

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

中村孝幸*・森田知志**・竹本 剛***

1. はじめに

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。本研究は, 港内係留船の長周期動揺の軽減を目的として, 港口部共振装置の設計を波浪フィルター理論(望月, 1990)に基づき行い, その効果を大型の水理模型実験と波浪ポテンシャル理論により明らかにする。特に, ここでは矩形状の掘込み港湾を想定し, その港口部付近に共振装置を設けたときの効果を理論と実験により検討する。このとき, 従来の研究ではあまり知られていない湾奥部よりの反射波の影響に着目して, 部分重複波の腹・節の位置と矩形共振装置の位置関係による波浪制御効果の変化などを検討する。また, アメリカの Long Beach 港で採用された矩形共振装置に類似した防波施設(Poon ら 1998)を対象にして, 波浪フィルター理論に基づき再検討し, その効果について理論的に再解析すると共に上記した波浪制御効果に及ぼす湾奥部よりの反射波の影響などについても考察する。

2. 大型共振装置の設計

ここで対象にした港口部大型共振装置は波浪フィルター理論に基づき設計し, 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。波浪フィルター理論では, 式(1)~(4)に見られるように, 設置水深 h , 装置の開口長 b_0 , 制御対象とする有効周波数帯(減衰極周波数 f_∞ , 臨界周波数 f_c ($< f_\infty$))を入力として, 図-1 に示す共振装置の残りの寸法を算出するもので, 共振装置の設計が簡便に行える利点があり, その有効性も確認されている(中村・國富 1997)。

$$b_3 = \frac{mb_0}{\sqrt{2(1-m^2)}} \dots\dots\dots (1)$$

$$l_1 = \frac{m\sqrt{gh}}{2\pi f_c} \dots\dots\dots (2)$$

$$l_2 = \frac{1}{\pi f_c} \sqrt{\frac{gh(1-m^2)}{2}} \dots\dots\dots (3)$$

ここに, m は次式による。

$$m = \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f_\infty}\right)^2} \dots\dots\dots (4)$$

ただし, 物理的な制約から $2h > b_0$ を満足するように諸寸法を決定する必要がある。

ここでは, 外洋船の通過が可能となるように開口長 b_0 は 310 m, 水深 h は 30 m, 有効周波数帯は係留船舶の長周期動揺を励起すると考えられる周期 30 s 以上として, 減衰極周波数 f_∞ に対応する周期 $T=43$ s, 臨界周波数 f_c に対応する周期 $T_c=80$ s と想定した。図-1 は, このような入力条件に基づき求められる矩形型共振装置の各寸法を入力条件を含めて示す。

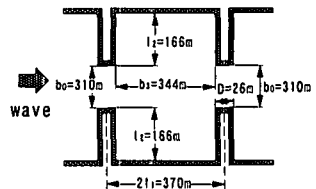
3. 実験装置および実験方法

(1) 実験水槽

実験に用いた平面水槽は, 熊谷組技研の全長 44 m 幅 20 m の 3 次元造波水槽である。水槽の一端には再反射を防ぐため, ヘチマロンより成る消波工が, 他端には, 20 枚の造波板からなる 20 機のピストン型造波機が設置されている。

(2) 港湾模型

実験で用いた港湾モデルは基本型モデル(図-2)とその港口部に図-1 に示す矩形型共振装置を設けたもの(図-3(a))および図-1 の共振装置を拡大解釈した平行堤型共振装置を設けたもの(図-3(b))の 3 種類である。



入力条件	算定結果
$h = 30 \text{ m}$	$b_3 = 344 \text{ m}$
$b_0 = 310 \text{ m}$	$l_2 = 166 \text{ m}$
$T_\infty (=1/f_\infty) = 43 \text{ s}$	$211 = 370 \text{ m}$
$T_c (=1/f_c) = 80 \text{ s}$	

図-1 大型共振装置の形状寸法

* 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科
** 正会員 工博 (株)熊谷組技術研究所
*** 正会員 工修 (株)荒谷建設コンサルタント

このとき模型の縮尺は、 $1/75$ を想定した。共振装置を含む港湾境界は、下部固定の直立式防水ベニヤ板で構成し、その前面に低反射材のヘチマロンを貼り付け、目標とする反射率が実現されるようにした。実験では、設置水深として一定水深の40 cmを用いた。

