

傾斜板列を前面壁とする二重式カーテン 防波堤による波浪制御効果について

PERFORMANCE OF A DOUBLE-CURTAIN-WALLED BREAKWATER WITH A FRONT WALL OF INCLINED PLATE ARRAY

中村孝幸¹・神川裕美²・河野 徹³・楨本一徳³

Takayuki NAKAMURA, Hiromi KAMIKAWA, Tohru KOHNO and Kazunori MAKIMOTO

¹正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3)

²学生会員 愛媛大学大学院 土木海洋工学科 (〒790-8577 松山市文京町3)

³正会員 復建調査設計(株) 沿岸開発部 (〒732-0052 広島市東区光町二丁目10番11号)

In order to mitigate secondary effects caused by high reflection waves from a curtain-walled breakwater, a new type of curtain-walled breakwater was proposed. It consists of two vertical walls with different draft depths. The distance between the two walls is comparatively narrow, e.g., having a similar size to the width of its super structure. The mechanism of effective dissipation of wave energy is to enhance the generation of vortex flows from the curtain walls, especially from the front curtain wall placed on the offshore side, which consists of an array of inclined plates with the same gap. By using the wave resonance of Helmholtz mode between the two walls, enhancement of the vortex flow is realized. In the experimental and theoretical examinations, changing the water depth and the distance between the two walls, important hydraulic properties of a double curtain-walled breakwater, such as reflection and transmission coefficients, wave energy dissipation rates and so on, are clarified.

Key Words: Double-curtain-walled breakwater, effective dissipation, Helmholtz mode resonance, inclined plate array, wave reflection, wave transmission

1. 序論

杭式防波堤であるカーテン防波堤は、軟弱地盤上への建設が可能であることや、堤体下部を通しての海水交換機能が期待できるなどの利点がある。この形式の防波堤では、波動運動の卓越する水面付近のみをカーテン壁で遮断することから、効率よく透過波を低減できる特性があるが、このとき逆に反射波は増大し、航行船舶や周辺海域に副次的な影響を及ぼすことが懸念される。

本研究は、上記したような反射波災害の防止を目的として、透過波のみならず反射波の低減も可能なカーテン防波堤の構造形式について究明する。既に、著者ら¹⁾は透過波および反射波の両者を低減するため、異吃水の二重式カーテン防波堤を提案し、その効果について検討してきた。ここでは、異吃水の二重式カーテン防波堤を改良して、潮位によらず波浪制御効果が維持できる構造形式を新たに提案する。具体的には、図-1に示すように、前後カーテン壁の間隔を上部矩形堤の幅程度と比較的狭く保ち、前面壁を図中に見られるように傾斜板列の透過性構造にしてある。この構造形式は、やはり異吃水の二

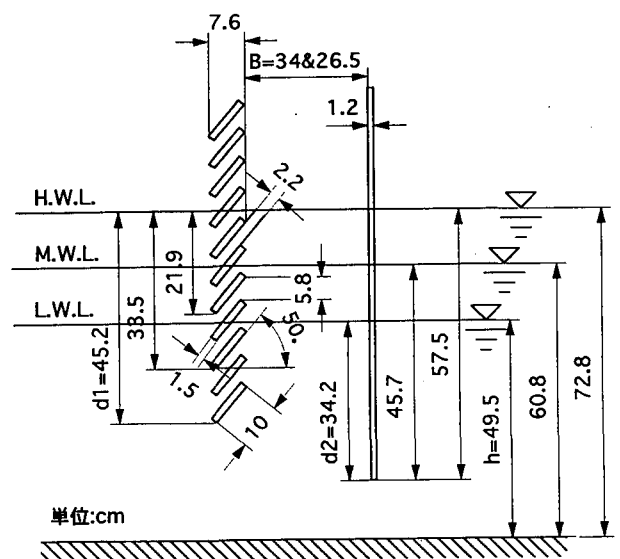


図-1 傾斜板列を前面壁とする二重式
カーテン防波堤の堤体模型

重式カーテン防波堤と同様に前後壁間でのピストンモードの波浪共振を利用して、主に前面傾斜板列間での渦流れの強化により波浪エネルギーが逸散できるようにと採用したものである。

