

# 波浪フィルタ理論による共振装置の最適化と 海岸・港湾構造物への適用性について

森田知志<sup>1</sup>・中村孝幸<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 博士(工) (株)熊谷組 土木技術部 (〒162-8557 東京都新宿区津久戸町2-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

電気工学におけるローパスフィルタ回路の設計理論を水路を伝播する水波の運動に応用し、入射波に対して効果的なフィルタ特性を有する波浪共振装置の最適化手法が示された。この方法では水路の開口幅、水深および制御すべき波の周期帯を設定することによって、共振装置各部の構造寸法が試行錯誤することなく簡単な机上計算により求められることに特長がある。共振装置の具体的な応用例として海岸の防護を目的に沖合に設置する離岸堤と港内波浪の静穏化のための港口部防波堤が取り上げられ、波浪数値解析と水理実験により共振装置型堤体構造の波浪制御効果と設計方法の妥当性が確認された。

**Key Words :** wave filter theory, detached breakwater, breakwater configuration, harbor tranquility, long wave attenuation

## 1. はじめに

音響工学や機械工学の分野では、波動伝播の基礎理論が電気工学における交流電気の伝送理論に類似していることに着目して、音波や振動の伝播経路や媒質の条件を等価な電気回路に変換して取扱う解析方法が知られている<sup>1)</sup>。電気工学における伝送理論はシンプルな基礎式で構成されているため、各々の分野に特有の複雑な現象までは考慮できないけれども、共振による波振幅の極大化などの大まかな特性を解釈するには便利な方法と言える。海岸・港湾工学の分野では、湖や内湾での長周期波の共振現象の解析へ適用した例が堀川<sup>2)</sup>によって紹介されているものの、設計などへの実務的な応用までには至っていないかった。

波浪フィルタ理論<sup>3)</sup>は、このような等価電気回路の考え方をさらに進めて、電気工学でのローパスフィルタ回路の設計理論を矩形水路内を伝播する水波の運動に適用したものである。これによれば、波浪に対して効果的なフィルタ特性を有する水路各部の形状寸法を、目標とする波浪の周期帯の条件から簡単な筆記計算によって直接決定することができ、模型実験や数値計算等による試行錯誤をすることなく最適化されたフィルタ特性をもつ波浪共振装置が与えられるところに大きな特長がある。

既に著者ら<sup>4)</sup>は波浪フィルタ理論に基づいて共振装置を最適化し、その波浪制御特性について実験や数値解析を実施して、ほぼ目標どおりの周期帯において優れたフ

ィルタ特性が得られることなど、同理論の設計法としての有効性を明らかにした。さらに共振装置の具体的な適用先として、海岸防護を目的とした沖合設置型の離岸堤構造<sup>5)</sup>や港内波浪の静穏化のための港口部における防波堤配置<sup>6)</sup>を提案し、それらの有効性について数値計算や水理実験による検討を行ってきたところである<sup>7)</sup>。特に港内静穏度の改善を目的とした港口部設置型の共振装置は、近年顕在化してきた長周期波による係留船舶の荷役作業障害に対して有効な対策であることや、アメリカのLong Beach港に最近完成した長周期波対策用の防波施設<sup>8)</sup>は、結果的に波浪フィルタ理論によって最適設計された共振装置に酷似した形状となっていることなどが示されてきた<sup>9)</sup>。

本稿は、以上の波浪フィルタ理論に基づく研究成果をとりまとめたもので、まず同理論による共振装置の最適化手法について概説する。そして沖合離岸堤構造および港口部設置型の防波堤配置に共振装置を応用した場合の各々の波浪制御効果について、波浪変形理論に基づく数値計算および水理模型実験の両面から明らかにすると共に、既存の構造形式との比較などからそれらの性能評価を行う。最後に、アメリカのLong Beach港に最近設けられた防波施設について、その形状寸法や波浪制御効果を波浪フィルタ理論の側面から再検討し、同理論の有効性について検証するものである。

## 2. 波浪フィルタ理論による共振装置の最適化手法

望月<sup>3)</sup>は、電気工学のローパスフィルタ回路の理論を利用することによって、波浪の特定の周期帯に対して効果的なフィルタ特性を有する波浪共振装置の形状を見出すための合理的な設計理論を提案し、これを波浪フィルタと称した。この理論によると、共振装置の平面形状は実用的には図-1のように仮定され、未知の形状寸法としては水深  $h$  や装置の開口幅  $b_0$  の他に  $b_3, l_1, l_2$  が採用されている。そして、水理学における微小振幅長波の理論と電気工学の電信方程式およびフィルタ回路理論を考慮して展開すると、共振装置の等価電気回路が図-2のように表されると共に、回路を構成する各々の素子は以下のように共振装置の未知の形状寸法と対応づけることができる。

$$L_s = \frac{l_1}{b_0 g h} \quad (1)$$

$$L_p = \frac{l_2}{4 b_3 g h} \quad (2)$$

$$C_p = 2 b_3 l_2 \quad (3)$$

ここに、 $L_s, L_p$ ：等価インダクタンス、 $C_p$ ：等価キャパシタンス、 $g$ ：重力加速度である。

図-2に示した電気回路は一種のローパスフィルタ回路を構成しており、交流電気の伝送回路理論によると電気フィルタとしての設計式が以下のように与えられている。

$$L_s = \frac{mR}{2\pi f_c} \quad (4)$$

$$L_p = \frac{R(1-m^2)}{4\pi m f_c} \quad (5)$$

$$C_p = \frac{m}{2\pi f_c R} \quad (6)$$

$$m = \sqrt{1 - (f_c/f_\infty)^2} \quad (7)$$

ここに、 $\pi$ ：円周率、 $R$ ：負荷抵抗、 $f_c$ ：カットオフ周波数、 $f_\infty$ ：減衰極周波数である。フィルタ回路の周波数特性は、これらの周波数をパラメータとして図-3のような高周波数減衰型の特性を示すことが知られている。なお、ここでの「減衰」は入射波振幅に対する通過波振幅の減少を意味するもので、波浪フィルタ理論では流体粘性等による非線形減衰は考慮されていないことを付記しておく。

式(4)-(7)の電気フィルタ回路の設計式は、式(1)-(3)の関係式を利用すると、図-1に示した波浪共振装置に対する表示式として以下のように導かれる。

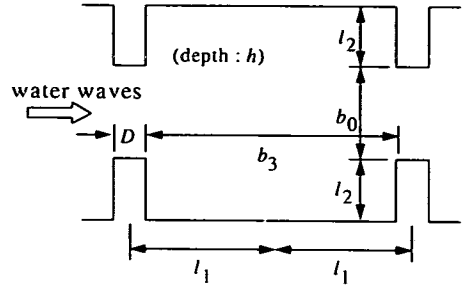


図-1 共振装置の平面形状

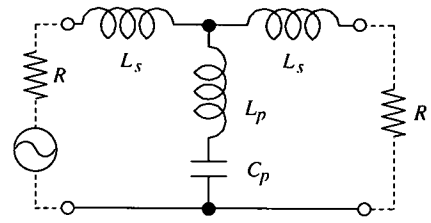


図-2 共振装置の電気的等価回路

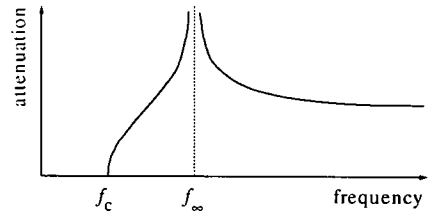


図-3 電気フィルタ回路の理論減衰特性

$$b_3 = \frac{m b_0}{\sqrt{2(1-m^2)}} \quad (8)$$

$$l_1 = \frac{m T_c \sqrt{gh}}{2\pi} \quad (9)$$

$$l_2 = \frac{T_c}{\pi} \sqrt{\frac{gh(1-m^2)}{2}} \quad (10)$$

ここに、 $T_c = 1/f_c$ 、 $m$  は  $T_\infty = 1/f_\infty$  を定義して次式のように再表示される。

$$m = \sqrt{1 - (T_\infty/T_c)^2} \quad (11)$$

式(8)-(11)が波浪共振装置の設計式であり、これらの関係式を利用すると、水深  $h$  と水路開口幅  $b_0$  および制御対象とする波浪の周期帯の条件  $T_c$  と  $T_\infty (< T_c)$  を設定することによって、最適化された波浪共振装置の形状寸法  $b_3, l_1, l_2$  が完全に決定できる。ただし、幾何学的な制約から壁厚  $D (=2l_1 - b_3)$  が現実的な値となるように入力条件を調整する必要がある。

