

スリット壁と垂下版を組合せた反射波低減工の効果と その消波機構について

中村 孝幸* ・高羽 泰久**・佐藤 茂樹**
小野塚 孝***・田中 潔****

従来まで多用されている単一遊水室構造のスリット式低反射護岸は、消波対象波よりも比較的短周期の波に対する高反射性およびこれよりも比較的長周期の波に対する高反射性など、その反射波低減効果が特定の波周期帯に限定される傾向が強く、消波対象波の選定が問題になる。ここでは、スリット式低反射護岸の有効周期帯を拡大する目的から、下部透過型の垂下版を遊水室内に挿入する工法を新たに提案すると共に、その有効性を理論と実験により明らかにする。この際、各単独堤体の消波特性についても検討し、組合せ堤の消波機構やより効果的な組合せ方法などを考察した。

1. はじめに

従来、スリット式低反射護岸は、比較的波の穏やかな海域を中心に使用されてきている。しかしながら、単一の遊水室構造であることから、その反射波低減効果は特定の波周期帯に限定される傾向が強く、消波対象波の選定が問題になる。このような背景から、多重スリット壁構造など（大東ら, 1987；萩原, 1989）が提案されているが、構造が複雑になることや二つのスリット壁の開口率や二重遊水室の寸法の設定法などが十分に明らかにされていないなどのため、現地に適用された例は少ない。

本研究は、従来のスリット式低反射護岸において、消波対象波よりも比較的短周期の波に対する高反射性およびこれよりも比較的長周期の波に対する高反射性の改善を目的としており、具体的には下部透過型の垂下版を遊水室内に挿入することでスリット式低反射護岸の有効周期帯を有意に拡大することを目指す。垂下版式低反射工は、遊水室内のピストンモード波動運動を利用することで、版下端部に強い渦流れを生成し、結果的に反射波を低減するもので、比較的長周期の波に対して効果的であることが知られている（中村ら, 1999）。

ここで提案する新規構造体の消波機構は、やはり二重遊水室構造を利用するもので、短周期の波に対する反射波低減をスリット壁と背後の垂下版で構成される遊水室内での腹・節モードの波運動の作用により、また比較的長周期の波に対する反射波の低減を主に垂下版と背後直立壁との間のピストンモード波動運動の作用により実現する。ここでは、このような新構造体の反射波低減効果を明らかにすると共に効果的な断面設定法についても究明する。

2. 実験装置および実験方法

実験は、図-1 に示す 2 次元造波水槽を用いて実施し

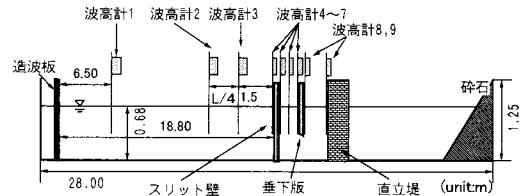


図-1 実験水槽及び模型堤体と波高計の設置状況

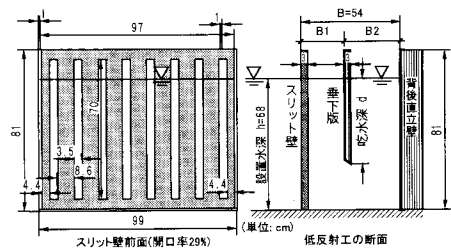


図-2 スリット壁と垂下版の組合せ堤（模型縮尺 1/12）

表-1 実験で使用した各種の堤体条件

CASE	堤体形式	B	B 1	B 2	d
1	単一スリット式	54 cm			
2	単一スリット式	25 cm			
3	単一垂下版式	54 cm			38 cm
4	単一垂下版式	25 cm			38 cm
5 (選)	組合せ堤	54 cm	29 cm	25 cm	38 cm
6	組合せ堤	54 cm	29 cm	25 cm	47 cm
7	組合せ堤	54 cm	29 cm	25 cm	28 cm
8 (最終)	組合せ堤	54 cm	29 cm	25 cm	22 cm
9	組合せ堤	54 cm	23 cm	31 cm	22 cm