本研究では、傾斜板列を前面壁とする二重式カーテン防波堤を対象にして、特に瀬戸内海などを想定して高低潮位など水位変化による透過・反射率の波周期および作用波高による変化を理論と実験の両面から明らかにする。この際、原型となる異吃水の二重式カーテン防波堤の成果についても、簡単にその結果を紹介する。また、効果的な構造諸元を見出す目的から、前後壁間の遊水室幅による透過・反射率の変化などについても検討する。

2. 不透過板で構成される異吃水の二重式カーテン防波堤の効果¹⁾

ここでは、後述する傾斜板列を前面壁とする二重式カーテン防波堤の原型である、異吃水の二重式カーテン防波堤による結果の概要について紹介する。

(1) 実験装置及び実験方法

a) 実験装置

実験は、長さ28m、幅1m、高さ1.25mの2次元造波水槽を用いて行った。実験に用いた堤体模型を図-2に示す。この実験では、前面壁及び後面壁共に不透過な板で構成されている。後面壁の吃水 d_2 は、単一カーテン壁のときに有効な透過波の制御効果が得られる程度の吃水深27.5cmに固定してある。そして、前面壁の吃水 d_1 は、6cm、12cm、27.5cmと後面壁と同じ吃水になるまで順次深くして、反射・透過率およびカーテン壁間の波高分布などを測定した。このとき、前後壁の間隔 B は従来のカーテン防波堤で用いられている上部矩形堤の幅を参照して、30cmに固定してある。ここで、想定した模型の縮尺は現地の1/17程度である。

b) 実験条件

実験に用いた水深 h は78cmと一定にし、堤体模型に作用せしめた入射波は、波高 H が5cm、10cm、15cmの3種類、周期 T が0.78~1.68secの12種類である。

(2) 透過波および反射波の特性

図-3、4は、代表例として、反射波の低減効果が最も高いことが確認された、前面カーテン壁の吃水 $d_1=12$ cmのときの透過率 C_t 、反射率 C_r の d_2/L (d_2 :後面壁の吃水、 L :波長) による変化を示す。図中には、比較のため後面壁と同吃水の単一カーテン壁による結果および減衰波理論²⁾による算定結果も併せ示してある。なお、減衰波理論の算定に必要となる線形抵抗係数 f_c には、中村・井出²⁾によりカーテン防波堤に対する適用性が認められている $f_c=0.15$ を用いた。

これらの図より、両堤体による C_t は、共に d_2/L が小さ

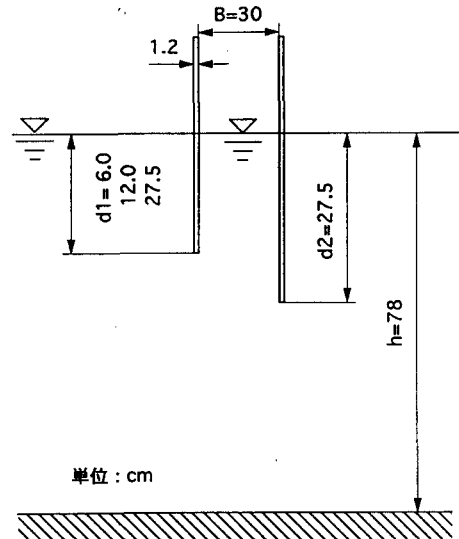


図-2 異吃水の二重式カーテン防波堤の模型

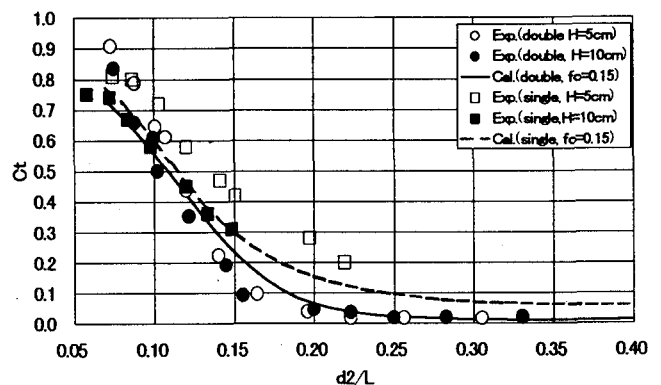


図-3 異吃水の二重式カーテンと単一カーテンの透過率 C_t の比較 ($h=78$ cm, $d_1=12$ cm, $d_2=27.5$ cm, $B=30$ cm)

