cm ³)	1.373	1.437	1.437

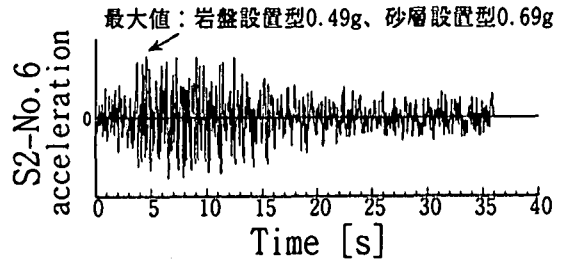


図-3 S2-No.6入力地震波形(加速度)

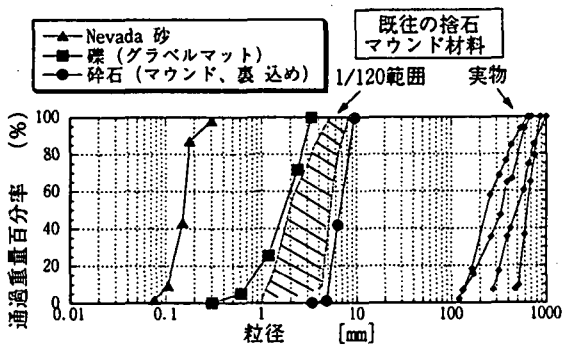


図-2 模型材料の粒径加積曲線

の30倍の粘性を持つ流体が間隙流体として使用されるが、本実験では若干透水性が大きくなるよう、30倍ではなく10倍の粘性を持つ流体を間隙流体として使用した。

加振は地震波(S2-No.6、図-3)とSIN波(12サイクル)の両方を使用し、動的振動特性を把握するための小加振(0.5G程度)と変形特性を把握するための大加振(3G~)とを実施した。なお大加振では入力加速度を段階的に大きくしているため、入力加速度が大きくなるほど前の段階までの加振履歴の影響が大きくなっている。

図-4には、入力加速度を基準とした模型各部の伝達関数を示す。伝達関数を計算する際には、パワースペクトルにおいて、周波数2.5HzのParzenウィンドウを使用した。この結果、岩盤設置型の卓越周波数は、消波工上部およびケーンソク上部で6Hz

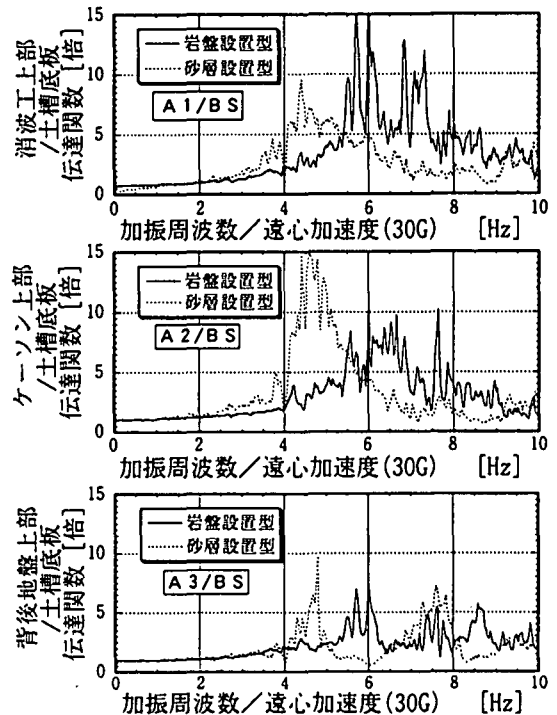


図-4 模型各部の伝達関数

付近、背後地盤上部で6Hz付近および7.5Hz付近であり、砂層設置型の卓越周波数は、消波工上部およびケーンソク上部で4.5Hz付近、背後地盤上部で4.5Hz付近および7.5Hz付近であることがわかる。

