

垂下版式低反射工の遊水室内における波浪共振 の特性と支配パラメータについて

PISTON MODE WAVE RESONANCE IN THE WATER CHAMBER OF A VERTICAL-BARRIER-TYPE REFLECTION DISSIPATER AND ITS GOVERNING PARAMETERS

中村孝幸¹・小野塚孝²・加藤孝輔²・神野充輝²

Takayuki NAKAMUR, Takashi ONODUKA, Kousuke KATO and Mitsuteru JINNO

¹正会員 工博 愛媛大学工学部環境建設工学科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)

²正会員 工修 (株)三柱 (〒135-0034 東京都江東区永代1-13-5)

Wave reflection characteristic by a curtain-walled dissipater is examined extensively. Especially, focusing on the resonance phenomena of piston mode wave motions in the water chamber between a rear vertical wall and a front curtain wall, hydrodynamic properties, such as an added mass, are examined theoretically. Using various dimensions of the dissipater, the governing parameters of the added mass are examined precisely. By taking account of the resonance condition of the piston mode motion, a new parameter governing wave reflection characteristics is deduced theoretically. It was confirmed that the new parameter is useful to determine an effective cross section of the dissipater, such as a draft of the front curtain wall and a width of a water chamber for given wave conditions.

Key Words : *Piston mode wave resonance, vertical barrier type dissipater, low reflection, governing parameter*

1. まえがき

既に著者¹⁾は、反射波災害の防止や港湾域の静穏化を目的として、直立護岸や直立堤などの不透過壁の前面に適切な間隔(遊水室)を設けて垂下版を設置した構造を有する垂下版式の反射波低減工を提案した。この低減工は、垂下版と不透過壁で構成される簡単な構造であるにもかかわらず、従来のスリット壁式や多孔壁式の反射波低減工に比較して遊水室幅を半減できるなど、比較的長周期の反射波の低減に有効であることなどが判明している。その反射波低減機構は、垂下版で一部遮蔽された遊水室内ではピストンモードの波動運動が生起することおよびそれに伴い垂下版下部に強い渦流れが生成され、結果的に反射波のエネルギーが逸散することにある。

ここでは、遊水室内の水表面に厚さのない仮想的な水平板を設け、その波浪動揺を理論的に解析することで、ピストンモード波浪共振に関係するパラメータや反射波の低減に効果的な断面設定法について明らかにする。

既に著者ら¹⁾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版を設置するという簡単な工夫により、反射波を低減する工法を提案した。これは、図-2 に示すように、背後不透過壁と垂下版で一部遮蔽された遊水室内でのピストンモードの波動運動およびその共振現象を利用して、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る方式である。

