

渦流れの増大現象を利用した垂下板式の反射波低減工について

中村孝幸*・神野充輝**・西川嘉明***・小野塚 孝***

1. はじめに

直立式の反射波低減工としては、スリット壁を前面壁とするスリット式ケーソンや前面有孔型のブロックを積み上げる直立式ブロック消波護岸などが著名である(例えば岩田, 1980)。このような低減工により効果的に反射波を低減するためには、前面壁と背後の不透過壁との間の遊水室幅として、波長の約 1/4 程度の長さが必要になることが知られており(岩田, 1980; 谷本・吉本, 1982)、長波長の波を対象とするときには大断面になりやすいなどの欠点がある。また、前面壁には、スリット孔、円孔、突起があるなど、港湾域にはあまり適していない前面壁構造と考えられる。

本研究では、図-1 に示すように、直立堤の前面に、水面近傍のみを遮蔽した垂下板を設置するという非常に簡単な工夫により、反射波を低減する工法を提案する。これは、背後不透過壁と垂下板で一部遮蔽された遊水室内でのピストンモードの波浪共振を利用して、板下端部での渦流れの増大現象を引き起こし、反射波エネルギーを効果的に逸散させようとするものである。特に、この消波工の利点としては、遊水室内でのピストンモードの波浪共振を利用するため、従来のスリット式ケーソンなどに比較すると、必要な遊水室幅をほぼ半減できることや、船の接岸にも容易な前面壁構造であることなどが指摘できる。

2. 実験装置及び実験方法

(1) 実験水槽

実験は、愛媛大学工学部環境建設工学科の長さ 25 m、幅 1 m、高さ 1.25 m の 2 次元水槽を用いて行った。この水槽の一端には、反射波吸収方式のピストン型造波装置が設置されている。そして、後述する模型堤体は、この水槽内の他端部より約 5 m の位置に設けた。

(2) 模型堤体

まず最初に、図-1 に示すような単一垂下板で構成さ

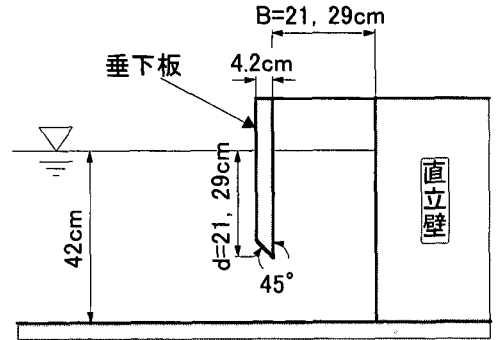


図-1 単一垂下式の反射波低減工の模型

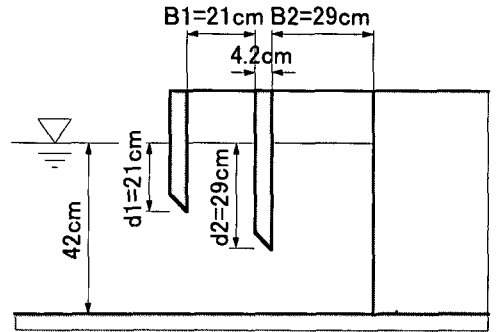


図-2 二重式構造の模型

れる低減工を対象にして、反射波の低減効果に及ぼす遊水室幅 B および垂下板の吃水深 d の影響を検討した。このため、遊水室幅は $B=21$ cm, 29 cm の 2 種類、前面垂下板の吃水深は $d=21$ cm, 29 cm の 2 種類に変化させ、計 3 種類の異なる構造条件を用いた。このとき、前面垂下板は現地では 0.5 m の RC 版を想定して、肉厚 4.2 cm のベニヤ板で製作し、上部よりの片持ち梁構造で支持した。板下端部の形状は、矩形状と剝離流れが生じやすいと考えられる楔状 (45 度鋭角) の 2 種類を用いたが、以下ではより効果的であることが確認された楔状下端部に対する結果について紹介する。また、背後の直立不透過壁には厚さ約 15 cm のコンクリート板を用いた。

