

長周期波制御のための外港型共振装置に関する研究

中 村 孝 幸*・國 富 將 嗣**

1. ま え が き

近年、外洋船の接岸係留時における長周期動揺が問題になり、その実態や原因究明について各種の方面より研究が進められつつある。その結果、接岸時船舶の長周期動揺は、外洋より港湾内へ侵入する長周期波との因果関係の強いことが指摘されている。本研究では、従来において困難と考えられていた長周期波の制御を、港湾の外港部とみなした大規模共振装置を用いて検討する。

既に、著者らの中の一人(中村ら, 1995)は、波浪制御のための矩形型共振装置の設計に対して、望月(1990)の波浪フィルタ理論が有効に利用できることや、共振装置を港口部に取り付けることで、港内波浪が比較的広い周期帯で有意に低減できることなどを示している。ここでも、やはり波浪フィルタ理論に基づき、長周期波用の共振装置の設計を行うこととし、その有効性を波浪ポテンシャル理論による数値解析と水理模型実験の両者から検討する。また、既設港湾において、内港・外港の2重形式をもつ例は比較的多く見られるが、長周期波に対する外港部のフィルタアクション効果はほとんど知られていない。ここでは長周期波用の大型共振装置を外港部として用いたときの制御効果を含めて、その効果を数値実験に基づき考察する。

2. 大規模共振装置の設計

望月らの波浪フィルタ理論に基づき、接岸時係留船舶の長周期動揺を励起すると考えられる、周期30秒以上の長周期波を制御対象にして、大規模矩形共振装置の設計を行った。この際、矩形共振装置は、内港・外港の2重形式港湾における外港部として位置づけた。このため、装置の開口長は、外洋船の通過が可能となるように300m程度以上に、しかも経済的な側面も考慮して、開口率がほぼ50%程度となるようにした。

波浪フィルタ理論によると、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)、水深 h および矩形型共振装置の出

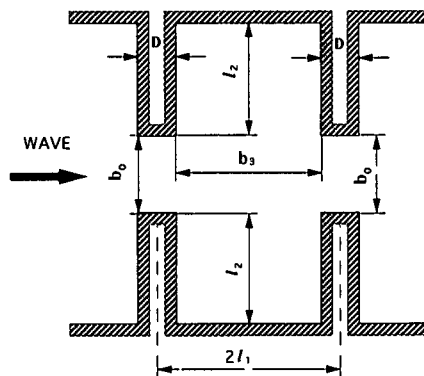


図1 フィルタ理論での矩形共振装置

表1 設計条件および結果

TYPE	b_0	$T_\infty(=1/f_\infty)$	$T_c(=1/f_c)$	b_3	l_2	D	b_3/l_2
(A)	310 m	43 s	80 s	344 m	166 m	26 m	2.07
(B)	600 m	81 s	135 s	566 m	312 m	30 m	1.82
(C)	300 m	65 s	180 s	550 m	159 m	30 m	3.50

入口の水路幅 b_0 とすると、次式から図1に示す残りの矩形装置の寸法が求められる。

$$\left. \begin{aligned} b_3 &= \frac{mb_0}{\sqrt{2(1-m)^2}} \\ l_2 &= \frac{1}{\pi f_c} \sqrt{\frac{gh(1-m)^2}{2}} \\ l_1 &= \frac{m\sqrt{gh}}{2\pi f_c} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 m は次式による。

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

この理論に基づき設計した大規模共振装置の代表例の各寸法を表1に示す。これらの設計例では、水深 $h=30$ mと固定して、制御対象とした波の周期帯(T_∞ , T_c)および開口長 b_0 を表1のように設定したときの結果である。以下では、説明の簡略化のため、各装置の名称は表中に示すTYPE (A)~(C)を使用することとしたい。

