

一枚スリット壁不透過堤による消波機能について

浦 島 三 朗*・石 塚 耕 一**・近 藤 俣 郎***

Wave Energy Dissipation at Impermeable Structure with One Slotted wall

Saburo URASHIMA*, Kouichi ISHIZUKA**, and Hideo KONDO***

要 旨

本研究は、一枚スリット壁不透過堤に対して波動実験および長波の理論解析を行い、波高分布、高調波成分波、最適形状について検討したものである。

Abstract

A wave tank test was performed on impermeable structure with one slotted wall. The reflection coefficient is determined by making use of the analytical approach of the small amplitude shallow wave deformation. It is considered to wave height distribution, high-frequency wave and the optimum form.

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てきた。²⁾ また、これらの係数を使用し、著者の1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前壁にスリット壁、後壁に不透過壁を用いた一枚スリット壁不透過堤について実験および解析を行い、一枚スリット壁不透過堤の特性を反射率、波高分布およびスペクトル解析の3項目から検討

し、消波効果に対する波浪条件と構造条件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⁴⁾により入・反射波を決定した。

2. 理 論 解 析

反射率の計算には、著者の1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。透水壁前後の水域で各速度ポテンシャルを考え、透水壁の位置で連続の式および運動方程式、運動量保存の式をたて、また不透過壁の位置で水平水粒子速度が零であるという境界条件により、透水壁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。

* 助教授 土木工学科

** 教 授 土木工学科

*** 教 授 室蘭工業大学土木工学科

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

式中の $A_{0,1}$ は次式のようになる。

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

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 $u_{1,1}$ の振幅を $U_{1,1}$ とするとローレンツの等価仕事の法則より次式となる。

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

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、 B は遊水室幅、 C_i は損失水頭係数、 $\mathcal{Z}_a$ は見掛けのオリフィス長さ、 g は重力加速度、 h は水深である。ここで、 C_i および $\mathcal{Z}_a$ 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_i はレイノルズ数 R_e の関数として、また $\mathcal{Z}_a$ はクリーガン・カーペンター数 $K.C.$ と波長の関数として次の実験式より求めた。

$$C_i = \frac{a_1}{R_e} + b_1 \quad \dots(4)$$

$$\frac{\mathcal{Z}_a}{L} = \frac{a_2}{K.C.} + b_2 \quad \dots(5)$$

なお、 a_1 、 b_1 、 a_2 および b_2 は透水壁の形状によって決まる係数で、実験より求めた値を用いると本研究のスリット壁実験模型の値は、それぞれ 2824、9、0.027 および 0.016 である。なお各種模型の実験値より b_1 、 b_2 の実験式を求めると次式のようになる。

$$b_1 = \frac{0.52}{\lambda^{3.0} (dw/s)^{0.46}} \quad \dots(6)$$

$$b_2 = 0.00567 dw + 0.0033 \quad \dots(7)$$

ここで、 λ は空隙率、 dw は壁厚、 s はスリット幅である。

3. 実験装置および実験方法

実験は、長さ 19.8 m、幅 0.8 m、高さ 0.8 m のベンジ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 40 cm、高さ 60 cm で、空隙率 $\lambda = 35\%$ 、スリット幅 $s = 28$ mm、壁厚 $dw = 30$ mm のものを使用した。

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

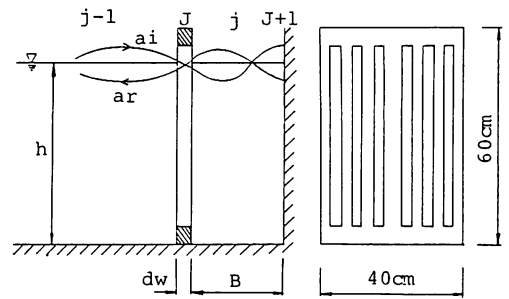


図-1 スリットケーソン概要図

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正確に識別できないことが少なくないので、ここでは合田ら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⁴⁾を用いた。波高計間隔は、波長 L の $1/2$ 、 $1/1$ 、 $3/2$ 倍の近傍で入射波、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 $\Delta t = 0.02$ sec、記録時間は周期 T の4倍で 6.0 ~ 8.0 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 5 cm 毎に波高を測定した。なお、水深は $h = 50$ cm と一定にして行った。