次に、反射波の低減に有効な周期帯を拡大する目的から、図-2 に示すような垂下板を二枚にした二重の遊水

* 正会員 工博 愛媛大学工学部 環境建設工学科
** 学生会員 愛媛大学大学院理工学研究科
*** 正会員 (株)三柱 技術・開発チーム

室をもつ低減工も用いた。このとき、前後の遊水室幅及び垂下板の吃水深の組み合わせは、図中に見られるように相違なるものに設定しており、前後の遊水室と吃水深をそれぞれ単独に有する単一垂下板の場合の結果との比較が行えるようにした。なお、ここで想定した模型の縮尺は、現地の約1/12程度である。

(3) 波高測定および実験条件

入射波および反射波は、入・反射波の分離推定法を介して推定できるように、模型堤体の沖側に設けた計3台の容量式波高計で水面変動を測定した。また、遊水室内の水位変動についても、計3~4台の容量式波高計で測定した。

実験で用いた水深 h は 42 cm と一定にし、堤体模型に作用せしめた入射波は、入射波高 H が 6 cm, 12 cm の 2 種類、周期 T は 0.85~2.30 s の範囲内で複数の条件を採用した。

3. 理論算定法の概要

本研究では、中村・井出 (1997) による、隅角部からの渦流れの発生に起因するエネルギー逸散を近似的に考慮する減衰波理論による算定を行った。ここでは、渦流れの影響が顕著と考えられる垂下板前面海域と遊水室内水域を減衰波領域とし、それよりも沖合い側を非減衰波領域とした。減衰波領域の沖合方向への広がり、垂下板から沖側へ 1/8 波長までの範囲を、鉛直方向には、水表面から水底までとした。

この減衰波領域では、流速に比例する抵抗が作用する仮想的な流体が想定されており、その運動方程式は、次式で表される。

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \nabla(p + \rho g z) - f_c \omega \vec{v} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 \vec{v} : 流速ベクトル、 p : 圧力、 ρ : 流体密度、 g : 重力加速度、 f_c : 線形抵抗係数、 ω : 角振動数 ($=2\pi/T$, T : 周期) である。実際の算定で、線形抵抗係数 f_c については、中村・井手 (1997)、中村ら (1998) の研究でカーテン防波堤に対して用いられている $f_c=0.15$ が適用できるものとした。

4. 単一垂下板式の反射波低減工の効果

(1) 反射波の低減効果

a) 遊水室幅 B の影響 : ここでは、図-1 において垂下板の吃水深 d を 21 cm に固定し、遊水室幅 B を 21 cm, 29 cm と変化させたときの反射波の特性について検討した。図-3, 4 は、これら遊水室幅のときの反射率 C_r の実験結果および算定結果を吃水深・波長比 d/L (L : 波長) による変化で示す。

これらの図の比較から、反射率 C_r の実験結果は、入射

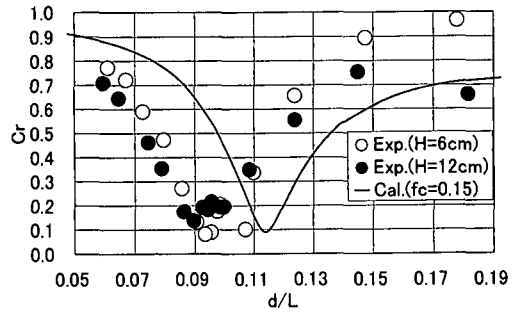


図-3 単一垂下式ののときの反射率 C_r ($B=21$ cm, $d=21$ cm)

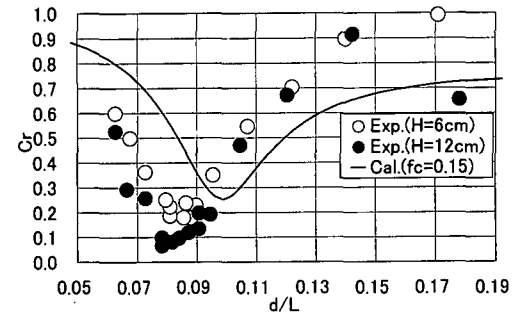


図-4 単一垂下式ののときの反射率 C_r ($B=29$ cm, $d=21$ cm)

