

高波浪域向け消波型ケーソンの開発

THE DEVELOPMENT OF A WAVE ABSORBING CAISSON BREAKWATER FOR ROUGH SEAS

本田秀樹¹・塩崎禎郎¹・堀内 博²・辻岡和男²
Hideki HONDA, Yoshio SHIOZAKI, Hiroshi HORIUCHI and Kazuo TSUJIOKA

¹正会員 工修 NKK 基盤技術研究所 都市工学研究部 (〒210-0855 神奈川県川崎市川崎区南渡田1-1)

²正会員 工修 NKK 鉄構建設部 港湾技術グループ (〒230-8611 神奈川県横浜市鶴見区末広町2-1)

In open sea region with severe wave attacks, a breakwater covered with wave-dissipating blocks have been widely used. However, the application of this breakwater at greater depths implies the increase of construction costs because it requires a large quantity of wave-dissipating concrete blocks. Therefore, the authors developed a new type of breakwater. This breakwater consists of wave absorbing caisson and sloping top caisson. In this paper, through the sliding experiment of this new type breakwater using a 1/60 model, we prove the stability and define the hydraulic characteristics of this breakwater.

Key Words : Wave absorbing caisson , sliding experiment, rough seas

1. はじめに

従来, 外洋域における防波堤は, 消波ブロックで防波堤の前面を被覆する構造形式が採用されるケースが多い。ところが, 港湾の沖合展開に伴い, 防波堤の設置水深が増大すると, ブロック重量とその個数が増加し, 建設コストの高騰が問題となることがある。そのため, 耐波安定性, 消波性能に優れ, かつ経済的にも有利な防波堤の開発が課題となっている。このような背景のもと, 著者らは, 高波浪域向け消波型ケーソンの開発を進めてきた。その概略図を図-1に示す。

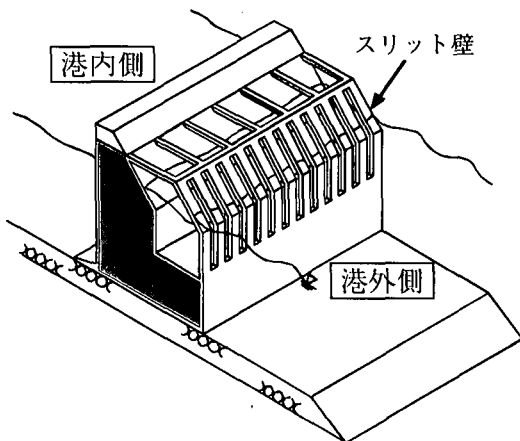


図-1 高波浪域向け消波型ケーソンの概略図

これは, 反射率の低減に有利な直立消波ケーソンと, 耐波安定性に優れる上部斜面ケーソンの両方の長所を組み合わせた構造である(以後, 上部斜面消波ケーソンと記述する)。したがって, 同じ波浪条件で直立消波ケーソンと比較した場合, 堤体安定に必要な重量が少なくてすむため, 経済的に有利になるものと考えられる。

そこで, 実用化に向けて, 上部斜面消波ケーソンの耐波安定性と消波, 越波特性を把握する目的で水槽実験を実施した。本論文では, 実験結果の概要を示すとともに, 設計で用いる波力算定式についても検討を行っている。

2. 実験概要

(1) 実験水路と模型断面

a) 実験水路

実験は, 吸収制御式の2次元造波水路(長さ13.5m×高さ0.8m×幅0.9m)を用いて実施した。水路図を図-2に示す。水路内には, 1/50勾配の水路床を設け, 造波板前面から8.15mの地点に模型を設置した。

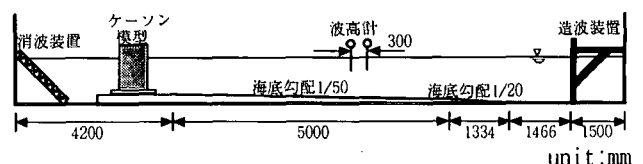


図-2 実験水路

b)実験模型

今回の実験では、上部斜面消波ケーソンの耐波安定性を把握することが主な目的であるが、実験の信頼性向上とメカニズム解明のため、直立消波ケーソンとの比較実験とした。実験対象は、水深-15mに設置される防波堤としている。実験に用いた堤体模型は、これらの断面を縮尺1/60でモデル化した。直立消波ケーソンと上部斜面消波ケーソンの模型断面図を図-3に示す。模型はアクリル製であり、底面はアルミ版にサンドペーパーを貼付けることで捨石マウンドとの摩擦係数の調整を行った。また、スリット部の開口率は30%とした。

