

傾斜版列を前面壁とする遊水室型杭式防波堤 の港湾域における効果について

EFFECTIVENESS OF A WATER CHAMBER TYPE BREAKWATER WITH AN
INCLINED PLATE ARRAY AS A FRONT IN A HARBOR

植本一徳¹・中村孝幸²・中山哲厳³・中村英輔⁴

Kazunori MAKIMOTO, Takayuki NAKAMURA, Akiyoshi NAKAYAMA
and Eisuke NAKAMURA

¹正会員 工修 復建調査設計㈱ 松山支社 (〒791-8036 愛媛県松山市高岡町26-8)

²正会員 工博 愛媛大学大学院 理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)

³正会員 工修 (独立)水産総合研究センター水産工学研究所水産土木工学部
(〒314-0408 茨城県神栖市波崎7620-7)

⁴学生会員 愛媛大学大学院 理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)

We have proposed a new type breakwater supported by piles, which consists of three major parts, i.e., an inclined plate array as a front wall, a vertical rear wall and a submerged plate at the bottom. It has been confirmed by the two dimensional study of vertical plane that the breakwater enables to reduce both reflected and transmitted waves for comparatively wide range of wave frequency, and also to generate mean current by wave actions in the offshore direction. In this study, we have examined the performance of this type of breakwater in the three dimensional wave fields, such as a harbor model basin. For the comparisons, conventional breakwaters, such as a curtain-walled breakwater and also a vertical impermeable breakwater, were also used as a harbor breakwater model. For the theoretical prediction of wave height distributions around the harbor, applicability of the numerical analysis based on the vertical line source Green's function method was extensively examined.

Key Words : *inclined-plate-array wall, pile supported breakwater, low wave reflection, low wave transmission, harbor tranquility*

1. はじめに

水深が比較的深く、海底の地盤が軟弱な海域に、来襲波浪に対して経済的かつ、高い波浪制御効果を有する防波堤を提案することは非常に困難であると考えられる。現在このような海域で比較的多く採用されている防波堤の構造形式としては、カーテンウォール型の杭式防波堤や軟弱地盤に地盤改良を施し、その上に重力式防波堤を構築する工法などである。しかしながら、これらの構造形式は、消波効果が十分でないことや、構造自体が大規模になるために不経済になる等の問題点がある。

例えばカーテンウォール型杭式防波堤の場合、長周期波が作用する大水深海域ではカーテン壁の吃水深を海底付近まで延伸しなければならない場合が多く、水平波力も増大するため杭径が大きくなる等の不経済な断面になりやすい。また、瀬戸内海などの潮位差が大きい海域などに設置する場合にもカーテン版下端が海面に露出してしまいうなどの問題点があり、その場合についてもカーテン壁吃水の延伸などで対応することになる。そして、カーテン版吃水の

延伸を行うと、不経済になるばかりではなく、反射波も高くなるなどの副次的な作用も大きい。

一方、重力式の場合は、反射波低減を行わなければならない場合は、前面に消波ブロックを設置するなどの工法が取られるが、それとともに地盤改良幅も大きくなり、不経済になるなどの問題もある。

それらを踏まえ、既に、著者ら¹⁾は、傾斜版列を前面壁とする二重壁式防波堤の遊水室下部に没水平版を設ける構造形式(以下、傾斜版列防波堤)を提案し、潮位差の大きい海域に対しても、波浪制御効果が十分に発揮されていることを断面二次元実験及び理論解析により明らかにした。しかしながら、当構造形式の防波堤を実際の港湾・漁港域に適用しようとする場合、平面的な防波堤配置に対する波浪制御効果を確認しておく必要がある。このため、本研究では、模擬港湾モデルを対象とした実験と理論により、傾斜版列防波堤を採用した場合の平面的な波浪の静穏化効果を明らかにする。そして、外郭防波堤の比較形式として単一カーテン防波堤や不透過堤を採用したときの静穏化効果についての検討を行い、当傾斜版列防波堤の有効性を確認する。

