

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

中村孝幸*・森田知志**・加藤孝輔***

1. はじめに

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、港内への波浪の進入を防ぐために防波堤を厳重に配置すると航路が狭く曲折したものとなるなど、これらの指標は一般に矛盾したものとなっている。本研究で対象とする共振装置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動フィルター機能を備えることによって港内への波浪の進入を防ぎ、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。

港湾の港口部に共振装置を設けて波動の伝播を阻止し、港内波浪の静穏化を進めようとする考えは古くからあるが、その設計法として望月(1990)は電気回路におけるフィルタ理論を応用した合理的な方法を提案しており、これを用いた港口部用の共振装置の効果に関する研究(たとえば、中村ら, 1995)も行われてきている。しかしながら、従来の研究では模型港湾や現地港湾を対象にして港口部用の共振装置の効果を実証的に検討した例はほとんどない。また従来の港口部用共振装置では、装置内での波高が増大しやすく通行船舶への障害となる懸念が指摘されており、実用化に当たってはこれについても解決する必要がある。

本研究では、波浪フィルタ理論に基づき設計された矩形型共振装置による波浪の静穏化効果の実態を、大型平面水槽を用いた港湾模型実験により明らかにする。また、装置内の波高低減を目的として新たに共振装置の背面部を除いた開放型共振装置についても提案し、その効果を実験および理論の両面から明らかにする。そして比較のため従来形式の防波施設としてよく用いられている島堤方式を採用した場合や防波施設を設けない場合についても同様に水理実験を行い、上記した港口部共振装置に関する結果との比較から共振装置型防波施設の有効性を検

討するものである。

2. 港口部共振装置の設計

(1) 矩形型共振装置

装置各部の寸法は中村ら(1995)による設計に基づき、港口部の開口幅 $b_0=50\text{ m}$ として図-1のように決定した。設計には望月(1990)による波浪フィルタ理論が用いられており、フィルターとしての有効周期帯が $11\sim 20\text{ sec}$ (周波数: $0.05\sim 0.09\text{ Hz}$) の広範囲に設定されている。設計後に行われた波浪制御効果に関する数値実験結果によると、有効周期帯においては港内の波高比が20%程度以下に抑えられるなど十分な効果を発揮する反面で、装置内には波浪の共振に伴って重複波が発生し、港口部を通過する船舶の安全性に支障をきたす恐れがあり、装置内壁を低反射構造とするなどの対策の必要性が指摘されている。

(2) 開放型共振装置

装置各部の寸法を図-2に示す。波浪フィルタ理論をほぼ忠実に具体化した矩形型共振装置に対して、岸沖方向の壁体を取り除き、さらに離岸堤部の延長を倍増させた構造である。これは矩形型共振装置の形状を示した図-1において、岸沖方向内壁に記した破線を鏡像面とみなした時に連想できる形状であり、連続配置の状態においては理論的には矩形型共振装置と全く等価な波浪制御効果が期待できる構造である。港口部に設置した単独配置の場合には、鏡像関係を考慮して連続配置した場合に比べて穏やかなフィルター効果となることが予想できるため、矩形型共振装置のように内壁を低反射構造とす

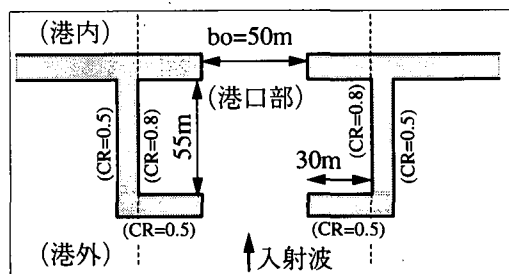


図-1 矩形型共振装置の平面形状

* 正会員 工博 愛媛大学 工学部 環境建設工学科
** 正会員 工修 (株)熊谷組 技術研究所
*** 学生会員 愛媛大学 大学院

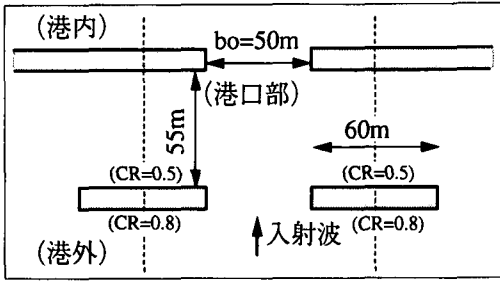


図-2 開放型共振装置の平面形状

ることなく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開放型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も有利であると考えられる。

開放型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であろうと推測されるが、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確認をしておく必要があろう。