図-5は横軸に入力加速度を遠心加速度で除した水平震度、縦軸に一回の加振で生じた換算変位量(実測変位量×遠心加速度)をとり、変位量-水平震度

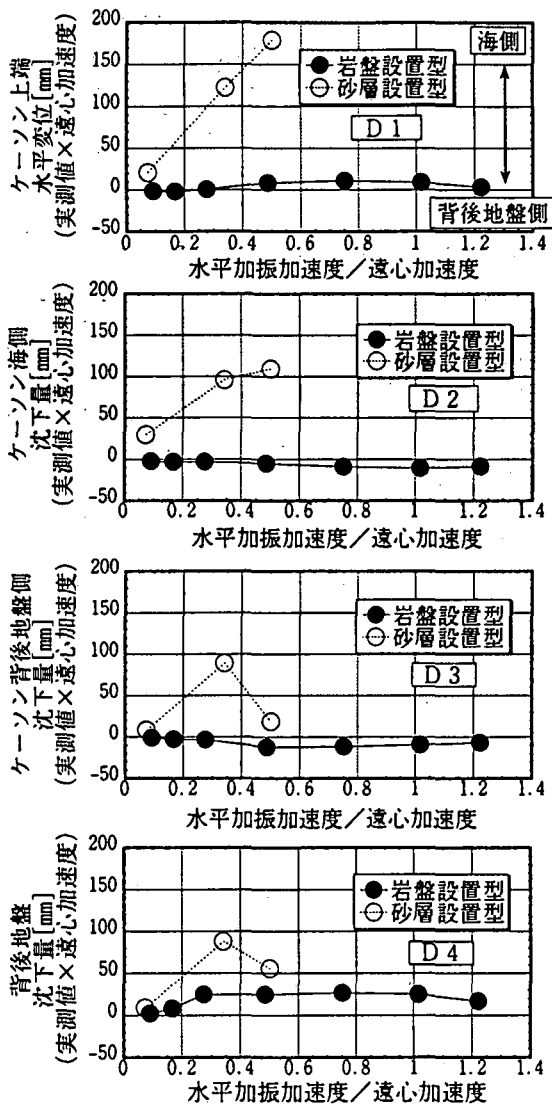


図-5 入力加速度-変位関係

関係を示している。図より、岩盤設置型は砂層設置型と比較して、ケーソン鉛直・水平変位、背後地盤鉛直変位のいずれも非常に小さいことがわかる。しかも、前段階までの加振履歴があるとはいえ、岩盤設置型では水平震度 1.0 においてもほとんどケーソンの変位を生じていない。

図-6には、水平震度に対する過剰間隙水圧比を示している。背後地盤の相対密度は相対密度は岩盤設置型および砂層設置型とも 90%程度であるが、砂層設置型の場合よりも、岩盤設置型の方が過剰間隙水圧の蓄積は大きく、水平震度 0.5 では岩盤設置型は過剰間隙水圧比が1に達している。しかしながら岩盤設置型のケーソン移動量は砂層設置型と比べてはるかに小さく、背後地盤の液状化はケーソンの水平移動の主要因ではないと考えられる。図-7は、入力加速度に対するケーソン壁面消波工側に作用する動水圧の最大値を、Westergaard の動水圧簡略式