4. 結果および考察

4. 1 波高分布

図-2 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 H 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、空隙率 35%、壁厚 30 mm 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たことが認められる。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

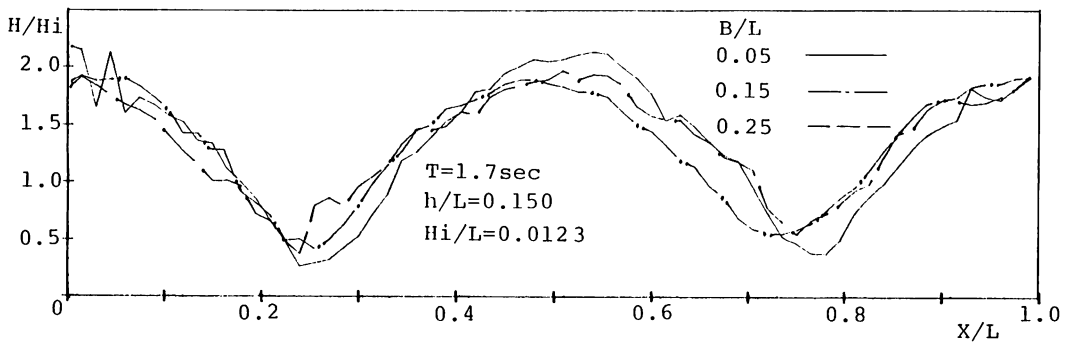


図-2 波高分布図

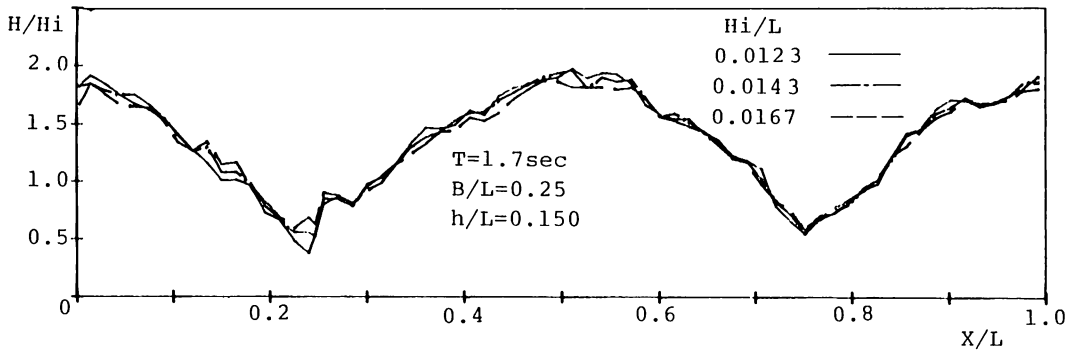


図-3 波高分布図

子速度は異なり、これらのことが反射率の実験における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-3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。各波高分布は入射波高を変化させても、 H/Hi はほ

ぼ同じ分布状態を示す。スリット壁前後の H/Hi の差は、入射波高が小さく、反射率の大きい波ほど大きいことが認められる。また、節の部分の波形は次節のスペクトル解析でも明らかに、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く出ている。