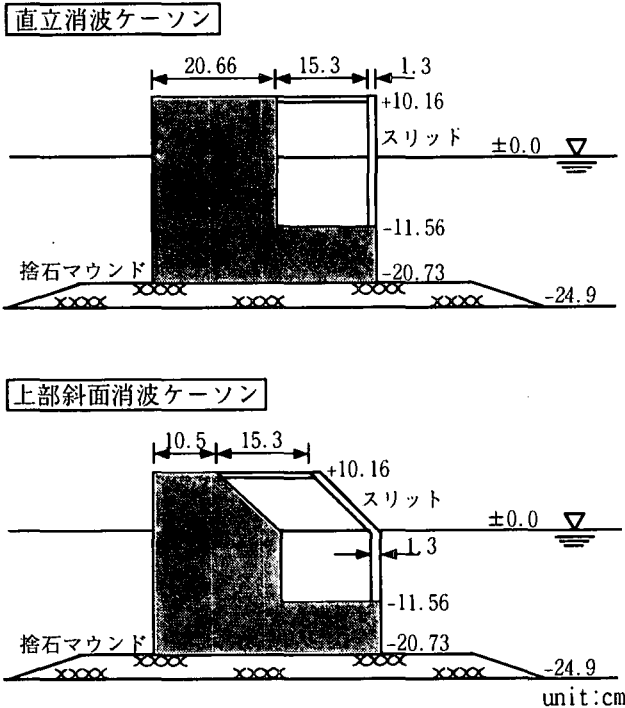


図-3 模型断面図

(2)実験条件

今回は、基本的な堤体安定性と水理特性を把握するため、規則波による実験とした。現地との想定縮尺率は1/60で、フルード相似則に基づいて実験条件を決定した。実験条件を表-1に示す。作用させた波は、同じ入力電圧値で造波しているため、周期により若干波高が異なる。また、実験条件とした波高は、通過波高検定時における堤体設置位置での通過波高である。

表-1 実験条件

縮尺率	1/60		
水深	24.9cm(15.0m)		
周期T	1.29s (10.0s)	波高H	4.6cm(2.8m), 10.2cm(6.1m), 14.1cm(8.5m), 14.1cm(8.5m)*
周期T	1.88s (14.5s)	波高H	5.1cm(3.1m), 12.0cm(7.2m), 17.5cm(10.5m), 15.9cm(9.5m)*

*) 捨石マウンド手前で砕波 () は現地換算値

(3)実験方法

a)水平載荷実験

滑動実験は、波を作用させた時の堤体重量と、変位の関係が重要となるため、実験前に堤体底面と捨石マウンドとの摩擦係数を求めておく必要がある。この摩擦係数を求めるために、水平載荷実験を実施した。水平載荷実験は、堤体に加える水平力を徐々に増加させ、堤体の変位した時の水平力と堤体重量の比から摩擦係数を求める方法である。今回は、堤体底面をアルミ製としたことから、設計時に用いる摩擦係数値 $\mu=0.6$ に合わせるため、底面にサンドペーパーを貼付けた。実験は、堤体の重量を変化させて行い、堤体重量と摩擦係数の関係を求めた。堤体重量は、堤体内に入れる錘を増減させることで調整した。実験で使用した捨石マウンドは砕石6号をふるい分け、粒径5~13mmの砕石を用いて作成した。これは、粒径と重量の関係¹⁾から現地換算で50~500kgの石材に相当する。なお、実験の際には、実現象に近づけるため捨石マウンドを水没させた。

水平載荷実験から得られた摩擦係数を図-4に示す。摩擦係数は、実験ケースごとにばらついてはいるが、今回は、平均値 $\mu=0.59$ を実験結果の整理に用いることにした。