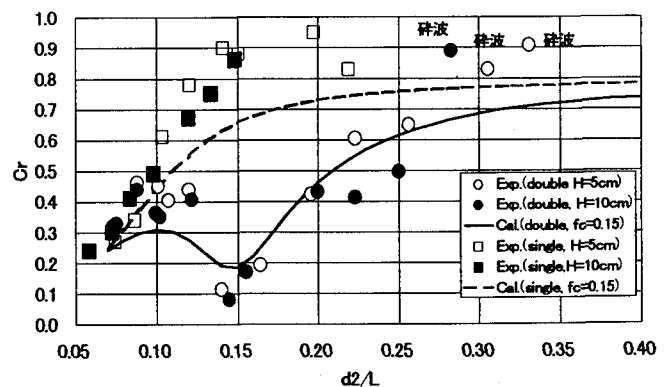


図-4 異吃水の二重式カーテンと単一カーテンの反射率 C_r の比較 ($h=78$ cm, $d_1=12$ cm, $d_2=27.5$ cm, $B=30$ cm)

く長周期になるにつれ増大し、差異はほとんど認められない。一方、 C_r は、単一カーテンでは d_2/L が大きくなるにつれ増大するのに対し、異吃水の二重式カーテンでは特定の d_2/L で一旦低下することがわかる。このような反射波の低減は、後述するように前面壁下端部よりの渦流れの増大現象によると考えられる。そして、前面壁の吃水深としては、後面壁のその約半分程度に設定すると、

図-4に見られるように、反射波が最も効果的に低減できることを確認している。

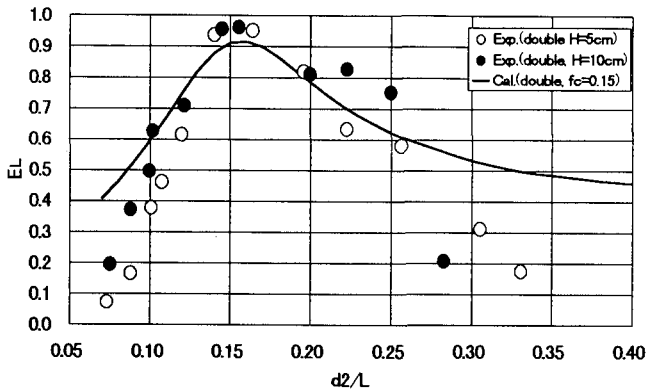


図-5 異吃水の二重式カーテンによるエネルギー逸散率 E_L
($h=78\text{cm}$, $d_1=12\text{cm}$, $d_2=27.5\text{cm}$, $B=30\text{cm}$)

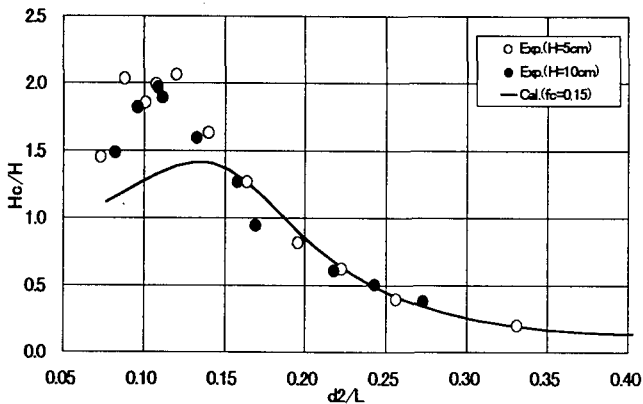


図-6 堤体内の平均波高($h=78\text{cm}$, $d_1=12\text{cm}$, $d_2=27.5\text{cm}$, $B=30\text{cm}$)

(3) 反射波の低減機構について

図-5は、エネルギーの逸散率 E_L の d_2/L による変化を示す。逸散率 E_L は、特定の B/L でピーク値を示し、この条件は、反射率が一旦低減する d_2/L の条件にほぼ一致している。このように、反射波の低減は、エネルギー逸散と密接に関係していることが確認できる。