### 3. 沖合離岸堤への適用

わが国各地の海岸における離岸堤の設置例をみると、消波ブロックなどによる波浪透過型の堤体が100m前後にわたって連続的に設置されており、水理的な作用面からみると堤体の断面は全延長で様な透過性能となるように設計されている。これに対して共振装置の連続配置による離岸堤の構造を想定すると、複数の独立した大型ブロックを直線状に並べる構造が考えられ、平面的な透過性構造となることに特徴を見出すことができる。そして、各ブロックどうしの間隔は波浪フィルタ理論による最適設計により比較的大きくとすることができるため、実質的な延長の少ない構造で効率的な消波効果が発揮できることが期待される。

#### (1) 共振装置の平面形状

##### a) 矩形型共振装置

水深 $h=8\text{m}$ 、開口幅 $b_0=12\text{m}$ 、フィルタとしての周期帯条件を $T_w=3.8\text{s}$ 、 $T_c=7.0\text{s}$ と設定し、共振装置の基本形状を式(8)-(11)によって算定した結果を表-1に示す。離岸堤に適用する場合には、図-4に示すように、H型の大型ブロックを直線状に配列し、各堤体間の遊水部が図-1に示した共振装置として機能する平面構造が考えられる。ブロックの配列ピッチ長 $\lambda$ は結果的に27mとなり、開口率( $b_0/\lambda$ )は44%と従来型の波浪制御構造物に比べて大きな値が得られている。

有限長の離岸堤を構成する場合には、配列ピッチ長 $\lambda$ をそのままに、ブロックの個数で調整する。ここでは、既設離岸堤の設置例や後述の実験水槽の規模を考慮して離岸堤の延長を $W=150\text{m}$ と設定し、合計6基のH型ブロックで構成されるものとした。

##### b) 平行堤共振装置

図-5は平行型ブロックを採用した場合の平面形状を示す。図-1の形状をほぼ忠実に具体化した矩形型共振装置に対して、岸沖方向の隔壁を省略したよりシンプルな構造である。この場合の遊水部は波が直角に入射するときには、各堤体の中立軸に関する鏡像関係を考慮すると矩形型共振装置の場合と同様に機能するものと期待できる。これは構造の簡略化を目的として考案した構造であり、平行堤共振装置と称することとする。

#### (2) 波浪に対する共振装置のフィルタ特性

有限長の離岸堤背後に伝達する波浪は、各ブロック間の遊水部を通過する透過波と堤体列の両端部からの回折波とによりもたらされる。これらのうち共振装置の効果が直接反映される透過波の特性について、理論解析結果による検討を行う。ここで用いた解析法は中村・小野<sup>10)</sup>により開発されたもので、任意平面形状の構造物が

表-1 波浪フィルタ理論による離岸堤形状の算定例

設定条件		計算結果
水深 $h$ :	8.00m	$l_1=8.28\text{m}$
開口幅 $b_0$ :	12.0m	$l_2=7.57\text{m}$
$T_w$ :	3.80s	$b_3=13.1\text{m}$
$T_c$ :	7.00s	$D=3.44\text{m}$

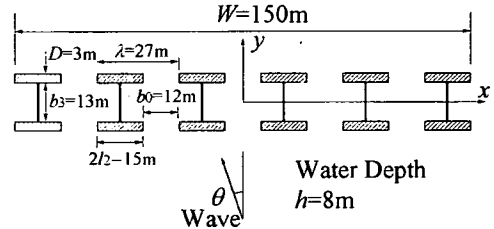


図-4 矩形型共振装置を応用した離岸堤の平面形状

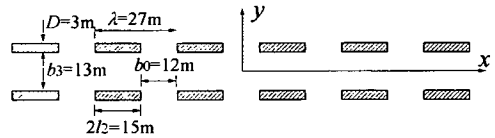


図-5 平行堤共振装置を応用した離岸堤の平面形状

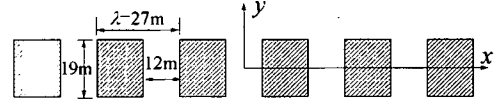


図-6 矩形柱体列による離岸堤の平面形状

一定の配列ピッチで直線状に無限個設置された状況下で、周囲の波高分布が微小振幅波理論に基づき算定できる。

解析結果を図-7および図-8に示す。各図の縦軸には透過波高の配列方向への空間的なRMS値と入射波高との比 $(K_{rms})$ が、横軸には配列ピッチ長 $\lambda$ と波長 $L$ との比 $\lambda/L$ が、第二横軸には波周期 $T$ がとってある。また、各図中には比較対象として図-6に示す矩形柱体列の解析結果についても併せて示してある。

図-7は直角入射波( $\theta=0\text{deg}$ )を想定した場合の結果であり、共振装置の形状としては表-1に示した基本形状に加えて、 $b_3$ のみを $\pm 10\%$ 増減させた場合の結果も示してある。なお、直角入射波の場合には鏡像原理により矩形型共振装置と平行堤共振装置の解析結果は等しくなり、図中では共振装置型堤体列としてまとめて表記した。この図より、共振装置型堤体列の $(K_{rms})$ は、 $\lambda/L=0.45\sim 1.6$ の広範囲の条件下で矩形柱体列のそれを下回り、良好な消波特性が得られている。この範囲は $T_w$ と $T_c$ によって表される設定時の周期帯(3.8~7.0s)よりも若干広めであり、 $T_w$ と $T_c$ によって消波構造物としての有効周期帯を余裕をもって表現可能であるものといえる。なお、 $\lambda/L=1.0$ 付近で $(K_{rms})$ がスパイク状の変化を示すのは構造物の無限配列

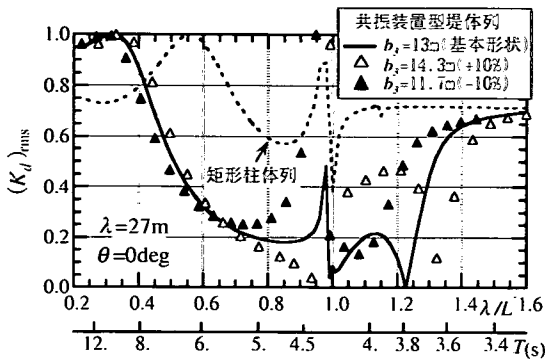


図7 各種の堤体列による透過波高の空間的RMS値の比較 ( $\theta=0\text{deg}$ )

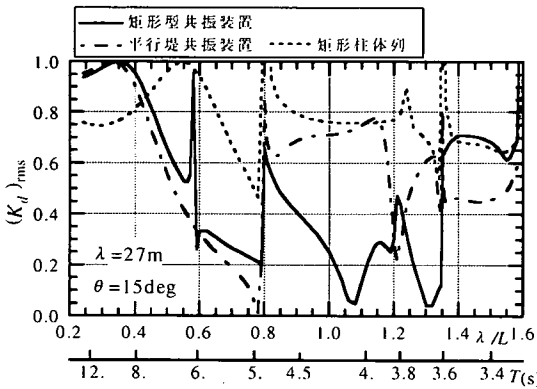


図8 各種の堤体列による透過波高の空間的RMS値の比較 ( $\theta=15\text{deg}$ )

