

港口部に設けた共振装置による港内波浪の静穏化効果について

中村 孝幸*・鈴木 裕明**・森田 知志***

1. ま え が き

従来、港口部に共振装置を設けて、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。Valembois (1953) は、1950 年代に矩形の共振装置を港口部に設ける方法を提案している。しかし、共振装置としては、縦横比が 2:1 の矩形のものに限定されており、比較的狭い周期帯でしか効果を発揮できない。このため、異なる寸法の矩形共振装置を複数個配列して、有効周期帯を拡大する方法などが提案されている。一方、中村・小野・長田 (1989)、中村・長田 (1990) は、矩形や円弧状の共振装置を直立式堤体列に設け、その波浪制御効果を、共振装置の平面寸法と波長の関係などに着目して検討している。そして、これらの形状の装置では、波周期による制御効果の変動が大きく、特定の周期条件下ではほとんど波が透過する場合もあることなどを示している。このように、共振装置の研究では、より広い周期帯で、しかも有効な波浪制御効果を発揮する装置の平面形状を見出すことが重要になる。近年、望月 (1990) は、電気回路におけるフィルタ理論を応用して、必要な周波数特性を持つ一様水路内の波浪フィルタの設計法を提案している。この波浪フィルタは、原理的には上述した共振装置の部類に属するもので、やはり装置により波エネルギーをトラップすることで透過波を低減するものである。

本研究は、まず最初に、望月のフィルタ理論に基づき、港口部用の矩形共振装置として、i) 船舶の航行に支障がないように十分な開口長を有すること、ii) できる限り広い周期帯で波浪制御効果が発揮できることの二点を満足するような共振装置の設計を行う。そして、このような共振装置の有効性を検証するため、直立式の堤体構造物に共振装置を設置したときの波浪制御効果を理論と実験の両面から検討する。これに引き続き、一般的な平面形状を有する港湾を対象にして、港口部にこの共振装置を設け、そのときの港内波浪の静穏化効果を、従来の島堤方式の防波施設による結果との比較などから明らかにす

る。

2. 共振装置の平面形状

共振装置の平面形状を決定する際、望月による波浪フィルタ理論 (1990) を用いた。この理論は、図-1 のような長水路に波浪フィルタを設けた場合の波浪境界値問題を等価な電気回路に置き換えて解き、その解に基づいて波浪フィルタの形状を決定するものである。この理論では、電気回路でローパスフィルタが想定されており、設計条件として遮断周波数 f_c (遮断開始の周波数)、減衰極周波数 f_∞ ($> f_c$ で、これより高い周波数で最も強く減衰させる)、設置水深 h 、開口長 b_0 などを設定すると、図-1 に示す波浪フィルタ (共振装置) の残りの寸法が決定できる。例えば、長波近似を仮定し、 $2b_2 = b_3$, $b_1 = b_0$ とすると、以下のような関係式が導ける。

$$b_3 = b_0 \frac{m}{\sqrt{2(1-m^2)}}, \quad l_1 = \frac{m\sqrt{gh}}{2\pi f_c}, \quad l_2 = \frac{\sqrt{2(1-m^2)}}{m} l_1 \quad (1)$$

ここに、 h : 水深、 g : 重力加速度、 m は次式による。

$$m = \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f_\infty}\right)^2} \quad (2)$$

本研究では、水深 $h = 15$ m、 b_0 (開口長) $= 50$ m、また制御対象波の条件として $f_c = 0.05$ Hz ($T_c = 20$ sec)、 $f_\infty = 0.09$ Hz ($T_\infty \approx 11$ sec) を設定した。このとき、残りの各寸法は $2l_1 = 65$ m、 $l_2 = 29.5$ m、 $b_3 = 55.1$ m となる。

既に、中村ら (1994) が報告しているように、図-1 に

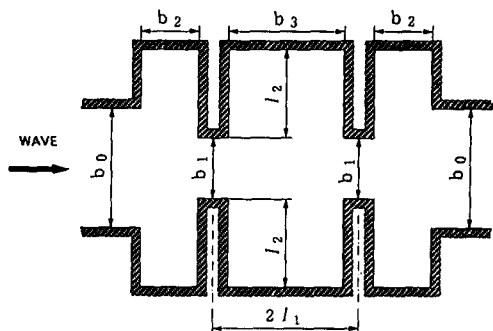


図-1 波浪フィルタ理論でのモデル

* 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部土木海洋工学科
 ** 正会員 りんかい建設(株)
 *** 正会員 工修 (株)熊谷組技術研究所