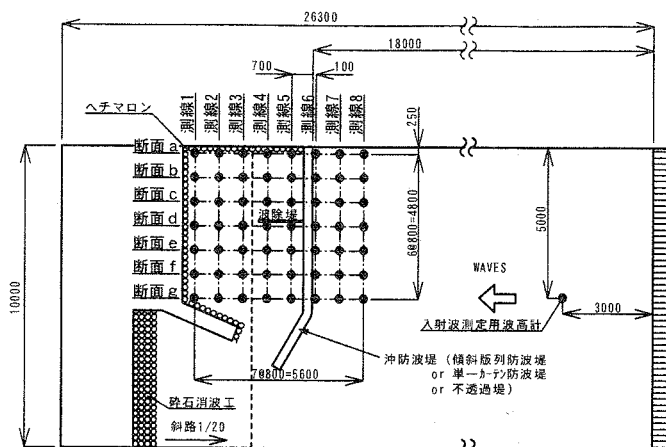


図-1 港湾モデル及び波高計測定位置
(縮尺: $S=1/25$, unit:mm)

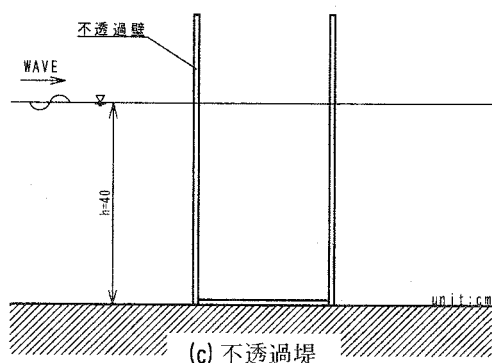
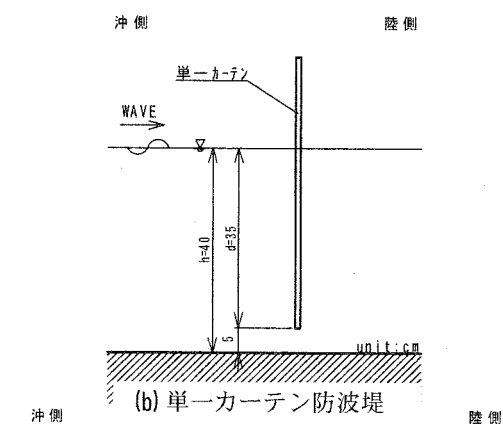
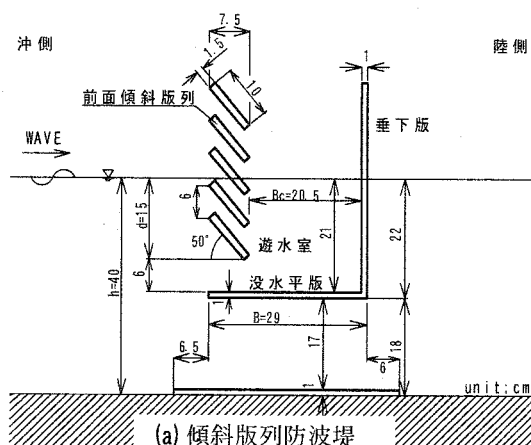


図-2 堤体模型 (縮尺: $S=1/25$, unit:cm)

表-1 実験波の条件 (模型縮尺 $S=1/25$)

周期: T		波高: H		波長: L		波長堤体 幅比 L/B
実験 $T(s)$	現地 $T(s)$	実験 (cm)	現地 (m)	実験 (cm)	現地 (m)	
1.2	6.0	5.0	1.3	194	48.4	6.68
1.4	7.0	5.0	1.3	239	59.8	8.25
1.8	9.0	10.0	2.5	327	81.7	11.27

2. 実験条件及び実験方法

(1) 実験条件

実験には、(独法)水産総合センター水産工学研究所の平面波浪水槽 (長さ26.0m×幅10.0m×高さ1m) を使用した。この水槽の一端には造波装置が他端には斜路が設置してある。

港湾モデルは図-1に示すように、沖防波堤・港湾泊地・物揚場及び突堤で構成されている。その時、沖防波堤は造波機から18.0mの位置に設置した。港湾泊地の大きさは一般的な港湾施設を参考に長さ約5.0m×幅4.0mとした。また、港湾泊地内のふ頭・突堤については、すべて直立堤で構成されている。直立堤で構成された境界については、反復反射の影響により過度に波が増幅されることが予想されたため、低反射材のヘチマロンを設置することで反射波の低減をはかった。また、港湾モデルの左岸側には波が直接入射する部分があるが、その区間については、やはり反射波の増幅防止を目的とした、砕石消波工を設置した。