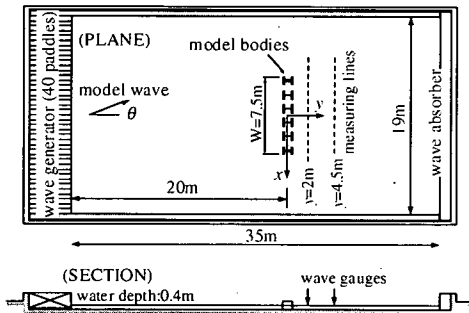


図9 平面水槽と実験模型の配置状況

を想定したことによって配列方向への横波共振が生じるため、配列数が有限の場合にはこれほどの急激な変動は生じない。

$b_2$ を変化させた場合の影響についてみると、 $b_2$ を基本形状から+10% ( $b_2=14.3\text{m}$ )とした場合の  $(K_d)_{\text{rms}}$  は、 $0.7 < \lambda/L < 1.0$ の条件下ではより小さく、 $1.0 < \lambda/L < 1.3$ では逆に大きく現れることや、-10% ( $b_2=11.7\text{m}$ )とした場合には逆に  $0.7 < \lambda/L < 1.0$ で大きくなるなど、 $\lambda/L$ の変化によって消波効果に大きな変動が生ずることがわかる。これに対し

て、基本形状 ( $b_2=13\text{m}$ )による  $(K_d)_{\text{rms}}$  は、 $1.0 < \lambda/L < 1.3$ の範囲ではより小さく、 $\lambda/L < 1.0$ および  $1.3 < \lambda/L$ の範囲では  $b_2$ を増減させた場合の中間的な値となっており、全体的に変動の少ない消波特性を示している。本研究では  $b_2$ の他、 $l_1$ や  $l_2$ が消波効果に与える影響についても同様な検討を行っているが、いずれの量においても基本形状としての算定値が、 $T_m$ と  $T_c$ によって表される周期帯において最も安定した消波効果を与えることを確認している。

このように、波浪フィルタ理論によると、対象とする波の周期帯を指定して、変動の少ない安定した消波効果を有する共振装置の形状を、理論解析による試行錯誤的な検討をすることなく簡単に最適設計できることが判明した。

次に図-8は波の入射角が  $\theta=15\text{deg}$ の場合について、矩形型および平行堤共振装置の結果を示す。この場合にも各共振装置を備えた堤体列の  $(K_d)_{\text{rms}}$  は矩形柱体列のそれを大きく下回るように出現しており、装置が有効に作用していることがわかる。ただし、平行堤共振装置の  $(K_d)_{\text{rms}}$  は  $\lambda/L=0.8\sim 1.2$ の条件下で0.7程度にまで増加するなど、矩形型共振装置に比べると消波効果が小さくなっている。また、 $\lambda/L=0.6$ および0.8付近の条件下では新たなスパイク状の不連続変化が認められるが、これらは、波の進行方向からみた遊水部の形状変化によって横波共振の発生パターンが異なるためと思われる。

### (3) 共振装置型離岸堤の規則波に対する波浪制御効果

#### a) 実験装置および実験方法

共振装置を組み込んだ有限長の離岸堤の規則波に対する有効性を検討するため、平面水槽による波高分布の測定実験を行った。図-4および図-5に示した離岸堤構造を対象に縮尺を1/20とした堤体模型を鋼材と耐水合板により製作した。平面水槽内への模型の設置状況は図-9に示すとおりであり、水域の平面位置を表す  $x-y$ 座標系を堤体列の中心に原点をとって図示のように設定した。水槽の一端には40枚のパドルからなる多方向造波機が、他端には厚さ1mの消波装置が設置されている。また水槽両側の内壁は鋼板による不透過構造となっている。ここでは入射波として周期  $T_m$ が0.75~1.98s (現地換算周期  $T=3.4\sim 8.9\text{s}$ )の5種類、波向  $\theta$ が  $0\text{deg}$ および  $15\text{deg}$ 、波高  $H$ が5cm程度の計10種類の規則波を採用し造波機の運転を行った。なお、斜め波の実験では森田・大本<sup>11)</sup>による水槽側壁による波の完全反射を考慮した造波方法を採用し、模型位置 ( $y=0$ )における入射波の分布が水槽横断方向にわたって均一となるように造波信号の制御を行った。

波高分布の測定は  $y=2\text{m}$ および  $4.5\text{m}$  (現地換算40mおよび90m)の堤体背後に設けた測線上に25~50cmの間隔で配置した波高計により行った。実験時の水深  $h$ は40cmと一定にした。

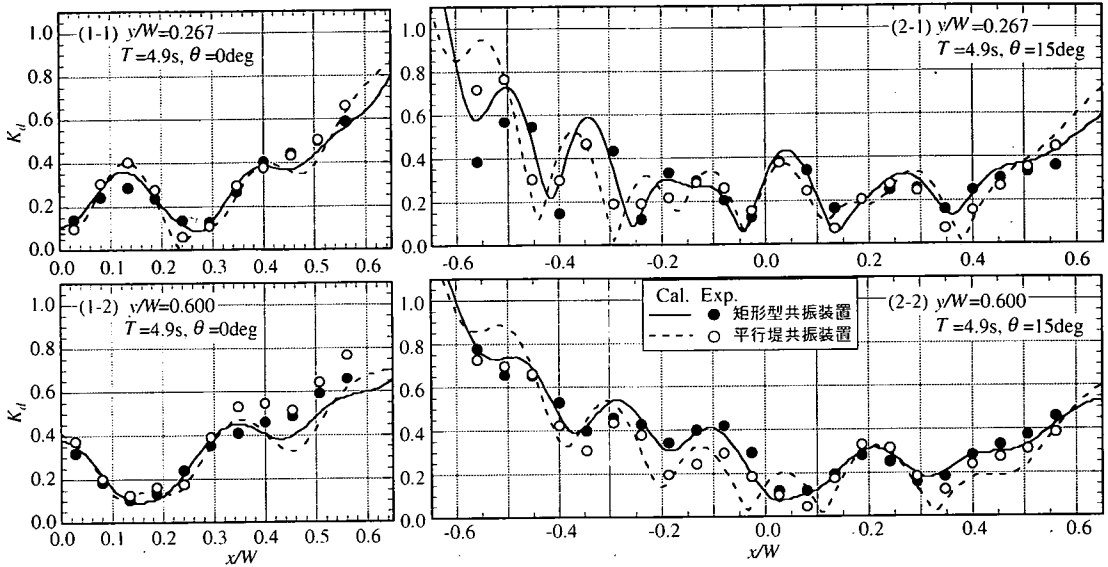


図-10 離岸堤背後の波高分布に関する実験結果と算定結果の比較

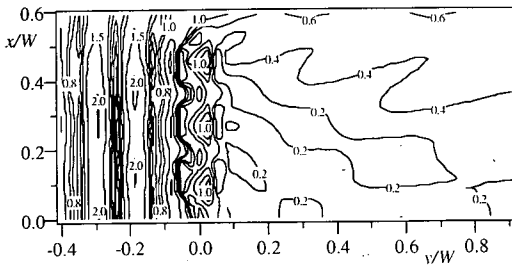


図-11 規則波に対する回折係数の平面分布  
(矩形型共振装置,  $T=4.9s, \theta=0deg$ )

### b) 実験結果と解析結果の比較

入射波の周期を現地換算で $T=4.9s$ 、波向 $\theta$ が $0deg$ および $15deg$ の場合の各測線上での波高分布の実験結果を代表例としてまとめて図-10に示す。図中の縦軸は回折係数 $K_d$ 、横軸は堤体延長 $W$ で無次元化した $x$ 座標を表す。図中には比較のため、解析結果についても併せ示してある。ここで解析法は、水深が一樣な平面波浪場中に設置された構造物まわりの波高分布を微小振幅波理論に基づき算定するもので、構造物の平面形状および配置や個数を任意に設定することが可能である<sup>12)</sup>。