図-3, 4 は、図-1 中に示す模型寸法の条件(縮尺1/12)を用いて水理実験を行なった結果を示す。各図中

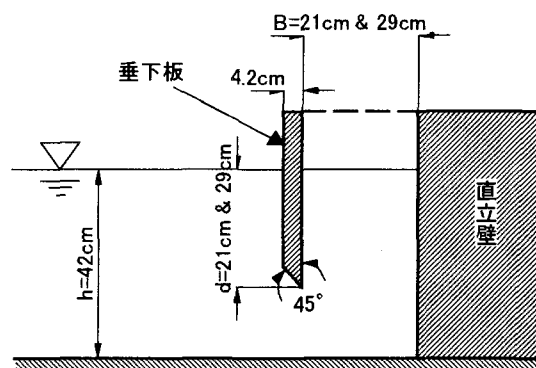


図-1 垂下版式の反射波低減工の模型

2. 垂下版式反射波低減工の特性

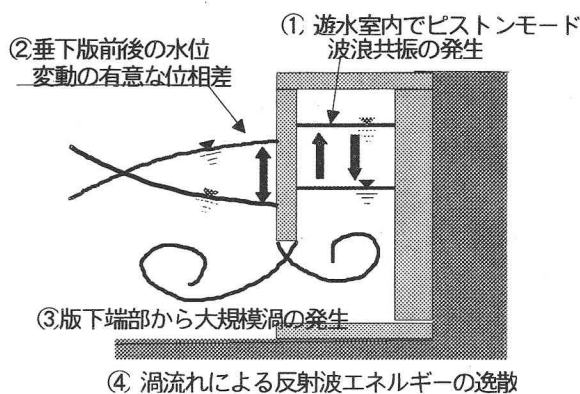


図-2 反射波の低減機構

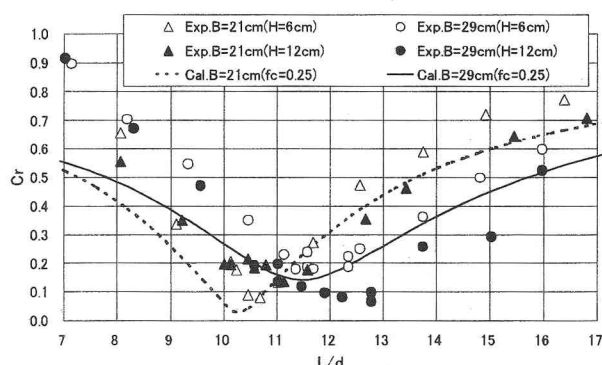


図-3 垂下版式低減工の反射率：遊水室幅の影響($d=21\text{cm}$)

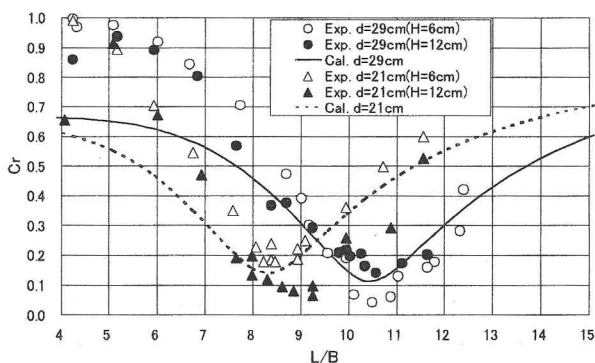


図-4 垂下版式低減工の反射率：吃水深の影響($B=29\text{cm}$)

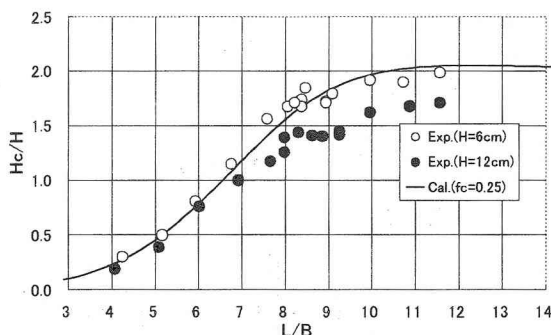


図-5 遊水室内の波高増幅度($B=29\text{cm}$, $d=21\text{cm}$)

では、それぞれ反射率 C_r と波長・吃水比 L/d および波長・遊水室幅比 L/B の関係で整理したもので、各図において反射率に及ぼす L/d および L/B の影響がそれぞれ検討できるようにしてある。なお、図中に示す算定曲線は、中村・井出²⁾による減衰波理論による算定結果を示す。まず、垂下版吃水深 d を固定して遊水室幅 B を2種類

に変化させて各種の周期条件下での反射率を検討した図-3に着目すると、極小反射率の現れる波長・吃水比 L/d の条件は、遊水室幅が広くなると L/d の大きな長周期側になることが認められる。

一方、遊水室幅 B を固定して、垂下版の吃水深 d を2種類に変化させたときの結果を示す図-4に着目すると、極小反射率の現れる波長・遊水室幅比 L/B の条件は、吃水深が深くなるとより長波長側の条件で現れるようになることが分かる。

このように、垂下版式低減工において極小反射率が現れる周期条件は、垂下版の吃水深が深くなるほど、また遊水室幅が広くなるほど長周期側に移行することが確認できる。そして、従来のスリット壁式低減工³⁾に比較すると、極小反射率の出現する L/B の条件は、図-4に典型的に示すように、 $L/B=10$ 程度とほぼ倍増しており、より長波長の波に対して反射波が低減できることが分かる。