* 正 会 員 工 博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科

** 学生会員 京都大学大学院工学研究科 土木工学専攻

3. 無限配列を想定したときの透過波の特性

設計した矩形共振装置の有効性を検討するため、装置の無限配列を想定した波浪ポテンシャル理論（中村ら、1988）により透過波の算定を行った。算定では、直角入射の条件で、装置内壁の反射率 C_R が完全反射で $C_R = 1.0$ のときと低反射構造で $C_R = 0.8$ のときの2種類を想定した。このとき、算定に用いた共振装置の配列ピッチ長 λ は、装置の突堤長 l_2 の2倍の距離と開口長 b_0 および壁厚 D の総和に等しいとした。

図-2～4 は、代表例として装置内壁の反射率 $C_R = 1.0$ としたときの TYPE (A)～(C) の共振装置による透過波の算定結果を示す。図中では、透過波が配列方向に重複波モードになる場合も含むことから、透過波高の平面的な rms 値と入射波高との比 K_T で表示した。図中で K_T がスパイク状の変化を示す波周期の条件は、配列方向における横波共振点に相当する。これらの算定結果から、図-2, 3 の TYPE (A), (B) の共振装置では、その有効周期帯は、想定したものに比較して全体的に短周期側に

シフトする傾向が見られるが、 K_T は比較的広い範囲で 0.5 以下になるなど、長周期波の制御に有効と考えられる。一方、図-4 の TYPE (C) では、制御対象とした周期帯の中で一部 K_T が 0.5 程度になる場合も見られるが、TYPE (A), (B) の共振装置に比較して、全体的に透過波高が大きく、制御機能は十分とは言えない。

TYPE (C) では、TYPE (A) に比較して、開口長 b_0 と突堤長 l_2 はほぼ同じであるが、共振水域の波向き方向長 b_3 が 1.6 倍程度と長くなっている。共振水域の縦横比を見てみると、表-1 中示すように、TYPE (C) では 1:3.5、TYPE (A) では約 1:2 に近い。そして、制御効果に優れるのは、Valembois (1953) により提案されている共振装置の縦横比 1:2 に近いものとなっている。

このような検討から、式 (1) に基づき求められる共振装置が全て有効とは言えず、共振水域の縦横比が 1:2 に近いものを選別する必要があると考えられる。いずれにしても、波浪フィルタ理論では、有効帯域幅はある程度推定できるが、その効果の度合いについては予測することはできず、波浪ポテンシャル理論等による機能の再確認が必要となる。

4. 制御効果に関する実験的検討

4.1 模型堤体および実験方法

ここでは、上記した TYPE (A) の共振装置が規則的に無限配列された場合を想定して、その波浪制御効果を実験的に検討してみた。採用した模型縮尺は 1/334 であるが、造波限界や波高測定の精度を考慮して、水深設定を含む鉛直方向の縮尺は 1/167 とした。装置の内壁は、直立壁と低反射構造の2種類を採用した。低反射構造には、壁前面に消波材を設け、その反射率がほぼ 0.8 程度になるように調整した。図-5 は、この低反射型の共振装置およびその水槽内への設置状況を示す。

実験では、この図に見られるように共振装置の 1/2 の模型を製作し、これを幅 1 m の長水路内に固定した。このような実験では、水路側壁の流体力学的な鏡像効果を考慮すると、水路幅の 2 倍の距離のピッチ長 $\lambda (=2 \text{ m})$

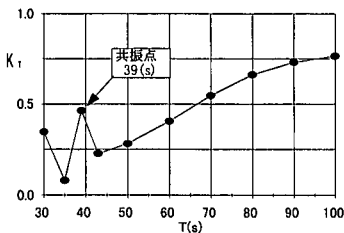


図-2 共振装置による透過波 (TYPE (A))

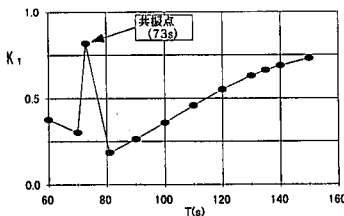


図-3 共振装置による透過波 (TYPE (B))

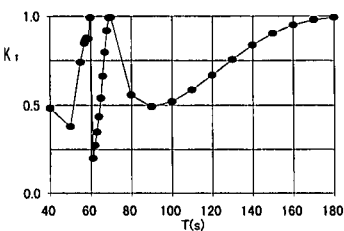


図-4 共振装置による透過波 (TYPE (C))