この図より、堤体列端部( $x/W \approx \pm 0.5$ )周辺での $K_d$ は、波の回折の影響により大きくなっているものの、堤体列中央部( $x/W=0$ )付近での $K_d$ は図-7や図-8に示した( $K_{dms}$ )にほぼ等価な値となっていることなど、共振装置の採用によって有限長の離岸堤による波浪制御効果は大幅に向上しているものと言える。矩形型と平行堤型の各共振装置による消波効果に有意な差異は見られないことや、実験値と解析値は複雑な場所的変化も含めて良好に対応している

ことなどがわかる。本研究では他の波周期についても同様な検討を行っているが、何れの周期条件においても離岸堤背後の中央部付近には図-7や図-8にほぼ対応した $K_d$ 値が現れることや実験値と計算値は周期や波向に拘わらず良く一致することなどが示された。

図-11は $T=4.9s, \theta=0deg$ の条件下での堤体まわりの回折係数 $K_d$ の解析結果をコンターで示す。堤体列の沖側では反射波の影響によって部分重複波が形成され起伏の激しい平面分布となっている一方で、背後の水域では波高の小さい静穏域が広がっており、良好な波浪遮蔽効果が発揮されていることがわかる。

### (4) 共振装置型離岸堤の多方向不規則波に対する波浪制御効果

#### a) 実験および解析の方法

より現実的な不規則波浪条件での消波性能の検証を目的に、多方向不規則波による実験を行った。実験水槽、模型および計測内容は前述の規則波実験の場合と同様である。多方向不規則波の造波条件としては、現地換算有義波で $T_s=6.0s, H_s=1.8m$ の諸元をもつプレットシュナイダー・光易型スペクトルと、波の主方向 $\theta=0deg$ 、方向集中度パラメータの最大値 $S_{max}=40$ の光易型方向関数<sup>13)</sup>を採用した。水槽内の発生波は、4本の波高計による星形アレイにより堤体模型を撤去した状態で計測し、高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform)と最尤法(Maximum Likelihood Method)<sup>13)</sup>によるデータ処理を介して諸元の確認を行った。測定された発生波の方向スペクトルを図-12に示す。

一方、理論解析に関しては(3)節での検討により適用性が確認された解析法<sup>12)</sup>を用いて成分波(規則波)ごとの回折係数を求めておき、それらを入射波の方向スペクトル

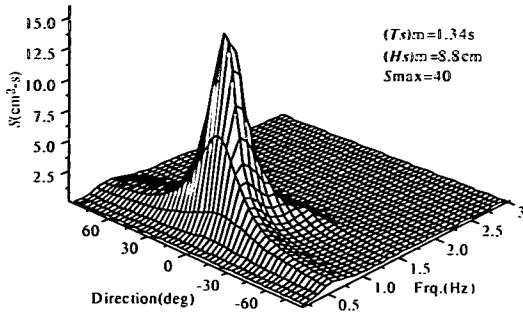


図-12 多方向不規則波の方向スペクトル

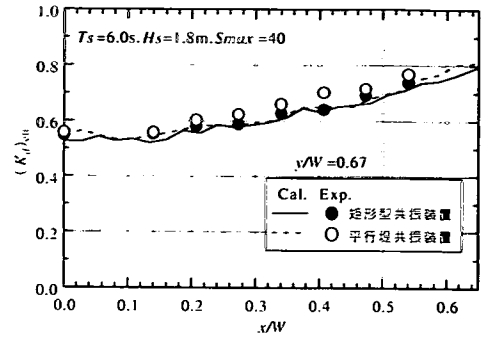


図-14 各種の離岸堤背後における不規則波回折係数の空間分布

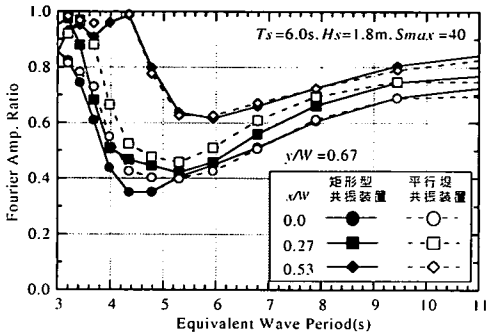


図-13 各種の離岸堤背後で計測された不規則波浪の振幅比スペクトル

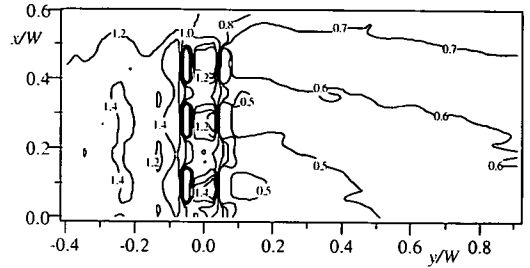


図-15 不規則波回折係数の平面分布  
(矩形型共振装置,  $T_s=6.0s, \theta=0deg, S_{max}=40$ )

ルに従って逆FFT法により不規則波に合成して着目点ごとの時系列を算定した。成分波(規則波)への分割数は波周期10成分×波向10成分の合計100成分程度とした。

#### b) 堤体背後における不規則波回折係数の特性

図-13は、各々の共振装置の堤体背後( $y/W=0.67$ )に現れる波浪の振幅スペクトルの入射波スペクトルに対する比率と成分波の周期との関係について、堤体列の中央および端部( $x/W=0, 0.53$ )を含む3ヶ所での測定結果に基づき示したものである。規則波が直角に入射する場合の透過波の特性を示した図-7と比較してみると、多方向不規則波の場合には斜波成分波の混入やFFT計算に伴う平滑化の影響のために波周期による振幅比の変動は穏やかなものとなり、その極小値も増加していることなどが認められる。しかし、それでも共振装置の有効周期帯(3.8~7.0s)における振幅比は堤体端部を除くとほぼ0.6を下回る範囲として出現しており、波浪フィルタ理論による共振装置の設計法は多方向不規則波に対しても有効であることが判明した。

次に、図-14は堤体背後における不規則波回折係数(回折波と入射波の有義波高の比)  $(K_{dir})$ の分布について実験結果と解析結果を示したものである。この図より実験値と解析値はよく一致していることや、矩形型および平行堤共振装置による不規則波に対する消波性能はほぼ

等価であることなどが確認できる。図-15は矩形型共振装置による堤体列まわりの不規則波回折係数  $(K_{dir})$ の計算結果をコンターで示す。規則波の場合を示した図-11に比べ、 $(K_{dir})$ の場所的な変動は穏やかで、堤体列背後での  $(K_{dir})$ は大きく現れることなど、多方向不規則波に対する回折係数の特徴を読みとることができる。

#### 4. 港口部防波堤への適用

港湾外郭部の防波堤の配置は港内水域の静穏度および出入りする船舶の安全航路の確保等に着眼して計画されるが、港内への波浪の侵入を防ぐために防波堤を嚴重に配置すると航路が狭く曲がりくねったものとなるなど、港内静穏度と安全航路の確保は一般に矛盾したものとなっている。共振装置の適用はこのような矛盾の解消を念頭に置いたもので、航路港口部に最適設計された波浪フィルタ作用を備えることによって港内への波浪の侵入を防ぎ、港内波浪の静穏化を達成しようとするものである。船舶の航路は見通しのきく直線状のまま確保できるため防波堤配置の自由度が大きくなるものと期待される。