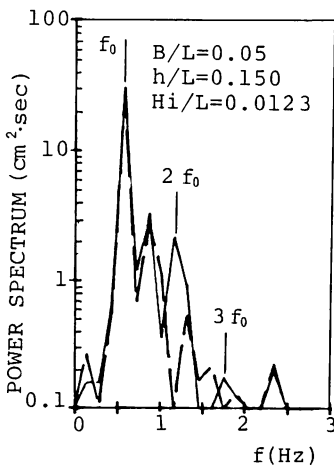


図-4

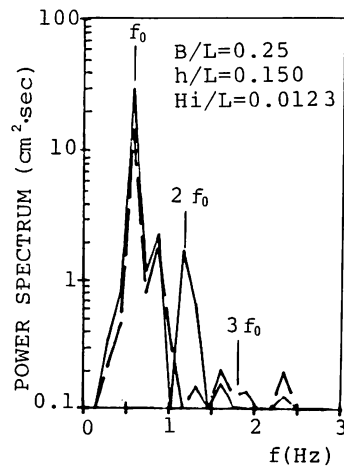


図-5

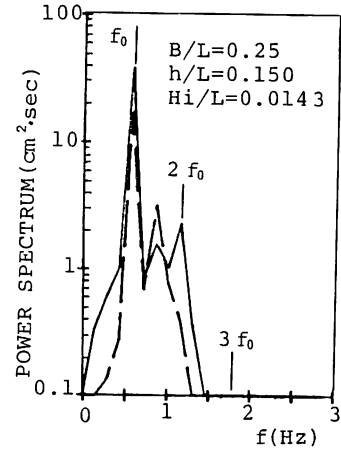


図-6

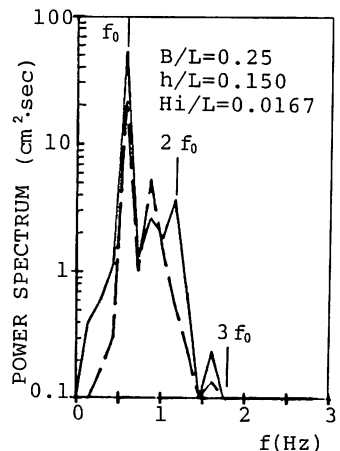


図-7

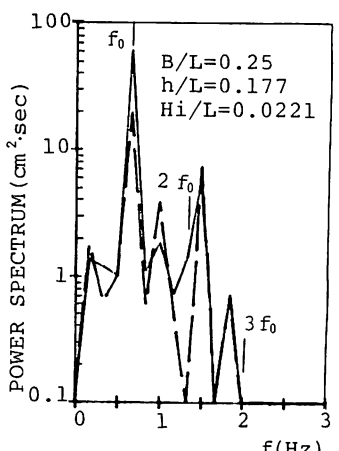


図-8

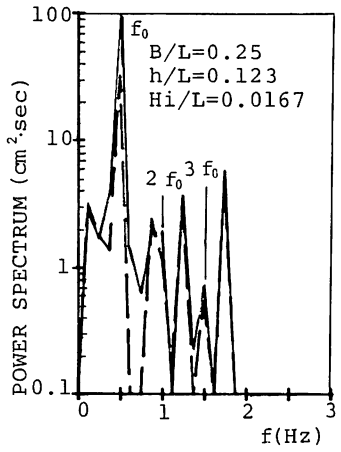


図-9

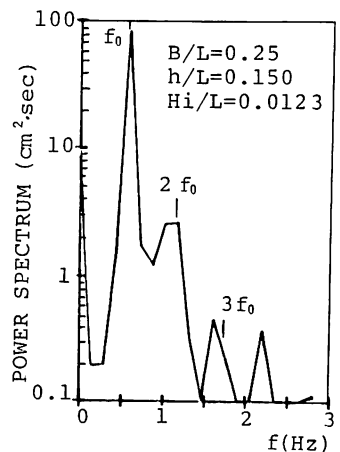


図-10

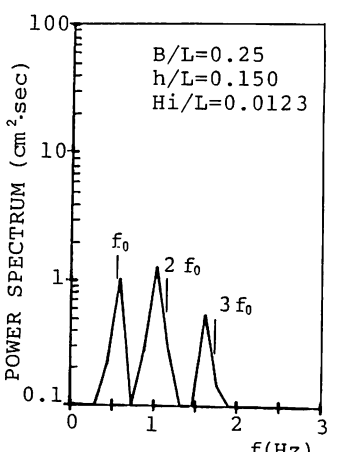


図-11

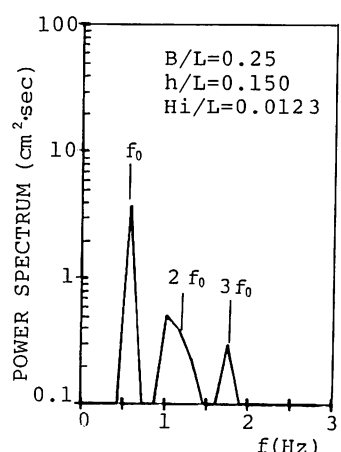


図-12

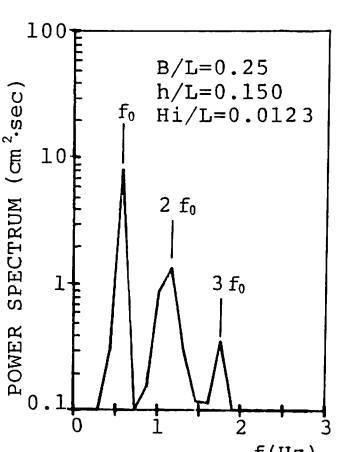


図-13

入射波: ———
反射波: - - -

4. 2 スペクトル解析

図-4～図-13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、明瞭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-4～図-9は、分離推定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-4～図-7は同一周期の波で、図-4、5は入射波高を一定にし遊水室幅を変化させ、図-5、6、7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 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、大きさに差はみられるものの、その形は図-4～図-7までほぼ同じ形を示している。これらの図より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、高調波成分波は周期によって影響されるが、入射波高の変化による影響は小さいように思われる。

図-4～図-7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-4、5においては入射波より反射波のパワースペクトルの方が小さいが、入射波高の大きな状態の図-6、7においては、 $2f_0$ 付近で入射波より反射波のパワースペクトルの方が大きい。これは、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波は入射波高が大きくなると顕著に表われるものと思われる。