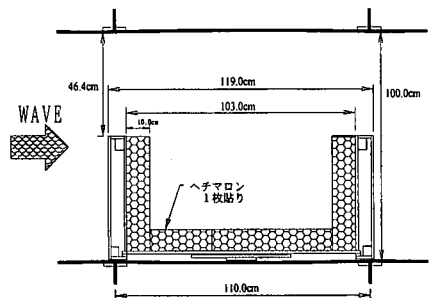


図-5 共振装置の設置状況 (低反射型)

で、共振装置が水路幅方向に規則的にしかも無限基配列された状況と等価になる。

実験では、作用波として、規則波と不規則波の両者を用いた。規則波の条件は、周期 T が1.2 s~3.5 sの範囲の12種類、波高 H が約3 cmの1種類である。また、不規則波では、Bretschneider・光易型スペクトルを標的として造波した。この際、スペクトルのピーク周波数を3種類に変化させた。設定水深 h は、全実験を通じて一定とし、 $h=18$ cmとした。

透過波は、斜波成分の発生が見られる条件も含み、短峰性の波面形状になり得るため、水路幅方向に5台の波高計を等間隔に直線配置して測定した。

4.2 規則波に対する検討

図-6は、規則波に対するTYPE (A)の透過波の波高比のrms値 K_T の測定結果を示すもので、図中には歪み模型そのものを実構造物として用いたときの K_T の算定結果についても併せて示す。図中では、算定結果と実験結果の両者について、図-5に示すような低反射型の共振装置と消波材を設けない高反射型のそれに対する結果を区別して示してある。なお、算定で高反射型装置の壁面よりの反射率は、実験でも多少の逸散があることから、0.9と設定した。

この図より、 K_T の実験結果は、算定結果に比較して小さく現れ、その傾向は特に制御対象とする長周期側で顕著になっている。なお、この歪み模型そのものを実スケー

ル(水深が表-1のTYPE (A)の場合に比較して2倍の60 m)に戻したときの制御対象波は、縮尺率を1/334とすると、30~56 sの範囲にあり、水深を深くすることで有効帯域幅は全体的に短周期側に移行し、かつ狭くなっている。いずれにしても、この図より、実験的にも大規模共振装置を用いて30秒以上の長周期波の制御が可能になることが再確認できる。

ここで、上記で一部触れた有効帯域幅に及ぼす水深の効果をも、式(1)に基づき考察してみる。すなわち、式(1)において、装置の各平面寸法を固定して、水深のみを変化させると、その水深条件のときの遮断および減衰極周波数(あるいは周期)を求めることができる。図-7はこのようにして求めた結果の一例で、表-1のTYPE (A)の共振装置の平面寸法が採用してある。この図より、装置の設置水深を浅くすることで、有効帯域幅は全体的に長周期側に移行し、かつその幅も拡大することが確認できる。このように、より効率的な長周期波の制御のためには、共振装置内の水深を浅くすることで対処できることがわかる。

4.3 不規則波に対する検討

図-8は、代表例として不規則波に対するTYPE (A)の透過波のスペクトルを入射波のそれと併せて示す。共振装置は、低反射型のものである。透過波のスペクトルは、直線アレイで配置した5台の波高計による測定スペクトルの単純平均値を用いた。また入射波のスペクトル

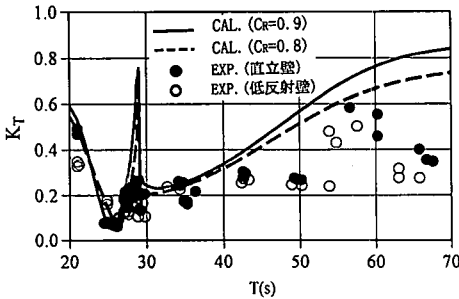


図-6 透過波の比較 (TYPE (A))