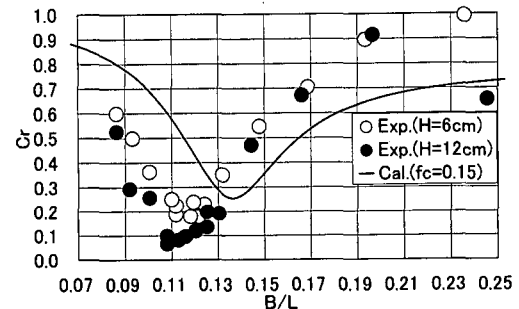


図-5 単一垂下式ののときの反射率 C_r ($B=29$ cm, $d=21$ cm)

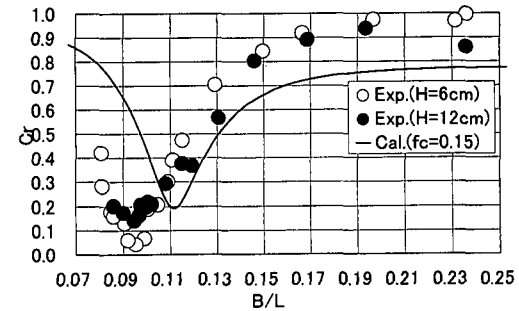


図-6 単一垂下式ののときの反射率 C_r ($B=29$ cm, $d=29$ cm)

波高 H の大小に関係なく、特定の d/L の条件下で $C_r=0.1\sim 0.2$ 程度と一旦低下することや、その d/L の条件は、遊水室幅 B が広がると、長周期側に移行することが確認できる。同様の傾向は、算定結果においても認められるが、 C_r が極小となる d/L の条件は、実験結果よりも多少ながら短周期側に現れるなどの差異が認められる。本研究では、各種の f_c の値を採用するなどの検討も行っているが、 f_c の大小は主に C_r の絶対値に影響し、 C_r が極小となる周期条件にはほとんど影響しないことを確認している。このため、上記したような差異の原因としては、明確ではないが、減衰波理論において剥離渦に作用する抗力のみならず、付加質量力の効果など付加的な慣性力の影響も考慮する必要があることを示唆するものといえる。このような剥離渦に作用する付加質量力の効果については、今後の検討課題としたい。

b) 垂下板の吃水深 d の影響：次に、図-5, 6は、遊水室幅 B を29 cmに固定し、垂下板の吃水深 d をそれぞれ21 cm, 29 cmと変化させたときの反射率 C_r の実験結果および算定結果を示す。これらの図の比較から、吃水深 d が深くなると、 C_r が一旦極小となる B/L の条件は、それが小さな長周期側へ移行することが実験的にも理論的にも確認できる。ただし、 C_r が一旦極小となる B/L の条件は、やはり算定結果の方が多少短周期側に現れるなどの差異が認められる。

このような検討より、直立堤の前面に垂下板を設けると、効果的に反射波が低減できることや、遊水室幅 B および垂下板の吃水深 d を増大させると、反射率が極小値を示す周期条件は長周期側へ移行すること及び必要な遊水室幅としては従来のスリット式低減工に比較するとほぼ半減できることなどが判明した。

(2) 反射波の低減機構

ここでは、代表例として遊水室幅 $B=29$ cm, 吃水深 $d=21$ cmの低減工に着目して、反射波の低減機構について検討してみる。

本研究で採用した垂下板式の反射波低減工では、反射波の低減機構として、垂下板下端部で形成される渦流れの影響が重要と考えられる。このため、垂下板下端部での流況をトレーサー法により可視化して観測した。

