

II-4 スリットケーソンによる波の変形に対する実験的研究

苫小牧工業高等専門学校 正会員 浦島 三郎
 苫小牧工業高等専門学校 正会員 石塚 耕一
 室 蘭 工 業 大 学 正会員 近藤 俣郎

1. ま え が き

透水壁と遊水室を有する消波ケーソンは直立堤と傾斜堤の長所を合わせもつ構造物として、近年各地で用いられてきており、その方面の研究も多く行われている¹⁾。著者らも、ケーソンタイプの基本となる単一のスリット壁について波力実験を行い、水理的係数である抗力係数、質量係数および波動変形理論に使用される損失水頭係数、見掛けのオリフィス長さについて調べた²⁾。また、これらの係数を使用し、著者の一人によって提案されている長波の波動変形理論により反射率および伝達率を計算し、実験値との比較を行ってきた³⁾。

そこで本研究では、これまでの研究をもとに縦スリットケーソンについて実験および解析を行い、スリットケーソンの特性を反射率、波高分布およびスペクトル解析の3項目から検討し、特に波浪条件と遊水室の影響について調べようとしたものである。なお、孔あきケーソンやスリットケーソンの反射の問題などでは、波の反射の際に高調波の波が発生するといわれている。従来一般に使用されているヒューリーの方法では高調波成分の検出が不可能なので、ここでは合田らによる分離推定法により入・反射波を決定した⁴⁾。

2. 理 論 解 析¹⁾

反射率の計算には、著者の一人によって提案されている長波の波動変形理論を用いて求めた。ここでは、波は微小振幅の長波であり、透水壁の厚さは波長に比べて非常に小さく、かつエネルギー損失は透水壁の部分のみで起こると仮定している。透水壁の前後の水深が変化しない同一水深であれば、一枚透水壁不透過堤の場合の振幅の比は次式のように求まる。

$$\frac{a_r}{a_i} = \frac{A_{0,1} + (2 - A_{0,1})e^{-2ik_1B_1}}{2 + A_{0,1} - A_{0,1}e^{-2ik_1B_1}} \quad (1)$$

式中の $A_{0,1}$ は次式のようになる。

$$A_{0,1} = \frac{\sigma}{k_1 h_1} \left[\frac{C_i}{2g} |u_{1,1}| + i\sigma \frac{\mathcal{L}_a}{g} \right] \quad (2)$$

上式中の $u_{1,1}$ はスリット壁の位置での水粒子速度であり、 $|u_{1,1}|$ は u の振幅を U とすると次式となる。

$$|u_{1,1}| = \frac{8}{3\pi} U_{1,1} \quad (3)$$

ここで、 a_i は入射波振幅、 a_r は反射波振幅、 $\sigma = 2\pi/T$ 、 $k = 2\pi/L$ 、 T は周期、 L は波長、 C_i は損失水頭係数、 $\mathcal{L}_a$ は見掛けのオリフィス長さ、 g は重力加速度である。ここで C_i

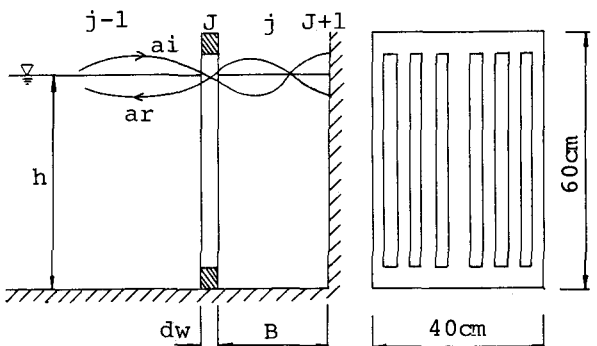


図-1. スリットケーソン概要図

および L_a にどのような値を使用するかが問題となるが、本研究においては各単一スリット壁において実験を行い、 C_l はレイノズル数 Re の関数として、また L_a/L はクリーガン・カーペンター数 KC の関数として次の実験式より求めた。

$$C_l = \frac{a_1}{Re} + b_1, \quad \frac{L_a}{L} = \frac{a_2}{KC} + b_2 \quad (4)$$

なお a_1 、 b_1 、 a_2 、 b_2 は実験より求めた値を用い、それぞれ 2824、9、0.027、0.016である。

3. 実験装置および実験方法

実験は長さ19.7m、幅0.8m、高さ0.8mのペンジュラム式造波装置が設置されている二次元規則波造波水路を仕切り板により二分し、その片方を使用した。スリット壁はアクリル材を使用し、その外寸は図-1に示すように幅40cm、高さ60cmで、空ゲキ率 $\lambda = 35\%$ 、スリット幅 $s = 28\text{mm}$ 、壁厚 $dw = 30\text{mm}$ のものをを使用した。