本実験のように、堤体間隔 B が波長 L より比較的短い条件下では、堤内波浪の波面モードは、ほぼ平坦なピストンモードの波面形状であることが確認されている。図-6は、このような堤内波高の空間的な平均値 h_0 の d_2/L による変化を示す。ここで、堤内波高は、入射波高で無次元化してある。

この図から、堤内波高はやはり特定の d_2/L で極大値を示すことが確認できる。これはいわゆるピストンモードの波浪共振点に対応する。図中には、減衰波理論による算定結果についても示してあるが、ピーク値を示す d_2/L の条件が異なるなどの相違が見られる。また、この

ピストンモードの共振点の B/L の条件と上記した反射率や逸散率が極値を示す d_2/L の条件とは、多少のずれがあるが、反射率や逸散率の動向と密接に関係していることが推定できる。

ここでは、割愛するが、ピストンモードの共振点近傍になると、前面壁下端部よりの渦流れが増大することや、前面壁の反射側および堤内側の水面変動には有意な位相差が生じることを確認している。そして、反射波の低減には、堤内波高の増大のみならず前面壁の前後における水位変動の位相差も強く関係していることが確認されている。

このような検討より、異吃水の二重式カーテン防波堤による反射波の低減機構を総括すると、①ピストンモードの波浪共振による堤内波浪の増大、②前面壁の前後での水面変動の位相差の増大、③前面壁下端部での渦流れの増大、④反射波エネルギーの逸散という過程を経ると推定される。

3. 傾斜板列を前面壁とする二重式カーテン防波堤の効果

異吃水の二重式カーテン防波堤では、上述してきたように、透過波のみならず反射波の低減も可能である。しかしながら、瀬戸内海のような潮位差の大きい海域では、低潮位の時に前面壁の下端が空中に露出する場合もあると考えられ、実際場への適用には強い制限を受けることになる。以下では、前面壁の吃水を比較的深くできる傾斜板列を前面壁とする二重式カーテン防波堤について紹介する。

(1) 実験装置及び実験方法

a) 実験装置

実験には、上記と同様の2次元造波水槽を用いた。模型堤体は図-1に示すように前面の傾斜板列と後面のカーテン壁で構成されている。傾斜板の角度は、ピストンモードの波浪共振が保持されるように、また施工の容易さを考慮して、上向き 50° とした。前後壁の吃水については、前面傾斜板列の吃水は、各潮位に対して、異吃水の二重式カーテン防波堤と同様の波浪の制御効果が保てるように、後面壁については、低潮位時でも有効な透過波の制御効果が得られる程度の吃水深として、異吃水の二重式カーテン防波堤よりも、深いものを採用した。前後壁の間隔 B は、異吃水の二重式カーテン防波堤で用いたものと同様の $B=34\text{cm}$ と、理論的検討により反射波の低減効果がより高いことが確認された $B=26.5\text{cm}$ の2種類とした。なお、このときの模型縮尺は、1/13程度を想定している。

b) 実験方法

実験に用いた水深は、現地の高潮位・平均潮位・低潮位に対応させて設定した。想定した現地の潮位差は、

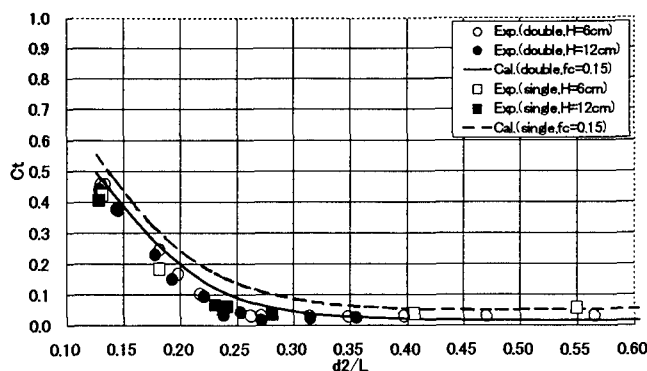


図-7 傾斜板列を前面壁とする二重式カーテンと単一カーテンの透過率 C_t の比較($h=60.8\text{cm}$, $B=34\text{cm}$, $d_1=33.5\text{cm}$, $d_2=45.7\text{cm}$)