図-7～図-9は、遊水室幅と波長の比 B/L を一定にし、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-8、9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、 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-8、9では反射波のパワースペクトルにおいて、 $3f_0$ 以上の高調波成分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。スリットケーソンの場合、波の透過あるいは反射の際に高調波の波が発生し、特に $3f_0$ から始まる奇数次の高調波が卓越する⁴⁾といわれているが、本実験においては偶数次の高調波も卓越している。

図-10～図-13は、遊水室幅および波浪条件を一定にし、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-4～図-9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瞭な線スペクトルが得られなかったためと考えられる。図-10～図-13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-10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-11と図-12を比較すると 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。

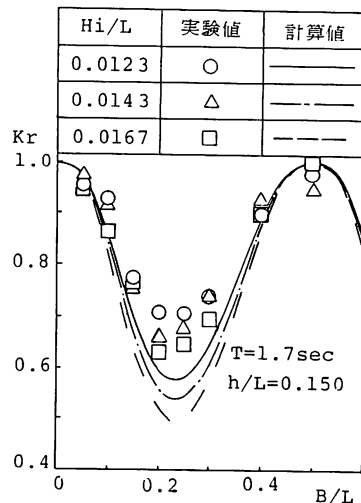


図-14 B/L による反射率

4. 3 反射率

図-14は、周期を一定にし遊水室幅 B を変化した時の各入射波高 H_i に対する反射率 K_r の実験値と計算値である。実験値は計算値よりも多少大きい傾向を示している。遊水室幅 B と波長 L の比 B/L が 0 および 0.5 ではスリット壁での水粒子速度が 0 となるため $K_r = 1$ となる。 K_r は $B/L = 0.2 \sim 0.25$ 付近で極小値を示し、波形勾配が大きくなるに従い極小をとる B/L は多少大きくなる。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となり、反射率は小さくなる。

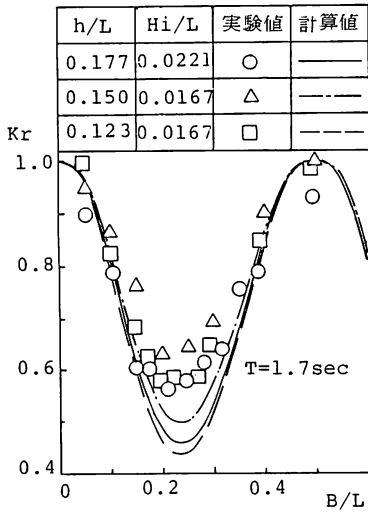


図-15 B/L による反射率

図-15は、各周期において遊水室幅 B を変化した時の反射率の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、入射波高を一定にし周期を変化させて計算を行ってもほとんど K_r の変化はみられなかった。このことより、反射率は周期によってあまり影響しないものと考えられる。