反射率の決定方法には一般に波高計を移動するヒーリーの方法が多く用いられているが、スリットケーソンの場合には、波の透過あるいは反射の際に高調波の波が発生し、基本周期に対応する部分重複波の腹と節とが識別できないことが少なくないので、ここでは合田⁴⁾によって提案されている隣接する2点の同時波形記録から全成分波のフーリエ係数を求めて、これから入射波、反射波の各振幅を推定する分離推定法を用いた。波高計間隔は、波長 L の $1/2$ 、 $1/1$ 、 $3/2$ の近傍で入射波、反射波の振幅の推定値が発散することから、波長 L の $1/4$ とした。なおフーリエ解析をするにあたってのサンプリングの時間間隔は $\Delta t = 0.02 \text{ sec}$ 、記録時間は周期 T の4倍で $6.0 \sim 8.0 \text{ sec}$ 、データの個数は300~400個である。

波高分布は、スリットケーソンの背後不透過壁から波長の距離の位置まで水平に水路中央で5cm毎に波高を測定した。なお、水深は $h = 50 \text{ cm}$ と一定に行った。

4. 結果および考察

(1) 反射率

図-2は、周期を一定にし遊水室幅 B を変化させた時の各入射波高 H_i に対する反射率 K_r の実験値と計算値である。実験値の反射率 K_r は遊水室幅と波長の比 B/L によってよくまとまっており、この B/L が K_r に対して支配的な要因であることがわかる。すなわち、 K_r は B/L が0および0.5に近づくにつれて大きくなり、その中間で極小値をもつ変化を示す。極小条件は波形コウ配 H_i/L によって若干異なるけれども、ほぼ $B/L = 0.20 \sim 0.25$ の範囲である。計算値は、実験値とほぼ同じ傾向を示すが、極小値付近において実験値よりも K_r は小さい値を示す。また計算値では $B/L = 0$ および0.5でスリット壁での水粒子速度が0となるため $K_r = 1.0$ となり、実験値でもほぼ1.0付近の値を示している。入射波高を大きくすると計算値、実験値とも反射率 K_r は小さくなる。これは、入射波高が大きくなるにつれエネルギー損失が大となり、反射率が小さくなるためである。

図-3は、各周期において遊水室幅 B を変化させた時の

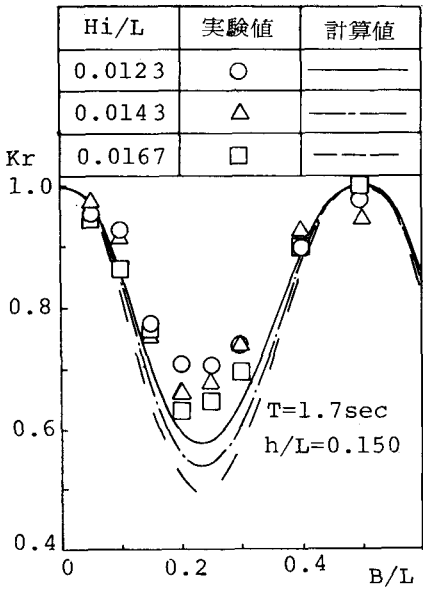


図-2. スリットケーソンの反射率

計算値と実験値である。周期と同時に入射波高も変化しているので、周期の影響がはっきりしないが、 $h/L = 0.150$ と 0.123 では、ほぼ同一の入射波高であり、これらを比較すると計算値では多少 $h/L = 0.123$ の方が Kr が小さくなっているが、実験値ではほぼ同一の Kr となる。入射波高 H_i 、遊水室幅と波長の比 B/L にして、周期を変化させて計算を行ってもほとんど Kr の変化はみられなかった。これらのことより、 Kr におよぼす影響は遊水室幅と入射波高の要因が大きく、周期による影響はあまりないものと思われる。

(2) 波高分布

図-4は、周期および入射波高を一定にし、遊水室幅を変化させた時の波高分布図である。xには、スリットケーソンの背後不透過壁を $x=0$ として定めている。波高は、静水面上下の波頂の差を有効測定時間内で平均したものをを用いている。各波高分布図は腹と節をもつ部分重複波の形を示している。波の節は、背後不透過壁から波長のほぼ $1/4$ の所に見られ、スリット壁の位置によってそれほど変化していない。これは、空ゲキ率35%、壁厚30mmのスリット壁では、スリット壁による反射波が小さく、背後不透過壁による反射波によって部分重複波が形成される