示すような3段式の共振装置とその中央部のみを用いた1段式のそれとは、周波数遮断特性はほぼ同一で、ただ2段式や3段式の方がよりシャープな遮断特性を有することが知られている。ここでは、建設コストなどの経済性を考慮して、図-1の中央部のみを用いた1段式の共振装置を対象にして、その波浪制御効果等を以下で検討してみる。

3. 共振装置の波浪制御効果

3.1 実験装置および実験方法

a) 実験装置：上記の2.で設計した共振装置の有効性を検討するため、図-2に示すように装置の1/2の模型を幅1mの長水路内に設置して、透過波の特性などを実験的に測定した。共振装置は、防水ペニャ板で製作した高反射型ものおよび、金網と採石と止水板で製作した低反射型のものの2種類とした。図-3に低反射型の共振装置の構造を示す。

このような実験模型は、水路側壁の鏡像効果を考えれば、2.で設計した共振装置が水路幅の2倍のピッチ長(模型で2m、現地で120m)で無限基配列されている状況と等価になる。なお、実験では、現地の1/60の縮尺模型を想定した。

b) 実験方法および実験条件：上記したような規則的配列された堤体列まわりの波高分布は、既に知られているように(中村・小野, 1988), 入射波の波長 L と配列ピッチ長 λ の大小関係により、短峰性の2次元的な波面パターンになる場合もある。実験ではこのことを考慮して、水路幅方向に等間隔で計5台の波高計を設置して、rms波高比や波向き特性量が測定できるようにした。

実験時の水深 h は25cm(現地換算で15m)と一定にした。また、模型堤体に作用せしめた入射波の周期 T_m は0.9secから2.6sec(現地換算で7~20sec)の14種類とし、入射波の波高は約4cm(現地換算で2.4m)程度とした。なお、上記の周期範囲は、 λ/L では0.5~1.8に相当し、短峰性の波面形状が出現する条件を含むことを付記しておく。

一方、上記のような共振装置に関する実験とは別に、低反射型の共振装置の壁面反射率の測定実験についても長水路内に同一構造の2次元低反射壁を設置して行った。

3.2 波浪制御効果

a) 透過波の特性：図-4は、直角入射の条件下での上記した高反射型および低反射型の共振装置による透過波の特性を示す。ここで、縦軸には透過波高の配列方向におけるrms値と入射波高との比 K_T 、第1横軸に現地換算量での周期 T 、第2横軸に波長と配列ピッチの比 λ/L がとってある。図中には、比較のため、堤体の無限配

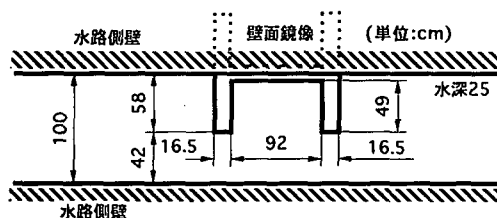


図-2 実験での共振装置の設置状況

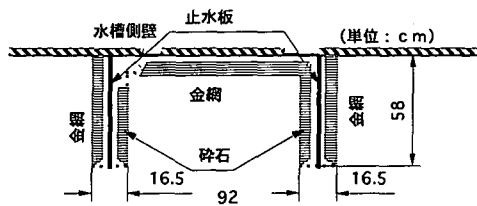


図-3 低反射型共振装置の構造概要

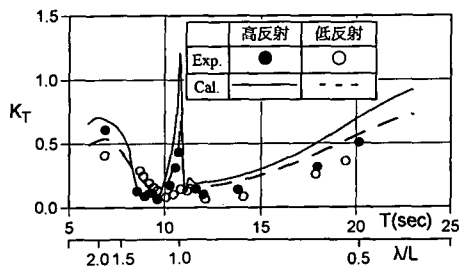


図-4 各共振装置による透過波高のrms値

列を想定したグリーン関数法(中村・小野, 1988)による算定結果についても併せ示してある。なお、低反射構造の共振装置に対する反射率 C_R は、別に実施した反射率測定実験で得られた値($C_R=0.75\sim0.90$)を参照して、各周期条件別に設定した。

