

ケーソン防波堤に組み込んだ垂下版式 反射波低減工の効果

PERFORMANCE OF A CURTAIN-WALLED REFLECTION DISSIPATER ATTACHED TO CAISSON BREAKWATERS

中村孝幸¹・神野充輝²・久保勝太³

Takayuki NAKAMURA, Mitsuteru JINNO and Syouta KUBO

¹ 正会員 工博 愛媛大学助教授 環境建設工学科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町三番)

² 正会員 (株)三柱 技術・開発チーム (〒135-0034 東京都江東区永代一丁目3-4)

³ 愛媛県土木部 (〒790-8570 愛媛県松山市一番町)

We have already presented the effectiveness of a curtain-walled reflection wave dissipater. In this study, in order to expand the effective range of wave frequency of the dissipater and also to extend the usage of the dissipater to much deeper sea area, a dissipative-type caisson breakwater with a curtain-walled reflection wave dissipater at the front side was newly proposed. Influence of the concrete mound height in the caisson breakwater on the performance was extensively examined from both the experimental and theoretical points. The conventional slotted-type caisson breakwater was also examined for the comparison.

Key Words : curtain-walled reflection dissipater, dissipative caisson breakwater, mound height effect

1. 序論

既に、著者ら¹⁾は垂下版式の反射波低減工を提案している。この構造体では、必要とされる遊水室の幅は、スリット式構造物などに比較するとほぼ半減できる利点があることなどが報告されている。

本研究は、より長周期の波に対する反射波の低減を目的として、ケーソンの前面側に遊水室を設け、前壁を垂下版とする垂下版式ケーソンの構造体を提案する。これは、特定高さのマウンド上にある遊水室内では水深が浅くなることにより波長が短くなるため、低減できる反射波の有効周期帯が、長周期側に移行することが期待されるからである。ここでは、マウンド高さに着目してその水理学的特性を実験と理論の両面から明らかにする。

2. 実験装置および実験方法

(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25m、幅1m、高さ1.25mの2次元水槽を用いて行った。この水槽の一端には、サーボ式モータを動力源とする反射波吸収方式のピストン型造波装置が、他

端には端部からの再反射を防ぐために砕石からなる1/5勾配の消波工が設けてある。

(2) 模型堤体

実験では、反射波低減効果に及ぼすマウンド高さの影響を検討するため、以下に示すCASE1~CASE6の6種類のマウンド高さやマウンド形状の異なる模型堤体を用いた。このとき、背後の直立不透過壁には防水加工した木板(幅100cm、高さ120cm、厚さ3.5cm)を実験水槽内に剛に固定した。以下に、それぞれの模型堤体の詳細について説明する。

(a) 平坦マウンドの垂下版式 (CASE1~CASE4)

図-1に示すように、直立不透過壁の前面に垂下版1枚を設置し、その間の遊水室内に各種の高さの水平マウンドを設け垂下版式ケーソンを模擬した模型堤体である。この垂下版は水槽枠の上部より片持ち梁構造で支持されており、各CASEそれぞれ、垂下版と直立不透過壁との間の遊水室幅を $B=19\text{cm}$ 、垂下版吃水深 $d=19\text{cm}$ と一定にした。CASE1はマウンドを設けていない状態、CASE2のマウンド高さは $h_m=48\text{cm}$ 、CASE3は $h_m=44\text{cm}$ 、CASE4は $h_m=38.5\text{cm}$ である。

(b) スリット式 (CASE5)

図-2に示すように、 $h_m=44\text{cm}$ のマウンド上に、幅11cm、厚さ3.1cm、高さ28cmのスリット版を5.5cm

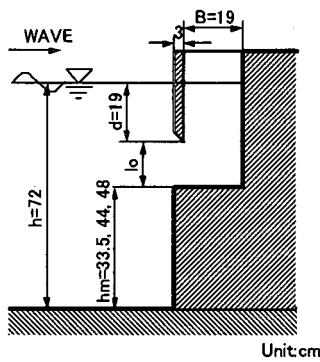


図-1 垂下版式ケーソン
($hm=33.5, 44, 48$ cm)