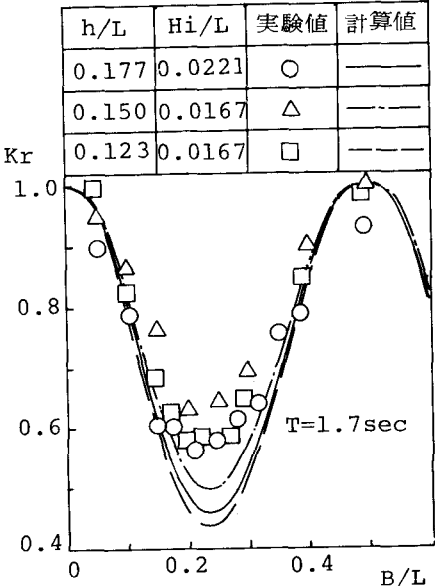


図-3. スリットケーソンの反射率

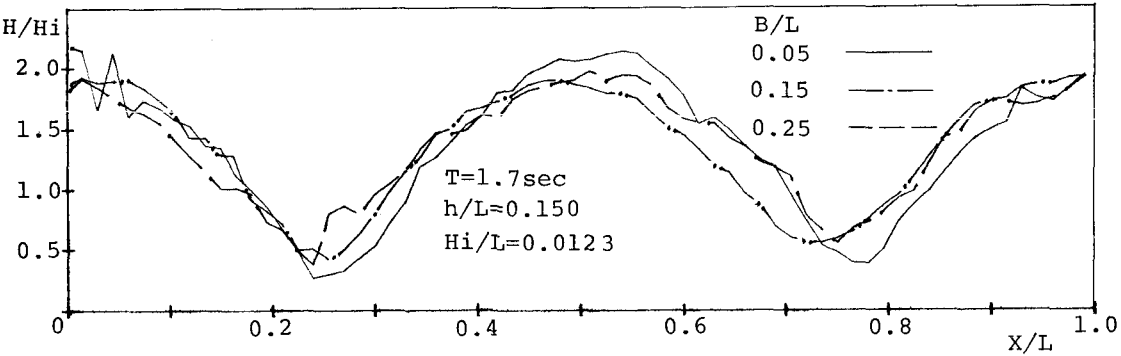


図-4. スリットケーソンにおける波高分布

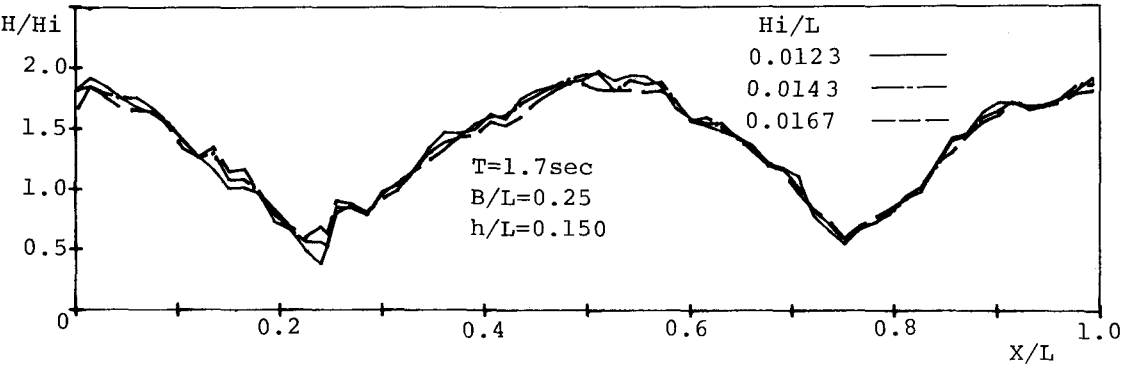


図-5. スリットケーソンにおける波高分布

ためと考えられる。またスリット壁前後の波高の差が大きいことが認められる。単一の縦スリット壁の水粒子速度の実験⁵⁾においても、スリット壁前後の水粒子速度は異なり、これらのことが(1)の反射率で述べた極小値付近の反射率が実験値と計算値で異なる1つの要因となっているものと思われる。