この図より、多少のずれは見られるが、ほぼ設計対象とした周期帯($T=11\sim20$ sec)に対して、透過波のrms波高比 K_T はほぼ0.5以下になるなど、フィルタ理論に基づく設計の妥当性が認められる。なお、第2横軸の λ/L が1に等しいとき、 K_T がスパイク状の変化を示すのは、横波共振によるものであるが、2.で示した波浪フィルタ理論ではこのような横波の生起は考慮されていない。一方、共振装置の側壁を低反射構造にすると、高反射型に比較して、特に横波共振点近傍や長周期波の条件下で、透過波高は低減できるが、両者の間にそれほど有意な差は認め難い。

次に、図-5は、共振装置の内外壁の反射率を0.6と固定したときの、直角入射および斜め入射(60°)の両条件に対する K_T の算定結果を示す。この図より、斜め入射の

条件下では、 K_T がスパイク状の変化を示す横波共振点の数が増えるものの、 K_T の絶対値は直角入射の場合とほとんど相違がなく、上記の共振装置は斜め入射波に対しても有効であることがわかる。

b) 共振装置内の波高分布：図-6, 7は、それぞれ高反射型および低反射型の共振装置内の波高分布の測定結果の代表例を示すもので、入射波高との比で表してある。

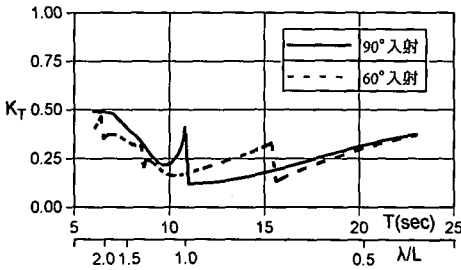


図-5 入射角による K_T の変化 (装置側壁の $C_R=0.6$)

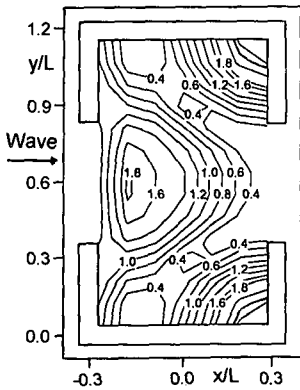


図-6 直立壁で構成される共振装置内の波高分布 ($T=9$ sec, $T_m=1.2$ sec)

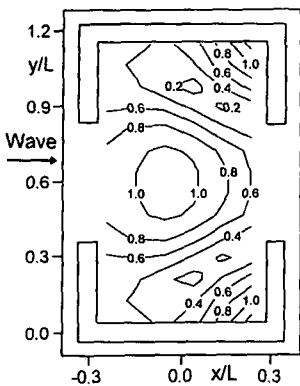


図-7 低反射壁で構成される共振装置内の波高分布 ($T=9$ sec, $T_m=1.2$ sec)

これらの波周期の条件は、現地換算量で $T=9$ sec で、図-4において K_T が比較的低い値を示す条件に相当している。これらの図より、 K_T が低い値を示すときには、共振装置の透過側の開口部に重複波の節が形成されることや、低反射構造にすると腹の位置の波高比は、高反射型に比較してほぼ半減することなどが認められる。

このように、共振装置では、その透過側の開口部に節が形成されるような平面形状で、しかもその状態が広い周期帯にわたり持続するものが最適であることがわかる。また、このような共振装置内を船舶が航行する場合には、支障をきたさないように、低反射構造にすることが必要と言えよう。

4. 共振装置による港内波浪の静穏化効果

ここでは、図-8に示す港湾を対象にして、その港口部に上記までに検討してきた共振装置を設けた場合、従来よく採用されている島堤を設けた場合、なにも設けない場合(基本形)の3者に対して港内波浪の算定を行ってみた。このとき、港内および港外水深は、上記までと同様に、一様水深 $h=15$ m とした。また、これら各種の港口形状において、港口部の開口長は 50 m と一定にし、島堤の場合、その離岸距離は 50 m とした。