3. 共振装置による波浪制御効果

(1) 実験装置および実験方法

モデルとした港湾の形状を図-3に示す。450m×200m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。港口部の形状については、(a) 構造物を設けない基本型モデル、(b) 長さ50mの島堤を港口部の沖合に設置した島堤モデル、(c) 港口部に図-1に示した矩形型共振装置を取り付けた矩形型共振モデル、および(d) 図-2に示した開放型共振装置を設置した開放型共振モデルの4種類を採用した。入射波は波高 $H=1.5$ m程度、周期 $T=9, 12, 15$ sec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、平面水槽(長さ40m、幅20m)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。港湾模型の外形は耐水ベニヤ板製の衝立を配置して再現し、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ベニヤ板により製作した。衝立や共振装置の各所には消波材を設置して、波反射率 C_R が図-1～3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る測定値を採用した。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

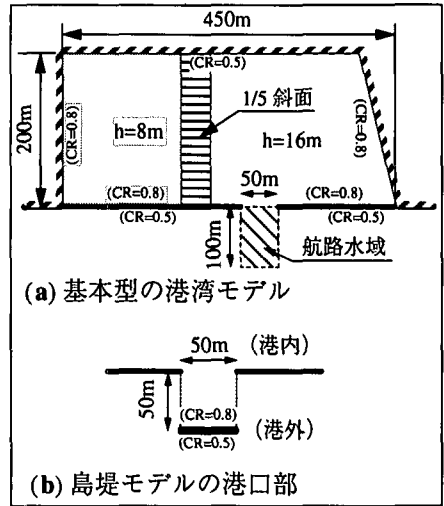


図-3 港湾および港口部構造物の検討モデル

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。

(2) 計算方法

理論的な側面からの検討を行うために、実験と併行して波浪ポテンシャル理論による波高分布の計算を行った。用いた計算法は著者ら(1997)により開発された鉛直線グリーン関数法である。この手法は境界の形状や波反射率が任意に設定できる他、水深変化の影響も考慮できるように拡張されたものであり、本件のような規則波を対象とした港内波高分布の算定には最適と考えられる。

(3) 波浪静穏効果の空間特性

図-4～7は波周期 $T=15$ secの波浪条件の下での各々の港湾モデルの港内に現れる波高分布の実験結果であり、入射波高による無次元量をコンターで示したものである。

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-4をみると、波浪は港口部からほぼストレートに進入するため港内の波高の静穏度は不十分であり、港内の各所に波高比が50%を超える水域が出現していることがわかる。特に左右両端部の隠岸前面では波高比が60%を超えて出現するなど船舶が係留されている場合など港湾環境に悪影響を及ぼすことが懸念される。図-5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-4と比較してみると港内全体の波高比が相対的にみて3割程度減少しているものの、依然として40%程度の波高比が観測されており十分な波浪静穏度であるとはいえない。ここでは離岸堤の長さを開口幅と等しくした場合の結果のみを示しているが、堤体を延長することにより港内の波浪静穏度を後述する共

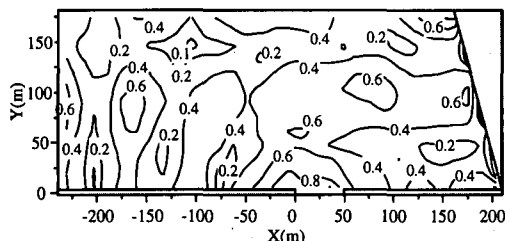


図-4 基本型モデルの港内波高分布 (実験結果)

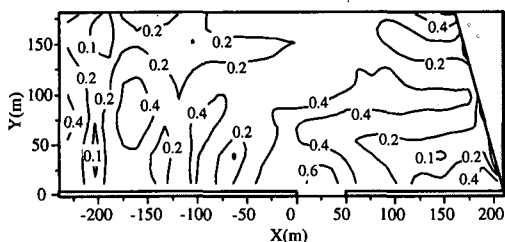


図-5 島堤モデルの港内波高分布 (実験結果)

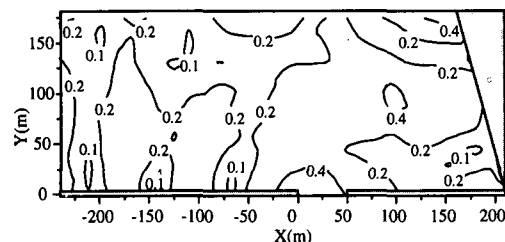


図-6 矩形型共振モデルの港内波高分布 (実験結果)

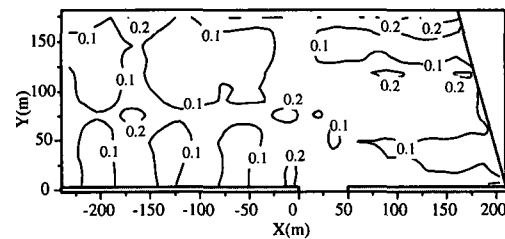


図-7 開放型共振モデルの港内波高分布 (実験結果)