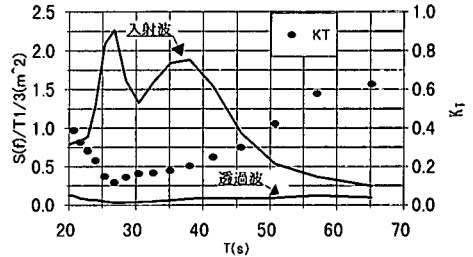


図-8 不規則波実験による透過波

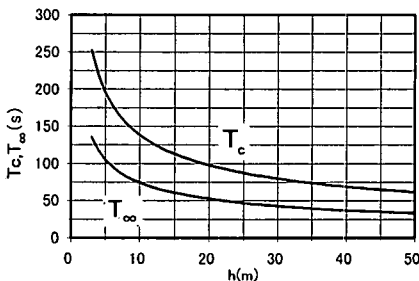


図-7 水深変化による有効周期帯の変化

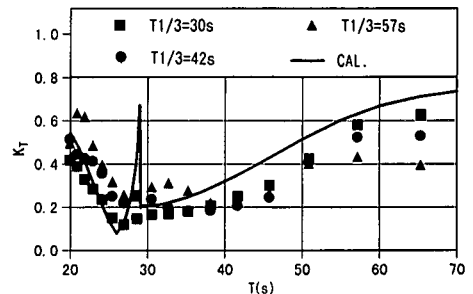


図-9 応答関数的に求めた透過波の波高比 K_T (有義波周期を変化させたときの結果)

は、模型を除去した状態で測定した。図中には、応答関数的に求められる透過波の rms 波高比 K_T についても示した。この図より、透過波のスペクトル密度は、入射波のそれに比較して、図-7の規則波に対する K_T の結果と類似した低減度で低下している。このことは、図-7の結果を含めて、有義波周期 ($T_{1/3}$) を各種に変化させたときの透過波の rms 波高比 K_T を示す図-9からも再確認できる。この図中には、 K_T の理論算定曲線もプロットしており、これは規則波に対するそれと同じになる。この図より、応答関数的に求められる透過波の rms 波高比 K_T の実験結果と算定結果とはほぼ一致しており、共振装置は、不規則波に対しても、規則波と同様に有効であることがわかる。

5. 外港型共振装置の有効性

5.1 港湾形状

ここでは、上記までに検討してきた TYPE (A) の共振装置を外港部に適用して、その有効性を数値実験により検討してみた。算定には、鉛直線グリーン関数法で、港湾境界の低反射効果が考慮できる中村ら (1993) の方法を用いた。計算の対象にしたモデル港湾を図-10に示す。図中には、想定した港湾境界の反射率の値についても併せ示した。この港湾モデルでは、TYPE (A) の共振装置を実現するには、図中に示すように単に港湾内に突堤2基を増設すればよい。

5.2 算定結果

図-11, 12は、それぞれ基本形の港湾および外港型共振装置を設けた場合の波高比をコンターで示す。これらの図で、作用波の周期 T は 35 s で、港口部への直角入射

が想定してある。この周期条件は、図-2に見られるように、共振装置による効果が最もよく見られるときに相当している。これらの図の比較から、突堤を2基増設するだけの外港型共振装置の場合、内港ではほとんど波の侵入が見られず、非常に効果的に長周期波の静穏化が実現できていることが分かる。しかしながら、外港部では、波高比にして1.6程度と増幅されている副作用も見られる。

このような大きな増幅度は、基本形港湾の港口部でも見られ、外洋に面する防波堤およびそれに続く港口部付近の水路形状によるフィルターアクションの効果と考えられる。このように長周期波に対しては、港内外に設ける防波堤あるいは突堤により、内港部での波高が急激に変化する傾向が見られ、平面プランを考える際に注意を要する。

次に図-13, 14は、外港型共振装置を設けた場合について、それぞれ作用波の周期 T を 40 s, 45 s と大きくした場合の結果である。これらの図より、図-2での横波共振点に相当する $T=40$ s のときでも、内港側では有意に波