図-5は、周期および遊水室幅を一定にして、入射波高を変化させた時の波高分布図である。各分布は入射波高を変化させても、 H/H_i はほぼ同じ分布状態を示す。

スリット壁前後の H/H_i の差は、反射波の大きい入射波高の小さい波ほど大きいことが認められる。また、節の部分の波形は(3)のスペクトル解析でも明らかなように細く割れたような形を示し、高調波成分の影響が特に大きい。

(3) スペクトル解析

図-6~図-14は、各実験波のスペクトル解析を行い、各周波数でのパワースペクトルを表わしたものである。スペクトル解析を行うためにサンプリングした記録時間が、有効測定時間の関係で周期の4倍の6.0~8.0 secと非常に短いため、規則波であることを明示するような鋭い線スペクトルにはなっていないけれども、造波機で造った周期 T の逆数である基本周波数 f_0 の整数倍の付近で、明りょうなピークが認められる。

また、波浪条件、構造条件および測定箇所によって、パワースペクトルの値の差が大きいので、縦軸は対数表示で表わしている。

図-6~図-14は、分離推定

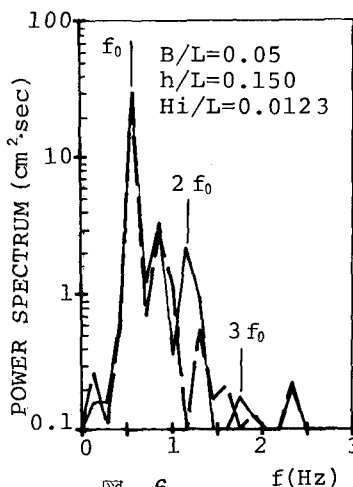


図-6.

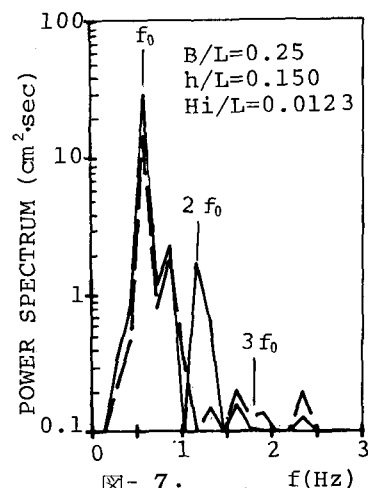


図-7.

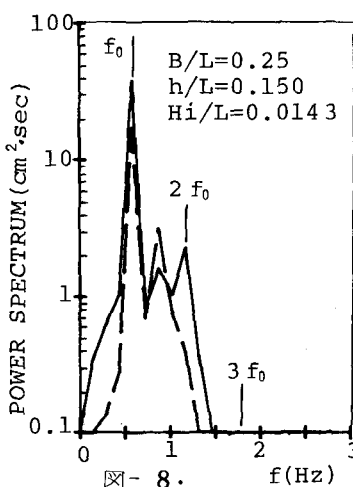


図-8.

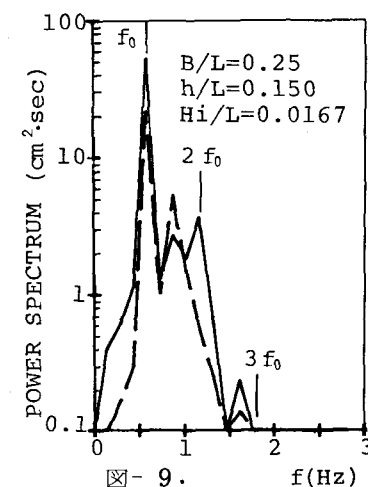


図-9.

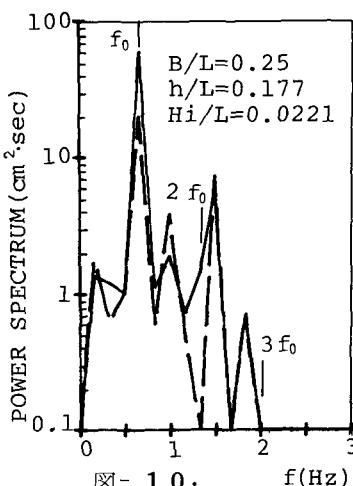


図-10.

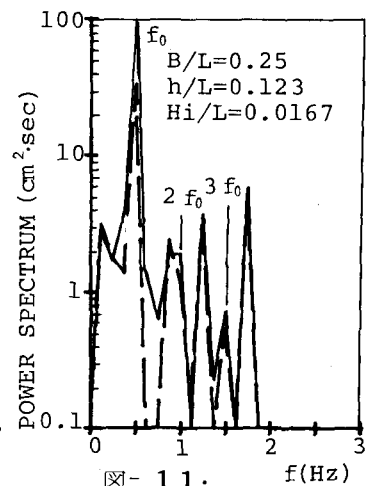


図-11.