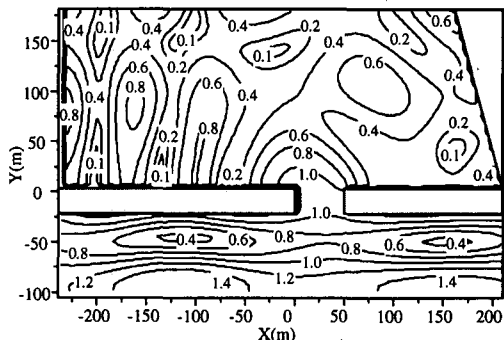


図-8 基本型モデルの港内波高分布 (算定結果)

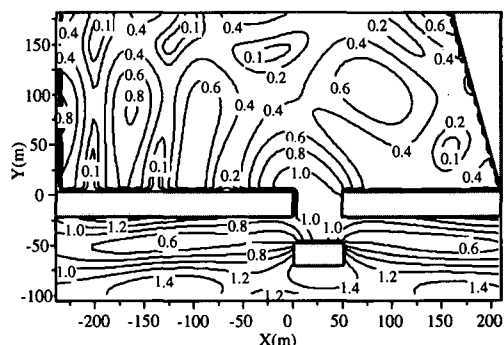


図-9 島堤モデルの港内波高分布 (算定結果)

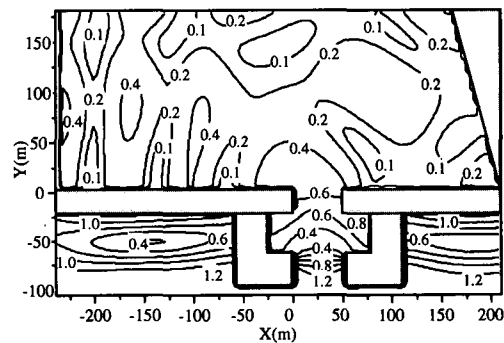


図-10 矩形型共振モデルの港内波高分布 (算定結果)

振型モデルの場合と同様にまで高めるためには、開口幅の2倍以上の長さが必要であることが別途行った検討から判明しており、そ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。

矩形型共振装置または開放型共振装置を港口部に設置した場合の結果を示すのが図-6および図-7である。港内全域の波高比は矩形型共振モデルで25%、開放型共振モデルで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。海外に

接続する港口部付近においても波高比は低く抑えられており、波浪の進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、図-8～11は各々図-4～7の実験結果と同一の条件を想定した場合における理論計算結果を示す。これらの図から実験結果と算定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、節の発生位置がほぼ同じ位置で見られ、波浪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。波高比の絶対値については算定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-9～11に

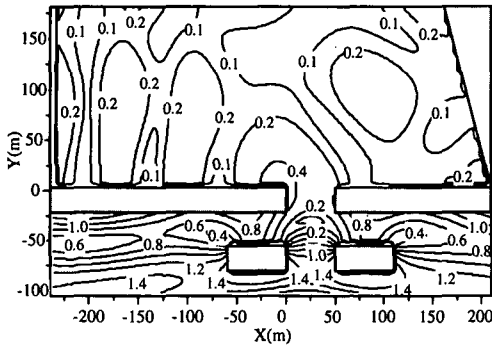


図-11 開放型共振モデルの港内波高分布 (算定結果)

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非線形流体现象が影響しているものと考えられる。

(4) 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と入射波の周期との関係を図-12～14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 ($\theta=0$) の実験・計算結果に加えて、波向きを左右に 30° ずつ振り分けた場合の計算結果についても併記してある。図-12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 $30\sim40\%$ 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開放型共振装置を設置した場合には、 $\theta=0^\circ$ の条件下では、図-13や14に見られるように $T=6$ sec 付近では 30% 程度であった平均波高比が $T=8$ sec 前後から 19 sec にかけては $10\sim20\%$ 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2章で述べたようにここでの共振装置は有効周期帯を $T=11\sim20$ sec として設計されたものであるが、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-13と14において波向きによる特性に着目してみると、開放型共振装置と矩形型共振装置の有効性は $\theta=0^\circ$ の場合に限って見ればほぼ等価なものと言えるけれども、斜め波に対する開放型共振モデルの平均波高比は、 $\theta=0^\circ$ 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。開放型共振装置を応用して港湾の設計をする場合には、設計波の方向性に特に注意を要することが判明した。