図-5は、代表例として $B=29\text{cm}$, $d=21\text{cm}$ のときの遊水室内の波高 H_c と入射波高 H の比、すなわち遊水室内の波高増幅度の L/B による変化を示す。この図と図-4との比較から、反射率が極小となる L/B の条件下で波高増幅度は増大することが認められ、上記したように反射波の逸散機構に遊水室内の波高増幅が関係していることが推測できる。

写真-1は、このように波高増幅度が大きくなる条件下での流況を示すもので、垂下版の下端から流れの剥離が生じ、強い渦への巻き込み現象が生じることが確認できる。また、写真中に見られるように、遊水室内の水面変動は、ほぼ平坦な水面のままで上下動するピストンモードの波面運動であることも認められる。

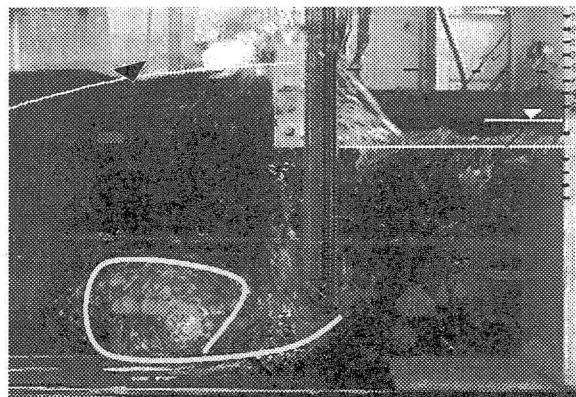


写真-1 垂下版下端よりの渦流れ

等価振動モデルによる理論的な検討

(1) 等価振動モデルとそれによる結果

図-4で確認された、遊水室幅 B を固定したときの垂下版吃水深 d の増加に伴う極小反射率の長周期側への移行は、吃水深が深くなると振動水塊量(質量)が増加するた

め、水面の静水学的な復元力の効果を考慮した振動系を考えると、結果的にピストンモード波浪共振の出現する周期条件が長周期側に移行することで説明できる。

しかしながら、図-3 に示す、吃水深 d を固定したときの遊水室幅 B による極小反射率の変化特性は、 B に伴いやはり振動質量が増加するものの、バネ常数に相当する静水学的な復元力も遊水室幅 B に比例して増加することから、共振特性に及ぼす B の影響は打ち消されるため理論的には理解し難い。

この理由としては、遊水室幅が増加するとその増加幅分以上に鉛直方向の付加質量が増加することが考えられる。以下では、このような遊水室幅の増加に伴う振動付加質量の変化特性やこの結果に基づくピストンモードの波浪共振の出現特性などを理論的に検討する。

図-6 (a), (b)は、垂下版式低反射工とその等価振動モデルを示す。従来の研究において、遊水室内の水面振動を取り扱う等価振動モデルは、各種のものが提案されているが、ここでは図(b)に示すように、遊水室内の

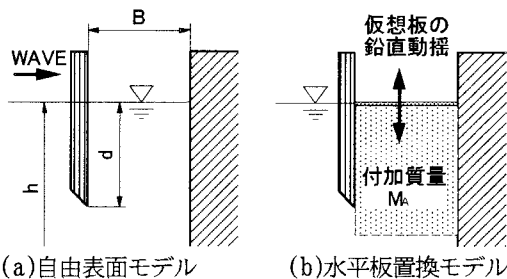


図-6

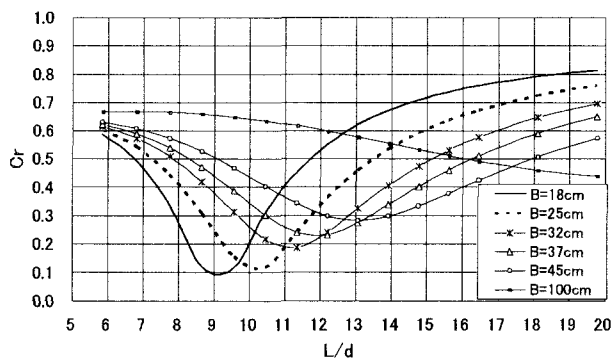


図-7 等価振動モデルによる反射率の算定結果
($d=25\text{cm}$, $h=40\text{cm}$, $f_c=0.25$)