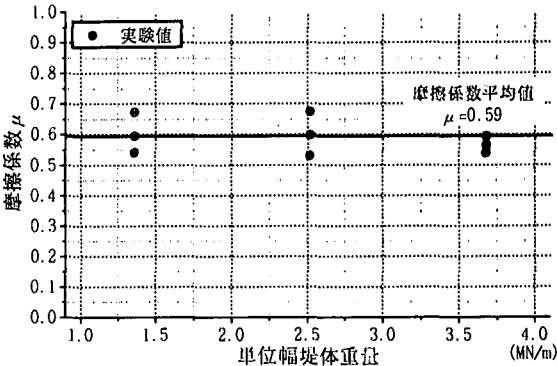


図-4 堤体重量と摩擦係数の関係

b)滑動実験

滑動実験は、谷本ら²⁾が行った実験方法を参考にした。滑動実験の概略図を図-5に示す。今回は、堤体全体に作用する水平波力、鉛直波力、及び、堤体に作用する波圧を同時に計測するために模型を防波堤法線方向に3分割し、それぞれ、滑動量測定用、波力測定用、波圧測定用とした。滑動量の測定に用いた堤体模型を写真-1に示す。また、捨石マウンドは、水平載荷実験と同じ砕石を用いて滑動量測定用の堤体部分のみ作成した。

実験では、最初に、作用させる波に対して、基本となる堤体重量を定める。この堤体重量の算定には、次の波力算定式を用いた。

【波力算定式】

〔直立消波ケーソン〕

堤体に作用する波圧分布を代表的な6つの位相に分け、それぞれの位相に対して合田式に直立消波ケー

ソンの効果を取り入れるため、補正係数を掛け合わせた高橋らの算定式³⁾。

〔上部斜面消波ケーソン〕

直立消波ケーソンの算定式に、上部斜面ケーソンに対して細山田ら⁴⁾が提案している斜面部、直立部の波力低減係数を掛け合わせた算定式。

これらの算定式を用いて、滑動安全率S.F.=1.0となるとき、この重量となるように滑動量測定用模型内に錘を入れ、水路内に設置した。次に、波を作用させ、堤体背後の上下2箇所に設置した防水型変位計で堤体の変位量を計測し、堤体下側に設置した変位計の計測値を堤体の滑動量とした。堤体下側の変位時系列波形において、1波で1mm(現地換算で6cm)以上の滑動が見られたときは、堤体が滑動したものと判断して堤体重量を増加させ、堤体が安定していれば堤体重量を減少させて実験を繰り返す。1回の実験終了後、捨石のマウンドを元の状態に戻し、堤体を据付け直してから次の実験を開始した。なお、水平波力、鉛直波力の計測には3分力型のロードセル、波圧の計測は波圧計を使用し、サンプリング周波数500Hzでデータの収集を行った。