沖防波堤の延長は、港内泊地内の物揚場に対して静穏度が保てる程度の延長とし、先端部の折れ角については、航路屈曲部の交角の最低角度 30° で設定した。²⁾

実験での作用波は規則波で、入射波高 H が 5cm, 10cm の 2 種類、周期 T については、1.2~1.8s の範囲内の波を選定した。また、水深 h は、M.W.L に相当する 40cm で実験を行った。いずれの条件も、瀬戸内海程度の海域を想定して設定した。これらの実験波の条件を表-1 に示す。なお、表中には波長 L 、波長遊水幅比 L/B 及び現地換算値について合わせ示す。このとき想定した模型縮尺は $S=1/25$ である。

(2) 堤体模型の諸元

図-2(a) は、本実験で用いた没水平版付きの傾斜版列型二重式カーテン防波堤の断面諸元を示したものである。傾斜版列防波堤の傾斜版の角度、間隔等については、従来の断面実験において最も効果的と判断された断面諸元を用いた。また、図-2(b), (c) は、比較断面として用いた、単一カーテン防波堤及び不透過堤の断面諸元である。単一カーテン防波堤の構造は、傾斜版列防波堤の透過波特性と類似させるためカーテン版下端を水深に対して 1 割程度 (5cm) 開口する設定とした。

(3) 実験方法

実験は、外郭施設としての沖防波堤全延長に、傾斜版列防波堤(図-2(a))及び比較のための単一カーテン防波堤と不透過堤(図-2(b),(c))の3構造を各々設置して行った。

各港湾モデルにおける港外及び港内の波高分布を把握するため、堤体の法線平行方向に7台の容量式波高計(a~g)を80cm間隔にて観測台車に設置した。そして、この7台の波高計を法線直角方向(波の入射方向)に80cm毎に移動させ、港外及び港内泊地の計8測線において波高を測定し、全体的な波高分布が検討できるようにした。このような波高の計測位置は図-1に示すとおりである。

3. 実験結果及び考察

(1) 静穏度検討における反射・透過率の設定

港湾内外の波高分布の理論算定には、中村ら³⁾による透過堤の影響を近似的に考慮する鉛直線グリーン関数法に基づく数値解析法を用いた。ただし、この算定法では、港湾境界の反射率や透過性防波堤についての透過率の設定が必要になる。ここでは、断面二次元的な検討結果に基づき、これらを設定した。

図-3, 4は、各々傾斜版列防波堤と単一カーテン防波堤の場合の、反射率: Cr 、透過率: Ct の結果を模型波の周期 T の変化で示す。図中には、中村・井出⁴⁾の減衰波理論による算定結果も合わせ示す。なお、理論算定では、等価線形抵抗係数 fc が必要となるが、ここでは、既存の実験等との整合性を考慮し、 $fc=0.35$ (傾斜版列防波堤)と $fc=0.15$ (単一カーテン防波堤)とした。

これらの図の比較から、傾斜版列型堤体では、反射・透過率の両者がカーテン防波堤に比較して低くなることが分かる。また、実験及び算定結果は、比較的一致する傾向にあることが確認できる。なお、図-3では、作用波高 $H=10\text{cm}$ の時の実験結果のみを示すが、実験では $H=5, 15\text{cm}$ についても同様の検討を行っており、やはり実験結果は算定結果とほぼ一致することなどを確認している。

そして、これらの断面二次元的な検討結果を参照して、平面的な静穏度の理論的な検討には、表-2に示す Cr, Ct の値の組み合わせを用いた。

また、各モデル港湾ともに直立堤部分は、入射波が直接作用する港外側の壁について、消波材であるヘチマロンを設置して低反射構造とした。このヘチマロンの反射率については、別途実験で検討しており、周期条件により多少の誤差のあるものの、ほぼ $Cr=0.6\sim 0.8$ の結果を得ている。ここでは、その中間値である $Cr=0.7$ を用いた。また、左岸側の碎石消波工部については、消波ブロック模型及び碎石を設置し反射低減を行っている。この時の反射率については、通常の基本設計を行う際によく用いられている、 $Cr=0.3$ を準用した。また、不透過直立堤の反射率についても、通常設計時によく使用されてい