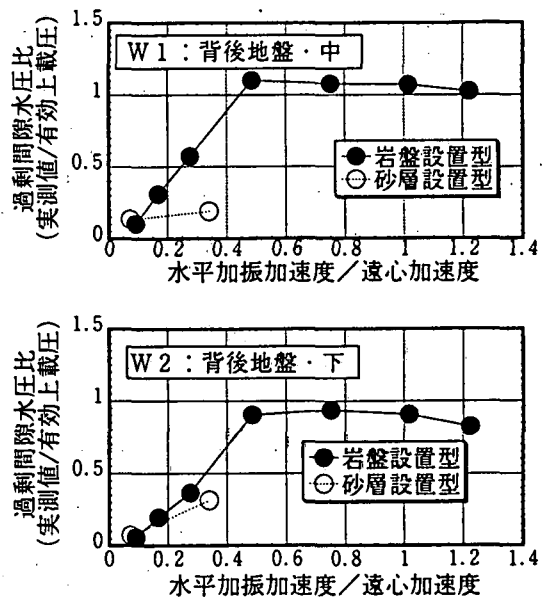


図-6 入力加速度-過剰間隙水圧比関係

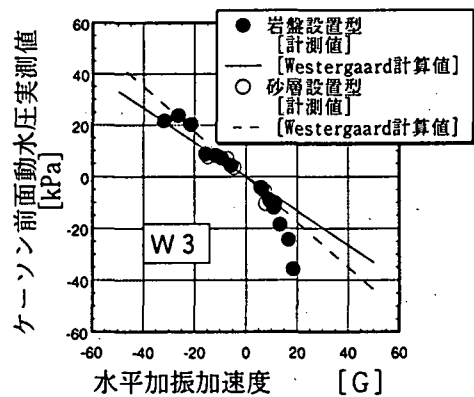


図-7 ケーソン側面消波工側に作用する動水圧

による計算結果と比較して示している。消波工側から背後地盤側に加振した場合 (図中+側)、加速度が大きくなるにつれて若干 Westergaard の値と異なってくるものの、実験値と簡略式による計算値は概ね一致する。

3. 消波工堤体の加振実験

消波工堤体は、モルタルで作製した高さ約 4cm の消波ブロックを、人間の手で高さ 20cm 程度になるようランダムに積み上げて作製した。なお計測のため、加速度計を堤体下部・上部のいくつかの消波ブロック内部にセットしている。図-8にその概要図を示す。加振は、消波工堤体の動的振動特性を把握するため、2種類の方法で実施した。その一つは、ひずみレベルに応じたせん断剛性を把握するための sin 波加振 (各遠心加速度場ごとに段階的に数回加振 [0.2 ~ 15G]) である。もう一つは堤体を自由振動させて減衰特性を把握するための step 波加振 (加

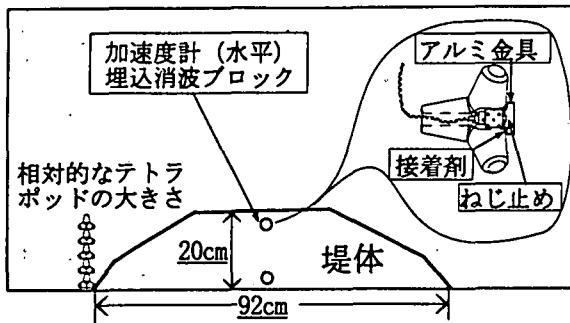


図-8 消波工堤体概要

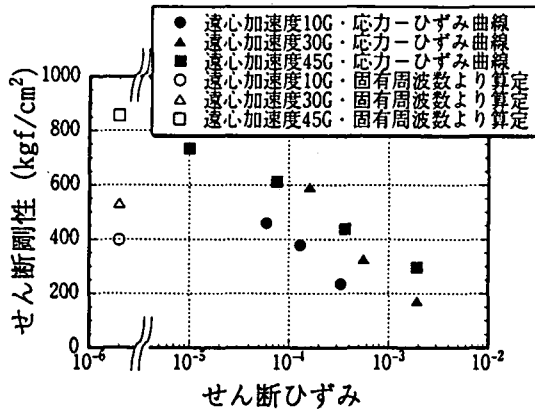


図-9 消波工堤体のせん断剛性-せん断ひずみ関係

振装置の変位制御入力電圧を 1/4000 秒で 0 → [一定電圧] とする：各遠心加速度場で一回加振 [5 ~ 12G] である。なお加振は遠心加速度 10G、30G、45G 場において、すべて乾燥状態で実施した。