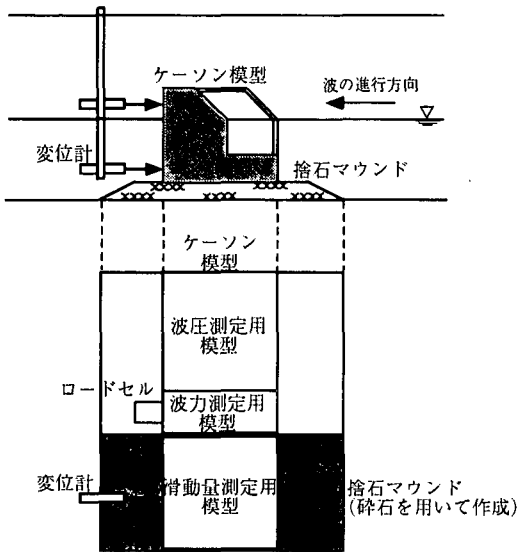


図-5 滑動実験概略図

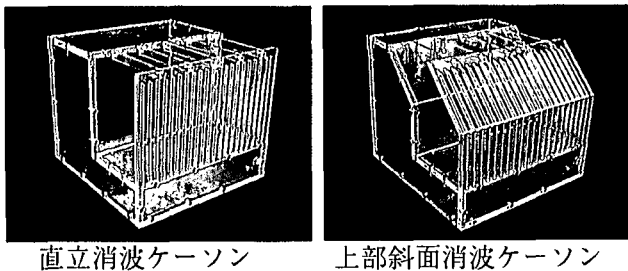


写真-1 滑動実験用模型

3. 実験結果

(1) 滑動実験

a) 滑動量と堤体重量の関係

実験結果の一例として、周期 $T=14.5s$ 、波高 $H=7.2m$ と $T=10.0s$ 、 $H=6.1m$ に対する単位幅堤体重量と滑動量の関係を、それぞれ図-6、図-7に示す。縦軸は、1波ごとの堤体の滑動量を1回の実験に対して10波分、繰返し実験2回についてプロットしており、横軸はそれぞれの実験時での単位幅堤体重量である。また、図中の黒印は、10波分の滑動量の平均値で、実線はその近似曲線である。図-6、図-7からも明らかなように、堤体の滑動量は1波ごとに異なっており、同じ堤体重量に対しても滑動の有無や、滑動量がばらつくことがわかる。ここでは、10波の滑動量がすべて1mm(現地換算6cm)以内であれば滑動しないものと判断し、滑動しない堤体重量のうち最小の堤体重量を滑動限界重量とした。上部斜面消波ケーソンと直立消波ケーソンの滑動限界重量を比較すると、波高の小さいケースでは両者の差はあまり見られなかったが、波高の増大に伴って斜面の効果が大きくなり、その差は顕著になった。今回の実験ケース中、最大波高時($T=14.5s$ 、 $H=10.5m$)における上部斜面消波ケーソンの滑動限界重量は、直立消波ケーソンの0.74倍であった。このことから、上部斜面消波ケーソンは直立消波ケーソンよりも耐波安定性に優れているものと判断できる。

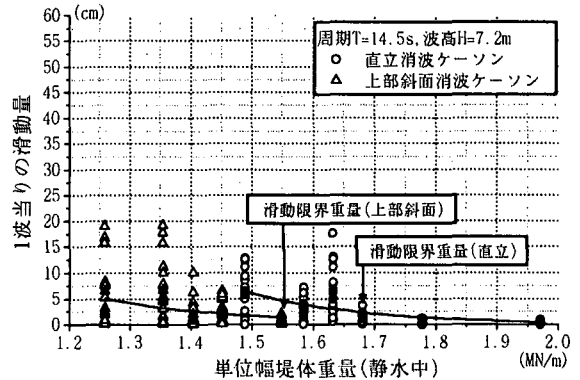


図-6 単位幅堤体重量と滑動量の関係
(周期 $T=14.5s$ 、波高 $H=7.2m$)

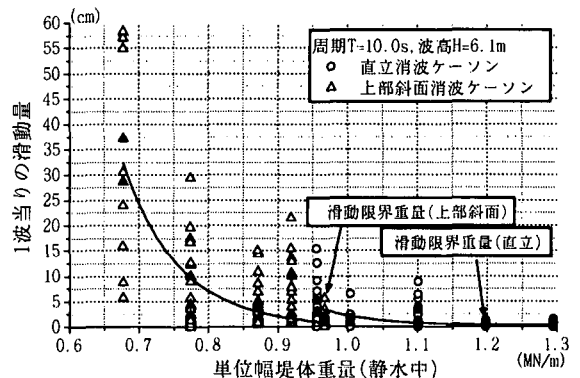


図-7 単位幅堤体重量と滑動量の関係
(周期 $T=10.0s$ 、波高 $H=6.1m$)

b) 波力算定式の検討

ここでは、滑動実験で仮定した波力算定式の妥当性を検討する。直立消波ケーソンと上部斜面消波ケーソンについて、滑動実験で求めた滑動限界重量 W_e と、波力算定式から求めた滑動限界重量 W_c の比を図-8、図-9に示す。ここで、 W_c は滑動安全率 $S.F.=1.0$ となるとき堤体重量である。図の縦軸は W_e と W_c の比であり、 $W_e/W_c > 1.0$ では今回用いた波力算定式が危険側となり、 $W_e/W_c < 1.0$ では安全側となることを示している。今回の実験結果では、直立消波ケーソンと上部斜面消波ケーソンの W_e/W_c は、0.8~1.1の範囲に分布している。また、 W_e/W_c の平均値は、両者とも1.0を下回っており、仮定した波力算定式は妥当なものと判断できる。

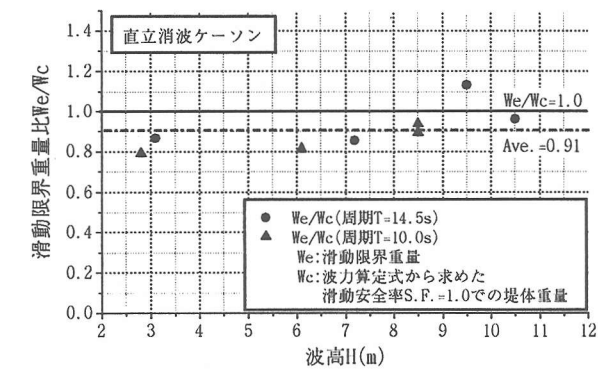


図-8 滑動限界重量の比較(直立消波ケーソン)