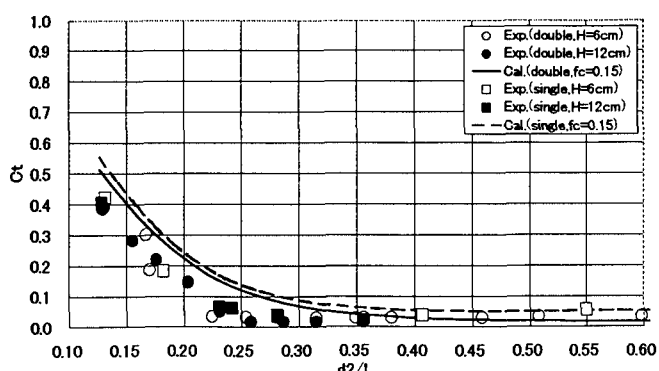


図-9 傾斜板列を前面壁とする二重式カーテンと単一カーテンの透過率 C_t の比較($h=60.8\text{cm}$, $B=26.5\text{cm}$, $d_1=33.5\text{cm}$, $d_2=45.7\text{cm}$)

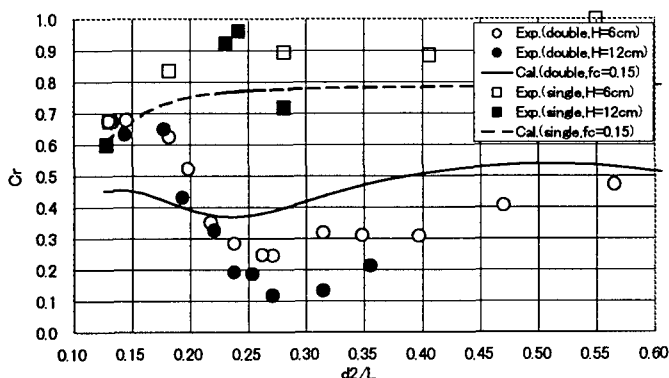


図-8 傾斜板列を前面壁とする二重式カーテンと単一カーテンの反射率 C_r の比較($h=60.8\text{cm}$, $B=34\text{cm}$, $d_1=33.5\text{cm}$, $d_2=45.7\text{cm}$)

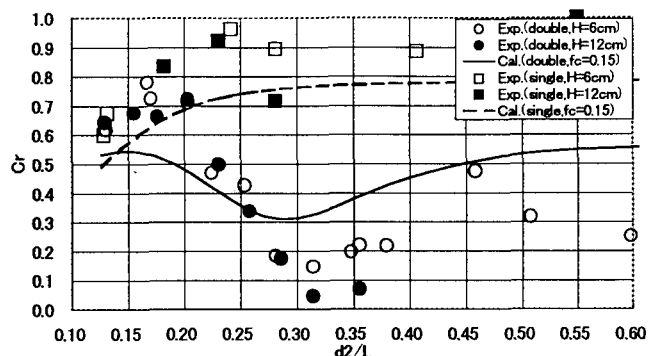


図-10 傾斜板列を前面壁とする二重式カーテンと単一カーテンの反射率 C_r の比較($h=60.8\text{cm}$, $B=26.5\text{cm}$, $d_1=33.5\text{cm}$, $d_2=45.7\text{cm}$)

3m程度である。各潮位に対応する水深は、このときの模型縮尺を考慮すると、それぞれ72.8cm、60.8cm、49.5cmになる。

堤体模型に作用せしめた入射波は、波高 H が 6cm, 12cm の 2 種類、周期 T が 0.70~1.7sec の範囲の 12 種類である。また、比較のため、前面壁の傾斜板列を取り除いた、単一カーテン壁による反射・透過率などをほぼ同様の波条件および水深条件を採用して測定した。

(2) 透過波及び反射波の特性

a) 前後壁間隔の影響

図-7, 8 は、平均潮位に相当する水位条件下で、前後壁間隔 $B=34\text{cm}$ のときのそれぞれ透過率 C_t , 反射率 C_r の d_2/L (d_2 : 後面壁の吃水) による変化を示す。また図-9, 10 は、同様の水位条件下で、前後壁間隔 $B=26\text{cm}$ のときの結果を同様にして示す。これらの図中には、比較のため、前面傾斜板列を取り除いた単一カーテン壁に対する結果および減衰波理論による算定結果についても併せ示してある。算定では、やはり線形抵抗係数 $fc=0.15$ を用いた。なお、単一カーテン壁の場合、その吃水を d_2 として表してある。