た。波高測定は、図中に示すように計 9 本の容量式波高計を使用して、後述する模型堤体の内外の水面変動や入・反射波の分離推定法に基づき反射率が測定できるように配置した。

反射波低減工の模型は、大きく分類して、①スリット式低反射工、②垂下版式低反射工、③スリット壁と垂下版を組合せた低反射工の 3 種類である。図-2 は、上記③の模型の例を示す。このとき、スリット壁は、縦スリット式とし、従来の施工例などを参照して開口率 $\epsilon=29\%$ とした。想定した模型の縮尺は、1/12 程度である。

* 正 会 員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科
** 正 会 員 みらい建設工業(株) 土木技術部
*** 正 会 員 (株)三柱 営業部
**** 学生会員 愛媛大学大学院 理工学研究科

基本型となるスリット式低反射工並びに垂下版のみの単独堤体は、これらを組合せる前の反射波低減効果を知るために用いたもので、表-1に示す4種類(CASE 1~4)について実験を行った。表中の記号の定義は、図-1を参照されたい。

また、組合せ堤の諸元は、表-1中の5種類(CASE 5~9)に変化させてあり、これらは主に垂下版の吃水深 d の影響を検討するためのものである。なお、表中のCASE 5の諸元は、後述する理論的な検討により最も効果的と予測されたものに相当し、CASE 8は実験的な検討によるそれに相当する。

実験時の水深 h は 68 cm と一定にした。作用波は規則波のみで、その入射波高 H は、原則として 10 cm (碎波するとき 5 cm) とし、周期 T は 0.8~2.3 s の範囲で 16 種類程度に変化させた。

3. 理論算定法

上記した3種類の低反射工に対する波変形の算定には、統一して減衰波理論に基づく鉛直面内における2次元解析法(中村・井出, 1997)を用いた。減衰波理論は、鋭角部よりの流れの剝離や渦流れの発生によるエネルギー逸散を近似的に考慮する方法で、流速に比例する線形減衰を仮定した流体を想定している。この算定法では、構造体の断面を直接的に考慮して解析するため、波変形に及ぼす構造体の慣性効果の影響は厳密に考慮されており、流体抵抗による影響を近似的に表すために線形抵抗係数 f_e のみが必要とされる。また、解析では、渦流れの影響が卓越する減衰波領域とその小さな非減衰波領域との接合が考慮されている。ここでは従来の減衰波領域の設定を拡張して、図-3に示すように、構造体の最も沖側面より $L/8$ の位置から、直立堤の前面までの全領域を減衰波領域と定義した。

線形抵抗係数 f_e には、従来の成果(中村ら, 1999)を参照して $f_e=0.25\sim0.30$ の値を用いた。しかしながら、スリット式低反射工の f_e は十分に知られていないことや、算定では実験で用いた縦スリット式構造を横スリット式構造に近似する必要があることなどから、総合的に事前検討を行った。

図-4は、一例として、縦スリット式構造を横スリット式構造で近似するときの部材数の影響の検討に用いた断面を示す。開口率は、両断面共に模型の縦スリット壁と同じ値にしてある。後述するように、図-4に示す2つの断面では、反射率にほとんど差異が見られず、実験結果との対応も見られることから、縦スリット壁の代表壁幅を目安にして、開口率を一致させるように横スリット壁に近似してもよいことが確認された。なお、スリット壁のみで構成される低反射工のときには、 f_e の値が 0.25 程

度と多少低めの値に設定する必要があることも確認されており、ここに付記しておく。

4. 各低反射工による反射波の低減効果

(1) 単独堤体の結果

a) 反射率

図-5は、基本型となるスリット式低反射工(CASE 1)の反射率 C_r の波周期による変化を示すもので、周期に関する無次元量として波長・堤体幅比 L/B が用いてある。図中には、図-4で示した2つの異なる横スリット壁断面に対する算定結果も併せ示す。

このときの実験結果での極小反射率は、従来において報告されているように(例えば岩田, 1980)、ほぼ $L/B=5$ 付近に現れる。この特性は算定結果でも同様の傾向が見られるが、特に L/B の小さな短周期側で実験結果との一致度が十分でない。そして、部材数の異なる二つの算定結果を比較すると、両者の間にはほとんど差異は見られない。このことから、以下では図-4の左段に示す5部材の水平スリット構造による近似算定を行った。