図-3(b)の平行堤型共振装置モデルは、矩形型共振装置の平行堤の部分に港湾の沖に出し、鏡像原理を仮定して、さらにその平行堤の長さを倍増した構造である。

(3) 実験条件

実験波の周期 T は、各港湾モデルに対し、 $T=3, 4, 5, 6.5$ sの4種類の規則波を採用した。このとき、入射波の波高は、ほぼ3 cm程度と一定にし、波向きは港口部に対して直角入射の条件とした。これらの実験周期は現地周期 T_p に換算すると、26 s~56 sの範囲にある。

4. 共振装置の効果

ここでは、共振装置の波浪制御効果を実験結果と算定結果に基づき検討する。このとき、算定には一定水深を想定した鉛直線グリーン関数法(中村・奥, 1985)を用いた。設定した反射率などは図-3中に示すとおりである。

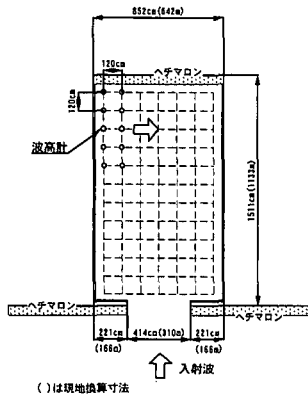
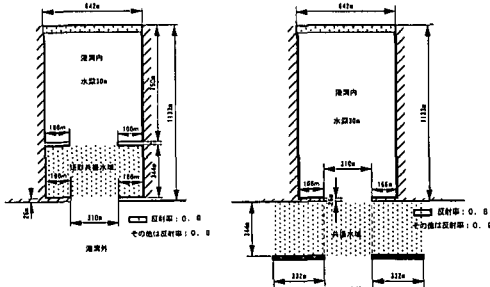


図-2 基本型港湾および波高分布の測点位置



(a) 矩形型共振装置 (b) 平行堤共振装置
図-3 共振装置を設けた港湾

(1) 港内平均波高比

図-4は直角入射波を想定したときの各港湾モデルに対する港内平均波高比($K_{d,av}$)の周期変化を示す。なお、ここで港内とは統一した比較が行えるように内港側の領域のみとした。

この図より、矩形型共振装置および平行堤型共振装置を港口部に設けると、港内平均波高比は現地換算周期 $T_p=35$ s付近から長周期側にかけて一部を除けば実験でも算定でも約5割ほど低下しており、これらの装置により広い周期帯で長周期波を有効に低減できることがわかる。なお、共振装置の有効周期帯は現地周期で43 s~80 sとして設計したが、実際の有効周期帯は全体的に短周期側へ移行する傾向が見られる。また、特に算定結果において、現地周期 $T_p=43$ s付近で共振装置の効果が一旦低下する傾向が見られる。この理由については後述したい。

次に、図-5は斜め入射波(30° 傾斜)を作用させた時の港内平均波高比の結果を示す。この図と前出の直角入射のときの結果との比較から、矩形型共振装置モデルの場合は入射角による影響をほとんど受けないことがわかる。また、平行堤型共振装置モデルの場合は、現地周期 $T_p=35$ s付近で基本型モデルの平均波高比を上回るところが見られるなど、斜め入射波に対して効果が十分で

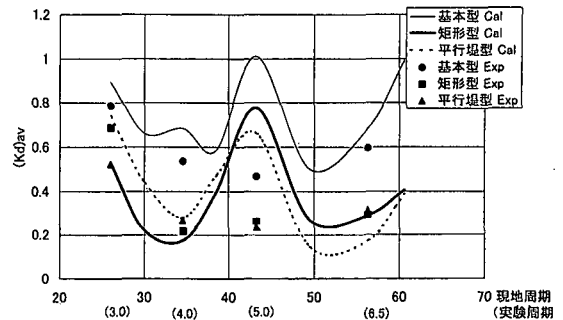


図-4 各港口形状の港内平均波高比の周期特性 ($\theta=0^\circ$)

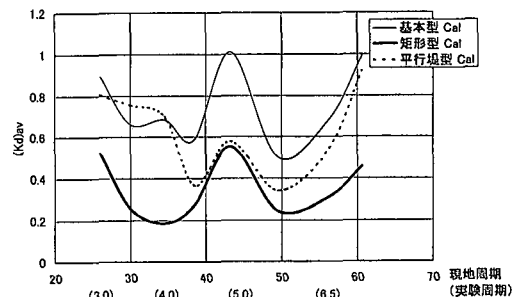


図-5 斜め入射波を作用させたときの各港口形状の港内平均波高比の周期特性 ($\theta=30^\circ$)