港湾域の波高分布の算定には、低反射条件を考慮できるように部分吸収条件を導入した鉛直線グリーン関数法(中村・岩崎, 1993)を用いた。想定した港湾内外の境界上の反射率 C_R は、図中に示す値とした。これは、護岸および防波堤の港外側では、ブロックで被覆されているものとして $C_R=0.4$ 、港内側の護岸上では、原則的に直立式構造を想定して $C_R=0.8$ としたものである。ただし、湾奥の護岸上では、物揚場などの傾斜護岸を想定して、 $C_R=0.4$ とした。また、共振装置の内壁は、上記の3.での検討結果を参照して、高反射型($C_R=1.0$)と低反射型

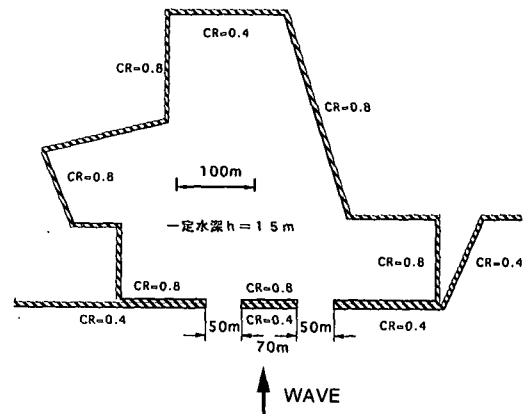


図-8 計算対象の港湾地形および反射率の条件

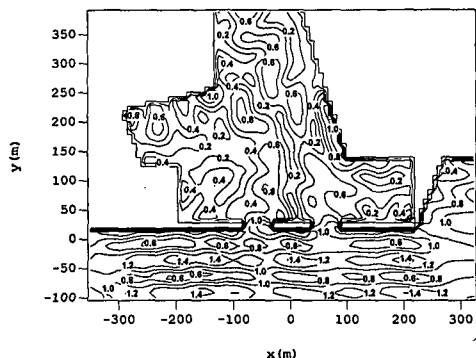


図-9 基本型港灣の波高分布 ($T=9$ sec)

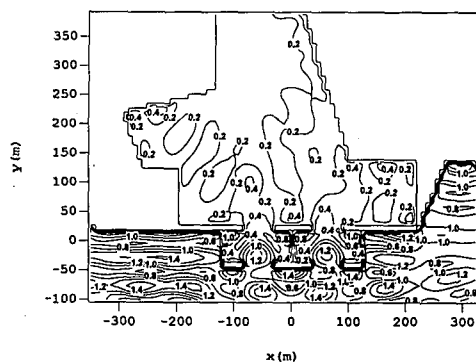


図-12 低反射型共振装置方式のときの波高分布
($T=9$ sec, 装置内 $C_R=0.6$)

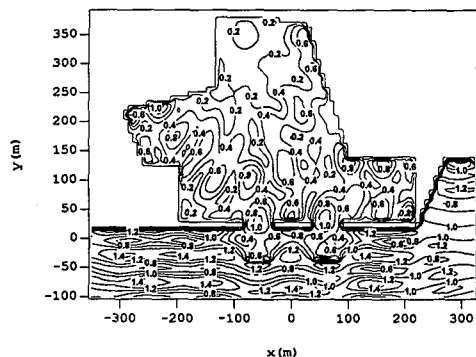


図-10 島堤方式のときの波高分布 ($T=9$ sec)

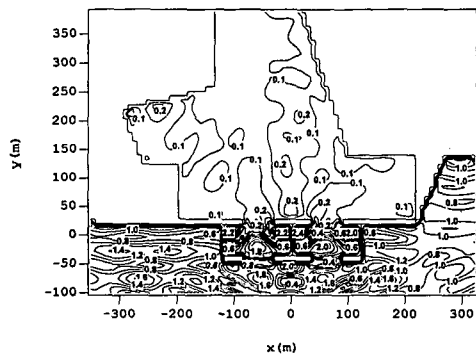


図-11 高反射型共振装置方式のときの波高分布
($T=9$ sec, 装置内 $C_R=1.0$)

($C_R=0.6$) の2種類に変化させた.