ここでは、港内へ回折しやす比較的長周期の波浪条件を設定して共振装置の適用性を検討する。

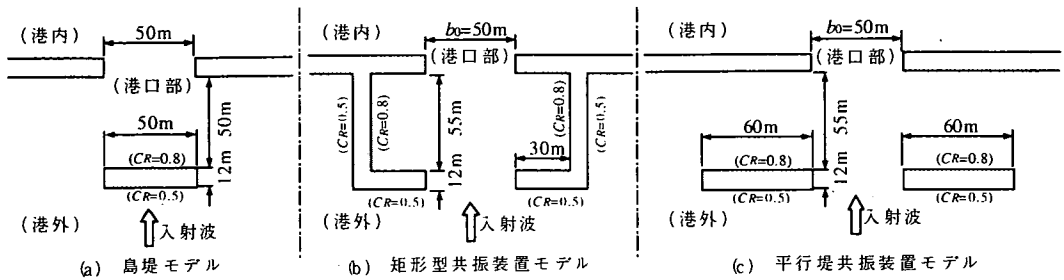


図-16 鳥堤または各種の共振装置を配置した港口部の平面形状

表-2 波浪フィルタ理論による港口部防波堤の算定例

設定条件	計算結果	
水深 $h$ :	160m	$l_1=33.3\text{m}$
開口幅 $b_0$ :	500m	$l_2=31.0\text{m}$
$T_{eq}$ :	11.0s	$b_3=53.7\text{m}$
$T_C$ :	20.0s	$D=12.9\text{m}$

(1) 港口部防波堤の平面形状

a) 矩形型共振装置

共振装置各部の寸法は2章で説明した設計式に従って、港口部の開口幅 $b_0=50\text{m}$ 、フィルタとしての有効周期帯を11~20sとした表-2の計算結果に基づき、図-16(b)のように決定した。設計後には、3章(2)節と同様の数値解析によって波浪制御効果に関する確認を行った。その結果、有効周期帯においては港内の波高比が0.2程度以下に抑えられるなど十分な効果を発揮する反面、副作用として共振装置内の遊水部では共振に伴って波浪が極大化し、通過する船舶の安全性に好ましくないことが判明した。

b) 平行堤共振装置

装置各部の寸法を図-16(c)に示す。上記した矩形型共振装置に対して、岸沖方向の壁体を取り除き、さらに平行堤の延長を倍増させた構造である。港口部に共振装置を一基設置した場合には、相互干渉効果が期待できないため、3章(1)節で述べた離岸堤構造の共振装置を連続配置した場合に比べて、穏やかなフィルタ効果となることが予想できる。このため、矩形型共振装置で予想される遊水部での極端な波浪共振現象が緩和され、港口部の波浪の静穏化が可能となるものと考えられる。さらに堤体の総延長は平行堤共振装置の方が短くなり、形状もシンプルであることから施工面からみて有利であると考えられる。

平行堤共振装置の波浪制御効果は、基本的には矩形型共振装置と同程度と推測されるが、離岸堤構造の場合と同様、鏡像関係が成立しなくなる斜め入射波に対しては効果の再確認をしておく必要がある。

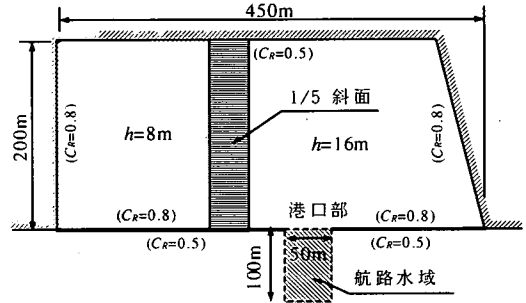


図-17 基本とした港湾モデル

(2) 実験モデルおよび実験方法

モデルとした港湾の形状を図-17に示す。450mx200mの台形状の港湾で、船舶は幅50mの開口部を通して入出港するものと想定した。港湾内は水深 $h$ が16mと8mの2つの領域からなり、両水域は1/5勾配斜面で接続しているものとした。また、防波堤や岸壁による波の反射率 $C_R$ についても、図中に示すように設定した。港口部の形状については、①構造物を設けない基本型モデル、②図-16(a)に示した長さ50mの鳥堤を港口部の沖合に設置した鳥堤モデル、③港口部に図-16(b)に示した矩形型共振装置を取り付けた矩形型共振装置モデル、および④図-16(c)に示した平行堤共振装置を設置した平行堤共振装置モデルの4種類を採用した。入射波は波高 $H=1.5\text{m}$ 程度、周期 $T=9, 12, 15\text{s}$ の3種類の規則波で、港口部に対して正面から作用するものとした。

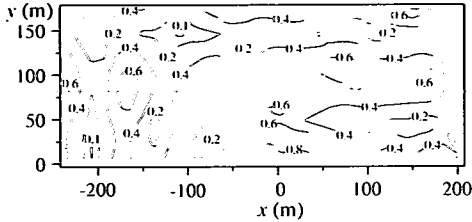
以上の4種類の港湾モデルについて縮尺1/40で実験模型を製作し、図-9に示した平面水槽内に据え付けた後、規則波を作用せしめて港湾内および港口部周辺の波高分布の計測を行った。港湾模型の陸域境界は耐水合板製の直立板を配置して再現し、浅水深領域の水底の嵩上げと共振装置は鋼製フレームと耐水合板により製作した。衝立や共振装置の各所にはヘチマロンによる消波材を設置して、波反射率 $C_R$ が図-16-17中に記した値となるように調整した。なお消波材の反射率は別途に行った断面水槽実験により測定した。

港内全域にわたる波高分布を求めるために、水域に正方格子を想定して約400の波高計測ポイントを設定した。正方格子のピッチ長は実験の都合上35cmとしたが、これは入射波の波長比にして1/7~1/14の範囲にある。計測には計11台の波高計を使用し、造波板による再反射波の影響を受けないように測定時間に注意しながら移動計測を行った。

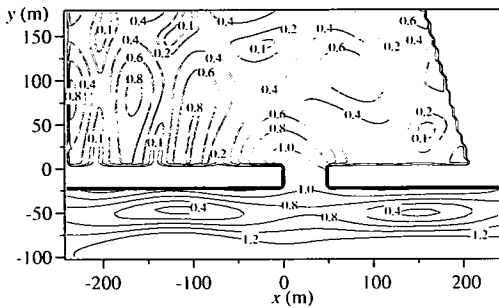
(3) 共振装置による港内波浪の静穏効果

a) 港内波浪の分布特性

図-18-21は波周期 $T=15s$ の波浪条件の下での各々の港湾モデルの港内に現れる屈折係数の分布をコンターで示したもので、各々の(a)図が実験結果を、(b)図が数値解<sup>12)</sup>による計算結果を示す。