ないことがわかる。

(2) 港内波高分布

ここでは、代表例として各々の港湾モデルを対象にして現地周期 $T_p=35$ s に対する港内波高分布の結果を紹介する。なお、以下に示す波高分布の図では、統一して入射波高で除した波高比のコンターで示す。

a) 基本型モデルの場合

図-6(a), (b) は、基本型モデルにおける港内波高分布の実験結果と算定結果をそれぞれ示す。これら図より、港内波浪の静穏度は不十分であり、港口部防波堤による静穏化効果はほとんど期待できないことがわかる。実験結果では、湾の奥および側壁付近で算定結果に比較して波高比が小さく現れる傾向がみられるが、これらの境界領域では低反射材の存在のため、波高測定が行えず、反射材の中で高波高が現れているためである。

b) 矩形型共振装置モデルの場合

図-7(a), (b) は、このときの波高分布を同様にして示すもので、前出の基本型モデルの場合と比較して内港側で効果的に静穏化されていることがわかる。実験結果の方が多少高めめの波高比になっているが、これは造波板からの反復反射の影響によるものと考えられる。

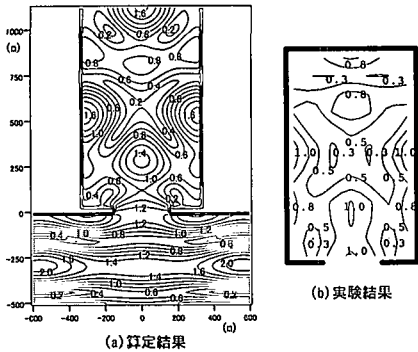


図-6 基本型モデルの港内波高分布
($T_p=35$ s) : 実験周期 ($T=4.0$ s)

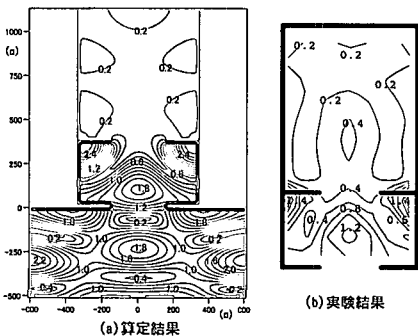


図-7 矩形型共振装置モデルの港内波高分布
($T_p=35$ s) : 実験周期 ($T=4.0$ s)

このモデルの特徴として、内港側では波高比は十分に小さいものの共振装置内では高波高比となることが認められる。しかしながら、従来、 $T=30$ s を超える長周期波の場合は、その侵入波高は高々数 10 cm 程度であることが知られており(永井ら, 1999)、共振装置内で波高が増幅されても、長波長であるという特性を考えれば航行船舶への影響はほとんどないものと推測される。

c) 平行堤型共振装置モデルの場合

図-8(a), (b) は平行堤型共振装置モデルにおける港内波高分布の算定結果を示す。この図と前出の矩形型共振装置モデルの結果を比較すると、同様に港内側で効果的に静穏化されており、同程度の静穏化効果が期待できることがわかる。また、平行堤型共振装置では、矩形型共振装置に比べ、中央の航路部付近では、波高値の増大が抑えられるなどの利点がある。

5. 内港と外港の相互作用

ここでは、図-4 で現地周期 $T_p=43$ s 付近で共振装置の効果が一且低下する理由について考察してみる。

図-9 は、周期条件を共振装置の効果低下する現地周期 $T_p=43$ s と固定し、矩形型共振装置モデルの内港の湾奥長 d を各種に変化させたときの港内平均波高比の結果を示す。この図より、港内平均波高比は、内港の湾奥長 d と波長 L が等しいとき極大となり、 $d/L=1.25$ のとき

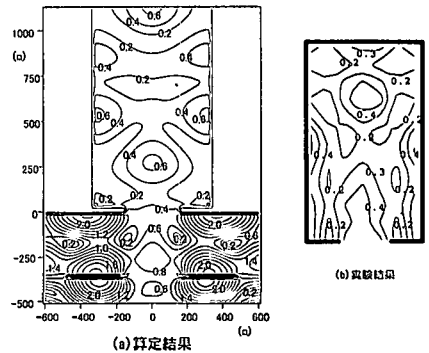


図-8 平行堤型共振装置モデルの港内波高分布
($T_p=35$ s) : 実験結果 ($T=4.0$ s)