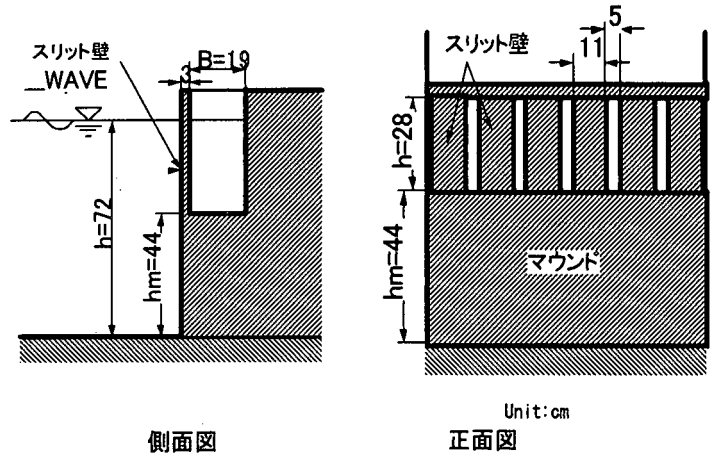


図-2 スリット式ケーソン

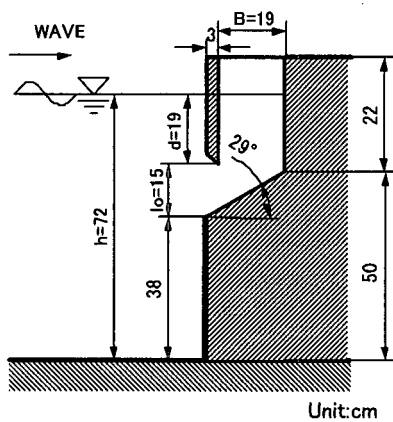


図-3 傾斜マウンド型垂下版式ケーソン
($hm=38\sim 50, lo=15$)

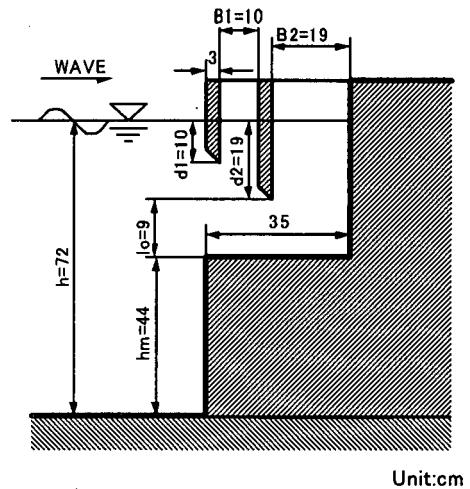


図-4 二重垂下版式ケーソン

間隔で6本設置したスリット式ケーソンの模型堤体である。このとき、スリット壁厚は垂下版と同一厚さとし、スリット壁の開口率 ε は $\varepsilon=0.32$ とした。

(c) 傾斜マウンドの垂下版式 (CASE6)

図-3に示すように、 $hm=44$ cmのCASE3の構造形式において、マウンド形状を断面積を変えずに平坦型から約 30° の傾斜型に変更した模型で、主に垂下版下部の開口長を拡大するために採用した。

(d) 二重垂下版式 (CASE7)

図-4に示すように上記したCASE3の単一垂下版式構造の前面にさらに垂下版を付加して二重垂下版式構造としたものである。実験模型は、反射側からみて第一遊水室幅 $B1=10$ cm、最前面の垂下版吃水深 $d1=10$ cm、後側の垂下版と直立不透過壁との間の第二遊水室幅 $B2=19$ cm、後側の垂下版吃水深 $d2=19$ cmとし、マウンド高さは $hm=44$ cmと固定した。

(3) 実験条件

実験に用いた堤体沖側の設置水深 h は72cmと一定にし、入射波高 H は7.5cm, 15cmの2種類、周期 T は0.6s~2.2sの範囲の中から16種類程度を選定した。

2. 理論算定法

本研究では、中村・井手²⁾による、減衰波理論を用いて各構造条件での波変形等の算定を行った。この理論では、隅角部からの渦流の発生等に起因するエネルギー逸散を近似的に考慮して、反射率等の算定が簡便に行える利点がある。算定では、中村・井手²⁾に習い、減衰波領域は垂下版から反射側へ入射波長の $1/8$ までの範囲を、鉛直方向には、水表面から水底までとした。また、等価線形抵抗係数 f_c は、中村・神野³⁾により垂下版式反射波低減工に対して用いられている $f_c=0.20$ をそのまま準用した。

ここでは、理論算定法の活用法として実験結果との対応の検討のみならず、実験の予備的な検討として事前に各種の寸法の垂下版式ケーソンを対象にして算定を行い、その概略的な機能を予測するなど効率的な実験を行うためにも利用している。