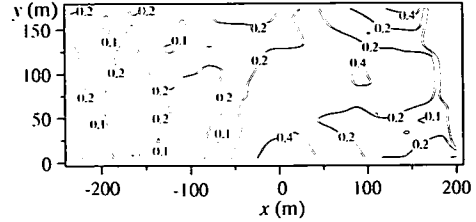


(a) 実験結果

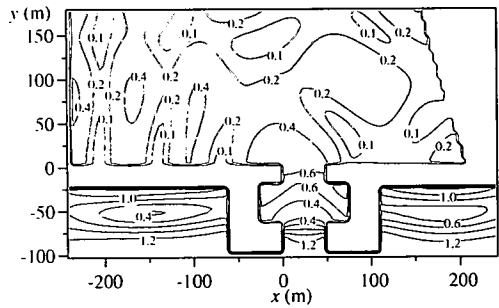


(b) 計算結果

図-18 基本港湾モデルにおける港内波高の平面分布

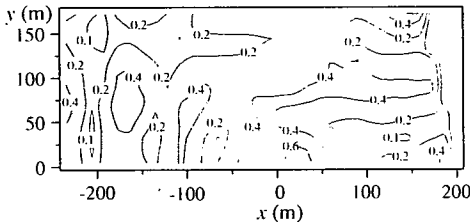


(a) 実験結果

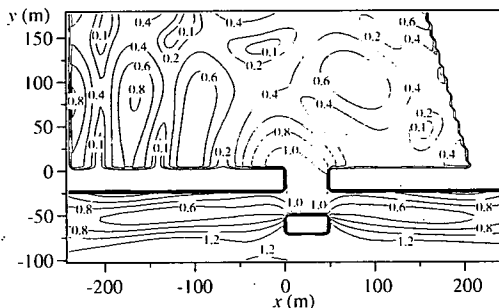


(b) 計算結果

図-20 港口部に矩形型共振装置を配置した場合の港内波高の平面分布

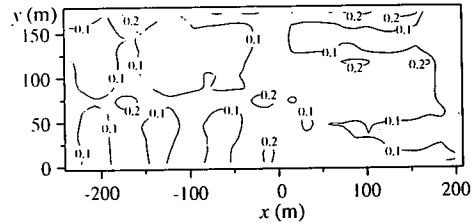


(a) 実験結果

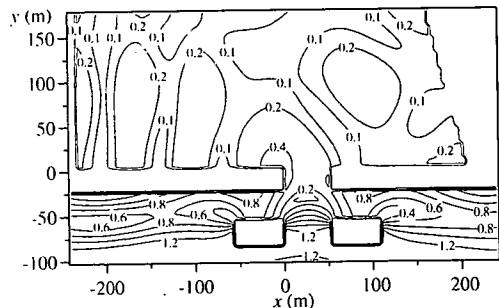


(b) 計算結果

図-19 港口部に島堤を配置した場合の港内波高の平面分布



(a) 実験結果



(b) 計算結果

図-21 港口部に平行堤共振装置を配置した場合の港内波高の平面分布



まず、港口部に防波施設を設置しない基本型モデルの場合を示す図-18をみると、波浪は港口部からほぼストレートに侵入するため港内の波高の静穏度は不十分であり、港内の各所に回折係数が0.5を超える水域が出現していることがわかる。特に左右両端部の護岸前面では回折係数が0.6を超えるなど係留船舶に悪影響を及ぼすことが懸念される。図-19は、港口部を遮るように離岸堤を設置した場合の結果を示すもので、図-18と比較してみると港内全体の回折係数が相対的にみて3割程度減少しているものの、依然として0.4を上回る回折係数が観測されており十分な波浪静穏度が得られていない。また、この場合には航路が著しく湾曲することや航行船舶は真横から波浪を受けることになるなど、港内の静穏化向上策として島堤を設置することは船舶の安全上現実的な解決方法とは言えない。

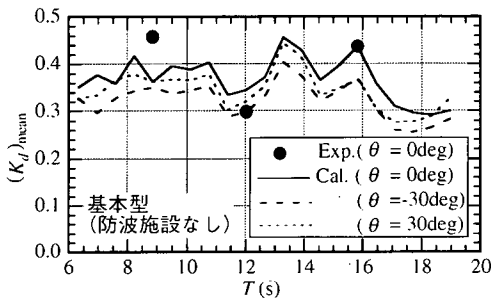


図-22 基本型モデルにおける港内平均波高の周期特性

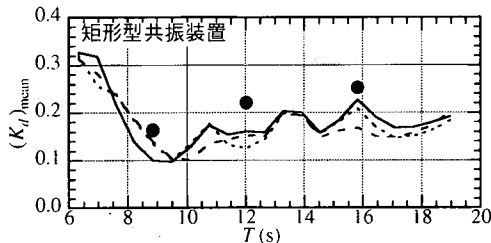


図-23 矩形共振装置モデルにおける港内平均波高の周期特性

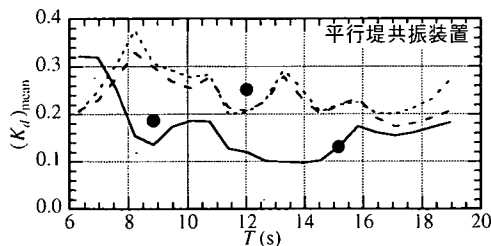


図-24 平行堤共振装置モデルにおける港内平均波高の周期特性

矩形共振装置または平行堤共振装置を港口部に設置した場合の結果を示すのが図-20および図-21である。港内全域の回折係数は矩形共振装置モデルで0.25、平行堤共振装置モデルで0.15程度となるなど、共振装置の設置によって港内波浪は効果的に低減していることがわかる。外海に接続する港口部付近においても回折係数は低く抑えられており、波浪の侵入そのものが共振装置によって遮断されていることがわかる。

次に、これらの図から実験結果と計算結果の比較を行ってみると、港内における部分重複波の腹、節の発生位置はほぼ同じ位置で見られ、波パターンとしては概ね対応した結果となっていることが認められる。回折係数の絶対値については計算結果は実験結果を幾分上回るように出現しており、この傾向は島堤や共振装置を設置した図-19-21において目立つようである。本研究では他の周期条件においても結果の比較を行っているが、短周期の条件下では実験結果と算定結果は波浪パターンに関して比較的良好な対応を示すことを確認しており、上記した差異の原因としては入射波の長周期化に伴って顕在化する渦流れ等の非線形流体现象が影響しているものと考えられる。

#### b) 波浪静穏効果の周期特性

各々の港湾モデル(但し、島堤モデルを省略)において港内に現れる波高比の空間平均値 $(K_d)_{mean}$ と入射波の周期 $T$ との関係を図-22-24に示す。各図中には港湾開口部正面から波が入射する場合( $\theta=0deg$ )の実験・計算結果に加えて、波向きをそれぞれ左右に $30deg$ とする場合の計算結果についても併記してある。図-22に示した基本型モデルの場合には、平均波高比の波周期や波向きによる変動は少なくほぼ0.3-0.4と一定となっていることなどがわかる。これに対して矩形型および平行堤共振装置を設置した場合には、 $\theta=0deg$ の条件下では、図-23や図-24に見られるように $T=6s$ 付近では0.3程度であった平均波高比が $T=8s$ 前後から $19s$ にかけては0.1-0.2となり、広い周期帯で安定した波浪静穏効果が得られていることが見てとれる。既に4章(1)節で述べたようにここでの共振装置は有効周期帯を $T=11-20s$ として設計したものであるが、実際の有効周期帯は設計条件を多少広めに満足することが判明した。次に、図-23と図-24において波向き $\theta$ による特性に着目してみると、平行堤共振装置と矩形共振装置の有効性は $\theta=0deg$ の場合に限って見ればほぼ等価なものと言える。しかし、斜め波に対する平行堤共振装置モデルの平均波高比は、 $\theta=0deg$ の時に比べて最大2倍程度まで増加しており有効性がかなり低下することがわかる。平行堤共振装置を応用して港湾の設計をする場合には、設計波の方向性に注意を要することが判明した。

#### (4) 港口部に現れる波浪の状況

既に述べたように共振装置内の遊水部においては波高が増幅されやすく、港を利用する船舶にとって港口部は交通の難所となる可能性がある。ここでは航行船舶の安全性に影響を及ぼす量として航路内の空間的な代表波高値を取り上げ、それらの特性について検討してみる。

島堤モデルを除く各港湾モデルにおいて、航路水域として港口部の外海側に50m×100mの領域を図-17中に示したように設定し、この水域内に現れる波高の平面分布に関する算定結果から最大・平均・最小波高値を求めた。各波高値の無次元量と波周期との関係をモデル別に図-25-27に示す。最初に基本型モデルの場合を示した図-25に着目すると、航路内の波高は入射波との波高比で0.5-1.3の範囲で出現していることや、その範囲は周期条件によってほとんど変動しないことなどがわかる。次に矩形型共振装置を設置した場合を示す図-26においては、