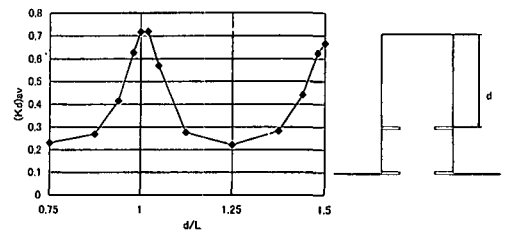


図-9 内港の湾奥長 d を変化させたときの現地周期 $T_p=43$ s における港内平均波高比の算定結果 ($\theta=0^\circ$)

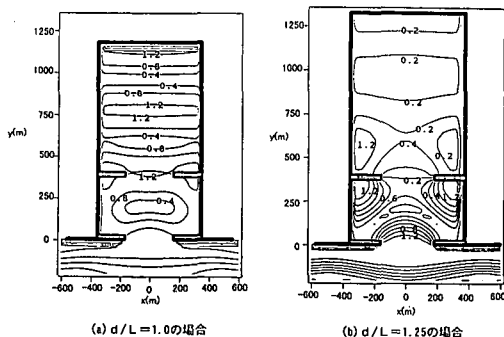


図-10 矩形共振装置モデルの場合の $d/L=1.0$ および $d/L=1.25$ における港内波高分布の算定結果 ($T_p=43$ s): 実験周期 ($T=5.0$ s)

極小となることからわかる。なお、矩形型モデルで図-4の $T_p=43$ s の条件は、平均波高比が極大となる $d/L=1$ の条件に相当することを付記しておく。

図-10(a), (b)は、上記でそれぞれ平均波高比が極大になる $d/L=1$ およびそれが極小になる $d/L=1.25$ の条件のときの波高分布を示すが、平均波高比が極大になる $d/L=1$ では内港の港口部付近に部分重複波の腹が形成されている。共振装置の波浪制御のメカニズムは装置の共振水域内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透過波を低減するものであるが、ここでは、それを防ぐように港内で部分重複波が形成されており、その結果、波高比が増大したものと考えられる。事実、平均波高比が極小になる $d/L=1.25$ のときの波高分布では、内港の港口部付近に部分重複波の節が形成されており、共振装置の波浪制御メカニズムを助けるように作用している。これらの結果より、共振装置の設計および設置の際には、湾奥部からの反射波による部分重複波の形成状況を十分考慮する必要があることがわかる。

6. ロングビーチ港の港口部共振装置に対する検討

(1) 波浪フィルタ理論に基づく再検討

アメリカのロングビーチ港内にあるコンテナ埠頭の pier J には、長周期波の侵入を防ぐため図-11に示すように防波施設が建設されている (Poon ら, 1998)。図中に斜線部で示す防波堤部分が長周期波の制御を目的とする防波施設に相当する。図-12は pier J の港口部付近の拡大図で、上述した矩形共振装置の平面形状に類似している。これまで、波浪フィルタ理論による共振装置の設計法では、式(1)~(4)に見られるように h , b_0 , f_0 , f_∞ を入力条件として、残りの各寸法を決定するというものであった。

ここでは、図-12に示すような水域 1 を維持するよう

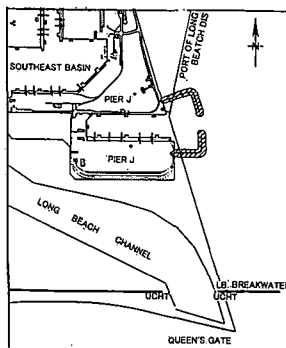
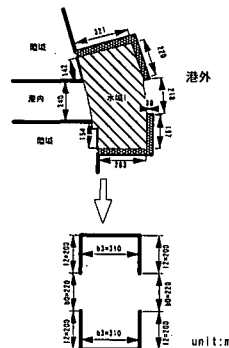