入射波: ———

反射波: - - -

法で求めた入射波と反射波の振幅のパワースペクトルを各周波数で表わしたものである。図-6~図-9は同一周期の波で、図-6、7は入射波高を一定にし遊水室幅を変化させ、図-7、8、9は遊水室幅を一定にして入射波高を変化させたものである。これらの入射波のパワースペクトルは、規則波であるので基本周波数 f_0 において特に卓越している。その他、基本周波数 f_0 の2倍および3倍周波数付近において、各パワースペクトルのピークがみられ、パワースペクトルの大きさに差はみられるものの、その形は図-6~図-9まではほぼ同じ形を示している。これらの入射波のパワースペクトルは、造波水路および造波機特性によって決まるもので、高調波成分は周期によって影響され、入射波高の変化による影響は小さいように思われる。

図-6~図-9の反射波のパワースペクトルをみると、

ほぼ全体的に基本周波数 f_0 およびその2倍周波数 $2f_0$ 付近において卓越している。また、入射波高の小さい図-6、7においては入射波のパワースペクトルより反射波のパワースペクトルの方が小さく出ているが、入射波高の大きな状態の図-8、9においては、基本周波数 f_0 の2倍周波数付近において入射波のパワースペクトルより反射波のパワースペクトルの方が大きい。これらは、波がスリット壁を透過あるいは反射する際に発生するものと考えることができ、スリット壁によって発生する高調波成分は入射波高が大きくなると顕著にあらわれるものと思われる。

図-9~図-11は、遊水室幅と波長の比 B/L を一定にして、周期を変化させたものである。入射波のパワースペクトルの形は、各図とも異なり、図-10、11においては基本周波数 f_0 の3倍以上の周波数付近においてもピークがみられる。本造波水路および造波機では周期によってパワースペクトルが異なる波が発生するが、基本周波数 f_0 が他の周波数に比して卓越しており、規則波実験として特に問題はない。また、図-10、11では反射波のパワースペクトルにおいて、3倍周波数 $3f_0$ 以上の高調波成分波のものも入射波のパワースペクトルよりも大きくなり、スリット壁によって発生する高調波成分波は、入射波高のみではなく、周期によっても異なるものと思われる。スリットケースの場合、波の透過あるいは反射の際に高調波の波が発生し、特に3倍周波数から始まる奇数次の高調波が卓越するといわれているが、本実験においては偶数次の高調波においてもスリット壁による発

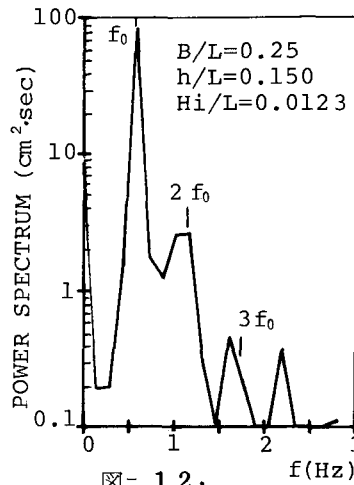


図-12.

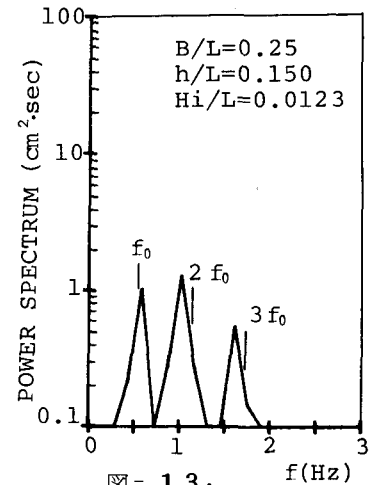


図-13.

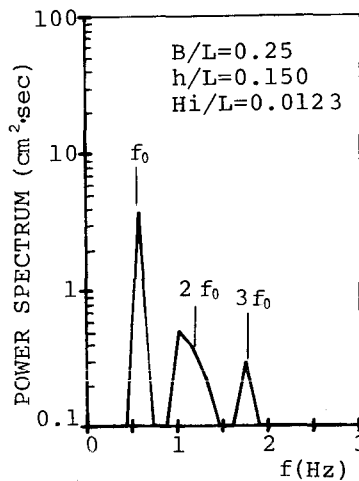


図-14.