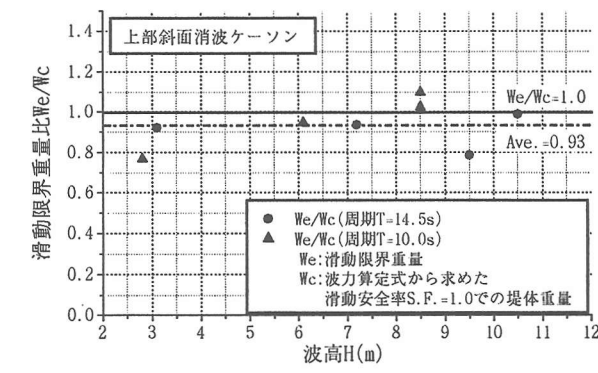


図-9 滑動限界重量の比較(上部斜面消波ケーソン)

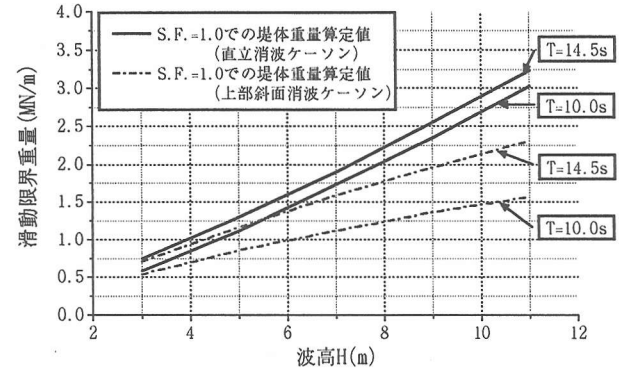


図-10 滑動限界重量の比較
(開口率30%,水深 $h=15.0$ m,周期 $T=10.0$ s,14.5s)

図-10は、この波力算定式に基づき、今回の断面形状に対して波高を変化させたときの、直立消波ケーソンと上部斜面消波ケーソンの滑動限界重量を試算した結果である。その結果、波高の比較的小さい範囲においては、直立消波ケーソンと上部斜面消波ケーソンの差はほとんど見られないが、波高の増大とともに、その差は顕著になる。このように、上部斜面消波ケーソンは、高波浪域において非常に有利な構造形式と考えられる。

c) 滑動メカニズムの検討

次に、滑動実験結果と計測した波力値をもとに、滑動のメカニズムについて考察を行った。写真-2は、堤体に波が作用している状況であり、この時点での堤体に作用する力を模式的に示したのが図-11である。滑動合成波力 F_c は堤体の滑動安定性の検討に用いる値であり、次式で算定される。

$$F_c = \text{水平波力} - \text{摩擦係数} \times (\text{鉛直波力} - \text{揚圧力})$$

ここで、水平波力、鉛直波力は波力測定用模型に取付けたロードセルの測定値を用い、揚圧力は堤体前面下端で測定した圧力計の値を代用した。また、滑動抵抗力 $\mu W'$ は、水平載荷実験より求めた摩擦係数 μ に静水中の堤体重量 W' を乗じた値で、堤体が作用する波力に抵抗する力である。