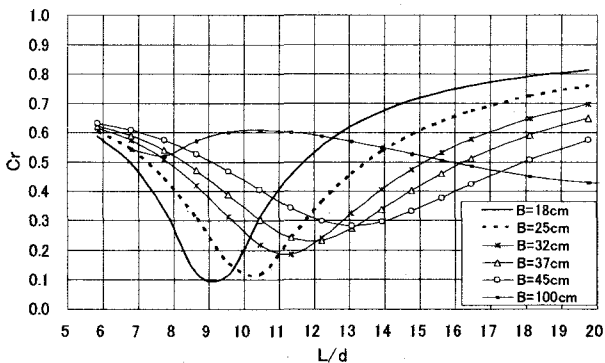


図-8 自由表面モデルによる反射率の算定結果
($d=25\text{cm}$, $h=40\text{cm}$, $f_c=0.25$)

水表面に重さのない十分に剛な仮想的な水平板があり、それが鉛直方向に波の作用により振動する振動自由度1の水平板置換モデルで近似する。これは、水平板の鉛直動揺による付加質量が直接的に求められることから採用してある。

理論解析では、このような等価振動モデルに加えて、遊水室内の水面振動モードを仮定しない、いわゆる自由表面モデルによる算定も行った。等価振動モデルでは、仮想水平板に作用する鉛直波力および付加質量係数などの動的流体力係数を求める必要があり、これらの水理学的な諸量の算定には、著者ら⁴⁾による減衰波理論に基づく浮体動揺算定法を用いた。このとき、等価線形抵抗係数 f_c には、自由表面モデルと同様に0.25の一定値を用いた。

図-7 は、図-1 の堤体断面を多少ながら簡単化して、水深 $h=40\text{cm}$ 、垂下版吃水深 $d=25\text{cm}$ に固定して、遊水室幅 B を100cm以下の範囲で7種類に変化させたときの反射率 C_r の等価振動モデルによる算定結果を示す。図中では、図-3と同様に波長・吃水深比 L/d による変化で示す。

この図より、反射率が極小となる L/d の条件は、遊水室幅 B の増大に伴い長波長の条件で現れるようになることが再確認できる。

一方、図-8 は、同様の堤体条件について、自由表面モデルに基づき求めた反射率の算定結果を示す。図-7と図-8との比較から、両モデルによる反射率の算定結果で差異が見られるのは、遊水室幅の最も広い条件($B=100\text{cm}$)で、しかも L/d が11程度以下と比較的短周期の条件下であることが認められる。これは、遊水室幅が半波長程度の長さになると、ピストンモードでなく、腹・節モードの波面形状が現れるようになるため、ピストンモードを想定した等価振動モデルでは不十分であることによると考えられる。

そして、このような特異な条件を除くと、両モデルによる反射率の算定結果はよく一致しており、遊水室内の水表面に仮想的な水平板を設ける等価振動モデルを用いても反射率を推定できることが分かる。

図-9 は、等価振動モデルでの水平板の鉛直動揺量をやはり各種の遊水室幅の条件について示す。ただし、腹・節モードの波面形状が現れると推定される、遊水室幅の最も広い条件($B=100\text{cm}$)に対する結果は除いてある。

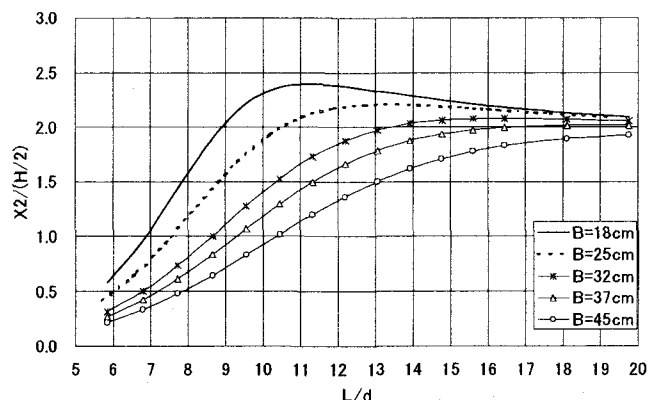


図-9 仮想水平板の鉛直動揺変位($d=25\text{cm}$, $h=40\text{cm}$, $f_c=0.25$)