この観測結果の代表例を写真-1に示す。この写真は、図-5で反射率が極小となる条件下($B/L\approx 0.12$)での順流時、逆流時における渦最大発達時の流況を一組にして示す。写真に見られるように、垂下板の反射側及び遊水室側ともに明確な渦が形成されており、反射波の低減がこのような大規模な渦流れの発生によることが分かる。そして、写真-1の条件よりも短周期側では、垂下板の反射側のみに明確な渦が形成されることや、より長周期の条件では逆に遊水室側のみに明確な渦が形成されるよう

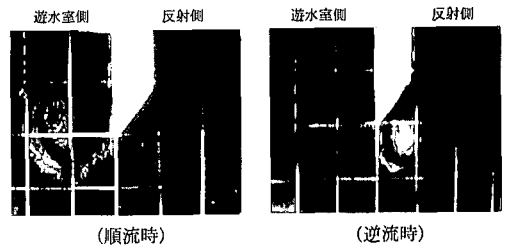


写真-1 垂下板の下端部での渦流れ($B/L=0.12$, $H=6$ cm)

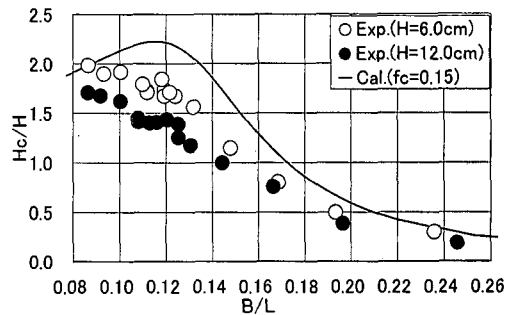


図-7 遊水室内平均波高の周期による変化

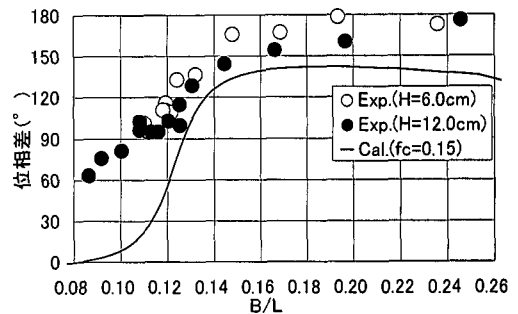


図-8 垂下板前後面での水面変動の位相差

になることなどを確認している。

次に、このような渦流れが形成される理由について考察してみる。図-7は、遊水室内の空間的な平均波高 H_c の B/L による変化を示す。図中では、入射波高との比について、実験結果および算定結果の両者についてプロットしてある。なお、遊水室内の波面モードは、本実験における周期条件の範囲内では、遊水室幅 B が波長 L より比較的短い条件であり、ほぼ平坦なピストンモードになっていたことを確認している。

この図より、 B/L が小さな長周期の条件になるほど、遊水室内の無次元波高は増大することや、反射率が極小となる $B/L\approx 0.12$ 付近では極大ではないものの比較的大きな値になることなどが分かる。

図-8は、垂下板前後面での水面変動の位相差 δ (前面

水位を基準)の B/L による変化を示す。この図より、長周期の条件になるにつれ、位相差 δ は減少することや反射率が極小となる条件下で位相差はほぼ 90° 程度であることなどが確認できる。このことより、垂下板前後面での水面変動の位相差も、渦流れの増大現象に寄与していることが推測できる。これは直接的には、位相差が生じると、板下端部を通過する流速が増大することによると考えられる。

以上の検討より、垂下板による反射波の低減は、遊水室内の波高増大のみならず垂下板前後での水位変動の位相差に関する渦流れの増大現象によると考えられる。

(3) 遊水室幅と吃水深の設定法

実際設計において、消波対象波が与えられたとき、各種の遊水室幅 B と垂下板の吃水深 d の組み合わせが可能となり、これらの影響を一括して検討できるパラメータが望ましい。本研究では、各種の B と d の値を採用した理論的な検討に基づき、有用なパラメータが見い出せたので、それについて紹介する。