透過率 C_t を示す図-7, 9 より、前後壁間隔を変化させても、 C_t はほとんど変化せず、 d_2/L が小さく長周期に

なるにつれ増大するなどの傾向が認められる。また、単一カーテン壁の C_t と比較しても、差異はほとんど見られない。そして、このような傾向は、算定結果でも確認できる。

一方、反射率 C_r は、図-8, 10 に見られるように、特定の d_2/L の条件下で一旦低下する傾向が認められ、前出の不透過カーテン板で構成される二重式カーテン防波堤と同様に、反射波が有意に低減されていることがわかる。このことは、図中に示す単一カーテン壁の C_r との比較からも明白である。そして、前後壁間隔を広くすると、 C_r が一旦低下する d_2/L の値は小さくなり、より長周期の反射波が低減できることになる。また、反射率の極小値は、前後壁間隔の狭い方がより小さくなるようである。

次に、減衰波理論による反射率の算定結果と実験結果を比較すると、 C_r が一旦低下する d_2/L の値は、前後壁間隔を広くすると長周期側に移行するなど定性的な傾向は一致するが、 C_r が極小値を示す d_2/L の値をより長周期側に予測することや反射率の絶対値もより大きいなど定量的な一致度は不十分である。

b) 設置水深(潮位)の影響について

ここでは、反射率の低減により有効であることが確認された前後壁間隔 $B=26.5\text{cm}$ の条件に固定して、設置水深(潮位)による透過・反射率の変化を検討してみる。

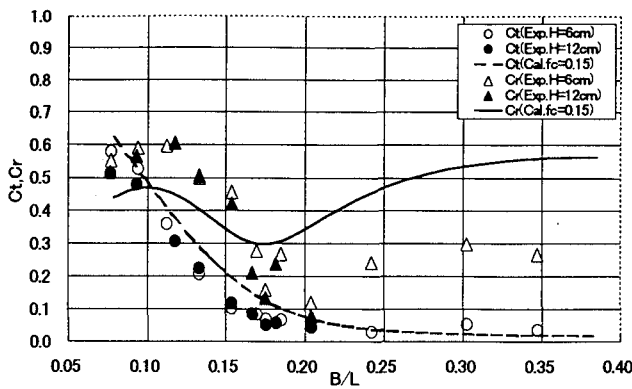


図-11 傾斜板列を前面壁とする二重式カーテンの透過・反射率($h=49.5\text{cm}$, $B=26.5\text{cm}$, $d_1=21.9\text{cm}$, $d_2=34.2\text{cm}$)

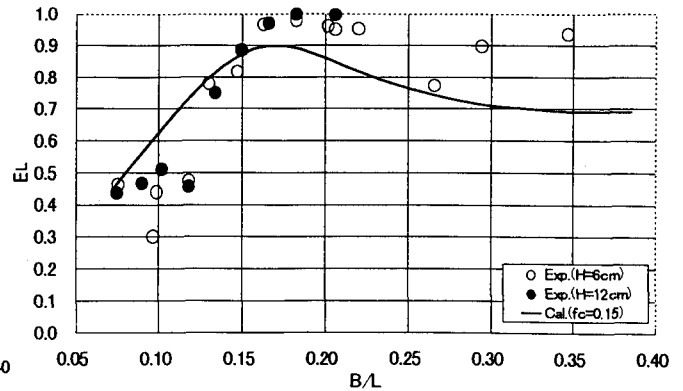


図-14 傾斜板列を前面壁とする二重式カーテンによるエネルギー逸散率($h=60.8\text{cm}$, $B=26.5\text{cm}$, $d_1=33.5\text{cm}$, $d_2=45.7\text{cm}$)