3. 反射波の低減効果

(1) 遊水室内のマウンド高さの影響

図-5は、マウンドが無い場合とマウンド高さを3種類に変化させたときの反射率 C_r の実験結果と算定結果の両方を併せ示す。図中では周期に関するパラメータとして L/B が用いてある。この図より、反射率 C_r は、実験結果および算定結果の両者共に特定の周期条件で一旦極小となる変化を示すことが分かる。そして、マウンドの無い状態から、マウンドを設けてその高さを $hm=38.5\text{cm}$ 、 44cm 、 48cm と順次高くすると、反射率が極小となる条件が L/B の大きな長周期側に移行することや、その絶対値が少しずつ高くなることが確認できる。算定結果については、反射率が極小となる条件が長周期側に移行する傾向は同じであるが、マウンド高さに伴う極小反射率の変化はあまり見られず、実験値と定量的に差が出てくる。これは、入射波高が $H=15\text{cm}$ と高い場合にも同様な傾向にあることを確認している。

このような実験結果と算定結果の相違の原因としては、開口部が狭くなることによる渦形成現象の変化が指摘できる。実験の観察では、マウンドを高くして開口部を狭くすると、遊水室内への流入が減少して、渦形成が弱められる傾向にあることが確認されている。これは、開口部に形成される渦流れが逆に流入を阻止するような役割を果たすようになるためと推測される。そして、減衰波理論では渦流れを一樣な渦流れ場で近似するため、このような局所的渦流れ場の影響を評価できないものと考えられる。対応する方法としては、使用する線形減衰係数を変えることがあるが、これについては今後の課題にしたい。

このように、遊水室内に設けるマウンドの高さを増すと、より長周期の波に対して反射波が低減できるようになり、遊水室幅を狭くできることが分かる。このようなマウンド高さの影響は、スリット式ケーソンの場合に指摘されているように³⁾、直接的にはマウンド上の水深に対応する波長が設置水深に対応するそれに比較して短くなることによる。ただし、垂下版式では開口長 l_0 が小さくなるため、反射率 C_r の絶対値を低下させるためには適切なマウンド上の開口長が必要といえる。

(2) スリット式ケーソンとの比較

ここでは、前面壁が垂下版のとき(図-1)と、スリット壁のとき(図-2)の2種類の堤体に対する反射波特性について検討してみる。これらの比較では、既に紹介したように、マウンド高さ、開口率、遊水室幅を同一の条件にしてある。図-6は、この比較を示すもので、垂下版式のときには算定結果についても併せ示す。

この図より、反射率 C_r の極小となる条件は、垂下版式ケーソンでは $L/B=14$ 付近、スリット式ケーソンでは $L/B=7$ 付近であり、垂下版式構造では、スリット式構造に比較して、約2倍程度の長波長の波に対する反射波が低減できることが分かる。これは、作用波の波長を固定すると、遊水室幅がほぼ半減できることに相当する。

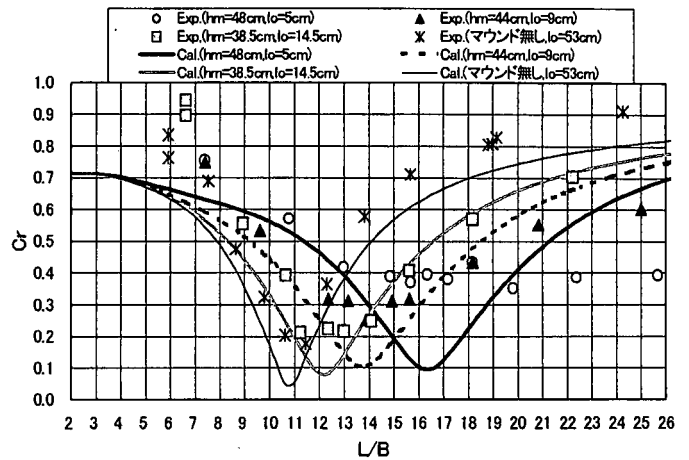


図-5 垂下版式ケーソンのマウンド高さによる反射率 C_r の変化
($B=d=19\text{cm}$, $h=72\text{cm}$, $H=7.5\text{cm}$)