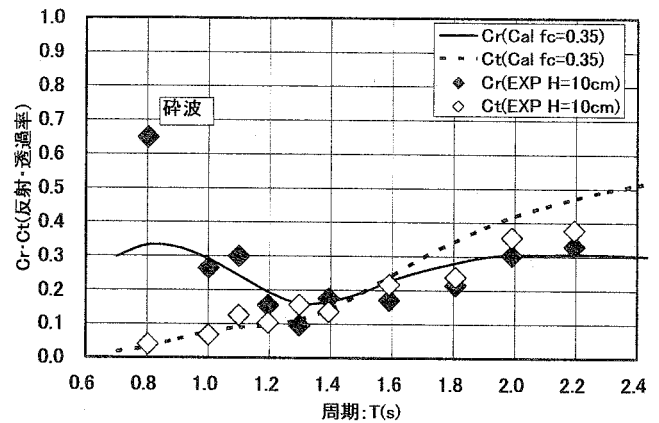


図-3 傾斜版列防波堤の反射、透過率
(M. W. L, $H=10\text{cm}$, $h=40\text{cm}$; 断面実験)

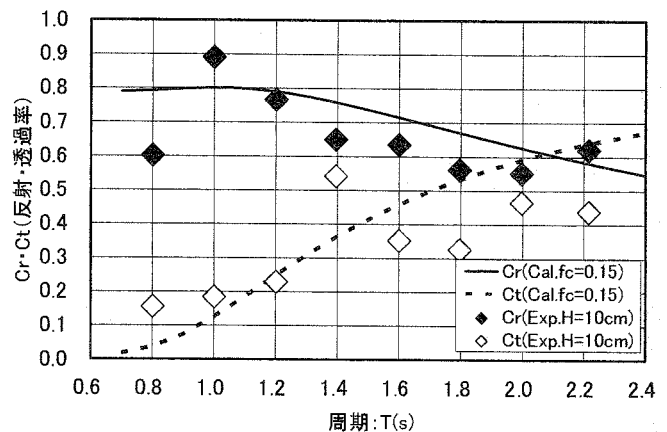


図-4 単一カーテン防波堤の反射、透過率
(M. W. L, $H=10\text{cm}$, $h=40\text{cm}$; 断面実験)

表-2 反射及び透過率(静穏度検討)

周期 T (s)	波高 H (cm)	傾斜版列防波堤		単一カーテン防波堤		不透過堤	
		Cr	Ct	Cr	Ct	Cr	Ct
1.2	5.0	0.20	0.10	0.75	0.30	0.90	0.00
1.4	5.0	0.15	0.15	0.70	0.40	0.90	0.00
1.8	10.0	0.25	0.30	0.60	0.60	0.90	0.00

る $Cr=0.90$ を周期条件に関係なく用いた。

(2) 傾斜版防波堤による静穏度効果

図-5, 7, 9は、外郭防波堤に傾斜版列防波堤を用いた場合の入射波高を基準にした波高比の平面分布の算定結果を示す。また、図-6, 8, 10は、そのときの代表的な『断面c』についての実験及び算定結果の比較を示す。なお、『断面c』は図-1に示すように湾奥のほぼ中央部に位置する。各々の図は、それぞれ周期 $T=1.2\text{s}, 1.4\text{s}, 1.8\text{s}$ の結果に対応している。これらの図より、長周期側に移行するほど、港内波高は増大することが分かる。これは、傾斜版列防波堤の透過率が長周期側で増加することや港口部よりの回折波の影響が増大するためと考えられる。

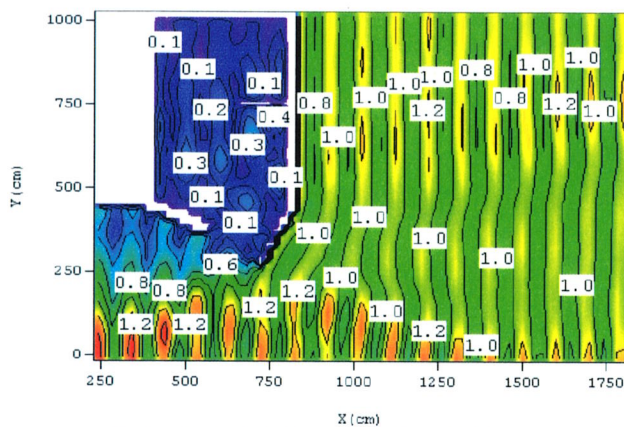


図-5 平面波高比分布の算定結果
($T=1.2s$, $H=5cm$, $h=40cm$; 傾斜版列)