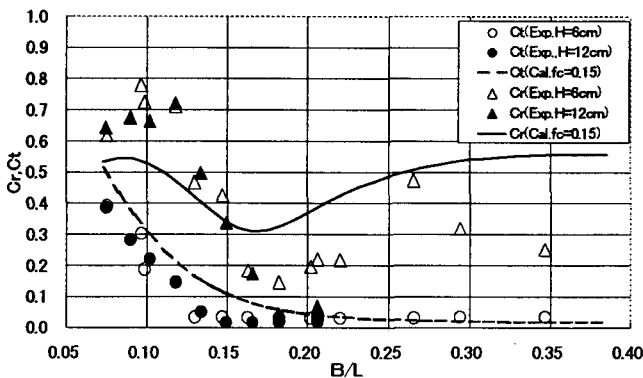


図-12 傾斜板列を前面壁とする二重式カーテンの透過・反射率($h=60.8\text{cm}$, $B=26.5\text{cm}$, $d_1=33.5\text{cm}$, $d_2=45.7\text{cm}$)

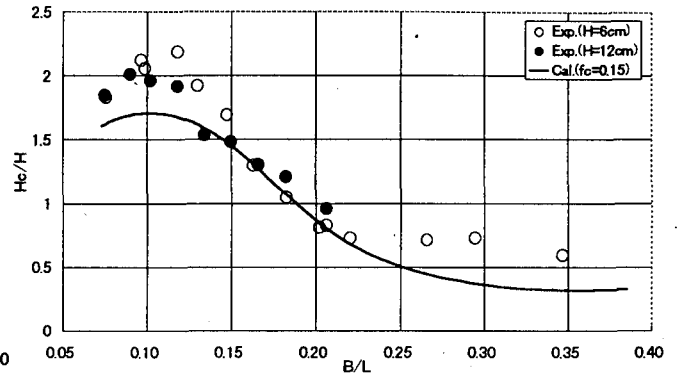


図-15 堤体内の平均波高($h=60.8\text{cm}$, $B=26.5\text{cm}$, $d_1=33.5\text{cm}$, $d_2=45.7\text{cm}$)

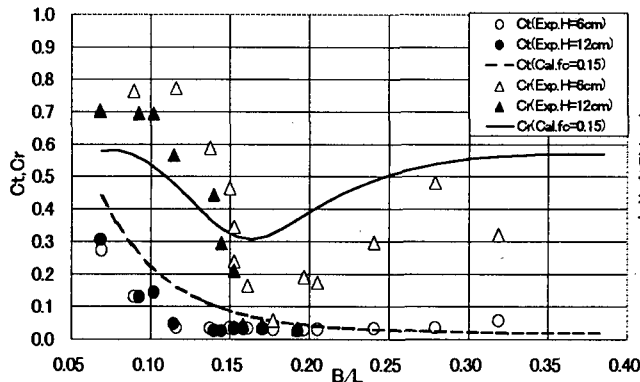


図-13 傾斜板列を前面壁とする二重式カーテンの透過・反射率($h=72.8\text{cm}$, $B=26.5\text{cm}$, $d_1=45.2\text{cm}$, $d_2=57.5\text{cm}$)

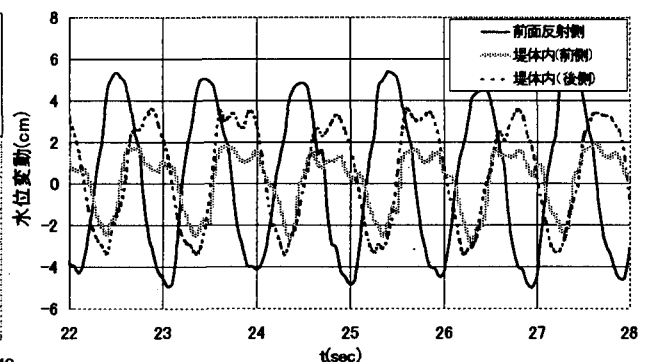


図-16 前面壁前後の水位変動($h=60.8\text{cm}$, $B=26.5\text{cm}$, $d_1=33.5\text{cm}$, $d_2=45.7\text{cm}$, $B/L=0.182$)

これらの検討結果を示すのが、図-11～13であり、設置水深が順次深くなる場合の C_t 、 C_r の B/L による変化を示す。図中には、線形抵抗係数 $f_c=0.15$ とした減衰波理論による算定結果についてもプロットしてある。

これらの図の透過率 C_t に着目すると、後面壁の波長に対する吃水比が最も大きくなる高水位（高潮位）の条件下で最も低く、水位が低下すると増加する傾向が認められる。そして、このような傾向は減衰波理論による算定結果とも一致している。