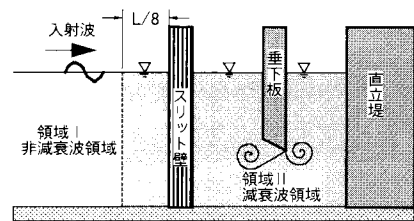


図-3 算定モデルでの減衰波領域

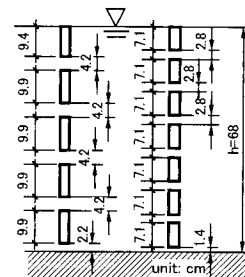


図-4 横スリット壁の入力断面 (開口率 29%)

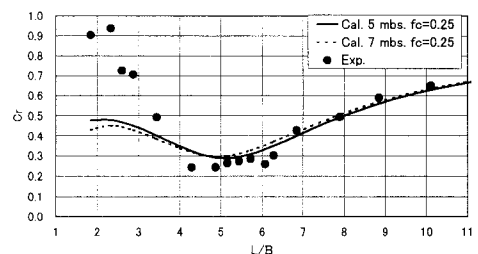


図-5 スリット式低反射工の反射率 ($B=54$ cm, 開口率 29%)

短周期側において C_r の算定値が実験値よりも小さく現れる理由としては、短周期側で鉛直流体運動が卓越しやすく、実験では構造的に鉛直流速に起因する逸散がほとんどないのに対して、算定では水平・鉛直流速に関係なく逸散が現れるように仮定していることによると考えられる。事実、短周期側で反射率の実験結果が極大となる条件は $L/B=2$ 付近であり、後述するように、スリット壁上に腹節モードの重複波の腹が形成される条件にほぼ一致している。

図-6 は、堤体幅 B を同じにして、壁構造を垂下版に変更したときの反射率の結果を図-5 と同様にして示す。図中には比較のため、同堤体幅のスリット式低反射工の結果も併せ示す。この図から、垂下版式低反射工では、極小反射率の現れる L/B が 8 程度になるなど、より長周期の波に対する反射波の低減効果が向上することが分かる。ただし、短周期側では反射率は逆に高くなることも認められる。より長周期の条件下において、垂下版式低反射工の反射率が低下するのは、遊水室内のピストンモード波動運動を駆動力とする逸散機構が作用するためである。

図-7 は、図-6 の場合に比較して、堤体幅 B をほぼ半減したときの結果を同様にして示す。このとき、極小反射率の現れる L/B の条件は、二形式の堤体でさらに差が大きくなる傾向にある。

b) 遊水室内の波面モード

図-8, 9 は、 $B=54$ cm のときのそれぞれスリット式および垂下版式低反射工の遊水室内外の波高分布を示す。

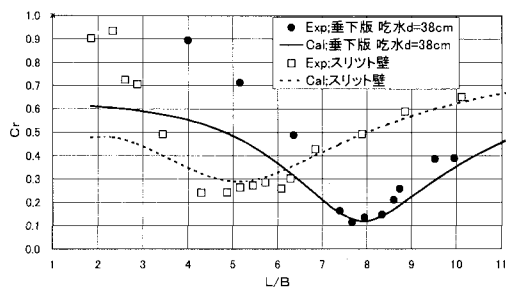


図-6 垂下版式低反射工の反射率：スリット式との比較 ($B=54$ cm)

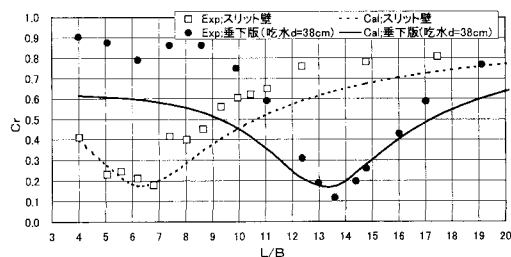


図-7 反射率の比較：スリット壁と垂下版 ($B=25$ cm)