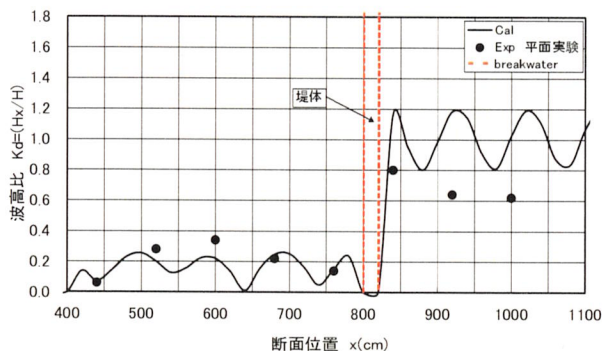


図-6 測線別の波高比分布『断面c』
($T=1.2s$, $H=5cm$, $h=40cm$; 傾斜版列)

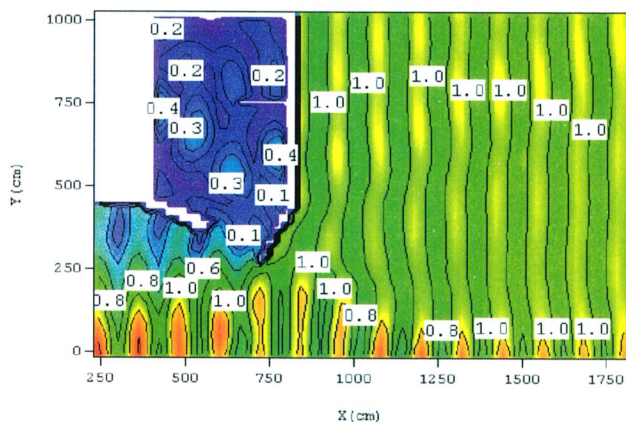


図-7 平面波高比分布の算定結果
($T=1.4s$, $H=5cm$, $h=40cm$; 傾斜版列)

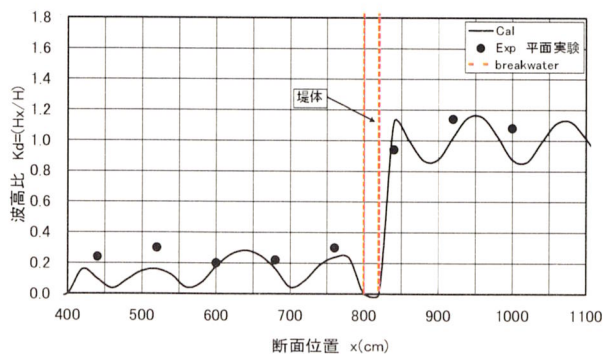


図-8 測線別の波高比分布『断面c』
($T=1.4s$, $H=5cm$, $h=40cm$; 傾斜版列)

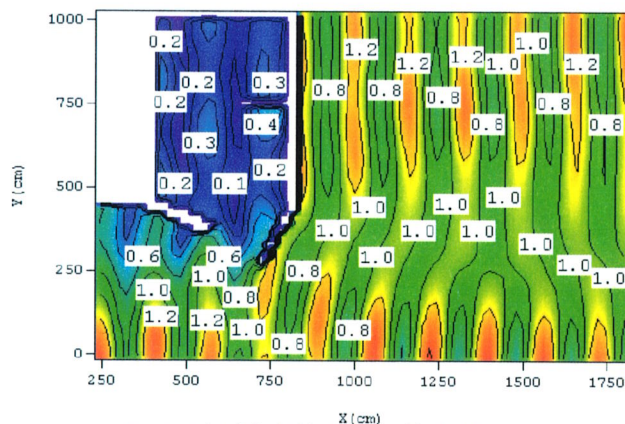


図-9 平面波高比分布の算定結果
($T=1.8s$, $H=5cm$, $h=40cm$; 傾斜版列)

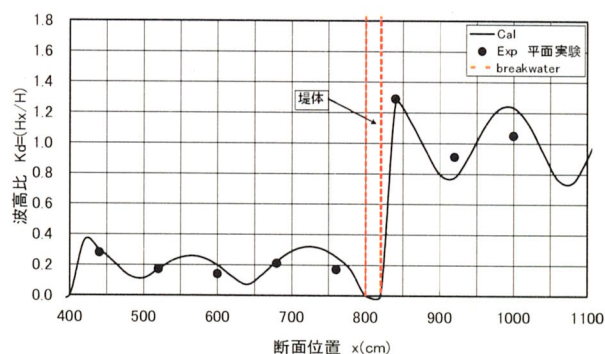


図-10 測線別の波高比分布『断面c』
($T=1.8s$, $H=10cm$, $h=40cm$; 傾斜版列)