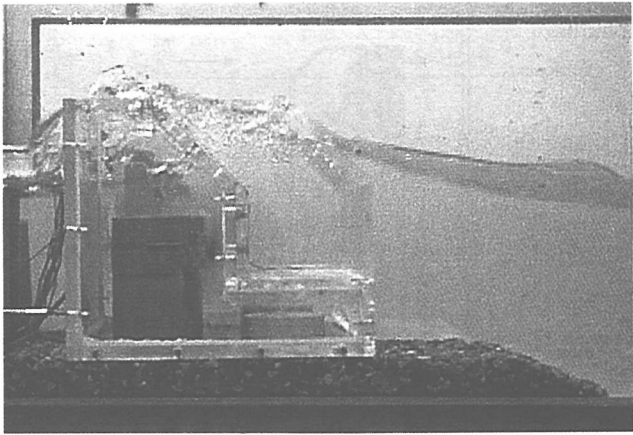


写真-2 波の作用状況

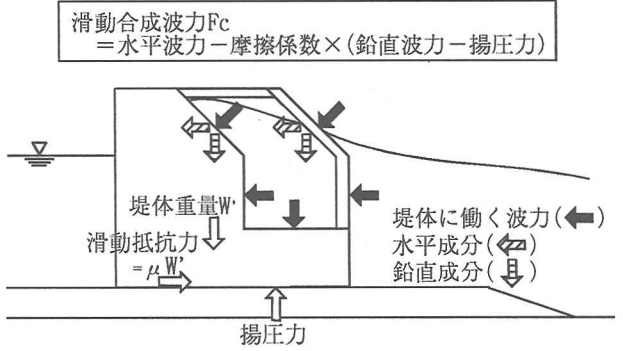


図-11 作用力の模式図

堤体の滑動は、物理的には $F_c = \mu W$ を境界として、 $F_c > \mu W$ となった時に発生し、 $F_c < \mu W$ では発生しない。このことを確認するために、上部斜面消波ケーソンの滑動合成波力と堤体変位の時系列波形の一例として、 $F_c > \mu W$ となる条件を図-12、 $F_c = \mu W$ となる条件を図-13に示す。

図-12では、 F_c が μW を大きく上回るため、変位時系列波形が階段状となり、堤体の滑動量が蓄積されていく様子がわかる。図-13は、 F_c と μW が一致する条件で、滑動の有無が混在する臨界状態である。以上の結果から、堤体の安定性は滑動合成波力 F_c と滑動抵抗力 μW の関係から評価できることがわかる。

また、堤体変位の時系列波形に着目すると、堤体の変位は、 F_c が堤体に向かって作用する $F_c > 0$ となる時刻から始まる。 F_c がピークをむかえた後も変位は増加し、変位のピークは F_c のピークと位相差をもって生じる。この現象は、下迫⁵⁾が提案している混成防波堤の滑動モデルと同様の現象であった。堤体の変位がピークとなった後、堤体は沖方向に戻る。これは、捨石マウンドの弾性変形が元に戻る影響や、波浪条件によっては、引き波時の波力による滑動現象が生じている可能性も考えられる。

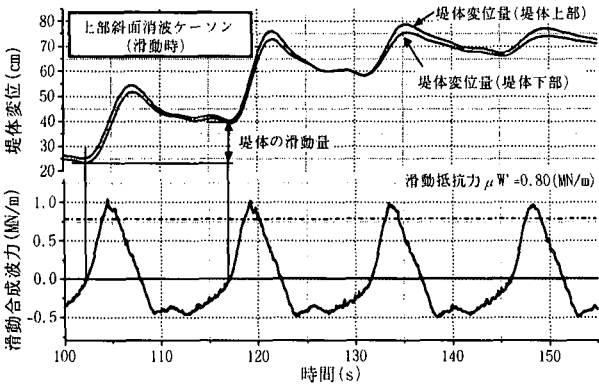


図-12 堤体変位量と滑動合成波力の時系列波形
($T=14.5\text{s}$, $H=7.2\text{m}$, $W'=1.354\text{MN/m}$)

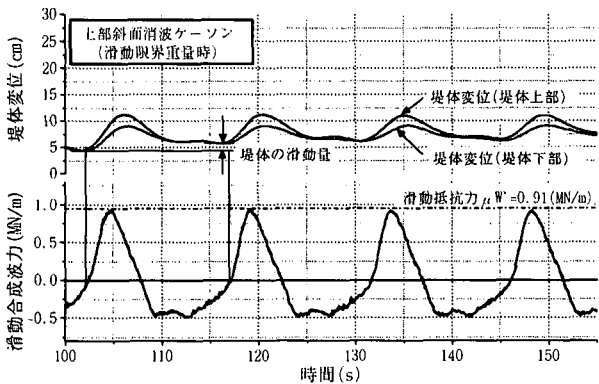


図-13 堤体変位量と滑動合成波力の時系列波形
($T=14.5\text{s}$, $H=7.2\text{m}$, $W'=1.548\text{MN/m}$)