図-9 はせん断剛性とせん断ひずみの関係を示している。横軸のせん断ひずみは、SIN 波加振による加速度記録 (堤体上下の相対加速度) を積分し、得られた相対変位を上下の加速度計の距離で除して求めている。また縦軸のせん断剛性は、堤体中央高さでのせん断応力-せん断ひずみ関係から求めた。ここでは、消波工堤体上半分の重量と、上下加速度記録から内挿した堤体 3/4 高さでの加速度とを乗じて、その積を中央水平断面の面積で除した値をせん断応力とした。この図には実験で得られた固有周波数を、水平地盤に適用される $G = \rho V_s^2$ 、 $V_s = f \times 4H$ (G :せん断剛性、 ρ :堤体密度、 V_s :せん断波速度、 f :固有周波数、 H :堤体高さ) に代入して求めた初期剛性の推定値もプロットしている。図中、固有周波数から求めたせん断剛性と、応力-ひずみ曲線から求められた初期剛性とは概ね一致している。さらに応力-ひずみ曲線から求められたせん断剛性には、他の一般の土質材料と同様に、せん断ひずみレベルが大きくなるとせん断剛性が低下するというひずみ依存性も示された。

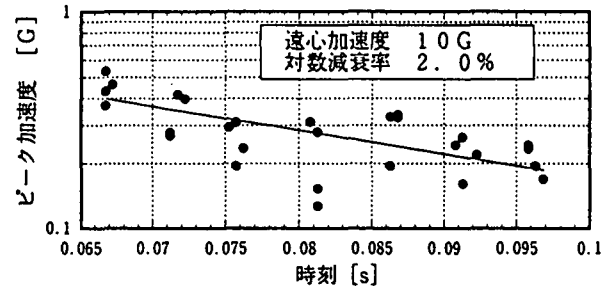
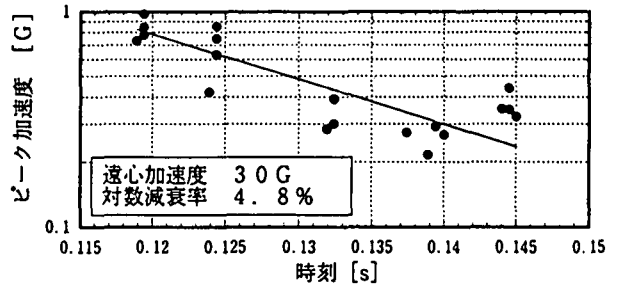
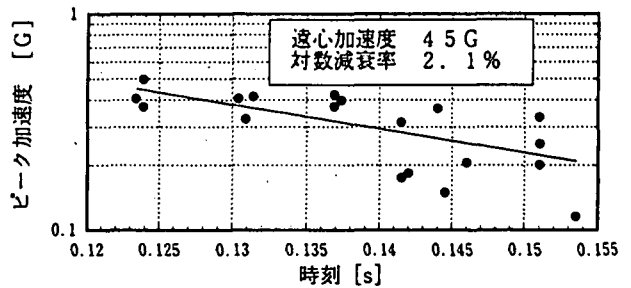


図-10 消波工堤体の対数減衰率

図-10 は STEP 波加振による自由振動の対数減衰率を示す。対数減衰率は、横軸に時間、縦軸に加速度の対数をとるグラフ上に、消波工堤体の相対加速度 (消波工上部-土槽底面) の自由振動におけるピーク値をプロットし、その最小自乗近似直線の傾きから求めた。ただし消波ブロックの形状によるばらつきを考慮し、堤体上部中央付近で得られた複数の加速度記録を使用した。これによると消波工堤体の対数減衰率は 2 ~ 5% であった。

4. まとめ

本研究では、遠心力载荷模型実験により岩盤上または砂層上に設置されたケーソン式防波護岸の地震時安定性を検討し、岩盤上に設置された防波護岸の高い安定性が示された。また消波ブロックからなる堤体の加振実験も実施し、その動的振動特性を把握した。

謝辞：遠心力载荷模型実験はすべて U.C.Davis の装置を使用した。Prof.Kutter 以下 U.C.Davis のスタッフに多大な協力を頂いたことを記して謝意を表す。なお、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。