なお、図中では、鉛直動揺振幅 X_2 を入射波振幅($=H/2$)で除した無次元変位で示す。

この図より、極大変位を示す L/d は、遊水室幅に伴い増加し、長周期側に移行するようになることが分かる。そして、この動揺振幅は、図-5 に示す遊水室内の波高増幅度の結果に対応するもので、類似した条件の $B=32\text{cm}$ のときの動揺算定結果が図-5 の実験結果や自由表面モデルによる算定結果と酷似していることが認められる。

図-10, 11 は、等価振動モデルでの水平板の鉛直振動による付加質量係数 C_A および造波減衰係数 C_W を各種の遊水室幅の条件に対して示す。このとき、吃水深 d はやはり固定してある。 C_A および C_W の定義は、図中に示すもので、その定義に使用されている変数は次の定義による。

ρ : 流体密度、 l_b : 堤体のユニット長、 ω : 振動の角振動数、 F_A : 付加質量力、 F_W : 造波減衰力である。

これらの図より、 C_A および C_W は、 L/d による変化傾向が異なるものの、いずれも遊水室幅 B で無次元化されているにも関わらず B に伴い増加することが分かる。このことは、上記で推測した通りの結果であり、遊水室幅が

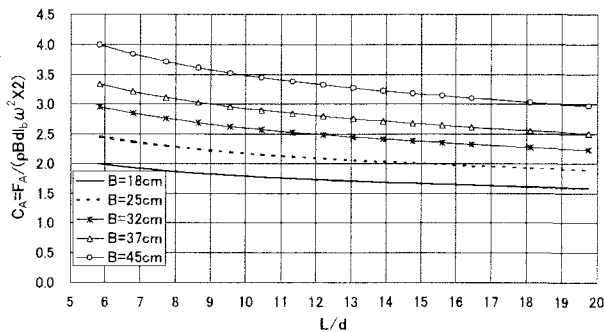


図-10 仮想水平板の鉛直振動による付加質量係数
($d=25\text{cm}$, $h=40\text{cm}$, $fc=0.25$)

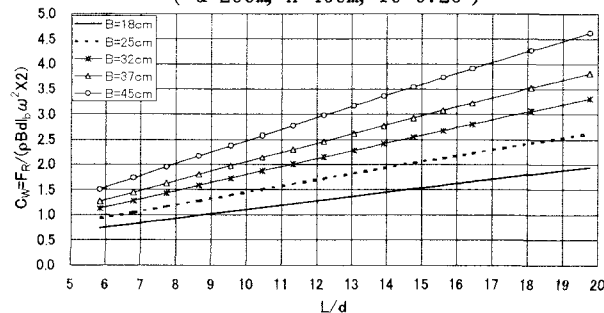


図-11 仮想水平板の鉛直振動による造波抵抗係数
($d=25\text{cm}$, $h=40\text{cm}$, $fc=0.25$)

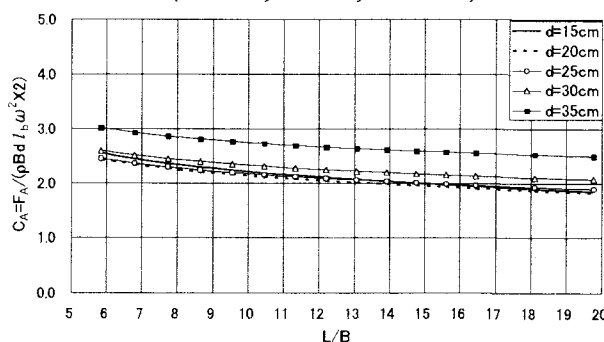


図-12 仮想水平板の鉛直振動による付加質量係数
: 吃水深の影響 ($B=25\text{cm}$, $h=40\text{cm}$, $fc=0.25$)