図-9 は、周期に関連する無次元量として、断面特性長と波長の比 ℓ_A/L を採用したときの結果を示す。ここに、断面特性長 ℓ_A は次式の定義による。

$$\ell_A = \sqrt{B \cdot d} \dots\dots\dots (2)$$

図中には、各種の B および d を採用したときの $C_r - \ell_A/L$ の関係の実験結果および算定結果を一括して示す。この図より、 C_r は、 B や d に関係なく、特定の ℓ_A/L の値で一旦低下することが分かる。この傾向は実験、算定結果の両者で認められるが、やはり算定結果の方が短周期側にずれるなどの差異がある。そして、実験結果で、 C_r が極小となる ℓ_A/L の値は 0.1 程度であり、設計ではこれを目標として B や d を設定すればよいことになる。

5. 二重式構造による有効周期帯の拡大

上記までの検討で、垂下板一枚のみの反射波低減工では、反射率が遊水室幅と垂下板の吃水深に関する固有な周期帯で極小となることがわかった。そこで、反射波低減の有効周期帯を拡大する目的から、図-2 に示すような直立堤前面に 2 枚の異なる吃水深の垂下板を異なる遊水室幅で設置する二重式構造の低減工を採用してみた。

図-10 は、このときの C_r の実験結果および算定結果の代表例を示す。図中では周期に関するパラメータとして、 $(B_1+B_2)/L$ が用いてある。ここに、 B_1, B_2 はそれぞれ前後の遊水室幅である。また、図中の d_1, d_2 は前後垂下板の吃水深である。

この図から、 C_r の実験値は、 $(B_1+B_2)/L=0.13, 0.24$ 付近の 2 箇所極小値を示し、0.18 付近でも多少低下す

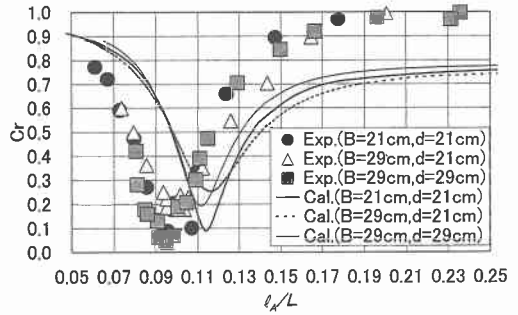


図-9 新しいパラメータ ℓ_A/L による反射率 C_r の変化 ($H=6$ cm)

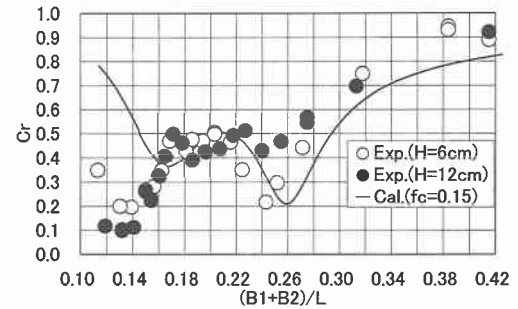


図-10 二重式構造のときの反射率 C_r ($B_1=d_1=21$ cm, $B_2=d_2=29$ cm)

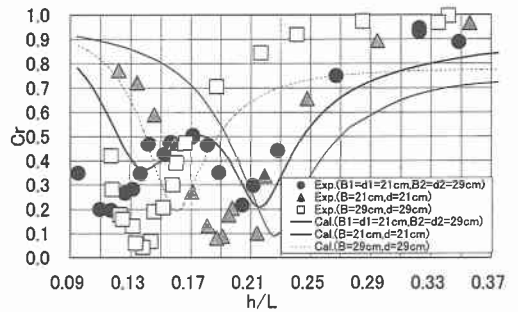


図-11 反射率 C_r の比較 ($H=6$ cm)

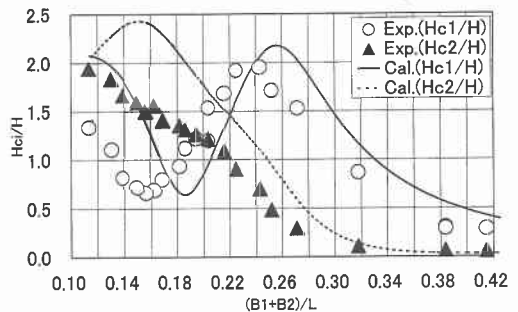


図-12 遊水室内平均波高の周期による変化 ($H=6$ cm)