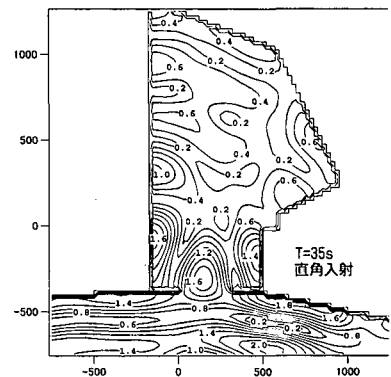


図-11 基本形港湾での波高比の分布 ($T=35$ s)

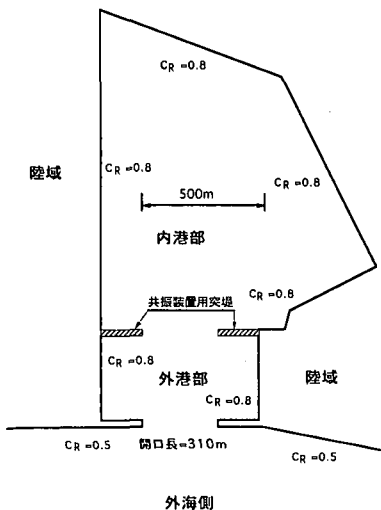


図-10 モデル港湾と設定した反射率

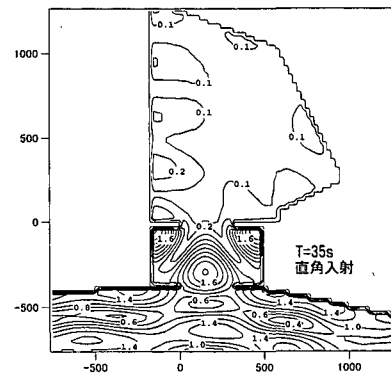


図-12 外港型共振装置を設けた場合の波高比の分布 ($T=35$ s)

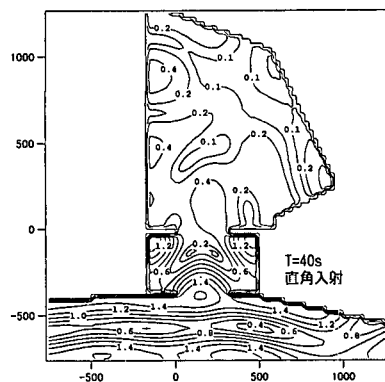


図-13 外港型共振装置を設けた場合の波高比の分布 ($T=40$ s)

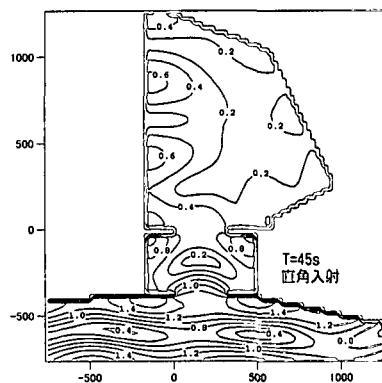


図-14 外港型共振装置を設けた場合の波高比の分布 ($T=45$ s)

高が低減しており、図-2での横波共振点に付随して生じる高透過率は、配列式構造物に特有な現象と言える。また、作用波の周期 T が増大すると、図-2で確認されているように、やはり内港側で波高比は増大する傾向が見られる。このように、外港型共振装置を設けた場合の波浪の静穏化効果は、横波共振点付近を除けば、装置を無限配列したときの透過率を検討することで、概略的に推定できる。

6. 結 語

(1) 外港部を想定した大規模共振装置を用いて、長周期波の制御が効果的に行える。そして無限配列を想定した実験では、波浪フィルタ理論で予測される長周期側の限界周期に対しても、理論で予測される以上の効果が、規則波および不規則波の両者に対して観測された。

(2) 波浪フィルタ理論により大規模共振装置を設計する際、理論によって求められる形状は数多くあるが、矩形水域の縦横比を2程度以下にすると、良好な制御効

果が得られる。

(3) 2重式港湾の外港部として位置付けた大規模矩形共振装置により、内港部に投入する長周期波を効果的に低減できる。ただし、外港部では、逆に波高の増幅作用が局所的に見られることに注意する必要がある。

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, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 527-531.
- 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・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効果について, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 746-750.
- 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.