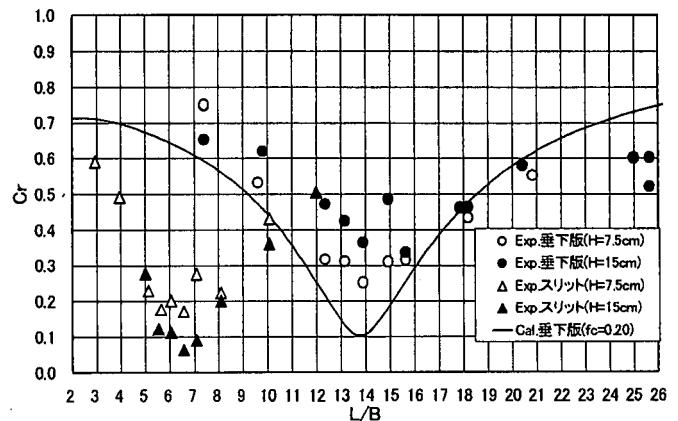


図-6 各前面構造の低反射型ケーソンの反射率 C_r の比較
($B=d=19\text{cm}$, $h=72\text{cm}$, $hm=44\text{cm}$)

反射率 C_r の絶対値を比較すると、極小反射率は垂下版式構造の方が全体的に高く現れる傾向が認められる。これは、スリット部の開口率と垂下版下部の開口率を一致させる条件での比較にしたことにより、垂下版下部の開口長が渦形成に十分でないことによると考えられる。事実、図-5に見られるように垂下版下部の開口部が大きいときには、反射率の絶対値はかなり低く現れる。このような開口長の影響については、傾斜マウンドを採用することで開口長を拡大するなどの工夫で対処できると考えられるが、これについては後述したい。

4. 傾斜マウンドの採用による開口長の拡大の影響

(1) 堤内波高に及ぼす開口長の影響

図-7は、入射波高 $H=7.5\text{cm}$ と固定して、垂下版式ケーソンの開口長を $l_0=5\text{cm}$ 、 9cm 、 14.5cm と大きくするときの遊水室内波高の L/B による変化を示す。ただし、このとき開口長と共にマウンド高さも変化していることに注意されたい。そして、遊水室内波高には遊水室内の3測点の平均波高 H_c を用いた。

この図より、 H_c/H は、実験結果と算定結果の両者共に波条件が長周期になるにつれて増大し、特定の条件で極大となり、その後緩やかに減少する傾向が

認められる。このような波高増大現象は既に指摘されているようにピストンモードの波浪共振による³⁾。そして、実験結果では、極大となる条件での絶対値が算定結果に比べると小さく、この傾向は開口長 l_0 が狭くなると顕著になる。やはり、これは上記したように開口長に伴う渦形成現象の変化によるものと考えられる。

このように、開口長が狭くなると、垂下版下部よりの遊水室内への流入が弱くなり、このため遊水室内でのピストンモードの波浪共振の度合いも低下することや、このような低下は、結果的に反射率の上昇に関係していることが指摘できる。

(2) マウンドの形状変化

上記したように、垂下版式構造ではマウンド高さを増すと反射波の低減できる波周期が長周期側に移行するものの、開口長が狭まるため反射率の絶対値が増加する傾向が確認された。ここでは、傾斜マウンドを採用することでマウンド上の平均水深を維持して開口長を拡大する工夫により、反射率の絶対値を低下できるかどうかを検討してみる。

対象としたモデルは、図-3に示すもので平均のマウンド高さはCASE 3と同じ $hm=44\text{cm}$ としてある。ただし、開口長 l_0 は、平坦マウンドのときに比較して約1.5倍に拡大できる。

図-8は、このときの結果を示すもので、入射波高 $H=7.5\text{cm}$ と固定してある。図中には比較のため、マウンド高さ $hm=44\text{cm}$ のマウンド平坦型垂下版式ケーソンおよびスリット式ケーソンの実験結果も併せ示してある。また、算定結果としては、マウンド傾斜型と平坦型の両者を示す。

この図より、垂下版式ケーソンではマウンドの形状を開口長 l_0 が広がるように傾斜型に変更することで、反射率 Cr が約0.1~0.2程度低下することが分かる。これは、やはり垂下版下部の開口部の拡大により、遊水室内への流入が増大することによって考えられる。

そして、マウンド形状を傾斜型にすると平坦型に比較して、多少ながら短周期側に極小反射率の周期条件が移行するが、それほど有意な差は見られない。

このように、垂下版式ケーソンでは、垂下版下部の開口長が狭いときには傾斜型マウンドの採用により、反射率の絶対値を有意に低下でき、しかも従来のスリット式構造に比較するとより長周期の波に対する反射波が低減できることが判明した。