各図に示す二つの周期条件は、反射率が高いとき、低いときの代表例に相当する。

図-8 より、スリット式低反射工では、スリット壁上に節が形成される波面モードになると反射率は低下するなど、反射率の増減が遊水室内に形成される波面モードと密接に関係していることが分かる。一方、垂下版式低反射工の結果を示す図-9 では、波面モードがほぼピストンモードであり、その増幅度が比較的大きい長周期側で反射率が低下することが分かる。そして、垂下版式低反射工の場合、反射波の低減に関係する遊水室内のピストンモードの波浪共振は波長と遊水室幅の関係のみならず垂下版の吃水深にも依存することが知られている（中村ら、1999）。このため、遊水室幅が狭くなると、図-7 の例のように二つの形式の低反射工で反射波低減特性に大きな差異が見られるようになったものといえよう。

以上のような検討から、図-5 に示すスリット式低反射工の反射波低減効果を改良する方策としては、その遊水室内に垂下版を挿入する工法が考えられる。これは、① L/B の小さな比較的短周期の波に対して、垂下版が仮の直立壁の役割を果たし、スリット壁上に腹節モードの重複波の節が形成されやすくなり、反射率が低下すること、② L/B の大きな長周期側の波に対して、スリット壁

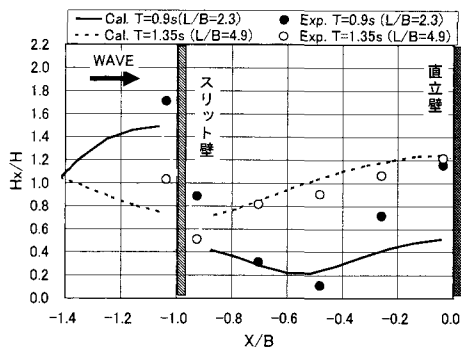


図-8 スリット式低反射工の遊水室内外の波高分布 ($B=54$ cm)

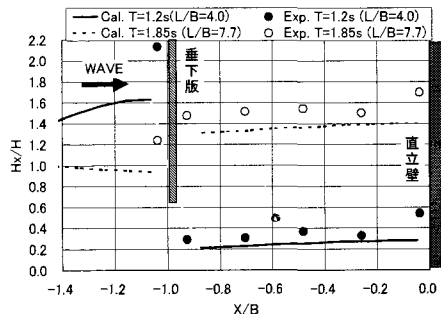


図-9 垂下版式低反射工の遊水室内外の波高分布 ($B=54$ cm)

と垂下版の両者が相乗的に作用しやすく、長周期波に対する反射波低減効果の向上が期待できることなどである。そして、このような改善効果は、遊水室幅を半減した図-7の結果からもある程度は推測できる。

(2) 組合せ堤の結果

a) 反射率

図-10, 11 は、図-2 に示す組合せ堤の反射率の結果を示すもので、表-1 の CASE 5~8 の結果に対応する。このとき垂下版は、基本型であるスリット式低反射工のほぼ真中に挿入してあり、主にその吃水深 d の影響を検討したものである。図中には、垂下版式低反射工のときの算定に合わせて線形減衰係数 $f_c=0.3$ を採用した算定結果についても示す。

垂下版の吃水深 d が比較的深い場合に相当する図-10 では、 L/B の小さな短周期側とそれの大きな長周期側の2箇所に極小反射率が現れるようになる。しかしながら、それらのほぼ中間付近の周期条件では、著しい反射率の増加が見られる。そして、図-5 に示す基本型のスリット式低反射工の結果と比較すると、ちょうど極小反射率となる条件下において、垂下版を挿入することで逆に極大反射率になるなど、副作用的な効果が現れるようになることが分かる。ただし、算定では、このような著しい反射率の増加は予測できず、実験結果との定量的な差異が大きい。

一方、垂下版の吃水深 d が比較的浅い図-11 では、二つの極小反射率に挟まれる中間的な周期条件下において、反射率の増加はそれほど顕著でない。ただし、 L/B の大きな長周期側での極小反射率は、図-10 の場合に比較すると短周期側に移行することやその絶対値がさらに低下するなどの傾向が認められる。