一方、反射率 C_r は各水位条件に共通して、 $B/L=0.18$ 付近で一旦低下する傾向が見られ、目的とした潮位条件に関係なく透過・反射率が低減できることを満足しているようである。そして、反射率の絶対値を比較すると、いずれの水位条件でも、極小値は $C_r<0.1$ と効果的に低減されていることや、水位条件が深くなると、 B/L の全体にわたり増加する傾向も認められる。

減衰波理論による算定結果と実験結果を比較すると、定性的な傾向は一致しているが、やはり定量的な一致度

は不十分である。これは、減衰波理論では傾斜板列間からの渦流れの相互干渉など、複雑な流体现象による逸散を十分に表現できないことによると考えられる。これについては、線形抵抗係数の値を変化させるなどの検討を含め、今後の課題としたい。

以上の検討より、傾斜板列を前面壁とする二重式カーテンでは、想定した範囲ではあるが、設置水深（潮位）に関係なく、透過・反射率の両者を効果的に低減できることが判明した。なお、水位条件が最も深い場合（高潮位）および浅い場合（低潮位）においても、図-8、10に示す中水位（平均潮位）の場合と同様に単一カーテン壁のときに比較すると効果的に反射波が低減できることを確認しており、ここに付記しておく。

（3）堤内波高の増幅特性およびエネルギー逸散率

図-14は、中水位（平均潮位）の条件で、かつ前後壁間隔 $B=26.5\text{cm}$ の条件下での B/L によるエネルギー逸散率 E_t の変化を示す。図中には、減衰波理論による算定結果も併せ示した。 E_t は、 Cr が極小値を示す $B/L=0.18$ 付近でピーク値を示し、エネルギー逸散と反射波の低減が直接的に関係することが分かる。

本実験における周期条件では、堤体間隔 B が波長 L より比較的短い条件であり、このときの堤内波高の空間分布も、水位条件に関係なく、ほぼ平坦なピストンモードの波面形状であることが実験的に確認されている。

図-15は、平均潮位に対応する水位条件下での、堤内平均波高比 H_c/H の B/L による変化を示す。図中には、実験結果及び減衰波理論による算定結果の両者を示す。この図から、堤内波高は、前出の不透過カーテン板の場合と同様に、特定の周期条件（ B/L ）で極大値を示すことが確認でき、前壁を透過性の傾斜板列としても、やはりピストンモードの波浪共振が生じることが分かる。

また、図-16は、上記した逸散率が極大となる周期条件下での前面傾斜板列の前後における水位変動の時間波形の関係を示す。図に見られるように、堤体前面と堤

体内の水位変動には、有意な位相差が確認でき、この位相差もエネルギー逸散に密接に関係することが推測できる。

4. 結語

(1)前面壁を傾斜板列とする二重式カーテン防波堤では、瀬戸内海のように潮位差が大きい海域でも、潮位に関係なく、効果的に反射波と透過波が低減できる。特に、単一カーテン壁の場合に比較すると、透過波の制御機能はそれほど改善されないが、反射波の低減機能が著しく、総体的なエネルギー逸散率は95%程度にもなる。

(2)異吃水の二重式カーテン防波堤では、反射波の低減とエネルギー逸散の増大は直接的に関係している。そして、エネルギー逸散の増大は、前面壁が不透過板でも傾斜板列で構成される透過板のときでも、前後壁間におけるピストンモードの波浪共振や反射側水域と堤体間の水位変動の位相差に起因する渦流れの強化による。

(3)前面壁を傾斜板列とする二重式カーテン防波堤では、その前後壁間隔を広くすると、反射率の低下が顕著な波周期は長周期側へ移行する。そして、反射波の低減効果が顕著になるのは、前後壁の間隔が波長の $1/6$ 程度のときである。

参考文献

- 1)中村孝幸・神川裕美・河野徹・楨本一徳：異吃水の二重式カーテン防波堤による反射波の低減機構について、土木学会第53回年次学術講演会概要集、第2部、pp.326～327, 1998.
- 2)中村孝幸・井手善彦：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、pp177～182, 1997.

(1999.4.19受付)