る傾向が認められる。そして、 C_r が0.5以下となる条件は、 $0.1 < (B_1 + B_2)/L < 0.26$ とかなり拡大しており、二重式構造にすることの有用性が認められる。

図-11は、二重式構造の低減工とそれを構成する個々の単一垂下板式の低減工に分解したときの反射率に関する比較を示す。横軸には、共通した比較が行えるように周期に関する無次元量として水深・波長比 h/L が採用してある。

この図から、二重式構造の C_r は、遊水室幅および吃水深が異なる2つの単一垂下板式の低減工による線形和的な効果に類似しているが、より長周期の波に対して反射率が極小値を示すなど相乗的な効果も認められる。これは、垂下板前後面での水面変動の位相差や遊水室内での波高の増幅度が二重式構造と単一構造とでは異なるなどの影響によると考えられる。

図-12は、二重式構造の各遊水室内における空間的な平均波高 H_{ci} ($i=1, 2$)の $(B_1 + B_2)/L$ による変化を示す。図中では入射波高との比で表してあり、下添字1が前面の遊水室、2が後面の遊水室の結果に対応する。

この図より、周期が順次長くなると、まず規模の小さい前面の遊水室内での波高 H_{c1} が増大し、その後、規模の大きい後面の遊水室内の波高 H_{c2} が増大することがわかる。そして、前面遊水室の波高 H_{c1} は、後面遊水室の波高 H_{c2} がピークを示す付近でも再度増加しており、前後の遊水室内で共通して波高増大が生じることが推測できる。この後者の波高増大は、前述した相乗的な効果に相当すると考えられる。

反射率との関係に着目すると、各遊水室内の波高がある程度大きくなると反射率が低下するなど、遊水室内の波高増大が反射率の低減とある程度関係することがわかる。そして、より詳細には、単一遊水室の場合と同様に、垂下板前後面における水面変動の位相差についても考慮する必要があるが、これについては割愛したい。

図中に示す算定結果と実験結果を比較すると、 $(B_1 + B_2)/L$ の小さな長周期側で差異が大きく、4.で述べた

ような渦流れの付加慣性の影響によると考えられる。これについては、今後の検討課題としたい。

6. 結 語

(1) 直立堤の前面に垂下板を設けると、反射率が0.1~0.2程度と効果的に反射波が低減できる。これは、直立堤と垂下板で一部遮蔽された遊水室内におけるピストンモードの波浪共振の発生により、板下端部での渦流れが増大することによる。このとき反射波の低減には、遊水室内の波浪増幅度のみならず、垂下板前後面における水位変動の位相差も重要になる。

(2) 垂下板一枚による単一遊水室の反射波低減工では、吃水深及び遊水室幅を増大させると、反射率が極小となる波周期は長周期側に移行する。ただし、このとき必要な遊水室幅は約1/10程度であり、従来のスリット式の反射波低減工に比較するとほぼ半減できる。

(3) 垂下板一枚の低減工において、反射波が最も効果的に低減できるのは、垂下板吃水深と遊水室幅の積の平方根が作用波の波長の1割弱になるときである。

(4) 垂下板を二枚に増やして二重式構造にすると、ほぼ各々の遊水室幅と垂下板の吃水深の条件に固有な波周期の条件下で、反射率は極小となり、反射波の低減に有効な周期帯を有意に拡大できる。

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, 1980年度水工学に関する夏期研修会講義集, pp. B 6-1~B 6-18.
 谷本勝利・吉本靖俊 (1982): スリットケーソンの反射率に及ぼす諸要因の影響, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 389-393.
 中村孝幸・井手善彦 (1997): 波の逸散現象を考慮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・中村文彦・川部正司・井上温人・森本 暁・後藤大介 (1998): 重力式カーテン防波堤による波変形と作用波力におよぼす上・下部工の影響について, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 781-785.