(5) 港口部での波浪増幅特性

既に述べたように共振装置の堤内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

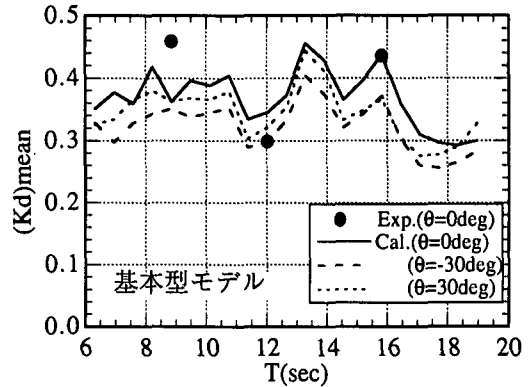


図-12 基本型モデルの港内平均波高の周期特性

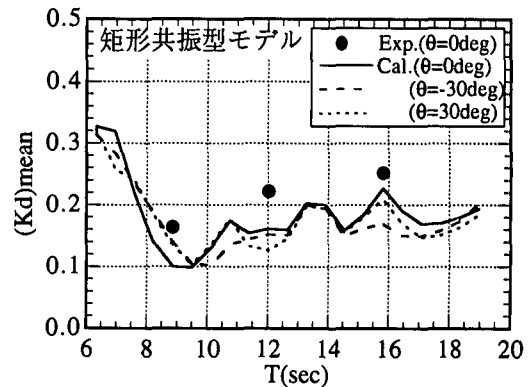


図-13 矩形型共振モデルの港内平均波高の周期特性

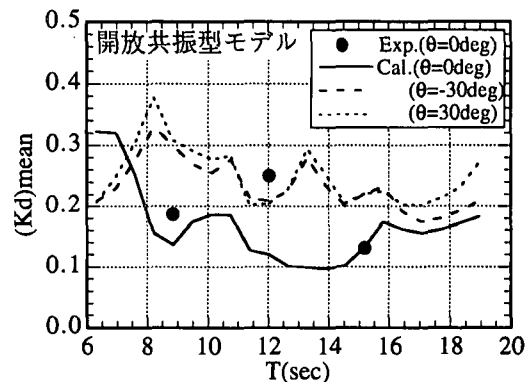


図-14 開放型共振モデルの港内平均波高の周期特性

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 $50\text{ m} \times 100\text{ m}$ の領域を図-3中に示したように設定し、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。

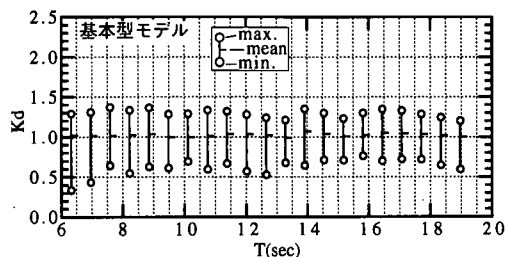


図-15 基本型モデルの港口部での発生波高

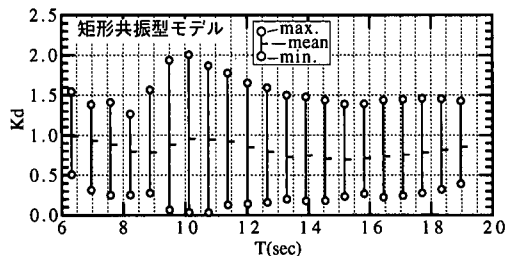


図-16 矩形共振モデルの港口部での発生波高

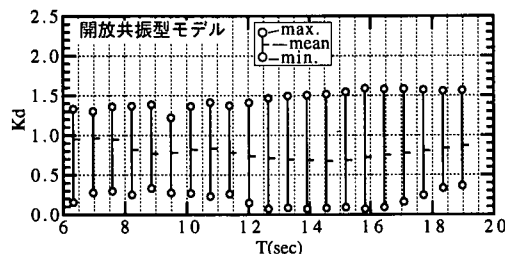


図-17 開放型共振モデルの港口部での発生波高

各波高値の無次元量と波周期との関係をモデル別に図-15~17に示す。最初に基本型モデルの場合を示した図-15に着目すると、航路内の波高は入射波との波高比で50~130%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。次に矩形共振装置を設置した場合を示す図-16においては、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拡大す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 $T=10$

sec 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-17に示した開放型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150%程度以下となっているのがわかる。このように開放型共振装置では矩形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開放型共振装置は矩形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。

4. 結 語

(1) 港口部設置型の共振装置として、矩形型に加え新たな形式として開放型を提案した。

(2) 港口部に共振装置を設置する方式は、従来の島堤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。

(3) 港口部に対して正面から入射波が作用する条件下では、開放型共振装置は矩形共振装置と同程度の波浪静穏効果が期待できる。共振装置を開放型とすることにより装置内波高比を有意に低減でき船舶の航行時安全性を高めることができる。一方、斜め入射波が作用する場合には開放型共振装置の有効性は低下する。

参 考 文 献

- 中村孝幸・鈴木裕明・森田知志 (1995): 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, 第42巻, pp. 746-750.
- 中村孝幸・加藤孝輔・森田知志 (1997): 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.
- 望月 仁 (1990): 波浪フィルタ, 日本音響学会誌, 46巻12号, pp. 998-1003.