増加することにより、ピストンモード波浪共振点に対応する極小反射率の出現する周期条件が長周期側に移行する要因と言えよう。

図-12 は、遊水室幅を固定して、垂下版の吃水深を変化させたときの仮想水平板の鉛直方向における付加質量係数の算定結果を示す。この図から、付加質量係数に及ぼす垂下版の吃水深の影響は、図-10 に示す遊水室幅の影響ほど強くないことや、吃水深を深くすると付加質量係数は多少ながら増加する傾向にあることなどが分かる。このため、仮想水平板の付加質量はほぼ吃水深に比例して増大することなどが確認できる。

(2) 共振特性に関する考察

既に著者ら¹⁾は、垂下版式低減工による反射波の低減特性が遊水室幅 B と垂下版の吃水深 d で定義される断面特性長 $\sqrt{Bd}$ と波長 L との比に密接に関係していることを報告した。例えば、極小反射率の現れる条件は、各種の B および d に関係なく、波長とこの特性長との比で10付近に出現することなどである。しかしながら、その理論的な背景については不明確なままであった。

ここでは、上記したピストンモード波動運動に関係する水塊質量、すなわち付加質量の特性とその共振特性に着目して、反射波低減特性を支配するパラメータについて考察してみる。

まず、図-6 に示す遊水室内の水塊のピストンモード振動を考えると、その共振周期 T_n は、減衰力の影響を無視すると、よく知られているように次式で与えられる。

$$T_n = 2\pi \sqrt{\frac{M_A}{K}} = 2\pi \sqrt{\frac{m_A l_b}{\rho g B l_b}} = 2\pi \sqrt{\frac{m_A}{\rho g B}} \quad (1)$$

ここに、 K : 遊水室内の仮想板の復元力係数、 m_A : 単位法線幅当りの付加質量である。

いま、この共振周期を波周期とする波長を L_n で定義すると、これは線形波動理論を仮定すると次式で与えられる。

$$L_n = \frac{g T_n^2}{2\pi} \tanh(2\pi h / L_n) \quad (2)$$

式(1)の T_n を式(2)に代入して、多少の演算を行うと、次式の関係が得られる。

$$L_n = \frac{2\pi m_A}{\rho B} \tanh(2\pi h / L_n) \quad (3)$$

式(3)は、超越方程式で解析的に解けないことから、式(3)で $\tanh()$ の項を深海波を仮定して1で近似した第1近似を $L_n^{(1)}$ とする。これを式(3)の $\tanh()$ に代入して、多少の整理を行うと、 L_n の第2近似の $L_n^{(2)}$ が次式のように導ける。

$$L_n^{(2)} = \frac{2\pi m_A}{\rho B} \tanh\left(\frac{h \rho B}{m_A}\right) \quad (4)$$

いま、単位法線幅当りの付加質量 m_A を図-10, 12 を参照して、次式のように仮定する。

$$m_A = \rho \alpha B^x d^y \quad (5)$$

ただし、次元的な考察から、 $x+y=2$ を満足する必要がある。ここで α は比例常数である。

式(5)を式(4)に代入して、多少の整理を行うと、次式の関係が得られる。

$$L_n^{(2)} = 2\pi\alpha B^{x-1} d^y \tanh\left(\frac{h}{\alpha B^{x-1} d^y}\right) \quad (6)$$

式(6)は、共振条件に対応する波長を B , d , h で表すもので、さらに詳細な結果を誘導するためには式(5)に含まれる累乗の x, y を特定する必要がある。

このため、各種の遊水室幅 B および吃水深 d に対する付加質量の結果(図-10, 12を含む)に着目して、式(5)の m_A の関数形を試行錯誤的に検討してみた。図-13, 14は、その結果の一例を示すもので、図-10, 12の算定結果を再整理したものである。このとき、 m_A に代わり、式(6)の関係を考慮して得られる、次式による A_D^* を最終的に用いてある。

$$A_D^* = \frac{m_A}{\rho \alpha B^{1.4} d^{0.65} / (h-d)^{0.05}} \tanh\left(\frac{2\pi h}{2\pi \alpha B^{0.4} d^{0.65} / (h-d)^{0.05}}\right) \quad (7)$$

なお、式(7)で新たに導入した水深に関する項は試行錯誤の結果による。これらの図より、式(7)により定義される A_D^* は、ほぼ遊水室幅や垂下版吃水深に関係なく、唯一の曲線で表され、しかもその絶対値が平均的に1に近いことが認められる。なお、式(7)中の α には繰り返し検討結果による $\alpha=1.65$ が採用してある。