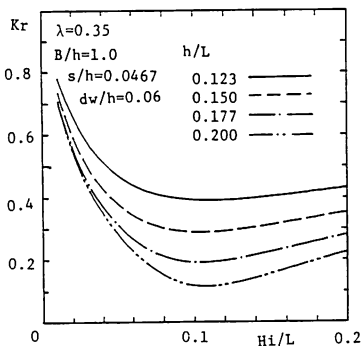


図-16 入射波高と反射率の関係

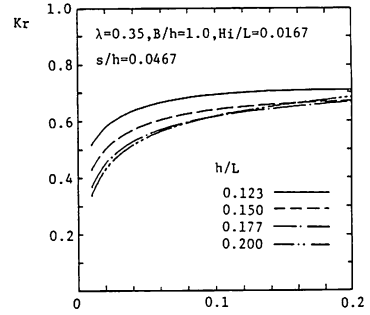


図-17 壁厚と反射率の関係

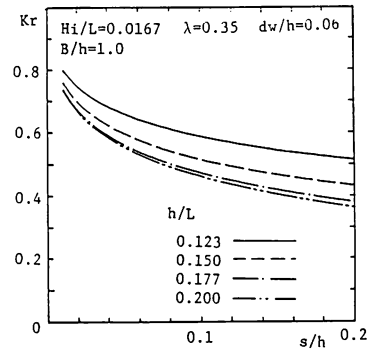


図-18 スリット幅と反射率の関係

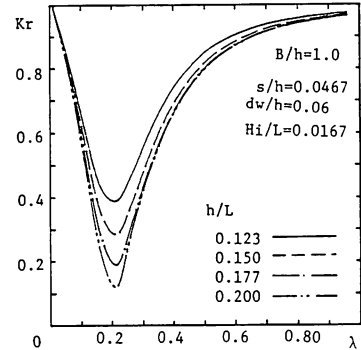


図-19 空隙率と反射率の関係

式(6)、(7)の係数を使用し反射率を計算し、入射波高を変化させると図-16に示されるように反射率は極小値をもつ。この傾向は短周期の波ほど顕著にあらわれる。これは一般に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のであるが、ある程度以上に波高が大きくなるとその抵抗が大きくなりすぎて、波高増大の割には遊水室へ流入しにくくなることによるものと思われる。スリット壁の厚さが大きくなると図-17に示すように反射率は大きくなりある値に漸近する。これは牛ら⁶⁾の実験結果と同じ傾向を示している。また、図-18に示すようにス

リット幅も反射率に影響し、スリット幅が大きくなると反射率は減少する。単一スリット壁の場合空隙率を大きくすると反射率は小さくなったが、³⁾一枚透水壁不透過堤の場合図-19に示すように0.2付近の空隙率において極小値をとる。これは谷本ら⁷⁾の計算結果ともよく一致し、一枚透水壁不透過堤の特徴であり、設計の際に最適空隙率をみつける目安となる。

5. あ と が き

以上の実験および計算結果より、波高分布では空隙率35%、壁厚30mm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と周期によって変化すると考えられる。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。

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0.5で $K_r=1.0$ に近づきその中間で極小値をとる。極小値をとる B/L はほぼ $B/L=0.2\sim0.25$ である。入射波高を大きくするとエネルギー損失が大きくなり反射率は減少するが、ある程度以上の入射波高になると逆に抵抗が大きくなり反射率は大きくなる。スリット壁の壁厚を小さく、スリット幅を大きくすることによって反射率を小さくすることが出来る。空隙率は0.20付近で反射率を最小にする。

一枚スリット壁不透過堤は、短周期の波で比較的波高の大きな波の消波に効果がある。設計する際には、遊水室幅は波長の1/4付近、空隙率を0.20付近にすると最も反射率を小さくすることができる。壁厚は波圧などの力学的条件によって制約を受けるが薄くすることによって、またスリット幅を大きくすることによってより消波効果

をあげることができる。

参 考 文 献

- 1) 近藤俊郎・竹田英章：消波構造物，森北出版，279 p.,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，運輸省港湾技術資料，No.248，pp.1～24，1976.
- 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II部，pp.339～340，1984.
- 6) 牛 恩宗・竹田英章・尾崎 晃：透過波の位相，反射率，波圧に及ぼすスリット部材の厚さの影響，土木学会北海道支部論文報告集，第39号，pp.95～100，1983.
- 7) 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，運輸省港湾技術研究所報告第21巻，第3号，pp.43～77，1982.

(昭和60年12月2日受理)