垂下版の吃水深 d が深いとき、上記したような中間的な周期条件下で反射率が急増する理由は、垂下版を仮の直立壁とする堤体前半のスリット式低反射工の反射率が増加することによるものと考えられる。そして、この吃水深を浅くすると、堤体後半の垂下版式低反射工が比較的短周期の条件下でも作用するようになり、反射率が低下するものと解釈される。

以上の検討から、組合せ堤では、挿入する垂下版の吃水深の影響を十分に吟味して選定する必要があることや、本研究で検討した範囲内では、表-1 中の CASE 8 に示す諸元が、原型のスリット式低反射工を改良するという目的からは最良と判断される。

b) 組合せ堤の諸元の設定法

ここでは、スリット式低反射工が対象波に対して最も効果的であるように設定されていることを前提として、その有効周期帯を拡大するなどの改良を目的として、組合せ堤に変更するときの各諸元の設定法を考察してみ

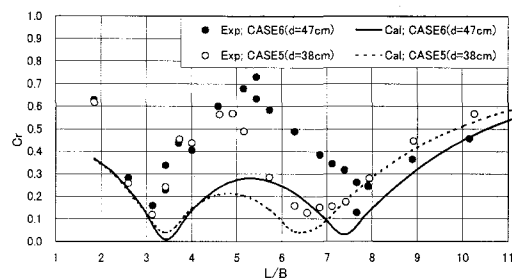


図-10 組合せ堤の反射率：垂下版吃水深の深い場合 ($B=54$ cm, $B_1=29$ cm, $B_2=25$ cm)

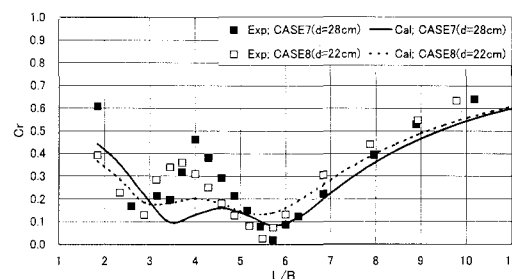


図-11 組合せ堤の反射率：垂下版吃水深の浅い場合 ($B=54$ cm, $B_1=29$ cm, $B_2=25$ cm)

る。

まず前提条件から、消波対象波の波長 L_d は、図-5 に示すように、 $L_d \approx 5B$ の関係にある。このとき、やはり図-5 から分かるように、原型堤体では波長 $L_H = 2.5B$ 程度の波に対する低減効果がほとんど期待できない。そして、波長 L_H の波の反射波を低減するため、図-2 に示す諸元において $B_1 \approx L_H/5 \approx 0.5B$ の関係が得られる。従って、 $B_2 \approx B - B_1 = 0.5B$ となる。

次に垂下版の吃水深 d を設定する。堤体後半の垂下版式低反射工では、極小反射率の出現条件がほぼ次式により推定できることが知られている (中村ら, 1999)。

$$\sqrt{B'd} = L_{\min}/10 \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 B' : 遊水室の内縁幅, $L_{\min}$: 垂下版式低反射工で極小反射率が現れる波長。

今、 $B' \approx B_2$ と近似して、極小反射率の波長条件として、最低限要求される $L_{\min} = L_d$ を用いると、式 (1) の関係を介して最終的に $d = B/2$ の関係が導ける。

この設定法を図-10, 11 の結果に適用してみると、 $B_1 = B_2 = 27$ cm, $d = 27$ cm となり、最良と考えられる CASE 8, それに近い CASE 7 の諸元にほぼ一致している。なお、上記の設定では、垂下版単独の吃水深 d に伴う反射・透過特性の変化については考慮されておらず、吃水深 d を深く設定しすぎると図-10 のような結果になる場合もあり、注意を要する。

5. 現地を想定した検討

図-12は、現地を想定した組合せ堤の例を示す。垂下版を取り外した断面が基本断面に相当する。実験は、現地量を縮尺1/5で模型化したものに対して実施した。実験では、上記の4.の検討と同様に、垂下版を取り除いた基本型のスリット式低反射工と組合せ堤の2種類の堤体について反射率および波高分布などを測定した。