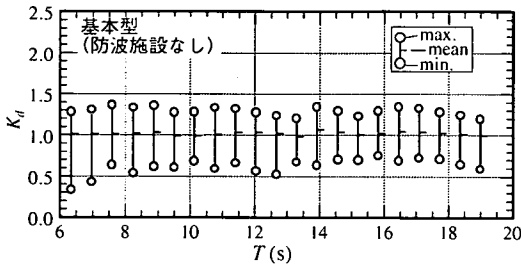


図-25 基本型モデルにおける港口部での出現波高

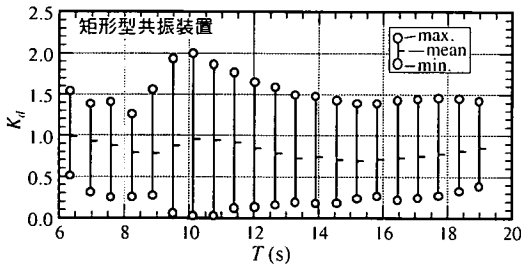


図-26 矩形型共振装置モデルにおける港口部での出現波高

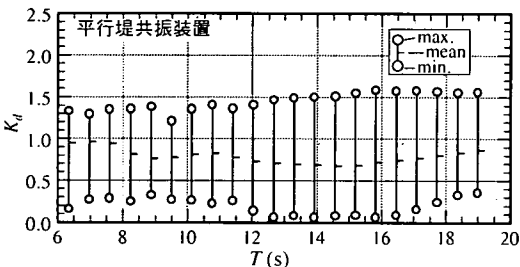


図-27 平行堤共振装置モデルにおける港口部での出現波高

装置内での波浪の共振現象の影響を受けて、発生波高比の最大値と最小値の差が広がると共に波周期による変動が顕著なものとなっている。特に波周期 $T=10s$ 前後の条件下では波高の最大値が入射波の2倍にも達しており、しかもこの場合の波高分布を調べてみると平面重複波の腹が航路のセンターライン上に孤立して現れるような振動モードとなっており、船舶の航行性に対して悪影響を及ぼすものと推測される。一方、図-27に示した平行堤共振装置の場合には、発生波高の波周期による変動傾向は極大化の兆候も見られず比較的穏やかなものとなっており、航路内に発生する最大波高も入射波の1.5倍程度以下となっているのがわかる。このように平行堤共振装置では矩形型共振装置に見られた堤内での波高の増幅化現象を低く抑えることが可能であり、両装置の港内波浪の静穏効果はほぼ同様であることなどを考え併せれば、港内の波浪静穏化を向上させる構造物として平行堤共振装置は矩形型共振装置よりも副作用が少なく有効性の高いものと結論づけられる。

#### 5. Long Beach港の防波施設に対する検討

アメリカのLong Beach港にあるコンテナ埠頭 Pier Jのバースには、長周期波の侵入を防ぐために図-28に示すような防波施設が建設されている。図中に斜線で示すカギ状の堤防部分がそれで、前章で扱った矩形型共振装置の平面形状に酷似したものとなっている。この防波施設の形状は大規模な模型実験による試行錯誤的な検討により決定されたもので、主だったものだけでも17種類におよ

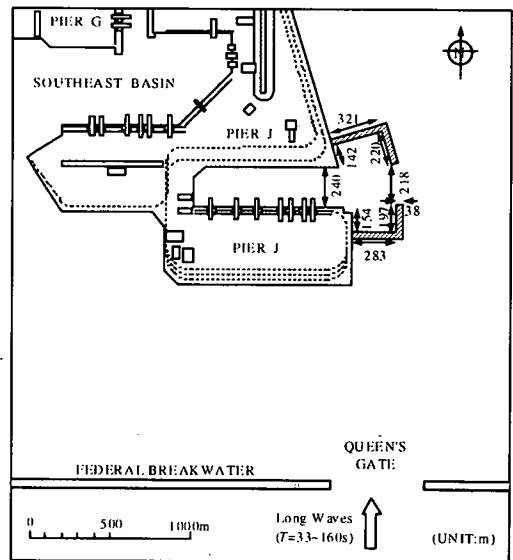


図-28 Long Beach港のPier Jと周辺海域の状況

ぶ形状案の中から選定された経緯がある<sup>9)</sup>。

ここでは、同施設に波浪フィルタ理論を適用した場合の理論形状寸法と上記した防波施設の形状寸法との対応や、バース内における長周期波に関する波浪静穏度について検討し、同理論の有用性について実証する。

### (1) 形状寸法に関する再検討

2章で述べた波浪フィルタ理論による共振装置(図-1)の設計法では、与条件として水深 $h$ 、水路開口幅 $b_0$ および波浪の周期帯の条件 $T_c$ と $T_\infty$ を設定し、式(8)-(11)によって残りの各寸法 $b_1$ ,  $l_1$ および $l_2$ を導いた。これに対して、ここでは現状での防波施設と堤内水域が同等となるような共振装置の形状寸法を仮設定して、 $T_c$ ,  $T_\infty$ および壁厚 $D$  ( $=2l_1 - b_1$ )を逆算してみた。 $h=20\text{m}$ ,  $b_0=220\text{m}$ ,  $b_1=310\text{m}$ ,  $l_2=200\text{m}$ と設定して得られた結果を図-29に示す。

これによるとこの防波施設を共振装置としてみたときの有効周期帯( $T_\infty \sim T_c$ )は63~140s程度であり、実際の有効周期帯は多少広めとなることを考え併せると、Poonらによる実験<sup>9)</sup>で採用された周期条件(33~160s)にほぼ合致したものとなっている。しかしながら、前後壁の厚さ $D$  ( $=2l_1 - b_1$ )は253mと極めて大きな値となっており、この原因としては堤内水域の寸法、特に $b_1$ ,  $l_2$ の設定が最適化されていないことによると考えられる。

図-30は、壁厚 $D$ の効果を理論的に検討したもので、無限配列された上記の共振装置を想定したグリーン関数法<sup>10)</sup>による算定結果を示す。この算定では堤内水域の寸法を一定として壁厚 $D$ のみを変化させ、透過波のRMS波高比( $K_{tr})_{rms}$ の波周期 $T$ による変化を求めた。この図より、 $D$ が大きくなって波浪フィルタ理論による最適値( $D=253\text{m}$ )に近づくにつれて( $K_{tr})_{rms}$ は減少していく傾向にはあるものの、 $T=50\text{s}$ 付近で( $K_{tr})_{rms}$ が極小となるなどの共振装置としての機能性は現状に近い壁厚条件( $D=40\text{m}$ )においても良好に維持されていることがわかる。

### (2) バース内波浪静穏度の改善効果

一定水深を想定した鉛直線グリーン関数法<sup>14)</sup>を用いて、Pier Jのバースに現れる波高の算定を行った。港口部の防波施設としては、現地の状況をできるだけ忠実に再現したモデル(図-31)および防波施設を矩形型共振装置に近い形に単純化したモデル(図-32)の2種類を用いた。

図-33はバースに現れる回折係数の空間平均値( $K_{d, \text{mean}}$ )に関する算定結果を波周期 $T$ との関係で示す。この図より港口部にある防波施設によってバース内平均波高はほぼ半減され、長周期波が効果的に制御されていることがわかる。また、現状の防波施設による静穏度改善効果は共振装置型モデルと同程度であることなどが確認できる。なお、( $K_{d, \text{mean}}$ )は $T=60\text{s}$ 付近と90~100s付近の条件下で極大となる変動傾向を示しているが、これはバース奥壁から