図-11 ロングビーチ港の Pier J とその周辺海域



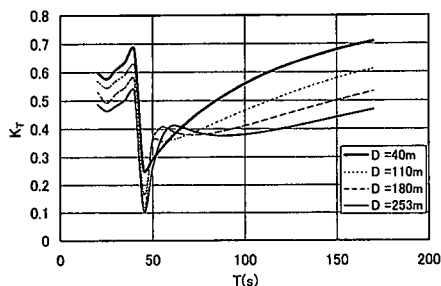


図-14 堤体厚 D を変化させたときの透過波の算定結果 ($\theta=0^\circ$)

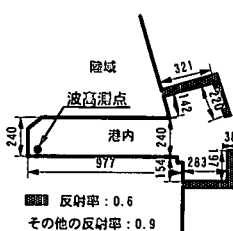


図-15 防波施設を設けた Pier J の形状寸法

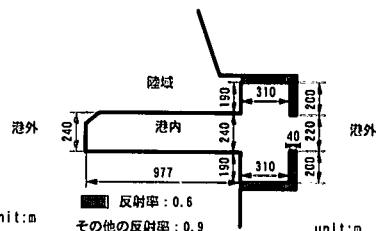


図-16 矩形共振装置を設けた Pier J の形状寸法

だけ忠実に再現したモデル (図-15) および防波施設を矩形共振装置に近い形に簡単化したモデル (図-16) の2種類を用いた。算定には、一定水深を想定した鉛直線グリーン関数法 (中村ら 1985) を用い、護岸および防波堤における反射率は図中に示すように設定した。

図-17 は各防波施設を設けたときの港内平均波高比の周期特性を示す。平均化の対象にした港湾域は、防波施設よりも内港側とした。この図より、pier J の港口部にある防波施設により、効果的に長周期波が制御されることや、その効果は矩形共振装置に近い形に簡単化したものと同程度であることなどが理解できる。

図-17 に示す港内平均波高比は、周期 60 s 付近と周期 90 s~100 s 付近で極大となる変化を示すが、これは、上で検討したように湾奥からの反射波の影響によるものであり、このような反射波の影響は Poon らによる事前模型実験による結果を示す図-18 においても確認できる。この図は、図-15 中に示す掘込港湾の湾奥部に設けられた測点での波高比を示す。

7. 主要な結論

(1) 長周期波を制御対象とする矩形共振装置の有効周期帯は、波浪フィルター理論で設計目標とした値よりも全体的に短周期側に移行する。そして、この周期帯内では、防波施設を設けることで港内平均波高比をほぼ半減できる。

(2) 港口部共振装置の設置位置は、湾奥部よりの反射波の影響を考慮して決定する必要がある。これは、共振装置の港内側開口部に部分重複波の腹が形成される周期条件下では、静穏化効果が低下するためである。

(3) 試行錯誤の設計に基づく Pier J の防波施設は、その共振水域など平面寸法等について、波浪フィルター理論に基づく設計結果とほぼ合致しており、波浪フィルター理論を用いれば試行錯誤的な設計を省略して、合理

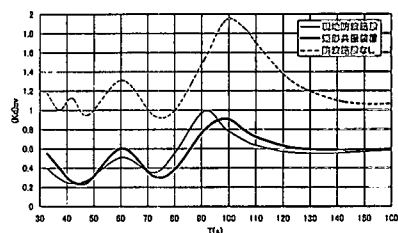


図-17 各港湾モデルの港内平均波高比の算定結果 ($\theta=0^\circ$)

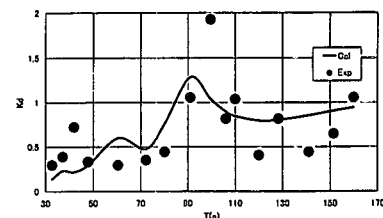


図-18 湾奥部の波高比

的な取り扱いが可能となる。

参考文献

- 中村孝幸・奥 吉雄 (1985): 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.
- 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・國富将嗣 (1997): 長周期波制御のための外港型共振装置に関する研究, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 716-720.
- 永井紀彦・橋本典明・川口浩二・佐藤和敏・菅原一晃 (1999): ナウファスの連続観測化による我国沿岸の長周期波の観測, 港湾技術研究所報告, 第 38 巻, 第 1 号.
- 望月 仁 (1990): 波浪フィルタ, 日本音響学会誌 46 巻 12 号, pp. 998-1003.
- Poon Y. K., F. Raichlen and J. Walker (1998): Application of physical model in long wave studies for the Port of Long Beach, Proc. 26th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 1222-1235.