図9—12は、代表例として $T=9$ sec のときの各防波施設に対する波高分布を、入射波高との比 K_d のコンターで示す。作用波の入射方向としては、港口部への直角入射が想定してある。これらの図の比較から、共振装置を設けると、港内波浪は十分に静穏化されることがわかる。しかし、装置内壁の反射率 1.0 の場合には、図9—11に

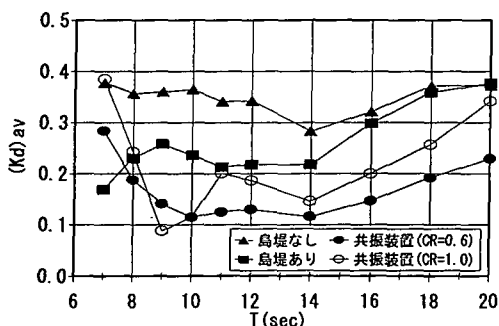


図-13 港内における平均波高比 $(K_d)_{av}$

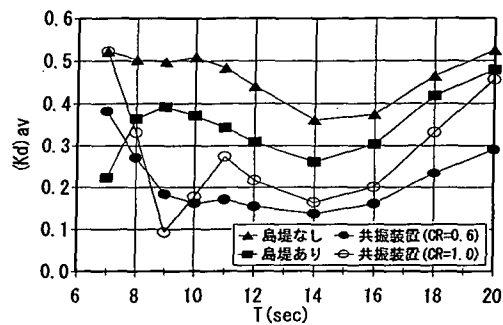


図-14 単一港口部のときの港内平均波高比 $(K_d)_{av}$

見られるように港口部での波高比は2以上になるなど、船舶の航行に支障をきたす結果になっている。そして、この副作用は装置内の壁面反射率を0.6に低減すると、**図-12**に見られるようにほぼ解消できる。

図一13は、基本形の港湾を含む各種の防波施設を設けたときの港内波高の比較を行ったもので、図中には港内側での平均波高比(K_d)_{av}の周期による変化が示してある。これを見るとと壁面反射率0.6とした共振装置では、設計対象にした広い周期帯で港内平均波高比は0.3以下に

なるなど、最も優れた防波施設であることがわかる。

最後に、図-14 は、図-8 に示す港湾で右側の港口部を閉じて、単一の港口部にしたときの結果を図-13 と同様にして示す。この図からも、設計周期帯の範囲内では、やはり低反射構造とした共振装置が最も優れた防波施設であることが確認できる。そして、図-4 と図-13, 14 の比較から、共振装置を設けたときの港内波浪の静穏化効果は、有効周期帯およびその効果を含めて、装置の無限配列を想定した結果から概略的に推定できるものと言えよう。なお、共振装置を設けた場合、 $T < 8 \text{ sec}$ の条件で、平均波高比が増加する傾向が見られるが、これは作用波の波長が開口長程度のオーダに近づくため、装置が機能しなくなることによるものと考えられる。今後、このような開口長程度、あるいはそれ以下の波長の波の制御法についても検討していきたい。

5. 結 語

(1) 波浪フィルタ理論により設計された共振装置の有効周期帯は、設計周期帯とほぼ一致する。そして、本研究で設計した共振装置は広い周期帯で、しかも各種の波向きの入射波に対しても、効果的に透過波高を低減できる。特に、共振装置の内壁を低反射構造にすると、有効周期帯を拡大でき、共振装置内の波高も低減できる。

(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、より広い周期帯で、しかもより高い静穏化効果が得られることから、非常に有効である。ただし、船舶の出入港を容易にするため、共振装置の内壁は低反射構造にする必要がある。

(3) 共振装置を港口部に設けたときの港内波浪の静穏化効果は、概略的には共振装置を無限配列したときの波浪制御効果を考えて推定できる。

参 考 文 献

- 中村孝幸・小野正順 (1988): 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, 海岸工学講演会論文集, 第35巻, pp. 527-531.
- 中村孝幸・小野正順・長田和久 (1989): 共振装置を設けた堤体列による波浪の制御効果について, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 529-533.
- 中村孝幸・長田和久 (1990): 各種平面形状を有する共振装置型堤体列の波浪制御効果について, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 529-533.
- 中村孝幸・岩崎和弘 (1993): 直線配列された消波堤による平面的な波変形に関する研究, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 626-630.
- 中村孝幸・望月 仁・仲子敏史 (1994): フィルタ理論に基づく共振装置型堤体列の波浪制御効果について, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 621-625.
- 望月 仁 (1990): 波浪フィルタ, 日本音響学会誌, 46巻12号, pp. 998-1003.
- Valembois, J. (1953): Investigation of the effect of resonant structures on wave propagation, Proc. of Minnesota International Hydraulics Convention, pp. 193-199.