5. 二重式垂下版構造の効果

反射波低減工としては、より広い周期帯に対して反射波が低減できることが望ましい。有効周期帯を拡大する方法として、中村・神野ら¹⁾は単一垂下版の前面に異なる吃水の垂下版を付加して二重式構造とする方法を提案している。本研究でも、同様の工法の有効性をケーソン形式の場合について検討して

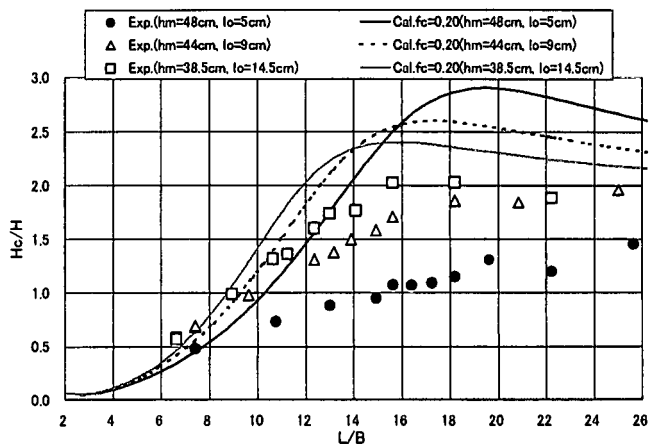


図-7 遊水室内の平均波高の変動特性 ($B/d=1.0, H=7.5\text{cm}$)

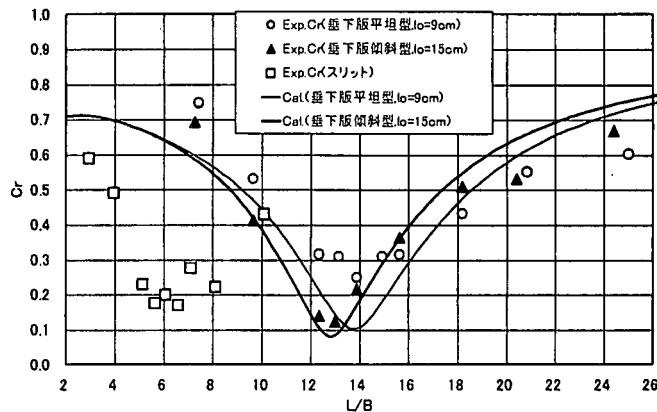


図-8 マウンド形状および構造形式の違いによる反射率 Cr の変化 ($B=d=19\text{cm}, h=72\text{cm}, hm=44\text{cm}, H=7.5\text{cm}$)

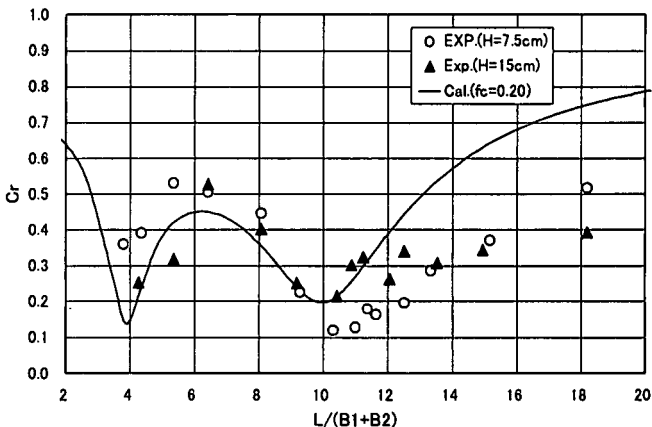


図-9 二重垂下版式ケーソンの反射率 Cr ($B1=d1=10\text{cm}, B2=d2=19\text{cm}$)

みた。

図-9は、その結果の代表例を示す。ここでは周期に関するパラメータとして波長と第1遊水室幅 $B1$ と第2遊水室幅 $B2$ の和の比 $L/(B1+B2)$ を用いた。この図から、二重式構造とすることで、極小反射率はほぼそれぞれの遊水室長と波長に関係して、異なる2ヶ所で現れるようになることが認められる。このため上記した単一式構造の場合に比較すると、特に短周期側の反射波の低減効果が改善されることが分かる。また、このとき背後壁側の第2遊水室を形成する垂下版下端部の開口長は、 $l_0=9\text{cm}$ と反射率の低減に関して問題点のあったケースに相当する。

しかしながら、二重式構造にすることで、反射率の実験値は算定値よりも低く現れるなど、反射率の低減に関する問題点は解消されていることが確認できる。この理由については明確でないが、沖側にある第1遊水室の前面版下端の開口長が大きいことに関係するものと考えられる。これについては、今後さらに検討を進めたい。