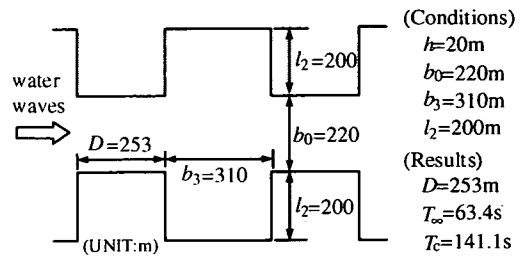


図-29 波浪フィルタ理論によって求められる防波施設の最適形状

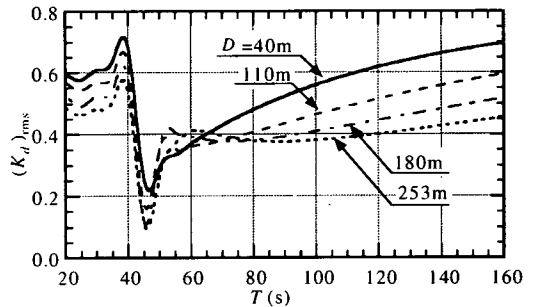


図-30 壁厚 $D$ の変化による透過波高の周期特性

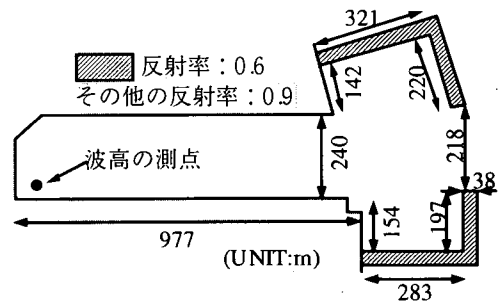


図-31 現状の防波施設を配置したPier Jバースの計算モデル

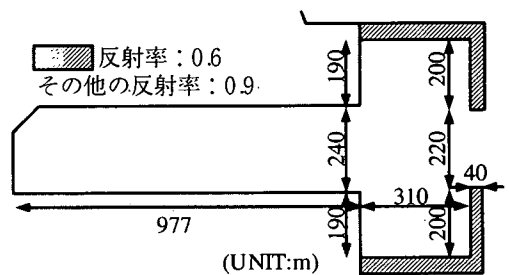


図-32 矩形型共振装置を配置したPier Jバースの計算モデル

の反射波の影響による。すなわち、共振装置の波浪制御のメカニズムは装置の堤内水域で波共振を誘起させ、装置の透過側の開口部に平面的な重複波の節を形成して通過する波浪を低減するものであるが、ここではそれを防ぐようにパス内での部分重複波が生じて、本来の平面重複波の形成が妨げられたものである<sup>9)</sup>。本例のように制御対象の水域(パス)の形状がシンプルで、奥壁からの反射波が直接共振装置に作用するような場合には、共振装置の設計・配置に充分注意する必要があるものと言えよう。

図-34は図-31中に示した計測点での回折係数に関する実験値<sup>9)</sup>と算定値の比較を示す。上記したパス内での部分重複波の形成に伴う回折係数の変動や、算定結果と実験結果との対応は概ね良好であることなどが確認できる。

## 6. 結論

- (1) 波浪フィルタ理論を用いて設計した共振装置型の離岸堤は、高い消波性能を維持したままで堤体列の開口率を45%程度まで広くとることが可能である。そして、その消波特性は、設計どおりの広い周期帯にわたって良好であることが、実験および理論計算により検証された。
- (2) 共振装置型の離岸堤は多方向不規則波に対しても有効である。波浪フィルタ理論を用いることによって多方向不規則波に対する効率的な離岸堤の設計が可能であることが明らかとなった。
- (3) 港口部に共振装置を設置する方式は、島堤による遮蔽方式に比較して効果的に港内波浪を静穏化できることが実験的にも理論的にも明らかとなった。そして、その有効周期帯は波浪フィルタ理論での設計周期帯を多少広めに満足することが判明した。
- (4) 港口部に対して正面から入射波が作用する条件下では、平行堤共振装置は矩形型共振装置と同程度の波浪静穏効果が期待できる。共振装置を平行堤型とすることにより、航行船舶に影響を及ぼす装置内波高比の増大化を抑えることができる。一方、斜め入射波が作用する場合には平行堤共振装置の有効性は低下するため、入射する波浪の方向性に留意する必要があることがわかった。
- (5) 試行錯誤の設計に基づくPier Jの防波施設は、その平面寸法などについて、波浪フィルタ理論に基づく設計結果とはほぼ合致したものとなっている。波浪静穏効果についても矩形型共振装置のそれと同様に良好である。この種の防波施設を設計する際には、波浪フィルタ理論を用いれば試行錯誤的な検討を省略して合理的な一次設計が可能であるものといえる。

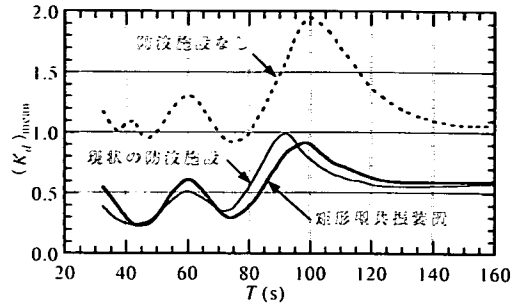


図-33 各種の防波施設によるパス内平均波高比の算定結果

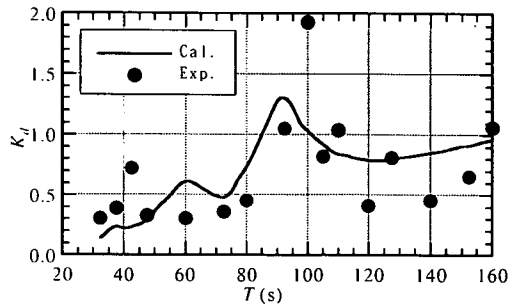


図-34 パス内最奥部の回折係数に関する実験結果<sup>9)</sup>と算定結果の比較

謝辞：本研究の実施にあたっては、電気通信大学の望月仁名誉教授より波浪フィルタ理論の内容と応用法に関するご教示を賜った。ここに記して謝意を表する次第である。

## 参考文献

- 1) たとえば、実吉純一：電気音響工学，標準電気工学講座 12，コロナ社，166p, 1986.
- 2) 堀川清司：海岸工学 海洋工学への序説，東京大学出版会，pp.121-129, 1982.
- 3) 望月 仁：波浪フィルタ，日本音響学会誌，46巻12号，pp.998-1003, 1990.
- 4) 中村孝幸，鈴木裕明，森田知志：港口部に設けた共振装置による港内波浪の静穏化特性について，海岸工学論文集，42巻，pp.746-750, 1995.
- 5) 森田知志，中村孝幸：波浪フィルター理論を応用した離岸堤構造の消波効果について，海岸工学論文集，46巻，pp.776-780, 1999.
- 6) 中村孝幸，森田知志，加藤孝輔：港内波浪の静穏化のための港口部共振装置の有効性について，海岸工学論文集，45巻，pp.721-725, 1998.

- 7) Morita, S. and Nakamura, T.: Effectiveness of wave resonators for harbor tranquility, *Proc. of Coastal Structures* 99, A.A.Balkema, pp.115-121, 2000.
- 8) Poon, Y.K., Raichlen, F. and Walker, J.: Application of physical model in long wave studies for the Port of Long Beach, *Proc. of 26th Coastal Eng. Conf., ASCE*, pp.1222-1235, 1998.
- 9) 中村孝幸, 森田知志, 竹本 剛: 大型共振装置による矩形掘込み港湾での超長周期波の遮断特性について, *海岸工学論文集*, 48巻, pp.776-780, 2001.
- 10) 中村孝幸, 小野正順: 規則配列された沖合消波堤まわりの波浪共振の特性とその解析法, *第35回海岸工学講演会論文集*, pp.527-531, 1988.
- 11) 森田知志, 大本晋士郎: 長水槽における横波モードを考慮した斜波・多方向不規則波の造波方法, *海岸工学論文集*, 39巻, pp.86-90, 1992.
- 12) 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*, 44巻, pp.16-20, 1997.
- 13) たとえば, 合田良實: 港湾構造物の耐波設計 波浪工学への序説, 鹿島出版会, 333p, 1990.
- 14) 中村孝幸, 奥 吉雄: 任意平面形状を有する堤体構造物まわりの波変形の解析法について, *第32回海岸工学講演会論文集*, pp.594-598, 1985.

(2002.6.18 受付)

## A OPTIMUM DESIGN OF WAVE RESONATORS FOR COASTAL AND HARBOR STRUCTURES

Satoshi MORITA and Takayuki NAKAMURA

Experimental verifications for the performance of a rectangular resonator designed by the Wave Filter Theory installed at a harbor entrance and beach as a detached breakwater are shown. A modified resonator with a simpler configuration is also examined for the purpose of practical usage. It is confirmed that the installation of each of these resonators at a harbor entrance or beach can improve the wave tranquility in comparison with that in a conventional detached breakwater. The modified resonator is found to be more practical than the rectangular resonator because it effectively controls wave amplifications in the fairway of the harbor.