以上の検討より、遊水室内のピストンモード波面運動

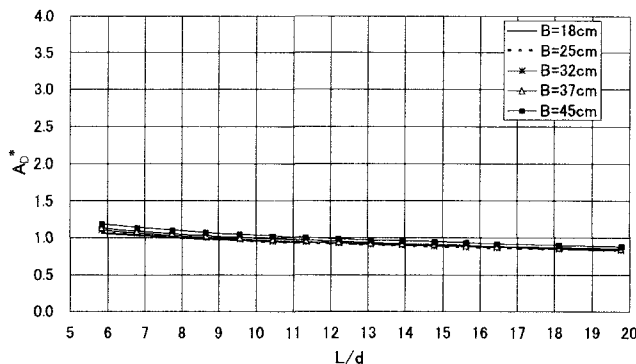


図-13 付加質量の関数形の検討：遊水室幅の影響($d=25\text{cm}$)

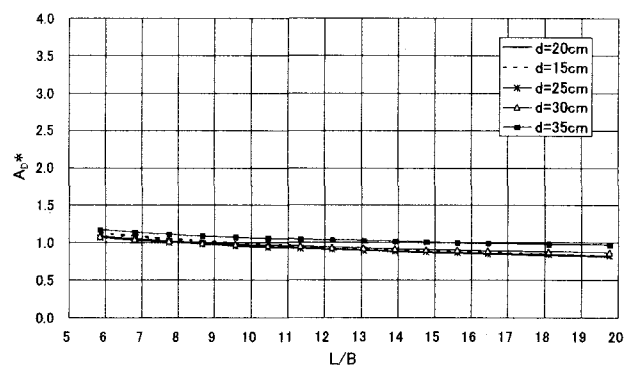


図-14 付加質量の関数形の検討：吃水深の影響($B=25\text{cm}$)

による付加質量は、遊水室幅 B の1.4乗、垂下版吃水深 d の0.6乗にほぼ比例することなどが判明した。

次に式(6)に基づき、ピストンモード波浪共振の出現条件を検討する。式(7)の A_D^* が遊水室幅や吃水深によらず、ほぼ一定値であることに注意すると、式(6)は次式のように表される。

$$L_n^{(2)} / (B^{0.4} d^{0.65} / (h-d)^{0.05}) = L_n^{(2)} / l_c = 2\pi\alpha \approx 10.4 \quad (8)$$

ここに、 l_c :左辺の分母で定義される断面特性長である。

式(8)によるピストンモード波浪共振の出現条件は、ほぼ遊水室幅や吃水深に関係なく成立する条件であり、反射波の低減がこの共振に密接に関係することから、反射率も式(8)のパラメータに関係することが推測される。

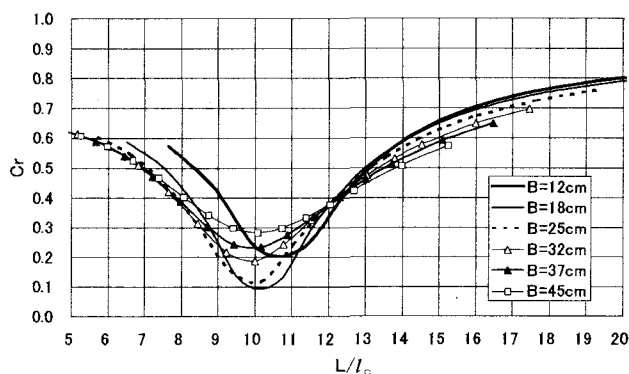


図-15 断面特性長を用いた反射率の再整理($d=25\text{cm}$, $h=40\text{cm}$)