6. 反射波低減工の諸量の設定法

中村・神野ら¹⁾によると、周期に関する無次元量として l_A/L ($l_A = \sqrt{Bd}$) を採用すると、反射率 Cr は、遊水室幅 B と垂下版吃水深 d の組み合わせに関係なく $l_A/L = 0.095$ 付近で一旦低下することが確認されている。

ここでは、マウンド上水深（遊水室内水深）に対応する波長 L_m に着目して、同様のパラメータである l_A/L_m を用いて各種のマウンド高さに対する反射率の結果が一律に表現できるかどうかを検討してみた。この結果を示すのが図-10である。なお、マウンド傾斜型の L_m は、遊水室内の平均水深を用いて求めた。この図より、実験および算定結果ともに、マウンド高さに関係なく、ほぼ $l_A/L_m = 0.09 \sim 0.10$ 付近で反射率 Cr が極小となることが分かる。そして、反射率 Cr の変化曲線は、 l_A/L_m を用いると概略的に一律の曲線で近似できることも確認できる。

以上より、 l_A/L_m を用いると反射率の特性は図-9に示すようにほぼ一律の曲線で表現できることが判明した。そして、この曲線は、各種のマウンド高さの条件について、反射波低減に最適な遊水室長や垂下版吃水深を決定する際に活用できると考えられる。ただし、垂下版下部の開口長が狭くなる場合には、反射率の絶対値が上昇する傾向にあり、適切な開口長を選定する必要がある。

7. 結語

(1) 単一垂下版式ケーソンでは、遊水室内のマウンド高さを高くすると、反射率が極小となる周期条件は、長周期側に移行する。ただし、吃水深を一定とするような条件下でマウンド高さを高くすると、垂下版下端の開口長が狭くなるため、渦形成が阻害され、結果的に反射率は増大する傾向にあることに注意する必要がある。そして、垂下版下端の開口長が狭くなりすぎるときには、マウンドを傾斜させ開口

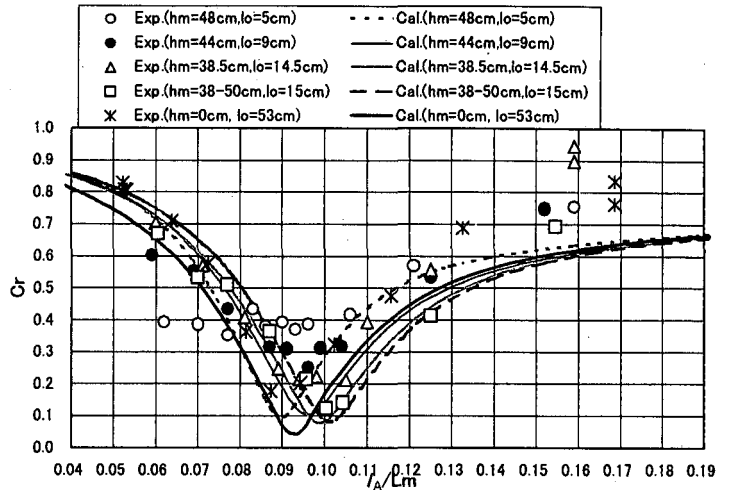


図-10 断面パラメータ l_A/L_m による各マウンド高さのときの反射率 Cr の変化 ($B=d=19\text{cm}$, $h=72\text{cm}$, $H=7.5\text{cm}$)

長を大きくするなど対処できる。単一垂下版式ケーソンで反射率が極小となる周期条件は、スリット式ケーソンに比較すると、より長周期側にあり、波長・遊水室幅 L/B でほぼ 13 程度である。これは遊水室内での波浪のピストンモード振動を利用するなど、減勢機構の相違に起因する。

(2) 垂下版式ケーソンの構造を二重式垂下版構造にすると反射波が低減できる有効周期帯を有意に拡大できる。

(3) マウンド上水深の波長 L_m を用いると、従来 of 一定水深上の垂下版式反射波低減工の結果がほぼそのまま適用できる。

(4) 減衰波理論を用いて、垂下版式ケーソンによる反射波低減効果がほぼ推定できる。ただし、垂下版下部の開口長が狭くなる場合には、低すぎる反射率を予測する傾向にあり、今後さらに改良の余地がある。

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. 797-800，1999。
- 2) 中村孝幸・井手義彦：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，第 13 巻，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，海岸工学論文集，第 29 巻，pp. 389-393，1982。