一方、防波堤の沖側については、反射率の特性によるものと考えられるが、最も長周期の条件で大きくなる傾向が見られる。実験結果と算定結果を比較すると、 $T=1.2s$ の沖側での結果を除けば、両結果はほぼ一致している。 $T=1.2s$ の時の防波堤沖側の結果において差異が見られるのは、反射率を設定する際、実験値が 0.15 に対して、算定結果の 0.20 と、算定結果により近い値で設定したことが多少なりとも原因になっているのではないと思われる。このため、静穏化効果を理論的に算定する場合の反射、透過率は、断面二次元実験による結果を用いることで、一致度はさらに向上すると推測される。そして、全体的には断面二次元理論による透過・反射率を用いても、工学的にそれほど大きな問題は生じないものと考えられる。

(3) 単一カーテン防波堤との比較

図-11, 13 は、外郭防波堤を単一カーテン防波堤とした場合の入射を基準とした波高比の平面分布の算定結果を示す。これらの図で波周期の条件は、 $T=1.4s$, $1.8s$ に対応している。また、図-12, 14 は前出と同様に、代表的な『断面 c』における算定結果と実験結果の比較を示す。これらの図より、通常、軟弱地盤上に建設される防波堤で比較的良好に利用されている単一カーテン防波堤では、港内においては、ある程度の静穏効果が期待できるものの、防波堤の

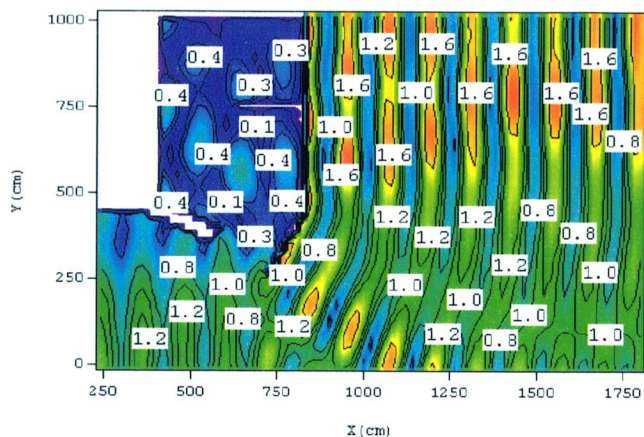


図-11 平面波高比分布の算定結果
($T=1.4s$, $H=5cm$, $h=40cm$; 単一カーテン)

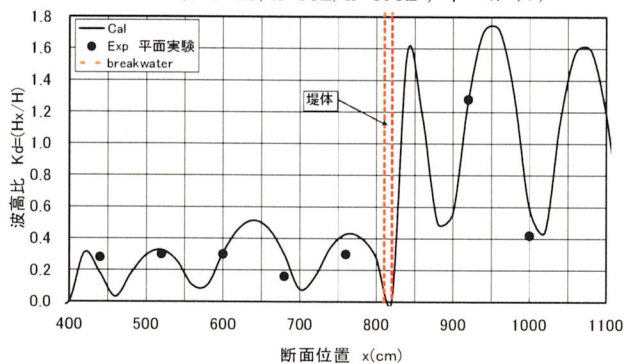


図-12 測線別の波高比分布『断面c』
($T=1.4s$, $H=5cm$, $h=40cm$; 単一カーテン)

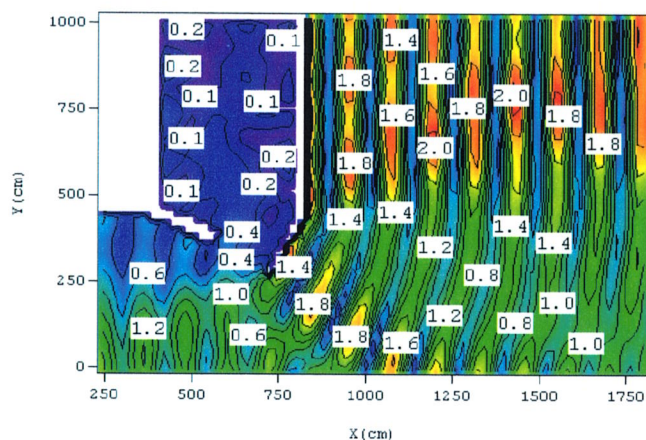


図-15 平面波高比分布の算定結果
($T=1.4s$, $H=5cm$, $h=40cm$; 不透過堤)