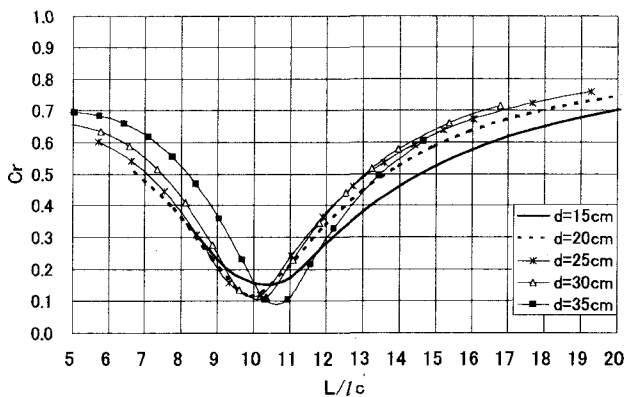


図-16 断面特性長を用いた反射率の再整理($B=25\text{cm}$, $h=40\text{cm}$)

図-15は、この検討結果を示すもので、図-8の算定結果を再整理したものに相当する。また、図-16は、遊水室幅を固定して、吃水深を各種に変化させたときの反射率の算定結果を同様に断面特性長を用いて整理した結果である。これらの図より、反射率の極小値が出現する条件は、断面条件に関係なく、波長と断面特性長の比がほぼ10から11の狭い範囲に限定して現れることが認められる。

図-17は、前出の図-3, 4の実験結果および算定結果、さらにはその他の著者らによる実験・算定結果を波長と断面特性長の比を用いて、再整理した結果に相当する。やはり、波長と断面特性長の比が10から11の狭い範囲に反射率の極小値が現れることが確認できる。

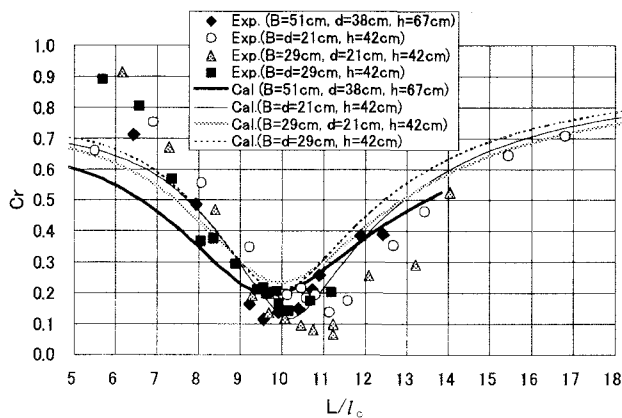


図-17 断面特性長を用いた各種断面条件での反射率の再整理結果

このように、式(8)で定義される波長・断面特性長を用いることで、容易に極小反射率の現れる条件が推定できる。例えば、計画海域での反射波低減工の遊水室幅あるいは垂下版吃水深のどちらかが与えられると、最適断面の残りの寸法は作用波条件を考慮して式(8)に基づき簡単に与えられる。

6. 結語

(1) 垂下版式低反射工の遊水室内の水面を質量のない剛な仮想板で置換する“水平板置換モデル”による反射率の算定結果は、遊水室幅が波長の2/5程度以下の条件ではピストンモードの波面モードが卓越するため、遊水室内の波面モードを仮定しない自由表面モデルによる算定

結果と一致する。

(2) 遊水室内のピストンモード波動運動に寄与する水塊量(付加質量)は、水平板置換モデルによる算定により、ほぼ遊水室幅 B の1.4乗、吃水 d の0.6乗に比例することなどが判明した。

(3) 遊水室内のピストンモードの波浪共振特性に着目して導出した断面特性長を用いると、垂下版式低反射工の反射率は、異なる垂下版吃水深や遊水室幅の条件および波条件でも、ある特定の波長・断面特性長の比の条件下で現れる。この関係を利用することで、効果的な断面を簡単に設定することができる。

参考文献

- 1) 中村孝幸・神野充輝・西川嘉明・小野塚孝：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，海岸工学論文集，第46巻，pp.796～800，1999.
- 2) 中村孝幸，井手善彦：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，Vol.13，pp.177-182，1997.
- 3) 谷本勝利・吉本靖俊：スリットケーソンの反射率に及ぼす諸要因の影響，海岸工学講演会論文集，第29巻，pp.389～393，1982.
- 4) 中村孝幸，井出善彦：減衰波中における浮体の動揺理論とその適用性に関する研究，海岸工学論文集，第44巻，pp.856-860，1997.