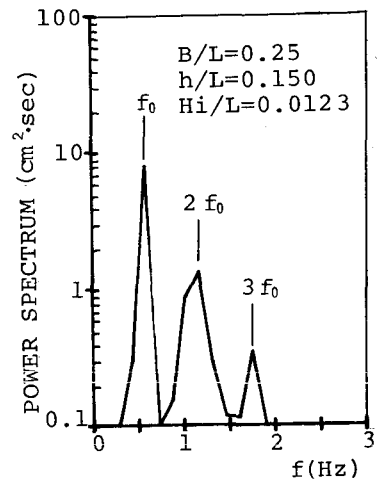


図-15.

生波が卓越しているものと考えられる。

図- 12～図- 14は、遊水室幅および波浪条件を一定にして、各位置での波形記録をとり、フーリエ解析を行いパワースペクトルでまとめたものである。図- 6～図- 11と同じように、ピークの位置が基本周波数 f_0 の2倍および3倍周波数の所から多少ずれているものもあるが、これは記録時間が短いため明りょうな線スペクトルが得られなかったためと考えられる。図- 12～図- 14における各測定位置は、背後不透過壁より1.5 cm、スリット壁後方1.0 cm、スリット壁前方1.0 cm および部分重複波の節の付近である。

各場所のパワースペクトルは、基本周波数 f_0 およびその2倍、3倍周波数付近までが卓越している。背後不透過壁より1.5 cm の場所を示した図- 12は0次の周波数の波が大きい値を示しているが、これは、波が背後不透過壁で上方に打ち上げられ、波が静水面上下で対称でないためである。スリット壁の後方と前方の波を示す図- 13と図- 14を比較すると基本周波数 f_0 の成分波がスリット壁前方では非常に大きく、2倍および3倍周波数付近の成分波はほぼ同程度の大きさを示している。

5. あ と が き

以上の実験および計算結果より反射率 K_r は、遊水室幅 B と波長 L の比 B/L によって大きく変化し、 B/L が0および1.0で $K_r=1.0$ に近づきその中間で極小値をとり、極小値をとる範囲はほぼ $B/L=0.2\sim0.25$ である。スリットケーソンの構造条件および周期以外の波浪条件を一定にし、周期を変化させても反射率にはほとんど変化は認められない。また、入射波高が大きくなるにつれてエネルギー損失が大きくなり、反射率は小さくなる。実験値と計算値を比較すると $B/L=0.0.5$ 付近を除いて計算値の方が反射率は小さいが、傾向はほぼ同じ傾向を示す。反射率に影響する要因としては、遊水室幅と波長の比、入射波高が主要な要因と考えられる。

波高分布では空ゲキ率35%、壁厚30 mm のスリット壁では、スリット壁による反射が小さいため、背後不透過壁の反射によって部分重複波の腹と節の位置が決まるものと思われる。また、入射波高が変化しても波高分布の形はほぼ同一である。

入射波と反射波のスペクトル解析においては、スリット壁において基本周波数の2倍、3倍周波数などの高調波成分波が発生するが、これらは遊水室幅と波長の比では、ほとんど変化しない。波がスリット壁を透過あるいは反射する際にどのような高調波成分波が発生するかは、同一のスリット壁においては入射波高および周期によって変化するものと考えられる。各場所でのスペクトル解析では、高調波成分は背後不透過壁付近を除いては、各場所ともほぼ同程度の大きさを示している。スリット壁前後においてはスリット壁前方の基本周波数のパワースペクトルが大きくなる。

ここでは、主として波浪条件と遊水室幅による消波効果について調べてきたが、今後は空ゲキ率、壁厚等のスリット壁自体の構造条件による消波効果について調べていきたい。

参 考 文 献

- 1) 近藤 郎・竹田英章：消波構造物，森北出版，279p.，1983.
- 2) 浦島三朗・石塚耕一・近藤俊郎：縦スリット壁に作用する波力に関する基礎的研究，第30回海岸工学講演会論文集，pp. 337～341，1983.
- 3) 浦島三朗・石塚耕一・近藤俊郎：スリット壁形状の波力と消波機能におよぼす効果，土木学会北海道支部論文報告集，第40号，pp. 285～286，1984.
- 4) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，運輸省港湾技研資料，N0. 248，1976.
- 5) 浦島三朗・石塚耕一・近藤俊郎：スリット壁周辺の波高及び水平最大水粒子速度について，土木学会第39回年次学術講演会講演概要集第2部，pp. 339～340，1984.