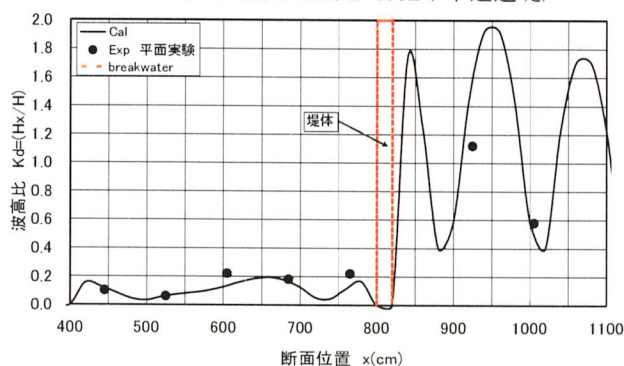


図-16 測線別の波高比分布『断面c』
($T=1.4s$, $H=5cm$, $h=40cm$; 不透過堤)

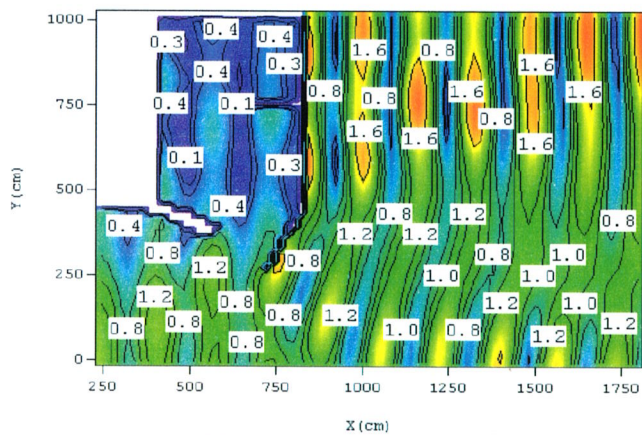


図-13 平面波高比分布の算定結果
($T=1.8s$, $H=10cm$, $h=40cm$; 単一カーテン)

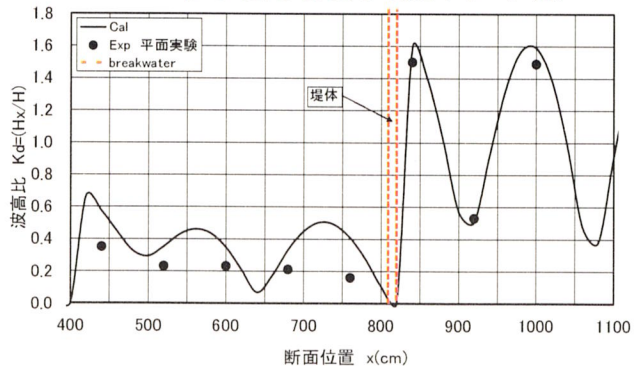


図-14 測線別の波高比分布『断面c』
($T=1.8s$, $H=10cm$, $h=40cm$; 単一カーテン)

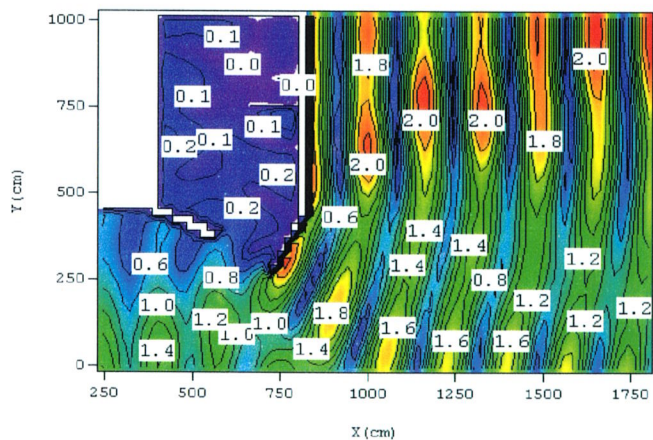


図-17 平面波高比分布の算定結果
($T=1.8s$, $H=10cm$, $h=40cm$; 不透過堤)