この検討では、上記した断面諸元の設定法によるものとは多少異なる断面にしてある。これは、現地スリット式低反射工において、反射波の低減効果を改善したい波周期(波長)が断面設定法の前提と異なることによる。

図-13は、このときの反射率の結果を現地換算周期による変化で示す。図中には、減衰波理論による算定結果についても併せ示す。

この図から、基本型のスリット式低反射工に垂下版を付設することにより、反射波の低減効果は広い周期帯にわたり改善されることが明白である。特に現地で課題になっていた、短周期側での反射波の低減という目標は十分に達成できることが分かる。また、このときの組合せ堤の特徴としては、本来のスリット式低反射工の効果も維持すると同時に短周期側のみならず長周期側においても反射波の低減効果が改善されることにある。

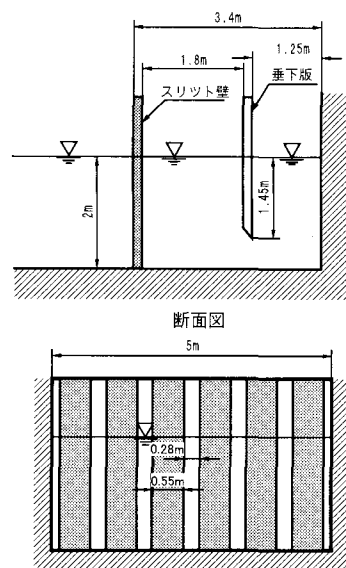
6. 結 語

(1) 組合せ堤による反射波低減効果は、短周期側では主にスリット壁に関係する低減機構が、長周期側では主に垂下版に関係する低減機構が作用するため、スリット式低反射工単独のときに比較して、広い周期帯で反射波が低減できる。ただし、垂下版の吃水深を深くしすぎると、一部の周期帯で逆に反射率が増加する場合も見られ、吃水深の設定に当り注意が必要である。

(2) 組合せ堤の断面設定では、まず原型のスリット式低反射工の遊水室をほぼ二分する位置に垂下版を設け、その吃水深を堤体幅の1/2程度に設定すると、有効周期帯の拡大や反射波の低減に効果的である。

(3) 減衰波理論に基づく波変形の算定法は、構造形式に関係なく、定性的な予測はある程度可能であるが、定量的な一緻性が不十分な場合も見られ、今後さらに検討すべき余地がある。

最後に本研究を実施するに当り、現地の課題や各種の諸条件を提供していただいた、国土交通省関東地方整備局横浜技術調査事務所の諸氏に深甚なる謝意を表する。



断面図 (スリット壁開口率33%)

図-12 組合せ堤の現地想定量

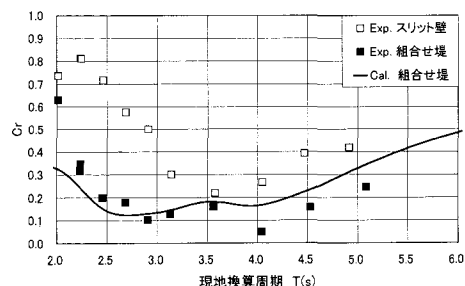


図-13 現地を想定した組合せ堤の反射率 ($H=0.5\text{ m}$)

参 考 文 献

- 岩田好一朗 (1980): 消波構造物による波の反射と透過, 水工学に関する夏季研修会講義集, pp. B 6-1~B 6-18.
- 大東秀光・角野昇八・小田一紀・芳田利春・村本哲二 (1987): 二重壁式縦スリット直立消波工の消波機能に与える構造形式の影響, 第42回土木学会年講概要集, pp. 558-559.
- 中村孝幸・井手善彦 (1997): 波の逸散現象を利用した隅角物体まわりの波変形と作用波力の算定法, 海洋開発論文集, 第13巻, pp. 177-182.
- 中村孝幸・神野充輝・西川嘉明・小野塚孝 (1999): 渦流れの増大現象を利用した垂下版式の反射波低減工について, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 797-800.
- 荻原運弘 (1989): 多重スリット型構造物による波浪の制御効果と作用波力の特性に関する研究, 大阪大学学位論文, 153 p.