(2)越波実験

上部斜面消波ケーソンは、斜面の効果により、耐波安定性に優れることを確認できたが、その反面、

越波流量を増大させ、波高伝達率が増加してしまう弱点も有している。現行の設計基準⁶⁾では、直立堤の天端高 hc は、設計有義波高 $H_{1/3}$ の0.6倍以上の適切な高さを用いることとしている。また、上部斜面ケーソンの天端高に関しては、中田ら⁷⁾が不規則波を用いた実験を実施し、波高伝達率による天端高の検討を行っている。その実験結果では、上部斜面ケーソンの天端高は $hc=1.0H_{1/3}$ に設定すれば、直立堤で $hc=0.6H_{1/3}$ とした場合の波高伝達率より安全側となることを明らかにしている。本来なら、上部斜面消波ケーソンに関しても波高伝達率により必要天端高を明らかにすべきであるが、今回は、水路の制約上、港内側に十分な距離を確保できなかったため、越波流量に着目して、上部斜面消波ケーソンと直立消波ケーソンの天端高について考察を加えた。

越波実験は、波を作用させた時に堤体を越流する水塊を、堤体背後に設置した升で収集し、その重量を計測することで越波流量を求めた。最初に、既存の模型に対して波高を変化させて越波流量を計測した。次に、直立消波ケーソンで $hc=0.6H$ となる波高に対して、上部斜面消波ケーソンに高さの異なる3種類のパラペット模型を取付けて、直立消波ケーソンと越波流量が等しくなる天端高を模索した。なお、今回は基本的な越波特性を把握するのが目的であったため、作用波は規則波としている。

図-14、図-15に実験結果を示す。縦軸は、単位時間単位幅当たりの越波流量 q 、横軸は、相対天端高比 hc/H としている。プロットはすべて現地換算値である。直立消波ケーソンで $hc/H=0.6$ における越波流量

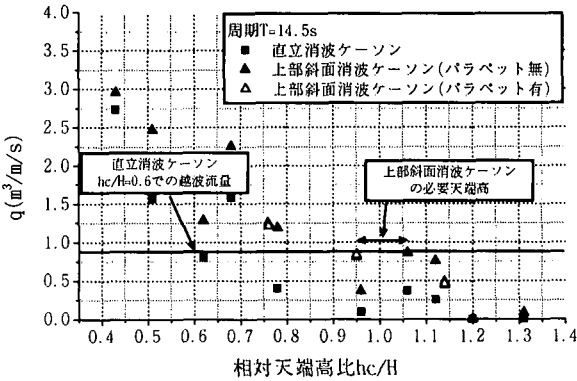


図-14 越波流量と相対天端高比の関係($T=14.5\text{s}$)

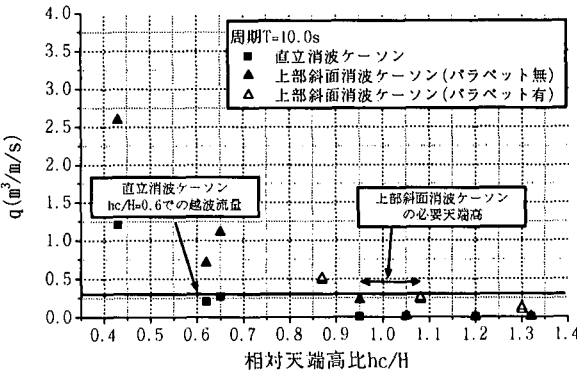


図-15 越波流量と相対天端高比の関係($T=10.0\text{s}$)

と同等となる上部斜面消波ケーソンの相対天端高比をグラフより読み取ったところ、 $T=10.0s$ 、 $T=14.5s$ のいずれに対しても、概ね $hc/H=0.9\sim 1.1$ の範囲であった。この結果は、直立堤と上部斜面堤の波高伝達率が同等となる関係と同じ傾向を示している。

(3) 消波特性

直立消波ケーソンと上部斜面消波ケーソンの反射率を図-16に示す。縦軸は反射率、横軸は波形勾配とした。反射率の実験値は、造波機と堤体の間に設置した波高計の測定データから合田の入・反射分離法を用いて求めた。また、実線は直立消波ケーソンの反射率の計算値であり、谷本ら⁸⁾の算定法に基づいて計算した。直立消波ケーソンの実験値と計算値を比較すると、すべてのケースに対して実験値は計算値よりも安全側となっていた。