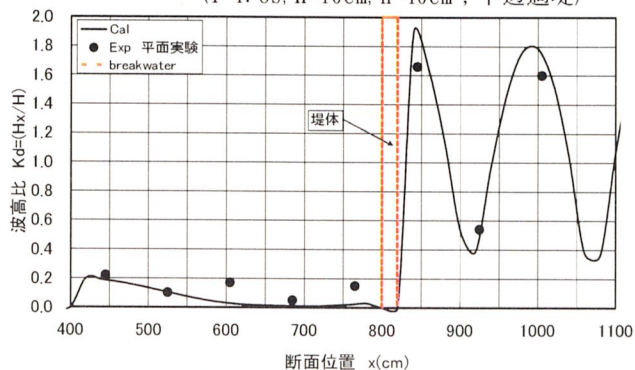


図-18 測線別の波高比分布『断面c』
($T=1.8s$, $H=10cm$, $h=40cm$; 不透過堤)

沖側については、反射率が高いため重複波の極大波高が大きくなるなど、副次的な影響が大きい防波堤であることが確認できる。このように単一カーテン防波堤では、港内の静穏化効果を高めるために、その透過率を不透過堤と同程度まで低減しようとする、カーテン版の吃水深を海底付近まで延伸するなど深くしなくてはならないことや、防波堤前面に航路や生け簀等の海洋施設がある場合には、反射波の影響が強く現れるため採用に際して十分注意しなければならないことなどが判明した。

(4) 不透過堤との比較

図-15, 17 は、外郭防波堤を不透過堤とした場合の波高比の平面分布の算定結果を示す。作用波の条件は、周期 $T=1.4s, 1.8s$ のときの結果である。また、図-16, 18 は前出と同様に、代表的な『断面 c』における算定結果と実験結果を示す。外郭防波堤を不透過堤にした場合、実験結果、算定結果ともに最も波高比が低くなるなど、やはり港内の静穏効果は最もよい結果となっている。

一方、港外側については、当構造形式のとき最も波高が大きい。これは、反射率が一番大きいためである。不透過堤についても、単一カーテン防波堤と同様に反射波に対して留意した配置を考えなければならない防波堤構造であることが分かる。また、不透過堤の場合の反射率については、 $C_r=0.9$ 程度に設定すればよいことなども判明した。

4. まとめ

(1) 傾斜版列防波堤を沖防波堤に用いると、港内の静穏化のみならず外郭防波堤の沖側についても反射波の低減が可能になるなど、非常に効果的な防波堤である。そして、従来において多用されてきている、カーテン防波堤では、港内においてはある程度の静穏化効果を期待できるものの、防波堤の沖側では反射波の影響が強く現れるなど、副作用の大きい防波堤である。

(2) 港内の静穏化効果を上げるためには、不透過堤

を沖防波堤として採用することも考えられるが、港湾内外の海水交換機能が期待できないことや、やはり反射率が大きくなることなどを考えると、採用に際して十分に留意する必要がある。

(3) 透過堤の影響を近似的に採り入れた鉛直線グリーン関数法に基づく平面波浪の算定法を用いることにより、各種の構造形式の防波堤を対象にして、港湾内外の波高分布を推定することができる。このとき、算定では、対象防波堤の反射・透過率が必要になるが、これらの係数には、断面二次元実験や断面二次元理論より求められる値を用いればよい。なお、本論文においては、紙面の都合上、各検討において代表的な『断面 c』についての実験及び算定結果しか記載できなかったが、その他の測線についても、同様な結果を得ていることを付記しておく。

最後に、本論文で言及できなかったこととして、遊水室構造の傾斜版列型防波堤に作用する波力の水理学的な特性の把握があるが、これについては既に断面実験及び理論解析による検討を進めつつあり、今後の機会に公表したい。また、港内静穏化効果については、規則波のみならず不規則波に対する検討が必要と考えており、今後続く検討課題としたい。

謝辞：本研究は、JFE エンジニアリング(株)、オリエンタル建設(株)、復建調査設計(株)、(財)災害科学研究所の共同研究として実施したものであり、関係する諸氏に深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 1) 楨本一徳、中村孝幸：傾斜版列を有する遊水室型海水交換防波堤の効果について、海岸工学論文集、第 53 巻、pp. 696-700, 2006.
- 2) 港湾の施設の技術上の基準・同解説(下巻)、社団法人日本港湾協会、H11. 4.
- 3) 中村孝幸、加藤孝輔、森田知志：鉛直線グリーン関数法による水深変化を伴う港湾域の波高分布の算定法、海岸工学論文集、第 44 巻、pp. 16-20, 1997.
- 4) 中村孝幸、井出善彦：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.