直立消波ケーソンと上部斜面消波ケーソンの反射率を比較すると、すべての実験ケースで上部斜面消波ケーソンの反射率は、直立消波ケーソンと同等、もしくは若干小さくなる傾向がみられた。このことから、上部斜面消波ケーソンの反射率の算定に直立消波ケーソンの算定式を代用した場合には、安全側の評価を得られることがわかった。

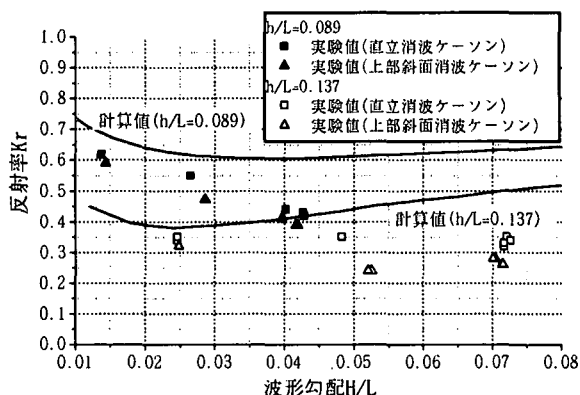


図-16 直立消波ケーソンと上部斜面消波ケーソンの反射率

4. まとめ

高波浪域向けの消波型ケーソンとして、直立消波ケーソンと上部斜面ケーソンを組み合わせた構造である上部斜面消波ケーソンを考案し、耐波安定性と水理特性を明らかにする目的で水槽実験を実施した。以下に、今回の実験結果より得られた結論を示す。

1) 滑動実験の結果、同一の波浪条件に対して、堤体安定上必要となる堤体重量は、上部斜面消波ケーソンの方が直立消波ケーソンよりも少なくすむ

ことがわかった。したがって、上部斜面消波ケーソンは、建設コストの縮減に結びつく有望な構造であるものと考えられる。

2) 滑動実験から得られた滑動限界重量と、波力算定式から求めた $S.F.=1.0$ となる堤体重量(滑動限界重量)を比較した結果、上部斜面消波ケーソンの波力算定式として、直立消波ケーソンの高橋らの式に、細山田らが提案している斜面と直立部の補正係数を掛け合わせた算定式が適用可能であることがわかった。

3) 規則波による越波実験の結果、直立消波ケーソンで相対天端高 hc/H を0.6としたときの越波流量と同等の越波流量とするためには、上部斜面消波ケーソンの相対天端高 hc/H を0.9~1.1とすればよいことがわかった。

4) 上部斜面消波ケーソンの反射率は、直立消波ケーソンと同等もしくは若干小さな値を示した。このことから、反射率の算定に直立消波ケーソンの反射率の算定式を代用しても安全側となることがわかった。

今回は、上部斜面消波ケーソンの滑動実験結果、及び、越波特性、消波特性について述べるに留まり、波圧特性、波力特性に関しては言及していない。これらに関しては、今後、より詳細な検討を加えた上で報告していく予定である。

参考文献

- 1) 莊司喜博：大型三軸圧縮試験による捨石材のせん断特性に関する考察，港湾技術研究所報告，第22巻第4号，pp. 59-120，1983
- 2) 谷本勝利，原中祐人，高橋重雄，小松和彦，轟正彦，大里睦男：各種ケーソン式混成堤の反射・越波および波力特性に関する模型実験，港湾技術資料，No. 246，1976
- 3) 高橋重雄，下迫健一郎，佐々木均：直立消波ケーソンの部材波力特性と耐波設計法，港湾技術研究所報告，第30巻第4号，pp. 3-34，1991
- 4) 細山田得三，高橋重雄，谷本勝利：離島港湾における上部斜面堤の適用性について，第41回海岸工学講演会論文集，pp. 706-710，1994
- 5) 下迫健一郎，高橋重雄：混成防波堤の期待滑動量の計算法，第41回海岸工学講演会論文集，pp. 756-760，1994
- 6) 社団法人 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1999
- 7) 中田邦夫，池田龍彦，岩崎三日子，北野雅三，藤田隆：上部斜面堤の現地建設に伴う水理模型実験，第30回海岸工学講演会論文集，pp. 313-316，1983
- 8) 谷本勝利，吉本靖俊：直立消波ケーソンの反射率に関する理論及び実験的研究，港湾技術研究所報告，第21巻第3号，pp. 43-77，1982